정책보고서 2015-10

기후변화와 생태계 변화에 기반한 침입외래종의 관리 전략

Climate Change and Ecosystem-Based Management Strategies of Invasive Alien Species

박용하 | 김재욱

한국환경정책·평가연구원
Korea Environment Institute

연구진

연구책임자 박용하 (한국환경정책·평가연구원 선임연구위원)

참여연구원 김재욱 (한국환경정책·평가연구원 연구원)

연구자문위원

노태호 (한국환경정책·평가연구원 선임연구위원)

이현우 (한국환경정책·평가연구원 선임연구위원)

정휘철 (한국환경정책·평가연구원 연구위원)

김태완 (한경대학교 교수)

김성환 (단국대학교 교수)

서창완 (국립생태원 실장)

박정준 (환경부 사무관)

ⓒ 2015 한국환경정책·평가연구원

발행인 박광국

발행처 한국환경정책·평가연구원

세종특별자치시 시청대로 370 (우편번호) 30147

전화 044)415-7777 팩스 044)415-7799

http://www.kei.re.kr

인 쇄 2015년 11월 26일

발 행 2015년 11월 30일

출판등록 제17-254호

ISBN 978-89-8464-964-4 93530

이 보고서를 인용 및 활용 시 아래와 같이 출처 표시해 주십시오.

박용하, 김재욱. 2015.「기후변화와 생태계변화에 기반한 침입외래종의 관리 전략」. 한국환경정책·평가연구원.

값 7,000원

국문 요약

기후변화에 의해 침입외래종의 유입이 증가되고 있으며 생태계 정착 및 확산이 빨라지고 있다. 기후변화에 의해 역동하는 또는 역동할 수 있는 침입외래종의 정착과 확산에 대응하는 생태계 기반 관리전략을 제시하고자 본 연구를 시도하였다. 국내외 사례를 통해 침입외래종에 대한 생태계기반관리의 배경과 개념을 제시하였으며, 기후변화와 침입외래종의 관리에 관한 미국, 영국, 유럽연합, 호주, 생물다양성협약에 제시되어 있는 정책을 비교하고 분석하였다. 또한 유럽연합에서 접근한 바 있는 돼지풀의 생태계기반관리 사례를 분석함으로써 우리나라에서 침입외래종의 생태계기반관리 적용의 현실성을 높이고자 하였다. 침입외래종의 생태계기반관리는 침입외래종의 생물종별 접근, 지역적인 접근, 적응관리 순환, 시행 정책에 대해 사전고려의 원칙 적용, 생태계의 지속가능성을 고려하는 것이다. 미국, 영국, 호주에서는 기후변화에 따라 변화되는 침입외래종의 생태계기반관리 전략이 발전되어 이미 현장에 적용되고 있다. 기후변화와 침입외래종에 관한 우리나라의 여건을 고려할 때, 생태계기반 침입외래종의 관리전략을 다음과 같이 제안하였다.

첫째, 기후변화에 따라 우리나라에 새로이 제기될 수 있는 침입외래종에 대한 검역이 강화되어야 한다. 둘째, 기후변화와 침입외래종의 공간분포에 따른 지역별 관리가 추진되어야 한다. 이를 위해서는, 이미 우리나라에 도입되어 정착하였으며, 기후변화에 의해 침입성이 증가·유지되는 외래종의 서식지 분포 모델 등을 이용한 공간분포의 예측이 추진되어야 한다. 이번 연구에서는 기후변화에 따른 생물종 분포 모델인 CLIMEX 모델을 이용하여 소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*)의 매개체인 솔수염하늘소(*Monochamus alternatus*)의 국내 분포 및 확산 예측을 통해 한반도 중남부 지역에서 소나무재선충병 발생 가능지역을 예측하고, 이를 기반으로 소나무재선충병의 지역별 관리방안 사례를 제시하였다. 또한 기존에 CLIMEX 모델의 적용 결과로 도출된 오이총채벌레(*Thrips palmi*), MaxEnt 모델의 적용 결과로 도출된 실망초(*Conyza bonariensis*)의 국내 분포 및 확산

예측을 바탕으로 지역별 관리방안 사례를 제시하였다. 이러한 접근방법과 결과 도출 과정을 이용하여 기후변화와 침입외래종의 공간분포에 따른 지역별 관리방안을 도출할 수 있을 것이다. 셋째, 침입외래종의 모니터링과 빠른 경보체계 프로그램이 구축되어야 한다. 새로운 외래종의 도입과 기존에는 침입성이지 않았으나 침입성이 변화하는 외래종을 모니터링하며, 침입외래종에 대해서는 빠른 경보가 발휘되는 프로그램이 이행되어야 한다. 넷째, 침입외래종에 대한 생태계의 복원력이 제고되어야 한다. 기후변화와 침입외래종이 생태계에서 우점화되지 않도록 기후변화와 침입외래종의 정착과 확산을 방지할 수 있는 생태계 고유의 복원력이 유지되어야 한다. 이를 위해서는, 기후변화와 침입외래종의 확산에 의해 생존이 위협받는 고유종이 조사되고 적극적으로 보호되어야 한다. 다섯째, 침입외래종의 인식을 제고하는 교육과 홍보가 적극적으로 이루어져야 한다. 침입외래종의 우선 이해당사자인 국민을 대상으로 하는 교육과 홍보가 적극적으로 이루어져서 국민적 차원에서 침입외래종의 문제를 이해하며 국민이 적극적으로 협력·참여할 수 있어야 한다. 여섯째, 연구 및 정보교환이 이루어져야 한다. 기후변화에 따른 침입외래종 관리를 과학적으로 지원하기 위한 침입외래종의 국내 도입, 정착 확산 예측 기술, 정보수집 및 보급, 침입외래종의 방제, 박멸, 제어기술이 개발되어야 한다. 일곱째, 법과 제도의 보완이다. 침입외래종의 검역, 거래규제, 연구와 빠른 경보체계와 정보공유체계를 가동하기 위한 재원의 확보가 필요하다. 그 외 침입외래종의 관리에 관한 부문은 정부의 거버넌스 변화를 통해 이루어질 수 있다.

주제어: 침입외래종, 생태계기반관리, 기후변화, 사례 분석, 관리 전략

| 차 례 |

제1장 · 서 론 ····· 1

제2장 · 외래종의 현황과 전망 ····· 5

1. 외래종의 증가 ····· 5
2. 외래종의 영향: 이익과 피해 ····· 6
3. 외래종의 증가 요인 ····· 14

제3장 · 기후변화와 생태계 기반 침입외래종 관리의 국내외 동향 및 사례 ·· 21

1. 침입외래종의 생태계기반관리 ····· 21
2. 우리나라의 정책 ····· 27
3. 선진외국의 정책 ····· 32

가. 미국 ····· 32

나. 유럽연합 ····· 37

다. 영국 ····· 41

라. 호주 ····· 44

4. 생물다양성협약에서의 침입외래종 관리 동향 ····· 47
5. 기후변화를 고려한 침입외래종의 생태계기반관리 사례 ····· 50
6. 시사점 ····· 82

가. 침입외래종의 생태계 기반 관리 ····· 82

나. 우리나라와 선진외국의 침입외래종 정책과 사례 ····· 89

제4장 · 기후변화와 생태계기반 침입외래종의 관리전략 ····· 93
1. 기후변화에 따른 침입외래종의 도입 및 정착, 확산 조사 및 예측 방법과 수단의 개발 ····· 94
2. 기후변화와 침입외래종의 분포에 따른 지역별 관리 ····· 106
3. 침입외래종의 모니터링과 빠른 경보체계 프로그램 구축 ····· 113
4. 생태계의 복원력 제고 ····· 114
5. 침입외래종의 인식제고, 교육과 홍보 ····· 115
6. 연구 및 정보교환 ····· 117
7. 법, 제도의 보완 ····· 118

제5장 · 결론 ····· 120

침고문헌 ····· 125

Abstract ····· 147

ㅣ표 차 례 ㅣ

<표 2-1> 외래종의 생태계서비스 가치 ····· 7

<표 2-2> 외래종에 의해 국내외 생태계 변화가 표출된 일부 사례 ····· 12

<표 2-3> 외래종에 의한 경제적 피해의 일부 사례 ····· 13

<표 3-1> 생태계기반접근 관련 용어와 개념 ····· 23

<표 3-2> 미국 연방정부의 주요 외래종 관리와 관련된 법과 주요 내용 ····· 34

<표 3-3> 돼지풀의 정착과 확산에 관련된 자연적, 인위적 개입요인 ····· 54

<표 3-4> 돼지풀의 제어에 일반적으로 이용되는 수단과 협력적인 사용 수단, 성공 조건 ··· 75

<표 3-5> 침입외래종에 대한 초기 경보 시스템 ····· 77

<표 3-6> 침입외래종에 대한 데이터베이스 시스템 ····· 79

<표 3-7> 유럽연합에서 돼지풀이 미치는 경제적 영향 ····· 81

<표 3-8> 생태계기반관리 개념의 주요 내용 ····· 83

<표 3-9> 기후변화에 따른 침입외래종의 변화를 보여주는 5가지 주요 가설 및 사례 ···· 84

<표 4-1> CLIMEX 모델의 EI를 고려한 기후변화에 따른 소나무재선충의
지역별 관리 방안 ····· 110

<표 4-2> CLIMEX 모델의 EI를 고려한 기후변화에 따른 오이총채벌레의
지역별 관리 방안 ····· 112

ㅣ그림 차례ㅣ

<그림 2-1> 국내 유입된 것으로 조사된 외래생물종 수의 변화 ····· 6
<그림 2-2> 1500년 이후 유럽에 유입된 외래 척추동물, 외래 식물, 외래 포유류 종수 · 15
<그림 2-3> 기후변화에 의한 2080년까지 지구의 농업생산성 변화 ····· 18
<그림 2-4> 기후변화에 의한 농업생산성의 잠재적인 영향 ····· 18
<그림 2-5> 인간의 행위와 침입외래종의 관계 ····· 20
<그림 3-1> 생태계변화, 기후변화, 침입외래종, 과도한 개발과 오염이
생태계에 미치는 영향의 과거 및 미래의 흐름 ····· 48
<그림 3-2> 돼지풀 관리에 관한 유럽연합의 단계적 작업의 순서 ····· 52
<그림 3-3> 1900-2011년 기간 중 돼지풀의 유럽 분포 ····· 58
<그림 3-4> GBIF Database에 의한 돼지풀의 유럽 분포 ····· 58
<그림 3-5> DAISIE Database에 기재된 돼지풀의 유럽 분포 ····· 59
<그림 3-6> 프랑스의 돼지풀 분포 ····· 59
<그림 3-7> 기후변화와 돼지풀의 침입과 화분의 확산에 관한 모델의 개요 ··· 65
<그림 3-8> IPCC 제4차 보고서 4개 시나리오와 부지의 이용변화
시나리오에 의한 유럽의 돼지풀 2050년 분포 예측 ····· 67
<그림 3-9> IPCC 제4차 보고서 4개 시나리오에 따라 제시된 2050년 유럽의
돼지풀 생태에 영향을 미치는 기후 질과 주요 기후 제한 인자
····· 67
<그림 3-10> IPCC 제4차 보고서 3개 시나리오에서 제시하고 있는 2050년
유럽의 돼지풀 화분 농도 분포 ····· 68
<그림 3-11> IPCC 제4차 보고서 4개 시나리오별 돼지풀이 2050년
유럽의 농업에 미치는 영향 ····· 69

<그림 3-12> 돼지풀의 제어전략 개념도 ····· 72
<그림 3-13> 유럽의 초기 경보 및 빠른 대응 체계 구조 ····· 78
<그림 3-14> 침입외래종의 도입과 정착, 확산 시기에 연관된 개체군 변화와 관리수단 ····· 86
<그림 3-15> 적응관리 정책의 순환체계 ····· 88
<그림 4-1> 기후변화에 따른 외래종의 도입과정과 국내 이미 도입된 외래종의 침입성에 따른 외래종의 집단 분류 ····· 98
<그림 4-2> 침입외래종의 침입력을 결정하는 주요 요소 ····· 100
<그림 4-3> 소나무재선충병 피해 현황 및 현황도 ····· 101
<그림 4-4> 기후변화에 따른 1995년과 2015년 솔수염하늘소의 생장가능 지역 변화 예측 ····· 102
<그림 4-5> 기후변화에 따른 2025년, 2035년, 2055년 솔수염하늘소의 생장가능지역 변화 예측 ····· 103
<그림 4-6> 기후변화에 따른 오이총채벌레의 연대별 서식지 분포 변화 예측 ····· 104
<그림 4-7> 기후변화에 따른 실망초의 연대별 서식지 분포 변화 예측 ····· 105
<그림 4-8> 솔수염하늘소에 의한 소나무재선충병의 발생지역(2015년 현재까지)과 기후변화에 따른 2025년 솔수염하늘소의 생장가능지역 ····· 106
<그림 4-9> 기후변화에 따른 연도별 오이총채벌레의 분포지역 ····· 111
<그림 5-1> 기후변화와 침입외래종의 향후 추진 사업의 체계도 ····· 122

| 제1장 · 서 론 |

1. 서문

20세기 이후 지구의 생물다양성에 가장 위협적인 요소는 침입외래종(Invasive Alien Species, IAS)으로 제기되고 있다 (CBD, 2014; IUCN, 2014; Burgiel & Muir, 2010; Master & Norgrove, 2010). 특히 기후변화와 연계되어 복합적으로 나타나는 침입외래종 문제는 세계의 GDP 10%를 소모시키는 21세기 지구의 가장 주요한 환경문제로 지적되고 있다 (IUCN, 2010; Hulme, 2009). 이로 인해, 세계침입종프로그램(Global Invasive Species Program, GISP)은 국가 차원에서 기후변화와 침입외래종의 문제를 연계시켜 접근하고 대응해야 함을 지적하고 있다(Burgiel & Muir, 2010). 최근 유엔의 지속가능개발목표(Sustainable Development Goals, SDG)에는 2020년까지 침입외래종의 유입[1]과 피해를 줄여야 함을 목표로 설정하고 있다[2].

우리나라에서는 소나무재선충, 뉴트리아, 황소개구리, 붉은귀거북, 파랑볼우럭(블루길), 큰입배스(배스), 뒤영벌, 솔입혹파리 등 침입외래종에 의한 국내 생태계 훼손 및 농업, 산업 분야 피해는 이미 주요한 사회 이슈이다. 기후변화에 의해 제기되는 침입외래종에 의한 생태계 변화는 이미 국내 여러 곳에서 감지되었고, 언론에서도 이를 수년간 지속적인 사회이슈로 다루고 있다 (조선일보, 2015.4.17; YTN, 2015.4.6; 연합뉴스, 2015.2.10, 2015.4.17; 경남일보, 2015.4.12; SBS, 2014.10.23; YTN Special, 2013.9.12; 중앙일보,

---

1) 본 연구에서 지칭하는 '생물종의 유입/도입(introduction)'이라 함은 고의적 또는 사고 등의 비고의적으로 어떤 생물종이 존재하지 않은 야생지역에 그 어떤 생물(종)이 방출하는 것을 의미한다. 본 보고서에 사용되는 외래종의 도입과 유입은 다르지 않다.

2) Sustainable Development Goal 15. Protect, restore and promote sustainable use of terrestrial ecosystems, sustainably manage forests, combat desertification, and halt and reverse land degradation and halt biodiversity loss.
15.8 by 2020 introduce measures to prevent the introduction and significantly reduce the impact of invasive alien species on land and water ecosystems, and control or eradicate the priority species (UN Open Working Group on Sustainable Development Goals, 2014)

2015.3.30; 한겨레, 2013.6.26; 경향신문 2015.4.7; 제주의 소리, 2015.1.5). 향후 기후변화에 따른 새로운 침입 외래종의 도입과 기존 침입외래종의 확산[3] 등에 의해 생태계 혼란이 가중될 것으로 예측된다.

미국, 호주, 뉴질랜드, 유럽 등에서는 기후변화에 의한 침입외래종의 유입 및 확산 등을 고려하여 외래종 관리가 이뤄진다. 또한 생물다양성협약(Convention on Biological Diversity, CBD; 제3차 당사국 회의, 2010~제12차 당사국 회의, 2014)과 IPBES (Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, 2012; 2014)는 기후변화에 따른 침입외래종 관리를 주요 핵심안건으로 논의하고 있다. 2015년 현재 우리나라는 「야생생물 보호 및 관리에 관한 법률」, 「산림자원의 조성 및 관리에 관한 법률」 등에 의한 야생생물보호기본계획(2011~2015)과 산림생물다양성기본계획(2013~2017), 제1차 외래생물관리계획(2014~2018) 등에서 멸종위기종을 포함한 국가생물종목록 작성, 보호지역 확대, 유해 야생생물과 외래종 관리 등을 추진하고 있다. 그러나 기후변화에 따른 외래종의 생리, 생태적 변화를 평가하고, 이와 연계하여 침입외래종을 관리하는 국가와 지역 차원의 전략을 수립하고 있지 아니하다.

본 연구의 목적은 기후변화에 의해 역동하는 또는 역동할 수 있는 침입외래종의 정착과 확산에 대응하는 생태계 기반 관리전략(ecosystem-based management strategy)을 제시하는 것이다. 또한 기후변화에 따라 새로이 국내에서 발생할 수 있는 침입외래종 문제에 대한 접근정책 방향을 포함하고 있다.

외래종의 침입은 외래종의 이동에 관한 기후변화와 생태계의 반응 등 과학적 고려 요소 외에도 사회적·경제적인 문제가 복합적으로 얽혀있다. 이 연구에서는 외래종의 국가간 이동에 대한 인간의 사회, 경제적인 문제는 포함하고 있지 않다. 본 연구에서 다루고 있는 외래종이라 함은 도입종, 귀화종, 침입종을 통칭하는 용어로 특정한 인위적 목적 여부에 관계없이, 본래의 자생지가 아닌 외부에서 들어와 다른 생물의 서식지를 점유하여 번식하는 생물종을 지칭한다. 이에 본 연구에서 사용하는 침입외래종은 「생물다양성 보전 및

3) 확산(Spread)이란 새로운 개체집단에 의한 생물종이 새로운 범위로 확장됨을 의미한다.

이용에 관한 법률」 제2조 제7호와 제8호, 그리고 제22조 제1항에 명시되어 있는 외래생물과 생태계교란생물, 위해우려종[4]과는 동일하지 않다.

본 연구에서는 외래종의 국가간 경계보다는 생태적 서식처(ecological niche) 개념을 적용하고 있다. 따라서 우리나라 내에서 그 본래의 원산지 또는 서식처를 벗어나 존재하게 된 생물의 경우도 외래종으로 지칭한다. 또한 이들 외래종 중에서 기존의 생태계에서 서식처를 확대·생장하면서 기존의 생물다양성과 생태계서비스를 위협하거나 악영향을 미치는 외래종을 침입외래종으로 지칭하고 있다[5]. 이 연구에서는 공간적으로는 국가나 행정적으로 구분된 경계보다는 생물종의 생태계에 기반을 두어 한계를 설정하고 있는 침입외래종에 대한 미국의 OTA와 행정명령13112, UNEP, GISP, EU 규정[6]의 정의에 따라 침입외래종

---

4) 「생물다양성 보전 및 이용에 관한 법률」에 명시되어 있는 '외래생물'이란 외국으로부터 인위적 또는 자연적으로 유입되어 그 본래의 원산지 또는 서식지를 벗어나 존재하게 된 생물을 지칭한다. '생태계교란생물'이란 다음 괄호 내용 (가. 외래생물 중 생태계의 균형을 교란하거나 교란할 우려가 있는 생물, 나. 외래생물에 해당하지 아니하는 생물 중 특정 지역에서 생태계의 균형을 교란하거나 교란할 우려가 있는 생물, 다. 유전자의 변형을 통하여 생산된 유전자변형 생물체 중 생태계의 균형을 교란하거나 교란할 우려가 있는 생물)의 어느 하나에 해당하는 생물로서 동법 제23조(생태계교란 생물의 지정 · 고시)에 따른 위해성평가 결과 생태계 등에 미치는 위해가 큰 것으로 판단되어 환경부장관이 지정 · 고시하는 것이다. '위해우려종'이란 국내에 유입될 경우 생태계 등에 위해(危害)를 미칠 우려가 있어 환경부장관이 지정 · 고시하는 생물종(살아있는 것으로서 개체의 일부·알·종자 등을 포함)이다.

5) 미국 의회의 기술평가과(US Congress/Office of Technology & Assessment, OTA, 1993)에 따르면 외래종이란 "자연서식범위 또는 잠정적 자연계 확산지역 외에 있는 생물종이다. 이러한 생물종으로 인간에 의하여 길들여지거나 또는 야생화된 생물종, 야생화된 생물종과 토착종과의 잡종을 포함한다. 그러나 토착종과의 교배에 의하여 자연적으로 발생된 잡종은 포함하지 않는다." 이 정의에서 사용하고 있는 자연서식범위란 "생물종의 거주지 또는 인간의 유의성 있는 영향 없이 생물종이 서식하는 지역의 범위"를 뜻한다. 잠정적 자연계 확산지역이란 "생물종이 인간의 유의성 있는 영향 없이 확산할 수 있는 지역"이다. 미국 국가침입종위원회(National Invasive Species Council)의 설립을 명기하고 있는 미국의 행정명령13112(Executive Order 13112, 1999)에서는 "침입외래종이란 경제적 또는 환경적 위해 또는 인간과 인간의 건강에 위해를 끼치거나 또는 끼칠 수 있는 생태계의 비토착종(외래종)"으로 정의하고 있다. 침입외래종은 동물, 식물, 미생물이 될 수 있으며 작물, 가축, 수렵용, 낚시용, 애완용 또는 선박의 화물을 통해 의도적 또는 비의도적으로 도입되어 확산된 생물종이다. 유엔환경계획(UNEP)에서는 침입외래종을 의도적 또는 비의도적으로 외부로부터 도입되어 새로운 서식지의 생물다양성, 생태계, 서식처와 인간의 복지를 위협하는 생물로 정의하고 있다 (Munyaradzi & Mohamed-Katerere, 2003). 유럽연합(EU)에서는 외래종을 '자연적으로 지역에 존재하지 않으나 인간에 의해 도입된 새로운 생물종 또는 자손(Race)'으로 정의하고 있다. 또한 침입외래종은 생태계에 도입되고 확산되면서 생물다양성과 연계된 생태계서비스를 위협하거나 또는 악영향을 미치는 외래종을 의미한다 (EU, 2014a). GISP의 경우, 침입외래종에 관련된 다양한 자료들이 발간되고 있으며, 발간자료에서 다루고 있는 침입외래종의 정의는 자료별로 약간의 차이를 보여주고 있으나, OTA와 UNEP의 Munyaradzi & Mohamed-Katerere(2003)가 제시하고 있는 침입외래종의 정의와 그 내용과 범위가 유사하다.

6) Regulation(EU) No 1143/2014 of the European Parliament and of the council of 22 October 2014 on the prevention and management of the introduction and spread of invasive alien species.

을 다루고 있다. 이중에서도 육상생태계에 도입 또는 서식하는 외래종에 초점을 두고 있다. 이들 용어에서는 생물종과 서식지의 변화에 대한 시간적인 개념은 적용하지 않았으며, 시간적인 개념을 적용하여 이들 용어의 개념을 정리하는 문제는 본 연구에서 다루지 않고 있다[7]. 끝으로, 본 연구보고서에 인용문헌이 표기되지 않은 글, 그림, 표는 연구진이 기술하고 작성한 고유의 결과물이다. 이에 대해 연구진에 책임이 있음을 밝힌다.

7) 도입종이란 특정한 목적을 위하여 인위적으로 도입된 생물종이다. 귀화종이란 본래 자생지가 아닌 곳에서 스스로 적응하여 번식하는 생물종이다. 침입외래종이란 본래의 자생지가 아닌 외부에서 들어와 다른 생물의 서식지를 점유하고 있는 생물종임을 지칭한다. 따라서 도입종, 귀화종, 침입외래종의 개념은 상호 공유하는 부분이 있을 수도 있으며, 상충하는 부분이 있을 수도 있다.

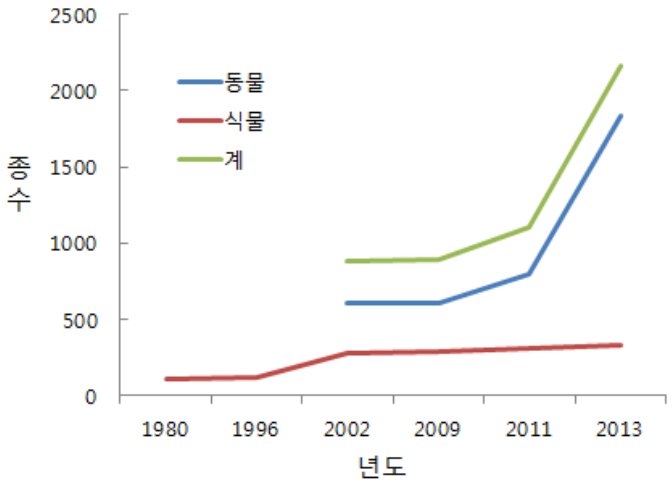
| 제2장 · 외래종의 현황과 전망 |

1. 외래종의 증가

세계적으로 생물종은 1,400만종으로 추정되고 있으며, 확인된 생물종수(species)는 약 170만 종이다. 이중에서 침입외래종(Invasive Alien Species, IAS)은 약 20만 종으로 평가하고 있다 (CBD, 2014; Masters & Norgrove, 2010; McNeely et al., 2001). 우리나라에서는 1980년에 외래식물종을 110여종으로 보고하였다. 2002년에는 281종으로 증가하였다. 1996년에는 외래 양서·파충류만을 223종으로 보고하고 있다 (국립환경연구원, 1996). 1996년 이후 5년간 추가로 유입된 것으로 조사된 외래식물종은 58종으로 전체 외래식물종의 22%를 차지하고 있다 (환경부 내부자료, 방상원 등(2004)에서 재인용). 2006년에 국내 유입된 것으로 조사된 외래 동물은 607종으로 포유류 128종, 양서류 10종, 파충류 124종, 어류 147종, 조류 95종, 곤충 48종, 기타 55종으로 보고하고 있다 (방상원 등, 2006). 이후, 2009년 유입된 것으로 조사된 외래 생물은 894종, 2011년에는 1,109종, 2013년에는 2,167종으로 지속적으로 빠르게 증가하고 있다 (환경부, 2014b) <그림 2-1>.

「생물다양성 보전 및 이용에 관한 법률」에서는 국내 유입된 외래생물종 중에서 우리나라 생태계를 훼손시키는 생물을 '생태계교란생물'로 지칭하고 있다. '생태계교란생물'은 1998년 3종, 1999년 2종, 2001년 1종, 2002년 4종, 2009년 6종, 2012년 2종이 지정되어 2014년 현재 18종이 지정되어 있다 (환경부, 2014a). 생태계교란생물은 황소개구리 *Rana catesbeiana*(1998년 지정), 파랑볼우럭(블루길) *Lepomis macrochirus*(1998년 지정), 큰입배스 *Micropterus salmoides*(1998년 지정), 붉은귀거북속 전종 *Trachemys* spp.(2001년 지정), 뉴트리아 *Myocastor coypus*(2009년 지정), 꽃매미 *Lycorma delicatula*(2012년 지정), 돼지풀 *Ambrosia artemisiaefolia* var. *elatior*(1999년 지정), 단풍잎돼지풀 *Ambrosia trifida*(1999년 지정), 서양등골나물 *Eupatorium rugosum*(2002년 지정), 털물참새피 *Paspalum distichum* var. *indutum*(2002년 지정), 물참새피 *Paspalum distichum* (2002년

지정), 도깨비가지 *Solanum carolinense*(2002년 지정), 애기수영 *Rumex acetosella*(2009년 지정), 가시박 *Sicyos angulatus*(2009년 지정), 서양금혼초 *Hypochoeris radicata*(2009년 지정), 미국쑥부쟁이 *Aster pilosus*(2009년 지정), 양미역취 *Solidago altissima*(2009년 지정), 가시상추 *Lactuca scariolia*(2012년 지정)이다.



〈그림 2-1〉 국내 유입된 것으로 조사된 외래생물종 수의 변화 (1980-2014)

2. 외래종의 영향: 이익과 피해

가. 외래종에 의한 이익

외래종의 생태계서비스에 대한 다양한 가치평가 연구가 최근 시도되고 있다. Pejchar and Mooney(2009)는 외래종의 생태계서비스를 제공(provisioning), 조절(regulating), 및 문화적 서비스(cultural service)로 구분하고, 각 서비스에 대한 외래종의 가치를 평가하였다. Barnes et al.(2014)은 외래종의 생태계서비스에 의해 얻는 이익을 바이오연료생산, 가축사료, 비료, 모피, 수렵 및 낚시, 목재 및 펄프생산 등에 대한 서비스를 대상으로 구분하여 사례를 수집하고 가치를 평가한 바 있다. 그 외 다수의 외래종에 의한 경제·사회

적인 가치와 이익이 사회 전반에 걸쳐 있다 <표 2-1>.

〈표 2-1〉 외래종의 생태계서비스 가치[1)]

일반명(영명)	학명	사용[2)]	수확지역	가치[3)]
Norway maple	*Acer platanoides*	T	워싱턴 DC	
Tree of heaven	*Ailanthus altissima*	B,E,T	미국	US$100-300/줄기
Persian silk tree	*Albizia julibrissin*	A	미국	
Garlic mustard	*Alliaia petiolata*	F,E,T	워싱턴 DC	
ㅊPorcelainberry	*Ampelopsis brevipedunculata*	E	워싱턴 DC	
Lesser burdock	*Arcium minus*	F	미국	
Axis deer	*Axis axis*	R	하와이	
Chinese mysterysnail	*Bellamya chinensis*	F	미국	
Banteng	*Bos javanicus*	E,R	호주	
Canadian goose	*Branta canadensis*	F	미국	
Paper mulbeny	*Broussonetia papyrifera*	E	워싱턴 DC	
Asian water buffalo	*Bubalus bubalis*	A,F,H,R	호주	US$47/스테이크
Camel	*Camelus* spp.	A,F,R	호주	
Goat	*Capra hircus*	F,H,E	호주, 뉴질랜드	US$15-30백만/년 (수출)
Green crab	*Carcinus maenas*	F,$	뉴잉글랜드, 워싱턴	US$5(개)
Oriental bittersweet	*Celastrus ohiculatus*	E	워싱턴 DC	
Spotted knapweed	*Centaurea maculosa*	A	미시간	US$400만/년
Peacock grouper	*Cephalopholis argus*	A,R	하와이	
Northern snakehead	*Channa argus*	F,R,$	뉴잉글랜드	US$200-1,500(상금)
Dead man's fingers	*Codium fragile*	F	코네티컷	
Asian clam	*Corbicula fluminea*	F	북미	
Common carp	*Cyprinus carpio*	A,F,R	미국, 호주	US$26
Queen Anne's lace	*Daucus carota*	F	북미 온대지역	
Didymo	*Didymosphenia geminata*	B		
Water hyacinth	*Eichhornia crassrpes*	A,B,E	빅토리아 호수	
Autumn olive	*Elaeagnus umbellata*	F	북미	
Horse	*Equus ferus caballus*	E,R	호주, 버지니아	US$1500(여행당), US$l,142(조랑말여행)
Chinese mitten crab	*Eriocheir sinensis*	F	영국	
Japanese knotweed	*Fallopia japonica*	R	북미	

English ivy	*Heden helix*	E	워싱턴 DC	
lrish ivy	*Hedera hibernica*	E	워싱턴 DC	
Asian shore crab	*Hemignpsus sanguineus*	F	코네티컷	
Rio Grande cichlid	*Herichthys cyanoguttatus*	R	뉴올리언스	
Rose of Sharon	*Hibiscus syriacus*	E,T	워싱턴 DC	
Sea buckthorn	*Hippophae* spp.	F	영국	
Hydrilla	*Hydrilla verticillata*	B		
Asian carp	*Hypophthalmichthys molitrix, Hypophthalmichthys nobilis*	A,F,R	미국 중부	US$20백만/년 (수출)
Blue catfish	*Ictalurus furcatus*	R	미국 동부	
Green iguana	*Iguana iguana*	F	플로리다, 푸에르토리코	
Nile perch	*Lates niloticus*	F,R	빅토리아 호수	
Periwinkle	*Littorina littorea*	F	뉴잉글랜드	
Japanese honeysuckle	*Lonicen japonica*	E,T	미국	
Blueline snapper	*Lutjanus coeruleolineatus*	A,R	하와이	
Blacktail snapper	*Lutjanus fulvus*	A,R	하와이	
Macaque monkeys	*Macaca* spp.	E,R	모리셔스, 플로리다, 브라질, 쿡제도, 멕시코, 푸에르토리코	
Lealherleaf mahonia	*Mahonia bealei*	F,E	워싱턴 DC	
White mulberry	*Morus alba*	B,F,E,T	워싱턴 DC	
Nutria	*Myocastor coypus*	A,H	미국 남부	
Eurasian watermilfoil	*Myiophyllum spicatum*	B		
Purple varnish clam	*Nuttallia obscurata*	F	캐나다 브리티시 콜롬비아, 워싱턴, 오리건	
Salmonids	*Oncorhynchus and Salmo* spp.	F,R	세계	
Rusty crayfish	*Oranectes rusticus*	F	미시간, 워싱턴	
Tilapia	*Oreodtromis* spp.	F	세계	
Oysters	*Ostreidae*	F	세계	
Signal crayfish	*Pacifastacus leniusculus*	F	영국, 미국, 타호 호수	
Asian tiger prawn	*Penaeus monodon*	F	워싱턴 DC	
Devil's tear-thumb	*Persicaria pedoliata*	E		
Sea lamprey	*Petromyzon marinus*	F	미시간	
Common reed	*Phragmites australis*	B		

Black crappie	*Pomoxis nigromaculatus*	F,R	메인	
Purslane	*Portulaca olencea*	F	븍미	
Louisiana crayfish	*Procambarus clarkii*	F,R	중국, 아프리카	
Guava	*Psidium* spp.	F	하와이	US$8/개
Lionfish	*Pterois miles,* *Pterois volitans*	F,R	플로리다, 카리브해	US$600/일 (수확)
Kudzu	*Puerarla lobata*	B,F	북미	
Burmese python	*Python molurus bivittatus*	F,H	플로리다	US$50-100/가죽, US$120/개
Bullfrog	*Rana catesbeiana*	F	워싱턴	US$13.31/파운드
Veined rapa whelk	*Rapana venosa*	F	유르구아이	
Multiflora rose	*Rosa multifloa*	E	워싱턴 DC	
Himalayan blackberies	*Robus armeniacus*	F	미국북서부	
Wineberry	*Rubus phoenicolasius*	F,E	워싱턴 DC	
Curly dock	*Rumex crispus*	F	미국	
Rusa deer	*Rusa timorensls*	A	호주	
Chinese tallow	*Tiadica sebifera*	B	세계	
Pink peppercorn	*Schinus molle*	F	하와이	US$8/개
Brazilian pepper	*Schinus terebinthifolius*	F	플로리다	
Feral swine	*Sus scrofa*	F,R	미국	
Dandelion	*Taraxacum officinale*	F	미국	
Brushtail possums	*Trichosurus vulpecul*	H	뉴질랜드	US$80백만/년 (수출)

주: 1) 각 외래종별 인용문헌에 대해서는 Barnes et al.(2014)의 자료를 확인할 수 있다.
2) A, 가축의 식량과 비료; B, 바이오연료 생산; E, 교육 및 공공인식; F, 식량; 모피 및 가죽; R, 여가 이용; T, 목재 및 펄프; $, 보상프로그램
3) 가치 - 모든 외래종의 위치가 구체적으로 확인된 것이 아니며, 이로 인한 모든 외래종의 생태계서비스 가치가 확인된 것이 아니다. 또한 바이오연료로서의 가치가 평가되지 않은 외래종의 경우도 다수이다.

자료: Barnes et al.(2014)

1) 바이오연료

에너지와 정치적인 흐름을 고려할 때, 세계적으로 바이오연료 시장은 2011년 827억 달러의 가치가 있다. 향후 10년 이내에 두배 이상으로 증가할 것으로 보고 있다. 바이오연료로 사용하는 대부분의 작물은 기존의 생태계를 훼손하는 침입외래종일 수 있으나, 기후변화를 저감시킬 수 있는 화석연료를 대체하는 긍정적인 생태계서비스 가치로 볼 수도 있다 (Sage et al., 2009).

2) 비료 및 가축사료

단백질 함량이 높은 침입외래종의 두 가지 사용용도는 비료와 가축 사료이다. 유기물질 비료의 사용은 장기적으로 기후변화에 영향을 나타내는 화학질소 비료의 사용을 감소시킨다. 침입외래종의 가공을 통해 적정한 비료로 사용할 수 있다. 이는 현대 농업에서 사용하고 있는 합성 질소 비료의 사용량을 감소시킬 수 있다 (Pinder et al., 2012).

3) 모피와 생가죽

세계적으로 소가죽과 염소 등의 가죽은 1,000만 톤 정도가 생산된다. 이중에서 500만 톤이 국제적으로 거래된다. 이는 약 100억 달러(US$)의 가치에 해당한다 (Barnes et al., 2014). 국제적으로 거래되는 상당분의 모피는 외래종으로 사육되거나 야생의 침입외래종으로부터 가공된 것이다 (Griffin, 2012).

4) 수렵

여가용 수렵은 세계적으로 확산되고 있다. 수렵용으로 도입한 외래동물에 의한 피해를 고려할 때, 수렵에 의한 외래 동물의 가치를 우선하기 어려울 수도 있다. 그럼에도 불구하고 외래 동물을 목표로 하는 수렵은 지역경제를 향상시키는 수단으로서 긍정적으로 평가되기도 한다 (Naevdal et al., 2012).

5) 목재와 펄프

세계적으로 외래종 목재와 펄프, 땔감, 목탄은 경제 가치가 높은 생산품이다. 호주에서 남아프리카로 도입된 아카시나무는 남아프리카의 주요 침입외래종이면서 목재와 펄프, 땔감의 주요 경제원이기도 하다 (Shewmake, 2008).

6) 교육과 공공인식

외래종은 환경교육 프로그램과 공공인식 증진에 사용된다 (Laberton, 1994; Gorman,

2011). 생태관광 산업 등에 침입외래종을 전시, 이용함으로써 침입외래종의 캠페인에 사용하고 있다. 이로 인한 상당한 경제적 이익을 얻기도 한다 (Chincorteague, 2012).

7) 식량과 영양분

세계 농업의 기초는 많은 부분이 외래종인 작물과 가축에 의존하고 있다. 우리나라 국민의 주식인 벼는 인도 북부지방에서 도입된 것이고, 고추는 임진왜란 당시 일본을 통해 국내에 도입된 것이다. 그 외 우리가 일상생활에서 접하고 있는 대부분의 동식물의 원산지는 한반도 밖에 있다. 이들은 대부분이 한반도에 유입된 외래종이다. 외국의 경우도 식품의 원산지는 우리나라와 유사하다. US Consensus Bureau(2001)에 따르면, 미국의 식품을 구성하고 있는 생물(작물과 기축을 포함하는)의 98%가 외래종이다 (Barnes et al., 2014).

나. 외래종에 의한 피해

우리나라를 포함하여 세계 각국에서 침입외래종에 의해 비가역적으로 생태계가 훼손된 사례는 수백 건이 넘는다. 세계 57개국에서 생태계를 훼손시키고 있다고 조사된 주요 침입외래종은 542종(식물종 316, 해양 어류 101, 육수 어류 43, 포유류 23, 조류 23, 양서류 15종)이다 (박용하 등, 1998; 환경부, 2014.6; 이요한 등, 2014; Masters & Norgrove, 2010; McGeoch et al., 2010) (표 2-2).

외래종이 토착생태계에 미치는 영향은 다음과 같이 몇 가지로 구분할 수 있다. 첫째, 유전자원의 유용성(availability)을 변화시키거나 침입하는 생태계의 체계(연대)를 교란시켜 생태계의 기능을 변화시킨다 (Richardson et al., 2000). 둘째, 토속과 외래종의 교잡을 통해 생태계의 유전자 풀을 변화시킨다 (Vila et al., 2000). 셋째, 토양에서의 물질대사 과정을 변화시킨다 (Liao et al., 2008). 특히 탄소포획과정에 영향을 미치는 외래종은 인류 생활의 여러 분야에 다양하고 심각한 영향을 나타낸다 (Richardson et al., 2008; Traveset & Richardson, 2006; Peltzer et al., 2010). 넷째, 토속종의 다양성을 감소시킨

다 (Gaertner et al., 2009; Sax & Gaines, 2003; Winter et al., 2009). 다섯째, 외래종과 토속종간의 위치, 생태학적 지위, 자리 경쟁이 나타난다 (Vila et al., 2004).

〈표 2-2〉 외래종에 의해 국내외 생태계 변화가 표출된 일부 사례

국가 또는 대륙	사례
우리나라	황소개구리(Bullfrog, *Rana catesbeiana*)는 국내 전국 호소 및 저수지, 논에 정착하였으며, 토착 개구리 및 뱀까지 잡아먹어 기존의 먹이사슬을 파괴하고 새우와 참게 양식장 등을 훼손
	파랑볼우럭(Blugill, *Lepomis macrochirus*)은 국내 댐, 하천지역에 유입된 번식력이 높은 잡식어종으로, 수서곤충, 새우, 국내 토종 물고기 등을 섭식하여 담수생태계를 교란
	큰입배스(*Lepomis macrochirus*)는 전국 저수지, 하천 등에 유입되어 토종어류, 알을 먹어 고유어종의 군집을 교란
	붉은귀거북속 전종(*Trachemys* spp.)은 붕어, 미꾸라지 등의 국내 고유종 어류와 수서곤충 및 양서류 등을 먹어 호소와 하천생태계를 교란
	돼지풀(*Ambrosia artemisiaefolia* var. *elatior*)은 능선, 계곡, 휴경지, 나대지 등에서 생육이 왕성하여 다른 식물의 성장을 방해하며, 꽃가루 알레르기를 유발함
	단풍잎돼지풀(*Ambrosia trifida*)은 집단적으로 생육하여 다른 식물의 생장을 방해하며, 꽃가루 알레르기를 유발
	소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*)은 1988년 부산 금정산에서 발견 이후, 2007년 이후 피해지역이 급증하면서 2014년에는 전국 13개 시,도, 60개 시,군,구 11,550ha의 산림의 소나무가 소나무재선충에 의해 고사
	생태계교란식물로 지정되어 있는 서양등골나물(*Eupatorium rugosum*), 털물참새피(*Paspalum distichum* var. *indutum*), 물참새피(*Paspalum distichum*), 도깨비가지(*Solanum carolinense*), 애기수영(*Rumex acetosella*), 가시박(*Sicyos angulatus*), 서양금혼초(*Hypochoeris radicata*), 미국쑥부쟁이(*Aster pilosus*), 양미역취(*Solidago altissima*), 가시상추(*Lactuca scariolia*)의 피해 사례가 보고
호주	호주에서 약 600km 동쪽에 위치하고 있는 로드 하우섬(Lord Howe Island)에 들어온 검은쥐(Black Rat)는 5개 고유 조류종을 멸종
	호주에 도입된 여우, 고양이, 토끼는 최소한 호주대륙의 자생종 22종을 멸종시킴
뉴질랜드	뉴질랜드 토속조류인 Yellowhead(*Mohua orchrocephala*)는 대륙에서 유입된 쥐에 의해 1999-2000년 기간 중 급감하여 멸종위기에 처함
북미, 중미, 호주	양서류에 감염하는 곰팡이인 Chytridiomycosis(*Batrachochytrium dendrobatidis*)는 북미지역, 중미, 호주 동부에서 양서류의 수를 급격하게 감소시킴. 지구상 양서류의 30%에 영향을 입혔으며, 최소한 78종의 개구리가 멸종

자료: 박용하 등(1998); 박용하(2005); Masters & Norgrove(2010); McGeoch et al.(2010); 이요한 등(2014); 환경부(2014b).

특히 외래종의 유입과 확산에 따른 생태계 변화를 생태계서비스의 경제적 가치 변화 차원에서 이루어진 연구에 따르면, 침입외래종에 의한 생태계서비스의 경제적 가치는 이미 상당히 훼손되어 있다. 이로 인한 경제적 손실은 보고된 연구결과만으로도 막대하다 (Antia et al., 2003; Pimentel, 2002; Pimentel et al., 2005; Perring, 2005; Lambdon et al., 2008; van Wilgen et al., 2008, Lowell et al., 2006; GISP, 2014). 이는 매년 세계 GDP의 약 10%에 해당한다 (IUCN, 2010; Hulme, et al., 2009) (표 2-3).

〈표 2-3〉 외래종에 의한 경제적 피해의 일부 사례

연구사례	내용
Office of Technology Assessment, 1993	79종의 가장 위해한 침입외래종을 발표. 이들에 의한 미국의 경제적 손실은 1906년 이후 87년간 970억 달러에 이른다.
Pimentel et al., 2000, 2001, 2002, 2004, 2005	미국에 약 5만종의 외래종이 도입되어 있으며, 위해한 외래종에 의한 미국의 연간 손실은 785억 달러, 호주의 손실은 62.4억 달러, 브라질의 손실은 426억 달러, 영국의 손실은 55.6억 달러, 인도의 손실은 910.2억 달러, 남아프리카의 손실은 43억 달러에 이르고 있는 등, 최소 1조 4,000억 달러가 위해 외래종에 의한 경제적 손실을 입고 있다.
Pimentel et al., 2004	US Consensus Bureau(2001)에 따르면, 일부 도입된 외래종(주로 잡초와 임·농작물병원균)들은 매년 최소 수십억 달러에 이르는 피해를 입히고 있는 등, 미국에서 작물의 생산성에 미치는 피해의 65%는 임농작물병원균, 12%는 잡초에 의한 것이다. 이들 잡초의 피해 중에서 약 73%가 침입외래종에 의한 것이다.
US Fish and Wildlife Service, 2012	침입외래해충에 의해 매년 미국 농업생산의 130억 달러가 손실되고 있는 것으로 평가되었다.
Pimentel et al., 2004	미국은 매년 침입외래종 방제비용으로 1,200억 달러가 지출되었다.
Callaway et al., 2006	중국에 약 283종의 외래종이 보고되었으며, 144.5억 달러의 경제적 손실이 발생하였다.
Kettunen et al., 2009	유럽에서 침입외래종에 의한 손실을 매년 최소 125억~200억 유로로 평가되었다.
Sinden et al,, 2004	호주에서는 잡초로 인해 농장에서는 연간 39억 호주달러의 손실을 입고 있으며, 이로 인해 호주 정부는 잡초의 모니터링, 방제, 관리, 연구 등에 1억1640만 호주달러를 매년 지출하고 있다.
van Wilgen et al., 2001	남아프리카공화국에서 잡초로 인해 생태계 가치의 4% 가량이 훼손되었다 (117.5억 달러로 평가)
Pimentel et al., 2002	침입외래종에 의한 연간 경제적 손실은 세계 GDP의 약 5%를 차지하고 있다.

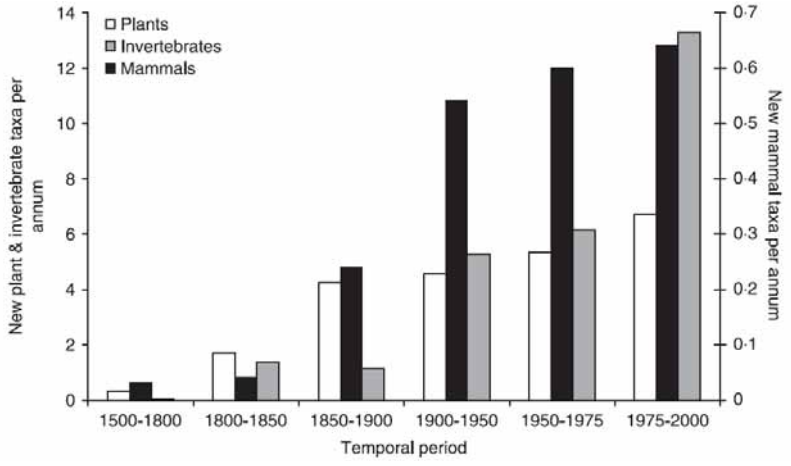
더욱이 현재 이루어지고 있는 침입외래종에 의한 경제·사회적 손실가치는 침입외래종의 잠정적인 도입경로, 매개종, 기주, 도입지역의 기후 및 지리적 조건 등에 대한 위해성 평가과정을 반영하지 않은 것이다. 침입외래종의 위해성 영향을 평가과정에 반영할 경우, 외래종에 의한 경제적 손실이 더욱 클 것으로 보고 있다 (Pimentel et al., 2004). 또한 Pyšek & Richardson(2010)은 탄소 및 질소 순환을 포함한 다양한 생태계서비스의 요소를 고려할 경우, 침입외래종에 의한 경제사회적 피해금액은 더욱 커질 것으로 보고 있다.

3. 외래종의 증가 요인

가. 세계 규모의 무역

지구상에서 인류의 이동에 따라 외래종의 대규모 이동은 4차례에 걸쳐 일어났다 (Hulme, 2009) (그림 2-2). 첫째 시기는 1500년대 중세시기로 유럽인의 미국 대륙 발견 및 식민지화 과정에서 대규모의 생물종이 유럽과 미국 대륙 간에 이동한 시기이다 (Preston et al., 2004). 둘째 시기는 1800년대 산업혁명기에 국가 간 물품 교역이 급진적으로 증가함에 따라 외래종의 국가 및 대륙 간 이동이 시작되었고, 1850년 후반 이후 급진적으로 증가했다. 1820년부터 1930년 기간 중에 유럽인 5,000만 명이 미국 대륙으로 이주함에 따라 외래종이 대규모로 이동한 시기이다 (Mack, 2003). 셋째 시기는 1975년 이후 현재까지 글로벌화에 따라 빈번하게 외래종이 이동한 시기이다. 이 시기는 소득수준의 향상과 효율적 운동수단의 발달로 인한 지구촌 사람 및 물품의 이동이 대규모로 빈번하게 이루어진 시기이다. 국제무역에 의한 국가 간 물품의 이동 증가는 다양한 생물종의 대륙 간, 국가간 이동 증가로 이어졌으며, 국가 차원에서는 새로운 외래 생물종의 도입 증가로 나타났다 (Levins & D'Antonio, 2003; Hulme, 2009). 넷째 시기는 기후변화에 의한 이동이다. 기후변화에 따른 생물종의 변화가 시작되었으며, 외래종의 변화가 나타나고 있다. 기후변화의 폭에 따라 외래종이 지구의 생태계에 미치는 영향은 점점 증가하고 있다 (Hulme, 2009; Hulme et al., 2010). 외래종의 4차례 대규모 이동 중에 첫째, 둘째,

셋째 요인은 인간에 의한 의도적인 외래종의 이동(연구용, 농업용, 관상용, 화훼용 등의 목적)으로 외래종을 수출입한 경우이다.



자료: Hulme(2009)

〈그림 2-2〉 1500년 이후 유럽에 유입된 외래 척추동물, 외래 식물, 외래 포유류 종수

나. 대기 구성물질의 변화

1) 대기 중 CO_2 농도의 증가

대기 중 CO_2 농도의 증가는 식물의 광합성에 직접적인 영향을 미친다. 식물은 CO_2 농도에 생리적이고 형태적으로 반응하여 광합성 과정과 생장과정의 변화로 나타난다 (Veteli et al., 2002). CO_2 농도에 대한 반응은 생물종별로 달리 반응하며, 이러한 반응은 생태계의 다른 요인과 맞물려 있어 CO_2 농도에 대한 생태계의 변화를 계량화하기는 어렵다. 예를 들면, 유럽의 1년생 식물인 명아주(lamb's quarter, *Chenopodium album*)는 북미의 주요한 침입외래종으로 대기 중 CO_2 농도에 반응하여 생장이 일반적으로 빨라진다. 그러나 북미의 캐나다 초원지대에서는 대기 중 CO_2 농도와 반응하지 않는다 (Taylor & Potvin, 1997). CO_2 농도가 식물에 미치는 영향의 불확실성에도 불구하고, 일반적으로 CO_2 농도는 C3 식물의 물의 흡수력을 촉진하며 상대적으로 C4 식물의 생장을 더디게

할 수 있다 (Veteli et al., 2002; Hobb & Mooney, 2014).

2) 대기 중 질소의 축적

도시와 산업화된 지역, 고농도의 질소비료를 사용하는 농촌지역의 대기에는 질소화합물 농도의 증가가 나타난다. 예를 들면 독일의 도시 대기 중 질소농도는 30-60kg/N/ha/yr이며, 이는 자연 상태의 약 두 배 이상이다 (Scherer-Lorenze et al., 2000). 대기 중 질소농도의 상승은 토양의 질소농도를 높인다. 그리고 초본류와 다른 외래 식물들을 빠르게 성장시킨다. 질소비료의 과다한 사용이 외래식물의 성장을 증가시키고 있으며, 유럽과 미국 캘리포니아 대기 중의 질소 농도를 상승시키고 있다 (Scherer-Lorenze et al., 2000; Hobb & Mooney, 2014).

다. 기후변화

기후변화는 지역의 평균온도 변화와 더불어 강수량/강설량의 변화(주기, 강도 등)를 가져온다. 대기 중 증가된 온실가스 농도는 태풍 및 돌풍 등 바람의 강도와 주기, 해수면의 변화 등을 통해 외래종의 생태적 변화를 야기한다. 미래의 기후변화 요인과 변화정도에 대해서는 이론이 있으나, 기후변화가 이미 진행되고 있으며, 향후에도 지속적으로 진행될 것이라는 데는 이론이 없다.

기후변화는 기상온도와 토양의 온도를 변화시킴으로써 침입 외래미생물의 생태적인 특성을 변화시킨다. 짧고 온화한 기후의 겨울은 병원균과 해충의 생장과 번식활동을 증가시킨다. 이를 통해 병원균과 해충은 확산능력이 높아진다. 또한 기후변화는 병원균과 기주의 저항성 능력을 변화시킨다. 기후변화에 의해 기주의 저항성이 낮아질 경우(감수성이 높아질수록), 병원균에 의한 감염이 쉽게 일어나게 된다 (Hulme, 2009; Hulme et al., 2010).

기후변화는 지구의 평균온도 변화와 더불어 특히 극한사상(최고/최저 온도, 최고/최저 강수/강설량의 빈도, 태풍과 돌풍 등의 발생빈도, 가뭄 정도 등)의 변화는 외래종과 고유종

의 생태적 변화로 직·간접적이고 밀접하게 연결된다. 예를 들면, 지중해 지역은 최근 강수량이 급격하게 줄어들고 이로 인해 기온 상승과 가뭄이 심각해졌다. 이러한 현상은 여러 차례 산불과 들불로 이어졌으며, 산불과 들불이 일어난 지역에서는 침입외래종이 가장 먼저 정착하였다. 1986년 이후 미국 서부 지역도 유사한 사례를 보인다. 기후변화로 인한 들불과 산불의 발생 빈도가 이전에 비해 4배 정도 자주 일어나며, 산불과 들불이 일어난 지역 생태계에는 이전과 달리 침입외래종이 심각하게 우점하고 있다. 기후변화는 이들 지역의 생태적인 우점종과 생태적인 특성을 바꾸어 놓았다 (Master & Norgrove, 2010).

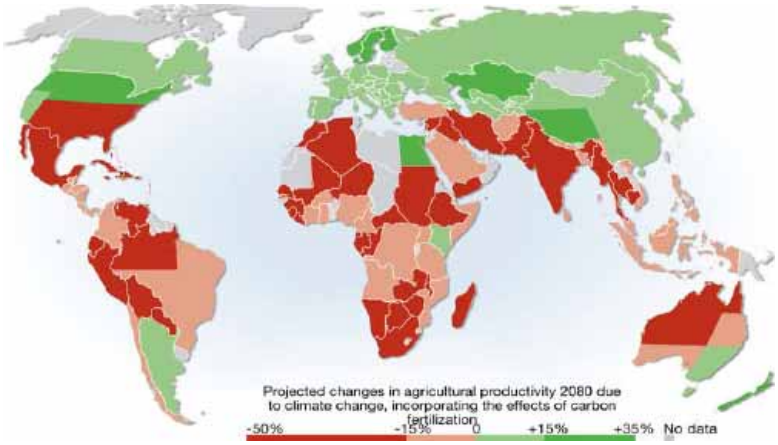
기후변화는 작물의 병 방제[8]에 사용되는 농약의 효능을 감소시킨다. 이로 인해 농약 사용량이 증가하고, 비선택 대상 생물에 대한 위협이 증가될 뿐 아니라 수질 오염과 농약 사용비용을 증가시킨다. 제초제의 사용도 농약의 사용량과 유사한 패턴이 예측된다 (Ahlenius, 2010; Lemmen and Warren, 2004). 기후변화는 작물의 생장 패턴을 빠르게 변화시킨다. 작물의 종류에 따라 생산성에 영향을 미칠 수 있다. 경우에 따라서는 작물의 생산성 자체가 사라질 수도 있다 (그림 2-3, 그림 2-4).

라. 토지이용의 변화

토지이용의 변화는 인류가 생태계를 변화시키는 가장 주요한 요인이다. 우리나라도 예외는 아니다. 토지 이용의 변화는 도시화, 산림의 이용, 생태계의 단편화, 농경지화, 농경지의 황폐화 등으로 구분할 수 있다 (Hobbs, 2000).

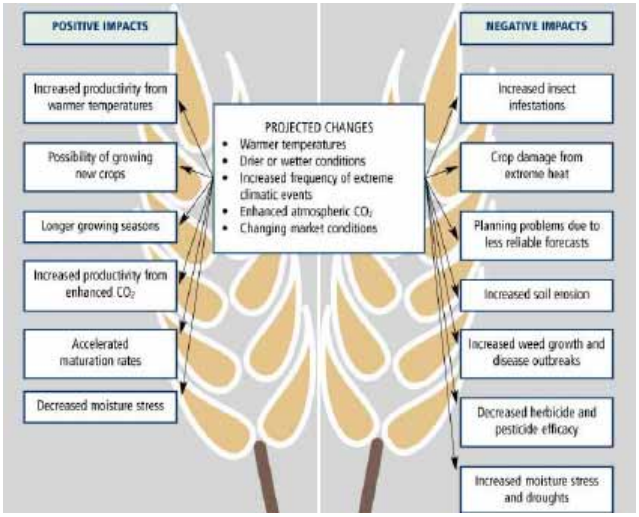
---

8) 엄격한 의미에서 외래종의 '방제(prevention)'란 외래종이 새로운 생태계에 도입되어 정착 및 초기단계의 확산을 방지하고 지역에서 외래종의 개체수를 감소 또는 영향을 저감시키는 행위이다. 외래종의 확산을 방지하는 모든 봉쇄수단을 포함한다. 외래종을 완전히 제거하는 '박멸'이 현실적으로 가능하지 않은 상태에서 '박멸'을 목표로 하는 노력은 '방제'와 다르지 않다. 또한 포괄적으로 외래종의 도입, 정착, 확산, 제어하는 모든 과정을 '방제'라는 용어로 통칭하여 사용하는 경우도 많다.



주: 붉은색은 생산량 감소 지역이며, 녹색은 생산량이 증가한 지역이다. 열대지역에서 농업생산량이 가장 크게 감소할 것으로 예측됐다.
자료: Ahlenius(2010)

〈그림 2-3〉 기후변화에 의한 2080년까지 지구의 농업생산성 변화



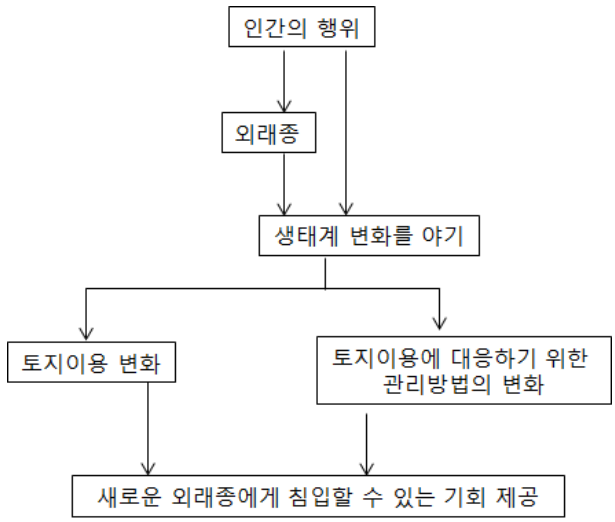
주: 기후변화가 침입외래종의 활동을 증가시켜 그 영향으로 농업생산성이 더욱 심각하게 변화할 것으로 예측하고 있다.
자료: Lemmen and Warren(2004)

〈그림 2-4〉 기후변화에 의한 농업생산성의 잠재적인 영향

토지이용의 변화와 외래종의 관계는 두 방향에서 접근할 수 있다. 인간에 의해 변화되는 생태계에는 새로운 생물종이 접근할 수 있는 기회가 주어진다. 이들 생물종이 새로운 생태계에 정착할지 여부는 새로운 생물종과 기존 생물종과의 관계, 생태계의 훼손 정도와 기후여건 등을 포함하는 무생물적 환경요인에 대한 적응력에 따라 달라진다. 지난 세기 후반에 발생한 주요한 사건은 두 가지이다. 첫째, 인간에 의한 토지이용 변화에 따른 생태계 교란과 훼손이 크게 증가한 것이다. 둘째, 세계적으로 생물종의 이동이 크게 증가한 것이다. 특히 이 두 사건은 생태계에 동시에 영향을 미쳐 더욱 역동적인 변화를 불러 일으켰다.

훼손된 생태계에 일반적으로 빠르게 적응하여 정착하는 생물종이 있다. 산불이 지나간 지역에 다른 생물종에 비해 빨리 발아하거나, 훼손된 환경에 적응력이 빠른 외래식물들이 빠르게 훼손된 생태계를 점유하게 되는 것이 대표적인 사례이다. 생태계의 훼손과 변화는 새로운 외래생물종에게는 정착과 번식, 확산의 기회가 된다. 더욱이 토지 이용이 변화된 지역에 외래종을 인위적으로 도입하거나 경작하게 된다면, 이는 이전과는 전혀 다른 생태계를 인위적으로 만드는 것이다 (그림 2-5). 실제로 이러한 일들은 세계 여러 지역에서 빈번하게 일어나고 있다. 예를 들면, 인위적 또는 자연적으로 훼손된 산림지역에 생장과 번식이 빠른 외래 수종을 도입하는 것은 목재와 펄프 생산 등 직접적으로 경제적 가치를 만들어 낼 수도 있으나, 이 지역의 생태계서비스의 보전 가치를 감소시키는 것이다 (Hobb & Mooney, 2014).

토지의 이용변화와 침입외래종은 상호 영향을 주는 요인이다. 토지의 이용 변화는 새로운 외래종에게 변화된 부지에 침입할 수 있는 기회를 제공한다. 반대로 외래종은 부지의 이용 변화를 발생하게 하는 요인이 되기도 한다. Kolar & Lodge(2002)는 이러한 토지의 이용변화와 외래종의 관계가 나타나는 담수생태계의 여러 사례를 제시하고 있으며, 이들 사례는 담수생태계의 변화가 침입외래종에서 기인함을 나타내고 있다.



자료: Hobbs(2000)

〈그림 2-5〉 인간의 행위(생태계 관리)와 침입외래종의 관계

| 제3장 · 기후변화와 생태계 기반 침입외래종 관리의 국내외 동향 및 사례 |

1. 침입외래종의 생태계기반관리

가. 생태계기반관리의 배경

생태계기반관리(ecosystem-based management)는 1930년대 미국 국립공원의 관리에서 시작되었다. 1932년 Ecological Society of America's Committee는 국립공원의 기능이 효과적으로 이행되기 위해서는 국립공원의 단일 생물종에 대한 관리 방법으로는 효과적으로 생물종을 보전하기 어렵고, 생태계 보전에 초점을 두어야 함을 제기한 바 있다. 1970년대 후반 북미의 오대호 지역에서는 "No park is an island"라는 구호와 "이 지역의 엄격한 보호가 최선의 보호 방법이 아니다"라는 주장에 근거하여 「Great Lakes Basin and the Great Lakes Water Quality Agreement of 1978」 법률이 제정되었다. 이 과정에서 사회적 인식, 생태계 보호를 위한 관계기관의 협력과 공공교육의 제고를 포함하는 「생태계관리정책(ecosystem management policy)」이 사용된 바 있다 (Slocombe, 1998; Wikipedia, 2015a). 이후 생태계의 통합적(integrated)이고 전체적(holistic)인 관리방법이 생물다양성협약(Convention on Biological Diversity)[9]을 포함, 리우 선언(1992), 요하네스버그 선언(2002) 등 여러 국제협약 및 선언문에 폭넓게 포함되었다. 1990년대 이후 기후변화에 의한 생태계 훼손과 관리 문제가 사회적 정치적 논쟁의 요소로 등장하고

9) 생물다양성협약(Convention on Biological Diversity)의 제2차 당사국회의(1995, 인도네시아 자카르타)에서는 생태계접근이 생물다양성협약 이행의 가장 주요한 틀임을 명시하고 있으며, 동 협약의 여러 주제별 작업계획 및 다분야 의제에 생태계 접근을 포함하고 있다. 제5차 당사국회의에서는 생태계접근에 대한 서술(description), 12가지 생태계접근의 원칙(Principles of Ecosystem Approach)을 채택하였고 생태계접근에 관한 5가지 이행지침을 채택한 바 있다. 이후 연속된 당사국회의에서 생태계접근의 이행(Initiating the approach), 역량강화 및 단체의사(collegiate will), 정보, 연구 및 개발(Information, research and development), 감시 및 평가(Monitoring and review), 협치(Good governance) 등을 통해 개도국들의 빈곤감소를 해결하는 이행방법으로 국제, 국가, 지역차원의 협력과 노력을 강조하고 있다.

기후변화와 생태계 변화에 대한 사회의 이익과 이해가 대립되면서, Grumbine(1994)은 기후변화를 생태계기반관리 개념에 끌어들였다 (Wikipedia, 2015a).

나. 생태계기반관리의 개념

생태계기반관리(ecosystem-based management), 생태계접근(ecosystem approach), 생태계기반접근(ecosystem-based approach), 생태계기반적응(ecosystem-based adaption) 등의 용어가 함께 혼용되고 있다. 생물다양성협약에서 사용하는 포괄적이고 통일된 용어는 생태계접근(ecosystem approach)이다. 생물다양성협약 제4차 당사국회의(1998, 슬로바키아 브라티슬라바)에서는 "Ecosystem Approach", "Ecosystem Process-oriented Approach", "Ecosystem Management Approach", "Ecosystem-based Approach" 등 관련된 용어에 대해 논의하였으며(CBD/COP Decision IV/1 A para 3, 4), SBSTTA(III/5 para 2, 3)는 '생태계접근(ecosystem approach)'을 생물다양성협약의 통일된 용어로 사용하고 있다. 생태계와 기후변화 문제가 주요 이슈로 등장하면서, 생태계기반적응(ecosystem-based adaptation) 개념을 생태계기반관리에 끌어들이고 있다 (Colls et al., 2009). 생물다양성협약의 생태계기반관리 개념에 이미 기후변화적응에 대한 내용이 포함되어 있으며, '생태계기반적응'과 '생태계기반관리'는 다르지 않다 <표 3-1>.

'생태계기반관리'의 개념과 연관 용어들의 개념을 기술한 바에 따르면, 이들 내용의 주요 핵심용어는 '생태계', '생태계 기능', '생태계 회복력', '기후변화', '지속가능', '균형', '통합', '사회적 고려', '지역주민, '전략' 이다. 이들 핵심용어는 '생태계기반관리'를 기술하고 사용하는 주체에 따라 존재의 유무와 개념의 뜻을 나타내는 정도의 차이가 있으나, 대부분의 용어 개념에 이들 핵심용어의 뜻이 포괄적으로 담겨 있다. 이를 재정리하여 기술하면 '생태계기반관리'란 기후변화를 포함한 생태계 영향 요소들을 통합적으로 고려하여 생태계의 기능을 유지 및 회복시키고 지속가능한 이용을 위한 사회적이고 과학적인 생태계 관리전략이라 할 수 있다. 본 연구에서는 정책과 학술적으로 가장 빈번하게 사용하고 있는 '생태계기반관리(ecosystem-based management)'를 사용하고 있으며,

이는 ‘생태계접근’, ‘생태계기반접근’, ‘생태계기반적응’과 기본적으로 다르지 않다.

〈표 3-1〉 생태계기반접근 관련 용어와 개념

근거	용어의 기술
Ecologic Institute EU, 2015	생태계기반접근(ecosystem-based approach)은 생태계접근(ecosystem approach)에 근거한 것으로 기후변화에 적응하는 생태계기반접근(ecosystem-based approaches)은 생태계 회복력을 증가시키며 지속가능한 인류의 생활을 지원하는 전략이다.
생물다양성협약, 2015	생태계접근(ecosystem approach)은 부지, 물, 생명자원의 통합적 관리를 위한 생물다양성의 보전과 지속가능한 이용을 균형 있는 방법으로 촉진하기 위한 전략이다.
Szaro et al., 1998	생태계접근(ecosystem approach)은 공간적, 생물학적, 구조학적인 연관성을 보여주며, 생태계와 기능을 복원하고 지속가능하게 하는 목표 지향적인 접근이다
UNCCD, 2014	생태계기반적응(ecosystem-based adaptation)은 자연의 체계를 강화하여 기후변화의 영향을 완충시키는 것이다.
Colls et al. 2009; IUCN, 2014	생태계기반적응(ecosystem-based adaptation)은 생태계의 지속가능한 관리, 생태계 보전과 기후변화에 대한 생태계 취약성을 줄이고 회복력을 높이며 기후변화에 사람들이 적응하도록 하는 것이다.
Christensen, et al., 1996; McLeod et al., 2005	생태계기반관리(ecosystem-based management)는 지속가능한 생태계 구조와 기능에 필요로 하는 생태학적인 상호관계와 과정에 대한 이해에 기반을 두고 정책적, 시행적인 측면에서 분명한 목적과 모니터링과 연구에 의해 적응할 수 있도록 설계된 체계이다.
UNEP, 2011; Boesch, 2006	생태계기반관리(ecosystem-based management)는 사회적이고 생태적 차원을 통합하는 데 있다.
UNEP/GPA, 2006	생태계기반관리(ecosystem-based management)는 식물, 동물, 인간의 커뮤니티를 물리적인 환경에서 상호 의존하며 생태계를 이루고 있는 것의 인식을 기본으로 한다. 생태계는 인간이 정하고 있는 정치적이며 행정적인 경계선을 넘어 반응하고 있어 다각적인 관리 체계에 연계되고 있다.
Levin & Lubchenco, 2008	생태계기반관리(ecosystem-based management)는 인구, 경제·사회학적 체계를 요소로 하며, 살아가고 있는 생태계 체계의 변화와 지속가능한 생태계에서 배출하는 생산물과 생태계서비스를 연계하고 있다. 생태계 변화에 근거한 과정을 통해 적응해 나갈 수 있도록 고안된 전략 체계이다.
Slocombe, 1998	생태계기반관리(ecosystem-based management)는 지역 주민들에 대한 영향과 지역, 국가 정부 조직의 계획과 관리를 포함한다. 모든 조직은 환경, 사회적, 정치적 변화를 고려하여 생태계기반관리의 목적을 달성하기 위하여 협력해야 한다.

다. 생태계기반관리의 이행

1) 생태계기반관리의 원칙

생태계기반관리의 이행을 위한 기본 원칙은 생물다양성협약 제5차 당사국회의에서 결정문 V/6 Part B를 통해 본 생태계적 접근(Principles of Ecosystem Approach)의 다음 12가지 원칙이다 (CBD/COP V/6 B; 박용하 외(2006)에서 한글번역문 인용).

원칙 1. 자연생태계의 이용은 사회적인 선택이므로 생태계적 접근의 핵심요소인 문화다양성과 생물다양성의 측면에서 토착민과 지역 사회를 포함한 모든 이들의 혜택을 위하여 지속가능하게 이루어져야 한다.

원칙 2. 관리방안은 가장 낮은 단계의 관련자들도 참여할 수 있도록 분권화되어 지역차원에서 이루어져야 한다.

원칙 3. 생태계 관리는 이로 인해 발생하는 영향, 다른 생태계에 미치는 영향 등을 최대한 고려하여야 한다.

원칙 4. 생태계관리에서 얻는 이익은 경제적 관점에서 이해되어야 하며 그러한 생태관리 계획은 i) 생물다양성에 악영향을 끼치는 시장왜곡을 줄이고, ii) 생물다양성 보전과 지속가능한 이용을 지원할 수 있는 유인책을 제공하고, iii) 생태계 이용비용 및 편익의 공정하고 공평한 분배를 가져올 수 있어야 한다.

원칙 5. 생태계 보전을 위한 생태계의 구조와 기능에 대한 이해는 생태계적 접근에서 우선적으로 이루어져야 한다.

원칙 6. 환경관리의 목적을 달성하는 과정에 있어서 생태계는 자연적 생산력, 생태계 구조, 기능 및 다양성 등을 유지하는 본래의 기능적 한계가 유지되어야 한다. 즉 환경용량 범위 내에서 이용되어야 한다.

원칙 7. 생태계접근은 적절한 지역에서 제한된 시간 내에 수행되어야 한다.

원칙 8. 위와 같은 사항을 고려하여 생태계 관리목표는 장기적 관점에서 수립되어야 한다.

원칙 9. 관리계획의 수립 시에는 생태계는 늘 변화하고 있다는 것을 염두에 두어야

한다.

원칙 10. 생태계접근은 생물다양성의 보전과 이용간의 적절한 균형 혹은 통합을 고려하여야 한다.

원칙 11. 생태계접근은 과학적·전통적 지식과 혁신적인 지식 및 방법들을 모두 고려할 수 있어야 한다.

원칙 12. 생태계접근은 모든 관련 사회구성원 및 과학자들의 의견을 고려하여 이루어져야 한다.

2) 생태계기반관리의 이행 지침

제5차 당사국 회의에서 제시하고 있는 생태계접근의 12개 원칙을 실행하기 위하여 채택한 5가지 이행 지침은 다음과 같다 (CBD/COP V/6 B; 박용하 외(2006)에서 한글번역문 인용).

이행 지침 1. 생태계 내의 기능적 관계와 과정에 초점

생물다양성의 구성원들은 에너지의 흐름 및 저장, 그리고 생태계에 적당한 물과 영양분을 공급하는 역할을 수행하며 이를 통해 생태계 교란에 의한 영향을 완화한다. 따라서 생태계 기능 및 구조와 생태계 내 생물다양성의 역할에 대한 정보는 i) 생태계 복원력(Resilience)과 생물다양성 감소에 따른 영향(특히 종, 유전적 단계에서의) 및 서식지 분열, ii) 생물다양성 감소의 근본적 원인, iii) 관리방안 결정에 있어서 지역 생물다양성의 역할 등을 이해하는데 필수적이다. 비록 경제적, 사회적으로 중요한 재화와 서비스를 제공하는 생태계의 기능적 생물다양성에 대한 정보가 충분하다고 볼 수 없다. 그럼에도 불구하고, 생태계관리는 반드시 이행되어야 한다. 생태계접근은 관리자들이 선택할 수 있는 가장 실질적인 방안이다.

이행 지침 2. 이익의 공유 증대

생물다양성의 여러 기능들로부터 제공받는 혜택은 인류 환경의 보전(security)과 지속가능성의 근간을 이룬다. 생태계적 접근은 바로 이러한 혜택들이 유지되거나 저장될 수

있도록 돕는 역할을 한다. 특히, 생물다양성 관리에 책임 있는 이해관계자들이 이러한 혜택들을 받을 수 있도록 해야 한다. 이를 위해서는 생태계의 생물다양성을 관리하는 지역사회의 모든 단계에서의 역량 형성, 생태계 재화 및 서비스에 대한 올바른 가치측정, 생태계 재화 및 서비스의 가치를 떨어뜨리는 왜곡된 유인책 감소, 생물다양성협약과 일치 및 필요한 경우 이를 지역별 유인책으로 대신하는 방안 등이 마련되어야 한다.

이행 지침 3. 적응관리방안의 이용

생태계 과정과 기능은 복합적이면서 가변성이 큰데 이와 같은 불확실성은 사회구조와의 상호작용에 의해 더욱 증가된다. 생태계 관리에는 모니터링 방법론 및 실행을 위한 학습과정이 반드시 필요하다. 그러므로 이행프로그램은 확실성에 기초한 행동들보다는 불확실성에 적응하도록 만들어져야 하며, 자연자원 이용에 영향을 미치는 사회적, 문화적 다양성의 요소들을 반영할 수 있어야 한다. 이와 마찬가지로 정책결정 과정과 그 이행에 있어서도 유연성이 요구되는데 생태계 관리는 그 결과나 과정에서의 경험을 반영할 수 있도록 장기적인 관점에서 이행되어야 한다. 이처럼 행동과정을 통해 학습은 관리 결과를 모니터링하고 처음의 목표가 얼마만큼 성취되는지를 판단할 수 있는 가장 중요한 요소이다. 따라서 당사국들은 이러한 모니터링 역량 강화를 위해 노력해야 한다.

이행 지침 4. 적절한 스케일의 관리 방안 모색

생태계적 접근은 그 이슈나 문제에 따라서 어떤 스케일에서의 접근도 가능한 기능적 단위이다. 이러한 생태계적 접근에 대한 이해를 바탕으로 관리방안 및 그 이행의 적절한 수준이 결정되어야 한다. 대부분의 경우 이러한 접근법은 지역사회의 가장 낮은 단계로의 분권화를 의미한다. 효율적인 분권화를 위해서는 적절한 권한이양이 필요하다. 이는 이해관계자들이 적절한 행동을 취하는 책임감과 역량을 갖도록 함과 동시에 이들이 정책적·법적 틀을 통해 얻어질 수 있다. 특히, 공공재와 관련이 있는 관리방안이나 행동을 결정할 때에는 관련 이해관계자들의 활동으로 인한 영향관리를 모두 포함할 수 있을 만큼 큰 스케일에서 이루어져 한다. 이러한 정책결정이 필요한 경우에는 분쟁해결을 담당할 수 있는 적절한 기관이 관여해야 한다. 생태계적 접근에서는 적절한 규모의 관리방안이 모색

될 수 있다. 그러나 국경간 또는 국제적 단계에서의 협력을 필요로 하는 일부 문제나 이슈들에서는 여전히 상위단계의 관여를 필요로 한다.

이행 지침 5. 부문간 협력 보장

생물다양성협약 활동의 기본 틀을 제공하는 생태계적 접근은 국가 생물다양성 전략 및 이행계획을 세우고 검토하는데 있어 가장 심도 있게 논의되어야 할 사항이다. 또한 생태계적 접근은 생물다양성에 심각한 영향을 끼칠 수 있는 농업, 어업, 임업 및 기타 생산시스템과 조화를 이루어야 한다. 생태계적 접근법에 따르면 정부부처, 관리사무소 등으로부터 부문간 의사교류 및 협력에 대한 요청이 크게 증가하고 있다. 이는 각국 정부부처간 국제협의체 또는 정보와 경험을 공유할 네트워크 구성 등을 통해 가시화될 수 있다.

2. 우리나라의 정책

가. 환경부

이미 도입되어 있는 외래생물과 향후 국내 도입될 수 있는 외래종으로 구분하여 관리하고 있다. 자연생태계에 영향을 미치는 외래생물의 주무부서는 환경부이다. 환경부는 「생물다양성 보전 및 이용에 관한 법률(2013. 2)」에 기반을 두고 외래생물을 관리하고 있다. 동법의 제21조에 따라 5년 단위 '외래생물관리계획(2014-2018)'을 마련하였으며, 이를 기반으로 정책을 추진하고 있다.

이미 우리나라에 도입된 외래생물을 대상으로 관계기관의 데이터베이스(DB)를 취합하고 외래종의 주요 유입경로 조사 및 전국실태조사를 통해 의심 외래생물을 찾아내며, 해당 외래생물의 정밀조사와 생태계위해성 평가를 통해 위해성 있는 외래생물을 생태계교란생물로 지정하고 있다. 2015년 9월 현재 생태계교란생물로 지정되어 있는 생물종은 황소개구리(*Rana catesbeiana*), 파랑볼우럭(블루길)(*Lepomis macrochirus*), 큰입배스(*Micropterus salmoides*), 붉은귀거북속 전종(*Trachemys* spp.), 뉴트리아(*Myocastor coypus*), 꽃매미(*Lycorma delicatula*), 돼지풀(*Ambrosia artemisiaefolia* var. *elatior*), 단풍

잎돼지풀(*Ambrosia trifida*), 서양등골나물(*Eupatorium rugosum*), 털물참새피(*Paspalum distichum* var. *indutum*), 물참새피(*Paspalum distichum*), 도깨비가지(*Solanum carolinense*), 애기수영(*Rumex acetosella*), 가시박(*Sicyos angulatus*), 서양금혼초(*Hypochoeris radicata*), 미국쑥부쟁이(*Aster pilosus*), 양미역취(*Solidago altissima*), 가시상추(*Lactuca scariolia*)이다(환경부 고시 제2013-12호, 생태계교란 생물 지정고시). 생태계교란생물은 학술, 연구, 교육, 전시, 식용 등의 사용을 제외하고는 생태계 교란 생물의 수입, 반입, 사육, 재배, 방사, 이식, 양도, 양수, 보관, 운반, 유통 등을 금지하고 있다(생물다양성보전 및 이용에 관한 법률 제24조).

2009년 이후, 비무장지대(DMZ), 국립공원, 습지 등 특정보호지역을 중심으로 외래생물의 조절 및 퇴치사업이 이루어지고 있다. 특정보호지역외 지역은 2012년 이후 본격적 퇴치 시범사업이 추진되고 있다. 2012년에는 1차 사업으로 13개 지역에서 외래생물의 퇴치사업이 이루어졌다. 2013년에는 2차 사업으로 확산추세에 있는 외래생물종 및 당시 신규로 지정된 생태계교란생물인 꽃매미, 가시상추를 포함한 9종에 대한 시범사업이 수행된 바 있다. 그 외 생태계교란 생물인 뉴트리아의 퇴치사업이 2013년 7월부터 12월까지 낙동강 하구 및 우포늪에서 시행되었다 (환경부, 2014b; 2014c).

생태계교란생물로 지정되지는 않았으나 생태계 위해성이 높은 외래종에 대해서는 정밀조사와 더불어 위해성 외래종으로 구분하고 있다. 생태계위해성이 높은 외래종 정밀조사가 2011년부터 2013년까지 동안 동물 19종, 식물 7종에 대해 시행된 바 있다. 2008년 이후 국내 도입된 일부 잠재적인 위해성이 야기된 외래종 37종을 1, 2, 3급으로 구분하고 있다. 1급에는 꽃매미 등 13종, 2급으로는 미국 선녀벌레 등 14종, 3급으로 창질경이 등 10종이 지정되어 있다 (환경부, 2014b; 2014c).

2007년 이후, 생태계교란 생물의 확산 및 위해성 등의 특성을 고려하여 매년 또는 격년으로 모니터링을 실시하고 있다. 2011년 이후 큰입배스, 가시박, 미국 쑥부쟁이 등의 확산 추세종은 매년, 이를 제외한 생태계교란생물에 대해서는 격년으로 모니터링을 실시하고 있다. 모니터링 결과는 환경청 및 지자체 등 관계 기관에 배포하고 있다 (환경부, 2014b;

2014c).

외래생물의 사전관리를 위하여 국내에 새로이 도입될 것으로 예상하는 잠재적 위해외래종을 대상으로 생태계위해성심사제도를 운영하고 있다. 우리나라는 국내에 유입될 경우 생태계 등에 위해(危害)를 미칠 우려가 있어 환경부장관이 지정·고시하는 생물종(살아있는 것으로서 개체의 일부·알·종자 등을 포함)을 '위해우려종'으로 지칭하고 있다. 수입외래생물(위해우려종)의 국내 반입에 대해서는 생태계위해성심사를 수행하며 허가 여부를 결정한다. 위해성이 있는 생물은 수입을 금지시키며, 미판정 위해우려종은 수입이 금지되나 예외적으로 허가 또는 심사를 통해 조건부로 수입을 허가하고 있다. 2013년 11월, 위해외래종으로 24종이 지정 및 고시되었으며, 2015년 24종이 추가되어 현재는 48종이다. 위해우려종은 Polynesian rat(*Rattus exulans* Peale), Deer mouse(*Peromyscus maniculatus* Wagner), Common Myna(*Acridotheres tristis* L.), Smallmouth bass(*Micropterus dolomieu* Lacépède), Mandarin fish(*Siniperca chuatsi* Basilewsky), Green mussel(*Perna viridis* L.), Crazy ant(*Anoplolepis gracilipes* F. Smith), Dog-strangling vine(*Vinecetoxicum rossicum* (Kleopow) Barbar.), Spiny plumeless thistle(*Carduus acanthoides* L.), Slenderflower thistle(*Carduus tenuiflorus* Curtis), Spotted knapweed(*Centaurea maculosa* Lam.), Bitter bush(*Chromolaena odorata* (L.) King & Rob.), Mile-a-minute(*Mikania micrantha* Kunth), Madagascar ragwort(*Senecio madagascariensis* Poir.), Creeping ox-eye(*Sphagneticola trilobata* (L.) Pruski), Southern sandbur(*Cenchrus echinatus* L.), Burmareed(*Neyraudia reynaudiana* (Kunth) Keng ex Hitchc.), Smooth cordgrass(*Spartina alterniflora* Loisel.), Common cordgrass(*Spartina anglica* C.E. Hubb.), Para grass(*Brachiaria mutica* (Forssk.) Stapf), Squirreltail fescue(*Vulpia bromoides* (L.) Gray), Mile-a-minute-vine(*Fallopia baldschuanica* (Regel) Holub), Sosnowski's hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden), Floating marshpennywort(*Hydrocotyle ranunculoides* L.f.)이다 (환경부 고시 제2013-147호, 위해우려종 지정고시). 이들 위해우려종을 국내 수입 또는 반입하려는 경우에는 동법의 제22조에 의거하여 사전에 환경부령으로 정하는

바에 따라 환경부장관의 승인을 받아야 한다.

2001년 이후 한국의 외래생물 종합검색시스템을 운영하고 있으며, 한국의 주요 외래생물(2011), 생태계교란 생물자료집(2012) 등 외래생물 관련 자료집을 제작 및 배포하고 있다. 2013년 이후 환경부는 지자체의 외래생물 퇴치 운동 전개에 협조하고 있다. 또한 관계 부처 및 유관 기관과의 협력 사업을 진행하고 있다. 어류의 경우, 국립수산과학원과 협조하여 파랑볼우럭, 큰입배스 등의 교란 어종 퇴치 방법의 연구를 추진하고 있다. 2013년 9월에는 환경부-한국도로공사간 고속도로변 생물다양성 보전을 위한 자발적 협약을 체결하여 도로변 생태계교란 생물을 퇴치하고 있다 (환경부, 2014c).

나. 그 외 관련 부처

농림수산식품부, 보건복지부, 해양수산부 등에서 생태적 피해예방, 농림수산업 및 인체 질병 등 관련부처의 목적에 따라 서로 다른 외래생물을 규제 및 관리하고 있다.

농림수산식품부에서는 국내 수입되는 축산물, 꿀벌, 병·해충, 활수산물에 대해서 검역 및 방역을 실시하고 있다. 검역대상 생물은 i) 금지병해충(73종: 병 13, 해충 60), 금지병해충의 기주식물(寄主植物)도 수입금지, ii) 관리병해충(1,968종: 병 453, 해충 1,495, 잡초 20), iii) 규제비검역병해충(49종: 병 37, 해충 2, 잡초 10), iv) 국내 승인 LMO종(옥수수 등 5작물 84종) 이외의 LMO종이다(식물방역법 제2조, 시행규칙 제4조 검역병해충). 농림수산식품부의 농림축산검역본부에서는 이들의 국내 유입을 방지하고 있다. 이들을 제외한 기타 외래생물(양서류, 파충류, 검·방역 비대상종)에 대한 관리 방법이 부재하다.

보건복지부는 국민의 건강을 유지·보호하는 것을 목적으로 우리나라로 들어오거나 외국으로 나가는 운송수단, 사람 및 화물을 검역(檢疫)하는 절차와 감염병을 예방하기 위한 조치에 관한 사항을 규정하여 국내외로 감염병이 번지는 것을 검역법을 통해 방지하고 있다. 검역법 대상은 콜레라, 페스트, 황열, 중증급성호흡기증후군, 조류인플루엔자 인체감염증, 신종인플루엔자감염증, 그리고 '가' 목에서 '바' 목까지의 것 외의 감염병이다. 외국에서 발생하여 국내로 들어올 우려가 있거나 우리나라에서 발생하여 외국으로 번질 우려가

있는 것으로, 보건복지부장관이 긴급 검역조치가 필요하다고 인정하여 고시하는 감염병이다 (보건복지부 2014, 검역법). 조류인플루엔자를 제외하고는 자연생태계에 위해한 침입외래종이 아니다.

다. 기후변화와 침입외래종의 관리를 위한 접근 동향

우리나라는 기후변화 등에 의해 침입성의 변화가 야기되는 외래생물에 대한 관리 대책이 미비하다. 최근 수년 동안 꽃매미, 등검은말벌, 미국선녀벌레, 갈색여치, 갈색매미충 등에 의하여 국내 수목과 과수 등이 심각한 피해를 입고 있다. 기후변화에 의해 침입성의 변화가 야기되는 외래생물종의 선제적 관리를 위해 낙후된 국내 외래생물 관련기술 수준(2014년 현재, 선진국의 40% 수준)의 제고가 필요한 것으로 나타났다 (환경부, 2014b).

환경부는 기후변화에 의한 침입외래종의 생태계 교란에 대응하기 위해 제1차 외래생물 관리계획(2014~2018)에 다음과 같은 추진 정책을 제시하고 있다. 첫째, 인접 국가 및 타국가, 국내의 잠재적 생태계교란생물 돌발 대발생 사례 조사이다. 둘째, 국내의 잠재적 생태계교란생물 사례 조사 및 목록화, 조기 탐지 및 예찰 방안, 조기 조절과 퇴치 방안 마련이다. 기후변화에 연계된 침입외래종의 관리 사업으로 외래생물 전국실태 조사, 생태계교란생물의 모니터링 사업 추진, 미확인 외래생물 조사 및 상세 정보 확보사업, 외래생물 DB 운영 및 정기적 갱신 사업, 생태계교란생물의 추가 지정 및 해제, 조절 및 퇴치 사업 등을 계획하고 있다 (환경부, 2014b)[10].

---

10) 2011년 환경부를 포함한 13개 정부부처에서 마련한 '저탄소 녹색성장기본법 시행에 따른 국가기후변화적응대책(2011~2015)'에서 외래종에 의한 생태계 훼손을 방지하기 위한 사업으로 i) 외래종 및 돌발 대발생 생물의 번식·확산 방지를 위한 감시 및 모니터링, ii) 외래종 및 돌발 대발생 생물의 관리제도 및 체계 정비 사업이 포함되어 있다. i) 사업에서는 기후변화 등에 따른 외래 생물종 변화 및 확산 모니터링 체계 구축, 기후변화 등에 따른 돌발생물 대발생 지역 및 외래종별 적응 능력에 대처한 생태환경 분석이 포함되어 있다. ii) 사업에서는 외래 생물종 생태계 위해성 평가와 유입의 원천 차단 및 국내 고유 생태계 보호를 위한 법·제도 정비·통합관리, 외래종 및 돌발 대발생 생물의 피해 확산 방지를 위한 조기 경보 및 방제 시스템 연구 사업이 포함되어 있다. 2015년 현재 국가기후변화적응대책(2011~2015)에 포함되어 있는 이들 사업이 체계적이고 효과적으로 진행되고 있는 것으로 판단되지 않는다. 국가기후변화적응대책(2011~2015)을 추진한 13개 정부부처는 기획재정부, 교육과학기술부, 행정안전부, 문화체육관광부, 농림수산식품부, 지식경제부, 보건복지부, 환경부, 국토해양부, 소방방재청, 농촌진흥청, 산림청, 기상청이다 (관계 부처 합동, 2011).

농림수산식품부는 기후변화에 따른 병해충 확산 방지 시스템을 구축하고 있다. 기후 및 농업환경 변화에 따른 병해충 돌발을 사전에 예측하고 대비하기 위한 전국 예찰 네트워크 구축 및 운영, 아열대 및 신소득 작물 병해충 발생 모니터링 및 진단 연구사업, 기후변화 대응 병해충 발생예측 및 모델링 기술 개발, 유비쿼터스 기반 무인 병해충 발생 예찰 시스템 구축을 추진하고 있다 (환경부, 2014b; 박창규와 정명표, 2012).

산림청은 산림병해충 발생 예찰시스템 강화(주요 산림병해충 발생 및 모니터링, 돌발 산림병해충 발생 및 모니터링, 산림병해충 발생 분석 및 확산 예측 등)하고 있다. 기후변화에 의한 외래 곤충 등의 확산 예측, 산림병해충 조기방제 체계 구축, 신종 병해충의 조기 박멸[11] 추진 및 효과적 방제방법, 전문 인력에 의한 예찰 방제체계 강화, 기후변화에 따른 산림생태계영향 평가 통합 모델, 기후변화 산림관리 적응방안 마련 등을 추진하고 있다 (환경부, 2014c).

3. 선진외국의 정책

가. 미국

1) 현황

미국에는 약 5만 종의 외래종이 유입되어 있다. 이들 외래종은 미국 식량의 98% 이상을 제공하며, 이 가치는 매년 약 8,000억 달러에 달한다. 그 외 이들 외래종은 경관 복원, 생물학적 방제,[12] 여가 및 체육활동, 식량 가공, 애완동물 등으로 사회 전반에서 다양하게 이용되는 등 그 경제적 가치는 매우 높다 (Szyniszewska, 2014). 반면에 일부 침입외래종은 미국 전역에서 생물다양성을 크게 훼손하고 있으며, 특히 멸종위기종의 존재를 위협하고 있다. 침입외래종에 의한 경제적 손실은 매년 1,200억 달러를 초과하고 있다 (Pimentel et al., 2005). 특히 침입외래종은 농업의 생산성을 떨어뜨리고 있으며, 사유재산의 가치를 낮추고 있다. FWS(US Fish and Wildlife Service)에 따르면 미국 농업의 생산성이 침입외

11) 외래종의 박멸(Eradication)이란 어느 지역에서 완전하게 외래종을 제거하는 행위이다.
12) 천적 또는 서식처의 경쟁 생물, 미생물 등에 의한 침입외래종의 개체 수와 활성을 조절 또는 박멸하는 수단이다.

래 곤충에 의해서 매년 130억 달러의 손실을 야기하고 있다 (NCSL, 2015).

2) 법과 제도

외래종에 관련된 정책은 미국에 유입되는 침입외래종의 사전 차단을 위한 i) 검역, ii) 외래종이 유입되는 공항과 항구에서의 교육 및 홍보, iii) 외래종의 위해성과 경제성 분석, iv) 이미 미국에 유입되어 있는 침입외래종의 처리로 구분하여 접근하고 있다. 미국으로 유입되는 인체 및 생태계 위해외래종 목록을 작성하고, 이에 대한 검역시스템을 운용하고 있다. 미국 내 위해외래종 우송(우편, 소포)도 불법으로 규제하고 있다. 외래종이 유입되는 공항과 항구에서 위해외래종에 대한 교육 및 홍보를 병행하고 있다. 미국으로 유입되는 외래종의 위해성 분석과 더불어 경제성 분석이 이루어지고, 이를 바탕으로 미국 내 유입 여부를 고려하고 있다. 외래종의 경제성 분석은 외래종의 박멸 또는 방제단계의 정책결정 단계에서도 사용된다. 미국에 이미 서식하고 있는 침입외래종의 관리는 여러 방법으로 접근된다. 외래종의 특성에 따라 i) 외래종의 확인 및 검측, ii) 외래종의 조사 및 감시, iii) 외래종의 정보 수집과 보급, iv) 박멸 또는 방제, v) 연구 및 기술 개발, vi) 교육 및 홍보 등이 독립적 또는 병행하여 진행된다 (USDA National Invasive Species Information Center, 2015).

외래종관리와 관련된 연방정부의 최상위기구는 National Invasive Species Council(NISC, 국가침입종위원회, 1999년 수립)이다. 외래종과 관련된 법을 집행하는 책임기관은 농무부의 Animal and Plant Health Inspection Service(APHIS, 동식물검역소), Fish and Wildlife Services(FWS), Center for Disease Control(CDC), National Oceanic and Atmospheric Administration(NOAA), Aquatic Non-Indigenous Species Task Force(수산외래종특별기구) 등 연방정부의 여러 기관이다 (NCSL, 2015).

〈표 3-2〉 미국 연방정부의 주요 외래종 관리와 관련된 법과 주요 내용

법률	주요 내용
Lacy Act of 1900	미국으로 유입되는 인체 및 생태계 위해 외래종 목록을 작성하고, 검역으로 위해 외래종의 미국 내 유입을 차단
National Environment Policy Act (NEPA)	외래종과 관련한 연방정부의 활동과 허가 사항, 외래종의 환경영향평가(environment impact assessment), 재정 지원
Alien Species Prevention and Enforcement Act of 1992	미국 내 위해외래종의 우편과 소포 등에 의한 우송을 불법으로 규제하고 관리
Federal Noxious Weed Act	위해 외래 잡초의 이동 및 방제, 교육 및 홍보, 관련 프로그램의 이행
Endangered Species Act of 1973	멸종위기종의 보호를 위한 위해외래종의 관리(박멸과 방제)
Non-indigenous Aquatic Nuisance Prevention and Control Act	비수서 외래종의 유입 방지 및 확산 통제, 연구 및 관련기관(FWS와 NOAA) 간의 협력, 방제 전략의 개발과 적용, 정보 제공 및 교육, 비수서 외래종의 유입 방지 및 확산 통제를 위한 연방 프로그램 수립, 위원회 수립
National Invasive Species Act of 1996	국제적으로 이동하는 선박으로 인한 외래종의 유입 규제, 연안지역의 외래종 관리
Non-Native Wildlife Invasion Prevention Act	2015년 8월 현재 이 법은 의회에 계류 중이다. 이법의 주요 내용은 국내 유입 외래종 목록, 유입되지 않아야 할 목록, 위해외래종의 사육 및 운송 등의 금지, 외래 생물의 침입방제기금(Non-Invasive Wildlife Invasion Prevention Fund) 조성, 외래종의 위해성평가 과정 수립 (Risk Assessment Process)
Executive Order 13112 (연방정부의 행정명령)	1999년 2월3일 당시 대통령이 서명한 외래생물에 대한 국가의 관리, 이를 총괄하는 국가외래종위원회(NISC, National Invasive Species Council) 수립. 이는 법은 아니나 행정부의 이행명령으로 현재 집행

자료: NCSL(2015)

각 개별 주에서도 주의 법과 제도에 의해 외래종 관리가 진행된다. 각 주에는 연방정부의 NEPA에 해당하는 외래종의 관리 및 규제법이 있다. 캘리포니아 주는 「California Environmental Quality Act」, 「California Porter-Cologne Water Quality Control Act」, 「Ballast Management for Control Non-Indigenous Species Act of 1999」, 「Marine Invasive Species Act of 2-003」, 「California Food and Agricultural Code」 등을 통해 캘리포니아 유입 및 침입외래종을 관리·규제하고 있다. 캘리포니아 주의 침입외래종 정책

결정 기구는 Invasive Species Council of California(ISCC), California Invasive Species Advisory Committee(CISAC), California Invasive Plant Council(Cal-IPC)이다. ISCC는 캘리포니아 관련 행정부를 총괄하는 외래종 관리 정책의 최상위 결정 기구이다. CISAC는 ISCC 전문가 자문기구이며, 캘리포니아 주에 서식하는 고유생물종을 위협하는 여러 지역별 위해 외래종 목록을 제공한다. 플로리다의 물 공급, 여가지역, 생물다양성을 보전하기 위하여 「Everglades Forever Act of 1994」이 제정되었다. 이 법은 위해 외래종의 방제 방법과 수단, 모니터링 등의 내용이 포함되어 있다. 하와이 주에서는 외래종 관리 관련 최상위 기구인 Hawaii Invasive Species Council(HISC)을 두고 있으며, 이 위원회는 침입외래종의 관리 분야(방제 기존 해충의 관리, 공공인식의 제고, 연구 및 기술 개발, 재정지원)에 따라 5개 소위원회를 두고 있다 (NCSL, 2015; USDA National Invasive Species Information Center, 2015).

최근 침입외래종에 대한 관리 및 예산을 확보하기 위한 입법화 움직임이 여러 주에서 나타나고 있다. 최소 47개 주에서는 법으로 'noxious'로 명시한 침입외래 식물에 대해 당국의 허가 없이는 판매·이동·증식을 엄격히 금지하며, 각 주에서는 이들 침입외래 식물에 대한 여러 관리 방법을 주법에 명시하고 있다. 2015년 10개 주(Alaska, California, Massachusetts, Michigan, Montana, New Hampshire, New Jersey, Nevada, Oregon and Vermont)에서는 수생 침입외래 식물을 관리하고 방제하는 예산과 프로그램을 위한 입법을 추진하고 있다. 또한 Maryland, Minnesota, Montana, Nebraska, New Hampshire, Nevada, Oregon, Utah and Wyoming 주에서는 수계 침입외래종의 검사소 설치예산을 확보하기 위한 입법 논의가 이루어졌다. 이 중에서 3개 주(Montana, Maryland, Nebraska)에서 검사소 설치가 확정되었다 (NCSL, 2015).

3) 기후변화와 침입외래종 정책 동향

NISC & ANSTF(2014, National Invasive Species Council & Aquatic Nuisance Species Task Force)에 따르면 기후변화는 직·간접으로 외래종의 도입, 정착, 확산에 영향을 주고 있으며, 침입외래종은 기후변화에 대한 생태계의 취약성을 증가시키고 온실가스를 포획하는 생태계의 능력을 감소시키고 있다. 이들은 외래종과 생태계에 대한 반응은 외래종별로 다르게 나타나므로, 기후변화와 개별 외래종에 대한 연구가 필요함을 제시하고 있다.

기후변화와 침입외래종과 관한 여러 정책과 안건, 전략은 백악관과 연방정부에서 작성, 논의되었다. 이들 보고서의 주요 메시지는 기후변화에 의해 침입외래종이 생태계 취약성을 증가시키고 있으며, 이를 저감하기 위해 침입외래종에 의한 위해성, 침입에 의한 영향을 감소시키는 생태계 적응정책을 이행해야 한다는 데 집중되어 있다 (NISC & ANSTF, 2014).

- Council on Climate Preparedness and Resilience & Natural Resources Working Group. Priority Agenda: Enhancing the Climate Resilience of America's Natural Resources (2014년 10월)
- President's State, Local and Tribal Leaders Task Force on Climate Preparedness and Resilience (2014년 11월)
- Association of Fish and Wildlife Agencies, Council on Environmental Quality, Great Lakes Indian Fish and Wildlife Commission, National Oceanic and Atmospheric Administration, and US Fish and Wildlife Services. National Fish, Wildlife and Plants Climate Adaptation Strategy (2012)

기후준비와 복원, 자연자원위원회(Council on Climate Preparedness and Resilience & Natural Resources Working Group[13])이 2014년 버락 오바마 대통령에게 현재와

13) Council은 미국의 각 관련 부서(Departments of Defense, Interior, and Agriculture, the Environmental

미래에 수행하고 달성해야 할 중요한 기후변화적응에 관한 우선적인 다음 두 가지 안건을 보고하였다. 첫째, 침입외래종의 도입과 확산을 방지하는 것은 국가의 기후변화 적응의 주요한 주제이며, 통상부(DoC), 국가해양대기국(NOAA), 환경청(EPA), 농무부(USDA)는 12개월 이내에 국가의 EDRR(Early Detection and Rapid Response) 프로그램을 개발한다. 둘째, 관련부서의 능력을 향상시키고 새로운 침입외래종을 잡아낼 수 있는 긴급대응재원(emergency response fund)을 마련한다.

기후변화에 따른 침입외래종을 관리하기 위한 전략과 수단은 침입외래종의 방제, 박멸과 제어(prevention, eradication and control)이며, 침입외래종이 정착 또는 정착할 수 있는 자연환경의 복원력을 높이는 것이 침입외래종에 대한 우선전략임을 제시하고 있다. 이러한 전략을 이행하기 위한 도구와 방법으로 방제, 초기발견과 대응, 제어, 협조와 활동을 제시하고 있다 (NISC & ANSTF, 2014).

나. 유럽연합

1) 현황

침입외래종은 다양한 방법으로 다른 대륙으로부터 유럽에 도입되고 유럽연합 회원국간 이동한다. 일부 침입외래종은 농업, 임업, 수생생물, 원예 등의 목적과 애완동물, 정원의 식물, 생물학적 방제의 목적으로 유럽에 의도적으로 도입, 이동되었다. 일부 침입외래종은 다른 무역물품에 섞여 들어오거나, 선박의 평형수(ballast water) 또는 장비에 묻어 국가와 국가간에 비의도적으로 이동되었다. 유럽연합에 도입된 외래종은 1만 2,000종이 넘으며, 이중에서 10~15%정도인 1,000~1,800종이 사람의 건강과 유럽의 생물다양성에 악영향을 미치고 있는 침입외래종으로 추산하고 있다 (EU, 2014a).

유럽환경청(EEA, 2015; 2012a; 2012b; 2012c)은 과도한 자연자원의 개발과 침입외래종의 정착과 확산이 유럽의 자연자원을 훼손하는 주요 요인으로 꼽고 있다. 특히 침입외

Protection Agency, the National Oceanic and Atmospheric Administration, the Federal Emergency Management Agency, the US Army Corps of Engineers)에서 추천한 전문가로 구성되어 있다.

래종은 생물다양성을 훼손하는 요인임과 동시에 막대한 경제적 손실을 입히고 있으며, 기후변화와 연계되어 고유종, 고유종의 서식처를 위협하고 있음을 보고하고 있다. 예를 들면, 침입외래종은 고유종과의 한정된 자연자원과 서식지의 경합, 고유종과의 교배, 고유종에 새로운 병을 일으켜 고유종을 멸종에 이르게 하는 요인으로 간주되고 있다. 또한 침입외래종은 인간의 건강에 위해하거나 기존 생태계의 체계와 기능을 변화시켜 근본적인 생태계서비스를 변화시키고 있다. 이러한 침입외래종의 악영향은 지난 20년간 최소 120억 유로를 지불하게 했으며. 향후 이 비용은 더욱 증가할 것으로 예측하고 있다 (EU, 2014b).

그러므로 침입외래종에 의한 생물다양성 훼손을 방지하기 위한 추가적이고 적극적인 조치가 없다면, 보호지역을 포함하는 육상 및 해상의 생태계가 5-10년 이내에 상당한 상태로 침입외래종에 의해 훼손될 것이며, 20년 정도이면 회복될 수 없을 정도가 될 것으로 예측하고 있다 (Capdevila-Argüelles and Zilletti, 2008; EEA, 2015).

2) 법과 제도

2014년 11월 유럽연합은 침입외래종에 의한 생태계 기능과 생태계서비스 악영향을 저감하기 위한 새로운 규정을 제정하였다. 이 규정은 'Regulation(EU) No 1143/2014 of the European Parliament and of the Council of 22 October 2014 on the prevention and management of the introduction and spread of invasive alien species'이다. 이 규정은 2020년 유럽연합 생물다양성전략 (EU's Biodiversity Strategy to 2020)의 목표 5(Target 5)[14]를 달성하기 위한 것이다. 이 규정은 침입외래종에 의한 국제적 합의를 지키기 위한 세 가지 수단(침입외래종의 방제, 빠른 경보 및 대응, 이미 정착해 있는 침입외

---

14) 유럽연합 생물다양성전략의 목표 5: By 2020, Invasive Alien Species and their pathways are identified and prioritised, priority species are controlled or eradicated, and pathways are managed to prevent the introduction and establishment of new IAS (Official Journal of the European Union, 2014).
Action 15: Strengthen the EU Plant and Animal Health Regimes
15) The Commission will integrate additional biodiversity concerns into the Plant and Animal Health regimes by 2012.
Action 16: Establish a dedicated instrument on Invasive Alien Species
16) The Commission will fill policy gaps in combating IAS by developing a dedicated legislative instrument by 2012.

래종의 관리)을 포함한다 (Official Journal of the European Union, 2014).

3) 기후변화와 침입외래종 정책 동향

2011년 유럽위원회는 생물다양성전략 2020(Biodiversity Strategy to 2020)을 채택하였다. 이 전략의 모토는 '2020년까지 유럽연합에서 생물다양성의 손실을 막고 생태계서비스의 저감을 방지하며, 가능한 생물다양성을 복원하여 지구의 생물다양성 손실을 피하기 위한 유럽연합의 기여를 높인다[15]'이다 (EU, 2011). 이 전략의 목표에는 생물다양성을 위협하는 요인으로 침입외래종이 명시되어 있다.

침입외래종을 관리하는 유럽연합(EU)의 정책은 2014년 제정된 Regulation(EU) No 1143/2014에서 제시하고 있듯이 다음에 초점을 두고 진행하고 있다 (EU, 2014a).

첫째, 침입외래종 목록 개발이다. 이 목록은 유럽에 서식하고 있는 침입외래종 1,000~1,800종 중에서 선택될 것이다. 이 목록에 있는 침입외래종은 유럽연합의 생물다양성에 가장 심한 피해와 위협을 줄 수 있는 침입외래종이 될 것이다. 이 목록에 포함되는 침입외래종은 증거에 기반을 둔 위해성 평가(Evidence-based Risk Assessment)를 토대로 선정될 것이다. 위해성 평가는 유럽연합에서 합의된 기준에 따라 이행될 것임을 계획하고 있다.

둘째, 유럽연합의 침입외래종 목록에 있는 침입외래종의 불법 유입을 사전에 차단하고 있다. 침입외래종의 생산, 이동, 판매, 이용, 소유, 환경방출을 금지하고 유럽연합의 국경지역에서 모든 침입외래종의 수출입을 검역하는 것이다. 회원국 관련기관의 특별한 요청, 예를 들면 연구용 침입외래종 이동 등에 관해 당국이 허가한 경우는 제외된다. 이 경우, 침입외래종은 봉인된 상태로 보관 및 이동된다. 공항과 항구 등 다양한 경로를 통해 비의도적으로 유입되는 침입외래종에 대해서는 검역, 교육과 훈련, 홍보 등을 통해 유럽연합에서 유입을 차단하고 있다. 침입외래종의 조사와 확인을 위한 지침의 마련과 관련 인력의 교육 및 훈련이 진행되고 있다.

---

15) 영문: 'halting the loss of biodiversity and the degradation of ecosystem services in the EU by 2020, and restoring them in so far as is feasible, while stepping up the EU contribution to averting global biodiversity loss' (Official Journal of the European Union, 2014)

셋째, 초기 경보 및 빠른 대응이다. 유럽연합 회원국들은 침입외래종을 최대한 빨리 감지할 수 있는 초기경보체계를 갖추어야 하며, 이들 침입외래종이 생태계에 완전하게 정착하기 이전에 빠른 수단을 동원하여 방제해야 한다. 초기단계에서 적용되는 대응 수단은 침입외래종이 생태계에 확산되기 이전에 완전히 박멸하는 것이다. 침입외래종을 박멸하는 다양한 효과적인 수단과 관리방법을 개발하고 있으며, 이들 방법의 효과성을 평가하고 있다.

넷째, 이미 정착된 침입외래종의 관리이다. 일부 침입외래종은 이미 유럽연합에 정착하였으며, 이들 침입외래종이 더 이상 확산하지 못하고 위해를 최소화할 수 있도록 관리하는 것이다. 유럽연합의 각 회원국들은 침입외래종의 개체군 수를 제어 또는 관리할 수 있는 수단과 방법을 마련해야 한다. 회원국이 적절한 수단에 의해 침입외래종을 완전히 박멸하는 것이 가능하다면, 이를 우선으로 하고 있다. 이러한 수단을 침입 동물종에게 적용할 경우, 동물이 받을 수 있는 불필요한 고통과 스트레스는 피할 것을 제시하고 있다.

회원국들은 인접 회원국에 침입외래종에 의한 심각한 위해가 발생하기 이전에 침입외래종이 인접 회원국으로 이동하는 것을 방지할 수 있는 프로그램을 운용해야 한다. 이 프로그램은 상호 회원국들에 비용효과적인 방법이어야 함을 제시하고 있다. 또한 침입외래종에 의해 훼손된 생태계를 복원하기 위한 적절한 수단을 취해야 한다. 이러한 수단을 통해 훼손된 생태계에 새로운 침입외래종이 유입되는 것을 방지하는 것이다.

유럽연합에서 환경, 생물다양성 보전, 기후변화 이행 프로젝트 부문에 재원을 지원하여 침입외래종 문제에 접근하는 LIFE 프로그램에서는 1992~2013년 기간 중에 265개의 침입외래종 프로젝트(약 7,000만 유로 지원)의 재원을 지원하고 있다. LIFE 프로그램은 유럽위원회(European Commission)에 의해 1992년 창설되었으며, 환경국(Environment Directorate-General, LIFE Units-E.3. and E.4.)에 의해 운영되고 있다. 1992년 1개 사업이 시작된 이후, 1994년 3개, 1995년 2개, 1996년 5개, 1997년 6개로 증가하였으며, 이 사업 수는 매년 증가하여 2004년 21개에 이르렀다. 이후 매년 20개 내외의 사업이 새로이 추진되고 있다. 상기 265개 프로젝트의 절반 정도는 침입외래종의 박멸, 방제, 초기 발견과 빠른 대응 등 침입외래종의 문제 해결을 위한 수단 개발 및 이행과 관련되어

있다. 그리고 상당수가 유용한 침입외래종 방제 수단의 확산과 이행사업을 지원하고 있다 (EU, 2014b).

2013년 이후 LIFE 프로그램이 중점적으로 지원하고 있는 것은 다음 6개 부문이다 (EU, 2014b).

- 방제(특히 비의도적인 침입외래종의 도입 경로를 찾아내고 문제를 해결하는 수단)
- 침입외래종의 빠른 발견과 박멸
- DAISIE(2015)[16] 목록에 기재된 침입외래종 외에 문제가 심각할 수 있는 침입외래종의 추가
- Natura 200 네트워크와 해양 환경 외의 침입외래종의 방제/박멸
- 일반국민과 이해당사자들의 인식 제고
- 침입외래종의 거래규제 등에 관한 입법화 등 침입외래종에 대한 효과적인 정책 수단 개발

다. 영국

1) 현황

침입외래종을 생물종의 서식처 훼손과 더불어 생물다양성을 훼손하는 핵심 요인으로 간주하고 있다. 영국에서 2,000여종의 침입외래종이 정착하고 있으며 (UK Arkive, 2015), 침입외래종에 의한 영국의 경제적 피해는 매년 최소 17억 파운드에 달한다. 이중에서 경제적 피해가 가장 큰 부문은 농업과 화훼 부문으로 약 10억 파운드에 달하고, 건설과 기반시설 부문에 2억 2,700억 파운드에 달하고 있다. 그 외 수상 및 여가 부문의 경제적 피해 비용이 약 3,000만 파운드, 수로관리 비용 2,200만 파운드, 전반적인 생물다양성 보전 부문에 약 4,000만 파운드가 소요되고 있다 (William et al., 2010).

---

16) DAISIE(Delivering Alien Invasive Species Inventories for Europe)는 유럽연합에서 문제가 가장 심각한 100종의 침입외래종을 목록화하고 있다(http://www.europe-aliens.org/speciesTheWorst.do). 이 목록은 black cherry(Prunus serotina), black locust(Robinia pseudoacacia), tree of heaven(Ailanthus altissima)을 포함하고 있다.

2) 법과 제도

Great Britain Non-native Species Secretariat(GBNNSS)가 설립되고 침입외래종의 제어 전략(A strategy for controlling invasive species)이 2008년에 개발되었다. 이 전략은 공공의 인식 제고, 침입외래종의 박멸, 방제, 위해성 저감에 대한 국가의 체계와 침입외래종에 의한 피해에 대한 책임문제를 포함하고 있다. 종합해충관리(IPM, Integrated Pest Management)를 침입외래종의 가장 효과적인 수단으로 고려하고 있다 (NNSS, 2008; NNSS, 2015a).

다수의 침입외래종 유입방지 및 관리법이 있다. Wildlife and Countryside Act of 1981, Nature Conservation Act of 2004, Natural Environment and Rural Communities Act of 2006, Import of Live Fish Act, Plant Health of 1967, Destructive Imported Animal of 1932, Dangerous Wild Animals Act of 1976, Countryside and Rights of Way Act 2000, Environmental Protection Act of 1990 등이다. 이들에 의해 야생동물의 도입방지, 침입외래종의 야생 방출 규제, 스코틀랜드, 웨일스 지역의 외래종 유입 방지 및 관리, 침입외래종의 판매규제, 외래종의 의한 피해 책임과 배상, 침입외래종의 방역 등이 다뤄지고 있다. 이들 법에 책임 있는 중앙정부의 침입외래종 관리 관련 기구는 Program Board, Stakehoder Sounding Board, Risk Analysis Panel이다. 연방정부의 DEFRA(Departmen t of Environment, Food and Rural Affairs), 웨일스의 Welsh Assembly Government, 스코틀랜드의 Scottish Executive Environment and Rural Affairs Department가 법을 이행하고 있다 (NNSS, 2015a).

3) 기후변화와 침입외래종 정책 동향

기후변화가 침입외래종의 생리, 생태적 특성에 영향을 미치고, 이로 인해 침입외래종이 생물다양성에 미치는 영향이 달라지고 있음은 30년간의 연구 자료를 통해 확인하였다. 기후변화에 의한 침입외래종의 문제에 대응하기 위하여 2008년 영국의 국가전략인 'The Invasive Non-Native Species Strategy for Great Britain: Protecting our natural

heritage from invasive species'를 마련하고, 기후변화에 의한 침입외래종의 영향에 대응하기 시작하였다.

2008년 전략에는 침입외래종 문제를 접근하기 위한 전략과 수단을 제시하였으며, 국가에서 이를 지원할 수 있는 법제도의 체계를 구축한 바 있다. 당시 영국 정부가 채택했던 침입외래종의 대응전략은 생물다양성협약에서 침입외래종에 대응하기 위한 3단계 접근전략(prevention, detection/surveillance and control/eradication)이다. 각 단계의 항목별 침입외래종 관리정책을 수립한 바 있다. 기후변화와 침입외래종의 관리수단으로 방제, 초기 검측, 감독, 모니터링 및 빠른 대응, 감축, 제어, 박멸, 그리고 공공인식의 제고와 이해, 연구, 정보교환 및 통합, 법제도의 구축 등이 이행사항이다 (NNSS, 2008).

2008년 이후 5년간의 전략 이행과 이를 기반으로 제2차 기후변화와 침입외래종의 정부 전략에 해당하는 정부 전략인 'The Great Britain Invasive Non-native Species Strategy'를 2013년에 마련하였다. 이 전략에는 전략의 목표를 기조로 하여 침입외래종의 방제, 초기 검측, 감독, 모니터링, 빠른 대응, 장기 관리 및 제어, 공공인식의 제고 및 이해, 거버넌스와 협력, 우선 과제와 위해성 분석, 법체계, 연구, 정보 교환과 통합, 이행 이슈를 담고 있다. 전략 목표는 이행 수단의 달성을 구체적으로 담고 있다. 기후변화와 침입외래종의 2차 전략에는 1차 전략에 있지 않은 생태계의 장기 관리와 거버넌스 등이 포함되어 있다. 이 부문에는 기후변화로 변화되는 침입외래종의 생태적 분포 변화 예측이 필요하며, 이를 기반으로 하는 침입외래종의 관리 수단 개발이 제시되어 있다. 즉 침입외래종의 지역별·생태적 특성에 적합한 관리의 필요성과 타당성이 1차 전략 이행 시 도출된 것이다. 이를 근거로 2차 전략에서 기후변화와 침입외래종의 관리 수단 마련이 제시된 것이다 (NNSS, 2015b).

라. 호주

1) 현황

호주에서 대부분의 외래종은 지난 230년간 유입되었다. 호주에 유입된 외래 식물은 약 3만 종이며, 이 중에서 약 10%가 침입외래 식물로 간주되고 있다. 침입성 외래 식물 중에서 약 30%(798종)가 호주의 심각한 경제적·환경적 피해를 입히고 있다 (Hughes et al., 2013).

호주에서 침입외래종은 생물다양성을 심각하게 훼손시키고 있다. 인간의 건강뿐 아니라 농업의 생산성 저감, 그리고 야생동식물을 멸종시키고 있다. 침입성 외래 잡초에 의한 경제적 피해는 매년 40억 달러에 이르고 있다 (Sinden et al., 2004). 현재 상태에서 획기적인 다른 방제 방법이 없다면, 향후 30년간 붉은개미에 의한 경제적 피해는 89억 달러에 이를 것으로 추정되고 있다 (Kompas & Che, 2001).

호주에서 침입외래종에 의한 고유종의 멸종은 다른 지역보다 심각하다. 호주에서는 여우, 고양이(*Felis catus*), 토끼(*Oryctilagus cuniculus*)를 포함한 22종의 포유류가 멸종되었으며, 수종의 조류(鳥類)와 양서류의 멸종이 지난 수십 년간 보고되어 있다 (Johnson, 2006). 그리고 침입외래종에 의해 다수의 고유종이 멸종위기에 처해 있다. 이미 침입외래종에 의한 생태계 기능과 경관의 변화가 나타난 바 있다. CSIRO(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation)에 따르면, 호주는 매년 20여 종의 침입외래종이 증가하고 있다 (Webber et al., 2014).

더욱이 1990년대 이후 침입외래종에 의한 문제는 기후변화에 따라 더욱 심각해지고 있음이 보고되어 있다 (Australian Biosecurity Group, 2005; Commonwealth of Australia 2008). 호주의 많은 지역이 기후변화에 영향을 받는 산불/들불, 사이클론(계절성 폭풍)의 영향을 받는 지역이며, 기후변화와 침입외래종에 의해 기존의 농경지가 황폐화될 수도 있음이 우려되고 있다 (Webber et al., 2014).

2) 법과 제도

침입외래종은 환경, 농업, 사회적인 자원을 위협하는 생물종으로 환경안보(Environment Security)의 대상으로, 주정부와 지방정부 그리고 관련 부속 영토에서 「국가생물안보협약(National Agreement on Biosecurity)」하에 관리되고 있다. 외래종의 관리 주무부서는 환경부(Department of Environment)이며, 연방정부법은 「환경보호 및 생물다양성보전법(Environment Protection and Biodiversity Conservation Act 1999, EPBC Act)」과 「검역법(Quarantine Act 1908)」에 의해 관리되고 있다 (Commonwealth of Australia, 2012). EPBC 법은 외래종에 의한 핵심위협과정, 침입외래종의 위협 저감 계획의 개발·이행, 침입외래종에 의해 훼손된 생태계 회복과 관련한 내용을 포함한다. 검역법은 호주에 유입되기 이전 단계에서 호주에 유입 및 유입 이후의 일련 과정을 검역체계를 통해 관리함으로써 인간과 동식물의 보전을 추구하는 것이다. 호주는 호주 유입이 허가된 외래종만이 호주 유입을 허가하는 허가목록(Clean list)에 의거하여 운영되고 있다. 이 목록에 없는 모든 외래종의 유입이 강력하게 금지된다. 이러한 검역은 연방과 주정부의 검역에 의해 상호 배타적으로 이행되고 있다 (Australian Quarantine Regulation, 2000).

3) 기후변화와 침입외래종 정책 동향

National Climate Change Adaptation Research Facility(2013)에 따르면, 호주의 향후 기후변화에 따라 생태계에 침입성을 나타낼 수 있는 외래 식물의 종류는 변화할 것이며, 이에 대응할 수 있는 적절한 침입외래식물에 대한 관리가 이루어져야 한다[17] (Australian Invasive Species Council, 2011; Hughes et al., 2013).

---

17) National Climate Change Adaptation Research Facility는 호주에 서식하고 있으며 현재까지 침입성을 나타나지 않은 292종의 외래식물을 선택하고, 이들을 호주 전역에 걸쳐 확산시켰을 때의 침입성을 두 시기(2013년, 2035년)로 구분하여 외래식물의 생태, 생리적 특성과 분포변화를 비교하였다. 2035년의 기후는 Representative Concentration Pathway(RCP) 8.5를 이용하여 예측하였다. 2013년 현재는 외래종 292종 중에서 4%가 높은 침입성, 83%가 중간, 13%가 낮은 침입성으로 나타났다. 반면, RCP 8.5가 예측한 2035년의 기후변화조건에서는 3%가 높은 침입성, 81%가 중간, 16%가 낮은 침입성으로 나타났다. 이 결과는 기후변화에 따라 호주에 서식하고 있는 외래식물의 침입성이 변화되는 것을 보여주는 것이다. 기후변화에 따라 우선관리대상의 침입외래종이 달라질 수 있으며, 이에 대응하는 적절한 국가의 침입외래종의 관리 프로그램이 수립되어야 함을 제시하고 있다 (Australian Weed Committee, 2013; Hughes et al., 2013).

기후변화와 침입성 외래 잡초에 의한 영향을 최소화하기 위해서는 기후변화가 식물의 분포에 나타나는 영향, 기후변화 조건(온도, 강수량 변화, 대기 중의 이산화탄소 농도 변화, 지역적 극한의 기후 조건-온도, 습도, 건기 기간 등, 토지이용 변화, 산불, 사이클론 등의 조건) 하에서 침입외래식물의 관리방안을 찾고 있다 (Webber et al., 2014).

국가 차원에서 기후변화가 외래생물에 미치는 다양한 영향 파악에 대해 지원하고 있다. 지난 수년간 호주 정부가 전략적으로 지원하고 있는 사업들은 다음과 같다 (Webber et al., 2014; Australian Invasive Species Council, 2011; Australia Invasive Species Council, 2015; Australian Weed Committee, 2013; Australian Biological Diversity Advisory Committee, 2008).

- 현재까지 진행되어 온 생태계 연결통로에 대한 재평가
  - 현재 생태계의 연결통로는 외래종의 연결통로로 이용되어 침입외래종의 확산에 도움을 줄 수 있다. 생태계연결 통로의 새로운 시각과 디자인이 필요하다 (Commonwealth of Australia, 2012).
- 기후변화(CO_2 농도, C:N 비율, 요소 간 상호작용)를 고려한 생물학적 방제
- 제초제의 진화(잡초의 제초제에 대한 내성 증가): 제초제 사용에 대한 재평가
- 기후변화에 따른 제초제의 문제점 및 사용
- 침입성으로 변하는 고산외래식물/목초지의 외래식물
- 조경용으로 사용하는 침입외래종의 사용 금지 및 제거
- 새로운 외래식물의 유입과 기존에는 침입성이지 않았으나 침입성이 변화하는 외래식물의 변화 모니터링과 관리
- 불확실성 중에 확실성과 정확성 제고
  - 장기생태모니터링 지역과 새로운 모니터링 지역에서 외래종의 확산, 위해성, 경로, 영향, 박멸, 검역의 효과를 잘 보여주고 있다.
- 기후변화와 외래종의 모델링: 기후변화, 외래종의 확산, 침입성을 예측하는 수단으로 정책결정자들에게는 침입외래종 관리의 우선순위를 제공 (Kriticos et al., 2015a;

Kriticos et al., 2015b)

- 기후변화에 의해 침입성이 증가 또는 감소하는 기존 침입외래종의 공간분포 지도화
- 기후변화에 의해 새로이 등장하는 침입외래종을 확인하고 공간분포 지도화

– 기후변화와 외래생물의 이해

- 사회적·문화적 측면에서의 이해, 미래의 정책개발과 침입외래종의 관리는 주민들의 참여와 이해가 필수이며, 현재 침입외래종은 생태계 복원에 주요한 수단으로 사용될 수도 있음. 그리고 미래에 유용하게 사용될 생물종에 대한 고려 필요

– 현재의 침입외래종에 대한 생물학적 관리와 적응 전략 재평가

– 바이오에너지로 재배되는 작물에 대한 기관차원에서의 규제

- 호주 전 지역에서는 바이오에너지로 사용되는 식물로 기후변화에도 잘 견디고 관리가 용이한 외래종인 jatropha(*Jatropha curcas*)와 giant reed(*Arundo donax*)를 선호하고 있으나, 이러한 경우에는 이들 식물의 재배 이전에 재배 후 확실한 방제가 약속되어야 함. 호주의 일부지역에서는 이들 두 식물의 재배가 금지되어 있음

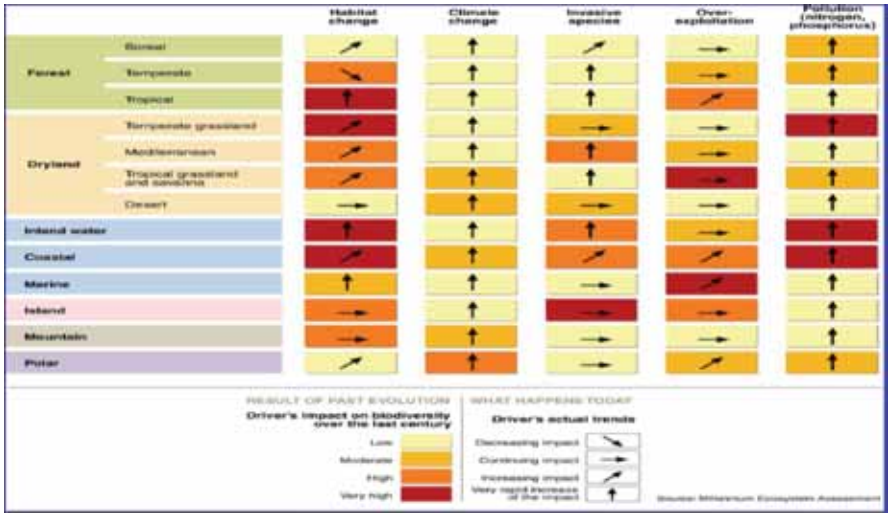
– 침입외래종이 주요한 기후변화 문제로 인식될 수 있도록 교육 및 홍보 필요

- 기후변화에 대한 이해 증가와 생태계의 기후변화 적응에 대한 이해

– 기후변화에 의해 변화되는 침입외래종 방제 프로그램 수립

4. 생물다양성협약에서의 침입외래종 관리 동향

생물다양성협약에서는 생물의 서식처 변화, 기후변화, 침입외래종, 과도한 개발, 오염을 지구 생태계를 위협하는 주요 요인으로 간주하고 있다. 특히 기후변화와 침입외래종은 상호관계에 의해 생물다양성/생태계를 복합적으로 위협하는 가장 주요한 요소로 평가한다 <그림 3-1>. 침입외래종의 유입은 유전자, 종, 생태계에 돌이킬 수 없는 환경적, 경제·사회적 악영향을 끼치기 때문에 생물다양성협약 제8조에서는 각 협약 당사국이 생태계, 서식지 또는 종을 위협하는 외래종(alien species)의 도입 금지, 통제, 근절해야 함이 제시되어 있다.[18)]



자료: MEA (2005)

〈그림 3-1〉 생태계변화, 기후변화, 침입외래종, 과도한 개발과 오염이 생태계에 미치는 영향의 과거 및 미래의 흐름

외래종에 관련된 협약의 논의는 제3차 당사국 회의(1996년, 아르헨티나 브에노스 아이레스)부터이다. 제3차 당사국회의는 '외래종에 관한 UN/Norway 회의(1996년 7월, 노르웨이 트론하임)'에서 도출된 회의결과를 받아들여 SCOPE(Scientific Committee on Problems of the Environment)와 IUCN-World Conservation Union의 전문가에게 지구적 차원에서의 외래종 문제 해결을 의뢰한 바 있다 (Norway/UN Conference on Alien Species, 1996). 이후 매 당사국 회의에서는 침입외래종 문제를 주요 이슈로 다루고 있다. 각 당사국 회의에서 도출된 외래종 관련 주요 결과는 다음과 같다.

제6차 당사국회의(2002년, 네덜란드 헤이그). 침입외래종의 악영향을 방지하기 위한 '생태계, 서식지, 종을 위협하는 침입외래종의 영향 예방, 소개 및 완화에 대한 15개 지침원칙(Guiding Principles for the Prevention, Introduction and Mitigation of Impacts of

18) 생물다양성협약의 제8조(현지 보전) (h) 생태계, 서식지 또는 종을 위협하는 외래종(alien species) 도입의 금지, 통제 및 근절.

Alien Species that Threaten Ecosystems, Habitats or Species)'을 채택하였고 (Decision VI 23), 각 당사국은 '국가 생물다양성 전략 및 행동계획(NBSAP, National Biodiversity Strategies and Action Plans)' 수립시 외래종 문제에 대한 접근정책을 포함하도록 당사국에 요청하였다. 15개 원칙[19]은 다음과 같다: (1) 사전예방적 접근(precautionary approach), (2) 3단계 접근(three-stage hierarchial approach), (3) 생태계적 접근, (4) 국가의 책임, (5) 연구와 감시(monitoring), (6) 교육과 공공 인식(awareness), (7) 방지, (8) 정보교환, (9) 능력배양을 포함한 협력(cooperation, including capacity building), (10) 의도적인 외래종의 도입(intentional introduction) (11) 비의도적인 외래종의 도입(unintentional introduction), (12) 영향감소(mitigation of impacts), (13) 박멸(eradication), (14) 외래종의 격리(containment), (15) 외래종의 제어(control)

제7차 당사국회의(2005년, 태국 방콕). 당사국과 각국 정부가 무역협정 등과 같은 국제적, 양자간 그리고 지역적 협약 체결 시 침입외래종의 위협을 고려하게 되어 있다. 이 문제에 대한 인식 증진을 위하여 환경, 식물보호, 무역 등의 분야들 간의 의사교환과 협력을 증진시킬 것을 권고하였다.

제9차 당사국회의(2008년, 독일 본). 침입외래종 문제를 8개의 심층 고려사안(issues for in-depth consideration)의 하나로 선정하였다. 침입외래종 관련 국제 규제체계 간의 차이점과 불일치를 해소하기 위하여 각 당사국이 국제식물보호협약(International Plant Protection Convention, IPPC), 세계동물건강기구(World Organisation for Animal Health, OIE) 등 관련 기관들이 개발한 위해성 평가 안내서와 기타 절차 및 기준 등을 이용할 것을 권장하였고, 관련 국제기구들에 침입외래종(특히 동물)을 포괄하는 국제적 기준을 마련할 것을 요청하고 있다.

---

19) 이 원칙은 제4차 당사국회의(1998년, 슬로바키아 브라티슬라바)에서 제안되었으며, 제5차 당사국회의(2000년, 케냐 나이로비)와 과학기술자문보조기구(SBSTTA, Subsidiary body on Scientific, Technical and Technological Advice) 회의를 통해 관련 기구와의 협력, 사용 용어의 정확성, 방지 원칙 등에 대한 좀 더 세부적인 사항이 추가로 보완된 것이다 (UNEP/CBD/SBSTTA/4/8).

제10차 당사국 회의(2010년, 일본 나고야). 현재의 국제기준에서 다루지 않는 침입외래종의 관리를 위한 국제기준의 개발 필요성과 지역적 협업의 중요성을 인식하였으며, 침입외래종의 도입, 정착 및 확산에 대한 사전 예방적 접근을 적용할 것을 촉구하고 있다.

제11차 당사국 회의(2012년, 인도 하이데라바드). 살아 있는 동물의 매매를 포함한 국제적 웹 기반 시장을 침입외래종의 중요한 도입 경로 중 하나로 인식하고 있다. 또한 당사국들은 상업적 동물보유 시설에서 동물 혹은 동물에게 주는 살아 있는 먹이들이 탈출함으로써 초래될 수 있는 침입외래종의 도입 및 확산의 잠재적 위험성을 인식하고 있으며, 침입외래종 문제의 해결을 위한 국제 협력을 논의하고 있다.

5. 기후변화를 고려한 침입외래종의 생태계기반관리 사례: 유럽연합에서의 돼지풀 관리

돼지풀(common ragweed, *Ambrosia artemisiifolia*)은 유럽 전역에 걸쳐 인체의 건강과 농업을 포함한 여러 부문에 악 영향을 주고 있는 유럽의 침입외래종이다. 유럽연합에서는 유럽에서 돼지풀을 효과적이고 체계적으로 관리하기 위하여 유럽연합 회원국에 미치는 돼지풀의 영향에 대한 자료와 정보를 종합하였고, 이를 경제, 사회, 환경 부문으로 구분하여 분석하였다. 기후변화에 따라 변화해 왔으며 현재와 향후 변화가 예측되는 돼지풀의 생태적인 특성과 서식처 변화 등을 고려하여 돼지풀의 관리정책에 관한 연구 사업을 추진한 바 있다 (Bullock et al., 2013). 본 연구 부문은 돼지풀 관리에 관한 유럽연합의 단계적 접근방법과 수단을 향후 우리나라가 접근해야 할 침입외래종의 생태계기반 관리에 고려해야 할 체계적인 사례로 제시한다. 본 연구 부문에 제시되고 있는 모든 내용과 인용문헌은 Bullock et al.(2013)에 제시된 것을 본 연구의 사례연구로 정리하고 편집한 것이다.

유럽연합의 돼지풀을 관리하기 위한 연구사업의 책임자는 J. M. Bullock(Center for Ecology & Hydrology, Benson Lane, Wallingford, OX10 8BB, UK)이다. 이 연구 사업은 European Commission이 영국의 Natural Environment Research Council의 Bullock에 요청하여 2011년 4월~2012년 10월(18개월) 기간에 이행한 사업이다. 이 사업에는 유럽

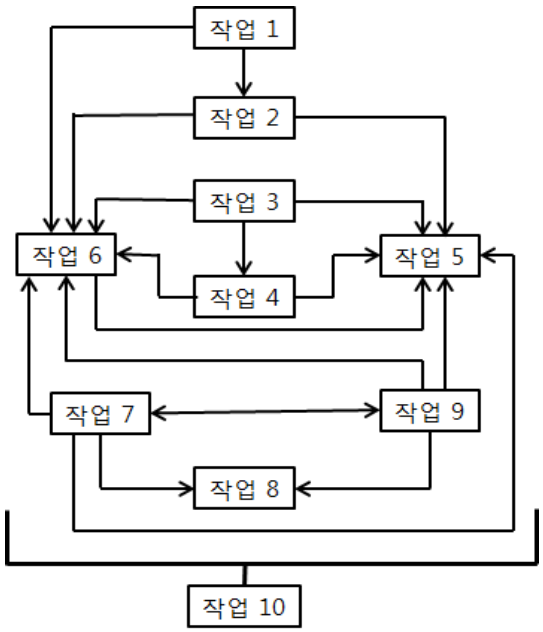
연합 회원국의 전문가 24명이 참여하였다. 2010년 당시 유럽연합의 회원국은 27개국이었다[20]. 당시 회원국은 네덜란드, 독일, 룩셈부르크, 벨기에, 이탈리아, 프랑스, 덴마크, 아일랜드, 영국, 그리스, 스페인, 포르투갈, 스웨덴, 오스트리아, 핀란드, 라트비아, 리투아니아, 몰타, 슬로바키아, 슬로베니아, 에스토니아, 체코, 키프로스, 폴란드, 헝가리, 루마니아, 불가리아였다.

이 사업은 전체가 10단계 작업으로 구분되어 진행되었다. 각 단계의 작업은 아래와 같다. 각 단계의 작업은 단계별로 독립적이고 순서적으로 이행되는 경우와 병렬하여 이행되는 경우도 있었다. 각 단계별 이행되는 순서와 체계는 <그림 3-2>와 같다 (Bullock et al., 2013).

- 작업 1: 돼지풀의 확산 메커니즘 검토 및 평가
- 작업 2: 돼지풀의 확산에 영향을 주는 조건과 매개 수단(매개생물)의 확인
- 작업 3: 유럽연합 27개국에 대한 돼지풀의 분포 공간화
- 작업 4: 침입외래종에 의한 사회적, 환경적, 경제적 영향을 평가하는 일반적이고 체계적인 방법을 마련하고, 돼지풀에 의한 현재와 미래의 영향을 정량화하여 평가
- 작업 5: 작업4를 근거로 유럽연합 회원국과 그 외 인근 영향지역 국가를 포함하여 돼지풀의 영향에 대한 비용분석 시행
- 작업 6: 두 개의 모델 개발-기후변화 시나리오와 정책 시나리오(no action 시나리오 포함)에 의한 돼지풀의 확산을 평가하고 돼지풀의 위해성(영향) 평가
- 작업 7과 9: 돼지풀의 향후 유입과 확산을 제어, 방제, 박멸하기 위한 현재의 정책과 수단 도출
- 작업 8: 유럽의 빠른 경보체계(Early Warning System)의 효과적 이행을 위한 필요 요소
- 작업 10: 돼지풀의 정보 확산과 연구결과를 발표하기 위한 전문가 워크숍 개최

---

20) 2013년 크로아티아가 가입함으로써 2015년 현재 유럽연합 회원국은 28개국이다.



자료: Bullock et al.(2013)

〈그림 3-2〉 돼지풀 관리에 관한 유럽연합의 단계적 작업의 순서

가. 작업 1: 돼지풀의 확산 메커니즘 검토 및 평가

1) 방법

지난 30년간 유럽연합 회원국과 인근 영향 국가(몰도바, 우크라이나, 벨라루스 포함)에서 확산되고 있는 돼지풀 확산 메커니즘을 평가하기 위해 돼지풀 유입에 대한 정보와 자료를 수집, 검토, 평가하였다. 대상 자료는 돼지풀의 자연적 및 인위적인 확산(전파)과 확산 과정으로 i) 자연현상인 중력, 바람, 물, 동물에 의한 확산, ii) 농업 경작 방법에 의한 확산: 곡물과 농산물의 오염, 새와 가축의 먹이, 농기계, iii) 도로와 운송체계 및 네트워크, iv) 건설 산업과 매립지, v) 하천과 수로, vi) 여가 산업으로 구분하여 수집하였다 (Bullock et al., 2013).

2) 결과

돼지풀의 확산에 관여하는 여러 매개 수단과 방법이 있다. i) 자연적인 돼지풀 씨앗의 확산, ii) 작물과 식량의 수입 단계에서 돼지풀 씨앗이 함께 이동, iii) 조류(새) 먹이를 포함한 동물의 사료에 담겨져 이동, iv) 운송 수단과 도로, v) 농기계 등을 통해 토양과 유기물질에 담기게 되어 이동하거나, vi) 홍수 등을 통해 하천과 도로를 따라 주변 지역으로 이동하는 것이다. 돼지풀의 자연적인 확산(과정)은 인위적인 확산에 비해 중요하지 않다. 돼지풀은 바람에 의해 확산되나 바람에 의한 확산에 잘 적응되어 있지 않다. 돼지풀의 씨앗은 성체 돼지풀의 2m 이내에 떨어진다. 돼지풀 씨앗은 동물의 분변 등에 의해 확산될 수 있으나, 이 과정은 인위적인 과정에 비하면 영향이 크지 않고 중요하지 않다. 하천과 수로가 돼지풀의 확산에 중요한 역할을 하고 있다. 자연적으로 돼지풀의 확산에 영향을 미치는 매개 수단은 물이다. 가벼운 돼지풀의 씨앗은 물의 흐름을 타고 멀리 이동할 수 있다. 수변지역에 돼지풀이 새로이 정착하는 과정은 이러한 경로로 돼지풀이 이동한 경우이다. 곡물, 원예종자의 수입은 돼지풀 유입의 핵심 요인이다. 돼지풀 씨앗이 있는 곡물(식량), 원예 종자의 수입을 통해 돼지풀이 새로운 국가(지역)에 유입되고 있음을 확인하였으며, 유럽 국가의 대부분이 이러한 경로를 통해 돼지풀이 유입되고 확산되었다는 확실한 여러 증거가 있다.

그 외 가축과 새들의 먹이용으로 유입된 사료에 포함되어 새로운 지역에 돼지풀이 유입되었다. 돼지풀 씨앗으로 오염된 토양과 곡물, 두엄의 이동 등을 통해서도 돼지풀이 새로운 지역으로 확산된다. 또한 건설 현장은 돼지풀이 잘 적응하여 자라는 지역이다. 돼지풀 씨앗은 건설지역 토양과 자갈 등에 섞이고 건설기계 등을 통해서도 다른 지역으로 이동된다. 농산업과 도로, 철도와 수로는 돼지풀의 확산에 영향을 주는 주요한 요인이다. 그에 반해 바람이나 동물에 의한 자연적인 돼지풀의 확산은 미미하다. 돼지풀 씨앗의 이동에 영향을 미치는 각 수단의 중요성은 다음과 같다. (가축의) 두엄 > 토양 > 수확한 작물 > 식품의 생산 과정 > 집합체 > 수로 > 사료의 생산 과정 > 바람 > 야생동물이다 (Bullock et al., 2013).

나. 작업 2: 돼지풀 확산에 영향을 주는 조건과 매개 수단(매개생물)의 확인

1) 방법

과거, 현재, 미래에 돼지풀의 정착과 확산에 관련된 자연적, 인위적 요인과 매개생물과 요인에 대한 정보와 자료를 검토하였다 (표 3-3).

〈표 3-3〉 돼지풀의 정착과 확산에 관련된 자연적, 인위적 개입요인

요인	세부 항목
돼지풀의 확산에 영향을 주는 조건(요인)	- 서식처와 생장군집 - 온도: 발아, 광합성률, 개화 및 종자생산 - 빛 - CO_2 농도 - 토양: 수분, pH, 유기물과 무기물질의 함량
돼지풀의 군집생존과 경쟁 등 생·물리학적 요인	- 군집에 있는 상호 생물들 간의 성장, 생식에 영향을 미치는 타감작용 (allelopathy) - 생식생장 효율성과 씨앗 상태에서의 생존 - 근권에서의 진균 군집 - 천적 - 경작방법에 대한 내성 - 염류, 특히 도로결빙 방지용으로 사용하는 염류에 대한 저항성 - 제초제 내성 - 납(Pb)에 대한 내성
인위적 개입 요인	- 생태계 훼손 (도로 및 건물 건설 등) - 국제무역 - 정치적 변화와 전쟁 - 도시지역 개발과 기반시설 성장 - 농업 정책 - 기후변화 - 돼지풀 제어 수단의 부재

자료: Bullock et al.(2013)

2) 결과

돼지풀의 확산에 가장 주요한 요인은 사람들의 행위인 것으로 보인다. 돼지풀은 도시의 나지대, 건설현장 주변, 농경지, 도로 주변, 하천 및 호소 주변, 매립장 인근, 폐기물처리 지역 인근 등 생태계가 훼손된 지역 등에 많이 나타난다. 특히 인위적으로 생태계를 훼손한

지역에서 돼지풀이 많이 나타난다. 훼손된 지역에는 유럽의 토속적인 고유종보다 돼지풀이 빨리 정착한다 (Basset & Crompton, 1975; Chauvel et al., 2006; Lavoie et al., 2007; Ziska et al., 2007; Fumanal et al., 2008b; Martin & Lambion, 2008; Chytrý, 2009). 국제적인 곡물의 무역 물품에 섞여 돼지풀이 회원국에 유입되는 경우가 많다. 이러한 과정을 통해 돼지풀의 개체수가 유럽연합 회원국에 많이 증가한 것이 보고된 바 있다. 또한 정치적 변화와 전쟁 등이 돼지풀의 확산에 기여하고 있다. 실제로 제1, 2차 세계대전과 정치적 변혁(동유럽 공산정권 붕괴) 이후 돼지풀 분포지역이 증가되었다. 1994년 일반농업정책(Common Agricultural Policy, CAP) 이후 돼지풀의 개체군 확산과 정착이 증가하였다. 돼지풀 씨앗과 유사한 해바라기의 재배가 돼지풀의 확산에 기여하고 있다. 최근에는 기후변화에 따라 돼지풀의 분포가 증가하고 있다 (Dullinger et al., 2006; Vogl et al., 2008; Essl et al., 2009).

돼지풀의 생장 및 생식, 확산에 영향을 미치는 핵심 요인은 온도이다. 북서 유럽 지역의 여름철 온도가 서늘한 지역에서는 돼지풀이 자연적으로 서식하기 어렵다. 이 지역의 낮은 온도에서는 돼지풀 꽃의 개화와 열매 맺음이 어렵기 때문이다. 유럽지역에서 나타나는 기후변화에 의한 온도 변화는 돼지풀의 번식에 영향을 미치게 될 것이다 (Bullock et al., 2013).

발아. Bassett & Crompton(1975)에 따르면 돼지풀의 씨앗 발아에 가장 중요한 요인은 온도이다. Dickerson(1968)은 돼지풀 씨앗을 10, 20, 30, 40℃와 8, 16, 24 시간 교차처리한 결과, '10℃, 16시간' 처리구와 '30℃, 8시간' 처리구에서 가장 높은 확률(75%)로 돼지풀 씨앗이 발아되었다 (Bassett & Crompton(1975)에서 인용된 것을 재인용). 이러한 온도조건은 돼지풀이 가장 무성하게 자라고 있는 캐나다 남부 온타리오와 퀘벡 지역에서의 돼지풀 씨앗의 발아 조건과 유사하다 (Bassett & Crompton, 1975). 그 다음 발아(50.1%)는 (20℃, 16시간), (30℃, 8시간) 처리구에서 기록되고 있다. 실험실 조건에서는 이 보다 높은 발아율이 관측되기도 한다 (Fumanal et al., 2008a; Leiblein & Lösch, 2011; Bullock et al., 2013).

춘화처리. 돼지풀 씨앗이 봄에 발아하기 위해서는 춘화처리(발아하기 위하여 추운 겨울 기간이 필요한 처리)가 필요하다 (Willemsen & Rice, 1972). 겨울이 지난 후, 봄철 돼지풀 씨앗의 발아 최적 온도는 15°C이며, 7~28°C에서 나타난다 (Brandes & Nitsche, 2006). Sang et al.(2011)에 따르면, 돼지풀 씨앗이 5~40°C, 12시간 광/암주기 교차 조건에서 발아가 가능하다. 5°C 이하에서는 돼지풀의 씨앗 발아가 일어나지 않는다 (Bullock et al., 2013).

돼지풀은 생태적으로 넓고 다양하게 적응할 수 있는 특성을 지니고 있다. 돼지풀은 수명이 긴 다량의 씨앗을 생산하고, 수천 개의 씨앗을 생성할 뿐만 아니라 35년을 생존하는 등 후대 생산능력이 높다. 온도 외에 돼지풀의 생장을 제한하는 다른 제한 요소를 찾기 어렵다. CO_2 농도 상승은 돼지풀의 광합성을 증가시키고 화분형성에 긍정적으로 기여한다. 돼지풀은 토양의 낮은 수분 함량, 가뭄에 대해 저항력이 크며, 산성조건에 대단히 잘 견딘다. 토양의 유기질 함량과 돼지풀의 생활사에 대한 연구는 거의 없다. 유럽지역에서 돼지풀의 천적을 이용한 효과적인 생물학적 방제는 보고되어 있지 않다. 도로 주변 얼음제거 또는 방지용으로 사용하고 있는 염화칼슘 사용 지역에서도 돼지풀이 잘 견디고 생장하는 등 고염분 지역에서도 생장이 가능하다. 제초제(2, 4—D, atrazine, bentazon, dicamba, diuron, linuron and MCPA)에 의한 돼지풀의 성공적인 방제가 이루어진 경우가 다수 있으나 (Taramarcaz et al., 2005; EPPO, 2009; Kazinczi et al., 2008; Reznik, 2009), 일부 돼지풀은 제초제에 내성이 생기고 있음이 보고되어 있다 (Ballard et al., 1996; Leif et al., 2000; Brandes & Nitzsche, 2006; Saint-Louis et al., 2005). 돼지풀은 납(lead)에 높은 내성이 있다 (Pitchel et al., 2000; Brandes & Nitzsche, 2006). 이러한 형질이 돼지풀이 도로 주변에서 잘 자랄 수 있는 경쟁력이다 (Bullock et al., 2013).

유럽의 돼지풀은 유럽에 침입하고 확산하는 동안에도 유전적인 다양성을 유지하고 있다. 유럽의 돼지풀은 원산지가 북미이며, 현존하는 유럽의 돼지풀은 북미지역의 돼지풀에 비해 유전적 손실이 나타난 증거가 없다. 실제 프랑스에서 발견된 돼지풀의 유전적 다양성은 증가(야생에 더 효율적으로 번식할 수 있는 능력)되어 있다.

돼지풀의 확산에 영향을 미치는 요인들에 순위를 매길 수 있다. 인위적인 영향이 자연적인 영향보다 크며, 주요 요소별 순위는 농산업 > 도로와 운송체계 > 건설 산업 > 철도운송체계 > 하천 및 수로 > 동물에 의한 확산이다 (Bullock et al., 2013).

다. 작업 3: 유럽연합 27개국에 대한 돼지풀의 분포 공간화

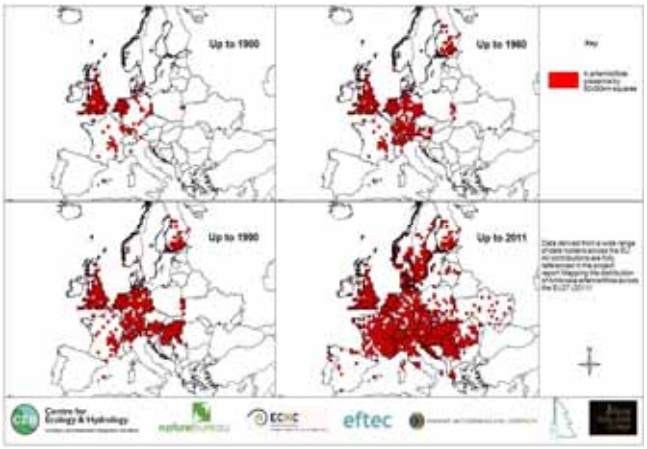
1) 방법

유럽연합 27개국을 대상으로 돼지풀 분포 및 발생 지역에 대한 지도를 작성하였다. 인근 유럽 국가들의 일부 정보와 자료를 포함하였다. 돼지풀의 지리학적 분포와 관련된 가용 정보와 자료는 DAISE(Delivering Alien Invasive Species Inventories for Europe)와 GBIF(Global Biodiversity Information Facility) 데이터베이스(Database)이다. 유럽연합 회원국들과 인접국가의 전문가들에 의해 돼지풀의 자료와 정보가 수집되었고, 자료의 품질보정 과정을 통해 표준화되었다. 이 자료는 World Geodetic System(1984)에 맞추어졌다. 이 사업에서는 북이탈리아, 폴란드, 체코, 오스트리아, 스위스, 러시아 지역의 돼지풀 분포를 포함하였다. 지도의 GIS 작업으로 유럽전역은 해상도 $50 \times 50km^2$, 국가별로 $10 \times 10km^2$, 돼지풀의 주요 분포지역은 $50 \times 50km^2$와 $10 \times 10km^2$ 지도를 중첩하여 평가하였다 (Bullock et al., 2013).

2) 결과

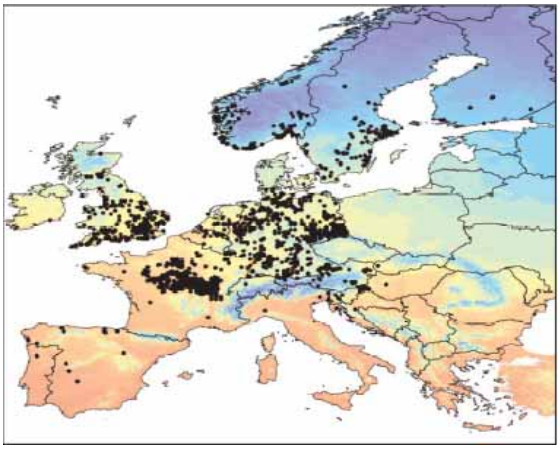
돼지풀의 분포 수준과 자료의 질적인 수준은 국가와 지역에 따라 다르다. 본 사업에서는 유럽 전체의 돼지풀 정보와 자료는 $50 \times 50km^2$ 해상도 지도를 기본으로 하고 있다. 개별 국가에서의 돼지풀 정보와 자료는 $10 \times 10km^2$ 해상도 지도에 표기하고 있다. 상대적으로 돼지풀이 많이 발생하는 지역의 지도 해상도는 다르게 만들어졌다. $50 \times 50km^2$ 해상도 지도를 볼 때, 유럽 주요지역에서 돼지풀이 전반적으로 확산되어 있다. 유럽전역(영국으로부터 흑해지역까지, 스칸디나비아에서 지중해까지)에 돼지풀이 확산되어 있다. 오스트리아, 벨기에, 불가리아, 크로아티아, 체코, 덴마크, 핀란드, 프랑스, 독일, 그리스, 헝가리,

아일랜드, 이탈리아, 라트비아, 몰도바, 네덜란드, 노르웨이, 폴란드, 포르투갈, 루마니아, 세르비아, 슬로바키아, 슬로베니아, 스페인, 스웨덴, 스위스, 우크라이나, 영국에서 돼지풀의 확산자료를 확인하였다. 벨라루스, 에스토니아, 리투아니아에서의 돼지풀 자료는 확인하지 못하였다 ((그림 3-3, 그림 3-4, 그림 3-5, 그림 3-6) 참조, Bullock et al., 2013).



자료: Bullock et al.(2013)

〈그림 3-3〉 1900-2011년 기간 중 돼지풀의 유럽 분포 (50×50km^2 해상도)

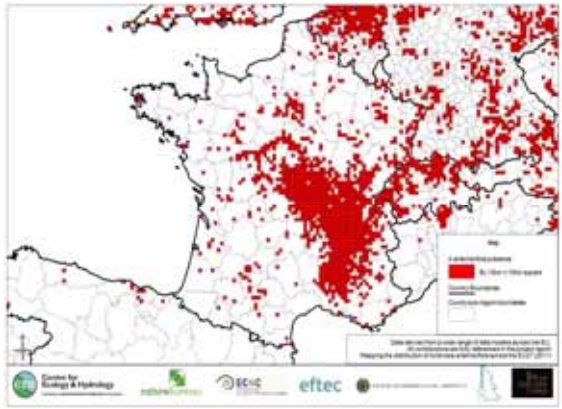


자료: Bullock et al.(2013)

〈그림 3-4〉 GBIF Database에 의한 돼지풀의 유럽 분포 (50×50km^2 해상도)

자료: Bullock et al.(2013)

〈그림 3-5〉 DAISIE Database에 기재된 돼지풀의 유럽 분포 (50×50km^2 해상도)



자료: Bullock et al.(2013)

〈그림 3-6〉 프랑스의 돼지풀 분포(10×10km^2 해상도)

라. 작업 4: 침입외래종에 의한 사회적, 환경적, 경제적 영향을 평가하는 일반적이고 체계적인 방법을 마련하고 돼지풀에 의한 현재와 미래의 영향을 정량화하여 평가

1) 방법

돼지풀의 사회, 경제, 환경 영향에 관한 정보와 자료를 모으고 분석하는 방법을 개발하였다. 이 방법은 다른 침입외래종에도 적용할 수 있다. 이 방법은 인간과 동물의 건강, 생물다양성, 광범위한 환경, 생산 체계, 운송과 건설 기반시설에 적용하였다 (Bullock et al., 2013).

2) 결과

유럽에서 돼지풀이 영향을 미치는 가장 중요한 요인(대상)은 인간의 건강이다. 돼지풀이 번식하고 있는 지역에서 알레르기에 고통을 받는 사람들은 20~50%에 달한다(유럽인의 1/4가량이 비염을 갖고 있다). 알레르기 현상은 비염, 꽃가루에 의한 건초열, 피부염, 기침 등으로 나타나며, 이 중에서도 돼지풀에 의한 알레르기는 다른 나무와 초본류의 꽃가루 알레르기보다 심하게 나타난다. 돼지풀이 확산되어 있는 지역에서 이러한 돼지풀 알레르기가 심하게 나타나고 있다는 증거가 축적되어 있다. 돼지풀 화분(pollen) 가루 5~20개/m^3가 공기 중에 있을 때, 사람에게 알레르기 증상을 일으킨다. 기후변화는 돼지풀 화분의 생산량을 증가시키고 화분에 의한 알레르기 기간을 연장시켜 돼지풀 알레르기를 악화시킬 것으로 보고 있다. 이러한 돼지풀 알레르기는 일반적인 알레르기 의약품으로 치료가 가능하다. 돼지풀 알레르기는 다양한 종류의 애완동물에게도 나타난다. 말, 개, 고양이에게 돼지풀 알레르기가 나타나고 있다. 유럽의 가축들에 대한 돼지풀의 영향은 확실하지 않으나, 북미에서 돼지풀을 먹는 가축들은 체내 질소 함량이 높아지는 등 돼지풀이 잠재적인 동물의 건강을 위협하는 요소로 알려져 있다. 북미와 유럽 일부 지역에서 돼지풀이 개와 고양이, 말의 피부에 피부염을 일으킨다는 제한적인 증거와 일부 보고된 자료가 있으나, 유럽연합에서 이에 대한 충분한 자료는 축적되지 않았다. 유럽 일부 지역에

서 돼지풀은 농업의 생산성을 떨어뜨리는 중요한 잡초이다. 대부분의 유럽 국가에서 돼지풀은 광범위하게 번식하고 있으며 농작물 재배에 위해한 잡초이다. 해바라기는 돼지풀에 가장 감수성이 높은 작물이며, 두 식물에 대한 제초제의 작용 기작이 유사하여 제초제로 해바라기 밭에 있는 돼지풀을 방제하기 어렵다. 그 외 옥수수, 감자, 콩, 완두콩, 사탕수수, 담배, 호박, 수수, 유채, 포도를 포함한 과수 및 채소재배지에 돼지풀은 주요한 잡초이다 (Bullock et. al., 2013).

돼지풀에 의한 작물의 생산성 감소는 작물에 따라 달리 나타나며 수확량의 50%를 넘지는 않는다. 다만 목초지에서 돼지풀은 주요한 잡초는 아니다. 돼지풀은 유럽에서 생물다양성을 위협하는 제한적인 문제를 발생시키고 있다. 돼지풀은 식물의 군집을 변화시키는 핵심 요인이라기보다는 서식처를 훼손시키는 동승 요인(passenger)으로 보인다. 돼지풀은 주로 인간에 의해 심하게 훼손된 생태계, 예를 들면 도시지역, 운송 기반시설 지역, 산림이 황폐된 지역, 훼손된 목초지 등에 주로 나타난다. 돼지풀이 침입한 생태계는 인위적 또는 자연적(홍수 또는 건천의 하상 훼손 등)으로 점차 훼손된다. 궁극적으로는 인위적으로 훼손되는 경우가 대부분이다. 매년 홍수가 일어나는 지역 또는 황무지 거친 지역에서 돼지풀이 침입하면, 이러한 지역에서는 돼지풀이 쉽게 확산된다. 돼지풀이 그 외 다른 광범위한 환경과 생태계서비스의 영향에 대한 연구는 없다. 인간의 복지와 농업 생산 외에 다른 생태계서비스 영향에 대한 증거는 보고된 바 없다. 이는 돼지풀이 생태계 환경을 변화시키는 직접적인 요인이기보다는 생태계의 침입단계에서 생태계를 변화시키는 동승 요인이기에 이에 대한 자료가 제시되어 있지 않다. 유럽에서 돼지풀이 운송, 지역개발, 관광 사업에 영향을 미치고 있는 증거는 거의 없다. 돼지풀이 개발이나 운송 부문에 영향을 미치고 있다는 증거는 보고된 바 없다. 이는 이에 대한 정보가 없기 때문일 수 있으며, 일반적으로 영향이 없다는 일반적인 개념이 있기 때문일 수 있다. 사람에 대한 돼지풀의 알레르기는 돼지풀이 있는 지역에 관광객들이 접근하기 어렵게 만들어 생태관광에 치명적일 수도 있다 (Bullock et. al., 2013).

마. 작업 5: 작업 4를 근거로 유럽연합 회원국과 그 외 인근 영향지역 국가를 포함하여 돼지풀의 영향에 대한 비용분석 시행

1) 방법

이 과정의 목적은 돼지풀 관리와 관련한 정책결정을 지원하는 경제적 자료를 제공하는 것이다. 작업 3과 4 결과, 작업 6의 모델 사용 결과에서 제공된 돼지풀의 영향에 대한 비용을 분석하였다. 비용은 재정비용과 손실비용으로 구분하였으며, 경제학적 관점의 가치에는 돼지풀에 의해 영향을 받는 모든 인간의 복지비용(화폐로 표현)을 포함하였다. 이 방법으로 i) 돼지풀의 영향에 대한 현재의 소요 비용, ii) 돼지풀을 방제하는 방법이 없을 경우, 2032년까지의 소요 비용, iii) 돼지풀의 방제 비용, iv) 돼지풀의 적절한 방제시, 2032년까지의 소요 비용을 분석하였다. 돼지풀의 영향을 받는 지역의 경제적 비용은 다음 비용을 고려하였다: i) 인간의 건강관리 비용, ii) 가축 위생비용, iii) 생물다양성과 환경보전비용, iv) 농업과 원예생산물, v) 다른 관련 경제 부문 비용(예, 관광), vi) 운송 및 건설 기반시설 (돼지풀 관리에 소요되는 비용)이다. 돼지풀의 영향을 받는 지역의 경제적 영향 비용은 다음 비용을 고려하였다: i) 행정비용, ii) 관리비용, iii) 방제 또는 박멸비용(농업 부문에서의 생물, 물리,[21] 화학적 제어[22] 비용, 도시 지역에서의 처리 비용), iv) 모니터링 비용, v) 외국에서의 종자 수입에 대한 제한으로부터 소용되는 비용, vi) 인간의 건강관리 비용 (작업의 생산성 감소, 알레르기에 의한 의약품 비용 등), vii) 기후변화 시나리오에 따른 사람과 가축의 건강관리 비용 등의 추세 (Bullock et al., 2013).

2) 결과

돼지풀에 의한 경제적 영향을 추정하는 작업이 유럽의 여러 나라에서 수행되었고, 이에 대한 경제적인 농업 피해, 인간의 건강 훼손, 작업 생산성 감소, 모니터링과 방제에 소요되

---

21) 본 연구에서 사용하는 외래종의 물리적 제어(physiological control) 수단이란 생물종의 물리적(기계적 또는 인위적) 제거, 작물의 윤작, 멀칭, 태우거나 또는 논밭을 갈아엎는 수단 등을 통칭한다.

22) 화학적 제어(chemical control)는 생물종의 개체 활성 또는 개체수를 화학물질(농약, 살충제, 제초제 등)로 조절하는 방제 또는 박멸 수단이다.

는 비용이 산정되었다. 그러나 이들 경제적인 비용 산정에는 아래와 같은 변수에 대한 가정과 불확실성을 포함하고 있어 실제 돼지풀에 의한 피해 비용이 왜곡될 수 있음을 감안해야 한다 (Bullock et al., 2013).

- 농업: 돼지풀에 의한 작물의 생산성 감소가 25%에 이르고 있음을 가정
- 인간의 건강: 돼지풀에 의한 건강을 보호하기 위한 의약품 비용으로 1년에 303유로가 소요되며, 그 외 의사와 간호사의 컨설팅 및 진단 비용 소요(이 부문의 목적 비용을 산정하기 위해서는 의사와 간호사의 국가별 임금 시간과 수준을 추가해야 함)
- 작업 생산성: 돼지풀에 의한 알레르기에 의해 고통을 받는 생산직 종사자의 생산성 저하이며, 작업 생산성의 1.5% 가량이 돼지풀에 의해 감소
- 모니터링과 방제 노력: 농경지에서 돼지풀의 방제를 위한 제초제의 사용 비용(농지에서 돼지풀을 방제하기 위하여 최소 1년에 1종류의 추가적인 제초제 적용이 필요. 이에 대한 제초제 구입비용과 살포비용)과 돼지풀이 자라는 도시 취약지역에서의 돼지풀 방제 비용. 모니터링 비용에는 정보 캠페인과 인터넷 등을 통한 보고비용 등이 추가로 포함되어야 한다.

돼지풀에 의한 경제적 영향을 추정하는 작업에서 몇 가지 주요한 변수에 대한 가정과 불확실성을 고려하면, 돼지풀이 농장과 사람의 건강에 미치는 영향과 관련해 현재 지불하고 있는 비용은 매년 45억 유로이다(29.5억~90.2억 유로/년). 이중에서 인간의 건강 2~10%, 제초제 처리 등을 포함한 농업생산성 감소 15-35%, 작업 생산성 감소 1.5~5%에 해당한다. 기후변화를 분석에 포함시키면, 돼지풀에 의한 경제적 영향은 2032년까지 점차 증가한다. 기후변화에 따라 독일과 프랑스, 폴란드를 포함하는 대부분의 유럽 지역에서는 돼지풀에 의한 경제적 훼손이 늘어날 것으로 예측된다. 돼지풀의 방제가 이루어질 경우, 돼지풀에 의한 미래의 영향은 크게 감소할 것으로 예측된다. 기후변화가 없는 시나리오 하에 향후 20년간 돼지풀에 의한 경제적 영향은 약 3% 증가할 것으로 예측된다. 기후변화와 더불어 돼지풀의 적정한 방제가 이루어질 경우, 돼지풀에 의한 경제적 영향은 약 25% 감소될 것으로 예측된다 (Bullock et al., 2013).

바. 작업 6: 두 개의 모델 개발 – 기후변화 시나리오와 정책 시나리오(no action 시나리오 포함)에 의한 돼지풀의 확산을 평가하고 돼지풀의 위해성(영향) 평가

1) 방법

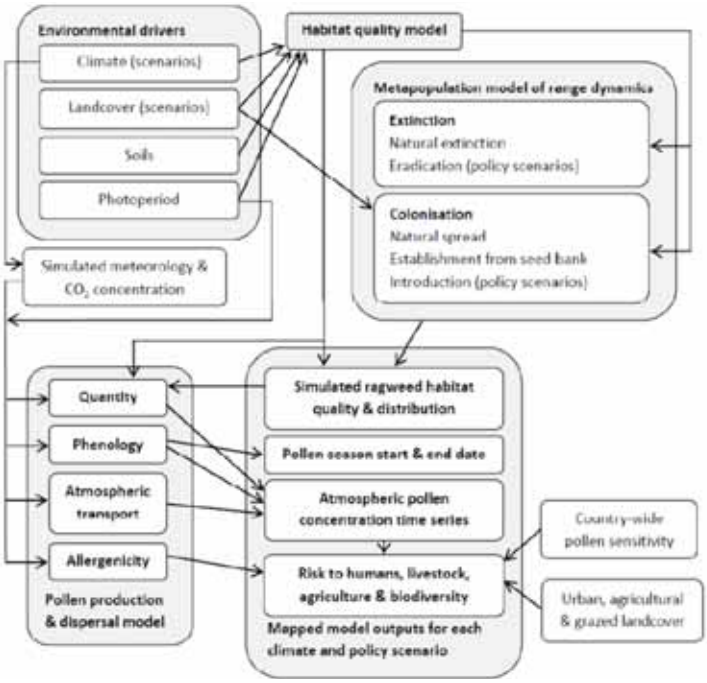
기후변화에 따라 돼지풀이 확산되는 것을 예측하기 위하여 기후, 토지의 이용과 정책 영향을 모델링하였다. 유럽에서 돼지풀의 확산은 기후변화, 토지이용 변화, 돼지풀 씨앗이 포함된 곡물/원예종자의 수입 정도(양과 빈도)에 따라 달리 나타난다. 돼지풀의 확산에 관한 유럽지역의 역사에 근거하여 현재 돼지풀 분포를 확인/예측하는 모델을 개발하였다. 모델은 기후변화, 토지이용 변화, 지역에서의 씨앗 확산 및 분산[23], 수입하여 도입되는 곡물/원예 종사에 묻어 들어오는 새로운 돼지풀의 유입 정도를 요인으로 한 것이다. 유럽연합에서 서늘한 기후, 지중해 지역 국가에서의 가뭄, 대서양 북부지역 국가에서의 계절성을 돼지풀의 확산 제한 요인으로 선정한 것이다. 제4차 IPCC 보고서의 4개 시나리오(기후변화가 없을 경우, SRES A1b, SRES A2a climate and GRAS, SRES B2/SEDG)[24]를 대상으로 2080년까지의 유럽지역 기후변화를 예측하였다. 돼지풀의 확산자료는 돼지풀의 계절학, 화분의 확산, 공간범위 변화에 대한 3개의 모델을 수정하여 사용하였다. 계절학 모델은 북미 지역에서의 돼지풀의 성장과 적응 (Deen et al., 1998a; Deen et al., 1998b; Deen et al., 2001) 연구를 기본으로 하고 일부를 수정한 것이다. 이를 토대로 돼지풀의 생활사와 가을 서리에 영향을 받는 점을 고려하여 돼지풀의 분산을 예측한 것이다. 공간범위변화

---

23) 생물종 개체가 모체로부터 시작되는 전생애 이동이다.

24) 4개의 시나리오는 i) 기후변화가 없을 경우, 현재의 기후변화와 토지이용으로 돼지풀의 공간 분포 예측이다. ii) 현재 상태에서 이산화탄소 등 기후변화물질에 대한 배출 통제가 없는 상태에서 예측되는 기후변화의 경우(SRES A1b)이다. 이 시나리오는 경제성장과 국제화가 빠르게 일어나는 경우이다. 도시 외곽지역의 토지이용 변화가 거의 없으며 농업이 최소지역과 최소 인력 이용수준에서 진행되는 경우이다. iii) SRES A2a 기후변화와 경제성장전략(GRAS, GRowth Applied Strategy)이 동시에 일어나는 형태이다. 이는 지구의 온도변화가 가장 크게 상승되는 시나리오이다. 가장 빠른 경제성장으로 도시지역의 확장과 이익이 없는 농업 부지를 없애는 경우이다. iv) SRES B2/SEDG 토지 이용 시나리오이다. 경제성장을 낮추고 배출물질을 최소화하여 지구의 온난화를 방지하는 환경 친화적인 시나리오이다. 부지의 이용으로 도시와 농경지의 확장이 없는 것을 채택하고 있다.

모델(Range Dynamic Model)은 IFM Model(Incidence Function Metapopulation Model)(Hanski et al., 1996)을 식물계절학, 생식, 군집의 정착 과정을 고려하여 확대시킨 것이다. 화분확산은 SILAM (System for Integrated modeLing of Atmospheric coMposition, http://silam.fmi.fi; Sofiev et al., 2012)에 기초하여 돼지풀 화분의 공간 확산 분포를 예측한 것이다. 이 모델에 돼지풀의 공간 분포와 European Aeroallergen Network(EAN)에서 제공하고 있는 화분의 모니터링 결과를 이용한 것으로, SRES 기후변화 A2a, A1b and B2 시나리오하에서 2080년까지 돼지풀 화분의 공간 분포를 예측한 것이다. 이 모델은 작업 7과 9의 향후 20년간 돼지풀의 생물안보와 제어(돼지풀 군집의 방제와 박멸) 효과를 예측하는 데 사용하였다 (그림 3-7) (Bullock et al., 2013).



자료: Bullock et al.(2013)

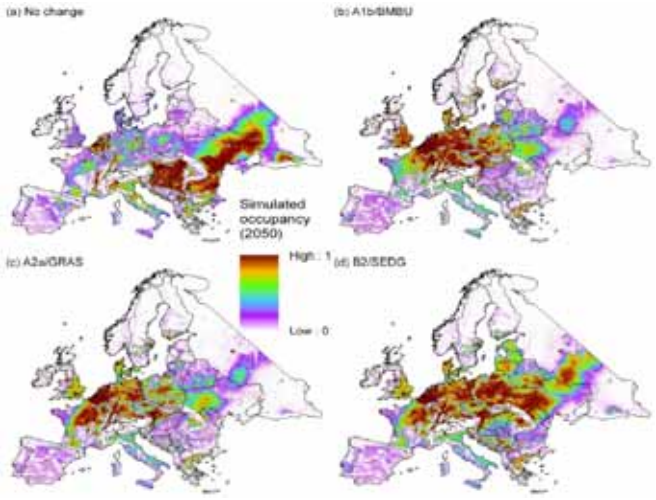
〈그림 3-7〉 기후변화와 돼지풀의 침입과 화분의 확산에 관한 모델의 개요

2) 결과

모델 결과에 따르면 2080년까지 제4차 IPCC 보고서에 제시된 4개 시나리오 대한 돼지풀의 분포, 화분(pollen) 농도 변화가 유럽지역에서 나타나고 있다. 기후변화에 따라 돼지풀은 점차 북쪽으로 확산되며, 새로운 지역에 더욱 큰 영향을 미칠 것으로 예측된다. 돼지풀의 생장에 적절한 조건인 유럽지역에는 돼지풀이 농경지와 도시 부지에 침입하게 된다. 프랑스 동부, 이탈리아 북동부, 패노니안 저지대, 다뉴브 강 동부 지역, 우크라이나 지역에서는 돼지풀 침입이 증가하고 확산될 것으로 예측되었다. 이외 지역에서 돼지풀의 자연적 확산은 예측되지 않으나, 곡물 종자 등에 섞여 돼지풀이 유입되어 일부 지역에서의 돼지풀 확산이 예측되었다. 특히 네덜란드와 벨기에의 경우, 인간에 의해 이러한 돼지풀의 유입과 확산이 예측되었다 (Bullock et al., 2013) (그림 3-8, 그림 3-9).

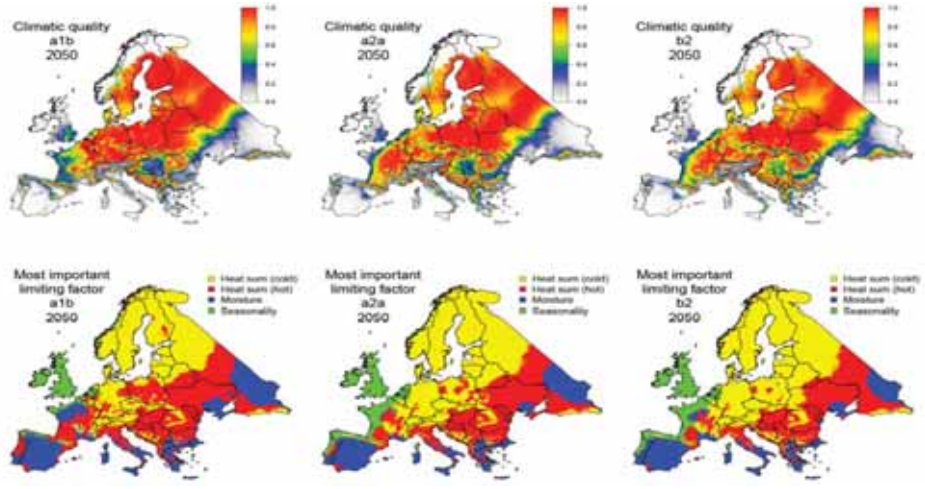
기후변화와 토지이용 변화는 돼지풀의 분포에 주요한 영향을 미친다. 기후변화와 돼지풀의 확산관계를 예측하는 모델에 따르면, 북서유럽 지역에서 기후변화는 농경지와 도시지역까지 돼지풀이 침입할 가능성이 높으며, 2050년에는 발트해안까지 돼지풀이 확산될 것으로 예측되었다. 기후변화와 토지이용을 복합적으로 고려할 때, 독일, 네덜란드, 벨기에, 프랑스 북동부, 영국 남부, 체코, 폴란드, 우크라이나 서부지역에서는 도시지역과 농경지에서 돼지풀의 확산이 더욱 심각하며 사람의 건강에 미치는 영향이 대단히 클 것으로 예측하고 있다 (Bullock et al., 2013) (그림 3-10).

돼지풀의 지역적인 분포는 돼지풀의 분산 특성과는 달리 나타날 것으로 예측되었다. 또한 돼지풀이 확산된 지역에서 돼지풀에 의한 농산물 피해와 건강 피해가 항상 일치하지 않았다. 돼지풀이 확산된 핵심 지역(hot spot)에서는 농산물 피해와 건강 피해가 높다. 그 외 지역에서는 두 요소 간에 유의적인 연관성이 나타나지 않았다. 따라서 돼지풀이 분포되어 있는 것을 모니터링 하는 것은 중요하나, 돼지풀의 분포 결과를 돼지풀에 의한 인간의 건강과 농업적 (피해) 영향의 정도로 직접 연계시키는 것은 무리한 추정일 수 있다. 돼지풀의 성장에 적절하지 않은 기후조건 지역에 유입된 돼지풀이 인간의 건강과 농업에 미치는 영향은 미미하다 (Bullock et al., 2013) (그림 3-11).



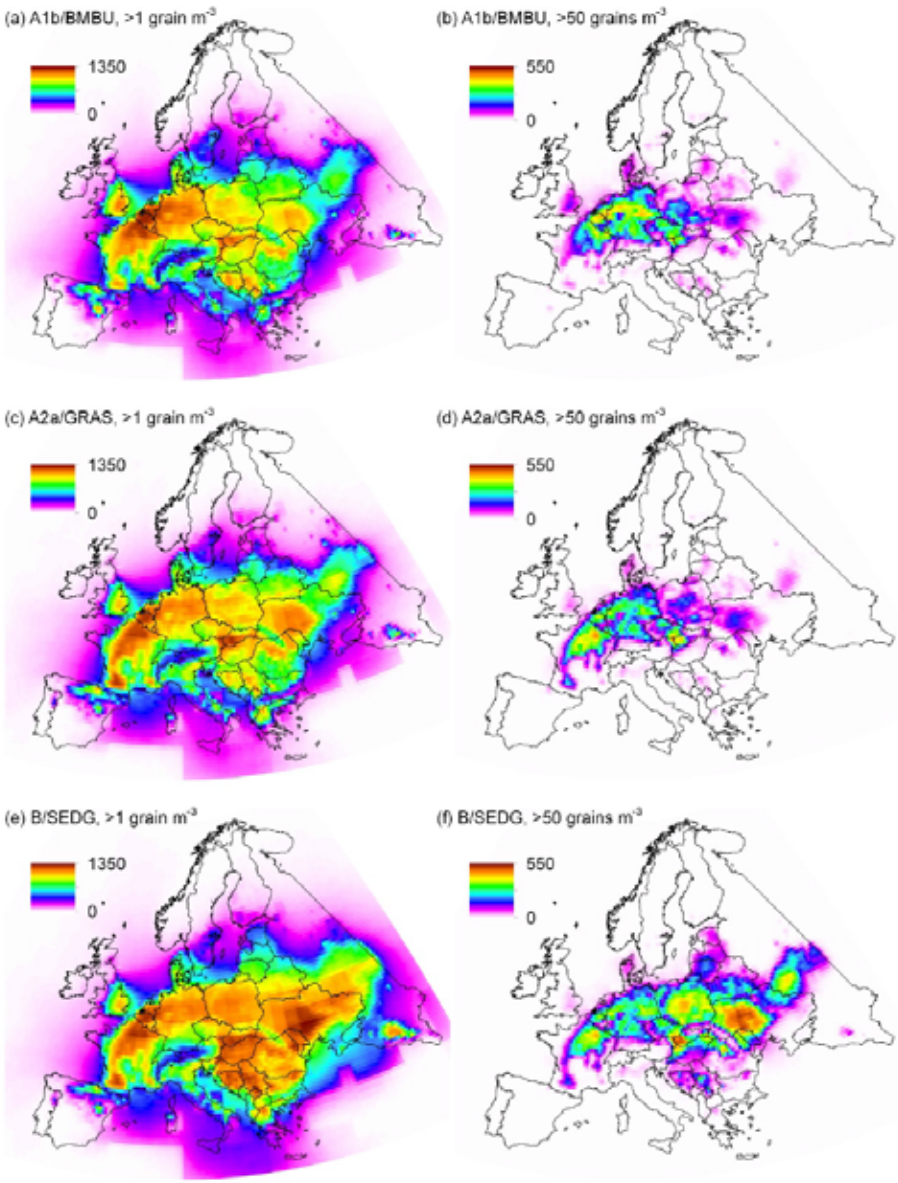
자료: Bullock et al.(2013)

〈그림 3-8〉 IPCC 제4차 보고서 4개 시나리오와 부지의 이용 변화 시나리오에 의한 유럽의 돼지풀 2050년 분포 예측



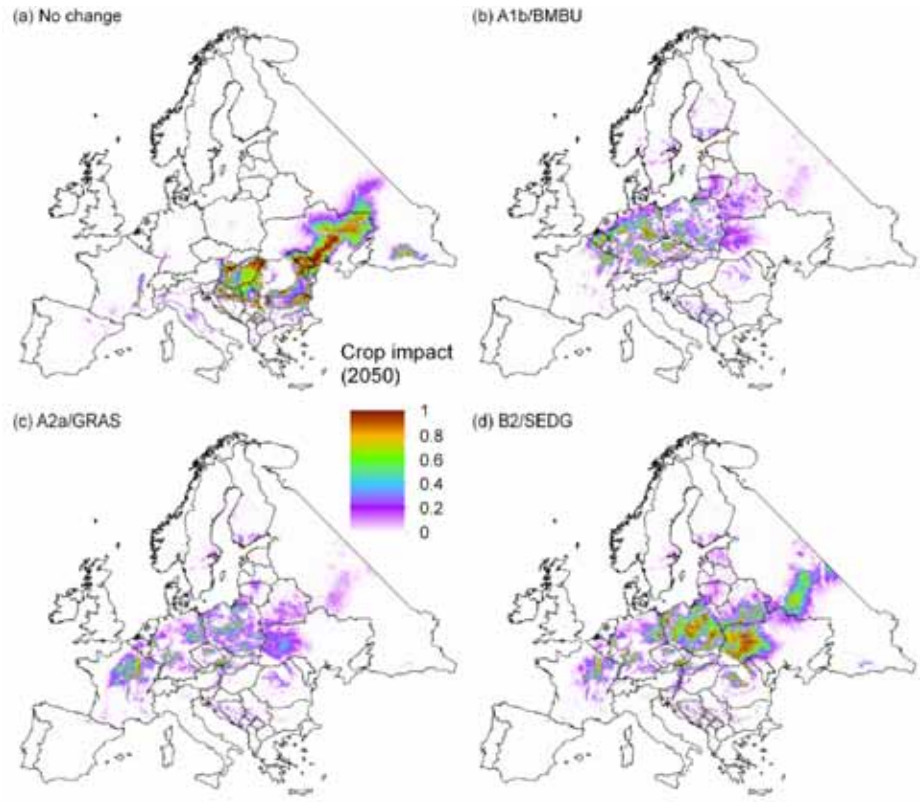
자료: Bullock et al.(2013)

〈그림 3-9〉 IPCC 제4차 보고서 4개 시나리오에 따라 제시된 2050년 유럽의 돼지풀 생태에 영향을 미치는 기후 질과 주요 기후 제한 인자



자료: Bullock et al.(2013)

〈그림 3-10〉 IPCC 제4차 보고서 3개 시나리오에서 제시하고 있는 2050년 유럽의 돼지풀 화분 농도(1-50개/m^3) 분포



자료: Bullock et al.(2013)

〈그림 3-11〉 IPCC 제4차 보고서 4개 시나리오별 돼지풀이 2050년 유럽의 농업에 미치는 영향

반면, 현재 돼지풀이 심각하게 확산되어 있는 동부 유럽지역에서는 돼지풀의 개체수가 감소할 것이고, 돼지풀에 의한 영향이 감소할 것으로 예측되었다. 이는 돼지풀이 생장하기에는 높은 온도와 농경지의 이용변화가 예측되기 때문이다. 물론 돼지풀 분포지역에 대한 예측에는 미래의 기후변화와 토지 이용변화에 대한 불확실성이 포함되어 있다. 돼지풀의 방제와 국가의 생물안보 정책은 돼지풀의 제한적인 확산과 영향에 주요한 영향을 미친다. 2013년에 시작해 20년간 운영되는 유럽의 침입외래종에 대한 프로그램이 효과적으로 진행될 경우, 돼지풀의 개체 수는 농경지역에서 매년 5% 감소하게 되어 돼지풀의 영향을

크게 떨어뜨릴 것으로 예측되었다. 특히 기후변화에 따른 돼지풀의 생태적 변화를 제어하는 데 초점을 맞출 경우, 향후 20년간 돼지풀의 개체 수는 현저하게 감소할 것으로 예측되었다. 또한 국가의 생물안보를 강화하여 항구 등을 통해 곡물에 섞여 새로이 유입되는 돼지풀(씨앗)을 사전에 차단한다면 효과가 배로 증가될 것으로 예측되었다 (Bullock et al., 2013).

사. 작업 7과 9: 돼지풀의 향후 유입과 확산을 제어, 방제, 박멸하기 위한 현재의 정책과 수단 도출

1) 방법

작업 7과 9는 연구재원, 법적수단, 기계적이고 화학적인 수단, 공공인식 캠페인, 모니터링 프로그램 등을 포함한다. 두 작업의 이행을 구분하는 것에는 어려움이 있으며, 실제 현장에서의 행동단계에서 작업 7과 9가 동시에 병행하여 이루어졌다 (Bullock et al., 2013).

작업 7. 유럽연합 국가들의 돼지풀에 대한 방제정책과 이행을 검토하고 악영향을 감소시키도록 한다.
- 돼지풀의 추가 유입과 확산을 방제하는 연구가 유럽연합 27개 회원국에 초점을 두고 진행되었다. 이 연구에는 인근 유럽국인 스위스, 크로아티아, 세르비아, 우크라이나, 몰도바와 벨라루스가 포함되었다.

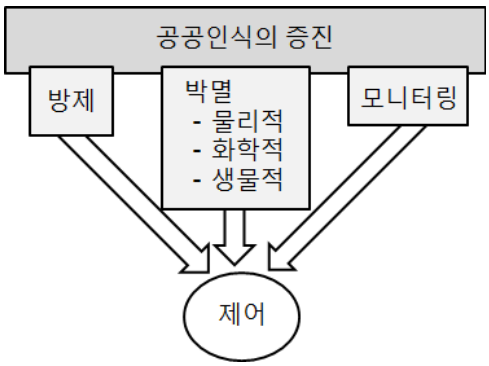
작업 9. 돼지풀의 방제를 위한 유럽연합 회원국들과 인근 영향 국가들(스위스와 크로아티아)의 최근 사업에 대한 검토
- 돼지풀을 박멸하기 위한 기존의 수단과 방법에 대한 정보를 축적하였다. 유럽연합 27개 회원국에 초점을 두었고, 인근 영향 국가를 포함한다. 돼지풀의 박멸 수단을 일반적인 방제수단과 구분하는 것이 어렵기 때문에 작업 7과 9를 병행하여 함께 보고하였다.

정보자료의 수집은 유럽연합 27개 회원국에 초점을 두어 수행하였으며, 그 외 유럽연합 국가에 영향을 주는 인근 국가의 정보를 포함하고 있다. 돼지풀의 방제/박멸 수단이 적용되는 대상은 i) 농경지와 식량생산 - 농산업, ii) 도로 운송 시스템, iii) 건설 산업, iv) 철도

운송시스템, v) 수로, 그리고 vi) 동물에 의한 확산이었다. 돼지풀의 가능한 제어 전략으로는 i) 방제, ii) 교육, iii) 공공인식 증진, vi) 모니터링을 평가하였다. 돼지풀의 가능한 제어 전략 요소로는 i) 공공인식의 증진, ii) 박멸, iii) 모니터링, vi) 방제를 대상으로 하였다. 돼지풀의 (모든) 방제수단으로 i) 온라인 정보 제공, ii) 정보 캠페인, iii) 국경에서의 외래종 통제, iv) 깨끗한 농기구와 차량 사용, v) 정부의 프로그램 - 공공인식의 증진, vi) 오염종자 및 토양의 처리, vii) 법적 규제, viii) 생물학적 수단, ix) 물리적 수단, x) 화학적 수단, xi) 워킹 그룹(이해당사자들이 관여한 집단), xii) 조사 및 지도화(mapping)를 대상으로 하였다. 돼지풀에 대한 공공인식의 증진 수단으로 i) 온라인 정보, ii) 정보 캠페인, iii) 정부 프로그램을 대상으로 하였다. 돼지풀의 모니터링 수단으로 i) 정부 프로그램, ii) 워킹 그룹, iii) 조사와 지도화를 대상으로 하였다. 돼지풀 박멸 수단으로 i) 생물학적 박멸(천적을 이용한 돼지풀의 박멸), ii) 물리적 박멸(베어내기, 멀칭, 태워버림, 뿌리까지 뽑아냄), iii) 화학적 박멸(농약 처리)을 대상으로 하였다 (Bullock et al., 2013).

2) 결과

돼지풀의 개체수를 방제하는 방법과 박멸을 분리하는 것은 가능하지 않다. 박멸(eradication)이란 지역에서 외래종을 완전하게 제거하는 것이다. 방제(prevention)란 생물종의 유입을 방지하고 지역의 외래종의 개체수를 감소 또는 영향을 저감시키는 것이다. 외래종의 박멸이 현실적으로 가능하지 않은 상태에서 박멸을 목표로 하는 노력은 방제와 다르지 않다. 유럽연합 대부분 회원국가에서는 기후변화에 의한 돼지풀의 확산에 대응하는 노력으로 방제에 초점을 두고 있다 (Bullock et al., 2013) <그림 3-12>.



자료: Bullock et al.(2013)

〈그림 3-12〉 돼지풀의 제어전략 개념도

돼지풀의 침입에 대응하는 것은 유럽 국가마다 다르다. 유럽연합의 6개국(체코, 덴마크, 루마니아, 라트비아, 몰도바, 폴란드)에서는 돼지풀의 방제에 어떠한 노력도 하고 있지 않다. 유입방지, 박멸, 공공인식의 증가와 모니터링은 돼지풀의 방제전략이다. 성공적인 돼지풀의 방제는 유입방지, 박멸, 공공인식의 증가와 모니터링이 복합적으로 이루어져야 한다. 방지가 우선되어야 하고, 돼지풀이 개화기 이전에 나타나기 시작한다면 박멸을 시도할 수 있다. 박멸 작업이 시작되었다면 매년 지속적으로 이루어져야 한다. 돼지풀을 현장에서 즉시 발견하기 위해서는 돼지풀에 대한 공공의 인식과 더불어 모니터링 시스템이 운용되어야 한다. 방제방법은 돼지풀이 생태계에 정착하기 이전에 확산을 방지하는 것이다. 방제는 돼지풀을 제어하기 위한 가장 비용 효과적인 접근방법이다. 오스트리아, 불가리아, 크로아티아, 독일, 이탈리아, 스위스 등의 여러 유럽 국가에서 이 방법을 채택하고 있다. 박멸은 돼지풀 꽃이 피기 전에 제어 수단으로 효과적일 수 있다. 이 수단은 모니터링 시스템과 반드시 병행해야 하며 돼지풀이 완전히 사라지기 전까지 매년 지속적으로 이행해야 한다. 이를 수행하기 위해서는 공공인식의 증진 캠페인이 주요한 성공요인이다 (그림 3-12). 돼지풀이 어떠한 지역에 정착한 이후에는 생물, 물리, 화학적인 어떠한 방법을 동원하더라도 이들을 완전히 박멸하는 것은 상당히 어렵다. 가장 일반적으로 이루어지고 있는 방제는 법적인 규제, 돼지풀에 오염된 토양과 종자의 제어 또는 구제(驅除), 작물의

윤작과 돼지풀에 경쟁력 있는 작물로의 대체 재배 등과 같은 생물학적 수단, 제초제 사용 등의 화학적 수단, 돼지풀의 물리적인 제거 또는 밭을 갈아엎는 물리적 수단이다. 지속적인 모니터링은 방제의 효과적인 진행을 확인하기 위하여 필요하다. 야생에서 발견되는 돼지풀 개체(군락)에 대한 정보는 이들 개체군을 효과적으로 감소시키는 성공(실패) 요소이다. 모니터링 시스템은 전문가와 일반인에 의한 신고 등에 의해 이루어질 수 있다. 벨기에, 크로아티아, 체코, 덴마크, 프랑스, 이탈리아, 헝가리, 라트비아, 폴란드, 스위스, 우크라이나를 포함한 유럽 여러 국가에서는 부지 소유자를 포함하여 일반 국민들이 위해외래종을 발견할 시, 신고하는 것이 법적인 의무로 되어 있다. 페이스북, 트위터, 스마트폰 애플리케이션(앱) 등의 소셜 미디어는 돼지풀의 생태적 특성과 방제의 효과를 모니터링하는 데 주요한 수단으로 이용될 수 있다. 소셜 네트워크와 스마트폰의 앱을 이용한 시스템은 전문가와 일반인을 이어주는 효과적인 수단이며, 위해외래종의 모니터링에 참여하고 위해외래종을 신고할 수 있는 수단이다 (Bullock et al., 2013).

박멸에는 생물학적·물리적·화학적 형태가 있다. 생물학적 방제는 동물을 방목하여 돼지풀을 먹게 하거나 또는 농경지에 돼지풀에 경쟁력 있는 작물을 재배하는 것으로, 오스트리아, 독일, 헝가리에서 사용하고 있다. 돼지풀을 방제하기 위한 효과적인 생물학적 방제 생물은 없다. 물리적 박멸은 땅을 갈아엎거나, 멀칭, 태우거나 기계적 제초 작업으로 오스트리아, 크로아티아, 독일, 헝가리, 세르비아, 스위스 등에서 이행되고 있다. 이는 노동력과 비용이 많이 드는 방법이다. 화학적 방법은 제초제(글리포세이트, 메소트리온, 크로파이라리드, MCPP, 플로라설람 등)를 사용하는 것으로 오스트리아, 크로아티아, 독일, 헝가리, 세르비아 등에서 사용되고 있으며, 가장 일반적인 돼지풀 방제 방법이다. 계획된 공공인식 증진 프로그램의 이행은 성공적인 돼지풀의 방제에 주요한 핵심 수단이다. 이해 당사자들이 참여하고 이들의 능력을 활용하는 가장 효과적인 방법이다. 스위스, 독일 등에서는 공공인식에 대한 프로그램이 효과적으로 운용되고 있다. 농산업 등 관련 기업을 포함하는 관련 사회부문에서 이해 당사자의 역할 이행이 중요하다. 농산업, 건설업, 운송, 정원, 공원, 자연서식처의 관리와 연계되어 있는 산업체들은 돼지풀의 모니터링과 확산 등에

밀접하게 연관되어 있다. 이 부문에 종사하는 사람들에게 돼지풀에 대한 모니터링 역할과 방제의무를 부여할 수 있다. 더욱이 정부가 이 부문에 종사하는 사람들에게 돼지풀에 대한 모니터링 역할과 방제의무를 부여하고, 이를 이행시키는 것은 최소의 투자로 큰 효과를 얻을 수 있는 수단이 될 수 있다 (Bullock et al., 2013).

돼지풀의 서식처에 따라 적절한 제어수단이 제공되어야 하며, 이들 수단이 실제 유럽 연합 회원국에 사용되는 우선순위는 다음 (표 3-4)와 같다 (Bullock et al., 2013).

- 농경지: 화학적 처리 > 법적 규제, 물리적 수단 > 생물학적 수단 > 정부 프로그램 > 오염종자 및 토양 처리, 워킹 그룹, 감시와 지도화, 정보 캠페인 > 국경 통제, 깨끗한 농기구 및 운송수단 사용
- 건축현장: 법적 규제 > 물리적 수단 > 정부 프로그램, 워킹 그룹 > 오염종자 및 토양 처리, 조사 및 지도화 > 정보 캠페인, 깨끗한 농기구 및 운송수단 사용, 화학적 수단
- 도로 인근 지역: 물리적 수단 > 법적 규제 > 화학적 수단 > 생물학적 수단 > 워킹 그룹, 조사 및 지도화 > 정부 프로그램 > 정보 캠페인
- 정원 및 공원: 물리적 수단 > 법적 규제 > 정부 프로그램, 화학적 수단
- 자연 서식처: 물리적 수단 > 법적 규제 > 정부 프로그램 > 정보 캠페인, 워킹 그룹, 조사와 지도화

〈표 3-4〉 돼지풀의 제어에 일반적으로 이용되는 수단과 협력적인 사용 수단, 성공 조건

수단	협력적인 사용 수단	성공 조건
깨끗한 농기구와 차량 사용	정보 캠페인	일하는 사람의 가용 정도
	법적 규제	재원
		완결하고자 하는 의도
경쟁적인 식물의 도입	베어내기	보상 지불
	잡초제거	지속적 확인
		적절한 유지
돼지풀 오염종자와 토양의 처리	깨끗한 농기구와 차량 사용	유럽연합에서 널리 사용되는 수단
	정보 캠페인	재원
	법적 규제	공공의 참여
	감독 행위	
제어 경작	농약	초기 발견
	법적 규제	재원
	베어내기	관련 여러 기관의 협력
	조사와 지도화	
윤작	농약	
	베어내기	
농기계 경작	농약	재원
		적절한 시간과 빈도
정부 프로그램	정보 캠페인	유럽연합에서 널리 사용되는 수단
	보상 지불	평가
	법적 규제	적절한 시간과 빈도
	위반자 처벌	훈련
	감독 행위	
농약	베어내기	재원
	정보 캠페인	다년도 이행 수단
	감독 행위	적절한 이행
	윤작	공공의 참여
		적절한 시간과 빈도
		훈련
		기후조건
정보 캠페인	법적 규제	관련 여러 기관의 협력
	다양한 워크샵	초기 발견
	조사와 지도화	
법/규제	윤작	관련 여러 기관의 협력
	농약	공공 참여
	정보 캠페인	보고 및 관찰
	베어내기	적절한 시간과 빈도
	조사 및 지도화	

	위반자 처벌	
	잡초제거	
인력 이용 제거	정보 캠페인	재원
	법적 규제	정치적 지원
		적절한 집행
		공공 참여
		훈련
기계 경작	감독 행위	반복
		적절한 시간과 빈도
베어내기	정보 캠페인	일하는 사람들의 가용성
	농약	재원
	법적 규제	적절한 집행
	온라인 정보	공공 참여
	파종	적절한 시간과 빈도
	워킹 그룹	훈련된 직원
		기후 조건
멀칭	농약	다년도 이행 수단
	베어내기	적절한 시간과 빈도
온라인 정보	법적 규제	관련 여러 기관의 협력
	조사 및 지도화	
태워버림	베어내기	정부 기관의 지원
	잡초제거	
감독 행위	정보 켐페인	지속성
	법적 규제	평가
		보고 및 관찰
		훈련
조사와 지도화	법적 규제	유럽연합에서 널리 사용되는 수단
	위반자 처벌	계획
		훈련
잡초제거	정보 캠페인	가용한 노동력
	농약	재원
	베어내기	다년도 이행 수단
	멀칭	적절한 시간과 빈도
	감독 행위	정치적 지원
	워킹 그룹	공공 참여
워킹그룹	정보 캠페인	지역 자원
	감독 행위	관련 여러 기관의 협력
		다년도 이행 수단
		공공 참여

자료: Bullock et al.(2013)

아. 작업 8: 유럽의 빠른 경보체계의 효과적 이행을 위한 필요 요소

1) 방법

돼지풀의 유입, 확산, 경보 등에 대한 유럽연합 회원국들의 국가시스템을 수집하고 분석하였다. 그 외 미국, 캐나다, 호주와 세계적 차원에서의 시스템을 포함하였다 (Bullock et al., 2013).

2) 결과

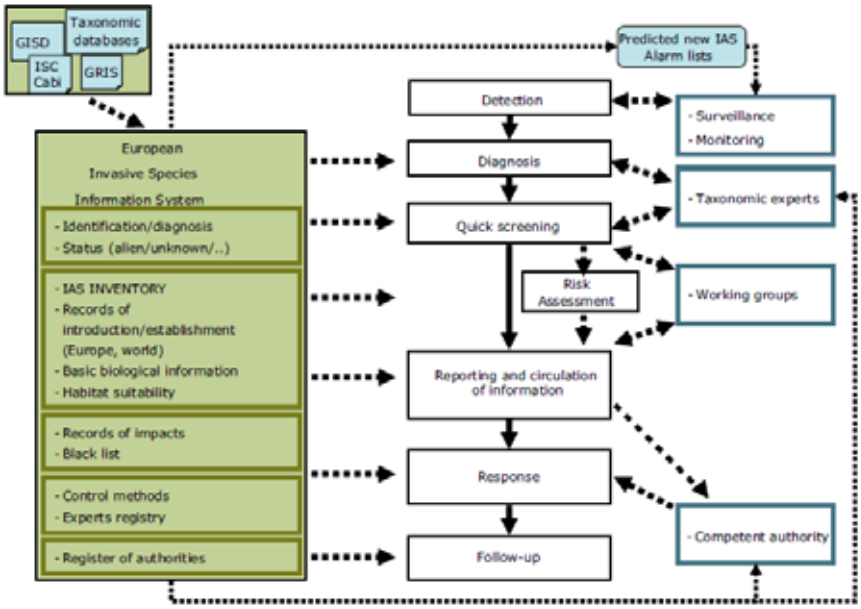
돼지풀을 포함한 외래종에 대한 초기경보 및 빠른 대응체계(Early Warning and Rapid Response system, EWRR)는 국가적 차원에서 개발되고 마련되었다. 유럽연합 국가 중에서 최소 13개국이 돼지풀을 초기에 발견, 평가, 보고 및 방제를 이행하는 국가 체계가 갖추어져 있다 (표 3-5). 새로운 국가(지역)에 유입된 이후에 침입외래종의 제어는 대단히 어렵고 비용이 많이 들어가며, 반면 초기 대응과 방제가 성공적이며 비용효과적인 접근방법이라는 인식과 사실에 기인한 것이다. EWRR과 Early Warning Systems(EWS)은 상호 교환하여 사용할 수 있다 (Bullock et al., 2013).

〈표 3-5〉 침입외래종에 대한 초기 경보 시스템

유럽	유럽 외
- European and Mediterranean Plant Protection Organization (EPPO) Website: www.eppo.int - European Network on Invasive Alien Species (NOBANIS) Website: www.nobanis.org - Rapid Alert System for Food and Feed (RASFF) Website:http://ec.europa.eufood/food/rapidalert/ index_en.htm	- 미국: 연방정부의 Early Detection and Rapid Response (EDRR) - 호주: 연방정부 차원의 초기 경보 시스템은 없으나 Australian Weeds Strategy (AWS)의 일환으로 초기 검측 및 빠른 대응체계가 가동되고 있음 Website: www.weeds.gov.au - 캐나다: 2004년 'An Invasive Alien Species Strategy for Canada' 마련과 이행 Website: www.ec.gc.ca/eee-ias

자료: Bullock et al.(2013)

국가의 조직체계는 온라인 포털과 같은 형태부터 공식적인 조직까지 다양하다. 침입외래종의 초기경보 및 대응 체계(EWRR) 일부로 돼지풀이 포함되어 있다. 유럽 네트워크와 체계가 이미 돼지풀을 포함한 침입외래종의 EWRR로 기능을 발휘하고 있다 (그림 3-13).



자료: EEA(2010), Bullock et al.(2013)

〈그림 3-13〉 유럽의 초기 경보 및 빠른 대응 체계 구조

다수의 유럽 데이터베이스와 정보 네트워크가 개발되어 왔다. 돼지풀을 포함한 침입외래종의 정보와 데이터베이스를 유럽과 세계적으로 다루고 있는 체계적인 네트워크가 다수 존재하고 있다. DAISIE는 프로젝트로 개발되었으며 현재 지속적이고 정기적인 업데이트는 되고 있지 않다. EPPO PQR database는 다국적으로 연결되어 있는 국가간 조직으로 장기간에 걸쳐 진행되고 있는 체계이다 (표 3-6). 각 체계의 장단점이 있으며, 체계를 연합하는 것이 효과적인 유럽정보네트워크가 될 수 있다 (Bullock et al., 2013).

〈표 3-6〉 침입외래종에 대한 데이터베이스 시스템

유럽	글로벌
- European and Mediterranean Plant Protection Organization (EPPO) Website: www.eppo.int - NOBANIS – European Network on Invasive Alien Species Website: www.nobanis.org - Delivering Alien Invasive Species Inventories for Europe (DAISIE) Website: www.europe-aliens.org.	- Regional Euro-Asian Biological Invasions Centre Website: www.reabic.net - Global Invasive Species Database Website: www.issg.org/database - Global Invasive Species Information Network Website: www.gisin.org

자료: Bullock et al.(2013)

관측 포털의 개발은 돼지풀의 모니터링에 도움이 된다. Google Earth와 같은 지형지리 정보를 포함하는 다수의 관측 포털이 있으며, 이들 관측 포털에는 돼지풀과 같은 생물종의 정보를 포함시킬 수 있다. 유럽의 NatureWatch component of EEA's Eye on Earth를 통해 유럽 전역에서 돼지풀의 관측 자료를 제공하고 신고할 수 있다. 이 시스템은 모니터링 시스템과는 다르다. 유럽에서 돼지풀의 진행 상태를 장기적으로 모니터링하는 프로그램은 없다. 돼지풀의 화분 모니터링에 초점을 두고 모니터링을 진행하는 프로그램은 있다. 일부 국가에서는 돼지풀의 열매에 초점을 두고 이들이 혼재된 곡물의 종자와 새의 모이에서 돼지풀을 국가 조직에서 모니터링하고 있다. 국가의 돼지풀 방제 캠페인이 개발되고 있다. 국가 차원에서 돼지풀에 대한 인식 강화가 진행되고 있다. 유럽 차원에서의 돼지풀에 대한 캠페인은 필요하지 않을 수 있으나 방제기술이나 방법 등에 대한 협력은 필요하다. 새로운 기술은 돼지풀의 방제에 크게 기여하고 있다. 소셜미디어 등 온라인 프로그램에 의한 정보 교환과 인식 증진은 유럽 차원에서 돼지풀에 대한 정보 교환과 인식을 증진시키는 중요한 수단이다. 원격탐사 기술은 돼지풀의 개체 위치를 확인하는 주요 수단으로 이용할 수 있다. DNA 바코드 기술은 국경 간 돼지풀 이동을 모니터링하는 수단으로 사용될 수 있다 (Bullock et al., 2013).

유럽의 초기경보 및 빠른 대응체계(EWRR)는 기존의 관련 네트워크에 기반을 두어야 하며, 이는 기존 네트워크의 협력과 이행 촉진에 초점을 두어야 한다. 침입외래종에 대한

유럽국가 간의 협력, 이행, 노력의 조화를 위한 네트워크 또는 조직이 필요하다. 이 조직으로 기존의 네트워크인 EPPO, EEA/Eionet, EFSA, NOBANIS, DAISIE 들의 협력과 정보의 차이를 채워주는 역할을 담당하고 있다. 최근 설립된 European Alien Species Information Network(EASIN)가 정보네트워크 수준의 기초(근거)를 제공할 수 있으며, 새로운 조직체계와 역할과 의무를 제안하고 있다 (Bullock et al., 2013).

돼지풀의 관리에는 여러 이해당사자들의 역할구분과 분담이 이루어지고 참여해야 한다. 다양하고 여러 분야의 이해당사자들이 국가수준의 돼지풀 관리에 참여하고 있다 (Bullock et al., 2013).

- 비의도적으로 돼지풀의 유입에 관련되어 있는 그룹/사람 - 예, 국제 무역 등을 통해 돼지풀의 씨앗 유입, 운송, 유통에 기여하는 기업/사람 등
- 돼지풀의 유입에 직접 또는 간접적으로 영향을 받는 그룹/사람 - 예, 돼지풀 알레르기 국민, 농부 등
- 돼지풀의 방제 또는 박멸에 직접 또는 간접적으로 기여하는 역할을 하는 반응 그룹/사람 - 예, 정책결정/집행기관, 연구수행자, 방제/박멸 수단 개발자, 공공인식개발자, 농부, 화훼 관련자 등

자. 작업 10: 돼지풀의 정보 및 연구결과 확산 전문가 워크숍 개최

1) 방법

이 연구 보고서에 대해 2012년 7월24일(EC DG Environment, 브뤼셀) 워크숍이 조직되었으며, 2개 부문 Focus Group Discussion(경제적 영향, 유럽에서의 미래 제어 전략)이 진행되었다 (Bullock et al., 2013).

2) 결과

워크숍은 사업의 책임자인 Bullock 교수를 포함하여 사업에 참여한 8인의 전문가가 진행하였으며, 유럽연합 회원국의 침입외래종 정책개발, 침입외래종의 데이터협력, 돼지풀

연구, 돼지풀의 국가 또는 국제 방제, 건강과 알레르기 분야에 관련된 14인의 전문가들이 EC의 승인 하에 참여하였다. 연구 주제에 대한 발표 후, 참여자들 간에 2개 주제(경제적 영향, 유럽에서의 돼지풀 제어전략)에 대한 포커스 그룹논의(Focus Group Discussion)가 이루어졌다. 유럽연합에서의 침입외래종에 대한 새로운 제도가 제안되었으며, 돼지풀의 방제/박멸을 위한 재원과 관련 정보의 지속적인 전달과 확산의 중요성과 이행이 촉구되었다 (Bullock et al., 2013).

〈표 3-7〉 유럽연합에서 돼지풀이 미치는 경제적 영향

(단위: 백만 유로)

	주요 민감 내용	2011년 현재	기후변화에 따른 2032년 예측	
			제어가 없을 경우	제어할 경우
영향	(낮음-높음 시나리오)			
의료비용	돼지풀에 의한 노출 인구(%)	357 (118 - 763)	296	29
농업비용	제초제 사용 후의 작물생산량감소	1,846 (1,302 - 3,307)	1,243	1,050
일 생산량 감소 비용	일 생산량에 대한 추가 영향	164 (49 - 1,361)	340	24
계		2,367 (1,439 - 5,431)	1,879	1,103
제어				
농업	추가적인 제초제 처리	179		66
도시	처리도시지역 면적(%)	~1.6		~8
총 제어비용		180		74
핵심 비계량영향	건설과 여가, 여행 부문에 대한 영향 및 종자 무역의 제한에 따른 비용			
총 영향 및 제어비용		2,548	1,879	1,177

주: 2032년 비용은 2011년 기준으로 산정. 2011년 현재 비용과 동일하게 비교 가능함.
자료: Bullock et al.(2013)

미래 시대에 돼지풀의 경제적 영향은 농경지와 도시지역에서 적정한 돼지풀의 방제와 더불어 생물안보(biosecurity)가 이루어질 경우 현재보다 점차 50%까지 감소할 것으로 예측된다. 1년에 약 4억 유로(이 비용에는 종자 무역에 관련된 규제 이행에 소요되는 비용은 포함되지 않음)의 돼지풀 방제를 통해 2032년에는 1년에 15억 유로의 경제적 영향을 감소시킬 것으로 예측된다. 모델이 갖고 있는 불확실성을 고려하더라도 돼지풀의 방제는 비용 효과적이다. 즉, 유럽지역에서 돼지풀의 방제는 돼지풀의 생장과 번식을 제한하며 기후변화에 따라 나타날 수 있는 새로운 지역에 돼지풀이 미칠 수 있는 생태적이고 경제적인 영향을 줄일 수 있다. 이러한 경제성 분석 결과는 현존하는 과학적 지식과 정보를 이용하여 돼지풀이 유럽에 미치는 경제적 영향을 예측한 것이다. 돼지풀에 의한 경제·사회·환경적 영향을 예측하기 위한 모델과 사용한 자료와 지식에는 한계가 있다. 이를 보완하기 위해서는 돼지풀의 영향을 예측하는 경제성 모델의 신뢰성을 높일 수 있는 추가적인 정보와 자료, 그리고 자료에 대한 표준화 등이 있어야 한다 (Bullock et al., 2013).

6. 시사점

가. 침입외래종의 생태계 기반 관리

생태계기반관리의 개념은 기후변화에 따른 생물종을 관리함에 있어 지역적이며 지역주민들의 참여를 기본으로 한다. 생태계기반관리는 생물다양성 보전 방안의 주요 구성요소가 되는 전통적인 접근법(생물권보전지역, 보호지역 지정, 단일 생물종 복원 프로그램 등)을 대체하는 것이 아니다. 이 개념은 이행 단계에서 생물(organisms)과 생태계, 그 환경 간의 역동적인 과정을 이해하기 위한 과학적 수단과 방법의 이용에 기초를 두며, 인간을 생태계의 통합적인 요소로 간주하여 인간의 문화적 다양성을 생태계의 주요 구성요소로 포함하고 있다. 또한 토양자원, 수자원 및 생물자원의 통합 관리를 장기적인 관점에서 시도하고 있다 <표 3-8>.

외래종의 생태계기반관리는 기후변화에 따른 외래종의 생리, 생태학적인 변화를 확인하고 지역 주민들의 참여를 외래종 관리의 기본으로 한다. 외래종의 실제적인 관리단계에서

유념할 수 있는 생물다양성협약의 생태계기반관리(생태계접근)의 원칙과 이행지침은 생태계의 지속가능한 관리를 위한 관련 정부 기관 간 협력과 지식의 공유, 서식처와 생물종의 보호, 공공 교육과 참여, 인간과 생물종간, 생태계 요소 간에 발생하는 상호 작용 등 다양한 분야를 광범위하게 제시한다.

〈표 3-8〉 생태계기반관리 개념의 주요 내용

접근 대상	개별 생물종 → 생태계
정책 접근 규모	작고 한정적인 규모 → 다각적 규모
접근 시기	단기적 관점 → 장기적 관점
인간과 생태계	독립적 요소 → 인간은 통합적인 요소의 한 부분
자연자원의 이용 및 관리	인간의 수요를 고려한 생산과 관리 → 생태계 산물과 서비스를 고려한 지속가능한 생산과 관리

현실적으로 생태계의 복합적이고 역동적인 특성상 이들 원칙을 실제 외래종 관리정책의 이행단계에서 적용하고, 그 효율성을 제시하는 것은 쉽지 않다 (Tallis et al., 2010). 개념을 현실에 적용하기 위한 생태계 체계 전반에 대한 지식이 부족하기 때문이다. 또한 현재 적용할 수 있는 생태계기반관리의 효율성을 제시하기 위해서는 이와 유사한 사례의 결과와 비교·분석이 이루어져야 하나, 현재로서는 생태계기반관리의 효과를 비교할 수 있는 유사한 비교 대상을 찾을 수 없다 (Slocombe, 1998). 그리고 실제 생태계의 보전과 지속가능한 이용 단계에서 생물다양성협약에서 제기된 모든 생태계접근원칙과 이행지침을 따르기는 어렵기 때문에 실제 생태계기반관리 개념과 원칙의 현장 적용단계에서는 생태계기반관리의 이행 성공요소를 우선 고려하는 것이 필요하다 (Mateu et al., 2015; Tallis et al., 2010).

그동안 생태계기반관리의 개념과 이행방법과 수단, 그리고 이에 연계된 우리나라에서의 여건 등을 고려할 때, 국내에서 침입외래종의 생태계기반관리 전략을 수립하고 이행할 시, 고려해야 할 요소를 다음과 같이 도출할 수 있다.

첫째, 침입외래종의 생물종별 접근(species-specific approach)이다. 기후변화에 대한

침입외래종의 반응은 종별로 달리 나타난다. Hellmann et al.(2008)은 다양한 실제 사례 분석을 통해 외래종이 성공적으로 새로운 지역에 정착하는 단계를 i) 이주단계(Transport stage), ii) 개척단계(Colonization stage), iii) 정착단계(Establishment stage), iv) 확산단계(Landscape spread stage)로 구분하였으며, 각각의 외래종이 자연생태계에서 우점하여 침입외래종이 되기 위해서는 단계별로 다양한 환경장벽을 통과해야 함을 보여주고 있다. 또한 기후변화에 따른 침입외래종의 반응을 직접 또는 간접적인 경로를 거쳐서 5가지의 형태로 구분하고 있다 (표 3-9). 이들 5가지 주요 가설 및 사례는 기후변화에 따라 나타나는 각각의 외래종별 생리, 생태적인 변화, 그리고 도입 및 운송 경로 등이 달라짐을 구체적으로 보여주고 있다.

〈표 3-9〉 기후변화에 따른 침입외래종의 변화를 보여주는 5가지 주요 가설 및 사례

가능한 결과	사례 외래종	주요 가설
1. 침입외래종의 운송 경로와 도입 기작을 변화	- monkey goby(*Neogobius fluviatilis*): 오대호에서 운송기간이 늘어나면서 침입가능성이 높아짐 (Kolar & Lodge, 2002) - Florida torreya(*Torreya taxifolia*): 고유종의 서식지가 북쪽으로 이동 (McLachlan et al., 2007) - switchgrass(*Panicum virgatum*): 고유영역 외 지역에 바이오연료용으로 재배 (Tilman et al., 2006)	상업 및 오락용 가치가 높아짐에 따른 인간에 의한 운송 증가로 외래종이 확산됨
2.침입외래종의 기후 적응 요인을 변화	- white-cloud mountain minnow (*Tanichthys albonubes*): 오대호의 수온이 증가할 경우, 사람들이 취미생활로 키우는 어항용 물고기들이 오대호에 확산 (Rixon et al., 2005)	기후변화에 따라 현재 야생에 정착하지 못한 외래종들의 정착 가능성이 높아지게 됨. 현재의 외래종들이 기후변화에 따라 개체수를 늘려갈 수 있음. 기후변화에 따라 외래종과 상호 공생중인 고유종의 생리적인 적응성이 낮아질 경우, 외래종이 고유종의 서식지를 차지하게 됨. 현재의 침입외래종이 기후변화에 따라 생리, 생태적 특성이 변화되면서 침입성이 감소될 수 있음
3. 현존하는 침입외래종의 분포를 변화	- brook (*Salvelinus fontinalis*) & brown (*Salmo trutta*) trout: 수온에 따라 서식이 달라짐 (Rahel & Olden, 2008)	온도에 따라 적응 능력이 크게 변화됨. 또한 강우의 강도와 패턴, 습도, 물의 산성화/염화 등에 따라 외래종의 적응력이 크게 변화됨. 특히 빠르게 생장하는 외래종의 경우는 대부분이 기후변화에 빠르게 적응함

4. 현존하는 침입외래종의 생태계영향을 변화	- exotic ascidians(*Styela clava* and *Molgula manhattensis*): (Carlton, 2000) - red imported fire ant(*Solenopsis invicta*): (Morrison et al., 2005)	외래종의 개체군의 밀도가 변화되며, 이는 고유종의 개체군 생장과 성장에 영향을 미침
5. 관리전략의 효율성을 변화	- water hyacinth (*Eichhornia* spp.): 기후변화에 따라 뉴잉글랜드 지역에서 외래종의 월동이 가능하게 됨(US EPA, 2008) - salt cedar leaf beetle (*Diorhabda elongata*): 생물학적 방제 곤충의 적응능력이 낮아지면서 생물학적 방제 능력이 낮아짐(US EPA, 2008)	현재 추운 지방에서 월동하기 어려운 침입외래종의 기계적인 방제가 더욱 어렵게 됨. 기후변화와 이산화탄소의 농도에 따라 농약에 대한 침입외래종의 저항력이 달라짐에 따라 농약의 효과도 달라짐. 기후변화는 기주와 병원체, 생물학적 방제 생물간의 생태, 생리적 변화를 야기함. 이를 통해 생물학적 방제의 효율성이 달라짐. 침입외래종의 관리방법도 달라짐(예, 강우량이 높아진 지역에서는 침수를 통해 침입외래종을 관리할 수도 있음)

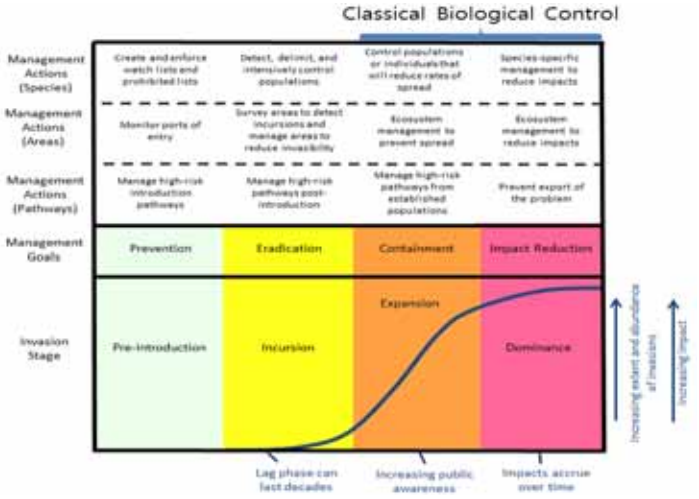
자료: Hellmann et al.(2008)

기후변화에 따른 침입외래종의 생리, 생태적인 변화를 일반화하고, 이에 기반을 둔 관리전략과 수단을 만들어내서는 안 된다. 각각의 외래종별로 생리, 생태적인 특성, 도입 및 운송 경로 등에 대한 과학적인 지식과 정보의 분석이 이루어져야 한다. 생물종에서 생태계 규모로 연결되는 관리계획을 만들어내고 이행하기 위해 취약성 및 위해성 평가를 이용할 수 있다. 이와 더불어 기후변화에 따른 침입외래종의 방제 또는 박멸수단은 침입외래종의 생리, 생태적인 특성, 지역에서의 생태적 특성 등을 고려하여 이루어져야 한다.

침입외래종이 정착 및 확산되는 지역에서 방제 또는 박멸을 선택할 것인가 또는 이후 이행 수단으로 생물·물리·화학적인 방법의 선택은 침입외래종별, 지역의 생태적 특성 등에 따라 다르다. 예를 들면, 소나무재선충병[25]의 경우, 가장 효과적인 수단은 병원균인 소나무재선충(*B. xylophilus*)이 지역에 도입되지 못하도록 사전에 차단하는 것이다. 소나무재선충의 개체군 변화는 여러 침입외래종의 도입과 정착, 확산 시기의 개체군 변화 패턴과

25) 소나무재선충병은 소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*)이 소나무, 해송, 잣나무 등 기주 내에서 단기간에 증식하여 나무를 죽이는 병이다. 이 병은 자체 이동력이 없는 소나무재선충이 매개충을 통해 기주인 소나무로 옮겨지면서 발병하게 된다. 우리나라에서 소나무재선충의 매개충으로는 솔수염하늘소(*Monochamus alternatus* Hope)와 북방수염하늘소(*M. saltturarius* Gebler)가 알려져 있다. 소나무재선충에 감염된 기주는 벌채·훈증, 컨테이너 대량 훈증, 벌채·소각, 벌채·파쇄, 살충제인 티아클로프리드를 살포하는 항공방제, 지상방제 방법을 이용하고 있다 (국립산림과학원, 2014).

유사할 수 있으나, 소나무재선충의 감염력이 높다는 것을 인지해야 한다. 소나무재선충에 감염된 기주의 치료는 현실적으로 어렵기 때문에 소나무재선충의 방제는 적절한 전략이 될 수 없다. 감염된 또는 감염이 의심되는 기주의 완전한 박멸이 현실적으로 가장 효과적인 소나무재선충병의 관리 수단이다.[26] 그리고 이 지역에서 소나무재선충에 감염된 기주를 외부 지역과 완전하게 봉쇄함으로써 외부 지역으로 확산을 막을 수 있다. <그림 3-14>는 침입외래종의 개체군 변화에 따른 관리 수단을 보여주고 있으나, 일반 자연환경 지역의 소나무, 잣나무, 해송에 확산되고 있는 소나무재선충병의 경우에는 이러한 관리 수단이 적절하지 않다. 기후변화에 따른 침입외래종의 생리, 생태적 특성, 도입 및 정착, 확산지역 생태계의 기능과 특성, 지역 생태계의 보전과 지속가능한 이용 목적 및 수단 등을 고려하여 침입외래종의 관리 전략과 수단이 도출되고 이행되어야 한다.



자료: Wilson(2013). 홍선희(2015)에서 재인용

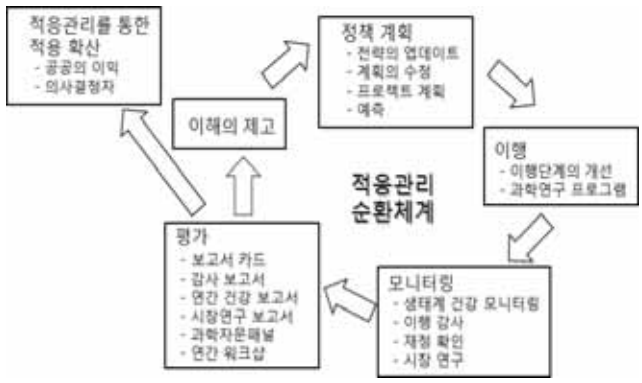
〈그림 3-14〉 침입외래종의 도입과 정착, 확산 시기에 연관된 개체군 변화와 관리수단

26) 소나무재선충의 감염이 의심 또는 예상되는 지역에서 소나무재선충에 감염되지 않은 기주(소나무류)의 예방 방법으로 설선충제(아바멕틴, 에바멕틴벤조에이트)를 기주에 나무주사를 이용하여 주입하여 소나무재선충병을 예방할 수도 있다. 또는 소나무재선충병의 발병 가능 지역의 기주 반경 1m 토양에 살선충제(포스치아제이트)를 주입하여 소나무재선충병을 예방할 수도 있다 (국립산림과학원, 2014). 이러한 화학적 예방 수단은 높은 비용이 소요된다. 특정 지역의 기주를 보호하는 특정한 목적으로 이 수단을 사용할 수는 있으나, 일반적인 기주(소나무, 잣나무, 해송)를 소나무재선충으로부터 보호하기 위한 수단으로 사용하는 것은 적절하지 않다.

둘째, 지역적인 접근(local approach)이다. 향후 기후변화의 정도는 지역에 따라 달리 나타날 수 있다. 기온 차이 뿐 아니라 강우/강수량, 이후 극한 사상의 빈도와 양의 변화 등이 지역에 따라 다를 것이다. 침입외래종을 효과적으로 관리하기 위해서는 지역별로 기후변화에 따라 변화되는 침입외래종의 생리, 생태적 특성, 개체군의 변화, 분포 등에 대한 과학적인 정보와 지식이 토대가 되어야 한다. 지역의 특성에 적합한 침입외래종의 관리 전략이 채택되고, 효율적으로 관리할 수 있는 침입외래종의 방제 또는 박멸방법 등이 선택되고 이행되어야 한다.

셋째, 생태계 보전과 이용 전략 등의 의사 결정 과정에 이해 당사자들의 참여이다 (UNEP, 2011; UNEP/GPA, 2006). 의사 결정 과정에 지역 주민을 포함한 이해 당사자들이 참석하고 서로 간의 승인과 약속의 결과로 최종 관리 결정이 이루어져야 한다. 물론 이해 당사자들의 범위와 상호 관할권 관리에 관한 문제, 합의된 최종 결정을 이끌어나가는 과정의 어려움, 자연자원의 다양한 이용에 관한 우선 이용 순서의 결정, 공공과 관련 과학 분야 간의 소통 등이 의사 결정에 어려움이 될 수 있다. 이해 당사자들 간의 협력 단계에서는 협상 전문가의 중재 및 조정이 필요할 수 있다.

넷째, 적응관리 순환(Adaptive Management Cycle) 체계의 마련이다. 생태계의 보전과 지속가능한 이용을 목적으로 하는 정책 이행의 각 단계에서는 흔히 생태계에 대한 지식의 한계에 부딪히게 된다. 이 경우 현재 주어진 정보와 지식으로 생태계기반관리와 비교할 수 있는 대상이 명확하지 않음으로 인해서 생태계기반관리의 효과를 찾아내고 확인하기 어렵다 (Mateu et al., 2015). 이를 극복하기 위해 현재까지 정보가 부족하거나 알려지지 않았거나 알지 못하는 생태계의 역동성과 관련 변수에 대응하기 위해서는 유연한 관리 목표를 정하고 이를 달성하기 위한 순환체계를 마련해야 한다 (그림 3-15).



자료: Mateu et al.(2015)

〈그림 3-15〉 적응관리 정책의 순환체계

다섯째, 시행 정책에 대한 사전 고려의 원칙 적용이다. 침입외래종의 방제 방법이 생태계에 크게 악영향을 미칠 수 있는 경우에는 시행하지 말아야 한다 (Boesch, 2006). 그러나 정책 이행의 위험이 관리의 한 부문일 수 있기에 사전 고려의 원칙이 문제가 되어 수행되고 있는 행위가 이행되지 않는 것은 피해야 한다. 예를 들면, 1982년 미국 캘리포니아에는 야생 독수리가 22마리만이 남았다. 야생 독수리의 수를 늘리는 방법으로 모든 야생의 독수리를 포획하여 후대 육종 프로그램이 제기되었다. 당시 야생 독수리 관리자들은 캘리포니아의 모든 독수리를 1987년까지 포획하여 인위적인 육종 프로그램으로 개체 수를 늘리는 것이 대단히 불확실하며 멸종까지 우려할 수 있을 정도로 위험할 수 있는 사항임을 인지하였다. 그럼에도 불구하고, 야생 독수리는 포획되었으며 육종 프로그램을 이행하게 되었다. 그 결과, 이 프로그램은 현재 성공적인 멸종위기종의 육종 및 관리 사례로 제시되고 있다 (Walters et al., 2010).

여섯째, 생태계의 지속가능성 고려이다. 이 개념은 생태계의 복원력(resilience)에 밀접하게 연계되어 있다. 이 개념은 개별 생물종 또는 개별 생물자원보다는 생태계서비스에 초점을 두고 있다. 생태계에 영향을 주는 요인이 있더라도 생태계의 기본 체계가 견딜 수 있을 정도의 영향 범위 내에 있다면, 이러한 요소와 함께 생태계의 기능을 유지하는 것이다 (Boesch and Goldman, 2009).

나. 우리나라와 선진외국의 침입외래종 정책과 사례

기후변화에 따른 침입외래종의 관리는 기존의 외래종 관리 정책으로 해결하기 어렵다는 인식하에 침입외래종 관리를 위한 정책, 법, 제도가 지난 10여 년간 각국에서 수립되어 이행되고 있다. 이러한 새로운 정책, 법, 제도, 국가의 전략을 마련한 배경에는 기후변화에 따른 침입외래종에 의한 영향을 파악하고, 확산을 예측하기 위한 수단과 방법을 개발하는 데 국가 차원의 적극적 지원이 필요하기 때문이다.

최근 이들 선진국에서는 기후변화와 침입외래종에 관한 정책, 법, 제도가 강화되고 있다. 유럽연합은 각 회원국에 침입외래종을 관리하기 위한 새로운 규정을 제정하고 생물다양성 전략 2020을 채택하여 각 회원국들이 기후변화에 따른 침입외래종에 의한 생물다양성 훼손을 최소화할 수 있도록 지원하고 있다. 미국은 침입외래종 문제를 2014년 오바마 대통령에게 보고 및 논의되었고, 국가의 안보를 보장하기 위한 기후변화적응의 주요 과제로 선정하였으며, 국가의 프로그램을 개발하고 침입외래종을 관리하기 위한 긴급재원을 마련한 바 있다. 침입외래종에 의한 관리 강화정책은 영국과 호주에서도 제시되고 있다. 국가차원에서 기후변화에 따른 침입외래종에 의한 영향을 파악하고, 확산을 예측하기 위한 수단과 방법을 개발하는 데 국가차원의 적극적 지원이 이루어지고 있다.

기후변화를 예측하고, 지역적 차원에서 기후변화에 따른 침입외래종에 대한 접근 정책이 이루어지고 있다. 검역은 이미 강화되어 있다. 유럽연합에서는 유럽 차원에서 마련한 침입외래종 목록에 있는 침입외래종의 불법적인 유입을 사전에 차단하기 위해 검역을 강화하고 있다. 검역 대상 침입외래종은 증거에 기반을 두고 위해성 평가(evidence-based risk assessment)를 토대로 선정한 것이다.

유럽연합에서 수행한 돼지풀 관리 사례는 현실적으로 문제되는 침입외래종에 대해 생태계에 기반을 둔 외래종의 관리 접근 수단과 방법을 현실적인 사례를 통해 보여준다. 유럽에서 주요한 침입외래종인 돼지풀의 확산 메커니즘에 대한 검토와 평가를 시작으로 하여, 돼지풀의 확산에 영향을 주는 조건과 매개 수단(매개생물), 수단의 확인, 유럽연합 27개국에 대한 돼지풀의 분포 공간화, 침입외래종에 의한 사회적, 환경적, 경제적 영향을 평가하는

일반적이고 체계적인 방법을 마련하고, 돼지풀에 의한 현재와 미래의 영향을 정량화하여 평가하고 있으며, 유럽연합 회원국과 그 외 인근 영향지역 국가를 포함하여 돼지풀의 영향에 대한 비용분석을 시행한 것이다. 기후변화 시나리오와 정책 시나리오에 의한 돼지풀의 확산을 평가하고 돼지풀의 위해성 평가를 기반으로 돼지풀의 향후 유입과 확산을 제어, 방제, 박멸하기 위한 현재의 정책과 수단을 도출하고 있는 절차와 과정은 침입외래종의 생태계기반 접근수단과 방법을 보여주고 있다. 유럽의 빠른 경보체계(Early Warning System)의 효과적 이행을 위한 필요 요소를 찾아내고, 제안함으로써 지역에 따른 돼지풀의 효과적인 박멸, 방제 방법을 제공하고 있다. 이 사업에서 추진한 수단과 방법은 이미 우리나라에서도 상당한 수준에서 이행되고 있다. 우리나라에서 이러한 침입외래종 관리사업의 이행 가능성을 충분히 보여주고 있다. 이 사업은 향후 우리나라에서 침입외래종의 관리 사업을 추진함에 있어 벤치마킹할 수 있는 사례로 이용할 수 있다.

미국, 영국, 호주에서는 기후변화에 따라 변화되는 침입외래종의 미래 분포 예측과 모델링 수단을 더욱 정교하고 신뢰성을 높일 수 있도록 지속적으로 개발하고 있다. 불확실성 중의 확실성과 정확성을 제고하기 위하여 기후변화에 대한 이해 증가와 생태계의 기후변화를 이해할 수 있는 수단을 적극 개발하고 있다. 또한 새로운 외래 식물의 유입과 기존에는 침입성이지 않았으나 침입성으로 변화하는 외래 식물의 변화를 모니터링·관리하고 있다. 기후변화와 침입외래종을 효율적으로 관리하기 위해서는 다양한 지식과 정보가 필요하나 현재는 부족함을 인식하고 있으며, 이러한 차이를 채우기 위해 정부 차원에서 적극적으로 연구를 지원하고 있다.

그 외 침입외래종에 대한 생물학적 관리에 대한 재평가, 적응 전략을 지속적으로 평가하고 있다. 이를 통해 기존의 생물/생태계 보전 전략을 재조명하고 있다. 또한 기후변화에 따른 농약(제초제와 병충해농약 등) 처리의 문제점이 있음을 인식한 바 있으며, 기후변화(CO_2 농도, C:N 비율, 요소간의 상호관계)를 고려한 생물, 물리, 화학적 방제 기술을 개발하고 있다. 호주의 경우, 현재 생태계의 연결통로는 외래종의 연결통로로 이용되어 침입외래종의 확산에 도움을 줄 수 있음을 우려하고 있다. 이에 따라, 생태계연결 통로에

대한 새로운 정책과 디자인을 계획하고 있다.

우리나라의 침입외래종 관리는 침입외래종의 서식지와 이용 용도 및 관리 목적 등에 따라 환경부, 농림수산식품부, 보건복지부, 해양수산부 등에서 서로 다른 외래생물을 규제 및 관리하고 있다. 이로 인해 실질적인 외래생물의 피해와 예방에 한계가 있음이 제시되고 있다. 우리나라의 검역 및 방역 대상은 국내 수입되는 축산물, 꿀벌, 금지품에서 제외된 해충(38종), 활수산물이다. 이들을 제외한 기타 외래생물(양서류, 파충류, 검·방역 비대상종)에 대한 관리 방법은 부재한 상황이다. 또한 부처 간 수입되는 외래생물의 정보가 공유되고 있지 않으며, 수입 목적 및 수입 이후 관리, 자연생태계로 유출될 경우의 발생 가능한 위해성에 대한 부처 간 정보공유체계도 미비한 상태다. 관련 부처별로 외래종 관련 용어가 동일하지 않고, 일부 사용하고 있는 용어에 대한 개념도 동일하지 않다.

국내 도입된 외래종의 서식 분포, 확산 등에 대한 모니터링을 확대하고 있으나 기후변화 등의 환경변화에 따른 침입외래종의 대발생(가능성)에 대한 대응책은 미흡한 상태이다. 예를 들면, 기후변화 등에 의해 침입성의 변화가 야기되는 외래생물의 관리 대책이 부재하다. 기후변화에 의한 침입외래종의 분포 변화를 예측하지 못한 상태에서는 기후변화에 의해 침입성의 변화가 돌발적으로 야기되는 외래종의 관리는 어려울 수 밖에 없다. 기후변화에 의해 생태계에 이미 서식하는 생물종과 침입외래종의 생리, 생태적 변화를 감지할 수 있어야 한다. 침입외래종의 매개체, 천적, 먹이, 서식처, 공생, 경쟁 관계 등을 고려하여 침입외래종의 분포예측이 이루어질 때, 생태계기반 침입외래종의 관리가 이루어질 수 있다. 반면, 우리의 현실은 이러한 접근과 수단 방법의 적용과는 상당한 괴리가 있다. 이로 인해 최근 수년 동안 가시박, 애기수영, 돼지풀, 소나무재선충, 꽃매미, 등검은말벌, 미국선녀벌레, 갈색여치, 갈색매미충 등에 의하여 산림과 농업 수목과 과수 등이 심각한 피해를 입고 있다.

지난 수년간 정부의 노력에도 불구하고 기후변화에 따른 침입외래종 문제를 접근하기 위해서는 다음과 같은 정책적인 고려사항이 남아있다.

첫째, 침입외래종의 생태계 기반 접근 정책이 필요하다. 기후변화에 따른 침입외래종

문제는 중앙정부[27]의 일괄적인 정책으로는 한계가 나타날 수밖에 없다. 기후변화는 한반도 전체에 발생하고 있으나, 현재의 정책은 침입외래종의 공간 분포 변화를 고려하지 못하고 있다. 기후변화는 침입외래종의 생리, 생태적 변화와 더불어 기존에 서식하는 생물과의 천적, 공생, 경쟁 관계 등의 변화를 야기할 수 있으나, 이러한 변화에 대한 지식과 정보가 미흡하며, 이로 인해 과학에 기반을 둔 침입외래종 관리가 이루어지지 않고 있는 실정이다. 이미 침입외래종이 생태계에 미치는 영향은 지역별로 달리 나타나고 있음을 고려할 때, 지역 주민이 참여하는 지역적인 생태계기반관리 침입외래종 정책이 수립되고 이행되어야 함에도 불구하고, 현재까지 지역 차원에서 기후변화에 따른 침입외래종의 생태적 분포 변화 예측과 이를 기반으로 하는 정책 수립과 이해 당사자들이 참가하여 이행되고 있는 사례는 찾기 어렵다.

둘째, 기후변화에 따른 검역, 초기검측, 조사, 위해성평가 및 관리체계이다. 이미 한반도에 발생한 기후변화에 따라 외래종의 침입성 변화가 나타나고 있으며, 이에 따른 분포변화가 가시화되고 있음에도 불구하고, 이러한 현상에 대응하는 적절한 검역, 초기검측, 조사, 위해성평가 및 관리체계가 운용되고 있다고 볼 수 없다. 현재의 검역체계는 기후변화를 고려하여 검역리스트를 재조정해야 하며, 기후변화에 의해 향후 한반도에 유입될 가능성이 높은 생물종에 대해서는 검역리스트가 만들어지고 검역경보시스템을 가동하는 것이다.

셋째, 기후변화에 따른 침입외래종에 대한 공공인식의 증진이다. 침입외래종에 대한 다양한 정보가 제공되고 자료가 배포되고 있으나, 현재 이행하고 있는 침입외래종 교육과 홍보로는 국민을 포함한 이해 당사자들에게 침입외래종의 현황과 각 이해 당사자들이 해야 할 일이 전달되고 있지 않다. 미국, 영국, 호주에서의 사례가 보여주듯 침입외래종에 대한 정보와 지식이 이해 당사자들에게 효과적으로 전달될 수 있는 적극적인 교육과 인식 제고 체계가 구축되고 이행되어야 한다.

---

27) 침입외래종 문제를 다루고 있는 실제적인 중앙정부의 컨트롤 타워가 없는 것도 문제이다. 침입외래종을 다루는 중앙정부의 책임과 역할 문제는 본 연구의 범위에서 다소 벗어나 본 연구에서는 다루고 있지 아니하다. 다수의 침입외래종은 영향을 미치는 범위(사람/동물식물, 자연생태계/농업생태계/수상생태계/해양생태계)가 대단히 넓다. 또한 외래종의 침입성/위해성이 인간이 구분하고 있는 자연생태계, 농업생태계, 해양생태계로 구분되어 나타나지도 않는다. 이러한 문제는 정책의 사각지대로 남아 있으며, 우리나라에는 이를 총괄하여 조정하는 기구가 실제 없는 상태이다. 이에 따라 침입외래종의 검역, 방제 등의 문제가 발생한다.

| 제4장 · 기후변화와 생태계기반 침입외래종의 관리전략 |

우리나라에서는 침입외래종의 국내 도입과 발생이 증가하고 있으며, 침입외래종에 의한 훼손면적이 증가하고 있다. 사람들의 이동, 운송 물품량의 증가 등과 같은 경제적인 활동의 증가로 인하여 외래종의 번식체가 이동할 가능성이 높아지고 있다. 또한 기후변화로 인해 항공과 선박 등에 의해 이동하고 있는 외래종의 생존기간이 길어지면서 외래종의 도입이 증가하게 된다. 그리고 애완, 조경, 낚시, 수렵용 등의 외래종의 의도적인 도입이 증가하고 있다.

기후변화에 의해 정착 및 확산이 적합한 외래종이 늘어날 수 있으며, 기존에 외래종과 공생관계에 있는 고유종들의 경쟁력도 약화될 수 있다. 강우의 강도와 빈도의 변화는 수분으로 인하여 분포가 제한되었던 외래종의 분포를 변화시킬 것이다. 토지이용에 따른 생태계 교란 부지의 증가는 '황무지 생활사'[28]를 지닌 외래종의 정착과 확산을 증가시킬 것이다. 월동기간의 감소로 인해 외래종의 생물학적 방제의 적용범위와 효과가 달라질 것이다. 침입외래종의 기계적인 방제방법과 효과도 달라질 것이다. 살충제와 제초제 등에 대한 침입외래종의 저항성이 달라질 것이다. 이를 고려할 때, 향후 지속적으로 새로운 외래종의 한반도 도입이 예측되는 상황에서 새로운 침입외래종의 발생 가능지역과 미래 확산에 대한 예측 등을 통해 침입외래종 문제에 대한 선제적 대응은 매우 중요하다.

우리나라는 외래종의 모니터링과 변화 예측기술 개발, 위해성 평가기술, 맞춤형 최적화 방제기술 개발, 민간협력과 대국민 홍보 등 기후변화에 의한 외래종 관리전략을 포괄적으

28) 자연생태계에 성공적으로 정착한 외래식물은 대부분 목본이 아닌 일년생, 이년생 초본으로 Grime의 식물생활사 분류(2006)에서 '황무지 식물'에 해당한다. 황무지 식물은 교란이 빈번하고 강하게 일어나는 지역에 발생하고 빠른 생식시기와 많은 수의 작은 종자를 생산하는 특징을 지닌다. 이에 비해 대부분의 목본식물은 자원이 풍부하고 경쟁이 심한 지역에 발생하고 자원이용 효율이 높으며 늦은 생식 시기와 적은 수의 종자를 생산하는 '경쟁식물'의 특징을 갖고 있다. 생태계 교란이 빈번하게 일어나는 지역은 경쟁이 낮기 때문에 황무지 식물이 쉽게 정착할 수 있다 (Grime, 2006; Herron et al., 2007).

로 포함하고 있는 '제1차 외래생물관리계획(2014-2018)'을 마련해 이행하고 있다. 기후변화와 생태계기반 침입외래종의 관리는 우리나라 기후의 아열대 화에 따라 국내 도입과 정착, 생태계에서 확산되고 있거나 향후 확산이 우려되는 침입외래종을 확인 및 예측하고, 이에 대해 과학에 기반을 둔 생물, 물리, 화학적 방제/박멸 방법 등을 제공하는 것이다. 기후변화와 침입외래종에 관한 우리나라의 여건을 고려할 때, 생태계기반 침입외래종의 관리전략, 수단과 방법은 다음과 같다.

- 기후변화에 따른 침입외래종의 도입 및 정착, 확산 조사 및 예측 방법과 수단의 개발
  - · 우리나라에 새로이 도입될 수 있는 침입외래종에 대한 검역 강화
  - · 이미 우리나라에 도입되어 정착하였으며, 기후변화에 의해 침입성이 증가·유지되는 외래종의 서식지 분포 모델 등을 이용한 공간분포 예측
- 기후변화와 침입외래종의 공간분포에 따른 지역별 관리
- 침입외래종의 모니터링과 빠른 경보체계(Early Warning System) 프로그램 구축
- 생태계의 복원력(resilience) 제고
- 침입외래종의 인식제고, 교육과 홍보
- 연구 및 정보교환
- 법, 제도의 보완

1. 기후변화에 따른 침입외래종의 도입 및 정착, 확산 조사 및 예측 방법과 수단의 개발

기후변화에 의해 변화되는 외래종의 이동경로와 도입기작의 변화, 정착, 확산 등을 고려하여, 새로이 도입, 정착 및 확산될 수 있는 침입외래종을 조사 및 확인해야 한다. 이 전략은 두 종류의 침입외래종으로 구분하여 적용하고 있다. 첫째는 우리나라에 새로이 도입될 수 있는 침입외래종이다. 둘째는 이미 우리나라에 도입되었고 정착하였으며, 기후변화에 의해 침입성이 증가·유지되는 외래종이다.

가. 우리나라에 새로이 도입될 수 있는 침입외래종: 검역 강화

외래종의 관리는 외래종의 도입 경로 확인에서 시작한다. 이에 우선 대상이 되는 외래종은 국내에서 농업 및 산림에 피해를 입히고 있는 검역대상종(「식물방역법」 제11조 제1항의 명기되어 있는 규제병해충 2,090종)과 더불어 생태계를 이미 교란하고 있는 생태계교란생물(「생물다양성보전 및 이용에 관한 법률」 제24조)이거나, 위해우려종(환경부 고시 제2013-147호, 위해우려종 지정고시), 그리고 우리나라에 현재 도입되어 있지는 않으나 향후 도입되어 생태계를 교란할 우려가 있는 외래종이다.

「생물다양성보전 및 이용에 관한 법률」과 식물방역법 등에는 포함되어 있지 않으나, 현재 우리나라의 기후나 서식 조건이 맞지 않더라도 향후 기후변화에 의해 국내에 도입될 가능성이 높으며 생태계를 훼손할 수 있는 외국의 생물종을 확인하고, 이들 외래종에 대한 검역도 이루어져야 한다. '제1차 외래생물관리계획(2014~2018)'에 따르면 우리나라는 2018년까지 위해우려종을 100종 이상으로 확대 지정하려 하고 있다. 확대하려는 위해우려종을 선정함에 있어 CABI(Centre for Agriculture and Biosciences International, 2015, Invasive Species Compendium)에서 제공하고 있는 8,000여 종의 침입외래종 중에서 온대지역, 열대지역에서 생활력이 높은 침입외래종을 우선 고려 대상으로 할 수 있다. 또한 미국 USDA/APHIS(Animal and Plant Health Inspection Service)와 USDA/NRCS (Natural Resources Conservation Services)에서 제공하고 있는 'Federal and State Noxious Weeds' 목록(http://plants.usda.gov/java/noxComposite)에 있는 682종 중에서 온·열대지역에 침입성이 높은 침입외래식물을 우선 고려대상으로 할 수 있다. 국내 아열대화 기후변화를 고려한 위해우려종을 선정하기 위한 외래종의 생태계위해성 평가기술(평가항목, 기준, 절차, 심사기법 등)을 개발해야 한다.[29]

---

29) 환경부에서 시행하고 있는 외래종의 생태계 위해성 평가에는 기후변화에 의한 외래종의 생태계 침입력을 예측·평가하는 항목이 없다 (국립생태원 외래생물 등의 생태계 위해성 평가 및 위해우려종의 생태계 위해성 심사에 관한 규정 제38호, 2014.8.26.). 위해성 평가는 사람 또는 생태계가 환경적인 위험에 노출될 경우에 개인 또는 집단에 나타날 수 있는 영향을 정성 또는 정량적인 확률로 추정하는 과학적 과정이다 (Wikipedia, 2015b). 외래종에 의한 '생태계 위해성'이란 그 외래종이 특정한 생태계에 미칠 수 있는 영향을 정성 또는 정량적인 확률로 추정하는 과정이다. 이에 따르면, 외래종이 영향을 미치는 생태계의 위치, 특성 등에 따라

기후변화에 의해 국내 도입될 가능성이 높은 침입외래종들은 특정한 목적으로 당국의 허가를 받은 경우를 제외하고는 국내 수입 또는 반입을 차단해야 한다. 이들 외래종에 대해서는 도입되는 시점에서의 차단이 가장 효과적인 방법이다. 이들이 도입되는 공항 또는 항구, 소포, 우편물 등이 검역되고 방역 등을 통해 국내 도입이 차단되어야 한다.[30] 제1차 외래생물관리계획(2014~2018)에 의거하여 위해우려종을 100종 이상 확대 지정하는 시기를 서둘러 이행해야 한다.

나. 이미 우리나라에 도입되어 정착하였으며, 기후변화에 의해 침입성이 증가·유지되는 외래종의 공간 분포 예측

1) 기후변화 및 침입외래종의 서식지 공간분포 예측 모델 개발

우리나라의 아열대화 기후변화에 따라 침입성이 변화될 수 있는 국내 도입된 외래종을 확인하고 예측할 수 있는 외래종별 방법과 수단(기후변화에 따른 외래종의 생리, 생태, 지리적 공간분포 변화 예측 모델)이 개발되어야 한다. 이에 해당하는 외래종은 이미 우리나라에 도입되었고 정착하였으며, 기후변화에 의해 침입성이 증가·유지되는 외래종이다. 현재 우리나라는 외래종의 생리, 생태, 지리적 분포 변화 예측에 기반하고, 이를 근거로 외래종의 우선순위 목록을 마련하고 있지 않다. 이에 해당하는 외래종으로는 현재 국내 들어온 외래생물 총 2,167종(2014년 기준, 환경부, 2014c) 중에서 기후변화에 따라 침입성이 증가할 수 있는 생태계교란생물과 위해우려종이 우선 순위에 있다. 기후변화에 따라

다르게 나타날 수 있으나, 현행 우리나라 외래종의 위해성 평가에는 평가 대상 외래종과 외래종이 영향을 미치는 (지역의) 생태계에 대한 특성을 반영하고 있지 못하다.

30) 외래종의 도입을 가장 강력하게 방지할 수 있는 수단은 국가에 도입할 수 있는 외래생물종의 허가목록(Clean list)를 작성하고, 이 목록 외에 있지 않은 모든 외래종의 도입을 금지하는 것이다. 뉴질랜드는 1993년 '생물보안법(Biosecurity Act)'을 제정하고 허가목록 외의 외래종의 도입을 금지하고 있다. 수입이 허가된 생물종에 대해서만 'biosecurity clearance'가 시행되고 도입이 허가된다. 우리나라에서 뉴질랜드에 시행하고 외래생물종의 '허가목록'에 의한 외래종의 도입 허가 제도를 시행하는 것은 외국의 생물자원을 대량으로 수입하고 있으며 외래종의 도입에 비교적 저항력이 높은 생태계를 보유하고 있는 우리의 현재 여건에서는 바람직하게 보이지 않는다. 이 보다는 침입외래종의 금지목록(Dirty list)을 정하고 이 목록에 명시된 침입외래종의 도입 규제가 적절할 것이다. 다만 기후변화에 의해 국내도입가능성이 높아진 침입외래종은 금지목록에 시급하게 기재되고 검역되어야 할 것이다.

확산속도가 빠를 수 있는 국내 정착 외래종과 자연생태계에 정착하지는 않았으나 온대와 아열대 지역에서 도입되는 애완용 또는 취미용 등으로 사육·재배하고 있는 관상어와 애완용 외래동물, 관상식물 등이 차기 대상이 되어야 한다.

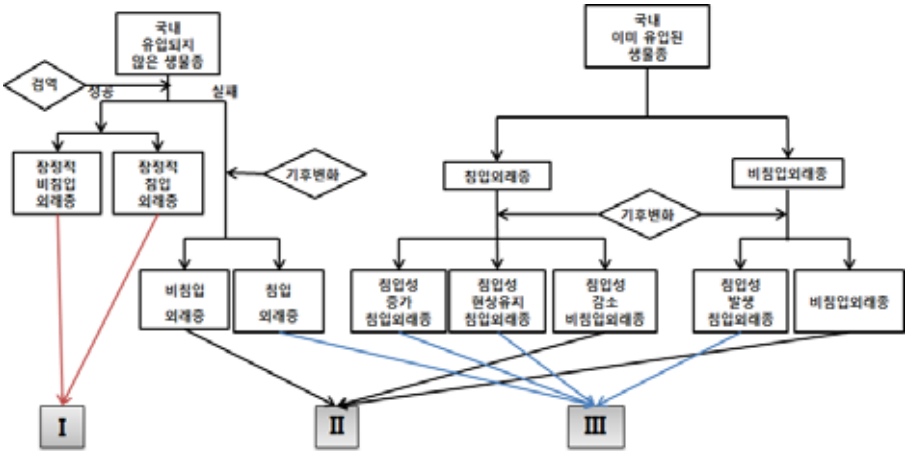
국내에 이미 도입된 외래종 중에서 침입성이 증가하거나 또는 유지되는 침입외래종의 생리, 생태, 공간 분포 등을 예측할 수 있는 모델은 국내외에서 이미 다양하게 연구 및 개발되어 있다. 외래종의 생태적 지위에 관련되어 있는 생물학적 특성을 활용한 모델은 기계적 모델(Mechanistic model)과 외래종이 발생하는 지역으로부터 추출된 환경조건들을 외래종에게 적당한 환경으로 예측하는 상관 모델(Correlative model)로 구분할 수 있다 (Kearney et al., 2010). 상관 모델은 외래종의 발생 유무와 환경 인자들 간의 관계를 정량화하는 패턴 기반의 모델로서 종분포모델(Species Distribution Model, SDM),[31] 생태적 지위 모델, 생물기후 선발 등 다양한 분야에 활용되고 있다 (Elith, 2016). 이들 모델들은 사용 목적과 장단점에 따라 연구자들이 이용하고 있다 (Barbosa et al., 2012). 최근에는 다양한 상관모델을 동시에 투영하여 각 모델들의 단점을 줄이고 모델의 적합도를 높이는 앙상블 모델의 활용이 증가하고 있다 (Vorsino et al., 2014).

현재까지 개발된 기후변화에 따른 외래종의 공간분포를 예측하는 모델들은 미래를 예측하는 불확실성에 대한 근본적인 문제를 안고 있으나, 현재로서는 기후변화 등에 따른 외래종의 도입을 예측하고 우리나라 생태계에서의 확산을 예측할 수 있는 최선의 수단과 방법으로 보인다 (Barbosa et al., 2012; Vorsino et al., 2014). 이를 통해 침입외래종의 생태적 특성을 고려하여 침입외래종의 목록화, 침입외래종 분포의 공간화,[32] 그리고 지역별 외래

---

31) 종분포 모델(Species Distribution Model, SDM)로는 Habitat Suitability Index(HSI), Expert Model, BIOCLIM, One-class support vector machines, Ecological Niche Factor Analysis(ENFA), Genetic Algorithm for Ruleset Production(GARP), Maximum Entropy(MaxEnt), Generalised Linear Models(GLMs), Generalised Additive Model(GAMs), Non-parametric multiplicative regression, Decision tree, Ensembles of tree, Boosted Regression Trees(BRT), Random Forests(RF) 등이 있다. 이들 모델의 운용에 이용되는 소프트웨어로는 BIOCLIM(Busby, 1991), ANUCLIM, BIOMAPPER(Hirzel & Guisan, 2002), BIOMOD2(Thuiller et al., 2003), DIVA(Hijmans & Graham, 2006), DOMAIN(Carpenter et al., 1993), ECOSPAT, GARP(Stockwell & Peters, 1999), GDM(Ferrier et al., 2002), GRASP(Lehmann et al., 2002), MAXENT(Phillips et al., 2005), SPECIES(Pearson et al., 2002), CLIMEX(Kriticos et al., 2007; 2015b) 등이 있다 (Elith, 2015).

종의 위해성 수준에 따른 지역별 침입외래종의 그룹 형성 ((그림 4-1) 참조),[33] 침입외래종의 관리우선순위와 방제수단과 박멸, 제어 방법과 수단을 제공할 수 있다.



주: 1) 그룹 I: 국내 도입되지 않은 외래종
2) 그룹 II: 국내 도입되었으나 침입성이 나타나지 않은 비침입성 외래종
3) 그룹 III: 국내 도입되어 침입성이 유지되고 있거나 또는 새로이 발생한 침입외래종

〈그림 4-1〉 기후변화에 따른 외래종의 도입 과정과 국내 이미 도입된 외래종의 침입성에 따른 외래종의 집단 분류

2) 기후변화에 따른 침입외래종의 서식지 공간 분포 예측(안)

우리나라에서는 모델을 이용한 외래종의 확산예측에 관한 여러 연구사례 들이 있다. 기후변화에 대응하는 침입외래종의 생태계기반 전략은 침입외래종의 공간분포와 향후

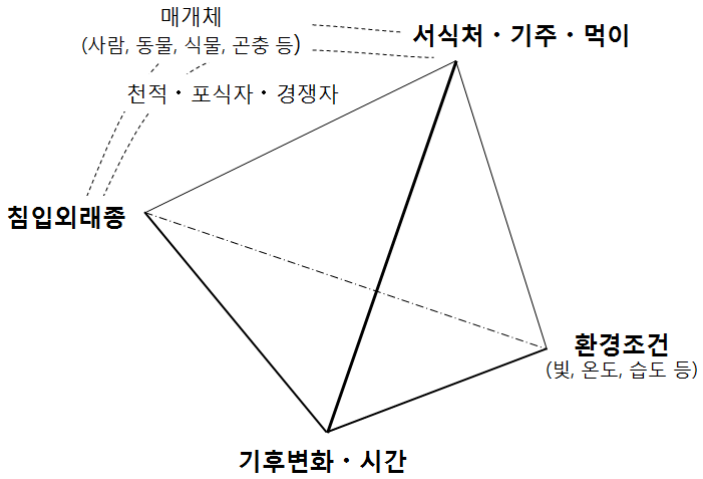
32) 침입외래종 분포의 주요한 공간화 작업으로는 i) 기후변화에 의해 침입성으로 변하는 고산외래식물/목초지의 외래식물 지도화, ii) 기후변화에 의해 새로이 등장하는 침입외래종을 확인하고 공간 분포를 지도화, iii) 기후변화에 의해 침입성이 증가 또는 감소하는 기존 침입외래종의 공간 분포를 지도화하는 작업을 포함한다. 침입외래종의 위해성과 정확한 공간 분포 지도는 침입외래종을 방제할 수 있는 주요 정책 결정 수단이다 (Darren et al., 2010).

33) 본 연구에서는 외래종 그룹을 3개로 구분하였다. 외래종 그룹 I은 검역 등에 의해 국내에 도입되지 않은 외래종이다. 이들 외래종은 국내 생태계에 도입될 경우, 침입 또는 비침입외래종일 수 있다. 그룹 II는 기후변화에 따라 국내 도입되어 침입성이 나타나지 않은 비침입성 외래종이다. 이들 비침입외래종에는 기후변화 이전 침입외래종이었으나 기후변화에 따라 비침입외래종으로 변화된 외래종을 포함한다. 그룹 III은 기후변화에 따라 국내 도입되어 침입성이 유지 또는 침입성이 증가하는 침입외래종이다. 이 그룹에는 기후변화에 따라 비침입외래종이 침입외래종으로 변화된 외래종을 포함하고 있다.

예측을 토대로 마련된다. 이 전략은 이미 우리나라에 도입되었고 정착하였으며, 기후변화에 의해 침입성이 증가·유지하는 외래종의 확인으로부터 시작한다.

외래종이 새로운 생태계에 도입되어 정착하고 확산되는 것은 외래종의 침입력에 있다. 침입력은 기본적으로 외래종, 서식처·기주·먹이에 대한 접근성, 환경조건(빛, 온도, 습도 등), 시간·기후변화와의 함수로 나타낼 수 있다. 그리고 침입외래종의 특성에 따라 매개체(사람, 동물, 식물 등), 외래종이 침입하는 서식범위(niche)에 천적(동, 미생물의 경우)·포식자(동, 식물의 경우)·경쟁자(동, 식, 미생물의 경우)가 존재할 때, 이 요인이 함수에 포함되어야 한다. 구분하면, 침입외래동물의 경우, 기후변화에 따른 외래동물의 생리·생태적 특성, 먹이에 대한 접근성, 천적의 유무를 고려해야 한다. 침입외래식물의 경우, 기후변화에 따른 외래식물의 생리·생태적 특성, 서식지에 대한 접근성, 매개체, 경쟁식물/병원체의 유무와 특성을 고려해야 한다. 식물에 병원성인 침입외래미생물의 경우, 외래미생물의 생리·생태적 특성, 기주, 매개체(매개체가 존재할 경우), 천적/경쟁자, 그리고 환경조건(기후조건) 등이다 <그림 4-2>. 예를 들면, 소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*)의 확산은 기후변화(온도, 습도, 극한기후사상의 빈도 등), 매개곤충(솔수염하늘소, *Monochamus alternatus* Hope; 북방수염하늘소, *M. salturarius* Gebler), 기주(소나무, 해송, 잣나무), 천적(기생벌, *Dolochmitus nakamurai*, 국립산림과학원, 2013)의 조건이 일치되어야 한다. 오이총채벌레(*T. palmi*) 확산의 주요 요인은 기후변화에 따른 환경조건과 기주(오이를 포함하여 다수 식물을 먹이로 함, 경상북도농업정보 DB, 2015)이다. 실망초(*C. bonariensis*) 확산의 주요 요인은 기후변화에 따른 환경조건과 천적(또는 경쟁식물), 매개체(사람 또는 곤충)로 보인다.

우리나라에 정착한 외래종의 기후변화에 따른 잠재적 분포(서식지)를 보여주는 연구결과를 볼 때, 각각의 외래종별로 기후변화에 따른 잠재적 분포(서식지)는 다르게 나타나고 있다. 이번 연구에서 침입외래종의 생태계 기반관리 전략(안)을 제시하고자 침입외래종 3종(소나무재선충, 오이총채벌레, 실망초)을 선택하였다. 이들 침입외래종의 기후변화 및 생물종 서식지 분포 모델 등을 이용한 분포 예측은 다음과 같다.



주: 침입력은 각 요소들의 상호관계에 의한 사면체의 체적에 해당함

〈그림 4-2〉 침입외래종의 침입력을 결정하는 주요 요소

가) 소나무재선충

1988년 부산 동래구에서 처음 발생한 소나무재선충(*Bursaphelenchus xylophilus*)은 소나무, 잣나무, 해송에 소나무재선충병(Pine wilt disease)을 일으킨다. 소나무재선충에 감염된 소나무는 내부의 물관이 막히고 물의 흐름이 차단되면서 고사하게 된다. 소나무재선충은 자체 이동이 어렵고 매개체에 의해 이동 및 확산된다. 우리나라에 소나무재선충의 매개체는 솔수염하늘소(*Monochamus alternatus* Hope)와 북방수염하늘소(*M. saltuarius* Gebler)로 알려져 있다. 남부지역은 주로 솔수염하늘소, 중북부지역은 북방수염하늘소에 의해 매개되고 있다. 일부지역에서는 두 매개충이 함께 발견된다. 소나무재선충병에 의한 피해 면적이 매년 확산되어 2014년에는 1500ha에 이르고 있다 (국립산림과학원, 2013; 2014; 산림청, 2014).

자료: 산림청(2014)

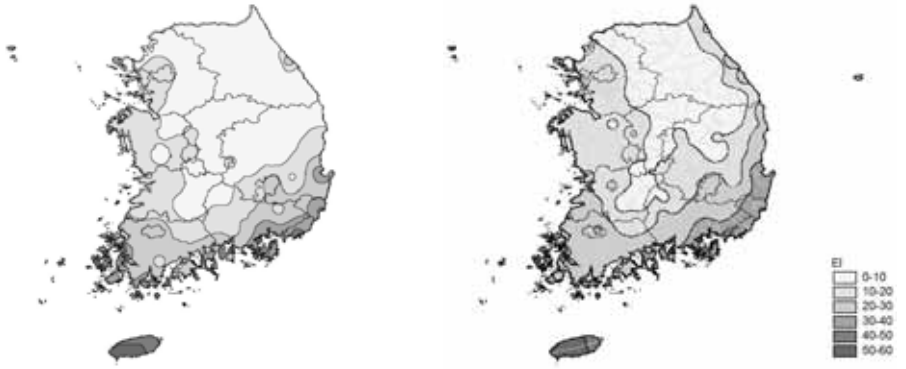
〈그림 4-3〉 소나무재선충병 피해 현황 및 현황도

소나무재선충병의 확산은 환경조건(기후변화)에 따라 소나무재선충, 매개충, 기주의 생존범위, 천적의 유무와 활동에 의해 결정된다. 따라서 기후변화에 따라 확산되는 소나무재선충병의 공간분포 예측은 이들 조건의 상관관계를 고려해야 한다. 예를 들면, 중남부지역에서의 매개충인 솔수염하늘소의 생장가능지역에 대한 분포와 기후변화에 따라 향후의 생장가능에 대한 예측은 소나무재선충병의 공간 분포 예측에 필요하다.

한반도는 1990년 이후 솔수염하늘소의 생장 및 번식에 좋은 조건으로 변화하고 있다[34]

34) 소나무재선충의 매개충인 솔수염하늘소의 기후변화에 따른 확산을 예측하기 위해서 CLIMEX 모델을 이용하였다 (Kriticos et al., 2015a). “Compare Locations(1 Species)” 시뮬레이션 옵션을 이용하였다. 옵션의 자료로 Irrigation과 관련해서는 기본 값을 이용하였고, 솔수염하늘소의 위치, 종특성 자료에 대한 입력 값을 수집하여 분석하였다. Song & Xu(2006)이 제공하고 있는 다음 자료를 CLIMEX 모델의 기본적인 입력 자료로 사용하였다: Limiting low temperature 10.8℃, Lower optimal temperature 15.0℃, Upper optimal temperature 30.0℃, Limiting high temperature 33.0℃, Degree days per Generation 1,690, Limiting low moisture 0.1%, Lower optimal moisture 0.55%, Upper optimal moisture 1.35%, Limiting high moisture 4.0%, Cold Stress Temperature Threshold 8℃, Cold Stress Temperature Rate, Heat Stress Temperature Threshold -0.00013, Heat Stress Temperature Rate 33℃, Dry Stress Threshold 0.0001, Dry Stress Rate 0.25, Wet Stress Threshold 0.25, Wet Stress Rate -0.001, Wet Stress Threshold 4.0, Wet Stress Rate 0.0001. 이들 자료는 국내외 문헌과 솔수염하늘소의 현장 검토를 통해 검증하였다 (Kwon et al., 2006; 정찬식 등, 2009; 최광식 등, 2011; 문일성 등, 2014; 국립산림과학원, 2014; 한혜림 등, 2014). 2015년

<그림 4-4>. CLIMEX 모델을 개발하고 발전시키고 있는 Sutherst & Maywald(1985), Sutherst et al.(2000; 2003; 2007), Kriticos et al.(2015a; 2015b)에 따르면, EI(Ecoclimatic Index) >25는 솔수염하늘소의 생장과 번식에 아주 좋은 조건이다. EI 10-25는 좋은 조건, EI <10의 경우는 생존가능성이 낮은 환경조건이다. 1990년대 솔수염하늘소가 생장과 번식하기 좋은 지역은 제주와 남부해안지역이었으나, 2015년에는 남서부 내륙지역과 동부해안지역으로 확대되었다 (그림 4-4). 한반도의 대부분은 소나무재선충병의 발생과 번식에 좋은 지역으로 소나무재선충이 이동하는 것을 엄격히 봉쇄하지 않는다면 소나무재선충병이 쉽게 확산될 수 있다는 것을 의미한다.



1995년 2015년

주: RCP8.5와 CLIMEX 모델을 사용한 것이며, 등치선은 CLIMEX 모델의 EI(0-100 범위) 분포임(1km 해상도, ArcGIS 소프트웨어 사용)

<그림 4-4> 기후변화에 따른 1995년과 2015년 솔수염하늘소(*M. alternatus*)의 생장가능지역 변화 예측

모델의 입력결과로 제시된 EI 지역은 솔수염하늘소가 매개하여 소나무재선충병이 발병한 지역과 상당히 일치하고 있다 (P<0.05). 기상 관측 자료는 기상청(2015a) 기상자료개방포털(data.kma.go.kr)에서 내려 받은 4가지 변수 (최고기온, ℃; 최저기온, ℃; 강수량, mm; 평균상대습도, %)를 이용하였다. 이 자료는 일기상자료를 월별 10년 평균하여 68개 관측지점별로 추출한 것이다. 미래 기후자료는 12.5km 해상도의 영국 기상청 Hadley Centre의 지역기후모델인 HadGEM3-RA를 이용하였으며, 현재 시기의 4가지 변수와 같은 RCP8.5 자료는 기상청(2015b) 기후변화정보센터(www.climate.go.kr)에서 제공하는 12.5km 격자의 월별자료를 10년 단위로 평균값을 도출하고 68개 관측지점별로 추출한 것이다.

더욱이 향후의 기후변화는 솔수염하늘소의 생장에 더욱 호의적으로 변화될 것으로 보인다. 솔수염하늘소의 생장과 번식에 적합한 기후조건은 한반도 남서부 해안에서 확대되어 2050년대에는 강원도와 지리산의 고산지대를 제외하고는 한반도 중남부 전체에 이를 것으로 예측된다 (그림 4-5). 21세기에 나타나고 있는 기후변화는 솔수염하늘소의 생장과 번식에 매우 좋은 서식지를 제공하게 되며, 휴전선 이남의 대부분에 서식하고 있는 소나무, 잣나무, 해송은 소나무재선충에 감염되어 고사될 가능성이 더욱 높아질 것이다.

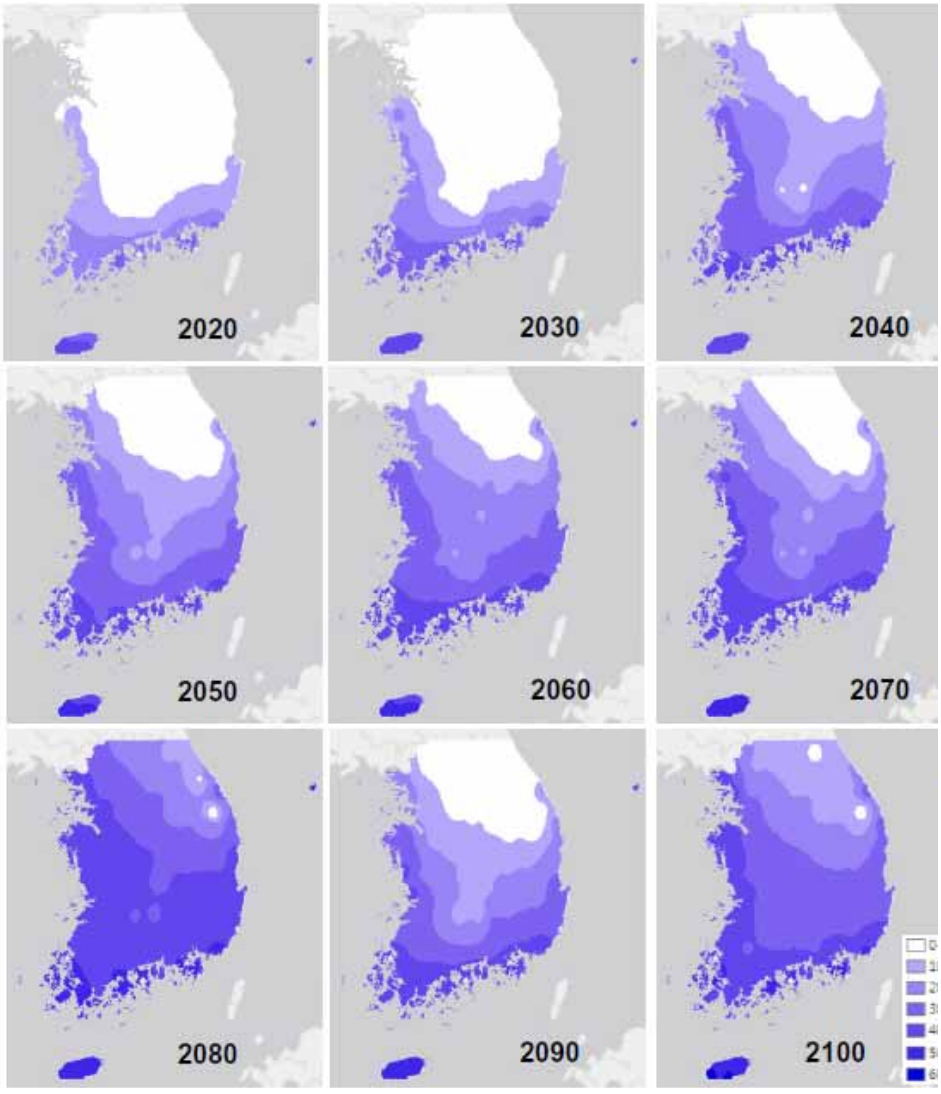
주: RCP8.5와 CLIMEX 모델을 사용한 것이며, 등치선은 CLIMEX 모델의 EI (0-100 범위) 분포임(1km 해상도, ArcGIS 소프트웨어 사용).

〈그림 4-5〉 기후변화에 따른 2025년, 2035년, 2055년 솔수염하늘소(*M. alternatus*)의 생장가능지역 변화 예측

나) 오이총채벌레

오이총채벌레(*Thrips palmi*)는 동남아시아지역이 원산이며, 1970년대까지는 인도, 인도네시아 등 아시아의 열대지역과 아열대 지역에 국한하여 발생하였다. 1978년 일본에서 발생을 시작하여 중국, 대만, 호주, 미국(플로리다), 중남미까지 분포가 확대되었다. 우리나라에서는 1993년 제주도 시설재배 꽈리고추에서 처음 발견되었다. 현재는 경기, 강원, 충청지역을 제외한 경남과 전남지역, 그리고 경북, 전북의 일부 지역에서 발생이 확인되고 있다. 기주범위가 매우 넓어 여러 종류의 작물에 피해를 입히고 있다 (경상북도농업정보 DB, 2015). 기후변화시나리오 RCP 8.5와 CLIMEX 모델에 따르면, 향후 기후변화에 따라

오이총채벌레가 서식할 수 있는 지역은 내륙지역으로 확대될 것으로 예측된다 (Park et al., 2014) (그림 4-6).

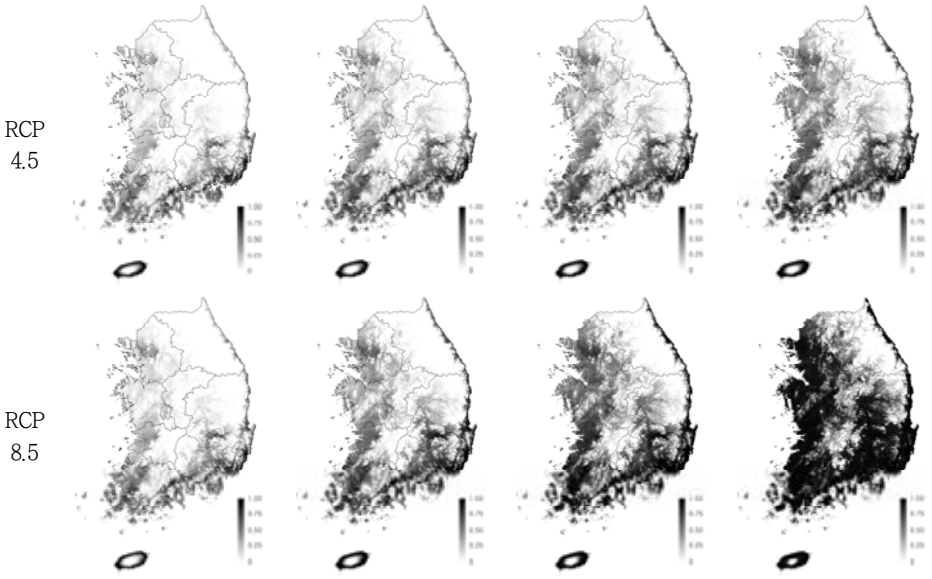


주: 기후변화 시나리오 RCP 8.5와 CLIMEX 모델 사용
자료: Park et al.(2014)

〈그림 4-6〉 기후변화에 따른 오이총채벌레(*T. palmi*)의 연대별 서식지 분포 변화 예측

다) 실망초

실망초(*Conyza bonariensis*)는 남미가 원산으로 우리나라와 열대지방에 분포한다. 우리나라에 도입된 시기는 정확하지 않으며, 주로 남부 해안지대에 분포한다. RCP 4.5와 8.5 시나리오에 의한 실망초 잠재 서식지는 평지를 중심으로 점차 확산되고 있다. RCP 4.5에서는 2030년대는 현재의 잠재 서식지와 거의 유사하지만 2050년대에 부산과 목포 등의 남해안 일대를 중심으로 확산되고, 2070년대와 2100년대는 잠재 서식지의 범위가 남해안 전역과 서해안 지역에까지 확대될 것으로 예측되었다. 기후변화시나리오 RCP 8.5에서는 2030년대는 RCP 4.5와 유사하지만 2050년대와 2070년대로 시간이 흐르면서 남해안과 서해안 일대로 서식지가 확산된다. 2100년에는 강원도의 태백산맥 주변 고산지와 소백산맥을 따르는 지리산 일대를 제외하고는 대부분의 지역으로 서식지가 넓어질 것으로 예측된다 (이용호, 2015) (그림 4-7).



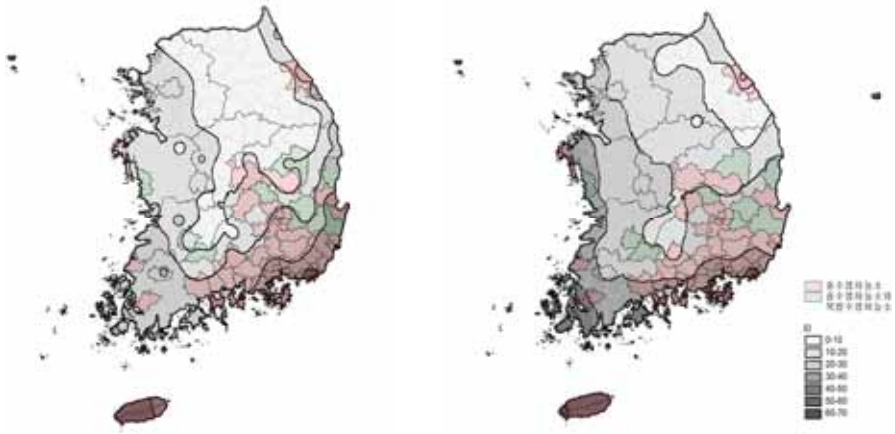
주: 기후변화 시나리오 RCP 8.5와 MaxEnt 모델 사용
자료: 이용호(2015)

〈그림 4-7〉 기후변화에 따른 실망초(*Conyza bonariensis*)의 연대별 서식지 분포변화 예측

2. 기후변화와 침입외래종의 분포에 따른 지역별 관리

기후변화에 따른 소나무재선충병의 발생 및 분포지역을 예측하기 위해서는 소나무재선충병의 현재 분포지역, 기후변화예측, 기후변화에 따라 변화하는 소나무재선충과 매개충의 분포에 대한 예측, 기주의 분포변화를 고려해야 한다. (그림 4-8)은 2014년 솔수염하늘소에 의한 소나무재선충병의 분포지역과 2025년 솔수염하늘소의 생존 가능지역을 비교한 것이다. 이 그림의 2015년 EI >25인 지역에서는 솔수염하늘소의 번식과 이에 따른 소나무재선충병의 확산을 예측할 수 있다. 2015년까지 솔수염하늘소의 생장에 적합한 기후조건이 남해안 지역과 동서해안 지역에 넓게 펼쳐 있음에도 불구하고, 내륙지역에서는 솔수염하늘소에 감염된 기주의 처리와 지역의 봉쇄가 비교적 잘 이루어져 왔다고 할 수 있다.

이후 기후변화는 솔수염하늘소의 생장과 번식에 더욱 우호적으로 진행될 것으로 보인다. 2025년에는 내륙의 고산지대(강원도 고산지대와 지리산의 경우)를 제외하고는 대부분의 지역에서 솔수염하늘소가 생장할 수 있을 것으로 보인다.



2015년 2025년

주: RCP 8.5와 CLIMEX 모델을 사용한 것이며, 등치선은 CLIMEX 모델의 EI(0-100 범위) 분포임(1km 해상도, ArcGIS 소프트웨어 사용)

〈그림 4-8〉 솔수염하늘소(*M. alternatus*)에 의한 소나무재선충병의 발생지역(2015년 현재까지)과 기후변화에 따른 2025년 솔수염하늘소의 생장가능지역

기후변화에 따른 소나무재선충의 매개충인 솔수염하늘소의 분포 및 확산지역((그림 4-4, 그림 4-5, 그림 4-8) 2015년, 2025년 참조)과 소나무재선충의 특성을 고려하여 관리수단과 방법을 선정해야 한다. 이번 연구에서 접근하고 있는 소나무재선충 매개충인 솔수염하늘소의 분포 및 기후변화에 따른 확산지역의 예측으로는 향후 소나무재선충병의 확산 범위의 일부를 예측할 수 있다.

이번 연구에서 도출된 솔수염하늘소의 분포 및 확산 지역 예측에는 상당한 한계가 있다. 소나무재선충의 지역별 관리방안을 도출하기 위해서는 기후변화에 따른 소나무재선충, 매개충(솔수염하늘소, 북방수염하늘소), 기주(소나무, 해송, 잣나무)에 대한 현황과 예측 공간분포 자료를 중첩 분석하고, 현장에서의 확인을 통해 제시될 수 있다. 이번 연구의 결과로 (그림 4-4, 그림 4-5, 그림 4-8)에서 보여주고 있는 결과는 기후변화에 따른 소나무재선충의 솔수염하늘소(매개충)의 EI 공간분포 현황 및 예측이다[35]. 따라서 연구의 결과로는 기후변화에 따른 소나무재선충의 관리방안을 제시하기에는 상당한 무리가 따른다. 향후 구체적인 소나무재선충의 지역별 관리방안이 작성되기 위해서는 추가적인 작업이 이루어져야 한다. 기본적으로 이루어져야 할 추가적인 작업으로는 i) 북방수염하늘소의 발생지역과 기후변화에 따른 공간분포 변화 예측, ii) 기주(소나무, 해송, 잣나무)의 기후변화에 따른 공간분포 및 예측 (이들 기주의 공간분포는 확보되어 있음), iii) 지역별 기후변화와 생물종의 공간분포 예측의 신뢰성 제고이다. 그리고 소나무재선충과 매개충(솔수염하늘소와 북방수염하늘소)의 천적(국내에 천적으로 소나무재선충의 생물학적 방제에 사용할 수 있는 경우에 한함)의 생활사, 기후변화에 따른 생리, 생태학적, 공간분포 변화 등에 대한 연구 및 조사가 이루어져야 한다.

---

35) (그림 4-4, 그림 4-5, 그림 4-8)에서 보여주고 있는 결과는 기후변화에 따른 소나무재선충의 솔수염하늘소(매개충)의 EI 공간분포 현황 및 예측은 기후변화에 따른 소나무재선충병의 과학적인 방제 전략을 보여주기 위해 시도한 것이다. 이들 결과는 연구의 주어진 조건에서 찾아낸 최선의 결과로써 2015년 모델의 입력결과로 제시된 EI 지역은 솔수염하늘소가 매개하여 소나무재선충병이 발병한 지역과 상당히 일치하고 있으나 ($P<0.05$), 모델결과의 신뢰성을 제고하기 위해서는 EI를 결정하는 CLIMEX 모델의 솔수염하늘소의 위치, 종특성 자료의 변수 등에 대한 추가 작업이 필요하다. 현장에서 실제적인 지역별 소나무재선충의 관리가 이루어지기 위해서는 추가적으로 기후변화에 따른 소나무재선충의 솔수염하늘소(매개충)의 EI 공간분포 현황 및 예측이 좀 더 정밀하게 이루어질 필요가 있다. 이를 기반으로 (표 4-1. 4-2) 관리방안이 EI 공간 예측분포 지역별로 더욱 정밀하게 발전되어야 한다.

이번 연구에서 도출된 솔수염하늘소의 분포 및 기후변화에 따른 확산지역의 예측만을 고려할 때, 솔수염하늘소가 매개하는 소나무재선충병의 관리방향으로 다음 몇 가지를 제안할 수 있다. 솔수염하늘소가 매개충인 소나무재선충병이 급격히 증가한 지역, 예를 들면, EI >25 지역(솔수염하늘소의 생장과 번식에 아주 좋은 기후조건; Kristicos et al., 2015a; 2015b)의 경우와 기후변화에 따라 EI가 상승하는 지역((그림 4-4, 그림 4-5) 참조)에서는 소나무재선충병이 발생한 감염 기주는 박멸(완전하게 병원체인 소나무재선충 처리)하여 추가적인 소나무재선충병의 확산을 차단해야 한다. 그리고 소나무재선충과 솔수염하늘소, 감염기주가 외부로 확산되는 것을 봉쇄해야 한다. (그림 4-2)에서 제시하듯 EI >25인 지역은 소나무재선충이 발생하기 위한 기본적인 조건(침입외래종의 감염성, 기주, 환경조건, 기후변화, 솔수염하늘소의 생장 및 번식)이 갖추어져 있는 지역이다. 솔수염하늘소에 의해 소나무재선충이 기주로 매개되면 소나무재선충병이 발생할 수 있는 지역이다. 이 지역에서 소나무재선충병을 관리할 수 있는 수단과 방법은 이미 감염된 기주의 완전한 처리와 소나무재선충병원체를 외부로부터 차단하는 것이다.

이 지역에서는 솔수염하늘소의 생물학적 제어, 물리적 또는 살충제 등을 이용하는 화학적 제어방법이 관리수단이 될 수 있다. 또한 소나무재선충에 감염된 기주 뿐 아니라 감염기주의 인근에 위치하고 있으며 감염이 우려되는 기주를 사전에 제거함으로써 소나무재선충에 의한 생태계 영향을 저감할 수 있다.[36]

향후 소나무재선충병이 발생할 수 있는 지역으로, 예를 들면 EI >25인 지역, 생물다양성과 생태계가 우수한 지역, 예를 들면 국립공원과 습지보호지역 등이 포함되어 있는 경우에는 더욱 특별한 소나무재선충병의 관리가 필요하다. 국립공원 지역에 발생하는 침입외래종의 경우는 침입외래종의 완전한 제거(박멸)를 우선으로 하고, 이를 달성할 수 있는 모든 가능한 수단을 채택해야 한다 (Hansen, 2011). 이를 위해서는 소나무재선충병의 발생지역에 대한 모니터링과 예찰, 이 지역으로의 소나무재선충 매개체와 감염기주의 온전한 차단

36) 소나무재선충은 전염성이 높고 일단 감염된 기주는 치료가 현실적으로 가능하지 않다. 감염된 기주는 기주내의 선충이 사멸될 수 있도록 완전하게 박멸(제거)해야 한다. 소나무재선충의 경우, '방제(prevention)' 전략은 적절하지 않다.

장치, 교육과 홍보, 보호지역 내 감염 기주 발견 시 즉시 대응 방안 등 소나무재선충병에 대한 대응 시나리오를 작성하여 단계별로 합리적이고 과학적인 대응이 이루어져야 한다.

소나무재선충의 EI 10~25 지역의 경우에는 지역의 특성을 고려하여, 소나무재선충의 확산을 방지하기 위한 소나무재선충, 솔수염하늘소의 박멸 수단을 적용할 수 있다. EI >25인 지역에서의 관리 방법과 동일하게, 생물다양성과 생태계가 우수한 국립공원과 습지 보호지역 등 생태계와 생물다양성을 특별히 보호해야 할 지역에 발생하는 침입외래종의 경우는 침입외래종의 완전한 제거(박멸)를 우선으로 하고, 이를 달성할 수 있는 모든 가능한 수단을 채택해야 한다 (Hansen, 2011). 감염된 기주는 제거하고, 경우에 따라서는 감염이 우려되는 기주를 사전에 제거할 수 있다. EI <10 지역에는 이 지역으로의 소나무재선충 이동 경로를 완전히 봉쇄하고, 발견되는 소나무재선충, 솔수염하늘소의 기계적 또는 화학적 방법에 의한 박멸, 그리고 소나무재선충에 감염된 기주는 반드시 제거해야 한다 ((그림 4-8), (표 4-1) 참조).

상기에 제안하고 있는 소나무재선충의 지역별 관리방안은 기후변화와 솔수염하늘소 생장지역 변화를 고려한 것이다. 우리나라에서 소나무, 해송, 잣나무는 전국에 분포되어 있으며, 기후변화에 대해 이들 개체군은 솔수염하늘소보다는 느리게 반응하고 있다 (전성우 등, 2002). 따라서 소나무재선충의 지역별 관리방안을 도출함에 있어 중요한 변수로 보이지 않는다. 그러나 소나무재선충의 다른 매개충인 북방수염하늘소, 천적(소나무재선충과 매개체의 천적이 존재하고 생물학적 방제 효과 있을 경우)의 변화는 소나무재선충의 지역별 관리방안에 반드시 고려해야 한다. 또한 소나무재선충이 발생하고 있거나 향후 발생할 것이 예측되는 지역의 특성을 고려해야 한다. 그리고 접근할 수 있는 과학에 기반을 두고 현실적인 소나무재선충의 방안을 구축하기 위해서는 소나무재선충 지역의 특성, 기후변화에 대한 예측의 신뢰성 제고, 기후변화에 따른 북방수염하늘소의 분포 변화, 지역에서의 기주의 분포변화를 추가로 고려해야 한다. 향후 이에 대한 정보와 자료가 축적되고 모델이 개선될 때, 더욱 현실적이고 합리적인 소나무재선충의 관리방안이 도출될 수 있다.

〈표 4-1〉 CLIMEX 모델의 EI를 고려한 기후변화에 따른 소나무재선충(*B. xylophilus*)의 지역별 관리 방안*

	EI		
	>25	10~25	<10
지역	제주, 남서해안, 남동해안, 동해안 지역(2015, 2025년 EI 지역 참조 〈그림 4-8〉	서남부, 동남부, 동해안 지역(2015, 2025년 EI 지역 참조 〈그림 4-8〉	EI <10 이하의 중남부 이북 지역(2015, 2025년 EI 지역 참조 〈그림 4-8〉
관리 방법	- 모니터링: 특히 EI >25 경계선 지역을 중심으로 이행 - 검역: 소나무재선충의 외부 확산 봉쇄(지역의 물리적 봉쇄) - 지역 내에서의 확산방지: 감염 기주와 소나무재선충, 솔수염하늘소의 생물, 물리, 화학적 제어: 지역의 특성을 고려하여 선정 - 감염기주 뿐 아니라 경우에 따라서는 인근 기주를 제거 - 인식제고: 교육과 홍보	- 모니터링 - 검역: 외부로부터의 도입 차단, 지역으로부터의 외부 확산 봉쇄 - 소나무재선충의 확산방지 - 박멸: 감염 기주와 소나무재선충, 솔수염하늘소의 생물, 물리, 화학적 제어: 지역의 특성을 고려하여 선정 - 감염기주 뿐 아니라 경우에 따라서는 인근 기주 제거 - 인식제고: 교육과 홍보	- 검역: 외부로부터의 도입 차단 - 모니터링: 특히 EI <10 경계선 인근지역을 중심으로 이행 - 외부로 부터의 소나무재선충, 솔수염하늘소 이동 경로 봉쇄 - 소나무재선충, 솔수염하늘소의 정착방지: 박멸 - 인식제고: 교육과 홍보

주: 이는 CLIMEX EI를 기준으로 작성한 소나무재선충의 관리방안 사례이다. 실제 현장에서 CLIMEX EI를 기준으로 소나무재선충의 박멸전략을 구축하기 위해서는 우리나라의 소나무재선충 분포 현장과 EI에 대한 실측자료와 상관관계 등을 고려하고, EI에 대한 현장 적용성 여부를 확인해야 한다.

오이총채벌레(*T. palmi*)의 경우, 2000년대 초반에는 제주도와 남해안과 남동해안지역에 분포하였으나 2010년에는 일부 내륙과 중부 동해안지역으로까지 확산되었다 〈그림 4-9〉. 향후 2020년 이후에는 서식지가 중부 서해안을 타고 확장되고 2040년에는 중남부의 일부 고산지역을 제외하고는 한반도 중부와 남부 지역 전체에 분포할 것으로 예상된다. 2050년 이후에는 오이총채벌레의 개체밀도가 더욱 증가하여 중남부의 고산지역을 제외하고는 분포지가 확산될 것으로 예상된다 (그림 4-6).

주: RCP 8.5와 CLIMEX 모델을 사용한 것이며, 등치선은 CLIMEX 모델의 EI (0~100 범위) 분포임(EI의 12.5km 해상도, ArcGIS 소프트웨어 사용)
자료: Park et al.(2014)

〈그림 4-9〉 기후변화에 따른 연도별 오이총채벌레(*T. palmi*)의 분포지역

오이총채벌레를 침입외래종으로 관리하는 것은 오이총채벌레의 침입력, 우리나라의 경제·사회적 영향 등을 고려하여 결정하게 된다. 현재까지 오이총채벌레가 오이 등의 농작물에 피해를 입히는 것으로 밝혀져 있으나 (이용호, 2015; 경상북도농업정보 DB, 2015), 자연생태계에 미치는 영향에 대해서는 잘 알려져 있지 않다. 오이총채벌레를 침입외래종으로 간주할 경우, 최근과 향후 기후변화에 따라 확산되는 오이총채벌레 서식분포를 기준으로 관리방안을 도출할 수 있다. 오이총채벌레의 CLIMEX 모델의 EI를 이용할 수도 있다. 예를 들면, 2010년과 2020년, 2030년 등의 EI >25 지역, EI 10-25 지역, EI <10 지역으로 구분하고, 각 지역별로 오이총채벌레의 관리 수단과 방법을 설정할 수도 있다 (그림 4-6, 그림 4-9).

오이총채벌레가 이미 급격히 증가한 지역, 예를 들면 EI >25 지역에서는 오이총채벌레가 외부로 확산되는 것을 봉쇄하고, 이 지역에서는 오이총채벌레에 의한 지역 생태계 영향을 저감할 수 있는 생물학적 제어, 기계적 또는 살충제 등을 이용하는 화학적 제어방법이 적정한 관리 수단이 될 수 있다. EI 10~25 지역의 경우에는 지역의 특성을 고려하여, 오이총채벌레의 정착과 확산을 방지하기 위한 박멸 또는 방제수단을 적용할 수 있다. EI <10 지역의 경우에는 이 지역으로의 오이총채벌레 이동 경로를 완전히 봉쇄하고, 발견되는

오이총채벌레의 기계적 또는 화학적 방법에 의한 박멸이 적정한 관리수단이 될 것이다[37] <표 4-2>. 물론 이 방법을 이용하고 EI를 기준으로 침입외래종의 방제 및 박멸 전략을 구축한다면, 침입외래종의 우리나라 분포현장과 EI에 대한 실측자료와 상관관계를 우선 고려하고, 이를 기반으로 지역별 관리전략을 결정해야 할 것이다.

<표 4-2> CLIMEX 모델의 EI를 고려한 기후변화에 따른 오이총채벌레(*T. palmi*)의 지역별 관리 방안*

	EI		
	>25	10-25	<10
지역	제주, 남서해안, 남동해안, 동해안 지역(2010년, 2020년, 2030년 EI 지역<그림 4-6, 그림 4-10>	서남부, 동남부, 동해안 지역(2010년, 2020년, 2030년 EI 지역<그림 4-6, 그림 4-10>	EI <10 이하의 중남부 이북 지역(2010년, 2020년, 2030년 EI 지역<그림 4-6, 그림 4-10>
관리 방법	- 모니터링: 특히 EI >25 경계선 지역을 중심으로 이행 - 검역: 오이총채벌레의 외부 확산 봉쇄(지역의 물리적 봉쇄) - 지역 내에서의 확산방지 및 영향저감(생물, 물리, 화학적 제어): 지역의 특성을 고려하여 선정 - 인식제고: 교육과 홍보	- 검역: 외부로부터의 도입 차단, 지역으로부터의 외부 확산 봉쇄 - 모니터링 - 정착 및 확산방지 - 박멸 또는 방제: 지역의 특성을 고려하여 선정 - 인식제고: 교육과 홍보	- 검역: 외부로부터의 도입 차단 - 모니터링: 특히 EI <10 경계선 인근지역을 중심으로 이행 - 이동 경로 봉쇄 - 정착방지: 방제 또는 박멸 - 인식제고: 교육과 홍보

* 이는 CLIMEX EI를 기준으로 작성한 관리방안 사례이다. 실제 현장에서 CLIMEX EI를 기준으로 오이총채벌레의 방제 및 박멸 전략을 구축한다면, 우리나라 오이총채벌레의 분포 현장과 EI에 대한 실측자료와 상관관계 등을 고려하고, EI에 대한 현장 적용성 여부를 확인해야 한다.

37) 침입외래종이 생태계에 도입되기 이전과 초기 단계에서는 방제, 도입된 이후 확산되는 초기 단계에서는 박멸이 가능할 수 있다. 침입외래종이 생태계에 완전하게 정착하기 이전에 빠른 수단을 동원하여 방제, 박멸하는 것이 가장 효과적이며 경제적인 수단과 방법이다. 그러나 오이총채벌레의 개체 수가 급격히 증가하는 지역에서 방제와 박멸은 효과적인 방법이 될 수 없다. 이러한 지역에서는 침입외래종의 완전한 박멸은 현실적으로 가능하지 않다. 침입외래종의 박멸이 가능하지 않은 지역에서 박멸을 목표로 하는 노력은 방제와 다르지 않다 (Bullock et al., 2013). 이 경우에는 오이총채벌레가 외부로 확산되는 것을 봉쇄하여야 한다. 이 지역에서는 오이총채벌레에 의한 생태계 영향을 저감할 수 있는 생물학적 제어, 기계적 또는 살충제 등을 이용하는 화학적 제어방법이 효과적일 것이다. 이전의 사례를 볼 때, 생태계에 이미 정착되어 확산되고 있는 침입외래종의 박멸은 비용이 많이 들면서도 효과적인 방법이 되지 못한다. 1100ha 이내의 경지에서도 이 방법은 성공 확률이 50% 이하이며, 1,000ha 넘는 경지에서 성공 확률은 미지수이다 (Rejmanek & Pitcarn, 2002). 갈라파고스 섬에서 30종의 침입외래종을 박멸하기 위한 시도에서, 4종의 침입외래종 박멸은 성공적이었으며, 나머지 침입외래종의 확산을 막을 수는 없었다 (Gardener et al., 2010). 이 단계에서 침입외래종을 박멸하는 것은 현실적으로 상당히 적용하기 어려운 방법으로 인식되고 있다 (Regan et al., 2006).

실망초(*Conyza bonariensis*)의 경우, 현재시점과 기후변화에 따른 최적서식지 분포를 고려하여 지역별 관리방안을 고려할 수 있다. MaxEnt 모델에 의한 미래의 실망초 서식지 분포는 현재 서식지 분포에 근거하기에 CLIMEX 모델의 EI와 같은 수치로 나타나지 않는다. 해당 지역 면적에서 실망초가 서식하는 서식처 비율로 나타난다. 지역의 실망초 서식처 비율과 지역의 특성을 고려하여 적절한 지역별 실망초 관리방안을 도출할 수 있을 것이다.

3. 침입외래종의 모니터링과 빠른 경보체계 프로그램 구축

새로운 외래종의 도입과 기존에는 침입성이지 않았으나 침입성이 변화하는 외래종을 모니터링하며, 침입외래종에 대해서는 빠른 경보가 발휘되는 프로그램이 이행되어야 한다. 환경부는 외래생물의 분포와 서식 실태 조사사업으로 생태계교란생물의 서식 실태 조사를 강화하는 계획을 추진하고 있으며, 갑자기 퍼지거나 생태계 또는 경제적 피해가 눈에 띄게 늘어난 위해성이 높은 외래종을 대상으로 정밀조사를 계획하고 있다. 그러나 기후변화에 따라 침입성이 변화하는 외래종을 대상으로 하는 프로그램은 계획되어 있지 않다.

침입외래종이 지역의 생태계에 완전하게 정착하기 이전에 빠른 수단을 동원하여 방제, 박멸하는 것이 가장 효과적이며 경제적인 수단과 방법이다. 이 시기를 놓치면 침입외래종의 방제·박멸은 더욱 어려울 수 밖에 없다. 위해성이 변화하는 침입외래종의 모니터링은 지역차원에서 조사 및 감시(surveillance) 프로그램이 이루어져야 하며, 빠른 경보체계를 통해 최선의 관리방법이 이행되어야 한다.

우리나라에서 빠른 경보체계 프로그램을 구축하기 위한 사례는 이미 유럽과 미국, 호주 등에서 다양하게 볼 수 있다. 유럽의 EPPO(European and Mediterranean Plant Protection Organization, Website: www.eppo.int), NOBANIS(European Network on Invasive Alien Species, Website: www.nobanis.org), RASFF(Rapid Alert System for Food and Feed, Website: http://ec.europa.eu/food/food/rapidalert/index_en.htm)가 있다. 미국 연방정부의 EDRR(Early Detection and Rapid Response), 호주의 AWS(Australian Weeds Strategy, Website: www.weeds.gov.au), 캐나다의 An

Invasive Alien Species Strategy for Canada(Environment Canada, 2004), UNEP(2012, Early Warning Systems)에서 제공하고 있는 다양한 빠른 경보체계 프로그램은 우리가 추구해야 할 빠른 정보체계의 마일스톤으로 참고할 수 있다.

우리나라에서 빠른 경보체계 프로그램을 구축하는 과정에서 고려해야 할 사항은 기존의 관련 네트워크에 기반을 두고 설정하는 것이다. 기존의 정보네트워크의 협력과 이행 촉진에 초점을 두어야 한다. 새로운 조직체계와 네트워크를 구축하는 것보다는 국내에서 침입외래종과 연결시킬 수 있는 정보네트워크를 스크리닝하고, 이에 침입외래종의 빠른 경보체계 프로그램을 구축하는 것이다.

4. 생태계의 복원력 제고

침입외래종이 없는 생태계를 유지하는 것은 현실적으로 불가능하다. 일정 기간 침입외래종이 없는 상태로 유지할 수는 있으나, 지속적으로 유지한다는 것은 현실적으로 불가능하다. 고유 생태계에서 침입외래종의 개체군과 수가 이미 일정 수준에 도달한 경우에는 침입외래종을 박멸하는 것보다는 생태계의 기본 체계가 유지되는 상태에서 특정한 침입외래종이 생태계에서 우점화하는 것을 방지하는 침입외래종의 관리 정책이다. 기후변화는 이미 기존의 고유종들 간의 관계를 변화시키고 있으며, 일부 고유종은 다른 고유종의 생태에 영향을 미치고 있다. 이 과정에 침입외래종이 생태계에 도입되고 정착될 경우, 침입외래종을 박멸하기보다는 생태계가 천이되는 단계에서 침입외래종이 생태계의 한 종으로 역할할 수 있도록 생태계를 관리하는 방법을 만들어가는 정책 접근이 현실적일 수 있다 (Hobb et al., 2006; Stromberg et al., 2009; Walther et al., 2009). 이 방법은 기후변화와 관계없이 이미 선별적으로 사용되고 있으며, 침입외래종의 서식처 및 고유종에 따라 상당한 효과를 나타내고 있다 (Walther et al., 2009; Schweiger et al., 2010). 이를 기후변화에 따른 침입외래종을 관리하는 전략으로 적용하는 것이다.

기후변화와 침입외래종이 생태계에서 우점화하지 않도록 기후변화와 침입외래종의 정착과 확산을 방지할 수 있는 생태계 고유의 복원력(resilience)이 유지되어야 한다. 이를

위해서는 기후변화와 침입외래종의 확산에 의해 생존을 위협받는 고유종을 조사하고 적극적으로 보호하여야 한다. 기후변화에 따라 침입외래종이 생태계에 확산될 수 있는 위협요인(오염, 염화, 목축지, 부영양화, 과도한 수확 등)을 개선시키고, 황무지 생활사를 지닌 침입외래종이 정착할 수 있는 터전을 사전에 제거하는 한편, 선별된 고유종을 도입 또는 식재해야 한다. 자연생태계에 성공적으로 정착한 침입외래종은 교란이 빈번하고 강하게 일어나는 지역에 많이 발생한다. 또한 침입외래종은 빠른 생식 시기와 많은 수의 후대를 빠르게 생산하는 특징을 가지고 있다. 침입외래 식물의 경우, 대부분 목본이 아닌 일년생, 이년생 초본으로 대부분이 생태계가 교란된 지역에 빠르게 정착하는 경우가 많다 (Grime, 2006; Herron et al., 2007). 침입외래종의 종류와 새로운 생태계에 정착되는 특성을 고려하여, 생태계의 기본 체계가 유지될 수 있도록 생태계의 안정성(stability)과 복원력(resilience)을 제고시킴으로써 폭우, 홍수, 한발, 산불·들불, 태풍 등 기후변화로 인한 자연의 극한사상이 발생한 이후에도 침입외래종에 의해 생태계가 교란되고 황폐화되는 것을 사전에 방지하는 것이다 (Boesch and Goldman, 2009).

5. 침입외래종의 인식제고, 교육과 홍보

침입외래종에 대한 적극적이고 지속적인 대국민 인식 제고와 교육, 홍보가 이루어져야 한다. 외국으로부터 침입외래종의 도입을 방지하기 위하여 검역 관련 인력의 교육과 훈련이 이루어져야 한다. 자연생태계와 공항과 항구 등의 검역 단계에서 침입외래종을 조사하고 확인하기 위한 지침을 마련하고 보급하며, 가장 주요한 이해 당사자인 국민을 대상으로 교육과 홍보가 적극적으로 이루어져야 한다. 특히, 기후변화와 침입외래종의 확산 등에 교육과 홍보가 이루어지고, 이를 국민적 차원에서 이해하며 국민이 적극적으로 협력·참여할 수 있는 기반을 마련해야 한다.

우리나라에서 이행하고 있는 기후변화와 침입외래종에 대한 국민의 인식제고, 교육과 홍보 정책은 초기단계이다. 국민을 적극적이고 지속적으로 협력·참여시키는 정부의 정책과 노력은 우리나라 뿐 아니라 선진외국에서도 어렵다. 미국, 유럽, 호주에서도 기후변화와

침입외래종의 확산 등에 대응하는 정부의 정책과 국민의 협력·참여가 최근까지 문제가 되었으며, 이에 대응하는 정책이 최근 마련되어 추진되고 있다. 예를 들면, 기후변화와 침입외래종 문제는 미국의 백악관과 연방정부의 주요 정책안건으로 논의되었으며, 침입외래종에 의한 위해성을 감소시키기 위한 생태계 적응정책의 일환으로 국민의 교육과 홍보 강화 정책이 2014년 마련된 바 있다 (Council on Climate Preparedness and Resilience & Natural Resources Working Group, 2014; President's State, Local and Tribal Leaders Task Force on Climate Preparedness and Resilience, 2014; Council on Environmental Quality, 2012). 최근 유럽연합의 침입외래종 문제에 접근하는 주요 프로그램인 LIFE 프로그램에서도 일반국민과 이해당사자들의 인식제고를 다루고 있으며 (EU, 2014b), 영국과 호주에서도 기후변화와 침입외래종에 대한 인식제고, 교육과 홍보는 프로그램을 수립하여 지속적이고 적극적으로 이루어지고 있다.

특히, 영국에서는 기후변화와 침입외래종 문제를 접근하는 교육과 홍보 프로그램을 최근 수립하고 운영하기 시작했다. 교육과 홍보 프로그램의 내용[38]은 기후변화와 침입외래종에 대한 영국의 정부, 관련기관과 조직, 국민 개인이 할 일로 구성된다 (UK Arkive, 2015.9.2). 이러한 협력·참여할 수 있는 교육·홍보 내용은 국민에게 기후변화와 침입외래종에 대한 인식 제고를 위해 우리나라에서도 참고할 수 있다.

---

38) i) 지역의 조경 또는 정원 설계 단계에서 지역의 고유종을 구매 및 이용. 고유종이 아닐 경우에는 지역의 침입외래종이 아닌 것을 확인하도록 한다. ii) 수생식물을 야생에 버리지 않도록 할 것. 적절히 수생생물을 폐기하여 야생에서 새로운 생태 집단이 정착되는 것을 방지할 것. iii) 침입 수생생물종의 확산은 요트, 카약, 낚시 등의 수상 여가활동에 따라 증가한다. 수상 활동 이후 살아 있는 생물이 물과 육지 간에 이동되는 것을 방지하기 위하여 장비에서 깨끗이 생물체를 제거할 것. 생물체가 남아 있을 수 있는 장비는 완전히 말릴 것. iv) 침입외래종 관련 앱(Apps) 개발 및 이용. 침입외래종을 확인하고 보고할 수 있는 웹사이트(websites), 스마트폰 프로그램을 개발하고 홍보할 것. 이러한 프로그램의 운용 결과는 침입외래종의 분포를 모니터링하게 할 수 있으며, 이 정보는 침입외래종의 공간 정보와 관리에 활용할 수 있다. v) 자연생태지역 방문 시 운송 차량과 장비, 의복을 깨끗이 할 것. 많은 수의 침입외래종의 종자는 운송 차량과 장비, 방문자의 의복에 붙어 이동한다. vi) 자연생태계지역을 훼손하지 말 것. 훼손된 자연생태계 지역에는 침입외래종이 빠르게 정착 및 확산된다. vii) 거주 지역에서 침입외래종을 박멸하는 캠페인에 적극 참여할 것. viii) 국제 통관 규정에 따라 외국으로부터 동식물 등 유기물질을 가져오지 말 것. ix) 거주 지역에서 침입외래종을 확인하고 소유하고 있는 침입외래종을 제거할 것. 침입외래종을 제거한 지역은 고유종으로 즉시 대체할 것. x) 침입외래종의 위해성을 다른 사람들에게 적극 전달하고 적극 대처하도록 유인할 것(UK Arkive, 2015).

6. 연구 및 정보교환

기후변화에 따른 침입외래종 관리를 과학적으로 지원하기 위한 침입외래종의 국내 도입, 정착 확산 예측 기술, 정보수집 및 보급, 침입외래종의 방제, 박멸, 제어기술이 개발되어야 한다. 그리고 기후변화와 침입외래종이 취약생태계에 미치는 영향을 단계별로 모니터링 및 확인하는 연구는 침입외래종의 관리와 경제·사회적인 타당성을 제공한다. 이 사업들은 기후변화와 침입외래종의 관리는 과학과 정보에 기반을 두고 이루어져야 한다. 기후변화와 침입외래종에 대한 현재의 지식과 정보를 인식하고, 기후변화에 따른 침입외래종의 생태적 변화를 이해할 수 있는 지식과 정보, 이들의 차이를 보완할 수 있는 과학적이고 논리적인 정보(DB 등)와 자료를 제공할 수 있는 연구가 이루어져야 한다.

기후변화와 침입외래종의 시공간적 군집변화에 따른 침입외래종별·지역별·생태계 기반 관리 정책이 도출되고, 침입외래종을 검역, 지역별로 침입외래종을 방제와 박멸할 수 있는 생물, 물리, 화학적 기술이 제공되고 개발되어야 한다. 기후변화(CO_2 농도, C:N 비율, 요소간의 상호작용)에 따른 외래종과의 관계를 이해하기 위한 정보와 지식이 필요하다. 기후변화를 고려한 침입외래종의 박멸 또는 방제 방법으로 제시되고 있는 생물학적 및 농약(제초제, 살충제 등)을 이용하는 화학적 관리방법에 대한 효율성의 변화에 대한 연구가 필요하다. 이는 기온과 습도, CO_2 농도, C:N 비율, 관련 요소간의 상호작용에 의해 침입외래종의 현존하는 생물학적 천적(biological agent)과 제초제, 살충제 등의 침입외래종 제어효율이 변화하기 때문이다. 기후변화와 지역의 기후와 생태적 특성에 따른 생물, 물리, 화학적 제어 방법의 효율성을 높이기 위한 침입외래종의 관리수단 개발이 필요하다.

현재 침입외래종과 향후 잠정적인 침입외래종에 대한 스크리닝, 검역, 정착 및 확산 예측, 침입외래종의 빠른 발견, 지역별 침입외래종의 관리전략 및 수단(생물, 물리, 화학적 박멸 또는 방제기술), 정보 공유 및 정보 체계, 일반국민과 이해당사자들의 인식제고, 침입외래종의 거래규제 등에 관한 입법화 등 효과적인 침입외래종의 정책 수단의 개발 등에 대한 연구가 진행되기 위해서는 상당한 규모의 연구 사업이 이루어져야 한다. 1992년 시작한 EU의 LIFE 프로그램은 매년 20여개가 진행되고 있으며, 최근까지 수행한 265개

프로젝트(약 7,000만 유로 지원)가 침입외래종의 박멸, 방제, 초기 발견과 빠른 대응 등 침입외래종의 문제 해결을 위한 수단 개발 및 이행에 관련되어 있음을 고려할 필요가 있다 (EU, 2014b).

이해당사자들(중앙정부, 지자체, 국민, 전문가 등)과의 정보공유체계가 구축되어야 한다. 침입외래종에 관련된 정보공유체계로는 유럽연합의 DAISIE(Delivering Alien Invasive Species Inventories for Europe), IUCN의 GISD(Global Invasive Species Database)/NBII (National Biological Information Infrastructure) 등 선진외국에서 시행하고 있는 다양한 정보공유체계의 사례가 있다. 이들 정보공유체계는 정부와 전문가들이 정보를 공유할 뿐 아니라, 정부와 민간이 정보를 공유하고 있다. 침입외래종에 대한 입법과 관리 뿐 아니라, 민간으로부터의 외래종 정보를 전달하며, 이에 대한 정보를 확인 및 교환할 수 있는 체계를 유지하고 있다. 이러한 정보공유체계는 정보의 공유 뿐 아니라, 침입외래종의 대국민 교육과 홍보수단으로 사용된다. 이들 정보공유체계 사례를 고려하여 우리나라의 정보 공유체계를 구축할 수 있다.

7. 법, 제도의 보완

기후변화와 침입외래종의 생태계기반관리에 있어 고려되는 법, 제도의 보완은 검역, 거래규제, 정책 이행을 위하여 부족한 과학적 조사 및 자료의 차이를 메울 수 있는 연구, 빠른 경보체계와 정보공유체계를 가동하기 위한 재원확보 문제이다.

첫째, 검역부문에서는 침입외래종 목록개발 및 적용이다. 식물방역법 제2조, 시행규칙 제4조 검역병해충에 검역대상 생물을 보완해야 한다. 검역대상 생물에는 생태계교란생물과 더불어 침입외래종이 구체적으로 포함되어 있어야 한다. 환경부는 검역 대상이 되는 침입외래종의 목록을 제공해야 한다. 이를 통해 자연생태계를 위협하는 침입외래종의 국내 도입을 사전에 차단할 수 있다.

둘째, 거래규제 침입외래종에 대한 법적 규제 장치의 보완을 고려해야 한다. 현재 침입외래종의 거래를 규제하는 장치가 부재하다. 자연생태계에 위해한 침입외래종의 목록과

더불어, 이들 침입외래종은 국내 또는 해외에서 구매 및 거래하는 것을 방지할 수 있어야 한다. 이를 「야생생물 보호 및 관리에 관한 법률」의 보완을 통해 가능할 것이다.

셋째, 기후변화와 침입외래종 문제를 접근할 때, 가장 기본적인 것은 정보와 자료의 부재이다. 기후변화에 따라 침입성이 변화될 수 있는 외래종에 대한 과학적 정보와 경제·사회적인 관련 자료의 축적이 필요하다. 기후변화에 따라 변화될 수 있는 침입외래종의 침입력, 공간분포 등을 예측할 수 있는 수단이 개발되어야 한다. 외래종의 도입과 정착 단계에서 가장 효과적으로 대응하기 위한 빠른 경보체계와 정보공유체계를 가동할 수 있어야 한다. 이러한 핵심 연구와 사업을 진행할 수 있는 예산이 확보되어야 한다. 이를 지원할 수 있는 법적 수단이 제시되어야 한다.

침입외래종의 관리에 관한 많은 부문은 정부의 거버넌스 변화를 통해 이루어질 수 있다. 예를 들면, 효과적인 침입외래종의 정책 수단 개발과 정책 이행이 가능할 것으로 보인다. 이해당사자들(중앙정부, 지자체, 국민, 전문가 등)간에 기후변화에 따른 침입외래종의 생태적 변화를 이해할 수 있는 지식과 정보, 이들의 차이를 보완할 수 있는 과학적이고 논리적인 정보(DB 등)를 제공하는 정보공유 체계를 마련할 수 있을 것이다. 관련 중앙정부와 지자체 등이 협력할 수 있는 체계를 통해 이루어질 수 있을 것이다.

| 제5장 · 결론 |

우리나라에서 침입외래종의 문제는 경제·사회적으로 심각한 문제가 나타나기 전에는 대부분의 관심에 벗어나 간과되어 왔다. 정부의 자연환경 정책에서도 우선순위가 높은 관심 분야가 아니었다. 그러나 외래종이 우리의 경제·사회·문화에 끼쳐 온 영향(외래종에 의한 생태계서비스 훼손 등)은 인류의 역사에서 가장 심각한 문제를 나타내 왔다. 특히, 침입외래종에 의한 생태계 변화는 자연적으로 회복하는 것이 거의 불가능하다. 인류의 생존을 위협하고 있는 기후변화와 연계된 침입외래종의 문제는 향후 더욱 심각한 문제로 나타날 수 있다. 이러한 문제로 인해 침입외래종은 국제적으로는 생물다양성을 훼손하는 주요 요인이며, 더욱이 기후변화에 따라 생태계에 더욱 큰 변화를 야기하는 침입외래종의 문제는 향후 인류가 적극적으로 대응해야 할 핵심 과제로 제기되어 있다 (GISP, 2014; UN Open Working Group on Sustainable Development Goals, 2014).

기후변화와 침입외래종의 문제는 점차 불거지고 있음에도 불구하고 이 분야에 대한 우리의 과학적 지식과 경험, 정책수립과 집행은 이제 걸음마 단계이다. 기후변화와 외래종의 도입, 정착, 확산에 나타나는 영향에 관한 우리의 이해와 과학적 지식은 불완전하나, 우리나라의 과학기술 기반을 고려할 때, 이 부문의 과학적 지식과 정보는 빠르게 축적될 수 있다. 이러한 과학 지식을 기반으로 하여 기후변화에 따른 침입외래종의 생태계기반 적응전략을 찾아나갈 수 있다. 과학기술이 정책을 이끌어 갈 수 있다 (Likens et al., 2010). 본 연구의 결과는 증거에 기반을 둔 과학의 역할을 통해 정책결정을 지원하고 있는 것이다.

기후변화에 의한 외래종의 도입, 이동, 분산, 확산은 외래종의 도입차단(예, 검역과 방역), 외래종의 생리·생태적 특성, 기주(병원체, 곤충의 경우)·먹이(동물의 경우), 매개체(매개체가 존재할 경우), 천적(동물의 경우)·경쟁자(동물, 식물의 경우), 서식처(식물의 경우), 그리고 환경조건(기후조건)에 의해 결정된다. 침입외래종의 문제를 해결하는 가장 효과적인 방법은 예방이 우선이다. 외국 또는 다른 생태계로부터 침입외래종이 도입되지

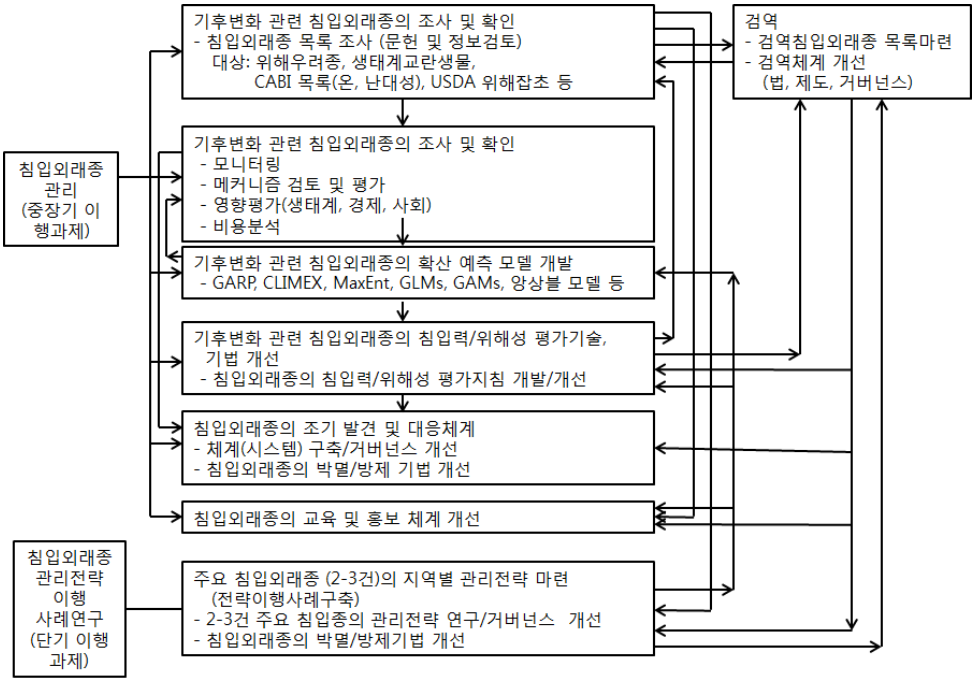
않도록 물리, 화학적으로 차단하는 것이다. 완전한 도입 차단이 어려운 상태에서는 기후변화에 의한 외래종의 이동, 분산, 확산을 예측할 수 있는 지표와 모델의 개발이 침입외래종의 초기 발견 및 빠르게 대응할 수 있는 효율적인 수단과 도구로 이용될 수 있다 (Pace et al., 2010; Smith et al., 2012). 기후변화와 이에 따른 침입외래종의 분포 변화에 대한 불확실성은 이미 주어진 것이다. 그러나 우리는 지속적으로 자연자원의 관리를 위한 의사결정과 자원의 할당에 도움을 주는 지식과 수단을 제고하고 개발시킴으로써 이를 극복할 수 있다. 국내 도입되고 침입성이 증가할 수 있는 침입외래종의 지역별 예측을 기반으로 하여 침입외래종의 분포에 따른 지역별 관리방안을 제안할 수 있다.

본 연구에서 제안하고 있는 전략에는 이미 국내에서 상당한 수준에서 시행하고 있는 내용이 있으며, 그동안 이행 상의 여러 현실적인 문제를 극복하지 못해 보류 또는 이행이 더디게 진행되고 있는 것들이 있다. 예를 들면, 침입외래종의 문제를 해결하기 위한 관련 정부 당국 간의 소통과 협력 문제이다. 특히 정책을 집행하기 위한 예산의 확보는 앞으로도 극복해야 할 장벽이다.

우리는 특정한 과학, 예를 들면 외래종에 관한 과학과 지식이 정책으로 연결되기까지 허용된 골든타임을 놓치게 되면, 이로 인해 막대한 대가를 지불했던 것을 국내외에서 여러 차례 보아왔다 (Pouyat et al., 2010; Smith et al., 2012). 미국과 유럽, 호주의 사례를 볼 때, 우리는 이미 침입외래종 문제를 효과적으로 해결하기 위한 골든타임을 지나쳐 있다고 할 수 있다. 향후 침입외래종의 문제는 더욱 확대될 것이다.

본 연구는 기후변화와 생태계 변화에 기반을 둔 침입외래종의 관리 전략을 제안하고 있다. 침입외래종에 대한 용어의 정의, 국내외 침입외래종 문제와 전망, 침입외래종과 생태계 기반관리의 개념과 국내외 정책을 다루었다. 그리고 본 연구는 기후변화와 침입외래종의 분포 변화를 예측하고, 이에 대한 국내외 여건과 사례 분석, 과학적 지식과 정보를 토대로 하는 침입외래종의 생태계기반 관리 전략을 제시한 것이다. 이 전략은 기후변화에 민감하게 생리·생태적으로 반응하는 침입외래종을 대상으로 정책에서 접근해야 할 방향과 큰 틀에서의 전략과 수단을 제안하고 있다. 현장에서 침입외래종의 생태계 기반관리전략이

이행되기 위해서는 지역의 특성과 침입외래종별로 침입외래종의 위해성과 정확한 공간 분포를 고려하여 지역별 구체적인 수단과 방법이 추후 마련되어야 할 것이다. 이를 포함하여 기후변화와 침입외래종 문제를 접근하는 향후 정책을 다음과 같이 정리할 수 있다.



〈그림 5-1〉 기후변화와 침입외래종의 향후 추진 사업의 체계도

- 기후변화에 따른 침입외래종의 검역 목록 마련
- 기후변화 관련 침입외래종의 조사 및 확인: 모니터링, 메커니즘의 검토 및 평가, 생태·경제·사회적 영향 평가, 경제성 분석
- 기후변화에 따른 침입외래종의 침입성/위해성 평가기술, 기법 마련, 평가체계의 개선
- 침입외래종의 빠른 조기발견과 신속한 대응체계 마련
- 기후변화에 따른 침입외래종의 분포확산 모델 개발 (불확실성을 낮추고 신뢰성을 제고)

- 침입외래종 교육과 인식 확산 체계 마련
- 침입외래종의 생리·생태학적 지식과 정보의 축적
- 법과 제도, 거버넌스의 개선 (검역체계, 침입외래종의 거래규제, 침입외래종의 빠른 조기발견과 신속한 대응체계, 예산확보 등)

기후변화와 외래종, 외래종의 위해성을 평가함에 있어 고려해야 할 불확실성 문제 해결 등이 우선순위가 높은 정책으로 선택되고 이행되기 위해서는 넘어야 할 어려운 장벽들이 다수 있다. 침입외래종 장벽을 넘고 문제를 접근함에 있어 외래종별로 접근하는 것이 현실적으로 우선하는 과제이다. 이러한 연구에서 축적된 지식과 정보, 그리고 사례를 통해 침입외래종에 대한 구체적이고 현실적인 대안과 정책이 이행될 수 있기 때문이다. 국내에서 침입성이 매우 우려되고 있는 가시박, 애기수영, 돼지풀. 단풍잎돼지풀, 소나무재선충, 뉴트리아, 황소개구리, 붉은귀거북, 파랑볼우럭(블루길), 큰입배스(배스), 뒤영벌, 꽃매미, 솔잎혹파리 중에서 침입성과 시의성이 높은 2~3건의 침입외래종을 선별하여 기후변화에 따라 발생할 수 있는 문제를 확인하고 침입외래종에 대한 생태계기반관리 전략, 수단과 방법을 마련하는 것이 선택적이고 효율적인 정책 사업이 될 것이다.

| 참고 문헌 |

<국문 자료>

관계부처 합동. 2011.「국가기후변화적응대책(2011-2016) 세부시행계획」.

경상북도농업정보 DB. 2015.「오이해충의 발생생태와 방제대책」. http://db.gba.go.kr/sub02/sub01_view.php? info_no=200&kind_code=07.

국립산림과학원. 2013.「소나무재선충 매개충의 생태 및 천적 이용 연구」.

_____. 2014. "New 소나무재선충의 생태와 방제". 산림과학속보 제14-22호.

국립생태원. 2014.「외래생물 등의 생태계위해성평가 및 위해우려종의 생태계위해성 심사에 관한 규정」 제38호, 2014.8.26.

국립환경연구원. 1996.「귀화생물에 의한 생태계 영향조사 (II)」.

기상청. 2015a.「기상자료개방포털」. www.data.kma.go.kr.

_____. 2015b.「기후변화정보센터」. www.climate.go.kr.

문일성, 정영진, 김철수 외. 2014.「소나무재선충 매개충의 생태특성 및 천적 이용 연구」. 국립산림과학원.

박용하, 이상돈, 김정원. 1998.「외래종 유입에 대한 환경정책 추진방향」. 한국환경정책·평가연구원 KEI/1998/WO-5.

박용하. 2005.「기후변화에 따른 생물다양성의 보전」. 자연보존 132:1-6.

박용하, 노태호, 안소은, 최재용 외. 2006.「생물다양성협약의 국가 대응체계 구축방안 연구」. 환경부.

박창규, 정명표. 2012. "CLIMEX®를 이용한 국내 침입 외래 해충의 정착 예측".「한국응용곤충학회 춘계학술대회」. p.20.

방상원, 김문희, 노태호. 2004.「생태계위해종의 통합관리방안연구」. 한국환경정책·평가연구원 KEI/2004/RE-2.

방상원, 변화근, 심재한, 최병진, 이상범, 문유리, 노백호, 신가은, 박주현, 정재현. 2006.「국내도입 외래종 동물의 현황 파악 및 생태계 위해성 등급 분류 연구」. 환경부.

이요한, 석덕현, 구자춘. 2014. “소나무재선충병과 방제정책 과제”. 「KREI 농정포커스」 제87호. 한국농촌경제연구원.

이용호. 2015. 「기후변화에 따른 외래식물의 분포와 확산」. 전문가 요청 원고.

전성우, 박용하, 정휘철, 이동근, Matsuoka, Y., Harasawa, H., Takahashi, K. 2002. 「기후변화에 따른 생태계 영향평가 및 대응방안 III (삼림부문을 중심으로)」. 한국환경정책·평가연구원 RE-08.

정찬식 등. 2006. 「소나무재선충병 생태특성 연구」. 국립산림과학원 연구보고서.

최광식, 이상명, 김동수, 김준범, 정영진. 2011. 「사진으로 보는 한국의 소나무재선충병 발생사」. 국립산림과학원 연구자료.

한혜림 등. 2014. 「한국의 재선충속(Bursaphelenchus) 선충」. 국립산림과학원 연구자료.

환경부. 2009. 「생태계교란야생동·식물 자료집」.

_____. 2014a. 「환경백서」.

_____. 2014b. “침입외래종생물의 위협으로부터 풍요로운 한반도 생태계보전”. 「제1차 외래생물 관리계획(2014-2018)」. 환경부.

_____. 2014c. 「외래생물 유입에 따른 생태계 보호대책」.

홍선희. 2015. “식물생태계의 불청객 생태계교란외래식물”. 한국환경정책·평가연구원 전문가초청 발표자료.

<영문 자료>

Ahlenius, H. 2010. *UNEP/GRID-Arendal.* http://maps.grida.no/go/graphic/projected-agriculture-in-2080-due-to-climatechange.

Antia, R. R., Koella, J. C., and Bergstrom, C. T. 2003. “The role of evolution in the emergence of infectious diseases”. *Nature,* 426:658-660.

Association of Fish and Wildlife agencies, Council on Environmental Quality, Great Lakes Indian Fish and Wildlife Commission, National Oceanic and Atmospheric Administration, and US Fish and Wildlife Service. 2012. *National Fish, Wildlife and Plants Climate*

Adaptation Strategy. Washington, D. C.

Australian Biological Diversity Advisory Committee. 2008. *Climate change and invasive species: A review of interaction*. Nov 2006 Workshop Report.

Australian Biosecurity Group. 2005. *Invasive Weeds, Pests and Diseases: Solutions to Secure Australia CRC for Pest Animal Control, CRC for Australian Weed Management*. WWF-Australia, Canberra.

Australian Invasive Species Council, 2011. *Inquiry into Australia's biodiversity in a changing climate*". Australian Invasive Species Council.

____. 2015. *Invasive species and climate change*. web: www.invasives.org.au.

Australian Weed Committee. 2013. *Weed of National Significance (WoNA)*.

Ballard, T. O., Foley, M. E. and Bauman, T. T. 1996. "Response of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) and giant ragweed (*Ambrosia trifida*) to postemergence Imazethapyr". *Weed Science,* 44:248-251.

Barbosa, F., Schneck, F., and Melo, A. 2012. "Use of ecological niche models to predict the distribution of invasive species: a scientometric analysis." *Braz. J. Biol.*, 72(4): 821-829. CABI International.

Barnes, M. A. et al. 2014. "Adapting to invasion in a changing world: Invasive species as am economic resource". pp.326-344. Ziska L. and Dukes, J. eds. In *Invasive Species and Global Climate Change*.

Baskin J. M. and Baskin C. C. 1977. "Dormancy and germination in seeds of common ragweed with reference to Beal's buried seed experiment". *American Journal of Botany*, 64: 1174-1176.

Basset, I. J. and Crompton, C. W. 1975. "The biology of Canadian weeds: 11. *Ambrosia artemisiifolia* L. and *A. psilostachya* D. C.". *Canadian journal of plant science*, 55:463-476.

Bazzaz, F. 1974. "cophysiology of Ambrosia artemisiifolia: a successional dominant". *Ecology,* 55:112-119.

Brandes, D. and Nitzsche, J. 2006. "Biology, introduction, dispersal, and distribution of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) with special regard to Germany". *Nachrichtenblatt des deutschen Pflanzenschutzdienstes,* 58:286-291.

Boesch, D. F. 2006. "Scientific requirements for ecosystem-based management in the restoration of Chesapeake Bay and Coastal Louisiana [pdf]". *Ecological Engineering,* 26(1):6-2.

Boesch, D. F. and E. B. Goldman. 2009. "Chesapeake Bay, USA". in *Ecosystem-Based Management for the Oceans*. K. McLeod and H. Leslie eds. pp.268-293. Island Press.

Bullock, J. M. et al. 2013. "Assessing and controlling the spread and the effects of common ragweed in Europe". p.456. *Uropean Commission* ENV.B2/ETU/2010/0037.

Burgiel, S. W. and Muir, A. A. 2010. "Invasive Species, Climate Change and Ecosystem Based Adaptation: Addressing Multiple Drivers of Global Change". *Global Invasive Species Programme (GISP)*, Washington, D. C., USA, and Nairobi, Kenya.

Busby, J. R. 1991. "BIOCLIM-a bioclimate analysis and prediction system". In: *Nature Conservation: Cost Effective Biological Survey sand Data Analysis*. (eds Margules, C. R. and Austin, M. P.). CSIRO, Melbourne. p.64-68.

Callaway, R., Miao, S., and Guo, Q. 2006. "Are trans-Pacific invasions the new wave? " *Biological Invasions,* 8:1435-1437.

Capdevila-Argüelles, L., and Zilletti, B. 2008. A perspective on climate change and invasive alien species. Convention on the Conservation of European Wildlife and Natural Habitats: 2nd Meeting of the Group of Experts on Biodiversity and Climate Change.

CABI (Centre for Agriculture and Biosciences International). 2015. *Invasive Species Compendium.* http://www.cabi.org/isc.

Carlton, J. T. 2000. "Global change and biological invasions in the oceans". *Invasive species in a changing world.* pp.31-53. H. A. Mooney and R. J. Hobbs, eds. Island Press, Covelo, California.

CBD (Convention on Biological Diversity) 2014. "Global Biodiversity Outlook 4". *A mid-term assessment of progress towards the implementation of the Strategic Plan for Biodiversity* 2011-2020. Montreal. p.155.

CBD. 2015. *Convention on Biological Diversity*. https://www.cbd.int.

Chincorteague Wild Ponies. 2012. http://www.chincorteague.com/ponies.html.

Colls, A., Ash, N., and Ikkala, N. 2009. *Ecosystem-based adaptation: a natural response to climate change*. Gland, Switzerland. IUCN.

Carpenter, G., Gillison, A. N., and Winter, J. 1993. "DOMAIN: A flexible modelling procedure for mapping potential distributions of plants and animals", *Biodiver Conserv*. 2: 667-680.

Chauvel, B. et al. 2006. "The historical spread of *Ambrosia artemisiifolia* L. in France from herbarium records". *Journal of Biogeography*, 33:665-673.

Chytrý, M. 2009. *Vegetation of the Czech Republic. 2. Ruderal, Weed, Rock and Scree Vegetation*. Academia, Praha.

Commonwealth of Australia. 2008. *Climate Change and Invasive Species: A Review of interaction*. Commonwealth of Australia.

Commonwealth of Australia, 2012. www.daff.gov.au/animal-plant-health/pihc.

Council on Climate Preparedness and Resilience and Natural Resources Working Group. 2014. *Priority Agenda: Enhancing the Climate Resilience of America's Natural Resources*.

DAISIE (Delivering Invasive Alien Species In Europe). 2015. http://www.europe-aliens.org/speciesTheWorst.do.

Darren, R. et al. 2010. "Pest risk maps for invasive alien species: A Roadmap for Improvement". *BioScience,* 60:349-362.

Deen W., Hunt L. A. and Swanton C. J. 1998a. "Photothermal time describes common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) phenological development and growth". *Weed*

Science, 46:561-568.

Deen W., Hunt T. and Swanton C. J. 1998b. "Influence of temperature, photoperiod, and irradiance on the phenological development of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*)". *Weed Science,* 46:555-560.

Deen W., Swanton C. J. and Hunt L. A. 2001. "A mechanistic growth and development model of common ragweed". *Weed Science,* 49:723-731.

Dukes J. S. and H. A. Mooney. 1999. "Does global change increase the success of biological invaders? " *Trends in Ecology and Evolution,* 14(4):135-139.

Dullinger, S., Kleinbauer, I., Essl, F., and Peterseil, J. 2006. *Ein allergener Neophyt und seine potentielle Ausbreitung in Österreich - Arealdynamik der Ambrosie (Ambrosia artemisiifolia) unter dem Einfluss des Klimawandels (An allergenic neophyte and its potential spread in Austria-the complex dynamics of ragweed (Ambrosia artemisiifolia) under the influence of climate change).* StartClim2005 Climate Change and Health C5. Ed. Vinca, Umweltbundesamt Wien, Vienna.

Ecologic Institute EU. 2015. *Ecosystem-based Approaches for Climate Change Adaptation and Mitigation.* http://www.ecologic.eu/3931.

EEA. 2010. *Towards an early warning and information system for invasive alien species (IAS) threatening biodiversity in Europe.* EEA Technical report No 5/2010. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Union.

____. 2012a. *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012 - an indicator-based report.* EEA Report No 12/2012, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark.

____. 2012b. *Invasive alien species indicators in Europe - a review of streamlining European biodiversity (SEBI) Indicator 10.* EEA Technical report No 15/2012, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark.

____. 2012c. *The impacts of invasive alien species in Europe.* EEA Technical report No 16/2012, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark.

____. 2015. *The European environment – state and outlook 2015: synthesis report*, European Environment Agency, Copenhagen.

Elith, J. 2015. *Chapter 6: Predicting distributions of invasive species*.(http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1312/1312.0851.pdf).

Environment Canada. 2004. *An invasive alien species strategy for Canada*. https://ec.gc.ca/eee-ias/default.asp? lang=En&n=1A81B051-1.

EPPO. 2009. *Ambrosia artemisiifolia*. OEPP/EPPO Bulletin 38:414-418.

Essl, F., Dullinger, S. and Kleinbauer, I. 2009. "Changes in the spatio-temporal patterns and habitat preferences of *Ambrosia artemisiifolia* during its invasion of Austria". *Preslia,* 81, pp.119-133. Academia Prag.

EU (European Union). 2014a. *Invasive Alien Species: a European response. Luxembourg: Publications Office of the European Union.*

___. 2014b. *LIFE and Invasive Alien Species. Luxembourg: Publications Office of the European Union.*

Ferrier, S. et al. 2002. "Extended statistical approaches to modelling spatial pattern in biodiversity in north-east New South Wales. II.". *Community-level modelling. Biodiver. Conserv,* 11:2309-2338.

Fumanal, B., Gaudot, I., and Bretagnolle, F. 2008a. "Seed-bank dynamics in the invasive plant, *Ambrosia artemisiifolia* L". *Seed Science Research,* 18:101—114.

Fumanal, B .et al. 2008b. "Can the large ecological amplitude of *Ambrosia artemisiifolia* explain its invasive success in France? " *Weed Research,* 48:349-359.

Gardener, M. R., Atkinson, R., and Renteria, J. L. 2010. "Eradications and people: lessons from the plant eradication program in Galapagos". *Restor. Ecol,* 18:20-29.

Gaertner, M., Breeyen, A. D., Hui, C., and Richardson, D. M. 2009. "Impacts of alien plant invasions on species richness in Mediterranean-type ecosystems: a meta-analysis". *Prog. Phys. Geogr;* 33:319-38.

GISP. 2014. *Invasive Species and Poverty: Exploring the Links*. http://www.issg.org/pdf/publications/GISP/Resources/invasivesandpoverty.pdf.

Gorman, J. 2011. "A diet for an invaded planet: Invasive species". *New York Times*. 2 Jan. 2012.

Grime, J. P. 2006. *Plant strategies, vegetation processes, and ecosystem properties*. John Wiley and Sons.

Griffin, J. 2012. "Craftmen seek profit in Everglades pythom boom". *Sun Sentine*. 20 Feb. 2012.

Grumbine, R. E. 1994. "What is Ecosystem Management? ". *Conservation Biology*. 8:27-38.

Hansen, A. 2011. "Keynote: Land-Use Change in the Greater Yellowstone Ecosystem: Past, Present, and Possible Future Patterns and Consequences. In Questioning Greater Yellowstone's Future: Climate, Land Use, and Invasive Species". *Proceedings of the 10th Biennial Scientific Conference on the Greater Yellowstone Ecosystem*. October 11-13, 2010, Mammoth Hot Springs Hotel, Yellowstone National Park. C. Andersen, eds., 38-45.

Hanski I., Moilanen A., Pakkala T. and Kuussaari M. 1996. "The quantitative incidence function model and persistence of an endangered butterfly metapopulation". *Conservation Biology,* 10:578-590.

Hellmann, J. et al. 2008. "Five Potential Consequences of Climate Change for Invasive Species". *Conservation Biology*, 22(3):534-543.

Herron, P. M. et al. 2007. "Invasive plants and their ecological strategies: prediction and explanation of woody plant invasion in New England". *Diversity and Distributions,* 13(5):633-644.

Hijmans, R. J. and Graham, C. H. 2006. "The ability of climate envelope models to predict the effect of climate change on species distributions". *Global Change Biology,* 12: 1-10.

Hirzel, A. and Guisan, A. 2002. "Which is the optimal sampling strategy for habitat suitability modelling". *Ecol. Model* 157:331-341.

Hobbs R. J. 2000. "Invasive Species in a Changing World. Island Press. Washington, D. C.", *Covelo London*. p.457

Hobbs R. J. and Mooney, H.A. 2014. "Invasive Species in a Changing World: The Interaction s between Global Change and Invasives". *Invasive Alien Species A New Synthesis*., pp.31 0-331. In H. A. Mooney, R. N. Mack, J. A. McNeely, L. E. Neville, P. J. Schei and J. K. Waage. eds. Washington D. C., Covelo London.: Island Press.

Hobbs R. J. et al. 2006. "Novel ecosystems: theoretical and management aspects of the new ecological world order". *Glob. Ecol. Biogeogr*: 15:1-7.

Hughes, L. et al. 2013. *Prioritising naturalised plant species for threat assessment: Developing a decision tool for managers, National Climate Change Adaptation Research Facility, Gold Coast.*

Hulme, P. E.. 2009. "Trade, transport and trouble: managing invasive species pathways in an era of globalization". *Journal of Applied Ecology.* 2009. 46:10-18.

Hulme, P. E.. Vila, M., Nentwig, W., and Pyšek, P. 2010. "Are the Aliens taking over? Invasive species and their increasing impact on biodiversity". In: *Atlas of Biodiversity Risk*. 132-133.

IPBES (Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services). 2012. *Outcome of aninformal expert workshop on main issues relating to the development of a conceptual framework for the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. IPBES/1/INF/9.

IPBES. 2014. *Decisions of the Plenary of the Platform adopted at its second session.* IPBES/2/3.

IPCC. 2013. "Summary for Policy makers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis." *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the*

Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IUCN. 2010. Oct22. *Invasive species and climate change form a 'deadly duo', warn top scientists*. International news release.

_____. 2014. *A Framework for Identifying Invasive Alien Species of European Union concern*. http://www.iucn.org/about/union/secretariat/offices/europe/activities/current_projects/? 14467/A-framework-for-the-identification-of-Invasive-Alien-Species-of-EU-concern.

Johnson, C. 2006. *Australia's Mammal Extinctions: A 50,000 Year History*. Cambridge University Press, Melbourne.

Kazinczi, G. et al. 2008. "Common ragweed (Ambrosia artemisiifolia L.): A review with special regards to the results in Hungary. III. Resistant biotypes, control methods and authority arrangements". *Herbologia,* 9:119-144.

Kearney, M. R., Wintle, B. A., and Porter, W. P. 2010. "Correlative and mechanistic models of species distribution provide congruent forecasts under climate change". *Conservation Letters,* 3:203-213.

Kettunen, M., Genovesi P., Gollasch S., Pagad S., and Starfinger U. 2009. *Technical support to EU strategy on invasive species (IAS)-Assessment of the impacts of IAS in Europe and the EU (final module report for the European Commission)*. Institute for European Environmental Policy (IEEP), Brussels, Belgium.

Kolar, C. S., and D. M. Lodge. 2002. "Ecological predictions and risk assessment for alien fishes in North America". *Science,* 298:1233-1236.

Kompas, T. and Che, N. 2001. *An economic assessment of the potential costs of Red Imported Fire Ants in Australia*. Report for Department of Primary Industries, Queensland. Australian Bureau of Agriculture and Resource Economics, Canberra.

Kriticos, D. J. et al. 2015a. *CLIMEX Version 4: Exploring the effects of climate on plants, animals and diseases*. CSIRO, Canberra.

Kriticos, D. J. et al. 2015b. "The Potential Distribution of Invading *Helicoverpa armigea* in North America: Is It Just a Matter of Time?". *PLoS ONE,* 10(3):1-24.

Kriticos, D. et al. 2007. "Using a pheromone lure survey to establish the native and potential distribution of an invasive lepidopteran, *Uraba lugens*". *Journal of Applied Ecology,* 44:853-863.

Kwon, T. S. et al. 2006. "Distribution patterns of *Monochamus alternatus* and *M. saltuarius* (Coleoptera: Cerambycidae) in Korea". *J Kor. For. Soc,* 95(5):543-550.

Laberton, K. 1994. "Yucca! Teaching the essentials of a wild food feast". *American Biology Teacher,* 56:230-232.

Lambdon, P. W. et al. 2008. "Alien flora of Europe: species diversity, temporal trends, geographical patterns and research needs". *Preslia,* 80:101-49.

Lavoie, C., Jodoin, Y., and De Merlis, A.G. 2007. "How did common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) spread in Québec? A historical analysis using herbarium records". *Journal of Biogeography,* 34:1751-1761.

Lehmann, A., Overton, J., and Leathwick, J. 2002. "GRASP: generalized regression analysis and spatial prediction." *Ecol. Model,* 157:189-207.

Leiblein, M.C. and Lösch, R. 2011. "Biomass development and CO_2 gas exchange of Ambrosia artemisiifolia L. under different soil moisture conditions". *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants,* 206:511-516.

Leif, J. W. et al. 2000. "Growth and Response of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) ecotypes to imazethapyr". *Weed Technology,* 14:150-155.

Lemmen, D. S. and Warren, F. J. 2004. *Climate Change Impacts and Adaptation: A Canadian Perspective Agriculture*. www.adaptation.nrcan.gc.ca/ perspective/summary_5_e.php.

Lewis, H. Z. and Jeffrey, S. D. 2014. *Invasive Species and Global Climate Change*. CABI

Invasives Series 4.

Levins, M. and D'Antonio, C. M. 2003. "Forcasting biological invasions with increasing international trade". *Conservation Biology,* 17:322-326.

Levin, S. A. and Lubchenco, J. 2008. "Resilience, robustness, and marine ecosystem- based management". *BioScience,* 58:27-32.

Liao, C. Z. et al. 2008. "Altered ecosystem carbon and nitrogen cycles by plant invasion: a meta-analysis". *New Phytol,* 177:706-714.

Likens, G. E. 2010. "The role of science in decision making: does evidence-based science drive environmental policy? " *Front. Ecol. Environ*, 8(6):1-9.

Lowell, S. J., Stone, S. F., and Fernandez, L. 2006. "The economic impact of aquatic invasive species: a review of the literature". *Agric. Resour. Econ. Rev.* 35:195-208.

Mack, R. N. 2003. "Plant naturalizations and invasions in the eastern United States: 1634-1860". *Annals of the Missouri Botanical Garden,* 90:77-90.

Martin, P. and Lambinon, J. 2008. "*Ambrosia artemisiifolia* L., l'Ambroise anuelle, en Belgique. Emergence d'une xeneophyte et incidence potentielle en santé publique". *Natura Mosana,* 61:31-46.

Masters, G. and Norgrove, L. 2010. *Climate change and invasive alien species*. CABI Working Paper 1, p.30.

McGeoch, M. A. et al. 2010. "Global indicators of biological invasion: species numbers, biodiversity impact and policy responses. 2010". *Diversity and Distribution* 16:95-108.

Mateu, M. G., Michaelis, A., and Spitzer. S. *Ecosystem Based Management: The challenge of change* http://ian.umces.edu/blog/2015/02/10/ecosystem-based-management-the-challenge-of-change.

McLachlan, J. S., J. J. Hellmann, and M. W. Schwartz. 2007. "Assisted migration in an era of climate change". *Conservation Biology,* 21:297-302.

McNeely, J. A., Mooney, H. A., Neville, L. E., Schei, P., and Waage, J. K. (eds.) 2001.

A Global Strategy on Invasive Alien Species. IUCN Gland, Switzerland, and Cambridge, UK. x + p.50.

MEA(Millennium Ecosystem Assessment). 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends*. Island Press, Washington, D. C.

Morrison, L. W., M. D. Korzukhin, and S. D. Porter. 2005. "Predicted range expansion of the invasive fire ant, *Solenopsis invicta*, in the eastern United States based on the VEMAP global warming scenario". *Diversity and Distributions,* 11199-204.

Munyaradzi, C., and Mohamed-Katerere, J. 2003. *Invasive Alien Species*. www.unep.org/.../en/.../aeo-2_ch10_INVASIVE_ALIEN_SPECIES.pdf.

Naevdal, E., Olaussen, J., and Skonhoft, A. 2012. "A bioeconomic model of trophy hunting". *Ecological Economics,* 73:194-205.

NCSL (National Conference of State Legislatures). 2015. *Displaced by invaders: State action on invasive species*. http://www.ncsl.org/research/environment-and-natural-resources/displaced-by-invaders-state-action-on-invasive-species.aspx.

NISC and ANSTF (National Invasive Species Council and Aquatic Nuisance Species Task Force). 2014. *Bioinvasions in a Changing World: A Resource on Invasive Species-Climate Change Interactions for Conservation and Natural Resource Management*.

NNSS (Great Britain Non-native Species Secretariat). 2015. *The Great Britain Invasive Non-native Species Strategy. Department of Environment Food and Rural Affair, The Scottish Government, Llywodraeth Cymru Welsh Government*.

_____. 2015. http://www.nonnativespecies.org/home/index.cfm. *Department of Environment Food and Rural Affair, The Scottish Government, Llywodraeth Cymru Welsh Government*.

_____. 2008. *The Invasive Non-native Species Strategy for Great Britain: Protecting our natural heritage from invasive species. Llywodraeth Cymru Welsh Government, The*

Scottish Government, Department of Environment Food and Rural Affair.

Norway/UN Conference on Alien Species. 1996. *Chair's report: Conclusion and recommendations from presentations and discussion. Directorate for Nature Management (DN) and Norwegian Institute for Nature Research (NINA).* Tungasletta 2, N-7005 Trondheim, Norway.

Office of Technology Assessment, US Congress, 1993. *Harmful Non-Indigenous Species in the United States.* OTA Publication OTA-F-565. US Government Printing Office, Washington D. C.

Official Journal of the European Union. 2014. *Regulation (EU) No 1143/2014 of the European Parliament and of the Council of 22 October 2014 on the prevention and management of the introduction and spread of invasive alien species.*

Pace, M. L. et al. 2010. "Communicating with the public: opportunities and rewards for individual ecologists. Front". *Ecol. Environ,* 8(6):292-298.

Park, J. et al. 2014. "Predicting the Potential Geographic Distribution of *Thrips palmi* in Korea, using the CLIMEX model". *Entomological Research,* 44:47-57.

Pearson, R. G. et al. 2002. "SPECIES: A Spatial Evaluation of Climate Impact on the Envelope of Species". *Ecol. Model,* 154:289-300.

Pejchar, L. and Mooney, H. A. 2009. "Invasive species, ecosystem services and human well-being". *Trends in Ecology and Evolution,* 24(9):497-504.

Peltzer, D. A, et al. 2010. "Effect of biological invasions on forest carbon sequestration". *Glob. Change Biol,* 6:732-746.

Pearson, R. G. and Dawson, T. P. 2003. "Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: Are bioclimate envelope models useful? ". *Global Ecology and Biogeography,* 12:361-371.

Perrings, C. 2005. *The Socioeconomic Links between Invasive Alien Species and Poverty.* Unpublished report to the Global Invasive Species Programme, p.35.

Phillips, S.J., Dudik, M. and Schapire, R. E. 2005. *Maximum entropy modeling of species geographic distributions*. In: Twenty-first International Conference on Machine Learning.

Pinder, R.. et al. 2012. "Climate change impacts of US reactive nitrogen". *Proc. Nat. Aca. Sci,* 109: 7671-7675.

Pitchel, J., Kuroiwa, K. and Sawyerr, H. T. 2000. "Distribution of Pb, Cd and Ba in soils and plants of two contaminated sites". *Environmental Pollution,* 110:171-178.

Pimentel, D. et al. 2000. "Environmental and Economic costs of nonindigenous species in the United States". *Bioscience,* 50(1): 53-56.

Pimentel, D. et al. 2001. "Economic and environmental threats of alien plant, animal, and microbe invasions". *Agriculture, Ecosystems and Environment,* 84:1-20.

Pimentel, D. ed. 2002. *Biological Invasion: Economic and Environmental Costs of Alien Plant, Animal, and Microbe Species*. Boca Raton: CRC Press.

Pimentel, D. et al. 2004. "Update on the environmental and economic costs associated with alien invasive species in the United States". *Bioscience,* 50(1):53-67.

Pimentel, D, Zuniga R., and Morrison D. 2005. "Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States". *Ecol. Econ,* 52:273-288.

Pouyat, R. V. et al. 2010. "The role of federal agencies in the application of scientific knowledge". *Front. Ecol. Environ,* 8(6):322-328.

Preston, C. D., Pearman, D. A., and Hall, A.R. 2004. "Archaeophytes in Britain". *Botanical Journal of the Linnean Society,* 145:257-269.

Pyšek, P. and Richardson, D. M. 2010. "Invasive species, environmental change and management, and health". *Annual Review of Environment and Resources,* 35: 25-55.

Rahel, F. J., and J. D. Olden. 2008. "Assessing the effects of climate change on aquatic invasive species". *Conservation Biology,* 22(3):521-33.

Rejmanek, M. and Pitcairn, M. J. 2002. "When is eradication of exotic pest plants a realistic goal? " In *Turning the Tide: the Eradication of Invasive Species*, CR Veitch, MN Clout eds. pp.249-53. Gland, Switz./Cambridge, UK: IUCN.

Regan, T. J. et al. 2006. "Optimal eradication: when to stop looking for an invasive plant". *Ecol. Lett,* 9:759-966.

Reznik, S.Y. 2009. Common ragweed (Ambrosia artemisiifolia L.) in Russia: spread, distribution, abundance, harmfulness and control measures. Ambroisie, The first international ragweed.

Richardson, D. M. et al. 2000. "Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions". *Divers. Distrib,* 6:93-107.

Richardson, D. M. et al. 2008. "Biological invasions-the widening debate: response to Charles Warren". *Prog. Hum. Geogr,* 32:295-298.

Rixon, C. A. M. et al. 2005. "Invasion risk posed by the aquarium trade and live fish markets in the Laurentian Great Lakes". *Biodiversity and Conservation,* 14:1365-1381.

Sage, R. et al. 2009. "Kudzu (*Pueraria montana* Merr.): A new sourve of carbohydrate for bioethanol production". *Biomass and Bioener,* 33:57-61.

Saint-Louis, S., Tomassino, A., and Watson, A. 2005. "A common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) biotype in southwestern Québec resitant to linuron". *Weed Technology,* 19:737-743.

Sang, W. G., Liu, X. Y. and Axmacher, J. C. 2011. "Germination and emergence of *Ambrosia artemisiifolia* L. under changing environmental conditions in China". *Plant Species Biology* 26:125-133.

Sax, D. F., and Gaines, S. D. 2003. "Species diversity: from global decreases to local increases". *Trends Ecol. Evol.* 18:561-566.

Scherer-Lorenzen, M. et al. 2000. "Plant invasions in Germany - General aspects and impact of nitrogen deposition". In: Mooney, H. A. and Hobbs, R. J. eds.: *Invasive Species*

in a changing world. Island Press, Covelo, p.351-368.

Schweiger, O. et al. 2010. "Multiple stressors on biotic interactions: how climate change and alien species interact to affect pollination". *Biol. Rev,* 85(4): 777-795.

Shewmake, S. 2008. *Vulnerability and impact od climate change in South Africa's Limpopo river basin.* Internation Food Policy Research Institute. Washington, D. C.

Sinden, J. et al. 2004. *The Economic Impact of Weeds in Australia. Adelaide: Tech.* Ser. 8, CRC for Australian Weed Management, Adelaide.

Slocombe, D. S. 1998. "Lessons from experience with ecosystem-based management". *Landscape and Urban Planning,* 40:31-39.

Smith, A. L. et al. 2012. "Effects of climate change on the distribution of invasive alien species in Canada: a knowledge synthesis of range change projections in a warming world". *Env. Rev,* 20:1-16.

Sofiev, M. et al. 2012. "A numerical model of birch pollen emission and dispersion in the atmosphere. Description of the emission module". *International Journal of Biometeorology,* 1-14.

Song, H. H. and Xu, R. M. 2006. "Global potential geographical distribution of Monochamus alternatus". *Chinese Bull Ent,* 43(4):535-539.

Stockwell, D. and Peters, D. 1999. "The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction". *Int. J.Geogr. Inf. Sci,* 13:143-158.

Stromberg, J. C. et al. 2009. "Changing perceptions of change: the role of scientists in Tamarix and river management". *Restor. Ecol,* 17:177-186.

Sutherst, R. W., Maywald, G. F., and Russell, B. L. 2000. "Estimating vulnerability under global change: modular modelling of pests". *Agriculture, Ecosystems and Environment.* 82:303-319.

Sutherst, R. W. 2003. "Prediction of species geographical ranges". *Journal of Biogeography,* 30:805-816.

Sutherst, R. W. and Maywald, G. F. 1985. “A computerised system for matching climates in ecology”. *Agriculture, Ecosystems and Environment,* 13:281-299.

Sutherst, R. W., Maywald, G. F., and Kriticos, D. J. 2007. *Climex User Guide v.3. Melbourne, Australia*, Hearne Scientific Software Pty Ltd.

Szaro, R. C., Sexton, W. T., and Malone, C. R. 1998. “The emergence of ecosystem management as a tool for meeting people’s needs and sustaining ecosystems”. *Landscape and Urban Planning,* 40:1-7.

Szyniszewska, A. 2014. *Invasive Species and Climate Change*. http://www.climate.org/topics/ecosystems/invasivespecies.html.

Tallis, H. et al. 2010. “The many faces of ecosystem-based management: Making the process work today in real places”. *Marine Policy,* 34:340-348.

Taramarcaz, P. et al. 2005. “Ragweed (*Ambrosia*) progression and its health risks: will Switzerland resist this invasion? ”. *Swiss Medical Weekly.* 538-548.

Thuiller, W., Araújo, M.B. and Lavorel, S. 2003. “Generalized model vs. classification tree analysis: Predicting spatial dis-ributions of plant species at different scales”. *J. Veg. Sci,* 14:669-680.

Tilman, D., J. Hill, and C. Lehman. 2006. “Carbon-negative biofuels from low-input high-diversity grassland biomass”. *Science*. 314:1598-1600.

Traveset, A., and Richardson, D. M. 2006. “Biological invasions as disruptors of plant-animal reproductive mutualisms”. *Trends Ecol. Evol.* 21: 208-216.

UK Arkive. 2015. *UK invasive species*. http://www.arkive.org/uk-invasive-species.

_____.. 2015.9.2. *UK invasive species*. http://www.arkive.org/uk-invasive-species/? gclid=CMWCspGS18cCFRcQjgodN8cF5A.

UNCCD. 2014. *What is Ecosystem-Based Adaptation?* http://www.unccd.int/en/programmes/Event-and-campaigns/WDCD/Pages/What-is-Ecosystem-Based-Adaptation.aspx.

UNEP. 2011. *Taking Steps toward Marine and Coastal Ecosystem-Based Management - An Introductory Guide [pdf]*. UNEP. Nairobi.

_____. 2012. *Early warning systems. A State of the art analysis and future direction. Division of Early Warning and Assessment (DEWA).* UNEP. Nairobi.

UNEP/GPA. 2006. *Ecosystem-based management : Markers for assessing progress.* http://www.unep.org/pdf/GPA/Ecosystem_based_Management_Markers_for_Assessing_Progress.pdf.

UN Open Working Group on Sustainable Development Goals. 2014. *A/68/970-Open Working Group proposal for Sustainable Development Goals.* https://sustainabledevelopment.un.org/sdgsproposal.

USDA National Invasive Species Information Center. 2015. https://twitter.com/InvasiveInfo.

US EPA (Environmental Protection Agency). 2008. *Effects of climate change on aquatic invasive species and implications for management and research.* EPA, Office of Research and Development, Washington, D. C.

US Fish and Wildlife Service. 2012. *National Fish, Wildlife and Plants Climate Adaptation Strategy.* http://www.wildlifeadaptationstrategy.gov/.

van Wilgen. et al. 2001. "The economic consequences of alien plant invasions: examples of impacts and approaches for sustainable management in South Africa". *Environ. Dev. Sustain,* 3:145-168.

van Wilgen. et al. 2008. "A biome-scale assessment of the impact of invasive alien plants on ecosystem services in South Africa". *J. Environ. Manag,* 89: 336-349.

Veteli, T. O. et al. 2002. "Effects of elevated CO_2 and temperature on plant growth and herbivore defensive chemistry". *Global Change Biology,* 8:1240-1252.

Vilà M., Weber, E., and D'Antonio, C. M. 2000. "Conservation implications of invasion by plant hybridization". *Biol. Invasions,* 2:207-217.

Vilà M., Williamson, M., and Lonsdale, M. 2004. "Competition experiments on alien weeds with crops: lessons for measuring invasive impact? " *Biol. Invasions,* 6:59-69.

Vogl, G. et al. 2008. "Modelling the spread of ragweed: effects of habitat, climate change and diffusion". *European Physical Journal,* Special Topics, 161, pp.167-173.

Vorsino, A. E. et al. 2014. "Modeling Hawaiian ecosystem degradation due to invasive plants under current and future climates". *PLoS ONE* 9(7): e102400. doi:10.1371/journal.pone. 0102400.

Walther, G. R. et al. 2009. "Alien species in a warmer world: risks and opportunities". *Trends Ecol. Evol.* 24: 686-693.

Walters, J. R. et al. 2010. "Status of the California Condor (*Gymnogyps californianus*) and efforts to achieve its recovery [pdf]". *The American Ornithologist's Union,* 127(4):969-1001.

Webber, B. L., van Linken, R. D., and Scott, J. K. 2014. "Invasive plants in a rapidly changing climate: an Australian perspective." in: Ziska, L. H and Dukes, J. S. eds. *Invasive species ans global climate change*. CABI Invasive Series 4.

Willemsen, R. W. and Rice, E. L. 1972. "Mechanism of seed dormancy in Ambrosia artemisiifolia". *American Journal of Botany,* 59: 248-257.

Williams, F. et al. 2010. *The Economic Cost of Invasive Non-Native Species on Great Britain*. CABI International.

Wikipedia. 2015a. *Ecosystem-based management.* https://en.wikipedia.org/wiki/Ecosystem-based_management.

_____. 2015b. *Risk assessment.* https://en.wikipedia.org/wiki/Risk_assessment.

Wilson, J. 2013. *Invasion strategies and management options*". PPT in CSIRO invasive aliens species workshop.

Winter, M. et al. 2009. "Plant extinctions and introductions lead to phylogenetic and taxonomic homogenization of the European flora". *Proc. Natl. Acad. Sci. USA,*

106:21-25.

Ziska, L. H., George, K., and Frenz, D. A, 2007. "Establishment and persistence of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) in disturbed soil as a function of an urban-rural macro-environment". *Global Change Biology,* 13:266-27.

Abstract

Climate Change and Ecosystem-Based Management Strategies of Invasive Alien Species

Invasive species and climate change are two of the most significant issues. Climate change is accelerating the risk of introduction, establishment and spread of potentially invasive species as they are moved both unintentionally and for deliberate purposes. This project had an aim to suggest ecosystem-based management strategies of invasive species influenced by climate change. By undertaking a thorough review of existing literature and other sources of information, we compared and analyzed ecosystem-based management strategies, species-specific approach, local approach, adaptive management cycle, precautionary principle, ecosystem sustainablity, and the current extents of policies and trends of invasive species in the United States, Great Britain, Australia, and the Convention on Biological Diversity. An approach for common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) in Europe was also reviewed as a practical case study which applied ecosystem-based management strategies for invasive species. Based on spreading mechanisms, understandings of the current extent, knowledge gaps and utilize modern modelling methods to predict, assessment of measures to control introduction, establishment and spread of invasive species, and the dissemination of accurate and up-to-date scientifically-based evidence to stakeholders, we suggested implementing measures for ecosystem-based management strategies of invasive species in Korea: i) development of measures and methodologies which predict

introduction, establishment and spread of invasive species now and in future climates. The measures includes an improvement in quarantine; ii) local approach based on introduction, establishment, and spread of invasive species; iii) establishment of early detection and rapid response system, iv) securing climate-ecosystem resilience to vulnerability; v) building public awareness and education, vi) research and information exchange system; vii) complementing legal and legislation. To show feasibility for ecosystem-based management strategies of invasive species in Korea, we reviewed existing literature and other sources of information, and ranked the spreading mechanisms of Pine wilt Disease vector (*Monochamus alternatus*), melon thrips (*Thrips palmi*), and Conzya (*Conyza bonariensis*) since they came in Korea peninsula. Also we evaluated and predicted the spreading of *M. alternatus, T. palmi,* and *C. bonariensis* now and in future climates by use of CLIMEX model and suggested ecosystem-based management local strategies for the invasive species.

Keywords: Invasive Species, Ecosystem-based Management, Climate Change, Case Study, Management Strategies

| 저자 약력 |

박용하

미국 텍사스A&M 주립대학 식물병리 및 미생물학 박사
한국환경정책·평가연구원 선임연구위원(현)
E-mail : yhpark@kei.re.kr

김재욱

서울대학교 환경대학원 박사과정
한국환경정책·평가연구원 연구원(현)
E-mail : jukim@kei.re.kr