KEI/2001
기본과제 연구보고서

기후변화에 따른 생태계 영향평가 및 대응방안연구 II
- 산림부문의 생태기후 모형을 개발을 중심으로 -

2001. 12

전성우
박용철
정휘철
Hideo Harasawa
Kiyoshi Takahashi

한국환경정책·평가연구원
Korea Environment Institute

序 言

현대는 지구환경문제에 대한 법지구차원의 이해와 행동의 동의가 필요한 시기입니다. 특히 기후변화로 인한 자연생태계 변화와 인간생존환경의 변화는 필연적인 귀결로 이에 대한 정확한 예측 및 대응방안수립은 지속가능한 생존을 위해 반드시 시급히 이루어져야 할 연구입니다. 특히 우리나라와 같이 화석연료에 대한 의존도가 높으며, 급격하게 사용량이 증가하는 국가에서는 정부차원의 대응방안 마련에 더욱 많은 고려가 필요한 시점입니다.

이와 같은 배경 및 필요성에 기초하여 본 연구에서는 우리나라 토지형태 중 가장 넓은 면적을 차지하고 있는 삼림부분의 영향을 예측하기 위하여 1차연도에서 선정된 모델을 우리나라에 적합하도록 개발하였습니다. 개발된 모델과 여러 기초자료들을 통합적으로 이용하여 삼림부분의 영향을 예측하고, 이 결과의 신뢰성을 검증하였습니다. 이와 같은 연구는 기후변화로 인한 영향연구와 이의 경제적 가치 평가 등 IPCC의 WG Ⅱ에서 주로 다루고 있는 연구분야에 대해 국내차원에서 처음 시도하는 연구로 삼림분포의 영향을 분석하고, 향후 국가 차원의 대응방안을 도출하는데, 기초자료로 널리 활용되기를 희망합니다. 또한 기후변화에 따른 삼림분포의 변화에 대한 이해의 초석을 다져, 향후 국가차원의 정책시행 시 이해의 폭을 넓히는데 기여하기를 바랍니다.

끝으로 본 연구를 맡아 성실히 수행하고, 좋은 결과를 도출한 본 연구원의 전성우 박사, 박용하 박사, 정휘철 연구원과 일본국립환경연구원의 Hideo Harasawa 박사와 Kiyoshi Takahashi에게 감사를 표합니다. 아울러 본 연구의 내용은 본 연구원의 공식견해가 아닌 연구자 개인의 의견임을 밝혀드립니다.

한국환경정책·평가연구원

원 장 윤 서 성

목 차

Ⅰ. 서론 ····· 1

1. 연구의 배경 및 필요성 ····· 1

2. 연구의 목적 및 범위 ····· 3

Ⅱ. 삼림영향예측모형의 이론적 고찰 ····· 5

1. 실험법 ····· 6

2. 유추법 ····· 6

3. 전문가 판단 ····· 6

4. 정량적 모형 ····· 6
4.1. 생물·물리적 모형 ····· 6
4.2. 경제모형 ····· 12
4.3. 통합모형 ····· 12

Ⅲ. 모델의 선정 및 부분별 적용방법 ····· 14

1. 모델의 선정 ····· 14

2. 기온상승시나리오 ····· 14

3. 대기대순환모형(GCM)과 지역대기순환모형(RCM) ····· 16

4. 기온감율을 고려한 기온의 공간내삽방법 ····· 20
4.1 일평균 기온감율의 추정 ····· 20
4.2 기온감율 기반의 공간내삽모형 ····· 21

5. 삼림영향모형 ····· 21

6. 삼림의 적응성 추정 ····· 24

Ⅳ. 모델의 적용 및 분석 ····· 27

1. 연구대상지역의 선정 ····· 27

2. 미래 기후의 추정 ····· 28
2.1. 기온 ····· 31
2.2. 강수량 ····· 37
2.3. 기후예측결과 ····· 39

3. AIM의 Holdridge 모델을 이용한 삼림의 생물기후학적 분류결과 ····· 45
3.1. 기후변화에 의한 삼림의 변화 ····· 45
3.2. 온량지수와 현존식생도를 이용한 모델의 검증 ····· 47
3.3. Holdridge 모델의 예측결과 ····· 51

4. 기후대의 변화가 지역 삼림에 미치는 영향 ····· 53
4.1. 영향 분석의 구조 ····· 53
4.2. 기후변화로 인한 삼림의 적응성 예측결과 ····· 55

5. 삼림의 경제적 가치 손실액의 추정 ····· 59
5.1. NCEAS 모형 ····· 59
5.2 경제적 가치 손실액의 예측결과 ····· 60
6. 수종별 적응성 평가 ····· 61

Ⅴ. 요약 및 제안 ····· 69

1. 요약 ····· 69

2. 정책제언 ····· 70

참고문헌 ····· 72

부록 Ⅰ : 1차년도 연구결과 요약 ····· 80

부록 Ⅱ : IPCC SRES 설명 ····· 89

부록 Ⅲ : BIOME3 모델개요 ····· 100

부록 Ⅳ : 우리나라의 삼림식물대 ····· 104

표차례

< 표 Ⅱ-1 > 삼림부문의 기후변화영향평가 기법별 개요 및 요약 ····· 5
< 표 Ⅱ-2 > 현재와 2100년 기후변화로 인한 삼림분포 결과 ····· 7
< 표 Ⅲ-1 > IPCC 1992 시나리오 요약 ····· 15
< 표 Ⅲ-2 > IPCC-DDC에서 공급되는 GCM 실험 ····· 19
< 표 Ⅲ-3 > 삼림부문 영향예측 목적에 따른 기술 ····· 22
< 표 Ⅲ-4 > Holdridge 모형의 삼림기후대 분류표 ····· 23
< 표 Ⅲ-5 > 목본식물의 이동가능속도 ····· 24
< 표 Ⅳ-1 > 지형보정을 위한 월평균 기온감율 ····· 25
< 표 Ⅳ-2 > 에 따른 여름철(6,7,8월) 평균기온변화량과 강수량변화량 ····· 25
< 표 Ⅳ-3 > 에 따른 겨울철(12,1,2월) 평균기온변화량과 강수량변화량 ····· 34
< 표 Ⅳ-4 > 기후변화에 의한 한반도지역의 영향분석 ····· 39
< 표 Ⅳ-5 > 생기후 삼림유형별 온량지수 및 한랭지수 범위 ····· 40
< 표 Ⅳ-6 > 평균온도변화에 따른 온대·아한대림의 평균변화량 ····· 45
< 표 Ⅳ-7 > 기후변화에 의한 한반도지역의 영향분석 ····· 47
< 표 Ⅳ-8 > 2100년의 지구평균기온의 상승예측 ····· 51
< 표 Ⅳ-9 > 삼림 기후대간의 비교 ····· 52
< 표 Ⅳ-10 > 목본식물의 이동에 따른 삼림의 영향예측결과 ····· 53
< 표 Ⅳ-11 > NCEAS모델을 이용한 세계 자연삼림의 경제적 가치평가 ····· 54
< 표 Ⅳ-12 > 경제적 손실액의 계산결과 ····· 59
< 표 Ⅳ-13 > 기후변화로 인한 수종별 적응성 ····· 60
< 표 Ⅳ-14 > 2050년 기후변화에 따른 소나무의 적응성 예측결과 ····· 61
< 표 Ⅳ-15 > 2100년 기후변화에 따른 소나무의 적응성 예측결과 ····· 62
< 부록표 Ⅰ-1 > 기후변화 관련 국제회의 연대기 ····· 65
< 부록표 Ⅰ-2 > 종합계획을 수립하기 위한 지구온난화 감시, 예측, 영향평가 기술 개발에 대한 외국의 연구현황 ····· 66

그림차례

< 그림 Ⅰ-1 > 3단계 연구추진 계획 ····· 4
< 그림 Ⅱ-1 > AIM/Impact 모형의 기후변화로 인한 삼림분포 변화 결과 ····· 8
< 그림 Ⅱ-2 > 생태계 모형으로 예측한 현재와 2080년의 지구삼림분포도 ····· 9
< 그림 Ⅱ-3 > 현재와 2080년의 유형별 삼림면적변화 ····· 10
< 그림 Ⅱ-4 > BIOME 3 모형에 의한 삼림부문의 영향 ····· 11
< 그림 Ⅱ-5 > AIM 통합모형의 개요 ····· 13
< 그림 Ⅲ-1 > 시나리오에 따른 1990년에서 2100년까지의 기온변화 ····· 16
< 그림 Ⅲ-2 > 일본기상연구소의 2중 지역기후모형 개념도 ····· 17
< 그림 Ⅲ-3 > GCM과 RCM을 이용한 인도몬순지역의 현재기후와 2040년에서 2050년사이의 겨울철 지표면 온도변화차이 ····· 18
< 그림 Ⅲ-4 > GCM과 RCM을 이용한 인도몬순지역의 상대적인 강우차이 ····· 18
< 그림 Ⅲ-5 > Holdridge 모형의 개념도 ····· 23
< 그림 Ⅲ-6 > 기후와 삼림영향예측 모형의 흐름 ····· 26
< 그림 Ⅲ-7 > 외래 수목종의 침입가능성 ····· 28
< 그림 Ⅳ-1 > 연구대상 지역의 위치와 구분 ····· 29
< 그림 Ⅳ-2 > 분석에 이용된 기상관측 지점(일부) ····· 31
< 그림 Ⅳ-3 > 현재시기의 한반도 주위의 년 평균 기온분포 ····· 32
< 그림 Ⅳ-4 > 분석에 이용된 수치표고모형 ····· 33
< 그림 Ⅳ-5 > 기온의 지형보정에 이용된 가상면 표고 ····· 34
< 그림 Ⅳ-6 > 기온감율을 고려한 현재시기 년 평균 기온분포 ····· 35
< 그림 Ⅳ-7 > 2×CO_2 시 연평균기온의 변화량 분포 ····· 37
< 그림 Ⅳ-8 > 현재시기 총강수량 분포 ····· 38
< 그림 Ⅳ-9 > 2×CO_2시 연강수량 변화량 분포 ····· 40
< 그림 Ⅳ-10 > 평균기온변화가 0.5℃일 경우의 지역별 평균기온 변화와 평균강수량 변화 ····· 41
< 그림 Ⅳ-11 > 평균기온변화가 1.0℃일 경우의 지역별 평균기온 변화와 평균강수량 변화 ····· 41
< 그림 Ⅳ-12 > 평균기온변화가 1.5℃일 경우의 지역별 평균기온 변화와 평균강수량 변화 ····· 42
< 그림 Ⅳ-13 > 평균기온변화가 2.0℃일 경우의 지역별 평균기온 변화와 평균강수량 변화 ····· 42
< 그림 Ⅳ-14 > 평균기온변화가 2.5℃일 경우의 지역별 평균기온 변화와 평균강수량 변화 ····· 43
< 그림 Ⅳ-15 > 평균기온변화가 3.0℃일 경우의 지역별 평균기온 변화와 평균강수량 변화 ····· 43
< 그림 Ⅳ-16 > 평균기온변화가 3.5℃일 경우의 지역별 평균기온 변화와 평균강수량 변화 ····· 44

< 그림 Ⅳ-17 > 평균기온변화가 4.0℃일 경우의 지역별 평균기온 변화와 평균강수량 변화 ····· 46
< 그림 Ⅳ-18 > 1990년 기후대의 Holdridge 분류 ····· 46
< 그림 Ⅳ-19 > 2100년 기후대의 Holdridge 분류 ····· 48
< 그림 Ⅳ-20 > Holdridge와 온량지수를 이용한 삼림기후대 분류 비교 ····· 48
< 그림 Ⅳ-21 > 냉온대 중부지역의 대표수종인 신갈나무군락과 동백나무군락의 분포와 각 삼림기후대의 비교 ····· 49
< 그림 Ⅳ-22 > 2100년의 GCM별 Holdridge 삼림기후대 분류결과 ····· 50
< 그림 Ⅳ-23 > 연평균온도 변화에 따른 온대·아한대림의 감소경향 ····· 52
< 그림 Ⅳ-24 > 삼림지역 영향과 경제성분석의 구조 ····· 53
< 그림 Ⅳ-25 > 분석에 이용된 Cramer와 Leemans 삼림기후대 구분 ····· 54
< 그림 Ⅳ-26 > 1990년 Carmer and Leemans 분류 ····· 56
< 그림 Ⅳ-27 > 2100년 Carmer and Leemans 분류 ····· 56
< 그림 Ⅳ-28 > 삼림평균이동속도가 0.25 ㎢/연 일 경우의 2100년 삼림분포분석57
< 그림 Ⅳ-29 > 삼림평균이동속도가 0.5 ㎢/연 일 경우의 2100년 삼림분포분석 57
< 그림 Ⅳ-30 > 삼림평균이동속도가 1.0 ㎢/연 일 경우의 2100년 삼림분포분석 58
< 그림 Ⅳ-31 > 삼림평균이동속도가 2.0 ㎢/연 일 경우의 2100년 삼림분포분석 58
< 그림 Ⅳ-32 > 2050년의 소나무 생육적합 예상지역 ····· 63
< 그림 Ⅳ-32 > 2100년의 소나무 생육적합 예상지역 ····· 64
< 그림 Ⅳ-34 > 2050년의 기후변화에 따른 소나무 적응성평가 ····· 67
< 그림 Ⅳ-35 > 2100년의 기후변화에 따른 소나무 적응성평가 ····· 68
< 부록그림 Ⅰ-1 > 연구의 개념적 흐름 ····· 86
< 부록그림 Ⅰ-2 > AIM/Impact 기후변화영양예측 및 평가 모형의 기본 골격 ·· 87
< 부록그림 Ⅱ-1 > SRES 시나리오 모식도. ····· 92
< 부록그림 Ⅱ-2 > SRES 시나리오 개념도 ····· 93
< 부록그림 Ⅱ-3 > 1990년에서 2100년까지 40개 SERS 시나리오 ····· 95
< 부록그림 Ⅱ-4 > 모든 배출원(에너지, 산업, 토지이용)으로부터 생산되는 지구의 CO_2 연간 총배출량 ····· 97
< 부록그림 Ⅱ-5 > 지구 누적 CO_2 배출량(GtC)과 시나리오 그룹별 누적 CO_2 배출량의 히스토그램 ····· 98
< 부록그림 Ⅳ-1 > 우리나라의 온도대 ····· 107

Ⅰ. 서론

1. 연구의 배경 및 필요성

1800년대 후반부터 현재까지 지구 여러 곳에서 기온 측정을 하고 있다. 아마도 기온 측정은 강수량과 함께 지속적인 기록이 남아 있고 가장 신뢰성이 있는 기록이라 할 것이다. 그 동안의 기록을 정리해 보면 전 세계적으로 1880년에 비해 1980년대의 기온이 0.5~0.7℃ 상승한 것으로 기록되어 있으며, 과거 100년 동안의 연평균 최고기온 상위 6개년 중 5개년이 1980년대 이후에 기록되어 있다. 인간이 감지할 수 있는 기온의 정도를 감안할 때 하루 중의 변화, 계절 변화의 영향이 매우 크기 때문에 100년 간 0.5~0.7℃ 상승이라는 것이 별것 아니라는 생각을 할 수도 있다. 그러나 연평균기온이 이만큼 상승한 변화는 과거에 없던 매우 급격한 변화이며 변화에 적응을 하지 못하는 생태계는 도태될 것으로 예상된다. 또한 이러한 변화는 향후 더욱 더 심해질 것이라는 예측이 여러 국게기구로부터 나오고 있다. 이와 같은 배경 속에서 지구온난화에 대한 관심이 1980년 중반 이후 고조되고 있는 것은 인간과 환경의 조화로운 생활을 통해 미래세대의 안정성 및 지속가능한 삶을 추구해야 한다는 현재세대의 고민을 반영한 것이라 할 수 있다.

자연을 위한 세계기금(The World Wide Fund for Nature)에서는 현재 전세계적으로 인정되고 있는 시나리오인 2100년 시점의 이산화탄소 배출량이 산업혁명이 시작된 이후 보다 2배가 된다는 가정하에 영향을 예측하였다. 이 결과, 북극곰과 해마에서 뉴잉글랜드 설탕 단풍나무에 이르는 많은 종들이 멸종할 수 있고, 외딴 곳이나, 산에 살고 있는 희귀종들은 더 많은 위험에 처하므로 다른 곳으로 빨리 이동시켜 새로운 환경에 적응할 수 있도록 해야 한다는 연구결과를 발표했다. 또한 북극과 캐나다, 러시아, 스칸디나비아 같은 북쪽 지역에 서식하고 있는 생물 중 70%가 사라질 수 있으며 20%는 멸종할 수 있다고 지적했다. 남쪽으로는 스웨덴, 핀란드, 에스토니아, 라트비아, 아이슬란드, 키르키스탄에 서식하는 생물의 반 이상 사라질 수 있다고 한다.[1)]

이와 같이 기후변화로 인한 지구환경변화와 그에 따른 생존환경의 변화는 인간을 포함한 현재를 살고 있는 모든 생물들에게 매우 큰 위협요인이다. 산업혁명이전의 인간의 활동으로 인한 지구환경의 변화는 매우 미약했으나, 현재는 영향의 범위가 넓어지고, 크기는 커지며, 지속적인 영향을 주기 때문에 환경의 수용능력을 넘어 서고 있다. 이와 같은 시대적 상황을 볼 때, 기후변화로 인한 각 부분의 영향을 과학적으로 예측·평가하는 것은 매우 시급한 연구로 평가되었다. 그 결과 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)와 국제연합환경계획(United Nations Environment Programme, UNEP)은 1988년에 지구기후변화의 영향 및 문제점을 인식하여 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)를 설립하였다. IPCC는 여러 국제협력기구 및 세계 각국들과 공동으

1) 뉴욕타임스, 2000. 9. 1

로 기후변화에 대처하기 위해 국가 기후계획 수립, 국제협약 체결과 국제 공동연구 수행 등 다양한 노력을 해오고 있다. 이러한 국제 공동연구는 크게 3가지 주제로 구분된다.

첫째, IPCC 제1실무그룹(Working Group I, WG I)명은 "기후변화의 과학(The Science of Climate Change)"으로 여기에서는 기후변화에 대한 과학적인 이해와 온실가스의 배출 및 흡수 방법론 개발 등 과학적 분석을 담당하고 있다(IPCC, 1996b).

둘째, IPCC 제2실무그룹(Working Group II, WG II)명은 "기후변화영향, 적응과 취약성(Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability)"으로 여기서 기후변화로 인한 긍정적 또는 부정적인 결과의 취약성을 과학적, 기술적, 환경적, 사회·경제적으로 평가하고 있다(IPCC, 1996c).

셋째, IPCC 제3실무그룹(Working Group III, WG III)명은 "기후변화의 저감(Mitigation of Climate Change)"으로 여기서 기후변화의 저감방법을 과학적, 기술적, 환경적, 사회·경제적 측면에서 평가하고 있다(IPCC, 1996d).

전 세계적으로 화석연료사용량의 증가, 토지이용의 급격한 변화 등 인간활동으로 인한 온실가스의 배출량 증가로 최근 지구온난화에 따른 이상기후 현상이 빈번히 나타나고 있다고 SAR(IPCC, 1996b)는 보고하고 있다. 특히 WG I 과 II의 통합영향연구에서 온실가스가 현 상태로 아무런 대책 없이 계속 방출되는 시나리오(Business-as-Usual, BAU)에 의하면, 향후 매 10년마다 지구 평균기온은 0.3℃증가하고, 이에 따라 해수면도 매 10년마다 6cm 상승할 것으로 예측되고 있다(Street and Semenov, 1990).

우리나라의 1908년부터 1940년까지의 연평균 기온이 10~11℃ 사이에 머물고 있었으나, 이후부터 1970년까지는 11~12℃, 1970년대부터 최근까지는 12~13℃ 사이를 나타내고 있어 완만하지만 지속적인 온난화 추세에 있다. 특히, 우리나라의 온도 상승은 지난 100년 간 세계의 평균기온이 0.42℃ 상승한 것과 비교할 때, 기온 상승폭은 무려 6배 이상을 나타내고 있어 기후변화로 인한 삼림부문의 변화는 피할 수 없는 것으로 추측된다.

지구의 생명체는 기온이나 토양의 습도, 습기, 강수량과 같은 환경요인에 매우 민감하게 반응하며, 외부 온도가 3℃ 상승하면 북쪽으로 250km 또는 고지대로 500m 이동해야 외부 온도에 적응할 수 있다는 예측결과가 도출되고 있다. 따라서 연평균 기온이 2℃ 상승하면, 우리나라와 같이 지형이 대부분 산악형으로 형성되어 있는 지역에서는 온대 수종과 아한대 수종은 기하급수적으로 감소할 것으로 예상된다. 특히 아한대 수종과 이들과 어울러져 살고 있는 식물의 소멸 확률이 높아 질 것이다. 또한 종자 비산 거리가 긴 수종보다 종자가 무게가 나가는 참나무류 등과 같은 종들의 이동 속도가 환경 변화 속도를 따라 잡을지가 의문시된다.

자연삼림의 적응에 관한 최근 연구로 MOVE 모형, DGVMs 모형등 자연삼림의 적응을 연구하는 연구성과가 보고되고 있으나, 예측결과는 큰 폭의 차이를 보이고 있으며 예측의 불확실성을 저감하는 모형의 개선이 필요하다.

자연삼림이 제공하는 경제적 가치에 대하여 Fankhauser(1995)는 대기중 CO_2 농도 배증시점에서 삼림의 경제적 가치 손실액이 OECD 국가에서 년 간 18억 달러, 전 세계적으로 년 간 20억 달러에 달한다고 보고하였다. 미국 삼림에 대한 연구결과에서 Cline(1992), Titus(1992), Callway(1994) 등은 년 간 33~440억 달러의 손실이 발생하는 것으로 추정하였

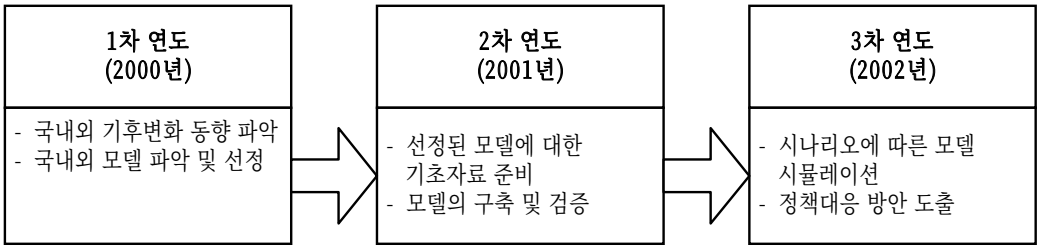
다. 특정지역, 특정수종의 기능변화에 대한 예측과 지구규모의 자연삼림의 다양성을 취급하는 추계학적인 극단적인 상황의 다양한 연구결과가 보고되고 있다.

영향연구가 진행되고 모형이 개선됨에 따라 영향예측결과의 신뢰성이 높아지며 정확한 결과를 도출하고 있다. 그럼에도 불구하고, 지구 온난화가 우리나라의 생태계에 미치는 영향에 대해서는 연구가 미흡하다. 우리나라는 그 동안 선도기술사업(G7 Project)의 일환으로 1990년대 초부터 기후변화에 따른 기후변화 예측기술 등에 대해서 연구사업을 추진하여 왔으며, 그 기후변화에 따른 생태계 영향을 평가할 수 있는 평가체계를 구축하기 위한 사업을 추진하고 있으나, 구체적으로 기후변화가 생태계에 미치는 영향을 평가하고 예측할 수 있는 체계가 마련되어 있지 못한 실정이다. 이러한 배경을 볼 때 기후변화로 인한 생태계 부문의 영향을 평가하고 대응방안을 연구하는 것은 시급히 진행되어야 할 과제이다.

삼림부분은 우리나라 전국토의 70%를 차지하고 있어, 영향평가 연구를 수행함에 있어서 가장 시급히 다루어져야 할 부분이다. 또한 자연삼림은 지구 유전자와 생물다양성의 저장고이며, 다양한 재원을 제공하는 동시에 기후안정에 중요한 역할을 담당한다. 비록 지구온난화가 삼림에 미치는 영향은 밝혀지지 않은 부분이 많지만 과학적인 지식으로 발생영향과 대책을 수립할 수 있을 것이다. 또한 기후변화에 따른 삼림부분의 변화로부터 삼림생태계를 보전하고, 사회·경제적인 악영향을 저감하기 위해서는 기후변화에 따른 삼림생태계의 영향을 여러 가지 시나리오하에서 정확하게 분석하여야 한다. 이를 위해 영향의 범위 및 정도를 예측·평가하는 모델을 구축하고, 이의 신뢰도를 검증하는 연구가 조속히 이루어져야 할 것이다.

2. 연구의 목적 및 범위

본 연구는 < 그림 Ⅰ-1 >과 같이 3개년 계획으로 연구를 추진하고 있으며, 1차년도인 2000년도에는 기후변화에 따른 우리나라 생태계의 변화예측모형 연구와 관련된 국제 협약의 동향 파악을 중점적으로 추진하였다. 지구 온난화에 따른 우리나라 생태계의 변화예측모형 연구부문에서는 생태계 영향연구의 범위를 삼림부문으로 한정하고 기존에 국내·외에서 연구된 기후 및 기상자료와 시나리오 설정에 관한 연구를 수집하였다. 이러한 기후변화에 따라 영향을 받는 삼림대 변화에 대한 국내외 모형을 검토하였다. 현재까지 우리나라에서는 국외에서 개발되고 있는 생태계 평가·예측에 관한 모형들에 대한 심층 검토가 이루어진 바 없으므로, 이러한 자료의 수집과 검토는 국내에서 생태계 영향평가·예측 모형을 개발하기 위한 중요한 기초단계라 할 수 있었다. 이미 개발된 모형을 검토함에 있어 이들 모형에서 사용하고 있는 모형인자, 연계되어 있는 기후 및 기상 변화에 대한 시나리오 자료 등을 수집 및 분석하였다.



< 그림 Ⅰ-1 > 3단계 연구추진 계획

2차년도(2001년)에서는 1차년도에 선정된 모델의 기본자료 구축 및 모델링과 모델링 결과의 검증에 주안점을 두었다. 기후변화가 자연삼림에 미치는 영향을 조사하기 위해 수치시뮬레이션을 이용하여 한반도 주변의 자연삼림분포 변화를 예측하고, 기존의 온량지수모형을 이용하여 구축된 모형의 정확도를 비교 검증한다. 그리고 자연삼림이 제공하는 재원의 경제적 가치의 변화를 추정하기 위해 다음과 같은 연구를 수행하였다.

첫째, 대기대순환 모형의 CO_2농도 배증시의 평형실험결과를 이용하여 지구온난화로 인한 한반도 주변의 기후 변화를 추정하였다. 대기대순환 모형은 IPCC에서 권장하는 시나리오별 결과를 이용하여 한반도 주변지역의 미래 기후자료로 변환하고 기후변화로 인한 영향을 분석하였다.

둘째, 변환된 기후자료를 이용하여 Holdridge 방법등 생물·기후학적 분류결과에 대한 예측을 수행하고, 기존의 연구결과에 따라 기후변화에 대한 삼림의 적응을 추가한 모형을 개발하여, 2100년 시점의 기후변화에 의한 한반도 주변지역의 삼림영향예측을 실시하였다.

셋째, 개발된 모형의 정확성을 검증하기 위하여 기존의 온량지수와 한랭지수를 이용한 연구결과와 대표수종에 대하여 비교·검증을 수행하였다.

넷째, 삼림의 영향예측결과와 삼림이 가지는 다양한 기능을 고려한 생태경제학적인 연구의 성과들을 이용하여 기후변화로 인한 삼림의 적응성에 의한 경제적 가치의 손실액을 추정하였다.

제3차 연도 연구(2002년)에서는 기후변화에 따른 우리나라 삼림변화에 따른 시나리오를 제시하고, 삼림변화에 대한 우리나라의 대책수립 방안을 제안하고자 한다. 삼림변화에 따른 우리나라의 대책으로는 삼림변화 시나리오별로 대응원칙을 정립하고 대응방식과 평가, 운영방향을 포함하고자 한다.

Ⅱ. 삼림영향예측모형의 이론적 고찰

삼림부문의 영향예측모형은 다양한 연구가 진행되고 있으나, 이를 분류하면 직접적인 측정 및 실험에 의한 실험법, 주변상황과 역사적인 상황을 추론하여 예측하는 유추법, 전문가의 판단에 의한 방법, 현상을 정량적 모델로 구축하여 예측하는 정량적모형의 4가지로 볼 수 있다.

< 표 Ⅱ-1 > 삼림부문의 기후변화영향평가 기법별 개요 및 요약

방 법			자료량	비용	가정	소요시간	도 구	기 술	산 출 물	검 증
실험법			많음	높음	낮음	많음	연구시설	산림학자, 생태학자, 실험과학자	상세하나 지역적으로 편차가 심함	필수적은 아니나 외삽과정에서는 요구됨
유추법	역 사 적 유 추 법		적음	중간	많음	중간	현미경 연구실	화분학자, 고생태학자	질적인 결과를 도출 그러나 공간적으로 고르지 못함	불가능
유추법	지 역 적 유 추 법		적음	낮음	많음	중간	지도. GIS	생물지리학자	지도 생물기후학 모형	일부자료의 역행실험
전문가 판단			적음	낮음	많음	적음	시나리오	다양한 분야의 지식과 경험	광범위, 질적인 일반적 판단	불가능
정량적모형	생물물리적모형	경험적 통계적 모형	보통	낮음	많음	적음	전자계산기 PC	생물기상학자, 통계학자	양적 결과물, 그러나 많은 외삽에서 오는 불확실성 높음	일부자료의 역행실험
정량적모형	생물물리적모형	과정 기반 모형	많음	중간	약간	중간	PC	모형개발 전문가,	지도, 시계열 결과물 도출. 양적이고 자세함	필수적. 역사적 또는 지역적 검증이 권장됨
정량적모형	경제모형		보통에서 많음	중간	많음	중간	PC	산림경제학자, 농업경제학자, 자원경제학자	공간적으로 종합된 결과, 양적이고 상세함	필수적이나 어려움
정량적모형	통합모형		많음	높음	중간	중간	워크스테이션	모형개발 및 기타 분야의 지식	공간적, 양적, 중간 상세도를 유지하는 시계열 결과물	필수적이나 어려움

자료 : Robert J. Scholes and Sune Linder(1998), Forest, Handbook on Method for Climatie Change Impact Assessment and Adaptation Strategies, UNEP, p.12-19

삼림부문의 기후변화영향평가에는 이용되는 다양한 모형들의 장단점은 < 표 Ⅱ-1 >과 같다. 이들 삼림 모형은 용도와 산출물의 요구조건에 맞도록 혼합하여 사용되어야 한다. 한 예로 실험법, 정량적모형 등은 필요 자료량과 소요시간이 많이 걸리나, 유추법과 전문가판단 등은 적게 소요되는 장단점이 있다. 따라서 삼림 영향평가의 목적과 결과에 따라 각종 요인들을 검토하여야 한다.

1. 실험법

변화된 기후의 상황을 재현하는 최적의 방법으로 직접측정법(Landsberg et al., 1995)이 있으며, 기후변화로 인한 강수의 영향을 측정하는 관개실험법(Linder, 1987), 토양의 온난화로 인한 영향을 측정하는 토양온난화실험법(Peterjohn et al., 1993, 1994)과 삼림자원생산성을 추정하는 삼림목록을 이용하여 평가하는 사회·경제적 영향평가법(Matyas, 1994)등이 연구되었다.

2. 유추법

유추법에는 역사적 유추법과 지역적 유추법으로 구분된다. 역사적 유추법에는 과거의 꽃가루를 이용하여 미래의 변화를 유추하는 화분학적(palynological) 접근법(Branchu et al., 1993, Servant et al., 1993)과 수목의 나이테를 이용하여 추정하는 연륜연대학적(dendrochronological) 접근법(D′Arrigo et al., 1992)이 있다.

역사적 유추법은 삼림의 경계가 얼마동안의 시간동안에 이동되었으며, 변화기동안 어떠한 현상들이 발생하였는가를 참조하는데 유리하다. 지역적 유추법은 특정지역의 현재의 변수를 이용하여 미래의 변화된 기후하의 상황을 추정하는 방법으로 기후변수를 제외한 다른 변수들은 현재와 미래가 동일하다는 취약점이 있다(UNEP, 1998).

3. 전문가 판단

전문가의 판단에 의한 삼림의 영향예측방법은 과학적 방법론으로 사용하기에는 곤란하나, 적합한 대안이 없을 경우에 최적의 추측을 포함한 추정범위를 포함하여, 여러 명의 전문가들 의견을 종합적으로 사용할 경우 대안으로 사용할 수 있는 방법이다(UNEP, 1998).

4. 정량적 모형

정량적모형은 생물에 영향을 미치는 자연인자와 생물간의 관계를 정형화하여 예측하는 생물·물리적모형과, 경제적인 예측모형을 자연현상에 적합하도록 수정한 경제모형, 생물·물리적 모형과 경제모형을 통합한 통합모형의 3가지로 구분하여 볼 수 있다.

4.1. 생물·물리적 모형

생물·물리적 모형은 강수, 온도, 토양유형, 식물종 등의 구동변수 변화의 결과로 인한 생

태계 속성(생물다양성의 생존과 성장 또는 생태계의 생산성) 변화예측을 위한 모형이다 (Shugart *et al*., 1988; Smith *et al*., 1992; Dale and Rauscher, 1994; Joyce, 1995; Agren *et al*., 1991; Ryan *et al*. 1996). 이 생물·물리적 모형의 대표적인 방법으로는 경험적 통계모형과 과정기반모형이 있다.

경험적 통계모형의 가장 일반적인 형태는 기후변수(강우, 증발산 등)에 따른 특정 종의 존재 또는 부재의 관계를 이용하는 생기후모형(Bioclimatic models)과 생태계의 에너지와 물질 순환을 중심으로 한 생화학모형(Biochemical Model)이다.

생기후모형 중 가장 대표적인 모형으로는 Holdridge모형(Holdridge, 1967), BIOME3모형 (VEMAP Members, 1995), BOX모형(Box, 1980)이 있다. 이 생기후모형은 다양한 기후변화 시나리오 하에서의 미래 평형상태의 삼림분포를 예측하는 용도로 사용할 수 있다.

Holdridge 모형을 이용하여 AIM project Team(1997)이 수행한 삼림모형의 결과는 < 표 Ⅱ-2 >, < 그림 Ⅱ-1 >과 같으며, 현재와 2100년 사이의 변화를 보여주고 있다.

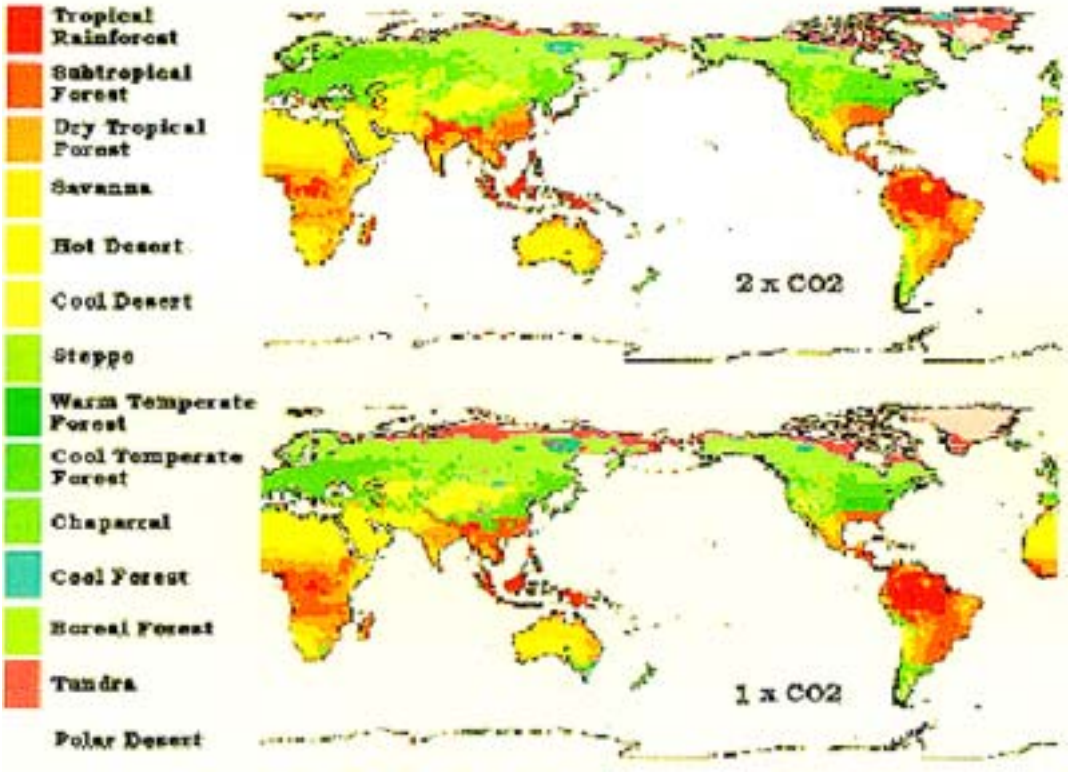
여러 가지의 대기대순환모델(Deneral Circulation Model: 이후 GCM이라 함)에 의해 예측된 삼림의 영향을 전체 면적으로 볼 때, 열대우림, 열대건조림, 사바나, 온대림, 한대림 등이 증가하고, 아열대림, 열대사막, 한대사막, 툰드라, 극 사막 등은 감소하는 경향을 보이고 있다.

< 표 Ⅱ-2 > 현재와 2100년 기후변화로 인한 삼림분포 결과 (단위 : %)

분 류	현재 기후	CCC	GFDL	GFDL Q-Flux	GFDL R30	GISS	OSU	UKMO	평균
열대우림	8.26	9.39	11.69	11.14	17.61	13.18	16.07	10.30	11.93
아열대림	10.87	7.25	8.48	8.23	9.09	7.22	7.44	8.38	8.01
열대건조림	12.31	17.43	14.46	14.95	14.14	14.24	12.21	15.94	14.77
사바나	9.43	12.98	11.38	11.11	10.85	12.35	10.85	11.70	11.60
열대사막	14.48	14.47	14.36	14.57	13.70	12.54	13.67	14.30	13.94
한대사막	2.80	1.26	1.66	1.86	1.60	1.76	1.77	1.41	1.62
스텝(초원)	4.70	4.87	7.01	5.23	5.22	3.85	5.47	4.96	5.23
온대림	2.05	1.76	2.23	2.38	2.41	2.16	2.08	2.44	2.21
한대림	10.01	12.04	12.71	12.73	13.82	12.88	12.15	12.10	12.63
저목수풀지대	3.62	4.28	4.10	3.52	3.83	3.56	3.69	4.20	3.88
냉대림	0.73	0.63	0.60	0.49	0.36	0.46	0.63	0.37	0.51
아한대림	14.13	10.05	7.44	9.48	9.21	11.35	9.74	9.42	9.53
툰드라	3.30	2.43	2.18	2.38	2.34	2.21	2.23	2.29	2.29
극 사막	3.32	1.16	1.70	1.94	1.68	2.25	2.00	2.19	2.85
합 계	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

자료 : AIM Project Team(1997) Asian-Pacific Integrated Model, NIES, p.68.

이를 지역별로 보면, 인도대륙에서는 열대림 및 아열대림의 현저한 증가가 예측되고, 동유럽 지역에는 한대림의 온대림으로의 현저한 변화 잠재성을 보여주고 있다. 북미대륙에서는 온대림이 초원으로 변화는 면적이 증가할 것으로 예측되고 있다. 우리나라의 경우 온대림에서 변화가 없는 것으로 예측되고 있다. 이는 광역영향모형의 공간적 해상도가 300km-400km이기 때문에 우리나라와 같이 위도 차가 적은 나라는 정확하게 예측되기 곤란하기 때문이다.

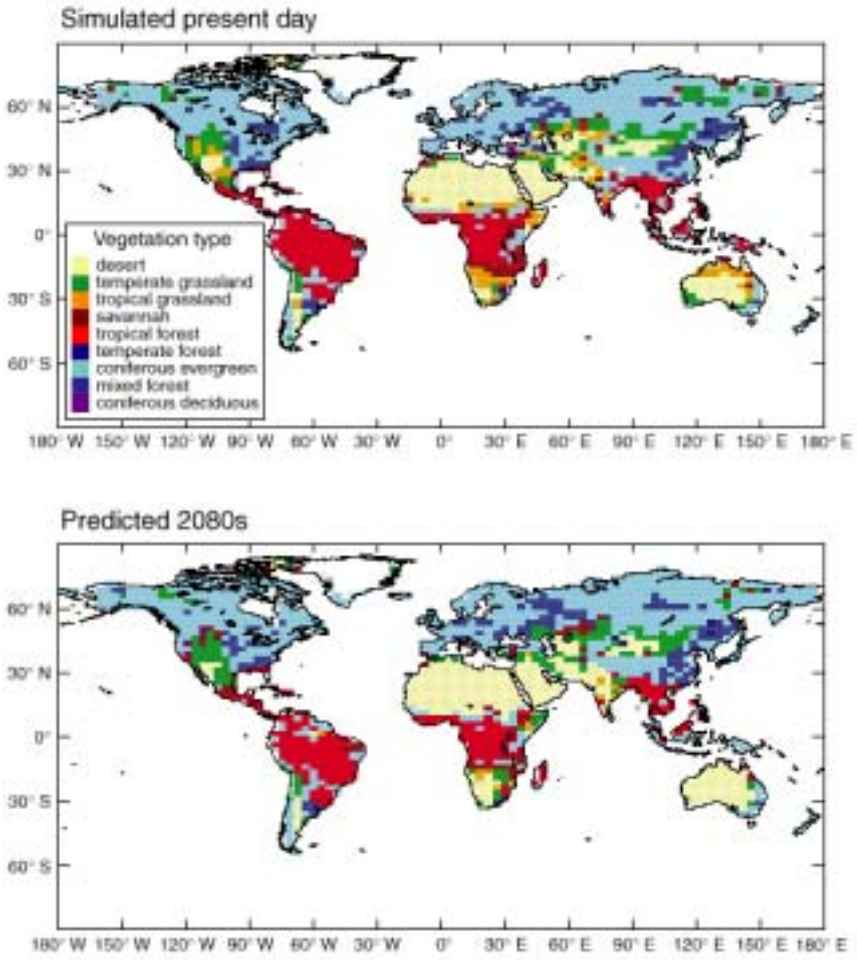


< 그림 Ⅱ-1 > AIM/Impact 모형의 기후변화로 인한 삼림분포 변화 결과물

자료 : AIM Project Team(1997), Asian-Pacific Integrated Model, NIES, p.69

< 그림 Ⅱ-2 >는 현재와 2080년경에 예상되는 사막과 8가지의 삼림유형의 분포를 보여주고 있다. 이 분석에서는 2080년경 혼효림의 면적이 증가하고 열대초원과 열대림의 감소를 예측하였으며, 우리나라의 경우 상록침엽수림으로 변화가 없다는 결과를 제시하고 있다. 이 역시 광역영향연구가 가지는 한계에 기인하는 것으로 판단된다.

< 그림 Ⅱ-3 >은 현재와 2080년 사이에 발생이 예상되는 사막과 6개 삼림유형('온대림'과 '혼효림'을 하나로 간주하여 '삼림'에 포함시키고 '사바나'를 '초지' 범주에 귀속시킴)에 의하여 점유될 면적의 비율을 보여주고 있다. 2080년에는 대부분의 열대초원이 온대초원 또는 사막으로 변화할 것으로 예측되었고 지구면적의 8%를 차지하고 있는 열대초원은 2080년경에는 지구전체면적의 1%만을 차지하게 될 것으로 예상되고 있다.

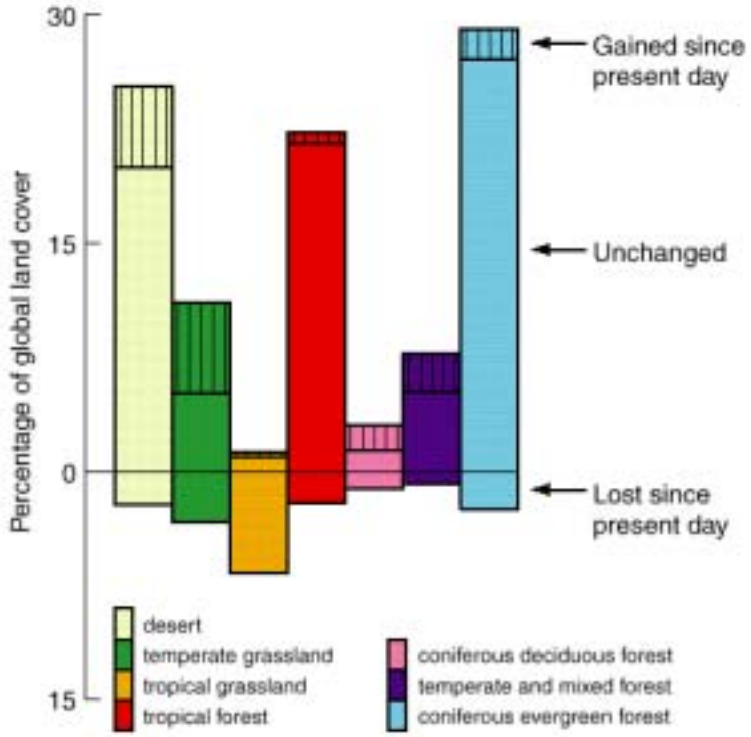


< 그림 Ⅱ-2 > 생태계 모형으로 예측한 현재와 2080년의 지구삼림분포도

자료 : Harasawa, H.(2000) Recent development of Impacts Study in Japan and IPCC, 기후변화와 생태계보전 심포지엄 발표 OHP

현재 열대림으로 분류되고 있는 지역의 일부는 인간의 간섭 없이도 사바나, 초원으로 변화할 것이며 심지어는 사막으로까지 변화할 것으로 예상된다. 이 모형은 이러한 열대지역의 심각하고 급격한 변화는 강수의 감소와 연중평균온도의 증가(남미 및 인도의 일부지역에서는 5℃까지의 상승이 예상됨)로 인하여 2050년경부터 시작될 것으로 예측하였으며 모든 열대삼림은 위기를 맞고 있으므로, 생물다양성에 막대한 영향이 예상된다.

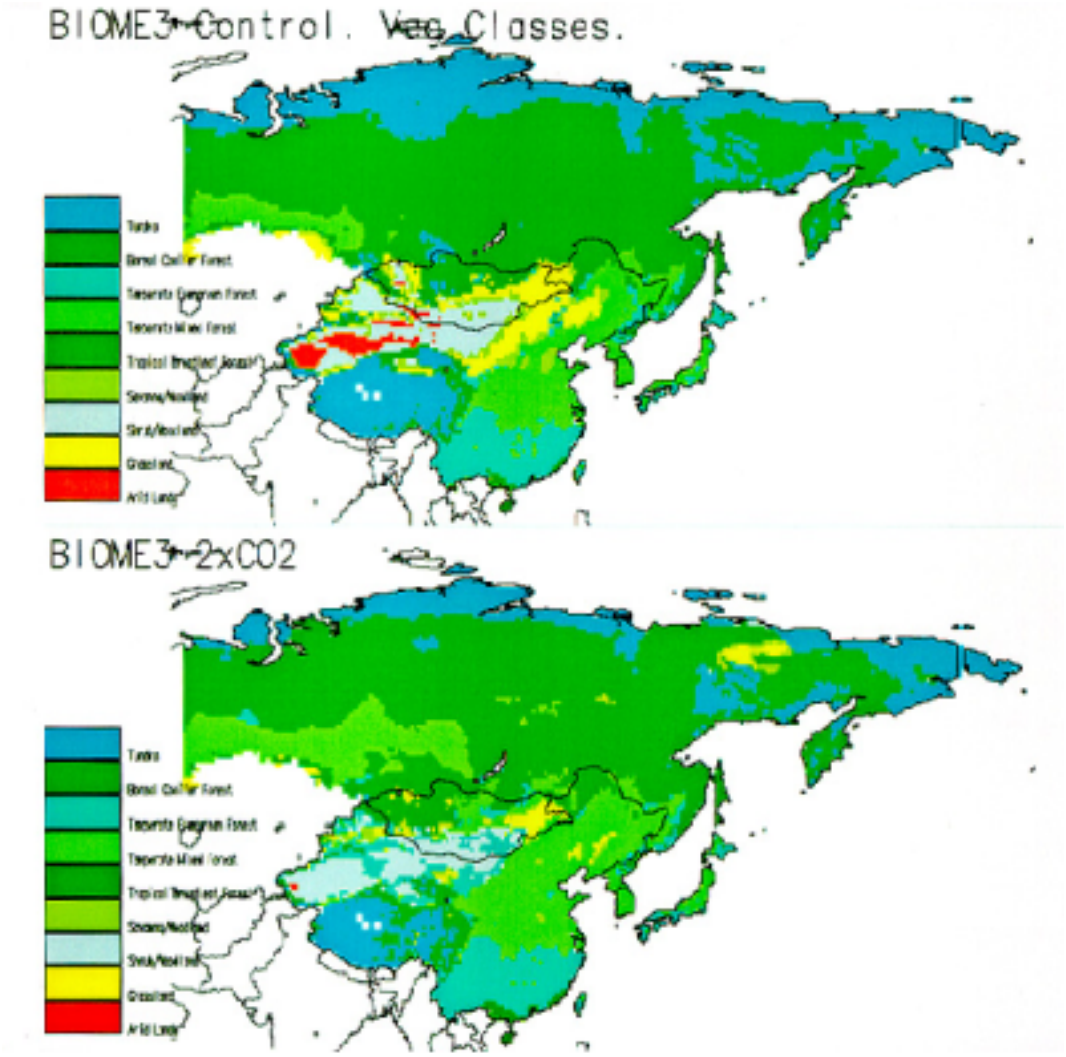
대조적으로 북미와 아시아의 온대림 및 혼효림의 면적은 다소 증가할 것을 예상되며 대부분의 북반구 침엽수림 지역에서는 매우 미약한 변화만이 예측되고 있다. 또 이러한 삼림은 더 알맞은 온도와 적당한 강우, 그리고 생장에 더 알맞은 대기중의 질소농도로 인하여 그 생장속도가 더욱 가속화될 것으로 전망된다. 위도 북위 30도에서 60도 사이의 잠재 바이오매스 생산량은 현재와 2080년 사이에 70% 증가할 것으로 예상된다.



< 그림 Ⅱ-3 > 현재와 2080년의 유형별 삼림면적변화

자료 : Harasawa, H.(2000) Recent development of Impacts Study in Japan and IPCC, 기후변화와 생태계보전 심포지엄 발표 OHP

< 그림 Ⅱ-4 >는 BIOME3 모형의 결과를 보여주고 있다. 이 역시 우리나라의 경우는 기후변화 전과 후의 차이가 없어 광역차원의 모형은 우리나라와 같이 경위도 차가 작은 나라에는 공간해상도의 정밀화를 이루지 않고는 충분한 설명력을 가질 수 없음을 단적으로 보여주고 있다.



< 그림 Ⅱ-4 > BIOME 3 모형에 의한 삼림부문의 영향

자료 : Harasawa, H.(2000) Recent development of Impacts Study in Japan and IPCC, 기후변화와 생태계보전 심포지엄발표 OHP

생화학모형은 생태계의 에너지 또는 영양물질의 순환과정을 중심으로 시뮬레이션함으로 탄소순환 산정에 더 효율적이라는 장점이 있다. 이 생지구화학적 모형중 수관의 복사특성을 시뮬레이션하여 광합성 및 증발산을 산출하는 모형으로는 MAESTRO(Wang and Jarvis, 1990; Jarvis, 1993)과 BIOMASS (McMurtrie et al., 1990)가 있다. 광합성과 증발산을 이용하여 영양물질 생성을 도출하는 모형으로는 CENTURY (Parton et al., 1988)이 있다.

탄소와 수분의 순환을 시뮬레이션한 모형으로는 TEM (Melillo et al., 1993)이 있으며, Forest-BGC (Running and Coughlan, 1988) 모형은 광합성/증발산과 탄소/수분 모형의 중간 형태이다.

이러한 생화학모형은 이산화탄소 농도의 증가시 각 삼림유형의 생산량 및 탄소보유량을 산정하는 데 유용하게 사용된다.

과정기반 모형은 입력과 출력의 기계적인 연산에 의해 예측되는 모형이라는 의미에서 기

계적인 모형이라고도 알려져 있다. 이 모형으로는 특정지역의 삼림수목의 생성, 생장, 소멸과정을 수명, 생장률, 요구환경을 이용하여 시뮬레이션하는 GAP 모형이 있다(UNEP, 1998).

이러한 정보들은 연구가 많이 이루어진 국가들에서는 비교적 구하기 쉬우나, 기초연구가 안되어 있는 대부분의 나라에서는 기초정보를 구축하는데 많은 시간과 노력이 투입되어야 한다는 단점이 있다. 그러나, GAP 모형은 종 구성변화 및 외부적 환경변화에 따른 일시적인 생물량 반응을 예측하는 연구에서는 매우 유용한 방법이다(이재훈 등, 2000).

4.2. 경제모형

가장 일반적으로 사용되는 경제모형(Economic Model)으로는 입출력모형(Input-Output Model) (Arthur and van Kooten, 1989; Rosenberg, 1993)이 있다. 이 모형은 다른 모형의 결과나 외부의 자료를 참고하여 일정비율의 입력을 적용하여 출력을 산출하며, 일반적으로 입력은 원재료, 자본, 노동력 등이 있으며, 출력으로는 상품, 폐기물 등이 있다.

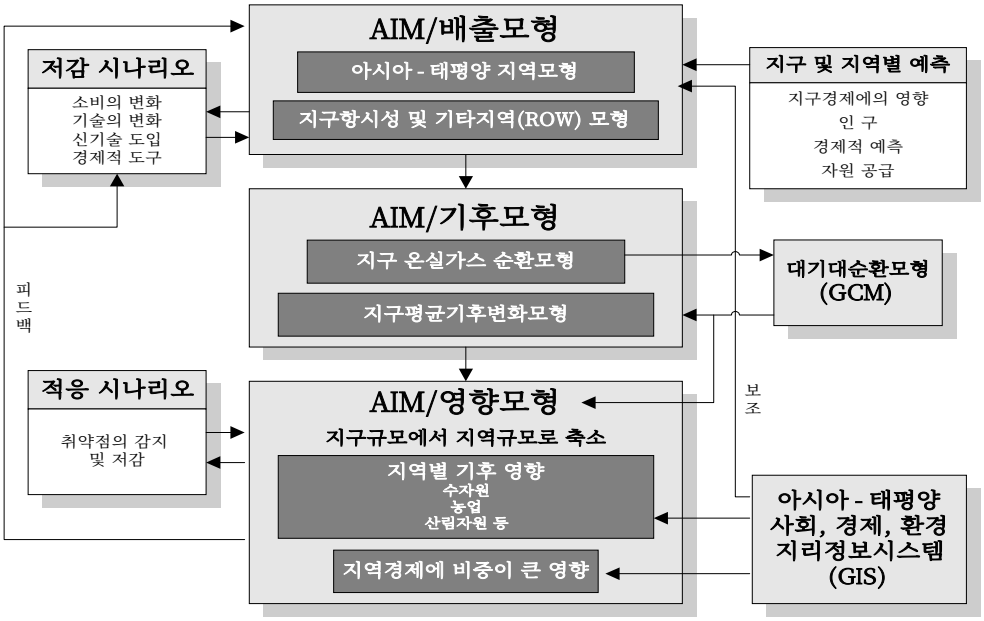
경제모형을 삼림부분에 적용한다면, 특정 삼림생산품의 가격곡선탄력성을 이용하고 수요와 공급의 관계를 활용하여 삼림생산품의 가격을 산출할 수 있다. 이 모형의 대표적인 사례로는 TAMM(Joyce et al., 1995)과 GCTM (Peres-Garcia et al., 1995)이 있다.

4.3. 통합모형

통합모형(Integrated Models)은 생물·물리학적(biophysical) 과정과 사회·경제적 과정을 통합한 모형으로(Rosenburg, 1993), 가장 이상적인 모형이나 그 구조가 매우 복잡하여 현실세계에 근접한 모형을 개발하기 어렵다.

이 모형의 사례로는 네덜란드 보건환경연구소(Research for Man and Environment : RIVM)에서 개발한 IMAGE 2.0(Alcamo, 1994)이 가장 근접한 사례이나 매우 기초적인 모형으로 한계성을 많이 가지고 있다.

일본의 AIM(Asian-Pacific Integrated Model)은 기후변화에 따라 변화하는 생물의 성장·동향 등을 모형화 한 것으로 기후 변화가 삼림생태계, 겨울 밀의 생산성 변화 등에 영향을 미치고 있다는 것을 예측하고 있다(AIM Project Team, 1996).



< 그림 Ⅱ-5 > AIM 통합모형의 개요

AIM은 크게 온실효과가스 배출모형(AIM/emission), 기후모형(AIM/climate), 영향모형(AIM/impact) 세 가지의 모델로 나뉘어져있는데 각 모델간의 관계는 다음 그림과 같다.

AIM 모델은 GIS를 이용하여 개발되었고, 각 지역의 중요한 경제와 환경에 관련된 자료가 입력되었다. 지구온난화에 따른 수자원의 변화, 농업생산량, 식물변화, 말라리아 확산 등의 예측을 위한 모델은 이러한 자료를 바탕으로 개발되었다. 실례로 모델링의 결과로 인도네시아는 7천 5백만에서 1억 8백만의 사람들이 말라리아에 노출될 위험이 증가할 것이라고 예견했고, 쌀 수확량은 2% 감소추세를 보이고 이 나라의 75%가 가뭄현상을 보일 것이라고 예측했다. 이와 같이 이 모델이 비록 기후변화의 문제점을 위해 개발이 되긴 했으나, 지역적 공기오염, 삼림관리 정책, 에너지, 농업과 수자원 관리 등에도 다양하게 이용될 수 있다는 것이 큰 장점이다.

Ⅲ. 모델의 선정 및 부분별 적용방법

1. 모델의 선정

본 연구에서는 기후변화로 인한 삼림의 변화를 예측하고, 평가하기 위하여 1차년도 연구에서 검토되어 선정된 AIM(Asia-pacific Integrated Model, 이후 'AIM'이라 함)/Impact 모형의 일부를 사용하였다. 본 연구에서 AIM/Impact 모형에 기초하여 적용한 이유는 다음과 같다.

첫째, 통합성을 고려하였다. 현재 전 세계에서 모형으로 인정받고 있는 주요한 모형들은 AIM/Impact 모형과 같이 배출모형, 기후모형, 영향모형 간에 유기적인 환류 과정을 가지고 있으며, 각 부분별로 세부 모듈화하여 모듈별로 발전시킬 수 있는 통합모형이다. 따라서 본 연구에서는 향후 여러 영향모형간의 통합성을 고려하고, 각 부문의 특성을 결합시킨 통합모형으로 발전시킬 수 있는 AIM/Impact 모형을 선정하여 모델을 구축하였다.

둘째, 적용적정을 고려한다. AIM/Impact 모형은 전 세계적으로 인정받고 있는 주요한 모형중의 하나이며, 기후, 지형조건이 우리나라와 유사한 일본에서 개발되어 우리나라에의 적용가능성이 높기 때문이다.

셋째, 신뢰성 및 정확성을 고려한다. 세계적인 흐름으로 볼 때 세계 각국이 지역차원의 영향연구를 진행시키고 있으며, 이 결과를 IPCC와 같은 국제기관에 제출하고 있다. 여기서 연구결과를 인정받고, IPCC 보고서에 인용되기 위해서는 모형의 신뢰성이 인정되어야 한다. 이러한 측면에서 AIM/Impact 모형은 이미 IPCC에서 인정된 모델이다.

본 연구에 이용되는 AIM/Imapct 모형의 3개 주요 모형과 모듈의 기본골격은 < 그림 Ⅱ-5 >와 같다. AIM/배출모형은 저감시나리오 및 지구 및 지역별 예측자료가 입력자료로 입력되어, 산출결과가 AIM/기후모형으로 입력된다. 여기에 GCM 결과가 입출력되며 환류하는 과정을 거쳐 목표연도의 기온 및 강수량 자료를 산출한다. 이와 같은 자료가 AIM/Impact 모형으로 입력되어 각 부문별 영향을 예측하는 과정을 거치게 된다. 영향의 예측결과는 다시 AIM/배출모형으로 입력되어 환류하는 과정을 반복적으로 거치는 통합모형이다. 이와 같이 AIM 모형은 배출모형, 기후모형, 영향모형이 유기적인 환류과정을 가지도록 설계되어 있어 예측의 신뢰성이 높으며, 적용 가능성도 높아 현 시점에서 유용한 모델로 판단된다.

2. 기온상승시나리오

IPCC 시나리오에 의하면 1990년도를 기준으로 2100년에는 CO_2가 35-170%, CH_4는 22-175%, N_2O는 26-40% 증가하는 것으로 나타났다(IPCC, 1995).

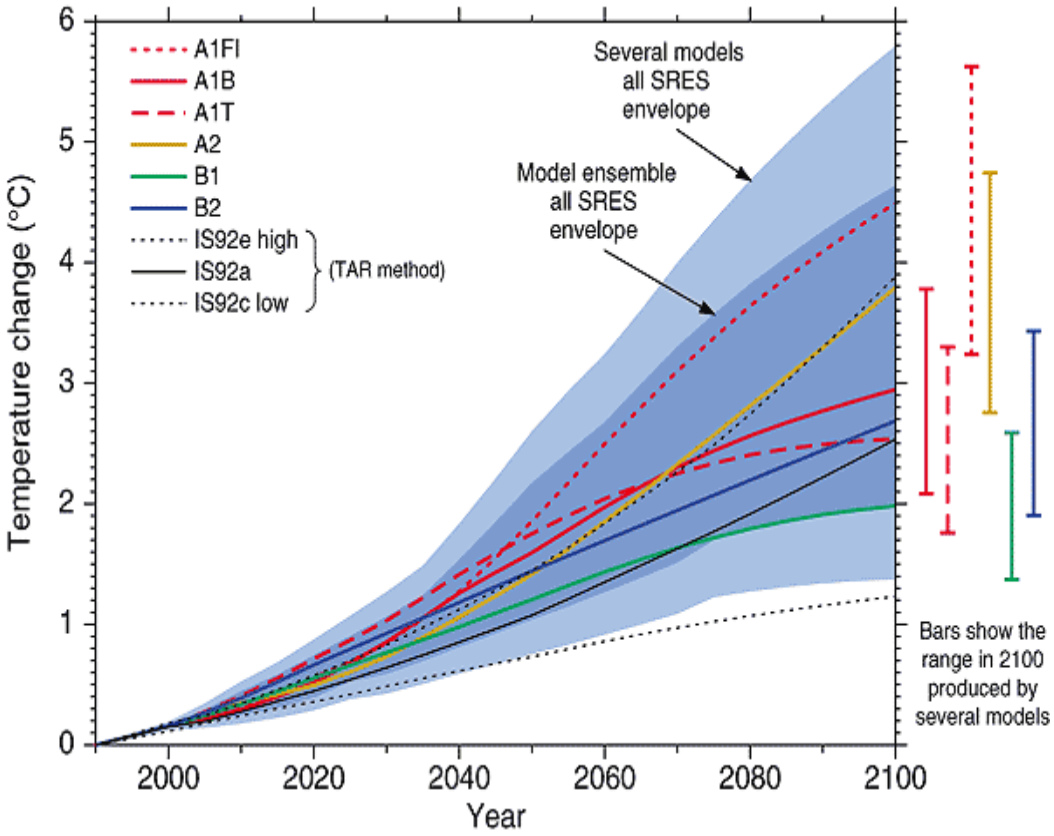
지구대기 조성변화에 따른 기후변화예측은 IPCC를 중심으로 이루어지고 있다. IPCC는 6개의 표준이 되는 배출 시나리오(IS92a-f)를 제시하였고, 기준 시나리오인 IS92a에 따르면, 기준년도인 1990년도의 CO_2농도는 약 350 ppmv이고 100년 후인 2090년에는 약 670ppmv가 될 것으로 추정된다. IS92a 시나리오에 따른 기후변화 예측결과, 향후 100년 동안에 전 지구의 평균온도는 2.5℃ 상승할 가능성이 가장 높으며, 1.5-4.5℃ 범위에서 상승할 것으로 예측된다(IPCC, 1992). 에어로졸 효과를 고려하면, 2.0℃ 상승 가능성이 가장 높게 나타난다. 이들 시나리오의 산출에 사용된 주요내용은 < 표 Ⅲ-1 >에 정리하였다.

< 표 Ⅲ-1 > IPCC 1992 시나리오 요약

시나리오	2100년 세계인구	경제 성장률	에너지공급	기타	CFCs
IS92a	세계은행 (1991) 113억	1990-2025: 2.9% 2025-2100: 2.3%	석유 12000EJ 천연가스 13000EJ 태양에너지비용은 0.75$/Kwh로 하며, 연당 191EJ의 바이오매스 연료는 70$/배럴(=6GJ)로 산정	SOx, NOx, NMVOC의 배출규제가 입법화되고, 국제적인 합의가 이루어지며, 개발도상국의 SOx, NOx, CO 배출감소노력이 다음 세기중반까지 이루어짐	몬트리올 의정서의 부분적 준수, 기술이전의 결과 비협약국도 2075년까지 CFC를 단계적으로 전폐함
IS92b	세계은행 (1991) 113억	1990-2025: 2.9% 2025-2100: 2.3%	IS92a와동일	IS92a와 함께 많은 OECD국가들이 이산화탄소감소 또는 안정화	범지구적으로 몬트리얼의정서의 일정준수
IS92c	UN (1991) 중저경우 64억	1990-2025: 2.0% 2025-2100: 1.2%	석유 8000EJ 천연가스 7300EJ 원자력비용은 연간 0.4% 감소	IS92a와동일	IS92a와동일
IS92d	UN (1991) 중저경우 64억	1990-2025: 2.7% 2025-2100: 2.0%	석유와 천연가스는 IS92c와 같으며, 태양에너지비용은 0.065$/Kwh, 바이오매스연료는 50$/배럴	CO, COx, NMVOC와 SOx에 대한 배출규제가 전 세계적으로 확산 삼림벌채 멈춤	공업국은 1997년까지 CFC생산을 전폐하고 HCFC도 전폐
IS92e	세계은행 (1991) 113억	1990-2025: 3.5% 2025-2100: 3.0%	석유 18,400EJ, 천연가스는 IS92a와 같으며, 원자력은 2075년까지 전폐	화석에너지비용을 30% 증가시키는 배출규제	IS92d와동일
IS92f	UN (1991) 중고경우 176억	1990-2025: 2.9% 2025-2100: 2.3%	석유와 천연가스는 IS92e와 같으며, 태양에너지비용은 0.75$/Kwh, 원자력비용은 0.09$/Kwh로 증가	IS92a와동일	IS92a와동일

자료 : IPCC(1992), Climate Change 1992 : The supplementary report to the IPCC Scientific Assessment, J. T. Houghton, B. A. Callander and S. K. Varneyl, Cambridge University Press, Cambridge, UK,, pp.331-339

IPCC의 WGⅢ는 2000년 보고서에서 기술의 발달과 에너지 사용과 관련하여 IS92 시나리오의 결점을 보완하는 SRES (Special Report on Emission Senario) 시나리오를 제안하였다. 이러한 다양한 시나리오는 < 그림 Ⅲ-1 >과 같이 IPCC에서 IS92a 시나리오의 기후 변화와 많은 차이를 나타낸다. < 그림 Ⅲ-1 >는 6가지 SRES 시나리오군의 지구 평균온도변화를 7가지 대기해양결합 대순환모형의 기후결과로 단순기후모형을 이용하여 나타낸 것으로 IS92 시나리오의 결과와 비교한 것이다.



< 그림 Ⅲ-1 > 시나리오에 따른 1990년에서 2100년까지의 기온변화

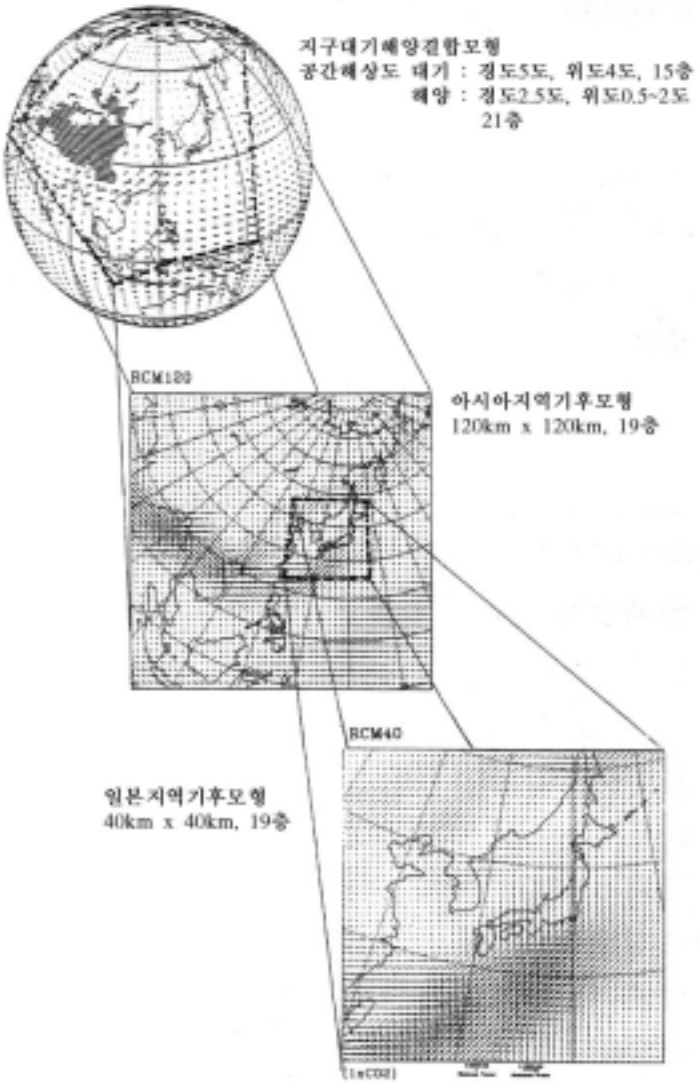
자료 : IPCC 제3차 보고서

본 연구에서는 대기대순환모형(GCM)의 확보가 용이한 IS92a 시나리오를 이용하여 분석을 수행하였다. IS92a 시나리오에 의한 GCM은 IPCC-DDC(Data Distribution Center)에서 제공되고 있으며, 3차년도의 연구에서는 SERS에 의한 대기대순환모형 결과를 확보하여 다양한 시나리오별 영향 연구를 수행할 것이다.

3. 대기대순환모형(GCM)과 지역대기순환모형(RCM)

또한 IPCC WG I 은 국가단위와 같은 작은 지역의 기후변화와 영향연구를 위해 GCM의

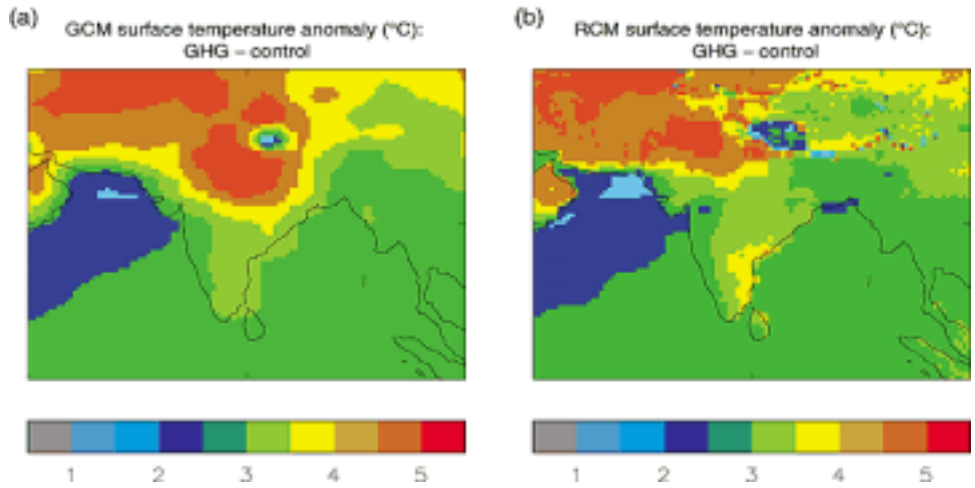
다운스케일링에 관하여 제안하고 있다. 제안된 다운스케일링의 방법의 한가지인 지역순환모형(Regional Circulation Model, RCM)은 < 그림 Ⅲ-2 >와 같이 GCM의 결과를 경계부 입력치로 하여 물리적인 모델링을 수행하여 보다 조밀한 공간분해능을 가지는 기후모형결과를 제공하는 것이다.



< 그림 Ⅲ-2 > 일본기상연구소의 2중 지역기후모형 개념도

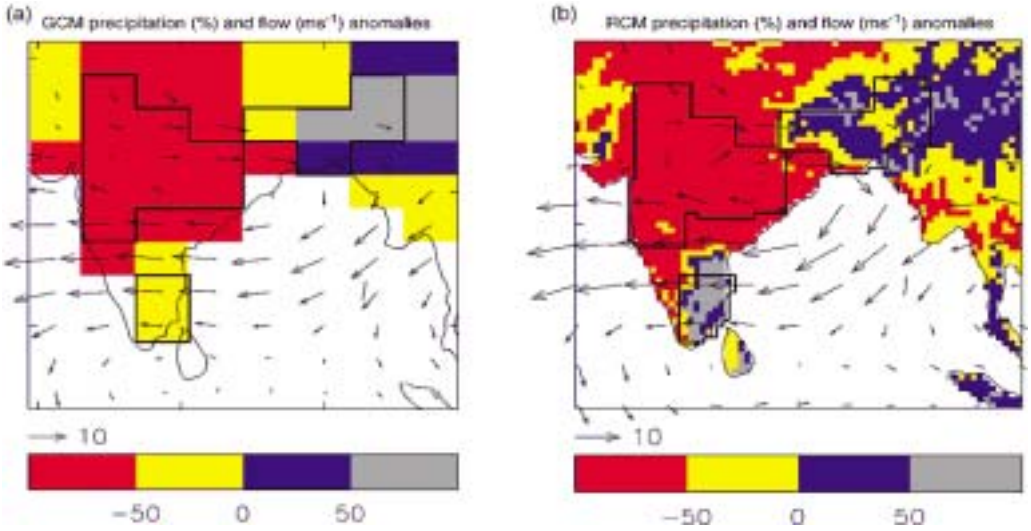
자료 : Sato et al.(1999), A 2×CO2 regional climate prediction experiment over Japan in winter with MRI regional climate model, Abstracts volume of the Workshop on "Development of High Resolution Climate Model", IUGG 1999, Birmingham, U.K., p.299

< 그림 Ⅲ-3 >과 < 그림 Ⅲ-4 >는 인도몬순지역에 대해 GCM의 결과와 RCM의 결과가 어떻게 달라지는 것인가를 나타낸 것으로 우리나라와 같이 좁은 지역의 연구시 GCM의 단순한 공간 통계적인 다운 스케일링이 포함할 수 있는 문제점을 알 수 있다. 따라서 다운 스케일링시 지형적인 요건을 감안할 수 있는 방법론의 활용이 필수적으로 고려되어야 한다.



< 그림 Ⅲ-3 > GCM과 RCM을 이용한 인도몬순지역의 현재기후와 2040년에서 2050년사이의 겨울철 지표면 온도변화차이(℃)

자료: Hassel and Jones (1999)



< 그림 Ⅲ-4 > GCM과 RCM을 이용한 인도몬순지역의 상대적인 강우차이(%)

자료 : Hassel and Jones (1999)

그러나 아직 신뢰할 수 있는 RCM 연구 결과들이 공급되지 못하고 있는 현실과 모델의 개발을 위한 다양한 시나리오의 적용한계로 본 연구에서는 미래 기후자료를 IPCC 자료제공 센터에서 권장하는 IS92a(중위시나리오)의 GCM들을 공간 통계적인 방법을 통해 변환하였다. < 표 Ⅲ-2 >는 연구에서 이용된 GCM 자료의 상세 내역이다.

< 표 Ⅲ-2 > IPCC-DDC에서 공급되는 GCM(IPCC-TGCIA,1999)

	CCSR /NIES	CCCma	CSIRO MK2	GFDL -R15	HadCM2	ECHAM4	NCAR -DOE
연구소명	Toko University National Institute for Environmental Studies, Japan	Canadian Center for Climate Modelling and Analysis	Australia's Common Wealth Scientific and Industrial Research Organization	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	Hadley Centre for Climate Prediction and Research UK	Deutsches Klimarechezentrum, Germany	National for Atmospheric Research, USA
해상도 (A-GCM)	5.625。 × 5.625。 20 Layer	3.75。 ×3.75。 10 Layer	5.625。 ×3.214。 9 Layer	7.5。 ×4.5。 9 Layer	3.75。 ×2.5。 19 Layer	2.8125。 ×2.8125。 19 Layer	7.5。 ×4.5。 9 Layer
해상도 (O-GCM)	2.8。 ×2.8。 17 Layer	1.8。 ×1.8。 29 Layer	5.6。 ×3.2。 21 Layer	3.75。 ×4.5。 12 Layer	3.75。 ×2.5。 20 Layer	5.6。 ×5.6。 11 Layer	1.0。 ×1.0。 20 Layer
격자수	64×32	96×48	64×56	48×40	96×73	128×64	48×40
CO_2농도 (control run)	345ppmv	295ppmv	330ppmv	300ppmv	323ppmv	354ppmv	330ppmv
CO_2농도 (transient run)	1%/yr	1%/yr	0.9%/yr	1%/yr	1%/yr	1%/yr	1%/yr
모의기간 (control run)	1890-2099 210yr	1900-2100 200yr	1881-2100 219yr	1958-2057 100yr	1860-2099 240yr	1890-2099 240yr	1901-2036 136yr
기후감도 (△T)	3.5℃	3.5℃	4.3℃	3.7℃	2.5℃	2.6℃	4.5℃
참조	Emori et al., 2000	Reader and Boer, 1998	Hirst et al., 2000	Manabe & Stouffer,1996	Johns et al.,1997	Roeckner et al., 1996	M e e h l , 2000

기후감도(△T) : CO_2 배증시 평형상태에 도달한 지표면온도 , ☐ 본 연구에 이용하는 GCM

자료 : Takahashi et al.(1998), Development of Climate Change Scenarios for Impact Assessment using results of General Circulation Model simulation, J. of Global Environmental Engineering, Vol(4), pp 1-8

본 연구에서는 IPCC의 자료 공급 센터에서 공급하고 있는 다양한 GCM 자료들중 2100년 모의된 5가지 GCM(CCSR/NIES, CCCma, CSIROMK2, HadCM2, ECHAM4)을 이용하여 한반도주변을 포함하는 0.1도 간격의 기후자료를 생성하였다. 1단계로 GCM은 일본 국립환경연구소 AIM 팀에서 사용했던 보간 방법과 동일하게 기온에 대해서는 spline 보간, 강수량은 거리자승역산가중 보간법(Inverse Distance Squraed Weightion, IDSW)을 이용하여 0.5°간격의 자료를 생성하였다. 보다 세밀한 변화 양상을 표현하기 위해 한반도지역에 대해, 1단계에서 제작된 결과물을 경위도 0.1°인 약 10km 해상도의 자료로 제작하였다. 이 때 기온은 거리 가중보간방법을 이용하였으며 강수량은 공간통계기법(Kriging)을 이용하였다. 제작된 기온자료는 과다한 공간보간으로 인한 기온 분포의 편차가 줄어드는 현상을 해소하고 지형고도의 영향으로 인한 기온 감소효과를 고려하기 위해 기온감율과 수치표고모형을 이용하여 보정하였다.

4. 기온감율을 고려한 기온의 공간내삽방법

4.1 일평균 기온감율의 추정

한반도와 같은 좁은 지역의 온난화 영향을 추정함에 있어 기온의 국지적 분포는 대단히 중요하다. 기상관측자료의 국지적인 분포는 여러 가지 요인에 의해 결정되지만 그 중에서도 지역의 지리지형특성이 가장 중요하다. 특히 기온은 식물의 대사과정에 직접적인 영향을 미쳐 생장과 발육을 결정하는 중요한 환경요인이다. 이에 따라 몇 개 지점에서 관측된 기온자료를 토대로 넓은 지역의 기온 분포, 즉 국지기온의 공간변이를 추정하는 기법도 활발하게 연구되어 왔다.

국지기온 결정인자 가운데 특히 고도의 영향이 현저하므로 비관측점과 공간내삽에 사용되는 주변 관측점간 표고편차를 기온감율에 의해 보정해주는 방법은 매우 단순하지만, 상대적으로 복잡한 다른 기법들에 비해 우수한 결과를 보인다(Nalder and Wein, 1998).

지구대기의 건조단열감율은 -0.0098℃ m^{-1}로 상수이지만, 수직으로 포화된 대기의 기온감율은 지표 부근의 -0.004℃ m^{-1}부터 대류권 중간의 -0.007℃ m^{-1}를 거쳐 권계면 부근에서는 건조단열감율과 거의 같아진다(Wallace and Hobbs, 1977). 그러나 산악지역에서 경사를 따라 이동할 때 관찰되는 기온변화 양상은 표준 대기의 연직 기온감율 양상과 다를 뿐 아니라 계절, 날짜, 일중 시간에 따라 변하므로, 시공간적인 변화속성을 감안하여 내삽 대상 기온의 시간적 규모에 따라 각기 다른 상수를 적용하거나 경험적인 예측식을 얻는 것이 일반적이다.

윤진일등(2001)은 한국지역의 일별 기온감율을 추정하기 위해 도서지방을 제외한 전국63개 표준관측소(해발고도 범위 17-840m)에서 1999년 1월 1일부터 12월 31일까지 생산한 일별 기상자료를 수집하여 위도, 경도, 해안거리, 해발고도 등을 회귀 분석하여 일평균 기온의 모형 기온감율 식을 제공하였다. 연중 날짜에 따른 기온감율 절대값 변화경향을 Fourier fitting에 의한 365일 주기의 함수로 표현하면 (식 Ⅲ-1)과 같다.

$$|\Gamma| = 0.00688 + 0.0015\cos\{0.0172(i-60)\} \qquad \text{(식 Ⅲ-1)}$$

여기서 i는 연중날짜 (1월 1일 = 1, 12월 31일 = 365)를 가리킨다. 관측된 사례들 중 90% 이상이 이 파동을 중심으로 ±0.002℃ m^{-1} 범위에 포함되는데, 이 식에 의해 추정되는 일 평균기온의 고도 100m 상승에 따른 감율은 9월의 0.56℃부터 3월의 0.84℃로서 평균값은 표준대기의 평균 기온감율과 크게 다르지 않다.

4.2 기온감율 기반의 공간내삽모형

관측된 기온은 이미 수평 및 수직 위치효과와 바다효과는 물론 기온역전을 포함한 모든 기온결정인자의 영향이 반영되어 있다. 만약 대상지역의 지표상태가 관측점과 동질적이며, 표고변이가 관측점의 표고값에 의해 대표될 수 있다면, 거리역산가중 내삽에 의한 기온의 공간변이 양상은 실제와 거의 일치할 것으로 기대할 수 있다. 우리나와 같이 해안지역에 인구가 밀집하고 산악지형을 이루는 경우는 실제지형이 관측지점의 표고와의 편차를 이용한 기온 추정이 불가능할 정도로 오차가 크게 발생할 수 있다. 산악지대에 설치된 관측소는 그 숫자가 적은 것은 물론 설치위치가 주변 지역을 대표하기 어렵기 때문에 단순한 거리역산가중 기법을 토대로 고도-기온 관계를 결합한 공간내삽모형을 작성한다면 기온의 공간변이를 보다 정확하게 추정할 수 있을 것이다. 지표피복상태 등 표고를 제외한 관측지점의 특징이 동일하다고 가정하면 임의지점의 기온 T는 (식 Ⅲ-2)와 같이 나타날 수 있다.

$$T=\frac{\sum\frac{T_i}{d_i^2}}{\sum\frac{1}{d_i^2}}+\left[z-\frac{\sum\frac{z_i}{d_i^2}}{\sum\frac{1}{d_i^2}}\right]\Gamma \qquad \text{(식 Ⅲ-2)}$$

여기서 T_i는 임의지점 주변의 관측소 i에서 실측된 기온값이며 d_i는 이 관측소와 임의지점간 거리로서 오른쪽 식의 첫째 항은 거리자승역산가중(Inverse distance squared weightion; IDSW) 내삽에 의한 기온 추정값이 된다. z는 임의지점의 실제표고, 괄호 안의 둘째 항은 IDSW에 의해 추정된 가상지형상의 표고 추정값으로서 괄호 안의 수식은 임의지점의 표고편차를 나타낸다. Γ는 내삽시점의 고도에 따른 기온감율로서 (식 Ⅲ-1)에 의한 일평균 기온감율에 의한 추정식을 이용한다. 가상지형의 표고 추정 값은 관측지점의 표고들만을 이용하여 IDSW 내삽을 통하여 생성된 가상면 수치표고모형과 실제 수치표고모형의 차를 이용하여 계산가능하다.

5. 삼림영향모형

UNEP(1998)에서는 다양한 모형들을 < 표 Ⅲ-3 >과 같은 용도로 사용하는 것을 권고하고 있다. 우선 생기후모형은 다양한 기후변화 시나리오 하에서의 미래 안정기(steady-state) 삼림분포를 예측하기 위하여 사용하여야 하며, 시간적 유추법과 생물역사학(bio-history)적 정보는 삼림의 경계가 얼마동안의 시간동안 이동되었고 변환기동안 어떠한 현상들이 발생하였는가를 참조하는데 사용할 것을 권고하고 있다. 특정삼림의 생성, 생장, 소멸과정을 수명, 생장률, 생장요구환경을 분석하여 시뮬레이션하는 천이모형은 종 구성변화 및 외부적 환경

변화에 따른 일시적인 생체량 반응을 예측하기 위하여 사용되며, 생태계 에너지 또는 영양물질의 순환과정을 중심으로 시뮬레이션 하는 생물·지리화학적모형은 이산화탄소 농도의 증가시, 각 삼림유형의 생산량 및 탄소보유량을 추산하는데 효과적이라고 밝히고 있다. 경제모형은 삼림생산물의 수요와 그 수요를 충족시킬 수 있는 지역을 예측하는데 효과적임을 들어 사용을 권고하고 있다.

이중 삼림면적의 분포와 변화를 기후변화와 연관하여 예측하는 방법론은 인공위성영상자료를 이용한 원격탐사기법과 지리정보시스템을 이용할 경우 자료 구축 및 활용시 시간을 절약할 수 있으며, 결과의 신뢰성을 높일 수 있다.

< 표 Ⅲ-3 > 삼림부문 영향예측 목적에 따른 기술

목 적	예 측	요 소 기 술
삼림면적과 분포의 변화분석	기후변화에 따른 삼림면적 및 분포변화의 예측	- 인공위성영상자료를 이용한 원격탐사기법과 지리정보시스템을 이용한 분석 - Holdridge 모형 - 시공간적 유추법
삼림구조의 변화분석	기후변화에 따른 삼림구조 변화의 예측	- 생장실험 - 천이(Gap) 모형
삼림자원 생산의 변화분석	기후변화에 따른 삼림자원 생산량 변화 및 자원경제학적 변화의 예측	- 경제모형 - 인구모형 - 통합모형 - 통계분석모형
삼림 생태계 구조와 기능의 변화분석	기후변화로 인한 삼림 생태계의 변화 예측	- 천이(Gap) 모형

이 모형은 생물온도(bio-temperature), 강수량, 강수량에 대한 PET의 비율과 같은 기후변수에 생태계 복잡성의 분포를 연관시키는 기후학적 분류 개요이다. 생물온도와 연 강수량은 이 분류 모형에 결정적인 영향을 미치는 두 가지의 주인자이다. 생물온도는 (식 Ⅲ-3)으로 계산된다.

$$T_{BIO} = \frac{\Sigma_{m=1}^{12} \max(T(m), 0)}{12} \qquad \text{(식 Ⅲ-3)}$$

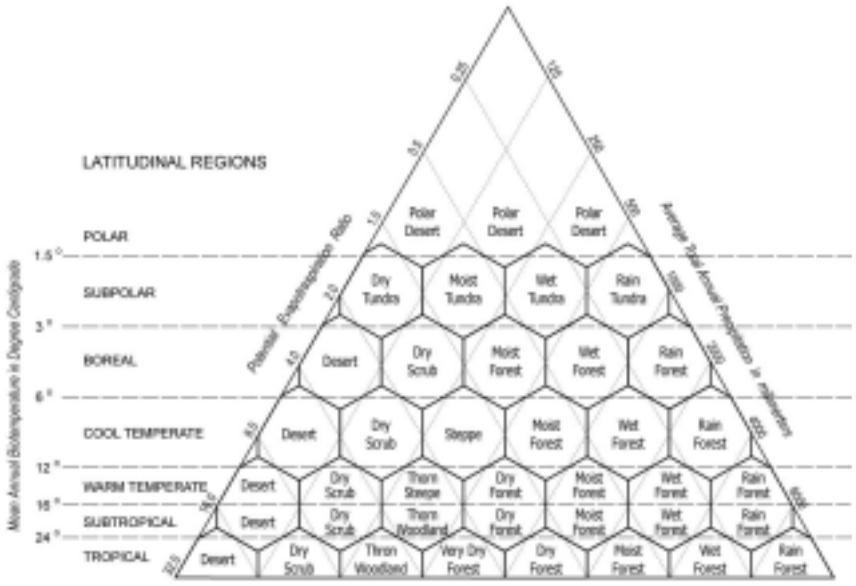
여기서 T_{BIO} [℃]는 생물 온도이고 $T(m)$ [℃]은 월 평균 기온이다. 먼저 기후는 이 생물온도에 의해 7가지로 구분되고, 평균 전체 연 강수량(average total annual precipitation)에 의해 나누어진다. 완결된 분류는 39개 기후 지역을 포함하는 것으로 < 표 Ⅲ-4 >와 같다.

< 표 Ⅲ-4 > Holdridge 모형의 삼림기후대 분류표

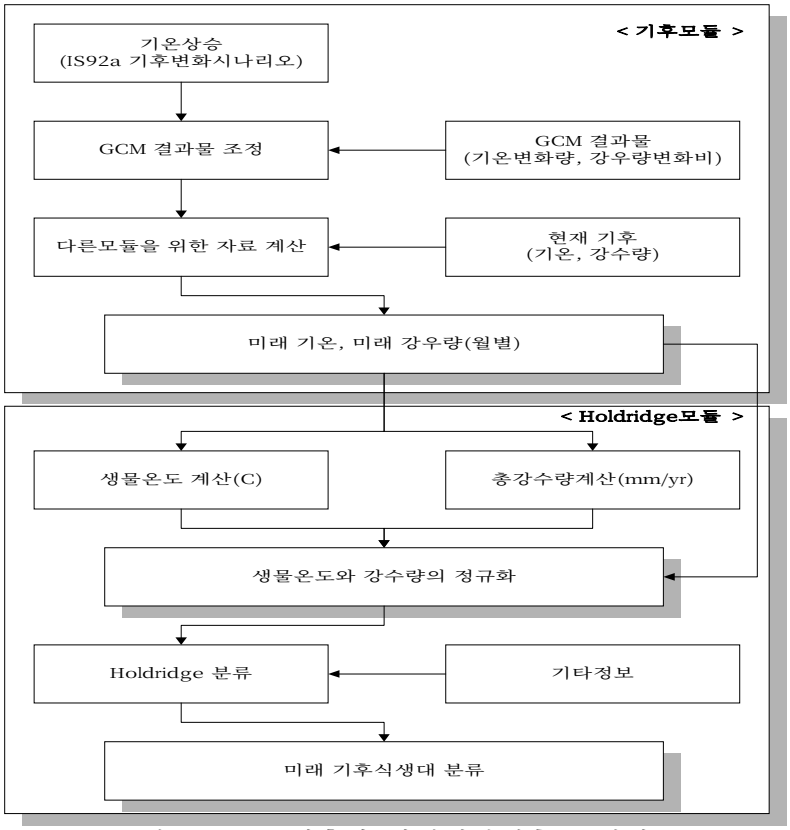
번호	분 류 명	번호	분 류 명
0	None	20	Warm temperate thorn steppe
1	Ice Polar desert	21	Warm temperate dry forest
2	Polar desert	22	Warm temperate moist forest
3	Subpolar dry tundra	23	Warm temperate wet forest
4	Subpolar moist tundra	24	Warm temperate rain forest
5	Subpolar wet tundra	25	Subtropical desert
6	Subpolar rain tundra	26	Subtropical desert scrub
7	Boreal desert	27	Subtropical thorn woodland
8	Boreal dry scrub	28	Subtropical dry forest
9	Boreal moist forest	29	Subtropical moist forest
10	Boreal wet forest	30	Subtropical wet forest
11	Boreal rainforest	31	Subtropical rain forest
12	Cool temperate desert	32	Tropical desert
13	Cool temperate desert scrub	33	Tropical desert scrub
14	Cool temperate steppe	34	Tropical thorn woodland
15	Cool temperate moist forest	35	Tropical very dry forest
16	Cool temperate wet forest	36	Tropical dry forest
17	Cool temperate rain forest	37	Tropical moist forest
18	Warm temperate desert	38	Tropical wet forest
19	Warm temperate desert scrub	39	Tropical rainforest

자료 : Holdridge, L.R.(1947), Determination of World Plant Formation from Simple Climatic Data, Sceince 105:367-368

본 연구에서는 기후변화로 인한 삼림분포의 변화를 기후적 요소와 생물학적 요소를 통합하여 예측하기 위해 생물기후학적 Holdridge 모형을 활용하며, Holdridge 모형의 개념도와 방법론은 각각 < 그림 Ⅲ-5 > 및 < 그림 Ⅲ-6 >과 같다.



< 그림 Ⅲ-5 > Holdridge 모형의 개념도



< 그림 Ⅲ-6 > 기후와 삼림영향예측 모형의 흐름

6. 삼림의 적응성 추정

IPCC의 제2차 보고서에 따르면 향후 100년 간에 지구의 평균기온이 1℃에서 3.5℃ 상승할 경우, 각 기후대는 극방향으로 약 150~550㎞이동할 것으로 예측하고 있다. 한편, 과거 기후변동 시기에 관한 연구로부터 목본식물도 기후대와 동시에 이동하는 것으로 알려져 있으나 그 이동속도는 < 표 Ⅲ-5 >와 같이 100년에 4~200㎞로 추정되기 때문에 이동속도가 빠른 수목종을 제외하고는 기후대의 이동을 따라가지 못하여 기후의 변화에 따라 삼림의 사멸 위험성이 높다고 제시되고 있다.

또한, 완신세(完新世)에 일어났던 기후변동에 관한 연구로부터 삼림의 이동속도는 이동루트가 산악지대와 저지대에 있어서 큰 차이가 나며, 바람에 의한 종자의 산란과 동물에 의한 삼림의 이동속도는 증가하게 된다. 이러한 원인으로 호소나 바다와 같은 지역에서도 삼림의 확산이 방해받지 않는 것으로 알려져 있다. 따라서 삼림의 이동은 이와 같은 종자의 분산력보다도 오히려 생육 가능한 조건을 갖춘 장소의 존재여부의 요인에 큰 영향을 받는다고 볼 수 있다.

< 표 Ⅲ-5 > 목본식물의 이동가능속도

목본식물	이동가능속도(m/년)
전나무속	40~300
자작나무속	500~2,000
밤나무・너도밤나무속	200~300
호두나무속	400
가문비나무속	80~500
소나무속	1,500
느릅나무속	75~500
기후대의 이동속도	1,500~5,500

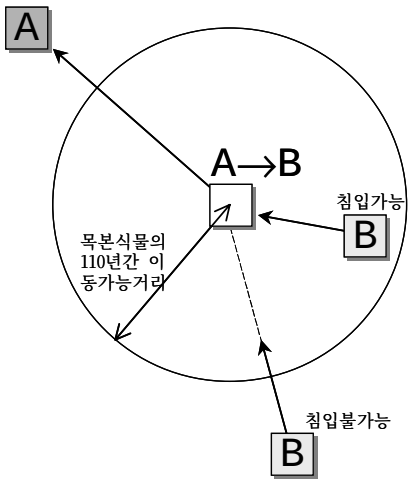
자료 : Davis, M. B.(1989), Lags in vegetation response to green house warming, Climate Change, 15:75-82

본 연구에서는 위와 같은 연구결과들로부터 기후변동에 의한 지역 삼림의 영향을 삼림이 생육 가능한 기후조건 및 목본식물의 이동속도 두가지 인자에 의해 < 표 Ⅲ-6 >과 같이 분류하였다. 기후변화에 의한 지역 삼림의 영향을 1990년 및 2100년 기후대에서 삼림 성립가능성에 따라 크게 4가지의 변화패턴으로 분류하였고, 삼림형성이 가능한 2100년 기후대는 기후대와 목본식물의 이동속도의 차이에 따라 새로운 기후대가 생성됨과 동시에 외래수종의 침입이 발생할 경우와 그렇지 않은 경우로 분류하여 생각하였다. 마지막으로 기후대가 변화하지 않을 경우를 덧붙여 a부터 g의 7가지로 분류하였다.

< 표 Ⅲ-6 > 기후대의 변화가 지역 삼림에 미치는 영향

<table>
<tr><td colspan="2">지역의 기후대변화의 패턴</td><td rowspan="2">지역의 삼림에 미치는 영향</td></tr>
<tr><td>1990년의 기후대</td><td>2100년의 기후대</td></tr>
<tr><td rowspan="4">삼림 성립 가능</td><td>삼림의 성립가능 (기후대 변화없음)</td><td>a) 기후대의 변화가 없고 그 지역에 현존하는 삼림이 보호・유지된다.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">(기후대의 변화있음)</td><td>b) 다른 지역으로부터 그 지역에 현존하지 않는 수목종(외래종)이 기후대와 동시에 이동할 수 있는 삼림을 형성한다.</td></tr>
<tr><td>c) 기후대만이 변화하여 타지역으로 부터 외래종의 침입이 발생하지 않은 경우, 그 지역에 현존하는 삼림의 종조성이 변화한다. 단계적으로 종조성이 변화하나, 극단적인 경우에는 열 stress, 건조, 화재에 의해 삼림이 고사하여 그 지역이 일시적으로 관목으로 덮여진다.</td></tr>
<tr><td>삼림 성립불가능</td><td>d) 삼림이 성립불가능한 기후대로 변화하기 때문에 최종적으로 삼림이 소실된다.</td></tr>
<tr><td rowspan="3">삼림 성립 불가능</td><td rowspan="2">삼림의 성립가능</td><td>e) 타지역으로부터 그 지역에 현존하지 않는 수목종(외래종)이 기후대와 동시에 이동할 수 있는 삼림을 형성한다.</td></tr>
<tr><td>f) 기후만이 변화하여 타지역으로부터 외래종 침입이 발생하지 않을 경우, 그 지역에 현존하는 삼림에 의해 삼림이 형성된다.</td></tr>
<tr><td>삼림 성립불가능</td><td>g) 본 연구에서는 사용하지 않는다.</td></tr>
</table>

지금까지, 목본식물의 이동은 기후대의 이동보다 늦기 때문에 외래수목종의 침입이 일어나지 않은 < 표 Ⅲ-6 >의 분류 c의 경우는 그 지역에 현존하는 삼림이 최소한의 상태로 살아가거나 단계적으로 다른 종으로 전환되어 간다. 또한 극단적인 경우에는 열 스트레스, 건조나 화재에 의해 그 지역의 식생이 고사하여 일시적으로 관목으로 덮여질 것으로 예측되었다.



A: 원 중심지역의 1990년 기후대
B: 원 중심지역의 2100년 기후대

< 그림 Ⅲ-7 > 외래 수목종의 침입가능성

자료 : Munesue Y. and Takahashi K.(2000), Evaluation of Climate Change Impact on Vegetation and its Economic Value, 日本環境科學會誌, 13(3): 329-337

< 그림 Ⅲ-7 >은 기후변화에 의한 외래수종의 침입가능성을 나타낸 것으로 원의 반경은 목본식물이 110년 간(1990~2100년)에 이동 가능한 거리를 나타낸다. 원의 중심지역의 기후대가 A에서 B로 변화한 경우, 기후대 B가 1990년의 시점에서 원내에 존재한다면, 그것에서 기후대 B로 적응해 간 수목종이 기후대와 동시에 이동하여 중심지역으로 침입할 수 있다.

Ⅳ. 모델의 적용 및 분석

미래의 기후변화의 영향을 추정하기 위해 보고된 많은 결과들은 직접적인 영향 평가 단계에서조차 GCM(General Circulation Model)의 종류와 추정된 기후변화 시나리오에 따라 상당히 다르게 나타난다. 따라서 기후변화 시나리오에 따른 유동성을 줄이고, 유용한 기후변화영향의 일관된 추정결과를 얻기 위하여 수개의 GCM을 활용하여 영향 평가를 수행하여야 한다.

본 연구에서는 지구 평균 표면 온도 상승의 범위를 가정하여 5개의 GCM 공간 기후변화 패턴을 중첩하였고 AIM/Impact의 하위 모듈을 사용하여 이들의 삼림 적합성에 대한 직접적인 영향을 계산하였다.

구축된 삼림영향평가모형의 정확도를 검증하기 위하여 1970년대부터 사용된 온량지수와 한랭지수를 이용하였다.

이러한 작업은 기후 변화 영향에 대한 완화(mitigation)와 적응(adaptation)에 대한 장래 평가에 유용한 영향 반응 곡선(impact response curves)을 제공할 것이다.

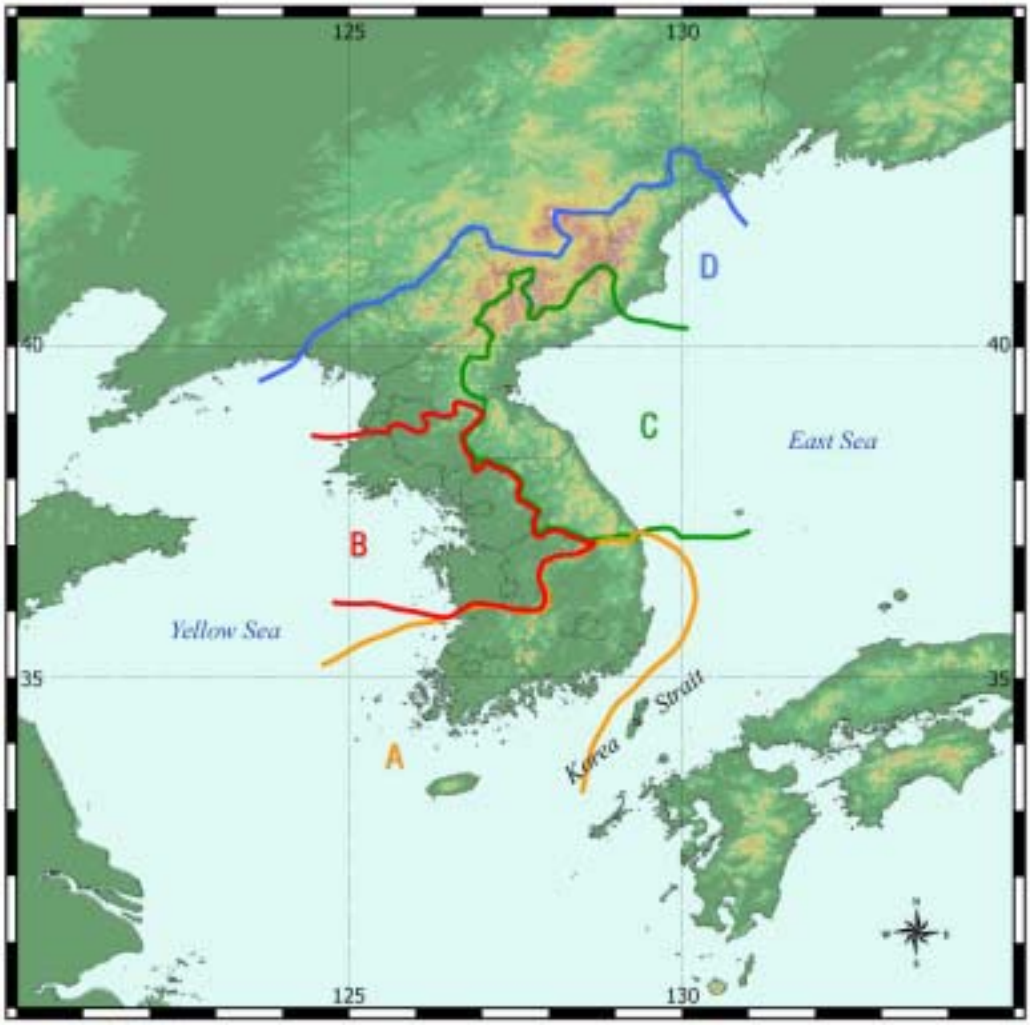
1. 연구대상지역의 선정

연구의 대상지역은 다음과 같은 이유에서 한반도를 포함한 경도 120°~135°, 위도 30°~ 45°으로 하였다.

첫째, GCM을 이용해 제작된 기후자료의 공간 해상도가 지역적 영향을 상세히 모의하기에 상대적으로 크므로, 너무 좁은 지역을 대상으로 할 경우 공간해상도으 1한계로 인해 연구결과가 왜곡될 가능성이 있다.

둘째, 한반도 삼림의 연결성을 고려하여 북한과 만주지역을 포함한 동북아시아 지역을 선정하였다.

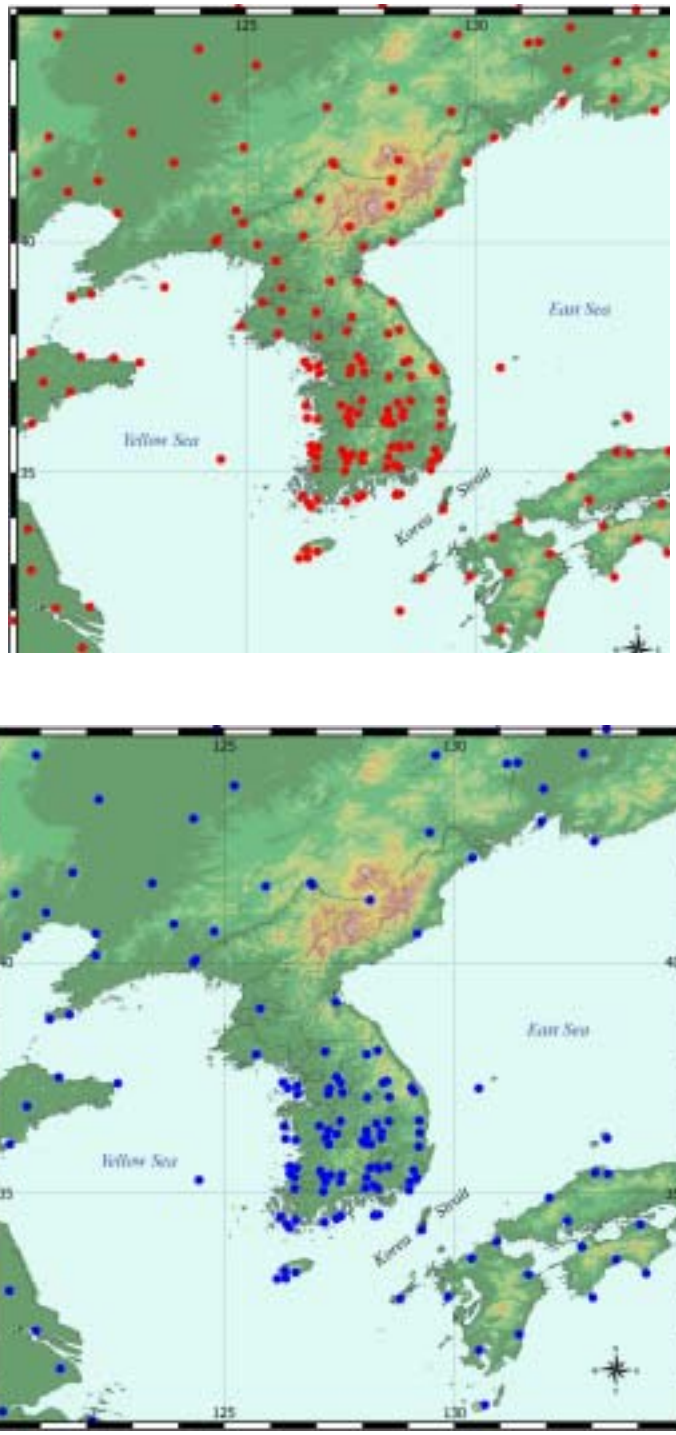
< 그림 Ⅳ-1 >은 연구대상지역의 위치를 나타낸 것으로. A지역은 남부지역인 경상남북도와 전라남북도, B지역은 중부 서해지역인 충청남북도, 경기도, 황해도, C지역은 중부동해지역으로 강원도와 함경남도일원, D지역은 북부지역으로 평양남북도와 함경북도 일원으로 구분하였다. 이러한 구분은 기존의 연구에서 나타난 삼림생태계 분포와 기후 패턴을 고려한 것으로 연구자가 행정구역경계를 이용하여 임의적으로 구분한 것이다.



< 그림 Ⅳ-1 > 연구대상 지역의 위치와 구분

2. 미래 기후의 추정

현재의 기온과 강수량 관측정보와 GCM 결과로부터 나온 기온과 강수량의 변화를 이용하여 연구에서 요구되는 기후 정보로 변환하였다. 현재 기후는 UNEP에서 개설한 그리드데이터센터에서 제공하는 지구기후네트워크(Global Historical Climatology Network Data, GHCN)의 동북아지역 기온 197개소, 강수량 119개소 지점의 월평균기온, 강수량자료와 기상청 상시관측소 80개 지점의 1961년~1999년까지 일 평균 기온과 강수량을 이용하여 제작하였다.



< 그림 Ⅳ-2 > 분석에 이용된 기상관측 지점(일부)
(상 : 기온관측소, 277개소, 하 :강우관측소,199개소)

GHCN의 자료는 6,039지점의 기온 관측지점과 7,533 지점의 강수관측지점을 가지고 있으며 모든 관측소는 최소 10년의 관측자료를 가진다. 50년 이상의 관측기록을 가지는 지점은 전체의 40%에 달하며 10%는 100년 이상의 관측기록을 가지고 있다. 또한 전체의 80%이상 관측소는 '80, '90년대까지 관측을 해오고 있다. IPCC에서는 현재기후를 대표하기 위해 30년

이상의 평균치를 이용할 것을 권장하고 있으나 한국 기상청에서 제공하는 상시 관측점 자료는 30년 이상 관측된 관측소가 적은 관계로 인해 최소 10년 이상의 관측지점을 가지는 지점을 포함하여 현재 기후를 나타내었다. < 그림 Ⅳ-2 >는 연구대상지역의 기온과 강수량 관측지점의 위치를 나타낸 것이다.

기후 자료의 공간적 분배를 위해서 < 표 Ⅳ-1 >에 열거된 5개의 GCM이 이용되었다. GCM의 공간적 해상도가 영향 연구에 이용될 정도의 충분히 조밀하지 않으므로 "GCM 결과 형성자(organizer)"를 이용하여 각 기후 인자에 적합한 방법에 의해 자료들을 공간적으로 보간 하였다. 이들 결과들은 가정된 지구평균기온과 조합되어 미래의 기후 자료를 생성하였다. GCM 결과의 보간 이후, 다음 식들이 월별 각 격자에 대한 미래 기후 자료를 계산하기 위해 사용된다.

기온에 대해서는

$$T(t) = T(present) + (T(2\times CO_2) - T(1\times CO_2)) \times \frac{T_{mean}(t) - T_{mean}(present)}{\Delta T} \quad (식\ Ⅳ-1)$$

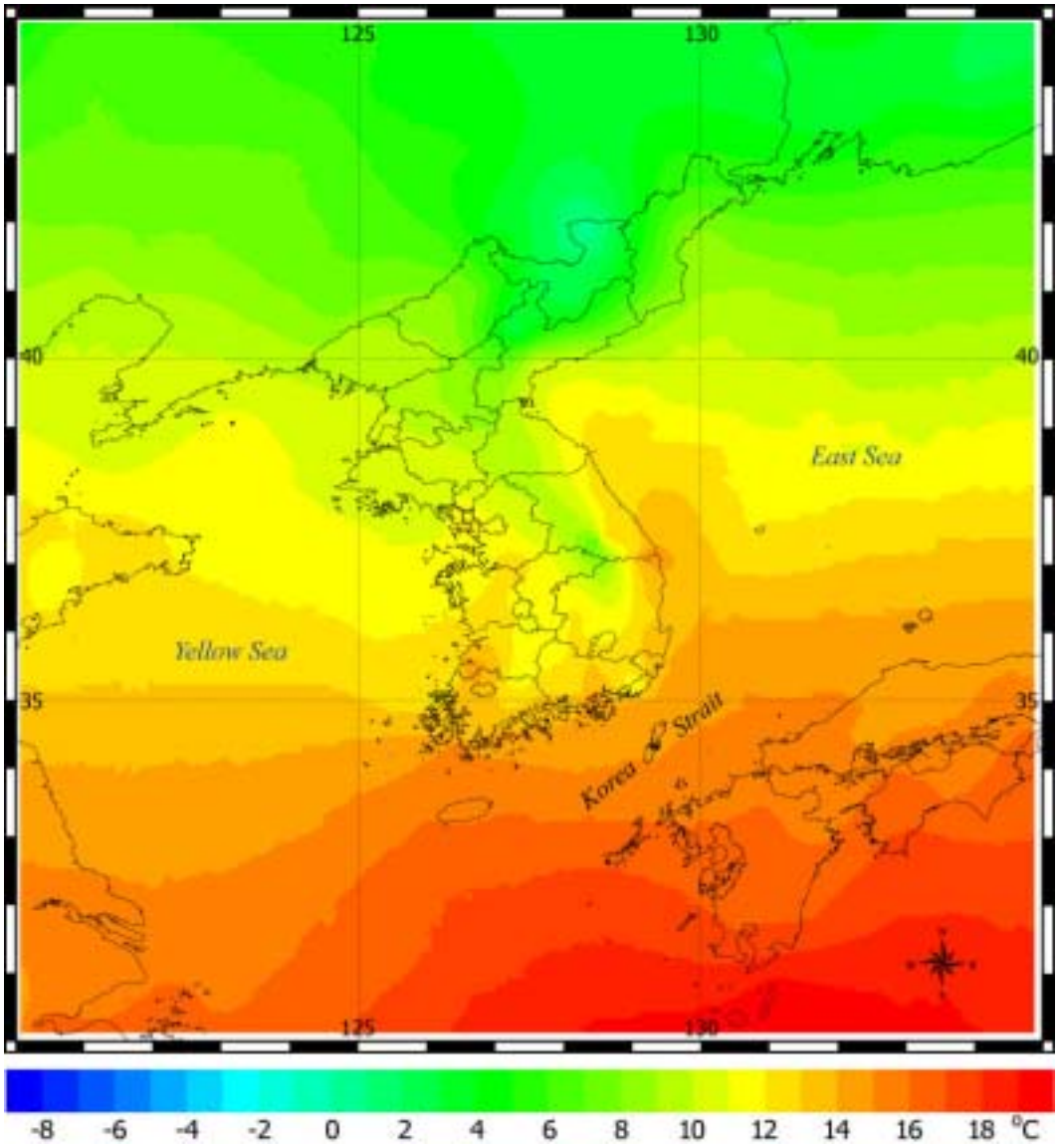
강수량에 대해서는

$$P(t) = P(present) + P(present) \times \left\{ \frac{P(2\times CO_2)}{P(1\times CO_2)} - 1 \right\} \times \frac{T_{mean}(t) - T_{mean}(present)}{\Delta T} \quad (식\ Ⅳ-2)$$

여기서 $T(t)$ [℃]와 $P(T)$ [mm/month]는 상대적인 t 년에서의 기온과 강수량이다. $T(2\times CO_2) - T(1\times CO_2)$ [℃]와 $P(2\times CO_2)/P(1\times CO_2)$ [-]는 GCM에서 계산된 각 격자에서 $2\times CO_2$와 $1\times CO_2$ 사이의 기온 차와 강수량의 비이다. ΔT [℃]는 < 표 Ⅲ-2 >에 나타난 $2\times CO_2$ 시 평형상태의 표면온도변화이다. $T_{mean}(t) - T_{mean}(present)$ [℃]는 기준년(base year)인 1990년과 연도 t 사이의 지구의 평균 기온의 상승 폭으로 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 [℃]로 추정된다(이후 ΔT_{asm}). 결론적으로 이 연구에서는 각 종류의 영향에 대해 8개의 ΔT_{asm} × 5개 GCM 결과 = 40개 경우의 영향 예측이 수행되었다.

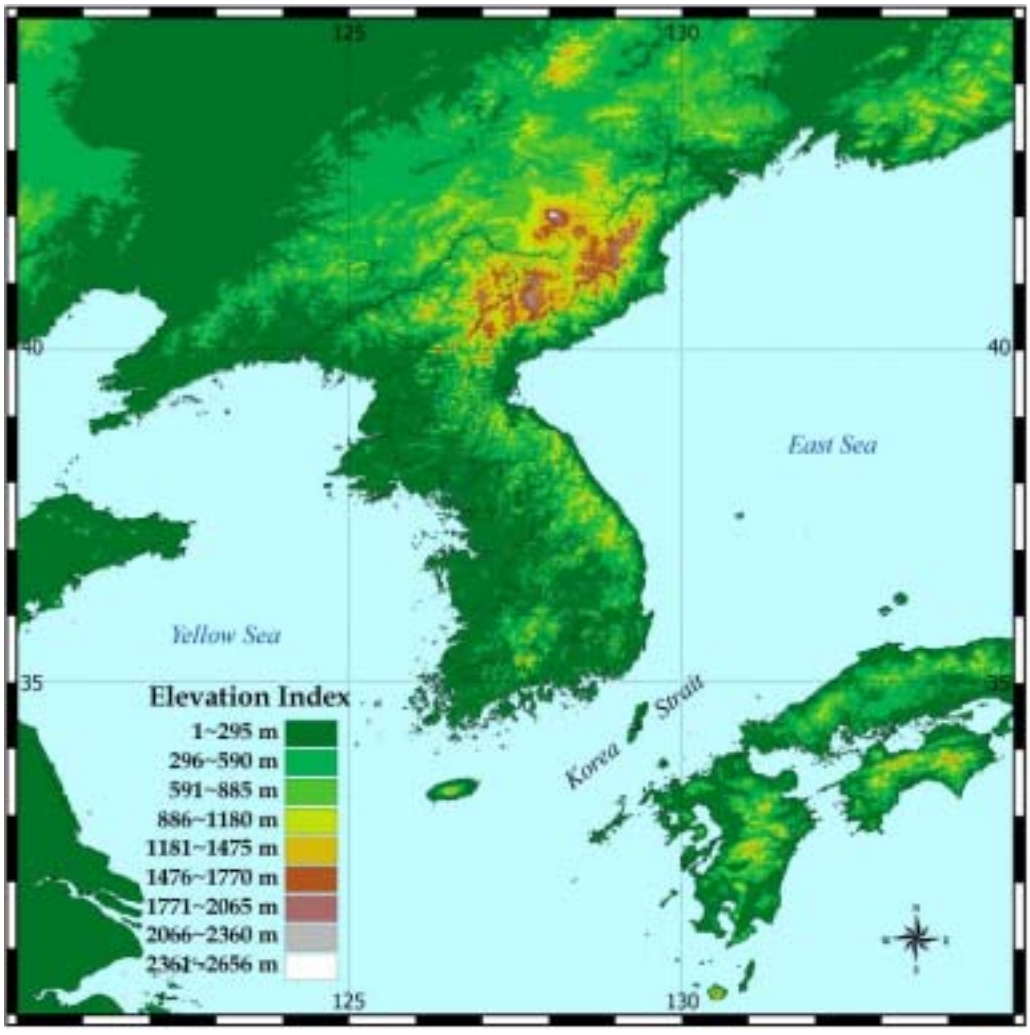
2.1. 기온

기온자료는 GHCN의 자료와 기상청 자료를 이용하여 제작된 현재기온과 GCM 결과를 이용한 40개 경우에 대해 각각 월별 기온을 생성하였다. 각 자료의 공간 해상도는 0.1°이며 < 그림 Ⅳ-3 >은 현재시기의 연평균기온을 나타낸 것이다.

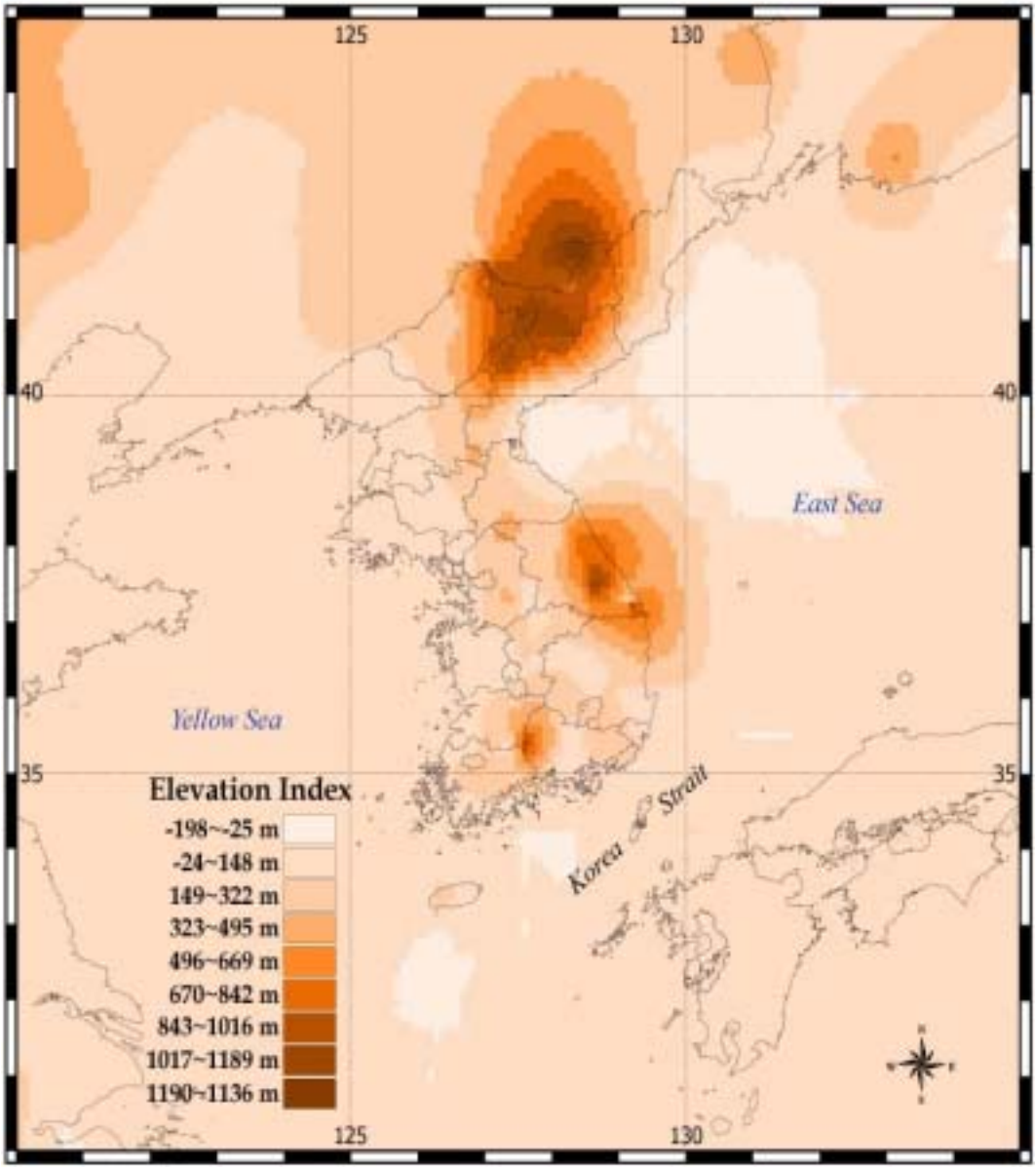


< 그림 Ⅳ-3 > 현재시기의 한반도 주위의 연평균기온 분포(℃)

기온 보간으로 인한 격자간의 편차 감소와 지형의 표고변화로 인한 기온감소의 영향을 고려하기 위하여 수치표고모형과 월별 모형 기온감율을 이용하여 수정된 월별 기온자료를 제작하였다. 수치표고모형은 NOAA의 국가지리물리자료센터(National Geophysical Data Center)의 GLOBE(Global Land One-km Base Elevation) 프로젝트의 결과물인 3초 간격의 전 세계 육지지역의 수치표고 모형을 확보하여 한반도 주위지역을 0.1도 간격으로 재 생성하였다. 좌표계는 WGS84 타원체의 경위도 좌표계를 이용하였고, < 그림 Ⅳ-4 >는 제작된 수치표고모형을 나타내고 있다.

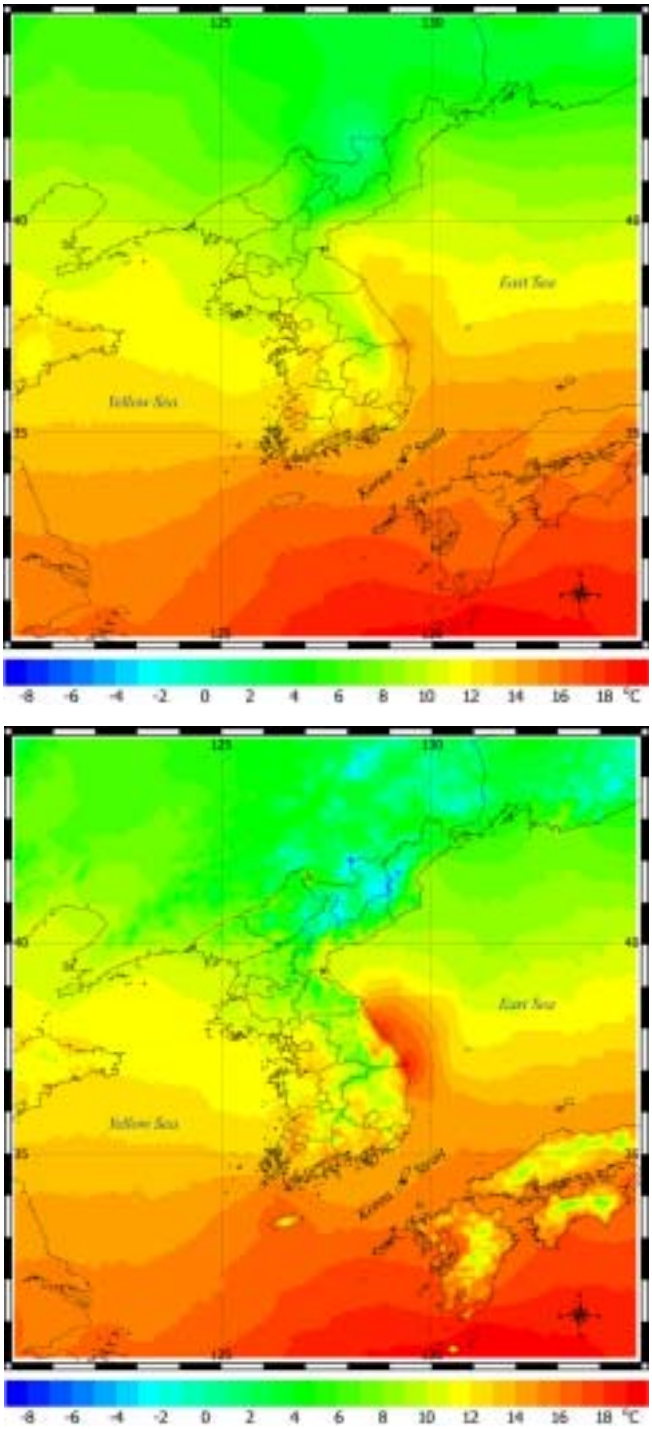


< 그림 Ⅳ-4 > 분석에 이용된 수치표고모형(3초 간격)



< 그림 Ⅳ-5 > 기온의 지형보정에 이용된 가상면 표고

3초 간격 수치표고모형에서 기온관측에 이용된 277개 측점의 고도를 추출하여 0.1도 간격의 가상면 수치표고모형을 제작하였다. 각 기온 관측소 고도값은 GLOBE 수치표고모형에서 직접 추출하여 재계산하였다. < 표 Ⅳ-1 >의 월별 모형 기온 감율을 고려하여 제작된 가상면 표고는 < 그림 Ⅳ-5 >과 같다.



< 그림 Ⅳ-6 > 기온감율을 고려한 현재시기 년 평균 기온분포

(상: 지형보정전, 하: 지형보정후)

< 표 Ⅳ-1 > 지형보정을 위한 월평균 기온감율

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
기온감율 ℃/m	0.0080	0.0083	0.0083	0.0079	0.0073	0.0065	0.0058	0.0054	0.0055	0.0058	0.0065	0.0073

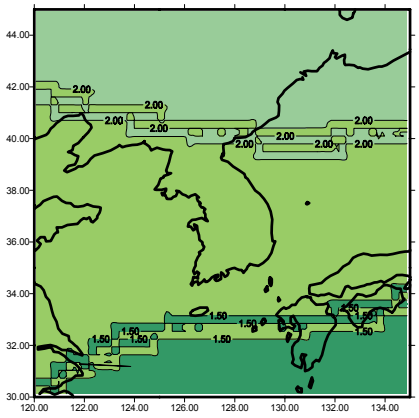
< 그림 Ⅳ-6 >은 월평균 기온감율을 고려하여 (식 Ⅲ-2)를 이용하여 제작된 현재시기의 수정된 연평균 기온을 나타낸 것이다. 수정된 기온은 백두대간 등 산악지역의 영향을 잘 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 특히 백두산과 개마고원, 소백산맥, 제주도지역의 기온분포에서 산악지역의 영향을 잘 표현하고 있다. 그러나 동해쪽 해안 지역의 기온이 상대적으로 높아지는 경향을 나타내고 있다. 이는 동해안 지역의 기상 관측 지점의 수가 부족하여 가상면표고 모형의 제작시 동해쪽 해안의 높이가 과대평가 되는 것에 기인한 것으로 판단된다.

GCM 모형별로 제작된 미래 기온과 현재기온[2]과의 연평균 기온차는 < 그림 Ⅳ- 7 >에 나타나 있다. 많은 연구자들에 의해 CO_2 농도가 두배로 증가되는 것으로 예측될 때, 세계 기온은 2℃증가할 것으로 예측되고 있으며, 우리나라의 경우 기온증가가 이 보다는 0.5~1℃가량 높게 나타났다.

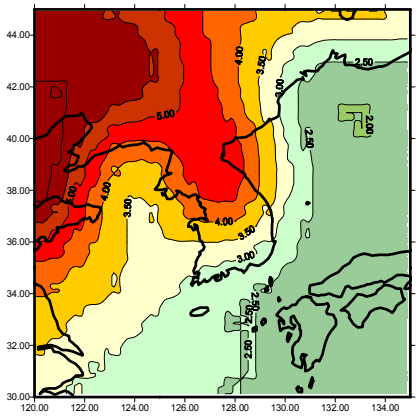
본 연구에 사용한 GCM중 CCCma와 ECHAM4 모형의 경우는 기온증가량이 2.5~5℃까지 가장 큰 변화량과 변동성향을 나타내었으며, HadCM2는 중간변화량을 보였고, CSIROMK2와 CCSR/NIES모형에 나온 기온증가량은 비교적 낮은 변화량과 변동성향을 보였다. 그러나 이러한 기온의 변화량은 여러 연구자들이 제안한 기온 변동치의 범위 내에 들어오므로, 개선된 지역차원의 기후모형 결과자료가 없는 현재시점에서는 이 자료가 제공될 때까지 영향연구에 이용하기로 하였다.

온도변화를 살펴보면 남한의 경우 2℃~4℃ 범위로 상승되었으며, 북한의 경우는 2℃~5℃까지 상승하는 것으로 나타났다, 5개 GCM 모형의 결과 남한 쪽보다는 북한쪽에서의 온도 증가가 좀더 크게 일어났다는 것이 특징이다. 이는 향후 삼림부분의 영향이 남한보다는 북한에서 더 심하게 일어날 가능성을 보여주는 것이라 할 수 있다.

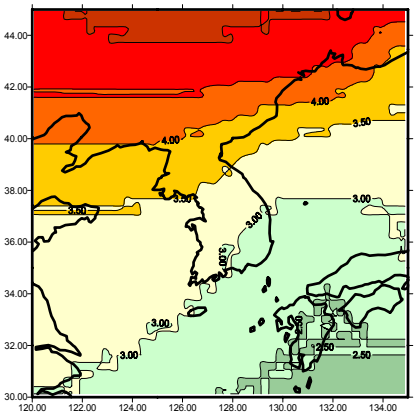
2) 이후 현재기온이라 함은 기온감율을 이용하여 수정된 현재기온을 말한다.



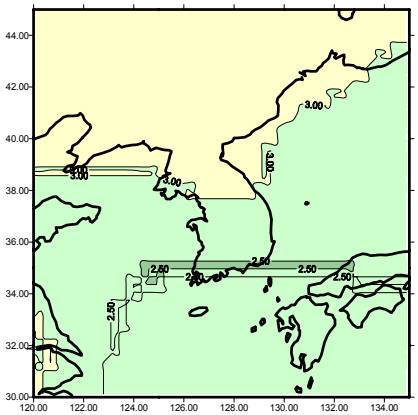
CSIROMK2



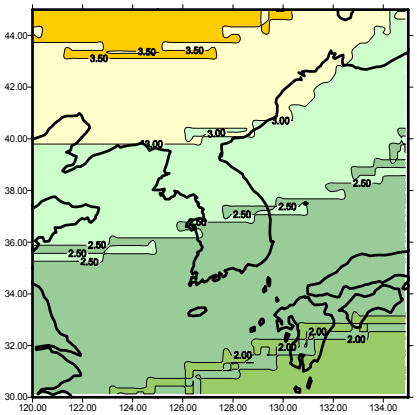
CCCma



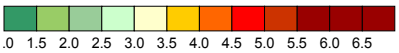
ECHAM4,



HadCM2



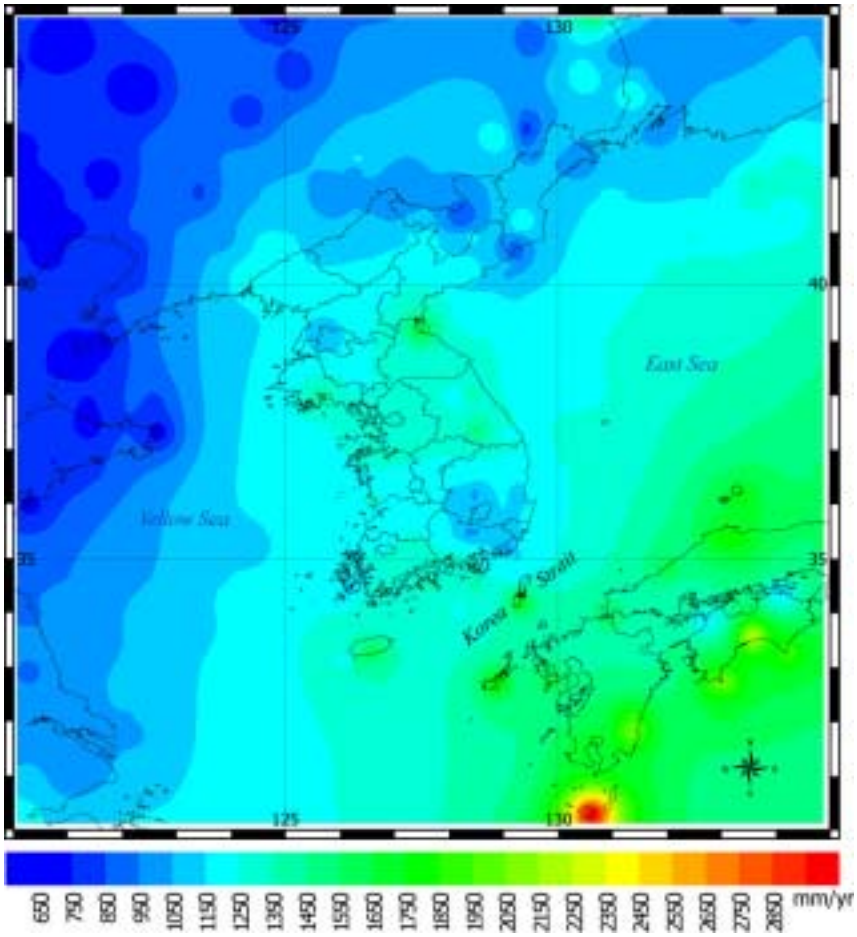
CCSR/NIES



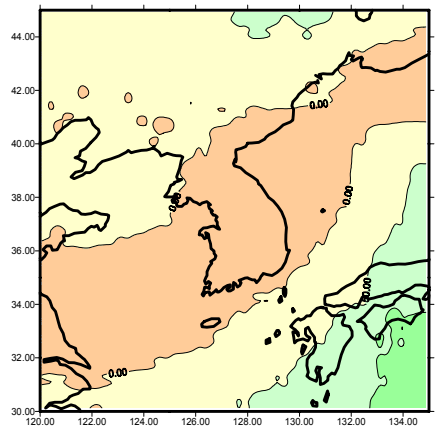
< 그림 Ⅳ-7 > $2\times CO_2$ 시 연평균기온(℃)의 변화량 분포

2.2. 강수량

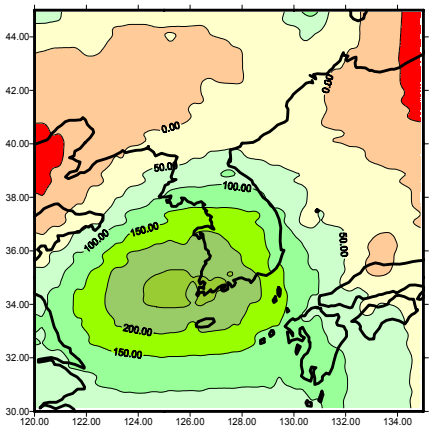
현재 강수량 분포자료는 199개소의 GHCN 관측소와 기상청 자료를 이용하여 제작되었다. 모의되는 40개 경우에 대해 각각 월별 미래 강수량 자료를 생성하였고 < 그림 Ⅳ-8 >은 현재시기의 연간 총강수량을 나타낸 것이다. < 그림 Ⅳ-9 >는 CO_2 배증시 GCM에서 계산된 강수량 변화차이를 나타낸 것으로 연구지역의 연간 강수량은 현재와 비슷하거나 증가하는 것으로 예측되었다. 기온증가가 커질수록 총강수량은 증가하였으며, 특히 중부 이북지역에서 증가의 폭이 크게 나타났다. 계절별로는 겨울철 남부지역에서 강수량 감소가 예측되었으나, 그 범위는 0.4~3.2% 였다.



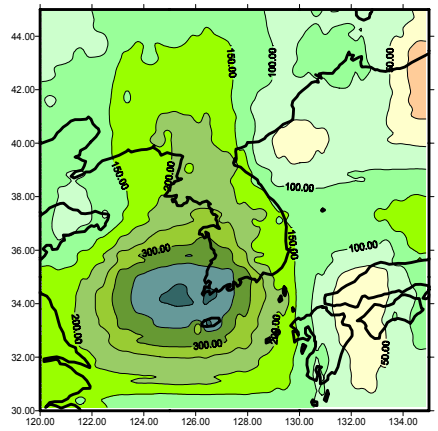
< 그림 Ⅳ-8 > 현재시기 총강수량 분포(mm/연)



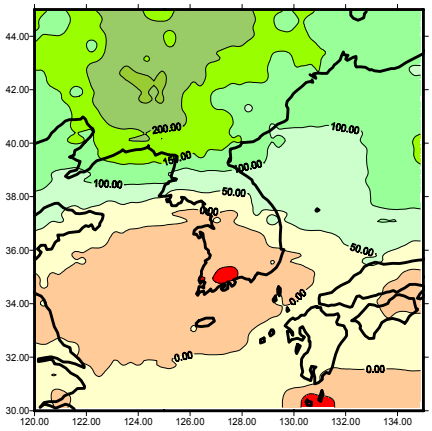
CSIROMK2



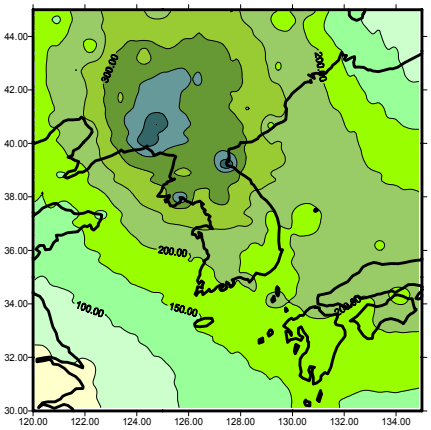
CCCma



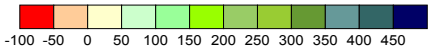
ECHAM4,



HadCM2



CCSR/NIES



< 그림 Ⅳ-9 > 2×CO_2시 연강수량(mm/연) 변화량 분포

2.3. 기후예측결과

기후예측결과 분석을 위해 5개 GCM의 평균을 취하였으며, 지역별로는 기온과 강수량의 평균과 편차를 각각 구하였다.

지구 평균 기온이 2℃ 증가함에 따라 연구 지역에서 추정된 기온증가는 2.3~4.1℃ 범위였고, 특히 겨울철 북한 지역의 기온이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

강수량 변화는 -1.6~+14.3% 범위이며 남부지역 일부에서 미소하게 감소하나 다른 지역은 강수량이 증가하는 것으로 나타났다. 강수량 변화도 북한 지역이 큰 것으로 나타났다. 기온과 강수량 추정의 편차는 매우 크게 나타났으며 어떤 추정에서는 북한 일부지역에서 6.9℃의 기온 편차를 보였다. < 표 Ⅳ-2 >와 < 표 Ⅳ-3 >은 평균 기온 증가량에 따른 여름철과 겨울철의 기온과 강수량 변화를 나타낸 것으로 5개 GCM 결과의 평균치를 대상지역별로 면적평균을 취한 값이다.

각 지역별 기온과 강수량의 변화량은 < 그림 Ⅳ-10 >에서 < 그림 Ⅳ-16 >까지와 같이 보여진다. 이 그림들은 지구의 평균 온도 변화량($\triangle T_{asm}$)이 0.5℃~4℃인 경우들이다. 그림에서 ●는 DJF(12월,1월,2월)의 3달 평균값을 나타내고 ○는 JJA(6월,7월,8월)의 3달 평균이다. 이 원들은 5개 GCM의 평균값을 나타낸다. 이러한 GCM들의 최대, 최소값들은 수평 오차 막대의 끝부분으로 나타난다.

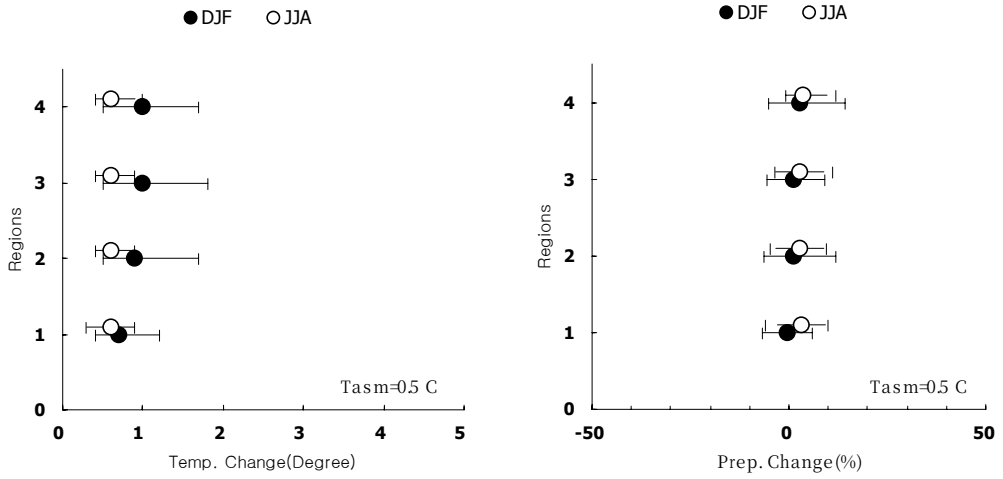
< 표 Ⅳ-2 > ΔT_{asm}에 따른 여름철(6,7,8월) 평균기온변화량과 강수량변화량

평균기온변화량		0.5℃	1.0℃	1.5℃	2.0℃	2.5℃	3.0℃	3.5℃	4.0℃
기온(℃)	A	0.6	1.1	1.7	2.3	2.8	3.4	4.0	4.5
	B	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0	3.6	4.1	4.7
	C	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8
	D	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0	3.7	4.3	4.9
강수량 (%)	A	3.0	6.0	9.0	12.0	15.0	18.0	21.0	24.0
	B	2.8	5.6	8.3	11.1	13.9	16.7	19.4	22.2
	C	2.9	5.8	8.6	11.5	14.4	17.3	20.2	23.1
	D	3.6	7.2	10.7	14.3	17.9	21.5	25	28.6

< 표 Ⅳ-3 > ΔT_{asm}에 따른 겨울철(12,1,2월) 평균기온변화량과 강수량변화량

평균기온변화량		0.5℃	1.0℃	1.5℃	2.0℃	2.5℃	3.0℃	3.5℃	4.0℃
기온(℃)	A	0.7	1.3	2.0	2.7	3.4	4.0	4.7	5.4
	B	0.9	1.8	2.6	3.5	4.4	5.3	6.1	7.0
	C	1.0	1.9	2.9	3.9	4.9	5.8	6.8	7.8
	D	1.0	2.0	3.1	4.1	5.1	6.1	7.1	8.1
강수량 (%)	A	-0.4	-0.8	-1.2	-1.6	-2.0	-2.4	-2.8	-3.2
	B	1.2	2.5	3.7	4.9	6.2	7.4	8.7	9.9
	C	1.0	2.1	3.1	4.1	5.2	6.2	7.2	8.3
	D	2.8	5.6	8.4	11.2	14.0	16.7	19.5	22.3

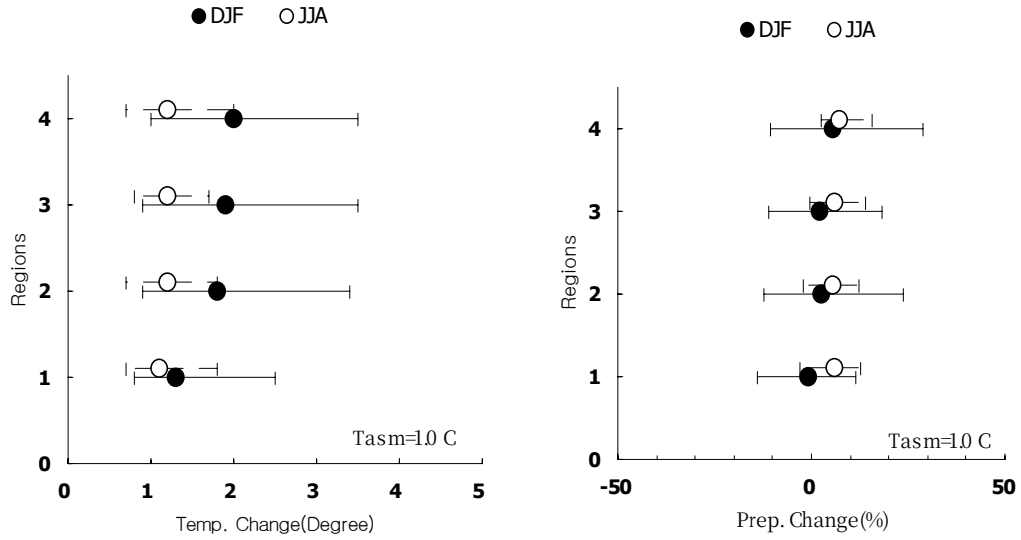
연평균기온이 0.5℃ 상승할 경우 < 그림 Ⅳ-10 >과 같이 우리나라의 여름철 평균기온은 0.6℃ 상승하는 것으로 나타났으나, 겨울철 연평균기온은 0.7℃~1.0℃까지 상승하는 것으로 산출되었다. 강수량의 경우 여름철은 2.8%~3.6%증가하는 것으로 산출되었으나, 겨울철은 -0.4%~2.8%까지로 다소 감소하는 것부터 증가하는 것까지 지역별로 차이가 있는 것으로 산출되었다.



< 그림 Ⅳ-10 > 연평균기온변화가 0.5℃일 경우의 지역별 평균기온 변화와 평균강수량 변화

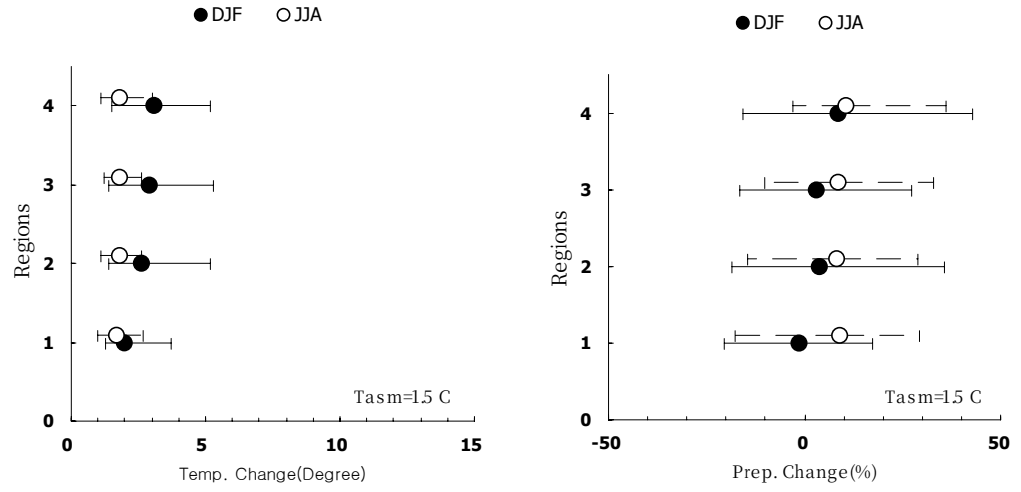
연평균기온이 1.0℃ 상승할 경우 < 그림 Ⅳ-11 >과 같이 우리나라의 여름철 평균기온은 1.1℃~1.2℃ 상승하는 것으로 나타났으나, 겨울철 연평균기온은 1.3℃~2.0℃까지 상승하는 것으로 산출되어 여름철 보다는 겨울철의 기온상승이 좀더 크게 나타났다. 강수량의 경우 여름철은 5.6%~7.2%증가하는 것으로 산출되었으나, 겨울철은 -0.8%~5.6%까지로 다소 감소하는 것부터 증가하는 것까지 지역별로 차이가 있는 것으로 산출되어 겨울철의 강수량 증가가

여름철보다 적게 나타났다.



< 그림 Ⅳ-11 > 연평균기온변화가 1.0℃일 경우의 지역별 평균기온 변화와 평균강수량 변화

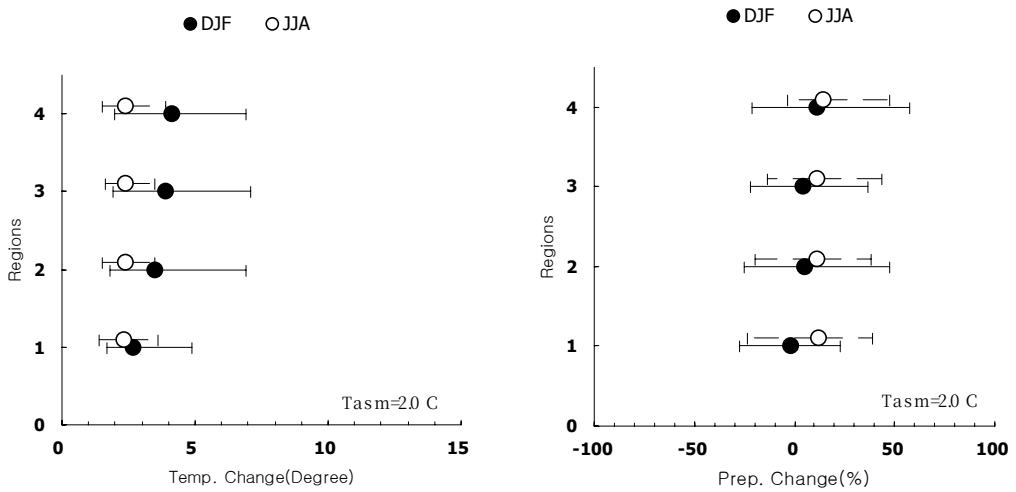
연평균기온이 1.5℃상승할 경우 < 그림 Ⅳ-12 >와 같이 우리나라의 여름철 평균기온은 1.7℃~1.8℃ 상승하는 것으로 나타났으나, 겨울철 연평균기온은 2.0℃~3.1℃까지 상승하는 것으로 산출되어 여름철보다는 겨울철의 기온상승이 큰 것으로 나타났다. 강수량의 경우 여름철은 8.3%~10.7%증가하는 것으로 산출되었으나, 겨울철은 -1.2%~8.4%까지로 다소 감소하는 것부터 증가하는 것까지 지역별로 차이가 있는 것으로 산출되었다.



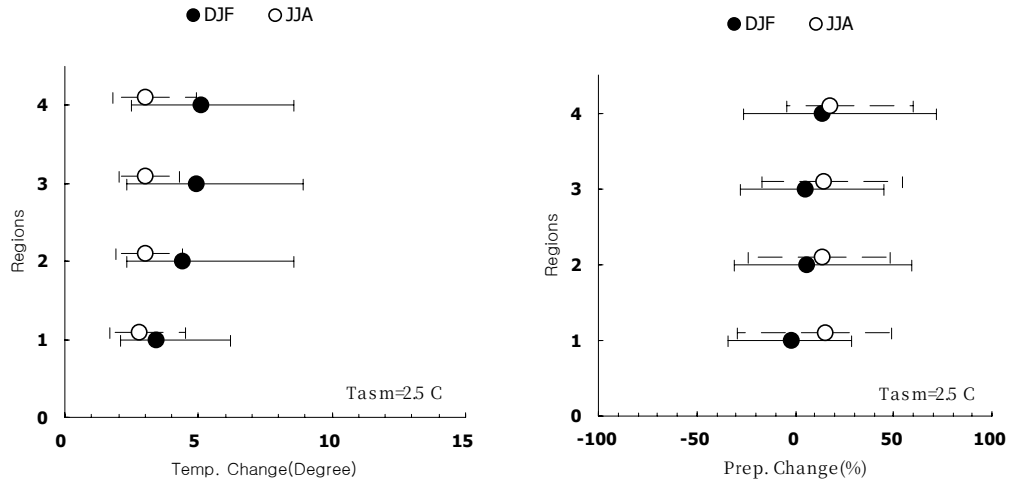
< 그림 Ⅳ-12 > 연평균기온변화가 1.5℃일 경우의 지역별 평균기온 변화와 평균강수량 변화

연평균기온이 2.0℃상승할 경우 < 그림 Ⅳ-13 >과 같이 우리나라의 여름철 평균기온은 2.3℃~2.4℃ 상승하는 것으로 나타났으나, 겨울철 연평균기온은 2.7℃~4.1℃까지 상승하는

것으로 산출되었다. 강수량의 경우 여름철은 11.1%~14.3%증가하는 것으로 산출되었으나, 겨울철은 -1.6%~11.2%까지로 다소 감소하는 것부터 증가하는 것까지 지역별로 차이가 있는 것으로 산출되었다.

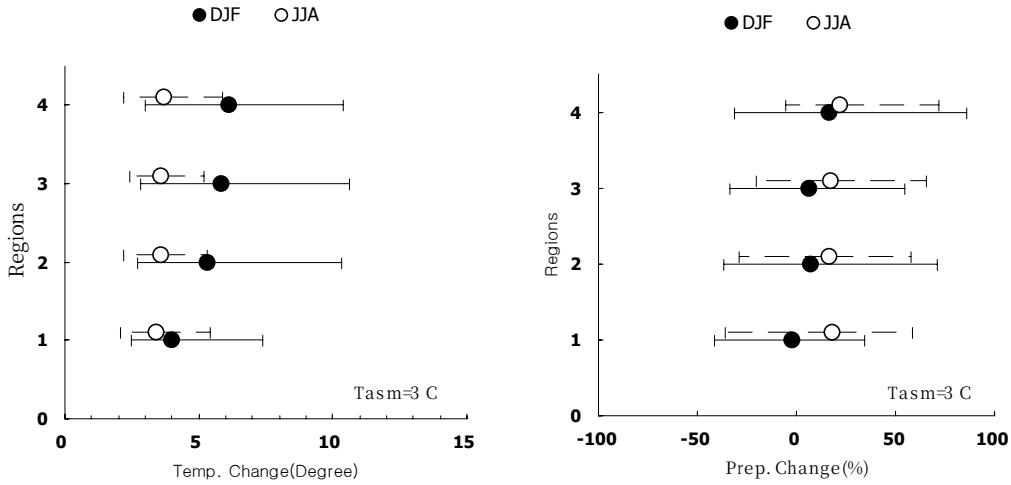


< 그림 Ⅳ-13 > 연평균기온변화가 2.0℃일 경우의 지역별 평균기온 변화와 평균강수량 변화



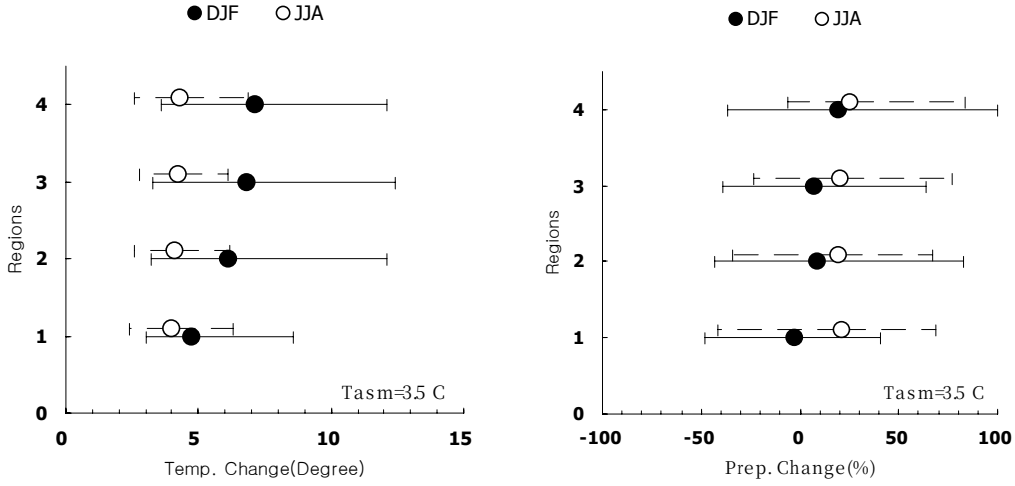
< 그림 Ⅳ-14 > 연평균기온변화가 2.5℃일 경우의 지역별 평균기온 변화와 평균강수량 변화

연평균기온이 2.5℃상승할 경우 < 그림 Ⅳ-14 >와 같이 우리나라의 여름철 평균기온은 2.8℃~3.0℃ 상승하는 것으로 나타났으나, 겨울철 연평균기온은 3.4℃~5.1℃까지 상승하는 것으로 산출되었다. 강수량의 경우 여름철은 13.9%~17.9%증가하는 것으로 산출되었으나, 겨울철은 -2.0%~14.0%까지로 다소 감소하는 것부터 증가하는 것까지 지역별로 차이가 있는 것으로 산출되었다.



< 그림 Ⅳ-15 > 연평균기온변화가 3.0℃일 경우의 지역별 평균기온 변화와 평균강수량 변화

연평균기온이 3.0℃상승할 경우 < 그림 Ⅳ-15 >와 같이 우리나라의 여름철 평균기온은 3.4℃~3.7℃ 상승하는 것으로 나타났으나, 겨울철 연평균기온은 4.0℃~6.1℃까지 상승하는 것으로 산출되었다. 강수량의 경우 여름철은 16.7%~21.5%증가하는 것으로 산출되었으나, 겨울철은 -2.4%~16.7%까지로 다소 감소하는 것부터 증가하는 것까지 지역별로 차이가 있는 것으로 산출되었다.

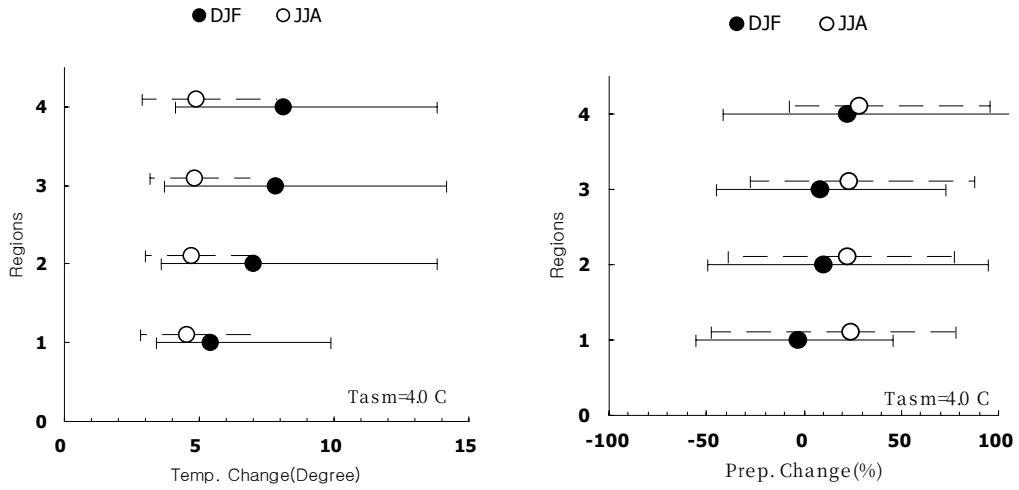


< 그림 Ⅳ-16 > 연평균기온변화가 3.5℃일 경우의 지역별 평균기온 변화와 평균강수량 변화

연평균기온이 3.5℃상승할 경우 < 그림 Ⅳ-16 >과 같이 우리나라의 여름철 평균기온은 4.0℃~4.3℃ 상승하는 것으로 나타났으나, 겨울철 연평균기온은 4.7℃~7.1℃까지 상승하는 것으로 산출되었다. 강수량의 경우 여름철은 19.4%~25.0%증가하는 것으로 산출되었으나, 겨울철은 -2.8%~19.5%까지로 다소 감소하는 것부터 증가하는 것까지 지역별로 차이가 있는 것으로 산출되었다.

연평균기온이 4.0℃상승할 경우 < 그림 Ⅳ-17 >과 같이 우리나라의 여름철 평균기온은

4.5℃~4.9℃ 상승하는 것으로 나타났으나, 겨울철 연평균기온은 5.4℃~8.1℃까지 상승하는 것으로 산출되었다. 강수량의 경우 여름철은 22.2%~28.6%증가하는 것으로 산출되었으나, 겨울철은 -3.2%~22.3%까지로 다소 감소하는 것부터 증가하는 것까지 지역별로 차이가 있는 것으로 산출되었다.



< 그림 Ⅳ-17 > 연평균기온변화가 4.0℃일 경우의 지역별 평균기온 변화와 평균강수량 변화

평균 온도 변화량이 2℃인 < 그림 Ⅳ-13 >에서 한반도 지역의 기온 변화량은 2.3~4.1℃ 범위지만 < 그림 Ⅳ-13 >의 오차 막대에 의하면 변동폭은 +1.4~7.1℃의 범위를 갖는다. 기온 변화의 영향이 있다고 판단되어지는 ±2.25℃이상의 변화폭을 보이는 $\triangle T_{asm}$의 값은 여름철에는 남북한 모두 2℃이상의 경우였으나 겨울철은 남해안 지역을 제외하고 1.5℃이상의 경우에서 변화가 있는 것으로 나타났다. 특히 겨울철은 북쪽으로 갈수록 온도변화의 영향이 커지는 것으로 나타나 평안북도 지역 등의 지역에서 기온변화로 인한 영향이 클 것으로 판단된다.

지구평균온도 변화 2℃인 경우 한반도 지역의 강수량 변화량의 평균값은 -1.6~+14.3%의 범위를 갖지만 < 그림 Ⅳ-13 >에서 보이는 바와 같이 GCM들간의 공간적 분포 차이로 인한 불확실성이 존재한다. 강수량의 변화가 있을 것으로 판단되어지는 ±15%의 변화를 나타내는 $\triangle T_{asm}$의 값은 여름철에는 평균 온도변화량 2.5℃이상의 경우 한반도 전지역에서 나타난다. 겨울철 강수량 변화는 D지역의 평균온도 변화량 3℃이상의 경우에만 발생하였다. 남해안 지역은 겨울철에 강수량이 모두 경우 감소하는 것으로 나타났으나 그 변화량이 기후변화의 영향으로 판단하기에는 미미한 것으로 판단되었다.

결론적으로 모든 경우, 겨울철(12월, 1월, 2월)의 기온 상승은 여름철(6월, 7월 8월)의 기온 상승보다 크게 나타났으나, 강수량 증가는 이와 반대로 여름철의 강수량이 겨울철보다 큰 것을 알 수 있었다. < 표 Ⅳ-4 >는 기온과 강수량 변화로 인한 한반도지역의 영향을 요약하여 나타낸 것이다.

< 표 Ⅳ-4 > 기후변화에 의한 한반도지역의 영향분석

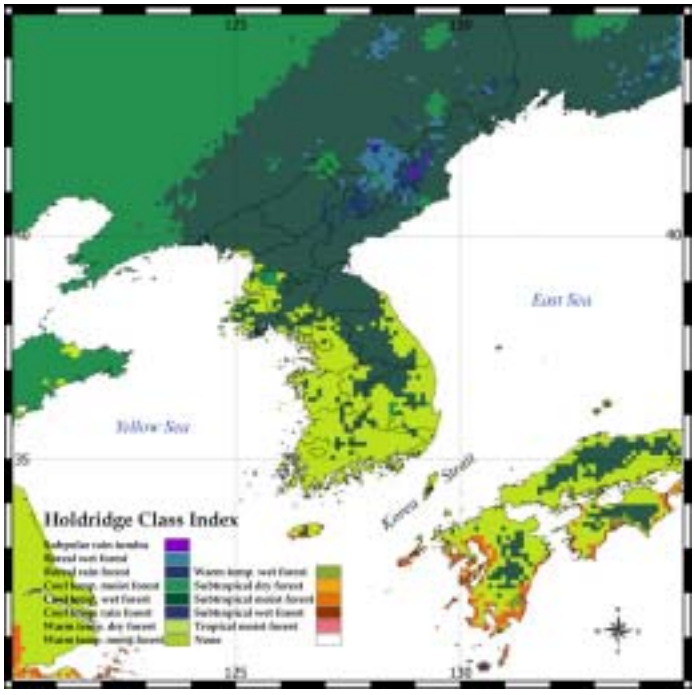
	기 후							
ΔT_{asm} / 지역	기 온				강수량			
	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5
A	0	0	++	+++	0	0	0	0
B	0	++	+++	+++	0	0	0	0
C	0	+++	+++	+++	0	0	0	0
D	0	+++	+++	+++	0	0	0	+

기 호	---	--	-	0	+	++	+++	단 위
기온변화				<2.25	2.25~2.5	2.5~2.75	>2.75	increase, ℃
강수량변화	<-45	-45~-30	-30~-15	-15~15	15~30	30~45	>45	% change

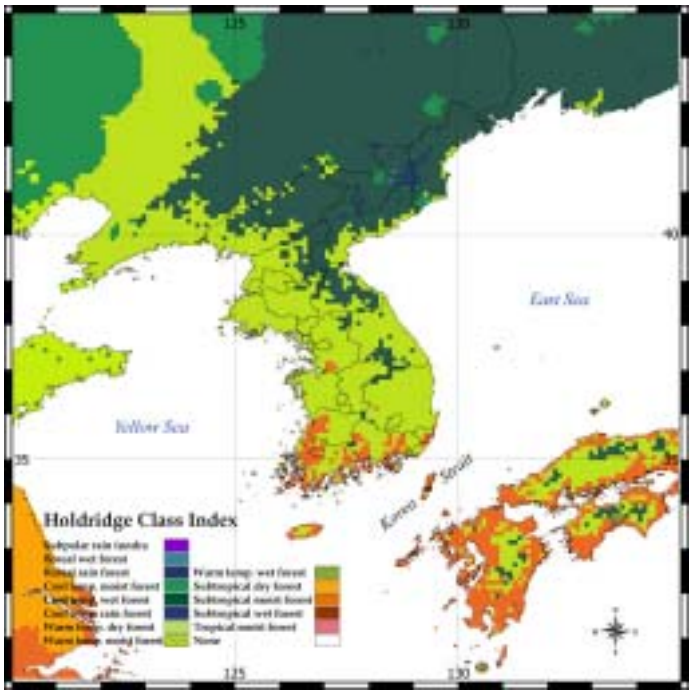
3. AIM의 Holdridge 모델을 이용한 삼림의 생물기후학적 분류결과

3.1. 기후변화에 의한 삼림의 변화

기후변화에 의한 삼림분포의 변화를 예측하고 평가하기 위해 Holdridge 모형이 사용되었으며, 입력인자로 GCM을 이용해 생성된 미래의 기온과 강수량을 이용하였다. 현재 Holdridge 구분에 의한 우리나라의 삼림상태는 < 그림 Ⅳ-18 >과 같이 남부지역과 백두대간을 제외한 중부지역의 대부분이 난온대림(Warm Temperate Moist Forest, 이후 '난온대림'이라 함)의 생기후조건을 가지고 있으며, 백두대간과 북한의 대부분의 지역은 냉온대습윤림(Cool Temperate Wet Forest, 이후 '냉온대습윤림'이라 함)의 생기후조건을 가지고 있다. 개마고원과 백두산 부근은 아한대습윤림(Boreal Wet Forest, 이후 '아한대습윤림')과 아한대강우림(Boreal Rainforest, 이후 '아한대 강우림')으로 구성되며 백두산 정상과 개마고원 중 고도가 매우 높은 지역은 한대툰드라(Subpolar Tundra) 지역을 이루고 있다.



< 그림 Ⅳ-18 > 1990년 기후대의 Holdridge 분류(시나리오=IS92a, GCM=HadCM2)



< 그림 Ⅳ-19 > 2100년 기후대의 Holdridge 분류(시나리오=IS92a, GCM=HadCM2)

기후변화로 인한 2100년경의 삼림의 분포는 < 그림 Ⅳ-19 >와 같이 보여지고 있다. 시뮬레이션 결과 중부지역의 난온대림의 생기후대는 고도가 높은 산맥의 일부를 제외하고는 북위 40°지역까지 북상하게 되고, 남한에서 냉온대습윤림은 지리산 일원과 태백산 등 일부 산악지역에만 분포하게 되며, 남해안 지역에는 아열대림의 기후대가 형성되는 것을 알 수 있다. 개마고원에 위치한 아한대습윤림은 거의 사라지게 될 것이며, 아한대강우림은 존재하게 되나 그 규모가 많이 축소됨을 알 수 있다. 따라서 중부 이북지역의 삼림기후대의 주된 변화양상

은 냉온대습윤림이 난온대림으로 변화하는 경우와 아한대습윤림이 냉온대습윤림으로 변화하는 경우로 나타났다.

3.2. 온량지수와 현존식생도를 이용한 모델의 검증

기후변화에 의한 삼림분포 영향을 연구함에 있어 기온과 강우만을 입력인자로 하는 Holdridge 모형을 통해 도출된 광역적인 분석결과는 국토 면적이 좁은 우리나라와 같은 지역에 적용하는데 한계가 있다. 따라서 삼림분포를 정확하게 추정하기는 어려우나 한국에서 주로 이용되고있는 지역적(Local) 규모차원의 연구와 조사를 통해 구축된 수종별 분포 경향에 대한 비교 및 검증이 필요하다.

삼림분포에 영향을 미치는 환경조건 중 지역적 규모 차원에서 가장 중요한 것은 온도이므로 온량지수(Warmth Index)를 이용한 수종별 생육 가능 분포 범위를 추정하였다.[3] 온량지수는 (식 Ⅳ-1)과 같이 월평균기온이 5도이상 되는 월의 월평균기온에서 5도를 뺀 값들의 합으로 표현되며, 한랭지수는 월평균기온이 5도 이하되는 월의 월평균기온에서 5도를 뺀 값들에 음의 값을 양수화 한 것으로 산출된다. < 표 Ⅳ-5 >는 온량지수를 이용한 삼림유형분류를 위해 적용된 지수의 범위를 나타낸 것이다.

$$\text{온량지수(WI)} = \Sigma(T_{mean,monthly} - 5),\ \text{월평균기온 } 5℃ \text{ 이상인 경우} \qquad \text{(식 Ⅳ-1)}$$

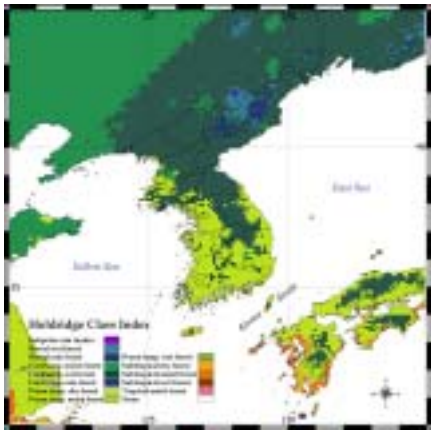
$$\text{한랭지수(CI)} = -\Sigma(T_{mean,monthly} - 5),\ \text{월평균기온 } 5℃ \text{ 미만인 경우} \qquad \text{(식 Ⅳ-2)}$$

< 표 Ⅳ-5 > 생기후 삼림유형별 온량지수 및 한랭지수 범위

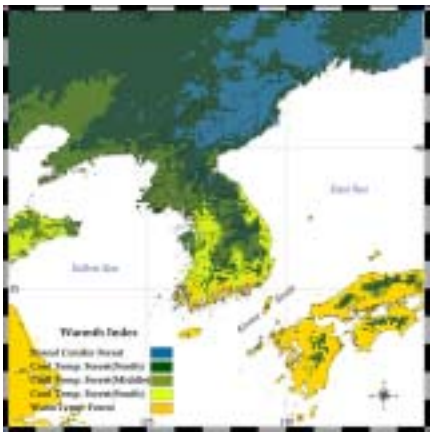
생기후 삼림유형	지수범위
Boreal Conifer Forest	WI < 55
Cool Temperate Forest Northern Part	55 ~ 85
Cool Temperate Forest Middle Part	85 ~ 110
Cool Temperate Forest Southern Part	WI > 110
Warm Temperate Forest	CI < 10

< 그림 Ⅳ-20 >은 현재 기후조건에서 Holdridge 분류결과와 온량지수를 이용한 분류결과를 비교한 것이며, < 그림 Ⅳ-21 >은 환경부에서 구축하고 있는 현존식생도에서 냉온대 중부지역의 대표수종으로 우리나라 전역에 고루 분포하고 있는 신갈나무 군락과 동백나무군락을 각 생기후대 결과와 비교한 것이다.

3) 이 연구는 Yim(1977)이 제시한 온량지수(Warmth Index)와 한랭지수(Coldness Index)를 기준으로 잠재분포역을 제시하였다.

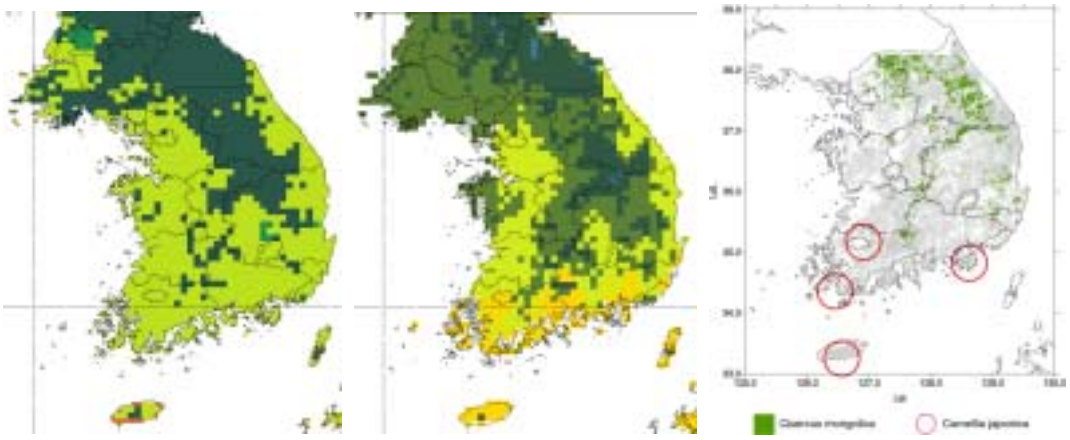


Holdridge분류에 의한 삼림분류



온량지수를 이용한 삼림분류

< 그림 Ⅳ-20 > Holdridge와 온량지수를 이용한 삼림기후대 분류 비교



Holdridge 온량지수 신갈나무군락과 동백나무

< 그림 Ⅳ-21 > 냉온대 중부지역의 대표수종인 신갈나무군락과 동백나무군락의 분포와 각 삼림기후대의 비교

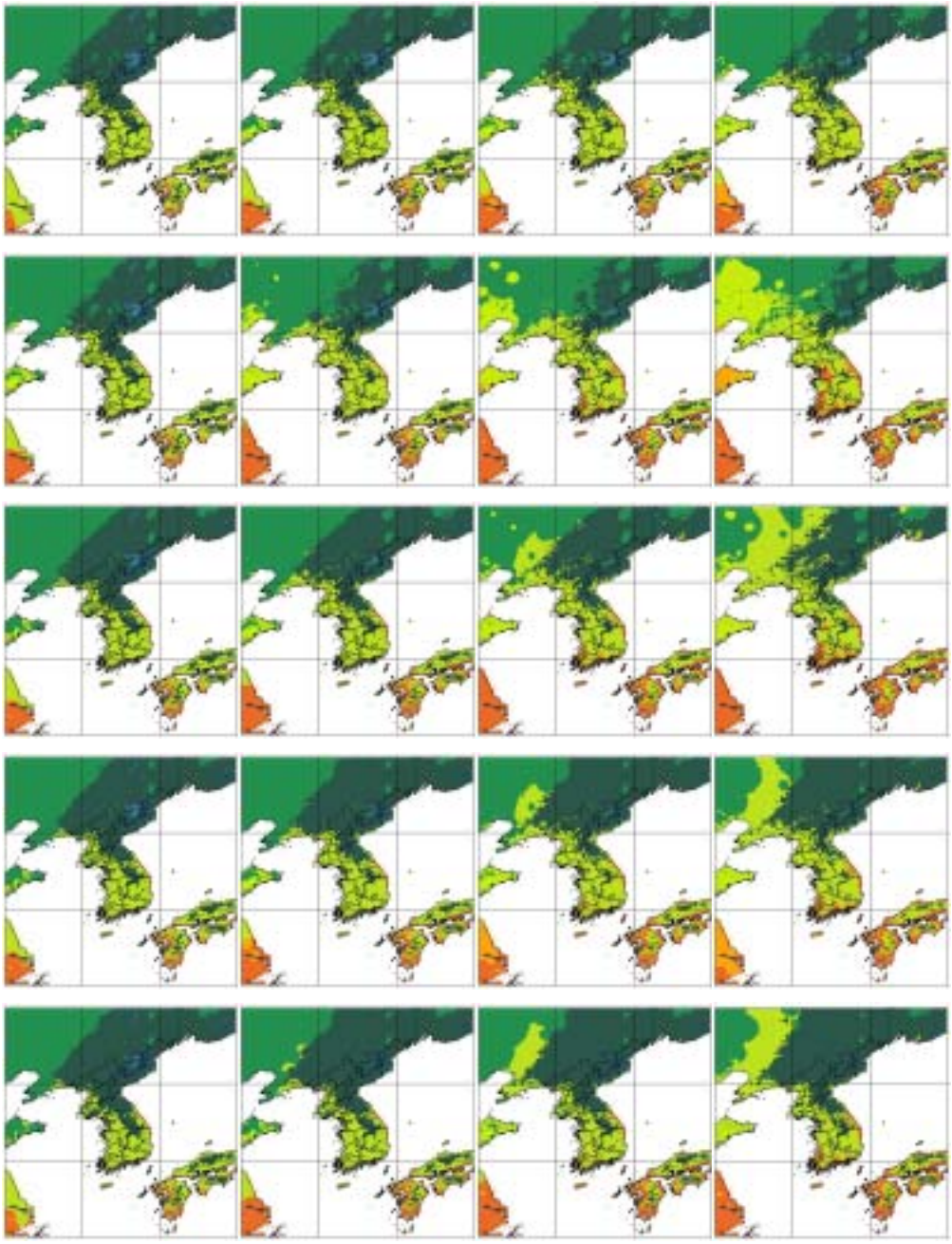
< 그림 Ⅳ-20 >과 < 그림 Ⅳ-21 >에서 각 삼림기후대의 직접적인 관계를 연결하는 것은 무리가 있으나 기후대의 분포 패턴을 비교함으로써 Holdridge 분류 방법의 적용 가능성을 알 수 있었다.

< 그림 Ⅳ-21 >에서 신갈나무의 분포 현존식생도에서 신갈나무가 우세종으로 표현되어 있는 것을 주로 추출한 것으로 주로 강원도 지역에 집중되어 있으며 백두대간을 따라 이동하고 있음을 알 수 있다. 온량지수와 Holdridge 분류의 결과를 비교분석한 결과 각각 냉온대

중부지역과 냉온대 습윤림의 분포가 유사하게 나타나고 있다.

그 외 온대림의 대표수종인 동백나무군락의 현존식생도와 온량지수 분포와 Holdridge 분포를 비교해 보면 온대림의 분포경향을 잘 반영하고 있는 것으로 파악되어 향후 Holdridge 모형을 이용한 삼림 기후대의 분류가 큰 오차 없는 것으로 판단되었다.

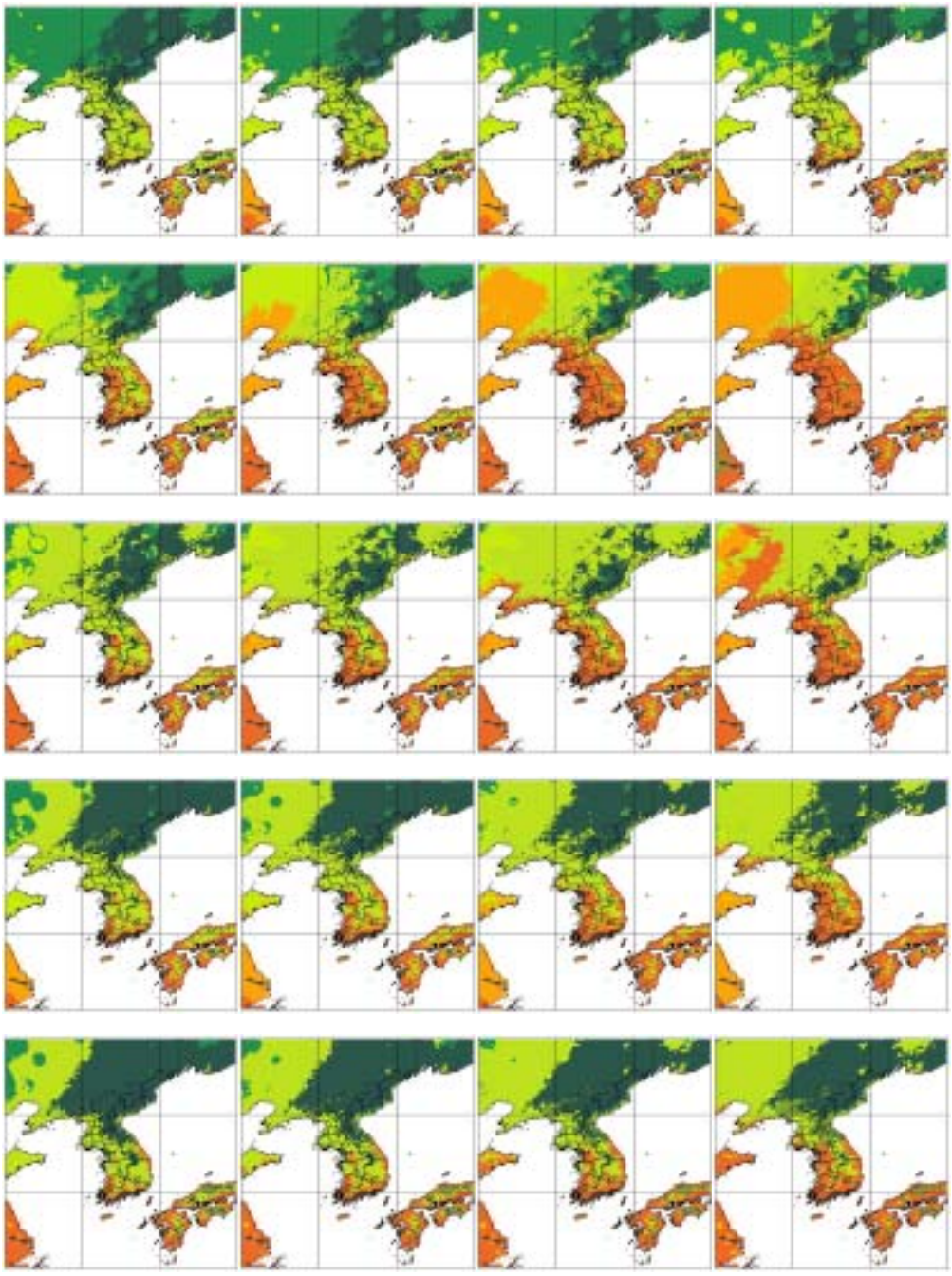
이와 같이 현존식생의 분포와 온량지수의 비교 및 온량지수와 Holdridge 분류결과의 비교에서 Holdridge 분류결과가 우리나라 삼림분포의 특성을 비교적 정확히 반영하고 있다는 사실에 기초해 다음 < 그림 Ⅳ-22 >와 같이 5개 GCM과 8가지 지구평균기온변화시나리오를 이용하여 미래의 우리나라 삼림분포의 변화를 예측하였다.



(ΔT_{asm}=0.5℃) (ΔT_{asm}=1.0℃) (ΔT_{asm}=1.5℃) (ΔT_{asm}=2.0℃)

< 그림 Ⅳ-22 > 2100년의 GCM별 Holdridge 삼림기후대 분류결과

(A: CSIROMK2, B: CCCma, C: ECHAM4, D: HadCM2, E: CCSR/NIES)



(ΔT_{asm}=2.5℃) (ΔT_{asm}=3.0℃) (ΔT_{asm}=3.5℃) (ΔT_{asm}=4.0℃)

< 그림 Ⅳ-22 > 2100년의 GCM별 Holdridge 삼림기후대 분류결과(계속)

(A: CSIROMK2, B: CCCma, C: ECHAM4, D: HadCM2, E: CCSR/NIES)

3.3. Holdridge 모델의 예측결과

한반도 지역의 삼림생태계의 변화정도를 파악하기 위해 온대림과 아한대림의 변화량을 합하여 기후변화로 인한 삼림전체의 변화량을 파악하였다. < 표 Ⅳ-6 >은 평균기온변화에 따른 온대·아한대림의 평균변화량을 나타낸 것이다. 산림분포 결과는 각 GCM의 변화량 평균치를 취하여 연구대상 지역별로 면적평균을 하였다. 나타난 변화량은 온대·아한대림 지역을 제외한 삼림기후대의 증감을 나타낸다. 지구평균기온이 2℃ 증가함에 따라 연구 지역 내 추정된 삼림의 평균 변화량은 최대 28.5%까지 변화하는 것을 알 수 있다. 변화의 편차는 0~40.8%까지의 넓은 범위를 나타났다. 지역별 변화에서 남해안 지역의 온대림은 평균기온 2.5℃ 증가 시 44%의 삼림이 아열대림(Subtropical Moist Forest)의 특성을 나타내는 기후대로 변화한다. 남해안과 동해안 지역은 0.5℃ 정도의 작은 기온변화에서도 기후대 변화가 시작되며 서해안은 기온변화량이 2.5℃이상 되는 경우, 삼림의 변화가 동해안보다 심각함을 알 수 있다. 북한 지역의 변화는 주로 황해도와 평안도의 서해쪽 삼림 변화로 인해 나타나는 것으로 개마고원과 같은 고산지역의 삼림은 냉온대습윤림을 유지하여 온대·아한대림의 변화비율이 적은 것을 알 수 있다.

< 표 Ⅳ-6 > 평균온도변화(ΔT_{asm})에 따른 온대·아한대림의 평균변화량

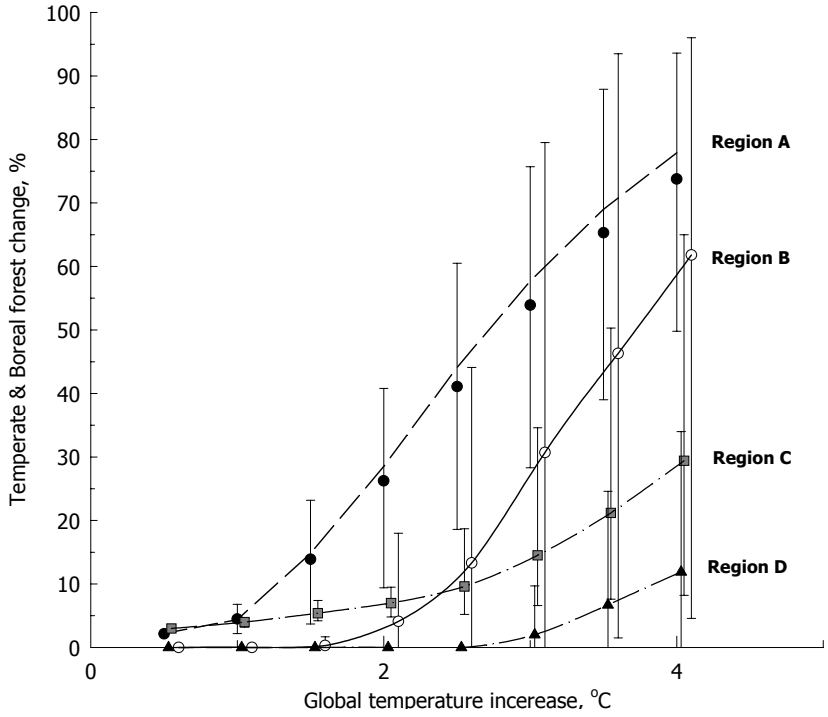
평균온도변화 (℃)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
A(%)	2.2	4.4	14.8	28.5	44.1	57.7	69	77.9
B(%)	0	0	0.3	4.1	13.3	30.7	46.3	61.8
C(%)	3	4	5.4	7	9.6	14.5	21.2	29.4
D(%)	0	0	0	0	0	2	6.7	11.9

< 그림 Ⅳ-23 >은 삼림지역의 변화정도를 나타낸 것으로 지역별 삼림상태가 현재 온대·아한대림이고 장래 조건하에서 다른 종류로 변화하는 것을 나타내고 있다.

변화결과를 정리하면 남해안 등 남부지역은 유력한 기후변화 시나리오인 ΔT_{asm}=2℃일 때 30%의 삼림 지역이 변화될 것으로 예상되고, ΔT_{asm}=4℃의 경우 80% 이상 변화될 것으로 예상된다. 이러한 변화의 대부분은 아열대성 삼림대로 변하는 것이다.

서해중부지역은 ΔT_{asm}=2℃일 때 변화량이 4% 정도로 예측되나, ΔT_{asm}=4℃의 경우 60% 이상의 급격한 삼림변화가 발생되어진다. 이러한 급격한 기후대의 변화는 삼림의 이동속도가 기후변화를 따라가지 못하게되어 지역 삼림이 소실될 위험성을 내포하게 된다. 동해중부지역은 ΔT_{asm}=2℃일 때 변화가 7%로 예측되며, ΔT_{asm}=4℃의 경우 30% 이상의 지역에서 변화가 발생한다.

한반도 북부지역은 ΔT_{asm}=2℃일 때 온대·아한대삼림의 면적비율에 변화가 없으나, ΔT_{asm}=4℃의 경우 서해쪽을 중심으로 12%정도의 지역이 변화한다. < 표 Ⅳ-7 >은 기후변화로 인한 한반도 지역의 변화양상을 정리한 표이다.



< 그림 Ⅳ-23 > 연평균온도변화에 따른 온대·아한대림의 감소경향

< 표 Ⅳ-7 > 기후변화에 의한 한반도지역의 영향분석

	삼 림 식 생 변 화							
ΔT_{asm} / 지역	온대·아한대림							
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
A	0	0	0	-	--	--	---	---
B	0	0	0	0	0	-	--	---
C	0	0	0	0	0	0	-	-
D	0	0	0	0	0	0	0	0

기 호	---	--	-	0	+	++	+++	단 위
삼림변화	<-60	-60~-40	-40~-20	-20~0				% change

4. 기후대의 변화가 지역 삼림에 미치는 영향

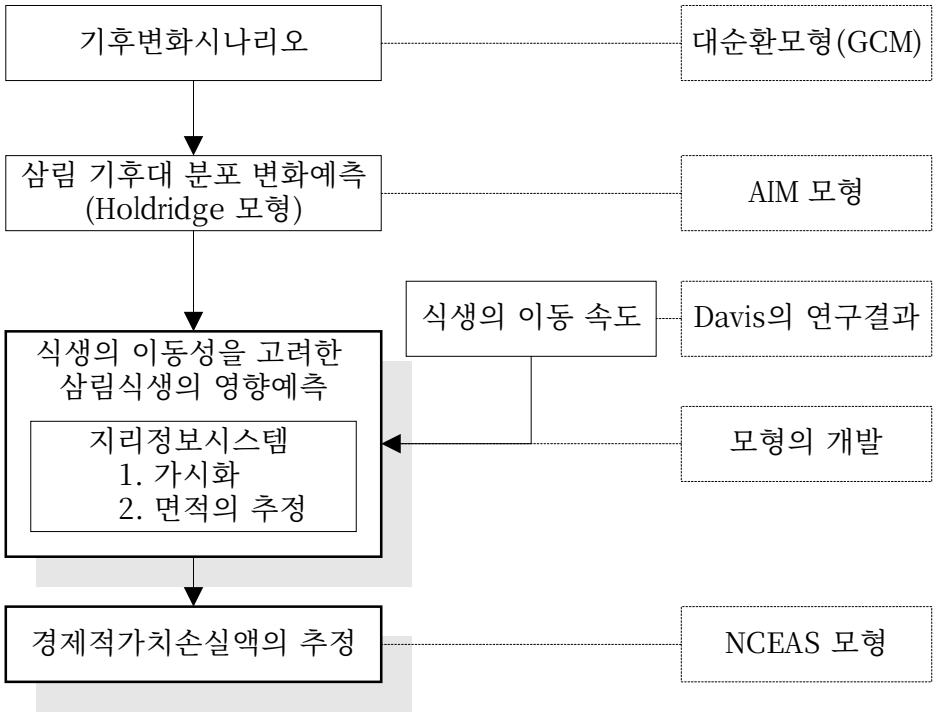
4.1. 영향 분석의 구조

삼림의 이동성을 고려한 지역 삼림의 영향평가와 경제적 영향 평가 흐름도는 < 그림 Ⅳ-24 >와 같다. 삼림의 영향예측시 수목의 적응(이동) 속도 변화에 따른 감도분석은 IPCC의 IS92a 시나리오를 기준으로 하였다. GCM은 < 표 Ⅳ-8 >에 나타난 IPCC IS92a 시나리오의 기후 감도와 동일한 HadCM2를 이용하였으며, 2100년 지구평균기온 상승을 2.08℃로 가정하고 분석을 수행하였다.

< 표 Ⅳ-8 > 2100년의 지구평균기온의 상승예측

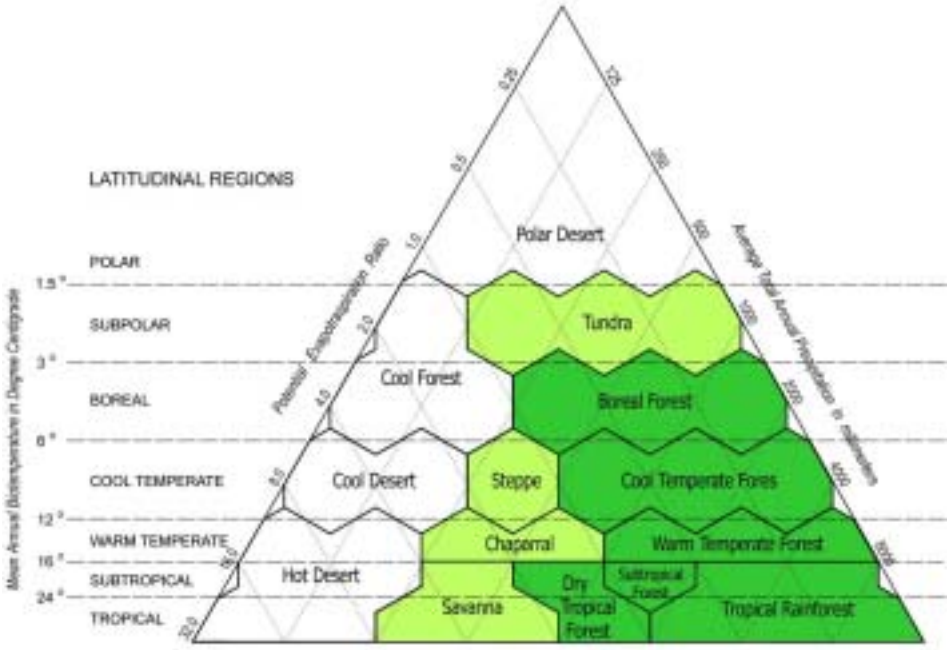
IPCC시나리오	2100년의 지구평균기온 상승(℃)	기후감도의 설정(℃)
IS92c	0.85	1.5
IS92a	2.08	2.5
IS92e	3.52	4.5

분석의 순서는 대기대순환모형의 CO_2 농도 배증시의 기후 예에서, AIM 모형을 이용하여 각 기후상태를 입력인자로 하여 2100년의 기후대 분포를 예측하였다. 그 결과는 2100년 세계 삼림의 영향예측의 입력인자가 되고 지리정보시스템으로 표시되어 영향이 발생하는 지역의 면적을 계산하였다.



< 그림 Ⅳ-24 > 삼림지역 영향과 경제성분석의 구조(음영부분)

연구대상지역의 39등급의 Holdridge 삼림기후대는 < 표 Ⅳ-9 >의 삼림대간의 비교표를 이용하여 Cramer와 Leemans의 분류법의 14개의 기후대로 변환하였다. Cramer와 Leemans의 분류방법에서 삼림이 성립 가능한 기후대는 Tropical Rainforest, Subtropical Forest, Dry Tropical Forest, Warm Temperate Forest, Cool Temperate Forest, Boreal Forest의 6가지로 구분된다. 초원지대를 형성하는 기후대는 Tundra, Steppe, Chaparral, Savanna의 4개 지역이며 그 외 지역은 삼림이 나타나기 힘든 지역으로 분류한다. Davis (1989)의 연구결과에 의해 목본식물은 이동루트의 수목종 차이에 관계없이 연간 0~2㎞의 속도로 이동하는 것으로 제시되었다. 이를 기초로 평균 이동속도를 0.25㎞/연으로 하고, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0㎞/연의 4가지 이동속도에 의한 삼림의 이동 가능성을 연구하였다. < 그림 Ⅳ-25 >는 분석에 이용된 Cramer와 Leemans 삼림기후대의 분류 개념도를 나타낸 것이다.



< 그림 Ⅳ-25 > 분석에 이용된 Cramer와 Leemans 삼림기후대의 구분

< 표 Ⅳ-9 > 삼림 기후대간의 비교

NCEAS모형의 삼림기후대	Cramer & Leemans 모형의 삼림이 성립 가능한 기후대	Holdridge 모형의 삼림기후대
열대림	1. Tropical Rain Forest	30. Subtropical wet forest
		31. Subtropical rain forest
		37. Tropical moist forest
		38. Tropical wet forest
		39. Tropical rain forest
	2. Subtropical Forest	29. Subtropical moist forest
	3. Dry Tropical Forest	28. Subtropical dry forest
		36. Tropical dry forest
온대림 · 아한대림	4. Warm Temperate Forest	22. Warm temperal moist forest
		23. Warm temperal wet forest
		24. Warm temperal rain forest
	5. Cool Temperate Forest	15. Cool temperal moist forest
		16. Cool temperal wet forest
		17. Cool temperal rain forest
	6. Boreal Forest	9. Boreal moist forest
		10. Boreal wet forest
		11. Boreal rain forest

4.2. 기후변화로 인한 삼림의 적응성 예측결과

< 그림 Ⅳ-26 >과 < 그림 Ⅳ-27 >은 Cramer와 Leemans의 분류방법에 따라 현재 기후하의 삼림대와 2100년의 삼림대를 나타낸 것이다. 현재 한반도는 난온대림(Warm Temperate Forest)과 냉온대림(Cool Temperate Forest)이 주종을 이루고 있으며, 개마고원 일원이 아한대림(Boreal Forest)으로 나타났다. 백두산 정상부와 개마고원의 한대림 일부가 삼림이 존재할 수 없는 지역으로 나타난 것이 특징이다. 이 지역들은 2100년의 기후하에서 아한대림으로 변하게되어 삼림이 증가하게 된다. 2100년의 삼림기후대의 구성은 현재와 변화가 없으나 삼림의 분포와 면적변화가 발생하게된다.

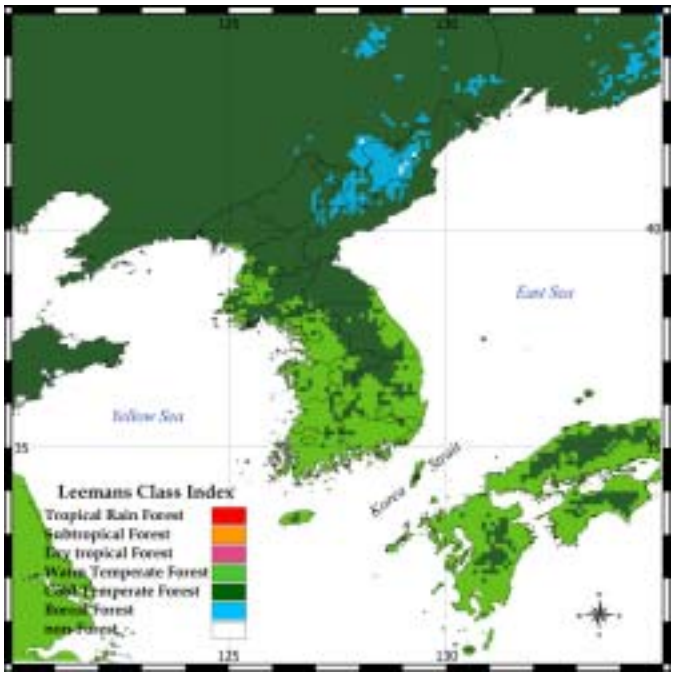
목본삼림의 이동속도에 따라 2100년 한반도 주위의 삼림의 적응성에 관한 영향예측결과는 < 그림 Ⅳ-28 >에서 < 그림 Ⅳ-31 >에 표시되어 있다. 모든 결과들에서 < 표 Ⅲ-7 >의 d지역인 삼림소실지역, c지역인 삼림의 종조성이 변화하거나 극단적인 경우 산불 등으로 인하여 삼림이 고사될 것으로 판단되는 지역은 만주지역과 중국 산동반도에서 집중적으로 나타났다.

목본식물의 추정 평균이동속도 0.25km/연의 경우, 한반도에서 삼림소실지역은 발생하지 않는 것을 것으로 예측되었다. 그러나 인위적 개입이 없는 경우 고사의 위험이 높은 지역은 남한의 경우 남한 총면적(99,800㎢)의 14%를 차지하였고, 북한지역은 총면적(122,762㎢)의 17.9%가 고사 위험이 있는 것으로 나타났다.

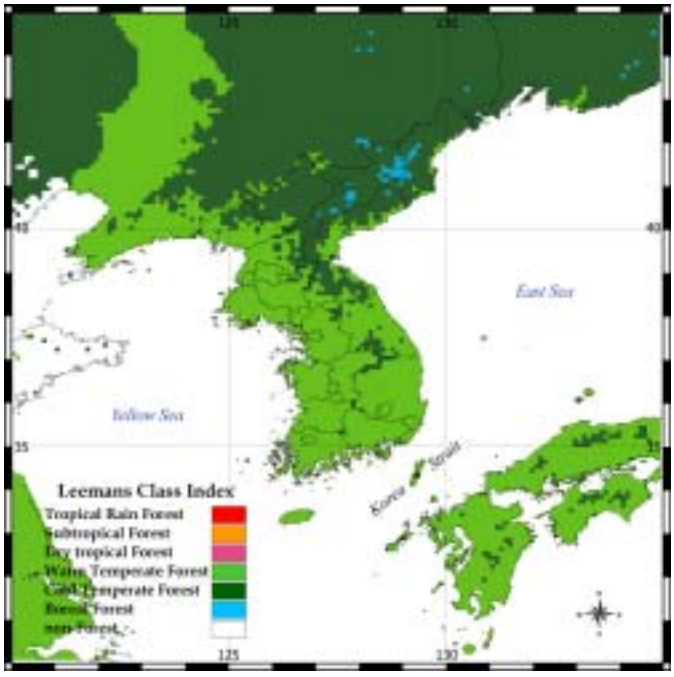
남한의 삼림고사 위험지역은 주로 남해안 일원과 전라도의 서해안에서 발생하며 고사위험지역의 80%는 난온대림 지역이며 나머지는 냉온대림으로 나타났다. 북한의 경우는 주로 평안도 내륙지역과 중국 접경지경, 함경남도의 영흥만 북쪽에서 고사 위험지역이 나타났다. 고사 위험지역의 대부분인 97.8%가 현재 냉온대림을 이루고 있으며 일부는 한대림지역으로 나타났다.

목본식물의 이동속도와 관련해서는 이동속도가 증가할수록 삼림 고사 위험지역의 면적이 감소하는 것으로 나타났다. 한반도의 경우 삼림평균이동속도가 1.0 km/연 이상의 경우 삼림지역이 기후변화에 잘 적응하는 것으로 나타났다.

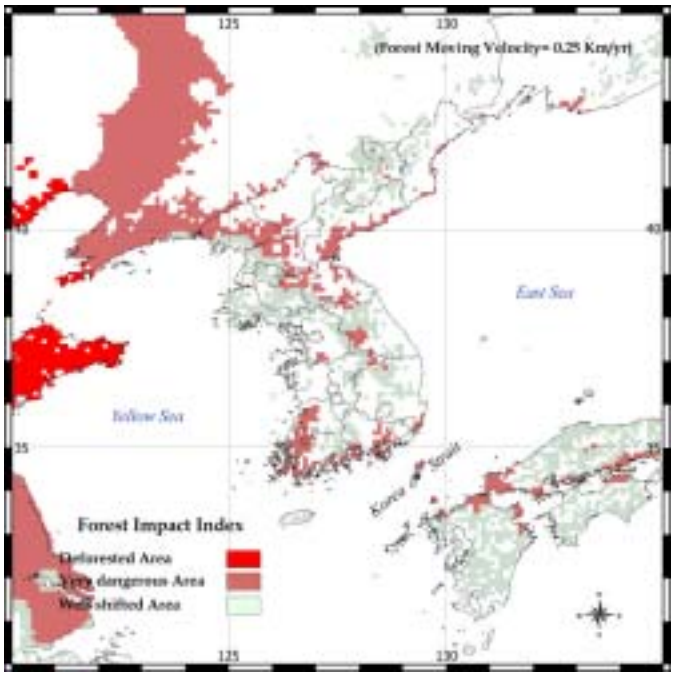
< 표 Ⅳ-10 >은 목본식물의 이동성에 따라 삼림의 영향에 대해 정리해 놓은 것으로, 기후변화패턴별로 영향이 발생하는 Cramer와 Leemans의 삼림기후대를 표시하였다.



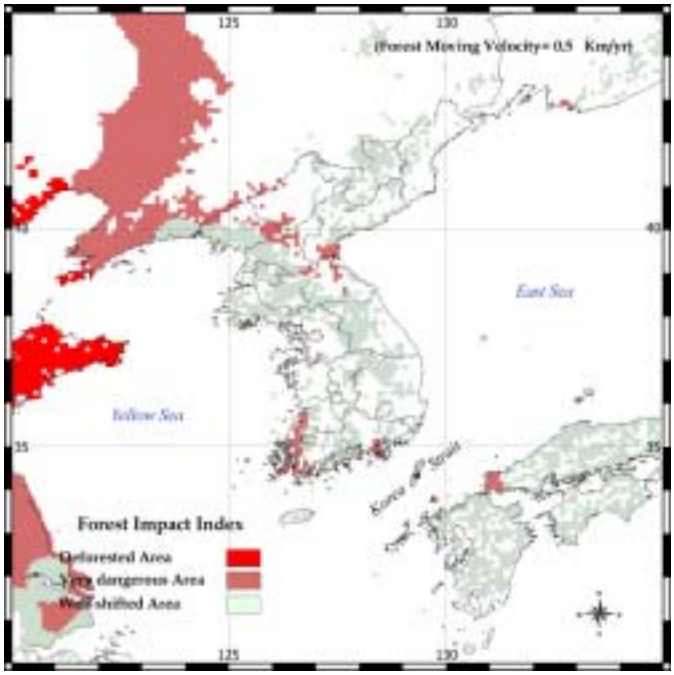
< 그림 Ⅳ-26 > 1990년 Carmer and Leemans 분류(시나리오=IS92a, GCM=HadCM2)



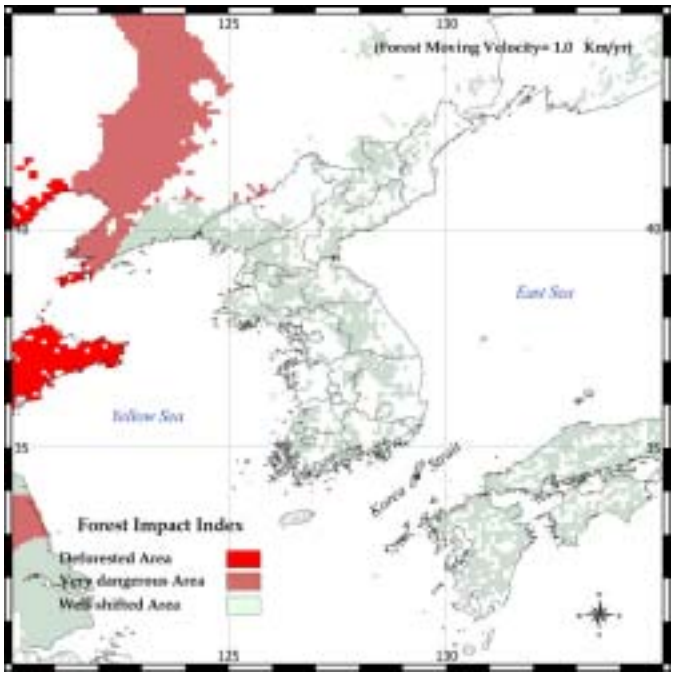
< 그림 Ⅳ-27 > 2100년 Carmer and Leemans 분류(시나리오=IS92a, GCM=HadCM2)



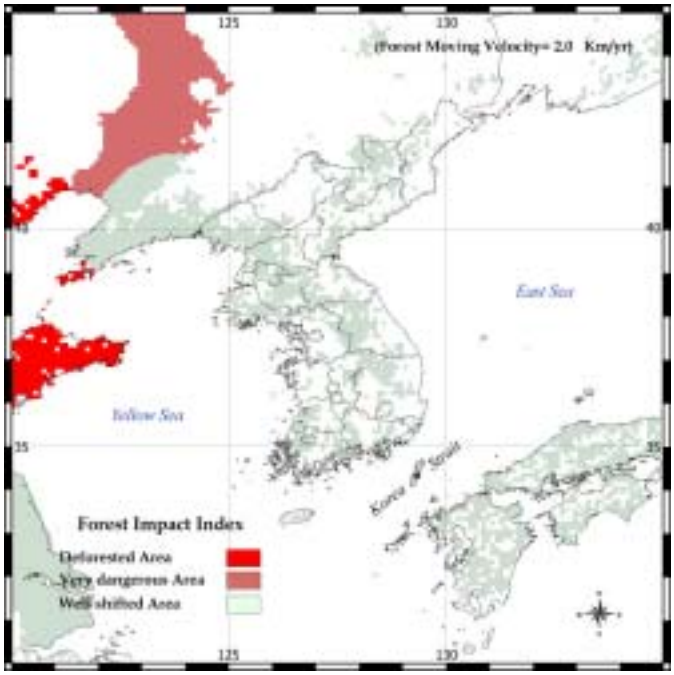
< 그림 Ⅳ-28 > 삼림평균이동속도가 0.25 ㎞/연 일 경우의 2100년 삼림분포분석



< 그림 Ⅳ-29 > 삼림평균이동속도가 0.5 ㎞/연 일 경우의 2100년 삼림분포분석



< 그림 Ⅳ-30 > 삼림평균이동속도가 1.0 ㎞/연 일 경우의 2100년 삼림분포분석



< 그림 Ⅳ-31 > 삼림평균이동속도가 2.0 ㎞/연 일 경우의 2100년 삼림분포분석

< 표 Ⅳ-10 > 목본식물의 이동에 따른 삼림의 영향예측결과

		남 한				북 한			
가후변화패턴 (Leemans 분류)		0.25 km/yr	0.50 km/yr	1.0 km/yr	2.0 km/yr	0.25 km/yr	0.50 km/yr	1.0 km/yr	2.0 km/yr
a		61.3%	61.3%	61.3%	61.3%	57.7%	57.7%	57.7%	57.7%
	4	56.3	56.3	56.3	56.3	7.2	7.2	7.2	7.2
	5	5.0	5.0	5.0	5.0	47.5	47.5	47.5	47.5
	6	-	-	-	-	-	3.0	3.0	3.0
b		24.7%	33.6%	38.7%	38.7%	24.1%	35.3%	41.8%	42.0%
	4	4.1	10.1	15.3	15.3	-	-	-	-
	5	20.6	23.4	23.4	23.4	14.0	24.8	31.3	31.5
	6	-	-	-	-	10.1	10.5	10.5	10.5
c		14.0%	5.2%	-	-	17.9%	6.8%	0.2%	-
	4	11.2	5.2	-	-	-	-	-	-
	5	2.8	-	-	-	17.5	6.8	0.2	-
	6	-	-	-	-	0.4	-	-	-
d		영향 없음				영향 없음			
e	목본×	영향 없음				0.3%	0.3%	0.3%	0.3%
f		영향 없음				영향 없음			
g		영향 없음				영향 없음			
계		100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

* 1999년 기준 남북한 면적합계 : 222,562㎢(남한 99,800㎢, 북한 122,762㎢)

자료: 건설교통부, www.moct.go.kr/DH/mct_hpg/mcthpg_gp/Data/tongae.htm

5. 삼림의 경제적 가치 손실액의 추정

5.1. NCEAS 모형

Robert Contanza 등(1998)은 생태계의 서비스와 이들에서 발생하는 자연자본은 지구의 생명유지에 중요한 역할을 하고, 인간복지에 직간접적으로 기여하므로 생태계 서비스의 경제적 가치에 관한 기존의 연구성과와 평가수법을 제한적으로 수집, 통합한 모델을 제시하였다. 연구의 주된 내용은 환경의 개선에 관한 지급의사액(Willingness to Pay)을 계산하여 생태계의 가치를 도출하는 것이었다.

NCEAS(National Center for Ecological Analysis and Synthesis) 모델에서 세계 생태계는 16개 생물권역으로 나뉘고 각 권역에 대해 17가지 생태계 서비스의 경제적 가치를 추정하였다. 이 연구결과는 계산된 생태계의 가치정보와 기존의 연구자료들과 결합되어 생태권역별 경제적 가치로 추정된다.

< 표 Ⅳ-11 >은 NCEAS모형에서 자연삼림의 경제적 가치를 추정한 부분으로 세계 삼림의 경제적 가치는 연간 4.7조 달러(1994년 U.S.$)로 추계 되었다. < 표 Ⅳ-11 >의 삼림별 경제적 가치는 삼림의 적응성에 대한 영향평가의 결과와 결합되어 2100년 소실되는 삼림지역의 경제적 가치를 추정하는데 이용되었다.

< 표 Ⅳ-11 > NCEAS 모델을 이용한 세계 자연삼림의 경제적 가치 평가

삼림구분	면적(Mha)	경제적 가치($/ha/년)	세계전체(조U.S.$/년)
열대림	1,900	2,007	3,817
온대림・아한대림	2,955	302	894
초원, 방목지	3,898	232	906

자료 : Costanza, R. et al.(1997), The Value of the world's ecosystem services and natural capital. NATURE, 387, pp 253-260

5.2 경제적 가치 손실액의 예측결과

< 표 Ⅳ-12 >는 삼림의 영향예측결과와 세계생태계 경제적 가치모델(NCEAS 모델)의 결과를 조합하여 삼림의 경제적 가치 손실액을 계산한 결과이다.

< 표 Ⅳ-10 >의 c는 삼림 피해가 발생하는 지역의 면적이 되고, 새로운 삼림이 형성될 가능성이 있는 지역으로 < 표 Ⅳ-10 >의 e, f가 이용된다. 그러나 새롭게 형성되는 삼림지역의 경제적 가치는 불확실성이 대단히 높기 때문에 계산에서 제외하였다.

따라서 본 연구에서 제시된 방법은 우리나라와 같이 새로이 삼림이 형성되는 지역의 면적이 적을 경우 추산된 결과에 영향이 거의 없으나, 세계적인 규모에서 분석을 실행 경우 피해액을 감소시킬 가능성이 있다는 한계가 있다.

NCEAS 모델에서는 < 표 Ⅳ-9 >에 나타난 것과 같이 열대림, 온대림, 아한대림으로 분류하여 삼림면적을 계산하였다. 따라서 NCEAS 모델의 삼림분류와 영향 예측에 이용된 삼림기후대를 대응시켜 모델링 결과를 간략화 하였다.

계산에 이용된 자료들의 공간해상도는 0.1°로 실제 면적을 추정하기에 적합하지 않으므로 계산에서 나온 결과를 직접이용하기 보다는 면적비를 계산하여 건교부 통계(1999)에서 나온 면적에 곱하여 새로이 삼림의 면적을 계산하였다.

계산 결과에서 삼림의 소멸지역과 삼림 고사의 위험이 높은 지역을 추출하여 삼림 손실로 보았고, 삼림 고사의 위험이 높은 지역은 삼림이 초지로 바뀐 것으로 생각하여 NCEAS 모델의 초원의 가치를 손실액에서 감해 주었다.

< 표 Ⅲ-7 >의 분류 c와 d에 해당하는 지역의 삼림의 경제적 가치손실액의 계산결과는 < 표 Ⅳ-12 >에 정리하였다. 이 결과에서 목본식물의 이동속도에 따라 삼림의 순손실액은 남한의 경우 매년 0~976백만불 발생하는 것으로, 북한의 경우는 0~2,492백만불의 손실이 매년

발생하는 것으로 예측되었다. 또한 목본식물의 추정 평균이동속도가 0.25km/yr일 경우, 한반도 전체의 삼림의 경제적 가치손실액은 매년 3,471백만불에 달하는 것으로 산출되었다. 또한 < 표 Ⅲ-7 >의 분류 c에 해당하는 지역은 삼림의 이동속도가 증가함에 따라 삼림 경제적 가치 손실액이 감소하는 것을 알 수 있다. 남한의 경우 목본식물의 이동속도가 0.5km/yr이상인 경우 삼림의 경제적 가치 손실은 발생하지 않는 것을 알 수 있었다.

< 표 Ⅳ-12 > 경제적 손실액의 계산결과

	남 한				북 한			
목본식물 이동속도	0.25 km/yr	0.50 km/yr	1.0 km/yr	2.0 km/yr	0.25 km/yr	0.50 km/yr	1.0 km/yr	2.0 km/yr
면적	99,800㎢				122,762㎢			
c*면적비	14.0%	5.2%	-	-	17.9%	6.8%	0.2%	-
손실액	4,225	1,555	-	-	6,636	2,512	71	-
초지증가 가 치	3,246	1,195	-	-	4,144	1,569	44	-
순손실액	976	360	-	-	2,492	943	27	-

단위 : 1994 U.S 백만$/연

6. 수종별 적응성 평가

많은 연구자들은 기후 변화가 수종의 분포에 미치는 영향을 연구해왔다. 수종별 분포변화 연구는 산림자원의 관리를 위한 구체적이고 정량적인 자료를 제공할 수 있다. 그러나 이러한 연구는 해당 수종의 대사 메커니즘에 대한 이해와 많은 입력인자들을 필요로 한다.

임양재(1977)는 우리나라의 각 수종들에 대하여 온량지수와 수종별 분포 범위를 비교하여 그 결과를 제시하였다. 온량지수를 이용한 수종의 분포 예측은 과정기반의 생물·물리적 모형과 비교하여 불확실성이 높은 편이나 입력인자가 기온으로 한정되어 있고 우리나라의 수종분포와 유사한 것으로 알려져 있다(과학기술처,1995).

기후변화로 인한 수종별 적응성 평가는 수종의 이동가능속도와 생육가능 기후 조건에 따라 < 표 Ⅳ-13 >과 같이 분류하였다. 본 연구에서는 현재와 GCM에 의해 생성되는 미래(2050년, 2100년)의 기온분포를 이용하여 온량지수를 계산하고 소나무림의 분포변화를 예측하였고 기후변화에 대한 적응성을 평가하였다.

○ 연구대상 수종 : 소나무 (*Pinus densiflora*)
○ 온량지수 범위 : 60~95 (임양재, 1977)
○ 이동가능속도 : 1.5 ㎞/yr
○ 시나리오 : IS92a

○ 대상시기 : 2050년, 2100년 (기준년도: 1990년)
○ 지구평균온도상승 : 2050년(1.04℃), 2100년(2.08℃)

< 표 Ⅳ-13 >에서 기후변화로 인한 수종별 적응성은 현재와 미래 기후대에서 생육 가능성과 수종의 이동가능범위에 따라 a~e 까지 5가지 경우로 나누었다. 연구 수종이 분포하는 온량지수범위 지역을 생육적합지역으로 하였으며, 타 수종으로 변환되는 경우와 초지나 사막화되는 지역은 생육부적합지역으로 나타내었다. 생육적합지역으로 변하는 경우는 자연 이동가능성 여부를 판단하여 자연 적응지역과 식재 등의 인위적 개입이 필요한 지역으로 나누었다.

계산된 생육적합지역의 면적은 온도만을 고려한 것으로 실제 삼림의 성장에 영향을 미치는 다른 요인(토질, 강수등)을 고려하게 되는 경우, 그 면적비가 줄어들게 될 것이다.

< 표 Ⅳ-13 > 기후변화로 인한 수종별 적응성

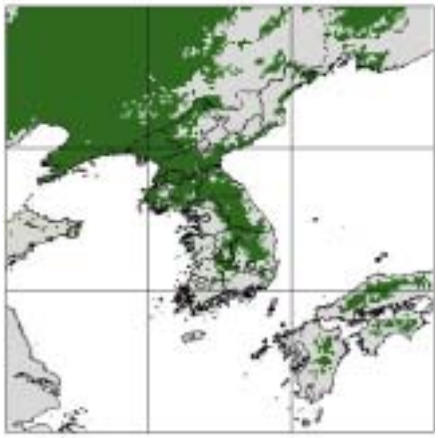
수종별 생육 가능성		지역의 삼림에 미치는 영향	
현재기후	미래 기후		
생육 적합 지역	생육적합 (기후대 변화없음)	a) 수종변화없음	자연적응
	생육부적합지역	b) 해당수종의 생육 불가능 지역	수종전환 필요
생육 부적합 지역	생육적합지역	c) 이동가능지역	자연적응
		d) 이동불가능지역	인위적 개입필요
	생육부적합지역	e) 관심대상지 아님	-

소나무는 개마고원 일부를 제외한 전 지역에서 고루 나타나는 수종이다. 그러나 연구결과에서 현재 소나무 생육적합지역은 실제에 비해 그 범위가 좁게 나타나고 있다. 이는 수종별 온량지수 분포범위를 연구한 70년대 보다 90년대의 평균기온이 높은 것과 기온감율보정으로 인해 온도 편차의 증가에 기인한 것으로 향후 새로운 온량지수 범위의 작성이 필요한 것으로 판단되었다.

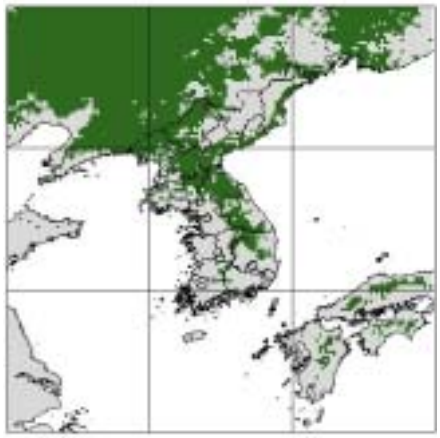
< 그림 Ⅳ-32 >와 < 그림 Ⅳ-33 >은 2050년과 2100년경의 소나무 생육가능지역을 나타낸 것이다. GCM별 분포는 온도변화 패턴과 유사하며 CCCma의 경우에 가장 큰 변화를 나타낸다.

2050년의 경우, IS92a 시나리오의 기온증가 예상치인 약 1℃ 의 기온 증가로 소나무 생육적합지역은 북쪽으로 조금 이동하게되며 면적변화가 가장 큰 지역은 함경도지역이었다.

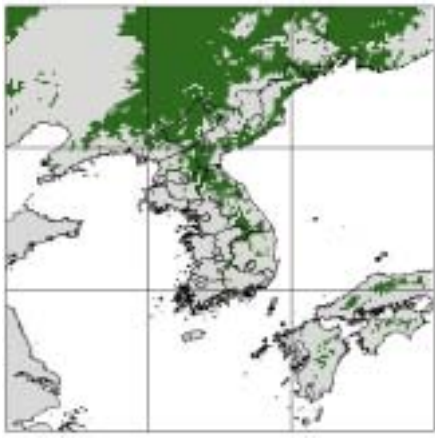
2100년의 경우는 2℃의 기온 증가로 대부분의 남부지방에서 소나무 생육이 어렵게되는 것을 알 수 있다. 또한 이 경우 한반도 전체에서 소나무 분포지역이 북동지역으로 이동하여 두만강 이북지역이 새로운 생육지역으로 나타나는 것으로 분석되었다.



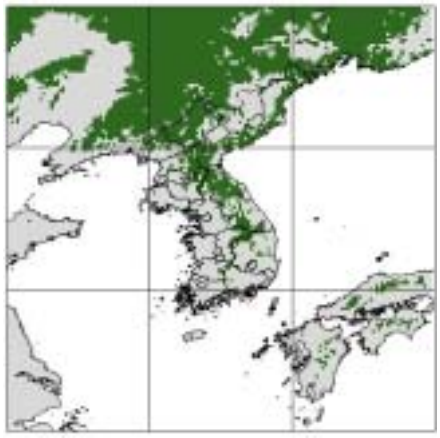
(current)



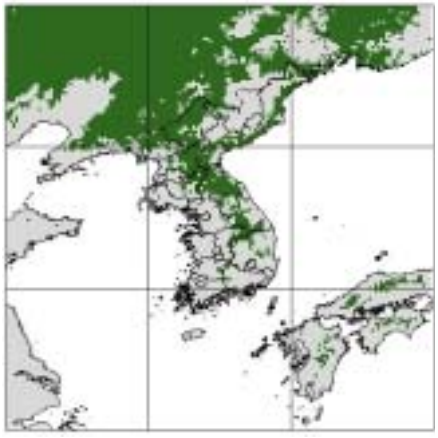
(CSIROMK2)



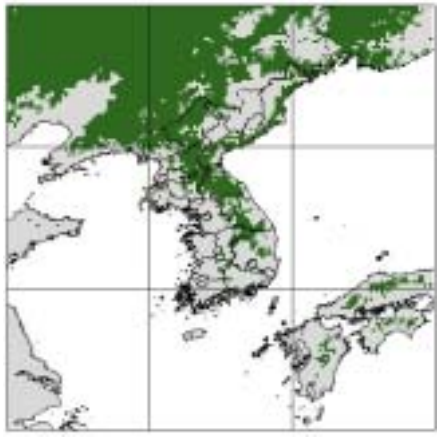
(CCCma)



(ECHAM4)

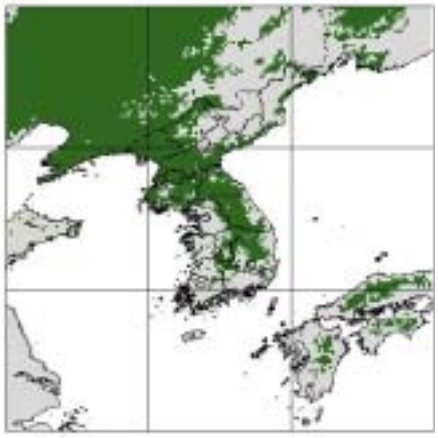


(HadCM2)

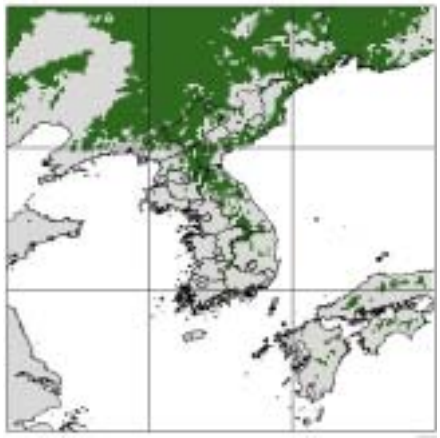


(CCSR/NIES)

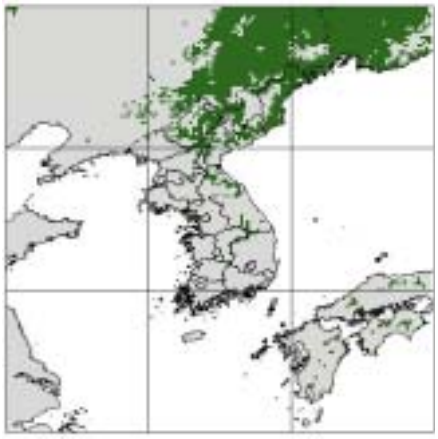
< 그림 Ⅳ-32 > 2050년의 소나무 생육적합 예상지역(녹색으로 표시된 지역)



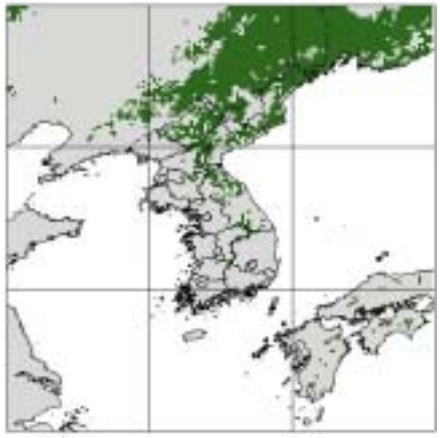
(current)



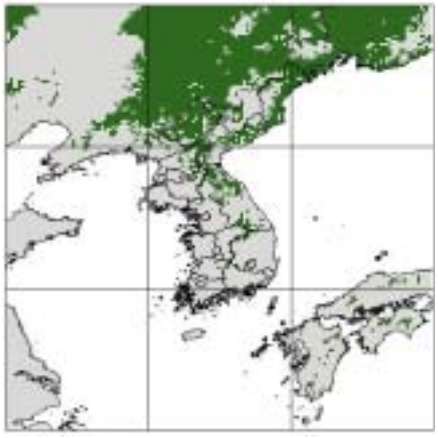
(CSIROMK2)



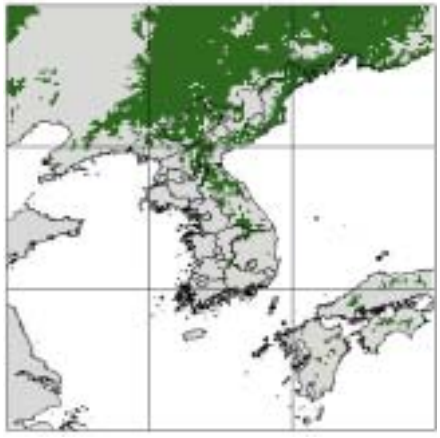
(CCCma)



(ECHAM4)



(HadCM2)



(CCSR/NIES)

< 그림 Ⅳ-33 > 2100년의 소나무 생육적합 예상지역(녹색으로 표시된 지역)

기후변화에 따른 소나무의 적응성평가 결과는 < 표 Ⅳ-14 >와 < 표 Ⅳ-15 >에 정리한 것과 같이 남한과 북한의 GCM 시나리오별 적응성별로 면적과 면적비를 산출하였다. 시뮬레이션에 이용된 격자크기는 0.1°로, 계산된 남한과 북한의 면적은 백분율(%) 면적비로 나타내었으며, 실제 넓이는 건설교통부의 남북한 면적통계 결과를 면적비에 곱하여 계산하였다. < 그림 Ⅳ-34 >와 < 그림 Ⅳ-35 >는 소나무 적응성 평가결과의 2050년, 2100년 결과를 나타낸 것이다.

기후변화에 따른 소나무의 적응성 예측 결과, 2050년과 2100년 모두에서 인위적 개입이 필요한 소나무 생육적합지역은 나타나지 않고 있다. 이는 소나무의 이동가능속도가 1.5 ㎞/연으로 기후대 변화 속도와 비슷하거나 빨라, 대부분의 지역에서 자연 적응 가능하기 때문으로 판단된다.

< 표 Ⅳ-14 > 2050년의 기후변화에 따른 소나무 적응성 예측결과

적응성 구 분		면 적 비(%)						면적(㎢)
		CSIRO MK2	CCCma	ECHAM4	HadCM2	CCSR /NIES	평균	
남한	a	20.49	11.82	13.79	15.37	17.64	15.82	15,791
	b	14.88	23.55	21.58	20.00	17.73	19.55	19,508
	c	0.30	0.49	0.49	0.49	0.39	0.43	433
	d	-	-	-	-	-	-	-
	e	64.33	64.14	64.14	64.14	64.24	64.20	64,069
소계		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99,800
북한	a	45.80	29.55	32.58	37.49	39.08	36.90	45,300
	b	13.68	29.93	26.91	22.00	20.41	22.59	27,726
	c	6.42	11.87	12.55	8.99	8.47	9.66	11,859
	d	-	-	-	-	-	-	-
	e	34.09	28.65	27.97	31.52	32.05	30.85	37,877
소계		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	122,762
총 면적								222,562

* 1999년 기준 남북한 면적합계 : 222,562㎢(남한 99,800㎢, 북한 122,762㎢)
자료: 건설교통부, www.moct.go.kr/DH/mct_hpg/mcthpg_gp/Data/tongae.htm

2050년의 기온 상승에 대한 소나무의 적응성 평가 결과, 한반도는 수종변화가 없는 지역은 26%, 자연 적응된 5% 지역을 합하여 전체 면적의 31%지역이 소나무 생육적합지역으로 나타났으며, 21% 지역은 생육부적합지역으로 나타났다.

남한의 경우, 현재 소나무 생육적합지역의 55%가 생육 부적합지역으로 변하였으며, 면적비로는 해발고도가 낮은 곳을 중심으로 남한 면적의 20%가 생육부적합지역, 16%가 생육적합지역으로 나타났다. 북한의 경우는 현재 소나무 생육적합지역의 38%가 생육부적합지역이 되며, 면적비로는 평안도와 황해도 지역을 중심으로한 북한 면적의 23% 지역이 생육부적합지역이 되며, 함경도등에서 자연 적응된 면적 10%를 포함하여 전체의 47% 지역이 생육적합지역으로 나타났다.

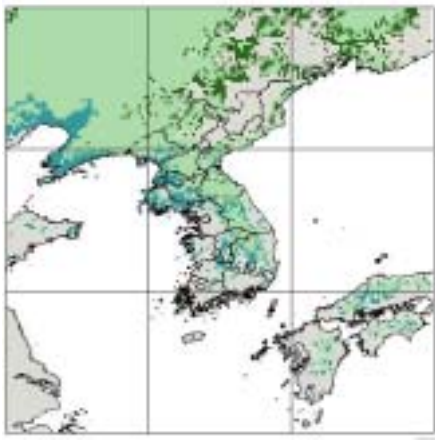
< 표 Ⅳ-15 > 2100년의 기후변화에 따른 소나무 적응성 예측결과

적응성 구 분		면 적 비(%)						면적(㎢)
		CSIRO MK2	CCCma	ECHAM4	HadCM2	CCSR /NIES	평균	
남한	a	11.13	2.66	4.14	5.12	7.39	6.09	6,076
	b	24.24	32.71	31.23	30.25	27.98	29.28	29,222
	c	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	492
	d	-	-	-	-	-	-	-
	e	64.14	64.14	64.14	64.14	64.14	64.14	64,010
소계		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99,800
북한	a	30.84	9.07	12.85	20.71	23.73	19.44	23,866
	b	28.65	50.42	46.64	38.78	35.75	40.05	49,160
	c	13.08	23.05	23.43	17.99	17.01	18.91	23,216
	d	-	-	-	-	-	-	-
	e	27.44	17.46	17.08	22.52	23.51	21.60	26,520
소계		100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	122,762
총 면적								222,562

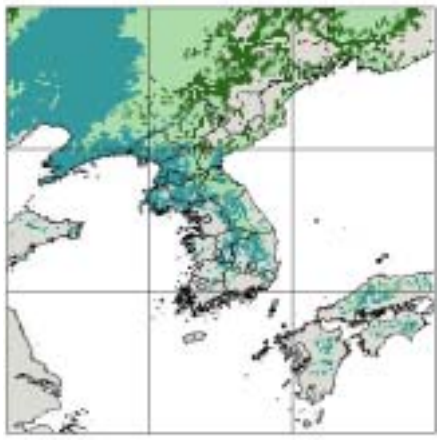
* 1999년 기준 남북한 면적합계 : 222,562㎢(남한 99,800㎢, 북한 122,762㎢)

자료: 건설교통부, www.moct.go.kr/DH/mct_hpg/mcthpg_gp/Data/tongae.htm

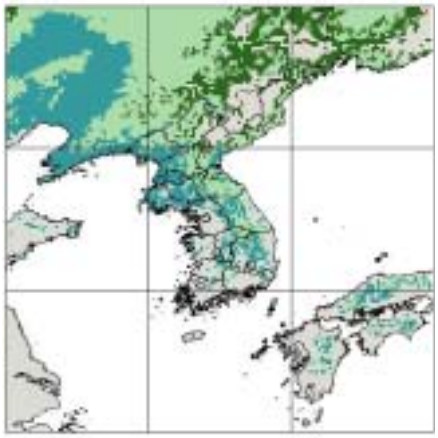
2100년의 기온 상승에 대한 소나무의 적응성 평가 결과, 2050년에 수종변화가 없던 지역들이 대거 생육부적합지역으로 변화되는 것으로 분석되었다. 한반도는 전체적으로는 수종변화가 없는 지역 13%, 자연 적응된 10% 지역을 합하여 전체 면적의 23% 지역이 소나무 생육적합지역으로 나타났으며, 35%는 생육부적합지역이 변화되는 것으로 예측되었다.



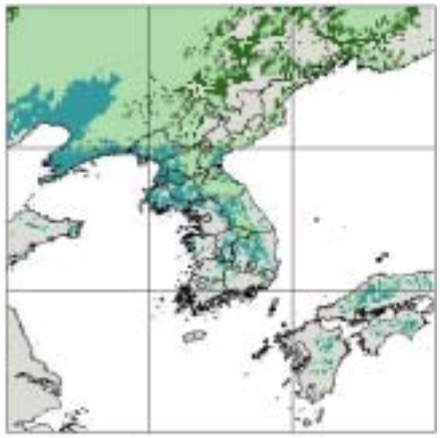
(CSIROMK2)



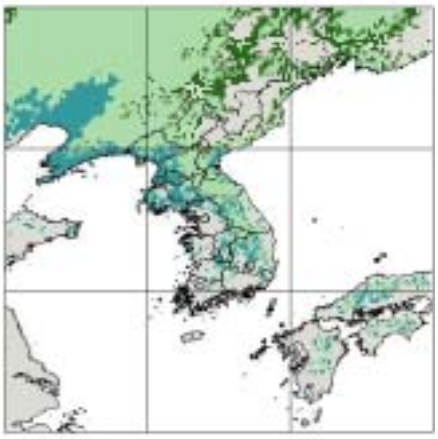
(CCCma)



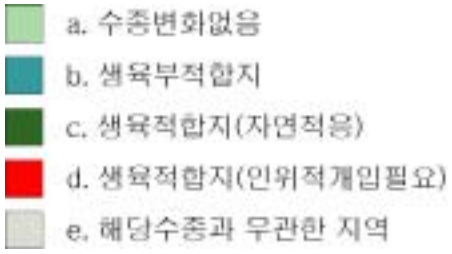
(ECHAM4)



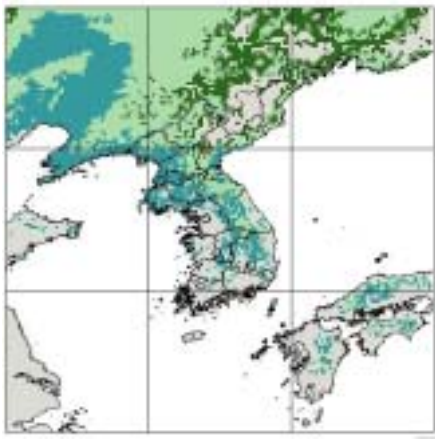
(HadCM2)



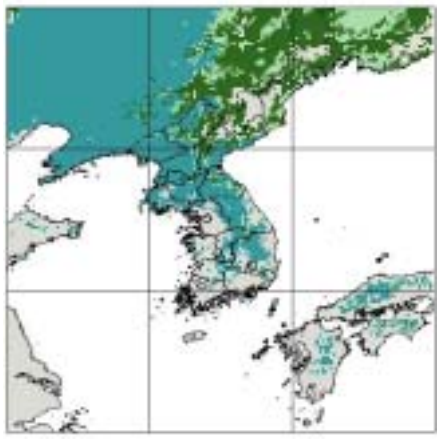
(CCSR/NIES)



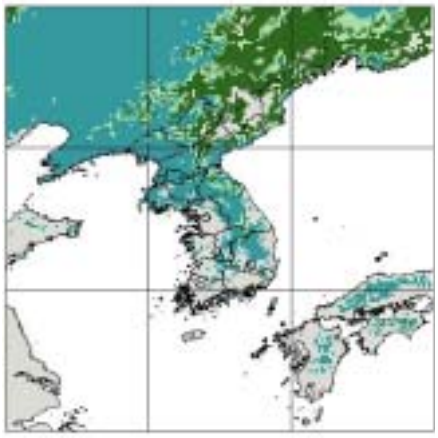
< 그림 Ⅳ-34 > 2050년의 기후변화에 따른 소나무 적응성평가



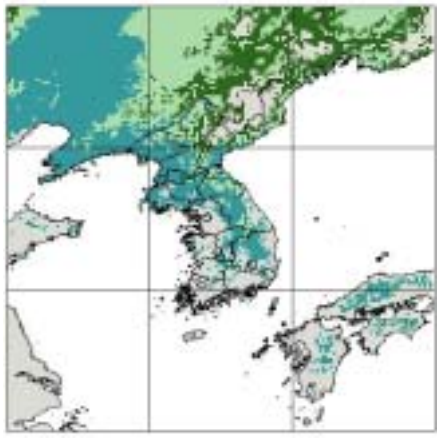
(CSIROMK2)



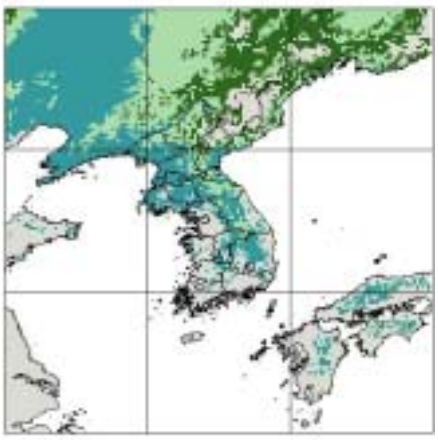
(CCCma)



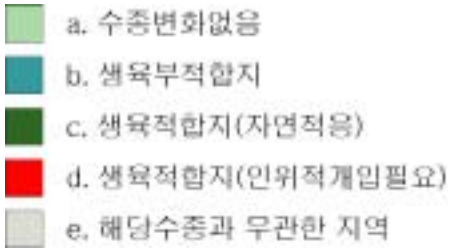
(ECHAM4)



(HadCM2)



(CCSR/NIES)



< 그림 Ⅳ-35 > 2100년의 기후변화에 따른 소나무 적응성평가

지역별 분석 결과, 남한은 현재 소나무 생육적합지역의 83%가 생육부적합지역으로 변하며, 면적비로는 남한 면적의 29%가 생육부적합지역이 되고 산악지역을 중심으로 남한의 7% 지역이 생육적합지역으로 분석되었다.

북한의 경우는 현재 소나무 생육적합지역의 67%가 생육부적합지역이 되며, 면적비로는 함경북도와 개마고원일원을 제외한 전 지역에서 변화가 발생하여 40%정도의 면적이 생육부적합지역으로 변하였고, 개마고원 등에서 자연 적응된 면적 19%를 포함하여 38% 정도가 생육적합지역으로 나타났다.

V. 요약 및 제안

1. 요약

최근 많은 영향 연구들이 아시아와 태평양 지역에서 행해졌다(아시아 개발은행 1994, Erda et al. 1996). 이들 연구에서 분석된 내용을 직접적인 영향으로만 제한하여도 넓은 범위의 불확실성이 나타나는 것으로 분석되고 있다. 특히, 모델에서 사용하는 각종 자료들의 지리적인 해상도는 중요한 인자이고, 기본적인 물리적, 생물학적 반응의 통합과 확대는 또 다른 문제들이다. 따라서 기존의 광역영향모형의 자료들을 그대로 우리나라에 적용할 경우 지역적인 소규모성과, 다양한 토지이용의 문제로 변화를 반영하지 못하는 문제점이 있는 것으로 선행연구 분석결과 나타났다.

따라서 본 연구에서 다루고 있는 우리나라의 삼림부분 영향을 예측하고 분석하기 위해서, 신뢰할 수 있는 지리적 해상도를 가지도록 각종 기초자료들을 변환하는 것이 매우 중요하다. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 각종 자료들을 경위도 0.1°이하 30m이상의 해상도로 자료들을 변환하였다.

기온과 강수량의 기후변화로 인한 세계의 자연삼림 분포 변화는 대기대순환모형에서 대기중의 CO_2농도 배증시의 평형실험 결과를 지형특성을 감안한 지역자료로 변환하여 사용하였다.

생기후학적인 분류는 평형상태에서의 분포예측과 기후변화에 따른 기온, 강수량변화하에서 삼림의 분포변화를 예측하였다. 이와 함께 과거의 기후 변동시 수목종의 이동속도에 대한 조사를 합하여, 기후변화에 따른 삼림의 적응성을 예측하는 모형을 개발하고 2100년의 한반도 주변의 삼림의 영향 예측을 시도하였다.

이와 같은 전제하에 수행한 연구결과, 미래의 삼림분포는 큰 폭으로 변화가 있는 것으로 예측되었다.

첫째, 기후변화에 대한 정부간 협의체(IPCC)의 IS92a 시나리오에 기초하여 한반도에서는 2100년까지 16%지역의 삼림이 고사할 위험성이 있는 것으로 나타났다.

둘째, 이들 지역의 삼림에 대한 2100년까지 경제적 가치의 손실액을 계산한 결과, 삼림의 연평균이동속도가 0.25km/연 이하일 경우, 삼림 소실로 인해 연간 35억 달러의 손실이 발생하는 것으로 예측되었으며, 남한보다는 북한에 영향이 더 크게 발생하는 것으로 분석되었다.

셋째, 단일 수종인 소나무군락에 대한 영향을 예측한 결과 소나무군락의 평균이동속도가 기후대의 변화속도보다 빠른 이유로 고사위험이 있는 지역은 없는 것으로 분석되었다.

이 연구에서 공간적인 기후 변화 양식을 얻기 위해 5개의 광역GCM자료가 사용되었으며, 이를 토대로 기후 변화의 영향을 추정하였다. 따라서 결과를 해석함에 있어서 3차연도인

2003년에 수행되는 시나리오별 영향예측에서 항상 5개의 GCM으로 추정된 영향들의 평균값과 범위를 동시에 분석하는 방법을 활용해야 할 것이다. 이와 같은 배경속에서 본 연구에서 사용한 GCM자료들의 평균과 변동범위는 우리나라의 삼림분포의 영향의 범위를 추정하는데, 많은 시사점을 주었으나, 지역미기후를 완벽히 반영하지 못한 이유로 결과의 이용시 신중한 검토가 이루어져야 할 것이다.

2. 정책제언

본 연구는 3개년을 연구계획으로 설정하고 연구를 진행하였다. 1차 연도는 주로 국제동향과 2차연도에 활용할 모델을 다루었으며, 2차 연도에서는 1차 연도에 선정된 모델을 우리나라의 자료를 변화하여 구동하고, 이를 우리나라에 맞도록 수정하였다. 이 결과 다음과 같은 부분의 정책제언이 도출되었다.

첫째, 자료의 활용성에 제고를 위하여 국가차원에서 기초자료를 생성하는데, 많은 지원이 반드시 이루어져야 한다.

일례로 GCM 자료의 경우, 현재 국제적 수준의 GCM 자료를 생성하는 국내연구기관을 찾을 수 없었다. 이 결과 다른 국제기관에서 생성된 GCM 자료를 구득하여 사용하다 보니, 우리나라의 특성을 정확히 반영하지 못한 측면이 있다. 이 결과 본 연구에서 구축한 모델의 시뮬레이션 결과에 불확실성을 높이는 측면이 있다. 따라서 영향연구의 신뢰성 제고를 위하여 기초자료의 생산을 위해 국가차원의지원이 필요하다. 특히 지역미기후를 반영한 지역기후모델결과의 생산에 많은 노력과 지원이 필요하다.

둘째, 지역차원의 영향연구를 활성화하고, 신뢰성있는 결과를 지속적으로 생성하기 위해서는 중장기 연구계획을 수립하고 이를 지속적으로 추진하는 것이 필요하다.

일례로 국제영향연구의 추세는 광역차원에서 지역차원으로 공간적 해상도가 향상되며, 지역차원의 영향을 면밀하게 파악하는 연구경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 IPCC 3차연도 영향연구 부분 결과보고서를 보면 더욱 뚜렷하게 파악할 수 있다. 따라서, 지구환경보전을 위해 지역차원의 영향연구를 진행하고, 이를 국제기구 및 기관에 발표하는 등의 절차를 거쳐 우리나라의 영향연구수준을 높이고, 이 결과를 국가정책에 반영하기 위해서는 중장기적인 연구계획을 수립할 필요성이 점차 증대되고 있다.

셋째, 통합영향평가모형의 활용을 검토하여야 한다.

기후변화로 인한 자연환경의 변화는 매우 복잡하며, 각 영향인자별로 상호연관되어 있어 이의 영향관계를 잘 반영하여야 미래의 영향예측을 정확하게 수행할 수 있다. 이와 같은 이유로 생기후적인 모형과 경제모형을 통합모형이 많이 활용되는 추세에 있다.

위의 정책제언을 토대로 향후 통합영향평가모형의 구축과 이를 이용한 국가대응방안의 마련을 위해서는 다음과 같은 분야별 연구계획의 추진이 필요하다.

○ 1단계(2000-2002) : 국제동향 파악 및 기초자료의 정비
- 기후변화 영향예측 및 대응방안에 관한 국제동향 조사 및 분석

- 영향예측에 필요한 기초자료의 수집 및 DB 구축
  · GCM 수집 및 구축
  · 지리지형정보 수집 및 구축
  · 산림식생정보 수집 및 구축

- 기후변화 영향예측을 위한 모델의 비교 분석
  · 산림식생 및 해수면상승 영향예측 모형 구축 및 검증
  · GCM별 기후변화 시나리오별 산림식생 및 해수면상승 영향예측 및 평가

○ 2단계(2003-2007) : 분야별 영향평가모형의 구축 및 검증
- 수자원부분 영향예측 모형 구축 및 검증
  · 영향예측 모형 구축 및 검증
  · GCM별 기후변화 시나리오별 영향예측 및 평가
- 농업 및 식량부분 영향예측 모형 구축 및 검증
  · 영향예측 모형 구축 및 검증
  · GCM별 기후변화 시나리오별 영향예측 및 평가

- 연안 및 해양생태계 영향예측 모형 구축 및 검증
  · 영향예측 모형 구축 및 검증
  · GCM별 기후변화 시나리오별 영향예측 및 평가

- 인간정주권, 에너지 및 산업부문 영향예측 모형 구축 및 평가
  · 영향예측 모형 구축 및 검증
  · GCM별 기후변화 시나리오별 영향예측 및 평가

- 보건부분 영향예측 모형 구축 및 검증
  · 영향예측 모형 구축 및 검증
  · GCM별 기후변화 시나리오별 영향예측 및 평가

○ 3단계(2008-2011) : 통합영향평가모형을 활용한 국가대응방안 수립
- 통합영향예측 모형의 구축 및 검증
- 영향에 대한 대응방안 수립

참고문헌

동양문헌

과학기술처(1995), 기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구 환경관련 대책 연구(Ⅱ), pp. 132-157

기상연구소(1990),「한반도 기후변화 감시 및 이상기상에 관한 연구(Ⅰ)」, 과학기술처, 기상연구소 연구보고서.

기상연구소(1991),「한반도 기후변화 감시 및 이상기상에 관한 연구(Ⅱ)」, 과학기술처, 기상연구소 연구보고서.

기상연구소(1992a),「한국-태평양 기후시스템(Ⅰ)」, 과학기술처, 기상연구소 연구보고서.

기상연구소(1992b),「한반도 기후변화 감시 및 이상기상에 관한 연구(Ⅲ)」, 과학기술처, 기상연구소 연구보고서.

기상연구소(1993),「한국-태평양 기후시스템(Ⅱ)」, 과학기술처, 기상연구소 연구보고서.

기상연구소(1994),「한국-태평양 기후시스템(Ⅲ)」, 과학기술처, 기상연구소 연구보고서.

기상연구소(1999),「대기조성변화에 따른 지역기후변화 연구」, 기상연구소 연구보고서.

기상연구소(1999),「대기조성변화에 따른 지역기후변화 연구」, 기상연구소 연구보고서.

김태훈(1993), 기후변화가 산림생태계에 미치는 영향 및 대응방안, 기후변화가 한반도에 미치는 영향에 관한 심포지엄 논문집, 한국과학기술연구원, pp. 31-59

棟居 洋介, 高橋 潔(2000) 地球溫暖化が世界の自然植生に及ぼす影響およびその經濟的價値, 環境科學會誌, 13(3), pp.329-337

松岡 譲(1996) 「アシア太平洋地域における溫暖化對策分析モデル(AIM)の開發に關する開途國等共同研究」, 地球環境綜合推進費成果報告.

野田 彰(2000), 地球溫暖化に伴う全球的な氣候變化豫測, 日本氣象學會 2000年 春季學術大會論文集, pp. 702-708

서양문헌

Agren, G. I., R. E. Mcmurtrie, W. J. Parton, J. Pastor, and H. H. Shugart(1991), State of The Art Models of Production Decomposition Linkages in Conifer and Grassland Ecosystems. *Ecological Applications* 1: 118-138.

AIM Project Team (1996), Technical Structure of AIM/Impact model, AIM Iterim Paper, IP-95-06, Tsukuba, Japan

AIM Project Team(1997), Asian-Pacific Integrated model, National Institute for Environmental Studies, Japan, 67-69

Alcamo, J. (Ed)(1994), *Image 2.0: Integrated Modelling of Global Climate Change.* Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.

Alcamo, J., A. Bouwman, J. Edmonds, A. Grubler, T. Morita, and A. Sugandhy, 1995: An evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios. In Climate Change 1994, Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios, J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, J. Bruce, Hoesung Lee, B.A. Callander, E. Haites, N. Harris and K. Maskell (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, pp. 233- 304.

Alcamo, J., R. Leemans, and E. Kreileman (eds.)(1998), Global Change Scenarios of the 21 st Century. Results from the IMAGE 2.1 model. Elsevier Science, London.

Arthur, L. M., and G. C. Van Kooten(1989), Assessing Economic Benefits of Climate Change on Canada's Boreal Forest. *Canadian Journal of Forest Research* 19: 463-470.

Box, E. O.(1980), *Macroclimate and Plant Forms: An Introduction To Predictive Modeling in Phytogeography.* Junk, The Hague, The Netherlands.

Branchu, P., H. Faure, J. P. Ambrosi, E. M. Van Zinderen-Bakker, and L. Faure-Denard(1993), Africa as Source and Sink For Atmospheric Carbon Dioxide. *Global and Planetary Change* 7: 41-49.

Costanza, R. et al.(1997), The value of the world's ecosystem services and natural capital. NATURE, 387, 253-260.

Cramer, W. P. and Leemans, R.(1993), Assessing impacts of climate change on vegetation using climate classification system. Vegetation Dynamics & Global Change, Chapman & Hall, USA

D'Arrigo, R. D., G. C. Jacoby, and R. M. Free(1992), Tree-Ring Width and Maximum Latewood Density at The North American Tree Line: Parameters of Climatic Change. *Canadian Journal of Forest Research* 22: 1290-1296.

Dale, V. H. and H. M. Rauscher(1994), Assessing Impacts of Climate Change on Forests: The State of Biological Modeling. *Climatic Change* 28: 65-90.

Davis, M. B.(1989), Lags in Vegetation Response to Greenhouse Warming. *Climate Change*, 15:75-82.

De Vries, B., J. Bollen, L. Bouwman, M. den Elzen, M. Janssen, and E. Kreileman(2000), Greenhouse gas emissions in an equity-, environment-and service-oriented world: An IMAGE-based scenario for the next century. Technological Forecasting & Social Change, 63(2-3). (In press).

De Vries, B., M. Janssen, and A. Beusen(1999), Perspectives on global energy futures - simulations with the TIME model. Energy Policy, 27, 477-494.

De Vries, H.J.M., J.G.J. Olivier, R.A. van den Wijngaart, G.J.J. Kreileman, and A.M.C.

Toet(1994), Model for calculating regional energy use, industrial production and greenhouse gas emissions for evaluating global climate scenarios. Water, Air Soil Pollution, 76, 79-131.

Dickinson, R. E. *et al.*(1989), A Regional Climate Model for the Western U.S., Climate Change 15: 383-422.

Eatwell, J., M. Murray, and P. Newman (eds.)(1998), The New Palgrave, A Dictionary of Economics, 3.

Edmonds, J., M. Wise, and C. MacCracken(1994), Advanced energy echnologies and climate change. An Analysis Using the Global Change Assessment Model (GCAM). PNL-9798, UC-402, Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA, USA.

Edmonds, J., M. Wise, H. Pitcher, R. Richels, T. Wigley, and C. MacCracken (1996a), An integrated assessment of climate change and the accelerated introduction of advanced energy technologies: An application of MiniCAM 1.0. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 1(4), 311- 339.

Edmonds, J., M. Wise, R. Sands, R. Brown, and H. Kheshgi(1996b), Agriculture, land-use, and commercial biomass energy. A Preliminary integrated analysis of the potential role of Biomass Energy for Reducing Future Greenhouse Related Emissions. PNNL-11155, Pacific Northwest National Laboratories, Washington, DC.

Holdridge, L. R.(1947) Determination of world plant formations from simple climate data. Science, 105, 367-368

Holdridge, L. R.(1967), *Life Zone Ecology.* Tropical Science Centre, San Jose, California.

IGBP(1997), The terrestrial biosphere and global change: Implications for natural and managed ecosystem. IGBP SCIENCE, No.1, 10-14

IPCC(1990), Climate Change, The IPCC Scientific Assesssment, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

IPCC(1992), Climate Change 1992 : The supplementary report to the IPCC Scientific Assessment, J. T. Houghton, B. A. Callander and S. K. Varneyl, Cambridge University Press, Cambridge, UK,, pp.331-339

IPCC(1994), IPCC Technical guidlines for assessing climate change impacts and adaptations.

IPCC(1996a), Climate Change 1995, Economic and social dimensions of climate change, Cambridge University Press, 192-193

IPCC(1996b), Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC(1996c), Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the

Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC(1996d), Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC(1996e), Climate Change 1995, Impacts, adaptations and mitigation of climate change, Cambridge University Press, 111 pp.

IPCC(1998), The regional impacts of climate change, an assessment of vulnerablity, A special report of IPCC WG-II

IPCC_TGCIA(1999), Guidlines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment, version 1, Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment, 69pp.

Jarvis, P. G.(1993), *Maestro: A Model of CO_2 and Water Vapour Exchange By Forests in Globally Changing World. In Design and Execution of Experiments on CO_2-Enrichment, Ecosystem Research Report No. 6*, The Commission of the European Community.

Joyce, L.A. *et al.*(1995), Forest Sector Impacts From Changes in Forest Productivity under Climate Change, *Journal of Biogeography* 22: 703-713.

Kirilenko, E. P. and A. M. Solomon(1998) Modeling dynamic vegetation response to rapid climate change using bioclimatic classification. Climate Change, 38, 15-49.

Landsberg, J. J., S. Linder, and R. E. Mcmurtrie(1995), *Effects of Global Change on Managed Forests: A Strategic Plan For Research on Managed Forest Ecosystem in a Globally Changing Environmen*t. Gcte Report No 4.

Lashof, D., and Tirpak, D.A.(1990), Policy Options for Stabilizing Global Climate. 21P-2003. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.

Legates, D. R. and C. J. Willmott(1990a), Mean Seasonal and Spatial Variability in Global Surface Air Temperature, *Theor. Appl. Climatol.* 41: 11-21.

Legates, D. R. and C. J. Willmott(1990b), Mean Seasonal and Spatial Variability in Gauge Corrected, Golobal Precipitation, *Int. J. Climatol.* 10: 111-127.

Linder, S.(1987), Responses to Water and Nutrition in Coniferous Ecosystems. in *Potentials and Limitations of Ecosystem Analysi*s, E. D. Schulze and H. Zwölfer (Eds). Ecological Studies 61. Springer Verlag, Berlin- Heidelberg-New York.

Matsuoka, Y., M. Kainuma and T. Morita(1995), Scenario Analysis of Global Warming Using the Asian Pacific Integrated Model(AIM), Energy Policy, 23(4/5), pp.357-371

Matyas, C.(1994), Modeling Climate Change Effects with Provenance Test Data. *Tree Physiology* 14: 797-804.

McMurtrie, R. E. *et al.*(1990), Modelling the Yield of *Pinus Radiata* on a Site Limited by Water and Nitrogen, *Forest Ecology and Management* 20: 381-413.

Melillo, J. M., A. D. Mcguire, D. W. Kicklighter, B. Moore, Iii, C. J. Vorosmarty, and A. L. Schloss(1993), Global Climate Change and Terrestrial Net Primary Production. *Nature* 363: 234-240.

Messner, S., and M. Strubegger(1995), User' s Guide for MESSAGE III. WP-95- 69, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, p.155

Mori, S.(2000), The development of greenhouse gas emissions scenarios using an extension of the MARIA model for the assessment of resource and energy technologies. Technological Forecasting & Social Change, 63(2-3). (In press).

Mori, S., and M. Takahashi(1999), An integrated assessment model for the evaluation of new energy technologies and food productivity. International Journal of Global Energy Issues, 11(1-4), 1-18.

Morita, T., Y. Matsuoka, I. Penna, and M. Kainuma(1994), Global Carbon Dioxide Emission Scenarios and Their Basic Assumptions: 1994 Survey, CGER-1011-94. Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan.

Munesue Y. and Takahashi K.(2000), Evaluation of Climate Change Impact on Vegetation and its Economic Value, 日本環境科學會誌, 13(3):329-337

Nalder, I. A. and R. W> Wein(1998) Spatial Interpolation of Climatic Normals : Test of a New Method in the Canadian Boreal Forest, *Agricultural and Forest Meteorology* 92:211-225

Nishioka, S. and Harasawa, H.(Eds)(1998), *Global Warming: The Potential Impact on Japan*, Springer-Verlag, Tokyo.

Ohikita, Y.(1995), Climate Change Impact on Natural Environment, Master's thesis at Kyoto University, Japan

Parton, W. J., J. W. B. Stewart, and C. V. Cole(1988), Dynamics of C, N, P and S in Grassland Soils: A Model. *Biogeochemistry* 5: 109-113.

Pepper, W.J., J. Leggett, R. Swart, J. Wasson, J. Edmonds, and I. Mintzer(1992), Emissions scenarios for the IPCC. An update: Assumptions, methodology, and results. Support document for Chapter A3. In Climate Change 1992: Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. J.T. Houghton, B.A. Callandar, S.K. Varney (eds.), Cambridge University Press, Cambridge.

Peres-Garcia, J., L. A. Joyce, C. S. Binkley, and A. D. Mcguire(1995), Economic Impacts of Climate Change on The Global Forest Sector: An Integrated Ecological/Economic Assessment. in *Proceedings of A Meeting on Economics of Carbon Sequestration in Forestry*, Bezendal, May 15-19.

Peterjohn, W. T., J. M. Melillo, F. P. Bowles, and P. A. Steudler(1993), Soil Warming and Trace Gas Fluxes: Experimental Design and Preliminary Flux Results. *Oecologia*

93: 18-24.

Peterjohn, W. T., J. M. Melillo, P. A. Steudler, K. M. Newkirk, F. P. Bowles, and J. D. Aber(1994), Responses of Trace Gas Fluxes and N Availability to Experimentally Elevated Soil Temperatures. *Ecological Applications* 4: 617-625.

Prentice, I. C., W. P. Cramer, Harrison, R. Leemans, R. A. Monserud and A. M. Solomon(1992), A global biome model based on plant physiology and dominace, soil properties and climate. Journal of biogeography, 19, 117-134.

Riahi, K., and R.A. Roehrl(2000), Greenhouse gas emissions in a dynamics-as- usual scenario of economic and energy development. Technological Forecasting & Social Change, 63(2-3). (In press).

Robert J. Scholes and Sune Linder(1998), Forest, *Handbook on Method for Climatie Change Impact Assessment and Adaptation Strategies*, UNEP.

Rosenberg, N. J. (Ed)(1993), Towards An Integrated Impact Assessment of Climate Change: The Mink Study. *Climatic Change* (Special Issue) 24: 1-173.

Running, S. W. and J. C. Coughlan(1988), A General Model of Forest Ecosystem Processes For Regional Application. I. Hydrological Balance, Canopy Gas Exchange and Primary Production Process. *Ecological Modelling* 42: 125-154.

Ryan, M. G., E. R. Hunt, R. E. Mcmurtrie, G. I. Agren, J. D. Aber, A. D. Friend, E. B.Rastetter, W. M. Puliam, R. J. Raison, and S. Linder(1996), Comparing Models of Ecosystem Function For Temperate Conifer Forests: I. Model Description and Validation, In *Global Change: Effects on Coniferous Forests and Grasslands,* A. I. Breymeyer, D. O. Hall, J. M. Melillo, and G. I. Agren (Eds*).* Scope (Scientific Committee on Problems of The Environment) 56. John Wiley, Chichester, United Kingdom.

Sankovski, A., W. Barbour, and W. Pepper(2000), Quantification of the IS99 emission scenario storylines using the atmospheric stabilization framework (ASF). Technological Forecasting & Social Change, 63(2-3). (In press).

Sato, Y., H. Sasaki, K. Adachi, A. Noda and S. Yukimoto(1999), A $2\times CO_2$ regional climate prediction experiment over Japan in winter with an MRI regional climate model, Abstracts volume of the Workshop on "Development of High Resolution Climate Models", IUGG 1999, Birmingham, U. K., B.299.

Servant, M., J. Maley, B. Turcq, M. L. Absy, P. Brenac, M. Fournier, and M.P. Ledru(1993), Tropical Forest Changes During The Late Quaternary in African and South American Lowlands. *Global and Planetary Change* 7: 25-40.

Shugart, H. H., P. J. Michaels, T. M. Smith, D. A. Weinstein, and E. B. Rastetter(1988), Simulation Models of Forest Succession. In *Scales and Global Change: Spatial and Temporal Variability in Biospheric and Geospheric Processes,* T. Rosswall, R. G.

Woodmansee, P. G. Risser (Eds). Scope (Scientific Committee on Problems of The Environment) 35. John Wiley, Chichester, United Kingdom.

Smith, T. M., H. H. Shugart, G. B. Bonan, J. B. Smith, and F. I. Woodward(1992), Modeling The Potential Response of Vegetation to Global Climate Change: The Ecological Consequences of Global Climate Change. *Advances in Ecological Research* 22: 93-116.

Street R. B. and S. M. Semenov(1990), Natural Terrestrial Ecosystems in Tegart, W.J. McG., G.W. Sheldon and D.C. Griffiths(eds) *Climate Change : The IPCC Impacts Assessment*, Australia Government Publish Service, Canberra.

Takahashi, K., et al.(1998), Development of Climate Change Scenarios for Impact Assessment using results of general circulation model simulations, J. of Global Environmental Engineering, Vol. 4, pp. 1-8

Takahashi, K., et al.(1998), Impacts of Climate Change on Water Resources, Crop Production and Natural Ecosystem in the Asia and Pacific Region, J. of Global Environmental Engineering, Vol. 1, pp. 91-103

UNEP/IVM(1998), Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaptation Strategies, chap. 12

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change)(1992), Convention Text, IUCC, Geneva.

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change)(1997), Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. FCCC/CP/L7/Add.1, 10 December 1997, UN, New York, NY.

VEMAP members(1995), Vegetation/Ecosystem Modeling and Analysis Project (VEMAP): Comparing Biogeography and Biogeochemistry Models in a Continental-scale Study of Terrestrial Ecosystem Responses to Climate Change and CO_2 Doubling, *Global Biogeophysical Cycles* 9: 407-437.

Wallace, J. M., and P. V. Hobbs(1977) Atmospheric Science - an Introductory Survey, Academic Press, New York, USA

Wigley, T. M. L.(1993) Balancing the carbon budget: Implications for projections of future carbon dioxide concentration change. Tellus, 45B, 409-425

Woodward, F. I.(1987), *Climate and Plant Distribution.* Cambridge Studies in Ecology. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

Yoshino, M. and H. P. Ono(1996), variation on the Plant Phenology Affected by Global Warming, In K. Omasa *et al.,*(eds), *Climate Change and Plants in East Asia*, Springer.

분석에 이용된 자료 제공 website

GCM

- The IPCC Data Distribution Centre
  http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/

환경/생태, 지자기, 중력, DEM 등

- NESDIS National Geophysical Data Center
  http://www.ngdc.noaa.gov/seg/
- The Global Land One-km Base Elevation (GLOBE) Project
  http://www.ngdc.noaa.gov/seg/topo/gltiles.shtml

Holdridge분류정보 및 문헌정보

- International Institute for Applied Systems Analysis
  http://www.iiasa.ac.at/

종합적인 정보(기상, 토양, 삼림 자료 등)

- Global Ecosystems Database
  http://www.ngdc.noaa.gov/seg/eco/cdroms/ged_iia/html/database.htm
- United Nations Environment Programme Global Resource Information Database
  http://www-cger.nies.go.jp/grid-e/index.html
- UNEP/DEWA/GRID-Geneva
  http://www.grid.unep.ch/
- EROS Data Center
  http://edcsnw3.cr.usgs.gov/ip/data.html

농업,경작

- FAO Guides / Resources Databases
  http://www.fao.org/ag/guides/resource/data.htm

해안선등 행양정보

- Rich Signell's Professional Page
  http://woodshole.er.usgs.gov/staffpages/rsignell/rsignell.html

부록 Ⅰ : 1차년도 연구결과 요약

1. 기후변화의 지구 및 한반도 생태계 영향 및 연구성과 평가

1.1. 지구차원의 영향 및 연구성과

19세기 이후 산업활동이 활발해지면서 이산화탄소(CO2) 메탄, 질산, CFC 등 열을 포획하는 온실기체의 대기중 농도가 급속히 증가하고 있다. 이에 따라 지난 100년간 지구의 평균 온도는 0.3~0.6℃ 상승하였으며, 이에 따라 해수면도 10~25cm 상승한 것으로 보고되고 있다(IPCC, 1995). 이것은 과거 이십만년 동안 지구의 평균 온도가 상승한 범위와 같은 것으로, 과거 이십만년 동안 자연적인 지구의 평균 온도보다 약 15~20배 빨리 상승한 것이다. 현재와 같은 정도의 온실가스 방출이 지속된다면 지구의 평균 기온은 2030년에는 현재보다 거의 1.0℃ 상승하게 될 것이고, 2100년에는 2℃ 상승(해수면은 49cm 상승)될 것으로 전망하고 있다.

지구의 생명체는 기온이나 토양의 습도, 습기, 강수량과 같은 환경요인에 매우 민감하게 반응하며, 외부 온도가 3℃ 상승하면 북쪽으로 250km 또는 500m고지대로 이동해야 외부 온도에 적응할 수 있다. 이러한 기후변화에 따라 지난 90년 동안 우리나라의 생물군락은 약 100~200km 북쪽으로 이동하거나 또는 300~500m 정도의 고지대로 이동하고 있는 것으로 추정된다. 더욱이 향후 우리나라의 생물군집은 지구온난화 과정에 따라 향후에도 끊임없이 이동하게 될 것이며 생물다양성은 현저하게 변화하게 될 것으로 예측되고 있다[4].

1.2. 한반도 차원의 영향 및 연구성과

그 동안 우리나라에서는 기후변화와 관련되어 연구사업이 수 차례에 걸쳐 수행되어 왔으나, IPCC의 WGII (Impact Assessment 그룹)에 참여하고 있는 전문가가 없는 상태에서 알 수 있듯이 기후변화가 생태계에 미치는 영향을 평가하기 위한 부문에 대한 연구는 거의 없는 상태이다. 환경부에서 지구온난화가 한반도에 미치는 영향 평가를 위해 '지구온난화에 따른 한반도, 동북아 및 전지구적 기후변화 추세 분석 및 예측모델(시나리오) 개발'을 향후 추진과제로 계획하고 있으나 현재까지 이에 대한 구체적인 실행계획은 마련되어 있지 않다.

2. 기후변화의 지구 및 국가 생태계 영향 저감을 위한 국제동향

4) 기후변화에 따라 나타나는 생태계의 영향 평가는 IPCC의 주요쟁점이며, IPPC의 제3차 평가보고서(안, The Third Impact Assessment, 2001년 발간 예정)에서 이에 대한 내용을 다루고 있다.

지구의 기후변화문제는 그 영향력과 예측불가능성으로 인하여 지구환경논의의 중심주제이고 이에 대한 논의가 < 표 Ⅲ-1 >과 같이 빠르게 진행되고 있다. 1988년 11월 UNEP과 WMO 주관 하에 IPCC가 설립되어 기후변화의 원인, 영향 및 대응에 관한 종합적인 연구를 진행하고 있다[5]. 1992년 6월 리우의 'UN환경개발회의'에서는 이산화탄소 등 온실가스 증가에 따른 지구온난화에 대처하기 위하여 「기후변화협약(UNFCCC, UN Framework Convention on Climate Change)」을 체결하였다.

< 부록표 Ⅰ-1 > 기후변화 관련 국제회의 연대기

연 도	회의 제목 및 내용
1972년 12월	UN 환경계획(UNEP) 설립 및 제1차 UN 환경개발회의 개최
1979년 5월	제1차 세계기후회의(WMO): 세계기후계획(WCP)
1985년 10월	온실기체의 기후변화에 대한 영향평가회의(오스트리아 Villach)
1985년	빈협약: 오존층 보호를 위한 CFCs 규제
1987년	몬트리올 의정서: 오존층 보호를 위한 CFCs 규제
1988년 11월	기후변화에 관한 정부간 패널기구(IPCC) 설립 : 실무그룹 구성 - WG I(과학적 연구), WG II(영향평가), WG III(대응방안)

< 부록표 Ⅰ-1 > 기후변화 관련 국제회의 연대기(계속)

연 도	회의 제목 및 내용
1989년 2월 ~ 1990년 6월	IPCC 회의 개최 :1차(제네바), 2차(나이로비), 3차(워싱턴), 4차(순드발)
1990년 11월	제2차 세계기후회의(제네바) - 제1차 IPCC 기후변화 과학 평가 보고서 작성 - IPCC 보고서에 근거하여 지구온난화에 대한 성명 채택
1990년 12월	UN 제 45차 총회 - 1992년 UNCED에서 기후변화협약(UNFCCC) 제정 - 사전에 협상회의(INC) 개최
1991년 2월 ~ 1992년 2월	INC 5차 개최 - 1차(워싱턴), 2차(제네바), 3차(나이로비), 4차(제네바), 5차(뉴욕)
1992년 6월	제2차 유엔환경개발회의 개최(브라질 리우) - 기후변화협약 제정
1992년	IPCC 기후변화 과학평가보고서 보충판 발간
1994년	IPCC 기후변화 과학평가보고서-Radiative forcing(복사력)
1995년 3월	기후변화협약 제 1차 당사국총회(베를린)
1995년 11월	제 2차 IPCC 과학평가보고서 작성
1996년 7월	기후변화협약 제 2 차 당사국총회(제네바)
1996년 9월	IPCC 회의(멕시코)
1997년 12월	기후변화협약 제 3 차 당사국총회(교토)
1998년 11월	기후변화협약 제 4 차 당사국총회(부에노스아이레스)
1999년 11월	기후변화협약 제 5 차 당사국총회(본)
2000년 11월(예정)	기후변화협약 제 6 차 당사국총회(헤이그)
2001년 초(예정)	IPCC 3차 보고서 발행 예정

자료: 국립환경연구원 (2000)

5) 기후변화에 대한 우려가 다자차원에서 심각하게 제기된 것은 1979년 열린 제1차 세계기후회의가 그 효시라 할 수 있다. 제1차 세계기후회의는 세계기상기구(WMO), 유엔환경계획(UNEP) 및 국제과학연맹이사회(ICSU)의 공동주관하에 개최되었으며 세계기후계획의 설치를 결의한 바 있다.

각국이 대기, 해양, 육지에 대한 관측 능력 및 데이터 교환을 강화하고, 국가보고서에 자국의 관측계획 및 프로그램을 포함토록 결정한바 있어 기후변화협약의 생태계 영향 평가 등에 대한 과학활동의 중요성이 점차 증대되고 있다.

2.1. 기후변화에 관한 정부간 패널기구(IPCC)

기후변화에 관한 정부간 패널기구(IPCC)는 1988년 11월 유엔환경계획(UNEP) 및 세계기상기구(WMO)의 공동주관으로 설립된 정부간 협의체이다. 이 기구에는 세계 2,000여명의 학자가 참여하고 있으며, 지구온난화의 원인규명, 이에 따른 사회, 경제 및 생태적인 영향과 그 대응전략을 분석하고 그 결과를 정부간 협상그룹에 제공하는 역할을 하고 있다. IPCC의 조직은 1992년 11월 총회에서 전면 개편되어 3개 실무그룹분과(Working Group: WG)로 구성되어 있다.

제1실무그룹(WG1)은 기후변화에 관한 과학적인 평가(scientific assessment) 그룹으로 기후변화에 대한 과학적 이해, 온실가스의 배출 및 흡수방법론 개발 등 과학적인 분석을 담당하고 있다. 이 그룹의 구체적인 사업은 1) 기후변화 및 기후변동성 파악, 예측가능성 및 기후변화의 과학적 평가, 2) 관측된 기후의 장기변동 평가, 3) 전지구적·지역적 기후변화와 해면수위변화 모델링과 예측의 평가, 4) 온실가스의 인위적 배출, 흡수목록의 작성 방법 개발과 더불어 각 국가별, 지역별 및 전지구적 순배출량 측정 등을 추진하고 있다.

제2실무그룹(WG2)은 영향평가(impact assessment)그룹이다. 이 그룹에서는 기후변화의 영향, 온실가스의 저감 및 적응수단에 대한 연구를 수행하고 있다. 이 그룹의 구체적인 사업은 1) 에너지, 산업, 운수, 도시문제 및 폐기물, 2) 연안지역과 도서국가, 해양 및 해양생태계 등, 3) 비관리자원과 육지생태계, 산악지역, 설빙권 등, 4) 사막화, 한발, 농업·산림·토지이용 등 분야에서 추진되고 있다. 이러한 내용은 본 과제에서 추진하고자 하는 기후변화에 따른 생태계 영향 평가 분야라 할 수 있다.

제3실무그룹(WG3)은 대응전략(response strategies)그룹이다. 이 그룹에서는 기후변화 및 대응수단의 사회 경제적인 비용과 편익의 분석, 배출시나리오의 평가 및 개발을 담당하고 있다. 이 그룹의 구체적인 사업은 1) 기후변화 및 대응하는 사회·경제적 영향에 관한 평가, 2) 온실기체 배출 시나리오의 평가 등을 추진하고 있다.

2.2. 지역차원에서의 노력 APN(Asia-Pacific Network for Global Change Research)

APN는 지구적 기후, 해양과 대륙 시스템, 그리고 상관 물리, 화학, 생물학, 사회경제학 수행에 대한 연구를 증진·활성화시키고 지지하고 있다[6]. 이 기구에서는 지구 기후변화 관련하여 3가지 주요한 연구프로그램(IGBP, WCRP, IHDP)을 현재 진행시키고 있다. 이 연구프로그램에는 ① 우선적인 연구 의제의 선택(Selection of the Priority Research Agenda), ② 기후시스템 변화와 다양성(Climate System Change and Variability), ③ 연안의 변화와 영향(Coastal Processes and Impacts), ④ 육지생태계 변화와 영향(Terrestrial Ecosystem Change and Impacts)에 관한 내용이 포함되어 있다.

2.3. 기후변화가 생태계에 미치는 영향 평가에 관한 종합분석

지구온난화의 영향연구는 지구온난화 연구의 핵심 과제로서 그 현상과 대책을 연결하는데 있어 지구온난화연구의 중요한 핵심적인 내용이다. 지역적으로 온난화 방지 및 대책과 관련되어 수립된 지구온난화 관련 연구는 지구온난화의 영향 연구 등을 비롯한 종래의 영향 평가의 방법론이나 그 응용 사례 등의 연구결과를 진전시키면서 세계적으로 주목받는 적응책이나 보다 자세하고 구체적인 정책 대안을 입안·실시되어야하며 이를 위해서는 다양한 지역적인 연구 및 영향연구로서 실시해야 할 연구분야는 점점 더 확대되고 있는 추세이다.

선진국들은 관련기관 연구개발의 진보상황 즉, 과학적 지견, 기술개발 상황, 사회정세 등을 정기적으로 규명하여 국가전략 프로그램으로서의 효율성을 재평가하는 기구를 구축하고 있다. 미국, 대통령 과학기술정책비서실에서는 “변화하는 지구환경: 특정회계연도 지구변화연구프로그램” Our changing Planet the Fly 1997 US Global Research Program(USGCRP)을 실시하고 있고, 일본의 경우는 지구과학기술심의회에서 “지구변동예측의 실현을 위하여”를 발간하고 있다. 종합계획을 수립하기 위한 지구온난화 감시, 예측, 영향평가 기술개발에 대한 외국의 연구현황을 < 부록표 2 >와 같이 종합할 수 있다.

---

6) 아태평양 지역에 관심을 집중시키고 있는 이유는 1) 아태평양 지역에서 중요한 대기 해양 자연 현상(아시나 몬순, 엘니뇨현상)들이 이 지역에서 발생하고 있으며, 2) 세계 인구의 절반 가량인 30억 인구가 밀집되고, 더욱이 경제적인 성장의 급진적인 성장을 보이고 있으며, 3) 열대우림, 사막, 다수의 산을 포함하고 있어 지구적인 환경문제를 이해하는데 중요한 지역이기 때문이다.

< 부록표 Ⅰ-2 > 종합계획을 수립하기 위한 지구온난화 감시, 예측, 영향평가 기술개발에 대한 외국의 연구현황

항 목	내 용
온실가스 감시체계	- 1958년부터 미국 스크립스해양연구소에서 하와이 마우나로아의 CO_2 배경농도 관측에서부터 시작하였고, 1974년부터 미국 NOAA/CMDL에서 SIO의 기술지원하에 온실기체의 정규관측 및 감시시스템의 구축과 평가 연구를 수행 - 일본, 1987년부터 기상청에서 온실기체의 관측을 실시
지구 온난화 예측기술	- 미국, 1993년에 클린턴 대통령이 『기후변화행동계획』을 발표하였고, 대기중 CO_2 농도 증가에 따른 기후변화를 예측, 기후변화 예측모델 완성 및 예측시스템을 구축하기 위해 기후변화에 대한 광범위한 연구를 진행 - 일본, 1990년에 지구온난화방지행동프로그램을 착수하여 지구온난화에 대한 광범위한 연구를 수행중이며 이중 기후모델에 의한 기후변화 평가 연구가 포함되어 있다.
지구 온난화로 인한 영향평가 기법 개발 기술	- 미국, 기후변화에 따른 지구환경영향 감시시스템(인공위성 감시시스템)을 구축하고 USGCRP를 중심으로 1994년부터 기후변화 영향평가를 실시, 평가결과를 이용하여 전지구적 또는 국내 환경정책 수립에 활용 - 일본, 과학기술청(STA), 국립환경연구소(NIES), 교육과학문화부를 중심으로 지구온난화에 의한 몬순기후영향, 열대림 생태조사, 에어로졸의 지구온난화와의 상관성 조사, 해양변화조사 등을 수행하고 원격탐사에 의한 국토변화 조사 시스템을 구축 - 유럽의 경우 노르웨이, 영국 등을 중심으로 수문순환 영향조사, 대기해양 상호작용 영향 평가, 생태계 영향평가, 지구온난화의 human dimensions 연구 및 보건환경영향 평가를 실시중이며, 러시아의 산림생태 변화 연구, 호주의 지구사막화 연구 및 대기질 변화 영향 평가 등을 사전 계획을 수립하여 추진 중

또한, 선진국을 중심으로 기후변화가 생태계에 미치는 영향을 분석하기 위한 다양한 모델들이 개발되고 있다. Foley 등(1996)의 기후 변화가 식생에 미치는 영향을 분석하기 위한 DGV(Dynamic Global Vegetation) 모델, Horie 등(1995)의 기후 변화가 농작물에 미치는 영향을 분석하기 위한 SIMRIW 모델, 및 Seino (1995)의 기후변화가 밭작물에 미치는 영향을 예측하기 위한 CERES-Maize 모델 및 일본의 AIM(Asian-Pacific Integrated Model) 등이 개발되어 기후변화에 따라 변화하는 생물의 성장·동향 등을 모형화한 것으로 이미 기후 변화가 식생, 산림생태계, 겨울밀의 생산성 변화 등에 영향을 미치고 있다는 것을 예측하고 있다.

앞에서 전술한 선진국가들과 비교해 볼 때 우리나라는 과학적인 감시, 예측과 생태계 영향평가의 기술개발이 매우 초보적인 단계로 뚜렷한 목표 설정 없으며 체계적·종합적인 계획도 또한 마련되어 있지 않다. 지금까지의 연구는 기후변화예측에만 초점을 맞추어 진행되어 기후변화 영향평가방법론, 온실가스 배출과 온난화의 대응책을 포함한 통합된 대책모델개발에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

3. 기후변화의 삼림생태계 영향평가모형 개발상황 및 평가

3.1. 모형개발의 배경

기후변화의 영향평가를 수행하는 목적은 기후변화에 따른 적응전략으로써 국가정책결정에 활용되도록 정책입안자 및 결정자들에게 중요한 과학적인 자료를 제공함을 그 목적으로 한다. 온난화영향연구의 목표로서는 ① 기후변화의 중요성 파악, ② 영향 위험성의 한계(범위)와 경제적인 비용 분석, 그리고 ③ 기후변화로 인한 영향의 취약한 분야나 지역 규명과 이의 적응대책 등에 대한 적절한 대응 검토가 해당된다.

지금까지 국내에서 수행되어온 기후변화 관련 연구는 과학적인 현상 또는 거시적인 관점에서 국가 경제분석의 개개 현상의 평가에 치중되어 정책적으로 활용하기가 다소 어려운 실정이다. 기후변화와 관련된 영향평가 연구는 최종적으로 기후변화에 대한 국가적응전략 및 정책수립에 활용될 수 있도록 정책 지향적인 모델을 제공하고, 이를 위해서는 자연과학과 사회과학의 유기적 결합을 필요로 한다. 결국, 기후변화와 관련된 연구는 “국가의 중장기전략”이라는 인식의 틀 내에서 일관성 있게 유지되는 것이 매우 중요하며, 이를 위해서는 국내·외 연구동향 및 환경변화의 과거 및 현재의 추세를 분석하고 한반도 역량을 고려한 분야별·단계별로 뚜렷한 목표하에서 지구온난화에 따른 영향평가 및 관련된 기술개발을 체계적으로 수행되어야 한다. 이러한 관점에서 볼 때, 지구의 기후변화가 생태계에 미치는 영향을 예측할 수 있는 정확한 모형의 개발은 우리나라에서 기후변화에 대한 적응전략 등 국가장기종합계획을 수립하는 데 주요한 도구가 될 것이다.

3.2. 기후변화로 인한 삼림분포변화예측 모형 현황 및 분석

기후변화 영향연구는 핵심과제로서 그 현상과 대책을 연결하는데 있어 핵심적인 내용이다. 지역적으로 온난화 방지 및 대책과 관련되어 수립된 지구온난화 관련 연구는 지구온난화의 영향 연구 등을 비롯한 종래의 영향 평가 방법론이나 그 응용 사례 등의 연구결과를 진전시키면서 세계적으로 주목받는 대응책이나 보다 자세하고 구체적인 정책 대안을 입안·실시되어야 한다. 이를 위해서 다양한 지역적인 연구 및 영향연구로서 실시해야 할 연구분야는 점점 더 확대되고 있는 추세이다. 이러한 측면에서 우리나라의 기초자료구축부문은 구축방법론 및 검증방법에 대한 논의가 미비하며, 이를 이용한 응용연구는 더욱 적은 실정이다.

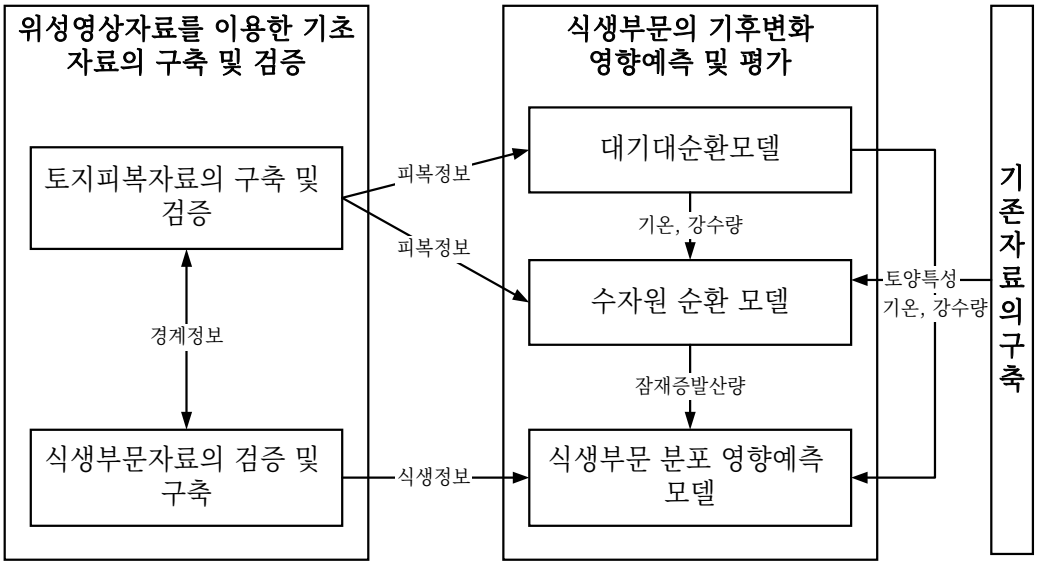
앞에서 전술한 선진국가들과 비교해 볼 때, 우리나라는 과학적인 감시, 예측과 영향평가의 기술개발이 매우 초보적인 단계로 뚜렷한 목표 설정 없으며, 체계적·종합적인 계획도 또한 마련되어 있지 않다.

우리나라의 기후변화에 의한 영향평가 연구는 한국과학기술연구원 환경연구센터가 중심이 되어, 1993년부터 기후변화시나리오, 생태계, 농림업 분야, 해양, 수문학 분야, 경제와 산업 및 에너지 분야에 대하여 영향분석을 진행하여 왔다. 그러나 지금까지 진행된 연구는 우리나라에 국한되어 분석되어 왔으며, 대기순환 모형의 결과로부터 얻어진 한반도 기후 변화 시나리오에 따라 각 분야의 개략적인 영향의 심각성 파악에 머무르고 있어 구체적인 기후변화에 의한 영향파악이 시급하다고 볼 수 있다. 또한 각 분야의 영향을 예측하는데 필요한 기초자료의 미비로 인해, 예측결과의 신뢰성이 저하되는 문제점을 가지고 있다.

특히 식생과 관련연구는 매우 미비하여 시급히 연구가 진행되어야 할 필요가 있으며, 특히 식생종과 기후자료가 통합되어 예측되는 식생기후모형은 다른 모형과 달리 광역적인 자료를 지역적 자료로 구축하여 단시간 내에 결과를 얻을 수 있다는 점에서 연구의 효율성이 높다. 이러한 배경 속에서 2차연도인 2001년에는 토지피복정보, 식생정보, RegCM 정보와 토양특성을 감안한 통합적인 지역영향평가모형을 구축해야 할 것이다.

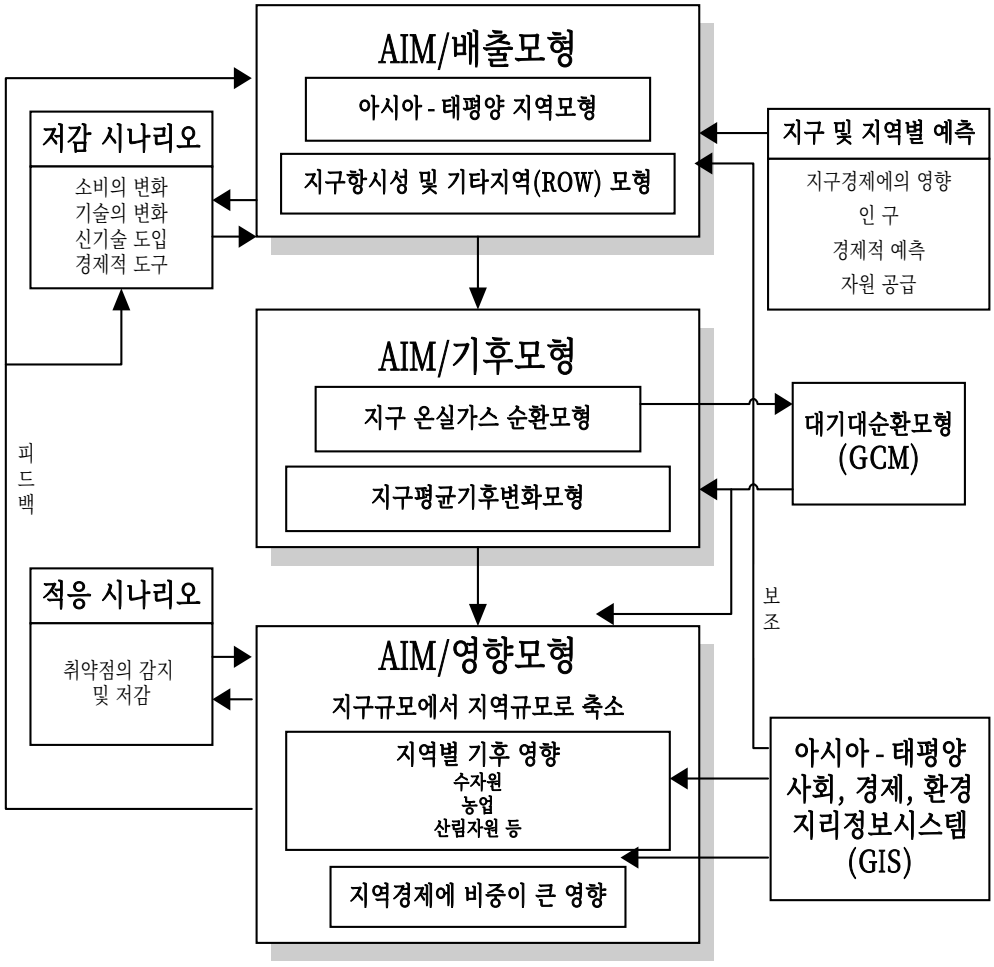
4. 기후변화에 따른 한반도 삼림분포변화 예측모형의 구조와 내용

본 연구에서 사용된 방법은 위성영상자료를 이용한 기초자료의 구축 및 검증 부문과 식생부문의 기후변화 영향예측 및 평가로 구성되며, 이들 주제간의 정보의 흐름은 다음 < 부록그림 Ⅰ-1 >과 같다.



< 부록그림 Ⅰ-1 > 연구의 개념적 흐름

본 연구에 이용되는 AIM/Imapct 모형의 3개 주요 모형과 모듈의 기본골격은 < 부록그림 Ⅰ-2 >와 같다. AIM/배출모형은 저감시나리오 및 지구 및 지역별 예측자료가 입력자료로 입력되어, 산출결과가 AIM/기후모형으로 입력된다. 여기에 GCM 결과가 입출력되며 환류하는 과정을 거쳐 목표연도의 기온 및 강수량 자료를 산출한다. 이와 같은 자료가 AIM/Impact 모형으로 입력되어 각 부문별 영향을 예측하는 과정을 거치게 된다. 영향의 예측결과는 다시 AIM/배출모형으로 입력되어 환류하는 과정을 반복적으로 거치는 통합모형이다. 이와 같이 AIM 모형은 배출모형, 기후모형, 영향모형이 유기적인 환류과정을 가지도록 설계되어 있어 예측의 신뢰성이 높으며, 적용가능성도 높아 현 시점에서 유용한 모델로 판단된다.



< 부록그림 Ⅰ-2 > AIM/Impact 기후변화영양예측 및 평가 모형의 기본 골격

자료 : AIM Project Team(1996), Technical Structure of AIM/Impact Model, AIM Interim Paper, IP-95-06, Tsukuba, Japan. pp.7.

5. 연구결과 요약 및 향후 추진방안

첫째, 기후변화에 따른 영향연구는 국제기관에 의해 주도되고 있으며, 이중 WMO와 UNEP에 의해 1988년에 설립된 IPCC에서는 기후변화에 관한 연구를 WGⅠ, WGⅡ, WGⅢ의 3가지 주제로 분류하여 수행하였다. WGⅠ에서는 기후변화 기작에 대한 과학적인 분석을 다루고 있으며, WGⅡ에서는 기후변화에 따른 영향연구를 수행하고 있고, WGⅢ에서는 기후변화의 저감방법을 연구하고 있다.

둘째, 이러한 IPCC의 연구주제들은 대부분 전지구 또는 대륙을 대상으로 한 광역연구에 초점이 맞추어져 있었으나, 최근에는 하나의 국가 차원과 그 보다 작은 지역차원으로 해상도를 높이는 방안에 대해서 연구를 진행하고 있다. 특히, 기후변화로 인한 지역차원의 영향예측과 이에 따른 적응전략은 근본적인 온실가스원인물질 저감대책과 함께 중요한 부문으로 대두되고 있다.

셋째, 우리나라의 경우 WGⅠ과 WGⅢ 연구의 경우 국가차원의 연구가 많이 진행되었으나, WGⅡ의 경우에는 연구를 위한 기초자료 및 모형의 구축이 어려워 국가차원의 연구가 미비한 실정이다. 특히, 종래의 기후변화 영향연구는 광역영향을 예측·평가함으로 인해 전 지구차원의 영향 파악에는 용이했으나, 하나의 국가 또는 그보다 작은 지역의 영향을 분석하는 데는 부족한 점이 많다. 따라서 본 연구에서는 향후 2001년부터 진행할 모형개발에 이러한 지역차원의 산림영향 예측에 필요한 기초자료를 구축·검증하고, GCM, 물 균형 모형과 산림영향모형을 통합한 기후모형을 구축하는데 연구의 방향을 설정하였다.

넷째, 기후변화에 따른 영향연구에는 매우 다양하고, 많은 자료의 통합적인 구축 및 이용이 요구되므로 본 연구에서 다루고자 하는 산림영향연구를 위해 토지피복정보, 산림정보 등의 지표자료와 RegCM, 생물기온, 연간 강수량 등의 지역기후자료 등이 구축이 필요하다. 또한 PET와 RO를 추정하는 물 균형 모형, 식생의 분포와 기후와의 연관성에 의해 구축된 Holdridge 모형 또는 기타 모형 등을 활용하여, 기후변화에 따른 산림부문의 영향을 예측하는 것으로 연구의 방향을 설정하였다.

부록 Ⅱ : IPCC SRES(Special Report Emissions Scenarios) 설명[7)]

1. 새로운 IPCC 배출 시나리오의 필요성

IPCC는 1994년 IS92 시나리오들의 평가시, 지구적 그리고 지역적 토대에서 온실가스와 SO_2의 발생에 대해 이 시나리오들이 혁신적이라 밝혔다. 그러나 6개의 IS92 시나리오에 반영되어 있는 에너지에 대한 CO_2강도(단위 에너지당 CO_2배출량)가 제한되어 있다는 것과 한 세기가 지났음에도 선진국과 개발도상국간의 수입격차에 중요한 종지부를 짓는 어떠한 시나리오도 없다는 등 많은 결점들도 발견되었다.(Parikh, 1992).

예를 들어, 1994년 IS92 시나리오 시리즈에 대한 평가(Alcamo et al., 1995)에서는 경제협력개발기구(OECD) 가입국들에서 나온 배출량이 미국에서의 대기조약(Clean Air Act) 개정안이나 2차 유럽유황규약(Second European Sulfur Protocol)과 같은 최근의 법적 변화를 반영하지 못하고 있다는 것이다. 따라서, 기후변화외의 요소들 즉, 지역적·지방적 대기질과 같은 것들은 지구온난화의 관심과는 별도로 향후 SO_2배출 제한을 상당히 고무시키게 될 것이다. 구소련의 신생독립국 및 중·동부 유럽들에 있어서의 체재개편 또한 IS92 시나리오들이 예상하지 못했던 CO_2감축과 경제활동에 막강한 영향력을 끼치고 있다. 또한, 통합평가(IA) 모델의 도입은 에너지사용, 경제, 토지이용변화간에 상호작용을 연관지어 고려할 수 있도록 하는 내부적으로 견실한 배출 시나리오를 가능하게 하였다. 어떤 통합평가는 온실가스와 SO_2 배출량의 추진력과 기후변화의 예상 영향간의 양방향 상호작용을 설명하고 있다. 여러 부문들에서 기술적 변화속도와 같은 시나리오 특성간 일관성을 반영하는 등의 진보가 이루어졌다.

이러한 발전에 기인하여 1994년 IS92 시나리오들에 대한 IPCC의 검토보고서는 만약 새로운 시나리오가 개발된다면 아래와 같은 점들을 포함시켜야 할 것이라고 결론지었다.

- ○ 배출 기준선 및 향후 non-CO_2배출량(특히 토지이용에서 배출되는)의 예측
- ○ 전 세계에 걸쳐 이루어지고 있는 경제개편에 대한 최신정보 통합
- ○ 개발도상국가와 산업국가들간의 수입격차를 좁히는 일을 포함하여 경제개발의 선로범위를 확장
- ○ 기술변화 속도 및 다양한 기술동향 검토
- ○ 무역 및 시장자유화, 민영화에 따른 예상결과 평가
- ○ UNFCCC(United Nations Framework Convention on Climate Change 1997)와 연계된 현행

7) 이 부분은 IPCC(2000), Summary for Policymakers : Emission Scenarios, A Special Report of IPCC Working Group Ⅲ의 내용을 발췌하여 정리한 것입니다.

배출량에 대한 책임 반영

그러나, SRES를 위한 분기보고서는 기후변화를 감소시키기 위해 특별히 고안된 추가조치, 수단, 정책들을 분명히 배제하고 있다.

2. 스토리라인(Storyline) 설명 및 시나리오의 정량화

미래의 배출 및 배출 추진력의 범위가 주어졌을 때, 이를 조사하기 위한 여러 가지 절대적인 대안들이 있다. SRES 시나리오들은 매우 넓은 부분을 포괄하고 있으며 절대적이고 전반적인 미래 배출가스들에 대한 내용을 다루고 있다. 연구진들은 미래 개발에 대한 대안 확인과정을 촉진시키기 위하여 스토리라인과 부합하는 시나리오들을 서술하였다. 스토리라인은 여러 가지 다양한 경제, 기술, 환경, 그리고 사회적 차원에서의 개발을 설명하고 있다. 스토리라인을 설정한 주요 이유는 다음과 같다.

- 각 시나리오 내부 및 다양한 시나리오들에 나타나는 추진력들간의 복잡한 상호 작용에 대해 보다 논리적으로 생각할 수 있도록 한다.
- 시나리오의 양적인 특성에서 벗어나서 미래 대안들을 서술적으로 묘사하여 다양한 사용자 그룹들에게 시나리오를 쉽게 설명할 수 있게 한다.
- 특히, 시나리오들이 IPCC WG-II 및 WG-III에 기여하는 분석가들에게 보다 유용하게 쓰일 수 있게 한다. 시나리오 스토리라인에서 제시되고 있는 사회적, 정책적, 기술적 설명은 기후변화에 적용하기 위한 또는 온실가스 배출량을 감소시키기 위한 정책 효과를 분석하는데 매우 중요하다.
- 세부적인 기후영향 및 완화분석에 대한 추가 가정의 지침을 제공한다. 현재로서는 어떠한 단일 모델이나 시나리오도 장기적인 배출시나리오에 대해 여러 사용자 그룹이 요구하는 넓은 범위의 정보와 데이터에 대해서 제대로 반응할 수 없기 때문이다.

연구진은 의도적으로 Occam의 Razor이론(예를 들어 사고의 경제학, Eatwell et al. 1998)을 적용했다. 그들은 기후변화를 평가하는데 적절한 토대로서 작용할 수 있으면서 정책결정자들이 미래의 일에 대해 가능성 있는 중요한 대응전략들을 검증하도록 하는 최소의 시나리오들을 추구했다. 연구진은 너무 많은 대안들에 의해 과정이 복잡해지는 것을 피하기 위해 스토리라인의 수를 4개로 하였다.

이러한 시나리오들이 광범위한 범위를 모두 다룰 수 있을까? 그러나 모두 불가능한 것은 아니지 않을까? 특히, 미래에 대한 “재해”시나리오가 없으며 새롭고 뚜렷한 기후정책을 포함하고 있는 시나리오는 하나도 없다. 연구진은 여러 종류의 화석연료의 제한성, 경제성장률, 또는 기술변화속도 등에 의해 대안적 시나리오를 고려하여 몇몇 스토리라인 내에서 민감도

측정을 수행하기로 결정하였다. 스토리라인은 다양한 사회적, 경제적, 기술적, 환경적, 그리고 정책적 측면에서의 개발을 보여주고 있다. 스토리라인의 제목은 간단하게 A1, A2, B1, B2로 했으며 스토리라인간에는 특별한 순서가 있는 것은 아니고 알파벳순과 내림차순으로 열거한 것이다.

○ A1 스토리라인 및 시나리오 군
- 빠른 경제성장, 낮은 인구성장, 그리고 보다 효율적인 신기술의 빠른 도입이 이루어질 경우를 보여주고 있다. 주요 기본주제는 지역간의 수렴성, 수용력의 증대, 개인소득의 지역적 편차가 점진적으로 감소하고 문화적·사회적 교류가 증대하는 것이다.
- A1 시나리오군은 에너지시스템의 기술적 변화방향의 차이를 설명하는 3가지 그룹으로 발달된다. 3가지 A1 그룹은 기술적으로 화석연료를 강조하는 A1FI 그룹, 비화석 연료원인 A1T 그룹, 모든 에너지원이 조화를 이루는 A1B 그룹으로 구분된다.

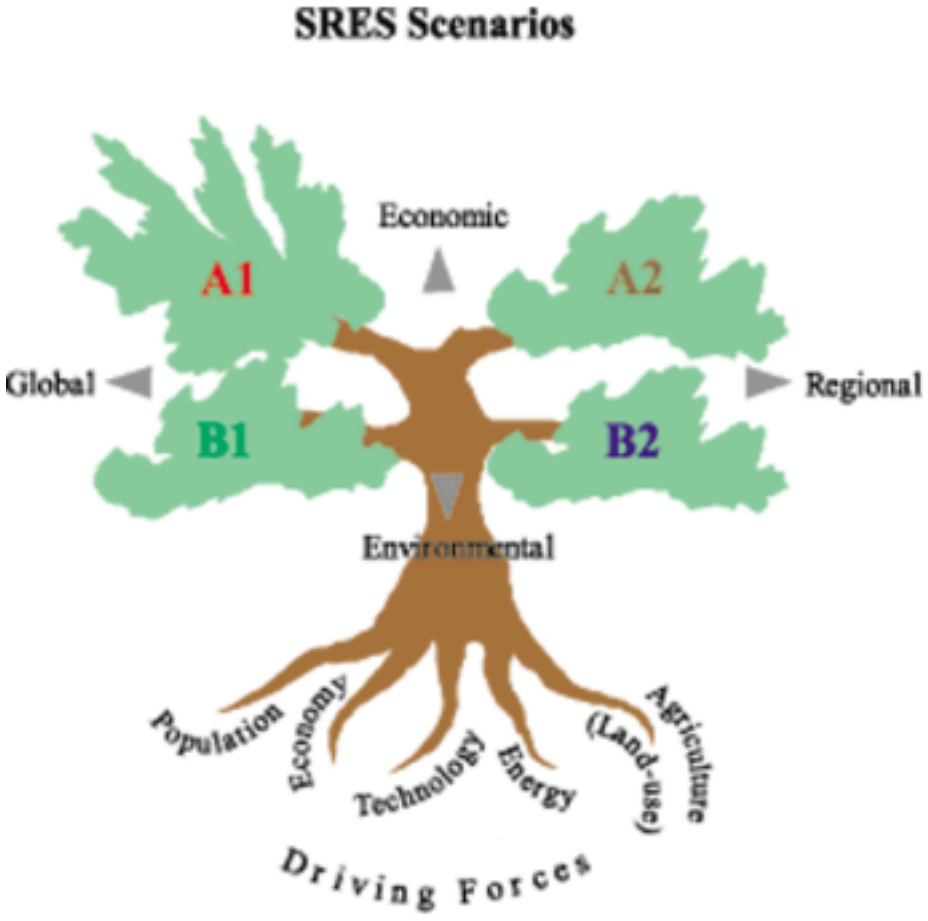
○ A2 스토리라인 및 시나리오 군
- 매우 이질적인 세계를 그리고 있다. 기본 주제는 자가신뢰 및 지역 특성의 보존이다. 지역에 걸쳐 나타나는 출생 패턴은 매우 느린 것으로 수렴되며 그 결과 높은 인구성장이 초래되는 경우이다.
- 경제개발은 주로 지역 기반으로 이루어지게 되며 일인당 경제 소득 증대 및 기술변화는 보다 단편화되어 다른 어떤 스토리라인에서보다 더욱 느린 특성을 갖게 된다.

○ B1 스토리라인 및 시나리오 군
- A1 스토리라인과 같이 낮은 인구성장을 보여주지만 경제 구조에서 물질적인 부분은 감소하고 서비스와 정보 경제로 변화하며, 청정하고 자원 효율적 기술들이 사용되는 세계를 묘사하고 있다.
- 이는 향상된 질을 갖추고 있지만 추가의 기후적 조치는 없는 사항들을 포함하면서 경제적, 사회적, 그리고 환경적 지속성에 대한 지구적 해결에 관심을 두고 있다.

○ B2 스토리라인 및 시나리오 군
- 경제적, 사회적, 환경적 지속성에 대한 지역적 해결에 관심을 두고 있는 세계를 묘사하고 있다.
- 이는 완만한 인구성장, 중간적인 경제개발, 그리고 B1 및 A1 스토리라인에서 보다는 덜 빠르고 더 다양한 기술변화를 갖춘 세계이다.
- 이 시나리오는 환경보호 및 사회적 평등을 지향하므로 지역적 수준 및 지방적 수준에 초점을 맞추고 있다.

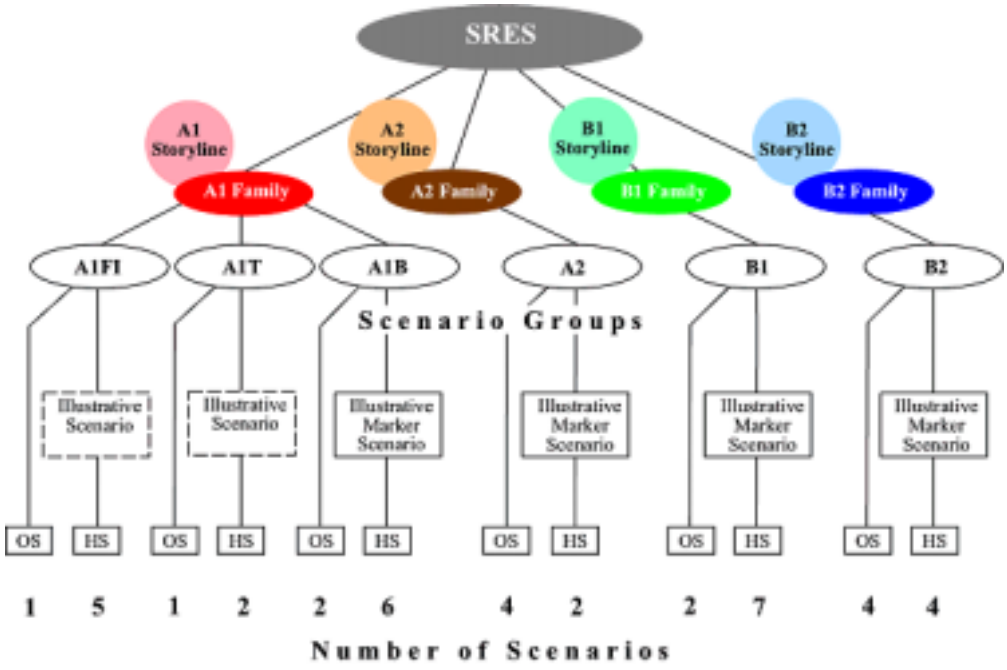
< 부록그림 Ⅱ-1 >은 SRES 시나리오를 도식적으로 나타낸 것으로 2차원 나무의 가지가 세부적인 4개의 시나리오 군(families)을 보여주고 있다. 그림에서 시나리오 군이 온실가스 배

출의 주요추진력 위에서 구축되었음을 보여준다. 4개의 시나리오 군이 서술되고 있는데, 2차원 나뭇가지로서 더 간단하게 표현하고 있다. 상하좌우 4방향은 지구적 또는 지역적 시나리오의 지향과 개발적 또는 환경적 지향을 상대적으로 나타내고 있는 것이다. 실제로 4개의 시나리오군은 주어진 많은 추진력들과 특정한 모델링 접근시 시나리오를 결정하기 위해 필요한 다른 가정들로 이루어진 고차원의 공간을 나누고 있다.



< 부록그림 Ⅱ-1 > SRES 시나리오의 모식도.

네 개의 스토리라인 각각에 대한 기본 특성 및 추진력을 결정한 후, 모델화하고 정량화하여 40개의 시나리오들을 도출했으며 각각은 스토리라인의 대안적 해설 및 정량화를 구성하고 있다.



< 부록그림 Ⅱ-2 > SRES 시나리오의 개념도

4가지 정량적인 스토리라인은 "군(Family)"이는 A1, A2, B1, B2의 4가지 그룹을 만든다. 40개 SRES시나리오 모두는 6가지 모형조직에 의해 개발되었다. 시나리오들은 4가지 군에서 나온 6가지 시나리오 그룹으로 이루어진다. A2, B1, B2에 각각 한 개의 그룹이 존재하며, 에너지 기술의 개발 특성에 따라 A1군에 3개의 그룹이 존재한다.[8)]

각 시나리오군과 그룹에서 몇몇은 지구인구와 총 세계생산, 최종 에너지의 "조화된(harmonized)" 가정을 공유하며 이러한 조화된 시나리오는 "HS"로 나타내었다. "OS"는 조화된 시나리오와 비교하여 추진력의 불확실성을 조사하는 시나리오를 의미한다. 각 범주에서 개발된 시나리오의 수는 아래에 표시되어 있다.

각 6개 시나리오 그룹에서 항상 조화된 시나리오인 예증(illustrative)시나리오가 제공된다. 4개의 예증되는 표적(illustrative marker) 시나리오는 각 시나리오군에 한 개씩 존재하며 1998 SRES 공개과정의 초안에서 사용되었으며, 2000년 보고서에 포함되었다. 두 개의 추가적인 예증 시나리오인 A1FI 과 A1T가 주어지며 모든 시나리오 그룹을 설명하는 6개의 집합이 완결되었다.

각 스토리라인은 미래 개발에 대해 명백하게 다른 방향으로 가정되어 4가지 스토리라인들은 점차 다른 방향으로 달라진다. 또한 주된 추진력에 내재하는 잠재적인 불확실성의 상당부분을 포함하는 미래들을 설명한다. 스토리라인들은 인구변화, 경제개발, 기술변화와 같은 미래의 주된 특징들의 광범위한 범위를 포함한다. 이러한 이유로, 스토리라인들의 실현가능성과 발생여부를 현재의 경제, 기술적, 사회적 경향의 단순한 외삽에만 기초한 것으로 생각해서는 안된다.

8) A1FI (화석연료중심), A1B (균형유지), A1T (비화석 연료우세)

40개의 시나리오를 만드는데 이용된 6가지 모델은 아래와 같다.

- 일본 국립환경연구소의 “아시아태평양통합모델”(AIM) ; (Morita et al., 1994)
- 미국에 있는 ICF 컨설팅에서 나온 “대기안정화구조모델”(ASF) ; (Lashof and Tirpak, 1990; Pepper et al., 1992, 1998; Sankovski et al., 2000)
- 네덜란드의 “WorldScan모델”, 독일 경제정책분석이사회(CPB)와 연계하여 사용되는 “국가공공건강 및 환경위생연구소”(RIVM)의 온실효과평가통합모델(IMAGE); (Alcamo et al., 1998; de Vries et al., 1994, 1999, 2000)
- 일본 동경공업대의 “다지역 자연 및 산업할당 접근방법”(MARIA) ; (Mori and Takahashi, 1999; Mori, 2000)
- 호주의 국제응용시스템분석연구소의 “에너지공급전략대안 및 일반환경영향모델”(MESSAGE); (Messner and Strubegger, 1995; Riahi and Roehrl, 2000)
- 미국에서의 태평양서북국가실험실(PNNL)의 “미기후평가모델”(MiniCAM) ; (Edmonds et al., 1994, 1996a, 1996b)

이러한 여섯 개의 모델은 배출시나리오 모델링 접근방법과 여러 문헌상의 통합평가(IA) 구조를 대표하고 있으며 소위 상향식과 하향식 모델을 포함하고 있다. 여섯 가지 모델은 다양한 지역적 차이의 집합체라고 할 수 있다. 집필 팀은 다양한 지구적 지역을 여섯 개 모델에 걸친 모든 지역적 집합체들에 대해 일반적인 네 개의 “거시지역”으로 그룹화하기로 결정하였다.

UNFCCC의 부록Ⅰ에 열거된 나라들 내에서 약간의 변화가 있기 때문에 정확히 일치하지는 않는다 하더라도 네 개의 거시지역은 기후변화에 대한UN구조회의(UNFCCC, 1997)에서 나라들을 유형화하고 있는 것과 대체로 일치하고 있다.

- OECD90 지역은 모델에 참여하고 있는 기준 년도인 1990년에 OECD에 속한 모든 나라들을 말하며, UNFCCC(1992)하의 부록Ⅱ에 속한 나라들을 말한다.
- REF 지역은 구소련 신생독립국과 동부유럽 국가들과 함께 경제개혁을 수행하고 있는 나라들로 구성되어 있다. 이는 UNFCCC(1992)하의 부록Ⅱ 이외의 지역들이다.
- ASIA 지역(부록Ⅰ이 아닌 지역)은 아시아의 모든 개발도상국을 의미한다.
- ALM 지역은 세계의 나머지 지역으로서 아프리카, 라틴아메리카 및 중동부에 있는 모든 개발도상국(부록Ⅰ이 아닌 지역)을 포함하고 있다.

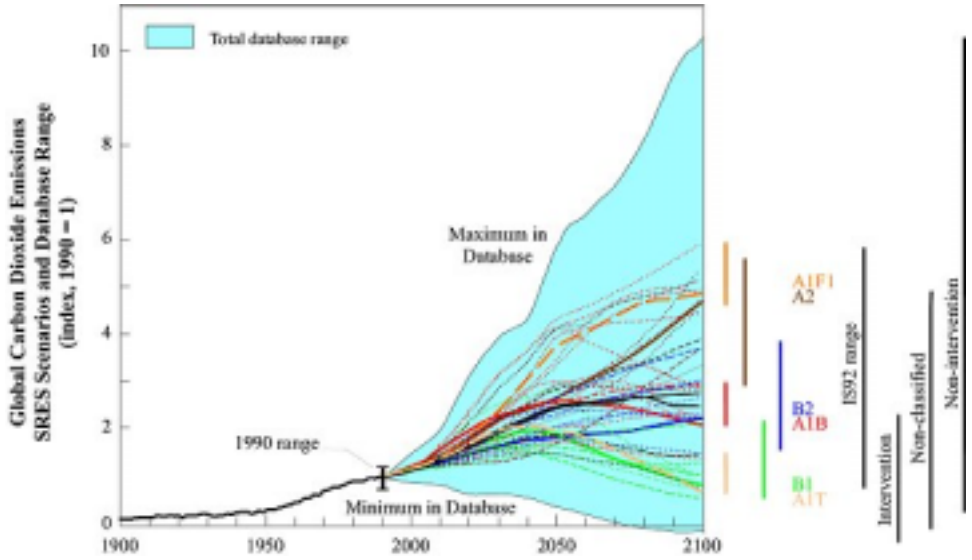
다시 말하면, 모든 ASIA 와 ALM 지역이 개발도상국가에 상응하고 있다면 OECD90과 REF 지역은 선진국에 대응되는 것이다. OECD90과 REF 지역들은 기후변화에 대한 구조회의에서 부록Ⅰ에 있는 나라들과 부합되며, ASIA와 ALM 지역들은 부록Ⅰ에 속하지 않은 나라들에 부합된다.

3. SRES 배출 시나리오의 범위와 의미

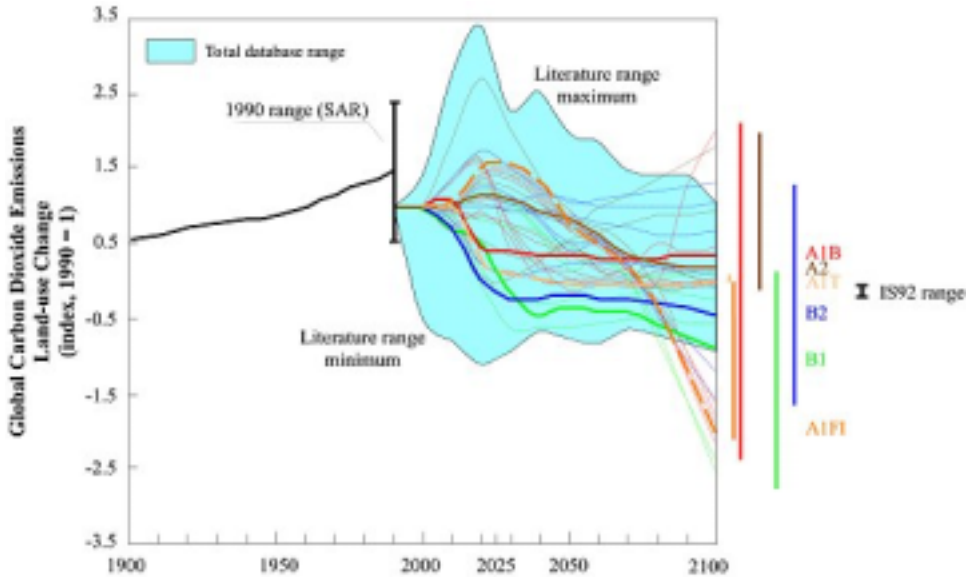
40가지 종류의 SRES 시나리오는 스토리라인과 일치하는 온실가스와 SO_2배출 의 전체 범위를 포함하며 SRES 데이터베이스에 기록되어있는 문헌들의 연구로부터 나온 추진력의 잠재적인 범위를 포함한다.

4가지 표적(Marker) 시나리오들은 4개 시나리오군의 특성을 나타내고 있으며 시나리오들의 전체 집합을 채우는 배출과 추진력의 대부분의 범위를 공동으로 포착한다.

< 부록그림 Ⅱ-3 >은 4개 사나리오군의 배출범위와 문헌에서 찾을 수 있는 시나리오의 분포에서 가장 극단적인 시나리오를 제외한 백분위수 5번째에서 95번째까지를 나타내었다.



(a) 1900년에서 1990년까지 에너지, 산업에 관련한 지구 CO_2 배출
(1990년의 상태를 1로 함)



(b) 1900년에서 1990년까지 토지이용 변화와 관련한 CO_2 배출

(1990년의 상태를 1로 함)

< 부록그림 Ⅱ-3 > 1990년에서 2100년까지 40개 SERS 시나리오

더욱 중요한 것은 4개 시나리오군이 이 분포에서 상당히 큰 부분을 차지한다는 것이며 이는 추진력의 비슷한 정량화는 미래 배출이 광범위한 범위로 나타날 수 있음을 암시한다. 더욱 자세히 설명하면, 주된 추진력들의 주어진 결합은 미래 배출 경향을 한 가지로 표현하기에 불충분하며, 많은 불확실성을 내포한다. 또한 각 시나리오군들이 문헌들의 주요한 범위를 포함한다는 사실은 4가지 군의 배출 범위에서 중복 범위를 발생하게 한다. 이것은 주어진 미래 배출 수준은 추진력들의 매우 다른 조합에서 발생된다는 것을 암시한다. 이 결과는 기후변화 영향 평가와 가능한 완화, 적응전략에 기본적인 중요성이다. A1과 B2 시나리오군의 배출경로는 이러한 의미를 가장 잘 설명할 것이다.

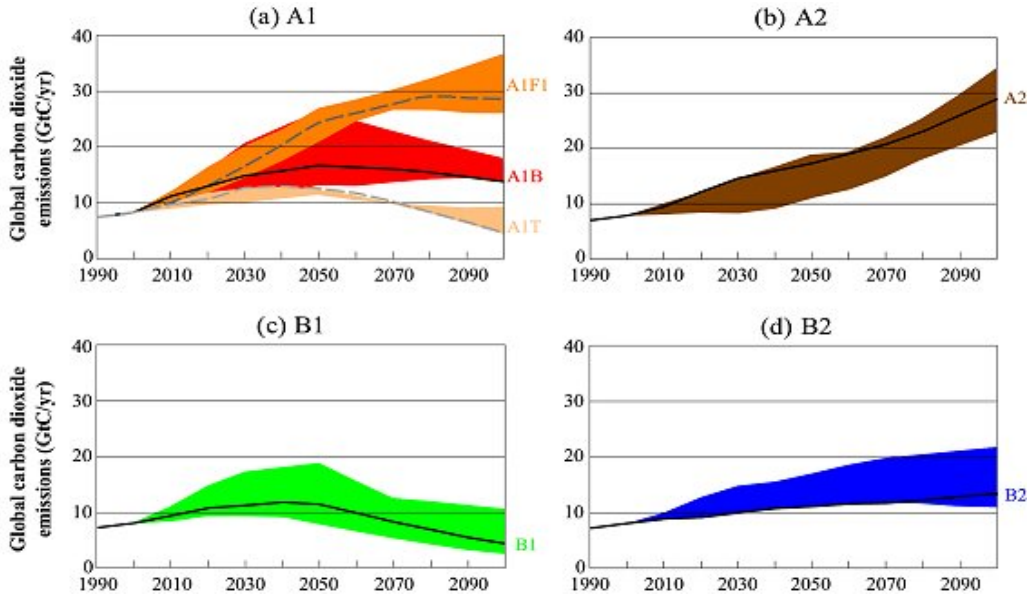
점선의 시간 경로는 개개의 SERS 시나리오를 나타내며 푸른색으로 나타나는 면적은 SRES 데이터베이스에 기록된 시나리오의 범위를 나타낸다. 시나리오들은 4가지 시나리오군에서 6개 그룹으로 분류하여 나타내었다. 6가지 예증(illustrative) 시나리오의 색깔 있는 수직 막대 그래프는 2100년의 배출 범위를 나타낸다.

< 부록그림 Ⅱ-3 >의 (a) 오른편에 있는 4개의 검은색 막대는 IS92시나리오의 2100년 배출범위를 나타낸 것과 SRES 데이터베이스에서 나타나는 문헌상의 시나리오들의 3가지 범위를 나타낸 것이다. 이 3가지 범위들은 몇 개의 추가적인 기후 시작 조건을 포함하는 경우(“intervention” 시나리오)와 그렇지 않는 경우(“non-intervention”), 어떠한 범주에도 포함되지 않는 경우(“non-classified”)로 지정된다. 이러한 분류는 데이터베이스 내의 시나리오에 대한 주관적 평가에 기초하며 단지 에너지와 산업의 CO_2 배출만을 대상으로 한 것이다.

A1 시나리오 군은 가장 뚜렷하게 에너지 시스템의 변동을 조사한 것으로 < 부록그림 Ⅱ-3 >에서 보여지는 시나리오의 가장 많은 부분을 차지한다. (10~95번째 백분위)

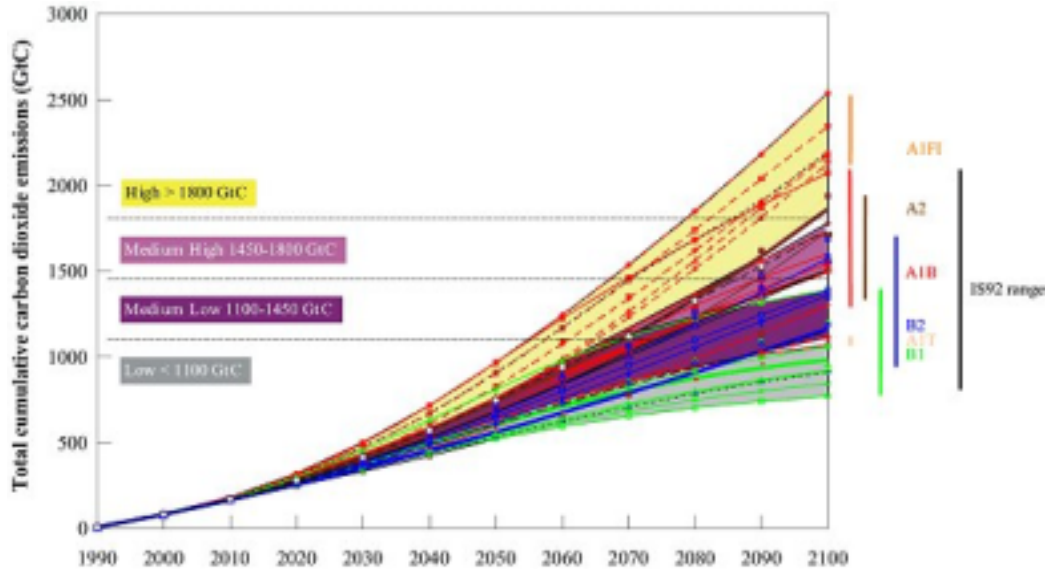
A1표적 (A1B) 시나리오는 미래의 에너지가 특정한 한가지 에너지원에 편중되지 않고 혼

합되고 균형을 유지하는 구조를 나타낸다. A1 시나리오군은 미래 에너지 시스템에서 다른 특별한 구조들을 조사하는 다른 그룹들의 시나리오를 포함한다. 탄소 집중적인 개발에서 A1 군의 배출 범위 대부분을 포함하는 두 가지 예증 시나리오로 나타나는 높은 탈탄소 시스템으로 변화한다. 그러나 모든 그룹들은 주된 추진력에 관해 동일한 가정을 가진다. 이것은 서로 다른 구조를 가지는 에너지 시스템은 인구, 경제활동, 에너지 소비등급과 같은 주 추진력의 조합으로 생성될 수 있는 미래 배출량 변동에서 기본적으로 같은 변동량이 나타나게 한다. 탄소 집중적인 에너지원에서 저탄소 혹은 탄소를 이용하지 않는 에너지원으로 이동하는 탈탄소 에너지 시스템은 다른 추진력과 같이 미래 배출경로를 결정하는데 동일한 중요성을 가진다. 지속적인 탈탄소는 새로운 기술의 개발과 성공적인 확산을 필요로 한다. 이와 같이 다가오는 10년동안 새로운 기술에 대한 투자는 인구증가, 경제발전, 에너지소비등급이 취하는 바와 같이 미래 배출에 대한 동일한 절차를 가져야 한다.

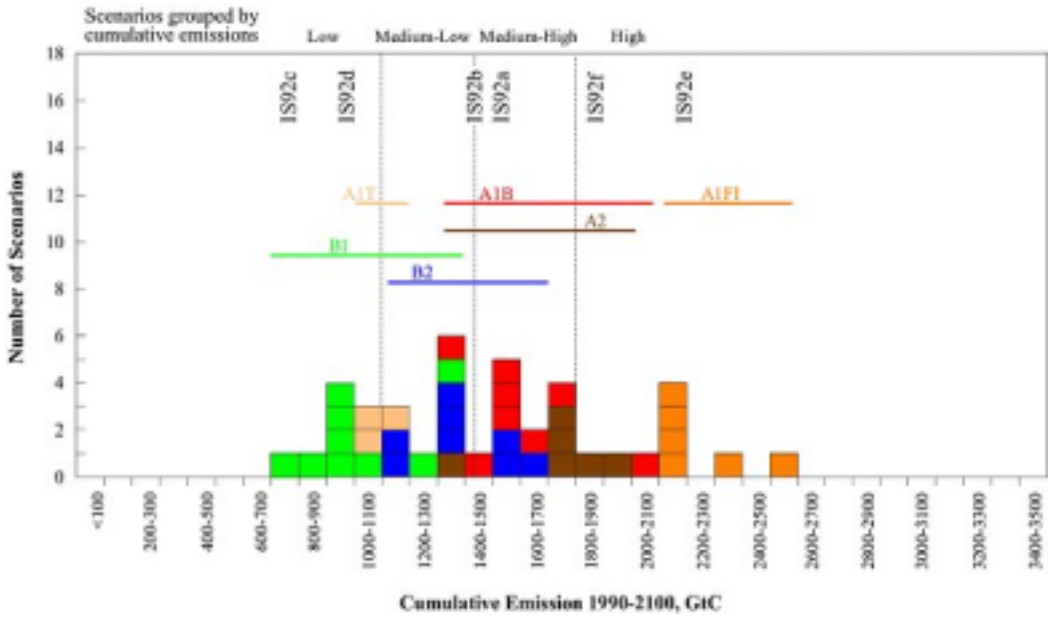


< 부록그림 Ⅱ-4 > 모든 배출원(에너지, 산업, 토지이용)으로부터 생산되는 지구의 CO_2 연간 총배출량(gigatonnes of carbon (GtC/yr))

< 부록그림 Ⅱ-4 >에서 40개의 SRES 시나리오는 4개 시나리오군(A1, A2, B1, and B2), 총 6개 시나리오그룹으로 나타난다. 색칠된 지역은 조화된 시나리오와 비조화 시나리오의 범위를 나타내며 6개의 시나리오그룹에 대해 예증 시나리오가 제공된다. 실선은 4개의 예증 표적 시나리오(A1, A2, B1, B2)와 점선은 A1FI 예증 시나리오와 A1T 예증 시나리오를 나타낸다.



(a) 지구의 누적 CO_2 배출량(GtC)



(b) 시나리오 그룹별 누적 CO_2 배출량

< 부록그림 Ⅱ-5 > 지구 누적 CO_2 배출량(GtC)과 시나리오 그룹별 누적 CO_2 배출량의 히스토그램

< 부록그림 Ⅱ-5 >에서 시나리오들은 4가지 누적 배출량 범주로 그룹화되어 저위, 중저위, 중고위, 고위 배출량으로 나타난다. 각 범주는 한 개의 예증 표적시나리오와 비슷한 누적 배출량을 보이는 다른 시나리오들을 포함한다. 이러한 범주화는 다른 추진력을 가진 시나리오들을 비교할 수 있게 한다. IS92의 누적 배출량도 표시되어있다.

4. SRES 용어 정리

○ 모델(Model)
: 관련된 시스템 변수들을 정량화 할 수 있는 시스템의 정형화 된 표현

○ 스토리라인(Storyline)
: 주된 시나리오 특성과 주요한 추진력과 시나리오 역학과의 관계에 초점을 맞추어 시나리오(군)을 서술적으로 묘사하는 것

○ 시나리오(Scenario)
: 명확한 논리와 정량화된 스토리라인에 기초한 잠재적인 미래상황 설명

○ 군(Family)
: 유사한 인구통계와 사회적, 경제적, 기술적 변화 스토리라인을 가지는 시나리오들. A1, A2, B1, B2의 4 종류의 시나리오군으로 이루어 짐

○ 그룹(Group)
: 스토리라인의 변동을 반영하는 한 개의 시나리오군 내의 시나리오들 A1 시나리오군은 미래 에너지시스템의 구조에 따라 A1T, A1C, A1G, A1B로 나뉜다. 정책 입안자를 위한 요약에서 A1C와 A1G는 화석연료에 집중한 시나리오로 합쳐서 A1FI 시나리오 그룹으로 표시하여 A1 시나리오군의 그룹수를 3가지로 줄여 표현한다. 나머지 3가지 시나리오군들은 각각 한 개의 시나리오 그룹을 가진다.

○ 범주(Category)
: 시나리오들은 1990년에서 2100년까지의 누적 CO_2 배출량에 따라 저위(low), 중저위(medium-low), 중고위(medium-high), 고위(high) 배출의 4가지 범주로 묶인다. 각 범주는 유사한 누적 배출량을 가지지만 다른 추진력으로 이루어지는 시나리오들을 포함한다.

○ 표적(Marker)
: 주어진 시나리오군을 대표하기 위해 SRES 웹사이트에 공포된 처음의 시나리오, 표적(marker)은 시나리오들의 중간이나 평균을 의미하는 것은 아니다.

○ 예증(Illustrative)
: 정책입안자들을 위한 요약보고서에서, 6개의 시나리오 그룹에서 각 그룹의 실례가 되는 시나리오(A1G와 A1C를 A1FI 그룹으로 합함). 이들은 4개의 개정된 “시나리오 표적(scenario markers)”(시나리오 그룹: A1B, A2, B1, B2)과 2개의 추가적인 예증 시나리오를 가진다.(시나리오그룹: A1FI, AIT)

○ 조화된(Harmonized)
: 시나리오군내에서 조화된(harmonized) 시나리오란, 「표적 시나리오의 최종에너지 소비량의 10%이내, GDP의 10%내에 있으며 표적 시나리오를 위해 특화된 인구 추정치의 5%내에 있다」는 세계인구 및 GDP에 대한 일반적 가정을 공유하고 있다.

○ 표준화된(Standardized)
: 1990년과 2000년의 배출량이 동일한 값을 가지도록 지수화된다.

○ 그 외 시나리오(Other scenarios)
: 조화되지 않은 시나리오들

부록 Ⅲ : BIOME3 모델 개요

BIOME3(Alex Haxe et al., 1996)은 지금까지의 개별적으로 개발이 추진될 수 있는 두종류의 프로세스모델, ①잠재적인 삼림의 분포를 기후, 토양 등과 연관시켜 예측하는 모델(Biogeography model : 생물지리모델)과, ②부여되었던 삼림분포와 생태계 내에서의 물질순환 등을 계산하기 위한 모델(Biogeochemistry model : 생물지구과학 모델)을 융합시키는 것을 목적으로 개발된 모델이다. 지구온난화 등의 기후변화가 생태계에 미치는 영향을 예측할 경우, 그 양자를 고려한 모델이 필요하게 될 것이다.

1. 모델 구성 요소

BIOME3에서는 각각의 타입에 Coupled carbon and water flux model(C. Prentice, 1996)을 사용하여 군락의 광합성량을 계산한다. 광합성은 APAR (Absorbed photosynthesis active radiation), 기후, 대기중의 CO_2농도, 일장, 군락 전도성(conductance)의 계수로서 계산된다. 임관전도성은 잠재광합성속도와 water fracas을 취합시켜 물 스트레스의 계수에서 구할 수 있다. 물 스트레스는 임관전도성의 감소를 통하여 광합성을 감소시키는 것을 생각할 수 있으나 이 메카니즘은 모델가운데에서 명확하게는 사용되지 않는다.

광합성은 Collatz et al(1991)에 의해 간소화된 Fraquhar 광합성 모델을 기초로 하고 있다. 그러나 Rubisco Capacity(Vm)을 사용하는 대신에 어떤 알고리즘을 사용하여 월별 최대(물 stress를 받지 않는 상태)의 광합성을 부여한 Vm의 값을 예측하고 있다. 이 Alcoholism은 나트륨 함량과 입의 Rubisco 활성은 계절과 순광합성을 최대로 한 임관의 위치에 의해 변화한다는 가정을 기초로 성립하며, 여기에서 입의 나트륨 함량은 명확히 모델화되지는 않지만 최적화는 직접, 입의 Rubisco활성의 값에 있어서 실행되고 있다. 이 최적화는 총 광합성의 최대속도와 입의 호흡속도는 광합성 효소의 활발화와 함께 증가한다는 사실에 기초하고 있다.

(1) 광합성량

광합성은 APAR, 기온, CO_2 농도, 일중시간, 군락전도성의 계수이다. APAR은 Net PAR에 FPAR을 제곱승하여 구한다.

(2) 식물기능유형(Plant functional types)

Plant functional types(PFT)은 식물의 기능유형이며 세계의 생태계는 하나 또는 얼마의 주요한 식물의 기능타입에 의해 분류되는 작은 BIOME의 셋트로 나뉘며, 환경조건(물리적인 제약, 경합)에 의해 주요한 PFT의 분포가 지배되고 있다.

BIOME3 에서는 제약조건에 의해 PFT의 편성(subset)할까를 선택하여, 그 편성 가운데서 어느 PFT가 우선적인 것인가를 계산해 간다. BIOME3에서는 이 기능타입에서 생육가능한 장소를 선정하고 있다. 이 PFT에서는 7가지의 목본과 2가지의 초본이 생리학, Ecology, 뿌리의 깊이의 차이마다에 의해 모델내에서 정의되고 있다. 초본의 뿌리는 토양의 2층 상단으로부터만 물을 흡수할 수 있다. 목본은 양방향의 층으로부터 물을 흡수할 수 있다. 또한, 상록침엽수는 엽령에 따라 광합성속도가 낮아진다. 침업수의 최대광합성속도는 일년에 30-50% 낮아진다. 그러나 고엽은 임관 내부의 비교적 광이 약한 환경이기 때문에 임관전체의 광합성은 그다지 저하하지 않는다. 그러나 여기에서는 그 저하가 단지 침엽수에서 나타나는 현상이라던가 상록침엽수의 특징때문 만은 아니며, 월동을 하는 것에도 관련되어 있다고 판정되고 있다.

여러 가지의 PFT의 퓌노로지 상록, Summer green, 우림 가운데 하나이다. 상록에서 엽면적은 년간 일정하다고 판정되고 있다. Summer green, 우림은 동장(冬場)에서는 잎이 떨어지고 유면상태이며, 기온이 5℃를 넘고 생장을 시작하여 최대치에 도달하기까지 생장한다.

(3) C3/C4 의 선택

초본은 광합성의 경로에 의해 C3 또는 C4에 분류된다. 목본은 C3밖에 없다. C4의 초본은 C3보다도 전도성(conductance)가 낮고 아직은 광합성속도가 높다. 그들의 특징에 의해 C4은 경합에 있어서 우위(優位)에 있다. 더구나 물 stress도 C3와 C4의 밸런스에 영향을 준다.

모델에서는 C4와 C3의 선택은 월마다 이뤄지게 하기 위하여 C4, C3의 어느쪽이 주요한 것인가도 계절별로 바꾼다. 모델은 많은 초본의 토지에서 나타나는 것과 같은 중정도의 물 stress를 토대로 C3과 C4의 경합을 시물레이션 한다. 물에 제한이 있는 경우 WUE(Water Use Effeciecy)는 물 stress가 없는 경우보다도 광합성 속도가 좋은 척도가 된다. 따라서 물 stress가 있는 경우가 WUE는 경합에 대하여 보다 설명하는 것이 가능하다. 모델은 보다 높은 WUE를 달성할수 있는 타입의 초본을 선택한다. 선택의 역치는 정도에서 결정되며 주위의 CO_2정도가 340μmol의 경우, 그 온도(월평균기온)은 15℃가 된다. 또한 주위의 CO_2농도가 증가함에 따라 C3의 쪽이 CO_2농가가 상승하는 것과 C4보다도 광합성속도의 증가율이 크기 때문에 C3과 C4의 광합성속도가 역전하는 온도는 높아진다.

(4) 엽면적과 NPP의 예측

BIOME3 의 기본은 엽면적을 수분과 탄소제한의 계수로서 계산하는 것이다. 지금까지 이용가능한 수분량으로부터 최적한 엽면적을 추정하는 접근이 여러 가지가 행해져 왔다. 그들은 수제한을 토대로 최대의 엽면적을 획득하는 식의 알고리즘이었다(Neilson, 1995).

그러나 그것에서는 증대되었던 엽면적이 정도의 증산을 초래하여 결과적으로 바이오매스가 감소하여 활력이 없게된다. 결국, 엽면적의 추전은 광의 흡수와 증산이 문제가 된다. 거지에서 NPP를 척도로서 사용하고 최적한 NPP를 달성한 엽면적을 추정하는 방법이 기대된다고 말한다.

어느 엽면적을 토대로 NPP는 다양한 요소를 갖고있지 않으면 안된다. 이렇게 진행된 일은 NPP의 엽면적이 수공급이외의 요소로 제한된 환경에서는 중요하게 된다. 이러한 환경(예를들면 고도)에서는 엽면적이 크고 식물전체의 탄소의 할당에 제한이 있다.

여기에서 년간 낙엽 Lf를 흡수된 할당의 최소로 판정하고 혹 NPP<Lf가 되는 경우에는 엽면적은 유지되지 않았다. 물의 제한이 없는 경우, 그 판정을 토대로 최대치를 엽면적의 최대치로 하였다. 이 논리의 기본은 어느 격자에 잠재적으로 존재하는 PFT의 적절한 NPP를 계산하는 것이다. NPP는 어느 포괄적인 범위의 엽면적에 관하여 계산된다.

최대의 NPP를 부여하고 즉 여기까지 말할 수 있었던 제한을 충분히 포함하는 것이 어느 PFT의 엽면적이다.

(5) 우선 PFT선택

어느 격자에 있어서 어느 PFT의 NPP와 다른 PFT를 비교하고, 더욱이 목본과 초본의 경합을 생각한다. 최종적으로는 가장 높은 NPP를 갖는 PFT가 그 격자의 PFT가 된다. 사바나에 있어서 목본과 초본의 경합은 먼저 이용가능한 물에 의해 결정된다. 그 외 중요한 요소로서는 물리적인 차이, 화재에 의한 재해, 광에 의한 경합 등이다. 시뮬레이션의 결과로 얻어진 NPP는 수질원의 영향, 물리적인 차이를 포함하고 있어도 화재에 의한 재해, 광의 경합에 관해서는 논의하지 않는다.

습윤한 환경에서는 수목은 닫혀진 계를 만드는 경우가 많으며, 광경합의 결과, 초본은 존재하기 어렵다. 더욱이 습한 환경에서는 건조한 환경보다도 화재도 일어나기 어렵고, 화재가 많으면 초본이 존재하기 쉽다. 그들의 기작에 의해 습윤한 환경에서는 초본은 존재하지 않고 목본이 존재하는 경우가 많다. 화재와 광은 BIOME에서는 기계적으로는 초본이 존재하지 목본이 존재하는 것이 많지 않다. 목본의 이용가능한 수분이 75%(0%일 경우는 수분이 고갈되고 있다. 100%일 경우는 임계(臨界))이상의 경우, 또한 년간강수량이 2200mm이상일 경우는 초본은 존재하지 않는다.

이 수분규칙에서도 초본이 제거되지 않을 경우는, 가장 높은 NPP를 갖으며 PFT가 우선적으로 예측된다. 이 경합의 알고리즘은 목본이 우선(Woody>Grass)적일까 그 반대일까를 구별하기 위하여 사용되었다. 이전의 모델보다도 이 과정을 간소화하여 계산에 드는 비용을 절약하고 있다.

2. 시뮬레이션의 흐름

본 모델에서는 먼저 초본·목본의 종별이나 입의 형태에 의한 패놀로지(상록수·낙엽수), 광합성정도(C3·C4) 등, 식물생리학적 프로세스에서 영향을 미치는 특성을 고려하여 식물기능타입 PFT를 사전에 작성하며, 생리생태학적 견지에서 최한월기온과 최저기온의 두가지의 온도역치를 기초로 그 장소에 생식할 수 있는 PFT를 얼마일까 선택하여 나타내는 SUBSET를 작성한다. 다음으로 그 SUBSET 가운데의 각 PFT에 관하여 여러 가지의 페놀로지를 고려하면서 LAI를 최대화시키는 식으로 NPP를 SUB모델인 Coupled carbon and water flux model에 의해 계산한다. 이 경우 토양중의 이용가능한 수분과 증발에 드는 비용을 계산한다. 이렇게 계산된 각 PFT의 NPP를 SUBSET 속에서 비교하여 가장 큰 NPP를 얻은 PFT를 우선 PFT로 판정한다. 이 우선 PFT와 그 LAI와 NPP를 기초로 최종적인 삼림이 결정된다.

부록 Ⅳ : 우리나라의 삼림식물대[9)]

우리나라는 동경 131°52‘ 22“에서 124°11‘ 0”, 북위 33°06‘ 40“에서 43°0‘39” 사이에 위치한 반도로서 편마암과 화강암으로 되어 있지만 결정편암 및 고생층이 그 사이에 있고 곳에 따라 현무암・제3기층 중생층이 산재하고 있다. 화강암지대의 지면은 흰빛이 돌고 편마암지대의 지면은 갈색이 돈다.

북쪽에는 장백산맥이 동북에서 서남으로 향하고, 그 한쪽은 동해안을 따라 남하하면서 함경산맥과 태백산맥으로 되었다. 낭림산맥이 북부지역을 동서로 갈라놓고 여기에서 강남산맥과 묘향산맥이 서남으로 향한다. 마식령산맥이 태백산맥을 가로막고 서남으로 비스듬히 향하면서 한반도를 남북으로 갈라놓으며 광주산맥과의 사이에 추가령 지지대를 형성한다. 광주산맥과 나란히 차령산맥・소백산맥이 서남으로 향하고 서쪽 끝에 노령산맥이 남쪽으로 흐른다.

강우량은 700～1,300mm이고 남쪽으로 갈수록 많아지며, 연평균 기온은 남부 14℃, 중부 10℃, 북부 3～4℃이며 난대에서 한 대에 걸친 식물대가 형성된다

1. 난 대

난대(warm temperate zone)는 연평균 기온이 14℃이상 되는 지역으로서 동쪽의 북위 35°30‘과 서쪽의 35°를 연결하는 선의 남쪽이 이에 속하는데, 제주도의 경우 500m 이하지역, 울릉도의 경우 600m 이하지역이 이에 속한다. 이 지역은 한랭지수가 -10℃이하이고, 온난지수가 85～180℃이다.

이 지역에서는 가시나무・까마귀쪽나무・감탕나무・개가시・개산초나무・검은재나무・겨울딸기・광나무・둥근광나무・구실잣밤나무・좀꽝꽝나무・나도은조롱・남오미자・녹나무・녹보리똥・다정큼나무・둥근잎다정큼・긴잎다정큼・담팔수・돈나무・동백나무・흰동백・동백나무겨우살이・마삭줄・민마삭줄・털마삭줄・만년콩・먼나무・멀꿀・모람・왕모람・모새나무・무자나무・백량금・왕백량금・백서향・백화등・보리밥나무・보리장나무・붉가시나무・개붉가시나무・붓순마무・비쭈기나무・사철나무・무룬나무・사스레피나무・떡사스레피・섬사스레피・산유자나무・새덕이・산호수・생달나무・센달나무・소귀나무・송악・수정목・순비기나무・식나무・아왜나무・영주치자・왕볼레나무・우묵사스레피・육박나무・자금우・제주광나무・조록나무・넓은잎조록나무・종가시나무・민종가시・죽절초・죽사철나무・참가시나무・넓은잎참가시나무・차나무・참나무겨유살이・참식나무・초령목・큰보리장나무・팔손이・함박이・호랑

9) 이 자료는 “이창복(1988), 신고 수목학, 향문사“에서 발췌한 내용임

가시나무・호자나무・황칠나무・회양목・섬회양목・후박나무・왕후박나무・후추등・후피향나무 등의 상록활엽수가 자라고 있다. 인위적인 파괴로 인하여 자연식생은 대부분 파괴되고 이차식생으로 구성되며, 소나무와 곰솔이 주체를 이루고 있다.

주도・가막섬・미조리 및 진도의 일부에 상록활엽수림이 보존되어 있지만, 미조리와 진도의 것은 이미 파괴되어 대표적인 온대낙엽수림으로 변하였다. 그 밖에 일반지역에 있어서는 상록수가 군데군데 자랄 뿐이고, 온대수종이 남하하여 대부분을 차지하고 있다.

초본류로는 솔잎란과 파초일엽 및 한란이 제주도 남쪽에서 자라고 있으며, 문주란이 제주도 북쪽 해안에서 자라고 있다.

2. 온 대(낙엽활엽수대, 참나무대)

2.1. 남부(개서어나무대)

이 지대는 동쪽의 영일만과 서쪽의 태안반도를 연결하는 선의 이남에서 난대 북부까지로서 동쪽에서 해안을 따라 강릉까지, 그리고 태백산맥과 소백산맥을 따라 북쪽 계통이 깊숙이 남쪽의 지리산과 무등산까지 내려온다. 온량지수는 100℃이상이다.

이 지역에서는 대나무가 자라며, 조계산의 털조장나무, 변산지역의 팥꽃나무・호랑가시나무 및 꽝꽝나무, 미선나무(괴산)・망개나무・이팝나무・개서어나무・푸조나무・감태나무・이나무・굴거리나무・산철쭉・꽃싸리・나도밤나무・합다리나무・정금나무 등이 자라고, 해안에서는 곰솔이 자라고 있다.
초본류로는 금털고사리, 진도의 금새우난・애기장대, 백양산의 백양꽃 등이 있다.2.2. 중부(서어나무대, 졸참나무대)

이 지대는 평해와 신의주를 연결하는 선의 서쪽에서 남부까지로서 광주산맥과 차령산맥 사이에서 동쪽으로 들어가고, 국경지대에서는 서쪽으로 밀려 내려오며, 온대 남부에 깊숙이 침투한 지리산・가야산・무등산 등의 높은 산악지대가 이에 포함된다. 온량지수는 85~100℃이다.

동쪽에는 태백산맥이 남북으로 향하므로 해안식물이 자라고 있는 곳이 적지만, 서쪽에는 넓은 갯벌이 있어 남쪽에서부터 북쪽에 이르기까지 해안식물이 많이 자라고 있다. 순비기나무・해당화・곰솔・소사나무 등의 목본류와 통보리사초・도깨비사초・갯완두・호비수리・왕잔디・갯잔디・나문재・칠면초・퉁퉁마디 등의 초본류가 이 지역에서 자라고 있다.

북쪽에는 왕느릅나무・돌뽕나무・서어나무・때죽나무・참나무류 등이 자라고, 남쪽에는 왕버들・서어나무・개수양버들・산초나무・개산초나무 등이 자라는데, 전체적으로는 측백나무・참나무류・버드나무・고로쇠나무・꼬리조팝나무・장구밥나무・몽고뽕나무・나도국수나무・돌단풍・깽깽이풀・산딸나무・비술나무・개나리 등이 자라고, 북쪽으로 갈수록 만리화・비

술나무·*Acer* 등이 많이 자란다.

초본류로는 춘란·골무꽃·마타리·큰구절초·분취·싸리나무·큰엉겅퀴·광릉갈퀴·억새류·진퍼리잔대·송이풀류·지모 등이 있다.

2.3. 북부(비술대나무)

이 지대는 평해와 신의주를 연결하는 선의 동북부 종에서 북부 산악지대를 제외한 곳으로 태백산맥과 여기에서 서남방으로 갈라지는 산맥을 걸쳐 남쪽으로 내려오며, 함경산맥의 동남부 해안지대와 마식령산맥과 낭림산맥 서쪽의 산맥을 타고 서쪽으로 뻗어 있다. 온량지수는 90℃ 이하이다.

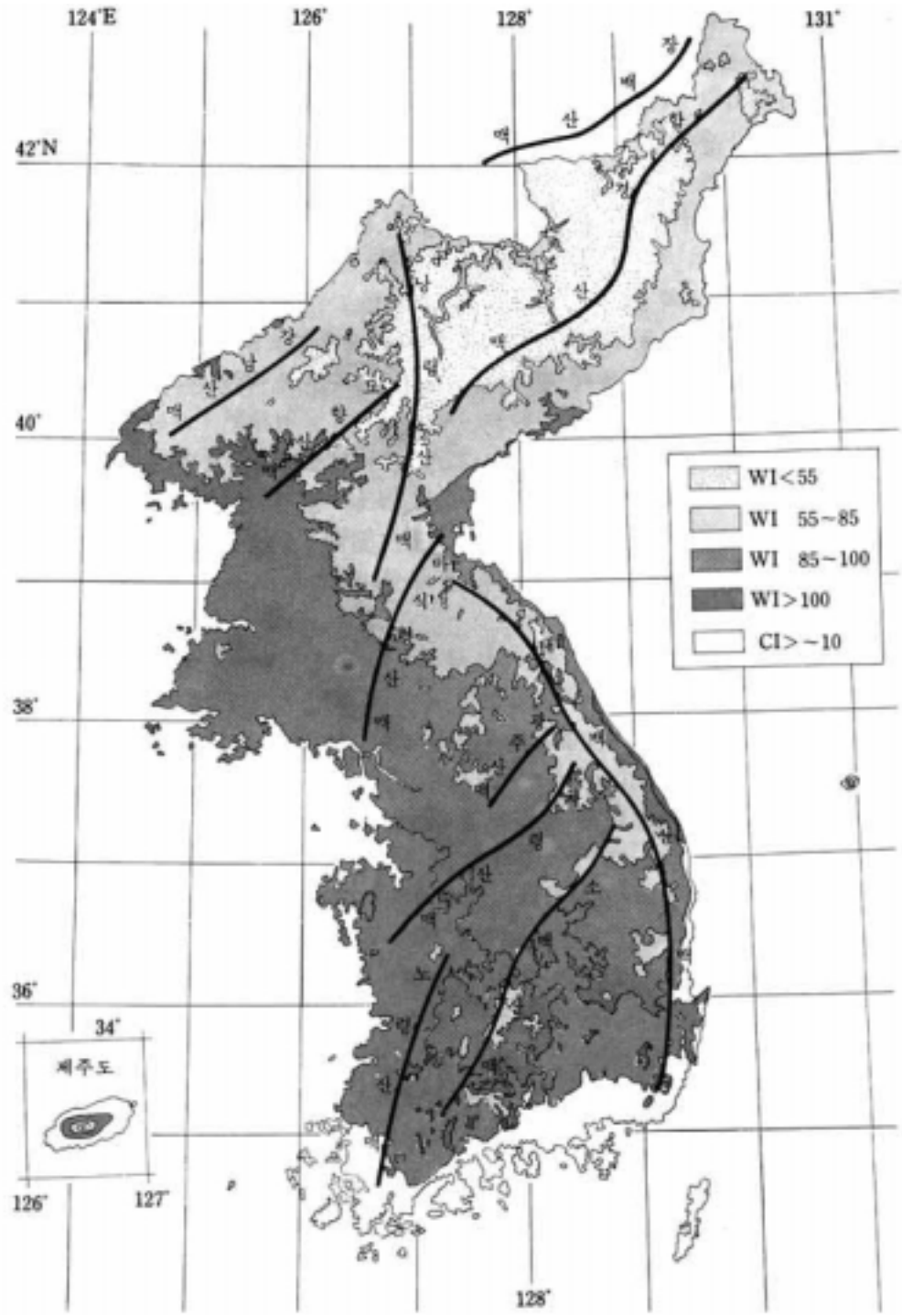
특산식물에는 금강초롱류·개느삼·금강조팝나무·부전반디 등이 알려져 있고, 눈잣나무·잎갈나무·젓나무·잣나무·분비나무·*Taxus*·가문비나무·눈측백·채양버들·박달나무·피나무·거제수나무·개박달나무·참조팝나무·다릅나무·찰피나무·염주나무·개벚지나무·산겨릅나무·부게꽃나무·신이대·황철나무·빈추나무·댕강나무·수수꽃다리·함박꽃나무·비술나무·시무나무·왕팽나무·갈기조팝나무·개버무리 등이 있으며, 이와 더불어 초본류에는 돌부채손·당분취·자주꽃방망이·국화방망이·말나리·솔나리 등이 있다.

3. 한 대

한대는 평안도의 동부(126°36')와 함경도에서 함경산맥의 북서부까지의 높은 지대로서 백두산을 비롯하여 표고 2,000m가 넘는 산악들이 많이 있다.

Abies·*Picea*·*Larix* 등과 더불어 잣나무의 숲이 우거져 있다. 주요 수종으로는 잎갈나무·가문비나무·분비나무·종비나무·풍산가문비 등의 침엽수와 *Betula*가 나타나고, 지대가 높아짐에 따라 들쭉나무·좀참꽃·곱향나무·단천향나무·설령오리나무 및 키가 작은 *Salix* 등이 있다.

초본류로는 병풍쌈·장군풀·검산초롱꽃·솔나리·깽깽이풀·덩굴현호색 등이 있다.



< 부록그림 Ⅳ-1 > 우리나라의 온도대