| KEI | 2004 | RE-10 | 연구보고서 |

기후변화영향평가모형 개발

-물관리 부문을 중심으로

전성우 정휘철 이동근

Yuzuru Matsuoka

Hideo Harasawa

Kiyoshi Takahashi

한국환경정책·평가연구원
Korea Environment Institute

연구진

연구책임자 전성우(한국환경정책・평가연구원, 연구위원)

참여연구원 정휘철(한국환경정책・평가연구원, 연구원)

박재범(한국환경정책・평가연구원, 연구원)

이동근(서울대학교, 교수)

Yuzuru Matsuoka(교토대학교, 교수)

Hideo Harasawa(일본국립환경연구원, 박사)

Kiyoshi Takahashi(일본국립환경연구원, 박사)

산・학・연・정 연구자문위원

권원태 (기상연구소, 연구실장)

김영오 (서울대학교, 교수)

성현찬 (경기개발연구원, 선임연구위원)

이상익 (국립환경연구원, 사무관)

최철웅 (부경대학교, 교수)

ⓒ 2004 한국환경정책・평가연구원

발행인 윤서성

발행처 한국환경정책・평가연구원

서울시 은평구 불광동 613-2

우편번호 122-706

전화 380-7777 팩스 380-7799

http://www.kei.re.kr

인쇄 2004년 12월

발행 2004년 12월

출판등록 제17-254호

ISBN 89-8464-107-3 93530

값 8,000원

국문요약

1. 서론

□ 연구의 배경 및 필요성

○ 최근 지구온난화 문제가 크게 이슈화되어 각 개인들도 위화감 없이 지구온난화를 받아들이게 되었으며, Bau(Business as usual) 시나리오 즉, 현재 경제활동이 지속되고 있다는 전제 하에 추진되는 연구에 따르면, 서기 2030년까지 지구전체 평균 온도가 약 2도 정도에서 최대 수십도까지 상승하는 것으로 조사

○ IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 등 많은 연구기관에서 지구온난화가 다양한 부분에 미치는 영향에 대하여 연구하고 있으며, 그 가운데 수자원 즉 육상의 물순환(terrestrial water cycle)은 인간활동과 생태계 전반에 대한 직접 영향으로 인해 기후변화 정책 수립 시 대단히 중요한 문제로 인식

□ 연구의 목적

○ 본 연구에서는 이러한 물순환에 미치는 기후변화의 영향을 평가하기 위해, IPCC의 권장 시나리오인 SRES(Special Report on Emissions Scenarios) 시나리오의 기후모형결과와 지역기후모형결과를 수집・정리하고 토양수분변화에 기초한 장기수문모형(Hydrological model)을 개발하여

○ 기후변화로 인한 수자원 공급능력 변화와 물수요 증가로 인해 발생할 수 있는 물부족 영향을 예측하고

○ 이러한 기후변화로 인한 물순환 변화가 농작물의 성장 및 생태계에 미치는

영향을 3년간에 걸쳐 평가

□ 연구의 내용 및 범위

○ 기후변화 영향평가 모형에서 요구되는 IPCC의 공통 기후 시나리오에 기초한 기후 데이터베이스를 구축

- 다양한 SRES시나리오의 GCM(Global Climate Model)결과들과 지역 영향 연구에서 요구하는 높은 공간해상도의 기후모형결과인 RCM(Regional Climate Model)자료 수집
- 시나리오 변화에 따른 다양한 영향예측 및 대책 수립연구에 필요한 월 혹은 일간격의 기후데이터베이스 구축

○ 격자기반의 장기수문모형 개발

- Thornthwaite와 Penman-FAO24 방법에 의한 잠재증발산량(Potential evapotranspiration) 추정을 포함한 토양 수분 변화(soil moisture change)에 기초한 물수지 모형(Soil Water Balance Model, SWBM)을 개발하여
- 미래에 발생 가능한 유출 변화를 한반도 주요 유역에 대해 평가

2. 연구방법

2.1. 기후모델자료

□ 활용한 기후모델 자료

○ 본 연구에서는 미래 기후자료로 IPCC의 자료공급센터에서 공급하고 있는 다양한 GCM 자료들 중 4종류 GCM 모형(CCSRNIES, CCCma, CSIROMK2, HadCM3)의 10가지 SRES 시나리오 결과물과 일본 국립환경연구소의 지역기

후모형인 RAMS 자료를 수집하여 수자원(water resources impact analysis) 영향평가에 이용

□ 기후재현성 검토

○ 기후재현성의 평가를 위해 현재시기(1981-1990년)의 기온과 강수량의 10년간 월별 지역평균값에 대해 관측치와 모형간의 비교 수행

○ 기온의 경우

- GCM과 RCM자료의 계절별 기온 변화는 남,북한 모두에서 관측치와 유사한 계절적 거동을 나타내었으나, 겨울철(12,1,2월) 기온에서 수치모의 결과가 높게 나타남
- CSIRO 모형의 결과가 가장 높은 온도차를 보여 10℃ 정도의 차이를 나타내었으며 RAMS자료는 GCM 결과들의 중간값 정도의 범위에서 변화를 나타냄
- 최대 ±10℃ 범위에서 겨울철 기온이 높게 나타나는 모형결과가 존재하므로 기후모형결과의 직접적 이용보다는 기후 관측치에 기온 변동폭을 더하는 "기후 중첩기법"의 이용을 권장함

○ 강수량의 경우

- 여름철 강우의 집중현상을 표현할 수 있는 기후모형은 RAMS가 유일하며, 나머지 GCM 자료들은 공간 보간된 자료로는 강수량의 계절적 변화를 정확히 표현할 수 없는 것으로 판단됨
- 연간강수량에서 RAMS 자료는 관측치에 비해 연중 높게 나타나며, 공간적으로 북한에 많은 강수량를 나타냄
- 이러한 강수량 과다는 RAMS 모형이 엘리뇨현상 등을 함께 모의하도록 개발되었으며, 적도순환 흐름의 감소로 인해 태평양 서부해안지역에 이상 분

기 흐름이 발생하여 미래 겨울철 강수량이 다른 GCM결과에 비해 높게 나타나는 모형 자체의 특성으로 판단됨

- 미래 강수량 자료의 이용 역시 직접적 기후모형 결과를 이용하는 것 보다 현재 강수량의 공간분포에 모형의 강수량 변동비를 곱하여 이용하는 것을 권장함

2.2. 물리적 데이터

□ 활용한 자료

○ 30초 간격의 GTOPO 수치표고자료와 정밀토양도, 토지피복지도를 활용

○ 유역과 하도망의 제작을 위해 30 초 격자간격의 GTOPO30 수치 표고자료를 이용하였으며, 제작된 유역 정보는 Pfafstetter 코드를 이용하여 상하류의 유역관계를 정의

○ Field Capacity는 soil property, vegetation rooting depth and Batjes PTF(different pedo-transfer functions) 공식을 이용하여 제작

- 이를 위해 남한 지역의 정밀토양도에서 Soil texture 와 soil depth 자료를 수집하여 이용함
- 식생 분포는 환경부의 토지피복 분류지도를 이용함
- 북한 지역은 FAO(1996)에서 제공하는 전세계 2층(0-30 and 30-100 cm)의 5-minute 간격의 Field Capacity map을 이용함

2.3. Soil Water Balance Model(SWBM)

□ 모형의 구조

○ 수자원 영향평가모형은 기후자료와 수치표고모형으로부터 일별 지표면 유출

을 모의할 수 있으며, 3개의 주요한 하부모듈로 구성

○ 이들 모듈은 잠재증발산량을 추정할 수 있는 잠재 증발산량 모듈, 강수량과 토양수분변화, 증발산량 변화로부터 물수지를 계산하고 지표면유출을 계산하는 물수지모듈(Soil Water Balance Model, '이후SWBM'), 각 격자의 지표면 유출량과 수치고도정보로부터 유역과 하도의 유출을 계산하는 유출모듈(Water Transfer Model, '이후 WTM')로 구성

○ 잠재증발산량과 물수지 모듈은 공간해상도 0.05도 간격의 격자별로 계산을 수행하여, 월별 토양수분, 증발산, 지표면 유출을 예측하게 되며, 예측된 격자별 자료는 농업생산성모형과 동적식생모형등의 입력자료로 이용됨

○ 유출모듈은 계산된 격자별 지표면유출 정보와 하도, 유역 정보 등을 이용하여 하천 지점에서의 유출변화를 예측함.

□ 모형의 검증

○ 대청댐 유역을 대상으로 검증

- 유역 유출은 1981년에서 1987년까지의 일 댐유입량 자료를 월자료로 환산한 후 유역면적으로 나누어 계산
- 연간유출관측치와 SWBM 모형에서 계산된 유출량을 비교한 결과 SWBM에서 계산된 연간유출은 관측치에 비해 작게 나타나 초기 Field Capacity를 축소할 필요성을 보임
- 그러나 SWBM의 유출결과와 관측치는 상호 높은 선형적 상관성을 보이고 있어(R2 =0.9936), 추가적인 비교 연구가 요구되며 이를 통해 모형의 최적화가 용이할 것으로 판단됨

3. 연구결과

□ 미래 기후의 변화 예측 결과

○ 기온 변화

- 기후변화로 인한 미래(2041~2050) 기온변화는 남한지역에서 RCM 분석결과, 여름철의 기온 상승이 겨울철 기온 상승에 비해 약 0.7℃ 정도 높게 나타나며, 겨울철 기온 변화량은 약 3℃로 GCM의 평균 변화 폭(1~3℃)인 내에 존재하나 여름철의 기온 변화량 3.7℃는 GCM의 변화 폭(1~3.5℃)을 넘어서는 것으로 예측됨.
- 북한 지역의 기온 변화는 RCM 분석결과, 여름철의 기온 상승이 겨울의 기온 상승에 비해 약 1.7℃ 정도 높은 것으로 분석되며, GCM의 결과와 정반대로 여름철의 온도변화가 겨울철에 비해 큰 것으로 분석됨 RCM의 겨울철 온도변화량은 약 2.7℃로 GCM의 평균 변화폭(1~5.3℃)내에 위치하고 있으나, 여름철의 기온 변화량 약 4.3℃는 GCM의 변화폭(1~3.2℃)을 넘어서는 것으로 예측됨.

○ 강수량 변화

- 남한지역의 RCM 분석결과, 여름철의 강수량변화율이 약 10% 정도인데 반해 겨울은 약 65%이상 변화하여 겨울에 강수량 변화가 큰 것으로 분석됨
  - RCM의 여름철의 강수량 변화율은 GCM의 강수량 변화폭(-10~55%)내에 위치하나, 겨울철 변화율은 GCM의 변화폭(-20~20%)을 넘어서는 것으로 예측되었으며, GCM의 모든 시나리오에서 여름철의 변화가 겨울철보다 큰 것으로 예측되어 RCM과 정반대의 경향을 보였음
- 북한 지역의 강수량변화는 RCM 분석결과, 여름철의 강수량변화율이 약 30%인데 반해 겨울은 약 55%이상 변화하여 겨울에 강수량 변화가 큰 것으로 분석됨
  - RCM의 여름철 강수량 변화율은 GCM의 변화폭(-10~40%)내에 위치하고 있으나, 겨울철 변화율은 GCM의 변화폭(-20~20%)을 넘어서는 것으로 예측되었으며, GCM의 모든 시나리오에서 여름철의 변화가 겨울철보다 큰 것으로 예측되어 RCM과 정반대의 경향을 보였음

□ 수자원 영향예측 모형의 검증

○ 연구에 이용된 AIM-WBM 모형과 실측자료간의 상관관계를 대청댐 유역에 대해 분석한 결과 높은 상관성(r2= 0.8967)을 보였음

○ 수자원 장기종합계획 보고서상의 남한지역 유역들에 대한 연평균유출을 비교한 결과 모형의 결과가 약 5~14% 정도 낮게 나타났으나 유역별 연평균유출량에서 수자원장기종합 보고서의 결과와 선형적인 비례 관계를 보였음.

□ 시나리오별 수자원영향 평가

○ IPCC SRES를 이용하여 기후변화로 인한 미래(2041~2050)의 한반도 주요 유역에 대한 수자원 영향평가를 실시한 결과

- B1시나리오의 발전방향이 한반도 지역에 가장 적은 영향을 미쳤으며, B1, B2 시나리오에 비해 A1, A2 시나리오에서 영향이 큰 것으로 나타남
- 지역적으로는 남한 지역이 북한에 비해 기후변화 영향이 높게 나타났으며, 남한지역은 B1 시나리오를 제외한 모든 경우에서 총유출과 우기유출의 증가를 보였음
- A1 시나리오의 경우 한강과 금강 유역을 중심으로 우기 유출이 크게 증가하였으며, 북한지역은, 두만강 유역이 B2 시나리오에서 유일하게 총유출 감소를 보이며 나머지 유역은 큰 영향이 없는 것으로 나타남.

○ RAMS 모형을 이용하여 기후변화로 인한 미래의 한반도 주요 유역에 대한 수자원 영향평가를 실시한 결과

- GCM을 이용한 결과에 비해 전체적으로 미래의 유출량이 증가함
- 특히 북한 지역의 서해로 향하는 유역들에서 큰 유출 증가가 발생하여 남한지역에 비해 수자원에 대한 기후변화 영향이 큰 것으로 나타났으나, 두만강 유역에서는 약 -19%정도의 년 평균 유출감소가 발생하였음

4. 요약 및 제안

□ 본 연구는 기후변화로 인한 수자원의 변화와 이에 기초한 물관리정책을 수립하기 위한 영향평가모형을 개발하기 위한 기초연구로 수행되었음

○ 기후변화영향평가연구는 먼 장래의 일을 예측하는 것으로 많은 불확실성을 내포하고 있는 한계가 있으며, 이를 정량적·과학적으로 예측·분석하기 위해서는 많은 정보와 합리적인 가정 및 예측이 필요하며, 이를 위해 지속적인 정보의 구축 및 모형의 개선이 이루어져야 할 것임

□ 이런 측면에서 본 연구는 다음과 같은 한계를 가지고 있으므로 이를 고려하여 활용하여야 할 것임

○ 본 연구에서 사용한 기초정보는 현재 가용가능 한 RCM과 SRES 시나리오에 기초한 GCM자료들로서 분석결과 많은 차이를 보이고 있음.

- RCM정보는 GCM 분석결과와 상이한 결과를 보여주고 있는데, 이는 기초자료가 가지는 한계로 향후 연구에서는 여러 RCM자료의 확보 및 분석이 이루어져야 함

○ 본 연구에서 사용한 모델은 토양수분량의 변화에 기초한 물수지 분석에 기초한 모형으로 최대용수량 자료의 정확성에 많은 영향을 받음

- 본 연구에 이용된 최대용수량자료는 관측 유량과의 최적화를 통한 수정과정을 거치지 않았으며, 그 결과 다른 연구 결과에 비해 작은 유출량을 보이고 있어 향후 연구에서 유량관측 자료들을 이용한 최대용수량도의 수정작업이 요구됨.

○ 본 연구는 3년간 수행할 것을 계획하였으나, 과제 수행중의 연구계획변경으로 인해 2005년부터 수행될 예정인 기후변화적응전략연구에 포함될 예정임. 따라서 1차년도 연구의 목적인 정보 수집 및 DB 구축에서 한발 나아가 기초적

인 모델개발, 모의, 해석단계를 수행하여 전체적인 수행체계를 제시하고자 함에 따라 위와 같은 한계를 가지고 있음. 그러나 향후 연구에서 이를 개선한다면, 기후변화 영향 발생지역 등 취약성 도면을 공간정보(GIS 등)와 연계하여 제공할 수 있을 것이며, 기후변화에 대한 지역별 생태계 관리 및 적응 전략을 제공할 수 있을 것임.

차례

제1장 서론 ····· 1
1. 연구의 배경 및 필요성 ····· 1
2. 연구의 목적 및 범위 ····· 4

제2장 국내외 연구사례 ····· 7
1. 기후변화와 수문기상 인자의 변동 ····· 7
2. 기후변화에 따른 GCM을 이용한 수자원 변화 ····· 10
3. 결정론적 수문모델을 이용하는 방법 ····· 11

제3장 기후변화 시나리오의 검토 ····· 13
1. 개요 ····· 13
2. 기후 시나리오의 종류 ····· 16
가. 유사법에 의한 시나리오 ····· 16
나. 감도분석 목적의 점증시나리오 ····· 18
다. 기후모형의 결과에 기초해 작성한 시나리오 ····· 18
라. 시나리오 연구방법 비교 분석 ····· 19
3. 기후 모형 ····· 21
가. IPCC SRES 전세계기후모형 ····· 21
나. NIES/RAMS 지역기후모형 ····· 26
다. 기후모형결과와 영향평가모형 통합의 문제점 ····· 29
4. 기후 모형의 현재 기후 재현성 ····· 31

제4장 영향평가 방법 ····· 32
1. 개요 ····· 32
2. 입력자료의 구축 ····· 35
가. 현재 기후자료의 구축 ····· 35
나. 미래 기후 시나리오의 작성 ····· 39

다. 유역도 및 하도망도의 구축 ····· 42
라. 최대용수량의 작성 ····· 43
3. 물수지 모형 ····· 46
가. 잠재증발량의 추정 ····· 48
나. 강설모형 ····· 50
다. 지표면 유출의 계산 ····· 51
4. 모형의 검증 ····· 54

제5장 기후변화 영향평가 결과 ····· 57
1. 미래 기후변화 ····· 59
가. 남한 지역 ····· 59
나. 북한 지역 ····· 67
다. 계절별 기후 영향 분석 ····· 75
2. 한반도 주요 유역의 유출변화 ····· 77
가. 남한 지역 ····· 80
나. 북한 지역 ····· 86
다. 기후변화에 따른 유출 변화 영향 평가 ····· 92

제6장 요약 및 제안 ····· 95
1. 요약 ····· 95
2. 연구의 한계 및 제안 ····· 97

참고문헌 ····· 99

부록1 : IPCC SRES 시나리오 ····· 108

부록2 : 잠재증발산량 산정 모형 ····· 132

Abstract ····· 145

표차례

<표 2-1> 우리나라의 기후변화로 인한 수문인자의 변화 연구사례 ····· 8
<표 2-2> 외국의 기후변화로 인한 수문인자의 변화 연구사례 ····· 9
<표 2-3> 우리나라의 GCM을 이용한 수자원 변화 연구사례 ····· 10
<표 2-4> 외국의 GCM을 이용한 수자원 변화 연구사례 ····· 10
<표 3-1> 기후시나리오 작성에 필요한 영향분야별 기상요소 ····· 14
<표 3-2> 과거 사례로부터의 유추에 의한 시나리오 작성사례 ····· 17
<표 3-3> 감도분석적 방법에 의한 시나리오 작성사례 ····· 18
<표 3-4> 기후모형의 결과에 기초한 시나리오 작성사례 ····· 19
<표 3-5> 다양한 기후시나리오 연구방법의 장단점 ····· 20
<표 3-6> IPCC(2001)에 의해 채택되고 있는 AOGCM ····· 22
<표 4-1> 토성에 따른 토양수분함량 실험 결과 ····· 43
<표 5-1> 분석에 이용된 기후모형 자료 ····· 58
<표 5-2> 시나리오별 남한지역 월평균 온도(℃) ····· 61
<표 5-3> 기후변화로 인한 남한지역 월평균 온도 변화(℃) ····· 62
<표 5-4> 시나리오별 남한지역 월평균 강수량(㎜) ····· 65
<표 5-5> 기후변화로 인한 남한지역 월평균 강수량 변화비(%) ····· 66
<표 5-6> 시나리오별 북한지역 월평균 온도(℃) ····· 69
<표 5-7> 기후변화로 인한 북한지역 월평균 온도 변화(℃) ····· 70
<표 5-8> 시나리오별 북한지역 월평균 강수량(㎜) ····· 73
<표 5-9> 기후변화로 인한 북한지역 월평균 강수량 변화비(%) ····· 74
<표 5-10> 한반도 지역의 기후 영향 분석 ····· 77
<표 5-11> 기후변화 시나리오별 남한지역 주요 유역의 월평균 강수량 (㎜) ····· 82
<표 5-12> 기후변화에 따른 유역별 년 평균 강수량 및 유출 변화 (남한, %) ····· 84
<표 5-13> 기후변화 시나리오별 북한지역 주요 유역의 월평균 강수량 (㎜) ····· 88
<표 5-14> 기후변화에 따른 유역별 년 평균 강수량 및 유출 변화 (북한, %) ····· 90
<표 5-15> 시나리오별 국가별 유출 및 강수량 변화 ····· 93
<표 5-16> 기후변화로 인한 한반도 주요 유역의 유출 변화 영향 ····· 94

<부록표 1-1> 일본 시나리오의 각 STORY LINE 개요 ····· 113
<부록표 1-2> SRES 시나리오의 정량화 개요 ····· 118
<부록표 1-3> SRES 시나리오 ····· 122
<부록표 1-4> SRES 시나리오에 있어서 정량화에 대한 개요 ····· 131
<부록표 2-1> 증발산 환산계수 ····· 134
<부록표 2-2> 운량과 n/N 비율과의 관계 ····· 140

그림차례

<그림 1-1> 3 단계 연구 추진계획 ····· 5
<그림 3-1> 기후변화 시나리오 검토의 단계 ····· 13
<그림 3-2> 시기별 기후모형 변화 추세 ····· 21
<그림 3-3> CMIP1 모델에 의한 12월-2월 지상기온 검증 ····· 24
<그림 3-3> CMIP1 모델에 의한 12월-2월 강수량 검증 ····· 24
<그림 3-4> 시나리오별 AOGCM에 의한 기온재현결과 ····· 25
<그림 3-5> 지역 기후 모델(NIES-RAMS)에 의한 몬순 아시아 지역의
계산 영역과 지형 ····· 28
<그림 4-1> IPCC 지침에서 제안하는 기후변화의 영향·적응평가의 구조 ····· 32
<그림 4-2> 수자원 모듈의 개요 ····· 33
<그림 4-3> 연구에 이용된 기상관측소 위치 ····· 36
<그림 4-4> 현재시기(1981-1990년) 년평균 강수량(㎜/yr)과 기온(℃) ····· 37
<그림 4-5> 관측 및 예측된 월평균온도와 강수량 ····· 38
<그림 4-6> 통계적 기법을 이용한 Downscaling 방법 ····· 39
<그림 4-7> NIES/RAMS에 의해 2041에서 2050년까지 예측된 10년 월평균기온 40
<그림 4-8> NIES/RAMS에 의해 2041년에서 2050년까지 예측된
10년 월평균강수량 ····· 41
<그림 4-9> 연구에 이용된 한반도 주요하천 유역(좌)과 중권역 유역 구분(우) ··· 42
<그림 4-10> 1:2,5000 정밀 토양도와 Batjes PTF 모형을 이용해 제작한
최대용수량도 ····· 45
<그림 4-11> 토양수분 실험결과와 Batjes모형을 이용해 제작된 최대용수량 비교 45
<그림 4-12> 작물(좌)과 산림(우)의 뿌리깊이를 고려한 최대용수량분포 ····· 46
<그림 4-13> 기후변화로 인한 수자원 영향평가 및 수문 모형 개발의 구조 ····· 47
<그림 4-14> SWBM에 의한 대청댐 유역의 월 유출 계산 결과 ····· 55
<그림 4-15> SWBM을 이용한 대청댐 유역의 년 유출량 계산치와 관측치 비교 · 56
<그림 5-1> 시나리오별 남한 지역의 기온 변화 ····· 60
<그림 5-2> 시나리오별 남한 지역의 강수량 변화 ····· 64

<그림 5-3> 시나리오별 북한 지역의 기온 변화 ····· 68
<그림 5-4> 시나리오별 북한 지역의 강수량 변화 ····· 72
<그림 5-5> 기후 시나리오에 따른 계절별 기온 및 강수량 변화 ····· 76
<그림 5-6> 한반도 주요 유역과 현재 기후 년 유출분포 ····· 78
<그림 5-7> 유출 탄력성의 개념 ····· 79
<그림 5-8> 시나리오별 남한지역 5대강 유역의 월평균 강수량 변화 ····· 81
<그림 5-9> 기후모형 결과에 기초한 남한지역 5대강 유역의 유출 탄력성 ····· 85
<그림 5-10> 시나리오별 북한지역 5대강 유역의 월평균 강수량 변화 ····· 87
<그림 5-11> RAMS 모형결과에 기초한 한반도 주요 유역의 유출변화 ····· 89
<그림 5-12> 기후모형 결과에 기초한 북한지역 5대강 유역의 유출 탄력성 ····· 91
<부록그림 1-1> 기존 연구에 대한 이산화탄소 배출시나리오 ····· 110
<부록그림 1-2> 에너지 및 산업에서 표준화된 40개 SRES CO_2 시나리오 ····· 119
<부록그림 1-3> 표준화된 40개 SRES 이산화황 시나리오 ····· 119
<부록그림 2-1> 증발산 개념 ····· 132
<부록그림 2-2> 복사량 구성요소 ····· 139

제1장 서론

1. 연구의 배경 및 필요성

환경 문제는 현대 사회가 당면한 사회 문제 가운데 해결해야 할 가장 큰 현안의 하나이다. 특히 지구온난화에 따른 환경 각 분야의 교란과 파괴 문제는 국제사회가 깊은 관심을 보이고 있는 범지구적 환경 문제이다.

대기 중의 온실가스(Greenhouse gas)는 태양으로부터 지구로 전달되는 단파장을 가진 가시광선을 흡수하지 않으나, 지구표면에서 대기 중으로 방출되는 장파장을 가진 적외선을 흡수한다. 이러한 온실가스[1]가 대기 중에 축적이 되면 지구표면으로부터 방출되는 적외선을 과다하게 흡수함으로써 지구가 더워지는 현상이 "지구온난화(Global warming)"이다.

대기 중 이산화탄소의 농도는 산업혁명 전 약 280ppm에서 1994년 358ppm으로 증가하였으며, 과거 100년 동안 지구상의 평균온도는 0.3~0.6℃ 상승하였다. 특히 우리나라의 이산화탄소 배출량은 세계 10위(IEA. 1998)였으며, 1997년 태안반도 이산화탄소의 농도는 368.7ppm으로 미국 해양청의 전 세계 49개 공식관측지점 가운데 세계 최고치를 기록하는 등 각종 자료에서 심각성을 보여주고 있다. 이와 같이 우리나라의 온실가스 배출량 연평균 증가율은 7.9%(1990~1997년 사이)이고, 1997년 국내 온실가스 총 배출량의 85%는 이산화탄소 배출이었다(조선일보. 2000).

1990년 기후변화에 대한 정부간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change, '이후 IPCC')이 발표한 보고서에 의하면 2050년이 되면 지구의 평균기온이

1) 지구온난화는 대기중에 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O), 수소불화탄소(HFC), 과불화탄소(PFC), 육불화황(SF_6) 등 6가지의 온실효과가스가 증가하여 생기는 현상으로 지구온난화에 기여하는 정도를 나타내는 지구온난화지수(global warming potential)는 CO_2를 1로 보았을 때 CH_4는 21, N_2O는 310, PFCs는 7,000, HFCs는 1,300, SF_6는 23,900 이다(www.me.go.kr)

3℃ 정도 상승하고, 여름은 더워지고 건조해지며, 강수량은 20% 정도 증감하는 이상기상 현상은 더욱 두드러질 것으로 예측하고 있다. Greenpeace는 1990년에 지구온난화의 영향과 대안에 대한 보고서를 발행하였다(Leggett. 1990). Worldwatch Institute도 1990년부터 지구환경보고서를 통해 지구온난화의 심각성을 여러 차례 보고하였다. 지구온난화는 국제적인 관심사로 IPCC 등을 중심으로 일찍부터 많은 연구가 수행되었다(Cannel & Hopper. 1990, Houghton *et al.* 1990, 1996. Tegart *et al.* 1990, IPCC. 1990, Geyer. 1992).

2000년은 전 세계적으로 과거 140년 동안 다섯 번째로 더운 해였다. 지표면의 연평균 기온은 1961년부터 1990년까지 30년간 평균보다 섭씨 0.32℃가 상승했다. 20세기 초에 비하면 평균 0.6℃가 올라간 것이다. 미국의 1999년~2000년 겨울은 103년 만에 가장 따뜻했고, 일본도 103년 만에 다섯 번째로 온난했다. 지금까지 가장 더운 해는 1998년이었으며, 엘니뇨현상이 극성을 부리던 1990년부터 1998년까지가 지구 역사상 가장 더운 기간이었다.

한편, 2001년 IPCC 제3차 평가보고서에서는 2100년의 온도가 1990년에 비해 1.4~5.8℃ 상승할 것으로 전망하는 등 현재까지의 기후변화 추세와 향후 전망을 과학적 근거 아래 상세히 서술하고 있다(기상청. 2002).

우리나라의 경우 기상청의 분석에 따르면, 1961~1990년의 연평균 기온이 13.0℃로, 1931~1960년의 연평균 기온이 12.6℃보다 0.4℃가 높아진 것으로 밝혀졌다. 더욱 걱정스런 것은 기온 상승 추세가 근래에 더욱 가속화되고 있다는 사실이다. 전체적으로 한반도에서는 지난 75년 동안 평균기온이 1.1℃ 증가하였으며, 지구온난화 효과는 0.7℃, 도시화 효과는 0.4℃로 추정되었다. 즉 우리나라의 지구온난화 추세는 세계적인 경향보다 훨씬 가파르고 분명하게 진행되고 있다. 1931~1960년의 연평균 기온 12.6℃와 비교할 때 1980년은 1.1℃가 상승한 13.7℃, 1990년은 1.4℃가 상승한 14.0℃를 기록해 상승세가 가파르다. 국립수산진흥원 조사에 의하면 한반도 근해의 해수온도는 1981~1990년까지 2월에는 약 2℃가 올랐고, 8월에는 약 1℃가 상승하였다(조선일보, 1995).

기상관측을 시작한 1904년이래 우리나라의 연평균기온은 불규칙적이지만 꾸준히

상승한 것으로 나타났다. 1908년부터 1940년까지 대체로 연평균기온이 10~11℃ 사이였으나 1970년대부터 최근까지는 12~13℃ 사이를 나타내 완만하지만 지속적인 상승세를 보이고 있다. 이러한 지구온난화 경향이 21세기에도 계속 유지된다고 가정할 때 21세기말 한반도 기온은 현재보다 약 1.4℃ 정도 상승할 것으로 예상된다. 이산화탄소(CO2) 농도가 2배로 증가할 경우에는 한반도 기온은 2.0~2.5℃ 정도 상승할 것으로 예상되며, 여름철 강우량은 -25%에서 +30%까지 변화 폭이 커져 극심한 가뭄과 홍수가 빈번하게 발생할 가능성이 높다(www.kei.re.kr).

지역별로 내륙 지방에서는 지난 100년 동안 약 1.4℃의 기온 상승을 보였으며, 이러한 기온 상승폭은 지구 북반구 평균기온 상승률의 2배에 이르는 수치이다. 한반도의 기온 상승 경향은 지난 25년 간 더욱 뚜렷해져서, 1974년부터 최근까지 전국 9개 측정장소의 연평균기온이 0.96℃가 상승하여(정용승. 1998), 이에 따른 위기감이 고조되고 있다.

온실가스 증가로 인한 기후변화는 미래의 기온 증가, 강수량의 패턴 변화, 증발산량의 증가 및 유출의 계절적 변동을 초래하게 되어 미래 물 순환의 변화에 따라 가뭄과 홍수가 극심하게될 것으로 예상된다. 자연환경의 변화와 함께, 인구증가, 공업 발전, 관개 농업의 확대라고 하는 인간 활동의 역동적인 변화로 인한 물수요는 심각한 물부족을 광범위한 지역에 발생시켰다. 이에 따라, 21세기에는 한정된 수자원을 둘러싼 분쟁이 발생될 것으로 예측되고 있다.

또한, 지구의 물순환은 에너지, 대기성분, 대륙・수생 생태계와 관련하여 지속적으로 변화하기 때문에 지구기후와 생태계의 가장 중요한 구성 요소라 할 수 있다. 이러한 물순환은 식물의 성장과 유기물질의 부식, 육상과 대기의 가스교환 등을 포함한 생물권 프로세서의 역할을 할 뿐 아니라 인간활동의 중요한 인자로 그 중요성에 대해서는 여러 연구보고서에서도 여러 차례 강조된 바 있다(IGBP. 1988, NASA & ESSC. 1998).

이에 대하여 IPCC 등 많은 연구기관에서 지구온난화가 다양한 부분에 미치는 영향에 대하여 연구하고 있으며, 그 가운데 수자원 즉 육상의 물순환은 인간활동과 생태계 전반에 대한 직접적인 영향을 미침으로 인해 기후변화 정책 수립시 대단히 중요

한 문제로 인식되고 있다. 따라서 기후변화영향 연구에서 수자원 부문의 연구는 다른 영향의 예측을 위한 기초단계로 시공간적인 공급 능력과 수요를 평가하는 적절한 수단이 요구된다.

국내 연구에서 주로 이용되는 유량계측 자료에 기초한 통계적인 분석(건교부, 2000)은 유량변화에 주목하여 시공간적 수분 분포 자료를 제공하기 곤란하므로 생태계 변화에 미치는 영향을 고려하기 위해서는 별도의 통합적이며 과학적인 평가 수단의 확보가 필요하다.

이러한 측면에서 본 연구에서는 격자 기반의 기존 지구규모의 광역 기후변화 평가모형을 한반도 지역에 직접 적용하기보다는 자료의 이용가능성과 지역특성을 고려하여 적절히 모형을 수정하는 형태로 연구를 진행하는 것이 필요하다.

2. 연구의 목적 및 범위

본 연구는 기후변화로 인한 물순환 및 다른 부분의 영향을 평가하는 것을 목적으로 하며 이를 위해 다음과 같은 내용을 연구의 범위 및 목적으로 설정하였다.

첫째, IPCC의 권장 시나리오인 SRES(Special Report on Emissions Scenarios, '이후 SRES') 시나리오의 기후모형결과와 지역기후모형결과를 수집・정리한다.

둘째, 토양수분변화에 기초한 장기 수문모형(Hydrological model)을 개발하여 기후변화로 인한 수자원 공급능력 변화와 물수요 증가로 인해 발생할 수 있는 물부족 영향을 예측한다.

셋째, 물순환 변화가 농작물의 성장 및 생태계에 미치는 영향 등 다른 분야에서의 활용가능성을 평가한다.

이를 위해 본 연구는 <그림 1-1>과 같이 3개년의 계획으로 기후변화에 따른 수자원 영향평가 연구를 추진하게 되며, 1차 년도인 2004년도에는 기후변화에 따른 수자원 변화예측 모형의 개발과 동시에 여러 연구기관에서 제공하는 기후모형결과를 수집, 데이터베이스화하는 것을 목표로 하였다.

2차 년도는 수자원 모형의 개발을 계속 진행하며, 미래 물수요 예측을 통해 기후변화시나리오에 따른 물부족 영향을 평가하며, 마지막 3차 년도에서는 농업 및 생태계 영향평가 모형과 연계하여 기후변화에 따른 물순환 변화가 농업과 생태계에 미치는 영향을 예측하고자 하였다.[2)]

	1차 연도 (2004년)	2차 연도 (2005년)	3차 연도 (2006)
목표	기후 DB의 구축 및 물수지모형 개발	기후변화에 따른 물부족 영향평가	농업생태계 영향평가 및 정책제안
내용	- 기후 DB의 구축 ・미래기후 (GCM/RCM) ・현재기후 - 기초GIS DB 구축 ・토양, 유역 및 하도망 DB 등 - 물수지모형의 개발 ・잠재증발산량 추정 ・토양수분변화 ・강우, 융설 등	- 추적모형의 개발 및 검증 ・수정Tank모형기반(한국) ・저류함수법(일본) ・최적화 - 장래 물수요예측 ・AIM-water 모형을 이용한 분야별(가정, 공업, 농업) 용수 추정	- 농업 생산성변화 예측 ・곡물성장모형에 의한 관계용수 등 농업용수 요구량 추정 ・일/월평균 기후자료비교(극값에 의한 작물 영향 분석) - 최종 영향평가 및 정책방안 도출
주요 평가 항목	- 기후변화로 인한 주요 유역의 총유출량 변화	- 시나리오별, 수자원 공급능력 변화 및 물부족 예측	- 기후변화에 따른 농업생산성 및 농업용수량 변화

<그림 1-1> 3 단계 연구 추진계획

위와 같은 계획하에 1차 년도인 2004년에는 모형의 운용을 위한 응용 데이터베이스의 제작과 예측 모형의 기초 구축에 중점을 두고 추진하였다.

1차 연도의 주요 연구범위 및 내용은 다음과 같다.

첫째, 기후변화 영향평가 모형에서 요구되는 IPCC의 공통 기후 시나리오에 기초한 기후 데이터베이스를 구축하는 것으로, 다양한 SRES시나리오의 대기대순환모델(Global Climate Model, '이후 GCM')결과들과 지역 영향 연구에서 요구하는 높은 공

2) 본 연구의 2차와 3차년도 연구내용은 본원에서 2005년부터 3년간 추진예정인 기후변화영평가 및 적응시스템구축에 포함될 예정임

간해상도의 지역기후모형결과(Regional Climate Model, '이후 RCM')자료를 수집하여, 시나리오 변화에 따른 다양한 영향예측 및 대책 수립연구에 필요한 일 혹은 월간격의 기후데이터베이스를 구축한다.

둘째, 격자기반의 장기 수문 모형의 개발을 위해, Thornthwaite 와 Penman-FAO24 방법에 의한 잠재증발산량 추정을 포함한 토양 수분 변화에 기초한 물수지 모형(Soil Water Balance Model, '이후 SWBM')을 개발하였다. SWBM모형에 의해 계산된 격자별 유출은 하도 및 유역 이동 모형의 입력자료가 되며, 올해 연구에서는 유역별 총유출량 변화만을 평가한다.[3)]

3) 1차 연도 모형의 입력자료인 한반도의 유역과 하도망을 수치표고모형(Digital Elevation Model, DEM)을 이용해 제작하는 것을 포함한다.

제2장 국내외 연구사례

기후변화가 수자원에 미치는 영향은 지구차원의 지표면, 물 순환의 변화에 따른 기후변화와 함께 서로 연동되어 움직인다. 따라서 기후변화에 따라 지역차원의 지표면, 물순환이 변화하게 되면 이것이 다시 기후변화에 영향을 미치는 형태로 작용하게 되는 것이다.

기후변화가 수자원에 미치는 영향에 대한 연구는, IPCC 제2작업 그룹에서 다수 보고되고 있다. 이러한 보고에 의하면, 지금까지 행해져 온 연구는 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 그것들은, 첫째, 유출과 기후 인자의 과거의 장기 변동의 성분에 관한 해석, 둘째, GCM을 이용하는 방법, 셋째, 결정론적수문 모델을 이용하는 방법이다.

첫 번째 방법은 과거의 온난한 시기 혹은 한냉기에 일어난 수문현상을 연구하는 방법이며, 두 번째 방법은 대기중의 미량 가스 농도를 증가시키고(예를 들면 이산화탄소 농도를 2배로 한다), GCM를 이용해 지역 기후와 수문특성의 변화를 직접 추측하는 방법이며, 세 번째 방법은 강수량-유출의 응답 함수에 GCM 출력을 포함한 기후데이터를 입력하여 유역 수문상태의 변화를 예측하는 방법이다.

이러한 측면에서 본 연구에서는 기후변화와 관련된 국내외 연구를 정리하였다.

1. 기후변화와 수문기상 인자의 변동

우리나라 수문기상 인자의 변동에 관한 연구는 크게 강수량, 기온 및 증발산량, 토양수분 등으로 나누어 살펴볼 수 있다. 그러나 현재까지의 연구는 특히 강수량에 집중되어 있는데 이러한 원인은 무엇보다도 강수량의 변화가 사회적으로 직접적인 영향을 미치며, 아울러 그 불확실성도 크기 때문으로 판단된다(김승. 2000).

<표 2-1> 우리나라의 기후변화로 인한 수문인자의 변화 연구사례

	연구사례	주요내용
관측 및 통계에 의한 강수량 변화	한반도 여름철 강수량의 장기예측(강인식, 허창회, 1992)	
	서울지방 연 강수량의 경년변동(1971-1990)(임규호, 정현숙, 1992)	
	서울지점 강수의 장기변동 성향에 대한 통계학적 검증(김승, 김현민, 1993)	강수과정의 선형성 및 분산안정의 가정하에 연 강수의 변동폭이 커 통계적으로 유의성 있는 경향 발견 못함
	서울지역 월 강수량과 강수일의 관계(정현숙, 임규호, 1994)	
	서울지역 강수량의 시계열에 나타난 시간 변동성의 해석(정현숙, 1999)	
GCM을 이용한 온도 및 강수량 변화	기후변화가 한반도에 미치는 영향에 관한 심포지엄(한국과학기술연구원, 1993)	GFDL, GISS, CCC, UI의 4개 GCM을 이용한 온도변화 예측
	21세기를 바라보는 수자원 전망(한국수자원공사, 1993)	
	기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구환경관련 대책연구(한국과학기술연구원, 1994, 1995a)	CCC, UI, GISS, MRI, GFDL의 5개 GCM모의결과 강수량의 경우 연평균-5-25%의 변화를 나타내며, 계절별로는-30~35%의 증감을 보임
	대기중의 CO_2변화에 따른 한반도 강수량의 변화(오재호, 홍성길, 1995)	CCC, UI, GFDL의 3개 GCM모의 결과에 근거한 한반도 연 강수량은 봄, 여름, 가을철에 10%, 13%, 24%증가를 겨울철에는 약간의 감소(-13㎜/연)의 변화예측
	기후변화예측기술 : 지구규모 대기환경기초 및 기반기술(환경부, 과학기술처, 1997)	MRI, GFDL등 7개 GCM모의결과를 활용하여 강수량의 증감을 예측
	지구환경의 변화에 따른 한반도 수문환경의 변화연구(윤용남 등, 1998)	MRI GCM과 중규모모형인 IRSHAM96을 이용하여 금강유역의 강수량과 증발산량을 비교
	범지구적 환경의 변화에 따른 갈수 및 홍수의 발생빈도 변화 예측(이재수 등 1998)	이항-지수강수모형에 적용한 결과 여름철의 홍수빈도가 크게 증가할 것으로 예측

이와 같은 연구는 과거의 관측기록에 의한 통계분석 및 시계열분석을 통한 장기변

동특성을 정량화하고 아울러 모형화 과정을 통해 예측가능성을 분석하는 것과 지구환경의 변화를 여러 가지 기후변화 시나리오에 근거하여 GCM을 모의결과를 분석하여 강수 등 수문특성의 변화를 예측하는 것으로 구분할 수 있다. 이를 정리한 것은 <표 2-1>과 같고, 외국의 사례는 <표 2-2>와 같다.

<표 2-2> 외국의 기후변화로 인한 수문인자의 변화 연구사례

연구사례	주요내용
미국 Susquehanna 유역의 기후변화로 인한 확대계수연구(Najjar, 1999)	유역의 확대계소 산정결과 1.92로 유출의 변화량이 강수량 변화율의 약 2배로 산출됨
미국 서부지역 하천의 경향분석(Wahl, 1991)	경향분석은 양이 아닌 비율에 한정되어야하며, 연구결과 뚜렷한 경향이 발견되지 않음
캐나다 Britisch Columbia와 Yukon의 기상수문자료 분석(Leith, 1991)	Mann-Kendall경향분석결과 전체58개 관측소중 17개 관측소에서 연유출이 감소할 경우 4월에서 7월사이의 융설유출이 유의 수준에서 감소경향하는 것으로 발견됨
아메리카와 아프리카 7개 호소수위에 대한 경향분석(Kite, 1992)	온도, 강수량, 유출을 분석한 결과 유의한 선형경향을 나타냈으나, 기후변화로 인한 영향으로 보기는 어렵다고 판단함
오스트레일리아 30개 하천의 연평균 유출경향 분석(Chiew, McMahon, 1993)	5가지의 통계분석을 실시하여 유의수준의 경향을 발견코자했으나, 자료기간의 단기로 인해 기후변화로 인한 영향을 찾을 수 없었음
미국전역에 대한 기후 경향분석(Lettenmaier et al, 1994)	기후와 수자원관리 등의 복합적 요인에 따라 유출 및 기후변수의 상관성이 일치하지 않는 것으로 판단함
남아메리카 기상수문 경향분석(Marengo, 1995)	남아메리카의 기상수문자료해석결과 페루북부해안과 브라질 동부에서 건조경향이 발견되었으며, 전체적으로 남아메리카의 유출 변동 혹은 경향은 발견하지 못함
전세계 176개 하천에 대한 유출 경향분석 방법론 비교(Mitosek, 1995)	Mann-Kendall 분석이 Kruskal-Wallis 분석보다 민감함
열한개 미국내 하천유출분석(Lins, 1994)	1940년 이후 개발이 이루어지지 않은 거의 모든 하천에서 유출이 증가하는 결과 도출
Britsh Columbia 주 여섯 개 하천 유출 경향분석(Leith, Whitefield, 1998)	개발된 유역에서도 지구온난화로 인한 영향을 감지할 수 있었음
캐나다 Churchill-Nelson 유역의 117개 하천에 대한 경향분석(Westmacott, Burn, 1997)	전체 하천의 30%에서 감소경향이 나타났으며, 유출은 온도와 역상관성을 보이는 것으로 나타남

2. 기후변화에 따른 GCM을 이용한 수자원 변화

우리나라의 기후변화에 따른 수자원영향평가는 및 관련 연구는 매우 미미한 실정이다. 1990년대 이후 GCM을 이용한 수자원 변화 연구를 정리한 것은 다음 표와 같다.

<표 2-3> 우리나라의 GCM을 이용한 수자원 변화 연구사례

연구사례	주요내용
기후변화가 한반도에 미치는 영향에 관한 심포지엄(김승 김현준, 1994)	기상청 기상연구소에서 GCM을 이용하여 5대강유역에 적용하여 유출량을 추정한 결과 평균적으로 약 25%정도의 유출증가를 예측
기후변화영향평가 및 영상처리기술개발(한국과학기술연구원, 1995b)	6개 댐 유역에 대해 물수지 산출모형을 개발하고 이 모형에 근거해 유출량을 추정한 결과 강수량 증가에 비해 약 2-4배의 유출량 증가가 예측
배증 이산화탄소 기후에 따른 동북아시아 지역의 수문 영향(오성남, 하경자. 1998)	GCM을 기반으로 기후변화가 동북아시아 지역의 지표 물수지에 미치는 영향을 현재의 상태와 비교하여 지표의 수문변화를 정량적으로 파악

<표 2-4> 외국의 GCM을 이용한 수자원 변화 연구사례

연구사례	주요내용
GCM을 이용하여 전세계 16개 대하천에 대해 현재 유출량모의(Khul, Miller, 1992)	모의 결과 계절적 진동 등은 유사하게 모의 하였지만, 양적으로 만족할 만한 수준은 아니었으며, 이는 실제 GCM을 이용한 직접유출 모의한계를 보임
GCM을 이용한 오스트레일리아 28개 유역에 대한 유출 및 함수량 모의(Chiew, 1995)	5개의 GCM을 이용 2030년과 2070년에 대한 유출과 토양함수비를 모의
GCM결과 수문모형을 결합하여 유출변화 모의(Kwadijk, Romans, 1995)	라인강 전체 유역의 연평균 유출량변화가 없었으나 겨울과 봄에는 유출증가, 여름과 가을에는 유출감소가 나타나며, 계절적 변화가 심한 것으로 모의됨
영국 39개 유역에 대한 GCM에 기초한 유출변화모의(Sefton, Boorman, 1996)	이산화탄소 배증 시나리오하에서 영구의 중부와 동부지역이 유출감소로 인한 가무피해가 증가할 것으로 모의됨
미국북동부지역에 대한 유출모의(Vogel, 1997)	4개 GCM을 이용한 결과와 다중회귀를 이용한 유출모의 결과 유사한 경향을 발견하여 다중 회귀식의 새로운 모수를 찾는 별도의 외삽과정이 불필요함을 주장
벨기에의 8개 유역에 대한 유출모의(Gellens, Roulin, 1998)	7개 GCM모의결과와 IRMB를 이용하여 벨기에지역에서 겨울기간동안 홍수빈도가 증가할 것을 분석

외국의 경우는 1990년대 이후 GCM을 수문모형과 연계하여 기후변화로 인한 수자원변화연구를 수행한 사례가 많이 있으며, 이를 정리한 것은 위의 표와 같다.

GCM 출력을 이용한 연구에서는 사용한 GCM 출력에 의해 다른 결과를 얻을 수 있지만, 미국에서 행해진 GCM을 이용한 다른 연구 결과를 해석해 보면, 「지구 온난화에 의해 북위 55도 이남에서 유출량은 감소하고, 북미 북부에서 유출량은 증가한다」라는 결과를 얻고 있다.

3. 결정론적 수문모델을 이용하는 방법

해외 많은 연구자들은 결정론적 수문모델을 이용해 연구를 실시하고 있으며, 캘리포니아의 새크러먼트강의 연구에서는, 이산화탄소 농도 2배 시의 GCM 출력을 이용해 시뮬레이션 한 결과, 겨울의 유량은 16~81% 증가하고, 여름은 30~68% 감소하고 있는 것으로 보고하고 있다.

최근에는 세계 규모로 수자원에 미치는 영향을 평가하는 모델도 개발되고 있다. 독일 Kassel 대학의 CESR(Center for Environmental System Research)는, WaterGAP (Joseph Alcamo *et al.*, 1997)이라고 하는 모델을 개발했다. WaterGAP은 유출만이 아닌 물수요량도 고려하여 장래 물의 안정공급성을 평가하고 있지만, 여기에서는 유출과정의 부분만 설명하면 다음과 같다.

WaterGAP에서는 경도×위도=0.5도×0.5도의 격자마다 유출량을 산정해, Klepper에 의한 전 세계 1162 유역 구분에 대해 유량을 산정하고 있다. WaterGAP의 유출 모델에서는, 우선 토양 수분량을 생각 토양 수분의 변화량은 강수와 융설의 합계로부터 증발산량과 유출량을 뺀 것으로 하였다. 산정 연도는 1995년, 2025년 및 2075년이다. 2025년과 2075년에 대해서는, MPI(Max-Planck-Institut) 모델과 GFDL(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) 모델의 2개의 GCM을 이용하여 기온과 강수량의 데이터를 작성해, 유출 모델에 입력하고 있다.

WaterGAP를 이용한 시뮬레이션의 결과, 1995년에 비해 2025년에 세계 대부분의

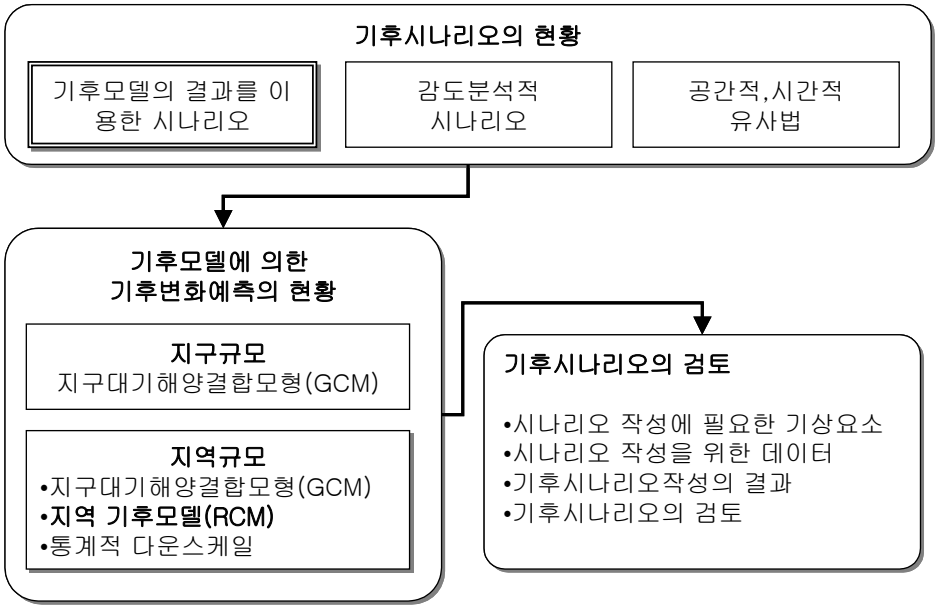
지역에서 유출량에 큰 변화는 볼 수 없지만, 중국 화중 및 화남 지구에서는 유출량이 20~50㎜/년 증가하고, 갠지스・프라마프트라 강 하류 부근에서는 150㎜/년 이상의 유출량 증가, 아마존강 하류에서는 150㎜/년 이상 유출량이 감소한다고 보고하고 있다. 또, 2075년에는 중위도 지역에서 큰 유출량의 변화는 볼 수 없지만, 화중・화남에서는 50~150㎜/년 유출량이 증가하고, 갠지스강유역에서는 150~500㎜/년 유출량이 증가하며, 아마존강 하류에서도 150㎜/년 이상의 유출량 증가가 있다고 보고하고 있다.

일본에서도 기후 변동에 의한 수자원에의 영향이 다수 연구되고 있다. 지금까지 행해져 온 연구는, 그 대부분이 계산하는 시점(예를 들면 이산화탄소 농도 2배시)에 있어서의 기온 변화량과 강수량 변화율을 가정해, 강수 유출 해석을 실시해 유량의 변화를 조사하는 것이다(西岡 등, 1997).

제3장 기후변화 시나리오의 검토

1. 개요

기후변화의 영향을 평가하기 위해서는 영향 예측의 목적에 적합한 모형을 구축하고, 적절한 방법으로 장래의 기후시나리오를 설계하여 기후변화에 따른 영향평가를 실시하게 된다. 기후 시나리오의 작성을 위해서는 아래그림과 같은 여러 가지 기후시나리오의 현황, 시나리오 작성에 이용되는 기후모형에 의한 기후변화 예측의 현상 등을 정리하고, 시나리오 작성시의 문제와 현재 상황에서 고려 가능한 시나리오의 검토가 필요하다.



<그림 3-1> 기후변화 시나리오 검토의 단계

기후변화로 인한 영향을 예측하고 평가하기 위해서는 장래 기후조건에 관한 합리적 예측과 각 영향 평가 항목에 대한 모형의 설계 및 통합적인 영향평가 과정이 요구된다. 기후변화 영향 연구에 주로 이용되는 기후예측 방법으로는 첫째, GCM이나 RCM 등 기후모형의 결과를 이용하는 방법과 둘째, 감도분석적 방법 셋째, 유사법에 의한 방법이 있다.

현재 IPCC의 정보분배센터(Data Distribution Center)에서는 기후변화에 의한 일관된 영향연구를 위해 SRES 시나리오에 의한 수개의 GCM 결과들을 제공하고 있다. 기후모형에 의한 GCM의 결과들은 장기간에 걸친 월단위의 다양한 기후요소들을 제공하나 공간 해상도가 성겨 한국과 같은 지역연구에 충분한 공간 정보를 제공하지 못하고 있다. 따라서 한국의 기후변화 영향 예측연구에서는 공간해상도가 향상된 RCM의 연구 결과와 통계적인 방법에 의해 해상도가 향상된 GCM의 결과를 이용하거나 감도분석적인 방법을 이용한 연구 방법이 제안 될 수 있다. <표 3-1>은 영향분야별 기후시나리오 작성에 필요한 기상요소를 정리한 것이다.

<표 3-1> 기후시나리오 작성에 필요한 영향분야별 기상요소

분야	영향 항목	예상 영향	영향평가에 필요한 기상 요소						요구시간	공간 해상도
			강수	기온	습도	일사	풍속	기타		
수자원	물공급	댐의 저류량 변화	○	○	○	○	○	적설량	10일・월・년	20×20㎢
		토양 등의 저류량 변화	○	○	○	○	○	적설량		
	물수요	농업용수 수요량의 변화	○	○	○	○	○	-		
		도시용수 수요량의 변화	○	○	○	○	○	-		
	기타	호소・하천 등의 수질변화	○	○	-	-	-	-		
		수온 변화	○	○	-	○	-	-		
삼림	식림수종	재목의 성장 변화	○	○	-	-	-	-	년	지역별
		재질의 변화	○	○	-	-	-	-	년	

<표 3-1> 계속

분야	영향 항목	예상 영향	영향평가에 필요한 기상 요소						요구시간	공간 해상도
			강수	기온	습도	일사	풍속	기타		
생태계	고산생태계	고산식물의 분포종에 대한 변화	-	○	-	-	-	-	계절	20×20㎢
	삼림생태계	식물·동물·곤충 종의 변화	○	○	-	-	-	-	계절	
	자연초원, 습지	식물·동물·곤충 종의 변화	○	○	-	-	-	-	계절	
	생물다양성		○	○	-	-	-	-	계절	
	생태계	산림 식생대이동 및 구조와 기능 변화	○	○	○	○	-	적설량	계절	20×20㎢
	산호초	산호초의 멸종	-	-	-	-	-	해수온도, 해수면	계절	
방재·국토보전	수해	홍수	○	-	-	-	-	집중호우와 같은 극단적인 현상	분·시간	
		융설홍수	○	○	-	○	-		시간·일	
	교통시설(항만)	파랑·고조(高潮)·침수의 증대	-	-	-	-	-	해수면, 태풍 등 기상재해	시간·일·월·년	
	교통시설(도로·철도·공항)	연안입지시설의 침수	-	-	-	-	-	해수면	년	
	해안보전	파랑·고조(高潮)·침수의 증대	-	-	-	-	-	해수면, 태풍 등 기상재해	시간·일·월·년	
	치산(治山) 치수(治水)	하천범람, 토사재해의 증대	○	-	-	-	-	태풍 등 기상재해	시간·일	
식료	토양환경	토양유기물의 분해 부족	-	○	-	-	-	-	월·년	20×20㎢
		토양침식량의 증가	○	-	-	-	-	강수강도	월·년	
		농지의 수몰, 지하수 상승, 염수화	-	-	-	-	-	해수면	월·년	
	수경재배	생산량의 변화	○	○	○	○	○	태풍 등 기상재해, 저온발생율, 이산화탄소농도	일·월·년	
	수경이외의 농작물	생산량의 변화	○	○	○	○	○		일·월·년	
	기타	해충의 분포, 발생종류의 변화	-	○	-	-	-	-	월·년	
		잡초의 변화	○	○	-	-	-	-	월·년	

<표 3-1> 계속

분야	영향 항목	예상 영향	영향평가에 필요한 기상 요소						요구시간	공간 해상도
			강수	기온	습도	일사	풍속	기타		
산업·에너지	상수도	물의 수요 변화, 물의 공급량 변화	○	○	○	○	○	적설	10일·월·년	
	하수도배수	바다나 하구의 배수효율 저하	-	-	-	-	-	해수면	월·년	
	전력선·통신선	강풍에 의한 절단	-	-	-	-	○	강풍과 같은 극단적 현상	시간	
	에너지 수급	에너지 수요변화 발전소의 효율저하 발전소·석유정제 시설의 침수	○	○	○	○	-	해수온도	시간·일·월·년	
건강·시민생활	사망률		-	○	-	-	-	-	년	지역별
	심혈관계질환	발병율의 변화	-	○	-	-	-	-	년	
	흉혈관계질환	발병율의 변화	-	○	-	-	-	-	년	
	호흡기계질환	발병율의 변화	-	○	-	-	-	-	년	
	열중병	발병율의 변화	-	○	-	-	-	-	년	
	수매개성 감염병	콜레라 발병율의 변화	-	○	-	-	-	-	년	
	식물매개성 감염병	말라리아 발병율의 변화	○	○	-	-	-	-	년	

2. 기후 시나리오의 종류

기후시나리오를 구축하는 여러 가지 방법이 있으며, 이러한 방법들은 <표 3-2>에 요약하여 각 방법의 장단점을 정리하였다. 우리나라의 경우 기후변화를 예측하는 시나리오가 작성되어 있지 않아 주로 외국의 사례를 정리하였다.

가. 유사법에 의한 시나리오

유사법에 의한 시나리오 작성방법은 장래의 기후와 유사하다고 판단되는 것과 관련짓는 방법이다. 이 시나리오의 작성방법으로는 공간적 유사법과 시간적 유사법이

있다.

공간적 유사법은 연구대상지역의 장래 예상되는 기후와 유사한 기후를 현재 가지는 지역과 연관짓는 방법이다. 예를 들어, 아이슬랜드의 장래 예상되는 기후로 잉글랜드 북부를 대응하는 연구와 뉴욕의 장래 열사에 의한 사망률을 아틀랜타에 대응한 연구 등이 있다. 이 방법에서 평가 대상지역과 대응시키는 지역은 여러 가지 조건에서 공통성이 있다는 것을 전제로 하므로 제약이 큰 방법이다.

시간적 유사법은 장래에 발생할 기후변화를 과거의 기후 정보로부터 유추하는 것으로 고기후 유사법과 계측에 근거한 유사법의 두 가지 종류가 있다. 고기후 유사법은 장래 예상되는 기후와 유사성이 있다고 생각되는 과거의 기후를 관련짓는 방법이다. 이 방법을 사용할 경우 특히 주목받는 시대는 완신세 중기(약 5~6천년 전)와 최종간빙기(약 12~13만년전)이다. 이러한 시대는 지구의 평균 기온은 현재와 비슷하거나 현재보다 높아 21세기에 예상되는 기온과 유사하다고 생각되고 있다. 그러나 과거 기후변화의 원인은 온실가스에 증감에 의한 것과는 다르다. 이 때문에 과거 기후변화의 지역적·계절적 분포패턴이 반드시 장래의 변화와 부합된다고 말할 수 없는 한계를 가지고 있다.

<표 3-2> 과거 사례로부터의 유추에 의한 시나리오 작성사례

시나리오 작성방법	작성사례	내용
온난기와 냉한기의 비교에 의한 유추	건설성 관동지방건설국 (1993)	온난기(1955-1964)와 냉한기(1901-1910)의 강수량과 기온을 사용하여 기온 1℃상승기의 지역별 수자원부존량을 추정
	건설성 토목연구소 댐부 수공수자원연구실 (1997)	온난기(1978-1987)과 냉한기(1904-1913)을 비교하여 평균기온 및 년평균강수량의 차(온난기-냉한기)가 점차적으로 +1℃, 7.4% 낮아지는 것으로 나타났다. 이2시기의 기온과 강수량의 실적치를 사용하여 기온차가 댐운용에 미치는 영향을 조사
과거의 고온사례에 의한 유추	Mori(1998) 森(2000)	1994년 여름 일본의 평균기온은 평년치보다도 1.8-2.0℃, 일조시간은 최대 평균치보다도 30-40% 길었다. 이 예를 온난화때의 기후로 생각하고 수자원부존량에 미치는 영향 등을 추정

나. 감도분석 목적의 점증시나리오(감도분석적 시나리오)

감도분석적 시나리오는 특정 기후요소의 값을 발생 가능한 범위 내에서 임의로 증가시키는 방법이다.[4] 이 시나리오는 많은 연구에서 기후변화가 연간 일정한 것으로 작성되고 있다. 감도 분석적 시나리오는 설계와 적용이 용이한 반면, 현실적인 변화를 적정하게 반영하지 못할 가능성이 높다.

<표 3-3> 감도분석적 방법에 의한 시나리오 작성사례

작성사례	내용
益倉・吉谷 (1992)	5년간의 일단위 강수유출을 계산 온도변화 △T : 1, 2, 3.5℃ 강수량변화 △P : -5, 0, +5, +10 (년간표준 시나리오 및 기상청 GCM에 기초한 월변화시나리오에 의한 평형실험)
丹羽 외 (1993)	10년간의 일단위강수유출 및 댐의 운용계산 온도변화 △T : 1, 2, 3℃ 강수량변화 △P : -10, 0, +10 (년간표준 시나리오에 의한 평형실험)
安藤 (1994)	11년간의 일단위 강수유출의 계산 온도변화 △T : 0, 3, 5℃ 강수량변화 △P : -10, 0, +10 (년간표준 시나리오 및 기상청 GCM에 기초한 월변화시나리오에 의한 평형실험)

다. 기후모형의 결과에 기초해 작성한 시나리오(GCM, RCM)

기후모형은 기후시나리오 작성시 가장 중요한 정보를 제공한다. 기후모형은 GCM과 대기해양대순환모형(Atmosphere-Ocean General Circulation Model, ‘이후 AOGCM)이 이용 가능하다. AOGCM을 이용한 장래 기후변화 예측은 최근까지 활발히 수행되고 있으나 다음과 같은 문제점을 가진다. 첫째, 대규모의 전산장비를 요구하

4) 예를 들어 기온의 변화를 1, 2, 3℃씩 상승시키며 이로 인한 변화를 모의

며, 둘째, 공간해상도가 너무 크며, 셋째, 인간활동에 의한 기후변화 원인과 모형상의 자연변동에 원인이 분리되어 있고, 넷째, 여러 모형간의 기후감도가 다르다.

<표 3-4> 기후모형의 결과에 기초한 시나리오 작성사례

작성사례	내용
건설성 토목연구소 하천부 수문연구실 (1996)	대기-강수과정60㎞메슈모델과 강수-수문20㎞메슈모델을 사용하여 온난화에 따라 발생하는 수분특성의 변화를 계산. 여기에서 CO_2 현상시 CO_2 2배시의 GCM의 계산결과를 60㎞메슈모델의 초기조건・경계조건으로 한다. 1년간의 기온, 상대온도, 풍속, 강수량, 지표면수분량의 각월평균, 년평균을 계산.
농환연뉴스 (1997)	기상연구소의 AOGCM에 의한 CO_2 1% 점증수치실험결과를 갖고 「국지기후시나리오」를 작성. 공간해상도는 약10㎞메슈로 100년후 까지의 기온변화, 강수량변화, 일조량변화 등을 10년 것으로 시나리오화 하고 있다.
농환연	IPCC DDC에 의,해 공개된 전지구AOGCM의 계산결과상 4가지 모델(CSIRO, DKRZ, CCC, CCSR)의 결과를 사용하여 10㎞의 「국지기후시나리오」를 작성. 약10㎞메슈로 월평균기온, 월평균최고기온, 월평균최저기온, 월강수량, 월평균일조량을 2000~2099까지 10년 것으로 10년간의 월별 평균으로 작성하고 있다.
井上 외(1998)	일본의 강설심, 최심적설, 설질의 변동을 100년후까지 10년 것으로 추정. 입력테이터로서 10㎞메슈의 「국지기후시나리오」를 사용하였다. 이것은 기상연구소의 모델에 의한 CO_2 1% 점증수치실험결과를 갖고 농업환경기술연구소에서 작성한 데이터이다.
高橋 외(2000)	2050-2059년의 표면유출량을 추산. 장래기후시나리오로서 가나다기후센터, Max Frank연구소, 동경대기후시스템센터/환경연구소의 GCM의 출력(1% 점증실험)을 사용하고 있다. 0.5°×0.5°의 공간분해상.

라. 시나리오 연구방법 비교 분석

앞에서 언급한 것과 같이 시나리오 작성 방법은 유사법에 의한 방법, 감도분석 목적의 점증 방법, 기후모형의 결과에 입각한 방법의 3가지로 구분하여 볼 수 있으며, 이 장단점을 정리한 것은 다음과 같다.

<표 3-5> 다양한 기후시나리오 연구방법의 장단점

기후시나리오의 종류		개요/이용법	장 점	단 점
유사법에 의한 기후시나리오	고기후 유사 시나리오	· 과거의 온난한 기간을 묘사	· 2100년까지예상되는 동일 규모의 변화에서 과거에 실제 발생하고 물리적으로 일어날 수 있는 기후변동	· 시공간적 해상도가 낮음 · 온실가스의 증가와 연관 없음
	Instrumental	· 취약성 및 적응능력을 조사	· 물리적으로 실현가능한 변화 · 해상도가 높아 내부정합성이 있어 변수의 조합이 가능 · 자료를 직접 취득 가능함	· 온실가스 증가와 반드시 관련이 없음 · 기후변화의 규모가 일반적으로 비상적으로 낮음 · 최근의 유사사례를 획득하지 못할 가능성이 있음
	공간적 유사 시나리오	· 기후/생태계의 관계를 외삽	· 고해상도 변수를 풍부하게 조합하는 것이 가능함	· 온실가스 증가와 관련이 없음 · 물리적 획득하지 못할 장소가 많음 · 적절한 유사사례를 갖지 못할 경우가 있음
점증시나리오 (감도분석적 시나리오)		· 시스템의 감도 테스터 · 주요한 기후 임계치의 지점	· 설계, 적용이 용이	· 비현실적인 시나리오의 가능성 · 온실가스의 증가와 직접적 연관 없음
기후모형결과에 기초한 기후시나리오	AOGCM 결과의 직접이용	· 많은 기후 시나리오의 출발점 · 인위적 강제에 대한 대규모의 응답	· 최신의 포괄적인 물리법칙에 근거 · 장기간의 결과 · 자료의 직접이용가능 · 다양한 요소의 정보이용가능	· 공간해상도가 낮음 · 비상식적으로 큰 값을 나타내는 지역을 제거 · 복수의 시나리오 작성시 계산기 부하가 큼 · 특정지역은 기준실험의 큰 편차가 문제가 됨
	고해상도 GCM	· 지구/대륙규모의 고해상도 정보 제공	· 고해상도의 정보제공 · 물리법칙에 기초한 모형에 의해 획득된 정보 · 다양한 요소의 정보이용가능	· 복수의 시나리오 작성시 계산기 부하가 높음 · 고해상도는 AOGCM의 SST와 해빙의 범위에 의존 · AOGCM의 결과에 의존
	지역기후모형	· 시공간적인 고해상도 정보 제공	· 시공간적인 고해상도의 정보제공 · 물리법칙에 기초한 모형에 의해 획득된 정보 · 다양한 요소의 정보 이용가능 · 극단적인 기상현상에 관한 GCM 상의 표현력이 높음	· 계산기 부하가 높아, 많은 시나리오를 작성하지 못함 · AOGCM의 결과에 의존
	통계적 다운스케일링	· 지점에 있어 공간적으로 높은 해상도의 정보제공	· 고해상도 혹은 균질하지 않은 지역에 관한 정보를 생성출력하는 것이 가능 · 다양한 변수를 취급하는 능력이 있음 · 변수는 내부 정합성이 있음 · 계산기 부하가 비교적 낮음 · 복수의 GCM에 적용가능	· 과거의 경험적 연관성을 장래에 이용 · 변동이 날의 지상 도는 상층의 관측 데이터가 필요 · AOGCM의 결과에 의존

3. 기후 모형

기후모형은 영향분야에 마다 공간적인 스케일이 다를 것으로 판단된다. 즉, 전세계 차원에서 기후변화를 예측해야 좋은 경우와 지역차원에서 예측해야 하는 경우가 있을 것으로 판단된다. 이러한 측면에서 전세계기후모형과 지역기후모형의 순으로 정리하였다.

가. IPCC SRES 전세계기후모형

전세계기후모형 가운데 중요한 역할은 AOGCM과 여러 가지로 관련되어 나타난다. 여기에서는 세계 각국의 모델에 관하여는 주로 IPCC(2001)자료 등 각종 문헌자료를 수집하여 정리하였다.

<그림 3-2> 시기별 기후모형 변화 추세

AOGCM이나 RCM 등은 장래의 기후를 평가하기 위하여 이용될 수 가장 강력한 수단이다. 이들 모델에서는 기후를 예측하기 위하여 매우 중요한 과정을 거쳐야한다. 기후모델은 컴퓨터의 발달과 더불어 과거 수 십년에 걸쳐 개발될 수 있었다. 초기에는 대기, 지표면, 해양, 해빙 등 중요한 요소의 모델이 각각 개발된 후 종합되었다(IPCC, 2001)(그림 3-1참조).

<표 3-6> IPCC(2001)에 의해 채택되고 있는 AOGCM

모델명	그룹명	국가	CMIP	대기모형 해상도	해양모형 해상도	지표면 스킴	해빙	Flux 조정
ARPEGE/OPA1	CERFACS	FRANCE	1	T21 (5.6 x 5.6) L30	2.0 x 2.0 L31*	C	(d)	-
ARPEGE/OPA2	CERFACS	FRANCE	2	T31 (3.9 x 3.9) L19	2.0 x 2.0 L31*	C	T	-
BMRCa	BMRC	AUSTRALIA	1	R21 (3.2 x 5.6) L9	3.2 x 5.6 L12	M,B	T	-
BMRCb	BMRC	AUSTRALIA	2	R21 (3.2 x 5.6) L17	3.2 x 5.6 L12*	M,B	T	H,W
CCSR/NIES	CCSR/NIES	JAPAN	1,2	T21 (5.6 x 5.6) L20	2.8 x 2.8 L17	M,BB	T	H,W
CGCM1	CCCma	CANADA	1,2	T32 (3.8 x 3.8) L10	1.8 x 1.8 L29	M,BB	T	H,W
CGCM2	CCCma	CANADA	-	T32 (3.8 x 3.8) L10	1.8 x 1.8 L29	M,BB	T,R	H,W
COLA1	COLA	USA	1	R15 (4.5 x 7.5) L9	1.5 x 1.5 L20*	C	T	-
COLA2	COLA	USA	1	T30 (4 x 4) L18	3.0 x 3.0 L20*	C	T	-
CSIRO Mk2	CSIRO	AUSTRALIA	1,2	R21 (3.2 x 5.6) L9	3.2 x 5.6 L21	C	T,R	H,W,M
CSM 1.0	NCAR	USA	1,2	T42 (2.8 x 2.8) L18	2.0 x 2.4 L45*	C	T,R	-
CSM 1.3	NCAR	USA	-	T42 (2.8 x 2.8) L18	2.0 x 2.4 L45*	C	T,R	-
ECHAM1/LSG	DKRZ	GERMANY	1	T21 (5.6 x 5.6) L19	4.0 x 4.0 L11	C	T	H,W,M
ECHAM3/LSG	DKRZ	GERMANY	1,2	T21 (5.6 x 5.6) L19	4.0 x 4.0 L11	C	T	H,W,M
ECHAM4/OPYC3	DKRZ	GERMANY	1	T42 (2.8 x 2.8) L19	2.8 x 2.8 L11*	C	T,R	H,W(*)
GFDL_R15_a	GFDL	USA	1,2	R15 (4.5 x 7.5) L9	4.5 x 3.7 L12	B	T,F	H,W
GFDL_R15_b	GFDL	USA	-	R15 (4.5 x 7.5) L9	4.5 x 3.7 L12	B	T,F	H,W
GFDL_R30_c	GFDL	USA	-	R30 (2.25 x 3.75) L14	1.875 x 2.25 L18	B	T,F	H,W
GISS1	GISS	USA	1	4.0 x 5.0 L9	4.0 x 5.0 L16	C	T	-
GISS2	GISS	USA	1,2	4.0 x 5.0 L9	4.0 x 5.0 L13	C	T	-
GOALS	IAP/LASG	CHINA	1,2	R15 (4.5 x 7.5) L9	4.0 x 5.0 L20	C	T	H,W,M
HadCM2	UKMO	UK	1,2	2.5 x 3.75 L19	2.5 x 3.75 L20	C	T,F	H,W
HadCM3	UKMO	UK	2	2.5 x 3.75 L19	1.25 x 1.25 L20	C	T,F	-
IPSL-CM1	IPSL/LMD	FRANCE	1	5.6 x 3.8 L15	2.0 x 2.0 L31*	C	(d)	-
IPSL-CM2	IPSL/LMD	FRANCE	2	5.6 x 3.8 L15	2.0 x 2.0 L31*	C	T	-
MRI1a	MRI	JAPAN	1,(2)a	4.0 x 5.0 L15	2.0 x 2.5 L21(23)a*	M,B	T,F	H,W
MRI2	MRI	JAPAN	-	T42(2.8 x 2.8) L30	2.0 x 2.5 L23*	C	T,F	H,W,M
NCAR1	NCAR	USA	1,2	R15 (4.5 x 7.5) L9	1.0 x 1.0 L20	B	T,R	-
NRL	NRL	USA	1,2	T47 (2.5 x 2.5) L18	1.0 x 2.0 L25*	BB	T(p)	H,W(*)
DOE PCM	NCAR	USA	2	T42 (2.8 x 2.8) L18	0.67 x 0.67 L32	C	T,R	-
CCSR/NIES2	CCSR/NIES	JAPAN	-	T21 (5.6 x 5.6) L20	2.8 x 3.8 L17	M,BB	T	H,W

주: 1)B는 바켓모델, BB 는 수정바켓모델, M은 다층온도모델, C는 복잡한 지표면모델을 나타냄.
2)T는 열역학적해빙모델, F는 후리-도리후도, R은 레오로지를 포함한 역학적해빙모델을 나타냄.
3)H, W, M은 여러 가지 열, 담수, 운동량의 플럭스조정을 의미한다. (*)은 년평균 플럭스

정비를 나타냄.

- CERFACS : European Center for Research and Advanced Training in Scientific Computation(France)
- BMRC : Bureau of Meteorology Research Center(Australia)
- CCSR/NIES : Center for Climate System Research(Japan)/ National Institute for Environmental Studies(Japan)
- CCCma : Canadian Center for Climate(Modeling and Analysis)(Canada)
- COLA : Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies(USA)
- CSIRO : Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation(Australia)
- NCAR : National Center for Atmospheric Research(USA)
- DKRZ : Deutsche KlimaRechenZentrum(Germany)
- GFDL : Geophysical Fluid Dynamics Laboratory(USA)
- GISS : Goddard Institute for Space Studies(USA)
- IAP/LASG : Institute of Atmospheric Physics(China)/State Key Labiratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics(China)
- UKMO : United Kingdom Met Office(UK)
- IPSL/LMD : Institut Pierre Simon Laplace/ Laboratoier de Meteorologie Dynamique(France)
- MRI : Meteorogocal Research Institute(Japan)
- NRL : Naval Research Laboratory(USA)
- NCAR : National Center for Atmospheric Research(USA)

출처 : IPCC(2001)

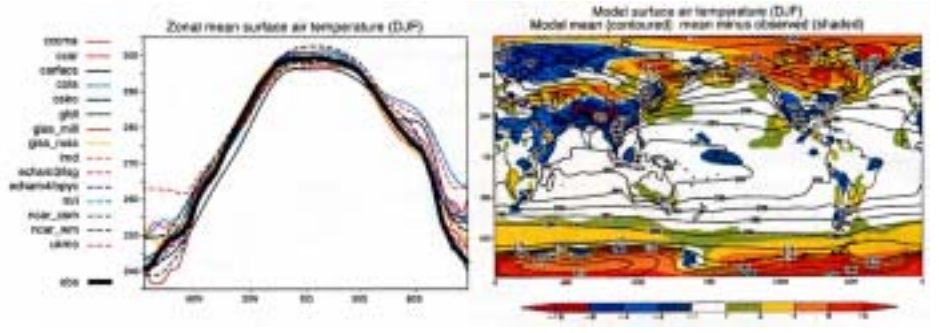
AOGCM은 세계의 다양한 연구기관에서 개발되고 있다. 이들 모델에 관해서는 CLIVAR에 의한 CMIP 등으로 상호비교하고 있는 평가가 이뤄지고 있다. 또한, IPCC(2001)에서는 AOGCM의 평가로 한 장을 이루고 있고 다양한 기상요소에 관해서 평가하고 있다. IPCC(2001)에서는 최근 AOGCM의 발전현상에 관하여 "장래기후를 예측하는 모델능력의 신속성이 증가되었다"고 평가하고 있다.[5)]

AOGCM을 이용하여 장래 기후변화를 예측할 경우, 이들 모델이 현재의 기후를 어느 정도 재현하고 있는가를 상세히 평가할 필요가 있다. 이것을 기준실험이라하며,

5) 개괄적으로 보면, 결합모델은 제2차 평가보고서 시점이래 보다 발전·개량되고 있다. 공간적 측면에서도 대륙이하의 스케일에서 모의가능하며, 시간적 측면에서는 계절간부터 10년간의 크기로 신속하게 기후계산결과가 얻어진다. 따라서 향후 장래기후에 관해 유용한 예측을 제공받을 수 있다.

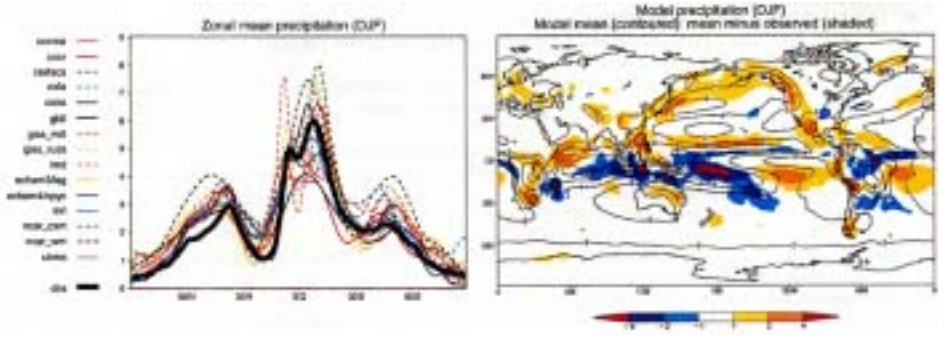
기준실험에서는 대기중의 이산화탄소농도는 현재의 수준인 것으로 고정된다.

CMIP1의 15개 모델(표 3-1 참조)에 의한 지상기온, 강수량의 결과로부터 기온에 관해서는 전모델의 평균치와 관측치와의 차이는 해상에서는 1℃이하, 육상에서는 5℃이하인 것으로 모의되었다. 강수량에 있어서는 기온보다는 약간 오차가 크지만 절대치와 분포패턴은 관측치와 거의 같게 모의되었다.



<그림 3-3> CMIP1 모델에 의한 12월-2월 지상기온 검증

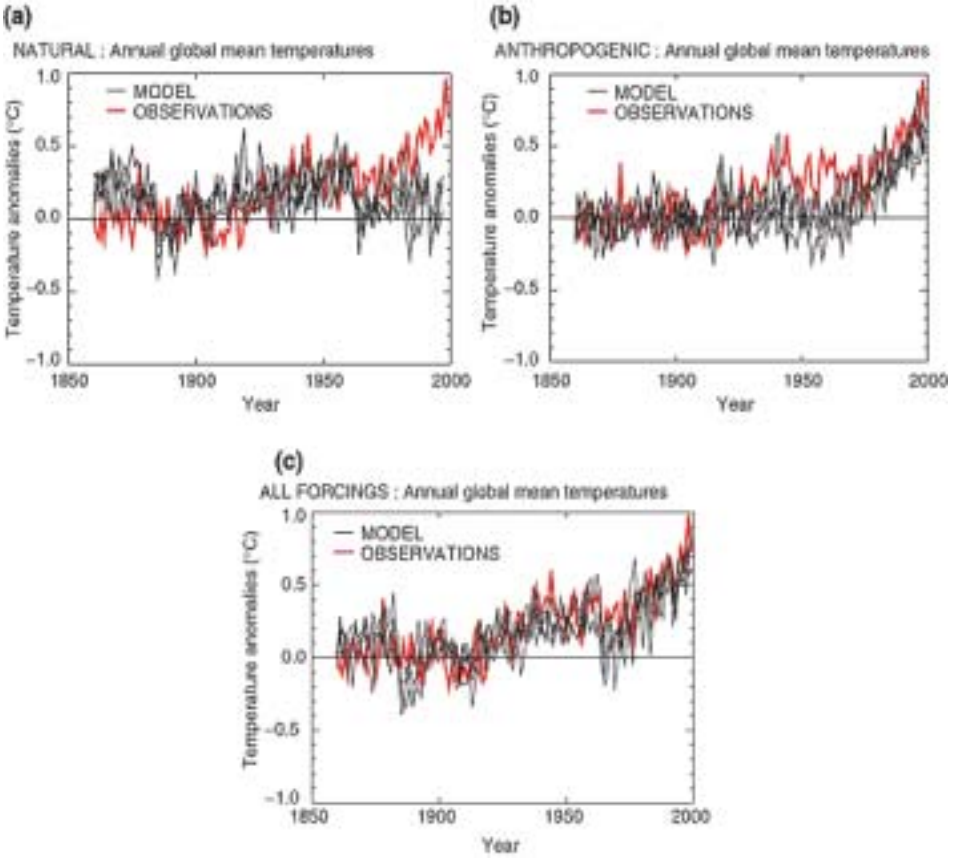
주 : 오른쪽 : CMIP1모델에 의한 12-2월의 지상기온(K)(콘타: 모델평균치, 색농담: 모델관측치)
왼 쪽 : CMIP1의 여러 가지 모델에 의한 12-2월의 기온의 대상평균(K)(흑실선은 관측치)



<그림 3-3> CMIP1 모델에 의한 12월-2월 강수량 검증

주 : 오른쪽 : CMIP1 모델에 의한 12-2의 강수량(㎜/일)(콘타 : 모델평균치, 색농담: 모델관측치)
왼 쪽 : CMIP1의 여러 가지 모델에 의한 12-2월의 강수량의 대상평균(㎜/일)(흑실선은 관측치)

<그림 3-4>는 AOGCM에 의한 과거(1860년경~2000년) 기온의 재현계산결과를 나타낸다(IPCC, 2001). 그림 (a)는 자연기원의 방사강제력을 고려한 경우의 계산결과이며, 그림 (b)는 인위기원의 방사강제력(온실효과가스와 유산(硫酸) 에어로졸의 영향)을 고려한 경우의 결과를 나타낸다. 양자 모두 관측치와의 차이를 나타내며 특히, 자연기원의 경우는 20세기 후반의 기온상승경향이 재현되지 않는다. 또한, 인위기원의 경우 이 상승경향은 재현하지만 20세기 중반의 고온경향이 재현되지 않는다. 그러나 자연기원과 인위기원 양자를 고려한 그림 (c)의 경우 20세기의 지상기온에서 관측된 큰 스케일의 변화를 재현하고 있다. 이와 같이 기온변화를 재현하여 관측된 변화와 비교하는 것에 의해 주요 기온변화의 원인을 밝혀낼 수 있다(환경성 외, 2001)



<그림 3-4> 시나리오별 AOGCM에 의한 기온재현결과

IPCC(2001)에서는 이들의 계산결과에 관하여 어느 정도의 부가적인 과정이나 방사강제력으로부터의 부여가 모델에 포함되어 있지 않은 것도 있지만 모델과 관측은 큰 스케일에서 일치하고 있는 것으로 평가되고 있다.

기후모델은 자연기원의 원인과 인위기원에 의하여 발생되는 기온변화를 재현하는 것에 이용할 수 있다. <그림3-4> (a)의 띠에서 나타난 시뮬레이션결과는 태양방사와 화산분화에 의한 자연기원의 방사강제력만으로 얻어지는 것이다. (b)의 띠에서 나타난 것은 인위기원의 방사강제력(온실효과가스와 유산에어로졸의 영향), (c)의 띠에서 나타난 것은 자연 및 인위기원의 방사강제력 양쪽에서 얻어지는 것이다.

IPCC(2001)에서는 AOGCM의 정확도와 관련하여 다음과 같이 평가하고 있다.

첫째, 종합모델은 기후변화와 관련된 많은 요소에 대하여 대륙적인 스케일에서의 연평균기온 및 기후학적인 계절변화에 관하여 신뢰성있는 결과를 나타낼 수 있으나, 구름과 온도에 있어서는 착실하게 개량되어 온 것일 지라도 상당한 불확정성이 있다.

둘째, 장래의 기후를 예측하는 모델 결과의 신뢰성은 증가하고 있다. 특히 자연적인 원인과 인위적인 원인을 포함한 모형결과의 경우 20세기 후반의 기후변동예측이 정확성이 개선되는 것으로 나타나고 있다.

셋째, 기존 기후모델연구나 지표면에서의 실험(삼림파괴, 사막화, 지표면상태의 변화를 포함)으로부터 대륙이하의 스케일에서의 식생피드백의 중요성이 명백히 나타났다. 식생의 변화가 장래기후예측에 중요할지 어떨지는 상세하게 조사되어야 한다.

넷째, 기후모델에 의해 계산된 극단현상, 특히 태풍의 경로나 강도에 관한 해석이나 신뢰성이 명백해질 수 있다. 그러나 이들의 해석에서는 불확실성이 있으며 열대성 저기압의 변화예측에 주의가 필요하여야 한다.

나. NIES/RAMS 지역기후모형

아시아 지역에 거주하는 사람들의 인간 활동 기반으로서의 물은, 아시아 몬순에 수반하는 물순환에 크게 의존하고 있다. 이 지역의 물순환 변동이 어떠한 구조로 조정되고 있는지, 특히 온실가스배출에 의해 발생되는 변화가 어떻게 물순환에 영향을 미

치는 지는 가까운 장래의 수자원 관리를 위한 이해를 위해서 정밀하게 예측・해석할 필요가 있다.

지구 환경 변동하의 물순환 예측은, 주로 전구기후모델을 이용해 행해지고 있지만, 현 단계에서는 지역 차원의 수자원, 농업 생산 활동 등의 영향평가를 위해서 이용할 수가 있는 정보는 매우 한정되어 있다. 그것은, 전구기후모델의 공간 해상도가 매우 크고, 불확실한 물리 과정을 포함하며, 검증 데이터가 한정되어 있는 것 등에 기인한다. 전구기후모델에 의해 전지구차원에서 예측된 기후 변동의 결과를, 지역 스케일의 기후에 적용해 수자원 관리에 유용하게 쓰려면, 다운스케일링하는 것이 필요하다.

전지구기후모델에 지역기후모델을 네스팅해 역학적 다운스케일링을 실시하는 경우, 물리 과정이 상이함에 따라 생기는 비현실적인 행동을 피하기 위해서 「전지구기후모델과 지역기후모델의 물리 과정이 동일하다」라고 하는 것이 바람직하다.

이러한 가정하에 일본에서는 콜로라도 주립 대학에서 개발된 3차원비정수압・압축모델(RAMS : Regional Atmospheric Modeling System (Pielke *et al.*, 1992))을 기반으로 CCSR/NIES AGCM(Numaguti *et al.*, 1997)의 물리 과정을 도입한 지역 기후 모델(NIES-RAMS, 이후 'RAMS')을 개발했다(Emori *et al.*, 2001).

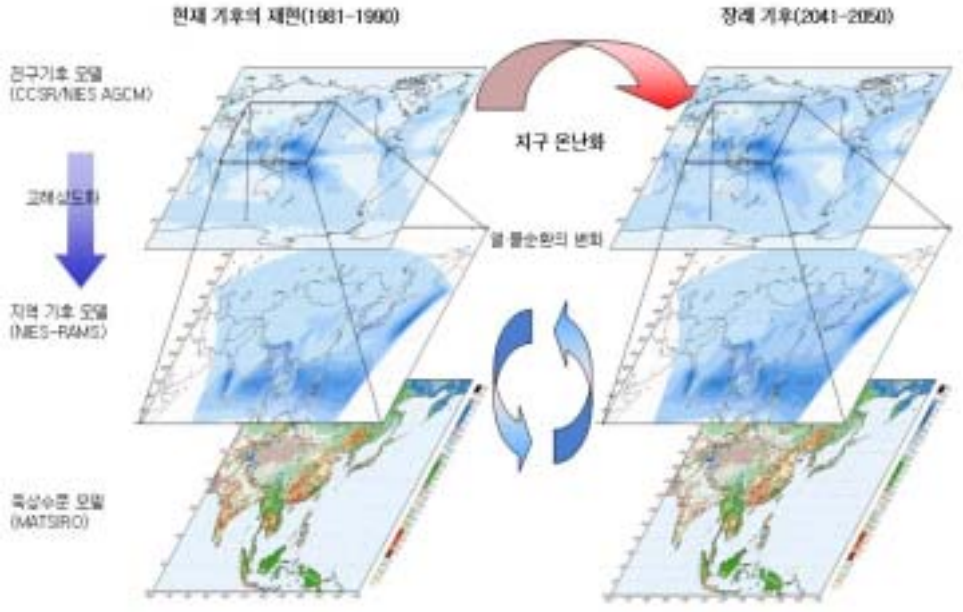
RAMS에 도입된 물리 과정으로는 Arakawa-Schubert 적운 대류 과정(Arakawa and Schubert, 1974), 대규모 응결 과정, 방사 과정(Nakajima *et al.*, 2000), 연직 확산(Mellor and Yamada, 1974, 1982), 육면과정 모델(MATSIRO : minimal advanced treatments of surface interaction and runoff (Takata *et al.*, 2003))이 있다.

전지구기후모델을 경계 조건으로서 지역 기후 모델 실험을 실시하면, 전지구기후모델의 편향을 지역 기후 모델이 계승하거나 지역적 편향을 보다 강하게 할 가능성도 있기 때문에, 유럽 중기 예보 센터(ECMWF)의 15 년 재해석치(ERA15)를 경계 조건으로서 NIES-RAMS에 의한 현재 기후 재현 실험을 실시했다.

그리고, 수평 해상도 T42 (약 2 . 8 번 구라두)의 CCSR / NIES AGCM 의 실험 결과(6 시간 마다)를 경계 조건으로서 NIES - RAMS 에 의한 현재 기후(1981 - 1990)와 장래 기후(2041 - 2050)의 지역 기후 실험을 실시했다.

NIES - RAMS 의 수치 실험의 계산 영역은, 그림-1 에 나타나는 약 9,600 ×

7,100km의 영역에서, 60km의 수평해상도이다. 현재 기후 실험의 해면 수온(SST)과 해빙분포는 UKMO 의 GISST (Rayner *et al.*, 1996)을 이용했다. 장래 기후에서는, T21 의 대기해양결합모델(CGCM) 실험으로부터 얻을 수 있던 계절 변화를 가지는 온난화 패턴을 GISST에 가세한 것을 이용했다.



<그림 3-5> 지역 기후 모델(NIES-RAMS)에 의한 몬순 아시아 지역의 계산 영역과 지형

강수의 관측치도, 데이터 세트에 의해 격차를 볼 수 있지만, 3 개의 관측치의 어떤 것과 비교해도, 모델은 열대역으로 강수를 과대 평가하는 경향이 나타났다. 또, 중국의 동부에 대해도 비교적 강한 강수가 생기고 있다. 이것은, NIES-RAMS의 편향으로 판단된다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 지구기후모델에 지역기후모델을 네스팅하여 역학적 다운스케일링을 실시하는 경우, 물리과정의 오차에 따라 발생하는 비현실적인 현상을 피하기 위해서 개발된 지역기후모델에 신규도입・파라미터 개량된 물리과정

을 도입시켜 지역기후모델을 개량하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

다. 기후모형결과와 영향평가모형 통합의 문제점

모델간 인터페이스의 개발에 앞서, 모델통합에 관련되는 문제점에 대하여 검토하였다. 기후모델과 영향평가모델 각각의 측면에서 모델통합을 방해하는 원인 및 개선방안에 대해 정리하면 다음과 같다.

1) 공간해상도

영향평가모델에서는 지구~대륙규모를 대상으로 하는 비교적 공간스케일이 큰 연구라 할 지라도, 10~50km정도 공간해상도의 기후정보가 필요하다. 또한 국가차원의 연구에서는 보다 고해상도의 기후정보가 요구된다. 한편, 현 시점에서 영향평가이용을 목적으로 제공되는 AOGCM의 공간해상도는 기껏해야 수100km정도이기 때문에 모델통합에 격차가 존재한다.

영향평가연구의 입장에서 보면, 지구시뮬레이터를 이용하여 실시하고 있는 고해상도 AOGCM에 의해, 필요한 공간해상도를 갖는 기후예측이 가까운 장래에 제공되리라는 기대가 크다. 그러나, 기후모델연구 측면에서는 컴퓨터 능력의 향상으로 인한 GCM의 고해상도화가 가능한 프로세스가 존재하는 한편, 고해상도화만으로는 해결할 수 없는 문제[6]도 존재하기 때문에, 영향평가연구의 요구에 부합되는 기후예측을 제공하려면, 아직 해결해야 할 많은 과제가 남아 있다고 본다.

2) 시간해상도

현 시점에 있어서, 영향평가를 위해 제공되는 AOGCM에 의한 기후변화실험출력의 상당수는 월평균치이다. 그러나 홍수와 같은 종류의 현실적인 시뮬레이션을 위해서는, 하루 또는 반나절의 기후정보가 필요하다. 그 종류의 고해상을 필요로 하는 영향연구에서는 현상의 일일변동패턴을 통계적으로 다뤄 필요한 시간해상의 기후시나

6) 예를 들면, 그 해상도에 대해 적절한 물리과정 파라미터의 개발이 새롭게 필요

리오를 개발하여 대처하고 있다. 오늘날 영향연구로부터 기후모델연구에 대해서, AOGCM에 의한 일평균치출력의 제공이 요구되고 있다. 그러나, 기후모델연구의 측면에서는 ①데이터량이 방대한 것 ②일일변동의 재현능력 대하여 아직 검증이 불충분한 것, 등의 이유로 영향연구에 일평균치를 제공하는 것을 꺼리고 있다. 전자의 데이터량의 문제에 대해서는 월평균치로 일평균치를 모사하여 얻은 집계정보(예를 들면, 월별강우일수)를 통하여 해결을 시도하고 있는 기후연구그룹도 있다. 일일변동의 재현능력에 대해서는 향후 검증을 위한 연구가 필요하다.

3) 기후요소의 종류

국제적인 데이터인프라 정비 프로젝트(예: IPCC-DDC)를 통한 기후모델이 제공하는 기후요소의 종류가 영향평가모델이 필요로 하는 입력데이터의 종류와 부합되지 않는 경우가 있다. 어느 정도 환산에 의해 영향모델의 입력정보로 이용될 수 있는 경우도 많지만, 불가능한 경우도 있다. 또한, 동일명칭의 기후요소도 기후모델마다 정의가 가지각색인 경우도 있다. 이 문제는 영향모델연구와 기후모델연구를 실시하며, 개선해 나갈 필요가 있다.

4) 전제로 하는 배출 시나리오의 다양성

장래의 다양한 발전·배출 시나리오를 통해서 영향을 추측하여 치명적인 오류를 피하기 위한 효율적인 대책을 검토하는 것이 영향평가모델연구 목적의 하나이다. 그러나 계산기부하가 크기 때문에 영향평가를 필요로 하는 시나리오 모두에 대하여 AOGCM를 이용한 기후변화실험을 실시하는 것은 불가능하다. 또한, 계산기 기술의 진보에 따라 동일공간해상도에서의 시뮬레이션에 걸리는 시간은 단축되었지만 공간해상도 향상이 우선이기 때문에 다양한 배출시나리오를 통한 기후예측은 하지 않는다. 이 갭을 극복하기 위해 영향모델연구에서는 계산기부하가 작은 간략형 기후모델에 의한 지구평균기온변화와 AOGCM에 의한 기후변화의 공간패턴을 통합하여 기후시나리오를 작성하는 이른바 패턴스케일링이라 불리는 방법이 제안되어 왔다. 그러나 패턴스케일링의 과학적 합리성에 대해서는 향후 더 검토되어야 한다.

5) 기후모델의 불확실성에 관한 정보의 전달

위에 서술한 개별과제와 더불어 양 모델통합에 장해가 되는, 불확실성에 관한 정보의 전달이 있다. 기후모델연구는 활발히 개량되고 있는 연구분야이며 기후변화실험의 출력결과에는 불확실성이 크고 작은 정보가 혼재하고 있다. 문제가 되는 것은 불확실성 자체가 아니고 불확실성에 관한 기후모델연구의 인식이 적절하게 영향모델연구에 전달되지 않는 것이다

이러한 문제점을 해결하기 위하여 지구기후모델에 지역기후모델을 네스팅하여 역학적 다운슬케이링을 실시하는 경우, 물리과정의 오차에 따라 발생하는 비현실적인 현상을 피하기 위해서 지구기후모델과 지역기후모델이 정합적인 물리과정을 거치는 것이 바람직하다.

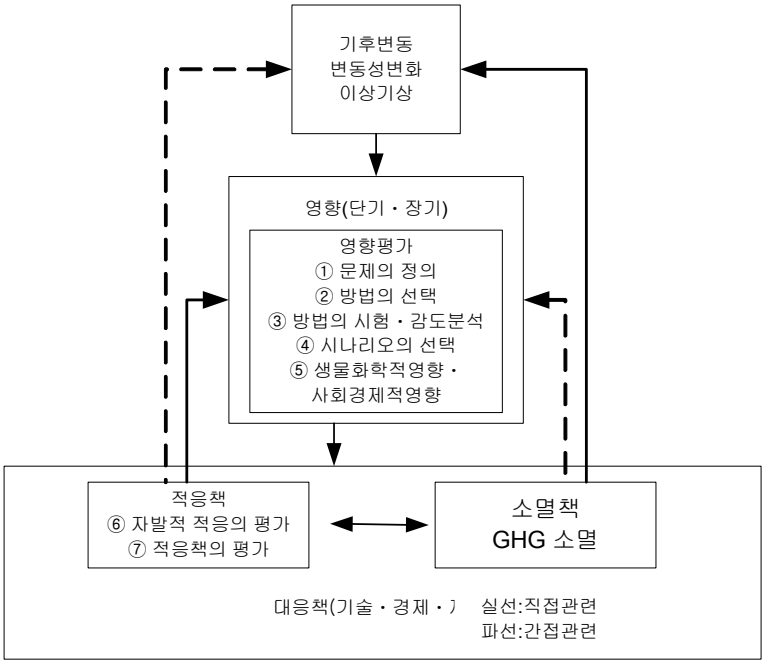
4. 기후 모형의 현재 기후 재현성

AOGCMs 등을 통해 생성된 미래 지역기후모의 결과는 기후변화로 인한 지역의 취약성 평가에 대단히 중요한 자료이다. AOGCMs에서 직접 지역 기후정보를 획득하는 것은 기후모형 내부의 물리적 프로세스와 동적 프로세스간의 타당성을 확보할 수 있으며, 작업결과의 모형내부회귀와 상호관계에 대한 정보를 유지·관리할 수 있는 장점이 있다. 최근 AOGCMs의 결과와 관측된 기후 자료와의 괴리는 현격하게 줄어들었으며 예보능력에서 뛰어난 향상을 보이고 있다(IPCC, 1996). 그러나 이러한 기후모형결과들은 아직도 복잡한 지형과 분균질한 토지피복상태의 지역에서 시공간적인 모의에 한계를 가지고 있으며, 현재 기후에 대한 수치모의결과와 관측결과의 비교를 통한 검증이 요구된다. 현재 기후관측 정보와의 이러한 비교를 통해 미래 지역 기후 시나리오의 변동성과 변화에 대한 어느 정도의 확신을 제공할 수 있을 것이다. 그러나 현재 기후비교 결과가 비교적 잘 일치하더라도 미래 기후의 예측 능력을 보장하는 것이 아니므로 미래 기후변화의 영향은 각 모형결과의 변동폭에 관심을 가져야 한다.

제4장 영향평가 방법

1. 개요

<그림 4-1>은 IPCC 가이드라인에서 제시된 영향・적응평가 구조와 순서를 나타낸 것이다. 영향・적응평가는 장래의 기후조건으로서 기후모형의 계산결과(기후시나리오)를 입력조건으로 하여 각각의 분야별 영향평가 모델을 사용하여 장래영향을 예측한다. 또한 대책을 실시하는 경우 피해저감에 대해서는 곡물수확량의 변화와 같은 물리적 변화와 피해액과 같은 경제적 효과를 추정하게 된다.

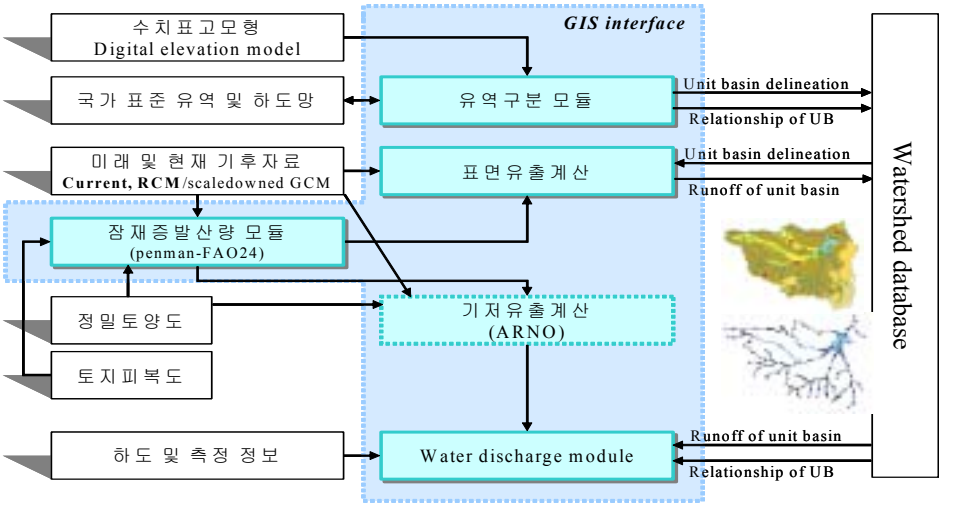


<그림 4-1> IPCC 지침에서 제안하는 기후변화의 영향・적응평가의 구조

기후변화에 의한 수자원 영향평가를 실시하기 위해서는, 강수로부터 유출에 이르는 물순환의 과정을 간결하고 정확하게 표현할 뿐만 아니라, 홍수나 갈수 등의 하천유량이나 지하수의 양을 산정·예측해, 홍수 제어나 하천수, 지하수의 이용 등 하천이나 지하수 등의 수자원 개발·관리 보전에 필요한 정보를 제공하는 것이 중요하다.

본 과제에서 제안하는 기후변화 영향연구와 적응 전략 수립의 관계는 <그림 4-1>과 같으며, 1차 연도에는 모형의 운용을 위한 응용 데이터베이스의 제작과 예측 모형의 기초 구축에 중점을 두어 추진하였다.

이 모델은 아래의 <그림 4-2>와 같이 4개의 서브 모듈로 나눌 수 있다.



<그림 4-2> 수자원 모듈의 개요

① 잠재 증발산량 산정 모형

유역의 강수량으로부터 증발산이나 토양 침투 등의 손실량을 공제한 것이 하천의 유출량이 된다. 따라서, 유출량을 계산하기 위해 증발산량이 필요하지만, 이것은 바람, 기온, 습도 등의 기상 조건, 나지, 초원, 임지 등의 지표 조건, 식물의 종류, 밀도, 생육 상태 등의 식생, 토양의 종류, 토양 수분, 토양의 열적 성질 등 많은 요인이 관계한다. 또, 증발산량을 실측하는 일도 어려우며 거기서 증발산량을 산정할 때의 지표로

서 지표면을 조밀하게 가린 녹초지에 충분한 물을 공급했을 경우에 없어지는 증발산량을 잠재증발산량이라고 정의하고, 이것을 증발산량 산정의 기초로 한다.

잠재증발산량의 추정 방법은, Thornthwaite, Budyko, Penman등에 의해 제안되고 있지만, 본 모형에서는 Penman-FAO24식과 Thornthwaite에 의한 잠재 증발산량 추정 모델을 사용한다.

② 물수지 모형

넓은 면적을 가진 유역의 유출 해석을 실시하는 경우, 증발산량 및 토양 수분량의 변화를 무시할 수 없다. 본 모형에서는, 하천 유출의 전 단계로 지표면 부근의 물균형을 생각하여 하천에 흘러드는 지표면 유출량을 산정하기로 한다. 물수지 모형에서, 최대용수량(Field water capacity)은 중요한 매개변수가 된다. 최대용수량이란, 토양이 수분으로 포화 상태가 된 상태로부터 중력에 의한 손실분을 공제한 수분량이지만, 이것은, 토양의 질, 토양을 가리고 있는 식생 등에 의해 영향을 받는다. 본 연구에서는 농업과학기술원의 정밀토양도를 이용하여 토양통별 토심과 토양종류, 토양에서 생육되는 식생의 최소 뿌리 깊이를 고려하여 최대용수량자료를 제작한다.

③ 유역 분할 모형

유역계, 하도 위치의 정보를 충분히 얻을 수 없는 지역에서 유출 해석을 실시하려면, 우선 유역의 구분이 중요하다. 따라서 본 모형에서는 환경부 표준 유역도와 국토지리정보원의 지형도 하천라인 등 실제 지형정보와 지형정보 시스템을 이용하여 연구에 필요한 유역과 하도를 생성한다.

④ 하천 유량 산정 모형

유역정보와 하도 정보로부터 하류의 단위 유역에 흐르는 물의 양을 계산한다. 유출해석 수법에는 합리식, 단위 도법, 유출 함수법, 탱크 모델법, 시네마틱 웨이브법 등 여러 가지의 방법이 제안되고 있다. 이러한 해석법의 대부분이 관측 유량 데이터로부터 다수의 모델 파라미터를 추정할 필요가 있다. 이것에 대해서, 저류함수법은 2개의

매개변수로 유효 유출량만을 입력으로서 산정 가능하고, 적용 예도 풍부하기 때문에 매개변수의 설정이 용이하다. 따라서, 저류함수법을 이용하면, 유역 정보를 거의 얻을 수 없는 지역에서도 계산적인 유출 해석이 가능하다. 본 연구에서는 저류함수법을 유출 해석 수법으로서 채용해, 하천 유량 산정모형을 개발한다.

2. 입력자료의 구축

가. 현재 기후자료의 구축

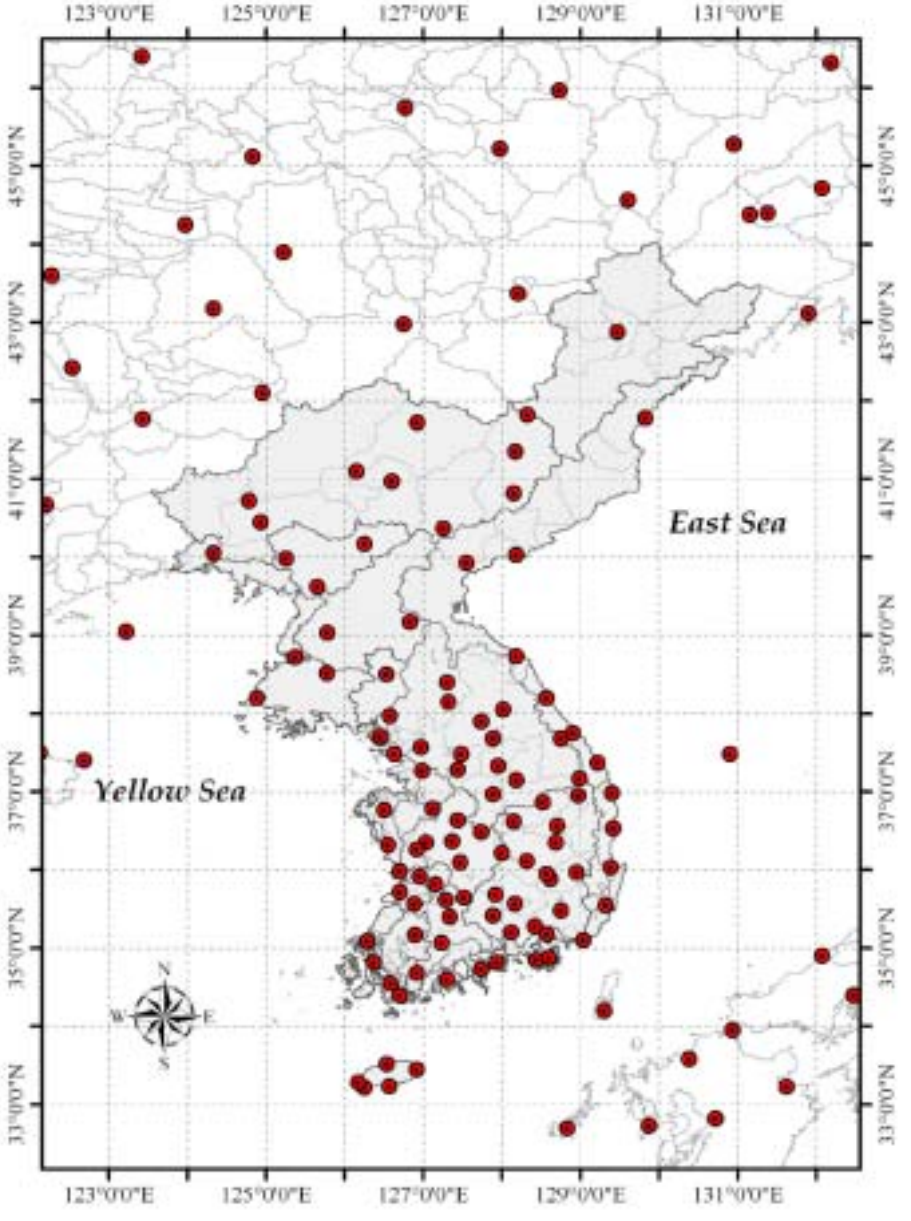
본 연구의 관심 대상영역인 한반도지역은 경도 123도 30분~131도 30분, 위도 33도~44도 30분의 지리적 경계를 가지며 남한지역과 북한 지역으로 나누어, 1981부터 1990년까지의 기상청 상시 관측소 일기상 자료와 UNEP의 지구기후네트워크(Global Historical Climatology Network Data, '이후 GHCN')의 월 평균강수와 기온자료를 이용하여 0.05도 격자로 공간 보간을 실시하여 제작하였다(그림 4-3, 4-4 참조). 1981년에서 1990년까지 10년간의 월평균 강수량과 기온에 대해 기후 관측치와 모형의 결과를 비교하였다.

기온 자료의 보간을 위해서는 Krigging 공간보간과 기온감율을 고려한 온도 수정을 실시하였으며, 강수량자료는 거리자승역산가중(Inverse Distance Squared Weighting; IDSW) 방법을 이용하여 공간 보간 되며, 이용된 기온 감율은 윤진일(2001)의 한국지역 일별 기온 감율식을 이용하였다.

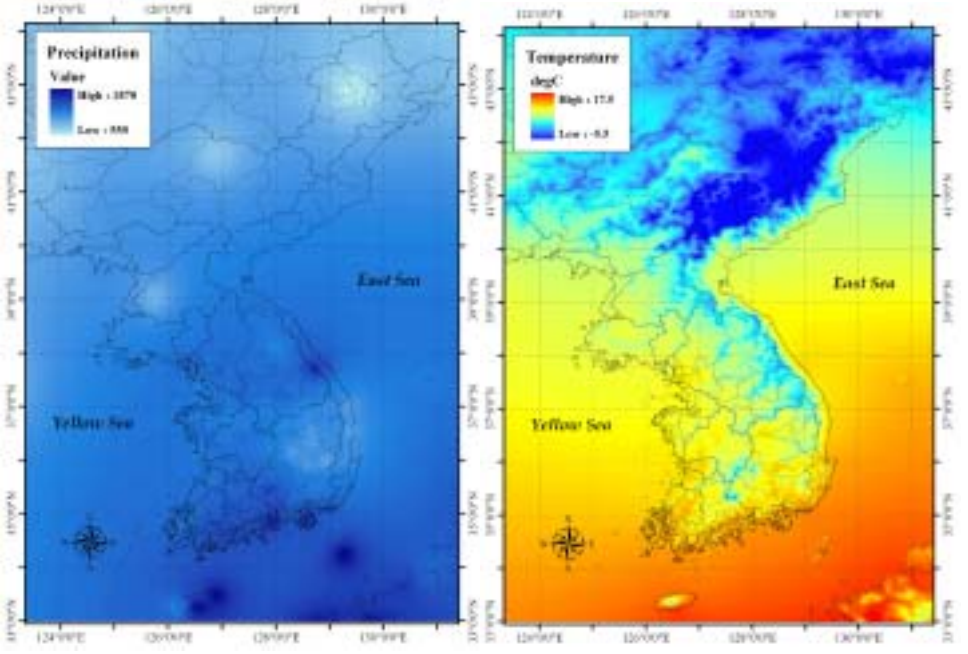
$$|\Gamma| = 0.00688 + 0.0015\cos\{0.0172(i-60)\} \qquad \text{(식 4-1)}$$

여기서 $_i$는 연중날짜 (1월 1일 = 1, 12월 31일 = 365)를 가리킨다. 관측된 사례들 중 90% 이상이 이 파동을 중심으로 ±0.002℃/m 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.



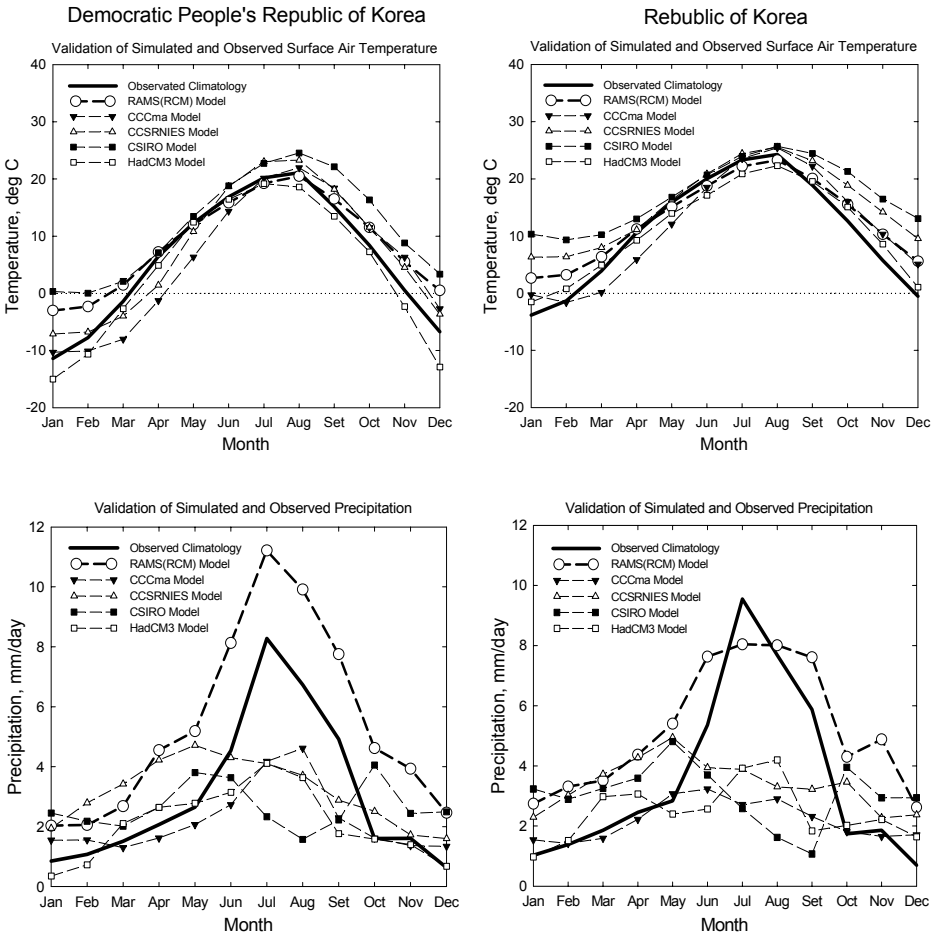
<그림 4-3> 연구에 이용된 기상관측소 위치



<그림 4-4> 현재시기(1981-1990년) 년평균 강수량(㎜/yr)과 기온(℃)

IPCC의 4가지 GCM모형결과(CCCma, CCSR/NIES, CSIRO, HadCM3)와 일본국립환경연구소 RAMS 모형결과와 10년 평균 월별 기후 관측치의 비교 결과는 <그림 4-5>와 같다.

기온은 모의된 GCM과 RCM자료와 관측된 월평균 기온이 남, 북한 모두에서 유사한 거동을 나타내는 것으로 예측되었으나, 겨울철(12,1,2월) 기온에서 수치모의 결과가 약간 높게 나타났다. 특히 기후모형결과 중 HadCM3가 가장 유사한 온도 분포와 편차를 가지며, CSIRO 모형의 결과가 가장 높은 차이를 나타내었다. RAMS자료는 IPCC GCM 결과들의 중간값 정도의 범위에서 변화를 나타내고 있다. <그림4-5>에서 기온의 공간분포를 보여주지는 않으나 최대 ±10℃ 범위로 겨울철 기온이 높게 나타나는 모형의 결과는 생태계의 변화에 가장 직접적인 영향을 미치게 되므로 사용에 주의를 요한다.



<그림 4-5> 관측 및 예측된 월평균온도와 강수량

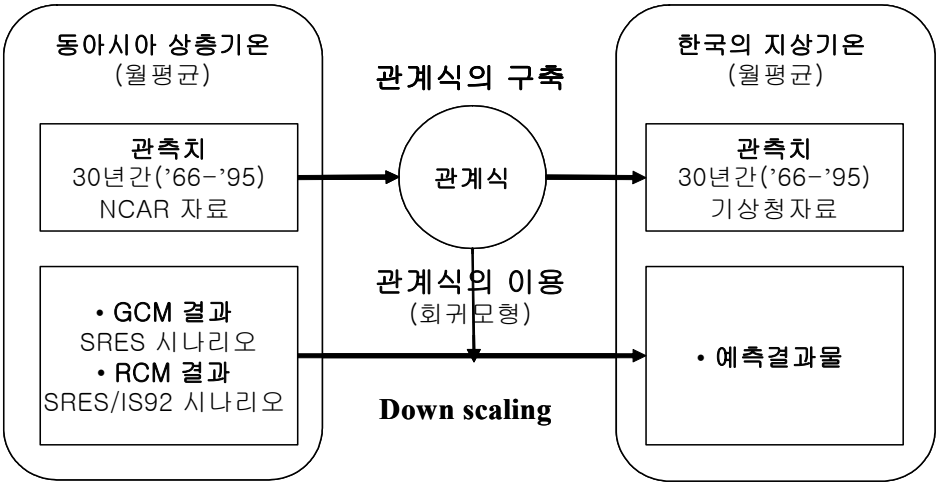
강수량의 경우, 여름철 강우의 집중현상을 표현할 수 있는 모의 자료는 RAMS가 유일하며, 나머지 GCM 자료는 공간 해상도가 강수의 연간 거동을 표현할 수 없는 것으로 판단된다. 따라서 통계적 보간 등을 고려하는 것이 필요하며, 본 연구에서는 기후자료의 중첩 기법을 통해 현재 강수량자료에 GCM 자료의 변화비를 곱하는 방법을 통해 강수량의 연간 분포변화를 재현하였다.

RAMS 자료의 강수량은 관측치에 비해 연중 높게 나타나며, 공간적으로 북한 서부 지역에 많은 강수량를 나타내었다. RAMS는 엘리뇨현상 등을 함께 모의하도록 개발

되었으며, 적도순환 흐름의 감소로 인해 태평양 서부해안지역에 이상 분기 흐름이 발생하여 미래 겨울철 강수량이 다른 GCM결과에 비해 많은 특징이 있는 것으로 알려져 있다(Koji Dairaku *et al*., 2004). 따라서 다른 기후 모형들과 비교시, RAMS 모형은 미래 강수량 증가가 짧은 시기에 높게 나타날 수 있으며 특히, 겨울철 강수량 증가로 인해 년 평균 유출의 증가에 큰 영향을 미치는 지역이 존재할 수도 있다.

나. 미래 기후 시나리오의 작성

모형개발 단계에서 가장 기본적인 부분은 기후 모듈이다. 현재의 기온과 강수량, GCM/RCM 결과로부터 나온 기온과 강수량 등 기후인자의 변화를 나타내는 기후 모듈은 영향평가 연구에서 요구되는 각각의 정보를 생산한다.



<그림 4-6> 통계적 기법을 이용한 Downscaling 방법

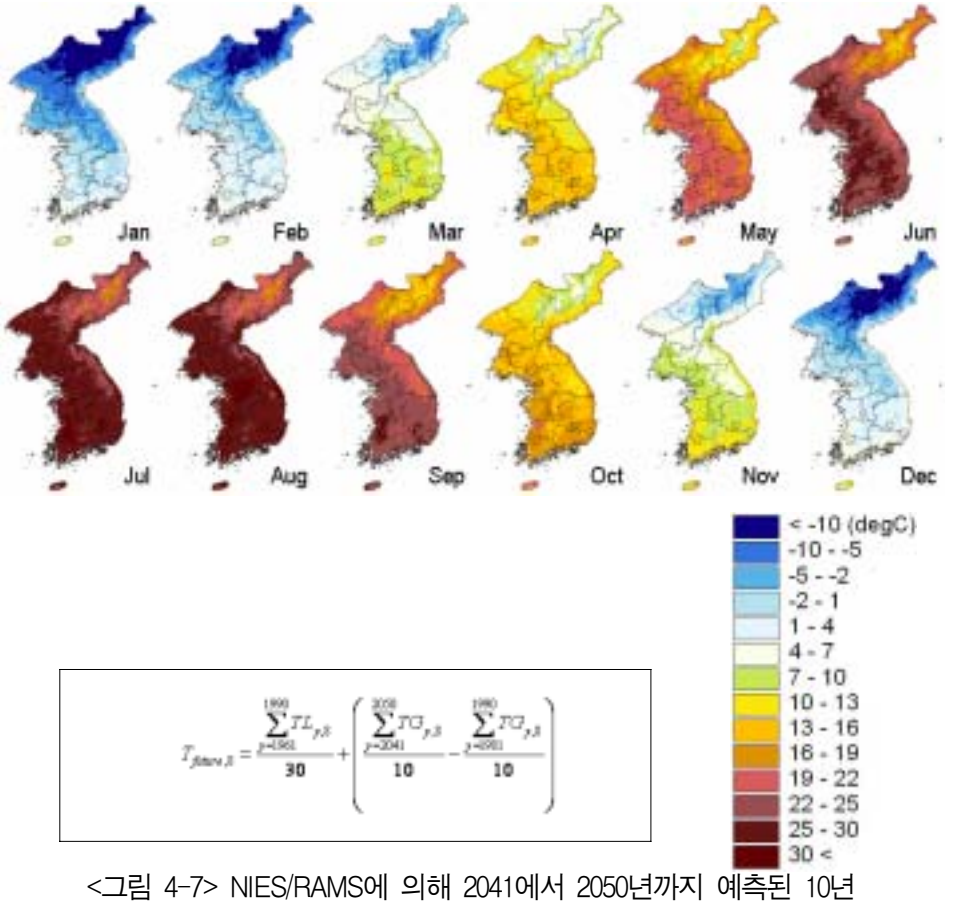
현재 기온은 기상청의 일별 강수량과 기온자료를 10년 평균하여 이용하며, 기후 자료의 공간적 분배를 위해서 GCM과 RCM의 기본 해상도를 고려하여 1~10km의 공간해상도를 취해 과도한 내삽이 발생하지 않도록 한다.

<표 3-6>에 열거된 IPCC의 GCM을 이용할 경우, 공간적 해상도가 영향 연구에 이

용될 정도의 충분히 조밀하지 않다. 따라서, 일정한 한계 내에서 보간과 통계적 방법에 의한 해상도의 증가가 요구된다. GCM 자료는 일반적으로 직접적으로 이용하는 경우보다는 미래기후의 변동량을 계산하여 현재 기후에 가감하는 방법을 취한다. GCM 결과의 보간 이후, 다음 식들이 월별 각 격자에 대한 미래 기후 자료를 계산하기 위해 사용되고 있다.

기온에 대해서는 아래의 (식 4-2)를 활용하였다

$$T(t) = T(present) + (T(2\times CO_2) - T(1\times CO_2)) \qquad \text{(식 4-2)}$$



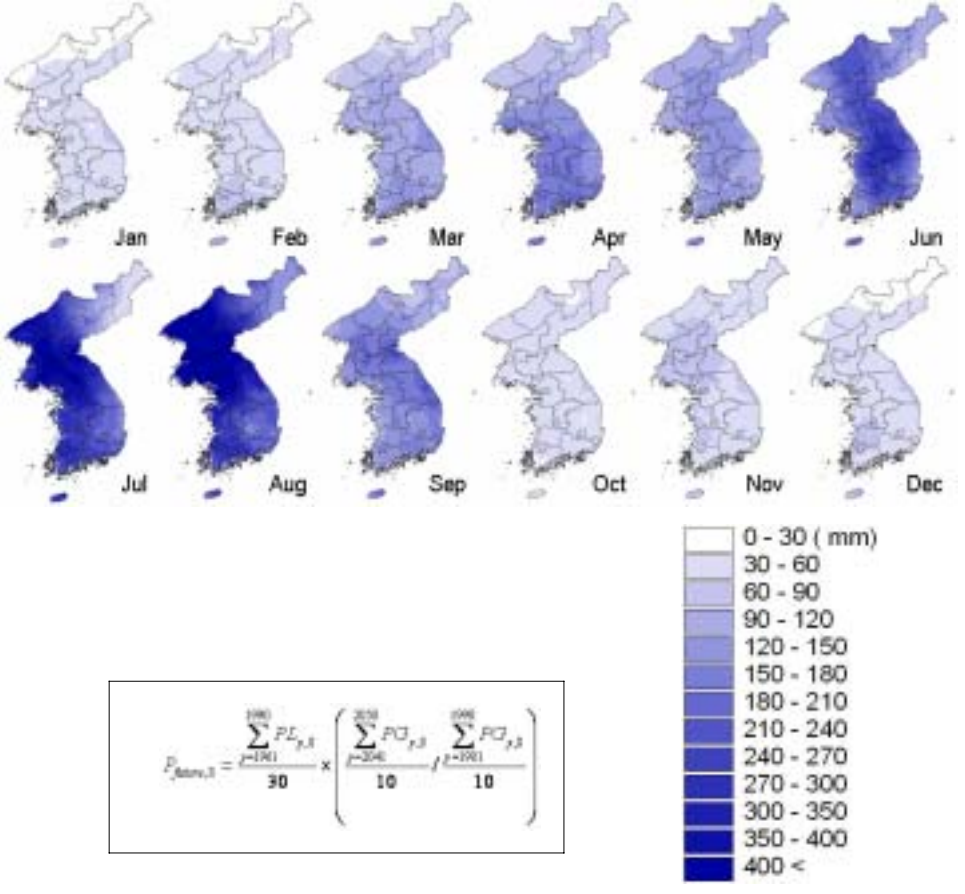
$$T_{future,\lambda} = \frac{\sum_{y=1961}^{1990} TL_{y,\lambda}}{30} + \left(\frac{\sum_{y=2041}^{2050} TC_{y,\lambda}}{10} - \frac{\sum_{y=1981}^{1990} TC_{y,\lambda}}{10} \right)$$

<그림 4-7> NIES/RAMS에 의해 2041에서 2050년까지 예측된 10년 월평균기온

강수량에 대해서는 아래의 (식 4-3)을 활용하였다.

$$P(t) = P(present) + P(present) \times \left\{ \frac{P(2 \times CO_2)}{P(1 \times CO_2)} - 1 \right\} \qquad \text{(식 4-3)}$$

여기서 $T(t)$ [℃]와 $P(T)$ [㎜/month]는 상대적인 t년에서의 기온과 강수량이다. $P(2 \times CO_2)/P(1 \times CO_2)$ [-]는 GCM에서 계산된 각 격자에서 $2 \times CO_2$와 $1 \times CO_2$ 사이의 기온 차와 강수량의 비이다.

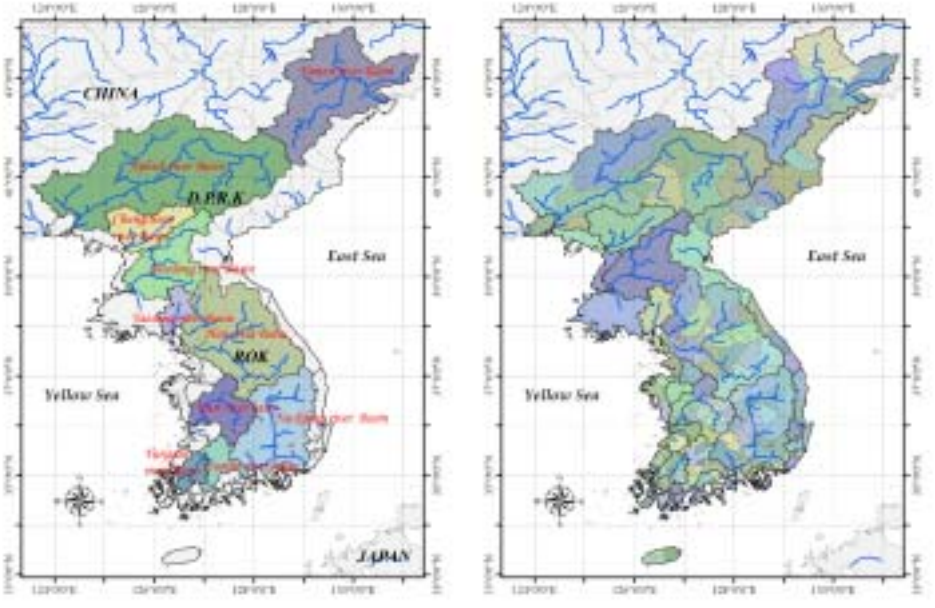


<그림 4-8> NIES/RAMS에 의해 2041년에서 2050년까지 예측된 10년 월평균강수량

다. 유역도 및 하도망도의 구축

한반도의 주요 유역별 수자원 공급량을 계산하기 위해, 소유역 분할이 요구되며, 기본적인 유역과 하도의 속성정보 구축이 필요하다.

본 연구에서는 수자원공사의 단위유역도를 기준으로 북한지역은 USGS 의 Verdin 등(1999)이 작성한 Hydro1k 데이터와 수치표고모형을 이용하여 연구에 요구되는 유역도를 생산하였다. Hydro1k 데이터는 30 초 격자간격의 GTOPO30 수치 표고자료 및 하도 자료로부터 작성된 지구 전역의 유역 자료로 전역을 6 개의 대륙으로 구분하여, 각 대륙을 단위 유역으로 분할한 것이다. Hydro1k 데이터의 특징은 Pfafstetter 코드 (Pfafstetter, 1989)를 유역 번호로서 이용하고 있는 것이다. Pfafstetter 코드란, 유역 식별을 위한 번호 할부 방법이다. 이 코드를 이용하면 할당하는 유역번호에 수문학적 추적 순서를 붙이는 것으로 상류-하류의 유역을 용이하게 추적할 수 있으며, 각각의 유역에 효율적인 고유번호를 할당할 수 있다.



<그림 4-9> 연구에 이용된 한반도 주요하천 유역(좌)과 중권역 유역 구분(우)

라. 최대용수량(Field Capacity)의 작성

본 연구에서 요구되는 물수지모델은 최대용수량의 결정이 중요하며, 이러한 최대용수량은 토양의 물리화학적인 성질, 온도, 햇빛등 기상요소와 동식물, 미생물등 생물적 요인에 따라 영향을 받는 작물 생육에도 특히 중요시된다.

<표 4-1> 토성에 따른 토양수분함량 실험 결과

토성	시료수	토양수분함량(%)							
		1/10bar	1/5bar	1/3bar	1/2bar	1bar	2bar	5bar	15bar
사토	5	8.2	7	6.3	5.9	5	4.7	3.7	2.6
양질사토	7	12.5	10.6	9.6	9	7.7	7	5.5	4.3
사양토	36	22.3	19.2	17	15.5	13.1	10.9	8.6	6.3
양토	33	29.4	25.3	22.5	20.6	17.3	14.4	11.6	8.7
미사질양토	8	35.1	30.5	27.1	24.9	21.3	18.3	14.2	10.4
사질식양토	7	27.3	23.4	20.6	19.1	16.8	15.2	12.9	10.6
식양토	10	33	28.9	26.2	24.5	21.4	19	15.8	12.8
미사질식양토	20	37.8	33.4	30.9	29	26	23.1	19.3	15.7
미사질식토	8	42.5	38.3	35.7	33.7	31.2	28.9	26.3	23.5
식토	2	44	40	38.1	36.2	33.7	31.4	28.8	26.2

최대용수량은 토양수분이 포화상태에서 중력에 의한 손실을 뺀 수분량으로 하지만 여기서는 토양의 속성, 토양을 덮고있는 식생대 등에 의해 영향을 받는다.

본 연구에서는 농업과학기술원의 1:25,000 정밀 토양도를 이용하여 토양깊이나 토양통의 종류에 따라 토양의 조성, 토양의 프로필, 토양에 식생하고 있는 식생뿌리의 깊이 내부를 고려하여 최대용수량 자료를 제작하였다. 또한 현장에서 토양수분을 일일이 측정하여야 하는 번거로움을 피하고 토양수분 증감에 관여하는 여러 요인들을 수집하여 토양수분을 계산하는 Batjes PTF의 공식을 이용하여 토성별 분포와 유효토심에 따른 최대 토양 수분량을 계산하였다.

FAO(1996)는 0~30㎝와 30~100㎝의 2층의 토층에 대해 대표적인 토양 특성(입자크기, 입경분포, 주요 토성, 유기물함량, 조도분포, 밀도, 공극률 등)을 알 수 있을 때, 이를 이용한 PTF(different pedo-transfer functions) 모형을 통해 최대용수량을 계산하는 방법을 제안하였다(Rawls, *et al,* 1982, Saxton, *et al,* 1986, and Batjes, 1996). 또한 FAO는 Saxton의 PTF모형을 이용하여 경작 모델링을 위한 100㎝ 유효토심의 최대 용수량자료와 일반적 모델링을 위한 250㎝ 유효토심 자료를 전세계 30분 간격으로 제작하여 연구자에게 제공하고 있다.

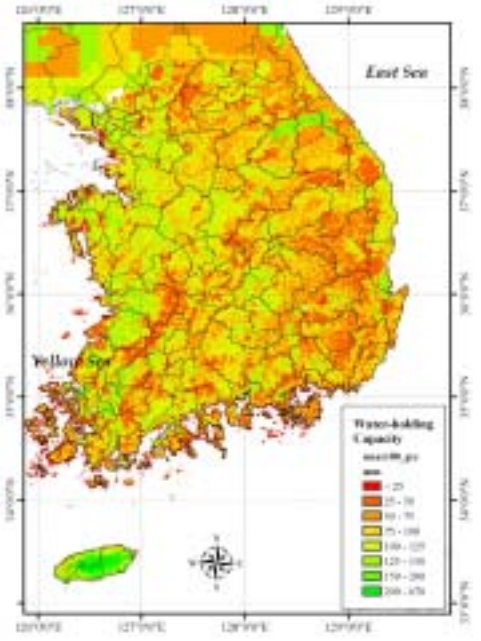
본 연구에서는 토양통 조사보고서의 토성과 유효토심 정보와 Batjes(1996) 모형을 이용하여 일반 목초지 및 경작지의 최대용수량 지도(smax-grs)와 산림지역의 뿌리 깊이를 고려한(smax-for) 2가지 최대용수량 지도를 0.01도 간격으로 제작하였다(그림 4-10 참조). <그림 4-11>은 Batjets의 PTF 모형을 이용해 제작된 토양통별 최대용수량과 <표 4-1>의 토성에 따른 토양수분함량 실험 결과를 이용하여 제작된 최대용수량을 비교하여 나타낸 것으로 최대용수량은 -1/20 ~ -1/3 bars 기압하의 최대 토양수분함량에 토양통의 유효토심을 곱하여 계산하게된다. <그림 4-11>에서 토양수분 실험결과를 이용한 쪽의 최대용수량이 다소 크게 나타나나 상호 상관성이 있음을 보여주며 두 방법의 상관성을 높이기 위해서는 유효토심의 조정 등 추가적인 연구가 필요하다. 한국이외의 지역에 대해서는 FAO saxton 방법의 최대용수량자료를 최근린 보간방법으로 0.01도로 보간하여 병합하였다. 이때 일반 목초지 및 경작지의 경우에는 유효토심 100㎝의 FAO 데이터와 산림지역의 뿌리 깊이를 고려한 경우에는 유효토심 250㎝의 자료를 이용해 병합하였다(그림 4-12 참조).

본 연구에서 이용된 Batjes PTF 모형의 식은 <식 4-4, 식 4-5>와 같다.

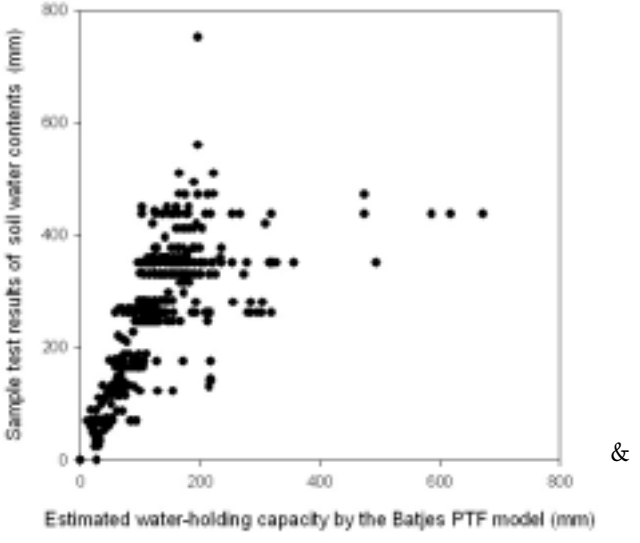
$$\theta f = 0.3624P_{clay} + 0.11705P_{sand} + 1.6054P_{om} \quad \text{(식 4-4)}$$

$$\theta w = 0.4600P_{clay} + 0.3045P_{sand} + 2.0703P_{om} \quad \text{(식 4-5)}$$

여기서, θf는 최대용수량(%vol)이고 θw는 영구 위조점(%vol)을 나타낸다. P_{sand}, P_{clay} 와 P_{om}는 각각 clay, sand, organic matter의 분율이다. 이 모형은 sand, clay와 silt가 5%이상인 경우에 유효하다.

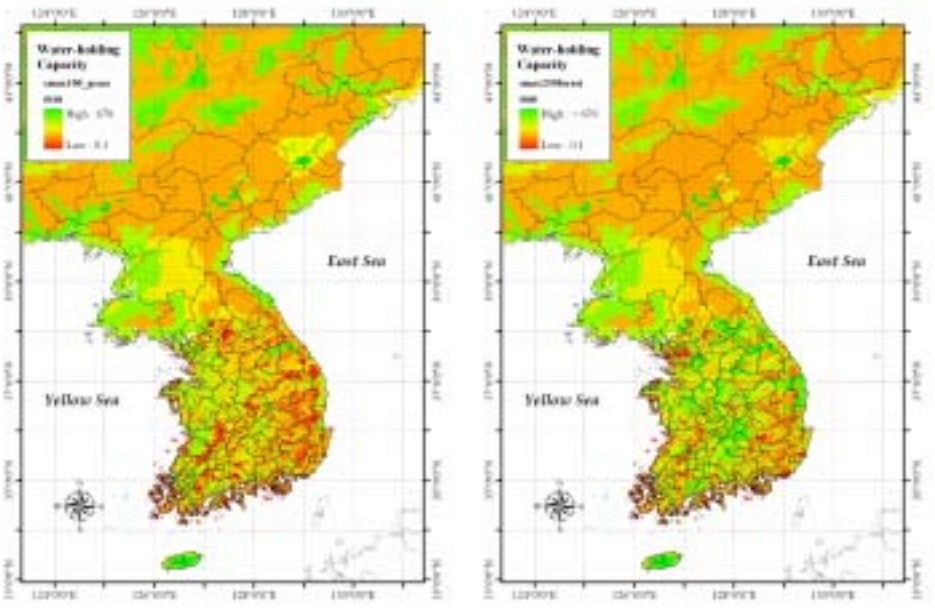


<그림 4-10> 1:2,5000 정밀 토양도와 Batjes PTF 모형을 이용해 제작한 최대용수량도(S_{max_grs})



&

<그림 4-11> 토양수분 실험결과와 Batjes모형을 이용해 제작된 최대용수량 비교

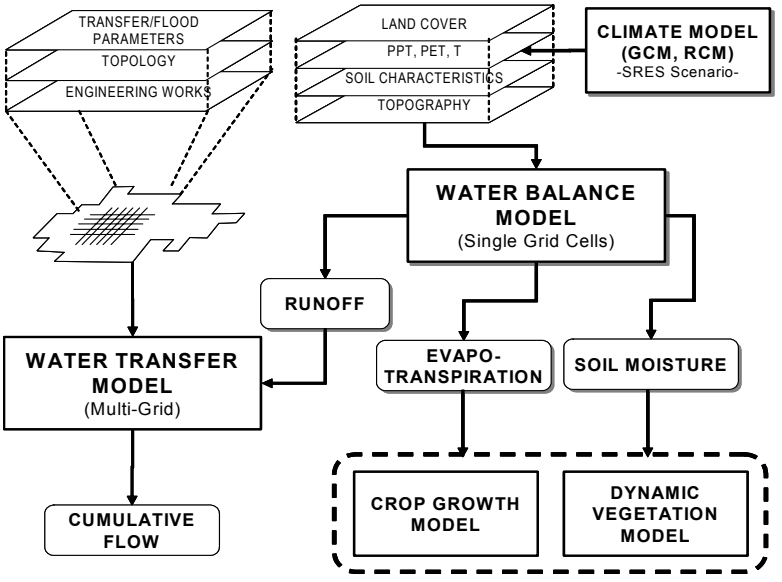


<그림 4-12> 작물(좌)과 산림(우)의 뿌리깊이를 고려한 최대용수량분포(㎜)
주 : 북한의 경우 FAO에서 제공하는 Saxton 모형의 결과를 이용하였음

3. 물수지 모형 (Soil Water Balance Model, SWBM)

수자원 영향평가모형은 기후자료와 수치표고모형으로부터 일별 지표면 유출을 모의할 수 있으며, 3개의 주요한 하부모듈로 구성된다. 이들 모듈은 잠재증발산량을 추정할 수 있는 잠재 증발산량 모듈, 강수량과 토양수분변화, 증발산량 변화로부터 물수지를 계산하고 지표면유출을 계산하는 물수지모듈(Soil Water Balance Model, '이후 SWBM'), 각 격자의 지표면 유출량과 수치고도정보로부터 유역과 하도의 유출을 계산하는 유출모듈(Water Transfer Model, '이후 WTM')로 구성된다(그림 4-13). 잠재증발산량과 물수지 모듈은 공간해상도 0.05도 간격의 격자별로 계산을 수행하여, 월별 토양수분, 증발산, 지표면 유출을 예측하게 되며, 예측된 격자별 자료는 농업생산성모형과 동적식생모형등의 입력자료로 이용된다. 유출모듈은 계산된 격자별 지표면유출

정보와 하도, 유역 정보등을 이용하여 하천 지점에서의 유출변화를 예측하게 된다.



<그림 4-13> 기후변화로 인한 수자원 영향평가 및 수문 모형 개발의 구조

넓은 면적을 가진 유역의 유출 해석을 실시하는 경우, 증발산량 및 토양 수분량의 변화를 무시할 수 없다. 본 연구에서는, 하천 유출 해석의 전단계로서 지표면 근처에서의 물균형을 생각해 하천에 흘러드는 수량인 지표면 유출량을 산정한다. 본 연구에서는, Vorosmarty 등(1989), 하라오카 등(1994)이 제안한 모델을 이용하여 모형을 개발하며, 이 모델에서는 강수량, 잠재 증발산량, 최대용수량, 기온을 입력 자료로 지표면 유출을 산출한다. 한반도지역의 물수지를 파악하기 위하여 계산 시간간격을 1개월로 하고 0.05도×0.05도 격자를 기본단위로 물수지 모델을 작성하였다. 토양정보등 이용 가능한 속성을 고려시, 남한 지역은 공간해상도 0.01도, 북한 지역은 0.10도 크기의 속성 정확도를 가진다. 이들 자료를 입력하고 현재의 토양, 식생, 표고 및 월별평균기온, 평균강수량, 잠재증발산량을 사용하여 출력함으로서, 각 월별 토양수분량, 증발산량, 각 격자로부터의 유출량을 구하였다.

가. 잠재증발량의 추정

하천 유역의 총강수량으로부터 증발산등의 손실량을 제거한 것이 하천의 총유출량이다. 따라서 유출량 계산시, 입력 자료의 하나로 증발산량이 필요하게 되며, 이것은 바람, 기온, 습도 등의 기상 조건, 나지, 초원, 임지 등의 지표 조건, 식물의 종류, 수관밀도, 생육 상태 등의 식생, 토양의 종류, 토양 수분, 토양의 열적 성질 등의 지중 조건 등 많은 인자와 관계되므로, 증발산량을 실측하는 것은 매우 어렵고, 자료를 확보하기 쉽지 않다. 자연 지표면에서의 증발산은 자유수면에서의 증발, 토양면의 증발, 식물의 잎 등에서 차단된 강수의 증발, 식물에 의한 증산의 4과정이 포함되어 있다. 잠재증발산량은 일반적으로 기상요소를 이용한 증발산량을 추정하기 위한 기후학적개념이며 산정방법은 열수지식 Dalton의 공기역학적 방법을 사용하여 산정하는 Penman법이나 월평균기온의 함수로 산정하는 Thornthwaite법 등이 있다. 본 연구에서는 Penman-FAO24 방법과 Thornthwaite방법의 잠재증발산량 모듈을 제작하였으며, 본 연구에서는 Thornthwaite법을 이용하였다.

1) Thornthwaite 방법

Thornthwaite 식은 기온과 일조시간의 함수만으로 나타내져 Penman 식과 비교해 요구변수의 수가 적은 것이 특징이다. 이 방법은 여름철에는 약간 과대, 겨울철는 약간 과소의 값을 나타내고 있으며, 사용할 수 있는 기상 데이터가 기온뿐일 때 유효하다. Thornthwaite 식은 다음과 같이 주어진다(Y.Mintz & G.K.Walker, 1993).

$$PET = \begin{cases} 0, & (T_A^* \le 0) \\ \dfrac{h}{12}\left\{0.533\left(\dfrac{10T_A^*}{I}\right)^a\right\}, & (0 < T_A^* \le 26.5) \\ \dfrac{h}{12}(-13.86 + 1.075T_A^* - 0.0144T_A^{*2}), & (T_A^* > 26.5) \end{cases} \quad \text{(식 4-6)}$$

단

$$I = \sum_{1}^{12} i \quad ; \quad i = \left(\frac{T_m}{5} \right)^{1.514} \quad ; \quad i_{\min} = 0 \qquad \text{(식 4-7)}$$

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.792 \times 10^{-2} I + 0.49293 \qquad \text{(식 4-8)}$$

여기서,

PET : 잠재 증발산량(㎜/day)

h : 일조시간(hour)

T_A^* : 일평균 기온(℃)

T_m : 월평균 기온(℃)

가능 일조시간 h는

$$h = \left(\frac{24}{180} \right) \arccos\{-(\tan\phi)(\tan\delta)\}, (0 \le h \le 24) \qquad \text{(식 4-9)}$$

여기서, ϕ : 위도 (degree), δ : 태양의 기울기 (degree) 이다.

태양의 기울기 δ는

$$\delta = 23.5 \sin\left\{ day\left(\frac{360}{365} \right) \right\} \qquad \text{(식 4-10)}$$

day는 3월 21일을 0으로 하는 적산 날짜이다.

2) Penman-FAO 24 모형

1990년 5월 FAO는 Penman-Monteith 모형에 기준작물의 높이 0.12 m, 표면저항 70s/m, 알베도 0.23(초지)의 값을 적용하여 <식 4-11>과 같은 FAO Penman-Monteith 모형을 개발하였다. <식 4-11>을 이용하여 증발산을 계산하기 위해서는 다양한 기상학적 및 물리적인 매개변수가 필요하다. 일부자료는 기상관측소에서 관측한 자료를 이용하고, 그 외 자료는 관계식 또는 경험식을 이용하여 산정해야 한다. 또한, 기상자료는 여러 가지 단위로 표현할 수 있으므로 <부록표 1-1>과 같은 증발산 환산계수를 이용해 수정해야 한다(부록 1).

$$PET = \frac{0.48\triangle(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}u_2(e_s - e_a)}{\triangle + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{(식 4-11)}$$

PET : 잠재증발산(㎜/day)
Rn : 식생에서의 순복사량(MJ/㎡・day)
G : 토양열플럭스(MJ/㎡・day)
T : 지상 2m에서의 일평균 대기온도(℃)
u2 : 지상 2m에서의 풍속(m/s)
es : 포화수증기압(㎪)
ea : 실수증기압(㎪)
es-ea : 포화수증기압 부족분(㎪)
△ : 포화수증기압곡선의 접선구배(㎪/℃)
γ : 습윤상수(㎪/℃)

나. 강설모형

눈이 녹은 융설수(snowmelt)로부터 보충되는 물(Rs)과 적설량(snowpack, SP)는 다음과 같다. 적설은 월평균 기온이 T_0℃ 이하일 경우 형성되며, 강수는 T_0℃ 이상일 강우가 되며, 이 때 융설이 발생한다고 가정한다. 이와 같이 강수량을 강우 Pr(㎜/day), 강설 Ps(㎜/day), 융설수 보충 Rs(㎜/day), 적설량 SP(㎜)을 수식화하면 <식 4-12> ~ <식 4-14>와 같다.

- $T \leq T_0$ 일 경우

$$\begin{aligned} P_r &= 0, \quad P_s = PPT \\ \frac{dSP}{dt} &= P_s \\ R_s &= 0 \end{aligned} \quad \text{(식 4-12)}$$

- $T > T_0$, $SP > 0$일 경우

$$\begin{aligned} P_r &= PPT, \quad P_s = 0 \\ \frac{dSP}{dt} &= K(T - T_0) \\ R_s &= \frac{dSP}{dt} = K(T - T_0) \end{aligned} \qquad \text{(식 4-13)}$$

- $T > T_0$, SP = 0일 경우

$$\begin{aligned} P_r &= PPT, \quad P_s = 0 \\ \frac{dSP}{dt} &= 0 \\ R_s &= \frac{dSP}{dt} \end{aligned} \qquad \text{(식 4-14)}$$

이때,

PPT : 강수량 (눈 포함) (㎜/day)

SP : 적설량 (㎜)

K : 융설계수 (㎜/day/℃)

T_0 : 기준 온도 (℃)

T_0는 눈이 녹기 시작하는 기점 온도(base temperature)이다. 계수 K는 1℃ 상승시 녹는 눈의 양을 결정하게 되며, T_0와 K는 풍속, 휘도 등과 같이 융설수에 영향을 미치는 많은 기상학적 요소에 따라 변화한다. Vorosmarty(1989)의 연구에 따르면 기점온도의 변화 폭은 $-3 \leq T_0 \leq 0$ ℃이며 계수 K의 폭은 $2 \leq K \leq 7$ (㎜/day/℃)라 보고하였다. 본 모형에서는 T_0 = -1℃와 K =4.5 ㎜/day/℃라고 설정하였다.

다. 지표면 유출의 계산

기후변수는 일별 평균 강수량, 온도, 잠재 증발산으로 결정할 수 있다. 또한, 토양수분량은 강우량, 융설량(snow melt recharge), 잠재 증발산으로 산정할 수 있다. 강우량과 융설량(snowmelt)이 잠재증발산량보다 큰 우기에는 토양수분량이 최대용수량까지 다다른다. 잠재증발산량이 토양수분량보다 큰 건기에는 토양수분량은 잠재적

수분손실의 함수이다. 이와 같이 잠재증발산량과 강우량 및 융설량에 따른 유역의 물 수지를 수식화 하면 <식 4-15> ~ <식 4-17>과 같다.

- Pr+Ps ≥ PET, SM0 < Fc 일 경우

$$\frac{dSM}{dt} = (P_r + R_s - PET) \quad \text{(식 4-15)}$$

- Pr+Ps ≥ PET, SM0 < 0 일 경우

$$\frac{dSM}{dt} = 0 \quad \text{(식 4-16)}$$

- Pr+Ps < PET 일 경우

$$\frac{dSM}{dt} = -aSM_0(PET - [P_r + R_s]) \quad \text{(식 4-17)}$$

$$a = \frac{\ln(F_c)}{(1.128F_c)^{1.28}} \quad \text{(식 4-18)}$$

SM : 토양수분량(㎜)
SM_0 : 전월의 토양수분량(㎜)
Pr : 강우량(㎜/day)
Rs : 융설량(㎜/day)
PET : 잠재증발산량 (㎜/day)
F_C : 최대용수량(Field Capacity) (㎜)
a : 수분보존함수(moisture retention function)의 경사

토양수분비축량(soil water stock)은 수분보존함수에 따라서 건기에는 고갈되고, 우기에는 토양수분은 잠재증발산량 보다 많은 수분의 영향으로 점차 증가한다. 토양이 건조하면서 공극(pore) 장력의 증가로 수분의 증발이 어렵게 되고 특정 토양에서는 logSM과 ∑[PET-(Pr+Rs)] 사이에 1차 관계가 성립한다. <식 4-15> ~ <식 4-17>를 이용하여 중간(intermediate) 최대용수량(F_C)의 dSM/dt를 산출하기 위해 <식 4-18>의 a는 모든 토양유형의 경우에 동일하다고 간주한다(Pastor & Post, 1983).

따라서, 토양수분량은 <식 4-19>와 같이 전일 토양수분량과 토양수분량 변화량의 합이다.

$$SM = SM_0 + \frac{dSM}{dt} \quad \text{(식 4-19)}$$

Thornthwaite와 Mather에 따르면 실제증발산량은 Pr+Rs ≥ PET인 우기에는 잠재증발산량과 같다고 설정하고 강우와 융설(snowmelt)이 모든 주변식생의 잠재 물 수요를 충당하기에 충분하다고 가정한다. 또한, Pr+Rs < PET인 건기에는 실제증발산량은 잠재증발산량으로부터 축소 수정한다. 이와 같이 잠재증발산량과 강우량 및 융설량에 따른 실제증발산량(ET, ㎜/day)을 수식화 하면 <식 4-20> ~ <식 4-21>과 같다.

- Pr+Ps ≥ PET 일 경우

$$ET = PET \quad \text{(식 4-20)}$$

- Pr+Ps < PET 일 경우

$$ET = P_r + R_s - \frac{dSM}{dt} \quad \text{(식 4-21)}$$

최대용수량에 도달하면 넘쳐난 물은 지표하 빗물과 눈이 녹은 융설수(snowmelt)가 유출 저수층(runoff storage pools)으로 흘러 들어간다. 융설수의 유출량은 저수층 크기와 1차 함수 관계를 가진다. 물의 이동(transfer) 계수는 장소에 종속되지만 본 연구에서는 계산분해능(calculate resolution)과 종속관계를 가지는 장소-독립 값으로 간주하였다. 최대용수량과 연관하여 수분부족이 존재할 경우, 모든 수분은 토양수분을 보충하기 위해 사용하므로 유출 저수층(runoff storage pool)으로 흘러 들어가는 물은 없다.

이와 같이 유출량을 강우 Pr(㎜/day), 강설 Ps(㎜/day), 융설수 보충 Rs(㎜/day), 토양수분량 SM (㎜)을 포함하여 수식화 하면 <식 4-22> ~ <식 4-24>와 같다.

- Fc ≤ SM, Rr+Rs ≥ PET 일 경우

$$RO = P_r + R_s - PET \quad \text{(식 4-22)}$$

- Fc > SM, Rr+Rs ≥ PET 일 경우

$$RO = \max[SM + P_r + R_s - PET - FC, 0] \quad \text{(식 4-23)}$$

- Rr+Rs < PET 일 경우

$$RO = 0 \quad \text{(식 4-24)}$$

여기서, RO는 단위시간당의 유효유출고(㎜/day) 이다.

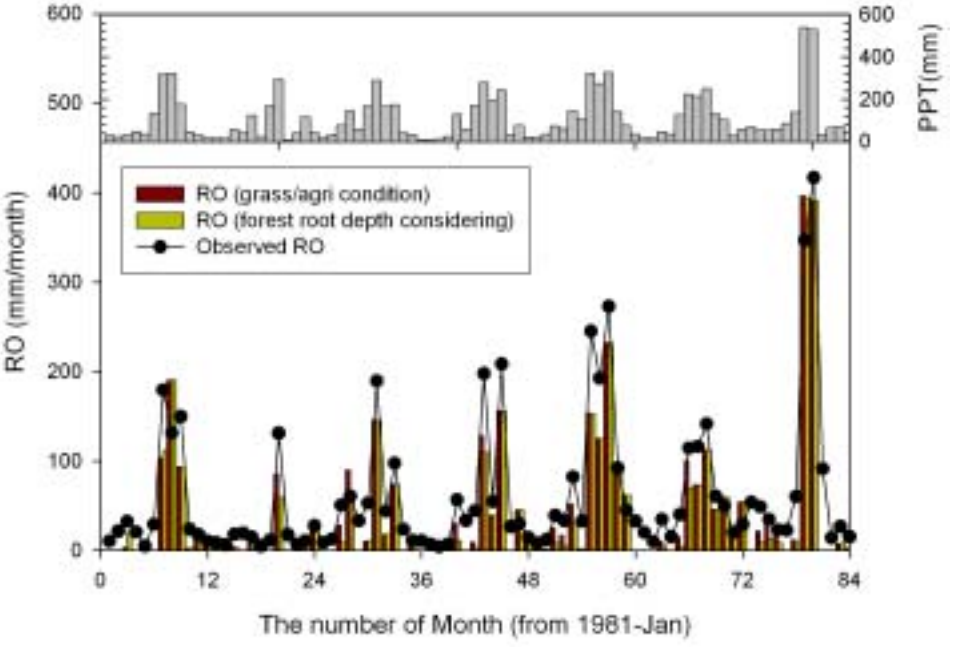
4. 모형의 검증

본 연구에서는 기후 예측 모형 결과를 이용한 한반도 수자원 영향 평가를 수행하기 위해, 토양 수분 변화에 기초한 물수지 모형(SWBM)을 개발하였고 모형의 입력자료로 두 종류의 최대용수량 자료를 제작하였다. 영향평가를 수행하기 위해 실측된 유출자료를 이용하여 개발된 SWBM 모형과 최대용수량 자료의 특성과 적용 가능성을 분석하는 과정이 요구되며, 이를 위해 대청댐 유역의 1981년에서 1987년까지 7년 간의 댐 유입량 자료를 수집하여 SWBM 모형의 년 유출 계산결과와 비교하였다. 최대용수량 자료는 일반 목초지와 경작지를 위한 경우와 산림지역의 뿌리 깊이도 함께 고려한 두 가지 경우를 모두 이용하여 비교하였다. 비교 대상 유역인 대청댐 유역은 유역면적이 4,134㎢으로 비교적 큰 유역에 속하며, 1979년 9월 유량관측을 시작하였고 동경 127도29분02초, 북위 36도28분33초에 유역출구가 위치하고 있다.

<그림 4-14>는 SWBM 모형을 이용하여 계산된 월 유출량과 실측 유출량을 비교한 그림으로 2종류의 최대용수량 자료를 이용한 유출 결과를 함께 나타내었다. <그림 4-14>에서 계산된 유출량들은 실측치에 비해 다소 작은 값을 보여 유출을 증가시키기 위해 최대용수량을 조절(감소)하는 것이 필요함을 알 수 있다. 두 종류의 최대용수량 자료를 비교할 때, 우기인 7월,8월,9월은 유출량 차이가 거의 없으며 건기에 산림의 뿌리 깊이를 고려한 최대용수량 자료가 유출이 적게 나타났다. 그러나 연간 총유출량을 고려할 경우, 두 종류의 최대용수량 자료를 특별히 구분할 필요는 없을 것으로 판

단되었다.

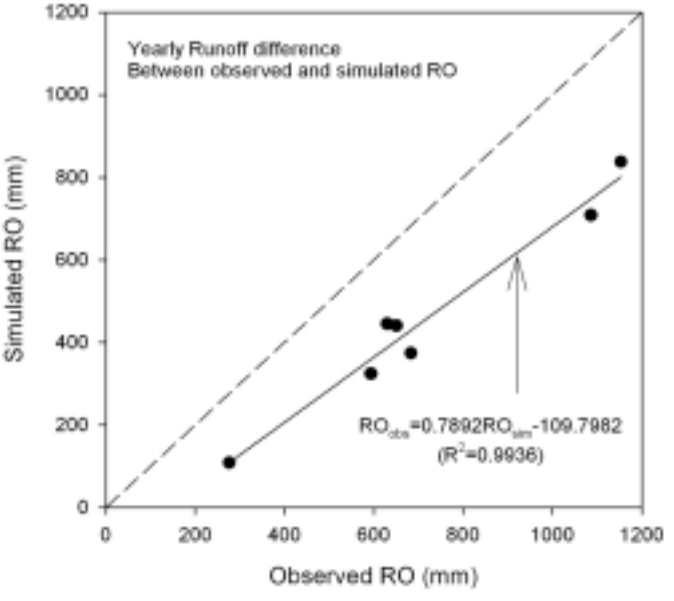
SWBM 모형은 격자별 유출량을 계산하는 모형으로 유역과 하도 추적을 통한 지점별 유량의 계산은 별도의 모형(WTM)을 구축하여 실시하게 된다. 따라서 현 단계로서는 관측 지점의 유량을 계산하지 못하며 각 격자의 유출이 유역과 하도를 따라 이동함으로 인한 시간지체를 표시하지 못하여 융설이 일어나지 않는 월 평균기온 -1℃이하의 겨울철(1월,2월)에 유출이 발생하지 않는 경우가 존재하였다.



<그림 4-14> SWBM에 의한 대청댐 유역의 월 유출 계산 결과

위에서 나타난 최대용수량 조절을 통한 연간 총 유출량의 조절과 하도 및 유역추적을 통한 지점 유량계산 등을 위해서는 WTM 모형과 최적화 모형을 개발하는 것이 요구된다. 이러한 모형들의 추가 개발은 향후 연구를 통해 개선해 나가는 것이 필요하다. 따라서 올해의 기후변화 영향평가는 유역 유출의 월별 거동과 정확한 유출량 계산대신 연간 총 유출의 변화에 주목하고자 한다.

<그림 4-15>는 SWBM 모형을 이용해 계산된 년 유출량과 관측값을 비교한 것으로 계산결과가 관측치와 동일할 경우, 점선주위에 집중하여 나타나게 된다. <그림 4-15>에서 SWBM의 계산 결과는 관측치와 양적으로 정확히 일치하지는 않으나 R^2가 0.9936로 두 값 사이에 대단히 높은 상관성을 보여 년 유출의 변화를 예측하는데 큰 차이는 없을 것으로 판단되었다. 그러나 향후 연구를 통해 더욱 많은 관측 유량을 이용한 검증을 추가하고 최적화를 통한 정확한 유출량 계산이 요구된다.



<그림 4-15> SWBM을 이용한 대청댐 유역의 년 유출량 계산치와 관측치 비교

제5장 기후변화 영향평가 결과

우리나라는 아시아 몬순 기후 지역으로 년 평균 강수량이 1,270mm 정도로 세계 평균의 1.3배 정도로 비교적 많은 편이나 1인당 강수 총량은 세계 평균의 1/11로 물부족 국가에 속하고 있다. 년간 강수량의 분포는 계절적, 지역적으로 큰 차이를 보여 다우기인 6월에서 9월까지의 강수량이 년 강수량의 2/3을 차지하며, 이듬해 3월까지의 강수량이 전체의 1/5에 불과해 여름에는 집중호우로 인한 홍수가 빈발하며, 겨울과 봄에는 물 부족이 발생하게 된다. 지역적 강수량의 분포는 한강, 영산강, 섬진강 유역과 제주도가 다우지역에 속하며, 낙동강 내륙과 형산강 지역이 과우지역에 속하게된다. 기후변화로 인한 강수량의 증가는 토양수분의 증가를 초래하고, 동일 강수량에 대해서도 더 큰 홍수를 발생할 수 있으며, 기온의 증가는 증발산을 촉진시켜 강수량의 증가에도 불구하고 유출을 감소시킬 가능성 또한 존재한다. 따라서 지구 온난화로 인한 유출의 영향을 파악하기 위해 강수량과 기온의 공간적 변화를 정량적으로 분석하여, 기후 변화 시나리오에 따라 발생할 수 있는 영향을 파악하는 것이 선행되어야 한다.

본 연구에서는 기후모형 결과에 기초한 시나리오에 따라 한반도의 기후와 유출변화를 파악하기 위해, IPCC에서 제공하는 SRES 시나리오 기후모형 결과들 중 4종류 GCM모형 결과와 일본 국립환경연구소의 NIES/RAMS RCM자료를 수집하여 분석에 이용하였다(표 5-1 참조). 기후모형결과는 모형의 종류와 시나리오에 따라 「A1」 시나리오 A11: CCSRNIES, A12: CSIRO, 「A2」시나리오 A21: CCCma, A22: CCSRNIES, A23: CSIRO, A24: HadCM3, 「B1」시나리오 B11: CCSRNIES, B12: CSIRO, 「B2」시나리오 B21: CCCma, B22: CCSRNIES, B23: CSIRO, B24: HadCM3, 「RAMS」시나리오의 13종류가 이용되었으며, 남한지역과 북한지역으로 구분하여 기후변화 영향을 분석하였다. 분석시 현재시기는 기준 년도인 1981년에서 1990년까지의 10년 평균된 기온과 강수량을 의미하고, 미래시기는 대상 년도인 2041년에서

2050년까지의 10년 평균 월별 기온과 강수량을 의미한다. 또한 행정경계와 유역경계 내의 지역 평균값을 각 기후 모형들의 대표값으로 이용하였다.

<표 5-1> 분석에 이용된 기후모형 자료

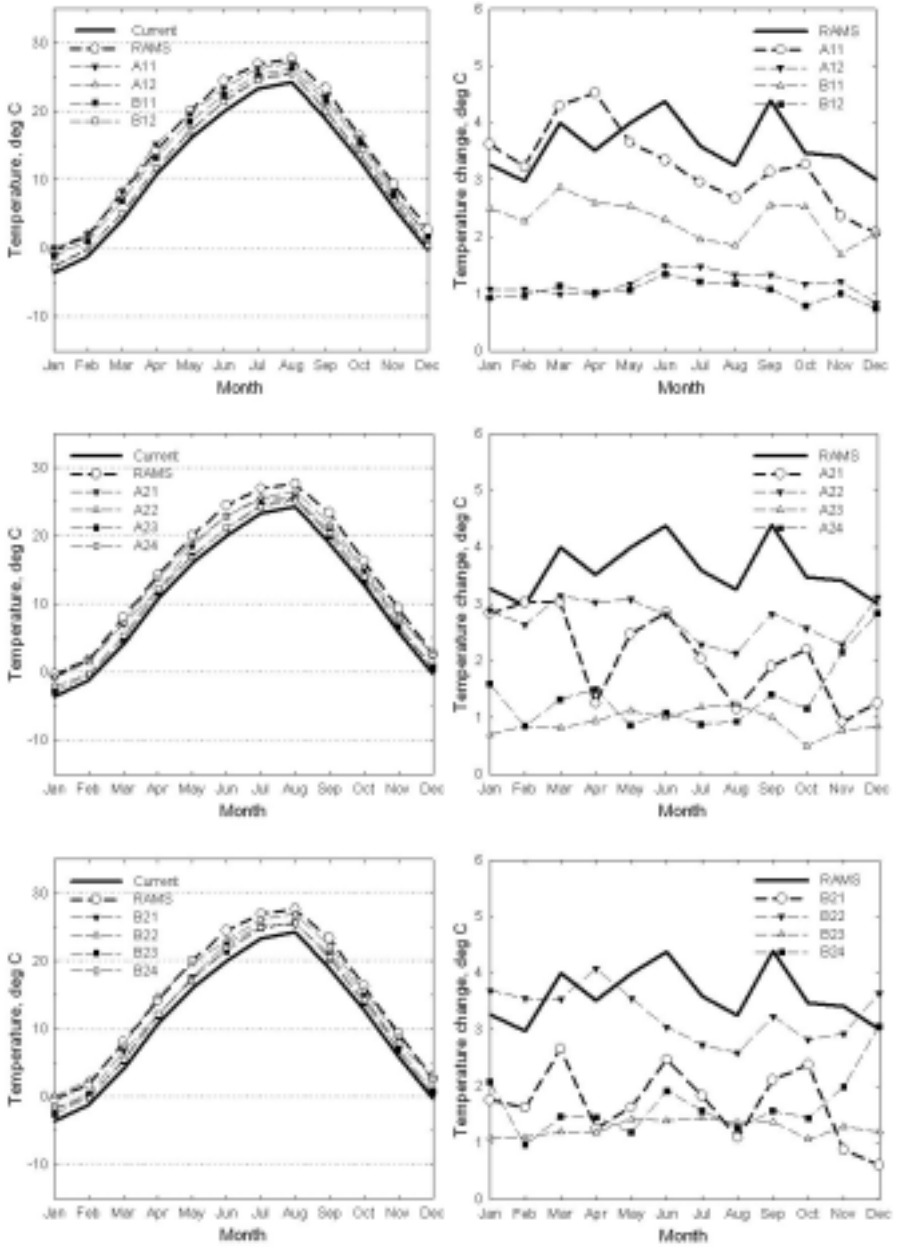
Center	Acronym	Model	SRES Scenario (ID)				Period	Time Step
National Institute for Environmental Studies (NIES)	NIES/ RAMS	NIESRAMS RCM	- (RAMS)				1981-1990 2041-2050	Daily
Canadian Center for Climate Modelling and Analysis	CCCma	CGCM2		A2 (A21)		B2 (B21)	1900-2100	Monthly
Center for Climate Research Studies (CCSR) National Institute for Environmental Studies (NIES)	CCSR/ NIES	CCSR/NIES AGCM +CCSR OGCM	A1 (A11)	A2 (A22)	B1 (B11)	B2 (B22)	1890-2100	Monthly
Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization	CSIRO	CSIRO-Mk2	A1 (A12)	A2 (A23)	B1 (B12)	B2 (B23)	1961-2100	Monthly
Hadley Centre for Climate Prediction and Research	HCCPR	HADCM3		A2 (A24)		B2 (B24)	1950-2099	Monthly

1. 미래 기후변화

가. 남한 지역

기후변화로 인한 남한지역의 년평균 기온 증가는 현재(1981년~1990년 10년 평균) 10.9℃에서 2041년~2050년에 11.8~14.5℃까지 증가해 약 0.9~3.3℃ 증가하게 되는 것으로 나타났다. 시나리오별로는 RAMS 모형이 3.6℃ 증가하여 가장 큰 기온 증가를 나타내었고 B2 시나리오(1.3~3.3℃), A1 시나리오(1.2~3.3℃), A2 시나리오(0.9~2.7℃), B1 시나리오(1.0~2.3℃) 순으로 기온 증가와 변동폭이 크게 나타났다.(표 5-2, 표5-3 참조)

<그림 5-1>의 월평균 기온의 연간 분포에서 RAMS 모형의 여름철(6월-9월) 기온이 가장 높게 나타남을 알 수 있으며, 다른 시기에서도 기후모형 결과들 중 높은 기온을 보이고 있어 증발이 상대적으로 활발할 것으로 예측된다. 기후 모형들의 월별 기온 변화량과 특성에서 CSIRO 모형은 연간 0.9~1.3℃의 기온 증가를 보여 모든 시나리오에서 가장 적은 기온변화를 보이며, 월별 변동도 가장 적게 나타났다. CCSRNIES 모형은 다른 GCM들에 비해 연평균기온 증가가 가장 크며(2.3~3.3℃), 봄철과 겨울철 기온 증가가 크게 나타나 4월 기온 증가가 4.1℃(B2시나리오)와 4.5℃(A1시나리오)로 연평균기온 증가가 가장 큰 RAMS 모형의 기온 증가폭을 넘어선다. GCM들 중 두 번째로 연평균기온 증가가 큰 CCCma 모형은 연간 1.7~2.1℃까지 기온이 증가하고 월별 기온 변동이 크게 나타났다. 겨울철 기온 증가가 특징인 HadCM3 모형은 년간 1.4~1.7℃로 기온이 증가할 것으로 예측되며 12월 기온 증가가 2.8℃(A2시나리오)와 3.1℃(B2시나리오)로 다른 계절에 비해 11-12월 기온 변화가 크게 나타났다. 년 평균 기온 증가(3.6℃)가 가장 크게 나타나는 RAMS 모형은 월 평균 기온 증가도 GCM들에 비해 크게 나타나 남한지역에서 가장 기온 증가가 높은 모형으로 나타났다.



<그림 5-1> 시나리오별 남한 지역의 기온 변화 (좌측: 월평균 기온, 우측: 월평균 기온 변화량)

<표 5-2> 시나리오별 남한지역 월평균 온도(℃)

scenario	name	1	2	3	4	5	6	7
Current		-3.6	-1.2	4.0	10.7	16.0	20.1	23.4
RCM	RAMS	-0.4	1.8	8.0	14.2	20.0	24.5	27.0
A1	CCSRNIES	0.0	2.1	8.3	15.2	19.7	23.4	26.3
	CSIRO	-2.5	-0.1	5.0	11.7	17.2	21.6	24.9
	mean	-1.3	1.0	6.7	13.5	18.4	22.5	25.6
A2	CCCma	-0.8	1.9	7.1	12.0	18.5	22.9	25.4
	CCSRNIES	-0.7	1.5	7.2	13.7	19.1	22.9	25.7
	CSIRO	-2.9	-0.3	4.8	11.6	17.1	21.1	24.6
	HADCM3	-2.0	-0.3	5.3	12.2	16.9	21.2	24.3
	mean	-1.6	0.7	6.1	12.4	17.9	22.0	25.0
B1	CCSRNIES	-1.1	1.1	6.9	13.3	18.5	22.4	25.3
	CSIRO	-2.7	-0.2	5.2	11.7	17.1	21.4	24.6
	mean	-1.9	0.5	6.0	12.5	17.8	21.9	25.0
B2	CCCma	-1.9	0.5	6.7	12.0	17.6	22.5	25.2
	CCSRNIES	0.1	2.4	7.6	14.8	19.5	23.1	26.1
	CSIRO	-2.5	-0.1	5.2	11.9	17.4	21.5	24.8
	HADCM3	-1.6	-0.2	5.5	12.2	17.2	22.0	25.0
	mean	-1.5	0.7	6.2	12.7	17.9	22.3	25.3

scenario	name	8	9	10	11	12	mean
Current		24.4	19.0	12.8	5.9	-0.3	10.9
RCM	RAMS	27.6	23.4	16.3	9.3	2.7	14.5
A1	CCSRNIES	27.0	22.1	16.1	8.3	1.7	14.2
	CSIRO	25.7	20.3	14.0	7.1	0.5	12.1
	mean	26.4	21.2	15.0	7.7	1.1	13.2
A2	CCCma	25.5	20.9	15.0	6.8	0.9	13.0
	CCSRNIES	26.5	21.8	15.4	8.2	2.8	13.7
	CSIRO	25.6	20.0	13.3	6.7	0.5	11.8
	HADCM3	25.3	20.4	14.0	8.1	2.5	12.3
	mean	25.7	20.8	14.4	7.5	1.7	12.7
B1	CCSRNIES	26.2	21.6	15.3	7.6	1.7	13.2
	CSIRO	25.5	20.1	13.6	6.9	0.4	12.0
	mean	25.9	20.8	14.5	7.3	1.1	12.6
B2	CCCma	25.4	21.1	15.2	6.8	0.3	12.6
	CCSRNIES	26.9	22.2	15.6	8.9	3.3	14.2
	CSIRO	25.7	20.4	13.9	7.2	0.9	12.2
	HADCM3	25.6	20.6	14.2	7.9	2.7	12.6
	mean	25.9	21.1	14.7	7.7	1.8	12.9

<표 5-3> 기후변화로 인한 남한지역 월평균 온도 변화(℃)

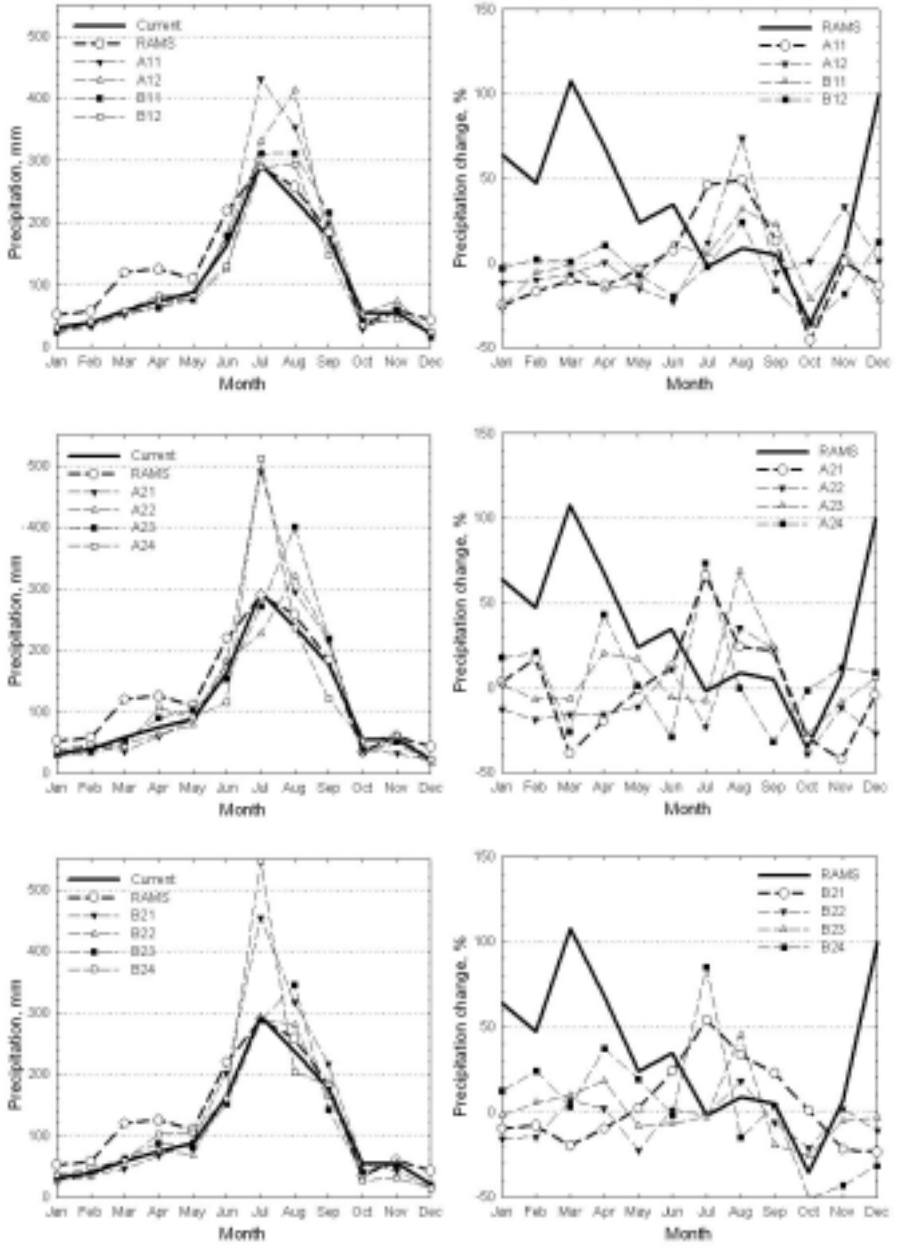
scenario	name	1	2	3	4	5	6	7
Current (Base)		-3.6	-1.2	4.0	10.7	16.0	20.1	23.4
RCM	RAMS	3.3	3.0	4.0	3.5	4.0	4.4	3.6
A1	CCSRNIES	3.6	3.2	4.3	4.5	3.7	3.4	3.0
	CSIRO	1.1	1.1	1.0	1.0	1.2	1.5	1.5
	mean	2.4	2.2	2.7	2.8	2.4	2.4	2.2
A2	CCCma	2.8	3.0	3.0	1.3	2.5	2.9	2.0
	CCSRNIES	2.9	2.6	3.2	3.0	3.1	2.8	2.3
	CSIRO	0.7	0.9	0.8	0.9	1.1	1.0	1.2
	HADCM3	1.6	0.9	1.3	1.5	0.9	1.1	0.9
	mean	2.0	1.8	2.1	1.7	1.9	1.9	1.6
B1	CCSRNIES	2.5	2.3	2.9	2.6	2.5	2.3	2.0
	CSIRO	0.9	1.0	1.1	1.0	1.1	1.4	1.2
	mean	1.7	1.6	2.0	1.8	1.8	1.8	1.6
B2	CCCma	1.8	1.6	2.7	1.3	1.6	2.5	1.8
	CCSRNIES	3.7	3.6	3.5	4.1	3.6	3.1	2.7
	CSIRO	1.1	1.1	1.2	1.2	1.4	1.4	1.4
	HADCM3	2.1	1.0	1.5	1.5	1.2	1.9	1.6
	mean	2.2	1.8	2.2	2.0	1.9	2.2	1.9

scenario	name	8	9	10	11	12	mean
Current (Base)		24.4	19.0	12.8	5.9	-0.3	10.9
RCM	RAMS	3.3	4.4	3.5	3.4	3.0	3.6
A1	CCSRNIES	2.7	3.1	3.3	2.4	2.1	3.3
	CSIRO	1.3	1.3	1.2	1.2	0.8	1.2
	mean	2.0	2.2	2.2	1.8	1.5	2.2
A2	CCCma	1.2	1.9	2.2	0.9	1.3	2.1
	CCSRNIES	2.1	2.8	2.6	2.3	3.1	2.7
	CSIRO	1.2	1.0	0.5	0.8	0.8	0.9
	HADCM3	0.9	1.4	1.2	2.2	2.8	1.4
	mean	1.4	1.8	1.6	1.5	2.0	1.8
B1	CCSRNIES	1.9	2.6	2.5	1.7	2.1	2.3
	CSIRO	1.2	1.1	0.8	1.0	0.8	1.0
	mean	1.5	1.8	1.7	1.4	1.4	1.7
B2	CCCma	1.1	2.1	2.4	0.9	0.6	1.7
	CCSRNIES	2.6	3.2	2.8	2.9	3.6	3.3
	CSIRO	1.4	1.4	1.1	1.3	1.2	1.3
	HADCM3	1.3	1.6	1.4	2.0	3.1	1.7
	mean	1.6	2.1	1.9	1.8	2.1	2.0

기후변화로 인한 남한지역의 연평균강수량 변화는 현재시기(1981년-1990년)의 1296㎜에서 미래시기(2041년-2050년)에 1261~1574㎜로 -2.7~21.5%까지 변화되는 것으로 나타났다. 연간 강수량 증가는 B2 시나리오가 -0.8%~21.5%의 강수량 증가를 보여 전체 시나리오 중 가장 큰 폭의 강수량 증가를 보였으며, RAMS(20%), A2 시나리오(-0.2~18.5%), A1 시나리오(12.2~17.4%), B1 시나리오(-2.7~7.9%)순으로 강수량 증가와 변동폭이 줄어드는 것으로 나타났다(표 5-4, 표5-5 참조)

<그림 5-2>에서 월평균 강수량의 연중 분포와 변화경향을 살펴보면, 가장 특징 적인 현상이 RAMS 모형의 봄철과 겨울철 강수량 증가이다. 연간강수량 증가가 1555㎜로 20%의 강수량 증가를 보이는 RAMS모형은 봄철인 3월 평균 강수량이 120㎜(107%), 4월 126㎜(68.1%)로 6월까지 다른 모형들에 비해 높은 강수량과 증가율을 보이다가 호우시기인 7, 8월에는 현재의 강수량과 비슷해지고 가을철인 10월까지 강수량이 감소(-35.7%)하다 다시 증가하는 건기 강수 증가의 특징을 보였다.

SRES 시나리오의 GCM 모형들은 5월까지 현재기후와 비슷한 범위에서 거동하다 7, 8월에 급격하게 강수량이 증가하는 경향을 보이는 특징이 나타난다. 홍수 피해가 예상되는 7-8월에 급격한 강수량 증가를 보이는 기후모형들은 B2 시나리오의 HadCM3(7월 546㎜, 85%증가), CCCma(7월 455㎜, 54.1%증가), A2시나리오의 HadCM3(7월 512㎜, 73.6%증가), CCCma(7월 490㎜, 66.1%증가), CSIRO(8월 400㎜, 68.6%증가), A1 시나리오의 CCSRNIES(7월 431㎜, 46%증가), CSIRO(8월 413㎜, 74% 증가)가 있었다. 년간 총 강수량의 감소가 발생하는 경우는 B1 시나리오의 CSIRO 모형(1261㎜, 2.7% 감소)과 B2시나리오(1286㎜, 0.8% 감소)와 A2시나리오(1294㎜, 0.2% 감소)의 CCSRNIES모형에서 발생하였으나 강수량 감소폭이 적어 큰 영향을 미치지 못할 것으로 판단된다.



<그림 5-2> 시나리오별 남한 지역의 강수량 변화 (좌측: 월평균 강수량, 우측: 월평균 강수량 변화비)

<표 5-4> 시나리오별 남한지역 월평균 강수량(㎜)

scenario	name	1	2	3	4	5	6	7
Current		32.0	39.2	58.1	74.6	88.8	162.9	295.2
RCM	RAMS	52.5	57.7	120.4	125.5	109.7	219.6	289.5
A1	CCSRNIES	23.9	32.6	52.0	64.5	85.2	174.8	431.0
	CSIRO	28.2	35.4	54.2	74.7	75.2	125.7	330.8
	mean	26.1	34.0	53.1	69.6	80.2	150.2	380.9
A2	CCCma	33.0	45.9	35.6	60.1	88.0	182.3	490.4
	CCSRNIES	27.9	31.8	49.0	62.9	78.7	180.6	227.5
	CSIRO	32.6	36.4	54.2	89.7	103.7	153.4	271.9
	HADCM3	37.6	47.4	43.0	106.9	90.0	115.6	512.4
	mean	32.8	40.4	45.5	79.9	90.1	158.0	375.5
B1	CCSRNIES	23.6	36.9	57.4	63.1	78.2	180.6	311.5
	CSIRO	31.0	40.1	58.6	82.6	82.6	130.6	289.0
	mean	27.3	38.5	58.0	72.8	80.4	155.6	300.3
B2	CCCma	28.9	36.0	46.6	67.3	90.7	202.0	454.9
	CCSRNIES	27.0	33.5	61.8	76.1	68.8	165.2	289.5
	CSIRO	31.4	41.3	63.9	88.1	81.3	151.8	287.1
	HADCM3	36.0	48.6	60.0	102.4	105.9	160.2	546.2
	mean	30.8	39.9	58.1	83.5	86.7	169.8	394.4

scenario	name	8	9	10	11	12	Total
Current		237.4	176.6	54.0	55.8	21.4	1296.0
RCM	RAMS	258.1	184.8	34.8	59.6	42.8	1554.8
A1	CCSRNIES	353.8	199.6	29.3	56.1	18.6	1521.5
	CSIRO	413.0	166.3	54.6	74.3	21.7	1454.1
	mean	383.4	183.0	41.9	65.2	20.2	1487.8
A2	CCCma	294.7	215.3	38.1	32.1	20.5	1536.1
	CCSRNIES	320.8	217.0	32.8	49.1	15.6	1293.8
	CSIRO	400.3	218.6	39.2	50.9	22.7	1473.6
	HADCM3	237.0	120.6	53.1	62.4	23.4	1449.4
	mean	313.2	192.9	40.8	48.6	20.5	1438.2
B1	CCSRNIES	312.2	216.6	42.6	59.5	16.8	1399.0
	CSIRO	294.2	148.2	34.5	45.5	24.1	1261.1
	mean	303.2	182.4	38.6	52.5	20.5	1330.0
B2	CCCma	316.9	216.6	54.5	43.5	16.4	1574.3
	CCSRNIES	280.3	165.7	42.5	56.7	19.1	1286.1
	CSIRO	345.5	142.3	40.1	52.9	20.7	1346.4
	HADCM3	202.5	183.2	26.7	31.7	14.7	1518.0
	mean	286.3	176.9	40.9	46.2	17.7	1431.2

<표 5-5> 기후변화로 인한 남한지역 월평균 강수량 변화비(%)

scenario	name	1	2	3	4	5	6	7
Current (Base)		32.0	39.2	58.1	74.6	88.8	162.9	295.2
RCM(%)	RAMS	63.9	47.2	107.4	68.1	23.6	34.8	-2.0
A1(%)	CCSRNIES	-25.3	-16.9	-10.4	-13.5	-4.0	7.3	46.0
	CSIRO	-12.0	-9.8	-6.6	0.1	-15.3	-22.8	12.0
	mean	-18.6	-13.4	-8.5	-6.7	-9.6	-7.8	29.0
A2(%)	CCCma	3.0	17.1	-38.6	-19.4	-0.8	11.9	66.1
	CCSRNIES	-12.8	-18.9	-15.6	-15.7	-11.3	10.9	-23.0
	CSIRO	1.9	-7.1	-6.6	20.2	16.9	-5.8	-7.9
	HADCM3	17.6	21.0	-25.9	43.3	1.4	-29.1	73.6
	mean	2.4	3.0	-21.7	7.1	1.5	-3.0	27.2
B1(%)	CCSRNIES	-26.2	-5.8	-1.1	-15.5	-11.9	10.9	5.5
	CSIRO	-3.2	2.3	1.0	10.7	-7.0	-19.8	-2.1
	mean	-14.7	-1.7	-0.1	-2.4	-9.5	-4.5	1.7
B2(%)	CCCma	-9.8	-8.1	-19.7	-9.8	2.2	24.0	54.1
	CCSRNIES	-15.6	-14.7	6.4	2.0	-22.4	1.4	-1.9
	CSIRO	-2.0	5.3	10.0	18.0	-8.4	-6.8	-2.7
	HADCM3	12.5	24.0	3.3	37.3	19.3	-1.7	85.0
	mean	-3.7	1.6	0.0	11.9	-2.3	4.2	33.6

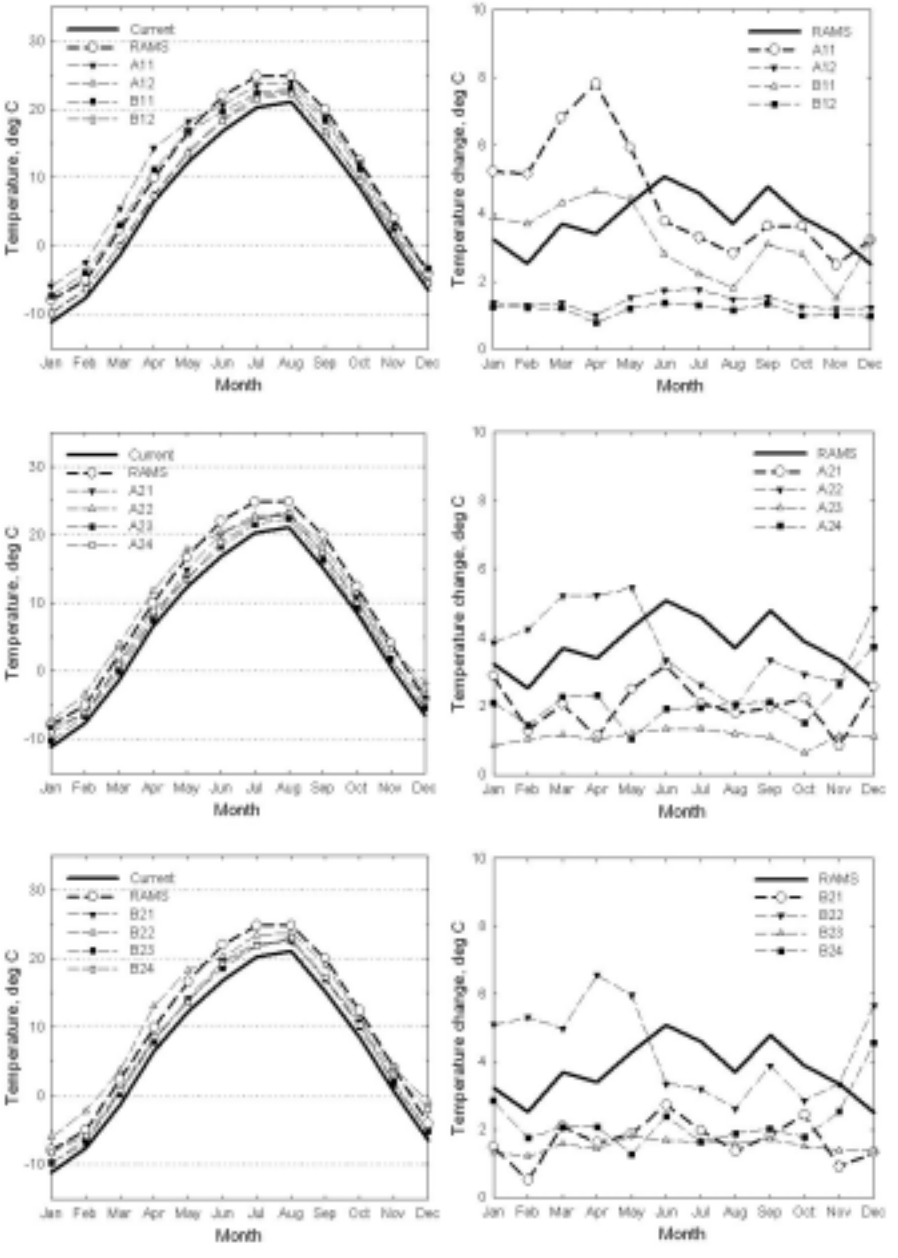
scenario	name	8	9	10	11	12	mean
Current (Base)		237.4	176.6	54.0	55.8	21.4	1296.0
RCM(%)	RAMS	8.7	4.6	-35.7	6.7	99.8	20.0
A1(%)	CCSRNIES	49.0	13.0	-45.8	0.6	-13.2	17.4
	CSIRO	74.0	-5.8	1.1	33.2	1.4	12.2
	mean	61.5	3.6	-22.3	16.9	-5.9	14.8
A2(%)	CCCma	24.2	21.9	-29.4	-42.4	-4.5	18.5
	CCSRNIES	35.1	22.9	-39.3	-11.9	-27.1	-0.2
	CSIRO	68.6	23.8	-27.5	-8.8	5.9	13.7
	HADCM3	-0.2	-31.7	-1.7	11.7	9.0	11.8
	mean	31.9	9.2	-24.5	-12.9	-4.2	11.0
B1(%)	CCSRNIES	31.5	22.6	-21.2	6.7	-21.6	7.9
	CSIRO	23.9	-16.1	-36.0	-18.4	12.6	-2.7
	mean	27.7	3.3	-28.6	-5.9	-4.5	2.6
B2(%)	CCCma	33.5	22.6	0.9	-22.0	-23.6	21.5
	CCSRNIES	18.1	-6.2	-21.3	1.6	-10.9	-0.8
	CSIRO	45.6	-19.5	-25.8	-5.2	-3.3	3.9
	HADCM3	-14.7	3.7	-50.6	-43.2	-31.6	17.1
	mean	20.6	0.2	-24.2	-17.2	-17.4	10.4

나. 북한 지역

기후변화로 인한 북한지역의 년 평균 기온 증가는 현재시기 6.3℃에서 미래시기에 7.4~10.7℃까지 증가해 약 1.1~4.5℃ 증가하게 되는 것으로 나타났다. 시나리오별로는 A1과 B2시나리오의 CCSRNIES 모형이 4.4℃ 증가하여 가장 큰 기온 증가를 나타내었고 RAMS 모형이 3.8℃ 증가하는 것으로 나타났으며, A1 시나리오(1.4~4.4℃), B2 시나리오(1.5~4.4℃), A2 시나리오(1.1~3.8℃), B1 시나리오(1.2~3.2℃) 순으로 기온 증가와 변동폭이 크게 나타났다.(표 5-6, 표5-7 참조)

<그림 5-3>의 월평균 기온의 계절적 거동에서 GCM의 월 평균 기온이 높은 경우가 있으나 여름철 기온(6~9월)은 RAMS 모형이 모든 시나리오에서 가장 높게 나타나는 것을 보여주고 있다. 기후 모형들의 월별 기온 변화량과 특성에서 CSIRO 모형은 년간 1.1~1.5℃의 기온 증가를 보여 모든 시나리오에서 가장 적은 기온 변화를 보이며, 월별 변동도 가장 적게 나타났다. CCSRNIES 모형은 다른 GCM들에 비해 연평균기온 증가가 가장 크며(3.2~4.4℃), 월평균 기온도 다른 모형들에 비해 높게 나타난다. 계절적으로는 특히 봄철과 겨울철 기온 증가가 특징이며, 4월의 기온 증가량를 살펴볼 때, A1시나리오(7.8℃ 증가), B2시나리오(6.6℃), A2시나리오(5.2℃), B1시나리오(4.7℃)로 모든 시나리오들 중 가장 높은 기온 변화를 나타내어 북한의 생육환경에 가장 큰 영향을 미치는 기후 모형으로 나타났다.

CCCma 모형은 연간 1.7~2.0℃까지 기온이 증가하고 월별 기온 변동이 큰 편이나 다른 모형에 비해 계절적 변화가 적다. 겨울철 기온 증가가 특징인 HadCM3 모형은 연간 2.1~2.2℃ 정도 기온이 증가할 것으로 예측되며, 12월 기온증가가 3.7℃(A2시나리오)와 4.6℃(B2시나리오) 증가하여 다른 계절에 비해 11-12월의 변화가 크게 나타났다. RAMS 모형의 월별 평균 기온 증가는 CCSRNIES 모형 다음으로 높게 나타났으며, 특히 6월 이후 하절기의 기온 증가가 가장 크고 뚜렷한 계절적 특징은 없는 것으로 나타났다.



<그림 5-3> 시나리오별 북한 지역의 기온 변화 (좌측: 월평균 기온, 우측: 월평균 기온 변화량)

<표 5-6> 시나리오별 북한지역 월평균 온도(℃)

scenario	name	1	2	3	4	5	6	7
Current		-11.1	-7.6	-1.3	6.5	12.4	16.9	20.3
RCM	RAMS	-7.9	-5.1	2.4	9.9	16.7	22.0	24.9
A1	CCSRNIES	-5.9	-2.4	5.5	14.3	18.3	20.7	23.5
	CSIRO	-9.8	-6.3	0.1	7.5	13.9	18.7	22.0
	mean	-7.8	-4.4	2.8	10.9	16.1	19.7	22.8
A2	CCCma	-8.3	-6.3	0.8	7.6	14.9	20.1	22.3
	CCSRNIES	-7.3	-3.4	3.9	11.8	17.8	20.3	22.9
	CSIRO	-10.3	-6.6	-0.1	7.5	13.6	18.3	21.6
	HADCM3	-9.0	-6.2	1.0	8.8	13.4	18.8	22.2
	mean	-8.7	-5.6	1.4	8.9	14.9	19.4	22.2
B1	CCSRNIES	-7.3	-3.9	3.0	11.2	16.8	19.7	22.5
	CSIRO	-9.9	-6.4	-0.1	7.3	13.6	18.3	21.5
	mean	-8.6	-5.1	1.5	9.2	15.2	19.0	22.0
B2	CCCma	-9.6	-7.1	0.8	8.1	14.2	19.7	22.2
	CCSRNIES	-6.1	-2.3	3.7	13.1	18.3	20.3	23.5
	CSIRO	-9.8	-6.4	0.3	8.0	14.2	18.6	21.9
	HADCM3	-8.3	-5.8	0.8	8.6	13.6	19.3	21.9
	mean	-8.4	-5.4	1.4	9.4	15.1	19.5	22.4

scenario	name	8	9	10	11	12	mean
Current		21.2	15.3	8.5	0.7	-6.5	6.3
RCM	RAMS	24.8	20.0	12.4	4.1	-4.0	10.0
A1	CCSRNIES	24.0	18.9	12.2	3.2	-3.3	10.7
	CSIRO	22.6	16.8	9.8	1.9	-5.3	7.7
	mean	23.3	17.8	11.0	2.6	-4.3	9.2
A2	CCCma	23.0	17.2	10.8	1.6	-3.9	8.3
	CCSRNIES	23.2	18.6	11.5	3.4	-1.6	10.1
	CSIRO	22.4	16.4	9.2	1.9	-5.4	7.4
	HADCM3	23.2	17.4	10.0	3.3	-2.8	8.4
	mean	22.9	17.4	10.4	2.5	-3.4	8.5
B1	CCSRNIES	23.0	18.3	11.3	2.2	-3.3	9.5
	CSIRO	22.3	16.6	9.5	1.7	-5.5	7.4
	mean	22.6	17.5	10.4	2.0	-4.4	8.4
B2	CCCma	22.5	17.1	11.0	1.6	-5.2	7.9
	CCSRNIES	23.8	19.2	11.4	4.1	-0.8	10.7
	CSIRO	22.8	17.0	10.0	2.1	-5.1	7.8
	HADCM3	23.1	17.3	10.3	3.3	-2.0	8.5
	mean	23.0	17.6	10.7	2.8	-3.3	8.7

<표 5-7> 기후변화로 인한 북한지역 월평균 온도 변화(℃)

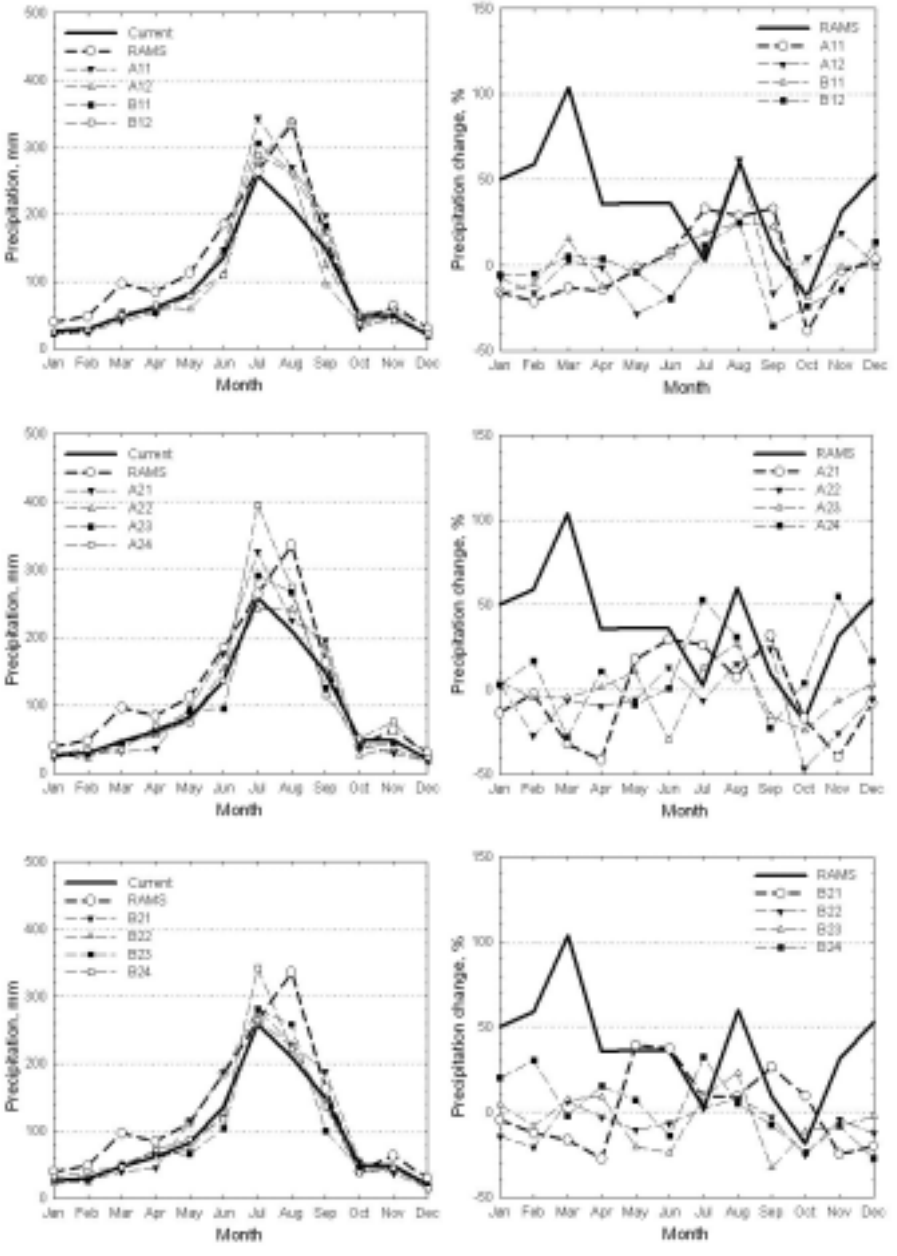
scenario	name	1	2	3	4	5	6	7
Current (Base)		-11.1	-7.6	-1.3	6.5	12.4	16.9	20.3
RCM	RAMS	3.2	2.5	3.7	3.4	4.3	5.1	4.6
A1	CCSRNIES	5.2	5.2	6.8	7.8	5.9	3.8	3.3
	CSIRO	1.4	1.3	1.4	1.0	1.5	1.7	1.8
	mean	3.3	3.2	4.1	4.4	3.7	2.8	2.5
A2	CCCma	2.9	1.3	2.1	1.1	2.5	3.2	2.1
	CCSRNIES	3.9	4.2	5.2	5.2	5.5	3.3	2.6
	CSIRO	0.9	1.0	1.2	1.0	1.2	1.3	1.3
	HADCM3	2.1	1.4	2.3	2.3	1.0	1.9	2.0
	mean	2.4	2.0	2.7	2.4	2.6	2.4	2.0
B1	CCSRNIES	3.9	3.7	4.3	4.7	4.4	2.8	2.2
	CSIRO	1.3	1.2	1.2	0.8	1.2	1.4	1.3
	mean	2.6	2.5	2.8	2.7	2.8	2.1	1.8
B2	CCCma	1.5	0.5	2.1	1.6	1.9	2.7	2.0
	CCSRNIES	5.1	5.3	5.0	6.6	6.0	3.4	3.2
	CSIRO	1.3	1.2	1.6	1.4	1.8	1.7	1.6
	HADCM3	2.9	1.8	2.1	2.1	1.3	2.4	1.6
	mean	2.7	2.2	2.7	2.9	2.7	2.5	2.1

scenario	name	8	9	10	11	12	mean
Current (Base)		21.2	15.3	8.5	0.7	-6.5	6.3
RCM	RAMS	3.7	4.8	3.9	3.4	2.5	3.8
A1	CCSRNIES	2.8	3.6	3.6	2.5	3.2	4.4
	CSIRO	1.5	1.5	1.3	1.2	1.2	1.4
	mean	2.1	2.6	2.4	1.8	2.2	2.9
A2	CCCma	1.8	2.0	2.2	0.9	2.6	2.0
	CCSRNIES	2.0	3.3	2.9	2.7	4.9	3.8
	CSIRO	1.2	1.1	0.6	1.2	1.1	1.1
	HADCM3	2.1	2.1	1.5	2.6	3.7	2.1
	mean	1.8	2.1	1.8	1.8	3.1	2.3
B1	CCSRNIES	1.8	3.1	2.8	1.5	3.2	3.2
	CSIRO	1.2	1.4	1.0	1.0	1.0	1.2
	mean	1.5	2.2	1.9	1.3	2.1	2.2
B2	CCCma	1.4	1.8	2.4	0.9	1.3	1.7
	CCSRNIES	2.6	3.9	2.9	3.4	5.7	4.4
	CSIRO	1.6	1.7	1.5	1.4	1.4	1.5
	HADCM3	1.9	2.0	1.8	2.5	4.6	2.2
	mean	1.9	2.4	2.1	2.0	3.2	2.5

기후변화로 인한 북한지역의 연평균강수량 변화는 현재시기(1981년-1990년)의 1120㎜에서 미래시기(2041년-2050년)에 1091㎜~1463㎜로 -2.6~30.6%까지 변화되는 것으로 나타났다. 연간강수량 증가는 RAMS 모형이 30.6%의 강수량 증가를 보여 전체 시나리오 중 가장 큰 증가를 보였으며, A2 시나리오(0.8~17.1%), A1 시나리오(7.2~13.9%), B2 시나리오(-2.6~11.1%) B1 시나리오(-1.5~11.0%)순으로 강수량 증가를 나타내었다(표 5-4, 표5-5 참조)

<그림 5-4>에서 월평균 강수량의 년중 분포와 변화경향을 살펴보면, 연간강수량 증가가 1463㎜로 30.6%의 강수량 증가를 보이는 RAMS 모형의 경우 봄철과 겨울철의 강수량이 증가는 남한과 동일하지만 8월에 강수량이 다시 증가하는 특징을 보인다. RAMS모형은 봄철인 3월 평균 강수량이 103.6㎜(96.3%)로 증가율이 가장 높고 6월까지 다른 모형들에 비해 높은 강수량과 증가율을 보이다가 남한보다 1달 늦은 8월에 가장 많은 335.8㎜의 강수량을 보여 60.1%의 강수량 증가를 보이게 된다.

SRES 시나리오의 GCM 모형들은 홍수 피해가 예상되는 7, 8월에 많은 강수량을 보이고 있다. 7-8월에 급격한 강수량 증가를 보이는 기후모형들은 A2시나리오의 HadCM3(7월 395㎜, 52.9%증가), CCCma(7월 326㎜, 26.3%증가), B2 시나리오의 HadCM3(7월 342㎜, 32.5%증가), A1 시나리오의 CCSRNIES(7월 343㎜, 32.8%증가), CSIRO(8월 339㎜, 61.6%증가)가 있었다. 연간총강수량의 감소가 발생하는 경우는 B2 시나리오(1091㎜, 2.6%감소)와 B1 시나리오(1103㎜, 1.5%감소)의 CSIRO 모형과 B2시나리오의 CCSRNIES 모형(1094㎜, 2.3%감소)에서 발생하였으나 강수량 감소폭이 적어 큰 영향을 미치지 못할 것으로 판단된다.



<그림 5-4> 시나리오별 북한 지역의 강수량 변화 (좌측: 월평균 강수량, 우측: 월평균 강수량 변화비)

<표 5-8> 시나리오별 북한지역 월평균 강수량(㎜)

scenario	name	1	2	3	4	5	6	7
Current		26.4	30.2	47.3	62.3	82.3	136.2	258.2
RCM	RAMS	39.7	48.0	96.3	84.3	112.4	185.1	264.1
A1	CCSRNIES	22.3	23.8	41.0	53.1	80.8	145.8	343.0
	CSIRO	24.5	25.3	48.4	61.4	59.1	110.8	277.9
	mean	23.4	24.6	44.7	57.3	70.0	128.3	310.4
A2	CCCma	22.8	29.4	32.0	36.4	97.0	176.1	326.2
	CCSRNIES	27.2	22.0	44.3	56.0	77.2	154.2	241.8
	CSIRO	27.7	28.7	44.9	63.0	90.9	95.7	291.2
	HADCM3	27.1	35.2	34.1	68.9	74.7	137.1	394.7
	mean	26.2	28.8	38.8	56.1	84.9	140.8	313.5
B1	CCSRNIES	22.0	27.0	54.4	54.3	78.9	146.9	306.0
	CSIRO	24.9	28.7	49.8	64.5	78.8	109.2	287.4
	mean	23.5	27.8	52.1	59.4	78.8	128.1	296.7
B2	CCCma	25.2	26.5	39.5	45.2	114.7	187.1	281.3
	CCSRNIES	22.7	24.0	50.3	60.4	73.7	127.0	264.6
	CSIRO	27.6	27.8	50.8	67.9	65.7	103.6	280.7
	HADCM3	31.8	39.4	46.3	71.7	88.1	117.0	342.1
	mean	26.8	29.4	46.7	61.3	85.6	133.7	292.2

scenario	name	8	9	10	11	12	Total
Current		209.8	148.7	49.9	48.7	19.6	1119.6
RCM	RAMS	335.8	162.2	40.8	63.8	30.0	1462.6
A1	CCSRNIES	269.9	197.9	30.7	46.8	20.3	1275.4
	CSIRO	338.9	124.3	52.1	57.7	19.7	1199.9
	mean	304.4	161.1	41.4	52.3	20.0	1237.7
A2	CCCma	224.7	195.9	41.5	29.2	18.1	1229.3
	CCSRNIES	241.0	184.3	26.7	36.0	18.5	1129.1
	CSIRO	266.7	125.6	37.9	45.3	20.3	1137.9
	HADCM3	274.6	114.9	51.8	75.4	22.9	1311.5
	mean	251.7	155.2	39.5	46.5	19.9	1201.9
B1	CCSRNIES	262.2	182.2	40.8	48.2	19.4	1242.2
	CSIRO	261.8	95.9	37.9	41.7	22.3	1102.9
	mean	262.0	139.0	39.4	45.0	20.9	1172.6
B2	CCCma	229.1	188.0	54.7	36.7	15.7	1243.6
	CCSRNIES	226.3	144.1	37.4	46.6	17.2	1094.2
	CSIRO	258.4	100.2	44.3	44.7	19.1	1090.8
	HADCM3	220.6	137.2	38.0	44.8	14.3	1191.3
	mean	233.6	142.4	43.6	43.2	16.6	1155.0

<표 5-9> 기후변화로 인한 북한지역 월평균 강수량 변화비(%)

scenario	name	1	2	3	4	5	6	7
Current (Base)		26.4	30.2	47.3	62.3	82.3	136.2	258.2
RCM(%)	RAMS	50.4	59.1	103.6	35.4	36.6	35.9	2.3
A1(%)	CCSRNIES	-15.7	-21.1	-13.4	-14.7	-1.8	7.1	32.8
	CSIRO	-7.5	-16.3	2.3	-1.3	-28.2	-18.7	7.6
	mean	-11.6	-18.7	-5.5	-8.0	-15.0	-5.8	20.2
A2(%)	CCCma	-13.8	-2.6	-32.2	-41.6	17.8	29.3	26.3
	CCSRNIES	3.1	-27.2	-6.3	-10.1	-6.3	13.2	-6.4
	CSIRO	4.7	-5.1	-5.0	1.2	10.4	-29.7	12.8
	HADCM3	2.6	16.7	-27.9	10.7	-9.2	0.6	52.9
	mean	-0.9	-4.5	-17.8	-10.0	3.2	3.3	21.4
B1(%)	CCSRNIES	-16.9	-10.6	15.1	-12.7	-4.2	7.8	18.5
	CSIRO	-5.6	-5.0	5.3	3.6	-4.3	-19.8	11.3
	mean	-11.3	-7.8	10.2	-4.6	-4.3	-6.0	14.9
B2(%)	CCCma	-4.7	-12.3	-16.5	-27.5	39.3	37.3	8.9
	CCSRNIES	-14.2	-20.6	6.3	-3.0	-10.5	-6.8	2.4
	CSIRO	4.3	-8.1	7.4	9.1	-20.2	-23.9	8.7
	HADCM3	20.1	30.3	-2.1	15.2	7.1	-14.1	32.5
	mean	1.4	-2.7	-1.2	-1.5	3.9	-1.9	13.1

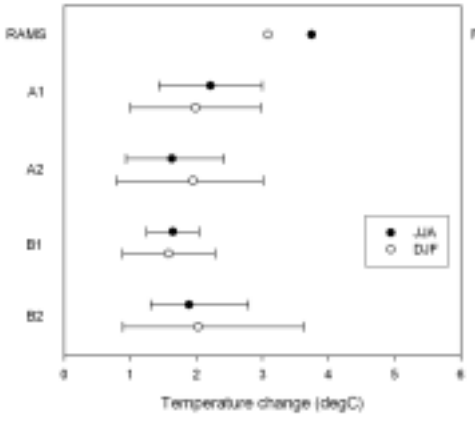
scenario	name	8	9	10	11	12	mean
Current (Base)		209.8	148.7	49.9	48.7	19.6	1119.6
RCM(%)	RAMS	60.1	9.1	-18.3	31.0	52.9	30.6
A1(%)	CCSRNIES	28.6	33.1	-38.6	-3.8	3.1	13.9
	CSIRO	61.6	-16.4	4.3	18.6	0.3	7.2
	mean	45.1	8.3	-17.1	7.4	1.7	10.5
A2(%)	CCCma	7.1	31.8	-16.9	-40.0	-8.1	9.8
	CCSRNIES	14.9	23.9	-46.5	-26.0	-5.8	0.8
	CSIRO	27.1	-15.5	-24.0	-6.9	3.2	1.6
	HADCM3	30.9	-22.8	3.9	54.9	16.8	17.1
	mean	20.0	4.3	-20.9	-4.5	1.5	7.4
B1(%)	CCSRNIES	25.0	22.5	-18.2	-0.9	-1.0	11.0
	CSIRO	24.8	-35.6	-24.0	-14.3	13.5	-1.5
	mean	24.9	-6.5	-21.1	-7.6	6.2	4.7
B2(%)	CCCma	9.2	26.4	9.6	-24.5	-20.0	11.1
	CCSRNIES	7.9	-3.1	-25.1	-4.2	-12.5	-2.3
	CSIRO	23.2	-32.7	-11.3	-8.3	-2.5	-2.6
	HADCM3	5.2	-7.8	-23.8	-8.0	-27.2	6.4
	mean	11.4	-4.3	-12.6	-11.3	-15.6	3.2

다. 계절별 기후 영향 분석

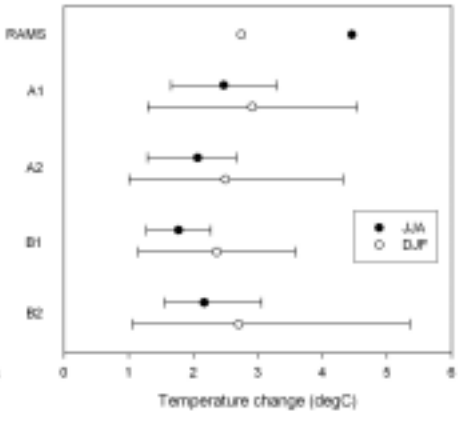
<그림 5-5>는 남한과 북한의 기온 및 강수량 변화를 여름철(6월, 7월, 8월)과 겨울철(12월, 1월, 2월)로 나누어 비교한 것으로 SRES 시나리오에 따른 GCM들의 기온과 강수량 변화값 평균과 편차를 RCM의 결과와 함께 나타내어 상호간의 특성을 비교하였다.

<그림 5-5>의 기온 변화에서 RCM의 경우, 북한은 여름철 기온 증가(4.5℃)가 겨울철 기온 증가(2.7℃)에 비해 약 1.3℃ 큰 것으로 나타나 남한의 여름철(3.7℃), 겨울철(3.1℃)의 약 0.6℃ 변화에 비해 계절 변화가 더욱 큰 것으로 나타났다. SRES 시나리오에서, 남한은 상대적으로 기온 변화가 적은 A1 시나리오와 B1 시나리오가 RCM과 동일하게 여름철 평균 기온 변화가 겨울철 보다 크게 나타났으며, 영향이 큰 A2 시나리오와 B2 시나리오에서는 겨울철 평균 기온 변화가 더욱 크게 나타났다. 북한의 경우는 기온 증가와 변동폭이 남한에 비해 크게 나타나며 모든 SRES 시나리오에서 겨울철 평균 기온 변화가 여름철 보다 높아 RCM과 정반대의 계절변화 특성을 보이고 있다. 여름철 평균 기온 변화가 가장 큰 시나리오는 남북한 모두 RAMS 모형으로 남한 3.7℃, 북한 4.5℃ 증가하였고, 겨울철 평균 기온 변화가 가장 큰 시나리오는 남한의 경우 RAMS 모형의 3.1℃, 북한은 A1 시나리오의 2.9℃로 나타났다.

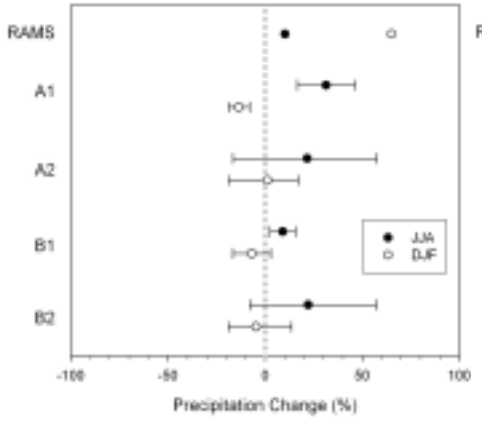
<그림 5-5>의 강수량 변화에서 RCM의 경우, 남한은 겨울철 강수량 증가(65.1%)가 겨울철(10.3%)에 비해 큰 것으로 나타나 북한의 겨울철(54.4%), 여름철(29.9%)에 비해 계절 변화가 더욱 큰 것으로 나타났다. SRES 시나리오는 남북한 모두 여름철 평균 강수량 변화가 겨울철에 비해 크게 나타나 7월, 8월의 우기에 강수량 변화가 집중됨을 보여 봄철과 겨울철 강수량 변화가 큰 RAMS RCM 과는 정 반대의 변화 특성을 보였다. 여름철 평균 강수량 변화가 가장 큰 시나리오는 남한에서는 A1 시나리오 31.5%이고 북한은 RAMS 모형의 29.9%였다. 겨울철 평균 강수량 변화가 가장 큰 시나리오는 남북한의 모두 RAMS 모형으로 남한 65.1%, 북한 54.5%로 나타났나



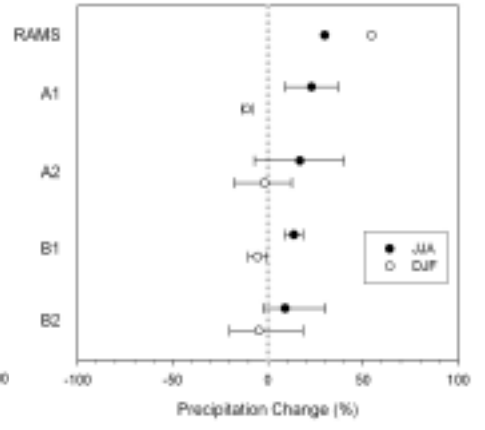
남한 기온



북한 기온



남한 강수량



북한 강수량

<그림 5-5> 기후 시나리오에 따른 계절별 기온 및 강수량 변화

기후모형 시나리오들의 비교 결과를 정리하면, 기온 변화영향은 남한은 여름, 겨울철 모두 RAMS 모형 시나리오가, 북한은 여름철 RAMS 모형, 겨울철 A1 시나리오의 영향이 가장 크게 나타났고 강수량 변화는 남한은 여름철 A1 시나리오, 겨울철 RAMS 모형, 북한은 RAMS 모형시나리오가 두 계절 모두 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. <표 5-10>은 남북한의 기후 변화 영향을 지역별, 계절별로 정리하여 나타낸 것으로 한반도에 가장 안정적인 발전 시나리오는 환경 친화적인 기술개발 및 지구적 차원의 지속가능성을 추구하는 B1시나리오인 것으로 나타났다.

<표 5-10> 한반도 지역의 기후 영향 분석

		기 온 변 화					강 수 량 변 화				
		RAMS	A1	A2	B1	B2	RAMS	A1	A2	B1	B2
여름철 (JJA)	남한	+++	0	0	0	0	0	++	+	0	+
	북한	+++	+	0	0	0	+	+	+	0	0
겨울철 (DJF)	남한	+++	0	0	0	0	+++	0	0	0	0
	북한	++	+++	+	+	++	+++	0	0	0	0

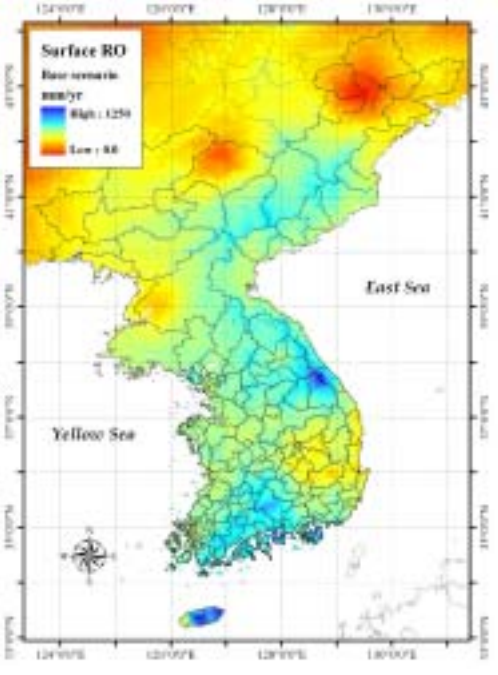
	---	--	-	0	+	++	+++	단 위
기온변화				<2.25	2.25 ~2.5	2.5 ~2.75	>2.75	증가, ℃
강수량변화	<-45	-45~-30	-30~-15	-15~15	15~30	30~45	>45	% 변화

주 : 2041년부터 2050년까지의 공간 평균된 월평균 기온 및 강수량에 기초하여 분석

2. 한반도 주요 유역의 유출변화

기후변화에 인한 한반도 수자원 영향 평가를 위해, <그림 5-6>에 나타난 한반도 10대 주요 유역(남한-한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강, 북한-압록강, 두만강, 대동강, 청천강, 예성강)에 대해 현재(1981년-1990년)와 미래(2041년-2050년)의 강수와 유출 변화를 <표 5-1>의 13개 기후 모형결과를 이용하여 분석하였다. 미래 시기의 강수와 유출 변화를 검토하기 위해 10년 평균된 관측 기후값과 기후모형 결과를 이용하여 주요 유역에 대한 현재와 미래의 강수와 유출을 계산하였고 남한지역의 대상 유역인 한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강 유역은 과학기술처(1995)의 기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구환경관련 대책연구에서 제시된 IS92 시나리오의 CO_2 배증시의 강수와 유출 변화를 함께 검토하였다.

한반도 주요유역



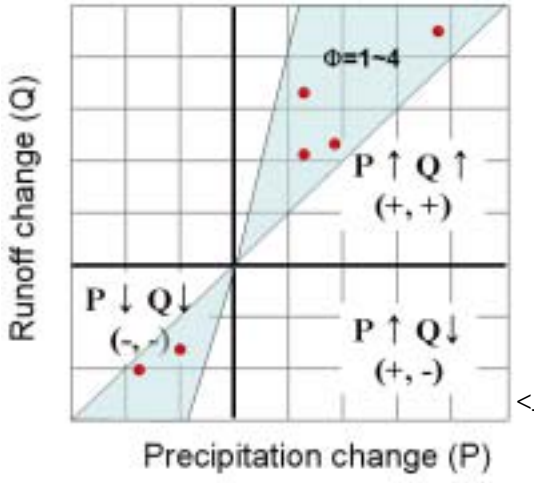
현재기후 유출

<그림 5-6> 한반도 주요 유역과 현재 기후 년 유출분포 (㎜/yr)

강수량의 변화에 대한 유출의 변화를 분석하기 위해 유출의 탄력성관계를 도시하고 시나리오별 강수-유출 특성을 분석하였다. 이는 강수의 변화율($\delta P/P$)에 대한 유출의 변화율($\delta Q/Q$)로 정의되며 (식 5-1)과 같이 표현된다.

$$\frac{\delta Q}{Q} = \Phi \frac{\delta P}{P} \qquad \text{(식 5-1)}$$

여기서 Φ를 강수의 변화에 대한 유출의 탄력성이라 하고, Φ가 1.0보다 클 때 강수의 변화보다 유출의 변화가 크며, 유출은 강수에 대해 탄력적이라고 할 수 있다. 미국의 경우 기후변화에 의한 Φ는 1.0보다 작은 값에서 4.0까지 변하는 것으로 조사되었으며, 한국은 IS92 시나리오에서 1.4~3.0까지의 범위에서 계산되었다(과학기술처, 1995). <그림 5-7>은 유출 탄력성의 개념을 정리한 것으로 음영지역이 Φ가 1~4까지 변화는 시나리오들을 나타내게 된다. 발생 가능한 변화는 강수와 유출변화 모두 증가하는 경우와, 강수와 유출 모두 감소하는 경우, 강수는 증가하고 유출은 감소하는 3가지 경우가 발생하였고 강수는 감소하고 유출은 증가하는 경우는 발생하지 않는다. 강수가 증가하고 유출이 감소하는 경우는 Φ가 음의 값을 가지며, 강수량 증가가 매우 적고 기온 증가가 급격한 시나리오들에서 발생하였으며, 기온 증가로 인한 증발산의 증가와 토양 수분 감소로 강수량 증가가 유출 감소에 기여하지 못하는 경우가 된다.



<그림 5-7> 유출 탄력성의 개념

가. 남한 지역

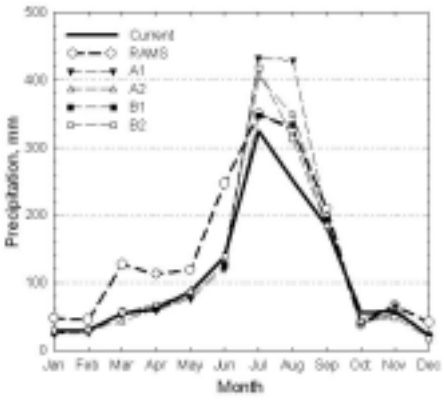
각 유역의 시나리오별 강수량 변화 특성을 <그림 5-8>과 <표 5-11>를 통해 살펴보면, 한강 유역의 연평균강수량은 건기(1월-3월, 10월-12월)에 많은 강수량을 가지는 RCM이 33.6%의 증가를 보여 기후 모형들 중 가장 강수량 변화가 컸으며, SRES 시나리오의 강수량 변화는 -0.7%~20.7%로 A2 시나리오 HadCM3 모형이 가장 큰 강수량 변화를 보였다. 우기(4월-9월)의 강수량 변화는 RCM이 30.4% 증가하였고 A1시나리오 CCSRNIES 모형이 29.5% 증가하여 가장 큰 변화를 나타내었다. RCM은 1월부터 9월까지 전체적으로 강수량이 증가가 하나 GCM 모형들은 7-8월에 강수량이 집중되며 여름철 강우가 연평균강수량 증가에 크게 기여하는 것을 알 수 있다.

낙동강 유역의 년 평균 강수량은 RCM이 16.1%의 증가를 보이고 SRES 시나리오의 변화 범위는 -3.3~22.9%로 B2 시나리오 CCCma 모형에서 가장 큰 강수량 증가를 나타내었다. 우기의 강수량은 B2 시나리오 CCCma 모형이 31.6%로 증가하여 가장 큰 변화를 보이고, RCM이 9.9% 증가하였다.

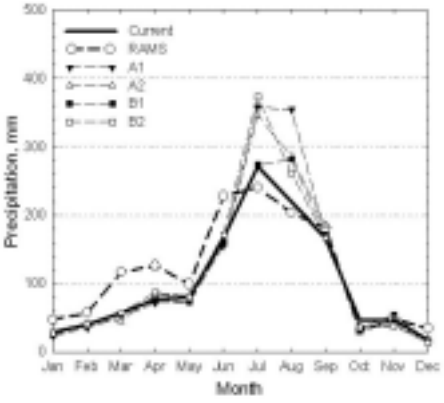
금강 유역의 연평균강수량은 RCM이 22.6%의 증가를 보이고 SRES 시나리오의 변화 범위는 -1.8~26.3%로 B2 시나리오 CCCma 모형에서 가장 큰 강수량 증가를 나타내었다. 우기의 강수량은 A2 시나리오 CCCma 모형이 36.9%로 증가하여 가장 큰 변화를 보이고, RCM이 16.2% 증가하는 것으로 나타났다.

영산강 유역의 년 평균 강수량은 RCM이 9.1%의 증가를 보이고 SRES 시나리오의 변화 범위는 -5.2~21.5%로 A2 시나리오 CCCma 모형에서 가장 큰 강수량 증가를 나타내었다. 우기의 강수량은 A2 시나리오 CCCma 모형이 32.2%로 증가하여 가장 큰 변화를 보이고, RCM이 2.3% 증가하는 것으로 나타났다.

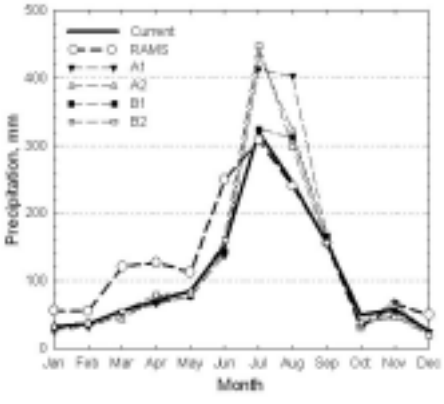
섬진강 유역의 년 평균 강수량은 RCM이 16.1%의 증가를 보이고 SRES 시나리오의 변화 범위는 -5.2~23.8%로 B2 시나리오 CCCma 모형에서 가장 큰 강수량 증가를 나타내었다. 우기의 강수량은 A2 시나리오 CCCma 모형이 33%로 증가하여 가장 큰 변화를 보이고, RCM이 9.6% 증가하는 것으로 나타났다.



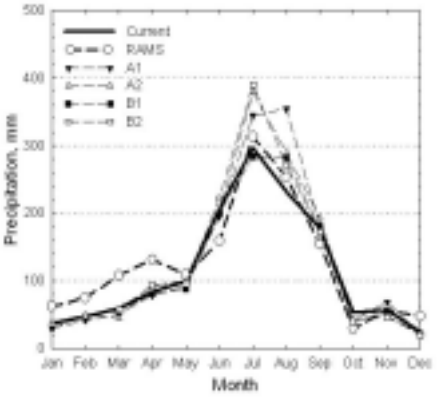
한강



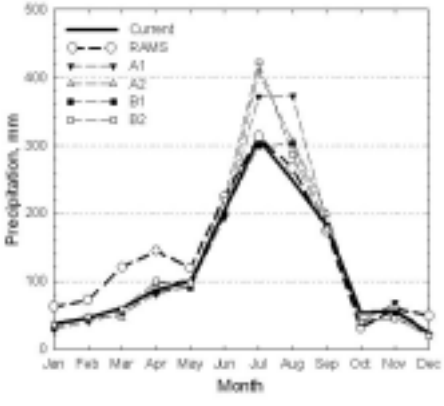
낙동강



금강



영산강



섬진강

<그림 5-8> 시나리오별 남한지역 5대강 유역의 월평균 강수량 변화 (㎜/월)

<표 5-11> 기후변화 시나리오별 남한지역 주요 유역의 월평균 강수량 (㎜)

Prep(mm)		전국(남한)			한강			낙동강		
scenario		건기	우기	년간	건기	우기	년간	건기	우기	년간
Current		261	1035	1296	249	1046	1296	235	980	1214
RCM RAMS		368	1187	1555	367	1364	1731	333	1077	1409
A1	CCSRNIES	213	1309	1521	201	1354	1556	191	1255	1446
	CSIRO	268	1186	1454	269	1270	1538	239	1103	1342
	평균	240	1247	1488	235	1312	1547	215	1179	1394
A2	CCCma	205	1331	1536	190	1304	1494	189	1247	1436
	CCSRNIES	206	1088	1294	193	1110	1303	187	1031	1217
	CSIRO	236	1238	1474	234	1257	1491	213	1186	1399
	HADCM3	267	1182	1449	272	1292	1564	234	1090	1324
	평균	229	1210	1438	222	1241	1463	206	1138	1344
B1	CCSRNIES	237	1162	1399	228	1207	1435	213	1108	1321
	CSIRO	234	1027	1261	227	1060	1287	211	963	1174
	평균	235	1095	1330	228	1133	1361	212	1035	1248
B2	CCCma	226	1348	1574	217	1326	1543	203	1289	1492
	CCSRNIES	241	1046	1286	227	1060	1287	218	993	1211
	CSIRO	250	1096	1346	243	1133	1375	226	1033	1258
	HADCM3	218	1300	1518	211	1318	1528	199	1240	1439
	평균	234	1198	1431	224	1209	1433	212	1139	1350

Prep(mm)		금강			영산강			섬진강		
scenario		건기	우기	년간	건기	우기	년간	건기	우기	년간
Current		257	1026	1283	278	1095	1373	277	1131	1408
RCM RAMS		380	1193	1572	378	1119	1498	394	1240	1634
A1	CCSRNIES	210	1316	1526	231	1303	1534	229	1375	1604
	CSIRO	267	1205	1472	275	1187	1462	273	1217	1490
	평균	238	1260	1499	253	1245	1498	251	1296	1547
A2	CCCma	199	1405	1603	221	1447	1668	219	1505	1724
	CCSRNIES	203	1071	1274	226	1130	1356	224	1173	1397
	CSIRO	234	1226	1459	241	1288	1530	241	1343	1584
	HADCM3	255	1187	1442	279	1163	1442	275	1228	1502
	평균	223	1222	1445	242	1257	1499	239	1312	1552
B1	CCSRNIES	233	1152	1386	253	1170	1423	251	1227	1478
	CSIRO	232	1028	1260	247	1055	1302	245	1090	1335
	평균	232	1090	1323	250	1113	1363	248	1158	1406
B2	CCCma	218	1401	1619	243	1423	1666	239	1504	1743
	CCSRNIES	237	1037	1273	259	1093	1351	258	1134	1392
	CSIRO	247	1104	1351	264	1114	1378	261	1148	1409
	HADCM3	206	1340	1545	230	1346	1575	226	1424	1650
	평균	227	1220	1447	249	1244	1493	246	1303	1549

<표 5-12>는 남한 지역 주요 유역의 년 평균 강수량과 유출 변화를 나타낸 것으로 한강 유역의 SRES 시나리오에서의 연유출변화는 -19.8~33%로 GCM 모형중 A2 시나리오의 HadCM3 모형이 가장 큰 유출 증가를 보이며, RAMS 모형은 43.2%의 증가를 보였다. <그림 5-9>와 <표 5-12>에서 CCSRNIES 모형은 강수량 변화가 A2 시나리오 0.6%, B2 시나리오 -0.7%로 매우 적으나 증발산량의 증가로 유역의 연유출변화는 A2 -14.2%, B2 -19.8%로 감소하여 유역의 유출 탄력성이 과학기술처(1995)의 IS92 시나리오 CO_2 배증시 연구사례의 유출 탄력성 1.4~3.0의 범위를 크게 벗어나고 있다. 따라서 강수량 변화가 적은 ±3% 이하의 강수량 변화는 유출 탄력성 계산에서 제외할 경우, 한강 유역의 유출 탄력성은 0.8~1.84의 범위를 가지며, RAMS 모형은 1.29의 값을 가진다. 이 값을 IS92 시나리오의 한강 유역 유출 탄력성 범위인 1.93~2.23에 비교할 때, SRES 시나리오가 IS92 시나리오에 비해 강수에 대한 유출 탄력성이 작음을 알 수 있다.

낙동강 유역의 SRES 시나리오에서의 연유출변화는 -20.7~38.6%로 GCM 모형중 B2 시나리오의 CCCma 모형이 가장 큰 유출 증가를 보이며, RAMS 모형은 3.1%의 증가를 보였다. SRES 시나리오 유출 탄력성은 0.18~4.76의 범위를 가지며, RAMS 모형은 0.19의 값을 가지며, IS92 시나리오의 범위는 1.54~2.06이다.

금강 유역의 SRES 시나리오에서의 연유출변화는 -21.1~44.9%로 GCM 모형중 B2 시나리오의 CCCma 모형이 가장 큰 유출 증가를 보이며, RAMS 모형은 18.2%의 증가를 보였다. SRES 시나리오 유출 탄력성은 0.14~1.77의 범위를 가지며, RAMS 모형은 0.80의 값을 가져 IS92 시나리오의 1.4~1.93에 비해 작은 유출 탄력성을 가진다.

영산강 유역의 SRES 시나리오 년 유출변화는 -26.7~33%로 GCM 모형중 B2 시나리오 CCCma 모형이 가장 큰 유출 증가를 보이며, RAMS 모형은 -5%의 감소를 보였다. SRES 시나리오 유출 탄력성은 0.07~3.73의 범위를 가지며, RAMS 모형은 -0.55의 값을 가져 IS92 시나리오의 1.46~2.93에 비해 큰 유출 탄력성을 가진다. RAMS 모형의 유출 탄력성은 강수량이 9.1% 증가하였으나 유출은 -5% 감소하여 계절별 비교는 어려우나 강수량 증가보다 기온 증가로 인한 증발산량 증가가 더 큼을 알 수 있다.

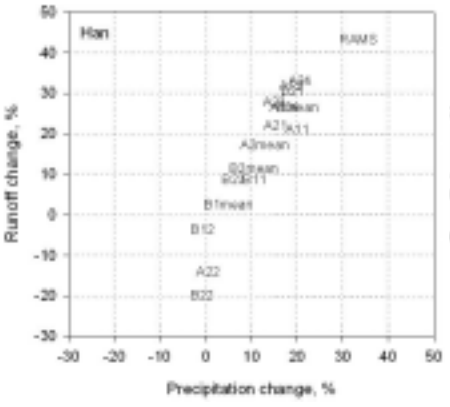
섬진강 유역의 SRES 시나리오에서의 연유출변화는 -20.2%~37.1%로 GCM 모형중

B2 시나리오 CCCma 모형이 가장 큰 유출 증가를 보이며, RAMS 모형은 8.5%의 증가를 보였다. SRES 시나리오 유출 탄력성은 0.6~3.05의 범위를 가지며, RAMS 모형은 0.53의 값을 가져 IS92 시나리오의 1.77~2.34에 비해 큰 유출 탄력성을 가진다.

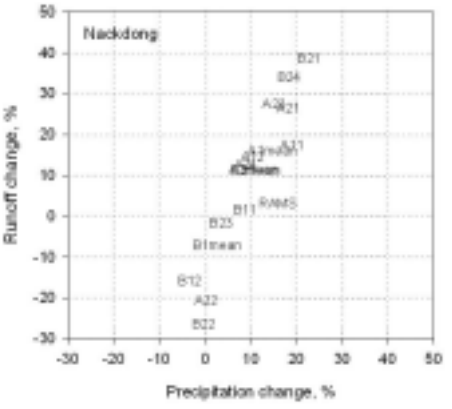
<표 5-12> 기후변화에 따른 유역별 년 평균 강수량 및 유출 변화 (남한, %)

시나리오 \ 유역		남한내륙		한강		낙동강		금강		영산강		섬진강	
		강수	유출	강수	유출	강수	유출	강수	유출	강수	유출	강수	유출
RCM	RAMS	20.0	15.2	33.6	43.2	16.1	3.1	22.6	18.2	9.1	-5.0	16.1	8.5
A1	CCSRNIES	17.4	14.3	20.1	20.9	19.1	17.4	19.0	16.8	11.7	0.9	13.9	8.4
	CSIRO	12.2	18.2	18.7	31.7	10.5	14.5	14.7	24.3	6.5	4.9	5.8	4.7
	평균	14.8	16.3	19.4	26.3	14.8	16.0	16.9	20.5	9.1	2.9	9.9	6.6
A2	CCCma	18.5	26.9	15.3	22.0	18.3	26.5	25.0	39.9	21.5	31.6	22.4	32.8
	CCSRNIES	-0.2	-18.7	0.6	-14.2	0.3	-20.7	-0.7	-21.1	-1.2	-22.1	-0.8	-16.4
	CSIRO	13.7	23.8	15.1	27.8	15.2	27.3	13.8	24.4	11.4	18.1	12.5	20.0
	HADCM3	11.8	17.8	20.7	33.0	9.0	12.6	12.4	21.6	5.0	5.4	6.7	9.4
	평균	11.0	12.5	12.9	17.2	10.7	11.4	12.6	16.2	9.2	8.3	10.2	11.5
B1	CCSRNIES	7.9	1.1	10.8	8.7	8.8	1.6	8.0	1.1	3.7	-8.6	5.0	-2.6
	CSIRO	-2.7	-11.9	-0.6	-3.7	-3.3	-15.8	-1.8	-10.6	-5.2	-19.2	-5.2	-15.8
	평균	2.6	-5.4	5.1	2.5	2.8	-7.1	3.1	-4.8	-0.7	-13.9	-0.1	-9.2
B2	CCCma	21.5	34.6	19.1	30.6	22.9	38.6	26.3	44.9	21.3	33.0	23.8	37.1
	CCSRNIES	-0.8	-23.9	-0.7	-19.8	-0.2	-26.4	-0.7	-25.1	-1.5	-26.7	-1.1	-20.2
	CSIRO	3.9	0.6	6.2	8.6	3.6	-1.8	5.4	3.2	0.4	-8.5	0.1	-6.3
	HADCM3	17.1	28.2	18.0	26.4	18.5	34.0	20.5	36.1	14.8	25.0	17.2	27.7
	평균	10.4	9.9	10.6	11.4	11.2	11.1	12.8	14.8	8.7	5.7	10.0	9.6
참고1) (IS92)	시나리오 A	-		35	70	35	58	35	54	36	70	36	71
	시나리오 B			15	29	13	20	15	21	13	19	13	23
	시나리오 C			-17	-38	-16	-33	-15	-29	-15	-44	-15	-38

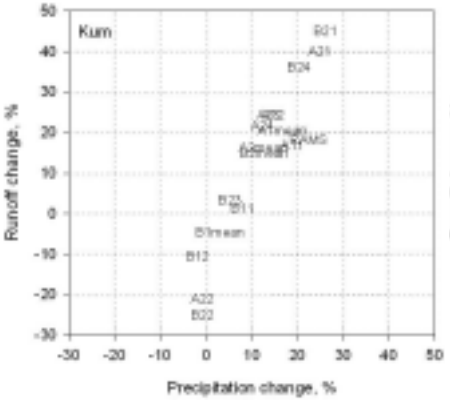
1) 자료: 과학기술처(1995), 기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구환경관련 대책연구, 기상청의 IS92 시나리오 기반의 CO_2 배증시의 GCM 연구를 통해 제작된 시나리오



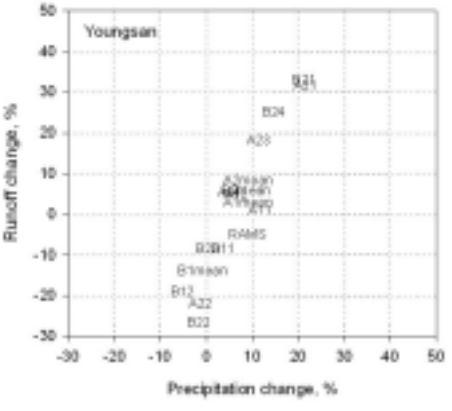
한강



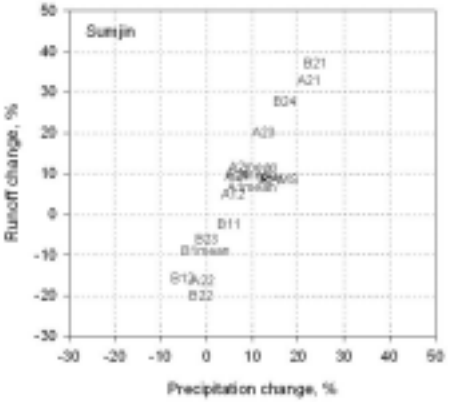
낙동강



금강



영산강



섬진강

● A1 시나리오

A11: CCSRNIES, A12: CSIRO,

● A2 시나리오

A21: CCCma, A22: CCSRNIES,

A23: CSIRO, A24: HadCM3,

● B1시나리오

B11: CCSRNIES, B12: CSIRO,

● B2시나리오

B21: CCCma, B22: CCSRNIES,

B23: CSIRO, B24: HadCM3,

<그림 5-9> 기후모형 결과에 기초한 남한지역 5대강 유역의 유출 탄력성

나. 북한 지역

북한 지역 주요 유역의 시나리오별 강수량 변화 특성을 <그림 5-10>과 <표 5-13>를 통해 살펴보면, 북한지역의 RCM모형의 월 평균 강수량 분포는 두만강 유역을 제외하고 모든 유역에서 봄, 겨울철의 강수량 증가와 우기의 매우 큰 강우 증가로 기후모형 결과들중 가장 큰 강수량 증가를 보였다. SRES 시나리오의 GCM 모형들은 7월~8월에 강수량이 집중되어 있다.

압록강 유역의 연평균강수량은 건기(1월-3월, 10월-12월) 강수량이 많은 RCM이 39%의 증가를 보여 기후 모형들 중 변화가 가장 컸으며, SRES 시나리오의 강수량 변화는 -3.8~15.2%로 A2 시나리오 HadCM3 모형이 가장 큰 증가를 보였다. 우기(4월-9월)의 강수량 변화는 RCM이 38.9% 증가한 것으로 모의되었으며, A1 시나리오의 CCSRNIES 모형이 19.3% 증가하는 경향을 보이고 있다.

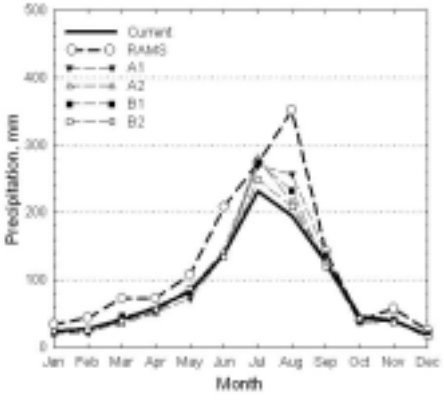
두만강 유역의 년 평균 강수량은 RCM이 2.9%의 증가를 보이고 SRES 시나리오의 변화 범위는 -3.6%~11.9%로 A1 시나리오 CCSRNIES 모형이 가장 큰 강수량 증가를 나타내었다. 우기 강수량은 A1 시나리오 CCSRNIES 모형이 17.9% 증가하여 가장 큰 변화를 보이고, RCM이 -2.9% 감소를 보인다.

청천강 유역의 년 평균 강수량은 RCM이 56.5%의 증가를 보여 가장 큰 변화를 보이며, SRES 시나리오의 변화 범위는 -3.1%~13.6%로 A1 시나리오 CCSRNIES 모형이 가장 큰 강수량 증가를 보였다. 가장 큰 우기 강수량 변화는 A1 시나리오 CCSRNIES 모형의 21% 증가한 결과이고, RCM은 58% 증가하는 것으로 나타났다.

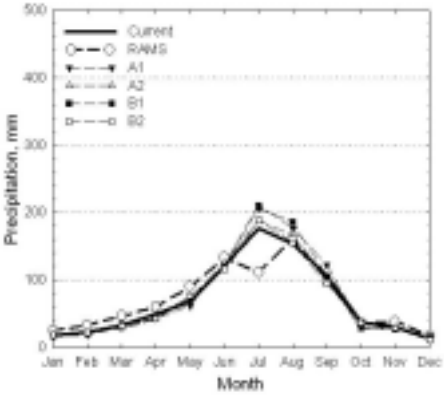
대동강 유역의 연평균강수량은 RCM이 55.6%의 증가를 보여 가장 큰 변화를 보이며, SRES 시나리오의 변화 범위는 -1.7%~21.5%로 A2 시나리오 HadCM3 모형에서 가장 큰 강수량 증가를 보였다. 우기의 강수량은 A2 시나리오 HadCM3 모형이 23.3% 증가하여 가장 큰 변화를 보였고 RCM은 55.9% 증가하였다.

예성강 유역의 년 평균 강수량은 RCM이 48.3%의 증가를 보여 가장 큰 변화를 보이며, SRES 시나리오의 변화 범위는 -1.7%~23%로 A2 시나리오 HadCM3 모형에서 가장 큰 강수량 증가를 보였다. 우기의 강수량은 A2 시나리오 HadCM3 모형이 25.3%

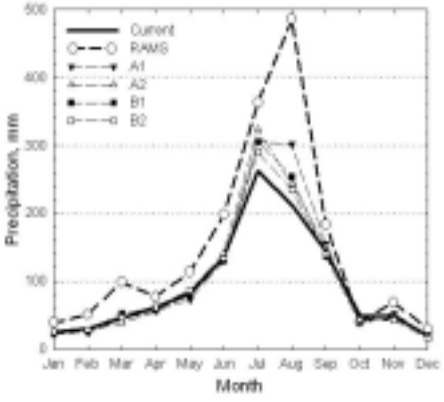
증가하여 가장 큰 변화를 보였고 RCM은 46.5% 증가하였다



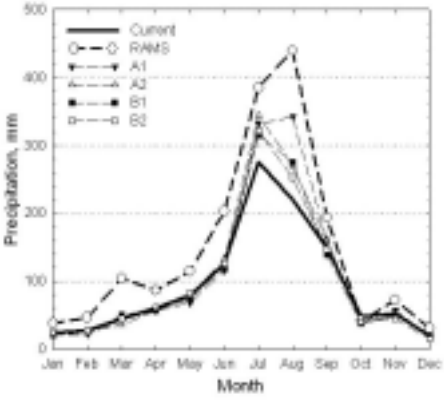
압록강



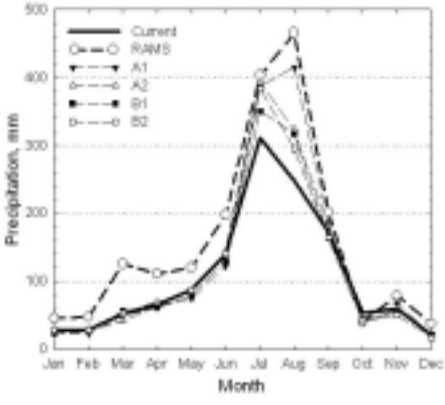
두만강



청천강



대동강



예성강

<그림 5-10> 시나리오별 북한지역 5대강 유역의 월평균 강수량 변화 (㎜/월)

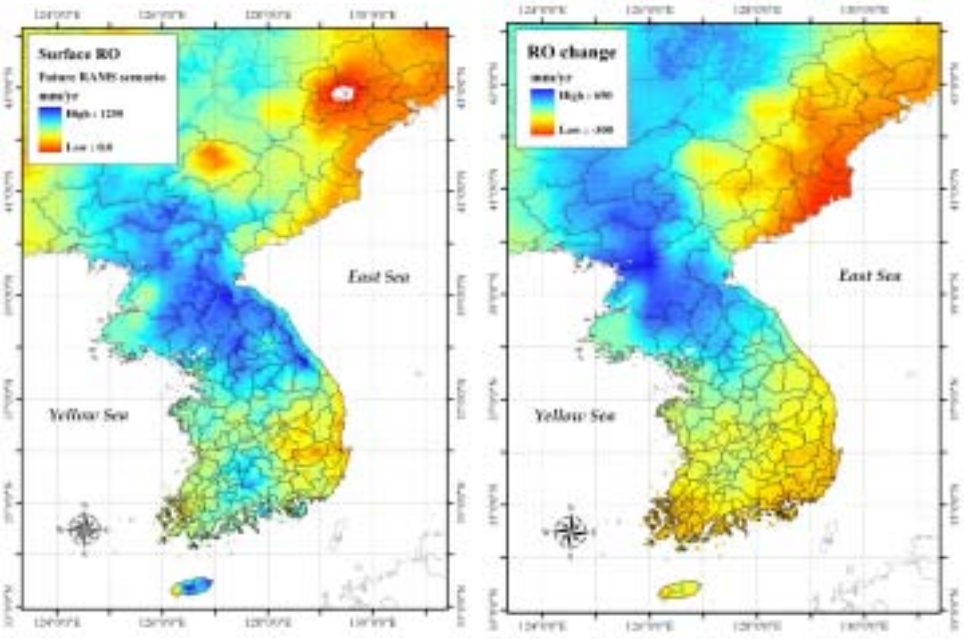
<표 5-13> 기후변화 시나리오별 북한지역 주요 유역의 월평균 강수량 (㎜)

Prep(mm)		전국(북한)			압록강			두만강		
scenario		건기	우기	년간	건기	우기	년간	건기	우기	년간
Current		222	898	1120	195	833	1028	154	675	829
RCM RAMS		319	1144	1463	272	1156	1428	196	655	851
A1	CCSRNIES	185	1091	1275	165	994	1159	131	795	927
	CSIRO	228	972	1200	196	857	1052	150	681	831
	평균	206	1031	1238	181	925	1106	141	738	879
A2	CCCma	173	1056	1229	155	945	1101	122	708	830
	CCSRNIES	175	954	1129	156	889	1046	125	710	835
	CSIRO	205	933	1138	180	817	997	139	695	834
	HADCM3	247	1065	1311	217	967	1184	166	682	848
	평균	200	1002	1202	177	905	1082	138	699	837
B1	CCSRNIES	212	1030	1242	190	960	1150	150	772	922
	CSIRO	205	898	1103	184	839	1023	141	699	840
	평균	209	964	1173	187	899	1086	145	736	881
B2	CCCma	198	1045	1244	175	923	1098	137	709	846
	CCSRNIES	198	896	1094	172	839	1012	141	658	799
	CSIRO	214	877	1091	188	801	989	150	659	808
	HADCM3	214	977	1191	203	859	1062	169	665	834
	평균	206	949	1155	185	856	1040	149	673	822

Prep(mm)		청천강*			대동강			예성강		
scenario		건기	우기	년간	건기	우기	년간	건기	우기	년간
Current		218	899	1117	215	911	1127	241	1022	1263
RCM RAMS		327	1421	1748	332	1421	1753	375	1497	1873
A1	CCSRNIES	182	1088	1269	177	1120	1297	196	1276	1471
	CSIRO	225	954	1179	226	1029	1256	257	1216	1473
	평균	203	1021	1224	202	1075	1276	226	1246	1472
A2	CCCma	174	1070	1245	166	1113	1279	183	1254	1437
	CCSRNIES	171	963	1133	166	972	1138	183	1090	1273
	CSIRO	201	883	1084	199	959	1158	223	1143	1366
	HADCM3	244	1082	1326	245	1124	1369	273	1281	1554
	평균	197	999	1197	194	1042	1236	216	1192	1408
B1	CCSRNIES	209	1035	1244	203	1046	1249	224	1169	1393
	CSIRO	206	892	1098	200	917	1117	223	1035	1258
	평균	207	964	1171	202	981	1183	224	1102	1325
B2	CCCma	196	1040	1237	191	1089	1280	214	1209	1423
	CCSRNIES	191	909	1100	190	918	1108	213	1028	1241
	CSIRO	211	872	1083	208	912	1121	234	1063	1297
	HADCM3	213	966	1178	199	1041	1240	206	1260	1467
	평균	203	947	1149	197	990	1187	217	1140	1357

* 청천강 유역은 대령강 유역을 포함한 지역임.

<그림 5-10>은 RAMS RCM 결과를 이용해 계산된 한반도 주요 유역의 유출 변화로 왼편의 미래 유출량 분포는 적색에서 청색으로 갈수록 유출이 큰 것을 나타낸다. 현재 시기의 남한지역 평균 유출이 607㎜로 북한지역 530㎜에 비해 많게 나타나고 있으나, 기후변화로 인해 북한 내륙지역의 유출이 크게 증가할 것으로 예측된다. 오른편의 유출 변화량은 노란색이 변화가 거의 없는 지역이고 적색은 감소 청색으로 갈수록 유출 변화량이 큰 것을 의미한다. 년유출 변화에서 남한의 경우 전체적인 유출변화는 적으나 남해안 일원과 영남 내륙 지역에서 다소 유출이 감소하는 것으로 나타났으며, 북한의 중부 이북지역에 유출 증가가 크게 발생하나 두만강 유역에서는 유출 감소를 보이고 있다.



미래 유출 분포 유출 변화

<그림 5-11> RAMS 모형결과에 기초한 한반도 주요 유역의 유출변화 (㎜/연)

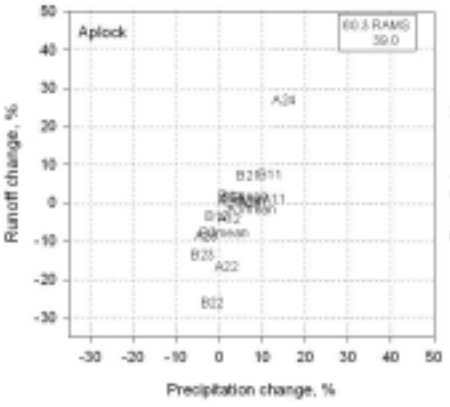
시나리오에 따른 주요 유역들의 강수와 유출 변화는 <표 5-14>와 <그림 5-12>에 정리하였다. <표 5-14>는 북한 지역 주요 유역의 년 평균 강수량과 유출 변화를 나타

낸 것으로 압록강 유역의 SRES 시나리오 년 유출 변화는 -26.1~26.9%로 A2 시나리오 HadCM3 모형이 가장 큰 유출 증가를 보이고, B2 시나리오 CCSRNIES 모형이 가장 큰 유출 감소를 보인다. RAMS 모형의 유출 변화는 43.2%의 증가를 보였다.

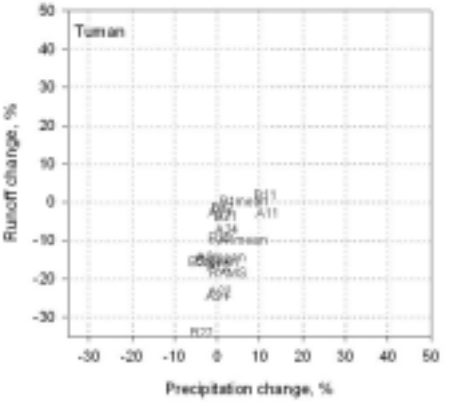
<표 5-14> 기후변화에 따른 유역별 년 평균 강수량 및 유출 변화 (북한, %)

구분 \ 유역		북한내륙		압록강		두만강		청천강		대동강		예성강	
		강수	유출	강수	유출	강수	유출	강수	유출	강수	유출	강수	유출
RCM	RAMS	30.6	41.9	39.0	60.3	2.7	-18.6	56.5	101.9	55.6	92.8	48.3	78.7
A1	CCSRNIES	13.9	4.9	12.8	0.9	11.9	-3.0	13.6	1.3	15.1	6.2	16.5	8.4
	CSIRO	7.2	7.8	2.4	-4.2	0.2	-16.8	5.5	3.8	11.4	16.9	16.6	29.0
	평균	10.5	6.4	7.6	-1.7	6.1	-9.9	9.6	2.5	13.3	11.6	16.6	18.7
A2	CCCma	9.8	8.0	7.1	0.0	0.2	-24.8	11.4	12.7	13.5	14.3	13.8	17.5
	CCSRNIES	0.8	-17.2	1.7	-16.7	0.7	-23.5	1.5	-21.5	1.0	-20.5	0.8	-20.4
	CSIRO	1.6	1.5	-3.0	-8.7	0.7	-2.8	-3.0	-9.9	2.7	2.2	8.2	14.1
	HADCM3	17.1	27.9	15.2	26.9	2.4	-7.2	18.7	34.2	21.5	37.4	23.0	39.2
	평균	7.4	5.0	5.3	0.4	1.0	-14.5	7.2	3.9	9.7	8.4	11.5	12.6
B1	CCSRNIES	11.0	6.3	11.9	7.2	11.3	1.8	11.4	5.7	10.9	5.0	10.3	4.3
	CSIRO	-1.5	-5.1	-0.5	-3.6	1.4	-1.6	-1.7	-6.6	-0.9	-5.7	-0.4	-4.9
	평균	4.7	0.6	5.7	1.8	6.3	0.1	4.9	-0.4	5.0	-0.4	4.9	-0.3
B2	CCCma	11.1	15.4	6.9	7.0	2.1	-3.8	10.7	16.0	13.6	19.3	12.7	16.7
	CCSRNIES	-2.3	-26.5	-1.6	-26.1	-3.6	-34.3	-1.5	-31.9	-1.7	-30.0	-1.7	-30.0
	CSIRO	-2.6	-9.9	-3.8	-13.6	-2.4	-15.2	-3.1	-12.3	-0.5	-7.2	2.7	-0.4
	HADCM3	6.4	5.9	3.4	1.3	0.6	-9.5	5.5	2.7	10.0	10.7	16.1	23.1
	평균	3.2	-3.8	1.2	-7.8	-0.8	-15.7	2.9	-6.4	5.4	-1.8	7.4	2.4

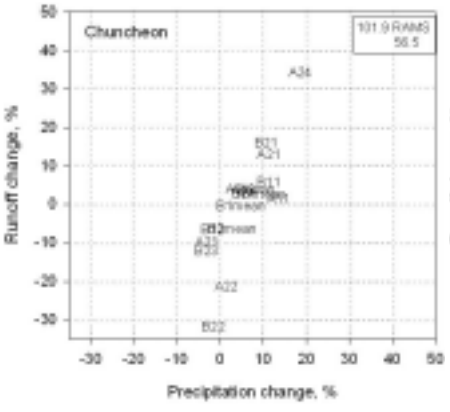
<그림 5-12>와 <표 5-14>에서 강수량 변화가 적은 ±3% 이하의 강수량 변화는 유출 탄력성 계산에서 제외할 경우, 압록강 유역의 유출 탄력성은 0.0~3.6의 범위를 가지며, RAMS 모형은 1.55의 값을 가진다.



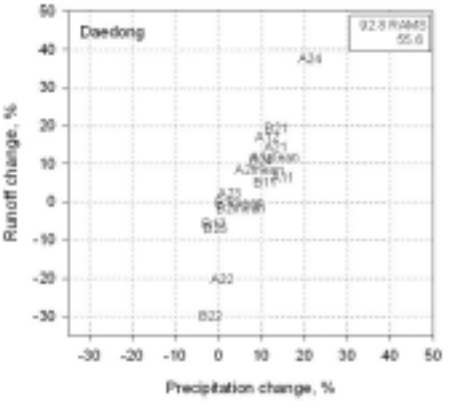
압록강



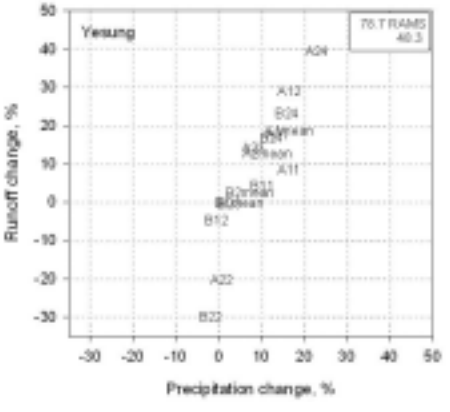
두만강



청천강



대동강



예성강

● A1 시나리오

A11: CCSRNIES, A12: CSIRO,

● A2 시나리오

A21: CCCma, A22: CCSRNIES,

A23: CSIRO, A24: HadCM3,

● B1시나리오

B11: CCSRNIES, B12: CSIRO,

● B2시나리오

B21: CCCma, B22: CCSRNIES,

B23: CSIRO, B24: HadCM3,

<그림 5-12> 기후모형 결과에 기초한 북한지역 5대강 유역의 유출 탄력성

두만강 유역의 SRES 시나리오에서의 연유출 변화는 -34.3~1.8%로 B2 시나리오 CCSRNIES 모형이 가장 큰 유출 감소를 보이며, RAMS 모형은 -18.6%의 감소를 보였다. SRES 시나리오 유출 탄력성은 0.16~9.65의 범위를 가진다.

청천강 유역의 SRES 시나리오에서의 연유출 변화는 -31.9~34.2%로 A2 시나리오 HadCM3 모형이 가장 큰 유출 증가를 보이고, B2 시나리오 CCSRNIES 모형이 가장 큰 유출 감소를 보인다. RAMS 모형은 101.9%의 유출 증가를 보였다. SRES 시나리오 유출 탄력성은 0.1~4.02의 범위를 가지며, RAMS 모형은 1.8의 값을 가진다.

대동강 유역의 SRES 시나리오에서의 연유출변화는 -30~37.4%로 A2 시나리오 HadCM3 모형이 가장 큰 유출 증가를 보이고, B2 시나리오 CCSRNIES 모형이 가장 큰 유출 감소를 보인다. RAMS 모형은 92.8%의 유출 증가를 보였다. SRES 시나리오 유출 탄력성은 0.41~1.74의 범위를 가지며, RAMS 모형은 1.67의 값을 가진다.

예성강 유역의 SRES 시나리오에서의 연유출 변화는 -30~39.2%로 A2 시나리오 HadCM3 모형이 가장 큰 유출 증가를 보이고, B2 시나리오 CCSRNIES 모형이 가장 큰 유출 감소를 보인다. RAMS 모형은 78.7%의 유출 증가를 보였다. SRES 시나리오 유출 탄력성은 0.42~1.74의 범위를 가지며, RAMS 모형은 1.63의 값을 가진다.

다. 기후변화에 따른 유출 변화 영향 평가

기후변화로 인한 한반도 주요 유역의 유출변화를 예측한 결과, 남한은 B1 시나리오(-5.4%)가 유출과 강수량 변화가 제일 작게 나타났고 B2시나리오(9.9%), A2시나리오(12.5%), RAMS 모형 시나리오(15.0%), A1 시나리오(16.3%) 순으로 유출의 영향이 크게 나타났다.

북한의 경우도 B1 시나리오(0.6%)가 가장 안정적인 시나리오로 나타나며, B2시나리오(-3.8%), A2시나리오(5.0%), A1 시나리오(6.4%), RAMS 모형 시나리오(41.9%) 순으로 유출의 영향이 크게 나타났다.

<표 5-15> 시나리오별 국가별 유출 및 강수량 변화

구 분	남 한				북 한			
	유출 변화(%)		강수량 변화(%)		유출 변화(%)		강수량 변화(%)	
시나리오	평균	범위	평균	범위	평균	범위	평균	범위
A1 시나리오	16.3	14.3~18.2	14.8	12.2~17.4	6.4	4.9~7.8	10.5	7.2~13.9
A2 시나리오	12.5	-18.7~26.9	11.0	-0.2~18.5	5.0	-17.2~27.9	7.4	0.8~17.1
B1 시나리오	-5.4	-11.9~1.1	2.6	-2.7~7.9	0.6	-5.1~6.3	4.7	-1.5~11.0
B2 시나리오	9.9	-23.9~34.6	10.4	-0.8~21.5	-3.8	-26.5~15.4	3.2	-2.6~11.1
RAMS RCM	15.0	-	20.0	-	41.9	-	30.6	-

남한의 대표적인 영향 시나리오인 A1 시나리오에 대해 주요 유역별 영향을 분석하면, 한강에서 강수량이 19% 증가할 때 유출은 26% 증가하는 것으로 추정되었으며, 낙동강은 강수량이 15% 증가할 때 유출이 16% 증가하였다. 금강의 경우 강수량이 17% 증가하면 유출이 21% 증가하고 영산강은 강수 9% 증가에 유출이 3% 증가하고, 섬진강은 강수 10% 증가에 유출이 7% 증가하여 전국적으로 15%의 강수 증가에 16% 내외의 유출이 증가되는 것으로 추정되었다.

북한의 대표적인 영향 시나리오인 RAMS 모형 시나리오의 경우, 압록강의 강수량이 39% 증가하여 60% 유출 증가를 보이며, 두만강은 3%의 강수 증가에 유출이 -19% 감소하는 것으로 추정되었다. 청천강은 57%의 강수량 증가와 함께 102%의 유출이 증가하고 대동강은 56%의 강수량 증가로 93% 유출이 증가하며, 예성강은 48% 강수량 증가로 79% 유출이 증가하여 전국적으로 31%의 강수 증가에 42% 내외로 유출이 증가하는 것으로 추정되었다.

<표 5-16>은 기후변화로 인한 한반도 주요 유역들의 유출 변화를 시나리오별로 정리하여 나타낸 것이다. 남북한 전체에서 가장 영향이 적은 시나리오는 B1 시나리오이며, RAMS 모형의 경우, 북한의 압록강, 청천강, 대동강, 예성강 유역에 매우 큰 유출 증가를 보이고 남한의 한강과 금강 유역에 영향을 미칠 것으로 추정된다.

<표 5-16> 기후변화로 인한 한반도 주요 유역의 유출 변화 영향

		연평균 유출 변화					우기(4월~9월) 유출 변화				
		RAMS	A1	A2	B1	B2	RAMS	A1	A2	B1	B2
남한	한강	++	+	+	0	0	+	++	+	0	0
	낙동강	0	+	0	0	0	-	+	+	0	+
	금강	+	+	+	0	0	0	++	+	0	+
	영산강	0	0	0	0	0	-	0	+	0	0
	섬진강	0	0	0	0	0	0	0	+	0	+
북한	압록강	+++	0	0	0	0	++	0	0	0	-
	두만강	-	0	0	0	-	-	-	-	0	-
	청천강	+++	0	0	0	0	+++	0	0	0	-
	대동강	+++	0	0	0	0	+++	0	0	0	0
	예성강	+++	+	0	0	0	+++	+	+	0	0

유출 변화	---	--	-	0	+	++	+++	단위
	<-45	-45~-30	-30~-15	-15~15	15~30	30~45	>45	% 변화

제6장 요약 및 제안

동 연구는 기존의 선도 기술사업 등에서 생태계 영향연구 부문별로 독립적인 기후변화 시나리오를 이용하는 것과 달리, 지역기후모형(RCM) 결과 등의 구체적인 공통기후 시나리오에 의해 정량적 영향을 평가하였다. 이는 정책입안자들이 용이하게 부문별 평가 결과를 이해하여 종합적인 판단을 유도할 수 있는 결과물을 제공할 수 있는 장점이 있다. 특히 IPCC의 기후시나리오를 사용한 연구로서는 국내에서는 처음으로 시도되는 것으로 향후 외국의 연구결과와 비교할 수 있는 IPCC 공통기후시나리오를 사용한다는 점이 매우 의미 있는 시도라 하겠다.

1. 요약

본 연구를 통해 나타난 한반도의 기후변화에 따른 기온과 강수량 변화와 이로 인한 유출변화에 관한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 기후변화로 인한 미래(2041~2050) 기온변화는 남한지역에서 RCM 분석결과, 여름철의 기온 상승이 겨울철 기온 상승에 비해 약 0.7℃ 정도 높게 나타나며, 겨울철 기온 변화량은 약 3℃로 GCM의 평균 변화 폭(1~3℃)인 내에 존재하나 여름철의 기온 변화량 3.7℃는 GCM의 변화 폭(1~3.5℃)을 넘어서는 것으로 예측되었다.

둘째, 북한 지역의 기온 변화는 RCM 분석결과, 여름철의 기온 상승이 겨울의 기온 상승에 비해 약 1.7℃ 정도 높은 것으로 분석되며, GCM의 결과와 정반대로 여름철의 온도변화가 겨울철에 비해 큰 것으로 분석되었다. RCM의 겨울철의 온도변화량은 약 2.7℃로 GCM의 평균 변화폭(1~5.3℃)내에 위치하고 있으나, 여름철의 기온 변화량 약 4.3℃는 GCM의 변화폭(1~3.2℃)을 넘어서는 것으로 예측되었다.

셋째, 기후변화로 인한 미래 강수량 변화는 남한지역에서 RCM 분석결과, 여름철의 강수량변화율이 약 10% 정도인데 반해 겨울은 약 65%이상 변화하여 겨울에 강수량 변화가 큰 것으로 분석되었다. RCM의 여름철의 강수량 변화율은 GCM의 강수량 변화폭(-10~55%)내에 위치하나, 겨울철 변화율은 GCM의 변화폭(-20~20%)을 넘어서는 것으로 예측되었으며 GCM의 모든 시나리오에서 여름철의 변화가 겨울철보다 큰 것으로 예측되어 RCM과 정반대의 경향을 보였다.

넷째, 북한 지역의 강수량변화는 RCM 분석결과, 여름철의 강수량변화율이 약 30% 인데 반해 겨울은 약 55%이상 변화하여 겨울에 강수량 변화가 큰 것으로 분석되었다. RCM의 여름철 강수량 변화율은 GCM의 변화폭(-10~40%)내에 위치하고 있으나, 겨울철 변화율은 GCM의 변화폭(-20~20%)을 넘어서는 것으로 예측되었으며 GCM의 모든 시나리오에서 여름철의 변화가 겨울철보다 큰 것으로 예측되어 RCM과 정반대의 경향을 보였다.

다섯째, 연구에 이용된 AIM-WBM 모형과 실측자료간의 상관관계를 대청댐 유역에 대해 분석한 결과 기울기 0.902, 절편 12.9025 (r2= 0.8967)의 높은 상관성을 보였다 또한, 수자원 장기종합계획 보고서상의 남한지역 유역들에 대한 년평균 유출을 비교한 결과 모형의 결과가 약 5~14% 정도 낮게 나타났으나 유역별 년평균 유출량에서 수장원 장기종합 보고서의 결과와 선형적인 비례 관계를 보였다.

여섯째, 기후변화로 인한 미래(2041~2050)의 한반도 주요 유역에 대한 수자원 영향평가를 실시한 결과, IPCC SRES 기후변화 시나리오에서 B1시나리오의 발전방향이 한반도 지역에 가장 적은 영향을 미쳤으며, B1, B2 시나리오에 비해 A1, A2 시나리오에서 영향이 큰 것으로 나타났다. 지역적으로는 남한 지역이 북한에 비해 기후변화 영향이 높게 나타났으며, 남한지역은 B1 시나리오를 제외한 모든 경우에서 총 유출과 우기 유출의 증가를 보였으며, A1 시나리오의 경우 한강과 금강 유역을 중심으로 우기 유출이 크게 증가하였다. 북한지역은, 두만강 유역이 B2 시나리오에서 유일하게 총유출 감소를 보이며 나머지 유역은 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

일곱째, RAMS 모형을 이용한 영향 평가결과는 GCM을 이용한 결과에 비해 전체적으로 미래의 유출량이 증가하였으며, 특히 북한 지역의 서해로 향하는 유역들에서

큰 유출 증가가 발생하여 남한지역에 비해 수자원에 대한 기후변화 영향이 큰 것으로 나타났다. 그러나 두만강 유역에서는 약 -19%정도의 년 평균 유출감소가 발생하였다.

2. 연구의 한계 및 제안

본 연구는 기후변화로 인한 수자원의 변화와 이에 기초한 물관리정책을 수립하기 위한 영향평가모형을 개발하기 위한 기초연구로 수행되었다. 기후변화영향평가연구는 먼 장래의 일을 예측하는 것으로 많은 불확실성을 내포하고 있는 한계가 있으며, 이를 정량적·과학적으로 예측·분석하기 위해서는 많은 정보와 합리적인 가정 및 예측이 필요하다.

이런 측면에서 본 연구는 다음과 같은 한계를 가지고 있으므로 이를 고려하여 활용하여야 할 것이다.

첫째, 본 연구에서 사용한 기초정보는 현재 가용가능 한 RCM과 SRES 시나리오에 기초한 GCM자료들로서 분석결과 많은 차이를 보이고 있었다. 특히 RCM정보는 GCM 분석결과와 상이한 결과를 보여주고 있다. 이는 기초자료가 가지는 한계로 기존의 연구들이 여러 개의 시나리오 및 GCM들을 이용하여 변동폭을 나타내는 방향에서 접근이 이루어지고 있는 것을 주목해야 할 것이다. 따라서 향후 연구에서는 여러 RCM자료의 확보 및 분석이 이루어져야 할 것이다.

둘째, 본 연구에서 사용한 모델은 토양수분량의 변화에 기초한 물수지 분석에 기초한 모형으로 최대용수량 자료의 정확성에 많은 영향을 받는다. 본 연구에 이용된 최대용수량자료는 관측 유량과의 최적화를 통한 수정과정을 거치지 않았으며, 그 결과 다른 연구 결과에 비해 작은 유출량을 보인다. 따라서 많은 차후 연구에서 유량관측자료들을 이용한 최대용수량도의 수정작업이 요구된다.

셋째, 본 연구에서 사용한 모형은 생태계 모형에 요구되는 토양수분변화 및 증발산량 산정을 위해 개발된 모형으로 중간 및 기저 유출을 고려하지 않고 있다. 따라서 영하 1℃ 미만의 기온에서는 표면유출이 발생하지 않는 지역이 나타나므로 유량의

시간적 변화 거동을 파악하고자하는 경우 모형의 적용에 유의하여야 한다.

넷째, 본 연구의 수자원 영향평가 결과는 모형의 최적화 과정을 통한 유출 결과의 보정을 실시하지 않았으며 다른 연구 성과와의 선형적 유출 상관관계에 기초하여 현재와 미래의 유출 변화에 따른 영향을 분석한 것이다. 따라서 유출량의 정량적 이용에 한계를 가짐으로 수자원 이용 취약성 분석에 적용이 불가능하다는 한계를 가지며, 관측자료와의 검보정을 통한 매개변수의 최적화가 요구된다.

본 연구는 3년간 수행할 것을 계획하였으나, 과제 수행중의 연구계획변경으로 인해 2005년부터 수행될 예정인 기후변화적응전략연구에 포함될 예정이다. 따라서 본 연구목적인 정보 수집 및 DB 구축에서 한발 나아가 기초적인 모델개발, 모의, 해석단계를 수행하여 향후 연구에서의 전체적인 수행체계를 보여주고자 노력하였다. 이에 따라 위와 같은 한계를 가지고 있다. 그러나 향후 연구에서 이를 개선한다면, 극단적 지구온난화 영향 발생지역 등 취약성 도면을 공간정보(GIS 등)와 연계하여 제공할 수 있을 것이며, 기후변화에 대한 지역별 생태계 관리 및 적응 전략을 제공할 수 있다.

특히, 공통의 기후시나리오에 기초한 산림, 농업 등 부분별 취약성 도면을 종합화하는 것에 의해 전반적인 생태계의 취약성을 파악할 수 있으면 우선적으로 관리하여야 지역을 종합적으로 평가 할 수 있으며, 기후변화에 따른 경제적 손실 등을 개략적으로 제시할 수 있을 것이다.

끝으로 본 과제를 통해 구축된 영향평가 결과와 각종 데이터베이스는 다른 분야의 기후변화 연구시 자료구축 시간과 비용을 획기적으로 감소시켜 활발한 연구 활동을 지원할 수 있을 것이다.

참고문헌

국내문헌

강인식, 허창회. 1992. “한반도 여름철 강수량의 장기예측”. 「한국기상학회지」 28(3):283-292

건설교통부. 1996.「횡성 다목적댐 건설사업 실시설계보고서(보완)」

건설교통부. 1997.「한국건설기술연구원: 낙동강 저수관리 시스템」

건설부. 1985.「태백권(광산지역)광역상수도 사업 기본계획보고서」

김승, 신현민. 1993. “서울지점 강수의 장기간 변동성향에 대한 통계학적 검증”.「제34회 수공학연구발표회 논문집」 한국수문학회.

박노혁. 1997.「저수지의 실시간 홍수조절을 위한 의사결정 지원시스템 개발」. 충북대 박사학위논문

오성남, 하경자, 김기영, 김정우. 1998. “배증 이산화탄소 기후에 따른 동북아시아 지역의 수문 영향”.「한국기후학회지」 34(2):293-305.

오재호, 홍성길. 1995. “대기중 CO_2 증가에 따른 한반도 강수량 변화”.「한국수자원학회지」 28(3):143-157

윤용남, 유철상, 이재수. 1998.「지구호나경의 변화에 따른 한반도 수문환경의 변화 연구」. 한국과학재단

이재수, 유철상, 아재현. 1998.「범지구적 환경의 변화에 따른 한반도내 갈수 및 홍수의 발생빈도 예측」 국재수문개발계획 연구보고서. 건설교통부.

임규호, 정현숙. 1992. “서울지방 연강수량의 경년변동(1971-1990)”.「한국기살학회지」 28(2):125-132

정현숙, 임규호. 1994. “서울지역 월강수량과 강수일의 관계”.「한국기상학회지」 28(2):125-132

정현숙. 1999.「서울지역 강수량의 시계열에 나타난 시간변동성의 해석」. 서울대학교 박사학위 논문.

한국과학기술연구원. 1993.「기후변화 영향평가 및 영상처리 기술개발연구 Ⅰ」. 과학기술처.

한국과학기술연구원. 1993a.「기후변화가 한반도에 미치는 영향에 관한 심포지엄 : Ⅱ. 해양수문학분야」.

한국과학기술연구원. 1993b.「기후변화가 한반도에 미치는 영향에 관한 심포지엄 : Ⅳ. 기후변화 예측시나리오」

한국과학기술연구원. 1994a.「기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구환경 관련 대책 연구Ⅰ」. 과학기술처.

한국과학기술연구원. 1994b.「기후변화 영향평가 및 영상처리 기술개발연구 Ⅱ」. 과학기술처.

한국과학기술연구원. 1995a.「기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구환경 관련 대책 연구Ⅱ」. 과학기술처

한국과학기술연구원. 1995b.「기후변화 영향평가 및 영상처리 기술개발연구 Ⅲ」. 과학기술처.

한국수자원공사 .1997.「낙동강유역조사보고서」

한국수자원공사. 1993.「21세기를 바라보는 수자원 전망」

한국수자원공사. 1995.「수자원연구소: 한강수계 다목적댐 하류 연속유출모형과 동역학적 하도추적 모형 연구」

한국수자원공사. 1996.「수자원장기종합개발계획」

한국수자원공사. 1997.「영월다목적댐 건설사업 기본설계보고서」

한국수자원공사. 1997.「포항지역 수자원개발 및 용수공급방안 기본조사」

한국수자원공사수자원. 1996.「개발 가능지점 및 광역배분계획 기본조사」

외국문헌

AIM. 1996. 「Technical structure of AIM/impact model」 Interim paper IP-95-06, National Institute for Environmental Studies.

Alcamo, J., T. Henrichs and T. Roesch. 2000. 「World water in 2025」. Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany.

Alexandratos, N. 1995. 「World agriculture : Towards 2010」 FAO. Rome.

Asian Development Bank. 1994. 「Climate change in Asia」 Manila Philippines.

Batjes, N.H. 1996. "Development of a world data set of soil water retention properties using pedotransfer rules". 「*Geoderma*」 71:31-52.

Boer, G. J., N. McFarlane and M. Lazane. 1989. 「Equilibrium response studies with the CCC Climate model」. Pers, Com.

Burman, R. and L. O. Pochop. 1994. "Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data". 「Developments in Atmospheric Science 22」. Elsevier.

Chiew, F. H. S., and McMahon, T. A. 1993. "Detection of Trend or Change in Annual flow of Australian Rivers" 「*International Journal of Climatology*」 13:643-653.3

Chiew, F. H. S., Whetton, P. H., Mcmahon, T. A., and Pittock, A. B. 1995. "Stimulation of the Impacts of Climate Change on Runoff and Soil Moisture in Australian Catchments". 「*Journal of Hydrology*」 167:121-147.

Chkita, Y. 1995. 「Climate change impact on natural environment」. Master's thesis at Kyoto University, Japan.

CIESIN (Center for International Earth Science Information Network), International Food Policy Research Institute (IFPRI) and World Resources Institute (WRI). 2000. 「Gridded Population of the world (GPW), Version 2」. Palisades, NY : CIESIN, Columbia University.

Cogley, R. and J. Graham. 1991. 「GGHYDRO-GLOBAL Hydrographic Data release 2.0」. Trent Climate Note 91-1.

Doorenbos, J. and W. O. Pruitt. 1992. 「Crop Water Requirements, FAO Irrigation and Drainage Papaer 24」. FAO.

Erda, L., *et al*. 1996. 「Climate change vulnerability and adaptation in Asia and Pacific」. Kliwer.

FAO. 1992. 「Crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper 24」. Rome.

FAO. 1996. 「The Digitized Soil Map of the World Including Derived Soil Properties」. CD-ROM, Rome.

Gellens, D. and Roulin, E. 1998. "Stremflow Response of Belgium Catchments to IPCC Climate Change Senarios". 「*Jouranl of Hydrology*」 210:242-258.

Gleick, P. H. 2000. 「The World's water 2000-2001」. Island Press. Washington, DC.

Hansen, J., *et al.* 1984. "Climate sensitivity analysis of feedback mechanism, In: Climate processes and climate sensitivity (ed. J. Hansen and T. Takahashi)". 「Geophys. Monogr」 Sep. 29, p.130-163.

Hayashi, N. 1997. 「A study of a watershed water cycle simulation model based on geographic information system」 M. D. Thesis, Nagoya University. Nagoya.

HYDRO1K data, descriptions available from the internet as of http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/hydro/

IPCC. 1990. 「Climate change: The IPCC Scientific Assessment」. Cambridge University Press. Cambridge, UK.

Kimura, T. 1978. 「Recent improvement of the method of storage function」 Proceedings of the 22nd workshop on Hydrology.

Kite, G. 1992. "Analysing Hydrometerological Time Series for Evidence of Climate Change", 「*9th Northern Res. Basin Symposium/Workshop*」.

Klepper, O. and G. van Drecht. 1998. 「WARiBaS, Water Assessment of a River Basin Scale. A Computer program for calculating water demand and water

satisfaction on a catchment basin level; to be used for global scale water stress analysis』. RIVM Rapport 40200.

Koji Dairaku, Seita Emori, Toru Nozawa, Noboru Yamazaki, Masayuki Hara, Hiroaki Kawase: “Regional climate simulation over Asia under the global warming nested in the CCSR/NIES AGCM“, Tsukuba,「Symposium on Water Resource and Its Variability in Asia in the 21st Century』 pp.90-93, 2004.3.1-3.2

Kuhl, S. C., and Miller, J. R. 1992. "Seasonal River Runoff Calculated from a Global Atmospheric Model".「*Water Resources Research*』 28(8):2029-2039.

Kwadijk, J., and Rotmans, J. 1995. "The Impact of Climate Change on the River Rhine : A Scenario Study".「*Climate Change*』 30:397-425.

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, global precipitation”.「*Int. J. Climatol.*』 10:111-127.

Leith, R. M. 1991. "Trends in Snowcourse and Streamflow Data in British Columbia and the Yukon",「*Proceedings of the Western Snow Conference*』 Environment Canada.

Leith, R. M. M., and Whitfield, P. H. 1998. "Evidence of Climate Change Effects on the Hydrology of Streams in South-Central B. C.".「*Canadian Water Resources Journal*』 23(3).

Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., and Wallis, J. R. 1994. "Hydro-Climatological Trends in the Continental United States, 1948-88".「*Journal of Climate*』 7:586-607.

Lins, H. F. 1994. "Increasing U. S. Streamflow Linked to Greenhouse Forcing".「*EOS*』 75(25) June 21.

Manabe, S., M. J. Spelman and R. J. Stouffer. 1992. “Transient responses of a coupled ocean atmosphere model to gradual change of atmospheric CO_2”.「*J.*

Climate』 5:105-126.

Marengo, J. A. 1995. "Variations and Change in South American Streamflow". 『*Climatic Change*』 31:99-117.

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):357-371.

Matthews, E. (1983) Vegetation, land-use and seasonal albedo data sets, Documentation of archived data tape, NASA Technical Memorandum #86107.

Meason, B. W., et al. (1995) ISLSCP Initiative I-Global data sets for land-atmosphere models, 1987-1988, Volumes 1-5, Published on CD by NASA.

Miller, J. R. and G. L. Russell (1995) Climate change and the arctic hydrologic cycle as calculated by a global coupled atmosphere-ocean model, Ann. Glac., 23(4/5), p.91-95.

Mitosek, H. T. 1995. "Climate Variability and Change within the Discharge Time Series : A Statistical Approach". 『*Climatic Change*』 29:101-116.

Najjar, R. G. 1999. "The Water Balance of the Susquehanna River Basin and Its Response to Climate Change". 『*Journal of Hydrology*』, 219:7-19.

New, M., M. Hulme and P. Jones. 1998 “Representing twentieth century space-time climate variability. I: Development of a 1961-1990 mean monthly terrestrial climatology”. 『*J. Climate*』 12:829-856.

Oki, T. and Y. C. Sud. 1998. 『Design of total Runoff Integrating Pathways (TRIP) - A global river channel network, Earth Interactions』.

Pfafstetter, Otto., 1989. Classification of hydrographic basins: coding methodology, unpublished manuscript, Departamento Nacional de Obras de Saneamento, August 18, 1989, Rio de Janeiro; available from J.P. Verdin, U.S. Geological Survey, EROS Data Center, Sioux Falls, South Dakota 57198 USA.

Ramankutty, N. and J. A. Foley. 1998. “Characterizing patterns of global land use:

An analysis of global croplands data". 「*Global Biogeochemical cycles*」 12(4): 667-685.

Raskin, P. 1997. 「Water futures : Assessment of long-range patterns and problems, Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world」. Vol.3, Stockholm Environment Institute, Sweden.

Rawls, W.L., D. L. Brakensiek, and K.E. Saxton. 1982. 「Estimation of soil properties」. Tans. ASAE 25:1316-1320

Reserch Institute for Development Assistance of the Overseas Economic Corporation Fund. 1995. 「Projection of food supply and demand in China and suggestion on agricultural development policy」. OECF Discussion Papers No.6 (in Japanese).

Saxton, K.E., W. L. Rawls, J.S. Rosenberger, and R. I. Papendick. 1986. "Estimating generalized soilwater characteristics from texture". 「*Soil Sci. Soc. Am. J*」 50:1031-1036.

Schlesinger, M. E. 1996. 「Development of the geographical climate scenarios for the impact analysis of Energy modeling Forum 14」. Proceedings for Energy Modeling Forum 14 workshop, IIASA, Laxenburg, Austria.

Schlesinger, M. E. and Z. C. Zhao. 1989. "Seasonal climatic change introduced by doubled CO_2 as simulated by the OSU atmospheric GCM/mixed-layer ocean model". 「*J. Climate*」 2:429-495.

Sefton, C. E. M., and Boorman, D. B. 1997. "A Resional Investigation of Climate Change Impacts on UK Streamflows". 「*Journal of Hydrology*」 195:26-44.

Shiklomanov, I. A. 1998. 「Assessment of water resources and water availability in the world」. Stockholm Environment Institute.

Takahashi, K., *et al*. 1997. 「Climate change impact on water resources: Preliminary assessment in Asia」

Takahashi, K., *et al*. 1998. 「Development of model to assess water resource

problems under climate change」

Takahashi, K., *et al*. 1999. "Developing climate change scenarios for impact assessment with the results of transient experiments of general Circulation Models". 「*Environmental Systems Research*」 27:521-526 (in Japanese).

Takahashi, K., H. Harasawa and Y. Matsuoka. 1997. "Climate change impact on global crop production". 「*J. Global Environment Engineering*」 4:145-161.

Tokioka, T., *et al*. 1995. "A transient CO_2 experiment with the MRI CGCM". 「*J. Met. Soc. Japan*」 74(4):817-826.

Verdin, K.L. and J.P. Verdin. 1999. "A topological system for delineation and codification of the Earth's river basins". 「Journal of Hydrology」 218(1-2):1-12

Vogel, R. M., Bell, C. J., and Fennessey, N. M. 1997. "Climate, Streamflow and Water Supply in the Northeastern United States". 「*Journal of Hydrology*」 198:42-68

Vorosmarty, C. J., C. A. Federer and A. L. Schloss. 1997 「Potential evaporation functions compared on US watersheds : Possible implications for global-scale water balance and terrestrial ecosystem modeling」.

Vorosmarty, C. J., *et al*. 1989. "Continental scale model of water and fluvial transport: an application to south America". 「*Global Biogeochemical Cycle*」 3(3):241-256.

Wahl, K. L. 1991. "Is April to July Runoff Really Decreasing in the Western United States?". 「*Proceedings of the Western Snow Conference*」 Juneau, Alaska

Wedd, R. S., *et al*. 1991. 「A global data set of soil particle size properties」. NASA, Tech. Man, 4286.

Westmacott, J. R., and Burn D. H. 1997. "Climate Change Effects on the Hydrologic Regime within the Churchill-Nelson River Basin". 「*Journal of Hydrology*」 202:263-279.

Wetherald, R. T. and S. Manabe. 1986. "An investigation of could cover change in

response to thermal forcing". 「*Climatic Change*」 8:5-23.

Wetherald, R. T. and S. Manabe. 1988. "Could feedback processes in a general circulation model". 「*J. Atmos. Sci.*」 45:1397-1415.

Wilson, C. A. and J. F. B. Mitchell. 1987. "Simulated climate and CO_2 induced climate change over western Europe". 「*Climatic Change*」 10:11-42.

World Bank. 1993. 「World data tables (Electric Version)」. The World Bank, Washington, DC.

World Bank. 1998. 「World development report 1998-1999」. Oxford University Press, N. Y..

海外經濟協力基金開發援助研究員. 1995. 「Projection of food supply and demand in China and suggestion on agricultural development policy」. OECF Discussion Papers No.6 (in Japanese).

부록1 : IPCC SRES 시나리오

1. 작성 경위와 개요

2000년 3월 15일 심야, 네팔의 Katmandu에서 IPCC(기후 변동에 관한 정부간 패널)의 새로운 배출 시나리오가 정식으로 승인되었다. 1990년과 1992년에 IPCC 공인시나리오가 작성된 이래 8년만의 갱신이다.

지구 온난화가 어느 정도 진행되는지는 자연의 불확실한 현상을 별도로 하면, 우리 인간사회가 어떠한 방향으로 발전하는지에 의해 크게 좌우된다. 장래의 사회의 발전 방향에 따라 에너지이용이나 토지이용 변화 예상이 크게 변하고, 온실효과가스나 유황산화물 등의 배출 시나리오가 크게 다르게 된다. 그 결과, 온난화의 예측에 큰 차가 나타나며 또한 어떤 정도의 온난화 대책을 필요로 하는지도 크게 달라진다.

지금까지의 지구온난화 예측의 대부분은 IPCC에 의해 1992년에 작성된 배출시나리오(Houghon *et al*, 1992)를 전제로 했다. 이 시나리오는 IS92a(「IPCC에 작성한 참조시나리오 1992년 판의 a케이스」의 의미)라고 불리며, 만들어진 6개중 하나로 사회의 발전 방향을 반영한 것에 1개의 사례에 불과하다. 이 시나리오는 1985년도 데이터에 기초하여 작성되었기 때문에 1990년 이후에 생긴 여러 가지 사회 변화는 고려되지 못했다. 소련 붕괴, 아시아 개발도상국의 경제의 급격한 성장, 자유무역체제의 도입 등은 1990년대에 접어들어 세계의 온실효과가스나 유황산화물의 배출량을 크게 변화시킨 요인이 되었다. 또한 1992년의 시나리오에는 선진국의 연구자의 일방적인 사고에 의해 작성되어 개발도상국으로부터 큰 비판을 받았다. 이와 같은 문제점은 1994년의 IPCC특별 보고서(AIcamo *et al*, 1994)에 의해 검토되고, 새로운 온실효과가스 등의 배출 시나리오의 작성이 권고되었다.

따라서 IPCC에서는 1996년부터 특별한 프로젝트 팀을 조직하여 새로운 배출시나

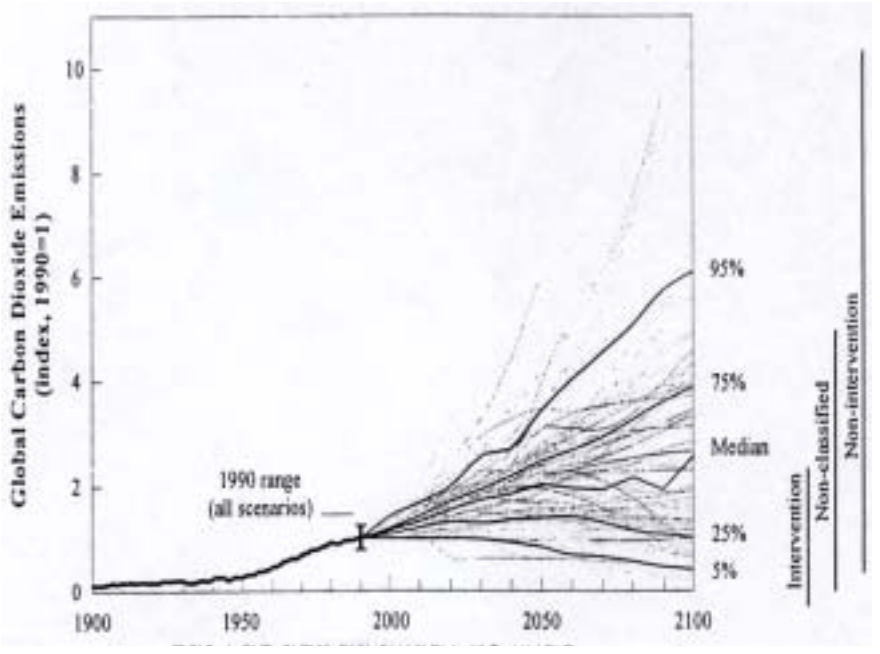
리오의 작성 작업을 진행시켜 왔다. IPCC는 본래, 이미 발표된 학술논문의 과학적 검토를 행하는 기관이므로 이와 같은 독자의 연구 프로젝트를 조직하는 것은 예외적이었다. 그러나, 배출 시나리오는 지구온난화 문제를 과학적으로 해명하기 위한 기본정보로 이 기본 정보의 제공이 IPCC에 요구됨에 따라 거기에 적합한 프로젝트였다. 이 프로젝트는 3년 동안 진행되었으며, IPCC의 작업으로서는 예외적으로 장기 프로젝트였다. 특히, 경제 모델을 포함시켰던 대규모 컴퓨터・모델에 의한 시뮬레이션작업에 많은 시간이 소비되었다.

그리고, 일련의 성과를 「배출시나리오에 관한 특별 보고서」로 정리하여 2001년 3월에 각국 정부의 승인을 얻어, 2002년 여름에 정식의 IPCC보고서로서 간행되었다. 이 보고서의 영문 명은 "Special Report on Emission Scenario"이며, 이것에 기초하여 새로운 배출시나리오는 「SRES 시나리오」로 불리고 있다.

2. SRES 시나리오 작성과정

SRES 시나리오는 기존의 배출시나리오의 검토, 서술적 시나리오 작성, 정량적 시나리오 작성, 인터넷에 의한 공표와 의견 청취, 정량적 시나리오의 개량 등 5개 과정을 통해 작성되었다.

우선, 기존의 연구에 의해 배출시나리오 검토는 일본 국립환경연구소에서 데이터베이스를 작성하는 것으로부터 시작하였다(Morita and Lee, 1997). 약 170개의 source에서 400개 이상의 배출시나리오를 수집하여, 이 중 2100년까지 추계기간으로 한 190개의 시나리오를 분석하였다. <부록그림 1-1>은 이들 시나리오 전부에 대해 이산화탄소 시나리오를 나타낸 것이다. 다양한 사회・경제 발전의 가정하에 매우 큰 폭의 시나리오가 그려진 것을 알 수 있다. 이들 다양한 가정과 큰 추계 폭은 다음의 SRES 시나리오 작성과정에 반영되어 이와 같은 폭을 망라하는 시나리오의 작성이 시도되었다.



<부록그림 1-1> 기존 연구에 대한 이산화탄소 배출시나리오

주 : 에너지 및 산업에 의한 이산화탄소 배출)

다음 과정으로는 장래사회 발전에 대해 서술적(Storyline) 시나리오를 작성했다. 이것은 시나리오의 일관성을 갖는 인구 통계적 · 사회적 · 경제적 · 기술적 · 환경적 · 정치적 장래를 양적이 아닌 질적으로 기술한 것이다. 정량적 시나리오 작성 앞에 이와 같은 서술적 시나리오를 작성한 이유는 첫째, 연구 프로젝트의 각 멤버가 복잡한 전제조건을 일관성을 갖고 생각하기 쉽게 하기 위한 것이며, 둘째, 시나리오를 다양한 사용자들에게 설명하기 쉽도록 하고, 셋째, 향후 분석이나 기후변화의 영향분석에 다양하게 가정을 추가하는데 지침이 되기 때문이다.

이렇게 작성한 서술적 시나리오는 뒤에 설명하는 것과 같이 4개이다. 각각 구체적인 사회적, 경제적 · 기술적 · 환경적 패러다임을 전개한 것으로 장래의 발전 가능성을 전부 포함하는 것은 불가능하나 넓은 범위를 포함하였으며, 모델에서는 정량화가 어렵고, 발생 가능성이 극단적으로 낮게 평가되는「서프라이즈」시나리오,「대참사」시나리오는 제외했다. 1998년에 접어들어 4개의 서술적 시나리오의 정량화가 시

작되었다. 이 작업은 다음 6개의 모델링・팀이 실시했다.

・일본의 국립환경연구소의 아시아태평양통합모델(AIM)팀
・미국의 ICF Consulting의 대기 안정화 모델(ASF)팀
・네델란드 MVM의 온실 효과 가스 영향 평가 통합 모델(IMAGE)팀・
・일본의 토교 이과대학의 다지역 자원 산업 배분 모델(MARIA)팀
・오스트리아 IIASA의 에너지 공급 전략・환경 영향 모델(MESSAGE)팀
・아메리카의 PNNL의 간략 기후 평가 모델(MiniCAM)팀

각 팀이 각각 다른 모델을 사용해 여러 서술적 시나리오를 작성했다. 이들은 4개의 서술적 시나리오에 대응하여, 「Marker・시나리오」라고 불리는 배출 시나리오를 선정하였다. Marker・시나리오는 정량화의 초기 단계에서 서술적 시나리오를 가장 잘 반영하고 있었던 것으로 4개의 서술적 시나리오마다 각각 다른 모델로 추계된 것이 선정되었다. 이러한 시나리오는 다른 시나리오에 비해 보다 중심적이다고 할 수 없으며 단지 보다 많은 체크를 받는데 지나지 않는다. 다른 시나리오에서는 Marker・시나리오의 인구, GDP, 최종 에너지량과 조화되도록 각각의 시나리오를 작성하였다.

4개의 Marker・시나리오 샘플버젼은 1998년 6월에 홈페이지에 게재하고, 많은 의견을 수렴하여 일부가 개정되었다. 4개의 시나리오에서 각각에 대해 추가 시나리오가 모델팀에 의해 작성되어 그 결과 고쳐진 4개의 Marker・시나리오와 다른 36개의 대체 시나리오를 합해 40개의 배출 시나리오가 작성되었다.

3. 4개의 서술적 시나리오

SRES에서는 「A1」, 「A2」, 「B1」, 「B2」의 4가지 시나리오가 실현되고 있다. 앞에서도 기술한 바와 같이 4개의 시나리오는 모두 현재보다도 풍요로운 세계를 그리고 있지만 각각의 발전방향성이 다르다. A, B는 경제지향인가, 환경지향인가를 1, 2는 지구주의

지향인지, 지역주의지향인가를 나타내고 있다. 이들의 조합에 의해 4개의 시나리오가 나타난다.

- o A-B축 : 경제(Economic)지향 - 환경(Environmental)지향
  - ・경제발전에 대해 상대적인 방향성으로서 경제성장을 중시하는가, 환경을 중시하는가를 나타내는 축이다. 단, 일본에서는 환경지향은 환경지향과 더불어 복지도 중시하는 것으로 하였다.

- o 1-2축 : 지구주의(Global)지향 - 지역주의(Regional)지향
  - ・경제발전에 대해 상대적인 방향성으로서 지구주의적 경제발전을 지향하는지, 지역주의적인 경제발전을 지향하는지를 나타내는 축이다. 지구주의에도 시장메카니즘을 중시하는 개념도 포함된다.

일본의 시나리오는 미래의 상황을 그리는 것이지만, 세계의 상황과 분리되어 존재하는 것은 아니기 때문에, 각각의 일본 시나리오에 결합되어 세계의 시나리오가 각각 존재한다 가정하고, 작성하였다. 4개의 일본 시나리오의 스토리 라인 개요는 <부록표 1-1>에 정리하였다.

<부록표 1-1> 일본 시나리오의 각 STORY LINE 개요

	A1	A2	B1	B2
중요한 테마	· 일본이 Global 경제에 놓여져 경쟁에서 살아남기 위해 경제적 합리성을 중시한 시장중심의 경제 시스템을 이행함.	· 종래의 사회 및 경제의 체계를 급속히 변화시키지않고, 종래의 연장선상에서 경제발전을 지향함.	· 기술혁신에 의해 탈물질화와 경제발전의 양립을 지향함.	· 개개의 지역이 지속가능하여 자립적인 생활권을 보유해 개개의 지역이 공존함.
인구·세대·노동	· 출생율이 낮음(국립사회보장 · 인구문제 연구소에 의한 인구추계의 저위추계와 동일) · 2030년 평균세대인원은 2.32인 · 성별, 연령, 국적 등에 관계없이 능력있는 사람을 채용함.	· 출생율이 낮음 (국립사회보장 · 인구문제연구소에 의한 인구추계의 저위추계와 동일) · 2030년 평균세대인원은 2.32인 · 종래의 일본적 경영시스템이 유지되고 있어 경제는 밝지 않지만 고용은 유지됨.	· 출생율의 저하가 조금씩 완화됨(국립사회보장 · 인구문제 연구소에 의한 인구추계의 중위추계와 동일) · 2030년의 평균세대 인원은 2.42인 · 고령자 및 여성의 사회진출이 진행됨.	· 출생률의 저하가 조금씩 완화됨(국립사회보장 · 인구문제 연구소에 의한 인구추계의 중위추계와 동일) · 2030년의 평균세대수은 2.47인 · Work Sharing이 진행되어 노동시간이 단축되고 여성 및 노령자의 사회진출이 진행됨.
경제·산업	· 다른 시나리오와 비교해 가장 높은 경제성장률이 달성됨. · Global 경제 속에서 제조업이 비교적 우위성이 없어지는 반면, 산업서비스화가 진행되어 제3차산업의 비율이 확대됨.	· 경제성장율은 낮음 · 산업구조가 현재로부터 크게 변함 없음.	· 후자는 환경보전을 목적으로 하는 것이 우선되며, 환경관련산업이 성장함. · 경제구조의 핵에 환경보전을 놓는 형태에 경제 발전도 중시하므로 A1 정도는 아니지만 높은 경제성장률이 달성됨.	· 경제성장율은 서서히 높아지며, 2015년까지 가장 경제성장률이 낮지만 2015년부터 이루는 A2를 넘어섬. 내수주도형 산업구조로 바뀜. 지역내 동맥산업과 정맥산업이 연대하므로, 건설업, 광업은 부가가치액에 정하는 비율이 낮아짐.
생활양식	· 높은 구매력을 배경으로 활발한 소비활동이 일어남.	· 현재와 동일한 수준에서 소비활동이 계속됨.	· 기술개발에 의해 자원효율을 향상시키는 것에 의해, 서비스 수요를 낮추지 않으면서 환경조화형 생활양식으로 바꾸어 나감.	· 가치관이 변화에 의해 생활양식이 환경조화형으로 바뀜.
국토·교통	· 인구나 자본의 집중이 진행되어 소수의 거대도시권에 집약됨. · 도시의 중심지역은 철도와 자동차를 중심으로 한 교통네트워크, 주변부에는 자동화중심의 교통네트워크화 됨.	· 인구나 자본은 복수의 중핵도시권에 분산됨. · 자동차 중심의 교통네트워크로 됨.	· 도시는 Compact화하여 직주근접하도록 함. · 도시내 교통 LRT 및 도시모노레일에 의해 분담함.	· 매우 Compact한 도시가다수 존재하며, 이 지역이 지속가능하며 자립적인 생활권을 보유함. · 자동차이용을 피하며, 공공 교통기관, 자동차 이용, 도보를 중시함.
에너지시스템	· 에너지 산업의 규제완화가 진행되어, 전력가격이 저하됨. · 가격결정의 결과, 석탄, 석유가 선택됨.	· 종래의 에너지 정책의 연장으로 원자력발전의 건설이 계속됨.	· 연료전지의 보급이 진행됨. · 천연가스화력발전, 연료전지의 보급에 의해 천연가스 중심의 에너지 구성이 됨.	· 원자력발전소의 신설을 하지 않고 천연가스 열병합 발전소 설치. · 바이오매스에너지 등 지역 에너지를 이용한 연료전지가 보급됨.

우선, A1시나리오는 「고성장 사회 시나리오」라고 하는 이미지와 거의 비슷하다. 시장의 이점을 활용하고, 전세계가 경제성장을 이루고 교육, 기술, 그리고 사회제도에 큰 혁신이 생기는 시나리오이다. 과거 100년 간의 평균 경제성장률 약 3%가 향후 100년 간도 계속한다고 가정하며, 2050년의 일인당 소득은 세계 평균에서 2만 달러를 초월한다. 개발도상국의 성장이 눈부시고, 남북의 격차가 급속하게 줄어든다. 따라서 개발도상국의 출생비율은 낮아지고, 세계인구는 2050년의 90억인에서 2100년에는 70억인으로 낮아진다. 평균수명은 향상되고 핵가족화가 진행된다. 급속한 경제의 확대는 대량의 에너지 자원을 필요로 하고, 자원개발이나 신에너지 개발에의 투자가 가속된다. 개발도상국의 식생활이 육식 기호로 급속하게 바뀌며 집약적 농업으로 이행한다.

선진국에서 개발도상국에의 기술 이전도 진행되며, 개발도상국의 기술혁신이나 자동차 보유가 높아진다. 환경문제의 해결은 시장에 의해 크게 영향을 받아 환경 보전의 관점보다 환경관리나 창조의 관점에서 이루어진다.

이 A1시나리오는 에너지・시스템에서의 기술혁신의 선택이 다른 4개의 그룹에 의해 더욱더 갈라진다. 석탄의 클린 이용 기술의 대폭적인 혁신을 가정한 시나리오(AIC), 석유와 천연 가스관련의 기술혁신이 현저한 시나리오(AIG), 신에너지의 대폭적인 기술혁신을 기대한 시나리오(AIT), 그리고 이러한 기술혁신이 균형 있게 도입되는 시나리오(AIB)이다. A1에 이러한 다양한 시나리오를 작성한 이유는 높은 경제성장의 시나리오에서는 기술혁신의 정도도 크게 기대되고, 기술혁신의 몇몇 방향이 온실효과가스 등의 배출에 미치는 영향이 감도를 분석하는 것에 적합하기 때문이다. 또한, 통상 A1시나리오라고 불리는 경우는 마지막 AIB를 나타내고 있다.

다음으로 A2시나리오는 「다원화 사회 시나리오」로 부를 수 있는 것이다. 세계의 각 지역의 고유의 문화를 존중하고, 다양한 사회구조나 정치 구조를 구축해 나가는 것에 따라, 세계의 경제나 정치가 Block화 해 나가는 것을 가정하고 있다. 이와 같은 사회에서는 나라나 지역의 사이에 항상 긴장 관계가 생기고, 국제적인 무역이나 사람의 이동, 기술의 이전이 제한된다. 따라서 경제발전의 지연, 일인당 소득도 2050년에 7천달러에 불과하다. 세계인구는 개발도상국의 출생률이 낮아지지 않아 2100년에는 150억인에게 달한다. 지역간의 자연 자원이나 자산의 격차는 지역간의 소득 격차를

더욱 더 확대시킨다. 자원이 적은 지역에서는 기술 개발에의 투자가 가속되지만, 경제성장이 낮기 때문에 일반적으로 기술혁신은 지연된다. 환경에의 관심은 상대적으로 낮고, 지역적인 환경문제의 심각화만이 환경 대책 동기가 된다.

B1은「지속 발전형 사회 시나리오」라고 부를 수 있다. 환경이나 사회에의 높은 관심에 따라 지구공공재로서의 환경의 보전과 경제의 발전을 지구규모에서 양립하고 균형 잡힌 경제 발전을 꾀하는 시나리오이다. 자원이용 효율화(탈물질화) 사회제도, 환경보호에 집중적으로 투자가 일어난다. 자원이용 효율화는 자원의 공급 측면을 중시하는 고성장 사회시나리오와 다르며 자원의 수요면에 집중한다. 또한 폐기물의 감량화나 리사이클이 발달되고, 자원이용 효율화나 리사이클의 활성화에 의해 환경 산업의 시장이 급속하게 확대되고, 이것이 경제성장에 지속으로 공헌한다. 경제성장율은 고성장 시나리오보다는 낮지만, 2050년의 일인당 평균 소득은 1만 3천달러에 달한다. 개발도상국에서는, 선진국에서의 첨단기술의 이전이 진행되고, 클린기술이 보급되며 이것에 의해 교육이나 능력도 크게 진전한다. 공공 교통 시스템이 정비되고, 도시 구조는 콤팩트화 하고, 저투입・저부하형 농업이 보급된다. 자연보호를 추진하는 것에 의해 농산물 가격은 상대적으로 비싸지만, 육식으로 식생활 패턴이 바뀌는 것은 억제된다.

마지막으로 B2는「지역 공존형 사회 시나리오」라고 부를 수 있다. 환경이나 사회에의 높은 관심에 기초하지만, 지구 규모 문제에의 관심이나 국제적인 문제해결이라고 하는 방향이 아닌 지역의 문제와 공평성을 중시하고, 하부에 기초를 둔 상향식 발전을 꾀하는 시나리오이다. 시장에 맡기지 않고 지방정부의 정책이 발전을 견인한다. 교육과 복지 향상 정책에 의해 개발도상국의 사망률, 출생율이 낮아지기 때문에, 세계인구는 2100년에 100억인 정도가 된다. 국제 시장보다는 지역의 공존을 중시하기 때문에, 경제성장은 약간 낮게 되고 2050년에 일인당 소득이 1만 2천달러가 된다. 개개인 및 남북간의 소득 격차는 축소된다. 기술 이전 등의 개발도상국 지원은 국제적인 통일된 방식이 아니라 두 나라간에 진행된다. 지역적인 독립성이 높아지고 지역마다의 경제권이나 정치 시스템이 발달해 나간다. 이것에 의해 에너지, 식량, 환경 등의 문제는 각 지역 안에서 주체적으로 해결한다.

4. 배출 시나리오

이러한 4개의 시나리오를 전제로 온실 효과 가스의 예측의 정량화를 세계의 6개의 팀이 시행하였다. 어느 것이나 세계 경제모델을 중심으로 하고 에너지 모델이나 토지 이용 모델을 편성하여 앞에서 말한 4개의 서술적 시나리오를 전제로 에너지 이용이나 토지이용변화 또한 공업의 장래를 시뮬레이션 하여 그 결과 배출되는 이산화탄소, 메탄가스, 이산화질소, 이산화황을 종합적으로 추계했다. < 부록그림 1-2>는 에너지 및 공업 기원의 이산화탄소 배출 시나리오에 계산된 40개 전부의 시나리오와 각 시나리오군의 Marker가 나타나 있다.

예상대로, 환경을 중시했던 B1시나리오가 CO_2배출량이 가장 적다. 이와 같은 사회를 만들면 특별한 온난화 대책을 하지 않아도 온난화는 억제할 수 있다. 전통적인 환경보호론자의 이상향에 가까운 B2시나리오는 경제발전 지상주의에 가까운 A1시나리오와 비교해 보면 2100년의 CO_2배출량은 거의 같게 된다. 지역을 중시해 환경문제를 해결하는 방향의 요인과, 경제 발전에 의해 기술효율이 향상하는 요인이, CO_2의 배출 억제에 있어서 같은 의미의 효과를 발휘했다. 가장 온난화 대책에 어울리지 않는 사회는 A1시나리오가 아닌 「다원화 사회」를 지향했던 A2시나리오였다. 이와 같은 사회로 발전해 가면 온난화 대책에는 믿어지지 않을 정도로 비용이 소요될 가능성을 시사하고 있다.

이 새로운 시나리오 작성을 통하여 다른 하나가 명백하게 되었다. 그것은 <부록그림 1-3>에 나타낸 이산화황 산화물(SOx)의 배출 시뮬레이션에 관계된 것으로 이전에 IPCC가 작성했던 IS92a등 지금까지의 많은 SOx 배출 시나리오는 다음 세기의 배출량이 느는 것이 계속된다는 것이지만, 이번의 시나리오 시뮬레이션에서는 일본을 비롯한 선진국의 공해대책 역사를 감안해 이러한 경험을 모델 속에 넣은 결과 모든 시나리오에 SOx배출량이 크게 감소하는 결과가 얻어졌다. 개발도상국의 경제발전에 동반하여 일인당 GDP가 3천달러에서 5천달러에 달하면, 공해 피해에의 인식이 높아져 단숨에 공해 대책이 진행된다고 하는 역사적 사실이 모델에 반영된 결과이다. 이것에 의해 SOx배출량은 감소하는 것이 계속되는지, 혹은 역U자의 형태로 다음세기에 들어

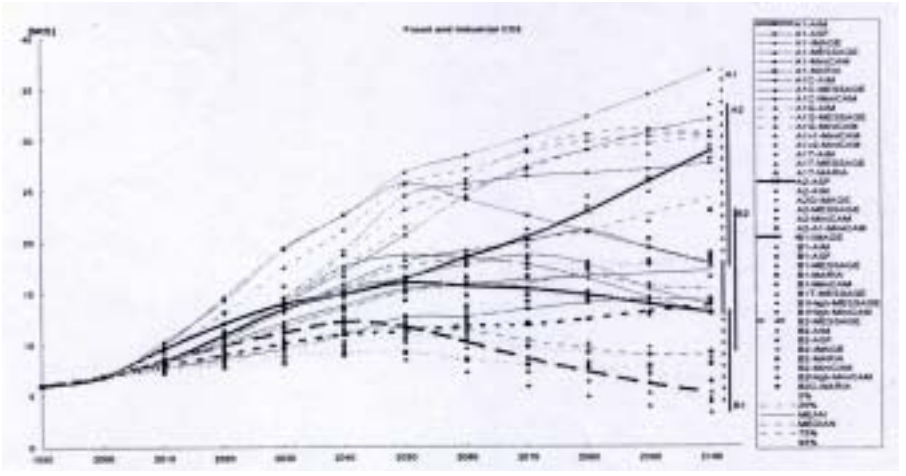
가 감소하는 지 중의 어느 한쪽이 된다. 이 SOx배출량의 감소는 대기중의 황산 aerosol을 감소시키고, 황산 aerosol이 갖는 「냉각 효과」를 낮추어, 지구 온난화를 가속시키는 것으로 추정된다.

<부록표 1-2>에 모든 가스의 배출 시나리오에 관한 정량화의 결과를 marker와 전 시나리오의 추계폭을 정리하였다. 이러한 SRES시나리오는 앞에 나타낸 최근의 문헌에서 보아도 배출 시나리오 폭의 대부분을 커버하는 것이 된다.

<부록표 1-2> SRES 시나리오의 정량화 개요

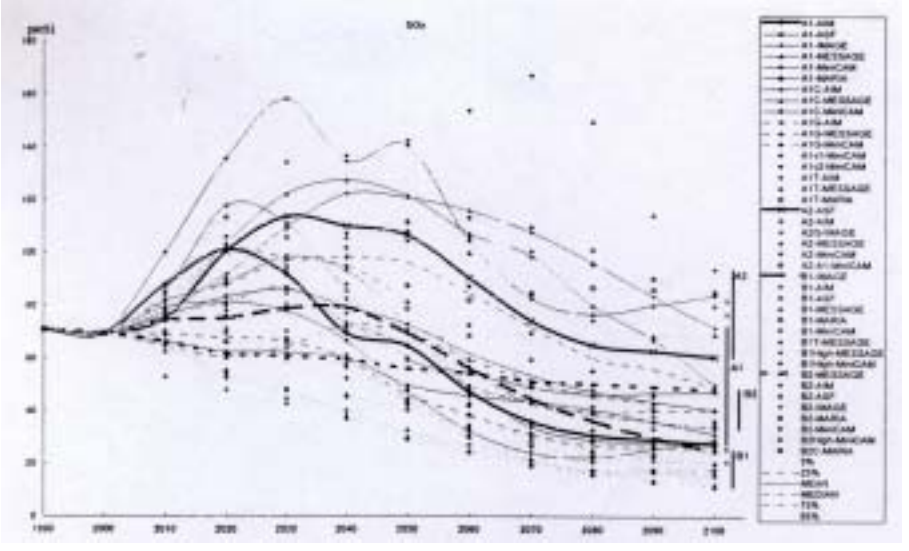
	A1				A2	B1	B2
		A1C	A1G	A1T			
CO_2 (GtC)	Median 13.5 (13.5-17.9) by2100	High (25.9-36.7)	High (28.2-30.8)	Low (4.3-9.1)	High 29.1 (19.6-34.5) by2100	Low 4.2 (2.7-10.4) by2100	Median 13.3 (10.8-21.8) by 2100
CH_4 ($MtCH_4$)	Low 289 (289-640) by2100	Median (392-693)	Median (289-735)	Low (274-291)	High 889 (549-1069) by2100	Low 236 (236-579) by2100	Median 597 (465-613) by2100
N_2O (MtN)	7.0 (5.8-17.2) by2100	(6.1-16.2)	(5.9-16.6)	Low (4.8-5.4)	16.5 (8.1-19.3) by2100	5.7 (5.3-20.2) by2100	6.9 (6.9-18.1) by2100
HFC (MtC equiv.)	Median Total of 824 by 2100	A1과 동일	A1과 동일	A1과 동일	High Total of 1096 by2100	Low Total of 386 by2100	Moderate high Total of 839 by2100
CO (MtCO)	Median 1663(1080-2532) by 2100	High (2298-3766)	High (3260-3666)	Median (1520-2077)	High 2325(776-2646)	Low 363(363-1871)	Median 2002(661-2002) by 2100
$NMVOC_3$ (Mt)	Median 193(133-552) by 2100	Median (163-373)	Median (192-484)	Median (114-128)	Median 342(169-342) by 2100	Low 87(58-349) by 2100	Median 170(130-304) by 2100
NOx (MtN)	Median 40.2(40.2-77.0) by2100	High (63.3-151.4)	High (39.9-132.7)	Low (28.1-39.9)	Very High 109.2(70.9-110.0) by2100	Low 18.7(16.0-35.0) by 2100	High 61.2(34.5-76.5) by 2100
SOx (MtS)	Low 27.6(27.6-71.2) by 2100	High (26.9-83.3)	Low (27.4-40.5)	Very Low (20.2-27.4)	High 60.3(60.3-92.9) by 2100	Very Low 24.9(11.4-24.9) by 2100	Low-Median 47.9(33.3-47.9)

주 : Maker 시나리오와 전 시나리오의 추계폭



<부록그림 1-2> 에너지 및 산업에서 표준화된 40개 SRES CO_2 시나리오

주 : 1. 마크시나리오는 굵은 선으로 기타 36개 시나리오는 가는 선으로 표시함



<부록그림 1-3> 표준화된 40개 SRES 이산화황 시나리오

주 : 1. 마크시나리오는 굵은 선으로 기타 36개 시나리오는 가는 선으로 표시함
2. 마크가 없는 가는 선은 백분율, 평균치, 중앙치를 표시함

5. 맺음말

2001년 3월 13일부터 15일에 걸쳐 네팔의 카트만두에서 IPCC가 개최되어 SRES 특별보고서가 승인되었다. 여기에는 각국 정부 대표에 의한 심의 과정에서 정책 담당자용 요약문이 수정되었다. 주요한 관점은 두 가지 이다.

첫째, 4개의 marker에 덧붙어 2개의 준marker가 추가되었다. 이것은 미국 정부 대표단의 강력한 요청에 의한 것이었다. 이는 B1시나리오의 온실 효과 가스 배출량이 과소 평가되었다는 정책담당자의 직관에 기초하여 전체의 균형을 잡은 높은 배출량 시나리오를 첨부할 필요성이 제기된 것이다. A1시나리오군의 석유와 천연가스 관련 기술혁신이 현저한 A1G에 기초하여 새로운 에너지의 대표적 기술혁신을 고려한 시나리오 A1T부터 각각 하나의 배출시나리오가 준marker로 선정되었다. 또 하나의 수정은 사우디아라비아와 중국의 견해를 따라 SRES 시나리오에 기초한 방사강제력 부분의 제거이다. 이들의 수정은 SRES 시나리오 본질을 변화시키는 것이 아니라 정책담당자에게 설명하기 쉬운 방향으로 부분적인 수정을 한 것에 불과하다.

한편 SRES 시나리오를 사용한 새로운 연구도 시작되고 있다. SRES 시나리오는 어디까지나 온난화 저감을 위한 대책을 포함하지 않는 시나리오이지만, IPCC의 제3차 평가보고서(TAR)에 있어서는 SRES 시나리오를 베이스로 한 대책 시나리오의 장이 만들어져, 이를 위한 분석 작업이 진행되고 있다. 이 대책시나리오는 「Post SRES시나리오」라고 불리며 세계 9개의 모델링팀이 참가하고 있다. 이중에서 SRES 시나리오에 그려진 장래의 발전방향을 전제로 온실효과가스의 대기중 농도를 목표 레벨로 유지하기 위한 배출저감을 시뮬레이션하며, 대책차원에서 필요로 하는 기술혁신은 어떠한 차이가 있는지를 분석하고 있다. 그리고 어떠한 발전 방향으로 진행시켜도 의미가 있는 대책이나 기술혁신이란 무엇인가를 명백히 하는 것이 온난화대책연구에 있어서 중요한 연구영역이 되고 있다.

SRES시나리오는 IPCC에 의해 준비된 새로운 배출시나리오 일뿐 아니라, 많은 과학적 혹은 정책적인 시사점을 주고 있다. 이 시나리오가 시사하는 것은 인류의 장래 발전 방향은 다양하고, 이러한 발전 방향에 의해 온난화의 정도나 온난화 대책 의미

는 크게 다르다는 것이다. 지금, 세계의 온난화 대책 논의에서 가장 부족한 점은 "세계가 향해 있는 방향이 어떠한 사회인 것인가"라는 것으로 이를 우선 논의할 필요가 있다.

가. 주요 특징

1) 시나리오에 대해

- 장래의 온실 효과 가스 배출량은 인구 변화, 경제 발전, 기술 변화 등의 구동요인(driving forces)에 의해 정해지지만, 이 결정은 불확실성이 높다. 시나리오는 장래의 배출량이 어떻게 될 지에 관한 선택적 이미지를 나타내는 것이고, 구동요인이 장래의 배출량에 어떻게 영향을 주는지를 분석하고, 불확실성을 평가하기 위한 도구가 된다.
- 4개의 시나리오에 대해서는 각각의 온실 효과 가스 배출 요인과 그 변화관계에 대해서 일관성을 가져 설명하는 서술적 시나리오가 작성되어 있다. 서술적 시나리오는 「장래의 역사」를 나타내는 여러 가지 문헌(예를 들면, Huntington의 「문명의 충돌」)을 토대로, SRES의 집필팀이 작성했다.
- SRES에는 A1, A2, B1, B2의 4개 시나리오가 설정되어 있다. A, B는 경제 지향인지 환경 지향인가를, 1, 2는 지구주의 지향인지 지역주의 지향인가를 나타내고 있고, 이것들에 의해 4개의 서술적 시나리오로 정리된다.

2) 배출 시나리오의 작성 작업에 대해

- 일본, 미국, 유럽에 의해 2개의 모델씩, 합계 6개 모델이 배출 시나리오 작성 작업에 참가하였다. 이들 6개의 모델에 대해서 기본적인 구동요인들(인구, GDP, 최종에너지 수요, CO_2배출)을 우선 조화되게 한 다음, 기술 진보나 에너지 이용 비용 등의 변수를 바꾸고, 변형 사례를 계산하고 있다. 이들 사례의 총수는 40개에 달한다.

<표식시나리오(marker scenarios)>

- 합계 40개의 SRES 시나리오는 4개의 다른 서술적 시나리오를 따라 이것에 각각 대응하는 4개의 시나리오 그룹으로 분류된다.
- 많은 수의 시나리오를 다루기 쉽게 하기 위해 SRES 작성 팀의 합의에 의해 각 서술적 시나리오(A1, A2, B1, B2)에 대해서 이 특징을 가장 잘 반영한 것을 대표적 사례로서 골라내어 「표식 시나리오」라고 했다. 따라서, 표식 시나리오는 각 서술적 시나리오별로 4개씩 있다. 표식 시나리오는 다른 시나리오에 비해 현실성이 높고 낮은 것이 아니라 어디까지나 각 서술적 시나리오를 예증(例証)하고 있다고 SRES 작성팀이 생각한 시나리오이다.

<조화된 시나리오(Harmonized Scenarios)>

- 결과로서 산출된 온실 효과 가스 배출량의 비교를 가능으로 하기 위해 인구, 경제성장률, 최종에너지수요의 어느 쪽이든 또는 전부에 대해서 공통 가정을 사용하였다. 이 중에서, 완전히 조화된 시나리오(Fully Harmonized Scenarios)는 인구, 경제성장률, 최종 에너지 수요의 전부에 대해서 공통의 가정을 쓰고 있고, 11개의 시나리오가 이것에 해당한다. 각 서술적 시나리오를 예증하고 있는 4개의 표식 시나리오는 이 11개의 시나리오 속에 포함된다. 또한 전지구적으로 조화된 시나리오(Globally Harmonized Scenarios)는 세계 전체인 인구와 국내 총 생산 합계에 대해서 공통 가정을 쓰고 있으며 26개의 시나리오가 해당된다(물론 앞의 11개도 포함된다). 남은 14개는 부조화된 시나리오(Non Harmonized Scenarios)가 된다.

<부록표 1-3> SRES 시나리오

A1	A1				A2	B1	B2	合計
	AIC	AIG	AIB	AIT				
Global Harmonized Scenarios Other Scenarios	2	3	6	2	2	7	4	26
Other Scenarios	1	0	2	1	4	2	4	14
合　計	3	3	8	3	6	9	8	40

<지역구분>

- OECD90 :1990년 시점에서 OECD가입국, 부속서Ⅱ체결국에 해당
- NAM(북미), WEU(유럽), PAO(태평양 OECD가입국)
- REF : 동, 중유럽, 구소련, 부속Ⅰ체결국에 해당. EEU(동유럽), FSU(구소련)
- ASIA : 아시아(중동제외)의 발전도상국(비부속Ⅰ체결국), CPS(아시아 사회주의 국가), SAS(남아시아), PAS(기타 태평양국가)
- ALH : 앞에 포함이 안된 국가, 아프리카, 남미, 중동의 개발도상국(비부속국가Ⅰ체결국), LAM(중남미), MEA(중동 및 북아프리카), AFR(사하라지역)

나. 각 서술적 시나리오의 개요

1) A1

■ 개관

- 저인구 성장에 기초한 고도 경제성장 시나리오로 높은 기술 개발이 계속된다. 세계 지역간의 벽은 축소되고, 지역간의 사회구조, 1인당 소득도 점차 어느 방향으로 수렴된다. 또한, 세계 에너지 회의(WEC)의 배출 시나리오와 같이 에너지에서의 기술 변화 방향성에 의해 AIB(밸런스가 떨어진 에너지 소비), AIC(석탄 주도형), AIC(가스 주도형), AIT(고효율 에너지 기술 주도형)라고 하는 4종류의 세분류가 있다.

■ 인구

- 경제성장의 결과, 사망률 및 출생율 저하.

■ 경제

- 고도 경제성장이 계속되고, 2100년까지의 년 평균 경제 성장율은 3%.
- GDP의 총계는 2100년의 시점에 550조 US달러.

· 1인당 국민소득의 세계 평균은, 2050년의 시점에 21,000 US달러.

■ 에너지시스템

· 급속한 기술혁신에 따라 에너지 자원은 풍부하다.
· 최종 에너지 수요의 GDP탄성치는 년 평균1.3%의 비율로 감소한다.

■ 기타

· 소득의 급속한 증가에 따라 최초는 고기나 유제품의 소비가 늘지만, 그 후 고령화 사회를 맞이해 건강에의 배려가 강조되는 것에 따라 이들 소비는 감소한다.
· 고소득에 의해 비싼 자동차 보유율, 교외 주택지의 확대, 교통 네트워크의 발전(국내 및 국제적으로)이 계획된다.

2) A2

■ 개관

· 지역주의가 높은 시나리오로 각 지역은 블록화하고, 독자의 전통적 문화 틀이 계속 유지된다. 또한 자유무역에 기초한 경제적 효율성에 높은 가치를 두지 않는다. 이 결과 세계인구는 가장 증대하여 약 150억인에 달한다. 에너지도 지역내의 자원에 의존하는 비례 합계가 높고, 기술 진보도 상대적으로 낮다. 따라서, 아시아 등 석탄이 풍부한 지역에서는 석탄의존도가 저하하지 않아 온난화 가스 배출도 고수준이 된다.

■ 인구

· 가족이나 커뮤니티에 중점을 두기 때문에, 출생률의 저하 속도는 완만하고, 다른 시나리오와 비교해 인구가 가장 많다(2100년의 시점에 150억인).

■ 경제

· 1인당 국민소득의 세계 평균은 다른 시나리오에 비해 낮고, 2050년 시점에 7,200

US달러, 2100년 시점에 16,000 US달러.
・GDP의 총계가 2100년 시점에 250조 US달러.

■ 기술 및 에너지 시스템
・기술 변화는 A1시나리오보다도 불균등하다.
・산업은 지역의 에너지부존량, 문화, 교육 레벨에 의존하기 때문에 기술 변화 속도는 지역에 따라 다르게 된다.
・에너지 자원이 풍부한 지역은 자원 집약형 경제를 추진해 나가지만, 반대로 자원이 궁핍한 지역에서는 에너지 효율을 높이는 기술이나 대체 에너지의 개발에 의해 수입 의존도를 가능한 한 줄이는 것을 노력한다.
・에너지 혼합은 그 지역에서의 에너지 이용 가능성에 의해 정해진다. 그리고 GDP는 크지만 자원이 부족한 지역에서는 탈화석연료 기술(재생 가능 에너지 또는 원자력에너지)로 이동하고, GDP는 작지만 자원이 풍부한 지역에서는 기존의 화석 연료 기술에의 의존이 계속된다.
・최종 에너지 수요 탄성치는 1년에 0.6~0.7%의 비율로 감소한다.

■ 기타
・사회제도나 정치제도가 다양화하고, 어느 지역에서는 고복지 사회를 추구해 소득 격차가 감소하지만, 어느 지역에서는 「작은 정부」를 지향해 소득 격차는 커진다.
・식량 공급 관점에서는 농업 생산성 및 환경 문제, 기술혁신, 연구 개발이 주요한 대상이 된다.
・당초의 토양 유실이나 수질 오염은 보다 지속적인 농업에의 지역적인 노력에 의해 해결된다. 잠재적인 지역적 환경 오염에 대해서는 해결 노력을 하지만 지역간에 균일적으로 행하여지지 않는다. 지역적인 오염에 대한 대처나 쾌적성의 유지에 관해서는 열심이지만, 지구 환경 문제에 대한 관심은 비교적 약하다.
・다른 스토리 라인과 같이 A2의 스토리 라인은 A2시나리오의 기본적 변동에 따

른 좋고 나쁨을 말하는 것은 아니다. 문헌은 A2의 스토리 라인이 그리는 세계에 대해서 다양하게 해석을 하고 있다. 예를 들면, A2에 관해서는 다양성이나 근본적 차이를 서로 받아들이는 것에 의한 문화 다원주의 경향의 증대라고 해석하고 있다.

3) B1

■ 개관

- 낮은 인구성장, 고도경제성장은 A1시나리오와 같이 동일하지만, 저자원소비, Green에너지의 개발 및 이용 등 지속 가능성에 중점을 둔 형태로 기술 선택이 행해진다. 따라서 경제 수준 자체는 A1시나리오보다도 낮다. 지역주의보다 지구주의의 가치가 주도하며, 그 결과로 온난화 가스 배출량은 2100년에 1990년 수준을 밑돈다.
- 온난화 대책을 일부러 하지 않아도 사회 전체로서 환경을 중시하기 때문에 온난화 대책 추가 비용은 적어진다. 단, 그와 같은 사회의 실현에는 현재부터 큰 변화가 필요하다.

■ 경제

- A1시나리오에서의 스토리 라인과 같이 급속하게 변화하는 세계를 그리지만, 우선 순위가 다르다. A1시나리오의 세계에서는 생산성의 향상이나 노하우에 의한 이윤을, 우선적으로 경제성장에 투자하는 것에 비해, B1시나리오의 세계에서는 이윤의 대부분을 자원 이용 효율성의 개선(탈물질화), 공평성, 사회제도, Green 환경보호에 투자를 한다.
- 경제성장은 밸런스를 갖추며, 공평한 소득 배분이 행해진다.
- 강력한 사회복지 정책은 빈곤을 시작으로 하는 사회적 소외 발생을 억제하지만, 반대의 영향이 생길 가능성도 있다. 강력한 소득의 재배분나 비싼 세율은 반대로 경제 효율이나 세계시장의 역할에 영향을 줄 가능성이 있다.
- 경제 수준은 높게(GDP의 총계가 2100년의 시점에 3조 US달러), 소득의 평준화

는 국제적으로나 국내적으로도 착실하게 진행된다.

- 1인당 국민소득의 세계 평균은 2050년의 시점에 13,000 US달러(A1시나리오의 약 1/3).
- 물적인 재산에는 관심이 두지 않아 환경제약에 의해 자원 가격이 상승하기 때문에, 서비스의 양보다는 질에 의해 소비된다.

■ 기술 및 에너지 시스템

- 자원 효율성의 향상을 위해 특별한 노력이 실시된다. 국제적 제도화에서 알 수 있듯이 인센티브 시스템에 의한 청정기술(Clean Technology)이 급속하게 확산 가능하며, 이러한 목적을 위해서 연구 개발이 활발히 행해지고 동시에 깨끗하며 공평한 발전을 지향한 교육이나 능력 개발이 행해진다. 또 조직화를 꾀하는 것(organization measures)에 의해 재사용 및 리사이클이 최대한 행해지고, 폐기물이 감소된다. 이러한 기술 및 제도의 변화에 의해 고도의 자원절약・에너지절약이 달성되고, 동시에 환경 오염도 감소된다. 이러한 노력의 결과, 부차적으로 노동 생산성도 향상된다.
- 석유자원 및 천연가스 자원이 감소하는 것에 의해, 비교적 자연스럽게 에너지 체계의 전환이 행해진다. 전환 과정에서는 가장 깨끗한 화석 연료로서 천연 가스가 광범위하게 사용되지만, 환경에의 배려에 의해 탈화석 연료화가 진행된다.

■ 인구

- 낮은 사망률 및 출생률에의 이행은 A1시나리오와 같은 스피드로 진행되지만 그 요인도 다르며 사회・환경적 요인에 의해 이행된다
- 2050년 시점의 인구는 90억인에게 달하지만, 그 후 감소하여 2100년의 시점에 70억인이 된다.

■ 기타

- 급속한 경제 발전 결과 발생되는 잠재적 환경 마이너스 요인에 대해서는 충분한

환경에의 배려 및 제도적인 효과에 의해 미리 여러 가지 차원(지역/국가/국제)에서 대응이 계획되기 때문에 환경 상태는 양호하다(산성비의 예).

- 특별한 온난화 대책을 시행하지 않아도 여러 가지 차원에 의한 적극적인 환경 정책에 의해 온실 효과 가스의 배출은 낮게 억제된다.

4) B2

■ 개관

- 비교적 지역주의가 강하고, 그 내에서 경제・사회・환경의 지속 가능성이 추구되므로 세계는 다양성을 가진다. 단, 환경 보전에 대한 의식이 기초를 이루고 있기 때문에 A2시나리오와 같은 극단적인 모습은 아니다. 인구는 국제연합의 중위 추계에 따르므로, 약간 보수적이지만 중용 시나리오라고 할 수 있다.

■ 인구

- 교육 및 사회복지 프로그램이 널리 실시되기 때문에 사망률 및 출생율은 감소된다.
- 2100년 시점의 세계인구는 100억인이 된다.

■ 경제

- 1인당 국민소득의 세계 평균은 2050년의 시점에 12,000 US달러.
- GDP의 총계는 2100년의 시점에 250조 US달러.
- 국제적인 소득 격차는 축소된다.
- 지역적인 격차는 강력한 커뮤니티 지원 네트워크의 진전에 의해 감소된다.

■ 기술 및 에너지 시스템

- 높은 교육 수준에 의해 커뮤니티 전략 및 사회혁신에 부분에 기후 변동에의 배려가 고려된다.
- 기술혁신은 AI 및 BI시나리오만큼은 빠르지는 않지만 진전되고 지역별로 격차는 있다.

- 국제적으로는 에너지의 연구개발에 대한 투자는 현재보다 감소하여 기술 및 노하우의 국제적 확산 메카니즘은 A1 및 B1시나리오보다 약하다(A2 시나리오보다는 강하다).
- 경제 발전이 빠르나 천연 자원이 제한되어 있는 지역에서는 기술 개발 및 양자간 협력이 중시된다. 따라서, 기술 변화는 불균등하게 발생된다.
- 에너지 수요의 GDP탄성치는 년 평균 약1%의 비율로 감소한다.
- 에너지 시스템은 천연 자원의 이용가능성에 따라 다르기 때문에, 지역에 따라 다르다.
- 에너지 및 다른 자원을 보다 효율적으로 이용하는 필요성에 의해 비화석 연료기술의 개발이 진행된다.
- 농업 생산에서는 지역 자립성을 유지하기 때문에 지역간 환경정책 협력 결과 산성비와 같은 월경적 환경 문제는 어느 정도 그 대응에 성공한다. 또 질소산화물이나 휘발성 유기화합물의 배출도 낮게 억제되기 때문에 오존 농도의 상승도 감소된다.
- 지구 전체에서는 2100년까지 화석 연료가 대부분이지만 세계 에너지 공급에 있어서는 현재의 화석 연료 비율이 서서히 감소되어 탄소 배출량이 감소된다.

■ 기타

- 토지이용관리는 지역 차원에서 진행된다. 도시부 하부기반시설 및 교통 기반시설은 커뮤니케이션의 발전을 중심으로 정비되고, 자동차 의존 비율을 억제해 도시의 확대를 억제하고 있다.
- 식량 자급을 중요시하기 때문에 식생활 패턴은 지역 생산품에 의존하여, 그 인구밀도가 높은 나라에서는 상대적으로 고기의 소비가 억제된다.

다. 시나리오에 있어서 표식시나리오의 정량화

각 시나리오의 표식 시나리오에서의 스토리 라인의 정량화는 다음과 같은 가정에

기초하여 행해진다.

1) A1 스토리 라인

- 급속하게 인구 동태가 변화(사망률 및 출생률의 저하)하고, 국제적으로 발전의 공평성 정도가 높아지는 것에 의해 풍요로운 세계가 된다.
- 개발도상국의 눈부신 발전에 따라, 모든 지역에 있어서 매우 높은 생산성과 경제 성장이 달성된다.
- 생산성의 현저한 개선과 높은 투자 회수율에 의해 계속적인 구조 변화 및 효율적인 기술의 확산이 이루어지며, 이에 따라 다소 완화되지만 상대적으로 높은 에너지 수요, 원재료 수요가 발생한다.

(에너지 구조 및 기술 변화 방향성의 세분류)

- AIB(밸런스형) : 에너지 공급부터 최종수요까지 에너지 및 기술의 밸런스를 잘 반영한다. AI 스토리 라인의 표식시나리오가 된다.
- AIC(석탄 주도형) : 온실 효과 가스를 제외하고는 환경으로 적합한 「clean coal」 기술이 주류가 된다
- AIG(가스 주도형) : 종래의 에너지로부터 지금까지 잘 이용되지 않았던 에너지로 전환하는 것에 의해 석유 및 가스가 주류가 된다.
- AIT(고효율 에너지 기술 주도형) : 공급 차원에서는 태양광발전기술이나 원자력 발전기술이, 최종 수요차원에서는 Micro turbine 및 연료전지의 급속한 발전에 의해 비화석 에너지가 주류가 된다.

2) A2 스토리라인

- 상대적으로 인구 동태의 변화는 완만하고, 상대적으로 지역적 출생 패턴도 완화된다.
- 1인당 GDP의 지역간 차이가 상대적으로 완만하다.
- 다른 스토리 라인에 비해 최종 수요 및 공급 차원에서의 에너지 효율 개선은 상

대적으로 완만하다.

- 재생가능에너지 개발이 늦다.
- 원자력 에너지를 사용함에 있어 장해는 없다.

3) B1 스토리라인

- 교육을 포함한 급속한 사회 발전에 의해 급속한 인구 동태의 변화가 생긴다.
- 발전이 늦은 지역의 현저한 변화에 의해 현재의 소득 격차는 대폭적으로 감소되고 모든 지역에 있어서 높은 경제성장이 달성된다.
- 경제 활동의 탈물질화나 물질 집약적 및 에너지 집약적 활동 포화상태(예를 들면 자동차 보유), 에너지 효율 개선책의 실행에 의해 에너지 수요의 증가는 상대적으로 작다.
- 지역 환경에의 배려 및 석유, 가스가 점진적으로 고갈됨에 따라 비화석 연료 개발이 행해진다.

4) B2 스토리라인

- 지정학, 인구동태, 생산성의 향상, 기술변화 등의 모든 점에 있어서, 다른 스토리라인(Al, Bl)과 비교하면 극단적이지 않으며 점진적인 변화를 나타낸다.
- 정량화에 관해서는, 교통정체나 지역대기오염, 산성비의 영향이라고 했던 지역적인 문제의 해결을 위한 효과적인 정책을 가정하고 있다.

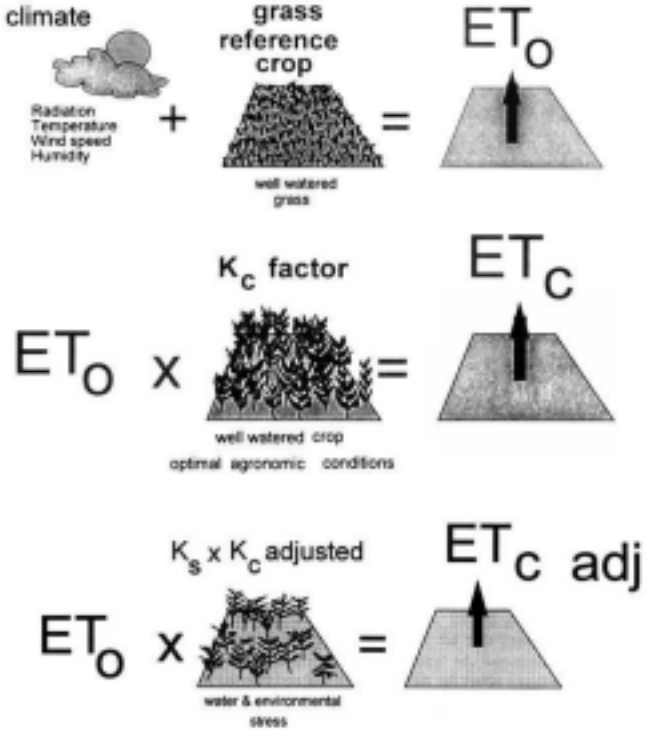
<부록표 1-4> SRES 시나리오에 있어서 정량화에 대한 개요

	A1				A2	B1	B2
	AIB	AIC (석탄)	AIC (석유)	AIT			
인구 증가	낮음	낮음	낮음	낮음	높음	낮음	중간
경제 성장	매우 높음	매우 높음	매우 높음	높음	중간	높음	중간
에너지 수요	낮음~중간	낮음~중간	낮음	낮음	높음	낮음	중간
토지 이용 변화	높음	높음	중간	중간	중/소	높음	중간
기술 변화 속도	빠름	빠름	빠름	빠름	늦음	중간	중간
기술 변화의 방향성	석탄	석유 및 가스	균형	비화석연료	지역적	효율성 및 탈물질	보통의 Dynamic

부록 2 : 잠재증발산량 산정 모형

1. 잠재증발량 산정 모형

하천 유역의 강수량으로부터 증발산, 토양 침투 등의 손실량을 공제한 것이 하천 유출량이다. 유출량 산정을 위해 필요한 증발산량은 기상조건(바람, 기온, 습도 등), 지표조건(라지, 초원, 임지 등), 식생조건(식물의 종류, 밀도, 생육 상태 등), 토양의 종류, 토양 수분, 토양의 열적 성질 등 많은 요인이 관계한다.



<부록그림 2-1> 증발산 개념

증발산(Evapotranspiration)은 증발산량 산정시 고려하는 매개변수에 따라 잠재증발산(ET_0), 표준증발산(ET_c), 비표준증발산($ET_{c\ adj}$)으로 나눌 수 있고, 기본 개념은 <부록그림 2-1>과 같다.

잠재증발산은 지표면을 조밀하게 가린 녹초지에 충분한 물을 공급했을 경우 소모하는 대기의 증발산으로 증발산량 산정의 기본자료이다. 즉, 토양조건이나 식생조건은 증발산에 영향을 끼치지 않고, 증발산에 영향을 미치는 유일한 매개변수는 기상조건이다. 표준증발산은 최적의 토양함수조건 및 기상조건과 함께 작물생산을 위한 표준조건에서의 작물의 증발산을 의미한다. 비표준증발산은 비표준조건에서의 작물의 증발산에 영향을 미치는 수분계수(Ks)와 환경관련계수(Kc)을 고려하여 산정한다.

본 연구에서는 잠재증발산 산정을 위해 FAO Penman-Monteith 모형과 Thornthwaite 모형을 선정하였다.

2. Penman/FAO 24 모형

가. 개 요

1990년 5월 FAO는 Penman-Monteith 모형에 기준작물의 높이 0.12 m, 표면저항 70 s/m, 알베도 0.23의 값을 적용하여 <부록식 2-1>과 같은 FAO Penman-Monteith 모형을 개발하였다.

$$ET_0 = \frac{0.48\triangle(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}u_2(e_s - e_a)}{\triangle + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{(부록식 2-1)}$$

ET_0 : 잠재증발산(mm/day)
Rn : 식생에서의 순복사량(MJ/㎡·day)
G : 토양열플럭스(MJ/㎡·day)
T : 지상 2m에서의 일평균 대기온도(℃)

u_2 : 지상 2m에서의 풍속(m/s)
e_s : 포화수증기압(KPa)
e_a : 실수증기압(KPa)
e_s-e_a : 포화수증기압 부족분(KPa)
△ : 포화수증기압곡선의 접선구배(kPa/℃)
¥ : 습윤상수(kPa/℃)

<부록식 2-1>을 이용하여 증발산을 계산하기 위해서는 다양한 기상학적 및 물리적인 매개변수가 필요하다. 일부자료는 기상관측소에서 관측한 자료를 이용하고, 그 외 자료는 관계식 또는, 경험식을 이용하여 산정해야 한다. 또한, 기상자료는 여러 가지 단위로 표현할 수 있으므로 <부록표 2-1>과 같은 증발산 환산계수를 이용해 수정해야 한다.

<부록표 2-1> 증발산 환산계수

증발산	깊이	체적/단위면적		에너지/단위면적
	mm /day	㎥/ha · day	1/ls · ha	MJ/㎡ · day
mm /day	1.000	10.000	0.116	2.450
㎥/ha · day	0.100	1.000	0.012	0.245
1/ls · ha	8.640	86.400	1.000	21.170
MJ/㎡ · day	0.408	4.082	0.047	1.000

나. 매개변수산정방법

1) 습윤상수

건습계상수(¥)는 <부록식 2-2>와 같고 대기압 P는 <부록식 2-3>을 이용하여 해수면고도 z를 이용하여 산정한다. 여기서, 정압에서의 비열은 대기의 온도를 1℃ 상승하기 위해 필요한 에너지의 양을 의미한다.

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} P \qquad \text{(부록식 2-2)}$$

γ : 건습계상수(kPa/℃)
P : 대기압(kPa)
λ : 수증기잠열, 2.45(MJ/kg)
cp : 정압에서의 비열, 1.013×10^{-3}(MJ/kg · ℃)
ε : 건조공기에 대한 수증기분자량 비 = 0.622

$$P = 101.3\left(\frac{293 - 0.0065z}{293}\right)^{5.26} \qquad \text{(부록식 2-3)}$$

P : 대기압(kPa)
z : 해수면고도(m)

2) 포화수증기압 부족분

포화증기압 부족분은 평균포화수증기압(e_s)과 평균실제수증기압(e_a)의 차이이다. 평균포화수증기압(e_s)는 <부록식 2-4>와 같은 포화증기압식을 이용하여 일평균 최소 대기온도 Tmin일때의 포화증기압 e^0(Tmin)과 일평균 최대 대기온도 Tmax일때의 포화증기압 e^0(Tmax)을 <부록식 2-5>와 같이 평균하여 산정한다.

$$e_s = \frac{\left[e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})\right]}{2} \qquad \text{(부록식 2-4)}$$

e_s : 평균포화수증기압(kPa)
T_{max}, T_{min} : 일평균 최대, 최소 대기온도(℃)

$$e^0(T) = 0.60108 \exp\left[\frac{17.27T}{T + 237.3}\right] \qquad \text{(부록식 2-5)}$$

e^0(T) : 대기온도 T에서의 포화수증기압(kPa)
T : 대기온도(℃)

평균실제증기압(e_a)는 이슬점온도, 건습계자료, 상대습도와 같은 기상자료를 이용하여 다음과 같은 5가지 방법으로 산정 할 수 있다.

- 이슬점온도

이슬점온도는 포화공기를 냉각하기 위해 필요한 온도이기 때문에 실제증기압은 <부록식 2-6>과 같이 이슬점온도(T_{dew})에서의 포화수증기압과 같다.

$$e_a = 0.6108 \exp\left\{\frac{17.27 T_{dew}}{T_{dew} + 237.3}\right\} \quad \text{(부록식 2-6)}$$

T_{dew} : 이슬점온도(℃)
e_a : 실제포화증기압(kPa)

- 건습계자료

실제증기압은 <부록식 2-7> ~ <부록식 2-9>과 같이 습구온도차를 이용하여 산정할 수 있다. <부록식 2-7>에서 상수 a_{psy}는 공기이동속도가 약 5 m/s일 경우 0.000662, 약 1 m/s일 경우 0.000800, 통풍이 되지 않는 건습계일 경우는 0.001200의 값을 가진다.

$$e_a = e^0(T_{wet}) - \gamma_{psy}(T_{dry} - T_{wet}) \quad \text{(부록식 2-7)}$$

e_a : 실제증기압(kPa)
$e^0(T_{wet})$: 습구온도에서의 포화수증기압(kPa)
γ_{psy} : 건습계 상수(kPa/℃)
T_{dry}-T_{wet} : 습구온도차(℃)

$$\gamma_{psy} = a_{psy} P \quad \text{(부록식 2-8)}$$

a_{psy} : 건습계의 통풍형태에 따른 상수(1/℃)
P : 대기압(kPa)

- 최대상대습도와 최소상대습도

실제증기압은 (식 2-9)와 같이 최대상대습와 최소상대습도를 이용하여 산정 할 수 있다.

$$e_a = \frac{e^0(T_{min})\frac{RH_{max}}{100} + e^0(T_{max})\frac{RH_{min}}{100}}{2} \qquad \text{(부록식 2-9)}$$

e_a : 실제증기압(kPa)
$e^0(T_{min})$: 일평균 최소 대기온도 일 때의 포화증기압(kPa)
$e^0(T_{max})$: 일평균 최대 대기온도 일 때의 포화증기압(kPa)
RH_{max} : 최대상대습도(%)
RH_{min} : 최소상대습도(%)

- 최대상대습도

최소상대습도의 오차가 큰 장비를 사용하거나, 상대습도 자료에 문제가 있을 경우에는 <부록식 2-10>과 같이 최대상대습도만을 사용하여 실제증기압을 산정 할 수 있다.

$$e_a = e^0(T_{min})\frac{RH_{max}}{100} \qquad \text{(부록식 2-10)}$$

- 평균상대습도

최대상대습도와 최소상대습도가 존재할 경우, <부록식 2-11>과 같이 평균상대습도를 이용하여 실제증기압을 산정 할 수 있다. 그러나, <부록식 2-11>은 <부록식 2-9> 및 <부록식 2-10>보다 정확하지 않은 값을 제공한다.

$$e_a = \frac{RH_{mean}}{100}\left[\frac{e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})}{2}\right] \qquad \text{(부록식 2-11)}$$

RH_{mean} : 평균상대습도(kPa)

3) 포화수증기압 곡선의 구배

포화수증기압곡선의 구배는 <부록식 2-12>를 이용하여 산정한다. 여기서, 온도 T는 평균대기온도(T_{mean})을 의미한다.

$$\triangle = \frac{4098\left[0.6108\exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right)\right]}{(T+237.3)^2} \qquad \text{(부록식 2-12)}$$

4) 풍속

풍속은 시간에 따라 변화하기 때문에 측정시간 간격에 따른 평균치를 사용한다. 또한, 고도에 따라서도 풍속이 변화하기 때문에 사용목적에 따라 관측고도가 변화한다. 증발산을 산정하기 위해 필요한 풍속자료는 지상 2 m에서의 자료이다. 지상 2m에서의 자료가 없을 경우에는 <부록식 2-13>을 이용하여 풍속을 산정 한다.

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.87z - 5.42)} \qquad \text{(부록식 2-13)}$$

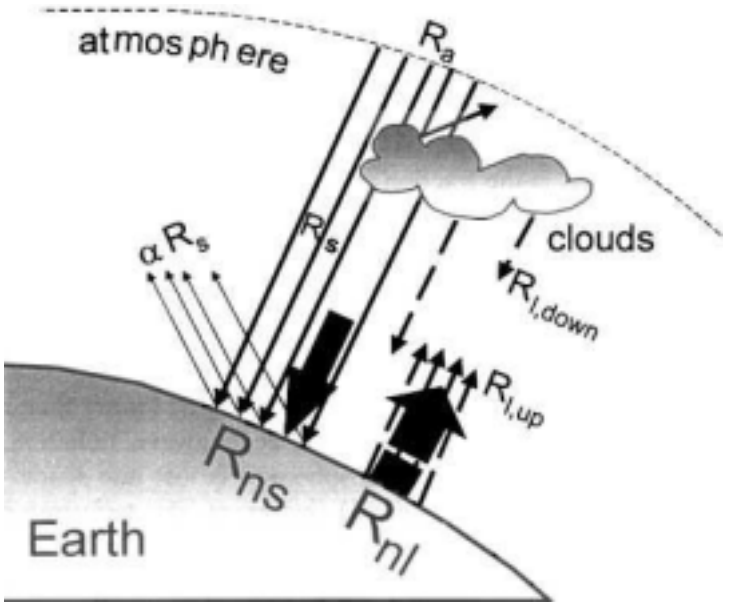
u_2 : 지상 2 m에서 관측한 풍속(m/s)

u_z : 고도 z에서 관측한 풍속(m/s)

z : 관측고도(m)

5) 복사량

순 복사량은 <부록그림 2-2>과 같이 모든 입사 복사량과 반사 복사량과의 차이를 의미하고, 운량, 온도, 증기압 자료를 이용하여 산출할 수 있다. 또한, 순복사량은 <부록식 2-14>와 같이 순단파복사량과 순장파복사량과의 차이와 동일하다.



<부록그림 2-2> 복사량 구성요소

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad \text{(부록식 2-14)}$$

R_n : 순복사량(MJ/㎡·day)

R_{nl} : 순단파복사량(MJ/㎡·day)

R_{nl} : 순장파복사량(MJ/㎡·day)

순단파복사량은 <부록식 2-15>과 같이 입사 복사량, 반사율을 이용하여 산정할 수 있다.

$$R_{ns} = (1-\alpha)R_s \quad \text{(부록식 2-15)}$$

R_{ns} : 순단파복사량(MJ/㎡·day)

α : 반사율(알베도), 초지의 경우 0.23

R_s : 입사복사량(MJ/㎡·day)

입사복사량은 지구 대기 밖 복사량과 상대 일조시간 간의 관계식인 Angstrom 식을 이용하여 <부록식 2-16>과 같이 산정할 수 있다.

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) \qquad \text{(부록식 2-16)}$$

Rs : 입사복사량(MJ/㎡ · day)

n : 실제 일조시간(hr)

N : 최대 가능한 일조시간 또는 일 일조시간(hr)

n/N : 상대 일조시간

R_a : 지구 대기 밖 복사량(MJ/㎡ · day)

a_s : 지표면에 도달하는 지구 대기 밖 복사량의 마찰을 표현하는 회귀상수

a_s+b_s : 지표면에 도달하는 지구 대기 밖 복사량의 마찰율(청명할 경우, n=N)

여기서, Angstrom 값 a_s, b_s는 대기조건(습도, 먼지 등)과 태양의 편위 등에 따라 변화한다. 따라서 이용 가능한 실측자료가 없고 검정(Calibration)이 불가능할 경우 a_s와 b_s 값은 0.25와 0.50을 사용하는 것이 바람직하다. 또한, n/N 비율은 운량(cloudiness)에 의하여 대략적인 산출을 할 수 있다. <부록표 2-2>는 운량과 n/N의 관계를 의미한다.

<부록표 2-2> 운량과 n/N 비율과의 관계

운량 (×10 %)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n/N 비율	1.00	0.90	0.80	0.75	0.65	0.55	0.50	0.40	0.30	0.15	-

운량이 없는 청명한 기상조건에서의 입사복사량(n=N)은 Angstorm 값의 이용 가능성에 따라 <부록식 2-17> 및 <부록식 2-18>을 이용하여 산정할 수 있다.

- 해수면 근처, as와 bs 값이 이용 가능할 경우

$$R_{so} = (a_s + b_s)R_a \quad \text{(부록식 2-17)}$$

R_{so} : 청명한 날의 입사복사량(MJ/㎡·day)

a_s+b_s : 지표면에 도달하는 지구 대기 밖 복사량의 마찰율

- as와 bs 값이 이용 불가능할 경우

$$R_{so} = (0.75 + 2\times10^{-5}z)R_a \quad \text{(부록식 2-18)}$$

z : 관측소 고도(m)

지구 대기 밖 복사량은 <부록식 2-19>와 같이 태양상수, 태양과 지구간 상대역거리, 일몰시간각, 위도, 태양편위 등을 이용하여 산정할 수 있다.

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\phi)\sin(\delta) + \cos(\phi)\cos(\delta)\sin(\omega_s)] \quad \text{(부록식 2-19)}$$

R_a : 지구 대기 밖 복사량(MJ/㎡·day)

G_{sc} : 태양상수 = 0.0820(MJ/㎡·min)

d_r : 태양과 지구간 상대역거리

ω_s : 일몰시간 각(rad)

ϕ : 위도(rad), 북반구 방향이 양

δ : 태양편위(rad)

여기서, 태양-지구간 상대 역거리(d_r)과 태양편위(δ), 일몰시간 각(ω_s)는 <부록식 2-20>과 <부록식 2-21> 및 <부록식 2-22>를 이용하여 산정할 수 있다. <부록식 2-20> ~ <부록식 2-21>에서 J는 1월 1일부터 12월 31일까지의 태양력 일수를 의미하고, <부록식 2-22>에서 X가 0이하일 경우는 0.00001의 값을 가지고, 0이상일 경우는 <부록식 2-23>을 이용하여 X 값을 산정할 수 있다.

$$d_r = 1 + 0.033\cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad \text{(부록식 2-20)}$$

$$\delta = 0.4093 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad \text{(부록식 2-21)}$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\phi)\tan(\delta)] \fallingdotseq \frac{\pi}{2} - \arctan\left[\frac{-\tan(\phi)\tan(\delta)}{X^{0.5}}\right] \quad \text{(부록식 2-22)}$$

$$X = 1 - [\tan(\phi)]^2[\tan(\delta)]^2 \quad \text{(부록식 2-23)}$$

순장파복사량은 <부록식 2-24>와 같이 Stefan-Boltzmann 상수, 온도, 증기압 등을 이용하여 산정할 수 있다.

$$R_{nl} = \sigma\left[\frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2}\right](0.34 - 0.14\sqrt{e_a})\left(1.35\frac{R_s}{R_{so}} - 0.35\right) \quad \text{(부록식 2-24)}$$

R_{nl} : 순장파복사량(MJ/㎡ · day)

σ : Stefan-Boltzmann 상수(4.903×10^{-9}MJ/k^4 · ㎡ · day)

$T_{max,K}$: 24시간 동안의 최대 절대온도(K=℃+273.16)

$T_{min,K}$: 24시간 동안의 최소 절대온도(K=℃+273.16)

e_a : 실제증기압(kPa)

R_s/R_o : 상대 단파 복사량(1.00 이하)

R_s : 순단파복사량(MJ/㎡ · day)

R_{so} : 운량이 없는 경우의 순단파복사량(MJ/㎡ · day)

6) 토양열플럭스

토양열플럭스는 순복사량에 비해 매우 작기 때문에 지표면이 식생으로 덮여 있고, 계산 시간간격이 24시간 이상일 경우 <부록식 2-25>를 이용하여 산정할 수 있다.

$$G = c_s\frac{T_i + T_{i-1}}{\triangle t}\triangle z \quad \text{(부록식 2-25)}$$

G : 토양열플럭스
c_s : 토양열용량
T_i : 시간 i에서의 대기온도(℃)
T_{i-1} : 시간 i-1에서의 대기온도(℃)
△t : 시간간격
△z : 유효토양깊이(m)

<부록식 2-25>는 시간간격에 따라 다음과 같은 3가지 세부적인 경우로 나누어 계산 할 수 있다.

- 시간간격이 1일 ~ 10일인 경우

토양열플럭스는 상대적으로 매우 작기 때문에 <부록식 2-26>과 같이 0으로 산정한다.

$$G_{day} \approx 0 \qquad \text{(부록식 2-26)}$$

- 시간간격이 1달인 경우

토양열용량을 2.1 MJ/㎥℃으로 가정하여 <부록식 2-25>을 <부록식 2-27>과 <부록식 2-28>을 이용하여 산정할 수 있다. Tmonth,i+1 값을 알 수 없을 때 <부록식 2-28>을 이용한다.

$$G_{month,i} = 0.07(T_{month,i+1} - T_{month,i-1}) \qquad \text{(부록식 2-27)}$$

$$G_{month,i} = 0.14(T_{month,i} - T_{month,i-1}) \qquad \text{(부록식 2-28)}$$

$T_{month,i}$: i월 평균대기온도(℃)
$T_{month,i-1}$: 이전 달의 평균대기온도(℃)
$T_{month,i+1}$: 다음 달의 평균대기온도(℃)

- 시간간격이 1시간 이하인 경우

주간 및 야간으로 나누어 주간에는 <부록식 2-29>을 야간에는 <부록식 2-30>을 이용한다.

$$G_{hr} = 0.1R_n \quad \text{(부록식 2-29)}$$

$$G_{hr} = 0.5R_n \quad \text{(부록식 2-30)}$$

Abstract

Development of Impact Assessment Model by Climate Chanage in Water Resources

1. Introduction

In recent years, global warming has emerged as a popular issue and become more evident. Under the BAU (Business-As-Usual) scenario which projects the future emission levels in the absence of changes in current policies, economics and technology, the global mean temperature rise are projected by 2℃ or higher around the year 2030. Consequently, the impact of global warming in various aspects have been investigated by many institutions, such as the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Among the various aspects of global warming, the impact on the terrestrial water cycle has been focused as one of the utmost important climate change policy issues because it directly affects the human settlement and ecosystem.

The shortages or scarcity of water resources and the associated environmental hazards have come up to the surface in most part of the world due to dynamic changes in human activities including immense human population growth thanks to the prolonged life expectancy, industrialization, and irrigated agricultural practices; moreover, more severe water shortage and scarcity are projected throughout the wider range of regions with the growth scenario that assumes the

continuous rapid industrialization and human population growth in developing countries. Therefore, more and more disputes associated with water resources shortage and scarcity, which directly limits a country's future economic development, are expected in this century.

Also, the global water cycles is one of the most important components in global climate and ecosystem due to the fact that all the water bodies, energy, atmospheric composition, and terrestrial and aquatic ecosystems are affected and changed in continuous interactions by the global water cycle. The importance of water cycle within the Earth system has been well defined and recognized by numerous institutions and organizations that it plays a crucial role as a mediator in the biosphere that affects the growth of vegetation, decomposition of organic matters, gas exchange process between the atmosphere and land surface while serving an important factor in human activities in regional, continental, and global scales as well (IGBP,1988, NASA & ESSC, 1998, and Eagleson, 1986).

This study collected and reviewed the global and regional climate modeling results under the SRES (Special Report on Emissions Scenarios), which is the IPCC's recommended scenario, to assess the impacts of global warming on the water cycle, and developed a long-term hydrological model based on soil moisture changes in order to achieve following goals:

- ○ To project the impact on water shortage caused by changes in water resources supply capacity and increased water demand under the changed future climate; and
- ○ To access the impacts on the growth of agricultural crops and on the ecosystem influenced by the change of water cycle in a 3-year period.

The scope of the study for the year 2004 is as below:

First, a set of climate database based on the IPCC's climate scenarios was created. GCM (Global Climate Model) results and RCM (Regional Climate Model) results that are in higher resolution required for regional impact studies under various SRES scenarios are collected to create a monthly or daily-scale dataset to be employed for the impact analyses and to carry out effective counter-measures.

Second, a Soil Water Balance Model (SWBM) was created reflecting the soil moisture changes by incorporating such techniques as Thornthwaite and Penman-FAO24 potential evapotranspiration methods to estimate the future potential run-off changes of the major river basins in the Korean peninsula. In ultimate, this effort was made to derive a raster-based mesh long-term hydrological model.

2. Methods

2.1. Climate Model Data and the Validation

In order to predict the future climate, this study employed 10 SRES scenarios and RAMS regional climate model of the National Institute for Environmental Studies of Japan under 4 general circulation models (CCSRNIES, CCCma, CSIROMK2, HadCM3) supplied by the IPCC Data Distribution Center for the water resources impact analysis (refer to Table 2-1).

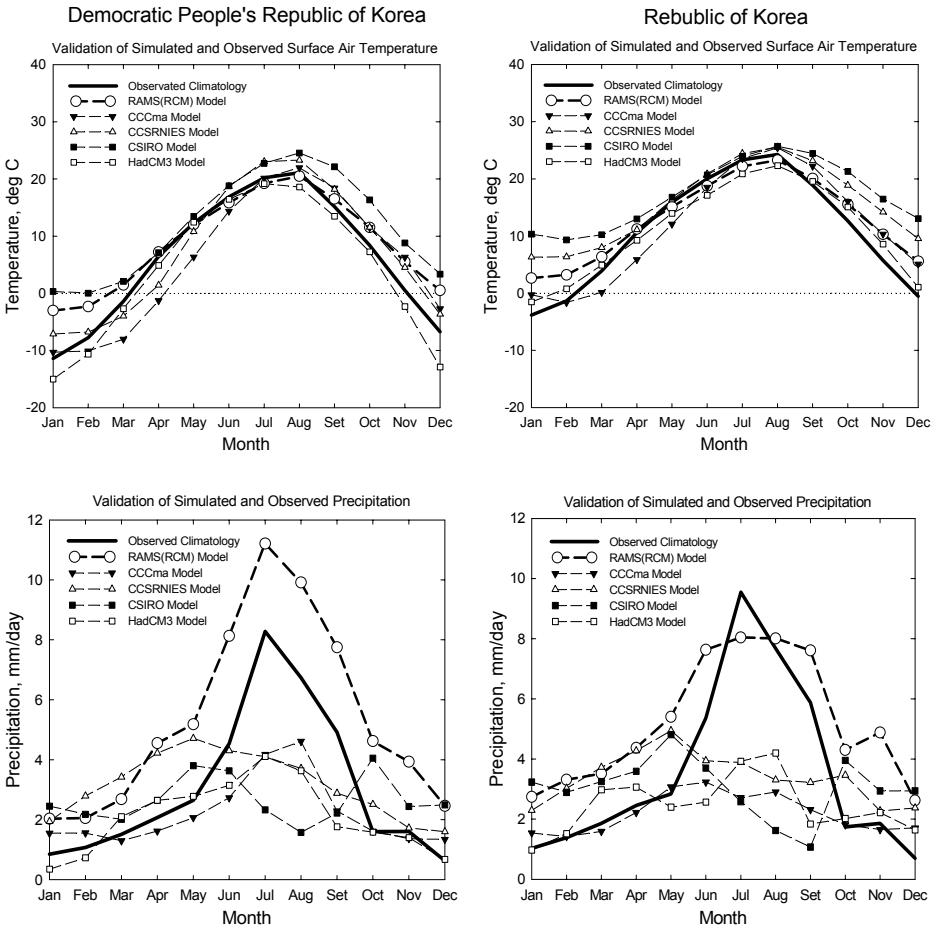
<Table 2-1> Climate Models Employed for the Analysis

Center	Acronym	Model	SRES Scenario				Period	Time Step
National Institute for Environmental Studies (NIES)	NIES/RAMS	NIESRAMS RCM	-				1981-1990 2041-2050	Daily
Hadley Centre for Climate Prediction and Research	HCCPR	HADCM3		A2		B2	1950-2099	Monthly
Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization	CSIRO	CSIRO-Mk2	A1	A2	B1	B2	1961-2100	Monthly
Canadian Center for Climate Modelling and Analysis	CCCma	CGCM2		A2		B2	1900-2100	Monthly
Center for Climate Research Studies (CCSR) National Institute for Environmental Studies (NIES)	CCSR/ NIES	CCSR/NIES AGCM +CCSR OGCM	A1	A2	B1	B2	1890-2100	Monthly

An impact assessment that only takes account mean temperature might be able to utilize a climate scenario derived from either GCM outputs or RCM outputs to create a reasonable result. However, if an assessment is conducted with a consideration of precipitation or in a regional scale, it is important to understand the fluxes while employing either GCM or RCM rather than placing a significance on the result of a model due to the fact that GCM and RCM will result climate prediction results with a significant range of differences; furthermore, an effort to understand the characteristics of each model should be given by evaluating the replicability of each model. In order to evaluate the replicability of each model, the regional monthly mean temperature and precipitation observation records of 10 years (1981-1990) and the simulated model result were compared in <Figure 2-1>. The seasonal temperature variability simulation employing GCM and RCM resulted similar values to the actual observation records in both the Republic of Korea (South Korea) and Democratic People's Republic of Korea (North Korea). However, the numerical simulation results for winter seasons (December, January,

and February) showed higher output values than the actual observed temperature data. In particular, the numerical simulation with CSIRO model predicted about 10℃ higher temperature variability while the result with RAMS was found within the range of which the GCMs have generated. Although the numerical simulation results shown in <Figure 2-1> do not provide the spatial distribution of the temperature variability, it nevertheless implies that the winter temperature could deviate within a range of ±10℃ from the actual observations; therefore, this study suggests to employ the 'climate overlay technique,' which accretes the temperature variability to the actual observation rather than imposing a full significance to the numerical simulation model results.

For precipitation, it turned out to be that RAMS was the only model that senses the intensive rainfall concentrated in summer while the spatially interpolated GCMs did not properly sense the seasonal change of precipitation. RAMS data generated a higher precipitation projection than the actual observations all year round and predicted more rainfalls in North Korea. This tendency of which RAMS projects a higher winter precipitation than GCMs may be caused by the fact that RAMS model was designed to simulate encountering large scale atmospheric events, such as El Niño, and changes in equatorial circulation increase rainfalls in the western Pacific rim areas (Koji Dairaku, 2004). Therefore, this study suggests to utilize a technique which applies the precipitation change rate generated by models to the present precipitation observations rather than employing the model simulation results for the impact model.



<Figure 2-1> Observed and Predicted Monthly Mean Temperature and Precipitation

2.2. Basic Biophysical Data

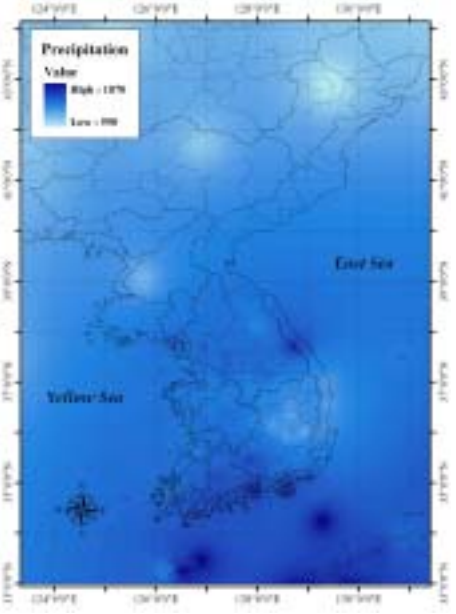
The grid-scale potential evaporation model and water balance model require several biophysical datasets as input at 0.05° (longitude×latitude) spatial scale. In this study, these biophysical datasets were produced over the study area, the entire

Korean peninsula. < Figure 2-2 > shows the typical biophysical inputs required to drive the models employed in this study.

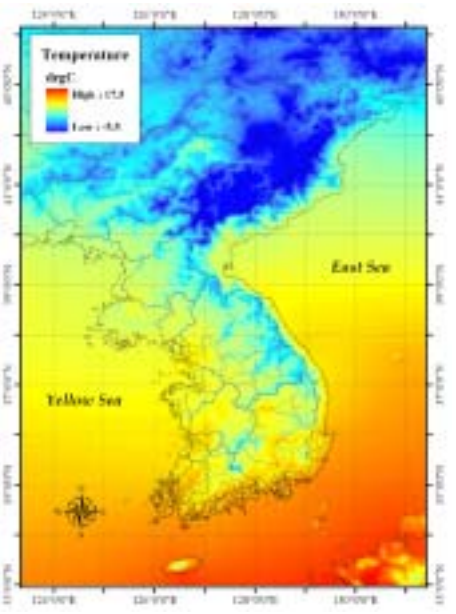
The temperature and precipitation datasets were respectively produced by the krigging spatial interpolation technique on the 0.05° mesh grid with the Korea Meteorological Administration's monthly mean precipitation dataset and UNEP's Global Historical Climatology Network Data (GHCN)'s temperature data incorporating the lapse rate.

The watershed and stream network data were produced with the GTOPO30 digital elevation model in a 30-sec mesh grid. Each produced watershed was assigned by the Pfafstetter watershed coding system (Pfafstetter, 1989) to identify the upstream and downstream watersheds.

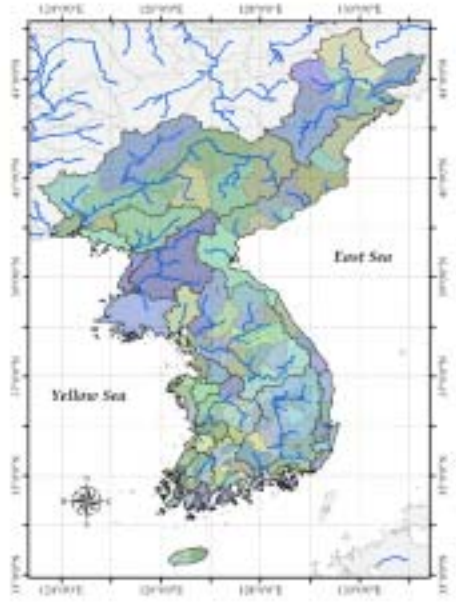
Lastly, the field capacity dataset was produced with the soil property, vegetation rooting depth and Batjes' PTF (different pedo-transfer functions) rules. The soil texture data and soil depth data were collected from the detailed soil map and the vegetation data was derived from the land cover classification map of the Korean Ministry of Environment. To acquire the field capacity data in North Korea, the FAO's World Soil Moisture Capacity Map (1996) in 2-level (0-30cm and 30-100 cm) at a 5×5 arc minute resolution was employed.



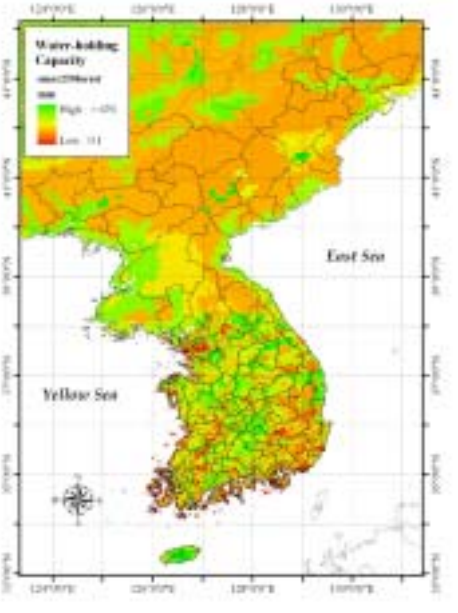
Precipitation (mm/yr)



Temperature (℃)



Watershed and Stream Network



Field Capacity (mm)

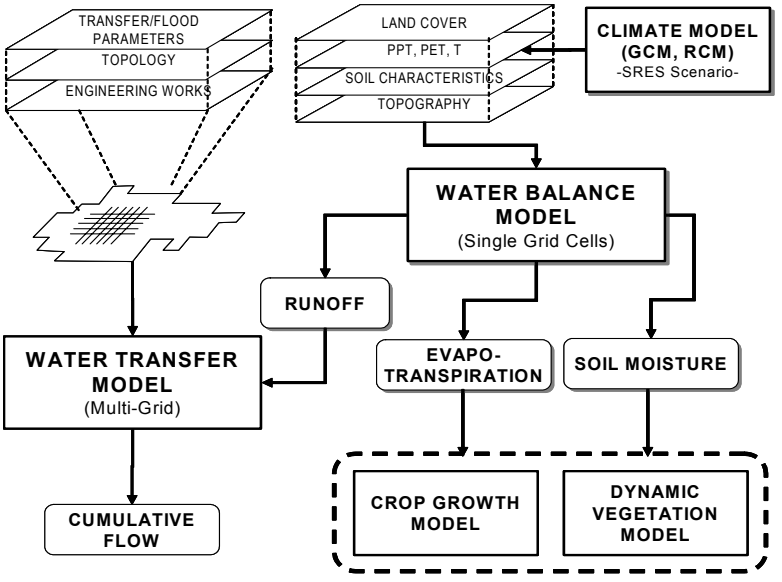
<Figure 2-2> Input datasets used to simulate water balance

2.3. Soil Water Balance Model(SWBM)

The SWBM (Vorosmarty et al., 1989, 1998; AIM, 1997) was applied to each 0.05° grid cell over the Korean Peninsula. We specifically estimated the spatial and temporal variations of precipitation, evapotranspiration, soil moisture and runoff using individual grid cells.

In this study, 2 potential evapotranspiration (PET) methods, and Thornthwaite and Penman-FAO24 were tested. For each PET method, PET was computed using climate and other biophysical drivers. Actual evapotranspiration (ET) relative to PET is calculated as an asymptotic function of relative soil wetness. The potential range of rooting depth is from 0.1 to 2.5 m and generally 0.5 m depth class associated with cultivated land. The dominant vegetation assigned to each 0.05° grid cell was used in conjunction with soil texture to assign a characteristic water holding capacity. The climate drivers are applied at a monthly time step but daily time step is also possible to simulate sub-monthly soil wetting and runoff events. Snow melt is determined from temperature and topographical relations. Runoff and snow melt are partitioned to either surface runoff or a linear control volume that simulates ground water flow. The model run from the initial condition with zero water in any of grids, to a dynamic steady state under which all monthly pools and fluxes fall within ±0.1% of their previous annual cycle values. < Figure 2-3 > shows the conceptual structure of SWBM and WTM.

.



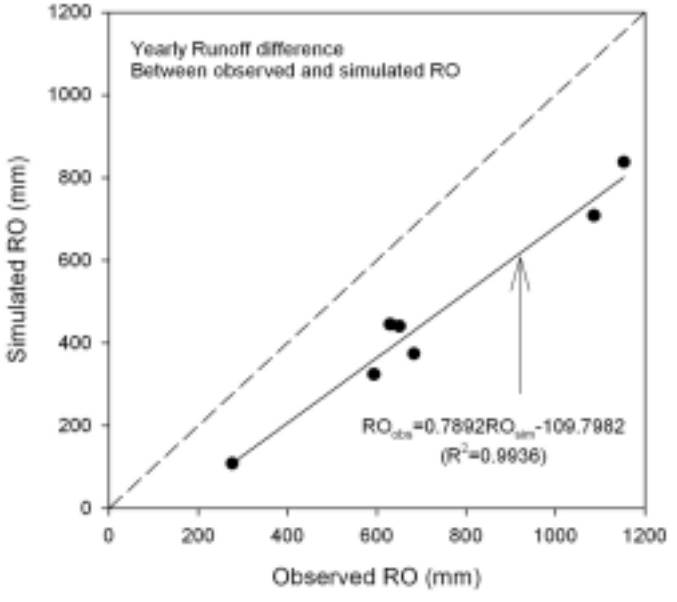
<Figure 2-3> Conceptual Structure of Soil Water Balance Model

2.4. Validation of Runoff

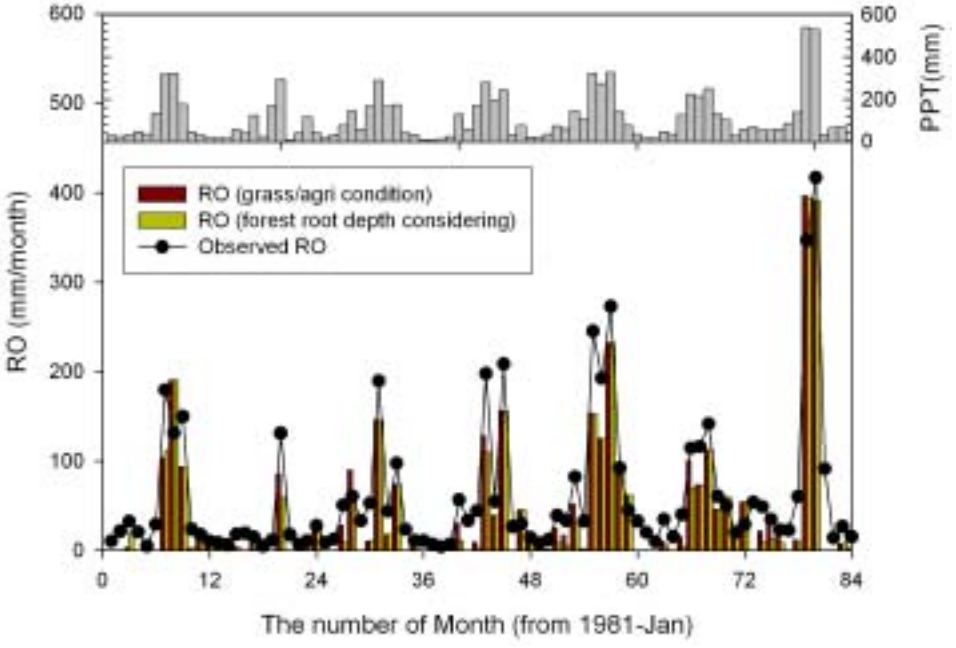
The runoff estimated by SWBM was compared with observations in Daechung dam basin. The discharge in Daechung dam basin has been monitored since September 1979. The watershed basin occupies a catchment area of 4,134㎢. The watershed's runoff was estimated by the daily water inflow volume records from 1981 to 1987 after converting it into a monthly scale; then, divide the monthly inflow volume by the catchment area. <Figure 2-4> shows the comparison between the yearly runoff observations and the calculated runoff amount by SWBM. Notice that the runoff amount estimated by SWBM turned out to be smaller than the actual observations. It implies that the initial field capacity needs to set lower. However, SWBM appears to be optimized by simple calibration with some

comparative studies due to the fact that there was a relatively strong linear correlation (R2 =0.9936) between the SWBM result and the runoff observations.

For the optimization of SWBM, the rooting depth was adjusted and calibrated until the difference between the yearly runoff estimate and the actual observation falls within a ±10% range. <Figure 2-4> shows the comparative monthly runoff simulation results in Daechung dam basin of both cases when the rooting depth of cultivated land is only considered as an input parameter to the model and when the rooting depths of cultivated land and forest are both considered. In <Figure 2-5>, the least runoff was projected when the rooting depth of forest was taken account along with that of cultivated lands; in other words, the rooting depth of forest appears to be a strong factor which influences the runoff in dry seasons although SWBM is not able to simulate the delay period.



<Figure 2-4> Simulated RO vs Observed RO in Daechung Dam site



<Figure 2-5> Monthly Runoff Simulated by SWBM by Rooting Depths

3. Results

3.1. Future Climate Change

<Figure 3-1> and <Figure 3-2> show the ranges of future climate change from the year 2041 through 2050 in the Korean peninsula with the IPCC's climate change scenarios and RAMS regional climate model results of Japan National Institute of Environmental Studies. RAMS regional climate model generates a higher variability of climate change than those GCM simulation results under SRES scenarios. The highest climate change variability was simulated during the winter

seasons. Therefore, a comparative review with the studies conducted by other institutions is recommended.

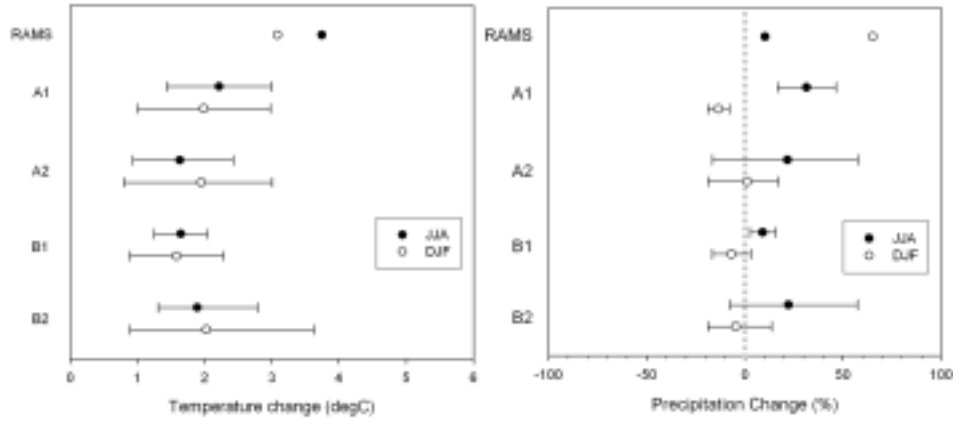
The temperature variability simulated with RCM was projected that the temperature rise in summer will be approximately 0.5℃ higher than winter in South Korea. The temperature variability in winter simulated with the RCM was found within a range of winter mean temperature fluxes (1~3℃) predicted by GCMs; however, the summer temperature variability was predicted to rise about 4℃, which exceeds the the temperature fluxes (1~3.5℃) of GCMs. The simulated mean temperature fluxes under B1 scenario turned out to be smaller than that under other scenarios.

With the RAMS regional climate model, the precipitation variability in South Korea was predicted to increase more than 60% in winter while approximately a 10% increase was predicted in summer. The summer precipitation fluxes predicted by the RCM fall within the mean precipitation flux range of the SRES scenarios (-10~55%); however, the winder precipitation fluxes turned out to be approximately 60% which exceeds the mean precipitation flux range of the SRES scenarios (-20~20%).

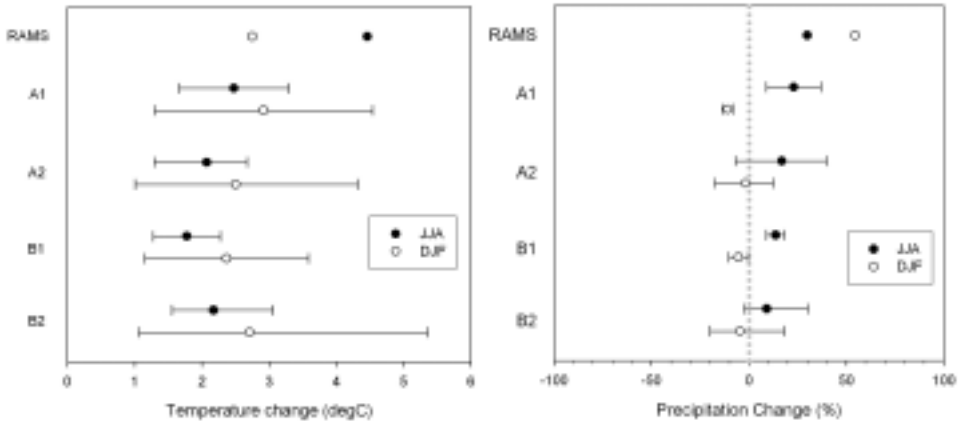
The temperature variability simulated with RCM was projected that the temperature rise in summer will be approximately 1.5℃ higher than winter in North Korea while the SRES scenarios predict a higher mean temperature rise in winter. The winter mean temperature variability predicted by the RCM was approximately 2.7℃ which falls within the winter temperature flux range of the SRES scenarios (1~5.3℃). However, the summer mean temperature variability with the RCM turned out to be 4.3℃, which exceeds the summer temperature flux range of the SRES scenarios (1~3.2℃).

A noticeable increase of precipitation in North Korea was predicted by the RCM. A 30% increase of the precipitation in summer in North Korea was predicted and

a 55% precipitation increase in winter. The summer precipitation variability predicted by the SRES scenarios was found within a range of -10~40%, and the winter variability was in a range of -20~20%. Therefore, to define such difference in seasonal precipitation variabilities, a further comparative review of various studies on model simulation with RCMs is recommended.



<Figure 3-1> Projected Ranges of Future Climate Change in South Korea



<Figure 3-2> Projected Ranges of Future Climate Change in North Korea

<Table 3-1> analyzes and summarizes the future climate change on the Korean peninsula with regional and seasonal classifications. The most stable development scenario in the Korean peninsula turned out to be the B1 scenario, which indicated the significant positive synergies between the development of environmentally-sound technologies, sustainable global society, and climate change.

<Table 3-1> Climate Impact Analysis on the Korean Peninsula

Region \ Scenarios		Temperature					Precipitation				
		RAMS	A1	A2	B1	B2	RAMS	A1	A2	B1	B2
Summer (JJA)	S.Korea	+++	0	0	0	0	0	++	+	0	+
	N.Korea	+++	+	0	0	0	+	+	+	0	0
Winter (DJF)	S.Korea	+++	0	0	0	0	+++	0	0	0	0
	N.Korea	++	+++	+	+	++	+++	0	0	0	0

	---	--	-	0	+	++	+++	Unit
Temp. change				<2.25	2.25 ~2.5	2.5 ~2.75	>2.75	increase, ℃
Prep. change	<-45	-45~-30	-30~-15	-15~15	15~30	30~45	>45	% change

Data & Analysis: Performed based on the predicted monthly mean temperature and precipitation from the year 2040 to 2050.

3.2 Future Runoff Change

The future runoff change was analyzed by employing SWBM on the area between latitude 33°~44° 30′ and longitude 123° 30′~131° 30′. To validate and predict the runoff change of present years (1981~1990) and that of future years (2041~2050), 10 major watershed basins in both North Korea and South Korea were

analyzed. The future climate was simulated and analyzed employing 4 IPCC/SRES scenarios, 10 GCM results, and RAMS regional climate model of Japan National Institute for Environmental Studies.

<Figure 3-3> shows the runoff of present years and the simulated runoff change in the future years. In <Figure 3-3>, (a) shows the 10-year mean runoff of present years, and (b) shows the simulated future runoff generated by NIES/RAMS regional climate model indicating the 607mm of the mean runoff in South Korea and 530mm in North Korea; however, a significant runoff increase in Pyeongan and Hwanghae provinces in North Korea was predicted. (c) shows the runoff changes between the present years and future, which predicts that a noticeable runoff increase in the central to northern regions of North Korea and a decline of runoff around the Hamkyungbuk-do province including the Tumen river basin area.

In southern regions, the changes in runoff was predicted to be marginal; however, some decline on runoff was predicted in the southern coastal regions and inland areas in Jeolla provinces. (d) shows the geographical locations of 10 major watershed basins chosen in this study. The predicted runoff changes by each climate change scenario are illustrated and summarized in <Table 5-16> respectively.

<Table 3-2> shows the results of the simulation to predict the runoff and precipitation changes caused by climate change in major watershed basins. In South Korea, the B1 scenario was predicted to bring the least magnitude of impact on the runoff and precipitation (-5.4%) while the A1 scenario was predicted to bring the most severe impact(16.3%). In North Korea, the B1 scenario turned out to associate the least magnitude of impact (0.6%); however, RAMS regional climate model projected a notable 41.9% variability on runoff.

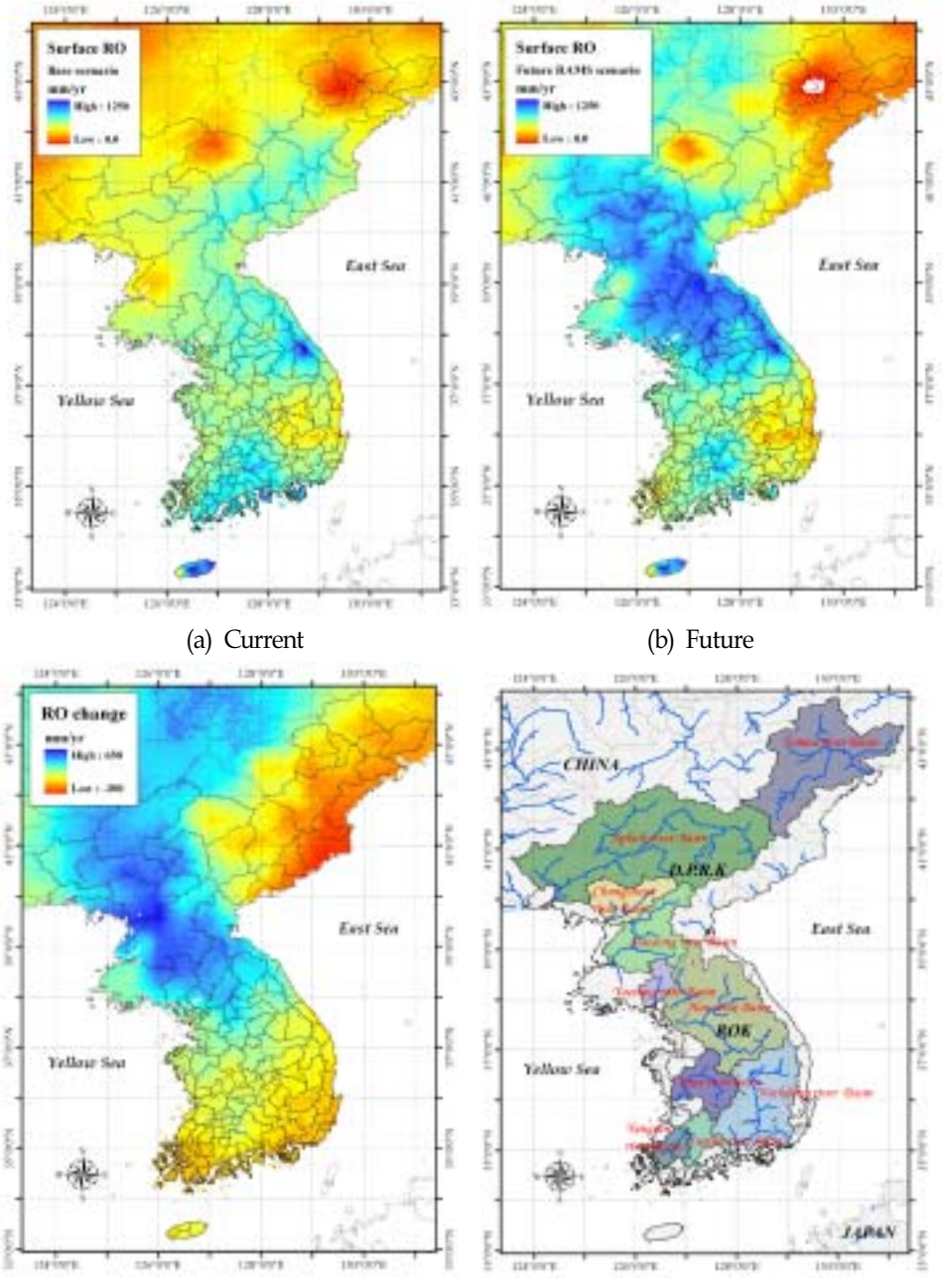
<Table 3-2> Runoff and Precipitation Changes by Scenarios

	South Korea				North Korea			
	Runoff change(%)		Prep. change(%)		Runoff change(%)		Prep. change(%)	
Scenarios	mean	range	mean	range	mean	range	mean	mean
A1	16.3	14.3~18.2	14.8	12.2~17.4	6.4	4.9~7.8	10.5	7.2~13.9
A2	12.5	-18.7~26.9	11.0	-0.2~18.5	5.0	-17.2~27.9	7.4	0.8~17.1
B1	-5.4	-11.9~1.1	2.6	-2.7~7.9	0.6	-5.1~6.3	4.7	-1.5~11.0
B2	9.9	-23.9~34.6	10.4	-0.8~21.5	-3.8	-26.5~15.4	3.2	-2.6~11.1
RAMS RCM	15.0	-	20.0	-	41.9	-	30.6	-

<Table 3-3> shows the projected runoff changes of 10 major watershed basins in the Korean peninsula. The B1 scenario turned out to associate the least magnitude of impact while RAMS regional climate model predicts a heavy increase of runoff in the Aplock, Chungcheon, Daedong, and Yesung River basins in North Korea, and Han and Geum River basins in South Korea.

The runoff change predictions of major watershed basins in the Korean peninsula simulated by the IPCC/SRES climate change scenarios show that the B1 scenario will create the least impact on the runoff while the A1 scenario will bring the most adverse impact on the runoff in the Korean peninsula refer to <Table 5-16>.

In South Korea, an increase of the yearly runoff and runoff in the rainy season was predicted under all scenarios except the B1 scenario. In particular, the A1 scenario was predicted to lead to serious adverse impacts including floods in the Han River and Geum River basins due to the fact that a noticeable increase of runoff during the rainy season was predicted.



(a) Current (b) Future

(c) Runoff Change (d) Major Basins

<Figure 5-9> Estimated Future Runoff change based on Regional Climate Model (RAMS, mm/yr)

In North Korea, the B1 scenario resulted the least runoff change. A decline in the runoff in Tuman River was also predicted. However, more severe impacts on runoff was predicted in North Korea. The simulation with the RCM predicted a runoff increase higher than 50% at all watershed basins except the Tuman River basin.

<Table 3-3> Impacts on Runoff at Major Watershed Basins

		Yearly mean					Wet season				
		RAMS	A1	A2	B1	B2	RAMS	A1	A2	B1	B2
SKOR	Han	++	+	+	0	0	+	++	+	0	0
	Nackdong	0	+	0	0	0	-	+	+	0	+
	Kum	+	+	+	0	0	0	++	+	0	+
	Youngsan	0	0	0	0	0	-	0	+	0	0
	Sumjin	0	0	0	0	0	0	0	+	0	+
NKOR	Aplock	+++	0	0	0	0	++	0	0	0	-
	Tuman	-	0	0	0	-	-	-	-	0	-
	Chungcheon	+++	0	0	0	0	+++	0	0	0	-
	Deadong	+++	0	0	0	0	+++	0	0	0	0
	Yesung	+++	+	0	0	0	+++	+	+	0	0

Runoff change	---	--	-	0	+	++	+++	unit
	<-45	-45~-30	-30~-15	-15~15	15~30	30~45	>45	% change

4. Discussions and Conclusions

The major findings in this study are as stated below:

First, a numerical simulation with RCM predicts that the temperature rises about 3.7℃ in the summer and 3℃ in the winter while the SRES scenarios project the temperature rise within a range of 1~3.5℃ in the summer and 1~3℃ in the winter. In North Korea, the RCM predicts that the temperature rise would be about 4.3℃ in the summer and 2.7℃ in the winter while the SRES scenario projected the mean temperature flux range to be 1~5.3℃ in the winter and 1~3.2℃ in the summer.

Second, the RCM and SRES scenario resulted different projections in precipitation variability. While RCM projects the future precipitation variability in South Korea to be about 10% in the summer and 65% in the winter, the SRES scenario projects the mean precipitation flux range to be -10~55% in the winter and -20~20% in the summer. In North Korea, the RCM projected the precipitation variability to be about 30% in the summer and 55% in the winter while the SRES scenario predicted -10~40% in the summer and -20~20% in the winter.

Third, among four IPCC/SRES scenarios, the B1 scenario turned out to be the development road map with the minimum impact on runoff. Moreover, a heavier impact on runoff is predicted in South Korea than North Korea. The RCM generated a higher future runoff projection than the SRES scenarios in general, and showed an opposite result to the SRES projections in North Korea.