

KEI/2000

가

-

-

2000. 10



한국환경정책·평가연구원
Korea Environment Institute

序 言

기후변화는 현대 문명과 경제사회발전의 기저를 형성하고 있는 기존의 생활양식과 경제발전방식에 많은 변혁을 요구하고 있습니다. 특히 우리 나라와 같이 경제기반이 화석에너지에 크게 의존하고 있는 국가에게는 기후변화에 관한 정책변화가 경제, 자연생태계를 포함한 다양한 분야에 더욱 큰 영향을 줄 것으로 예측됩니다. 이에 따라 기후변화의 영향을 예측하고 이에 따른 대책을 마련하는데 정부·학계·민간 등에서 많은 노력이 있었으나 이는 산업 및 경제활동과 기후변화의 상호 직접적인 영향을 예측하고 평가하는데 주로 초점을 두어 왔습니다.

기후변화에 따른 생태계 변화 예측과 이에 대한 생태계 보전분야는 우리가 추진해야 할 다른 정책분야입니다. 그러나 이에 대해서는 우리 나라에서 체계적으로 이루어지지 못하고 있는 실정입니다. 본 연구원에서는 이러한 현실을 인지하고 기후변화에 따른 생태계 보전정책사업의 일환으로 산림생태계부문의 영향을 예측하고, 이에 따른 경제적인 영향을 분석하며 정부차원의 대응방안을 마련하기 위한 본 연구를 시작하였습니다.

본 연구에서는 영향연구의 국제적인 동향 및 향후 연구에서 수행할 모델개발연구를 위해 필요한 자료를 수집·분석하여 우리 나라에 적합한 모델을 선정하고 개발하는 것을 제시하였습니다. 이러한 우리의 견해는 정부와 여러 연구기관과 일치하지 않는 부분이 있습니다. 그러나 이러한 차이점은 다양한 생태계의 영향을 파악하는데 다른 방법론을 사용한 데 기인한 것이며, 이와 같은 다양한 접근방법론들이 정확한 영향을 예측하고 정부 정책을 수립하는데 기초자료로 큰 도움이 될 수 있을 것입니다. 본 보고서가 기후변화에 따른 산림생태계 부문의 영향을 분석하고 대응방안을 수립하는데 기초자료로 널리 활용되기를 바라는 동시에 기후변화에 따른 여러 문제점들에 대한 이해의 폭을 넓히는 데 기여되기를 바랍니다.

끝으로 본 연구를 맡아 성실히 수행하고 좋은 결과를 도출한 본 연구원의 박용하 박사, 전성우 박사, 최재용 박사, 정휘철 연구원과 김정원 연구원에게 감사를 표합니다. 아울러 본 연구의 내용은 본 연구원의 공식견해가 아닌 연구자 개인의 의견임을 밝혀드립니다.

韓國環境政策·評價研究院

院 長 李 相 垠

목 차

I. 서론	1
1. 연구의 배경 및 필요성	1
2. 연구의 목적 및 범위	2
II. 기후변화의 지구 및 한반도 생태계 영향 및 연구성과 평가	4
1. 지구차원의 영향 및 연구성과	4
2. 한반도차원의 영향 및 연구 성과	5
3. 정부차원의 대응체계	8
III. 기후변화의 지구 및 국가 생태계 영향 저감을 위한 국제 동향	10
1. 기후변화협약	11
1.1. 기후변화협약문에 나타난 생태계 영향 평가	11
1.2. 당사국 회의	12
2. 기후변화에 관한 정부간 패널기구(IPPC)	14
2.1. IPPC 정기 보고서	15
2.2. IPPC 특별 보고서와 기술보고서	17
2.3. Workshop	18
3. 지역차원에서의 노력-APN	18
4. 미국	21
4.1. 기본전략	21
4.2. 국가기후계획법 제정	21
4.3. 연구 프로그램	24
5. 일본	27
6. 오스트리아	31
7. 네덜란드	31
8. 기후변화가 생태계에 미치는 영향 평가에 관한 종합분석	31
IV. 기후변화의 산림생태계 영향평가 모형 개발 상황 및 평가	34
1. 모형개발의 배경	34
2. 기후변화로 인한 생태계 영향 예측 및 평가 모형 현황 및 분석	35
2.1. 광역차원의 영향예측 및 평가	36
2.1.1. 대기대순환모형	36
2.1.2. 물 균형 모형	36
2.1.3. 식생영향모형	37
2.2. 지역차원의 영향 예측 및 평가	45
2.2.1. 지역기후모형	45
2.2.2. 물 균형 모형	47

2.2.3. 식생영향모형	47
3. 연구사의 시사점	49
V. 기후변화의 한반도 산림생태계 영향평가모형 구조와 내용	51
1. 연구방법	51
1.1. 위성영상자료를 이용한 기초자료의 구축 및 검증	52
1.1.1. 토지피복정보의 구축 및 검증	52
1.1.2. 식생부문정보의 검증 및 구축	56
2. 기후변화로 인한 식생부문의 영향예측 및 평가	56
2.1. 대기대순환모형	58
2.2. 물 균형 모형	59
2.2.1. 잠재 증발산량(Potential Evapotranspiration)	60
2.2.2. 물 균형 모델(Water Balance Model)	64
2.3. 식생영향모형	68
VI. 연구결과 요약 및 향후 추진방안	71
참고문헌	73

표목차

< 표 II-1 > 기후변화에 대응하기 위한 주요 연구개발사업	7
< 표 III-1 > 기후변화 관련 국제회의 연대기	10
< 표 III-2 > 기후변화협약 당사국 회의 개최지역 및 시기	13
< 표 III-3 > IPPC 제3차 보고서중에서 제2실무그룹(WGII)에서 작성하고 있는 보고서의 개요	16
< 표 III-4 > IPCC 특별 및 기술 보고서 목록	17
< 표 III-5 > START의 설립목적, 주요연구조직 및 내용	19
< 표 III-6 > 국가기후계획(NCP) 수립 추진 과정	23
< 표 III-7 > 미국의 USGCRP 내역	24
< 표 III-8 > 미국의 1999년과 2000년 연구계획 요약	25
< 표 III-9 > 미국의 GCRP의 주요 연구결과 보고서	26
< 표 III-10 > 일본의 FRSGC 프로그램 내역	29
< 표 III-11 > 종합계획을 수립하기 위한 지구온난화 감시, 예측, 영향평가 기술개발에 대한 외국의 연구현황	32
< 표 IV-1 > 현재와 2100년 기후변화로 인한 식생분포 결과	38
< 표 IV-2 > 산림부문의 기후변화영향평가 기법별 개요 및 요약	44
< 표 IV-3 > 산림·식생부문 영향예측 목적에 따른 기술	45
< 표 V-1 > 현재 전세계적으로 활용되는 GCM과 본 연구에 활용한 GCM	59
< 표 V-2 > 운량과 비율과의 관계	63
< 표 V-3 > Holdridge 모형의 식생분류표	70

그림 목차

< 그림 I-1 > 3단계 연구추진 계획	2
< 그림 II-1 > 기후변화협약에 대응하는 우리 나라 실무대책 조직도	9
< 그림 III-1 > 지역네트워크 구성 현황	20
< 그림 III-2 > 미국의 국가기후계획(NCP) 추진체계	22
< 그림 IV-1 > AIM/Impact 모형의 기후변화로 인한 식생분포 변화 결과물	39
< 그림 IV-2 > 생태계 모형으로 예측한 현재와 2080년의 지구식생분포도	40
< 그림 IV-3 > 현재와 2080년의 유형별 식생면적변화	41
< 그림 IV-4 > BIOME 3 모형에 의한 식생부문의 영향	42
< 그림 IV-5 > AIM 통합모형의 개요	43
< 그림 IV-6 > 산림생태계에서의 탄소순환모형	48
< 그림 IV-7 > 산림생태계 변화예측모형 구조사례	49
< 그림 V-1 > 연구의 개념적 흐름	51
< 그림 V-2 > 토지피복분류정보 구축 및 검증의 흐름	52
< 그림 V-3 > 식생부문정보 검증, 구축 연구의 흐름	57
< 그림 V-4 > AIM/Impact 기후변화영양예측 및 평가 모형의 기본 골격	58
< 그림 V-5 > 물 균형 모형의 개요	60
< 그림 V-6 > 물 균형 모형의 Data 흐름도	67
< 그림 V-7 > 기후와 식생영향예측 모형의 흐름	69

I. 서론

1. 연구의 배경 및 필요성

브라질 리우데자네이루에서 1992년에 개최된 유엔환경개발회의(United Nations Conference on Environment and Development, UNCED)에서 우리 나라를 비롯한 154개 국가가 기후변화에 관한 국제연합기본협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)에 서명함으로써 지구온난화 방지문제가 지구환경보전의 핵심과제로 대두되었다. UNFCCC에 현재 181개국이 가입해 있으며, 우리 나라는 1993년 12월에 가입하였다.

1993년에 체결된 UNFCCC에서 기후변화란 “지구온난화에 의하여 기후변화가 발생한 몇 십 년부터 몇 세기동안을 포함하여 기후시스템을 대기권, 수권, 생물권, 그리고 지권의 총체성 그리고 그들의 상호작용”이라고 정의하였다. 그러나 최근 들어 기후변화의 개념은 과학논문과 국제 토론회에서 여러 가지 다른 의미로 해석되고 있다. 한 예로 기후변화를 그 원인이 어디에 있는 전형적인 기후의 정의를 나타내는 30년 평균기후의 변화로서 단순히 표현하려는 견해도 있다(IPCC, 1996a). 이와 같은 기후변화에 대해 1996년에 발간된 기후변화에 관한 정부간 패널기구(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 제2차보고서(Second Assessment Report)에서는 기후변화란 “직접적 또는 간접적으로 전체 대기의 성분을 바꾸는 인간 활동에 의한 그리고 비교할 수 있는 시간동안 관찰된 자연적 기후변동을 포함한 기후의 변화”라고 정의하고 있다(IPCC, 1996b).

세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)와 국제연합환경계획(United Nations Environment Programme, UNEP)은 1988년에 지구기후변화의 영향 및 문제점을 인식하여 IPCC를 설립하였다. IPCC는 여러 국제협력기구 및 세계 각국들과 공동으로 기후변화에 대처하기 위해 국가 기후계획 수립, 국제협약 체결과 국제 공동연구 수행 등 다양한 노력을 해오고 있다. 이러한 국제 공동연구는 크게 3가지 주제로 구분된다.

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

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

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

전세계적으로 화석연료사용량의 증가, 토지이용의 급격한 변화 등 인간활동으로 인한 온실

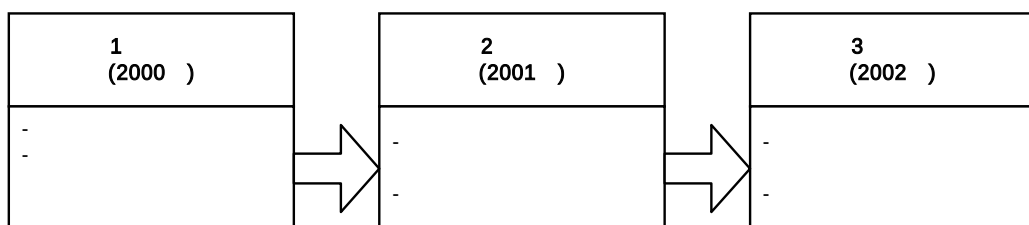
가스의 배출량 증가로 최근 지구온난화에 따른 이상기후 현상이 빈번히 나타나고 있다고 SAR(IPCC, 1996b)는 보고하고 있다. 특히 WG I 과 II 의 통합영향연구에서 온실가스가 현 상태로 아무런 대책 없이 계속 방출되는 시나리오(Business-as-Usual, BAU)에 의하면, 향후 매 10년마다 지구 평균기온은 0.3℃ 증가하고, 이에 따라 해수면도 매 10년마다 6cm 상승할 것으로 예측되고 있다(Street and Semenov, 1990). 또한 IPCC의 제2차 보고서(1996b)에 의하면 산업 혁명이전과 1992년의 주요 온실기체 농도를 비교하면, 이산화탄소가 280ppm에서 360ppm, 메탄이 700ppb에서 1,720ppb로 각각 증가하여 19세기말 이후 지구평균기온을 0.3℃~0.6℃ 상승시켰으며, 해수면도 10cm~25cm 상승시킨 것으로 조사·보고되고 있다. 이와 같이 영향연구가 진행됨에 따라 모형이 개선됨에 따라 영향예측결과의 신뢰성이 높아지며 정확한 결과를 도출하고 있다.

그럼에도 불구하고, 지구 온난화가 우리 나라의 생태계에 미치는 영향에 대해서는 연구가 미흡하다. 우리 나라는 그 동안 선도기술사업(G7 Project)의 일환으로 1990년대 초부터 기후변화에 따른 기후변화 예측기술 등에 대해서 연구사업을 추진하여 왔으며, 그 기후변화에 따른 생태계 영향을 평가할 수 있는 평가체계를 구축하기 위한 사업(국립환경연구원, 2000)을 추진하고 있으나, 구체적으로 기후변화가 생태계에 미치는 영향을 평가하고 예측할 수 있는 체계가 마련되어 있지 못한 실정이다. 이러한 배경을 볼 때 기후변화로 인한 생태계 부문의 영향을 평가하고 대응방안을 연구하는 것은 시급히 진행되어야 할 과제이다.

2. 연구의 목적 및 범위

기후변화에 따른 국가의 대응체계 구축을 위한 흐름은 이미 국립환경연구원 (2000, 안)에서 구체적으로 제시되어 있다. 이에 의하면 정부의 국가전략의 전체적인 흐름은 기후변화의 원인 물질 배출, 이로 인한 기후변화와 기후변화로 인한 자연 환경에의 영향 및 사회 경제에의 영향과 이러한 영향을 대응할 수 있는 체계로 구성되어 있다.

본 연구의 목적은 기후변화에 따른 생태계 부문의 영향을 분석하고 평가하기 위하여 < 그림 I-1 >과 같이 3단계의 연구 일정을 수립하였다.



< 그림 I-1 > 3단계 연구추진 계획

제1차 연도 연구(2000년도)에서는 지구 온난화에 따른 우리 나라 생태계의 변화 예측 모형 연구와 관련된 국제 협약의 동향 파악을 중점적으로 추진하고자 한다. 지구 온난화에 따른 우

리 나라 생태계의 변화 예측 모형 연구부문에서는 생태계 영향연구의 범위를 산림부문으로 한정하여 기존에 국내·외에서 연구된 기후 및 기상자료와 시나리오 설정에 관한 연구를 수집하고, 이러한 기후변화에 따라 영향을 받는 생물체 군집변화에 대한 국내외 모형을 검토하고자 한다. 현재까지 우리 나라에서는 국외에서 개발되고 있는 생태계 평가·예측에 관한 모형들에 대한 심층 검토가 이루어진 바 없으므로, 이러한 자료의 수집과 검토는 국내에서 생태계 영향평가·예측 모형을 개발하기 위한 중요한 기초단계라 할 수 있다. 이미 개발된 모형을 검토함에 있어 이들 모형에서 사용하고 있는 모형인자, 연계되어 있는 기후 및 기상 변화에 대한 시나리오 자료 등을 수집 및 분석하고자 한다.

관련된 국제 협약으로는 기후변화협약과 생물다양성협약 등이 있다. 기후변화협약의 IPPC는 UNEP과 WMO에 의해 1988년 설립되어 기후변화에 의한 생태계 영향 평가를 주요 항목으로 다루고 있다. 따라서 기후변화협약과 IPPC에서 다루고 있는 기후변화에 따른 생태계 영향평가에 대해서 그간의 진행사항과 동향을 분석하고자 한다. 또한 생물다양성협약에서는 기후변화에 따라 생태계 변화에 따른 문제점이 제기되고 있으며, 이에 대한 논의가 이루어지고 있다. 따라서 생물다양성협약에서 논의되고 있는 사항을 분석하고자 한다.

제2차 연도 연구에서는 제1차 연도에서 분석한 내용을 토대로 기후변화에 따른 산림 변화를 평가할 수 있는 모형을 선택하고 국내에 적용하고자 한다. 2차 연도에 도출되는 모형에서는 국내에서 생태계 변화에 대해 자료가 축적되어 적용할 수 있는 생태군을 선별하여 기후변화에 따른 생태군집 변화 또는 생산성 등을 추정하고자 한다. 이때, 생태계 군집 변화 모형과 사회·경제적 영향인자의 연계성 모색을 검토하고자 한다. 또한 생태계 변화에 대응하기 위한 국제 동향 및 주요 선진국가의 추진정책 및 사례 분석을 통하여 우리 나라의 정부차원에서 대응할 수 있는 자료를 제공하고자 한다.

제3차 연도 연구에서는 기후변화에 따른 우리 나라 생태계 변화에 따른 시나리오를 제시하고 생태계 변화에 따른 우리 나라의 구체적 대책 수립방안을 제안하고자 한다. 생태계 변화에 따른 우리 나라의 구체적 대책 수립 방안에는 생태계 변화 시나리오별로 대응원칙을 정립하고 대응방식과 평가, 운영방향을 포함하고자 한다.

II. 기후변화의 지구 및 한반도 생태계 영향 및 연구성과 평가

1. 지구차원의 영향 및 연구성과

대기중의 CO₂ 가스 농도가 2배 증가하게 되면 지구전체 평균기온이 1.5~4.5℃가 상승될 것으로 예측된다. 특히 여름보다는 겨울철의 온도가 더 상승되고, 위도가 높아짐에 따라 더 상승될 것으로 예측되고 있다(Tangley, 1988). 이러한 지구온난화는 남극대륙 및 그린랜드에 존재하는 육상빙하의 해빙으로 나타날 것이라는 예측이 가장 우세하다. 이에 따라 해수면 상승을 유발하여 남태평양 일원의 산호초로 이루어진 도서 지역의 소멸로 나타나게 될 것이며, 최근에 이러한 침수위협에 직면한 호주 동북쪽 투발로 공화국, 키리바시 공화국, 몰디브 공화국 등의 예는 이러한 우려가 현실화된 것으로 보인다(이재훈 등, 2000).

지구온난화가 진행됨에 따라 나타나는 기후변화는 인류와 지구환경의 모든 분야에 걸쳐 그 영향을 미칠 것으로 예측되고 있다. 이중 본 연구와 관련 있는 자연환경부문중 식생부문의 영향은 매우 다양하나, Scholes et al.(1996)은 다음과 같은 다섯 가지를 제시하고 있다. 즉, 주어진 식생 종들의 적정생육지역 변화, 단위면적당 산림목재 생산량의 증감, 산림생태계에 의해 저장되는 탄소 양의 증감, 산림생태계 기능의 교란, 산림내부의 종다양성 변화 이다.

지구온난화는 지구의 평균기온이 상승하는 현상으로 인간의 활동으로 인해 발생된 환경문제로 온실효과가스(Greenhouse Gas, GHG)인 CO₂ 가스와 매우 밀접한 연관관계를 가지고 있다. CO₂ 가스의 흡수원인 산림은 지구온난화로 인한 기후변화를 저감시키는 역할을 수행하는 매우 중요한 인자로 이에 대한 관심이 매우 커지고 있다. 이런 현상들은 다양하게 서로 연관된 형태로 나타나 심층적인 각종 환경적인 악영향의 원인이 될 것으로 보여진다. 따라서, 기후조건과 산림생태계와의 상호작용을 이해하고 규명함으로써, 식생에 미치는 영향을 평가하고 예측하는 것은 인류에게 매우 중요한 과제라 할 수 있다.

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

기후변화협약 등 국제적인 차원과 국내에서의 노력에도 불구하고 기후변화는 예정된 사항이며 이에 따른 지구 생명체의 적응 및 이동은 이미 나타나고 있다. 지구의 생명체는 기온이나 토양의 습도, 습기, 강수량과 같은 환경요인에 매우 민감하게 반응하며, 외부 온도가 3℃ 상승하면 북쪽으로 250km 또는 500m고지대로 이동해야 외부 온도에 적응할 수 있다. 이러한

기후변화에 따라 지난 90년 동안 우리 나라의 생물군락은 약 100~200km 북쪽으로 이동하거나 또는 300~500m 정도의 고지대로 이동하고 있는 것으로 추정된다. 더욱이 향후 우리 나라의 생물군집은 지구온난화 과정에 따라 향후에도 끊임없이 이동하게 될 것이며 생물다양성은 현저하게 변화하게 될 것이다¹⁾. 이는 우리에게 사회·경제적인 간접적 영향을 나타내게 될 것이다.

2. 한반도차원의 영향 및 연구 성과

한반도의 경우, 지구온난화와 관련되어 지난 75년간 일평균 기온의 총 증가량은 약 1.1℃였으며, 이중 지구온난화와 동반되어 나타난 기온 증가량은 약 0.7℃ 이고, 도시화에 의한 기온 증가량은 약 0.4℃로 추정된다(김정우, 1997). 이러한 기온상승의 원인이 되는 온실가스는 이산화탄소, 메탄 등 여러 가지가 있지만, 이산화탄소가 전체의 55%를 차지하고 있다(환경부, 1996). 우리 나라의 경우 온실가스 중 가장 주요한 원인물질인 CO₂ 가스는 1990년에서 1997년 기간 중에 약 21ppm 증가하여 기후변화에 따른 각종 악영향이 우려되고 있다(환경부, 1999). 최근에 비무장지대 부근지역에 말라리아가 자주 발생하는 것 역시 1996년 홍수에 따른 서식환경의 제공과 기온상승으로 인한 모기의 조기출현 및 발육기간 단축이 영향을 준 것으로 추정되고 있다(국립보건원, 1998). 또한, 기후변화는 곡물의 생산량에 많은 영향을 주게 될 것이며, 이와 관련된 연구로 북한지역의 곡물생산량은 기후변화에 의해 더욱 악화될 것이란 연구 결과도 있다(이동근, 2000).

우리 나라에서는 급속한 기후변화도 보고되고 있다. 1908년부터 1940년까지의 연평균 기온이 10~11℃ 사이에 머물고 있었으나, 이후부터 1970년까지는 11~12℃, 1970년대부터 최근까지는 12~13℃ 사이를 나타내고 있다. 환경백서 (1999)등에 따르면 지난 75년간 우리 나라에서 연평균 기온의 증가는 1.1℃로 이중 지구온난화에 의한 기온 상승은 약 0.7℃로 추정되고 있다. 또한 제주도와 남해안의 연간 강수량이 최근 60년 동안 계속 증가하는 추세에 있으며 해안 생태계의 변화로 인하여 연안 수산업의 변화가 나타나고 있는 등 이미 한반도에서는 기후변화에 따른 생태계 변화가 나타나고 있다. 더욱이 이미 대기 중으로 방출된 지구온난화 가스는 금세기 말까지 대기에 지속적으로 잔존하기 때문에 향후 이러한 가스의 방출을 완전히 제한하더라도 한반도를 포함한 지구의 온난화를 당분간 막기 어려울 것으로 예측된다.

우리 나라의 산림은 매우 양호한 상태를 유지하고 있었으나, 1900년대 초의 일제강점기에 무분별한 벌목에 의해 많은 산림이 파괴해지게 되었다. 이후 1950년대의 6.25전쟁을 겪으며, 더욱 황량하게 변하게 되었다. 그러나, 산림의 중요성을 인지하여, 산림을 육성함으로 인해 산림축적(Biomass)은 지속적으로 증가중이나, 1970년대 이후 급격한 산업구조의 변화와 함께 토지이용의 변화로 인해 산림면적이 감소하는 추세를 보이고 있다. 감소된 산림면적이 다른 용도로 변화되는 경향은 1970년대 말에는 초지 및 농지로, 1980년대에는 공업용지로, 1990년대에는 휴양 및 위락시설용지로의 전용이 지속적으로 이루어져 왔다. 근래에 이르러서는 농·산촌지역의 인구가 감소되어, 농경지가 휴경으로 인해 초지 및 녹지로 환원되는 경우가 증가되

1) 기후변화에 따라 나타나는 생태계의 영향 평가는 IPPC의 주요한 쟁점이며, IPPC의 제3차 평가 보고서(안, The Third Impact Assessment, 2001년 발간 예정)에서 이에 대한 내용을 다루고 있다.

는가 하면, 도시주변의 그린벨트지역의 산림은 인구증가에 따른 지속적인 수요증가로 인해 각종 전용 및 개발압력이 점증하고 있는 실정이다(전성우, 1999a).

산림의 과도한 파괴는 지구자원의 기후변화를 초래하는 주요한 원인중의 하나이다. 이같이 기후 변화는 생물환경인 자연에도 직접적인 영향을 주며, 그것이 지구 환경에 다시 영향을 준다. 이것은 지구 변화의 구조 안에서 기후변화와 동시에 토지이용변화가 들어있는 것에서도 알 수 있다.

위와 같이 기후변화에 따른 식생부문의 영향예측에는 다양하고, 매우 많은 양의 자료의 통합적인 구축 및 이용이 요구된다. 특히, 영향예측에 기초적으로 필요한 지역차원의 우리 나라 토지피복정보와 식생부문에 대한 정보는 미비하다. 따라서 현존하고 있는 기존자료의 검증 및 미비한 필요자료의 구축이 필요한 실정이다. 인공위성영상자료를 이용한 원격탐사기법은 지구 표면을 광역적·주기적으로 신속, 정확하게 관찰할 수 있어 많은 분야에 활용되고 있으며, 특히 단시간 내에 광역자료를 구축할 수 있어, 경제적인 측면에서도 효용성이 높다. 이러한 측면에서 위성영상자료 분석을 이용한 기초자료의 검증 및 구축과 여러 분야의 정보를 지리정보체계(Geographic Information System, GIS) 기법을 이용하여 구축하는 것은 기후변화영향 연구에 있어서 필수적인 것이라 할 수 있다.

이러한 IPCC의 연구주제들은 대부분 전지구 또는 대륙을 대상으로 한 기후변화영향평가에 초점이 두어져 왔으며, 최근 들어서 이를 하나의 국가차원인 지역차원으로 해상도를 높이는 방안에 대해서 연구를 진행하는 단계에 있다. 2001년 발간 예정인 IPCC의 3차보고서(Third Assessment Report)에서는 기후변화의 지역적 영향, 기후변화에의 적응 등을 주요내용으로 다룰 것으로 예정되어 있으며, 특히 기후변화로 인한 지역차원의 영향과 이에 따른 적응전략은 근본적인 온실가스원인물질 저감대책과 함께 중요한 부문으로 대두되고 있다.

이러한 시점에 우리 나라의 경우 상대적으로 IPPC WG I의 경우는 기상연구소가 중심이 되어 연구를 진행했으며, WGⅢ의 경우는 우리 나라의 연구자가 공동의장과 주작성자를 맡아 많은 기여가 있었다. 그러나, WGⅡ의 경우에는 우리 나라 연구자의 참여가 매우 미흡하며, 국가중심의 연구가 미비한 실정이다. 현재까지 WG Ⅱ에서는 전 지구를 대상으로 한 연구가 주종을 이루고 있었으나, 하나의 대륙 더 나아가 한 국가의 영향을 예측하고 대응방안을 설정하기 위한 지역차원의 연구가 전세계적으로 확산되고 있는 추세이다. 기존의 전 지구를 대상으로 수행된 영향연구에서 남한지역은 단지 4-6개의 화소로 표현되고 있어 정확한 영향을 평가하고, 이 결과를 해석하는데 많은 한계를 가지고 있다. 특히 우리 나라의 경우 기후변화로 인한 식생부문의 영향을 평가하는데 있어서 필요한 기초자료인 토지피복분류정보와 식생정보 및 토양특성도 등의 자료가 미비하여 이를 효율적으로 구축하는 것 역시 시급하다.

그 동안 우리 나라에서는 기후변화 관련되어 연구사업이 < 표 II-1 >과 같이 수 차례에 걸쳐 수행되어 왔다. 기후변화영향 평가에 대한 연구는 1992년 10월에 시작한 환경부와 과학기술부가 주도한 G-7 환경공학 기술 개발 과제의 1단계 (1993~1995) 사업에서 오성남 (1993, 1994, 1995, 1996) 등이 지구환경감시 및 기후변화 예측 기술과제의 “기후변화 영향평가 및 영상처리 기술 개발”에 대한 연구내용으로 온실기체의 점증에 따른 기후변화의 영향을 강수와 농업에 국한하여 분석한 바 있다.

수자원에 대한 영향은 지구 대규모 물 순환 구조 변동과 국지적 하천 유역의 물 수지 변화에 대한 영향으로서 아시아 몬순규모의 물 순환에 대한 영향은 GCM 모사의 과정에서 대륙의 증발량 증가와 강수의 시간별 변화에 따라 여름철 토양의 수분 부족과 겨울철 강수 증가를 예측할 수 있게 하였으며, 농업에 대한 영향 연구는 배로 증가된 대기의 이산화탄소에 의한 기온과 강수의 GCM 시나리오를 벼 작물의 생육 모델에 적용하여 벼 작물의 성장과 수확에

대한 영향을 평가하는 기술 개발에 연구의 목적을 두었다.

우리 나라의 주변 해역의 장주기 해수면 변화와 관련한 주요 자료는 조사원에서 실시하고 있는 조석관측자료이며 이를 토대로 일평균 해면을 조사원에서 수로기술연보로 보고되고 있다. 그러나 기후 변화 signal을 포착하기에는 아직 자료 축적이 부족한 편이며 황해, 남해를 중심으로 한 지속적인 연안개발이 이루어져 온 까닭으로 인위적인 영향이 더 크게 나타날 수도 있다. 최근 행정자치부(1998)에서 서해안 해수범람 흔적조사 및 대책수립 연구를 수행한 바 있으나 단주기적인 영향에 관심이 집중되고 있다. 한반도 주변해양생태계 변화의 한 징후로 여겨지는 백화현상에 관한 연구는 한국해양연구소에서는 1997년 8월부터 제주도 일원을 대상으로 예비연구를 시작하였고 이 결과를 바탕으로 1998년 1년 기한으로 생화학적 원인 규명에 관한 연구를 수행하였다.

기후변화가 농업부문과 산림생태계에 미치는 영향에 대한 연구로 윤성호 등(1993)은 농업부문에서 지구온난화와 관련하여 지구온난화의 원인이 되는 미량기체들 가운데 CH₄, N₂O 등의 발생과 지구온난화와 대기 CO₂농도 증가에 따른 농업생태계의 변화를 예측한 바 있다. 김종원 등(1993)은 기후변화가 산림생태계에 미치는 영향 및 대응방안에 관한 연구를 통하여 CO₂ 증가가 수목과 산림생태계에 미치는 영향을 분석하고자 한 바 있다.

< 표 II-1 > 기후변화에 대응하기 위한 주요 연구개발사업

연구명	목적	연구수행연도
온실기체 제어기술 연구	- 이산화탄소의 화학적 및 생물학적 고정화 기술개발	1992년 (G7 프로젝트)
국가보고서 작성을 위한 기초연구	- 온실기체 국가통계작성 - 기후변화의 영향조사 - 온실기체저감의 비용효과적인 방안 - 국익에 부합될 대응방안	1994년 및 1995년
기후변화 예측기술 연구	- 기후변화 예측기술 확충 - 대기/해양 접합 GCM의 개발 - 고기후 모델링사업 - 지구온난화와 관련된 광범위한 자료 및 정보 구축	1995년 - (G7 프로젝트)
기후변화에 관한 범정부적 대응방안 연구	- 기후변화에 대한 국가 조직 및 행정적 대응방안 연구	1997년(STEPI)
국가에너지기본계획	- 에너지 수급안정 - 에너지소비로 인한 환경피해요인 최소화 - 에너지이용의 합리화 및 에너지 관련 기술의 개발촉진	1997년부터 2006년 총 10년 단위
기후변화방지를 위한 중장기 실천계획	- 범국가적인 중장기적 에너지·경제·환경 정책에 대한 비용효과적인 실천계획 도출	1997년 - 1999년
지구온난화에 따른 한반도 영향평가 및 적응전략 기술개발	- 전지구적, 지역적, 한반도의 기후변화 및 영향의 추세 분석 - 기후변화 대응을 위한 국제기구 및 선진 외국의 노력과 연구동향 분석 - 우리 나라의 연구동향과 지구, 한반도의 추세분석에 따른 연구의 문제점 분석 - 한반도 영향평가 및 적응전략 기술개발을 위한 중장기 추진계획 수립 - 중장기적으로 추진해야 할 분야별 연구과제 도출	1999년 - 2000년 (G7 프로젝트)

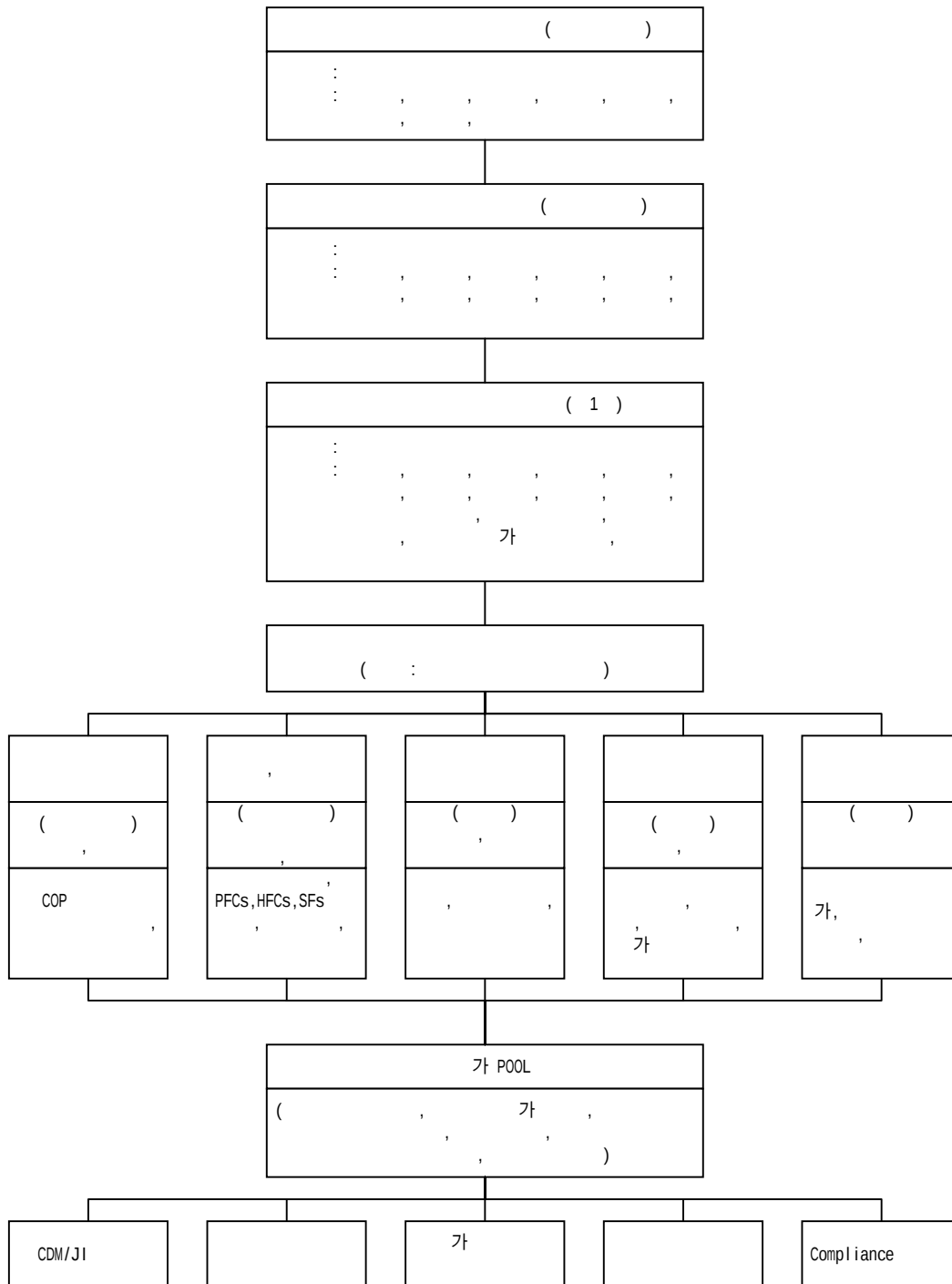
1993년부터 시작된 국가 GIS 기술개발 사업이 시작되었으나 기후변화 등 자연환경 변화에 따른 토지이용변화와 생태계 조사는 실시된 바 없고 환경부에서 상수도 하천시스템 구축을 위하여 부분적으로 GIS기술을 도입한 사례는 있다. 특히, 북한지역과 여타 주위국가에 대한 지표환경과 전지구 규모의 환경정보 시스템의 구축이 아직은 없어 국가간 협의나 협력을 위한 자료가 마련되어 있지 않고 있다.

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

3. 정부차원의 대응체계

기후변화에 따른 우리 나라의 대응체계에 대한 논의는 우리 나라가 1993년 기후변화협약에 가입하기 이전부터 논의되어 왔다. 정부는 1992년 8월 16개 부처가 참여하는 지구환경관계장관회의(위원장, 국무총리)를 설치하여 범정부차원에서의 합동대책을 수립 추진하기 시작하였다(총리 훈령 제261호, 1992. 7. 10). 제1차 지구환경관계장관회의(1992. 8. 31)에서는 산업, 환경, 국제협상대책 등 3개 분야 44개 세부과제를 선정하여 과제별 대책방안을 수립한 바 있다.

이후 정부는 부처별 산발적으로 제시되고 있는 기후변화에 대한 부처별 추진정책을 종합적으로 추진하기 위한 정부의 종합대책을 마련하고자 국무조정실 기후변화협약 실무대책회의에서 ‘기후변화협약 대응 종합대책(1999. 2)’을 수립하였다. 동 실무대책회의는 <그림 II-1>과 같이 5개 실무작업반 즉 협상대책반(외교통상부), 산업·에너지대책반(산업자원부), 환경대책반(환경부), 농림대책반(농림부), 연구개발반(과학기술부)과 전문가 POOL을 구성하였다. 기후변화협약 대응 종합대책에는 국제사회에서의 응분의 역할분담과 적정성장유지를 조화시킬 수 있는 협상전략 수립, 모든 분야에서의 온실기체 배출 저감노력 확산, 온실기체 국제거래 참여 방안 구축 등 과제를 중심으로 대책을 마련하고 있다.



< 그림 II-1 > 기후변화협약에 대응하는 우리 나라 실무대책 조직도

자료: 기후변화협약실무대책회의, 2000. 2.

Ⅲ. 기후변화의 지구 및 국가 생태계 영향 저감을 위한 국제 동향

지구의 기후변화문제는 그 영향력과 예측불가능성으로 인하여 지구환경논의의 중심주제이고 이에 대한 논의가 < 표 III-1 >과 같이 빠르게 진행되고 있다. 1988년 11월 UNEP과 WMO 주관 하에 IPCC가 설립되어 기후변화의 원인, 영향 및 대응에 관한 종합적인 연구를 진행하고 있다²⁾. 1992년 6월 리우의 ‘UN환경개발회의’에서는 이산화탄소 등 온실가스 증가에 따른 지구온난화에 대처하기 위하여 「기후변화협약(UNFCCC, UN Framework Convention on Climate Change)」을 체결하였다.

< 표 III-1 > 기후변화 관련 국제회의 연대기

연 도	회의 제목 및 내용
1972년 12월	UN 환경계획(UNEP) 설립 및 제1차 UN 환경개발회의 개최
1979년 5월	제1차 세계기후회의(WMO): 세계기후계획(WCP)
1985년 10월	온실기체의 기후변화에 대한 영향평가회의(오스트리아 Villach)
1985년	빈협약: 오존층 보호를 위한 CFCs 규제
1987년	몬트리올 의정서: 오존층 보호를 위한 CFCs 규제
1988년 11월	기후변화에 관한 정부간 패널기구(IPCC) 설립 : 실무그룹 구성 - WG I(과학적 연구), WG II(영향평가), WG III(대응방안)
1989년 2월 ~ 1990년 6월	IPCC 회의 개최 : 1차(제네바), 2차(나이로비), 3차(워싱턴), 4차(순드발)
1990년 11월	제2차 세계기후회의(제네바) - 제1차 IPCC 기후변화 과학 평가 보고서 작성 - IPCC 보고서에 근거하여 지구온난화에 대한 성명 채택

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

〈 표 III-1 〉 기후변화 관련 국제회의 연대기(계속)

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

자료: 국립환경연구원 (2000)

본 연구 부문에서는 기후변화협약의 최종의결기구인 당사국회의(Conference of Parties, COP)에서 논의되고 있는 사항과 IPCC³⁾에서 다루고 있는 생태계 영향 평가에 관한 내용을 살펴보고, 선진 주요국가들에서 추진되고 있는 생태계 영향평가에 관한 정부 추진방향 등을 제시하고자 한다. 아울러 기후변화협약의 생태계 영향평가부문에 대한 우리 나라의 대응 방향과 선진 외국의 대응책을 비교 분석함으로써 이에 대한 우리 나라 정책의 문제점을 도출하고자 한다.

1. 기후변화협약

1.1. 기후변화협약문에 나타난 생태계 영향 평가

기후변화협약은 “인간이 유발하는 지구 기후시스템의 교란을 방지할 수 있는 수준으로 대기 중의 온실가스를 안정화시키는 것”을 목적으로 1992년 6월 리우의 ‘UN환경개발회의’에서 채택되었으며 1994년 3월부터 발효된 국제협약이다. 이 협약에서는 협약의 목적을 추진하기 위하여 다음 3가지 원칙을 제시하고 있다.

첫째, 사전예방의 원칙이다. 기후변화에 대한 어느 정도의 과학적인 불확실성이 있더라도

3) ‘기후변화에 관한 정부간 패널기구(IPPC, Intergovernmental Panel on Climate Change)’는 1988년 11월 유엔총회 결의에 따라 발족되었으며, 이 기구에서는 기후변화에 대한 과학·기술적인 연구 및 경제사회적인 영향에 대한 광범위한 검토와 기후변화협상을 촉진하는데 필요한 과학적인 근거를 제시하고 있다.

국제사회는 이에 대한 대응조치 또는 적응조치를 지연시켜서는 안된다.

둘째, 공동·차별화 된 책임원칙이다. 기후변화에 대해 모든 국가가 책임을 지나 의무부담에 있어서는 차별적인 책임이 적용되어야 한다는 것이다.

셋째, 형평성의 원칙이다. 현재 세대와 미래 세대간에 그리고 현세대에서도 지역간 또는 경제개발의 차이에 따른 균형을 강조해야 한다는 것이다.

이 협약에서 온실가스의 증가는 산업화과정에서의 이용되는 화석에너지의 과도한 사용에 의하고 있으며 이러한 온실가스의 증가에 책임이 있는 선진국(동 협약의 부속서 I)들에 대해서 온실가스 배출량을 2000년까지 1990년 수준으로 감축할 것을 권고하고 있다. 또한 선진국들은 개도국에 협약 이행을 위해 재정·기술적 지원을 해야 함을 명시하고 있다. 2000년 6월 현재 181개국이 동 협약에 가입하고 있다. 우리 나라는 1993년 12월에 협약의 비부속서 I 국가지위로 협약에 47번째로 가입하였다.

기후변화협약에서는 기후변화에 관한 원인, 결과, 규모, 시기 및 사회경제적인 영향에 관한 이해증진과 불확실성 감축을 위한 각종 조사 및 체계적 관측의 촉진을 규정하고 있다. 협약의 제4조제1절(a)⁴⁾, (b)⁵⁾, (e)⁶⁾, (f)⁷⁾에서는 기후변화에 대응할 수 있는 영향 평가 등에 관한 당사국의 의무사항 등에 대해 기술되어 있다. 더욱이 기후변화에 대한 국가간 상호협력과 대응 능력이 미흡한 개발도상국에 대한 재정적 지원에 대해서도 제시하고 있다(협약 제4조제4절⁸⁾).

제4차 당사국총회(1998년)에서는 각국이 대기, 해양, 육지에 대한 관측 능력 및 데이터 교환을 강화하고 국가보고서에 자국의 관측계획 및 프로그램을 포함토록 결정한바 있어 기후변화협약의 생태계 영향 평가 등에 대한 과학활동의 중요성이 점차 증대되고 있다.

1.2. 당사국 회의

기후변화협약의 당사국 회의(COP)는 < 표 III-2 >와 같이, 1995년 제1차 회의를 시작으로 1999년 제5차 회의까지 진행되었다.

-
- 4) 제4조제1절(a) : 기후변화에 대한 적절한 적응능력을 도모하기 위한 조치와 기후변화를 저감하기 위한 조치사항을 포함하는 국가정책인 지역정책을 주기적으로 수립, 시행, 공표하며 주기적으로 갱신해야 한다.
 - 5) 제4조제1절(b)항 : 당사국들은 기후변화의 원인을 기대하고 예방하거나 감소시킬 예방시책을 취해야만 한다. 이를 달성하기 위해 정책이나 시책들은 모든 가능한 배출원, 흡수원, 및 온실가스의 저장고 및 적응을 포함하는 가능한 광범위한 상이한 사회적 경제적 환경을 고려해야만 한다.
 - 6) 제4조제1절(e)항 : 모든 당사국은 기후변화의 영향에 대한 적응을 위한 준비에 관하여 상호 협력한다.
 - 7) 제4조제1절(f)항 : 모든 당사국들은 기후변화에 관련된 사회, 경제 및 환경에 관한 자국의 정책 및 조치에 있어서 가능한 범위내에서 고려한다. 기후변화를 완화 또는 적응하기 위해 자국이 실시하는 사업 또는 조치의 경제, 공중위생 및 환경의 질에 대한 악영향을 최소화하기 위해 자국이 결정한 적당한 방법 예를 들면, 영향평가(Impact Assessment)를 채용하여 실시한다.
 - 8) 제4조제4절 : 선진국은 기후변화의 악영향을 특히 받기 쉬운 개발도상국의 악영향에 적응하기 위한 비용을 부담함으로써 해당 개발도상국을 지원한다.

< 표 III-2 > 기후변화협약 당사국 회의 개최지역 및 시기

	시기	장소
제1차	1995년 3월	독일 베르린
제2차	1996년 7월	스위스 제네바
제3차	1997년 11월	일본 교토
제4차	1998년 11월,	아르헨티나 부에노스아이레스
제5차	1999년 10월 25일 ~11월 5일	독일 본

1995년 3월 독일 베르린에서 개최된 제1차 당사국 회의에서는 선진국의 의무강화를 위해 부속서 I 국가(협약 채택당시 OECD 24개국, 체제 전환 11개국 및 EU국가)의 2000년 이후 감축 목표에 관한 구속력 있는 의정서를 제3차 당사국 회의(1997년)에서 채택기로 결정한 바 있다(Berlin Mandate, 1995). 협약의 부속서 I국가는 제3차 당사국 회의에서 추가되어 2000년 6월 현재 40개국과 EU 국가들이다.

제2차 당사국 회의는 1996년 7월 스위스 제네바에서 개최되었다. 이 회의에서는 당사국의 의무 강화를 위한 협상을 가속화하고 협약을 법적 구속력이 있는 문서로 채택하는 것을 논의하였으나, 이에 대해 개도국이 심하게 반발함에 따라 협약을 법적 구속력이 있는 문서로의 채택은 이루어지지 않았다.

제3차 당사국회의에서는 1997년 일본 교토에서 개최되었다. 이 회의에서 선진국들은 온실가스 배출량을 2008년~2012년까지 1990년 수준보다 평균 5.2% (EU -8%, 미국 -7%, 캐나다 -6%, 아이슬란드 +10% 등)의무적으로 감축하기로 하는 교토의정서에 합의하였다. 또한 이 회의에서는 1995년부터 1997년까지 7차례의 특별 그룹회의를 거쳐 마련된 소위 교토의정서 메카니즘을 도입하기로 결정하였다. 교토메카니즘에는 선진국들이 온실가스 감축의무를 이행하는데 따르는 부담을 줄이기 위해 배출권거래제도⁹⁾, 청정개발체제¹⁰⁾, 공동이행제도¹¹⁾가 포함되어 있다¹²⁾.

-
- 9) 배출권거래제(ET, Emission Trading)란 선진국들이 온실가스 감축의무에 따른 배출쿼터를 국제시장에서 거래할 수 있게 하는 제도(감축의무 초과 달성국은 배출권을 판매, 미달성국은 매입할 수 있음)이다.
- 10) 청정개발체제(CDM, Clean Development Mechanism)란 선진국들이 개도국에 투자하여 얻게되는 온실가스 감축분을 선진국의 감축실적으로 인정받는 제도이다.
- 11) 공동이행제도(JI, Joint Implementation)란 선진국 A가 다른 선진국에 투자하여 얻게되는 온실가스 감축분의 일정분을 A국의 온실가스 감축분으로 인정하는 제도이다.
- 12) 교토메카니즘은 공동이행제(JI), 청정개발체제(CDM), 배출권거래제(ET)의 3개 메카니즘으로 타국에서의 온실가스 감축실적을 자국의 감축목표 달성에 활용키 위한 제도이다. 선진국은 3개 메카니즘의 운영세칙에 대한 일괄타결을 주장하고 있으나 개도국은 3개 메카니즘은 서로 독립된 사안으로서 각기 개별적으로 타결되어야 함을 주장하고 특히 청정개발체제(CDM)에 대한 메카니즘을 우선적으로 타결지을 것을 주장하고 있다. 현재 각국의 기본입장이 제시되고 쟁점사항을 도출해 나가는 상황으로 원칙, 규칙, 가이드라인 등에 대한 논의가 활발히 진행되고 있다. 현재 교토의정서 메카니즘을 온실가스 양적감축의무 이행의 보조적 수단으로만 사용해야 한다는 EU의 입장과 한도설정에 반대하는 미국의 입장이 대립되고 있다.

제4차 당사국총회(1998년 11월, 아르헨티나 부에노스아이레스)에서는 온실가스 감축 의무부담을 개도국에 확대하는 문제가 제기되었다. 그러나 이에 대한 개도국의 강한 반발로 토의의제에서 이 안건은 삭제된 바 있다. 또한 제3차 당사국회의에서 도입된 온실가스의 국제배출권 거래제도, 청정개발체제, 공동이행제도 등 소위 신축성 체제(Flexibility Mechanisms)라고 하는 교토의정서 메카니즘을 어떻게 설계하고 운용할 것인가가 주요 논의 쟁점사항이었다.

이 회의에서는 협약의 부속서 I에 제시된 선진국에 속하지 않으나 주최국인 아르헨티나와 카자흐스탄이 온실가스 배출량 저감의 1차 공약기간(2008~2012)이후 의무부담에 참여하겠다는 의사를 표명한 바 있다.

제5차 당사국총회(1999년 10월 25일~11월 5일, 독일 본)에서는 교토메카니즘의 구체적 이행방안 마련 등 실질문제에 대한 논의가 있었다. 선진국들은 배출권거래제도, 청정개발체제(CDM) 등 교토 메카니즘의 구체적 이행방안에 대한 논의를 진전하기를 희망하였으나, 반면에 개도국들은 재정지원, 기술이전, 능력형성 등에 대한 구체적인 진전을 기대함으로써 이 안건에 대한 당사국들의 합의는 이루어지지 않았다. 이 회의에서는 제6차 당사국회의까지의 실질적인 진전을 위한 작업일정을 마련하였다.

이 회의에서는 아르헨티나의 감축목표 발표로 개도국의 온실가스 감축의무부담 문제가 부각되었다. 아르헨티나는 2008~2012년간의 1차 공약 기간 중 온실가스 배출량 전망치(BAU) 대비 2~10% 감축하고자 하는 목표치 발표하였다. 또한 교토의정서를 비준하고 있지 않은 미국은 개도국의 참여가 미국의 교토의정서 비준을 위한 전제조건이며, 이를 위해 선진국과 개도국간의 새로운 대화채널을 열 것이라고 언급한 바 있다.

우리 나라는 개도국의 경제성장을 보장하는 새로운 참여방식의 필요성을 지적하고 자발적이며 비구속적이라는 전제하에 참여가능 의사 표명한 바 있다. 우리 나라는 새로운 방식을 모색하기 위한 국제적인 논의에 전향적으로 참여하며, 새로운 방식에 합의가 이루어지면 자발적이며 비구속적이라는 전제하에 참여 용의를 표명한 바 있다.

2. 기후변화에 관한 정부간 패널기구(IPPC)

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

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

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

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

2.1. IPCC 정기 보고서

IPCC는 1989년 2월부터 1990년 6월까지 4차례 회의를 개최하여 1990년 8월에 제1차 보고서(First Assessment Report, FAR)를 채택하였다. 제1차 보고서에서는 지구가 더워지고 있다는 과학적 증거를 확인하였다. 이러한 보고서의 내용은 기후변화협약(UNFCCC)의 초기 협상을 위한 기초자료로 사용되었다. 이 보고서는 1990년 11월 제2차 세계기후회의(SWCC)에 보고되었다.

1991년부터 1995년 작업을 통하여 1995년 제2차 보고서(Second Assessment Report, SAR)를 채택하였는데 본 보고서에서는 기후변화의 주요 원인이 인간의 행위에 의한 것이라는 과학적인 결론에 도출한 바 있다. 또한 보고서의 내용은 제1세대의 GCM(Global Climate Model)의 결과를 이용한 영향연구, CO₂의 농도가 2배로 증가하였을 때를 가정한 기후변화 시나리오로서 예측한 기온, 강수량을 전제로 한 연구 등으로 영향연구의 대부분은 IPCC FAR에서 얻어진 기후변화 시나리오를 이용한 것이다.

제3차 보고서(Third Assessment Report, TAR)는 2001년 채택을 목적으로 현재 준비중에 있다¹³⁾. 이 보고서에서는 개발도상국을 대상으로 한 온난화의 영향 및 대책평가, 분야별/지역별 영향 통합 평가, 영향평가의 방법론, 기후 시나리오, 온난화의 적응책 및 경제성 평가 등이 다루어지고 있다.

제3차 보고서는 현재 기후변화에 관한 국제적인 동향을 파악함에 있어 가장 중요한 보고서(안)으로 이는 3개의 실무그룹(WG)이 정책결정자들에게 제시하는 요약문과 각 그룹에서의 전체보고서로 구성되어 있다. 이 보고서는 특히 UNFCCC의 제2조인 협약의 목적을 달성하기 위한 각 국가별 정책적인 이슈와 이에 연계된 내용을 포괄적으로 다루고 있다. 이 보고서의 초안의 기초와 이에 관한 개략적인 내용은 이미 1999년 4월 코스타리카에서 개최된 제15차 IPCC 회의에서 승인된 것이다. 제3차 보고서를 작성하는 전문가들은 각 실무그룹별 독립적으로 구성되어 있으며, 본 과제에 직접적으로 연계되어 있는 WGII의 보고서¹⁴⁾는 3개의 < 표 III-3 >과 같이 Part와 총 19장으로 구성되어 있다.

제2실무그룹(WGII)에 참여하는 전문가들은 WGII에서 다루고 있는 보고서의 장(chapter)별로

13) 이는 말디브(Maldives)에서 1997년 9월에 개최된 IPCC 제13차 회의에서 결정된 것이다. 이 회의에서는 2001년을 목표로 한 제3차 평가 보고서(TAR) 작성 체제가 결정되었다.

14) 이 보고서(안)는 향후 수 차례의 전문가 그룹의 협의를 거쳐서 2001년 2월 브레노스아이레스에 개최되는 IPCC WGII회의에서 채택될 계획이다.

다르다. 보고서의 각 장에는 coordinateing lead authors (CLAs), lead authors(LAs), contributing authors (CAs)와 Review editors(REs)로 구성되어 있으며, 각 장별 이들 구성원의 수가 같지 않다. 예를 들면 보고서의 제11장에서는 아시아지역을 다루고 있는 데 3인의 CLAs, 15인의 LAs로 구성되어 있는 데, 이는 보고서중에서 가장 큰 전문가 그룹이다. 보고서의 다른 장의 경우 2~3인의 CLAs, 5~10인의 LAs로 구성되어 있다. Review editors들은 전문가에 의해 추천되는 바 주로 경험이 많은 전문연구자 들로 구성되어 있다¹⁵⁾.

< 표 III-3 > IPCC 제3차 보고서중에서 제2실무그룹(WGII)에서 작성하고 있는 보고서(Climatic Change: Impacts, Adaptations, and Vulnerability)의 개요

Part I. Setting the Stage for Impact, Adaptation, and Vulnerability Assessment Ch 1: Overview (15 pp.) Ch 2: Methods and Tools (20 pp.) Ch 3: Development and Application of Scenarios in Climate Change Impact, Adaptation, and Vulnerability Assessment (20 pp.)
Part II. Sectors and Systems: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Ch 4: Hydrology and Water Resources (20 pp.) Ch 5: Natural and Managed Ecosystems (40 pp.) Ch 6: Coastal Zones and Marine Ecosystems (20 pp.) Ch 7: Energy, Industry, and Settlements (20 pp.) Ch 8: Financial Services (15 pp.) Ch 9: Human Health (20 pp.)
Part III. Regional Analyses: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Common template for each chapter Executive Summary X.1 Description of Region X.2 Key Regional Concerns(6 sectors/systems) X.3 Adaptation Potential and Vulnerability X.4 Synthesis Ch 10: Africa (25 pp.) Ch 11: Asia (45 pp.) Ch 12: Australasia (20 pp.) Ch 13: Europe (25 pp.) Ch 14: Latin America (25 pp.) Ch 15: North America (25 pp.) Ch 16: Polar Regions (Arctic and Antarctic) (15 pp.) Ch 17: Small Island States (25 pp.)
Part IV. Global Issues and Synthesis Ch 18: Adaptation to Climate Change in the Context of Sustainable Development and Equity (20 pp.) Ch 19: Synthesis and Integration of Impacts, Adaptation, and Vulnerability (35 pp.)
TOTAL PAGE LENGTH = ~450 pp. (plus references)

15) 우리 나라에서는 IPCC 제3차 보고서 WGII에 참여자가 없다.

2.2. IPCC 특별 보고서와 기술보고서

IPCC는 1988년 발족한 이후 생태계 영향평가에 관한 제1차와 제2차 보고서외에 < 표 III-4 >와 같이 특별보고서(special report)와 기술보고서(technical report), 지침(guidelin)을 마련해 왔다. 이러한 기술보고서는 Ad hoc Group on the Berlin Mandate(AGBM), 기후변화협약의 과학기술자문기구(Subsidiary Body on Scientific, Technical and Technological Advice, SBSTA)등의 요청에 의해 작성된 것이다.

< 표 III-4 > IPCC 특별 및 기술 보고서 목록

<u>특별보고서(Special Reports)</u> IPCC Technical Guidelines for Assessing Impacts and Adaptations (1994) Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability (Oct. 1997) Aviation and the Global Atmosphere (April, 1999) Methodological and Technological Issues in Technological Transfer (March 2000) Emission Scenarios (March 2000) Land Use, Land Use Change and Forestry (May , 2000) <u>기술보고서(Technical Reports)</u> Technologies, Policies, and Measures to Mitigate Climate Change An Introduction to Simple Climate Models used in the IPCC Second Assessment Report Stabilization of Atmosphere Greenhouse Gases: Physical, Biological and Socio-Economic Implication Implication of Proposed CO₂ Emission Limitations.

특별보고서로서는 기후변화협약의 SBSTA의 요청에 의해 교토회의 이전에 마련한 ‘기후변화의 지역영향에 관한 특별보고서(Special report on the Regional Impacts of Climate Change)’와 ‘항공 및 지구대기에 관한 특별보고서(Special report on Aviation and the Global Atmosphere)’ 등이 있다. ‘항공 및 지구대기에 관한 특별보고서’는 제15차 IPCC회의에서 WGI와 WGIII의 승인을 받은 바 있다. ‘기술 이전에 관한 특별보고서(Special report on Technology Transfer)’와 ‘배기시나리오에 관한 특별보고서(Special report on Emission Scenarios)’는 2000년 3월에 개최된 제16차 IPCC WGIII에서 승인된 바 있다. 또한 ‘토지이용, 토지이용변화 및 삼림에 관한 특별보고서(Special Report on Land Use, Land Use Changes and Forestry)’가 제16차 IPCC 회의에서 승인되었다. 이 보고서는 기후변화협약의 SBSTA의 요청에 의해 지난 2년간 준비된 것이다. 이 보고서는 토지와 삼림의 이용변화에 의한 이산화탄소의 방출에 관한 과학적 근거를 제공하는 것으로 기후변화협약 제6차 당사국 회의와 SBSTA 회의에 제공될 예정이다.

2.3. Workshop

IPPC에서는 정기, 특별보고서에서 제시한 결과외에도 범 지구적 차원의 기후변화가 산림생태계에 미치는 영향 평가기술 개발을 기후변화에 대응하기 위한 도구로 인식하고 있다. 이에 따라 영향을 평가하고 산림자원의 변화를 예측할 수 있는 기술을 개발 중에 있다. 이에 대한 IPCC의 지구온난화영향 연구에 대한 성과는 여러 가지의 보고서나 워크샵(Workshop)의 형태로 발표되고 있다. 특히 1988년 3월 29일~4월 1일에 코스타리카에서 기후변화의 적응(대책)에 관한 IPCC Workshop (1998)개최되었는 바, 기후변화에 대한 적응에 대한 연구는 대책분야보다는 영향 연구의 일환으로 실시되는 것이 보다 적절하다는 의견이 제기된 바 있다.

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

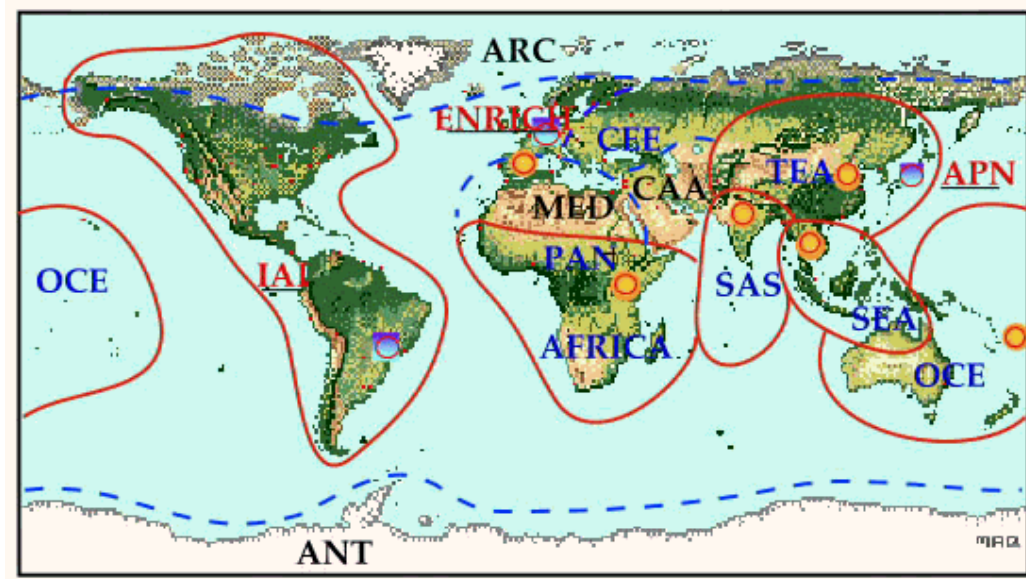
우리 나라를 둘러 쌓고 있는 지역적 기후변화에 대한 지역 국가들의 국제협력은 아시아·태평양 지역을 중심으로 활동하고 있는 APN(Asia-Pacific Network for Global Change Research)을 중심으로 이루어지고 있다. 이 기구는 < 표 III-5 > < 그림 III-1 >과 같이 ‘분석연구와 훈련을 위한 지구기후변화시스템 (Global Change SysTem for Analysis Research and Training, START)’에 의해 발족된 태평양·아시아지역에서의 기후변화연구에 관한 네트워크이다¹⁶⁾.

16) ‘분석연구와 훈련을 위한 지구기후변화시스템 (START; Global Change SysTem for Analysis Research and Training)’은 국제과학연맹이사회(ISCU)의 주요연구계획인 IGBP(International Gedsphere-Biosphere Programme)의 지역단위 지구환경연구를 위해 설치된 것으로 대규모 지구환경관련 연구·개발·지원·조정을 담당하는 국제기구이다. 이 기구는 세계기상기구(WMO) 및 국제해양위원회(IOC) 공동지원인 WCRP에 의해 지원되고 있다. 이 기구는 전세계를 포함하는 체계를 형성하기 위해 각각에 지역 연구센터 (Regional research center (RRC)와 지역 연구 지점(Regional research sites (RRSs)들을 포함하고 있다. 이 기구는 1990년 4월 지구환경변화에 대한 경제, 과학적 조사를 위한 미국 백악관 회의에서 지구환경연구를 위한 지역네트워크 구성이 제안되었으며 이중 지역의 연구센터이고 네트워크의 구성원으로서 한반도를 포함한 APN(Asia-Pacific Network for Global Change Research)이 설치되었다. START에서 운영하고 있는 다른 기관으로 IAA(Inter-American Institute for Global Change), ENRICH(European Network for Research in Global Change)가 있다 (<http://www.start.org/>).

< 표 III-5 > START의 설립목적, 주요연구조직 및 내용

구분	내용
설립 목적	- 지구기후변화와 관련된 지역적인 과학적 질문들을 처리하기 위한 과학 인력과 요소들을 결집 - 정책 발전과 관련하여 지역의 종합과 과학적인 평가를 수행하기 위한 기틀을 제공
주요연구 조직 및 내용	- o Inter-Governmental Meeting(IGM) - 1996년 3월 25-26에 개최된 제1회 IGM은 지구기후변화 연구와 관련하여 APN(Asia-Pacific Network)과 뜻을 같이하여 기획팀과 운영팀을 구성하고 매년 개최되는 이 행사에서 중추적 역할을 수행 - IGM을 통해서 APN의 주요 의사를 결정 · APN의 모든 연구활동, 연구분야 및 선결과제에 관한 지침과 절차, APN수행 프로그램을 결정 - o Scientific Planning Group (SPG) - IGM에서 심사중인 과학 프로그램을 추천 · APN 프로젝트 자금, IGM에서 활용가능한 프로젝트 자금의 할당을 APN에서 규정한 원칙아래 계획하고 실행에 필요한 선결과제등을 심사하고 분배하는 역할을 포함 - 운영팀(Steering Group)과 함께 과학 프로그램의 활동체계를 정립 - 기후변화와 관련된 다른 국제 연구 프로그램과 상호 교류하며 IGM 혹은 운영팀에서 제시한 다른 이슈에 관해 논의
주요연구 조직 및 내용	- o Steering Group - IGM 계획안을 제시하며 APN 사무팀과 함께 IGM의 정책을 이행하고 APN 프로그램 수행에 필요한 행정적 업무수행을 용이하도록 함 - SPG에 의해 제시된 연구계획서의 자금원을 고려하고 APN 연구활동자금에 관한 정보를 제공하며 사무원과 함께 APN 프로젝트 자금의 심사결과 보고에 관한 일을 수행 - 회원들의 자금기부를 장려하며 APN의 기부회원에게 지속적인 지원을 촉진시키며 국제기관 및 단체의 지원요청을 수행하며 현존하는 유동자원 및 그 지역의 외적인 자원공급을 위해 지방 연구기관들의 협조를 의뢰

자료: 국립환경연구원 (2000)



< 그림 III-1 > 지역네트워크 구성 현황

APN은 아태평양 지역에서 범 지구적인 환경변화 연구를 실행하고, 이 기관에 참여하는 국가들의 발전 증진, 학제와 정책 결정자와의 연계성을 강화시키는 것을 목적¹⁷⁾으로 하고 있다. 현재 APN에는 한국, 일본, 중국, 말레이시아, 인도네시아, 호주, 뉴질랜드, 몽고, 인도, 파키스탄, 필리핀 등과 START 산하 Regional committee인 TEACOM, SARCS (The Southeast Asian Regional Committee for START), START for Oceania 등 3개 Committee가 참여하고 있다¹⁸⁾.

APN은 지구적 기후, 해양과 대륙 시스템, 그리고 상관 물리, 화학, 생물학, 사회경제학 수행에 대한 연구를 증진·활성화시키고 지지하고 있다¹⁹⁾. 이 기구에서는 지구 기후변화 관련하여 3가지 주요한 연구프로그램(IGBP, WCRP, IHDP)을 현재 진행하고 있다. 이 연구프로그램에는 1) 우선적인 연구 의제의 선택(Selection of the Priority Research Agenda), 2) 기후 시스템 변화와 다양성(Climate System Change and Variability), 3) 연안의 변화와 영향

17) APN에서 추진하고 있는 세부목표는 으며 구체적인 세부목표는 ① 아태평양 지역에 대해 특히 관련있는 주제에 관한 지구적인 변화 연구의 지역적인 공동연구를 지원 ② 지구기후변화와 과학적 자료의 표준화, 수집, 교환 ③ 아태평양 지역내의 과학적, 기술적 능력과 연구 하부구조의 향상 ④ 다른 지역과의 연구 네트워크 ⑤ 대중들에게 과학적 지식을 전파하고 정책결정과정에 정보제공 ⑥ 축적된 기술을 전달할 적절한 기작의 개발이다

18) 우리 나라는 TEACOM (The Temperate East Asia regional Committee)에 속해 있다. 1993년 8월에 베이징에서 이 기구를 구성하기 위한 준비회의가 열렸고, 1994년 1월에 도쿄에서 제 1차 TEACOM회의, 1994년 7월에 울란바토르에서 2차 회의가 열렸다. TEACOM의 주요 연구 과제는 지구온난화에 의한 몬순 시스템 변화와 경제 발전에 미치는 영향, 토지 사용 변화에 따른 지역 환경 등 2가지 과제 등이다. 이에 속해 있는 국가는 우리 나라외에 북한, 중국, 일본, 몽골, 러시아 등이 있다.

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

(Coastal Processes and Impacts), 4) 육지생태계 변화와 영향(Terrestrial Ecosystem Change and Impacts)에 관한 내용이 포함되어 있다.

4. 미국

기후변화 대응관련된 미국의 기본전략과 국가기후계획법 및 연구프로그램을 중심으로 제시하였다²⁰⁾.

4.1. 기본전략

- 현 기후시스템 상태 및 기후에 영향을 주는 요소를 철저히 파악
- 기후변화예측 능력개발
- 기후변화 영향평가

- 기본전략을 바탕으로 한 국가기후계획(NCP : National Climate Program) 구성
 - 기후자료 분석과 서비스
 - 기후모델링과 기후예측
 - 기후변화 영향

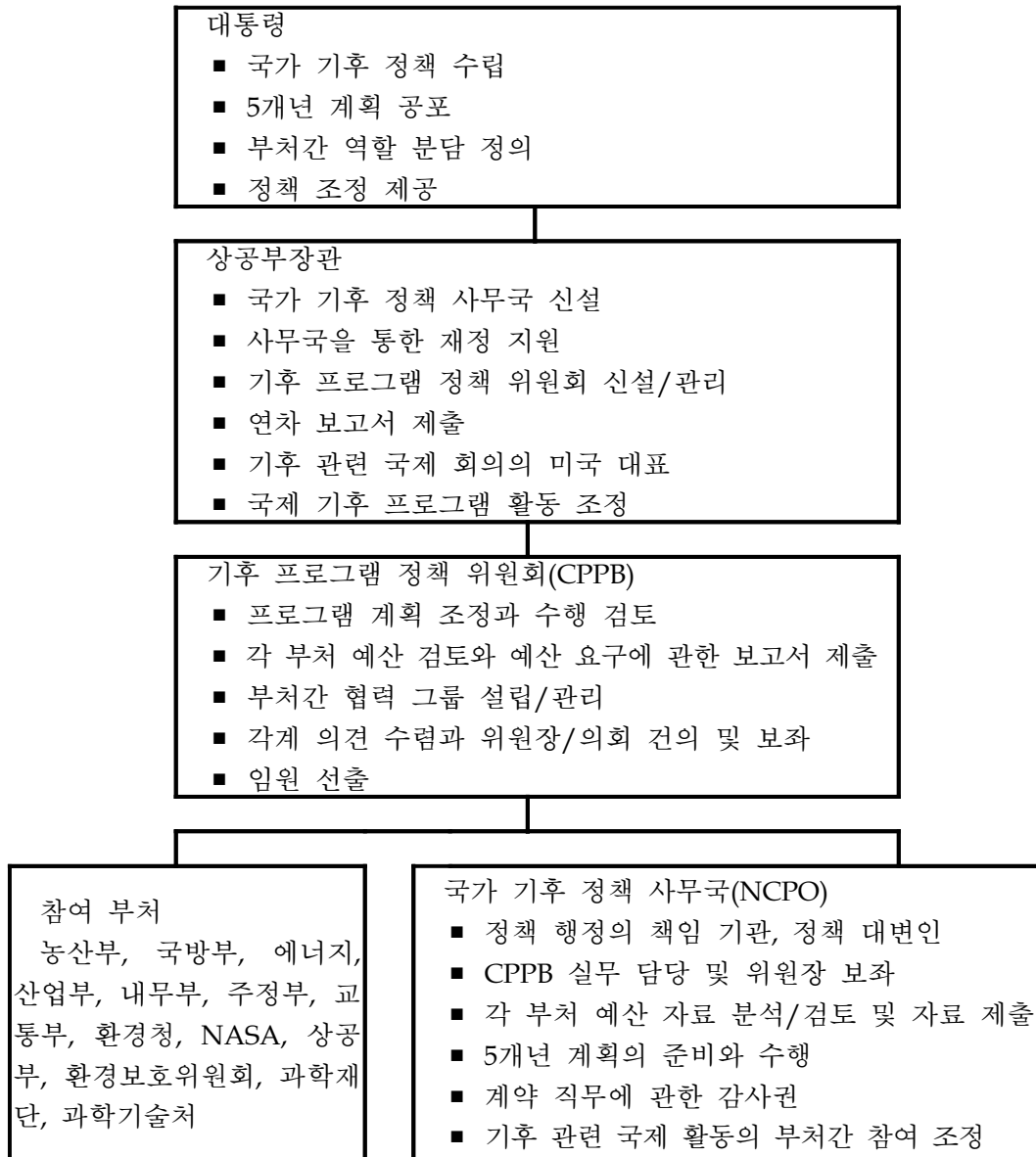
- NCP 사업수행 관련기관
 - 국가기구계획 사무국 : 사업총괄조정
 - 국립과학아카데미 : 과학적 자문
 - 기후계획 정책단 : 사업계획 검토
 - 지구과학위원회 : 지질, 지구과학분야 조정
 - 사업집행에는 NOAA와 7개 기관 참여

- 국가기후계획 발간
 - 발간부서 : 상무성
 - 자료작성 : NOAA 국가기후계획 사무국
 - 참여기관 : 농산부, 상공부, 국방부, 에너지부, 보건부, 주택 및 도시발전부, 내무부, 법무부, 국무부, 교통부, 재무부의 5소(총 16개 기관)

4.2. 국가기후계획법 제정(1978)

- 기후변동대책 종합추진을 위한 국가기후계획법을 근거로 해양대기청(NOAA)내에 국가기후계획국을 설치하여 기후계획의 추진 및 조정에 임하고 있음. 국가기후 추진체계는 < 그림 III-2 >와 같다.

20) 본절은 참고문헌 STEPI, 1997년의 내용을 요약한 것이다.



< 그림 III-2 > 미국의 국가기후계획(NCP) 추진체계

자료: STEPI, 1997

- 국가기후계획 1차 5개년 계획 시작(1980)

기후정보의 제공개선, 기후영향의 대응과 정책의 반영, 기후해명과 기후 예측 능력의 개선을 기본 축으로 하여 5년마다의 국가기후계획 수립 추진 과정은 <표 III-6>과 같다.

< 표 III-6 > 국가기후계획(NCP) 수립 추진 과정

1976년 5월	환경기상 분과위원회; 국가기후정책에 관한 공청회 개최
1977년 4월 4,5,6일	환경기상 분과위원회; 법적 근거 마련을 위한 공청회 재개최
1977년 4월 25일	환경기상 분과위원회 소집; 법안의 검토, 수정안 채택, 법안의 과학기술 위원회 상정 의결
1977년 4월 27일	법안 H.R.6669 제출
1977년 5월	법안 H.R.6669 과학 기술 위원회 회부
1978년 9월 17일	법안 비준
1978년 9월 17일로부터 30일 이내	국가 기후 정책 사무국(NCPO) 신설
1978년 9월 17일로부터 180일 이내	사무국의 5개년 계획 초안 제출 제출 후 90일 이상 의회 검토
1978년 9월 17일로부터 1년 이내	5개년 계획 최종 결정안 의회 제출
매년 3월 31일 이전 제출자 ; 장관 제출처 ; 의회와 대통령	기후정책 위원회의 전 회계 연도에 대한 연차 보고서 제출 ▪ 전 회계 연도 프로그램의 성과 요약 ▪ 정책 목적 달성을 위한 진척 상황 분석 ▪ 5개년 계획 사본과 변동 사항 ▪ 프로그램 예산 요약 ▪ 추가 법안의 권고
매 4년마다	5개년 계획은 매 4년에 한 번 이상 검토, 수정되어야 함

자료 ; STEPI, 1997

• 국가기후계획의 내용

- 기후 영향 평가
- 기후 과정, 변화의 사회·경제·정치적 영향에 관한 기초/응용 연구
- 월별, 계절별, 연별, 장기 예보의 개선방안
- 기상 자료/정보의 활발한 배포 관리 시스템
- 기후 연구, 모니터링, 분석, 자료 분배에 관한 국제적 협력 방안
- 기후 관련 연구와 서비스 관련 대학, 사기관 간의 협력 방안
- 기후 예보 실험 센터
- 5개년 계획 초안 작성과 검토, 5개년 계획 최종안의 의회 제출

• 프로그램 수행 방법 : 계약 및 승인의 허가

- 효율적 업무수행을 위한 전문인력 확보와 비용절감을 위해 본 정책은 정부 기관외 관련 기관 또는 개인에 의한 업무수행을 허가함
- 국가 기구 정책 사무국장과 감사원장은 활동 종료후 3년 간 계약 이행에 관한 감사권을 갖는다.

4.3. 연구 프로그램

미국은 대통령 과학기술 정책비서실산하에 “변화하는 지구환경: 특정 회계연도 미국 지구변화 연구 프로그램”으로 미국의 국립연구소에서 수행하는 모든 전지구적 연구프로그램(Global Research Program)을 통합하여 각종 과제를 발굴 운영하고 있다. 본 프로그램에서는 1995년 회계연도부터 2000년까지의 계획이 수립되어 있다. 총 300여개의 각종 연구소, 대학들이 참여 중에 있으며 주요 연구분야 및 관련기관은 다음 < 표 III-7 >과 같다.

< 표 III-7 > 미국의 USGCRP 내역

주요 연구분야	관련 기관
o Seasonal to interannual climate fluctuations	- 지질조사국(USGS)과 기상청(NWS), 기후 변화연구센터
o Climate change over decades to centuries	- 프린스턴 대학의 GFDL_GCM 모형 결과 활용
o Stratospheric ozone depletion, UV radiation, and atmospheric chemistry	- NCAR(National Center for Atmospheric Research), NOAA/ERL(National Oceanic Atmospheric Administration Environment Research Lab.), NASA(National Aeronautics & Space Administration),
o Changes in land cover and interrestrial and marine ecosystems	- DOE/BNL,(Department Of Energy/Brookhaven National Lab.), EPA(Environment Protection Agency)

자료 : USGCRP 홈페이지

프로그램 결과는 매년 our changing planet라는 제목하에 요약된 형태로 발표되고 있으며 아래의 내용은 1998년도 수행 결과(Our changing Planet; The FY2000 U.S. Global Change Research Program, 1999)를 나타낸 것이다.

- o National Assessment : U.S. National Assessment 는 1997년 미래의 기후변동을 기초로 정책을 수립하기 위해 시작되었다. 1998년 12번의 workshop 이 개최되었고 농업, 해안 및 해양 자원, 숲지(forest), human health, 그리고 수자원의 5개 분야에 대한 연구 및 평가가 진행되었다.
- o Greenhouse gas increase and ozone depletion : 대기중에서 온실가스 농도의 증가는 지표면의 온난화와 성층권 하부의 냉각을 가져오고 성층권에서 대류권으로의 trace substance 의 이동(transport) 및 전도(propagation)는 이들에 영향을 준다. 성층권의 어떠한 형태의 냉각도 성층권 오존의 감소를 증대시킨다.
- o Assessment of Ozone Depletion : 오존감소에 대한 USGCRP의 결과는 명백하다. 성층권에서 결합된 형태의 염소의 양은 2000년 전에 최대치를 이룰 것으로 예측된다. 그러나 오존층이 회복된다는 명백한 증거는 아직 확실하지 않다.

- o Long-range transport of air pollution : 지상에서 그리고 공간에서의 관측기를 이용한 관측 결과는 오염된 지역으로부터 상대적으로 덜 오염된 지역으로의 오염물질의 장거리 수송을 명백히 보여준다. 어떤 경우 동남아로부터 오염된 공기는 미국 서해안까지 도달하기도 하며 아프리카의 mineral dust가 미국 동남지역까지 가기도 하며 멕시코 연안의 smoke 와 ash 가 미국 북동부로까지 수송되는 것이 밝혀졌다.

2000년도 예산요구액은 18억 달러규모(1999년도는 17억달러)이며 이 가운데 8.3억달러는 지구온난화에 관한 과학적 연구비, 9.6달러는 NASA에 의한 인공위성 및 지상관측시설을 사용한 지구온난화 관측비로 배분되어 있다.

1999년과 2000년 회계연도의 연구계획은 다음 < 표 III-8 >과 같다.

< 표 III-8 > 미국의 1999년과 2000년 연구계획 요약

1999년 FY 대과제와 세부과제내용	2000년 FY 대과제와 세부과제 내용
- o National Climate Change Assessment - o Seasonal to Interannual Climate Variability - Understanding and skills needed to forecast short term climate fluctuation improved - Prediction of El Nino events and their regional impacts - Climate variability in North America - Using seasonal climate forecasts to reduce costs of impacts - o Climate Change over Decades to Centuries - Seek to understand, predict, and assess the consequences of climate change for society and the environment - Global Carbon Cycle - Predictive Models of Climate Change - Climate Change and Deep Ocean Circulation - o Changes in Ozone, UV radiation, Atmospheric Chemistry - Biomass Burning and Global Tropospheric Ozone - Cooling Role of Aerosols	- o Understanding the Earth's Climate Systems - o Biology and Biochemistry of Ecosystems - Changing Land Use and Land Cover - Multiple Stresses in Ecosystems - Changes in the Global Nitrogen Cycle - o Composition and Chemistry of the Atmosphere - Stratospheric Ozone and UV Radiation - Photochemical Oxidants - Atmospheric Modeling - Atmospheric Aerosols and Radiation - Toxic and Nutrients - Clouds - o Paleoenvironment/Paleoclimate - Global Climate and Earth's Environment - The Natural Limits of Global Environmental Variability - Forcing Factors - o Human Dimensions of Global Change - Determining the human sensitivities to the consequences of global environmental change - Determining a scientific foundation for analyzing the potential human responses to global change - Understanding the underlying social processes or driving forces behind the human relationship to the global environment - Understanding the major human causes of change in the global environment - o The Global Water Cycle

미국에서 발행된 중요한 자료는 아래 < 표 III-9 >에 미국 GCRP의 주요 연구결과 목록을 제시하였다.

< 표 III-9 > 미국의 GCRP의 주요 연구결과 보고서

Publications currently available from the U.S. Global Change Research Information Office (GCRIO)
Our Changing Planet : The FY 2000 US Global Change Research Program (1999)
NOAA Satellites Monitor Coral Bleaching (22" × 28" poster) (1999)
Catalog of 1998 Newly Available Data Sets that are significantly Global Change Related(1999)
Environmental Effects of Ozone Depletion - 1998 UNEP Assessment (special scientific publication) (1998)
Our Changing Planet : The FY 1999 US Global Change Research Program (1998)
Global Change Data and Information System Video (1998)
Our Changing Planet : The FY 1998 US Global Change Research Program (1997)
Implications of Proposed CO ₂ Emissions : IPCC Technical Paper IV (1997)
An Introduction to Simple Climate Models Used in the IPCC SAR: IPCC Technical Paper II (1997)
Our Changing Planet : The FY 1997 US Global Change Research Program (1996)
Our Changing Planet : The FY 1996 US Global Change Research Program (1995)
US Interagency UV-Monitoring Network Plan (1995)
The US Global Change Data and Information System Implementation Plan (1994)

o 기후변화에 따른 영향 평가에 관한 주요 추진 내용

- 지역(국가)연구에서는 자세한 영향평가용의 지침서를 작성
- 영향평가 관련 각종 모델이나 기초가 되는 기상자료, 및 모델 적용에 관련되는 지식의 기술이전을 할 수 있는 체제를 갖추고, 그 결과를 발표 및 보고서 작성 참여

o 기후변화에 따른 환경영향연구

- 기후변화에 적응할 수 있는 식생의 보존과 농작물의 품종 개발을 위하여 1990년에 설립된 US Global Change Research Program(GCRP)을 미 농무성과 환경청 산하에 두고 “기후 모델의 시나리오 이용”, “지구 환경계의 수분과 에너지 순환”, “이산화탄소 순환”, “자연환경 생태계 변화 및 국토이용 평가”에 관하여 2020년까지 조사 연구하고 있다.

o 온실가스 감시체계

- 1958년부터 미국 스크립스해양연구소에서 하와이 마우나로아의 CO₂ 배경농도 관측에서부터 시작하였고, 1974년부터 미국 NOAA/CMDL에서 SIO의 기술지원하에 온실기체의 정규 관측 및 감시시스템의 구축과 평가 연구를 수행

o 지구온난화예측기술

- 1993년에 클린턴 대통령이 『기후변화행동계획』을 발표하였고, 대기중 CO₂ 농도 증가에 따른 기후변화를 예측, 기후변화 예측모델 완성 및 예측시스템을 구축하기 위해 기후변화에 대한 광범위한 연구를 진행

o 지구온난화로 인한 영향평가 기법 개발 기술

- 기후변화에 따른 지구환경영향 감시시스템(인공위성 감시시스템)을 구축하고 USGCRP를 중심으로 1994년부터 기후변화 영향평가를 실시, 평가결과를 이용하여 전지구적 또는 국내 환경정책 수립에 활용

5. 일본

o IGM-WCP회의에¹⁾ 제출된 국가기후계획의 국가성명에 의하면 담당기관은 일본과학평화회의의 과학기술평의회, 지구환경보존 관계장관 회의

- 지구과학과 기술에 대한 연구 및 발전 기본계획 : 1990. 8
- 지구온난화 저지 실행계획 : 1990
- 지속발전을 위한 기후서비스, 기후과학과 예측의 신영역, 기후계의 관측, 기후영향과 대응 전략에 중점을 두고 국가기후계획을 추진
- 기상청 : 기후자료 감시 및 이용·서비스 분야를 주로 담당, 기후 문제 간담회(1979), 온실 효과 검토회(1988)를 통한 조사·계몽
- 문부성 : 기후변동 국제 협동 연구계획('89~'90) 수행 등 일본 기후 연구의 주도적인 역할
- 과학기술청 : 과학기술진흥 조성비로 기후변화 관련 국내외 연구 지원
- 일본학술학회의 국제대응위원회 : 기후연구전문위원회를 두고 기본연구계획 수립 지원

* 온실가스 관측실시

- Ryori 관측소(지상) : CO₂(1987), CFC, N₂O(1990), CH₄ (1991)
- Ryofu-Maru 관측(선박) : 북서태평양상 온실가스 관측 (1989)
- 기후자료센터 설립(1990. 10) → WMO에 의해 세계온실가스 자료 센터로 지정
 - floppy 디스크 및 양식에 의해 자료수집후 품질검사 및 분석을 거쳐 기후자료센터 연보

또는 floppy 디스켓으로 회원국 요청에 의해 배포

- 참고 : 세계오존자료센터(캐나다), BAPMoN 자료센터(미국), 복사 자료센터(소련), 강수량 자료센터(독일)

- 5층 GCM을 이용한 기후변화 예측

- 강수패턴 : 적은 대류성 강수증가, 층운형 구름 감소, 강수구역 전반적 감소
- 몬순패턴 : 육지온난화>해양온난화 → 여름철 몬순강화, 겨울철 시베리아 한랭기류 남하 약화 예상

- 중점연구사업

- 해양-대기 복합모델 개발('91~'96)
- 지구온난화에 미치는 구름의 영향조사('91~2000)
- 역학과 복사과정 고려한 구름 모델링
- 위성자료를 이용한 구름 기후분석 등

- 기후문제위원회(1979) 산하에 온실효과 대책그룹(1988. 9)을 설치 운영

- 기후변화관련 제반 문제처리, 보고서 발간(1990. 7 : 동북아시아지역 기후변화보고서 발간)

일본의 경우 가장 중요한 기후변화 연구 프로그램은 바로 FRSGC일 것이다. 자세한 내용은 아래에 서술되어 있다.

o 기후자료센터 설립(1990)

- 지구 온난화 방지 행동프로그램 착수
- 기후 모델에 의한 기후변화 평가 연구

o 일본 지구과학기술 심의회 보고서 : 지구변동 예측의 실현을 위하여

- 기후변화의 기본적 인식, 지구변동 예측계획의 제언, 지구 변동 예측계획의 제언, 지구 변동 예측 계획의 추진 방향

o FRSGC(Frontier Research System for Global Change), Toward the Prediction of Global Change(1996, 7)

FRSGC 프로그램 별 중점 연구사업은 아래 < 표 III-10>과 같다.

o 참여 연구소:

- Institute for Global Change Research in Tokyo(core base)

- International Pacific Research Center(IPRC) in Hawaii
- International Arctic Research Center(IARC) in Alaska

o 예산 : 3 billion yen(1998 FY) 약 300억원

1.4 billion yen(1997FY) 약 140억원

< 표 III-10 > 일본의 FRSGC 프로그램 내역

연구 프로그램	프로그램 내역
1. Climate Variation Research Program	- Enhance process studies on seasonal to interdecadal oceanic and/or atmospheric phenomena on the international basis - Increasing level of understanding of decadal and intedecadal climate variations : El Nino, Antarctic circumpolar waves, oceanic meridional circulation change - Ocean and atmosphere data analysis, simulation using models
2. Hydrology Cycle Research Program	- How hydroloical cycle(precipitation, evaporation, land-surface hydrological processes) would change due to anthropogenic and other forcings - 어떻게 기후변화의 격년 변화(interannual variability)가 대륙, 지역의 수자원에 영향을 미치는 가를 연구
3. Global Warming Research Program	- Reliable, Quantitative projection of global warming을 목표로 함. - 3가지 project 로 구성 1) 온실가스 증가나 에어로졸 증가등의 인위적 forcing 이 기후에 미치는 변화를 정량적으로 결정 2) global carbon cycle을 제어하는 과정 탐구, 미래의 CO2 변화증가에 따른 영향을 예측 3) 고시대의 large climate change에 대한 물리, 화학적 기작 탐구
4. Atmospheric Composition Research Program	- Carbon dioxide, methane, and nitrogen monoxide 의 영향 연구 - 성층권 오존 연구 뿐 아니라 온실가스의 영향에 의해 배출되는 가스에 의해 증가되는 대류권오존에 관한 연구; toxicity to human, creating OH which ascts as an oxidant - research on aerosol: cooling effect - Satellite and ground observation을 통한 data 수집, 이러한 변화를 고려한 prediction model 개발
5. Integrated Modeling Research Program	- 현재의 climate model 은 아직 Globla warming 등의 문제에 대해 신뢰할 만한 결과를 내기에 적합지 않음 - 5.의 목적은 차세대 기후 모델의 개발 - 10km 의 resolution 과 많은 개별적 물리 과정에 있어서의 진보를 가져옴.

o 일본 환경청 산하 온난화 문제 검토위원회(1997)

- 온난화 영향연구 및 향후 검토과제 정리
- GCM등의 장래기후의 예측결과를 이용하여 장해의 기온, 강수량 변화에 따른 영향분석
- 농업, 연안시스템(해면상승)분야에 관해 중점연구

o 기후변화에 따른 영향 평가에 관한 주요 추진 내용

- 일본환경청에 설치된 온난화문제검토위원회를 기초로 1년간에 걸쳐 분야별로 온난화영향연구 및 향후의 검토과제가 1997년 4월에 발표하였고 그 일부는 국가보고서로 됨
- 종래 실시되어온 영향연구와 관련연구의 성과를 중심으로 정리함으로써 IPCC와 동일한 접근방법을 취하고 있어 JPCC라는 약칭으로 불림
- GCM 등의 장래기후의 예측결과(기후시나리오)를 이용하여 장해의 기온·강수량변화가 각 분야에 어떻게 영향을 주는가를 정량적으로 평가
- IPCC의 영향/적응평가의 가이드라인에서 제시한 방법에 기초하여 실시된 연구 포함
- 영향연구가 진행된 분야로는 농업, 연안시스템(해면상승)분야가 있음
- 두 분야에서는 이미 대응책까지 고려한 연구성과가 작성됨
- 기타 다른 분야에서의 영향연구는 아직 빈약해서 향후 진전이 기대됨

o 기후변화에 따른 환경영향연구

- 학술원을 중심으로 기후변화에 따른 토지이용변화와 지표 분류에 관한 연구를 IGBP의 연구계획에 참여시켜 ① 도시화 및 산업화와 지구환경변화, ② 농업과 산림생태계 변화와 지구환경 변화, ③ 토지이용변화와 지구환경 보존에 관하여 중점적으로 연구하고 있다.

o 온실가스 감시체계

- 1987년부터 기상청에서 온실기체의 관측을 실시

o 지구온난화예측기술

- 1990년에 지구온난화방지행동프로그램을 착수하여 지구온난화에 대한 광범위한 연구를 수행중이며 이중 기후모델에 의한 기후변화 평가 연구가 포함되어 있다.

o 지구온난화로 인한 영향평가 기법 개발 기술

- 일본, 과학기술청(Science and Technology Agency, STA), 국립환경연구소(National Institute of Environment and Sciences, NIES), 교육과학문화부를 중심으로 지구온난화에 의한 몬순기후영향, 열대림 생태조사, 에어로졸의 지구온난화와의 상관성 조사, 해양 변화조사 등을 수행하고 원격탐사에 의한 국토변화 조사 시스템을 구축

Seino (1995)의 기후변화가 발작물에 미치는 영향을 예측하기 위한 CERES-Maize 모델 및

일본의 AIM(Asian-Pacific Integrated Model) 등이 개발되어 기후변화에 따라 변화하는 생물의 성장·동향 등을 모형화한 것으로 이미 기후 변화가 식생, 산림생태계, 겨울밀의 생산성 변화 등에 영향을 미치고 있다는 것을 예측하고 있다.

6. 오스트리아

International Institute for Applied Systems Analysis(IIASA) 프로그램에서 “토지이용과 전 지구 변화: 유럽과 아시아의 과거 토지이용과, 미래, 현재”라는 주제로 연구 project를 시작하고 있다. 여기에 일본은 “유럽과 북아시아 지역의 기후변화에 따른 토지이용 및 지표변화 모델링” 개발에 전력하고 있다. 따라서 일본, 유럽, 미국뿐만 아니라 UN 가입국 대다수 국가가 국토개발에 따른 복지공간 훼손, 하천의 수질보존, 산업발전에 대한 국토 개발, 해수면상승과 연안해역 개발 등 많은 분야에서 자국의 국토환경변화를 기후변화와 연계하여 조사 연구하고 있다.

7. 네덜란드

기후변화연구 그룹인 NOP는 1990년부터 정부의 강력한 지원으로 The IMAGE Project라는 국가과제로서 지구온난화에 대한 국토이용과 산림, 농업, 에너지 및 생태계 변화 영향에 대하여 예측 소프트웨어를 개발하여 왔다. IMAGE 소프트웨어는 기후예측 시나리오를 바탕으로 인공위성 관측과 GIS 기법 등으로 국토환경의 영향을 예측할 수 있는 컴퓨터 모델을 개발하여 왔다. 지구온난화에 따른 수자원 및 에너지 공급과 국토이용을 정확히 예측함으로써 기후변화에 따른 정부의 경제정책에 반영하고 기후변화 협약에 활용 하고자 함이다.

8. 기후변화가 생태계에 미치는 영향 평가에 관한 종합분석

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

선진국들은 관련기관 연구개발의 진보상황 즉, 과학적 지견, 기술개발 상황, 사회정세 등을 정기적으로 규명하여 국가전략 프로그램으로서의 효율성을 재평가하는 기구를 구축하고 있다. 미국, 대통령 과학기술정책비서실에서는 “변화하는 지구환경: 특정회계연도 지구변화연구프로

그램” Our changing Planet the Fly 1997 US Global Research Program(USGCRP)을 실시하고 있고, 일본의 경우는 지구과학기술심의회에서 “지구변동예측의 실현을 위하여”를 발간하고 있다. 종합계획을 수립하기 위한 지구온난화 감시, 예측, 영향평가 기술개발에 대한 외국의 연구현황을 < 표 III-11 >와 같이 종합할 수 있다.

또한, 선진국을 중심으로 기후변화가 생태계에 미치는 영향을 분석하기 위한 다양한 모델들이 개발되고 있다. Foley 등(1996)의 기후 변화가 식생에 미치는 영향을 분석하기 위한 DGV(Dynamic Global Vegetation) 모델, Horie 등(1995)의 기후 변화가 농작물에 미치는 영향을 분석하기 위한 SIMRIW 모델, 및 Seino (1995)의 기후변화가 밭작물에 미치는 영향을 예측하기 위한 CERES-Maize 모델 및 일본의

< 표 III-11 > 종합계획을 수립하기 위한 지구온난화 감시, 예측, 영향평가 기술개발에 대한
외국의 연구현황

항 목	내 용
온실가스 감시체계	- 1958년부터 미국 스크립스해양연구소에서 하와이 마우나로아의 CO₂ 배경농도 관측에서부터 시작하였고, 1974년부터 미국 NOAA/CMDL에서 SIO의 기술지원하에 온실기체의 정규관측 및 감시시스템의 구축과 평가 연구를 수행 - 일본, 1987년부터 기상청에서 온실기체의 관측을 실시
지구 온난화 예측기술	- 미국, 1993년에 클린턴 대통령이 『기후변화행동계획』을 발표하였고, 대기중 CO₂ 농도 증가에 따른 기후변화를 예측, 기후변화 예측모델 완성 및 예측시스템을 구축하기 위해 기후변화에 대한 광범위한 연구를 진행 - 일본, 1990년에 지구온난화방지행동프로그램을 착수하여 지구온난화에 대한 광범위한 연구를 수행중이며 이중 기후모델에 의한 기후변화 평가 연구가 포함되어 있다.
지구 온난화로 인한 영향평가 기법 개발 기술	- 미국, 기후변화에 따른 지구환경영향 감시시스템(인공위성 감시시스템)을 구축하고 USGCRP를 중심으로 1994년부터 기후변화 영향평가를 실시, 평가결과를 이용하여 전지구적 또는 국내 환경정책 수립에 활용 - 일본, 과학기술청(STA), 국립환경연구소(NIES), 교육과학문화부를 중심으로 지구온난화에 의한 몬순기후영향, 열대림 생태조사, 에어로졸의 지구온난화와의 상관성 조사, 해양변화조사 등을 수행하고 원격탐사에 의한 국토변화 조사 시스템을 구축 - 유럽의 경우 노르웨이, 영국 등을 중심으로 수문순환 영향조사, 대기해양 상호작용 영향 평가, 생태계 영향평가, 지구온난화의 human dimensions 연구 및 보건환경영향 평가를 실시중이며, 러시아의 산림생태 변화 연구, 호주의 지구사막화 연구 및 대기질 변화 영향 평가 등을 사전 계획을 수립하여 추진 중

AIM(Asian-Pacific Integrated Model) 등이 개발되어 기후변화에 따라 변화하는 생물의 성장·동향 등을 모형화한 것으로 이미 기후 변화가 식생, 산림생태계, 겨울밀의 생산성 변화 등에 영향을 미치고 있다는 것을 예측하고 있다.

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

IV. 기후변화의 산림생태계 영향평가 모형 개발 상황 및 평가

1. 모형개발의 배경

지구온난화가 진행됨에 따라 나타나는 기후변화는 인류와 지구환경의 모든 분야에 걸쳐 그 영향을 미칠 것으로 예측되고 있다. 강수공급의 지역별 불균형으로 인해 농업은 물론 토양의 성질과 자연환경의 생태계 변화를 가져오고 동시에 지구의 사막화를 유발할 것으로 보고되고 있다.

현재 보고되고 있는 지구온난화에 따른 영향들을 열거하여 보면, 저온으로 인해 경작이 어려운 농업지역을 농지로 변환을 유발시키거나, 기온의 상승시 물의 사용량을 증가시키거나, 남극·북극의 얼음을 녹게 하여 그 결과로 해수면의 상승 및 연안해역의 오염을 유발시키거나, 도시와 산업시설의 확장에 따른 열섬효과와 지구 알베도 증가, 산림 및 농경지의 이동 등에 따른 국토이용과 자연환경의 변화, 전염병의 발병 및 인체의 기형화 유발하는 등을 들 수 있다. 특히 이런 현상들은 다양하게 서로 연관된 형태로 나타나 심층적인 각종 환경적인 악영향의 원인이 될 것으로 보여진다. 따라서, 기후조건과 자연생태계 및 지표와의 상호작용을 이해하여 규명함으로써 자연환경에 미치는 영향을 평가하고 예측하는 것은 인류의 생존에 매우 중요한 과제라 할 수 있다.

UN의 IPCC는 “인간에 의해 발생하는 온실가스가 자연적인 기후변화에 단독으로 미치는 영향보다도 복합적으로 작용하여 현재보다도 훨씬 더 현재의 지구온난화를 가속화시키고 있다”고 발표하였다. 전세계적으로 화석연료사용량의 증가, 토지이용의 급격한 변화 등 인간활동으로 인한 온실가스의 배출량 증가로 최근 지구온난화에 따른 이상기후 현상이 빈번히 나타나고 있으며 지난 100년간 평균기온은 0.3-0.6℃가 상승하였고 해수면도 10-25 cm 상승한 것으로 알려져 있다. 현재의 추세라면 2100년까지 약 2℃의 기온상승(해수면은 49cm 상승)이 예상되고 있다. 만약 이런 지구환경변화가 발생한다면, 기후적인 요소에 의해 영향을 받는 각종 환경상의 부정적인 영향이 매우 심각할 것으로 예상할 수 있다.

IPCC를 비롯한 국제협력기구 및 선진국들은 이러한 기후변화에 범세계적으로 대처하기 위해 국가 기후계획 수립, 국제협약 체결과 국제 공동연구 수행 등 다양한 노력을 해오고 있다. 주요한 연구의 하나로 기후변화가 전지구적으로 또는 지역적으로 생태계, 수자원, 식량자원, 연안환경, 국민건강 등에 미치는 영향에 대한 분석·평가를 통해 지구온난화와 관련한 대책 마련에 국제기구와 선진국들은 부단한 노력을 경주하고 있다.

한반도의 경우, 지구온난화와 관련되어 지난 75년간 기온이 약 0.7℃ 증가하였다고 추정되며 온실가스의 하나인 CO₂는 1990-1997년 기간 중에 약 21ppm증가하여 기후변화에 따른 환경적인 각종 악영향이 우려되고 있다. 특히, 한반도는 세계 최대 에너지 소비국가이며 세계 1

위의 CO₂ 배출국가로 예상되는 중국과 인접한 위치에 있어 국가간 장거리 이동으로 인한 기후변화 영향 또한 크게 받을 것으로 예상된다. 따라서, 지구온난화에 의한 기후변화에 효율적으로 대처하기 위해 지구온난화가 한반도의 자연적 환경에 미치는 영향뿐만이 아니라 사회적·경제적 환경에도 영향을 미치게 되어 장기적인 경제성장시나리오에도 변화를 가져옴으로써 한반도 지역의 기후변화에 미치는 그 영향을 다양한 공간적 규모(지구, 동북아, 한반도) 및 장기간에 따른 계량화된 형태의 자료를 파악·평가하는 연구가 요구된다.

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

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

2. 기후변화로 인한 생태계 영향 예측 및 평가 모형 현황 및 분석

본 연구에서 기후변화로 인한 영향예측 및 평가에 관한 선행연구를 전 지구와 대륙 등 광역차원의 영향연구와 한 국가를 대상으로 한 지역차원의 영향연구의 두 가지로 나누어 고찰하였다. 식생영향예측 모형 중 생물기후모형은 대기대순환모형에서 도출된 기온과 강수량 결과물과 물 균형 모형에서 산출된 유출량 잠재증발산량 등을 입력자료로 활용한다. 따라서 이와 직접적으로 관련있는 GCM, 물 균형 모형, 식생영향모형의 3가지로 세분하여 연구사를 정리·분석하였다.

2.1. 광역차원의 영향예측 및 평가

2.1.1. 대기대순환모형

기후변화에 따른 환경영향을 평가하기 위해서는 기후변화시나리오를 필요로 한다. 따라서 기후변화에 따른 여러 분야의 영향평가에 필요한 입력자료를 제공하기 위해서는 기후모형의 여러 가지 변화시나리오를 설정해야 한다.

1970년대 전후 GCM의 태동(Bryan, K., 1969; Arakawa, 1972; Takano, 1974; Semter, 1974) 이후 대기대순환모형(Atmospheric General Circulation Model, AGCM)과 해양대순환모형(Oceanic General Circulation Model, OGCM)은 각각 괄목할만한 발전을 보았으나, 대기해양 접합대순환모형(Combined General Circulation Model, CGCM)은 기술 발달 단계로 볼 때 거의 답보 상태에 있었다(김정우, 1997).

기후변화 시나리오는 GCM시나리오로 현재 세계적으로 대기대순환연구개발모임(Atmospheric Model Intercomparison Project, AMIP)에 등록된 GCM은 약 60여개 이나, 대기해양영향을 접합하여 기온 상승에 따른 시나리오를 이용할 수 있는 CGCM은 약 20개로 IPCC는 추천하고 있다(IPCC, 1996b). 이중 IPCC는 IS92a~IS92f의 6개 기후변화시나리오를 제시하였으며(IPCC, 1992), 각 시나리오의 인위적인 이산화탄소배출량과 그때의 대기중 이산화탄소 농도를 같이 제시하였다.

위와 같이 전지구규모의 기후변화 정보를 산출하는 도구인 CGCM은 보통 수평격자크기가 250km 내외이며, 연직격자크기는 1km 정도인 3차원 역학수치모델이다. 따라서 대륙규모 또는 지역규모와 같이 작은 규모의 정보생산에는 한계가 있다(기상연구소, 1999).

2.1.2. 물 균형 모형

수자원 분야의 연구는 1990년을 기점으로 기후변화에 대한 많은 국제적 연구들이 수행되어 오고 있다. 수자원에 대한 기후변화의 영향을 고찰한 연구는 과거유출로부터의 기후변화감지, 미래유출변화의 예측의 2가지로 구분된다.

과거의 유출로부터의 기후변화감지에 관한 연구로는 Najjar(1999)는 미국의 Susquehanna 유역에 대해 연구한 결과 유출의 변화율은 강수량의 변화율의 약 두배로 나타났다. 현재까지 이루어진 유출에 대한 추세분석 연구들을 살펴보면 주로 비모수 통계방법인 Mann-Kendall 실험법 사용하고 있으며, 추세분석의 결과는 지역별로 상이한 모습을 보이고 있다. Wahl(1991), Leith(1991), Chiew와 McMahon(1993), Lettenmaier 등(1994), Burn(1994), Lins(1994), Mitosek(1995), Marengo(1995), Westmacott과 Burn(1997), Leith와 Whitefield(1998)등은 Mann-Kendall 실험법을 이용하여 추세분석을 하였으며, 일부지역에서 유의한 추세를 감지하였다.

미래 유출의 예측은 대부분의 경우 GCM으로 작성된 기후변화 시나리오를 수문 모형에 결합하는 기법이 주종을 이루고 있다. Kwadijk과 Romans(1995)는 GCM을 이용한 기후변화 시

나리오를 수문 모형과 결합하여 전형적인 유출에 대한 기후변화의 영향평가를 수행하였다.

GCM의 신뢰성이 낮은 현재의 시점에서 주로 이용되고 있는 방법은 위와 같이 현재상태와 CO₂ 가스 배증상태의 온도와 강수량 차이를 구한 후 이를 과거 기후자료에 적용하여 이용하는 방법이 있다. 이를 이용하여 유출량을 예측한 연구로는 Nash와 Gleick(1990), Lettenamaier와 Sheer(1991), Kwadijk과 Middelkoop(1994), Kirshen과 Fenessey(1995), Rao와 Al-Wagdany(1995), Arnell과 Reynard(1996), Schreider et al.(1996), Dvorak et al.(1997), Vogel(1997), Gellens와 Roulin(1998), Najjar(1999) 등이 있다.

2.1.3. 식생영향모형

식생부문의 영향예측모형은 다양한 연구가 진행되고 있으나, 크게 4가지의 모형으로 압축하면, 실험법, 유추법, 전문가판단, 정량적모형으로 볼 수 있다.

(1) 실험법

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

(2) 유추법

유추법에는 역사적 유추법과 지역적 유추법으로 구분된다.

역사적 유추법에는 과거의 꽃가루를 이용하여 미래의 변화를 유추하는 화분학적(palynological) 접근법(Branche et al., 1993, Servant et al., 1993)과 수목의 나이테를 이용하여 추정하는 연륜연대학적(dendrochronological) 접근법(D'Arrigo et al., 1992)이 있다. 역사적 유추법은 산림의 경계가 얼마동안의 시간동안에 이동되었으며, 변화기동안 어떠한 현상들이 발생하였는가를 참조하는데 유리하다(UNEP, 1998).

지역적 유추법은 특정지역의 현재의 변수를 이용하여 미래의 변화된 기후하에서의 상황을 추정하는 방법으로 기후변수를 제외한 다른 변수들은 현재와 미래가 동일하다는 취약점이 있다(UNEP, 1998).

(3) 전문가 판단

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

(4) 정량적 모형

정량적모형은 생물·물리적모형과, 경제모형, 통합모형의 3가지로 구분하여 볼 수 있다.

① 생물·물리적 모형

생물·물리적 모형은 강수, 온도, 토양유형, 식물종 등의 구동변수 변화의 결과로 인한 생태계 속성(생물다양성의 생존과 성장 또는 생태계의 생산성) 변화예측을 위한 모형이다(Shugart et al., 1988; Smith et al., 1992; Dale and Rauscher, 1994; Joyce, 1995; Agren et al., 1991; Ryan et al. 1996). 이 생물·물리적 모형의 대표적인 방법으로는 경험적 통계모형과 과정기반 모형이 있다.

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

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

Holdridge 모형을 이용하여 AIM project Team(1997)이 수행한 식생모형의 결과는 < 표 IV-1 >, < 그림 IV-1 >와 같으며, 현재와 2100년 사이에 변화를 보여주고 있다.

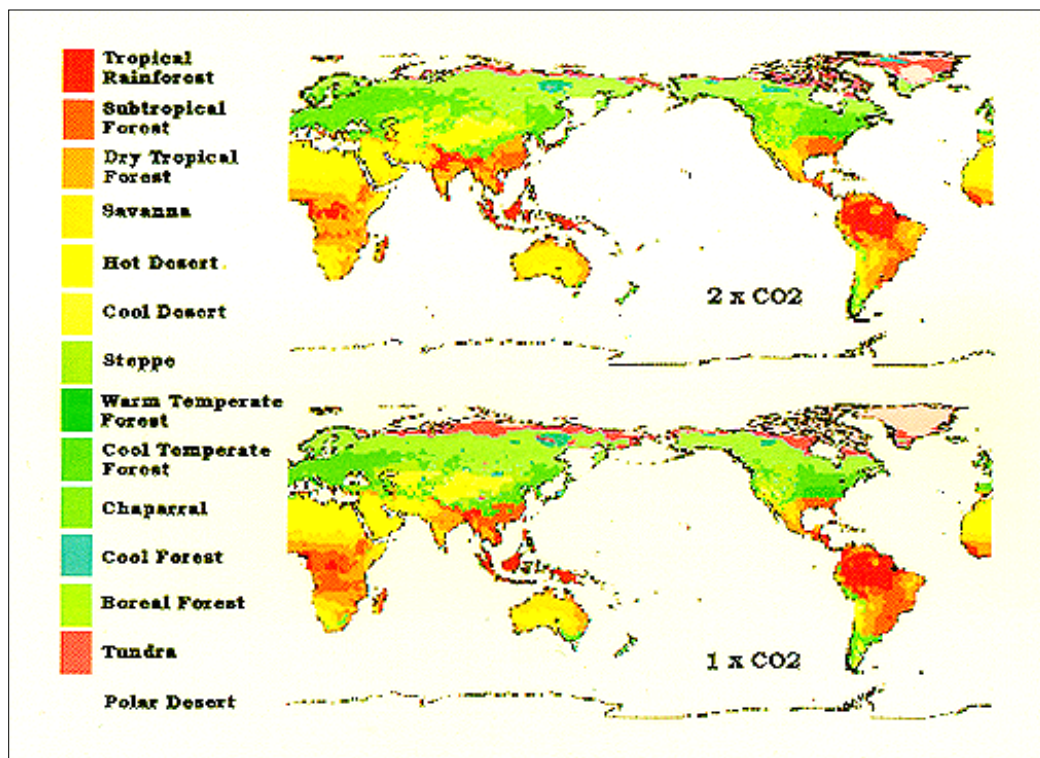
< 표 IV-1 > 현재와 2100년 기후변화로 인한 식생분포 결과 (단위 : %)

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

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

여러 가지의 GCM에 의해 예측된 식생의 영향을 전 세계적으로 볼 때, 열대우림, 열대건조림, 사바나, 온대림, 한대림 등이 증가하고, 아열대림, 열대사막, 한대사막, 툰드라, 극 사막 등은 감소하는 경향을 보이고 있다.

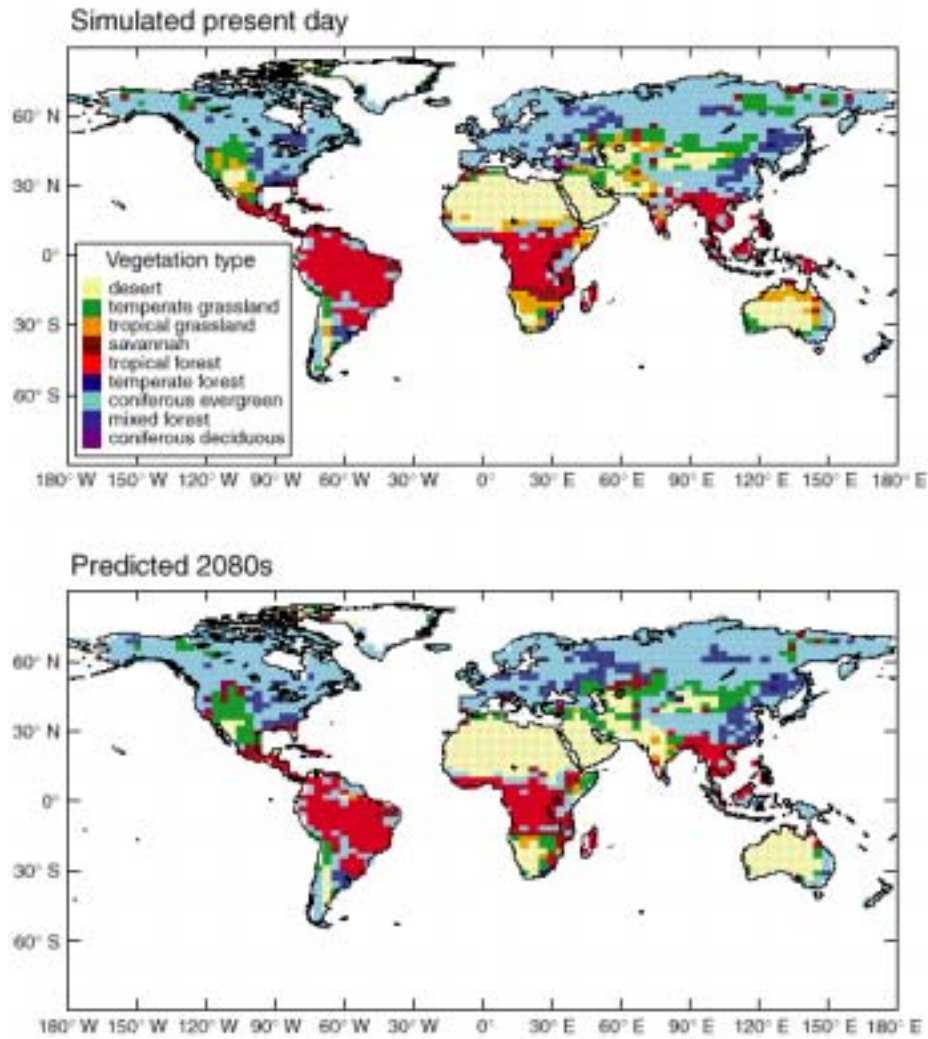
이를 지역별로 보면, 인도대륙에서는 열대림 및 아열대림의 현저한 증가가 예측되고, 동유럽 지역에는 한대림의 온대림으로의 현저한 변화 잠재성을 보여주고 있다. 북미대륙에서는 온대림이 초원으로 변화하는 면적이 증가할 것으로 예측되고 있다. 우리 나라의 경우 온대림에서 변화가 없는 것으로 예측되고 있다. 이는 광역영향모형의 공간적 해상도가 300km-400km이기 때문에 우리 나라와 같이 위도 차가 적은 나라는 정확하게 예측되기 곤란하기 때문이다.



< 그림 IV-1 > AIM/Impact 모형의 기후변화로 인한 식생분포 변화 결과물

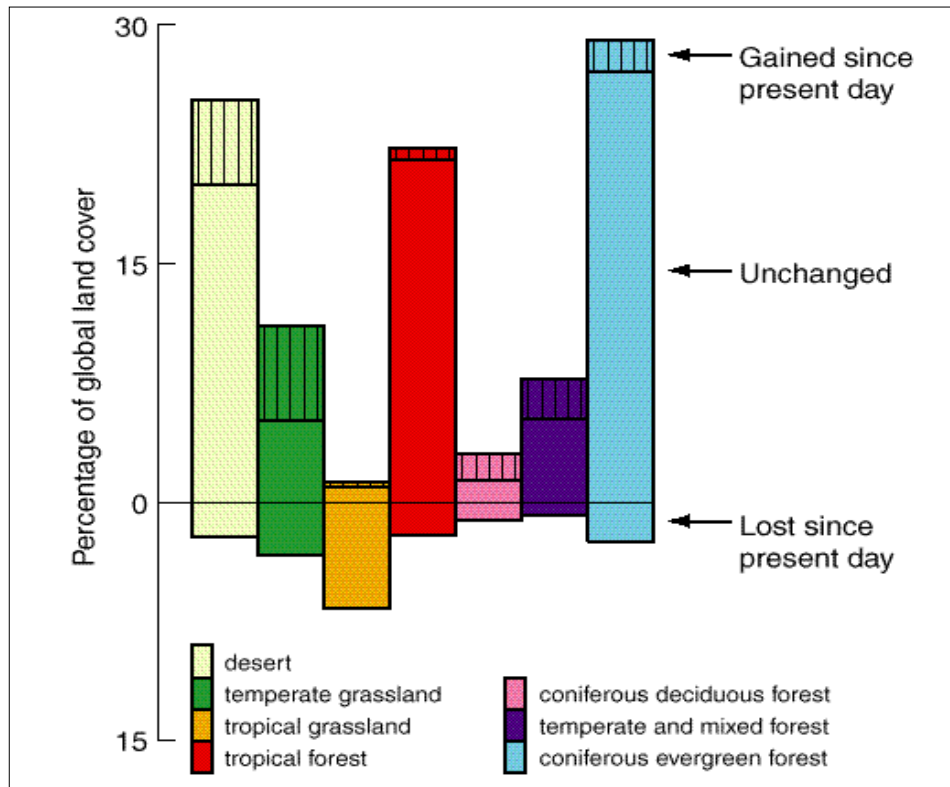
자료 : AIM Project Team(1997), Asian-Pacific Integrated Model, NIES, p.69

< 그림 IV-2 >은 현재와 2080년경에 예상되는 사막과 8가지의 식생유형의 분포를 보여주고 있다. 이 분석에서는 2080년경 혼효림의 면적이 증가하고 열대초원과 열대림의 감소를 예측하였으며, 우리 나라의 경우 상록침엽수림으로 변화가 없다는 결과를 제시하고 있다. 이 역시 광역영향연구가 가지는 한계에 기인하는 것으로 생각된다.



< 그림 IV-2 > 생태계 모형으로 예측한 현재와 2080년의 지구식생분포도
 자료 : Harasawa, H. (2000) Recent development of Impacts Study in Japan and IPCC, 기후
 변화와 생태계보전 심포지움 발표 OHP

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

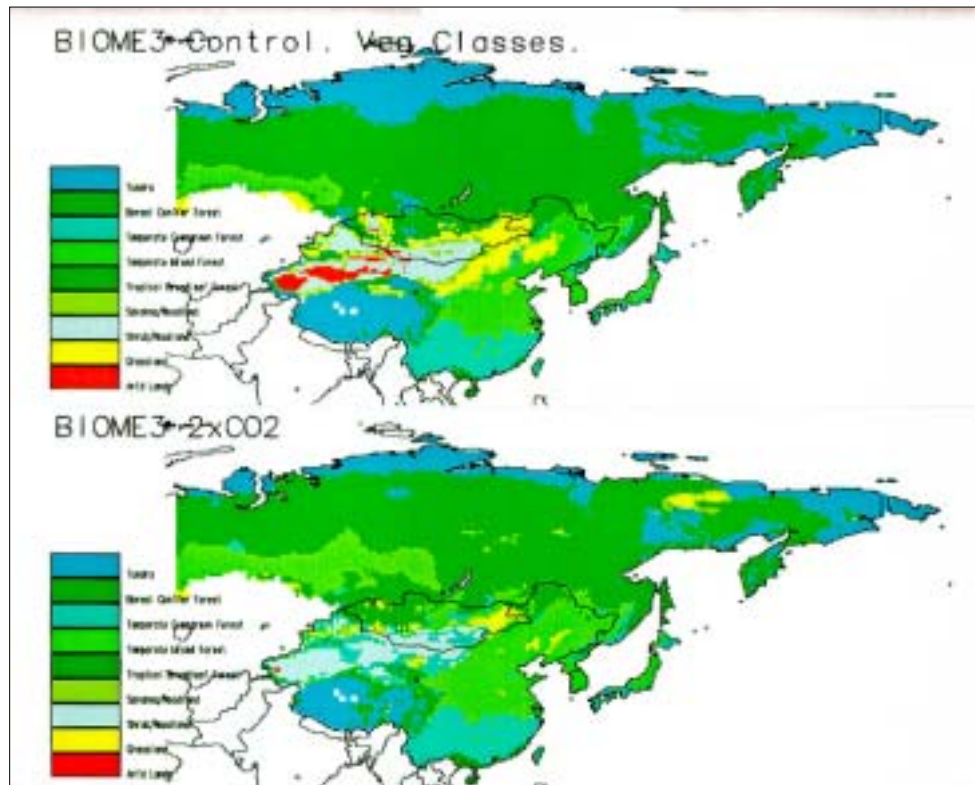


< 그림 IV-3 > 현재와 2080년의 유형별 식생면적변화

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

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

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



< 그림 IV-4 > BIOME 3 모형에 의한 식생부문의 영향

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

위의 < 그림 IV-4 >는 BIOME3 모형의 결과를 보여주고 있다. 이 역시 우리 나라의 경우는 기후변화 전과 후의 차이가 없어 광역차원의 모형은 우리 나라와 같이 경위도차가 작은 나라에는 충분한 설명력을 가질 수 없음을 단적으로 보여주고 있다.

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

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

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

과정기반 모형은 입력과 출력의 기계적인 연산에 의해 예측되는 모형이라는 의미에서 기계적인 모형이라고도 알려져 있다. 이 모형으로는 특정지역의 산림수목의 생성, 성장, 소멸과정을 수명, 생장률, 요구환경을 이용하여 시뮬레이션하는 GAP 모형이 있다(UNEP, 1998).

이러한 정보들은 연구가 많이 이루어진 국가들에서는 비교적 구하기 쉬우나, 기초연구가 안되어 있는 대부분의 나라에서는 기초정보를 구축하는데 많은 시간과 노력이 투입되어야 한다는 단점이 있다. 그러나, GAP 모형은 종 구성변화 및 외부적 환경변화에 따른 일시적인 생물

량 반응을 예측하는 연구에서는 매우 유용한 방법이다(이재훈 등, 2000).

② 경제모형

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

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

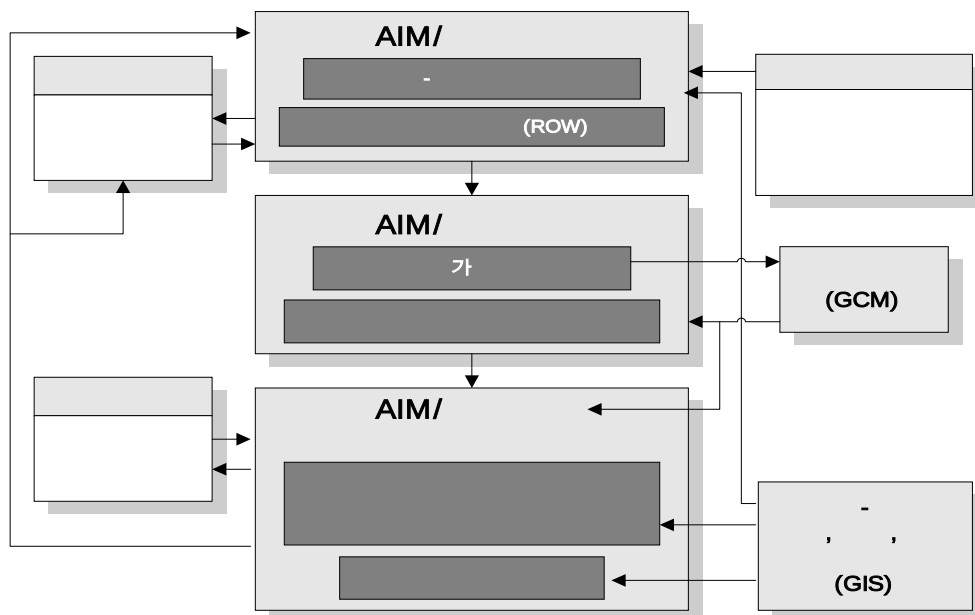
③ 통합모형

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

이 모형의 사례로는 네덜란드 보건환경연구소(Research for Man and Environment : RIVM)에서 개발한 IMAGE2.0(Alcamo, 1994)이 가장 근접한 사례이나 매우 기초적인 모형으로 한계성을 많이 가지고 있다.

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

AIM은 크게 그린하우스 가스 배출 (AIM/emission), 기후 (AIM/climate), 영향 (AIM/impact) 세 가지의 모델로 나뉘어져있는데 각 모델간의 관계는 다음 그림과 같다.



< 그림 IV-5 > AIM 통합모형의 개요

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

〈 표 IV-2 〉 산림부문의 기후변화영향평가 기법별 개요 및 요약

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

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

기후변화로 인한 산림·식생부문의 영향을 예측하는 방법은 다음의 < 표 IV-3 >과 같이 목적에 따라 분할 수 있다. 이중 산림·식생면적의 분포와 변화를 기후변화와 연관하여 예측하는 방법론은 인공위성영상자료를 이용한 원격탐사기법과 지리정보시스템을 이용할 경우 자료 구축 및 활용시 시간을 절약할 수 있으며, 결과의 신뢰성을 높일 수 있다.

〈 표 IV-3 〉 산림·식생부문 영향예측 목적에 따른 기술

목 적	예 측	요 소 기 술
산림면적과 분포의 변화분석	기후변화에 따른 산림 면적 및 분포변화의 예측	- 인공위성영상자료를 이용한 원격 탐사기법과 지리정보시스템을 이용한 분석 - Holdridge 모형 - 시공간적 유추법
산림구조의 변화분석	기후변화에 따른 산림 구조 변화의 예측	- 성장실험 - Suceession(Gap) 모형
산림자원 생산의 변화분석	기후변화에 따른 산림 자원 생산량 변화 및 자원경제학적 변화의 예측	- 경제모형 - Demographic모형 - 통합모형 - 통계분석모형
산림 생태계 구조와 기능의 변화분석	기후변화로 인한 산림 생태계의 변화 예측	- Succession(Gap) 모형

UNEP(1998)에서는 위의 다양한 모형들을 다음과 같은 용도로 사용하는 것을 권고하고 있다.

생물·기후적 모형은 다양한 기후변화 시나리오 하에서의 미래의 안정기(steady-state) 산림분포를 예측하기 위하여 사용하여야 한다.

시간적 유추법과 생물역사학(bio-history)적 정보는 산림의 경계가 얼마동안의 시간동안 이동되었으며 변환기동안 어떠한 현상들이 발생하였는가를 참조하는데 사용한다.

2.2. 지역차원의 영향 예측 및 평가

2.2.1. 지역기후모형

지구규모의 기후변화는 결과적으로 지역기후의 변화로 나타날 것이므로 이를 지역차원에서 예측하는 지역기후모형(Regional Climate Model, RegCM)이 필요하다. AGCM은 오래 전부터 개발되어 왔으나, RegCM은 불과 10년 이내의 짧은 역사를 가짐에 따라 예측의 정확성 및 신뢰성 등 앞으로 개선되어야 할 부분들이 많다(김정우, 1997) 지역기후변화 는 GCM 모의 결과를 직접 분석하거나 통계모형 또는 3차원의 역학모형을 이용하여 산출할 수 있다(기상연구소, 1999).

GCM을 이용한 RegCM의 구축은 주로 IPCC에 의해 이루어졌다. IPCC(1990)는 여러 개의 GCM으로 모의한 결과를 종합·분석하여 미 대륙중북부, 동남 아시아, 아프리카 사하라지역, 남부 유럽, 호주 대륙의 기후변화를 유추하였다(Cubasch et al., 1995; Whetton et al., 1993,

Whetton et al., 1994).

동아시아지역에 대한 유추도 Raisenen(1995)과 Liu et al.(1994)에 의해 이루어졌다. 이들 결과를 정리하면 여러 개의 GCM으로 산출한 지역 기후변화 시나리오의 몇 개는 서로 부호가 일치하고 민감도의 범위는 편향(규준모의-관측) 범위보다 작았다. 그러나 각 모델 결과로부터 산출한 지역 기후변화 시나리오의 범위와 모형별 지역 편향이 커 GCM 결과에서 산출한 지역 기후변화시나리오의 신뢰도는 낮았다. 이와 같이 낮은 신뢰도를 보이는 것은 주로 GCM의 낮은 공간분해능, 모형물리과정의 제한, 현재 지역기후분석의 오차 등에 의한 것으로 판단되었다(IPCC, 1996b).

컴퓨터의 계산능력이 상당히 증가하였지만, 현재도 CGCM의 수평해상도는 매우 낮기 때문에 복잡한 지형을 가진 지역에서 지역적 강제력 효과를 잡아낼 수 없어 영향평가연구에 적절한 정보를 제고하지 못하고 있다. 그래서 낮은 해상도의 GCM 모의 결과로부터 고해상도 지역기후 정보를 만드는 다운스케일링(Downscaling)방법이 제안되었고, 통계적 방법과 역학적인 지역기후모의 모형이 사용되고 있다(기상연구소, 1999).

통계적 방법은 지역기후변수와 광역기후인자간의 통계적 상관관계를 개발하고 GCM 모의 결과에 적용하여 지역규모 기후특성을 모의하는 것이다. 통계적 방법을 이용한 연구는 주로 모형 검증에 필요한 자료가 많은 미국, 유럽, 일본 지역에서 이루어졌다(Karl et al., 1990, Bardossy and Plate 1992; Wilks 1992, Wilson et al., 1992; Zorita et al., 1995).

3차원 역학모형을 이용한 지역규모 기후모의 기술은 저해상도의 GCM 모의 결과를 고해상도의 RegCM의 초기조건과 경계조건으로 사용하여 RegCM을 모의하므로써 지역규모기후정보를 산출하는 것이다. 전반적인 기후패턴은 GCM의 기후정보에 의해 형성되고, RCM의 상세한 지표이용, 식물분포, 토양특성, 산악, 해안분포 등에 의해 유발되는 강제력이 지역특성의 지역규모 기후패턴을 형성한다. RegCM은 중규모 국지 기상모델과 유사한 구조로 운영방법도 유사하다. 따라서 일 기상현상 모의에서 월, 계절, 연 및 수 백년의 지역규모 기후를 모의할 수 있는 장점이 있다(기상연구소, 1999).

관측 또는 GCM 모의 자료로부터 RegCM을 이용한 지역기후모의 연구가 여러 지역에 시도되었다. Giorgi et al.(1994), Bates et al.(1995) 등이 북미 지역에 대해, Kanamitsu와 Juang(1994), Liu et al.(1994), Hirakuchi와 Giorgi(1995), Sakaki et al.(1995) 등이 아시아 지역에 대해, Jones et al.(1995) 등이 유럽지역에 대해 McGregor와 Walsh(1994), Walsh와 McGregor(1995) 등이 호주지역에 대해, 그리고 Semazzi et al.(1994) 등이 사하라 지역에 대해 현재의 지역기후모의를 시도하였다. 이산화탄소 증가로 인한 지역기후 변화 모의는 Giorgi et al.(1994)가 미국대륙에 대해 McGregor와 Walsh(1994)가 호주의 Tasmania지역에 대해, Hirakuchi와 Giorgi(1995)는 아시아지역에 대해 그리고 Johnes et al.(1995)가 유럽에 대해 시도하였다.

또한 Dickinson et al.(1989), Giorgi(1990; 1991), Giorgi & Mearns(1991), Marinucci and Giorgi(1992), Giorgi et al.(1992; 1993a; 1993b; 1994), Kida et al.(1991), Liu et al.(1994)등에 의해 수행된 연구결과들은 RegCM과 OGCM을 연결한 결과를 보여주고 있다.

국내도 전국 규모 기후변화와 그 영향에 관한 연구로 기상연구소(1990, 1991, 1992a, 1992b, 1993, 1994), 강인식(1992), 환경부와 과학기술부(1996, 1997), 윤원태(1996) 등이 있다.

2.2.2. 물 균형 모형

국내에서 기후변화와 관련된 수자원분야의 연구는 1990년대부터 시작되었기 때문에 뚜렷한 연구성과를 내고 있지는 못하다. 더욱이 수자원부문의 영향을 예측하기 위해서는 RegCM과 과거의 수자원에 대한 자료가 같이 구축생성되어야 하므로 연구를 진행하는데 많은 어려움이 있어, 현재상태의 물 균형과, 단기간의 물 균형을 통계적인 자료를 이용하여 예측하는 수준에 머무르고 있는 실정이다.

현재의 물 균형의 문제에 중점을 둔 연구로는 기후변화에 기인한 수자원의 일반적인 영향, 서울지점의 장기 수문특성, 기후변화 시나리오에 의한 수문특성의 변화 및 현안문제에 대해서 기술한 김승 등(1993)의 연구가 있으며, 기상청 기상연구소가 제시한 기후변화에 따른 기온과 강수변동 시나리오에 따라 물수지 방정식을 도입하여 한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강에 대하여 유출의 변화를 추정한 김승 등(1994)의 연구가 있다.

GCM으로부터 도출된 결과를 이용하여, 기상수문 모형과 물 균형 모형을 구축한 연구로는 한반도의 중규모 및 소규모 모형을 개발한 윤용남 등(1994)의 것이 있으며, 김정우 등(1997)은 7개의 GCM에 의해 모사된 남한지역강수량을 이용하여 계절별 강수량의 변화를 모사한 연구 등이 있다.

물 균형 모형의 결과를 실측자료와 비교하여 평가한 연구로는 오성남 등(1995)의 것이 있다. 이 연구에서는 지구온난화가 우리 나라의 수자원에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기 위하여 6개의 댐유역에 대하여 강수량, 증발산량, 하천유량 등의 물 균형을 산출하는 모형을 개발하여 물 균형을 계절별로 산출하고, 실측자료로 평가 개선하였다.

외국의 물 균형모형 중 기후변화로 인한 강수량의 변화와 이로 인한 물 균형의 변화를 예측한 연구로 Kojiri(1992), Tsutsumi et al.(1993), Takahara et al.(1991), Ttakahara와 Kojiri(1993), Tanakamura와 Kadoya(1991; 1992), Masukura와 Yoshitani(1992), Niwa et al.(1993), Ando(1994), Ujihashi(1994) 등의 연구가 있다.

2.2.3. 식생영향모형

기후변화에 따른 식생부문의 영향을 예측하는 지역차원의 연구는 최근 들어 활발히 진행되고 있다. 이러한 지역차원의 연구에는 여러 가지 모형들이 사용되고 있으며, 지속적으로 모형의 개선이 이루어지고 있다.

경험적 통계적 모형 중에서 지역차원의 식생부문의 영향을 예측하는 연구로 가장 진보된 모형들은 호주국립대학교(Australian National University)에서 개발한 BIOCLIM 과 국제산림 연구센터(Centre for International Forestry Research)에서 개발한 DOMAIN 모형이 있다(Box, 1980; Woodward, 1987; Prentice et al., 1992, 1993; Carpenter et al., 1993). 이와 같은 모형은 자세한 지역차원의 자료들을 필요로 한다.

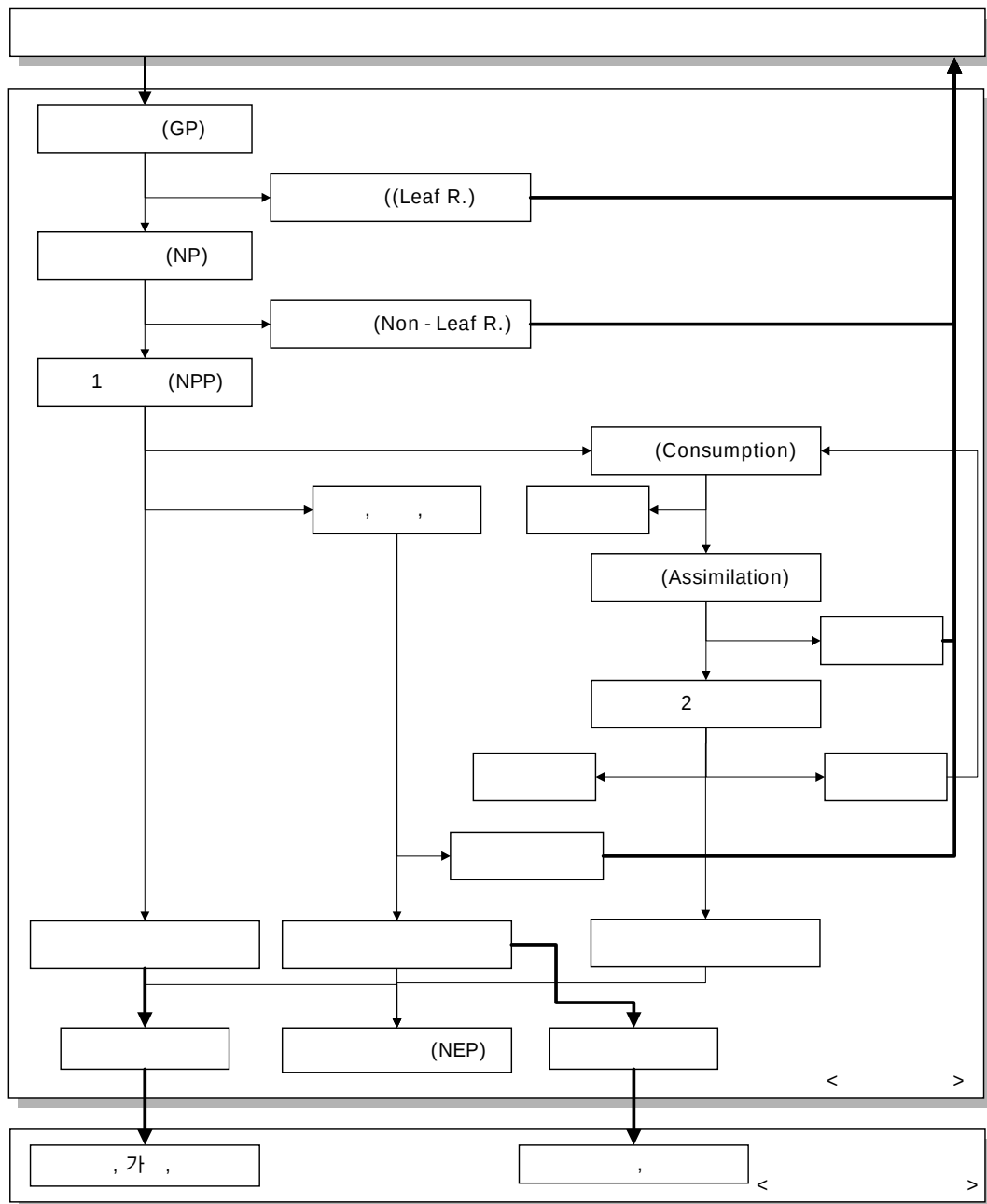
지구온난화의 영향을 추정하는 지역차원의 연구로, 일본에서는 3월의 기온과 벚나무의 개화 시기의 관계를 분석한 연구가 이루어졌다(Yoshino et al., 1996). 위도에 따라 변하는 각 종류별 삼림대의 변화를 보기 위해, 삼림내 수목의 크기 분포에 관한 동태적지리확장모형이 개발된 연구가 있다(Koyama and Shigesada, 1995).

우리 나라의 기후변화가 산림에 미치는 영향에 관한 국내연구사례는 기초자료인 식생 관련 자료와 예측자료인 RegCM 자료를 구축하기 어려워 관련 연구가 매우 한정되어있다. 그러나, 기후변화로 인한 산림생태계의 영향은 매우 지대하며, 이의 영향을 예측하고 대응방안을 강구하는 것은 매우 시급한 연구과제이다(김은식, 2000).

기후변화에 의한 산림에 대한 영향을 예측하는 방안으로 탄소순환체계 및 산림생태계의 기

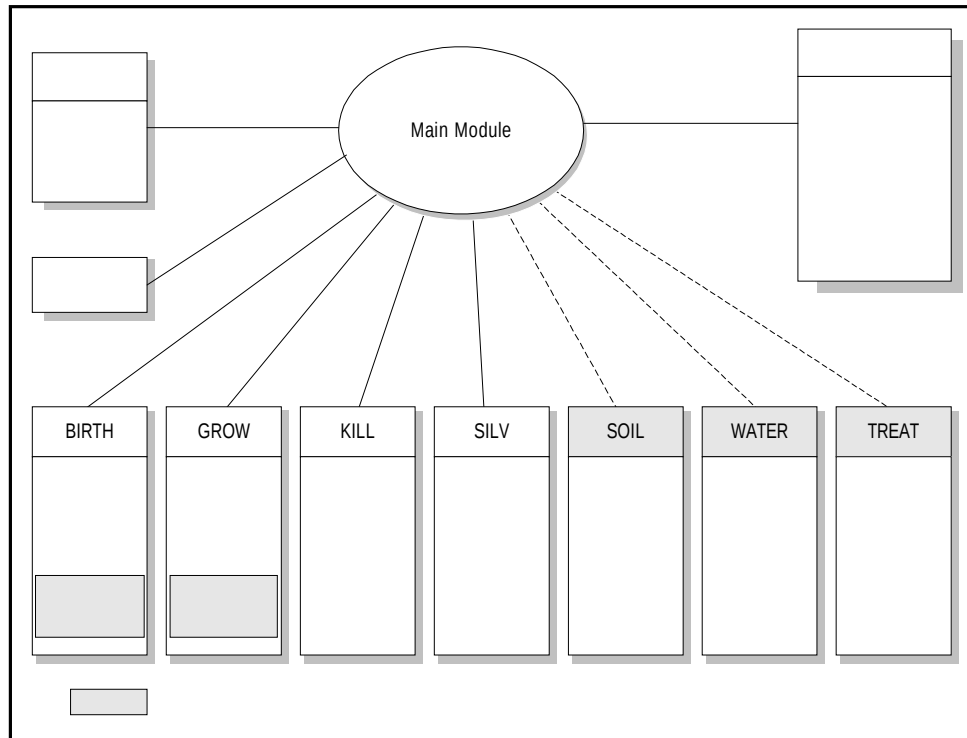
능을 이용하여 접근하는 방법을 < 그림 IV-6 >와 같이 김태훈(1995)은 제시하고 있다. 이 연구에서 산림의 영향을 대기중의 이산화탄소 농도의 변화가 총광합성, 순광합성, 순1차생산에 미치는 영향을 모식화하고, 이를 통해 산림생태계와 산림생태계외의 탄소순환을 통해 산림부분의 영향을 파악하고자 하였다. 그러나 현재 우리 나라에서는 여러 가지 자료의 부족으로 인하여 이와 같은 모형으로 우리 나라 전체의 산림생태계에서의 탄소수지를 알아보기는 어렵다고 밝히고 있다.

산림부문의 지구온난화영향을 다루고 있지는 않으나, 우리 나라 주요 수종에 대하여 현재 생육하고 있는 분포범위가 기후변화 시나리오에 따라 생육가능 분포위치가 어떻게 달라질 것인가를 지역적 규모에서 분석하고 보다 적은 임분단위에서 산림의 생산성과 종 구성의 변동 양상을 산림 gap모형을 이용하여 분석한 사례가 있다(박원훈 등, 1995). 다음의 < 그림 IV-7 >는 위의 연구에 사용된 산림생태계 변화예측 모형의 구조이다. 그러나 이 연구에서도 기초 자료의 부족으로 완벽한 변화예측모형을 구축하진 못하였다.



〈 그림 IV-6 〉 산림생태계에서의 탄소순환모형

자료 : 김태훈(1995), 기후변화가 산림생태계에 미치는 영향 및 대응방안, 기후변화가 한반도에 미치는 영향에 관한 심포지움, 한국과학기술원, p.37.



< 그림 IV-7 > 산림생태계 변화예측모형 구조사례

자료 : 박원훈 등(1995), 기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구환경관련 대책연구(II), 한국과학기술원, p.153.

3. 연구사의 시사점

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

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

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

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

V. 기후변화의 한반도 산림생태계 영향평가모형 구조와 내용

본 연구의 내용적 범위는 우리 나라를 대상으로 한 지역차원의 영향평가모형을 구축하기 위하여 다음과 같이 설정한다.

첫째, 토지피복분류도를 구축하고 검증한다.

둘째, 현황 식생정보와 기후변화영향으로 인한 식생정보의 변화를 파악하기 위하여 기존의 식생관련자료를 검증하고, 연구에 사용할 식생정보를 구축한다.

셋째, 기후변화로 인한 식생부문의 영향을 예측하기 위하여, GCM자료를 지역차원의 자료로 변환하고, 수자원과 토양부문의 자료를 통합·이용하여 기후변화가 식생부문에 미치는 영향을 예측하고 분석하는 것이다.

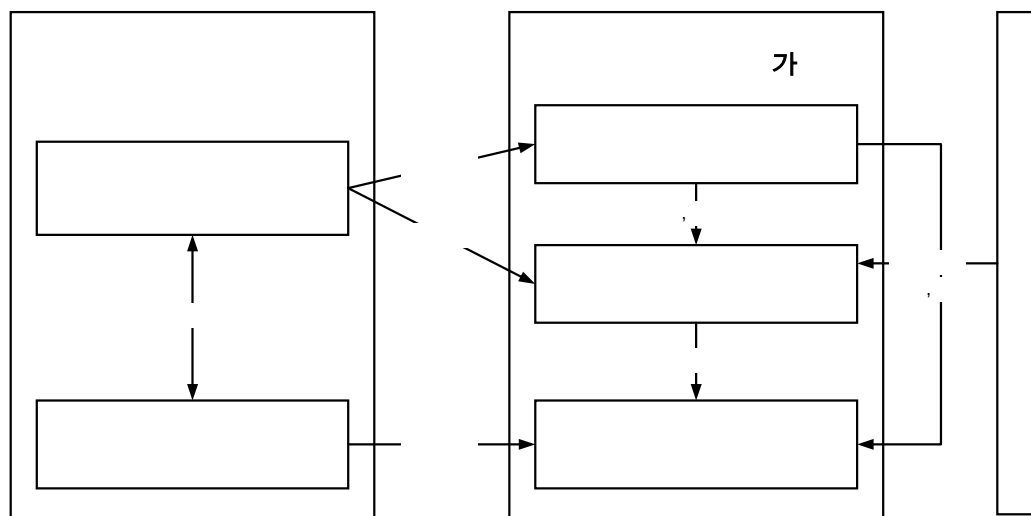
본 연구의 공간적 범위는 자료구축 및 통합의 목적상 북한을 포함하는 것은 불가능하여 남한만을 대상으로 한다. 연구에 사용되는 공간해상도는 향후 분석에 진보된 기후변화 영향평가를 수행하기 위하여 기존의 300-400km 공간해상도의 정보들을 토지피복정보의 경우는 Landsat TM 위성영상자료의 공간해상도인 30m로 자료를 구축한다. 식생분류정보는 1:50,000 축척의 도면으로부터 구축함으로써 인해 최소 오차범위인 100m를 공간해상도로 설정하고, RegCM은 현재 각국에서 구축하고 있는 10km의 공간해상도로 구축한다.

본 연구의 자료의 범위는 토지피복분류정보의 구축은 최근인 1997년부터 1999년까지의 Landsat TM자료를 대상으로 하며, 식생자료는 현재 조사가 완료된 환경부의 현존식생도를 이용한다.

본 연구의 시간적 목표연도는 2100년으로 설정하였다. 이는 IPCC에서 발표한 기후변화시나리오의 목표연도와 대부분의 GCM이 목표연도로 설정하고 있기 때문이며, 본 연구에서 사용하려는 GFDL-Q plux 모형의 목표연도 또한 2100년으로 설정되어 있기 때문이다.

1. 연구방법

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

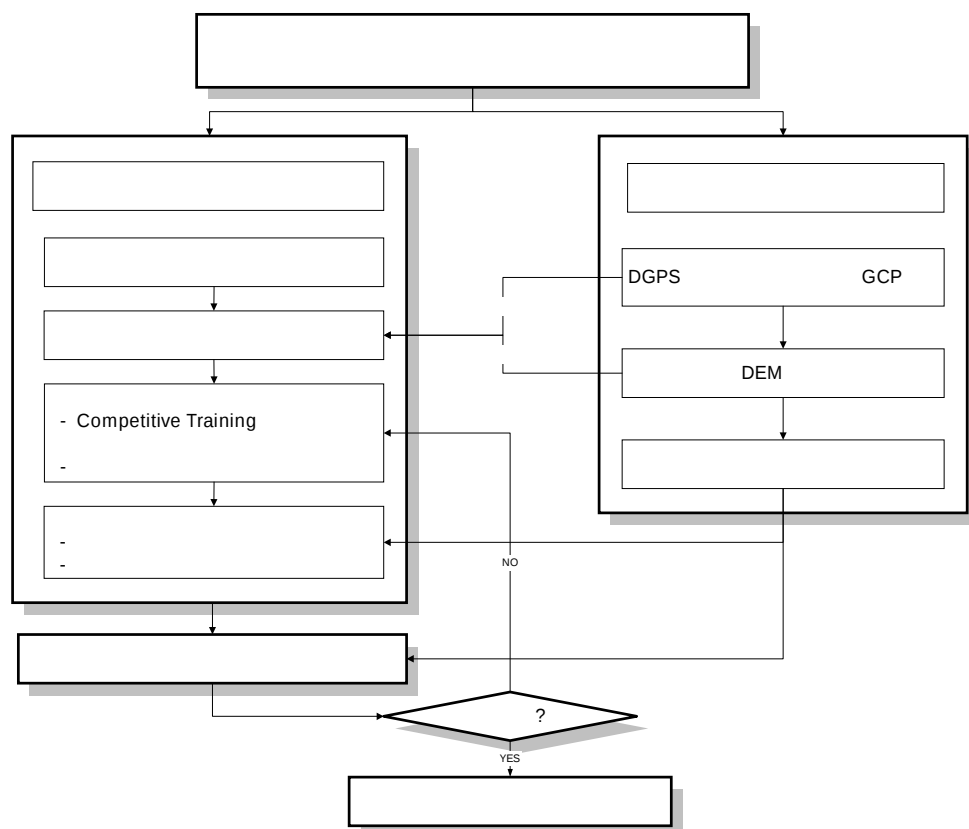


< 그림 V-1 > 연구의 개념적 흐름

1.1. 위성영상자료를 이용한 기초자료의 구축 및 검증

1.1.1. 토지피복정보의 구축 및 검증

< 그림 V-2 >는 토지피복분류작업을 통하여 토지피복정보를 추출하는 작업의 흐름을 나타낸 것이다. 우리 나라와 같이 지표면의 경사가 다양한 지형은 지형의 기복에 의해 분류시 오분류가 발생할 가능성이 많다. 따라서 지형정규화과정을 거쳐 분류정확도를 높이는 과정을 거치며, 감독분류기법과 무감독 분류기법을 조합하여 최적의 분류결과물을 얻을 수 있도록 연구방법을 설정한다.



< 그림 V-2 > 토지피복분류정보 구축 및 검증의 흐름

1) DEM을 이용한 Landsat TM 영상자료의 지형적 정규화

Civco(1989)가 제시한 방법론에 따라 지형정규화를 수행한다. 영상에서 지형적 영향을 제거하기 위해서는 우선적으로 Landsat 위성이 통과하는 시기의 태양 밝기와 대응하는 음영기복이 DEM을 이용하여 계산되어야 한다. Landsat TM 위성영상자료와 함께 공급되는 태양방위각과 태양고도각의 천문정보가 이 조명모형을 계산하기 위해 이용된다. 이 음영기복모형은 코

사인 법칙의 특별한 응용으로 이론적으로 -1.0에서 1.0사이의 결과 값들을 8비트 범위의 디스플레이 장치의 256단계의 밝기값으로 표현하게 된다. 구형 기하학 코사인 법칙의 Lambertian 가정에 따라 각 화소에서의 코사인 값은 (식 V-1)을 이용하여 계산된다.

$$\gamma = \cos \theta_o \cos \theta_n + \sin \theta_o \sin \theta_n \cos(\phi_n - \phi_o) \quad (\text{식 V-1})$$

여기서

γ = 태양입사각과 국부적인 지표 법선 사이의 코사인각

θ_o = 태양의 천정각

θ_n = 지표면 경사

ϕ_n = 태양 방위각

ϕ_o = 지표면 방향각

Landsat TM 위성영상자료의 각 밴드별로 1차 지형 평준된 영상을 얻기 위하여 (식 V-2)를 이용하여 선형변환을 실시한다.

$$\delta DN_{\lambda ij} = DN_{\lambda ij} + (DN_{\lambda ij} \times \frac{(\mu_k - X_{ij})}{\mu_k}) \quad (\text{식 V-2})$$

여기서

$\delta DN_{\lambda ij}$ = 밴드 λ 에서의 픽셀 ij에서의 정규화된 복사값

$DN_{\lambda ij}$ = 밴드 λ 에서의 픽셀 ij에서의 원 복사값

μ_k = 0 ~ 255 사이의 조명모형에서의 전체 평균 조명값

X_{ij} = 0 ~ 255 사이의 픽셀 ij에서의 조명값

Landsat TM 위성영상자료에 대한 이 첫 단계 정규화 알고리즘의 적용은 평균 분광반응은 유지되며 편차가 감소하는 것을 보여준다. 그러나 지형효과를 감소하는데 있어 이 정규화 알고리즘은 부분적으로만 성공적임을 보여준다. 인공 구조물의 조명과 그림자는 완전히 제거되지 않는다. 다양한 경사와 방향을 가진 몇 가지 균질한 피복항목에 대한 분광 반응 실험은 첫 단계의 변형이 부적절하다는 것을 나타내었다. 일반적으로 북쪽사면은 여전히 상대적으로 더 어둡고 남쪽사면은 더 밝다. 적외선 밴드를 포함한 다양한 밴드조합에서 지형영향이 여전히 나타나는 것을 화면상에서 확인할 수 있다.

Civco(1989)는 지형영향을 더욱 줄이기 위한 노력의 일환으로 활엽수림 항목의 전체 평균 밝기와 북쪽 사면과 남쪽 사면에서 동일한 수의 많은 표본들의 밝기값을 비교하여 실험적으로 유도된 수정계수를 도입하였다. 균등하게 혼합된 활엽수림 지역의 분광 반응차이는 북쪽

사면과 남쪽 사면의 평균과 분산에서 계산되어진다. 수정계수 ' C_λ '는 각 밴드별로 다르고 활엽수림 항목의 평균 밝기값과 평형을 유지하기 위한 조절치(상향 또는 하향)에 기초한다. 이러한 수정계수는 (식 V-3)에 의해 계산된다.

$$C_\lambda = \frac{[(\mu_\lambda - N_\lambda)/((\mu_\lambda - N_\lambda) - (\mu_\lambda - N'_\lambda)) + (\mu_\lambda - S_\lambda)/((\mu_\lambda - S_\lambda) - (\mu_\lambda - S'_\lambda))]}{2} \quad (\text{식 V-3})$$

여기서

C_λ = 밴드 λ 에 대한 수정 계수

μ_λ = 활엽수 항목에 대한 전체 평균 밝기값

N_λ = 원자료의 북쪽사면 활엽수림의 평균 밝기값

N'_λ = 1차 정규화된 북쪽사면 활엽수림의 평균 밝기값

S_λ = 원자료의 남쪽사면 활엽수림의 평균 밝기값

S'_λ = 1차 정규화된 남쪽사면 활엽수림의 평균 밝기값

밴드별로 2차 지형정규화 된 밝기 값을 구하기 위한 선형변환은 (식 V-4)와 유사하다. 이들 계수들은 처리되지 않은 Landsat TM 위성영상자료에서 나타나는 지형영향을 좀 더 수정하기 위해 사용된다.

$$\delta DN_{\lambda ij} = DN_{\lambda ij} + ((DN_{\lambda ij} \times \frac{(\mu_k - X_{ij})}{\mu_k}) \times C_\lambda) \quad (\text{식 V-4})$$

여기서

$\delta DN_{\lambda ij}$ = 밴드 λ 에서의 픽셀 ij 에서의 정규화된 밝기값

$DN_{\lambda ij}$ = 밴드 λ 에서의 픽셀 ij 에서의 원 밝기값

μ_k = 0 ~ 255 사이의 조명모형에서의 전체 평균 조명값

X_{ij} = 0 ~ 255 사이의 픽셀 ij 에서의 조명값

C_λ = 밴드 λ 에 대한 실험적으로 유도된 수정 계수

2) 선행확률을 포함한 최대우도분류

매개변수에 의한 분류 방법에서는 동일한 분류 항목이란 정의된 경계에 포함되는 자료 그룹들이라는 가정에 의존한다. 일반적으로 N차원 형상 공간에서의 다중 정규분포가 가정된다. 가장 잘 알려져 있고 이용되는 매개변수를 이용하는 감독 분류자중의 하나는 최대우도(Maximum-likelihood) 분류자이다. 이 분류자는 기본적인 다중 정규분포의 가정이 대체적으로 유효할 때 적절한 수행이 보증된다. 이 방법의 성공을 위해서는 아주 한정된 수의 트레이

닝지점들과 이들의 광학적 분포 변형에 대한 상대적인 보장이 요구된다. 오랫동안 이 방법은 가장 발전된 분류방법으로 생각되어져 왔다. 반면에 모든 다른 매개변수 분류자와 같이 최대우도 분류자는 복잡하고 비균질한 환경하에서 흔히 발생하는 피복 항목의 비정규적인 광학적 분포 특성에서 두드러진 한계를 가진다(Consese et al., 1991). 게다가 모든 매개변수에 의한 분류자들은 주어진 범위내에서 매우 많은 종류의 피복 항목을 가질 때 면적 추정 능력이 부족하다.

이러한 문제들을 극복하기 위해서 Swain et al.(1978), Strahler(1980), Skidmore et al.(1988)와 같은 연구자들은 최근 자연 상태의 피복상황에서 주로 비 매개변수 방법의 사용을 제안하였다. 이러한 방법들은 자료의 광학분포형태에 관한 가정을 얹고 결정함수에 의해 분류될 수 있어 광학적으로 불규칙한 상황하에서 많은 장점이 있을 것으로 예상된다. 이론적인 측면에서 이 방법들은 피복항목과 정의된 분광등급간의 낮은 상관성에서 발생하는 문제들을 극복하기 위한 시도로 보인다. 특히 많은 응용에서 전통적인 매개변수에 의한 방법에 비해 더 뛰어나게 수행되는 것으로 설명되었고, 분류 항목에 대한 면적 추정 능력을 향상시킨다. 그러나 이런 장점과 더불어 비변수적 분류자에서는 트레이닝 지역의 편향성에 민감하게 반응한다. 사실 자료분포 형태에 대한 가정의 결핍은 통계적으로 전체 집단을 대표하지 못하는 잘못된 분포에 의존하게 한다. 특히 적은 수의 트레이닝 지역일 경우 이들 방법은 실행 불가능하다. 2가지 기본적인 방법의 통합을 위한 시도는 Swain et al.(1978), Strahler(1980)의해 설명된 최대우도방법에 선행확률을 도입하는 이론과 Skidmore et al.(1988)에 의해 실현된 비변수적 분류방법에 근거하여 설명된다. 이 새로운 방법은 전통적인 최대우도 방법의 안정성과 강건성을 비변수적 분류자의 올바른 면적추정에 대한 유연성 및 적합성과 결합하는 것이다.

Maselli et al.(1992)는 매개변수를 이용한 분류자와 비매개변수적인 방법의 통합을 위해 선행확률을 이용한 최대우도방법을 제안하였다. 이들은 비매개변수적인 방법을 통해 획득된 선행확률을 기존의 최대우도방법에 도입하여 이들 분류 방법들간의 장점을 통합하는 시도를 하였다. 이들은 선행확률 P를 결정하기 위해 Skidmore et al.(1988)에 의해 제안된 수학적 확률 (식 V-5)을 도입하였다.

$$P = Fr / Frt \quad (\text{식 V-5})$$

여기서

Fr = 픽셀벡터에서 시험하는 분류항목의 픽셀 수

Frt = 픽셀벡터에서 모든 분류항목의 픽셀들의 합

각 분류항목의 선행 확률이 P이면, 이 확률을 (식 V-6)과 같이 Maximum-likelihood 분류과정의 식별함수를 수정하여 도입하게 된다.

$$F = (X-M)' C^{-1} (X-M) + \ln|C| - 2 \ln(P) \quad (\text{식 V-6})$$

여기서

X = 픽셀 벡터

M = 시험하는 분류항목의 평균벡터

C = 시험하는 분류항목의 분산-공분산 행렬

선행확률은 사전 독립된 정보나 지표 정보의 무작위적인 표본 뽑기와 같이 다양한 방법으로 추정 가능하다. Skidmore et al.(1988)의 연구에서는 선행 확률 P 를 표본 빈도 히스토그램에서 찾을 수 있는 가능성을 제시하였다. 사실상 빈도 히스토그램은 피복항목의 객관적인 특성을 직접적으로 표현하기 때문에 피복항목들의 본질적인 속성을 설명함으로써 올바르게 가정되어질 수 있고 선행확률을 유도하기 위해 이용될 수 있다. 따라서 이 확률은 피복항목들의 결정과 이용 가능한 정보를 증가시키기 위해 전통적인 매개변수 분류자에 포함될 수 있다. 응용적인 측면에서 이런 통합은 연관된 제한이 없이 두 시스템의 장점을 결합하여 좋은 결과를 낼 수 있다. 특히 이 새로운 방법은 전체 집단을 대표하지 못하는 편향된 훈련 표본의 선택의 부정적 영향을 방지할 수 있는 통계적으로 안정된 매개변수(평균, 분산, 공분산)의 정의 때문에 적은 수의 훈련 샘플을 이용한 경우에도 매개변수를 이용하는 분류자의 강건성과 안정성을 보여줄 수 있다. 반면에 비 매개변수적 측정의 존재는 주목할만한 절차상의 유연성과 면적 추정에서의 획기적인 향상을 가능케 한다.

1.1.2. 식생부문정보의 검증 및 구축

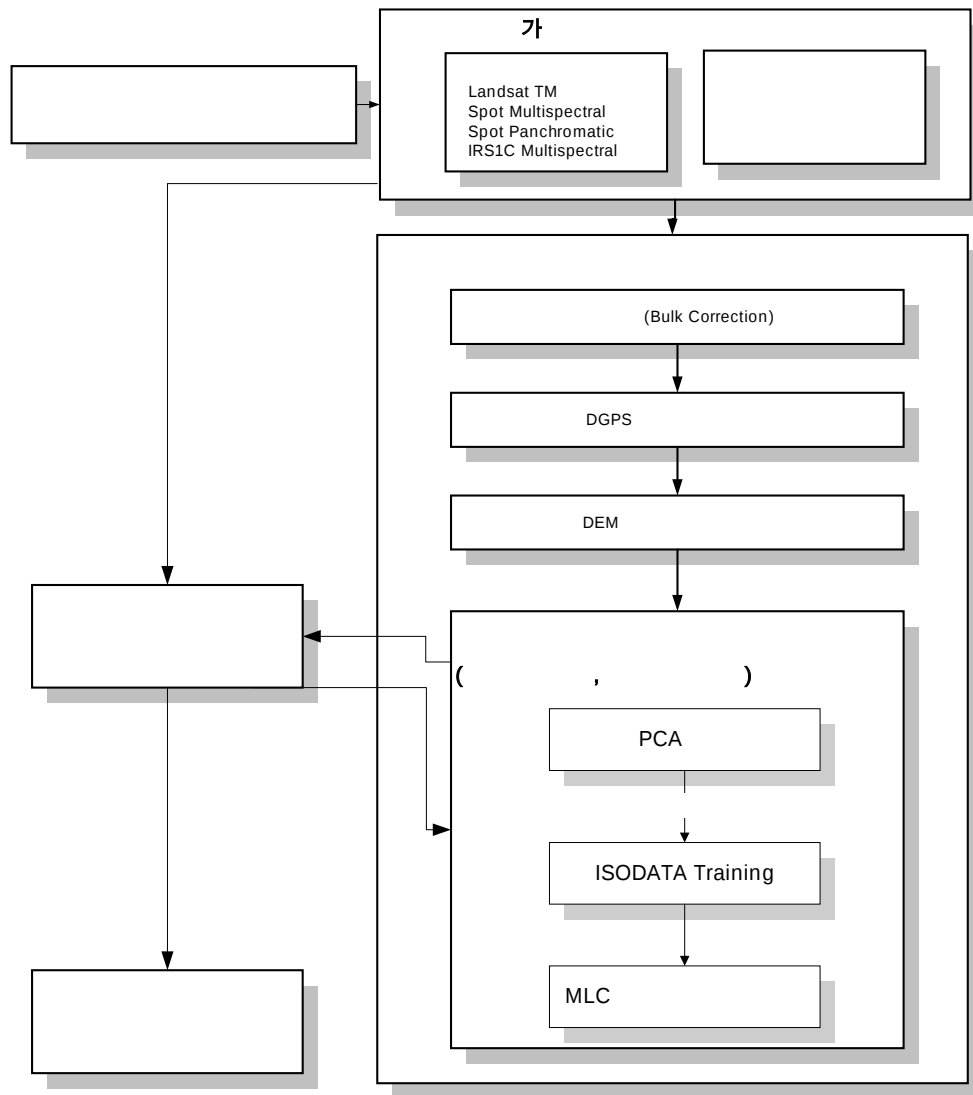
본 연구에서는 기존의 식생의 경계와 식생군락의 파악을 위하여 기존에 환경부에서 조사한 현존식생도와 산림청에서 조사한 임상도를 위성영상자료를 이용하여 검증하며, 이 결과에 따라 식생도를 수치지도화 한다. 이의 방법론을 개념도로 정리하면 다음의 < 그림 V-3 >과 같다.

2. 기후변화로 인한 식생부문의 영향예측 및 평가

기후변화로 인한 식생의 변화를 예측하고, 평가하기 위하여 일본에서 개발한 AIM/Impact 모형의 일부를 사용한다. 본 연구에서 AIM/Impact 모형에 기초하여 적용한 이유는 다음과 같다.

첫째, 통합성을 고려한다. AIM/Impact 모형은 배출모형, 기후모형, 영향모형 간에 유기적인 환류 과정을 가지고 있어, 각 부문의 특성을 결합시킨 통합모형으로 발전시킬 수 있기 때문이다.

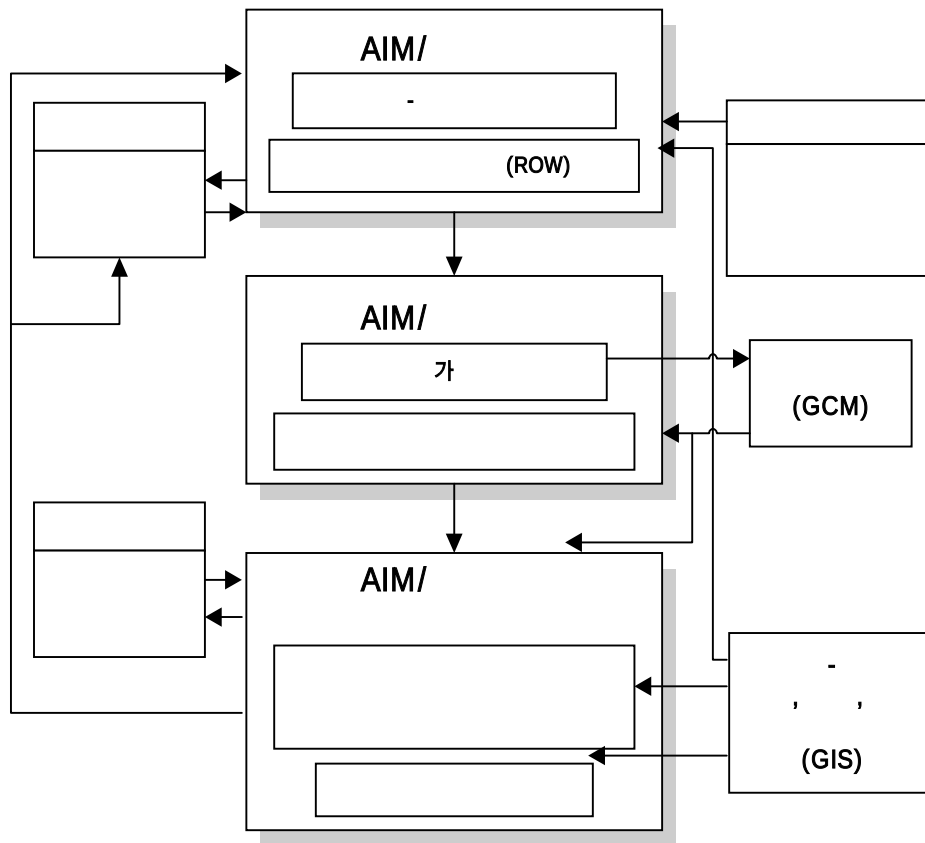
둘째, 적용가능성을 고려한다. AIM/Impact 모형은 전세계적으로 인정받고 있는 주요한 모형중의 하나이며, 기후, 지형조건이 우리 나라와 유사한 일본에서 개발되어 우리 나라에의 적용가능성이 높기 때문이다.



< 그림 V-3 > 식생부문정보 검증, 구축 연구의 흐름

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

본 연구에 이용되는 AIM/Impact 모형의 3개 주요 모형과 모듈의 기본골격은 < 그림 V-4 >와 같다. AIM/배출모형은 저감시나리오 및 지구 및 지역별 예측자료가 입력자료로 입력되어, 산출결과가 AIM/기후모형으로 입력된다. 여기에 GCM 결과가 입출력되며 환류하는 과정을 거쳐 목표연도의 기온 및 강수량 자료를 산출한다. 이와 같은 자료가 AIM/Impact 모형으로 입력되어 각 부문별 영향을 예측하는 과정을 거치게 된다. 영향의 예측결과는 다시 AIM/배출모형으로 입력되어 환류하는 과정을 반복적으로 거치는 통합모형이다. 이와 같이 AIM 모형은 배출모형, 기후모형, 영향모형이 유기적인 환류과정을 가지도록 설계되어 있어 예측의 신뢰성이 높으며, 적용가능성도 높아 현 시점에서 유용한 모델로 판단된다.



< 그림 V-4 > AIM/Impact 기후변화영양예측 및 평가 모형의 기본 골격

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

2.1. 대기대순환모형

일본 국립환경연구소의 AIM 팀에서 사용했던 보간방법으로 GCM결과들을 공간적으로 보간한다. 기온에 대해서는 spline 보간 방법이 사용되고, 강수량에 대해서는 $1/r^2$ 가중 보간 방법이 이용된다.²¹⁾ 이 방법에 의해 우리 나라 RegCM을 경위도 0.1° 인 약 10km 해상도의 자료로 생성한다. 본 연구에서는 아래의 < 표 V-1 >에 제시된 GCM중 GFDL Q-plux 의 결과를 이용한다.

21) r : 거리반경

< 표 V-1 > 현재 전세계적으로 활용되는 GCM과 본 연구에 활용한 GCM

GCM 모형	계산연도	위도×경도(°)	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	Reference
CCC	Nov-89	3.75×3.75	3.5	Boer <i>et al.</i> , 1989
GISS	1982	7.83×10.0	4.2	Hansen <i>et al.</i> , 1984
GFDL	1984-85	4.44×7.50	4.0	Wetherald & Manabe, 1986
GFDL R30	May-89	2.22×3.75	4.0	Wetherald & Manabe, 1989
GFDL Q-flux	Feb-88	4.44×7.50	4.0	Wetherald & Manabe, 1989
UKMet	Jun-86	4.00×7.50	5.2	Wilson & Mitchell, 1987
UIUC	Sep-96	4.00×5.00	3.4	Schlesinger, 1996
MRI	1994	4.00×5.00	2.5*	Tokioka <i>et al.</i> , 1995
GISS	1995	4.00×5.00	3.6*	Miller & Russell, 1995
GFDL100	1991	4.50×7.50	3.2*	Manabe <i>et al.</i> , 1992

주 : ΔT = CO₂ 가스 배증시 표면온도

CCC : Canadian Center for Climate Research(Canada)

GISS : Goddard Institute for Space Studies(USA)

GFDL : Geophysical Fluid Dynamic Laboratory(USA)

OSU : Oregon State University(USA)

UKmet : U.K. Meteorological Office(UK)

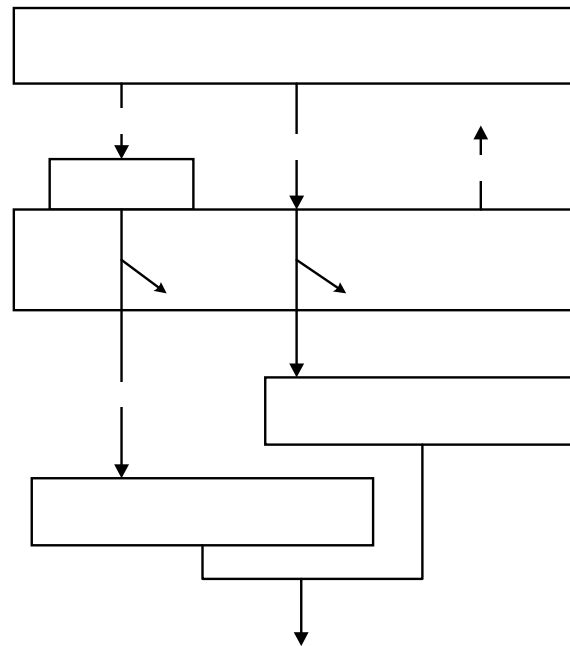
UIUC : University of Illinois at Urbana-Champaign(USA)

MRI : Meteorological Research Institute(Japan)

 : 본 연구에 이용하는 GCM

2.2. 물 균형 모형

수문학적 영향은 기후 변화의 기본적인 인자중의 하나다. 수문학적 인자들의 양과 빈도, 지속 기간의 변화는 수자원의 이용 가능성, 홍수 강도, 농업과 자연의 육상 생태계에 영향을 미친다. 물 수지 균형과 물 이동 요소로 이루어진 영향모형의 하부 모듈인 강우-유출과정은 영향모형의 다른 부분에 대한 기초적인 수문 정보를 제공하는 역할을 한다(AIM Project Team, 1996). 특히 이 모형은 < 그림 V-5 >와 같은 물순환을 프로그램화한 것으로 표면 유출, 토양 습윤도, 증발산, 하도 유출의 격자화된 고해상도의 자료를 만들어 낸다. FC는 단층 토양 흐름 모형에 의해 현재의 식생 항목과 토양 조직 상태를 이용하여 추정된다. PET을 추정하기 위해서 2개의 선택적 모듈을 사용한다. 이들은 자료의 이용 가능성에 따라 상대적으로 선택되는 FAO24와 Thornthwaite 방법(FAO24)에 기초한다.



< 그림 V-5 > 물 균형 모형의 개요

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

2.2.1. 잠재 증발산량(Potential Evapotranspiration)

(1) Penman-Monitheth 방법

증발산량은 물 균형 모형에서 가장 중요한 요소 중 하나이다. 증발산이란 ‘식물이 필요로 하는 토양수분이 부족하지 않은 경우, 발생하는 수분의 감소’라 정의된다(Thornthwaite, 1955).

자연상태의 지표에서의 증발산은 개방 수면으로부터의 증발, 토양표면으로부터의 증발, 꽃 표면에 맺힌 강우의 증발, 식물로부터의 증발산 등 네 가지 과정으로 구성된다

증발산량을 구하는 공식은 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 적은 자료를 활용하여 비교적 정확한 결과물을 산출하는 Penman-Monitheth 공식을 채택하였다. Penman-Monitheth 공식은 ① 에너지(복사량)와 ② 공기역학적 요소(바람, 습도)의 두 가지 요소로 구성되어있다.

$$E T_0 = c \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot R_n + f(u) \cdot (e_a - e_d) \right] \quad (\text{식 V-7})$$

(에너지적 요소) (공기역학적 요소)

$E T_0$ = 관련 농작물의 증발산량 (단위: mm/day)

Δ = 포화증기압 변화율 (단위: mbar/°C)

γ = 습윤상수 (단위: mbar/°C)

R_n = 상응 증발산의 Net 복사량 (단위: mm/day)

$f(u)$ = 바람관련 함수

$(e_a - e_d)$ = 평균기온 포화증기압과 실제 평균대기증기압과의 차
(단위: mbar)

c = 주간 및 야간의 기상상태의 차이에 대한 영향을 보정하는
조정인수

(2) 변수의 설명 및 변수의 산출방법

이 공식은 실제로 측정된 기상자료 변수가 현존하지 않을 경우, 연관 기상자료로부터 연역하여 사용해야만 하는 요소를 포함하고 있다.

① 증기압 부족 (Vapor Pressure Deficit): $(e_a - e_d)$

여기서는 습도(Humidity)는 포화증기압부족 $(e_a - e_d)$ 으로 표현하고 있다. 이는 평균포화수증기압(e_a)과 평균실제수증기압의 차이이다. 평균포화증기압(e_a)은 평균온도(T)로부터 파생되었다. 평균실제수증기압(e_d)는 평균이슬점온도로부터 파생되었다.

$$e_a = 6.108 \exp\left(\frac{-17.3T}{T+239}\right) \quad (\text{식 V-8})$$

$$e_d = 6.108 \exp\left(\frac{17.3T_{dew}}{17.3T_{dew}+239}\right) \quad (\text{식 V-9})$$

e_a = 평균포화수증기압 (단위: mbar)

e_d = 평균실제수증기압 (단위: mbar)

T = 평균기온 (단위: °C)

T_{dew} = 평균이슬점온도 (단위: °C)

② 바람함수 $f(u)$

$$f(u) = 0.27(1 + U + / 100) \quad (\text{식 V-10})$$

U = 지상 2m 고도에서의 24시간 풍속측정자료
(단위: km/일)

만약 지상 2m에서 측정한 풍속자료가 없을 시에는 다른 고도 $a(m)$ 에서 측정된 자료를 아

래의 공식을 이용하여 근접한 보정치를 구할 수 있다.

$$U_{2m} = U_{am} \left(\frac{2}{a} \right)^{0.2} \quad (\text{단위: } km/\text{일}) \quad (\text{식 V-11})$$

③ 포화증기압의 변화율 : Δ

$$\Delta = \frac{de_a(T)}{dT} = \frac{25211}{(T+239)^2} \exp\left(-\frac{17.3T}{T+239}\right) \quad (\text{식 V-12})$$

Δ = 포화증기압변화율 (단위: $mbar/^\circ C$)

T = 평균온도 (단위: $^\circ C$)

④ 습윤(psychrometric) 상수 : γ

$$\gamma = 0.534 \quad (\text{단위: } mbar/^\circ C) \quad (\text{식 V-13})$$

⑤ 순 복사량 : R_n

순 복사량 R_n 은 모든 입사 복사량과 방사 복사량과의 차이를 의미한다. R_n 은 운량, 온도, 증기압 자료로 산출될 수 있다. R_n 은 단파복사순량(R_{ns})과 장파복사순량(R_{nl})과의 차이와 동일하다.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (\text{식 V-14})$$

R_n = 복사순량 (단위: mm/일)

R_{ns} = 단파복사순량 (단위: mm/일)

R_{nl} = 장파복사순량 (단위: mm/일)

단파복사순량(R_{ns})은 ①지구 외(extra-terrestrial) 복사량(R_a), ②반사량(α) 및 운량에 좌우되는 ③대기를 통한 transmission(β)에 의존된다.

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot R_a \cdot \beta \quad (\text{식 V-15})$$

R_{ns} = 단파복사순량 (단위: mm/일)

R_a = 지구 외 복사량 (단위: mm/일)

α = 반사량

β = 대기를 통한 tranmission

지구 외 복사량(R_a)은 다음의 공식을 이용하여 구할 수 있다.

$$R_a = 15.392 d_r (w_s \sin f \sin d + \cos f \cos d \sin w_s) \quad (\text{식 V-16})$$

R_a = 지구 외 복사량 (단위: mm/일)

d_r = 태양-지구간 상대거리, 공식(V-17)

w_s = 일몰시간 각(단위: 弧度), 공식(V-18)

f = 지역의 위도 (북반구는 +)

d = 태양 적위(단위: 弧度), 공식 (V-19)

J = 태양력 일수

그리고 :

$$d_r = 1 + 0.033 \cos (2\pi J / 365) \quad (\text{식 V-17})$$

$$w_s = \arccos (-\tan f \tan d) \quad (\text{식 V-18})$$

$$d = 0.4093 \sin(2\pi J / 365 - 1.404) \quad (\text{식 V-19})$$

반사량(α)는 Albedo라 불린다. 대부분의 농작물의 경우 $\alpha = 0.25$ 이다. 대기를 통한 전달(β)은 실제일광시간(n)과 최대가능일광시간(N)의 비율을 이용하여 구한다.

$$\beta = \left(0.25 + 0.5 \frac{n}{N} \right) \quad (\text{식 V-20})$$

$\frac{n}{N}$ 비율은 운량(cloudiness)을 이용해 대략적으로 산출할 수 있다. 다음의 < 표 V-2 >는 운량과 $\frac{n}{N}$ 의 관계를 대략 보여준다.

< 표 V-2 > 운량과 $\frac{n}{N}$ 비율과의 관계

운량 ($\times 10\%$)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n/N 비율	1	0.9	0.8	0.75	0.65	0.55	0.5	0.4	0.3	0.15	-

장파복사순량 (R_{nl})은 사용가능한 온도 (T), 증기압 (e_d), 실제일광시간(n), 최대가능일광시간(N)의 비율에 의하여 측정된다.

$$R_{nl} = f(T) \cdot f(e_d) \cdot f(n/N) \quad (\text{식 V-21})$$

$$f(T) = \sigma (T + 273.2)^4 \quad (\text{식 V-22})$$

$$f(e_d) = 0.34 - 0.14\sqrt{e_d} \quad (\text{식 V-23})$$

$$f(n/N) = 0.9 \frac{n}{N} + 0.1 \quad (\text{식 V-24})$$

R_{nl} = 장파복사순량 (단위: mm/일)

T = 평균온도 (단위: °C)

e_d = 평균 증기압 (단위: mbar)

n/N = 실제일광시간(n)과 최대가능일광시간(N)의 비율

조정인수 c 는 간혹 1로 지정되나, FAO-24(FAO, 1992)의 경우는 아니다.

$$c = a_0 + a_1 R H_{\max} + a_2 \frac{R_{ns}}{1-\alpha} + a_3 U_{day} + a_4 \frac{U_{day}}{U_{night}} + a_5 \frac{U_{day}}{U_{night}} + a_6 R H_{\max} \frac{R_{ns}}{1-\alpha} U_{day} + a_7 R H_{\max} \frac{R_{ns}}{1-\alpha} \frac{U_{day}}{U_{night}} \quad (\text{식 V-25})$$

R_{ns} = 단파복사순량 (단위: mm/일)

$R H_{\max}$ = 최대상대습도 (단위: %)

U_{day}, U_{night} = 주간 및 야간의 각각의 풍속 (단위: Km/일)

α = albedo (=0.25)

$a_0, \dots, a_7$ = 계수

$$a_0 = 0.6817006, \quad a_1 = 0.0027864, \quad a_2 = 0.0181768, \quad a_3 = -5.89680864$$

$$a_4 = 0.0126514, \quad a_5 = 0.84064608, \quad a_6 = 0.00371736, \quad a_7 = -9.2118 \times 10^{-8}$$

2.2.2. 물 균형 모형 (Water Balance Model)

기후변수는 ①일별 평균 강수량(PPT), ②온도(T), ③PET로 결정되어진다.

토양습윤도(SM)는 ①강수량(P_r), ②용설수(snowmelt) 충전(R_s), ③PET로 계산된다. 우기(강수량과 용설수가 PET보다 큼)에는 토양습윤도가 최대 농포용수량(Field Capacity, FC)까지 다다른다. 건기(PET가 사용 가능한 물보다 큼)에는 토양습윤도는 잠재적 수분손실(potential water loss) 함수가 된다. 그러므로,

$$\frac{dSM}{dt} = (P_r + R_s - PET), \quad \text{만약 } P_r + R_s \geq PET, SM < FC \quad (\text{식 V-26})$$

$$\frac{dSM}{dt} = 0 \quad \text{만약 } P_r + R_s \geq PET, SM = FC \quad (\text{식 V-27})$$

$$\frac{dSM}{dt} = -a SM (PET - [P_r + R_s]), \quad \text{만약 } P_r + R_s < PET \quad (\text{식 V-28})$$

SM = 토양습윤도 (단위: mm)

P_r = 강수량(비) (단위: mm/일)

R_s = 용설수 충전 (단위: mm/일)

PET = 잠재증발산량 (단위: mm/일)

FC = 토양 농포용수량(Field Capacity) (단위: mm)

a = 수분보존함수(Moisture retention function)의 경사(식 V-23)

토양수분비축량(Soil water stock)은 수분보존함수에 따라서 건기시에는 고갈된다. 습기 시에는 토양수분은 PET 보다 많은 수분의 영향으로 점차 증가하게 된다.

토양이 건조되면서 공극 장력의 증가 때문에 수분의 증발이 어렵게 된다. 특정 토양에서는 $\log SM$ 과 $\sum [PET - (P_r + R_s)]$ 사이에 1차 관계가 성립된다. (식 V-26), (식 V-27), (식

V-28)을 이용하여 중간 FC 의 $\frac{dSM}{dt}$ 을 산출하기 위해서는 ' a '는 모든 토양유형의 경우에 동일하다고 간주한다 (Pastor and Post, 1983).

$$a = \frac{\ln(FC)}{(1.1282FC)^{1.2756}} \quad (\text{식 V-29})$$

Thornthwaite et al.(1995)에 의하면, 실제증발산량(Evapotranspiration, ET)은 $P_r + R_s \geq PET$ 인 우기에는 PET 와 같다고 설정한다. 습기 시에는 강우와 용설수가 모든 주변식생의 잠재 물 수요를 충족하기에 충분하다고 가정한다. 건기 ($P_r + R_s < PET$)에는 실제 증발산량(ET)(mm/일)는 잠재증발산량으로부터 축소 수정한다. 아래는 관련 공식이다.

$$ET = PET, \quad \text{만약 } P_r + R_s \geq PET \quad (\text{식 V-30})$$

$$ET = P_r + R_s - \frac{dSM}{dt}, \quad \text{만약 } P_r + R_s < PET \quad (\text{식 V-31})$$

ET = 실제 증발산량 (단위: mm/일)

농포용수량(FC)에 도달하면 넘쳐난 물은 지표 밑의 빗물과 눈이 녹은 용설수가 유출되어, 저수층(runoff storage pools)으로 흘러 들어간다. 용설수의 유출은 저수층의 크기와의 1차 함수를 통하여 구한다. 물의 이동계수는 사실상 장소와 종속되어야 하지만, 이 모형에서는 계산 분해능(calculate resolution)과만 종속관계를 가지는 장소-독립 값으로 간주하였다. FC 와 연관하여 수분부족이 존재할 경우, 모든 수분은 토양수분을 보충하기 위하여 사용되므로 유출 저수층으로 흘러 들어가는 물은 없다. 그러므로, 저수층으로 흘러 들어가는 물(PK)을 산출하기 위하여 다음을 구한다.

$$PK = P_r + R_s - PET, \quad \text{만약 } FC = SM, P_r + R_s \geq PET \quad (\text{식 V-32})$$

$$PK = \max[SM + P_r + R_s - PET - FC, 0],$$

$$\text{만약 } FC > SM, P_r + R_s > PET \quad (\text{식 V-33})$$

$$PK = 0 \quad \text{만약 } P_r + R_s < PET \quad (\text{식 V-34})$$

유출과 저수층의 저수량을 산출하기 위하여 다음을 구한다.

$$RO = r_s(D + PK) \quad (\text{식 V-35})$$

$$\frac{dD}{dt} = PK - RO \quad (\text{식 V-36})$$

PK = 저수층으로 흘러 들어가는 물 (단위: mm/일)

RO = 유출 (단위: mm/일)

D = 저수층 (단위: mm)

눈이 녹은 용설수로부터 보충되는 물(R_s)과 눈 덮임(SP)은 다음과 같이 산출된다. 눈 덮임은 평균 월별 기온이 T_0 ℃ 이하일 때만 형성되며 용설수는 T_0 ℃ 이상일 때만 발생한다고 가정한다. 그러므로 이 공식에서 강수량은 강우 P_r (mm/일), 강설 P_s (mm/일), 용설수 보충 R_s (mm/일), 눈 덮임 SP (mm)을 포함한다.

$$\begin{cases} P_r = 0, & P_s = PPT \\ \frac{dSP}{dt} = P_s \\ R_s = 0 \end{cases} \quad \text{만약 } T \leq T_0 \quad (\text{식 V-37})$$

$$\begin{cases} P_r = PPT, & P_s = 0 \\ \frac{dSP}{dt} = K(T - T_0) \\ R_s = \frac{dSP}{dt} = K(T - T_0) \end{cases} \quad \text{만약 } T > T_0, SP > 0 \quad (\text{식 V-38})$$

$$\begin{cases} P_r = PPT, & P_s = 0 \\ \frac{dSP}{dt} = 0 \\ R_s = \frac{dSP}{dt} \end{cases} \quad \text{만약 } T > T_0, SP = 0 \quad (\text{식 V-39})$$

PPT = 강수량 (눈 포함) (단위: mm/일)

SP = 눈 덮임 (단위: mm)

K = 용설수율 계수 (단위: mm/일/℃)

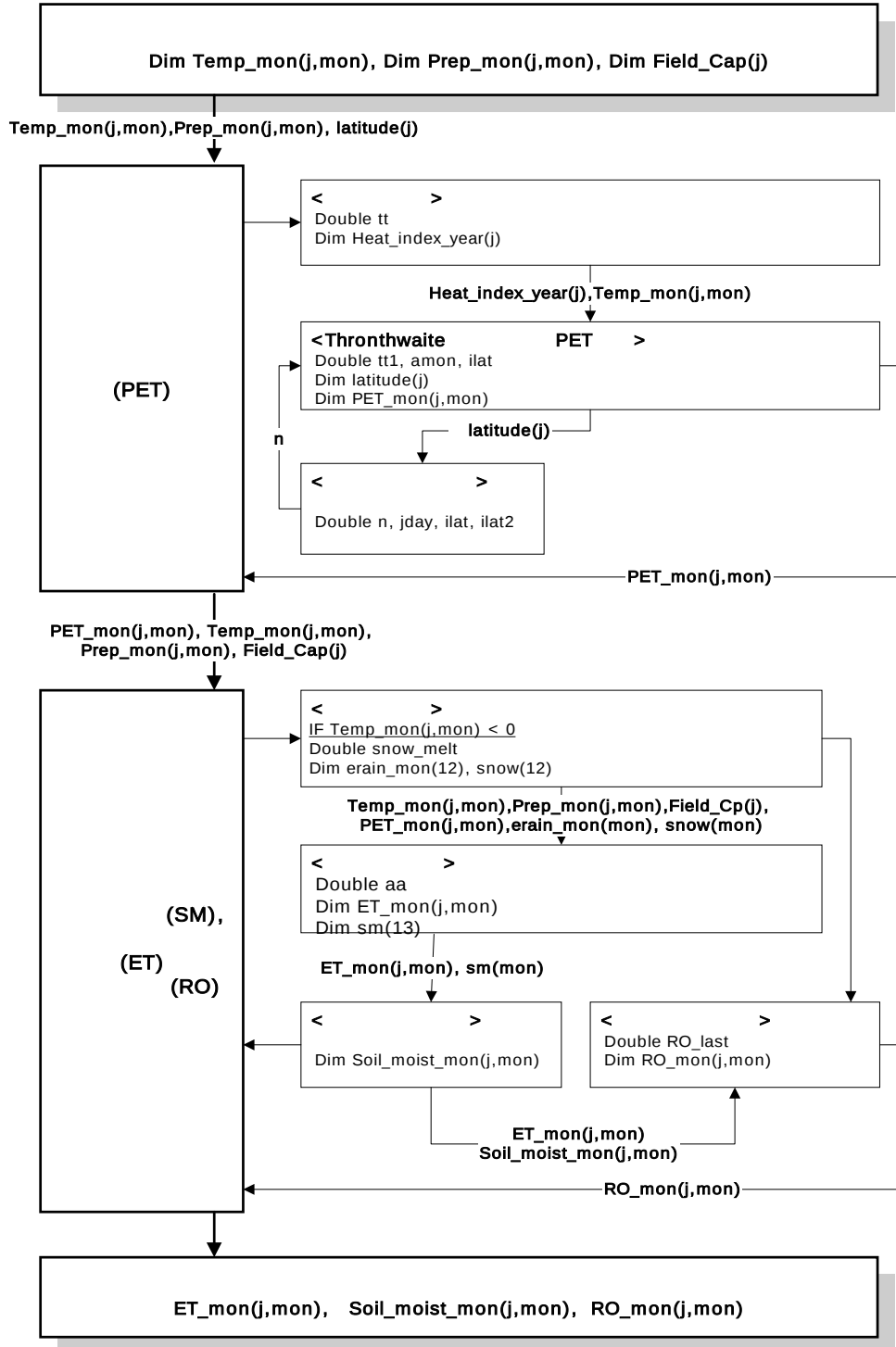
T_0 = 기준온도 온도 (단위: ℃)

T_0 는 눈이 녹기 시작하는 기준 온도(base temperature)이다. 계수 K 는 1℃ 상승 시 녹는 눈의 양을 한정한다. T_0 와 K 는 풍속, 휘도 등과 같이 용설수에 영향을 미치는 많은 기상학적 요소에 따라 변화한다.

학자들의 연구에 의하면, 기점온도의 변화 폭은 $-3 \leq T_0 \leq 0$ ℃이며, 계수 K 의 폭은 $2 \leq K \leq 7$ mm/일/℃라 주장하고 있으나, 본 모형에서는 $T_0 = -1$ ℃와 $K = 4.5$ mm/일/℃라고 설정한다(AIM Project Team, 1996).

본 절에서 다루고 있는 물 균형 모형에서는 FC를 결정하는 방법이 중대한 문제점이다.

FC는 ‘포화상태의 토양수분의 양에서 중력수(gravitational water: 중력에 의하여 토양 밖으로 배수되는 수분의 양)를 제외한 수분의 양’이라 정의되고 있다. FC는 토성(soil character), 식생 등에 종속된다. 본 연구에서는 FC를 산출하기 위한 방법으로 Webb 방법을 채택하였다(Webb, 1991). Webb 방법은 Zobler의 토심(soil depth)과 토양종(soil variety) 자료를 이용하였다(Zobler, 1986). 이 방법에서는 FC를 토양단면의 잠재 저수량, 근역(root zone)의 잠재 저수량, 토양질감(soil texture)으로부터 파생된 잠재 저수량의 3가지로 서술하고 있다. 본 연구에서는 위의 3가지 요소중 최소 값을 FC로 채택한다.



< 그림 V-6 > 물 균형 모형의 Data 흐름도

물 균형 모형의 흐름은 위의 < 그림 V-6 >과 같이 우선 입력자료로 월별기온과 월별강수량, 위도가 정의되어, PET를 계산하는 모듈로 입력된다. 이 모듈에서 월별 PET, 월별 FC가 계산된 후, 월별 기온, 월별 강수량과 함께 토양습윤도와 ET, RO를 계산하는 모듈로 입력된다. 이 모듈에서 최종적으로 월별 ET, 월별 토양습윤도, 월별 RO가 계산되어 산출된다.

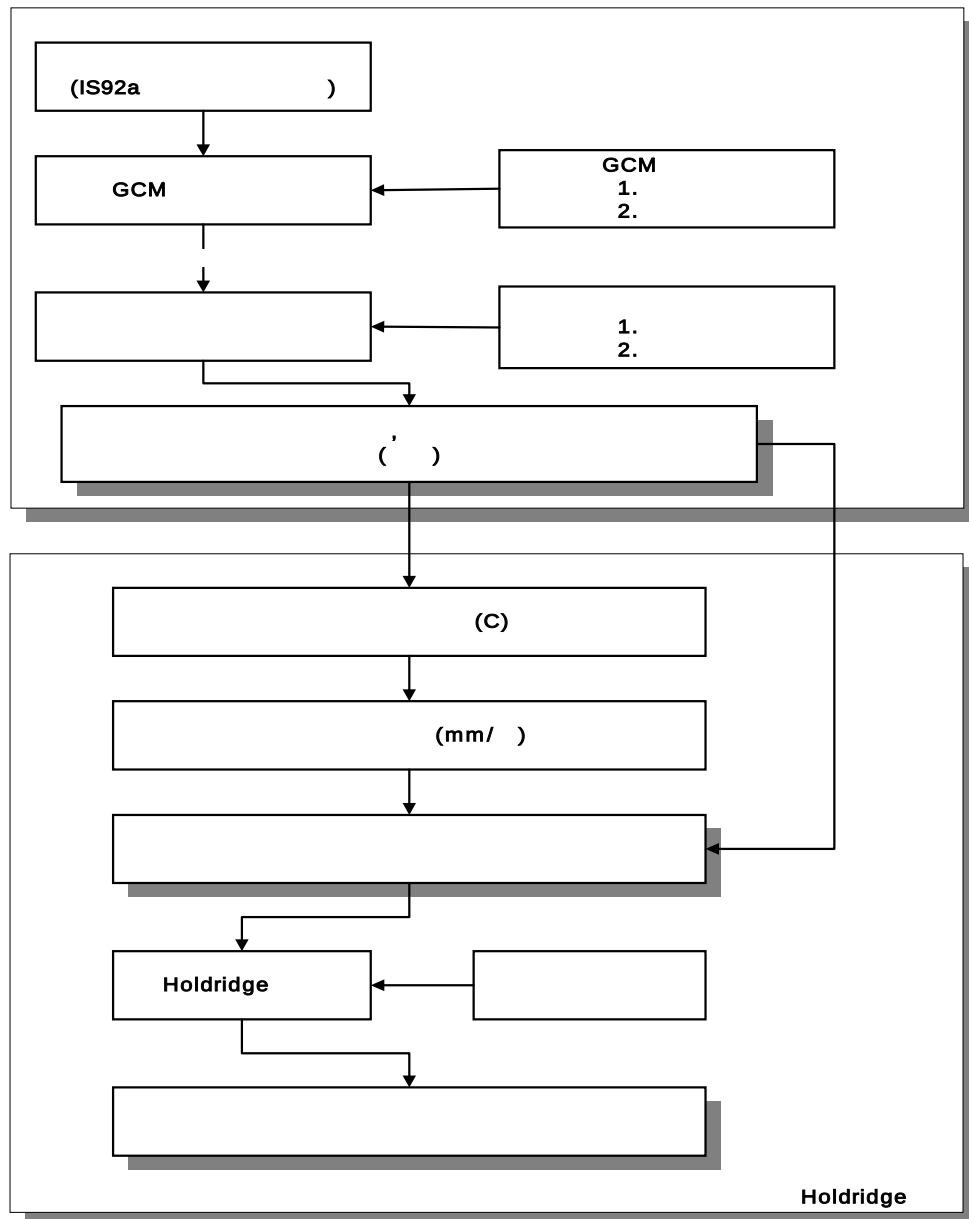
2.3. 식생영향모형

산림부문의 기후변화영향평가에는 실험법, 유추법, 전문가판단, 정량적 모형과 같은 다양한 모형이 활용되고 있다. 이러한 모형들은 < 표 V-3 >과 같이 각각의 장단점이 있으므로, 용도와 산출물의 요구조건에 맞도록 혼합하여 사용하여야 한다. 한 예로 실험법, 정량적모형 등은 필요 자료량과 소요시간이 많이 걸리며, 유추법과 전문가판단 등은 필요 자료량과 소요시간이 적게 소요되는 장단점이 있다. 따라서 식생 영향평가의 목적과 결과에 따라 각종 요인들을 검토하여야 한다.

기후변화로 인한 식생부문의 영향을 예측하는 방법은 다음의 < 표 IV-2, 3 >과 같이 목적에 따라 분할 수 있다. 이중 식생면적의 분포와 변화를 기후변화와 연관하여 예측하는 방법론은 인공위성영상자료를 이용한 원격탐사기법과 지리정보시스템을 이용할 경우 자료 구축 및 활용시 시간을 절약할 수 있으며, 결과의 신뢰성을 높일 수 있다.

UNEP(1998)에서는 위의 다양한 모형들을 다음과 같은 용도로 사용하는 것을 권고하고 있다. 우선 생물·기후적 모형은 다양한 기후변화 시나리오 하에서의 미래 안정기(steady-state) 산림분포를 예측하기 위하여 사용하여야 하며, 시간적 유추법과 생물역사학(bio-history)적 정보는 산림의 경계가 얼마동안의 시간동안 이동되었고 변환기동안 어떠한 현상들이 발생하였는가를 참조하는데 사용할 것을 권고하고 있다.

특정산림의 생성, 성장, 소멸과정을 수명, 성장률, 성장요구환경을 분석하여 시뮬레이션 하는 천이모형은 종 구성변화 및 외부적 환경 변화에 따른 일시적인 생체량 반응을 예측하기 위하여 사용되며, 생태계 에너지 또는 영양물질의 순환과정을 중심으로 시뮬레이션 하는 생물·지리화학적모형은 이산화탄소 농도의 증가 시, 각 산림유형의 생산량 및 탄소보유량을 추산하는데 효과적이라고 밝히고 있다. 경제모형은 산림생산물의 수요와 그 수요를 충족시킬 수 있는 지역을 예측하는데 효과적임을 들어 사용을 권고하고 있다.



< 그림 V-7 > 기후와 식생영향예측 모형의 흐름

자료 : Takahashi *et al.*(1998), Impacts of Climate Change on Water Resources, Crop Production and natural Ecosystem in the Asia and Pacific Region, *Journal of Global Environment Engineering* 1:93-95를 수정

따라서 본 연구에서는 기후변화로 인한 산림분포의 변화를 기후적 요소와 생물학적 요소를 통합하여 예측하기 위해 생물기후학적 Holdridge 모형을 활용한다. Holdridge 모형의 방법론은 < 그림 V-7 >과 같다.

이 모형은 생물온도(bio-temperature), 강수량, 강수량에 대한 PET의 비율과 같은 기후 변수에 생태계 복잡성의 분포를 연관시키는 기후학적 분류 개요이다. 생물온도와 연 강수량은 이 분류 모형에 결정적인 영향을 미치는 두 가지의 주인자이다. 생물온도는 (식 V-40)으로 계산된다.

〈 표 V-3 〉 Holdridge 모형의 식생분류표

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

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

$$T_{BIO} = \frac{\sum_{m=1}^{12} \max(T(m), 0)}{12} \quad (\text{식 V-40})$$

여기서 T_{BIO} [°C]는 생물 온도이고 $T(m)$ [°C]은 월 평균 기온이다. 먼저 기후는 이 생물 온도에 의해 7가지로 구분되고, 평균 전체 연 강수량(average total annual precipitation)에 의해 나누어진다. 완결된 분류는 39개 기후 지역을 포함하는 것으로 < 표 V-3 >와 같다.

Ⅶ. 연구결과 요약 및 향후 추진방안

기후변화가 한반도의 생태계 부문에 미칠 영향에 관한 국내 연구사례는 거의 전무한 실정으로 기후변화가 어떻게 작용할 것인지에 대해서 정확한 해답을 얻을 길이 없다. 다만 기후변화로 인한 서식지 환경의 변화가 생태계의 구성 및 분포에 큰 영향을 미칠 것이란 추정만이 이루어지고 있는 실정이다. 따라서 이 부분에 대한 정확한 예측 및 평가가 시급히 이루어져야 할 것이다.

이와 같은 배경에서 본 연구는 기후변화에 따른 영향연구의 국내외 동향을 파악하는 1차연도(2000년)를 진행하였으며, 이 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

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

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

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

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

제2차 연도 연구에서는 제1차 연도에서 분석한 내용을 토대로 기후변화에 따른 생태계 변화를 평가할 수 있는 모형을 최종적으로 선정하고, 국내의 실정에 적합하도록 수정·적용하고자 한다. 현재 국외에서 활발히 사용되고 있는 모형으로는 Holdridg 모형, Biome 3 모형, NPP 모형 등이 있으며, 이러한 모형은 모형의 사용가능 여부, 이용하는 인자들의 활용가능성, 자료의 구축가능성 및 결과의 활용성 등을 고려하여야 할 것이며, 2차 연도에서 이들을 심층적으로 비교하여 최종적으로 선정 개발할 예정이다. 이때, 사회·경제적 영향인자의 연계성 모색을 검토하고자 한다. 또한 생태계 변화에 대응하기 위한 국제 동향 및 주요 선진국가의 추진정책 및 사례 분석을 통하여 우리 나라의 정부차원에서 대응할 수 있는 자료를 제공하고 자 한다.

제3차 연도 연구에서는 기후변화에 따른 우리 나라 산림생태계 변화에 따른 시나리오를 제시하고 생태계 변화에 따른 우리 나라의 구체적 대책 수립방안을 제안하고자 한다. 생태계 변화에 따른 우리 나라의 구체적 대책 수립 방안에는 생태계 변화 시나리오별로 대응원칙을 정립하고 대응방식과 평가, 운영방향을 포함할 것이다.

참고문헌

동양문헌

단행본

- 국립보건원(1998), 「감염발생정보」.
- 국토개발원(1987), 「중소수계의 하천유출량 추정모델개발」.
- 기상연구소(1990), 「한반도 기후변화 감시 및 이상기상에 관한 연구(Ⅰ)」, 과학기술처, 기상연구소 연구보고서.
- 기상연구소(1991), 「한반도 기후변화 감시 및 이상기상에 관한 연구(Ⅱ)」, 과학기술처, 기상연구소 연구보고서.
- 기상연구소(1992a), 「한국-태평양 기후시스템(Ⅰ)」, 과학기술처, 기상연구소 연구보고서.
- 기상연구소(1992b), 「한반도 기후변화 감시 및 이상기상에 관한 연구(Ⅲ)」, 과학기술처, 기상연구소 연구보고서.
- 기상연구소(1993), 「한국-태평양 기후시스템(Ⅱ)」, 과학기술처, 기상연구소 연구보고서.
- 기상연구소(1994), 「한국-태평양 기후시스템(Ⅲ)」, 과학기술처, 기상연구소 연구보고서.
- 기상연구소(1999), 「대기조성변화에 따른 지역기후변화 연구」, 기상연구소 연구보고서.
- 김승, 정성원, 김현준(1993), 기후변화가 수문과 수자원에 미치는 영향, 「기후변화가 한반도에 미치는 영향에 관한 심포지움」, 한국과학기술연구원.
- 김정우 등(1997), 「기후변화 예측 기술」, 환경부 및 과학기술처.
- 박원훈 등(1995), 「기후변화가 한반도에 미치는 영향과 지구환경관련 대책연구(Ⅱ)」, 한국과학기술연구원.
- 오성남 등(1995), 「지구환경 감시 및 기후변화예측 기술」, 환경부 및 과학기술처 연구보고서.
- 오정환, 이영걸, 채문식(1988), 「대기오염과 산성우가 산림생태계에 미치는 영향 -산림지역 대기 오염의 경시적 변화」, 과학기술처 연구보고서.
- 오진규(1994), 이희성편저, 기후변화 협약 체결 및 전망, 「기후변화협약과 한국경제」, 에너지경제연구원.
- 윤용남 등(1994), 「지구환경의 변화에 따른 한반도 수문환경의 변화 연구」, 한국과학재단 연구보고서.
- 이동근(2000), 「기후변화가 북한지역에 미치는 영향에 관한 연구: 곡물잠재생산성을 중심으로」, 통일부 연구보고서.
- 이재훈 등(2000), 지구온난화에 따른 한반도 환경영향 평가 및 적응전략 기술개발, 환경부 연구보고서.
- 전성우 등(1999a), 「인공위성영상자료를 이용한 토지피복분류」, 환경부 연구보고서.
- 전성우, 정성문(1998b), 「생태·자연도 작성 및 활용을 위한 원격탐사기법 연구Ⅰ : 토지피복

- 분류도 구축을 중심으로」, 한국환경정책·평가연구원 연구보고서.
- 전성우, 정휘철(1999d), 「생태·자연도 작성 및 활용을 위한 원격탐사기법 연구Ⅱ : 식생분류도 구축을 중심으로」, 한국환경정책·평가연구원 연구보고서.
- 환경부(1996), 「환경백서」.
- 환경부(1999), 「환경백서」.
- 환경부, 과학기술처(1996), 「지구규모 대기환경 기초 및 기반기술/기후변화 예측기술」, G7 프로젝트 제2단계 1차년도 연차보고서.
- 환경부, 과학기술처(1997), 「지구규모 대기환경 기초 및 기반기술/기후변화 예측기술」, G7 프로젝트 제2단계 2차년도 연차보고서.
- 松岡 讓(1996) 「アジア太平洋地域における温暖化対策分析モデル(AIM)の開発に關する開途國等共同研究」, 地球環境綜合推進費成果報告.

논문

- 강인식, 허창희, 민경덕(1992), 한반도 여름철 강수량의 장기예측, 「한국기상학회지」 28: 283-292.
- 김광래, 이종성(1998), 원격탐사자료를 이용한 서울시 토지피복의 시계열 변화량 추출, 「대한 국토·도시계획학회지」 33(3): 363-374.
- 김승, 김현준(1994), 기후변화가 한국의 수자원에 미치는 영향, 「기후변화가 한반도에 미치는 영향에 관한 심포지움」, 한국과학기술연구원.
- 김영표, 김순희(1994), 인공위성영상자료를 이용한 수도권 토지이용 실태분석, 한국GIS학회지 2(2): 135-146.
- 김원주, 서동조, 박병준, 이건표, 박종화(2000), 고해상도 위성자료를 이용한 한강시민공원 잠실지구의 토지피복변화분석, 「대한원격탐사학회 춘계학술대회」 3:114-119.
- 김은식(2000), 기후변화와 산림생태계, 「기후변화와 생태계보전 세미나」, pp.51-68.
- 김의홍, 이석민(1996), NOAA AVHRR 자료를 이용한 한반도 토지피복 변화 연구, 「한국GIS학회지」 4(1):13-20.
- 김종천(2000), 기후변화에 따른 국제동향과 대책, 「기후변화와 생태계보전 세미나」, pp.17-29.
- 김태훈(1995), 기후변화가 산림생태계에 미치는 영향 및 대응방안, 「기후변화가 한반도에 미치는 영향에 관한 심포지움」, 한국과학기술원, pp.31-59.
- 문현생 등(1995), 인공위성자료를 이용한 환경영향평가:토지이용변화를 중심으로, 「한국환경영향평가학회지」 4(2): 23-28.
- 박병욱(1996), Landsat TM자료를 이용한 광주시 환경변화분석, 「지형공간정보학회지」 4(1): 31-41.
- 박종화(1992), Landsat 녹색식생지수를 이용한 서울시 도시녹지 변화 조사, 「대한원격탐사학회

- 지」 8(1): 27-43.
- 박종화(1995), 위성자료를 이용한 서울시 도시녹지의 평가기법 연구 : 북한산 국립공원 주연부 탐지, 「대한원격탐사학회지」 11(3): 71-81.
- 송태갑, 김은일(1997), Remote Sensing 기법과 지리정보체계(GIS)를 이용한 도시지역의 녹피 구조와 환경특성에 관한 연구, 「대한국토·도시계획학회지」 32(5): 203-214.
- 신진민, 이규석(2000), RS와 GIS를 이용한 도시개발에 따른 도시녹지의 변화과악, 「대한원격탐사학회 춘계학술대회」 3: 67-68.
- 안승만, 이규석(2000), RS와 GIS를 이용한 무주리조트개발에 따른 덕유산 국립공원 토지이용 및 녹지의 변화과악, 「대한원격탐사학회 춘계학술대회」 3: 120-121.
- 윤원태, 오재호, 권원태, 나득균(1996), 온실기체 증가로 야기된 서진하는 지구규모 일시파의 변화, 「한국기상학회지」 32: 535-543.
- 이규성(1994), 시계열 AVHRR 위성자료를 이용한 한반도 식생분포 구분, 「한국임학회지」 83(4): 441-449.
- 전성우 등(1999c), 토지피복분류체계에 관한 이론적 고찰, 「한국환경복원녹화기술학회지」 2(1): 29-37.
- 전성우, 서창완(1998a), 원격탐사와 GIS기법을 이용한 접경지역 토지피복연구, 「한국환경영향평가학회지」 7(1): 11-22.
- 전성우, 윤소원, 이동근, 정휘철(1999b), 인공위성영상자료를 이용한 우리 나라 도시의 도시화 추이에 관한 연구, 「한국환경복원녹화기술학회지」 2(3): 38-46.
- 조명희(1995), 원격탐사자료와 GIS를 이용한 라오스 남칸유역분지의 토지이용평가 및 미작적 지분석, 대한원격탐사학회 홈 페이지.
- 조인상 등(1989), 토성 및 유효토심의 차이가 토양수분 변화에 미치는 영향. 「농시연보」 31(1): 6-13.
- 한의정 등(1997), 식생지수와 녹지자연도의 비교평가, 「한국환경영향평가학회지」 6(2): 181-188.

서양문헌

서적

- AIM Project Team(1996), Technical Sturcture of AIM/Impact Model, AIM Interim Paper, IP-95-06, Tsukuba, Japan.
- AIM Project Team(1997), Asian-Pacific Integrated Model, NIES.
- Alcamo, J. (Ed)(1994), Image 2.0: Integrated Modelling of Global Climate Change. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.
- Anderson, J. R. et al.(1976), A Land Use and Land Cover Classification System for Use

- with Remote Sensor Data, USGS Professional Paper 964.
- Arakawa, A.(1972), Design of the UCLA General Circulation Model, Numerical Simulation of Weather and Climate, Tech. Rept. 7. Dept. of Meteorology, UCLA.
- Box, E. O.(1980), Macroclimate and Plant Forms: An Introduction To Predictive Modeling in Phytogeography. Junk, The Hague, The Netherlands.
- Cramer, W.P. and Leeman, R.(1993), Assessing Impacts of Climate Change on Vegetation Using Climate Classification System, Vegetation Dynamics and Global Change, Chapman & Hall, USA.
- European Commission(1993), CORINE Land Cover Technical Guide, Office for Official Publication of the European Communities.
- FAO/Unesco(1994), Digital Soil Map of the World and Derived Soil Properties, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAO(1992), Crop Water Requirements, Irrigation and Drainage paper. 24., Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Fleming, M. D.(1975), Computer Aided Analysis of Landsat MSS Data : A Comparison of Three Approaches Including a Modified Clustering Approach, Purdue University, Indiana, LARS Information Note 072475.
- Holdridge, L. R.(1967), Life Zone Ecology. Tropical Science Centre, San Jose, California.
- IPCC(1990), Climate Change: The IPCC Scientific Assessment, J. T. Houghton, G. J. Jenkins and J. J. Ephraums(Eds.), Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC(1992), Climate Change 1992: The Supplementary Report to The IPCC Scientific Assessment, J. T. Houghton, B. A. Callander and S. K. Varney(Eds.), Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC(1996a), Climate Change 1995 : The Science of Climate Change, Summary for Policemakers, Cambridge University Press.
- IPCC(1996b), Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC(1996c), Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC(1996d), Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jarvis, P. G.(1993), Maestro: A Model of CO₂ and Water Vapour Exchange By Forests in Globally Changing World. In Design and Execution of Experiments on CO₂-Enrichment, Ecosystem Research Report No. 6, The Commission of the

- European Community.
- Koyama, T. and N. Shigesawa(1995), A Size-Distribution-Based Model of Forest Dynamics along a Latitudinal Environmental Gradient, Global Change and Terrestrial Ecosystems on Monsoon Asia, Kluwer Academic Publisher.
- Köppen W.(1936), Geographisches System der Klimate, In:Handbuch der Klimatologie I(C), Gebruder Borntraeger, Berlin.
- Landsberg, J. J., S. Linder, and R. E. Mcmurtrie(1995), Effects of Global Change on Managed Forests: A Strategic Plan For Research on Managed Forest Ecosystem in a Globally Changing Environment. Gcte Report No 4.
- Legates, D. R. and C. J. Willmott(1989), Monthly Average Surface Air Temperature and Precipitation, Digital Data on a 0.5 Degree Geographic 361×721 Grid, NCAR, Boulder, Colorado, USA.
- Linder, S.(1987), Responses to Water and Nutrition in Coniferous Ecosystems. in Potentials and Limitations of Ecosystem Analysis, E. D. Schulze and H. Zwölfer (Eds). Ecological Studies 61. Springer Verlag, Berlin- Heidelberg-New York.
- Nishioka, S. and Harasawa, H.(Eds)(1998), Global Warming: The Potential Impact on Japan, Springer-Verlag, Tokyo.
- Robert J. Scholes and Sune Linder(1998), Forest, Handbook on Method for Climatic Change Impact Assessment and Adaptation Strategies, UNEP.
- Ryan, M. G., E. R. Hunt, R. E. Mcmurtrie, G. I. Agren, J. D. Aber, A. D. Friend, E. B.Rastetter, W. M. Puliam, R. J. Raison, and S. Linder(1996), Comparing Models of Ecosystem Function For Temperate Conifer Forests: I. Model Description and Validation, In Global Change: Effects on Coniferous Forests and Grasslands, A. I. Breymeyer, D. O. Hall, J. M. Melillo, and G. I. Agren (Eds). Scope (Scientific Committee on Problems of The Environment) 56. John Wiley, Chichester, United Kingdom.
- Semter, A. J.(1974), An Oceanic General Circulation Model with Bottom Topography, Numerical Simulation of Weather and Climate, Tech. Report No. 9, Dept. of Meteorology, UCLA.
- Shugart, H. H., P. J. Michaels, T. M. Smith, D. A. Weinstein, and E. B. Rastetter(1988), Simulation Models of Forest Succession. In Scales and Global Change: Spatial and Temporal Variability in Biospheric and Geospheric Processes, T. Rosswall, R. G. Woodmansee, P. G. Risser (Eds). Scope (Scientific Committee on Problems of The Environment) 35. John Wiley, Chichester, United Kingdom.
- Street R. B. and S. M. Semenov(1990), Natural Terrestrial Ecosystems in Tegart, W.J. McG., G.W. Sheldon and D.C. Griffiths(eds) Climate Change : The IPCC Impacts Assessment, Australia Government Publish Service, Canberra.

- Swain, P. H., and S. M. Davis(1978), Remote Sensing-The Quantitative Approach, McGraw- Hill.
- Takano, K.(1974), A General Circulation Model for the World Ocean, Numerial Simulation of Weather and Climate, Tech Report No. 8, Dept of Meteorology, UCLA.
- Takara, K., T. Kojiri, S. Ikebuchi, and T. Takasao(1991), A Simulation Study on Catchment Response Change Due to Global Warming, Lee & Cheng(Eds.), Environmental Hydraulics, Balkema.
- Ujihashi, Y.(1994), Numerical Experiment of Changes in Responses of River basins to Global warming, III, Heavy Snow Basins, In 'A Comprehensive Research on Reliability Analysis and Drought Control of Water Resources Systems Under the Conditions of Global Warming No. 03303046' T. Kojiri(Eds.), Final report of Grant-in Aid for Co-operative research (A) Sponsored by the Ministry of education, Science and Culture, pp.49-54.
- UNEP(1998), Handbook on Method for Climatie Change Impact Assessment and Adaptation Strategies.
- Webb, R. S., et al.(1991), A Global Data Set of Soil Particle size properties, NASA Tech. Mem., 4286.
- Woodward, F. I.(1987), Climate and Plant Distribution. Cambridge Studies in Ecology. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Yoshino, M. and H. P. Ono(1996), variation on the Plant Phenology Affected by Global Warming, In K. Omasa et al.,(eds), Climate Change and Plants in East Asia, Springer.
- Zobler, L.(1986), A World Soil File for Global Climate Modeling, NASA Tech. Mem., 87802.

논문

- Achard, F. and F. Blasco(1990), Analysis of Vegetation Seasonal Evolution and Mapping of Forest Cover in West Africa with the Use of NOAA AVHRR HRPT Data, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 56(10): 1359-1365.
- Agren, G. I., R. E. Mcmurtrie, W. J. Parton, J. Pastor, and H. H. Shugart(1991), State of The Art Models of Production Decomposition Linkages in Conifer and Grassland Ecosystems. Ecological Applications 1: 118-138.
- Ando, T.(1994), Study on Estimation of Effect of Global Warming on River Runoff, Water Science 38(4): 34-44.
- Arnell, N. W., and Reynard, N. S.(1996), The Effects of Climate Change due to Global Warming on River Flows in Great Britain, Journal of Hydrology, 183: 397-424.

- Arthur, L. M., and G. C. Van Kooten(1989), Assessing Economic Benefits of Climate Change on Canada's Boreal Forest. *Canadian Journal of Forest Research* 19: 463-470.
- Bardossy, A. and E. J. Plate(1992), Space-time Model for Daily Rainfall Using Atmospheric Circulation Patterns, *Water Resource. Res.* 28: 1247-1259.
- Bates, G. T., S. W. Hostetler and F. Giorgi(1995), Two-year Simulation of the Great Lake region with a Coupled Modeling System, *Mon. Wea. Rev.* 115: 1825-1850.
- Beaubien, J.,(1979), Forest Type Mapping from Landsat Digital Data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 45(8): 1135-1144.
- Branchu, P., H. Faure, J. P. Ambrosi, E. M. Van Zinderen-Bakker, and L. Faure-Denard(1993), Africa as Source and Sink For Atmospheric Carbon Dioxide. *Global and Planetary Change* 7: 41-49.
- Bryan, K.(1969), A Numerical Method for the Study of the Circulation of the World Ocean, *J. Comput. Phys.* 2: 510-514.
- Burn, D. H.(1994), Hydrological effects of climate change in west-central Canada, *Journal of Hydrology* 160: 53-70.
- Carpenter, G., A. N. Gillison, and J. Winter(1993), Domain: A Flexible Modelling Procedure For Mapping Potential Distributions of Plants and Animals. *Biodiversity and Conservation* 2:667-680.
- Chavez, P. S. Jr., and A. Y. Kwarteng(1989), Extracting Spectral Contrast in Landsat Thematic mapper Image data using Selective principle Component Analysis, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 55(9): 1303-1309.
- Chavez, P.S., Jr. and D.J. MacKinnon(1994), Automatic Detection of Vegetation Changes in the Southwestern United States Using Remotely Sensed Images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 55(3): 339-348.
- Chiew, F. H. S., and T. A. McMahon(1993), Detection of Trend or Change in Annual Flow of Australian Rivers, *International Journal of Climatology* 13: 643-653.
- Civco, Daniel L.(1989), Topographic Normalization of Landsat Thematic Mapper Digital Imagery, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 55(9): 1303-1309.
- Colby, Jeffery D.(1991), Topographic Normalization in Rugged Terrain, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 57(5): 531-537.
- Conese, C. et al.(1993), Topographic Normalization of TM Scenes through the Use of an Atmospheric Correction Method and Digital Terrain Models, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 59(12): 1745-1753.
- Consese, C., and F. Maselli(1991), Use of Multitemporal Information to Improve Classification Performance of TM Scenes on Complex Terrain, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.

- Cubasch, U., G. Hegerl, A. Hellbach, H. H. CK, U. Mikolajewicz, B. D. Santer and R. Voss(1995), A Climate Simulation Starting in 1935, *Clim. Dyn.* 11: 71-84.
- D'Arrigo, R. D., G. C. Jacoby, and R. M. Free(1992), Tree-Ring Width and Maximum Latewood Density at The North American Tree Line: Parameters of Climatic Change. *Canadian Journal of Forest Research* 22: 1290-1296.
- Dale, V. H. and H. M. Rauscher(1994), Assessing Impacts of Climate Change on Forests: The State of Biological Modeling. *Climatic Change* 28: 65-90.
- Dickinson, R. E. et al.(1989), A Regional Climate Model for the Western U.S., *Climate Change* 15: 383-422.
- Dvorak, V., Hladny, J., and Kasperek, L.(1997), Climate Change Hydrology and Water Resources Impact and Adaptation for Selected River Basins in the Czech Republic, *Climate Change* 36: 93-106.
- Felix, N. A., and Binney, D. L. (1989), Accuracy Assessment of a Landsat-Assisted Vegetation Map of the Coastal Plain of the Arctic National Wildlife Refuge, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 55(4): 475-478.
- Franklin, S. E.(1994), Discrimination of Subalpine Forest Species and Canopy Density Using Digital CASI, SPOT PLA, and Landsat TM Data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 60(10): 1233-1241.
- Gail A. C., S. Gopal, S. Macomber, S. Martens, and C. E. Woodcock(1999), A Neural Network Method for Mixture Estimation for Vegetation Mapping, *Remote Sensing of Environment* 70(2): 138-154.
- Gellens, D. and Roulin, E.(1998), Stramflow Response of Belgium Catchments to IPCC Climate Change Senarios, *Journal of Hydrology* 210: 242-258.
- Giorgi, F. and L. O. Mearns(1991), Approaches to the Simulation of Regional Climate change : A Review, *Rev. Geophys.* 29(2): 191-216.
- Giorgi, F. et al.(1993b), Development of the Second Generation Regional Climate Model(RegCM2) Part II, Convective Process and Assimilation of Lateral Boundary Condition, *Mon. Wea. Rev.* 121: 2814-2832.
- Giorgi, F. et al.(1992), A 2XCO2 Climate Change Scenario over Europe Generated using a Limited Area Model Nested in a General Circulation Model Part II, *Climate Change Scenario*, *J. Geophys. Res.* 97: 10011-10028.
- Giorgi, F. et al.(1993a), Development of the Second Generation Region Climate Model(RegCM2) Part I , Boundary-layer and Radiative Transfer process, *Mon. Wea. Rev.* 121: 2794-2813.
- Giorgi, F. et al.(1994), Regional Climate Change Scenarios over the United State Produced with a Nested Regional Clime Model, *Journal of Climate* 7: 375-399.
- Giorgi, F.(1990), Simulation of Regional Climate Using a Limited Area Model Nested on a

- General Circulation Model, *Journal of Climate* 3: 941-963.
- Giorgi, F.(1991), Sensitivity of Wintertime Precipitation and Soil Hydrology Simulation over the Western U.S. to Lower Boundary Specification, *Atmos. Ocean* 28: 1-23.
- Gong, P., P. J. Howarth,(1992), Frequency-based contextual classification and gray-level vector reduction for land-use identification, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 58(4): 423-437.
- Hame, T.(1984), Landsat-Aided Forest Site Type Mapping, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 50(8): 1175-1183.
- Hirakuchi, H. and F. Giorgi(1995), Multi-year Present Day and 2×CO₂ Simulation of Monsoon Climate over Eastern Asia and Japan with a Regional Climate Model Nested in a General Circulation Model, *J. Geophys. Rev.* 100: 21105-21126.
- Holben, B. N., and C. O. Justice(1980), The Topographic Effect on Spectral Response from Nadir Pointing Source, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 46(9): 1191-1200.
- Holdridge, L.R.(1947), Determination of World Plant Formation from Simple Climatic Data, *Science* 105: 367-368.
- Hung, C. C.(1993), Competitive Learning Networks for Unsupervised Training, *International Journal of Remote Sensing* 14(12): 2411-2415.
- Johnes, A. R., J. J. Settle, and B. K. Wyatt(1988), Use of Digital Terrain data in the Interpretation of SPOT-1 HRV Multispectral Imagery, *International Journal of Remote Sensing* 9(4): 669-682.
- Jones, R. G., J. M. Murphy and M. Noguer(1995), Simulation of Climate Change over Europe Using a Nested Regional Climate Model Part I. Assessment of Control Climate, Including Sensitivity to Location of Lateral Boundaries, *Quart. J. R. Met. Soc.* 121: 1413-1449.
- Joria, Peter and Ahearn, Sean C.(1991), A Comparison of the SPOT and Landsat Thematic Mapper Satellite Systems for Detecting Gypsy Moth Defoliation in Michigan, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 57(12): 1605-1612.
- Joyce, L.A. et al.(1995), Forest Sector Impacts From Changes in Forest Productivity under Climate Change, *Journal of Biogeography* 22: 703-713.
- Kanamitsu, M. and H.-M. Juang(1994), Simulation and Analysis of an Indian Monsoon by the NMC Nested Regional Spectral Model. Extended Abstract, International Conference on Monsoon Variability and Prediction. International Centre for Theoretical Physics. Trieste, Italy, 9-13 May.
- Karl, R., W. C. Wang, M. E. Schlesinger, R. W. Knight, and D. Portman(1990), A Method of Relating General Circulation Model Simulated Climate to the Observed Local Climate, *Journal of Climate*, 3: 1053-1079.

- Kawata, Y., S. Ueno, and T. Kusaka(1988), Radiometric Correction for Atmospheric and Topographic Effects on Landsat MSS Images, International Journal of Remote Sensing 9(4): 729-748.
- Kida, H. T. et al.(1991), A New Approach for Coupling a Limited Area Model to a GCM for Regional Climate Simulation, J. Meteor. Soc. Japan 68: 687-703.
- Kirshen, P. H., and Fennessey, N. M.(1995), Possible Climate-Change Impacts on Water Supply of Metropolitan Boston, Journal of Water Resources Planning and Management 121(1): 61-70.
- Kojiri, T.(1992), A Study of Impact Analysis of Global Warming on Water Resources System, Proc. of 4th Symposium on Water Resources pp.11-20.
- Kwadijk, J., and Middelkoop, H.(1994), Estimation of Impact of Climate Change on the Peak Discharge Probability of the River Rhine, Climate Change 27: 199-224.
- Kwadijk, J., and Rotmans, J.(1995), The Impact of Climate Change on the River Rhine : A Scenario Study, Climate Change 20: 397-425.
- La Perriere, A. J. et al.(1980), Use of Landsat data for moose Habitat Analysis in Alaska , Journal of Wildlife Management 44(4): 881-887.
- 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. 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.
- Leith, R. M.(1991), Trends in Snow Course and Stream Flow Data in British Columbia and the Yukon, Proceedings of the Western Snow Conference, Environment Canada.
- Lettenmaier, D. P., and Sheer, D. P.(1991), Climate Sensitivity of California Water Resources, Journal of Water Resources Planning and Management. 117(1): 108-125.
- 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.
- Liu, Y. F. et al.(1994), Simulation of Summer Monsoon Climate Over East Asia with an NCAR Regional Climate Model, Mon. Wea. Rev. 122: 2331-2348.
- Loughlin, W. P.(1991), Principle Component Analysis for Alteration Mapping, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 57(9): 1163-1169.
- Marengo, J. A.(1995), Variations and Change in South American Streamflow, Climate Change 31: 99-117.
- Marinucci, M. R. and F. Giorgi(1992), A 2XCO₂ Climate Change Scenario over Europe

- Generated using a Limited Area Model Nested in a General Circulation Model Part I, Present day Simulation, J. Geophys. Res. 97: 9989-10009.
- Maselli, F., C. Conese, L. Petkov and R. Resti(1992), Inclusion of Prior probabilities derived from a nonparametric process into the maximum Likelihood Classifier, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 58(2): 201-207.
- Masukura, K. and J. Yoshitani(1992), Discharge variation in the Tone River Due to Climate Change, Proc. of 4th Symposium on Water Resources pp.751-756.
- Matyas, C.(1994), Modeling Climate Change Effects with Provenance Test Data. Tree Physiology 14: 797-804.
- McGregor, J. L. and K. J. Walsh(1994), Climate Change Simulation of Tasmania Precipitation Using Multiple Nestings, J. Geophys. Res. 99: 20990-20905.
- McMurtrie, R. E. et al.(1990), Modelling the Yield of Pinus Radiata on a Site Limited by Water and Nitrogen, Forest Ecology and Management 20: 381-413.
- Melillo, J. M., A. D. Mcguire, D. W. Kicklighter, B. Moore, Iii, C. J. Vorosmarty, and A. L. Schloss(1993), Global Climate Change and Terrestrial Net Primary Production. Nature 363: 234-240.
- Merola J. A. et al(1983), Determination of Aspen/Conifer Forest Mixes from Multitemporal Landsat Digital Data, Proceeding of the 17th International Symposium on Remote Sensing of the Environment 2: 883-893.
- Mitosek, H. T.(1995), Climate Variability and Change within the Discharge Time Series : A Statistical Approach, Climate 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.
- Nash, L. L., and Gleick, P. H.(1991), Sensitivity of Streamflow in the Colorado Basin to Climate Changes, Journal of Hydrology 125: 221-241
- Nelson, R. F.(1981), A Comparison of Two Methods for Comparing Forest Land, International Journal of Remote Sensing 2(1): 49-60.
- Niwa, K., M. Hirose, T.Miyai, and Y. Amano(1993), Comparison of Global Warming Effect on Water Resources in Various Regions, Proc. Hydraulic Engineering, JSCE 37: 201-206.
- Parton, W. J., J. W. B. Stewart, and C. V. Cole(1988), Dynamics of C, N, P and S in Grassland Soils: A Model. Biogeochemistry 5: 109-113.
- Peres-Garcia, J., L. A. Joyce, C. S. Binkley, and A. D. Mcguire(1995), Economic Impacts of Climate Change on The Global Forest Sector: An Integrated Ecological/Economic Assessment. in Proceedings of A Meeting on Economics of Carbon Sequestration in Forestry, Bezendal, May 15-19.
- Peterjohn, W. T., J. M. Melillo, F. P. Bowles, and P. A. Steudler(1993), Soil Warming and

- Trace Gas Fluxes: Experimental Design and Preliminary Flux Results. *Oecologia* 93: 18-24.
- Peterjohn, W. T., J. M. Melillo, P. A. Steudler, K. M. Newkirk, F. P. Bowles, and J. D. Aber(1994), Responses of Trace Gas Fluxes and N Availability to Experimentally Elevated Soil Temperatures. *Ecological Applications* 4: 617-625.
- Philip A. T.(2000), A Quantitative Fuzzy Approach to Assess Mapped Vegetation Classification for Ecological Applications, *Remote Sensing of Environment* 72(3): 253-267.
- Prentice, I. C., W. Cramer, S. P. Harrison, R. Leemans, R. A. Monserud, and A. M. Solomon(1992), A Global Biome Model Based on Plant Physiology and Dominance, Soil Properties and Climate. *Journal of Biogeography* 19: 117-134.
- Price, J. T.(1995), Potential Impacts on Global Climate Change on the Summer Distribution of Some North American Grassland Birds, Ph.D. Dissertation, Wayne State University, Detroit, Michigan
- Qari Mohammed Yousef H. T.(1991), Application of Landsat TM Data to Geological Studies, Al-Khabt Area, Southern Arabian Shield, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 57(4): 421-429.
- Raisenen, J.(1995), A Comparison of the Results of Seven GCM Experiments in North Europe, *Geophysica* 30(1-2): 3-30.
- Rao, A. R., and Al-Wagdany, A.(1995), Effects of Climatic Change in Wabash River Basin, *Journal of Irrigation and Drainage Engrg.* 121(2): 207-215.
- Rosenberg, N. J. (Ed)(1993), Towards An Integrated Impact Assessment of Climate Change: The Mink Study. *Climatic Change (Special Issue)* 24: 1-173.
- Running, S. W. and J. C. Coughlan(1988), A General Model of Forest Ecosystem Processes For Regional Application. I. Hydrological Balance, Canopy Gas Exchange and Primary Production Process. *Ecological Modelling* 42: 125-154.
- Sakaki, H., H. Kida, T. Koide and M, Chiba(1995), The Performance of Long term Integration of a Limited Area model with the Spectral Boundary Coupling Method, *J. Met. Soc. Japan* 73(2): 165-181.
- Scholes, R. J. and M. R. Van Der Merwe(1996), Sequestration of Carbon in Savannas and Woodlands. *The Environmental Professional* 18: 96-103.
- Schreider, S. Yu., Jakeman, A. J., Pittock, A. B., and Whetton, P. H.(1996), "Estimation of Possible Climate Change Impacts on Water Availability, Extreme Flow Events and Soil Moisture in the Goulburn and Ovens Basins, Victoria", *Climatic Change* 34: 513-546.
- Schriever, James R. and Congalton, Russel G.(1995), Evaluating Seasonal Variability as an Aid to Cover-Type Mapping from Landsat Thematic Mapper Data in the Northeast,

- Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 61(3): 321-327.
- Semazzi, F. H. M., N. H. Lin, Y.-L. Lin and F. Giorgi(1994), A Nested Model Study of the Sahelian Climate Response to Sea-surface Temperature Anomalies, *Geophys. Res. Let.* 20: 2897-2900.
- Servant, M., J. Maley, B. Turcq, M. L. Absy, P. Brenac, M. Fournier, and M.P. Ledru(1993), Tropical Forest Changes During The Late Quaternary in African and South American Lowlands. *Global and Planetary Change* 7: 25-40.
- Skidmore, A. K.(1989), An Expert System Classifies Eucalypt Forest Types using Thematic Mapper Data and a Digital Terrain Model, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 55(10): 1449-1464.
- Skidmore, A. K., and B. J. Turner(1988), Forest Mapping Accuracies Are Improved Using a Supervised Nonparametric Classifier with SPOT Data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54(10): 1415-1421.
- Smith, T. M., H. H. Shugart, G. B. Bonan, J. B. Smith, and F. I. Woodward(1992), Modeling The Potential Response of Vegetation to Global Climate Change: The Ecological Consequences of Global Climate Change. *Advances in Ecological Research* 22: 93-116.
- Strahler, A. H. et al.(1978), Improving Forest Cover Classification Accuracy From Landsat By Incorporating Topographic Information, *Proceeding of the 12th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Environment Research Institute of Michigan, Michigan, 3: 1541-1552.
- Strahler, A. H.(1980), The Use of Prior Probabilities in Maximum Likelihood Classification of remotely Sensed Data, *Remote Sensing of Environment* 10: 135-163.
- Takahashi et al.(1998), Impacts of Climate Change on Water resources, Crop Production and natural Ecosystem in the Asia and Pacific Region, *Journal of Global Environment Engineering* 1: 91-103.
- Takara, K., and T. Kojiri(1993), Numerical Experiment on Effects of Global Warming on Catchment Response Change, *J. of Hydraulic, Coastal and Environmental Engineering*, JSCE 479/II-25 pp.1-10.
- Tanakamura, H. and M. kadoya(1991), Effects of Global Warming on Hydrological Cycle, *Annals Disa. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.* 34 B-2 pp.189-207.
- Tanakamura, H. and M. Kadoya(1992), Effects of Global Warming on Hydrological Cycle(2), *Annals Disa. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.* 35 B-2 pp.183-195.
- Tangley L.(1988), Preparing for Climatic Change, *Bioscience* 38: 14-18.
- Thompson, D. G. et al.(1980), Caribou Habitat Mapping in the Southern District of Keewatin, N.W.T.:An Application of Digital Landsat data, *Journal of Applied Ecology* 17: 125-138.

- Thornthwaite, C. W., and J. R. Mather(1955), The water balance, Publications in Climatology, 8: 1-86.
- VEMAP members(1995), Vegetation/Ecosystem Modeling and Analysis Project (VEMAP): Comparing Biogeography and Biogeochemistry Models in a Continental-scale Study of Terrestrial Ecosystem Responses to Climate Change and CO₂ Doubling, Global Biogeophysical Cycles 9: 407-437.
- 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.
- Wahl, K. L.(1991), Is April to July Runoff Really Decreasing in the Western United States?, Proceedings of The Western Snow Conference, Juneau, Alaska.
- Walsh, K. and J. L. McGregor(1995), January and Huly Climate Simulation Over the Australian Region using a Limited Area Model, J. Climate 8: 2387-2403.
- Walsh, S. J.(1980), Coniferous Tree Species Mapping Using Landsat Data, Remote Sensing of Environment 9: 11-26.
- 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.
- Whetton, P. H., A. M. Fowler, M. R. Haylock and A. B. Pittock(1993), Implication of Climate Change Due to the enhanced Greenhouse Effect on Flood and Droughts in Australia, Clim. Change 25: 289-317.
- Whetton, P. H., P. J. Rayner, A. B. Pittock and M. R. Haylock(1994), An Assessment of Possible Climate Change in the Australia Region Based on an Intercomparison of General Circulation modeling Results, J. Climate 7: 441-463.
- Wilks, D. S.(1992), Adapting Stochastic Weather Generation Algorithms for Climate Change Studies, Clim. Change 22: 67-84.
- Wilson, L. L., D. P. Lettenmaier and E. Skyllingstad(1992), A hierarchical Stochastic Model of Large-scale Atmospheric Circulation Patterns and Multiple Station Daily Precipitation, J. Geophys. Res. 97: 2791-2809.
- Wolter, P. T., D. J. Mladenoff, G. E. Host, T. R. Crow(1995), Improved forest classification in the northern Lake States using multi-temporal Landsat Imagery. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 61(9): 1129-1143.
- Zorita, E., J. P. Hughes, D. P. Lettenmaier and H. von Storch(1995), stochastic Characterization of Regional Circulation Patterns for Climate Model diagnosis and Estimation of Local Precipitation, J. Climate 8: 1023-1042.