

이 자료는 지난 3월 15일 에너지 경제연구원이 라 마다르네상스호텔에서 개최한 <기후변화협약의 과제와 대응방향> 워크숍에서 발표된 논문을 옮긴 것이다. <편집자註>

1. 머리말

지구온난화(地球溫暖化, Global Warming)란 문자 그대로 지구의 평균 기온이 점점 더워지는 현상을 말한다. 지구 대기권의 연평균 기온이 과거 100년간에 0.5℃가량 높아졌으며, 특히 온난화 경향은 최근에 더욱 뚜렷해져서 과거 140년간 지구 연평균 기온의 상위 기록 6개가 1980년대 이후에 나타났다. 이같은 추세는 한반도에도 그대로 나타나 겨울을 따뜻하게 보내기 시작한 셈이다.

이러한 지구의 기온상승 원인은 온실효

을 흡수차단함으로써 온실과 같은 효과를 일으킨다.

19세기 이전에는 인간의 활동에 의한 온실가스의 배출규모가 기후를 변화시키기에 너무 적었으나 19세기에 들어서서 산업문명이 발달함에 따라 이산화탄소를 비롯한 여러 물질들을 점차 대규모로 배출하기 시작하였다. 인간이 사용하는 연료의 성분인 탄소에 의해 지구의 기후가 변화할 수 있다는 것은 1938년에 칼렌다(Callendar)가 처음 제기하였다. 다시 말해 인간의 행위에 의한 기후변화라는 문제의 대두는 겨우 50년의 역사를 가지고 있는 것이다. 그런데 문제는 온실효

기후변화협약의 과제와 전망

지구온난화가 한반도에 미치는 영향

과가스(溫室效果가스, Greenhouse Gases)의 대기중 농도가 증가하기 때문이라는 것이 정설로 되어 있다. 온실가스로는 이산화탄소(CO₂), 메탄가스(CH₄), 아산화질소(N₂O), 염화불화탄소(CFC) 등이 있으며 우주공간으로 방출되는 적외선

스의 대기중 수명은 아주 길어서 지구온난화 현상을 뒤늦게 발견하였을 뿐만 아니라 지금부터 혁신적인 조치를 취한다 하더라도 그 효과는 아주 늦게야 나타나는 사실이다.

1980년대의 각 온실가스가 지구온난화

<표-1> 한반도 기후변화(1931년 이후 30년 평균 기온비교)

	강릉	서울	울릉도	추봉령	대구	울산	광주	부산	제주	전국
1931 - 60	12.1	11.1	12.0	11.5	12.6	12.8	12.8	13.4	14.7	12.6
1961 - 90	12.5	11.8	12.0	11.5	13.2	13.5	13.2	13.6	15.3	13.0
차 이	+0.4	+0.7	0.0	0.0	+0.6	+0.7	+0.4	+0.2	+0.6	+0.4

<자료> 기상청

박 원 훈

한국과학기술연구원
환경연구센터 책임연구원

에 미치는 온실효과에 대한 비율은 이산화탄소의 비율이 약 50% 정도를 차지하고 있고, 메탄가스 18%, CFC 14%, 아산화질소 6%, 기타가 13%이다. 인간활동 종류에 따른 온난화 기여정도는 에너지 소비와 생산이 57%, CFC가 17%, 농업이 14%정도 기여하고 있다.

2. 한반도의 기후변화 시나리오

(1) 한국의 기후변화 영향 연구

한국에서의 기후변화에 대한 영향 평가 연구는 과학기술처의 위탁에 의해서 한국과학기술연구원 환경연구센터가 중심이 되어 진행되어 왔다. 1992년 11월부터 2년 계획으로 연구가 진행중이며 현재 2차년도 연구가 진행중이다. 이 연구는 한국과학기술연구원 뿐만 아니라 한국내 10여개 연구기관, 대학이 참여하는 종합적인 연구이다. 1993년에 4차에 걸친 심포지움을 개최하여 지역 기후변화 시나리오, 생태계, 농림업분야, 해양, 수문학분야, 경제와 산업 및 에너지분야에 대한 분석을 시도하였으며 2차년도에는 1차년도의 연구를 보완, 개선하는 연구를 추진하고 있다. 제2절, 제3절의 내용은 제1차년도 연구결과를 요약한 것이다.

지구온난화란 이산화탄소, 메탄가스 같은 온실가스의 계속된 배출로 지구의 평균기온이 점차 올라가는 현상을 말한다.

(2) 한반도 기후변화 시나리오

앞으로 일어날 기후변화를 예측하는 일은 무척 복잡하다. 상대적인 기후의 안정성은 과거의 기후변화 기록에 의해서 알 수 있고 과거의 기후변화 자료를 이용해 미래의 기후를 예측해 볼 수도 있다. 그러나 과거의 기후변화는 평균 기온변화 1~4°C에 수천년이 걸려 일어난 느린 변화인데 반해, 오늘의 기후변화는 수십년 단위로 일어나는 매우 빠른 변화로서 과거의 기후자료가 앞으로 전개될 더운 기후에 대한 단편적인 정보는 제공할 수 있지만 기후가 더워지면서 생기게 될 여러 문제에 대해서는 큰 도움을 주지 못한다.

기후변화를 예측하기 위해 GCM(General Circulation Models)이라 불리는 삼차원 컴퓨터 모델이 개발되었는데 여러 연구그룹이 GCM 모델을 개발해 기후변화에 대한 정부간패널 (IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change)을 중심으로 계속 연구를 진행중이다. 지금까지 IPCC등 국외의 연구결과에 따르면 전 지구적인 값은 개략적으로 얻어지고 있다. 즉 앞으로 CO₂ 농도가 2배 증가시 기온은 1.5~4.5°C (최적값 2.5°C) 정도 상승하고 그 정도는 고위도로 갈수록, 하계보다 동계에 더 뚜렷할 것으로 예상되고 있다. 또 강수량의 경우는 기온의 경우에 비해 훨씬 불확실 하지만 대체로 3~15% 증가할 것으로 예상되고 있다. 그러나 이러한 기후변화 시나리오는 전 지구적인 평균 값으로서 기후가 지역에 따라 매우 차이가 있고 특히 강수량은 매우 불규칙한 변동을 한다는 것을 감안할 때 이 시나리오를 지역별로 그대로 적용할

〈표-2〉 온실가스 농도의 증가추세

온실가스	농도			대기중 잔류수명 (년)
	산업혁명전	1990년	현재 증가율(%)	
이산화탄소 (CO ₂)	280ppm	353ppm	0.5%	50-200
메탄 (CH ₄)	0.8ppm	1.72ppm	0.9%	10
CFC 12	0	184ppt	4%	130
CFC 11	0	280ppt	4%	65
아산화질소 (N ₂ O)	288ppb	310ppt	0.25%	150

자료 : IPCC보고서 (1990)

수 없다.

한반도 부근에 대한 기후변화 시나리오를 작성하는 방법으로는 전지구를 대상으로 하는 대기 대순환 모델에 현재와 미래의 온실기체의 농도를 각각 입력 자료로 사용하여 기온, 강수량, 토양 수분함량 등 예측치의 차이를 분석하여 미래의 기후변화를 예측하는 방법이 가장 많이 사용되고 있다. 아직까지 우리나라의 GCM 모델은 수립되지 못하였으므로 국외의 주요 GCM 모델이라 할 수 있는 美國의 GFDL(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory), 美國의 GISS(NASA/Goddard Institute for Space Study), 캐나다의 CCC(Canadian Climate Center), 美國의 UI(University Illinois), 日本의 MRI(Meteorological Research Institute) 등 5개 모델을 사용하여 출력된 GCM 모델결과 값을 통계적인 방법으로 처리하여 CO₂ 2배 증가시 예상되는 한반도 기온과 강수량 변화의 시나리오를 얻었다. 그러나 이번에 얻어진 결과들은 아직 불확실성이 많으므로 사용시 주의를 요하며, 앞으로 범 세계적인 연구 추세에 맞추어 이 시나리오의 개선을 위한 연구가 계속 이루어져야 할 것으로 생각된다.

지구온난화가 한국의 기후변화에 미치는 영향을 시나리오별로 예측치를 추출한 연구결과를 소개한다. 흔히 사용되는 시나리오는 Business-as-usual(BaU) 시나리오로서 급격한 배출 억제 조치를 취하지 않았을 때의 시나리오이다. 또한 연구자마다 Business-as-usual 시나리오와 함께 배출억제 방안을 실시하였을 경우의 시나리오를 개발하여 기후변화를 예측하

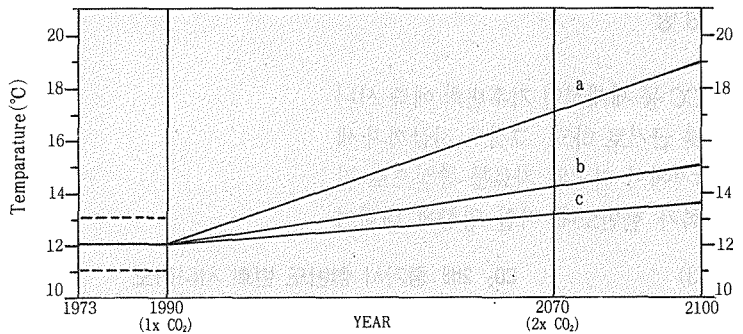
기후변화의 영향은
해수에 대한 영향이외도
지표수와 지하수의
가용정도와 질의 변화를
가져와 용수공급, 관개,
수력발전등 각종
수자원분야에 영향을
미친다.

기도 한다. 여기 CO₂의 증가율은 현재의 CO₂증가율(하와이의 마우나로아 관측소) 0.5%/년과 앞으로 21세기 중반에 예상될 수 있는 최대 2%/년을 고려하여 1%/년으로 하였으며 이렇게 했을때 CO₂ 2배 증가는 대체로 2070년 부근에 될 것으로 예상된다.

1) 기온

- 현재의 기후조건(1×CO₂)에서 과거 20년동안(1973~1992) 한반도의 연평균 기온은 12.1°C이며 그 변동폭은 1°C로서 11.1~13.1°C 사이에서 변동하였다.
- CO₂ 2배 증가시(2×CO₂) 한반도의 기온은 1.0~4.0°C 범위내에서 상승할 것으로 예상된다. IPCC의 BaU에 따라 기후가 변동한다고 볼 때 한반도의 기온은 10년에 0.15~0.50°C(최적 0.25~0.3°C)의 증가율을 보일 것으로 예상된다. 대체로 중부지방의 기온변화가 동해안과 남해안 지방보다 크며, 동계가 하계보다 큰 것으로 나타났다.

<그림 1> CO₂ 2배 증가시 한반도 온도 변화 시나리오



- a : 최대 온도 변화 시나리오(예상)
- b : 최적 온도 변화 시나리오(예상)
- c : 최소 온도 변화 시나리오(예상)

2) 강수량

- 현재의 기후조건($1 \times CO_2$)에서 과거 20년동안(1972~1991년) 한반도의 연평균 강수량은 1295mm이며, 그 변동폭은 26%로서 약 960mm~1630mm 사이에서 변동하였다.
- CO_2 2배 증가할시($2 \times CO_2$) 한반도 강수량 변화 시나리오는 아래의 <표-3>과 같다.

그런데 CO_2 농도가 두배가 되었을 때의 한반도에서의 강수량 변화는 모델에 따라 상반된 결과를 보여주고 있어서 이는 현재 우리의 지식과 기술 수준으로는 정확한 강수량 변화 예측이 쉽지 않음을 보여준다.

여기서 유의하여야 할 점은 강수는 계속되는 현상이 아니라 어느 기간동안만 일어나는 *event* 현상이라는 점이다. 강수량 시나리오에 있어서 월평균, 또는 계절 평균 강수량과 더불어 고려되어야 하는 사항은 폭우와 같은 기후 극값의 발생 빈도이다.

3. 기후변화가 한반도에 미치는 영향

IPCC 등 세계적인 기후변화 예측 시나리오를 근거로 하고, 그것도 지금까지 세계 각지에서 연구된 자료를 중심으로 기후변화가 한반도에 미칠 영향에 대하여

<표-3> CO_2 2배 증가시 한반도 변화 시나리오

지역	연평균	여름	겨울	비고
한반도	(a) 25%	35%	10%	최대 강수 시나리오
	(b) 15%	20%	0%	최적 강수 시나리오
	(c) -5%	-20%	-20%	최소 강수 시나리오

기후변화의 영향
평가에 대한 연구에서
중요한 것은 국제
공동연구 체제의
구축이다.

분석·평가한 것을 각 분야별로 세분하여 요약한다.

(1) 농업에 미치는 영향

1) 작물생산

- 이산화탄소의 농도가 증가하면 광합성과 상대 생장률이 초기에는 활발하다가 보통의 수준으로 떨어지지만 작물의 바이오매스 생산은 증가된다.
- 발작물의 생산에는 유리하다.
- 생육기간이 단축된다.
- 벼의 생산량도 이산화탄소의 증가에 따라 증가한다.
- 온도가 높아질수록 토양 유기물의 함량이 감소하여 토양의 비옥도를 감소시킨다.
- 잠재총일차생산은 약 9~15% 증가한다.

2) 작물의 재배적지

- 현재 재배되고 있는 작물과 품종은 저온에 의한 생육의 제한이 상당히 완화되고 작물의 발육 속도가 빨라져 생육기간이 단축된다.
- 모든 작물의 재배 적지의 북상현상이 기대되어 각 작물의 성격에 따라 과중시기등을 조절할 필요가 있다.

(2) 생물다양성에의 영향

1) 이산화탄소의 증가가 생태계에 미치는 영향

- 단기적으로는 광합성이 촉진되나 식물에 따라 광합성 증가가 둔화되기도 한다.
- 식물의 호흡률 감소, 생체량의 증가, 줄기에 대한 뿌리의 부피비 증가, 식

물조식의 질적 변화, 식물의 노화 둔화, 유기물 분해의 활발로 영양부족, 긴장의 고조등의 변화를 예측할 수 있다.

- 육지 생태계에 일어날 변화에 대해서는 장기적인 실험의 결여로 확실히 예측할 수 없다.

2) 기온 상승이 미치는 영향

- 식물 군락의 변화 및 유해곤충에 의한 식물 피해에의 증가
- 생물상의 대이동이 일어나며 미처 적응하지 못하는 많은 식물들의 사멸이 예상된다.
- 고산, 극지, 섬, 해안 서식군집, 잔존 식생, 천연 보호지역의 종들이 기후변화에 적절히 대응하지 못하여 멸종될 위험이 있다.
- 생물종간의 상호관계를 단절 또는 교란시키게 되는데 그 결과로 해충에 의한 피해지역이 확장되거나 해충의 피해가 없어지기도 하고 천적곤충과 숙주 곤충사이에도 변화가 예상된다.
- 생물상의 대이동에 적응하지 못하는 많은 식물들이 멸절될 경우 이에 의존하는 곤충들의 생존도 위협을 받아 곤충의 다양성이 감소한다.

(3) 산림 생태계에 미치는 영향

- 우리나라 자생수종에 대한 이산화탄소 농도 증가가 수목의 생리적 반응에 미치는 영향에 관한 실험자료가 없다.
- 우리나라의 중요한 수종들은 대부분 C₃ 형 광합성 패턴을 가지므로 다른 C₃ 형 식물에 관한 연구로부터 우리나라 산림에의 영향을 추정할 수 있다.

1) 이산화탄소 농도 증가가 C₃ 형 식물에 미치는 영향

- 광합성률이 증가한다. (20~300%)
- 물의 증산을 감소시키고 물 이용 효율을 높여준다.
- 뿌리에 대한 바이오매스의 배분이 증가한다.
- 탄수화물 합성의 과다로 식물체내의 질소농도가 상대적으로 감소하여 리그닌, 테르펜, 축합 탄닌등의 합성이 촉진되어 초식동물이나 병원균이 싫어하는 형태가 된다.
- 온도의 증가는 호흡을 늘리고 탄수화물이 감소하여 줄기에 바이오매스 분배를 늘린다.

2) 산림생태계의 반응

- 식물 군집구조의 변동이 예상된다.
- 수종의 이동속도가 기후변동 속도에 미치지 못하여 많은 수종들에 대한 인간의 보조가 요구된다.
- 우리나라의 고산지대에 위치하고 있는 한대림의 분포지역이 훨씬 좁아질 것이다.
- 대기중 이산화탄소의 농도가 증가하고 기온이 상승하여 강수량이 증가한다면 산림의 생산성은 증가할 것이다.

(4) 해수위 변화

지구온난화 현상은 해수의 팽창, 고산 지대빙하 및 극지방 빙원의 용해 및 해양으로의 유입으로 인한 해수면 상승을 유발시키고 있다. 과거 100년간 지구적 규모의 해수면 상승은 10~20cm이었고 그동안 전지구 평균기온은 약 0.5℃ 상승하였다고 보고되고 있다. 이 두개의 값사이

한반도의 기후변화로
인하여 농업뿐만 아니라,
생태계에도 변화가 일어나
일부의 식물과 동물의
멸종이 예상된다.

에 어떤 비례관계가 성립한다고 가정했을 때 이산화탄소가 2배가 되는 시점의 기온 상승의 추정치가 2~4°C 사이라고 하면 해수면의 상승은 40~160cm의 범위가 될 것으로 추정되고 있다.

이러한 해수면 상승은 침식을 통하여 연안지형의 변화를 가져올 것으로 관측되고 있다. 정량적 침식량에 대한 연구결과에 의하면 전 해안선 침식의 10~100%가 순수한 해면 상승효과이며 현재의 추세는 해면상승에 의한 해안선 후퇴속도는 약 0.3m/yr이고 2100년까지 해수면이 1.5m 상승할 경우 해안선 후퇴량이 약 200m에 이를 것으로 예상하고 있다.

우리나라의 경우 기후변화와 관련해서 장기간의 자료에 의한 해수면 변화와 이에 따른 연안지형의 변화에 대한 분석은 현재로서는 불가능하나 해수면 상승의 경우 전지구적인 해수면 상승과 거의 비슷하게 영향을 미칠 것으로 판단되고 이에 따른 해안선 침식도 세계의 전반적인 추세를 따를 것이 예상된다.

(5) 수산자원의 변화예측

기후변화에 따른 해수의 온도변화는 수산자원의 변화를 유발시킬 수 있다. 과거 1920년대 후반부터 60년대 후반까지 일시적인 온난화 현상이 일어나 해양의 흐름이 강화되어 생태계의 구조변경이 보고된 적이 있다. 생태계의 구조변경중에 하나는 저위도 생물의 고위도 침투를 들 수 있다. 또한 수온의 상승은 일반적으로 어류의 성장과 생존에 좋은 영향을 주지만 냉수성 어류에는 이와 반대 영향을 주기 때문에 어류의 분포에 영향을 미칠 것으

로 예상되고 있다.

기후변화에 따른 해양수산자원의 변동을 예측하기 위해서는 어려움이 많다. 하지만 한반도 근해의 해수온이 상승한다는 것을 전제조건으로 하였을 때 가장 심각하게 타격을 받는 것은 냉수성 어종이 될 것이다. 황해에서는 겨울철에 냉각된 수괴가 여름에 황해의 가장 깊은 골을 따라 존재하며 대구와 같은 냉수성 어종은 이 지역에 한정되어 분포한다. 따라서 온난화 현상으로 냉수괴가 여름철이 되기전에 소멸한다든지 혹은 쿠로시오 해류의 흐름이 강화되어 냉수괴가 형성하지 못한다면 황해에서는 냉수성 어종이 자취를 감추게 될 것이다. 동해에서의 상황도 심각할 것이다. 표층수온의 상승이 깊은 수심의 수온을 상승시킨다고 말할 수 없으나 최소한 연어 청어등의 표층성 냉수종은 그 서식처가 북쪽으로 이동하게 될 것으로 보이며 북쪽으로부터 유입되는 냉수괴가 끊어진다면 명태 대구와 같은 중층성 냉수 어종들도 사라지리라고 추측된다.

(6) 수자원변화 예측

기후변화의 영향은 해수에 대한 영향 외에도 지표수와 지하수의 가용도와 질의 변화를 가져와 용수공급, 관개, 수력발전 등 각종 수자원분야에 영향을 미친다. 세계적으로 기후변화에 따른 수문학적 그리고 수자원 변화에 대한 연구가 수행되고 있지만 지역적으로 기상변화나 사회-경제 조건을 정확하게 예측할 수 없기 때문에 수자원의 변화를 예측한 자료들이 없다. 최근 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 정량적으로 추정하는 연구와 노력이 국제

**기후변화에 따른
해양수산자원의 변동을
예측하기 위해서는
어려움이 많다. 하지만
한반도 근해의 해수온이
상승한다는 것을
전제조건으로 하였을 때
가장 심각하게 타격을 받는
것은 냉수성 어종이 될
것이다.**

연합의 주도로 활발히 진행되고 있으며 아시아 지역에서는 중국과 일본이 정부차원의 연구를 수행중에 있다.

기후변화에 따른 한반도 수문기상 특성의 변화를 보기 위하여 국내에서는 기상연구소가 미국 NASA의 Goddard 우주연구소의 이산화탄소 농도 2배 증가시 전지구적 월평균기온 및 강수량의 격자점 값을 이용하여 우리나라 부근의 기온과 강수량을 구한 바 있다. 기온을 보면 이산화탄소가 2배 증가시 기온이 연평균 3~4°C 상승하고 강수량은 봄에는 약 15% 증가하고 여름에는 10% 이상 감소하며 가을과 겨울에는 한반도 북부지방은 증가하고 남부지방은 감소하는 것으로 예측되고 있다. 그러나 이 결과는 격자점이 넓어 한반도내에는 격자점이 없으며 모형에 따른 지역적인 것을 고려할 때 매우 불확실한 것으로 보고 있다.

4. 향후 연구계획

2차년도에는 1차년도에 이어 기상청의 주관으로 한반도 지역 기후변화 시나리오를 개선하는 연구를 하고 있다. 장차 예상되는 통일에 대비하여 한반도 전체에 대한 기후변화 예측과 이에 따른 영향 평가가 필요하기 때문에 북한지역의 기상 데이터의 부족에도 불구하고 한반도 전체에 대한 기후변화 시나리오를 작성하고 있다. 또한 기후변화에 대한 영향은 평균치 보다는 기온, 강수량의 최대·최소치, 이상 기상의 발생 빈도와 그 강도에 영향을 받으므로 이를 보완하는 연구를 하고 있다.

기후변화에 대한
영향연구는 각국 노력에
의해 진행되고 있는데
연구의 방법론과 영향,
평가 모델들을 상호
비교·교환하여 연구질을
향상시켜야 한다.

그 밖에도 2차년도에는 기후변화에 따른 농업, 주요작물의 재배지대 및 재배시기 변동예측(농업기술연구소), 한국 하천의 유출변화(건설기술연구원), 산림식생대 변화예측(임업연구소) 연구를 수행하고 있고 생태계, 해양, 해안예의 영향, 수산자원에의 영향등도 추진되고 있다.

기후변화의 영향 평가에 대한 연구에서 중요한 것은 국제 공동연구 체제의 구축이다. 기후변화에 대한 영향 연구는 IPCC와 UNEP의 주관으로 진행되는 WCIARP (World Climate Impact Assessment and Response Strategy Programme), 또한 각국의 노력에 의해서 진행되고 있는데 연구의 방법론과 영향, 평가 모델들은 상호 비교, 교환을 통하여 연구의 질을 향상시키는데 필요하다. 일본은 국립환경연구원에 지구환경연구센터를 설립하여 일본의 기후변화에 의한 영향을 평가하고 있다. 한국과 일본은 지역적으로 가깝고 자연조건, 사회, 문화적 유사성이 많아서 서로 협력하면 실질적인 연구성과를 기대할 수 있다. 한국과학기술연구원은 일본 국립환경연구원과의 정보교환 협동 연구를 통하여 서로의 영향 평가연구를 향상시키는 것에 대해서 논의중이다. 가능한 연구분야로는 GCM과 지역 기후모형을 통한 동북아시아 기후변화 시나리오 작성, 동해와 남해에서의 수산자원변화, 해수면 변화, 농림업, 생태계에의 변화등이 있다.

기후변화에 의한 영향 연구는 한국이 기후변화 협약에의 대응전략을 세우는데 기초가 되므로 국가적인 지원이 필요하다. ●