

## 기후변화에 대한 생태계 영향을 연구하기 위해<sup>1)</sup>

이 재 석<sup>2)</sup>

건국대학교 생명과학과

### 기후변화와 생태계

현재 지구 대기의 CO<sub>2</sub> 농도는 산업혁명 이전의 280 ppm에서 지속적으로 증가하여 380 ppm 정도까지 증가하여 왔다(Schimel *et al.*, 1996). 이산화탄소의 배출의 최 상위 그룹에 속하는 미국의 탄소배출량 감축에 대한 비협조적 자세와 중국, 인도, 동남아시아 등의 급속한 경제 발전으로 인한 에너지 화석 연료 소비량의 급격한 증가는 몇몇 교토 의정서 비준국의 감축 노력을 무색케 할 정도로 막대한 CO<sub>2</sub>를 대기에 뿜어내고 있다. 인간 활동에 의한 대기로의 CO<sub>2</sub> 배출은 주로 화석연료의 직접적 연소, 시멘트 제조, 화력발전 등을 통해 이루어지며, 이러한 원인으로 대기의 CO<sub>2</sub> 농도는 매년 1-2 ppm 정도의 높은 속도로 증가해왔다(Gribbin and Gribbin, 1996). 많은 연구자들은 현재 대기 CO<sub>2</sub> 농도 증가 속도는 당분간 지속될 것으로 예상하고 있으며, 금세기 내에 산업혁명 이전의 2배 농도까지 달할 것으로 보고 있다(dependent on scenarios; IPCC, 1996). 이러한 대기의 CO<sub>2</sub> 농도 증가에 수반하여 나타나는 지구의 온도환경 변화는 식물은 물론이고 그 외의 다양한 유기생명체의 생리생태적 요소에 근본적으로 영향을 미쳐 개체, 개체군, 군

락과 나아가서는 지구생태계에 커다란 변화를 초래할 것으로 예측하고 있다. 극지방의 빙하를 빠른 속도로 용해시켜, 해수면상승, 해류의 변화 등을 야기하거나, 대기의 흐름, 대기 수분 함량과 이동경로 변화를 통해 지구의 열 분배 시스템의 교란을 초래하여, 이는 이상 고온 및 저온, 집중 호우, 기후대의 변화 등을 초래한다. 이는 지구의 다양한 온도 및 수분환경에 오랜 시간에 걸쳐 최적으로 적응하여 형성된 수많은 생태계를 교란시키는 원인으로 작용한다.

생물은 종에 따라 성장과 번식에는 필요한 최적의 온도조건이 존재하며, 주위의 온도환경 변화에 따라 성장 속도와 번식속도는 조절된다. 육상식물의 경우, 밤과 낮, 계절적에 따라 크게 변화하는 온도환경에 종속되어 생육하고 있으며, 이러한 온도환경은 적도지방의 경우 대륙 내부는 낮과 밤의 경우, 온도차가 매우 크다. 리비아, 멕시코, 캘리포니아의 경우 최고기온이 57-58°C까지 올라가는 것으로 보고되고 있다. 또한 북극권 위 시베리아 동부에서는 여름의 기온은 30°C 까지 상승하지만 겨울의 기온은 -70°C까지 하강하는 경우도 종종 일어난다(Long and Woodward, 1988). 이와 같은 한랭지역에서도 타이가림(북방림)이라는 광대한 침엽수림

1)For Studying Effect of the Global Warming on Ecosystem

2)LEE, Jaeseok, Department of Biological Science, College of Sciences, Konkuk University

E-mail: jaeseok@konkuk.ac.kr

이 성립되어 있다. 이러한 온도차에 따른 식물의 고도적 위도적 배치는 고등식물의 대부분은 10°C에서 35°C까지의 온도범위 내에서 각기 최적 생육온도를 가지기 때문이다. 최적생육온도의 상승 및 하안온도를 벗어난 온도환경에서는 고온 또는 저온스트레스에 의해 세포의 생리항상성을 유지하기 위한 생리적 기능이 손상을 입어 현저한 세포손상을 받고 그것은 결국 그 지역에서의 경쟁력을 잃게 만든다. 생리적 항상성을 유지하기 위해서는 생명체내의 여러 세포 내외에서의 질서 있고 체계적인 생화학반응이 연속성을 가져야만 되며, 이러한 연속성은 일정한 온도범위에서만 효율적으로 이루어진다. 일반적으로 화학반응은 온도가 낮을수록 느려지며 반대로 온도가 증가할수록 빨라진다(Long and Woodward, 1988). 하지만 온도가 증가한다고 하여 계속 증가하는 것이 아니고 일정한 범위 내에서는 증가하지만, 그 범위를 넘어서게 되면 생화학반응을 일으키는 효소인 단백질의 구조가 변형되어 그 기능이 저하되어 화학반응 속도가 저하된다. 즉 적절한 온도 범위에 이를 때까지는 효소의 활성이 증가하여 생화학반응이 촉진되지만 그 이상 온도가 높아지면 효소(단백질)의 구조가 변형되어 그 기능이 상실되므로 반응속도가 급격히 떨어진다. 이러한 결과들과 관련하여 일반적으로 생화학적 반응과정의 반응속도는 온도상승에 따라 증가하며 온도가 10도 상승할 경우 반응속도가 몇 배로 증가하는지의 수치를 Q10치라고 한다. 예를 들어 오이의 광합성속도는 20도 전후에서의 Q10치는 1.95, 30도 전후에서는 1.43 정도이다(Konishi, 1996). 결과적으로 식물이 겪는 최저온과 최고온에서의 내한성 및 내열성 획득은 일시적 또는 계절적으로 겪게 되는 극한 온도환경에서의 생존과 관련이 있는 반면, 생육 적온 하에 처해지는 시간의 장단은

식물의 성장과 번식에 대단히 중요한 역할을 한다. 많은 식물의 경우 생육 적온은 유전적으로 고정되어 있는 것이 일반적이며 새로운 온도환경에서도 양호한 생육상태를 유지하기 위해서는 많은 시간을 필요로 한다.

지구의 환경은 끊임없이 변화하여 왔지만, 그 속도는 매우 완만했기 때문에 종들은 환경변화에 맞춰 몸을 적응시키거나 적당한 환경으로 이동하며 생존해 왔다. 지구 역사적으로 빙하기와 간빙기가 반복되어 왔지만 그러한 변화들의 특징은 지금과 비교할 수 없을 정도로 긴 시간을 갖는다는 것이다. 따라서 현재의 지구의 온난화가 서서히 진행된다고 한다면 식물들도 변하는 온도환경에 적응하거나 생육지를 변하는 기후대로 천천히 이동시켜 생존을 유지해 나갈 것이다. 하지만 현재의 지구온난화는 생물이 이동하거나 적응할 수 없을 정도로 빠른 단기간의 급격한 온도 증가형태로 나타나고 있으며, 이러한 빠른 온도상승에 적응과 부적응의 차이는 안정된 경쟁 관계 하에 유지되던 군락의 성립과 종의 서열관계에 혼란을 초래하며, 그러한 과정에서 일부의 종과 생태계는 열세적 지위에서 상위적 지위를 획득할 것으로 예측되지만 대부분의 생태계와 구성종은 빠른 온도환경 변화에 적응하지 못하는 결과, 그 지역에서 절멸되거나 흔적종으로 남을 가능성이 강하게 제기되고 있다(Ehleringer *et al.*, 1997; Street-Perrott *et al.*, 1997).

특히, 식물군락의 구성종 변화는 그 군락의 구성종이 부양하고 있는 많은 종속영양생물에 있어서 지구온난화와 같은 직접적 요소에 더해진 또 하나의 큰 생존위협 요소이다. 이는 많은 종속 영양생물들이 특이적으로 숙주와 연관 지어져 생태계의 물질순환과 에너지 흐름을 담당하며 생존하고 있기 때문이다. 이러한 이유로 가장 많은 생물량을 차지하고 있는 어떤 군락의 우점종의 변

화는 그 생태계 자체를 완전히 다른 형태로 바꿔 놓는 요인으로 작용한다. 이러한 측면에서 지구온난화에 의한 온도변화와 그에 의한 주요 식물군락 우점종의 성장 반응, 그 결과로 나타나는 군락의 구성종 변화와 분포역 변화는 우리의 생존과 직결되는 문제이다. 나아가서 이러한 생태계의 변화는 생태계에 의존하는 인류에게도 식량자원 상실, 면역력이 없는 질병의 만연, 사막화, 수자원 고갈 등과 같은 요인을 통해 생존을 위협하는 결과를 가져오는 것은 당연한 사실이다.

우리나라는 반도 국가로서 국토의 60%가 산지로 구성되어 지형이 복잡하고 심한 일교차 등의 다양한 환경요소가 조성되어 있으며, 그에 직접적 관계가 있는 생물다양성은 동일한 온대지역 내에서도 매우 높은 편에 속하는 지역이다. 하지만 급속도로 진행되는 현재의 온난화는 수많은 시간 동안 안정되게 유지되어 온 많은 종들에 생리생태적으로 다양하고 복잡한 영향을 초래하여 현재의 안정된 생태계의 계절적 변화와 구성상태를 변화시키며, 그를 통해 지역적 환경특성에 따라 나타나는 특이적 천이와 극상상태를 근본적으로 변화시키고 있는 징후들이 여러 연구기관을 통해 보고되고 있다. 이렇듯 지구온난화는 벌써 우리의 자연과 생활 전반에 걸쳐 영향을 미치고 있음이 명확함에도 불구하고 기후변화에 의한 한반도 생

태계의 혼란, 그로부터 야기되는 우리의 삶에의 영향을 방지하기 위한 기초 자료의 수집은 미미한 상황이다.

## 세계의 주요 온난화 연구시설

### 고 CO<sub>2</sub> 생장실

고 CO<sub>2</sub> 생장실은 종래 식물생장실험에 이용하던 생장실을 자연채광이 가능하도록 전면을 투명한 재질로 개조하여 실내에서 끌어내 실외에 설치하여 그 내부의 온도와 CO<sub>2</sub> 농도를 조절하여 온난화 조건을 조성하는 시설이다(그림 1. Bazzaz, 1990; Wayne *et al.* 1998). 투명한 재질의 벽을 이용해 자연광을 이용하여, 설정한 일정한 또는 단순한 온도 변화 조건의 반 인공 생태계를 조성하여, 기후 변화에 따른 생태계의 반응에 관한 연구를 하는데 이용하여 왔다. 실제 영국에서는 이러한 시설을 이용하여 온도, 이산화탄소 등의 기후 변화에 따른 생태계의 반응에 관한 연구를 실행하고 있다. 하지만 이러한 chamber 형태의 온난화 실험시설은 다수의 챔버를 설치하는데 따른 시설비와 환경조건을 조절하기 위한 조절시스템 및 운영비, 인력이 요구되는 바 연구비 투자비 얻어지는 결과가 매우 낮은 것으로 평가되고 있다. 더욱 중요한 것은 야외의 자연기상리듬과는 거리가 있는 단순한 온도와 CO<sub>2</sub> 농도변화에



그림 1. 야외생장실과 Solar dome(좌: 일본농업환경기술연구소, 우: USDA(USA))



그림 2. 여러 가지 FACE 실험(좌: Nevada(USA), 중: 농경지, 우: Duke Forest(USA))

대한 생물 반응으로 실제의 자연환경의 실험 결과가 얼마나 적용될지에 대한 의문이 제기되고 있다(Olszyk *et al.* 1980).

#### FACE (Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment)

FACE는 Solar Dome이 자연기상리듬하의 온난화 환경 조성이 어렵다는 단점을 극복하기 위한 대안으로 실시되고 있는 실험이다(그림 2). FACE System은 자연상태의 균락에 CO<sub>2</sub> 탱크와 연결된 수직한 파이프를 원형으로 세워놓고 바람이 불어 오는 쪽의 파이프의 밸브를 열어 방출된 고 농도의 CO<sub>2</sub> 가스가 원 안으로 흘러 들어가고 CO<sub>2</sub> 조건이 조성되도록 한 후 그에 대한 식물의 반응을 보는 시설이다(FATL, Nijs *et al.*, 1996; Hendrey *et al.*, 1999). FACE는 현재 온난화 연구 시설 중 가장 자연환경에 가까운 조건에서 실험이 가능한 시설로 평가되고 있으며, 외국에서는 이미 약 20여년 전부터 산림(Duke forest)이나 농경지(Rice(Japan), 건조식생(Nevada사막, USA), Grassland(Germany) 등 서로 다른 생태계에 관한 연구들이 진행되어 왔으나, 국내에는 이러한 시스템이 없으며, 아시아에서는 일본과 중국에서에서 실시한 Rice FACE의 예가 있다.

FACE(Free Air CO<sub>2</sub> Enrichment)를 이용한

생태계 연구가 갖는 장점은 대기 중에 완전히 open된 조건에서 수행되며, 생태계를 교란시키지 않은 환경에서, 광, 온도, 바람, 강우, 병원균 그리고 해충 등 생태계 모든 요소들의 상호작용(interaction)을 변화시키지 않는 상태에서 이루어진다. 거대한 크기의 여러 FACE 소조사구들의 결합을 통하여 동시에 많은 식물을 대상으로 동일한 소조사구의 전반적인 생태계 과정들에 대한 종합적 측정이 가능하게 된다. 또한, 식물의 생활사(life cycle) 전반에 걸쳐 연구할 수 있으며, 임관의 발달로 인한 공간의 제한을 충분히 해결할 수 있다.

하지만, FACE 시설의 가장 큰 결점은 CO<sub>2</sub> 농도 증가에 대한 영향만을 볼 수 있으며 온난화에 대한 온도증가 영향은 볼 수 없다는 것과, 대상 지역의 고 CO<sub>2</sub> 농도 조건 조성을 바람에 의존하므로 바람이 강하거나 야간과 같이 바람이 없는 일기조건의 경우, 목표로 하는 고 CO<sub>2</sub> 농도 조건 조성이 어렵다는 것이다.

#### OTC(Open Top Chamber)

OTC는 실험대상이 되는 식물에 상부가 개방되어 있는 투명한 원통형 관을 설치하고 원통의 바닥 면의 벽을 따라 관을 부착하여



그림 3. 다양한 OTC 시설. 좌; 미농무성(USDA), 중; Iceland, 우; 백두산(중국)

고 CO<sub>2</sub>를 공급, 내부의 CO<sub>2</sub> 농도를 높이는 시설이다(그림 3). 덮어 쉬운 원통은 연구자에 따라 여러 가지로 변형되어 상부를 완전히 개방시킨 것부터 수분 조건에 대한 실험을 목적으로 개방된 상부에 우산처럼 상판을 덮어 씌어 내부로 공기의 유통은 원활하나 빗물이 들어가지 못하도록 한 형태, 투명한 비닐 재질을 프레임에 부착한 OTC, 아크릴 통을 사용한 OTC 등 다양하다(Field *et al.*, 1996; Leadley *et al.*, 1997; Norby *et al.*, 1997), 이러한 OTC는 설치가 비교적 간단하나 내부의 고 CO<sub>2</sub> 환경을 만들기 위해서는 많은 셋의 조절기가 필요하며 그러한 조절기 세트를 설치하지 않을 경우 온난화 환경 조성이 매우 불규칙적이라는 것이다. 또한 반복실험을 위해서 많은 수가 필요하며, 환경을 조절하기 위해서는 많은 제어 셋트가 필요하고, 처리구의 환경이 달라지기 쉽고, 온도 보다는 CO<sub>2</sub> 농도 만의 증가 환경을 조정하는 것이 대부분이다. 또한 규모가 작아 개체군에 대한 실험이 곤란한 점도 지적되고 있다.

### 온난화 영향에 대한 외국의 선행 연구

필자는 이미 십 수년 전부터 온난화와 관련된 연구를 진행해 온 바, 본 보고서에서

제시한 온난화 시설은 이미 다수의 논문을 통해 보고하였다. 보고한 논문의 내용으로는 온도구배형 온난화 실험온실이 여타의 시설에 비해 저렴한 비용으로 넓은 연구공간의 확보가 가능하며 또한 기온과 광조건의 일 변화 및 연변화와 같은 자연의 기상리듬을 그대로 반영한 현실적인 온난화 조건의 조성이 가능한 시설로 인정받았다. 이러한 시설을 통해 얻은 연구결과에서 온실의 입구에서 출구까지 5 m 거리를 두고 1°C씩 온도가 증가하는 연속적인 온난화 상태가 조성되었음을 알 수 있다(그림 4. Lee *et al.*, 2000a, 2000b, 2001). 이러한 온실과 더불어 설치된 온도-CO<sub>2</sub> 농도구배온실을 이용한 2차 천이 초기에 나타나는 7종 초본 종자에 대한 동계의 기온과 CO<sub>2</sub> 농도 상승의 발아 영향 연구 결과를 보면, 대기의 CO<sub>2</sub> 농도

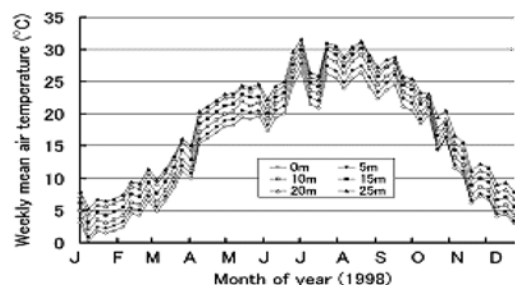
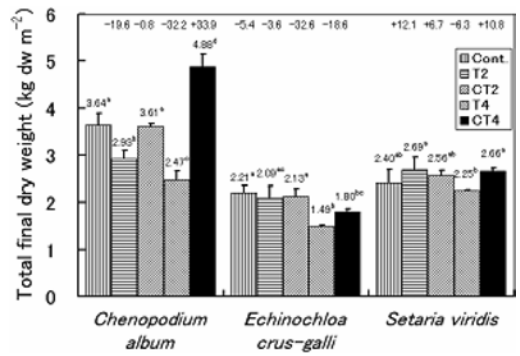


그림 4. 온도구배형 온실의 입구부터 5 m 지점별 온도변화 추이

증가는 종자의 발아 반응에 영향이 없었으나, 온도 상승은 모든 종에 있어 출아시기(emergence time)를 앞 당겼다. 즉, 현재 기온에서 2°C 상승으로 평균 출아 시기는 23.6일, 4°C 상승으로 32.2일 빨라졌다. 하지만 동일한 온난화의 정도에 대해 종의 출아 시기 단축 정도는 서로 다른 결과를 보였다. 예를 들어 돌피와 바랭이 종류의 경우, 2°C 상승에 대해 약 17일 빨라졌지만, 개기장, 달맞이꽃, 바랭이새류의 경우 약 30일정도 빨라지는 차이를 보였다. 또한 4°C 상승 조건에는 이러한 종간의 반응차가 또 다른 형태를 보여 온도 상승 정도에 따라 다양한 경향을 나타남을 보고하였다. 이러한 원인을 현재의 온도 조건에서 형성된 출아 순서 및 그에 의한 지상부 점유 시기가 복잡한 양상으로 변화되어 춘계 초기의 광자원 획득을 위한 지상부 점유 경쟁에 혼란을 초래, 이후의 군락형성에도 영향을 미치는 것으로 파악되었다(Lee *et al.*, 2000b).

온도와 CO<sub>2</sub> 농도 상승에 대한 C3식물과 C4식물의 성장 반응의 선행 연구(Lee *et al.*, 2001)에서 C3인 명아주의 경우 온도가 4°C 증가할 경우 성장량 및 종자 생산 속도는 심

각하게 줄어들지만 CO<sub>2</sub> 농도가 동시에 증가한 온도증가 조건에서는 고온에 의한 마이너스 영향이 완전히 해소되어 현재 조건보다 약 2배 정도 높은 성장량과 종자 생산량을 보였다(그림 5). 이에 비해 C4식물은 온도의 증가에도 CO<sub>2</sub> 농도의 증가에도 큰 영향을 받지 않는 결과를 보여 현재의 CO<sub>2</sub> 농도 증가를 동반한 온난화는 C4식물 보다는 C3식물에 유리한 환경을 제공하는 것으로 조사되었다(Lee *et al.*, 2000a, Morse and Bazzaz, 1994). 온도구배형 온난화시설을 이용한 온도 상승과 목본 식물인 상수리와 졸참나무의 개엽 및 낙엽시기 반응 선행연구에서 상수리나무의 경우, 온도가 현재보다 2°C 상승할 경우 약 4일, 4°C 상승할 경우 8일 정도 개엽이 빨라지지만, 졸참나무의 경우, 2°C 상승할 경우 약 10일, 4°C 상승할 경우 약 20일정도 빨라지는 것으로 조사되었다. 한편 낙엽시기의 경우는 개엽 반응보다 훨씬 더 민감하여 상수리나무의 경우 2°C 상승할 경우 약 22일, 4°C 상승할 경우 약 46일 간, 졸참나무의 경우, 약 2°C 상승할 경우 약 22일, 4°C 상승할 경우, 42일 정도 늦어지는 것으로 보였다. 이러한 개엽과 낙엽 시기의 변화를 묶어 보면 결국 상수리나무의 경우 2°C 온도 증가에 대해 생육기간은 24일, 4°C 증가에 대해 54일 길어지며, 졸참나무의 경우 2°C 증가에 32일, 4°C 증가에 대해 62일 늘어나게 되며, 이는 해당 수종의 연간 성장속도와 성장량에 종간 변화를 초래, 그를 통해 구성 생태계의 종조성 변화를 수반할 것으로 예측되고 있다(그림 6). 상록활엽수인 가시나무(*Quercus myrsinaefolia*)의 유묘에 미치는 온도와 CO<sub>2</sub> 농도증가 영향 연구에서 가시나무는 3-5°C의 온도 증가 조건에서 성장속도는 각각 53%와 47%로 크게 증가하였으며, 이것은 여름의 고온기에 약간의 고온 피해를 입지만 온도증가로 춘



**그림 5.** 온도와 CO<sub>2</sub> 농도 증가에 의한 C3식물과 C4식물의 물질생산량  
 Cont: ambient temp+CO<sub>2</sub>, T2: ambient+2°C, T4: ambient+4°C.  
 CT2: ambient temp+2°C+1.4CO<sub>2</sub>, CT4: ambient temp+4°C+1.8CO<sub>2</sub>

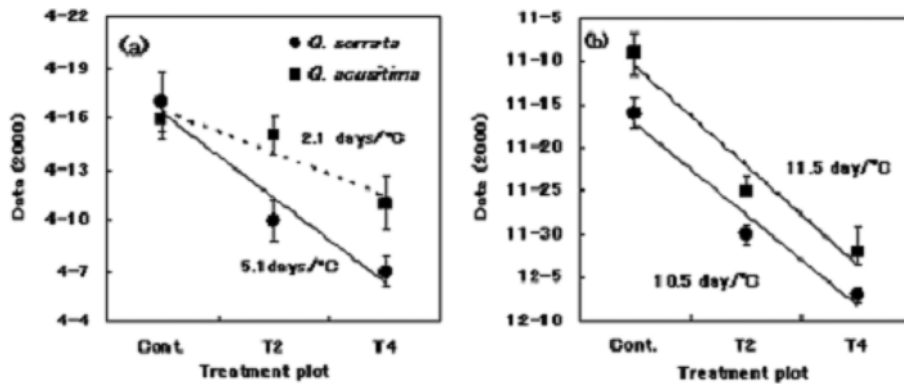


그림 6. 온도 증가에 대한 개엽(a) 및 낙엽기(b)의 변화.  
 Y축은 날자, X축은 Cont: 현재기온, T2: 현재+2°C, T4: 현재+4°C.

계와 추계에 확장된 전체적인 생육 기간의 확대가 주요한 요인으로 보고되었다(Usami *et al.*, 2001).

한편, 벼와 같은 작물에 대한 연구결과에서 곡식 낱알은 작물의 특정한 생육발달 과정에서 약간의 고온기간으로도 수확량에 크게 영향을 주며(Horie *et al.*, 1995), 이와 관련 Morison과 Lawlor(1999)는 온대지방의 경우, 2-4°C의 온도증가로 지구적 규모의 식량 생산, 특히 밀의 수확량은 크게 영향을 받을 것이라는 시나리오를 보고하였다.

### 국내의 온난화에 대한 실험적 선행 연구

우리나라의 경우 자연생태계의 식물종을 대상으로 온난화 환경 조건의 조성을 통해

실시한 온난화 영향 연구보고는 거의 전무한 상태이며, 일부 초본성 작물과 과수품종에 대한 조사가 농업진흥청의 산하 연구기관에서 연구 보고되었다. 특히, 원예연구소에서 실시한 고추와 사과에 대한 온도와 CO<sub>2</sub> 증가에 대한 생육실험에서 사과나무는 온도와 CO<sub>2</sub> 농도 증가에 대해 초기에는 생장 저하를 보이지만 약 6년이 지나면서 생육이 촉진되어 과실 크기의 증가로 수확량은 증가하지만 당도와 산도가 낮아져, 이른바 맛이 없는 상품성 낮은 과실이 생산되는 것으로 보고되었다. 고추의 경우, CO<sub>2</sub> 농도의 증가는 고추의 현재의 대기 CO<sub>2</sub> 농도 조건하에서의 온도증가는 고추의 생육과 결실에 크게 영향을 미치지 않지만, CO<sub>2</sub> 농도 증가는 엽내 오옥신 함량을 높혀 엽의 C/N율을 감

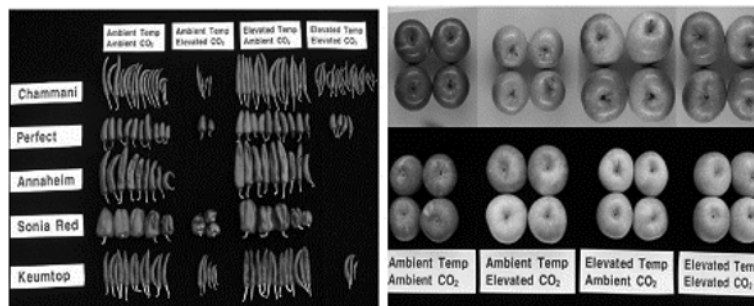


그림 7. 기후변화에 대한 사과와 고추의 반응(원예연구소)

소시키고, 그를 통해 source/sink의 불균형을 초래 고추의 결실과 착과는 현저하게 저해되어 수확량을 크게 저하시키는 것으로 보고하였다.

온난화의 자연 종에 대한 영향에 대한 연구는 현재 환경부에서 온난화에 의한 한반도 생태계 전반에 미치는 영향을 파악하기 위해 진행하는 장기생태모니터링 연구가 있지만, 연구의 방향이 현재의 생태계에 대한 장기적인 변화를 모니터링하여 온난화의 영향을 파악하는 것이기 때문에 장기간의 자료가 축적되지 않으면 온난화의 영향에 대한 실체를 알아내기 어려운 상황이다. 유사한 연구로 산림청 산하의 산림과학원에 진행하는 LTER(Long-Term Ecological Research site) 사이트의 운영 또한 장기생태와 유사한 연구내용으로 생태계 구성요소 전반에 걸쳐 다양한 자료를 수집하고 있지만, 온난화 시설의 이용을 통한 적극적인 자료수집은 미약한 상태이다. 이러한 상황에서 다양한 온난화 시설을 사용하여 짧은 시간 내에 온난화에 대한 식물의 반응을 알 수 있다면, 그러한 자료들은 장기모니터링과 LTER과 같은 실제 야외 관측 자료들과 결부되어 보다 더 정확한 한반도 생태계 변화를 예측하는데, 크게 기여할 것이다.

### 국내 현실에 적합한 온난화 연구 시설

#### 온도구배 및 온도 CO<sub>2</sub> 구배형 온난화 시설

현재 우리나라의 연구비 수준에서의 온난화 연구시설로서는 저렴한 연구비로 고 CO<sub>2</sub> 농도 환경의 조성이 가능한 온도구배형온실(TGC; Temperature Gradient Chamber, Lee *et al.*, 1999)과 온도-CO<sub>2</sub> 구배형온실(CTGC; CO<sub>2</sub>- Temperature Gradient Chamber, Lee *et al.*, 2001; Usami *et al.*, 2001)이 적당할 것으로 판단된다. 이 두 연구시설은 기온과

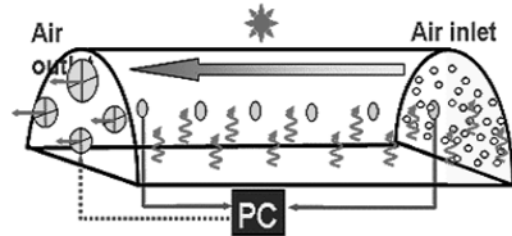


그림 8. 2100년까지의 온난화 환경 조절 모식도

광조건의 일변화와 연변화 등과 같은 자연적인 기상리듬이 그대로 반영된 온난화 환경이 조성 가능한 시설로 규모적으로 개체만을 대상으로 실험 할 수 있는 협소한 공간을 가진 시설이 아니라, 자연환경 조건의 개체군 규모의 생장 실험이 가능하다. 또한 식물 뿐 아니라 그와 밀접한 관련이 있는 곤충까지도 동시에 실험이 가능하며, 연구자가 여러 가지 측정 기계를 직접 시설물 안으로 들어가 온난화 환경 하에서 직접 자료 획득이 가능하다.

실험 시설은 폭 35 m, 길이 25 m, 높이 2.5 m의 가늘고 긴 형태로 일본이나 한국의 일반 농가에서 흔히 이용되고 있는 비닐하우스이다. 온난화 조건의 조성원리는 비닐하우스 온실의 한쪽 끝에 환풍기를 설치 자동 시킴에 의해 온실의 입구 쪽에서 환풍기가 설치된 출구 쪽으로 공기 흐름을 만든다. 주간, 온실 내에서 출구 쪽으로 흘러가는 공기는 일사에 의해 점점 가온되어 출구에 가까워질수록 고온이 된다. 즉, 입구의 현재 기온 조건이 온실 내를 이동하며 가온되어 출구 쪽까지 미래의 온난화 조건까지 연속적인 온난화 환경이 조성되는 것이다. 여기서 입구와 출구의 기온차가 5°C의 구배를 유지하도록 일사량 증감과 그에 따른 기온 차의 변화에 따라 환풍기의 회전속도를 조절하여 출구 쪽에서 일정한 온도 상승 조건을 안정적으로 유지되도록 자동 조정한다.

일사가 없거나 부족한 야간 또는 흐린 날



그림 9. 온난화 환경하의 식물생장 실험

에는 전기열선을 자동적으로 작동시켜 일사에 의해 가열되는 것과 같은 원리로 연중 24시간 온난화 조건을 조성한다.

#### CO<sub>2</sub> 농도의 연속 상승 구배 환경 조성

CO<sub>2</sub> 농도 상승온실은 온도 상승온실에 CO<sub>2</sub> 농도제어 시스템을 추가된 형태로, CO<sub>2</sub> 농도제어 시스템은 온실 내의 CO<sub>2</sub> 농도를 측정하는 CO<sub>2</sub> 농도측정부, 측정치를 비교하여 공급량을 계산하는 비교제어부, 제어치에 따라 온실내에 실제로 CO<sub>2</sub> 가스를 분사하는 조작부로 구성되어 있고, 이러한 시스템은 10초 간격으로 새로운 계산 제어치를 만들어 CO<sub>2</sub> 농도 증가 환경을 정밀하게 조성한다. 이러한 제어에 의해, 두 시설은 시스템은 오전부터 정오까지의 온도증가와, 오후부터 저녁까지의 온도저하라고 하는 기온의 자

연 일주기변화가 잘 반영된 온난화조건 조성과 현재부터 100년 후까지의 연속적인 CO<sub>2</sub> 농도 구배환경 조성이 가능하다.

#### 맺음말

지구온난화에 의한 온도상승은 지구적으로는 물론 한반도 분포 모든 생물종에 대해 생리생태적 기능의 변화를 통해, 종 자체의 적응력 및 경쟁력의 변화를 초래, 군락의 종조성, 물질생산, 미량원소의 순환 등 식물의 일차적 기능의 변화를 초래하고, 그로인해 생태계 전반의 변화를 야기시킬 것으로 예측하고 있다. 온대낙엽활엽수림대로 대표되는 한반도는 삼림식생의 대부분은 낙엽활엽수인 *Quercus*류와 상록침엽수인 소나무로 구성되어 있다. 이러한 종과 군락은 위도 및



그림 10. CO<sub>2</sub> 농도 증가 환경 조성을 위한 시설

고도 변화에 따른 온도변화에 따라 확연히 구별되는 분포역을 가지고 있는 온도에 대단히 민감한 생태계이다. 그러므로 온난화에 대한 주요 우점종 수목의 정착기작과 정착 후의 성장반응에 대한 실험적 결과는 장래의 생태계 변화를 예측하는데 필요한 요소 중 가장 시급히 요구되는 자료일 것이다. 즉, 이러한 자료들은 한반도 식생의 주요 우점종의 성장반응 추이는 장래의 기후변화 하에서 어떻게 식생과 그를 포함한 생태계가 반응하고 변화해 갈 것인지의 방향성을 파악할 수 있는 지표가 되며, 우리가 현재의 상황에서 어떠한 정책적 조치와 관리가 필요한지의 방향성을 제시할 수 있는 근거가 된다. 이를 통해 우리는 온난화가 생태계에 미치는 영향을 최소화 할 수 있는 대처가 가능해진다. 이러한 연구 결과가 축적되면 현재에는 멸종 가능성이 없지만 기후 변화에 의해 다른 종과의 경쟁력 약화로 멸종될 위기에 처하게 될 종, 더욱 더 개체수 또는 분포면적이 확대 될 가능성이 있는 종 등 다양한 예측 자료의 확립으로 보다 더 정확하고 효과적인 그리고 과학적인 종다양성 보전 정책수립에도 기여할 것이다.

또한 이러한 연구를 통해 온난화가 군락의 성립과 쇠퇴에 관여하는 메카니즘의 분석이 가능해져 보다 숲에 대한 면밀한 이해가 가능해 질 뿐 아니라, 환경 변화에 대한 종의 특이적 반응기작, 종의 반응으로 인한 환경의 변화 등과 같은 환경과 생물과의 작용과 반작용, 종간 상호작용의 메카니즘의 파악으로 주어진 환경에서 안정적 극상상태로 성장해 가는 식물군락의 주도적 역할의 이해가 가능해 질 것이다.

현재 숲은 교토의정서에 의한 탄소배출량 감축 자료로 요구되는 인벤토리 항목 중 유일한 흡수원으로 취급되고 있는 바, 이러한 연구를 통해 장래의 식생 변화를 예측, 흡수

원 기능 변화를 예측할 수 있으며, 그를 통해 흡수원으로서의 산림식생 관리와 확충에도 크게 기여할 것이다. 가까운 일본의 경우 제1기 탄소배출 감축기간인 2008년부터 1012년까지 90년 배출량의 6%를 감축하기로 서명하였지만, 산림의 탄소흡수 기능을 이용하여 그중 3.9%를 공제 받음으로서 실제로는 감축하는 양은 2.1%로 제1기 감축목표국 전체 평균 5.2%의 반에도 미치지 못하는 수준을 이끌어 냈다. 산림의 구조와 국토면적을 차지하는 비율이 비슷한 우리나라의 경우도 이러한 삼림흡수원을 이용한다면 탄소배출량 감축에서 오는 사회경제적 충격을 크게 낮출 수 있다. 그를 위해서는 현재의 산림에 대한 다양한 과학적 자료의 수집뿐 아니라 흡수원 기능의 변화에 대한 자료 수집 또한 절실히 요구되는 사항이다.

### 참고문헌

- Bazzaz, F.A., Coleman, J.S. and Morse, S.R. 1990. Growth responses of seven major co-occurring tree species of the northeastern United States to increased CO<sub>2</sub>. *Canadian Journal of Forest Research*, 20: 1479-84.
- Ehleringer, J.R., Cerling, T.E., Coyne, P.I. and Helliker, B.R. 1997. C4 photosynthesis, atmospheric CO<sub>2</sub>, and climate. *Oecologia*, 112: 285-299.
- Gribbin, J. and Gribbin, M. 1996. The greenhouse effect. *New Science*, 151 No. 2083, 'Inside Science' No. 52.
- Hendrey, G.R., Ellsworth, D.S., Lewin, K.F. and Nagy, J. 1999. A free-air enrichment system for exposing tall forest vegetation to increased atmospheric CO<sub>2</sub>. *Global Change Biology*, 5: 293-309.
- IPCC. 1996. *Climate change 1995. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change. Scientific-Technical Analyses*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. pp. 19-53.
- Konishi, K. 1996. Plant growth and development.

- youkenndou. pp32-41
- Leadley, P.W., Niklaus, P., Stocker, R. and Korner, C. 1997. *Screen-aided CO<sub>2</sub> control (SACC): A middle ground between FACE and open-top chambers. Acta-Oecologia*, 18: 207-219.
- Lee, J., T.i Usami and T. Oikawa. 2001. High Performance of CO<sub>2</sub>-Temperature Gradient Chamber Newly Built for Studying Global Warming Effect on a Plant Population. *Ecological Research*, 16(2): 347-358
- Lee, J. 2004. Effects of Elevated Temperature on Plant Phenology of *Quercus serrata* and *Q. acutissima* Seedlings. *Journal of basic science of Kon-kuk University*, 29: 65-68.
- Lee, J, T. Usami, T. Oikawa and H.N Lee. 2000a. High Performance of Temperature Gradient Chamber Newly Built for Studying Global Warming Effect on Plant Population. *The Korean Journal of Ecology*, 23(4): 293-298.
- Lee, J., T. Oikawa, S., Mariko and H Lee. 2000b. Effects of Elevated CO<sub>2</sub> and Temperature on Seedling Emergence of herbs in a Japanese Temperate grassland. *The Korean Journal of Ecology*, 23(6): 423-431.
- Long, S.P. and Woodward, F.I. 1988. Plants and temperature. *Society of Experimental Biology Symposia* 42.
- Morse, S.R. and Bazzaz, F.A. 1994. Increased CO<sub>2</sub> and temperature alter recruitment and size hierarchies in C3 and C4 annuals. *Ecology*, 75: 966-975.
- Morison, J.I.L. and Lawlor, D.W. 1999. Interaction between increasing CO<sub>2</sub> concentration and temperature on plant growth. *Plant, Cell and Environment*, 22: 659-682.
- Nijs, I., Kockelbergh, F., Teughels, H., Blum, H., Hendrey, G. and Impens, I. 1996. Free air temperature increase (FATI): a new tool to study global warming effects on plants in the field. *Plant, Cell and Environment*, 19: 495-502.
- Norby, R.J., Edwards, N.T., Riggs, J.S., Abner, C.H., Wullschlegel, S.D. and Gunderson, C.A. 1997. Temperature-controlled open-top chambers for global change research. *Global Change Biology*, 3: 259-267.
- Olszyk, D.M., Tibbits, T.M. and Hertsberg, W.M. 1980. Environment in open-top field chambers utilized for air pollution studies. *Journal of Environmental Quality*, 9: 610-615.
- Schimel, D., Ives, D., Enting, I., Heimann, M., Joos, F, Raynaud, D. and Wigley, T. 1996. CO<sub>2</sub> and the carbon cycle. In *Climate Change 1995* (eds, Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callender, B.A., Harris, N., Kattenberg, A., Maskell, K.), Cambridge University Press, Cambridge, UK. pp. 65-131.
- Street-Perrott, F.A., Huang, Y., Perrott, R.A., Eglinton, G., Barker, P., Khelifa, L.B., Harkness, D.D. and Olago, D.O. 1997. Impact of lower atmospheric carbon dioxide on tropical mountain ecosystems. *Science*, 278: 1422-1426.
- Usami, T. J. Lee and T. Oikawa. 2001. Interactive Effects of Increased Temperature and CO<sub>2</sub> on the Growth of *Quercus myrsinaefolia* Saplings. *Plant, Cell & Environment* 24: 1007-1019.
- Wayne, P.M., Reekie, E.G. and Bazzaz, F.A. 1998. Increased CO<sub>2</sub> ameliorates birch response to high temperature and frost stress: implications for modeling climate-induced geographic range shifts. *Oecologia*, 114: 335-342.