

기후변화가 떡갈나무의 생육 및 환경내성에 미치는 영향¹⁾

조규태²⁾

서원대학교 겸임교수

I. 서론

최근에 지구는 CO₂ 농도가 급격히 증가하고 기온을 빠르게 상승시키고 있으며, 근년에 들어 상승이 가속화되고 있다. 인위적으로 발생하는 CO₂ 농도의 증가는 지구온난화의 가장 큰 원인이다 (Kobayashi, 2006). 대기 중 CO₂ 농도는 산업화 이전에 약 280ppm 이었으나, 2009년에는 약 385ppm으로 산업화 이전에 비해 38% 증가하였다. 현재와 같은 증가추세라면 2100년에는 대기 중 CO₂ 농도가 800ppm에 육박할 것이며, CO₂ 농도가 2배가 되면 지구의 평균 표면온도가 2~3℃ 증가한다고 예측하고 있다(Enoch and Hurd, 1977).

국제에너지기구(International Energy Agency)에 의하면 우리나라의 이산화탄소 배출량은 세계 9위이며, 지속적인 경제성장과 에너지 다소비 산업구조로 인해 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 2006년에 CO₂ 농도는 388.9 ppm으로 보고되었고, 서울 등 6개 도시의 평균기온은 1.7℃ 상승률로 전 지구적인 온난화 추세보다 빠르게 나타났다(Korea Meteorological Administration, 2008).

공기 중의 CO₂ 농도는 식물의 기본적인 생리활동인 광합성에 이용되는 원료이다. 공기 중의 CO₂ 농도가 높을수록 잎 속으로 CO₂ 확산속도가 커지고 이용이 높아져 광합성 속도가 증대된다. CO₂ 농도의 증가가 식물의 생장을 증진시키며, 이것을 CO₂ 시비효과(CO₂-fertilization effect)라 부른다 (Park, 2003). 그러나 CO₂ 농도가 증가함에 따라 생장량이 증가하는 경우도 있지만 변화가 없거나, 오히려 감소하는 반응을 보이는 경우도 있다. 또한, 초본보다 목본에서 CO₂ 농도에 대한 생물량의 반응이 크다(De Graaff et al., 2006).

CO₂ 농도와 온도의 증가는 식물마다 종 특이성을 갖고 있기 때문에 식물생리학 및 생태적 반응에 다양하고 복합적으로 영향을 미치며, 식물의 생장과 발달에 영향을 미친다. 식물의 변화 중 CO₂ 농

1) Effects of Climate Change on the Growth Response and Environment-Tolerant of *Quercus dentata* Thunb.

2) CHO, Kyu-Tae, Seowon University, E-mail: rbxo38@kongju.ac.kr

도와 온도 증가에 의해 가장 뚜렷하게 나타나는 형태적 변화는 잎과 관련된 변수들이다. 일반적으로 CO₂ 농도가 높아지면 잎 수가 증가하고, 잎의 두께가 두꺼워지며, 비엽면적은 감소한다. 그리고 잎 속으로 CO₂ 확산속도가 커지고 이용이 높아져 광합성 속도가 증대된다. 그러나 어린 흰가시나무 (*Quercus alba*)의 엽면적은 CO₂ 농도가 높을수록 넓어지는 것으로 보고되었다. 이렇게 잎의 형태적 특성은 생리활동과 성장반응에 큰 영향을 미친다.

식물 생육에서 중요하게 생각되는 환경요인은 광, 수분 및 영양소이며, 이 중에서 광은 기공의 개폐에 영향을 주어 광도가 높을수록 기공이 많이 열리게 하여 식물의 증산작용을 왕성하게 하고, 뿌리의 발달을 촉진시켜 식물의 생육에 큰 영향을 끼친다(변, 2000). 임상의 광 환경에서는 내음성이 낮은 수종은 엽록소함량이 감소하고 빛 흡수율과 광합성의 저하로 생장이 불량하게 된다(Kim and Lee, 2001). 최적 분배모델(optimal partitioning model)에 의하면 식물은 환경요인의 변화에 반응하여 최적의 성장반응을 나타내기 위해 식물의 기관 또는 구조에 물질을 분배한다(Beranacchi et al., 2000). 일반적으로 CO₂ 농도와 온도가 증가하면 식물은 지상부보다 지하부의 물질분배에 더 투자한다(Crookshanks et al., 1998). 또한, 광합성량을 증가시키며, 수분이용효율(water use efficiency, WUE)을 향상시킨다. 식물마다 종 특이성을 갖고 있기 때문에 CO₂ 농도와 온도에 따른 식물의 성장특성의 영향은 다양하며 복합적으로 이루어진다(Kim and Kang, 2003). 지구온난화에 따른 식물의 반응을 정확하게 예측하기 위해서는 CO₂ 농도와 온도뿐만 아니라 다른 환경요인들이 고려되어야 한다.

국내에서 CO₂ 농도 및 온도 증가에 따른 식물의 생육에 관한 연구는 섬자리공과 미국자리공의 식물계절 및 잎의 형태학적 반응, 한국특산식물 섬자리공의 식물계절학 및 번식생태학적 특성, 단양쑥부쟁이의 종 생태적 반응 등이 있으며, 참나무의 생육에 관한 연구는 환경구배치리에 따른 상수리나무, 굴참나무와 신갈나무의 생육 차이, 지구온난화에 따른 상수리나무와 굴참나무의 생육반응, 광, 수분, 영양소에 따른 졸참나무 유식물의 생육차이, 환경구배치리에 따른 떡갈나무의 생육반응, 광도와 토양수분 구배에 따른 참나무류 치수의 발아 및 성장 등이 있다.

생태계에서 '천이'란 환경교란의 결과이며, 단속적인 것이 아니고 환경변화에 따라 연속적으로 이루어지는 현상이다. 수분, 광, 온도, 토양 등의 환경요인이 극한적 상태가 아닌 곳에서는 새로운 군집이 형성된다. 온대지방의 천이는 방향성이 있어 환경변화에 따라 예측이 가능하고 마침내 생태계를 형성한다. 선행된 연구에서는 주어진 환경조건에서 경쟁력이 강하고 적응도가 높은 종들이 그 지역의 변화된 환경에 더 잘 적응하는 종, 즉 생태적 지위가 더 알맞은 종들로 대체되어 생태계의 구조와

기능이 변화하는 것이 천이라고 하였다. 그리고 우연한 것임에도 불구하고 지역적으로 반복되는 과정이 천이라고 하였다.

생태적 지위(ecological niche, 또는 niche)라는 용어는 Grinnell에 의해 처음 사용되었고, 생태적 지위는 생태계에서 한 생물이 차지하는 공간적 위치와 기능적 역할에 초점을 두어 공간지위(spatial niche)라 하였다. Elton은 생태적 지위를 생태계에서 먹이사슬의 에너지관계에 역점을 두어 영양지위(trophic niche)라 하였다. 또한, Hutchinson은 다차원 공간 개념을 도입하여 다차원 지위(hypervolume niche)를 주장하였고, Odum은 생태적 지위를 인간사회에 비유하여 서식지는 주소와 같고, 생태적 지위는 직업과 같은 것이라고 표현하였다(김 등, 1997).

생태적 지위는 생태적 지위폭(ecological niche breadth)과 생태적 지위 중복역(ecological niche overlap)으로 구분되어진다. 생태적 지위폭은 생물의 최저와 최고 내성한계 사이의 폭으로써 내성의 범위를 말하며(Pianka, 1983), 종의 천이 계열을 밝히는데 이용되고, 생태적 지위 중복역은 자원에 대한 경쟁의 정도를 가늠할 수 있는 척도로 이용할 수 있다(박, 2003). 생태적 지위폭의 측정은 학자에 따라 형질이 다르게 나타날 수 있으나, 환경 구배에 따른 각 형질의 평균치를 가지고 계산되어질 수 있다. 생태적 지위가 동일하면 자원에 대한 경쟁을 피할 수 없으며, 경쟁의 정도는 생태적 지위 중복역의 너비를 통해 종내 또는 종간의 상대적 경쟁도를 비교할 수 있다(Abrams, 1980). 생태적 지위의 변화는 토양 함수량 구배에 따른 종간의 경쟁을 피하기 위해 생장 및 생식생장의 차이로 나타난다. 어떤 환경요인의 생태적 지위 중복역이 넓으면 그 환경요인에 대한 두 종간의 경쟁이 커지고, 좁으면 작아진다(여천생태연구회, 2005).

참나무(*Quercus*)는 세계적으로 6속 600여종이 분포하고, 피자식물문 참나무목의 참나무과(Fagaceae)에 속하는 상록 또는 낙엽교목(관목도 있음)이다(안, 2001). 그 중에서 우리나라 산림에 분포하는 주요 우점종은 상수리나무, 굴참나무, 신갈나무, 떡갈나무, 졸참나무, 갈참나무 등 6종이며, 재질이 좋아 목재의 이용가치가 높은 대표적인 활엽수로서 우리나라 임목축적량의 약 27%를 차지하고 있다. 또한, 이들은 심근성으로 환경 적응력이 뛰어나고 낙엽은 임지의 비옥화에 크게 기여하는 우리 고유의 향토 수종으로써 경제적이고 환경적인 가치가 있는 참나무에 대한 생태, 생리학적인 기초 연구가 필요하다.

참나무의 평균 종자크기는 상수리나무가 가장 크고, 굴참나무, 갈참나무, 졸참나무 등의 순으로 작다. 발아 시기는 굴참나무, 신갈나무, 졸참나무, 떡갈나무 등은 그해 가을에 발아되고 상수리나무와 갈참나무는 이듬해 초봄에 발아되어 지상부는 상수리나무, 갈참나무, 떡갈나무, 굴참나무, 신갈나

무, 졸참나무 등의 순으로 출현한다(정, 2010). 식물에서 종자의 크기는 식물의 발아, 생존과 유식물의 성장 등에 큰 영향을 미친다(전 등, 2003). 일반적으로 크기가 큰 종자로부터 출현한 유식물은 지하부 생장속도가 빨라 건조한 환경 하에서 다른 유식물에 비해 경쟁에서 유리하기 때문에 건조하고 교란이 적은 서식지 또는 고도가 낮고 위도가 높은 주역에 주로 분포한다. 또한, 큰 종자는 유식물의 높이, 지름, 엽면적, 생물량 등에서 작은 종자에 비해 유리하며, 종자 크기에 따라 떡잎출현과 생존율과 생장률이 영향을 받는다. 식물의 종자크기는 환경과 영향상태, 종자 수와 우성개체 선택, 동물에 의한 섭식 등 복잡한 요소들에 의해 종합적으로 나타나기 때문에 그 종류와 생식지에 따라 달라진다(Gmez, 2004; He et al., 2005). 또한, 설치류나 사슴류 등에 의한 초식작용, 초본식물과 목본식물의 경쟁, 종자 산포와 발아 등 여러 요인들이 매우 복잡하게 관여한다. 이러한 식물들은 환경에 대한 적응력이 다르기 때문에 더욱 복잡한 양식으로 식물의 분포와 상태에 영향을 줄 것이다. 따라서, 식물 분포의 원인과 과정을 밝히기 위해서는 보다 더 많은 요인들을 고려한 연구가 필요하다.

지구온난화에 따른 식물의 생육반응 연구와 생태적 지위에 관한 연구는 국내·외를 포함하여 소수에 불과하며, 특히 지구 온난화 조건에서 식물의 여러 가지 형질을 이용한 생육반응 분석과 생태적 지위에 관한 연구는 찾아보기 힘든 실정이다. 국내에서 지구온난화에 의한 식물의 생육에 관한 연구는 수행 중에 있으나 소수에 불과하며, 생태적 지위에 관한 연구는 거의 진행되지 않고 있는 실정이므로 종간의 경쟁을 이해할 수 있는 생태적 지위에 대한 연구의 수행이 가능하다. 외국의 경우 FACE(Free Air Carbon dioxide Enrichment) 장치를 이용하여 기후변화에 대한 연구가 많이 진행되고 있으나, 국내에서는 매우 부족한 실정이므로, 학교에서 있는 유리온실을 이용하여 가상의 기후변화 환경을 만들어 식물을 생육시킴으로써 기후변화에 따른 떡갈나무의 영향정도를 파악할 수 있다. IPCC에서 제시한 2100년의 여러 가지 기후변화 시나리오의 지구온난화 환경을 인위적으로 처리할 수 있는 제어 시스템을 개발하여 한반도에 자생하는 식물들의 영향을 연구할 수 있다. 한반도 숲의 주요 식물인 참나무를 이용하여 기후변화에 따른 산림식생 변화를 예측할 수 있는 기초자료를 확보하고, 식물의 종자를 발아시켜 유식물을 측정함으로써 기후변화뿐만 아니라 광, 수분, 토양유기물 환경에 대한 연구대상 식물의 반응을 알 수 있을 것이다.

II. 연구 수행내용

1. 종자 채취 및 보관

떡갈나무 종자의 채집은 먼저 환경부의 생태자연도 및 현존식생도를 근거로 떡갈나무군락의 위치를 파악하였다. 현장답사를 통해 종자의 수량이 풍부하고 질이 좋은 떡갈나무군락을 선정하였다. 그 결과, 조령산 남측의 능선과 사면부에 분포하는 떡갈나무군락을 선정하였고, 군락 선정 후에는 2016년 9월 12일~13일과 9월 20일에 종자를 채집하였다.

떡갈나무 종자의 무게는 2016년 10월 28일에 무작위로 600개의 도토리를 전자저울로 측정하였다. 그 결과, 떡갈나무 종자의 평균 무게는 2.81g이었으며, 파종시 평균무게를 고려하였다.

종자의 보관은 냉장고에서 4℃를 유지하였고, 적당히 수분을 공급하였다. 대부분의 종자는 양호한 상태를 유지하였으나, 일부 곰팡이가 피거나 벌레가 먹은 종자가 발생하여 선별하였다.

떡갈나무 종자의 파종은 벌레가 먹거나 색이 변하고, 가볍거나, 손으로 눌러서 쉽게 들어가는 것, 곰팡이가 핀 것 등은 빼고 선정된 종자를 물에 침윤하여 2시간 정도 둔 뒤 파종하였다.

파종은 광, 수분, 영양소 그리고 토성의 환경구배 당 지름 24cm, 높이 23.5cm인 4개 화분에 각각 3개체씩 파종하였다. 심을 때 종자를 덮는 깊이 가능하면 얇게 하고, 씨 높이의 2~3배로 살짝 덮었다.

파종 후에는 대조구와 온난화처리구의 발아율을 측정하였다. 일반적인 쌍떡잎식물은 떡잎이 보이는 시기를 발아로 보고, 참나무와 같이 떡잎이 밖으로 나오지 않는 것은 지상부가 보이는 때를 발아



〈그림 1〉 종자 선정 및 파종

로 본다. 발아는 1주일 간격으로 기록하였다. 물은 흙의 수분상태에 따라 다르지만, 보통 화분이 마르지 않게 3~4일에 한번 정도 공급하였다.

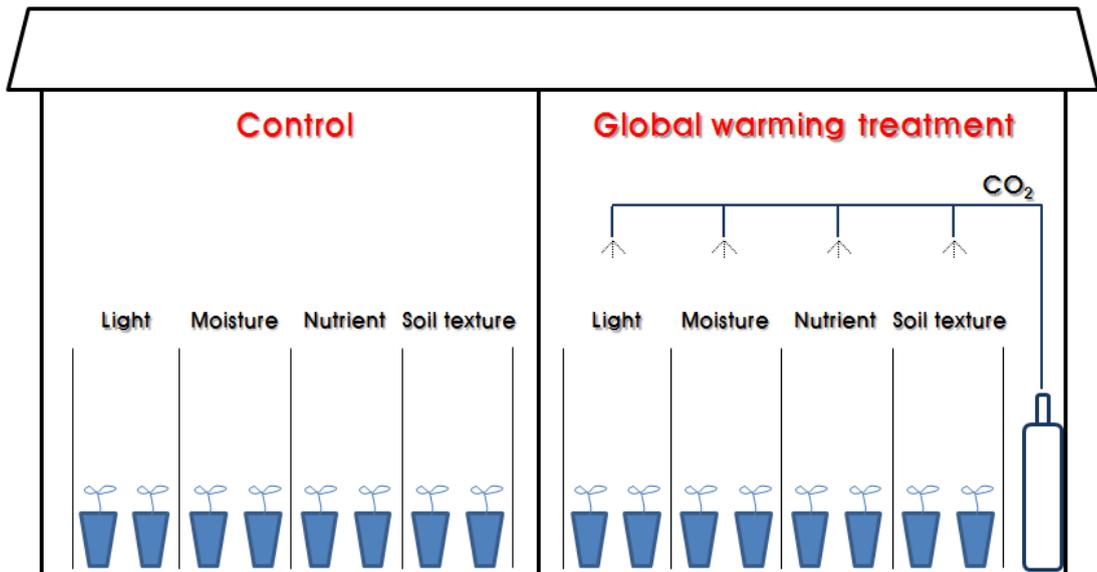
발아가 완료된 후 유식물(seedling)은 대조구와 온난화처리구에서 생육시킨다. 대부분의 식물 생태학적 연구시 사용하는 대상이다. 큰 식물로서는 식물을 실험에서 사용하기가 어렵고, 공간이 부족하여 현실적으로 불가능하기 때문이다. 어린 식물의 반응은 결국 성숙한 식물과 별반 다르지 않다고 보는 이유도 유식물을 많이 사용하는 이유이다. 나무의 경우를 더욱 그렇다. 실험에 사용할 유식물의 상태가 비슷한 것을 사용하였다. 본 잎이 2~3장 나와 있는 것을 사용하는 것이 무난하다.

2. 환경요인 처리

지구온난화에 따른 생태적 지위의 변화를 알아보기 위해 대조구와 온난화처리구로 구분하고, 각각의 처리구에 식물의 분포에 중요하다고 알려진 광, 수분 및 영양소를 각각 네 구배로 처리하여 실험하였다.

1) 대조구 환경

대조구(ambient CO₂-ambient temperature)는 유리온실 내에서 대기 중의 CO₂ 농도를 그대로



〈그림 2〉 환경구배 처리 모식도

반영하였다.

Control : Ambient CO₂(AC) + Ambient Temperature(AT)

CO₂ 측정은 CO₂ 측정로거(TEL-7001, Onset computer, USA)를 이용하여 농도변화를 모니터링 하였으며, 이때 CO₂ 농도는 약 386ppm을 유지하였다. 온도측정은 디지털 데이터 온도계(Thermo recorder TR-71U, Co., Japan)를 설치하여 30분마다 모니터링하였다.

① 광

광 처리는 온실에 입사되는 전 일광을 차광막의 두께를 조절하여 10%(L1, $76.8 \pm 2.16 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), 30%(L2, $236.42 \pm 32.15 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), 70%(L3, $539.21 \pm 54.66 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), 100%(L4, $787.75 \pm 77.76 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)로 처리하였다. 이때 광도는 광합성측정기(LCI Ultra Compact Photosynthesis System. ADC 2005)로 측정하였다.

② 수분

수분 처리는 토양을 채운 화분에 물을 주면서 화분 밑으로 물이 새어나가기 직전까지의 물의 양인 포장용수량(carrying water capacity) 700mL(M4)를 최댓값으로 하고, 이보다 적은 100mL(M1), 300mL(M2), 500mL(M3)로 구분하여 물을 공급하였다. 수분의 공급주기는 증발이 빠른 여름철에는 3~4일 간격으로, 그 외 기간에는 7일 간격으로 공급한다. 이때 사용된 물은 수돗물을 받아서 안정화시켜 사용하였다.

③ 영양소

토양은 동일 입자 크기(2mm 이하)의 모래를 사용하고, 토양의 영양소 처리는 건조한 모래(100%)를 기준으로 하여 유기물의 비율을 0%(N1), 5%(N2), 10%(N3), 15%(N4)가 되도록 배합한다. 영양소는 유기물 함량이 46.7%인 유기질비료(주, 효성오엔비)를 사용하였다.

④ 토성

토양은 동일 입자 크기(2mm 이하)의 모래를 사용하고, 건조한 토양 100%를 기준으로 질석(Vermiculite)를 0%(S1), 25%(S2), 50%(S3), 75%(S4)가 되도록 배합하였다. 질석은 흡습수, 층간수

및 결정수의 3가지 수분을 함유하고 있는 특이한 광물로서 가열하면 결정 속에서 발생하는 수분의 압력 때문에 박리 팽창하여 6~30배 정도로 팽창한다. 입자의 크기가 증가하는 질석의 성질을 이용하여 토양의 토성을 조절하였다.

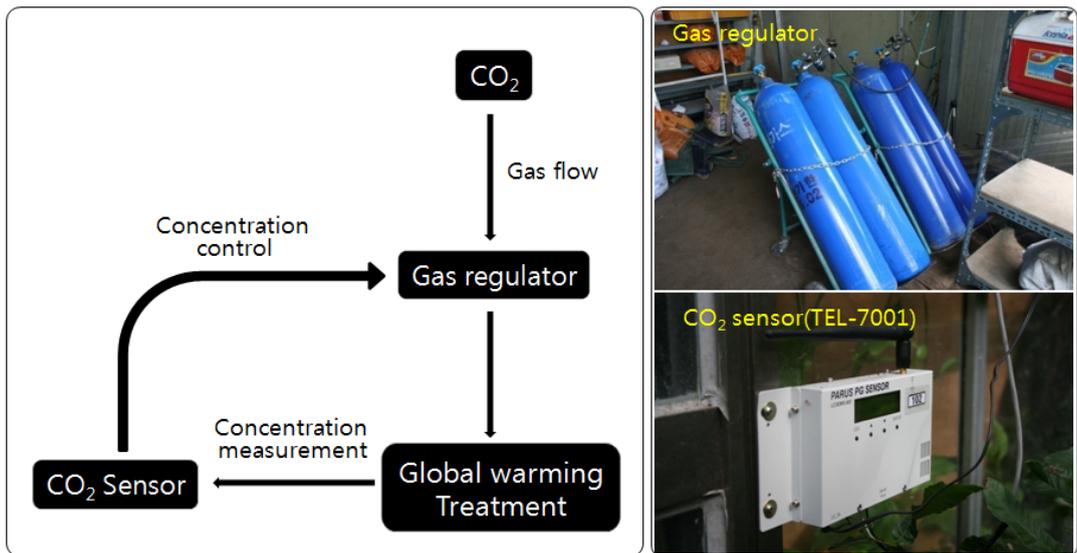
2) 온난화처리구 환경

온난화처리구(elevated CO₂-elevated temperature)는 유리온실 내에서 지구온난화의 핵심 요소인 CO₂ 농도와 온도를 조합하여 처리하였다.

Treatment : Elevated CO₂(EC) + Elevated Temperature(ET)

CO₂ 농도 처리는 CO₂가스통 두 개를 설치한 뒤, 각각 지름 0.2mm인 호스를 연결하여 CO₂가스를 24시간 주입하고, 온난화처리구 내 설치된 CO₂센서(TEL-7001, Onset computer, USA)를 통해 농도변화를 모니터링한 뒤, Gas regulator로 조절하여 대조구 CO₂ 농도의 약 1.6배(평균 602.7 ± 64.1 ppm)로 유지시켰다. 이는 유엔 정부간 기후변화위원회(IPCC)에서 제시한 2100년 지구온난화에 대한 가장 낙관적 시나리오인 B1 시나리오(CO₂ 농도 600ppm, 온도 1.8℃ 상승)에 해당된다.

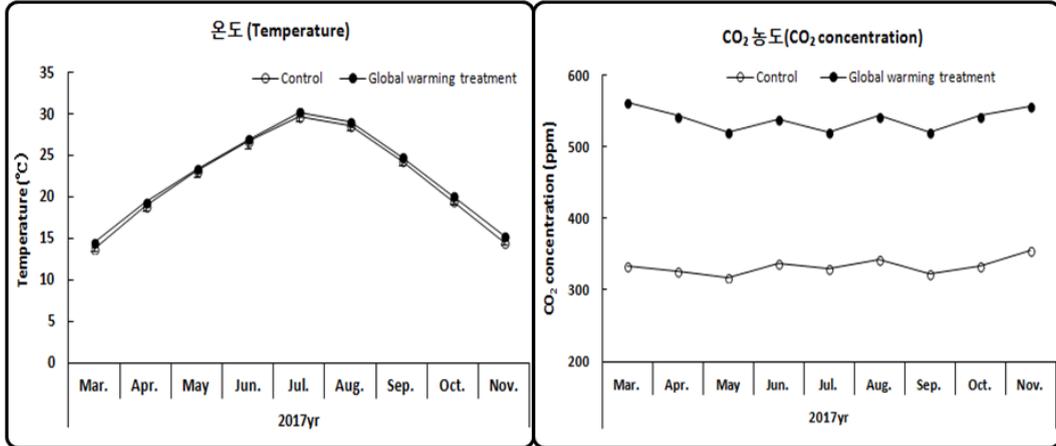
온도측정은 대조구와 동일한 방법으로 측정하였다. 그 결과, 온난화처리구의 월별 평균기온은 대조구보다 평균 2.2℃ 높게 유지되었다.



〈그림 3〉 CO₂ 처리 및 농도변화 모니터링 과정

● 온도 변화

● CO₂ 농도 변화



〈그림 4〉 연구기간 동안 대조구와 온난화처리구에서의 온도 및 CO₂ 농도 변화

① 광

광 처리는 대조구와 동일한 방법으로 온실에 입사되는 전 일광을 차광막의 두께를 조절하여 처리하였다.

② 수분

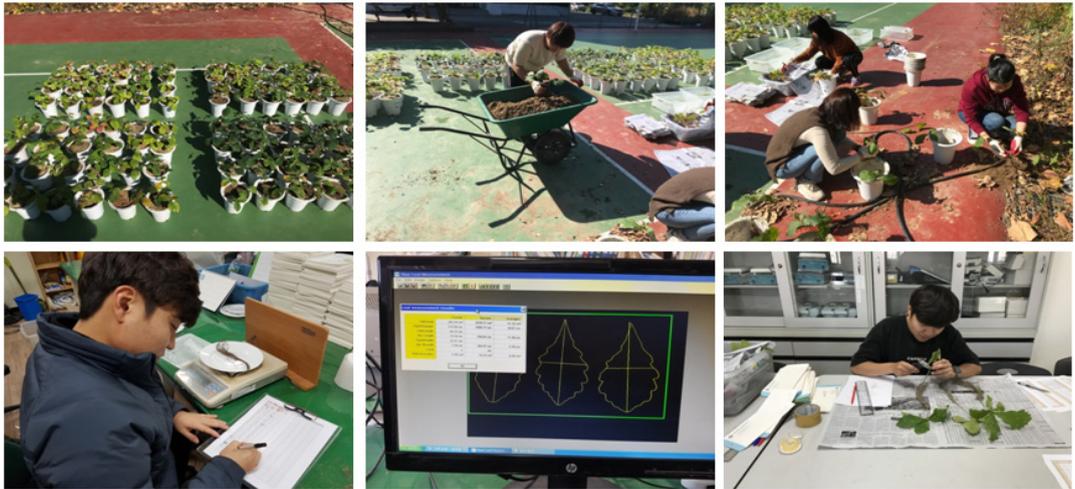
수분 처리는 대조구와 동일한 방법으로 토양을 채운 화분에 물의 양을 구분하여 공급하였다.

③ 영양소

영양소 처리는 대조구와 동일한 방법으로 동일 입자 크기(2mm 이하)의 건조한 모래(100%)에 유기물을 배합하여 처리하였다.

④ 토성

토성 처리는 대조구와 동일한 방법으로 동일 입자 크기(2mm 이하)의 건조한 모래(100%)에 질석(Vermiculite)을 배합하여 처리하였다.



〈그림 5〉 유식물의 수확 및 측정

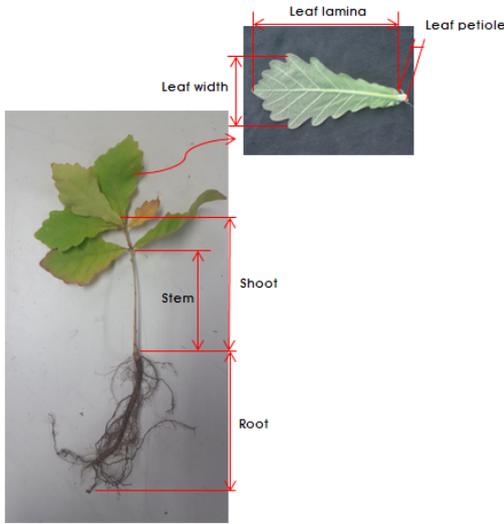
3. 유식물의 생육측정 및 수확 후 측정

발아 측정 후 대조구와 지구온난화처리구, 환경구배에 따라 유식물의 성장과정을 측정하여 어떤 환경에서 떡갈나무가 잘 성장하는지를 측정하였다.

떡갈나무의 유식물은 3월에 파종한 뒤 180일 이후인 10월에 수확하였다. 유식물의 지하부는 화분에서 꺼낸 후 물로 세척하여 흙을 완전히 제거하였으며, 70℃ 건조기에서 48시간 건조시켰다.

생태형태학적 형질의 측정항목은 총 20개 항목으로 잎 수(ea), 잎폭 길이(cm), 잎몸 길이(cm), 잎자루 길이(cm), 엽면적(cm²), 줄기 길이(cm), 줄기 직경(mm), 지상부 길이(cm), 지하부 길이(cm), 잎몸 무게(g), 잎자루 무게(g), 전체 잎 무게(g), 줄기 무게(g), 지상부 무게(g), 지하부 무게(g), 식물체 무게(g), 잎 밀도, 비엽면적, 지하부/지상부 비, 광합성기관 투자비를 측정하였다.

각 형질의 측정방법으로 수확시 각 개체의 총 잎 수를 세고, 최상위에 위치한 잎을 기준으로 각 개체당 3개씩 채집하였다. 각각의 잎은 잎자루를 제거한 후 엽면적계(SI700, Skye)를 이용하여 잎폭 길이, 잎몸 길이 및 엽면적을 측정하였다. 그리고, vernier calipers (CD-15CPX, Mitutoyo Corp.)와 전자저울(UX400H)을 이용하여 잎몸에 대한 무게 측정과 잎자루의 길이 및 무게를 측정하였다. 줄기는 뿌리와의 경계부를 절단 후 직경을 측정하고, 최하위 잎이 달린 지점까지의 길이와 무게를 측정하며, 절단된 뿌리의 길이와 무게를 측정하였다.



Group	Character
잎의 특징	잎수 (Leaves number)
	잎폭 길이 (Leaf width length)
	잎몸 길이 (Leaf lamina length)
	잎자루 길이 (Leaf petiole length)
	잎면적 (Leaf area)
	잎밀도 (Leaf density)
식물체 구조	비엽면적 (Specific leaf area)
	줄기 길이 (Stem length)
	줄기 직경 (Stem diameter)
	지상부 길이 (Shoot length)
	지하부 길이 (Root length)
	지하부/지상부 비 (Root/shoot ratio)
생산량	광합성기관 투자비 (Photosynthetic investment)
	잎몸 무게 (Leaf lamina weight)
	잎자루 무게 (Leaf petiole weight)
	잎 무게 (Leaves weight)
	줄기 무게 (Stem weight)
	지상부 무게 (Shoot weight)
	지하부 무게 (Root weight)
식물체 무게 (Plant weight)	

〈그림 6〉 유식물의 측정 부위 및 항목

측정된 값을 이용하여 지상부의 길이와 무게, 지하부의 길이와 무게, 식물체의 길이와 무게, 잎 밀도, 비엽면적, 지상부/지하부 비, 광합성기관 투자비 등을 계산하였다. 지상부는 잎, 줄기 및 가지를 합하여 길이와 무게를 계산하고, 지하부는 뿌리의 길이와 무게이며, 식물체는 지상부와 지하부의 길이와 무게를 합하여 계산하였다. 잎 밀도(leaf density)는 잎이 가지에 모여 있는 정도로써 가지 길이에 대한 잎 수, 비엽면적(specific leaf area)은 잎 무게에 대한 엽면적의 비, 지하부/지상부 비(root/shoot ratio)는 지상부에 대한 지하부의 비, 광합성기관 투자비(photosynthetic investment)는 잎을 뺀 식물체 무게에 대한 잎 무게의 비를 말한다.

4. 데이터 정리 및 분석

유식물의 생육을 측정하고, 약 7개월간 생육시킨 후 수확하여 20개의 생태형태학적 형질을 측정하여 기후변화가 떡갈나무의 생육 및 환경내성에 미치는 영향을 분석하였다. 통계학적 분석은 Statistica 8 통계패키지(Statsoft Co. 2008)를 이용하였다. 생태적 지위폭은 어떤 환경요인이나 환경자원의 정도가 다른 곳에 사는 개체 또는 환경요인이나 환경자원을 인위적으로 조절하고 구배를 이룬 조건에서 재배하여 각 개체의 성장, 형태, 물질생산, 생식 등을 조사하여 그에 대한 반응을 분석하였다.

본 연구에서는 광, 수분 및 영양소의 구배를 이룬 대조구와 온난화처리구에서 생육시킨 떡갈나무에 대한 생태적 지위폭을 각각 계산하여 CO₂ 농도와 온도 처리에 따른 생태적 지위 변화양상을 파악하였다.

III. 연구 결과

1. 생육에 미치는 영향

1) 잎의 특징

광, 토성 그리고 수분 구배에 따른 잎 수의 변화는 없었으나 유기물 구배에서는 유기물 함량에 비례하여 잎 수가 증가하였다. 지구온난화가 진행되었을 때 유기물 함량이 높아질수록 잎 폭/ 잎 몸 길이가 증가하면서 잎면적이 증가하였으나 비엽면적은 차이가 없었다. 비엽면적은 잎의 두께와 관련이 있는데(Gunn et al., 1999), 일반적으로 CO₂ 농도가 증가하면 잎의 두께가 두꺼워져서(Tomas and Bazzaz, 1996) 잎의 건중량이 증가하여 비엽면적이 감소한다고 알려져 있다. 하지만 본 연구결과를 보았을 때, 잎의 형태는 CO₂ 농도 만에 의해 결정되는 것이 아니라 다른 다양한 환경요인의 상호작용에 의해 결정되는 것으로 생각된다.

2) 식물체의 특성

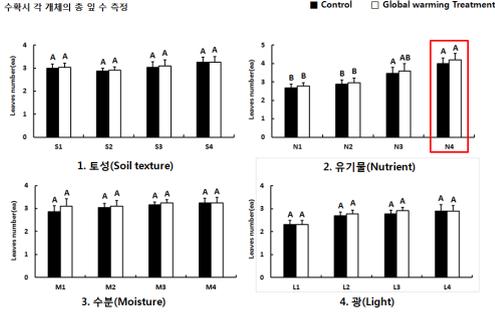
줄기 직경과 지하부 길이 생장은 광 환경의 영향을 많이 받았다. 낮은 광 구배에서 지하부/지상부 비가 낮고 광합성기관 투자비가 높은 것은 광이 부족한 지역에서 지하부보다 줄기 신장 및 광합성기관에 더 많은 투자를 하는 자원-비율 가설(Huston & Smith, 1987; Tilman, 1985)에 따른 결과로 해석된다.

3) 생산량

지구온난화가 진행되었을 때, 모든 구배에서 잎 무게, 지하부 무게 그리고 식물체 무게가 증가하는 경향을 보였다. 떡갈나무는 광이 적은 조건보다 광이 많은 조건에서 건중량이 높았다(지구온난화처리구 L1구배의 지하부무게는 L4구배의 20%, L2구배는 26%, L3구배는 73%). 떡갈나무의 건중량은 수분에 영향을 크게 받지 않았다. 이러한 결과는 떡갈나무는 수분이 부족한 조건에서도 잘 자랄 수 있을 것으로 생각된다.

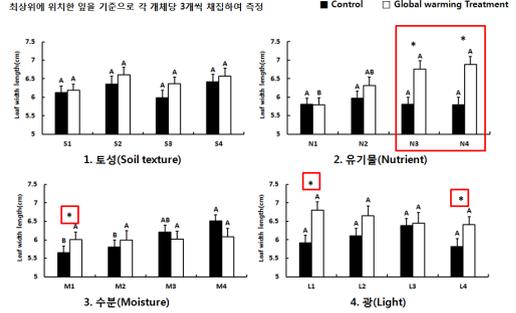
1. 잎 수 (Leaves number)

수확시 각 개체의 총 잎 수 측정



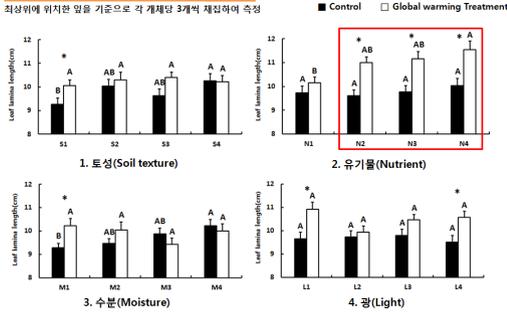
2. 잎 폭 길이 (Leaf width length)

최상위에 위치한 잎을 기준으로 각 개체당 3개씩 채집하여 측정



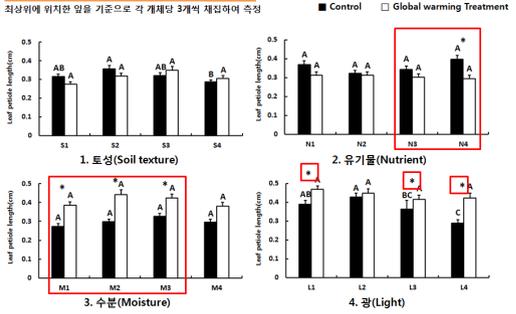
3. 잎몸 길이 (Leaf lamina length)

최상위에 위치한 잎을 기준으로 각 개체당 3개씩 채집하여 측정



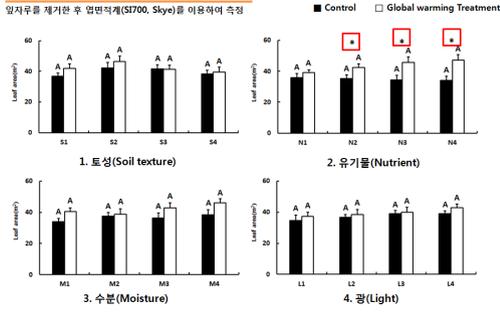
4. 잎자루 길이 (Leaf petiole length)

최상위에 위치한 잎을 기준으로 각 개체당 3개씩 채집하여 측정



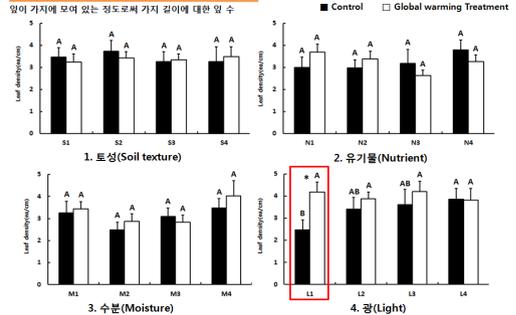
5. 잎면적 (Leaf area)

잎자루를 제외한 두 엽면적계(S1700, Skye)를 이용하여 측정



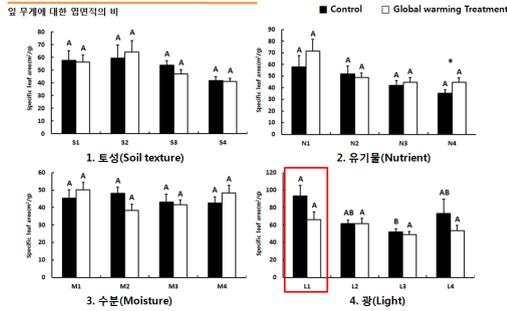
6. 잎 밀도 (Leaf density)

잎이 가지에 모여 있는 정도를 가지 길이에 대한 잎 수



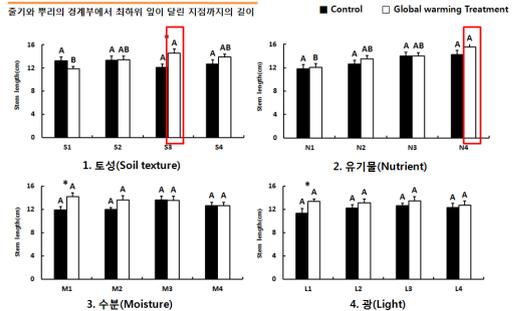
7. 비엽면적 (Specific leaf area)

잎 무게에 대한 엽면적의 비



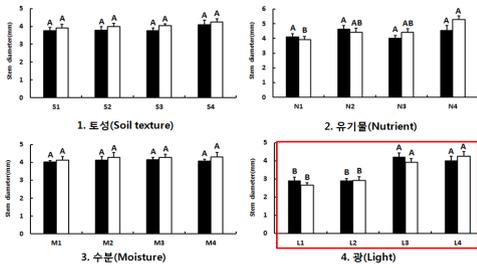
8. 줄기 길이 (Stem length)

줄기와 뿌리의 경계부에서 최하위 잎이 달린 자경까지의 길이



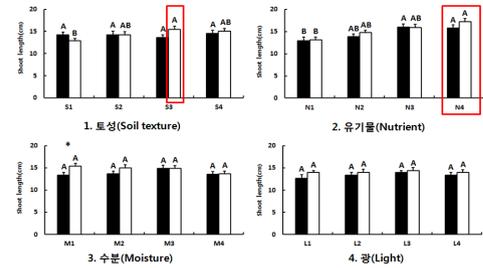
9. 줄기 직경(Stem diameter)

줄기와 뿌리의 경계부에서 절단한 후 직경 측정 ■ Control □ Global warming Treatment



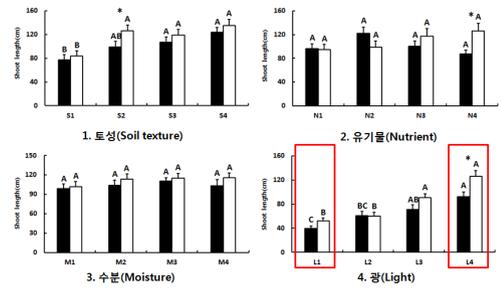
10. 지상부 길이(Shoot length)

줄기와 뿌리의 경계부에서 가장 높은 부분까지의 길이 ■ Control □ Global warming Treatment



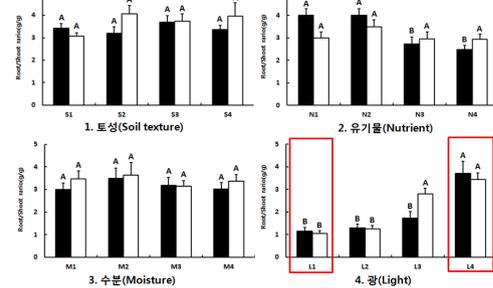
11. 지하부 길이(Root length)

줄기와 뿌리의 경계부에서 뿌리의 끝지점까지의 길이 ■ Control □ Global warming Treatment



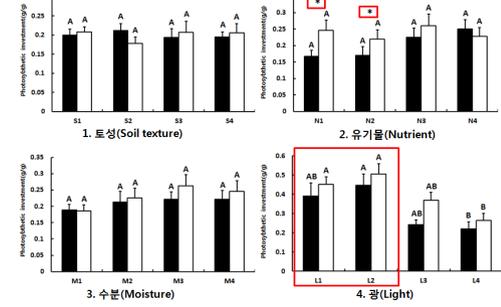
12. 지하부/지상부 비(Root/shoot ratio)

지상부에 대한 지하부의 비 ■ Control □ Global warming Treatment



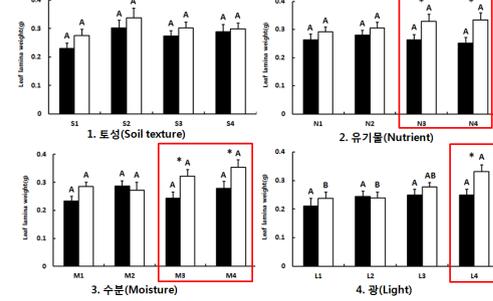
13. 광합성 기관 투자비(Photosynthetic investment)

잎은 편 식용체 무게에 대한 잎 무게의 비 ■ Control □ Global warming Treatment



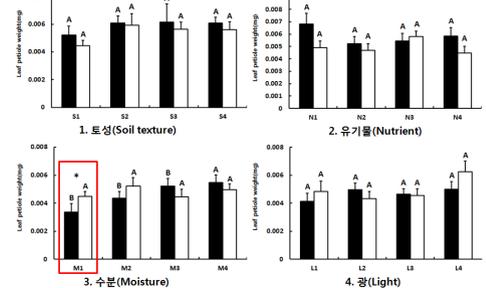
14. 잎몸 무게(Leaf lamina weight)

최상위에 위치한 잎을 기준으로 각 개체당 3개의 채집하여 측정 ■ Control □ Global warming Treatment



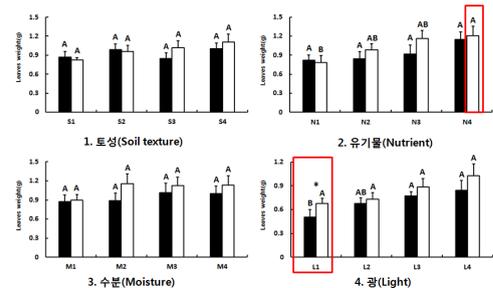
15. 잎자루 무게(Leaf petiole weight)

최상위에 위치한 잎을 기준으로 각 개체당 3개의 채집하여 측정 ■ Control □ Global warming Treatment



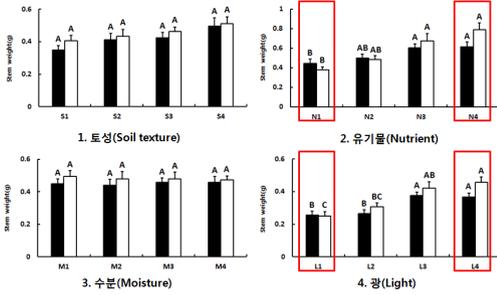
16. 잎 무게(Leaves weight)

개체당 전체 잎 무게 ■ Control □ Global warming Treatment



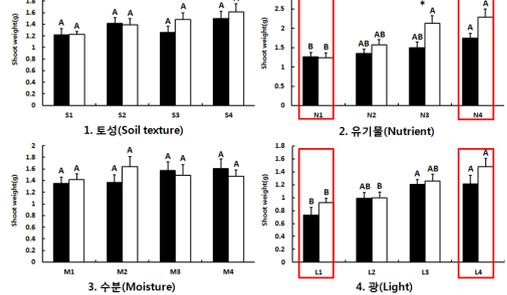
17. 줄기 무게(Stem weight)

줄기와 뿌리의 경계부에서 최하위 잎이 달린 지점까지의 무게 ■ Control □ Global warming Treatment



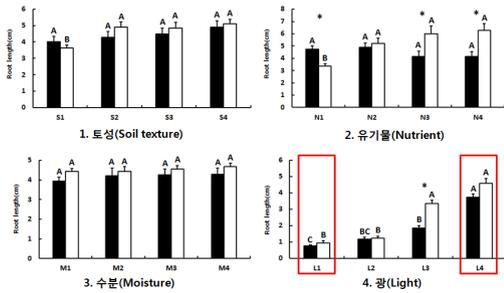
18. 지상부 무게(Shoot weight)

잎 무게를 포함한 지상부의 전체 무게 ■ Control □ Global warming Treatment



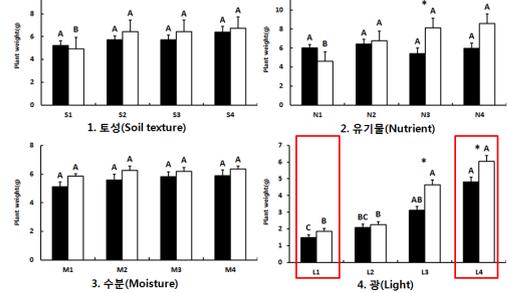
19. 지하부 무게(Root weight)

지하부의 전체 무게 ■ Control □ Global warming Treatment



20. 식물체 무게(Plant weight)

지상부 무게와 지하부 무게의 합 ■ Control □ Global warming Treatment



〈그림 7〉 환경 처리에 따른 떡갈나무의 생육반응

2. 환경내성에 미치는 영향

떡갈나무의 생태적 지위폭 계산결과, 대조구는 수분(0.995)>토성(0.994)>유기물(0.987)>광(0.948) 순으로 나타났고, 온난화처리구는 수분(0.995)>토성(0.980)>유기물(0.980)>광(0.950) 순으로 나타났다. 이것은 떡갈나무가 대조구와 처리구에서 모두 광과 유기물보다는 수분과 토성에 대한 반응이 크다는 것으로 해석될 수 있다. 대조구와 온난화처리구를 비교한 결과, 떡갈나무의 생태적 지위폭은 온난화처리구에서 평균적으로 토성과 유기물 구배에서 감소되었고, 수분 구배에서는 변화가 없었으며, 광 구배에서는 약간 증가하였다. 떡갈나무는 지구온난화가 진행되면, 토성과 유기물에 대한 생태적 지위폭이 좁아짐에 따라 환경 내성이 감소하게 되어 다른 환경이 동일한 조건에서 수분과 영양소 변화에 잘 적응하지 못해 분포역이 좁아질 것으로 예상된다. 또한, 광에 대한 생태적 지위폭이 약간 넓어짐에 따라 광 환경에 대한 내성이 커지므로 다른 환경이 동일한 조건에서 광 환경에 잘 적응할 수 있어 현재보다 분포역이 넓어질 것으로 예상된다.

〈표 1〉 유식물의 측정 부위 및 항목

구분	측정항목	대조구(Control)				온난화처리구(Treatment)			
		토성(S)	수분(M)	유기물(N)	광(L)	토성(S)	수분(M)	유기물(N)	광(L)
잎의 특성	잎수	0.998	0.998	0.975	0.993	0.998	0.999	0.973	0.992
	잎폭길이	0.999	0.996	1.000	0.999	0.999	1.000	0.996	1.000
	잎몸길이	0.999	0.998	1.000	1.000	1.000	0.998	0.998	0.999
	잎자루길이	0.994	0.996	0.993	0.979	0.993	0.996	1.000	0.999
	잎면적	0.997	0.998	1.000	0.998	0.997	0.996	0.995	0.997
	잎밀도	0.997	0.986	0.990	0.975	0.999	0.978	0.986	0.998
	비엽면적	0.984	0.998	0.967	0.954	0.968	0.989	0.957	0.987
식물체 특성	줄기길이	0.998	0.997	0.994	0.998	0.994	0.998	0.992	1.000
	줄기직경	0.999	1.000	0.996	0.970	0.999	1.000	0.989	0.964
	지상부길이	0.999	0.998	0.992	0.999	0.995	0.998	0.990	1.000
	지하부길이	0.974	0.998	0.985	0.924	0.973	0.998	0.986	0.889
	지하부/ 지상부비	0.997	0.996	0.956	0.788	0.989	0.997	0.995	0.818
	광합성기관 투자비	0.999	0.996	0.970	0.919	0.996	0.985	0.996	0.950
생산량	잎무게	0.995	0.996	0.981	0.968	0.989	0.990	0.974	0.974
	잎몸무게	0.990	0.992	0.999	0.996	0.994	0.989	0.997	0.981
	잎자루무게	0.996	0.968	0.989	0.995	0.989	0.995	0.990	0.978
	줄기무게	0.985	1.000	0.983	0.969	0.993	1.000	0.929	0.948
	지상부무게	0.993	0.994	0.985	0.966	0.991	0.997	0.949	0.965
	지하부무게	0.995	0.999	0.995	0.729	0.984	0.999	0.954	0.737
	식물체무게	0.995	0.997	0.996	0.840	0.987	0.999	0.954	0.823
Mean	0.994	0.995	0.987	0.948	0.991	0.995	0.980	0.950	
Stdev	0.006566	0.006998	0.012152	0.075955	0.008463	0.005846	0.020534	0.074443	

IV. 맺는말

본 연구는 ‘중견연구자지원사업’으로써 한국연구재단의 지원을 받아 수행하였다. 일반적으로 생태학에서 진행하기 어려운 통제된 공간에서 유식물을 이용한 생태적 지위에 관한 연구를 수행하였다. 지구온난화에 따른 식물의 생육반응 연구와 생태적 지위에 관한 연구는 국내·외를 포함하여 소수에 불과하며, 특히 지구온난화 조건에서 식물의 여러 가지 형질을 이용한 생육반응 분석과 생태적 지위에 관한 연구는 찾아보기 힘들다. 우리나라 참나무 중 식생의 교목층에 높은 빈도로 분포하는 떡갈나무의 유식물을 대상으로 대기 중의 CO₂ 농도와 기온이 상승하고 환경요소인 광, 수분, 유기물 및 토성이 변화할 때 식물의 생육에 어떠한 변화가 있는지, 지구온난화에 따른 생태적 지위폭의 변화가 어떻게 일어나는지 알 수 있다. 지구온난화에 따른 생육 및 생태적 지위폭의 변화는 식물종에 따라 다르기 때문에 다양한 종을 대상으로 한 연구가 필요하다.

참고문헌

- 김준호, 서계홍, 정연숙, 고성덕, 이점숙, 이병선, 문형태, 이희선, 민병미, 오경환. 1997. 현대생태학. 교문사. pp. 179-180.
- 박병현. 2003. 환경구배에 따른 초본 4종의 생태적 지위에 관한 연구. 서원대학교 교육대학원 석사학위논문 pp. 1-13.
- 변무섭. 2000. 광도와 토양수분 구배에 따른 참나무류 치수의 발아 및 성장. 한국농림기상학회지 2(4): 183-189.
- 안상열. 2001. 참나무과 식물의 접목활착조건 및 접목친화성에 관한 연구. 경상대학교 박사학위논문 pp. 8-11.
- 여천생태연구회. 2005. 현대 생태학 실험서. 교문사. pp. 239-242.
- 전병삼, 강진호, 윤수영, 이상우, 정종일. 2003. 안동 대목종자의 크기와 등숙 정도에 따른 발아, 유묘 출현 및 성장. 한국작물학회지 48: 152-155.
- 정중규, 김해란, 유영한. 2010. 지구온난화에 따른 상수리나무와 굴참나무의 생육반응에 관한 연구. 한국환경생태학회지 24(6): 648-656.
- Abrams, P. 1980. Some comments on measuring niche overlap. Ecology 61: 44-49.
- Beranacchi, C. J., Coleman, J. S., Bazzaz, F. A. and McConnaughay, K. D. M., 2000. Biomass allocation in old-field annual species grown in elevated CO₂ environments: no evidence for optimal partitioning. Global Change Biology 6: 855-863.
- Crookshanks, M., Taylor, G. and Broadmeadow, M., 1998. Elevated CO₂ and tree root growth: contrasting responses in *Fraxinus excelsior*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris*. New Phytologist 138: 241-250.
- De Graaff, M. A., Van Groenigen, K. J., Six, J., Hungate, B. and van Kessel, C., 2006. Interactions between plant growth and soil nutrient cycling under elevated CO₂: a meta-analysis. Global Change Biology 12: 2077-2091.
- Enoch, H. Z. and Hurd, R. G., 1977. Effect of light intensity carbon dioxide concentration and leaf temperature on gas exchange of spray caenation plants. Journal of Experimental Botany 28: 84-95.

- Gomez, J. M., 2004. Bigger is not always better : conflicting selective pressures on seed size in *Quercus ilex*. *Evolution* 58: 71-80.
- Gunn, S., Farrar, J. F., Collis, B. E. and Nason, M., 1999. Specific leaf area in barley: individual leaves versus whole plants. *New Phytologist* 143: 45-51.
- He, J. S., Flynn, D. F. B., Wolfe-Bellin, K., Fang, J. and Bazzaz, F. A., 2005. CO₂ and nitrogen, but not population density, alter the size and C/N ratio of *Phytolacca americana* seeds. *Functional Ecology* 19: 437-444.
- Kobayashi, N., 2006. *Global Warming and Forest Business*(3th ed.). Bomoondang, Seoul. 268pp.
- Kim, P. G. and Lee, E. J. 2001. Ecophysiology of photosynthesis 2: Adaptation of photosynthetic apparatus to changing environment. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 3(3): 171-176.
- Kim, S. Y. and Kang, H. J. 2003. Effects of elevated atmospheric CO₂ on wetland plants: a review. *Korean Journal of Limnology* 36(4): 391-402.
- Korea Meteorological Administration. 2008. Report of Global Atmosphere Watch 2008. Seoul, Korea. 177 pp (in Korean).
- Park, H. R. 2003. *Global Warming and Its Effects and Preventive*. Uyoug, Seoul, 285 pp.
- Pianka, E. R. 1983. (3rd ed.) *Evolutionary Ecology*. Harper & Row, NY. 253 pp.
- Tilman, D. 1985. The resource ratio hypothesis of succession. *American Naturalist* 125: 827-852.
- Tomas, S. C. and Bazzaz, F. A., 1996. Elevated CO₂ and leaf shape: Are dandelions getting toothier? *American Journal of Botany* 83(1): 106-111.