

기후변화와 잡초¹⁾

이 재 석²⁾

건국대학교 이과대학 생명과학과

지구의 온실효과와 지구온난화란?

지구생태계는 지권, 수권, 기권으로 구분하며, 이중 기권은 지권과 수권의 양 요인에 공통적으로 관여하는 인자이다. 지표면을 둘러싸고 있는 기권의 구성 물질은 질소가 78.1%, 산소가 20.9%, 알곤 0.9%, 이산화탄소 0.04%, 기타(Ne, He, H₂, N₂O, CFC, CH₄ 등) 0.06%로 구성되어 있다. 이러한 대기의 기본적인 구성물질에 덧붙여 멕시코만에 가득 찬 해수 정도의 물이 수증기 형태로 대기권에 포함되어 에너지의 흡수와 방출에 지대한 역할을 수행한다. 대기권을 구성하는 이러한 물질들은 수증기와 더불어 단파장 에너지의 태양광이 대기권을 통과하여 지표면에 도달할 때 일부를 흡수하여 장파장 에너지로 전환하며, 지표면에 도달한 단파장 태양광이 장파장 형태로 우주로 복사될 때 일부를 흡수하여 재차 지표면으로 되돌려 보내는 역할을 수행한다. 이로서 지구는 대기가 존재하지 않는 것에 비해 높은 온도에서의 에너지 평형이 이루어지기 때문에 대기권 내부의 온도는 따뜻한 상태가 유지되며, 이는 태양광 아래에서 온실 내의 온도가 밖보다 높은 상태로 유지되는 현상과 같

은 원리로 설명된다. 이러한 현상을 지구의 온실효과(greenhouse effect)라 한다. 지구 대기의 온실효과 기능은 지표면 부근의 온도가 급격히 가열되거나 냉각되는 것을 방지하여 생물의 생명활동에 적당하고 안정한 온도 환경을 유지시켜 준다. 이러한 온실효과 덕분에 지구상의 생명체들은 현재와 같은 온화한 온도 환경에서 안전하게 생명을 유지하고 종족을 보존해 왔다. 만약, 대기권의 이러한 온실효과 기능이 없다면 지구의 평균 기온은 현재의 영상 약 15°C에서 -18.6°C의 영하로 급격히 냉각되어 적도지방의 일부를 제외한 현재의 많은 지역은 빙하의 세계로 생물이 생존하기 어려운 지역이 될 것이다. 이처럼 지구의 온실효과는 지구 생명체가 온화한 온도환경에서 생존하기 위해서는 절대적으로 필요한 요소이다.

지구온난화(global warming)란 대기권에 존재하는 온실효과 기체의 농도상승, 특히 CO₂, CH₄, N₂O, CFC's 등과 같은 인위기원의 온실효과 기능 기체의 농도가 높아져 대기의 온실효과 기능이 증대되어 나타나는 지표면 부근의 온도 상승현상을 말한다. 한편, 대기권에서는 수증기가 온실효과 기능의 약 70%를 담당하고 있고, 나머지 30% 정도가 온실

1)Climate Change and Weed

2)LEE, Jae-Seok, Biological Science, Konkuk University; E-mail: jaeseok@konkuk.ac.kr

효과 기체가 담당하고 있기 때문에 대기 중에서 수증기를 제거한다면 온실효과 기능을 저하시켜 온난화를 억제할 수 있지만 현재의 기술로서는 해양으로부터 발생하는 수증기의 양을 억제하는 것은 불가능하다. 결국 온실효과의 기여도가 큰 인위기원 기체의 농도를 억제하는 것이 현실적인 대안이 될 수 있다. 또한 대기의 수증기 변화는 자연적인 요인에 의한 것으로 인위기원의 온실효과 기체와는 다른 관점에서 보아 진다.

이산화탄소농도 변화와 온난화의 정도

인위기원의 온실효과 기체 중 지구 온난화의 기여에 가장 큰 비중을 차지하는 물질은 석유와 석탄과 같은 화석연료를 연소할 때 발생하는 CO₂이다. 대기중의 CO₂ 농도가 급격하게 상승하기 시작한 것은 산업혁명이 일어 난 1870년경 부터가 된다. 산업혁명 이전의 소극적인 자연친화적 동력의 조달이 산업혁명을 기점으로 기계를 이용한 적극적인 동력 조달로 전환되었으며, 그러한 동력원의 대부분은 수백만 년 동안 지하에 매장되어 있던 탄소 덩어리인 화석연료이며 지금도 계속되고 있다. 이러한 화석연료의 연소에 의해 대기로 방출되는 CO₂의 양은 산업사회의 급속한 확장으로 해가 갈수록 급상승하게 되었고, 결국 지구의 열수지 환경에 까지 영향을 미치는 심각한 지경에까지 이르렀다.

이러한 CO₂는 우리의 일상 생활을 통해 매일 다량으로 대기에 배출된다. 이는 자동차를 운전하거나 취사를 한다거나 하는 직접적 배출에서 화력 발전소의 화석연료 연소로부터 만들어진 전기를 사용하거나 전기를 이용하여 만든 수 많은 공산품을 인간이 사용함으로써 간접적으로 배출된다. 대기의 CO₂ 농도는 산업혁명 이전까지는 약 280 ppm 정도

로 비교적 안정하게 유지되어 왔지만, 산업혁명 이후 매년 약 1.5 ppm 정도로 증가하여 현재 370 ppm 정도까지 증가하였다. 이러한 빠른 증가 속도에 특별한 인류의 대책이 가해지지 않을 경우 금세기 말에는 산업혁명 이전의 약 2배의 농도까지 증가 할 것으로 예측하고 있고, 그로 인해 지구 온도는 1.5-6.0°C 상승할 것으로 보고 있다(IPCC, 1996).

다양한 온난화의 영향

지구의 온도환경 변화는 극지방의 빙하를 빠른 속도로 용해시켜, 해수면 상승, 해류의 변화 등을 야기시키거나, 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 수 많은 생태계를 교란시키는 원인으로 작용한다.

지구의 환경은 끊임없이 변화하여 왔지만, 그 속도는 지금의 온난화에 비하면 훨씬 완만했기 때문에 종들은 완만한 환경변화에 맞춰 몸을 적응시키거나 적당한 환경으로 이동하여 생존해 왔다. 그러나 지금의 지구 온난화는 생물이 이동하거나 적응할 수 없을 정도로 빠르게 진행되기 때문에 빠른 이동력이나 적응력이 없는 생물과 생태계는 멸종하거나 크게 쇠퇴할 가능성이 있다. 이러한 생태계의 변화는 생태계에 의존하는 인류에게도 식량자원 상실, 면역력이 없는 질병의 만연, 수자원 고갈과 같은 요인을 통해 생존을 위협하게 한다.

기후변화와 잡초

농업은 끊임 없는 잡초와의 전쟁이다. 인

간은 가능한 한 많은 소출을 올리기 위해 작물생육에 최적의 환경을 조성하고 작물의 생육이 종료될 때까지 그 환경을 유지하려 노력하여 왔다. 작물의 최적 생육환경이란 광, 수분, 온도, 토양의 영양 등 식물생육이 필요 불가결한 조건들이 포함되며, 이러한 조건들은 작물뿐만 아니고 잡초들에게도 매우 절실히 요구되는 환경조건 들이다. 잡초는 인간이 조성해 놓은 이러한 호적한 환경에 편승하여 필요한 여러 환경자원을 획득하여 생존해 간다.

온난화 문제의 핵심이 되는 CO₂ 농도와 온도변화는 모든 식물의 생육을 좌우하는 절대적 요인이기도 하다. 이러한 생육조건 변화에 따른 식물의 생태적 특성 변화는 많은 식량에너지원을 농업생태계에 의존하고 있는 인간에 있어서 대단히 중요한 문제가 된다. 어떤 종의 잡초가 기후변화에 의한 생육환경 변화로 인해 현재보다 강한 생육과 번식력을 갖게 되어 경쟁하던 어떤 종의 잡초가 자취를 감출 정도로 쇠퇴하게 된다면 이전까지 인간이 축적해 놓은 잡초 구제기술의 적용은 그 구제효과가 현저히 감소할 지도 모른다. 이러한 경우, 새롭게 부상한 잡초에 대한 구제기술을 개발하여야만 할 것이다. 작물 또한 새로운 잡초에 대해 항상 우월적 경쟁력을 갖고 높은 소출이 도출되도록 품종 개발이나 재배방법이 고안되어야 할 것이다. 새로운 기술개발이란 단시간에 가능한 것이 아니기 때문에 기후변화에 따라 우점종으로 자리잡을 가능성이 있는 잡초의 예측과 예상되는 잡초의 식물계절(plant phenology), 성장과 종자의 결실 형태와 같은 생리생태적 자료의 수집은 대단히 중요하다.

세계적으로 잡초는 약 8,000종 정도가 조사되어 있으며, 이중 주요 잡초로 분류된 것은 약 250종이다(伊藤, 1993). 주요 잡초 중에는 인간을 농업경영을 끊임없이 방해해 온

강력한 종들이 포함되어 있다. 이러한 잡초들을 온도대로 나누어 보면 열대부터 아한대까지는 2종으로 명아주와 냉이, 열대에서 냉온대까지는 개피와 쇠비름을 포함한 14종, 난온대부터 아한대까지는 쇠뜨기를 포함한 14종, 열대에서 난온대까지는 왕바랭이를 포함하여 23종 정도가 작물과 경쟁을 하고 있다(伊藤, 1993). 이러한 잡초들은 광합성 형태가 상이한 C3형과 및 C4형 잡초로 구분하여 온도와 수분환경을 결부시킨 분포형태를 살펴보면 C4형 잡초는 주로 남쪽에서 또는 고위도로 이동할 경우 고온계절인 여름에, 그리고 건조한 곳에 우점하는 경향을 보이지만 C3형 잡초의 경우, 고위도 또는 저온 생육기에 우점하는 경향을 보인다(Okuda and Hurukawa, 1990).

두 가지 타입의 잡초, C3형 잡초와 C4형 잡초

하와이의 사탕수수 연구소의 Kortschak 등(1965)은 사탕수수가 종래까지 알려져 온 Calvin cycle을 가진 식물(C3식물)과는 상이한 광합성산물을 생성한다는 것을 발견하였다. 이후, Hatch 등에 의한 추가적 실험을 통하여 수수나 옥수수과 같은 벼과, 방동사니과, 쌍자엽식물의 일부에서도 Calvin회로와는 다른 광합성 초기산물이 생성된다는 것을 발견하고 이를 C4 dicarbonate 회로라고 이름 지었다. 이후 Downton 등(1968)과 Laetsch 등(1968)은 C4식물이 Kranz(꽃 목걸이)형 잎 구조(엽록체를 가진 유관속 세포가 둥근 꽃 목걸이 형태의 유관속초를 만듦)를 갖지만 C3식물은 갖지 않는다는 차이점을 보고하였다. 그 후, 많은 식물에서 잎 조직의 연구가 이루어져 약간의 예외와 중간형이 보고되었으나, 단자엽과 쌍자엽을 불문하고 Kranz형 잎 구조를 갖을 경우 C4식물로

구분하고 있다. 이러한 형태적 연구와 더불어 생리적 차이에 따른 생태적 특성과 지리적 분포의 차이에 관한 연구가 진행되어 왔다. 일반적으로 동일속 내에 한 종이더라도 C4형 식물이 발견되면 나머지 종들 또한 C4식물일 확률이 높다(Takeda *et al.*, 1985). 하지만 갯능쟁이屬, 대극屬, 방동사니屬, 수수屬과 같이 양쪽 형태의 식물을 모두 포함하고 있는 경우도 있다.

C3, C4형 잡초의 지리적 분포와 환경요인에 관한 연구들

온도

Black(1971)은 C3식물이 주로 온대에, C4식물은 주로 열대, 아열대의 건조지, 사막이나 염류지에 많이 분포하고 있는 것을 보고하였고 그러한 분포 원인은 온도라고 지적하였다. 일본의 경우, 벼과 C3 및 C4식물의 지리적 분포특성을 조사한 谷川 등(1985)은 두 형태 식물의 분포가 온도요인과 높은 상관성을 가지며, 그 중에서도 연평균기온과 높은 상관성이 있음을 보고하였다. 강수량의 경우 유의적인 차는 있지만 온도요인보다 낮은 상관성을 보였다.

奥田와 古川(1990)는 일본에 생육하는 C4형 잡초 중 단자엽식물인 벼과 및 방동사니과가 전체의 약 81%, 귀화식물을 제외할 경우 90%를 차지한다고 보고하였다. 또한, 비교적 습윤한 기후조건인 일본에 C4형 단자엽식물이 다수 분포하는 것은 건조요인 적응형인 C4 쌍자엽식물 보다는 고온적응형인 C4 단자엽식물이 유리하기 때문으로 분석하였다. 長谷川(1979)는 C3식물과 C4식물의 분포에 관하여 1) 토양수분에 관계없이 저온지대 및 저온계절에는 압도적으로 C3식물이 많이 분포하며, 2) 고온지대 및 고온계절에는 C4와 CAM식물이 우점하지만, 토양수

분이 충분히 있는 경우 C3식물도 분포한다. 3) C4식물은 평균기온이 높을 지라도 일교차가 크며, 야간의 온도가 낮은 지역 또는 계절에는 우점도가 낮아진다. 4) CAM 식물은 주간 기온이 높고, 야간의 기온이 낮으며 일교차가 큰 지역 및 계절에 우점하는 것으로 정리하였다. Hattersley(1983)는 기후와 관련된 호주의 C3와 C4식물의 분포를 조사한 결과, C4식물의 분포가 1월(여름)의 최저기온 평균과 가장 상관성이 높고, 다음에 1월과 10월(봄)의 최고기온 평균과 상관성이 높다고 보고하였다. 즉, C4식물은 고온 다습한 지역에, C3식물은 저온 다습한 지역에 가장 분포하는 종수가 많았다. Tieszen 등(1979)은 케냐산의 저지에서 산정까지의 transect조사에서 C3와 C4식물의 분포가 저지(2,000 m 이하)의 C4식물, 중간지대(2,000-3,000 m)의 C3 및 C4식물 혼생지, 고지대(3,000 m 이상)의 C3식물의 3개 분포역으로 구분된 것을 발견하였다.

수분요인

한편 Young and Young(1983)은 C3와 C4식물이 혼생하는 케냐산의 인접지역의 C3 및 C4식물의 분포조사에서 C4식물은 보다 건조한 지역에, C3식물은 보다 습윤한 지역에 빈도가 높은 결과를 보고하였으며, 특히, 수분조건에서도 식물이 이용 가능한 토양수분함량이 중요한 요인인 것으로 단정하였다. 武田 등(1977)은 목밭에 대한 벼과의 C3 및 C4형 잡초의 생태적 분포와 토양수분의 관계를 조사한 결과, C3형 잡초는 보다 습윤한 목밭에, C4형 잡초는 C3형 잡초보다 건조한 목밭에 각각 적산 우점도가 높은 결과를 보고하였다.

대기의 CO₂ 농도

Cerling 등(1993)은 화석화된 초식동물 치

아의 $\delta^{13}\text{C}$ 치 연구로부터 과거 700만년전의 순수한 C3식생에서 5백 만년 전에 걸친 신대륙 및 구대륙에 C4 식물이 우점하는 식생으로 변화한 사실을 유추해 냈으며 그 주요한 원인은 C3식물의 광합성에 유리한 대기 CO_2 농도의 증가인 것으로 추측하였다. Coie와 Monger(1994)는 Chihuahuan사막(new Mexico)의 충적층 지대로부터 채취한 토양의 $\delta^{13}\text{C}$ 치 측정에서 약 7-9만년 사이에 C4식물 초원식생이 저목의 C3식생으로 변화한 원인은 대기 CO_2 농도의 빠른 증가가 원인이라고 보고하였다.

C4형 잡초군의 분류

벼과, 방동사니과, 명아주과, 대극과, 국화과, 비름과의 순으로 많은 종을 포함되어 있으며, 열대원산의 벼과는 대부분이 C4형에

속하고, 작물로는 옥수수 사탕수수, 수수, 기장 등과 잡초로써는 띠, 강아지풀, 개피 등이 속한다. 벼는 열대원산 임에도 불구하고 C3형 식물에 속한다. 작물의 경우 세계작물 재배면적의 약 70%는 C3형 작물이 나머지 30%에 C4형 작물이 재배되고 있다.

기후변화에 따른 C3형 및 C4형 잡초의 반응

식물계절 반응

저온계절이 있는 지역에서 온난화에 의해 가장 확실히 일어나는 식물의 반응 중 하나는 바로 식물계절의 변화이다. 개략적으로 식물의 생리활성의 한계 온도를 5°C 로 기준하여 일 평균기온이 5°C 이상인 일수를 계산하면 일본 이바라키현(한국의 남부지방과 유사)의 경우, 현재의 기온에서 2°C 상승할

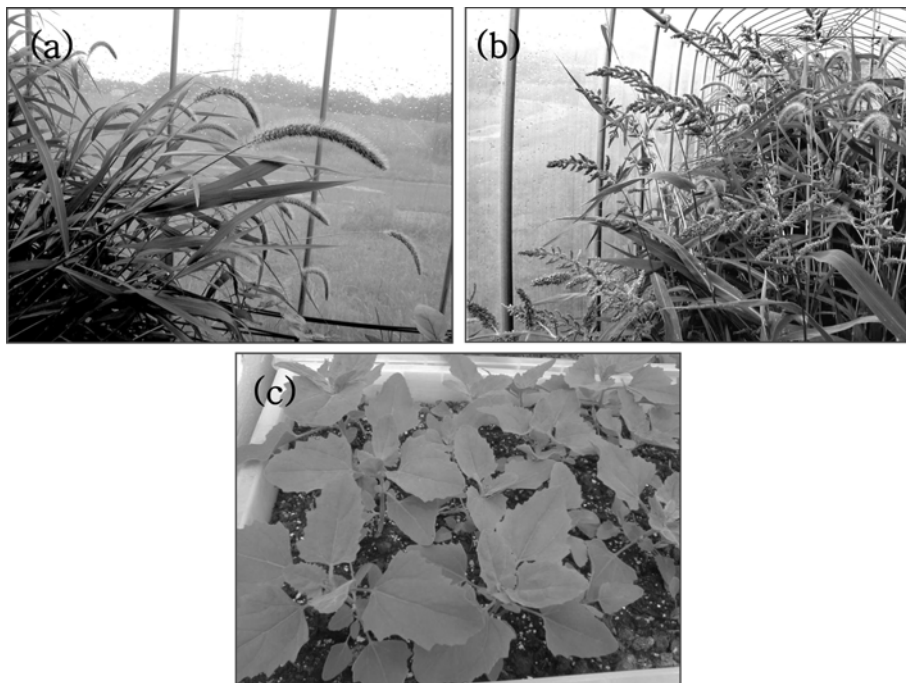


그림 1. (a) 개피, (b) 강아지풀, (c) 명아주 사진.

경우 29일, 4°C 상승할 경우 68일 이상 늘어나게 된다. 이러한 수치를 단위 온도로 계산할 경우 온도가 1°C씩 상승함에 따라 16일씩 생육 가능 기간이 증가하는 것이 된다. 온난화에 의해 늘어난 생육 가능 기간에 비례하여 식물의 생육 개시 시기는 비례적으로 현재보다 앞당겨지고, 이러한 결과로 춘기의 식물계절변화는 온난화의 영향을 가장 빠르고 확실하게 느끼게 하는 생물의 반응 중의 하나가 된다.

온대지역 특히 아시아의 극동지방에 널리 분포하고 있는 잡초로 밭 작물과 동일한 생육기에 흔히 발견할 수 있는 천이과정 상 2차 천이 초기에 우점하는 개피(*Echinochloa crus-gali*, C4형 잡초), 강아지풀(*Setaria viridis*, C4형 잡초), 명아주(*Chenopodium album*, C3형 잡초)은 유사한 생육상의 입지 환경을 공유하기 때문에 항상 작물과의 생육경쟁뿐 아니라(그림 1), 세 식물간에도 끊임없는 경쟁관계에 놓여 있는 잡초이다. 온난화에 따른 세 종의 반응은 아시아 지역의 밭 작물의 재배에 있어서 대단히 중요한 변수가 된다. 이러한 두 종의 경우, 온도가 2°C 상승할 경우 생육 개시 시기는 개피와 강아지풀이 각각 34일, 25일, 명아주가 약 17일 빨라지며 4°C 상승할 경우, 개피와 강아지풀

은 45일과 35일, 명아주는 27일 빨라졌다(그림 2). 이러한 결과를 단위 °C로 환산하여 계산하면 온다 1°C 증가함에 따라 개피와 강아지풀의 생육개시시기는 각각 18일과 12일씩, 명아주는 13일 정도씩 빨라지는 것이 된다. 이러한 온도 상승에 따른 생육개시 시기의 변화는 춘기에 지상부류 어느 종이 빨리 점유하여 광 자원을 선취하느냐와 대단히 밀접한 관계를 가지고 있고, 명아주와 같이 종자의 크기가 작은 종의 경우 개피나 강아지풀보다 비교적 빠른 시기에 생육을 개시함으로써 적은 자원을 가진 종자의 광 자원 선취에 대한 취약점을 보완하고 있다. 하지만 4°C의 온도 증가의 경우, 온난화에 의한 경쟁 종인 개피의 생육개시 시기 변화가 보다 민감하게 작용하여 명아주가 가진 현재의 빠른 생육개시 시기의 유리한 장점은 거의 소멸되어 버릴 것으로 생각된다. 이러한 경우 작물들은 명아주보다는 개피와 보다 더 강한 경쟁관계에 놓이게 될 것이며, 그에 따라 인간의 작물관리 방법도 변화될 것이다.

온도 및 CO₂ 농도 상승에 대한 생장반응

온도 및 CO₂ 농도 상승에 세 종류 잡초의 생장 반응에서 온도만 4°C 높아진 경우, C3형 잡초인 명아주의 최종 생물량은 -32.2% 감소하였으나, CO₂ 농도가 1.8배로 높아진 경우는 33.9%로 온도만의 증가에 대한 C3형 잡초의 생물량 생산감소 현상은 CO₂ 농도 증가로 인해 완전히 보상되었다. 한편 C4형 잡초인 개피와 강아지풀은 온도만 4°C 높아진 경우 각각 -32.6%와 -6.3% 감소하였으나, CO₂ 농도가 동시에 1.8배로 높아진 경우 개피는 -18.6%, 강아지풀은 10.8%로 증가하여, 2종 모두 온도와 CO₂ 농도 증가에 대한 반응은 명아주 보다 현저히 낮은 결과를 보였다(그림 3). 이러한 생물량의 변화는 최종적으로 종자 생산량과 밀접하게 연관되

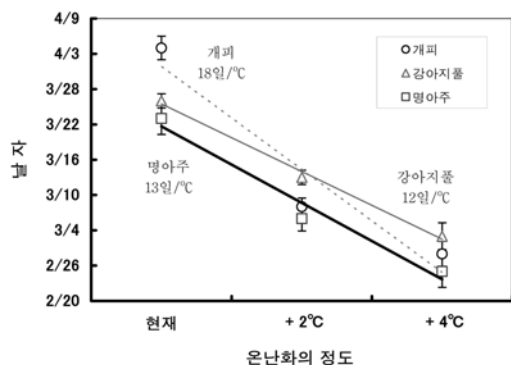


그림 2. 온난화 따른 온도 상승에 대한 개피, 강아지풀, 명아주의 생육개시시기 변화.

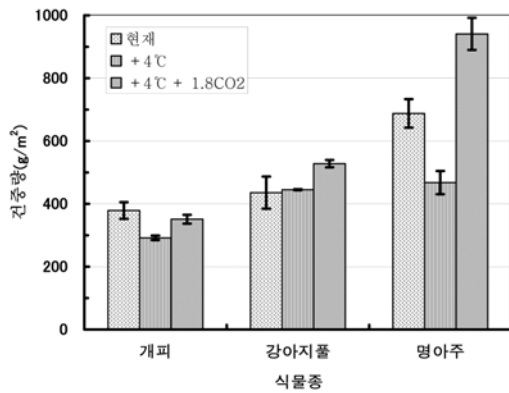


그림 3. 온난화 따른 온도 상승과 CO₂ 농도 증가에 대한 개피, 강아지풀, 명아주의 생물량 생산에 미치는 영향.

어 있으며, 일반적으로 초본의 경우 생물 생산량이 큰 식물이 종자생산량이 큰 것을 고려할 때, 온도와 CO₂ 농도 증가에 대한 명아주의 호전적 반응으로 현재보다 생물 생산량이 증가되고, 또한 증가된 생물 생산량을 결과로부터 발생하는 높아진 종자생산량은 높은 생존력을 갖게 될 것이다(온도와 CO₂ 농도가 동시에 높아진 경우, 실제로 명아주의 종자 생산량은 약 2배로 증가되었으나 지면 관계상 자료는 제시하지 않도록 함). 이러한 생물 생산량과 종자 생산량의 증가는 온도증가에 대한 춘기 생육개시 시기의 둔감한 반응으로부터 지상부 점유에 우월적 지위를 갖고 있던 명아주가 온도상승에 대해 민감한 반응하는 개피에 의해 약화된 상황을 보상할 가능성 또한 기대된다.

참고문헌

伊藤操子. 1993. 雜草學總論. 養賢堂.
 奥田 敏総, 古川 昭雄. 1990. C4植物のフロラとその日本における分布. 日本生態學會誌 40: 91-121.
 武田 友四朗, 縣 和一, 箱山 普, 田中 日吉. 1977.

休耕田の植生遷移に関する研究. 第2報 休耕田におけるイネ科のC3型およびC4型雜草の生態的分布と土壤水分との關係. 日作記 46(4): 558-568.
 谷川 孝弘, 縣 和一, 箱山 普. 1985. イネ科C3, C4植物の生態と地理的分布に関する研究. 日作記 54(1): 54-64.
 長谷川 史郎. 1979. C3とC4植物の分類と地理的分布. 農業氣象 34(4): 195-200.
 Black, C.C. 1971. Ecological implications of dividing plants into groups with distinct photosynthetic production capacities. *Advan. Ecol. Res.* 7: 87-114.
 Cerling, Thure E., Wang, Y. and Quade, J. 1993. Expansion of C4 ecosystems as an indicator of global ecological change in the late Miocene. *Mature* 361: 344-345.
 Coie, D.R. and Monger, H.C. 1994. Influence of atmospheric CO₂ on the decline of C4 plants during the last deglaciation. *Nature* 368: 533-536.
 Downton, W.J.S. and Tregunna, E.B. 1968. Carbon dioxide compensation -its relation to photosynthetic carboxylation reactions, systematics of the Gramineae, and leaf anatomy. *Canadian Journal of Botany* 46: 207-215.
 Hattersley, P.W. 1983. The distribution of C3 and C4 grasses in Australia in relation to climate. *Oecologia (Berlin)* 57: 113-128.
 IPCC. 1996. *Climate Change 1995*. Cambridge University Press.
 Kortshack, H.P., Hartt, C.E. and Burr, G.O. 1965. Carbon dioxide fixation in sugarcane leaves. *Plant physiology* 40: 209-213.
 Laetsch, W.M. 1968. Chloroplast specialization in dicotyledons possessing the C4-dicarboxylic acid pathway of photosynthetic CO₂ fixation. *American Journal of Botany.* 55: 875-883.
 Tieszen, Larry L., Senyimba, Michael M. and

Imbamba, Simeon K. 1979. The distribution of C3 and C4 grasses and carbon isotope discrimination along an altitudinal and moisture gradient in Kenya. *Oecologia* 37: 337-350

Young, H.J. and Young, T. 1983. Local distribution of C3 and C4 grasses in sites of overlap on Mount Kenya. *Oecologia* 58: 373-377.