

지구환경변화가 수도의 생산과정에 미치는 영향

Effects of global environment change on rice production processes

김한용

전남대학교 농업생명과학대학

1. 서 언

화석연료(석유, 석탄, 천연가스 등)의 대량소비, 토지이용의 변화(열대림파괴) 및 농업 생산활동을 포함한 인간활동규모의 확대에 따라 대기중에 CO₂를 비롯한 CH₄, N₂O 등의 온실가스농도가 급속히 상승하고 있다. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 보고서⁷⁾에 의하면 지난 1.2세기동안 대기CO₂농도는 약 31%증가하여 현재 368ppmV에 달하였고 매년 0.2-0.8% (1991-2000)의 속도로 증가하고 있다. 1997년 12월 교토에서 열린 제3차 기후변화협약 (United Nations Framework Convention on Climate Change; UNFCCC) 당사국총회에서는 온실가스 배출량을 의무적으로 삭감하기 위하여 청정개발계획, 공동이행제, 방출거래제 등을 골자로한 선진국의 온실가스 방출량삭감을 법률적형식으로 규정한 교토의정서를 채택하기에 이르렀다. 그러나 자국의 경제활동을 보호하고 산업규모를 확대시키려는 이해관계의 대립으로 그 비준에는 상당한 어려움을 겪고 있다. 이와 같은 CO₂방출량의 삭감을 위한 노력에도 불구하고 CO₂를 포함한 대기중의 온실가스농도는 금세기중에 산업혁명이전(280ppmV)의 적어도 약 2배 (540ppmV)에 달하여 지구평균기온이 $3 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 상승 할 것으로 예측되고 있다⁷⁾. CO₂농도상승에 기인하는 지구규모의 환경(기후)변화는 국가산업 전체에 직·간접적으로 막대한 영향을 초래할 것으로 예상되나, 특히 환경의존성 높은 농업생산활동이 가장 큰 영향을 받을 것으로 우려되고 있다. 따라서 상기와 같은 환경변화가 식량작물의 생산성을 포함한 경지생태계 전반에 미치게 될 영향을 정량적으로 파악하여 안정성이 높은 생산시스템을 구축하는 것은 미래의 식량안전보장 확보라는 측면에서 중요한 의미를 갖는다 하겠다.

여기에서는 일본, IRRI, 미국 등에서 아시아의 주요 식량작물인 수도를 대상으로 최근 10여년간에 실시된 연구를 중심으로 CO₂농도 (혹은 CO₂ x 온도) 상승에 대한 수도의 응답을 살펴보고 금후의 과제에 관하여 간략히 논 하고자 한다.

2. 작물의 CO₂ 응답 연구의 발전

CO₂농도와 식물(작물)과의 관계는 100년이상에 걸쳐 방대한 연구가 이루어져 왔으나, 대략적으로 1980년 이전의 연구는 대부분 CO₂농도상승에 따른 환경변화의 영향보다는 CO₂시비의 관점에서 작물의 광합성 및 생산성향상 등이 주된 관심이었다고 할 수 있다¹⁴⁾. 이러한 연구는 대개의 경우 실내·외형환경제어챔버를 이용한 포트실험이나 온실에서 경제성이 높은 원예·화훼작물을 대상으로 한 CO₂시비 연구가 주류를 이루 었다¹⁴⁾. 1980년이후 지구환경변화의 중요한 요인의 하나로서 대기CO₂농도의 상승에 관심이 높아지면서 식량작물(벼, 밀 등)의 성장과 수량에 대한 영향을 실제의 포장에 가까운 상태에서 정확히 파악하려는 연구가 본격화 되었고, 자연광을 이용하면서 CO₂ 및 온도 제어가 가능한 각종 포장형챔버를 개발·이용 하기에 이르렀다. 수도의 연구에 이용되고 있는

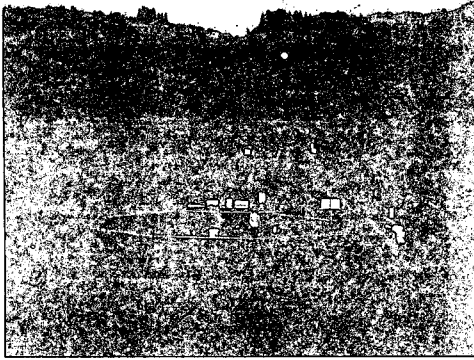


Fig. 1 An overview of the rice FACE built-up in farmers' field at Iwate prefecture, Japan.

대표적인 포장형 챔버로서는 SPAR (Soil-Plant-Atmosphere-Research)^{1,2)}, TGC (Temperature Gradient Chamber)⁵⁾ 및 OTC (Open Top Chamber)²⁶⁾ 등이 있다. 챔버의 구조나 모양은 각기 다르나 공통적으로 챔버내의 논(또는 모의논)에 벼를 직파하거나 이앙재배 할 수 있기 때문에 개체군을 대상으로 한 연구가 가능하다. 챔버는 투명한 폴리에틸렌 필름으로 전면(완전폐쇄형) 또는 부분피복(부분개방형)한 형태로 되어 있다. SPAR는 완전폐쇄형 챔버로 수도군락의 연속적인 CO₂교환수지 측정에 적합한 시설이라 할 수 있다.

전형적인 하우스(터널) 모양의 TGC는 양쪽 말단이, 원통형의 OTC는 챔버의 위부분(천정)이 각각 개방되어 있다. SPAR와 OTC는 챔버단위로 독립적으로 온도제어가 이루어지는 반면, TGC는 하나의 챔버내에 다단계의 온도조건을 실현 할 수 있는 특징을 가지고 있다. 그러나 이와 같은 포장형 챔버들이 실내형 챔버(growth chamber)나 일반적인 온실보다 실제의 포장과 유사한 환경조건(기온 및 일사량의 일·계절변화)을(를) 재현 할 수 있다고는 하지만 피복자재를 사용하고 있는 만큼 챔버내의 광조건은 옥외에 비하여 통상 10-25% 감소한다. 또한, 수증기압차(vapor pressure deficit)가 일반적으로 낮으며, CO₂농도나 온도제어에 따른 강제적인 송풍(blower) 혹은 환기(ventilation) 등의 영향으로 풍향·풍속이 실제의 포장조건과 다르다. 그래서 챔버와 실제포장의 이러한 환경차이가 작물의 생장에 영향을 미칠 수 있다는 이른바 "chamber effect" (noise)가 지적되어 왔다²⁰⁾. 따라서 최근 CO₂농도 이외의 환경조건을 아무것도 변화시키지 않고 실제의 포장에서 실험 할 수 있는 개방형 CO₂ 부화(Free-Air CO₂ Enrichment; FACE)기술이 개발·이용되고 있다^{4,11,12,13,15,16,17,20,23)}

그림1에서 보는 바와 같이 FACE는 아무런 피복자재를 사용하지 않고 넓은 포장에서 일정구획(공간)의 CO₂농도를 증가시키는 방법이다. 따라서 포장형 챔버에서와 같은 chamber effect를 거의 배제한 실제의 포장에서 다양한 농학적 실험·연구가 가능하다는 장점을 갖는다. 반면, 고CO₂농도의 유지를 위해서는 다량의 CO₂를 계속적으로 공급해야 하므로 CO₂의 소모량(풍속의 함수)이 많을 뿐만 아니라 시스템의 구축 및 운전비용 등이 고가이며 사실상 온도제어가 불가능하다는 문제점이 있다.

3. 수도의 CO₂ 응답

광합성과 성장. 작물의 생육에 필요한 양·수분, 온도, 일사량 등이 충분한 조건에서의 광합성속도는 전적으로 CO₂농도에 의해 제한을 받기 때문에 CO₂농도의 증가는 작물 특히, 벼와 같이 C-3 탄소고정계를 갖는 작물의 광합성을 향상시켜 일반적으로 생산성에 정의 효과를 나타낸다. 그러나 CO₂농도에 대한 수도의 광합성응답은 전술한 바와 같은 생육조건 뿐만아니라 발육단계에 따라 크게 달라 진다¹²⁾. 즉, 고CO₂농도(550-700ppmV)의 광합성촉진효과(Ps)는 질소가 풍부한 토양조건과 수분이 부족한 조건에서 더욱 현저하게 나타난다^{15,21)}. 개엽(single-leaf)의 Ps는 큰 생육온도 의존성(25℃ < 32℃)을 보이는 반면²²⁾, 군

락의 경우 온도의존성이 비교적 적은 것으로 알려져 있다²⁾. 더욱 흥미로운것은 벼의 생육이 진전됨에 따라 Ps가 현저히 감소한다는 것이다. 생육초기(영양생장기)의 균락광합성의 Ps는 약35%정도^{6,25)}이나 생육이 진전됨에 따라 감소하여 출수이후의 Ps는 오히려 부의 값을 나타는 경우도 있다²⁵⁾. 이와 같이 고CO₂농도환경에 장기간 노출된 벼에서 광합성능력이 저하하는 현상을 흔히 광합성의 순화(phosynthetic acclimation 또는 down-regulation)라고 한다. 순화의 주 요인으로는 엽신의 질소분배감소¹⁸⁾, Rubisco (Ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase)함량 및 활성저하²⁴⁾ 등으로 알려져 있다.

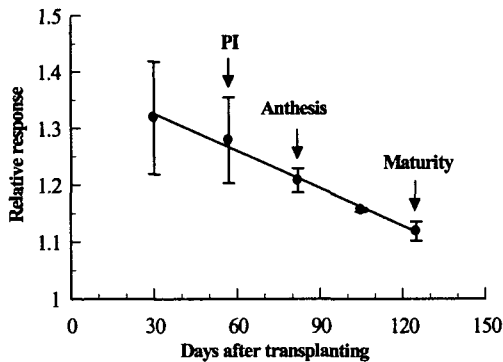


Fig. 2 Seasonal pattern of the relative response of rice total biomass to FACE for crops with medium N (80-90kg ha⁻¹)

고CO₂농도에 대한 성장반응도 균락광합성과 거의 유사한 반응을 보인다. 즉 영양생장기에는 분얼과 엽면적지수(LAI)의 현저한 증가로 흡수 일사량이 많아 질 뿐만아니라 일사의 건물전환 효율이 향상 되어 건물수량이 약 33%정도 증가 하나 최종건물생산량은 약 12%¹³⁾ (그림 2) - 25%⁶⁾증가 하는데 그친다. 한편, 고CO₂농도환경에서 생육한 벼는 출수기가 2일정도 빨라 지는데^{9,17)}, 이와 같은 고CO₂농도의 영향은 유수분화 이후 중·하위엽의 고사를 재촉하여 LAI의 손실을 가져온다. 이러한 LAI감소와 더불어 질소

분배의 감소에 따른 엽면적당 질소함량의 저하가 균락광합성을 감소시켜 최종건물생산에 대한 고CO₂농도의 효과가 낮아지는 것으로 보이며, 이러한 일련의 CO₂응답은 후술의 질소흡수패턴과 밀접한 관계에 있는 것으로 생각된다.

질소흡수 및 이용. 주지의 사실과 같이 작물체내외의 질소요인은 생육전반에 관여하는 중요한 요소이다. 고CO₂농도환경은 벼의 일생을 통하여 흡수하는 전질소량에는 영향을 미치지 않으나, 영양생장기(이앙-유수분화)에는 질소흡수를 조장하고 생식생장기(유수분화-성숙)에는 대체로 부의 영향을 주어 양분흡수의 시기적 불균형을 초래한다^{11,12)}. 이러한 질소흡수의 불균형은 분얼 및 LAI의 소장에 깊이 관여하여 위에서 지적한 바와 같은 균락광합성과 건물수량의 CO₂응답에 커다란 영향을 미치는 것으로 판단된다. 고CO₂농도환경에서는 벼의 뿌리생장이 현저 할 뿐만아니라^{10,11,26)} 광합성과 생육의 유지에 필요한 질소요구도가 크므로 양분흡수포텐셜이 증가 할 것으로 판단된다. 동 환경하에서 벼의 질소흡수는 생육온도에 거의 독립적이다⁸⁾. 한편, 벼의 일생동안 흡수한 단위질소당 건물생산량(질소농도의 역수)으로 표시한 질소이용효율은 고CO₂농도환경에서 현저히 증가 한다⁸⁾

증발산과 수분이용. 고CO₂농도환경에서는 벼 뿐만아니라 대부분의 농작물 잎의 기공이 부분적으로 폐쇄(기공전도도 감소)되므로 일반적으로 증산이 억제되어 단위엽면적당 증산량이 크게 감소 하게된다³⁾. 벼의 경우 영양생장기에는 LAI증가에 따른 상쇄작용으로 단위토지면적당 증산량은 크게 감소하지 않으나, 벼의 일생을 통한 적산엽면적에 거의 변함이 없으므로 증발산에 의한 물의 손실이 감소(≈10%)하여 수분이용효율이 크게 향상 된다(≈22%). 한편, 증산의 감소는 잠열손실을 억제하여 엽온(균락표면온도) 또는 균락내

부의 온도를 상승시키게 된다¹⁹⁾. 고CO₂농도환경은 이러한 균락내·외부의 열교환수지의 변화를 통하여 벼의 발육(생육기간의 단축)과 생장 나아가서는 생산성에 간접적인 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 증산의 감소는 증산류와 함께 체내이동하는 것으로 알려진 규산의 축적을 감소시켜 잎의 실리카층형성이 불충분 할 경우 도열병에 대한 내성이 약화 될 것으로 추측된다. 따라서 CO₂환경변화과 작물의 각종 병·해충내성변화의 직간접적 인과관계의 해명은 금후의 중요한 과제로 생각된다.

생산성과 미질. 질소조건이 충분 할 경우, 550ppmV정도의 고CO₂환경에서 생육한 벼의 수량은 품종에 의존하면서 12%¹³⁾- 25%^{2,26)}증수 할 것으로 보인다. 벼의 수량(Y)은 간단하게 $Y=DM(\text{건물중}) \times HI(\text{수확지수})$ 로 표시할 수 있는데 위의 증수율은 DM증가율(12%)과 일치하여 CO₂농도상승에 의한 증수는 주로 DM증가에 기인한다는 것을 알 수 있다¹³⁾. 수량구성요소중에서는 수수와 수당영화수가 증가하여 단위면적당 영화수가 가장 두드러진 증가를 보이는데, 이는 앞에서 지적한 바와 같은 영양생장기(이앙-유수분화기)의 질소흡수량이 고CO₂환경에서 많아지기 때문으로 볼 수 있다^{11,13)}. 통상적인 기온조건에서 고CO₂농도환경은 임실율이나 천립중 등에 거의 영향을 미치지 않으나¹³⁾ 기온이 상승하여 특히 출수개화시에 고온(>36℃)에 노출 될 경우 임실율과 천립중의 현저한 감소를 초래 할 것으로 우려되고 있다^{2,10,19)}. 그러나 고CO₂ × 통상기온조건에서는 현미(또는 백미)의 단백질함량이 낮아짐으로, 영양적인 측면을 고려하지 않는다면, 고CO₂환경은 식미를 개선 하는 방향으로 작용 할 것으로 기대된다.

4. 금후의 과제

지금까지 대기CO₂농도상승에 대한 수도의 응답을 최근 10여년간에 발표된 논문을 중심으로 간략히 살펴 보았다. CO₂농도상승에 따른 수도의 생산성 향상은 바람직한 것으로 받아들일 수 있으나 CO₂를 포함한 온실가스농도 배증시에 예상되는 기온상승의 악영향을 최소화하는 한편 고CO₂농도환경을 증수 또는 품질향상에 적극적으로 이용 하기 위한 기술적 대응(예: 고온불임저항성 및 고온등숙성이 양호한 품종의 개발 등)이 필요할 것으로 사료된다. 한편, 논 생태계는 벼 뿐만아니라 잡초, 병원균, 곤충, 토양미생물 등 다양한 생물로 구성되어 있고 서로 영향을 주고받는 관계에 있기 때문에 어느 한 생물의 응답이 생태계 전체에 적용될 수 없는 것은 당연한 사실이다. 따라서 어느 한 생물(벼)이 아닌 생태계레벨의 환경응답을 해명하고 이를 토대로 안정성이 높은 생산생태계의 구축 하는 것이 무엇보다 중요하다 하겠으나, 이러한 연구는 작물학을 포함한 잡초학, 토양학, 병리학, 곤충학, 농업기상학 등 다양한 분야의 전문가가 참여한 학제간연구로 추진 될때 비로서 가능할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Baker, J.T., Allen, Jr. L.H., 1993. Contrasting crop species responses to CO₂ and temperature: rice, soybean and citrus. *Vegetatio* 104/105, 239-260.
2. Baker, J.T., Allen. Jr. L.H., Boote, K.J., Pickering, N.B. 1996. Assessment of rice response to global climate change: CO₂ and temperature. In: *Carbon Dioxide and Terrestrial*

- Ecosystems (eds Koch GW, Mooney HA), pp. 265-282. Academic Press, San Diego, USA.
3. Drake, B.G., Gonzalez-Meler, M.A., Long, S.P. 1997. More efficient plants: A consequence of rising atmospheric CO₂? *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 48, 609-639.
 4. Hendrey, G.R., Ellsworth, D.S., Lewin, K.F., Nagy, J., 1999. A free-air CO₂ enrichment system for exposing tall forest vegetation to elevated atmospheric CO₂. *Global Change Biology*, 5, 293-309.
 5. Horie, T., Nakagawa, H., Nakano, J., Hamotani, K., Kim, H.Y., 1995. Temperature gradient chambers for research on global environment change. III. A system designed for rice in Kyoto, Japan. *Plant, Cell and Environment*, 18, 1064-1069.
 6. Horie, T., Baker, J.T., Nakagawa, H., Matsui, T., Kim, H.Y., 2000. Crop ecosystem responses to climate change: rice. In: Reddy, K.R., Hodges, H.F (Eds), *Climate Change and Global Crop Productivity*. CAB International, Wallingford, Oxon, UK, pp. 81-106.
 7. IPCC, 2001. *IPCC Third Assessment Report: Climate Change 2001*, pp.184.
 8. Kim, H.Y., Horie, T., Nakagawa, H. 1993. Effects of elevated CO₂ concentration and high temperature on growth and nitrogen use efficiency of rice. In: KCSS, *Crop Production and Improvement Technology in Asia*, pp. 205-211.
 9. Kim, H.Y., Horie, T., Nakagawa, H., Wada, K. 1996. Effects of elevated CO₂ concentration and high temperature on growth and yield of rice. I. The effect on development, dry matter production and some growth characteristics. *Japanese Journal of Crop Science*, 65, 634-643.
 10. Kim, H.Y., Horie, T., Nakagawa, H., Wada, K., 1996. Effects of elevated CO₂ concentration and high temperature on growth and yield of rice. II. The effect on yield and its components of Akihikari rice. *Jpn. J. Crop Sci.* 65, 644-651.
 11. Kim, H.Y., Lieffering, M., Miura, S., Kobayashi, K., Okada, M. 2001. Growth and nitrogen uptake of CO₂-enriched rice under field conditions. *New Phytologist*, 150, 223-229.
 12. Kim, H.Y., Lieffering, M., Kobayashi, K., Okada, M., Miura, S., 2003. Seasonal changes in the effects of elevated CO₂ on rice at three levels of nitrogen supply: a free air CO₂ enrichment (FACE) experiment. *Global Change Biology*, 9, 826-837.
 13. Kim, H.Y., Lieffering, M., Kobayashi, K., Okada, Mitchell, M.W., Gumpertz, M. 2003. Effects of free-air CO₂ enrichment and nitrogen supply on the yield of temperate paddy rice crops. *Field Crops Research*, 83, 261-270.
 14. Kimball, B.A. 1983 Carbon dioxide and agricultural yield: an assemblage and analysis of 430 prior observations. *Agronomy Journal*, 75, 779-788.
 15. Kimball, B.A., Kobayashi, K., Bindi, M. 2002. Responses of agricultural crops to free-air CO₂ enrichment. *Advances in Agronomy*, 77, 293-368.
 16. Kobayashi, K., Okada, M., Kim, H.Y., 1999. The free-air CO₂ enrichment (FACE) with rice in Japan. In: Horie, T., Geng, S., Amano, T., Inamura, T., Shiraiwa, T. (Eds.), *World Food Security and Crop Production Technologies for Tomorrow*. Graduate school

- of Agri., Kyoto University, Kyoto, Japan, pp. 213-215.
17. Kobayashi, K., Lieffering, M., Kim, H.Y., 2001. Growth and yield of paddy rice under free-air CO₂ enrichment. In: Shiyomi, M., Koizumi, H. (Eds.), *Structure and Function in Agroecosystem Design and Management*. CRC press, Boca Raton, Florida, USA, pp.371-395.
 18. Makino, A., Harada, M., Sato, T., Nakano, H., Mae, T. 1997. Growth and N allocation in rice plants under CO₂ enrichment. *Plant Physiology*, 115, 199-203.
 19. Matsui, T., Namuco, O.S., Ziska, L.H., Horie, T., 1997. Effects of high temperature and CO₂ concentration on spikelet sterility in indica rice. *Field Crops Research*, 51, 213-221.
 20. McLeod, A.R., Long, S.P., 1999. Free-air carbon dioxide enrichment (FACE) in global change research; a review. *Advances in Ecological Research*, 28, 156.
 21. Nakagawa, H., Horie, T., Kim, H.Y. 1994 Environmental factors affecting rice response to elevated carbon dioxide concentrations. *International Rice Research Note*, 19, 45-46.
 22. Nakagawa, H., Horie, T. 2000 Rice responses to elevated CO₂ and temperature. *Global Environmental Research*, 3, 101-113.
 23. Okada, M., Lieffering, M., Nakamura, H., Yoshimoto, M., Kim, H.Y., Kobayashi, K., 2001. Free-air CO₂ enrichment (FACE) using pure CO₂ injection: system description. *New Phytologist*, 150, 251-260.
 24. Rowland-Bamford, A.J., Baker, J.T., Allen, Jr. L.H., Bowes, G. 1992. Acclimation of rice to changing atmospheric carbon dioxide concentration. *Plant, Cell and Environment*, 14, 577-583.
 25. Sakai, H., Yagi, K., Kobayashi, K., Kawashima, S. 2001. Rice carbon balance under elevated CO₂. *New Phytologist*, 150, 241-249.
 26. Ziska, L.H., Weerakoon, W., Namuco, O.S., Pamplona, R. 1996. The influence of nitrogen on the elevated CO₂ response on field-grown rice. *Australian Journal of Plant Physiology*, 23, 45-52.
 27. Ziska, L.H., Namuco, O.S., Moya, T., Quilang, J. 1997. Growth and yield responses of field-grown tropical rice to increasing carbon dioxide and air temperature. *Agronomy Journal*, 89, 45-53.