

CO₂농도의 상승과 온난화환경이 수도의 생장, 물질생산 및 그 분배에 미치는 영향

金漢龍, 堀江武¹⁾

科學技術振興事業團, ¹⁾京都大學 農學部

Effects of Elevated CO₂ and Global Warming on Growth Parameters, Biomass Production and Its Partitioning of Rice

Han Yong Kim, Takeshi Horie¹⁾

Japan Science and Technology Cooperation, Morioka 020-0123, Japan

¹⁾Faculty of Agriculture, Kyoto University, Kyoto 606, Japan

ABSTRACT

The influence of elevated CO₂ and temperature on growth parameters, biomass production and its partitioning of rice (*Oryza sativa* L. cv. Chukwangbyeon) were investigated in three experiments (1991-1993). Rice plants were grown from transplanting to harvest at either ambient (\cong 350ppm) or elevated CO₂ concentrations (690 or 650ppm) in combination with either four or seven temperature regimes ranging from ambient temperature (AT) to AT plus 3°C. From transplanting to panicle initiation, crop growth rate (CGR) was enhanced by up to 27% with elevated CO₂, primarily due to an increase in leaf area index, although net assimilation rate was also greater at elevated CO₂. The effect of elevated CO₂ varied with temperature. During the reproductive phase, CGR declined linearly with increased temperature, and was greater at elevated CO₂. Elevated CO₂ increased final crop biomass and panicle weight 30% and 37% respectively at AT (27.6°C; 1991). However, there was no significant effect of elevated CO₂ on panicle weight at AT plus 3°C, where severe spikelet sterility occurred. There was also no effect of CO₂ on biomass partitioning into vegetative and reproductive organs (harvest index) at AT, although higher temperatures could affect that by inducing spikelet sterility. These results suggest that elevated CO₂ could enhance rice productivity through promoted growth and biomass production, but its positive effects may be less at higher temperatures.

Key words: elevated CO₂, growth parameters, higher temperatures, rice.

서 언

최근, 대기중의 CO₂농도가 증가하고 있으며, 이에 따라 예측되고 있는 지구온난화 등, 지구규모의 기후 및 환경변화문제가 농업을 비롯한 정치, 사회, 경제 전반에 파급되고 있다. CO₂는 기본적으로 광합성의 기질이기 때문에 그 농도의 증가는 수도를 비롯한 대부분의 C₃작물의 광합성을 촉진하여 수량에 정의 효과를 가져오는 것으로 알려져 있다(Kimball, 1983).

수도의 경우 CO₂농도상승(현재의 약2배)에 의한 증수효과는 6~73%(Imai 등, 1985; Baker 등, 1990; Ziska와 Tramura, 1992; Kim 등, 1996b)로 보고되어 있으나, 상당한 폭의 변이를 보이고 있다. 이것은 CO₂농도에 대한 수도의 반응이 CO₂이외의 기온, 광, 무기영양이나 수분 등의 환경요인과 품종, 즉 유전적 요인에 크게 좌우된다는 것을 시사한다.

그러나, CO₂농도와 그이외의 환경요인의 복합적 영향에 관한 연구에는 적을 뿐만 아니라 孤立個體의 수도를 대상으로 한(Imai 등, 1985; Ziska와 Teramura,

1992) 것이기 때문에 그 결과가 포장군락조건 의 수도에 그대로 적용된다고는 볼 수 없다. 이와 관련하여 Kim 등(1996a)은 수도군락의 물질생산의 CO₂농도 반응에 미치는 온도의 영향은 孤立個體의 경우와 다르다고 하였다.

따라서 가까운 장래로 예측되고 있는 지구온난화 등의 기후변화가 수도생산에 미치게 될 영향을 정확히 평가하고 그 대응기술의 개발에 필요한 유용정보를 축적하기 위해서는 群落상태의 수도를 대상으로 한 CO₂와 기온의 복합적 영향에 관한 연구가 절실히 요구되고 있다. 본 연구에서는 기온과 일사의 일변화와 계절변화를 허용하면서, 온도와 CO₂농도의 제어가 가능한 溫度旬配型 CO₂처리시설 [TGC, Temperature Gradient Chamber(Horie 등, 1995)]를 이용하여 수도군락의 성장, 물질생산 및 그 분배특성에 미치는 CO₂와 온도의 복합적 영향에 관하여 검토하였다.

재료 및 방법

1. 온도구배형 CO₂농도처리시설 (TGC) 의 개요

본 실험은 京都대학 농학부 포장에 설치한 2개의 TGC를 이용하여 1991년부터 1993년까지 3작기에 걸쳐 실시하였다. TGC의 기본구조는 일사의 투과율이 높은 투명 Polyethylene telephthalate 필름 (太陽工業, Sixlight 型) 으로 피복한 길이 26m, 폭 2.06m, 높이 1.7m의 하우스와 동일한 구조이다. 한동의 TGC의 開口部에 CO₂공급 및 농도제어시스템(COSGH-250E型)을 장착하여, 이를 컴퓨터제어함으로써 TGC내의 CO₂농도를 현재 대기CO₂농도의 약 2배(이하, 고CO₂)로 유지하였다. 다른 한동의 TGC는 현재의 대기CO₂농도(≒350ppm, 이하, 자연CO₂)구로서 온도구배처리만 가능토록 하였다.

주간 의 온도구배는 開口部로부터 閉口部로의 일정속도의 通氣와 태양에너지에 의해 발생하며 통기에는 폐구부에 설치한 2개의 환기팬을 사용하였다. 또한, 폐구부에 설치된 오일히터를 이용한 야간의 온도구배는 환기팬을 주간 의 역방향으로 회전시켜 히터의 따뜻한 공기를 TGC내에 도입하여 개구부로의 배기과정에서 생기는 자연방열에 의하였다. 본 TGC 시스템의 특징은 자연조건에 가까운 기온의 일변화 및 계절적 변화를 반영하면서 평균기온을 TGC의 長

軸방향으로 연속변화시킬 수 있다는 점이다.

2. CO₂농도와 온도의 제어 및 측정

高CO₂TGC의 CO₂농도는 1991년과 1992년에는 수도의 전생육기간을 통하여 690ppm, 1993년에는 650ppm으로 제어하였다. 단, 오전 5시부터 오후 7시까지를 주간으로 설정하고 고CO₂농도치리는 주간에만 실시하였다. 자연 및 고CO₂TGC내의 CO₂농도는 적외선가스분석계(Horiba, ASSA-100型)를 이용하여 측정하였다. 兩TGC내의 온도는 환기팬의 회전속도(주간) 및 히터의 출력(야간)을 각각 컴퓨터제어하여, 개구부와 폐구부의 온도계 示度差가 4°C가 되도록 하였다. 개구부로부터 0, 3.5, 9.5, 14.5, 21.5 및 24m지점의 수도군락 0.3m위에 通氣型熱電對 온도계를 설치하여 乾球 및 濕球온도를 측정하였다. 각 온도계의 출력은 데이터로거(Yokogawa, YEWMAC300型)를 통하여 컴퓨터에 연속적으로 집적하였다. 상기 6점의 온도 측정치를 직선보간하여 TGC의 장축방향으로 0.2m간격의 온도를 구해 수도의 성장해석에 이용하였다.

3. 재배, 생육조사 및 성장분석

실험에는 일본형품종으로 조생종인 秋光벼를 공시하였다. 1991년에는 6월 14일 1/5000a 포트에 주당 2본 이양한 후, TGC내의 水槽(길이 24m, 폭 1.2m, 깊이 0.3m)에 20×20cm의 밀도(20주/m²)로 배치하여 포트군락상태로 재배하였다. 1992년과 1993년에는 상기수조의 지면을 0.4m의 깊이로 굴착한 후 논토양으로 충전한 모의답에 25주/m²의 재식밀도로 이양(1992년: 6월 5일, 1993년: 7월 2일)재배하였다. 실험년 차순으로 N-P-K를 m²당 24-24-24g, 12-15-14.4g, 12-15-15g 시용하였다. 이중 P는 전량기비로 시용하였으며, N와 K는 2~3회 분시하였다. 일반적인 수도군락에서와 같은 光환경을 제공하기 위하여 TGC의 측면으로부터의 입사광을 커튼으로 차단하였다. 물관리는 상시 담수상태로 하였으며, 기타는 관행재배법에 준하여 관리하였다.

현행의 대기온도~현행 대기온도+3°C범위의 4온도구(1991년, 1992년)~7온도구(1993년)를 설정하여 고CO₂농도와 자연CO₂농도를 성숙기까지 처리하였다.

이상과 같이 재배한 수도의 유수분화기, 출수기 및 성숙기를 포함한 3~5회, 각회 3~8주를 뿌리까지

발취하여 기관별 건물수량, 엽면적, 자실수량 등을 조사하여, 개체군 생장속도(CGR), 순동화율(NAR) 및 엽면적지수(LAI)에 대한 CO₂농도 및 온도의 영향을 검토하였으며, 영양기관 및 생식기관에의 물질분배 특성에 대하여도 검토, 고찰하였다.

결과 및 고찰

1. LAI, NAR 및 CGR

유수분화기에 있어서의 LAI, NAR 및 CGR을 고CO₂농도구에 대한 자연CO₂농도구의 比로 그림1에 나타내었다.

고CO₂농도는 엽면적의 확대생장을 촉진하여 LAI를 증대시켰으나, 이에대한 온도의 영향은 명료하지않았다. NAR도 고CO₂농도처리에 의해 약간 촉진되었으나, 특히 CGR의 촉진이 현저하였다. LAI의 경우와

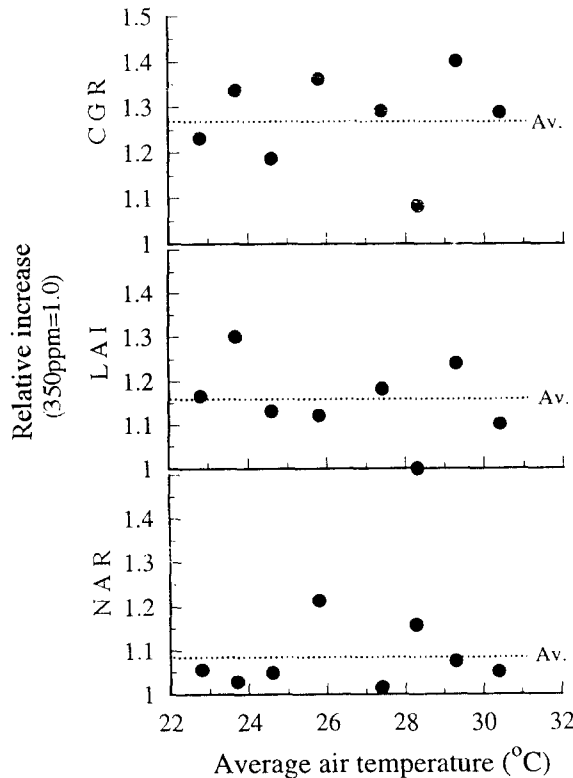


Fig.1. Relative increase by elevated CO₂ in rice leaf area index(LAI), net assimilation rate(NAR) and crop growth rate(CGR) of rice as a function of average air temperature [1991 and 1992 experiments; average(Av.) of all temperatures/experiments indicated].

마찬가지로 고CO₂농도의 NAR 및 CGR 촉진정도에 대한 온도 (22.8~30.4°C)의 영향에는 일정한 경향이 인정되지 않았다. 전온도구를 평균한 이들의 촉진율은 CGR (27%) >LAI (16%) >NAR (8%) 순으로 컸다. 일반적으로 이들 3자관계는 CGR=LAI×NAR로 나타낼 수 있기 때문에 CGR에 대한 고CO₂농도의 효과가 LAI나 NAR보다 큰 것은 당연한 결과라 하겠다. 한편, CGR의 촉진에 대한 LAI와 NAR의 기여정도를 보면 후자보다는 전자의 기여도가 큰 경향이였다. 이는 고CO₂농도가 엽군형성전의 생육상에 있어서는 주로 엽면적의 확대생장 촉진을 통한 흡수일사량의 증대로 CGR을 촉진하기 때문으로 생각되며, 同생육상에 있어서의 건물수량은 LAI와 직선관계에 있다는 보고(Kim 등, 1996a)와 잘 일치하였다.

출수기로부터 등숙중기에 걸친 CGR도 고CO₂농도구가 자연CO₂농도구를 상회하였으나 兩CO₂구의 CGR 모두 생육온도의 상승에 따라 저하하였고 그 저하정도는 고CO₂농도구에서 큰 경향이였다 (그림2. a).

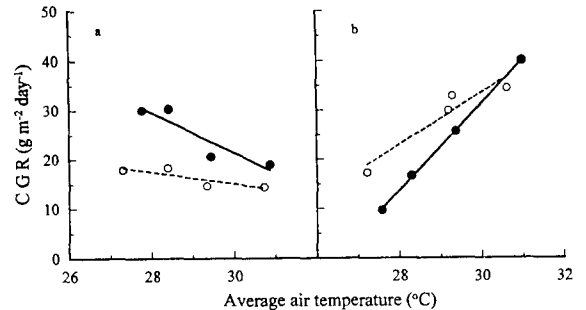


Fig.2. Crop growth rate(CGR) over the period from (a) heading to mid-ripening and (b) mid-ripening to maturity as a function of average air temperature under ambient(○) and elevated CO₂(●) concentrations(1991 experiment).

이는 고CO₂농도의 장기처리에 따른 기공폐쇄 (Morison과 Gifford, 1983)와 엽온 등의 식물체온 상승(Honma 등, 1997)으로 엽신의 노화가 진척되어 물질생산 능력이 자연CO₂농도구보다 빨리 쇠퇴하였기 때문으로 생각된다. 등숙중기로부터 성숙기에 걸친 CGR의 CO₂농도 및 온도반응은 출수이후 등숙중기에 걸친 CGR의 CO₂농도 및 온도반응과 정반대의 반응을 보였다 (그림2. b). 즉, 자연CO₂농도구의 CGR이 고CO₂농도구의 CGR을 상회하였으며, 양CO₂농도구의 CGR은 모두 생육온도의 상승에 따라 직선적으로

증가하였다. 이와 같은 CGR의 온도반응은 주로 고온유래의 불임영화 발생으로 인한 물질분배의 교란에 기인하며, 이에 대해서는 후술하고자한다.

2. 물질생산 및 분배특성

京都지역에 있어서 수도재배기간중의 평균기온이 현행 (27.6°C;1991년)의 경우와 현행기온 +3°C의 온도조건하에서 생육한 수도의 건물수량과 영양 및 생식기관으로의 물질분배에 미치는 CO₂농도의 영향을 그림3에 나타내었다.

고CO₂농도는 전 생육기간을 통하여 건물생산을

촉진시켰으며 최종 건물수량을 20~30% 증가시켰다. 건물생산에 미치는 온도의 영향은 비교적 작았으나 수중은 생육온도에 크게 지배되었다. 현행기온하에서의 최종 수중은 고CO₂농도처리에 의해 약37%증가한 반면, 3°C상승한 고온하에서는 CO₂농도처리간에 수중의 차이가 인정되지 않았을 뿐만 아니라 출수이후 성숙에 이르기까지 수중의 증가를 거의 볼 수 없었다. 이는 출수개화기의 고온에 의한 불임으로 인하여 영화가 동화물질을 수용할 Sink로서의 기능을 상실했기 때문이다. 고온에 의한 수정장애는 개화 당시의 기온에 가장 큰 감수성을 보이며(Satake와 Yoshida,

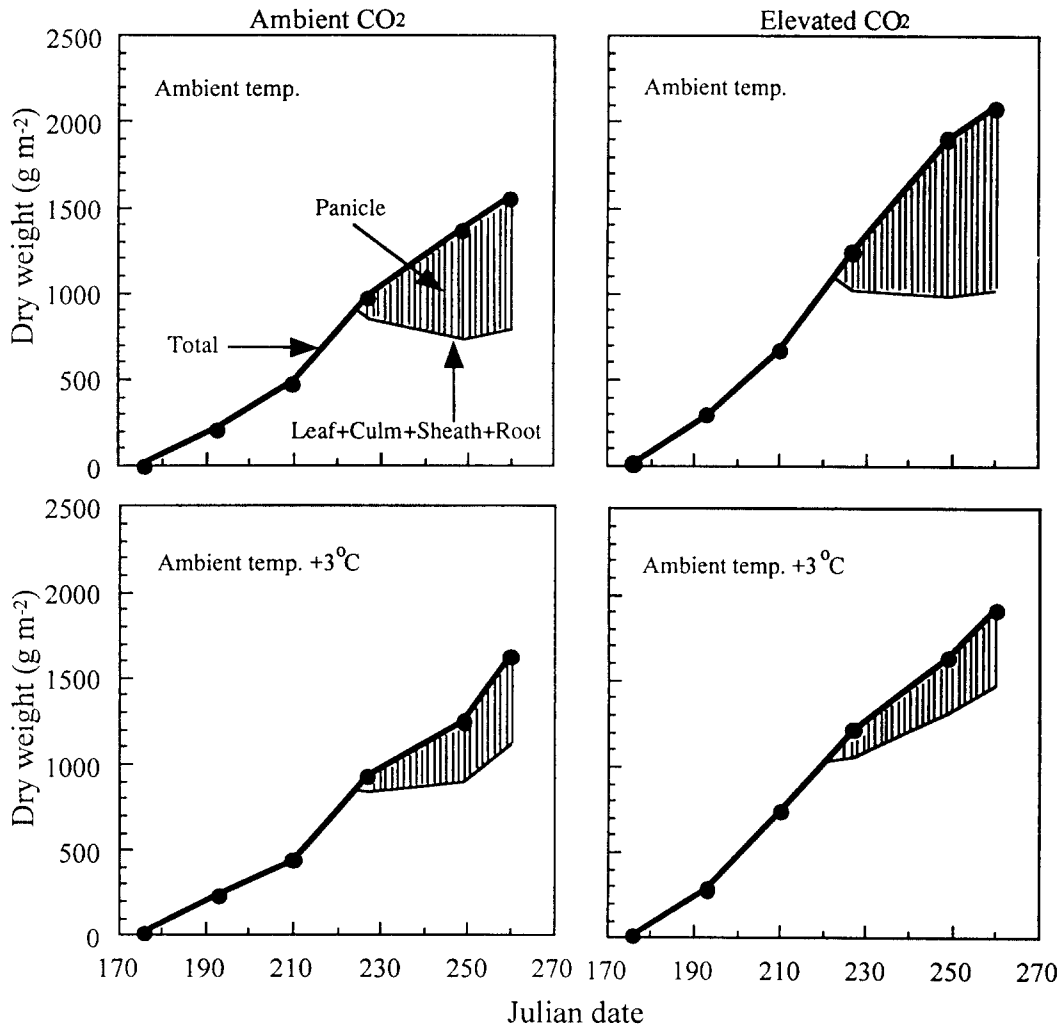


Fig.3. Change in dry matter production and its partitioning to vegetative and reproductive organs in rice grown under different temperatures and CO₂ concentrations (1991 experiment).

1978), 개화기의 고온에 의한 영화의 불임은 평균기온보다 최고기온에 크게 지배된다(Kim 등, 1996b). Kim 등(1996b)은 개화기의 최고기온이 36°C 이상일 때 불임이 발생하며, 그 불임율은 고CO₂농도하에서 높다고 하였다. 또한, 고CO₂농도는穗溫의 상승에 관여하여 영화의 불임을 유발할 가능성이 높다고 하였다(Honma 등, 1997).

CO₂농도처리간에 영양기관(잎, 줄기 및 뿌리)과 생식기관(이삭)으로의 물질분배(수확지수)의 차이는 거의 인정되지 않았으나 불임을 유발하여 영화의 Sink기능상실을 초래한 고온은 동화물질을 새로운 영양기관의 생성에 분배하여 출수이후에 신경엽 및 뿌리를 증가시켰으며, 특히 경엽의 증가가 현저하였다.

그림 4에 나타난 바와 같이, 불임율과 성숙기의 경중 및 LAI와는 직선관계가 인정되었으며, 고온불임에 따른 LAI의 증가는 전술한 생육후기의 높은 CGR과 밀접히 관계되었다.

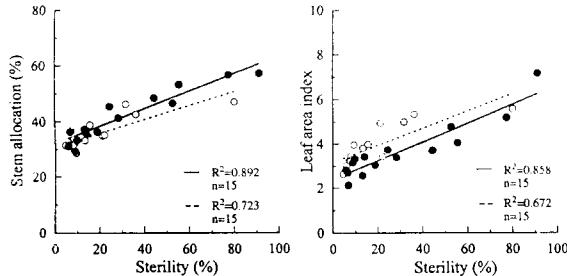


Fig.4. Relationship between spikelet sterility and dry matter allocation to stem(culms+sheaths) and leaf area index at maturity under ambient(○) and elevated CO₂(●) concentrations in the 1991, 1992 and 1993 experiments(Combined data).

Table 1. Effects of CO₂ concentration on rice leaf area index(LAI), dry matter production(DM) and panicle weight after heading(1991 experiment).

CO ₂	DAT ^{a)}	LAI ^{b)}	ΔDM(gm ²)	ΔPanicle wt.(gm ²)
Ambient CO ₂	51-73	6.03	399(100)	533(100)
	73-84	4.45	245(100)	131(100)
	Total		644(100)	664(100)
Elevated CO ₂	51-73	5.85	659(165)	684(128)
	73-84	2.93	182(74)	152(116)
	Total		841(131)	836(126)

a):Days after treatment of CO₂

b):Mean existing LAI during each period.

Numerals in parentheses indicate values relative to ambient CO₂(=100)

한편, 현행기온조건 (27.6°C)에서 생육한 수도의 출수이후의 LAI변화, 건물생산량 및 수중을 보면, 출수후 약3주에 이르기까지의 평균 LAI는 CO₂농도처리간에 큰 차이가 없었으나 건물생산량 및 수중은 고CO₂농도처리에 의해 각각 65% 및 28%증가하였다(표1).

이것은 단위 LAI당 물질생산능력이 고CO₂농도에 의해 향상된 결과라 할 수 있으며 주로 흡수일사를 건물로 전환하는 효율(Horie와 Sakuratani, 1985)의 향상과 광호흡의 감소(Chollet와 Orgen, 1975)에 기인하는 것으로 생각된다. 출수후 약3주로부터 성숙기에 걸친 LAI는 고CO₂농도구에서 약 26% 감소하였다. 이는 등숙기 중기 이후 엽신의 노화가 급격히 진척되었기 때문이다.

가까운 장래로 예측되고 있는 고CO₂농도환경을 수도의 수량증대에 잘 이용하기 위해서는 전등숙기간을 통하여 높은 물질생산능력을 유지할 수 있는 시비방법 또는 시비기술의 개발이 필요할 것으로 생각된다.

적 요

대기중의 CO₂농도 상승과 이에 따라 예측되고 있는 온난화환경이 수도생산에 미치게 될 영향의 정량적 평가와 그 예측에 필요한 기초자료를 얻고자 온도구배형CO₂처리시설(TGC)를 이용하여 CO₂×온도의 장기처리하에서 재배한 수도개체군의 성장반응, 물질생산 및 분배특성에 관하여 검토하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 고CO₂농도는 이앙으로부터 유수분화기에 걸쳐 엽면적의 확대생장을 촉진하여 엽면적지수(LAI)를 증대시켰으며, 개체군 성장속도(CGR) 및 순동화율(NAR)을 향상시켰다. 이들에 대한 고CO₂농도의 촉진효과는 CGR(27%)>LAI(16%)>NAR(8%)순으로 컸으나 그 촉진 정도에 대한 온도의 영향에는 일정한 경향이 인정되지 않았다.
2. 현행기온 (27.6°C)조건하에서 고CO₂농도는 등숙중기이후 LAI를 크게 저하시켰으나 최종 건물수량 및 수중을 각각 30% 및 37% 증가시켰다. 그러나 현행기온+3°C조건하에서는 CO₂농

도처리간에 수종의 차이가 인정되지 않았다.

3. 영양기관 및 생식기관으로의 물질분배(수확지수)는 CO₂농도보다는 영화불임을 통한 온도의 영향이 현저하였다.

인 용 문 헌

- Baker, J.T., L.H. Allen, Jr. and K.J. Boote. 1990. Growth and yield response of rice to carbon dioxide concentration. *J. Agri. Sci.* 115:313-342.
- Chollet, R. and W.L. Orgen. 1975. Regulation of photorespiration in C₃ and C₄ species. *Bot. Rev.* 41:137-179.
- Honma, K., H. Nakagawa, T. Horie, H. Ohnishi and H.Y. Kim. 1996. Effects of elevated CO₂ concentration and high temperature on growth and yield of rice. VIII. The effect on leaf and panicle temperature. *Jpn. J. Crop Sci.* 65(Extra issue):89-90.
- Horie, T. and T. Sakuratani. 1985. Studies on crop-weather relationship model in rice: (1). Relation between absorbed solar radiation by the crop and the dry matter production. *J. Agro. Met.* 40:331-342.
- Horie, T., H. Nakagawa, J. Nakano, K. Hamotani and H.Y. Kim. 1995. Temperature gradient chamber for research on global environment change. III. A system designed for rice in Kyoto, Japan. *Plant Cell Environ.* 18:1055-1063.
- Imai, K., D.F. Coleman and T. Yanagisawa. 1985. Increase in atmospheric partial pressure of carbon dioxide and growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.). *Jpn. J. Crop Sci.* 54:413-418.
- Kim, H.Y., T. Horie, H. Nakagawa and K. Wada. 1996a. 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. *Jpn. J. Crop Sci.* 65:634-643.
- Kim, H.Y., T. Horie, H. Nakagawa and K. Wada. 1996b. 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.
- Kimball, B.A. 1983. Carbon dioxide and agriculture yield: An assemblage and analysis of 430 prior observations. *Agro. J.* 75:779-788.
- Morison, J.I.L. and R.M. Gifford. 1983. Stomatal sensitivity to carbon dioxide and humidity: A comparison of two C₃ and two C₄ grass species. *Plant Physiol.* 71:789-796.
- Satake, T. and S. Yoshida. 1978. High temperature induced sterility in indica rices at flowering. *Jpn. J. Crop Sci.* 47:6-17.
- Ziska, L.H. and A.H. Teramura. 1992. Intraspecific variation in the response of rice (*Oryza sativa*) to increased CO₂-photosynthetic, biomass and reproductive characteristics. *Physiol. Plant.* 84:269-276.