

CO₂ 농도 증가에 따른 벼의 생육 반응

김영국[†] · 신진철 · 최민규 · 구본철 · 김석동

작물과학원

Response of Rice Growth under CO₂ Enrichment

Young-Guk Kim[†], Jin-Chul Shin, Min-Gyu Choi, Bon-Cheul Koo, and Seok-Dong Kim

National Institute of Crop Science, Suwon 441-857, Korea

ABSTRACT : The effects of CO₂ enrichment on growth of rice (*Oryza sativa* L.) were examined. The plants were grown in growth chambers with a 12-h photoperiod and a day/night temperature of 28/21°C of the seedling stage and 30/23°C after the panicle initiation stage. The plants were exposed to two elevated CO₂ of 500, 700 ppm and ambient levels (350 ppm). At early growth stage of three varieties (Ilpumbyeo, Chucheongbyeo, Hwaseongbyeo), the elevated CO₂ increased plant height, tiller, leaf area and dry weight. The photosynthetic rate was decreased at 24 days after treatment (DAT) compared to 11 DAT. The elevated CO₂ increased plant height and dry weight at panicle initiation stage (PIS) and heading stage (HS) of three varieties (Ilpumbyeo, Chucheongbyeo, Hwaseongbyeo). The photosynthetic rate, stomatal conductance, evapotranspiration rate were decreased at the long days of treatment than that of short days. At entire stages, the elevated CO₂ increased the water use efficiency of rice plant because evapotranspiration rate was lowered at the elevated CO₂ than ambient levels.

Keywords: CO₂ enrichment, rice, photosynthetic rate, stomatal conductance, evapotranspiration rate, elevated CO₂

지구온난화와 더불어 대기 중의 CO₂ 농도는 산업혁명 이전의 280 ppm에서 360 ppm까지 증가되었다(Baker & Enoch, 1983, Keeling *et al.*, 1995). 대부분의 작물은 CO₂ 농도 증가와 함께 광합성과 건물중이 증가되고 있으며 이와 관련하여 CO₂ 농도가 벼의 생육에 미치는 영향에 관해서도 많은 연구가 수행되어 CO₂ 농도 증가와 함께 광합성과 건물중이 증가되었다고 보고되었다(DeCosta *et al.*, 2003a, 2003b; Gesch *et al.*, 2002). 또 다른 연구에서 Kim *et al.*(2001, 2003)과 Kobayashi *et al.*(2001)은 벼의 생육 기간 중 CO₂ 농도를 증가시켰을 때 질소비료 사용에 따라 식물체 생산 및 수량에 미치는 영향이 달라지기 때문에 질소비료의 중요성을 강조하였

는데, 이와 같은 결과는 다른 환경요인이 증가된 CO₂ 농도의 영향을 변화시킬 수 있다는 것을 알 수 있다

Tako *et al.*(2001)은 같은 대기온도에서 CO₂ 농도를 대기보다 2배로 증가시켰을 때 생육하는 벼는 생물량의 차이가 없었으나, 대기온도가 2°C 증가되었을 때 대기 CO₂ 농도에서 자란 벼보다 생물량을 22% 더 증가시켰다고 하였다. 그러나 Ziska *et al.*(1997)은 CO₂ 농도와 온도를 동시에 높였을 때는 차이가 없었으나 대기온도에서 CO₂ 농도만 300 ppm 더 증가시켰을 때 식물체 생산량이 40% 까지 증가되었다고 하였다. 광합성과 다른 측면에서 Baker *et al.*(2000)은 벼에서 암호흡을 통한 탄소 손실률은 증가하는 야간의 CO₂ 농도로 감소되었고, Weerakoon *et al.*(2000)은 대기 중의 CO₂ 농도에 300 ppm을 추가한 처리구에서 생육한 벼가 장기간의 평균복사이용 효율이 35% 더 높은 것으로 나타났고 차단된 태양복사량의 단위당 생산된 생물량으로 나타났다. 이와 같이 대기 중의 CO₂ 농도를 증가시킨 조건에서 일반적으로 더 많은 생물량이 생산되는 것으로 나타났다 Widodo *et al.*(2003)은 벼의 전 생육기간 동안 CO₂ 농도 350 ppm과 700 ppm에서 한발 처리에 의해 고농도 CO₂ 처리구에서는 증가된 CO₂ 농도 처리구에서는 주간의 광합성량이 증가되고 한발을 견디는 기간이 길고 회복력도 빨랐다고 하였다. 이와 같은 결과로 미래의 대기 CO₂ 농도가 증가된 기후에서 자라는 벼는 한발에 더 잘 견딜 수 있다고 하였다. Watling & Press(2000)는 벼 생장에 있어서 기생잡초인 Striga의 감염과 관련하여 대기 CO₂ 농도 처리구에서는 65%가 감염되었으나 CO₂ 농도를 700 ppm으로 증가시켰을 때는 27%만 감염되어 대기 CO₂ 농도 증가는 벼에서 식물체 생산에 대한 기생물질의 부정적인 영향을 감소시켰다고 하였다. 이와 관련하여 미래의 대기 CO₂ 농도가 높은 기후에서 수량성을 극대화하기 위해서는 증가된 대기온도, CO₂ 농도 등 지역특성을 극복할 수 있는 가장 적합한 품종을 선발해야 할 것이다

이와 같이 지구온난화에 따른 대기 중의 CO₂ 농도 변화에 적용할 수 있는 작물 개발을 위한 기초연구로서, 대기 중의 증가된 CO₂ 농도 조건이 국내 벼 품종에 미치는 영향을 알아보고자 본시험을 수행하였다

[†]Corresponding author: (Phone) +82-31-290-6683 (E-mail) kimyk@rda.go.kr

<Received June 1, 2005>

재료 및 방법

본시험은 작물과학원 인공기상실에서 CO₂ 조절 식물생육챔버를 이용하여 2004년에 수행하였다. 시험재료는 일품, 추청, 화성(3품종)을 공시하였고, CO₂ 농도는 자연 상태(350 ppm, 500 ppm, 700 ppm)로 하여 처리시키는 유묘기, 유수형성기에 각각 20일~25일간 처리하였고, 출수기에는 출수직전부터 수확기까지 처리하였다. 챔버는 CO₂ 조절 챔버를 이용하였고, CO₂ 가스는 순도 99.99%를 이용하였다. 챔버내의 광도는 900 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이고, 온도는 유묘기 24°C(최고 28°C/최저 21°C), 유수형성기부터는 26°C(최고 30°C/최저 23°C)로 조절하였으며, 습도는 70~80%, 일장은 12시간의 조건을 유지하였다. 재배법은 파종후 15일묘를 wagner 포트(1/5000a)에 이양하여 15일 경과 후 30일 묘를 챔버에 처리를 하였다. 시비 및 관리는 관행 포트재배법에 의거하였으며, 조사시기는 생육단계별 처리 후 각각 7일에서 25일까지 7~10일 간격으로 3회 조사하였다. 조사내용은 생육특성 및 광합성량, 엽록소 함량, 수량 관련 형질 등을 조사하였다. 광합성 관련 형질은 Li-6400(USA)을 이용하여 광합성량, 증산율, 기공전도도 등 광합성관련 형질을 조사하였고, 엽록소 함량은 SPAD-502(JAPAN)를 이용하여 조사하였다.

결과 및 고찰

유묘기의 생육 반응

벼 유묘기의 생육반응(Table 1)은 일품벼는 초장이 대비구에 비해 CO₂ 농도 500, 700 ppm 처리구에서 시간이 길어질수록 더 길었고, 경수도 많아지는 경향이었다. 엽면적과 건물중도 CO₂ 농도가 높을수록 증가되어 처리 후 24일에는 700 ppm 처리구에서 대비구보다 엽면적이 30%, 건물중이 34% 증가되었다. 엽록소 함량(SPAD값)은 차이가 없었고, 광합성율은 처리 후 24일 경에는 대비구에 비해 500 ppm과 700 ppm에서 각각 105%, 140% 증가되었다.

추청벼도 대비구에 비해 CO₂ 농도 증가 처리구에서 초장이 길고 경수 및 엽면적과 건물중이 많아지는 경향으로 건물중은 대비구에 비해 CO₂ 농도 500 ppm과 700 ppm 처리구에서 각각 9%, 16% 증가되었다. 광합성율은 처리기간이 길어질수록 줄어들었으나 처리농도 간에는 처리 후 18일에 500 ppm과 700 ppm 처리구에서 대비구보다 46%, 107% 증가되었고, 24일에는 500 ppm구에서 대비구에 비해 14% 증가되었으나 700 ppm에서는 같은 경향이었다.

화성벼에서 초장은 처리 후 11일 경에는 CO₂ 농도 간 차이는 없었으나 처리 후 18일과 24일에는 대비구에 비해 길어졌고, 경수와 엽면적은 CO₂ 농도와 처리기간에 따라 증가되었다. 엽록소함량을 측정된 SPAD값은 40.0에서 48.0까지 나타났고 CO₂ 농도 간에는 차이가 없었다. 건물중은 처리기간과

CO₂ 농도가 증가될수록 많아지는 경향으로 처리 후 18일경에는 500 ppm과 700 ppm 처리구에서 대비구보다 각각 39%, 65% 증가되었다. 광합성율은 CO₂ 농도가 증가될수록 높았고, 처리 후 24일에 대비구에 비해 500 ppm과 700 ppm 처리구에서 140% 168% 증가되었다. 기공전도도와 증산량도 500, 700 ppm 처리구에서 높게 나타나는 경향이었다.

Jitla 등(1997)도 벼의 유묘기에 CO₂ 농도 700 ppm을 26일간 처리하였을 때 350 ppm에 비해 경수가 42% 증가되었고, Gesch et al(2002)도 30일 묘를 350 ppm과 700 ppm에서 10일 동안 처리한 결과 대비구에 비해 광합성량이 31% 증가되었다고 하여 본 실험의 결과와 같이 CO₂ 농도 증가는 벼에서 광합성율에 직접적으로 영향을 주는 것으로 나타났다.

이와 같이 세 품종 모두 CO₂ 농도가 높아지면 엽면적과 건물중이 증가되고 광합성율도 높아져서 벼의 유묘기 생육을 촉진시킨다는 것을 알 수 있었다.

유수형성기의 생육 반응

벼 유수형기에는(Table 2) 일품벼는 초장은 500 ppm과 700 ppm 처리구에서 대비구보다 길었으나 경수와 엽면적은 처리 후 14일부터는 증가되지 않았다. 건물중은 처리 후 14일에는 대비구보다 각각 2%, 7%로 약간 증가되었고 광합성율은 각각 143%, 175% 증가되어 큰 차이를 보였다.

그러나 처리 후 21일에는 건물중이 대비구에 비해 각각 13%, 19% 증가되었지만, 광합성율은 감소되었다. 기공전도도와 증산량은 처리 후 6일부터 계속 감소되는 경향이었다.

추청벼는 대비구와 CO₂ 농도 처리구 모두 초장과 경수가 약간 증가되는 경향이나 큰 차이는 없었다. 엽면적은 대비구에 비해 처리기간이 길어질수록 증가되어 처리 후 21일에는 500 ppm과 700 ppm 처리구에서 대비구보다 각각 3%, 13% 증가되어 건물중도 각각 3%, 7% 증가되었다. 광합성율은 처리 후 14일까지는 CO₂ 농도에 따라 증가되었으나 처리 후 21일에는 큰 차이가 없었다. 화성벼는 CO₂ 농도가 증가되고 처리기간이 길어질수록 초장이 길어졌으나 경수에는 차이가 없었다. 엽면적도 마찬가지로 차이가 없었으나 건물중은 처리 후 14일에 500 ppm과 700 ppm 처리구에서 대비구보다 각각 5%, 9% 증가되었다. 광합성율과 기공전도도, 증산량은 처리기간이 길어질수록 낮아지지만 CO₂ 농도 처리구에서 대비구보다 대체로 높아지는 경향이었다. 이와 같이 벼 유묘기에 비해 유수형성기에는 CO₂ 농도가 생육에 미치는 영향이 줄어드는 경향을 볼 수 있었다.

출수기의 생육 반응

벼 출수기에 CO₂ 농도를 처리한 결과는 표 3과 같다. 일품벼에서 출수율은 출수초기인 처리 후 5일경에는 500 ppm과 700 ppm 처리구가 대비구에 비해 180%, 200% 높았으나 처리 후 12일부터는 같은 경향으로 출수 초기에는 CO₂ 농도가 출

Table 1. Influence of CO₂ enrichment on the growth and photosynthetic factors at the seedling stage of rice plant.

Treatment	CO ₂ (ppm)	Plant height (cm/pl.)	Tillers (No./pl.)	Leaf area (cm ² /pl.)	SPAD value	Dry weight (g/pl.)	Photosynthetic rate [†]	Stomatal conductance ^{††}	Evapotran spiration rate [‡]		
Ilpum -byeo	0 day	Control*	23.6	1.7	12.6	31.2	0.1	-	-	-	
	11 day	Control	49.2	8.0	86.8	45.8	0.9	23.1	0.202	2.69	
		500	53.0	11.1	123.1	47.9	1.3	32.0	0.150	2.26	
		700	55.0	11.9	130.6	47.8	1.4	41.0	0.139	2.25	
	18 day	Control	55.0	10.0	153.4	42.6	1.9	18.4	0.181	2.42	
		500	55.7	13.0	200.8	43.1	2.9	29.8	0.141	2.20	
		700	56.1	14.1	203.9	43.0	2.8	32.4	0.250	3.56	
	24 day	Control	64.8	14.2	365.8	45.1	3.8	12.8	0.157	2.01	
		500	66.6	14.6	384.6	46.1	4.6	26.3	0.114	2.25	
		700	67.8	15.6	477.0	44.0	5.1	30.8	0.208	3.07	
	Chucheong -byeo	0 day	Control*	31.7	4.7	24.5	40.3	0.2	-	-	-
		11 day	Control	54.7	9.3	117.0	45.4	1.2	24.2	0.175	2.22
			500	55.2	9.7	121.3	46.2	1.3	28.4	0.102	1.68
			700	55.9	10.3	122.7	46.0	1.4	35.7	0.096	1.64
		18 day	Control	61.2	13.2	212.1	40.8	3.0	15.3	0.052	0.79
500			64.1	15.1	235.9	42.0	3.4	22.3	0.146	2.17	
700			63.6	15.3	236.5	41.0	3.9	31.8	0.128	2.13	
24 day		Control	65.8	14.4	407.4	43.2	4.3	18.6	0.284	3.24	
		500	67.4	15.3	430.7	43.4	4.7	21.2	0.112	1.84	
		700	67.6	16.2	471.8	44.1	5.0	28.8	0.056	1.02	
Hwaseong -byeo		0 day	Control*	34.4	3.8	22.8	40.1	0.2	-	-	-
		11 day	Control	57.2	7.3	107.3	46.6	1.0	19.7	0.116	1.57
			500	57.3	8.1	111.4	48.3	1.3	21.4	0.070	1.18
			700	57.6	9.0	117.7	46.1	1.5	40.4	0.244	3.37
		18 day	Control	61.9	9.3	128.6	40.5	2.3	13.3	0.064	0.89
	500		65.2	10.9	180.2	43.1	3.2	26.9	0.211	2.92	
	700		65.5	12.9	224.3	42.5	3.8	38.0	0.171	2.64	
	24 day	Control	70.0	14.3	343.5	44.8	5.0	10.0	0.071	1.16	
		500	71.5	14.6	365.9	41.9	5.3	24.4	0.170	2.44	
		700	71.6	16.2	465.9	44.0	5.9	26.8	0.200	3.06	

†Photosynthetic rate · μmol m⁻²s⁻¹††Stomatal conductance : mol m⁻²s⁻¹‡Evapotranspiration rate . mmol H₂O m⁻²s⁻¹, *Control . 350 ppm

수를 촉진시킨다는 것을 알 수 있었다. 엽면적은 경당 엽면적을 나타낸 결과 처리후 5일에는 500 ppm과 700 ppm 처리구가 대비구에 비해 각각 26%, 45% 증가되었으나 그 이후부터는 점차 감소되는 경향이였다. 건물중도 마찬가지로 경향이였으나, 광합성율은 처리기간이 길수록 감소되지만 대비구에 비해 CO₂ 농도 처리구가 증가되는 경향이였다.

추청벼의 출수율도 처리후 5일에는 CO₂ 농도가 증가될수록 높았으나 그 이후부터는 대비구와 비슷한 경향이였다. 경당 엽면적은 대비구보다 CO₂처리구에서 높았으나 건물중은 큰 차이가 없었다. 광합성율과 기공전도도, 증산량 등은 감소하는

경향을 보여 등숙 후기에는 CO₂ 농도가 증가되면 노화를 촉진시키는 것으로 판단되었다

화성벼는 처리 전 50% 출수된 것을 처리한 결과 출수율은 대비구와 큰 차이가 없었고 CO₂ 농도가 높을수록 엽면적과 건물중이 감소되고 노화가 촉진되어 엽록소함량(SPAD) 및 광합성율이 감소되는 것으로 나타났다

수량 반응

벼 출수직전부터 수확기까지 CO₂ 농도를 처리(55일간 처리)한 결과 표 4와 같이 나타났다 일품벼의 경우 식물체당 이삭

Table 2. Influence of CO₂ enrichment on the growth and photosynthetic factors at the panicle initiation stage of rice plant.

Treatment	CO ₂ (ppm)	Plant height (cm/pl.)	Tillers (No./pl.)	Leaf area (m ² /pl.)	SPAD value	Dry weight (g/pl.)	Photosynthetic rate [†]	Stomatal conductance ^{††}	Evapotran spiration rate [‡]		
Ilpum -byeo	0 day	Control*	74.8	9.3	684.0	41.6	7.7	5.9	0.012	0.23	
	6 day	Control	74.4	8.8	668.3	41.7	8.8	12.0	0.201	2.92	
		500	74.1	9.8	684.3	40.0	11.5	10.5	0.055	1.01	
		700	75.6	12.7	795.2	40.3	11.0	5.1	0.026	0.52	
	14day	Control	74.8	12.5	752.2	33.3	12.2	3.2	0.017	0.41	
		500	75.4	12.3	797.2	32.5	12.5	7.8	0.015	0.56	
		700	77.7	12.3	838.0	32.8	13.0	8.8	0.011	0.42	
	21day	Control	80.7	11.3	777.9	33.1	13.3	7.8	0.009	0.15	
		500	83.1	11.0	794.9	33.1	15.0	5.3	0.006	0.11	
		700	81.3	11.7	843.0	30.6	15.8	5.8	0.004	0.07	
	Chucheong -byeo	0day	Control*	72.1	10.7	666.4	33.6	8.3	8.1	0.082	1.45
		6day	Control	76.7	11.8	737.8	33.8	10.5	2.9	0.046	0.73
500			76.0	13.5	749.0	35.3	10.7	11.3	0.044	0.82	
700			77.1	15.0	824.9	33.9	12.8	25.4	0.010	1.78	
14day		Control	77.6	12.8	693.7	31.8	13.3	6.5	0.012	0.43	
		500	80.9	13.3	703.7	31.0	14.2	9.4	0.010	0.36	
		700	81.9	13.0	745.7	28.8	14.3	10.0	0.003	0.51	
21day		Control	81.8	13.7	775.8	29.0	15.3	10.1	0.010	0.18	
		500	83.4	14.5	799.4	30.2	15.8	7.5	0.011	0.22	
		700	86.2	13.2	875.7	27.3	16.3	9.02	0.009	0.21	
Hwaseong -byeo		0day	Control*	81.0	10.0	704.1	38.9	9.0	12.3	0.142	2.21
		6day	Control	81.3	10.0	768.5	40.5	11.7	9.4	0.132	2.14
	500		79.4	12.3	782.8	39.3	12.3	10.3	0.058	1.05	
	700		81.7	11.5	774.3	38.7	12.0	4.1	0.025	0.52	
	14day	Control	81.3	12.8	780.3	32.6	13.3	0.9	0.001	0.02	
		500	82.9	12.5	790.7	30.3	14.0	2.5	0.002	0.17	
		700	83.3	13.2	796.6	32.0	14.5	7.5	0.007	0.28	
	21day	Control	89.2	11.7	723.4	32.9	15.5	6.1	0.003	0.04	
		500	88.7	11.3	701.4	29.6	15.3	4.7	0.009	0.17	
		700	90.4	11.3	691.2	30.7	15.8	9.0	0.004	0.07	

[†]Photosynthetic rate : $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$

^{††}Stomatal conductance : $\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$

[‡]Evapotranspiration rate : $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$, *Control . 350 ppm

수는 500 ppm 처리구에서 많았지만 이삭당립수는 대비구보다 적었고 등숙율은 높게 나타나 식물체당 수량은 가장 양호하였다. 추청벼와 화성벼도 같은 경향으로 식물체당 수량은 대비구보다 약간 증가되었으나 출수기에 CO₂ 농도를 증가시킬 경우 수량에 미치는 영향은 거의 없고 식물체의 노화를 촉진시키는 것으로 생각된다.

DeCosta *et al* (2003a, 2003b)은 개방형 환경조절챔버를 이용하여 대기 중의 CO₂ 농도보다 200 ppm 증가시켰을 때 광합성률이 계절별로 22-23%, 51-57% 증가되고, 잎과 이삭 그리고 전 식물체 생산량, 건근중, 주당 이삭수 등이 증가되었으

며, 수량이 24~39% 증가되었다고 하였다. 또 다른 연구에서 Kim *et al* (2001, 2003)과 Kobayashi *et al.* (2001)은 벼의 생육기간 중 CO₂ 농도를 증가시켰을 때 질소비료 시용에 따라 식물체 생산 및 수량에 미치는 영향이 달라지기 때문에 질소비료의 중요성을 강조하였다

이와 같이 벼의 생육단계별 CO₂ 농도를 처리한 결과 영양생장기인 유효기에는 CO₂ 농도가 증가할수록 식물체 및 광합성속도 증가율이 높았다. 그러나 처리기간이 길어질수록 CO₂ 농도가 높은 처리구에서 엽이 황화되는 현상이 나타났는데, 이러한 이유는 수분과 비료 등 같은 조건하에서 CO₂ 농도가 높

Table 3. Influence of CO₂ enrichment on the growth and photosynthetic factors at the heading stage of rice plant.

Treatment	CO ₂ (ppm)	Heading ratio (%)	Leaf area (m ² /stem)	SPAD value	Dry weight (g/stem)	Photosynthetic rate [†]	Stomatal conductance ^{††}	Evapotran spiration rate [‡]		
Ilpum -byeo	0 day	Control*	0	84.8	33.0	2.3	-	-		
	5 day	Control	35	83.8	25.7	2.2	6.0	0.040	0.43	
		500	63	105.7	29.2	2.7	8.3	0.028	0.44	
		700	70	121.1	31.2	2.7	13.5	0.041	0.60	
	12 day	Control	79	94.1	34.6	3.3	8.7	0.062	0.84	
		500	73	71.7	33.1	2.5	10.2	0.029	0.60	
		700	78	76.4	31.1	2.5	11.6	0.028	0.64	
	19 day	Control	85	71.0	31.8	2.8	0.6	0.020	0.35	
		500	88	69.4	32.6	3.5	8.1	0.033	0.72	
		700	88	65.0	30.8	2.8	6.6	0.012	0.28	
	26 day	Control	95	76.4	24.2	4.5	1.0	0.020	0.32	
		500	95	89.0	28.6	4.2	6.9	0.036	0.72	
		700	90	60.6	16.8	2.9	6.3	0.019	0.40	
	Chucheong -byeo	0 day	Control*	0	61.4	31.9	2.3	-	-	
		5 day	Control	35	63.9	21.2	1.9	8.3	0.037	0.52
			500	38	91.6	23.7	2.2	10.3	0.020	0.33
			700	49	88.1	23.3	1.9	9.8	0.007	0.12
		12 day	Control	79	62.2	27.0	2.4	9.1	0.040	0.67
500			69	65.4	26.3	2.3	8.5	0.006	0.13	
700			76	66.5	26.1	2.2	9.9	0.008	0.19	
19 day		Control	90	75.2	26.4	2.7	2.7	0.003	0.06	
		500	88	74.8	27.7	2.8	7.6	0.010	0.25	
		700	93	62.5	28.0	2.7	4.7	0.003	0.07	
26 day		Control	85	43.5	20.8	2.7	5.9	0.017	0.31	
		500	89	40.7	19.3	1.9	6.6	0.016	0.33	
		700	92	56.6	20.0	2.9	2.5	0.007	0.17	
Hwaseong -byeo		0 day	Control*	50	80.4	34.6	2.0	-	-	
		5 day	Control	81	79.8	28	2.7	9.9	0.084	1.19
			500	79	69.4	30.8	2.3	7.3	0.025	0.40
			700	83	79.7	30	2.6	23.9	0.111	1.63
		12 day	Control	82	73.5	34.0	2.9	7.6	0.066	1.20
	500		85	77.0	31.9	3.0	11.7	0.052	1.10	
	700		88	65.5	29.8	3.2	13.6	0.050	1.08	
	19 day	Control	83	66.2	28.2	3.3	1.7	0.003	0.06	
		500	84	46.1	26.5	3.4	5.2	0.011	0.26	
		700	86	51.7	27.8	2.8	4.9	0.003	0.07	
	26 day	Control	86	32.1	15.5	2.2	7.5	0.064	1.13	
		500	84	30.1	15.4	2.1	5.5	0.026	0.55	
		700	87	26.2	14.1	1.7	0.7	0.002	0.03	

† Photosynthetic rate : $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ †† Stomatal conductance : $\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ‡ Evapotranspiration rate : $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$, *Control : 350 ppm

은 처리구에서 광합성율이 증가되고 생육이 촉진되어 양분부족 증상이거나, 챔버내의 생육환경 조건이 장기간 처리시 부

적합한 것으로 생각되어진다. 생식생장으로 전환되는 유수형성기에는 CO₂ 농도 처리기간이 길어질수록 대비구와 큰 차이

Table 4. Influence of CO₂ enrichment on the yield factors from the heading stage to the harvesting stage in rice plant.

Varieties	CO ₂ (ppm)	Panicles (No./pl.)	No. of grains (No./panicle)	Grams weight (g/stem)	Head rice ratio (%)	Yield (g/pl.)
Ilpum -byeo	Control*	12.0	84.2	2.0	74	23.8
	500 ppm	14.3	73.2	2.0	83	28.4
	700 ppm	12.3	89.3	2.2	78	27.0
Chucheong -byeo	Control	19.3	55.2	1.4	89	26.6
	500 ppm	18.0	63.2	1.5	87	26.8
	700 ppm	20.7	56.4	1.3	86	27.1
Hwaseong -byeo	Control	15.3	77.1	1.9	83	29.1
	500 ppm	18.7	70.1	1.6	82	30.4
	700 ppm	17.7	71.8	1.9	88	32.6

*Control : 350 ppm

가 없었으며 대비구에 비해 식물체가 노화되는 경향이였다. 출수기에도 처리기간이 길어질수록 CO₂ 농도가 높은 처리구에서는 노화가 촉진되어 잎이 변색되고 생육기간을 단축시키는 경향이였다 수량은 출수기 이후에 CO₂ 농도를 처리하여 큰 차이가 없었으나 전 생육기간 동안 대기 CO₂ 농도보다 높게 처리할 경우 대비구에 비해 수량이 증가되어질 것으로 생각 된다.

CO₂ 농도에 따른 광합성과 증산율의 관계

CO₂ 농도에 따른 광합성속도와 증산율의 관계를 알아본 결과 그림 1과 같다. 광합성속도가 증가되면 증산량도 증가되는데, CO₂ 농도가 낮은 처리구보다 높은 처리구에서는 광합성속도 증가에 따른 증산량이 낮은 것으로 나타나서 대기중의 CO₂ 농도가 높으면 수분 손실이 줄어들어 수분 이용면에서는 효율적이라고 생각되어진다. Widodo *et al* (2003)도 벼의 전 생육기간 동안 CO₂농도 350 ppm과 700 ppm에서 수분 및 한해스트레스를 시험한 결과 한발처리 효과는 증가된 CO₂ 농도 처리구보다 자연구에서 자라는 식물체에 더 심하게 나타났고, 증

가된 CO₂ 농도 처리구에서는 주간의 광합성량이 증가되고 광합성 관련 변수가 더 넓었으며 한발을 견디는 기간이 길고 회복력도 빨랐다고 하였다. 그리고 유수형성기에 한발유도 후에 수분을 공급했을 때 24일동안 한발처리를 처리한 자연상태 CO₂ 농도처리구보다 증가된 CO₂ 농도 처리구에서 6-8일 동안 한발을 처리한 구에서 더 많은 수분을 흡수하였다. 개화기에 한발처리를 한 결과 증가된 CO₂ 농도 처리구에서는 수분을 재공급한 후 16일에 회복이 되었으나 자연상태구에서는 회복력이 21%나 지연되었다. 이와 같은 결과로 대기 CO₂ 농도가 증가된 기후에서 자라는 벼는 한발에 더 잘 견딜 수 있다고 하였다.

적 요

대기중의 CO₂ 농도 증가에 따른 벼의 생육단계별 생육 및 광합성 관련 반응을 관찰한 결과는 다음과 같았다

1. 벼 유효기에는 CO₂ 농도가 증가하고 처리기간이 길어질수록 일품벼, 추청벼, 화성벼 모두 초장, 경수, 엽면적이 증가하였고 처리후 18일경에는 대비구에 비해 500 ppm, 700 ppm에서 건물중 35~47% 증가하는 경향이였다(3품종 평균).
2. 벼 유효기의 광합성율은 높은 CO₂ 농도에서는 증가되었으나 처리기간이 길어져서 생육이 진전될수록 약간 감소하는 경향이였다.
3. 유수형성기 및 출수기에는 CO₂ 농도가 증가함에 따라 초장, 건물중은 증가되었으나 SPAD값과 광합성속도, 기공전도도, 증산율 등은 처리기간이 길어질수록 감소하였다.
4. 출수 직전부터 55일간 처리한 벼의 수량은 대비구에 비해 500 ppm, 700 ppm 처리구에서 세 품종 모두 큰 차이가 없었다.
5. CO₂ 농도에 따른 광합성 속도 및 증산량은 농도가 높아지고 광합성속도가 빨라질수록 증산량은 낮아져 수분 이용 효율이 높은 것으로 나타났다

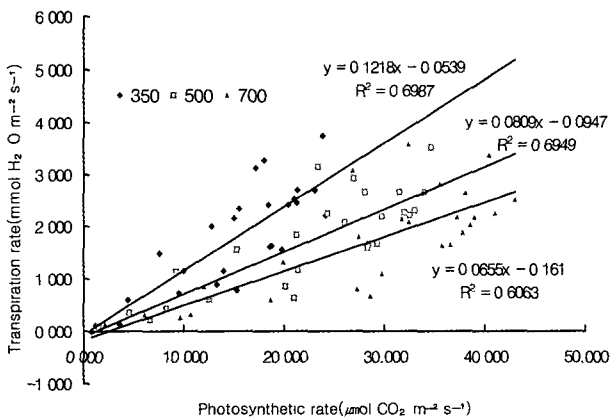


Fig. 1. Changes of photosynthetic rate and transpiration according to the concentration of carbon dioxide

인용문헌

- Baker, J. T., L. H. Jr. Allen, K. J. Boote, and N. B. Pickering. 2000. Direct effects of atmospheric carbon dioxide concentration on whole canopy dark respiration of rice. *Global Change Biology* 6 : 275-286.
- De Costa, W. A. J. M., W. M. W. Weerakoon, R. M. I. Abeywardena, and H. M. L. K. Herath. 2003a. Response of photosynthesis and water relations of rice (*Oryza sativa*) to elevated atmospheric carbon dioxide in the subhumid zone of Sri Lanka. *Journal of Agronomy and Crop Science* 189 : 71-82.
- De Costa, W. A. J. M., W. M. W. Weerakoon, H. M. L. K. Herath, and R. M. I. Abeywardena. 2003b. Response of growth and yield of rice (*Oryza sativa*) to elevated atmospheric carbon dioxide in the subhumid zone of Sri Lanka. *Journal of Agronomy and Crop Science* 189 : 83-95.
- Gesch, R. W., J. C. Vu, K. J. Boote, L. H. Allen Jr, and G. Bowes. 2002. Sucrose-phosphate synthase activity in mature rice leaves following changes in growth CO₂ is unrelated to sucrose pool size. *New Phytologist* 154 : 77-84.
- Kim, H. -Y., M. Liefferring, K. Kobayashi, M. Okada, M. W. Mitchell, and M. Gumpertz. 2003. Effects of free-air CO₂ enrichment and nitrogen supply on the yield of temperate paddy rice crops. *Field Crops Research* 83 : 261-270.
- Kim, H. -Y., M. Liefferring, S. Miura, K. Kobayashi, and M. Okada. 2001. Growth and nitrogen uptake of CO₂-enriched rice under field conditions. *New Phytologist* 150 : 223-229.
- Kobayashi, K., M. Liefferring, and H. -Y. Kim. 2001. Growth and yield of paddy rice under free-air CO₂ enrichment. In : Shiyomi, M. and Koizumi, H. (Eds), *Structure and Function in Agroecosystem Design and Management*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp 371-395.
- Tako, Y., R. Arai, K. Otsubo, and K. Nitta. 2001. Application of crop gas exchange and transpiration data obtained with CEEF to global change problem. *Advances in Space Research* 27 : 1541-1545.
- Watling, J. R. and M. C. Press. 2000. Infection with the parasitic angiosperm *Striga hermonthica* influences the response of the C3 cereal *Oryza sativa* to elevated CO₂. *Global Change Biology* 6 : 919-930.
- Weerakoon, W. M. W., K. T. Ingram, and D. D. Moss. 2000. Atmospheric carbon dioxide and fertilizer nitrogen effects on radiation interception by rice. *Plant Soil* 220 : 99-106.
- Widodo, W., J. C. V. Vu, K. J. Boote, J. T. Baker, and L. H. Allen Jr. 2003. Elevated growth CO₂ delays drought stress and accelerates recovery of rice leaf photosynthesis. *Environmental and Experimental Botany* 49 : 259-272.
- Ziska, L. H., O. Namuco, T. Moya, and J. Quilang. 1997. Growth and yield response of field-grown tropical rice to increasing carbon dioxide and air temperature. *Agronomy Journal* 89 : 45-53.