

질소영양 상태에 따른 벼 군락의 광 이용효율 변화

이동윤 · 김민호 · 이규종 · 이변우

서울대학교 농업생명과학대학 식물생산과학부

(2006년 8월 21일 접수; 2006년 9월 5일 수락)

Changes in Radiation Use Efficiency of Rice Canopies under Different Nitrogen Nutrition Status

Dong-Yun Lee, Min-Ho Kim, Kyu Jong Lee, and Byun-Woo Lee

¹Department of Plant Science, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

(Received August 21, 2006; Accepted September 5, 2006)

ABSTRACT

Radiation use efficiency (RUE), the amount of biomass produced per unit intercepted photosynthetically active radiation (PAR), constitutes a main part of crop growth simulation models. The objective of the present study was to evaluate the variation of RUE of rice plants under various nitrogen nutritive conditions. From 1998 to 2000, shoot dry weight (DW), intercepted PAR of rice canopies, and nitrogen nutritive status were measured in various nitrogen fertilization regimes using japonica and Tongil-type varieties. These data were used for estimating the average RUEs before heading and the relationship between RUE and the nitrogen nutritive status. The canopy extinction coefficient (K) increased with the growth of rice until maximum tillering stage and maintained constant at about 0.4 from maximum tillering to heading stage, rapidly increasing again after heading stage. The DW growth revealed significant linear correlation with the cumulative PAR interception of the canopy, enabling the estimation of the average RUE before heading with the slopes of the regression lines. Average RUE tended to increase with the increased level of nitrogen fertilization. RUE increased approaching maximum as the nitrogen nutrition index (NNI) calculated by the ratio of actual shoot N concentration to the critical N concentration for the maximum growth at any growth stage and the specific leaf nitrogen (SLN; g/m² leaf area) increased. This relationship between RUE (g/MJ of PAR) and N nutritive status was expressed well by the following exponential functions:

$$RUE = 3.13 \{1 - \exp(-4.33NNI + 1.26)\}$$

$$RUE = 3.17 \{1 - \exp(-1.33SLN + 0.04)\}$$

The above equations explained, respectively, about 80% and 75% of the average RUE variation due to varying nitrogen nutritive status of rice plants. However, these equations would have some limitations if incorporated as a component model to simulate the rice growth as they are based on relationships averaged over the entire growth period before heading.

Key words : Rice, Nitrogen nutrition index, Specific leaf nitrogen, Extinction coefficient, Radiation use efficiency

I. 서 언

작물을 재배하는데 있어 생육상태의 정확한 예측은

효율적인 재배관리를 위해 매우 중요한데, 최근에는 비료 등 생산자재의 이용효율을 높이고 동시에 환경부하를 경감하기 위한 재배관리 의사결정에 식물생장 모

델을 이용하려는 노력이 증가하는 추세이다.

작물생장을 정확하게 모의하기 위해서는 작물의 건물생산속도에 영향을 주는 요인에 대한 광범위하고 정확한 지식이 필요하다. 병충해 등이 제어된 상황에서 작물의 건물생산속도에 영향을 주는 요인은 크게 수분, 광, CO₂, 무기양분 등이다. 식물의 성장속도는 이들 환경자원의 식물체에 의한 흡수량에 비례하기 때문에, 식물성장 모델에 있어서는 식물 군락의 광 흡수와 흡수한 광의 biomass로의 전환효율(RUE, radiation use efficiency), 군락의 CO₂ 흡수, 즉 광합성과 생장, 식물의 증산량과 생장량과의 관계 즉 물 이용효율(WUE, water use efficiency)과의 관계 등을 biomass 추정모델에 이용하고 있다.

식물군락이 차단 혹은 흡수한 일사의 biomass로의 전환효율을 광 이용효율(RUE, radiation use efficiency)이라고 하는데, 광합성 유효복사(PAR, photosynthetically active radiation; MJ/m²) 또는 일사의 군락에 의한 차단 또는 흡수량에 대한 탄소동화산물 양(DW, dry weight; g/m²)의 비율로 나타낸다(Monteith, 1972). Sinclair and Horie(1989)의 이론적 분석에 의하면 RUE는 엽의 광합성과 curve linear한 관계가 있다.

광합성량과 엽의 질소함량 간에는 거의 직선적인 정(+)의 상관관계가 성립한다고 한다(Murata, 1961; Osada, 1966; Lee, 1976). 비엽질소농도(SLN, specific leaf nitrogen)는 비엽면적(SLA, specific leaf area; m²/g)에 대한 엽 중 질소농도(g/g)의 비로서, 단위 엽면적 당 질소함량을 의미하며 상부 잎일수록 높다고 한다(Muchow, 1988). 이는 생육이 진전됨에 따라 군락 내에서 상하위엽 간에 질소의 재분배가 진행되기 때문이며, 이같이 불균일한 질소의 분포로 인해 유지작물에서는 SLN으로써 광 이용효율(RUE, radiation use efficiency)의 추정이 다소 어렵다고 한다(Bange *et al.*, 1997). 그러나 일반적으로 SLN이 증가할수록 RUE도 곡선적으로 증가한다고 하였다(Allison *et al.*, 1997; Sinclair and Horie, 1989). Sinclair and Horie(1989)는 벼의 SLN이 증대됨에 따라서 RUE가 증가하여 최대 1.5 g/MJ of solar radiation에 달하며 낮은 SLN에서 RUE의 반응이 민감하다고 하였다. 어느 생육시기에 있어서 식물생장률이 최대가 되는 식물체 중의 질소농도를 한계질소농도(Nc, critical nitrogen concentration)라고 하는데, 한계질소농도는 식물의 건

물중이 증가함에 따라서 낮아진다. Greenwood *et al.*(1990)은 C3과 C4 작물에 대한 Nc-W 관계식을 제시하였는데, 식물에 따라서 조직 및 형태학적 특성이 다르기 때문에 작물의 질소영양 상태를 파악하기 위해서는 각 작물별로 Nc-curve의 설정이 필요하다(Lemaire and Gastal, 1997). 밀(Justes *et al.*, 1994), 옥수수(Pinet and Lemaire, 1999) 뿐만 아니라 벼(Cui *et al.*, 2002)에서도 Nc-curve가 설정되어 있다. Nc-curve는 비록 품종, 기후, 토양조건이 다르다 하더라도 같은 작물 내에서는 동일하게 적용할 수 있다고 한다(Pinet and Lemaire, 1999). 작물의 생장과 관련된 질소영양 상태는 Nc-curve에서 구한 한계질소농도(Nc)와 지상부의 실제 질소농도(Na)와의 비로 파악할 수 있는데 이를 질소영양지수(NNI, nitrogen nutrition index; Na/Nc)라고 한다. Lemaire and Gastral(1997)은 옥수수의 NNI와 RUE의 관계를 검토하여 NNI가 0.5-1.0 사이에서 RUE와 직선적인 정(+)의 상관관계가 성립된다고 하였다. 이외에도 옥수수(Muchow and Davis, 1988), 콩(Muchow *et al.*, 1993), 밀(Green, 1987) 등에서 NNI와 RUE의 관계에 대하여 보고되었으나, 벼에서는 연구된 바 없다. 일부 벼에서 이루어진 RUE 추정연구는 NNI나 SLN의 어느 특정한 범위로 한정시켰기 때문에, 다양한 시비조건에 따른 포괄적인 값을 제시하지 못했다. 또한 Sinclair and Horie(1989)에 의해서 벼와 콩, 옥수수에서 이론적인 SLN과 RUE의 관계가 설정되고 보고되었지만, 이는 이론적인 고찰이고 벼에서 실제 실험을 통한 RUE와 질소영양 상태와의 관계를 검토한 결과는 보고되지 않았다. 또한 지금까지 벼에서 RUE를 포장조건에서 조사한 보고는 많지 않아서, 1.1 g/MJ of solar radiation(Kiniry *et al.*, 1989)와 1.39 g/MJ(Horie and Sakuratani, 1985) 정도가 보고되었을 뿐이다.

따라서 벼에서의 기상환경, 품종, 시비조건, 재배양식 등 다양한 조건에서 광 이용효율(RUE)과 NNI 및 SLN과의 관계 등에 대한 실험적인 연구가 필요하다. 이 연구는 벼의 질소영양 상태와 RUE와의 관계를 구명하여 벼 성장모델 구축을 위한 기초 자료를 얻고자 수행되었다.

II. 재료 및 방법

벼의 질소영양 상태와 광 이용효율과의 관계를 검토

하고자 1998년부터 2000년까지 3개년에 걸쳐 서울대학교 농업생명과학대학 부속농장에서 실험을 수행하였다. 실험포장의 토양은 사질식양토로 유기물함량과 CEC가 비교적 낮은 토양이었다.

다. 특히 실험 4의 건담직파재배 실험에서는 완효성 비료인 LCU(Latex coated urea, 성분량 32%)와 IBDU (Isobutylidene diurea, 성분량 31%)를 사용하였다.

2.1. 실험개요

1998년부터 2000년도까지 3개년에 걸친 실험의 개요는 Table 1과 같다. 시험구 배치는 난괴법 3반복으로 하였다.

질소, 인산, 가리의 시비처리는 Table 2, 3과 같으며, 질소는 요소(성분량 46%), 인산은 용과린(성분량 20%), 가리는 염화가리(성분량 60%)를 사용하였

2.2. 건물중 및 질소함량 조사

엽면적, 건물중 및 질소함량을 조사하였다. 조사 간격은 3개년 모두 이앙 후 10일 간격 내외로 하였다. 엽면적은 처리구 당 평균적인 3주를 예취하여 엽, 줄기, 이삭 등으로 분리한 후 엽면적측정기(CI-203, CID社)로 측정하였으며, 분리된 엽, 줄기, 이삭을 72°C Dry Oven에서 72시간 건조하여 건물중을 측정

Table 1. Summary of rice cultivars and cultural conditions used for the experiments

	Experiment 1 (2000)	Experiment 2 (2000)	Experiment 3 (1999)	Experiment 4 (1998)
Rice cultivars	Odaebyeo, Hwasungbyeo Dongjinbyeo	Hwasungbyeo Dasanbyeo	Hwasungbyeo Dasanbyeo	Hwasungbyeo
Dates of sowing	25 April	25 April	23 April	29 April
Dates of transplanting	27 May	19 May	16 May	Direct seeding
Planting density	30 cm×15 cm (3 seedlings per hill)	30 cm×15 cm (3 seedlings per hill)	30 cm×15 cm (3 seedlings per hill)	Drill seeded

Table 2. Amount and date of fertilizer application treatment in experiment 1, 2, 3

	Basal fertilizer		Tillering fertilizer		Panicle fertilizer	Total (kg/10a)
Exp. 1	19 May	2 June			27 July	
0 N						0
14 N	7.0	4.2			2.8	14
22 N	11.0	6.6			4.4	22
P	7.0					7
K	4.9				2.1	7
Exp. 2	18 May	1 June	13 June	2 July	26 July	
12 N	6.0	3.6			2.4	12
24 N	7.2	4.8	4.8	2.4	4.8	24
36 N	10.8	7.2	7.2	3.6	7.2	36
48 N	16.0	9.6	9.6	4.8	9.6	48
P	10.0					10
K	7.0				3.0	10
Exp. 3	18 May	1 June			26 July	
6 N	2.4	1.8			1.8	6
12 N	4.8	3.6			3.6	12
18 N	7.2	5.4			5.4	18
24 N	9.6	7.2			7.2	24
30 N	12.0	9.0			9.0	30
P	10.0					10
K	7.0				3.0	10

Table 3. Summary of fertilizer application treatment in experiment 4

Exp. 4	Basal Fertilizer			Tillering Fertilizer 1st			T.F. 2nd	Panicle Fertilizer	Note
	Urea	LCU	IBDU	Urea	LCU	IBDU	Urea	Urea	
T1	50%			25%			0%	25%	
T2				25%			50%	25%	
T3		100%							
T4					100%				
T5			100%						
T6						100%			
T7									No fertilizer

*Amount of fertilizer application : Urea treatment, N-P₂O₅-K₂O = 15-6.6-7.8 kg/10a
 LCU, IBDU treatment, N-P₂O₅-K₂O = 11-6.6-7.8 kg/10a

하였다. 건물중을 측정 한 시료는 고속마쇄기로 잘게 분쇄하여 자동시료분석기(Auto-Kjeltec 1038, Tecator 사)로 전질소 분석을 하였다.

다음과 같이 계산하였다.

$$PAR_i = (1 - e^{-K \cdot LAI}) \times PAR_o \tag{3}$$

2.3. 질소영양지수 및 비엽질소농도

벼의 질소영양지수(NNI)는 벼의 한계질소농도곡선에서 구한 한계질소농도(Nc, %)와 현재의 질소농도(Na, %)의 비로 다음과 같이 계산하였다.

$$NNI = \frac{Na}{Nc} \tag{1}$$

Nc는 벼의 한계질소농도곡선(Cui et al., 2002)에 의하여 계산하였다.

비엽질소농도(SLN, specific leaf nitrogen; gN/m² leaf)는 비엽면적(SLA, specific leaf area; m² leaf/g leaf dry weight)에 대한 엽의 질소농도(gN/g leaf dry weight)의 비로 계산하였다.

2.4. 흡광계수 및 광합성 유효복사의 균락 차단

벼의 흡광계수(K, light extinction coefficient)를 구하기 위해서 실험 2의 12 kgN/10a 실험구에 균락상부에 quantum sensor를 균락하부에 line quantum sensor(Li-Cor inc., USA)를 설치하여 생육기간 중 연속 측정하였으며, 흡광계수(K)는 아래와 같이 계산하였다. 여기서 PAR₀는 하루 중 입사된 전체 PAR flux이고, PAR_b는 토양에 도달한 전체 PAR flux이며, LAI는 엽면적지수이다.

$$K = \frac{\ln(Pa_b / RPARR_o)}{LAI} \tag{2}$$

균락에 의한 광합성 유효복사(PAR) 차단(interception)은 엽면적지수(LAI)와 위에서 구한 K로부터

III. 결과 및 고찰

3.1. 벼 균락의 흡광계수

흡광계수(K, light extinction coefficient)는 입사된 광의 균락 내부로의 투과와 균락 내부의 광 분포를 결정하는데, 식물균락의 초형과 밀접한 관계가 있다. Fig. 1은 12 kg N/10a 조건에서 전 생육기간동안 화성벼와 다산벼의 흡광계수(K)의 변화를 나타낸 것이다. 이앙 후 최고분얼기까지는 K값이 증가하였는데, 이 시기에는 화성벼의 K값이 다산벼보다 높았다. 화성벼의 K값은 생육초기 0.3에서 최고분얼기 0.4로 0.1이 증가한 반면, 다산벼의 K값은 0.2에서 0.4로 0.2만큼 증가했다. 비록 화성벼의 K값이 다산벼의 K값보다 생육 초기부터 높았지만, 균락의 밀폐는 거의 동일한 시점(최고분얼기)에서 이루어졌다. 이는 상대적으로 화성벼에 비해 다산벼의 초형이 생육초기부터 직립해 있기 때문에 판단된다.

균락이 거의 밀폐되는 최고분얼기 이후 출수전까지는 0.4에 이르는 일정한 값을 보였다. 이삭이 나오는 출수기 이후부터 두 품종 모두 K값이 증가하였는데, 호숙기가 끝나는 시점까지는 거의 직선적으로 증가하다가 등숙이 거의 완료되는 시점에서는 화성벼는 0.8 내외로 다산벼는 0.7 내외의 값을 보였다. 출수 이후 상대적으로 화성벼의 K값 증가폭이 다산벼보다 컸는데, 이는 japonica인 화성벼의 이삭이 지엽과 비슷한 중상부에 위치한 반면, 통일계인 다산벼는 상대적으로 화성벼보다는 지엽보다 낮은 곳에 위치하기 때문이며,

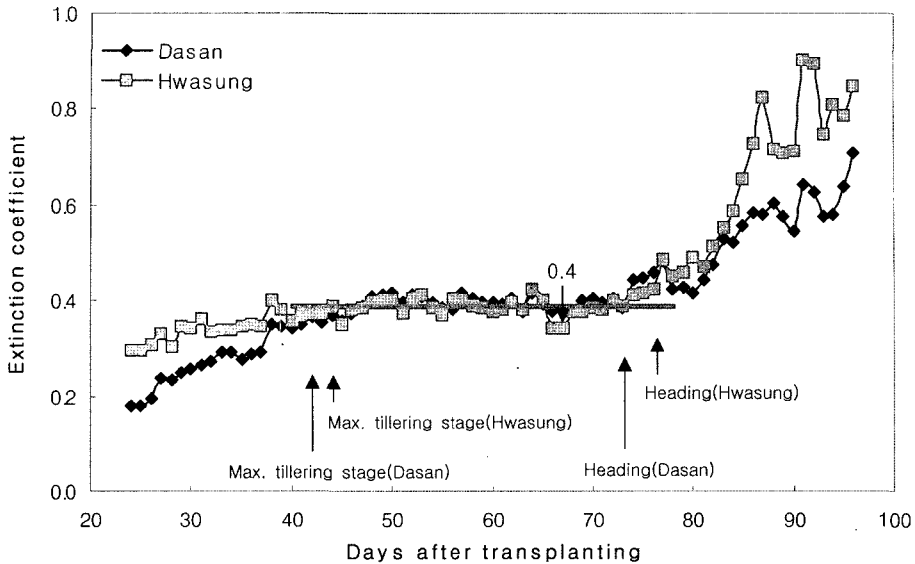


Fig. 1. The temporal changes of light extinction coefficient (K) values for two cultivars 'Hwasung' and 'Dasan' during rice growing season under 12kg N/10a fertilization level in Experiment 2.

등숙기에도 통일계인 다산벼의 엽이 직립형태를 유지하였기 때문에 판단된다.

3.2. 광 이용효율 추정

RUE는 균락에 의하여 차단된 광합성 유효복사 (PAR_i, intercepted PAR; MJ/m²)에 대한 탄소동화산물의 양(DW, g/m²)의 비를 의미하며, 태양에너지의 biomass로의 전환효율을 의미한다(Monteith, 1972). 보통 건물생산량은 다른 제한요인이 없을 경우, PAR_i와 직선적인 관계를 나타낸다고 한다(Justes *et al.*, 2000; Monteith, 1972).

Fig. 2~5는 균락에 의하여 출수 전 차단된 광합성 유효복사와 건물중과의 관계를 나타낸 것으로, 모든 품종과 처리에서 유의한 직선 회귀관계를 나타내어 균락의 출수 전 평균 RUE는 이 직선의 회귀계수로 평가할 수 있다.

Fig. 2는 조생종, 중생종, 중만생종인 오대벼, 화성벼, 동진벼에서 PAR_i와 건물중 간의 관계를 나타낸 것이다. 세 품종 모두 시비량이 증가함에 따라 PAR_i와 건물생산량이 증가하였는데, 단위 PAR_i 증가량 대비 건물생산 증가율, 즉 RUE(g/MJ)는 시비량이 증가함에 따라 커졌다. 0N 처리에서 RUE는 품종에 따라 1.16-1.20 범위였고, 14N에서는 1.96-2.03 범위였으며, 22N 처리에서는 2.06-2.17 범위였다.

Fig. 3는 Japonica인 화성벼와 통일계인 다산벼를 공시하여 흡수된 광합성 유효복사(PAR)와 건물중 간의 관계를 살펴본 것이다(Table, Exp2). 두 품종 모두 시비량이 증가함에 따라 광 이용효율(RUE)이 높아졌다. 12N 처리에서 RUE는 2.68-2.94 범위였고, 24N에서는 3.10-3.21, 36N에서는 3.28이었으며, 48N에서는 3.36-3.46 범위로 품종 간 차이는 크지 않았다.

Fig. 4는 Japonica인 화성벼와 통일계인 다산벼를 이용하여, 질소시비수준에 따른 PAR_i와 건물중 간의 관계를 나타낸 것이다(Table 2, Exp 3). 다산벼는 질소시비량 증가에 따라 RUE가 증가하는 경향을 보였으나, 화성벼는 질소시비량 증대에 따른 RUE 증가가 뚜렷하지 않았다. 추정된 RUE값들을 살펴보면, 6N 처리에서는 2.44-2.93, 12N에서는 2.53-2.86, 18N에서는 2.60-2.76, 24N에서는 3.00-3.03 내의였고, 30N에서는 3.05를 나타내었다.

Fig. 5는 화성벼를 공시하여 건답직과 재배조건에서 비료종류와 분시방법에 따른 흡수된 PAR와 건물중간의 관계를 나타낸 것이다(Table 3, Exp4). T1, T2, T4, T6처럼 대체로 기비보다 분얼비에 중점을 둔 쪽이 건물중 증가가 더 많았고, 전량 투입하는 것보다는 분시하는 쪽이 RUE가 더 높았다(T1, T2). 또한 기비 및 분얼비로 전량 투입했을 때, LCU(T4)보다는 IBDU(T6)가 다소 높은 RUE값을 보였다. 그리고 무

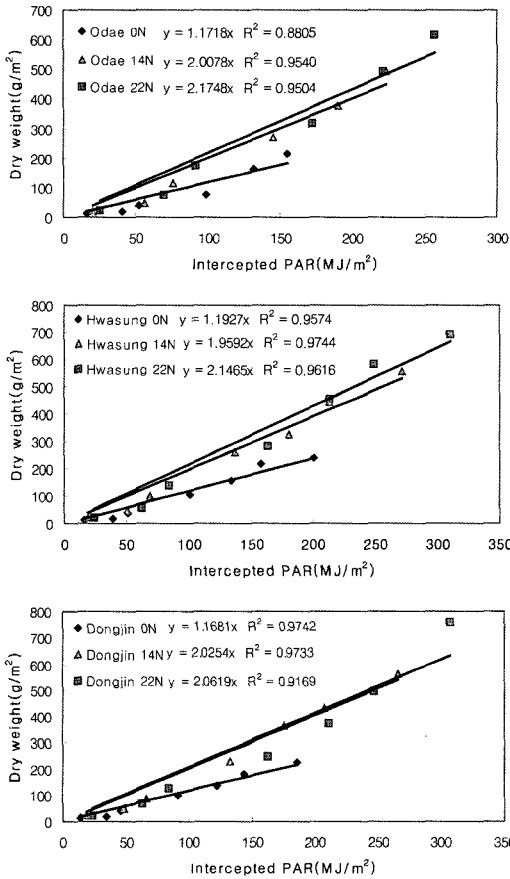


Fig. 2. The relationship between the cumulative PAR intercepted by canopy and the dry weight before heading of three rice cultivars 'Odae', 'Hwasung', and 'Dongjin' (Experiment 1).

비인 T7의 경우는 질소부족으로 인하여 뚜렷하게 낮은 RUE를 나타내었다. 전체적으로 보면, RUE값은 2.20-3.05 g/MJ 내외였다.

Table 4는 1998년부터 2000년까지 3개년에 걸쳐 다양한 시비조건에서 실험한 결과 얻어진 RUE값을 종합하여 표로 나타낸 것이다. 무비조건에서 RUE는 98년 건답직파에서는 2.11을 보인 반면, 2000년의 이양재배에서는 오대 1.47, 화성 1.36, 동진 1.3의 값을 나타내었다. 그리고 2000년 실험결과에서 보듯이 오대벼의 RUE가 화성벼와 동진벼의 RUE 보다 높게 나타나 조생종의 RUE값이 높게 나타났다. 품종 간 RUE의 차이를 살펴보면, 98년과 99년 모두 12N 이하의 시비량에서는 화성벼가 다산벼보다 다소 높은 RUE를 보인 반면, 시비량이 증가할수록 두 품종간의 RUE 차이는 줄어들었다.

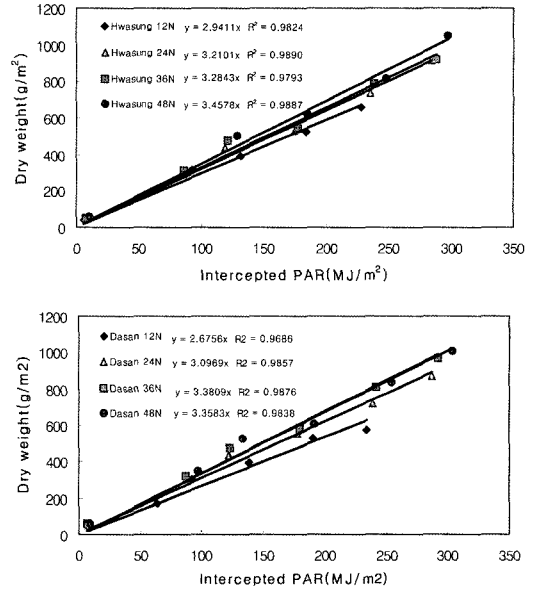


Fig. 3. The relationship between the cumulative PAR intercepted by canopy and the dry weight before heading of two rice cultivars 'Hwasung' and 'Dasan' (Experiment 2).

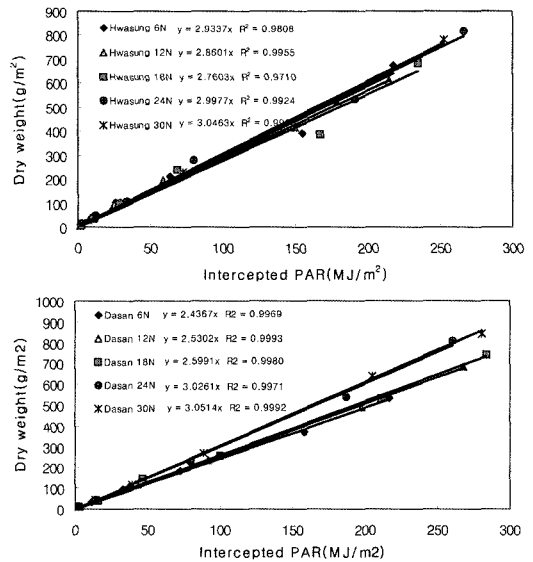


Fig. 4. The relationship between the cumulative PAR intercepted by canopy and the dry weight before heading of two rice cultivars 'Hwasung' and 'Dasan' (Experiment 3).

3.3. 광 이용효율과 질소영양지수 및 비엽질소농도와 의 관계

이양부터 출수 전까지의 평균 RUE(Table 4)와 이 기간 중의 평균 NNI 및 평균 SLN과의 관계를 나타낸 것이 Fig. 6이다. NNI와 RUE의 관계는 지수함수

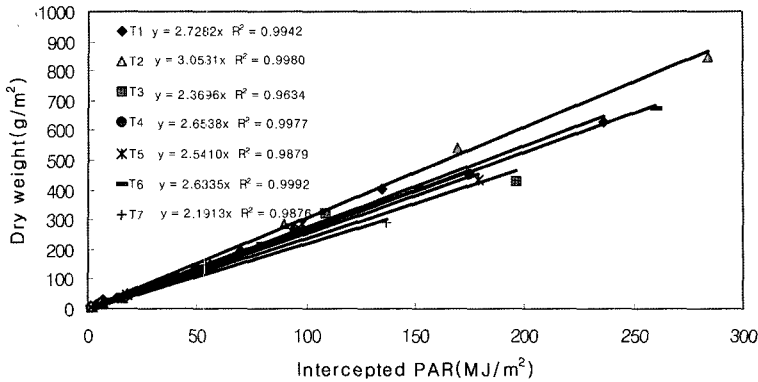


Fig. 5. The relationship between the cumulative PAR intercepted by canopy and the dry weight before heading of rice cultivar 'Hwasung' (seven treatments) (Experiment 4).

Table 4. Estimated average RUE (g/MJ of PAR) before heading in the four experiments with different nitrogen fertilization regimes in rice

Experiment 1	Cultivar	Nitrogen level (kg/10a)						
		0	14	22				
	Odae	1.17	2.01	2.17				
	Hwasung	1.19	1.96	2.15				
	Dongjin	1.17	2.03	2.06				
Experiment 2	Cultivar	Nitrogen level (kg/10a)						
		12N	24N	36N	48N			
	Hwasung	2.94	3.21	3.28	3.46			
	Dasan	2.68	3.10	3.38	3.36			
Experiment 3	Cultivar	Nitrogen level (kg/10a)						
		6N	12N	18N	24N	30N		
	Hwasung	2.93	2.86	2.76	3.00	3.05		
	Dasan	2.44	2.53	2.60	3.03	3.05		
Experiment 4	Cultivar	Fertilizer treatments						
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
	Hwasung	2.73	3.05	2.37	2.65	2.54	2.63	2.19

로 잘 표현되었으며, NNI가 증가함에 따라 RUE 또한 곡선적으로 증가하였으나 증가폭은 점차 줄어드는 경향으로, RUE는 NNI의 지수함수식으로 잘 표현되었다. 이 식은 NNI 변화에 따른 RUE 변이의 약 80% ($R^2=0.7974$)를 설명할 수 있다.

SLN과 RUE의 관계 역시 SLN이 증가할수록 RUE가 곡선적으로 증가하였으나 증가폭이 점차 줄어들 때, 지수함수식으로 잘 표현되었는데, 이 식은 RUE 변이의 약 75% ($R^2=0.7446$)를 설명하였다.

이상의 결과를 종합해 보면 RUE는 1.17-3.46g/MJ PAR 범위(Table 4)였는데, RUE는 조생종이 높

은 경향이였으며(Fig. 2, Table 4) 또한 12N 이하 처리에서는 Japonica인 화성벼가 통일계인 다산벼보다 다소 높은 RUE를 보인 반면, 시비량이 증가할수록 RUE는 증가하였으나 품종 간의 차이는 점차 줄어드는 경향이였다(Fig. 3-5, Table 4). 벼에서 이와 같이 실제 실험에 의한 RUE값이 보고된 예는 많지 않은데, Horie and Sakuratani(1985)는 1.39 g/MJ, Inthapan and Fuke (1988)는 0.93 g/MJ, Kiniry *et al.*(1989)는 1.1 g/MJ를 보고하였다. 이 값들은 본 연구에서와는 달리 RUE의 추정에 PAR 대신 일사량을 이용하였기 때문에 본 연구의 RUE 값과 차이가

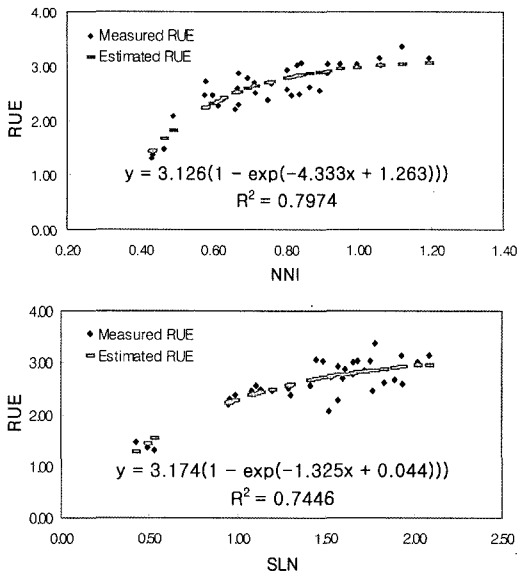


Fig. 6. Relationship of average radiation use efficiency (RUE, g/MJ of PAR) before heading with the average nitrogen nutrition index (NNI) and specific leaf nitrogen (SLN, g/m²).

있는 것 같이 보이나, PAR이 일사량의 약 50%인 점을 감안하면 이들이 보고한 RUE는 모두 본 연구에서 측정한 범위 내에 있는 것으로 판단된다. 한편 벼에서 출수기 이전의 RUE는 질소영양상태를 나타내는 질소영양지수(NNI, nitrogen nutrition index) 및 비엽질소농도(SLN, specific leaf nitrogen concentration; g/m² leaf area)가 증대됨에 따라 최대 RUE에 접근하는 다음과 같은 지수 함수로 잘 표현할 수 있었다 (Fig. 6). 벼에서는 이와 같은 관계가 보고된 바 없고, 다만 Sinclair and Horie(1989)가 SLN과 RUE와의 관계를 이론적으로 해석한 예가 있는데, 이와 본 연구의 결과를 비교해 보면 최대 RUE는 비슷하였으나 SLN 저하에 따른 RUE의 저하 정도가 본 연구 결과보다 매우 컸다. 그런데 여기에서 구해진 RUE와 NNI 및 SLN 관계는 출수전 전 기간의 평균적인 관계에 근거한 것으로서, 벼 RUE는 생육시기가 진전됨에 따라서 감소하므로(Campbell et al., 2001), 생육모델의 건물중 추정의 구성모델(component model)로서 활용하는 데는 한계가 있으며, 건물중 추정 구성모델로 사용하기 위해서는 보다 짧은 기간을 대상으로 이와 같은 분석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 벼의 질소영양 상태가 광 이용효율에 미치는 영향을 검토하여 벼 생육모델을 구축하기 위한 기초자료를 얻기 위해 수행되었다. 1998년부터 2000년까지 3개년에 걸쳐서 일관적 및 통일적 품종을 공시하여 다양한 질소시비 조건에서 건물중, 균락의 흡광량 및 질소영양 상태를 조사하였고, 이들 자료를 이용하여 균락의 광 이용효율 및 광 이용효율과 질소영양 상태와의 관련성을 검토하였다.

벼 균락의 흡광계수(K)는 최고분얼기까지 벼의 생장과 함께 증가하다가, 최고분얼기에서 출수기까지는 0.4 정도로 일정하게 유지되고, 출수기 이후부터 다시 급격하게 증가하였다. 출수전 벼 균락의 누적 PAR interception과 건물중과는 직선 회귀관계가 성립하였고, 이 직선 회귀계수를 이용하여 균락의 출수전 평균 광 이용효율(RUE, g/MJ of PAR)을 추정하였는데, 평균 RUE는 질소시비량이 많을수록 높아지는 경향이였다. 벼에서 출수전의 RUE는 질소영양 상태를 나타내는 질소영양지수(NNI, nitrogen nutrition index) 및 비엽 질소농도(SLN, specific leaf nitrogen concentration; g/m² leaf area)가 증대됨에 따라 최대 RUE에 접근하는 다음과 같은 지수함수로 잘 표현할 수 있었다.

$$\begin{aligned} RUE &= 3.13 \{1 - \exp(-4.33NNI + 1.26)\} \\ RUE &= 3.17 \{1 - \exp(-1.33SLN + 0.04)\} \end{aligned} \quad (4)$$

위의 식은 질소영양 조건에 따른 RUE의 변이를 각각 80%와 75% 정도를 설명할 수 있다. 여기에서 구해진 RUE와 NNI 및 SLN 관계는 출수전 전 기간의 평균적인 관계에 근거한 것으로서, 벼 생육모델의 건물중 추정의 구성모델(component model)로서 활용하는 데는 한계가 있으며, 건물중 추정 구성모델로 사용하기 위해서는 보다 짧은 기간을 대상으로 이와 같은 분석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 말

이 연구는 기상청 기상지진기술사업단 연구비 지원 (CATER 2006-4301)에 의하여 이루어진 것임.

REFERENCES

Allison, J. C. S., H. T. Williams, and N. W. Pammenter, 1997: Effect of specific leaf nitrogen content on

- photosynthesis of sugarcane. *Annals of Applied Biology* **131**, 339-350.
- Bange, M. P., G. L. Hammer, and K. G. Rickert, 1997: Effect of specific leaf nitrogen on radiation use efficiency and growth of sunflower. *Crop Science* **37**, 1201-1207.
- Campbell, C. S., J. L. Heilman, K. J. McInnes, L. T. Wilson, J. C. Medley, G. Wu, and D. R. Cobos, 2001: Seasonal variation in radiation use efficiency of irrigated rice. *Agricultural and Forest Meteorology* **110**, 45-54.
- Cui, R. X., M. H. Kim, J. H. Kim, H. S. Nam, and B. W. Lee, 2002: Determination of critical nitrogen concentration and dilution curve for rice growth. *Korean Journal of Crop Science* **47**(2), 127-131.
- Green, C. F., 1987: Nitrogen nutrition and wheat growth in relation to absorbed solar radiation. *Agricultural and Forest Meteorology* **41**, 207-208.
- Greenwood, D. J., G. Lemaire, G. Gosse, P. Cruz, and A. Draycott, 1990: Decline in percentage N of C3 and C4 crop with increasing plant mass. *Annals of Botany* **66**, 425-436.
- 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. Japanese. *Journal of Agricultural Meteorology* **40**, 331-342.
- Inthapan, P., and S. Fuke, 1988: Growth and yield of rice cultivars under sprinkler irrigation in southeastern Queensland. 2. Comparison with maize and grain sorghum under wet and dry condition. *Australian Journal of Experimental Agriculture* **28**, 243-248.
- Justes, E., B. Mary, J. M. Meynard, J. M. Jachet, and L. Thelier-huches, 1994: Determination of a critical nitrogen dilution curve for inter wheat crops. *Annals of Botany* **74**, 397-407.
- Justes, E., P. Denoroy, B. Gabrielle, and G. Gosse, 2000: Effect of crop nitrogen status and temperature on the radiation use efficiency of winter oilseed rape. *European Journal of Agronomy* **13**, 165-177.
- Kiniry, J. R., C. A. Jones, J. C. O'Toole, R. Blanchet, M. Cabelguenne, and D. A. Spinel, 1989: Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain-filling for five grain-crop species. *Field Crops Research* **20**, 51-64.
- Lee, J. Y., 1976: The Effect of the Photosynthetic Ability and the Nutritional Status on Dry matter Production and Yield Components of the Rice Plant at the Latter Half of the Growth Stage. *Korean Journal of Crop Science* **21**(2), 187-202.
- Lemaire, G., and F. Gastal, 1997: N uptake and distribution in plant canopies. In : G. Lemaire (Eds.), *Diagnosis of the nitrogen status in crops*. Springer-Verlag, 3-34.
- Monteith, J. L., 1972: Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology* **9**, 747-765.
- Muchow, R. C., 1988: Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment: 1. Leaf growth and leaf nitrogen. *Field Crops Research* **18**, 1-16.
- Muchow, R. C. and R. Davis, 1988: Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment : II. Radiation interception and biomass accumulation. *Field Crops Research* **18**, 17-30.
- Muchow, R. C., M. J. Robertson, and B. C. Pengelly, 1993: Radiation use efficiency of soybean, mungbean and cowpea under different environmental conditions. *Field Crops Research* **32**, 1-16.
- Murata, Y., 1961: Studies on the photosynthesis of rice plants and its culture significance. *Bulletin of National Institute of Agricultural Science (Japan) Series* **D9**, 1-169.
- Osada, A., 1966: Relationship between photosynthetic activity and dry matter production in rice varieties, especially as influenced by nitrogen supply. *Bulletin of National Institute of Agricultural Science (Japan) Series* **D14**, 117-188.
- Plnet, D., and G. Lemaire, 1999: Relationship between dynamics of nitrogen and drymatter accumulation in maize crops. Determination of critical N concentration. *Plant and Soil* **216**, 65-82.
- Sinclair, T. R., and T. Horie, 1989: Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: A review. *Crop Science* **29**, 90-98.