

광독립영양 기내 미세증식시스템에서 광강도 및 CO₂ 농도에 따른 감자 소식물체 생육분석 및 모델링에 의한 생육단계별 적정 환경조건 설정

손정익¹ · 이 훈¹ · 오명민^{2*}

¹서울대 식물생산과학부 및 농업생명과학연구원, ²캔자스주립대 원예학과

Growth of Potato Plantlets (*Solanum tuberosum* L. cv. Dejima) in Photoautotrophic Micropropagation System at Different Light Intensities and CO₂ Concentrations and Decision of Optimum Environment Conditions with Growth Stage by Modelling

Jung Eek Son¹, Hoon Lee¹, and Myung-Min Oh^{2*}

¹Department of Plant Science and Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Republic of Korea

²Department of Horticultural Science, Kansas State University, Manhattan, KS 66503, USA

Abstract. Adequate environment conditions with growth stage of potato were decided in a photoautotrophic micropropagation system using models. Total 20 day-period of growth were divided into three growth periods such as 6 (stage 1), 7 (stage 2), and 7 (stage 3) days. At the 1st stage, no significant differences were observed in the growth of potato plantlets at various photosynthetic photon flux density (PPFD) and CO₂ conditions. Considering damaged leaves, 80 mmol·m⁻²·s⁻¹ PPFD and ambient CO₂ level were adequate in this stage. At the 2nd stage, significant differences were partly observed in several growth characteristics including dry weight. Based on the dry matter model, over 240 mol·m⁻²·s⁻¹ PPFD was too high to cultivate potato plantlets at this stage due to the occurrence of damaged leaves. Considering both plant growth and energy efficiency, 160 mol·m⁻²·s⁻¹ PPFD and 700 mol·mol⁻¹ CO₂ were selected for the adequate combination. At the 3rd stage, the biomass accumulation was significantly induced in potato plantlets under higher levels of PPFD and CO₂ concentration as suggested by increased fresh and dry weights. However, we could not find the saturated point with regard to dry matter due to continuous increase of dry matter even under maximum PPFD (320 mmol·m⁻²·s⁻¹). Thus, 320 mol·m⁻²·s⁻¹ PPFD and 1800 mol·mol⁻¹ CO₂ were considered as the best choice at final stage in this study. In conclusion, even though the growth period of micropropagated potato plantlets was quite a short, favorable environmental conditions required at each growth stage were different. This technique could improve the growth of micropropagated plantlets compared to the conventional micropropagation and apply to other agriculturally important crops as well as potato in the future.

Key words : CO₂, energy efficiency, PPFD

서 언

감자(*Solanum tuberosum* L.)는 전 세계 식량자원 중 매우 중요한 농작물 중에 하나이다. 생산량을 기준으로 보면 곡물류(쌀, 밀, 보리)를 제외하고는 감자가

전 세계적으로 가장 많이 재배되고 있다(FAO, 2008). 그러나 감자는 주로 영양 번식을 하기 때문에 바이러스 감염에 의한 피해와 수량 감소가 심각한 문제로 알려져 있다(Weidemann, 1988). 이를 극복하기 위해 조직배양을 통한 대량 증식 체계 연구가 많이 이루어져 있으며, 최근에는 미세증식을 이용하여 이식묘를 대량 생산한 후 기외로 이식하여 피경을 생산하는 체계가

*Corresponding author: saka131@hanmail.net, sjeenv@snu.ac.kr
Received February 10, 2009; Revised March 10, 2009
Accepted March 17, 2009

중점적으로 연구되고 있다(Kozai 등, 1997a; Zobayed 등, 2004). 미세증식은 무균 상태의 묘를 급속, 대량 증식할 수 있는 장점이 있지만, 묘의 생육이 비정상적으로 이루어진다는 단점이 있다. 특히 무균환경을 위한 밀폐 용기의 사용과 기내 이산화탄소의 부족이 비정상적인 생육을 일으키는 주요 원인들로 지적되었다(Jeong 등, 1995). 따라서 환경 조절을 통한 광독립영양 미세 증식 소식물체의 정상적인 생육을 유도하는 연구도 시도되었다(Kozai 등, 1997b).

기내 환경을 조절하기 위한 실제적인 시스템의 개발은 적정 환경조절이 가능하지 않다면 비효율적이 된다. 광독립영양 미세증식을 위한 광원과 온도제어에 사용되는 전기사용량을 기존 배양실에 필요한 전기사용량과 단순히 비교했을 때 높다(Kozai, 1991). 이러한 측면에서 기내 소식물체의 생육 특성을 고려하며, 기존의 미세증식 경제적, 기술적 한계를 뛰어넘는 새로운 환경 조절 기술이 요구된다. 비록 효과적인 환경 조절을 위한 각 환경요소들의 정량화와 소식물체의 생체중 예측은 시도 되었지만, 짧은 생육기간이라는 이유로 생육 단계 구분 없이 미세증식 소식물체는 일정한 환경조건에서 재배되었다(Kitaya 등, 1995; Niu와 Kozai, 1997). 하지만 소식물체에 적합한 환경은 그 생육이 진행되면서 달라질 수 있다. 왜냐하면 처음에는 외마디 외식체에서 시작된 배양은 나중에 완전히 전개된 여러 개의 잎을 가진 식물체로 끝나기 때문이다. 더군다나 기내 배양 마지막 단계에서는, 미세증식으로 번식한 소식물체가 기외로 이식되었을 때 외부 환경 스트레스에 의한 피해를 최소화하기 위해서 거의 외부환경과 비슷한 환경에서 재배 되어야 한다(Pospisilova 등, 1999). 즉 이식 전에 순화 과정을 거쳐야 할 필요가 있다. 본 실험의 목적은 기내에서 배양된 감자 소식물체의 생육을 향상시키며 동시에 에너지 사용도 절감하기 위해서, 감자 소식물체의 전 생육기간을 여러 생육 단계로 구분하고, 생육 실험과 모델링 기법을 이용하여 각 생육 단계별 광합성 광량자속 밀도(PPFD)와 CO₂ 농도를 기준으로 하는 적정 환경 조건을 결정하는 것이다.

재료 및 방법

1. 식물재료 및 배양환경

공시재료로 감자(*Solanum tuberosum* L. cv. Dejima)

를 광혼합영양 상태로 당(30 g·L⁻¹)과 파이토젤(2 g·L⁻¹) 이 함유된 MS배지(Murashige and Skoog, 1962)에서 30일 동안 계대 배양하였다. 그 이후 감자 줄기 끝으로부터 3번째와 5번째 마디의 잎이 있는 외마디 외식체를 370 mL의 마젠타 배양 용기(GA 7, Sigma Co Ltd., USA)에서 배양하였다. 광의 반사나 흡수에 의한 광원 손실은 최소화하기 위해 OPP 필름을 배양용기 뚜껑으로 사용하였다. 배양용기 뚜껑의 3개의 구멍(직경 10 mm)에는 기체가 이동 가능한 미세필터(Milliseal, Millipore: pore size 0.5 mm, Japan)를 설치하였고, 환기횟수는 6.2 h⁻¹이었다. 폴리우레탄 큐브(90 cm³)를 지지 재료로 사용하였으며, 광독립영양 조건을 위해서 비타민과 당이 포함되지 않은 MS배지를 사용하였다.

2. 미세증식 시스템

환경 제어 가능한 미세 증식 시스템은 서울대학교 실험 농장에 위치한 냉난방 시설에 설비된 공간(6×3×2.5 m)에 설치되었다(Fig. 1). 이 시스템은 4개의 아크릴 챔버(40×60×30 cm), 제어 및 환경측정 장치, 데이터 수집 장치로 구성되었다. 시스템 제어와 데이터 수집을 위해서 데이터수집기(CR10X, Campbell Co Ltd., USA), 멀티플렉서(AM416, Campbell Co Ltd., USA), 그리고 제어기(SDM-CD16AC, Campbell Co Ltd., USA)가 사용되었다. CO₂ 가스는 유입관을 통해서 직접 공급되었으며, 제어를 위해서 비분산 적외선 CO₂ 분석기(WMA-3, PP systems Co Ltd., UK)가 모든 챔버에 연결되어 유출되는 공기의 CO₂를 측정하였다. 보다 정확한 CO₂ 제어를 위해서 비례 제어 방식을 도입하였다. 1000 μmol·mol⁻¹ 기준 CO₂ 제어편

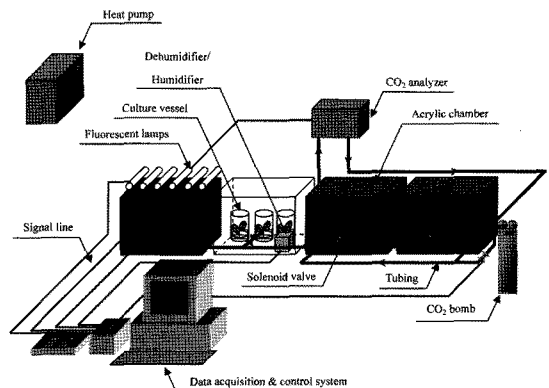


Fig. 1. Schematic diagram of a micropropagation system.

Table 1. Description of environmental conditions at each growth stage.

Growth stage	PPFD ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)				CO ₂ ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)			Light/dark period (h)	RH (%)
	80	160	240	320	350	700	1400		
1 st Stage	80	160	240	320	350	700	1400	16/8	90±3
2 nd /3 rd stage	80	160	240	320	700	1400	1800		

치는 39 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 였다. 또한 균일한 PPFD의 분산을 위해서 직선형 형광 램프를 설치하였고, 160 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 기준 PPFD 편차는 4.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 였다.

3. 생육단계 구분 및 생육모델

감자 소식물체의 생육 단계를 구분하기 위해서 마디 수, 전개된 잎의 수, 지상부 초장을 6일째부터 21일째까지 3일 단위로 매회 8개체를 이용하여 측정하였다. 이 결과를 근거로 3단계로 생육단계를 구분하였다. 이 실험은 PPFD가 160 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, CO₂ 농도 1065±39 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 광주기 16시간, 상대 습도 90±3%인 환경에서 실시되었다. 또한 Negative exponential 모델을 이용하여 광 강도와 건물중과의 관계를 정량적으로 분석하였다.

4. 생육단계에 따른 적정 생육환경

감자 소식물체의 각 생육 단계에 따른 적정 생육 환경을 조사하기 위해서 여러 가지 환경 조건하에서 감자 소식물체를 배양하였다(Table 1). 첫 번째 단계 마지막에 생체중과 건물중을 측정하였고, 추가적으로 스트레스 받은 잎의 비율을 조사하였다. 첫 번째 단계에서 결정된 적정 생육 환경은 두 번째, 세 번째 단계에도 사용되었다. 이 단계들에서는 마디수, 전개된 잎의 수, 지상부 직경, 초장, 건물중, 생체중이 측정되었다. 또한 상대 생장률과 상대 생장률의 차이를 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 생육단계 구분

시간에 따른 감자 소식물체의 전개된 잎의 수, 마디 수, 초장 모두 증가하였고, 특히 전개된 잎의 수와 초장은 시간이 갈수록 급격히 증가하였다(Fig. 2). 기내 계대 배양 직후, 소식물체의 지상부 생육은 관찰되지 않은 반면 뿌리 발달은 뚜렷하였다. 미세증식 배양 6일째에도 전개된 잎은 없었으며, 초장은 10

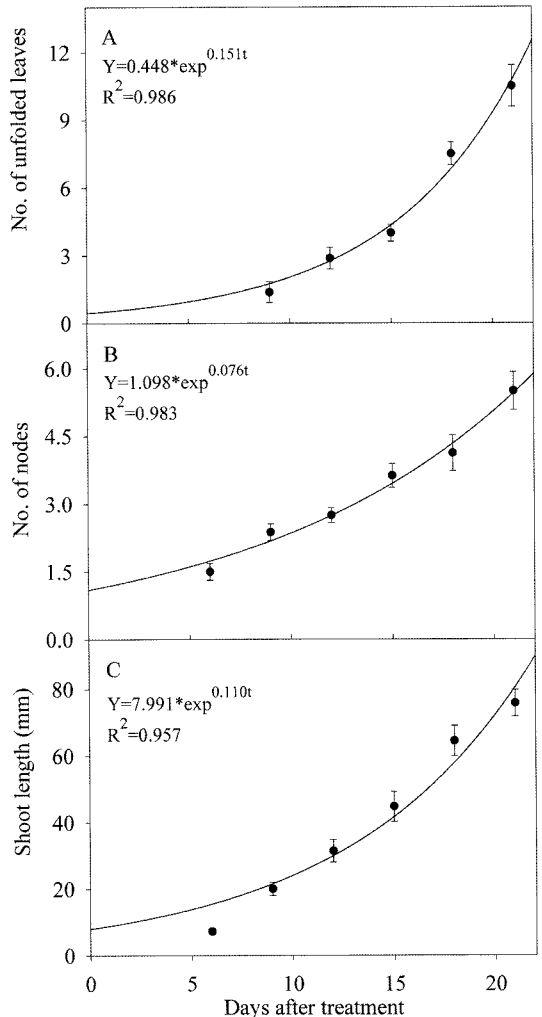


Fig. 2. Changes of number of unfolded leaves (A) and nodes (B), and shoot length (C) of micropropagated potato plantlets with time courses. Potato plantlets were grown with a photosynthetic photon flux density (PPFD) of 200 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, CO₂ of 1065±39 $\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, relative humidity (RH) of 90±3% and a 16 h photoperiod. Vertical bars represent SE of the means.

mm 이하였다. 하지만 9일째부터 새로운 잎이 생성되면서 전체적인 생육 발달이 시작되었으며, 15일째부

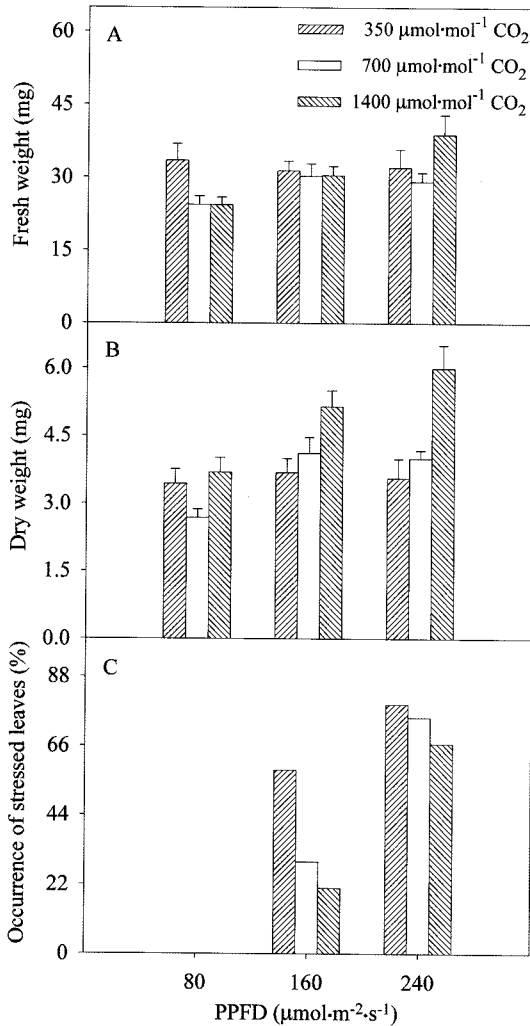


Fig. 3. Effects of PPFD and CO₂ on Fresh (A), dry (B) weights, and occurrence of stressed leaves (C) at the 1st stage. Vertical bars represent SE of the means.

터는 전개된 잎의 수가 급격히 증가하는 경향을 보였다. 이러한 전체적인 생육 발달의 형태를 고려했을 때, 지상부 생육보다는 뿌리의 발달이 집중적으로 이루어진 첫 6일을 생육 1단계로 구분할 수 있었다. 6일부터 21일까지 증가율을 보았을 때 대략 15일을 기준으로 15일 이전이 그 이후 보다 다소 점진적인 증가를 보였기 때문에 이 기간을 생육 2단계로 구분하였다. 자동적으로 그 이후 기간은 생육 3단계가 되었다. 따라서 총 20일 간의 생육 기간을 각 단계별로 6일(1단계), 7일(2단계), 7일(3단계)로 결정할 수 있었다.

2. 각 생육단계별 적정 환경조건 결정

생육 1단계에서 다양한 PPFD와 CO₂ 농도는 감자 소식물체의 생육에 부분적인 영향을 미쳤다(Fig. 3). 두 환경 요소는 감자 소식물체의 생체중에 뚜렷한 영향을 미치지 못했다. 하지만 높은 CO₂ 농도(700과 1400 μmol·mol⁻¹)에서 PPFD가 높아질수록 건물중의 축적이 관찰되었다(Fig. 3B). 감자의 마디 수, 초장, 지상부 직경은 처리 간 유의적 차이가 없었다. 스트레스 받은 잎의 발생율은 PPFD가 증가 할수록 현저하게 증가한 반면, 낮은 PPFD(80 μmol·m⁻²·s⁻¹)에서는 잎의 피해가 관찰되지 않았다(Fig. 3C). 따라서 위의 결과를 종합해 보았을 때 생육 1단계에서는 낮은 PPFD(80 μmol·m⁻²·s⁻¹)와 대기상의 CO₂ 농도(350 μmol·mol⁻¹)만으로도 감자 소식물체가 충분히 자랐다고 결론을 내릴 수 있었다.

생육 2단계에서는 마디 수와 생체중을 제외한 모든 측정항목에서 PPFD와 CO₂ 농도에 따른 유의적 차이가 나타났다(Table 3). 전개된 잎의 수와 건물중은 두 가지 환경 요인에 의해서 큰 변화를 일으켰다. 특히 건물중의 경우 PPFD가 증가함에 따라 지속적인 증가를 보였다. 따라서 이를 근거로 PPFD에 따른 감자 소식물체의 건물중 모델(P_d)을 만들 수 있었다(Fig. 4A). 음의 지수 방정식(A negative exponential equation)은 이 모델을 만드는데 사용 되었고(Goudriaan와 van Laar, 1994), PPFD 보상점(L₀)은 다른 문헌들을 참조하였다(Niu와 Kozai, 1997; Nobel, 1991; Nobel 등, 1993). 이 모델의 계수는 Table 4와 같았다. Fig. 4A에 따르면 두 CO₂ 농도(700과 1400 μmol·mol⁻¹)에 노출된 감자 소식물체 건물중은 160 μmol·m⁻²·s⁻¹ PPFD에서 포화되었다. 하지만 가장 높은 CO₂ 농도(1800 μmol·mol⁻¹)에서는 가장 강한 PPFD(320 μmol·m⁻²·s⁻¹)에서도 포화되지 않고 건물중의 증가를 보였다. 그러나 이미 240 μmol·m⁻²·s⁻¹의 PPFD에서 스트레스에 의한 잎의 피해가 발생하였기 때문에 1800 μmol·mol⁻¹ CO₂ 농도는 불필요하였다. 또한 PPFD 160 μmol·m⁻²·s⁻¹에서 다른 CO₂ 농도 처리간의 건물중의 차이는 거의 없었으므로, 에너지 효율적인 면에서도 700 μmol·mol⁻¹ CO₂ 농도가 생육 2단계 환경으로서 충분하다고 판단되었다.

마지막 생육 3단계에서는 감자 소식물체의 생육은 매우 활발하였다. 지상부 초장을 제외한 모든 생육관련

Table 2. Growth characteristics under different PPFD conditions at the 2nd stage.

Treatment		No. of nodes	No. of unfolded leaves	Shoot height (mm)	Shoot diameter (mm)	Fresh weight (mg/plantlet)	Dry weight (mg/plantlet)
CO ₂	PPFD						
700	80	4.14	3.07	38.30	1.05	110.49	9.41
	160	4.31	4.50	42.57	1.09	134.14	12.09
	240	4.07	4.87	37.25	1.03	104.50	10.21
	320	3.77	4.15	39.81	1.05	142.41	13.97
1400	80	4.17	4.67	45.79	1.01	119.79	10.25
	160	3.70	4.50	38.75	1.05	108.79	11.55
	240	4.00	5.45	39.17	1.08	127.47	12.76
	320	3.63	4.18	35.08	1.04	122.56	13.86
1800	80	4.00	4.25	47.53	1.09	107.14	8.79
	160	4.23	5.15	40.31	1.17	143.84	13.55
	240	4.14	4.93	38.50	1.13	145.49	15.26
	320	3.82	4.63	32.49	1.11	141.95	16.21
CO ₂		NS	*	NS	*	NS	*
PPFD		NS	**	*	NS	NS	***
CO ₂ ×PPFD		NS	NS	NS	NS	NS	NS

NS, *, **, ***Nonsignificant or significant at P=0.05, 0.01 or 0.001, respectively.

Table 3. Estimated values of coefficients of P_d model expressed with PPFD for in vitro potato plantlets at the 2nd stage (13th day) and 3rd stage (20th day).

Coefficient ^z	Unit	On the 13 th day			On the 20 th day		
		700 ^y	1400	1800	700	1400	1800
P _{max}	mg	12.352	13.107	16.793	69.319	- ^x	165.604
b	μmol ⁻¹ ·m ² ·s ⁻¹ ·mg	0.250	0.261	0.180	0.333	-	0.397
I _c	μmol·m ⁻² ·s ⁻¹	10 ^w	10	10	10	-	10
R ²		0.445	0.778	0.999	0.949	-	0.995

^zCoefficients in the following equation:

$$P_d = P_{max} \left(1 - e^{-\frac{b(x-I_c)}{P_{max}}} \right)$$

^yCO₂ concentration (μmol·mol⁻¹).

^xNot simulated.

^wObtained from the literature (Niu and Kozai, 1997; Nobel, 1991; Nobel et al., 1993).

측정 항목에서 두 가지 환경 요인에 의한 유의적 차이를 볼 수 있었다(Table 5). 대체로 PPFD와 CO₂ 농도가 증가함에 따라 생육의 증가가 가속화 되었다. 이는 감자를 포함한 다른 작물들의 기내 미세배양의 결과와 일치하였다(Kirdmanee 등, 1995; Kozai 등, 1988; Mousseau, 1986). 이 단계 역시 건물중에 관한 모델을 만들었다(Fig. 4B). 생육 3단계에서의 건물

중 모델에 관한 계수는 Table 4에 제시되었다. 1400 μmol·mol⁻¹의 CO₂ 농도에서는 회귀분석의 문제로 건물중 모델을 얻을 수 없었다. 생육 2단계와 3단계의 소식물체들이 자라는데 충분한 환경 조건이 주어졌다면, 두 단계의 상대 생장률은 비슷해야 한다. 그러나 2단계 건물중 모델에서 제시된 생육환경은 생육 포화점 이끌어 내는데 충분했지만(Fig. 4A), 3단계 건물중

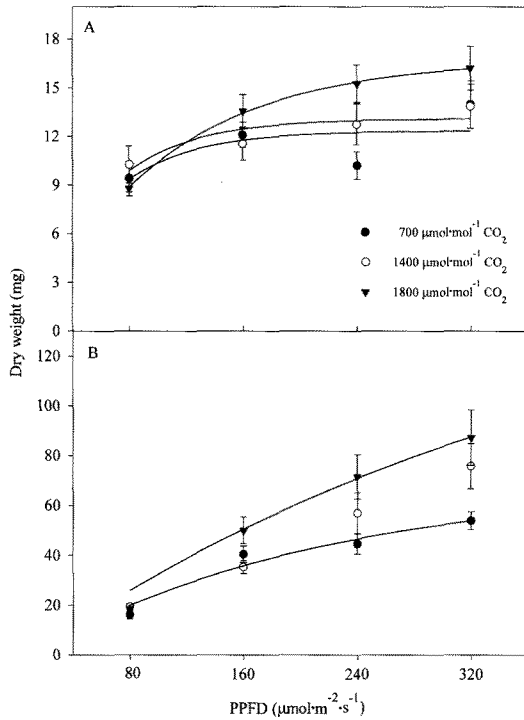


Fig. 4. P_d model of potato plantlets expressed with PPFD at the 2nd (A) and 3rd (B) stage. Vertical bars represent SE of the means. P_d model at 1400 mol·mol⁻¹ CO₂ in (B) was not expressed due to the failure of regression analysis.

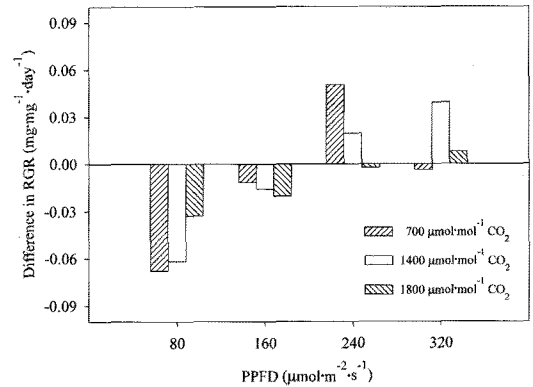


Fig. 5. Differences in relative growth rate (RGR) between the 2nd and 3rd growth stage. RGR at 3rd growth stage was subtracted by RGR at 2nd growth stage.

모델은 제시된 생육 조건들이 생육 포화점에 이르지 않고, 계속 증가하는 경향을 보였다(Fig. 4B). 실제로 생육 3단계를 기준으로 두 단계의 상대 생장률의 차이는 비교해 본 결과, 160 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PPFD 이하에서 CO₂ 농도에 관계없이 음(-)의 값을 보였고, 240 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 PPFD 이상에서는 대체로 양(+)의 값을 보였다(Fig. 5). 상대 생장률의 차이에 있어 음의 값은 그 값을 보인 환경 조건이 생육 3단계에서 원활한 생육에 부족했다는 것을 의미한다. 따라서 생육 3

Table 4. Growth characteristics under different PPFD conditions at the 3rd stage.

Treatment		No. of nodes	No. of nfolded leaves	Shoot height (mm)	Shoot diameter (mm)	Fresh weight (mg/plantlet)	Dry weight (mg/plantlet)
CO ₂	PPFD						
700	80	5.78	7.00	73.18	1.31	203.44	16.10
	160	6.31	8.38	83.17	1.65	477.82	40.39
	240	7.00	9.53	76.37	1.68	485.83	44.61
	320	8.00	10.67	77.15	1.74	586.62	53.85
1400	80	5.25	6.25	81.81	1.35	261.19	19.32
	160	5.62	7.69	68.28	1.59	398.69	35.28
	240	7.11	9.78	80.12	1.79	625.80	56.91
	320	5.88	12.38	72.32	1.96	801.91	75.76
1800	80	5.79	6.57	76.51	1.31	233.35	18.49
	160	5.69	9.25	74.71	1.70	589.24	49.99
	240	6.54	10.92	75.13	1.98	782.46	71.53
	320	6.20	11.40	69.94	2.05	889.11	87.19
CO ₂		***	NS	NS	*	**	**
PPFD		***	***	NS	***	***	***
CO ₂ ×PPFD		NS	NS	NS	*	*	**

NS, *, **, *** Nonsignificant or significant at P=0.05, 0.01 or 0.001, respectively.

단계에서 원활한 소식물체의 발달에 필요한 PPFD는 최소한 240 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이상이라고 할 수 있겠다. PPFD 320 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 건물중 증가가 멈추지 않을 것으로 보아, 더 높은 PPFD에서 감자 소식물체의 발달이 활발히 진행되리라 예상된다. 하지만 고풍도를 위한 소비되는 에너지가 미세증식 시스템의 경제성에 미치는 영향에 대해서도 고려해 보아야 할 것이다 (Kozai, 1991). 이 연구에서는 320 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 PPFD가 생육 3단계에서 소식물체 생육에 가장 좋은 조건이었고, 1800 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 의 CO₂ 농도에서 건물중이 최대화 되었다. 따라서 320 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 PPFD와 1800 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 의 CO₂ 농도가 생육 3단계에서 적정의 조건이었다.

결론적으로 감자의 광독립영양 미세증식에 있어서 총 생육기간을 구분지어 나누었을 때, 각 생육단계에서 감자 소식물체가 요구하는 PPFD와 CO₂ 농도를 기본으로 하는 환경 조건은 모두 달랐다. 따라서 각 생육 단계별 적절한 환경 조건을 유지해 준다면 감자 소식물체 뿐만 아니라 기내에서 배양된 다른 식물체의 원활한 생육을 유도할 수 있을 것이며, 에너지 절감 차원에서도 기여를 할 것이다.

적 요

본 연구는 묘의 생육을 최대화하기 위하여 생육 단계를 임의로 구분하고 각 단계 별 적정 환경 조건을 확립함에 목적을 두었다. 생육 단계는 총 20일의 배양 기간을 6일(1단계), 7일(2단계), 7일(3단계)의 3단계로 구분하였다. 첫 번째 단계는 활착기로서 환경 처리 별 생육에 큰 차이가 나타나지 않았다. 높은 환경 조건에 의한 잎의 장애를 고려하였을 때, 80 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 PPFD 및 대기 중의 CO₂ 농도가 적합하였다. 두 번째 단계에서는 PPFD 및 CO₂ 조건이 높아짐에 따라 건물중을 중심으로 부분적으로 향상되었다. 에너지 효율과 생육을 고려할 때, 160 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 PPFD와 700 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 의 CO₂가 적합할 것으로 생각되었다. 세 번째 단계에서는 PPFD 및 CO₂ 농도가 높아짐에 따라 유의적으로 생육이 향상되었으며, 잎 및 마디의 발달상태도 현저히 향상되었다. 따라서 보다 적극적으로 생육 증진을 고려할 때, 320 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PPFD와 1800 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 의 CO₂가 적합할 것으로 생각되었다. 생육

단계별 환경 조절은 초기단계에 상대적으로 낮은 조건을 유지하고 후기단계에서 충분한 조건을 제공함으로써 건전한 묘를 생산할 수 있고 에너지 및 물질의 투입량을 절약할 수 있다.

주제어 : 에너지 효율, PPFD, CO₂ 농도

사 사

본 연구는 농림부 농림기술개발사업의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

인 용 문 헌

1. FAO. 2008. <http://www.potato2008.org/en/aboutiyp/index.html>
2. Goudriaan, J. and H.H. van Laar. 1994. Modeling potential crop growth processes: Textbook with exercises. Current Issues in Production Ecology Vol 2. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, The Netherlands. p.150.
3. Jeong, B.R., K. Fujiwara, and T. Kozai. 1995. Environmental control and photoautotrophic micropropagation. p. 123-170. In: Janick, J. (ed.). Horticultural Reviews. Vol 17. AVI Publishing Co. Inc, Westport.
4. Kirdmanee, C., Y. Kitaya, and T. Kozai. 1995. Effects of CO₂ enrichment and supporting material *in vitro* on photoautotrophic growth of *Eucalyptus* plantlets *in vitro* and *ex vitro*. In Vitro Cell. Dev. Biol. Plant 31: 144-149.
5. Kitaya, Y., O. Fukuda, T. Kozai, and C. Kirdmanee 1995. Effects of light intensity and lighting direction on the photoautotrophic growth and morphology of potato plantlets *in vitro*. Sci. Hortic. 62:15-24.
6. Kozai, T. and Y. Iwanami. 1988. Effects of CO₂ enrichment and sucrose concentration under high photon fluxes on plantlet growth of carnation (*Dianthus caryophyllus* L.) in tissue culture during the preparation stage. J. Jpn. Soc. Hort. Sci. 57:279-288.
7. Kozai, T. 1991. Micropropagation under photoautotrophic conditions. P.C. p. 447-469. In: Debergh and R.H. Zimmerman (eds.). Micropropagation: technique and application, Academic Press.
8. Kozai, T., C. Kubota, and B.R. Jeong. 1997a. Environmental control for the large-scale production of plants through *in vitro* techniques. Plant Cell Tissue Organ Culture 51:49-56.
9. Kozai, T., N.T. Quynh, and C. Kubota. 1997b. Environmental control and its effects in transplant production under artificial light. J. Kor. Soc. Hort. Sci.

- 38:194-199.
10. Mousseau, M. 1986. CO₂ enrichment *in vitro*. Effect of autotrophic and heterotrophic cultures of *Nicotiana tabacum* (var. Samsun). *Photosynthesis Res.* 8: 187-191.
 11. Murashige, T. and Skoog F. 1962. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiol. Plant* 15:473-497.
 12. Niu, G., T. Kozai, and Y. Kitaya. 1996. Simulation of the time courses of CO₂ concentration in the culture vessel and net photosynthetic rate of cymbidium plantlets. *Trans. ASAE.* 39:1567-1573.
 13. Niu, G. and T. Kozai. 1997. Simulation of the growth of potato plantlets cultured photoautotrophically *in vitro*. *Trans. ASAE.* 40:255-260.
 14. Nobel, P.S. 1991. *Physiochemical and environmental plant physiology.* Academic Press, Inc., 473-495. San Diego, CA.
 15. Nobel, P.S., I.N. Forseth, and S.P. Long. 1993. Canopy structure and light interception. in *photosynthesis and production in a changing environment.* London, England: Chapman & Hall.
 16. Pospisilova, J., I. Ticha, P. Kadlecek, D. Haisel, and S. Plzakova. 1999. Acclimatization of micropropagated plant to *ex vitro* conditions. *Biol. Planta* 42:481-497.
 17. Weidemann, H.L. 1988. Importance and control of potato virus Y (PVY) in seed potato production. *Potato Res.* 31:85-94.
 18. Zobayed, S.M.A., F. Afreen, Y. Xiao, and T. Kozai. 2004. Recent advancement in research on photoautotrophic micropropagation using large culture vessels with forced ventilation. *In vitro Cell. Dev. Biol.-Plant* 40:450-458.