

## 광전환 필름 피복에 따른 채소류의 묘소질 및 광합성 특성

윤효인<sup>1</sup> · 강준현<sup>1</sup> · 김도연<sup>1</sup> · 손정익<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 농림생물자원학부 원예생명공학전공 대학원생, <sup>2</sup>서울대학교 농림생물자원학부 원예생명공학전공 교수,

<sup>3</sup>서울대학교 농업생명과학연구원 겸임연구원

## Seedling Quality and Photosynthetic Characteristic of Vegetables Grown Under a Spectrum Conversion Film

Hyo In Yoon<sup>1</sup>, Jun Hyeun Kang<sup>1</sup>, Doyeon Kim<sup>1</sup>, and Jung Eek Son<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student, Department of Agriculture, Forestry and Bioresources (Horticultural Science and Biotechnology), Seoul National University, Seoul 08826, Korea

<sup>2</sup>Professor, Department of Agriculture, Forestry and Bioresources (Horticultural Science and Biotechnology), Seoul National University, Seoul 08826, Korea

<sup>3</sup>Adjunct Senior Researcher, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

**Abstract.** This study aims to investigate the effect of spectrum conversion film on seedling quality and photosynthetic traits of leaf and fruit vegetables. Lettuce, Chinese cabbage, and cucumber seeds were sown in 50-cell plug trays filled with commercial seedling media and grown under a spectrum conversion film (SCF) and a poly-ethylene film as a control. The SCF decreased blue-green light and increased red light, and thereby increased the R/FR ratio and R/B ratio of solar spectrum, which was sufficient to affect the photosynthesis, growth, and morphogenesis of the seedlings. The photosynthetic rates of Chinese cabbage and cucumber were significantly increased under the SCF, and their maximum photosynthetic rates were 23% and 19%, respectively. However, the growth of lettuce was decreased under the SCF, and the plant height and leaf length became longer, resulting in a decrease in seedling quality. Although the morphology of Chinese cabbage grown under the SCF was not changed compared to the control, the leaf dry weight increased and its dwarf rate was 10%. The growth of cucumber under the SCF was similar to that of the control, but the plant height and petiole were significantly reduced, resulting in a high dwarf rate of 24%. It was concluded that the solar spectrum modified by the SCF increased the photosynthetic efficiency and improved the seedling quality of Chinese cabbage and cucumber.

**Additional key words :** agriculture covering material, compactness, dwarf rate, light curve, light quality, specific leaf area

## 서 론

광은 식물의 생장에 필수적인 요소이며, 광질은 식물의 생육과 형태형성 반응을 결정한다(Dieleman 등, 2019). 적색광을 인지하는 광수용체인 phytochrome은 종자 발아, 줄기 신장, 잎의 확장, 개화 유도 등 다양한 식물의 생육 및 발달 반응을 매개하고(Smith, 2000), 청색광은 cryptochrome과 phototropin 등의 광수용체로부터 인지되어 광형태형성, 굴광성, 기공 개폐 등 다양한 기작에 관여한다고 알려져 있다(Schulze 등, 2019). 또한 청색과 적색 등 서로 다른 광질의 혼합 이용은 식

물의 엽록소 함량 및 순광합성 속도에도 직접적인 영향을 미친다(Lee 등, 2007). 식물의 엽록소는 주로 적색(663nm와 642nm) 및 청색(430nm와 453nm) 영역의 빛을 흡수하며, 광합성에 대한 분광 양자수율은 적색광과 청색광에서 가장 높은 것으로 알려져 있다(McCree, 1971). 그러나 발광다이오드(light emitting diode, LED)와 같은 단색광을 이용한 이전 연구들은 자연광 같이 다양한 파장의 스펙트럼이 동시에 식물에게 미치는 영향을 설명하기에는 충분하지 않다.

태양광은 온실 피복재를 통과하여 작물에 도달하며, 온실 내 광환경은 피복재의 광학적 특성에 따라 결정된다. 광전환 필름은 작물의 광합성 및 생육을 향상시키기 위하여 태양광 스펙트럼을 변형시키는 기능성 피복재이다(Lamnatou와 Chemisana, 2013). 광전환필름은 상대적으로 높은 에너지를

\*Corresponding author: [sjeenv@snu.ac.kr](mailto:sjeenv@snu.ac.kr)

Received March 22, 2021; Revised April 7, 2021;

Accepted April 12, 2021

가지면서 광합성 효율이 낮은 파장(주로 280-400nm의 자외선 또는 500-600nm의 녹색)을 흡수하여 광합성 효율이 높은 긴 파장(주로 400-500nm의 청색 또는 600-700nm의 적색)으로 발광하는 광전환재를 포함하며, 일반적으로 자외선을 청색으로 또는 녹색을 적색으로 전환시킨다(Park 등, 2016). 기존 연구들에 따르면 광전환필름은 여러 작물에서 생육을 촉진하고 생산성을 향상시킨다고 알려져 있어왔다(Hidaka 등, 2008; Nishimura 등, 2009; Park 등, 2016). 최근에는 광전환 필름에서의 식물의 광합성 효율 증가와 그 메커니즘에 대한 연구가 보고되고 있지만(Li 등, 2017; Yoon 등, 2020a), 광전환필름으로 인한 태양광의 광질 변화에 따라 발생하는 형태형성적 영향에 대해서는 충분히 보고되지 않다.

광질에 의한 식물의 형태형성 반응은 발달 단계 전반에 걸쳐 다양하게 나타나며, 생육 초기의 반응은 그 자체로 묘소질을 결정한다. 채소류의 묘소질은 정식 후 생육과 수량에 큰 영향을 미칠 수 있으며, 도장을 억제하고 지하부 생육을 촉진하여 충실도 높을수록 품질이 높은 묘라고 할 수 있다. 최근에도 LED 조명에 따른 참외와 오이 등 과채류의 묘소질에 대한 연구들이 보고되고 있다(Jeong 등, 2020a; Lee 등, 2016). 오이는 광질에 민감한 주요 시설 원예작물 중 하나로, 많은 연구자들이 광질에 대한 식물의 광합성 및 형태형성 반응을 연구하는 데에 이용하고 있다(Hogewoning 등, 2012; Kang 등, 2020). 엽채류 중에서도 상추와 배추는 대표적인 쌈 채소로 국내에서 신중 상태로 소비되고 있으며 연중 생산을 위해 시설 재배의 비중이 늘어가는 추세다. 상추의 경우 광전환필름 및 LED 조합을 포함하여 다양한 광질에서의 광합성 및 생육에 대해 이전 연구들에서 보고된 바 있다(Nishimura 등, 2009; Son과 Oh, 2013). 본 연구는 광전환 필름에 의해 변형된 태양광 스펙트럼이 상추와 배추, 오이의 묘 생장과 형태특성, 광합성 효율에 미치는 영향을 구명하고자 수행되었다.

## 재료 및 방법

### 1. 식물 재료 및 재배 조건

본 실험은 경기도 수원시(37°16'N, 126°59'E)에 위치한 서울대학교 실험 온실에서 수행되었다. 온실 내 기온은 천창 환기 및 온수 난방을 통해 주간 25°C, 야간 15°C로 조절되었다. 실험 작물로는 로메인 상추(*Lactuca sativa* L.) ‘시저스그린’, 배추(*Brassica rapa* L. ssp. *pekinensis*) ‘CR노랑쌈’, 오이(*Cucumis sativus* L.) ‘조은백다다기’의 엽채류 및 과채류 3종을 이용하였다. 2020년 11월 6일에 각 종자를 원예용 혼합상토(‘쑥쑥이’, Nongwoo Bio Co., Ltd., Korea)가 충전된 50구 플러그 트레이에 파종하였으며, 실험 필름을 각 트레이에 아

지형으로 피복하였다. 파종 후 각 트레이는 점적관을 이용하여 1일 2회 10분씩 저면관수하였다.

### 2. 필름 처리 및 분광 특성

실험에 사용된 필름은 광전환 필름(spectrum conversion film, SCF)과 대조구로서 상업용 폴리에틸렌 필름(Tajopyo PE, Taekwangnewtec Co., Ltd., Korea)이 이용되었다. SCF는 자외선을 청색으로 전환하는 형광 염료와 녹색을 적색으로 전환하는 형광 염료, 근적외선을 차단하는 염료를 포함하는 필름이며, 실험에 사용된 필름의 전광선 투과율은 이전 연구에 따라 분광복사계(BLUE-Wave spectrometer, StellarNet, Inc., USA)와 적분구(IC-2, StellarNet, Inc.)를 이용하여 300-900nm 파장 범위에서 측정하였으며, 솔라시뮬레이터(XIL-01B50KPV1, SERIC, Ltd., Japan) 광원을 이용하였다(Yoon 등, 2020b). 필름이 피복된 온실 내 분광 분포는 2020년 12월 30일 오후 12시에 스펙트로라디오미터를 이용하여 측정하였다.

### 3. 생육 조사

상추와 배추는 12월 7일(피복 후 31일차)에 본엽이 5매가 되었을 때, 오이는 화방 및 덩굴손이 출현한 12월 17일(피복 후 41일차)에 6개체씩 무작위로 선별하여 지상부와 지하부 생체중, 초장을 측정하였다. 작물의 엽병, 절간(1-2번째 마디 사이) 길이, 엽면적, 엽장 및 엽폭은 작물 사진을 촬영한 후 이미지 소프트웨어(ImageJ 1.49, National Institutes of Health, USA)를 이용하여 획득하였고, SPAD 값은 엽록소 측정기(SPAD-502 Plus, Konica Minolta Inc., Tokyo, Japan)를 이용하여 완전히 전개된 잎을 측정하였다. 지상부 생체중을 측정 후 건조 오븐에서 75°C로 1주일 건조한 뒤 중량을 측정하여 건물중으로 삼았다. 비엽면적(specific leaf area, SLA), 왜화율(dwarf rate), 묘의 충실도(compactness)는 기존 연구에 따라 아래의 계산식으로 산출하였다(Jeong 등, 2020b).

$$\text{비엽면적(SLA, cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}) = (\text{식물체당 엽면적}) / (\text{총 건물중}) \quad (1)$$

$$\text{왜화율(drawf rate, \%)} = (\text{대조구 초장} - \text{각 처리의 초장}) / (\text{대조구 초장}) * 100 \quad (2)$$

$$\text{충실도(compactness, mg} \cdot \text{cm}^{-1}) = (\text{지상부의 건물중}) / (\text{식물체의 초장}) \quad (3)$$

#### 4. 엽 광합성 속도

광합성 속도는 작물의 완전히 전개한 잎을 대상으로 휴대용 광합성 측정기(LI-6400XT, Li-Cor Inc., USA)와 LED 챔버(6400-02B, Li-Cor Inc.)를 사용하여 오전 10시부터 오후 3시까지 생육 조사와 동일한 날에 처리구별 4개체씩 광반응곡선을 측정하였다. 모든 측정 전 잎을 챔버 내에서  $1000\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  광합성 유효광양자속밀도(Photosynthetic photon flux density, PPF)로 약 15분 동안 적응시켰으며, 챔버 내의 엽온은  $22.1\pm 1.5^\circ\text{C}$ , 상대습도는  $66.1\pm 6.7\%$ ,  $\text{CO}_2$  농도는  $400\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 로 동일한 조건에서 측정하였다. 광합성속도는 0, 100, 200, 400, 600, 900, 1200,  $1500\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  PPF 수준에서 획득했다.  $\text{CO}_2$  동화에 대한 광반응 곡선은 직각쌍곡선 모델을 이용하였으며, 다음의 식으로 표현된다.

$$P_n = -R_d + P_{max} * I / (P_{max}/\theta + I) \quad (4)$$

$P_n$ 은 순 광합성속도( $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $R_d$ 는 호흡속도( $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $P_{max}$ 는 최대 광합성속도( $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $I$ 는 광합성 유효광양자속밀도( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $\theta$ 는  $I$ 가  $0\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  일 때의 광자 수율을 의미한다. 광도에 따른 상추, 배추, 오이 묘의 엽 광합성 속도 측정 결과를 이용하여 비선형 회귀분석을 실시하였다.

#### 5. 통계분석

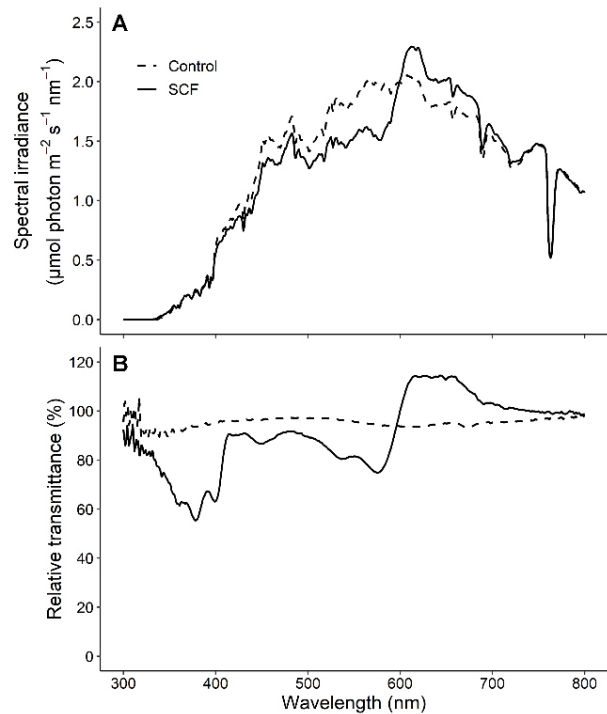
생육조사 결과의 경우, 6개체 중 최대값과 최소값을 갖는 개체를 제외한 후 통계 분석을 진행하였다. 생육 조사 및 광합성 속도 결과는 Student's t-test를 실시하였고, 처리 간 차이를 비교하였다. 광합성의 광반응 곡선의 회귀분석을 포함하여 모든 통계 분석과 그래프 작성은 R 소프트웨어(R 3.6.2, R Foundation, Austria)를 사용하였다.

### 결과 및 고찰

#### 1. 광 스펙트럼 및 필름의 투과 특성

광전환 필름(SCF)과 대조구 필름으로 피복된 실험 온실로

투과된 태양광의 분광분포는 Fig. 1에 나타내었다. 대조구 필름 대비 SCF 피복 온실의 PPF는 적색 파장대(600–700 nm)에서 10.1% 증가하였고, 청-녹색 파장대(400–600 nm)에서 13.6% 감소하였다. 적색 대 원적색(R/FR) 비는 SCF와 대조구 필름에서 각각 1.5, 1.4로 나타났고, PPF는 대조구 필름 대비 SCF 하에서 4.8% 감소하였다. 대조구 필름 대비 SCF의 투과율은 적색 파장대에서 16.1% 높았으며, 청-녹색 파장대에서 10.8% 감소하였다(Fig. 1B, Table 1). 100%보다 높은 투과율은 입사된 광량보다 투과된 광량이 높음을 의미하며, 형광 특성을 갖는 SCF에서만 발견된다. 이전 연구에 따르면 SCF와 같은 형광 필름의 경우, 측정 광원의 스펙트럼에 따라



**Fig. 1.** Spectral distributions (A) of incident light under the spectrum conversion film (SCF) and poly-ethylene film (Control) measured in the experimental site at 12:00 h on 30 December 2020. Total transmittances (B) of the films measured using a spectroradiometer with an integrating sphere and relative percentages to incident light.

**Table 1.** Spectral transmittance of the spectrum conversion film (SCF) and poly-ethylene film (Control) before covering.

Film	Transmittance (%)					
	Ultraviolet <sup>2</sup>	Blue	Green	Red	PAR	Far-red
Control	94.4	96.5	95.6	94.3	95.5	96.5
SCF	75.9	87.9	82.7	110.4	93.7	100.0

<sup>2</sup>Ultraviolet, 280–400 nm; blue, 400–500 nm; green, 500–600 nm; red, 600–700 nm; PAR (photosynthetic active radiation), 400–700 nm; far-red, 700–800 nm.

투과율이 다르게 나타난다(Yoon 등, 2020b). 따라서 본 실험에서는 태양광과 가장 유사한 인공 광원인 솔라시뮬레이터에서 측정하였다.

2. 광-광합성 반응 및 엽록소 함량

엽 광합성속도는 대조구 필름 대비 SCF 하에서 자란 배추와 오이 묘에서 유의적으로 증가하였으며, 상추 묘에서는 차이가 나타나지 않았다(Fig. 2). 회귀분석 결과 광반응 곡선의 매개 변수 값은 Table 2에 나타내었다. 최대 광합성속도( $P_{max}$ )는 대조구 필름 대비 SCF 하에서 자란 배추와 오이 묘에서 각각 23.1%, 19.0% 높았다. 반대로 호흡 속도( $R_d$ )는 SCF 처리구의 배추와 오이 묘에서 각각 40.1%, 26.0% 감소하였다. 이러한 결과는 이전의 파프리카를 대상으로 녹색에서 적색으로 전환시키는 광전환 필름 처리와 동일하였다(Yoon 등, 2020a). 마찬가지로 광전환 필름에서 자란 Arabidopsis가 대조구에 비해  $1200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  PPFD에서 순 광합성속도가 유의적으로 증가한 바 있다(Li 등, 2017). 본 연구에서 동일한 광원

(적색 및 청색 LED)으로 측정한 결과를 통해 광전환필름에 의해 변형된 태양광이 작물의 잎 자체의 광합성 효율을 높이는 광합성 순응 반응을 유도한 것으로 추측할 수 있다. 또한 선행 연구에서는 이러한 순응 반응이 특히 광계1(photosystem I) 주위의 cyclic electron flow를 높여  $\text{CO}_2$  동화를 촉진한 것으로 제안하고 있다(Li 등, 2017; Yoon 등, 2020a). 모든 회귀식의 결정 계수( $R^2$ )가 0.9 이상으로 매우 높았으며, 본 연구에서 사용된 광합성 모델식이 광-광합성속도를 잘 설명하고 있음을 나타낸다(Table 2). 직각 쌍곡선 모델의 경우 광-광합성 반응 곡선을 나타내는 간단한 모델로 이전 연구에서도 이용되고 있다(Lobo 등, 2013).

단위 면적당 엽록소 함량을 나타내는 SPAD 값은 상추와 배추 묘에서는 필름 처리에 따른 차이가 나타나지 않았으나, 오이 묘에서는 SCF 처리구에서 유의적으로 7.2% 증가하였다(Tables 3, 4). 청색광이 엽록소 생합성에 미치는 주요 효과는 이전 연구에서 보고된 바 있으며(Hogewoning 등, 2010), 그 효과는 자외선 또는 적색광의 유무, 적색 대 청색(R/B) 비 등

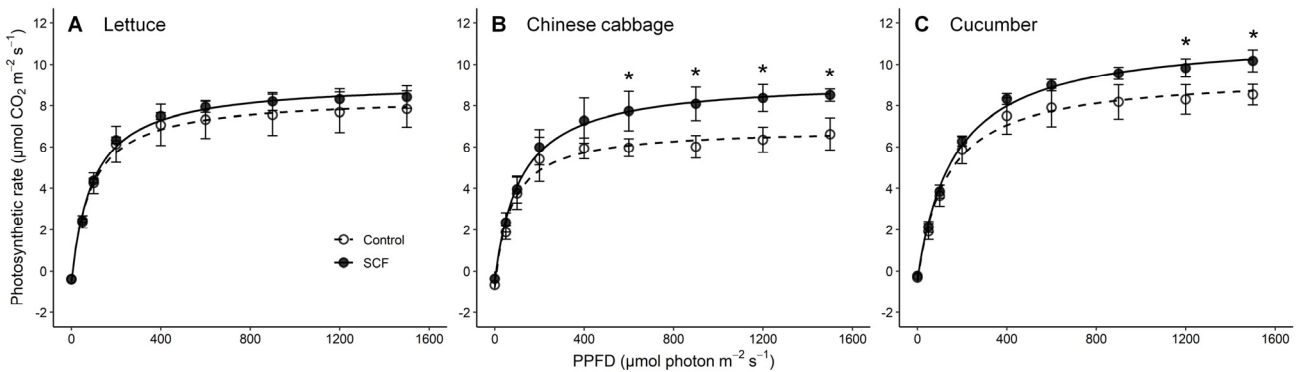


Fig. 2. Light-response curves of net photosynthesis ( $P_n$ ) in the fully expanded leaves of the romaine lettuce (A), Chinese cabbage (B), and cucumber (C) seedlings grown under the spectrum conversion film (SCF) and poly-ethylene film (Control) for 31, 31, and 41 days, respectively. The regression curves were obtained by Eq. (4) (Refer to Table 4 for the parameters). The vertical bars indicate SD,  $n = 4$ . The asterisk indicates significant differences *via* Student's t-test,  $*p < 0.05$ .

Table 2. The parameters and coefficients of determination ( $R^2$ ) for photosynthetic light-response curves of the romaine lettuce, Chinese cabbage, and cucumber seedlings grown under the SCF and poly-ethylene film (Control) for 31, 31 and 41 days, respectively.

Plant	Film	$R_d^z$ ( $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$P_{max}$ ( $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$\theta$ ( $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$R^2$
Lettuce	Control	0.509	8.89	0.105	0.939
	SCF	0.522	9.68	0.101	0.987
Chinese cabbage	Control	0.753	7.85	0.100	0.921
	SCF	0.451	9.66	0.086	0.962
Cucumber	Control	0.522	9.94	0.079	0.964
	SCF	0.386	11.83	0.072	0.992

<sup>z</sup>The parameters ( $R_d$ ,  $P_{max}$ , and  $\theta$ ) of regression curves were obtained by Eq. (4).

에 따라 결과가 상이하였다(Son과 Oh, 2013; Huché-Thélier 등, 2016). 한편 이전 연구들에서 복합 광원 하에서는 원적색광이 적을수록, 즉 R/FR이 증가했을 때 SPAD 값이 증가된다고 보고한 바 있다(Jeong 등, 2020a; Zhang 등, 2020). 본 연구에서는 SCF 처리구 하에서 줄어든 청색광에도 불구하고, 감소한 자외선량 및 높은 R/B 비(SCF의 경우 1.8, 대조구의 경우 1.5)로 인해 오이 잎의 단위 면적당 엽록소 농도의 증가로 인해 나타난 결과로 판단된다.

### 3. 묘의 생육 및 형태형성

대조구 필름과 SCF 하에서 자란 묘의 생육 및 형태 변화는 작물별로 다른 양상을 나타내었다(Tables 3, 4, Fig. 3). 대조구 필름 대비 SCF 하에서 자란 상추 묘의 경우, 뿌리의 생체중과 건물중, 잎의 건물중이 유의적으로 감소하였으며, 엽장이 길어짐에 따라 초장이 증가하였다. 반면에 SCF 하에서 자란 배추 묘의 경우, 대조구 필름 대비 잎의 건물중이 유의적으로 21.3% 증가하였으며 엽형태의 경우 큰 차이를 보이지 않았다. 오이 묘의 경우, 필름 처리에 따라 줄기의 건물중은 차이 없

**Table 3.** Growth and morphology of the romaine lettuce and Chinese cabbage seedlings grown under the spectrum conversion film (SCF) and poly-ethylene film (Control) for 31 days.

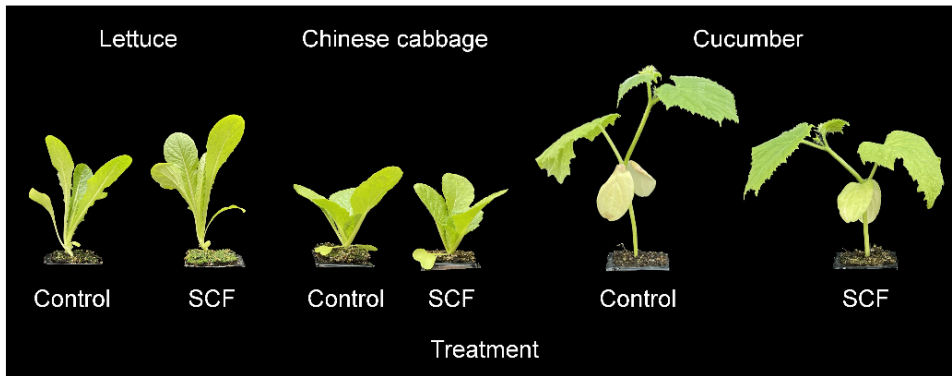
Plant	Film	Fresh weight (g)		Dry weight (g)		SPAD value
		Leaf	Root	Leaf	Root	
Lettuce	Control	2.7 ± 0.2 <sup>z</sup>	1.0 ± 0.1	0.19 ± 0.01	0.07 ± 0.01	24.9 ± 1.9
	SCF	2.7 ± 0.2	0.7 ± 0.1	0.16 ± 0.01	0.04 ± 0.01	23.5 ± 2.1
		ns	**	*	**	ns
Chinese cabbage	Control	2.4 ± 0.2	1.1 ± 0.0	0.26 ± 0.02	0.08 ± 0.01	23.7 ± 1.3
	SCF	2.4 ± 0.1	1.1 ± 0.2	0.32 ± 0.01	0.08 ± 0.00	23.8 ± 0.3
		ns	ns	**	ns	ns
Plant	Film	Leaf area (cm <sup>2</sup> )	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Plant height (cm)	
Lettuce	Control	79.3 ± 4.9	11.3 ± 0.7	3.9 ± 0.1	11.1 ± 1.5	
	SCF	80.1 ± 6.5	13.8 ± 1.3	3.7 ± 0.3	14.8 ± 1.9	
		ns	*	ns	*	
Chinese cabbage	Control	75.0 ± 4.7	9.5 ± 0.9	4.4 ± 0.4	9.4 ± 0.8	
	SCF	73.2 ± 4.9	8.9 ± 0.2	4.5 ± 0.1	8.2 ± 0.6	
		ns	ns	ns	ns	

<sup>z</sup>Data are presented as mean ± SD (n = 4). The asterisk indicates significant differences via Student's t-test, \**p* < 0.05; \*\**p* < 0.01; ns, not significant.

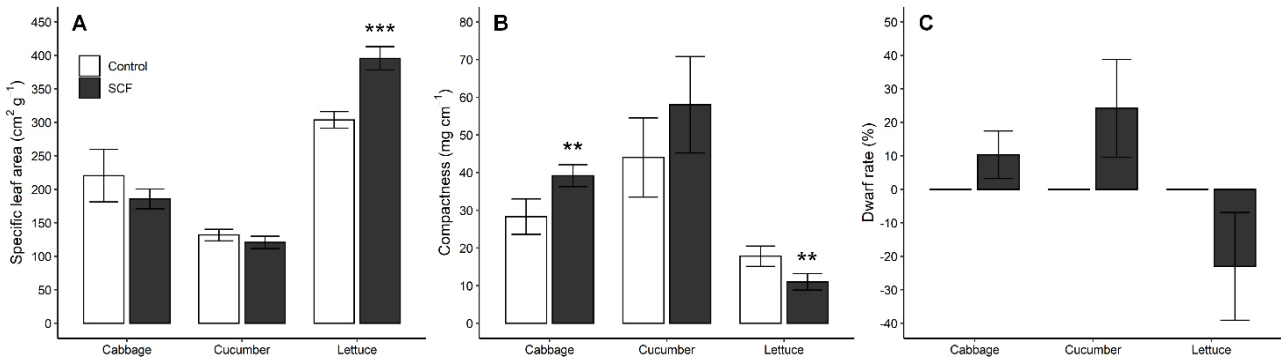
**Table 4.** Growth and morphology of the cucumber seedlings grown under the spectrum conversion film (SCF) and poly-ethylene film (Control) for 41 days.

Film	Fresh weight (g)			Dry weight (g)			SPAD value
	Leaf	Petiole and stem	Root	Leaf	Petiole and stem	Root	
Control	2.8 ± 0.3	2.3 ± 0.2	1.9 ± 0.6	0.63 ± 0.09	0.25 ± 0.03	0.22 ± 0.03	28.4 ± 0.8
SCF	2.6 ± 0.1	1.9 ± 0.3	2.0 ± 0.1	0.63 ± 0.04	0.23 ± 0.02	0.22 ± 0.01	30.5 ± 0.9
	ns	*	ns	ns	ns	ns	*
Film	Leaf area (cm <sup>2</sup> )	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Plant height (cm)	Petiole length (cm)	Internode length (cm)	
Control	114.5 ± 16.0	8.7 ± 0.8	10.5 ± 0.2	20.4 ± 2.4	3.2 ± 0.2	5.2 ± 0.9	
SCF	130.9 ± 11.5	8.9 ± 0.5	10.1 ± 0.2	15.4 ± 3.0	2.5 ± 0.4	4.5 ± 1.4	
	ns	ns	*	*	*	ns	

<sup>z</sup>Data are presented as mean ± SD (n = 4). The asterisk indicates significant differences via Student's t-test, \**p* < 0.05; ns, not significant.



**Fig. 3.** Representative images of the romaine lettuce, Chinese cabbage, and cucumber seedlings grown under the spectrum conversion film (SCF) and poly-ethylene film (Control) for 31, 31 and 41 days, respectively.



**Fig. 4.** Specific leaf area (A), compactness (B), and dwarf ratio (C) of the romaine lettuce, Chinese cabbage and cucumber seedlings grown under the spectrum conversion film (SCF) and poly-ethylene film (Control) for 31, 31 and 41 days, respectively. The parameters were calculated by Eqs. 1–3. The vertical bars indicate SD, n = 4. The asterisk indicates significant differences *via* Student's t-test, \*\* $p < 0.01$ ; \*\*\* $p < 0.001$ .

나 SCF 처리구에서 초장은 유의적으로 24.5% 감소하였으며 엽병과 줄기의 생체중이 20.5% 유의적으로 감소하였는데, 이는 엽병 길이의 20.1% 유의적 감소에 의한 것으로 추정되었다. 유사하게 광전환필름 하에서의 엽병 길이 감소는 파프리카를 대상으로 한 이전 연구에서도 나타났다(Yoon 등, 2020a). 엽병 생장은 피토크롬(phytochrome)에 의해 조절되는 반응으로 일반적으로 R/FR 비가 낮은 음지 환경에서 나타난다(Lötscher와 Nösberger, 1997; Ranwala 등, 2002). 또한 식물은 수광량을 높이기 위한 전략으로 엽병 길이가 증가되기도 한다(Duursma 등, 2012; Takenaka, 1994). 따라서 본 연구에서 SCF 하에서 높은 R/FR 비와 형광 소재에 의한 적색 산란광에 의해 오이 묘의 엽병 길이 신장이 억제되었다고 추측된다. 대조구 필름과 SCF 하에서 자란 묘의 품질을 나타내는 비엽면적과 충실도, 왜화율은 Fig. 4에 나타내었다. SCF 처리구에서 배추의 충실도는 유의적으로 38.3% 증가하고 왜화율은 10.3%로 나타났다. 마찬가지로 SCF 하에서 자란 오이 묘의 충실도는 31.7% 증가했고, 왜화율은 24.2%로 높았다. 충실

도는 전체 건물중에서 지상부의 초장을 나눈 값으로, 그 값이 높을수록 묘의 품질이 우수하다고 보고되고 있다(Jo 등, 2021; Lee 등, 2016). 왜화율은 수치가 높을수록 대조구에 비해 초장이 감소하여 성장 억제 효과가 있는 것으로 보며, 묘의 도장이 줄어들음을 나타낸다(Jeong 등, 2020b). 잎의 두께를 간접적으로 나타내는 비엽면적은 값이 클수록 잎의 두께가 얇은 것을 의미하는데, 상추에서 유의적으로 증가하였으며, Kim 등 (2021)은 왕고들빼기에서 광도가 높을수록 비엽면적이 감소한다고 보고한 바 있다. 또한 SCF 하에서 자란 상추 묘의 충실도가 유의적으로 감소하고, 왜화율이 음의 값을 나타내어 묘소질이 저하되었다. 이는 SCF에서의 낮은 PPFD에 의해 상추 묘가 도장한 결과로 보인다. 반면에 SCF 처리구에서의 배추와 오이 묘의 품질 향상은 낮은 PPFD에도 불구하고 태양광의 광질 변화로 인한 광합성 속도 증가와 형태형성적 변화 유도에 따른 결과로, 광전환 필름이 일반 상업용 필름에 비해 배추와 오이 묘의 도장 억제 및 묘소질 향상에 효과적임을 나타낸다.

## 적 요

본 연구는 광전환필름에 의해 변형된 태양광 하에서 채소류의 묘소질과 광합성 특성에 미치는 영향을 구명하기 위해 수행되었다. 상추와 배추, 오이 종자를 원예용 상토로 충전된 50구 플러그 트레이에 파종하고, 광전환 필름(SCF)과 상업용 폴리 에틸렌 필름(대조군) 하에서 재배하였다. 대조군 대비 SCF에 투과된 태양광 스펙트럼은 청-녹색광은 감소하고, 적색광은 증가했으며 R/FR 비와 R/B 비가 증가하여 묘의 광합성과 생육, 형태형성 측면에서 영향을 미치기에 충분한 수준이었다. 광합성속도는 SCF 하에서 자란 배추와 오이 묘에서 유의적으로 증가했으며, 최대 광합성속도는 각각 23%, 19% 높게 나타났다. 상추의 경우, SCF 처리구에서 생육이 유의적으로 감소하였으며 도장하였다. SCF 필름 하에서 자란 배추의 경우, 형태적인 차이는 없었으나 잎의 건물중이 증가하여 묘의 충실도가 유의적으로 증가했고 왜화율은 10%로 나타났다. SCF 처리구의 오이 묘는 생육에 차이는 없었으나 엽병 및 초장이 유의적으로 감소하여 왜화율이 24%로 높게 나타났다. 결론적으로 SCF에 의해 변형된 태양광 스펙트럼은 배추와 오이 묘의 광합성 효율을 증가시키고 묘소질을 향상시켰다고 판단되었다.

**추가주제어:** 광반응 곡선, 농업용 피복재, 비엽면적, 왜화율, 충실도

## 사 사

이 연구는 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 지원으로 수행되었음(10052798).

## Literature Cited

Dieleman J.A., P.H.B. de Visser, E. Meinen, J.G. Grit, and T.A. Dueck 2019, Integrating morphological and physiological responses of tomato plants to light quality to the crop level by 3D modeling. *Front Plant Sci* 10:1-12. doi:10.3389/fpls.2019.00839

Duursma R.A., D.S. Falster, F. Valladares, F.J. Sterck, R.W. Pearcy, C.H. Lusk, K.M. Sendall, M. Nordenstahl, N.C. Houter, B.J. Atwell, N. Kelly, J.W.G. Kelly, M. Liberloo, D.T. Tissue, B.E. Medlyn, and D.S. Ellsworth 2012, Light interception efficiency explained by two simple variables: a test using a diversity of small- to medium-sized woody plants. *New Phytol* 193:397-408. doi:10.1111/j.1469-8137.2011.03943.x

Hidaka K., K. Yoshida, K. Shimasaki, K. Murakami, D. Yasutake, and M. Kitano 2008, Spectrum conversion film for regulation of plant growth. *J Fac Agric Kyushu Univ* 53:549-552. doi:10.5109/12872

Hogewoning S.W., E. Wientjes, P. Douwstra, G. Trouwborst, W. van Ieperen, R. Croce, and J. Harbinson 2012, Photosynthetic quantum yield dynamics: From photosystems to leaves. *Plant Cell* 24:1921-1935. doi:10.1105/tpc.112.097972

Hogewoning S.W., G. Trouwborst, H. Maljaars, H. Poorter, W. Ieperen, and J. Harbinson 2010, Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *J Exp Bot* 61:3107-3117. doi:10.1093/jxb/erq132

Huché-Thélier L., L. Crespel, J.L. Gourrierc, P. Morel, S. Sakr, and N. Leduc 2016, Light signaling and plant responses to blue and UV radiations—Perspectives for applications in horticulture. *Environ Exp Bot* 121:22-38. doi:10.1016/j.envexpbot.2015.06.009

Jeong H.W., H.R. Lee, H.M. Kim, H.M. Kim, H.S. Hwang, and S.J. Hwang 2020a, Using light quality for growth control of cucumber seedlings in closed-type plant production system. *Plants* 9:639. doi:10.3390/plants9050639

Jeong H.W., H.R. Lee, H.S. Hwang, E.B. Kim, and S.J. Hwang 2020b, Growth suppression of tomato plug seedlings as affected by material type for brushing stimulation. *Prot Hortic Plant Fact* 29:313-319. doi:10.12791/KSBEC.2020.29.4.313

Jo H.G., H.W. Jeong, H.R. Lee, S.M. Kwon, H.S. Hwang, and S.J. Hwang 2021, Growth of tomato and pepper grafted plug seedlings under different shading condition during acclimatization after graft-taking. *J Bio-Environment Control* 30:10-18. doi:10.12791/KSBEC.2021.30.1.010

Kang W.H., J. Kim, H.I. Yoon, and J.E. Son 2020, Quantification of spectral perception of plants with light absorption of photoreceptors. *Plants* 9:556. doi:10.3390/plants9050556

Kim J.K., D.C. Jang, H.M. Kang, K.J. Nam, M.H. Lee, J.K. Na, and K.Y. Choi 2021, Effects of light intensity and electrical conductivity level on photosynthesis, growth and functional material contents of *Lactuca indica* L. ‘Sunhyang’ in hydroponics. *J Bio-Environment Control* 30:1-9. doi:10.12791/KSBEC.2021.30.1.001

Lamnatou C., and D. Chemisana 2013, Solar radiation manipulations and their role in greenhouse claddings: Fluorescent solar concentrators, photoselective and other materials. *Renew Sustain Energy Rev* 27:175-190. doi:10.1016/j.rser.2013.06.052

Lee J.E., Y.S. Shin, H.W. Do, J.D. Cheung, and Y.H. Kang 2016, Effect of seedling quality and growth after transplanting of Korean melon nursed under LED light sources and intensity. *Prot Hortic Plant Fact* 25:294-301. doi:10.12791/KSBEC.2016.25.4.294

- Lee S.-H., R.K. Tewari, E.-J. Hahn, and K.-Y. Paek 2007, Photon flux density and light quality induce changes in growth, stomatal development, photosynthesis and transpiration of *Withania Somnifera* (L.) Dunal. plantlets. *Plant Cell Tissue Organ Cult* 90:141-151. doi:10.1007/s11240-006-9191-2
- Li Y., W. Tu, C. Liu, W. Liu, G. Hu, X. Liu, Z. Chen, and C. Yang 2017, Light conversion film promotes CO<sub>2</sub> assimilation by increasing cyclic electron flow around Photosystem I in *Arabidopsis thaliana*. *Int J Hydrogen Energy* 42:8545-8553. doi:10.1016/j.ijhydene.2017.01.108
- Lobo F. de A., M.P. de Barros, H.J. Dalmagro, Â.C. Dalmolin, W.E. Pereira, É.C. de Souza, G.L. Vourlitis, and C.E. Rodríguez Ortíz 2013, Fitting net photosynthetic light-response curves with Microsoft Excel - A critical look at the models. *Photosynthetica* 51:445-456. doi:10.1007/s11099-013-0045-y
- Lötscher M., and J. Nösberger 1997, Branch and root formation in *Trifolium repens* is influenced by the light environment of unfolded leaves. *Oecologia* 111:499-504. doi:10.1007/s004420050263
- McCree K.J. 1971, The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric Meteorol* 9:191-216. doi:10.1016/0002-1571(71)90022-7
- Nishimura Y., Y. Fukumoto, H. Aruga, and Y. Shimoi 2009, Growth and developmental characteristics of vegetables grown under spectrum conversion film. *Hortic Environ Biotechnol* 50:416-421.
- Park K.S., J.K. Kwon, D.K. Lee, and J.E. Son 2016, Microclimate and crop growth in the greenhouses covered with spectrum conversion films using different phosphor particle sizes. *Prot Hortic Plant Fact* 25:111-117. doi:10.12791/KSBEC.2016.25.2.111
- Ranwala N.K.D., D.R. Decoteau, A.P. Ranwala, and W.B. Miller 2002, Changes in soluble carbohydrates during phytochrome-regulated petiole elongation in watermelon seedlings. *Plant Growth Regul* 38:157-163. doi:10.1023/A:1021272902811
- Schulze E.-D., E. Beck, N. Buchmann, S. Clemens, K. Müller-Hohenstein, and M. Scherer-Lorenzen 2019, Light. In: *Plant Ecology*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 57-90. doi:10.1007/978-3-662-56233-8\_3
- Smith H. 2000, Phytochromes and light signal perception by plants - An emerging synthesis. *Nature* 407:585-591. doi:10.1038/35036500
- Son K.-H., and M.-M. Oh 2013, Leaf shape, growth, and antioxidant phenolic compounds of two lettuce cultivars grown under various combinations of blue and red light-emitting diodes. *HortScience* 48:988-995. doi:10.21273/HORTSCI.48.8.988
- Takenaka A. 1994, Effects of leaf blade narrowness and petiole length on the light capture efficiency of a shoot. *Ecol Res* 9:109-114. doi:10.1007/BF02347485
- Yoon H.I., J.H. Kang, W.H. Kang, and J.E. Son 2020a, Subtle changes in solar radiation under a green-to-red conversion film affect the photosynthetic performance and chlorophyll fluorescence of sweet pepper. *Photosynthetica* 58:1107-1115. doi:10.32615/ps.2020.057
- Yoon H.I., J.H. Kim, K.S. Park, J.W. Namgoong, T.G. Hwang, J.P. Kim, and J.E. Son 2020b, Quantitative methods for evaluating the conversion performance of spectrum conversion films and testing plant responses under simulated solar conditions. *Hortic Environ Biotechnol* 61:999-1009. doi:10.1007/s13580-020-00286-y
- Zhang M., Y. Park, and E.S. Runkle 2020, Regulation of extension growth and flowering of seedlings by blue radiation and the red to far-red ratio of sole-source lighting. *Sci Hortic* 272:109478. doi:10.1016/j.scienta.2020.109478