



## Effect of Polycarbonate Covering Sheet on Greenhouse Indoor Environments and Growth Behavior of Cherry Tomatoes

Kyung Yun Choi, Soo Bok Kim\*, Seokhu Bae\*\*, Jeong-Hwan Yoon\*\*, Ju-Ho Yun\*\*, and Namil Kim†

Technical Research Center, Taekwang Newtec, 11 Ssireumteo-gil, Geumga-myeon, Chungju-si, Chungbuk 27441, Republic of Korea

\*Chungju Agricultural Technology Center, 1350 Chungwon-daero, Dongnyang-myeon, Chungju-si, Chungbuk 27442, Republic of Korea

\*\*Advanced Materials R&D Center, Korea Automotive Technology Institute, 303 Pungse-ro, Pungse-myeong, Chungnam 31214, Republic of Korea

(Received April 27, 2020, Revised May 18, 2020, Accepted May 22, 2020)

**Abstract:** The effect of a greenhouse-covering material on its indoor environment and on the characteristics of cherry tomatoes grown in it was investigated. The conventional polyethylene (PE) film on the greenhouse roof was replaced by a polycarbonate (PC) sheet, while maintaining the main structural frame intact. Color changes and the formation of water droplets on the PC surface were avoided by applying coextrusion and coating layers. When compared to the PE greenhouse, the PC greenhouse enabled increased light transmittance and thus a higher indoor temperature during both summer and winter. The thermal insulating property of the PC sheet effectively reduced the heating loss by approximately 55% during winter. The cherry tomatoes grown in the PC greenhouse exhibited superior fruit characteristics in terms of size, weight, and sugar content. The total amount of cherry tomatoes produced per unit area (1,000 m<sup>2</sup>) in the PC greenhouse was found to be greater by approximately 19% compared to that in the PE greenhouse.

**Keywords:** cherry tomato, energy saving, greenhouse, indoor temperature, polycarbonate

### Introduction

건강에 대한 관심이 증가하면서 사계절 신선한 농산물을 공급할 수 있는 시설원예산업이 꾸준히 주목을 받고 있으며 대외적으로는 국가간 자유무역이 활발히 진행되면서 농업 분야에서 경쟁력을 확보하기 위해 기술 집약적이고 고품질의 농산물을 생산할 수 있는 시설원예산업이 대안으로 떠오르고 있다. 국내 시설농업 분야는 1990년대 환경관리가 가능한 비닐하우스, 경질판온실, 유리온실이 보급된 이후 현대화가 급속히 진행되었다. 시설원예용 온실은 폴리에틸렌(Polyethylene, PE) 혹은 에틸렌비닐 아세테이트(Ethylenevinyl acetate, EVA)계의 연질 필름을 사용하는 비닐하우스와 판유리를 기반으로 제작된 유리온실이 주로 설치되어 사용되고 있다.<sup>1-5</sup> 국내 시설원예시설의 95% 이상을 차지하는 비닐하우스는 채소, 과일, 화훼 등 다양한 농산물이 생산되고 있으나 피복재를 1~3년 주기로 교체하면서 발생하는 폐비닐에 의한 환경오염문제와 추가 비용, 겨울철 외부 열손실에 의한 난방비 증가 등의 이유로 농가에 적잖은 부담이 되고 있다. 또한 유리나 아크릴 재질의 피복재에 비해 광투과율이 떨어져 재배작물의 생육부진

이나 품질저하를 유발할 수 있다. 대규모 연동 형태의 유리온실은 투과율은 우수하지만 비닐하우스에 비해 설치비가 약 8~10배 정도 비싸고 외부 충격에 의해 파손되어 정부의 지원 없이 일반 농가에서 설치하기 어려운 실정이다.

투명 열가소성 플라스틱 소재인 폴리카보네이트(Polycarbonate, PC)는 광투과율(> 85%)과 내충격성(일반유리의 250배, 아크릴의 50배)이 뛰어나고 유연성과 가공성이 우수해 유리 또는 연질필름의 대체 소재로 관심을 받고 있다.<sup>6-10</sup> 고유의 단열특성(열전도도 ~0.2 W/mK)으로 인해 시설하우스 내부와 외부의 열흐름을 효과적으로 차단함으로써 작물의 성장을 앞당기고 난방비를 절감할 수 있다. 하지만 장시간 옥외 노출 시 자외선에 의해 분해되어 황변이 발생하고 굽힘과 마모에 취약한 단점으로 인해 외장부품 적용에 한계가 있다.<sup>11-14</sup> 본 연구에서는 PC 고유의 단점을 극복하기 위하여 시트 위에 공압출층과 코팅층을 동시에 도입하여 내구성과 표면 특성을 향상시키고자 시도하였다. 기존 PE 온실의 골조를 그대로 사용하였고 덮개 부분만 PC 시트로 대체한 후 온실 내부환경 변화와 토마토 생육특성에 대해 알아보았다.

†Corresponding author E-mail: [nikim@katech.re.kr](mailto:nikim@katech.re.kr)

## Experimental

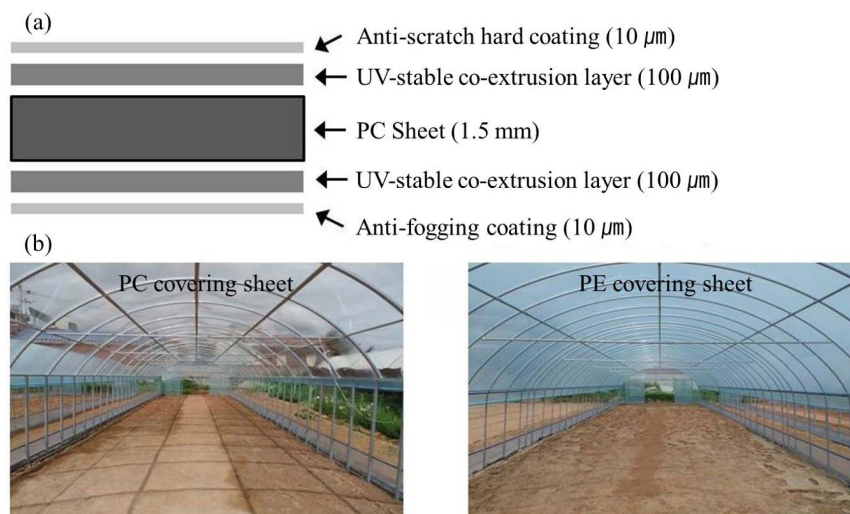
롯데케미칼에서 제공받은 펠렛 형태의 폴리카보네이트는 옥외 적용 및 다층시트 제조에 적합한 고강도, 고점도 PC-1070U (MI = 7 g/10 min at 300°C) 제품을 사용하였고, 240~280°C의 온도범위에서 압출시켜 두께가 1.5 mm이고 크기가 1220 × 2440 mm인 시트를 제조하였다. PC 시트의 인장강도는 61.8 MPa을 보였으며 굴곡강도와 굴곡탄성률은 각각 90.2 MPa, 2,353 MPa임을 확인하였다. 외부 환경 노출에 따른 황변 발생을 억제시키기 위하여 시트 양면에 UV 안정제 (Tinuvin-1600, BASF)가 1.5 wt% 첨가된 PC기반 공압출층을 100 μm 두께로 도입하였다.<sup>15</sup> 공압출된 PC 시트의 바깥면에는 다관능 아크릴 단량체로 구성된 하드코팅층을 추가로 도입하였고 안쪽면에는 무적코팅제(H-5000, NOF)를 도포하여 물방울 맺힘 현상을 억제시키고자 시도하였다.<sup>16</sup> 하드코팅층과 무적코팅층은 각각 자외선과 열을 조사하여 경화가 진행되었으며 자외선 노출 총광량은 약 700~800 mJ/cm<sup>2</sup> 범위에서 조절되었고 열경화는 90°C에서 15분동안 진행되었다. 총 5개 층으로 구성된 PC 시트의 구조 및 각각의 기능을 Figure 1a에 보여주고 있다. 표면경도는 KS M ISO 15184에 기준하여 PC 표면에서 45° 각도를 유지한 상태에서 규정된 연필을 대고 1kg의 하중을 가하였을 때 긁힘 정도에 따라 평가하였다. 내구성을 알아보기 위하여 촉진내후성시험(SAE J1960)을 진행하였다. 하드코팅된 시험편 표면이 빛에 조사되도록 환경시험기(Xe-3, Q-Lab) 내에 걸고 1,000시간동안 노출시킨 후 색차계(Color i5D, X-rite)를 이용하여 변색 정도를 확인하였다.

일반 PE 온실과 유사한 구조의 골조에 지붕 부분만 PC로 대체하여 돔형 온실을 설치한 후 계절에 따른 내부환경 변화에 대해 살펴보았다(Figure 1b). 온실의 길이와 폭은 각각

21 m와 5.4 m이고 동고와 간고는 각각 2.8 m와 1.8 m로 고정하였다. 광투과율이 80%~90% 수준이고 두께가 8 mm인 PE 필름을 온실의 지붕뿐만 아니라 전후면과 출입문, 측면 개폐 부분에도 사용하였다. PC 온실과 PE 온실 내부에 투과되는 광투과율과 광량은 헤이즈측정기와 조도계를 사용하여 각각 측정하였다. 여름철과 겨울철 외부 온도에 따른 내부의 온도 변화는 자기온습도계를 설치하여 알아보았고 지온 변화는 10 cm 아래에 삽입형지온계를 매설하여 측정하였다. 시험구별 오차를 최소화하기 위하여 세 곳을 선정 후 평균값을 구하였다. 겨울철 난방효과는 온풍난방기를 PC 온실과 PE 온실에 각각 설치한 후 일정온도를 유지하기 위하여 소요되는 시간을 통하여 알아보았다

## Results and Discussion

PC는 장시간 자외선 노출 시 황변이 발생하여 광투과율이 저하되므로 광안정제가 첨가된 공압출층을 PC 양면에 도입하였다. 플라스틱 소재의 내후성을 판단하는 지표로 색차값 ( $\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$ )이 주로 사용되는데 L값은 색의 밝기 (0 : 검은색, 100: 하얀색)와 관련이 있고 a값은 색의 초록 (-80)과 홍색(100), b값은 청색(-80)과 황색(70) 정도를 나타낸다. 1,000시간의 내후성 시험 후 색차값( $\Delta E$ )을 비교해 보면 공압출된 PC는 1.66을 보인 반면, 일반 PC는 3배정도 높은 4.99를 보였다(Table 1). 특히 L, a값에 비해 b값이 상대적으로 큰 차이를 보였는데 이는 시간의 흐름에 따라 시트가 점차적으로 황색으로 변화되고 있음을 의미한다. 색차값이 2이하일 경우 육안으로는 황변을 거의 인식할 수 없는 수준이기 때문에 초기와 거의 동일한 색의 범위로 간주될 수 있으며 층간 박리에 의한 헤이즈 현상도 발견되지 않아 계면접착력 역시 우수한 것으로 확인되었다. 일반 PC의 연필경도(Pencil



**Figure 1.** (a) Structures of PC sheet consisting of UV-stable co-extrusion, anti-scratch hard coating and anti-fogging coating layers and (b) the pictures of PC greenhouse and PE greenhouse.

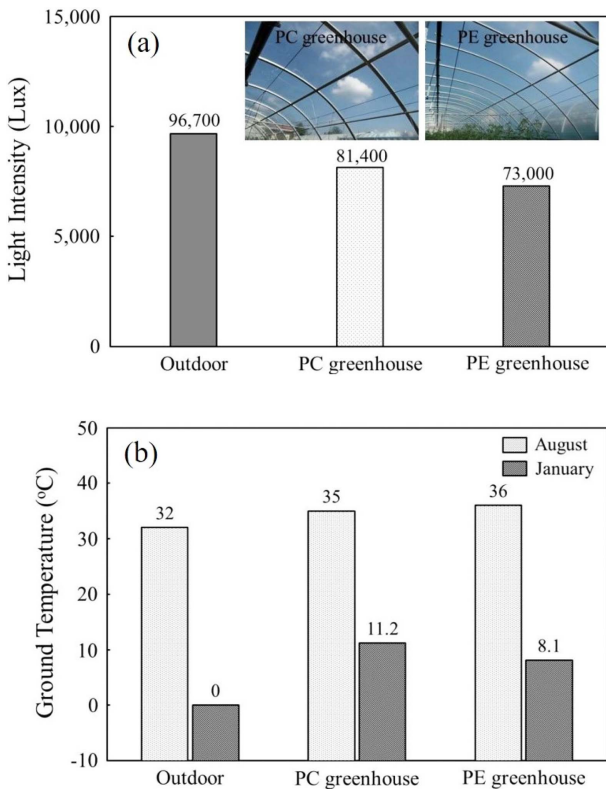
**Table 1.** Comparison of Surface Hardness and Optical Properties of PC Sheet after Introduction of UV-resistant co-extrusion and Hard Coating Layers

	PH	T (%)	Weathering Test						Color Change ( $\Delta E$ )
			Before			After			
			L	a	b	L	a	b	
PC	2B	87	95.40	-0.05	0.03	94.32	-1.10	4.79	4.99
Surface coated PC	2H	86	96.36	-0.43	0.46	95.10	-0.56	1.53	1.66

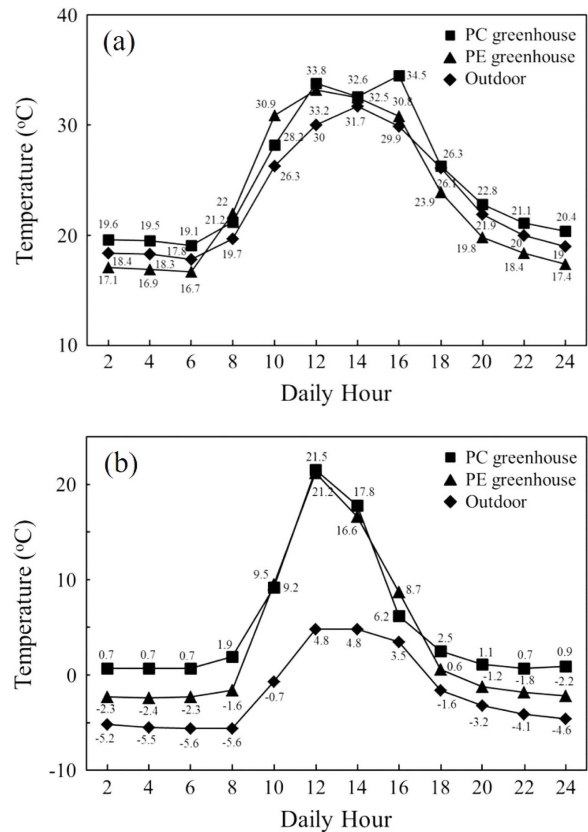
hardness, PH)는 2B 수준으로 돌푼이나 우박 등에 의해 표면이 쉽게 손상될 수 있으나 하드코팅층을 도입함으로써 2H까지 향상시킬 수 있었다. 하드코팅층이 두꺼울수록 경도는 향상되지만 외부환경 변화에 대한 저항성이 떨어져 쉽게 크랙이 발생할 수 있으므로 10  $\mu\text{m}$  수준에서 최적화 되었다. 공압출층과 코팅층의 도입 유무에 상관없이 PC 시트의 가시광선 투과율(Transmittance, T)은 85% 이상을 유지하였다. 공압출된 PC의 인장강도와 굴곡탄성률은 순수 PC에 비해 각각 6.9 MPa, 307 MP 상승하여 기계적 특성 역시 우수한 것으로 나타났다.

외부 태양빛의 광도가 96,700 Lux일 때 PC와 PE로 피복된 온실 내부 광도는 각각 84,400 Lux와 73,000 Lux이 측정되어 15.9%와 24.5% 저감되었고 내부에서 하늘을 바라보면 PC 피복재에서 보다 선명한 것을 확인하였다(Figure 2a). 작물은 뿌리로부터 공급된 양수분과 공기로부터 흡수된 이산화탄소를

앞에 집결시키고 태양에너지를 받아 대사과정이 진행되는데 햇빛의 쪼임량이 부족할 경우 생육에 필요한 탄수화물 생성량이 감소되므로 생육이 늦고 품질이 저하될 수 있다. 시설하우스 내에서 지온과 기온은 작물의 생육과 수량, 품질을 결정하는 중요한 요인으로 작용한다. 여름철(8월상순) 외부 지온이 32.0°C일때 지표 아래 10 cm 지점에서의 지온을 살펴보면 PC 온실과 PE 온실은 각각 35.0°C와 36.0°C를 보여 큰 차이를 보이지 않았다(Figure 2b). 여름철 지온 상승을 억제시킬 경우 재배작물 뿌리부의 활동력을 높여줌으로써 성장에 도움을 줄 수 있다. 지표 아래 10 cm 깊이에서 0.0°C인 겨울철에는 PC 온실은 11.2°C를 보여 PE 온실(8.1°C)에 비해 3°C 이상 따뜻하게 유지되고 있음을 확인하였다. 난방을 작동하지 않았음에도 차이가 발생한 이유는 태양에너지 흡수 능력과 축열된 에너지의 방출 억제에 기인한 것으로 사료된다.



**Figure 2.** Comparison of indoor environments of PC greenhouse and PE greenhouse: (a) light intensity and (b) ground temperature.



**Figure 3.** Daily temperature changes of PC greenhouse and PE greenhouse in (a) August and (b) January.



Figure 3a는 외부 평균기온이 23.3℃일 때 1일 시간대별 온도변화를 보여준다. 일반 비닐하우스(PE)는 외부 온도에 민감하게 반응하여 큰 온도 변화폭을 나타내었다. 일출시간대인 오전 6시(16.7℃)부터 가파르게 상승하기 시작한 이후 12시에는 최고 33.2℃를 보였다. 16시까지 30℃ 이상을 유지하다가 급격히 떨어지기 시작하였고 18시부터는 외부온도보다 오히려 더 낮은 온도를 형성하였다. 새벽 2시부터 6시까지는 시간대에서는 16.7~17.1℃ 분포를 보여 외부온도(17.8~18.4℃)보다 1℃ 이상 낮았다. PC 온실은 시간대에 상관없이 외부 기온보다 높은 온도를 유지하였고 낮 12시(33.8℃)부터 16시(34.5℃)까지의 시간대에서 가장 높았다. 새벽 2시부터 6시까지는 평균 19.1~19.6℃를 유지함으로써 외부기온 및 PE 온실보다 각각 1.2℃, 2.4℃ 이상 높은 것을 확인하였다. 겨울철(12월 중하순)에는 피복재의 종류에 상관없이 온실의 내부가 외부보다 높았다(Figure 3b). 새벽 2시부터 아침 8시까지 외부 기온이 -5.2~-5.6℃일때 PE 온실 내부의 온도는 -1.6~-2.4℃의 분포를 보였으며 PC 온실은 0.7~1.9℃대를 유지하였다. 일출시간인 8시 이후 온도가 상승하기 시작하였고 12시경에는 각각 최고 21.2℃와 21.5℃에 도달하였다. 외부 최고기온이 4.8℃인 것을 고려하면 태양열이 효과적으로 내부에 전달되어 축적되었음을 예상할 수 있다. 12시 이후에는 온도가 급격히 떨어졌고 20시경에는 각각 영하 1.2℃와 영상 1.1℃를 보였다. 오전 10시부터 16시까지는 거의 비슷한 온도 분포를 보였으나 일몰(18시) 이후에는 PC 온실이 높은 온도를 유지하고 있음을 확인할 수 있다. 시설하우스 내부의 온도는 재배작물의 생산성을 좌우하는 중요한 요소이므로 야간에도 적절한 온도를 유지해야 한다. 계절에 상관없이 PC 피복재에서 높은 온도를 보인 이유는 뛰어난 광투과율과 우수한 보온효과 때문으로 사료된다.

외부 기온이 영상 3.8℃일 때 온풍난방기를 가동시켜 온실 내부의 온도가 21℃까지 도달하는데 걸린 시간을 측정하였다. 내부 온도가 1℃씩 상승하는데 걸린 시간을 살펴보면 초기에는 비슷한 수준을 보였으나 설정 온도에 가까워질수록 외부와의 온도 차이로 인해 PE 온실은 400초 이상이 소요된 반면 PC 온실은 측정된 모든 온도 범위에서 47~77초 정도를 보였다(Figure 4a). 평균값으로 환산해 보면 PC 온실은 약 64.1초, PE 온실은 약 140.5초가 소요되어 76.4초가 짧아졌다. PC 온실은 우수한 단열성능으로 인해 열에너지의 손실이 효과적으로 억제되었으나 PE 필름은 내부의 열기가 외부의 찬공기와 쉽게 교류함으로써 온도를 올리는데 오랜 시간이 소요된 것

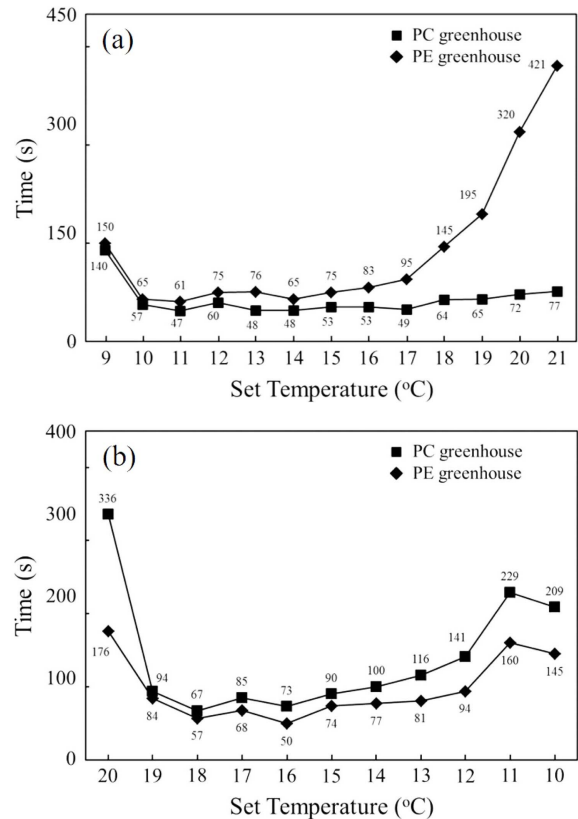


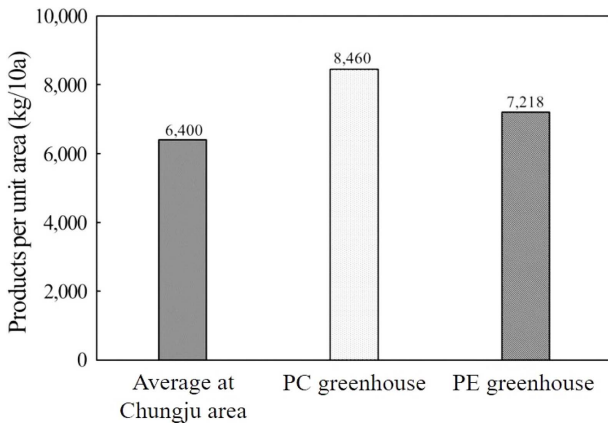
Figure 4. Time to reach set temperature in the temperature range from 9°C to 21°C during (a) heating and (b) cooling.

으로 보인다. 난방기 총 가동 시간은 PE 온실의 경우 1,826초가 소요되어 3.074ℓ의 경유가 소모된 반면 PC 온실은 883초, 1.383ℓ의 경유가 소모되어 약 55%의 연료가 절감된 것으로 나타났다. 온실 내부의 온도를 20℃로 유지된 상태에서 온풍기를 끄고 시간에 따른 내부온도 변화를 살펴보면 PE 온실에서 빠르게 냉각되어 난방유지 시간이 짧은 것을 알 수 있다(Figure 4b). PC 온실의 내부온도가 10℃까지 떨어지는데 소요된 시간은 PE 온실보다 376초가 길었다.

PC 온실에서 수확한 방울토마토의 평균 과고와 과경은 3.97 cm, 3.4 cm로써 PE 온실에서 수확한 방울토마토(평균 과고: 3.76 cm, 과경: 3.29 cm)에 비해 길고 굵었다(Table 2). 방울토마토가 길고 굵은 만큼 평균 1과중에서도 차이를 보였는데 PE 온실에서 생산된 방울토마토의 평균 과중은 24.3 g인데 비해 PC 온실에서 수확한 방울토마토는 25.7 g으로 1.4 g이 더 무거웠다. 방울토마토의 맛을 좌우하는 당도를 살펴보면 PC 온실에서 수확한 방울토마토는 평균 9.2°Brix를 보여

Table 2. Fruit Characteristics of Cherry Tomatoes Grown in PE Greenhouse and PC Greenhouse

	Fruit height (cm)	Fruit diameter (cm)	Fruit weight (g)	Soluble solid (°Brix)	No. of fruits (No./plant)
PC greenhouse	3.97	3.4	25.7	9.2	141
PE greenhouse	3.76	3.29	24.3	7.6	120.3



**Figure 5.** Comparison of the amount of cherry tomatoes per unit area (1,000 m<sup>2</sup>) produced in PC greenhouse and PE greenhouse.

PE 온실에서 수확한 방울토마토의 7.6°Brix보다 1.6°Brix 높은 것으로 나타났다. 일반 농가에서 재배되는 방울토마토의 평균 당도가 6~7°Brix 수준인 것을 고려하면 PC 온실에서 재배한 방울토마토에서 높은 당도를 유지하고 있음을 알 수 있다. 방울토마토의 당도는 주로 햇빛 노출량에 비례하여 증가하므로 PC 온실의 우수한 광투과율이 당도 증진에 영향을 미친 것으로 보인다. 방울토마토 총 착과수는 PC 온실의 경우 1주당 평균 141개가 착과되었고 PE 온실은 120.3개가 착과되어 PC 온실이 20.7개가 더 많았다. 착과수는 보편적으로 육묘과정에서 결정되지만 성장 환경조건에 따라 차이를 보일 수 있다.

방울토마토의 수량 구성요소인 주수와 1주당 착과 수, 1과 평균 무게를 기준으로 단위면적당(1,000 m<sup>2</sup>) 수확량을 비교해 보면 PE 온실은 충주지역 일반농가의 평균 수확량(6,400 kg)에 비해 13%가 증수된 7,218 kg이 생산되었고 PC 온실은 32%가 증수된 8,460 kg이 생산되었다(Figure 5). 방울토마토의 광 보상점은 70,000 Lux 이상으로 채광율이 높을수록 생육이 왕성하고 착과성이 우수하다. 비교군으로 사용된 일반 농가용 하우스 역시 PE 필름으로 피복되어 있지만 설치된지 2년 이상 경과되어 투과율이 초기에 비해 많이 떨어진 것으로 추정된다. 반면, 시험구인 PE 온실과 PC 온실은 피복된지 1년 이내로 태양광을 충분히 흡수함으로써 방울토마토의 생산량을 증진시킨 것으로 보인다.

## Conclusions

일반 비닐하우스의 골조를 유지한 상태에서 지붕 부분만 폴리카보네이트(PC)로 대체하였을 때 외부 환경에 따른 온실 내부 환경과 방울토마토의 생육 특성에 미치는 영향에 대해 알아보았다. PC 시트 양면에 공압출층과 하드코팅층, 무적코팅층을 각각 도입함으로써 표면경도와 내구성을 향상시킬 수 있었다. PC 온실은 우수한 보온특성과 광투과율로 인해 여름철

과 겨울철 모두 PE 온실보다 높은 온도를 유지하였고 난방비는 약 55%까지 저감할 수 있음을 확인하였다. 재배된 방울토마토의 착과 특성과 단위면적당 총 생산량 역시 PE 온실보다 우수한 것으로 나타났다. 따라서 PC 시트가 적용된 온실은 에너지 절감뿐만 아니라 방울토마토의 품질 향상과 증수에도 효과적인 것으로 보인다.

## Acknowledgements

이 조사 연구는 농림수산식품부 첨단생산기술개발사업(Grant No; 112050-3)의 연구지원으로 수행되었기에 감사드립니다.

## References

- H. B. Lee and K. S. Kang, "Characteristics and development direction of covering materials in protected horticulture", *Protected Hort. Plant Fac.*, **9**, 53 (1996).
- P. A. Dilara and D. Briassoulis, "Degradation and stabilization of low-density polyethylene films used as greenhouse covering materials", *J. Agric. Engng Res.*, **76**, 309 (2000).
- E. Schettini, L. Stefani, and G. Vox, "Interaction between agrochemical contaminants and UV stabilizers for greenhouse EVA plastic films", *Appl. Eng. Agric.*, **30**, 229 (2014).
- A. P. Papadopoulos and X. Hao, "Effects of three greenhouse cover materials on tomato growth, productivity, and energy use", *Sci. Hortic-Amsterdam*, **70**, 165 (1997).
- G. A. Giacomelli and W. J. Roberts, "Greenhouse Covering Systems", *HortTechnology*, **3**, 50 (1993).
- J. K. Kwon, Y. H. Choi, D. K. Park, J. H. Lee, Y. C. Um, and J. C. Park, "Optical and physical properties of covering materials for plastic greenhouse", *J. Bio-Environ. Control*, **10**, 141 (2001).
- S. Janjai, P. Intawee, J. Kaewkiew, C. Sritus, and V. Khamvongsa, "Large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: Modeling and testing in a tropical environment of Lao People's Democratic Republic", *Renew. Energy*, **36**, 1053 (2011).
- J. K. Kwon, B. Khoshimkhujiev, J. H. Lee, I. H. Yu, K. S. Park, and H. G. Choi, "Growth and yield of tomato and cucumber plants in polycarbonate or glass greenhouses", *Hortic. Sci. Technol.*, **35**, 79 (2017).
- H. W. Lee, S. Diop, and Y. S. Kim, "Variation of the overall heat transfer coefficient of plastic greenhouse covering material", *J. Bio-Environ. Control*, **20**, 72 (2011).
- J. B. Park and H. K. Koh, "Analysis of solar radiation and simulation of thermal environment in plastic greenhouse", *Sol. Energy*, **6**, 22 (1986).

11. M. Diepens and P. Gijssman, "Influence of Light Intensity on the Photodegradation of bisphenol A polycarbonate", *Polym. Degrad. Stabil.*, **94**, 34 (2009).
12. A. Rivaton, B. Mailhot, J. Soulestin, H. Varghese, and J. L. Gardette, "Comparison of the photochemical and thermal degradation of bisphenol-A polycarbonate and trimethylcyclohexane-polycarbonate", *Polym. Degrad. Stabil.*, **75**, 17 (2002).
13. A. Blaga and R. S. Yamasaki, "Surface microcracking induced by weathering of polycarbonate sheet", *J. Mater. Sci.*, **11**, 1513 (1976).
14. B. N. Jang and C. A. Wilkie, "The Thermal Degradation of Bisphenol A Polycarbonate in Air", *Thermochim. Acta*, **426**, 73 (2005).
15. J. H. Kim, B. O. Jang, Y. K. Park, and B. H. Lim, KR patent 10-1614855 (2016).
16. N. I. Kim, Y. S. Yoon, M. H. Oh, A. Y. Kim, D. J. Moon, and W. B. Jo, KR patent 10-1650450 (2016).