

ORIGINAL ARTICLE

온실시설내 인간 열환경지수(열쾌적성)에 대한 사례연구

정이원 · 진영환 · 전윤아 · 고규만 · 박형욱 · 박수국^{1)*}

제주대학교 생명자원과학대학 원예학과 대학원, ¹⁾제주대학교 생명자원과학대학 생물산업학부 원예환경전공

A Case Study of Human Thermal Sensation (Comfort) in Plastic Houses

Leeweon Jung, Younghwan Jin, Yoona Jeun, Kyuman Ko, Hyungwook Park,
Sookuk Park^{1)*}

Graduate School of Horticultural Science, College of Applied Life Science, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

¹⁾Research Institute for Subtropical Agriculture and Animal Biotechnology, SARI, Horticultural Science, College of Applied Life Science, Jeju National University, Jeju 63243 Korea

Abstract

To analyze human thermal environments in protected horticultural houses (plastic houses), human thermal sensations estimated using measured microclimatic data (air temperature, humidity, wind speed, and solar and terrestrial radiation) were compared between an outdoor area and two indoor plastic houses, a polyethylene (PE) house and a polycarbonate (PC) house. Measurements were carried out during the daytime in autumn, a transient season that exhibits human thermal environments ranging from neutral to very hot. The mean air temperature and absolute humidity of the houses were 14.6-16.8°C (max. 22.3°C) and 7.0-12.0 g·m⁻³ higher than those of the outdoor area, respectively. Solar (*K*) and terrestrial (*L*) radiation were compared directionally from the sky hemisphere (↓) and the ground hemisphere (↑). The mean *K*↓ and *K*↑ values for the houses were respectively 232.5-367.8 W·m⁻² and 44.9-55.7 W·m⁻² lower than those in the outdoor area; the mean *L*↓ and *L*↑ values were respectively 150.4-182.3 W·m⁻² and 30.5-33.9 W·m⁻² higher than those in the outdoor area. Thus, *L* was revealed to be more influential on the greenhouse effect in the houses than *K*. Consequently, mean radiant temperature in the houses was higher than the outdoor area during the daytime from 10:45 to 14:15. As a result, mean human thermal sensation values in the PMV, PET, and UTCI of the houses were respectively 3.2-3.4°C (max. 4.7°C), 15.2-16.4°C (max. 23.7°C) and 13.6-15.4°C (max. 22.3°C) higher than those in the outdoor area. The heat stress levels that were influenced by human thermal sensation were much higher in the houses (between hot and very hot) than in the outdoor (between neutral and warm). Further, the microclimatic component that most affected the human thermal sensation in the houses was air temperature that was primarily influenced by *L*↓. Therefore, workers in the plastic houses could experience strong heat stresses, equal to hot or higher, when air temperature rose over 22°C on clear autumn days.

Key words : Human thermal sensation, Human thermal comfort, Microclimate, Plastic house, Green house, Vinyl house

Received 25 May, 2016; Revised 8 August, 2016;

Accepted 10 August, 2016

*Corresponding author : Sookuk Park, Horticultural Science, Jeju

National University, Jeju 63243, Korea

Phone : +82-64-754-3326

E-mail : sooland@jejunu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

농업의 장소적 유형으로는 노지재배와 시설재배로 크게 나눌 수 있다. 기후의 영향을 직접적으로 받는 노지재배에 비해 시설재배는 작물 생산에서 자연환경의 영향으로 받게 되는 외부 영향을 최소화 하여 작물의 계획적 생산을 가능하게 하고, 생산수량 증대, 단경기(off season)생산 및 품질 향상으로 농가소득 향상에 기여하고 있다. 시설원예는 세계적으로 주로 극동지역과 지중해 연안지역에 분포되어 있으며, 시설면적이 1980년 100,000 ha에서 2000년 485,000 ha로 매년 약 20%에 이르는 증가율을 나타내고 있다(Moon et al., 2014). 우리나라는 2015년 기준 90,468 ha의 시설재배 면적을 갖는 세계적인 시설 재배 국가이며(Fig. 1; Statistics Korea, 2015), 시설의 대부분인 96.7%는 플라스틱(plastic) 하우스지만(Statistics Korea, 2010), 채소와 화훼 농가에서는 유리온실 및 경질판을 사용한 시설도 또한 이용되고 있으며, 2000년 235 ha에서 2010년에는 329 ha로 점진적으로 증가하고 있다(Statistics Korea, 2000, 2010). 여러 종류의 경질판 중 polycarbonate(PC)판은 광 투과율이 90%로 높아 우리와 유사한 수준의 투과율을 나타내며, 가벼우면서 보온성이 뛰어나고, 여타 경질판에 비해 충격강도가 큰 특징을 갖기 때문에 유리온실에 비해 선호되고 있

다(Moon et al., 2014).

제주도는 2014년 전국에서 9번째 규모의 농업경지 면적(62,686 ha)을 차지하고 있으며, 전국의 시설면적 비율인 5.5%에 비해 높은 수준인 8.3%의 시설면적을 가지고 있다(Statistics Korea, 2014, 2015). 2010년 기준 제주의 시설 면적은 3,477 ha이며, 그 중 플라스틱 하우스가 99.0%, 유리온실이 0.5%, 버섯 재배사를 포함한 기타 시설이 0.5%로, 플라스틱하우스 형태의 시설이 가장 일반적이었다(Statistics Korea, 2010).

시설 내부의 환경 조절은 효과적인 생산을 위한 필수적인 요소이며, 주로 시설 내부에서 온도와 같은 특정 인자를 실측한 후, 이를 목표로 하는 값과 비교하여 제어 시스템을 작동시키는 센서 기반의 제어가 사용되고 있다(Chung et al., 2001). 센서 값의 기준은 온도의 경우 작목에 따른 식물의 최저 한계온도, 생육 적온, 최고 한계온도에 따라 관리되고 있으며, 냉방·난방·환기 등의 방법으로 제어된다. 따라서, 원예 시설에 대한 기존의 연구들은 주로 시설 내의 환경에 대한 식물의 반응, 혹은 난방 및 냉방 효율과 에너지 절감 방안에 대해서 진행되고 있다.

시설은 기르는 작물의 생육환경을 가장 적합하게 하여야 하지만, 그 시설 안에서 작업하는 사람들의 작업환경도 고려되어야 할 것이다. 1980년대 비닐(polyethylene,

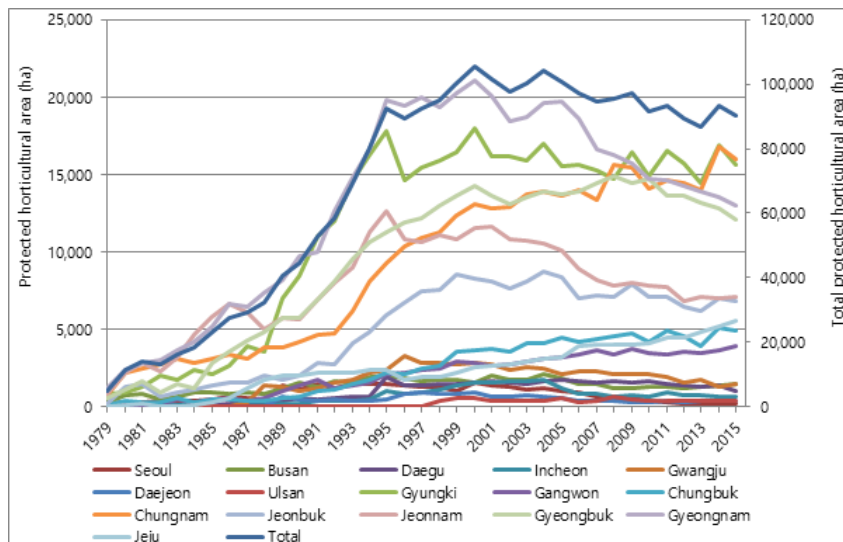


Fig. 1. The changes of national protected horticultural areas from 1979 to 2015 (Statistics Korea, 2015).

PE하우스의 보급이 이루어진 후(Moon et al., 2014), 하우스에서의 농작업자 중 요통, 견통, 감기 이환률 증가, 현기증 등의 증상과 하우스 내부의 고온 스트레스 및 내·외부의 온도 격차로 인한 체온조절 장애 등이 포함되는 PE하우스 증후군을 호소하는 비율이 증가하였고(Myung et al., 1993), 미국 국립직업안전보건연구원(the national institute for occupational safety and health, NIOSH)이나 국제표준화기구(international organization for standardization, ISO) 등에서는 높은 열환경에서 일하는 작업자 보호를 위한 노출 온도 및 작업량에 대한 지침을 제공 하지만, 농촌의 시설 작업 현장에 대한 권고 기준은 부족한 실정이다(Choi et al., 2002). 특히, 겨울철을 제외한 세 계절에는 시설 안의 낮 시간대 열환경이 작업자들이 일하기에는 일반적으로 (매우) 더운 것으로 알려져 있다. 그러므로, 기상청이 여름철에 내리는 폭염주의보나 폭염경보처럼 높은 열환경이 형성되는 시설 안 작업자들을 위한 작업 지침이 만들어져야 할 것이다.

현재 기상청에서 사용하는 인간 열환경 관련 지수로는 여름철에 기온과 습도자료만을 이용해 분석하는 불쾌지수(Humidex; Thom, 1959)와 겨울철 기온과 풍속자료만을 이용해 분석하는 체감온도(Wind chill; Siple and Passel, 1945; Environment Canada, 2001)를 들 수 있다. 그러나, 이 지수들은 인간 열환경지수(human thermal sensation) 및 열쾌적성(human thermal comfort)에 영향을 미치는 네 가지의 중요 기후요소들(기온, 습도, 풍속, 태양 및 지구복사에너지)을 다 이용하지 않으므로, 시설 내 인간 열환경을 분석하는데 한계성을 가진다고 할 수 있겠다. 국제적으로 활발하게 사용되고 있는 모델들은 실내용으로 predicted mean vote (PMV; Fanger, 1972), 실외용으로 physiological equivalent temperature (PET; Höppe, 1993, 1999)와 universal thermal climate index (UTCI; Bröde et al., 2012a, 2012b)가 있다. 이 모델들은 중요한 네 가지 기후요소들을 모두 이용하여 실내의 공간에서 인간이 느끼는 열환경을 분석하는데 활발하게 이용되고 있어, 시설 내 인간 열환경을 분석하는데도 적합하다고 하겠다.

국내에서 시설 내 미기후에 대한 연구들은 computational fluid dynamics (CFD)를 이용한 온실

안 미기후 환경 분석에 대한 연구들(Ha et al., 2014; Hong and Lee, 2014)과 벤로형 온실 안에 유입되는 태양복사에너지양에 대한 연구(Choi et al., 2013)가 있었고, 시설 안에서의 인간 열환경 분석에 대한 연구는 온실의 겨울철 실내외 기온차이를 분석하여 온실이 주는 열환경적 효과에 대한 연구(Kim and Na, 2007), 비닐하우스용 작업복 개발을 위해 생리학적 열환경에 대해서 조사한 연구(Myung et al., 1993), 여름철 비닐하우스 오이 수확 작업자들의 생리학적 열환경지수를 web-bulb globe temperature (WBGT)를 이용하여 분석한 연구(Choi et al., 2002)만이 있어, 아직까지 인간 열환경지수 분석에 필요한 4가지 기후요소들을 이용한 종합적인 시설 실내외 비교분석 연구가 체계적으로 이루어지지 않고 있다.

따라서, 이 연구는 인간 열환경지수가 적당함(neutral)에서 매우 더움(very hot) 단계까지 순차적인 흐름을 볼 수 있는 계절 전환기(transient season)인 가을철 맑은 날 낮 시간대에 시설 외부와 두 종류의 시설(PE하우스와 PC온실) 안의 미기후 자료를 측정하여, 시설 외부의 열환경에 비해 시설 안에서 일하는 작업자들의 열환경이 어떻게 변하는지를 알아보고자 인간 열환경 모델을 이용하여 비교 분석해 보고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구재료

측정은 제주특별자치도 제주시 애월읍 상귀리에 위치한 제주 농업기술원 농업연구센터(33°27'28"N, 126°24'25"E)에 설치된 PC온실과 PE하우스에서 맑은 날인 2015년 10월 6-7일 이틀 동안 9:00-17:00시까지 수행 되었다(Fig. 2). 다만, 7일은 15:00이후 구름이 점점 많아져 16:30까지만 분석에 포함시켰다.

PC온실은 676 m² 면적으로 2006년에 설치 되었으며, 경질판은 투명한 10 mm 두께의 PC를 사용하였으며, 시설의 천장 PC판 위에는 패브릭 필름(Green house fabric film, Paramo, Korea)이 추가적으로 부착되었다(Fig. 3a). PE하우스는 1,310 m² 면적이며, 2012년에 설치되었으며, 0.12 mm 두께의 PE 필름(Jangsoo Film, Ihlshin, Korea)을 이용하여 피복되었다(Fig. 3b). 바닥은 모두 콘크리트로 되어 있었다. 두

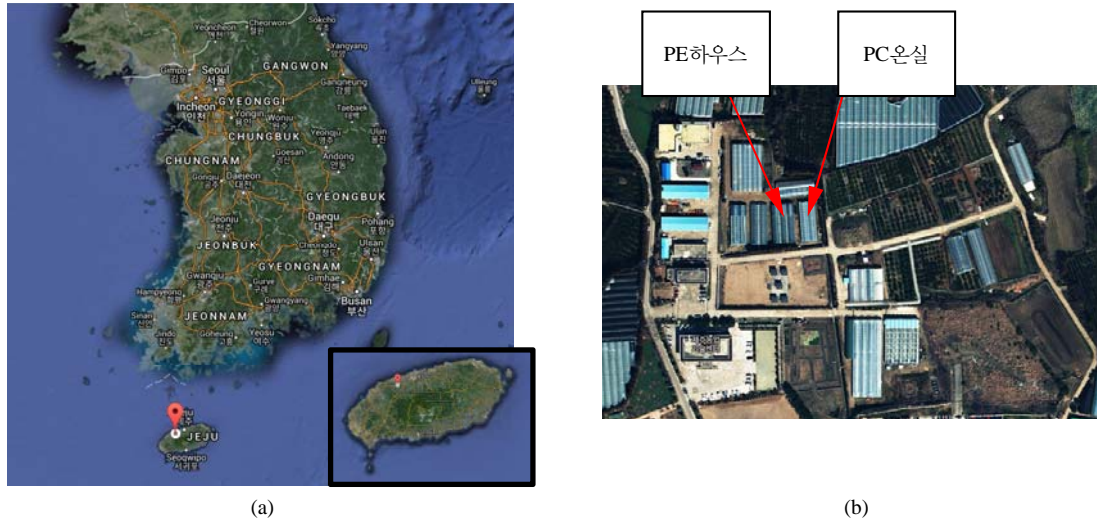


Fig. 2. Study site: (a) location (<https://www.google.co.kr/maps>), (b) skyview photograph (<http://map.daum.net>).

종류의 시설 모두 설정 온도에 따라 천창과 측창의 개폐가 가능한 자동화 설비를 갖추고 있으나, 본 연구에서는 시간의 경과에 따른 시설 내의 미기후의 변화를 보고자 6일 오전(9:00-13:00)에 PC온실의 자동화 설비에 의한 천창 개방(기온이 25℃일 때)을 제외하고는 천창과 측창의 개방 없이 수행 하였다. 또한, 식물체에 의한 영향이 없도록 하고자 하였으나, 연구장소가 농업기술원 연구센터인 관계로 실내의 모든 식물체를 옮길 수는 없었다. 그래서, PC온실 측정장비가 설치된 동안에 다육식물만이 조금 있었으며, PE하우스 측정장비가 설치된 동안에는 식물체가 없었으며 옆 동에 채소 묘종이 조금 있는 상태로 실험을 진행하여, 식물체의 영향은 크지 않을 것으로 생각된다(Fig. 2 참조).

인간 열환경지수 분석을 위해 미기후 자료(기온, 상

대습도, 풍속, 태양 및 지구복사에너지를 1분 단위로, 인간의 평균 가슴높이인 지상 1.2 m 높이에서 측정하였다. 시설 외부에 1곳, PC온실과 PE하우스 안 중심부에 각각 1곳씩 선정하여 측정장비를 설치하였다. 또한, 콘크리트 바닥의 표면온도는 적외선 온도계를 이용하여 30분 단위로 동시에 측정하였다. 측정장비에 대한 제원은 Table 1과 같다.

2.2. 연구방법

측정된 미기후 자료를 이용하여 실내에서 전세계적으로 가장 많이 이용되고 있는 인간 열환경지수인 PMV, 실외에서 가장 많이 이용되고 있는 독일에서 개발한 PET와 최근에 국제생명기상학회(International Society of Biometeorology)에서 개발한 UTCI를

Table 1. Instruments for microclimatic data

Microclimatic data	Instruments	
Radiation	CNR4 Net Radiometer	Kipp & Zonen Inc.
Air temperature and relative humidity	HMP155A	
Wind speed and direction	Met One 034B-L Windset	Campbell Scientific Inc.
Datalogger	CR1000	
Surface temperature	Fluke-62 Max+	Fluke Co.

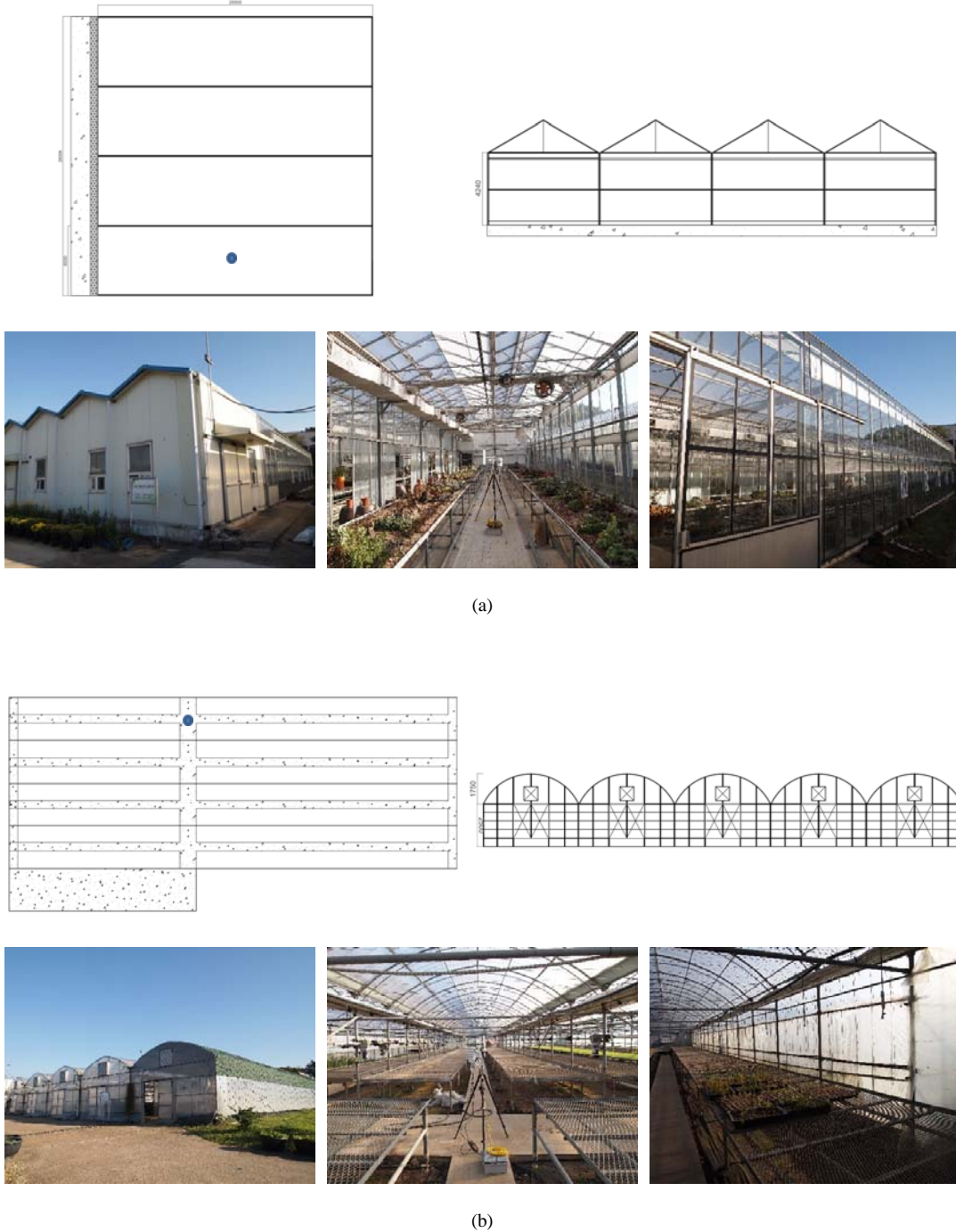


Fig. 3. Information of (a) PC house blueprints and photographs and (b) PE house blueprints and photographs. ● indicates the locations of the instruments.

Rayman Pro. 2.2(<http://www.urbanclimate.net/rayman>)를 이용하여 계산하였다. 인간 열환경지수(PMV, PET와 UTCI) 계산을 위해 필요한 입력 자료는 기온(T_a), 상대습도(RH), 풍속(u), 평균복사온도(mean radiant temperature, T_{mrt})이다. T_{mrt} 는 측정된 태양(K) 및 지구(L)복사에너지를 이용하여 Human-urban radiation exchange simulation model(HURES; Park, 2011)을 이용하여 계산하였다. T_a , RH, 표면온도(T_s) 자료는 30분 단위로 Microsoft Office Excel 2010(<https://www.office.com>)을 이용하여 비교 분석하였으며, T_{mrt} 와 인간 열환경지수들은 15분 단위로 Excel을 이용해 비교 분석하였다. u 는 PE하우스와 PC온실 안에서는 바람이 거의 없는 $0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 이하의 단계(calm)였으므로(자료를 생략하였음), 산출식에서는 일괄적으로 $0.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 를 적용하였으며, 시설 외부 풍속은 10월 6일에는 평균적으로 $1.3\pm 0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 7일에는 $1.6\pm 0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 풍속이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 미기후요소별 측정결과

3.1.1. 기온 및 습도

T_a 는 시설 외부에서 가장 낮게 나타났으며, 6일에는 15:00 7일에는 14:30전에는 PE하우스가 PC온실보다 높은 T_a 를 보였으며, 그 시간 이후에는 반대로 PC온실이 PE하우스에 비해 더 높은 T_a 를 나타냈다(Fig. 4). 이것은 PC온실 천창부분에 부착된 온실 패

브릭 필름이 온실 옆면에는 부착되어 있지 않아서, 오히려 갈수록 온실 옆면에서 내부로 유입된 태양복사 에너지양이 증가된 영향으로 보인다. PE하우스는 외부($23.4\pm 0.9^\circ\text{C}$)에 비해 6일에는 평균±표준편차가 $16.8\pm 5.3^\circ\text{C}$ (최대 22.3°C), 7일에는 $16.2\pm 6.4^\circ\text{C}$ (최대 21.7°C) 더 높은 T_a 를 나타내었으며, PC온실은 6일에는 $11.0\pm 8.2^\circ\text{C}$ (최대 21.9°C), 7일에는 $14.6\pm 6.6^\circ\text{C}$ (최대 21.3°C) 더 높은 T_a 를 보였다. PC온실에서 6일에 보였던 낮은 평균값은 9:00-13:00까지 자동개폐기를 통해 천창을 열어 놓은 결과로서, 자동개폐기를 통해 천창과 측창을 열어 놓지 않은 PE하우스에 비해 자연 대류현상에 의한 원활한 통기효과의 기온저감효과를 보여주었다(Fig. 4a).

RH는 이른 오전을 제외하고는 시설 외부에서 가장 높았으며, 오후 14:00-14:30 전에는 PC온실이 그 시간대 기온이 높게 나온 PE하우스에 비해 높은 RH를 보였으나, 그 이후에는 비슷한 결과를 보였다(Fig. 5a, 5b). RH는 온도에 의해 변화하는 값이므로, 여기서는 기온의 변화에 정반대의 결과를 보이는 것이 당연하다 하겠다.

절대습도(AH)값으로 변환하여 비교해 보면, 10월 6일에는 PC온실은 천창이 열려 있어서 시설 외부와 비슷한 값을 보였으며 PE하우스는 시설 외부에 비해 평균적으로 약 $7.0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 높은 값을 보이다가 15:00부터는 가장 높은 값을 보인 PC온실보다 낮은 결과를 보였다(Fig. 5c). 7일에는 시설 외부(평균 $13.0\pm 1.0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$)보다 PE하우스(평균 $21.2\pm 3.2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$)와 PC온실

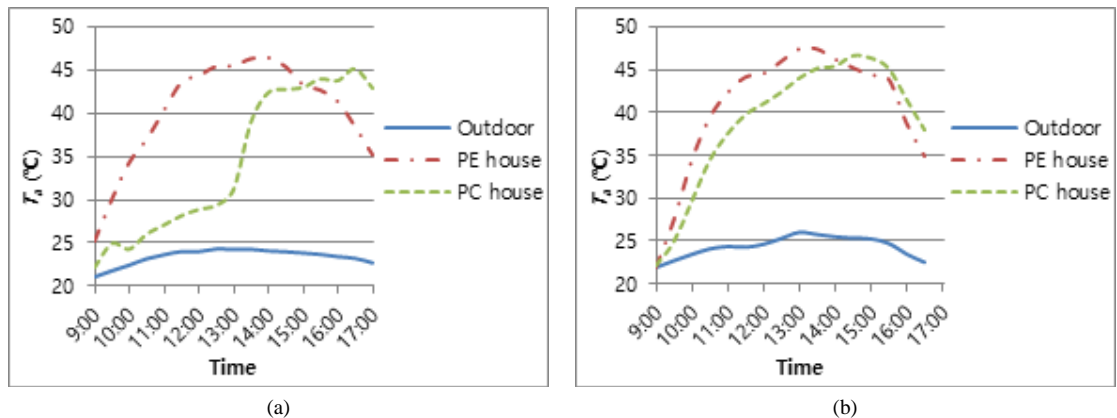


Fig. 4. Air temperature in (a) Oct. 6 and (b) Oct. 7, 2015.

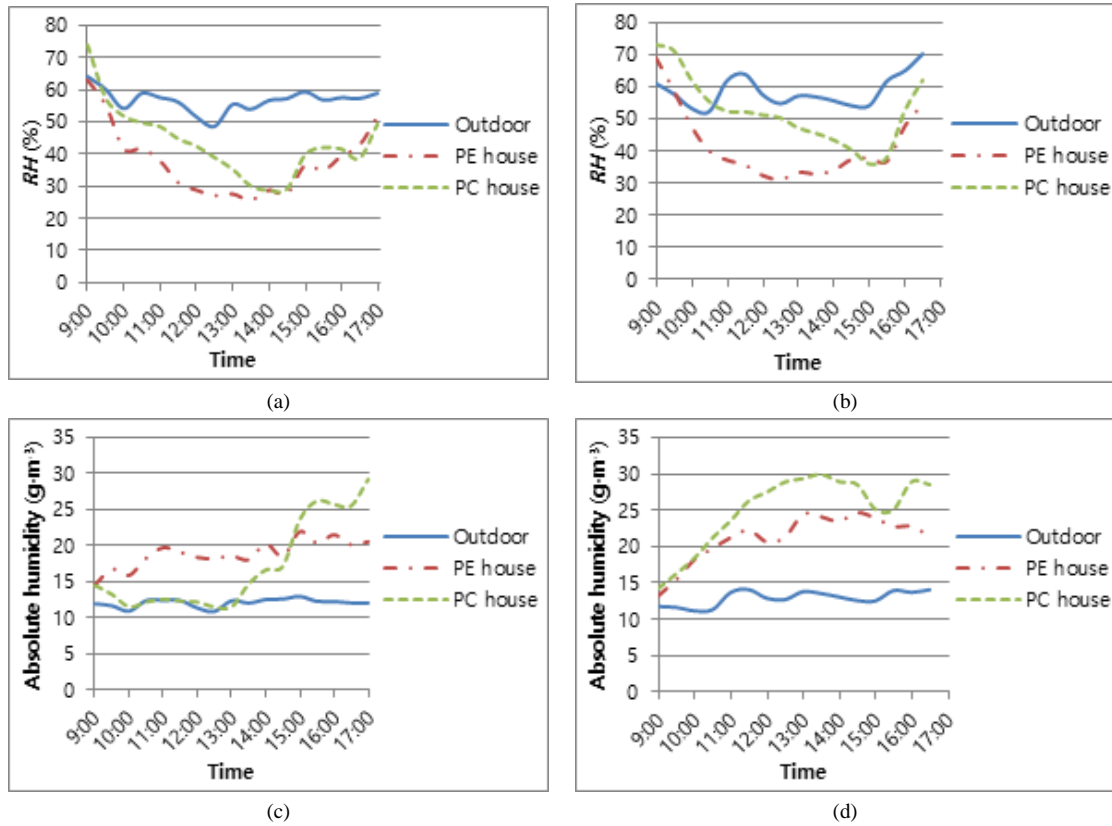


Fig. 5. Relative humidity in (a) Oct. 6 and (b) Oct. 7, and absolute humidity in (c) Oct. 6 and (d) Oct. 7, 2015.

(평균 $25.0 \pm 5.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$)이 높은 값들을 보여, 미미하지만 식물체들의 증산작용영향이 있었던 것으로 보인다 (Fig. 5d).

3.1.2. 표면온도

콘크리트 바닥재의 T_s 는 6일에는 11:00까지는 비슷한 값들을 보이다가, 오후 13:30에 PE하우스가 시설 외부에 비해 최대 5°C 이상 높은 값을 나타내었다(Fig. 6a). PC온실은 측면에서의 태양복사에너지 유입이 많아지는 오후 15:00경에 가장 높은 값을 나타내었다. 7일에도 11:00-14:30 동안에는 PE하우스가 가장 높은 값을 나타내었고, PC판에 패브릭 필름을 붙인 PC온실은 태양복사에너지 투과율이 PE필름 보다 낮음을 잘 나타내 주는 결과(Fig. 7a, 8a 참조)로서 시설 외부와 PE하우스보다 9:00-13:30 동안 가장 낮은 값을 보였으며 15:00경에는 6일과 동일하게 가장 높은 값을

보였다(Fig. 6b).

3.1.3. 복사에너지

태양(K) 및 지구(L)복사에너지를 하늘 방향(\downarrow)과 지표면 방향(\uparrow)으로 나누어 분석해 보면, 하늘방향에서 오는 태양복사에너지($K \downarrow$)는 PE하우스가 시설 외부에 비해서 10월 6일에는 $265.9 \pm 43.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 7일에는 $232.5 \pm 58.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 적게 들어오는 것으로 나타났으며, PC온실은 시설 외부에 비해 6일에는 $367.8 \pm 119.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 7일에는 $346.4 \pm 116.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 적게 투과되어 들어오는 것으로 나타났다(Fig. 7a, 8a). 지표면에서 반사되어 오는 태양복사에너지($K \uparrow$)도 $K \downarrow$ 와 마찬가지로 시설 외부에 비해서 PE하우스가 $55.7 \pm 12.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (6일)와 $51.2 \pm 14.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (7일) 적게, PC온실이 $45.9 \pm 12.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (6일)와 $44.9 \pm 16.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (7일) 적게 반사되는 것으로 나타났다(Fig. 7b,

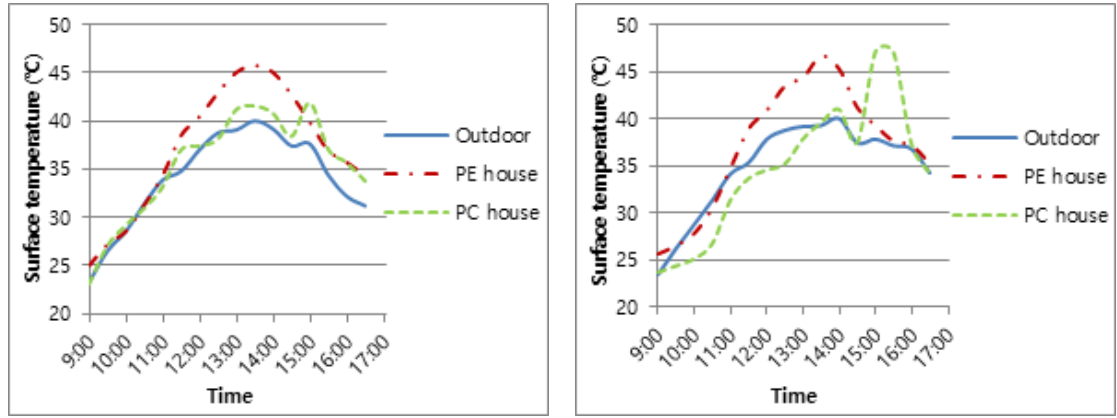


Fig. 6. Surface temperature in (a) Oct. 6 and (b) Oct. 7, 2015.

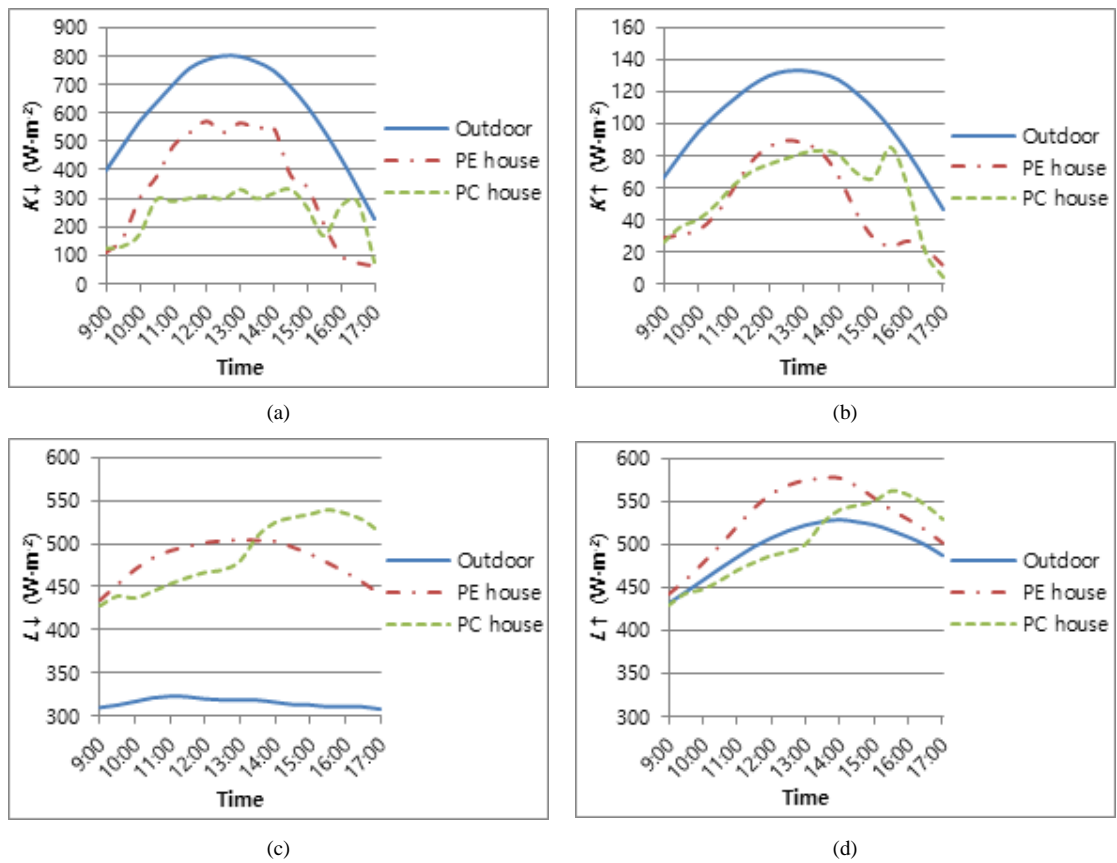


Fig. 7. Shortwave and longwave radiation in Oct. 6, 2015. Shortwave radiation coming (a) from the sky hemisphere and (b) from the ground hemisphere and longwave radiation coming (c) from the sky hemisphere and (d) from the ground hemisphere.

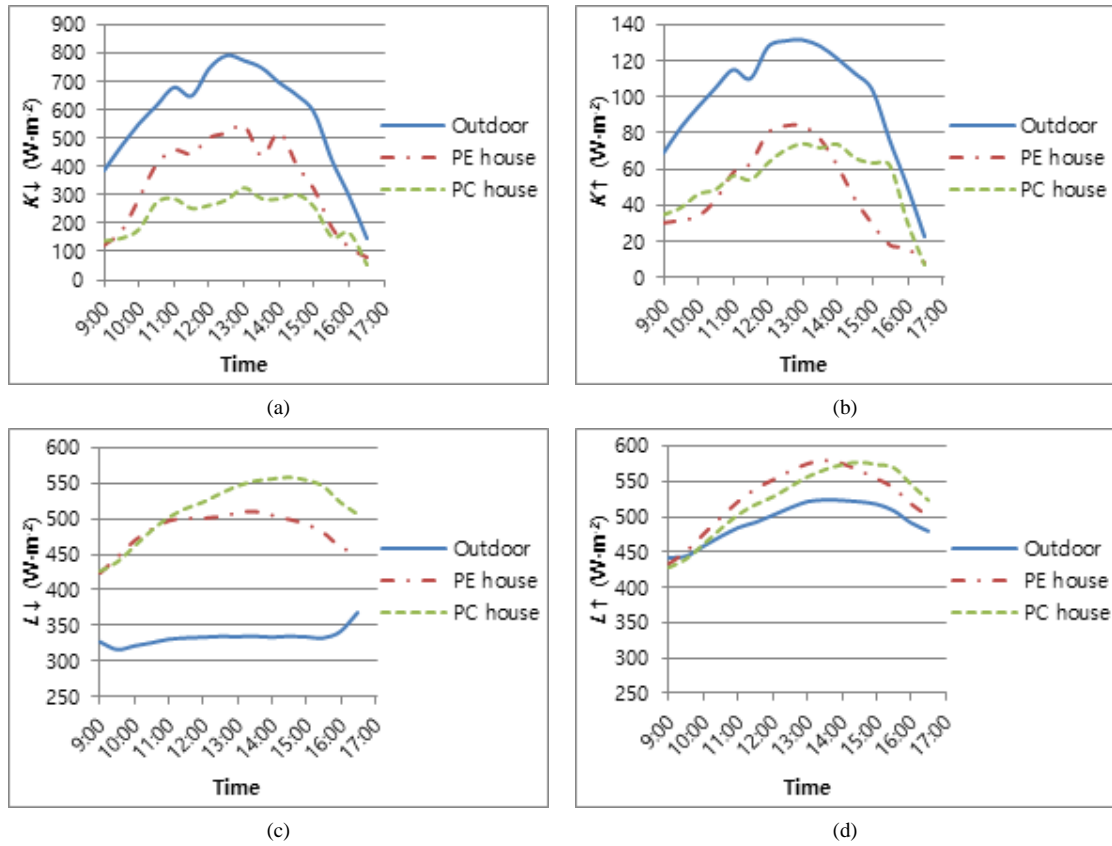


Fig. 8. Shortwave and longwave radiation in Oct. 7, 2015. Shortwave radiation coming (a) from the sky hemisphere and (b) from the ground hemisphere and longwave radiation coming (c) from the sky hemisphere and (d) from the ground hemisphere.

8b). 이것은 PE필름이 시설 외부에 비해 $K \downarrow$ 에서 $46.3 \pm 18.7\%$ (6일)와 $43.3 \pm 13.3\%$ (7일)의 차단 효과가 있다는 것을 보여주며, 패브릭 필름을 붙인 PC판은 PE필름보다 더 높은 $57.2 \pm 14.1\%$ (6일)와 $60.2 \pm 6.3\%$ (7일)의 차단 효과가 있는 것으로 나타났다. $K \uparrow$ 에서도 PE필름과 PC판 모두 다 $K \downarrow$ 와 유사한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 특이한 점은 PC온실에서 15:30에 $K \downarrow$ 는 줄어든 반면에 $K \uparrow$ 는 급격하게 증가한 현상을 보였는데, 이때의 태양복사에너지 반사율(albedo)이 10월 6일에는 51.0%, 7일에는 41.0%로 다른 시간 때에 비해 거의 두 배 높은 반사율을 보이는 것으로 나타났다(자료를 포함하지 않았음). 이것은 16:00에 PC온실의 측면에서 들어오는 $K \downarrow$ 에 비해

15:30에는 패브릭 필름이 붙은 천창 쪽의 PC판을 통해 $K \downarrow$ 이 적게 들어온 뒤, 허리 높이의 금속체인 식물 bed들에 의한 높은 반사량이 영향을 미친 것으로 생각된다(Fig. 3a).

$L \downarrow$ 에서는 시설 외부에 비해 PE하우스는 10월 6일 $168.0 \pm 19.3 W \cdot m^{-2}$ (시설 외부에 비해 $53.2 \pm 5.8\%$ 더 많이 유입됨)와 7일 $150.4 \pm 28.7 W \cdot m^{-2}$ ($45.3 \pm 8.9\%$), PC온실은 6일 $170.5 \pm 43.7 W \cdot m^{-2}$ ($54.3 \pm 14.3\%$)와 7일 $182.3 \pm 39.3 W \cdot m^{-2}$ ($54.7 \pm 11.6\%$) 더 많이 유입되는 것으로 나타났으며, PE하우스와 PC온실 둘 다 시설 외부에 비해서 약 50%의 $L \downarrow$ 을 더 받는 것으로 나타나 온실효과의 특성을 잘 보여 주고 있었다(Fig. 7c, 8c). $L \uparrow$ 에서도 T_s 의 결과와 동일한 패턴으로 PE

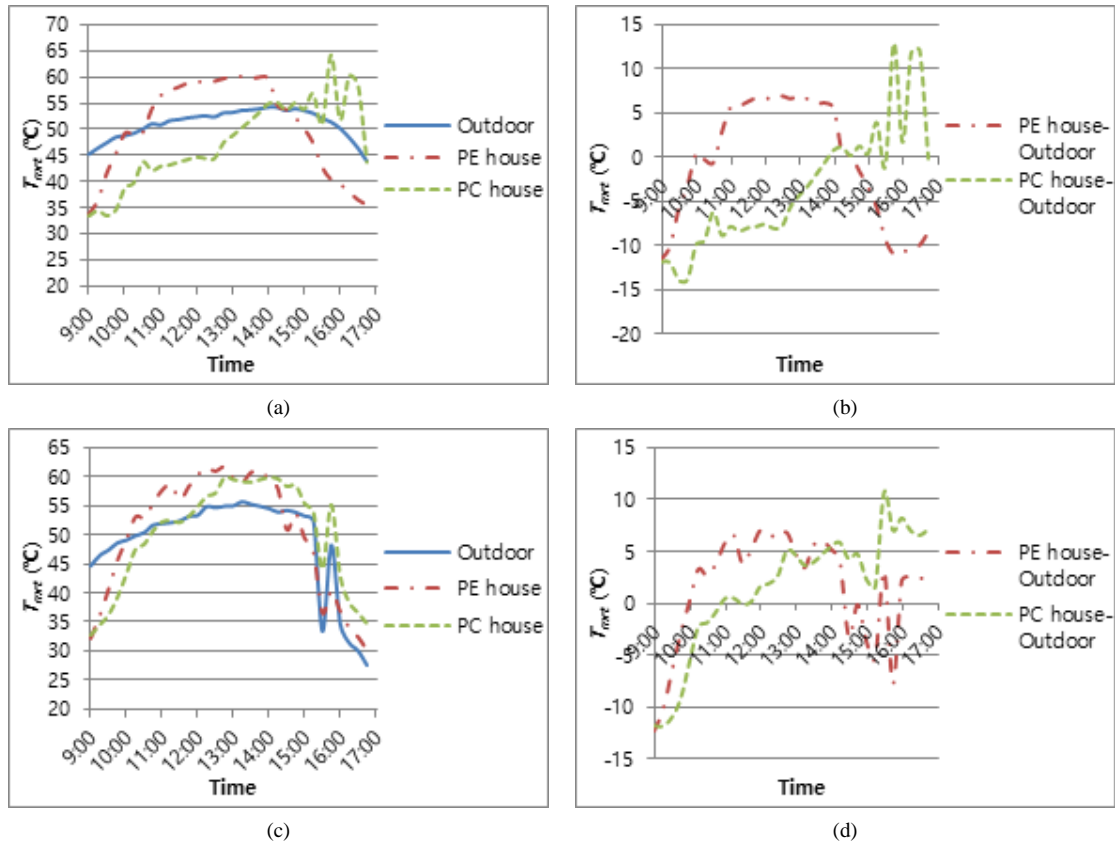


Fig. 9. Mean radiant temperature of outdoor, PE house and PC house in (a) Oct. 6 and (b) their differences and in (c) Oct. 7 and (d) their differences.

하우스는 시설 외부에 비해 6일에는 $32.7 \pm 15.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ($6.5 \pm 2.8\%$)와 7일 $33.9 \pm 18.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ($6.7 \pm 3.5\%$) 더 많이 방출하는 것으로 나타났으며, PC온실도 시설 외부에 비해 6일에는 $4.4 \pm 26.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ($0.8 \pm 5.1\%$)와 7일 $30.5 \pm 22.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ($6.0 \pm 4.5\%$) 더 많이 방출하는 것으로 나타나, 두 시설 다 적은 양(약 6%)이지만 시설 외부에 비해 많은 바닥면에서의 지구복사에너지가 방출되는 것으로 나타났다(Fig. 7d, 8d).

PE하우스와 PC온실을 비교해 보면, K 에서는 패브릭 필름을 붙인 PC판이 PE필름에 비해 K 차단효과가 더 큰 것은 나타났으며, L 에서도 6일에는 천창을 열어 놓은 PC온실이 14:00부터 7일에는 11:00부터 PE하우스보다 더 높은 L 을 방출하는 것으로 나타나 온실 효과가 더 높은 것으로 보인다.

T_{mrr} 는 9:00경에는 시설 외부에서 PE하우스보다 11.5°C (6일)와 12.3°C (7일) 더 높게 나왔으며, PC온실보다도 14.0°C (6일)와 11.9°C (7일) 더 높은 결과를 보였으나, 6일에는 10:45-14:30동안 7일에는 10:00-14:15동안 PE하우스가 시설 외부보다 더 높은 결과를 보였다(Fig. 9). PC온실은 6일에는 천창을 닫은 후인 14:00부터 7일에는 11:00부터 시설 외부보다 높은 결과를 보였다. 그리고, PE하우스가 오전부터 PC온실보다 계속 높은 값을 보이다가 14:00-14:30경부터 PC온실에서 더 높은 값을 보이는 역전현상을 보여, K 보다 L 이 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히, 지표면 반구(↑)보다는 하늘 반구(↓)에서 오는 지구복사에너지양이 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있었다.

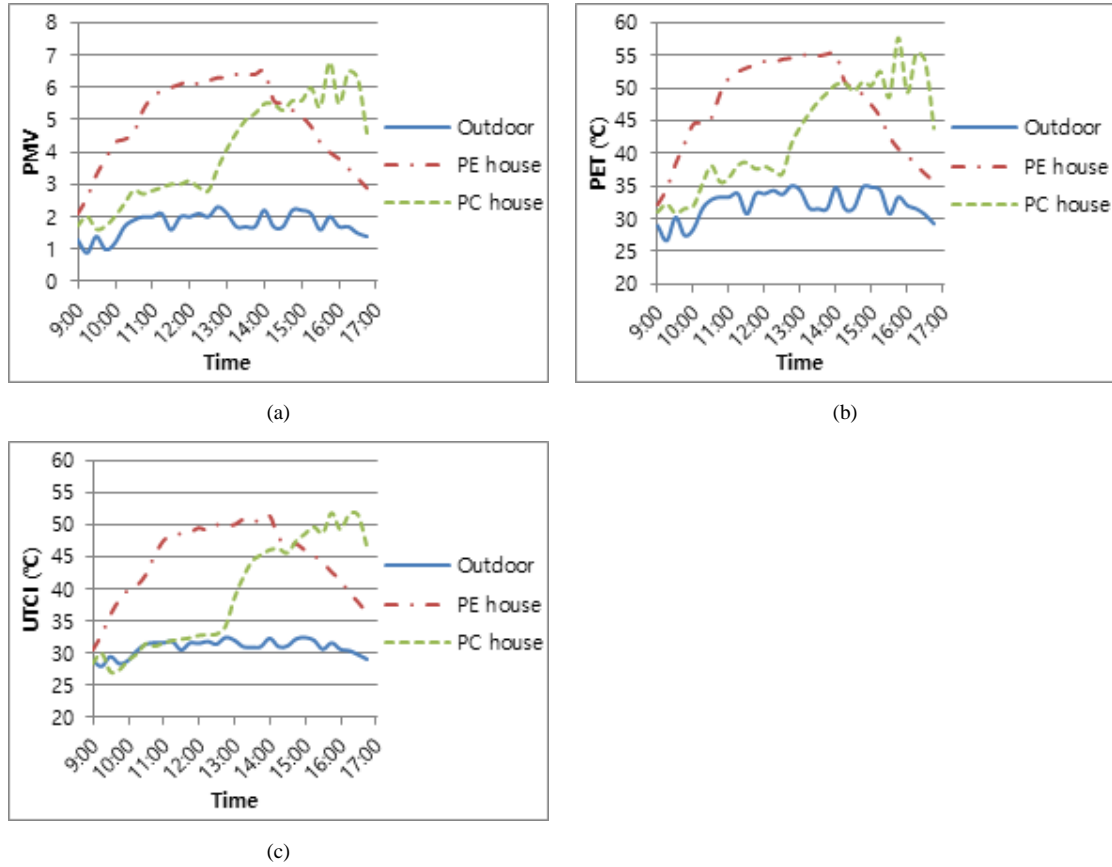


Fig. 10. Human thermal sensations in Oct. 6, 2015: (a) PMV, (b) PET and (c) UTCI.

3.2. 인간 열환경지수(열쾌적성)

시설 외부는 10월 6일에 약간 따뜻함(pleasantly warm, slight heat stress) 또는 따뜻함(warm, moderate heat stress) 레벨을 보였으며, 7일에는 약간 따뜻함(9:00-9:15), 따뜻함(9:30-15:15), 약간 따뜻함(15:30-16:00), 적당함(neutral, no heat stress; 16:15-16:45) 레벨을 나타낸 반면에, PE하우스와 PC온실은 대부분의 조사시간동안 더움(hot, strong heat stress)과 매우 더움(very hot, extreme heat stress) 레벨을 보여 주었다(Fig. 10, 11; Table 2). PE하우스는 시설 외부보다 6일에는 13:45에 7일에는 12:45에 가장 큰 차이를 보였으며, 평균적으로 PMV에서 3.2±1.1 (6일, 최대 4.7)과 3.4±1.1 (7일, 최대 4.6), PET에서 15.2±6.0℃ (6일, 최대 23.7℃)과 16.4±5.8℃ (7일, 최대 22.8℃), UTCI

에서 13.6±4.8℃ (6일, 최대 19.8℃)과 14.5±5.4℃ (7일, 최대 20.1℃) 높은 결과를 보였다. PC온실도 천창이 열려진 시간인 6일 9:00-13:00를 제외하면 유사한 결과를 보여 주었다. 특히, 7일은 14:30에 시설 외부와 가장 큰 차이를 보였으며, PMV에서 3.3±1.2 (최대 4.7), PET에서 16.0±6.0℃ (최대 22.8℃), UTCI에서 15.4±6.8℃ (최대 23.2℃)로 PE하우스와 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

오전은 PE하우스가 PC온실보다 모든 지수들에서 더 높은 결과들을 보였으나, 6일에는 14:45부터, 7일에는 PMV와 PET는 14:00부터 UTCI는 12:30부터 PC온실이 PE하우스보다 더 높은 결과를 나타내었다. PC온실의 패브릭 필름이 부착되지 않은 온실 측면으로부터의 K 유입이 그 원인이라고 할 수 있겠다.

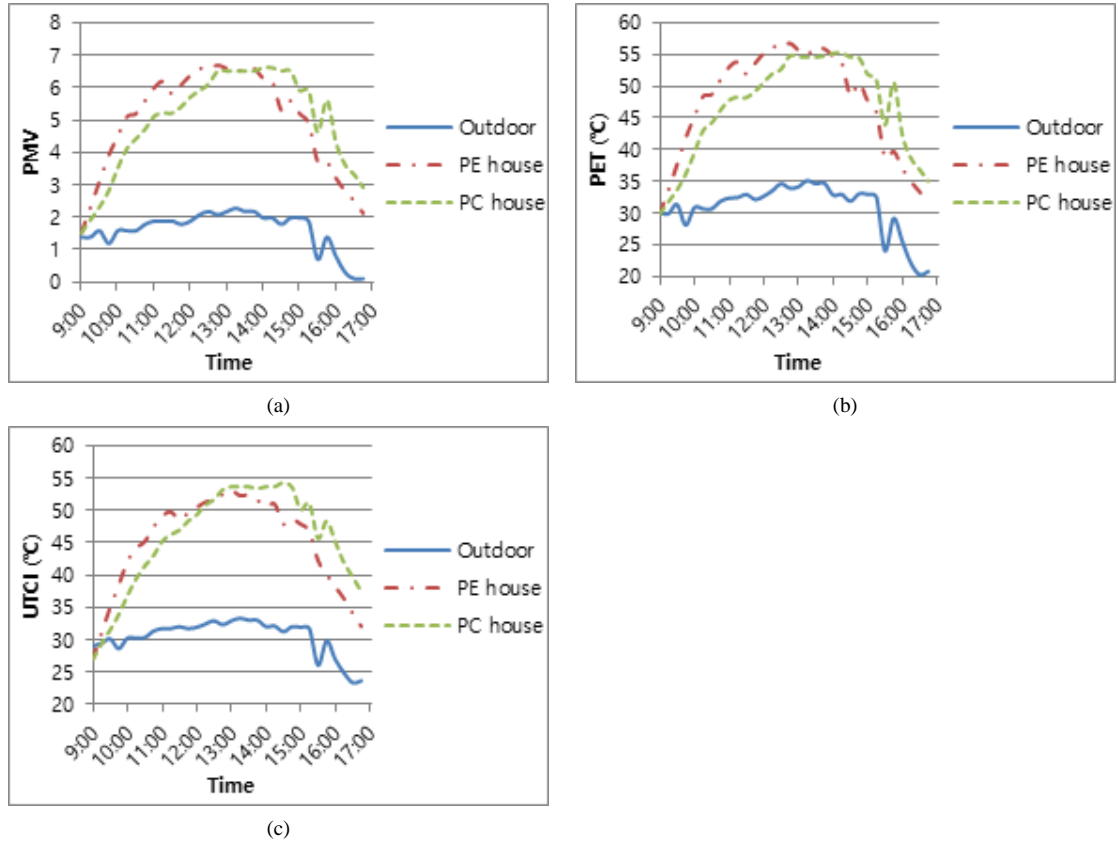


Fig. 11. Human thermal sensations in Oct. 7, 2015: (a) PMV, (b) PET and (c) UTCI.

3.3. Sensitivity test

각각의 미기후 요소들이 인간 열환경지수인 PMV와 UTCI의 한 단계(PMV, 1.0; UTCI, 6°C in heat stress)를 변화시키는데 미치는 영향을 분석해 보기 위해, 늦여름과 초가을의 낮 시간대 열환경을 기준 [$T_a=30^\circ\text{C}$, $RH=50\%$, $u=0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $T_{mrt}=50^\circ\text{C}$, 신진대사에너지(metabolic energy)는 서 있는 자세인 1.5 MET, 의복은 긴 바지와 짧은 팔 티셔츠의 의류절연(clothing insulation)인 0.55 clo]으로 하여, 각각의 미기후 요소들을 일정 범위 안($T_a=20\text{-}40^\circ\text{C}$, $RH=0\text{-}100\%$, $u=0.3\text{-}2.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $T_{mrt}=30\text{-}80^\circ\text{C}$)에서 변화를 주어 보았다. 그 결과, T_a 는 PMV에서는 일률적으로 6°C, UTCI에서는 6°C(40°C근처)-10°C(20°C근처)의 변화량이 한 단계를 변화시키는 것으로 나타났다. u 는 PMV에서 1.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (풍속이 약할 때)-2.8 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (풍속이 강할

때)이 한 단계를, UTCI에서는 2.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 변화가 2.5°C를 변화시킨다는 결과를 보여 풍속에 대한 영향이 PMV보다는 덜 민감한 것으로 나타났다. RH 는 PMV에서는 약 60%의 변화가 0.5 단계를 변화시키는 것으로 나타났고, UTCI에서는 30%(습도가 높을 때)-90%(습도가 낮을 때)의 변화가 한 단계를 바꿀 수 있다는 결과를 보였다. AH 로 변환해 보면 $T_a=20^\circ\text{C}$ 일 때 PMV에서는 10.4 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 이 0.5 단계를 변화시키며 UTCI에서는 5.2(습도가 높을 때)-15.5(습도가 낮을 때) $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 이 한 단계를 변화시킬 수 있는 것으로 나타났으며, $T_a=30^\circ\text{C}$ 일 때는 PMV에서 18.2 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 와 UTCI에서 9.1-27.3 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $T_a=40^\circ\text{C}$ 일 때는 PMV에서 30.7 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 와 UTCI에서 15.3-46.0 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 이 같은 변화를 만들 수 있는 것으로 나타났다. T_{mrt} 는 PMV에서 8-10°C, UTCI에서는 약 24°C의 변화가 한 단계를 변

화시킬 수 있는 것으로 나타나, UTCI는 u 에서와 같이 T_{mrt} 에서도 덜 민감하게 영향을 받는 것으로 나타났다.

7일 인간 열환경지수에서 시설 외부와 가장 큰 차이를 보였던 시설 내부(PE하우스, 12:45; PC온실, 14:30)의 미기후 자료 차이값들을 보면, PE하우스는 $T_a=21.3^\circ\text{C}$, $AH=11.6\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (RH, 14.0%), $u=1.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $T_{mrt}=6.9^\circ\text{C}$ 이었으며, PC온실은 $T_a=21.7^\circ\text{C}$, $AH=16.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (RH, 13.7%), $u=1.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $T_{mrt}=4.3^\circ\text{C}$ 이었다. 이 차이값들은 PMV에서 T_a 이 3.6단계, AH가 0.2-0.3단계, u 이 0.9-1.0단계, T_{mrt} 이 0.5-0.8단계를 변화시킬 수 있는 것으로 나타났으며, UTCI에서는 T_a 에서는 동일하게 3.6단계, AH가 0.4-0.5단계(RH를 50%로 가정했을 때), u 이 0.4단계, T_{mrt} 이 0.2-0.3단계를 변화시킬 수 있는 것으로 나타나, 시설 외부에 비해 PMV가 4.6-4.7단계, UTCI에서 3.4-3.9배 높게 나온 시설 내부의 인간 열환경지수는 T_a 의 상승에 의해 좌우된다고 할 수 있겠다. 또한, 시설 내부(PE하우스와 PC온실)와 시설 외부의 각각의 미기후 자료의 최대 차이값들을 살펴보면 $T_a=22.3^\circ\text{C}$ (PE하우스-시설 외부, 6일 14:00), $AH=17.1\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (PC온실-시설 외부, 6일 17:00), $u=2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (시설 외부-시설 내부, 7일 15:00), $T_{mrt}=12.8^\circ\text{C}$ (PC온실-시설 외부, 6일 15:45)이었는데, PMV에서 T_a 가 3.7단계, AH가 0.3단계, u 이 1.1단계, T_{mrt} 이 1.4단계를 변화시킬 수 있는 것으로, UTCI에서는 T_a 이 3.7단계, AH가 0.6단계, u 이 0.4단계, T_{mrt} 이 0.5단계를 변화시킬 수 있는 것으로 나타나, PMV와

UTCI에서 모두 T_a 의 상승이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났고, PMV에서는 T_{mrt} 과 u 이 그 다음으로 영향을 미쳤으나 AH의 영향은 약한 것으로 나타났다. UTCI에서는 T_a 를 제외한 다른 미기후 요소들의 영향은 크지 않는 것으로 나타났다.

3.4. 인간 열환경지수에서 기온의 역할

물론, 시설 내부의 T_a 의 상승은 K 와 L 의 영향, 특히 $L\downarrow$ 의 영향이 크다고 할 수 있는데, 가을 중순(10월 6-7일) 맑은 날을 기준으로 시설 외부의 T_a 만을 가지고 인간 열환경지수와 비교해 보면, PE하우스에서는 6일 더움이 시작될 때(9:15) T_a 는 21.9°C 였고, 매우 더움이 시작될 때(9:45)의 T_a 가 22.4°C , 오후 늦게 다시 더움으로 될 때(16:15)의 T_a 이 23.2°C 였다. 7일에는 더움(9:30) 23.1°C , 매우 더움(9:45) 23.2°C , 더움(16:00) 23.2°C 로 시간대에 따라 유입되는 복사에너지 양의 영향을 더 받아 1.3°C 의 T_a 변화를 보인 6일에 비해, 더움과 매우 더움 단계의 경계성이 없는 것으로 나타났다. PC온실은 6일 더움(10:30) 23.6°C , 매우 더움(13:00) 24.1°C , 7일 더움(9:45) 23.2°C , 매우 더움(10:15) 24.1°C , 더움(16:30) 22.1°C 로 나타나 6일과 7일이 매우 유사한 값들을 보였으나, 더움 단계에서 매우 더움 단계로 넘어가는 T_a 의 차가 1.0°C 도 안 돼, 그 경계성이 명확하다고 보기 어려웠다. 그러므로, 계절 전환기인 가을철 맑은 날일 때 T_a 가 22°C 이상이면 시설 내부에서 일하는 농작업자들이 더움 단계 이상의

Table 2. The levels of PMV(Fanger, 1972), PET(Matzarakis et al., 1999) and UTCI(<http://www.utci.org>)

Thermal perception	PMV	PET (°C)	UTCI (°C)	Grade of physiological stress
very cold	<-3.5	<4	<-40	extreme cold stress
			-27~-40	very strong cold stress
cold	-2.5~-3.5	4~8	-13~-27	strong cold stress
cool	-1.5~-2.5	8~13	0~-13	moderate cold stress
slightly cool	-0.5~-1.5	13~18	9~0	slight cold stress
neutral	-0.5~0.5	18~23	9~26	no thermal stress
slightly warm	0.5~1.5	23~29		slight heat stress
warm	1.5~2.5	29~35	26~32	moderate heat stress
hot	2.5~3.5	35~41	32~38	strong heat stress
			38~46	very strong heat stress
very hot	>3.5	>41	>46	extreme heat stress

열 스트레스(heat stress)를 받을 수 있다고 볼 수 있다.

4. 결론

시설(온실 및 비닐하우스) 안에서 일하는 농작업자들의 열환경을 분석해 보고자, 인간 열환경지수가 다양한 단계(적당함-조금 따뜻함-따뜻함-더움-매우 더움)를 보이는 계절 전환기인 가을철 낮 시간대를 대상으로 연구를 실시하였다. 시설 외부와 두 종류의 시설 [polyethylene (PE) 하우스와 polycarbonate (PC) 온실] 안의 미기후(기온, 습도, 풍속, 태양 및 지구복사에너지)자료를 측정하여, 인간 열환경을 비교분석해 보았다.

미기후요소별 결과로는, 시설 외부에 비해 시설 내부의 기온이 평균적으로 14.6-16.8°C(최대 22.3°C) 높았으며, 절대습도도 7.0-12.0 g·m⁻³ 높은 것으로 나타났다. 태양 복사에너지(K)와 지구 복사에너지(L)를 유입되는 하늘 방향(↓)과 지표면 방향(↑)으로 나눠 분석해 보면, 시설 내부로 유입되는 K↓는 평균적으로 232.5-367.8 W·m⁻² 적게, K↑는 44.9-55.7 W·m⁻² 적게 유입되는 것으로 나타났다. L↓는 150.4 -182.3 W·m⁻² 더 많이, L↑는 30.5-33.9 W·m⁻² 더 많이 유입되어, K보다는 L이 온실효과의 주 요인이었으며, 시설 내의 평균복사온도를 10:45-14:15 동안 시설 외부보다 높게 만들었다.

인간 열환경지수인 PMV에서 3.2-3.4(최대 4.7), PET에서 15.2-16.4°C(최대 23.7°C), UTCI에서 13.6-5.4°C(최대 22.3°C) 더 높은 열환경을 만들어, 시설 외부가 적당함(neutral)에서 따뜻함(warm) 단계일 때 시설 내부는 더움(hot)과 매우 더움(very hot) 단계의 열 스트레스를 주는 것으로 나타났다. 가장 큰 영향을 미치는 미기후 요소는 L↓의 영향을 많이 받은 기온이었다. 그러므로, 계절 전환기인 가을철 맑은 날일 때 기온이 22°C이상이면, 시설 내부에서 일하는 농작업자들이 더움 단계 이상의 열 스트레스를 받을 수 있다고 볼 수 있다.

물론, 시설 내부의 인간 열환경지수는 기온뿐만 아니라 맑은 정도에 따른 복사에너지양의 변화, 작물에 따른 습도의 변화에 따라서도 달라질 수 있으므로, 향후 좀 더 다양한 기상환경에 따른 기상청 자료와의 연

계뿐만 아니라 시설재료의 영향에 대한 연구도 더불어 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

This research was supported by the 2015 scientific promotion program funded by Jeju National University.

REFERENCES

- Bröde, P., Fiala, D., Blazejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B., Havenith, G., 2012a, Deriving the operational procedure for the universal thermal climate index (UTCI), *International Journal of Biometeorology*, 56, 481-494.
- Bröde, P., Krüger, E. L., Rossi, F. A., Fiala, D., 2012b, Predicting urban outdoor thermal comfort by the universal thermal climate index UTCI-a case study in Southern Brazil, *International Journal of Biometeorology*, 56, 471-480.
- Choi, J. W., Kim, M. J., Lee, J. Y., 2002, Evaluation of the farmers' workload and thermal environments during cucumber harvest in the greenhouse, *Journal of the Korean Society of Living Environmental System*, 9(3), 245-253.
- Choi, M. K., Shin, Y. S., Yun, S. W., Kim, H. T., Yoon, Y. C., 2013, Analysis of surplus solar energy in venlo type greenhouse, *Protected Horticulture and Plant Factory*, 22(2), 91-99.
- Chung, T. S., Min, Y. B., Moon, G. K., 2001, Temperature control of greenhouse using ventilation window adjustments by a fuzzy algorithm, *Journal of Bio-Environment Control*, 10(1), 43-49.
- Environment Canada, 2001, <http://ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=En&n=5FBF816A-1> (Nov. 17, 2015 checked).
- Fanger, P. O., 1972, *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*, McGraw-Hill, New York.
- Ha, J. S., Lee, I. B., Kwon, K. S., Ha, T. H., 2014, Analysis on internal airflow of a naturally ventilated greenhouse using wind tunnel and PIV for CFD validation, *Protected Horticulture and Plant Factory*,

- 23(4), 391-400.
- Hong, S. W., Lee, I. B., 2014, Predictive model of micro-environment in a naturally ventilated greenhouse for a model-based control approach, *Protected Horticulture and Plant Factory*, 23(3), 181-191.
- Höppe, P. R., 1993, Heat balance modeling, *Experientia*, 49, 741-746.
- Höppe, P. R., 1999, The physiological equivalent temperature-a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment, *International Journal of Biometeorology*, 43, 71-75.
- Kim, S. J., Na, S. Y., 2007, A study on the thermal environment in the multipurpose greenhouse in winter, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 27(3), 15-21.
- Matzarakis, A., Mayer, H., Iziomon, M. G., 1999, Applications of a universal thermal index: Physiological equivalent temperature, *International Journal of Biometeorology*, 43, 76-84.
- Moon, W., Lee, Y. B., Son, J. E., 2014, *Protected horticulture*, Korea National Open University Press.
- Myung, J. Y., Shim, H. S., Choi, J. W., 1993, A study on development of work wear for the plastic house workers, *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 17(1), 19-35.
- Park, S., 2011, *Human-Urban Radiation Exchange Simulation Model*, PhD Dissertation, University of Victoria, Victoria, B.C., Canada.
- Siple, P. A., Passel, C. F., 1945, Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures, *Proceedings of the American Philosophical Society*, 89, 177-199.
- Statistics Korea, 2000, http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1NH1016 &conn_path=I3 (Dec. 7, 2015 checked).
- Statistics Korea, 2010, http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1AG1016&conn_path=I3 # (Dec. 7, 2015 checked).
- Statistics Korea, 2014, http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1EB001&conn_path=I3 (Dec. 7, 2015 checked).
- Statistics Korea, 2015, http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1ET0017&conn_path=I3# (Dec. 7, 2015 checked).
- Thom, E. C., 1959, The discomfort index, *Weatherwise*, 12, 57-60.