PO필름 피복 온실의 수량 증대 및 에너지 절감 효과

문종필^{1*} · 박석호² · 김진구¹ · 이재한¹ · 강연구³ · 임미영⁴ · 김혜민⁴

¹국립원예특작과학원 시설원예연구소 연구사, ²국립원예특작과학원 시설원예연구소 연구관,

³국립농업과학원 농업공학부 연구사, ⁴국립원예특작과학원 시설원예연구소 박사후 연구원

Yield Increase and Energy Saving Effect on Plastic Greenhouse Covered with Polyolefin Film

Jong Pil Moon^{1*}, Seok Ho Park², Jin Gu Kim¹, Jae Han Lee¹, Youn Koo Kang³,
Mi Young Lim⁴, and Hye Min Kim⁴

¹Researcher, Protected Horticulture Research Institute, NIHHS, RDA, Haman 52054, Korea

²Senior Researcher, Protected Horticulture Research Institute, NIHHS, RDA, Haman 52054, Korea

³Researcher, Department of agricultural Engineering, NAS, RDA, Jeonju 54875, Korea

⁴Postdoctoral fellow, Protected Horticulture Research Institute, NIHHS, RDA, Haman 52054, Korea

Abstract. This study was carried out to investigate the effect of PO film on the increase of crop yield and energy saving through PO and PE film greenhouse application and comparison test. As a experimental greenhouse, two single span greenhouses (1-1 W) and two double span greenhouses (1-2 W) were used. During winter season, PO film (0.15 mm outer layer, 0.10mm inner layer) was used as a covering material of greenhouse in double layers for double-span (B15) and single-span(B21), and PE film used for double-span (B15), and single-span (B23) as a control. The experimental vegetable was tomato(*Solanum lycopersicum* L.) cultivated in soil and the cultivar of that was 'Happiness'. That was cultivated from December 3, 2019 to April 30, 2020. The temperature at night inside the greenhouse was maintained at 15°C, and the side and roof windows were opened to maintain 23 ~ 24°C during the day. As a result, this study showed that the yield in single-span greenhouse(B21) covered with a PO film increased 20% and that in double-span greenhouse (B16) increased by 9% compared to the greenhouse covered with a PE film (B23, B15). Fuel consumption of the single-span greenhouse (B21) with the cover of PO film was reduced by 12.4% and that of double-span greenhouse was done by 11.5% compared to that of the PE film greenhouse (B23, B15) without any difference between them in growing state.

Additional key words : heating cost saving, insulation effect, Solar radiation increase

서 론

우리나라의 온실면적은 2018년 현재 53,274ha이며 가온온실은 17,399ha로서 온실 전체면적의 32.7%를 차지하고 있다(MAFRA, 2019). 난방을 하는 온실면적은 2005년에 12,733ha로서 24.5%를 차지하였고 2010년에는 15,591ha로 30%를 넘어서 2018년 현재에는 32.7%를 차지하고 있다(MAFRA, 2019). 근래에 난방온실의 증가추세가 많이 둔화되었지만 난방온실 점유율이 점차로 증가하는 것은 작물을 연중 재배하고자 하는 시설 재배 농업의 특성으로 보여진다. 이

런 특성은 시설원예농가의 생산비 중 난방비가 차지하는 비율이 30~40%(Lee 등, 2011)로서 고추가 38%, 토마토 31%, 파프리카 38%, 국화 26% 장미가 42%로서 네덜란드가 10~20% 수준인 것에 비교하면 분명히 농가경영에 부담이 되고 있으며 난방비의 비중을 2022년까지 20~30%로 줄이고자 하는 농림축산식품부의 정책에서도 분명하게 드러나고 있다. 또한 난방연료중 유류가 차지하는 비중이 2018년 현재 84%를 차지하고 있고 온실의 90% 이상이 10년 이상 노후화된 시설로 보온성에 다양한 문제가 발생되고 있다. 또한 채소 비닐하우스의 86%는 단동온실로 보온비가 낮고 단열 미비로 가온에 불리한 실정이다. 이러한 상황을 극복하기 위해서는 시설재배 농가에서 주로 사용되고 있는 유류사용을 줄이고 열손실을 최소화하여 난방비용을 절감할 수 있는 에너지 절감기술 개발이

*Corresponding author: jpmoon2002@korea.kr

Received September 11, 2020; Revised October 12, 2020;

Accepted October 13, 2020

매우 중요하다(Ryou 등, 2008). 온실의 열손실은 대개 피복재 표면을 통하여 일어나게 되는데, 이때 외부로 전달되는 열이 60~100%가 되므로 겨울철 온실 난방비를 줄이기 위하여 온실 표면적을 통한 열손실을 최소화해야 한다(Shin 등, 2015).

한편 농가의 경제적 이익을 증진하기 위해서는 생산성을 증가시켜야 하는 측면이 있는데 난방비용을 절감하는 것과 상충되는 면이 있어 생산성을 증가시키면서도 난방비가 많이 들지 않는 기술개발이 필요하다. 이러한 기술개발에 온실 피복 및 보온재에 대한 기술개발이 중요시되고 있다(Jin 등, 2018, 2019; Yun 등, 2019). 온실 피복재는 작물 성장 및 수확에 필수적인 에너지를 공급하는 햇빛을 투과시키는 중요한 역할을 한다. 온실에 있어서 햇빛은 광합성유효광량자속밀도(PPFD)가 감소할 때 광합성효율이 떨어져 수량 및 품질 저하로 이어지므로(Challa와 Schapendonk, 1984; Cockshull, 1992) 빛의 강도를 1% 감소시키면 작물 수확량이 1%가 감소될 수 있다고 한다. 이는 햇빛이 광합성 과정에서 식물의 생육량을 형성하는 화합물이 생성되고 대사과정에 필요한 에너지로 사용되기 때문이다(Kwon 등, 2012). 특히 Polyolefin 필름(이하 PO필름 표기)이 최근 투명성과 보온성이 우수하여 지중가온을 통한 참외재배 시 보온터널의 피복재로 사용하여 수량성 및 품질 증대를 확인하였고(Shin 등, 1999; Shin 등, 2009) 2014년 PO필름 사용이 2010년에 비해 3.4배로 증가한 것을 보고하였으며(Shin 등, 2016) PO필름의 우수성이 생산성 증대 및 품질개선에 효과적임으로 보고되고 있다. 그러나 에너지 절감측면에서 그 효과를 구체적으로 제시한 연구결과는 그리 많지 않다.

그러므로 본 연구에서는 PO필름의 생산성 및 보온성을 관행적으로 많이 사용되고 있는 Polyethylene 필름(이하 PE 필름 표기)과 비교하였다. 또한 주간에 PO필름의 투광성 증대에 의한 PE필름 대비 생산성 증대와 지상부 야간 난방시 PO필름의 보온성 증대에 의한 열손실 저감 효과를 온실 형태(단동 및 연동형)에 따라 검증하고자 하였다.

재료 및 방법

1. PE, PO필름 시험온실의 조성

1.1 단동 온실

PE필름 및 PO필름의 단동온실에서 에너지 절감효과를 비교하기 위하여 경남 함안군 소재 시설원예연구소 단동형 온실(1-1S, 동서 방향)을 PE필름 온실(B23동)과 PO필름 온실(B21동)로 각각 조성하였다. 온실의 시설규모는 폭 7.7m, 길이 30m, 측고 1.5m, 동고 3.8m이다. 시험온실의 난방기 용량 선정을 위해 최대난방부하는 식 (1)(NIAS, 2010)을 이용하여

계산하였다. 비닐피복온실에 다겹보온커튼(5겹: 마트자+PE폼+화학솜4온스+부직포40g+마트지)을 보온재로 사용하였으며 열절감률은 이중피복 시 45%, 설계 외기온은 진주시방의 TAC 5%(20년 빈도) 최저기온인 -10.5°C, 지중온도 -2.1°C, 온실 난방설정온도는 15°C를 설계인자로 하여 산정하였다.

$$Q_g = [A_g(Q_t + Q_v) + A_s \cdot Q_s]F_w = [A_g(H_t(T_s - T_o)(1 - F_r) + H_v(T_s - T_o)) + A_s(T_s - T_g)]F_w \quad (1)$$

여기서 Q_g : 최대난방부하(W), A_g : 시설 피복면적(m^2), Q_t : 관류전열부하(W/m^2), Q_v : 환기전열부하(W/m^2), A_s : 시설 바닥면적(m^2), Q_s : 지중전열부하(W/m^2), F_w : 풍속보정계수, H_t : 관류열전달계수($W/m^2 \cdot ^\circ C$), T_s : 난방설정온도($^\circ C$), T_o : 설계 외기온($^\circ C$), T_g : 지중온도($^\circ C$) F_r : 보온재 열절감률, H_v : 환기전열계수($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

상기의 계산에 의해 시험 단동온실 1동의 공간난방을 위한 최대난방부하는 37,000kcal/h로 계산되었으며 산정된 최대난방부하에 충분히 대응할 수 있도록 60,000kcal/h의 등유온풍기 및 난방 덕트를 설치하였다. 시험온실의 피복형태는 이중피복형태로서 외피는 두께 0.15mm의 피복재를 사용하였고 내피는 0.10mm를 사용하였다. 보온재로는 5겹의 다겹보온커튼을 사용하였다. 다겹보온커튼은 1중골조와 2중골조 사이를 보온할 수 있도록 2중골조에 중앙권취식으로 설치하였다. 주간에는 다겹보온재 및 이중피복재를 지붕 중앙부(중도리 근접부)에 권취하도록 하고 이를 개방하여 1중의 피복재만이 지붕부를 피복하도록 하여 광합성에 필요한 광량을 충분히 확보할 수 있도록 운영하였다. 야간에는 이중골조에 설치되어 있는 피복재 및 보온재가 온실 상부 및 측면을 덮어야 야간 난방시 충분한 보온이 이루어 질 수 있도록 하였다. 또한 주간에는 온실내부가 27°C 이상이 되면 외피(1중 피복 필름) 측장이 열리고 자연환기가 이루어지도록 하였고 온실내부 23~24°C가 되도록 관리하였다. 또한 23°C 이하가 되면 외피 측장이 닫히도록 설정하였다. 내피(2중 피복 필름)는 오후 5시에 닫았으며 오후 5시 30분에 다겹보온커튼이 닫히도록 하였다. 야간에는 온실내부온도가 15°C가 유지될 수 있도록 난방기 설정온도를 15°C로 운영하였다. 아침 8시에 다겹보온커튼이 열리고 9시에 2중 피복 필름이 열리도록 운영하였으며 피복 및 보온재의 온실 내 설치형태는 Figs. 1. 2와 같다.

1.2 연동 온실(2연동)

PE 및 PO필름의 연동온실(2연동)에서의 에너지 절감효과를 비교하기 위하여 시설원예연구소의 2연동의 온실(1-2W, 남북 방향)을 PE필름 온실(B15동)과 PO필름 온실(B16동)로 각각 조성하였다. 온실의 시설규모는 폭 8m, 길이 30m, 측고 3.1m, 동고 5.8m의 온실로서 이중 골조로 된 아치형 표준온실이다. 최대난방부하를 식(1)을 이용하여 단동온실과 동일한 방법으로 산정한 결과 86,000kcal/h로 산정되었다. 산정된 최대난방부하에 충분히 대응할 수 있도록 100,000kcal/h의 등유온풍기 및 난방덕트를 설치하였다. 시험온실의 피복형태는 이중피복형태로서 외피는 두께 0.15mm의 피복재를 사용하였고 내피는 0.10mm를 사용하였다. 보온재로는 4겹의 알루미늄 다겹보온커튼(알루미늄스크린 95%+부직포40g+화학솜4온스+마르지)을 사용하였다. 알루미늄 다겹보온커튼을 2중골조 아래 중방위치에 수평에인식으로 설치하였다. 주간에는 알루미늄 다겹보온재 및 이중피복재를 개방하여 일중피복을 통하여 광합성에 필요한 광량을 충분히 확보 할 수 있도록 운영하였다. 야간에는 이중 피복 필름 및 보온재가 온실 상부 및 측면을 덮어 야간 난방시 충분한 보온이 이루어 질 수 있도록 하였다. 또한 주간에는 온실내부가 27°C 이상이 되면 천창(1중 피복 필름)을 열어 최고 30°C가 유지되면서 자연환기라 이루어지도록 하였다. 또한 온실내부온도는 23~24°C가 되도록 관리하였으며 23°C이하가 되면 외피의 천창을 닫아 관리

하였다. 내피(2중 피복 필름)는 오후 5시에 닫았으며 일몰 후 일몰 전 50분에 알루미늄 다겹보온재가 자동으로 닫히도록 운영하였다. 야간에는 단동온실과 동일한 방법으로 온실내부온도가 15°C가 유지될 수 있도록 난방기 설정온도를 15°C로 운영하였다. 오전 9시에 내피(2중 피복 필름)가 개방되도록 하였으며 피복 및 보온재의 온실 내 설치형태는 Figs. 3, 4와 같다.

2. PE, PO필름 시험온실의 열관류율, 일사량, 온 · 습도 및 연료소비량 측정

단동 시험온실의 열관류율, 일사량, 온습도를 측정하기 위하여 온실 중간지점에 열관류율 센서(MF-180, EKO, Japan), 일사량 센서(LightScout solar radiation sensor(36701), SPECTRUM Tech. inc., U.S.A) 및 온습도 센서(HOBO Pro v2, ONSET, U.S.A)를 설치하여 2019년 12월 24일부터 2020년 4월 30일까지 10분 간격으로 측정하였다. 열관류율 측정은 지붕면의 열관류율을 측정하기 위해 지붕면 중도리와 처마도리 사이의 중간지점인 남측면 내측면에 설치하였다. 또한 측면의 열관류율을 측정하기 위해서 측면의 지면으로부터 1.7m 지점의 남쪽측창부에 측창 열림의 상한지점보다 바로 윗 지점에 설치하였다. 일사량 센서는 지면으로부터 1.8m 지점의 남북면 양쪽에 2개를 설치하였으며 15일 간격으로 평균 일사량을 분석하였다. 온습도 센서는 온실내부온도를 측정하기 위해 지면으로부터 2m 위치이며 온실 중앙에 1개를

Fig. 1. Cover and insulation curtain in PE film B23).

Fig. 2. Cover and insulation curtain in PO film (B21).

Fig. 3. Cover and insulation curtain in PE film (B15).

Fig. 4. Cover and insulation curtain in PO film (B16).

설치하였다. 1층과 2층 필름 사이의 지붕면과 측면을 측정하기 위해 2개를 설치하였으며 모든 계측센서의 설치위치 및 온실내부는 Figs. 5, 6, 7과 같다. 또한 피복재별 연료소비량을 측정하기 위해 재배기간인 2019년 12월 3일부터 2020년 4월 30일까지 난방을 위해 가동되는 온풍난방기의 등유사용량을 측정하기 위해 적산유량계(미소유량계 SSO-8(15A), hanil ins., Korea)를 연료공급배관에 설치하여 측정하였다.

연동온실의 열관류율을 측정하기 위해 열관류율 센서를 온실전체의 중간지점에 설치하였다. 시험온실은 2연동 온실이어서 지붕면의 열관류율을 측정하기 위해 서쪽지붕과 동쪽지붕면 사이의 곡부로부터 가까운 동쪽과 서쪽의 지붕면의 중간 위치에 열관류율 센서(MF-180, EKO, Japan) 2개를 설치하였다. 연동온실의 측면 열관류율을 측정하기 위하여 북쪽과 남쪽 측면에 지상으로부터 2.5m 높이에 위치하도록 하여 2개의 열관류율을 측정하였다. 일사량 센서(LightScout solar radiation sensor(36701), SPECTRUM Tech. inc., U.S.A)는 지면으로부터 1.8m 지점의 동서면 양쪽에 2개를 설치하였으며 단동온실과 동일한 방법으로 분석하였다. 온습도 센서(HOBO Pro v2, ONSET, U.S.A)는 온실내부 온도를 측정하기 위해 지면으로부터 1.8m 위치이며 온실 중앙에 1개를 설치하였다. 또한 1층과 2층 필름 사이의 지붕면과 측면의 온습도

를 측정하기 위해 지붕면 2개, 측면 2개를 설치하였으며 연료 소비량도 단동온실과 동일한 방법으로 계측하였다. 모든 계측센서의 설치위치 및 온실내부는 Fig. 8, 9, 10과 같다.

3. 토마토 토양 재배

시험 토양은 미사질 식양토(Silty Clay Loam)로서 2017년 국립농업과학원에서 발행한 작물별 비료사용처방기준에서 제시하는 토마토 시설재배 추천 시비량에 준하여 비료와 퇴비를 사용하였다(NIAS, 2017). 비료 사용량은 10a당 N-P-K, 11.6-10.3-4.1kg을 기비로, 추비는 10a당 N-P-K, 8.8-0-8.1kg을 2~3회에 걸쳐 사용하였다. 또한 10a 당 퇴구비 2,000kg, 석회 30kg를 기준으로 전량 기비로 투입하였다. 재배실험은 완숙 토마토 품종인 *Solanum lycopersicum* L. 'Happiness'(주)아시아종묘)를 2019년 12월 3일에 정식하여 2020년 4월 30일까지 재배하였다. 정식은 폭 60cm로 조성된 두둑에 1줄 심기를 하였으며 재식거리는 40cm 간격으로 두둑 1열에 73주씩 정식하였다. 단동온실은 두둑 3곳을 조성하여 총 220주를 정식하였다. 연동온실도 단동온실과 동일하게 두둑 폭을 60cm로 조성하여 1줄에 88주를 정식하였고 2연동 온실에 8곳의 두둑을 조성하여 700주를 정식하였다. 관수, 병해충 방제 및 재배관리는 농촌진흥청 표준재배법에 준하여 실시하였다.

Fig. 5. Sensor location map in PE film (B23).

Fig. 6. Sensor location map in PO film (B21).

(a)

(b)

(c)

Fig. 7. Tomato cultivation(a), insolation meter(b) and heat transmittance sensor(c) in a single span greenhouse.

Fig. 8. Sensor location map in PE film (B15).

Fig. 9. Sensor location map in PO film (B16).

(a)

(b)

(c)

Fig. 10. Tomato cultivation(a), thermo-hygrometer(b) and heat transmittance sensor(c) in double span greenhouse.

4. 생육량 및 수량조사

단동온실에서는 Fig. 11과 같이 3줄 재배를 하였다. PE 필름 피복온실과 PO 필름 피복온실의 작물 생육상태를 북쪽 측면(Col. 1), 중앙(Col. 2), 남쪽 측면(Col. 3)에서 재배열 간 비교하였다. 2019년 12월 3일부터 2020년 4월 30일까지의 재배 기간 중 2019년 12월 14일, 2020년 1월 20일, 2월 5일, 2월 19일, 3월 4일, 3월 18일, 4월 1일, 4월 14일에 8차례 걸쳐 생육조사를 실시하였다. 조사항목으로 초장, 경경, 엽장, 엽폭, 엽수, 엽록소 지수(SPAD), 수확량을 조사하였다. 2020년 3월 6일 PO 필름 온실에서 수확이 가능할 수 있을 정도로 과실이 맺혀 첫번째 수확을 실시하였고 수량조사를 실시하였다. 그 이후로 3월 13일, 3월 20일, 3월 31일, 4월 8일, 4월 22일, 4월 27일에 걸쳐 7차례에 걸쳐 5화방까지 수확량 조사를 실시하였다. 연동온실은 Fig. 12와 같이 곡부를 기준으로 한 서쪽온실에서 생육조사를 실시하였다. 1동의 우측 온실에서 동쪽 측면부터 서쪽으로 col. 1, col. 2, col. 3, col. 4로 나누어 각각 재배열 특성을 조사하였다. 조사 항목, 조사일 및 수확량 조사는 단동온실과 동일하게 실시하였다. 조사결과에 대한 통계분석은 SAS 프로그램(SAS. ver. 9.2, Institute inc., Cary, NC, USA)을 이용하여 처리하였으며 Duncan의 다중 검정 방법 및 F-test 방법으로 분석하였다.

결과 및 고찰

1. PE, PO 필름 시험온실의 열관류율 및 단열층 온도 비교

단동 및 연동온실에서 외피 내측에 부착된 열관류율 센서에 의해 계측된 PE 필름과 PO 필름의 열관류율을 측정 개시일인 2020년 1월 13일부터 측정 종료일인 4월 30일까지의 야간(18:00 – 익일 05:00)에 10분 간격으로 측정된 열관류율의 평균값을 산정하였다. 산정결과 온실내외부 온도차에 따른 단위면적당 피복 및 보온재의 평균 열관류율은 Table 1과 같다.

Table 1에서 계측된 열관류율 값은 단동온실과 연동온실과 구분하여 분석하고자 한다. 단동온실의 열관류율 값은 온실 내부의 열이 Fig. 13과 같이 대류 및 복사에 의해 2중 피복재(내피), 다겹보온커튼, 공기층, 1중 피복재(외피)로 전달이 되는데 단열성능이 우수한 공기층이 1개만 존재하여 열관류율 값이 연동온실보다 크게 나타난 것으로 판단된다. 연동온실에서는 온실내부의 열이 Fig. 14와 같이 알루미늄 다겹보온커튼, 공기층, 2중 피복재, 공기층, 1중 피복재에 열이 전달되어 온실 외부로 열이 전달되므로 단열층 역할을 하는 공기층이 2개가 존재하여 그 단열효과가 큰 것으로 판단된다.

또한 동일한조건을 가지고 있는 경우 동일한 형태의 온실 내에서의 PE 필름과 PO 필름의 특성을 분석하기 위하여 경계 층마다의 온도변화를 비교하였다. 2020년 1월 16일 0시부터

Fig. 11. Sample location map for a growth survey in a single span greenhouse.

Fig. 12. Sample location map for a growth survey in double greenhouse.

Table 1. Measured Heat transmission rate for cover and insulation combination.

Greenhouse type	Cover and insulation material			Heat transmission rate ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)	Temp. difference between outside and inside ($^\circ\text{C}$)
	1-layer (mm)	2-layer (mm)	Insulation layer		
Single span	PE film (0.15)	PE film (0.10)	Multi-layer thermal curtain(5 layers)	2.30 ± 0.5^A	9.8
	PO film (0.15)	PO film (0.10)	Multi-layer thermal curtain(5 layers)	1.88 ± 0.3	10.1
Double span	PE film (0.15)	PE film (0.10)	Aluminum thermal curtain(4 layers)	2.17 ± 0.6	10.1
	PO film (0.15)	PO film (0.10)	Aluminum thermal curtain(4 layers)	1.80 ± 0.5	10.5

^AMean $\pm$ S.D. Value

Fig. 13. Heat Transmission process (Single span).

Fig. 14. Heat Transmission process (double span).

새벽 4시50분까지의 온실형태 및 피복재에 따른 시험온실의 경계층 및 온실내외부의 온도변화를 도시하면 Figs. 15, 16과 같다. 단동온실에서는 Fig. 15에서와 같이 PO필름 온실이 외 피의 바로 밑에 층에 있는 1중과 2중피복사이의 온도가PE 필름 온실보다 약0.9°C 정도 높아 열손실이 적고 보온효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 단동온실에서 2중 피복재로 쓰인 PO필름은 다겹보온커튼과 밀착되어 있어 단열효과가 크게 나타나지 않은 것으로 나타났다. 연동온실에서는 Fig. 16과 같이 PO필름 온실의 1중과 2중 피복재 사이의 온도가PE 필름 시험온실보다 약 1.0°C 정도 일정하게 높고 2중 피복재와 3중 알루미늄 다겹보온커튼 사이의 온도가PE필름 피복온실보다 0.5°C 정도 높은 것으로 나타나 단동 및 연동온실에서 PO 필름 피복 온실이 각각의 경계층에서의 열손실 저감 및 보온 효과에 유리한 것으로 나타났다.

2. 일사량 및 온실 내부 온 · 습도 비교

2019년 12월 24일부터 2020년 4월 30일까지 10분간격으

로 일사량을 측정하고 15일 간격으로 평균 일사량값을 온실 형태 및 피복 형태에 따라 분석한 결과 Fig. 17과 같이 나타났 다. 이러한 결과는 단동온실은 동서방향으로 설치되어 있고 연동온실은 남북방향으로 설치되어 있어 동절기 태양고도가 남쪽으로 치우쳐 있을 때에는 단동온실에 일사량이 많고 남북 방향으로 설치된 연동온실에는 불리하게 작용한 것으로 판단 되었다. 시간이 경과되어 계절이 바뀌게 됨에 따라 연동온실에 일사량이 유리하게 변하는 것으로 나타났다. 전체적인 일사량의 평균값을 비교해보면 PO필름 피복온실의 단동온실(B21동) 내부 일사량은 시험기간 동안 평균적으로 195W/m²이었으며PE 필름 피복 단동온실(B23동) 온실 내부 일사량은 183W/m²로서 PO필름 온실이PE필름 온실보다 약 7% 높은 것으로 조사되었다. 연동온실에서는 PO필름 피복온실(B16 동) 온실내부 평균 일사량이 210W/m²이었으며PE필름 피복 온실(B15동)의 온실내부 평균일사량이 187W/m²으로서 PO 필름 온실이PE필름 온실보다 약 11% 일사량이 많은 것으로 계측되었다. 또한 외부일사량은 시험기간동안 평균적으로

Fig. 15. Temp. comparison between each layers (single span).

Fig. 16. Temp. comparison between each layer (double span).

Fig. 17. Solar radiation comparison based on analysis of average value for 15 day intervals.

314W/m²로 계측되어 온실 내부 광투과율은 PO필름이 62~67% , PE필름이 58~60%를 나타냈다. 이러한 결과는 Polyolefin계 필름이 Polyethylene계 필름에 비해 투명도가 높아 광투과율이 높았다고 보고한 연구결과(Shin 등, 2009; Shin 등, 2016)와도 일치하였다.

단동온실의 온실내부의 일평균 야간온도는 PO필름 온실이 15.8°C, 상대습도 84% 이었으며 PE필름 온실은 15.5°C, 상대습도 85%로 계측되었다. 연동온실에서는 PO필름온실이 16.2°C, 상대습도 63%이고 PE필름 시험온실은 15.8°C, 상대습도 69%로 계측되었다. 시험 온실별 내부 온도 및 상대습도

는 거의 유사한 것으로 나타나 시험온실 난방이 설정온도에 맞춰 정상적으로 잘 수행된 것으로 판단되었다. 또한 온실 내부의 주야간 일평균 온습도를 측정한 결과 단동온실은 PE, PO 필름 온실이 각각 19.0°C, 19.1°C, 상대습도는 모두 75%를 나타냈다. 연동온실은 PO필름 온실이 19.6°C, 상대습도 57%를 나타냈고 PE 필름 온실이 18.8°C, 상대습도 63%를 나타내어 시험기간의 일평균온도 및 상대습도 역시 거의 유사한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 환기(천창 및 측창개폐)에 의한 주간의 온습도관리가 잘 이루어진 것으로 판단되었다.

Table 2. Tomato growth status in a single span greenhouse.

Item	Treatment		Days after planting (Date)			
	A	B	21 ('19.12.24)	64 ('20.2.5)	106 ('20.3.18)	133 ('20.4.14)
Plant height (cm)	PE	col.1	37.3±4.5 a ^z	147.6±19.6 a	269.0±14.1 a	327.6±20.4 a
		col.2	38.6±2.3 a	161.3±2.0 a	260.6±9.0 a	323.6±11.0 a
		col.3	34.6±6.3 a	145.6±15.0 a	256.3±14.6 a	325.0±19.3 a
	PO	col.1	36.0±7.0 a	158.0±2.6 a	263.6±13.6 a	339.5±7.5 a
		col.2	38.6±1.1 a	166.3±7.7 a	253.0±7.9 a	323.0±6.5 a
		col.3	34.6±3.5 a	144.3±9.2 a	256.6±16.5 a	332.0±24.0 a
	F-test ^y	A	NS	NS	NS	NS
		B	NS	*	NS	NS
		A*B	NS	NS	NS	NS
No. of leaves	PE	col.1	12.3±0.5 ab	28.0±1.0 a	37.6±1.1 a	45.0±2.6 bc
		col.2	12.6±0.5 a	28.3±1.1 a	39.6±1.5 a	46.3±1.1 ab
		col.3	12.0±0.0 ab	27.0±1.7 a	37.3±2.0 a	47.6±1.1 a
	PO	col.1	11.3±0.5 b	26.6±1.1 a	39.0±3.0 a	43.5±0.5 c
		col.2	12.0±1.0 ab	26.6±1.5 a	37.3±1.1 a	44.3±0.5 bc
		col.3	12.6±0.5 a	26.6±0.5 a	38.6±1.1 a	44.0±1.0 bc
	F-test	A	NS	NS	NS	**
		B	NS	NS	NS	NS
		A*B	NS	NS	NS	NS
SPAD value	PE	col.1	35.5±2.0 a	36.4±3.6 b	34.1±3.4 d	35.1±2.8 c
		col.2	36.5±2.1 a	38.2±0.2 b	35.5±0.6 d	35.2±9.0 c
		col.3	34.2±2.4 a	40.1±0.8 ab	42.8±3.8 bc	48.2±3.8 ab
	PO	col.1	36.4±4.1 a	41.0±1.5 ab	37.2±1.3 cd	39.4±2.9 bc
		col.2	37.4±2.2 a	39.7±4.5 ab	48.4±5.5 ab	39.7±7.4 bc
		col.3	35.1±1.2 a	44.7±2.4 a	49.3±1.6 a	54.3±2.8 a
	F-test	A	NS	*	***	NS
		B	NS	NS	***	**
		A*B	NS	NS	NS	NS

^zMean±S.D. values in the same row (a-c) followed by different letters are significantly different according to Duncan's multiple range test ($p<0.05$).

^yNS, *, **, *** stands for Nonsignificant or significant at $p<0.05$, 0.01 or 0.001 respectively.

3. 생육량 및 수확량 비교

3.1 생육조사 결과

온실내부 북쪽 측면(Col. 1), 중앙(Col. 2), 남쪽 측면(Col. 3)에 위치한 재배열에 따라, PE 필름과 PO 필름 피복재에 따른 단

동온실의 생육조사 결과는 다음과 같다. 단동온실에서 초장의 경우 PE 필름과 PO 필름 처리에 의한 차이는 없었고, 엽수의 경우 정식 후 133일 조사구에서 PE 필름의 재배열 북쪽 측면(Col. 1) 보다 중앙(Col. 2) 또는 남쪽 측면(Col. 3)에서 유의성 있게

Table 3. Tomato growth status in double span greenhouse.

Item	Treatment		Days after planting (Date)			
	A	B	21 ('19.12.24)	64 ('20.2.5)	106 ('20.3.18)	133 ('20.4.14)
Plant height (cm)	PE	col.1	29.3±6.1 b ^c	135.0±18.0 ab	258.3±29.0 a	286.0±16.0 b
		col.2	29.0±3.6 b	133.3±14.5 ab	247.3±19.6 a	295.5±12.2 ab
		col.3	32.6±4.9 ab	128.3±2.8 b	236.3±11.9 a	302.6±32.3 ab
		col.4	31.0±2.6 ab	131.6±1.5 ab	236.0±11.5 a	302.0±28.1 ab
	PO	col.1	34.1±2.0 ab	148.0±19.2 ab	234.0±51.8 a	284.6±53.1 b
		col.2	31.3±1.1 ab	143.6±10.9 ab	230.0±22.2 a	283.0±28.0 b
		col.3	38.0±2.0 a	143.6±19.3 ab	223.0±31.5 a	277.0±33.1 b
		col.4	36.0±4.0 ab	155.6±1.1 a	269.0±8.5 a	346.3±9.2 a
	F-test ^y	A	**	*	NS	NS
		B	NS	NS	NS	NS
		A*B	NS	NS	NS	NS
No. of leaves	PE	col.1	10.0±1.0 b	24.0±0.0 a	32.6±3.5 b	41.5±0.5 a
		col.2	11.0±1.0 ab	25.3±1.1 a	36.3±0.5 ab	44.3±1.5 a
		col.3	11.0±1.0 ab	25.0±0.0 a	34.3±0.5 b	43.3±0.5 a
		col.4	11.0±1.0 ab	24.6±1.5 a	35.0±1.0 ab	43.0±2.0 a
	PO	col.1	11.6±0.5 ab	24.6±2.5 a	34.3±3.7 b	40.6±4.9 a
		col.2	11.6±0.5 ab	24.6±0.5 a	33.6±1.5 b	42.0±2.6 a
		col.3	12.0±1.0 a	26.3±1.5 a	35.3±1.5 ab	44.0±0.0 a
		col.4	12.0±1.0 a	25.6±2.0 a	38.6±2.5 a	44.0±1.0 a
	F-test	A	*	NS	NS	NS
		B	NS	NS	NS	NS
		A*B	NS	NS	NS	NS
SPAD value	PE	col.1	33.4±0.1 a	35.2±0.2 b	37.8±3.2 a	39.8±3.8 c
		col.2	34.5±2.7 a	36.1±3.6 ab	39.8±3.6 a	40.8±7.0 bc
		col.3	33.9±1.4 a	40.6±4.3 ab	39.5±4.0 a	45.0±5.6 abc
		col.4	32.2±1.9 a	37.4±1.1 ab	45.3±5.0 a	45.6±7.0 abc
	PO	col.1	33.8±0.6 a	36.4±3.8 ab	42.8±5.6 a	53.7±7.4 ab
		col.2	32.9±1.3 a	42.0±7.3 ab	46.4±3.5 a	54.1±5.0 a
		col.3	32.6±1.7 a	43.5±2.3 a	45.3±4.3 a	51.0±10.8 abc
		col.4	32.0±0.8 a	36.6±5.1 ab	44.1±6.0 a	41.7±4.4 abc
	F-test	A	NS	NS	*	*
		B	NS	NS	NS	NS
		A*B	NS	NS	NS	NS

^aMean±S.D. values in the same row (a-c) followed by different letters are significantly different according to Duncan's multiple range test ($p<0.05$).

^yNS, *, **, *** stands for Nonsignificant or significant at $p<0.05$, 0.01 or 0.001 respectively

높았다. 단동온실에서는 수량과 과실 품질에 영향을 미칠 수 있는 엽록소 지수(SPAD Value)가 필름처리 및 재배열의 위치에 따라 처리간에 매우 높은 유의성을 나타냈다(Table 2). 특히 PO필름을 사용한 단동온실 남쪽 측면 재배열에서 엽록소 지수가 54.3으로 가장 높았다. 참외의 경우 광 요구도가 높은 작물로 광 투과율이 저하하는 조건에서 엽록소 함량이 감소하는 경향이 있다는 보고가 있다(Lee 등, 2003; Shin 등, 2016). 이와 같이 PO필름 온실의 남쪽 측면(col 3)에 위치한 재배열이 토마토 생장에 매우 유리한 것으로 판단된다. 연동온실의 생육 조사 결과는 Table 3과 같다. 초장과 엽수의 경우 PO필름 재배 시 조금 더 좋은 결과를 보였으나 큰 유의성은 없었고, 단동온실 결과와 마찬가지로 엽록소 지수의 경우 정식 후 133일 조사구에서 PO필름 처리 시 높은 값을 나타내었고, 특히 PE필름 Col. 1 재배열은 연동온실에서 가장 중심에 위치한 부분으로서 엽록소 지수가 39.8로 가장 저조한 값을 나타내었다.

3.2 수확량 조사 결과

수확량 조사를 시험 기간 동안 7차례에 걸쳐 5화방까지 수행하였으며 수량조사는 생육조사 지점의 첫번째 조사구에서 수확한(단동 9주, 연동 12주)과실만의 중량을 합하여 총중량으로 계산하였으며 그루당, 단위면적당 수확량 및 재식밀도는 Table 4, 5와 같다.

또한 PE 및 PO필름 시험온실에서 각각 수확한 1주당 수확량을 서로 비교한 결과 단동온실은 Fig. 18과 같이 나타났으며 PO 필름 온실이 PE 필름 온실 대비 11일 정도 수확시기가 빨라졌으며 수량은 20% 증대된 것으로 조사되었다. 연동온실은 Fig. 19와 같이 나타났으며 PO 필름 온실이 PE 필름 온실 대비 14일 정도 수확시기가 빨라지고 수량은 9% 증대된 것

로 조사되었다. 참외 피복필름 연구에서 PE필름 처리에 비해 PO필름 처리구에서 첫 수확 소요일수가 7일 촉진되었고, 과중이 더 높은 결과와 같았다(Shin 등, 2016). 또한 PO필름 처리의 경우 적외선 흡수율이 높을수록 초기 수량이 증가한다는 연구결과와 일치한다(Choi 등, 2007; Shin 등, 2016). 단동온실과 연동온실 각각 4월 14일과 4월 22일 수량은 PE 필름 처리에서 증가한 것으로 나타났으나 이는 토마토 화방을 적과 조정을 하지 않고 방임한 결과로 판단된다.

4. 연료소비량 비교

2019년 12월 3일부터 2020년 4월 30일까지의 연료소비량을 측정한 결과 단동온실이며 PE필름 피복 온실의 연료소비량은 2,310L(liter)이었으며 PO 필름 단동 온실의 연료소비량은 2,024L(liter)로 측정되었다. 연동온실이며 PE필름 피복온실의 연료소비량은 5,127L(liter)이며 PO 필름 피복온실의 연료소비량은 4,539L(liter)로 측정되었다. 연료소비량을 등유 1L 당 총발열량인 36.7MJ(8,770kcal)로 환산하면 단동온실에서의 PE 필름, PO 필름 피복온실의 난방에너지 소비량은 84,777MJ, 74,281MJ로 나타났으며 연동온실의 PE필름, PO 필름 피복온실의 난방에너지 소비량은 188,161MJ, 166,581MJ로 산정되었다, 연료소비량을 PE필름을 기준으로 하여 PO필름의 에너지 절감효과를 산정한 결과 단동온실에서는 12.4%가 절감되었고 연동온실에서는 11.5%가 절감된 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 PO필름을 이중 피복으로 설치하였을 때 PE필름보다 보온성이 우수한 것으로 판단되었으며 시설채소온실의 80%이상을 차지하고 있는 단동 온실에서 PO필름이 피복재로 사용된다면 상당한 양의 난방에너지를 절감 할 수 있을 것으로 판단되었다.

Table 4. Yield analysis for PE, PO covering film in a single span greenhouse.

Treatment	Total yield (g/9plant)	Yield per unit		Planting density (row spacing (cm) × plant spacing (cm))
		Yield (g) per 1 plant	Yield (g) per unit area(m ²)	
PE film (B23)	27,641	3,071	2,924	190 × 40
PO film (B21)	33,187	3,687	3,511	190 × 40

Table 5. Yield analysis for PE, PO covering film in double span greenhouse.

Treatment	Total yield (g/12 plant)	Yield per unit		Planting density (row spacing (cm) × plant spacing (cm))
		Yield (g) per 1 plant	Yield (g) per unit area(m ²)	
PE film (B15)	24,347	2,028	2,958	160 × 40
PO film (B16)	26,413	2,201	3,209	160 × 40

Fig. 18. Yield comparison for each covering film on harvest day in a single span greenhouse.

Fig. 19. Yield comparison for each covering film on harvest day in double span greenhouse.

적 요

본 연구는 PO필름과 PE필름을 온실의 피복재로 적용하였을 때 작물 수량 증대 및 에너지 절감에 미치는 영향을 조사하였다. 시험온실은 국립원예특작과학원 시설원예연구소 내에 위치한 단동온실(1-1W) 2동(B21, B23)과 2연동온실(1-2W형) 2동(B15, B16)을 사용하였다. 단동온실의 규격은 폭 7.2m, 길이 30m, 측고 1.5m, 동고 3.6m 이고, 연동온실의 규격은 폭 8m, 길이 40m, 측고 3.1m, 동고 5.8m의 온실로서 이중 골조로 된 아치형 표준온실이다. 동절기 시험을 위하여 PO필름(외피 0.15mm, 내피 0.10mm)을 단동과 연동의 온실 피복재로 사용하였으며 대조구 온실로서 PE필름(외피 0.15mm, 내피 0.10mm)을 단동과 연동에 설치하였다. 시험작물은 완숙토마토 ‘해피니스’를 토양재배 하였고 2019년 12월 3일에 정식하여 2020년 4월 30일까지 재배하였다. 온실내부 야간 설정온도는 15℃를 유지하였으며 주간에는 23~24℃를 유지할 수 있도록 측창 및 천창을 개방하였다. PO필름의 단동 및 연동온실 내부에서의 일사량, 온습도 등을 측정하였고, 재배 기간 동안의 생육량을 조사하였으며 에너지 절감 효과를 조사하기 위해 피복재별 시험온실의 온풍난방기 연료 소비량을 조

사하였다. 조사 결과 단동온실에서의 일사량은 PO필름 온실에서 PE필름 온실보다 7% 증가하였고 수확량은 20% 증대되었다. 연동온실에서의 일사량은 PO필름 온실에서 PE필름 온실보다 11% 증가되었고, 수확량은 9% 증가하였다. 또한 온실내부의 일평균 온습도 측정 결과 단동온실은 PE, PO필름 온실이 19.0℃, 19.1℃, 상대습도 75%를 나타냈고 연동온실은 PO필름 온실이 19.6℃, 상대습도 57%를 나타냈고 PE필름 온실이 18.8℃, 상대습도 63%를 나타냈다. 연료 소비량은 단동온실의 PO필름 온실이 PE필름 온실보다 12.4% 절감되었고 연동온실에서는 PO필름 온실이 PE필름 온실보다 11.5% 절감된 것으로 나타났다.

추가 주제어: 일사량 증대, 보온 효과, 난방비 절감

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립원예특작과학원 연구개발사업(과제번호:PJ013489012020)의 지원에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

- Challa, H. and A.H.C.M. Schapendonk. 1984. Quantification of effects of light re-duction in greenhouses on yield. *Acta Horti* 148:501-510.
- Choi, Y.J., H. Chun, H.J. Kim, S.Y. Lee, S.H. Yum, Y.H. Choi, Y.S. Shin, and D.S. Jeong. 2007. Nutritional components content of oriental melon fruits cultivated under different greenhouses covering films. *J. Bio-Env. Con.* 16:72-77 (in Korean).
- Cockshull, K.E., C.J. Graves, and C.R.J. Cave. 1992. The influence of shading on yield of glasshouse tomatoes. *J Horti Sci* 67:11-24.
- Jin, B.O., H.K. Kim, Y.S. Ryou, T.S. Lee, Y.H. Kim, S.S. Oh, J.P. Moon and G.C. Kang, 2018. Comparative Analysis of Thermal Performance According to Combines of Multilayer Insulating Curtain. *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology* 20:763-769 (in Korean).
- Jin, B.O., H.K. Kim, Y.S. Ryou, T.S. Lee, Y.H. Kim, S.S. Oh and G.C. Kang, 2019. Analysis of Heat Transfer Characteristics on Multi-layer Insulating Curtains Coated with Slica Aerogel. *Proteded Horticulture and Plant Factory*. 28:273-278 (in Korean).
- Kwon, J. K., K.S. Park, H.G. Choi, S.Y. Lee, K. Bekhzod and N.J. Kang, 2012, Effect- of Polyolefine Greenhouse Covering Film on Growth of Lettuce and Cucum-ber in Cool Season Cultivation. *Journal of Bio-Environment Control* 21:312-316 (in Korean).
- Lee, H.W., S. Diop, and Y.S. Kim. 2011. Variation of the overall heat transfer c-oefficient of plastic greenhouse covering material. *J. Bio-Environ. Control* 20:72-77 (in Korean).
- Lee, S.G., Y.C. Kim, T.C. Seo, Y.G. Kang, H.K. Yun and H.D. Suh. 2003. Effects of low light intensity after fruit set on growth and quality of oriental melon. *J Kor Soc Hort Sci* 44:31-34 (in Korean).
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA). 2019. The status of greenhouse and vegetable production in 2018 ed. Sejong, Korea (in Korean).
- National Institute of Agricultural Sciences. 2010. New Agricultural Energy Saving Tec-hnology. p. 126 (in Korean).
- National Institute of Agricultural Sciences. 2017. Prescription criteria for fertilizer use by crop. 3rd edition. p. 66 (in Korean).
- Rural Development Administration, National Institute of Agricultural Sciences. 2015. Design standards for greenhouse environment, Wanju, Jeollabukdo, Korea (in Korean).
- Ryou, Y.S., Y.K. Kang, Y.J. Kim and K.C. Kang, 2008. Heating and Cooling Effect of Protected Horticulture by Geothermal Heat Pump System with Horizontal Heat Exchanger. *Proceedings of the 2008 spring annual conference of The Korean society for New and Renewable Energy*. p. 630-633 (in Korean).
- Shin, Y.S., H.W. Do, I.K. Yeon, S.K. Choi, and B.S. Choi. 1999. Effect thermokee-ping-water bag on growth, fruit quality and yield of oriental melon. *J Bio-Env Con* 8:67-73 (in Korean).
- Shin, Y.S., I.K. Yeon, J.E. Lee, J.D. Cheung, S.Y. Choi, and D.S. Chung. 2009. Ef-fect of long period usage of polyolefin film on growth and fruit quality in Korea melon. *J Bio-Env Con* 18:9-14 (in Korean).
- Shin, Y.S., J.E. Lee, H.W. Do, H. Chun, and D.S. Chung. 2016. Effect of polyolef-in film on korean melon quality and industry. *J Bio-Env Con* 25:95-99 (in Korean).
- Yun, S.W., S.Y. Lee, D.H. Kang, J.K. Son, M.J. Park, H.T. Kim and D.K. Choi, 2019, Comparison of Thermal Insulation of Multi-Layer Thermal Screens for Greenhouse: Results of Hot-Box Test. *Proteded Horticulture and Plant Factory*. 28:255-264 (in Korean).