Journal of Bio-Environment Control, 20(2):72-77, (2011)

플라스틱온실 피복재의 관류열전달계수 변화

이현우[1]* · 소레이멘디옵[1] · 김영식[2]
[1]경북대학교, [2]상명대학교

Variation of the Overall Heat Transfer Coefficient of Plastic Greenhouse Covering Material

Hyun-Woo Lee[1]*, Souleymane Diop[1], and Young-Shik Kim[2]
[1]*Department of Agricultural Eng., Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea*
[2]*Sangmyung University, San 98-20 Anso-dong Choongnam 330-720, Korea*

Abstract. The objective of the present study is to provide the basic data necessary for estimating the overall heat transfer coefficient of commercial plastic greenhouse. The heat flow through covering of greenhouses was measured and the variation of overall heat transfer coefficient was analyzed. Because the inside-outside temperature difference of greenhouse to indicate the stabilized overall heat transfer coefficient was different depending on the number of covering layers, the actual overall heat transfer coefficient should be decided in range of inside-outside temperature difference to make the coefficient constant for each covering method. The variation trend of the overall heat transfer coefficient according to the inside-outside temperature difference corresponded with the existing research results, but the specific values of temperature difference to present the stabilized overall heat transfer coefficient were different each other. The increase rates of overall heat transfer coefficient with wind speed were quite dissimilar among several research results and the quantity of heat loss through covering according to the wind speed in the double layers covered or curtained greenhouse was less than that in the single layer covered greenhouse. Because there was large variations among the values of overall heat transfer coefficient for the polyethylene film greenhouses, it was required to establish the standardized environmental condition for experiment measuring heat flow through covering in commercial greenhouse.

Key words : double layers covering, heat loss, heating load, single layer covering, temperature difference, wind speed

서 론

국내 원예시설의 피복은 대부분 연질플라스틱필름으로 되어 있고, 이 가운데 고분자 플라스틱 소재인 폴리에틸렌 필름이 가장 많이 차지하고 있다. 2009년 현재 채소를 재배하는 50,024ha의 원예시설 중에서 연질필름이 49,605ha로 99.2%를 차지하고 있으며, 이 가운데 폴리에틸렌 계열의 필름이 43,929ha로 88.6%를 차지하고 있고, 난방을 하는 시설면적은 11,955ha로 전체면적의 24% 정도를 차지하고 있다(MIFAFF, 2009). 시설원예 생산비 중 난방비가 차지하는 비중이 30~40% 내외로 매우 높고 난방유류를 전량 수입에 의존하고 있어 채소류 수출의 국제 경쟁력 면에서도 크게 불리한 입장이기 때문에 난방비를 절감할 수 있는 방안들이 절실히 요구되고 있다.

난방비를 평가하기 위해서는 우선 난방에 소요되는 경비가 정확히 계산 되어야 하며 이를 위해서는 난방설비의 적정 용량을 결정하기 위한 최대난방부하와 재배기간 동안의 난방소요열량을 산정하기 위한 기간난방부하의 정확한 계산이 필요하다. 이러한 난방부하의 요인이 되는 온실의 열손실량은 피복재를 통한 관류열손실량, 온실 표면의 틈새를 통한 환기전열손실량 및 실내공기와 토양과의 열교환에 의한 지중전열손실량의

*Corresponding author: whlee@knu.ac.kr
Received May 31, 2011; Revised June 8, 2011; Accepted June 9, 2011

합으로 계산되지만 이 중 관류열손실량은 전체 열손실량의 60~100% 정도로 대부분을 차지하고 있기 때문에 난방부하량을 산정하는데 가장 중요한 요소이다(Japan Protected Horticulture Association, 1994).

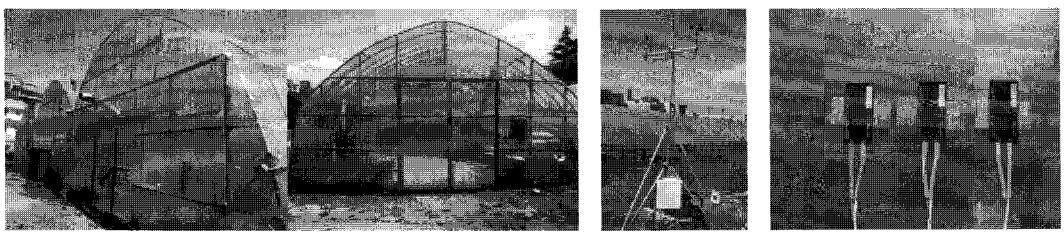
관류열손실량은 일반적으로 관류열전달계수와 온실 내외부 온도차의 곱으로 구해지고, 관류열전달계수는 외부기온, 풍속 및 천공상태 등의 기상조건, 피복재의 표면상태, 피복재 내외부 표면의 대류열전달 방식, 장파복사열교환량, 틈새환기량, 피복면적, 온실형태, 온실바닥면적, 보온커튼의 유무 등에 따라 달라지며. 이 값은 열전도계수, 피복재 내외부의 대류열전달계수 및 장파복사열전달계수의 항으로 구성된다(Papadakis 등, 2000). 여러 가지 피복재들에 대한 관류열전달계수들이 문헌에서 소개되고 있으며(Papadakis 등, 2000; Seginer 등, 1988; Njijskens 등, 1984; Japan protected horticulture association, 1994; Minagawa and Tachibana, 1982; ASABE, 2008), 이 값은 주로 모형실험이나 수학적 모델링을 이용한 시뮬레이션을 통해 구해졌다. 그러나 관류열전달계수는 실험할 때의 환경조건과 피복재의 열복사성질에 따라 달라지기 때문에 동일한 종류의 피복재에 대해서도 연구자에 따라 다른 값을 제시하거나 사용하고 있는 실정이다(Abdel-Ghany와 Kozai, 2006). 특히 기본소재가 동일하더라도 첨가물에 따라 열전달 특성이 달라지기 때문에 실제 재배환경과 피복재 특성에 맞는 관류열전달계수가 제시될 필요가 있다(Seginer 등, 1988).

최근 국내 플라스틱온실의 피복재에는 기본소재에 좋은 특성을 지닌 다른 수지를 혼합하여 기능을 향상시킨 필름들이 개발되어 시설농가에 보급되고 있다(Kwon 등, 2009). 따라서 우리나라 온실의 정확한 난방부하량을 산정하기 위해서는 국내에 보급되어 사용되고 있는 피복재들에 대해 실제 온실환경과 피복재 특성에 맞는 관류열전달계수를 제시할 필요가 있으며, 이를 위해서는 실제 많이 사용되고 있는 피복재가 설치된 온실현장에서 직접 측정하여 제시하는 것이 바람직하다(Papadakis 등, 2000).

본 연구에서는 국내 상업용 온실 피복재의 관류열전달계수를 산정하는데 필요한 기초자료를 제공하기 위하여 최근 국내에 많이 보급되어 사용되고 있는 플라스틱필름으로 피복된 온실에 대해 관류열량을 측정하고 관류열전달계수의 변화를 분석하였다.

재료 및 방법

실험에 사용한 온실은 교내 농장에 설치된 온실로 Fig. 1(a)와 같이 한 개의 스팬이 7.0m, 측고 3.0m, 동고 4.5m, 길이 50m인 남북방향의 3연동 온실과 스팬이 5.0m, 측고 1.2m, 동고 2.6m, 길이 30m인 단동온실이다. 실험용 피복재는 농가에 많이 보급되어 사용되고 있는 I사에서 생산된 S제품이며, 그 특성은 Table 1과 같다. 이 피복재는 폴리에틸렌계열의 필름이며 무적 및 내후 처리가 된 필름으로 제조회사에서 가장 많이 생산되고 판매되는 제품이다. Fig. 1(b)는 풍속측정을 위한 센서와 장비를 보여주는 사진이다. 풍



(a) (b) (c)

Fig. 1. Experimental greenhouses (a), wind speed sensor (b), heat flow sensors (c).

Table 1. Physical properties of covering material for experiment.

Thickness (mm)	Heat transfer coefficient ($W \cdot m^{-2} \cdot k^{-1}$)	Insulation ratio (%)	Transmittance (%)	Haze (%)
0.1	62.7	18.8	91	8.2

속은 03101-L 풍속센서(CAMPBELL SCIENTIFIC, 미국)를 21X(L) 데이터로그(CAMPBELL SCIENTIFIC, 미국)에 연결하여 5분 간격으로 저장되도록 하였다. Fig. 1(c)는 관류열량을 측정하기 위해 피복재 표면에 설치한 관류열센서를 보여주는 사진이다. 관류열량은 MF-180 관류열센서(EKO, 일본)를 MP-75 데이터로그(EKO, 일본)에 연결하여 5분 간격으로 저장되도록 하였으며, 3개의 센서에서 측정한 값을 평균하여 사용하였다. 온도는 HOBO 온도센서(ONSET, 미국)를 온실 내외부에 각각 3점씩 설치하여 5분 간격으로 저장되도록 하였다. 모든 측정은 2011년 1월 1일부터 4월 20일까지 실시하였다.

관류열전달계수는 다음 식을 이용하여 계산하였다 (Albright 등, 1985).

$$U = \frac{q}{(T_i - T_o)} \quad (1)$$

여기서, U는 관류열전달계수(kcal · m^{-2} · h^{-1} · °C^{-1}), q는 온실내부에서 외부로의 열흐름량(kcal · m^{-2} · h^{-1}), T_i는 온실내부온도(°C), T_o는 온실외부온도(°C)이다. 이때 열흐름량은 야간(오후 9시부터 익일 오전 5시까지)의 값만 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 온실 내외부 온도차에 따른 관류열전달계수의 변화

Fig. 2는 일중피복온실과 이중피복온실에 대한 온실 내부와 외부의 온도차에 따른 피복재의 관류열전달계수의 변화를 도시한 것이다. 온실 내외부의 온도차이가 5°C 미만의 작은 값에서는 온도차이가 증가함에 따라 관류열전달계수가 급격히 감소하다가 온도차이가 어느 정도 커지게 되면 감소율이 점점 적어지면서 거의 일정한 값이 유지되는 것으로 나타났다. 또한, 관류열전달계수가 거의 일정한 값에 도달하게 되는 온실 내외부 온도차이의 값은 일중피복의 경우가 이중피복의 경우보다 약간 더 큰 것으로 나타났다. 일중피복의 경우는 약 8°C 정도 이상이 되었을 때 3.3~5.7kcal · m^{-2} · h^{-1} · °C^{-1} 범위의 비교적 안정된 값을 나타내었으며, 이중피복의 경우는 적어도 온실 내외부 온도차이가 약 5°C 이상이 되었을 때 1.8~3.2kcal · m^{-2} · h^{-1} · °C^{-1} 범위의 안정된 값을 나타내었다. 따라서 피복의 층수에 따라 안정된 관류열전달계수를 나타내게 되는 온실 내외부 온도차의 값이 다르다는 사실을 확인할 수 있었으며, 온실 피복재에 대한 관류열전달계수를 결정할 때에는 피복층수별로 안정된 값을 나타내는 온실 내외부 온도차 범위에서의 관류열전달계수를 채택하여야 할 것이다. 본 연구에서 얻어진 온실내외부 온도차이에 따른 관류열전달계수의 변화 경향은 Minagawa와 Tachibana (1982)와 Feuilloley와 Issanchou(1996)의 연구결과와 잘 일치하였으나 안정된 값을 나타내는 온도차이는 각각 약 15°C와 20°C 정도로 세 가지 연구 결과 모두 다르게 나타났기 때문에 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

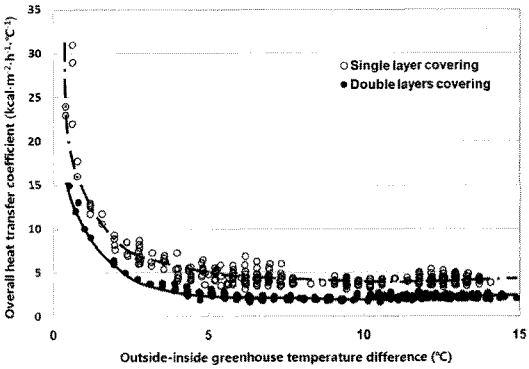
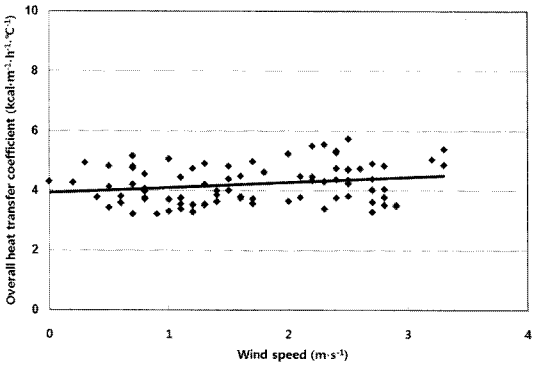


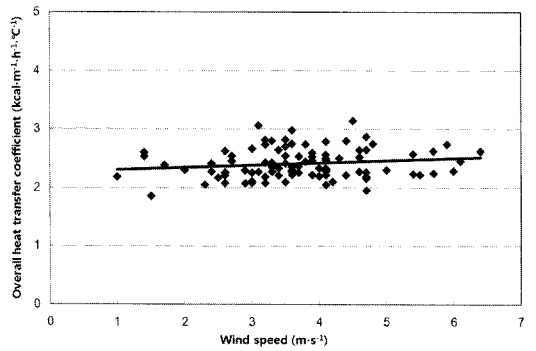
Fig. 2. Variations of overall heat transfer coefficient with the inside-outside temperature difference for experimental plastic greenhouses.

2. 풍속에 따른 관류열전달계수의 변화

Fig. 3은 플라스틱온실의 외부 풍속에 따른 피복재의 관류열전달계수의 변화를 도시한 것이다. Hanan (1998)은 많은 연구자들이 관류열전달계수와 풍속의 관계를 선형관계로 보고 있다고 하였으며, 본 연구에서도 선형식을 유도하여 비교분석 하였다. 풍속에 따른 관류열전달계수의 증가율은 측정 날짜에 따라 다소 차이가 있었으며, Fig. 3은 피복방식별로 대표적인 변화경향을 보여주는 그림이다. Fig. 3(a)는 풍속의 변화가 비교적 적은 날인 1월 26일의 일중피복온실에 대한 풍속에 따른 관류열전달계수의 변화를 나타낸 것으로 풍속이 증가함에 따라 관류열전달계수는 증가하는 것으로 나타났으며, 일중피복온실의 풍속에 따른 관류열전달계수



(a) Single layer covering



(b) Double layers covering

Fig. 3. Variations of overall heat transfer coefficient with the wind velocity for experimental plastic greenhouses.

의 증가율은 측정 날짜에 따라 다소 차이가 있었으며 대체로 0.2 내외인 것으로 나타났다. Fig. 3(b)는 풍속의 변화가 비교적 큰 날인 3월 15일의 이중피복온실에 대한 풍속에 따른 관류열전달계수의 변화를 나타낸 것으로 일중피복온실과 마찬가지로 풍속이 증가함에 따라 관류열전달계수는 증가하였으며, 풍속에 따른 관류열전달계수의 증가율은 일중피복과 마찬가지로 측정 날짜에 따라 차이가 있었으나 그 값은 대체로 0.05 내외로 일중피복온실보다 적은 것으로 나타났다. Feuilloley와 Issanchou(1996)는 일중피복의 플라스틱필름온실과 유리온실에 대한 풍속에 따른 관류열전달계수의 증가율을 각각 0.026과 0.031로 제시하였고, Albright(1985) 등은 일중피복온실은 풍속에 큰 영향을 받는 것으로 보고 증가율을 모든 종류의 피복재에 대해 0.5로 제시하였으며, Garzoli와 Blackwell(1981)은 일중피복온실에 대해 증가율을 3.8로 제시하였고, Hanan(1998)은 벤로유리온실에 대해 증가율을 1.2로 제시하여 연구자에 따라 풍속에 따른 관류열전달계수의 증가율이 많은 차이가 있음을 알 수 있었다. Seginer(1988) 등은 일중폴리에틸렌 피복온실에 대해서는 0.5를 제시하였고, 이중폴리에틸렌 피복온실에 대해서는 0.1을 제시하였으며, 본 연구의 결과는 이 결과보다 전체적으로 값이 약간 낮게 나타났으나 이중피복온실의 증가율이 일중피복온실보다 낮다는 경향은 일치하는 것으로 나타났다. Mihara와 Hayashi(1979)는 일중피복의 유리온실과 PVC 온실에 대해 각각 0.4 및 0.54로 제시하였고, 커튼을 설치한 동일한 피복온실에 대해서는 더 작은 0.1~0.2 범위의 값을 제시하였다. 이러한 결과를 종합해 볼 때 이중피복온실이나 커튼을 설치한 온실과 같이 보온성을 높인 온실은 일중피복온실에 비해 풍속에 따른 관류열 손실이 더 작다는 사실을 확인할 수 있었다.

3. 관류열전달계수의 비교

Table 2는 관류열전달계수에 대한 기존의 연구결과들을 비교한 것으로 폴리에틸렌 일중피복온실과 이중피복온실에 대해 제시된 값이며, Papadakis 등(2000), Seginer 등(1988), Njijskens 등(1984), Minagawa와 Tachibana(1982) 등의 연구결과에는 측정 조건이 제시

Table 2. Different overall heat transfer coefficients of polyethylene greenhouse. (kcal · m^{-2} · h^{-1} · ℃$^{-1}$)

Covering method	Papadakis etc. (2000)[1]	Seginer etc. (1988)[2]		Njijskens etc. (1984)[2]		Minagawa and Tachibana (1982)[3]		Japan protected horticulture association (1994)	ASABE (2008)	This study
		Regular	With additives	Clear sky	Overcast sky	Clear sky	Overcast sky			
Single	5.2~6.9	8.6	8.2	7.7	6.2	7.2	6.2	5.8	5.3	3.3~5.7
Double	3.6~5.2	6.3	5.9	5.5	4.1	-	-	3.5	3.4	1.8~3.2

[1]Results measured at wind speed of 4 m · s^{-1}.
[2]Results measured at wind speed of 4 m · s^{-1}, radiative outside temperature of −28°C, outside air temperature of −10°C, inside air temperature of 20°C.
[3]Results measured at inside-outside temperature difference of 30°C.

되어 있으나 현재 온실설계에 많이 활용되고 있는 Japan protected horticulture association(1994)와 ASABE (2008)의 결과에는 측정 조건이 제시되어 있지 않다. 전체적으로 연구자에 따라 차이가 있음을 알 수 있으며, Njijskens 등(1984)과 Minagawa와 Tachibana(1982)는 흐린 날과 맑은 날로 나누어 서로 다른 값을 제시함으로서 날씨의 맑음 정도에 따라 차이가 있음을 보여주고 있고, Seginer 등(1988)은 첨가물이 첨가된 경우에는 관류열전달계수가 감소됨을 보여 주고 있어 동일한 폴리에틸렌 피복재 온실일지라도 여러 가지 조건에 따라 관류열전달계수가 많은 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 이와 같이 관류열전달계수는 외부기온, 풍속 및 천공상태 등의 기상조건, 피복재의 표면조건, 피복재 내외부 표면의 대류열전달 방식, 장파복사열교환량, 틈새환기량, 피복면적, 온실형태, 온실바닥면적, 보온커튼의 유무 등 여러 가지 조건에 따라 달라지므로 (Papadakis 등, 2000) 관류열전달계수를 결정할 때의 실험이나 이론적 시뮬레이션의 환경조건들에 대해 표준화할 필요가 있을 것으로 판단된다. 특히 본 연구결과가 차이가 다소 크게 발생한 것은 기존의 연구들은 제한된 특수 조건에서 얻어진 값인 반면에 본 연구의 결과는 관류열센서를 실제 온실의 피복재 내부표면에 부착하여 관류열량을 직접 측정한 결과로 특수한 조건이 아닌 기상변화가 많은 자연적인 조건에서 측정된 값이며, 피복재에 무적성과 내후성을 높이기 위해 첨가물을 이용한 표면처리가 되었기 때문으로 판단된다. 따라서 국내 온실의 정확한 난방부하량을 산정하는데 필요한 적절한 관류열전달계수를 제시하기 위해서는 우선 측정을 위한 표준화된 환경기준이 마련될 필요가 있으며, 또한 국내에서 실제로 사용되고 있는 주요 피복재별로 구체적인 관류열전달계수가 구해져야 할 것이다.

적 요

본 연구는 국내 상업용 온실 피복재의 관류열전달계수를 산정하는데 필요한 기초자료를 제공하기 위하여 최근 국내에 많이 보급되어 사용되고 있는 플라스틱필름으로 피복된 온실에 대해 관류열량을 측정하고 관류열전달계수의 변화를 분석하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

온실 내외부 온도차에 따른 관류열전달계수의 변화를 분석한 결과 피복의 층수에 따라 안정된 관류열전달계수를 나타내게 되는 온실 내외부 온도차의 값이 다르게 나타났기 때문에 온실 피복재에 대한 관류열전달계수를 결정할 때에는 피복층수별로 안정된 값을 나타내는 온실 내외부 온도차 범위에서의 관류열전달계수를 채택하여야 할 것이다. 온도차이에 따른 관류열전달계수의 변화 경향은 기존의 연구결과와 잘 일치하였으나 안정된 값을 나타내는 온도차이의 구체적인 값은 다르게 나타났기 때문에 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 풍속에 따른 관류열전달계수의 증가율은 연구자에 따라 많은 차이가 있음을 알 수 있었으며, 이중피복온실이나 커튼을 설치한 온실과 같이 보온성을 높인 온실은 일중피복온실에 비해 풍속에 따른 관류열 손실이 더 작다는 사실을 확인할 수 있었다. 관류열전달계수의 기존 연구결과들을 분석한 결과 연구자에 따라 값이 차이가 있었기 때문에 국내 온실의 정확한 난방부하량을 산정하는데 필요한 적절한 관류열전달계수를 제시하기 위해서는 우선 측정을 위한 표준화된 환경기준이 마련될 필요가 있으며, 또한 국내에서 실제로 사용되고 있는 주요 피복재별로 구체적인 관류열전달계수가 구해져야 할 것이다.

주제어 : 난방부하, 열손실, 온도차, 이중피복, 일중피복, 풍속

사 사

본 연구는 농림수산식품부 농림기술개발사업의 지원에 의하여 이루어진 것임.

인 용 문 헌

1. Abdel-Ghany, A.M. and T. Kozai. 2006. On the determination of the overall heat transmission coefficient and soil heat flux for a cooled, naturally ventilated greenhouse: Analysis of radiation and convection heat transfer. Energy Conversion and Management 47: 2612-2628.
2. Albright, L.D., I. Seginer, L.S. Marsh, and A. Oko. 1985. In situ thermal calibration of unventilated greenhouse. J. agric. Engng Res. 31:265-281.
3. ASABE. 2008. Heating, ventilating and cooling green-

houses. ASABE Standards.
4. Feuilloley, P. and G. Issanchou. 1996. Greenhouse covering materials measurement and modeling of thermal properties using the hot box method, and condensation effects. J. agric. Engng Res. 65:129-142.
5. Garzoli, K.V. and J. Blackwell. 1981. An analysis of the nocturnal heat loss from a single skin plastic greenhouse. J. Agric. Engng Res. 26:203-214.
6. Garzoli, K.V. and J. Blackwell. 1987. An analysis of the nocturnal heat loss from a double skin plastic greenhouse. J. Agric. Engng Res. 36:75-85.
7. Hanan, J.J. 1998. Greenhouses-Advanced technology for protected horticulture. CRC Press, Boca Raton, FL, USA. p. 191-197.
8. Japan Protected Horticulture Association. 1994. Handbook of protected horticulture. Japan Protected Horticulture Association. p.170-173(in Japanese).
9. Kittas, C. 1994. Overall heat transfer coefficient of a greenhouse cover. Agricultural and forest Meteorology 69:205-221.
10. Kwon, J.K., M.W. Cho, N.J. Kang, and Y.I. Kang. 2009. Effects of high performance greenhouse films on growth and fruit quality of tomato. Journal of Bio-Environment Control 18(3):232-237 (in Korean).
11. Mihara, Y. and M. Hayashi. 1979. Studies on the insulation of greenhouses (1)-overall heat transfer coefficient of greenhouses with single and double covering usingseveral material curtains. J. Agr. Met. 35 (1):13-19(in Japanese).
12. Minagawa, H. and K. Tachibana. 1982. The overall heat transfer of greenhouses covered with PE and PVC single layer - The heat insulation efficiency of greenhouses and their covering materials (1). J. Agr. Met. 38(1):15-22(in Japanese).
13. Mistry of Food, Agriculture, Forestry, and Fisheries (MIFAFF). 2009. Status of vegetable production in South Korea(in Korean).
14. Nijskens, J., J. Deltour, S. Coutisse, and A. Nissen. 1984. Heat transfer through covering materials of greenhouses. Agricultural and Forest Meteorology 33:193-214.
15. Papadakis, G., D. Briassoulis, G. S. Mugnozza, G. Vox, P. Feuilloley, and J. A. Stoffers. 2000. Radiometric and thermal properties of, and testing methods for, greenhouse covering materials. J. Agric. Engng Res. 77(1): 7-38.
16. Seginer, I., D. Kantz, U.M. Peiper, and N. Levav. 1988. Transfer coefficients of several polyethlene greenhouse covers. J. Agric. Engng Res. 39:19-37.