

Calculation of Night Sky Temperature According to Cloudiness in Daegu

Wook-Ho Na, Jong-Won Lee, Souleymane Diop, Hyun-Woo Lee*

Department of Agricultural Engineering, Kyungpook National University, Daegu702-701, Republic of Korea

운량에 따른 대구지방의 야간 천공온도 산정

나옥호 · 이종원 · 소레이멘디옴 · 이현우*

경북대학교 농업토목공학과

Abstract

To estimate the radiative heat loss from greenhouses, a new equation for calculating the sky temperature is presented. The sky temperature in the Daegu region was measured using a pyrgeometer and calculated using different equations according to the cloudiness. The calculated and measured results were then compared to identify the best equation for calculating the sky temperature. The difference value between the air and sky temperature was dissimilar and increased as the cloud amount decreased. On clear days the difference value was 10~20 times greater than that on cloudy and rainy days. When analyzing the relationship between the calculated and measured sky temperatures on clear days, Bliss's and Clark & Allen's equations were found to be superior to the other equations. However, on cloudy days, the best relationship between the calculated and measured sky temperatures was exhibited by Fuentes's equation. Therefore, a new equation is proposed for calculating the sky temperature on a cloudy day.

Keywords : cloudiness, pyrgeometer, radiative cooling, sky temperature

서론

2011년 현재 우리나라의 온실면적은 49,537ha이며 이중난방을 하는 온실면적은 13,771ha로 전체면적의 28% 정도를 차지하고 있다(MIFAFF, 2011). 시설원에 생산비중 난방비가 차지하는 비중이 30~40%정도로 매우 높고 난방유류를 전량수입에 의존하고 있어 채소류 수출의 국제경쟁력 면에서도 크게 불리한 입장이기 때문에 난방비를 절감할 수 있는 방안들이 절실히 요구되고 있다(RDA, 2004).

동절기 맑은날 주간에 온실은 일사량의 영향이 크게 작용하여 외기온도 보다 높은 실내온도의 상승효과를 가져오지만, 야간에는 장파장복사 냉각에 의해 기온이 급격히 떨어져 작물이 피해를 입는 경우가 빈번히 발생하여 농가에 막대한 손실을 가져오고 있다.

이와같은 피해를 방지하기 위해서는 온실의 열손실을 예측하고 난방부하량 및 복사냉각의 크기를 산정할 필요가 있다. 복사냉각에 의한 복사열손실량을 계산하기 위해서는 천공온도를 알아야 하는데 천공온도는 다양한 경험식들에 의해 구할 수 있다. Duffie and Beckman (1981)은 천공

온도 산정을 위해 Swinbank식과 Bliss식을 추천하면서 지역에 따라 실제로 측정된 값이 없으면 이들 두 식중 어느 식이 적절한지 여부를 결정하기 어렵지만 상대습도가 25% 이하이고 맑은 날인 조건에서는 두식의 결과가 같다고 하였다. Fuentes (1987)는 지표대기온도를 이용한 Swinbank 수정식을 발표한다. 또한 Brunt식은 증기압과 대기온도를 이용하여 계산하는 식이고, Clark and Allen식은 대기온도와 이슬점 온도를 이용하여 천공온도를 구할 수 있는 식이다(Byun 2005; Yu et al. 1999). 이들 식 모두 구름이 없는 맑은 날에 대하여 적용될 수 있는 식이다. 이와같이 맑은 날에 대한 천공온도 계산식들 사이에도 지역의 기상 조건에 따라 계산 값이 차이가 발생할 수 있기 때문에 해당지역의 기상조건에 적합한 식을 선택하여 사용할 필요가 있다. 또한 국제표준(ISO 6946)에 의하면 하늘이 완전히 구름으로 덮인(운량1) 날에는 지표대기온도와 천공온도가 같고 일부 구름으로 덮인 하늘(운량0.1~0.9)에 대한 천공온도는 맑은 날의 천공온도 계산식에 운량을 고려한 수정식을 사용하여 천공온도를 구할 수 있다(Ursula and

Received: February 22, 2013 / Revised: March 11, 2013 / Accept: March 13, 2013

*Corresponding Author: Hyun-Woo Lee, Tel. 82-53-950-5736, Fax. 82-53-950-6752, Email. whlee@knu.ac.kr

This work was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ00852601)" Rural Development Administration, Republic of Korea.

©2012 College of Agricultural and Life Science, Kyungpook National University

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.

Antoine 2011). 그러나 기존 의식들은 계절과 지역에 따라 그 값이 큰오차를 나타내는 경우도 있는 것으로 알려져 있다(Atwater and Ball 1978; Duffie and Beckman 1981). 따라서 본 연구에서는 온실 설계시 야간복사열 손실량 예측을 위한 천공온도를 산정하는데 필요한 적절한 계산식을 제시하기 위하여 야간복사계를 이용하여 대구지역의 야간천공 온도를 측정하고 측정된 천공온도와 기존식들을 이용한 계산결과를 비교분석 하였다.

재료 및 방법

천공온도를 계산하기 위하여 기상인자들의 함수로 구성된 다양한 경험식들이 제안되어 왔으며, 본 연구에서 비교 분석을 위해 사용한 천공온도를 산정하는 식들은 Table 1과 같다(Duffie and Beckman 1981; Yu et al. 1999; Byun 2005).

$$T_s = \left(\frac{Q_s}{5.67 \times 10^{-8}} \right)^{\frac{1}{4}} \tag{1}$$

여기서, T_s 는 천공온도(K), Q_s 는 천공복사($W \cdot m^2$)이다. 온습도 측정은 호보센서(ONSET, 미국)를 사용하였으며, 일사의 영향을 받지 않도록 쉴드를 설치하여 일사를 차단 하였다. 호보센서로 측정된 건구온도와 상대습도와 습공기 선도를 이용하여 이슬점온도와 증기압을 계산하였다. 천공온도와 온습도는 2012년 3월 1일부터 4월 9일까지 5분 단위로 측정하여 저장하였다. 유효데이터를 이용할 수 있는 18일간에 대해서만 분석을 실시하였다. 맑은 날과 흐린 날을 분류하기 위해 기상청에서 제공된 대구지역의 운량에 관한 기상자료를 기준으로 일별운량이 0이면 맑은 날, 0.1~0.9이면 구름 낀 날 그리고 1이면 비온 날로 구분하였다.

Table 1. Equations for sky temperature calculation

Sky condition	Authors	Equations
Clear sky	Swinbank	$T_{s-clear} = 0.0552T_{amb}^{1.5}$
	Fuentes	$T_{s-clear} = 0.037536T_{amb}^{1.5} + 0.32T_{amb}$
	Bliss	$T_{s-clear} = T_{amb}(0.8 + (T_{dp} - 273)/250)^{0.25}$
	Clark and Allen	$T_{s-clear} = [0.787+0.764\ln((T_{dp} + 273)/273)]^{1/4}T_{amb}$
	Brunt	$T_{s-clear} = (0.526 + 0.075\sqrt{f})/4T_{amb}$
Cloudy sky	Clark and Allen	$T_{s-cloudy} = (Ca)^{1/4}T_{s-clear}$ $Ca = 1 + 0.0224CC - 0.0035CC^2 - 0.00028CC^3$

$T_{s-clear}$:sky temperature on clear day(K), $T_{s-cloudy}$:sky temperature on cloudy day(K), T_{amb} :ambient temperature(K), T_{dp} :dew-point temperature(K), f :vapor pressure(mmHg), cc :cloudiness(0.1~0.9)

대구지역의 야간 천공온도를 측정하기 위해 경북대학교 농대2호관 5층 건물옥상에 Figure 1과 같이 야간복사계(IR02, 네덜란드)를 책상위에 수평이 되게 설치하고 천공복사를 측정하여 데이터로거(CR10X, 미국)에 저장하였으며, 천공온도는 다음 식을 이용하여 계산하였다.

분석에는 지표에서 복사냉각이 많이 일어나는 0시부터 5시까지의 측정 자료를 사용하였으며, 측정된 천공온도와 Table 1의 식들을 사용하여 계산한 천공온도를 비교분석 하였다.

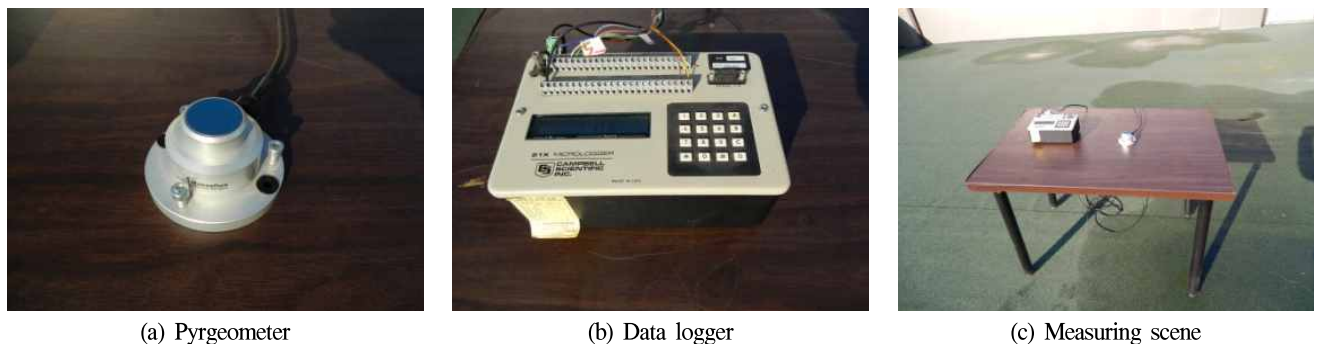


Figure 1. Measuring system for sky temperature.

결과 및 고찰

운량별 측정된 천공온도의 변화

운량을 기준으로 총 18일중 맑은 날이 10일, 구름 낀 날이 5일, 비온 날이 3일로 분류되었다. 맑은 날, 구름 낀날, 비온 날에 측정된 대기온도와 천공온도의 변화는 각각 Figure 2, Figure 3, Figure 4와 같다. 운량이 0인 맑은 날에는 Figure 2에서 보는바와 같이 대기온도와 천공온도의 차이가 최소 11.9°C, 최대 25.5°C, 평균 18.7°C로 나타났다. 구름 낀 날에는 Figure 3에서와 같이 0시에서 5시까지 중일별 시간운량의 데이터가 결측된 부분과 시간경과에 따른 운량의 변화로 구름 낀 운량의 범위인 0.1~0.9를 벗어난 부분을 제외한 데이터를 사용하였다. 구름 낀 날에는 Figure 3에서와 같이 대기온도와 천공온도의 차이가 최소 2.1°C, 최대 16.8°C, 평균 9.3°C로 나타났다. 또한 운량의 크기에 따라 온도차이가 달랐으며, 운량이 0.9일 때 2.3°C, 0.6 일 때 7.3°C, 0.3 일 때 13.4°C, 0.1 일 때 16.5°C의 평균 온도차를 나타내어 운량이 감소함에 따라 평균 온도차는 점차 증가하였다. 비온 날은 운량이 1인 데이터를 사용하였으며 0시에서 5시 사이에 운량이 결측된 부분을 제외한 데이터를 사용하였다. 비온 날에는 Figure 4에서와 같이 최소 온도차는 0.0°C, 최대 온도차는

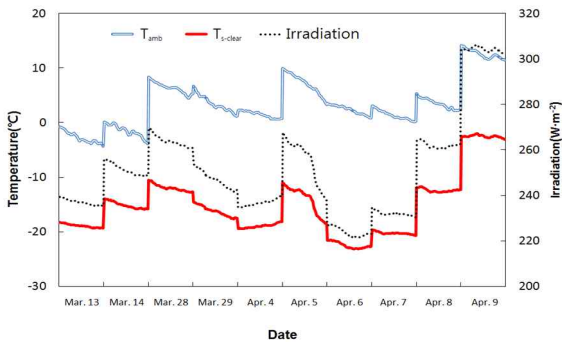


Figure 2. Variation of sky temperature($T_{s-clear}$), ambient temperature(T_{amb}) and irradiation on clear day

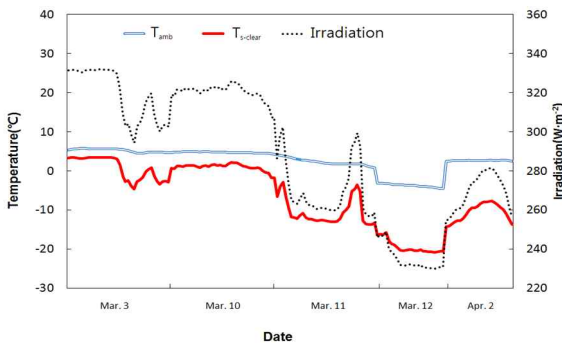


Figure 3. Variation of sky temperature($T_{s-cloudy}$), ambient temperature(T_{amb}) and irradiation on cloudy day

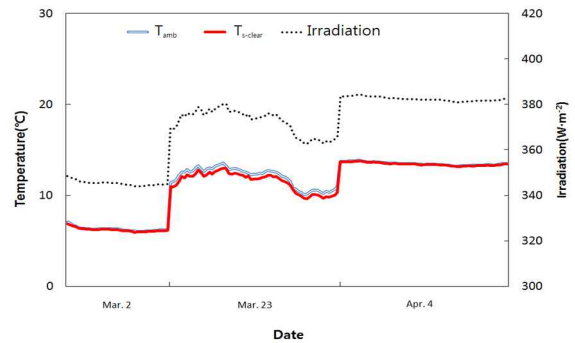


Figure 4. Variation of sky temperature($T_{s-rainy}$), ambient temperature(T_{amb}) and irradiation on rainy day

0.7°C, 평균온도 차는 0.2°C로 대기온도와 천공온도가 거의 일치하는 것으로 나타나 국제표준(ISO 6946)에서 제안한 완전히 구름으로 뒤덮인 하늘(운량1)에서는 지표대기온도와 천공온도가 같다는 것을 확인할 수 있었다. 전체적으로 맑은 날이 구름 낀 날과 비온 날에 비해 약 10~20배정도의 더 높은 온도차를 나타내었으며 온도차가 가장 큰 맑은 날이 복사냉각이 크다는 것을 확인할 수 있었다.

맑은 날 천공온도의 계산 값과 측정값 비교

Fig 5는 10일간의 맑은 날에 대하여 Table 1의 식들을 사용하여 계산한 천공온도와 측정된 천공온도의 변화를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와같이 측정된 천공온도와 계산된 천공온도의 외기온에 따른 변화 경향은 유사한 것으로 나타났으나 값의 차이는 크다는 사실을 확인할 수 있었다. Table 2는 계산된 천공온도와 측정된 천공온도 각각에 대한 최소값, 최대값, 평균값 및 계산 값과 측정값의 차이를 나타낸 것이다. Swinbank식과 Brunt식의 계산값은 측정값보다 더 낮은 온도를 나타내었고 Fuentes식과 Bliss식 및 Clark and Allen식은 측정값보다 더 높은 온도를 나타내었다. Brunt식의 경우 측정된 평균 천공온도와의 차이가 -9.3°C로 가장 크게 나타났으며 Swinbank 식은 -

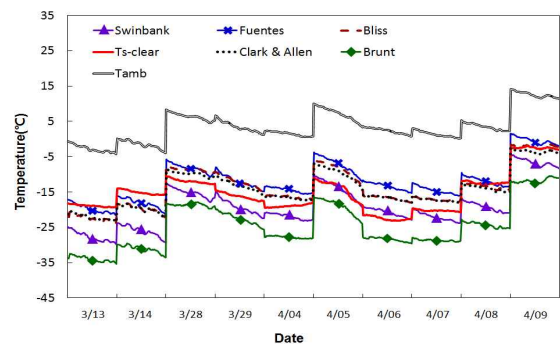


Figure 5. Variation of measured and calculated sky temperature on clear day

Table 2. Comparison between measured and calculated sky temperature on clear day

Classification	Temperature (°C)					
	Min.	Max.	Ave.	Difference from air temperature ¹⁾	Difference from measured value ²⁾	
Calculated sky temperature	Swinbank	-29.9	-4.3	-19.3	22.7	-4.0
	Fuentes	-21.7	1.6	-12.0	15.4	3.3
	Bliss	-23.8	-1.5	-13.8	17.1	1.5
	Clark and Allen	-23.5	-2.7	-14.3	17.7	1.0
	Brunt	-34.6	-10.0	-24.6	28.0	-9.3
Measured sky temperature	-23.2	-2	-15.3	18.7	-	
Air temperature	-4.4	14.15	3.4	-	-	

¹⁾Average value of air temperature - Average value of sky temperature

²⁾Average value of calculated sky temperature - Average value of measured sky temperature

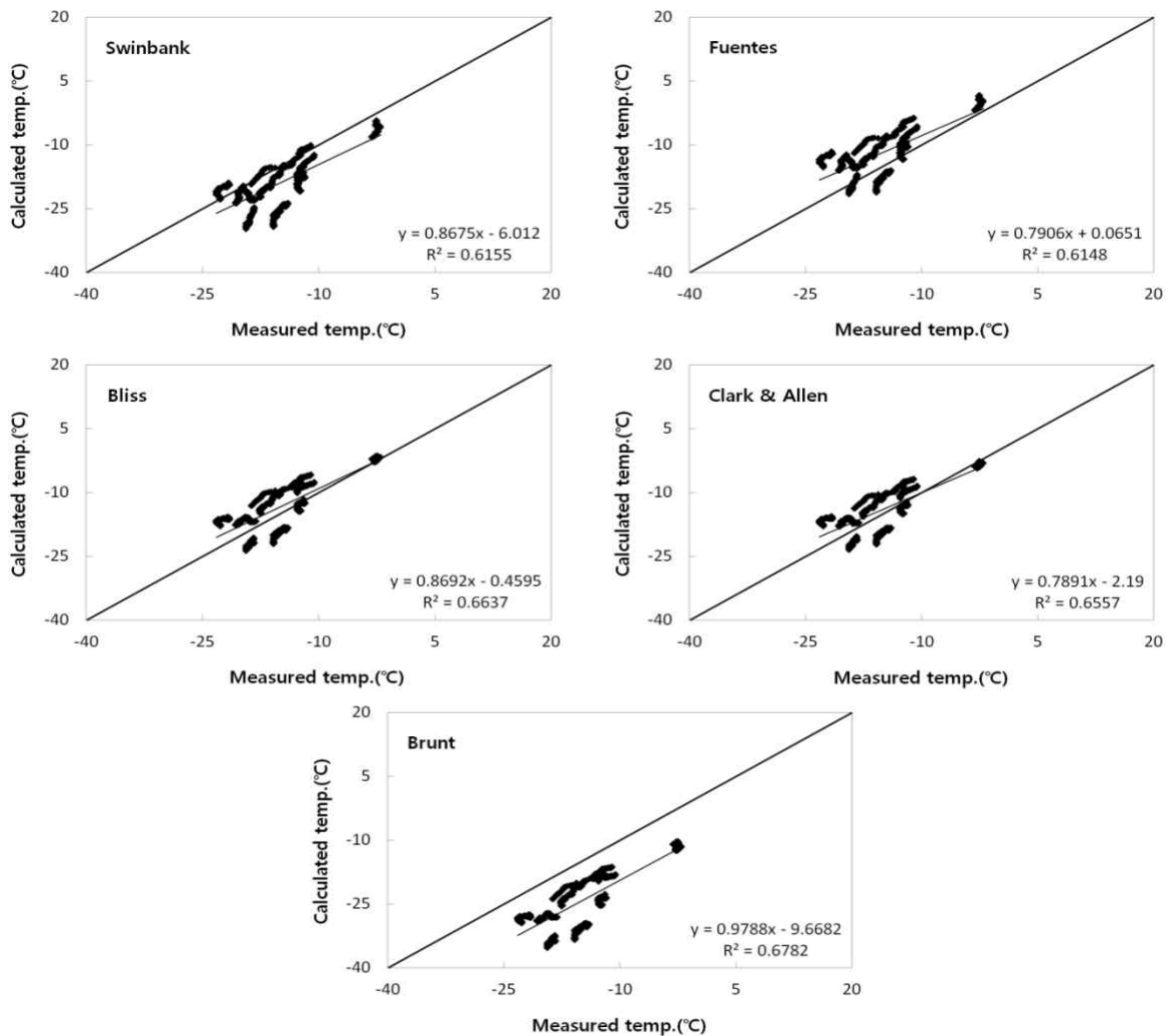


Figure 6. The relationships between measured and calculated sky temperature on clear day

4.0°C, Fuentes식은 3.3°C, Bliss식은 1.5°C, Clark and Allen 모델은 1.0°C로 나타나 Bliss식과 Clark and Allen식이 측정 값과 가장 유사한 결과를 나타내었다. Fig. 6은 각각의 식들에 대하여 계산된 천공온도와 측정된 천공온도와 상관성을 도시한 것이다. 그림에서 보는바와 같이 Bliss식과 Clark and Allen식이 다른 식들에 비해 1:1라인에 더 가깝게 밀집해 있고 상관성도 비교적 더 높은 것으로 나타났다. 따라서 대도시에서 맑은 날 천공온도를 산정하고자 할 때에는 Bliss식이나 Clark and Allen식을 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

구름 낀 날에 대한 천공온도 산정

구름 낀 날의 천공온도는 Table 1의 식을 사용하여 계산하였으며, Figure 7은 각각의 식을 사용하여 계산한 결과와 측정된 결과의 상관성을 도시한 것이다. 5가지 식 중 Fuentes식

의 천공온도를 사용하였을 때가 1:1라인에 가장 밀집해 있고 상관성도 비교적 높은 것으로 나타났다. 앞에서 맑은 날의 천공온도는 Bliss식과 Clark and Allen식이 측정결과와 가장 유사한 것으로 나타났다. 반면에 Clark and Allen식을 사용한 구름 낀 날의 천공온도 산정시 사용된 맑은 날의 천공온도 산정식은 Clark and Allen식보다 오히려 Fuentes식이 더 적합한 것으로 나타났다. 이는 계절과 지역에 따라 기존 식들의 계산결과와 실제 측정된 값이 차이가 나기 때문인 것으로 판단되며 (Atwater and Ball 1978; Duffie and Beckman 1981) 천공온도를 산정하고자 할 때에는 각 지역에 적합한 식을 개발하여 사용할 필요가 있다.

Byun (2010)은 미국의 경우 식 (2)와 같이 대기온도에서 일정한 값을 제하여 천공온도를 구할 수 있는 식을 제안하고 있다고 하였으며, Kittas (1994)는 그리스의 volos 지역에 대해 식 (3)과 같이 일조율을 이용하여 천공복사를 산정하는

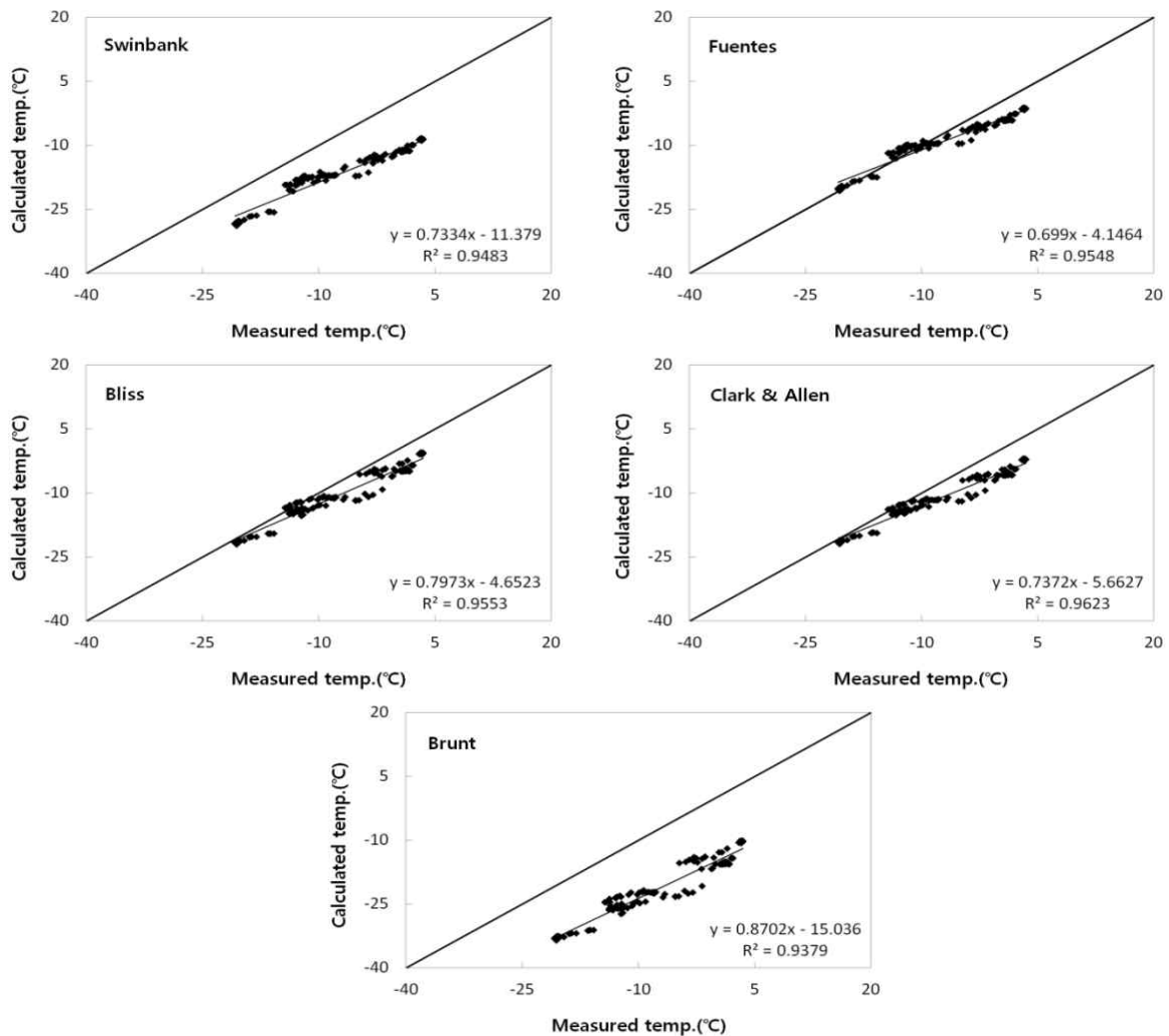


Fig. 7. The relationships between measured and calculated sky temperature on cloudy day (by equation of Clark and Allen)

식을 제안한 바 있다.

$$T_s = T_{amb} - C \quad (2)$$

여기서, C는 상수 즉 대기온도와 천공온도의 차이(5~20°C)이다.

$$T_s = i \times (T_{amb} - 15) + (1 - i) \times (T_{amb} - 4) \quad (3)$$

여기서, I는 일조율(0.1~0.9), 15와 4는 각각 맑은 날과 비온 날에 대한 대기온도와 천공온도의 차이(°C)이다.

본 연구에서는 운량이 감소함에 따라 대기온도와 천공온도의 차이가 증가한다는 본 연구의 결과와 대기온도와 천공온도의 차이를 이용하여 천공온도를 산정한 식 (2)와 (3)을 참고하여 구름 낀 날의 천공온도를 산정할 수 있는 식 (4)를 제안하고 측정값과의 상관성을 분석하였다.

$$T_{s-cloudy} = (1-CC) \times (T_{amb} - X) + CC \times T_{amb} \quad (4)$$

여기서, CC는 운량(0.1~0.9), X는 맑은 날의 지표대기온도와 천공온도의 평균온도차(°C)이다.

식(4)의 X는 맑은 날의 대기온도와 천공온도의 평균온도차로 본 연구에서는 측정실험에서 얻어진 18.7°C를 사용하였고(Table 2), 비온 날은 대기온도와 천공온도의 차이가 없는 것으로 하였다(Figure 4). Figure 8은 식(4)를 사용하여 계산된 천공온도와 측정된 천공온도의 상관관계를 도시한 것이다. 그림에서 보듯이와 같이 계산 값과 측정값 사이에 높은 상관관계가 있는 것으로 나타났기 때문에 제안된 식은 대구지역에서 구름 낀 날의 천공온도를 산정하는데 사용될 수 있을 것이다. 천공온도는 겨울철 야간에 온실의 복사열 손실량을 산정하는데 가장 중요한 인자이며 지금까지는 기존의 다양한 식들을 사용하여 천공온도를 산정해 왔다. 그러나 본 연구에서 제안한 식을 사용한다면 대구

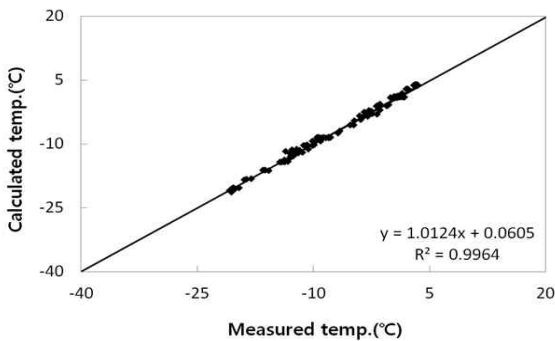


Figure 8. The relationships between measured and calculated sky temperature on cloudy day (by equation suggested by this study)

인근지역의 온실에 대한 보온설계 시 흐린 날의 복사열 손실량을 보다 더 정확하게 산정할 수 있기 때문에 더 경제적인 온실설계가 이루어질 수 있을 것으로 기대된다.

요 약

본 연구의 목적은 온실설계 시 야간복사열 손실량 예측을 위한 천공온도를 산정하는데 필요한 적절한 계산식을 제시하는 것이다. 대구지역의 운량에 따른 야간천공온도를 야간복사계를 이용하여 측정하고 기존의 식들을 이용하여 계산하였다. 천공온도를 계산하기 위한 최적의 식을 찾아내기 위하여 측정값과 계산값을 비교하였다. 운량의 크기에 따라 대기온도와 천공온도의 차이가 달랐으며 운량이 감소함에 따라 온도차는 점차 증가하였다. 맑은 날이 구름 낀 날과 비온 날에 비해 약 10~20배 정도의 더 높은 온도차를 나타내었으며 온도차가 큰 맑은 날이 복사냉각이 크다는 것을 확인할 수 있었다. 맑은 날에 대하여 계산된 천공온도와 측정된 천공온도와의 상관성을 분석한 결과 Bliss식과 Clark and Allen 식이 다른 식들에 비해 상관성이 비교적 더 높은 것으로 나타났다. 구름 낀 날에 대해 계산된 천공온도와 측정온도와의 상관성을 분석한 결과 Fuentes 식이 가장 잘 맞는 것으로 나타났다. 구름 낀 날의 천공온도를 산정할 수 있는 새로운 식을 제안하였다.

주요 추가어: 운량, 야간복사계, 복사냉각, 천공온도

감사의 글

This work was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ00852601)" Rural Development Administration, Republic of Korea.

참고문헌

Atwater MA, Ball JT (1978) Computation of IR sky temperature and comparison with surface temperature. *Sol Energy* 21: 211-216.

Byun KH (2005) Nocturnal radiant cooling experiment by a plate viewing the sky. *J Soc Air-Cond Ref Eng Korea* 17: 605-610.

Byun KH (2010) Prediction of the summer effective sky temperature during the clear day on Osan city. *J Korean Sol Energy Soc* 30: 100-106.

Duffie JA, Beckman WA (1981) Solar engineering of thermal processes. Wiley Interscience Publication, New York.

Fuentes MK (1987) A simplified thermal model for flat-plate photovoltaic arrays. Sandia Report SAND85-0330-UC-63, Albuquerque, New Mexico.

Kittas C (1994) Overall heat transfer coefficient of the greenhouse cover. *Agri Meteorol* 69: 205-221.

- Ministry of Food, Agriculture, Forestry, and Fisheries (MFAFF)
(2011) Status of vegetable production in South Korea.
- Rural Development Administration (RDA) (2004) Energy saving technology for greenhouse.
- Ursula E, Antoine D (2011) Photovoltaic - thermal collectors for night radiative cooling of buildings. *Sol Energy* 85: 1322-1335.
- Yu JY, Choi CH, SuhSJ (1999) A Study of Long-wave Sky Radiation Effects in a Lightweight Concrete Plate. *J Korean Sol Energy Soc* 2: 44-51.