

비 투과면 복사 냉각에 대한 복사 물성의 영향 예측

변기홍*

*동국대학교 기계로봇에너지공학과(khbyun@dongguk.edu)

Simulation of Radiative Property Effects on Radiant Cooling of Opaque Surface

Byun, Ki-Hong*

*Dept. of Mechanical Robotics and Energy Engineering(khbyun@dongguk.edu)

Abstract

The effects of surface radiative properties on the radiant cooling of opaque surfaces under clear sky condition are studied. Two types of surfaces, one gray and the other selective, are compared. For the nighttime cooling, black surface gives the lowest plate temperature and on the other hand the ideal selective surface gives the highest temperature. The reverse is true when there is an insolation. Equivalent radiative heat transfer coefficient of radiant cooling without convection is about $1 \sim 7 \text{ W/m}^2\text{-K}$ for the range of values studied. The surface with black within the $6 \sim 13 \mu\text{m}$ band else zero emissivity could be regarded as a black surface for the nighttime radiant cooling purposes. However, lower band limit of $4 \mu\text{m}$ is preferred to $6 \mu\text{m}$ for small insolation situations.

Keywords : 복사냉각(Radiant cooling), 흑체판(Black surface), 선택판(Selective surface), 맑은 하늘(Clear sky), 밤(Nighttime), 일사량(Insolation)

기 호 설 명

f	: blackbody fractional function	Greek
h	: convection coefficient, $\text{W/m}^2\text{-K}$	α_λ, α : spectral absorptivity, total absorptivity
q	: heat flux, W/m^2	$\epsilon_\lambda, \epsilon$: spectral emissivity, total emissivity
T	: temperature, K	σ : Stefan Boltzmann constant
		하첨자
		p, r : plate, radiative

투고일자 : 2009년 9월 28일, 심사일자 : 2009년 10월 4일, 게재확정일자 : 2009년 12월 16일
교신처 : 변기홍(khbyun@dongguk.edu)

1. 서 론

야간에 복사냉각(Radiant Cooling)이 발생하기에 적절한 조건이 존재하면 지표면 위 물체의 온도는 주위 온도보다 낮아 질 수 있다. 1-7) 변3)이 서울에서 야간 하늘을 바라보는 평판으로 측정된 복사 냉각효과는 다음과 같다. 흑색페인트를 스프레이한 함석판의 온도는 대기온도보다 낮았으며, 또한 일반 함석판이나 알루미늄 필름을 부착한 함석판보다 낮았다. 주요 변수는 판의 표면 성질, 풍속, 그리고 운량이었다. 일사량을 적절히 차폐하지 않는 한, 여름철 낮에 서울에서 대기온도보다 낮은 온도를 얻을 가능성은 적었으나, 해질 무렵에 대기온도 또는 주위온도보다 낮은 온도를 얻을 수는 있었다.⁸⁾ Michell⁴⁾ 등은 선택판과 백색페인트를 칠한 판을 비교하는 복사냉각 실험을 했으며, 판의 온도가 대기온도보다 약 5°C 이상 낮지 않는 한 지붕에 선택판을 사용할 이유는 없다고 결론지었다. Berdahl⁶⁾ 등 또한 백색페인트를 칠한 판의 야간 복사냉각 성능이 선택판보다 우수하다고 발표했다. Chebihi⁷⁾ 등은 천장에 복사냉각재를 설치한 정육면체 박스형 구조물의 내부 온도를 시뮬레이션해서, 복사냉각재에 요구되는 물성치의 특성들을 발표했다.

이 연구의 목적은 비 투과면의 복사물성치가 복사냉각에 미치는 영향을 모델을 세워 예측하고, 대기 온도보다 가능한 한 낮은 온도를 얻기 위해 비 투과면에 요구되는 특성을 파악하는데 있다.

2. 해석 모델

2.1 판의 복사냉각해석 모델

온도에 관해 비선형인 식(1)을 사용해서 하늘만을 바라보는 복사냉각판의 온도를 예측할 수 있다. 예측 모델에 사용된 가정은 다음과 같다.

1. 하늘 입사량은 (등가)하늘 온도로 표현한다.
2. 맑은 날이다.
3. 대기에 있는 참여 매질의 영향은 무시한다.
4. 판은 하늘만을 바라본다.
5. 수직방향 복사물성치의 영향만 고려한다.
6. 판의 밑면은 단열되었다.
7. 판은 비 투과(opaque) 면이다.
8. 정상상태를 가정한다.

식(1)의 우변 첫 번째 항은 판의 방사량을, 두 번째 항은 하늘로부터 입사되어 흡수된 복사량을, 세 번째 항은 판에서 흡수된 일사량을, 마지막 항은 대류 열전달량이다. 식(2)는 표면 복사물성치와 표면 온도의 함수이다. 식(3)은 하늘의 상태와 표면 복사물성치의 함수이다. 하늘의 상태란 하늘로부터의 입사량, 운량, 그리고 하늘과 판 사이의 흡수 및 산란 매질의 영향, 즉 대기에서의 농도 및 두께이다. 하늘로부터의 입사량은 등가 하늘온도를 사용해서 모델링 하거나⁶⁾ 하늘로부터의 입사량을 측정해서 사용하고 있다.^{5,6)} 식(3)에서는 (등가)하늘 온도를 사용했다. 식(1)의 h, T_{air}, T_p 는 각각 대류상수, 판 주위 대기 온도, 판의 온도이다. 식(2)~(4)에서 $T_{sky}, T_{sun}, \lambda, \epsilon_\lambda, \alpha_\lambda, f$ 는 각각 하늘 온도, 태양온도 (5800K), 파장, 파장당 방사율, 파장당 흡수율, 흑체복사에너지누적 분포함수 (Blackbody fractional function)⁹⁾이다. 식(1)에서 판이 냉각되는 경우에는 양의 값이며, 가열되는 경우 음의 값이다. 따라서 식(1) 좌변이 0이 되는 판의 온도(T_p)는 극한 값이다. 대류 항은 판의 온도가 대기 온도보다 낮은 경우에는 냉각을 방해하고, 반대의 경우 판의 가열을 방해한다.

$$q = q_{ems} - q_{abs} - q_{sol} - h(T_{air} - T_p) \quad (1)$$

$$q_{ems} = \sigma T_p^4 \int_0^\infty \epsilon_\lambda f(\lambda T_p) d\lambda \quad (2)$$

$$q_{abs} = \sigma T_{sky}^4 \int_0^\infty \alpha_\lambda f(\lambda, T_{sky}) d\lambda \quad (3)$$

$$q_{sol} = \sigma T_{sun}^4 \int_0^{\infty} \alpha_{\lambda} f(\lambda, T_{sun}) d\lambda \quad (4)$$

대류가 없을 때 순 복사(냉각)열유속은 식(5)와

$$q_r = q_{ems} - q_{abs} \quad (5)$$

같다. 이를 등가의 대류상수로 표현하면 식 (6)

$$q_r = h_r (T_p - T_{sky}) \quad (6)$$

이 되며, h_r 은 $\epsilon_{\lambda}, T_p, T_{sky}$ 의 함수이다.

2.2 판의 복사 물성치 모델

선택판과 회체(gray) 판의 영향을 고려한다. 회체판인 경우 전체 파장 영역에서 방사율을 상수로 가정하며, 방사율이 1이면 흑체(blackbody)판이다. 선택판에서는 수직방향 파장당방사율 변화를, 회체의 판에서는 방사율의 변화를 고려했다. 대기의 창 ($8 \sim 13 \mu m$)에서만 방사율이 1이고 나머지 파장에서는 방사율이 0 (이상적 선택판)⁽⁶⁾이거나 방사율이 낮은 선택판 등이 비교되었다.

표1. 문헌의 복사물성치^{4,6)}

(a) white paint (b) aluminized Tedlar sheet (c) ideal

wavelength mm	e	wavelength mm	e (b)	e (c)
0-3	0.1	0-7	0.1	0
		7-8	0.65	0
		8-13	0.75	1.0
3-15	0.8	13-30	0.3	0.0

2.3 문헌의 물성치

표 1. 에 문헌^{4,6)}의 복사물성치를 측정된 값은 수치로 근사한 값이 요약되어 있다. 비 투과판이므로 반사율은 $\rho = 1 - \epsilon$ 이다. 백색페인트의 경우 TiO_2 함량 (17.5%) 및 두께에 따라서, Tedlar sheet ($12 \mu m$) 경우도 판 및 금속의 물성

및 막의 두께에 따라서 값이 다를 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 이상적 선택판 및 흑체판의 야간 복사냉각

그림 1에 대류상수의 변화에 따른 이상적 선택판(표1.c)과 흑체판의 온도가 비교되어 있다. 판 주위 대기의 온도(T_{air})는 $290 K$ 이며 하늘 온도(T_{sky})는 $280, 270, 250 K$ 이다. 하늘 온도가 낮아지면 판의 온도는 낮아진다. 바람이 없으면,

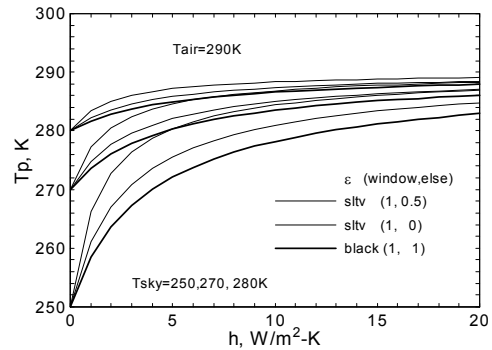


그림 1. Comparison of ideal surfaces (nighttime)

($h = 0 W/m^2-K$), 판은 하늘온도까지 냉각 가능하다. h 가 증가하면 판의 온도는 증가한다. h 변화에 따른 판의 온도 증가율은 작은 h 에서는 급격하고 큰 h 에서는 완만하다. 하늘 온도가 낮을수록 증가율의 차이가 일어나는 h 값은 커진다. 이상적 선택판의 복사냉각성능은 백색페인트를 칠한 표면보다 못하다고 보고되어 있다.⁽⁶⁾ 이 모델의 예측 결과 또한 흑체판은 물론 방사율이 0.5인 회체판보다 못하다. 변⁽³⁾의 실험에서도 동일한 결과를 얻었다. Berdahl⁽⁶⁾ 등이 사용한 백색페인트의 전방사율은 0.9로 회체이다. 따라서, 위 온도범위에서 백색페인트를 칠한 판은 흑체판에 근사한다고 볼 수 있다. 하늘 온도가 낮을수록 물성치의 영향이 커져서, 판의 온도 차이가 커진다. 선택판의 경우

대기의 창 ($8-13\mu m$) 밖의 파장대에서의 방사율이 증가하면 판의 온도는 낮아진다. 대기의 온도가 $310, 260K$ 인 경우에 대한 결과도 그림 1과 유사하므로 그림 발표를 생략한다. T_{air} 가 낮아질수록, 작은 h 값에서 변화량의 절대값 $\Delta T/\Delta h$ 는 감소한다.

그림 2는 표1에 제시된 문헌상의 값을 가지고 예측한 판의 온도이다. 흑체판, 백색페인트 판 Tedlar 판의 순서로 판의 온도가 낮았다. 하늘 온도는 $280, 270, 250K$ 이며, 하늘 온도가 낮을수록 판 온도차이가 커진다. 선택판의 결과에 근사하는 회체의 전방사율 값은 0.5 이다. 회체 방사율이 감소하면 판의 온도는 상승한다.

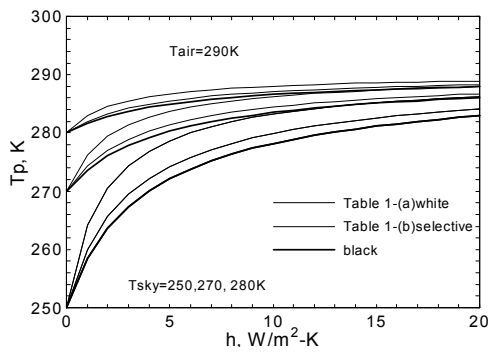


그림 2. Comparison of real surfaces (nighttime)

3.2 이상적 선택판 및 흑체판의 주간 복사냉각

그림 3에는 일사량 하에서 이상적 선택판과 회체판의 복사냉각 효과가 대류상수 범위에서 비교되어있다. 하늘 온도 $290, 280, 250K$ 이며, 대기 온도는 $300K$, 일사량(S)은 $400 W/m^2$ 이다.

하늘 온도가 낮을수록 판의 온도는 낮아진다. 바람이 없어도 회체판을 하늘 온도까지 냉각할 수 없다. 대기 온도보다 판의 온도가 높으면, h 가 증가할수록 판의 온도는 감소한다. 반대의 경우, h 가 증가할수록 판의 온도는 증가한다. 증가율은 작은 h 에서는 급격하고 큰 h 에서는 완만하다. 이상적 선택판의 온도가 가장 낮았으며, 대기의 온도는 물론 회체

방사율이 0.1 인 판보다 온도가 낮았다. 대기의 창($8-13\mu m$)에서 방사율이 높을수록 판의 온도가 낮아짐을 계산을 통해 검증했으며 직면관계상 그림 발표는 생략되었다.

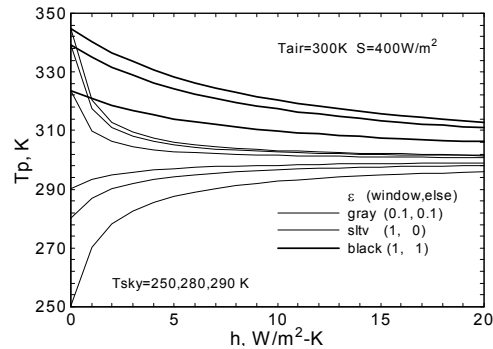


그림 3. Comparison of ideal surfaces with insolation

3.3 일사량 크기의 영향

그림 4에는 선택판과 회체판의 복사냉각에 일사량이 미치는 영향이 대류상수 범위에서 비교되어있다. 판 주위 대기 온도는 $300K$, 하늘 온도는 $290, 250K$, 일사량은 $60, 600 W/m^2$ 이다. 표 1에 물성치가 제시된 세 종류 판에 대한 결과이다. 실선은 이상적 선택판의 경우이며, 판의 온도는 일사량에 무관하며, 위 및 아래 선은 각각 하늘 온도가 $250, 290K$ 인 경우이다. 나머지 두 판에 대한 결과들은 4개의 선으로 표시되었다. 같은 선형에서 위의 두 선은 하늘 온도 $290K$ 에서 일사량의 영향을,

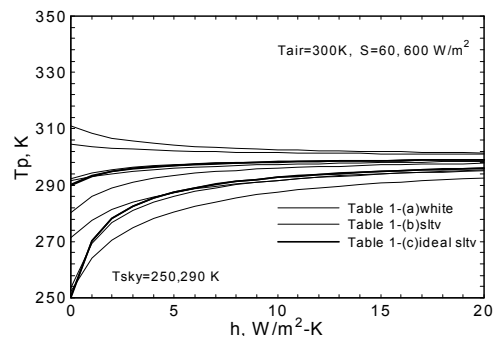


그림 4. Comparison of real surfaces with insolation

아래 두 선은 하늘 온도 250K에서 일사량의 영향을 나타내며, 하늘 온도가 높으면 판의 온도 또한 높다. 하늘 온도와 무관하게, 일사량 60W/m²에서는 백색페인트 판의 온도가, 일사량이 10배 증가하면 이상적 선택판의 온도가 가장 낮았다. 일사량이 크고 하늘 온도가 높은 경우, 세 판의 성능은 거의 비슷했다. 일사량이 적고 하늘 온도가 낮은 경우, Tedlar 선택판의 성능은 이상적 선택판과 유사하나, 일사량 600W/m²에서는 판의 온도가 가장 높았다. 일사량이 커지면 백색페인트 판은 이상적 선택판보다 못하다.

3.4 순 복사냉각성능비교(야간)

그림 5에는 순 복사열유속의 크기인 식(5) 결과를 판의 온도를 변화시키며 제시했다. 하늘 온도는 300, 270, 240K 이다. 일사량 0에서, 흑체 및

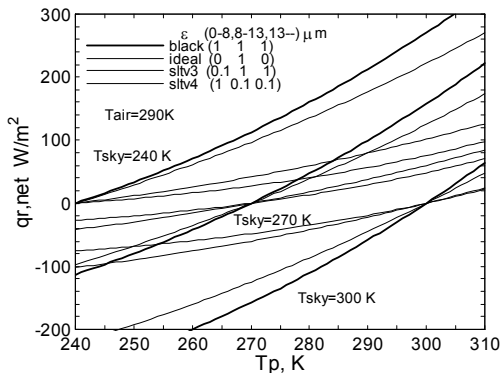


그림 5. Net Radiative flux (nighttime)

세 종류의 선택판에 대한 결과가 비교되어 있다. 대기의 창에서만 방사하는 이상적 선택판, 파장 8μm에서 방사율이 0.1에서 1로 계단식으로 증가하는 선택판3(sltv3), 파장 8μm에서 파장당 방사율이 1에서 0.1로 계단식으로 감소하는 선택판4(sltv4)이다. 방사율이 계단식으로 변하는 파장 값을 이하 '컷오프파장'이라 부른다. 판을 냉각하는 것이 목적인 경우, 판의 온도가 하늘 온도보다 높고 낮음에 따라

서 흑체판과 선택판에 대한 선호도가 바뀐다. 절대열유속이 큰 순서는 흑체판, 선택판3, 이상적 선택판, 선택판4이다. 판의 온도가 하늘 온도보다 높으면 흑체판이 냉각에 유리하다. 반대의 경우, 흑체판은 가열에 유리하고, 선택판4는 냉각에 유리하다.

3.5 등가대류상수

그림 5에 발표된 순 복사열유속을 온도차이 (T_p - T_{sky})로 나누면 식(6)의 h_r이 되며, 이 값들이 그림 6에 제시되어 있다. 일사량 0에서, 하늘 온도는 300, 270, 250K 이다. 같은 형식의 선 3개에서, h_r 값이 크면 하늘 온도가 높은 경우이다. 일정한 하늘 온도에서, h_r은 대략 판의 온도에 선형적으로 증가하나, T_{air}와 무관하다.

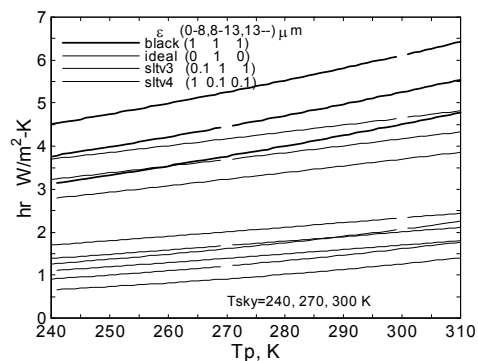


그림 6. Equivalent radiative heat transfer coefficient expressions (nighttime)

장파장 방사율이 크면 h_r 값이 크다. 사용된 조건하에서 h_r = 1 ~ 7 W/m²-K 범위에 있다.

3.6 컷오프 파장의 영향

컷오프 파장에서 방사율이 0에서 1로 계단식으로 증가하는 경우, 파장범위 0 ~ 100μm에서, 컷오프 파장의 위치가 복사냉각에 미치는 영향을 그림 7에 비교했다. 일사량이 없으며, 하늘 온도는 280, 270, 250K 이고, 판 주위 대기 온도는 290K이다. 컷오프 파장이 8, 6, 2μm인

경우와 판의 온도가 가장 낮은 흑체판인 경우를 비교했다. 하늘 온도 280 K 에서 컷오프 파장의 영향은 작으나, 하늘 온도가 낮아지면 컷오프 파장의 영향은 커진다. 250 K 에서 컷오프 파장이 $6\mu\text{m}$ 보다 작으면 판의 온도는 흑체판과 거의 같다.

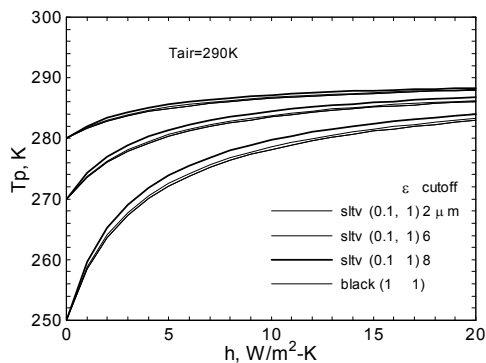


그림 7. Effects of cutoff wavelength (nighttime)

그림 8은 일사량 하에서 컷오프 파장의 영향이다. 흑체면이 첫 번째로, $2\mu\text{m}$ 컷오프 파장인 경우가 두 번째로 복사냉각에 부적절하다. 컷오프 파장이 $8\mu\text{m}$ 에서 짧아질수록 판의 온도가 낮아져서 $6\mu\text{m} \sim 4\mu\text{m}$ 근방까지는 큰 차이가 없으나 $4\mu\text{m}$ 근방에서 $2\mu\text{m}$ 로 감소함에 따라 판의 온도는 다시 상승하고 있다.

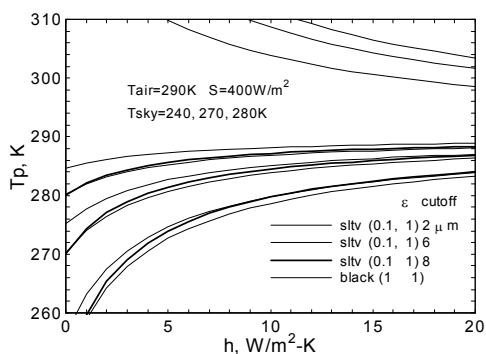


그림 8. Effects of cutoff wavelength with insolation

아래 기술한 경향을 계산을 통해서 검증했

으며 지면 관계상 결과만 요약한다. 컷오프 값 이전 파장 영역의 방사율이 0보다 크면, 위에 제안된 컷오프 파장 값 또한 증가해야한다. 일사량이 없는 경우, 선택판의 조건이 다음과 같으면 흑체판의 냉각특성에 근사한다. 첫째, 첫 번째와 두 번째 컷오프 구간의 방사율이 1이다. 둘째, 두 번째 컷오프 이후의 방사율은 0이다. 셋째, 두 번째 컷오프 파장은 $13\mu\text{m}$ 보다 크다. 일사량 하에서는, 두 번째 컷오프 파장이 증가해야하며, 두 컷오프 파장 구간내의 방사율이 높아야 냉각에 유리하다.

4. 결 론

다음은 비 투과면의 복사물성치가 복사냉각에 미치는 영향에 대한 모델 결과의 요약이다.

- (1) 야간복사 냉각에서 냉각판의 최저 온도는 이상적인 경우 하늘 온도까지 낮아질 수 있다.
- (2) 냉각판 물성치에 따라 판이 도달할 수 있는 온도는 다르며, 판의 온도가 하늘보다 높은 경우, 흑체판의 온도가 가장 낮았다.
- (3) 대기보다 판의 온도가 높고 일사량이 있는 경우, 흑체판의 온도가 가장 높았으며 이상적 선택판의 온도가 가장 낮았다. 이론적으로 선택판은 하늘 온도에 도달할 수 있다.
- (4) 판이 대기보다 온도가 낮고 일사량이 없는 경우, 대류상수가 증가하면 판의 온도는 증가한다. 대류상수에 대한 판의 온도 증가율은 대류상수 0에서 가장 크며 대류상수가 증가하면 감소한다.
- (5) 컷오프 파장에서 방사율이 0에서 1로 증가하는 비 투과 선택판의 경우, 컷오프 파장이 $4\mu\text{m}$ 이상이면 야간은 물론 작은 일사량 하에서도 복사냉각에 유리하다. 야간용이면 약 $6\mu\text{m}$ 컷오프 파장에서도 이상적인 흑체판의 성능을 나타낸다. 컷오프 값 이전 영역의 방사율이 0보다 크면, 위 제시된 컷오프 파장 값은 증가해야한다.

후 기

이 논문은 2009년도 동국대학교 연구년 지원에 의해서 이루어 졌으며, 저자는 동국대학교와 The U. of Iowa 의 지원 대해서 감사드린다. 또한 Theodore F. Smith 교수의 복사냉각 연구에 대한 많은 제안과 기여에 대해 감사드린다.

참 고 문 헌

1. Erell, E. and Etzion, Y., A Radiative Cooling System Using Water as Heat Transfer Medium, Architect. Sci. Rev., Vol. 35, pp. 35 49, 1992.
2. Meir, M. G., Rekstad, J. B. and Lovvik, O. M., A Study of Polymer Based Radiative Cooling System, Solar Energy, Vol. 73, No. 6, pp. 403 417, 2002.
3. 변기홍, 야간 하늘에 노출된 평판의 복사냉각 실험, 설비공학 논문집, 제17권, 제 6호, pp. 605 610, 2005.
4. D. Michelle, and K. L. Biggs, Radiation Cooling of Building at Night, Applied Energy, Vol. 5, pp. 263 275, 1979.
5. Martin, M. and Berdahl, P., Characteristics of Infrared Sky Radiation in the United States, Solar Energy, Vol. 33, No. (3/4), pp. 321 336, 1984.
6. P. Berdahl, M. Martin and F. Sakkal, Thermal Performance of Radiative Cooling Panels, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 26, No. 6, pp., 871-880, 1983.
7. A. Chebihi, K.H. Byun, J. Wen, T.F. Smith, Radiation Cooling of an Enclosure, Energy Conversion and Management, Vol. 47, pp. 229-252, 2006.
8. 변기홍, 주간 하늘에 노출된 평판에 의한 복사냉각 실험, 한국태양에너지학회 논문집, 제27권, 제 4호, pp. 11 17, 2007.
9. Siegel, R. and Howell, J. R., Thermal Radiation Heat Transfer, 3rd ed., Hemisphere Publishing Co, 1992.