

야간 하늘에 노출된 평판의 복사냉각 실험

변 기 홍[†]

동국대학교 기계공학과

Nocturnal Radiant Cooling Experiment by a Plate Viewing the Sky

Ki-Hong Byun[†]

Department of Mechanical Engineering, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea

(Received February 15, 2005; revision received May 16, 2005)

ABSTRACT: The purpose of this experiment is to study the radiant cooling effects by a plate directly viewing the nighttime sky. The measurements are performed on a rooftop of the Engineering building at the Dongguk University in Seoul during the month of August in 2004. The radiant cooling effects are compared using three different types of plate surfaces, namely, galvanized iron, black painted, and aluminum film coated galvanized iron plate. Among these plates, the black painted surface showed the lowest temperature that is lower than the ambient temperature. The maximum radiant cooling temperature difference, which is ambient temperature minus plate temperature, observed is about 5 K.

Key words: Nocturnal(야간), Radiant cooling(복사냉각), Plate(평판), Sky(하늘)

기 호 설 명

RCTD : 복사냉각온도차 [°C]

T : 온도 [°C]

하첨자

air : 주변 대기

b : 흑체

p : 판

1. 서 론

기원전에 존재했었던 고대 문명사람들도 야간

에 적절한 조건이 성립하면 지표면에 놓인 물체의 온도가 주위 공기의 온도보다 더 낮아질 수 있음을 알고 있었던 것 같다. 물체가 대기권에서 수증기와 이산화탄소의 흡수밴드의 영향이 적은 8~13 μm 파장대의 창을 이용해서 온도가 낮은 우주 공간으로 열을 방출시킬 수 있다면 물체의 온도는 주위 공기 온도보다 낮아질 수 있으며 이를 복사냉각효과라고 부른다. 이 사실을 이용해서 야간에 냉수를 얻으려는 시도가 참고문헌^(1,2)에 발표되어 있다.

국내에서 복사냉각에 대한 연구가 행해진 적은 없다. 대도시인 서울지역은 하절기에 고온다습하며, 대기오염으로 인한 스모그 등이 상존하고 있다. 야간에도 시내 곳곳에 많은 조명들이 켜져 있으며, 이들이 스모그에 의해 산란되어 일어나는 광공해로 인해 야간 하늘이 전원지역처럼 어둡지는 않다. 스모그 및 광공해는 8~13 μm 밴드 창에 의한 복사냉각효과를 감소시키리라 예상되므로, 서울지역에서도 야간에 복사냉각효과를 얻

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-2260-3701; fax: +82-2-2263-9379

E-mail address: khbyun@dongguk.edu

을 수 있는지를 확인해 볼 필요가 있다. 만일 복사냉각이 가능하다면, 이를 이용하여 다양한 에너지 절약 시스템을 설계할 수 있을 것이다. 하절기 야간에 냉수를 얻어서 이를 주간에 사용하려는 시스템^(1,2) 등이 복사냉각을 이용한 에너지 절약 시스템의 한 예이다. 복사냉각의 크기는 이러한 기기들의 경제성을 판별하는 데 중요한 지표로 사용될 수 있을 것이다.

이 연구의 목적은 2004년 8월 서울에 있는 건물 옥상에서 야간에 가능한 복사냉각효과를 실험을 통해서 측정하는 것이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

야간에 복사냉각효과를 측정하기 위해 고안된 시스템의 개략도는 Fig. 1과 같다. 케이스 박스는 아크릴 판을 사용해서 두 개의 얇은 금속판을 부착할 수 있도록 만들었다. 맨 위에서 첫번째 금속판은 복사냉각판이다. 이 판을 교환하며 서로 복사 특성이 다른 냉각판이 복사냉각에 미치는 영향을 비교해 볼 수 있다. 두번째 판에는 써모파일(Thermopile)을 부착하였다. 두번째 판의 중앙 바로 밑에 알루미늄 금속블록을 부착하였다. 케이스와 금속블록 사이의 빈 공간은 모두 스티로폼 단열재로 채워져 있다. 또한 야간 측정시, 이 측정시스템을 스티로폼 단열재를 사용하여 옥상 바닥과 분리시켰다. 써모파일의 재질은 K-type 열전대이며 온도 및 열유속을 측정할 수 있다. 이 시스템은 크기가 작으므로 이동성이 좋다.

측정한 변수들은 다음과 같다. 복사냉각판의 온도, 열유속, 대기의 온도, 대기의 습도이다. 열유

속 센서의 출력은 정밀 측정용 OP amp를 사용해서 1,000배 정도 증폭해서 Hioki 3635-24 data logger에 입력되도록 했으며, K-type 열전대의 출력은 Omega CL511 calibrator를 사용해서 직접 읽거나, 약 100배 증폭해서 Hioki 3645-20 data logger에 입력했다. 외기의 온도 및 습도는 이를 측정할 수 있는 Hioki 3641-20 또는 Omega OM-44 data logger를 사용해 측정했다.

장비를 보유하고 있지 않아서 측정할 수 없는 양들은 기상청의 자료⁽³⁾를 최대한 보조자료로 이용했으며, 서울 기상관측소와 실험장소와의 직선 거리는 약 3.6 km이다.

측정은 야간에 동국대학교 공과대학 건물 옥상 위에서 행해졌다. 이 건물은 6층이지만 동산 위에 세워졌으므로 실제 환산 층고는 이보다 높아서 15층인 서울 명동의 세종호텔과 옥상의 높이가 거의 같다.

가능하면 바람이 없는 날 실험했으며, 간헐적으로 바람이 있는 경우에도, 최대풍속은 2 m/s를 넘지 않았으며, 이는 다시 기상청의 예보 및 풍속계를 사용한 직접 측정으로 일부 확인되었다.

야간 복사냉각실험에 사용된 판은 3종류이며, 각각 아연도금판(이하 함석판), 흑체판, 그리고 알루미늄 코팅판(이하 Al-코팅판)이다. 흑체판은 함석판에 KRYLON 1618 BBQ Black을 스프레이 해서 제작되었다. Al-코팅판은 함석판에 Low-E (emissivity) coating film을 부착해서 제작되었다. 이 코팅은 가시광선 영역에서 반사율이 높은 선택적 코팅막이다.

이 연구에서 복사냉각온도차(Radiant Cooling Temperature Difference, $RCTD$)는 주위 공기의 온도에서 측정판의 온도를 뺀 차이값을 의미하며 식(1)과 같다.

$$RCTD = T_{air} - T_p \quad (1)$$

따라서 $RCTD$ 가 양수이면 복사냉각효과가 있으며, 값이 클수록 효과가 크다. 그러나, 판이 야간 하늘에 노출된 경우, 판의 온도가 낮아지면 표면에 이슬이 맺히기 시작하며, 이 이슬이 제거되지 않는 한 $RCTD$ 최대값에 한계가 생기게 된다. 따라서, $RCTD$ 의 첫번째 한계는 우변 두번째 항인 판의 온도가 이슬점 온도가 되는 경우가 됨을 이 실험을 통해서 확인했다.

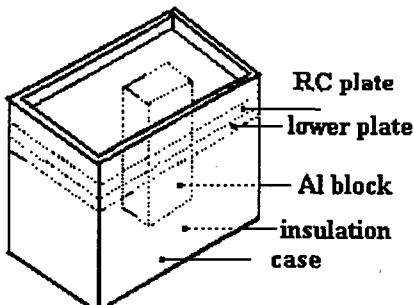


Fig. 1 Radiant cooling test system.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 검정페인트 코팅의 영향

Fig. 2와 Fig. 3은 검정 페인트 코팅이 복사냉각 판의 온도에 미치는 영향에 대한 측정 결과이다. 함석판과 흑체판의 온도가 저녁 10시부터 다음날 새벽까지 약 10분 간격으로 측정되었다. T_p 는 함석판의 온도이고, $T_{p,b}$ 는 흑체판의 온도이며 두 온도 모두 CL511를 사용해서 측정했다. 알루미늄 블록의 초기온도가 주위 대기온도보다 많이 낮았기 때문에 처음에는 대기에 의해 가열되었다가, 밤 12시경부터 복사냉각에 의해서 냉각되기 시작하는 것을 관찰할 수 있다. 실험시간 동안 검정 페인트 코팅의 효과 때문에 흑체판의 온도가 함석판에 비해 약 2~3°C 더 낮아졌다.

8월 9일의 경우 새벽 3시에서 3시 20분경에 *RCTD*가 최대였으며, 흑체판의 경우 최대값은 약 4.5°C이고 함석판의 경우 2.2°C였다. 상대습도는 밤 10시경부터 82%에서 감소하여 12시 반경에 74%를 저점으로 증가하기 시작해서 새벽 4시경에 약 90%까지 증가했다가 다시 감소하여 6시경에는 약 85%를 유지했다. 이슬점 온도는 밤 10시경 약 23°C에서 증가 감소를 반복하다가 6시경에는 다시 23°C가 되었다. 이 사이 이슬점온도의 최저값은 오전 1시경 21.6°C였으며, 최고값은 3시 반경 23.3°C였다. 따라서, 흑체판인 경우에도 온도가 *RCTD*의 첫번째 한계값에 도달하지 못했다. 이 실험에 사용된 흑체판보다 복사냉각 성능이 우수한 판을 사용했다면 판의 온도를 흑체판의 경우보다 약 2~3°C 정도 더 낮출 수 있었으

리라 예상된다.

Fig. 3은 Fig. 2와 동일한 조건에서 8월 10일 야간에 행한 실험의 결과이다. 육안으로 실험시간 동안 관찰한 바에 의하면 8월 9일 및 10일 모두 야간에 비가 오지 않았던 맑은 날이었다. 8월 9일 야간 평균 운량은 1.0이었고 10일의 운량은 0.3이었다. 야간 평균 운량은 저녁 9시, 12시, 새벽 3시, 6시에 대한 기상청의 운량 자료를 산술 평균한 값이다. 운량은 0~10 사이값을 가지며 강수와 관계가 없는 구름의 양이며, 맑음(0~2), 구름 조금(3~5), 구름 많음(6~7), 흐림(8 이상)으로 표현되기도 한다.⁽³⁾ 이 양은 기상관측관들이 매 3시간마다 하늘을 육안으로 관찰하여 기술한 경험적인 값이다. 따라서 측정값이 관측판마다 조금씩 다를 가능성은 있다. 참고로 8월 9일 서울 지역 최고, 최저 기온은 33, 25°C이고 10일의 경우 36.2, 25.2°C였다.

8월 10일의 경우 새벽 1시에서 1시 30분경에 *RCTD*가 가장 컸으며, 이때 흑체판은 약 5.2°C의 온도차를, 함석판의 경우에는 2.6°C의 온도차를 보였다. 상대습도는 10시에서 12시 사이에 약 65%에서 62% 정도까지 감소했다가 1시경에 다시 약 70%까지 증가하여 이 값을 오전 5시경까지 유지했다. 따라서 8월 10일 야간의 상대습도가 8월 9일 야간보다 전반적으로 낮다.

이슬점 온도는 밤 9시 반경부터 12시까지 약 23.5°C에서 21°C까지 감소했다가, 1시경 22°C까지 증가한 다음 이 값을 정점으로 해서 20°C에서 증감을 반복하며 오전 5시경까지 약 20°C를 유지했다. 이 사이 이슬점 온도의 최저값은 새벽 5시경 19.6°C였다. 따라서 성능이 좋은 복사냉각판을 사

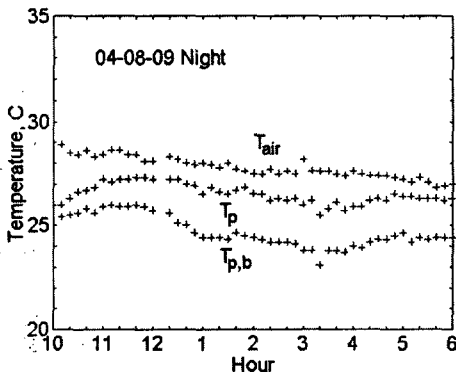


Fig. 2 Effects of black paint coating.

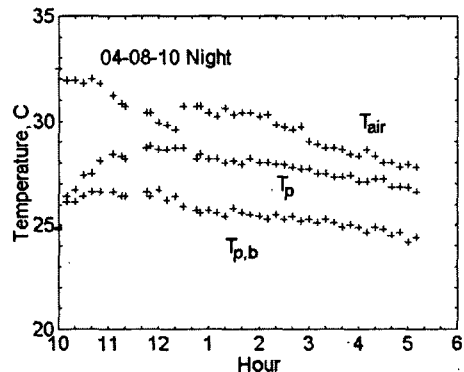


Fig. 3 Effects of black paint coating.

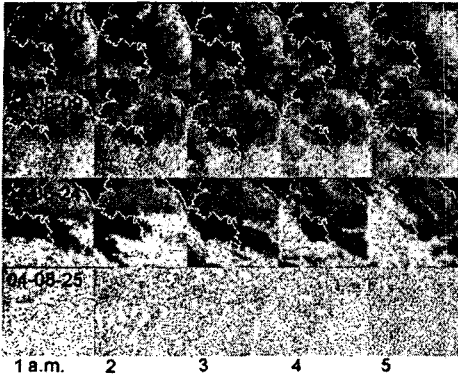


Fig. 4 Composite satellite image.⁽³⁾

용한다면, 이 연구에서 사용한 흑체판보다 약 5°C 정도 더 낮은 온도를 얻을 수 있을 것이다.

Fig. 4는 8월 9일, 10일, 24일, 25일 인공위성 사진의 합성영상이다. 오전 1시부터 오전 5시까지의 영상이 매 시간마다 표시되어 있다. 합성영상에서 가시광선은 붉은색을 적외선은 푸른색을 나타낸다. 진한 분홍색은 하층운을, 약간 투명한 푸른색은 상층운인 권운을 나타낸다. 탁하면서 흰색이나 회색이 섞인 분홍색은 하층에서 상층까지 발달한 구름을 나타낸다.⁽³⁾ 8월 9일과 10일 영상에 큰 차이는 없으나, 8월 9일 새벽 1~2시경 서울에 중·하층운이 있었으나, 8월 10일 같은 시간대에는 거의 구름이 없었음을 볼 수 있다.

3.2 선택적 코팅의 영향

흑체판과 Al-코팅판의 복사냉각효과를 Fig. 5에 비교하여 나타내었다. $T_{p,Al}$ 은 Al-코팅판의 온도이고, $T_{p,b}$ 는 흑체판의 온도이다. 두 판의 온도는 모두 CL511를 사용해서 8월 24일 밤 10시부터 새벽 5시까지 약 10분 간격으로 측정했다.

8월 24일 밤 12시 이후 데이터에서 12시 20분경에 최대 *RCTD*를 얻었으며, 흑체판의 경우 5°C, Al-코팅판의 경우 4.8°C였다. 복사냉각온도의 관점에서만 보면 흑체판이 Al-코팅판보다 성능이 더 우수하다. 실험시간 동안 흑체판의 경우 *RCTD*는 대략 2~5°C 정도의 분포를 보였으며, Al-코팅판의 온도는 흑체판에 비해 약 0.2에서 1.5°C 정도 높았다.

이날 상대습도는 밤 10시경 약 75%에서 증가하여 12시경에 86%를 정점으로 해서 2시 반경까

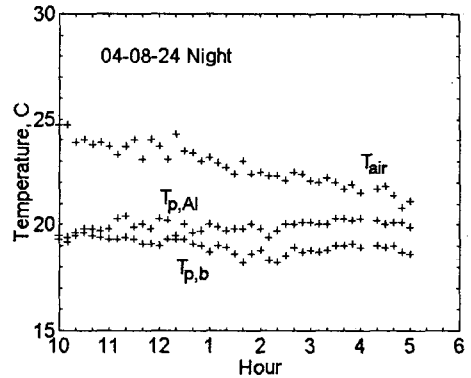


Fig. 5 Black plate vs. Al-coated plate.

지 80% 내외를 유지하다가 약 20분 후에 100%까지 증가했다. 이후 약 98% 내외에서 변동하다가 5시에 약 95%까지 하락했다. 이날 옥상에서 육안으로 관측된 기상은 별과 상현달이 보이고 바람이 거의 없는 맑은 날씨였다. 그러나 고층운이 있었음을 Fig. 4에서 추정할 수 있으며, 기상청의 자료를 평균한 야간 평균 운량은 3.5이다. 새벽 2시 30분 이후에 간헐적으로 바람이 불기 시작했으나 그 속도는 1.5 m/s를 넘지 않았다. 약 3시 20분경에 흑체판에 결로가 생기는 것을 육안으로 관찰할 수 있었다.

3.3 흐린 날의 복사냉각효과

흐린 날 흑체판의 복사냉각성능을 2.1절에서 서술한 데이터로거들을 사용해서 측정된 결과들은 Fig. 6과 같다. 흐린 날에도 구름의 온도가 지표 주위의 대기온도보다 낮으므로 흑체판의 온도

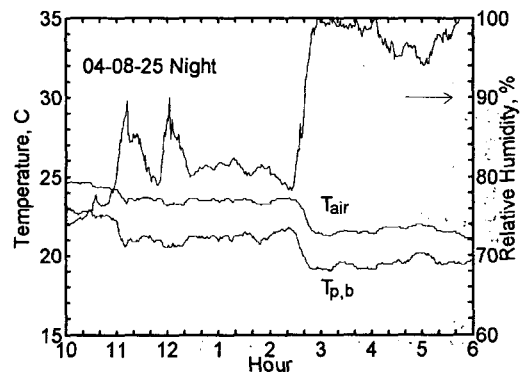


Fig. 6 Radiant cooling on cloudy day..

가 주위 대기온도보다 낮아질 수 있다. 이 날 얻어진 *RCTD* 최대값은 2.9°C이다. 밤 10시부터 새벽 2시 20분까지, *RCTD*의 평균값은 2.3°C이고, 이후부터 6시까지의 평균값은 2.1°C이다. 따라서, 흐린 날에도 흑체판을 사용해서 복사냉각효과를 얻을 수 있지만, 맑은 날인 Figs. 2~3의 경우에 비해서 그 효과가 작음을 알 수 있다.

기상청 예보에 의하면 8월 25일 저녁에서 26일 새벽까지 운량이 8.3~9.4인 흐린 날로 예측되었으며, 강수확률이 40%였다. 실제로 새벽에 비가 왔었으며 강수량은 0.5 mm였다. 25일 최고기온은 27.5°C, 최저기온은 20.7°C였다. 기상청이 예측한 최대풍속은 2 m/s였다. 상대습도 측정 결과를 보면 초저녁부터 새벽 3시경까지 80%를 유지하다가 새벽 3시경에 증가하여 100%에 도달했었고, 이를 통해 새벽에 비가 왔었던 사실을 확인할 수 있다. Fig. 4의 인공위성 합성사진에서도, 이날 서울지역 야간 하늘은 고도가 높은 구름과 낮은 구름으로 완전히 덮혔던 흐린 날이었음이 확인되며, 야간 평균 운량은 10이었다.

3.4 8월 중 야간 복사냉각이 가능한 일자

2004년 8월 기상청의 자료를 처리해서 작성한, 서울지역 야간에 대한 기상자료를 Table 1에 요약했다. 야간 평균 운량(CLN)은 당일 9시부터, 야간 평균 풍속(WDN)은 당일 10시부터 익일 새벽 6시까지의 자료를 산술 평균한 값이며 야간 강수량은 누적값이다. 야간 강수량의 단위는 mm이고, 야간 평균 운량은 0~10 사이값을 갖는다. 8월달의 31일 중 야간에 전혀 비가 오지 않았던 날은 모두 26일이다. 강수량이 없었던 26일 중 흑체판을 사용해서 5°C 정도의 *RCTD*를 얻을 수 있는 날은 대략 운량이 4 이하인 구름이 조금 있는 날로써, 모두 12일이다. 흑체판을 사용해서 2~5°C 정도의 *RCTD*를 얻을 수 있는 날은 대략 운량이 10 이하인 날로써 모두 14일이었다. 단, 야간 복사냉각이 가능한 날에 대한 추정일수는, 해당일 야간풍속이 2 m/s 이하였다는 가정이 성립하는 경우 유효하다.

운량이 4 이하인 12일 중 풍속이 2 m/s 이상인 날은 3일이었으며, 이때 최고 풍속은 2.4 m/s였다. 또한 운량이 4보다 큰 14일 중 풍속이 2 m/s 이상인 날은 8일이었으며, 이 8일에 대한 평균

Table 1 Night weather for Seoul; August 2004⁽³⁾

	Sun.	Mon.	Tue.	Wed.	Thur.	Fri.	Sat.
HT	34.2	33.2	32.7	32.9	32.7	32.9	32.4
LT	25.3	23.7	25.7	23.2	23.8	24.7	26.2
CLN	2	4	0.3	9.3	4	2.8	5.3
WDN	2.4	1.3	1	1.4	1.9	1.4	2.1
PN	0	0	0	39.9	0	0	0
HT	32	33	36.2	35.7	34.7	32.7	29.2
LT	26.1	25	25.2	25.6	25.6	26	24
CLN	8	1	0.3	0	1.5	5.5	7.5
WDN	1.3	1.2	1.9	1.7	1.9	1.1	1.7
PN	0	0	0	0	0	0	0
HT	31	29.1	26.2	25	25.3	26.8	25.5
LT	22.8	21.5	21.1	22	19.1	20.5	21
CLN	9.3	10	10	10	8	8	6.5
WDN	1.2	2.7	1.2	4	3	2.1	2.3
PN	0	19.5	25	22.5	0	0	0
HT	25.2	26	29.2	27.5	28.5	28.3	26.6
LT	21.3	20.5	18.7	20.7	21.2	21.1	22.1
CLN	10	1.5	3.5	10	6	7.3	9
WDN	3	2.3	0.7	1.6	1.4	4.2	3.2
PN	0	0	0	0.5	0	0	0
HT	30.1	31.5	29.3				
LT	21.6	22.7	20				
CLN	4.8	0.5	7				
WDN	2	2.3	3				
PN	0	0	0				

HT, LT: daily high and low temperature, °C
CLN: nighttime average cloud index, scale of 10
PN: nighttime precipitation, mm

WDN: nighttime average wind velocity, m/s

풍속은 2.9 m/s였으며, 최대값은 4.2 m/s였다.

따라서, 2004년도 8월 서울에서 야간에 5°C 정도의 *RCTD*를 얻을 수 있었던 날은 최소 9일에서 최대 12일 정도였으며, 2~5°C 정도의 *RCTD*를 얻을 수 있었던 날은 최소 8일에서 최대 14일 정도라고 추정된다.

4. 결 론

2004년 8월 중 서울에서 환산 층수가 약 15층 인 건물 옥상에서 야간 하늘에 노출된 평판에 의해 얻을 수 있는 복사냉각효과를 확인하기 위해

실험을 했다. 사용된 시편은 함석판, 흑체판, 그리고 Al-코팅판이었다. 실험은 바람이 거의 없는 (풍속 2 m/s 이하) 맑은 날과 흐린 날에 행해졌다. 이 실험 결과가 보이는 경향은 다음과 같다.

(1) 환경오염 및 광공해가 심한 서울에서도 8 월달 야간에 복사냉각이 가능하다.

(2) 흑체판의 복사냉각효과는 Low-E coating 을 한 Al-코팅판이나 함석판보다 컸다. 운량이 약 4 이하인 구름이 조금 있거나 맑은 날에 흑체 판을 사용해서 얻을 수 있는 최대복사 냉각온도 차는 약 5°C 정도였다.

(3) 흑체판을 사용해서 흐린 날에도 복사냉각 효과를 얻을 수 있으나 맑은 날에 비해 작았다.

(4) 판의 표면이 직접 하늘에 노출된 경우 얻을 수 있는 판의 최저온도는 이슬점온도로 추정된다. 따라서 이 연구에 사용된 흑체판보다 복사 냉각성능이 더 우수한 판을 사용한다면, 판의 온도를 이 실험 결과보다 약 5°C 정도 더 낮출 수 있으리라 예측된다.

(5) 판의 온도가 주위 대기온도보다 낮아지면, 바람은 복사냉각을 저해하게 된다. 따라서 바람의 영향을 정량적으로 연구할 필요가 있다.

(6) 구름의 온도를 측정하고 이를 정량화하거나 하늘로부터의 입사량(irradiation)을 측정하는 연구가 필요하다.⁽⁴⁾

(7) 대기 중의 습도가 복사냉각에 미치는 영향에 대해서는 정량적으로 연구할 필요가 있다. 이 실험의 경우, 대기 중의 습도는 표면에 생기는

결로를 통해서 복사냉각에 영향을 주고 있다.

후 기

이 연구는 에너지관리공단(에너지기술 학술진흥사업(2003-E-ID03-P-05-0-000-2003))에 의해 지원되었으며, 연구비 지원에 대해 감사드립니다. 또한, 이 연구에 대해 자문을 해주신 The U. of Iowa의 Theodore F. Smith 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

1. Erell, E. and Etzion, Y., 1992, A radiative cooling system using water as heat transfer medium, Architect. Sci. Rev., Vol. 35, pp. 35-49.
2. Meir, M. G., Rekstad, J. B. and Lovvik, O. M., 2002, A study of polymer-based radiative cooling system, Solar Energy, Vol. 73, No. 6, pp. 403-417.
3. Korea Meteorological Administration, 2004, Weather Information Service, Seoul, Korea (www.kma.or.kr).
4. Martin, M. and Berdahl, P., 1984, Characteristics of infrared sky radiation in the united states, Solar Energy, Vol. 33, No. 3/4, pp. 321-336.