야간 하늘에 노출된 평판의 복사냉각효과

변 기 홍

Nocturnal Radiant Cooling by a Plate Viewing the Sky

Ki-Hong Byun

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

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 at 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 such as galvanized Iron, black painted, and aluminum film coated galvanized iron plate. Among these plates, the black painted surface show the lowest temperature that is lower than its ambient temperature. The maximum radiant cooling temperature difference, that is ambient temperature minus plate temperature, observed is about 5K..

기호설명

T: 온도(temperature), ℃
b: 흑체(black)
p: 판(plate)
RC: 복사냉각(Radiant cooling)

1. 서 론

기원전의 고대 문명에서도 야간에 적절한 조건이 성립하면 주위 공기의 온도 보다 낮은 온도를 얻을 수 있음을 알고 있었던 것 같다. 물체가 대기권에서 수증기와 이산화탄소의 흡수밴드가 없는 8-13㎛ 파장대의 창을 이용해서 온도가 낮은 우주 공간으로 열을 방출시킬 수 있으면 물체의 온도는 주위 공기 온도보다 낮아 질수 있으며 이를 복사냉각효과라고 부른다. 이 점을 이용해서 야간에 냉수를 얻으려는 시도가 참고문헌[1,2] 에 발표되어 있다.

국내에서 복사냉각에 대한 연구가 행해진 적은 없다. 대도시인 서울 지역은 하절기에 고온 다습하며, 대기오염으로 인한 스모그 등이 상존하고 있다. 야간에도 시내 곳곳에 많은 조명들이 켜져 있으며, 이들이 스모그에 의해 산란되어 일어나는 광공해로 인해 야간 하늘이 칠흙같이 어둡지는 않다. 스모그 및 광공해는 8-13㎛ 밴드 창에 의한 복사냉각 효과를 감소시키는 역할을 하게 된다. 따라서, 서울지역에서도 야간에 복사냉각 효과를 얻을 수 있는지를 확인할 필요가 있다고 생각한다. 만일 복사냉각이 가능하다면, 이를 이용하여 다양한 에너지절약 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 판별하는데 중요한 지표로 사용될 수 있을 것이다.

† 동국대학교 기계공학과
E-mail : khbyun@dongguk.edu
TEL : (02)2260-3701 FAX : (02)2263-9379

이 연구의 목적은 2004년 8월 서울의 건물 옥상에서 야간에 가용한 복사냉각효과를 실험을 통하여 측정하는 것이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

야간에 복사냉각을 측정하기 위해 고안된 시스템의 개략도는 Figure 1 과 같다. 케이스는 Acryl로 두개의 얇은 금속판을 부착할 수 있도록 만들어져 있다. 맨 위에서 첫 번째 금속판은 복사 냉각 판이다. 이 판을 교환하며 서로 복사 특성이 다른 냉각 판이 복사냉각에 미치는 영향을 고려할 수 있다. 두 번째 판에는 Thermopile을 부착하였다. 두 번째 판의 중앙 바로 밑에 알루미늄 금속 블록을 부착하였다. 케이스와 금속블록 사이는 모두 스티로폼 단열재로 채워져 있다. 또한 야간에 측정하는 동안에는 이 측정 시스템을 스티로폼 단열재를 사용하여 옥상 바닥과 분리시켰다. Thermopile 의 재질은 K-type thermocouple 이며 온도 및 열유속을 측정할 수 있다. 이 시스템은 크기가 작으므로 이동성이 좋다.

측정한 변수들은 다음과 같다. 복사냉각판의 온도, 열유속, 대기의 온도, 대기의 습도이다. 열유속 센서의 출력은 정밀 측정용 OP amp를 사용해서 1000배 정도 증폭해서 Hioki 3635-24 data logger 에 입력되도록 했으며, K-type 열전대의 출력은 Omega CL511 calibrator를 사용하여 직접 읽거나, 약 100배 증폭해서 Hioki 3645-20 data logger 에 입력했다. 외기의 온도 및 습도는 이를 측정할 수 있는 Hioki 3641-20 또는 Omega OM-44 data logger를 사용해서 측정했다.

장비를 보유하고 있지 않아서 측정할 수 없는 양들은 기상청의 자료[(3)]를 최대한 보조 자료로 이용했으며, 서울지역 기상 관측소는 이 실험을 행한 곳 근처에 있다.

측정은 야간에 동국대학교 공과대학 건물 옥상 위에서 행해졌다. 이 건물은 6층이지만 동산 위에 존재하므로 실제 환산 층고는 이보다 높아서 15층인 서울 명동의 세종호텔 정도의 높이이다.

가능하면 바람이 없는 날 실험이 행해졌으며, 간헐적으로 바람이 있는 경우에도, 최대풍속은

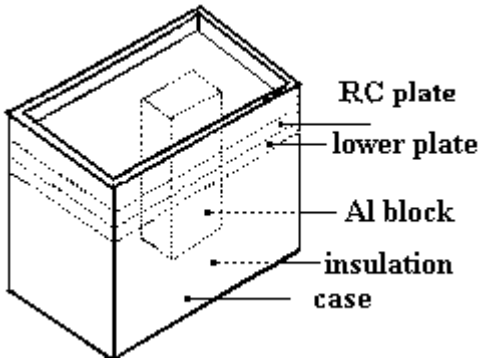

Fig. 1 Radiant cooling test system

2m/s를 넘지 않았으며, 이는 다시 기상청의 예보 및 풍속계를 사용한 직접 측정으로 일부 확인되었다.

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

이 연구에서 복사냉각온도차는 주위공기의 온도에서 측정판의 온도를 뺀 차이 값을 의미한다.

$$T_{RC} = T_{air} - T_p \qquad (1)$$

야간하늘에 노출된 판의 첫 번째 최대복사냉각온도차의 한계는 우변 두 번째 항인 판의 온도가 이슬점 온도가 되는 경우로 이 실험을 통해서 확인되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 검정페인트 코팅의 영향

Fig. 2 와 Fig. 3 에는 검정 페인트 코팅이 복사냉각에 미치는 영향이 발표되어 있다. 함석판과 흑체판의 온도가 저녁 10시부터 새벽까지 약 10분 간격으로 측정되었다. T_p 는 함석판의 온도이

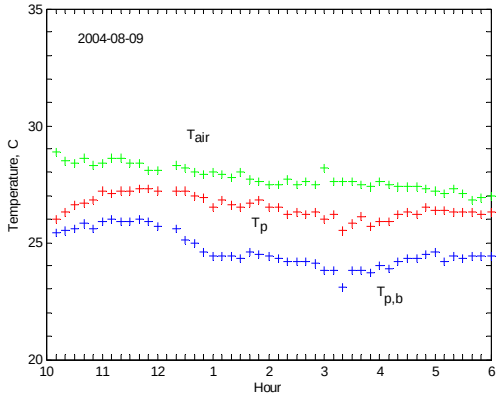

Fig. 2 Effects of black paint coating

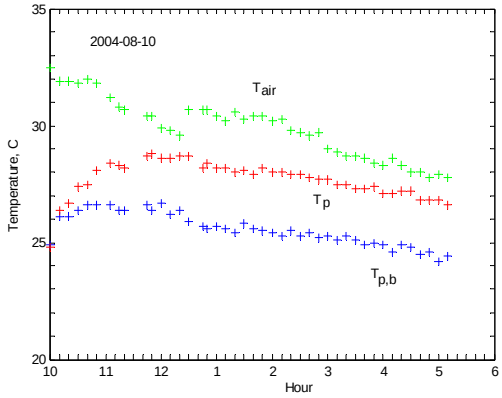

Fig. 3 Effects of black paint coating

고, $T_{p,b}$ 는 흑체판의 온도이며 두 온도 모두 CL512를 사용해서 측정했다. 알루미늄 블록의 초기온도가 주위 대기온도보다 많이 낮았기 때문에 처음에는 대기에 의해 가열되었다가, 대략 밤 12시 경부터 복사냉각에 의해서 냉각되기 시작하는 것을 관찰할 수 있다. 실험시간동안 검정페인트 코팅의 효과 때문에 흑체판의 온도가 함석판에 비해 약 2 - 3℃ 더 낮아진 것을 볼 수 있다.

8월 9일의 경우 새벽 3시에서 3시20 경에 복사냉각온도차가 최대였으며, 흑체판의 경우 최대값은 약 4.5℃ 이고 함석판의 경우 2.2℃ 였다. 상대습도는 밤 10시경에 82%에서 감소하여 12시 반경 74%를 저점으로 증가하기 시작해서 새벽 4시경에 약 90% 까지 증가했다가 다시 감소하여 6시경에는 약 85%를 유지했다. 이슬점 온도는 밤 10경 약 23℃ 에서 증가 감소를 반복하여 약 6시경에는 다시 23℃가 되었다. 이 사이 이슬점온도의 최저값은 오전 1시경 21.6℃ 이고 최고값은 약 3시 반경 23.3 ℃였다. 따라서, 흑체판의 경우도, 최대복사냉각 온도차의 첫 번째 한계값에 도달하지 못했다. 만일 사용된 흑체판 보다 복사냉각 효율이 더 좋은 판을 사용할 수 있었다면, 판의 온도를 흑체판 보다 약 2-3℃ 정도 더 내릴 수 있었으리라 예상된다.

Fig. 3은 Fig. 2와 동일한 조건에서 8월10일 야간에 행한 실험의 결과이다. 육안으로 실험시간동안 관찰한 바에 의하면, 8월9일 및 10일 모두 강수량이 없었으며 야간에 맑은 날이었다. 8월9일과 10일 날씨에서 가장 큰 차이점은 운량이다. 기상청의 자료에 의하면 8월9일의 운량은 4 (구름조금)이었고 10일의 운량은 0.8(맑음)이었다. 참고로 8월9일 서울지역 최고, 최저, 기온은 33, 25℃이고 10일의 경우 36.2, 25.2℃ 였다.

8월 10일의 경우 새벽 1시에서 1시30 경에 최대 복사냉각온도차가 가장 컸었으며, 이때 흑체판은 약 5.2℃의 온도차를, 함석판의 경우에는 2.6℃ 의 온도차를 보였다. 상대습도는 밤 9시반경 약 75%에서 감소하여 10시에는 약65%, 12시에는 약 62% 까지 감소했다가 1시경에 다시 약 70%로 증가하여 약 오전 5시까지 상대습도 70%를 유지했다. 이 사이의 상대습도의 최대값은 오전 2시경 72.5%, 최소값은 오전 2시 반경 65.6%였다. 따라서, 상대습도는 8월10일의 (Fig. 2 조건) 이 8월9일(Fig. 1) 보다 야간에 전반적으로 낮다.

이슬점 온도는 밤 9시반경 약 23.5℃ 에서 10시에는 23℃ 12시에는 약 21℃ 까지 감소했다가 1시경까지 다시 22℃로 증가했다가 이 값을 최고치로 하여 20℃에서 증감을 반복하여 오전 5시경까지 약 20℃ 를 유지하였다. 이 사이의 이슬점온도의 최저값은 새벽 5시경 19.6℃ 였다. 따라서, 더 효율적인 복사냉각판을 사용한다면, 이 연구에서 사용한 흑체판보다 약 5℃ 정도 더 낮은 온도를 얻을 수 있을 것 같다.

Fig. 4 는 8월9일 과 10일 오전 1시부터 오전 5시까지의 위성사진의 합성영상이다. 합성영상에 가시광선은 붉은색을 적외선은 푸른색을 나타낸다. 진한분홍색은 하층운을, 약간 투명한 푸른색은 상층운인 권운을 나타낸다. 탁하면서 흰색이나 희색이 섞인 분홍색은 하층에서 상층까지

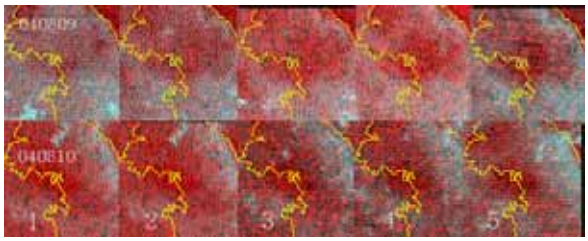

Fig. 4 Composite Satellite Image[3]

발달한 구름을 나타낸다.[3] 8월9일 새벽 3시 4시 경에는 서울 지역에 하층운이 있었음을 나타내며 8월10일에는 해당시간대에 서울지역에 거의 구름이 없었음을 나타낸다.

8월9일의 예보에 의하면 오후 9시부터 새벽 6시까지 맑고, 강수확률은 10%이며, 풍속이 약 0-2㎧/s 인 북서 및 북동풍이 있을 수 있다고 예측되었다. 8월10일의 경우 9시부터 12시까지 흐렸다가, 그 후 6시까지 맑으며, 강수확률은 10%이며 북동풍이 풍속 약 0-2㎧/s 범위에서 있을 수 있다고 기상청이 예측하였다.

3.2 선택적 코팅의 영향

흑체판과 Al-코팅판의 복사냉각효과를 Fig. 5에 비교했다. $T_{p,Al}$ 은 Al-코팅판의 온도이고, $T_{p,b}$ 는 흑체판의 온도이다. 두 판의 온도는 모두 CL512를 사용해서 8월24일 밤 10시부터 새벽 5시까지 약 10분 간격으로 측정했다.

8월 25일 새벽 12시 이후 데이터에서, 12시 20분경에 최대 복사냉각온도차를 얻었으며, 흑체판의 경우 5℃, Al-코팅판의 경우 4.8℃ 였다. 복사냉각온도의 관점에서만 보면 흑체판이 Al-코팅판 보다 성능이 더 좋다. 실험시간동안 흑체판의 경우 복사냉각온도는 대략 2 - 6℃ 정도의 분포를 보였으며, Al-코팅판의 온도는 흑체판에 비해 약 0.2에서 1.5℃ 정도 높았다.

이날 상대습도는 밤 10시경 약 75%에서 증가하여 12시경에 86%를 정점으로 약 12시반경 80% 까지 감소하였다. 이후 약 2시간을 80% 내외를 유지하다가 2시반경 다시 증가하기 시작해서 10분 후에 90% 다시 10분 후에 100%까지 증가 했다. 이후 약 98% 내외에서 변동하다가 5시에 약 95% 까지 하락했다.

이날 옥상에서 육안으로 관측 된 기상은 별과 상현달이 보이고 바람이 거의 없는 맑은 날씨였다. 새벽 2시 30분 이후에 간헐적으로 바람이 불

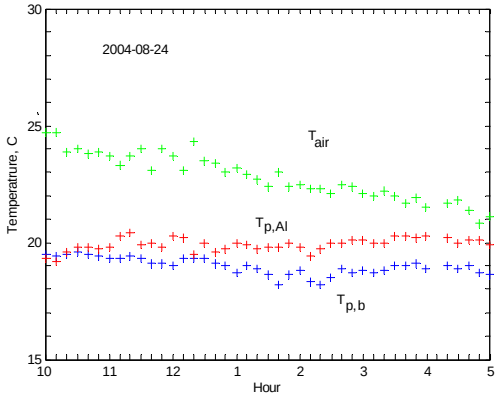

Fig. 5 Black painted plate vs. Al-coated plate

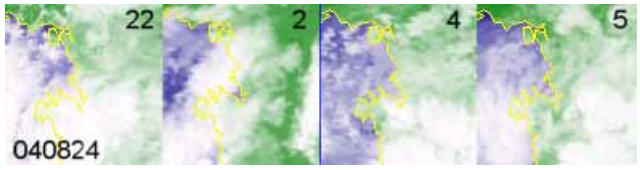

Fig. 6 Infrared (10.3-11.3μm) satellite image

기 시작했으나 그 속도는 대략 1m/s를 넘지 않았다. 약 3시 20분경에 흑체판에 결로가 생기는 것을 육안으로 관찰할 수 있었다.

Fig. 6은 적외 채널의 위성사진이다. 적외영상이란 구름의 휘도 온도를 나타내는 영상이다. 적외영상에서는 온도가 낮을수록 밝게 보인다. 대류권에서는 구름의 고도가 높을수록 온도가 낮다. 따라서 밝은 구름은 고도가 높다고 할 수 있다.[3] 이 위성사진을 보면 10시경 육안으로는 맑은 하늘이었으나 높은 구름이 서울지역을 덮고 있을 가능성이 있다. 2시경에 낮은 구름이 있었으나 서울 상층부는 구름이 없을 가능성이 있으며, 4시 5시 경에도 상층부에 높은 구름이 덮고 있을 가능성을 보여주고 있다. 이날 평균 운량은 3.1이다.

3.3 흐린 날의 복사냉각효과

흐린 날 흑체판의 복사냉각성능을 2.1절에서 서술한 데이터로거들을 사용해서 측정한 결과들이 Fig. 7 에 발표되어있다. 흐린 날에도 구름의 온도가 지표 주위의 대기 온도보다 낮으므로 흑체판의 온도가 주위온도보다 낮을 수 있다. 이날 얻어진 최대 복사냉각온도차는 2.3℃이고 밤

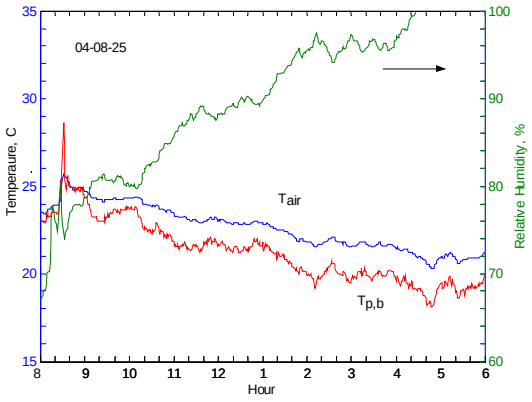

Fig. 7 Radiant cooling on cloudy day

10시부터 새벽 4시 사이의 복사냉각온도차의 평균값은 1.5℃이다. 따라서, 흐린날에도 흑체판을 사용해서 복사냉각효과를 얻을 수 있지만, 맑은 날인 Figs. 2-3 의 경우에 비해서 그 효과가 작음을 알 수 있다.

기상청 예보에 의하면 8월25일 저녁에서 26일 새벽까지 운량이 8.3-9.4인 흐린날로 예측되었으며, 강수확율은 40%였다. 그리고 이날 새벽 비가 왔었으며 강수량은 1mm 였다. 25일 최고기온은 27.5℃ 최저기온은 21.2℃ 였다. 기상청이 예측한 최대 풍속은 2m/s 였다. 상대습도 측정결과를 보면 초저녁의 70%에서 증가하여 새벽 4시30분경에는 100%에 도달했었고, 이를 통해 새벽에 비가 왔었던 사실을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 4 와 같은 인공위성 합성사진이며, 이날이 고도가 높은 구름 및 낮은 구름이 존재하는 흐린 날이었음을 다시 한번 확인할 수 있다.

3.4 8월중 복사냉각이 가용한 날

기상청에 발표한 2004년 8월의 날씨가 Table 1 에 요약되어 있다. 강수량의 단위는 mm 이고 운량은 맑음(0-2), 구름조금(3-5), 구름많음(6-7), 흐림(8이상), 운량은 0-10 사이값을 가지며 강수와 관계가 없는 구름의 양이다.[(3)] 이 양은 기상관측관 들이 매 3시간 마다 하늘을 육안으로 관찰하여 기술한 경험적인 값이다. 따라서, 측정값이 관측관마다 조금씩 다를 가능성은 있다.

8월 달의 31일 중 약 21일이 전혀 비가 오지 않았던 날이며, 6일 이상이 강수량이 1mm 보다 많았던 날이고, 약 4일 정도가 강수량이 1mm 이

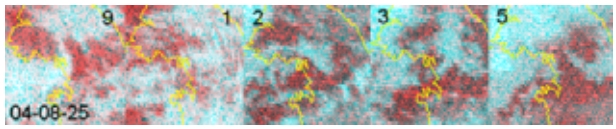

Fig. 8 Composite satellite image of cloudy night

Table 1 Climate of Seoul in August of 2004[(3)]

	일	월	화	수	목	금	토
최고	34.2	33.2	32.7	32.9	32.7	32.9	32.4
최저	25.3	23.7	25.7	23.2	23.8	24.7	26.2
운량	3.5	2.3	4.6	4.8	6.6	3.9	4.9
강수	0	0	0	39.5	0.5	0	0
최고	32	33	36.2	35.7	34.7	32.7	29.2
최저	26.1	25	25.2	25.6	25.6	26	24
운량	7.9	4	0.8	0.1	1.4	3.4	8.9
강수	0.2	0	0	0	0	0	3
최고	31	29.1	26.2	25	25.3	26.8	25.5
최저	22.8	21.5	21.1	22	19.1	20.5	21
운량	7.5	9.9	9.9	10	9	7.5	8.6
강수	0	33.5	33	43.5	39	0	0
최고	25.2	26	29.2	27.5	28.5	28.3	26.6
최저	21.3	20.5	18.7	20.7	21.2	21.1	22.1
운량	9.1	7.1	3.1	8.3	9.4	6.6	8.6
강수	0.1	0	0	0	1	0	0
최고	30.1	31.5	29.3				
최저	21.6	22.7	20.0				
운량	6.6	5.3	2.6				
강수	0	0	0				

하인 날이다. 강수량이 1mm 보다 작은 경우에, 만일 이 강수량이 저녁 10시에서 4시 사이를 피해서 있는 경우라면, 대략 2℃ 내외의 복사냉각효과를 얻을 수 있으리라 추정된다. 강수량이 없었던 21일 중 흑체판을 사용해서 5℃ 정도의 복사냉각온도차를 얻을 수 있는 날은 대략 운량이 4이하인 구름이 조금 있는 날로써 (Fig. 2, 8월9일자 실험 참조) 약 10일 정도 된다. 강수가 없는 21일 중 흑체판을 사용해서 2-5℃ 정도의 복사냉각온도차를 얻을 수 있는 날은 대략 운량이 9 이하인 날로써 (Fig. 7 8월25일자 실험 참조) 약 11일 정도 된다. 단, 위의 복사냉각이 가용한 날에 대한 추정 일수는, 8월 달 내내 풍속이 2㎧/s 이하였다는 가정이 성립하는 경우에 대한 예측 값이다.

4. 결 론

2004년 8월 중 서울에서 환산 층수가 약 15 층인 건물 옥상에서 야간 하늘에 노출된 평판에 의해 얻을 수 있는 복사냉각효과를 확인하기 위해 실험을 했다. 사용된 시편은 함석판, 흑체판, 그리고 Al-코팅판 이었다. 실험은 바람이 거의 없는(풍속 2m/s 이하) 맑은 날과 흐린 날에 행해졌다. 이 실험 결과가 보이는 경향은 다음과 같다.

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

(2) 흑체판의 복사냉각효과는 Low E coating을 한 Al-코팅판 보다 컸다. 운량이 약 4이하인 구름이 조금 있거나 맑은 날에 흑체판을 사용해서 얻을 수 있는 최대복사냉각온도차는 약 5℃ 정도였다.

(3) 흑체판을 사용해서 흐린 날에도 복사냉각효과를 얻을 수 있으나, 맑은 날에 비해 작다.

(4) 판의 표면이 직접 하늘에 노출된 경우 얻을 수 있는 판의 최저온도는 이슬점 온도로 추정된다. 따라서 이 연구에 사용된 흑체판 보다 복사냉각성능이 더 좋은 판을 사용하면, 판의 온도를 이 실험결과보다 약 5℃ 정도 더 낮출 수 있으리라 예측된다.

(5) 바람은 복사냉각을 저해하는 요인으로 작용한다. 따라서 이의 영향을 정량적으로 연구할 필요가 있다.

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

(7) 대기 중의 습도는 표면에 결로가 생기지 않는 한 복사냉각에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 추정된다.

후 기

이 연구는 에너지관리공단의 에너지기술 학술진흥사업(2003-E-ID03-P-05-0-000-2003)에 의해 지원되었다. 공단 및 지원과 관련되시는 분들께 연구비 지원에 대해 감사드립니다. 또한, 이 연구에 대해 자문을 해주신 The U. of Iowa 의 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 Society, 2004, *Weather Information Service*, 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.