

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 27, No. 4, 2007

주간 하늘에 노출된 평판에 의한 복사냉각 실험

변기홍

동국대학교 기계공학과(khbyun@dongguk.edu)

Radiant Cooling by the Plate Viewing the Daytime Sky

Byun, Ki-Hong

Dept. of Mechanical Engineering(khbyun@dongguk.edu)

Abstract

The purpose of this study is to check whether the plate temperature could be lower than the surrounding air by using the radiant cooling during the day time in summer at Seoul. Without an insolation shield as this experiment was performed, a few cases were found. The temperatures of the black painted plate are lower than those of the aluminium film coated plate if the following condition exist; no or small insolation over the plate, the wind velocity less than around 2 m/s, and clear sky. However if there are insolation over the plate, the temperatures of the aluminium coated plate are lower than the black painted plate. Also, as the wind velocity increases, the plate temperature decreases faster. The temperature response of the small system is much faster than the large system.

Keywords : 복사냉각(Radiant cooling), 주간 하늘(Day time sky), 흑체판 (Black painted plate), 코팅판(Aluminium coated plate), 일사량(Insolation), 풍속(Wind velocity)

기 호 설 명

Tair : 건구 대기 온도 (°C)
Troom : 실내 온도 (°C)
RH : 상대습도 (%)

1. 서 론

복사냉각에 적절한 조건이 존재한다면, 야간에 지표면 위에 놓인 물체의 온도가 주위 온도보다 낮아 질 수 있다.^{1,2)} 서울은 여름에 한 달 정도의 장마가 끝난 후부터 무덥고 다습하며, 대기오염으

접수일자 : 2007년 8월 10일, 심사완료일자:2007년 10월 14일
교신저자 : 변기홍(khbyun@dongguk.edu)

로 인한 스모그가 발생하기도 한다. 대기오염은 8-13 μ m 파장대를 통한 복사냉각효과를 감소시키리라 예측된다.

대도시인 서울에서 하절기에 복사냉각이 가능하다면, 다양한 에너지 절약기기^{1,2)} 등을 설계할 수 있으며, 냉방부하를 줄일 수 있는 시스템이나 건축물 들을 설계하는데 이용할 수 있을 것이다.

변³⁾은 본 논문에서도 사용된 복사 냉각 실험 장치 중의 하나를 처음으로 제작해서, 2004년 8월 서울에서 야간에 복사냉각이 가능함을 실험으로 확인했다. 함석판, 흑색페인트를 스프레이 한 함석판, 알루미늄 필름을 부착한 함석판이 사용되었다. 흑색페인트를 스프레이 한 함석판의 온도가 가장 낮았으며, 대기온도보다도 낮았다. 만일 야간에 판이 하늘과 평행하게 놓여 직접 대기와 접촉하는 경우, 판이 도달할 수 있는 최저온도는 이슬점 온도이며, 이를 복사냉각의 이슬점한계³⁾ 라고 불렀다.

본 연구의 목적은 주간에 복사냉각(Radiant Cooling: RC)으로 대기온도 또는 주위온도 보다 낮은 온도를 얻을 수 있는지를 서울에 있는 빌딩에서 실험으로 확인하려는 것이다. 실내 실험 장소는 동국대학교 서울캠퍼스 학생회관 6층에 있는 백상 실내이며, 12층인 세종호텔과 높이가 대략 같으며 실험은 2005년 8, 9월에 행해졌다.

2. 실험장치

그림 1은 복사냉각효과를 측정하기 위해 사용된 시스템의 개략도이다. 그림에는 앞 커버가 제거되어 있다. 대(L), 소(S) 두 종류의 측정시스템이 사용되었다. S-시스템의 경우, 박스의 재질은 나무이며, 내부는 우레탄 단열재로 채워졌다. L-시스템의 경우, 박스는 아크릴로 만들었으며, 내부는 스티로폼 단열재로 채워졌다. L-시스템은 변³⁾의 이전 연구에서도 사용되었다.

단열재 위에는 두개의 얇은 판이 놓여 있으며,

S-시스템에 사용된 판의 기본 재질은 가로 세로가 각각 6.35 cm, 8.9 cm인 알루미늄 판이다. L 시스템에 사용된 판의 기본 재질은 가로와 세로가 S-시스템의 각각 두 배인 함석판이다.

위판은 교체가 가능하다. 복사냉각효과가 일정 기간 지속가능한지를 점검하기 위해 정육면체인 알루미늄 블록이 사용되었다. 블록의 중심에 열전대가 부착되어 있다. 열유속 게이지는 아래판의 윗면에 부착되어 있으며 판과 블록, 그리고 게이지의 중심은 서로 일치한다. 게이지의 종류는 k-type 열전대이며 온도와 열유속을 측정한다.

두 가지 서로 다른 위판이 사용되었으며, 한판에는 KRYLON 1618 BBQ 흑색페인트 스프레이를 했고 다른 판의 표면에는 알루미늄 필름을 부착했다. 가시영역에서 알루미늄 필름의 반사율은 크다.

3. 실험방법

복사냉각시스템 및 관련 측정 및 자료 수집 장치를 실험 장소에 설치했다. 실험 장소는 동국대 학생회관 6층에 있는 백상 실내이며, 높이는 서울시 내의 12층 빌딩과 대략 같다. 설치시 필요에 따라 위판을 교체한다.

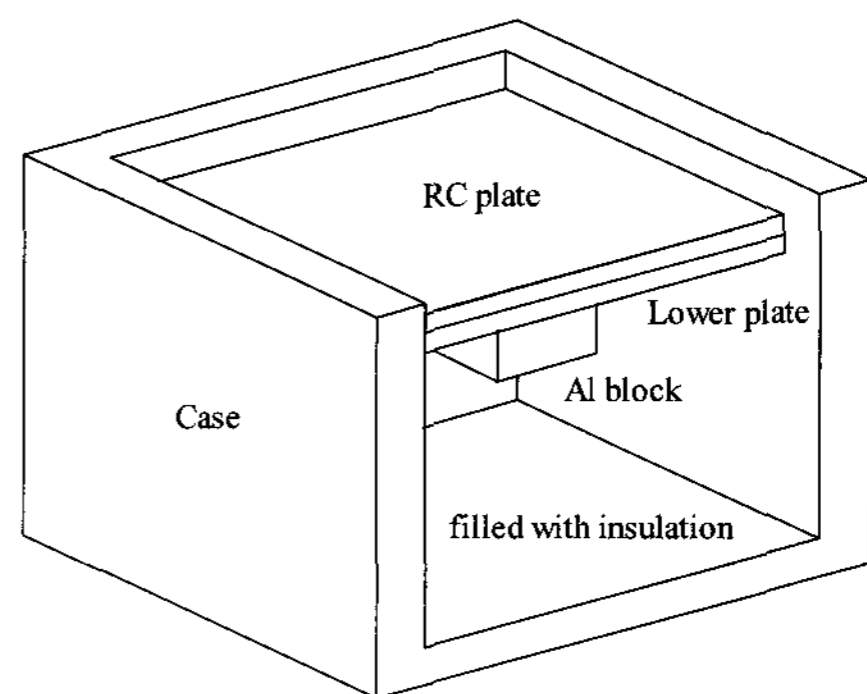


그림 1. Radiant cooling test system

자료수집에는 HP34970A 데이터 획득 장치와 Hioki 3641-20 데이터 로거가 사용되었다. HP34970A 를 사용해서는 판 및 알루미늄 블록 중심의 온도, 열유속, 그리고 주위 공기의 온도가 측정되었다. 측정된 데이터는 RS232 시리얼 케이블을 통해 PC로 전송되므로, HP Bench Link Data Logger 소프트웨어를 사용해서 실험을 관리하고 데이터를 저장할 수 있다. 이와는 별개로 주위 공기의 온도와 습도가 Hioki 3641-20 데이터 로거를 사용해서 측정되었다. 또한, 한국기상청 (Korea Meteorological Administration)의 자료를 결과해석에 참고했다.⁴⁾ 실험위치에서 반경 3.6km 내에 한국 기상청의 서울 관측소가 있다.

4. 결과 및 고찰

복사냉각온도차는 주위온도 T_{air} 에서 판의 온도를 빼 값이다. 이 온도차가 양수 값이 되는 조건을 찾는 것이 본 연구의 목표이다.

실험은 2005년 8월 21일부터 9월 7일 까지, 백상 건물 실내에서 수행되었다. 백상은 8각정 모양의 최고층이며 지붕과 측벽은 모두 외기와 접촉하고 있으며, 측벽은 창문으로 되어 있다. 측정 장치는 창문을 열어놓고 창틀에 설치했다.

이 장에 제시된 모든 그림 및 표에는 다음의 규약을 사용했다. 시스템의 조합에 대해서는 두 개의 영어 약자가 사용되었다. 첫 번째 약자는 L 또는 S 이며 각각 큰 과 작은 시스템이 사용되었음을 나타낸다. 두 번째 약자는 B 또는 C 이며 각각 위판이 흑체판 또는 코팅판임을 나타낸다. 예를 들어, LB는 큰판에 흑색페인트를 스프레이 한 위판이 사용되었음을, SC는 작은 판에 알루미늄 필름을 표면에 부착한 위판이 사용되었음을 의미한다. 온도 측정위치에 대해서는 약자 p 또는 c 가 사용되었으며, 각각 판의 온도와 알루미늄 블록 중심의 온도를 의미한다. 여기서 판의 온도라 함은, 센서게이지의 부착위치가 아래판의 윗면이고

바로 그위에 위판이 있으므로, 두 판의 온도 범위 내의 값이다. T_{room} 은 J형 열전대로 측정한 백상 실내의 온도이며, 창틀에 위치한 Hioki 온습도계로 측정한 대기의 온도는 T_{air} 이다. 따라서, 본문에서 실내온도는 그림의 T_{room} 을, 본문에서 대기 온도는 그림에서 T_{air} 를 의미한다.

표 1에는 그림 2부터 그림 7까지의 결과에 대한 평균 기상조건이 요약되어 있다. 평균 기상 조건은 기상청 발표 자료들에 대한 평균값이다.

그림 2는 LC를 사용해서 8월 23일 오전 10시부터 오후 6시 사이에 수행한 실험결과이다. 장치의 방위는 북에서 동쪽으로 30도이며 수평면과 각도는 56.7도이다. 측정시간 동안 맑은 날씨였으며, 시정거리가 20~22km 였고, 전운량이 0 인 전형적인 가을 날씨였다. 전운량은 강수와 관련이 없는 구름이 하늘을 뒤덮은 정도를 나타내며 0~10 사이의 정수 값을 갖는다. 맑은 날이면 (0-2), 구름이 1/4정도 하늘을 덮고 있으면 (3-5), 반쯤 덮여 있으면 (6-7), 3/4 이상이 덮여져 있으면 (8-10) 이다.⁴⁾ 운량은 기상관측관이 매 3시간 마다 하늘을 육안으로 관찰해서 적은 값이며, 관측자에 따른 차이가 있을 수 있다. 상대습도는 최대 43%에서 최소 35%의 분포를 보였다. 그림에서 습도는 좌측 눈금을 읽은 다음 20%를 더해주면 된다. 풍속은 오전에는 약 4.5m/s 오후에는 2m/s 이며, 특히 오후 4~6시 사이의 평균 풍속은 2m/s 이다. 그림에서 T_{room} 은 J형 열전대로 측정한 백상 실내온도다. Hioki 온습도계는 창틀에 위치했으며 측정 온도 및 습도는 점선으로 표시되어 있다. 붉은 실선은 LC 온도이며, p는 판의 온도이고 c는 알루미늄 블록의 중심온도이다. 판의 온도는 블록 중심의 온도보다 시간당 변화량이 크다. 아래쪽에 위치한 실선은 열유속 측정치이며 눈금 및 단위는 우측에 있다. 흐린 날에는 산란 일사 (diffuse insolation) 성분으로 인해, 복사 냉각 판의 온도가 대기온도는 물론 실내 온도보다 높을 수도 있으나, 이 날은 대기온도와 거의 같았으며,

표 1. 기상자료 요약 (2005년 해당일 3-9시 평균)4)

일자	시정거리 (km)	운량 (0-10)	습도 ϕ (%)	풍속 m/s	판형	비고
8/23	21.7	0	39	2.9	LC	그림2
8/26	12.7	6.3	73	3.1	LB	그림3
					SB	그림4
8/27	12.7	1.3	61	2.9	LB	그림5
					SB	
8/28	7.3	3.7	72	2.9	LB	그림6
					SB	
9/5	20	2	40	5.2	SB	그림7
					SC	

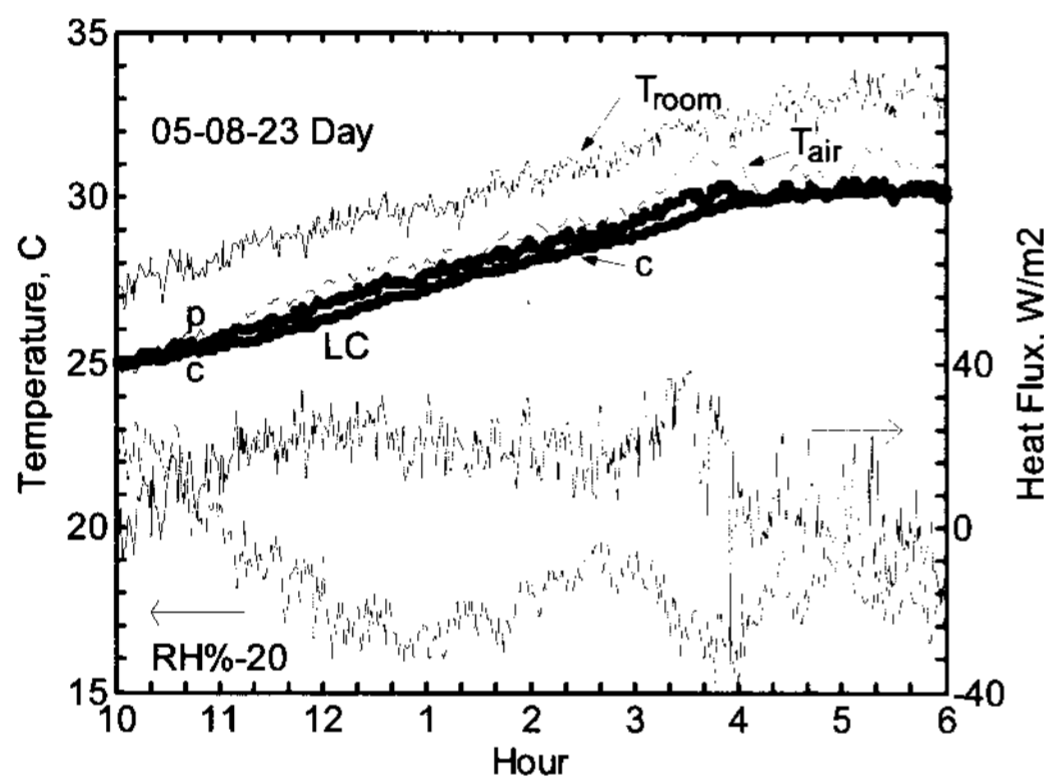


그림 2. Daytime measurement on 05-08-23 (LC)
 (T_{room}, T_{air}: room T and air T near window
 LC: Large system with Al-coated plate
 p: plate T, c: block center T, RH: relative humidity)

실내온도보다 약 2°C 정도 낮았다. 특히 5시~6시 사이에서는 Hioki 온습도계로 측정된 주위 대기 온도 보다 1°C 정도 낮았다. 그러나 이 시간대의 기상청 발표 대기온도는 LC 온도 보다 1~2 °C 높았다. 오전 10시~4시 사이에 약 40W/m²의 열유속이 블록으로 전달되며 온도가 상승하는 것을 볼수 있다. 이 양은 산란일사량과 대류냉각량이 차이이다. 오후 4~6시 사이에는 열유속이 0 W/m²을 진동하며, 열유속 평균값은 대체로 감소되어 6시 근방에 음수 값을 갖고 있으므로 판과 블록이 냉각되고 있음을 거듭 확인할 수 있다. 대

기온도가 약 1°C 정도 높으므로 산란일사 및 대류에 의해 전달된 열량이 복사냉각에 의해서 방출되고 있다고 추정할 수 있다.

그림 3은 다음 날인 8월26일에 LB를 사용해서 오전 11시부터 오후 7시까지 실험한 결과이다. 장치의 방위는 북동쪽 30도 이고 수평과의 각도는 25.5도이다. 측정시간동안 전운량은 11-12시, 12~4시, 4~7시 사이에 각각 1, 5, 8 이었다. 따라서 오전에는 맑다가 오후에 흐려지는 날씨였다. 시정거리는 12~18km 였다. 상대습도는 72.5 + 12.5% 분포를 보였다. 그림에서 습도는 좌측 눈금을 읽은 다음 45%를 더하면 된다. 풍속은 3.0~3.5 m/s 였다. 쿨은선은 LB의 온도이며, p는 판의 온도이고 c는 블록의 중심온도이다. T_{room}은 J형 열전대로 측정된 실내온도이다. Hioki 온습도계는 창틀에 위치했으며 측정 온도 및 습도는 점선으로 표시되어있다. 그림 하단의 실선은 열유속 측정치이며 눈금은 우측에 있다.

그림 2의 LC판에 대한 측정 결과에 비해 LB판의 온도는 실내온도보다 최대 5°C 정도 높았다. LB의 경우 6시 반 지나서야 판의 온도가 실내온도보다 낮아졌다. 5시를 지나서부터 산란일사 성분의 감소에 따라서 실내온도보다 빠른 속도로 판의 온도가 냉각되고 있으며, 이때 열유속의 크기는 음의 값을 갖고 있다. 그러나, 저녁 7시가 되었

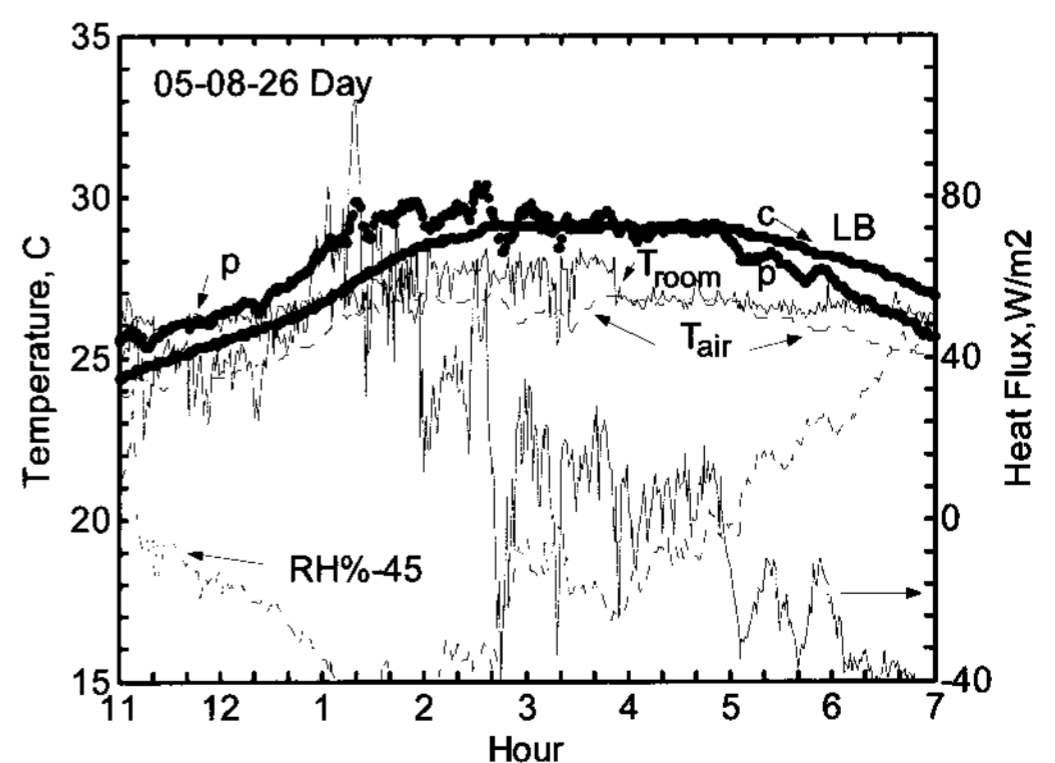


그림 3. Daytime measurement on 05-08-26 (LB)

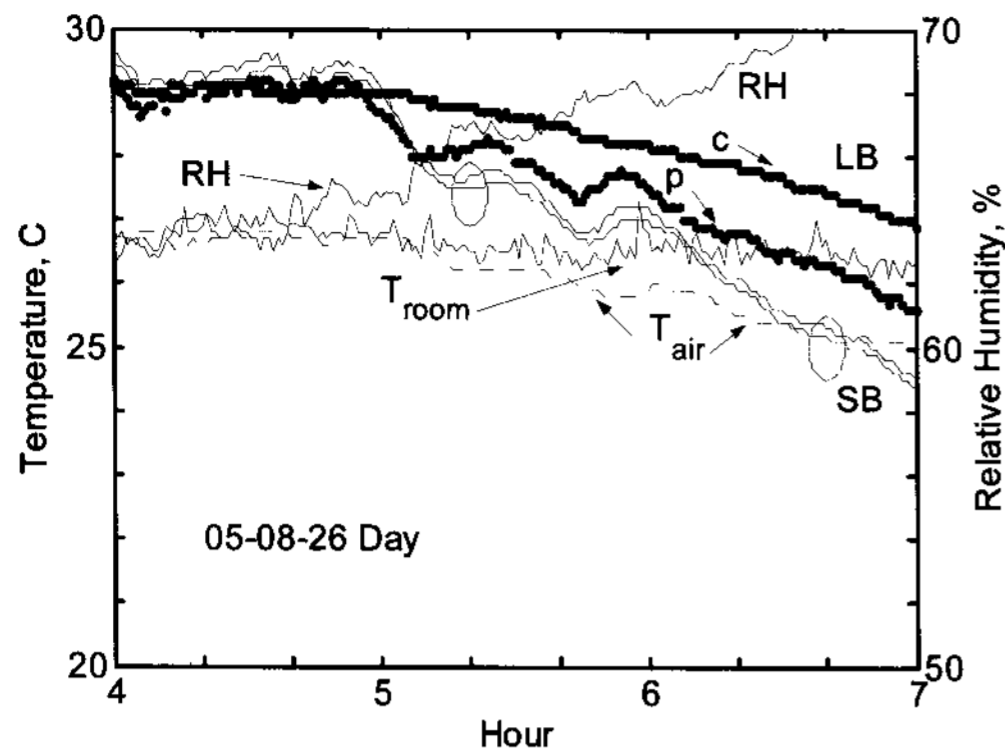


그림 4. LB vs SB for Radiant Cooling on 05-08-26

어도 판의 온도는 대기온도보다 높았다. 맑은 날에 LB를 사용해서 실험한 결과는 그림 5에 발표되어 있다.

그림 4는 그림 3과 동일한 조건에서 SB와 LB의 표면과 중앙온도를 비교했다. 굵은선은 LB의 온도이고, p와 c는 각각 판 및 블록의 중심온도이다. 실선은 SB의 중심 및 판의 온도이다. 5시 이전 데이터에서 온도가 높은 쪽이 판이 온도이며 이후 변곡이 일어난 다음부터는 낮은 쪽이 판의 온도이다. T_{room} 은 J형 열전대로 측정된 실내온도이며 실선으로 표시되어 있다. Hioki 측정 온도는 점선으로 습도는 실선 및 RH로 표시되어 있다. SB의 온도 변동 폭은 LB에 비해 크며, 표면과 중심과의 온도차는 작다. 실내온도보다 낮아지기 시작하는 시각은 SB의 경우 6시 경부터, LB의 경우 6시 반경부터이다. 오후 6시 반경부터 SB의 경우 주위 대기온도보다 낮아지기 시작했다. 일사량의 영향을 무시할 수 있는 경우 작은 시스템이 큰 시스템에 비해 빨리 냉각되고 있다.

그림 5는 8월 27일, 그림 6은 8월 28일에 실험한 결과이다. 양일 모두 8월 26일과 동일한 방향과 각도로 실험장치를 설치해서 실험을 수행했다. 선에 대한 규약은 그림 4에서와 같다. 8월 27일 및 28일에 행한 두 개의 흑체판 (SB, LB)을 사용한 주간 복사냉각실험에서 판의 온도가 보이는

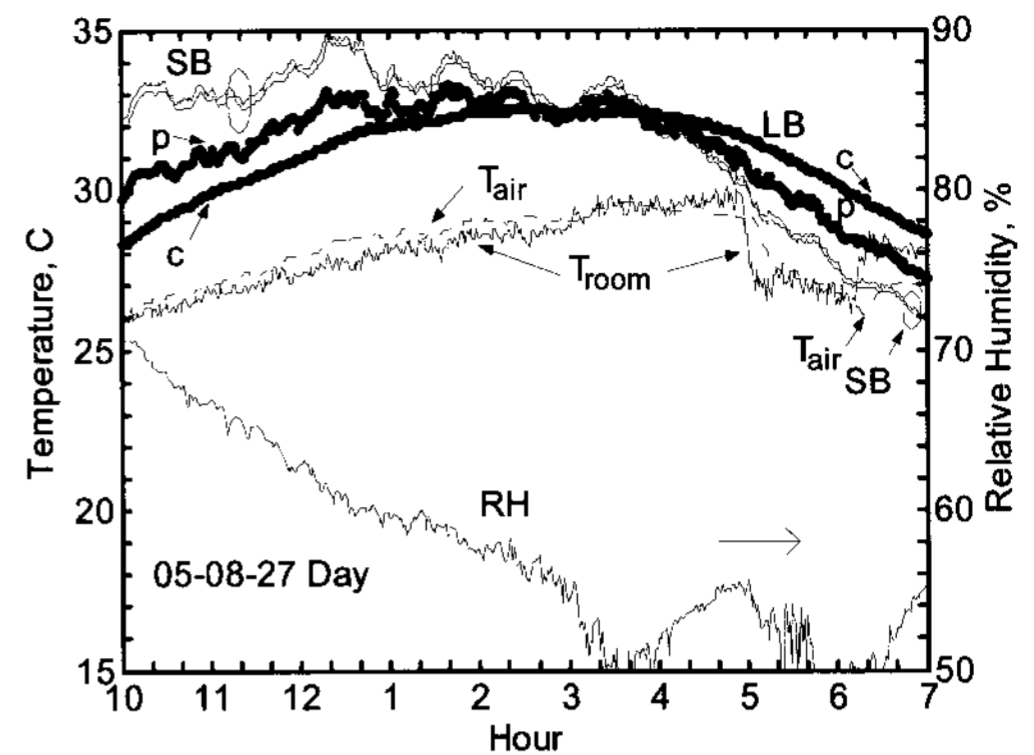


그림 5. LB vs SB for Radiant Cooling on 05-08-27

경향은 그림 4와 유사하다. 27일과 26일 사이의 기상에서 가장 큰 차이는 표 1에 의하면 운량이다. 약 3시 이후의 판의 냉각속도를 비교해 보면, 맑은 날인 그림 5에서의 냉각속도가 흐린날인 그림 4에서의 냉각속도보다 두 판 모두 빠르다. 일사량의 영향을 무시할 수 있는 경우 맑은 날이 흐린날에 비해 복사냉각에 유리함을 유추할 수 있다. 그림 5와 그림 6의 기상에서 가장 큰 차이는 시정거리와 운량이며 8월 28일은 27일에 비해 시정거리가 약 5km 짧고 운량이 약 2.4 정도 많다. 양일 결과에 큰 차이는 없지만 그림 5의 복사 냉각 결과가 그림 6보다 다소 양호하다.

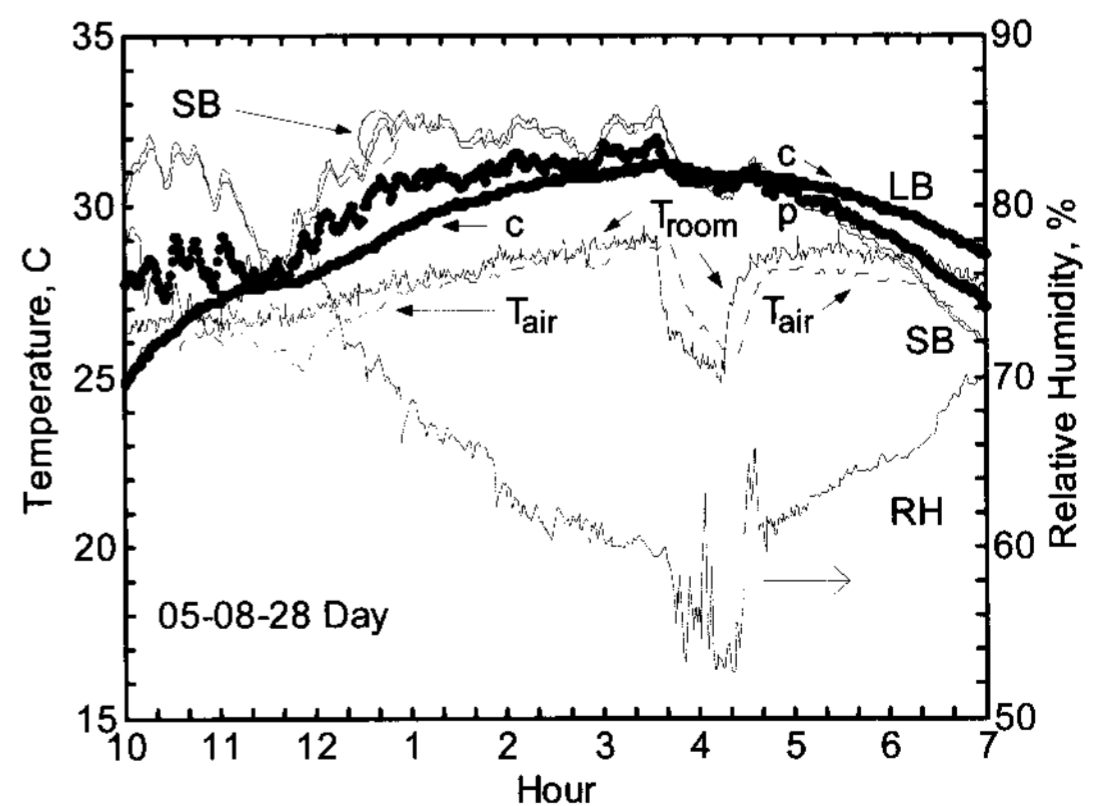


그림 6. LB vs SB for Radiant Cooling on 05-08-28

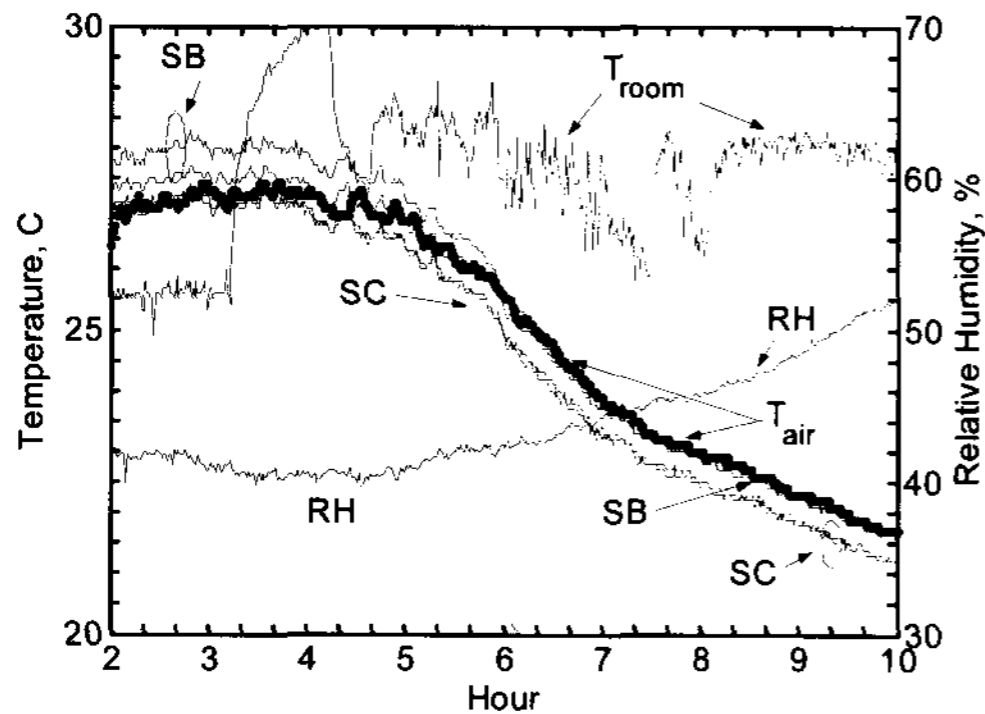


그림 7. LB vs SB for Radiant Cooling on 05-09-05

그림 7은 2005년 9월 5일에 백상에서 유리창을 닫은 상태에서, SB와 SC를 유리창의 실외 쪽 면에 부착 설치해서 오후 2시부터 10시까지 실험한 결과이다. 설치 방향은 북동쪽 30도이며, 수평과의 경사는 25~26도 정도이며 그림 3~6의 설치 조건과 거의 같다. 9월5일은 태풍이 오기 전 맑은 날이다. 그림 3~6까지의 기상조건과 가장 큰 차이는 풍속이며 이날의 평균 풍속은 5.2m/s 이다. SB와 SC의 온도 모두 실선을 사용해서 표시되어 있으나, SB의 온도가 SC보다 높다. 또한 각각의 SB와 SC에서, p와 c 온도는 거의 일치한다. T_{room}은 J형 열전대로 측정한 실내온도이다. Hioki 측정 온도 T_{air}는 굵은 실선으로 표시되어 있으며, SB 온도와 거의 일치한다. 습도는 실선과 RH를 사용해서 제시되어있다. SB의 그림에서의 결과는 보정 전이므로 보정을 하고난 후의 결과는 7시 이후에는 거의 SC와 일치하며 이전에는 약 0.5°C 정도 SC 보다 높다. 유리창이 닫혀있고, 냉방시스템이 가동되지 않았던 백상의 실내 온도에 비해서 약 5~7°C 낮은 온도이다. SC의 경우 주위 공기온도보다 약 1°C 정도, SB의 경우 약 0.5°C정도 온도가 낮아, 창문 밖 주위 대기온도를 측정한 Hioki 온도 기준으로 보면 미약한 복사냉각이 행해진 것으로 추정할 수도 있으나, 기상청 온도와 비교해보면 8시~10시 사이에도 약 0.2~0.3°C 정도 높았다. 야간 복사냉각실험³⁾에서 얻

은 결론에 의하면 풍속이 약 2m/s 보다 작으며, 맑은 날 야간에 복사냉각 효과가 관찰되었다. 이날은 풍속이 5.2 m/s 로 빠른 날이어서, 오전부터 해질 무렵까지의 산란일사에 의한 가열효과도 바람에 의한 대류냉각효과에 의해 상쇄되었으며, 해가 진후 하늘에 의한 복사냉각효과도 바람에 의한 대류 가열에 의해 상쇄되고 있다.

백상 실내 실험에서 판의 온도가 주위 대기온도보다 낮아져서 주간복사냉각효과가 있는 경우는 7일 실험 중 LC를 사용한 경우에는 8월 23일 오후 4~6시 사이에, SB를 사용한 경우에는 8월 26, 27, 28일 오후 6~7시 사이에, 약 1~2°C 내외의 복사냉각 효과를 관찰 할 수 있었다. 그러나 모두 기상청에서 발표한 대기온도보다 낮아지지 못했다.

직달 및 산란일사량이 표면에 없는 경우, 주간 복사냉각은 대체로 야간 복사냉각 실험에서 확인한 조건들이 충족되면 일어날 수 있으며, 이때 변수들의 영향은 야간 복사냉각과 유사하다고 추정된다. 따라서, 일사량이 없는 경우 풍속이 2 m/s 이하이고, 하늘이 맑은 날이면, SB가 SC에 비해 복사냉각에 유리하며 SB의 냉각속도가 LB에 비해 약 30분 정도 빠르다.

5. 결 론

서울에 있는 빌딩에서 8월 및 9월에 주간 복사냉각(Radiant Cooling: RC) 효과에 의해서 대기온도 또는 주위온도 보다 낮은 온도를 얻을 수 있는지를 실험으로 확인하려했으며, 실험 결과가 보이는 경향을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 일사량을 적절히 차폐하지 않는 한, 여름철 낮 동안 서울에서 복사냉각을 확인하기는 힘들었다. 그러나 몇 일정도 해질 무렵부터는 가능함을 실험으로 확인했다.
- (2) 일사량이 있는 경우, 흑체판 보다는 코팅판이 주간 복사냉각에 유리하다. 일사량이 없는 경우는 이와 반대이다.

- (3) 작은 시스템의 냉각 및 가열 속도는 큰 시스템 보다 크다. 따라서, 일사량이 없는 경우 주간 복사 냉각에는 작은 흑체판이 큰 흑체판 보다 유리하나, 일사량이 있는 경우 큰 흑체판이 작은 흑체판에 비해 덜 가열 된다.
- (4) 일사량이 있는 경우, 풍속이 클수록 판의 냉각에 도움이 되나, 일사량이 없는 경우 풍속이 크면 판의 복사 냉각을 방해한다.
- (5) 일사량이 없는 경우 실험결과가 보이는 경향은 대체로 야간 복사 냉각 실험에서 관찰한 결과와 유사하다. 맑은 날이 흐린 날에 비해 주간 복사냉각에 유리하다. 또한 풍속이 작아야 한다는 조건이 필요했으며, 야간 복사냉각의 경우 약 2 m/s 이하였다.
- (6) 직달 및 산란 일사량에 자료가 필요하며 하늘로부터 오는 일사량에 대한 자료⁵⁾ 또는 하늘의 온도가 필요하다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 에너지기술 학술진흥사업 연구비지원으로 수행되었음(과제번호 :

2003-E-ID03-P-05-0-000-2003)

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. Korea Meteorological Administration, Weather Information Service, Seoul, Korea (www.kma.or.kr), 2004.
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.