

복사냉각 시스템에서 커버의 영향

변 기 홍^{**}, Theodore F. Smith

^{*}동국대학교 기계공학과, The U. of Iowa 기계공학과

The Experimental Study of Radiant Cooling Test System under Different Covers

Ki-Hong Byun^{**}, Theodore F. Smith

^{*}Department of Mechanical Engineering, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea

Department of Mechanical and Industrial Engineering, The U. of Iowa, Iowa City, IA52242, USA

(Received March 14, 2007; revision received October 23, 2007)

ABSTRACT: The effects of window cover on the performance of the plate type radiant cooling test system are studied. The cover materials tested are 2 mm, 1 mm, 0.7 mm glass, Cokin 007 filter, and PVC film. The measurements are performed during the September nights of 2005 at the rooftop of the building in Seoul. The equivalent height of the building is about a building with twelve floors. The radiant cooling performance of the black painted and aluminum film coated plate are compared under no cover condition. Also the results are compared when the system has cover over the plate. In general, the covers reduce the radiant cooling temperature differences during the nighttime. Among these covers, the PVC film cover shows the best performance. In some cases, the plate with PVC film cover shows lower temperatures than the system without cover.

Key words: Radiant cooling(복사냉각), Nighttime(야간), Cover(커버), PVC film(PVC 필름)

1. 서 론

야간에 적절한 조건이 존재한다면 지표면 위에 놓인 물체의 온도는 주위 온도보다 낮을 수 있다. 이러한 사실은 기원전에 존재했던 고대 문명인들에게도 알려져 있었다. 물체가 대기중 수증기와 이산화탄소의 흡수대가 없는 8~13 μ m의 파장대를 통해서 하늘로 복사열전달을 방출할 수 있기 때문이다. 서울은 여름에 한달 정도의 장마가 끝난 후부터 무덥고 다습하게 된다. 대기오염으로 인한 스모그가 발생하기도 하며, 전원지역

과는 달리 조명이 산란되어 밤중에도 별이나 달을 보기 힘든 날도 있다. 대기오염은 8-13 μ m 파장대를 통한 복사냉각효과를 감소시키리라 예측된다. 이 논문의 목적 중의 하나는 대도시인 서울에서 야간에도 복사냉각이 가능한지를 실험으로 확인하려는 것이다. 복사냉각이 가용하다면, 다양한 에너지 절약기기 등을 설계할 수 있을 것이다. 한 여름 밤에 생성한 찬물을 건물의 에너지 절약에 이용하는 사례가 보고되어 있다.^(1,2) 얼마나 낮은 온도의 물을 얻을 수 있는지가 이러한 시스템의 경제성을 결정하는 중요한 인자이다. 변⁽³⁾은 복사냉각 실험 장치를 고안해서 야간하늘을 바라보는 판에 의한 복사 냉각효과를 2004년 8월 서울에서 측정했다. 고안된 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 합석판, 흑색페인트를 스프레이 한 합

† Corresponding author

Tel.: +82-2-2260-37011; fax: +82-2-2263-9379

E-mail address: khbyun@dongguk.edu

석판, 알루미늄필름을 부착한 합석판이 사용되었으며, 이 셋 중 흑색페인트를 스프레이 한 합석판의 온도가 제일 낮았으며, 대기온도보다 낮았다. 만일 야간에 판이 하늘과 평행하게 놓여 직접 대기와 접촉하는 경우, 판이 도달할 수 있는 최저온도는 이슬점 온도이며, 이를 복사냉각의 이슬점한계⁽³⁾라고 불렀다.

이 연구의 목적은 서울에 있는 빌딩 옥상에서 9월의 야간 복사냉각(Radiant Cooling: RC) 효과를 실험으로 확인하고, 판위에 커버를 씌워서 냉각판의 온도를 낮출 수 있는지 확인하려는 것이다

2. 실험장치

복사냉각효과를 측정하기 위한 시스템의 개략도는 Fig. 1이며, 그림에는 앞 커버가 제거되어 있다. 대(L), 소(S) 두 가지의 측정시스템이 사용되었다. 두 시스템의 기하학적 형상은 같았으며, L-시스템에 사용된 판의 가로와 세로를 모두 절반으로 줄인 시스템이 S-시스템이다.

L-시스템의 경우 박스는 아크릴로 만들었으며, 내부는 단열재로 채워져 있다. 단열재 위에는 두 개의 얇은 판이 놓여 있으며, 판의 기본 재질은 가로 세로가 각각 12.7 cm, 17.8 cm인 합석판이다. 위판은 교체가 가능하며, 아래판 윗면에 열유속 게이지가 부착되어 있다. 열유속 게이지의 재질은 k-type 열전대이며 온도와 열유속을 측정한다. 알루미늄 블록은 아래판에 부착되어 있으며, 판, 블록, 게이지의 중심을 맞추었다. 복사냉각효과가 일정기간 지속가능한지를 점검하기 위해 알

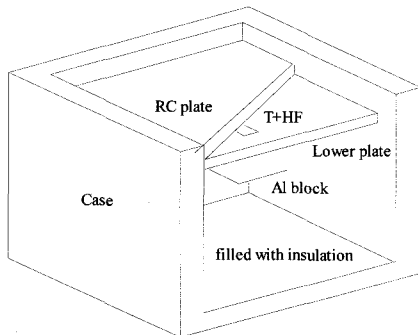


Fig. 1 Radiant cooling test system (RC plate cutted view to show the measurement location. Front cover removed.).

루미늄 블록이 사용되었다. 단열재는 L-시스템의 경우 스티로폼이다.

S-시스템에서는 L-시스템에 사용된 판의 가로와 세로를 모두 절반으로 줄인 알루미늄 판이 사용되었다. 알루미늄 블록은 한 변의 길이가 2 cm 인 정육면체이다. 박스는 나무로 만들어져 있으며, 내부는 우레탄 폼으로 채워져 있다.

학교 건물 옥상에서 실험이 수행되었으며, 옥상의 높이는 서울 시내의 12층 빌딩과 같다. 측정시스템과 건물 옥상 바닥사이에는 스티로폼 단열재를 놓았다.

두 가지 서로 다른 위판이 사용되었으며, 한판에는 흑색페인트 스프레이를 했고 다른 판의 표면에는 알루미늄 필름을 부착했다. 판의상 KRYLON 1618 BBQ 흑색페인트 스프레이를 한판에 사용한 경우에는 약자 B를, 알루미늄 필름을 부착한 판을 사용한 경우에는 약자 C를 사용해서 구분하기로 한다. 가시영역에서 알루미늄 필름의 반사율은 크다.

판위에는 창을 부착할 수 있다. 이 실험에 사용된 창호재는 2 mm, 1 mm, 0.7 mm 두께의 유리, Cokin 007 필터, 그리고 PVC 필름이다.

자료수집에는 HP34970A 데이터 획득장치가 사용되었으며, RS232 시리얼 케이블을 통해 PC에 연결되었다. HP Bench Link Data Logger 소프트웨어를 사용해서 실험을 관리하고 데이터를 저장했다. 판의 온도 열유속 그리고 주위 공기의 온도가 측정되었다. 이와는 별개로 주위 공기의 온도와 습도가 Hioki 3641-20 로거를 사용해서 측정되었다. 실험 중 측정되지 않았던 자료들은 한국기상청(Korea Meteorological Administration)의 자료를 이용했다.⁽⁴⁾ 실험위치에서 반경 3.6 km 내에 한국 기상청의 서울 관측소가 있다. 복사냉각온도차 (RCTD) 는 주위온도 T_{air} 에서 판의 온도 T_p 를 감한 것이다.

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

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2~Fig. 5에 공통으로 사용된 표시 규약에 대해서 먼저 설명한다. 그림에는 3개의 대기온도와 3개의 서로 다른 판의 온도가 있다. 공기의

온도에는 HK, HP, KMA 세 약자가 사용되며, HK는 Hioki 3641-20 로거를 사용해서 측정한 측정 시스템 근처의 온도이고, HP는 측정기 주변의 온도를 HP34970A 에 연결된 J-type 열전대를 사용해서 측정한 온도이다. 접점은 대기에 노출되어 있다. KMA는 매시간 기상청에서 측정한 대기 온도이며 작은 원을 사용해서 값을 표현했다. KMA를 제외한 모든 온도는 저녁 10시부터 다음날 아침 6시까지 1분 간격으로 측정되었으며, 그림에는 저녁을 기준으로 한 일자가 표시되어 있다.

세 조의 대문자 약자를 사용해서 조건을 표시했다. 첫 번째 대문자 L과 S는 각각 대 소 시스템을, 두 번째 대문자 B와 C는 각각 흑체와 알루미늄 필름 코팅을, 마지막 대문자가 없으면 커버가 없는 경우이며, W는 커버가 있는 경우이다. LB는 큰 시스템에 흑체판이며 커버가 없는 경우이며, SCW는 작은 시스템에 알루미늄 코팅판을 사용했으며 판 위에 커버가 있는 경우이다. 그림 제목에 커버의 재질이 명기되어 있다. 판과 커버 사이의 거리는 약 8mm이다. 그림에서 3개의 서로 다른 판의 온도를 구분하기 위해 다음 규약을 사용했다. 예를 들어, LB, SC, SBW인 경우 LB 라벨 위치를 기준으로 라벨 위에 있는 세 온도 중 가장 높은 온도가 LB, 그리고 가장 낮은 온도가

SBW 임을 의미한다.

Table 1은 Fig. 2~Fig. 5에 해당되는 날에 대한 기상청의 기상자료이다. 운량은 강수와 관련이 없는 구름이 하늘을 뒤덮은 정도를 나타내며 0~10사이의 정수 값을 갖는다. 맑은날이면(0~2), 1/4정도 구름으로 덮혀져 있으면(3~5), 반쯤 덮혀 있으면 (6~7), 3/4이상이 덮혀져 있으면(8~10)이다.⁽⁴⁾ 기상관측관이 매 3시간 마다 하늘을 육안으로 관찰해서 적은 값이며, 관측자에 따른 차이가 있을 수 있다. Table 1의 기상자료에서 대류 열전달에 영향을 미치는 인자는 풍속이고, 복사 열전달에 영향을 미치는 인자는 운량 및 시정 거리 그리고 커버이다.

Fig. 2에는 커버를 씌우지 않은 경우에 대한 복사 냉각 실험 결과가 발표되어 있다. 그림의 수직축에서 4개 온도의 기준점은 25°C이며 작은 눈금 하나는 1°C를 나타낸다. 저녁에서 새벽으로 가는 동안 대기 온도가 감소하는 경향을 보이고 있으며 판의 온도 또한 감소하고 있다. 판의 온도가 대기온도 보다 낮으므로 복사냉각이 있음을 확인할 수 있다. 9월24일을 제외하고, 판의 온도가 높은 순서는 LB, SC, SB이다. LB의 온도는 SB나 SC보다 약 1°C 높았다. 이는 이 실험에서 사용하는 형식의 복사 냉각시스템에 적절한 크기가 있으며, 적절한 크기는 현재의 L과 열전대 접점 비드의 크기 사이라 추정된다. 대기온도에서 HK와 KMA의 차이는 1°C정도이나 HP의 경우 2°C이상 차이가 나는 경우도 있다.

Fig. 2에 제시된 결과를 두개의 집단으로 분류할 수 있다. 집단A는 9월14일과 24일의 결과이고 집단B는 9월26일과 28일의 결과이다. 집단 A의 평균풍속은 2.7 and 2.8 m/s이고, 집단 B의 평균 풍속은 1.7 and 1.3 m/s이다. LB시스템의 경우 풍속이 2 m/s보다 작으면 복사냉각이 관찰되었다.⁽³⁾

9월24일 실험결과에서 SC 온도가 SB 온도보다 낮은 이유는 규명하지 못했다. 새벽 3시부터 6시사이의 평균풍속은 9월 14일, 26일, 28일의 경우 각각 3.1, 2.5, 1.5 m/s이다. 위 시간대에 평균 운량은 각각 0, 6.5, 2이다. 따라서, 9월 14일과 28일 사이의 온도차는 운량보다는 풍속에 기인한다고 추정된다. 14일과 26일 실험결과에 나타난 차이는 주로 운량차이 때문이라 추정할 수 있다.

9월 24일 실험결과를 제외하면, 풍속이 운량보다 복사냉각에 더 영향을 미친다고 가정할 수 있

Table 1 KMA weather data for Seoul⁽⁴⁾

time		Wind velocity (0.1 m/s)										
m	d	21	22	23	24	1	2	3	4	5	6	7
9	14	10	22	30	23	27	16	28	27	37	31	21
9	24	42	41	37	32	34	25	23	22	19	17	19
9	26	0	5	9	11	11	16	18	33	24	22	23
9	28	0	0	11	16	11	15	19	12	14	17	21
9	11	19	10	11	1	10	10	15	18	0	5	0
9	15	19	16	18	22	21	23	20	24	25	25	25
9	25	25	27	16	1	0	15	16	16	24	20	19
9	27	10	1	12	0	13	3	18	18	20	22	16
10	4	6	9	7	12	12	12	12	15	8	13	14
10	5	12	9	5	12	11	11	10	20	15	8	12

time		Cloud index (0-10)				Visibility (km)			
m	d	21	24	3	6	21	24	3	6
9	14	2	1	0	0	15	15	15	18
9	24	7	8	1	3	17	15	15	15
9	26	5	6	6	9	13	12	12	12
9	28	2	0	0	4	14	13	12	12
9	11	6	2	3	6	13	12	12	12
9	15	4	3	7	9	20	18	18	15
9	25	5	10	6	5	14	14	13	13
9	27	3	3	9	4	14	12	12	13
10	4	2	2	3	3	15	14	14	14
10	5	0	0	0	0	11	8	7	7

다. 이러한 가정이 타당함은 Fig. 2에 제시된 10시부터 12시 사이 실험결과에서도 볼 수 있다. 저녁 9시부터 12시사이의 평균풍속은 9월 14일, 26일, 28일의 경우 각각 2.1, 0.6, 0.7 m/s이다. 위 시간대에 평균운량은 각각 1.5, 5.5, 1.0이다. 따라서, 9월 14일과 28일 사이의 온도차는 운량보다는 풍속에 기인한다고 추정된다. 반면에 9월 26일과 28일의 온도차는 운량에 기인한다고 볼 수 있다. 또한, 12시부터 3시 사이의 데이터를 살펴 보아도 위의 가정이 타당함을 확인할 수 있다. 위 시간대의 평균풍속은 9월 14일, 26일, 28일의 경우 각각 2.2, 1.3, 1.4 m/s이며, 평균운량은 각각 0.5, 6.0, 0.0이다.

그림에서 짧은 주기의 온도 변동은 주로 풍속의 변화에 기인한다. 복사냉각효과가 있거나 풍속이 감소되면, 판의 온도는 공기의 온도보다 더 빠르게 감소한다. 이와 반대로 판의 온도가 대기

온도보다 느리게 감소하면, 복사냉각효과가 감소되었거나 풍속이 증가된 경우이다. 이러한 경향은 9월 28일 새벽 1시경의 데이터에서 추정할 수 있다. 이때 풍속은 느리고, 하늘은 맑았다.

예외가 있지만, 새벽 근처에 기온이 가장 낮으며 판의 온도 또한 가장 낮게 된다. 따라서, 새벽에 바람이 없고 맑아야 복사냉각으로 인한 판의 추가 냉각을 기대할 수 있다. 실험결과를 보면, 시정거리가 12 km이상인 경우, 시정거리는 복사냉각에 큰 영향을 미치지 못하는 것 같다.

Fig. 3에 Cokin 007필터로 만든 창이 복사냉각에 미치는 영향을 제시했다. 상대습도 3개의 주위 공기온도, 그리고 SC, SBW, LB 시스템의 온도가 나타나 있다. LB와 HK 온도는 거의 일치한다. KMA 값은 최대 1°C정도 HP 값보다 작다. Cokin 007 필터는 SB위에 장착되어 있다. SBW의 온도가 SC보다 높으므로, Cokin 필터는 복사냉각효과를 증진시키지 못하고 있다. 일반적으로 SB의 온도가 SC온도보다 낮고, 느린 풍속에서 차이가 크기 때문이다.

Fig. 3에서 10~12시, 새벽 0~3시, 새벽 3~4시, 그리고 새벽 4~6시 사이의 결과를 보자. 풍속은 12시, 3시, 5 시에 각각 0.1, 1.5, 0 m/s였다. 이 시간대 근방에서 온도의 기울기가 변화함을 볼 수 있다. 10~12시 사이에 운량은 2~6, RCTD는 KMA 값을 기준으로 약 0~1°C이다. 12~3시 사이에 운량은 2~3, RCTD는 약 2~3°C이고 3~4시 사이에 RCTD 약 0~1°C이다. 5~6시 사이에 RCTD는 약 2~3°C이고, 6시의 운량은 6이다. 풍속이 느릴수록 RCTD 값이 컸다.

Fig. 4는 유리창의 두께가 복사냉각에 미치는

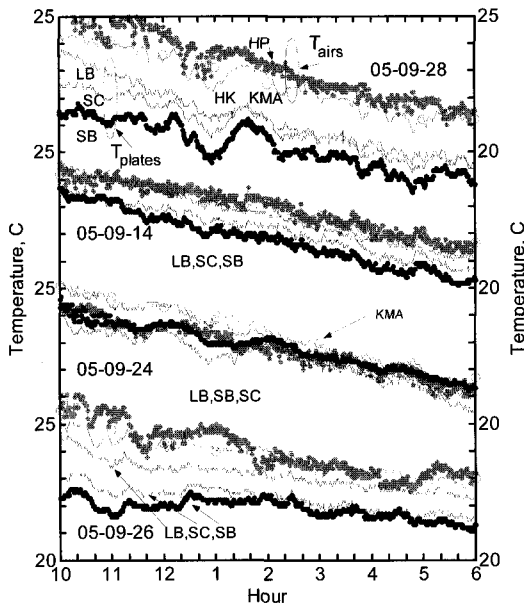


Fig. 2 RC results with no cover.

- (1) Upper 3 lines for air and lower 3 lines for plate T.
- (2) Air-HP: HP34970A, KMA: Korea Meteorological Administration, HK: Hioki Logger.
- (3) Plate-LB: Large system/Black plate, SC: Small/Al, SB: Small/Black.
- (4) 'LB, SB, SC': T in highest order from left to right.
- (5) '05-09-14': Year-Month-date

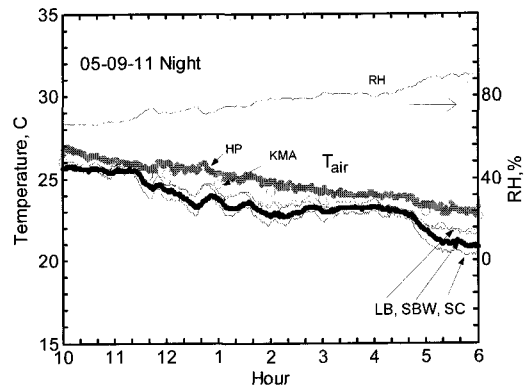


Fig. 3 Effects of COKIN 007 filter on RC.

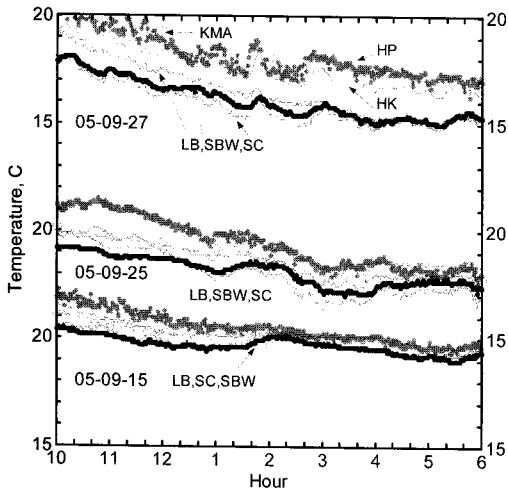


Fig. 4 Effects of glass covers on RC.

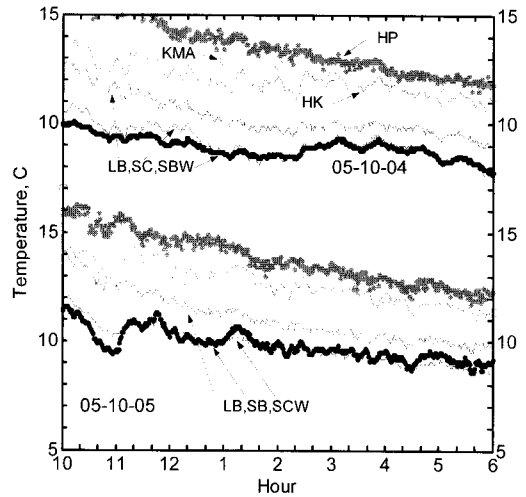


Fig. 5 Effect of PVC cover on RC.

영향에 대한 실험 결과이다. SB위에 장착한 유리창의 두께는 2, 1, 0.7 mm 세 종류이며, LB, SC, SBW로 표시된 세 결과가 제시되어 있다. 9월 15, 25, 27일에 각각 다른 두께의 유리가 사용되었으며, 두께는 각각 2, 1, 0.7 mm이다.

9월 15일의 경우, 12시 이전에만 복사냉각 효과가 있었다. Table 1을 보면, 12시 이후의 풍속 및 운량 값이 복사냉각에 호의적이지 못했음을 알 수 있다. Fig. 4에서 LB, SBW, SC는 LB라벨 바로위에 있는 세 온도그래프에서 온도가 제일 높은 경우가 LB이며, 제일 낮은 경우가 SC 임을 의미한다. 풍속이 느릴 때 복사냉각효과가 기대되며, 27일의 경우 12, 1시 그리고 25일의 경우 10, 1시 경이다. 이 시간대에서 RCTD 값의 차이는 유리 두께와 운량이 다르기 때문에 생기고 있다. 25일과 27일 12시의 운량은 각각 10과 3이다. 저 풍속에서 창은 대류에 의한 판의 가열을 방지하지 못하고 있는 것으로 추정된다.

유리창의 장점은 9월 15일과 25일 밤 10시부터 11사이의 데이터에서 볼 수 있다. SBW의 온도가 SC보다 낮기 때문이다. 풍속은 9월 27일의 경우보다 크다. SB와 SBW를 비교하는 실험이 필요하다. 25일과 27일의 12시부터 2시 사이의 데이터를 보면 SBW의 온도가 SC보다 높다. 따라서, 저속의 풍속에서는 창이 복사냉각에 도움이 되지못함을 추정할 수 있다. 이때 운량은 27일의 경우 맑음이었으며, 25일의 경우 조금 흐림과 흐림 사이였다. 창호가 복사 냉각에 도움이 되는 풍속

값의 범위를 찾을 필요가 있다. Fig. 4로부터 창호가 복사냉각에 도움이 되는 풍속의 범위는 1~2 m/s로 추정된다.

Fig. 5에는 PVC cover가 복사냉각에 미치는 영향이 비교되어 있다. PVC 필름의 두께는 13 μ m 이고 한 장만 창호로 사용되었다. 대기온도 KMA와 HP 값의 최대차는 KMA와 HK 값의 차이의 범위이다. 양일 모두 실험 기간 동안 최대 풍속은 1.5 m/s였고, 최대 운량은 3이었다. 특별히 10월 5일 밤은 육안으로 별들을 관측할 수 있을 정도로 맑은 날이었다. 그러나 12시가 지나서 시정 거리는 7km로 떨어졌다. KMA의 분류에 의하면 시정거리가 1km에서 7km사이를 이를 연무(mist, haze)로 분류한다.

10월 4일 10시부터 1시 사이에 SBW의 온도는 SC보다 낮다. PVC 필름 창이 유리 창보다 복사냉각에 유리한 것으로 추정된다. 그러나 이외의 시간에서 SBW와 SC의 온도는 거의 같다. 10월 5일 10시부터 11시 사이에 SCW의 온도는 SB보다 높다. 그러나 이후부터는 SCW의 온도가 SB와 거의 같거나 더 낮다. 온도구분을 적어 놓은 영역인 4시부터 6시 사이의 데이터에서 이를 확인 할 수 있다. 따라서, PVC 창호가 미약하나마, 복사냉각에 도움되었다고 추정할 수 있다. LB 온도는 SBW나 SC보다 적어도 1 $^{\circ}$ C이상 높았다.

10월 4일 밤 RCTD는 SC와 SBW 모두 3 $^{\circ}$ C 이상이다. 4일과 5일 밤 모두 상대 습도는 KMA

자료에 의하면 72%와 85% 사이 값을 가졌으며 동일한 시간에 상대습도차이는 4% 이하였다. Hioki 3641-20 로거로 실험위치에서 측정된 값은 4일의 경우 84.4와 94.1% 사이에, 5일의 경우 81.6과 97.4% 사이에 놓였다. 따라서 두 습도 측정 결과에 약 10% 정도의 차이가 있었다. 4일과 5일의 기상조건에서 가장 큰 차이는 시정거리이다. 5일의 실험 결과로부터 연무가 있는 경우에도 풍속과 운량이 조건을 만족하면 복사냉각이 가능하다고 추정할 수 있다. 물론 RCTD는 맑은 날 보다 감소한다.

4. 결 론

복사냉각시스템에 창호의 영향을 보기위해서 9월중 서울에 있는 건물 옥상 위에서 실험을 했다. 실험 결과에 대한 경향을 요약하면 다음과 같다.

(1) 공해와 광공해가 있는 서울에서 9월중 야간에도 복사냉각이 가능하다.

(2) 창호가 없는 경우 RCTD는 SB, SC, LB 순서로 크기가 크다.

(3) 복사냉각 시스템에 최적사이즈가 존재한다. 그 크기는 대략 L 보다는 작은 것으로 추정된다.

(4) 판의 온도는 풍속이 작을수록, 운량이 작을수록 낮다. 실험결과를 운량보다 풍속에 더 민감하게 변한다. 시정거리가 12 km 이상이면 복사냉각은 시정거리에 덜 민감하다.

(5) 창호재 중 Cokin 007필터나 0.7 mm보다 두꺼운 유리는 복사냉각을 증진하지 못하나, PVC 필름은 복사냉각에 도움이 되는 것 같다.

(6) 운량을 주변수로 사용하지 않으려면, 하늘로부터 오는 입사량⁽⁵⁾ 또는 하늘의 온도에 대한 자료가 필요하다.

(7) 대기 습도가 복사냉각에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하다. 상대습도는 창호가 없는 시스템이 도달할 수 있는 최저온도에 영향을 준다.

후 기

이 연구는 에너지관리공단의 에너지기술 학술진흥사업(2003-E-ID03-P-05-0-000-2003)에 의해 지원되었으며, 연구비 지원에 대해서 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. Byun, K. H., 2005, Nocturnal radiant cooling experiment by a plate viewing the sky, SAREK J., Vol. 17, No. 6, pp. 605-610, in Korean.
4. Korea meteorological administration, 2004, Weather information service, Seoul, Korea (www.kma.or.kr)
5. 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.