

겨울 야간 하늘에 노출된 평판에 의한 복사냉각 실험

변기홍*

*동국대학교 기계공학과(khbyun@dongguk.edu)

Nocturnal Radiant Cooling during the Winter by the Plate Viewing the Sky

Byun, Ki-Hong*

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

Abstract

The radiant cooling(RC) effects are studied during the winter night. The plate was viewing the nighttime sky. The data were collected at the rooftop of the Engineering building at the Dongguk University in Seoul, Korea. As observed during the summer night, the plate temperature was lower than ambient temperature under the RC favorable conditions. The parameters under study are the wind velocity, cloud index, and visibility for given system size and surface condition. The results follow the same tendency with these parameters as observed from the previous study for the summer night. As long as the wind velocity is less than around 2 m/s, the radiant cooling was observed with the system under study. In some cases, the radiant cooling temperature differences (RCTD) are higher than those for the summer night. The larger the RCTD as the wind velocity decreases and as the sky becomes clear.

Keywords : 복사냉각(Radiant cooling), 밤 하늘(Nighttime sky), 흑체판 (Black painted plate), 겨울(Winter), 풍속(Wind velocity), 운량(Cloud index)

기 호 설 명

h : 대류열전달계수 (W/m^2-K)
RCTD : 복사냉각온도차 ($^{\circ}C$)
RCTDF : 복사냉각온도차 상수($^{\circ}C$)
 T_{air} : 건구 대기 온도 ($^{\circ}C, K$)
 T_p, T_{sky} : 판과 하늘의 온도($^{\circ}C, K$)

ϵ : 면의 전방사율
 σ : Stefan Boltzmann 상수
 $5.67 \times 10^{-8} W/m^2-K^4$

1. 서 론

야간에 복사냉각(Radiant Cooling: RC)이

투고일자 : 2008년 8월 29일, 심사일자 : 2008년 9월 1일, 게재확정일자 : 2008년 10월 6일
교신저자 : 변기홍(khbyun@dongguk.edu)

발생하기에 적절한 조건이 존재한다면 지표면 위에 놓인 물체의 온도는 주위 온도보다 낮아 질 수 있다.^{1,2,3)} 변³⁾은 야간 하늘을 바라보는 평판에 의한 복사 냉각효과를 2004년 8월 서울에서 측정해서 발표했다. 본 논문에서도 사용된 복사냉각 실험 장치를 처음 설계 제작해서 실험을 했다. 흑색페인트를 스프레이한 합석판의 온도가 합석판 또는 합석판에 알루미늄필름을 부착한 판보다 낮았으며, 또한 대기온도보다 낮았다. 야간에 평판이 하늘과 평행하게 놓인 상태로, 직접 대기와 접촉하는 경우, 복사냉각에 의해 평판이 도달할 수 있는 최저온도는 이슬점 온도이며, 이를 복사냉각의 이슬점한계³⁾ 라고 불렀다. 변⁴⁾은 낮에 복사냉각을 이용해서 대기온도 또는 주위온도보다 낮은 온도를 얻을 수 있을 가능성에 대한 실험을 2005년 8월 및 9월에 수행했다. 일사량을 적절히 차폐하지 않는 한, 여름철 낮 동안 서울에서 복사 냉각의 가능성은 적었다. 그러나 며칠 정도 해질 무렵 부터는 가능함을 실험으로 보였다. 일사량이 있는 경우와 없는 경우에 대해, 판의 표면 성질, 시스템의 크기, 풍속, 그리고 운량의 영향을 고려했다.

이 연구의 목적은 서울에 있는 빌딩 옥상에서 겨울철 밤에도 여름철 밤의 경우와 마찬가지로 복사냉각(Radiant Cooling: RC) 효과에 의해서 대기온도 또는 주위온도 보다 더 낮은 온도를 얻을 수 있는지를 실험으로 확인하고 제 변수의 영향을 파악하는 것이다.

2. 실험장치

복사냉각효과를 측정하기 위해 사용된 시스템에 대한 개략도는 그림 1 과 같으며, 변³⁾에 의해 처음 제작되어, 변의 이전 연구^{3,4)}에서도 사용되었던 시스템과 동일하다. 그림 1 에는 앞 커버가 제거되어 있다. 대(L), 소(S) 두 가지의 시스템이 복사냉각 측정에 사용되

었다. S-시스템의 경우 나무 박스 안은 우레

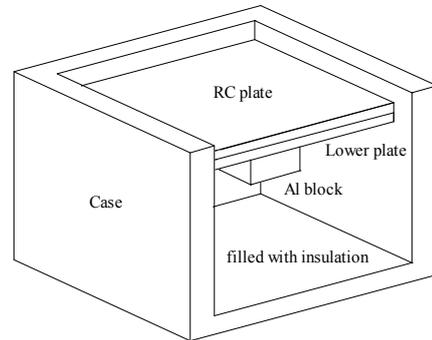


그림 1. Radiant cooling test system

탄 단열재로 채워졌으며, L-시스템의 경우 아크릴 박스 안이 스티로폼 단열재로 채워졌다. 단열재 위에는 두개의 얇은 판이 놓여 있다. S 시스템에 사용된 판의 기본 재질은 가로 세로가 각각 6.35 cm, 8.9 cm인 알루미늄 판이다. L 시스템에 사용된 판의 기본 재질은 합석판이며 가로와 세로가 S-시스템의 각각 두 배이다.

아래판의 윗면 중심에 k-type 열유속 게이지가 부착되어 있다. 아래판의 밑면 중심 하단에 정육면체 알루미늄 블록이 중심을 맞추어서 부착되어 있다. 블록 한변의 길이는 L 시스템의 경우 3.5cm 이고 S 시스템의 경우 2.5cm 이다. 블록의 목적은 복사냉각효과가 일정기간 지속가능한지를 점검하기 위함이다. 블록의 중심에 열전대가 부착되어 있다.

이 실험에서는, KRYLON 1618 BBQ 흑색페인트를 스프레이를 한 합석판과 표면 처리를 하지 않은 합석판이 사용됐다. 편의상 큰 시스템과 작은 시스템을 구분하기 위해 각각 L 과 S 를 사용했으며 윗판이 흑색판임을 나타내기 위해 약자 B를 사용했다. 예를 들어, LB는 큰 시스템에 흑색페인트 스프레이를 한 윗판을 사용한 경우이다. 자료수집에는 HP34970A 데이터 획득장치가 사용되었으며, RS232 시

리얼 케이블을 통해 PC 에 연결되었다. HP Bench Link Data Logger 소프트웨어를 사용해서 실험을 관리하고, 판의 온도 열유속 그리고 주위 공기의 온도 데이터를 저장했다. 이와는 별개로 주위 공기의 온도, 습도가 Hioki 3641-20 데이터 로거를 사용해서, 참고용 풍속 데이터는 Kestrel 4000 측정기를 사용해서 측정되었다. 실험 장소에서 반경 3.6km 내에 기상청(Korea Meteorological Administration) 서울 관측소가 있으며, 기상청 자료를 결과 해석에 참고 했다.⁵⁾

실험 장소는 동국대 공과대학 건물 옥상이다. 이 건물은 6층이지만 동산위에 세워져 있어서 실제 높이는 12층인 서울의 세종호텔과 대략 같다.

3. 해 석

복사냉각온도차 (RCTD) 는 주위온도 T_{air} 에서 판의 온도 T_p 를 감한 값으로 정의했다.

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

복사냉각이 있는 경우에 대한 부등식은

$$\epsilon\sigma(T_p^4 - T_{sky}^4) > h(T_{air} - T_p) \quad (2)$$

이며 ϵ, σ, h 는 각각 판의 전방사율, 스테판 볼츠만 상수, 그리고 대류열전달계수이다. 이 식을 정리하면 RCTD 의 최대 크기를 복사냉각 온도차 상수(RCTDF: Radiant Cooling Temperature Difference Factor)를 사용해서 표시할 수 있다.

$$RCTD \leq RCTDF(T_{air} - T_{sky}) \quad (3)$$

$$RCTDF = \max\left[\frac{x}{1+x}\right]$$

$$x = \frac{\epsilon\sigma(T_p^2 + T_{sky}^2)(T_p + T_{sky})}{h}$$

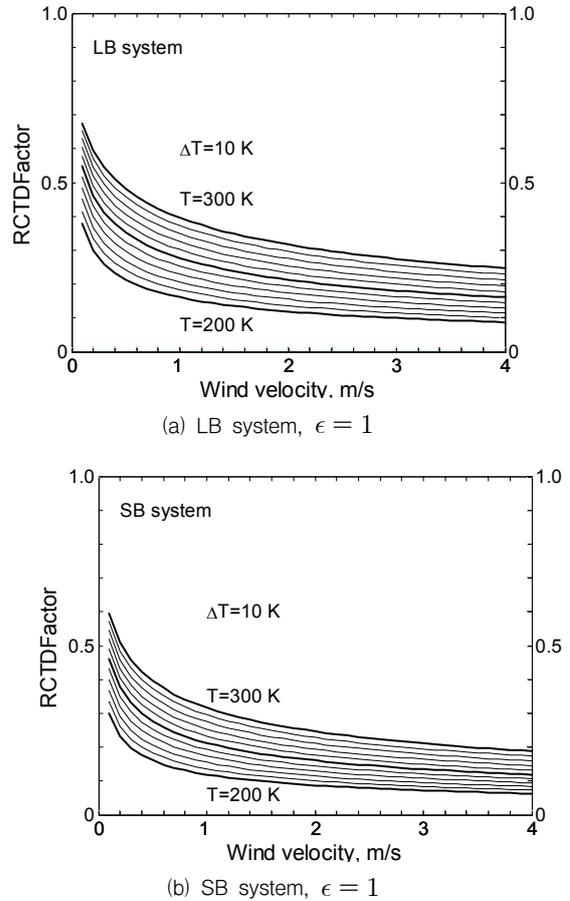


그림 2. Radiant Cooling Temperature Difference Factor

RCTDF 는 판의 전방사율, 풍속, 판의 크기, 온도의 함수이다. RCTDF 의 하한 및 상한 추정치는 그림 2와 같은 그래프를 사용해서 구할 수 있다. 이 논문에서 사용된 LB 및 SB 시스템에 대한 RCTDF 값은 각각 그림 2(a), (b) 이며, 윗판을 흑체로 가정한 경우에 대한 결과이다.

온도가 일정한 경우 풍속이 증가하면 RCTDF 값은 감소하고 있다. 풍속의 변화량에 대한 RCTDF 값의 변화량은 고속에서 보다 저속

에서 더 크다. 일정한 풍속에서 판의 온도가 낮을수록 RCTDF 값의 크기가 감소한다. 일정한 풍속에서 온도의 변화에 대한 RCTDF 값의 변화량은 LB 시스템의 경우가 SB 시스템에 비해서 크다.

주어진 기상조건에서 복사냉각시스템이 도달할 수 있는 복사냉각 2차 한계를 RCTDF를 사용해서 추정할 수 있다. 일정한 풍속에서, RCTDF 값은 T_p 와 T_{sky} 값을 사용해서 그림2에서 읽은 RCTDF 값 사이에 위치한다고 추정된다. (단, $T_p \geq T_{sky}$) 예를 들어 하늘의 온도가 270K 이고 대기 온도가 290K 이고 판의 온도를 약 285K 로 추정한다면, 풍속 2m/s에서 LB의 경우 RCTDF의 하한 및 상한은 대략 0.25에서 0.3 사이가 된다. 만일 RCTDF의 하한값을 사용해서 RCTD를 추정하면 $RCTD < 0.25 * (290 - 270) = 5K$ 이며, SB의 경우 4K 보다 작게 된다. 이때 만일 하늘의 온도가 250K 이면, LB의 경우는 8K, SB의 경우 6K 정도로 예측 된다.

4. 결과 및 고찰

2004년 및 2005년 하절기와, 2008년 1월14일부터 2월14일 까지 동국대학교 서울 캠퍼스의 공대 옥상에서 행한 실험에 대한 기상조건을 부록의 표1에 수록했다.

그림 3-5에는 각각 맑은 날, 부분적으로 흐린날, 그리고 흐린날 야간에 LB 시스템을 사용해서 측정된 복사냉각온도차(RCTD)가 제시되어 있어서 전운량의 영향을 비교해 볼 수 있다. 전운량은 강수와 관련이 없는 구름이 하늘을 뒤덮은 정도를 나타내며 0~10 사이의 정수값을 갖는다. 맑은날이면 (0~2), 구름이 1/4 정도 하늘을 덮고 있으면 (3~5), 반쯤 덮고 있으면 (6~7), 3/4 이상 덮고 있으면 (8~10)이다. 운량은 기상관측관이 매 3시간마다 하늘을 육안으로 관찰해서 작성한 값이며, 관측자에 따른 차이가 있을 수 있다.⁵⁾

그림 3에는 맑은날 하절기 및 동절기 야간에 측정된 복사냉각 온도차가 비교되어 있

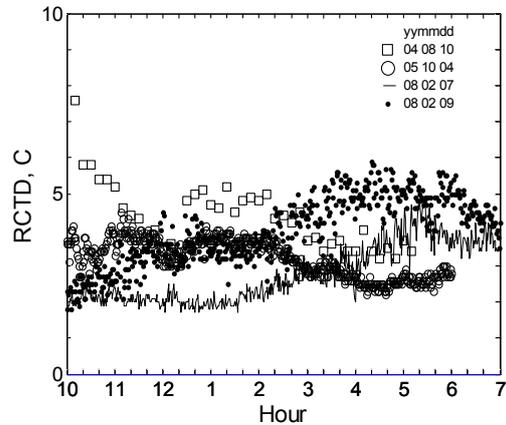


그림 3. Summer and winter clear night RCTD (LB)

으며 사용된 냉각판은 LB이다. 2004년과 2005년의 경우는 하절기 실험데이터이고 2008년의 경우는 동절기 데이터이다. 2004년도 실험데이터는 10분 간격으로 측정되었으며, 이외의 데이터는 모두 1분 간격으로 측정되었다. 수평축은 저녁 10시부터 새벽 7시까지 시간이며, 수직축은 RCTD이고 단위는 °C이다. 건구 대기온도는 측정 장치의 윗판 근처에서 J type 열전대로 측정된 온도를 기준으로 했다. 그림 3에서 복사 냉각이 관찰된 4일은 모두 야간에 운량이 3 이하인 맑은 날이었으며, 풍속은 2.8m/s 이하였다. 동절기 야간에 측정된 복사냉각의 크기는 하절기와 비슷한 크기임을 볼 수 있다. 새벽 (3, 4, 5, 6)시의 풍속은 2008년 2월 9일의 경우 (1.0, 1.8, 3.0, 1.5)m/s 이고 2008년 2월 7일의 경우 (1.5, 0.8, 0.7, 1.9)m/s이다. 2004년 8월10일의 경우 (1.8, 2.4, 2.1, 2.5)m/s 이고, 2005년 10월4일의 경우 (1.2, 1.5, 0.8, 1.3)m/s이다.

그림 4는 그림 3의 조건에 비해 운량이 증가한 경우이다. 측정시스템은 LB이며 그림 3과 동일하나, RCTD의 크기는 그림 3에 비해 약 1~2°C 정도 작은 것을 관찰할

수 있다. 2005년 10월 4일과 2008년 1월 25일 데이터를 비교해 보면 운량은 거의 비슷하

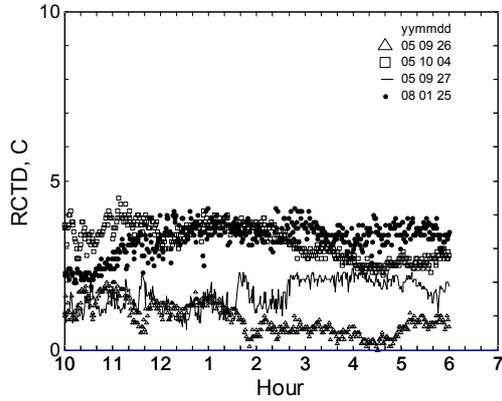


그림 4. Summer and Winter partly cloudy night RCTD (LB)

건에서 측정된 RCTD 값은 비슷했다.

그림 5 에는 흐린날의 야간 복사 냉각효과

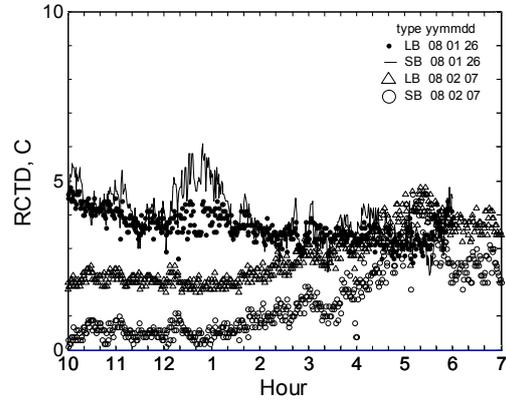


그림 6. Winter clear night RCTD (LB vs SB)

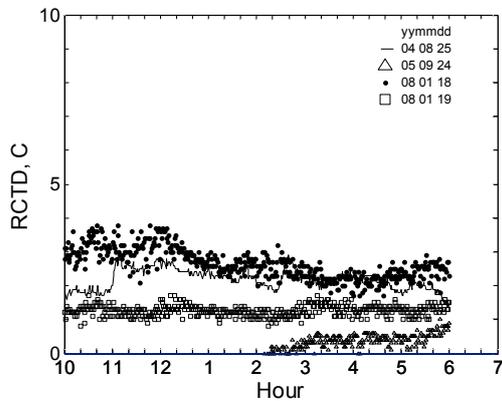


그림 5. Summer and Winter cloudy night RCTD (LB)

나. 새벽 (3, 4, 5, 6)시의 풍속이 1월의 경우 (0.3, 0.0, 0.2, 0.5)m/s 이고 10월의 경우 (1.2, 1.5, 0.8, 1.3)m/s 여서, 풍속이 작은 1월에는 RCTD의 값이 약 1℃ 정도 컸다. 2005년 9월 26일 및 27일 새벽 (5, 6)시의 풍속은 각각 (2.4, 2.2)m/s 와 (2.0, 2.2)m/s 이다. 따라서, 풍속의 크기가 약 2m/s 이상에서 비슷한 경우 (그림 2 참조), RCTD 차이는 운량차이에서 기인했다고 추정할 수 있다. 하절기 동절기 관계없이 대체로 비슷한 풍속 및 운량 조

가 하절기와 동절기에서 비교되어 있다. 측정시스템은 LB이다. 9월24일을 제외하면, 12시 이후의 운량은 8~10이다. 그림 3 및 그림 4 와 결과를 비교해보면 RCTD 의 크기가 가장 작다. 그림 5 에서 동절기 하절기 모두 최대 약 3℃ 정도의 복사냉각효과를 관찰할 수 있다. 그러나 풍속이 2m/s 이상이 되면 복사냉각효과를 무시할 수 있음을 2005년 9월24일 실험결과로부터 볼 수 있다. 이날 새벽은 맑았고 풍속은 초저녁보다 많이 감소했다. 따라서, 하절기 야간에 대한 연구결과³⁾와 마찬가지로, 동절기에도 흐리고 풍속이 2m/s 이상이 되면 복사냉각효과를 거의 관찰할 수 없었다. 흐린날에도 풍속이 약 2m/s 이하이면, RCTD 의 크기는 맑은날에 비해 작지만 복사냉각효과를 관찰할 수 있다. 그림 6 에는 풍속이 LB 및 SB 시스템에 미치는 영향을 비교해 보았다. 실험이 행해진 2일 모두 운량이 0인 맑은 날이나, 풍속 조건이 다르다. 1월26일의 평균 풍속은 0.8m/s 이고 2월7일의 평균 풍속은 2.0m/s 이다. 동일한 날, LB 및 SB 시스템에 대한 결과가 서로 비교되어 있다. 1월26일LB 및 SB 시스템에 대한 RCTD의 크기는 대체로 일치한다.

SB에 대한 RCTD가 LB 보다 큰 경우를 12~1시 사이의 결과에서 볼 수 있으며, 이때 (11, 12, 1)시의 풍속은 (0.5, 0.1, 0.9)m/s

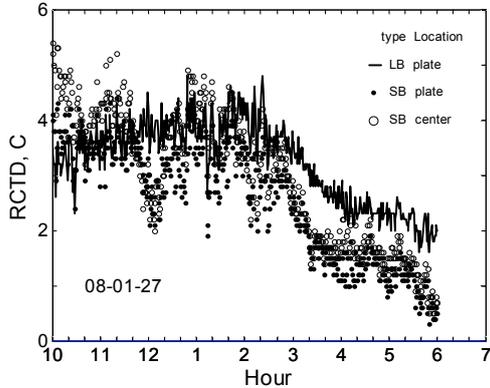


그림 7. System response comparison (LB vs SB)

이다. 그러나 2월 7일의 초저녁부터 새벽 2시까지의 풍속은 2m/s 를 넘어서, SB의 경우 복사냉각효과가 거의 없음을 관찰 할 수 있다. 이날 (10, 11, 12, 1, 2)시 풍속은 (2.8, 2.5, 2.8, 2.5, 1.9)m/s 이다. 그러나 이날 (4, 5, 6)시 풍속은 (0.8, 0.7, 1.9)m/s 로 작아졌으며, 이때 LB, SB 의 결과는 거의 일치하고 있었다. 또한 1월26일 (4, 5, 6)시 사이의 풍속은 (0.8, 0.8, 1.8)m/s 여서 2월7일의 동일시간대의 풍속과 거의 일치하므로, 그림 6에서 4개의 결과가 거의 일치하고 있다.

그림 7 에서 운량 변화가 SB 및 LB 시스템에 미치는 영향을 비교해 보았다. 1월27일은 12시와 3시 사이에 운량이 맑음(2)에서 흐림(9) 으로 크게 변했다. LB, SB 시스템의 윗판 표면 온도와 SB 블록의 중심온도가 그림 7 에 제시되어 있다. 10~11시 사이 데이터를 보면, SB 시스템의 경우 풍속이 작아서 복사냉각이 지속적으로 진행되었으며, 따라서 블록 중심의 온도가 표면온도 보다 낮았다. 11~1시 사이에 풍속이 증가되고 운량 또한 증가되어, LB 시스템 보다 SB 시스템이 복사냉각효과를 빨리 상실해서 표면과 중

심의 온도가 같아져 있다. SB 시스템이 LB 시스템에 비해 운량 변화에 민감해서 복사냉각 온도차가 급격하게 감소하고 있음을 3시경 데이터에서 확인할 수 있다. 그림 6과 그림 7을 비교해보면 풍속이 복사냉각에 미치는 영향이 운량보다 상대적으로 크다. 3시~6시 사이에 운량 조건은 변화가 없으나, 풍속이 증가해서 LB, SB 모두 RCTD 값이 감소하고 있다. SB의 경우 LB에 비해 상대적으로 RCTD 값이 더 빨리 감소하고 있다. SB의 경우 빠른 풍속에서는 표면과 블록 중심의 온도차가 거의 없다.

5. 결 론

서울에 있는 빌딩 옥상에서 동절기 야간에도 하절기 야간에서처럼 복사냉각(Radiant Cooling: RC) 효과에 의해서 대기온도 또는 주위온도 보다 낮은 온도를 얻을 수 있는지를 실험으로 확인하려했으며 측정 결과가 보이는 경향을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 동절기 야간에도 하절기 야간에서처럼 서울지역에서도 복사냉각이 가능하다.
- (2) 풍속이 2m/s 이하인 경우에는 대체로 복사냉각이 관찰되고 있다.
- (3) 복사냉각의 크기는 풍속이 작을 수록, 맑은 날 일수록 크다.
- (4) 풍속이 작으면 SB 및 LB 시스템에 대한 복사냉각실험 결과가 거의 일치하거나, SB 시스템의 복사냉각효과가 상대적으로 더 크다. 그러나 풍속이 2m/s 를 넘으면, SB 시스템의 복사냉각 효과는 LB 시스템보다 작거나 거의 없다.
- (5) 운량을 주 변수로 사용하지 않으려면, 하늘로부터 지상으로 오는 입사량 측정치⁶⁾ 또는 하늘의 온도에 대한 자료가 필요하다.

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, 제6호, pp. 605~610, 2005.
4. 변기홍, 주간 하늘에 노출된 평판에 의한 복사냉각 실험, 한국태양에너지학회 논문집, 제27권, 제 4호, pp. 11~17, 2007.
5. Korea Meteorological Administration, Weather Information Service, Seoul, Korea (www.kma.or.kr), 2004, 2005, 2008.
6. 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.

(b) Cloud index and visibility

time yy mmdd	Cloud index (0-10)				Visibility (km)			
	21	24	3	6	21	24	3	6
04 08 10	1	0	0	0	11	11	10	8
04 08 25	10	10	1	10	15	12	12	10
05 09 24	7	8	1	3	17	15	15	15
05 09 26	5	6	6	9	13	12	12	12
05 09 27	3	3	0	4	14	12	12	13
05 10 04	2	2	3	3	15	14	14	14
08 01 18	5	10	9	9	15	15	15	15
08 01 19	8	8	8	9	13	13	13	12
08 01 25	3	2	3	2	14	13	13	12
08 01 26	0	0	0	0	15	15	15	14
08 01 27	1	2	9	9	15	15	15	15
08 02 07	0	0	0	0	15	15	15	15
08 02 09	0	0	0	2	12	12	11	11

부 록

표 1. 서울지역 야간 기상자료⁵⁾
(a) Wind velocity

time yy mmdd	Wind velocity (0.1m/s)										
	21	22	23	24	1	2	3	4	5	6	7
04 08 10		12	14	15	19	22	18	24	21	25	
04 08 25		24	27	0	14	17	21	12	12	16	
05 09 24		41	37	32	34	25	23	22	19	17	19
05 09 26		5	9	11	11	16	18	33	24	22	23
05 09 27		1	12	0	13	3	18	18	20	22	16
05 10 04		9	7	12	12	12	12	15	8	13	14
08 01 18	12	8	8	23	22	11	17	19	15	17	23
08 01 19	6	19	9	15	24	18	11	12	7	9	10
08 01 25	8	21	24	10	10	10	3	0	2	5	7
08 01 26	5	12	5	1	9	0	6	8	8	18	18
08 01 27	5	6	6	9	7	2	6	17	13	11	11
08 02 07	25	28	25	28	25	19	15	8	7	19	18
08 02 09	33	19	6	15	19	15	10	18	3	15	18