

# 솔라시뮬레이터의 램프뱅크 설계에 관한 연구

백 상 화\*

국방과학연구소 종합시험단

## A STUDY ON LAMP BANK DESIGN OF SOLAR SIMULATOR

S.H. Baek\*

Defence Systems Test Center, Agency for defence development

*This paper is a study on the design of the solar lamp bank which is a very important part of the solar simulator with the commercial metal halide lamps and infrared lamps. Lamp Bank is designed by the lamp bank design program based on point light source theory. The reliability of the program for lamp bank design is verified through irradiance variation experiments of a kind of lamp according to horizontal distance. Solar lamp bank facilitates heat distribution and satisfies the irradiance in the three wave length which test guidelines require. The shape of the ceiling board next to the lamp bank to promote the lamp cooling efficiency and to reduce temperature deviation and air velocity deviation in the chamber is so creative. The ceiling board of partial closed type is the best among several types.*

**Key Words :** 점광원조명이론(Point Light Source Theory), 태양열복사시험기(Solar Simulator), 복사조도(Irradiance), 램프뱅크(Lamp Bank), 천장면(Ceiling Board), 부분폐쇄형(Partial Closed Type)

### 1. 머리말

솔라 램프뱅크는 솔라시뮬레이터, 즉 태양열복사시험기의 성능을 결정하는 핵심부분으로서 모사된(simulated) 태양 빛을 방사하는 장치이다. 이러한 장치로 수행하게 되는 환경시험은 실제 자연환경 하에서의 피시험체의 운용능력을 예측하고 지리적 난점으로 인하여 경험하지 못하는 극한 자연환경을 모사함으로써 피시험체에 대한 환경적응능력을 단기간에 간접적으로 평가하는데 주목적이 있기 때문에 시뮬레이터에 적용하는 모사 빛은 자연광에 가능한 흡사해야한다. 이번 연구를 통해 설계된 솔라 램프뱅크는 태양열복사시험 지침[1]에서 요구하는 하절기 일일 최대복사조도를 매우 안정적으로 모사할 수 있다.

기존 자동차, 공조분야 산업체의 램프뱅크는 적외선램프만

을 적용하고 있으며 시스템 측면에서 다소 차이는 있지만, 색바램(fading) 현상을 확인하는 대다수 의류시험기관에서는 단일 자외선램프를 사용하고 있다. 이러한 램프들은 전량 독일, 미국 및 일본에서 수입하고 있는 실정이며 단일 종류의 램프를 적용하고 있기 때문에 램프뱅크 설계에 대한 특별한 국내 기술이 없는 실정이다. 또한 태양 빛이 갖는 과장영역별(자외선, 가시광선, 적외선) 복사에너지중 적외선만 또는 자외선만을 램프뱅크에 적용하고 있기 때문에 완전한 솔라 램프뱅크라 말 할 수 없다.

미국과 같은 선진국에서도 아크제는 램프와 같이 자연광에 흡사한 단일종의 특수램프를 제작하여 램프뱅크에 적용하고 있기 때문에 램프뱅크 설계에 대한 필요성을 절감하지 못하고 있고 이러한 아크제는 램프뱅크는 복사조도를 일정하게 방사하는 안정성은 좋으나 조사면적이 제한되어 있고 복사조도의 재현성과 가격 면에서 문제점을 갖고 있다. 이러한 문제점 때문에 국내 자동차, 공조업체에서는 불완전한 적외선 램프뱅크를 사용하고 있는 것이다. 이번 연구를 통해 설계된 램프뱅크의 조합방식은 점광원 복사조도 이론[2][3]을 적용하여 램프의 위치와 복사조도값, 전체 램프뱅크 복사조도값, 조사면적의 복사조도값의 균일성을 예측한 후 램프뱅크를 설계하였다.

Received: April 23, 2012, Revised: August 17, 2012,

Accepted: August 20, 2012.

\* E-mail: backsan@add.re.kr

DOI http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2012.17.3.045

© KSCFE 2012

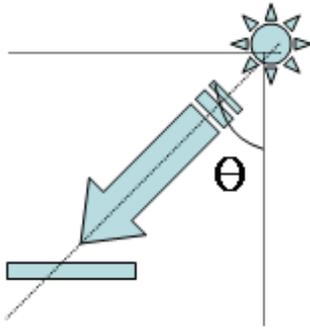


Fig. 1 Incidence angle between light(lamp) and target area

## 2. 이론해석

점광원 조명이론식은 다음과 같다.

$$E = (I/P^2)\cos\theta \tag{1}$$

램프뱅크 중심에서 거리가 멀어질 때 조사면적의 복사조도 값은 점광원 조명계산식에 따른다. 이 식에서 I는 램프의 특성을 나타내는 광도이며, P는 램프와 조사면적(target area) 사이의 거리이다.  $\theta$ 는 램프 빛의 입사각이다.

태양이 하루 중 고도가 가장 높을 때 가장 뜨겁고 고도가 낮은 아침이나 오후 늦은 시간에 가장 서늘하다. Fig. 1과 같이 램프가 비추는 각도에 따라서 조사면적의 복사조도가 결정된다. 램프뱅크를 설계하는데 있어서 평면과 입체면을 모두 고려하도록 하였다. 필요에 따라서는 램프뱅크가 평판형태가 아닌 중심이 위쪽으로 올라간 반구형태가 될 수도 있으므로 3차원 공간상의 램프의 위치는 직각좌표계에서 타원형 입체면(ellipsoid)상에 위치하도록 계산하였다. 타원형 입체면상의 한 점은 직각좌표계에서 다음 식으로 표현된다.

$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} + \frac{(z-z_0)^2}{c^2} = 1 \tag{2}$$

직각좌표계에서 램프뱅크를 타원형 입체면상에 배열하기 위해서는 두 가지 제약조건이 있는데, 첫 번째로 중심좌표는 (0, 0, 0)이며  $a=b$ 이면 뱅크의 단면이 원이며  $c=H_0$ 라 두면 램프뱅크의 중심좌표는 (0, 0, z1), 즉 z축이 램프뱅크의 중심을 지난다. 여기서  $H_0$ 는 피시험체의 중심과 램프뱅크의 중심과의 거리이다. 두 번째로 피시험체의 중심좌표는 (0, 0, z2), 즉  $H_0=z1-z2$ 이다. 식(2)에서 초기조건  $x_0 = y_0 = z_0 = 0$ ,  $a = b$ ,  $c = H_0$ 을 적용하면 다음과 같이 z좌표값을 계산할 수 있다.

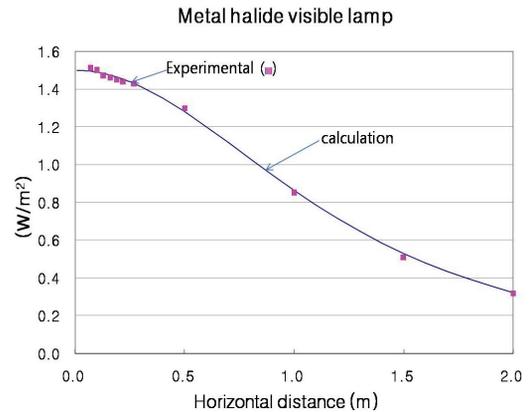


Fig. 2. Relation between metal halide lamp irradiance and horizontal distance

$$z = c\sqrt{1 - \frac{(x^2 + y^2)}{b^2}} \tag{3}$$

## 3. 실험방법 및 신뢰성 검증결과

### 3.1. 실험장치 및 방법

일사계와 조명도계를 조사면적(target area)중심에 위치하고 수직방향으로 상부 1.5 m 위치에 램프뱅크를 설치 후, 램프뱅크에 장착된 메탈할라이드 램프와 적외선램프를 중심에서 10~20 cm단위로 최대 200 cm까지 수평방향으로 상하 좌우 이동할 때 일사계에서 측정되는 복사조도를 측정한다. 거리이동에 따른 복사조도값을 확인할 수 있다. 램프에서 방사되는 빛들끼리의 중첩과 상쇄효과는 실험을 통하여 확인하는 것은 어렵다. 각 램프가 갖는 특성과 시험조 벽면에서 반사되는 빛, 온도조절을 위해 히터에서 방열되는 열, 램프소켓 베이스(base)의 형태 등, 여러 가지 이유 때문에 중첩과 상쇄에 대한 원인인자를 찾는 것은 어려우며 단일 램프에 대한 특성을 파악한 후 설계예측 프로그램에서 계산된 값과 비교를 하였다.

### 3.2. 모델링 검증

Fig. 2는 메탈할라이드램프(가시광선, 50 W)에 대한 수평거리와 복사조도에 대한 상관관계를 보여준다. 램프와 조사면적의 거리를 3 m로 둔 상태에서 조사면적을 중심으로 램프가 좌우로 이동할 때 거리, 즉 수평거리 이동에 따라 복사조도값이 1.5~0.3 W/m<sup>2</sup>범위로 감소함을 볼 수 있다. 예측된 값과 실제 실험한 값이 정확히 일치함을 알 수 있다.

Fig. 3은 일반상용 적외선램프(300 W)에 대한 수평거리와 복사조도에 대한 비교를 보여준다. 수평거리 이동에 따라 복

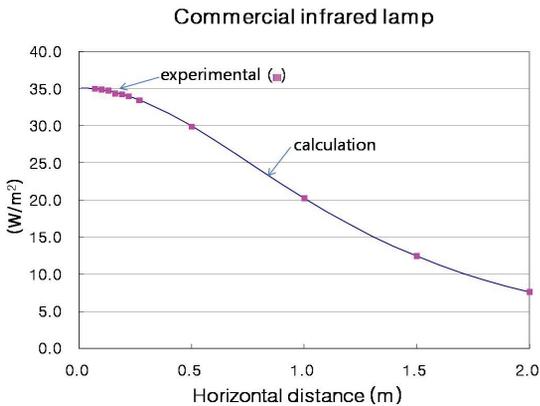


Fig. 3 Relation between infrared lamp irradiance and horizontal distance

사조도값이 35~8 W/m<sup>2</sup>범위로 감소함을 볼 수 있다. 예측된 값과 실제 실험한 값이 정확히 일치함을 알 수 있다.

#### 4. 결과의 해석 및 고찰

기존 솔라 램프뱅크[4]에서는 할로겐 램프에 의한 과열로 램프뱅크에 장착된 램프들이 시험 중에 소등되는 현상이 발생했고, 그 원인은 다음 세 가지로 요약할 수 있다. 첫째로 국내외 상용 할로겐방식 램프들은 시험지침에서 요구하는 400~780 nm 파장영역에서 일정거리에서 조사면적에 560 W/m<sup>2</sup> 복사조도를 낼 수 있어야 하고 780~3,000 nm 파장영역에서는 492 W/m<sup>2</sup>의 복사조도를 낼 수 있어야하나, 실제 대부분의 할로겐방식 램프들은 적외선의 복사에너지가 가시광선의 복사에너지보다 5~15배 이상 많다. 따라서 적외선필터를 장착하여 적외선파장영역의 에너지를 감소(필터링)시켜주어야 하나 필터링(흡수 또는 투과)된 적외선파장 영역의 복사에너지는 시험조 내부에서 순환되면서 다시 램프의 표면온도를 상승시키는 효과를 가함으로써 램프소등의 원인으로 작용을 하였다. 필터링된 에너지를 냉각하기 위해서 더 많은 용량의 냉동기를 설치해야하는 단점도 발생했다. 두 번째로 램프뱅크에 장착되는 램프들의 배열상의 문제점이다. 적외선램프와 가시광선램프, 자외선램프 등을 어떤 방식으로 조합을 하느냐에 따라 램프수명이 길어질 수도 짧아 질 수도 있다. 적외선램프들을 중앙에 집중하는 방식과 가시광선램프와 조합하는 방식, 적외선램프를 램프뱅크 가장자리에 배치하는 방식 등 여러 형태의 배열을 고려할 수 있는데 기존 솔라 램프뱅크는 적외선을 중앙에 집중하는 방식을 택하였고 이것은 복사에너지가 램프뱅크 중앙에 집중되는 결과를 초래하여 램프의 소등의 원인으로

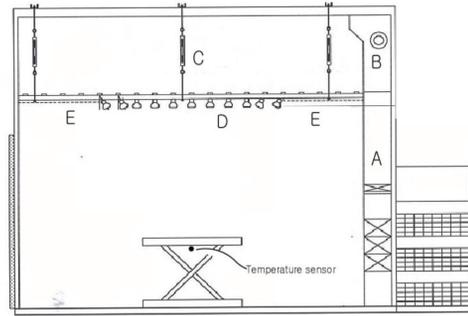


Fig 4. Side picture of Solar simulator

작용을 하였다. 따라서 이번에 개발한 램프뱅크는 최대한 램프의 소등을 줄이고 파장영역별 복사조도를 시험지침의 요구를 만족할 수 있도록 설계하였다. 마지막으로 램프 소등의 원인은 램프뱅크가 설치되는 않는 시험조 천정의 나머지 공간부분의 비활용으로 볼 수 있다. 공기조화기에서 냉각되어져 나오는 공조공기는 램프들을 냉각시키는 효과를 갖는다. 그러나 기존의 램프뱅크가 설치되어 있는 천정은 램프뱅크를 포함하지 않는 공간을 개방형으로 만들어 놓아 냉각된 공기가 램프 쪽으로 집중적으로 부딪히도록 하지 못했다. 냉각된 공기를 램프쪽으로 집중해서 보낼 수 있다면 램프의 열을 냉각시킬 수 있어 램프의 수명을 연장할 수 있다. 이번에 개발한 램프뱅크는 램프가 장착되지 않는 공간을 부분폐쇄(타공판) 형태로 설계함으로써 공조기의 냉각공기가 램프 쪽으로 집중해서 송출될 수 있도록 하였다. 이때 송출되는 공기의 유속이 지침에서 요구하는 범위를 넘지 않도록 최적의 부분폐쇄 형태(타공판의 타공지름-실험)를 찾아내야한다.

Fig. 4에서 공조된 공기는 A(증발관, 히터)에서 B(fan)로, 다시 B에서 시험조의 천장인 C로 흐르고, C에서 램프뱅크인 D나 램프뱅크 주위 E(ceiling board)를 통과한다. E부분을 부분폐쇄(타공판) 형태로 함으로써 공조기의 냉각공기가 램프뱅크 쪽으로 집중할 수 있도록 설계를 하였다. 램프뱅크 주위 천장면의 설계는 램프의 냉각효율과 온도 안정화를 고려하여 이루어졌다. 온도센서는 복사조도의 영향을 받지 않기 위해서 시험테이블 아래에 설치되어 있다. 시험조내부의 온도분포가 균일해야한다.

#### 4.1 램프뱅크 램프배열 설계

Fig. 4의 D부분이 램프뱅크이다. 램프뱅크를 설계하기 위해서 선행되어야하는 것은 램프뱅크에 장착할 램프선정이다. 자외선, 가시광선, 적외선이 각 파장영역에서 시험지침이 요구하는 복사조도값을 만족하여야한다. 요구값은 아래 Table 1과 같다.

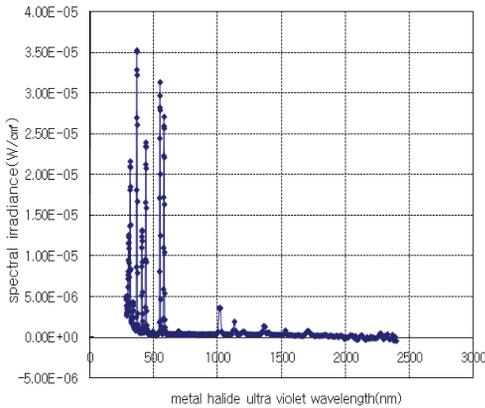


Fig. 5 Spectral irradiance of metal halide ultraviolet lamp(150 W)

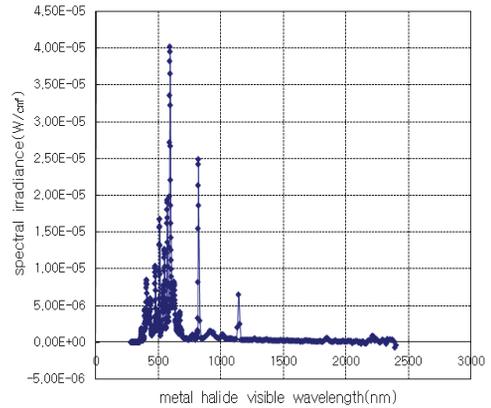


Fig. 6 Spectral irradiance of metal halide visible lamp(150 W)

표에서 보듯이 최대 복사조도값(1,120 W/m<sup>2</sup>)에서 자외선이 차지하는 비중은 6.1%, 가시광선이 차지하는 비중은 50%, 적외선은 43.9% 차지한다. 상용램프에서 지침에서 요구하는 자외선, 가시광선 및 적외선의 복사조도값을 만족시키는 램프는 없다. 따라서 Table 1을 고려하여 자외선 램프, 가시광선 램프 및 적외선을 선정하여야한다. 선정된 각 램프의 복사조도 그래프는 Fig. 5 ~ Fig.7과 같다.

메탈할라이드 가시광선 램프는 high density lamp로서 가시광선영역의 복사에너지가 적외선영역 복사에너지보다 상대적으로 많다. 기존 할로겐램프는 적외선영역의 복사에너지가 가시광선보다 상대적으로 많아 필터링기술을 이용하여 적외선에너지를 감소시켰으나, 필터링된 적외선에너지가 다시 램프표면의 온도를 상승시키는 역효과를 가져옴으로써 램프수명을 짧게 하는데 큰 요인으로 작용을 했다. 그러나 이번에 개발한 램프뱅크에는 메탈할라이드 가시광선 램프를 사용함으로써 램프뱅크의 열 발생을 현저히 낮추었다.

4.1.1 적외선램프(60 W) 집중방식 램프뱅크 설계

점광원 조명이론식 (1)을 이용하여 계산하면 Fig. 8의 램프뱅크는 자외선은 75.26 W/m<sup>2</sup>, 가시광선은 594.9 W/m<sup>2</sup>, 적외선은 556.9 W/m<sup>2</sup>로 Table 1의 요구조건을 만족한다. 그러나 이 방식은 램프뱅크에 비활용 공간이 발생하여 램프의 냉각효과를 떨어뜨리는 단점을 갖고 있다. 또한 적외선 램프와 가시광선 램프가 중앙에 집중하고 있어 열분산이 곤란하다. 이 방식

Table 1 Spectral energy distribution and permitted tolerance

Characteristic	Spectral Region			Sum
	Ultraviolet	Visible	Infrared	
Bandwidth(nm)	280 ~ 400	400 ~ 780	780 ~ 3,000	280 ~ 3,000
Irradiance(W/m <sup>2</sup> )	68	560	492	1,120
Tolerance	±35 %	±10 %	±20 %	±10 %

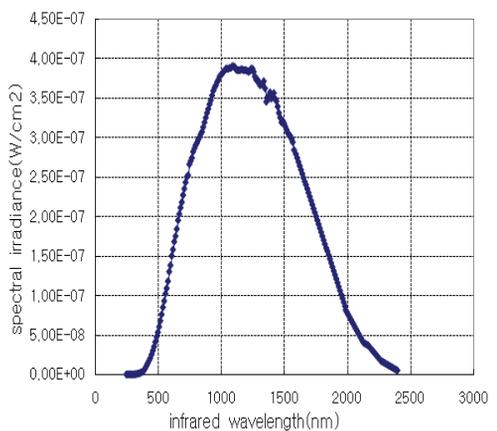


Fig. 7 Spectral irradiance of infrared lamp(40 W)

에서는 자외선 램프 12개, 가시광선 램프 32개, 적외선 램프 12개가 소요된다. 요약하면 다음 Table 2와 같다.

4.1.2 적외선램프(25 W) 집중방식 램프뱅크 설계

Fig. 9의 자외선은 84.37 W/m<sup>2</sup>, 가시광선은 623.7 W/m<sup>2</sup>, 적외선은 598.6 W/m<sup>2</sup>로 Table 1의 요구조건을 만족한다. 그러나 이 방식은 램프뱅크에 비활용 공간이 적다는 장점은 있으나

Table 2 Irradiance value of infrared lamp(60 W) concentration method

Sector	Spectral irradiance (W/m <sup>2</sup> )			Sum
	Ultraviolet	Visible	Infrared	
Guideline value	68±35%	560±10%	492±20%	1120±10%
Simulation value	75.26	594.9	556.9	1227.06
Characteristics	· Cooling effect of lamp is bad · Thermal distribution is not efficient			

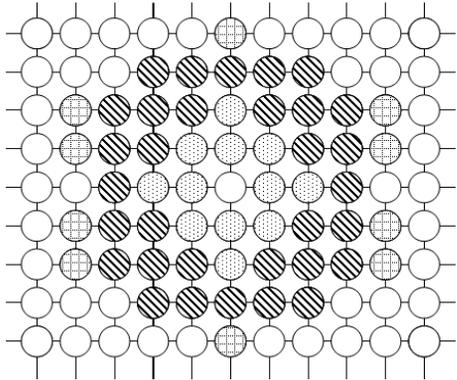


Fig. 8 Lay-out of infrared lamp(60 W) concentration method(● infrared lamp, ● metal halide visible lamp, ● metal halide UV lamp)

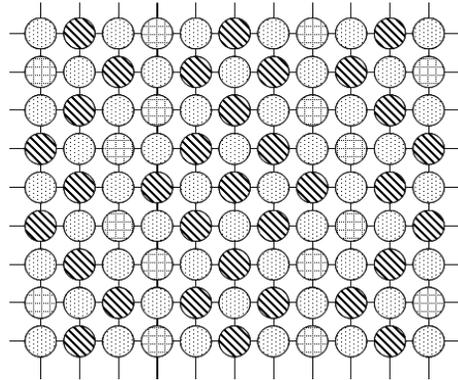


Fig. 10 Lay-out of infrared lamp(60 W) combination method(● infrared lamp, ● metal halide visible lamp, ● metal halide UV lamp)

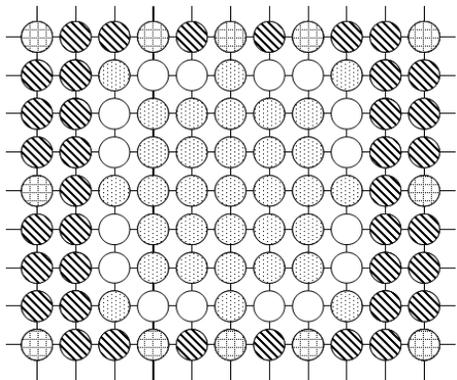


Fig. 9 Lay-out of infrared lamp(25 W) concentration method(● infrared lamp, ● metal halide visible lamp, ● metal halide UV lamp)

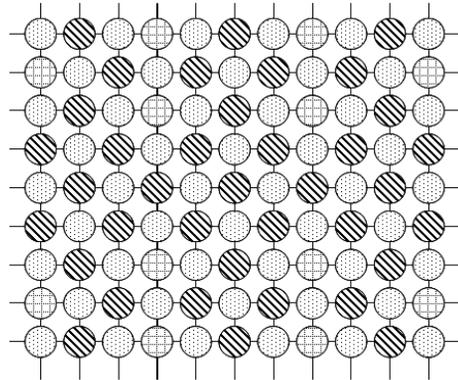


Fig. 11 Lay-out of infrared lamp(40 W) combination method(● infrared lamp, ● metal halide visible lamp, ● metal halide UV lamp)

아직 16곳(적외선 램프 가장자리)의 비활용 램프소켓이 있어 램프의 냉각효율이 떨어지고 적외선 램프가 중앙에 집중하고 있어 열분산이 곤란하다. 이 방식에서는 자외선 램프 12개, 가시광선 램프 38개, 적외선 램프 33개가 소요된다.

**4.1.3 적외선(60 W) 가시광선 램프 조합방식 램프뱅크 설계**

Fig. 10의 자외선은 110.93 W/m<sup>2</sup>, 가시광선은 637.45 W/m<sup>2</sup>, 적외선은 611.94 W/m<sup>2</sup>로 Table 1의 요구조건을 만족한다. 그러나 이 방식은 4.2.1항과 같이 램프뱅크에 비활용공간이 없다는 장점은 있으나 자외선영역 복사에너지의 지침 요구값의 상한선이 91.8 W/m<sup>2</sup>이고 가시광선은 616 W/m<sup>2</sup>, 적외선은 588.4 W/m<sup>2</sup>이므로 본 설계방식으로는 지침요구값 범위를 초과한다. 따라서 램프조합방식을 적용하되 적외선 램프의 용량을 줄여야

한다. 이 방식에서는 자외선 램프 16개, 가시광선 램프 33개, 적외선 램프 50개가 소요된다.

**4.1.4 적외선(40 W)-가시광선 램프 조합방식 램프뱅크 설계**

Fig. 11의 자외선은 88.99 W/m<sup>2</sup>, 가시광선은 658.57 W/m<sup>2</sup>, 적외선은 550.34 W/m<sup>2</sup>로 Table 1의 요구조건을 만족한다. 이 방식은 열분산이 용이하다는 장점과 조사면적의 복사조도의 균일성이 좋다는 장점이 있다. 최종 이 방식을 선택하였다. 이 방식에서는 자외선 램프 12개, 가시광선 램프 37개, 적외선 램프 50개가 소요된다.

**4.2 램프뱅크 주위 천장면(ceiling board) 설계**

Fig 4.의 E부분이 램프뱅크 주위 천장면이다. Table 3과 같

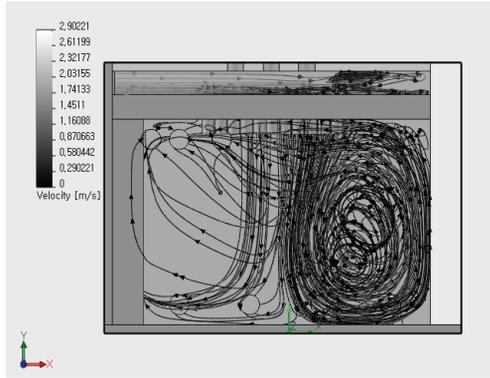


Fig. 12 The air flow At fully closed type (A type)

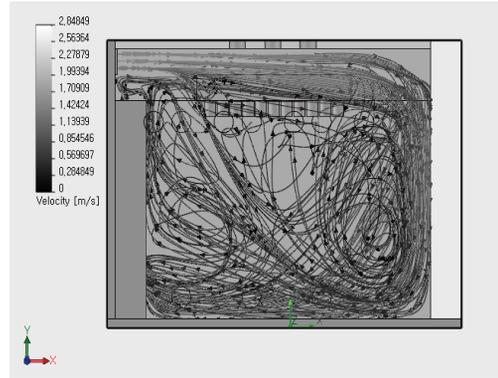


Fig. 13 The air flow at fully opened type (B type)

이 램프뱅크 주위 천장면 설계는 램프의 냉각효율과 온도 안정화를 모두 고려하여 이루어져야한다. 냉각효율이 좋기 위해서는 공기조화기에서 나오는 공기유속이 커야하고 시험조 내부의 온도안정화가 좋기 위해서는 시험조 내부의 공기흐름이 빠르지 않아야하므로 최적의 공기유속을 예측과 실험을 통해 규명해야한다. 램프뱅크에 장착된 램프들의 냉각효율은 측정이 불가능하므로 모델링을 통해 해석을 하고 온도안정화는 시험조내부의 온도센서와 유속센서에서 일정 주기 동안 측정을 하여 평균온도와 편차, 평균유속과 편차를 확인한다.

#### 4.2.1 천장면 설계를 위한 해석

완전 폐쇄형(A형) Fig. 12는 램프뱅크 주위 천장면을 완전히 폐쇄하는 방식이다. 이 방식은 공기가 램프뱅크 쪽으로만 유입되도록 하는 방식으로 램프의 냉각효과는 계산을 하지 않더라도 다른 방식보다 더 뛰어나다. 그러나 공기유속이 빨라 시험조 내부 온도가 불안정할 수 있다는 단점이 있다.

완전 개방형(B형) Fig. 13은 시험조내부의 온도가 안정적이라는 장점이 있지만 공기조화기에서 나온 공기가 램프뱅크와 주위 천장면에 골고루 분산되어 버리기 때문에 램프의 냉각효율은 떨어지는 단점이 있다.

마지막으로 부분 폐쇄형(C형, 타공판) Fig. 14는 완전 폐쇄형과 개방형의 특징들을 조금씩 갖고 있다. 환경시험지침에서 시험조 내부 공기의 유속은 0.25~1.5 m/s로 규정하고 있으며 온도편차는 ±1.0℃를 요구하고 있다.

유속과 온도편차를 만족하면서 냉각효율이 가장 높은 방식으로 천장면을 설계해야한다. 실제 천장면 설계를 위해

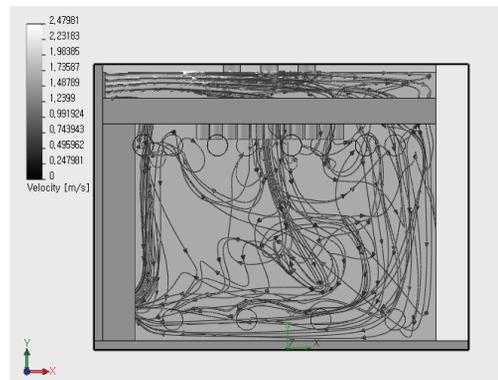


Fig. 14 The air flow at partial closed type (C type)

시험조 내부의 공기유동에 대하여 먼저 모델링 및 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig 12~14에서 보듯이 부분폐쇄형의 공기유동은 fan앞쪽의 공기유동이 적을 뿐 대체적으로 약한 유동이 시험조내에 골고루 미치고 있고 완전폐쇄형은 시험조 fan의 맞은편에 집중적으로 공기유동이 일어나고 있고 완전개방형은 대체적으로 시험조내부 전 영역에 공기유동이 일어나고 있음을 알 수 있다.

#### 4.2.2. 천장면 설계 결과

공기조화기에서 유출되는 공기는 난류( $5 \times 10^5 < Re < 10^7$ )가 아닌 층류이다. 완전폐쇄형에서 램프뱅크를 지나가는 공기의 Re수가 3,755이고 완전개방형은 1,140이다. 따라서  $1,140 < Re < 3,755$  이므로 층류이다[5]. 완전개방형은 층류이고 반면에 완전폐쇄형은 전이영역이나 분석을 단순화하기위해 모두 층류로 가정하고 설계를 하였다. 공기조화기의 공기흐름의 형태를 평행유동내의 평판으로 간주하고 점성소산을 무시하고 일정한 유체 물성치를 가진 정상, 비압축성 층류임을 가정한다.  $x$ 와  $y$  방향으로 연속방정식과 운동량방정식을 유체역학적해석방법인

Table 3 Conditions of ceiling board design

Cooling efficiency	Temp. tolerance (in chamber)	Air velocity (out of AHU)	Air-flow (in chamber)
High	± 2℃	Fast (turbulent)	Slow (laminar)

Blasius에 따르면 최종적으로 국소대류열전달계수는 Re수와 Pr 수의 함수로 나타난다. 단일램프의 냉각효율을 알기 위함으로 평균대류열전달계수를 적용하지 않고 국소대류열전달계수를[6][7][8] 적용한다.

$$\overline{Nu}_x \equiv \frac{h_x}{k} x = 0.332Re_x^{1/2}Pr^{1/3}, \quad Pr \geq 0.6 \quad (4)$$

공기조화기에서 유출되는 공기, 즉 솔라 시뮬레이터 램프뱅크의 천장공간(Fig. 4의 C)에 유입되는 공기온도는 322 K, 밀도 $\rho=1.0782 \text{ kg/m}^3$ , 점도  $\mu=196.4 \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ ,  $k=28.15 \times 10^{-3} \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ,  $Pr=0.7035$ , 공기유속  $V=1.5 \text{ m/s}$ , 단면적  $A=0.87 \text{ m}^2$ 이다. 램프뱅크에 유입되는 공기와 램프뱅크에서 유출되는 공기를 베르누이식에 적용하여 계산할 수 있으며 완전 폐쇄형(A형)의 경우는 램프뱅크 쪽으로만 공기가 유출되므로 공기가 유출되는 단면적이 작고 유속은 빠르며 완전 개방형(B형)은 램프뱅크 주위를 개방했기 때문에 공기유출 단면적은 작고 유속은 느리다. 부분 폐쇄형(C형)은 타공지름 5 mm의 구멍을 모두 합산한 면적을 계산식에 대입하였다. 소켓베이스를 포함한 램프의 길이는 0.12m이며 가시광선용 메탈할라이드 램프(M형)와 적외선 램프(I형)의 시험 중 표면온도( $T_s$ )는 각각 363 K, 383K이다.

Fig. 15에서 보듯이 완전 폐쇄형태에서 각 램프의 냉각효율이 가장 좋다. 완전 개방형태에서 냉각효율은 가장 낮다. A형의 메탈할라이드 램프를 기준으로 하였을 때 B형의 메탈할라이드 램프의 냉각효율은 56.3%, C형의 램프 냉각효율은 79.7%이다. A형의 적외선 램프를 기준으로 하였을 때 B형의 적외선 램프의 냉각효율은 56.3%, C형의 램프 냉각효율은 79.8%이다. 메탈할라이드 램프와 적외선 램프의 냉각효율은 거의 같다고 볼 수 있다.

다음은 냉각효율과 시험조내부의 온도분포, 공기유속의 관계를 통해 최적의 천장면 형태를 결정하여야한다. 온도와 공기유속은 최대 복사조도값( $1,120 \text{ W/m}^2$ )이 안정적으로 유지될 때 5분단위로 20회 반복측정을 하였다.

Table 4 및 5에서 보듯이 A형은 온도편차가 0.95로 높고 공

Table 4 Temperature deviations according to the shapes of ceiling board

Shapes of ceiling board	A	B	C
T dev.(K)	0.95	0.35	0.5

Table 5 Air velocity deviations according to the shapes of ceiling board

Shapes of ceiling board	A	B	C
T dev.(%)	0.07	0.04	0.04

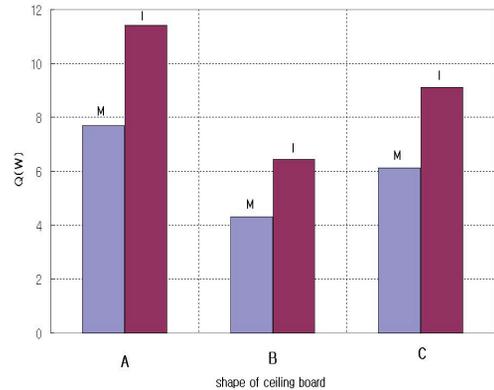


Fig 15. Comparison of lamp cooling efficiency according to the shape of ceiling board

기유속 편차도 타 유형에 비해 상대적으로 높다. 시험지점에서 온도편차는  $\pm 1^\circ\text{C}$ 이어야한다. B형은 온도편차가 0.33로 가장 낮고 공기유속 편차도 낮다. 그러나 냉각효율이 낮다는 단점이 있다. 그러나 C형은 온도편차와 공기유속의 편차가 양호하면서 램프의 냉각효율이 좋다. 따라서 최종적으로 램프뱅크 주위 천장면의 형태는 부분폐쇄 방식(C형,  $\varnothing 5 \text{ mm}$  타공판)을 적용하였다. 타공지름은 실험을 통해  $\varnothing 5 \text{ mm}$ 가 가장 공기유속편차와 램프의 냉각효율을 모두 만족하는 지름으로 확인하였다.

### 5. 결 론

솔라시뮬레이터의 램프뱅크설계방식에 점광원조도이론을 설계기본으로 적용하여 기존 적외선램프 집중방식의 램프뱅크가 갖고 있었던 열분산 곤란과 조사면적의 복사조도의 불균일성을 고려하여 적외선과 가시광선·자외선 메탈할라이드 램프를 조합하는 방식을 고안하였고, 최종 램프뱅크에 적용하는 램프는 자외선 램프 12개, 가시광선 램프 37개, 적외선 램프 50개이다. 램프뱅크에 장착된 램프들의 냉각효율을 높이기 위하여 램프뱅크 주위 천장면(ceiling board)을 설계하였고, 각 램프가 강제대류에 의해 냉각되는 열량과 시험조 내부의 공기의 유속과 표준편차, 온도와 표준편차를 고려하였다. 최적의 천장면 형태는 부분폐쇄형(타공판)으로서 각 적외선 램프의 냉각열량은 9.11 W, 메탈할라이드 램프의 냉각열량은 6.12 W, 시험조 내부의 온도편차는 0.50, 공기유속편차는 0.04이다. 완전 폐쇄형은 램프의 냉각효율은 상대적으로 좋으나, 온도편차가 규격요구치인  $\pm 1 \text{ K}$ 에 근접하고 유속편차도 타 방식보다 크게 나왔다. 완전개방형은 온도편차 0.33, 유속편차 0.04로 양호하나 램프의 냉각효율이 타 방식에 비해 현저히 낮아 램프의 수명을 짧게 할 수 있으므로 적합하지 않았다.

## 참고문헌

- [1] 2000, MIL-STD-810F, Method 505.4, *Solar Radiation*, Department of Defense(USA).
- [2] 1987, Hecht, Optics, Addison-Wesely, pp53, New York.
- [3] 1982, R. Danial Overheim and David L. Wauer, *Light and Color*, John Wiley & Sons, New York.
- [4] 1999, Baek Sang Hwa, "Solar Simulator", *J Korean Ind. Eng. Chem.*, Vol.10, No.8, pp.1147-1154.
- [5] 1976, R. Byron Bird, *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, pp.291-297, New York.
- [6] 1982, James R. Welty, *Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, pp.353-378, pp.428-444, New York.
- [7] 1986, Kenneth J. McNaughton, "The chemical Engineering Guide to Heat Transfer", Vol1,2, pp.112-118, McGraw-Hill, New York.
- [8] 1996, Frank P. Incropera, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, pp.353-378, pp.428-444, New York.