

최적의 램프뱅크형태를 결정하기 위한 열유동 해석

백상화*

*국방과학연구소 종합시험단(backsan@add.re.kr)

A Thermal Flow Analysis for an Optimal shape of Solar Lamp Bank

Baek, Sang-Hwa*

Defense Systems Test Center, Agency for Defense Development(backsan@add.re.kr)

Abstract

This study is on the thermal flow analysis to select an optimal shape of solar lamp bank. Solar 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. Among the 4 kinds of lamp bank, since lamp bank type D satisfies uniformity $\pm 10\%$ and also doesn't exceed total irradiance $1,232 \text{ W/m}^2$, type D is finally selected

Keywords : Lamp bank, Spectral irradiance(복사조도), Point light source theory(점광원조명이론), Thermal flow(열유동), Solar Simulator(태양열복사시험기)

기 호 설 명

E : Irradiance, watt per unit area [W/m^2]
I : Luminous intensity [cd]
P : Distance between a lamp and target area [m]
 θ : Incidence angle [rad]
x : Rectangular coordinate system, x [m]
 x_0 : Rectangular coordinate system, x_0 [m]
y : Rectangular coordinate system, y [m]
 y_0 : Rectangular coordinate system, y_0 [m]

z : Rectangular coordinate system, z [m]
 z_0 : Rectangular coordinate system, z_0 [m]

1. 서 론

1.1 기존 램프뱅크

솔라 램프뱅크는 솔라시뮬레이터, 즉 태양 열복사시험기의 성능을 결정하는 핵심부분으로서 모사된(simulated) 태양 빛을 방사하는 장치이다. 기존 솔라 램프뱅크에서는 할로겐 램프에 의한 과열로 램프뱅크에 장착된 램프

들이 시험 중에 소등되는 현상이 발생했고, 그 원인은 다음 두 가지로 요약할 수 있다. 첫째로 국내외 상용 할로겐방식 램프들은 시험 지침에서 요구하는 400~780 nm 파장영역에서 일정거리에서 조사면적에 560 W/m² 복사 조도를 방사 할 수 있어야 하고 780~3,000 nm 파장영역에서는 492 W/m²의 복사조도를 방사 할 수 있어야하나, 실제 대부분의 할로겐방식 램프들은 적외선의 복사에너지가 가시광선의 복사에너지보다 5~15배 이상 많다. 따라서 적외선필터를 장착하여 적외선과장영역의 에너지를 감소(필터링)시켜주어야 하나 필터링(흡수 또는 투과)된 적외선과장영역의 복사에너지는 시험조 내부에서 순환되면서 다시 램프의 표면온도를 상승시키는 효과를 발생함으로써 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 들을 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 램프뱅크¹⁾는 적외선을 중앙에 집중하는 방식을 택하였고 이것은 복사에너지가 램프뱅크 중앙에 집중되는 결과를 초래하여 램프의 소등의 원인으로 작용을 하였다. 따라서 이번에 개발한 램프뱅크는 최대한 램프의 소등을 줄이고 파장영역별 복사조도를 시험지침의 요구를 만족할 수 있도록 설계하였다.

1.2 실험 및 설계이론

램프뱅크의 형태는 램프의 수명의 연장과 태양빛과 흡사한 자외선, 적외선 및 가시광선의 각 파장영역별의 에너지를 방사할 수 있어야하고, 열의 분산의 용이성과 조사면적의 균일도를 보장할 수 있도록 설계되어야한다. 이러한 4가지 조건을 모두 만족시키기 위해선 기술적 한계가 있기 때문에 가능한 최적의 램프뱅크의 설계가 필요한 것이다. 램프의 각각의 조도를 확인하기 위하여 점광원조도이론을 적용하였다. 점광원 조명이론식은 다음과 같다.

$$E = (I/P^2)\cos\theta \quad (1)$$

램프뱅크 중심에서 거리가 떨어질 때 조사면적의 복사조도값은 점광원 조명계산식에 따른다. 이 식에서 I는 램프의 특성을 나타내는 광도이며, P는 램프와 조사면적(target area) 사이의 거리이다. θ 는 램프 빛의 입사각이다. 태양이 하루 중 고도가 가장 높을 때 가장 뜨겁고 고도가 낮은 아침이나 오후 늦은 시간에 가장 서늘하다. 마찬가지로 램프도 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 한점은 직각좌표계에서 다음 식으로 표현된다.

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

직각좌표계에서 램프뱅크를 타원형 입체면상에 배열하기 위해서는 몇 가지 제약조건이

1) Baek Sang Hwa, A Study on the Development of Three Wavelength Solar Bank by Mercury-Halogen Lamps Combination Method. J. Korean Ind. Eng. Chem., Vol 10, No 8, 1999, 1147-1154

있는데, 첫 번째로 중심좌표는 (0,0,0)이며 a=b이면 램프의 단면이 원이며 c=H₀라 두면 램프 램프의 중심좌표는 (0,0,z₁), 즉 z축이 램프램프의 중심을 지난다. 여기서 H₀는 피시험체의 중심과 램프램프의 중심과의 거리이다. 두번째로 피시험체의 중심좌표는 (0,0,z₂), 즉 H₀=z₁-z₂이다. 식(2)에서 초기조건 x₀ = y₀ = z₀ = 0, a = b, c = H₀을 적용하면 다음과 같이 z좌표값을 계산할 수 있다.

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

열유동 해석모델은 범용적인 k-ε 난류실험 모델³⁾을 사용하였고 유동해석은 Solidwork 상용소프트웨어를 사용하였다.

1.3 실험장치 및 방법

Fig 1.의 솔라시뮬레이터가 최종 개발 시스템이자 동시에 실험을 위한 장치이다.

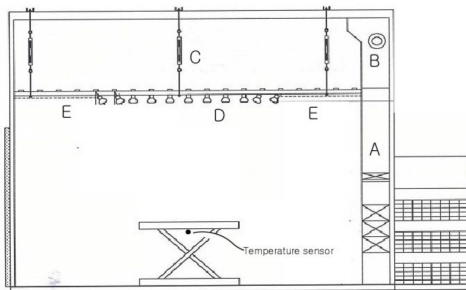


Fig. 1 Side picture of Solar simulator

Fig. 1에서 공조된 공기는 A(증발관, 히터)에서 B(fan)로, 다시 B에서 시험조의 천장인 C로 흐르고, C에서 램프램프인 D나 램프램프 주위 E(ceiling board)를 통과한다. E부분을 부분폐쇄(타공판) 형태로 함으로써 공조기의 냉각공기가 램프램프 쪽으로 집중할 수 있도록 설계를 하였다. 램프램프 주위 천장면의 설계는 램프의 냉각효율과 온도 안정화를 고

려하여 이루어졌다. 공조용 온도센서는 복사 조도의 영향을 받지 않기 위해서 시험테이블 아래에 설치되어 있다. 시험조내부의 온도분포가 균일해야한다. 램프램프의 설계를 위해 조사면적 상부에 복사조도 센서(일사계)를 설치하여 램프램프 형태별 복사조도를 측정하였고, 전체 복사조도값은 점광원조도이론을 통해 개발한 프로그램을 이용하여 계산하였다. 개발한 프로그램의 검증을 위해 수평거리에 따라 각 램프들을 램프램프 중심에서 가장자리로 이동할 때 일사계에서 측정되는 복사조도의 변화실험을 실시하였고, 실험결과는 프로그램의 수치해석값과 일치하였다. 램프램프의 형태는 크게 중앙 집중형과 조합형으로 구분하여 설계하였다.

2. 본 론

Table 1. Spectral energy distribution and permitted tolerances

Sector	Spectral regions			
	Ultra-V	Visible	Infrared	
Wave-length(μm)	0.28~0.32	0.32~0.40	0.40~0.78	0.78~3.00
Irradiance(W/m ²)	5	63	517~604	492
Tolerance(%)	±35	±35	±10	±20

램프램프 설계는 네 가지 중요한 상세설계요건이 있다. 첫째는 Table 1.에 있는 파장영역별 복사조도²⁾를 만족해야하는 것이다. 두 번째는 램프램프에서 방출되는 열이 집중되지 않고 균등하게 분산되어 램프의 수명을 길게 할 수 있어야한다. 셋째는 조사면적의 균일도가 ±10% 이내 이어야한다. 마지막으로 시험조 내부의 공기의 유동을 안정적으로 유도할 수 있어야한다. 즉 유속과 온도편차가 양호해야한다. 이 네 가지를 모두 고려하여 설계하였다.

2) MIL-STD-810F, Method 505.4, Solar Radiation, Department of Defense(USA), 2000

2.1 A형(중앙집중형)

(1) 일반적외선 램프(250 W)를 사용한 램프뱅크 설계

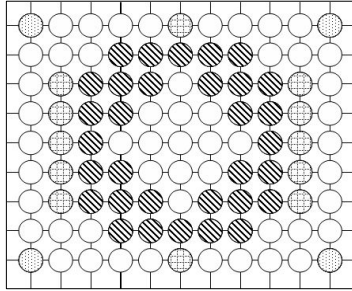


Fig. 2 Lay-out of infrared lamp(250 W) distribution method (● infrared lamp, ▨ metal halide visible lamp, ⊙ metal halide UV lamp)

Fig. 2는 중심에 램프를 장착하지 않은 형태이나 단일램프를 중심부 주변에 위치하여 중앙집중형으로 분류하였다. 250 W 메탈할라이드형 적외선 램프를 사용함으로써 적외선 복사조도값이 높아질 것이라는 예상으로 중심에 적외선램프를 장착하지 않았다. 대신 램프뱅크 가장자리 모서리에 4개만을 장착하였고 적외선값과 가시광선값, 자외선값이 모두 규격조건을 만족하였다. 그러나 조사면적의 균일도가 10%를 초과하였고 전체 복사조도 허용치인 1,232 W/m²에 근접하는 복사조도량을 갖고 있어 적합한 램프뱅크 형태라 볼 수 없다. 램프를 장착하지 않은 소켓베이스가 많아 램프를 냉각시키는데도 비효율적이라 볼 수 있다.

(2) A형 램프뱅크의 열유동 해석

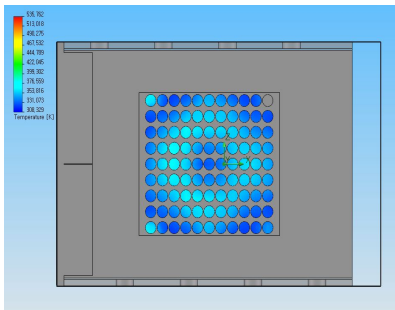


Fig. 3 Plane figure describing the heat flow of A type lamp bank

Fig. 3은 열이 램프뱅크 중앙에 집중되어 있지는 않다. 중앙에 램프가 없기 때문이다. 램프뱅크 중앙을 중심으로 원형의 열분포를 보이고 있다. 원형의 램프온도 범위는 363 ~ 376 K이다. 중앙부분과 가장자리의 램프온도는 331 K 부근에 있다. 원형부분과 중앙부분의 온도차이는 약 30 ~ 40 K이다. 램프뱅크의 열분포가 고르지 않고 크게 두 영역으로 나뉘어 온도가 분포하고 있다.⁴⁾ 이런 열분포의 경우 균일도가 좋지 않을 수 있다. 좌측 위와 아래의 온도가 중앙 원형부분과 비슷한 것은 자외선램프가 끝부분에 장착이 되어 있기 때문이다. 결론적으로 중앙은 온도가 낮고 중앙 주변의 온도는 높고 다시 램프뱅크 가장자리는 온도가 낮은 비균질 형태를 보이고 있다.

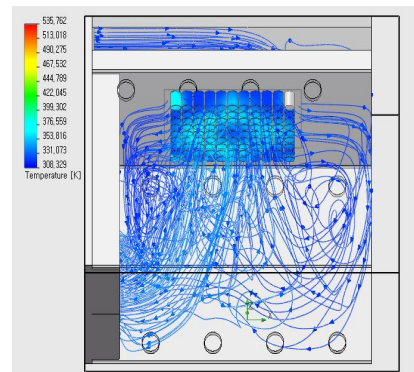


Fig. 4 Side figure describing the heat flow of A type lamp bank

위 Fig. 4는 시험조내부의 공기의 유동을 파악하기 위해 램프뱅크 아래에서 위쪽으로 열유동 해석을 보여주고 있다. 대체적으로 열의 흐름은 균일한 것으로 판단된다. 약간의 좌측부분으로 열의 흐름이 많아 보이나 대체적으로 시험조 내부 좌측과 우측에 골고루 열이 이동하고 있음을 알 수 있다. 이 램프뱅크의 형태가 열유동의 균일성이 좋은 이유는 중앙에 램프가 없고 가장자리에도 램프가 없어 시험조 상하좌우로 골고루 공기의 유동을 유도하고 있기 때문인 것으로 파악된다.

2.2 B형(중앙집중형)

(1) 일반적외선 램프(25 W)를 사용한 램프뱅크 설계

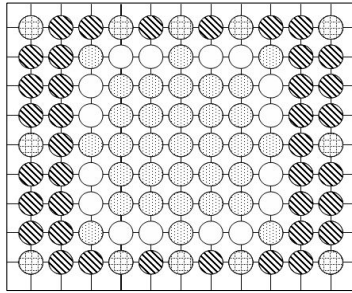


Fig. 5 Lay-out of infrared lamp(25W) distribution method (● infrared lamp, ⊘ metal halide visible lamp, ⊚ metal halide UV lamp)

Fig. 5는 중심에 적외선램프를 33개를 장착한 형태이다. 25 W 적외선 램프를 중심에 장착함으로써 램프뱅크가 전체적으로 열이 집중되는 단점이 있고 적외선값과 가시광선값은 규격허용치를 벗어났고 자외선값 만이 규격조건을 만족하였다. 조사면적의 균일도가 10%를 초과하였고, 전체 복사조도 허용치인 $1,232 \text{ W/m}^2$ 를 초과하여 적합한 램프뱅크 형태라 볼 수 없다. 램프를 장착하지 않는 소켓 베이스가 균데균데 있어 램프를 냉각시키는 데도 다소 비효율적이라 볼 수 있으나 A보다는 냉각효과가 좋을 것으로 판단한다.

(2) B형 램프뱅크의 열유동 해석

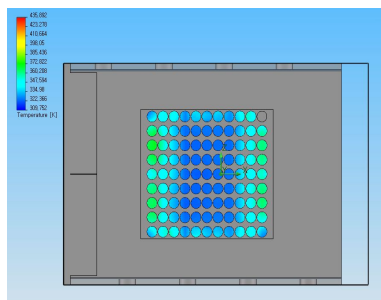


Fig. 6 Plane figure describing the heat flow of B type lamp bank

열이 램프뱅크 가장자리에 집중하고 있고 중앙은 오히려 온도가 낮다. 적외선 25 W 램프를 사용했기 때문이다. 열의 분포가 중앙에 직사각형의 형태를 보이고 있다. 온도범위는 약 325 K부근이다. 직사각형 열분포는 좌우편에는 약 340 K 온도를 나타내고 있다. 좌우측 가장자리에는 360 ~ 372 K 온도범위를 보이고 있다. 중앙과 가장자리의 온도차이는 약 35 ~ 47 K이다. A형태보다 온도차이가 큼을 알 수 있다. 온도분포가 심하다는 것은 램프뱅크의 열분포가 균일하지 않다는 것을 말해준다.⁵⁾ 전체적으로 램프뱅크의 열의 분포가 고르지 못하다. 적외선 램프를 중앙에 장착을 했지만 25 W 용량의 램프를 사용했기 때문에 열이 중심에 집중되는 것을 상대적으로 타 형태의 램프뱅크보다는 낮다. 그러나 분명 균일도가 좋지 않을 것으로 판단된다.

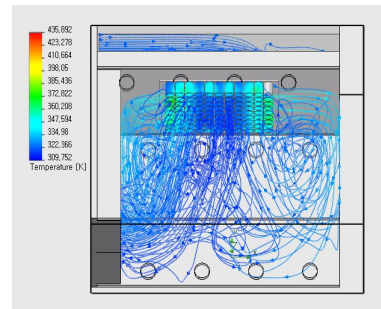


Fig. 7 Side figure describing the heat flow of B type lamp bank

열의 흐름을 33개의 적외선램프들이 지배하고 있다. 직사각형 형태의 중앙부분의 적외선 램프에서 열의 흐름이 거의 이루어지고 있다. 예상 공기유속 편차는 A형과 비슷할 것으로 예상된다. 열유동 균일성도 A형과 비슷할 것으로 예상된다. 적외선 램프의 영향때문에 A형보다 열흐름이 더 조밀하다. 램프뱅크 하단 부위 세 곳에서 열의 흐름이 원을 그리며 회전하고 있다. 중심에 적외선 램프를 많이 장착하였으나 25 W 램프들이어서 가장자리가 온도가 더 높음을 알 수 있다.

2.3 C형(조합형)

(1) 일반적인외선 램프(60 W)를 사용한 램프뱅크 설계

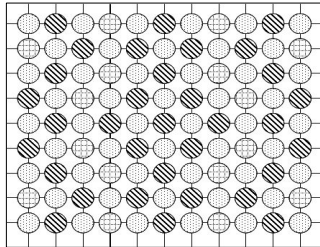





Fig. 8 Lay-out of infrared lamp(60W) distribution method ( infrared lamp,  metal halide visible lamp,  metal halide UV lamp)

Fig. 8은 A, B 형태의 램프뱅크와는 다르게 열분포를 좋게 하기 위하여 교대조합방식을 적용한 것이다. 중심에 가시광선램프와 교대로 적외선램프를 50개를 장착한 형태이다. 60 W 적외선 램프를 가시광선 램프와 교차하여 장착함으로써 램프뱅크가 전체적으로 열이 분산되는 장점이 있다. 그러나 적외선값과 가시광선값, 자외선 파장영역의 복사조도값은 규격허용치를 모두 벗어났다. 조사면적의 균일도가 10%를 만족하였으나 전체 복사조도 허용치인 1,232 W/m²를 초과하여 적합한 램프뱅크 형태라 볼 수 없다. 램프를 장착하지 않는 소켓베이스가 없어 램프를 냉각시키는 데는 효율적이라 볼 수 있다. 램프뱅크의 성능 중 파장영역별 복사조도가 가장 중요하나 본 C형태는 자외선, 가시광선, 적외선 중 한 가지도 규격범위를 만족시키지 못했다.

(2) C형 램프뱅크의 열유동 해석

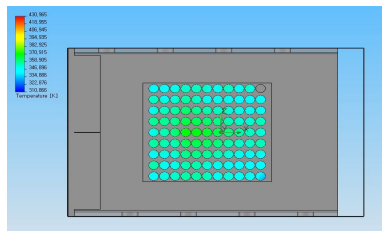


Fig. 9 Plane figure describing the heat flow of C type lamp bank

각 램프를 조합하여 설계한 램프뱅크이므로 열이 한곳에 집중하지 않고 넓게 퍼져 있음을 알 수 있다. 단 녹색부분이 알파벳 F자 형태의 열분포를 약간 보이고 있다. 중심은 350 ~ 375 K 온도범위에 있다. 가장자리는 340 K 온도부근에 있다. 온도차이가 10 ~ 35 K이다. 중앙부분이 가장자리로 램프위치가 이동 할수록 온도변화가 서서히 있음을 알 수 있다. 급격한 온도변화는 균일도에 영향을 미치며 램프간의 열적불균형을 주기 때문에 바람직하지 않다. 본 C형은 대체적으로 급격한 온도의 변화없이 열이 균등히 램프뱅크에 분포되어 있음을 알 수 있으나 녹색부분이 알파벳 F자 형태를 갖고 있어 좀더 열분포의 개선이 필요함을 알 수 있다. A, B 및 C 형태 중에서 열분포가 가장 우수하다. 램프를 교대로 장착을 했지만 중심이 상대적으로 다른 곳에 비해 온도가 높음을 알 수 있다.

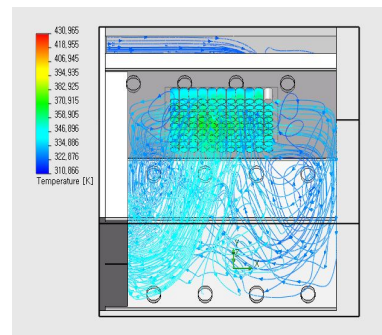


Fig. 10 Side figure describing the heat flow of C type lamp bank

Fig. 10은 대체적으로 열의 흐름은 균일한 것으로 판단된다. 열의 유동이 A형 램프뱅크와 비슷하다. 약간 좌측부분으로 열의 흐름이 많아 보이나 대체적으로 시험조 내부 좌측과 우측에 균등히 열이 이동하고 있음을 알 수 있다. 예상되는 공기유속 편차도 낮은 것으로 예상된다. 다음에 나오는 D형보다 열유동 균일성은 더 우수하다. 열의 흐름이 좌측으로 많이 편향되어 있으나 C형은 좌측 우측이 골고루 분포되어 있다.

2.4 D형(조합형)

(1) 일반적인 적외선 램프(40 W)를 사용한 램프뱅크 설계

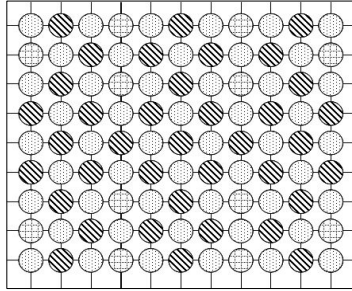


Fig. 11 Lay-out of infrared lamp(40W) distribution method (● infrared lamp, ▨ metal halide visible lamp, ▩ metal halide UV lamp)

본 램프뱅크는 중심에 가시광선램프와 교대로 적외선램프를 50개를 장착한 형태로 C형과 같다. 40 W 적외선 램프를 가시광선 램프와 교차하여 장착함으로써 램프뱅크가 전체적으로 열이 분산되는 장점이 있다. 적외선값, 자외선값 및 가시광선값은 규격허용치를 모두 만족하였다. 조사면적의 균일도가 10%를 만족하였고 전체 복사조도 허용치인 1,232 W/m²를 초과하지 않아 적합한 램프뱅크 형태라 볼 수 있다. 적외선 램프의 W용량을 줄임으로써 규격범위를 만족하게 되었다. 램프를 장착하지 않는 소켓베이스가 없어 램프를 냉각시키는 데는 효율적이라 볼 수 있다.

(2) D형 램프뱅크의 열유동 해석

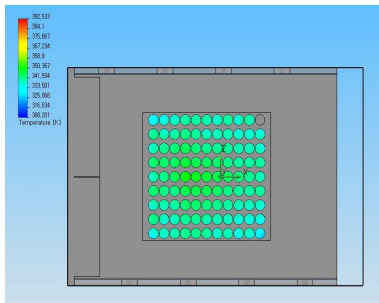


Fig. 12 Plane figure describing the heat flow of D type lamp bank

D형도 C형과 마찬가지로 각 램프를 조합하여 설계한 램프뱅크이므로 열이 한곳에 집중하지 않고 넓게 퍼져 있음을 알 수 있다. 그러나 C형처럼 녹색부분이 알파벳 F자 형태의 열분포를 보이지 않고 있다. 가장자리는 330 ~ 340 K 범위에 있다. 열분포가 우수하여 예상조사면적의 균일도도 우수할 것으로 예상된다.

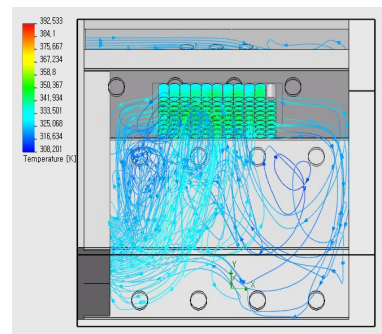


Fig. 13 Side figure describing the heat flow of D type lamp bank

Fig. 13은 대체적으로 열의 흐름은 균일한 것으로 판단된다. 열의 유동이 C형 램프뱅크와 비슷하나 시험조 내부 우측부분이 C형보다는 열의 흐름이 적다. 오히려 좌측부분은 C형보다 열의 흐름이 더 많아 보인다. 공기조화기 앞의 열의 유동은 특별히 타 뱅크형태보다 활발하면서도 온도는 더 낮다. 열유동 균일성은 C형보다는 다소 못하다.

3. 결 론

D type lamp bank는 점광원조도이론을 통해 개발한 프로그램을 이용하여 계산한 결과, 조사면적의 균일도가 10%를 만족하였고 전체 복사조도 허용치인 1,232 W/m²를 초과하지 않았다. 열유동 해석 결과에서도 열분포, 열유동 균질성, 예상조사면적의 균일도 및 예상되는 공기유속편차 등 종합적인 측면에서 램프뱅크들 중 가장 우수하여 최종 태

양열복사시험기의 램프뱅크로 D형이 채택이 되었다.

References

1. Baek Sang Hwa, A Study on the Development of Three Wavelength Solar Bank by Mercury-Halogen Lamps Combination Method. J. Korean Ind. Eng. Chem., Vol 10, No 8, 1999, pp1147~1154
2. MIL-STD-810F, Method 505.4, Solar Radiation, Department of Defense(USA), 2000
3. David C. Wilcox, Turbulence Modeling for CFD, DCW industries, Anaheim, 2002, pp123~125
4. Lee Jung Yong, Baek Sang Hwa, Study on Prediction of the Induced Temperature in Environmental Test, Journal of Korea Society of Computational Fluids Engineering, Vol. 13, No 4, 2008
5. R. Danial Overheim and David L. Wager, Light and Color, John Wiley & Sons, New York, 1982