

## 솔라 램프뱅크 내의 열유동 수치해석에 관한 연구

A Study on Numerical Analysis of Thermal Flow in Solar Lamp Bank

**김성대\***                      **유성열\***                      **백상화\*\***                      **이정용\*\***  
Kim, Sung-Dae              Ryoo, Seong-Ryoul              Baek, Sang-Hwa              Lee, Jeong-Yong

**박소진\*\*\***      **김철주\*\*\*\***      **고한서\*\*\*\***  
Park, So-Jin              Kim, Chul-Ju              Ko, Han Seo

### ABSTRACT

A three-wavelength solar bank is a very important part for a solar simulator with commercial superlux lamps. It is projected metal halide lamps to satisfy following points simultaneously:  $\pm 10\%$  of uniformity for irradiance of target area and irradiance in each wave region, and  $1,232\text{W}/\text{m}^2$  of maximum solar irradiance in summer. The developed solar lamp bank has been analyzed numerically by commercial programs in this study to carry out experiments.

In conclusion, designed B-type heat lamp is not concentrated in one place than designed A-type heat lamp, it is spreaded widely, and it was proved numerical computation.

We suggest that solar simulator is applied to actual experiment test through heat flow numerical analysis in solar lamp bank and the lamp is applied private industry or the military using complex environmental assessment test.

주요기술용어(주제어) : Three-wavelength Solar Bank(삼파장 솔라뱅크), Solar Simulator(솔라 시뮬레이터), Superlux Lamp(적외선용 램프), Metal Halide Lamp(가시광선, 자외선용 램프), Irradiance(조사)

### Nomenclature

† 2008년 1월 17일 접수~2008년 3월 7일 게재승인

\* 성균관대학교 대학원 기계공학과(Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School of Sungkyunkwan University)

\*\* 국방과학연구소 종합시험단 2부(ADD)

\*\*\* 충남대학교 화학공학과(Department of Chemical Engineering, Chungnam National University)

\*\*\*\* 성균관대학교 기계공학부(School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

주저자 이메일 : sd4945@skku.edu

$E$  : energy [J]

$H$  : enthalpy [J]

$T$  : temperature [K]

$\delta_{ij}$  : Kronecker delta function

$\epsilon$  : dissipation rate

$\mu$  : viscosity [ $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$ ]

$\tau_{ij}$  : stress [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]

## 1. 머리말

태양열 복사시험기의 성능을 가늠하는 핵심부분으로서 솔라 램프뱅크(Solar Lamp Bank)는 솔라 시뮬레이터(Solar Simulator), 즉 모사된 태양 빛을 방사하는 장치이다. 다수의 램프들이 장착이 되어 있다고 하여 뱅크라는 표현을 사용하고 있다. 본 시스템으로 수행하게 되는 환경시험은 실제 자연환경 하에서의 피시험체의 운용능력을 예측하고 지리적 난점으로 인하여 경험하지 못하는 극한 자연환경을 모사함으로써 피시험체에 대한 환경적응 능력을 단기간에 간접적으로 평가하는데 주목적이 있다. 솔라 시뮬레이터에 적용하는 모사 빛은 각 파장영역별 복사에너지가 자연광에 가까워야 하며 수명이 길어야 한다. 태양열 복사시험 지침<sup>[1]</sup>에 의하면 전세계 지역을 대상으로 하는 하절기 일일 최대 복사조도(1,232W/m<sup>2</sup>)를 매우 안정적으로 모사할 수 있도록 개발되어져 있다. 현재 자동차, 전자재 및 공조분야 기기의 태양열 복사시험기 내부의 램프뱅크는 적외선 램프만을 적용하고 있으며, 시스템 측면에서 다소 차이가 있다. 또한 색바랜 현상을 확인하는 대다수 의류 시험기관에서는 단일 소형 자외선 램프를 사용하고 있다. 이러한 램프들은 전량 선진국에서 수입하는 실정이며 단일종류의 램프를 적용하고 있기 때문에 램프뱅크 설계에 대한 특별한 국내기술이 없는 실정이며 태양 빛이 갖는 파장영역별 복사에너지 중 적외선 또는 자외선만을 램프뱅크에 적용하고 있다. 솔라 시뮬레이터의 모사 태양 빛을 재현하는 기술의 가장 핵심적인 부분은 각 파장영역별 복사에너지를 태양 빛에 근접시키는 기술과 램프뱅크에서 방출되는 열이 집중되지 않고 균등하게 분산되게 하는 기술, 램프의 수명을 길게 유지하며 조사면적이 넓고 균일도를 ±10% 이내에 유지시키는 기술이다<sup>[4-7]</sup>. 이 세 가지 기술을 토대로 예측하며 설계해야 할 것이다. 본 연구에서 모사하고자 하는 램프는 적외선 램프로 사용되고 있는 Superlux와 가시광선과 자외선 램프로 사용되고 있는 Metal halide 두 가지이며, 상용 소프트웨어 프로그램인 SolidWorks COSMOS FloWorks를 이용하여 실제 모사 실험을 수행하기 전 전산 수치해석에 의해 설계 및 적용 가능성을 예측하려 한다. 또한 우리가 제시하고자 하는

형태의 솔라 시뮬레이터가 얼마나 태양 빛에 가깝게 모사되는지 알아보기 위해 이 연구를 수행하게 되었다.

## 2. 솔라 램프뱅크 내의 수치해석 조건

### 가. 지배방정식

일반적으로 유체 및 열유동을 해석하기 위한 방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$\bullet \text{ 연속방정식 : } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (i=1,2,3) \quad (1)$$

### • 운동량방정식 :

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right) + \rho g_i \quad (2)$$

### • 에너지방정식 :

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma \frac{\partial T}{\partial x_j} - \overline{\rho u_j t} \right) \quad (3)$$

where  $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^2}{2}$

여기서  $i=1, 2, 3$ 은 각각  $x, y$ , 그리고  $z$ 방향을 의미하고 식 (2)와 식 (3)의 레이놀즈(Reynolds) 응력항 ( $\overline{\rho u_i u_j}$ )과 난류 열유속항 ( $\overline{\rho u_j t}$ )은 각각 난류 유동 및 열확산을 지배하는 요소로서 와점성 근사에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$\overline{\rho u_i u_j} = -\mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4a)$$

$$\overline{\rho u_j t} = \alpha_t \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (4b)$$

여기서  $\mu_t$ 와  $\alpha_t$ 는 난류 와점성계수 및 와확산계수

이다.  $\mu_t$ 와  $\alpha_t$ 를 구하기 위해서는 지배방정식의 닫힌 문제를 해결해야 하는데, 이 연구에서는 표준  $k-\epsilon$  난류모델을 이용한다. 이때 난류운동에너지 ( $k$ )와 이의 소산율 ( $\epsilon$ ) 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_k + G_b) (1 + C_3 R_f) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (7)$$

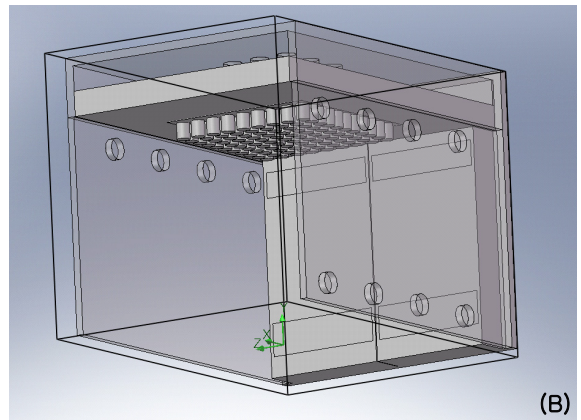
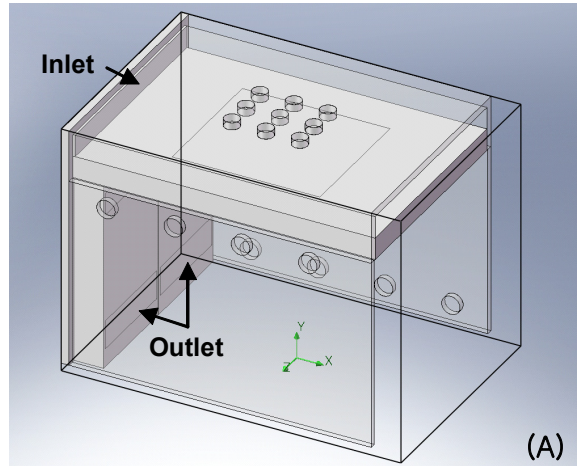
식 (6)과 식 (7)에 나타난  $G_k$ 와  $G_b$ 는 각각 난류 응력 및 부력에 의한 생성에너지,  $R_f$ 는 플릭스 리차드슨 수,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ 는 경험상수,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\epsilon$ 는 난류 플란틀 수이다.

이 연구에서 적용한 Standard  $k-\epsilon$  난류모델에 사용된 계수 및 함수는 참고문헌<sup>[2,8]</sup>에 잘 설명되어 있다.

나. 해석모델

그림 1은 솔라 램프뱅크를 3차원 모델링한 것이다. 전체 솔라 램프뱅크의 가로, 세로 및 높이는 각각 4.09×3.07×3.27m이고 가운데 램프 하나의 지름은 15cm이며 총 99개가 장착되어 있다[그림 1 (B)참조]. 솔라 램프뱅크 양 옆면과 천장에 있는 홀(Hole)은 출구부(Outlet)에 해당되며 해석 경계조건이 되는 사각 형태의 입구부(Inlet)와 출구부 제원은 표 1, 출구부 홀의 제원은 표 2와 같다. 초기 및 경계 조건은 대기 압 조건으로 입구부는 내부유입 공기속도 1.5% 및 온도 49℃이고 출구부는 유속이 빠져나가는 조건을 적용하였으며, 초기 솔라 램프뱅크의 실내 온도는 20℃이며 또한 램프의 열원은 적외선용 램프(Superlux) 60W, 가시광선 및 자외선용 램프(Metal halide)는 40W이다<sup>[9~11]</sup>. 초기 공기유입 속도값은 MIL-STD-810F에 의거한 값이며 팬(Fan)이 부착되어 있다. 그리고 방정식 내의 대류항의 계산을 위하여 상류차분도식(Upwind Difference Scheme)을 사용하였다. 계산의 수렴성은 질량유량의 잔류량이  $10^{-3}$  보다 작아

질 경우로 하였다<sup>[3]</sup>.



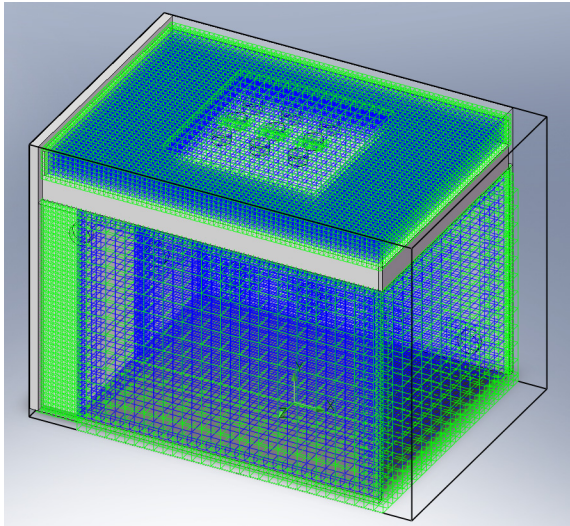
[그림 1] 솔라 램프뱅크 3차원 모델링(A)와 (B)

[표 1] 솔라 램프뱅크 입출구부 제원(A 모델링 참조)

Rectangle	Inlet	Outlet
Length(m)	2.87	1.32 × 2(EA)
Width(m)	0.3	0.39 × 2(EA)

[표 2] 솔라 램프뱅크 출구부 제원(B 모델링 참조)

Hole	Outlet	EA
Both Sides(mm)	D=250	12
Ceiling(mm)	D=210	9



[그림 2] 솔라 램프뱅크 유체와 고체의 격자영역

그림 2는 솔라 램프뱅크 내의 유체영역과 고체영역의 해석격자를 나타내었다. 격자수는 약 300,000개이다. 본 연구에서 99개의 램프 조건은 두 가지 램프 (Superlux lamp & Metal halide lamp)가 섞여 있으며, 고려되는 설계 조건에 따라 각각 다르게 삽입하여 비교하는 형태를 취하였다.

### 3. 적용된 램프 배열 형태

그림 3과 4는 솔라 램프뱅크에 적용한 두 가지(각각 A형과 B형) 형태의 램프 배열이며 표 3과 4는 각각 램프 형태의 파장영역별 복사조도를 나타내었다. A형은 램프뱅크 중심에 적외선 램프를 12개 장착한 형태이다. 60W 적외선 램프를 중심에 장착함으로써 램프뱅크가 전체적으로 열이 집중되는 형태를 취하였으며 표 3에서 보는바와 같이 적외선, 가시광선, 자외선 값이 모두 규격 조건을 만족하였다. 반면에 B형은 램프뱅크 중심에 가시광선 램프와 적외선 램프를 교대로 50개를 장착한 형태이며 40W 적외선 램프를 가시광선 램프와 교차하여 장착함으로써 램프뱅크에서 전체적으로 열이 분산되도록 설계하였다. 위와 같이 설계된 이유는 그림 3과 그림 4에서 보는 것처럼 램프의 수가 각각 다르지만 본 연구에서는 에너지 절약

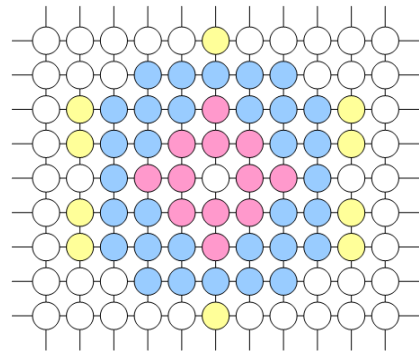
차원에서 시도한 것이며 그림 3에서 램프가 장착된 면적과 동일하게 그림 4에도 비록 전체 램프가 장착되어 있으나 그림 3과 동일한 면적으로 적용하였기

[표 3] A형 파장영역별 복사조도

구 분	개수	파장영역별 복사조도(W/m <sup>2</sup> )			합 계
		자외선	가시광선	적외선	
가시광선램프	32	18.88	502.97	279.68	801.53
자외선램프	12	56.38	70.30	49.37	176.05
적외선램프	12	-	21.61	227.90	249.51
소 계	56	75.26	594.88	556.95	1,227.09
규 격 값	-	44.2~ 91.8	517~ 604	393.6~ 590.4	1,008~ 1,232

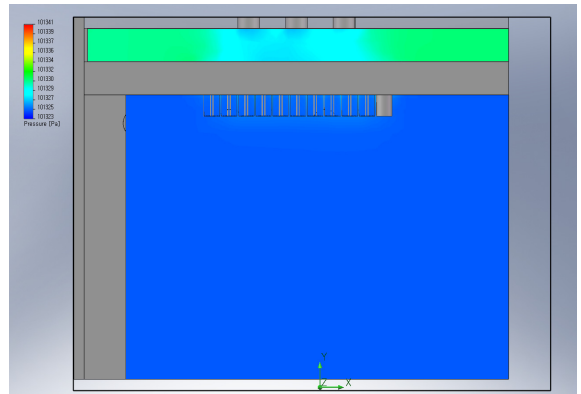
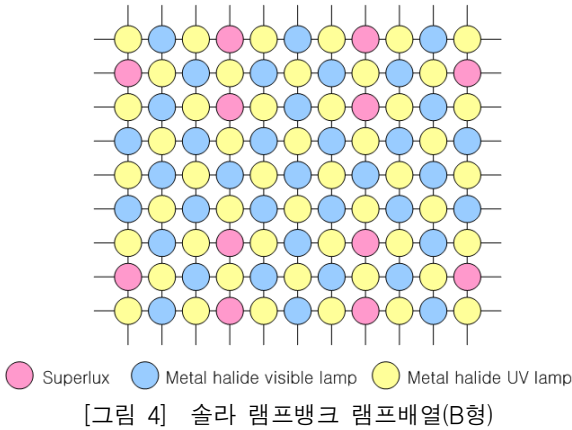
[표 4] B형 파장영역별 복사조도

구 분	개수	파장영역별 복사조도(W/m <sup>2</sup> )			합 계
		자외선	가시광선	적외선	
가시광선램프	37	20.76	480.20	307.44	808.40
자외선램프	12	68.16	84.23	59.15	211.54
적외선램프	50	0.07	21.43	183.75	205.25
소 계	99	88.99	585.86	550.34	1,225.19
규 격 값	-	44.2~ 91.8	517~ 604	393.6~ 590.4	1,008~ 1,232



● Superlux ● Metal halide visible lamp ● Metal halide UV lamp

[그림 3] 솔라 램프뱅크 램프배열(A형)



때문에 램프의 수가 다르더라도 비교 가능하기 때문이다. 또한 그림 3에서 적외선 램프를 집중시킨 이유는 머리말에서 언급했듯이 적외선 램프를 일반적으로 사용하고 있기 때문에 그림 4와 같이 삼파장(Three-wavelength) 램프를 골고루 장착한 것과 비교 및 최적화를 찾아낼 수 있기 때문이다. 표 4에서 보는 바와 같이 B형도 A형과 마찬가지로 규격 조건을 모두 만족하였다.

건이 대기압이었으므로 전체적으로 솔라 램프뱅크 내의 압력은 일정한 분포를 보였다. 또한, 솔라 램프뱅크 윗부분의 입구부에는 솔라 램프뱅크 아랫부분보다 공간이 상대적으로 작아 미소하지만 다소 높은 압력 분포를 보였다. 그러나 시간이 지남에 따라 일정한 정상상태의 압력 분포 결과를 보였다.

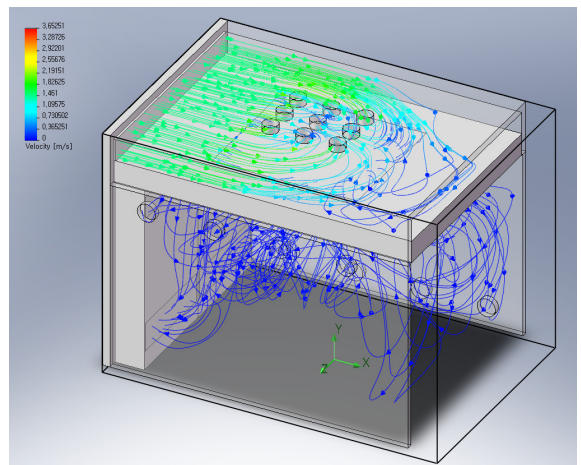
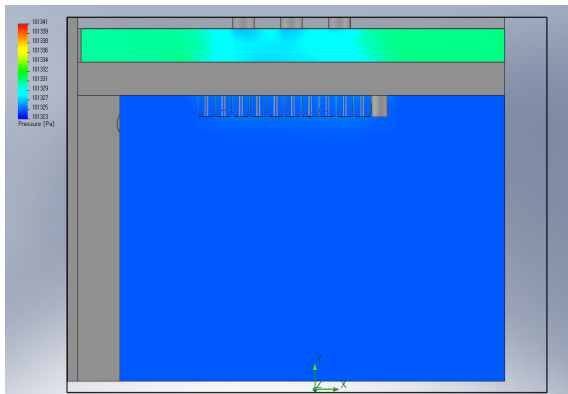
#### 4. 수치해석 결과 및 고찰

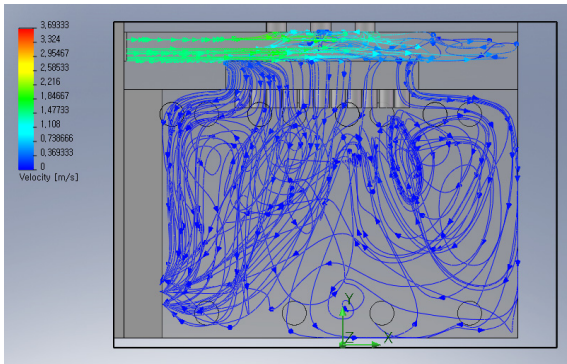
##### 가. 솔라 램프뱅크 내의 압력 결과

그림 5와 6은 각각 A형과 B형의 솔라 램프뱅크 내의 압력 결과이다. ‘2.가’에서 설명하였듯이 초기 조

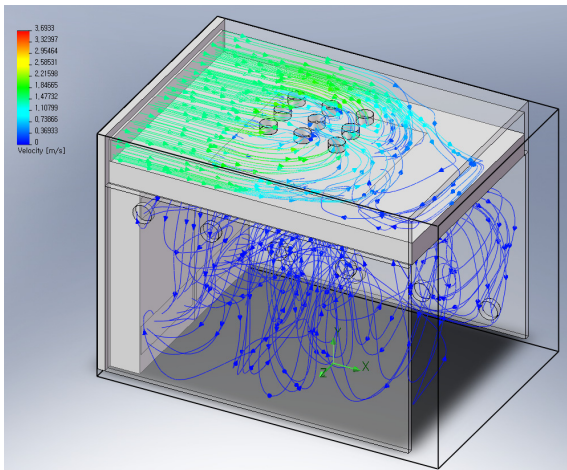
##### 나. 솔라 램프뱅크 내의 속도 결과

그림 7과 8 그리고 그림 9와 10은 각각 A형과 B형의 솔라 램프뱅크 내의 유속 결과이다. 그림에서 보는바와 같이 A형과 B형의 속도 초기조건(1.5m/s)은 동일하며 결과가 두 가지 모두 최대 3.7%까지의 유

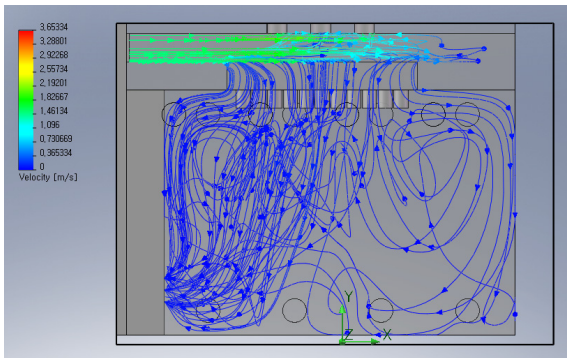




[그림 8] 솔라 램프뱅크 내의 속도 분포 결과 (A형, 측면 구조)



[그림 9] 솔라 램프뱅크 내의 속도 분포 결과 (B형, 트리메트릭 구조)

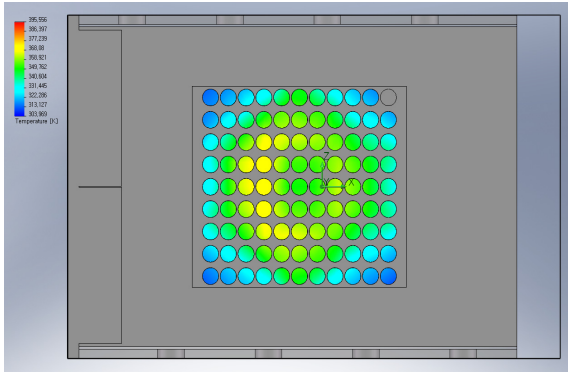


[그림 10] 솔라 램프뱅크 내의 속도 분포 결과 (B형, 측면 구조)

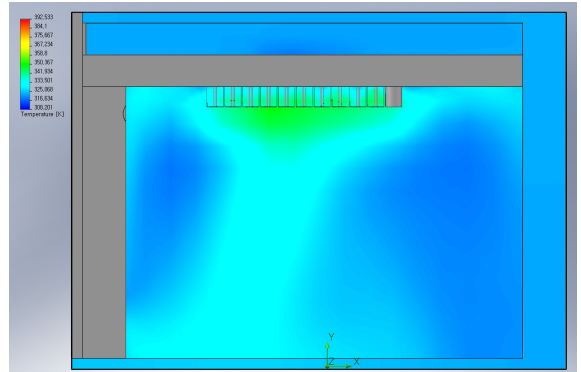
동속도 분포를 보이고 있으며 솔라 램프뱅크의 천장 부분은 그림 8과 10에서 보듯이 램프가 장착된 부분 윗 공간이 아래쪽 보다 면적이 적어서 공기의 유속이 다소 크며 스윙(Swirl)의 형태로 램프가 장착된 부분 사이 공간으로 빠져나오는 것을 확인할 수 있었다. 반면에 램프가 장착된 부분 아래쪽 공간은 공기의 유동면적이 확대되어 유속이 작다. 그림 8과 10에서 나타낸 바와 같이 각 부분의 출구부로 공기가 빠져나가며 미소하지만 램프 부분 하단부 측면에서 와류(Turbulence)가 발생하는 것으로 나타났다.

#### 다. 솔라 램프뱅크 내의 온도 결과

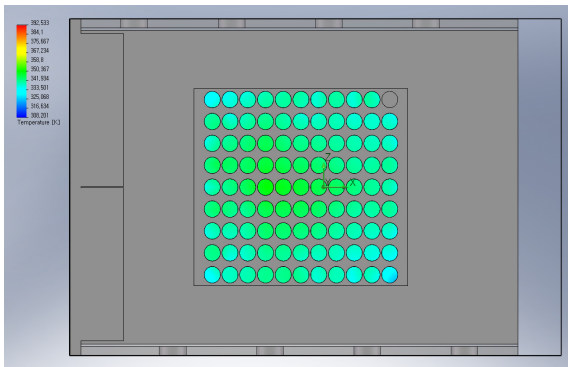
그림 11과 12, 그림 13과 14는 각각 A형과 B형의 솔라 램프뱅크 내의 램프 온도 결과와 솔라 램프뱅크 측면의 온도 분포의 결과이다. A형은 그림 11에서 보는바와 같이 램프뱅크 중앙을 중심으로 원형의 열분포를 보이고 있다. 중앙 좌측의 노란색 부분은 온도가 368K 범위에 있고 중앙 우측의 연두색 부분은 온도가 358K 범위에 있으며 원형 부분과 중앙 부분의 온도차이는 약 20~30K이었음을 알 수 있었다. 그러나 솔라 램프뱅크의 열분포가 고르지 않고 크게 두 영역으로 나뉘어 온도가 분포하고 있으며 램프를 장착한 측면 부분은 중앙 부분보다 온도가 높음을 알 수 있었다. 그림 13은 측면에서 본 온도 분포의 결과이며 열흐름은 다소 좌측 부분으로 형성되며, 이는 열흐름이 균일하지 못함을 알 수 있다. 반면에 B형은 A형과는 달리 가시광선 램프와 적외선 램프를 교대로 장착한 형태이며 그림 12에서 본 결과 각 램프를 조합하여 설계한 솔라 램프뱅크이므로 열이 한 곳에 집중하지 않고 분산됨을 알 수 있었으며 램프 중앙의 온도는 350K이고 램프 가장자리 온도는 326~355K를 나타내고 있다. 그림 14는 측면에서 본 온도 분포의 결과이며 램프 중앙과 가장자리의 온도가 일정하게 분포되어 있음을 볼 수 있었으나 열흐름은 A형과 유사한 반면에 B형은 대체적으로 균일한 열흐름을 보였다. 솔라 램프뱅크의 램프 온도 및 측면의 온도 분포 결과를 토대로 A형과 B형의 결과를 비교해 볼 때 최종적으로 태양복사 지침서와 복사조도 규격은 둘 다 만족 시켰으나 B형의 솔라 램프뱅크가 A형보다 열흐름과 온도 분산 면에서 우수함을 보였고 확인



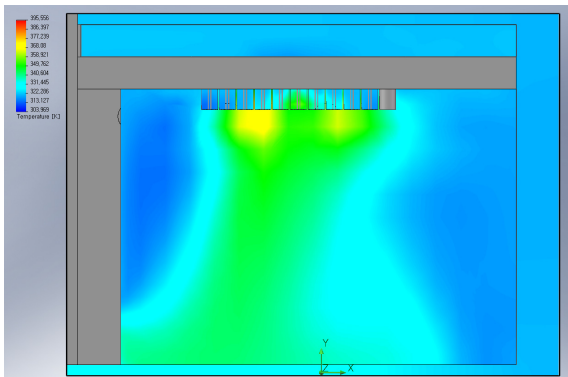
[그림 11] 솔라 램프뱅크 내의 램프 온도 결과(A형)



[그림 14] 솔라 램프뱅크 내의 측면 온도 결과(B형)



[그림 12] 솔라 램프뱅크 내의 램프 온도 결과(B형)



[그림 13] 솔라 램프뱅크 내의 측면 온도 결과(A형)

할 수 있었다.

그래서 이 연구를 통하여 실제 환경실험 시 최적의 램프 배열이 전산 수치해석을 통하여 열흐름을 밝히고 곧 적용하는 것이 가능해 졌고 솔라 램프뱅크를

이용한 환경실험을 수행할 경우 A형과 B형의 경우를 통해 모두 열흐름이 다소 편중되므로 최적 구간에서 피시험체를 설치하여 평가하는 것이 적절하다고 판단 된다.

## 5. 맺음말

본 연구는 솔라 램프뱅크 내의 열유동 수치해석을 통하여 실제 적용 가능성을 검토 하였고 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 독자적인 램프 조합방식으로 선진국에서 적용하지 않은 상용램프 조합방식을 채택하여 태양빛을 전 파장에 걸쳐서 모사하였다.
- (2) 설계한 B형 램프방식에서 열흐름이 A형 램프방식보다 한 곳에 집중되지 않고 전체적으로 골고루 분산됨을 알 수 있었다.
- (3) 본 연구를 통하여 램프 배열방식, 램프 각도조절 및 Fan 제어 등 다양한 변수 등으로 전산 수치해석을 할 수 있게 되었으며 따라서 적합한 최적화 연구를 모색하고 수행할 수 있는 기반을 제시할 수 있게 되었다.
- (4) 실제 각종 무기체계 및 직물류, 위장페인트 등 특수목적 도료가 사용되는 시험평가 수행 시 오차

를 최대한 줄일 수 있으며 램프는 저비용 예산이 가능하여 에너지 절약이 된다. 따라서 군사 또는 민간 산업체 등 복합 환경 시험평가를 운용하는 곳에 파급될 것이라 기대된다.

### 참 고 문 헌

- [1] MIL-STD-810F, Method 505.4, "Solar Radiation", Department of Defense, 2000.
- [2] W. Budde, "Optical Radiation Measurements", Vol. 4, Academic Press, New York, 1983.
- [3] F. Grum and R. J. Becherer, "Optical Radiation", Measurements Vol. 1, Academic Press, New York, 1982.
- [4] R. Danial Overheim and David L. Wager, "Light and Color", John Willy & Sons, New York, 1982.
- [5] Hecht, "Optics", Addison-Wesely, p. 53, New York, 1987.
- [6] R. Byron Bird, "Transport Phenomena", John Willy & Sons, pp. 291~297, New York, 1976.
- [7] Baek Sang Hwa, "J Korean Ind. Eng. Chem.", Vol 10, No. 8, pp. 1147~1154, 1999.
- [8] James R. Welty, "Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer", John Willy & Sons, pp. 353~378, pp. 428~444, New York, 1982
- [9] Hyun Ju Park, Study on the Effect of the Ambient Temperature on the Luminous Flux of Blub Type Flourescent Lamp, Department of Electrical Engineering, Yonsei University, 1989.
- [10] Gye Hyun Jo, Development of Hot Restarting Ignition Circuits to Expand HID Lamp Life, Department of Electrical Engineering, Kangwon National University, 2004.
- [11] Kyung Yul Kim, The Characteristic Evaluation of Thermal Fatigue for Tungsten Filament, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, 2002.