

## 복사열 반사판의 설계를 위한 광학적 해석 및 실험기법

정 해 용, 송 태 호<sup>†</sup>, 유 승 열\*

한국과학기술원 기계항공시스템 학부, \*한국수자원공사 수도기술처

### Optical Analysis and Experimental Method for Design of Radiative Thermal Reflector

Haeyong Jung, Tae-Ho Song<sup>†</sup>, Seung-Yeol Yoo\*

School of Mechanical, Aerospace and System Engineering,

Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

\*Water Supply Technology Department, Korea Water Resources Corporation, Daejeon 306-711, Korea

(Received March 14, 2008; revision received July 28, 2008)

**ABSTRACT:** Radiative heating is suitable for outdoor heating system in windy and cold seasons. Optimal design of the reflector is very important to maximize heat transfer to a specific target area in the open space. The geometrical optical theory can be applied to analyze efficiency of the reflector. Commercial ray tracing computer programs are available only for limited geometries of the reflector. Alternatively, it may be designed and analyzed through an approximated simple lens theory. Two types of reflectors are analyzed using either of these methods. The key issue in this paper is to propose a new illumination experimental method for determination of the radiative efficiency. Optical light source and illuminometer are employed. The calculated efficiency of the reflector is compared with experimental one for checking the reliability. The relative errors between the experimental and analytical results are less than 5%, which proves the validity of this method. Based on these methodologies, a practical reflector and heating lamp unit is developed.

**Key words:** Reflector(반사판), Radiation(복사), Infrared(적외선), Illumination(조도)

기 호 설 명	
$A$	: 면적 [ $m^2$ ]
$a$	: 광원과 반사판 사이의 거리 [m]
$b$	: 반사판으로부터 상이 맺히는 거리 [m]
$c$	: 각 광원 사이의 거리 [m]
$e$	: 조도 [Lux]
$F$	: 형상계수
$f$	: 초점거리 [m]
$h$	: 반사판 높이 [m]

$\ell$	: 광원과 피가열면 사이의 거리 [m]
$R$	: 구면반사판 반경 [m]
$T$	: 실험환경온도 [K]
$w$	: 반사판 너비 [m]

#### 그리스 문자

$w\alpha$	: 반사판 각도
$\eta$	: 효율(efficiency)
$\theta$	: 편각(polar angle)
$\lambda$	: 복사 파장(wave length of radiation)
$\rho$	: 반사율(reflectivity)
$\phi$	: 방위각(azimuthal angle)

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-42-869-3032; fax: +82-42-869-8207

E-mail address: taehosong@kaist.ac.kr

## 1. 서 론

한국과 같이 겨울철에 입학식이나 졸업식 등의 야외행사가 많은 나라에서는 야외에서의 활동성 증대를 위한 야외난방이 매우 필요하다. 이러한 목적을 위해서는 전력이나 직화를 이용한 원격 복사 가열 방식이 적합하다. 즉, 일반적으로 실내 난방에 쓰이는 대류 열전달 매커니즘은 실외에서는 바람 등의 영향으로 인해 열전달 효율이 극히 낮으므로 적합하지 않고, 복사 열전달은 적외선에 의해 직접적으로 열을 전달하므로 춥고 바람이 심하게 부는 계절의 야외 난방 장치에 알맞다. 이러한 목적으로 사용될 수 있는 열원으로는 예전부터 사용해 온 세라믹 히터가 있다. 또한 최근 보급되고 있는 근적외선 할로겐램프도 고온, 고효율의 이상적인 램프이다.

발열램프나 세라믹 히터처럼 발열장의 표면온도가 상당히 높은 경우 대부분의 열이 적외선의 형태로 전달된다. 따라서 임의의 공간상에서 우리가 원하는 특정한 위치로의 복사열전달을 최대화하기 위해서는 반사판의 최적설계가 상당히 중요하다. 이러한 반사판은 적외선 파장보다 훨씬 크기가 크므로 기하광학적인 해석이 가능하다. 따라서 가시광선의 전달을 염두에 둔 조명이론과 해석법이 유효하게 적용될 수 있고, 이를 위해 가능하다면 광선 추적 프로그램을 이용하는 것이 바람직하다.

Kim et al.<sup>(1)</sup>은 photopia<sup>®(2)</sup>를 이용하여 터널용 고효율 조명기구의 반사판을 설계하였고 시뮬레이션 하였으며, Jeong et al.<sup>(3)</sup>은 SpeROD(Specular Reflector Optical Designer)라는 광학 설계 프로그램을 개발하여 형광등기구용 경면 반사판을 설계하여 FIELD<sup>®(4)</sup>를 이용하여 반사판을 시뮬레이션 하였으며, Park et al.<sup>(5)</sup>은 photopia<sup>®</sup> and lumen-micro<sup>®(6)</sup>를 이용하여 칠판등용 반사판을 설계하고 시뮬레이션 하였다. 또한 Jung et al.<sup>(7)</sup>도 photopia<sup>®</sup> and lumen-micro<sup>®</sup>를 이용하여 도로 방음벽용 조명기구의 반사판을 설계 및 시뮬레이션 하였다.

하지만 앞의 논문들에서 조명용 반사판 설계에 사용된 photopia<sup>®</sup>, FIELD<sup>®</sup>, lumen-micro<sup>®</sup> 등의 프로그램들은 2차원의 형상만을 구현할 수 있고, 균일한 조도분포에 중점을 둔 배광예측 프로그램이므로 임의의 공간상에서 특정한 위치로의 열전

달을 최대화해야 하는 복사열 반사판의 성능을 해석함에 있어서는 적합하지 않다. 또한 Optics-Lab522<sup>®(8)</sup>라는 광선 추적 프로그램은 광원에서 조사된 총 빛의 양과 우리가 원하는 특정한 위치로 조사된 빛의 양의 비를 구할 수 있지만 복잡한 형상에의 적용에 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 상용 광선추적 프로그램의 포괄적 이용, 혹은 신규 프로그램을 개발하려는 시도 대신, 이보다 손쉽고 효율적인 방법을 개발하였다. 즉, 앞서 언급한 사각 세라믹 히터에 적용할 수 있는 사각 반사판과, 근적외선 할로겐램프 어레이에 적용할 수 있는 구형 반사판을 해석 및 설계하였다. 우선 반사판의 성능을 평가하기 위해 OpticsLab522<sup>®</sup>를 이용하거나 렌즈이론을 적용하여 설계 및 근사 해석하였다. 다음으로 적외선으로 이루어지는 복사열전달을 가시광선으로 상사시켜 광원과 조도계를 이용한 실험을 통하여 반사판의 성능을 평가하는 새로운 방법을 소개하였다. 이 방법을 예시하기 위해 선택된 사각 반사판과 구형 반사판의 주요변수들을 변화시켜가며 얻은 실험 및 해석 결과의 비교를 통해 제시된 방법의 타당성을 입증할 것이다.

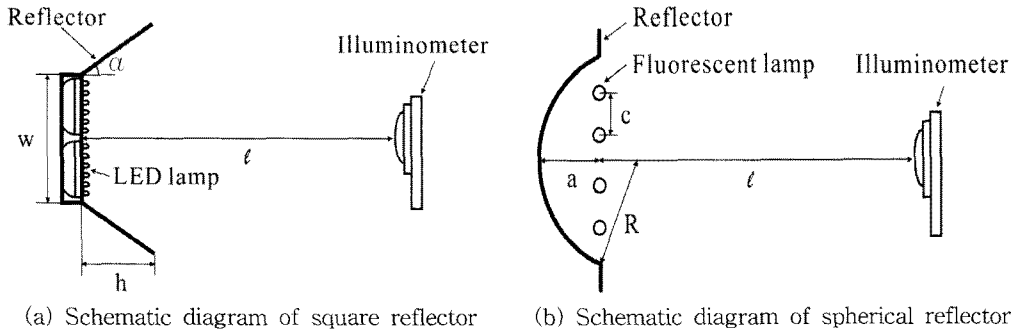
## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도로서 STS 304로 제작된 반사판과 열원을 상사시킨 광원, 그리고 특정 위치에서 복사 열전달되는 적외선 열 유속을 비례적으로 모사하는 빛의 조도를 측정할 수 있는 조도계로 구성된다. 각 광원은 사각형 세라믹 히터와 할로겐램프를 염두에 둔 것인데 그 광원면이 광학적으로 확산적이라고 보았고 반사면은 정반사면으로 보았다.

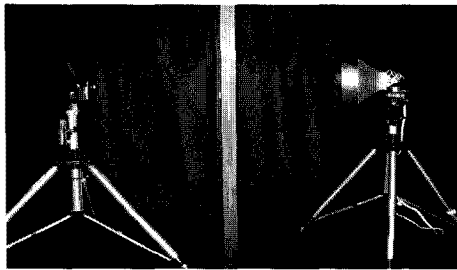
반사판의 성능을 결정하는 주요 변수는 다음과 같다. 사각반사판의 경우는 높이와 너비의 비인  $h/w$ 와 반사판의 각도  $\alpha$ 로 설정한다. 구형 반사판의 경우는 반사판의 구에 대한 반경  $R$ 과 반사판으로부터 광원까지의 거리  $a$ , 그리고 각 광원 사이의 거리  $c$ 로 설정한다(Fig. 1 참조).

반사판 전면의 전체 반구면상의 조도를 면적 적분하고 이것을 가지고 반구면 상의 일부 목적면 상의 조도 면적 적분치를 나누면 목적면으로

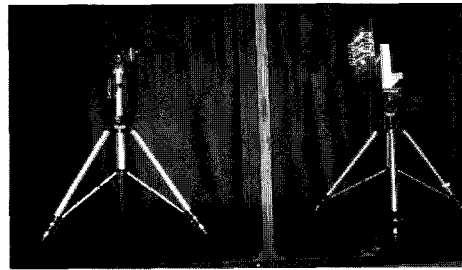


(a) Schematic diagram of square reflector

(b) Schematic diagram of spherical reflector



(c) Photograph of square reflector



(d) Photograph of spherical reflector

Fig. 1 The experimental apparatus.

의 복사열전달 효율을 구할 수 있다. 이 값이 우리가 알고자 하는 것이며 이를 극대화하는 반사판이 바로 최적면이 되는 것이다.

사각 반사판의 광원으로는 35 mm의 직경을 가지는 4개의 원형 1 W LED 램프를 사용하고, 구형 반사판의 광원으로는 193 mm의 발광장과 12 mm의 직경을 가지는 4개의 7 W 형광등을 사용한다.

구형 반사판에 사용된 형광등의 경우는 확산적으로 빛이 방출된다고 볼 수 있지만 사각 반사판에 사용된 LED 램프의 경우는 전방으로 편중되어 빛이 방출되는 경향이 발견되었다. 따라서 반구 방향으로 일정하게 같은 양의 빛을 조사시키기 위해 Fig. 2와 같이 LED 램프 위에 실리카 겔을 쌓고, 그 위에 젯빛 유리를 덮음으로써 LED 램프에서 방출되는 빛을 확산시켜 사용하였다.

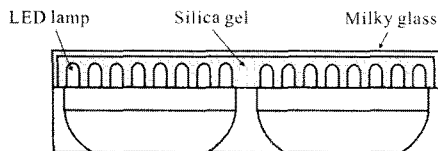


Fig. 2 Schematic diagram of the LED lamp.

본 실험에서 복사에너지를 상사한 가시광선의 조도 측정을 위해 사용된 조도계는 TES-1336A로써, ±3%의 정확도를 가진다. 이 조도계는 거리에 따른 조도를 측정하여 거리의 제곱에 반비례하는지를 확인하는 예비실험을 통해 두 가지 광원에 대한 교정을 마친 상태에서 실험에 사용되었다.

반사판은 0.777의 반사율을 가지는 STS 304(18-20% Ni, 2% Mn, 1% Si, 0.08% C, Fe balance, polished)로 제작하였다. 이 반사율은  $T = 298\text{ K}$ ,  $\lambda = 1.81\ \mu\text{m}$ 에서의 값으로서 적외선 전 구역에서의 일정한 값을 가진다.<sup>(9)</sup>

다양한 변수들을 갖는 여러 반사판을 제작하였다. 그 규격은 Table 1에 나타내었다. 사각반사판은 제작이 쉬워서 여러 가지를 시도하였으나, 구형 반사판은 고가이므로 한 가지만 제작하여 실험하였다.

모든 실험은 상온에서 수행하였으며 외부에서의 빛을 차단하기 위해 암실에서 수행하였다. 암실의 내부는 모두 무광의 검은색으로 도색하였고 그 크기는 4 m(길이) × 1.2 m(폭) × 2 m(높이)이다. 암실의 길이방향 끝면에 광원과 반사판이 놓이고, 그 반대편 끝면에 조도계를 놓았으며, 광원을

Table 1 Specification of the reflectors

Square reflector					
구분	w(mm)	h(mm)	h/w	$\alpha$	Surface
Case 1	80	40	0.5	15°	Specular
Case 2	80	80	1.0	15°	Specular
Case 3	80	120	1.5	15°	Specular
Case 4	80	40	0.5	30°	Specular
Case 5	80	80	1.0	30°	Specular
Case 6	80	120	1.5	30°	Specular
Spherical reflector					
구분	R(mm)	a(mm)	c(mm)	Surface	
Case 7	165	82.5	40	Specular	

여러 각도로 회전시켜 구면상의 여러 각도를 설정하였다.

## 2.2 실험방법

통상 피 가열면의 크기와 열원으로부터의 거리는 열원의 크기에 비하여 훨씬 크다. 이 경우 열원은 거의 점광원처럼 다룰 수 있고, 구면상의 면적적분은 입체각(Solid angle) 상의 각적분과 비례하게 된다. 이러한 상황에서 반사판의 성능을 판단하기 위한 척도로써 입체의 공간상에서의 반구방향으로의 전체 복사 열전달량과 특정한 위치로의 복사 열전달량의 비, 즉 반사판의 효율  $\eta$ 를 계산하기 위하여 다음 식을 이용한다.<sup>(10)</sup>

$$\eta = \frac{\sum_{i: \text{target angle}} e_i \sin \theta_i \Delta \theta_i \Delta \phi_i}{\sum_{i: \text{total angle}, 4\pi} e'_i \sin \theta_i \Delta \theta_i \Delta \phi_i} \quad (1)$$

여기에서  $e_i$ 는 반사판이 설치된 상태에서 측정된 조도로써 전체 복사 열전달량을 나타내며,  $e'_i$ 는 반사판이 없는 상태에서 측정된 조도로써 특정한 위치로의 복사 열전달량을 나타내고,  $\Delta \theta$ ,  $\Delta \phi$ 는 각 측정 방향의  $\theta$ ,  $\phi$ 가 대표하는 각도범위이다.

조도계와 반사판 사이의 거리( $\ell$ )를 2m로 고정하였다. Table 1의 반사판의 크기  $w$ 와 비교할 때에  $\ell \gg w$ 로서 반사판이 피 가열면과 충분히 떨어져서 앞서, 언급한 것처럼 피 가열면에서 볼

때에 광원이 거의 점광원처럼 보이는 현실적 상황을 모사한 것이다.

반사판이 없는 상태에서 광원을 수직방향과 수평방향으로 180° 범위에서 10°마다 각도를 변화시켜가며 19×19 개의 노드에서 측정된 조도의 합산에 의해 전체 조도를 구한다. 수평방향의 좌우로 30° 범위, 수직방향의 위아래로 30° 범위를 피 가열면으로 설정하고, 각각 규격이 다른 반사판을 설치하여 수평, 수직으로 각각 60°의 범위에서 10°마다 각도를 변화시켜 가며 7×7개의 노드에서 측정된 조도의 합산에 의해 피 가열면의 조도를 구한다. 이 값들을 식(1)에 대입함으로써 반사판의 성능을 판단하는 효율을 구할 수 있다.

## 3. 해석

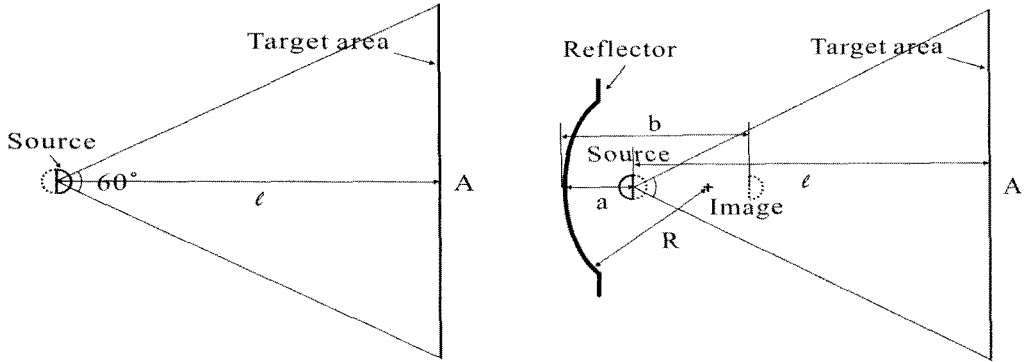
전술한 바와 같이 반사판의 성능해석에 수치해석 코드를 적용할 수 있다면 매우 유용할 것이다. 본 연구의 대상인 2종의 반사판의 경우에는 적용할 수 있는 범용코드가 없었고 다만 사각 반사판의 경우 OpticsLab522<sup>®</sup>가 적용 가능하였다. 그리고 구형 반사판의 경우는 형상계수 이론과 간단한 렌즈이론을 적용하여 근사해석을 수행하였다. Fig. 3은 구형 반사판의 근사해석을 위한 개념을 도시하고 있다. 열원과 피 가열면 사이의 형상계수는 반사판을 바라보고 있는 후방 절반면과, 그 반대편인 피 가열면을 직접 바라보고 있는 전방 절반면으로 나누어 생각하고 각각의 형상계수를 구한다. 그리고 이 두 값의 평균을 내는 방법에 의해 총괄 형상계수를 구할 수 있다.

Fig. 3의 (a)와 같이 광원이 피 가열면을 바로 바라보고 있는 전방 절반면의 경우는 다음 식과 같이 형상계수를 구할 수 있다.<sup>(10)</sup>

$$F = \frac{A}{2\pi \ell^2} \quad (2)$$

여기서  $F$ 는 형상계수,  $A$ 는 피 가열면의 면적,  $\ell$ 은 광원으로부터 피 가열면까지의 거리를 나타낸다.

Fig. 3의 (b)와 같이 광원이 반사판을 바라보고 있는 후방 절반면의 경우는 반사판의 반사에 의해 반사판에서  $b$ 만큼 떨어진 거리에 그 상이 맺히므로 상이 맺히는 지점에서 피 가열면을 바라



(a) Forward half source facing target area (b) Backward half source facing reflector

Fig. 3 Schematic diagram of the spherical reflector.

보고 있는 전방 절반면으로 생각할 수 있다. 따라서 식(2)에서의  $l$  대신 ( $l-b+a$ )를 대입함으로써 다음 식과 같이 그 형상 계수를 구할 수 있다.

$$F = \frac{A}{2\pi(l-b+a)^2} \quad (3)$$

광학에서의 렌즈이론에 의하여 광원과 반사판 사이의 거리인  $a$ 와 초점거리인  $f$ , 그리고 반사판으로부터 상이 맺히는 거리인  $b$ 와의 관계식은 다음 식과 같음을 알 수 있다.<sup>(11)</sup>

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (4)$$

식(4)에서 초점거리  $f = R/2$ 이 되고, 여기서  $R$ 은 구면 반사판의 반경을 나타낸다. 식(3)에 식(4)를  $b$ 에 관해 정리하여 대입하면 반사판을 바라보고 있는 후방 절반면의 형상계수를 구할 수 있다. 이 후방절반면의 경우는 반사판에 의해 반사가 되므로 반사판이 가지는 광학적 물성치인 반사율에 의해 초기 광원의 방출조도보다 더 약해지게 된다. 따라서 식(3)에 반사판의 반사율을 곱하여 최종적으로 형상계수를 구한다. 이렇게 구해진 피 가열면을 바로 바라보고 있는 반구부분의 형상계수와 반사판을 바라보고 있는 반구부분의 형상계수를 평균을 취함으로써 다음 식과 같이 구형 반사판의 총괄 형상계수, 즉 효율을 구할 수 있다.

$$F = \frac{l^2}{3\pi} \left( \frac{1}{l^2} + \frac{\rho}{\left( l + \frac{2a^2 - 2aR}{2a - R} \right)^2} \right) \quad (5)$$

여기서  $a$ 는 각 램프사이의 거리인  $c$ 에 따라 조절되며  $\rho$ 는 반사율을 나타낸다.

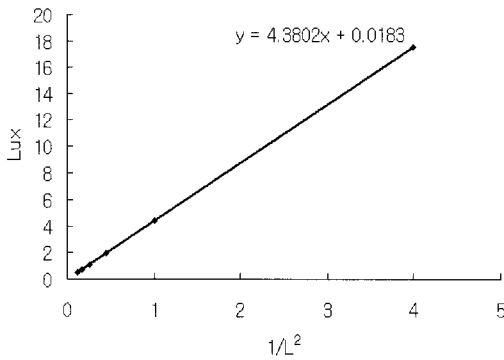
#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 조도 교정 결과

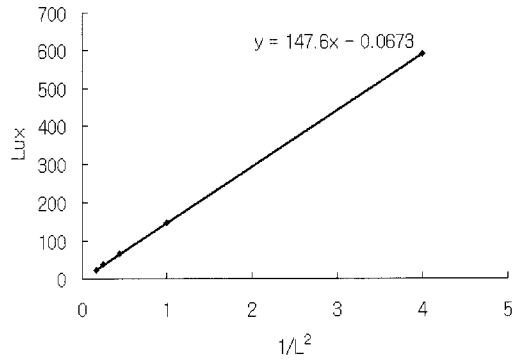
앞서 언급했듯이, 조도계는 각 광원에 대한 호환성이 성립하는지를 확인해야 한다. 따라서 조도계를 사용하기 전 교정이 필요하다. 반사판이 없는 상태에서 각 광원을 설치하여 거리에 따라 측정된 조도가 광원과 조도계 사이의 거리의 제곱에 반비례하는지를 확인한다. 이것은 조도계의 선형성을 확인하는 것으로써, 이 연구에서 반드시 필요한 조도계의 특성이다.

Fig. 4의 (a)는 사각 반사판에 사용된 LED 램프로부터의 거리에 따른 조도의 최소 제곱 회귀 분석 그래프이며, (b)는 구형 반사판에 사용된 형광등의 최소 제곱 회귀 분석 그래프이다.

조도는 거리의 제곱에 반비례하므로 거리가 무한히 커지면 조도 값은 반드시 0으로 가야한다. 그러나 Fig. 4의 그래프를 보면 알 수 있듯이 LED 램프의 경우 1.83%, 형광등의 경우 6.73%의 오차를 가진다. 이는 작은 값으로 여겨지므로 무시 가능하다.



(a) LED lamp



(b) Fluorescent lamp

Fig. 4 Illumination along the distance using least-square regression.

4.2 실험 결과 및 고찰

각각의 다른 주요변수를 가지는 여섯 가지 경우의 사각 반사판을 OpticsLab522<sup>®</sup>를 이용하여 해석효율을 구하였고 구형반사판의 경우는 식(5)를 이용하여 해석효율을 구하였다. 그리고 이 일곱 가지 경우의 반사판에 대해 실험을 통하여 얻어진 효율의 비교결과와 오차를 Table 2에 나타내었다.

결과를 통하여 사각 반사판의 경우 대략 50% 내외의 효율을 가짐을 알 수 있다. 또한  $h/w$ 가 같을 때  $\alpha$ 가 15°일 때보다 30°일 때 더욱 큰 효율을 얻을 수 있으며,  $\alpha$ 가 같을 때  $h/w$ 가 커질수록 효율 또한 커지는 경향이 있음을 알 수 있다.

구형 반사판의 경우는 40% 가량의 효율을 보이는 게, 단 한 가지 형상에 대하여 얻은 결과이므로 일반화는 하기 어렵다. 위의 식(5)를 살펴보면,  $R$ ,  $a$ , 그리고  $c$ 의 어떠한 한 가지 변수에 변화에 따라 경향이 바뀌는 것이 아니라 주요변수

들의 어떠한 특정한 조합에 의해 최대 효율을 가지는 최적 반사판이 설계됨을 알 수 있다.

실험치와 해석치의 평균 오차는 7.372%로 구해진다. 이 평균 오차는 Chauvenots's criterion에 의해 Case 1이 무시되어 4.859%로 감소한다.<sup>(12)</sup> 앞에서 언급했던 측정상의 오차 및 환경 오차를 감안할 때 이 결과는 제시된 새로운 방법의 타당성을 입증하기에 만족스러운 결과임을 알 수 있다.

본 연구에서 오차의 원인으로는 다음과 같은 이유를 들 수 있다. 반사판과 조도계 사이의 거리 측정 시와 반사판의 각도를 조절시 관찰자의 측정에 의한 오차와 검은 색으로 도색된 암실 벽의 미세한 반사, 암실 내부에서 가지는 0.1 Lux의 자체조도, 그리고 광원이 반구 방향으로 정확하게 같은 양의 빛을 완벽하게 확산하지 못한다는 환경에 의한 오차를 들 수 있다.

Table 2 Efficiency comparison of the experiment and the analysis

구분	Experiment	Analysis	Error(%)
Case 1	0.420	0.343	22.449
Case 2	0.510	0.503	1.392
Case 3	0.537	0.557	3.591
Case 4	0.479	0.429	11.655
Case 5	0.558	0.545	2.385
Case 6	0.620	0.605	2.479
Case 7	0.408	0.379	7.652

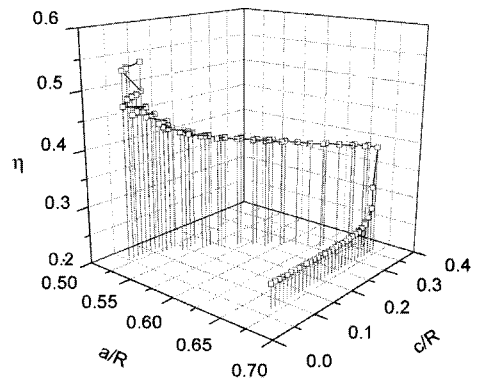


Fig. 5 Efficiency for spherical with various  $a/R$  and  $c/R$ .

실험결과와 해석결과의 비교를 통해 식(5)의 신뢰도를 확인하였기 때문에 식(5)를 여러 설계인자를 바꾸어 가며 계산한 결과를 Fig. 5에 나타내었으며,  $a/R = 0.52$ ,  $c/R = 0.09$ 일 때 최대효율 0.539를 얻을 수 있다.

여러 가지 경우의 반사판을 비교한 결과 가장 큰 효율을 가지는 반사판은 높이와 너비의 비 1.5, 반사판의 각도가  $30^\circ$ 를 가지는 사각반사판인 Case 6임을 알 수 있다. 이 사각 반사판의 성능은 위에서 최적화한 구형 반사판보다도 더 우수하다. 하지만 반사판이 차지하는 자체부피와 각 반사판에 설치할 수 있는 열원에서 방출하는 열량의 크기를 고려한다면 구형 반사판도 그 나름의 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 구형반사판의 상기 최적결과를 이용하여,  $R = 241$  mm,  $a = 125$  mm,  $c = 20$  mm의 규격과  $2000^\circ\text{C}$ 의 표면온도와  $2000$  W의 발열량을 가지는 근적외선 할로겐램프를 이용하여 실제 야외난방에 적용할 수 있는 반사판을 제작하여 실용화를 도모하고 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 복사열 반사판의 설계를 위한 광학적 해석 및 새로운 실험기법에 관한 연구를 기술하였다. 해석적 결과를 얻기 위해 사각 반사판의 경우는 OpticsLab522<sup>®</sup>라는 상용프로그램을 이용하였고 구형 반사판의 경우는 렌즈이론 및 형상계수의 개념을 적용하였다. 복사열의 적외선을 가시광선으로 상사하여 광원과 조도계를 이용한 실험법을 제시하였고 실제 복사열전달 효율을 구하였다. 실험의 결과와 해석 결과를 비교한 결과 그 측정오차와 환경오차를 감안하면 8%내로 잘 일치함을 알 수 있었다. 이로써 본 연구에서 제시된 복사열 반사판 설계를 위한 광학적 해석 및 실험기법이 타당함을 확인할 수 있었으며 이를 바탕으로 실제 응용이 가능한 구형 반사판과 근적외선 할로겐램프 열원을 제작하였다.

## 참고문헌

1. G. H. Kim, J. S. Hwang, M. R. Yun and H. Kim, 2001, The development of a high efficiency luminaries reflector for tunnel lighting, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 15, pp. 1-6.
2. Photopia,<sup>®</sup> Lighting Technologies Inc.
3. J. H. Jeong, S. K. Jin and H. Kim, 1999, Development of the specular reflector optical design program for fluorescent luminaries, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 13, pp. 1-6.
4. FIELD,<sup>®</sup> Lighting Technologies Inc.
5. H. J. Park, D. J. Kim and H. Kim, 2003, The design of a reflector for blackboard lighting, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 17, pp. 13-19.
6. Lumen-micro,<sup>®</sup> Lighting Technologies Inc.
7. S. G. Jung, M. S. Jo and H. Kim, 2005, The development of luminaries reflector for sound proof wall, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Proceedings of the KIIEE, pp. 201-205.
8. OpticsLab522,<sup>®</sup> Science Lab Software.
9. Y. S. Touloukian and D. P. Dewitt, 1970, Thermal Radiative Properties : Metallic Elements and Alloys, IFI/PLENUM, New York, p. 1280.
10. M. F. Modest, 2003, Radiative Heat Transfer, 2nd ed., Academic Science, New York, pp. 132-136.
11. A. Meyer and R. Jorgen, 1989, Introduction to Classical and Modern Optics, 3rd ed., Prentice Hall, New Jersey, pp. 67-71.