

2차광학설계에서 LED모형화의 정확성검증

서광혁, 임춘화

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《과학자, 기술자들은 현실에 튼튼히 발을 붙이고 사회주의건설의 실천이 제기하는 문제들을 연구대상으로 삼고 과학연구사업을 진행하여야 하며 연구성과를 생산에 도입하는 데서 나서는 과학기술적문제들을 책임적으로 풀어야 합니다.》(《김정일선집》 증보판 제15권 492페이지)

LED광학체계설계는 발광소편을 광원으로 하는 LED봉합구조설계와 봉합된 LED를 광원으로 하는 조명광학체계설계로 나눌수 있는데 각각 1차광학설계, 2차광학설계라고 한다.[2]

세계적으로 LED광학체계설계에 몽떼까를로광선추적법에 기초한 조명광학체계설계프로그램들인 Zemax, TracePro, ASAP, Lighttools 등이 가장 많이 리용되고있다.[4, 5]

일반적으로 LED광학체계설계에서는 제작자들이 제공한 자료카드에 기초하여 LED모형을 만들고 조명광학체계에 대한 광선추적모의해석을 진행하거나 LED로부터 매우 가까운 거리에 놓이는 렌즈나 반사경을 설계하면서도 그보다 먼 거리에서의 LED복사무늬특성을 놓고 LED모형화의 정확성을 논의한다.[2, 3]

논문에서는 측광거리에 따르는 LED복사무늬의 변화특성을 이론적으로 해석하고 복사무늬들의 호상상관성에 기초하여 두 복사무늬를 비교하는 방법과 Lighttools를 리용하여 LED모형화의 한가지 방법을 제기하고 측광거리에 따르는 복사무늬에 대한 측정결과와 모의결과를 비교분석하는 방법으로 LED모형화의 정확성을 검증하였다.

1. 측광거리에 따르는 LED복사무늬의 변화특성에 대한 이론적해석

LED봉합구조에서 발광체는 두께가 매우 얇은 립방체구조의 반도체소편이며 발광면은 직4각형모양이다. 단일소편LED의 경우에는 출력이 클수록 소편의 발광면적이 크며 집성LED의 경우에는 단일소편을 평면우에 배열했을 때 발광면적이 비교적 크다. 그러므로 LED의 복사분포는 반구의 공간상에서 이루어지는데 바로 이것이 체적발광체인 일반조명광원과 구별되는 중요한 특징의 하나이다.

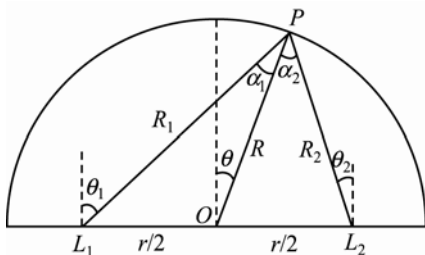


그림 1. 두 광원(L_1 , L_2)과 측정점 P사이의 기하학적관계

빛접수면에 나타나는 복사무늬의 변화특성을 해석하기 위하여 람베르트복사무늬를 가지는 두 광원이 반경이 R 인 구면우에 만드는 비침도분포의 수학적모형을 보기로 하자. 이때 두 광원의 크기는 그것들사이의 거리 r 에 비하여 매우 작다고 가정한다.(그림 1)

측정점 P에서의 비침도 E_p 는 광원 L_1 과 L_2 에 의한 비침도의 합으로 표시된다.

$$E_p = \frac{I(\theta_1)}{R_1^2} \cos \alpha_1 + \frac{I(\theta_2)}{R_2^2} \cos \alpha_2 \quad (1)$$

람베르트복사의 각분포는 $I(\theta) = I_0 \cos(\theta)$ 이므로 식 (1)을 다음과 같이 표시할수 있다.

$$E_p = \frac{I_0}{R_1^2} \cos \theta_1 \cos \alpha_1 + \frac{I_0}{R_2^2} \cos \theta_2 \cos \alpha_2 \quad (2)$$

한편 시누스정리와 코시누스정리로부터 다음의 관계식들을 얻을수 있다.

$$\frac{r/2}{\sin \alpha_1} = \frac{R}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_1\right)} = \frac{R_1}{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right)}, \quad \frac{r/2}{\sin \alpha_2} = \frac{R}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_2\right)} = \frac{R_2}{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right)},$$

$$R_1^2 = R^2 + \left(\frac{r}{2}\right)^2 - Rr \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right), \quad R_2^2 = R^2 + \left(\frac{r}{2}\right)^2 - Rr \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right),$$

$$\cos \theta_1 = \frac{R}{R_1} \cos \theta, \quad \cos \theta_2 = \frac{R}{R_2} \cos \theta, \quad \cos \alpha_1 = \frac{R + (r/2) \sin \theta}{R_1}, \quad \cos \alpha_2 = \frac{R - (r/2) \sin \theta}{R_2}$$

위의 식들을 리용하여 식 (2)를 R, r, θ 에 관한 함수로 표시할수 있다.

$$E_p = I_0 R \cos \theta \left\{ \frac{R + (r/2) \sin \theta}{[R^2 + (r/2)^2 + Rr \sin \theta]^2} + \frac{R - (r/2) \sin \theta}{[R^2 + (r/2)^2 - Rr \sin \theta]^2} \right\} \quad (3)$$

또한 r/R 에 관하여 다음과 같이 표시할수 있다.

$$E_p = \frac{I_0 \cos \theta}{R^2} \left\{ \frac{1 + (1/2)(r/R) \sin \theta}{[1 + (r/R)^2/4 + (r/R) \sin \theta]^2} + \frac{1 - (1/2)(r/R) \sin \theta}{[1 + (r/R)^2/4 - (r/R) \sin \theta]^2} \right\} \quad (4)$$

r/R 는 측광거리에 비한 광원의 상대적인 크기를 반영하는 량이고 그것의 거꿀수는 광원의 크기에 비한 상대적인 측광거리를 나타낸다. 우리는 상대적인 측광거리를 $R/r = k$ 로 표시하고 측광척도라고 부른다. 측광척도 k 는 $0 < k < +\infty$ 의 값을 가진다.

두 광원사이의 거리 r 를 구자리표계의 원점과 발광면의 중심을 일치시킨 1개 광원의 기하학적크기를 반영하는 파라미터로 보면 식 (4)는 구자리표계의 원점 O 로부터 방향각 θ 에 따르는 비침도분포가 광원의 기하학적형태와 크기, 빔접수면인 구면의 반경 R 에 따라 측광척도 k 에 따라 달라진다는것을 보여준다.(그림 1)

비침도는 빔세기각분포에 따라 다음과 같이 표시할수 있다.

$$E_p = \frac{I(k, \theta)}{R^2} \quad (5)$$

여기서 $I(k, \theta)$ 는 식 (4)로부터 다음과 같이 표시된다.

$$I(k, \theta) = I_0 \cos \theta \left\{ \frac{1 + [(1/k)/2] \sin \theta}{[1 + (1/k)^2/4 + (1/k) \sin \theta]^2} + \frac{1 - [(1/k)/2] \sin \theta}{[1 + (1/k)^2/4 - (1/k) \sin \theta]^2} \right\} \quad (6)$$

만일 $k \gg 1 (R \gg r)$ 이면 $I(k, \theta)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$I_f(\theta) = \lim_{k \rightarrow \infty} I(k, \theta) = 2I_0 \cos \theta \quad (7)$$

식 (7)은 두 광원이 구자리표계의 원점에 놓인 경우 광원의 복사무늬분포를 나타낸다.

광원의 복사무늬분포가 측광척도에 관계되므로 측광마당을 측광척도에 따라 먼마당, 중간마당, 가까운마당으로 구분하였다.

식 (7)에 의하여 식 (6)을 다음과 같이 표시할수 있다.

$$I(k, \theta) = I_f(\theta) K(k, \theta) \quad (8)$$

식 (8)로부터 먼마당복사무늬($k \rightarrow \infty$ 일 때)가 주어지면 가까운마당 또는 중간마당의 복

사무늬는 측광척도에 관계되는 어떤 함수 $K(k, \theta)$ 에 의하여 생성된다고 말할수 있다. 이로부터 $K(k, \theta)$ 를 무늬생성함수라고 부르며 다음과 같이 표시된다.

$$K(k, \theta) = \frac{1/2 + [(1/k)/4]\sin\theta}{[1 + (1/k)^2/4 + (1/k)\sin\theta]^2} + \frac{1/2 - [(1/k)/4]\sin\theta}{[1 + (1/k)^2/4 - (1/k)\sin\theta]^2} \quad (9)$$

우리는 먼마당과 중간마당, 가까운마당에 해당하는 측광척도에 따르는 무늬생성함수를 얻고 컴퓨터모의를 진행하였다.(그림 2) 결과 측광척도가 10이상일 때 먼마당복사분포 $I_f(\theta)$

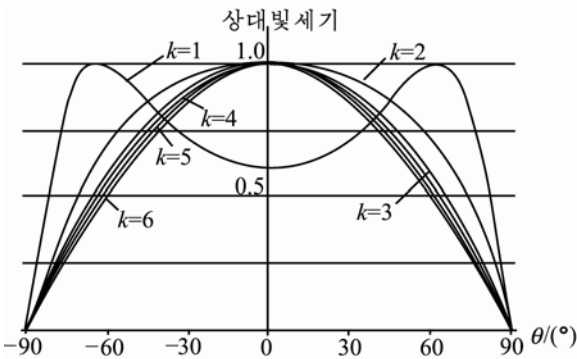


그림 2. 각이한 측광척도에 따르는 복사무늬분포

와 비슷한 복사무늬분포가 얻어졌다. 따라서 측광척도가 10이상일 때의 측광마당을 먼마당으로, 측광척도가 2이하일 때의 측광마당을 가까운마당으로 정의하였다.

그림 2에서 보는바와 같이 측광척도가 작을수록 복사무늬분포가 점차 넓어진다. 또한 측광척도가 1일 때의 복사무늬의 형태는 2개의 광원을 일정한 거리만큼 떨어져 배치한 경우와 매우 비슷하다. 이로부터 빛접수면이 가까운 거리에 있을 때 복사무늬분포는 발광면의 구조(소편배열형태, 전극선 등)를 반영한다는것을 알수 있다.

이와 같이 먼마당복사무늬분포는 LED의 크기와 형태에 관계없이 점광원인 경우의 빛분포를 반영하지만 중간마당과 가까운마당의 복사무늬분포는 LED의 형태와 크기에 따라 달라진다. 이러한 복사무늬분포특징으로부터 경기장이나 도로조명과 같은 일반조명설계에서는 먼마당복사무늬분포만 주어진다면 광원을 점광원으로 보고 조명기구의 크기와 형태에 관계없이 경기장바닥이나 도로면에서의 조명설계를 진행할수 있다. 그러나 렌즈 혹은 반사경과 같은 광학요소들이 광원의 가까운마당 또는 중간마당에 놓이는 LED투광등이나 LED시준기설계에서는 광원의 모형화를 보다 정확히 진행하여야 한다.

2. 복사무늬의 호상상관

어떤 물리적량에 대한 측정값과 이론적계산값사이의 편차는 일반적인 오차론을 적용하여 평가할수 있지만 곡면이나 곡선무늬인 경우에는 적용할수 없다. 그러므로 LED광축에 대한 방향각 θ 에 따르는 빛복사무늬들사이의 일치성은 호상상관법으로 복사무늬들사이의 상관정도를 정량적으로 평가하여 검증한다.

호상상관법에서는 다음과 같은 호상상관(cross correlation)함수를 리용한다.

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t+\tau)dt \quad (10)$$

여기서 x, y 는 각각 시간에 따르는 서로 다른 신호, τ 는 신호 x 에 대한 신호 y 의 지연시간이다.

상관함수 $R_{xy}(\tau)$ 의 값이 어떤 지연시간 τ 에서 령이 아닌 값이면 두 신호는 상관성을 가지며 그 값이 최대이면 상관성이 가장 크다고 평가한다.

상관성정도를 정량적으로 평가하기 위하여 다음과 같은 표준화된 호상상관(normalized cross correlation)함수를 리용한다.

$$C_{xy}(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x(t)y(t+\tau)dt}{\left[\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |y(t)|^2 dt \right]^{1/2}} \quad (11)$$

여기서 $C_{xy}(\tau)$ 를 지연시간이 τ 인 경우 신호 x 와 y 의 상관결수라고 하며 그 크기는 $-1 \leq C_{xy}(\tau) \leq 1$ 이다.

실지 LED의 복사무늬와 모형화한 LED의 θ 에 따르는 복사무늬를 각각 $I_r(\theta)$, $I_s(\theta)$ 라고 하면 이것들사이의 상관결수는 다음과 같이 표시된다.

$$C = \frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} I_s(\theta)I_r(\theta)d\theta}{\left[\int_{-\pi/2}^{\pi/2} I_s^2(\theta)d\theta \cdot \int_{-\pi/2}^{\pi/2} I_r^2(\theta)d\theta \right]^{1/2}} \quad (12)$$

C 는 $0 \leq C \leq 1$ 인 값을 가진다. 만일 모형과 실체의 복사무늬가 완전히 일치한다면 즉 $I_s(\theta) = I_r(\theta)$ 이면 $C=1$ 이다. 일반적으로 모형과 실체의 복사무늬가 완전히 일치할수 없으므로 상관결수 C 는 1보다 작은 값을 가진다.

론문에서는 호상상관법에 따라 LED가 정확히 모형화되었는가 하는것을 컴퓨터모의와 측광을 통하여 얻은 모형과 실체의 중간마당 혹은 가까운마당에서의 복사분포를 비교하여 평가하였다. 이때 θ 는 $\theta_i (i=0, n)$ 로 이루어진 수렬로 되고 $I_r(\theta)$, $I_s(\theta)$ 는 각각 θ_i 에 따르는 $I_r(\theta_i)$, $I_s(\theta_i)$ 수렬로 된다. 이때 $\Delta\theta = \theta_{i+1} - \theta_i = \pi/n$ 이고 θ_0, θ_n 은 각각 $-\pi/2, \pi/2$ 로 취할수 있다. 따라서 $I_r(\theta_i)$ 와 $I_s(\theta_i)$ 로 이루어지는 두 복사무늬의 상관결수는 식 (12)로부터 다음의 식으로 표시된다.

$$C = \frac{\sum_{i=0}^n I_s(\theta_i)I_r(\theta_i)}{\left[\sum_{i=0}^n I_s^2(\theta_i) \sum_{i=0}^n I_r^2(\theta_i) \right]^{1/2}} \quad (13)$$

3. LED모형화와 정확성평가

최근 LED시준기나 LED가로등과 같은 목표면이나 도로면에 대한 엄격한 비침도분포를 요구하는 조명체계설계에서는 단소편면발광형(예폭시평면불합형)과 여러개의 소편을 배열한 집성LED들이 많이 리용되고있다.

실례로 단소편백색LED는 형광체구역이 발광면으로 되지만 실제적인 발광체는 발광면보다 작은 크기를 가지는 소편이다. 우리는 먼저 표준측정(광명LED적분구)을 진행하여 주어진 LED의 전기광학적특성을 얻고 150mm의 측광거리에서 복사분포를 측정하여 주어진 LED가 램베르트복사특성을 가진다는것을 밝혔다. 다음으로 비침도측광체계(그림 3)를 구성하

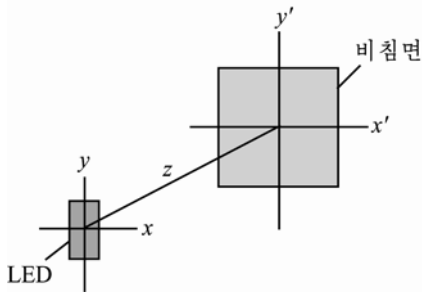


그림 3. 비침도측광체계

분포는 거의 원형이다. 두 모형의 면마당복사무늬분포는 완전히 일치한다. 두 모형에 대한 모의결과는 표와 같다.

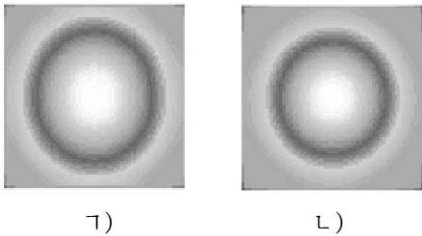


그림 4. 발광면크기모형(Γ)과 소편크기 모형(L)의 비침도분포

표. LED의 두 모형에 대한 모의결과

특성량	발광면크기 모형	소편크기 모형
총빛흐름/lm	32	32
비침면에 떨어진 빛흐름/lm	16.932	17.531
총광선수/개	1 000 000	1 000 000
비침면에 떨어진 광선수/개	319 545	329 867
비침도/lx	최소값	60 762
	최대값	326 980
	평균값	169 620
		175 620

표에서 보는바와 같이 두 모형에서의 특성량값들은 현저한 차이를 가진다.

단소편평면형LED에서 측정과 모의결과에 기초하여 얻은 상대비침도특성은 그림 5와 같다.

그림 5에서 보는바와 같이 소편크기모형인 경우에는 측정결과와 모의결과가 일치하지만 발광면크기모형인 경우에는 측정결과와 모의결과가 심하게 차이난다. 소편크기모형과 발광면크기모형에 의하여 모의한 복사무늬와 측정무늬사이의 상관결수는 각각 99.9, 99.4%이다.

다음으로 가로등이나 투광등에서 많이 이용되고있는 50W백색집성LED를 모형화하고 그 정확성을 검증하였다. 수십개 소편들이 배열되어있는 이 집성LED발광면의 크기는 3cm×3cm이며 빛흐름은 3 000lm, 색온도는 3 000K이다.

측광체계에서 $z=30\text{mm}$, 비침면의 크기를 50mm×50mm로 하고 단소편평면형LED에서와 같은 방법으로 비침도를 측정하고 발광면크기모형과 소편배렬크기모형에 대한 모의를 진행한 결과 소편배렬크기모형과 발광면크기모형인 경우 복사무늬와 측정무늬사이의 상관결수는 각각 99.9, 99.4%이다.

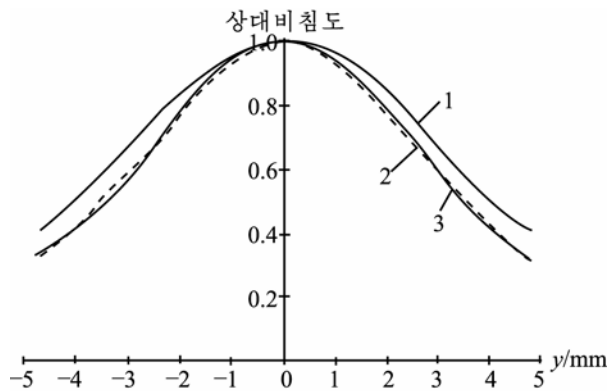


그림 5. 측정과 모의결과에 기초하여 얻은 상대비침도특성

1-발광면크기모형, 2-소편크기모형, 3-측정결과

맺는 말

LED의 측광거리에 따르는 복사무늬의 변화특성에 대한 이론적해석을 통하여 측광척도에 따르는 측광마당을 구분하고 가까운마당에서의 비침도무늬에 대한 모의결과와 측정결과를 비교하였다. 결과 면발광형LED의 모형화를 발광면의 크기가 아니라 실제발광소편의 크기와 배열구조에 기초하여 진행하는것이 보다 정확하다는것을 확증하였다.

참고 문헌

- [1] 서광혁 등; 물리, 4, 7, 주체104(2015).
- [2] M. Nisa Knan; Applied Optics, 54, 6566, 2015.
- [3] Ming Shiou Tsai et al.; Applied Optics, 53, H114, 2014.
- [4] Lam Powell et al.; Optical Engineering, 1, 33, 1994.
- [5] 严萍 等; 半导体光电, 25, 181, 2004.

주체107(2018)년 3월 5일 원고접수

The Verification for Accuracy of LED Modeling at the Secondary Optical Design

So Kwang Hyok, Om Chun Hwa

We divided field of measuring light corresponding to scale of measuring light by interpreting the characteristics about variation of radiational figure with the distance of measuring light of LED theoretically, and compared the measurement result with the simulation on illuminance figure in the near field. Finally, we proved that modeling the surfaced-illumination LED on the basis of size and the arrangement of actual illumination chip had more accuracy than modeling on the basis of size of illumination surface.

Key words: secondary optical design, LED modeling