

3차원 자유곡면식을 이용한 LED 비대칭 렌즈 설계 및 성능 비교 분석

이창수^{a*}, 이수영^a, 현동훈^aAnalysis of Performance on Asymmetric LED Lens Design Using
Three-Dimensional Free-Form Surface ExpressionChang Soo Lee^{a*}, Soo Young Lee^a, Dong Hoon Hyun^a^a Graduate School of Knowledge-based Technology & Energy (Opto-Nanotronics), Korea Polytechnic University,
237, Sangidaehak-ro, Siheung, Gyeonggi-do, 15073, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	6	April	2017
Revised	29	May	2017
Accepted	1	June	2017

Keywords:

LED
Lens
Free-form surface
IESNA
LCS
Asymmetric

ABSTRACT

The exit surface of a lens is designed using a three-dimensional free-form expression in order to easily modify a curved surface. This enables the design of numerical values and mathematical things using three-dimensional free-form expression, and enhances precision because it can be fine-tuned via numerical control. The standard of "Classification of Luminaire Light Distribution" for outdoor lighting fixtures by IESNA is adopted in order to examine the correlation between three-dimensional free-form surface expression and lighting performance. The variation of light distribution type and range is analyzed using the values of maximum light intensity and 50% light intensity. The actual tolerance occurs owing to parameters such as the thickness of the lens, the distance between LEDs, and the movement of the center of the incident surface; the effects of changes in these parameters on the performance are compared and analyzed.

1. 서론

LED(light emitting diode)는 높은 효율성과 반도체 산업의 대량 생산 기술을 통해 낮은 비용으로 신 광원 시장을 주도하고 있다. 앞으로도 성능 개선에 대한 여지가 상당하고, 전통 조명보다 높은 효율성으로 초기 투자비용이 합리적인 시간 내에 회수가 가능하다^[1].

하지만, LED의 배광 분포는 중심광의 세기가 주변광에 비해 상대적으로 강한 형태인 램버시안(lambertian) 형태를 띄고 있고, 직진성이 강하여 눈부심(glare)이 심해 별도의 광학계를 사용하여 광을 제어할 필요가 있다^[2,3]. 광학계는 LED 조명기기에서 요구되는

광학 분포, 조명 제품의 성능 및 형태 등에 따라 렌즈(lens), 리플렉터(reflector), 디퓨저(diffuser) 등의 광학 시스템을 채택할 수 있다. LED 조명기기에서 부품별 발생하는 에너지 손실 중 광학계를 통한 광 손실은 설계 방식에 따라 최고 5% 이하로 줄일 수 있지만, 평균적으로 약 10~15%의 광 손실을 보이고 있다. 그렇기 때문에 다양한 부품으로 이루어진 LED 조명기기의 시스템에서, 광학계는 설계 및 최적화 방식에 따라 LED 조명기기의 효율성에 큰 영향을 끼치는 구성 요소 중 하나이다^[4].

그 중에서 렌즈는 대표적으로 구면과 비구면, 또는 자유곡면을 이용한다. 구면 렌즈는 LED에 따라 크기가 좌우되는 반면, 비구면 렌즈는 고차 다항식을 이용해 면을 구현하기 때문에 렌즈의 소형

* Corresponding author. Tel.: +82-31-8041-1784

Fax: +82-31-8041-1784

E-mail address: lotin83@gmail.com (Chang Soo Lee).

화 및 경량화가 가능하며, 대량 생산 시 금형 제조 및 생산 비용을 절감할 수 있다. 하지만, 연마하는 데에 큰 어려움이 있어, 글라스 및 플라스틱 금형을 사용해야 하는 단점이 있다. 자유곡면 렌즈는 면을 생성하는 데에 있어 자유도가 높고, 대칭 및 비대칭의 조도 균제도를 구현할 수 있기 때문에 다양한 설계가 가능하다. 하지만, 자유 곡면은 생성하는 방법이 다양하고, 그 방법들의 난이도가 높아, 전문가 외에는 접근하기가 쉽지 않다. 그리고, NURBS 곡면 또는 B-spine 기법을 이용할 시 곡면의 조절이 어렵고^[5,6], 회전 대칭형 렌즈에만 사용할 수 있거나^[7], Runge-Kutta 기법에서는 광원 따른 결과의 차이가 발생할 수 있어^[8], 관련 연구가 진행되고 있다^[9-15].

본 연구에서는 LED 조명기에 사용하는 렌즈의 출사면에 3차원 자유곡면식을 이용하여 매개변수 최적화를 통해 비대칭의 자유곡면으로 설계하였고, 북미조명학회(Illuminating Engineering Society of North America, IESNA)에서 제시하고 있는 옥외 조명기에 대한 배광 분포 분류 시스템의 기준을 이용해 성능을 만족하는 지 확인하였다. 그리고, 제품 조립 시 발생할 수 있는 공차 관리를 위해 렌즈 설계 시 여러 변수를 제시하고, 배광 분포의 변화 특성을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 IESNA 등급 분류 정보

북미조명학회에서는 옥외 조명기구의 배광 분포에 대해서 도로 폭 방향과 도로 길이 방향, 그리고 눈부심 제어 등급으로 구분하여 그 기준을 제시하고 있다^[16]. Fig. 1은 도로 폭 방향과 도로 길이 방향으로 배광에 대해 분류한 내용을 도식화한 것이고, Type III - Medium의 배광 분포를 가지는 조명기구의 최대 광도와 최대 광도의 50%가 되는 지점들의 자취 분포를 가상 구체와 도로로 표현하고 있다. 조명기구의 천저점(nadir)을 기준으로 전방을 street side(SS), 후방을 house side(HS)로 구분하고 있고, 여기에서 MH(mounting height)는 설치 높이, LRL(longitudinal roadway lines)은 도로 종 방향 라인, TRL(transverse roadway lines)은 도로 횡 방향 라인을 의미한다^[17].

배광 분포 타입(distribution type)은 조명기구를 기준으로 전방인 도로 폭 방향으로 빛을 얼마나 효과적으로 보내는 지를 분류하는 것으로, 조명기구의 설치 높이의 단위로 거리를 정의하는 그리드에서 조명기구의 유효한 광도 패턴의 위치를 기반으로 한다. 도

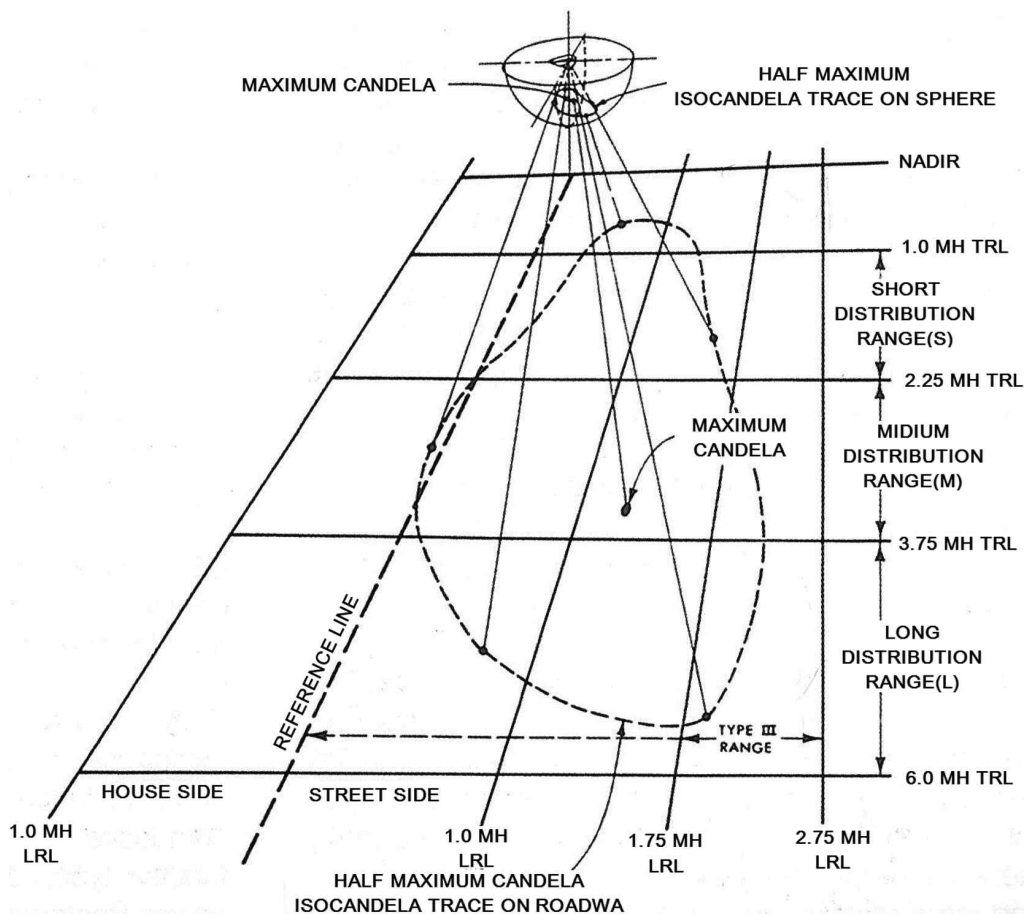


Fig. 1 Type III - Medium distribution on the imaginary sphere and the roadway (ANSI/IES RP-8-14)

로 폭 방향으로 향하는 빛의 세기의 정도에 따라 Type I, II, III, IV, V로 나뉘고, 각각의 값은 최대 광도의 50 %가 되는 지점들의 자취 영역의 분포에 의해서 결정된다. 배광 분포 범위(distribution range)는 측면 방향으로 얼마나 효과적으로 빛을 보내는 지를 판단하는 것으로, 도로 길이 방향의 배광영역에 대한 분류이며, Fig. 2와 같이 최대 광도의 지점의 위치에 따라 Very short, Short, Medium, Long으로 나뉜다. Table 1은 배광 분포 타입과 배광 분포 범위를 정리한 표이고, Type V의 symmetric은 기준선(reference line)에 대하여 house side와 street side가 대칭인 배광을 갖는 것을 말한다^[18].

2.2 출사면의 자유곡면 설계

렌즈의 출사면은 자유곡면을 최대한 활용하고, 3차원 자유곡면식의 계수 등의 조정을 통해 곡면을 보다 자유롭게 수정 및 변경할 수 있게 설계하였다^[19]. 이는 자유곡면식에 의한 수치 및 수학적 설계를 가능하게 하고, 수치 제어를 통해 미세한 조정까지 가능하기 때문에 광 제어에 따른 정밀성을 높일 수 있으며, 자유곡면 수식이 적용된 LED 광원의 디퓨저로서의 역할을 가능하도록 한다. 렌즈의 출사면은 차선을 포함하는 도로 환경에서 도로 폭 방향에 대해 비대칭 구조이고, 도로 길이 방향에 대해 대칭 구조를 갖는 비대칭의 자유곡면을 갖도록 설계하였다. 입사면에 의해서 1차적으로 광 균일도를 이끌어낸 광들을 출사면에서 굴절 작용을 통해 확산시

Table 1 Lateral & Transverse light distributions

Distribution type	MH LRL	Distribution range	MH TRL
Type I	HS 1.0~SS 1.0	Very short	1.0
Type II	SS 1.75	Short	1.0~2.25
Type III	SS 2.75		
Type IV	SS 2.75~6.0	Medium	2.25~3.75
Type v	Symmetric	Long	3.75~6.0

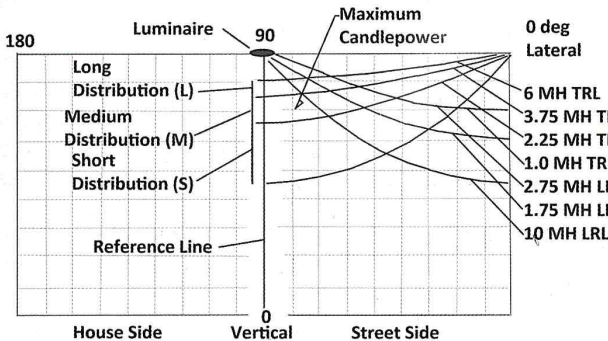


Fig. 2 Vertical, lateral light distribution boundaries on a rectangular coordinate grid (ANSI/IES RP-8-14)

켜 광을 제어함으로써 목표 영역을 넓게 비춰줄 수 있고, 아울러 고른 밝기로 조명할 수 있다. 식 (1)은 3차원 자유곡면식(T)으로 자유곡면의 형상에 대해서 수치 해석적으로 표현하였다.

$$T = ax + by + cz + dx^2 + ey^2 + fz^2 + gx^3 + hy^3 + iz^3 + jx^4 + ky^4 + lz^4 + m = 1 \tag{1}$$

식 (1)에서 변수 x, y, z 는 독립변수이고, T 는 종속변수로 시간을 의미한다. 독립변수 3개와 종속변수 1개를 합하면 원칙적으로는 4차원 함수가 되지만, 함수 $f(x, y, z) = T$ 로 정의를 하고, 이때 T 는 1로써 레벨 세트(level set)하여, 단일 수식으로 전개한다. 이 때, $m=0$ 이 되는 것으로서 3차원의 비선형 자유곡면식으로 나타낼 수 있다. 자유곡면은 변수 x, y, z 중에서 홀수차항의 계수가 어느 하나는 반드시 0을 만족할 때에 차선 폭 방향으로 비대칭의 구조를 갖고, 차선 길이 방향으로는 좌우 대칭의 구조가 필요한 우함수 형태의 비선형 자유곡면식을 갖는다.

Fig. 3은 상기의 식 (1)에서의 3차원 자유곡면 형상 조건을 만족하고 있는 자유곡면을 조명 시뮬레이션 프로그램인 LightTools에서 구현한 그림으로 자유곡면 식으로는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다. 식 (2)의 조건에서는 변수 x 의 1차항과 3차항의 계수가 0이고, 변수 y 의 3차항의 계수가 0을 만족하므로, 변수 x, y, z 중에서 홀수차항의 계수가 어느 하나는 반드시 0을 만족시키고 있음을 보여주고 있다. 출사면의 자유곡면은 볼록한 곡면을 이루되 비대칭의 곡면 구조를 형성하고 있어 도로 폭 방향으로 광을 확산시키고, 볼록한 곡면 중심부에 오목형태의 패인 골을 갖는 형태를 통해 도로 길이 방향으로 광 확산을 유도해 광 균일도를 유지한다.

$$T = 0x + 3.37y + 3.85z - 0.461x^2 + 1.17y^2 + 0z^2 + 0x^3 + 0y^3 + 0.0627z^3 + 0.127x^4 + 0y^4 - 0.0922z^4 + 0 = 1 \tag{2}$$

2.3 Type II - Medium 기준 렌즈 성능 분석

국외에서 요구하는 다양한 배광 분포 중 다소 좁은 도로 폭과

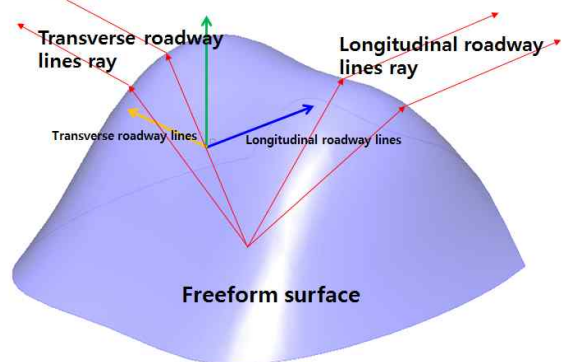


Fig. 3 Freeform surface of lens

넓은 설치 간격을 만족할 수 있는 배광 분포 타입은 Type II이고, 배광 분포 범위는 Medium인 비대칭의 자유곡면 렌즈를 설계하였다. 렌즈를 설계하기 앞서 광원을 결정할 필요가 있고, 여러 종류의 LED 광원 중에서 COB(chip on board) 타입의 LED를 선정하였으며, COB 타입 LED는 특정되는 영역 내에 수십 개에서 수백 개의 small chip을 실장하기 때문에 면광원으로 간주할 수 있다.

Table 2는 시뮬레이션 조건을 나타내고 있다. LED 광원은 지름이 34 mm인 이상적인 원 광원으로 설정하고, 배광 분포는 램버시안 형태이며, 최대 배광각 허용치는 180 °이다. 렌즈의 재료는 PMMA이고, 모든 시뮬레이션에서 총 광속은 10,000 lm으로 적용해 조도 및 광도 값을 비교할 수 있도록 하였다. 렌즈의 형상은 CDF Player에서 간략하게 확인이 가능하고, 렌즈 형상의 구현은 LightTools에서 제공하는 user macro 기능을 이용하였으며, 3차원 자유곡면식을 적용하기 위해 별도의 polynomial macro를 프로 그래밍 하였다.

식 (3)은 Type II - Medium의 성능을 만족하는 출사면의 3차원 자유곡면식이고, 매개변수 조정을 통해 도출된 값이다. Fig. 4는 식 (3)에 의해서 구현된 렌즈의 형상을 나타낸다. 도로 폭 방향으로 는 비대칭이고, 도로 길이 방향으로는 대칭의 구조를 가지고 있으며, 조명을 기울이지 않아도 전방의 도로면에 균일한 광을 조사할 수 있는 형상이다. 최대 광도는 4,276 cd이고, 이때의 수평각

(lateral angle)은 86 °이며, 수직각(vertical angle)은 74 °이다. Fig. 5는 수평각 86 °의 종단면을 나타내는 배광 분포 곡선으로 수직각 74 °에서 4,276 cd의 최대 광도 값을 가짐을 알 수 있다.

$$T = 0x + 2.24y + 8.5z - 1.5x^2 + 2.7y^2 + 0.2z^2 + 0x^3 - 0.9y^3 + 0.53z^3 + 0.3x^4 + 0.33y^4 - 0.4z^4 + 0 = 1 \tag{3}$$

Fig. 6은 TRL의 배광 분포 범위를 2차원의 직각 좌표에 영역을 표기한 그래프로, 수평각과 수직각, 설치 높이의 관계식을 이용해 3개의 경계면 곡선을 표기하였다. 최대 광도의 수직각과 수평각의 값에 의해 위치가 정해지고, 배광 분포 범위를 알 수 있다. 설계한 렌즈의 최대 광도는 좌측 상단에 위치해 있고, 배광 분포 범위는 Medium distribution이며, 기준선에 근접해 있다.

Fig. 7은 LRL의 배광 분포 타입을 2차원의 직각 좌표에 영역을 표기한 그래프로, 수평각과 수직각, 설치 높이의 관계식을 이용해 3개의 경계면 곡선을 표기하였다. 최대 광도의 50%값을 가지는 광도의 수직각과 수평각의 값에 의해 위치가 정해지고, 이는 하나

Table 2 Simulation condition

Simulation property		Value
LED	Source size	∅ 34 mm
	Photometric flux	10,000 lm
	Light distribution	Lambertian
Lens	Material	PMMA
Receiver	Bin angular resolution	2 degrees
	Photometry	IES type C
Simulation	Total ray to trace	80,000,000

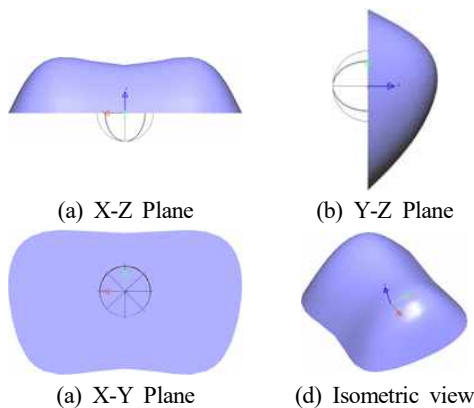


Fig. 4 Shape of Type II - Medium lens

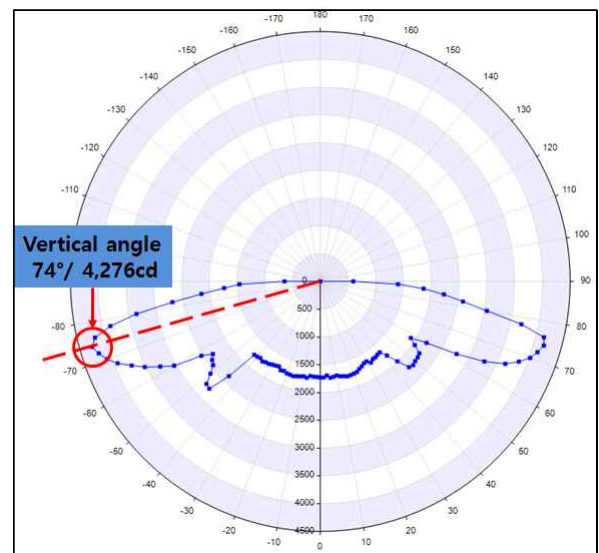


Fig. 5 Polar curve of vertical plane through lateral angle 86°

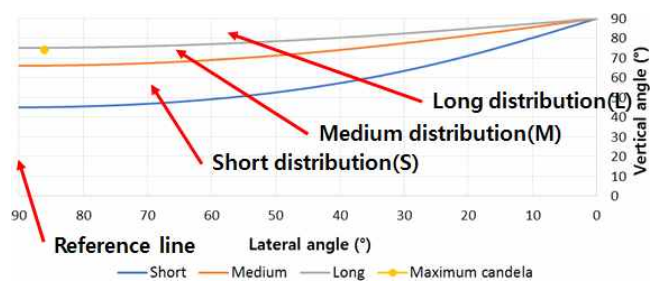


Fig. 6 TRL boundaries on rectangular coordinate grid with maximum candela of Type II - Medium lens

의 값이 아닌 복수 이상의 값을 가지게 된다. 이 때, LRL 영역에 속하게 되는 여러 광도 값의 위치에 의해 배광 분포 타입은 결정이 된다. 설계한 렌즈의 최대 광도의 50%값을 가지는 광도들의 분포는 Fig. 7을 통해서 알 수 있고, Type II 영역에 위치하고 있다.

Fig. 8은 TRL과 LRL의 영역을 도식화한 그래프이고, 렌즈의 최대 광도와 최대 광도의 50%값을 가지는 광도 값들의 위치를 알 수 있다. 최대 광도는 3.48 MH TRL로 2.25 MH TRL~3.75 MH TRL의 영역에 위치하고, 50% 최대 광도 값들은 1.75 MH LRL 이내에 분포하고 있으며, 이 렌즈는 Type II - Medium의 배광 분포를 가진다.

2.4 변수에 따른 성능 변화 분석

LED 조명용 렌즈는 일반적으로 플라스틱 금형 사출을 통해 대량 생산하고, 사출시 문제가 되는 미성형 및 수축 등으로 인해 내부 굴절율 변화 등과 같은 생산 과정에서 발행할 수 있는 설계 오차가 있을 수 있으며, 이에 따른 성능 손실은 불가피하다. 조립 및 생산 공차를 감안해 렌즈를 설계하고, 상이한 실증 설치 조건에 적용하

기 위해 여러 형태의 렌즈를 설계하여, 다양한 배광 분포를 확보한다. 상기에 제시한 문제점과 관련된 렌즈의 속성을 변수로 설정하여 어떠한 성능 변화 추이를 보이는지 분석하였다.

Fig. 9는 변수에 관한 정보를 나타낸 그림이고, (a)에서 변수 A는 LED 발광 표면과 렌즈의 입사면까지의 거리 변화를 의미하며, 변수 B는 렌즈의 두께 변화이다. (b)에서 변수 C는 입사면의 중심을 도로 폭 전후 방향으로 이동하여 배광 분포 타입의 변화에 영향을 끼치는지 확인한다. 여기에서 변수는 기준 렌즈 설계 값에서의 변화량을 의미하고, [mm] 단위를 사용한다.

Fig. 10은 변수 A에 의한 성능 변화 그래프이고, LED 발광 표면과 렌즈의 거리 변화에 관한 내용이며, Table 3에서 수치를 정리하였다. 변수 A의 모든 값에서 측정된 최대 광도는 유사한 값을 가지고, 최대 광도의 수직각과 수평각 또한 큰 차이가 없지만, 변수 A의

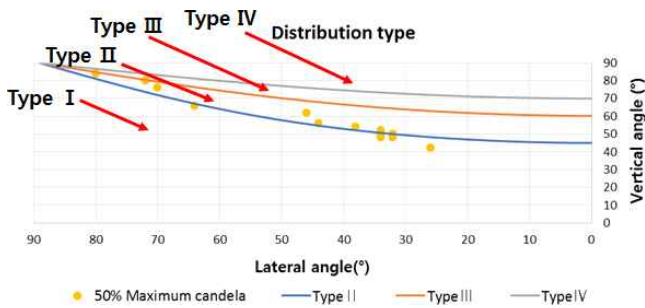


Fig. 7 LRL boundaries on rectangular coordinate grid with 50% maximum candela of Type II - Medium lens

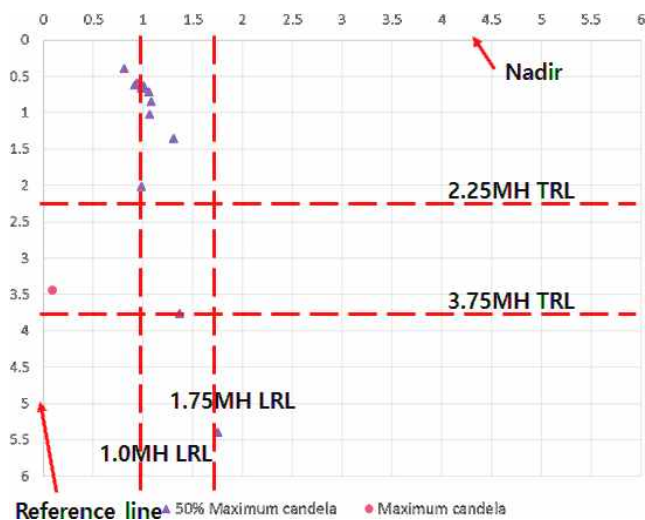
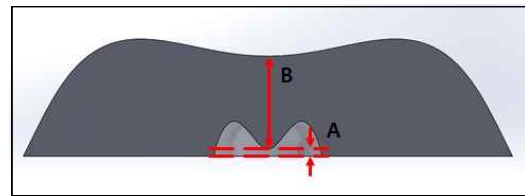
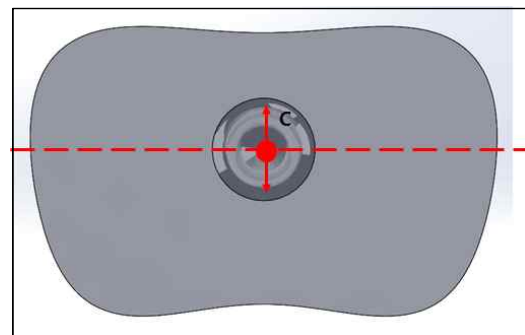


Fig. 8 Diagram showing projection of maximum candela and 50% maximum candela of Type II - Medium lens



(a) A : Distance between LEDs, B : Thickness of lens



(b) C : Movement of the center of the incident surface

Fig. 9 Shape & variable of Type II - Medium lens

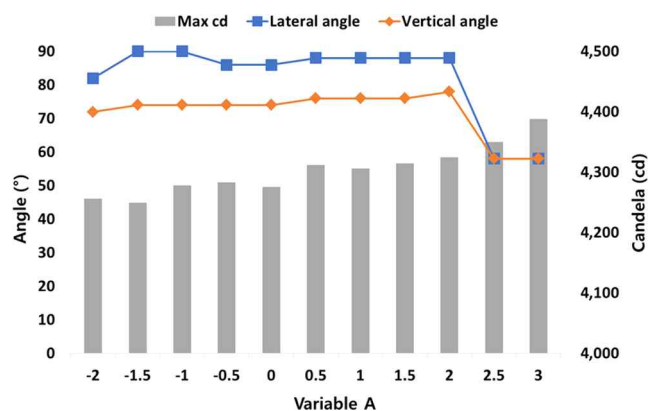


Fig. 10 Vertical angle and lateral angle of maximum candela (variable A)

2.5~3.0에서는 큰 변화폭을 보인다. 수직각은 30°, 수평각은 20°가 감소하였고, LED와 렌즈의 거리가 기준 렌즈의 설계에서 2.5 mm 이상의 큰 값을 가질 경우 배광 곡선은 급격하게 무너지며, 설치된 조명의 위치를 기준으로 도로 폭과 길이 방향 모두에서 근접 거리를 조사하게 된다. 변수 A의 -2.0~-0.5는 3.05~3.48 MH TRL의 성능을 보이고 있고, Medium의 배광 분포 범위이다. LED와 렌즈의 거리가 가까워져도 기준 렌즈의 성능을 구현하는 데에 무리가 없지만, 반대로 거리가 0.5~2.0 mm 멀어지면 3.75 MH TRL 이상의 성능을 가지게 되어, 배광 분포 범위는 Medium에서 Long으로 늘어나게 된다. 이러한 결과는 COB LED를 사용하는 조명에 긍정적으로 활용이 가능한 것으로, 발광 면적에 비해 출력이 높아 온도에 따른 렌즈의 변형이 우려되기 때문에 LED와 렌즈의 거리에 따른 배광 분포 변화 분석은 중요하다. 변수 A의 -2.0~-0.5는 1.44~1.75 MH LRL이고, 기준 렌즈의 성능인 Type II와 큰 차이를 보이지 않는다. 하지만, 거리가 0.5~2.0 mm 멀어

지면 도로 폭 방향으로 조사되는 광량이 증가하고, Type III의 배광 분포 타입을 가지며, 차선수가 많아 도로 폭이 넓은 도로에 활용도가 크다. 그리고 거리가 2.5 mm 이상부터는 배광 곡선의 각도가 좁아지기 때문에 주의할 필요가 있다. Fig. 11은 배광 분포 타입과 범위를 나타낸 그래프이고, 변수 A의 -2.0~-0.5는 Type II - Medium, 변수 A의 0.5는 Type II - Long, 변수 A의 1.0~2.0은 Type III - Long이며, 변수 A의 2.5~3.0은 Type II - Short이다.

Fig. 12는 변수 B의 값인 렌즈의 두께 변화에 따라 최대 광도의 수직각과 수평각의 변화를 보여주는 그래프이다. Table 4는 변수에 따른 성능을 표로 정리하여 분석에 대한 이해가 쉽도록 하였다. 렌즈의 두께가 기준 렌즈보다 얇을 때 최대 광도의 수직각과 수평각이 크게 변화하고, 변수 B의 -2.5~-0.5는 MH TRL이 같은 값을 갖으며, 배광 분포 범위가 같다는 것을 의미한다. 기준 렌즈보다 도로 폭 방향 기준에서 수평각의 크기가 30° 작아졌고, 멀리 조사하는 수직각 또한 14° 낮아져 배광 각도는 좁은 배광 분포를 가진다. 기준 렌즈의 배광 분포 범위인 3.48 MH TRL에서 1.44 MH TRL로 감소한 값을 보이는 것은 Medium의 배광 분포 범위가

Table 3 Simulation results of variable A

Variable A	Maximum candela			
	Lateral angle (°)	Vertical angle (°)	Max. candela (cd)	MH TRL
-2.0	82	72	4,257	3.05
-1.5	90	74	4,250	3.49
-1.0	90	74	4,278	3.49
-0.5	86	74	4,283	3.48
0	86	74	4,276	3.48
+0.5	88	76	4,312	4.01
+1.0	88	76	4,306	4.01
+1.5	88	76	4,315	4.01
+2.0	88	78	4,325	4.70
+2.5	58	58	4,350	1.36
+3.0	58	58	4,389	1.36

Variable A	50 % Maximum candela		
	Lateral angle (°)	Vertical angle (°)	MH LRL
-2.0	50	66	1.44
-1.5	50	66	1.44
-1.0	50	66	1.44
-0.5	70	76	1.37
0	72	80	1.75
+0.5	78	84	1.75
+1.0	74	82	1.96
+1.5	76	84	2.30
+2.0	76	84	2.30
+2.5	44	58	1.15
+3.0	44	58	1.15

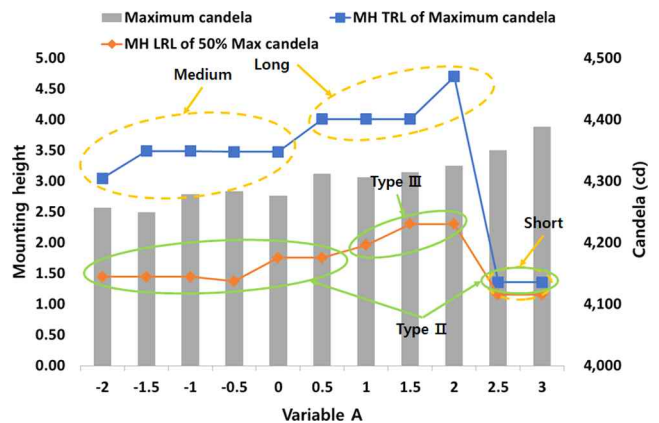


Fig. 11 Maximum candela & MH TRL of maximum candela & MH LRL of 50% max candela (variable A)

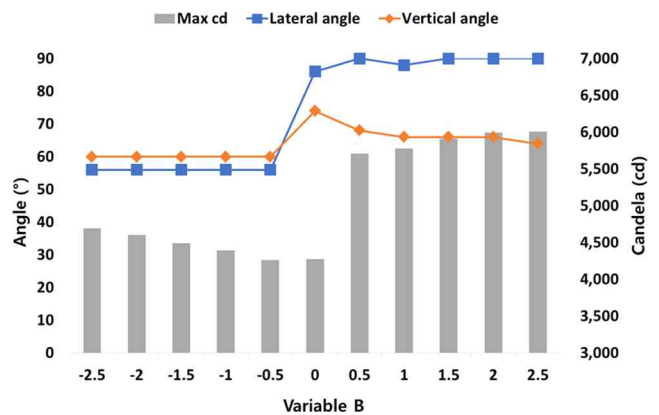


Fig. 12 Vertical angle and lateral angle of maximum candela (variable B)

Shot으로 짧아진 것이다. 좁은 영역을 조사하고, 도로 폭 방향의 중심 영역으로 광이 집중되어, 도로 길이 방향으로 조사되는 광도는 낮아지게 된다. 두께가 두꺼워진 경우에는 최대 광도의 수평각의 변화는 크지 않지만 수직각은 약 8°의 차이가 있다. 도로 폭 방향으로 조사되는 광량이 감소하고, 도로 길이 방향으로 광량이 이동하여, 최대 광도는 평균 1,605 cd 증가했다. 수직각이 낮아져 변수 B의 1.0~2.5는 2.25 MH TRL 이하의 값을 가지기 때문에 배광 분포 범위가 Short로 변경되었다. 변수 B의 0.5는 수직각이 낮아졌지만 2.48 MH TRL의 값으로 Medium을 유지한다. 변수 B의 1.5~2.5는 도로 폭 방향으로 조사하는 광의 tilt 각도가 상대적으로 좁아져 Type I으로 바뀌었고, 변수 B의 -2.5~1.0은 기준 렌즈의 성능인 Type II를 유지하고 있지만, 전체적으로 기준 렌즈의 설계에서 두께에 대한 공차를 가지게 되면 설치되어 있는 조명의 하단 영역을 집중적으로 조사하게 되어, 휘도 및 조도 균제도가 저하될 수 있다. Fig. 13은 배광 분포 타입과 범위를 나타낸 그래프이고, 변수 B의 -2.5~-0.5는 Type II - Short, 변수 B의 0.5는 Type II - Medium, 변수 B의 1.0은 Type II - Short이며, 변수 B의

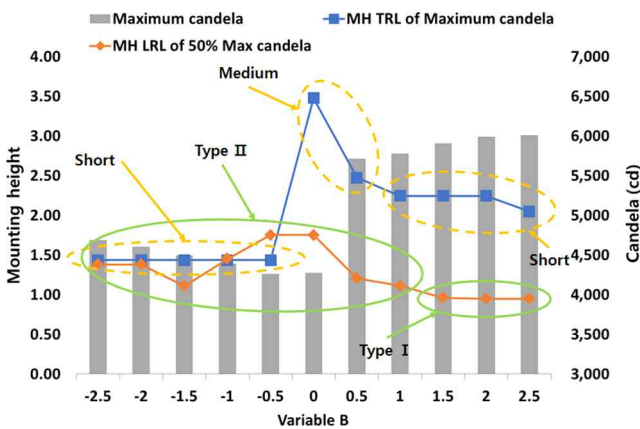


Fig. 13 Maximum candela & MH TRL of maximum candela & MH LRL of 50 % max candela (variable B)

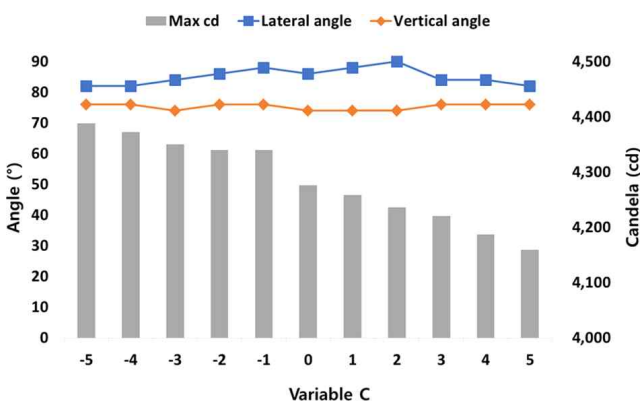


Fig. 14 Vertical angle and lateral angle of maximum candela (variable C)

1.5~2.5는 Type I - Short이다.

Fig. 14는 변수 C에 의한 성능 변화 그래프이고, 렌즈의 입사면의 중심 이동에 따른 성능 변화의 측정값이다. Table 4는 수치를 표로 정리한 것이고, 입사면의 중심을 기준으로 도로 길이 방향의 변수는 광 치우침이 당연시되기 때문에 제외하였다. 도로 폭 방향을 기준으로 house side(-), street side(+) 방향으로 이동시켜 추이를 관찰하고, 변수 C의 모든 값에서 측정된 최대 광도는 유사한 값을 가진다. 최대 광도의 수평각은 기준 렌즈 대비 약 4°, 수직각은 약 2°의 차이로 고르게 분포되어 있고, 82°~90°의 수평각을 가지고 있으며, 기준선 근접 영역을 조사하고 있다. 또한, 수직각이 크기 때문에 도로 길이 방향으로 넓은 배광 곡선을 가진다. 변수 C의 배광 분포 범위는 변수 C의 -3.0과 1.0, 2.0에서 기준 렌즈의 성능인 Medium의 배광 분포 범위를 가지고, 변수 C의 -5.0~4.0, -2.0~1.0, 3.0~5.0는 3.97~4.01 MH TRL로 모든 값이 3.75 MH TRL 이상이기 때문에 배광 분포 범위 중 Long에 해당된다. 도로

Table 4 Simulation results of variable B

Variable B	Maximum candela			
	Lateral angle (°)	Vertical angle (°)	Max. candela (cd)	MH TRL
-2.5	56	60	4,692	1.44
-2.0	56	60	4,605	1.44
-1.5	56	60	4,495	1.44
-1.0	56	60	4,396	1.44
-0.5	56	60	4,264	1.44
0	86	74	4,276	3.48
+0.5	90	68	5,712	2.48
+1.0	88	66	5,781	2.24
+1.5	90	66	5,910	2.25
+2.0	90	66	5,991	2.25
+2.5	90	64	6,011	2.05

Variable B	50 % Maximum candela		
	Lateral angle (°)	Vertical angle (°)	MH LRL
-2.5	52	66	1.38
-2.0	52	66	1.38
-1.5	46	58	1.11
-1.0	72	78	1.45
-0.5	72	80	1.75
0	72	80	1.75
+0.5	50	62	1.21
+1.0	50	60	1.11
+1.5	74	74	0.96
+2.0	72	72	0.95
+2.5	72	72	0.95

Table 5 Simulation results of variable C

Variable C	Maximum candela			
	Lateral angle (°)	Vertical angle (°)	Max. candela (cd)	MH TRL
-5.0	82	76	4,388	3.97
-4.0	82	76	4,372	3.97
-3.0	84	74	4,350	3.47
-2.0	86	76	4,340	4.00
-1.0	88	76	4,340	4.01
0	86	74	4,276	3.48
+1.0	88	74	4,259	3.49
+2.0	90	74	4,236	3.49
+3.0	84	76	4,220	3.99
+4.0	84	76	4,187	3.99
+5.0	82	76	4,160	3.97

Variable C	50 % Maximum candela		
	Lateral angle (°)	Vertical angle (°)	MH LRL
-5.0	48	70	1.84
-4.0	72	82	2.20
-3.0	48	68	1.66
-2.0	72	82	2.20
-1.0	78	84	1.98
0	72	80	1.75
+1.0	76	82	1.72
+2.0	46	58	1.11
+3.0	74	76	1.11
+4.0	78	80	1.18
+5.0	48	56	1.00

길이 방향으로의 배광 분포 변화는 특정한 형태로 규정되지 않고, Medium과 Long의 범위를 가지면서 넓은 조사면을 확보한다. 배광 분포 타입은 변수 C에서 house side 방향인 -5.0~-1.0로 이동시키면 -3.0을 제외하고 나머지는 Type III의 성능을 가진다. 변수 C가 street side 방향으로 이동하는 경우에는 모든 변수에서 Type II 배광 분포 타입이 측정되었다. 변수 C의 변화에 따라 배광의 형태가 다소 변하고 있지만, 그 정도가 크지 않고, 전체적인 성능에는 영향을 끼치지 않아, 넓은 영역을 조사하는 배광 형태로만 구성된다. 변수 C에 따른 성능 변화는 렌즈의 입사면의 중심이 house side로 이동을 할수록 도로로 향하는 광량에 대해 후배광이 상대적으로 감소하는 것을 볼 수 있다. 반대로, street side로 중심이 5.0 mm 이동하는 경우에는 도로로 향하는 광량과 후배광의 비율이 동등할 정도로 후배광의 광량이 증가하게 되는데, 이는 유사한 배광 분포 타입 및 범위의 성능을 가진다고 해서 배광 곡선의 형태가 모두 동일하지 않다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 15는 배광 분포

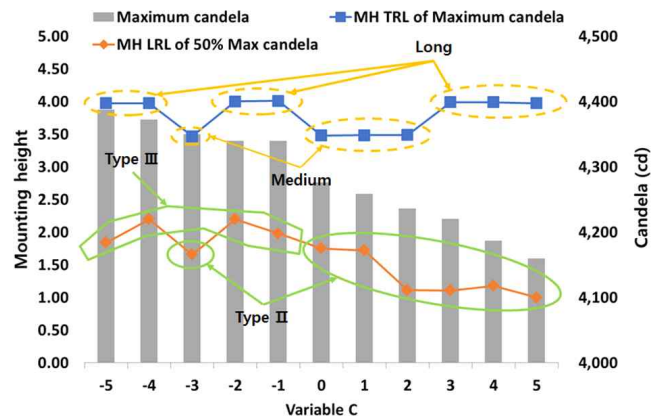


Fig. 15 Maximum candela & MH TRL of maximum candela & MH LRL of 50 % max candela (variable C)

타입과 범위를 나타낸 그래프이고, 변수 C의 -5.0, -4.0, -2.0, -1.0은 Type III - Long, 변수 C의 -3.0, 1.0, 2.0은 Type II - Medium, 변수 C의 3.0~5.0은 Type II - Long이다.

3. 고찰

3차원 자유곡면식을 이용해 최대 광도는 4,276 cd이고, 이때의 수평각은 86°이며, 수직각은 74°인 기준 렌즈를 설계하였다. 북미조명학회에서 제시하는 규격에 대해 2차원의 직각 좌표로 도식화하고, 설계 후 평가에 활용함으로써 Type II - Medium의 배광 분포를 가지도록 하였다. 그리고, 조립 및 생산 공차 시 발생할 수 있는 변수에 대해 지정하고, 성능 변화를 확인하였다. 변수 A는 LED 발광 표면과 렌즈의 입사면까지의 거리 변화를 의미하고, LED와 렌즈의 거리가 기준 렌즈의 설계에서 2.5 mm 이상의 큰 값을 가질 경우 배광 곡선은 급격하게 무너지며, 반대로 거리가 0.5~2.0 mm 멀어지면 배광 분포 범위의 성능은 향상되었다. 이러한 결과는 LED 조립 과정에서 방열계면물질(thermal interface materials, TIM)의 사용량 또는 재질 변경에 대한 두께 기준을 마련할 수 있다. 변수 B는 렌즈 두께 변화를 의미하고, 기준 렌즈의 설계에서 두께에 대한 공차를 가지게 되면 설치되어 있는 조명의 하단 영역을 집중적으로 조사하게 되어, 휘도 및 조도 균제도가 저하되었다. 이는 렌즈 금형 사출 시 미성형으로 인한 외형 변화에 민감한 것으로 사출 성형 관리가 필요하다. 변수 C는 렌즈의 입사면의 중심 이동 변화를 의미하고, 이동 방향에 따라 후배광의 비율 변화가 일정하게 증가 및 감소하였다. 이는 빛 공해에 관련해 후배광 제어 등에 활용할 수 있다. 그리고 배광의 형태가 다소 변하고 있었지만, 그 정도가 크지 않고, 전체적인 성능에는 영향을 끼치지 않아, 넓은 영역을 조사하는 배광 형태로만 구성되었다.

4. 결론

본 연구에서는 3차원 자유곡면식을 적용한 별도의 매크로 기능을 이용해 비대칭의 자유곡면을 생성하였고, 매개변수 최적화를 통해 자유곡면을 설계하였다. 이를 LED 조명기기에 사용하는 렌즈에 적용하여, 북미조명학회에서 제시하는 옥외 조명기구에 대한 배광 분포 분류 시스템을 이용해 Type II - Medium 성능을 확인하였다. 또한, 공차 관리 및 설치 조건이 다양한 옥외조명의 특징을 반영해 렌즈에 여러 변수를 제시하였고, 배광 분포의 변화 특성을 확인하였다. 종래의 비대칭 자유곡면 렌즈의 설계법을 대체할 수 있는 가능성을 확인하였고, 이 후 렌즈 가공 및 제작을 통해 신뢰성을 확보할 것이다.

References

- [1] Bardsley Consulting, SB Consulting, SSLS, Inc., Monica Hansen, and Navigant Consulting, 2015, Solid-State Lighting R&D Plan, DOE SSL Program, Inc., USA.
- [2] Kasahara, T., Aizawa, D., Irikura, T., Moriyama, T., Toda, M., Iwamoto, M., 2006, Discomfort Glare Caused by White LED Light Sources, *Journal of Light & Visual Environment*, 30:2 95-103.
- [3] Shei, S. C., Lin, N. M., Chang, S. J., Wu, Y. X., 2011, Optical Design of a Freeform Lens based on Multi-Chip-On-Single-Board LED Light Source for 140W Street Lamp, *International Journal of Science and Engineering*, 1:1 31-33.
- [4] Malacara, D., Malacara, Z., 2004, *Handbook of Optical Design Second Edition*, Marcel Dekker, Inc., USA.
- [5] Sah, J. Y., Park, J. H., 2004, Optical Design of Reflector of Automotive Headlamp, *Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers*, 12:2 190-196.
- [6] Ding, Y., Liu, X., Zheng, Z. R., Gu, P. F., 2008, Freeform LED Lens for Uniform Illumination, *OPTICS EXPRESS*, 16:17 12958-12966.
- [7] Chen, J. J., Wang, T. Y., Huang, K. L., Liu, T. S., Tsai, M. D., Lin, C. T., 2012, Freeform Lens Design for LED Collimating Illumination, *OPTICS EXPRESS*, 20:10 10984-10995.
- [8] Zheng, Z. R., Hao, X., Liu, X., 2009, Freeform Surface Lens for LED Uniform Illumination, *APPLIED OPTICS*, 48:35 6627-6634.
- [9] Wang, K., Chen, F., Liu, Z., Luo, X., Liu, S., 2010, Design of Compact Freeform Lens for Application Specific Light-Emitting Diode Packaging, *OPTICS EXPRESS*, 18:2 413-425.
- [10] Moiseev, M. A., Doskolovich, L. L., Kazanskiy, N. L., 2011, Design of High-Efficient Freeform LED Lens for Illumination of Elongated Rectangular Regions, *OPTICS EXPRESS*, 19:S3 225-223.
- [11] Wang, K., Wu, D., Qin, Z., Chen, F., Luo, X., Liu, S., 2011, New Reversing Design Method for LED Uniform Illumination, *OPTICS EXPRESS*, 19:S4 830-840.
- [12] Situ, W., Han, Y., Li, H., Luo, Y., 2011, Combined Feedback Method for Designing a Free-Form Optical System with Complicated Illumination Patterns for an Extended LED Source, *OPTICS EXPRESS*, 19:S5 1022-1030.
- [13] Hu, R., Luo, X., Zheng, H., Qin, Z., Gan, Z., Wu, B., Liu, S., 2012, Design of a Novel Freeform Lens for LED Uniform Illumination and Conformal Phosphor Coating, *OPTICS EXPRESS*, 20:13 13727-13737.
- [14] Jang, S. W., Jung, B. J., 2013, Design of the Lens Structure for COB type LED Safety Luminaires, *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, 27:8 1-8.
- [15] Yang, J. S., 2017, Study on Design Method of a LED Lens with a Single or Multiple Freeform Surfaces for Improving its Luminous Flux, Doctorate thesis, Inha University, Republic of Korea.
- [16] IES, 2014, *Luminaire Classification System for Outdoor Luminaires*, IESNA TM15-11, IESNA, USA.
- [17] Lee, M. W., 2014, A Study on Luminaire Characteristic Classification and Applying Installation for Preventing Light Pollution, Doctorate thesis, Kangwon University, Republic of Korea.
- [18] Illuminating Engineering Society of North America, 2011, *The IES Lighting Handbook Reference and Application*, 10th ed, Illuminating Engineering Society of North America.
- [19] Hyun, D. H., Noh, M. J., 2013, LED Light Diffusing Lens Using Numerical Formula of Asymmetric Free Curved Surface, KR Patent: 10-1343563.