

A Study of Reflector Design Method for Low Road Illumination

Jeong-Su Lee, Hye-Jin Park, Jin-Hee Seo, You-Jin Jeong, Seo-Young Kim,
Hyun-Woon Ra, and Mee-Suk Jung[†]

Department of Nano-optical Engineering, Korea Polytechnic University, 237, Sangidaehak-ro, Siheung 15073, Korea

(Received October 30, 2017; Revised November 9, 2017; Accepted November 13, 2017)

In this paper, a freeform reflector is designed for low road lighting. In the case of low road lighting, which requires light distribution over a wide lane compared to the height, it is difficult to match uniformity, compared to existing road lighting. To satisfy road lighting grade M3, the reflector was divided into nine parts, and the inclination of the reflecting surface was changed to have the desired light distribution. The fitted curves were drawn based on each point, following the formula that was derived. Through the Street Light Simulation of LightTools, we confirmed that it meets the M3 road lighting standard; we then made it directly and satisfied the lighting grade on an actual road, proving the validity of the design result.

Keywords: Road light, Reflector, Freeform

OCIS codes: (110.2945) Illumination design, (120.5700) Reflection

낮은 도로 조명을 위한 Reflector 설계 방법 연구

이정수 · 박혜진 · 서진희 · 정유진 · 김서영 · 라현운 · 정미숙[†]

한국산업기술대학교 나노-광공학과
Ⓣ 15073 경기도 시흥시 산기대학로 237

(2017년 10월 30일 받음, 2017년 11월 9일 수정본 받음, 2017년 11월 13일 게재 확정)

본 논문에서는 낮은 도로 조명을 위한 freeform reflector를 설계하였다. 높이에 비해 넓은 차선까지 배광을 보내야 하는 낮은 도로 조명의 경우, 기존의 등주식 도로 조명에 비해 균제도를 맞추기 힘들다는 단점이 있다. 조명 등급 M3를 만족시키기 위해 reflector를 part 9개로 나누어 part 별 반사면의 기울기를 변화시켜 원하는 배광을 갖도록 하였고, 각 점을 기준으로 fitted curve를 그려 이에 따른 수식을 도출하였다. LightTools의 street light simulation을 통해 M3 조명 등급에 만족하는 것을 확인하였고 직접 제작하여 실제 도로상에서 조명 등급을 만족시키며 설계 결과에 대한 타당성을 입증하였다.

Keywords: 도로 조명, 반사판, 자유 형상

OCIS codes: (110.2945) Illumination design, (120.5700) Reflection

I. 서 론

도로 조명은 야간에 운전자가 안전하게 주행할 수 있도록 해 주는 도로 안전 시설물로 운전자의 시선을 유도하는 기능 등을 가진다^[1]. 하지만 기존의 높은 등주식 가로등은 7~10 m에 설치되어 운전자에게 눈부심과 같은 빛공해를 유발하며 설치 및 유지비용이 많이 든다는 단점이 있다. 낮은 도로 조명은 기존의 등주식 가로등과 다른 유형으로 도로의 가드레일 측에 설치되어 낮은 높이(1 m 이하)에서 노면만을 비추는 조명방식으로 대형 기구물이 아닌 단일 LED와 소형 reflector로 제작되기 때문에 설치 및 제작비용이 저렴하다. 또한 설

치 간격을 좁게 가질 수 있어 균제도 향상에 이점을 가지며 후사광이 없어 빛공해가 적다는 장점이 있다^[2].

본 논문에서는 낮은 높이(1 m 이하)에서 도로 2차선(7 m), 등기구 높이 1 m, 등기구 간격 2 m의 설치 조건에서 M3 조명 등급을 목표로 광학계 설계를 진행하였다.

II. 본 론

2.1. 조명 등급

도로 조명의 조도와 휘도 분포는 도로 조명 성능의 가장 핵심적인 기준이다. 다양한 설치 조건에서 목표 조명 등급,

[†]E-mail: msoptic@kpu.ac.kr, ORCID: 0000-0003-3430-876X

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

Table 1. Standard target lighting class

Target lighting class	Lighting interval	Lighting height	Lane width	Lavg	Uo	Ui
M3	2 m	1 m	7 m	1	0.4	0.6

조명 간격, 조명 높이, 차선폭에 따른 평균노면휘도(Lavg), 종합균제도(Uo), 차선축균제도(Ui) 등 다양한 기준을 만족하는 광학계 설계가 이루어 져야한다.

이 때, 조명의 질을 결정하는 요소는 평균노면휘도(Lavg)이다. 평균노면휘도(Lavg)란 운전자의 시야에서 본 마른 노면이 유지해야하는 휘도 평균값의 최소 허용치를 의미하며 조명기구의 설치 간격 및 배열에 영향을 받으며 운전자의 시야에서 바라 봤을 때 충분히 높고 일정해야한다. 또한 균제도는 도로 노면휘도 분포가 얼마나 균일한가를 나타내는 기준을 의미한다. 도로 조명의 빛 분포와 밀접한 관련이 있어 운전자의 야간주행시 시각적인 환경에 영향을 미치기 때문에 도로 조명 설계 시 목표 균제도 만족을 위한 광학계 설계가 중요하다. 따라서 본 논문에서는 노면휘도 분포의 균일한 정도의 비율인 종합균제도(Uo)와 운전자의 시야에서 전방 노면 밝기 분포의 균일한 정도의 비율인 차선축균제도(Ui)을 고려하여 표 1과 같은 조명 등급 M3를 목표로 설계를 진행하고자 한다³⁾.

2.2. Reflector 형상 곡률에 따른 배광분포 변화

그림 1은 반사의 법칙으로 법선에 대한 입사각과 반사각의 크기가 같다는 것을 증명한다. 반사의 법칙에 의하면 ray는

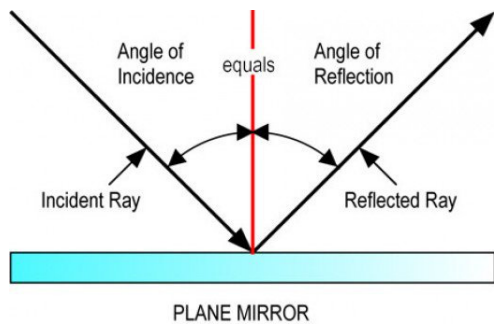


Fig. 1. Law of reflection.

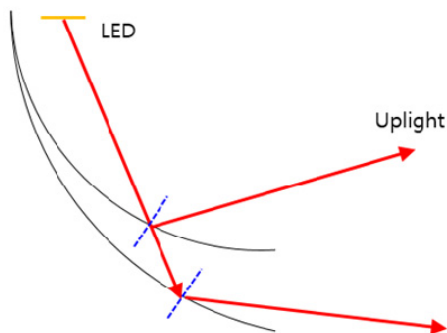
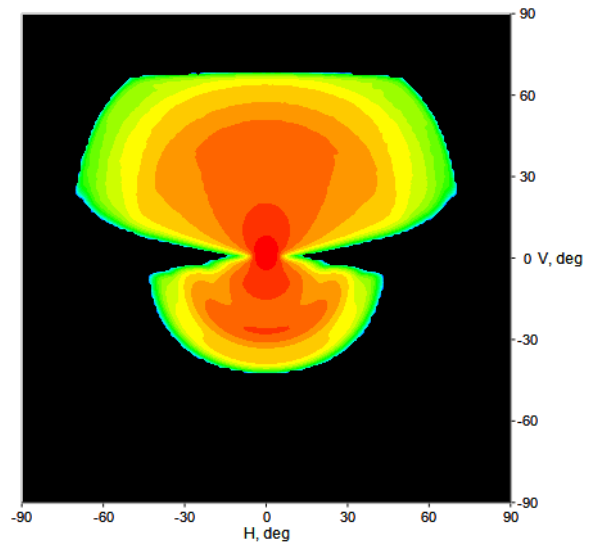


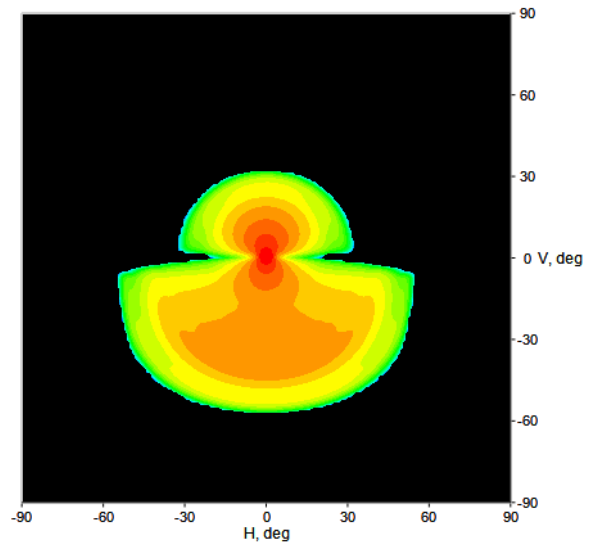
Fig. 2. YZ plane ray direction according to curvature change.

곡률 변경에 따라 입사되는 기울기가 달라지기 때문에 도달하는 영역이 달라진다.

광학 조명 시스템에서는 빛의 상향발산, 0도 이상으로 방출되는 빛을 uplight라고 하며 조명 설치 높이 1 m에서 uplight는 운전자의 눈부심을 유발할 수 있으므로 최소화시켜야한다⁴⁾. 그림 2를 통해 곡률반경이 변경됨에 따라 반사광의 기울기가 변화하는 것을 알 수 있으며, 그림 3(a)는 곡률반경 80일 때, 그림 3(b)는 곡률반경 115일 때의 front intensity로 곡률반경을 증가시키에 따라 uplight가 감소했다는 것을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 3. Front intensity according to curvature change.

2.3. LED 각도에 따른 배광 분포 변화

곡률반경이 증가할수록 uplight는 감소되었지만 중심부의 최대 조도가 높아 목표 종합균제도에 만족하지 못하였다. 종합균제도를 맞추기 위해서는 중심부로 가는 ray가 주변부로 갈 수 있도록 설계 변수 요소에 변화를 주어야한다. 이 때, LED tilt 각도를 x축 기준으로 주게 되면 reflector 중앙부분에 기울기가 비슷한 부분이 생기게 되어, 이 영역에서는 반사가 일어나지 않고 노면조도 분포의 좌우로 향하는 ray가 형성된다. 그림 4 bottom illumination을 통해 LED tilt가 중

심부의 최대 조도를 낮추어 목표 조명 등급을 만족시킬 수 있는 요소임을 확인 할 수 있다.

2.4. Freeform reflector 분석 및 설계

표 2, 그림 5는 spherical reflector 곡률과 LED tilt 각도 변화에 대한 simulation 결과로 평균휘도는 만족하였으나 종합균제도가 0.37로 목표에 도달하지 못했다. Freeform은 면을 생성하는데 있어 자유도가 높아 다양한 설계가 가능하다⁵⁾. 따라서 본 절에서는 목표 조명 등급에 도달하고자 freeform

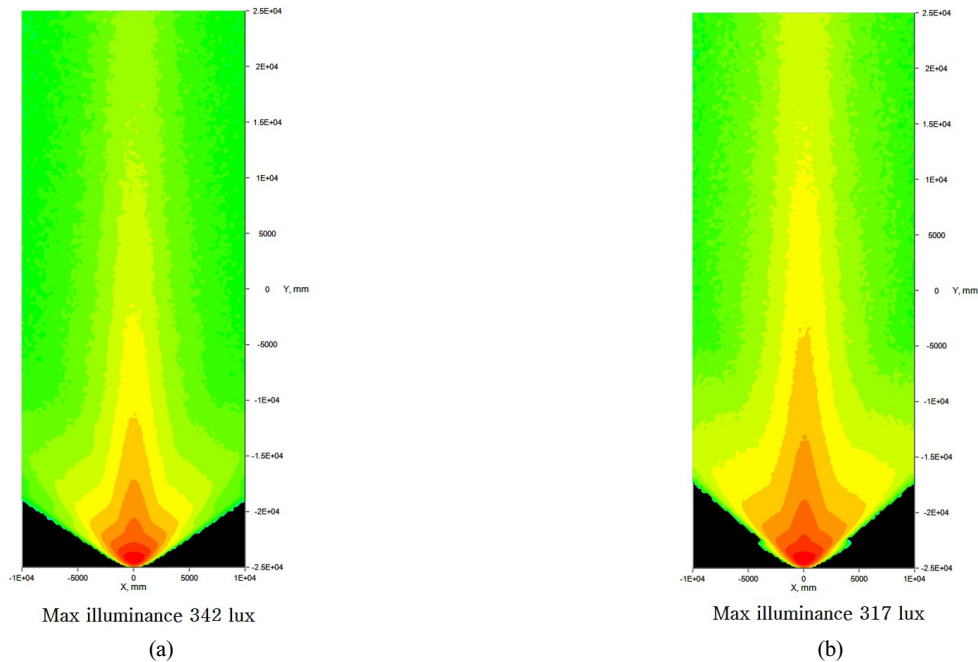


Fig. 4. Bottom illumination according to angle change: (a) Tilt 0°, (b) Tilt 20°.

Table 2. Design result of spherical reflector in standard target lighting class

Lighting interval		Lighting installation angle		Electrical energy		The presence or absence of obstacle	
2 m		0°		1120 lm		X	
Lighting height 1 m / Lateral distance 7 m							
Lavg		Uo		Ui			
Observer 1	Observer 2	Observer 1	Observer 2	Observer 1	Observer 2		
1.321	1.33	0.379	0.377	0.802	0.843		

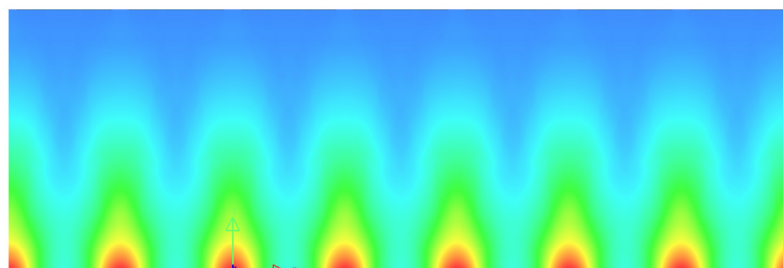


Fig. 5. Bottom illumination simulation of spherical reflector array.

reflector에 대한 설계 방법을 제시하였다.

Freeform reflector 경우에도 법선각도에 의한 입사각과 반사각의 크기가 같아 고정된 광원의 경우 반사되는 면의 변화로 배광을 변화시킬 수 있다. 광학 프로그램인 LightTools를 이용하여 reflector를 9 part로 나누고 각 part마다 도달하는

영역을 지정하는 형식으로 freeform reflector 설계를 진행하고자한다. 먼저 기존의 spherical reflector를 잇면 기준으로 10 mm마다 수직으로 선을 그어서 각 part 별로 분석하였다. 그림 6은 spherical reflector의 part를 구분한 모습이고 그림 7은 spherical 형상의 reflector를 part별로 분석한 결과이다.

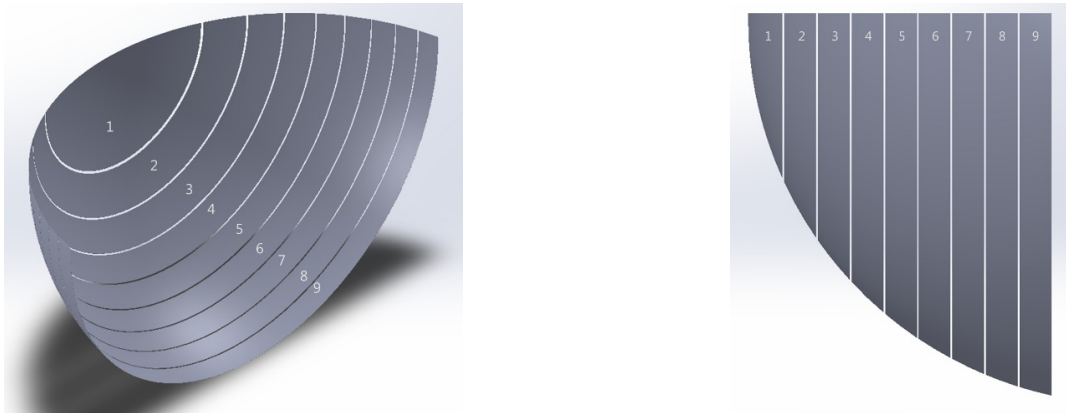


Fig. 6. Part division of spherical reflector.

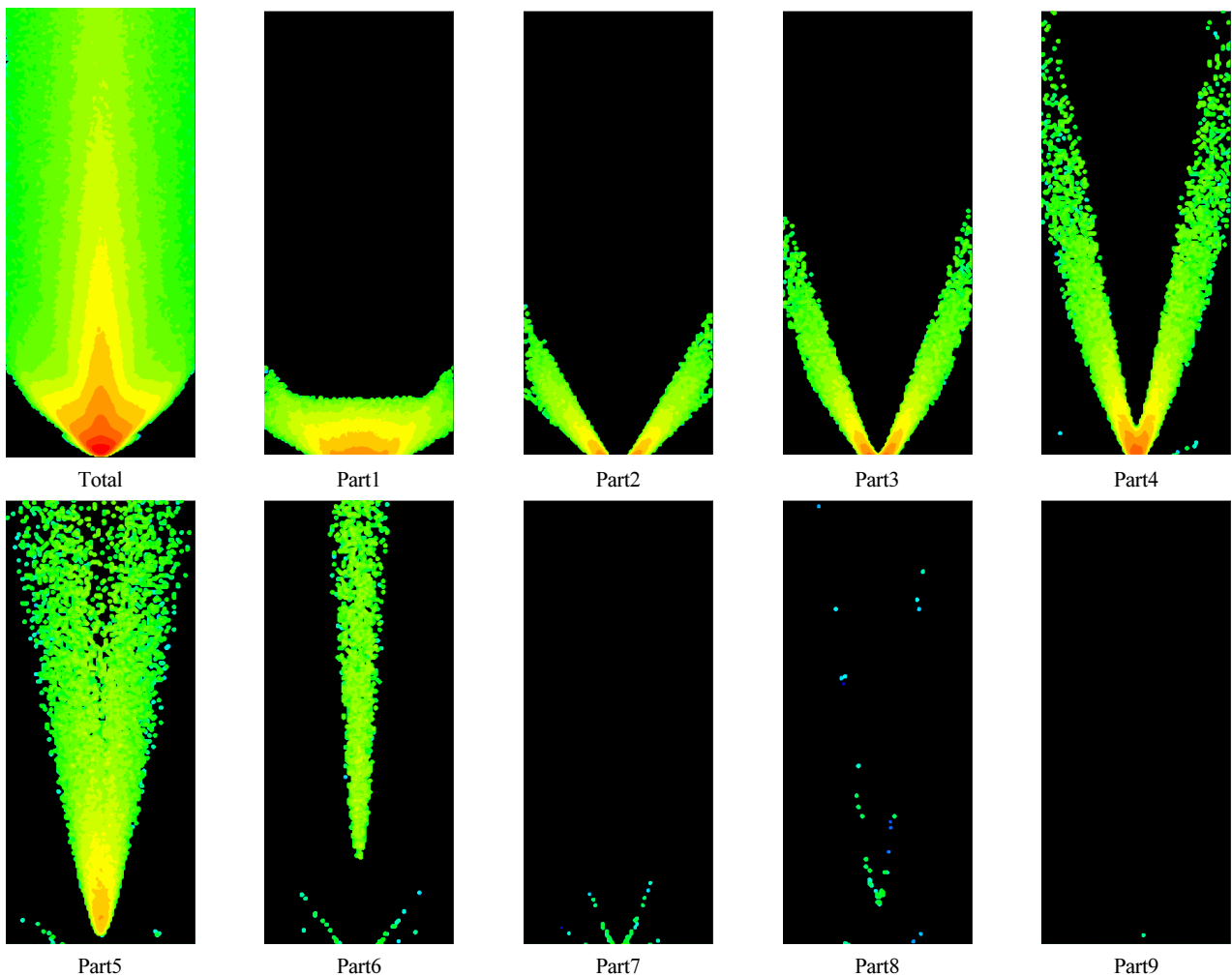


Fig. 7. Bottom illuminance analysis of spherical reflector in part.

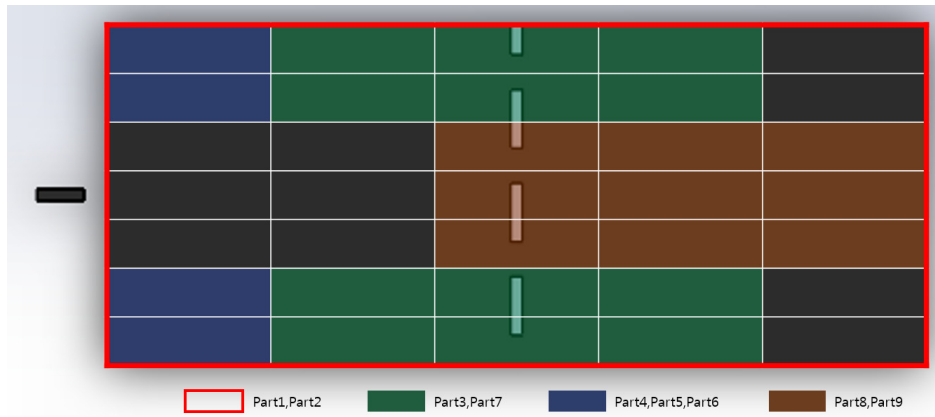


Fig. 8. Placement of road light distribution.

Spherical reflector를 분석한 결과, part1은 갓길, part2, part3, part4는 노면조도 분포의 주변부, part5, part6은 2차선 중심부로 빛을 보내고 있는 것을 확인할 수 있다. part1은 더 넓은 조도 분포를 가질 수 있으나 갓길에 빛이 집중되어 종합 균제도가 나빠지는 것을 막고 있고 part7, part8, part9는 ray가 upright로 진행되어 노면조도에 전혀 나타나지 않아 reflector의 기능을 제대로 수행하지 못하고 있다. 이러한 문제들을 해결하고자 각 part 별로 광 도달 영역을 지정한 후 freeform reflector 설계를 진행하였다. 이 때, 광원을 고정하고 임의의 영역을 설정하면 반사의 법칙을 통해 면 요소인 곡면 기울기(dz/dx)를 결정할 수 있으므로 기울기를 계산하여 각 노면의 영역으로 갈 수 있도록 설계를 진행하였다. 그림 8과 같이 part1과 part2는 가장 많은 ray를 받을 수 있는 구간으로 전반적인 노면 조도 분포 형성할 영역으로 설정하였고 part3과 part7은 1차선과 2차선 사이, part4와 part5와 part6은 중심으로 치우친 배광을 해결하고자 노면조도 분포의 주변부, part8과 part9는 2차선도로의 중심으로 가도록 영역을 지정하여 기울기 계산을 진행하였다.

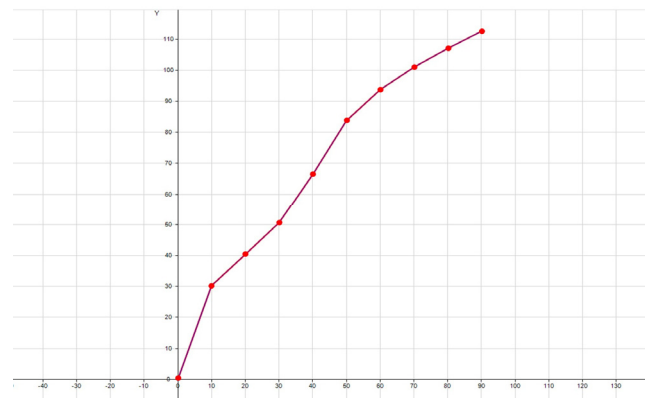
Part 별 목표 배광을 위한 기울기 도출 값은 표 3과 같다. 각 Part 별 기울기를 통해 식 (1)과 같은 수식을 도출했다. x축은 회전축으로써 회전체의 사이즈를 결정하고, y축은 회전체의 높이를 결정한다.

Table 3. Freeform reflector tilt value by part

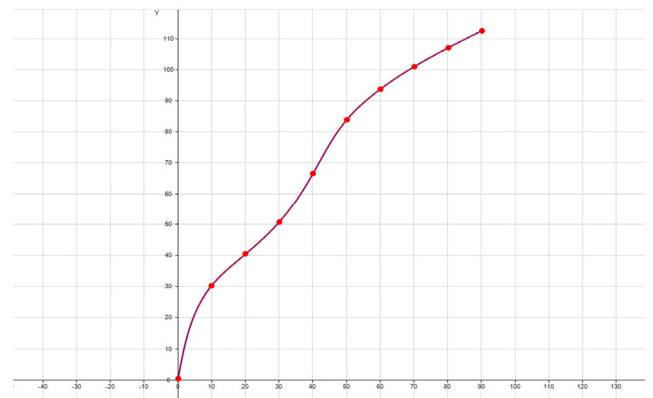
Part	Gradient
1	3.20
2	1.0
3	0.98
4	1.29
5	1.95
6	1.33
7	0.86
8	0.67
9	0.59

$$y = -1.18e-14 \times x^{10} + 5.59e-12 \times x^9 + 1.129e-9 \times x^8 + 1.26e+7 \times x^7 - 8.665e-6 \times x^6 + 0.0003695x^5 - 0.009774x^4 + 0.1552x^3 - 1.395x^2 + 7.4204x + 8.082 \quad (1)$$

직선으로 점을 연결할 경우 그래프가 그림 9(a)와 같이 형성되어 각 꼭지점이 생기므로 빛이 의도하지 않은 방향으로



(a)



(b)

Fig. 9. Curve design of freeform reflector using fitted curve function.

진행된다. 이러한 문제를 해결하고자 주어진 오차의 범위 내에서 측정 point를 연결하여 곡선의 변화를 부드럽게 연결시키는 fitted curve를 이용하여 그림 9(b)와 같은 곡선을 형성하였다⁶⁾.

그림 10은 그림 9(b) 곡선형의 그래프를 LightTools의 swept 기능으로 회전시킨 reflector 형상이고 그림 11은 freeform reflector의 각 part 별 노면조도 분포로 목표 영역에 대한 배광을 얻은 것을 확인하였다.

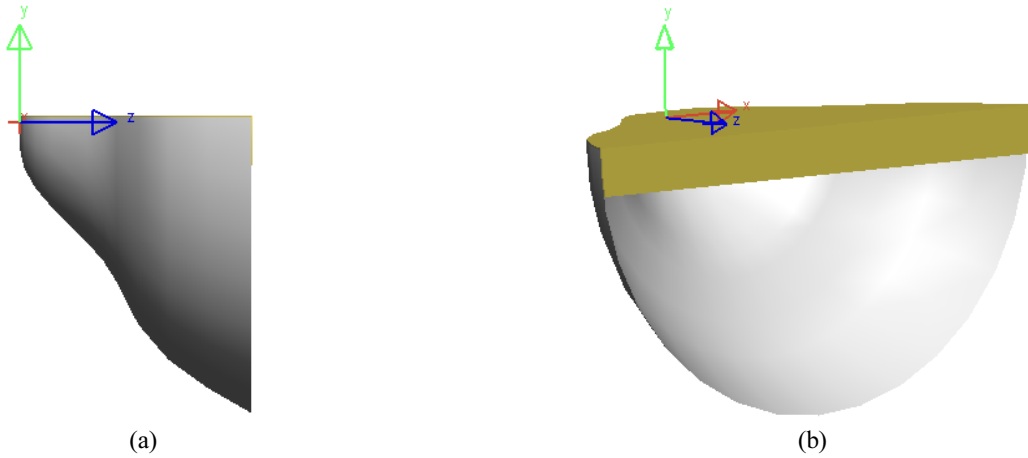


Fig. 10. Freeform reflector using swept function in LightTools: (a) yz plane, (b) Isometric view.

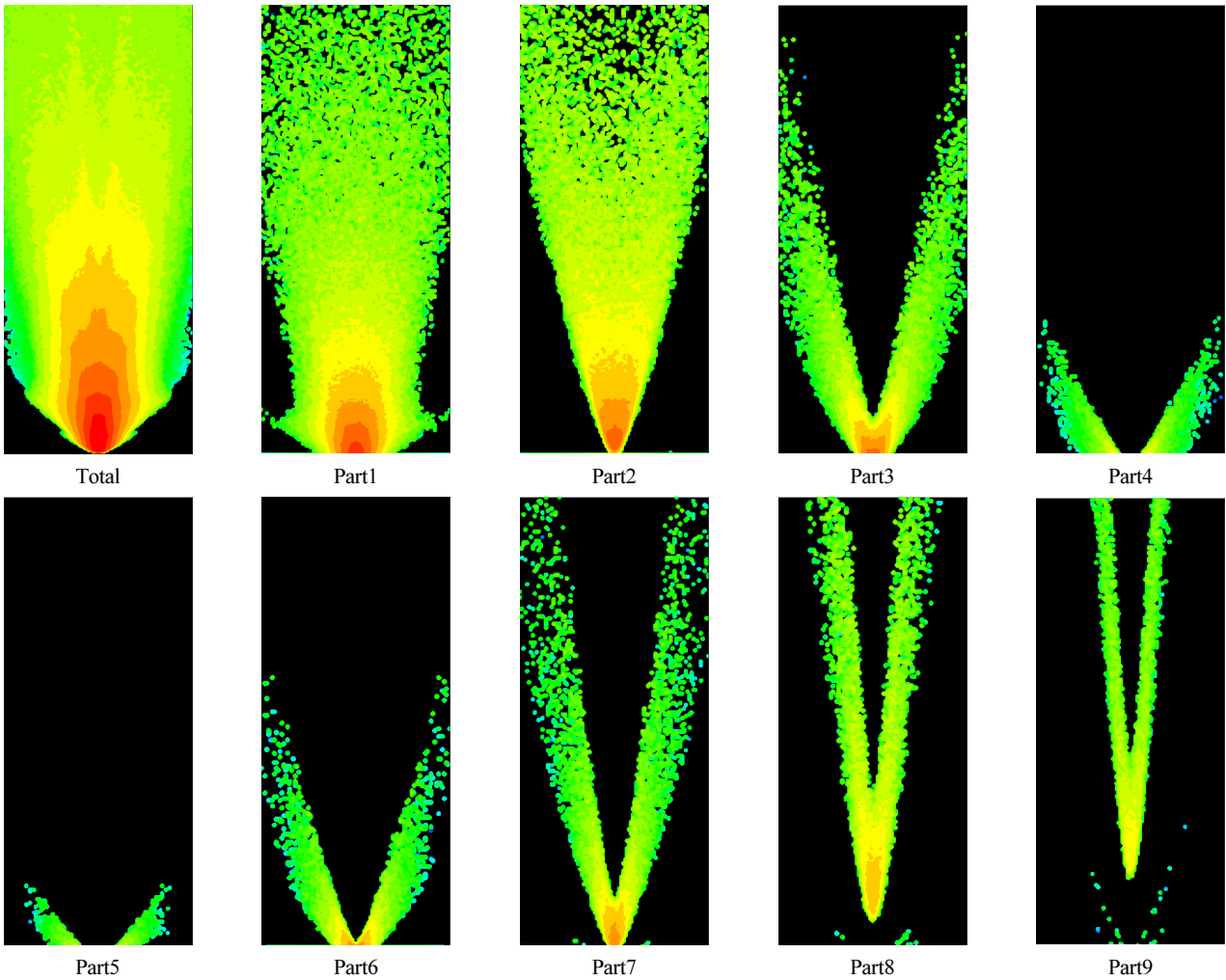


Fig. 11. Bottom illuminance analysis of freeform reflector in part.

Table 4. Design result of freeform reflector in standard target lighting class

Lighting interval		Lighting installation angle		Electrical energy		The presence or Absence of obstacle	
2 m		0°		1120 lm		X	
Lighting height 1 m / Lateral distance 7 m							
Lavg		Uo		Ui			
Observer 1	Observer 2	Observer 1	Observer 2	Observer 1	Observer 2		
1.92	1.921	0.711	0.719	0.814	0.93		

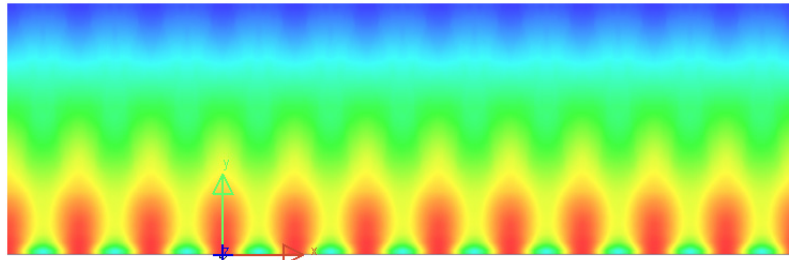


Fig. 12. Bottom illuminance simulation of freeform reflector array.

표 4와 그림 12는 LightTools의 street light simulation으로 분석한 freeform reflector 최종 설계에 대한 simulation 및 결과이다. 평균휘도(Lavg) 약 1.92 Nit, 종합균제도(Uo) 약 0.711, 차선축균제도(Ui) 약 0.87로 조명 등급 M3를 만족함을 확인할 수 있다.

그림 13은 결과에 의해 제작된 freeform reflector와 제작된 reflector가 가드레일에 설치된 모습이다. 제작한 reflector는 실제 도로상에서 성능 평가를 진행하기 위해 한국건설기술

연구원 연천SOC실증연구센터 내 시험주로(600 m 구간)에서 실시하였다.

조건은 설계 simulation 분석 조건이었던 높이 1 m, overhang 1 m, 간격 2 m로 설정하고 측정 도구 휘도계는 독일 Techno-Team의 LMK로 측정하였다. 관측 높이는 1.5 m, 측정 포인트와의 거리는 60 m (KS 도로 조명 기준 근거)로 simulation 분석과 동일한 조건으로 진행하였다.

표 5는 측정 결과로 등기구간격 2 m에서는 평균휘도(Lavg) 1.656 Nit, 종합균제도(Uo) 0.431, 차선축균제도(Ui) 0.6으로 조명등급 M3에 만족하는 결과를 확인하였다.

최종적으로 simulation 분석 값 (등기구 간격 2 m에서 평균 휘도(Lavg) 약 1.92 Nit, 종합균제도(Uo) 약 0.715, 차선축균제도(Ui) 약 0.87)보다는 약간 감소화된 실제 측정 값(등기구 간격 2 m에서 평균휘도(Lavg) 약 1.656 Nit, 종합균제도(Uo) 약 0.431, 차선축균제도(Ui) 약 0.6)을 얻었지만 조명 등급 M3를 만족하면서 도로 조명 reflector 설계 기술의 신뢰도와 타당성을 입증하였다⁷⁾.

III. 결 론

본 논문은 낮은 도로 조명을 위한 reflector 설계 방법 연구를 진행한 것이다. 높이에 비해 넓은 차선까지 배광을 보내



Fig. 13. Manufactured freeform reflector and application in road.

Table 5. Performance evaluation result of manufactured freeform reflector

Measured value		1	2	3	4	Comparison			
		1 lane (1/4)	1 lane (1/2)	2 lane (1/4)	2 lane (1/2)	Lavg	Uo	Ui	Target lighting class
Lighting interval 2 m	Lavg	1.553	1.660	1.635	1.635	1.656			M2~M3
	Lavg	0.494	0.431	0.473	0.433		0.431		M1~M3
	Lavg	0.667		0.600					M3

야 하는 낮은 도로 조명의 경우, 기존의 등주식 도로 조명에 비해 균제도를 맞추기 힘들다는 단점이 있다.

이를 해결하기 위해 낮은 도로 조명을 위한 reflector 설계 방법으로 freeform 설계를 진행하였다. 출사한 광선은 반사면에 따라 배광이 변화하게 된다. 이 때, 각 part 별 반사면의 기울기를 변화시켜 원하는 배광을 갖도록 하였다. 이와 같은 형식으로 설계를 진행하면 원하는 배광을 얻을 수 있으며 최적화 등 다른 방식에 비해 효율적으로 설계할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서 진행한 낮은 도로 조명의 경우, part를 9개로 나누어 설계를 진행하였지만 reflector 크기에 따라 더 많은 part로 나누어 세분화 설계를 진행할 수 있다. 각 part 별 반사면의 기울기를 이어 선으로 연결한 점을 fitted curve로 만드는 형식으로 freeform을 설계하면 원하는 배광과 유사한 형태의 결과를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 각 part 별 기울기를 계산하는 방법으로 수식을 도출하여 낮은 높이에 설치하는 도로 조명을 설계하였고 이를 fitted curve로 만들어 reflector를 완성하였다. 이러한 방법으로 설계한 낮은 도로 조명을 simulation하여 성능 평가를 진행하였고, 직접 제작하여 측정한 결과 실제 도로상에서 조명 등급을 만족할 수 있음을 검증하였다.

References

1. M.-A. Lee and D.-H. Lee, "Study of road light standards to improve economic efficiency, safety and environmental performance," *J. Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng.* **30**(2), 33-42 (2016).
2. D.-I. Seok and H. Kim, "The reflector design with light distribution of LED road lighting luminaire," *in Proc. KIEE Annual Conference*, 23-24 (2010).
3. Technology Standards Agency, "KS road lighting standard," KS A 3701 (2007).
4. J.-N. Chung, "A study on the fairing of the spline fitted curve data," *Dept. of Computer Engineering Chunbuk Nat'l University*, 638-642 (1991).
5. C.-S. Lee, "Analysis of performance on asymmetric LED lens design using three-dimensional free-form surface expression," *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.* **26**(3), 328-336 (2017).
6. R. Gibbons, A. Flintsch, and B. Williams, "Evaluation of impact of modern headlamp technology on design criteria for sag vertical curves," *Transp. Res. Rec.: J. Transp. Res. Board* **2384**, 65-73 (2013).
7. H.-W. Ra, "The study of the reflector design technology for street lighting," *Dept. of Nano-Optics Engineering Korea Polytechnic University*, 1-30 (2017).