



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2010년 2월
석사학위논문

비구면 광학계를 적용한 LED
조명의 광학성능 향상에 관한 연구

조선대학교 대학원

광 기술 공 학 과

이 학 석

비구면 광학계를 적용한 LED
조명의 광학성능 향상에 관한 연구

A Study on Optical Efficiency Improvement of
LED-Lighting Adopting Aspherical Optical System

2010년 2월 25일

조선대학교 대학원

광 기술 공 학 과

이 학 석

비구면 광학계를 적용한 LED 조명의 광학성능 향상에 관한 연구

지도교수 박 종 락

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2009년 10월

조선대학교 대학원

광 기술 공 학 과

이 학 석

이 학 석의 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 조선대학교 교수 김 현 수 인

심 사 위 원 한국광기술원
책임연구원 김 정 호 인

심 사 위 원 조선대학교 교수 박 종 락 인

2009년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서 론	1
제2장 이론적배경 및 실험장비	3
제1절 조명광학계	3
제2절 비구면렌즈	9
제3절 비구면렌즈 가공 및 측정장비	15
제3장 조명용 LED 모델링 및 시뮬레이션 결과	25
제1절 조명용 LED 모델링	25
제2절 비구면렌즈 적용 광학 시뮬레이션 결과	35
제4장 비구면렌즈 가공 및 측정 결과	42
제1절 가공용 Jig 설계 및 비구면렌즈 설계	42
제2절 비구면렌즈 가공 및 측정 결과	47
제3절 시제품 적용 결과	54
제5장 결론	57
[참고문헌]	59
[감사의 글]	62

List of figure

Fig. 2.1 Radiometry and Photometry	3
Fig. 2.2 Optical power property	6
Fig. 2.3 Materialization method of white LED	8
Fig. 2.4 Characteristics of aspherical and spherical lens	10
Fig. 2.5 Aspheric curve illustrating origin and axis	12
Fig. 2.6 Definition of conic section	13
Fig. 2.7 Error of tool radius and center positions	14
Fig. 2.8 3D-Modeling of Diamond Turning Machine	16
Fig. 3.1 Chemical formula of polycarbonate	26
Fig. 3.2 Drawing citizen electronics LED chip	28
Fig. 3.3 Blue LED + Yellow phosphor	28
Fig. 3.4 LED spectrum of LightTools TM	29
Fig. 3.5 LED Spectrum	29
Fig. 3.6 Far Field Receiver	30
Fig. 3.7 Optical design of Lighting-lamp & Photo	32
Fig. 3.8 Screen position	32
Fig. 3.9 Illumination of Spherical Lens Radius Change	33
Fig. 3.10 CIE & CCT Chart	34
Fig. 3.11 Optical design of Spherical and Aspherical	36
Fig. 3.12 Aspherical optical design	37
Fig. 3.13 Shape of spherical lens and aspherical lens	38
Fig. 3.14 Illumination comparison of spherical lens and aspherical lens	39
Fig. 3.15 CCT chart of spherical lens and aspherical lens	40

Fig. 3.16 CCT value of spherical lens and aspherical Lens	41
Fig. 4.1 Drawing of cutting jig & photo	43
Fig. 4.2 Geometry of diamond tool	44
Fig. 4.3 Aspherical coefficient form	45
Fig. 4.4 Drawing of spherical lens and aspherical lens	46
Fig. 4.5 Flowchart of cutting process	48
Fig. 4.6 ToolSetting(STM6, Olympus Co., Japan)	49
Fig. 4.7 Form accuracy and surface roughness of spherical lens	51
Fig. 4.8 Form accuracy and surface roughness of aspherical lens	52
Fig. 4.9 Diagram of optical measurement	53

List of photograph

Photo 2.1 Diamond Turning Machine	15
Photo 2.2 Structure of Diamond Turning Machine	17
Photo 2.3 Ultra high accurate 3-D profilometer	19
Photo 2.4 3-D surface roughness measurement system	21
Photo 2.5 High precision vision inspection system	22
Photo 2.6 Integrating Sphere System(LF Series, PSI Co., Australia)	23
Photo 2.7 Chroma meter	24
Photo 3.1 Yellow belt of LED-Lighting	31
Photo 4.1 Aspheric cutting of polycarbonate material	47
Photo 4.2 LED-Lighting test equipment	54
Photo 4.3 Fabricated lenses	54
Photo 4.4 Yellow Belt of Spherical Lens	55
Photo 4.5 Yellow Belt of Aspherical Lens	56

List of table

Table 2.1 LED-Lighting unit	5
Table 2.2 Table of conic constant values	13
Table 2.3 Specification of Diamond Turning Machine(Nanoform200)	18
Table 2.4 Specification of UA3P	20
Table 2.5 Specification of Intergrating Sphere System	23
Table 3.1 Specification of polycarbonate	26
Table 3.2 Aspherical design and a coefficient form	36
Table 4.1 Condition of Diamond Turning Machine	44

ABSTRACT

A Study on Optical Efficiency Improvement of LED-Lighting Adopting Aspherical Optical System

By Hak-Suk Lee

Advisor : Prof. Jong-Rak Park, Ph.D.

Department of Photonic Engineering

Graduate School of Chosun University

Recently, light-emitting diodes (LEDs) have attracted much attention due to their superior characteristics to other conventional light sources e.g., low power consumption, long lifetime, less environmental pollution, and so on. The use of LEDs has been rapidly increasing and this trend is expected to continue in the future. Currently, spherical lenses are commonly employed for LED-lighting, which gives rise to many problems, that include low illuminance, unpleasant feelings in human eyes due to a yellow belt phenomenon, etc., inherent to spherical nature of the lens.

In this thesis, improvement of LED-lighting performance by adopting an aspherical lens is reported. A commercially available lens design software Code VTM (Optical Research Associates) was used to design an aspherical lens for an LED-lighting system and the performance of the system before and after adopting the aspherical lens was analyzed using an illumination design software LightToolsTM (Optical Research Associates). The yellow belt phenomenon was confirmed and improvement of the optical performance of

the LED-lightning system adopting the aspherical lens was predicted through the simulations.

The aspherical lens was fabricated using a diamond turning machine and the performances of the LED-lightning system before and after adopting the aspherical lens were measured. It was experimentally observed that the yellow belt phenomenon was noticeably eliminated and the illuminance was increased by adopting the aspherical lens to the LED-lightning system.

제1장 서론

오늘날 현대 산업사회의 첨단 제품의 발전을 주도하고 있는 반도체, 정보통신, 광학제품 관련 산업의 비약적인 발달로 인해 정밀기계부품의 가공은 고부가가치 기술로서 매우 중요하게 인식되고 있다. 특히 이러한 제품에 대한 요구 정밀도가 크게 증가하면서 미소절삭에 의한 초정밀 가공의 필요성이 증대되고 있다. 또한, 현재 초정밀을 향한 핵심기술 보유는 첨단산업의 국제적 경쟁력 확보를 위해 필수적인 공통 기반기술로서 자리 매김을 하고 있다.^[1,2]

초정밀가공에 관한 연구는 미국, 일본, 독일 등 선진국에서 활발히 이루어지고 있으며, 역사적으로 1962년 미국의 Union Carbide사와 프랑스의 DuPont사의 협동으로 고정도 기계를 개발하여 연삭 가공한 것이 최초이다.^[3] 초정밀 가공은 표면 거칠기와 형상정도를 나노미터(Nanometer: 1 nm = 10⁻⁹ m)오더로 달성하는 것으로서 기본적으로 창성 운동에 의해 가공이 이루어지므로 가공기의 정밀도가 가공 면에 직접 옮겨져 간다. 따라서 운동정밀도가 가공품의 정밀도를 실현하는데 극히 중요한 함수가 된다.

한편, 최근 반도체 기술의 발전으로 인해 단순표시용 소자로만 사용되던 LED(Light Emitting Diode)가 차세대 대체 조명으로 급부상하고 있다.^[4,5] 이러한 배경에는 LED가 기존 조명보다 고효율, 저전력 소비, 환경친화성, 그리고 뛰어난 내구성 및 견고성 뿐만 아니라 다양한 집적화는 물론 정교한 디자인이 가능하여 빛이 필요한 다양한 분야에서 응용이 가능하기 때문이다. 또한 광색이 뚜렷하여 시인성, 색재현성이 높고 사이즈가 작아 조명을 소형화할 수 있는 장점을 가지고 있다.^[6] 특히 교토의정서 협약과 더불어 전 세계적으로 환경에 대한 관심이 증가하면서 LED는 에너지 절감효과와 환경보전이라는 측면에서 더욱더 주목받고 있으며 미국, 일본, 유럽 등의 선진국에서는 국가적인 수행 과제로서 차세대 조명용 LED 광원 개발을 하고 있는 실정이다.^[7,8] 이와 같이 일반 조명광원과 특수조명 등에 다목적으로 이용되는 LED 광원을 개발하기 위해서는 제품개발 전에 충분한 광학적 현상분석을 통한 개선된 광학설계가 선행되어야 한다. 특히, LED에 광학렌즈와 같은 부품을 채용할 경우 다양한 응용제품에 사용가능할 뿐 아니라 광학적 성능도 향상될

수 있다. 그러나 기존에는 구면렌즈를 사용하는 경우가 대부분으로 구면렌즈로 인한 광학수차가 발생하여 조명용 광원으로서의 광학적 성능이 저하되는 단점을 가지고 있다.^[9] 따라서 이러한 광학수차를 개선하기 위해 비구면렌즈의 설계 및 적용이 제안되고 있다. 또한 종래의 광학렌즈를 채용한 조명용 LED의 경우 백색광 주변에 황색 띠 무늬가 생기는 현상이 발생하는데 이는 사람의 눈에 불쾌감을 주고 나아가 명확한 시인성 확보에 어려움이 발생하는 단점을 가지고 있다. 이러한 점을 보완하기 위하여 비구면 광학렌즈를 채용함으로써 광학렌즈의 수차로 인해 발생하는 황색 띠 무늬를 감소시키기 위한 연구 또한 활발히 진행 중에 있다.

본 연구에서는 조명용 LED 광원에 기존 구면렌즈를 사용하여 광학수차에 의해 황색 띠 무늬가 발생하는 현상을 상용 조명설계 프로그램인 LightToolsTM(ORA사)를 이용하여 모델링하고 광학현상을 분석한 후 상용 결상설계 프로그램인 Code VTM(ORA사)로 비구면렌즈 설계를 실시하여 조명광학계에서의 비구면렌즈 설계기술 적용 및 성능개선을 위한 광학설계를 수행하였다. 또한 Diamond Turning Machine(DTM)을 이용하여 광학용 Polycarbonate(PC)를 직가공 하였으며 가공 후 가공물에 대하여 계측장비로 측정을 수행하였다. 가공 완료된 구면렌즈와 비구면렌즈를 LED 조명 시제품에 적용하여 비교 분석하였으며 이를 통하여 비구면 렌즈를 적용한 조명용 LED 광학계의 광학적 성능을 측정 평가하였다.

제2장 이론적배경 및 실험장비

제1절 조명 광학계

1. 복사측정학과 측광학의 단위

Figure 2.1에서 나타내듯이 복사측정학(radiometry)이란 전자기파의 분광성분(파장별 intensity), 공간분포, 편광상태를 측정 하는 분야로서, 객관적인 물리적 양(physical quantities)인 스펙트럼, 분광분포, 편광등을 측정 대상으로 삼는다. 반면에 측광학(photometry)은 사람의 눈이 가지고 있는 전자기파 스펙트럼에 대한 반응을 고려하여 복사측정학의 측정량들을 눈이 실제로 느끼는 빛에너지로 환산한 양들에 대해 다룬다. 따라서 사람의 뇌가 인지하는 정신적-물리적 양(psycho-physical quantities)에 대한 분야라고 말할 수 있다. 따라서 에너지의 전달율인 파워의 기본 단위는 복사측정학에서는 와트 watt [W] 이고 측광학에서는 루멘 lumen [lm]을 사용한다.^[10,11]

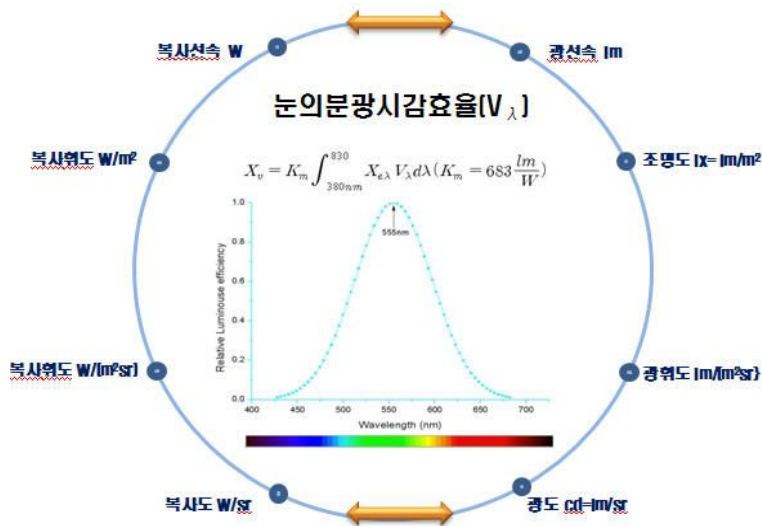


Fig. 2.1 Radiometry and Photometry

가. 광선속 (Luminous Flux)

단위시간 당 사람의 눈이 인지하는 가시광선의 에너지는 발광출력 혹은 광속(luminous flux)라 하는데, 각 파장의 복사출력을 사람의 눈이 어떻게 받아들이는가에 의해 그 양이 결정되며 파장은 약 380~780 nm이며 단위는 lumen [lm]이다. 복사에너지가 단위시간당 방사되는 양을 복사선속이라 하고 이 복사선속 중 가시광선이 단위시간당 통과하는 광량을 Φ 로 표기한다.

나. 광도 (Luminous Intensity)

SI 단위계에서 광도의 기본단위는 Candela [cd]이며 단위는 I로 표기한다. 역사적으로는 초 한 개의 광도에서 유래하였으며 주파수 540×10^{12} Hz (555 nm)인 단색광을 방출하는 광원의 복사 강도가 어떤 주어진 방향으로 단위 입체각 steradian [sr] 당 1/ 683 W 일 때 이 방향에 대한 광도이다. 단위 입체각은 반지름이 r인 구의 표면 위에 임의의 면적 A가 구 중심으로부터 이루는 입체각을 의미하며 w로 표기한다.

$$w = \frac{A}{r^2} \quad I_v = \frac{\Phi_v}{w} \quad \Phi_v = I_v w \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

다. 조도 (Illuminance)

조도는 어떤 면이 받는 빛의 세기를 그 면적에 비치는 광속으로 나타낸 양이다. 단위로는 lux [lx], 기호는 E를 사용한다. 면적 A [m²]에 도달하는 광속을 Φ [lm]이라 할 때 조도 E는 거리의 제곱에 반비례한다.

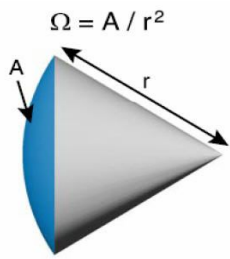
라. 휘도 (Luminance)

휘도는 빛을 발하거나 반사하는 표면의 밝기를 나타내며 조명기구에서 발생된 빛이 직접 눈에 들어오거나 물체의 표면에 반사된 후에 눈으로 들어오는 빛이 얼마나 밝은 것인가를 나타내는 것으로서 작업 능력에 커다란 영향을 미친다. 휘도의 단위는 nit를 사용한다.

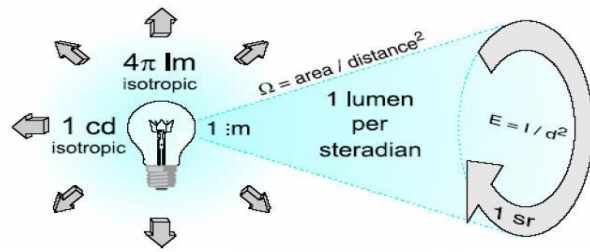
Table 2.1은 조명에서 사용되는 용어들의 단위, 의미 및 적용범위를 간략하게 설명하였으며, Fig. 2.2는 본 절에서 설명한 용어(광속, 광도, 조도, 휘도)들을 나타내고 있다.

Table 2.1 LED-Lighting unit

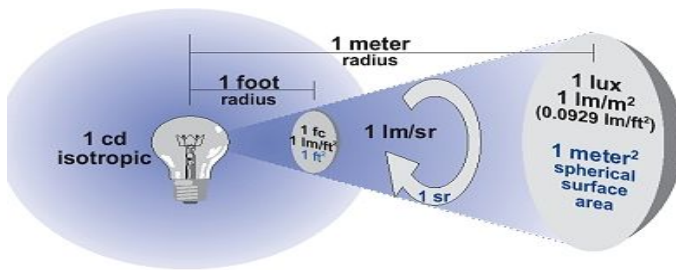
용어	단위	의미	적용범위
광속	lm (=cd/sr)	광원으로 부터 나오는 광(가시광)의 총량	LED 전체 광량
광도	cd (candela)	단위 입체각당 광속 (lm/sr)	LED 중심 밝기
조도	lx (=lm/m ²) (lux)	빛이 비추지는 면의 단위 면적당 광속	조명기구
휘도	nt (=cd/m ²) (nit)	단위 입체각당, 단위 면적에 조사되는 광속	BLU
효율	lm/w	소비 전력당 광속	소비 전력



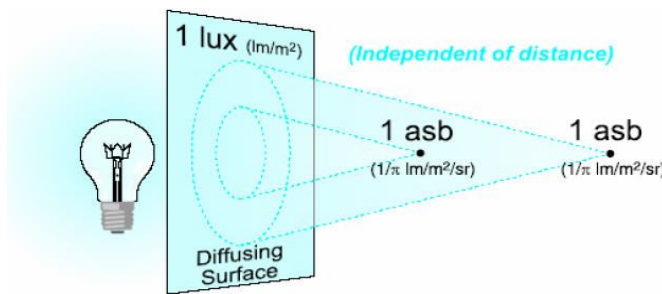
(a) Solid angle



(b) Luminous intensity



(c) Illuminance



(d) Luminance

Fig. 2.2 Optical power property^[12]

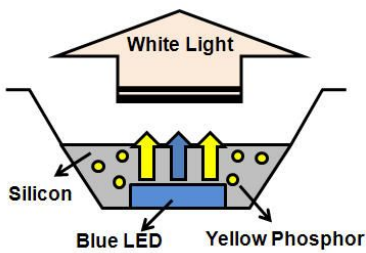
2. 백색 LED 구현방법

Figure 2.3에서 알 수 있듯이 백색 LED를 구현하는 방법은 4가지가 있으며 첫째로 청색 LED와 황색 형광체를 캡슐로 감싼 뒤 청색광이 형광체를 통과하면서 황색을 생성시켜 청색과 황색의 조합으로부터 백색을 구현하는 방법이 있다.^[13] 이 방법이 상용화가 가장 빠를 것으로 기대되고 있는데 무엇보다 청색 LED 시장이 크게 형성되어 있어 기업들의 연구 개발이 가장 활발하기 때문이다. 그렇지만 생성된 빛의 방향성이 높은 LED의 특성상(LED는 빛이 여러 방향으로 균일하게 퍼지기보다는 한 방향에 모이는 경향이 있음) 옆면에서 관측되는 빛은 황색을 띠는 헤일로 현상과 형광체의 황색 생성 효율이 낮아 두터운 형광체가 필요한 점이 가장 큰 문제점으로 꼽히고 있다. 또한 자연광에 가까운 양질의 백색을 만들기 위해서 녹색과 적색을 생성시키는 여러 종류의 형광체를 동시에 사용해야 하는 것도 단점으로 꼽힌다. 여러 가지 형광체는 백색광의 효율을 떨어뜨리기 때문이다.

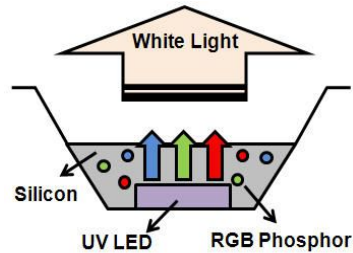
자외선을 이용한 백색광의 구현은 청색광을 이용한 경우 보다 자연광에 가까운 백색광을 실현할 수 있다는 점에서 매우 매력적이다. 그렇지만 자외선을 이용하여 백색의 가시광선 영역의 빛을 만들기 위해서는 형광체의 발광효율을 감소가 불가피하다. 따라서 형광체의 효율이 LED의 효율에 비해서 떨어지기 때문에 청색광을 이용한 응용보다 높은 LED의 효율을 요구하는데, 대략 70% 이상의 효율을 갖는 자외선 LED가 필요한 것으로 예측되고 있다. 이는 현재의 수준과는 많은 차이가 있으며 앞으로 상용하는 기술적 발전이 이루어지는데 상당한 수준의 노력과 시간이 필요할 것으로 보인다.

빛의 삼원색을 이용한 방법은 가장 자연광에 가까운 백색광을 만들 수 있을 뿐만 아니라 여러 가지 색이 이용되므로 빛의 색상과 채도를 회로의 설계에 의해서 수월하게 조절할 수 있다는 장점이 있다. 그렇지만 사용되는 전체 LED의 효율이 50% 이상이 되어야 하고, 색상에 따른 LED 각각의 동작 전압과 수명이 다르므로 보다 정교한 조절 회로가 필요할 것이다. 네 번째 방법은 보색관계를 갖는 2개의 LED를 결합하여 만드는 방법이다. 주황색과 청녹색을 4대1의 비율로 섞으면 백색이 되는데 최근 주황색에서 적색까지의 발광색을 조절할 수 있는 InGaAlP LED의 경우 성능지수가 100 lm/W를 초과

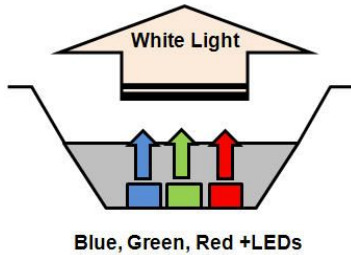
함에 따라 현재 조합된 백색LED의 조명효율이 형광등에 가깝게 구현할 수 있을 것으로 기대되지만 청녹색의 경우 만족할만한 효율이 나오지 않기 때문에 많은 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 백색광 구현이 가장 용이하고 단가가 가장 저렴한 청색 LED에 황색 형광체를 조합한 조명용 LED를 사용하였다.



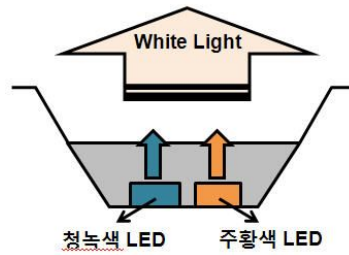
(a) Blue LED + Yellow phosphors



(b) UV LED + RGB phosphors



(c) Red+Green+Blue LEDs



(d) Binary complementary LED

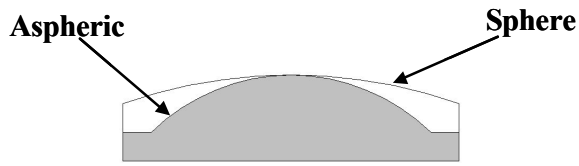
Fig. 2.3 Materialization method of white LED

제2절 비구면 렌즈

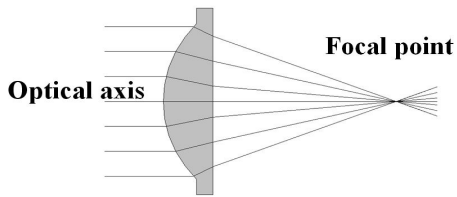
비구면 렌즈란 렌즈의 표면이 구면도 평면도 아닌 비구면(非球面)인 렌즈를 말하는 것이다. 우리가 주위에서 흔히 보는 렌즈들을 살펴보면 양면볼록, 양면오목, 한면볼록(한면은 평면이고 다른 면은 볼록렌즈), 한면오목 등 그 종류나 모양은 다양하지만 이들 렌즈들의 경우 거의가 구면렌즈(정도의 차이는 있지만 굴곡을 가지고 있는데 이 곡선을 연장시켜보면 하나의 커다란 원을 형성하게 되므로 구면렌즈라고 함)들인데 구면렌즈의 경우, 연마나 가공이 용이하므로 가격도 저렴한 편이라 일반적으로 많이 사용하지만 그 구조상 구면수차(Spherical Aberration)가 발생한다는 문제점을 가지는데 이러한 구면수차는 렌즈주변부로 갈수록 더 커지게 된다. 이러한 구면수차를 해결하기 위하여 렌즈중심부와 가장자리의 굴곡을 달리하여 렌즈의 가장자리를 아주 미세하게 조금 더 깎아주게 되면 렌즈중심부는 물론 주변부에 입사한 광선들도 하나의 점에 초점이 맺히게 되므로 구면수차를 완전히 없앨 수는 없지만 그래도 획기적으로 줄어든다고 하는데 구면수차가 없는 렌즈를 설계해보면 그 모양이 느슨한 정규분포곡선 모양 또는 종(鐘)모양이 되는데 그 모양이 구면도 평면도 아니므로 비구면(Aspherical)렌즈라고 부르는 것이다.^[14,15]

최근에는 새로운 광원으로 레이저가 개발되고 광학기술과 전자공학, 정밀기계공학과와의 결합이 이루어짐에 따라서 비구면렌즈의 가공 기술도 크게 발전하고 있다. 또한, 컴퓨터의 개발과 더불어 복잡한 광학 시스템의 계산이 가능해졌을 뿐 아니라 초정밀 가공 기술이나 초정밀 측정 기술 등의 핵심기술이 급속히 진보되어 고 정밀 비구면렌즈가 대량으로 생산되고 제품화되는 상황이 일어나고 있어 종래의 구면 렌즈만을 주로 사용하였던 많은 단점과 불편함이 점차 해소되어 가고 있다.

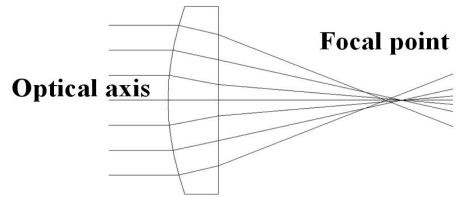
Figure 2.4는 구면렌즈와 비구면렌즈의 특성들을 나타낸 것으로 (a)는 구면과 비구면의 도식화, (b)는 비구면렌즈의 초점 위치, (c)는 구면렌즈에서 초점 위치, (d)는 일정간격의 정사각형 격자용지를 비구면렌즈를 통해 나타나는 이미지, 그리고, (e)는 구면렌즈를 통해 본 이미지를 나타낸 것이다.



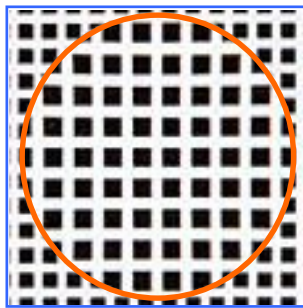
(a) Comparison of aspheric and spheric



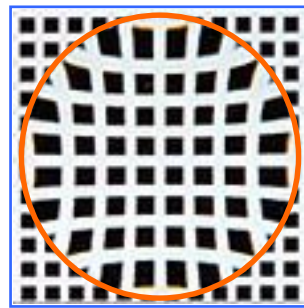
(b) Focal point of aspherical lens



(c) Focal point of spherical lens



(d) Image of aspherical lens



(e) Image of spherical lens

Fig. 2.4 Characteristics of aspherical and spherical lens

비구면렌즈를 사용하면 구면렌즈에 비하여 다음과 같은 많은 장점이 있다. 첫째 구면으로는 해결하기 어려운 상의 질을 저해하는 근본적인 구면수차, 왜곡수차 등을 극소화 내지는 보다 쉽게 제거하여 선명하고 넓은 시야의 영상을 얻을 수 있다. 예를 들면, 상의 일그러짐을 완전히 제거한 대단히 넓은 시야의 대물렌즈, 대안렌즈, 고도수의 안경렌즈 등의 광학계 제작에 비구면을 사용할 수 있다. 둘째 광학계를 소형화, 경량화 시킬 수 있다. 즉, 구면렌즈와 거의 동일한 수준의 성능을 유지한다면 비구면 1매를 사용할 경우 통상 구면렌즈 4~5매 정도의 효과를 가질 수 있다. 예를 들면, 미놀타사에서는 카메라용 교환렌즈에 비구면 1매를 사용함으로써 렌즈의 매수를 14매에서 12매로 줄이고, 길이를 87 mm에서 59.5 mm로, 무게를 495 g에서 290 g등으로 대폭 감소시켰음을 보여주었다. 셋째 결과적으로 생산단가 인하에도 중요한 요인으로 부각되고 있다. 넷째 설계자유도의 증가로 광학계 설계를 위한 설계 변수가 많아져서 고성능을 실현할 수 있게 된다. 비구면을 수식으로 표현하면 다음과 같이 나타낸다.

$$z = \frac{C \cdot x^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K) \cdot C^2 \cdot x^2}} + \sum_{i=1}^n A_i \cdot x^i \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

여기서 z는 x축에 수직인 면의 새그(Sag)값, K는 코닉상수(conic constant), C는 1/R의 기본곡률을 나타내며, R은 기본반경, A₄에서 A₁₂는 비구면계수이다.

Figure 2.5는 가공축과 비구면 방향에 대한 개략도를 나타낸 것이다. 위 식은 1차원적인 면으로 정의되어 있지만 중심(0, 0)에서 회전대칭의 단면이라고 가정한다.

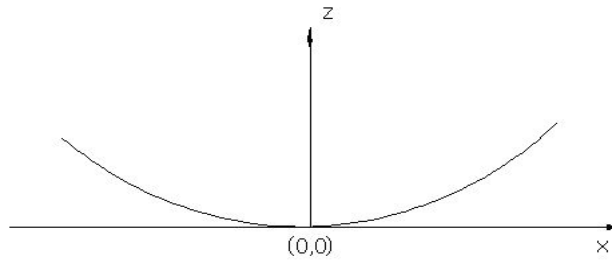


Fig. 2.5 Aspheric curve illustrating origin and axis

비구면의 면 기울기에 대한 식 또한 매우 유용한 식이다. 이것은 위의 비구면 식을 미분하면 얻을 수 있는데 다음과 같다.

$$Slope = \frac{Cx}{\sqrt{1 - (1+K)C^2x^2}} + iA_i x^{i-1} \dots\dots\dots (2.3)$$

여기서, Slope= tan(surface angle)이다.
 비구면 식은 원추(conic)항과 비구면(aspheric)항 두 부분으로 나눌 수 있다.
 원추항은 다음과 같다.

$$z = \frac{Cx^2}{1 + \sqrt{1 - (1+K)C^2x^2}} \dots\dots\dots (2.4)$$

코닉상수 K의 값은 구면(sphere), 포물선(parabola), 타원(ellipse) 또는 쌍곡선(hyperbola)에 따라서 달라지는 값이다. Table 2.2과 Fig. 2.6에 각 변수 값에 따른 원추부분의 형상을 나타내었다. Figure 2.6에 나타낸바와 같이 원추 형상은 원뿔을 평면으로 절단함으로써 만들어지는 곡선임을 알 수 있다. 절단면이 원뿔의 바닥면과 평행하면 교차점들은 원(Circle)이 되고, 다른 각도의 절단면들은 Ellipse, Parabola, Hyperbola 형상을 이루게 된다.

Table 2.2 Table of conic constant values

Conic constant	Surface type
$K = 0$	Sphere
$K = -1$	Parabola
$-1 < K < 0$	Prolate ellipse
$K > 0$	Oblate ellipse(Not strictly a conic section)
$K < -1$	Hyperbola

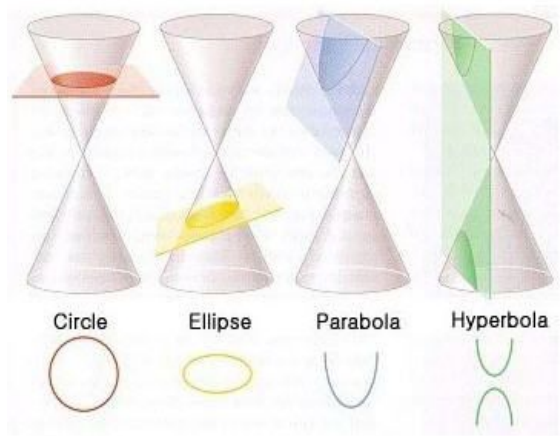


Fig. 2.6 Definition of conic section^[16]

예를 들어 포물면 경우 $K = -1$ 이다. K 값을 원추형 식에 넣으면 포물면 식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$z = -\frac{Cx^2}{2} \dots\dots\dots (2.5)$$

Figure 2.7은 공구 인선의 형상과 공구의 위치결정에 따른 오차발생 모델을 도식화한 것이다. 초정밀 가공에서는 공구 인선 형상이 그대로 공작물에 전사되는 원리를 이용하여 가공하는데, 공구 인선의 형상이 완벽한 곡률반경을 갖지 않았을 경우에는 가공 접촉점이 일치하지 않아 실제 가공면은 가공 형상오차가 발생한다. 공구 위치결정 오차가 발생한 경우에는 이상적인 공구 경로를 지나지 않고 오차발생량 만큼의 궤적을 그리게 된다. 이러한 이유로 실제 가공면의 형상은 오차가 그대로 전사되게 된다.^[17]

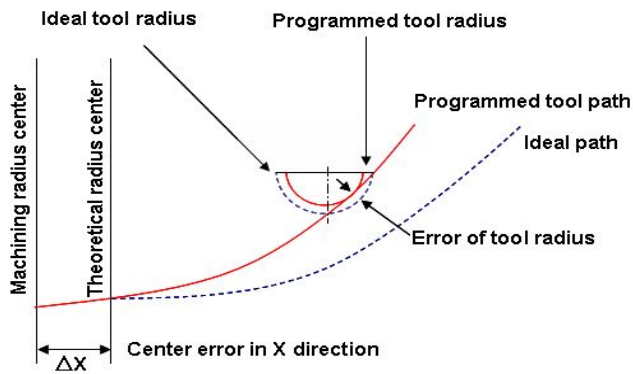


Fig. 2.7 Error of tool radius and center positions

제3절 비구면렌즈 가공 및 측정장비

1. 초정밀 가공기

본 논문에서는 조명용 LED에 비구면 렌즈를 적용하기 위해 비구면 렌즈 가공이 가능한 초정밀 비구면 가공기를 사용하여 초정밀 가공을 수행하였다. Photo 2.1에 초정밀 비구면가공기인 다이아몬드 터닝머신(Nanoform200, Precitech Inc., USA)을 나타내었다.



Photo 2.1 Diamond Turning Machine
(Nanoform200, Precitech Inc., USA)

다이아몬드 터닝머신은 초정밀 가공을 위해 유체 정역학적인 슬라이드와 기체 정역학적인 슬라이드를 사용한다. 기본적으로 Nanoform200은 다이아몬드 터닝머시인(single-point diamond machining, SPDM)이지만 필요에 따라 옵션을 이용하여 연마가공이 가능하며, 특히 일반 상용 공구를 사용하여 많은 종류의 물질들을 직접 가공 할 수 있다. 기본적인 Nanoform200은 가공물 회전 지름이 200 mm, 최대 가공 가공물 지름이 180 mm이고, SP150 스피들로 장착 가능한 가공물의 무게는 57 kg, SP75 스피들은 18 kg이다. 위 연구에 사용한 장비에는 SP150 스피들이 장착되어 있다. Nanoform200은 최상의 정밀도와 열적 안정성을 위해서 천연 화강암 베이스를 사용한다. Figure 2.8은 다이아몬드 터닝머시인의 3D-Modeling 구조를 나타내며, Photo 2.2는 다이아몬드 터닝 모습을 나타낸다.

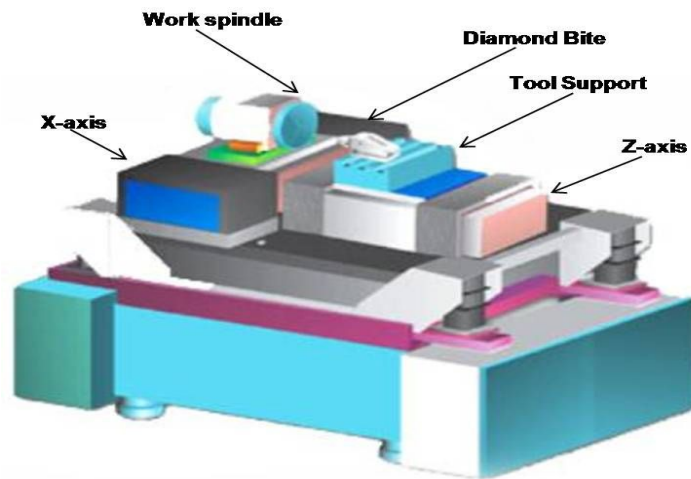


Fig. 2.8 3D-Modeling of Diamond Turning Machine

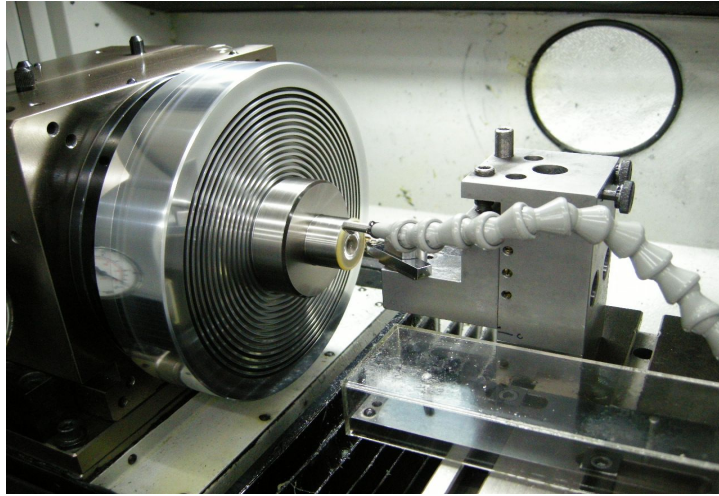


Photo 2.2 Structure of Diamond Turning Machine

베이스의 외각 크기는 610 mm×1016 mm×150 mm이다. 스테인리스 스틸 절삭유 트레이는 베이스 아래에 있다. 베이스 주위를 스틸 프레임이 둘러싸고 있고 베이스 위에 기계를 올리게 된다. Nanoform200은 두개의 수평 슬라이드가 T자 형태로 되어 있으며 두 슬라이드는 베이스 위에 있다. 기본적인 선반 형태는 x축 슬라이드에 가공물을 고정하게 된다. x축 슬라이드는 가공물을 고정하는 스펀들의 회전축에 수직하게 이송한다. z축 슬라이드는 공구를 지지하고 x축 슬라이드에 수직하게 이송하고 가공물 마운트 스펀들에는 평행하며 x축과 z축의 직각도는 2.0 arc second 이내가 된다. Table 2.3은 다이아몬드 터닝머시인의 주요 스펙을 나타낸다.

Table 2.3 Specification of Diamond Turning Machine(Nanoform200)

Diamond Turning Machine(Nanoform200)		
Workpiece size	φ200 mm	
X and Z axis slide table (hydrostatic oil bearing)	Travel : 180 mm	
	Feedrate : 0~1500 mm/min	
	Scale resolution : 8.62 nm	
X and Z-axis slide accuracy	Straightness	Vertical : 0.2 μm/100mm
		Lateral : 0.1 μm/100mm
Workholding spindle	Speed range : 10~5000 RPM	
	Load capacity : 57 Kg at spindle nose	
Tool spindle rotation accuracy	Radial direction : 0.3 μm	
	Thrust direction : 0.3 μm	

2. 초정밀 계측장비 및 광측정 장비

가. 접촉식 형상측정기

본 논문에서는 초정밀 가공으로 제작한 LED 조명 렌즈의 형상 및 표면 측정을 위해 3차원 자유곡면 형상측정기(UA3P, Panasonic Co., Japan)를 사용하였다. 본 장비는 AFP (Atomic Force Probe)에서의 측정면에 대하여 프로브를 원자간력이 작용하는 영역까지 근접시켜서 이 원자간력을 항상 일정하게 유지하면서 최대 60°까지의 경사면을 측정할 수 있는 형상측정기로서 원자간력은 극도로 미소하게 작용하여 측정면에 손상을 주지 않는다. 또한 각 종의 비구면(회전대칭면, Toric 렌즈, 실린더렌즈 등)이나 평면의 형상측정이 가능한 장비이다.^[18] Photo 2.3과 Table 2.4는 고정도 3차원 형상측정기와 주요 규격을 각각 나타낸다.



Photo 2.3 Ultra high accurate 3-D profilometer(UA3P, Panasonic Co., Japan)

Table 2.4 Specification of UA3P

Measurable range	200 mm×200 mm×45 mm
Scale	He-Ne Oscillation frequency stabilized laser
Sensor : Atomic force probe	Ruby - Tip curvature radius: 0.5 mm - Pressure: 0.3 mN (30 mgf)
	Diamond - Tip curvature radius: 2 μm - Pressure: 0.3 mN (30 mgf)
Max. measurable angle	60°
Probe measurement accuracy	Ruby : 0.01 to 0.05 μm
	Diamond : 0.1 μm
Measurement error	0.05 μm / 100 mm
Measuring speed	0.01 to 10 mm/sec

나. 표면조도측정기

본 논문에서는 초정밀 가공으로 제작한 LED 조명 렌즈의 표면조도 측정을 위해서 3차원 표면조도측정기(NewView5000, Zygo Co., USA)를 사용하였다. 표면조도측정기는 초정밀 가공부품의 표면 형상을 비접촉식으로 광 간섭의 원리를 이용한 대물렌즈의 확대를 통하여 표면조도 및 미세한 현상을 측정하는 장비로써 국부 표면조도 측정에 활용된다. 광원은 백색광 할로겐램프이다. 수직분해능은 0.1 nm이고 수평분해능은 대물렌즈에 따라서 0.45~11.8 μm 사이가 된다. Photo 2.4는 3차원 표면조도측정기를 나타낸다.

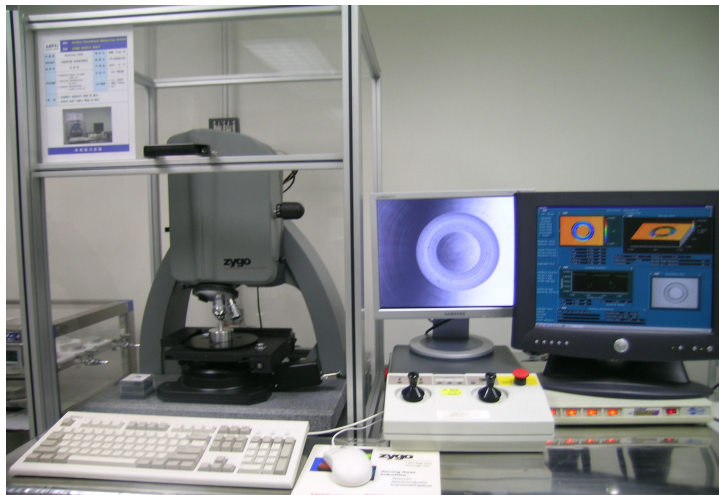


Photo 2.4 3-D surface roughness measurement system
(NewView5000, Zygo Co., USA)

다. 공구현미경

본 논문에서는 LED 조명 렌즈의 가공면을 관찰하기 위하여 공구현미경 (STM6, Olympus Co., Japan)을 사용하였다. 공구현미경은 초정밀 가공부품의 표면의 미세한 현상을 측정하는 장비로써 가공된 렌즈의 표면검사에 활용된다. 광원은 백색광 할로겐램프를 사용하며 40~1000배의 배율로 관찰할 수 있다. Photo 2.5는 공구현미경을 나타낸다.

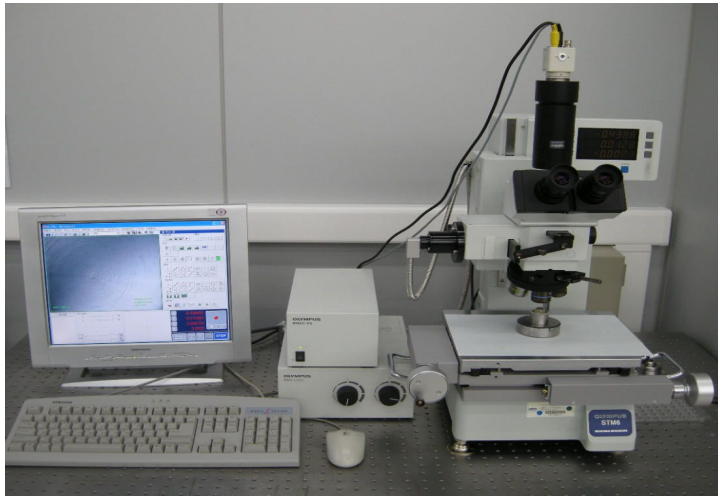


Photo 2.5 High precision vision inspection system(STM6, Olympus Co., Japan)

라. 적분구 (Integrating Sphere System)

본 논문에서는 LED 조명 렌즈의 광학적 특성을 측정하기 위하여 적분구 (LF Series, PSI Co., Australia)를 사용하였다. 적분구는 조명용 LED의 스펙트럼 분포 및 색온도등을 측정하는 장비로써 비구면렌즈를 적용한 LED 조명의 광학적 특성을 파악하는데 활용된다. Photo 2.6과 Table 2.5는 LED 조명의 광학 측정을 수행하기위한 적분구와 주요 규격을 각각 나타낸다.



Photo 2.6 Integrating Sphere System(LF Series, PSI Co., Australia)

Table 2.5 Specification of Integrating Sphere System

Sphere diameter	0.5 m & 1.0 m
Spectral range	380 ~ 780 nm
Wavelength accuracy	< 0.5 nm
DC power supply	60 VDC / 3 A
Temperature probe	0 ~ 100 deg

따. Chroma meter CL-200

본 논문에서는 LED 조명의 조도값을 측정하기 위하여 색채 조도계 측정 장치인 Chroma meter(CL-200, Konica minolta sensing Co., Japan)를 사용하였다. Chroma meter는 LED 조명의 색좌표 및 조도 등을 측정하는 장비로써 비구면렌즈를 적용한 LED 조명의 광학적 특성을 파악하는데 활용된다. Photo 2.7는 Chroma meter CL-200을 나타낸다.

CHROMA METER

Ev xy, Ev u'v'
Ev, Tcp, Δuv
Δ(XYZ), Δ(Ev xy)
Δ(Ev u'v'), ΔEv Δu'v'



Photo 2.7 Chroma meter(CL-200, Konica minolta sensing Co., Japan)

Chroma meter는 건축, 인테리어, 램프 제조 등 다양한 산업 분야에서 광원 컬러 연구(프로젝터 연구 및 디스플레이 장치의 컬러 조정 Light box 또는 Light booth의 컬러 평가)에 사용되며, 빠른 영점 조정 및 초당 2회의 연속 측정이 가능하다는 특징을 가진다.

제3장 조명용 LED 모델링 및 시뮬레이션 결과

제1절 조명용 LED 모델링

1. 조명용 LED 광학렌즈 소재 Polycarbonate(PC)

본 연구에서 조명용 LED 모델링에 사용된 광학렌즈는 플라스틱 소재중 하나인 광학용 Polycarbonate(PC)를 사용하였다. 광학용 PC는 일반 플라스틱 소재보다 광 확산성이 뛰어나며 열에 강한 특성을 가지고 있어서 일반적으로 조명용 광학렌즈 소재로 주목받고 있다. PC는 1950년대 초반 Bayer 및 Sabic(구 GE Plastics)이 상업적 생산이 시작된 이래 Teijin, Idemitsu, Mitsubishi, Dow 등에서 상업적으로 생산되고 있다. PC는 범용 엔지니어링 플라스틱 중 유일하게 투명성을 지니고 있으며, 내충격성, 내열성, 타 수지와와의 상용성 등의 우수한 특성을 지녔다. 때문에 전기·전자분야, 광학기기분야, 자동차분야, 건축분야, 의료분야, 식품용기 및 기타 생활소재 등 광범위한 분야에 사용된다.

PC의 장점으로는 두께에 상관없이 550 nm 파장에서 90% 이상의 광투과율을 가지며 내충격성이 우수하여 자동차 유리 대체 및 방탄소재로 활용이 가능하고 내열성이 우수하여 전기 및 가전제품에 사용된다. 또한 절연소재로도 사용이 가능하며 우수한 치수안정성 및 0.1 mm이하의 제품 두께에서부터 수십 mm까지의 제품 성형이 가능하다는 장점이 있다. 단점으로는 일반 유기용제에 대해 내약품성이 떨어지며 유동성이 좋지 않아 고온성형이 필요하다. 또한 자외선에 의한 내광성이 좋지 않고 표면경도가 낮아 내스크래치성이 떨어지는 단점을 가진다. Table 3.1, Fig. 3.1은 PC의 기본 특성과 화학식을 각각 나타내고 있다.^[19]

Table 3.1 Specification of polycarbonate

물성항목(단위)	PC
광선투과율(%)	92
굴절율	1.59
복굴절(nm)	<65
haze(%)	0.5
비중	1.20
유리전이온도(°C)	145
열팽창계수(%/°C)	0.006
흡수율(% @21°C 24hr)	0.4
흡습팽창계수(%/%RH)	0.002
영율(kg/mm ²)	220
굴곡탄성(kg/mm ²)	230
항장력(kg/mm ²)	7.9 ~ 8.8
과단신도(%)	190

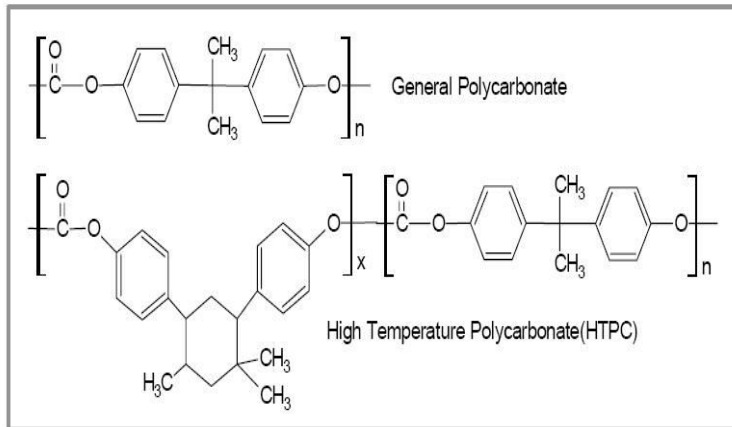


Fig. 3.1 Chemical formula of polycarbonate

2. 조명용 LED 특성분석 및 광학적 모델링

본 연구에서는 청색 LED에 황색 형광체를 첨가시켜 구현한 백색 LED 광학설계를 수행하였다. 조명용 LED 모델링은 정확한 데이터에 근거하여 설계하여야 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있다. 일반적으로 각 제조 회사에서 제공하는 설계 데이터를 바탕으로 실제 제품의 구조와 크기에 유사한 조명용 LED를 설계할 수 있으나 이 설계 데이터에는 LED에 사용된 물질의 재질 특성에 대한 정보는 제공하지 않기 때문에 입력한 물질의 재질 종류, 반사율, 투과율 및 형광물질의 파장에 따라 전혀 다른 성능을 가진 LED가 모델링 될 가능성이 높다.

따라서 본 연구에서는 시뮬레이션 결과의 타당성을 확보하기 위하여 적분구를 이용한 측정데이터를 바탕으로 조명용 LED 모델링을 실시하였다. 적분구 측정 결과를 광학 시뮬레이션에 사용하였으며 측정광원으로 부터 중심파장이 455 nm, 선폭 (FWHM)이 29 nm인 청색파장을 선택하였다.^[20-22] 황색 형광체는 실리콘 물질(굴절률 $n=1.5$)에 형광체 특성을 입력하였으며 여기스펙트럼, 방출스펙트럼, 흡수스펙트럼 및 Mie 이론을 기초로 한 각각의 특성을 사용하였다.^[23] 형광체(굴절률 $n=1.8$)는 입자 밀도 $1.00 \times 10^6 \text{ 1/mm}^3$, 인광평균 자유경로 0.03 mm, 입자크기 반경 500 nm를 적용하였으며 LightTools™(ORA사)에서 기본적으로 제공하는 특성치를 입력하였다. Figure 3.2와 Fig. 3.3은 CITIZEN ELECTRONICS사의 LED칩 설계도면 및 청색 LED와 황색 형광체를 도포한 그림을 각각 나타낸다.

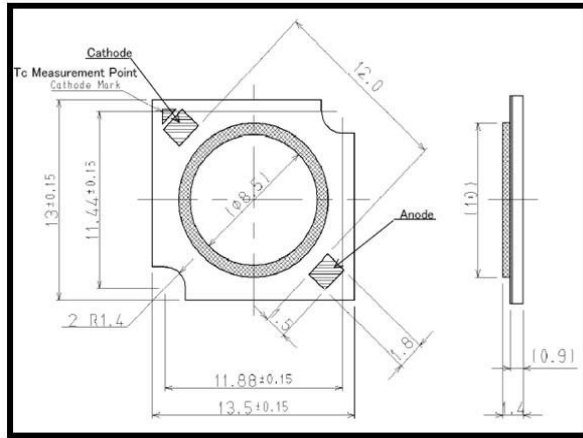


Fig. 3.2 Drawing citizen electronics LED chip

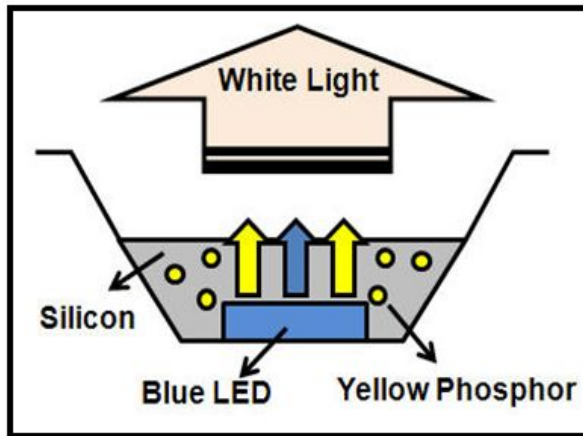


Fig. 3.3 Blue LED + Yellow phosphor

Figure 3.4는 LightTools™를 사용하여 청색 LED와 황색형광체 스펙트럼 (여기스펙트럼, 방출 스펙트럼, 흡수 스펙트럼)을 각각 나타내고 있다.

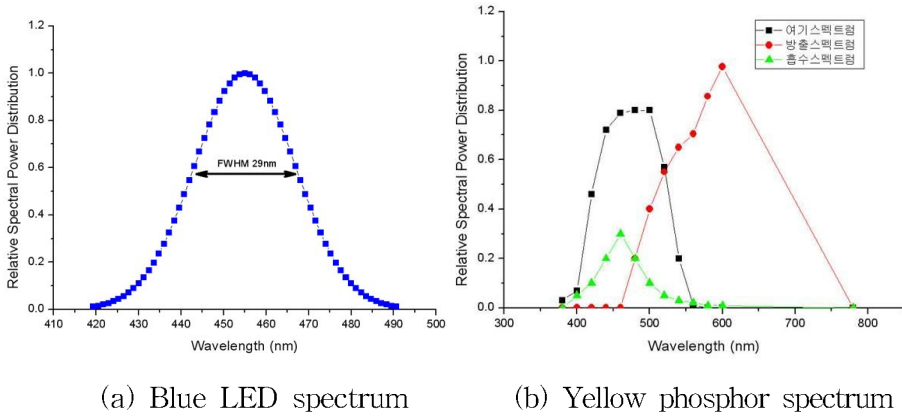


Fig. 3.4 LED Spectrum of LightTools™.

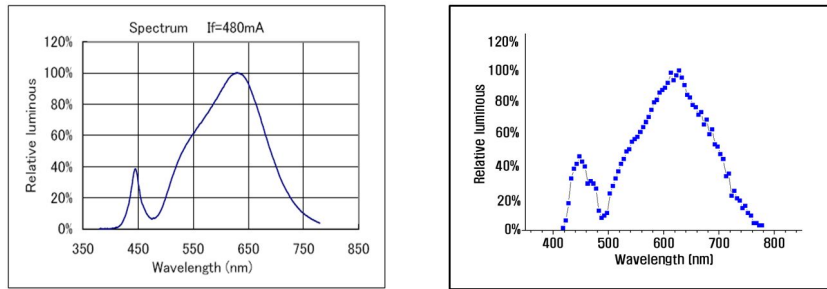


Fig. 3.5 LED Spectrum

Figure 3.5는 CITIZEN ELECTRONICS사에서 제공하는 LED 패키지 (CL-L251-MC4L)의 스펙트럼 데이터와 LightTools™(ORA사) 모델링 실시 후의 스펙트럼 데이터를 각각 나타내고 있으며 위의 Fig. 3.4의 두 스펙트럼을 합쳐서 백색광을 구현 하였다. 스펙트럼의 일치는 휘도의 일치와 함께 시뮬레이션을 수행하는데 있어 타당성을 확보할 수 있는 기초자료가 된다.

기존 구면렌즈를 채용한 조명용 LED의 휘도를 적분구를 사용하여 측정된 결과 261 lm으로 나타났으며, LightTools™(ORA사) 모델링을 통한 시뮬레이션 상에서 휘도를 측정된 결과 260.98 lm으로 나타났다. 이러한 결과는 실제 샘플에 대해 측정된 적분구의 휘도와 LightTools™(ORA사) 모델링 실시 후 시뮬레이션 휘도의 일치됨을 확인할 수 있었으며, 본 연구를 수행함에 있어 시뮬레이션 신뢰성을 확인할 수 있는 결과로 생각된다. Figure 3.6은 시뮬레이션 상에서 적분구 역할을 하는 Far Field Receiver를 나타낸다.

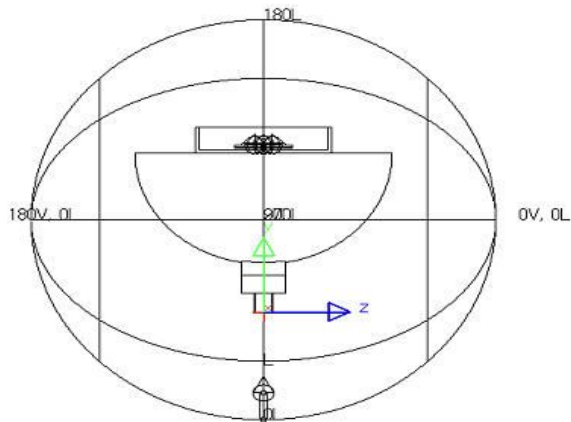


Fig. 3.6 Far Field Receiver

3. 조명용 LED 문제점 현상확인 및 시뮬레이션 재현

백색광 LED 모델링은 상업적으로 사용되고 있는 상용 LED 조명을 사용하였다. 사용된 상용 LED 조명은 청색 LED에 황색 형광체를 첨가하여 백색광이 구현되지만 Photo 3.1에 나타낸 것과 같이 백색광 주변에 황색 띠 무늬가 나타나는 현상으로 인하여 사람의 눈에 불쾌감을 주고 시인성에 문제를 야기한다. 본 연구에서는 이러한 황색 띠 무늬를 감소시키기 위한 목적으로 LightTools™(ORA사)를 사용하여 황색 띠 무늬 현상을 분석하였다.



Photo 3.1 Yellow belt of LED-Lighting

Figure 3.7은 LED 조명의 광학설계를 나타내고 있으며 실제 치수를 기초로 설계를 수행하였다.

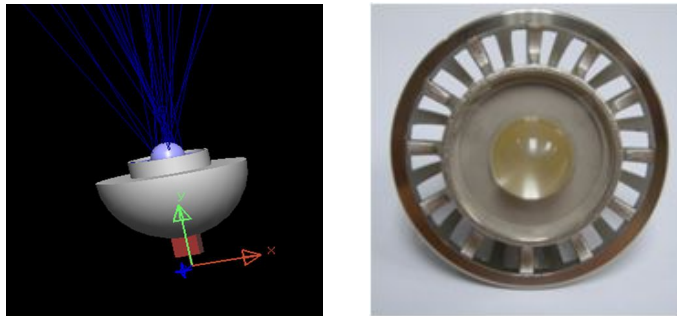


Fig. 3.7 Optical design of Lighting-lamp & Photo

또한 Fig. 3.8은 LED 조명 분석을 위한 스크린의 위치를 나타내며 각 위치별로 광학적 분석을 수행하기 위해 광원으로부터 100 mm, 500 mm, 1000 mm 거리를 두고 시뮬레이션을 실시하였다. 본 연구에서는 조명용 LED 광학렌즈 치구의 전체 지름이 $\Phi 28$ mm인 LED 조명을 사용하였으며 기존 곡률반경 7 mm인 구면렌즈 곡률반경을 11 mm까지 0.5 mm단위로 변경시키며 시뮬레이션을 각각 수행하였다.

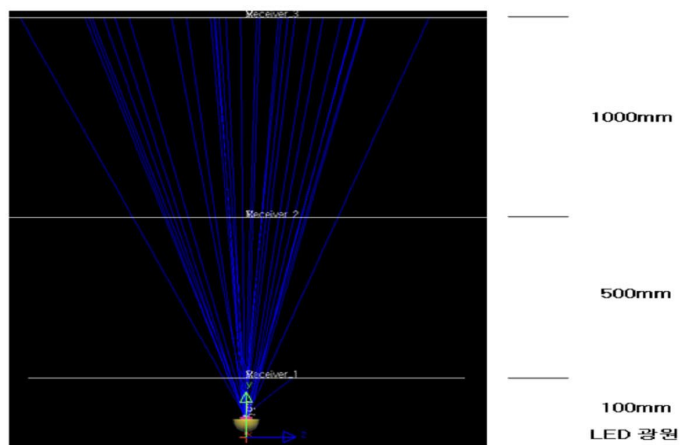


Fig. 3.8 Screen position

Figure 3.9는 구면렌즈의 경우 곡률반경 7 mm에서 곡률반경 11 mm까지 0.5 mm단위로 변경하면서 시뮬레이션을 수행하였으며 광학적으로 특성이 우수한 구면렌즈 곡률반경을 실험적으로 찾아내었다. 1000 mm위치에서 시뮬레이션을 통해 조도 측정 결과 렌즈의 곡률반경 변화에 따라 조도 변화가 크게 나타났으며 곡률반경 8.5 mm에서 최대조도 412 lm/m²를 가졌으며, 이는 구면렌즈 곡률반경 8.5 mm가 광학적인 특성이 우수함을 알 수 있다

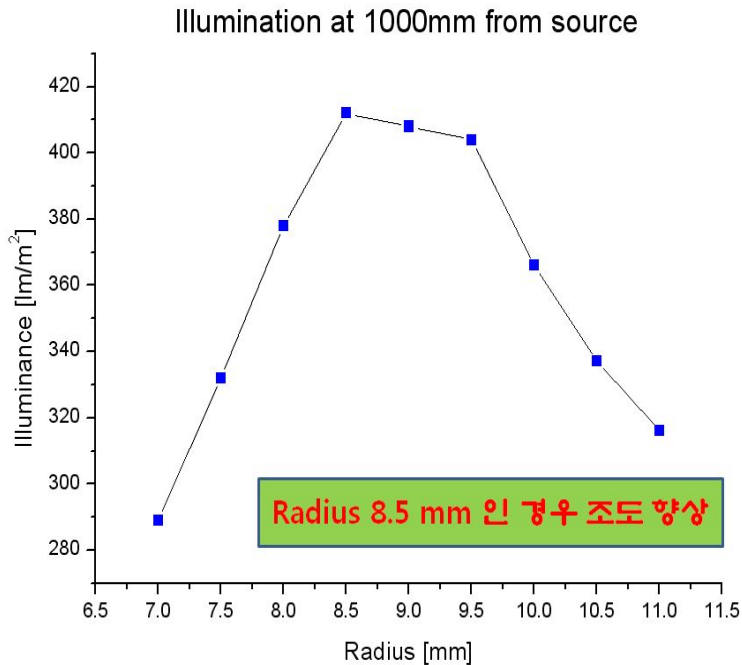
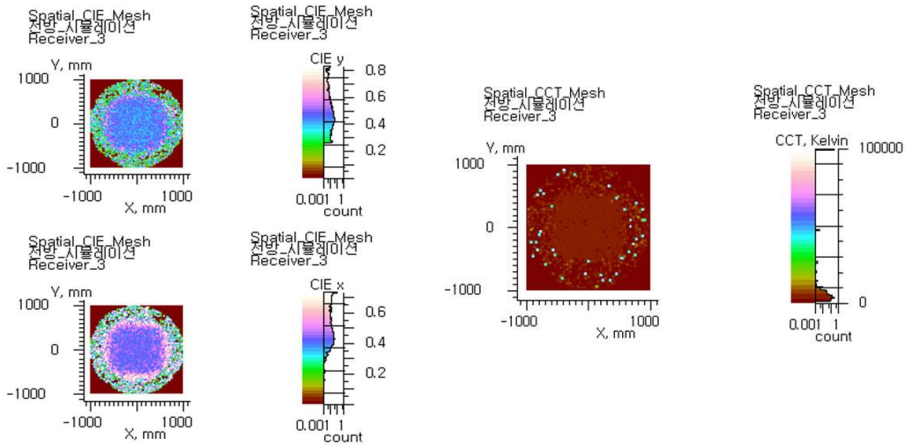


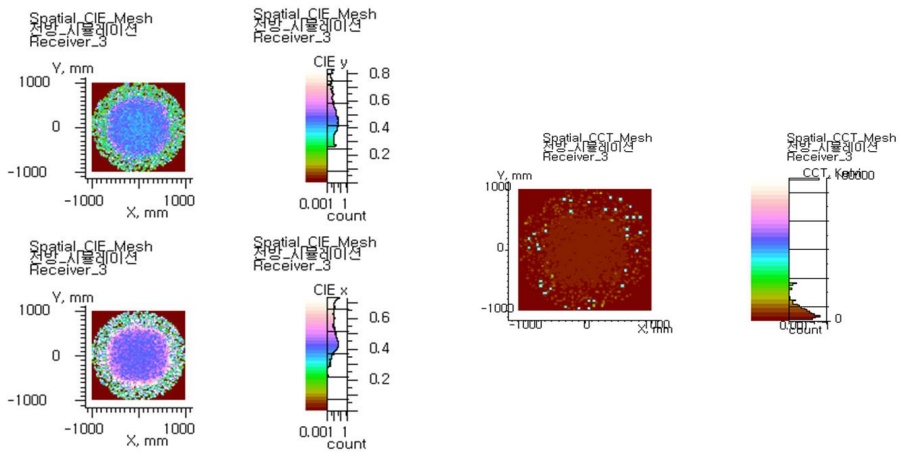
Fig. 3.9 Illumination of Spherical Lens Radius Change

Figure 3.10은 국제 조명 위원회에서 색을 수치적이고 객관적으로 표시하기 위해 만든 CIE(Commission Internationale on Illumination)표색계와 상관 색온도 CCT(Correlated Color Temperature) Chart를 통한 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 기존 구면렌즈의 시뮬레이션 비교 분석을 수행한 결과 백색광 주변에 황색 띠 무늬가 나타남을 알 수 있으며 중심부와 주변부의 균일한 광량을 확보하지 못하여 나타난다고 사료된다. 따라서 균일한 백색광을

구현해야 하나 기존 구면렌즈에서는 중심부에 비해 주변부 빛이 균일하게 분포하지 못해 황색 띠 무늬가 나타나며 이는 비구면렌즈의 적용을 통해 균일한 광 공간분포를 확보함으로써 해결이 가능할 것으로 기대된다.



(a) Spherical lens radius 7 mm



(b) Spherical lens radius 8.5 mm

Fig. 3.10 CIE & CCT Chart

제2절 비구면렌즈 적용 광학 시뮬레이션 결과

1. 비구면렌즈 광학설계

현재 조명용 LED 광학계에서는 일반적으로 구면렌즈를 사용하고 있다. 구면렌즈 사용 시 발생하는 광학계의 성능 저하(황색 띠 현상 등)를 개선하기 위해 본 논문에서는 조명용 LED 광학계에 비구면렌즈를 적용하고자 한다.

본 연구에서는 결상용 광학설계 프로그램인 Code V™(ORA사)를 이용하여 비구면 설계를 수행하였다. 조명 시뮬레이션 결과 곡률반경 8.5 mm의 광학렌즈를 채용한 경우 광학적으로 우수한 특성(조명용 LED 조도가 가장 높은 값을 가짐)을 가지며, 이러한 결과를 토대로 광학적으로 우수한 특성을 가진 곡률반경 8.5 mm와 동일한 특성을 가지는 비구면 설계를 수행하였다. 파장은 450 nm, 550 nm, 650 nm를 각각 사용하였고 화각은 0°에서 ±60°까지 15°간격으로 입력하였다. 대부분의 LED는 ±90°전방으로 모두 방출되며 대부분 ±60° 이상의 광량이 전체 광량에서 차지하는 비율은 2~3%에 불과하므로 설계의 용이성을 위해 전체화각은 ±60°까지만 고려하여 설계하였다.

최적화 시뮬레이션을 수행을 하기위하여 자동 설계 기능을 사용하였으며 유효 초점거리(Constraints Target = 16.3927)에 특별 구속 조건을 주었으며 일반 구속 조건을(Maximum Center Thickness = 8.5 mm) 입력 한 후 최적화를 수행하였다. 특별 구속 조건으로 사용한 유효 초점거리는 곡률반경 8.5 mm를 갖고 있는 구면렌즈의 유효 초점거리이다. 최적화 변수로는 conic constant 및 비구면 계수항(4차~10차)을 사용하였다. Table 3.2는 최적화 시뮬레이션 수행 후 최종적으로 결정된 conic constant 및 비구면 계수항의 값들을 보여주고 있다.

Table 3.2 Aspherical design and a coefficient form

비구면 렌즈	Radius 8.5 mm
Conic Constant	-7.86e-005
4차	-0.0004
6차	+1.0691e-005
8차	-2.3616e-007
10차	+2.4186e-009

Figure 3.11, Fig. 3.12는 비구면 광학설계를 수행하여 2D로 나타낸 그림과 렌즈의 파라미터 입력을 각각 나타내고 있다.

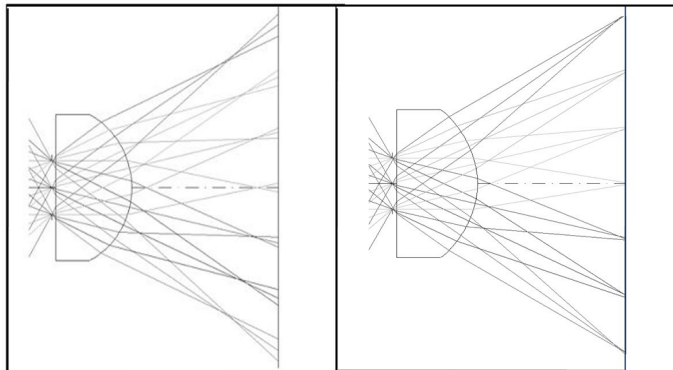


Fig. 3.11 Optical design of Spherical and Aspherical Lens


```

New lens from CVMACRO:cvnewlens.seq
      RDY      THI      RMD      GLA      CCY      THC      GLC
OBJ:      INFINITY      INFINITY      100      100
STO:      INFINITY      0.500000      100      100
2:      INFINITY      8.100000      BK7_SCHOTT      100      100
3:      -8.50000      16.392700      100      100
ASP:
K :      -0.000079      KC :      0
IC :      YES      CUF:      0.000000      CCF:      100
A :      0.408793E-03      B :      -1.06913E-04      C :      0.266161E-06      D :      -2.41865E-08
AC :      0      BC :      0      CC :      0      DC :      0
IMG:      INFINITY      0.000000      100      100

```

Fig. 3.12 Aspherical optical design

구면렌즈를 사용하였을 때 나타난 황색 띠 현상은 파장별 광 공간분포가 균일하지 못하여 나타나는 것으로 이해할 수 있다. Code V에서 자동설계 기능을 통해 수행되는 최적화 시뮬레이션에서는 횡수차(transverse ray aberrations) 값들의 제곱의 합을 오차 함수로 사용하고 있으며, 이 오차 함수 값은 최적화에 고려된 파장별, 화각별 RMS(root-mean-square) spot 반경의 제곱값 평균에 해당한다. 따라서 Code V에서 자동설계 기능을 통해 설계된 비구면렌즈를 사용할 경우 구면렌즈를 사용할 때보다 광 공간분포 균일도가 향상될 것으로 기대할 수 있으며, 이를 통해 황색 띠 현상을 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 이를 확인하기 위하여 설계된 비구면렌즈를 사용한 추가적인 시뮬레이션을 진행하였으며, 다음 절에 이에 대하여 자세히 기술하도록 하겠다.

2. 비구면렌즈 적용 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과 곡률반경 8.5 mm의 광학렌즈를 채용한 경우에서 조명용 LED의 조도가 가장 높은 값을 가짐을 알 수 있었고, 이러한 결과를 토대로 동일한 특성을 가지는 곡률반경 8.5 mm의 비구면 설계를 수행하였다. 비구면 설계는 결상용 광학설계 프로그램인 Code VTM(ORA사)를 이용하였다.

Figure 3.13은 구면렌즈와 비구면렌즈의 정면 및 측면 형상을 각각 나타내고 있다. 비구면계수식을 입력하여 구현한 형상으로 구면렌즈에 비해 비구면렌즈는 종모양 형상을 나타냄을 알 수 있다.

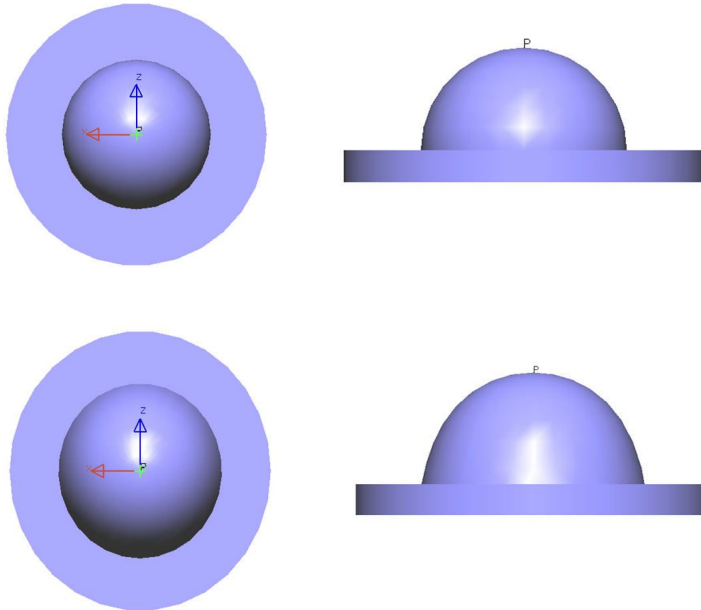


Fig. 3.13 Shape of spherical lens and aspherical lens

Figure 3.14는 1000 mm에서 시뮬레이션을 통하여 광학적 우수한 특성을 가진 구면렌즈 곡률반경과 동일한 곡률반경에서 구면렌즈와 비구면렌즈 조도를 비교 측정된 결과로써 구면렌즈 412 lm/m², 비구면 렌즈 434 lm/m²로 비구면렌즈 적용을 통해 조도가 향상되었다.

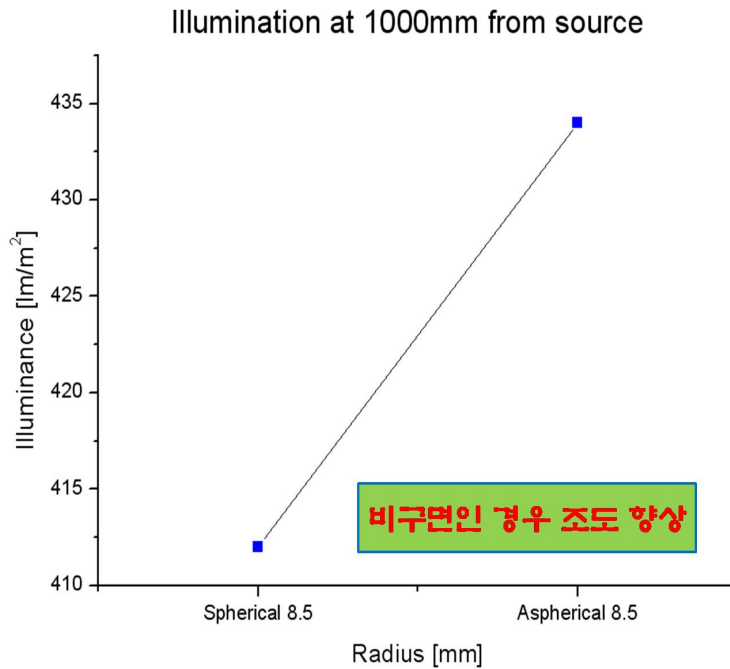


Fig. 3.14 Illumination comparison of spherical lens and aspherical lens

Figure 3.15는 구면렌즈와 비구면렌즈의 CCT Chart(황색 띠 무늬)를 나타내며 비구면렌즈 적용시 중심부 조도의 균일도가 더 향상됨을 알 수 있다. 또한 주변의 황색 띠 무늬가 감소하였다.

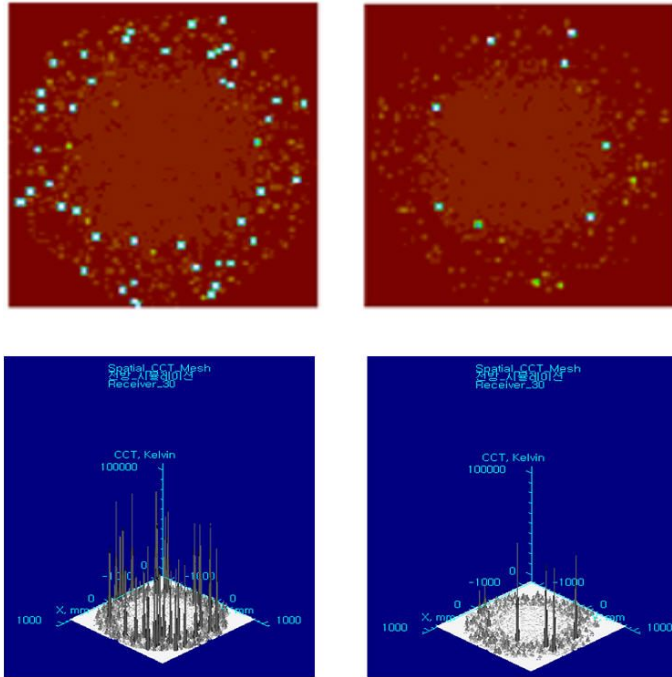


Fig. 3.15 CCT chart of spherical lens and aspherical lens

Figure 3.16은 중심부 0 mm를 기준으로 좌우 ±1000 mm의 황색 띠 무늬 값을 나타낸다. 구면렌즈의 경우 ±950 mm에서 CCT값이 약 7800 K 비구면 렌즈의 경우 ±950 mm에서 약 4900 K 정도가 나왔으며 CCT값을 비교해 볼 때 비구면렌즈에서 주변부의 CCT값이 감소되었다. 전체적인 CCT 값은 평균 적이기 때문에 구면이나 비구면 모두 동일하나 비구면렌즈 적용시 주변부 CCT값에 영향을 미침을 알 수 있다.

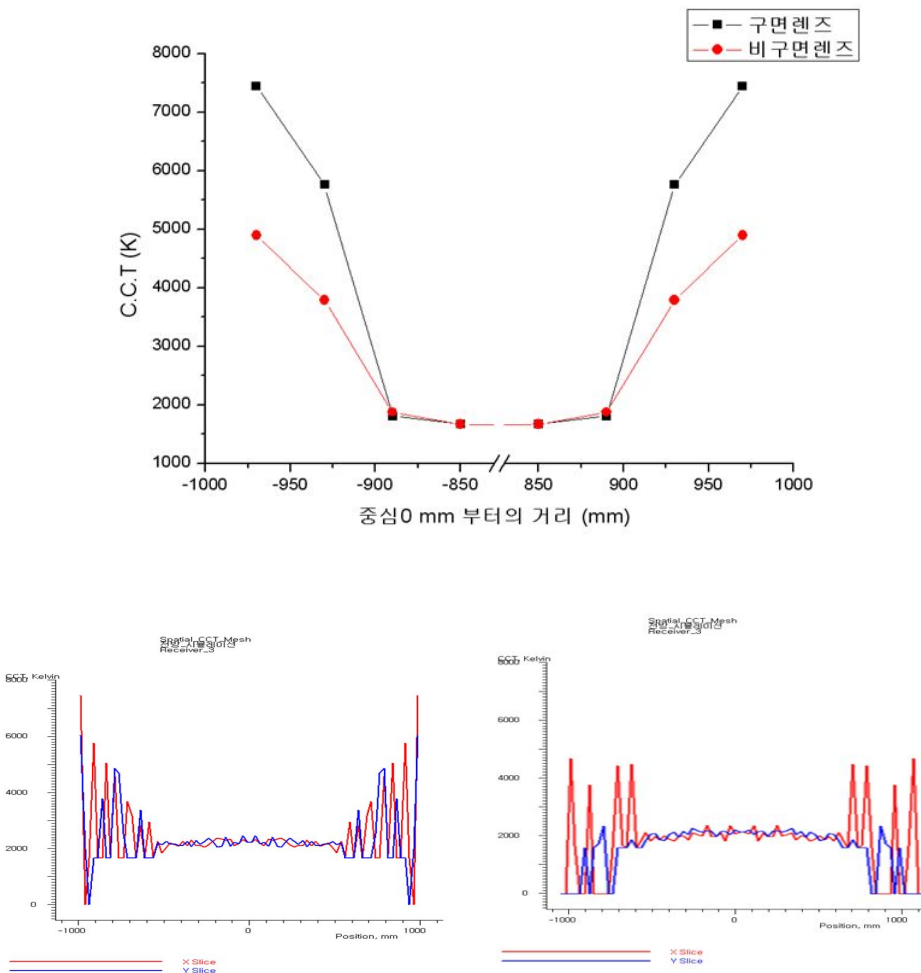


Fig. 3.16 CCT value of spherical lens and aspherical lens

제4장 비구면렌즈 가공 및 측정결과

조명용 LED에 들어가는 광학렌즈 제작을 위해 다이아몬드 터닝 머신을 이용하여 유리와 거의 유사한 재질인 Polycarbonate(PC)대한 초정밀 절삭가공을 수행하였다. 초정밀 절삭가공은 재질과 형상등 여러 가지 조건에 따라 가공 품질이 많은 영향을 받기 때문에 취급, 가공, 지그제작에 어려움이 많기 때문에 이를 고려한 가공을 수행하였다. 또한 비구면렌즈 개발진행에 있어 양산시에는 광학설계 수행, 금형코어 제작 및 렌즈 사출 성형을 수행하며 이는 시간이 오래 걸리고 비용도 많이 드는 단점이 발생한다. 따라서 본 연구에서는 금형코어 제작 및 렌즈 사출 성형을 수행하지 않아도 성능을 단시간에 평가할 수 있는 가공방법인 렌즈 직 가공을 수행하였다.

제1절 가공용 Jig 설계 및 비구면렌즈 설계

1. 가공용 Jig 설계

LED 조명용 광학렌즈의 초정밀 가공을 수행하기 위하여 초정밀 비구면 가공기(Nanoform200)에 적합한 가공용 Jig를 설계하여 제작하였다. 광학용 Polycarbonate 렌즈의 구면 및 비구면을 가공하기 위하여 가공에 적합한 Jig를 제작하였으며 가공물 직경을 고려하여 $\Phi 28 \pm 0.01$ mm의 공차를 두어 가공물이 Jig에 장착되도록 설계하였다. Figure 4.1은 가공에 사용된 Jig의 설계도면과 사진을 각각 나타낸다.

2. 다이아몬드 바이트

본 연구에서 가공에 사용된 공구는 Osaka사의 천연다이아몬드 바이트로서 바이트 날 끝 모양이 원통형이며 노우즈 반경 0.129 mm를 사용하였다. Figure 4.2는 실험에 사용된 천연다이아몬드 바이트 형상을 보여주며, 가공기로 다이아몬드 바이트를 측정된 결과 노이즈 반경 0.129 mm 이고 Waviness 는 47 nm였다. 이에 요구되는 Waviness 100 nm이하 이므로 공구를 사용하기에 적합한 것으로 판단되었다. Table 4.1은 본 연구에서 초정밀 가공을 수행한 황삭 및 정삭 조건(회전속도, 절입량, 이송속도)을 나타낸다.

Table 4.1 Condition of Diamond Turning Machine

Material	Polycarbonate		
NCD bite	R 0.129 mm		
Cutting condition	Spindle speed	Depth of cut	Feedrate
Rough	1500 rpm	10 μm	10 mm/min
Finish	1500 rpm	4 μm	4 mm/min

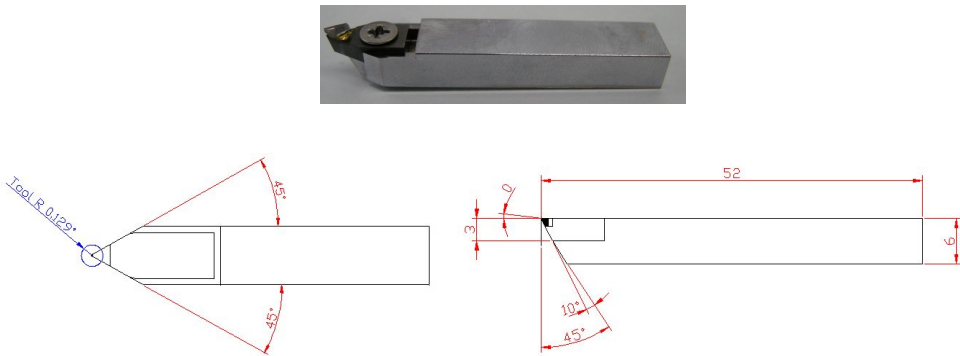


Fig. 4.2 Geometry of diamond tool

Figure 4.4는 구면렌즈와 비구면렌즈의 설계도면을 각각 나타낸다.

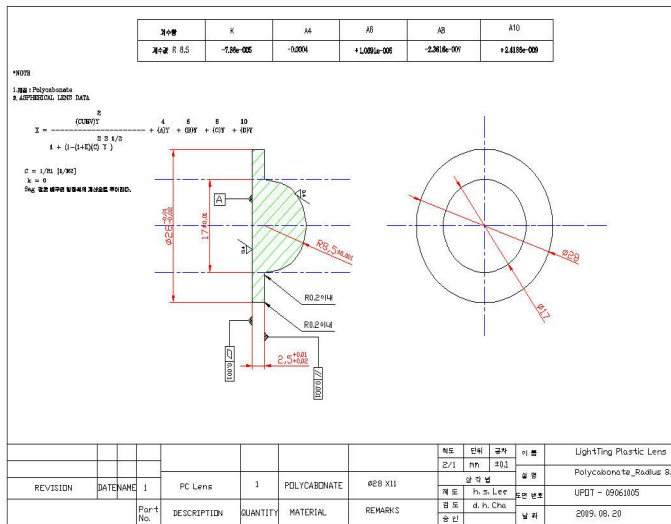
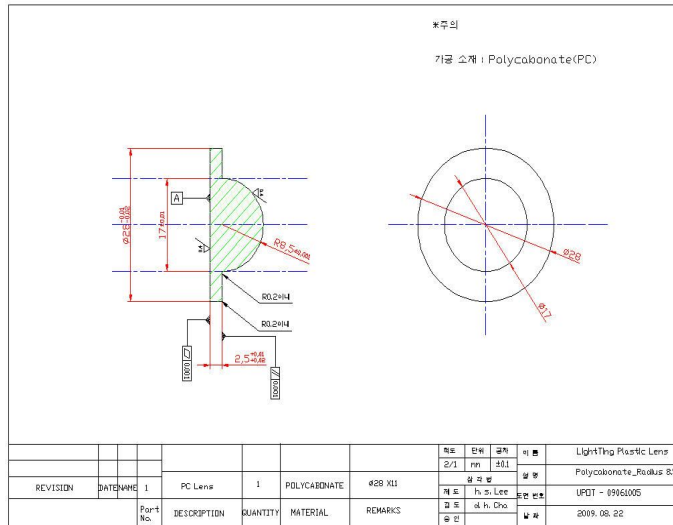


Fig. 4.4 Drawing of spherical lens and aspherical lens

제2절 비구면렌즈 가공 및 측정 결과

1. 비구면 가공

본 연구에서는 DTM 가공을 통한 LED 조명용 비구면렌즈의 시제품 개발을 위한 초기 개발 단계로서 LED 조명에 채용될 비구면렌즈의 성능을 검증하기 위하여 광학렌즈 소재인 Polycarbonate(PC)에 대한 초정밀 절삭 가공을 수행하였다. Photo 4.1은 조명용 LED 비구면렌즈를 가공하는 사진을 나타낸다.

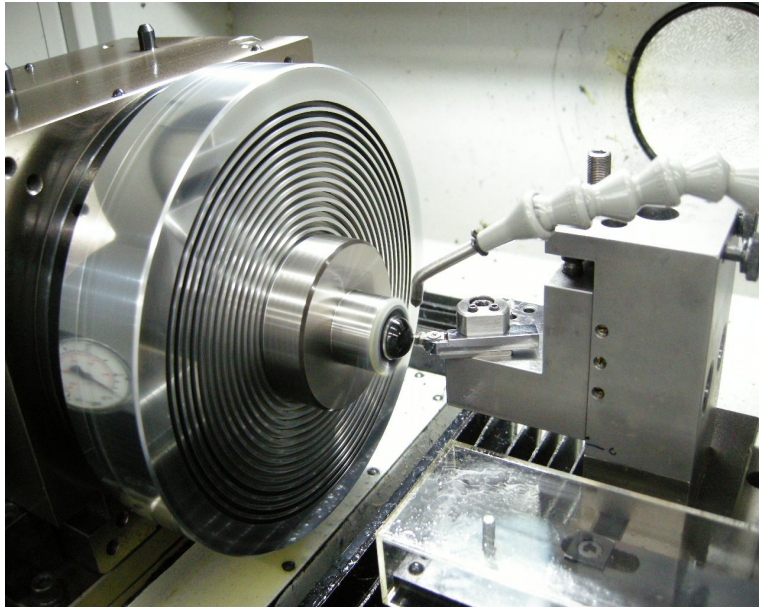


Photo 4.1 Aspheric cutting of polycarbonate material

다이아몬드터닝 순서는 많은 부분을 고려해야 하기 때문에 매우 복잡한 과정이 많이 있지만 크게 Fig. 4.5와 같은 순서로 가공을 수행한다. 그림에 나타난 바와 같이 다이아몬드 터닝가공 공정은 공구의 위치결정과 공구인선의 형상 보정을 통해 원하는 형상정도를 가지는 가공물을 얻을 수 있다.

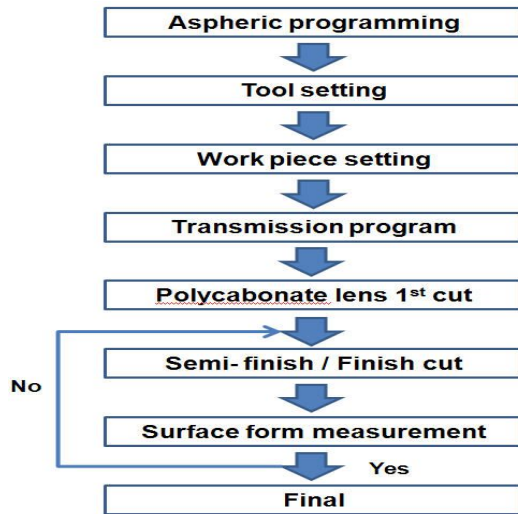


Fig. 4.5 Flowchart of cutting process

가공 수행 중 가장 초기단계로서 비구면 가공식을 작성하기 위하여 Nanoform200을 지원하는 가공프로그램인 Diffsys를 이용하여 가공 프로그램을 작성하였다. 전체 지름이 Φ 28 mm인 PC 소재를 가공하기 위하여 14.5 mm에서 X-axis의 가공 시작점을 선택 하였으며 실제 가공 프로그램에서의 가공점은 8.5 mm에서 수행되도록 하였다. 광학설계 프로그램 설계치인 곡률반경 8.5mm, K: $-7.868686e-005$, 4차: 0.0004087931, 6차: $-1.069129e-005$, 8차: $2.361609e-007$, 10차: $-2.418648e-009$ 값을 각각 입력하였으며, 가공은 Prolog file로부터 Epilog file까지 가공경로를 따라 가공되도록 하였다. 비구면 가공 경로는 Excel 프로그램을 이용한 Sag값과 비구면 가공프로그램을 이용한 Sag값이 일치함을 확인한 결과 가공을 수행하는데 문제가 없음을 확인하였다.

다음으로 가공함에 있어 가장 중요한 단계인 ToolSetting을 수행하였다. ToolSetting은 가공물을 가공하기 전에 X-axis, Y-axis의 중심을 맞추기 위하여 수행하는 공정으로 공구인선의 형상이 완벽한 곡률반경을 가지고 있지 않을 경우 가공 접촉점의 불일치로 인하여 실제 가공 면은 가공 형상오차가 발생하여 가공물의 형상정도와 표면조도에 큰 영향을 미치므로 중요한 공정 중 하나이다. 오차를 보정하기 위하여 X-axis: $(0.3\text{-측정값})/2$, Y-axis: 측정값/2로 공구 인선 반경오차 및 공구 위치오차를 보정하여 중심에 거의 일치하도록 하였으며 Fig. 4.6은 공구현미경으로 측정하여 가공오차를 최소화한 ToolSetting을 나타낸다.

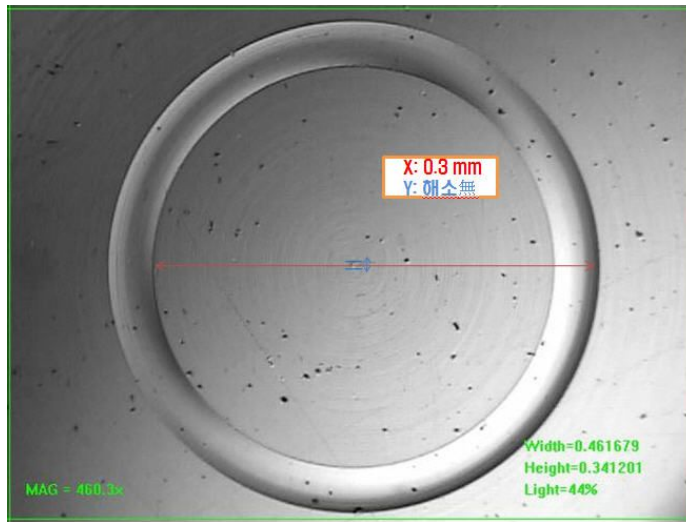
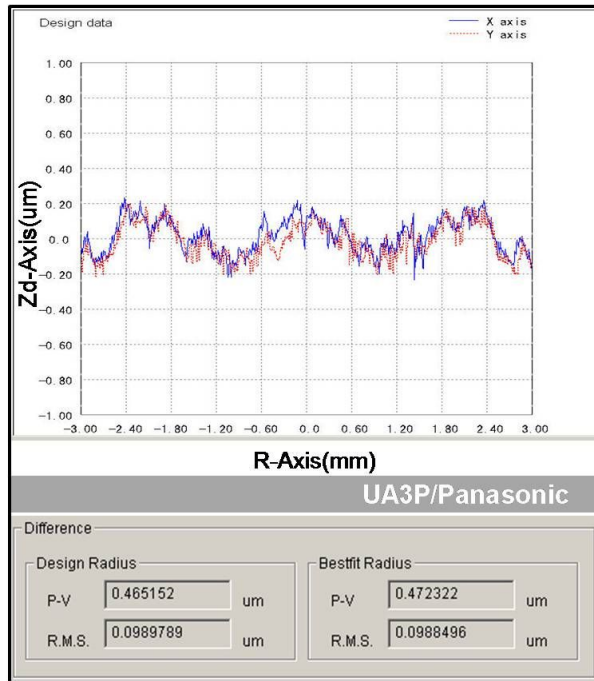


Fig. 4.6 ToolSetting (STM6, Olympus Co., Japan)

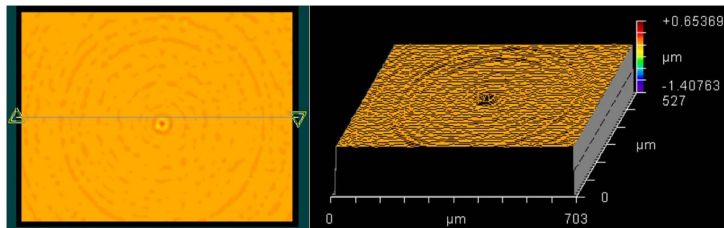
ToolSetting 완료 후 황삭, 정삭 및 보정가공을 통하여 만족하는 형상정도를 얻기 위하여 가공물의 초정밀 가공을 수행하였다.

2. 초정밀 가공 측정 결과

본 논문에서는 조명용 LED 비구면 플라스틱렌즈의 가공을 위하여 초정밀 절삭 가공을 수행하였다. 비구면 렌즈의 중심 값 보정과 공구 반경을 보정하여 Ultracomp 프로그램에서 Stylus 보정 값을 적용한 시뮬레이션 결과를 토대로 중심축 오차 $+1.5 \mu\text{m}$ 를 보정하여 정상가공을 수행하였다. Figure 4.7과 Fig. 4.8은 보정가공을 수행한 최종결과로써 구면 형상정도(PV) $0.465 \mu\text{m}$, 표면조도(RA) 8 nm 비구면 형상정도(PV) $0.533 \mu\text{m}$, 표면조도(RA) 9 nm 의 결과를 각각 나타낸다. 이러한 결과는 광학용 Polycarbonate가 점도가 높은 점탄성재료이며, 공구 형상의 전사정이 좋지 못하기 때문에 절삭가공에 의해 광학부품으로서의 형상정도를 만족하지 못하지만 열에 강한 장점으로 인해 일본 및 유럽의 선진국에서 사용이 증가하고 있으며 일반적으로 LED 조명에 사용되는 유리의 형상정도가 $1 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ 이며 $0.5 \mu\text{m}$ 정도의 광학용 Polycarbonate 형상정도는 만족할 만한 결과임을 알 수 있다.

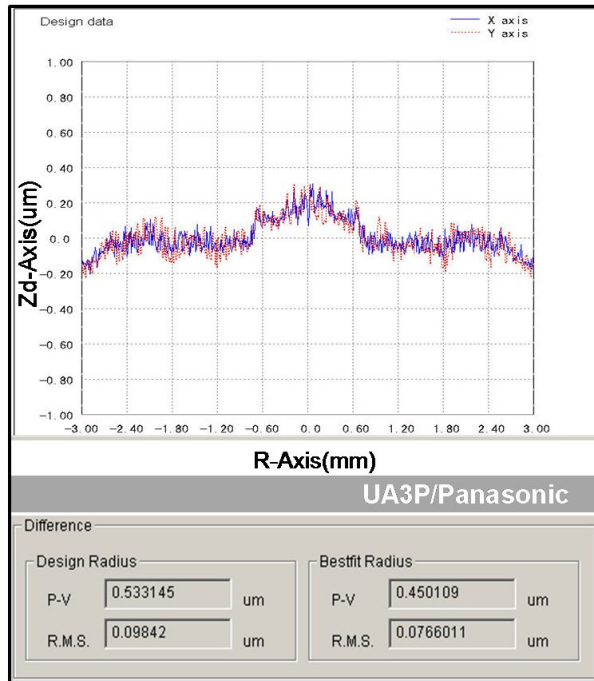


(a) Form accuracy of spherical lens

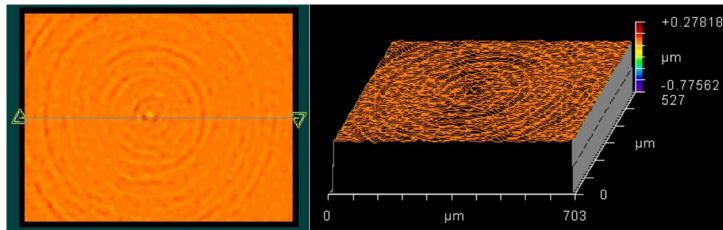


(b) Surface roughness of spherical lens

Fig. 4.7 Form accuracy and surface roughness of spherical lens



(a) Form accuracy of aspherical lens



(b) Surface roughness of aspherical lens

Fig. 4.8 Form accuracy and surface roughness of aspherical lens

3. 광학 측정결과

본 논문에서는 가공완료 된 구면렌즈와 비구면렌즈의 광학 측정을 위하여 적분구 및 색채 조도계 측정 장치인 Chroma meter CL-200으로 조도를 측정하였다. Figure 4.9는 Chroma meter CL-200을 사용하여 LED 조명 측정에 관한 구성도를 나타낸다. LED 조명에서 나온 백색광에 대한 조도 측정값의 신뢰성 확보를 위하여 암실에서 측정하였으며 1000 mm 거리에서 구면렌즈와 비구면 렌즈를 측정하였다. 조도 측정 결과 구면렌즈 500.7 lm/m^2 비구면 렌즈 562.2 lm/m^2 의 결과 값을 확인하였으며 측정결과는 시뮬레이션을 수행한 결과 비교하여 비구면렌즈 채용 시 LED 조명의 광학적 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다.

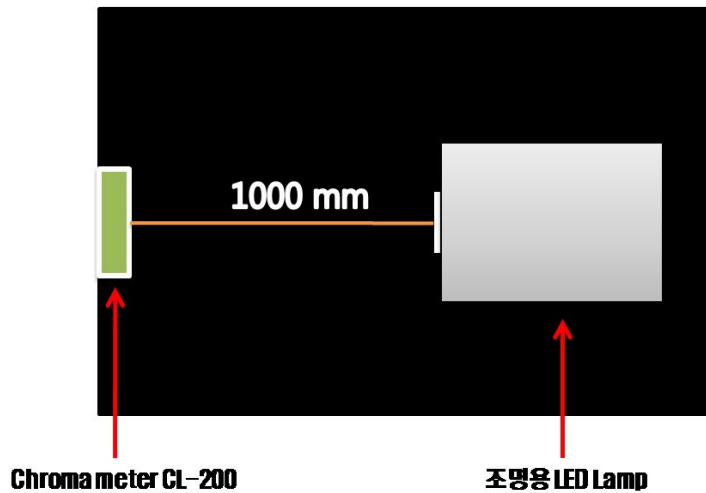


Fig. 4.9 Diagram of optical measurement

제3절 시제품 적용 결과

본 연구에서는 LED 조명에 채용될 비구면렌즈의 성능을 검증하기 위하여 LED 조명 실장테스트 모듈을 제작하였으며 Photo 4.2는 황색 띠 무늬 현상을 확인하기 위한 실장테스트용 모듈을 나타낸다. 그리고 Photo 4.3은 실장테스트 모듈에 적용하기 위하여 가공한 구면렌즈와 비구면렌즈를 각각 나타낸 사진이다.



Photo 4.2 LED-Lighting test equipment



(a) Spherical lens

(b) Aspherical lens

Photo 4.3 Fabricated lenses

실장테스트는 1000 mm 정도 거리를 두고 측정하였으며 5W LED 조명을 사용하였다. 또한 동일한 곡률반경 8.5 mm의 구면과 비구면 렌즈 시제품을 이용하여 실장테스트를 수행하였다.

실장테스트 결과 구면렌즈를 적용한 LED 조명의 경우 Photo 4.4에서와 같이 황색 띠 무늬가 나타났으며 Photo 4.5에서 알 수 있듯이 비구면렌즈를 적용한 LED 조명의 경우 황색 띠 무늬가 개선되었다. 이러한 결과는 비구면렌즈 적용으로 인해 중심부와 주변부의 각도별로 균일한 광량 확보로 인해 황색 띠 무늬가 감소된 결과로 보여진다.



Photo 4.4 Yellow Belt of Spherical Lens



Photo 4.5 Yellow Belt of Aspherical Lens

제 5 장 결 론

본 연구에서는 상용 조명용 LED와 동일한 광학적 특성을 갖는 모델을 제조 회사의 설계데이터에 기초하여 광학설계를 수행하였으며 조명용 LED에 사용되는 구면렌즈와 비구면렌즈가 조명계에 미치는 영향을 비교 분석하기 위하여 다음과 같은 시뮬레이션을 수행하였다. 선행 연구를 위하여 기존 구면렌즈 곡률반경 7 mm에서 곡률반경 11 mm까지 0.5 mm단위로 변경하면서 조도를 비교 분석하였고, 그 중 가장 조도가 상대적으로 높게 나온 구면렌즈 곡률반경 8.5 mm를 이용하여 황색 띠 무늬 현상을 확인한 후 구면렌즈 곡률반경 8.5 mm와 동일한 곡률반경을 갖는 비구면렌즈 광학설계를 실시하여 비구면렌즈가 조도 및 황색 띠 무늬에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

시뮬레이션을 통하여 설계한 조명용 LED 렌즈의 광학적 특성을 분석한 결과 기존 구면렌즈 곡률반경 7 mm에서 289 lm/m^2 에 비해 시뮬레이션을 통한 구면렌즈 곡률반경 8.5 mm에서 412 lm/m^2 로 렌즈의 곡률반경에 의해 조명계 조도가 향상됨을 알 수 있었다. 또한 광학적으로 우수한 특성을 가진 구면렌즈 곡률반경 8.5 mm와 동일한 곡률반경을 가지는 비구면렌즈를 비교한 결과 412 lm/m^2 , 434 lm/m^2 인 결과로부터 구면렌즈보다 비구면렌즈를 채용 시 LED 조명이 더 향상된 조도값을 나타냄을 알 수 있었다. 황색 띠 현상은 구면렌즈 사용 시 광의 공간분포가 렌즈 중심부보다 주변부에서 고르지 못하여 발생하는 것으로 이해된다. 시뮬레이션을 통해 비구면 광학설계를 적용함으로써 황색 띠 무늬가 크게 개선되었다.

또한 비구면 설계된 렌즈에 Diamond Turning Machine(DTM)가공을 수행하여 가공된 렌즈의 형상정도와 표면조도에 관하여 측정하였으며 측정한 결과 구면 형상정도(PV) $0.465 \mu\text{m}$, 표면조도(RA) 8 nm 비구면 형상정도(PV) $0.533 \mu\text{m}$, 표면조도(RA) 9 nm의 결과를 얻었다. 이는 광학용 Polycarbonate가 점도가 높은 점탄성재료이며, 공구 형상의 전사정이 좋지 못하기 때문에 절삭가공에 의해 광학부품으로서의 형상정도를 만족하지 못하지만 열에 강한 장점으로 인해 일본 및 유럽의 선진국에서 사용이 증가하고 있으며 일반적으로 LED 조명에 사용되는 유리의 형상정도가 $1 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ 이며 $0.5 \mu\text{m}$ 정도임을

감안할 때 광학용 Polycarbonate 형상정도는 만족할 만한 결과임을 알 수 있다. 따라서 시제품에 Polycarbonate 소재의 비구면 렌즈를 적용하여 실장 테스트 한 결과 황색 띠 무늬가 감소하였다. 이상의 연구 결과를 통하여 렌즈의 곡률반경과 렌즈의 형상이 조명용 LED에 중요한 영향을 미침을 알 수 있었으며 다양한 분야에 쓰이는 조명용 LED에 상용 구면렌즈 대신 비구면렌즈를 설계하여 실제 제품에 적용할 시 조명용 LED의 광학적 성능을 향상 시킬 수 있을 것으로 기대된다.

[참고문헌]

- [1] P. McKeown, "Manufacturing how small can we go? The challenge and opportunities of the nanometer age", The British Association Lecture (1996)
- [2] N. Taniguchi, "Current status in the future trends of ultra precision machining and ultra fine materials processing", Annals of CIRP, Vol. 32, No. 2, pp. 573-582 (1983)
- [3] Whitten. L. G., Lewis, T. G., "Machining and Measurement to Submicron Tolerance", Proc. M. T. D. R., Pergamon Press, pp. 491 (1966)
- [4] ISENA National conference 2004 LED Paper., "The Emergence of LEDs-Luminance to Illumination". (2004)
- [5] Diniel A. Steigerwald, Jerome C. Bhot. Dave Collius, Robert M. Fletcher, MariOchiai Holcomb, Michael J. Ludowise, Member IEEE, Paul S. Martin, and Serge L.Rudaz, "Illumination With Solid State Lighting Technology", IEEE journal on selected topics in quantum electronics, Vol.8, No.2, MARCH/APRIL (2000)
- [6] Gerard Harbers, Christoph Hoelen, "LP.2:High Performance LCD Backlighting using high Intensity Red, Green and Blue LED", Society for Information Display(SID) International Symposium 2001:Digest of Technology Paper. (2001)
- [7] 류기호, "고휘도 White LED의 기술개발동향과 특허동향", 한국특허 정보원 (2005)
- [8] 기획리포트, "백색 LED" [기술동향], 한국전자 산업 진흥회 (2002)
- [9] 박재덕. 김수용. 한민식. 진언찬, "LED 균일 면광원 비구면렌즈 설계", 한국광학회 동계 학술대회 논문집 pp.299-300 (2007)
- [10] ANSI/IES. Nomenclature and Definitions for Illuminating Engineering, ANSI/IES RP-16-1986. New York, NY: Illuminating Engineering Society of North America (1986)
- [11] Paul M. Kapecki, O.D. : Review of Optometry 15, 111 (2005)
- [12] Illumination Fundamentals, Alma E. F. Talor, Rensselaer Polytechnic Institute (2000)

- [13] IT기획시리즈-세계일류 IT기술-LED 백라이트 최신기술개발 동향
(주간기술동향 통권 1283호), 정보통신연구진흥원 (2007)
- [14] www.p-oe.co.uk
- [15] Sugano. T., Takeuchi K, "Diamond Turning of an Aluminium Alloy for Mirror",
Annals of the CIRP, Vol.36, No.1, pp.17-20 (1987)
- [16] <http://mrhiggins.net/algebra2>
- [17] C. L. Chao, K. J. Ma, D. S. Liu, C. Y. Bai and T. L. Shy, "Ductile behaviour in
single-point diamond-turning of single-crystal silicon", Journal of Materials
Processing Technology, Volume 127, Issue 2, 187-190 (2002)
- [18] Hideki Tsutsumi, Keiichi Yosizumi, and Hiroyuki Takeuchi, "Presentation
of Ultrahigh Accurate 3-D Profilometer and Case Examples of
Measurement", Presentation of Matsushita Electronic Industrial Co. LTD (2002)
- [19] www.kipris.or.kr, 특허청, "기능성 폴리카보네이트 특허맵" Polymer Science
and Technology Vol. 20, No. 1, February (2009)
- [20] LightTools Seminar Notes, "LED Modeling Pros and Cons of Various
Approaches," ORA (2001)
- [21] LightTools Seminar Notes, "Illumination Module Seminar," ORA (2000)
- [22] Arthur Davis, Reflexite Display Optics, Technical Paper, "Microstructured
Optics for LED Applications," October (2002)
- [23] W. Brown, Dynamic Light Scattering :The Methods and Some Application,
Clarendon Press, Oxford (1993)

저작물 이용 허락서

학 과	광기술공학과	학 번	20087139	과 정	석 사
성 명	한글: 이 학 석 한문: 李 學 石 영문: Hak-Suk Lee				
주 소	광주광역시 동구 산수동 511-11번지				
연락처	E-MAIL : storm01n@hanmail.net				
논문제목	한글 : 비구면 광학계를 적용한 LED 조명의 광학성능 향상에 관한 연구 영어 : A Study on Optical Efficiency Improvement of LED-Lighting Adopting Aspherical Optical System				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의() 반대()

2010년 2월

저작자: 이 학 석 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하

[감사의 글]

오늘 이렇게 작은 결실이 있기까지 많은 분들의 도움이 있었기에 무사히 석사학위 과정을 마칠 수 있었습니다. 특히 어려운 형편에서도 자식이 잘 되기를 바라는 마음으로 항상 걱정하시며 늦둥이인 저를 보살펴주신 부모님의 노고에 진심으로 감사의 마음을 전합니다.

2년이라는 결코 짧지 않은 대학원 기간에 부족함이 많은 저에게 전공분야의 연구 지도와 함께 참된 배움의 길을 걷게 해주신 박종락 교수님께 진심으로 감사드리며 교수님의 가르침을 가슴에 새겨 앞으로는 최선을 다하는 사람이 되도록 노력하겠습니다.

아울러 부족한 저의 논문을 심사하느라 고생하신 조선대학교 김현수 교수님과 한국광기술원의 김정호 박사님께 다시 한번 진심으로 감사의 마음을 전하며 살아가는 동안 교수님과 박사님께서 주신 가르침 결코 잊지 않겠습니다. 또한 학부와 대학원 과정동안 훌륭한 가르침을 베풀어 주신 김진태 교수님, 박시현 교수님, 안태정 교수님께도 깊은 감사드립니다.

한국광기술원 초정밀 광학팀에서 지낸 시간은 저에게 두 번 다시 없을 값진 시간이었으며 앞으로 살아가는데 있어 새로운 분야에 도전할 수 있는 용기를 주었습니다. 본 논문이 결실을 맺을 수 있도록 관심과 애정을 가져주신 한국광기술원의 김혜정 박사님께 감사드리며 논문의 시작에서 끝까지 따뜻한 관심을 가져준 두환이 형, 힘든 일이 있을 때 같이 고민해준 연희 형, 그리고 본 논문의 가공을 수행함에 있어 가장 많이 도움을 준 민재 형, 너무 착한 홍수와 들어 온지 얼마 안됐지만 항상 웃는 현성이까지 모두의 앞날에 좋은 일만 가득하길 바랍니다. 그리고 일본에서 응원해 준 현욱이형, 조연과 충고를 아끼지 않았던 마이크로 옵틱스팀의 이동길 선임연구원에게도 감사의 마음을 전합니다.

학부과정에서부터 대학원과정까지 어려울 때나 기쁠 때 저에게 큰 힘이 되어준 최 호 형님과 미국에 있는 동기 태원이 인생의 친구 동준이 그리고 잘난 것 없지만 그저 형이 좋다고 따르는 레이저 Lab실의 정문이와 철용이 직속후배 기찬이에게도 감사의 마음을 전합니다.

그리고 광 반도체 Lab실의 석현이형, 준희, 현행, 경태, 재훈이와 레이저 응용 Lab실의 진창이, 한글이, Adnan에게도 그동안 고마웠다고 말해 주고 싶습니다.

마지막으로 사랑하는 나의 가족들 특히 아버지와 어머니에 대한 고마움은 몇 줄의 글로 다 표현 하진 못하지만 다시 한번 진심을 다해 아버지와 어머니에게 못한 아들 뒷바라지 해주셔서 고맙다고 그리고 감사하다고 사랑한다고 말해주고 싶습니다. 가족이 있어 제 자신을 이기는데 큰 힘이 되었으며 막내인 제가 오늘 이 자리에 있기까지 곁에 있는 것만으로도 힘이 되어준 두 분 형님과 누님 그리고 형수님과 우리 이쁜 조카 진선이에게도 감사의 마음을 전합니다.

그 외 제가 미처 언급하지 못한 너무나도 고마운 분들의 이름을 하나 하나 되새기질 못함을 죄송스럽게 생각하며 고개숙여 감사의 마음을 전합니다.

앞으로도 도움을 주신 모든 분들의 은혜 잊지 않는 학식이 항상 밝고 건강한 학식이 되도록 노력하겠습니다. 감사합니다.

2010 年 11 月

李 學 石 拜 上