

레이저 프린터용 광학계 설계 및 평가

삼성전기(주) 종합연구소 광메카/광기기팀의 임천석 선임연구원이 연구한 '레이저 프린터용 광학계 설계 및 평가'를 게재한다. 이 논문은 지난 3월 열린 한국광학회 광기술분과 주최 '한국광기술의 현황과 전망'에서 발표된 내용이다. 관심 있는 독자들에게 많은 도움이 되기를 바란다.

-편집자 주-

글 : 임천석 선임연구원/삼성전기(주) 종합연구소 광메카/광기기팀

자동차의 엔진과 같이 레이저 프린터의 핵심부품 중 하나인 LSU(Laser Scanning Unit)의 작동 원리에 관해 살펴 보았고, 이를 구성하는 광학부품(레이저 다이오드 모듈, 실린더 렌즈, 폴리곤 미러, $f\theta$ 렌즈)들의 배치 및 $f\theta$ 렌즈의 면형상을 Code-V를 사용하여 설계했다. 특히 $f\theta$ 렌즈 설계시 기존제품들을 비교·분석하여 설계에 반영했다.

I. 서론

레이저 프린터에서 화상신호(Video Signal)를 입력으로 받아서 광전도성 드럼(Photoconductive Drum)상에 집속된 광을 주사하는 장치를 레이저 프린터 엔진 또는 LSU[1-3]라고 한다. LSU는 입력된 화상신호(전기적인 ON/OFF 신호)를 콜리메이팅(Collimating)된 광신호로 변환하는 LD(Laser Diode) 모듈, LD모듈로부터 출사되는 콜리메이팅 빔을 편향시키는 회전다면경(Polygon Mirror, PM), 고속회전하는 회전다면경의 동적인 기울어짐(Wobble)에 의해 발생하는 주사선 휨 및 주사간격 불균일성을 보정하기 위해 LD모듈과 회전다면경 사이에 위치한 실린더 렌즈, 회전다면경으로부터 편향된 빔을 광전도성 드럼상에 결상시키는 $f\theta$ 렌즈로 구성되어 있다.

LSU의 저가화 및 소형화가 요구됨에 따라, 각 부품들의 플라스틱화(LD 모듈 Housing, 회전다면경, 실린더 렌즈, $f\theta$ 렌즈[4-7]) 및 $f\theta$ 렌즈의 단초점화(185mm \rightarrow 136mm), LD모듈 출사빔의 수렴광화가 진행되고 있다. 본 논문에서는 LSU의 소형화를 위해 $f\theta$ 렌즈의 초점거리를 136mm로 설계하고, 저가화를 위해 플라스틱으로 구성된 2매의 $f\theta$ 렌즈를 설계한다.

그림 1은 LSU의 전형적인 예이다. LD(1)로부터 광변조된 광속이 콜리메이터렌즈(2)를 거치면서 평행광이 된 후 주주사 방향(<그림 1> (a))으로 장형인 슬릿(3)을 통과한다. 슬릿을 통과한 평행광속은 정면의 부주사 방향으로 굴절능을 가지는 실린더 렌즈(4)에 입사하게 되고, 실린더 렌즈(4)를 통과한 후 주주사 방향의 광속은 평행광으로 회전다면경(5)의 반사면에 입사한 후 $f\theta$ 렌즈(6)로 편향되고, 부주사 방향의 광속은 회전다면경의 반사면상에 결상된 후(<그림 1> (b)) $f\theta$ 렌즈(6)로 편향된다. 회전다면경에 의해서 $f\theta$ 렌즈로 편향된 광속은 결상면상(7)에 부주사 방향으로 장축을 가지는 타원형 spot으로 결상되는 동시에 $f\theta$ 특성($(y-f\theta) \times 100\%/y$, y 는 상고)을 만족한다.

다음 <표 1>에 본 논문에서 설계하고자 하는

LSU용 광학계의 개발요구 Spec.을 제시한다.

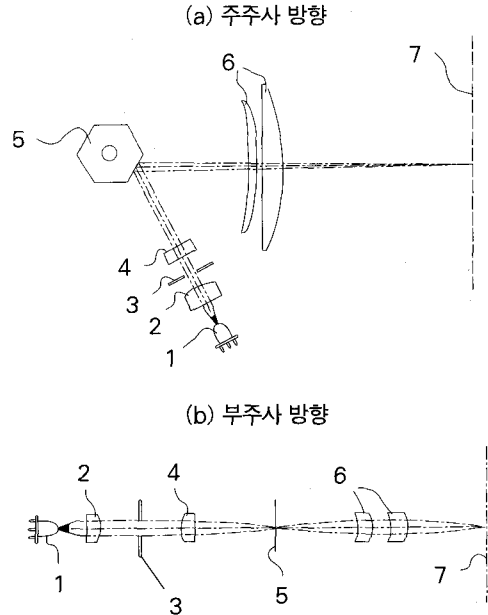
본 논문의 이해를 돕기위해 LD모듈의 구성도, 광원과 결상면과의 관계, 회전다면경의 반사면에 입사하는 LD모듈 출사광의 위치를 <그림 2>에서 <그림 4>에 걸쳐 제시한다.

II. 레이저 프린터용 주사광학계 (2매구성의 fθ렌즈) 설계

근래에 와서 성형재료의 개발, 금형가공의 초정밀화, 사출기술의 향상 등에 힘입어 정밀한 비구면 플라스틱 렌즈의 사출성형이 가능하게 되었고, 이로 인하여 비구면 렌즈의 제조에서 원가가 절감되고 생산성이 크게 향상되었다. 그러나 플라스틱 렌즈의 경우 사출성형시 수축에 의한 변형, 렌즈 내부의 기포, 복굴절, 이물 등의 문제로 유리렌즈에 비해 제조하기 어려운 점이 있고, 사출성형 후 온도 및 흡습성에 의한 굴절률과 렌즈 형상의 변화가 유리렌즈에 비해 크므로(굴절률 변화는 약 60~100배, 선폽창계수 변화는 약 10배) 렌즈재료로서 플라스틱을 선택할 때에는 세심한 주의가 필요하다.

광학용 플라스틱 재료로는[8-15] PMMA, 日立化成의 OPTORETZ, PC, 일본ZEON의 ZEONEX, 일본합성고무의 ARTON 등이 주로 사용되고 있다.

PMMA는 투명성 및 복굴절 특성이 우수하지만, 내열성이 낮고(열변형 온도 100℃) 고흡습성에 의한 형상, 굴절률변화가 큰 것이 단점이다. PMMA의 결점을 개량하기 위해 분자설계된 OPTORETZ는 PMMA보다 우수한 저복굴절성, 저흡습성, 내열성을 겸비하고 있기 때문에 광픽업용 렌즈(CD, VD 플레이어, CD-ROM 드라이브), 카메라나 캠코드의 각종렌즈, 팩시밀리용의 결상렌즈, 센서용 렌즈 등에 사용되고 있다. PC는 우수한 내열성, 내충격성을 가지고 있으며 흡습성도 작지만 본질적으로 고유 복굴절이 크기



<그림 1> LSU용 광학계의 전형적인 예

<표 1> 개발요구 Specification

항 목	단위	개발요구 SPEC
해 상 도	DPI	600
주주사 빔경(1/e ²)	μm	65±15
부주사 빔경(1/e ²)	μm	80±15
주사시 빔경편차	μm	20 이하
유효주사폭(총 주사각)	mm(°)	±108(θ=±45.52°)
주주사방향 초점거리(fθ)	mm	136.0
f·θ 특성	%	±0.5% 이하
LASER WAVELENGTH	nm	786.5, +10/-15
POLYGON MIRROR 면수	면	6
POLYGON MIRROR 내경	nm	φ34.64±0.1
사용온도	℃	+5℃~+50℃
LD BEAM의 PM 입사각(β)	°	80°
실린더렌즈~PM 반사점	mm	33.5±2.0
PM 반사면~결상면 거리	mm	185mm 이하

때문에 복굴절이 거의 문제되지 않는 렌즈 용도에 고분산성을 이용하여 색수차 보정용으로, 저

분산성인 아크릴계 수지(PMMA, OPTORETZ)와 조합하여 사용하는 경우가 많다. ZEONEX와 ARTON은 아크릴계 수지의 투명성, 저복굴절성, 정밀성형성 및 경제성(저가격)에는 못미치지만, 아주 우수한 저흡습성과 고내열성을 가지고 있으므로 가혹한 온습도 환경이 요구되는 특수 용도의 렌즈($f\theta$ 렌즈) 등에 많이 사용되고 있는 추세이다.

본 설계에서는 아크릴계 수지의 단점인 고흡습성을 개량하고, PC의 단점인 고복굴절 특성을 개량한 올레핀계 수지중 하나인 ZEONEX를 렌즈재료로 선택한다.

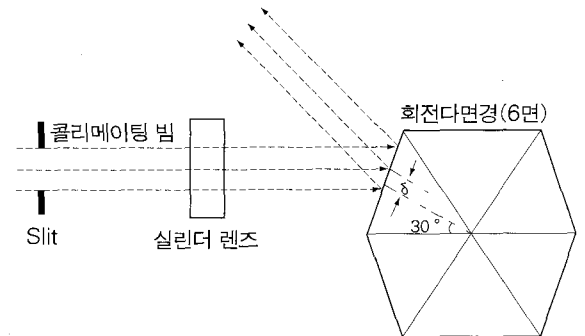
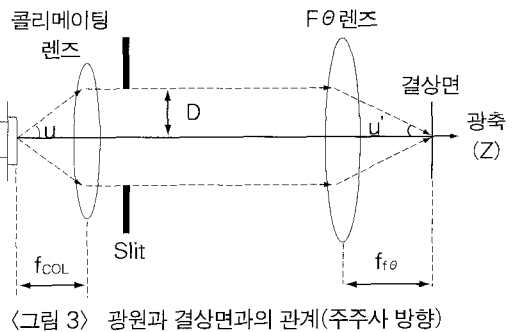
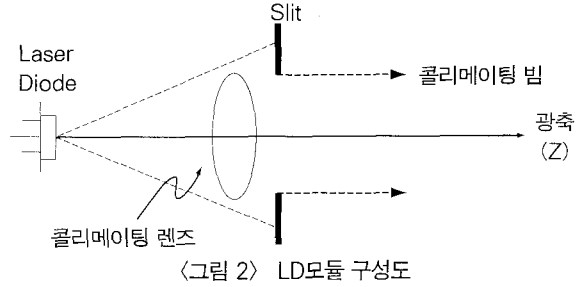
기존의 대표적인 A4용 $f\theta$ 렌즈계(주사각 $\pm 45^\circ$ 이상)는 플라스틱 1매로 구성되어 있거나 글래스 렌즈와 플라스틱렌즈 각 1매로 구성되어 있다. 플라스틱 1매로 구성된 $f\theta$ 렌즈는 설계시 특수한 토릭면을 사용하므로 금형가공이 어렵거나(CANON社) 또는 렌즈볼륨이 큰 편이므로(RICOH社) 사출이 용이하지 않은 것이 단점이다[16].

그리고 글래스와 플라스틱으로 구성된 2매의 $f\theta$ 렌즈는 글래스렌즈에 대부분의 굴절능이 분배되어 있고 플라스틱렌즈는 광학적으로 글래스렌즈의 보조적인 역할을 하므로 플라스틱 1매로 구성된 $f\theta$ 렌즈에 비해 환경특성(특히 온도특성)은 우수하지만, 렌즈가격이 비싼 것이 단점이다.

본 설계에서는 특수한 토릭면을 사용하지 않는 플라스틱 2매로 구성된 $f\theta$ 렌즈계를 설계함에 의해 금형가공 및 사출성형이 용이하게 하고자 한다. 그리고 이상과 같은 $f\theta$ 렌즈를 설계하기 위해 최적화의 초기data로 特開平4-110817을 선택한다(표 2 참조).

特開平4-110817의 초기설계치를 가지고 미국 ORA사의 광학설계 프로그램인 CODE-V를 이용하여 최적설계를 한다.

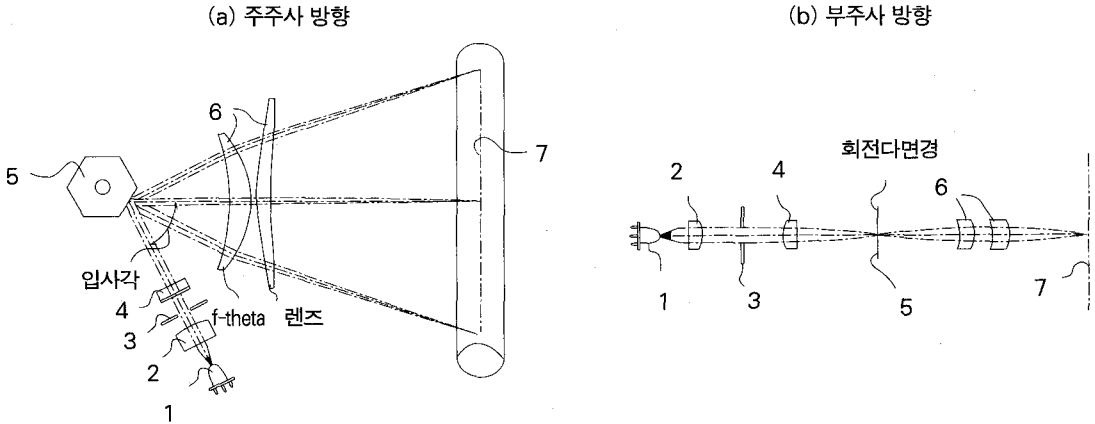
본 논문의 최적설계에서는 전 주사폭($\pm 108\text{mm}$)에 걸쳐 $f\theta$ 특성($\pm 0.5\%$ 이하)을 만족시키기



〈표 2〉 特開平4-110817의 설계자료

면 수	곡률반경(mm)		두께 (mm)	비구면 계수 (A: mm ³ , B: mm ⁶)	굴절률	면종류
	주주사	부주사				
1	-341.26	97.87	8.07	A=2.32583×10 ⁻⁷ B=-1.59736×10 ⁻¹⁰	1.57467 (PC계열)	Y-토릭면
2	-83.91	-59.19	12.55	A=-5.62618×10 ⁻⁹ B=-6.82987×10 ⁻¹²	Air	Y-토릭면
3	238.85	-17.61	7.81	A=-1.81103×10 ⁻⁶ B=2.29302×10 ⁻¹⁰	1.57467 (PC계열)	Y-토릭면
4	3617.04	-13.71	123.19	A=-1.49612×10 ⁻⁶ B=9.82617×10 ⁻¹¹	Air	Y-토릭면

- 주주사 초점거리(f) = 136mm, 주사각(θ) = $\pm 45^\circ$
- P/M면에서 $f\theta$ 렌즈 첫번째면까지의 거리 = 35.1mm



〈그림 5〉 최적설계된 LSU용 광학계

$$z = \frac{(x^2 + y^2) / R}{1 + \sqrt{1 - (1+k)(x^2 + y^2) / R^2}} + A(x^2 + y^2)^2 + B(x^2 + y^2)^3 + c(x^2 + y^2)^4 \dots\dots\dots (1)$$

$$z_y = \frac{(y^2) / R}{1 + \sqrt{1 - (1+k)(Y^2) / R^2}} + Ay^4 + By^6 + Cy^8 \dots\dots\dots (2)$$

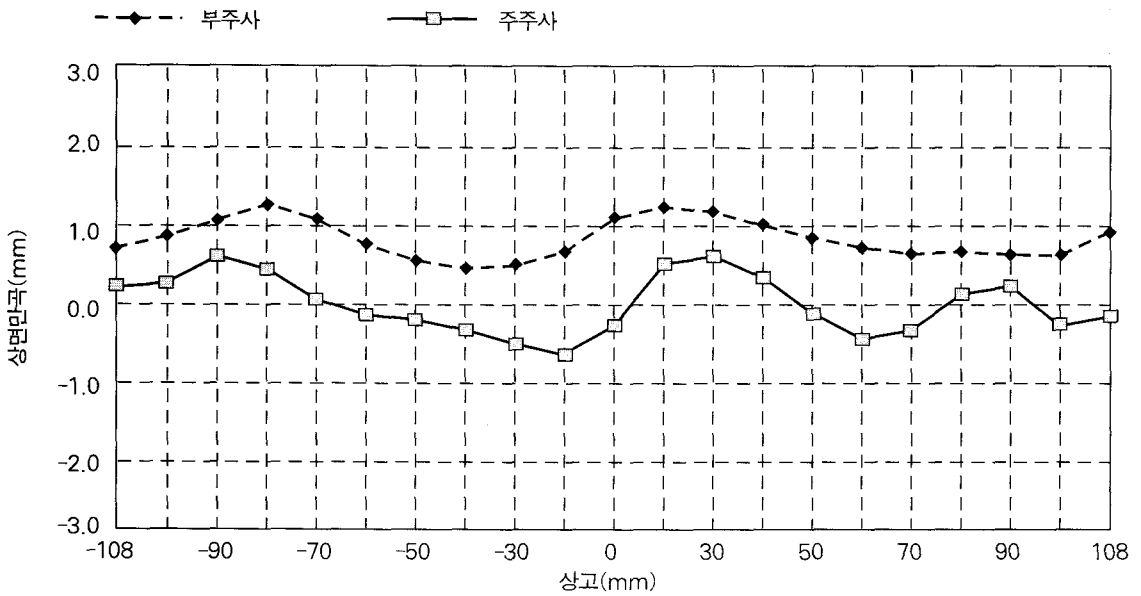
$$z = \frac{(X^2 - Z^2y) / R' + 2Zy}{1 + \sqrt{(1 - Zy / R')^2 - (x / R')^2}} \dots\dots\dots (3)$$

위해 첫번째 및 두번째 fθ렌즈를 광축에 대해 각각 편심시켜 fθ특성을 보정하였다. 그리고 주사각(θ)±45.52°(주사폭 ±108mm에 대응)를 21등분해서 최적설계를 했다.

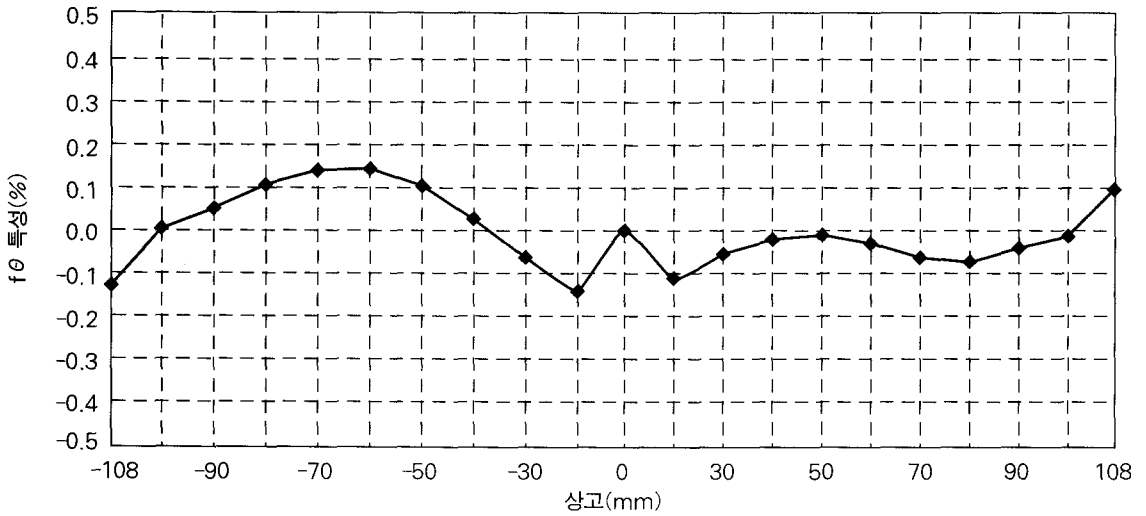
LSU Housing은 플라스틱 사출품이므로 휨 또는 수축에 의해 편심(Decenter) 및 틸트(Tilt) 오차가 발생하기 쉽기 때문에, 이에 의한 광학성능 저하를 최소화하기 위해 fθ렌즈 설계시 적어도 한면 이상은 광축대칭적인 면(구면, 공축비구면)을 가지도록 최적설계하였다. 최적설계된 fθ렌즈의 면구성은 제 1면, 즉 회전다면경쪽으로 향한 면이 공축비구면, 제2면, 제3면, 제4면은 주주사방향으로 회전축을 가지는 비구면 토릭(Y-토릭)으로 구성되어 있다. 또 fθ렌즈의 광축

근방 형상은 주주사 방향으로 제1면부터凹, 凸, 凸, 凹이고, 부주사 방향으로 제1면부터凹, 凸, 凹, 凸으로 구성된 것을 특징으로 한다(〈그림 5 참조〉). 위에 공축비구면 및 Y-토릭면의 향상식을 나타내었다.

식 (1)은 fθ렌즈의 제1면 향상식(공축비구면)이고, 식 (2), 식 (3)은 fθ렌즈의 제2면, 제3면, 제4면의 향상식(Y-토릭면)이다. 단, x, y는 X, Y 축상의 임의의 점(〈그림 5〉 참조), z는 비구면 토릭면의 임의의 점에서 XY평면까지의 광축방향 거리(SAG 양)를 나타내고, Zy는 비구면 토릭면의 임의의 점에서 Y축까지의 광축방향 거리, R은 광축근방의 주주사 곡률반경, R'은 부주사 곡률반경, K는 원추곡면계수, A는 4차의 비구면



〈그림 6〉 최적설계된 LSU용 광학계의 상면만곡

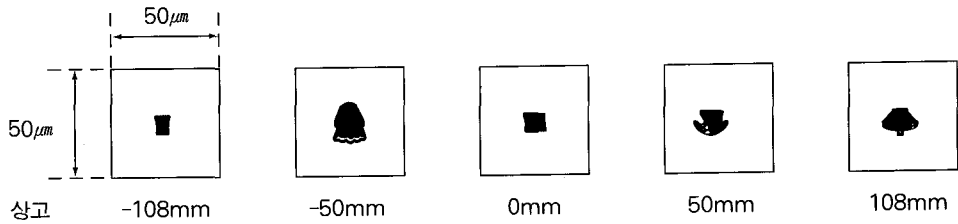


〈그림 7〉 최적설계된 LSU용 광학계의 fθ 특성

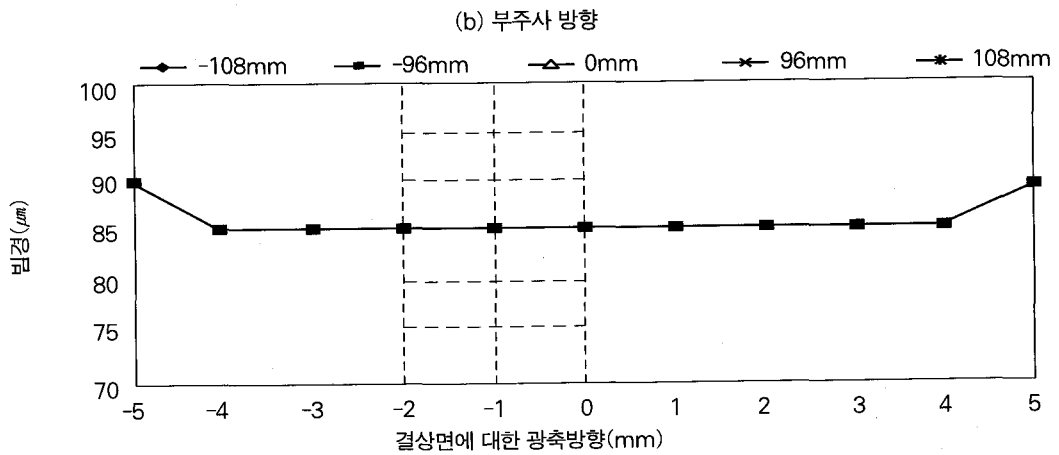
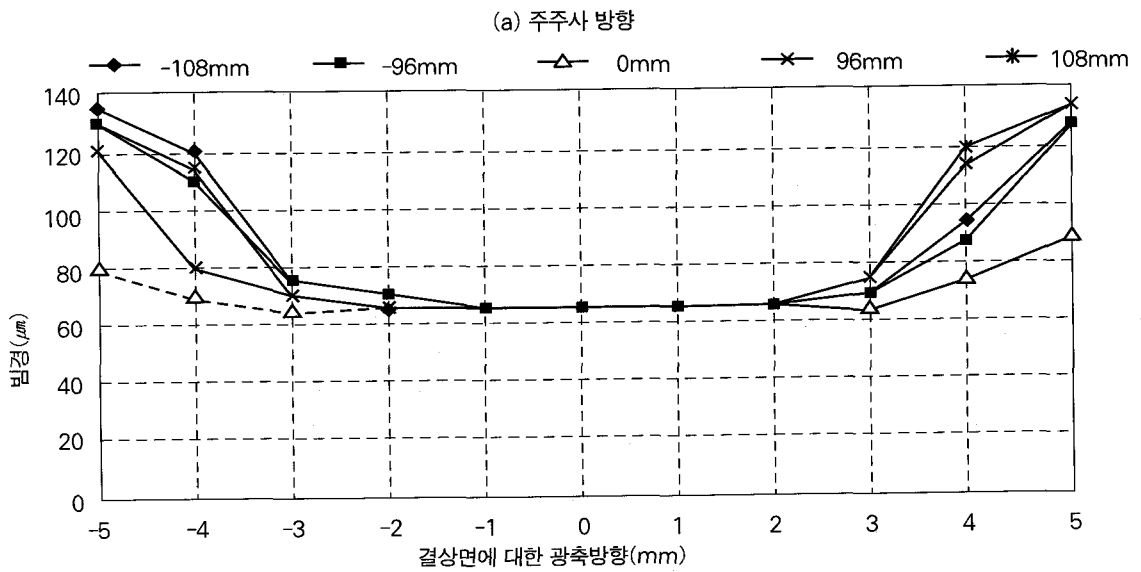
계수(mm^{-3}), B는 6차의 비구면 계수(mm^{-5}), C는 8차의 비구면 계수(mm^{-7})를 나타낸다.

〈표 3〉에 개발요구 스펙을 만족시키는 최적설계된 LSU용 광학계의 data를 제시한다(〈그림

5〉 참조). 표 3은 광원의 파장이 786.5nm일 때를 기준으로 설계되었고, 회전다면경 입사각(β)이 80° , 주사각(θ)이 $\pm 45.52^\circ$, LSU의 주주사 초점거리(f_{θ})가 136.0mm, 부주사 초점거리(f_{θ})가



〈그림 8〉 최적설계된 LSU용 광학계의 Spot Diagram



〈그림 9〉 최적설계된 LSU용 광학계의 Point Spread Function

92.1mm, 회전다면경의 편향면에서 피주사면까지 거리가 185.0mm, 회전다면경의 off-set량(δ)이 2.0mm로 설계되었다. 슬릿크기는 개발빔경 Spec. 이 $65\mu\text{m}$ (주) $\times 80\mu\text{m}$ (부)이므로, 이를 만족시키기 위해 2.6mm(주) $\times 1.4\text{mm}$ (부)로 설계되었다.

<표 3>의 $f\theta$ 렌즈에 대한 상면만곡 및 $f\theta$ 특성, Spot Diagram은 각각 <그림 6>, <그림 7>, <그림 8>에 제시하였다.

상면만곡이란 광전도성드럼면과 광선추적에 의해서 계산된 결상점과의 광축방향거리로, 그림 6에서 보듯이 $\pm 1.2\text{mm}$ 이내로 잘 보전되어져 있고, 결상면에서 빔의 위치가 주사각 θ 에 선형적으로 비례하는 정도를 나타내는 $f\theta$ 특성은 $\pm 0.3\%$ 내로 잘 보전되어 있다(<그림 7> 참조). 그리고 spot diagram으로부터 $\pm 108\text{mm}$ 상고 내에서 회절한계 이내로 수차보정이 잘 되어 있음을 알 수 있다(<그림 8> 참조). 회절한계 이내로 수차보정이 되어 있는 광학계에서 빔경은 파동광학적으로 평가되어야 하므로 <그림 9>에 PSF(Point Spread Function)으로부터 계산된 주주사 및 부주사방향 빔경($1/e^2$)을 상면위치별로 나타내었다.

<그림 9>에서 보듯이 주주사 방향의 초점심도(DOF, Depth Of Focus)는 $\pm 3.1\text{mm}$ 이고 부주사 방향 초점심도는 $\pm 5.0\text{mm}$ 이상임을 알 수 있다.

III. 결론

본 논문에서 최적설계된 LSU용 광학계는 <표 1>의 개발요구 스펙을 잘 만족시키고 있다. 또 LSU의 저가격화를 실현하기 위해 LSU내의 핵심 광부품인 $f\theta$ 렌즈계를 플라스틱화 했고, $f\theta$ 렌즈계를 2매로 구성함에 의해 렌즈면 형상을 공축 비구면 또는 Y-토릭면으로 설계할 수 있었다.(금형가공이 용이) 두께도 각각 12mm와 8mm로(사출 성형이 용이) 설계할 수 있었다.

<표 3> 최적설계된 LSU 광학계

렌즈	면수	주주사 곡률반경 (mm)	부주사 곡률반경 (mm)	두께 (mm)	굴절률
실린더 렌즈	제 1 면	∞	18.18	4.00	1.511
	제 2 면	∞	∞	33.50	-
회전다면경	반사면	∞	∞	32.34	반사
주사렌즈	제 1 면	-106.47	-106.47	12.00	1.524
	제 2 면	-56.95	-25.17	5.05	-
	제 3 면	79.21	-33.79	8.00	1.524
	제 4 면	176.66	-20.77	128.66	-
주사렌즈의 비구면 계수					
1면 : $A=9.564 \times 10^{-7}$, $B=-1.251 \times 10^{-9}$					
2면 : $A=8.162 \times 10^{-7}$, $B=-5.404 \times 10^{-10}$					
3면 : $A=-1.985 \times 10^{-6}$, $B=4.159 \times 10^{-10}$					
4면 : $A=-1.354 \times 10^{-6}$, $B=2.826 \times 10^{-10}$					

참고문헌

- [1] Robert E. Hopkins and David Stephenson, Optical Scanning(Marcel Dekker, Inc.)pp. 27~82, 1991.
- [2] Takanori Hisade, Takesuke Maruyame, et al., SPIE 1670, 404 (1992).
- [3] Mark Geslicki and Vinod Mirchandani, Laser Focus World, March,167(1996).
- [4] 特開平4-50908.
- [5] 特開平8-76011.
- [6] 特開平10-232347.
- [7] 特開平10-3051.
- [8] 内尾舜二, 光技術コンタクト 36(4), 157(1996).
- [9] 佐藤康浩, 光技術コンタクト 34(4), 161(1996).
- [10] 中西寛, 光技術コンタクト 34(4), 177(1996).
- [11] 田中日出男, 光技術コンタクト 34(4), 189(1996).
- [12] Sachio Yasufuku, IEEE 8(1), 7(1992).
- [13] 青木修, 光技術コンタクト 34(4), 169(1996).
- [14] Charles N. Teyssier, Photonics Spectra, March, 105(1996).
- [15] 河合宏政, 월간 전자기술, 3월호, 147(1997).
- [16] 小瀬古久秋, 光技術コンタクト 36(10), 43(1998).