

f-θ 렌즈 표면형상오차와 광학적 성능과의 연관성 분석

김동식*, 이인용*, 김형재*

An Analysis of the Relationship between Surface Profile Error of *f*-θ Lens and Optical Performance

Dong-Sik Kim*, In-Yong Lee*, Hyeong-Chae Kim*

ABSTRACT

f-θ lens is one of the important parts in Laser Scanning Unit because it affects on the optical performance of Laser Scanning Unit dominantly. It is necessary to find out the relationship between the surface profile error of *f*-θ lens and the beam profile focusing on the Organic Photo Conductive drum in order to analyse the beam profile problems such as appearance of side lobe and expansion of center lobe. In this research, a simulation process which relates the surface profile characteristics to the beam profile has been developed by CODE V. The simulated beam profiles also have been compared with the measurement results.

Key Words : *f*-θ lens(에프세이터 렌즈), Laser Scanning Unit(레이저 스캐닝 유니트), Laser printer(레이저 프린터), Surface profile error(표면형상오차), Beam profile(빔형상), Center lobe(센터로브), Side lobe(사이드로브)

기호설명

$A_3 \sim A_{10}$: Aspheric constants in main-direction

$B_3 \sim B_{10}$: Aspheric constants in sub-direction

C_1 = Curvature in main-direction

C_2 = Curvature in sub-direction

K = conic constant

1. 서론

최근 레이저빔 프린터(LBP:Laser Beam Printer)는 사무자동화의 발전과 저가화에 기여를 하면서, 시장 확장이 가속화 되고 있다. 또한, 디지털 전사기의 출력부로서의 개발 실용화도 진행되고 있기 때문에, LBP의 핵심부품인 레이저 주사광학계(LSU:Laser

Scanning Unit)의 고성능화, 소형화, 고신뢰성화, 저가화 등의 필요성이 대두되고 있다⁽¹⁾.

고품질의 이미지를 얻기 위한 고분해능의 레이저 프린터는 매우 정교하고, 균일한 주사빔 형상이 요구된다. 주사광학계의 경우 깊은 초점심도가 필요하며, 입사빔의 넓은 면적을 사용하므로, 파면수차가 작아야 이러한 균일한 빔 형상을 구현할 수 있다. 이러한 주사광학 시스템의 설계에서는 구면에 비하여 성능을 높일 수 있고, 자유도를 높일 수 있는 비구면이 사용되며, 또한 최근에는 저가화, 고생산성에 대응하기 위하여 렌즈의 단순화, 플라스틱화가 큰 추세로서, 그 중 *f*-θ 렌즈도 2 내지 3 매에서 1 매화로 진행되고 있다. *f*-θ 렌즈의 매수가 줄어드는 대신에 렌즈의 표면형상은 더욱 더 복잡한 비구면형상을 지니게 된다.

* 삼성전자(주) 디지털 프린팅 사업부

이러한 비구면 형상의 정밀 $f\text{-}\theta$ 렌즈는 최근 플라스틱 사출 금형⁽²⁾에 의하여 대량 생산화가 이루어지고 있다. 따라서, 사출렌즈의 표면 형상오차가 레이저 주사광학계의 빔 형상을 좌우하는 중요한 인자이므로, 양호한 빔 형상과 주사광학계의 성능을 구현하기 위해서는 초정밀 금형가공기술, 정밀렌즈 사출기술, 측정 및 평가기술 등을 필요로 한다.

사출금형을 이용하여 플라스틱 렌즈를 대량으로 사출하여 생산을 하므로, 금형코어의 표면형상오차, 사출조건에 의한 형상오차 등에 의하여 사출렌즈의 표면에는 근본적으로 형상오차가 존재하게 된다. 이러한 렌즈 표면의 형상오차는 빔형상에 악영향을 주어 성능을 떨어뜨리며, 결국 레이저 프린터 전체의 성능을 저하시키게 된다.

따라서 본 연구에서는 레이저 주사광학계에 있어서 $f\text{-}\theta$ 렌즈의 표면형상오차와 빔형상과의 연관성을 분석하였다. CODE V를 이용하여, 렌즈표면 형상오차를 입력하여 빔 성능을 분석할 수 있는 프로세스를 개발하여, 렌즈표면 형상오차의 진폭과 주기에 따른 빔성능, 센터 로브와 사이드 로브 빔형상의 발생원인과 렌즈표면 형상오차와의 연관성을 분석하였다.

2. 레이저 주사광학계

Fig.1은 본 연구에서 개발한 레이저주사광학계(LSU)를 나타낸 것이다. 레이저 주사광학계는 크게 광학계($f\text{-}\theta$ 렌즈, Collimating 렌즈, Cylindrical 렌즈, BD 렌즈, Polygon Mirror), 회로부(Polygon Scan Motor 구동회로, 레이저 다이오드 구동회로, 수평동기회로), 기구부(Unit Housing, Cover)로 구성이 된다.

레이저 주사광학계는 레이저 빔을 감광드럼에 주사하는 유니트로, 엔진 제어부의 신호에 따라 인쇄할 페이지를 회전하는 감광 유전체(OPC: Organic Photo Conductive) 드럼에 빛을 비추어 잠재적인 영상을 형성하게 한다. 레이저 프린터 드라이버는 비디오 콘트롤러로부터 인쇄하고자 하는 비디오 데이터를 직렬 데이터 신호형태로 받아서 레이저 빔을 변조시킨다. 변조된 레이저 빔은 회전하는 다면경(Polygon Mirror)에 반사되어 감광 유전체드럼에 수평주사가 이루어진다. 부주사 방향으로는 실린더렌즈(Cylindrical Lens)에 의해 빔이 모아져 회전 다면경에서 반사되어, 드럼 표면에

빛에 의한 화상을 형성한다. 페이지의 수직주사를 위해 감광드럼은 일정한 속도로 회전하며 레이저 빔이 주사 거울의 왼쪽 일정 위치에 오면 동기(Beam Detector) 신호가 발생되어 인쇄할 수평주사선에 대한 동기를 맞추게 된다.

광학계 중 $f\text{-}\theta$ 렌즈는 등속직선주사 기능을 가진다. 즉, 회전다면경에서 나오는 빛을 편향각(θ)에 따라 주사속도가 일정하도록 하는 것으로 주사속도가 일정하여야 노광시 감광드럼 상에서 시간당 광량이 일정하게 된다. 그리고, 부주사 방향으로의 초점 위치를 감광드럼의 직선에 놓이도록 하는 기능도 가진다. 이와 같은 이유로 $f\text{-}\theta$ 렌즈는 복잡한 비구면 형상을 지니게 된다. 기존의 2매 렌즈의 경우 축대칭 비구면 또는 Toric 비구면 형상을 지니는데, 본 연구에서 개발한 렌즈의 경우 1매로 설계됨으로 인하여 더욱 더 복잡한 비축대칭 비구면 형상을 지니게 되었다. 따라서, $f\text{-}\theta$ 렌즈의 성능을 구현하기 위한 형상오차의 한도가 높아져, 금형 코어의 가공 및 측정 난이도 또한 더욱 높아지게 되었다.

뿐만 아니라, 표면형상오차가 빔형상에 미치는 영향을 파악하여야 금형코어 및 사출렌즈의 형상오차 한도를 설정할 수 있을 것이다.

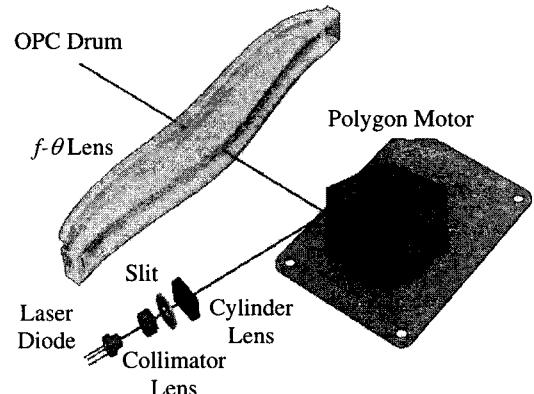


Fig. 1 Block diagram of Laser Scanning Unit(LSU)

3. $f\text{-}\theta$ 렌즈 표면형상오차분석

3.1 $f\text{-}\theta$ 렌즈 설계

본 연구에서는 상용광학 프로그램인 CODE-V⁽³⁾와 최적화 기법을 이용하여 600dpi의 $f\text{-}\theta$ 렌즈를

설계하였는데, 주주사 방향의 설계 범경은 65 μm, 부주사 방향의 설계 범경은 70 μm 이다. $f\theta$ 렌즈의 설계식은 일반 비구면식에 부주사 방향의 곡률이 첨가된, 3 차원 자유곡면으로 다음과 같다.

$$z(x, y) = \frac{C_1 y^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)C_1^2 y^2}} + \sum_{m=3}^{10} A_m Y^m \\ + \frac{C_2 (1 + \sum_{m=3}^{10} B_m Y^m) x^2}{1 + \sqrt{1 - (x C_2 (1 + \sum_{m=3}^{10} B_m Y^m))^2}} \quad (1)$$

Fig.2는 설계된 $f\theta$ 렌즈의 외형을 나타낸 것이다. Y축방향은 폴리곤 모터에 의하여 빔이 스캔되는 방향으로서 주주사방향이라고 하며, X축 방향은 부주사 방향이라고 한다. (1)식에서 보면 주주사방향(Y-axis)으로는 홀수항과 짝수항을 모두 포함하는 일반비구면으로 좌우 비대칭이며, 부주사방향(X-axis)으로는 원호로서 주주사방향의 위치 즉, y 값에 따라 원호의 반경과 중심점의 높이가 변함을 알 수 있다. C_1 과 C_2 는 각각 주주사 방향과 부주사 방향의 주 곡률을 나타낸다. 그리고, 비구면 계수 $A_3 \sim A_{10}$ 은 주주사 방향 즉, 스캔 방향으로의 비구면을 형성하여 주주사 방향의 스캔 속도가 등속도가 되도록 최적화된다. 그리고, $B_3 \sim B_{10}$ 은 주주사 방향의 각 위치에서의 부주사 빔경이 최소화 되도록 부주사 방향의 반경을 결정하는데 사용되는 계수들이다.

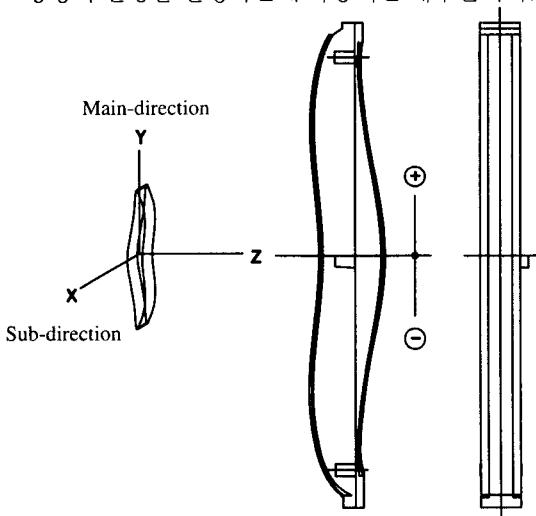


Fig. 2 Layout of the developed single $f\theta$ lens

3.2 표면형상오차 측정 및 특성

광학 설계적인 관점에서 볼 때 $f\theta$ 렌즈의 주주사 방향의 형상오차는 약 5 μm 이하, 부주사 방향은 약 0.2 μm 이하이어야 한다. 주주사 방향의 설계 허용한도는 현재의 가공 및 사출기술로서 충분히 달성할 수 있는 수준으로서 주주사방향의 실제 화상결과도 만족할 만한 수준이다. 이에 비해 부주사 방향의 설계 허용한도는 현재 기술로서 달성하기가 어려운 수준으로 그 원인에 대한 심층적인 분석이 필요하다. 따라서, 이후의 모든 측정 및 분석은 부주사 방향에 한하여 실시하였다. 기존의 여러 다른 렌즈들과 마찬가지로, $f\theta$ 렌즈의 경우에도 설계식 대비 형상오차가 있을 경우 이러한 형상오차에 상응하는 파면수차(Wavefront aberration)가 발생하여 렌즈의 성능에 영향을 미치게 된다. 따라서, 렌즈의 성능을 평가하기 위하여 설계식에 기준한 형상오차를 측정할 필요가 있다. 그리고, Z 축 방향으로의 설계형상의 최대 높이 변화가 10 mm 정도이며, XY 평면에서의 사용영역이 약 100 mm × 6 mm 정도이기 때문에 2차원 전체 영역에서의 형상오차를 측정하기가 용이하지 않다. 따라서, 주주사 방향으로 일정한 간격을 설정한 후 각 위치에서의 부주사 방향의 형상오차를 Rank Taylor Hobson사의 형상 측정기인 FormTaly Surf를 이용하여 평가를 하였다. Fig.3은 $f\theta$ 렌즈의 주주사방향 중심에서 부주사 방향으로의 형상오차를 측정한 예를 보여 준다.

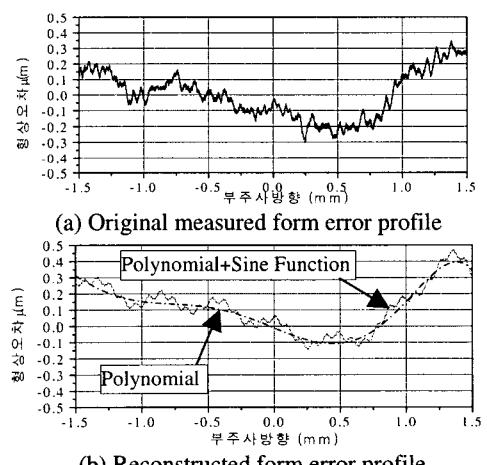


Fig. 3 Measured and reconstructed form error profile of the $f\theta$ lens in sub-scan direction

Fig.3(a)에서 보는 것처럼 코어가공의 한계, 사출조건 등에 의한 수축, 재료 결합 등 여러 가지 요인에 의하여 사출렌즈에 형상오차가 발생하는 것을 알 수 있으며, 형상오차는 큰 굴곡을 가지는 저주파 성분과 표면거칠기에 해당하는 고주파 성분의 조합으로 이루어 진 것을 알 수 있다. Fig.3(b)와 같이 렌즈 표면의 형상오차를 저주파 성분과 고주파 성분으로 구분을 하여 저주파 성분은 다항식으로 근사화하고, 고주파성분은 사인함수로 근사화하여 전체 형상오차를 나타낼 수가 있다.

(2) 식은 Fig.3에서 찾아낸 다항식과 사인함수를 나타낸다. Fig.3(a)의 측정결과를 이용하여 저주파수 성분은 다항식으로 fitting을 하였으며, 표면거칠기에 해당하는 고주파수 성분은 FFT를 하여 지배적인 성분의 진폭과 주기를 찾아 내었다.

$$\begin{aligned} z = & -0.117 - 0.331x + 0.011x^2 + 0.473x^3 + 0.222x^4 \\ & - 0.143x^5 - 0.071x^6 + 0.047 \cos\left(\frac{2\pi}{0.44}x - 0.36\right) \\ & + 0.019 \cos\left(\frac{2\pi}{0.10}x - 0.65\right) + 0.006 \cos\left(\frac{2\pi}{0.02}x + 1.28\right) \end{aligned} \quad (2)$$

4. 모의실험 결과 및 고찰

모의 실험은 광학설계 및 평가 프로그램인 CODE V(ORA 사, 미국)⁽³⁾를 이용하였다. 본 연구에서 사용한 식은 CODE V가 기본적으로 내장한 식이 아니다. 따라서, 광학설계에 이용되는 CODE V가 내장한 기본식 이외의 일반적인 수식으로 나타나는 자유곡면을 모의실험하기 위하여 사용자가 그식을 정의하여 추가하여야 한다. 이와 같이 일반적인 수식으로 정의되는 자유 곡면인 경우 CODE V에서는 UDS(User define surface)를 사용하여 면형상을 정의할 수 있으며, 따라서, 앞 절에서 살펴본 형상오차의 특성인 저주파 성분인 다항식과 고주파성분인 사인함수를 입력할 수 있도록 사용자 정의함수를 추가하였다.

모의 실험은 두가지 방법으로 진행하였다. 첫째는 설계된 $f\text{-}\theta$ 렌즈에 일정한 주기와 진폭을 갖는 사인함수를 도입하여 진폭과 주기의 변화에 따른 빔경 성능 변화를 검토하였다. 둘째는 실제 제작된 $f\text{-}\theta$ 렌즈의 형상정도를 표면형상측정기를 이용하여 측정하고, 측정된 형상오차값을 다항식 Fitting을 하여 다항식 계수를 얻어내고, FFT를 이용하여

고주파 성분 중 지배적으로 나타나는 주기성분의 진폭과 주기를 찾아내어, 이를 CODE V에 입력하여 광학적인 분석을 통하여 성능을 검토하였다.

4.1 표면거칠기/형상오차의 설계적 한계

표면에 주기적인 형상오차 성분이 존재할 때, 이러한 주기적인 성분의 진폭과 주기가 빔경 및 빔형상에 어떠한 영향을 미치는지를 살펴 보았다. 이렇게 함으로서 고주파수 성분인 표면거칠기, 저주파수 성분인 형상오차의 한도를 설계적으로 설정을 할 수가 있다.

표 1은 $f\text{-}\theta$ 렌즈 모의실험을 통하여, 표면에 존재하는 오차성분의 진폭과 주기에 따른 빔경의 크기를 나타낸 것이다.

Table 1 Beam diameter with respect to amplitude and wavelength of the surface profile error in sub-direction

오차진폭 (μm)	오차주기(입사/출사) (mm)	부주사 빔경 (μm)
1.00	4.0 / 5.0	70~76 / 70~76
	3.0 / 4.0	70~128 / 72~116
0.50	3.0 / 4.0	70~76 / 70~76
	2.0 / 3.0	70~147 / 72~119
0.20	2.0 / 3.0	70~76 / 70~76
	1.5 / 2.0	70~132 / 74~120
0.10	1.5 / 2.0	70~76 / 70~76
	1.0 / 1.0	70~124 / 71~126
0.05	0.2 / 0.22	70~74 / 66~73
	0.1 / 0.18	70~383 / 70~529
0.03	0.15 / 0.15	70~75 / 67~74
	0.05 / 0.11	70~1717 / 70~1667
0.01	0.03 / 0.01	70~75 / 70~74
	0.01 / 0.01	70~254 / 70~834

설계 부주사 빔경은 70~75 μm 정도인데, 위 표에서 보면 렌즈 표면에 존재하는 주기적인 오차성분의 주기가 커지면 빔경에 악영향을 미치는 오차허용진폭 또한 커지고, 표면거칠기와 같은 고주파의 주기적인 성분 즉, 짧은 주기적 성분이 존재할 경우에는 허용진폭 또한 작아짐을 알 수 있다. 본 연구에서 설계된 $f\text{-}\theta$ 렌즈의 부주사 방향 폭은 6 mm이며 실제 빔에 의한 사용영역은 약 2 mm 정도인데, 형상오차(Form Error)의 주기를 1.5~2.0 mm 정도라고 하면, 설계적 빔 성능을 내기 위해서는 형상오차가 0.2 μm 이내이어야 하며, 표면거칠기

(Surface roughness) 성분의 경우 주기가 0.15 mm 보다 작은 성분이 존재할 경우 최대표면거칠기는 0.03 μm 이내이어야 함을 알 수 있다. 이상과 같이 설계적인 관점에서 $f\theta$ 렌즈의 형상오차 및 표면거칠기의 한도를 설정할 수 있으나, 이 경우에는 LSU 내의 다른 부품들의 오차요인은 고려하지 않은 것이다. 따라서, LSU의 양상을 고려하였을 경우, 즉 다른 부품들의 오차요인을 예상할 경우에는 위의 $f\theta$ 렌즈의 형상오차한도를 좀 더 낮추어 설정을 하여야 한다.

4.2 센터로브 및 사이드로브 원인분석

주사광학계의 성능은 설계적으로는 상대 에너지 13.5 % 수준에서의 빔경에 의하여 결정되지만, 실제적으로 화상은 13.5 % 이하 영역에서의 사이드로브(side lobe)나 센터로브(center lobe)의 형상 및 크기에 의하여 악화되어 나타난다. 따라서, 레이저 프린터의 화상을 개선하기 위하여는, 빔형상에서 센터로브 또는 사이드로브와 렌즈의 표면형상오차와의 연관성을 찾아내어야 할 것이다.

먼저, Fig.4는 $f\theta$ 렌즈 출사면의 부주사 곡률반경을 설계값을 기준으로 줄여 나갔을 경우의 모의실험에 의하여 구한 빔형상을 보여주는 것이다. 즉, 렌즈 중심에서의 곡률반경이 9.32, 9.20, 9.10 mm가 되도록 (1)식의 부주사 곡률인 C2 값을 조절하여 모의실험을 하였다. 실제 종이에 프린터되는 화상위치 2 군데(중심, +108 mm)를 비교하였다. 여기서, 설계값보다 부주사 곡률반경이 줄어들 경우 빔경이 72 μm 에서 145 μm 내지 284 μm 로 크게 증가하며, 빔의 형상은 센터로브가 발생함을 알 수 있다. 부주사 곡률 변화에 의한 촛점거리의 변화가 센터로브를 발생시키는 것임을 알 수 있다. 실제, 사출성형 플라스틱 렌즈의 경우 플라스틱 자체의 수축률에 의하여 성형후 수축이 발생하여 위와 같이 부주사 곡률의 감소로 인하여 빔경 및 화상에 악영향을 미치고 있다.

Fig.5는 진폭 0.2 μm , 파장길이 1.5 mm의 사인함수를 형상오차로 대입한 후, 위상을 변화시켜 가면서 나타난 빔형상을 고찰한 것이다. 렌즈의 형상오차가 중심을 기준으로 좌우 비대칭일 경우, 이러한 비대칭 방향으로 빔형상에서 사이드로브가 발생하는 것을 알 수 있다. 렌즈의 형상오차에서 위상이 0 일 경우 중심을 기준으로 좌우 비대칭이며, 드럼 결상면에서의 빔형상도 우측에 사이드로브가 발생함을 알 수 있다.

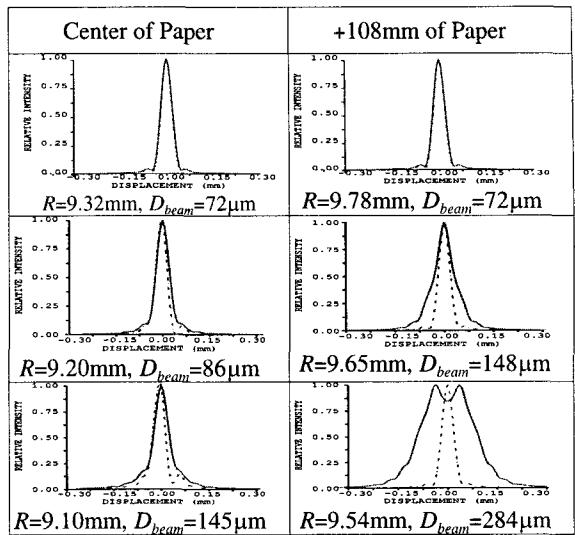


Fig. 4 Center lobe type beam profile according to sub-direction radius of $f\theta$ lens :design radius=9.32 mm at Paper center and 9.78 mm at Paper +108 mm

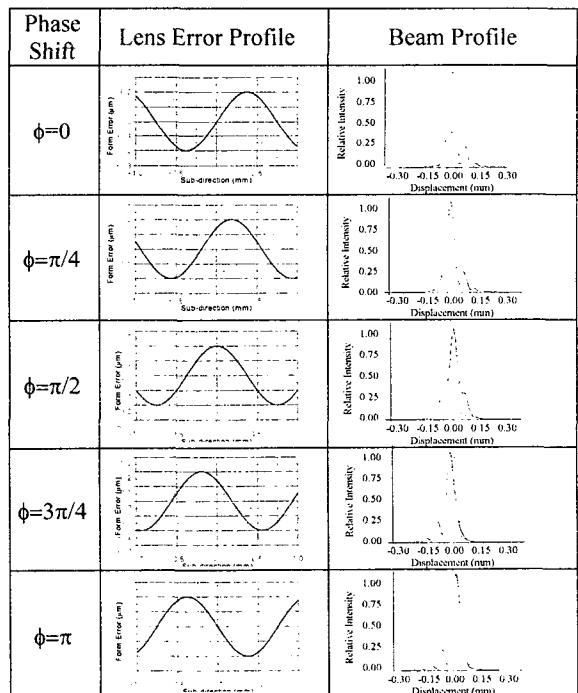


Fig. 5 Side lobe type beam profile according to phase shift of lens error profile

$$(\text{Error profile} : A \sin(\frac{2\pi}{\lambda} x + \phi), A=0.2 \mu\text{m}, \lambda=1.5 \text{ mm})$$

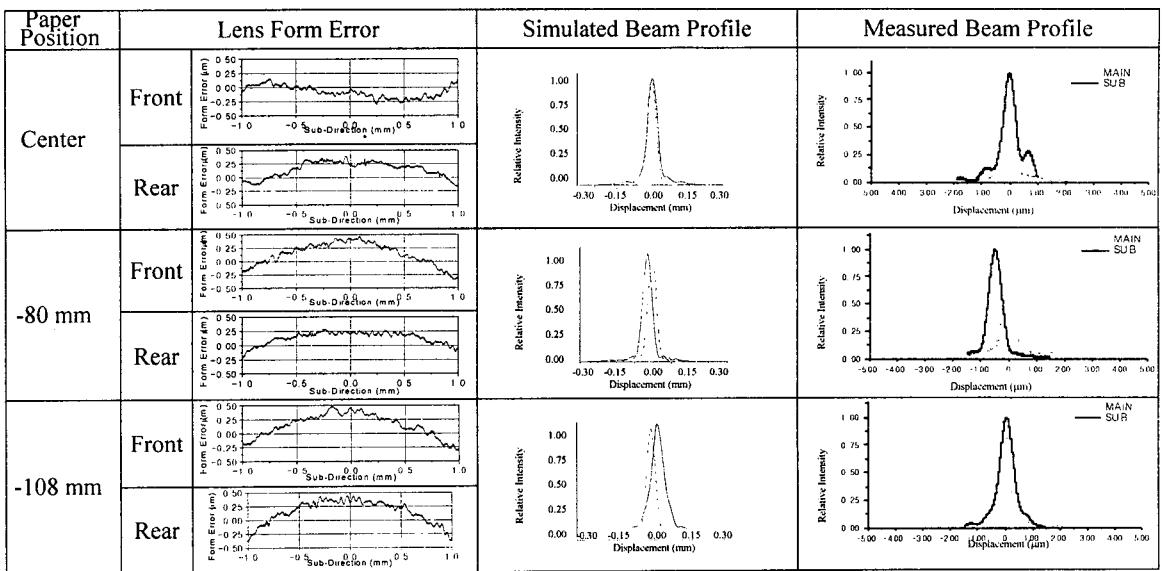


Fig. 6 Simulated Beam Profiles and Measured Beam Profiles

위상이 $\pi/4$ 일 경우 사이드 로브의 위치가 중심쪽으로 들어오는 것을 알 수 있으며, 위상이 $\pi/2$ 일 경우 형상오차가 좌우 대칭이 되기 때문에 빔형상도 좌우 대칭으로 센터로브가 커지는 것을 알 수 있다. 위상을 $3\pi/4$, π 로 증가시키면 사이드 로브가 좌측에 발생하는 것을 볼 수 있다. 여기서, 렌즈의 형상오차가 좌우 비대칭일 경우, 비대칭 방향으로 사이드 로브가 발생함을 알 수 있다.

이상의 결과에서, 드럼결상면의 빔형상에서 센터로브가 증가하면, 렌즈의 형상오차가 설계값에 비하여 좌우 대칭형으로 되어 있다는 것을 알 수 있다. 그리고, 사이드 로브 형태의 빔형상은 렌즈 표면에 있는 좌우 비대칭형의 형상오차에 기인함을 알 수 있다.

4.3 렌즈 측정결과를 이용한 비교실험

실제 성형사출 플라스틱 렌즈의 형상을 측정하여 모의실험을 통하여 빔형상을 구하였으며, 빔스캔 장비를 이용하여 실제의 빔형상을 측정한 후 결과를 비교하여 Fig.6에 나타내었다. 화상기준으로 렌즈의 주주사방향으로 중심, -80 mm, -108 mm에 해당되는 위치의 부주사 빔경을 비교하였는데, 입/출사면의 렌즈형상이 전체적으로 설계값에 비하여 수축되어 있어서, 센터로브가 증가한 형태의 빔형상이 나타남을 알 수 있으며, 모의실험결과와 측정결과가 유사함을 확인할 수 있다.

5. 결 론

$f\theta$ 렌즈의 표면형상오차와 빔형상과의 연관성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) $f\theta$ 렌즈의 형상오차를 입력하여 CODE V에서 광학적 성능 분석 방안을 제시 하였다.
- (2) 표면 형상오차의 진폭이 커지거나, 주기가 작아지면 빔경의 크기가 증가한다.
- (3) 빔 형상중 센터로브는 좌우 대칭형의 렌즈 표면 형상오차에 의한 촛점거리의 변화에 기인하는 것이며, 사이드로브는 렌즈 표면의 좌우 비대칭 형상오차에 기인하는 것이다.
- (4) 실제 렌즈의 표면형상과 빔 형상을 측정하여 모의실험의 유효성을 입증하였다.

참고문헌

1. Takanori,H., Takesuke,M., and Yoshio,A., "Laser scanning optical system with plastic lenses featuring high solution," SPIE Color Hard Copy and Graphic Arts, Vol. 1670, pp. 404 - 415, 1992.
2. Motonobu,Y., Yoshiharu,Y., Shoji,N. and Hironori,N., "Optical Scanning Unit with Bi-Anamorphic Lens for Beam Shaping," Matsushida National Technical Report, Vol. 39, pp. 425 - 432, 1993.
3. Juergens,R.C., CODE V Prompting Guide, Optical Research Associates, 1995.