

◆ 특집 ◆ 초정밀가공기술

선명한 주변시를 가진 근시용 비구면 안경렌즈 설계와 초정밀 가공 특성

Design of Myopic Aspherical Ophthalmic Lenses with Peripheral Clear Vision and Properties of Its Ultra-Precision Machining

김동익¹, 허명상¹, 이길재¹, 박순섭², 원종호³, 김건희^{1,✉}
 Dong-Ik Kim¹, Myeng-Sang Huh¹, Gil-Jae Lee¹, Soon-Sub Park²,
 Jong Ho Won³, and Geon Hee Kim^{1,✉}

¹ 한국기초과학지원연구원 (Korea Basic Science Institute)

² 한국생산기술연구원 (Korea Institute of Industrial Technology)

³ 충남대학교 기계공학과 (Div. of Mechanical Engineering, Chung-Nam Univ.)

✉ Corresponding author: kgh@kbsi.re.kr, Tel: 042-865-3460

Manuscript received: 2012.10.18 / Accepted: 2012.10.24

Oblique astigmatism according to the rotation of the eye has to be removed for obtaining peripheral clear vision in ophthalmic lenses. For this reason, we calculated tangential and sagittal power using third-order approximation theory and then controlled conic constant for the difference of the two powers to converge to 0 regardless of the rotation angle of the eye. As a result, an aspherical ophthalmic lens without oblique astigmatism was designed. Also, we found optimal machining condition to the lens material using factorial design and finally fabricated the designed lens through ultra-precision machining with that condition.

Key Words: Third-Order Approximation (3 차 근사), Oblique Astigmatism (비점수차), Factorial Design (요인배치법), Ultra-Precision Machining (초정밀가공)

기호설명

T' = tangential vergence

S' = sagittal vergence

L = on-axis object vergence

L_2' = inverse of the distance from the lens to the center of the rotation of the eye

y = height of the off-axis chief ray

θ = angle of rotation of the eye

1. 서론

비구면 렌즈 광학계는 구면수차를 제거하여 초점의 집광 능력을 향상시키고 여러 개의 복잡한 렌즈 구성을 단순화시켜주는 장점을 가져 광학 산업 전반에 걸쳐 수요가 급격히 증가하고 있다. 이에 안광학 분야에서도 비구면 렌즈가 주는 여러 가지 혜택인 구면수차 제거, 렌즈 두께의 감소로 인한 경량화, 그리고 미려한 외관으로 인하여 점차 비구면 렌즈의 설계가 중요해지고 있다. 최근에는 3 차 근사에 입각한 수차 이론과 비구면을 이용하여 안경렌즈의 주변부에서 발생하는 비점수차의 특성을 분석한 연구가 Atchison¹ 과

Miks² 등에 의해 수행되었다. 본 연구에서는 이러한 선행연구를 기반으로 구면을 가진 안경렌즈를 통하여 비축 방향으로 물체를 바라볼 때 발생할 수 있는 비점수차 량을 정량적으로 분석하였고 이를 반영하여 비점수차를 최소화할 수 있는 렌즈 면의 곡률반경과 원추상수(conic constant)를 구했다. 그 결과, 비점수차를 보정하여 선명한 주변시(peripheral vision)를 줄 수 있는 근시용 안경렌즈를 설계하였다. 그리고 이 설계 값을 가지고 직접 렌즈를 가공하여 그 결과를 분석하였다. 본 연구에서는 안경렌즈 설계와 고굴절 안경렌즈 소재에 대하여 실험계획법을 이용한 최적절삭 조건을 찾아 비구면 안경렌즈를 초정밀 가공하였다.³

2. 비구면 안경렌즈 설계

2.1 비점수차 이론

안경렌즈를 설계할 때 반드시 고려해야 할 것은 주변시를 볼 때 생기는 비점수차의 영향이다. 이것은 곡률을 가진 렌즈에서 필연적으로 나타날 수 밖에 없는 제한 요소인데 이것을 제거하기 위해 3 차 근사(third-order approximation)에 입각한 방정식을 통해 비점수차 량을 계산하고 이것을 최소화할 수 있는 곡률반경과 원추상수를 찾고자 한다. 그림 1 은 회전하는 눈에 대한 3 차 근사 광선추적을 보여 주고 있다.

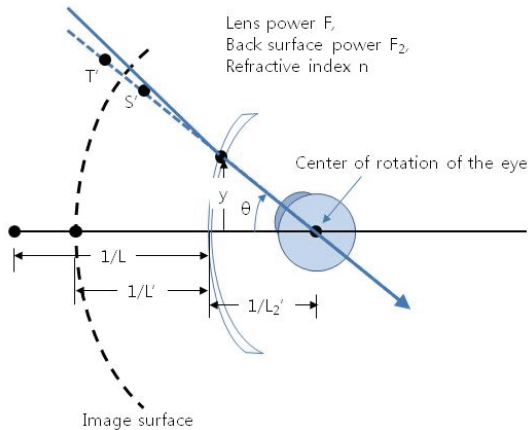


Fig. 1 Astigmatism according to the rotating eye

3 차 근사로부터 유도한 tangential 과 sagittal 방향에 대한 얇은 렌즈의 이미지 vergence S', T'은

각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S' &= L + F + y^2 P, \\ T' &= L + F + y^2 M \end{aligned} \tag{1}$$

여기에서 y 는 비축방향의 주광선(chief ray)의 높이이고 L 은 광축 상의 물체에 대한 vergence, F 는 렌즈 도수이고, P 와 M 은 다음과 같이 주어 진다.

$$\begin{aligned} P &= \frac{F}{n(n-1)^2} \left[F_2^2 \frac{(2n+1)}{2} + F_2 \left\{ \frac{-Fn(n+2)}{2} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{2L_2'(n^2-1)}{2} \right\} + \frac{\{Fn - L_2'(n-1)\}^2}{2} \right] \\ &\quad + \frac{K_1(F - F_2)^3 + K_2 F_2^3}{2(n-1)^2} \end{aligned} \tag{2a}$$

$$\begin{aligned} M &= \frac{F}{n(n-1)^2} \left[F_2^2 \frac{(4n+5)}{2} + F_2 \left\{ \frac{-Fn(n+2)^2}{2} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{2(3L_2' + 2L)(n^2-1)}{2} \right\} + \frac{F^2 n(n+2)}{2} \right. \\ &\quad \left. - FL_2'(n-1)(n+2) - FLn(n^2-1) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\{L_2'(2n+1)(n-1)\}^2}{2} + 2L_2'L(n-1)(n^2-1) \right] \\ &\quad + \frac{3\{K_1(F - F_2)^3 + K_2 F_2^3\}}{2(n-1)^2} \end{aligned} \tag{2b}$$

n 은 렌즈의 굴절률, F₂ 는 렌즈 뒷면의 표면도수, L₂' 은 렌즈와 눈의 회전 중심 사이의 거리의 역수, K₁, K₂ 는 각각 렌즈의 앞면과 뒷면의 원추상수이다. 따라서 tangential 과 sagittal 방향의 도수오차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta S' &= y^2 P \\ \Delta T' &= y^2 M \end{aligned} \tag{3}$$

(3)식으로부터 비점수차 OA(oblique astigmatism)는

$$OA = \Delta T' - \Delta S' = y^2 (M - P) \tag{4}$$

가 되고 (2a), (2b)식을 여기에 대입하면

$$OA = \frac{y^2 F}{n(n-1)^2} [F_2^2(n+2) + F_2 \{-F(n+2) + 2(L_2' + L)(n^2 - 1)\} + F^2 n - 2FLL_2'(n-1) - FLn(n^2 - 1) + 2L_2' L(n-1)(n^2 - 1)] + y^2 \frac{K_1(F - F_2)^3 + K_2 F_2^3}{(n-1)^2}$$

가 된다.

2.2 비구면 렌즈 설계

본 연구는 위의 (1)식부터 (5)식까지를 이용하여 비축 방향의 비점수차를 최소화하고 렌즈 두께가 주는 영향을 고려한 근시 교정용 렌즈를 설계하였다. 설계에 사용된 렌즈 재료는 굴절률 n_c 가 1.597 이고 Abbe 값이 42 인 1.60 Index Resin 을 사용했는데, 이 재료는 플라스틱이라 가볍고 높은 굴절률로 인하여 같은 도수라도 저 굴절률 렌즈 보다 두께를 더 얇게 만들 수 있어 경량화에 유리하다.

표 1 은 (5)식을 이용하여 도수 F 가 -4.00D 인 렌즈의 비점수차가 최소가 되는 설계 값을 보여주고 있다.

Table 1 -4.00D Ophthalmic lens specification

-4.00 D Lens			
n	1.597	L_2' (D)	+37.04
F_1 (D)	+6.44	K_1	0.00
F_2 (D)	-10.52	K_2	-0.05
L(D)	0	$y = \sin\theta/L_2'$	

여기에서 렌즈와 눈의 중심까지의 거리 $1/L_2'$ 는 일반적으로 알려진 27 mm 를 사용하였다. 표 1 과 같이 앞면은 구면이고 뒷면은 K_2 가 -0.05 인 긴 타원체면(prolate ellipsoid)일 때 렌즈 주변부의 비점수차가 최소가 되는 결과를 얻었고 Fig. 2 는 Table 1 을 이용하여 눈의 회전각에 따른 tangential 과 sagittal 방향의 도수오차를 보여주고 있다.

설계 결과에 따르면 눈의 회전 각도에 따른 tangential 과 sagittal 방향의 도수변화 dT 와 dS 는 40°에서 약 0.2D 가 되는데 보통 사람이 눈을 돌려 보는 각이 20° 미만인 것을 감안하면 주변부의 변화가 약 0.05D 로 상당히 만족할 만한 수준이다. 각도에 따른 비점수차 OA 는 dT 와 dS 의 차이

로 40°에서 최대 비점수차가 0.003D 로 거의 0 에 가깝기 때문에 이 렌즈에 대해서 OA 는 제거되었다고 볼 수 있다.

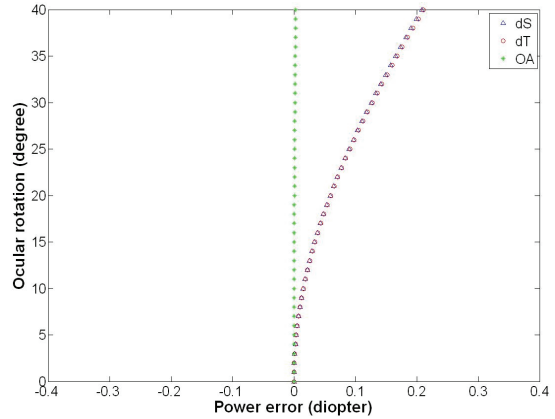


Fig. 2 Minimized oblique astigmatism according to ocular rotation

다음으로 할 일은 비점수차가 제거된 -4.00D 렌즈의 단면을 구해야 한다. 이것은 비구면 렌즈 방정식을 이용하는데, 비구면에 대한 sag 방정식⁴ 은 다음과 같다.

$$z_i = \frac{C_i y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K_i) C_i^2 y^2}} \tag{6}$$

여기에서 $i = 1, 2$ 로 1 은 렌즈의 앞면, 2 는 뒷면을 각각 나타낸다. 그리고 C_i 는 렌즈의 곡률로 곡률 반경 R_i 의 역수이다.

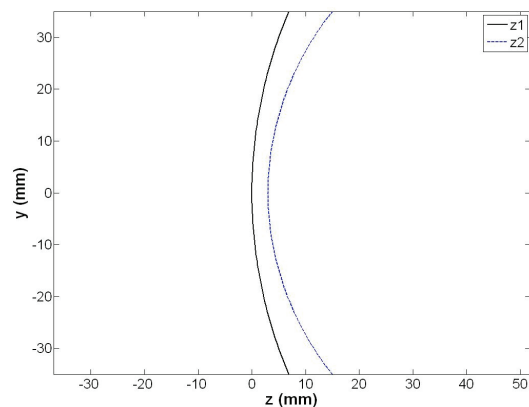


Fig. 3 Cross section of -4.00D lens

Fig. 3 은 (6)식과 아래 Table 2 를 이용하여 그린 렌즈의 단면으로 렌즈의 중심축으로부터 ±35 mm까지의 y 의 변화에 대한 z 값을 산출하여 그린 것이다. Table 2 는 Table 1 에 따른 렌즈의 설계 값으로 Dia.는 렌즈직경, R₁ 과 R₂ 는 각각 앞면과 뒷면의 곡률반경이고 T_c는 렌즈의 중심두께이다.

Table 2 -4.00D Lens design parameters

-4.00 D Lens			
Dia.(mm)	70	K ₁	0.00
R ₁ (mm)	92.701 ± 0.05	K ₂	-0.05
R ₂ (mm)	56.755 ± 0.05	T _c (mm)	3.00 ± 0.05

3. 비구면 안경렌즈 초정밀 가공특성

3.1 실험장치

Fig. 4 는 본 실험에 사용한 초정밀 자유곡면 가공기 Freeform 700A (5-axis freeform generator)를 보여준다. 다이아몬드 터닝 머신은 선삭의 경우 최대 ø700 mm, 연삭의 경우 ø400 mm 까지 가공이 가능하다.

표면거칠기 측정장비는 비접촉식 표면형상 측정기 NT2000 을 사용하였으며 측정기의 측정범위는 최대 100 mm×100 mm이며, 높이방향 측정범위로는 0.1 nm~150 μm, 분해능은 0.1 nm이고 auto-focusing 타입이다. 비구면 형상 측정은 초고정도 3 차원 표면형상측정기(ultra high accuracy 3-D profilometer) UA3P 를 이용하였다.



Fig. 4 Freeform 700A (5-axis freeform generator)

3.2 실험방법

앞서 설계한 -4.00D 렌즈의 초정밀 최적절삭조건을 찾기 위해 실험계획법 상의 Kn 요인배치법을 이용하여 실험 테이블을 작성하였다. Table 3 에 보여주듯이 표기한 각각의 인자들을 3 수준으로 하여 각각의 변화에 따른 표면 거칠기를 MINITAB

의 분산분석기법을 이용하여 평가하였고 이것이 초정밀 절삭가공에 미치는 영향을 분석하였다.

Table 3 Experimental condition

Item	Cutting condition
Work piece	-4.00D Lens
Cutting speed (m/min)	86, 102, 126
Feed rate (mm/min)	3, 5, 10
Depth of cut (μm)	1, 5, 10
Tool rake angle	-10° -15° -25°
Nose radius (mm)	0.8
Cutting fluid	Mist

4. 실험결과 및 고찰

4.1 표면거칠기 측정에 관한 잔차플롯

Fig. 5 는 -4.00D 렌즈 절삭 후 특성치에 대한 잔차분석을 나타내고 있다. 그림에서 잔차 정규확률도는 잔차의 정규성을 검토하는 것으로, 잔차가 정규분포를 따르면 이 플롯의 점들이 일반적으로 직선 형태를 이루어야 한다. 정규성 그래프에서 점들이 직선에 위치하므로 잔차의 분포상태는 정규분포를 보이고 있다. 잔차 대 적합지에서는 변동의 특별한 이상이 없음을 나타내고 있다. 히스토그램 역시 잔차의 정규성을 검토하는 것으로써 평균값을 기준으로 좌우 대칭의 종모양을 이루면 정규분포를 따른다고 말할 수 있으며, 잔차 대 데이터 순서는 모든 잔차를 데이터 수집 순서로 표시한 것인데, 특히 시간과 관련된 효과가 랜덤하지 않은 오차를 찾는 데 사용할 수 있는 것으로 특이점을 찾을 수 없었다.

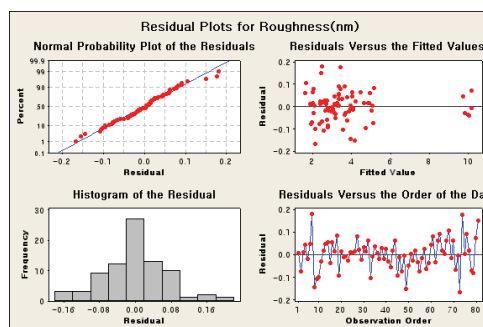


Fig. 5 Residual model diagnostics for surface roughness

4.2 주 효과에 의한 표면거칠기 영향

Fig. 6 은 표면 거칠기 측정값에 대한 주 효과의

크기를 비교하기 위하여 분산 분석한 그래프이다. 표면 거칠기에 영향을 미치는 인자로는 이송속도가 가장 큰 것으로 판단 할 수 있다. 실험결과 윗면 경사각 -25°, 절삭속도 102 m/min, 이송속도 3 mm/min, 절삭깊이는 1 μm 일 때 양호한 표면거칠기 Ra 1.24 nm를 얻을 수 있었다.

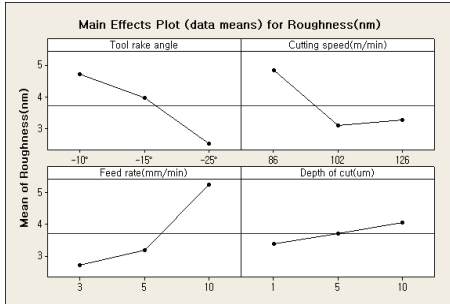


Fig. 6 Main effects plot for surface roughness

4.3 교호작용에 의한 표면거칠기 영향

Fig. 7 은 -4.00D 렌즈의 초정밀 가공특성을 4 가지 요인을 바탕으로 교호작용에 의해 표면거칠기에 미치는 영향을 그래프로 나타낸 것이다. 표면

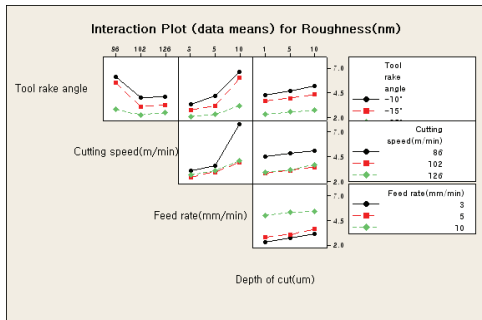


Fig. 7 Interaction plot for roughness

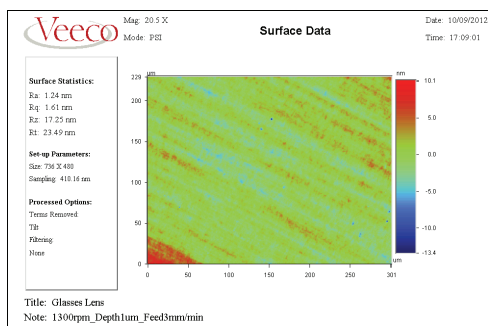


Fig. 8 Measurement of -4.00D Lens sample (NT 2000)

거칠기는 작을수록 좋기 때문에 각 요인들의 낮은 수준을 최적조건으로 선택할 수 있었다. 각 조건들을 조합했을 때 공구윗면경사각 -25°, 절삭속도 102 m/min, 이송속도 3 mm/min, 절삭깊이 1 μm 일 때 Fig. 8 에서 보이는 것처럼 양호한 표면 거칠기 Ra 1.24 nm를 얻었다.

5. 비구면 안경렌즈 초정밀 가공

본 연구에서는 실험을 통하여 얻어진 -4.00D 렌즈의 초정밀 최적가공조건을 이용하여 비구면 안경렌즈를 가공 하였다. -4.00D 렌즈의 천연 다이아몬드 초정밀가공은 국내에서는 처음으로 시도 되는 것으로 초정밀가공기와 초정밀도의 형상을 갖는 공구, 초정밀 지그를 필요로 하였다. Fig. 9 에서 보여주듯이 Freeform 700A 를 이용하여 직경 70 mm 의 비구면 안경렌즈를 가공 하였다.

표면거칠기는 표면 형상 측정기 NT 2000 을 이용해 측정하여 표면조도를 얻었고 가공된 렌즈의 형상 정밀도는 초고정도 3 차원 측정기인 UA3P 를 이용하여 측정 및 분석 하였다.

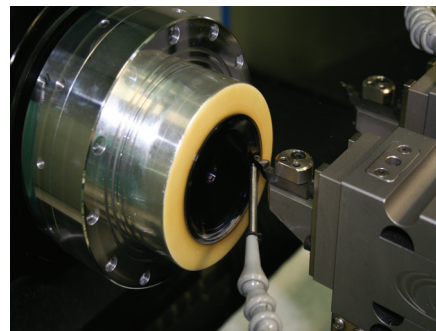


Fig. 9 Cutting of -4.00D aspherical ophthalmic lens

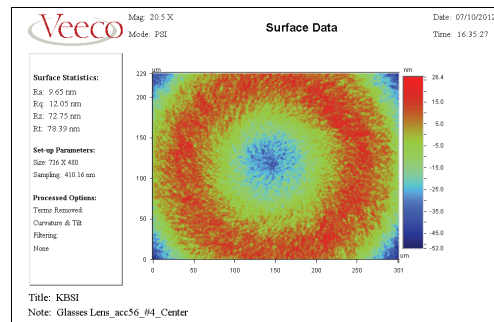


Fig. 10 Surface measurement data of -4.00D aspherical ophthalmic lens (NT 2000)

Fig. 10 은 초정밀 가공 후 NT2000 을 이용해 측정한 표면거칠기의 결과 값을 보여주고 있다. 그 결과 Ra 9.65 nm의 표면거칠기를 얻을 수 있었다.

Fig. 11 은 UA3P 로 렌즈의 형상을 측정 하는 모습이고 측정방식은 렌즈의 중심점을 시작으로 X-Y 방향으로 측정하였다. 그 측정 데이터로부터 Fig. 12 에서 보여주는 표면형상정밀도 PV 0.9532 μm 를 얻었다.

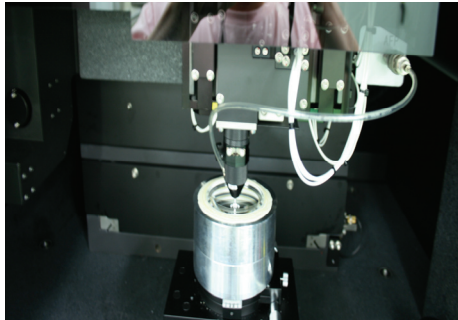


Fig. 11 Form accuracy measurement of -4.00D aspherical ophthalmic lens by UA3P

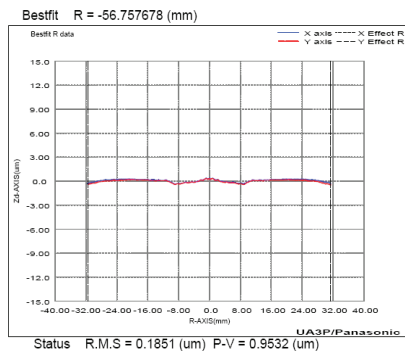


Fig. 12 Measurement result of -4.00D aspherical ophthalmic lens

6. 결론

본 연구에서는 3 차 근사를 이용해 비점수차량을 계산하고 비구면 정도를 결정하는 원추상수 K 를 조절하여 눈의 회전에 따른 주변시의 비점수차를 제거한 -4.00D 렌즈를 설계하였다. 또한 이 렌즈의 가공을 위해 렌즈 소재가 되는 1.60 Index Resign 의 초정밀 절삭특성을 파악하기 위하여 Freeform 700A 자유곡면가공기와 천연다이아몬드 공구를 사용하였다. 그리고 실험계획법의 완전요인

배치법을 이용하여 초정밀절삭조건(윗면경사각, 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이)에 따른 표면거칠기를 측정 및 분석하여 다음과 같은 초정밀가공 조건과 결과를 얻을 수 있었다.

1) -4.00D 렌즈 소재에 관한 초정밀 절삭특성을 통하여 표면거칠기에 대한 최적가공조건은 노우즈 반경 R 0.8 mm, 절삭속도 102 m/min, 이송속도 3 mm/min, 절삭깊이 1 μm 일 때 가장 양호한 표면거칠기 Ra 1.24 nm를 얻었다.

2) 위의 절삭조건을 이용하여 -4.00D 비구면 안경렌즈 가공했을 때 일반적인 안경렌즈의 형상정밀도 5 μm 보다 좋은 PV 0.9532 μm 를 얻었다.

참고문헌

1. Atchison, D. A., "Third-Order Theory of Spectacle Lenses Applied to Correction of Peripheral Refractive Errors," Optometry and Vision Science, Vol. 88, pp. E227-E233, 2011.
2. Mijs, A., Novak, J., and Novak, P., "Third-Order Design of Aspheric Spectacle Lenses," Optik, Vol. 121, pp. 2097-2104, 2010.
3. Yang, S. C. and Won, J. H., "Development of the Ultra Precision Machining of IR Material for Space Observation Optical System," J. of the KSPE, Vol. 27, No. 12, pp. 9-14, 2010.
4. Lee, D. H., "Program Development for Extracting the Numerical Data of Aspherical Surface for the Core Manufacturing of Ophthalmic Lens," J. Korean Oph. Soc., Vol. 12, No. 4, pp. 87-90, 2007.