

## 초소형 초광각 비구면 유리렌즈의 초정밀 연삭가공기술에 관한 연구

김두진\*, 유경선<sup>+</sup>, 현동훈<sup>++</sup>

(논문접수일 2010. 2. 24, 심사완료일 2010. 3. 22)

An Research on Ultra Precise Polishing Manufacturing Technology of Glass for  
Micromini and Super Wide-Angle Aspherics Glasses Lens.

Kim Doo-Jin\*, Yoo Kyung-Sun<sup>+</sup>, Hyun Dong-Hoon<sup>++</sup>

### Abstract

This research's goal is to process directly aspherics with big sagment and thin center thickness. If we can process directly aspherics with big sagment and thin center thickness, we think it greatly helps to reduce the time of developing optical system. We made very thin glass using diamond grinding whetstone regarding the trace of tool and the detailed drawing of tool super precise aspherics that has 0.46mm center thickness and over 30° segment, 0.1 $\mu$ m machining accuracy, 15nm surface accuracy.

We think this research's result will be effective to open new market because it is applied not only cell phone optical system but also CCTV robot optical system, internet phone optical system. Also we expect to enhance the super strong brittle precise process's possibility with super precise processing technique that achieves 0.46mm glass center thickness as first in the world.

**Key Words** : Super wide-angle(초광각), Aspherics glasses lens(비구면유리렌즈), Polishing manufacturing technology(연삭가공기술), Micromini(초소형), Diamond grinding whetstone(다이아몬드 연삭 슷돌)

\* 한국산업기술대학교 나노광공학과 박사과정 (kimdujin@yahoo.co.kr)

주소: 429-793 경기도 시흥시 정왕동 2121

+ 한국산업기술대학교 나노광공학과 석사과정

++ 한국산업기술대학교 나노광공학과 교수

## 1. 서론

초정밀광학제품의 초정밀가공기술은 플라스틱 금형이나 유리성형을 위한 금형의 코어(core)를 제작하는 경우에 대표적으로 적용되어 왔다. 최근에 가장 많이 적용되는 제품은 휴대폰의 광학계이다. 휴대폰 광학계의 단점으로는 대부분의 사람들이 휴대폰 카메라로 두 사람의 얼굴을 촬영하려면 머리를 가깝게 하여야 한다는 것을 알게 되었다. 이러한 현상은 휴대폰 광학계는 소형(∅3~4)이므로 광각이 60~70°에 국한되어 있기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 초소형이면서 광각이 100°인 초광각 광학계를 개발이 필요하다.

비구면 렌즈가 초광각기능을 가지기 위해서는 기존 렌즈보다 경사값(sagmet)이 커야하고, 중심 두께가 0.46mm이므로 금형 코어(core)제작 및 성형이 쉽지 않고 금형제작 및 성형 등의 시간과 비용이 많이 소요되므로 개발기간을 단축하기 위해 비구면 유리렌즈의 직가공이 필요하다.

기존 연구에서 유리가공은 주로 평탄도를 얼마나 좋게 가공하느냐에 대한 연구와 제품에 대한 연구에 치우쳐 있으며<sup>(1)~(6)</sup>, 본 연구와 같이 유리 직가공에 대한 연구는 전무한 상태이다.

따라서, 본 연구에서는 경사값이 크고, 중심두께가 얇은 유리렌즈의 직가공 방안을 제시하고자 하며, 본 연구가 성공하면 세계적인 휴대폰 초광각 광학계 시장에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

## 2. 관련이론

### 2.1 유리의 마이크로 크랙

유리렌즈는 비정질의 무기유리이므로 크기 10<sup>-5</sup>~10<sup>-3</sup>cm 정도의 영역에서 불균질성이 있다. 이것을 미상(micro phase)이라고 한다. 이 영역을 넘어서 큰 퍼짐의 응력장에서는 마이크로 크랙이 발생할 가능성이 크다. 즉 일정 응력 이상이 되면 미상 내에서 분자간의 전단응력 면을 따라 슬립이 일어나 소형변형 즉 크랙(crack)이 일어난다.

Hill의 반무한 구 셸(shell)이론<sup>(7)</sup> 중 항복응력과 유리의 소성변형 시작하는 점의 응력을 표시하면 다음과 같다.

$$H = \frac{2}{3} Y \left[ 1 + \frac{3}{3-\lambda} \cdot \ln \frac{3}{\lambda + 3\mu - \lambda\mu} \right] \quad (1)$$

$$= \frac{2}{3} Y(1 + BnZ)$$

여기서,  $\lambda = 6(1-2\nu) \cdot (Y/E)$ ,  $\mu = (1+\nu) \cdot (Y/E)$ 이며 BK7 유리에서는  $E \approx 70\text{GPa}$ ,  $H \approx 5.5\text{GPa}$ ,  $Y \approx 3.4\text{GPa}$ 이다. 유리 변형은 탄성파괴는 없고, 미상간의 점소성 슬립(slip)이 일어난다.

식 (1)에서 보는 바와 같이 본 연구의 재질인 광학용 유리인 BK7은 탄성변형이 작게 일어나므로 가능한 응력 집중이 적게 일어나도록 초정밀 가공하는 것이 중요하다.

### 2.2 비구면 방정식

비구면 렌즈를 이용하여 광학계를 구성할 경우 다음과 같은 이점을 얻을 수 있다. 첫 번째, 표면의 자유곡면을 이용하여 입사각의 크기를 증대시킬 수 있다. 두 번째, 입사각의 증대에 따른 보다 많은 광량 확보가 가능하다. 세 번째, 화각 확보에 따른 비점수차를 제거할 수 있다.

회전대칭형 비구면 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$z = \frac{cs^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2s^2}} + As^4 + Bs^6 + Cs^8 + Ds^{10} + \dots \quad (2)$$

여기서,  $s^2 = x^2 + y^2$ , c는 근축 영역에서의 곡률, k는 원추 곡면계수, 그리고 A, B, C 및 D는 4차, 6차, 8차 및 10차 비구면 계수이다. k의 값에 따라 여러 가지 형태의 원추곡면이 만들어진다. 즉, k=0(원), k=-1(포물면), -1<k<0(긴 타원체면), k>0(납작한 타원체면) 및 k<-1(쌍곡면)이다.

Fig. 1은 구면 렌즈에서 발생하는 구면 수차를 비구면 렌즈로 대신하여 보정한 것이다.

Fig. 1과 같이 비구면 광학계를 채택하면 초광각 광학계에서 렌즈 매수를 줄일 수 있으므로 본 연구에서도 비구면 광학계를 채택하게 되었다.

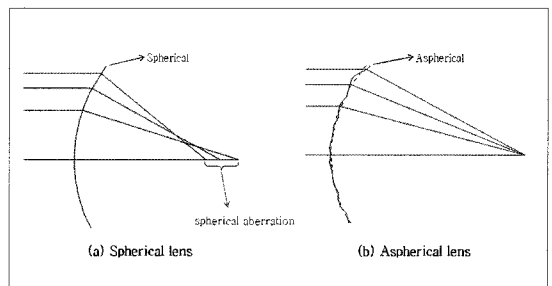


Fig. 1 Spherical & aspherical Lens

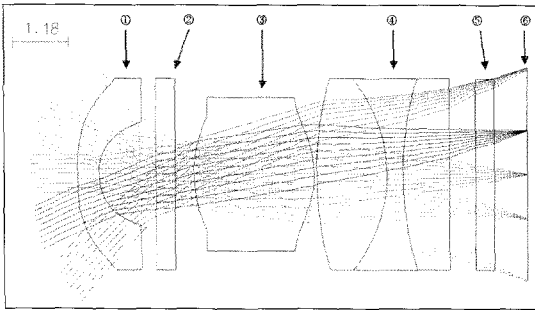
### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1. 광학설계와 해결과제

렌즈설계는 OSLO(Optics Software for Layout and Optimization of optical system)를 이용하여 설계하였다. Fig. 2는 OSLO를 이용해 초광각렌즈의 조립 모습을 설계한 것이다. 비구면 유리렌즈 1매, 비구면 플라스틱 렌즈 1매, 구면 유리렌즈 3매로 구성되어 있다.

광학설계의 특징은 중심축의 두께가 0.46mm이며 경사부의 경사값(sagment)이 30°이상이 되지 않으면 초광각렌즈로서 기능이 불가능하다.

Fig. 3은 본 연구에서 직접 가공하고자 하는 제 1 비구면 렌즈의 설계데이터이다. 그림에서 제 1 비구면 렌즈의 오목면인 R1의 세그(sag)는 0.803133cm이고 볼록면이 R2의 세그(sag)는 0.899512cm이나 이것은 설계상의 직선거리의 값



① First aspherical lens ② Filter ③ Second aspherical lens  
④ Spherical cemented lens ⑤ C/G(CoverGlass) ⑥Sensor

Fig. 2 Lens design

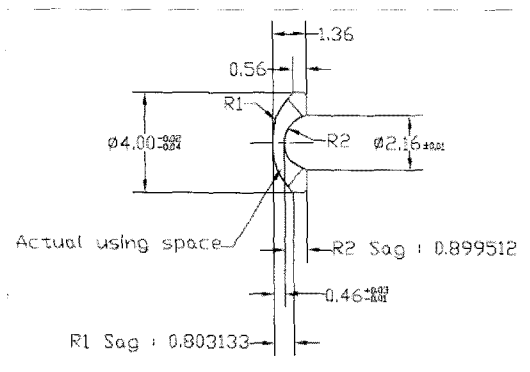


Fig. 3 First aspherical lens design

이고 실제 비구면 상의 최외각 경사부의 세그먼트는 R1면에서 48.8°, R2면에서 71.5°이다.

초광각렌즈의 설계사양을 보면 초정밀 가공 측면에서 현재까지 기술로는 두 가지 측면에서 어렵다. 하나는 유리렌즈의 외곽부보다 중앙부로 갈수록 렌즈 두께가 얇아지며, 중심부에서 0.46mm이라는 점이다. 일반적으로 0.46mm는 우리가 주로 사용하는 샤프심 0.5mm보다 얇기 때문에 초정밀 가공 중에 깨지기 쉽다. 또 하나는 초광각의 특징상 렌즈 오목·볼록면의 세그값이 0.8cm 이상 되어 기존 초정밀 가공방법으로는 공구간섭문제를 쉽게 해결하지 못하여 고정사각 가공이 어렵다.

따라서, 본 연구는 이 두 가지 문제를 해결하는데 주안점을 두고 연구를 진행하였으며, 수많은 실패와 시간이 소요될 수밖에 없었다.

#### 3.2 실험장치 구성

초정밀 가공에 이용되는 장비는 비구면 렌즈의 표면가공과 몰드의 코어 가공을 구현시키기 위한 초정밀연삭 및 절삭가공장비이다. 구동장치는 리니어 스케일 피드백 계측제어 방식의 동시 4축(X, Y, Z, C)제어 다이아몬드 초정밀선반(DTM, 도시바LG100H3)을 사용하였다. 아래 Fig. 4는 가공장비 본체 사진이다.

Fig. 5는 사축연삭 가공 장면이다. 장비의 X, Y, Z, C 좌표축의 방향성을 나타내며 모두 4개의 좌표를 갖는다. 즉, X, Y, Z의 3차원 공간좌표를 가지며 주축대의 회전이 C축으로 적용된다.

본 연구에서는 형상 측정을 위하여 고정도의 3차원 측정

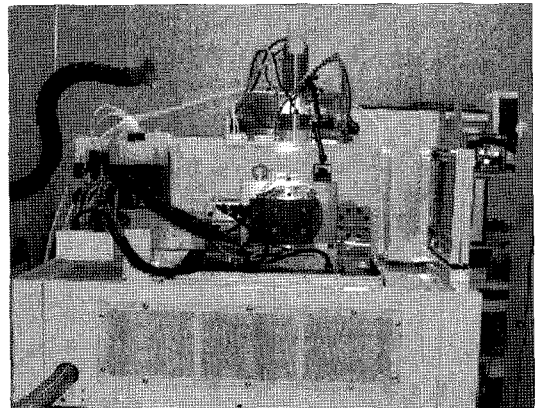
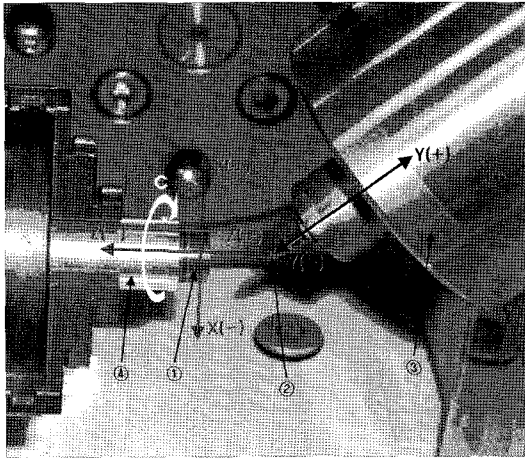


Fig. 4 Diamond turning machine(DTM)



① Core                      ② Polishing wheel  
③ Tools Spindle        ④ Work Spindle

Fig. 5 DTM Manufacturing(4-shaft)

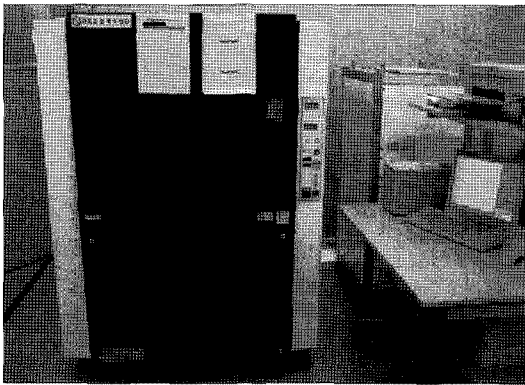


Fig. 6 UA3P(Ultra-high Accuracy 3D Profilometer)

기를 사용하였다. Fig. 6은 3차원 측정기인 일본 Panasonic 사의 Ultrahigh Accurate 3-D Profilometer(UA3P)이다.

### 3.3 실험방법

초정밀연삭가공의 대상물은 광학용 유리인 BK7을 사용하였다. Table 1은 렌즈 재질들의 화학적 성질(Chemical Properties)을 비교한 것인데 물, 산, 기후에 변화에 따른 안정성을 수치화 한 것이다. 그 수치는 1이 가장 이상적인 수치이며 그 중 BK7이 가장 적합한 소재이다. Table 2는 광학용 유리의 기계적 성질(Mechanical Properties)을 비교한 것이다. 그 중 누프 경도(Knoop Hardness)는 550~650Hk 사이의 수치가 가장 이상적인 경도를 유지한다. 수치가 550Hk보

Table 1 Chemical properties [SUMITA optical glass data book(2007)]

	PSK2	FK5	BK7	SK9	KF6
Water Resistance, RW	3	4	2	1	1
Acid Resistance, RA	4	5	1	4	3
Weather Resistance, DW	2	2	1	1	2

Table 2 Mechanical properties [SUMITA optical glass data book(2007)]

	PSK2	FK5	BK7	SK9	KF6
Knoop Hardness, Hk	554(6)	531(5)	589(6)	501(5)	472(5)
Vickers Hardness, Hv	556	582	587	514	470
Abrasion, Ha	110	110	100	140	110
Young's Modulus, E(108N/m <sup>2</sup> )	859	605	799	779	622
Modulus of Rigidity, G(108N/m <sup>2</sup> )	347	244	330	307	258
Poisson Ratio, $\sigma$	0.239	0.241	0.209	0.267	0.207

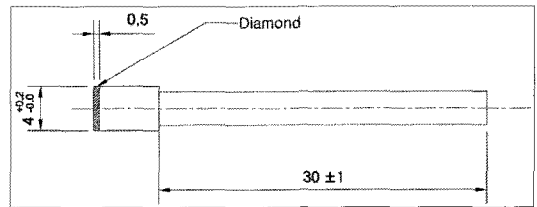


Fig. 6 Diamond polishing whetstone drawing

다 낮으면 재질의 특성이 연하여 표면 스크래치가 많이 발생하고 650Hk보다 크면 재질특성이 너무 강하여 원하는 면을 가공하는데 연삭이 힘들어진다. 마멸(Abrasion)은 100Ha가 기준이며 BK7은 그 기준을 이루고 있다. 기계적 성질만 보았을때 PSK2와 BK7은 큰 차이를 보이지 않으나 화학적 성질을 비교하였을 때는 BK7이 더 안정된 소재인 것을 알 수 있다. 또한 시장 구입할 수 있는 소재 중에서 BK7이 표준으로 쓰이고 있으며 실험 시에도 가장 많이 사용되고 있다.

BK7을 황삭가공시 초정밀연삭가공 여유를 두고 유리연삭기로 가공하였다. 가공여유는 150 $\mu$ m를 두었다. 연삭숫돌(Fig. 6)은 메탈접착제를 이용한 원통모양의 소경축 내장 다이아몬드 숫돌로 연삭숫돌 입자는 CVD(화학 기상 합성 다이아몬드)를 사용하였으며, 초정밀연삭면의 경사가 심하므로 연삭간섭을 피하기 위해 막대형 연삭숫돌을 사용하였다.

숫들의 직경은  $\varnothing 4$ 이고 두께는 0.5t이며, 샹크는 직경이  $\varnothing 3$ , 길이가 30mm인 초경합금을 사용하였다.

렌즈는 투과 또는 빛을 모으거나 반사시키는 역할을 하므로 렌즈 표면의 형상정밀도는 렌즈의 성능에 큰 영향을 미친다. 따라서, 성형된 렌즈의 형상 측정은 매우 중요하다. 비구면의 형상 및 표면 측정 장비로서 본 연구에서는 형상 측정을 위하여 고정도의 3차원 측정기(UA3P)를 사용하였다. UA3P는 AFP를 기본으로 내장하고 있어 비구면 측정에 유리하며, 수직의 프로브(Probe)로 인해 측정시 렌즈 형상의 간섭을 최소화 시킬 수 있는 것이 특징이다. 또한 특수한 스타이러스(Stylus)를 추가할 경우 더욱 미세한 형상을 측정할 수 있다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 Jig 정밀도에 의한 취성균열의 방지

실험장치의 Fig. 5에서 표시한 경사 연삭가공이 가능한 특수 장치와 공구에 의해 세그값이 큰 유리렌즈를 초정밀 연삭 가공하였다.

Fig. 7 (a)에서 보는 바와 같이 주축과 수평방향으로 초정밀연삭을 하는 경우가 대부분이다. 이러한 방법은 세그값이 작은 가공에는 문제가 없으나 세그값이 큰 경우에는 초정밀 광학계가 요구하는 형상정도 0.2 $\mu$ m이내를 유지하기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 Fig. 6 (b)와 같이 45°로 경사축을 가진 공구대를 이용하여 초정밀연삭가공을 하므로써 세그값이 큰 유리렌즈가공 방식을 채택하였다.

Fig. 8에서 표시한 바와 같이 Jig의 형상정도가 0.5 $\mu$ m, 1 $\mu$ m, 3 $\mu$ m, 4 $\mu$ m, 5 $\mu$ m일 경우 중심두께에서 취성균열이 일어

나는 두께를 측정하였다.

본 연구의 목적인 초광각렌즈의 중심두께가 0.46mm이므로 Jig의 형상정도는 0.5 $\mu$ m로 하여야 한다는 것을 알 수 있었다. 이것은 유리와 Jig사이의 틈이 발생하면 연삭가공시에 걸리는 집중하중을 받아 취성균열이 발생하여 연삭가공 중에 유리가 깨지기 때문이다. 따라서, Jig의 형상정도는 유리의 얇은 두께 연삭가공시 매우 중요함을 알 수 있다.

##### 4.2 초정밀 가공 Tool의 선정

다이아몬드공구로 유리 렌즈를 가공하는 경우 유리의 렌즈의 중심두께가 1.5~2mm인 경우에 취성균열이 일어나 본 연구 목적인 중심두께 0.46mm의 가공에는 적합하지 못하였다. 이러한 경우의 취성균열은 다이아몬드공구(Fig. 9) 날 끝 반지름의 크기가 유리에 탄성스트레인을 발생시켜 Hertz 크랙을 발생시키기 때문에 발생한 것이다. 공구 날 끝을 아무리 작게 하여도 다이아몬드공구로는 탄성스트레인을 제거할 수 없었다.

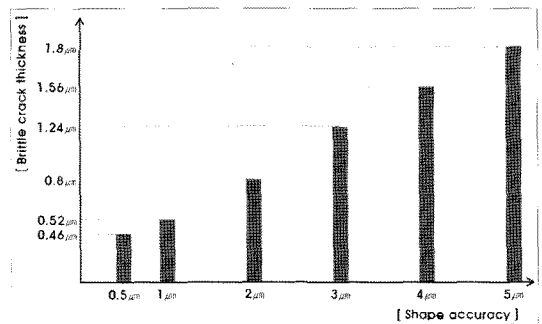
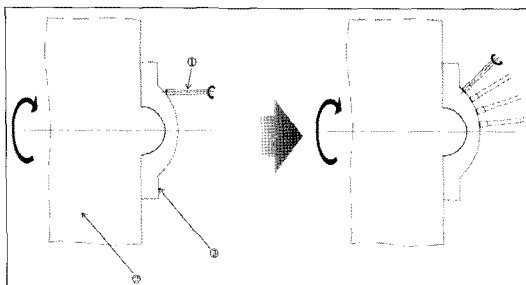


Fig. 8 Shape accuracy & Brittle crack thickness



① Diamond wheel ② Jig ③ Core  
(a) General manufacturing (b) 4-shaft concurrent control manufacturing

Fig. 7 Sag value solution

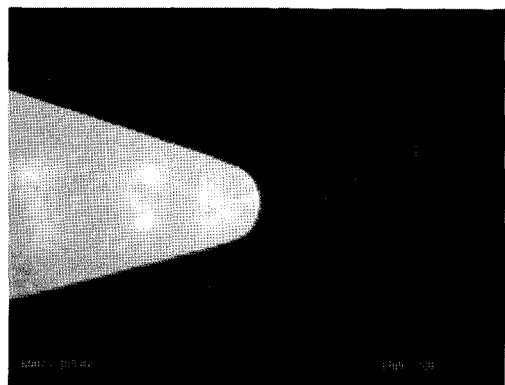


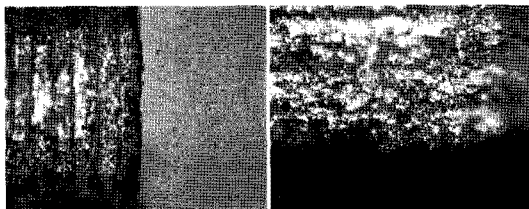
Fig. 9 Expand photo of existing diamond Tool

따라서, 소성스트레인에 의한 가공을 하기 위해 다이아몬드 연삭숫돌(Fig. 10)을 사용한 결과 중심두께 0.46mm 까지 연삭가공을 할 수 있었다. 이것은 연삭숫돌의 다인절삭날에 의해 가공력을 분산하기 때문에 탄성스트레인이 일어나기 전에 소성스트레인에 의해 연삭이 일어나므로 취성균열 없이 가공이 가능하였다. 단 초미립 연삭입자의 연삭숫돌을 가공하기 때문에 가공시간이 많이 걸릴 수밖에 없으므로 환삭, 중삭, 정삭 가공 시 연삭숫돌의 종류 선택에 주의해야 한다.

### 4.3 연삭조건의 선정

연삭가공시 유리의 취성을 고려하여 특수한 초정밀 형상 및 정도를 가진 지그(Jig)를 사용하였다. 유리렌즈의 볼록면은 일반지그를 사용한 후 마지막 오목면은 특수 지그를 사용하여 유리렌즈의 응력집중을 최소화하였다.

연삭깊이는 0.01~0.1 $\mu$ m, 이송은 0.5~1 $\mu$ m/min으로 하여 연삭력이 가능한 적계 걸리도록 하였으나 연삭가공 중에 지그문제로 가공에 실패하고, 연삭 조건 때문에 가공에 실패하기도 하는 많은 시행착오를 거쳤다.



Diamond polishing whetstone(300X)      Diamond polishing whetstone particle(600X)

Fig. 10 Diamond polishing whetstone magnify photo

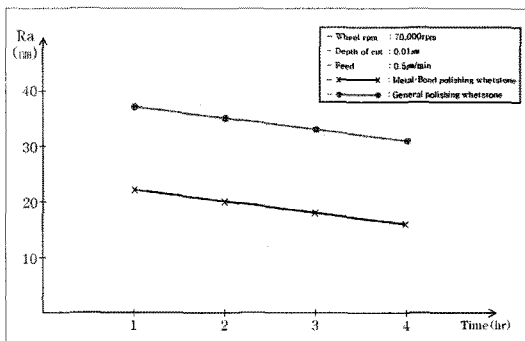
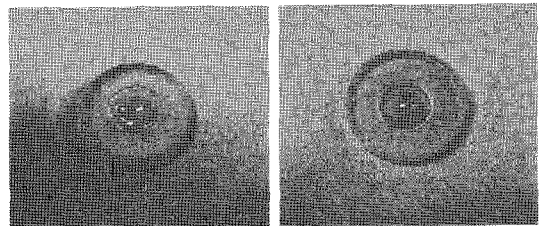


Fig. 11 Polishing whetstone bonding agent and surface quality

다이아몬드 연삭숫돌을 Fig. 11과 같은 결과를 얻어, 높은 지지력을 가진 메탈 숫돌을 사용하였다. 메탈 연삭숫돌은 다른 연삭숫돌에 비해 연삭숫돌입자 지지력과 지지 강성이 높아 연삭숫돌입자의 탈락이 쉽게 일어나지 않는다면 결합제의 탄성변형도 최소화 할 수 있어 초정밀연삭가공에 적합한 것으로 나타났다. 연삭조건은 연삭깊이 0.01 $\mu$ m, 연삭이송 0.5 $\mu$ m/min 연삭숫돌회전은 10,000rpm으로 가공한 결과 우리가 깨지지 않고 박막의 유리렌즈 가공할 수 있었다. 중심 두께가 얇아질수록 깊이를 더욱 작게 하여 연삭력을 최소화 하고자 하였으며, 연삭이송을 반대로 크게 하였다.

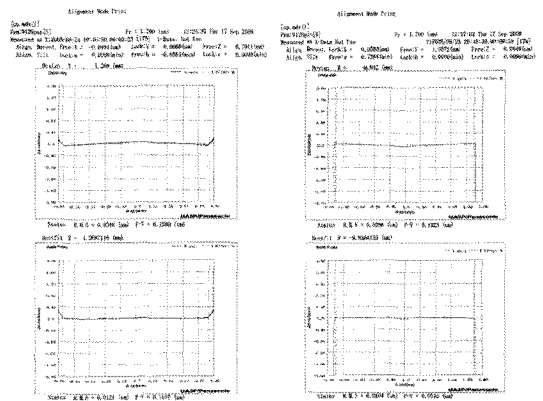
### 4.4 연삭 후 측정값

Fig. 12는 가공 유리렌즈 사진이며 Fig. 13은 UA3P로 초광각렌즈를 측정한 데이터이다. 초광각렌즈의 볼록면 비구면과 오목면 비구면의 형상정도와 표면정도의 값이 형상정도 0.1 $\mu$ m, 표면정도 15nm가 나왔다. (b) 볼록면 비구면의 최외각은 경사값이 매우 커 가공은 가능하나 측정이 불가능



(a) Concave aspherical      (b) Convex aspherical

Fig. 12 First aspherical glass lens



(a) Concave aspherical      (b) Convex aspherical

Fig. 13 UA3P measurement data

하므로 위와 같이 최외각이 무너지는 그래프가 나오게 되었다. 하지만 붉은 점선부분이 기존 카메라 폰으로 얻을 수 있는 화상 영역이므로 본 연구 결과 초광각의 화상을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

## 5. 결론

초광각 초정밀 비구면 유리렌즈의 초정밀 연삭가공기술에 대한 광학설계, 톨링, 유리연삭가공 및 측정을 한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 기존 휴대폰 카메라의 광각인 65~70°보다 넓은 100°의 초광각 광학설계를 하고 해석을 하였다.
- (2) 중심두께 0.46mm, 경사값(sagmet)이 30°이상인 광학용 유리를 초정밀 Jig와 소형 메탈계 다이아몬드 연삭숫돌을 이용하여 연삭하였다.
- (3) 연삭조건은 연삭깊이 0.01 $\mu$ m, 연삭이송 0.5 $\mu$ m/min 연삭숫돌회전은 10,000rpm으로 가공한 결과 유리가 깨지지 않고 박막의 유리렌즈 가공할 수 있었다.
- (4) 초정밀 연삭 결과 형상정도 0.1 $\mu$ m, 표면정도 15nm를 얻어서 광학설계 허용치를 만족하였다
- (5) 초정밀 연삭가공으로 가공한 비구면 렌즈를 mock-up)용 광학계에 조립하여 성능을 평가한 결과 기존 휴대폰 광학계보다 넓은 광각 화상을 얻는 것을 알 수 있었다.

향 후 양산성을 위해 연삭조건을 좀 더 세밀하게 연구할 필요가 있으며, 본 연구 결과물은 휴대폰 초광각렌즈에 적용하기 위해 관계사와 협의 중이다.

휴대폰렌즈의 고화소 및 초광각 광학계를 광학설계를 검토하기 위해 mock-up 렌즈가 필요하다. 현재 기술로는 GMP 공정도 mock-up렌즈를 개발하여 최소 6개월 정도 소요되고 있다.

본 연구결과 1개월 내에 mock-up렌즈를 유리로 직접 가공하는 기술이 확보되어 관련 산업의 개발기간을 획기적으로

단축시키는데 기여할 것으로 보인다.

## 참고 문헌

- (1) Kohzo, A., Nobuo, Y., Masakazu, M., Junishi, Y., and Michimasa, D., "Development of Ultraprecision Grinding Equipment for Ductile Mode Grinding of Brittle Materials," 1993, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 58, No. 12, pp. 1985~1990.
- (2) Masakazu, M., "Ductile Mode Grinding Technology for Brittle Materials - The Way to Nanogrinding Technology," 1990, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 56, No. 05, pp. 782~787.
- (3) Hitoshi, O., "Electrolytic In-Process Dressing (ELID) Grinding Technique for Ultraprecision Mirror Surface Machining," 1999, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 59, No. 09, pp. 1451~1457.
- (4) Ohmori, H. and Nakagawa, T., "Mirror Surface Grinding of Silicon Wafers with Electrolytic In-Process Dressing," 1990, *Annals of the CIRP*, Vol. 39, No. 01, pp. 329~332.
- (5) Toshio, T., Hideo, Y., and Masami, M., "Precision Truing of Metal Bond Diamond Wheels by Lapping their Cutting Edges," 1993, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 59, No. 12, pp. 1979~1984.
- (6) Masakazu, M., "Unstable Vibration Analysis of Centerless Grinding System and Remedies for its Stabilization," 1993, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 40, No. 477, pp. 865~871.
- (7) Hill, R., 1950, *The mathematical theory of plasticity*, Oxford at the Clarendon Press, London, pp. 97~106.