

비구면 마이크로 렌즈 가공을 위한 초정밀 연삭 시스템 개발 및 가공 특성에 관한 연구

백승엽*(에이엠텍놀로지㈜), 인하대 대학원 기계공학과), 이해동, 김성철(에이엠텍놀로지㈜),
이은상(인하대 기계공학과)

A study on the development of ultra-precision grinding system and manufacturing properties
for aspheric surface micro lens

S. Y. Baek(Mechanical. Eng. Dept. INU, AM Technology Co.,Ltd),
H. D. Lee, S. H.Kim(AM Technology Co.,Ltd), E. S. Lee (Mechanical . Eng. Dept. INU)

ABSTRACT

As consumer in optics, electronics, aerospace and electronics industry grow, the demand for ultra-precision aspheric surface lens increases higher. To enhance the precision and productivity of ultra precision aspheric surface micro lens, The development of ultra-precision grinding system and manufacturing properties for the aspheric surface micro lens are described. In the work reported in this paper, an ultra-precision grinding system for manufacturing the aspheric surface micro lens was developed by considering the factors affecting the surface roughness and profiles accuracy. And this paper deals with mirror grinding of an aspheric surface micro lens by resin bonded diamond wheel and spherical lens of BK7. It results was that a form accuracy of $3 \mu\text{m}$ P-V and a surface roughness of $0.1 \mu\text{m} R_{\max}$.

Key Words : Contour accuracy(형상정밀도), Aspheric surface lens(비구면 렌즈), Surface roughness(표면 거칠기), Truing(트루잉), Form error(형상오차), Grinding system(연삭 장치)

1. 서론

비구면의 반사경이나 렌즈는 광학적인 수차를 보정할 수 있기 때문에 최근 그 사용이 늘어나고 있다. 또한 렌즈의 매수를 줄여 경박 단소한 제품 제작이 가능하기 때문에 광학, 정보 기기 디바이스에 탑재되고 있는 여러 종류의 광학렌즈에는 비구면 형상화 및 고정도화가 행해지고 있다⁽¹⁾.

구면 렌즈는 원리적으로 수차를 포함하고 있으며 이것을 제거하기 위하여 렌즈의 조합수를 늘리고 다중막 코팅 등을 통하여 성능 향상을 실현시켜 왔다. 그러나 비구면 렌즈 광학계는 초점집광 성능을 향상시켜 구면 수차를 제거하고 복잡한 렌즈 조합을 필요로 하지 않으며 높은 투과율이 얻어지는 등 많은 장점이 있다. 지금까지 비구면 광학부품에 대한 연구는 비교적 직경이 큰 렌즈를 대상으로 진행되어 왔으나 광학계의 마이크로화에 따른 마이크

로 비구면 광학 부품의 연구 및 개발의 중요성이 대두되고 있다⁽²⁾.

현재 비구면 렌즈를 생산하는 방법은 여러 가지로 개발이 되어 있다. 저가인 플라스틱렌즈의 정밀 사출기에서 사출하는 방법과 고신뢰도를 요구하는 제품에 적용되는 유리렌즈를 성형하는 방법이 있다. 유리성형기는 고온에서 금형에 의해 유리렌즈를 성형하기 때문에 금형의 수명이 문제가 되며 성형용 유리재질이 몇 가지로 한정되어 광학계 설계에 제약이 따르는 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해서 경쟁력 있는 비구면 유리 렌즈 가공 시스템 개발이 매우 높게 요구 되어 왔다. 비구면 렌즈 가공은 진동, 이송 정밀도, 공구의 형상 오차와 공구 경로는 비구면 렌즈 금형에서 잔류 공구마크가 남게 된다. 또한 렌즈의 소형화에 따라 연삭 공구가 급속하게 마멸되어 정밀 비구면 형상을 만들기 어려운 경우도 있다. 따라서 고정밀급의 비구면 형상

렌즈를 가공하는 경우 구면렌즈와는 다르게 공구를 비구면 궤적에 따라 운동시켜 가공할 수 있는 CNC 비구면 연삭기가 필요하며, 요구되는 렌즈의 정밀도에 따라서 가공기가 초정밀화 되어야만 표면 형상 및 거칠기를 개선시킬 수 있다^(3,4).

비구면 마이크로 렌즈의 경우, 렌즈 기본 곡률 반경이 작고, 비구면 경사도가 크기 때문에 공구의 크기와 형상, 공구의 운동을 제약하는 요건이 되고 있다⁽⁵⁾. 그리고 비구면 렌즈를 가공 한 후 폴리싱 공정을 통해서 높은 정밀도의 제품을 얻을 수 있고 가공물과 연마 공구의 동시 회전을 통해서 폴리싱 공정이 이루어지는 연구가 진행되고 있다⁽⁶⁾.

따라서 본 연구에서는 초정밀 비구면 마이크로 렌즈를 얻기 위해 초정밀 비구면 가공기를 개발하였고, 이 시스템을 이용하여 초정밀 비구면 마이크로 렌즈 개발을 위한 가공 특성을 평가하였다.

2. 초정밀 비구면 연삭 시스템

2.1 초정밀 연삭 가공 시스템 구축

본 연구에서는 외경 4mm 비구면 마이크로 렌즈를 가공하기 위한 연삭 시스템 개발이 목적이다.

Fig. 1은 초정밀 비구면 연삭 시스템의 개략도를 보여주고 있다. 구면 렌즈를 공작물 지그에 본딩을 한 후 지그를 공작물 주축에 진공으로 고정한다. 공작물 주축과 공구대 이송 축을 동시에 제어하여 비구면 형상을 가공할 수 있게 된다. 비구면 형상 가공을 위해서 NC 컨트롤러를 통해서 비구면 NC 데이터를 입력하게 되고 가공을 하게 된다.

2.2 비구면 렌즈 설계

비구면 렌즈의 설계는 렌즈의 각 반경 위치에 따라서 렌즈의 굴절률과 입사각을 고려하여 최소자승 법에 의하여 비구면 다항식으로 근사한 것이다. 일반적으로 사용되고 있는 회전 대칭의 비구면 렌즈의 표면 형상은 다음과 같다.

$$Z(X) = \frac{C \cdot X^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1) \cdot C^2 \cdot K^2}} + \sum_{i=1}^m C_i \cdot X^i \quad (1)$$

Z 축은 회전의 중심축으로서 비구면 축방향의 위치이고 X는 비구면 축으로부터의 수평 방향거리이다. 첫 번째 항은 구면 항이고, 두 번째 항은 구면 항에 대한 수정량 즉, 비구면 항에 해당된다. 여기서 k는 원추상수로서 원추면에 따라서 달라지고, C는 비구면의 곡률 기준 반경을 나타내는 계수이다. C_i 는 구면을 포함한 단순 원추면을 비구면으로 수정하는 비구면 계수이다.

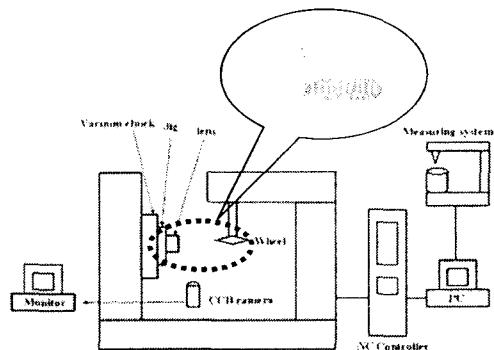


Fig. 1 Schematic diagram of grinding system for aspheric surface lens

3. 비구면 렌즈 가공

3.1 가공 메커니즘

비구면 렌즈의 가공 프로세스는 공구 좌표 생성, 비구면 가공, 부정 후 가공, 비구면 형상 측정 등으로 나눌 수 있다. 먼저 비구면 렌즈 형상의 좌표를 식(1)에 의해서 구하고 숫돌의 곡률 반경에 따른 공구 경로를 구한다. 구해진 공구 경로를 NC 데이터로 변환을 해서 CNC 컨트롤러에 전송을 한다. 비구면 렌즈 가공기는 CNC 제어로 연삭 가공을 수행하고 가공된 비구면 렌즈는 형상 측정을 통해서 데이터를 보정하여 수차례 가공을 한 후 형상 정밀도 및 표면 거칠기를 측정한다. Fig. 2는 비구면 렌즈의 초정밀 연삭 가공 공정 개략도이다.

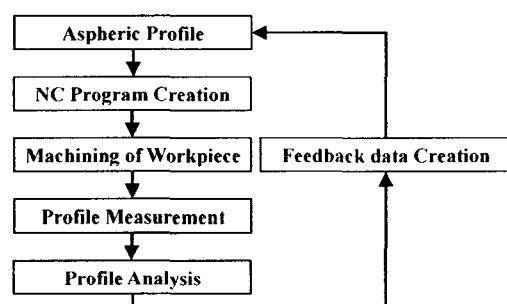


Fig. 2 Grinding process of aspheric surface lens

3.2 비구면 형상 가공

윤곽 가공은 주로 구면과 비구면 형상을 생성할 때 사용된다. 본 연구에 이용된 시스템의 구동은 두 개의 LM 가이드 안내면과 공작물을 고정시키는 공기정압 베어링 스펀들로 구성되어 있다. 두 안내면은 각각 X 축과 Z 축으로 직교 형태를 이루고 있다. 공구가 Y 축에 고정되어 있고, 렌즈는 Z 축에 고정되어 있으며 Y 축은 X 축 테이블 위에 고정되

어있다. 공작물과 휠은 회전을 하고, Z 축과 X 축이 동시에 제어되면서 가공을 수행하였다. Fig. 3은 비구면 가공용 초정밀 연삭 시스템의 구동 메커니즘을 보여주고 있다.

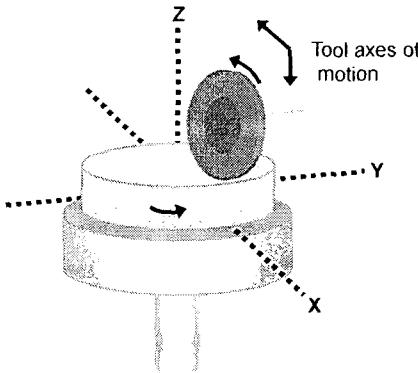


Fig. 3 Schematic of the contour grinding geometry for aspheric surface lens

3.3 비구면 형상 경로 생성

회전 대칭의 비구면에 대해서 연삭 공구는 Fig. 4 와 같이 회전하는 공작물의 직경 축에 대해서 왕복운동을 한다. 각 반경 위치에 따라 공구의 접촉점과 공구의 중심 위치가 다르다. 따라서 공구와 공작물의 접선을 계산하면 공구의 중심위치 추적이 가능하다. 접선의 기울기는 그 점에서의 합수의 미분으로 나타낼 수 있다. X 는 비구면 축으로부터의 수평 방향 거리이며, Z 는 비구면 축 방향의 위치이다. 식(2)는 비구면 형상 가공 시 구면 수들의 운동과 공구 경로의 계산을 보여주고 있다.

$$x_t = x + \Delta x = x + r \sin \theta \quad (2)$$

$$z_t = z - \Delta z = z - r \cos \theta$$

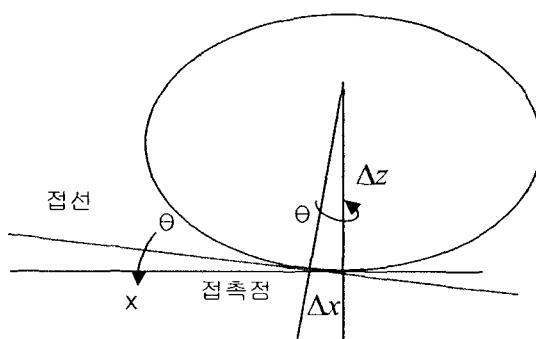


Fig. 4 Geometrical model for tool path compensation

즉, 구면 수들의 공구 캐릭터를 수들의 중심좌표와 비구면 형상의 관계에서 결정하였다. 따라서 비

구면 가공은 일정한 반경을 갖는 구면 수들의 캐릭터에 의하여 이루어지며 비구면 형상의 변곡점에서의 간섭을 최소화하기 위해서 수들의 곡률반경은 비구면의 최소 곡률반경보다 작아야 한다. 구면수들은 초기 가공 개시점에서 가공 종료점까지 계산된 가공 경로를 따라 실제 위치인 X_t, Z_t 의 2 축 NC 제어로 가공이 된다.

4. 실험 결과 및 고찰

초정밀 비구면 마이크로 렌즈 가공을 위한 연삭 가공 특성을 파악하기 위해서 횡삭용 연삭 수들은 800 메시 다이아몬드 휠을 사용하였고, 정삭용 연삭 수들은 1,500 메시 다이아몬드 휠을 사용하였다. 비구면 렌즈를 가공하기 위한 연삭 조건은 연삭 주축의 회전수, 공작물 회전수, 이송속도 등으로 나누어서 실험을 수행하였고 이러한 인자들이 초정밀 연삭의 표면 거칠기에 미치는 영향을 알아보았다.

4.1 연삭 주축 속도에 따른 가공 특성

본 연구에서 사용된 시스템은 최대 주축 회전수가 100,000rpm 이다. 주축 스펀들의 런아웃은 0.5um 이하이고, 주축 속도를 20,000~80,000rpm 까지 변화를 주었다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 주축의 회전수가 증가할수록 Ra 값이 작아진다. 이는 주축의 회전수가 증가하면 공작물의 회전방향으로 미치는 입자의 영향이 작아지므로 표면 거칠기가 향상되었다.

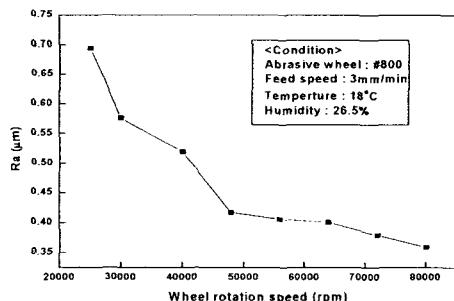


Fig. 5 Relationship between wheel rotation speed and surface roughness

4.2 공작물 주축 속도에 따른 가공 특성

Fig. 6 은 주축속도에 따른 표면 거칠기를 측정한 결과를 보여주고 있다. 공작물 주축 회전속도는 최대 3,000rpm 이고 본 실험에서는 200~1,000rpm 범위까지 변화를 주어 가공을 수행하였다. 이송속도는 3mm/min, 연삭 주축 속도는 80,000rpm 으로 고정을 하였다. 공작물의 회전수가 증가함에 따라서 표면 거칠기가 좋아지는 것을 볼 수 있다. 하지만 일정 속도 이상이 되면 표면 거칠기가 나빠진다.

따라서 공작물의 회전속도와 이송속도의 적절한 조절이 필요하다.

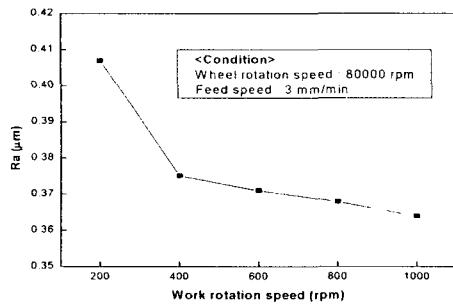


Fig. 6 Relationship between work rotation speed and surface roughness

4.3 이송속도에 따른 가공 특성

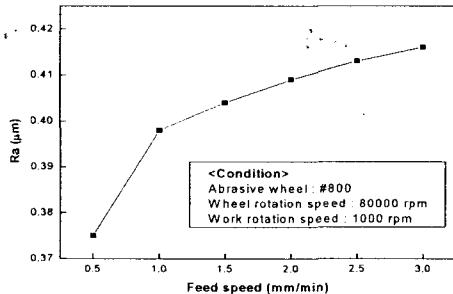


Fig. 7 Relationship between work rotation speed and surface roughness

연삭 주축의 회전속도와 공작물의 회전속도를 고정하고 이송속도를 변화시키면서 가공 한 후 표면 거칠기를 측정한 값을 Fig. 7 에 나타내었다. 이송속도가 증가할수록 표면 거칠기 값도 커지는 것을 알 수 있다. Fig. 8 은 3 차원 비접촉식 측정기에 서 측정된 비구면 마이크로 렌즈의 3 차원 형상이며 800 메시의 다이아몬드 휠로 가공을 하였다. 표면 거칠기는 약 0.3μm 이다.

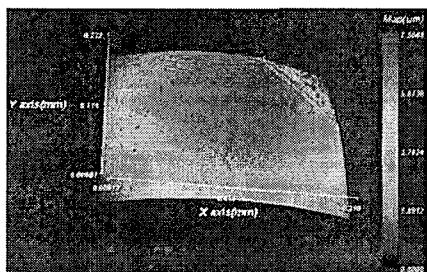


Fig. 8 3-D form for aspheric surface micro lens by noncontact 3-D measuring apparatus (NV-E1000)

4. 결론

본 연구에서는 카메라 휴대폰용 비구면 마이크로 렌즈 가공기와 가공 특성에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구의 결과를 요약하면, 4 축 동시제어가 가능한 비구면 가공 시스템 및 가공 메커니즘을 개발하였다. 또한 공구보정을 한 비구면 렌즈 형상 생성 프로그램을 개발하였다. 개발한 시스템을 이용하여 비구면 렌즈를 가공을 하였다. 800 메시 휠을 사용했을 때 형상정밀도는 약 3μm 이고 표면 조도는 0.3μm 였다. 또한 연삭 주축 속도와 공작물 주축 속도가 증가할수록 표면 거칠기가 향상되었다. 하지만 일정 속도 이상이 되면 표면 거칠기가 나빠짐을 알 수 있었다. 따라서 적절한 가공 조건이 필요하다. 향후 형상정밀도와 표면 거칠기에 대한 연구가 더 필요하다.

후기

본 연구는 산업자원부에서 주관하는 “고기능성 부품가공용 지능형 연삭시스템 개발” 과제 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Shida, H., "Development of Machining Technology on High Precision Plastic Opto-Element," Rich Technical Rept, No. 24, pp. 99 - 105, 1998.
2. Suzuki, H., Kodera, S., Maekawa, S., Morita, N., Sakura, E., Tanaka, T., Takeda, H., Kuriyagawa, T., and Shoji, K., "Study on precision grinding of Micro Aspherical surface," JSPE, Vol. 64, No. 4, pp. 619 - 623, 1998.
3. Yang, M. Y., and Lee, T. M., "New biarc interpolation for ultra-precision aspheric surface machining," Proc. ASPE Annual Meeting, pp. 195 - 198, 1997.
4. Arnold, J. B., Sterger, P. J., and Saito, T. T., "Tool feed influence on the machinability of CO₂ laser optics," Applied Optics, Vol. 25, pp. 1777 - 1782, 1975.
5. Foreman, J. W., and Jr., "Simple numerical measure of the manufacturability of aspheric optical surfaces," Applied Optics, Vol. 25, pp. 826 - 827, 1986.
6. Doughty, G., and Smith, J., "Microcomputer-controlled polishing machine for very smooth and deep aspherical surfaces," Applied Optics, Vol. 26, pp. 2421 - 2426, 1987.