

셰이핑에 의한 마이크로렌즈 어레이가공에 있어서의 가공오차분석 valuation of Machining error on Manufacturing Microlens array shaping

**송영찬¹, 황주호¹, 김민기², 박천홍¹

**Y. C. Song(ycsong@kimm.re.kr)¹, J. Whang¹, M. Kim², C. Park¹

¹ 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부, ² 두산인프라코어 공기자동차화 BG 연구개발 1 팀

Key words : Shaping, Microlens array, Machining error

1. 서론

렌즈의 절삭가공은 일반적으로 선삭방식에 의해 가공되어지고 있으나, 다수의 렌즈 집합체인 렌즈어레이¹를 가공하기 위해서는 선삭방식으로는 곤란하다. 렌즈어레이를 절삭가공할 수 있는 방법으로는 엔드밀링²과 셰이핑 등을 생각할 수 있다. 엔드밀링의 경우는 반구형상까지 가공이 가능하며, 고속가공이 가능한 장점이 있으나, 회전공구의 회전정밀도를 마이크로렌즈 가공을 수행할 수 있을 정도로 유지하기가 쉽지 않으며, 공구의 제작이 어려워 고가인 단점이 있다. 한편 셰이핑은 공구의 여유각에 따라 가공 가능한 렌즈 열림각(렌즈형상 외주의 임의의 한 점에서 렌즈 중심까지를 연결한 선분과 렌즈의 중심축이 이루는 각)이 제한되며, 고속가공이 곤란하다는 단점이 있으나, 회전공구를 사용하지 않으므로, 비교적 쉽게 고정도의 마이크로렌즈를 가공할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 셰이핑에 의해 마이크로렌즈어레이 가공을 시도하여 그 유용성을 확인하였으며, 가공에 있어서 오차의 주된 원인을 분석하여 가공오차를 억제하고자 하였다.

2. 셰이핑에 의한 구면 렌즈어레이 가공방법

Fig. 1은 셰이핑가공에 의해 오목형상 구면을 가공하기 위한 공구의 이송경로를 나타내고 있으며, 구면의 깊이방향을 Z 방향, 벡터 $\vec{P_1P_2}$ 의 방향을 Y 방향, YZ 평면에 대해 법선방향을 X 방향으로 정의한다. 점 P_1 에서 점 P_2 로 원호궤적의 가공을 행한 후 점 P_3 로 이동하며, 이러한 과정을 반복함으로써 원하는 구면 형상이 가공되어진다. Fig. 2는 구

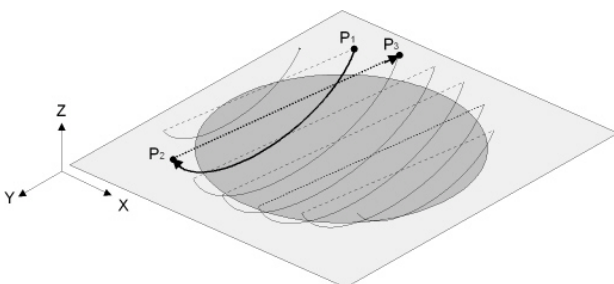


Fig. 1 Machining process of sphere by shaping

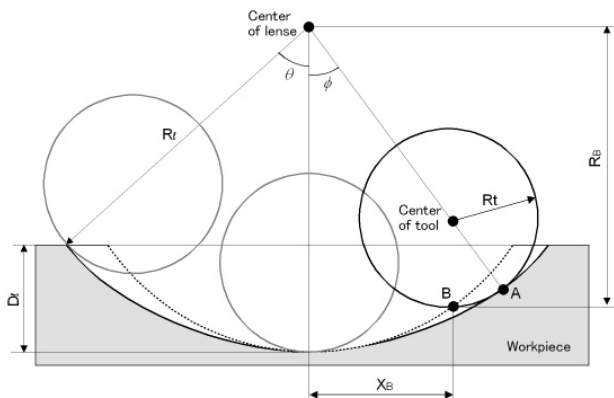


Fig. 2 Cross section of sphere on the XZ plane

의 중심을 지나는 XZ 평면상에서의 구의 단면형상을 나타내고 있으며, 구의 곡률반경, 공구날 곡률반경, 구의 깊이, 구의 열림각을 각각 R_l, R_t, D_l, θ 로 정의한다. 점 $A(R_l \sin \phi, 0, R_l \cos \phi)$ 를 통과하는 원호궤적을 가공하고자 할 경우, 공구의 최하단부가 점 $B(X_B, 0, R_B)$ 를 통과하도록 공구의 원호궤적을 설정하여야 한다. 여기에서 점 B의 Z 방향 좌표값 R_B 는 공구의 원호궤적 반경이 된다. 이들 관계를 기하학적으로 정리하면 아래의 식으로 표현되어진다.

$$\begin{aligned} \theta &= \cos^{-1} \left(\frac{R_B}{R_t} \right) \\ &= \left(\frac{R_B}{R_t} \right) \sin \phi \\ &= \cos \phi + \left(\frac{R_B}{R_t} - \cos \phi \right) \\ &-\theta \leq \phi \leq \theta \end{aligned}$$

이상의 관계식을 이용하여, Fig. 1에 제시한 이송경로를 따라 가공을 수행하므로 1개의 구면형상이 가공되어지고, 일정간격 이송시켜 이 과정을 반복하여 수행하므로 구면 렌즈어레이 가공이 이루어진다.

3. 실험방법 및 조건

Fig. 3은 렌즈어레이 가공실험의 모습을 나타내고 있으며, 가공에 사용된 3개의 이송축 모두 공기정압배어링과 리니어모터에 의해 제어되고 있다. 렌즈어레이 가공의 주요 실험조건을 Table 1에 나타내었다. 실험에 사용한 공구는 일반적으로 많이 사용되어지는 공구날 곡률반경 1mm의 단결정다이아몬드 공구를 사용하였으며, 공구 여유각은 15°로 하였다. 가공메카니즘의 적합성을 테스트하는 것이 주된 목적이므로 다이아몬드공구의 초정밀절삭가공에 있어 피삭성이 좋아 공구마모 등을 고려하지 않아도 되는 알루미늄 합금을 가공재료로 선택하였다. 렌즈는 가로 세로방향 각각 3개씩 9개의 렌즈를 가공하였으며, 렌즈의 형상은 Table 1에 제시한 바와 같다. 렌즈 간의 간격은 구면렌즈 반경과 렌즈 깊이로부터 기하학적으로 계산하여 렌즈형상들의 외주가 서로 접촉하도록 설정하였다. 또한 가공기의 강성과 가공재료의 피삭성 등을 고려하여 한꺼번에 원하는 형상의 렌즈를 가공하지 않고 절삭깊이를 5 μm씩 나

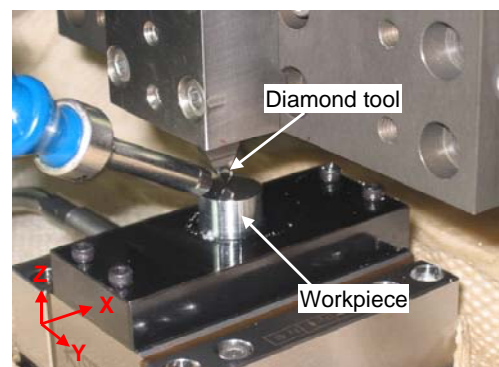
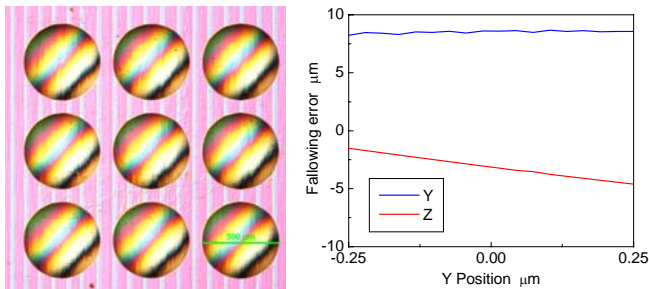


Fig. 3 Experimental setup

Table 1 Experimental conditions

Tool	Material	Single crystal diamond
	Radius	1.0 mm
	Rake angle	0 degree
	Flank angle	15 degree
Workpiece		Aluminum alloy
Form of Lens array	Radius	2.0 mm
	Depth	20 μm
	Lens pitch	0.564 mm
	Number	3 EA \times 3 EA
Cutting conditions	Cutting speed	50, 800 mm/min
	Depth of cut	5 μm
	Feed	0.6 degree
Cooling condition		Oil mist



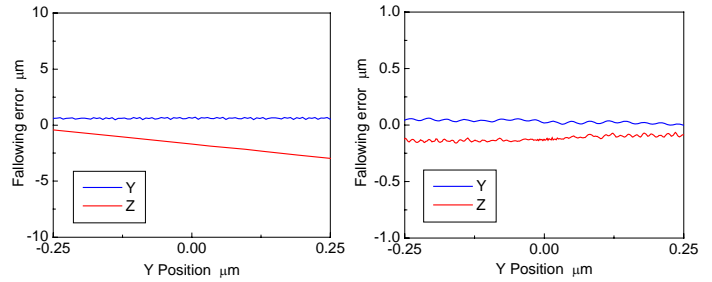
(a) Micro photograph (b) Following error in machining area
Fig. 4 Lens array machined at the cutting speed of 800 mm/min

누어 수행하였다. 구면 렌즈 표면의 표면정밀도를 일정하게 유지하기 위하여 원호계적과 원호계적 사이의 이송간격을 일정길이로 하지 않고 렌즈형상의 중심을 기준으로 일정각도로 하였다. 각각의 원호계적의 구현방법은 원호보간을 이용하였다.

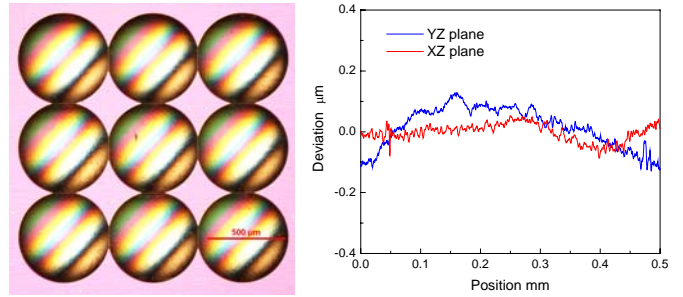
4. 실험결과 및 고찰

Fig. 4(a)에 가공속도 800 mm/min의 조건에서 가공되어진 마이크로 구면 렌즈어레이의 미분간섭현미경 사진을 나타내고 있으며, 각각의 구면형상에 안정된 간섭 무늬를 확인할 수 있다. 구면의 중심에서는 Z축 이송방향의 반전이 일어나지만 이에 따른 백레쉬는 확인되지 않고 비교적 양호한 구면형상이 구현되었다고 생각되어진다. 또한 각각의 구면의 크기와 간격이 재현성있게 유지되고 있음을 확인할 수 있다. 단, 본 가공실험에 있어서 목표치가 구면 깊이 20 μm , 구면 외주의 직경 564 μm 으로 각각의 구면 외주가 서로 접촉되어야 한다. 하지만, 실제 가공되어진 구면 외주의 직경은 약 500 μm 으로 약 60 μm 의 형상오차가 발생하였다. 이를 깊이방향으로 환산하면, 약 4 μm 의 깊이오차가 발생한 것이 된다. 본 가공실험에서는 셀프컷과 구면 형상가공을 공구교환 없이 연속하여 수행하였으므로, 공구날과 가공물과의 깊이방향 위치오차는 가공기의 위치결정정도 수십 nm 이하로 판단되어진다.

본 가공실험에 있어서 발생한 구면형상의 깊이오차 원인을 파악하기 위하여, 원호계적 이송 중의 엔코드 신호를 직접 측정하였다. Fig. 4(b)는 제어명령값에 대한 엔코드 신호의 오차를 나타내고 있다. Y축방향의 경우는 전 가공영역에 있어서 균일하게 약 8 μm 의 오차가 발생하고 있으며, 이는 구면의 위치가 가공하려던 위치에 대해 전후로 이동할 뿐 구면의 형상오차에는 거의 영향을 미치지 않을 것으로 판단되어진다. 반면, 구면의 깊이 방향인 Z축방향의 경우 약 -2 ~ -5 μm 의 오차가 발생하고 있으며, 이 오차가 본 실험에서의 발생한 깊이방향 형상오차의 주된 원인으로 판단되어진다.



(a) at the speed of 800 mm/min (b) at the speed of 50 mm/min
Fig. 5 Following error in machining area after turning again



(a) Micro photograph (b) Form accuracy
Fig. 6 Lens array machined at the cutting speed of 50 mm/min

가공실험에서의 형상오차를 개선하기 위하여 각 축의 튜닝을 재실시여 Fig. 5(a)의 결과를 얻었다. Y축의 경우 오차가 0.1 μm 이하로 응답성이 크게 개선되었으나, Z축의 경우 약 -0.5 ~ -3 μm 의 오차를 여전히 가지고 있음을 알 수 있다. Z축의 경우 수직축이므로 항상 중력을 받고 있어 더 이상의 응답성 개선이 곤란할 것으로 생각되어진다. 가공속도를 800 mm/min에서 50 mm/min으로 늦추는 것으로 Z축 오차의 개선을 시도하였으며, 그 결과, Fig. 5(b)에 제시한 것과 같이 제어명령에 대한 엔코더 오차가 0.1 μm 로 유지되고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 가공속도를 50 mm/min으로 설정하고 구면가공을 수행한 결과이며, Fig. 6(a)의 현미경사진으로부터 각각의 구면 외주가 서로 접촉되고 있는 것을 볼 수 있다. 이 결과로 Fig. 4에서 발생한 구의 형상오차가 크게 억제되었다고 판단되어진다. Fig. 6(b)는 Form Talysurf를 사용하여 Fig. 6(a)의 왼쪽 위에서 첫번째 구면 렌즈에 대해 형상정도를 측정한 결과이며, 약 0.3 μm 의 형상정도를 나타내었다.

· 결론

웨이핑에 의해 마이크로렌즈어레이 가공을 시도하여 본 가공방법의 유용성을 확인하였으며, 가공 중에 있어 제어명령과 엔코더 신호를 직접 측정 분석함으로써 가공오차의 원인을 분석할 수 있음을 확인하였다. 또한 이 방법으로 적합한 가공속도를 선정함으로써 가공오차를 크게 억제할 수 있었다. 가공된 마이크로렌즈의 형상정도는 약 0.3 μm 의 양호한 결과를 얻었다.

참고문헌

1. K. Iga and etc, “마이크로렌즈(어레이)의 초정밀가공과 양산화기술”, 2003
2. N. Yasunaga, T. Obikawa and etc, “초정밀가공기술의 기초와 실제”, 2006, pp208 - 211