

다이아몬드 미세형삭가공에서 자려진동의 발생경향과 안전성 평가

이언주*(부산대 대학원) 임한석(부산대 기계기술연구소) 안중환(부산대 기계공학부)

ABSTRACT

Diamond shaping is one of the machining strategies to make the optical micro-groove molds, and it is especially useful when the component is an assembly of the linear micro-groove array. A mirror-like surface and arbitrary cross-sectional curve can be easily made by diamond. However, the cutting speed of shaping is relatively lower than that of the other cutting methods, and there exist an unstable cutting conditions that generate the chatter. This study is focused on the modeling of the simplified self-induced chatter of the diamond shaping. From the chatter model and experiments, it is found that the unstable cutting conditions exist when the depth of cut is low and cutting speed is high.

Keyword : diamond shaping(다이아몬드 형삭), optical micro-groove(광학홈), self-induced chatter(자려진동), lenticular lens(렌티큘라 렌즈), reflection reflector(반사판)

1. 서론

프로젝션 TV에 있어서 시청각도에 따른 화면의 밝기를 일정하게 하거나 입체영상을 얻기 위해 사용되는 렌티큘라 렌즈 또는 LCD디스플레이의 조명용 도광판 등은 비교적 넓고 평탄한 면에 미세홈이 가공된 평판형 금형에서 투명도가 좋은 아크릴 수지나 광경화성 수지를 이용하여 제작되고 있다.^[1]

광학부품으로서의 기능이 요구되기 때문에 이들 미세홈 금형은 주로 비철금속재의 금형재료에 다이아몬드 공구를 이용한 가공으로 제작되고 있다. 이것은 다이아몬드 공구의 형상을 미리 요구되는 미세홈의 단면형상에 맞게 제작, 준비함으로써 비교적 삼각형, 원, 타원, 또는 포물선 등과 같은 홈의 형상을 비교적 쉽게 가공할 수 있고, 또한 공구의 날끝 반경이 매우 작으므로 비교적 쉽게 경면을 얻는 것이 가능하기 때문이다.^[2,3]

한편 이러한 미세형삭가공에서도 일반가공의 경우와 같은 채터의 발생이 일어날 수 있다. 경면의 미세형삭가공에서 채터가 발생하면 작업자체가 무의미해지기 때문에 채터의 발생원인 및 메카니즘을 규명하여 채터를 회피할 수 있는 작업조건을 선정할 필요가 있다. 채터의 발생원인을 크게 강제진동(forced

chatter)과 자려진동(self-induced chatter)으로 분류 할 수 있다.^{[4][5][6]}

미세형삭가공에 있어서 강제진동은 주로 안내면의 정밀도 저하에 의한 영향이 크며, 특히 볼(ball)에 의한 직선안내기구(LM guide system)의 경우 안내면의 마멸 등에 의한 정도저하와 볼의 편마모에 의한 진구도(眞球度)의 저하가 진동을 발생시키는 주원인이 된다. 자려진동은 공구와 공작물간에 외부로부터 명확한 주기변동력이 작용하지 않아도 절삭과정의 불안정 상태가 생기므로써 기인되는 공진적 진동으로서 진동부의 고유진동수 또는 그 근방에서 일어난다. 자려진동은 강제진동에 비해 진동상태가 더 격심하고 공구마모를 현저하게 심화시킨다. 미세형삭가공에서 주로 마찰계수, 절삭력의 변화, 공구 인선반경의 영향^[7]등이 자려진동을 일으키는 원인이 될 수 있다.

본 연구에서는 이러한 영향들에 의한 자려진동 발생 메카니즘을 고찰하여 미세형삭가공에서의 채터발생모델을 제시하고, 알루미늄에 대한 절삭실험을 통해 채터모델의 타당성을 실험적으로 검증하고, 채터 안정화를 위한 절삭조건을 찾고자 한다.

2. 미세형삭가공시 자려진동 발생기구

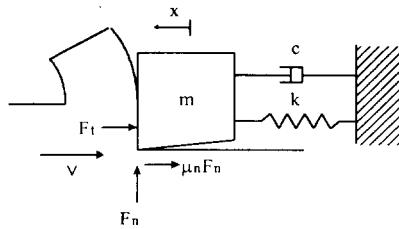


Fig.1 Model of the self-induced chatter in micro machining

본 연구에서 대상으로 하는 미세형삭가공의 기본 진동계는 Fig.1과 같이 1자유도의 진동계로 간주하며, 공구는 정적평형상태에서 절삭방향으로만 변형되는 것으로 가정한다. 여기서 v 는 이송속도, x 는 공구의 변위로 한다.

주분력과 배분력이 외력으로 작용한다. 공구의 경사각이 0°이므로 경사면에서의 마찰력은 진동에 영향을 주지 않고, 여유면에서의 마찰력이 진동계에 외력으로 작용하는 것으로 가정한다. 이때 진동계의 운동방정식은 아래와 같다.

$$mx + cx + kx = -F_t - F_n \cdot \mu \quad (1)$$

여유면의 마찰계수와 두 방향의 절삭력은 공구와 공작물 간의 상대속도의 함수로 간주한다. 일반적으로 절삭속도가 증가하면 절삭력은 감소하는 경향이 있다. 그러나 미세형삭가공과 같은 낮은 절삭속도에서는 오히려 소성변형속도 증가에 따른 소성응력의 증가가 절삭력을 증가시키는 것으로 한정한다. 주 절삭력은 가공단면적에 비례하는 것으로 생각할 수 있으므로 단위폭의 공구에 대해서 주절삭력은 절삭깊이 d 에 비례하는 것으로 간주한다. 따라서 주절삭력은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$F_t = [f_{t0} + c_t(v + \dot{x})] \cdot d \quad (2)$$

여기서, f_{t0} 는 이송속도가 거의 0일 때의 단위절삭깊이에 대한 주절삭력이며, c_t 는 이송속도에 대한 주절삭력의 변화율이다.

배분력은 절삭깊이가 미세해짐에 따라 나타나는 날끝반경의 영향에 의해 발생하는 것으로 생각할 수 있다. 날끝반경의 영향에 의한 배분력을 공작물에

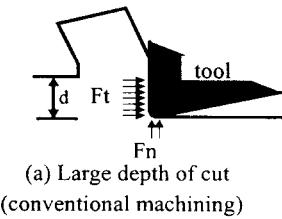


Fig.2 Variation of the direction of resultant cutting force according to depth of cut

침투되어 있는 공구 날끝의 크기를 수평면에 투영시킨 길이에 비례하는 것으로 가정할 수 있다. 즉 절삭깊이의 변화에 따라 절삭력의 작용방향 및 크기는 Fig.2와 같이 나타낼 수 있으며, 날끝반경의 크기 r , 절삭깊이 d 라고 할 때, 배분력은 다음과 같다.

$$F_n = [f_{n0} + c_n(v + \dot{x})] \cdot d \quad (d \geq r) \quad (3A)$$

$$F_n = [f_{n0} + c_n(v + \dot{x})] \cdot \sqrt{d(2r - d)} \quad (d < r) \quad (3B)$$

여기서 f_{n0} 는 이송속도가 거의 0일 때의 단위절삭깊이에 대한 배분력이며, c_n 는 속도에 대한 배분력의 변화율이다.

동마찰계수는 일반적으로, 마찰속도에 따라 감소하다가 어느 속도 이상이 되면 일정해진다.^{[8][9][10]} 본 연구에서는 절삭속도가 비교적 저속이므로 동마찰계수는 속도의 증가에 따라 선형적으로 감소되는 것으로 가정한다. 따라서 동마찰계수는 다음과 같다.

$$\mu = \mu_0 - c_\mu(v + \dot{x}) \quad (4)$$

단, 여기서 μ_0 는 마찰속도가 거의 0일 때의 동마찰계수이며, c_μ 는 마찰속도변화에 따른 동마찰계수의 변화율이다.

식(2)~(4)의 관계를 식(1)에 대입하고 정리하면

다음과 같다.

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + [c + c_t d - c_n r(f_{n0} + c_n v) \\ + c_n r(\mu_0 - c_n v)]\dot{x} + kx \\ = -(f_{n0} + c_n v)d - (\mu_0 - c_n v)(f_{n0} + c_n v)r \quad (5) \end{aligned}$$

단, 본 연구에서의 최소 절삭깊이는 약 $2\mu\text{m}$ 정도로 일반적인 다이아몬드 공구의 인선반경보다는 큰 값이므로 F_n 값은 식 (3A)를 사용한다.

식(5)의 좌변의 둘째항 \dot{x} 의 계수는 절삭시스템이 진동할 때 시스템의 감쇠역활을 한다. 따라서 이를 등가감쇠계수 c_{eq} 라 두면

$$c_{eq} = c + c_t d - r[c_n(f_{n0} + c_n v) - c_n(\mu_0 - c_n v)] \quad (6)$$

와 같다.

만일 c_{eq} 값이 음이 되는 경우는 시스템이 늘 정적 불안정 상태에 있게 된다. 그러나 c_{eq} 가 음이 되지 않더라도, 값이 작아지면 외부의 가진력에 의해 절삭시스템이 진동할 수 있다.

식(6)에서 등가감쇠계수를 결정하는 우변의 각 항들의 절삭조건에 따른 변화를 고찰해 본다. 먼저, 첫째항 c 는 시스템 자체의 감쇠계수이므로 절삭조건의 변화에 영향을 받지 않는다. 둘째항 $c_t d$ 에서 속도에 대한 주절삭력의 변화율 c_t 가 양의 값으로 정의되는 저속의 구간에서 절삭깊이의 증가는 등가감쇠계수의 증가를 초래하여 시스템을 안정화 시키는 역할을 하게된다.

식(6)의 셋째항 $-r[c_n(f_{n0} + c_n v) - c_n(\mu_0 - c_n v)]$ 에서 공구인선반경 r 이 클수록, 절삭속도가 빠를수록 채터가 일어날 가능성이 많음을 알 수 있다.

3. 실험 장치 및 방법

본 연구에서의 절삭실험은 미세형삭전용으로 제작된 3축의 가공기를 사용하였다. 각축은 LM가이드 시스템이 채용되었으며, 위치 정밀도는 $1\mu\text{m}$ 이하이다. 각 직선 유니트는 석정반상에 고정되어 있으며, 바닥으로부터의 진동을 차단하기 위한 에어댐퍼가 설치되어 있다. 시편의 폭은 $25\sim35\text{mm}$ 정도로 하였으며

재질은 알루미늄을 사용하였다. 형삭가공에서 변경 가능한 가공조건은 절삭깊이와 절삭속도이다. 절입깊이는 $2\sim12\mu\text{m}$ 까지, 이송속도는 $3\sim27\text{mm/sec}$ 로 하였다. 공구는 날폭 1mm , 경사각 0° , 여유각 3° 의 직선 절인을 갖는 단결정 다이아몬드 공구를 사용하였다. 절삭력과 표면거칠기를 측정하여 실험결과를 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

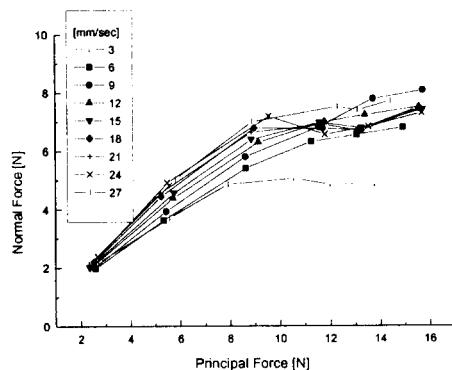


Fig.3 Variation of the measured cutting force

Fig.3은 절삭속도와 절삭깊이에 따른 절삭력의 변화를 나타낸다. 위 그림에서 알 수 있듯이 절삭깊이가 증가함에 따라 주분력은 증가한다. 배분력은 주분력에 비해 변화가 완만하다. 그러나 전체적인 절삭력의 거동을 볼 때 식(2),(3)에서의 절삭력에 대한 가정은 대체로 타당하다고 볼 수 있다.

Fig.4는 가공조건에 따른 표면 거칠기를 측정한 결과이다. 여기서 절입깊이가 작고, 절삭속도가 빠를 때에 거칠기가 매우 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 채터가 발생하였기 때문이다. 절입깊이가 크고 절삭속도가 느릴 때는 중심선거칠기가 $0.2\mu\text{m}$ 정도로 일정하다. 자력진동의 경우 절삭조건에 따라 감쇠계수의 크기가 달라지므로 표면거칠기에도 변화가 심할 것이다. 그러나 주로 안내면에서 발생되는 강제진동

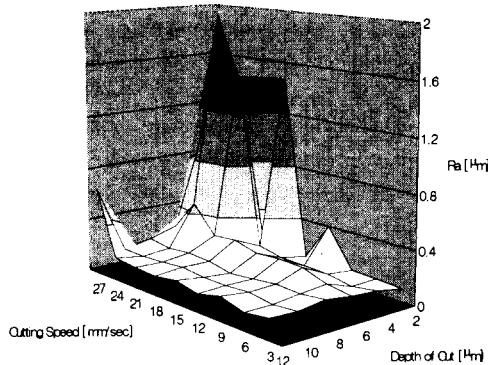


Fig.4 Roughness of the machined surface

의 영향에 의한 표면거칠기는 일정할 것이다. 따라서 중심선거칠기가 $0.2\mu\text{m}$ 정도로 일정한 영역에서 일어난 채터링은 강제진동에 의한 것으로 사료된다.

Fig.5는 이러한 미세형삭가공에서의 채터 발생영역을 절삭조건에 따라 일반적인 공작기계에서의 채터 발생영역과 비교하여 그 영역의 차이를 표현한 것이다. Fig.5에서 \times 는 채터가 일어나지 않는 것을 표시하며, \blacktriangle 는 주어진 절삭조건에서 부분적으로 약간의 채터가 일어난 것을 표시하고, \bullet 은 전영역에 대해 채터가 일어났음을 표시한 것이다. 미세형삭가

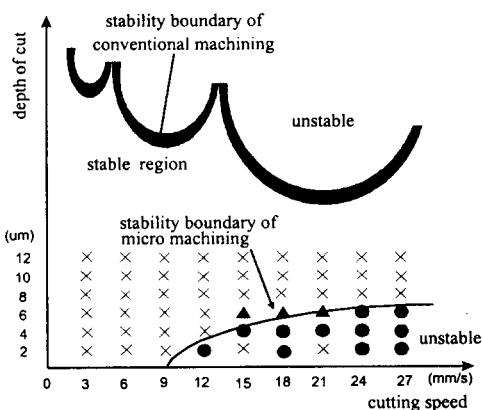


Fig.5 Stability boundary of the micro shaping

공에서 채터를 피하는 절삭조건은 절삭속도를 어느

정도 이하로 낮추든지 또는 일반절삭과는 다르게 절삭깊이를 어느정도 이상으로 크게 해야함을 알 수 있다. 그러나 절삭깊이를 크게하면 절삭력의 증가에 의해 벼의 발생이나 형상의 찌그러짐 등이 두드러지기 때문에 절삭깊이를 크게하는데는 한계가 존재하며, 이에 따라 최대 절삭속도가 정해지게 된다.

5. 결론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- [1] 알루미늄의 미세형삭가공에 있어서 채터의 발생 영역은 일반절삭에서의 채터발생영역과 달리 절삭깊이가 작고, 절삭속도가 빠를 때 채터가 존재함을 알 수 있다.
- [2] 안내면의 강제진동 성분이 가공면의 표면거칠기의 변화에 미치는 영향은 자려진동 성분의 영향에 비해 매우 작다.

6. 참고문헌

- [1] 中野新吾, 金丸正一, レンチキュラーレンズ金型の製造方法, 日本国特許廳 公開特許情報(A) 平4-53642, 1992
- [2] 上田勝宣, 住谷充夫, 微細溝の超精密切削加工, JSPE, Vol.52, No.12, 1986, pp.2016-2019
- [3] 杉田忠彰, 上田完次, 稲村豊四郎, 基礎切削加工學, 共立出版株式會社, 1984, pp.153-180
- [4] 廉永夏, 工作機械의 切削加工, 東明社, 1985
- [5] 孫明煥, 切削加工論, 文運堂, 1992
- [6] Geoffrey Boothroyd, Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools, Scripta Book Co., 1975
- [7] D.A.Lucca, R.L.Rhorer, R.Komanduri, "Energy Dissipation in the Ultraprecision Machining of Copper", CIRP, Vol 40, No 1, 1991, pp.69-72
- [8] 공호성, 한국과학기술원, "재료의 마찰과 마모"
- [9] JOHN A. SCHEY, "Tribology in Metalworking" 1983
- [10] "Tribology Handbook"