

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

다이아몬드 미세형삭가공의 자려진동 발생경향에 관한 연구

임한석*, 이연주*, 김솔용*, 안중환**

A Study on the Cutting Conditions of Self-Induced Chattering in Micro Shaping with Diamond Tool

HanSeok Lim*, EonJoo Lee*, SoolYong Kim*, JungHwan Ahn**

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 an arbitrary cross-sectional curve can be easily made by the diamond tool. 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, and the machinabilities of three materials are compared by cutting experiments. 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. It is also found that the brass is relatively good material in micro shaping than copper or aluminium from the cutting experiments.

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

1. 서론

프로젝션 TV(projection TV)에 있어서 시청각도에 따른 화면의 밝기를 일정하게 하거나 입체영상을 얻기 위해 사용되는 렌티큘라 렌즈(lenticular lens) 또는 LCD 디스플레이의 조명(back light)용 도광판(渡光板) 등은 비교적 넓고 평탄한 면에 미세한 원통렌즈나 프리즘을 집합시킨 형태로 제작되는 광학부품이다. 이들은 주로 미세홈이 가공된 평판형 금형에서 투명도가 좋은 아크릴 수지나

광경화성 수지를 이용하여 제작되고 있다⁽¹⁾.

광학부품으로서의 기능이 요구되기 때문에 이들 미세홈 금형은 주로 비철금속계의 금형재료에 다이아몬드 공구를 이용한 가공으로 제작되고 있다. 이것은 다이아몬드 공구의 형상을 미리 요구되는 미세홈의 단면형상에 맞게 제작, 준비함으로써 비대칭 삼각형, 원, 타원 또는 포물선 등과 같은 홈의 형상을 비교적 쉽게 가공할 수 있고, 또한 공구의 날끝반경이 매우 작으므로 비교적 쉽게 경면을 얻는 것이 가능하기 때문이다^(2,3). 평판에 대한 직선의 홈의

* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원
 ** 부산대학교 기계공학부

가공은 공구를 회전시키게 되면 단속절삭이 이루어져 내충격성이 적은 다이아몬드 공구의 경우 쉽게 공구 파손을 일으킬 수 있으므로 공구를 고정시킨 상태에서 형삭가공을 하는 것이 공구를 보호하여 가공의 정도를 높이는 방법이 된다. 이 경우 절삭속도는 선삭이나 밀링가공 등에 비해 매우 낮게 설정될 수 밖에 없다.

한편 이러한 낮은 절삭속도와 미세한 절삭깊이의 형삭가공에서도 일반가공의 경우와 같은 채터(chatter)의 발생이 일어날 수 있다. 경면가공의 미세형삭가공에서 채터가 발생하면 작업자체가 무의미해지기 때문에 채터의 발생 원인 및 그 메커니즘을 규명하여 이를 회피할 수 있는 작업조건을 선정할 필요가 있다. 채터의 발생원인을 크게 나누면 강제진동(forced chatter), 자려진동(self-induced chatter) 그리고 재생진동(regenerative chatter)으로 분류할 수 있다^(4,5,6).

미세가공에 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. 자려진동에 의해 발생한 표면의 요철은 다시 재생진동을 일으키는 원인이 되므로, 적절한 절삭조건을 택하여 자려진동을 막을 필요가 있다.

미세형삭가공에서 자려진동을 일으키는 원인은 주로 마찰계수와 비절삭저항의 변화와 공구인선반경의 영향⁽⁷⁾ 등이다. 본 연구에서는 이러한 영향들에 의한 자려진동 발생메커니즘을 고찰하여 미세형삭가공에서의 채터발생모델을 제시하고, 다이아몬드 공구의 주 피삭재인 알루미늄, 동, 황동 등의 연질금속에 대한 절삭실험을 통해 채터모델의 타당성을 실험적으로 검증하고자 하였다.

2. 미세형삭가공시 자려진동 발생 기구

2.1 미세형삭에서의 절삭 파라미터

절삭공구, 공작물, 공작기계로 구성되는 가공계는 무한자유도의 연속계로 볼 수 있으나, 실제로 일어나는 진동은 1~2방향에 한정되므로 1자유도의 기본 진동계 또는

2자유도의 연성진동계로 치환하여 생각할 수 있다. 본 연구에서 대상으로 하는 미세형삭가공기의 기본진동계는 Fig.1과 같이 1자유도의 진동계로 간주하며, 공구는 정적평형상태에서 절삭방향으로만 변형되는 것으로 가정한다. 공구의 질량 m , 스프링상수 k , 점성감쇠계수 c 를 절삭공구, 공작물, 공작기계에 상당하는 정수로 하고, x 를 공구의 변위라고 가정한다. 절삭에 수반되는 주분력 F_t , 배분력 F_n 이 외력으로 작용하며, 다이아몬드 공구의 경사각이 일반적으로 0° 이므로 경사면에서의 마찰력은 진동에 영향을 주지않고, 여유면에서의 마찰력이 진동계에 외력으로 작용하는 것으로 가정한다. 이때 진동계의 운동방정식은

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -F_t - F_n \cdot \mu \tag{1}$$

과 같이 된다.

지금 Fig.1에서 변위 x , 변위속도 \dot{x} 가 일어났다고 하면 공구와 공작물의 상대속도는 $v - \dot{x}$ 이다. 여유면의 마찰계수와 두 방향의 절삭력은 상대속도의 함수로 간주한다. 상대속도에 따른 마찰계수와 절삭력의 변화는 일반적으로 상대속도의 크기 및 재질에 따라 다양하게 변화하지만, 본 연구에서는 절삭력은 속도의 증가에 따라 증가하며, 마찰계수는 속도의 증가에 따라 감소하는 영역만을 대상으로 한다. 절삭력은 가공속도의 증가에 따라 감소되는 것으로 알려져 있지만, 이는 가공시 발생하는 열적인 영향에 의한 재료의 강도저하에 의한 것이며, 형삭가공과 같은 낮은 절삭속도에서는 오히려 소성변형속도 증가에 따른 소성응력의 증가가 절삭력을 증가시키기 때문에 절삭력이 이러한 경향을 가지는 것으로 한정한다. 가정을 단순화시키기 위해 절삭력과 마찰계수는 Fig.2에 표시한 것과 같이 선형적인 경향을 가지고 변화되는 것으로 가정한다.

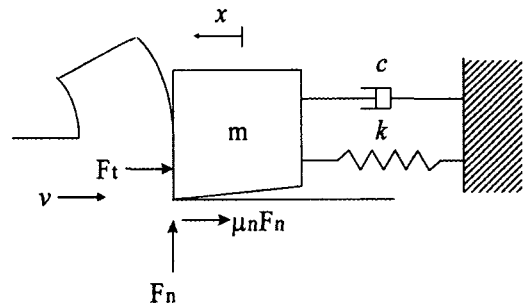


Fig. 1 Modeling of self-induced chatter

주절삭력은 가공단면적에 비례하는 것으로 생각할 수 있으므로 단위폭의 공구에 대해서 주절삭력은 절삭깊이 d 에 비례하는 것으로 생각하기로 한다. 따라서 Fig.2(a)에서와 같이 절삭력의 속도에 따른 영향을 고려하면 주절삭력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서, f_{t0} 는 절삭속도가 거의 0일때의 단위절삭깊이에 대한 주절삭력이며, c_t 는 속도에 대한 주절삭력의 변화율로 양의 값이다.

배분력은 절삭깊이가 미세하여짐에 따라 나타나는 날끝 반경의 영향에 의해 발생하는 것으로 생각할 수 있다. 일 반절삭모델에서 칩의 유동에 따른 경사면에서의 마찰력은 본 연구에서의 진동계의 진동방향과 수직으로 작용하므로 그 영향은 고려하지 않기로 한다. 날끝반경의 영향에 의한 배분력은 공작물에 침투되어 있는 공구 날끝의 크기를 수평면에 투영시킨 길이에 비례하는 것으로 가정할 수 있다. 즉, 절삭깊이의 변화에 따라 절삭력의 작용방

향 및 크기는 Fig.3과 같이 나타낼 수 있으며, 날끝반경의 크기를 R , 절삭깊이를 d 라고 할 때, 배분력 F_n 은 기하학적 관계로부터 다음과 같이 적을 수 있다.

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

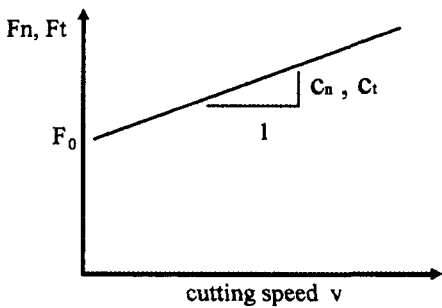
$$F_n = \{f_{n0} + c_n(v + \dot{x})\} \cdot \sqrt{d(2R - d)} \quad (d < R) \quad (3B)$$

여기서 f_{n0} 는 절삭속도가 거의 0일때의 단위절삭깊이에 대한 배분력이며, c_n 는 속도에 대한 배분력의 변화율로 양의 값이다.

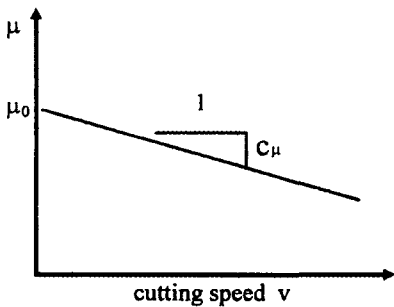
비교적 저속의 마찰속도에 대해 마찰계수는 Fig.2(b)에 나타낸 것과 같이 속도의 증가에 따라 선형으로 감소되는 것으로 가정한다. 즉,

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

단, μ_0 는 속도가 거의 0일때의 마찰계수이며, c_μ 는 속도변화에 따른 마찰계수의 변화분으로 양의 부호값을 갖는 것으로 한다.

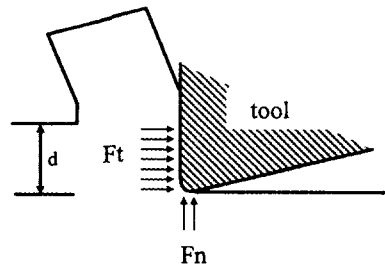


(a) cutting force

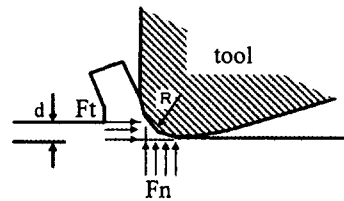


(b) friction coefficient

Fig. 2 Variation of the cutting forces and friction coefficient with cutting speed



(a) Large depth of cut (conventional machining)



(b) Small depth of cut (micro machining)

Fig. 3 Change of the principal and normal cutting forces according to depth of cut

2.2 자려진동계의 진동발생조건

식(2)~(4)의 관계를 식(1)에 대입하고 정리하면 식(5)와 같다. 단, 본 연구에서의 최소절삭깊이는 약 $2\mu\text{m}$ 정도로 일반적인 다이아몬드 공구의 인선반경보다는 큰 값이므로 F_n 값은 식(3A)를 사용하는 것으로 한다.

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx &= -F_t - \mu \cdot F_n \\ &= -\{f_{i0} + c_i(v + \dot{x})\} \cdot d \\ &\quad - \{\mu_0 - c_\mu(v + \dot{x})\} \{f_{n0} + c_n(v + \dot{x})\} \cdot R \\ &= -(f_{i0} + c_i v) d - (\mu_0 - c_\mu v) (f_{n0} + c_n v) R \\ &\quad - \{c_i d - c_\mu R (f_{n0} + c_n v) + c_n R (\mu_0 - c_\mu v)\} \dot{x} \\ &\quad + c_\mu c_n R \dot{x}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

$v \gg \dot{x}$ 라고 가정하고 \dot{x} 의 이차항을 생략하여 다시 쓰면

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + \{c + c_i d - c_\mu R (f_{n0} + c_n v) + c_n R (\mu_0 - c_\mu v)\} \dot{x} + kx \\ = -(f_{i0} + c_i v) d - (\mu_0 - c_\mu v) (f_{n0} + c_n v) R \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)의 좌변의 둘째항은 절삭시스템이 진동할 때 시스템의 감쇠역할을 한다. 만일 이 시스템 등가감쇠계수(c_{eq}) 값이 음이 되는 경우에는 시스템이 정적 불안정 상태에 놓이게 되어 외부에서 가진력을 주지 않아도 진동이 발생될 수 있다. 전가공면의 요철에 의해 발생하는 주기적인 절삭력도 진동을 발생시킬 수 있지만, 다이아몬드 공구를 이용한 미세절삭에서는 미리 가공면을 평활하게 한 후 작업이 이루어지므로, 절삭시스템의 불안정에 의한 자려진동만을 고려하기로 한다.

시스템의 등가감쇠계수는 다음과 같이 다시 적을 수 있다.

$$c_{eq} = c + c_i d - R \{c_\mu (f_{n0} + c_n v) - c_n (\mu_0 - c_\mu v)\} \quad (7)$$

시스템의 등가감쇠계수가 음이 되는 경우는 확실하게 절삭시스템이 불안정해져 심한 진동을 유발할 수 있다. 그러나 등가감쇠계수가 음이 되지 않더라도, 그 값이 작게 감소한다면 불가이드시스템에서 유발되는 진동이나 피삭재 표면의 요철, 재질의 불균일 등에 의한 외부의 가진력에 의해 절삭시스템이 진동할 수 있다. 따라서 절삭조건에 따른 등가감쇠계수의 변화를 파악함으로써, 미세형삭 가공에 있어서 채터의 발생을 피할 수 있는 가공조건을

찾는데 참고할 수 있다.

식(7)에서 등가감쇠계수를 결정하는 우변의 각 항들의 절삭조건에 따른 변화를 고찰해 본다. 먼저, 첫째항(c)은 시스템 자체의 감쇠계수이므로 절삭조건에 변화에 영향을 받지 않는다. 둘째항($c_i d$)은 등가감쇠계수에 대한 절삭깊이의 영향을 나타내고 있다. 속도에 대한 주절삭력의 변화율 c_i 가 양의 값으로 정의되는 저속의 구간에 대해 절삭깊이의 증가는 등가감쇠계수의 증가를 유발시키므로 절삭시스템을 안정화시키는 역할을 하게 된다. 이것은 선삭 등 일반 절삭에 있어서 채터를 피하기 위한 조건으로 한계절삭폭 이하의 절삭을 수행할 것이 제시되는 것과는 다르게, 미세형삭에서 채터를 피하기 위해서는 어느정도 이상의 절삭깊이로 가공을 할 필요가 있음을 나타낸다.

식(7)의 셋째항 ($-R\{c_\mu (f_{n0} + c_n v) - c_n (\mu_0 - c_\mu v)\}$)은 공구날끝반경과 절삭속도의 영향을 나타내는 항으로 볼 수 있다. 중괄호안의 값이 양이 되는 경우 공구날끝반경 R 이 클수록 등가감쇠계수의 값은 작아지게 된다. 이것은 같은 절삭조건에서 공구의 날끝반경이 큰 무딘 공구를 사용하는 것이 채터의 측면에서 나쁜 영향을 미침을 의미한다. 중괄호안의 값은 주어진 절삭속도에서의 배분력과 마찰계수의 조합으로 이루어져 있다. 각각의 계수값을 정량적으로 논하기는 어려우나 모두 양의 부호를 가지는 절삭조건을 가정하면, 절삭속도(v)의 증가는 배분력의 증가와 마찰계수의 감소를 가져온다. 이러한 변화는 세 번째항의 값의 증가를 가져오므로 결과적으로 시스템의 등가감쇠계수를 줄이게 된다. 따라서 절삭속도의 증가는 채터를 발생시키는 하나의 요인이 될 수 있음을 알 수 있다. 또한 f_{n0} 의 값이 작은 연한 재료에서는 이 항의 값이 작아져 채터가 발생되지 않는 속도의 영역이 더욱 확장될 수 있음을 알 수 있다.

이상과 같이 미세형삭가공에 있어서 절삭조건에 따른 시스템 감쇠계수의 각 항의 변화를 종합하면 절삭시스템은 절삭깊이가 작을수록, 그리고 절삭속도가 빠를수록 불안정해지며, 어느 조건 이상이 되면 채터가 발생될 수 있음을 알 수 있다. 또한 경한 재질을 절삭하는 경우 안정 영역이 축소되는 것을 알 수 있다. Fig.4는 이러한 미세형삭가공에서의 채터 발생 영역을 절삭조건에 따라 일반적인 동작기계에서의 채터발생영역과 비교하여 그 영역의 차이를 표현한 것이다. 선반, 밀링 등의 회전절삭의 경우에는 채터가 발생될 때 전가공면의 요철에 의한 절삭력의 변화가 주축회전속도의 변화에 따라 진동계에 주는 위상이 달라져, Fig.4의 윗부분과 같은 형태의 안정·불안

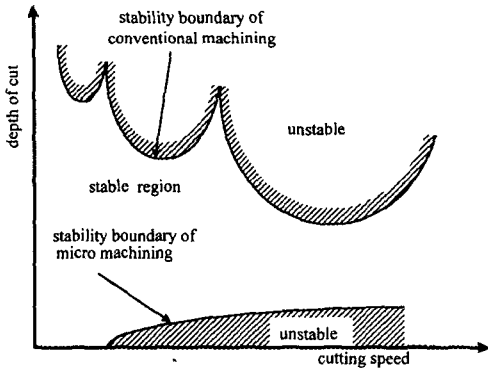


Fig. 4 Stability boundary of the micro shaping

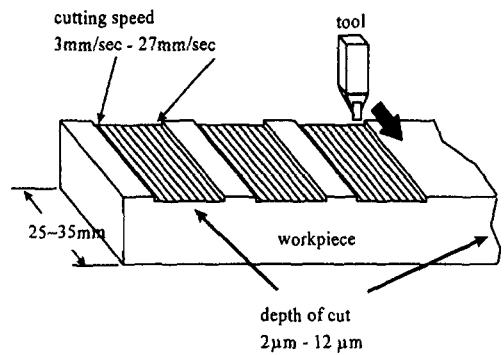


Fig. 5 Cutting scheme to evaluate the chatter

정 영역이 나타난다. 또한 불안정영역은 절삭량이 어느 정도 이상이 될 경우에 나타나므로, 한계절삭깊이 또는 한계이송속도이하에서 절삭하는 것이 채터를 피하는 일반적인 방법으로 제시되고 있다. 그러나 미세형삭가공에서 채터가 발생하는 조건은 Fig.4내의 아래부분에 빗금으로 표시된 것과 같이 절삭깊이가 작고 절삭속도는 어느 정도 큰 영역에 존재하게 된다. 따라서 미세형삭에 있어서 채터를 피하는 절삭조건은 절삭속도를 어느 정도 이하로 낮추든지 또는 일반절삭과는 다르게 절삭깊이를 어느 정도 이상으로 크게 하여야 한다. 낮은 가공속도의 형삭가공에서 가공능률을 높이기 위해서는 절삭속도를 낮춘 만큼 절삭깊이를 크게하는 것이 바람직하지만, 절삭깊이를 크게하면 절삭력의 증가에 의해 버의 발생이나 형상의 썩그러짐 등이 두드러지기 때문에 절삭깊이를 크게하는 데는 한계가 존재하며, 이에 따라 최대 절삭속도도 정해지게 된다.

이상의 채터 모델에서 실제로 채터가 발생하는 가공조건을 예측하기 위해서는 마찰계수, 비절삭력, 공구날끝반경 등의 많은 절삭 파라미터를 결정해야 하며, 이들의 정량적인 측정도 그리 쉬운 문제는 아니다. 본 연구에서는 채터가 발생할 수 있는 정확한 불안정 영역에 관한 논의는 배제하고, 절삭실험 및 가공중의 진동신호나 가공면의 거칠기를 측정을 통해, 지금까지 논의한 채터 모델의 타당성 및 전반적인 진동발생 경향을 확인하기로 한다.

3. 실험 장치 및 방법

본 연구에서의 절삭실험은 미세형삭전용으로 제작된 3축의 가공기를 사용하였다. 각축은 LM가이드 시스템이 채용되었으며, 위치 정밀도는 1µm이하이다. 각 직선 유

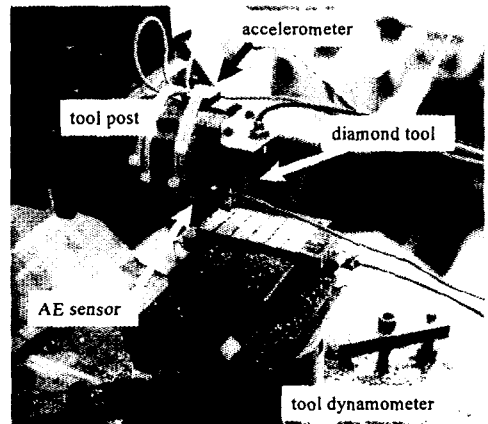


Fig. 6 Sensor attached tool post

니트는 석정반상에 고정되어 있으며, 바닥으로부터의 진동을 차단하기 위한 에어템퍼가 설치되어 있다⁶⁾.

Fig.5는 평판의 시편에 대한 절삭실험에서 가공조건에 따른 시편의 절삭법을 나타내고 있다. 시편의 폭은 25~35mm정도로 하였으며 재질은 알루미늄, 황동, 무산소동의 3가지를 사용하였다. 형삭가공에서 변경가능한 가공조건은 공구의 자세를 제외하면 절입깊이와 절삭속도의 2가지이므로 이 두가지의 절삭조건에 대해 진동이 발생하는 영역을 조사하는 것으로 하였다. 절입깊이는 2µm~12µm까지, 가공속도는 3~27mm/sec로 하였다. 공구는 날폭 1mm, 경사각 0°, 여유각 3°의 직선 절인을 갖는 단결정 다이아몬드 공구를 사용하였다. Table 1에 가공조건을 정리한다. Fig.6은 공구대에 센서를 부착하여 가공실험을 하고 있는 모습이다.

절삭실험중에는 절삭력(X,Z축), 가속도 신호(X,Z축)를 기록하였으며, 절삭후에는 가공면의 표면조도를 측정하는 것으로 비교분석하였다. 각각의 실험조건에 대해 모두 9회의 실험을 한 후 나중에 얻어진 6개의 신호들에 대해 신호를 정리하였다. 절삭력 신호는 주분력과 배분력의 평균값을 계산하였고, 진동신호는 RMS값을 구하여 비교하였다.

4. 결과 및 고찰

알루미늄, 황동, 구리의 3가지 재료에 대한 가공실험에서 얻어진 절삭력과 가속도 신호를 각 조건별로 비교분석하였고, 표면거칠기를 측정하여 절삭의 안정성을 비교하였다.

Fig.7은 각 재료별의 절삭력의 변화를 표시한 것이다. Fig.7(a)는 알루미늄의 절삭력의 변화를 나타낸다. 그림상의 실선과 각 점의 동일 표식은 동일 절삭속도임을 나타낸다. 각 그림에서 좌측 하단으로 갈수록 주분력과 배분력이 감소하는데 이는 가공깊이가 감소하는 이유 때문이다. 동일속도의 선도에서 좌측은 가공깊이 2 μ m, 우측은 12 μ m이며, table 1의 가공조건과 같다. 알루미늄의 절삭력의 거동은 가공깊이가 2 μ m일 때 주분력과 배분력이 각각 2.5N, 2N 정도이며, 가공깊이 12 μ m에서는 각각 15~16N, 7~8N정도이다. 이때 주분력은 가공깊이의 변화에 대해 거의 선형적으로 변화하지만, 배분력은 가공깊이가 큰 경우에는 절삭깊이에 대해 조금 완만한 변화를 보이고 있다. 또한 가공속도에 대해서도 절삭력은 변화를 보이고 있는데 속도가 빠를수록 증가하고 있지만 속도의 영향은 가공깊이의 변화에 비해서는 둔감한 특성을 가지고 있음을 볼 수 있다. 이러한 절삭력의 거동을 종합하면, 식(2), (3)에서의 절삭력의 가정은 대체로 타당하다고 볼 수 있다.

Fig.7(b)는 동금의 절삭력 거동을 나타낸다. 알루미늄에 비해 동금 절삭력의 크기가 약 5배정도 크게 나타나기 때문에 쉽게 절삭상태가 불안정해 질 수 있음을 예측할 수 있다. 가공속도에 대한 절삭력의 변화는 알루미늄에 비해 상관관계가 더욱 적음을 알 수 있다.

Fig.7(c)는 황동의 절삭력 분포이다. 황동에 있어서도 절삭력과 가공속도와의 상관관계가 적음을 알 수 있다. 주분력은 가공깊이에 거의 비례하여 증가됨을 볼 수 있다. 그러나 배분력은 가공깊이의 변화에 크게 둔감하여 6~8N사이의 적은 변화를 보이고 있다.

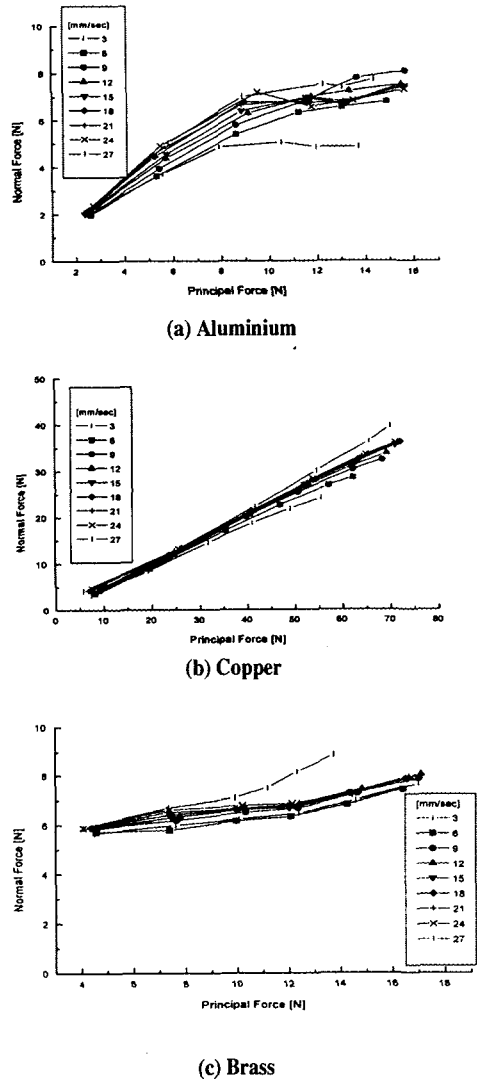


Fig. 7 Variation of the measured cutting force(average value)

Table 1 Cutting conditions of experiment

Material	brass(7-3), copper(OFHC), aluminium(7075)	
Tool	rake angle	0°
	relief angle	3°
	edge width	1mm
Cutting Condition	cutting depth	2, 4, 6, 8, 10, 12 [μ m]
	cutting speed	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27 [mm/sec]

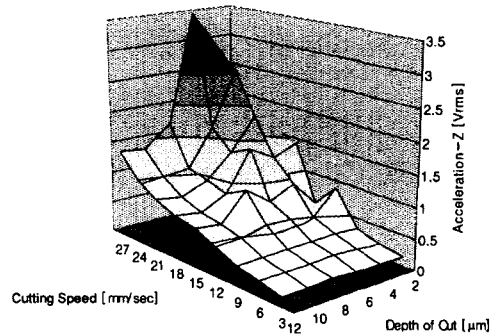
Fig.8은 각 재료의 절삭속도와 가공깊이에 대한 가속도 계 출력전압의 RMS값이다. Fig.8(a)는 알루미늄의 가공에 따른 가속도계의 출력으로 절삭깊이 $6\mu\text{m}$ 이하, 절삭속도 15mm/sec 이상에서는 신호값의 큰 출력 상승을 볼 수 있다. 이것은 절입깊이가 작고 절삭속도가 빠른 영역에 있어서 채터링이 발생되었기 때문이다. 채터링이 발생되지 않는 영역에서는 가속도는 절입깊이가 크고 절삭속도가 빠를수록 점진적인 증가를 보이고 있다. 이것은 가공기의 안내면에서 발생하는 강제진동의 영향으로 사료된다.

Fig.8(b)는 동을 절삭에 따른 가속도 신호의 값이다. 동을 절삭하는 경우에 있어서도 알루미늄의 경우와 유사한 특성을 보이고 있다. 그러나 채터가 발생한 가공깊이는 $2\mu\text{m}$ 로 알루미늄의 경우보다 깊이가 낮은 것을 볼 수 있다.

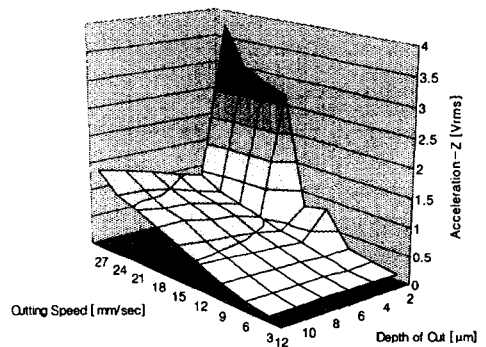
Fig.8(c)는 황동의 절삭시의 가속도 신호의 값으로 황동 절삭의 경우는 특별히 가공깊이가 작은 영역에서의 채터링은 두드러지지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 황동이 다른 재료에 비해 취성이 강하며 절삭성이 좋기 때문으로 생각된다. 황동의 경우는 오히려 가공 깊이가 크고 절삭속도가 빠를 때 점진적인 진동의 증가를 볼 수 있다. 이것도 역시 안내면의 떨림에 의한 강제진동의 영향으로 여겨진다. 따라서 안내정도가 우수한 가공기를 사용하여 미세형삭가공을 한다면 피가공재로는 황동이 적합하다고 생각된다.

Fig.9는 각각 재료의 가공조건에 따른 표면거칠기를 측정된 결과이다. Fig.9(a)는 알루미늄의 표면거칠기를 측정된 것으로 가공조건에 따른 중심선거칠기는 대체적으로 Fig.8(a)의 가속도의 값과 관련이 있는 것을 볼 수 있다. 채터가 발생하였던 절삭깊이 $6\mu\text{m}$ 이하, 절삭속도 15mm/sec 이상에서는 가속도의 값이 크게 증가한 것과 같이 표면거칠기의 값이 다른 가공조건에 비해 매우 크게 나타나고 있다. 그러나 이러한 영역 이외에서는 가속도계의 신호는 주로 속도의 증가에 따라 증가하지만, 표면거칠기는 중심선거칠기 약 $0.2\mu\text{m}$ 정도로 일정한 값을 나타내고 있다. 이것은 이때의 진동이 주로 안내면에서 발생하는 강제진동으로 공구와 공작물이 동일위상의 진동을 유발시켰기 때문으로 사료된다.

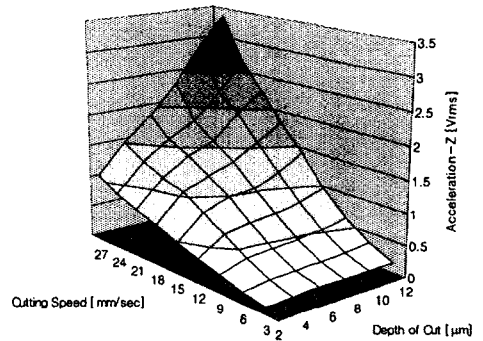
Fig.9(b)는 동을 절삭하는 중심선거칠기 값을 나타낸다. 동을 절삭하는 경우 절삭력이 매우 클 뿐만 아니라, 가공상태도 불안정하여 전 가공조건에 대해 양호한 가공면을 얻을 수 없었으며, 표면거칠기가 최대 $4\mu\text{mRa}$ 정도를 나타내었다. 동을 절삭하는 경우 가공면의 거칠기 뿐만 아니라 가공면의 광택도 양호



(a) Aluminium



(b) Copper

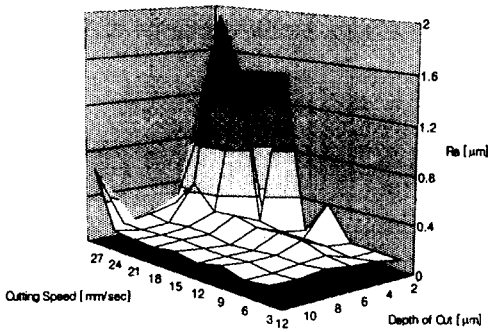


(c) Brass

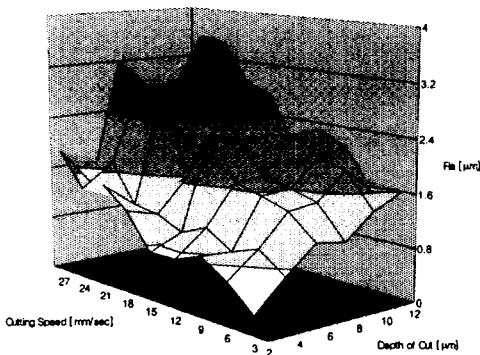
Fig. 8 Variation of the measured vibration signal(RMS value)

하지 않아 미세형삭가공용 피삭재로는 적절치 못함을 알 수 있었다.

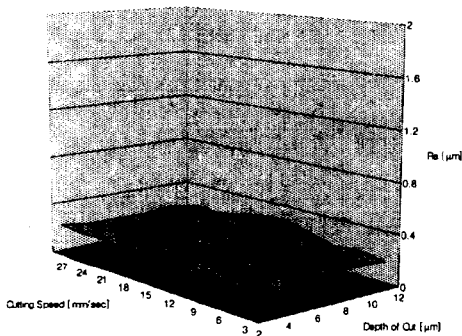
Fig.9(c)는 황동의 표면거칠기 값을 나타낸다. 황동에 있어서는 거의 모든 가공조건에 있어서 거칠기 값이 고르게 나타나, 가공조건에 대한 거칠기의 상관성이 적은 재료임을 알 수 있다. 또한 거칠기 값 자체도 $0.3\mu\text{mRa}$ 이하로 나타나 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 황동의 가속



(a) Aluminium



(b) Copper



(c) Brass

Fig. 9 Roughness of the machined surface(Ra)

도계 신호는 알루미늄의 경우에서 나타나는 절삭깊이가 작고 속도가 빠른 조건에서의 채터와 같은 것은 보이지 않고 있다. 따라서 알루미늄에서 채터가 발생하지 않은 영역과 같이 절삭조건에는 상관이 적은 일정한 거칠기의 가공면이 얻어졌다. 따라서 황동에서의 진동은 절삭상태

의 불안정에 의한 채터의 발생 없이 안내면의 떨림에 의해 발생하는 것으로 공작물과 공구가 어느정도 동일위상을 가지고 진동하는 것으로 사료된다. 본 연구에서 사용한 형삭가공기가 볼가이드 시스템을 사용하고 있는 것을 감안하면 보다 정밀한 가공기에서는 표면거칠기가 더욱 작은 우수한 가공면을 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

이상과 같이 절삭력과 진동신호의 거동 그리고 표면거칠기의 측정 결과를 보면 낮은 절삭깊이와 높은 절삭속도에서 발생하는 진동은 가공면의 거칠기를 매우 악화시키게 되지만, 절삭깊이가 어느정도 이상에서 속도에 비례하여 증가되는 진동은 거칠기에 그다지 많은 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 이것은 두가지의 진동이 서로 다른 원인에 의해 발생된다는 것을 의미하며, 낮은 절삭깊이와 높은 절삭속도의 상태에서 발생하는 큰 진동은 앞에서 서술하였던 자러진동 발생기구로 설명하는 것이 가능하다고 생각된다. 다만 재료와 공구의 마찰계수의 속도에 따른 변화를 정량적으로 측정하는 것은 곤란한 문제이기 때문에 가공실험전에 그 범위를 예측하는 등 정량적인 해석은 향후의 과제가 될 것이다.

5. 결론

미세형삭에 있어서 자러진동발생기구의 해석, 가공중의 진동측정, 가공면의 거칠기 분석등을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1 미세형삭가공시스템의 안정도 해석을 통해 절삭깊이가 작고, 절삭속도가 빠를 때 자러진동이 발생할 가능성이 있음을 알 수 있었으며, 공구날끝반경이 크고, 공작물의 절삭저항이 클수록 불안정영역이 확대됨을 알 수 있었다.

2 알루미늄의 절삭실험에서 절삭깊이 6 μ m 이하, 절삭속도 15mm/sec 이상에서 발생하는 채터진동은 가공면의 거칠기를 매우 나쁘게 하였으나, 다른 절삭조건에서 발생된 속도에 비례하는 진폭의 진동은 가공면 거칠기에 주는 영향이 적었다.

3 동의 경우 큰 절삭저항으로 인하여 가공조건에 관계없이 가공면의 거칠기가 매우 나빴으며, 황동의 경우에는 채터가 발생되지 않아 미세형삭가공재로 적합하였다.

참고 문헌

1. 中野新吾, 金丸正一, 렌치キュラー-렌즈金型の

- 製造方法, 日本國特許廳 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, pp.2016~2019, 1986.
 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, pp.153~180, 1984.
 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, pp.69~72, 1991.
 8. 임한석, 안중환, 프레넬렌즈 금형용 미세홈 가공에 있어서 버 발생에 관한 연구, 한국정밀공학회, Vol. 14, No.3, 1997.