

진동절삭법을 이용한 절삭깊이의 최소화

손성민[#], 안중환^{*}

The Minimizing of Cutting Depth using Vibration Cutting

SeongMin Son[#], JungHwan Ahn^{*}

ABSTRACT

This paper discusses the minimum cutting thickness with a continuous chip in sub-micrometer order precision diamond cutting. An ultra precision cutting model is proposed, in which the tool edge radius and the friction coefficient are the principal factors determining the minimum cutting thickness. The experimental results verify the proposed model and provide various supporting evidence. In order to reduce the minimum cutting thickness a vibration cutting method is applied, and the effects are investigated through a series of experiments under the same conditions as conventional cutting method.

Key Words : Micro diamond cutting(마이크로 다이아몬드 가공), Friction coefficient(마찰계수), Minimum cutting depth(최소절삭깊이), vibration cutting(진동절삭)

기호설명

- F_{ex} = horizontal force in elastic region
- F_{ez} = vertical force in elastic region
- p_e = pressure to workpiece in elastic region
- β_e = friction angle in elastic region
- β_p = friction angle in plastic region
- τ_s = shear strength, w = width of cut
- ϕ = shear angle, μ = friction coefficient
- μ_d = deformation term in friction coefficient
- μ_a = adhesion term in friction coefficient
- H_T = tangential hardness, H_N = normal hardness
- A_T = tangential projected area against scratching
- A_N = normal projected area against scratching

1. 서론

다이아몬드 공구를 이용한 미세절삭가공은 임의 단순형태를 가진 3차원 형상을 비교적 저렴한 비용으로 자유롭게 가공할 수 있다는 이점으로 초기의 초정밀 가공을 주도하였으며 지금까지 오래도록 중요한 비중을 차지하고 있다. 공구로서 다이아몬드를 연마한 바이트를 주로 사용하기 때문에 다이아몬드 절삭가공이라고도 불리는 초정밀 절삭가공기술은 특히, 광학분야에서 각종 초고정밀도 렌즈와 반사경의 제작으로 우수한 역량을 발휘하고 있다.

이러한 초정밀 가공에서는 표면거칠기와 형상

접수일: 2004년 4월 28일; 게재승인일: 2004년 8월 13일
[#] 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소
교신저자: 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소
E-mail smson@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-3087
^{*} 부산대학교 기계공학부

정밀도를 초정밀로 실현하는 것이 최우선의 목표이기 때문에 절삭깊이를 얼마나 작게 하고 그 가공단위를 정확하게 제어하여 재현할 수 있느냐 하는 것이 가장 중요하다. 또한, 재료는 가공되는 과정에서 형상뿐만 아니라 특성도 변하기 때문에 가공물의 사용 환경에서 물리적, 화학적 안정성까지 요구하는 현대 생산시스템에서 가공단위 개념의 중요성은 더욱 커진다.

다이아몬드 공구를 이용한 절삭가공법에 의해 가능한 작은 절삭깊이를 달성하여 초정밀 부품을 제작하기 위해서 고려되어야 할 요소들은 가공기, 공구, 공작물 그리고 가공 시 이 요소들의 상호작용에서 나타나는 현상 등 주요 4부분과 기타요소들로 나누어 생각할 수 있다. 우수한 성능의 가공기와 높은 정밀도의 공구가 갖추어져 있다하더라도 공작물의 물리·화학적 특성 및 공구와 공작물사이의 상호작용에 대한 이해는 높은 정밀도의 가공을 행하는데 필수적인 요소이다. 또한, 가공에 의해 공작물의 특성이 변할 수 있는데 이는 가공 시에 발생하는 절삭력, 온도 등에 의한 것으로서 이와 관련성이 가장 큰 가공조건인 가공단위, 특히 가공물의 보다 높은 정밀도를 고려할 때 가공이 가능한 최소절삭깊이에 대한 해석의 중요성은 매우 높다.

최소절삭깊이에 관한 연구는 임계절삭깊이, 한계절삭깊이, 최소절삭깊이 등의 용어로 정의되어 국내외에서 이론적, 실험적으로 꾸준히 수행되었다. Basuray¹ 등은 공구의 날끝을 실린더형태로 가정하고 플라우잉(Plowing)과 연속형 절삭칩이 발생하는 경계를 응력에 관한 수식전개를 통해 정체점(Neutral point)이라는 공구날끝 원주상의 값을 구하였다. Lucca² 등은 초정밀 가공에서의 에너지 소산에 대한 공구 날끝반경의 영향에 관한 절삭실험에서 절삭력의 관찰을 통해 연속칩이 발생하지 않는 최소의 절삭깊이를 추정하였다. Yuan³ 등은 마찰계수, 주분력과 배분력, 공구의 날끝반경에 관한 간단한 관계식을 유도하여 절삭이 가능한 최소깊이를 구하고 실험결과를 통해 이 식의 타당성을 주장하였다. 한편, 국내에서는 J.D Kim⁴ 등이 공구의 날끝반경을 고려한 마이크로가공에서의 특성을 이론적으로 해석하고 실험하여 Moriwaki, Lucca 등 기존의 관련연구에서 얻어진 결과들과의 비교를 통해 초정밀 절삭가공에서는 공구의 날끝반경이 절삭력 해석에 중요한 역할을 한다는 것으로 보였다. 김국원⁵ 등은 열-점소성 절삭모델의 유한요소해석으로

초정밀 절삭시의 정체점과 임계절삭깊이를 구하고 절삭속도, 절삭깊이에 따른 이 값의 변화를 보고하였다. 또한, S.M Son, J.H. Ahn⁶ 등은 마찰계수와 최소절삭깊이에 관한 관계식을 유도하고 이를 실험으로 증명하였다.

최소절삭깊이에 관한 연구들을 정리하여 보면 연속형의 칩 배출이 가능한 최소의 절삭깊이는 공구의 날끝반경과 공구와 공작물 사이의 마찰계수와 밀접한 관련이 있다는 것을 알 수 있다. 날끝반경이 예리할수록 그 가공깊이를 작게 할 수 있다는 것은 직관적으로도 예측할 수 있다. 한편, 마찰계수의 경우 전통적인 절삭이론에서는 공구 경사면에서 칩의 흐름을 방해하는 저해 요소였으나 서브마이크로미터 오더의 절삭가공에서는 그 해석이 조금 다르게 나타난다. 공구와 공작물재료 사이의 마찰계수가 클 경우 칩이 배출될 때는 흐름을 방해하는 요소가 되지만 원재료로부터 칩을 만들기 위한 전단변형에는 긍정적인 요소로 작용한다는 것이다. 그러나 미세영역에서의 마찰계수는 두 물질사이의 미끄럼 운동에 의해 얻어지는 불변의 값이 아니라 두 물체 사이의 마찰조건과 형태에 따라 변하는 값으로 트라이볼로지(Tribology)분야에서도 지속적으로 연구되고 있는 과제이다.

본 연구에서는 최소절삭깊이와 공구-공작물 사이의 마찰계수와 관계를 조사하고 공구를 주기적으로 진동하며 가공하는 진동절삭에 의해 일반절삭법보다 최소절삭깊이를 더 작게 할 수 있음을 보고한다.

2. 최소절삭깊이와 마찰계수

2.1 최소절삭깊이 모델

최소절삭깊이는 안정적인 가공상태가 지속되며

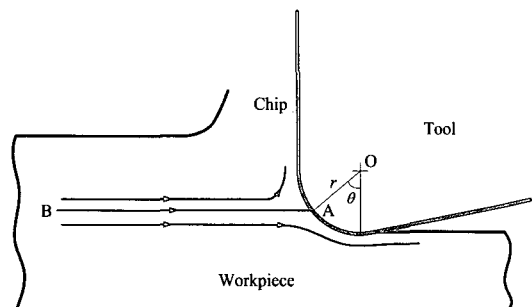


Fig.1 Metal flow around a rounded tool edge

연속형의 칩이 생성되는 최소의 가공깊이로 정의한다. 절삭깊이가 공구의 날끝반경보다 작아지는 초정밀 절삭가공의 경우 그림 1과 같이 연속형의 칩이 발생하거나 절삭이 발생하지 않고 공구 아래쪽으로 가공되지 않고 흘러가는 임계깊이가 존재하게 된다.

이 때, 최소절삭깊이에 대응하는 공구날끝 상의 점을 정체점(Stagnation point or Neutral point)라 한다. 가공깊이가 공구 상의 최저점과 정체점에 의해 결정되는 깊이보다 크면 연속형 칩을 발생시키고 이 값보다 작으면 공구의 진행에 따라 공구 앞쪽에 쌓여서 솟아오르며(Piling-up) 단속적으로 떨어져 나가거나 공구 밑으로 흐르게 된다. 이 정체점을 구하는 것이 연속형 절삭칩을 발생하는 최소절삭깊이를 구하는 것이다.

본 연구에서는 재료가 최소절삭깊이를 임계값으로 하여 완전소성과 완전탄성으로 나뉘어 지는 것으로 가정한다. 즉, 최소절삭깊이 이상으로 가공할 때는 연속형의 칩이 발생되고 최소절삭깊이 이하로 가공할 때는 칩이 전혀 발생하지 않고 공구의 아랫면을 지난 뒤 완전하게 회복되는 것이다. 먼저, 절삭깊이가 최소절삭깊이보다 작을 경우에 공구 주위의 힘을 그림 2와 같이 표현하였다.

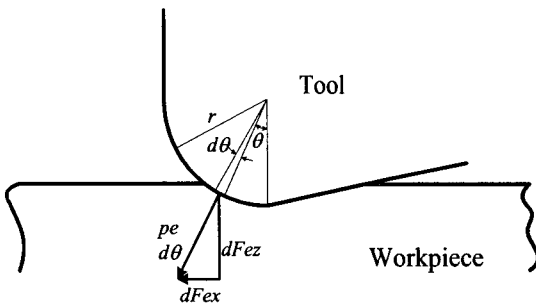


Fig.2 Differential cutting force in the elastic region

이 때, 미세각 $d\theta$ 에 해당하는 영역에 가해지는 힘을 표현하면 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} dF_{ex} &= p_e r d\theta \sin\theta + \mu p_e r d\theta \cos\theta \\ dF_{ey} &= p_e r d\theta \cos\theta - \mu p_e r d\theta \sin\theta \end{aligned} \quad (1)$$

그리고, 임의 단위각에서 dF_{ex}/dF_{ey} 는 다음과 같

이 정리된다.

$$\begin{aligned} \frac{dF_{ex}}{dF_{ey}} &= \frac{p_e r d\theta (\sin\theta + \mu \cos\theta)}{p_e r d\theta (\cos\theta - \mu \sin\theta)} \\ &= \frac{p_e r d\theta \sqrt{(1+\mu^2)} \sin(\theta + \beta_e)}{p_e r d\theta \sqrt{(1+\mu^2)} \cos(\theta + \beta_e)} \quad (2) \\ &= \tan(\theta + \beta_e) \end{aligned}$$

한편, 절삭깊이가 최소절삭깊이보다 커서 완전소성영역에 해당하는 부분에서 연속형의 칩이 생성될 경우를 그림 3과 같이 표현하였다.

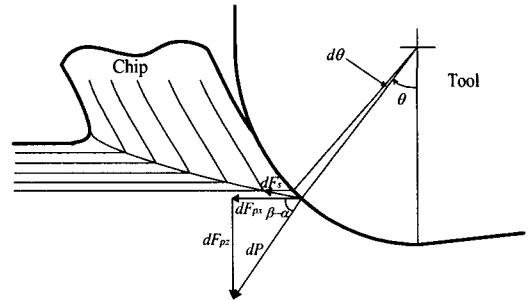


Fig.3 Force model in the cutting region

칩이 발생하는 소성영역에서의 미세영역에 대한 힘 dF_{px} 를 다음과 같이 정의하였다.

$$dF_{px} = \frac{\tau_s w \cos(\beta_p - \alpha)}{\sin\phi \cos(\phi + \beta_p - \alpha)} dt \quad (3)$$

이 때, $\alpha + \theta = \frac{\pi}{2}$, $t = r(1 - \cos\theta)$ 이므로, $dt = r \sin\theta d\theta$ 로 되어 dF_{px} 는 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$dF_{px} = \frac{-r \tau_s w \sin\theta \sin(\beta_p + \theta)}{\sin\phi \sin(\phi + \beta_p + \theta)} d\theta \quad (4)$$

또한, 같은 방법으로 dF_{pz} 도 다음과 같이 된다.

$$dF_{pz} = \frac{-r\tau_s w \sin\theta \cos(\beta_p + \theta)}{\sin\phi \sin(\phi + \beta_p + \theta)} d\theta \quad (5)$$

식 (4), (5)로부터 dF_{px}/dF_{pz} 는 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{dF_{px}}{dF_{pz}} = \frac{\sin(\beta_p + \theta)}{\cos(\beta_p + \theta)} = \tan(\beta_p + \theta) \quad (6)$$

초정밀 절삭가공에서 가공 중 공작물의 저항력, 즉, 공구가 경험하는 힘을 완전탄성영역, 완전소성영역으로 나누어 식 (2)와 (6)으로 정리하였다. 최소 절삭깊이를 결정하는 정체점은 각 영역 힘의 경계가 되고 이를 표현하면 그림 4와 같다. 이 때, 칩으로 분리되는 미세영역에서 전단각과 정체각이 거의 같다고 가정하고 정체점에서 미소두께의 응력평형상태로부터 식 (2)와 (6)을 이용하여 정리하면 식 (7)과 같다.

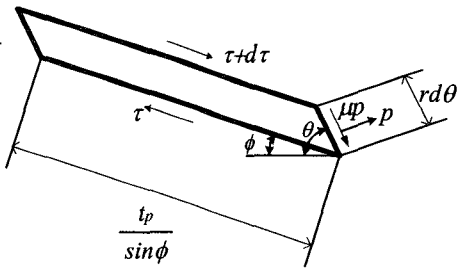


Fig. 4 Stress on the stagnation point

$$\frac{dF_{cx}/d\tau d\theta \cos\theta_c}{dF_{cz}/d\tau d\theta \sin\theta_c} = 1, \tan(\theta_c + \beta_c) = \cot\theta_c$$

또는,

$$\frac{dF_{px}/d\tau d\theta \cos\theta_c}{dF_{pz}/d\tau d\theta \sin\theta_c} = 1, \tan(\theta_c + \beta_p) = \cot\theta_c \quad (7)$$

식 (7)로부터 칩이 분리되는 점 P_c 에 대한 공구

저점으로부터의 정체각 θ_c 는 식 (8)과 같이 정리할 수 있고, 이 값을 대입하면 식 (9)와 같이 최소절삭 깊이를 결정할 수 있다.

$$\theta_c = \frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} \quad (8)$$

$$t_m = r(1 - \cos(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2})) \quad (9)$$

따라서, 최소절삭깊이는 공구의 날끝반경과 공구와 공작물 사이의 마찰계수에 의해 영향을 받는다는 것을 예측할 수 있다.

2.2 공구 진동을 이용한 마찰계수의 변화

식 (9)로부터 마찰계수가 클수록 최소절삭깊이가 작아질 수 있다는 것을 확인하였다. 마찰이란 두 물체가 접촉하여 움직이려 하거나 움직이고 있을 때 그 운동을 방해하여 저지하려는 현상이다. Amonton이 1699년, Coluomb이 1785년에 마찰과 관련된 실험을 토대로 마찰력이 물체에 작용하는 수직 힘에 비례한다고 발표하였다. 하지만 이 법칙은 매우 청정한 표면에 의한 건조 공기중에서의 마찰과 같이 극히 제한적으로 적용이 가능한 어림식이다. 이 후 20세기에 Holm, Ernst, Bowden, Tabor^{7,8} 등의 연구논문들에 의해 마찰력은 변형(Plowing)과 응착(Adhesion)이 함께 나타나는 양면성이 있는 현상으로 설명하였다. 따라서 마찰계수를 변형에 의한 항과 응착에 의한 항으로 분리하여 식 (10)과 같이 나타낼 수 있으며 마찰력은 두 물체 표면의 미세한 돌기(Asperity)들의 물리적 저항과 화학적 응착에 의한 접촉저항을 극복하고 미끌어지기 위한 힘으로 설명할 수 있다.

$$\mu = \mu_p + \mu_a \quad (10)$$

한편, 마찰계수는 트라이볼로지(Tribology)분야에서의 Vingsbo⁹ 등에 의해 정의된 동적경도를 이용하여 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu = \frac{H_T \cdot A_T}{H_N \cdot A_N} \quad (11)$$

따라서 재료의 수직·수평경도, 접촉면적에 의해 마찰계수가 결정될 수 있다. 또한, 경도와 접촉면적의 변화에 따라 같은 재료라 할지라도 마찰계수가 다르게 나타날 수 있음을 알 수 있다. 재료의 경도는 온도의 영향을 받기 때문에 가공 시의 절삭열, 윤활상태에 따라 변할 수 있으며, 접촉면적 또한 진실접촉면적을 말하는 것으로 공구와 공작물의 접촉상태에 따라 변할 수 있는 값이 된다. 그러므로 공구에 진동을 가하여 가공하는 진동절삭을 적용할 경우 마찰계수의 변화를 피할 수 있다.

특히, 식 (10)에서 응착에 관한 항이 변형에 의한 항보다 마찰계수의 결정에 훨씬 큰 영향을 준다는 트라이블로지 분야에서의 연구결과들을 감안할 때, 연성가공 등에 적용되고 있는 진동절삭법에 의해 응착으로 인한 마찰계수의 증가가 기대된다. 진동이라는 메커니즘에 의해 공구가 공작물에 접촉할 때 응력의 집중현상이 생긴다. 이로 인하여 공구-공작물의 접촉부에서 온도가 상승하면 재료의 항복응력이 낮아지게 되고 실질접촉면적이 늘어나면서 응착이 용이해지기 때문이다. 따라서 마찰계수의 증가에 의해 식 (9)로부터 절삭깊이를 보다 작게 할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 실험결과

3.1 마찰계수

실험에는 전자주사현미경에 의해 날끝반경이 0.5 μm 로 측정된 플랫(Flat)형상의 다이아몬드 공구

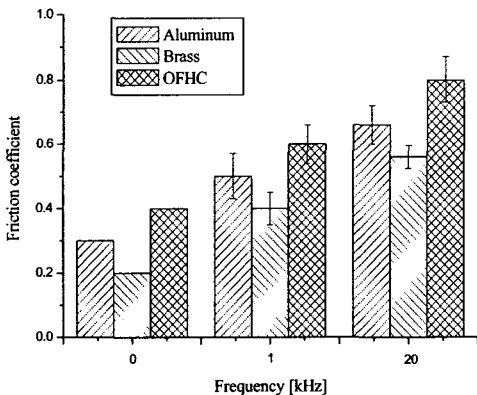


Fig. 5 Friction coefficient varying with frequency

와 알루미늄, 황동, 무산소동 등 3종류의 비철금속이 사용되었다.

가공실험에 앞서 마찰계수를 측정하였다. 마찰계수의 측정은 동일한 마찰조건에서 공구를 진동시키지 않았을 때와 가공방향으로 공구에 1kHz, 20kHz의 진동을 부가하며 접촉했을 때의 수직·수평력을 측정하여 구하였다. 이 때, 진폭은 각각 1.3 μm 와 0.3 μm 로 진동절삭의 효과를 기대할 수 있는 한계 진폭을 충분히 만족하고 있다.

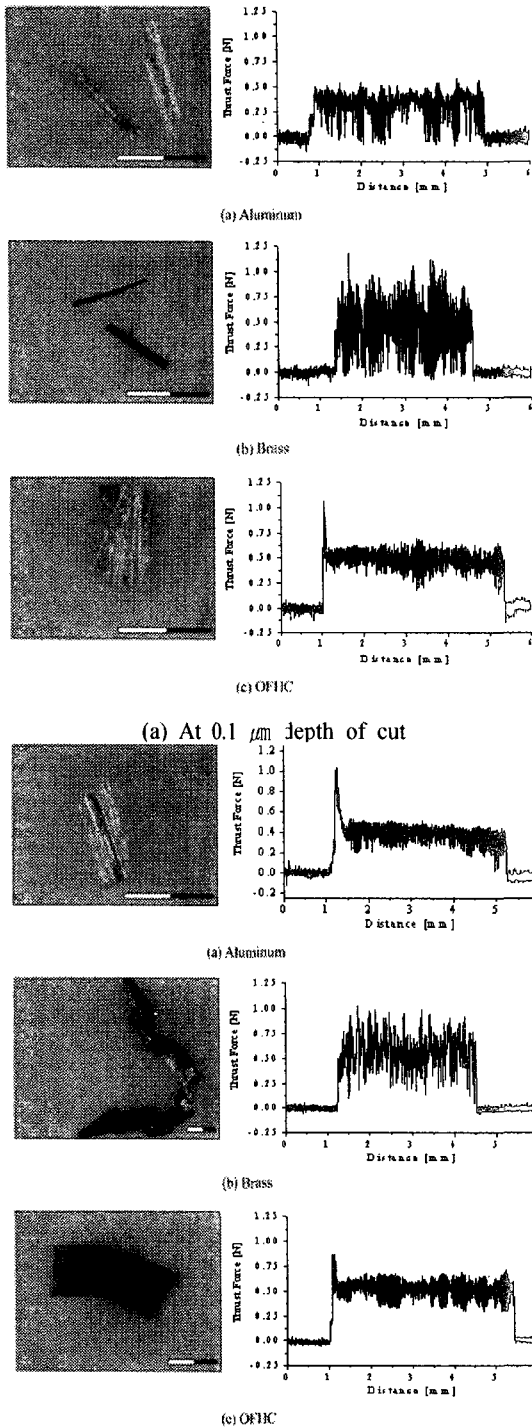
그림 5는 마찰계수 측정결과를 나타낸다. 공구에 진동을 부가하지 않은 경우 알루미늄의 경우 0.3, 황동의 경우 0.2, 그리고 무산소동의 경우는 0.4로 측정되었다. 공구의 진동에 의해 세 종류의 재료모두 마찰계수가 증가하면서도 진동하지 않았을 때의 마찰계수 특성은 그대로 유지되어 무산소동이 가장 높고 황동이 가장 낮은 것을 확인할 수 있다. 예리막대는 공구진동에 의해 변화되는 마찰계수의 변화폭을 나타내는 것으로 값의 변화는 있으나 공구의 진동주파수 증가에 따라 마찰계수가 증가하는 경향에는 변함이 없다.

3.2 일반절삭

마찰계수를 고려하여 최소절삭깊이를 구하는 이론적 모델의 타당성을 검증하고 최소절삭깊이 부근에서 나타나는 가공특징을 조사하기 위하여 절삭 가공실험을 수행 하였다.

절삭형태는 셰이핑(Shaping)이며 공구에 진동을 부가하지 않고 가공속도를 1mm/s로 고정하여 절삭깊이를 0.1 μm 부터 0.5 μm 까지 0.1 μm 씩 증가시키며 절삭실험을 하였다. 최소절삭깊이에 관한 식 (9)로부터 무산소동은 0.1 μm 의 절삭깊이에서 알루미늄과 황동은 0.2 μm 의 절삭깊이에서 연속형의 칩을 기대할 수 있다. 그림 6은 절삭깊이 0.1 μm 와 0.2 μm 에서 생성된 절삭칩 사진과 배분력 파형을 나타낸다. 절삭칩 사진아래의 흑백 막대는 절삭폭을 나타내는 기준막대로 1 mm이다.

절삭깊이가 0.1 μm 인 그림 6(a)에서 알루미늄과 황동의 절삭력 파형은 0N과 일정한 값 사이에서 지속적으로 변화하고 있다. 배분력이 0N이라는 것은 공구와 공작물이 접촉하고 있지 않다는 것을 의미하는 것으로 단속적인 형태의 가공이 이루어지고 있음을 추측할 수 있으며 칩 사진에서 이를 확인할 수 있다. 반면에 무산소동의 경우는 일정한 값에 이르러 절삭력의 변동폭이 작아 0N으로 되는 구간



(b) At 0.2 μm depth of cut
Fig. 6 Chip shape and cutting force profile

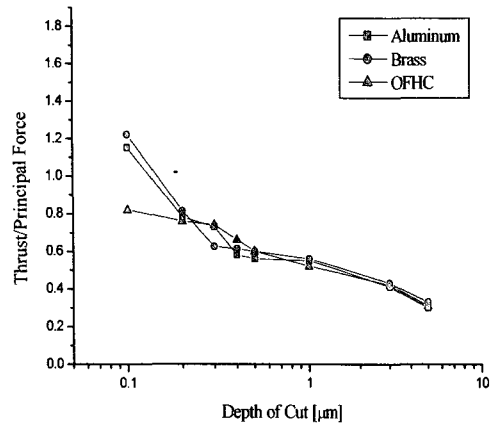


Fig. 7 Force ratio of thrust to principal direction

이 없으며 현미경 사진에서도 연속형의 절삭칩이 생성되었음을 볼 수 있다

그림 7은 절삭실험에서 측정된 배분력을 주분력으로 나눈 값을 표시한 그래프이다. 0.1 μm 의 절삭깊이에서부터 연속형의 칩이 생성된 무산소동의 경우는 모든 절삭깊이 구간에서 주분력이 배분력보다 크지만, 알루미늄과 무산소동의 경우는 0.2 μm 의 절삭깊이에서부터 주분력이 배분력보다 크게 나타난다.

3.3 진동절삭

동일한 가공조건에서 공구에 1 kHz와 20 kHz의 진동을 추가하여 절삭가공했을 때, 배분력을 주분력으로 나눈 결과를 각각 그림 8, 9로 나타내었다.

일반적인 방법에 의한 절삭실험 결과 절삭깊이 0.1 μm 에서 연속칩이 생성되었던 무산소동만 1이하로 표시되었던 반면에 공구에 진동을 추가하여 절삭가공하였을 때는 알루미늄과 황동도 무산소동과 함께 모든 절삭깊이 구간에서 1이하로 표시되었다.

그림 9는 공구의 진동주파수를 20 kHz로 설정하여 절삭하였을 때의 주분력에 대한 배분력의 비를 나타내는 그래프이다. 공구를 1 kHz로 진동하였을 때와 비슷한 결과를 나타내고 있다.

진동절삭 시의 주분력에 대한 배분력의 비를 나타내는 그래프에서 특이한 점은 공구의 진동주파수가 1 kHz일 때, 주분력에 대한 배분력의 값이 절삭깊이 0.1~0.5 μm 구간에서 1주위에 머무르며 일반절삭

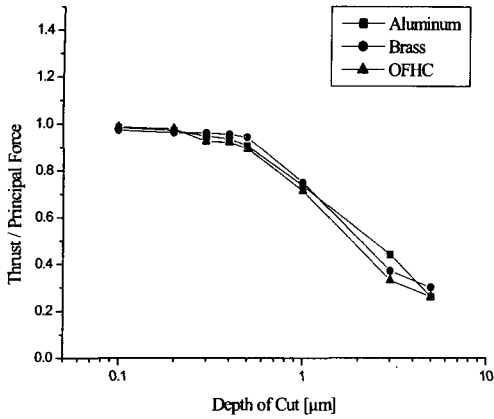


Fig. 8 Force ratio of thrust to principal direction in vibration cutting (1kHz)

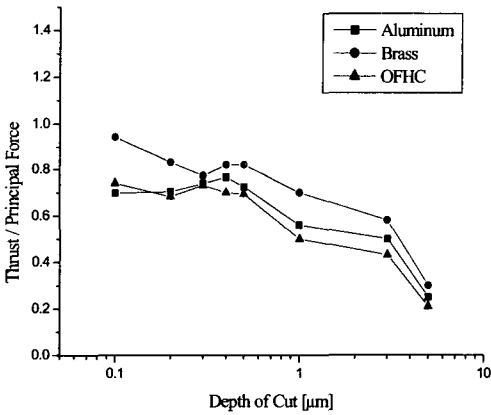


Fig. 9 Force ratio of thrust to principal direction in vibration cutting (20kHz)

에서보다 배분력의 비중이 더 크게 나타나고 있다.

이는 가공속도에 비해 공구의 진동주파수가 충분히 크지 않아 주기적으로 전·후진을 반복하는 진동공구가 공작물로부터 후퇴할 때 가공되지 않고 공구아래를 지났던 재료의 탄성회복으로 음(-)의 힘이 측정되면서 나타난 결과이다. 공구의 진동주파수를 20 kHz로 설정하여 가공하였을 때는 공구의 진동주파수가 가공속도에 비해 충분히 크기 때문에 이러한 현상이 나타나지 않았다.

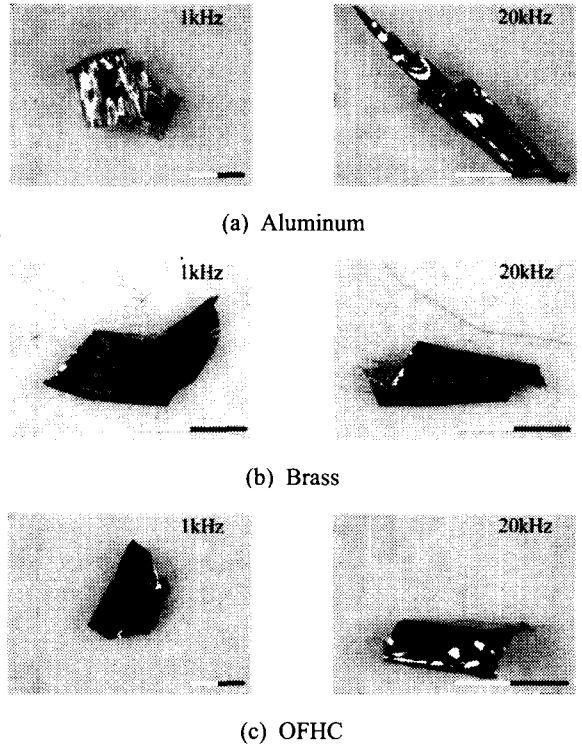
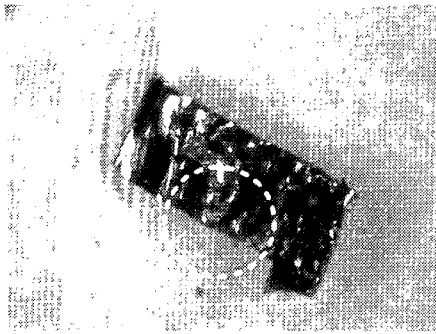


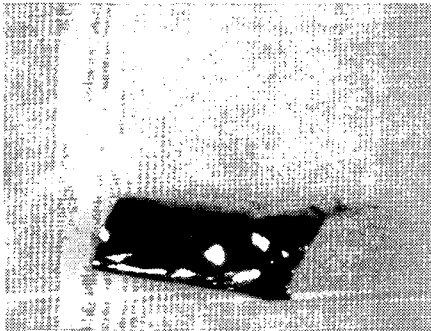
Fig. 10 Cutting chip produced by vibration cutting

진동절삭에 의해 생성된 칩을 수거하여 현미경으로 살펴보았다. 그림 10은 절삭깊이를 1 μm 로 설정하여 가공하였을 때의 절삭칩이다. 3종류의 재료 모두 진동이라는 메카니즘에 의해 마찰계수가 증가하여 일반절삭에서는 절삭깊이 1 μm 에서 연속형의 칩이 생성되지 않았던 알루미늄과 황동 모두 연속형의 칩이 생성되었음을 확인할 수 있다. 상대적으로 경도가 낮고 마찰계수가 크게 증가된 알루미늄은 두꺼운 칩이 생성되었다. 하지만, 경도가 높고 마찰계수의 증가가 다른 재료에 비해 작았던 황동은 칩의 가운데 부분이 갈라져 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 진동절삭에 의한 칩은 그 메카니즘에 의해 칩의 두께가 공구의 진동에 의해 주기성을 띄며 변하게 되는데 이 때, 절삭깊이가 충분히 크지 않아 상대적으로 두께가 작은 부분이 갈라져 나타난 것이다.

한편, 일반적인 절삭가공에 의해 절삭깊이 0.1 μm 에서도 연속형의 칩이 생성되었던 무산소동의 경우 진동절삭에 의해 칩의 두께가 더욱 두꺼워 졌는데 이를 그림 11에서 확인할 수 있다.



(a) Vibration cutting (1kHz)



(b) Vibration cutting (20kHz)

Fig. 11 Comparison of chip produced in vibration cutting

일반절삭가공에 의한 무산소동의 절삭칩의 경우 두께가 얇아서 일부가 갈라져 있음을 확인 할 수 있다. 그림 11에서 1 kHz의 진동절삭에 의한 칩은 일반절삭에 의한 칩보다 두꺼워 졌으나 일부에 구멍이 나 있음을 볼 수 있으나 20 kHz의 진동절삭에 의한 칩에서는 이러한 모습이 전혀 보이지 않을 만큼 두꺼워 졌다.

4. 결론

다이아몬드 공구를 이용한 서브미크론 오더의 초정밀절삭가공에서 공구-공작물 사이의 마찰계수를 고려한 최소절삭깊이에 관한 식을 제안하고 진동절삭법에 의해 마찰계수를 변화시켜 절삭깊이를 더욱 작게 할 수 있음을 보였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 공구의 날끝반경과 공구-공작물 사이의 마찰계수를 고려한 최소절삭깊이에 관한식을 제

안하고 가공실험을 통해 제안된 식이 타당함을 보였다.

- 2) 진동절삭법에 의해 공구-공작물 사이의 마찰계수를 변화시켜 최소절삭깊이를 일반절삭법에 비해 더욱 작게 할 수 있음을 실험결과를 통해 밝혔다.

후 기

이 논문은 1999년도 부산대학교 학술연구조성비를 지원받아 수행된 연구임.

참고문헌

1. BASURAY, P.K., MISRA, B.K. and LAL, G.K., "TRANSITION FROM PLOUGHING TO CUTTING DURING MACHINING WITH BLUNT TOOL," *Wear*, 43, pp.341-349, 1977.
2. Lucca, D.A., Seo, Y.W., "Effect of Tool Edge Geometry on Energy Dissipation in Ultraprecision Machining," *Annals of the CIRP*, Vol. 42/1/1993.
3. Yuan, Z.J., Zhou, M. and Dong, S., "Effect of diamond tool sharpness on minimum cutting thickness and cutting surface integrity in ultraprecision machining," *Journal of Materials Processing Technology*, 62, pp.327-330, 1996.
4. Kim, Jeong-Du, Kim, Dong Sik, "Theoretical analysis of micro-cutting characteristics in ultra-precision machining," *Journal of Materials Processing Technology*, 49 (1995) 387-398.
5. Kim, KugWeon, "A Study on the Critical Depth of Cut in Ultra-precision Machining," *Journal of KSPE*, Vol.19, No.8, pp.126-133, 2002.
6. Son, SeongMin, Lim, HanSeok and Ahn, JungHwan, "A Study on Critical Depth of Cuts in Micro Grooving," *KSME International Journal*, Vol. 17, No. 2, pp. 239-245, 2003.
7. Bhushan, Bharat 'Handbook of Micro/Nano Tribology,' CRC Press, 1999.
8. STOLARSKI, T.A., 'Tribology in Machine Design,' Industrial Press Inc., 1990.
9. Liang, Y.N., Li, S.Z., Li, D.F., Li, S., "Some developments for single-pass pendulum scratching," *WEAR*, 199, pp. 66-73. 1996.