

〈論 文〉

정밀 선삭 가공 과정의 절삭력 예측모델

윤영식* · 이상조**

(1992년 6월 23일 접수)

Cutting Force Prediction in Single Point Diamond Turning

Young-Sik Yoon and Sang-Jo Lee

Key Words : Diamond Tool(다이아몬드 공구), Single Point Diamond Turning(정밀 선삭 가공), Cutting Force Model(절삭력 예측모델)

Abstract

The achievable machining accuracy depends upon the level of the micro-engineering, and the dimensional tolerances in the order of 10 nm and surface roughness in the order of 1 nm are the accuracy targets to be achieved today. Such requirements cannot be satisfied by the conventional machining processes. Single point diamond turning is one of the new techniques which can produce the parts with such accuracy limits. The aims of this thesis are to get a better understanding of the complex cutting process with a diamond tool and, consequently, to develop a predicting model of the cutting forces. A cutting model for describing the influence of cutting conditions (cutting speed, feedrate and depth of cut), material properties of the workpiece and tool geometry has been proposed after estimating the two cutting force models-the Recht model and the Dautzenberg model. The experiments with Al-alloy workpieces, which have been carried out in order to estimate the models, show that the proposed model in this thesis is better than the two models. As the depth of cut and feedrate are increased in the operations settings (depth of cut 8 ~100 μm , feedrate 8~140 $\mu\text{m}/\text{rev}$ and cutting speed 8 m/sec), the relation of dimensionless cutting forces from experiments are similar to the proposed model. With the undeformed chip area of 30~80 $\times 10^2 \mu\text{m}^2$, the experimental cutting forces accord with the force prediction.

1. 서 론

최근 들어 초정밀가공기술(ultra-precision technology)에 대한 관심이 고조되어 가고 있으며, 컴퓨터, 반도체, 레이저, 영상 및 정보분야의 눈부신 발전은 그 기반을 부품의 치수 및 형상정밀도가 미크론 단위에 이르는 초정밀화에 두고 있다. 현대의 각종 첨단산업에 있어 초정밀가공을 요하지 않

는 분야는 거의 없다고 할만큼 초정밀가공의 중요성은 더욱 강조되고 있다.

지난 200여년 동안 정밀절삭에 대한 점진적 노력의 결과로 1미크론의 정밀도를 유지하는 수준으로 발전하였으며, 수 나노미터의 오차를 갖는 제품을 생산하기에 이르렀다. 비록, 아직도 정밀절삭에 대한 많은 문제점이 미해결 상태에 있지만 제품의 소형화, 경량화 추세에 발맞추어 초정밀가공 분야의 발전은 더욱 박차를 가할 것으로 예상되며, 이것은 또한 가공 경제성과 생산성의 향상에도 기여할 것으로 기대된다.

*정회원, 건양대학교 기계공학과

**정회원, 연세대학교 기계공학과

절삭가공에서 어느정도의 가공정밀도로 가공이 될 때를 "초정밀가공"이라 할 것인가는 그 시대의 기술수준에 따라 달라지는데, 오늘날에는 치수 및 형상정밀도 100 nm, 표면조도는 10 nm 이하를 지칭한다.⁽¹⁾ 엄밀한 의미에서의 치수 형상 정밀도는 가공물의 치수와 의 비로서 표시하는 것이 타당하며, 이러한 점이 미세가공과 구분된다. 그 비가 10^{-6} 차수인 가공을 초정밀가공이라 하는데 예로써 직경 100 mm의 원통을 가공함에 있어 그 진원도가 10 nm 이어야 한다. 현재, 초정밀가공은 치수정밀도로 10 nm, 표면거칠기는 1 nm를 목표로 하고 있으며, 이는 금속의 결정격자간격($\text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$)에 육박하는 정도이다. 이러한 정밀도에 이르려면 가공을 행하는 공작기계의 발전도 병행되어야 하는데, 원하는 부품의 오차가 $1 \mu\text{m}$ 일 때, 공작기계의 운동정도와 동작의 반복성이 10 nm를 요구하고 있다.

이런 요구사항은 전통적 가공과정의 연장개념으로는 만족시키지 못하며 새로운 가공기술의 필요성이 대두되기에 이르렀다. 그러한 신기술중의 하나가 다이아몬드 공구를 사용한 절삭이다. 다이아몬드를 공구로 사용하는 기술은 그 자체가 전혀 새로운 것이 아니나, 본격적으로 연구되고 실용화되기 시작한 것은 50여년에 불과하며 이와 관련하여 측정기술, 공구, 피삭재의 재질 및 제어 시스템 등이 비약적으로 발전하였다. 다이아몬드를 사용한 절삭가공에 의하면 표면거칠기의 향상뿐 아니라 양호한 치수정밀도, 진원도, 원통도, 평면도, 진직도 등의 요구 사항을 만족시킬 수 있다. 다이아몬드 절삭가공의 대상은 최근의 전자공학의 진보와 정보화 사회로의 발전에 따라 사용빈도가 높은 비자성 금속인 구리, 알루미늄, 플라스틱 등이 대표적인 경우이고 이외에도 금, 은, 플라티늄, 납, 니켈 등도 가공되고 있다.⁽²⁾ 비디오 테이프 레코더의 실린더 드럼, 건식 복사기의 드럼, 컴퓨터의 자기디스크, 레이저 프린터의 폴리곤 미러, 구면 및 비구면 렌즈, 우주 관측기계에 쓰이는 비구면경 등이 다이아몬드 절삭가공에 의한 가공품들이다.

본 논문에서는 다이아몬드 공구를 사용한 절삭과정에 대하여 절삭력 관계식을 제안하고, 이를 실제 천연 다이아몬드 공구를 사용하여 알루미늄 합금을 절삭하는 실험해석을 통하여 절삭력을 예측하는 모델을 세우고자 한다.

이를 위하여 제2장에서는 소성이론에 기초를 둔

절삭력 모델을 유도하고, 제3장에서는 실제 선삭 실험을 행하여, 80년대에 발표된 2개의 절삭력 관계식, 즉 Recht의 모델⁽⁴⁾과 Dautzenberg의 모델⁽⁵⁾과의 비교를 통하여 본 논문에서 제안된 모델의 타당성을 입증하며, 제4장에서는 결론을 정리하고자 한다.

2. 절삭력 예측모델

사용범위가 점차 확대되고 더욱 엄격해 가는 가공정도를 만족시키기 위하여 정밀절삭 과정에 대한 완전한 이해가 요구되고 있으나, 표면 형성에 관계되는 인자들의 수가 매우 많고 절삭과정중에 이들 인자들이 상호작용을 하는 복잡성으로 인하여 이에 대한 해석을 어렵게 하고 있다. 절삭과정에 입력되는 인자로는 공작기계의 작업조건, 공구의 기하학적 형상, 피삭재의 금속학적 특성과 공작기계의 동특성 등이며, 이외에도 스트레인, 온도와 절삭력 등이 또한 상호 연관성을 갖고 있다. 본 장에서는 위에서 언급한 인자들 중 절삭력을 예측하는 모델을 세우고, 이를 칩 유동각의 개념이 포함된 3차원 절삭력 모델로 확장한다.

2.1 2차원 절삭

많은 인자들을 포함하는 복잡한 3차원 절삭(oblique cutting) 과정을 다음과 같은 가정을 통하여 2차원 절삭(orthogonal cutting) 과정으로 단순화한다.

(1) 절삭날(cutting edge)은 절삭 속도벡터에 수직인 직선이다.

(2) 칩은 양측면으로 유동하지 않는다.

(3) 절삭날은 이상적으로 예리하고, 절삭 공구의 여유면(clearance face)을 따라서는 피삭재와 접촉하지 않는다.

(4) 절삭 깊이는 항상 일정하다.

(5) 절삭 속도는 항상 일정하다.

(6) 연속형 칩(continuous chip)이 발생된다.

(7) 칩의 전단면은 절삭날에서부터 비스듬히 위로 향하는 평면에 존재한다.

위의 가정에 의해서 2차원 절삭 과정을 간략화한 그림을 Fig. 1에 도시하였으며, 절삭과정은 이송(f), 절삭속도(V), 전단각(ϕ), 공구경사각(γ), 칩 속도(V_c)로 표현할 수 있다. F_R 은 공구면에 작용하는 절삭 저항이고, F_R' 은 피삭재에 작용하는

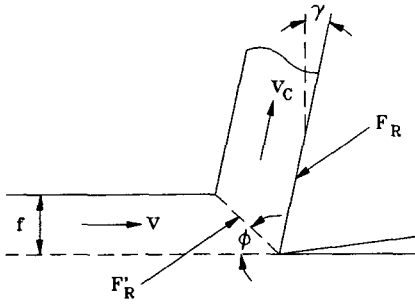


Fig. 1 Schematic representation of the orthogonal cutting process

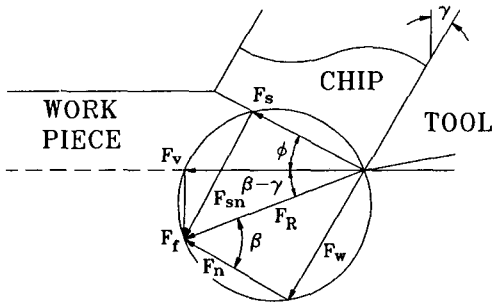


Fig. 2 Fundamental cutting force circle

절삭 저항으로, F_R 과 $F_{R'}$ 의 크기는 서로 같고 방향은 반대이다. 또한, Fig. 2에 표시된 기하학적 관계로부터 공구면과 전단면에 작용하는 분력들을 실험을 통해 측정가능한 주분력 F_v 와 배분력 F_f 의 성분으로 표현하면 다음과 같다.

$$F_w = F_v \cdot \sin \gamma + F_f \cdot \cos \gamma \quad (1)$$

$$F_n = F_v \cdot \cos \gamma - F_f \cdot \sin \gamma \quad (2)$$

$$F_s = F_v \cdot \cos \phi - F_f \cdot \sin \phi \quad (3)$$

$$F_{sn} = F_v \cdot \sin \phi + F_f \cdot \cos \phi \quad (4)$$

2.2 절삭력 모델

절삭모델은 2차원 절삭시 절삭력과 절삭에 관계되는 인자들(절삭조건, 전단각, 공구경사각 등)의 관계를 소성이론에 근거하여 전개하였으며, 다음과 같은 가정을 적용하였다.

- (1) 절삭과정은 전단과 마찰의 두 과정이 동시에 일어나는 소성변형을 한다.
- (2) 절삭에 소요되는 동력은 위의 두 과정(전단과 마찰)에 의해 완전히 소모된다.
- (3) 피삭재는 Lüdwick의 구성 방정식에 따라 거동한다.

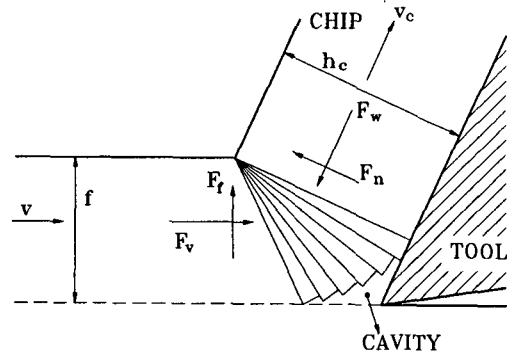


Fig. 3 Schematic representation of the proposed model

절삭과정은 Fig. 3과 같이 전단과정에 의하여 칩이 피삭재로부터 분리되어 유동방향이 바뀌면서 동시에 마찰에 의하여 칩두께가 증가하는 과정을 거친다.

절삭과정에서 소요되는 총동력(E_{ps})은 다음과 같다.

$$E_{ps} = E_p + E_s \quad (5)$$

여기서,

E_p = 주전단 영역에서 변형에 소요되는 동력

E_s = 부전단 영역에서 변형에 소요되는 동력

주전단영역에서 소요되는 동력은 다음과 같으며,

$$E_p = \int_{\bar{\epsilon}} \sigma \cdot b \cdot f \cdot V \cdot d\bar{\epsilon} \quad (6)$$

여기서, $d\bar{\epsilon}$ = 전단영역에서 미소 스트레인

Lüdwick 방정식으로부터 식(6)을 정리하면 다음과 같다.

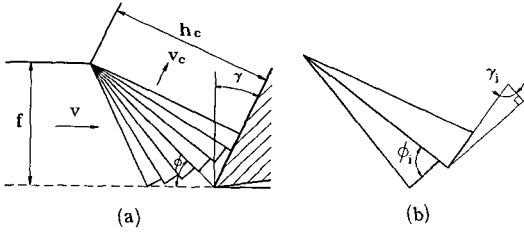
$$E_p = \int_0^{\bar{\epsilon}_1} C \cdot \bar{\epsilon}^n \cdot b \cdot f \cdot V \cdot d\bar{\epsilon} \quad (7)$$

주전단영역에서의 변형과정에서 소모된 에너지가 최소가 되도록 전단면의 수가 결정되며, 그 수는 한계에서 무한대개의 사이에 있다.

n_s 개의 전단면을 가진 경우 i 번째 전단면의 스트레인($\bar{\epsilon}_{oi}$)은 Lüdwick 방정식과 von Mises 항복조건에 의하여 다음과 같다.

$$\bar{\epsilon}_{oi} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot f \cdot dy_{\max} = \frac{\cos \gamma_i}{\sqrt{3} \cdot \sin \phi_i \cdot \cos(\phi_i - \gamma_i)} \quad (8)$$

또, Fig. 4(a), (b)의 기하학적 관계로부터 i 번째 전단면에 작용하는 경사각(γ_i) 및 전단각(ϕ_i)은 다



(a) Deformation region with n_s shear planes
 (b) The shear angle ϕ_i and the rake angle γ_i for shear plane i

Fig. 4 Deformation region of the proposed model

음과 같다.

$$\gamma_i = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi - 2 \cdot \gamma}{2 \cdot n_s} \quad (9)$$

$$\phi_i = \frac{\pi}{4} + \frac{\gamma_i}{2} \quad (10)$$

식(9)와 식(10)을 식(8)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\bar{\epsilon}_{oi} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \tan\left\{\frac{\pi - 2 \cdot \gamma}{4 \cdot n_s}\right\} \quad (11)$$

따라서, 주전단영역에서 소요되는 동력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_p &= \frac{C}{n+1} \cdot \left\{ \sum_{i=1}^{n_s} \bar{\epsilon}_{oi} \right\}^{n+1} \cdot b \cdot V \cdot f \\ &= \frac{C}{n+1} \cdot \left[n_s \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \tan\left\{\frac{\pi - 2 \cdot \gamma}{4 \cdot n_s}\right\} \right]^{n+1} \cdot b \cdot V \cdot f \end{aligned} \quad (12)$$

한편, 부전단영역에서의 소요동력(E_s)은 다음과 같다.

$$E_s = F_w \cdot V_c \quad (13)$$

위식에서, V_c 는 칩의 속도이며 기하학적인 관계로부터 전단각(ϕ), 공구경사각(γ), 절삭속도(V)로 표현하면 다음과 같다.

$$V_c = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \gamma)} \cdot V \quad (14)$$

여기서,

$$\phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{\cos \gamma}{hc/f - \sin \gamma} \right\} \quad (15)$$

식(13), (14)로부터

$$E_s = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \gamma)} \cdot F_w \cdot V \quad (16)$$

이므로 식(5), (12), (16)을 종합하면, 절삭에 소요되는 총동력은 다음식과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} E_{ps} &= \frac{C}{n+1} \cdot \left[n_s \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \tan\left\{\frac{\pi - 2 \cdot \gamma}{4 \cdot n_s}\right\} \right]^{n+1} \cdot b \cdot V \cdot f \\ &\quad + \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \gamma)} \cdot F_w \cdot V \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} F_v \cdot V &= E_{ps} \\ &= \frac{C}{n+1} \cdot \left[n_s \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \tan\left\{\frac{\pi - 2 \cdot \gamma}{4 \cdot n_s}\right\} \right]^{n+1} \cdot b \cdot V \cdot f \\ &\quad + \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \gamma)} \cdot F_w \cdot V \end{aligned} \quad (18)$$

위 식의 양변을 $C \cdot b \cdot f \cdot V$ 항으로 나누어 무차원화시키면,

$$\begin{aligned} F_v^* &= \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \gamma)} \cdot F_w^* \\ &\quad + \frac{1}{n+1} \cdot \left[n_s \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \tan\left\{\frac{\pi - 2 \cdot \gamma}{4 \cdot n_s}\right\} \right]^{n+1} \end{aligned} \quad (19)$$

이고, 이는 전단면의 수에 따라 다음과 같이 정리된다.

(1) 하나의 전단면($n_s=1$)인 경우

$$\begin{aligned} F_v^* &= \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \gamma)} \cdot F_w^* \\ &\quad + \frac{1}{n+1} \cdot \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \tan\left\{\frac{\pi - 2 \cdot \gamma}{4}\right\} \right]^{n+1} \end{aligned} \quad (20)$$

(2) 무한개의 전단면($n_s=\infty$)인 경우

$$F_v^* = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \gamma)} \cdot F_w^* + \frac{1}{n+1} \cdot \left\{ \frac{\pi - 2 \cdot \gamma}{2 \cdot \sqrt{3}} \right\}^{n+1} \quad (21)$$

2.3 칩 유동각을 고려한 3차원 절삭

앞절에서 전개된 절삭력 관계식은 절삭과정이 2차원으로 가정하여 유도되었지만, 노우즈 반경을 갖는 다이아몬드 공구를 사용한 절삭 과정은 oblique chip을 생성하는 3차원 절삭이므로 칩의 유동 방향에 대한 개념이 요구된다.

절삭깊이(b)가 공구의 노우즈 반경(R)보다 작은 경우, 칩 유동각(χ)의 계산은 Young의 모델⁽⁷⁾을 따르기로 한다.

단위 길이, 단위 두께당 작용하는 마찰력은 일정(u =상수)하며, 칩의 유동방향은 절삭날에 수직이라는 가정하에 Fig. 5의 기하학적 관계로부터 다음의 관계식이 성립한다.

$$F_x = u \cdot f \cos \chi \cdot dA \quad (22)$$

$$F_y = u \cdot f \sin \chi \cdot dA \quad (23)$$

$$\chi = \tan^{-1} \left[\frac{F_y}{F_x} \right]$$

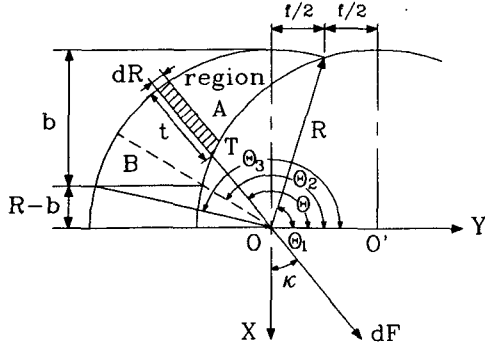


Fig. 5 Geometry of the chip flow model by Young

$$= \tan^{-1} \left[\frac{(f \sin \alpha \cdot t \cdot d\theta)_A + (f \sin \alpha \cdot t \cdot d\theta)_B}{(f \cos \alpha \cdot t \cdot d\theta)_A + (f \cos \alpha \cdot t \cdot d\theta)_B} \right] \quad (24)$$

기하학적 형상에 의해 유도된 칩 유동각의 예측식은 다음과 같다.

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{NUM}{DEN} \right]$$

$$NUM = \left[-R \cdot \sin \theta \right]_{\theta_1}^{\theta_3} + \frac{1}{2} \left[\sin \theta \cdot (R^2 - f^2 \cdot \sin^2 \theta)^{1/2} + \frac{R^2}{f} \cdot \sin^{-1} \left\{ \frac{f}{R} \cdot \sin \theta \right\} \right]_{\theta_1}^{\theta_2} + f \cdot \left[\frac{\sin(2\theta)}{4} + \frac{\theta}{2} \right]_{\theta_1}^{\theta_2} + \left[(R-b) \cdot \ln(\sin \theta) \right]_{\theta_1}^{\theta_2} \quad (25)$$

$$DEN = \left[-R \cdot \cos \theta \right]_{\theta_1}^{\theta_3} + \frac{1}{2} \left[\cos \theta \cdot (R^2 - f^2 \cdot \sin^2 \theta)^{1/2} + \frac{R^2 - f^2}{f} \cdot \ln \left\{ (f \cdot \sin \theta) + (R^2 - f^2 \cdot \sin^2 \theta)^{1/2} \right\} \right]_{\theta_1}^{\theta_2} + \frac{f}{4} \cdot \left[\cos(2\theta) \right]_{\theta_1}^{\theta_2} + \left[(-R+b) \cdot \theta \right]_{\theta_1}^{\theta_2} \quad (26)$$

여기서,

$$\theta_1 = \cos^{-1} \left[\frac{f}{2 \cdot R} \right] \quad (27)$$

$$\theta_2 = \pi - \tan^{-1} \left[\frac{R-b}{(2 \cdot 2 \cdot R \cdot b - b^2)^{1/2} - f} \right] \quad (28)$$

$$\theta_3 = \pi - \sin^{-1} \left[\frac{R-b}{R} \right] \quad (29)$$

따라서, Fig. 6에 나타난 바와 같이 공구 동력계에서 얻을 수 있는 수직방향의 힘들(P_1, P_2, P_3)과 2차원 절삭이론에서 기하학적으로 표시되는 힘들(F_v, F_f, F_p)간에는 다음의 변환식이 성립된다.

$$F_v = P_1$$

$$F_f = P_2 \cdot \sin \alpha + P_3 \cdot \cos \alpha$$

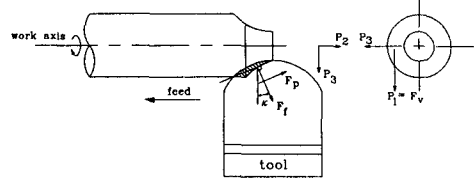


Fig. 6 Oblique chip formation model

$$F_p = P_2 \cdot \cos \alpha - P_3 \cdot \sin \alpha \quad (30)$$

식(30)을 식(1), (2)에 대입하여 정리하면 공구 경사면에 작용하는 힘 F_w, F_n 은 다음과 같다.

$$F_w = P_1 \cdot \sin \gamma + (P_2 \cdot \sin \alpha + P_3 \cdot \cos \alpha) \cdot \cos \gamma \quad (31)$$

$$F_n = P_1 \cdot \cos \gamma - (P_2 \cdot \sin \alpha + P_3 \cdot \cos \alpha) \cdot \sin \gamma \quad (32)$$

2.4 절삭력 관계식

앞의 2.2절에서 전개한 무차원화된 주절삭력과 마찰력의 관계식은 두 개의 미지변수(F_w^*, F_v^*)가 있기 때문에 절삭력 예측식으로는 충분하지 못하므로 다음과 같은 또 하나의 방정식이 필요하다.

$$F_w^* = \mu_r \cdot F_v^* \quad (33)$$

여기서, μ_r 은 공구경사면에서 공구와 피삭재간의 평균 마찰계수이며, 다이아몬드 공구를 사용한 절삭에서는 절삭조건의 범위가 한정되고, 절삭속도는 빠르며, 공구 경사각이 0°인 공구가 주로 사용되므로, 마찰계수의 변화를 매우 작다고 가정하여 μ_r 을 상수로 취급할 수 있다.

위 식(33)과 2.2절의 무차원화된 주절삭력과 마찰력의 관계식을 연립하여 풀고 힘의 단위로 나타내면, 공구경사면에 작용하는 절삭력들은 다음과 같다.

$$F_v = \frac{\cos(\phi - \gamma)}{\cos(\phi - \gamma) - \sin \phi \cdot \mu_r} \cdot E_o^* \cdot C \cdot A \quad (34)$$

$$F_w = \frac{\cos(\phi - \gamma) \cdot \mu_r}{\cos(\phi - \gamma) - \sin \phi \cdot \mu_r} \cdot E_o^* \cdot C \cdot A \quad (35)$$

앞의 식에서 비에너지항(E_o^*)은 전단면의 수에 따라 다음과 같이 정리된다.

(1) 하나의 전단면($n_s=1$)인 경우

$$E_o^* = \frac{1}{n+1} \cdot \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \tan \left\{ \frac{\pi - 2 \cdot \gamma}{4} \right\} \right]^{n+1} \quad (36)$$

(2) 무한개의 전단면($n_s=\infty$)인 경우

$$E_o^* = \frac{1}{n+1} \cdot \left(\frac{\pi - 2 \cdot \gamma}{2 \cdot \sqrt{3}} \right)^{n+1} \quad (37)$$

3. 실험 및 결과

3.1 실험장치

절삭실험은 1 μm 의 정밀도를 갖는 NC정밀 선반(TSUGAMI社 : FANUC 3T)에서 행하였고, 원통형의 피삭재는 공압척(PML-AMCORAM)을 사용하여 고정시켰다. Fig. 7은 실험장치의 개략도이며, Fig. 8은 실제 실험을 행하고 있는 사진이다. 공구동력계는 X테이블위에 위치하고 있으며, 그 아래에 Y테이블 및 베드가 있고, 공작물은 절삭거리가 10 cm 이상 되도록 충분한 길이(20 cm)로 척에 고정되어 있다.

절삭시에 발생하는 3축 방향의 힘을 압전형(piezo-electric type) 공구동력계(KISTLER 9257B)로 측정하고 용량형앰프(charge amplifier, KISTL-

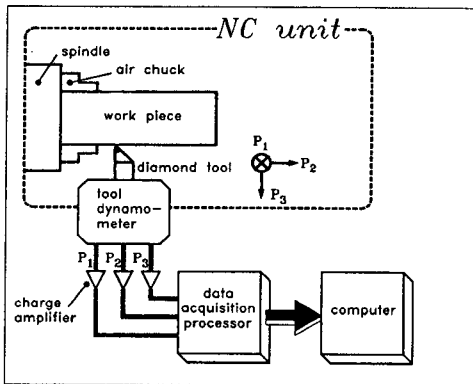


Fig. 7 The arrangement of the measuring equipments

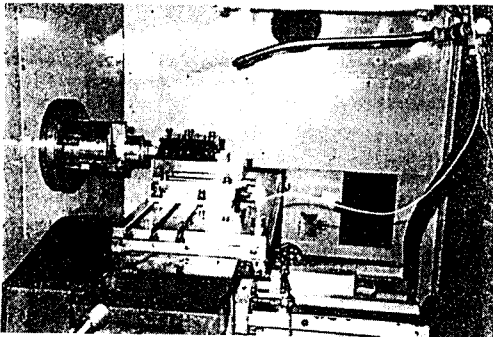


Fig. 8 Photograph of the experimental set-up for cutting test

ER 5007)로 증폭하여, A/D변환기(DAP 2400)를 통하여 개인용 컴퓨터로 전송하여 데이터 처리하였다. 공구동력계의 고유진동수는 4 kHz이며, 힘의 측정범위는 주분력 방향은 0~10 kN, 배분력 및 이송분력 방향은 -5~5 kN이다.

3.2 실험방법

가공재료로는 VTR의 실린더 및 복사기의 드럼 등에 사용되고 있는 알루미늄 합금(2218 ; AlCu3.8 Ni1.7)으로서 용체화 처리 및 시효 경화처리(T6열처리)를 거친 재질로 지름 약 60 mm의 봉을 택하였다. 절삭실험에 앞서 재료의 소성물성치를 구하기 위해서 표준 인장시편(표점거리 : 62.5 mm, 직경 : 12.5 mm)으로 정적인장시험(변형률 약 $10^{-3}/s$, 상온)을 실시하였다. 시험결과 피삭재의 비응력(C)은 754 N/mm^2 이고, 가공경화지수(n)는 0.22이다.

절삭 공구로는 천연 다이아몬드 팁을 브레이징시킨 바이트를 사용하였으며, 공구팁의 반경은 800 μm 이고, 공구의 상면 경사각은 0° , 여유각은 6° 이다.

일반적으로 다이아몬드 공구의 작업조건은 알루미늄 합금의 절삭시 이송 500 $\mu\text{m}/\text{rev}$ 이하, 절삭깊이 300 μm 이하, 절삭속도 1000 m/min이내의 절삭 조건에서 많이 사용되고(8 m/sec)로 상기 조건의 범위내의 조건에서 실험을 행하였으며, 절삭유를 사용하지 않는 건절삭으로 하였다.

A/D변환기의 데이터 추출시간(sampling time)은 절삭력의 변동을 충분히 반영할 수 있도록 1 msec로 하였으며, 3분력(주분력, 배분력, 이송분력)을 동시에 측정하였고, 전단각의 측정을 위하여 칩도 수거하였다. 연속된 절삭에 의한 온도 상승의 영향 및 마모의 영향을 배제하기 위하여 절삭 길이를 가능하면 짧게(10 cm) 하였으며, 한 절삭조건에 대한 실험후에는 일정한 시간의 간격을 두고 다음 실험에 임하였다. 또한, 전단각의 측정을 위하여 수거된 칩은 눈금 환산자가 내장된 공구 현미경을 사용하여 칩 두께를 측정하였다.

3.3 실험결과 및 고찰

천연 다이아몬드 공구를 사용하여 절삭깊이 8~100 μm , 이송 8~140 $\mu\text{m}/\text{rev}$ 의 조건으로 절삭시 발생하는 3분력 힘을 측정된 결과 100 mN에서 16N사이의 절삭력 데이터를 얻을 수 있었다. 모든 실험조건에 걸쳐 절삭력의 크기는 주분력(P_1), 배

Table 1 Width of the chip(h_c) and shear angle(ϕ)

$b(\mu\text{m}) \backslash f(\mu\text{m}/\text{rev})$		8	20	40	60	80	100
20	$h_c(\mu\text{m})$	-	-	-	57.2	87.6	106.7
	$\phi(\text{deg})$	-	-	-	46.4	42.4	43.1
40	$h_c(\mu\text{m})$	-	-	45.7	61.0	80.0	99.1
	$\phi(\text{deg})$	-	-	41.2	44.5	45.0	45.3
60	$h_c(\mu\text{m})$	-	23.6	46.5	68.6	81.5	102.9
	$\phi(\text{deg})$	-	40.3	40.7	41.2	44.8	44.2
80	$h_c(\mu\text{m})$	-	24.4	53.3	70.1	87.6	103.6
	$\phi(\text{deg})$	-	39.3	36.9	40.6	42.4	43.9
100	$h_c(\mu\text{m})$	9.9	22.9	49.5	67.8	91.4	109.0
	$\phi(\text{deg})$	38.9	41.1	38.9	41.5	41.2	42.5

분력(P_3), 이송분력(P_2)의 순이었고, 절삭면적이 커질수록 주분력의 크기가 현저하게 증가함을 보이고 있다. 이송분력의 크기는 매우 작아서 주분력의 20%미만이였다. Fig. 9(a)~(e)는 절삭깊이가 각각 8, 20, 40, 60, 80, 100 μm 일 경우 이송의 증가에 따른 주절삭력(F_v)과 마찰력(F_w)의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 네모모양(\square)의 점은 주절삭력을 나타내고, 세모모양(\triangle)의 점들은 마찰력을 나타낸다.

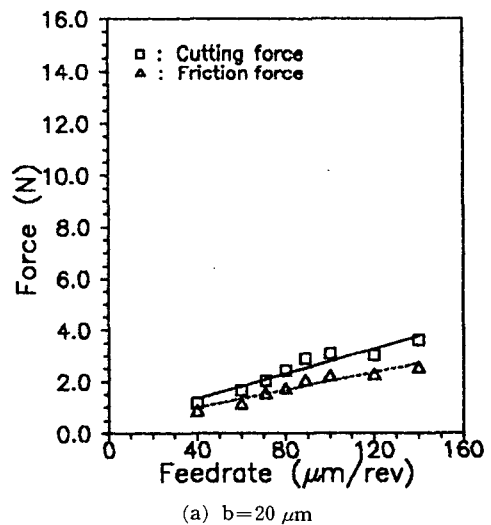
전단각을 계산하기 위하여 공구현미경을 사용하여 수거된 칩의 두께를 측정하였다. 측정된 칩 두께 및 계산된 전단각을 Table 1에 정리하였다.

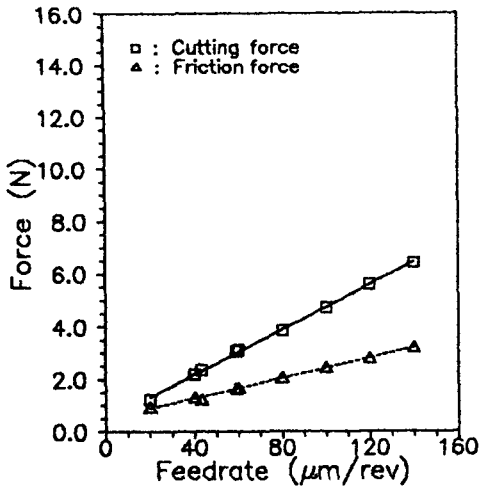
또한, 앞 절에서 전개한 이론식들과 비교하기 위하여 측정된 절삭력을 비응력과 절삭면적의 곱(C·A)으로 나누어 무차원화한 결과를 Fig. 10에 도시하였다. 그림에서 직선은 Dautzenberg모델⁽⁵⁾의 이론값이고, 곡선으로 나타난 점선은 Recht모델⁽⁴⁾을 나타내며, 짧은 점선은 본 논문에서 제안하는 모델의 이론값이며, 더하기 부호(+)로 표시한 점들은 무차원화된 실험값을 나타낸다.

무차원화된 주절삭력(F_v^*)은 1.5~2.2 사이의 값이고, 무차원화된 마찰력(F_w^*)은 0.8~1.6 사이의 값이다. 그림의 이론치와의 비교에서 알 수 있듯이 세 모델중에서 본 논문에서 제안하는 모델과 실험값이 가장 유사한 경향을 보이고 있으며, 실험

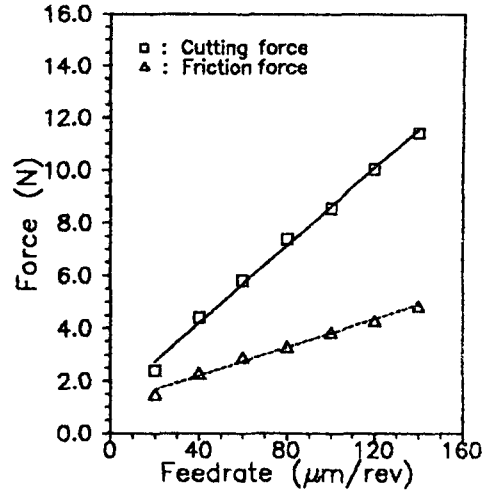
(F_w^* 가 큰 경우)보다 이론값과 더 잘 일치하며, 실험값의 분산도도 덜함을 보이고 있다.

위의 실험결과로부터 공구의 경사면에서 피삭재와의 평균 마찰계수(μ_r)를 계산한 다음, 절삭면적의 증가에 따른 절삭력의 변화를 도시한 그림이 Fig. 11이다. 그림에서 직선은 예측한 이론값으로 데이터의 분포된 양상을 보면, 절삭 조건이 상대적으로 중한 경우(F_w^* 가 작은 경우)가 경한 경우

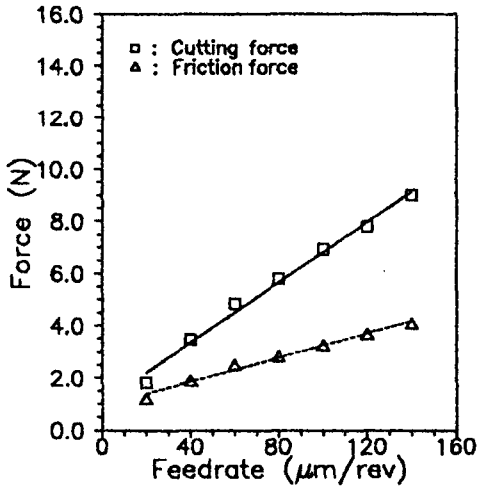




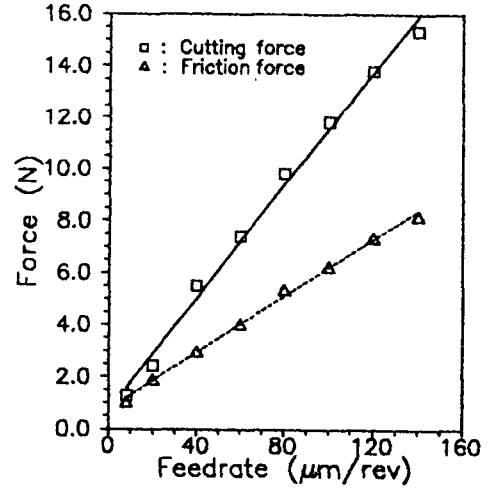
(b) $b=40 \mu\text{m}$



(d) $b=80 \mu\text{m}$



(c) $b=60 \mu\text{m}$



(e) $b=100 \mu\text{m}$

Fig. 9 Measured cutting forces and friction forces with variations of the feedrate.(depth of cut : 20~100 μm)

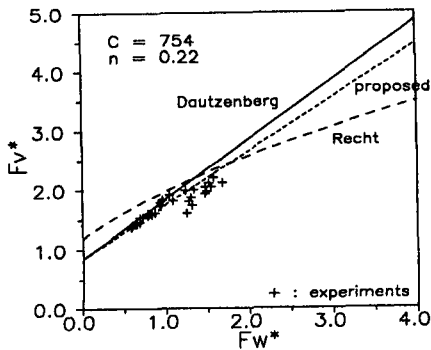


Fig. 10 The cutting force number vs. the friction force number

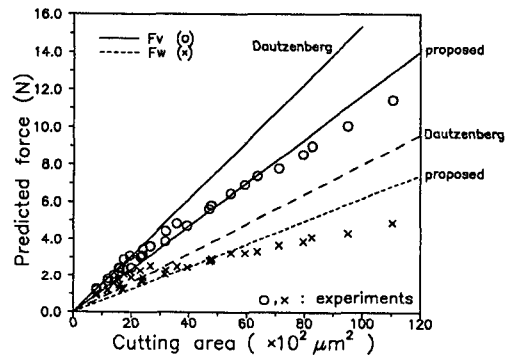


Fig. 11 Predicted and experimental forces

서 주절삭력은 실선, 마찰력은 점선으로 나타내었다. 실험값은 기호로 나타내었는데 기호 ○는 주절삭력을 나타내고, 기호 ×는 마찰력을 나타내고 있다. 절삭면적이 $30\sim 80\times 10^2 \mu\text{m}^2$ 의 영역에서 절삭력의 예측이 정확하게 이루어졌으나, 절삭면적이 큰 부분($80\times 10^2 \mu\text{m}^2$ 이상)에서는 마찰력의 경우 이론값이 크게 예측되었고, 절삭면적이 작은 부분($30\times 10^2 \mu\text{m}^2$ 이하)에서는 이론값이 작게 예측되었다. 주절삭력의 경우 전 절삭면적에 걸쳐 잘 예측됨을 보이고 있다.

4. 결 론

초정밀 부품에 대한 수요가 급증함에 따라 사용범위가 점차 확대되고 있고, 더욱 엄격해가는 가공정밀도를 만족시키기 위한 정밀절삭가공 과정을 규명하기 위하여, 천연 다이아몬드 공구를 사용한 알루미늄 합금의 선삭 실험해석과 이론전개를 통하여 절삭력 예측모델에 대한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 절삭과정을 2차원으로 단순화하여 전단과 마찰이 동시에 일어나는 소성변형과정으로 가정하고, 전단면의 수를 무한개로 보고 절삭력 예측식을 유도하였으며, 이를 칩 유동각의 개념을 도입하여 3차원 절삭과정으로 변환하였다. 절삭력 모델을 Merchant의 방정식을 고속절삭의 개념에서 새로이 유도한 Recht의 절삭모델과 소성이론에 기초한 Dautzenberg의 절삭력 예측모델을 비교·검토하고 그 제한성을 보완하는 절삭력 모델을 제안하였다.

(2) 천연 다이아몬드 공구를 사용한 알루미늄 합금의 선삭실험을 통한 비교로부터, 앞의 3가지 모델중 본 논문에서 제안하는 절삭력 모델이 실험값과 가장 유사함을 보이고 있으며, 특히 절삭면적이 $30\sim 80\times 10^2 \mu\text{m}^2$ 인 범위에서는 주절삭력 및 마찰력이 모두 잘 예측됨을 보이고 있다.

(3) 실험에 적용된 전 절삭조건 범위에서 마찰력보다는 주절삭력이 더 잘 예측되고 있는데, 이는 버니싱 효과 등에 의한 마찰력의 증가를 모델에 포함하지 못한 결과이다.

참고문헌

- (1) Taniguchi, N., 1983, "Current Status in, and Future Trends of Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing," Annals of the CIRP, Vol. 32, No. 2, pp. 573~582.
- (2) Ikawa, N., Shimada, S. and Ohmori, G., 1988, "Recent Trends in Diamond Tool Technology," Proceedings of the International Congress for Ultraprecision Technology (Aachen), pp. 126~142.
- (3) Dautzenberg, J. H., Veensta, P. C. and Van der Wolf, A. C. H., 1981, "The Minimum Energy Principle for the Cutting Process in Theory and Experiment," Annals of the CIRP, Vol. 30, No.1, pp. 1~4.
- (4) Recht, R. F., 1985, "A Dynamic Analysis of High-speed Machining," Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, Vol. 107, pp. 309~315.
- (5) Lo-A-Foe, T. C. G., Dautzenberg, J. H. and Van der Wolf, A. C. H., 1986, "A Model for the Micro-cutting Forces of Non-ferrous Metals," Proceedings of the 5th Polytechnics Symposium on Manufacturing Engineering, pp. 346~362.
- (6) ASM International, 1989, Metals Handbook-Machining (9th edition), Vol. 19.
- (7) Young, H. Y., Mathew, P. and Oxely, P. L. B., 1987, "Allowing for Nose Radius Effects in Predicting the Chip Flow Direction and Cutting Forces in Bar Turning," Proc. Int. Mech. Eng. Part. C, Vol. 201, No. 3, pp. 213~226.
- (8) 구상헌, 윤영식, 이상조, 1991, "PCD 공구를 이용한 알루미늄 합금소재의 절삭," 대한기계학회 '91년도 추계학술대회논문집, pp. 223~226.
- (9) 윤영식, 이상조, 1992, "다이아몬드 공구를 사용한 절삭," 대한기계학회 '92년도 춘계학술대회 논문집 (I), pp. 207~210.