

절삭력 계수를 통한 마이크로 가공의 절삭 특성 분석

이한울*, 조동우+, 박종권**

Analysis of cutting characteristics in micro machining using cutting force coefficient

H.U.Lee*, D.W.Cho+, J.K.Park**

Abstract

The complex three-dimensional miniature components are needed for a wide range of applications from the aerospace to the biomedical industries. To manufacture these products, micro machining that can make a high aspect ratio part and has good accuracy is widely researched. In this paper, cutting characteristics were analyzed in micro machining using cutting force coefficients, which are the specific cutting force for normal and frictional direction of rake surface. From measured cutting force in micro end milling, cutting condition independent cutting force coefficients were determined and used for analysing the characteristics of micro cutting. Using the cutting force coefficient, 써써

Key Words : Micro machining, Cutting force, Cutting force coefficients, Cutting characteristics

1. 서론

항공 산업에서부터 바이오 산업에 이르기까지 3차원 미세 구조물의 가공에 대한 요구가 커지고 있다^[1]. Micro/Meso 기계가공은 기존 MEMS 공정에서 제작할 수 없었던 높은 세장비의 가공이 가능하며, 높은 가공 정밀도를 구현할 수 있어 이를 위한 가공 장비 및 가공 기술에 대한 연구가 진행되고 있다. 공구의 소형화가 이루어짐에 따라 가공 재료의 제한이 없고, 복잡한 형상을 가공할 수 있

는 미세 엔드밀을 이용한 마이크로 절삭 가공이 주로 연구되고 있다.

현재까지 밝혀진 마이크로 절삭 가공의 주요 특성으로는 최소 칩 두께 효과와 가공 재료의 조성에 따른 절삭력 변화가 있다. Weule 등^[2]은 마이크로 엔드밀링에서 최소 칩 두께 효과에 따른 표면 오차 증가 효과를 통해 최소 칩 두께를 예측하였으며, Kim 등^[3]은 가공된 칩의 길이의 변화와 가공 표면의 가공 흔적을 분석하여 마이크로 가공에서의 칩 생성에 대하여 설명하였다. Vogler 등^[1,4,5]은 여러

* 발표자, 포항공과대학교 기계공학과 (polarb@postech.ac.kr)
주소: 790-784 경북 포항시 남구 효자동 산31

+ 포항공과대학교 기계공학과

++ 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부

가지 조성이 혼합된 재료에 대한 마이크로 절삭 가공에서 재료의 조성에 따라 강도가 변화하며, 마이크로 가공의 가공 깊이는 이 변화를 무시할 수 없음을 연구하였다. 그리고, 재료 조성에 따른 절삭력 변화와 최소 칩 두께를 이용하여 마이크로 절삭 가공에서의 표면 오차와 절삭력을 예측하였다.

본 논문에서는 마이크로 가공의 절삭력 예측의 전 단계로써 미세 엔드밀을 이용한 마이크로 절삭 가공에서의 절삭력을 측정하고, 이에 대한 절삭력 계수를 구해보므로써 마이크로 절삭 가공의 특성을 분석하였다. 측정된 절삭력을 이용하여 절삭 조건에 독립적인 절삭력 계수를 구하였다. 절삭력 계수를 통해 미변형 칩 두께에 따른 절삭 특성을 분석하였다.

2. 절삭력 계수 모델

절삭력 계수는 절삭 시 상면 경사면 (rake face)의 단위 면적에 작용하는 수직력과 마찰력을 의미한다. 미변형 칩두께와 절삭력 계수를 구할 수 있다면, 절삭력을 정확히 예측할 수 있다. 본 논문에서는 Yun 등^[6]과 Ko 등^[7]이 제안한 절삭 조건에 독립적인 절삭력 계수 모델을 이용하여 마이크로

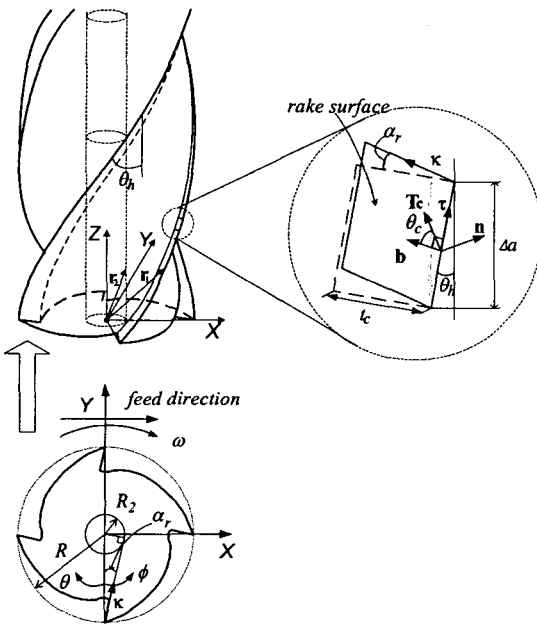


Fig. 1 Cutter geometry, coordinate system, and unit vectors on the rake surface [6].

로 절삭 가공에서 미변형 칩 두께에 따른 절삭력의 변화를 확인하였다.

엔드밀링 공구는 절삭 깊이 내에서 다수의 디스크 요소로 나누어지며, 각각의 요소에 작용하는 힘 성분을 합함으로써 임의의 공구 회전각에서의 3차원 절삭력을 계산할 수 있다. 그림 1과 같은 공구 형상과 좌표계에서 j 번째 공구 회전 위치각에서 i 번째 날의 k 번째 축 방향 디스크 요소에서의 위치각은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi(i, j, k) = \alpha(i, k) + \theta(j) \quad (1)$$

$$\alpha(i, k) = (i-1) \frac{\phi}{2} + (k\Delta\alpha + \frac{\Delta\alpha}{2}) \frac{\tan\theta_h}{R} \quad (2)$$

$$\theta(j) = -j\Delta\theta \quad (3)$$

여기서 $\alpha(i, k)$ 는 j 가 0 일 때의 절삭날의 위치각, $\theta(j)$ 는 공구 회전각이며, $\Delta\alpha$, θ_h , R 은 미소 디스크 요소의 높이, 헬릭스 각, 공구 반경이다.

상면 경사면의 단위 면적에 작용하는 절삭력의 수직 분력 (dF_n)과 수평 분력(dF_f)은 다음식으로 주어진다.

$$dF_n(\phi) = K_n T(\theta) \vec{n}(\alpha) dA_c \quad (4)$$

$$dF_f(\phi) = K_f K_n T(\theta) \vec{T}_c(\alpha) dA_c \quad (5)$$

$$A_c = t_c(\phi) \alpha_r (\Delta\alpha / \cos\theta_h) \quad (6)$$

여기서 K_n 과 K_f 는 수직, 마찰 방향 절삭력 계수이다. α_r 은 공구의 경사각이며, \vec{n} , \vec{T}_c 는 공구 형상으로부터 계산되는 값으로 경사면 상의 수직, 칩 유동 벡터이다. $T(\theta)$, $t_c(\phi)$ 는 각각 3차원 좌표변환행렬, 미변형 칩 두께 이다. 식 (4)와 (5)를 이용하여 절삭력을 직교 좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$F_x(i, j, k) = [C_1 K_n \cos(\phi - \alpha_r) + K_f K_n C_3 \cos\phi - K_f K_n C_4 \sin(\phi - \alpha_r)] t_c(\phi) B_1 \quad (7)$$

$$F_y(i, j, k) = [C_1 K_n \sin(\phi - \alpha_r) + K_n K_f C_3 \sin\phi + K_f K_n C_4 \cos(\phi - \alpha_r)] t_c(\phi) B_1 \quad (8)$$

$$F_z(i, j, k) = [-C_2 K_n + K_f K_n C_5] t_c(\phi) B_1 \quad (9)$$

$$C_1 = \cos\theta_h / \sin\theta_{tk}, \quad C_2 = \sin\theta_h / \sin\theta_{tk}$$

$$C_3 = \sin\theta_h (\sin\theta_c - \cos\theta_c \cot\theta_{tk})$$

$$C_4 = \cos\theta_c / \sin\theta_{tk}$$

$$C_5 = \cos\theta_h (\sin\theta_c - \cos\theta_c \cos\theta_{tk})$$

$$B_1 = \cos\alpha_r (\Delta\alpha / \cos\theta_h), \quad \cos\theta_{tk} = \sin\alpha_r \cdot \sin\theta_h$$

실험을 통하여 측정된 절삭력을 동기화 하고, 각 회전각에서의 절삭력을 식 (7)~(9)와 같이 표현함으로써 공구 회전각에 대한 절삭력 계수를 구할 수 있다.

3. 마이크로 절삭 가공 실험

마이크로 가공의 절삭 특성을 분석하기 위하여 표 1과 같은 다양한 가공 조건에서 절삭력 측정 실험을 수행하였다. 그림 2와 같은 Northwestern University의 마이크로 드릴링/밀링 머신을 이용하여 가공을 수행하였으며, 주축 회전 속도는 최대 120,000rpm이다. 공구는 Ultra tool 사의 508 μ m 직경, 2날 초경 평 앤드밀을 사용하였고, 비틀림각과 경사각은 각각 30°, 9° 이다. 가공 재질은 Al6061 T6이다. 마이크로 가공의 절삭력을 측정하기 위하여 힘 측정 센서(Kistler, 9251A)를 사용하였고, AD 변환기(HP, 3566A)를 이용하여 32kHz로 측정하였다.

마이크로 절삭 가공을 통해 측정된 절삭력은 그림 3과 같다. 그림 3(a)~(c)는 절삭 폭, 절삭 깊이, 그리고 날 당 이송량이 일정할 경우 주축 회전수의 변화에 따른 절삭력의 변화 여부를 보여주고 있다. 실험 결과를 통해서 마이크로 가공에서도 일반적인 고속 가공^[8]과 마찬가지로 주축 회전수는 절삭력의 변화에 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다. 임의의 주축 회전 속도에서 구해진 절삭력 계수를 이용하여 다양한 주축 회전수에서의 절삭력을 예측할 수 있게 된다.

그림 3(d)~(e)는 이송속도가 매우 낮을 경우 날 당 이송량의 변화에 따른 절삭력 크기의 변화를 보여주고 있다. 일

Table 1 Cutting conditions.

No	Spindle speed (rpm)	Axial depth (μ m)	Radial depth (μ m)	Feed (μ m/tooth)
1	10000	101	254	3.81
2	10000	101	508	3.81
3	10000	101	254	1.91
4	10000	101	508	1.91
5	10000	101	254	0.953
6	10000	101	508	0.953
7	20000	101	254	3.81
8	20000	101	508	3.81
9	20000	101	254	1.91
10	20000	101	508	1.91
11	20000	101	254	0.953
12	20000	101	508	0.953
13	45000	101	254	3.81
14	45000	101	508	3.81
15	45000	101	254	1.91
16	45000	101	508	1.91
17	45000	101	254	0.953
18	45000	101	508	0.953
19	20000	101	254	0.476
20	20000	101	254	0.238
21	20000	101	254	0.119

반적인 매크로 가공에서는 공구의 파손을 방지하기 위한 방법으로 추천 절삭 조건에 비하여 낮은 이송속도를 사용하여 공구에 가해지는 절삭력을 조절한다. 하지만, 마이크로 가공에서는 최소 칩두께 효과에 의해 일정 이송량 이하에서는 절삭력이 더 이상 줄어들지 않는 특성이 있다^[2-5]. 그림3(d)~(e)에서는 이러한 최소 칩두께 효과에 의하여 날 당 이송량의 감소에 따라 더 이상 절삭력이 줄어들지 않는 현상을 확인할 수 있다. 따라서 마이크로 절삭 가공에서는 이송속도를 조절하는 것만으로는 공구의 치핑이나 파손을 피할 수 없으며, 미소 미변형 칩두께에서의 절삭 현상을 이해하고 정확한 절삭 조건을 적용하여야 한다.

4. 절삭력 계수를 통한 마이크로 가공 특성 분석

측정된 마이크로 절삭 가공의 절삭력을 이용하여 그림 4와 같은 절삭력 계수를 추출하였다. 절삭력 계수 K_n 과 K_f 을 이용하여 미변형 칩두께에 따라 상면 경사면에 수직 방향으로 작용하는 절삭력과 수평 방향으로 작용하는 마찰력의 크기를 확인할 수 있다. 그림 4는 Test 1, 3, 5, 7, 9, 11의 절삭력을 이용하여 얻어진 절삭력 계수이다.

그림 4(a)와 같이 공구의 경사면에 수직방향으로 작용하는

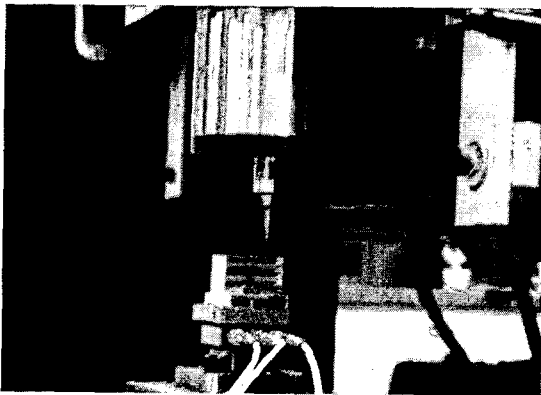
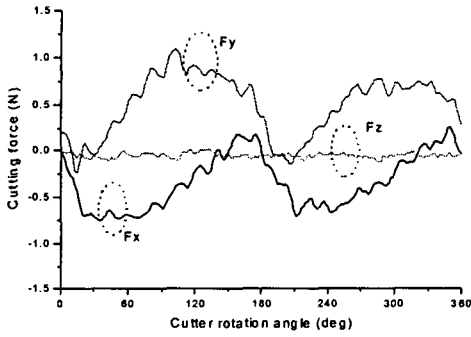


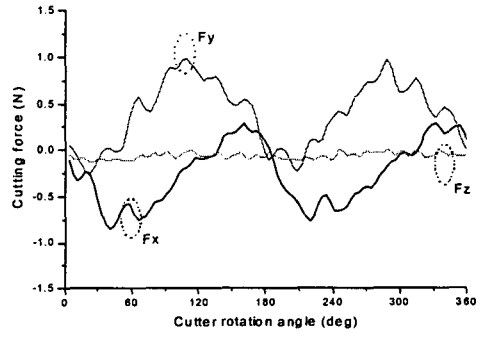
Fig. 2 Experimental setup.

절삭력은 미변형 칩두께가 클 경우 단위 칩두께에서 발생하는 절삭력은 일정한 크기를 가지며, 미변형 칩두께에 비례하

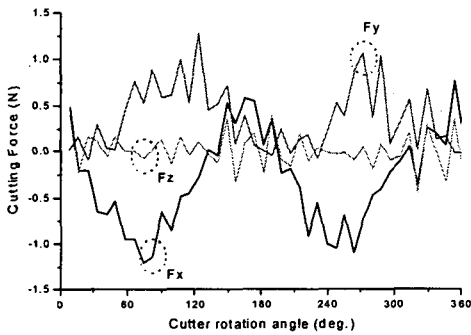
여 커지게 된다. 미변형 칩두께가 작아질수록 칩의 생성 시 발생하는 절삭력 뿐 아니라 공구와 피삭재 간의 마



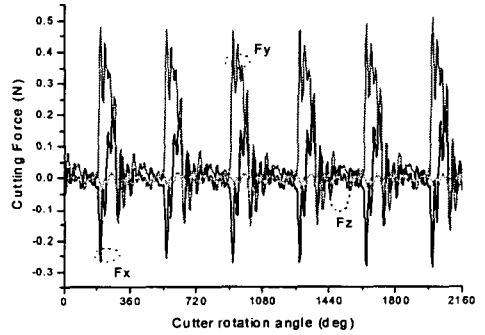
(a) Test 2



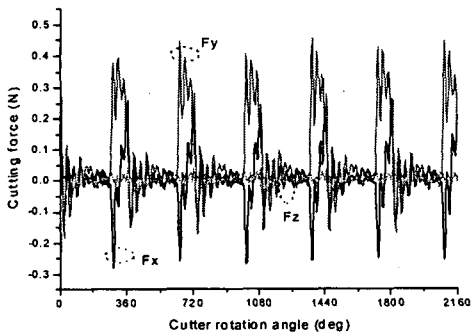
(b) Test 8



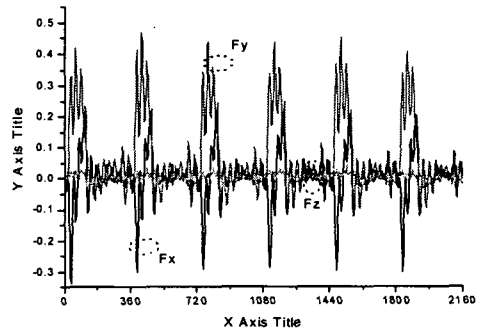
(c) Test 14



(c) Test 19

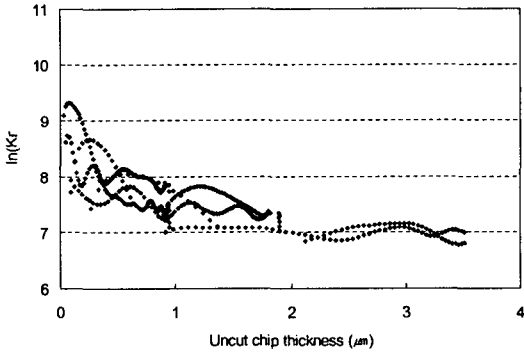


(d) Test 20

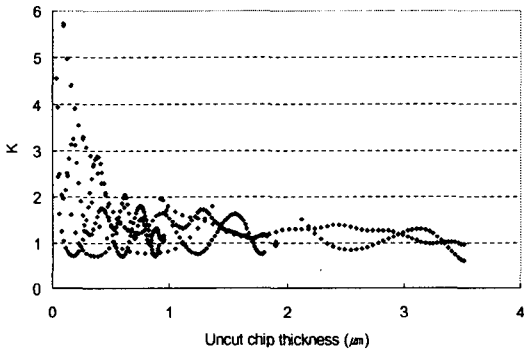


(e) Test 21

Fig. 3 Measured cutting forces.



(a) K_r



(b) K_f

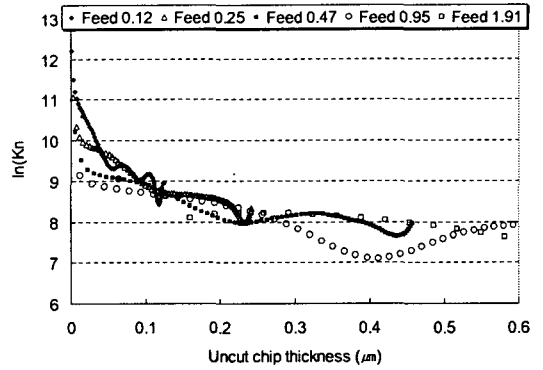
Fig. 4 Cutting force coefficients in micro machining.

찰력으로 인해 힘이 증가하는 치수효과가 나타난다. 마이크로 머시닝에서는 공구 날 끝단의 반지름이 상대적으로 크기 때문에 매크로 가공에 비하여 큰 마찰력이 발생하므로 치수효과를 정확히 고려하여야 한다. 그림 4(a)와 5(a)에서 미변형 칩두께가 작아질수록 K_r 이 증가하는 것으로부터 마이크로 머시닝의 치수효과를 확인할 수 있다.

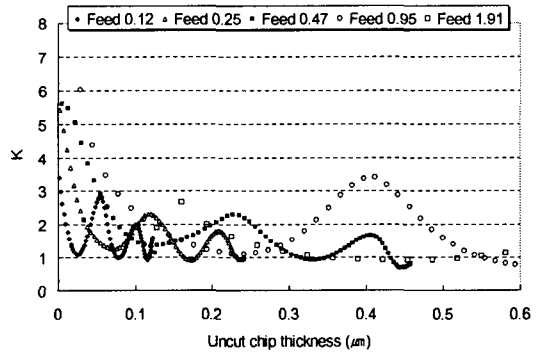
최소 칩두께 효과에 의해 날당 이송량이 작아지면 매 회전 칩이 발생하지 않는다. 칩이 발생하지 않는 구간에서는 칩의 유동에 의한 마찰력이 존재하지 않기 때문에 K_f 가 작아지게 된다. 그림 5(b)에서 날당 이송량이 작을 경우 K_f 가 작아지는 것으로 이러한 최소 칩두께 효과를 확인할 수 있다.

5. 결론

모든 공구는 날 끝단에 일정한 반경을 가지고 있다. 미세



(a) K_r



(b) K_f

Fig. 5 Cutting force coefficients at low feed condition

엔드밀은 가공하는 칩의 크기에 비하여 공구 날 끝단의 반경이 상대적으로 매우 크기 때문에 일정한 이송속도 이하에서는 가공이 이루어 지지 않는다. 마이크로 가공의 절삭력을 예측하기 위해서는 이러한 마이크로 가공의 절삭 특성을 정확히 파악하여야 한다.

본 논문에서는 마이크로 가공의 절삭력을 예측하기 위하여 미세 엔드밀을 이용한 마이크로 절삭 가공의 절삭력을 측정하고, 이에 대한 절삭력 계수를 구하여 마이크로 절삭 가공의 특성을 분석하였다. 절삭 조건에 독립적인 절삭력 계수 모델을 사용하였으며, 이를 이용하여 미변형 칩두께에 따른 절삭 특성을 분석하였다.

후기

본 연구는 기계연구원 주관의 2004년도 차세대신기술개발사업의 위탁과제의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Vogler, M. P., DeVor, R. E., and Kapoor, S. G., 2003, "Microstructure-Level Force Prediction Model for Micro-milling of Multi-Phase Materials," *J. Manufacturing Science & Engineering*, Vol. 125, pp. 202-209.
- (2) Weule, H., Huntrup, V., and Tritschle, H., 2001, "Micro-cutting of Steel to Meet New Requirements in Miniaturization," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 50, pp. 61-64.
- (3) Kim, C. J., Bono, M., and Ni, J., 2002, "Experimental Analysis of Chip Formation in Micro-Milling," *Trans. of NAMRI/SME*, Vol. 30, pp. 247-254.
- (4) Vogler, M. P., DeVor, R. E., and Kapoor, S. G., 2004, "On the Modelling and Analysis of Machining Performance in Micro-Endmilling, Part I: Surface Generation," *J. Manufacturing Science & Engineering*, Vol. 126, pp. 685-694.
- (5) Vogler, M. P., DeVor, R. E., and Kapoor, S. G., 2004, "On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Micro-Endmilling, Part II: Cutting Force Prediction," *J. Manufacturing Science & Engineering*, Vol. 126, pp. 695-705.
- (6) Yun, W. S., Cho, D. W., and Ehmann, K. F., 1999, "Determination of Constant 3D Cutting Force Coefficients and Runout Parameters in End Milling," *Trans. of NAMRI/SME*, Vol. 27, pp. 87-92.
- (7) Ko, J. H., Yun, W. S., Cho, D. W., and Ehmann, K. F., 2002, "Development of a Virtual Machining System, Part I: Approximation of the Size Effect for Cutting Force Prediction," *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, pp. 1595-1605.
- (8) Lee, H. U., Ko, J. H., and Cho, D. W., 2004, "Feedrate Scheduling for High Speed Milling Based on an Improved Cutting Force Model," *6th Int. Conf. Frontiers of Design and Manufacturing*, Xi'an, China, pp. 610-612.