

## 유한요소해석과 가공실험을 통한 마이크로 밀링가공의 가공특성평가

구민수\*, 김정석<sup>+</sup>, 김평호<sup>++</sup>, 박진호<sup>++</sup>, 강익수<sup>++</sup>

(논문접수일 2010. 12. 10, 심사완료일 2011. 1. 14.)

### An Evaluation of Machining Characteristics in Micro-scale Milling Process by Finite Element Analysis and Machining Experiment

Min-Su Ku\*, Jeong-Suk Kim<sup>+</sup>, Pyeoung-Ho Kim<sup>++</sup>, Jin-Hyo Park<sup>++</sup>, Ik-Soo Kang<sup>++</sup>

#### Abstract

Analytical solution of micro-scale milling process is presented in order to suggest available machining conditions. The size effect should be considered to determine cutting characteristics in micro-scale cutting. The feed per tooth is the most dominant cutting parameter related to the size effect in micro-scale milling process. In order to determine the feed per tooth at which chips can be formed, the finite element method is used. The finite element method is employed by utilizing the Johnson-Cook (JC) model as a constitutive model of work material flow stress. Machining experiments are performed to validate the simulation results by using a micro-machining stage. The validation is conducted by observing cutting force signals from a cutting tool and the conditions of the machined surface of the workpiece.

**Key Words** : Micro-scale Milling Process(마이크로 밀링가공), Size Effect(치수효과), Feed Per Tooth(날당이송), Finite Element Analysis(유한요소해석)

## 1. 서론

전자, 광학, 항공, 자동차, 연료전지 산업과 같은 첨단산업의 성장과 함께 제품의 소형화가 빠르게 진행되면서, 마이크로 부품의 수요도 함께 증가하고 있다. 고정밀도를 요구하는 마이크로 부품의 제조공정은 미래 산업의 핵심기술이다. 최근 환경오염을 최소화하기 위한 친환경자동차의 개발이 활발히 이루어지고 있으며, 특히 연료전지자동차가 차세대 친환경자동차로서 주목받으며 연구 및 개발이 이뤄지고 있다. 이에 따라 연료전지자동차의 핵심이라고 할 수 있는 연료전지에 대한 연구도

활발히 진행되고 있다. 연료전지의 핵심부품 중 하나인 연료전지분리판의 미세유로패턴가공은 효율적인 연료의 이동을 위해 정밀한 마이크로 가공이 필요하다.

마이크로 부품의 가공에는 주로 리소그래피 공정이 사용되고 있다. 하지만 이 공정은 가공시간이 길 뿐만 아니라, 가공을 위한 기반시설의 설치비용과 리소그래피용 마스크의 제조비용 또한 상당히 비싸다. 가공이 가능한 소재 또한 실리콘계열로 제한적이며, 제품의 형상 또한 단순한 평면형으로 한정적이다<sup>(1)</sup>.

마이크로 부품의 또 다른 가공법으로는 기계적 가공의 대표

\* 부산대학교 대학원 기계공학부

+ 교신저자, 부산대학교 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공연구소(ERC/NSDM) (juskim@pusan.ac.kr)

주소: 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30 부산대학교

++ 부산대학교 기계공학부

적인 방식 중 하나인 마이크로 밀링가공이 있다. 마이크로 밀링 가공은 리소그래피 방식과는 다르게 다양한 소재를 가공할 수 있으며, 복잡한 형상의 3차원 마이크로 부품을 직접 가공하는 것이 가능하다<sup>(2)</sup>. 또한 마이크로 부품의 금형을 가공함으로써 부품의 대량생산을 가능하게 한다. 따라서 마이크로 밀링가공은 연료전지 분리판의 대량생산을 위한 금형가공에 있어서 생산시간과 비용측면에서 효율적인 가공방식으로 판단된다.

마이크로 밀링가공은 범용 밀링가공과 전체적으로 유사하다. 하지만 두 가공방식의 사이에는 치수효과에 의한 차이점이 존재하며, 공구선단반경에 의한 영향을 고려해야 한다<sup>(3)</sup>. 범용 밀링가공에서는 공구선단반경에 대한 날당이송의 비가 상대적으로 크기 때문에 가공시 공구선단반경의 영향을 무시할 수 있다. 하지만 마이크로 밀링가공에서는 그 비가 작기 때문에 특정 비이하에서는 플라우잉 현상에 의한 치수효과에 의해 소재절삭이 정상적으로 발생하지 않으며, 이로 인해 가공정밀도 및 가공 표면품질이 나빠지게 된다.

본 논문은 마이크로 밀링가공에 대한 유한요소해석과 가공실험을 통하여 가공조건 중에서 날당이송의 변화에 따른 가공특성을 파악하고, 그 결과를 이용하여 연료전지분리판의 대량생산을 위한 금형가공에 있어서 보다 안정적인 절삭이 발생할 수 있는 날당이송을 제시하고자 한다.

## 2. 마이크로 밀링가공의 절삭특성

마이크로 밀링가공은 범용 밀링가공과 가공형태 측면에서 전체적으로 유사하다. Fig. 1에는 밀링가공의 일반적인 가공형태에 대해 나타내었다. 하지만 두 가공의 사이에는 스케일과 관련된 중요한 차이점이 존재한다. 범용 밀링가공에서는 날당이송에 대한 공구선단반경의 비가 작기 때문에 공구선단반경의 영향은 무시할 수 있다. 이와 달리, 마이크로 밀링가공에서는 날당이송에 대한 공구선단반경의 비가 크기 때문에 공구선단반경의 영향을 고려하여 가공조건을 선정해야 한다. 특정한 크기의 날당이송 이하에서의 가공에서는 치수효과(Size Effect)의 주원인인 플라우잉(Ploughing) 현상에 의해 소재가 공구선단에 눌러져서 소재의 절삭이 정상적으로 행해지지 않으며, 전단각의 감소에 따른 전단면적의 증가로 인해 전단에너지가 증가하게 되고, 공구선단이 지나간 후에 눌러졌던 소재의 탄성회복으로 인한 슬라이딩(Sliding) 현상에 의해 가공정밀도 및 표면 품질이 악화되며 공구의 수명에도 나쁜 영향을 끼친다. 최소칩두께보다 작은 날당이송의 가공에서는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 플라우잉 현상에 의해 칩이 생성되지 않고 소재가 눌러지면서 뭉쳐지고, 공구선단이 지나간 후에는 탄성회복에 의해 공구의 여유면을 슬라이딩하게 된다. 반면에 최소칩두께 이상의 날당이송의 가공에서는 칩이 생성되면서 소재의 절삭이 이뤄

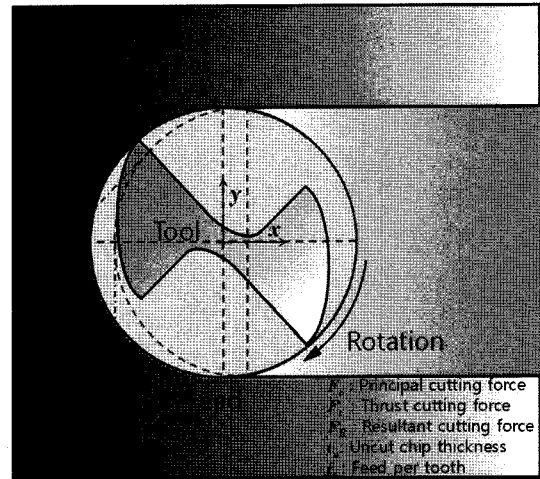


Fig. 1 Micro-scale milling process

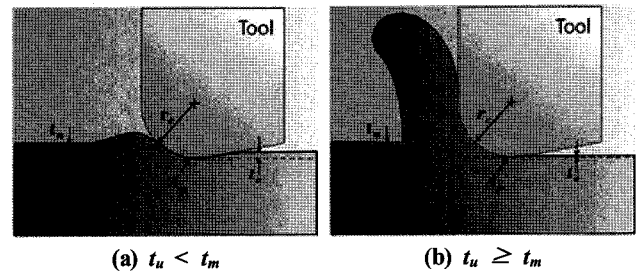


Fig. 2 Cutting mechanism in micro-scale cutting

지며, 소재의 탄성회복량도 매우 적어진다.

하지만 최소칩두께의 가공에서 칩이 생성된다고 하여도, 원하는 가공정밀도와 표면 품질을 얻을 수 있는 안정적이고 정상적인 절삭이 이뤄지는 것은 아니다. 따라서 고품질의 제품을 생산하기 위해서는, 마이크로 밀링가공의 특성에 대한 해석을 통해 안정적인 절삭이 발생할 수 있는 최소날당이송을 찾는 것은 매우 중요하다.

## 3. 마이크로 밀링가공 시뮬레이션

### 3.1 소재유동응력 구성모델

절삭가공에서 소재의 거동은 탄성영역에서 소성영역으로 변하게 된다. 본 논문에서는 소성영역에서의 유동응력을 표현하기 위한 구성모델로 식 (1)에 나타난 Johnson-Cook(JC) 모델이 사용되었다<sup>(4)</sup>. JC 모델은 소재의 가공경화와 열적연화에 의한 응력변화를 나타내는데 효과적이며, 마이크로 절삭가공의 유한요소해석에서 사용되고 있다.

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon})^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_{melt}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right] \quad (1)$$

$\bar{\sigma}$	von Mises 유동응력	$C$	변형률 상수
$\bar{\epsilon}$	등가변형	$T$	공작물 온도
$\dot{\bar{\epsilon}}$	등가변형률	$T_{room}$	가공실 온도
$\dot{\bar{\epsilon}}_0$	참조변형률	$T_{melt}$	공작물 용융점 온도
$A$	항복응력	$n$	경화지수
$B$	경화 상수	$m$	열연화 지수

**3.2 유한요소모델**

유한요소해석을 수행하기 위해서는 해석에 사용될 모델을 먼저 생성해야 한다. 본 논문에서 유한요소모델은 해석시간을 최소화하기 위해 시편형상을 가공하기 전의 형태가 아닌 가공 중의 형상으로 가정하여 생성하였다. 유한요소모델의 가공 중의 형상을 정의하기 위해서는 우선 미절삭칩두께  $t_u$ 를 계산하여야 한다. 범용 밀링가공에서  $t_u$ 는 식 (2)를 이용하여 구해진다<sup>(3)</sup>. 하지만 마이크로 밀링가공은 공구반경에 대한 날당이송의 비가 크기 때문에 이러한 특성을 고려하여 범용 밀링가공과는 달리 식 (3)에 주어진 Bao와 Tansel[5]의 해석적 모델을 이용하여  $t_u$ 를 구한다. 본 논문에서도 보다 정확한 해석결과를 얻기 위해 Bao와 Tansel의 해석적 모델을 이용하여 얻은  $t_u$ 를 활용하여 유한요소모델을 생성하였으며, Fig. 3에 나타내었다.

$$t_u = f_t \sin \theta \tag{2}$$

$$t_u = f_t \sin \theta - \frac{Z}{2\pi R} f_t \sin \theta \cos \theta + \frac{1}{2f} f_t^2 \cos^2 \theta \tag{3}$$

여기서,  $f_t$  날당이송,  $\theta$  공구회전각,  $Z$  공구날수,  $R$  공구반경이다.

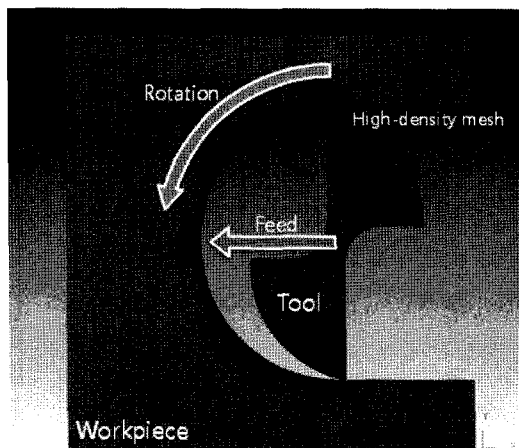


Fig. 3 Finite element model of micro-scale milling process

Table 1 JC model constants of SM45C

$T_{melt}(\text{°C})$	$A(\text{MPa})$	$B(\text{MPa})$	$C$	$n$	$m$
1460	553.1	600.8	0.0134	0.234	1.0

Table 2 Cutting conditions

Spindle speed, $N(\text{rpm})$	100,000
Axial depth of cut, $A_d(\text{mm})$	20
Feed per tooth, $f_t(\mu\text{m})$	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0

Table 3 Dimension and material of micro milling tool

Material	Tungsten carbide
Diameter, $D(\mu\text{m})$	200
Cutting edge radius, $r_c(\mu\text{m})$	1.0
Clearance angle, $\alpha(\text{deg.})$	10
Rake angle, $\gamma(\text{deg.})$	0

**3.3 시뮬레이션 조건**

마이크로 밀링가공의 유한요소해석을 수행하기 위해 Deform-2D 프로그램을 이용하였다. 소재절삭이 일어나는 공구선단경로 주변은 메쉬밀도를 높게 하였다. 공구의 소재는 고속가공에 주로 사용되는 초경합금(Tungsten Carbide)로 하였으며, 가공시편의 소재는 SM45C종으로 하였다. 가공시편은 탄소성영역 거동을 나타낼 수 있도록 탄소성(Elasto-plastic) 타입으로 하였으며, 공구는 강체로 가정하였다. 그리고 마이크로 밀링가공에서는 수직방향 절삭깊이가 크지 않으므로 공구헬리컬각의 영향은 무시하였다. Table 1에 가공시편의 소재인 SM45C의 JC 모델상수를 나타내었다<sup>(6)</sup>. Table 2에는 절삭가공조건을 나타내었으며 Table 3에는 공구의 주요치수 및 소재에 대해 나타냈다.

**3.4 시뮬레이션 결과**

날당이송의 크기를 5단계로 나누어 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 4에는 가공 중의 소재의 응력분포 및 칩의 형상에 대해 나타냈으며, Fig. 5에는 절삭력신호의 형태에 대해 나타내었다. 날당이송이 1.0 $\mu\text{m}$ 과 0.8 $\mu\text{m}$ 일 경우에는 칩이 안정적으로 생성되며, 범용 밀링가공에서 관찰되는 형태의 전단응력영역이 발견되었다. 절삭력신호의 형태 또한 범용밀링가공의 형태와 유사한 형태를 나타냄을 확인할 수 있었다. 날당이송이 0.6 $\mu\text{m}$ 과 0.4 $\mu\text{m}$ 일 경우, 절삭력신호의 일부구간에서 그 형태가 소재의 눌러짐에 의해 상대적으로 평평한 구간이 발견되었다. 특히, 날당이송이 0.2 $\mu\text{m}$ 인 경우에는 칩이 생성되지 않고, 소재가 공구선단에 의해 눌러지며, 절삭력신호의 형태 또한 평평한 구간이 존재함을 확인할 수 있었다.

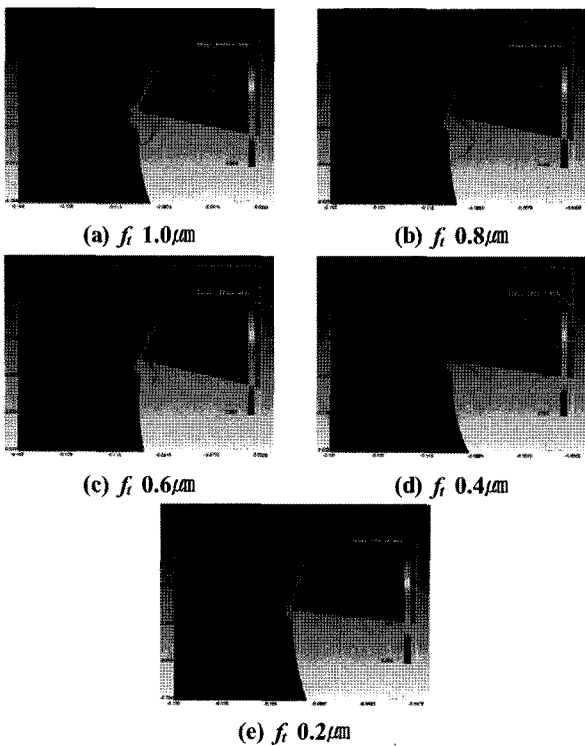


Fig. 4 Stress distribution and shape of chip

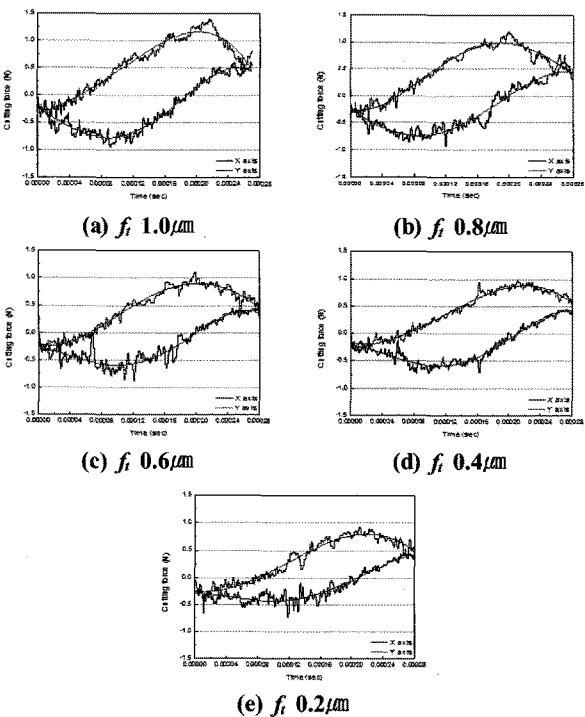


Fig. 5 Cutting force signal versus cutting time

#### 4. 마이크로 밀링가공실험

##### 4.1 실험장치 구성 및 실험방법

마이크로 밀링가공은 에어터빈스핀들이 장착된 3축 마이크로

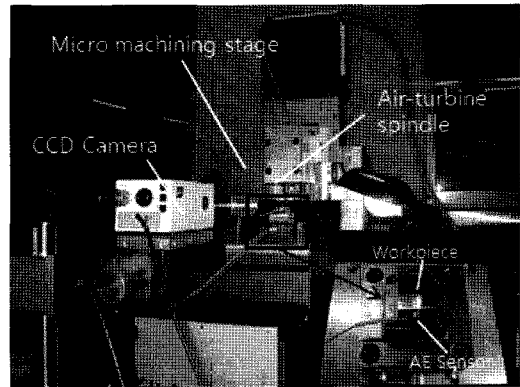


Fig. 6 Experimental setup

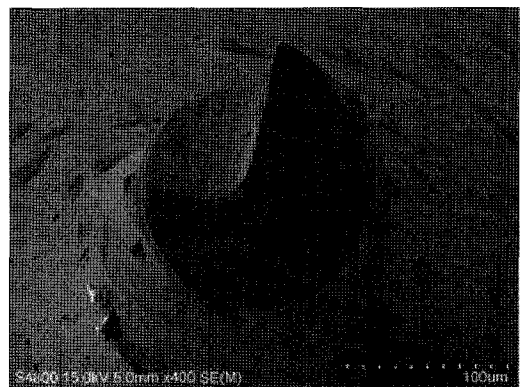


Fig. 7 SEM image of micro milling tool

로 머시닝 스테이지를 활용하여 수행되었으며, 제어는 개인용 컴퓨터를 이용하여 수행되었다. 가공시 절삭력 신호를 얻기 위해 절삭력측정센서가 장착된 절삭력측정시스템을 x-y이송계에 설치하고, 가공시편을 절삭력측정시스템 위에 고정시켰다. 그리고 가공시의 AE(Acoustic Emission)신호를 획득하기 위해 가공시편의 측면에 AE센서를 부착하였다. 절삭력측정센서와 AE센서의 신호는 내셔널인스트루먼트(NI)사의 Labview 8.2를 사용하여 동시에 획득하였다. 모니터링과 신호저장 및 신호 분석의 효율성을 증대시키기 위하여 모든 신호의 FFT(Fast Fourier Transform)변환과 AE신호의 RMS(Root Mean Square) 변환을 실시간으로 수행하도록 프로그램을 작성하였다. 모든 신호는 대역통과 필터(Band Pass Filter)를 이용하여 100Hz~5,000Hz 대역의 신호만을 획득하도록 설정하였다. 각 신호의 샘플링율은 앨리어스(Alias) 현상을 방지하고, 신호의 해상도를 높이기 위해 나이퀴스트 주파수(Nyquist Frequency)를 고려하여 20,480Hz로 하였다. Fig. 6에는 실험장치를 나타내었다. 날당이송에 따른 마이크로 밀링가공의 특성을 파악하기 위해 날당이송을 변화시키면서 실험을 수행하였다. Fig. 7에는 사용된 마이크로 밀링공구의 SEM 사진을 나타내었으며, 공구의 소재 및 치수와 절삭가공조건은 시뮬레이션과 동일하다.

### 4.2 실험결과 및 고찰

Fig. 8에는 측정된 마이크로 밀링가공의 절삭력신호를 나타내었다. 공구선단반경과 같은 크기인 1.0 $\mu\text{m}$ 의 날당이송과 공구선단반경과 비슷한 크기인 0.8 $\mu\text{m}$ 의 날당이송에서는 절삭력신호가 범용 밀링가공에서 발견할 수 있는 절삭력신호의 형태를 나타내며, 주기적이고 안정적이라는 것을 확인할 수 있었다. 반면에 날당이송이 0.6 $\mu\text{m}$ 와 0.4 $\mu\text{m}$ 일 때의 절삭력신호는 비교적 불규칙하며, 특히 0.2 $\mu\text{m}$ 의 날당이송에서는 절삭력신호의 형태가 비주기적이며, 불규칙함을 확인할 수 있었다. 이를 통해 플라잉 현상과 슬라이딩 현상에 의해 소재의 절삭이 안정적으로 발생하지 않음을 간접적으로 확인할 수 있었다.

Fig. 9에는 실험에서 얻은 날당이송에 따른 AE신호를 나타내었다. AE신호는 절삭력 신호와 유사한 성향을 나타냄을 확인할 수 있었다. Fig. 10에는 AE신호를 FFT변환한 결과를 나타내었다. 1.0 $\mu\text{m}$ 와 0.8 $\mu\text{m}$ 의 날당이송에서는 FFT그래프의 형태가 유사함을 확인할 수 있었다. 하지만, 0.6 $\mu\text{m}$ 와 0.4 $\mu\text{m}$ 의 날당이송에서는 500~750Hz와 1,000~1,250Hz 대역의 피크값이 상승함을 확인할 수 있었으며, 특히 가장 작은 크기인 0.2 $\mu\text{m}$ 의 날당이송에서는 500~750Hz와 1,000~1,250Hz 대역의 피크값 뿐만 아니라, 2,250~2,500Hz 대역의 피크값도 상승하였음을 확인할 수 있었다.

각 조건에 대한 가공표면상태를 비교하기 위해 Fig. 11에 가공표면의 SEM 이미지를 나타내었다. 1.0 $\mu\text{m}$ 와 0.8 $\mu\text{m}$ 의 날당이송에서는 표면상태가 비교적 매끄러우며, 벽면의 상태도 비교

적 양호하였다. 이를 통해 소재제거가 정상적으로 발생하였음을 확인할 수 있었다. 하지만 0.6 $\mu\text{m}$ 와 0.4 $\mu\text{m}$ 의 날당이송에서는 가공표면 및 벽면이 매끄럽지 않으며, 이를 통해 소재의 절삭이 정상적으로 발생하지 않았음을 알 수 있다. 특히 0.2 $\mu\text{m}$ 의 날당

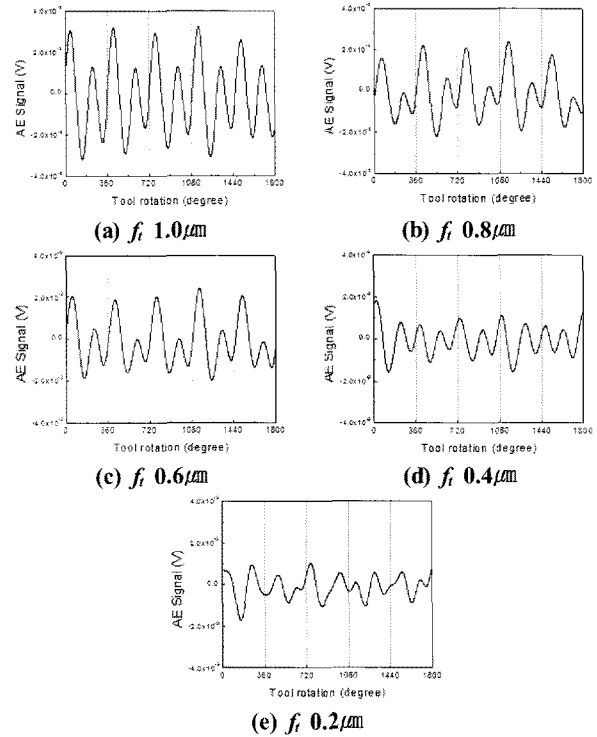


Fig. 9 AE signal versus tool rotation

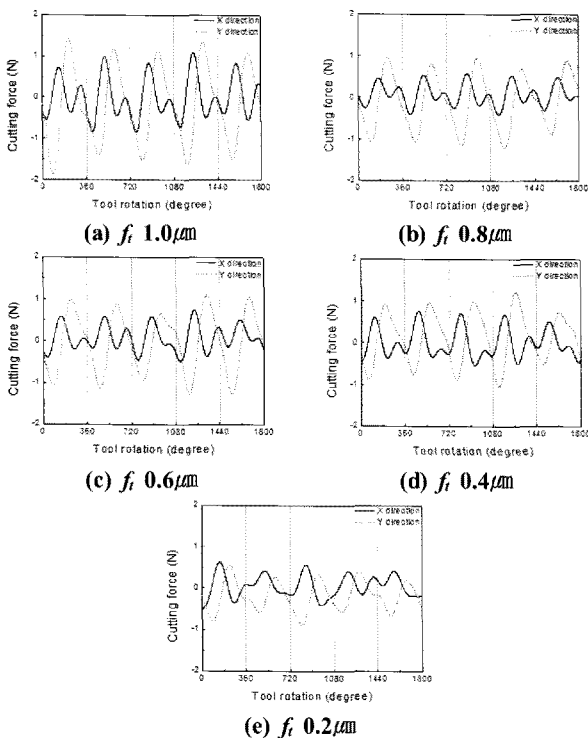


Fig. 8 Cutting force signal versus tool rotation

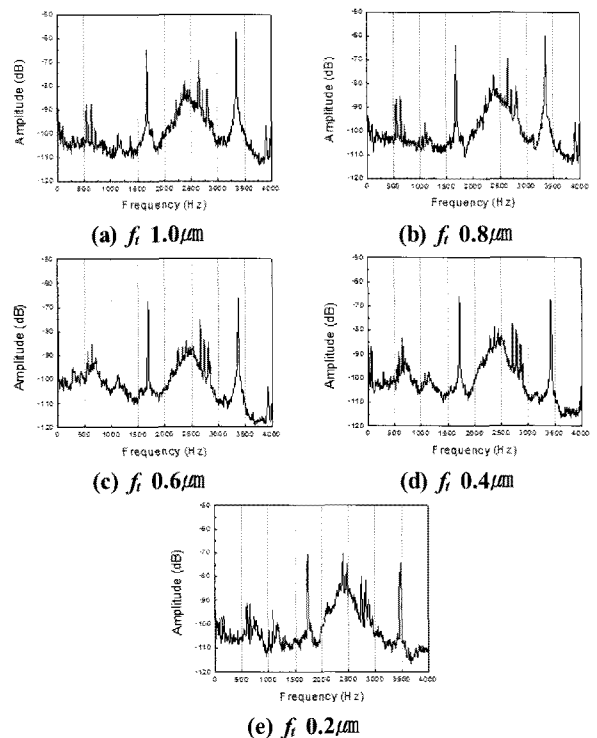


Fig. 10 Power spectrum of AE signal

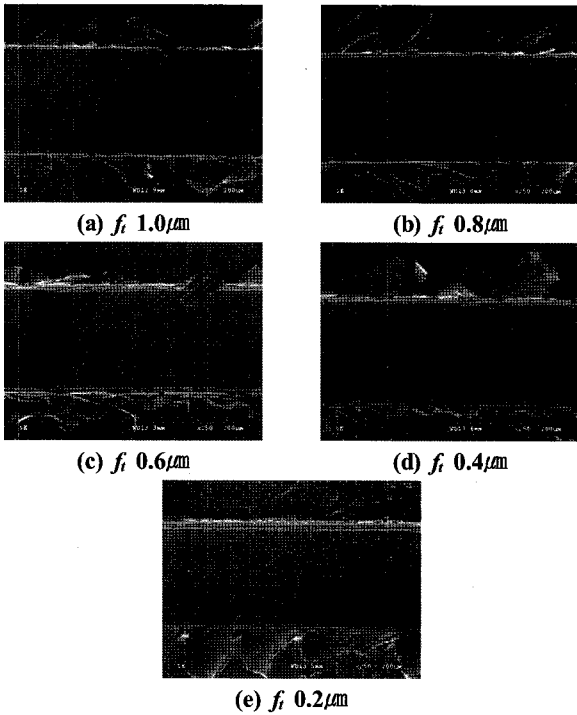


Fig. 11 SEM image of machined surface

이송에서는 가공표면상태 및 벽면상태가 좋지 않을 뿐만 아니라, 생성된 버 또한 제거하기 어렵게 생성되어 있고, 소재의 일부 찌꺼기들이 가공표면에 많이 남아 있음을 확인할 수 있다. 이는 소재가 정상적으로 제거되지 않고 공구선단에 의해 눌러지면서 찢어져서 발생한 결과로 사료된다.

Fig. 12에는 날당이송에 따른 절삭력의 합력의 평균과 AE RMS값의 평균을 나타내었다. 절삭력과 AE RMS는 상당히 유사한 성향을 나타냄을 확인할 수 있으며, AE RMS를 절삭력과 함께 가공과정의 모니터링에 활용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 13은 날당이송에 따른 비절삭에너지의 변화를 나타내고 있다. 날당이송이 작을수록 비절삭에너지는 증가함을 알 수 있으며, 특히 날당이송이 0.6μm일 때부터 비절삭에너지가 급격히 증가함을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 치수효과에 의해 발생하는 현상으로, 공구선단반경과 관련된 플라우잉 현상에 의한 전단에너지의 증가에 따른 것으로 판단된다. 따라서 마이크로 밀링가공의 시뮬레이션과 실제적인 가공실험의 결과에 대한 분석을 통해 공구선단반경의 0.8배에 해당하는 0.8μm이상의 날당이송에서 소재의 절삭이 정상적으로 발생함을 확인할 수 있었다.

### 5. 결론

마이크로 밀링가공의 가공특성을 파악하고 소재의 정상적인 절삭이 발생하는 날당이송을 찾기 위해 유한요소해석과 가공 실험을 수행하여 다음의 결론을 얻었다.

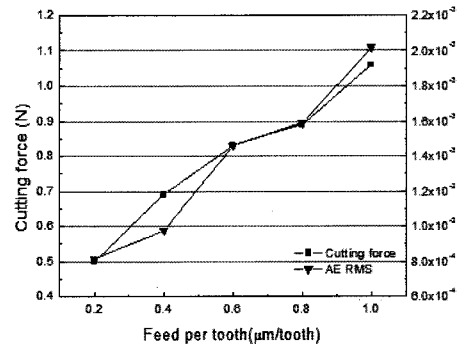


Fig. 12 Cutting force and AE RMS

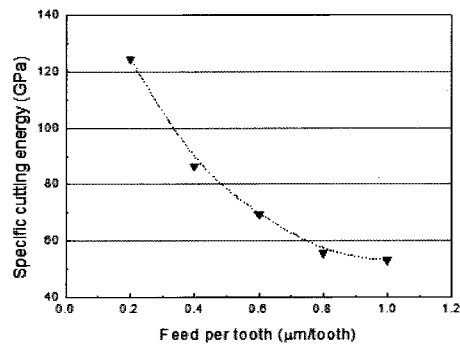


Fig. 13 Specific cutting energy

- (1) 유한요소해석에서 공구선단반경에 대한 날당이송의 비가 0.2일 때, 플라우잉현상에 의한 치수효과에 의해 칩이 생성되지 않았다.
- (2) 가공실험에서 절삭력신호와 AE신호와 FFT주파수분석, 가공표면의 분석을 통해, 공구선단반경에 대한 날당이송의 비가 0.6이하일 때 소재의 정상적인 절삭이 발생하지 않음을 확인하였다.
- (3) 유한요소해석과 가공실험의 결과를 통해 소재의 정상적인 절삭을 위해서 공구선단반경에 대한 날당이송의 비는 0.8 이상이어야 한다.

### 후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입(No. 2010-0008804)

### 참 고 문 헌

- (1) Malekian, M., Park, S. S., and Jun, M. B. G., 2009, "Modeling of dynamic micro-milling cutting forces," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 49, pp. 586~598.
- (2) Chae, J., Park, S. S., and Freiheit, T., 2006, "Investigation of

- microcutting operations," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp. 313~332.
- (3) Kang, I. S., Kim, J. S., Kim, J. H., Kang, M. C., and Seo, Y. W., 2007, "A mechanistic model of cutting force in the micro end milling process," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187-188, pp. 250~255.
- (4) Liu K., and Melkote, S. N., 2007, "Finite element analysis of the influence of tool edge radius on size effect in orthogonal micro-cutting process," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 49, pp. 650~660.
- (5) Bao, W. Y., and Tansel, I. N., 2000, "Modeling micro-end-milling operations. Part I: analytical cutting force model," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, pp. 2155~2173.
- (6) Yigit, K., and Tugrul, O., 2006, "Predictive Analytical and Thermal Modeling of Orthogonal Cutting Process - Part I: Predictions of Tool Forces, Stresses, and Temperature Distributions," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 128, pp. 435~444.