

**알루미늄 합금(Al6061-T6)의 마이크로밀링가공에서
버 발생과 신호 특성의 상관관계 분석**김현중^a, 구준영^b, 윤지찬^a, 이종환^c, 김정석^{b*}**Correlation Between Cutting Signal Characteristics and
Microburr Formation in Micromilling of Al6061-T6 Alloy**Hyun-Jung Kim^a, Joon-Young Koo^b, Ji-Chan Yoon^a, Jong-Hwan Lee^c, Jeong-Suk Kim^{b*}^a School of Mechanical Engineering, Pusan National University,
2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea^b School of Mechanical Engineering/Engineering Research Center for Net Shape and Die Manufacturing, Pusan National University,
2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea^c Department of Mechatronics Engineering, Korea Polytechnic Air Colleges,
46, Daehak-gil, Sacheon, Gyeongnam-do, 52549, Korea**ARTICLE INFO***Article history:*Received 26 August 2016
Revised 2 November 2016
Accepted 7 December 2016*Keywords:*Micro milling
Micro burr
Burr characteristic
Acoustic emission**ABSTRACT**

The formation of micro-burrs in micro-milling processes causes several problems related to productivity and surface integrity. It should be minimized and suppressed by effective monitoring of the cutting conditions. This paper presents the correlation between the micro-burr length and cutting signals in the micro-milling process of an Al alloy (Al6061-T6). The acoustic emission (AE) signals and cutting force signals are acquired during the experiments. The characteristics of the cutting signals are obtained by analyzing the AE root mean square value and resultant cutting force. In addition, the micro-burr length is measured according to the cutting conditions by analyzing a scanning electron microscopy image of the machined surface. The results of this study can be used to enhance the surface quality of micro parts.

1. 서론

최근 전자, 의료, 광학, 디스플레이 그리고 연료전지 산업과 같은 첨단산업의 성장과 함께 마이크로 부품에 대한 수요가 증가하고 있다^{1,2)}. 마이크로 부품의 수요증가에 따라 다양한 마이크로 가공방법이 활용되고 있다. 마이크로 가공의 대표적인 가공방법으로 마이크로밀링(micro-milling)가공이 있다. 다른 마이크로 가공방법과 달리 마이크로밀링가공은 금형들을 가공함으로써 마이

크로 형상부품의 대량생산을 통한 비용효과를 얻을 수 있다^{3,4)}. 가공표면에 발생하는 미세버(micro-burr)는 제품의 정밀도를 저하시키고 가공비용 증가의 원인이 되며 자동화 생산공정에 영향을 준다. 마이크로 밀링가공 역시 생성되는 마이크로 버로 인해 많은 문제가 야기되고 있다. 일반적인 버와 달리 미세버는 디버링(deburring)과정이 더 까다로워 가공비용 증가 및 자동화 공정에 문제가 생기고 정밀도 관리에 애로점이 있다. 현재 일반적인 디버링 방법은 연마제(abrasive), 바렐(barrelling), 브러시(brushing)

* Corresponding author. Tel.: +82-51-510-2334

Fax: +82-51-518-7207

E-mail address: juskim@pusan.ac.kr (Jeong-Suk Kim).

등을 이용하는 기계적인 버 제거 방법이 있고 에칭(etching) 등 화학적인 반응을 이용하는 버 제거 방법 등이 있다⁵⁻⁷⁾. 그러나 Gillespie^[8]에 의하면 정밀 부품 가공에 있어 디버링 공정의 비용이 전체 공정비용의 약 30% 넘게 차지하기도 하며, 공정시간에 의한 생산성 저하의 문제가 있다. 따라서 버를 최소화하기 위한 가공상태 모니터링에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 선행연구에서 음향방출 평균값을 이용하여 표면거칠기를 예측할 수 있었으며, 또한 절삭합력과 음향방출 평균값(AE RMS)은 유사한 경향이 있는 것을 확인하였다^{9,10)}.

본 논문에서는 경량화 구조에 많이 활용되는 알루미늄 합금(Al6061-T6)에 대한 마이크로밀링가공을 수행하여 가공신호 특성과 미세버 길이의 상관관계를 파악하고자 한다. 이를 위해 공구동력계와 AE (acoustic emission)센서를 활용하여 가공중 절삭합력과 음향방출 신호를 획득하고 표면상태를 관찰하여 미세버를 측정한다. 신호처리를 통해 미세버 생성 시의 절삭변수에 따른 신호의 특성을 파악하고, 미세버와의 상관관계를 도출한다.

2. 마이크로밀링가공 실험

2.1 실험장치

마이크로밀링가공 실험을 위한 실험장치 구성을 Fig. 1에 나타내었다. 본 실험에서는 고속 머시닝센터 Makino V55를 사용하였으며, 주축에 최대 80,000 rpm급 에어 터빈 스피들(air-turbine spindle)을 장착하였다. 이는 공압(air-pressure)으로 회전속도 조절이 가능하다. 직경 200 μm 의 2날 마이크로 엔드밀공구(Union Tool, C-CES 2002-0040)를 사용하였으며 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 촬영한 공구형상을 Fig. 2에 나타내었다. 가공

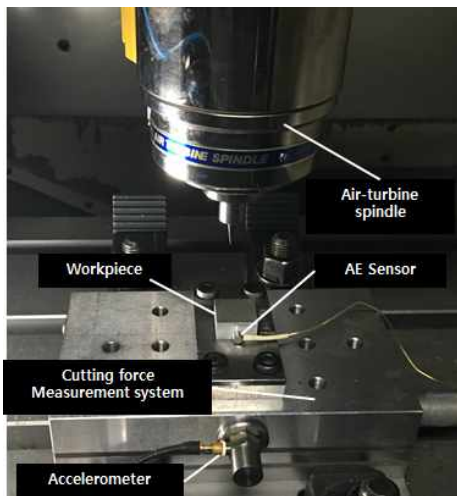


Fig. 1 Experimental setup

소재는 알루미늄 합금(Al6061-T6)을 사용하였다. 절삭력신호를 획득하기 위해 공구동력계(Kistler, 9257B)를 이송테이블에 장착하였으며, AE신호를 획득하기 위해 소재 전면부에 AE센서(4357 Pico type)를 부착하였다.

2.2 실험방법

Fig. 3에 실험의 개략도를 나타내었다. 가공 중 획득한 절삭력신호에 대한 연산을 통해 절삭력 합력의 평균값을 계산하였으며, AE 신호는 RMS(root mean square) 연산을 수행하였다. 절삭변수는 주축회전속도와 날당 이송량 그리고 절삭깊이로 선정하였으며, 주축회전속도는 60,000, 65,000, 70,000 rpm, 날당 이송량은 0.5, 1.0, 1.5 $\mu\text{m}/\text{tooth}$, 절삭깊이는 20, 30, 40 μm 로 정하였다. 이를 이용하여 생성된 절삭조건을 Table 1에 나타내었다. 마이크로밀링 가공 실험은 그루빙(grooving) 가공을 수행하였으며, 가공변수의 변화에 따른 절삭신호 특성을 파악하고 가공표면의 SEM 이미지를 이용하여 미세버 길이를 측정하였다.

2.3 실험결과

Fig. 4에 각 실험조건에 따른 절삭합력과 음향방출 평균값을 나타내었다. 상대적으로 절삭합력(resultant cutting force)과 음향방출 평균값이 큰 값을 가지는 가공 조건에서는 미세버의 길이가 길고 가공면에 생성량이 증가함을 확인할 수 있었다. 이는 절삭합력과 음향방출 평균값의 신호를 동시에 획득함으로써 미세버의 생성

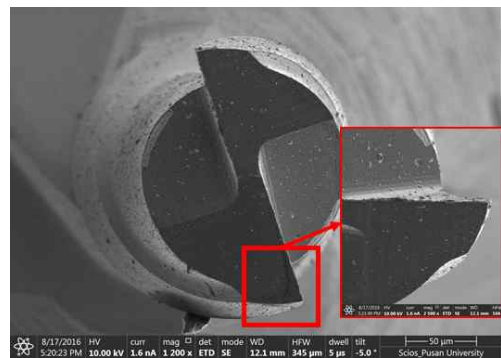


Fig. 2 SEM image of micro milling tool

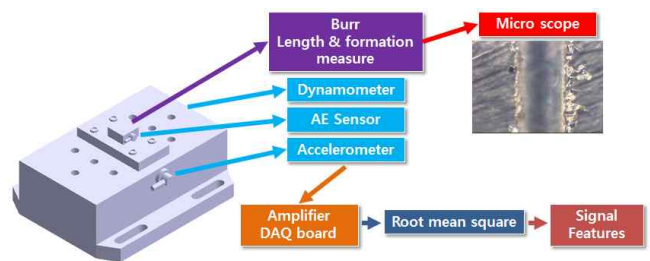


Fig. 3 Scheme of machining experiments

Table 1 Cutting conditions

Experiment No.	Spindle speed (rpm)	Feed per tooth ($\mu\text{m}/\text{tooth}$)	Depth of cut (μm)
1	60,000	0.5	40
2		1.0	
3		1.5	
4	65,000	0.5	
5		1.0	
6		1.5	
7	70,000	0.5	
8		1.0	
9		1.5	
10	65,000	0.5	20
11		1.0	
12		1.5	
13		0.5	30
14		1.0	
15	1.5		

Table 2 Micro-burr length according to experiment number
(μm)

Exp. 1	46.3	Exp. 2	76.3	Exp. 3	92.7
Exp. 4	57.2	Exp. 5	77.4	Exp. 6	109.0
Exp. 7	60.0	Exp. 8	87.2	Exp. 9	125.0
Exp. 10	21.8	Exp. 11	38.1	Exp. 12	70.9
Exp. 13	32.7	Exp. 14	62.7	Exp. 15	96.3

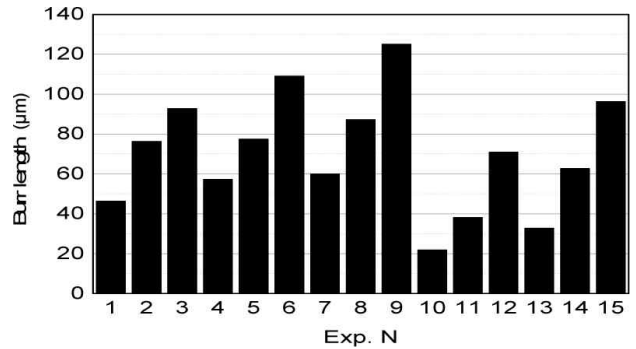
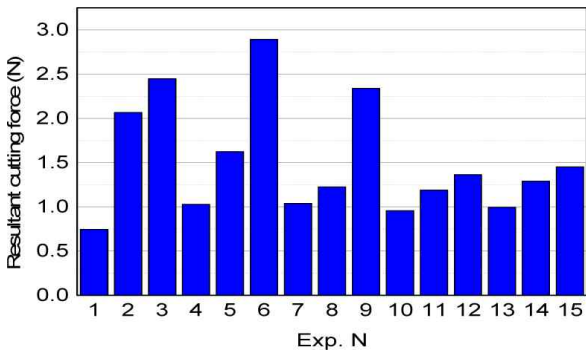
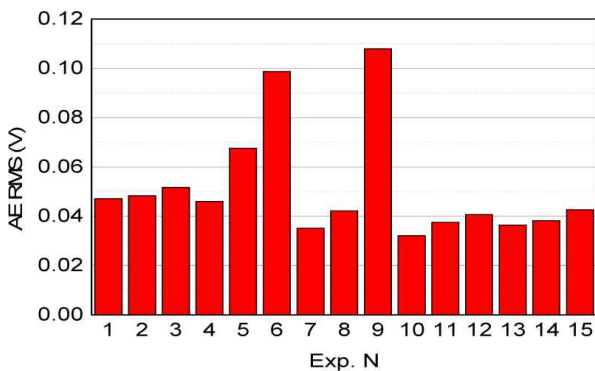


Fig. 5 Micro-burr length according to experimental number



(a) Cutting force



(b) AE RMS

Fig. 4 Resultant cutting force and AE RMS according to experimental number

량과 길이에 대하여 예측할 수 있을 것으로 사료된다. Fig. 5에는 가공 진입부의 SEM 이미지를 나타내었으며, (p)에 주축의 회전방향과 피드방향을 나타내었다.

SEM 이미지를 통하여 측정된 미세버 길이를 Table 2에 나타내었다. 미세버는 가공이 시작될 때의 형상을 촬영한 것으로, 버의 크기는 생성된 가장 긴 미세버를 측정하여 결정하였다. 날당 이송량과 주축회전속도의 증가에 따라 그리고 절삭깊이의 증가에 따라 미세버의 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 5에는 Table 2에 따른 버의 길이를 나타내었다.

Fig. 6의 (c) Exp. 3, (f) Exp. 6, (i) Exp. 9에 보이는 바와 같이 날당 이송량이 증가함에 따라 미세버의 형상이 불규칙하며 표면상태가 불량하였다. 주축회전속도 70,000 rpm, 날당 이송량 1.5 $\mu\text{m}/\text{tooth}$ 인 (i) Exp. 9에서는 가장 큰 크기의 버가 생성되었다. 그러나 주축회전속도 65,000 rpm, 날당 이송량 0.5 $\mu\text{m}/\text{tooth}$, 절삭깊이 20 μm 인 (j) Exp. 10에서는 가장 작은 크기의 미세버가 생성되고 표면상태가 양호하였다.

Fig. 7에는 마이크로밀링가공 초기 진입부에서의 음향방출 평균값의 변화를 나타내었다. 미세버가 길고 크게 생성된 (c) Exp. 6과 (d) Exp. 9에서 음향방출 평균값은 진폭이 크고 불규칙한 형태를 나타내었다. 그러나 미세버가 작게 생성된 (a) Exp. 1과 (b) Exp. 4는 진폭이 작고 상대적으로 안정된 형태를 나타내었다. 이를 통해 음향방출 평균값의 변화와 미세버 크기와의 상관관계를 파악할 수 있으며, 마이크로밀링가공에서 미세버 발생에 대한 실시간 모니터링에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 8에는 일정 주축회전속도에서 날당 이송량의 변화에 따른 음향방출 평균값과 절삭압력 간의 상관관계에 대하여 나타내었다. 날당 이송량이 증가함에 따라 음향방출 평균값과 절삭

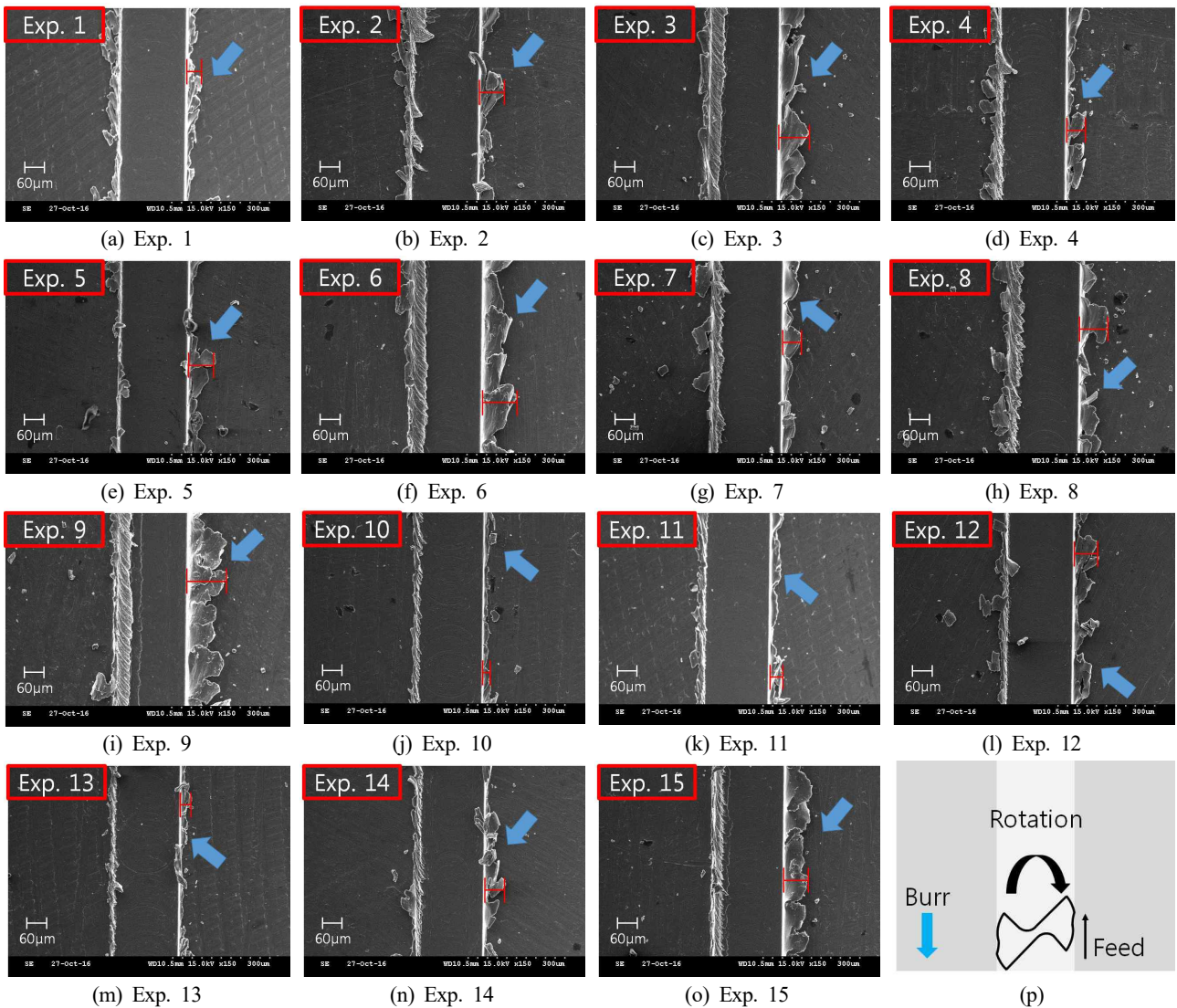


Fig. 6 SEM images of machined surface

합력이 증가하는 경향을 보이고 있다. (a)의 60,000 rpm에서 음향방출 평균값의 증가특성은 미세하게 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 낄당 이송량의 변화에도 불구하고 AE신호에 발생에 영향을 주는 칩 형성 기구가 안정적으로 진행된 것에 기인한 것으로 사료된다. 전체적으로 볼 때 마이크로밀링가공에서 음향방출 평균값과 절삭합력이 서로 상관관계를 가지는 것으로 사료된다.

Fig. 9에는 일정 주축회전속도에서 낄당 이송량의 변화에 따른 음향방출 평균값과 미세버 길이의 상관관계에 대하여 나타내었다. 낄당 이송량이 증가함에 따라 미세버의 길이와 음향방출 평균값이 증가하는 경향을 나타내었다. 이를 살펴볼 때 마이크로밀링가공에서 낄당 이송량 변화에 따라 음향방출 평균값과 미세버 길이가 서로 상관관계를 가지는 것으로 사료된다.

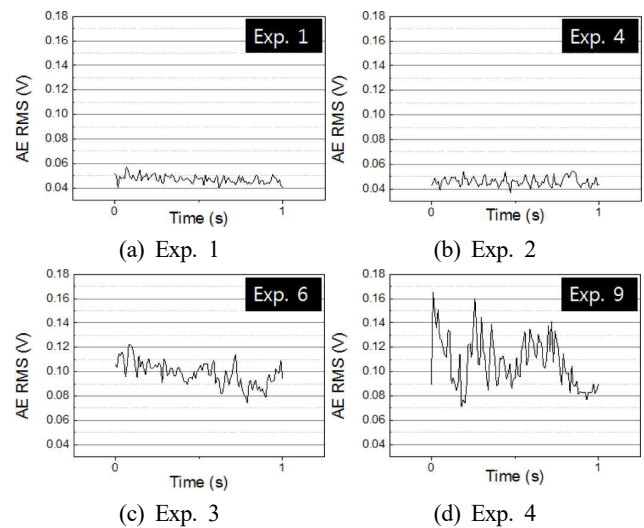
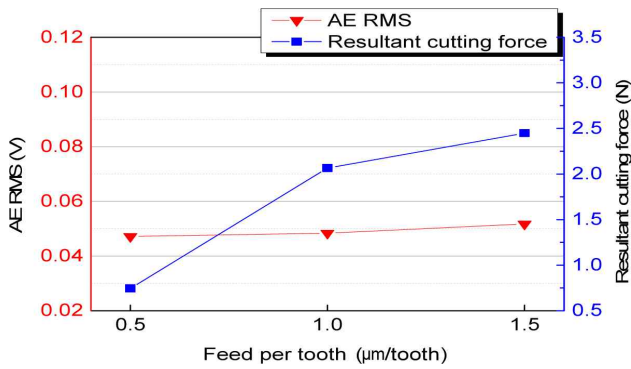
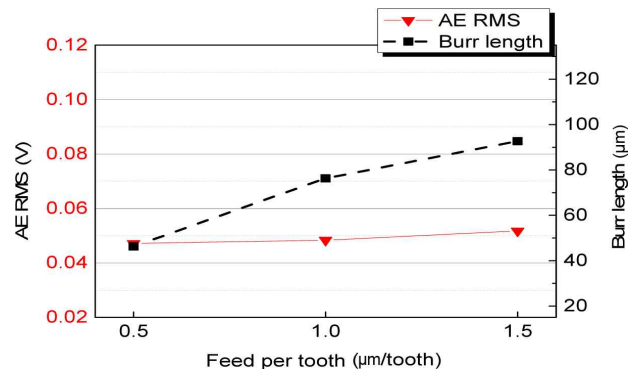


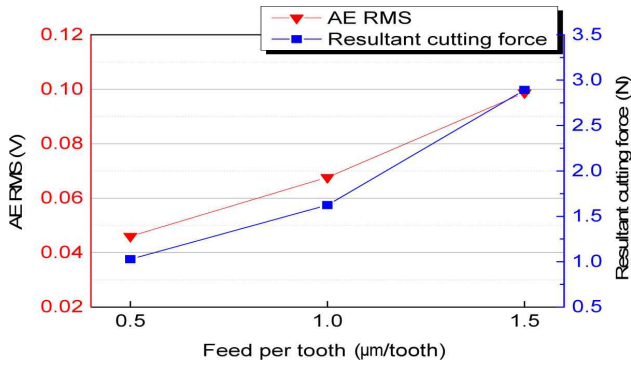
Fig. 7 Changes in AE RMS



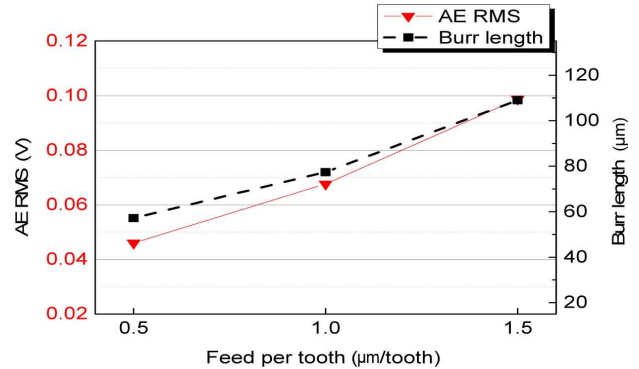
(a) 60,000 rpm



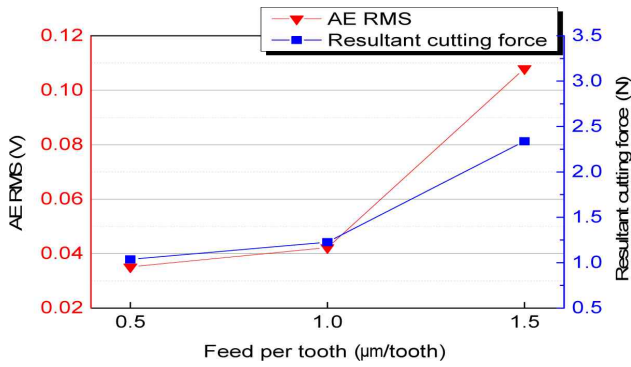
(a) 60,000 rpm



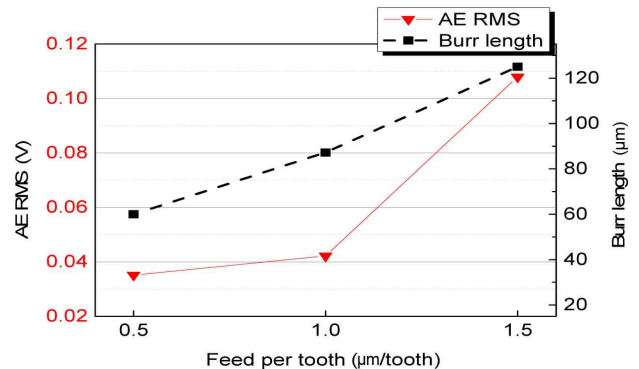
(b) 65,000 rpm



(b) 65,000 rpm



(c) 70,000 rpm



(c) 70,000 rpm

Fig. 8 AE RMS and resultant cutting force according to change of feed per tooth

Fig. 9 AE RMS and burr length according to change of feed per tooth

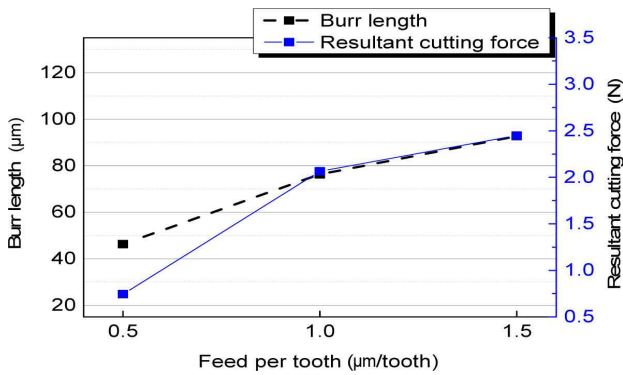
Fig. 10에는 일정 주축회전속도에서 날당 이송량의 변화에 따른 미세버 길이와 절삭합력 간의 특성에 대하여 나타내었다. 날당 이송량의 증가에 따라 미세버의 길이가 증가하며, 절삭합력도 증가하는 경향을 나타내었다. 이를 통하여 미세버의 길이와 절삭합력이 서로 상관관계를 가지는 것으로 사료된다.

Fig. 8~Fig. 10의 상관관계 분석을 통하여 마이크로밀링가공에서 일정한 주축회전속도에서 날당 이송량의 변화에 따라 음향방출 평균값, 절삭합력, 미세버의 길이는 서로 상관관계를 가짐을 확인할 수 있었고, 날당 이송량의 변화에 따라 값이 민감하게 반응하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 11에서 일정 날당 이송량에서 주축회

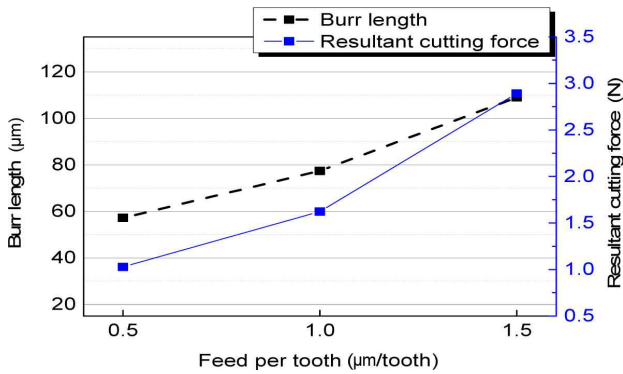
전속도의 변화에 따른 음향방출 평균값과 절삭합력 간의 관계를 나타내었다. 이 실험결과를 볼 때 두 값의 변화가 미미하거나 일관성이 적은 경향을 보였다. 음향방출 평균값과 절삭합력은 날당 이송량에 민감하게 반응하며, 주축회전속도에는 둔감한 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12에는 일정 날당 이송량에서 주축회전속도의 변화에 따른 음향방출 평균값과 미세버 길이의 관계에 대하여 나타내었다. 실험 결과를 볼 때 미세버 길이의 특성과 음향방출 평균값은 주축회전속도에 둔감한 특성을 보이고 있음을 확인할 수 있다.

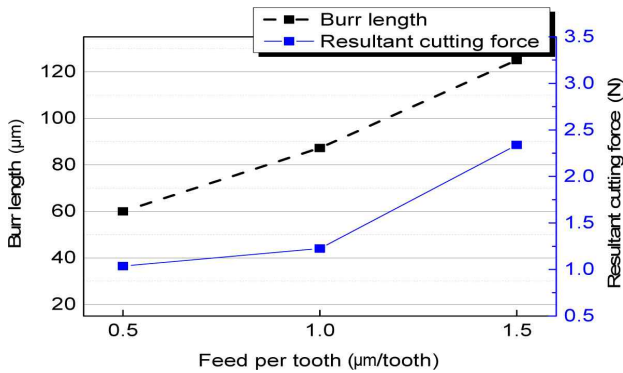
Fig. 11과 Fig. 12를 통하여 절삭합력과 미세버의 길이의 상



(a) 60,000 rpm



(b) 65,000 rpm

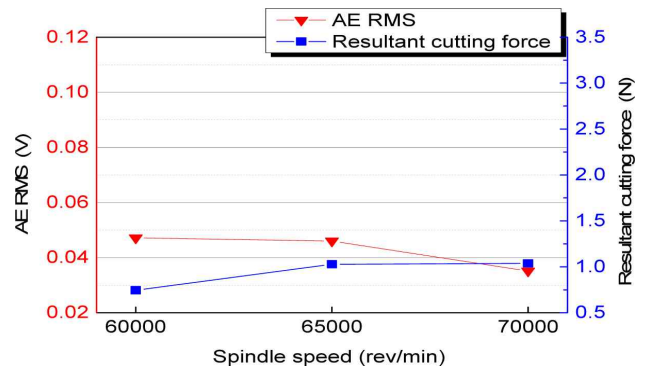


(c) 70,000 rpm

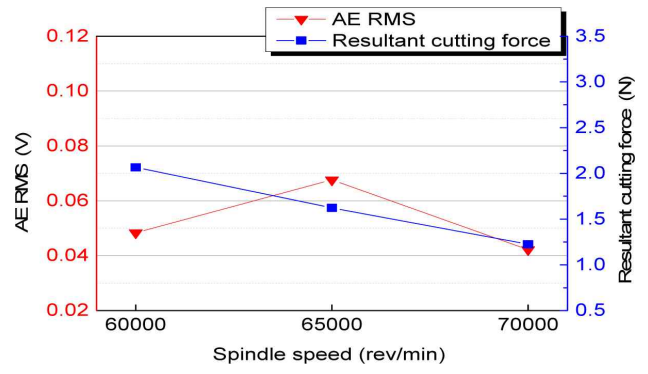
Fig. 10 Burr length and resultant cutting force according to change of feed per tooth

관관계를 찾기 어려울 것으로 예측된다. 또한 마이크로밀링 가공에서 주축회전속도의 변화에 따른 음향방출 평균값, 절삭합력, 미세버의 길이에서 둔감한 특성을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

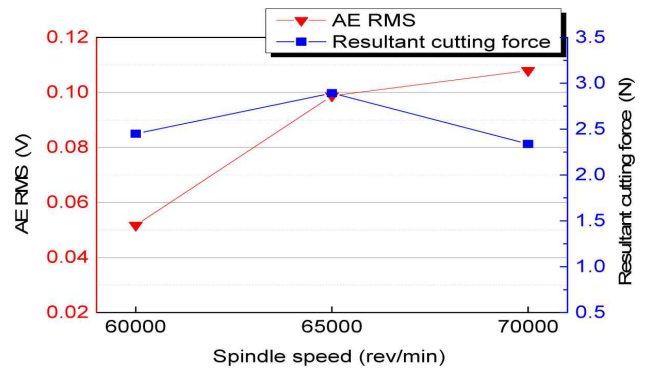
Fig. 13에는 일정 날당 이송량에서 절삭깊이의 변화에 따른 음향방출 평균값과 절삭합력과의 특성에 대하여 나타내었다. Fig. 8에서의 날당 이송량의 변화에 따른 특성과 같이 절삭깊이의 변화도 음향방출 평균값과 절삭합력이 서로 상관관계를 가지는 것을 확인할 수 있었다.



(a) 0.5 μm/tooth



(b) 1.0 μm/tooth

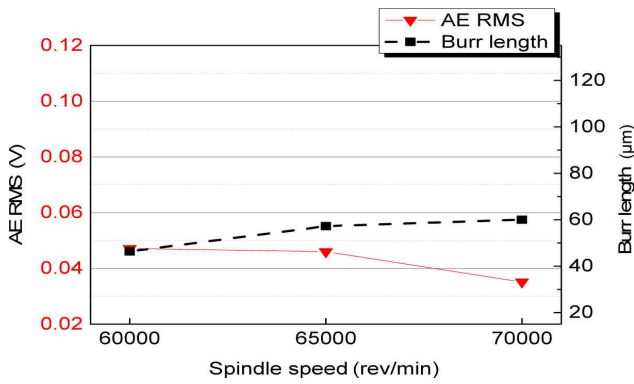


(c) 1.5 μm/tooth

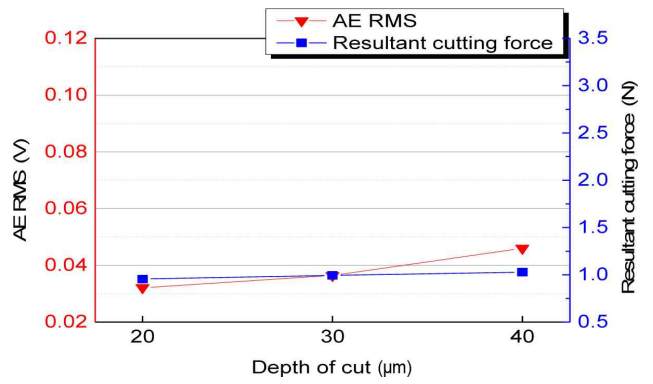
Fig. 11 AE RMS and resultant cutting force according to change of spindle speed

Fig. 14에는 일정 날당 이송량에서 절삭깊이의 변화에 따른 음향방출 평균값과 미세버의 길이와의 특성에 대하여 나타내었다. 절삭깊이의 변화에서도 음향방출 평균값과 미세버 길이는 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이는 날당 이송량의 증가와 절삭깊이의 증가가 신호 특성과 표면건전성에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

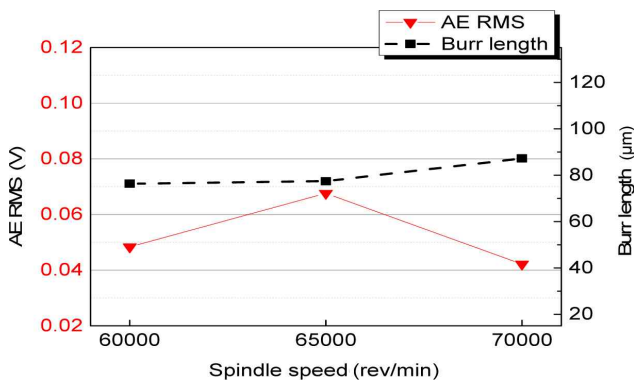
Fig. 15에는 일정 날당 이송량에서 절삭깊이의 변화에 따른 미세버 길이와 절삭합력과의 특성에 대하여 나타내었다. Fig. 10에서의 날당 이송량의 변화에 따른 특성과 유사한 경향을 가지는 것을 확



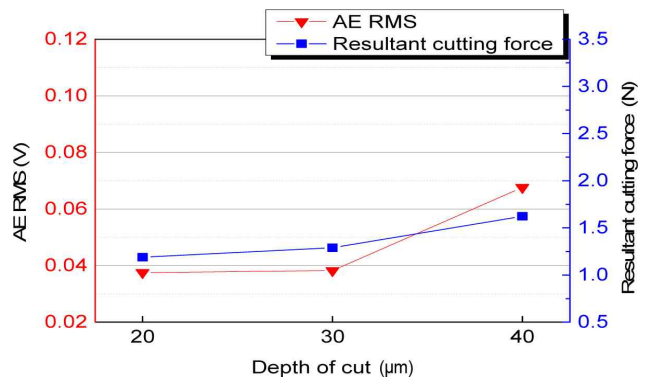
(a) 0.5 μm/tooth



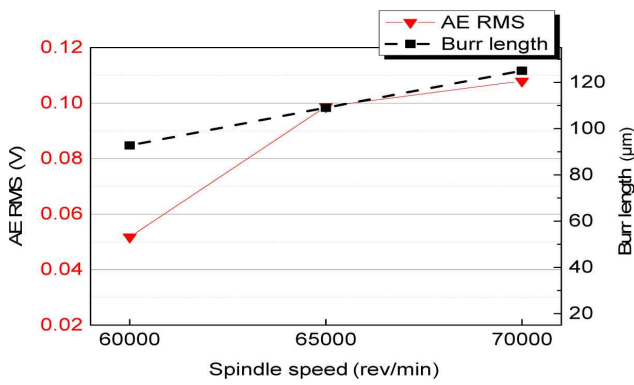
(a) 0.5 μm/tooth



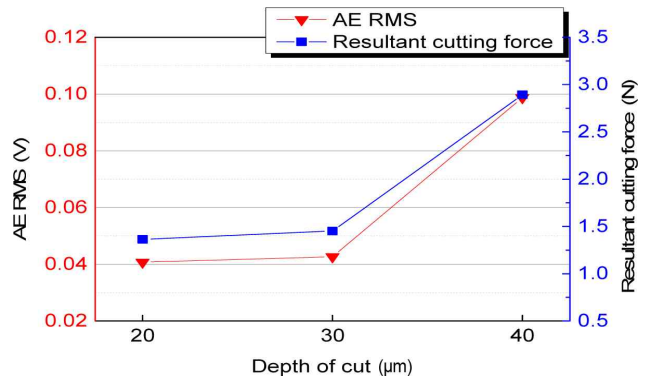
(b) 1.0 μm/tooth



(b) 1.0 μm/tooth



(c) 1.5 μm/tooth



(c) 1.5 μm/tooth

Fig. 12 AE RMS and burr length according to change of spindle speed

Fig. 13 AE RMS and resultant cutting force according to change of depth of cut

인할 수 있었다.

본 가공실험 결과를 살펴볼 때, 마이크로밀링가공에서 날당 이송량과 절삭깊이의 변화에 민감하게 반응하며, 주축회전속도의 변화에는 둔감하게 반응하는 것을 확인할 수 있었다. 마이크로밀링가공 중 발생하는 미세버는 음향방출 평균값과 절삭합력과 각각 상관관계가 있으며, 이를 통하여 미세버의 모니터링에 활용될 수 있음을 알 수 있다. 따라서 마이크로밀링가공 중에 음향방출 평균값과 절삭합력의 신호 중 획득이 용이한 신호를 선정하여 버의 감시에 효과적으로 적용할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

알루미늄 합금(Al6061-T6)의 마이크로밀링가공에서 절삭변수인 주축회전속도와 날당 이송량 그리고 절삭깊이의 변화에 따른 절삭신호 특성과 미세버의 상관관계를 파악하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

미세버의 생성과 절삭합력 그리고 음향방출 평균값은 주축회전속도의 변화에 둔감하고, 날당 이송량과 절삭깊이의 변화에 민감함을 확인하였다.

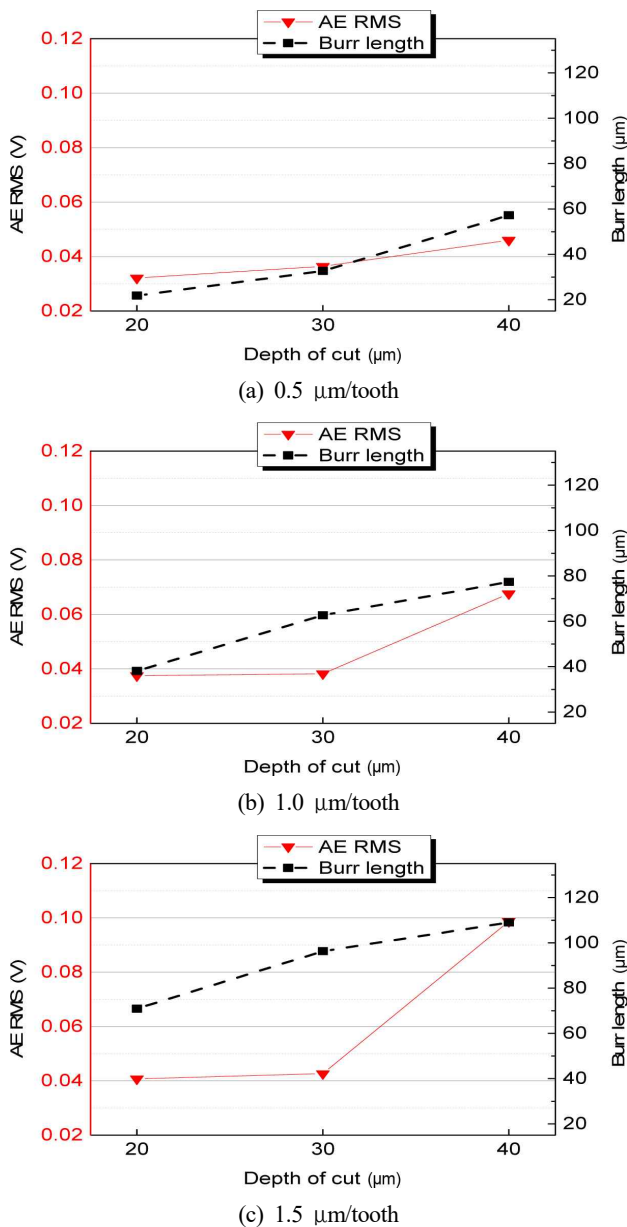


Fig. 14 AE RMS and burr length according to change of depth of cut

날당 이송량의 증가에 따라 절삭합력과 음향방출 평균값이 증가하였고 이때의 미세버의 길이가 증가함을 확인하였다. 가공표면상태와 음향방출 평균값의 신호형태에 대한 분석을 통해 음향방출 평균값은 버의 크기와 상관관계를 가짐을 확인하였다.

음향방출 평균값과 절삭합력 신호는 마이크로밀링가공에서 미세 버에 대한 예측, 제어, 그리고 효과적인 모니터링에 적용할 수 있음을 알 수 있다.

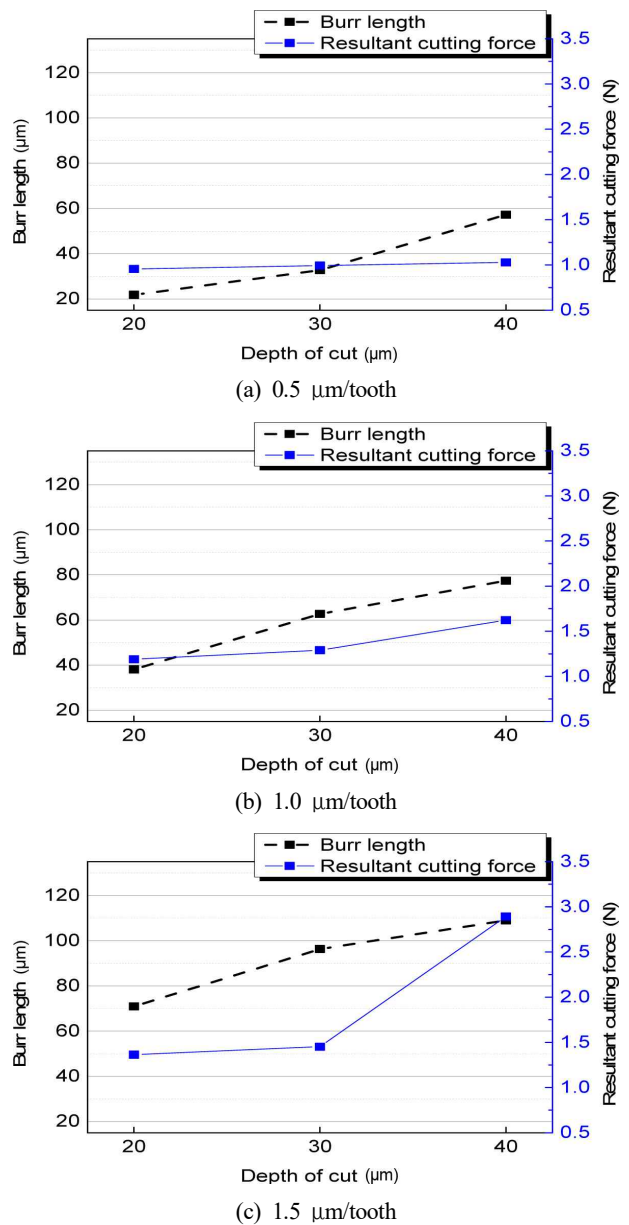


Fig. 15 Burr length and resultant cutting force according to change of depth of cut

후기

본 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기본연구지원사업임(No. 201524090001).

References

- [1] Jun, M. B., Bourne, K., DeVor, R. E., Kapoor, S. G., 2007, Estimation of Effective Error Parameters In High-Speed Micro-endmilling, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47:9

- 1449-1454.
- [2] Vogler, M. P., Devor, R. E., Kapoor, S. G., 2004, On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Micro- endmilling, Part 1: Surface Generation, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126:4 685-694.
- [3] Wang, J., Gong, Y., Abba, G., Antonie, J. F., Shi, J., 2009, Chip Formation Analysis in Micromilling Operation, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45:130.
- [4] Özel, T., Liu, X., Dhanorker, A., 2007, Modelling and Simulation of Micro-milling Process, 4th International Conference and Exhibition on Designs and Production of Machines and Dies/Molds.
- [5] Jeong, Y. H., Yoo, B. H., Lee, H. Y., Lee, B. K., Cho, D. W., Lee, S. J., 2009, Deburring Microfeatures using Micro-EDM, *Journal of materials processing technology*, 209:14 5399-5406.
- [6] Lee, S. H., Dornfeld, D. A., 2001, Precision Laser Deburring, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 123:4 601-608.
- [7] GO, S. L., Jeon, G. B., Lee, J. G., 2000, Development of the Burr Measurement System using Laser, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 17:9 166-173.
- [8] Gillespie, L. K., 1979, Deburring Precision Miniature Parts, *Deburring Precision Miniature Parts*, *Precision Engineering*, 1:4 189-198.
- [9] Ku, M. S., Kim, J. S., Kim, P. H., Park, J. H., Kang, I. S., 2011, An Evaluation of Machining Characteristics in Micro-scale Milling Process by Finite Element Analysis and Machining Experiment, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 20:1 101-107.
- [10] Jang, S. H., Kang, I. S., Kim, J. S., Park, J. H., Kwon, H. Y., 2008, AE Signal Analysis for Machined Surface Condition Monitoring in Micro Milling Process, *Proceeding of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 143-147.