

# 헬릭스각이 버형성에 미치는 영향

맹민재\*, 정준기\*\*

## Effects of the Helix Angle on the Burr Formation

Min-Jae Maeng\*, Joon-Ki Chung\*\*

### Abstract

Even in a fully automated factory, many deburring operations are carried out manually. To remove or minimize the burr effectively or automatically, understanding of the burr formation which occur at the exit stage of machining is necessary. Burrs can be formed on the feed mark ridges and the edges of the machined parts in machining operations. These burrs are undesirable in terms of the surface quality, the precise dimensioning of the machined parts and the safety of operators. This paper demonstrates the effectiveness of using end mill tool on minimizing the exit burr formation in machining. In particular, the experimental relationships between the size of exit burr and the cutting parameters are established in end mill machining. Methods to control the size of exit burr are then explained.

**Key Words :** Helix Angle(비틀림각), Exit Burr(출구버), Burr Formation(버형성), Milling Machning(밀링가공), Feed Mark(이송자국), Deburring(버제거)

### 1. 서론

일반적으로 엔드밀 가공은 다양한 가공을 하기 위해 사용되고 있다. 산업이 발달할 수 록 제품의 고정밀도를 요구하게 되었고, 이로 인해 엔드밀로 고정밀도 가공을 하게 되었다. 하지만 대부분의 가공에서 원하지 않은 미소크기의 버가 생기게 된다. 가공부분의 가장자리 또는 표면에 생기는 버는 가공품의 품질이나 가공부분의 정밀도에 치

명적인 영향을 미치고 나아가서는 생산성을 저하시키는 결과를 초래한다. 이러한 가공표면에 남겨진 버를 제거하는 연구가 매우 활발히 진행되는 것은 필수적이라 하겠다. 1970년대 중반 Gillespie<sup>(1)</sup>가 엔드밀 가공에서의 버는 이송속도, 공구마모정도, 절삭속도, 출구각에 의해 영향을 받는다는 연구결과를 발표하였다. 1990년대 후반 Chern과 Domfeld<sup>(2-3)</sup>는 공구가 공작물에서 빠져나갈 때 버가 형성된다는 것을 관찰하였는데 이 결과는 절삭날의 형상,

\* 홍익대학교 대학원  
\*\* 홍익대학교 기계공학과

공작물의 특성에 의존한다고 하였다. 국내에서는 고성립<sup>4</sup> 등<sup>5</sup> 등이 비의 측정 및 비를 최소화하는 방법을 제시하였다. 그러나 국내에서는 독립된 기술분야의 인식 부족으로 디버링 기술이 부족한 실정이다. 본 연구에서는 밀링가공시 엔드밀의 헬릭스각을 변화시켜 가공조건, 즉 절삭속도, 이송속도, 축방향 절삭깊이, 반경방향 절삭깊이, 공작물 재질에 따른 비 높이를 현미경을 이용하여 측정하고, 공구동력계에서 검출한 축방향 절삭력을 비 높이와 비교하여 특징적 변화를 파악한다. AE신호도 비교하였다. 밀링작업에서는 칩의 두께가 절삭속도와 이송속도 모두의 영향을 받으므로, 이송속도 대신 절삭전 칩두께를 변수로 사용하여 비 높이를 비교하는데 이용하였다. 이와 같은 다양한 절삭조건에서 비의 발생을 실험적으로 고찰하여 비의 생성과 엔드밀 헬릭스각과의 관계를 도출하는 것이다.

## 2. 실험장치의 구성 및 방법

### 2.1 실험장치 구성

Fig. 1은 엔드밀 가공에서 헬릭스각과 비의 관계를 제시하기 위해 CNC머시닝센터(Tongil H. I.-TNV40A)에 부착한 실험장치의 구성을 보여준다. AE센서(PAC-R15)는 공작물측면, 공작물은 지그에 고정하고, 지그는 공구동력계(Kistler-9257B)위에 설치하였다. 기타 실험장치는 전치증폭기(PAC-1220A), AE신호처리장치(LOCAN 320-AT), 충전증폭기(Kistler-5019A) 등이다. 절삭공구는 2날

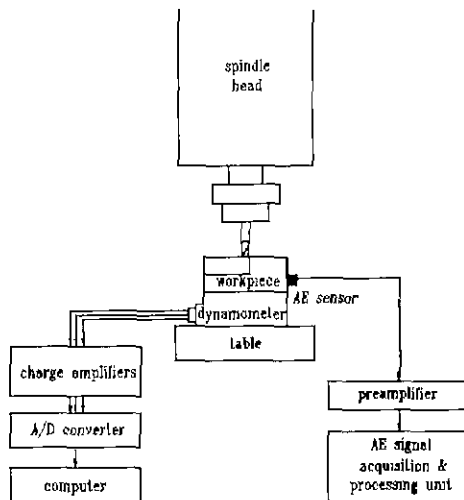


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

솔리드형 고속도강 엔드밀( $\phi 10\text{mm}$ , Helix angle  $i=25^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ ), 공작물은 파단없이 비가 형성되는 순수구리(Cu)와 알루미늄(Al 6061-T6)을 사용하였다. 비 높이는 표면경도계에 부착된 금속현미경(Kosaka Lab Formacoder EF-150S)으로 촬영하였다.

### 2.2 실험방법

실험은 2단계로 수행되었다. 첫단계에서는 엔드밀의 헬릭스각 변화에 따른 축방향 절삭력 데이터를 컴퓨터에서 처리하였다. 동시에 AE신호도 처리하였다. 두 번째 단계에서는 각각의 절삭조건에서 얻은 비 높이의 정도를 현미경을 이용하여 정량적으로 측정하였다. 비의 크기 측정의 경우 비의 크기는 절삭이 시작된 부분에는 비의 크기가 작고, 길이에 따라 일정하지 않으므로 시편의 중앙지점의 길이 10mm 구간을 정하여 2mm 간격마다 최대, 최소 비 깊이를 4회 측정하여 평균값을 사용하였다. 절삭실험에 선정된 절삭조건은 엔드밀 공구에 대한 추천 절삭조건보다 하향 조정하였다. 그 이유는 비의 형성을 효율적으로 관찰하기 위해 채택하였다. 실험은 16가지의 절삭조건, 즉 절삭속도  $V=12, 15\text{m/min}$ , 이송속도  $f=60, 80, 100, 120\text{mm/min}$ , 축방향 절삭깊이  $d_p=2, 4\text{mm}$ , 반경방향 절삭깊이  $d_r=5\text{mm}$ 에 대하여 구리(Cu)와 알루미늄(Al 6061-T6)을 하향 절삭하면서 수행되었다.

### 2.3 신호처리

공구동력계에서 충전증폭기를 거쳐 출력된 절삭 주분력의 신호는 1.5ms의 간격으로 검출하여 컴퓨터에 입력하였다. 입력된 절삭 주분력 신호에 대하여 연속적인 50개의 피크 값을 취하여 절삭력의 평균값을 계산하였다.

AE센서에서 검출된 신호는 전치증폭기에서 40dB 증폭하고 주파수 영역 100-300kHz에서 여파한 후 AE신호처리장치에 입력하였다. 입력된 AE신호를 신호처리장치내의 주증폭기에서 20dB 증폭한 후 0.1 $\mu\text{s}$  간격으로 검출하였다. 검출된 AE신호가 50ms 동안에 경계값(threshold value) 100mV를 통과하는 횟수를 검출하여 AE count를 산출하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 헬릭스각에 따른 비 높이의 관계

Fig. 3은 하향절삭시 헬릭스각 변화에 따른 비 높이의 변화를 나타낸다. 공작물 재료는 구리와 알루미늄을 이용

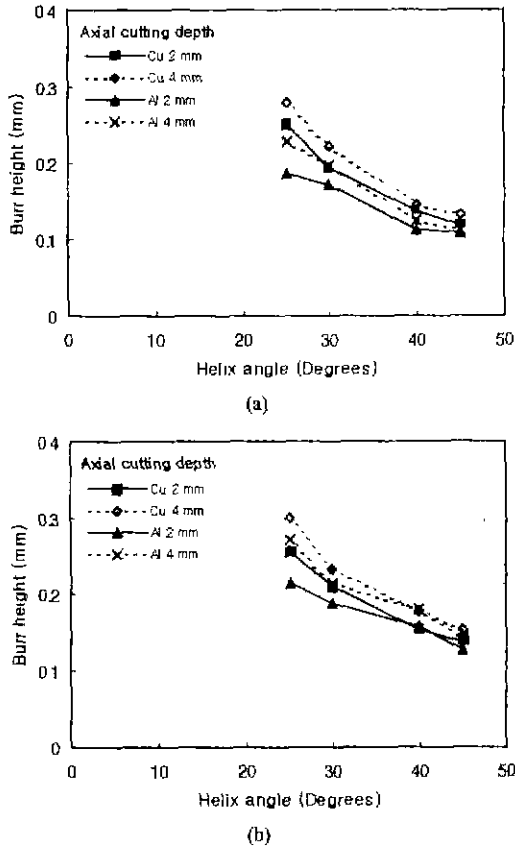


Fig. 3 Burr height versus helix angle:(a)V=12m/min, f=60mm/min, and (b)V=12m/min, f=80mm/min

하여 비교하였다. 헬릭스각이 감소하면 버의 높이는 증가하고, 상대적으로 헬릭스각이 증가하면 버의 높이는 감소함을 실험을 통해 확인할 수 있다. 그 이유는 헬릭스각이 증가하면 절삭날의 한 점에서 가공이 시작하여 차례로 가공하는 단계가 많기 때문에 버의 높이는 감소한다. 반대로 헬릭스각이 감소하면 커터의 절인 1개당 접촉하는 인선길이가 크게 작용하기 때문인 것으로 사료된다. 이상의 결과를 종합하면 접촉하는 인선길이는 헬릭스각에 영향을 받으므로 버 높이와 관계가 있다. 따라서 헬릭스각을 이용하면 효과적으로 버를 감소시킬 수 있는 기술을 얻을 수 있다고 결론 지을 수 있다. 다른 절삭조건에서도 정성적으로 유사한 결과를 얻었으므로, 이송속도  $f=60, 80\text{mm/min}$ 의 절삭조건에서 얻은 실험 결과만을 제시하였다.

### 3.2 공작물 재료에 따른 버 높이의 관계

Fig. 4(a)는 하향절삭시 축방향 절삭력 증가에 따른 버 높이의 변화를 나타낸다. 축방향 절삭깊이는 일정하게 하고 이송속도  $f=60, 80, 100, 120\text{mm/min}$ 로 증가시켜 축방향 절삭력을 검출하였다. 비틀림 각은 일반적으로 사용하는  $30^\circ$ 인 엔드밀을 선택하였다. 공작물재료는 구리와 알루미늄을 이용하여 비교하였다. 기계적 성질을 비교할 때 인장강도, 항복강도, 연신율이 알루미늄에 비해 강도가 떨어지는 구리가 버의 높이는 평균적으로 약  $0.0311\text{mm}$  정도로 크게 나타났다. Fig. 4(b)는 하향절삭시 축방향 절삭력 증가에 따른 버 높이의 변화를 나타낸다. Fig. 4(a)와 동일 절삭조건에서 절삭속도를  $15\text{m/min}$ 으로 증가시킨 경우 버 높이의 변화를 보여준다. 절삭속도가 증가함에 따라 단위시간당 절삭되는 칩의 체적이 감소하여 절삭저항이 감소하고, 이로 인해 버의 높이는 평균적으로 약  $0.0130\text{mm}$ 정도로 구리가 미미한 차이로 크게 나타났다.

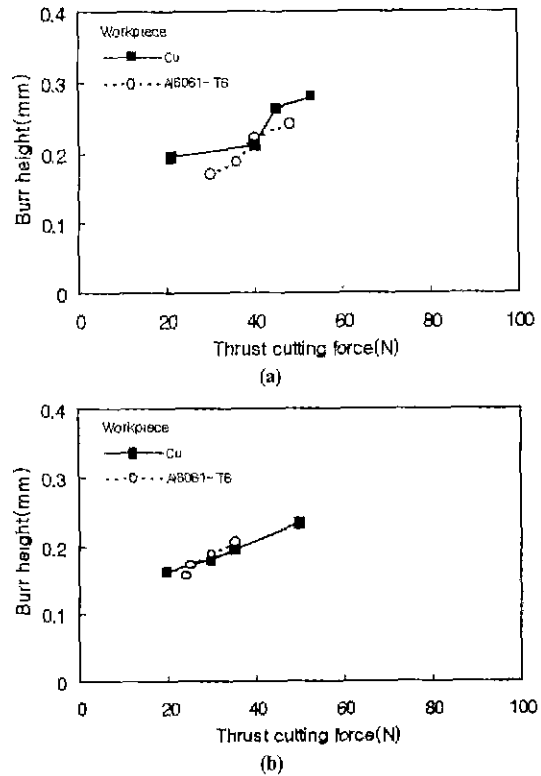


Fig. 4 Burr height versus thrust cutting force:(a)V=12m/min,  $d_1=2\text{mm}$ ,  $i=30^\circ$ , and (b)V=15m/min,  $d_1=2\text{mm}$ ,  $i=30^\circ$

따라서 공작물 재료에 따른 버 높이의 관계는 기계적성질, 즉 연성이 큰 재료가 크게 나타났으며, 동일 절삭조건에서 절삭속도만 증가시켜도 버 높이의 차이는 감소시킬 수 있다. 다른 절삭조건하에서도 정성적으로 유사한 결과를 얻어으므로, 대표적으로 두 가지의 절삭조건에서 얻은 실험 결과만을 제시하였다.

### 3.3 축방향 절삭력과 버 높이의 관계

Fig. 5는 헬릭스각, 절삭속도, 축방향 절삭깊이의 변화에 따른 축방향 절삭력과 버 높이와의 관계를 보여준다. 버가 발생되면 절삭력도 변화하는데 절삭가공중 주분력, 이송분력, 배분력(축방향 절삭력)을 측정하여 그 힘들과 버 발생과의 관계를 알아낼 수 있다.

본 연구에서는 헬릭스각 차이에 따른 절삭력의 변화에 가장 민감한 축방향 절삭력을 고려하여 절삭을 수행하였다. 헬릭스각을 크게 하면 절삭주분력과 버는 감소하는데 상대적으로 엔드밀의 결점으로 축방향 절삭력이 크게 발생한다. 축방향 절삭력을 감소시키고 버 높이를 감소시킬 수 있는 개선책이 필요하다. 따라서 축방향 절삭력과 버 높이의 관계를 제시하고자 한다. Fig. 5에서 (a), (b)와 (c), (d)를 각각 비교하면 축방향 절삭깊이가 증가함에 따라 절삭력이 증가하지만, 절삭속도가 증가하면 상대적으로 절삭력은 감소함을 알 수 있다. 본 실험에서는 헬릭스각 25°일 때가 축방향 절삭력은 가장 작고, 헬릭스각이 증가함에 따라 축방향 절삭력이 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 그 이유는 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$F_t = F \cdot \tan i \quad (1)$$

로 계산된다. 여기서,  $F_t$ =축방향 절삭력,  $F$ =이송분력,  $i$ =헬릭스각으로 나타낸다. 그리고 헬릭스각 30°와 40°를 살펴보면 축방향 절삭력은 큰 차이가 없지만 버 높이는 현저하게 차이가 있음을 확인할 수 있다.

### 3.4 절삭전 칩두께와 버 높이의 관계

Fig. 6은 절삭속도, 칩두께, 축방향 절삭깊이의 변화에 따른 버 높이의 변화를 보여준다. 밀링작업에서는 칩의 두께가 절삭속도와 이송속도 모두의 영향을 받으므로, 이송속도 대신 절삭전 칩두께를 절삭변수로 사용하였다. 하향 절삭시 절삭전 칩두께  $t_{down}$ 은 다음의 식으로 계산하였다.<sup>[6-7]</sup>

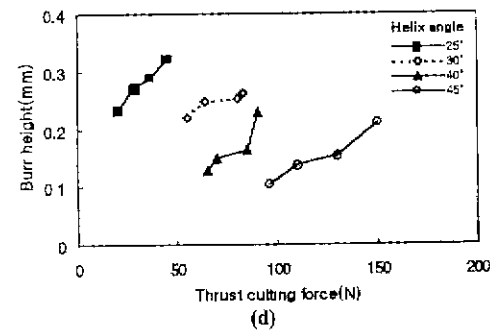
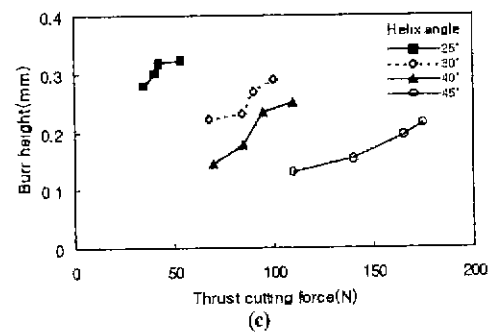
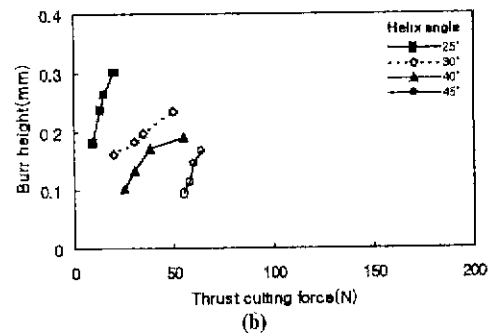
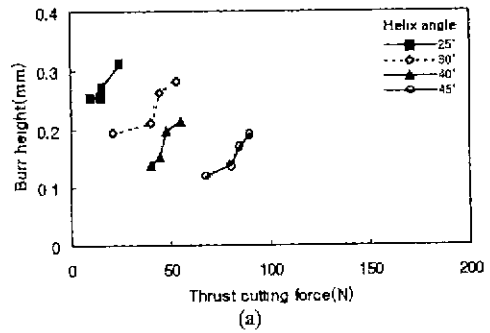


Fig. 5 Burr height versus thrust cutting force in Copper: (a)  $V=12\text{m/min}$ ,  $d_1=2\text{mm}$ , (b)  $V=15\text{m/min}$ ,  $d_1=2\text{mm}$ , (c)  $V=12\text{m/min}$ ,  $d_1=4\text{mm}$ , and (d)  $V=15\text{m/min}$ ,  $d_1=4\text{mm}$

$$t_{down} = \frac{f_i d_r}{L_d} \quad (2)$$

여기서,  $f_i$ 는 절삭날당 이송량을,  $d_r$ 은 반경방향 절삭 깊이를 나타내며, 하향절삭시의 칩길이  $L_d$ 는

$$L_d = \frac{\pi}{180} R \cos^{-1} \left( \frac{R - d_r}{R} \right) \pm \frac{f_i}{2\pi R Z} (2Rd_r - d_r^2)^{0.5} \quad (3)$$

로 계산된다. 여기서,  $R$ 은 공구반경을,  $Z$ 는 날의 개수를 나타내며, 양의 부호(+)는 상향절삭, 음의 부호(-)는 하향절삭의 경우이다. Fig. 6에서 (a), (b)와 (c), (d)를 각각 비교하면 절삭전 칩두께가 증가함에 따라 4가지 헬릭스각에서 버 높이는 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 버 높이는 헬릭스각 25°일 때가 가장 크게 증가하였으며, 45°일 때는 버 높이가 가장 적게 발생하였다. 그 이유로는 헬릭스각이 증가하게 되면 절삭작업에서 원활한 절삭을 할뿐만 아니라 칩의 형성도 잘 이루어지기 때문인 것으로 사료된다.

### 3.5 버 높이와 AE신호의 관계

Fig. 7은 Fig. 6과 동일 절삭조건에서 측정된 절삭날당 AE count의 변화를 보여준다. AE count rate 대신 절삭날당 AE count를 사용한 이유는 절삭속도가 변화하면 단위 시간당 절삭에 관여하는 절삭날의 개수가 변화하기 때문이다. AE count  $N$ 은 다음의 식으로 표현된다.<sup>(6)</sup>

$$N = \frac{t^*}{2\pi/\omega} = \frac{\omega}{2\pi r} \ln \frac{V_0}{V^*} \quad (4)$$

여기서,  $t^*$ =측정시간,  $V_0$ =초기신호의 진폭,  $\omega$ =각주파수,  $r$ =감쇠상수( $>0$ ),  $V^* = V_0 e^{-rt}$ ,  $t^* = \frac{1}{r} \ln \frac{V_0}{V^*}$ 이다. Fig. 7에서 (a)(c)와 (b)(d)를 비교하면 절삭속도가 증가함에 따라 절삭날당 AE count도 증가하고, (a)(b)와 (c)(d)를 비교하면 축방향 절삭깊이가 증가함에 따라 버의 영향을 받아 AE count가 증가함을 알 수 있다. 본 실험의 절삭조건에서는 헬릭스각이 25°인 경우 버의 영향을 받아 절삭날당 AE count가 가장 크게 나타났다. 헬릭스각이 45°에서 버 높이는 가장 적게 나타났으며, 절삭날당 AE count도 적게 나타났다. 4가지 헬릭스각에서 살펴보면 버 높이가 증가함에 따라 절삭날당 AE count도 증가함을 확인할 수 있다. 결론적으로, 헬릭스각에 따라 버 높이의 변화는 절삭날당 AE count를 이용하면 효과적으로 버 높이와 AE count의 관계를 알 수 있다.

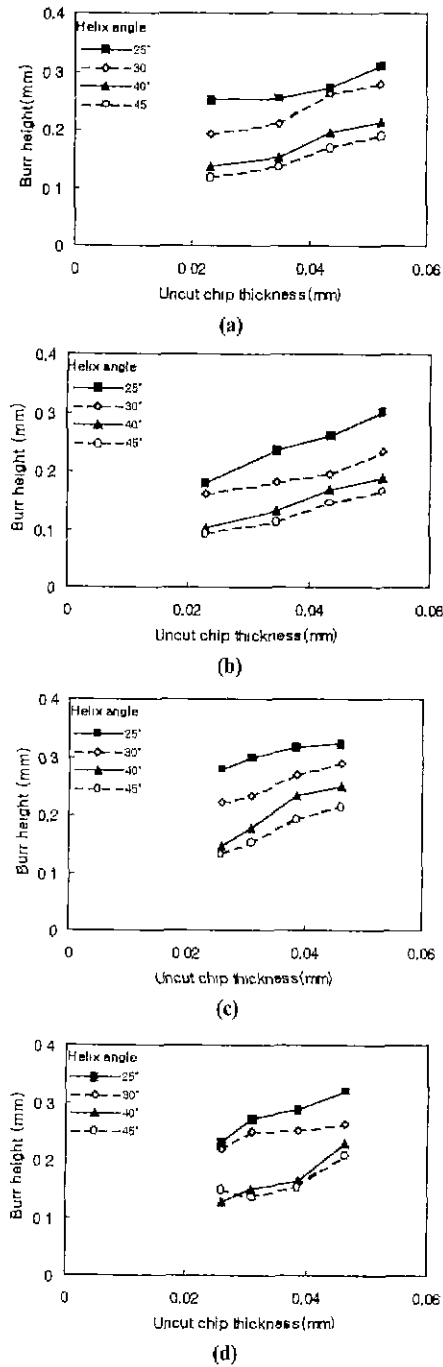


Fig. 6 Burr height versus uncut chip thickness in Copper:(a) $V=12\text{m/min}$ ,  $d_s=2\text{mm}$ , (b)  $V=15\text{m/min}$ ,  $d_s=2\text{mm}$ , (c) $V=12\text{m/min}$ ,  $d_s=4\text{mm}$ , and (d) $V=15\text{m/min}$ ,  $d_s=4\text{mm}$

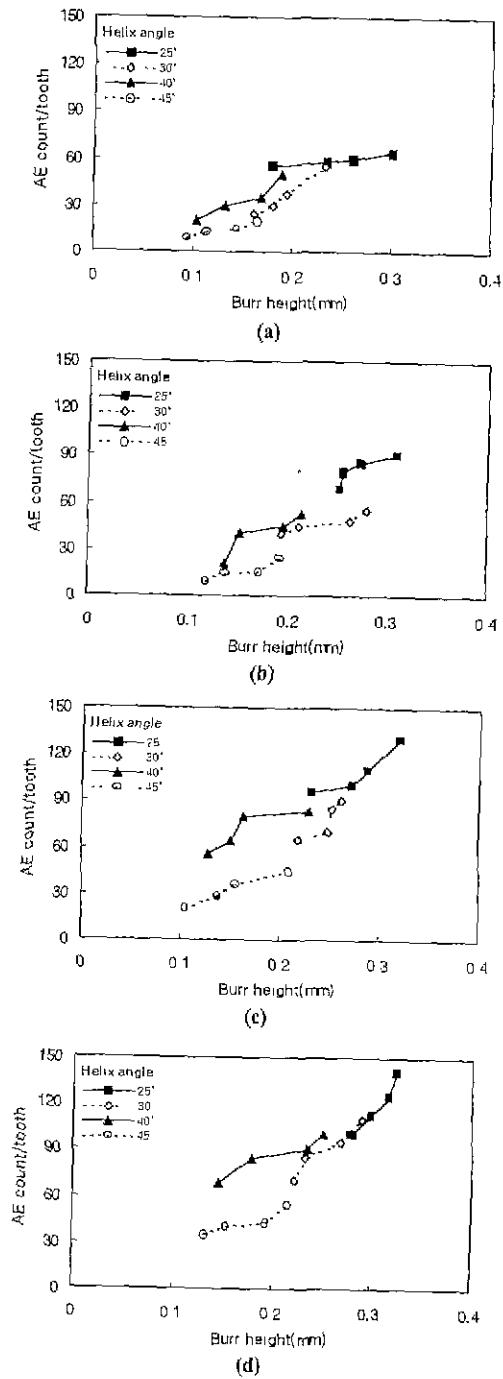


Fig. 7 AE count per tooth versus burr height in Copper: (a)  $V=12\text{m/min}$ ,  $d_s=2\text{mm}$ , (b)  $V=15\text{m/min}$ ,  $d_s=2\text{mm}$ , (c)  $V=12\text{m/min}$ ,  $d_s=4\text{mm}$ , and (d)  $V=15\text{m/min}$ ,  $d_s=4\text{mm}$

#### 4. 결론

본 연구에서는 축방향 절삭력과 AE신호를 이용하여 엔드밀 작업에서 헬릭스각이 버 형성에 미치는 영향을 분석한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 커터의 절인 1개당 접촉하는 인선길이는 헬릭스각에 따라 다르므로 버 높이에 영향을 받는다.
- (2) 공작물 재료에 따른 버 높이의 관계는 기계적성질, 즉 연성이 큰 재료가 크게 나타났으며, 동일 절삭조건에서 절삭속도만 증가시키더라도 버 높이의 차이는 현저하게 감소한다.
- (3) 4가지 헬릭스각에서 절삭전 칩두께가 증가함에 따라 버 높이는 선형적으로 증가한다.
- (4) 헬릭스각에 따른 버 높이의 변화는 절삭당 AE count를 이용하면 효과적으로 버 높이와 절삭당 AE count의 관계를 알 수 있다.
- (5) 헬릭스각이 증가하면 축방향 절삭력은 증가하고 버 높이는 감소한다.

#### 참고 문헌

- (1) Gillespie, L. K., "Burs Produced by End Milling", BDX-613-1503 Unclassified Technical Report, August 1976.
- (2) Chern, G. L., "Analysis of Burr Formation and Breakout in Metal Cutting", Ph. D. Dissertation, Univ. of California, Berkely, Department of Mechanical Engineering, 1993.
- (3) Chern, G. L., and Domfeld, D. A., "Burr/Breakout Model Development and Experimental Verification", Transactions of the ASME, Vol. 118, pp. 201~206, 1996.
- (4) Ko, S. L., "Burr Formation and Fracture Mechanism at the Exit Stage of Machining Metals", Ph. D. Dissertation, Univ. of California, Berkeley, Department of Mechanical Engineering, 1989.
- (5) Ko, S. L., and Domfeld, D. A., "A study on Burr Formation Mechanism", Transactions of the ASME, Vol. 113, No. 1, pp. 75~87, 1991.
- (6) Martellotti, M. E., "An Analysis of the Milling Process", Transactions of the ASME, Vol. 63, pp.

- 677~700, 1941.
- (7) Spiewak, S., "An Improved Model of the Chip Thickness in Milling", *Annals of the CIRP*, Vol. 44, No. 1, 1995.
  - (8) Klinc, R. A., "Acoustic Emission Signal Characterization", *Canadian Crown Publish*, pp. 105~137, 1981.
  - (9) 맹민재, 조성산, 정준기, "엔드밀 밀링공구의 가공 특성검출", *한국정밀공학회 '96년도 추계학술대회 논문집*, pp. 678~682, 1996.
  - (10) 맹민재, 조성산, 정준기, "엔드밀 가공시 절삭력과 절삭유를 통해 전파된 음향방출을 이용한 공구파손검출", *한국정밀공학회지*, Vol. 14, No. 11, pp. 163~170, 1997.
  - (11) 이승일, 맹민재, 정준기, "엔드밀 변위에 의한 공구파손검출", *한국공작기계학회*, Vol. 8, No. 2, pp. 100~107, 1999.