

엔드밀 가공시 절삭력과 절삭유를 통해 전파된 음향방출을 이용한 공구파손검출

맹민재*, 조성산**, 정준기**

Tool Fracture Detection in End Milling Using Cutting Force and Acoustic Emission Propagated through Cutting Fluid

M. J. Maeng *, S. S. Cho **, J. K. Chung **

ABSTRACT

End milling experiments are conducted to investigate characteristics of acoustic emission (AE) and cutting force signals due to tool fracture. The AE signals are obtained with a sensor attached to cutting fluid discharge nozzle. Tool states are identified with scanning electron microscopy and optical microscopy. It is demonstrated that the AE signals provide reliable informations about the cutting processes and tool states. Moreover, tool fracture can be detected successfully using both the AE count rate and the standard deviation of principal cutting force.

Key Words : End Milling(엔드밀 가공), Acoustic Emission(음향방출), Cutting Fluid(절삭유), Cutting Force(절삭력), Fracture(파손)

1. 서론

엔드밀 가공은 CNC 머시닝센터에서 금형을 제작하는 데 많이 이용된다. 엔드밀의 마멸, 칩핑 및 파손에 따른 치경상 절삭상태의 발생은 금형의 가공정밀도와 공정효율을 저하시키므로, 공구의 이상상태를 자동으로 감지하기 위한 다양한 방법이 연구 개발되었다. 이 방법들은 공구상태를 직접 감지 및 측정하는 직접측정법과 공구상태에 따라 변화하는 절삭력, 음향방출(Acoustic Emission, AE), 공구 진동, 주축 동력, 가공면 거칠기 등을

측정하는 간접측정법⁽¹⁾으로 구분된다. 최근에는 공구 이상상태 감지의 신뢰성을 증대시키기 위해 다수의 간접측정법을 동시에 이용하여 간접측정법 각각의 장점을 상호 보완적으로 이용하는 연구가 진행되었다. 이 연구에는 공구상태의 거시적 변화에 민감한 절삭력과 미시적 변화에 민감한 AE신호⁽²⁾가 많이 이용되었다.

AE센서는 일반적으로 공구축에 부착한다. 밀링의 경우에는 공구의 회전운동 때문에 센서를 공구에 부착하는데 어려움이 있어, 센서를 공작물 또는 주축두에 부착하는 방법이 연구되었다. 전자의 경우에는 절삭중에 절삭점과

* 홍익대학교 대학원, 기계공학과
** 홍익대학교 기계공학과

센서 간의 거리가 변화하여 신호의 진폭(amplitude)이 변화하는 문제점이 있고, 후자의 경우에는 신호가 주축두 내부에 설치된 볼을 통과하면서 분산과 감쇠에 의해 파형이 변화하는 문제점이 있다. 후자의 문제점을 극복하기 위해 자성유체를 담고 있는 특수한 연결장치를 주축에 부착하고, 그 표면에 AE센서를 설치하는 방법⁽³⁻⁹⁾이 연구되었다.

밀링가공시 절삭유 분사노즐은 절삭점과 일정한 거리를 유지하면서 절삭유를 공급한다. 한편, AE는 파동의 일종이며, 파동은 유체를 통해 전파된다.⁽¹⁰⁾ 따라서, AE센서를 절삭유 분사노즐에 부착하면 상기한 특수 연결장치를 사용하지 않고 신뢰성 있는 AE신호의 검출이 가능할 것으로 예상된다. 본 연구의 목적은 절삭유를 통해 전파된 AE신호를 이용하여 공구상태에 관한 신뢰성 있는 정보 취득의 가능성을 검증하고, 공구 파손시 발생하는 AE 및 절삭력 신호의 특징적 변화를 파악하여 엔드밀 공정 중에 공구 파손을 자동으로 감지할 수 있는 방안을 도출하는 것이다.

2. 실험장치의 구성 및 방법

2.1 실험장치 구성

Fig. 1은 엔드밀 가공중에 AE신호와 절삭력을 검출하기 위해 CNC머시닝센터(Tongil H. I- TNV40A)에 부착한 실험장치의 구성을 보여준다. AE센서(PAC-R15)는 절삭유 분사노즐의 후미에 부착하고, 공작물은 공구동력계(Kistler-9257B) 위에 설치하였다. 기타 실험장치는 충전증폭기(Kistler-5019A), 전치증폭기(PAC-1220A), AE신호처리장치(LOCAN 320-AT), 터빈유

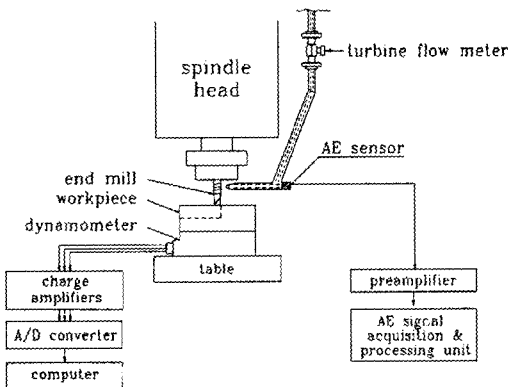


Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

량계(KFI- 1100-S-F) 등이다. 절삭공구는 2날 솔리형 고속도강 표준 엔드밀($\phi 16\text{mm}$), 공작물은 일반 조용 탄소강(SM45C)과 금형강(SKD11), 절삭유는 물 드로무스 오일 혼합(95% H_2O + 5% Oil)을 사용하였다. 공구의 측면마멸폭은 광학현미경(Mitutoyo-TYF BI-5)으로 측정하였으며, 절삭날은 주사전자현미경(Hitachi-S-2700)으로 촬영하였다.

2.2 실험방법

실험은 3단계로 수행되었다. 첫단계에서는 최적의 AE신호를 검출할 수 있는 절삭유 공급조건을 선정하였다. 실험은 정지상태의 공구 종단에 고주파 진동을 가하면서 절삭유 분사속도와 공구-분사노즐간의 간격을 변화시키면서 AE신호의 변화를 측정하였다. 두번째 단계에서는 절삭조건 변화에 따른 절삭력과 절삭유를 통해 전파된 AE신호의 변화를 비교하면서 AE신호의 신뢰성을 검증하였다. 실험은 32가지의 절삭조건, 즉 절삭속도 $V=20, 22\text{m/min}$, 이송속도 $f=60, 80, 100, 120\text{mm/min}$, 축방향 절삭깊이 $d_a=6, 9\text{mm}$, 반경방향 절삭깊이 $d_r=8\text{mm}$ 에 대하여 SM45C를 상향 및 하향절삭하면서 수행되었다. Fig. 2는 절삭방향(상향 및 하향절삭)과 절삭 3분력의 방향을 보여준다. 마지막 단계에서는 점진적인 공구마멸이 진행되는 중에 발생하는 공구 파손에 의한 AE와 절삭력 신호의 특징적 변화를 검출하였다. 실험은 8가지의 절삭조건, 즉 $V=20, 22\text{m/min}$, $f=60, 100\text{mm/min}$, $d_a=1.5\text{mm}$, $d_r=8\text{mm}$ 에 대하여 SM45C와 SKD11을 하향절삭하면서 수행되었다. 공구

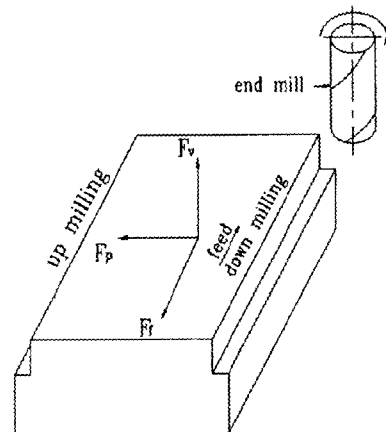


Fig. 2 Cutting force components in end milling (F_p =principal cutting force, F_r =feed force, F_v =vertical force)

의 점진적인 마멸을 유도하기 위해 축방향 절삭깊이를 감소시켰으며, 밀링작업에서 주로 사용되는 하향절삭의 경우만을 고려하였다.

2.3 신호처리

공구동력계에서 충전증폭기를 거쳐 출력된 절삭 3분력의 신호는 각기 1.5ms의 간격으로 검출하여 컴퓨터에 입력하였다. 입력된 각각의 절삭 3분력 신호에 대하여 연속적인 50개의 피크값을 취하여 절삭력의 평균값과 표준편차를 계산하였다. 평균값과 표준편차는 절삭시간 2분 30초 간격으로 산출하였다.

AE센서에서 검출된 신호는 전치증폭기에서 40dB 증폭하고 주파수 영역 100-300kHz에서 여과한 후 AE신호처리장치에 입력하였다. 입력된 AE신호를 신호처리장치내의 주증폭기에서 20dB 증폭한 후 0.1μs 간격으로 검출하였다. 검출된 AE신호가 50ms 동안에 경계값(threshold value) 100mV를 통과하는 횟수를 검출하여 AE count rate를 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 절삭유 공급조건

Fig. 3(a)는 유속의 증가에 따른 AE count rate의 변화를 나타낸다. 유속은 터빈유량계로 측정된 유량과 연속방정식을 이용하여 산출하였다. 본 실험장치에서는 유속이 0.815m/s일 때 가장 강한 AE신호가 검출되며, 이때의 유량은 16ml/s이다.

Fig. 3(b)는 분사노즐과 엔드밀 외경간의 간격이 AE count rate에 미치는 영향을 보여준다. 본 실험장치에서는 간격이 7mm일 때 가장 강한 AE신호가 검출되었다.

간격 7mm 이하에서는 엔드밀 절삭날 부위에 분사되는 절삭유의 분포가 불안정하여 상대적으로 약한 AE신호가 검출되고, 간격 7mm 이상에서는 AE신호의 전파과정에서 발생하는 신호의 감쇠로 인해 상대적으로 약한 신호가 검출되는 것으로 사료된다. 따라서, 본 실험에서는 유속 0.815m/s, 간격 7mm의 절삭유 공급조건을 채택하였다.

3.2 AE신호의 신뢰성

Fig. 4는 상향 및 하향절삭시 절삭속도, 칩두께, 축방향 절삭깊이의 변화에 따른 절삭 3분력 합력의 변화를 보여준다. 여기서 합력을 사용한 이유는 절삭 3분력의 상대적 크기는 절삭방향의 영향을 받으며, AE신호는 특정의 절삭분력보다는 모든 절삭분력의 영향을 받기 때문이다. 밀링작업에서는 칩의 두께가 절삭속도와 이송속도 모두의 영향을 받으므로, 이송속도 대신 평균 칩두께를 절삭변수로 사용하였다. 상향 및 하향절삭시 평균 칩두께 t_{up} 과 t_{down} 은 다음의 식으로 계산하였다.⁽¹¹⁾

$$t_{up} = \frac{f_i d_r}{L_u}, \quad t_{down} = \frac{f_i d_r}{L_d} \quad (1)$$

여기서, f_i 는 절삭날당 이송량을, d_r 은 반경방향 절삭깊이를 나타내며, 상향 및 하향절삭시의 칩길이 L_u 와 L_d 는

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

로 계산된다. 여기서, R 은 공구반경을, Z 는 날의 갯수를 나타내며, 양의 부호(+)는 상향절삭, 음의 부호(-)는 하향절삭의 경우이다. Fig. 4는 칩두께와 축방향 절삭깊이가 증가하면 절삭력은 증가하지만 절삭속도가 증가하면

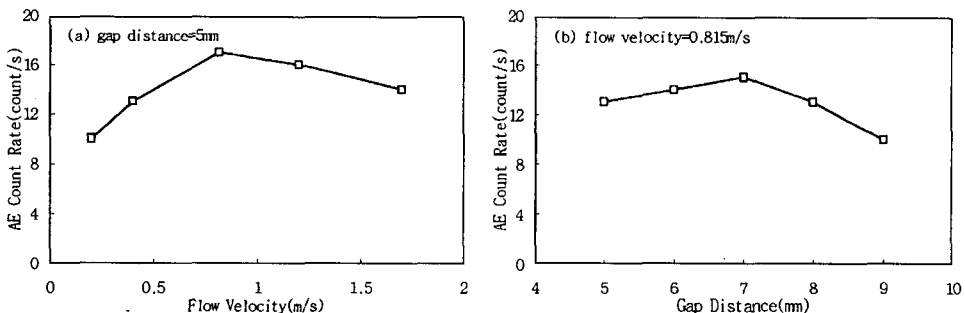


Fig. 3 AE count rate versus (a) flow velocity and (b) gap distance

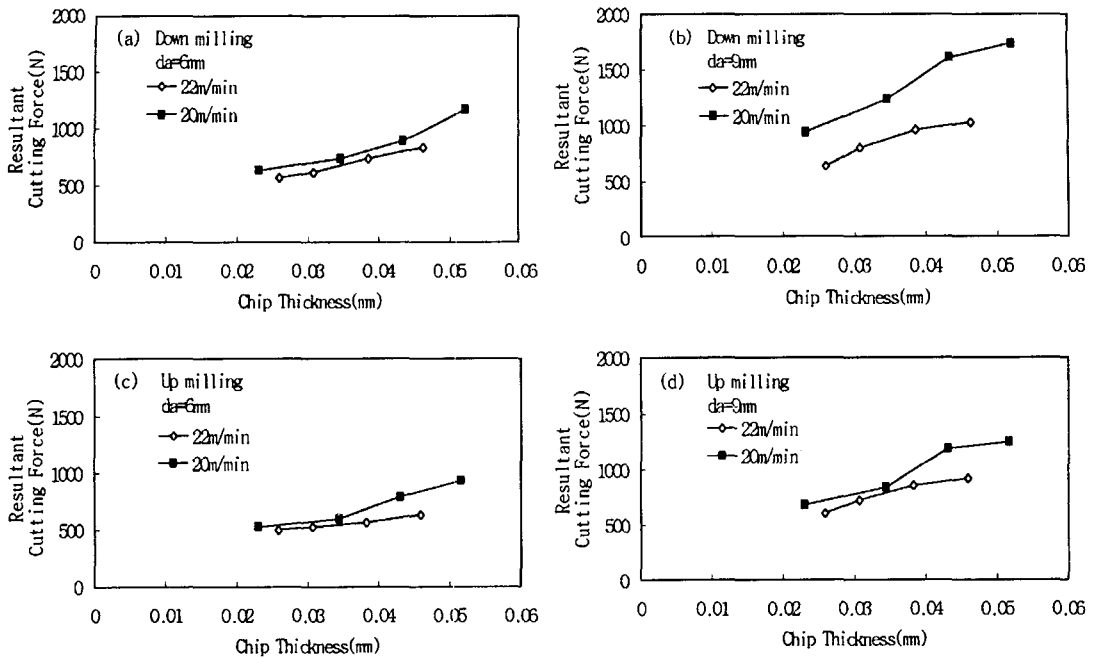


Fig. 4 Resultant cutting force versus chip thickness, cutting speed, and axial cutting depth in: (a), (b) down milling, and (c), (d) up milling

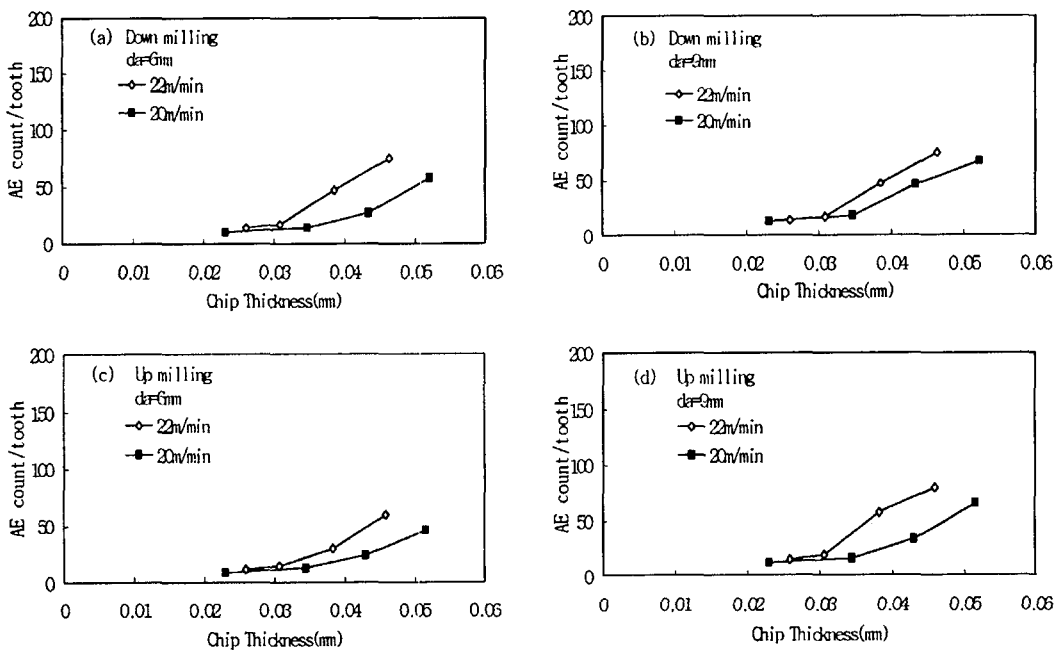


Fig. 5 AE count per tooth versus chip thickness, cutting speed, and axial cutting depth in: (a), (b) down milling, and (c), (d) up milling

절삭력은 감소하며, 상향절삭에 비해 하향절삭시의 절삭력이 훨씬 높게 나타난다.

Fig. 5는 Fig. 4와 동일 절삭조건에서 측정된 절삭당 AE count의 변화를 보여준다. AE count rate 대신 절

삭날당 AE count를 사용한 이유는 절삭속도가 변화하면 단위시간당 절삭에 관여하는 절삭날의 갯수가 변화하기 때문이다. Fig. 5는 칩두께, 축방향 절삭깊이 및 절삭속도가 증가함에 따라 절삭날당 AE count는 증가하지만, 축방향 절삭깊이의 영향은 미미함을 보여준다. 이 결과는 절삭조건과 AE-RMS의 관계를 보여주는 기존의 실험결과⁽¹²⁾와 일치한다. 특히, 절삭속도가 증가하면 절삭날당 AE count는 증가하지만 절삭력은 감소한다. 이 결과는 AE신호가 절삭속도에 매우 민감하다는 기존의 실험결과와 일치한다. 칩두께 0.035mm이하에서 절삭력에 비해 절삭날당 AE count의 미미한 변화는 AE신호의 낮은 민감도를 반영한다기 보다는 경계값의 영향으로 추정된다. Fig. 5에서 (a)와 (c), (b)와 (d)를 각각 비교하면 상향절삭에 비해 하향절삭시 절삭날당 AE count가 상대적으로 크음을 알 수 있다. 이 경향은 절삭방향에 따른 절삭력의 변화 경향과 일치한다. 한편 기존의 실험결과⁽¹²⁾에 의하면, 상향절삭시의 AE-RMS 값이 하향절삭에 비해 크다. 식(1)과 (2)에 의하면 상향절삭에 비해 하향절삭은 길이가 짧으면서 두꺼운 칩을 배출한다. 즉, 상향절삭에 비해 하향절삭은 한 개의 칩을 생성하는데 필요한 시간은 짧지만 큰 절삭력이 요구되고 진폭이 큰 AE신호를 발생한다. 따라서, 한 개의 칩 생성 시간과 진폭의 크기에 따라 절삭날당 AE count와 AE-RMS는 동일한 또는 반대의 경향을 나타낼 것이다. 절삭방향에 따른 절삭날당 AE count와 AE-RMS의 변화 경향은 별도의 연구가 필요할 것으로 사료된다. 이상의 결과를 종합하면, 절삭유를 전파매치로 하여 검출된 AE신호는 절삭조건의 변화에 민감하며, 따라서 신뢰성이 있다고 결론 지을 수 있다.

3.3 공구 이상상태 검출

밀링시 AE신호는 칩이 형성되는 전단영역, 칩과 공작틀이 공구의 상면 및 여유면과 접촉하면서 발생하는 소성 변형 및 마찰, 칩 형성의 초기에 발생하는 절삭날과 공작틀의 충돌, 그리고 칩 형성의 말기에 발생하는 파괴에 의해 주로 생성된다.⁽¹²⁾ AE신호가 절삭조건의 변화에 민감하다는 것은 AE신호가 상기한 AE발생원에서 일어나는 소성변형, 마찰, 충돌 및 파괴에 민감하다는 것을 의미한다. 한편, 공구의 마멸 및 파손은 절삭날 형상의 변화를 통해 AE신호를 발생시키는 소성변형, 마찰, 충돌 및 파괴에 영향을 미치므로, 절삭유를 통해 전파되는 AE신호는 공구 이상상태를 반영하는 정보를 제공할 것으로 예상된다.

Fig. 6은 절삭속도 20m/min, 이송속도 60mm/min으로 SKD11을 하향절삭할 때 절삭시간에 따른 절삭주분력의 평균값과 표준편차 그리고 AE count rate의 변화를 절삭시간 2분 30초의 간격으로 보여준다. 여기서 AE count rate는 검출시간 1초 동안에 측정된 AE count 값이다. 이송분력과 수직분력도 주분력과 유사한 경향을 나타냈으며, 하향절삭의 경우 3분력 중에서 주분력의 값이 가장 크므로 주분력만을 제시하였다. 절삭시간이 증가함에 따라 주분력의 평균값(Fig. 6(a))은 점진적으로 증가를 하지만, 표준편차(Fig. 6(b))는 특히 절삭시간 17분 30초 이후부터 급격히 증가한다. AE count rate(Fig. 6(c))도 전반적으로 증가의 경향을 나타내지

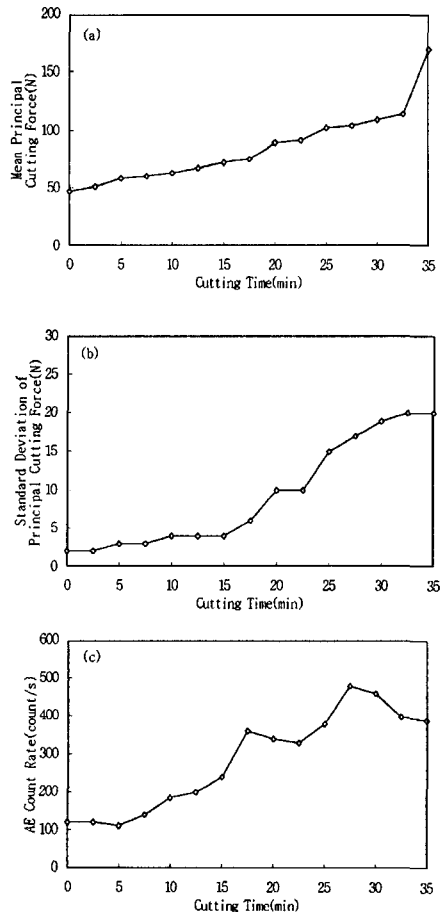


Fig. 6 Variation of mean and standard deviation of principal cutting force and AE count rate with cutting time in down milling SKD11 at V=20m/min and f=60mm/min

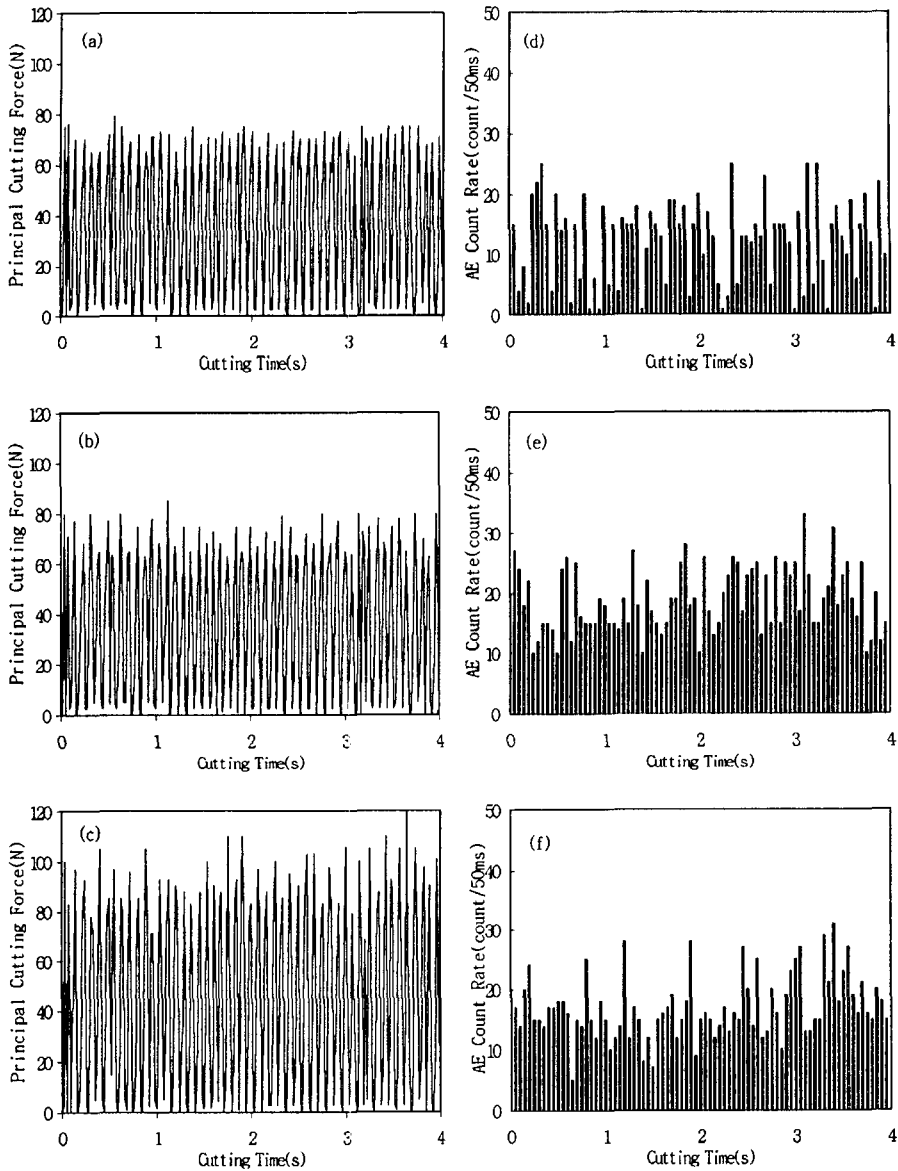


Fig. 7 Raw signals of principal cutting force and AE count rate at cutting times of 15, 17.5, and 20min in down milling SKD11 at $V=20\text{m/min}$ and $f=60\text{mm/min}$

만, 절삭시간 17분 30초와 27분 30초 전 후에서 급격한 증가와 감소를 특징을 나타낸다. 다른 절삭조건하에서도 정성적으로 유사한 결과를 얻었으므로, Fig. 6과 동일한 절삭조건에서 얻은 실험 결과만을 아래에 제시하였다.

Fig. 7은 절삭시간 15분, 17분 30초, 20분경의 절삭 주분력과 50ms 기준으로 검출된 일련의 AE count rate 를 보여준다. 절삭력은 절삭시간 15분(Fig. 7(a))과 17

분 30초(Fig. 7(b))에서 비교적 균일한 피크를 나타내지만, 절삭시간 20분(Fig. 7(c))에는 피크값이 상대적으로 큰 변화를 나타낸다. 한편, 절삭시간 17분 30초(Fig. 7(e))에서의 AE count rate는 절삭시간 15분(Fig. 7(d))에 비해 전반적인 증가를 나타내며, 절삭시간 20분(Fig. 7(f))에는 절삭시간 15분의 경우보다는 크지만 절삭시간 20분의 경우보다는 다소 적은 경향을 나타낸다.

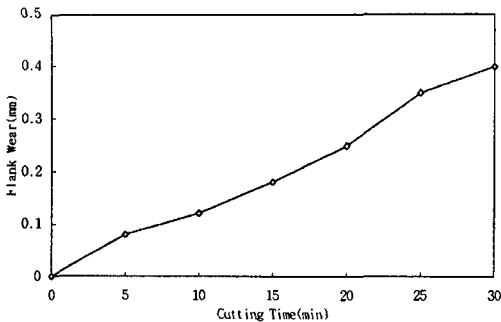


Fig. 8 Variation of flank wear with cutting time in down milling SKD11 at $V=20\text{m/min}$ and $f=60\text{mm/min}$

Fig. 8은 절삭시간에 따른 절삭날 측면마멸폭의 변화를 보여준다. 측면마멸폭은 절삭날에 수직인 방향의 평균 마멸폭이다. 절삭날 파손 전의 측면마멸폭은 2날에 생긴 마멸폭의 평균값이고, 파손 후의 측면마멸폭은 파손이 되지 않은 날에서 측정한 것이다. 측면마멸폭도 절삭주분력의 평균값(Fig. 6(a))과 AE count rate(Fig. 6(c))와 유사하게 전반적인 증가 경향을 나타낸다.

Fig. 9는 절삭시간 15분 및 25분에서의 절삭날 상태를 보여준다. 절삭날은 절삭시간 15분과 25분 사이에 파손

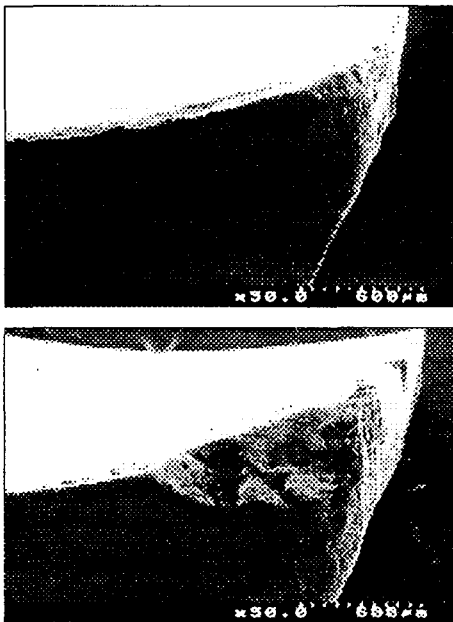


Fig. 9 SEM micrographs showing cutting edge at cutting times of 15 and 25min in down milling at $V=20\text{m/min}$ and $f=60\text{mm/min}$

되었으며, 파손은 공구내의 균열 성장에서 기인되었음을 추정할 수 있다.^[13-14]

이상의 결과를 종합 비교하면 다음과 같다. 공구 측면 마멸폭의 균일한 증가 경향(Fig. 8)은 절삭주분력의 평균값(Fig. 6(a))과 AE count rate(Fig. 6(c))의 전반적인 증가 경향과 유사하다. 즉, 절삭주분력의 평균값과 AE count rate를 전반적으로 증가 경향은 측면마멸폭의 증가에 따른 공구와 공작물 간 접촉면적의 증가에서 기인하는 것으로 사료된다. 한편, 공구 파손(Fig. 9)은 절삭시간 15분과 25분 사이에 발생하였으며, 이 기간중 절삭시간 17분 30초에 AE count rate(Fig. 6(c))는 일시적으로 급격히 증가한 후 감소한다. 급격한 AE count rate의 증가는 파손 말기에 발생하는 균열의 급격한 성장과 공구 파편이 절삭부위에서 배출되는 과정에 발생하는 극심한 마찰조건에서 기인하는 것으로 사료된다. 절삭주분력(Fig. 7)은 절삭시간 17분 30초 이후부터 엔드밀의 2개의 절삭날에 작용하는 절삭력의 차이가 증가하며, 그 결과로 절삭주분력의 표준편차(Fig. 6(b))는 증가한다. AE신호는 공구의 파손 과정에서 발생하는 균열 성장과 파손 후 절삭날 형상의 변화 모두의 영향을 받지만 절삭력 신호는 주로 절삭날 형상 변화의 영향만을 받기 때문에 AE의 변화가 절삭력의 변화보다 선행하는 것으로 사료된다. Fig. 10은 AE count rate 변화에 대한 절삭주분력 표준편차의 변화를 도시한 것이다. 공구 파손시 발생하는 AE count rate와 절삭주분력의 특징적 변화와 이 변화가 발생하는 시점의 차이로 공구 파손점을 명확하게 알 수 있다. 결론적으로, AE count rate와 절삭주분력의 표준편차를 동시에 이용하면 공구 파손을 효과적으로 검출할 수 있다.

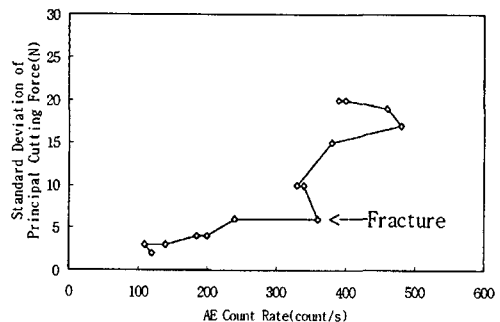


Fig. 10 Standard deviation of principal cutting force versus AE count rate in down milling SKD11 at $V=20\text{m/min}$ and $f=60\text{mm/min}$

4. 결 론

엔드밀 가공시 절삭유를 통해 전파된 AE신호, 절삭력, 공구상태, 절삭날 측면마멸폭을 비교하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) 절삭유를 통해 전파된 AE신호는 절삭조건 및 공구 이상상태에 관한 신뢰성 있는 정보를 제공한다.

(2) 절삭유 공급조건은 검출되는 AE신호의 강도에 영향을 미치며, 최적 조건이 존재한다.

(3) 공구 파손시 AE count rate는 일시적으로 급격히 증가한 후 감소를 하고, 절삭주분력의 표준편차는 급격히 증가를 한다. AE count rate의 증가는 주분력 표준편차의 증가보다 먼저 발생한다.

(4) 절삭날의 점진적 마멸은 AE count rate와 절삭주분력의 평균값을 점진적으로 증가시킨다.

(5) AE count rate와 절삭주분력 표준편차를 이용하면 공구 파손을 효과적으로 검출할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Dan, L., and Mathew, J., "Tool Wear and Failure Monitoring Techniques for Turning - A Review," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 30., No. 4, pp. 579-598, 1990.
2. Rangwala, S., and Dornfeld, D., "Sensor Integration Using Neural Networks for Intelligent Tool Condition Monitoring," ASME Trans., Journal of Engineering for Industry, Vol. 112, pp. 219-228, 1990.
3. Blum, T., Suzuki, I., and Inasaki, I., "AE-Monitoring Systems for the Detection of Single-Point and Multipoint Cutting Tool Failures," Journal of Acoustic Emission, Vol. 7, No. 4, pp. 179-184, 1988.
4. Blum, T., "Tool Failure Detection in Milling Operations Using an Intelligent Tool Monitoring System," University of California at Berkeley, LMA Research Report, pp. 35-38, 1990.
5. Hutton, D. V., and Yu, Q. H., "Investigations of Sensor Placement for Monitoring Acoustic Emission in Machining," Journal of Acoustic Emission, Vol. 8, No. 3, pp. 41-46, 1989.

6. Blum, T., and Dornfeld, D. A., "Milling Process Monitoring via Acoustic Emission Using a Ferrofluid Coupled Sensor Device," 4th World Meeting on Acoustic Emission, ASNT, Boston, MA, pp. 239-254, 1991.
7. Takeshita, H., and Inasaki, I., "Monitoring of Endmill Cutter Failure with an AE-Sensor," 4th World Meeting on Acoustic Emission, ASNT, Boston, MA, pp. 301-307, 1991.
8. Hutton, D. V., "A Noncontact AE Sensing System for Rotating-cutter Machining Processes," Exper. Techniques, Washington State Univ., Pullman, USA, Vol. 11, No. 12 pp. 40-44, 1991.
9. Yu, Q., and Hutton, D. V., "Liquid-Coupled Acoustic Emission Measurement for Milling Operations," Proc. 18th North American Manufacturing Research Conference, Dearborn, MI, pp. 403-407, 1988.
10. Junger, M. C., and Feit, D., "Sound, Structures, and Their Interaction," 2nd Ed., MIT Press, 1986.
11. Martellotti, M. E., "An Analysis of the Milling Process," ASME Transactions, Vol. 67, pp. 233-251, 1945.
12. Diei, E. N., and Dornfeld, D. A., "Acoustic Emission From the Face Milling Process-the Effects of Process Variables," ASME Trans., Journal of Engineering for Industry, Vol. 109, pp. 92-99, 1987.
13. Takeyama, H., and Murata, R., "Basic Investigation of Tool Wear," ASME Transactions, Journal of Engineering for Industry, Vol. 85, pp. 33-38, 1963.
14. Okusa, K., Takahashi, H., and Nishizawa, M., "The Mechanism of High Speed Steel Tool Wear (3rd Report): Macroscopic Tool's Failure and their Factors," JSPE, Vol. 43, No. 7, pp. 777-783, 1977.
15. 맹민재, 조성산, 정준기, "엔드밀 밀링공구의 가공 특성검출", 한국정밀공학회 '96년도 추계학술대회는 문집, pp. 678-682, 1996.