

밀링 공구마멸과 치핑의 검출을 위한 음향방출 이용에 관한 연구

윤 중 학* · 강 명 순**

A Study on the Application of Acoustic Emission Measurement for the In - process Detection of Milling Tools' Wear and Chipping

J. H. Yoon and M. S. Kang

Abstract Acoustic emission(AE) signals detected during metal cutting were applied as the experimental test to sensing tool wear and chipping on the NC vertical milling machine. The in - process detection of cutting tool wear including chipping, cracking and fracture has been investigated by means of AE in spite of vibration or noise through intermittent metal cutting, then the following results were obtained 1) When the tool wear is increased suddenly, or the amplitude of AE signals changes largely, it indicates chipping or breaking of the insert tip. 2) It was confirmed that AE signal is highly sensitive to the cutting speed and tool wear. 3) At the early period of cutting, the wear were large and RMS value increased highly by the influence of minute chipping and cracking, etc. Therefore, the above situations should be considered for the time when the tool would be changed.

Key Word : Acoustic Emission(AE : 음향방출), Tool Wear(공구마멸), Minute Chipping(미소파괴), Root Mean Square Voltage(실효치전압), Cracking(터짐), Fracture(파손)

1. 서 론

최근 생산성 향상과 경영합리화를 추진하기 위한 공장자동화의 열기가 급속도로 확산되어 가고 있다.

기계공장에서도 절삭가공의 자동화로 가공중 공구파손의 검출이나 공구의 마멸상태를 정확히 감지함으로써 최적의 공구교환 시기를 결정하여 생산성을 향상시키려 하고 있다.

* 서울산업대학 기계공학과

** 한양대학교 정밀기계공학과

접수 : 1991년 1월 29일

공구손상을 검출하는 방법에는 공구의 날끝 손상을 직접 관찰하는 방법과 절삭형태의 변화를 추적하여 절삭상태를 파악하는 간접적인 방법으로 대별하고 있는데, 자동가공 시스템의 확대로 간접적인 방법이 점차적으로 많이 이용되어 가고 있다. 그중에서도 대표적인 방법(1)~(4), (13) 절삭력, 절삭음, 진동, 모터의 전력소비량, 절삭온도, 그 밖에 피삭재의 치수나 표면거칠기의 변화를 감시하는 가공중 검출방법들이다. 그러나 이러한 간접적인 방법은 측정이 비교적 용이하나 공구마멸과의 관련성이나 반복가공에서의 신뢰성 등에 아직도 문제가 있다. 간접적인 방법중에서 측정이 용이하고 실용성이 크며, 최근에 관심의 대상이 되고있는 방법은 음향방출(AE)신호를 공구의 마멸이나 파손 등을 검출하는데 이용하는 것이다. 이미 국내외에서 AE의 이용으로 선삭이나 드릴작업, 연삭 등에서 일어나는 절삭날의 미소한 파손, 치핑, 크레이터링, 기타 마멸 등에 의한 공구의 수명을 검출할 수 있는 가능성에 대한 방법 등이 보고되었다.^{5~10)} 한편 단속절삭을 하고있는 밀링은 다른 공작기계만큼 활발하지는 못하나 점차적으로 관심이 높아지고 있다. 예로서 Diei¹²⁾는 밀링가공에서 발생하는 AE신호의 간단한 처리방법을 제시하고 있으며 Kim¹⁰⁾은 절삭조건으로 절삭속도, 이송량, 절삭깊이를, 그리고 장착한 인서트 팁의 수가 AE신호의 특성에 미치는 영향을 조사하여, 절삭조건에 따른 AE신호의 변화량을 보고 하였다. 또한 Dornfeld^{13~15)}는 가공중에 발생하는 AE의 해석에 기초를 두어 칩형태의 탐지와 공구파괴, 마멸의 양상 등을 보고하였다. 따라서 본 실험에서는 기존의 연구를 바탕으로 직립밀링머신에서 정면커터를 사용할 때 공구 수명을 검출하기 위한 기술로서 AE신호의 사용 가능성에 대한 확인과 신호의 특성을 조사하고자 한다.

2. 이론적인 고찰

2-1. AE의 발생원

AE는 재료내부에 저장된 변형에너지의 국부적인 방출에 의하여 발생하는 과도적인 탄성응력파로서, 발생되는 형태는 크게 나누어 연속형(Continuous

Type)과 돌발형(Burst Type)으로 구분된다.

연속형 신호는 연성재료가 소성변형을 일으킬 때, 그리고 돌발형은 재료내에서 크랙이 성장할 때 주로 관찰된다고 보고되었다.²⁰⁾ 또한 절삭중 칩의 충돌이나 칩의 뒤엉킴(Tangling)도 돌발형의 AE신호를 발생한다.

일반적으로 금속절삭 중에 소성변형(연속형 AE신호)과 재료의 파괴(돌발형 AE신호)는 AE의 주요한 발생원으로 알려져있다.

Fig. 1은 금속절삭과정(Primary, Secondary, Tertiary 변형영역)에서의 소성변형영역을 나타내고 돌발형 AE신호를 발생하는 파괴기구(칩의 파손)의 위치를 보여준다.

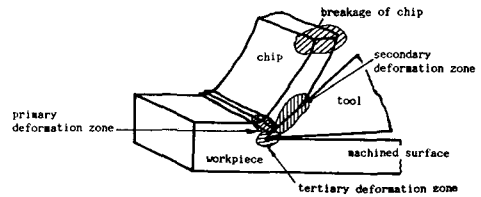


Fig. 1 Source of Acoustic Emission Signals

지금까지 미끄럼 과정중 두 고체 사이의 접촉에 대한 여러 연구는 마찰력의 향으로 수많은 이론적인, 또한 실험적인 식을 정립하였다. 그중에서 가장 일반적인 식의 전개는 다음과 같다.

$$F = \mu N \dots\dots\dots (1)$$

여기서 F는 마찰력, μ 는 마찰계수, N은 수직력이다.

마찰력의 성분중 접착(Adhesion) 성분은 Plowing 성분보다 훨씬 크므로 Plowing 성분을 무시하면

$$F = \tau_s A_r \dots\dots\dots (2)$$

의 식으로 나타낼 수 있다.

여기서 τ_s 는 재료의 전단응력, A_r 는 실 접촉 면적이다. 한편, 미끄럼의 외부조건이 일정하다고 하면 실접촉면적은

$$A_r = \eta A_a \dots\dots\dots (3)$$

이며 여기서 η 는 재료의 표면 거칠기의 함수, A_n 는 겉보기 접촉면적으로 표시되므로 (2)식은

$$F = \eta \tau_s A_n \dots\dots\dots (4)$$

로 나타내진다.

마찰과정에서 에너지 소비율 W 는

$$W = F V \dots\dots\dots (5)$$

여기서 V : 미끄럼 속도

이므로

$$W = \mu N V$$

$$= \eta \tau_s A_n V \dots\dots\dots (6)$$

이다.

측정 가능한 AE를 발생하는 에너지 소비과정에서 AE 에너지율은 W 의 멱함수로 나타낼 수 있으므로 다음과 같이 바꿔 쓸 수 있다.⁹⁾

$$AE_{\text{energy rate}} = (K W)^m \dots\dots\dots (7)$$

여기서 K, m 는 AE 측정시스템과 마찰재료에 의존하는 상수이다.

또한

$$AE_{\text{rms}} = (AE_{\text{energy rate}})^{1/2} \dots\dots\dots (8)$$

이므로

$$AE_{\text{rms}} = (K \mu N V)^{m/2}$$

$$= (K \eta \tau_s A_n V)^{m/2} \dots\dots\dots (9)$$

으로 나타내진다.

따라서 식(9)는 금속절삭과정에서 AE를 이용하여 프랭크 마모를 측정할 수 있는 이론적 기초를 제공해 준다.

3. 실험방법 및 실험장치

실험장치의 계통도는 Fig. 2와 같다. 기계는 Bridge-Port사의 램형 NC 밀링머신을, 검파장비로는 일본 NF 回路設計 Block(주)의 AE System을 사용하였다. AE센서의 부착위치는 날끝에 가까울수록 정확한 신호를 받을 수 있으나 밀링에서는 공구가 회전체이므로 공구에 부착시키기는 어렵다. 그밖에 가능한 곳은 그림에서 검은 점이 있는 주축대(A), 공

작물(B), 바이스(C), 테이블(D) 등인데, 본 실험에서는 가급적 정확한 신호를 얻기 위해서 공구와 직접 접촉되는 공작물의 밑면에 구리스를 도포하여 부착시켰다. 시험편은 SM45C로 50×75×300mm의 각재에서 표피의 산화피막만을 제거한 다음 사용하였다.

절삭유는 사용하지 않았으며 공구는 정면커터로, 인서트립은 대한중석(주)의 SNKN1204ENR형 4각 TA립을 사용하였다. 절삭조건으로는 절삭속도와 깊이, 그리고 이송량을 변화시켜가며 공구마멸에 대한 AE신호의 특성을 조사하였다. 그의 Engage각이나 Disengage각, 공구의 경사각 등은 일정하게 하였다.

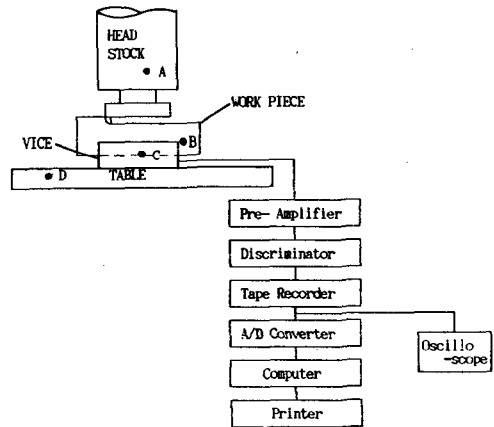


Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

AE센서로 검출한 신호는 Pre-Amplifier로 40dB 증폭시켰으며 Discriminator에서 100-300kHz로 고정한 Band Pass Filter를 통과하면서 날끝과 피삭재, 또는 칩사이의 충돌음이나 각종 기계적인 소음 등을 최소화 시켰다. 시험중 AE의 원파형 등을 감시하기 위하여 오실로스코프를 사용하였으며, 필터링된 모든 신호는 TEAC(주)의 Tape Recorder(model-260)로 녹음한 다음 A-D Converter로 Computer와 연결하여 각종 데이터를 정리하였다.

프랭크 마멸 측정은 절삭 도중에 인서트를 빼내어 일본 Mitutoyo Mfg. Co.의 공구현미경(Model TM 100)을 사용하여 평균마멸길이(V_B)를 측정하였으며 Fig. 3에 인서트의 플랭크 마멸 측정위치를 나타내었다.

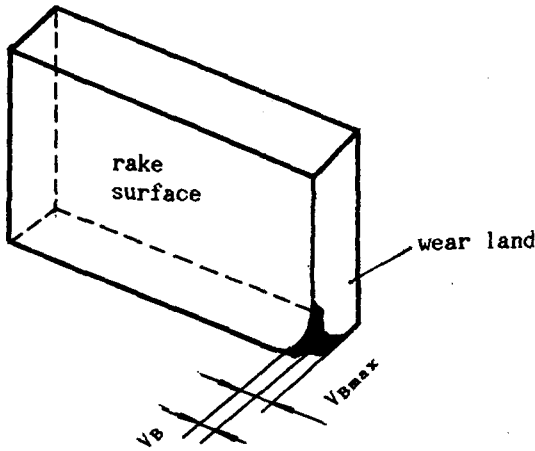


Fig. 3 Configuration of flank wear profile on a milling insert.

4. 실험결과 및 고찰

밀링가공은 단속절삭의 연속이므로 절삭중에 발생하는 AE신호의 상당량은 날끝이 피삭재로 파고들어 갈 때 부딪치며 일어나는 충돌음과 칩이 피삭재나 공구에 부딪치는 충돌음, 그밖에 기계고유의 진동음이다. 그러나 이들은 100-300kHz의 영역에 있는 신호만을 검출하는 Band Pass Filter를 거치면서 대부분이 Filtering되어 진동이나 소음등에 의한 잡음은 극소화 시켰다.

Fig. 4는 가공중에 임의의 구간을 발췌한 AE신호의 진폭파형이다. 선삭과는 달리 단속 절삭을 하기 때문에 검출되는 AE 신호도 주기성을 나타내고 있다. 즉 시간이 경과함에도 균일한 레벨의 AE 값에 갑자기 높은 Peak AE가 일정한 간격으로 생겨났다. 이 Peak는 밀링 특유의 단속절삭에서 갖게되는 인선과 피삭재 사이의 충돌음이라 생각된다. 공구는 강한 압력을 받으며 상대운동을 하므로 날끝은 처음 형상을 잃고, 마멸되거나, 파손 또는 절손되어 사용할 수 없을 때 공구수명이 다된 것으로 판정한다.¹⁹⁾

같은 조건으로 수명이 다될 때까지 절삭을 하면서 기록한 AE신호는 A-D 변환기에서 디지털 신호로 변환시켜, 500μsec의 샘플링 간격으로 2.5sec 동안 샘플링하여 총 자료의 수는 5000개로 하였다.

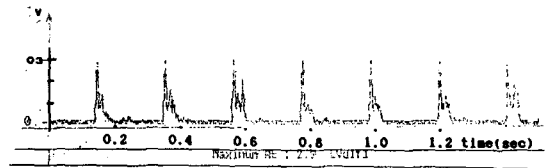


Fig. 4 AE signal in milling process of single tip at 100 m/min, 0.1mm/tooth.

칩을 형성하는 과정에서 절삭조건(절삭속도, 이송속도, 절삭깊이 등)의 영향은 잘 알려져 있다. 또한 AE신호의 발생은 칩의 형성과정과 직접적으로 관련되어 있기 때문에 절삭 파라미터의 변화에 따라 AE신호는 비슷한 형태로 변화될 것으로 예측할 수 있다.

Fig. 5는 절삭깊이별로 절삭속도의 증가에 따라 AE RMS 값이 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이것은 (9)식에서도 이미 예측할 수 있었던 바와 같이 AE RMS 값은 절삭속도에 매우 민감함을 알 수 있다. 이와 같이 절삭속도에 대한 AE RMS 값의 강한 의존성은 이미 여러 연구자들에 의하여 선반절삭 과정에서도 증명되었다.^{5), 8), 14)}

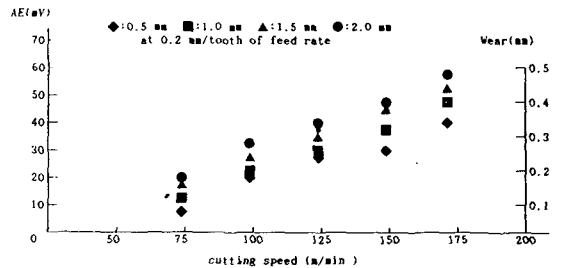


Fig. 5 AE rms as a function of cutting speed at different depth of cut.

Fig. 6은 절삭속도와 절삭깊이의 파라미터를 일정하게 하고 이송속도를 변화시켜 AE RMS 값의 변화를 살펴 본 것이다. 역시 이송속도의 변화에 따라 AE RMS 값이 강하게 의존하고 있음을 보여주고 있다. 저속에서는 AE RMS 값이 이송속도의 증가에 따라 크게 변하지 않으나 고속에서는 이송속도가 증가함에 따라 AE RMS 값도 증가하다가 감소하거나 비슷하게 나타나고 있었다. 이것은 전단각 및 마찰각의 변화에 기인하는 칩압축 Factor의 변화 때문이라고 생각된다.¹⁹⁾

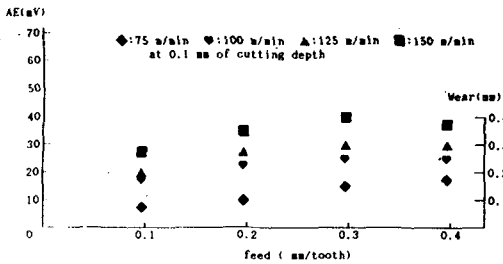


Fig. 6 AE rms as a function of feed at different cutting speed.

다음은 절삭속도와 이송속도를 일정하게 하고 절삭깊이 만을 변화시켜서 가공한 실험결과를 Fig. 7에 나타내었으며 여기에서도 AE RMS 같은 절삭속도에 관계가 깊다는 것을 알 수 있다.

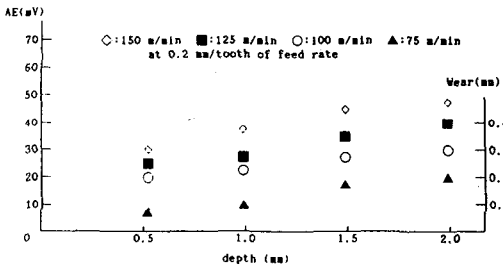


Fig. 7 AE rms as a function of cutting depth at different cutting speed.

Fig. 8은 같은 절삭조건으로 공구의 플랭크 마멸과 AE RMS 사이의 관계를 조사하기 위하여 실험한 결과이다. 즉 250m/min의 절삭속도에서 0.1mm/tooth의 이송속도와 1.0mm의 절삭깊이로 반복 실험하여 공구의 총마멸량이 0.39mm가 될 때까지의 그림이다. Fig. 8(a)의 경우에서는 AE RMS 값이나 마멸이 일정하게 유지되고 있다. Fig. 8(b)와 (c)에서는 RMS 값이 고르지 못하였지만 거의 일치하였고 마멸량 만이 시간에 따라 약간씩 차이가 생기고 있었다. 여러가지 원인이 있겠으나 인서트팁의 마멸량을 측정하기 위하여 팁을 자주 홀더에서 장탈착하는데 주원인이 있는 것으로 생각된다. 그리고 모든 경우에서 초기의 AE값이 크게 상승하고 있음을 볼 수 있는데, 이는 마멸의 초기 단계에서 예리한 날끝이 쉽게 파손되어 떨어져 나가는 미소파괴로서 파괴 시간이 짧은 순간적인 과정에서 오는 현상이라고 생각된다.¹⁷⁾

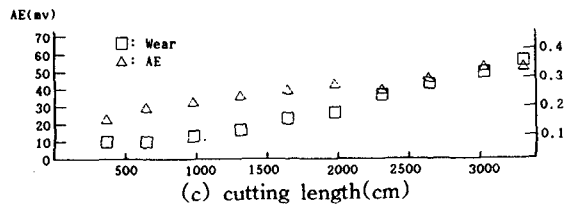
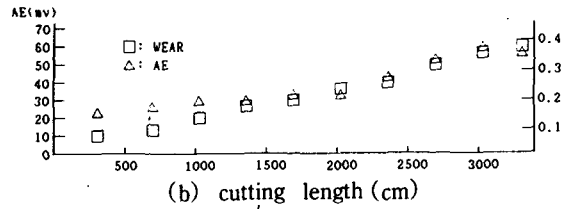
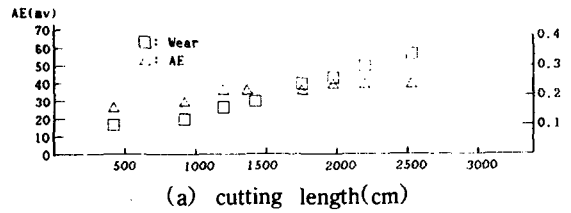


Fig. 8 Relation between AE rms and tool wear at $V=250$ m/min, $f=0.1$ mm/tooth, and $d=1.0$ mm.

Fig. 9(a)는 절삭속도 200m/min, 절삭깊이 1.0mm, 이송속도 0.3mm/tooth로 절삭할 때의 결과이다. 총 절삭길이가 1000mm 정도까지는 AE값이 계속 상승하였으나 그후 안정된 상태를 유지한 후 다시 5000mm를 넘어서면서 AE값은 등락이 불균일한 상태로 크게 상승하였고 더욱 시간이 경과 할 수록 그 진폭은 아주 커졌다. Fig. 8(a)와 (b)는 같은 조건에서 실험을 한 것이다. 수명이나 마멸의 진전 상태는 거의 일치하고 있다. AE값에서도 큰 차이를 나타내고 있지는 않았으며 변화과정 또한 500~6000mm까지는 비슷하였다. 그러나 6000mm 정도에서 Fig. 8(b)는 갑자기 높게 상승하면서 큰 진폭으로 불안정 상태를 유지하다가 AE값은 다시 증가하였다. 이와같은 현상은 전형적인 단속절삭을 하고 있는 밀링작업에서 보기 쉬운 팁 파손에 의한 마멸로서 이때 공구의 파손상태 등은 Fig. 10과 같다. Fig. 9(c)는 이송속도를 0.2mm/tooth로 변화시켜 본 결과이다. 절삭량은 약간 길어졌으나 AE값이 불균일하게 갑자기 커지고 있으며, 또한 약 11,000mm 정도까지의 평균

AE값도 42mV 정도로 높은 레벨을 보여주고 있다. 그러나 Fig. 9(a)에서는 플랭크 마멸량이 0.25mm를 넘어서면서, 그리고 Fig. 9(b)에서는 0.17mm를 넘어서면서 AE값은 큰 진폭으로 변화하는 현상을 보였다. 이와같은 현상은 다른 절삭과정에서도 비슷하게 나타나고 있었다.

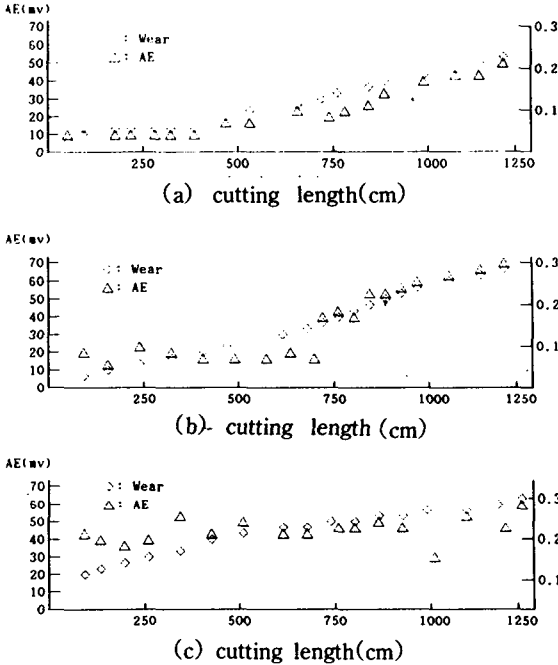


Fig. 9 Relation between AE rms and tool wear at V=200 m/min

선삭에서는 200m/min에서 1.5mm의 절삭깊이와 0.3mm/rev의 이송량으로 절삭하거나 또 저속인 50 m/min에서도 절삭깊이와 이송량을 크게하면(절삭깊이 : 3mm, 이송량 : 0.5mm/rev) 이와같은 현상이 생기고 있는데, 이것은 절삭조건이 맞지 않을때 마멸이 커지면서 공구는 치핑이나 미소파괴 등이 생기고, 또한 진동이 심해지기 때문이라고 판단된다.

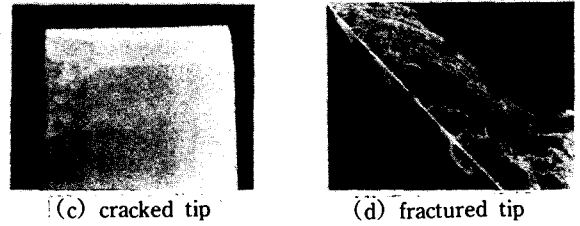
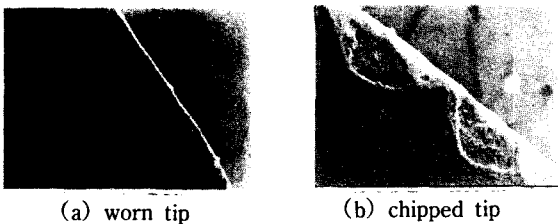


Fig. 10 Worn or fractured insert tip of face milling cutter

이송속도와 절삭깊이를 각각 0.1mm/tooth와 1mm로 하고, 절삭속도만 150m/min, 100m/min로 변환시켰을 때도 비슷한 현상을 나타내고 있었으나 총절삭길이가 매우 짧아졌다.⁵⁾ 그리고 절삭길이에 비하여 과도한 마멸이 발생하는데, 이는 날 1개로서 이송속도가 너무 늦는등 적당한 조건이 이루어지지 못하는데서 기인하였다고 생각된다. 또 森協俊道¹²⁾ 절삭속도가 커질수록 여유면의 마멸속도가 증가하고 따라서 진동이 커지기 때문에 결과적으로 AE전압까지 증가한다고 말하고 있다.

반복되는 실험에서 공구교환의 시기결정은 AE 신호의 절대적인 크기보다 변화되어가는 경향을 보아 진폭이 크게 변화하거나 또는 큰 진폭으로 불안정 상태를 유지하다가 AE값이 크게 떨어지는 특성이 있으므로 이 특성을 잘 관찰하여 공구교환 시기의 결정에 기준을 삼을 수 있으리라 판단된다.

5. 결 론

밀링절삭중 공구의 마멸 및 치핑을 감지할 수 있는 수단으로 AE신호의 적용 가능성을 조사하기 위하여 실험을 행하였다. 선삭과는 달리 밀링 특유의 단속절삭에서 일어나는 진동이나 소음 등에도 불구하고 날끝의 마멸이나 파손등의 절삭중 감시가 밀링에서도 가능하다고 생각되었으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 공구의 마멸과 AE 신호와의 관계도에서 AE 값이 급상승하거나 진폭이 크게 변화하는 것은 밀링절삭에서 일어나는 팁 파손에 의한 마멸로 관찰되었다.

2. AE 신호는 절삭 파라미터인 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이의 증가에 따라 증가하는 경향을 보이며 특히 절삭속도에 민감하다.
3. 절삭 초기에는 순간적인 미소파괴 등으로 날끝 마멸이 심하고 이에 따른 RMS 값도 급상승한다. 공구 교환시기 결정에서는 이 초기변화를 고려해야 한다.

References

1. 水津弘次, "아코스틱스 에미션에 의한切削工具의磨耗および熱き裂のインプロセス檢出に關する基礎的研究", 京都大學工學部製造工學研究室論文集, (昭和55年), pp. 1~55.
2. 大宮毅, 稻崎一郎, 青山藤詞郎, 酒井勝, 萩尾雄一, "아코스틱스 에미션에 의한 드릴折損의 인프로세스檢出", 日本機械學會論文集(C編) 51卷 472號, pp. 3322~3328
3. 垣野義昭, "아코스틱스 에미션을 이용한切削工具의破損檢出法", 機械と工具, (1980년 6월), pp. 140~144.
4. Moriwaki T., "Detacktion for Cutting Tool Fracture by Acoustic Emission Measurment", CRIP Vol., 29/1/1986 pp. 35~40
5. 康明順, 崔聖周, 朴炫, "二次元切削時發生하는 AE에 관한研究", 大韓機械學會論文集, 第10卷第1號, (1986), pp. 906~915.
6. 權炯湖, "Acoustic Emission에 관한 WA계 Vitri-fied 및 Resinoid 결합제 연삭숫돌의 파괴강도와 연삭성능 평가에 관한 연구", 한양대학교 박사학위논문집 pp. 83, 88, 6
7. 垣野義昭, Luc Dieu Chuong, 小林昌彦, "아코스틱스 에미션에 의한工具破損의檢出", 日本精密機械學會誌, 46卷3號, pp. 66~71
8. Iwata K., Moriwaki T., "An Application of Acoustic Emission Measurement to In-Process Sensing of Tool Wear", CIRP. Vol. 25/1, (1977,) pp. 21~25.
9. 이병찬, "밀링가공시 발생하는 공구마멸과 AE신호에 관한 연구", 한국과학기술원 '87논문집, pp. 20~72
10. Kim K. J., Kim K. H. and Hwang H. Y., "Progressive Tool Wear Sensing in Turning Operation Via Acoustic Emission Signal Processing", KAIST(published by ASME, New York) PED-Vol, 21, Book No. H00368 pp. 305~307.
11. 小島浩二, 稻崎一郎, 三完亮一, "아코스틱스 에미션을 이용한旋削プロセス의監視", 日本機械學會論文集(C編), 52卷474號, pp. 799~808.
12. 森脇俊道, "機械加工の監視における AE의應用", 工作機械 關聯技術者會議資料, 東京, 134-1-1-10, 昭和 58, 7, 21
13. Diei E. N., Dornfeld D. A., "A. E. Sensing of Tool Wear in Pripheral Milling", Univ. of California, Berkeley California, pp. 107~124.
14. Dornfeld D. A. & Kannatey-Asibu Elijah, "Acoustic Emission During Orthogonal Metal Cutting", Int. J. Mech. Sci. Vol. 22 (1986), pp. 285~296.
15. Ko Sung-Lim, Dornfeld David A., "A Study on Burr Formation Mechanism", Univ. of California, Berkeley, pp. 1~12.
16. Liptai, R. G., Harries, D. O., Tatro, C. A., "An Introduction to Acoustic Emission", Acoustic Emission, ASTM STP 505, (1972), pp. 308.
17. 황흥연, 이병찬, 김광준, "밀링가공시 발생하는 공구마멸과 AE신호에 관한 연구", 대한기계학회 논문집 제12권 제5호 (1988), pp. 1035~1042.
18. 徐南燮, "金屬切削理論" 東明社, 서울, (1985), pp. 128~156.
19. E. N. Diei, D. A. Dornfeld, "Acoustic Emission From the Face Milling Process - the Effects of Process Variables" J. of Engineering for Industry, Vol. 109, (1987), pp. 92~99.
20. T. Blum, I. Inasaki : A Study on Acoustic Emission from the Orthogonal Cutting Process, Trans. ASME, Vol. 112., (1990).