

## 선삭가공에서 공구마멸에 따른 절삭력과 AE 신호의 특성 연구

맹민재\* · 정준기\*\*

(A Study on the Cutting Resistance and Acoustic Emission Signal due to Increasing Tool Wear in Turning )

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

### Abstract

In order to achieve the automation and untended system of manufacturing process, it is necessary that the monitoring system check up the disorder of machine tool or the conditions of tool wear for the maximum use of cutting tool.

In the metal cutting process, AE signal is detected by AE sensor, then amplified and transmitted to an Locan-AT. The experiment was performed to SM25C and STS304 steels at uniform feedrate, cutting speed and depth of cut. The results of experimental data apparently showed emission intensity vary due to increasing of tool wear at the 165kHz, 200kHz in the SM25C and 140kHz, 165kHz, 200kHz in the STS304 respectively. Therefore, it is possible to predict the tool wear.

This study is intended to suggest the way to the automation and untended system of machine tool through the system monitoring tool wear by using AE signal.

Keywords : Acoustic Emission(음향방출), Tool Wear(공구마모), Emission Intensity(방출크기) Untended(무인화), Monitoring System(감시시스템), Automation(자동화)

### 1. 서 론

생산기술이 발달함에 따라 기계 가공품에 대한 고정밀도가 요구되고 있고, 이에 부응하여 NC 및 CNC공작기계 등에 의한 가공의 자동화가 이루어져 지금까지 마련되지 않고 있던 고정밀, 고 능률적인 음향방출신호측정 방식의 필요성이 높아지고 있다.

정밀 제품의 품질 보증을 위한 평가에 있어서 공구마멸 감시에 대해 현재까지 가장 일반적인 평가방법은 직접적인 방법이지만 이러한 직접적 측정법이 갖는 여러 가지 문제점으로 인해 최근 신뢰성 있는 음향방출신호측정 방법들이 활발히 연구되고 있다.

이 분야에 대한 연구결과들을 살펴보면 Lan과 Naerheim<sup>(1)</sup>은 통계적 해석으로부터 AERMS 값의

\* 홍익대 대학원

\*\* 홍익대 기계공학과

Kurtosis가 빠르게 증가한다고 보고하였다. AE 신호의 다른 특성인 event rate의 빈도 또한 공구 마멸과 밀접한 관계를 보이고 있는데 Iwata와 Moriwaki<sup>(2)</sup>에 의하면 플랭크마멸이 약 0.12mm에 이르기까지는 event rate가 마멸에 비례하지만 0.12mm 이상에서는 거의 일정한 값을 나타낸다고 하였다. 또한 event의 전체 갯수가 플랭크마멸과 함께 증가한다고 보고하였다. 한국과학기술원<sup>(3)</sup>은 밀링가공시 공구마멸과 AE 신호의 특성변화에 대하여 연구를 수행하였는데 공구마멸에 민감한 인자로서 신호의 평균값에서 표준편차를 뺀 신호를 선정하였다. 또한 마멸의 증가에 따라 AE 신호는 플랭크마멸량 0.2mm~0.3mm에 도달할 때까지는 심해지거나 일정한 수준을 유지하는 두 가지의 유형을 보인다고 보고하였다.

이러한 연구들은 공구마멸 검출을 위하여 기본적으로 1개의 센서와 센싱 신호만을 사용하는 방법을 사용한 것이며, 최근에는 여러 개의 센서를 사용하는 센서융합 개념을 도입함으로써 마멸검출의 정확도와 신뢰성을 높이고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

센서융합 개념을 이용한 연구로 Rangwala와 Dornfeld<sup>(4)</sup>는 절삭력과 AE 신호를 이용하여 공구 마멸을 검출하고자 하였다. 본 연구에서는 선삭가공시 발생하는 절삭력의 3분력, 즉 주절삭력, 배분력, 이송분력과 AE 신호의 특성변화를 실험적으로 비교 분석하여 선삭가공시 인 프로세스 (in-process) 측정의 가능성을 검토하고, 공구 마멸 감시와 최적 공구교환 시기를 알기 위한 기초 자료를 얻고자 한다.

## 2. AE의 이론적 고찰

### 2-1. 음향방출의 본질

음향방출(acoustic emission: AE)이란 재질 내부나 국부적인 근원으로부터 변형에너지의 급작스런 이완에 의해 생성되는 천이적인 탄성용력과로서, 초기에는 지진학에서 단층운동 특성을 감지하는데 사용되다가 1960년대 재료특성 등 공학분야에 응용되었다.<sup>(5)</sup> 그후 비파괴시험으로 응력받은 구조의 결함이나 크랙 전파의 감지에 사용되어 오고, 파이프, 압력용기의 기밀과 누수검출 시험, 비행기의 비행중 시험 및 파괴기구 판별, 복합재구조의 약화감지, 제조시스템의 감지, 무인화제조 시스템의 다양

한 공정상태의 정보를 주는 지적선서역활, 정밀제조 공정의 감지에 응용되었다.

### 2-2. 2차원 절삭에서 AE의 해석적 모델

2차원 절삭은 공구 접촉부의 끝부분이 공작물에 대하여 압력을 가하기 때문에 공구 앞부분의 재료에 전단이 일어나 칩으로 형성되고 공구 윗면을 따라 미끌어 지면서 변형이 된다. 금속절삭에서 발생하는 AE 발생원은 다음과 같다.<sup>(6)</sup> (1) 제1변형영역(primary shear zone)에서의 소성변형 (2) 제2변형영역(secondary shear zone)에서의 칩과 공구의 변형과 마찰 (3) 제3변형영역(tertiary zone)에서의 공구측면-공작물 표면 접촉 (4) 칩의 충돌, 휘말림, 부스러짐

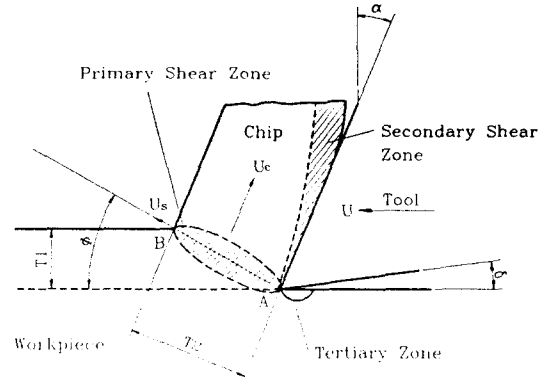


Fig. 1 Deformation zones affecting acoustic emission in the metal cutting process.

Fig. 1은 AE 발생에 주목되는 세영역을 나타내었다. 이중 가장 큰 AE 신호를 발생시키는 제1변형영역에서 재료는 매우 높은 변형속도로 변형되며 대부분의 금속에 있어서 AE 강도는 변형속도에 강하게 의존하고 있으므로 변형에 관계되는 AE 신호는 이 영역이라고 예측할 수 있다. 제2 변형영역에서 재료는 더욱 변형되고 변형 경화되어 이 경우 칩-공구 접촉면에서의 마찰과정은 이 영역에서 발생하는 AE에 대하여 우세한 역할을 한다. 제3변형영역에서 발생하는 AE 신호는 절삭초기에 미소하지만 시간이 경과함에 따라 공구 측면마멸이 증가하면 공작물과 측면마멸 부분의 마찰에 의해 AE 신호가 발생한다.

### 2-3. AE 신호 계측이론

절삭가공 동안에 발생하는 AE 신호는 비주기적이고 많은 주파수를 포함하고 있기 때문에 AE 신호의 분석과 해석은 중요하다. AE 신호를 분석하는데 있어서 가장 핵심적인 사항은 AE 신호속에 담겨있는 신호 파형을 해석해 내는 것이다.

공구마멸에 의해 탄성파가 발생되어 전파하는 경우, 종파와 횡파 등의 합성파로서 전파되기 때문에 일정시간 동안 탄성파에 의한 주파수가 1주기 T에 대하여 평균한

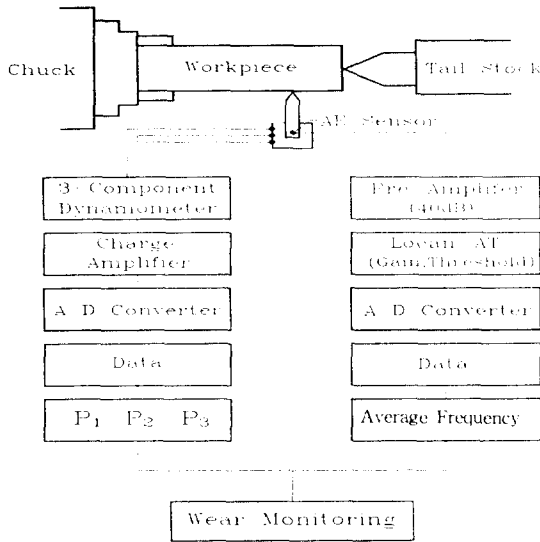


Fig.2 Schematic of experimental apparatus.

것을 평균주파수(F<sub>avg.</sub>)로 검출함으로써 신뢰성 있는 신호처리를 가능케 한다.

$$F_{avg} = \frac{1}{n} \left[ \frac{1}{\sum T_1 + T_2 + \dots + T_n} \right]$$

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3-1. 실험장치

Fig. 2는 본 실험에서 사용한 공구마멸감시 실험장치의 계통도이다. 실험장치는 CNC선반, 공구동력계, AE변환자, 데이터처리장치 등으로 구성되어 있다.

절삭력을 측정하기 위해 CNC선반의 공구대에 공구동력계를 설치하고 Fig. 3과 같은 PTTNL 2525M22의 호울

더에 P20계열의 소결 탄화물 팁(sintered carbide insert tip) TNMG220408을 고정하였으며 또한 AE 신호를 측정하기 위하여 공구홀더의 측면에 센서를 설치하였다.

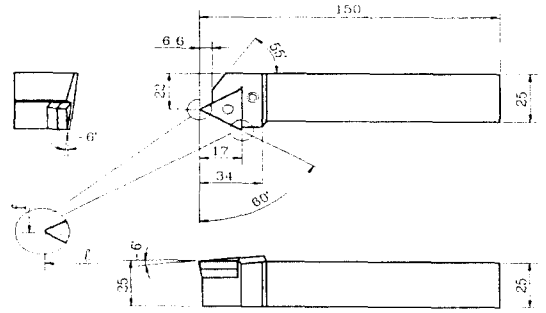


Fig. 3 Turning tool.

AE 신호 발생위치에서 AE 센서까지의 전달경로부에 결합부 결함 등이 존재할 경우 결함 등에 의한 산란, 접촉면에서의 반사 등에 의해 신호가 변형되거나 감쇠가 일어난다. 그러므로 가능한 AE 신호의 발생위치에서 가까운 곳에 변환자를 설치하는 것이 바람직하지만 칩의 휘말림 등을 고려하여 공구 끝에서 100mm 떨어진 곳에 지그를 제작하여 나사로 견고하게 고정하고 변환자의 측정감도를 높이기 위하여 공구와 변환자 사이에 그리스(grease)를 사용하여 공기 층을 제거하였다. 실험에 사용한 시편은 SM25C, STS304로 지름 100mm 환봉을 구입하여 양단의 금속학적 불균일 부위를 절단하여 버리고

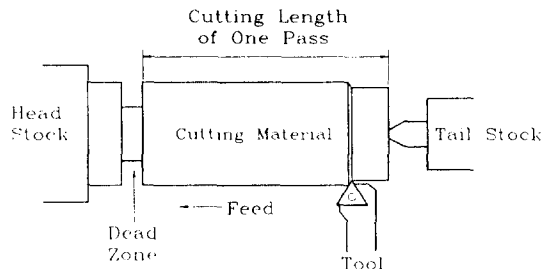


Fig. 4 Shape of cutting material.

재질의 변질층을 제거하기 위하여 약 5mm 정도 흑피 표면을 제거후 외경 90mm, 길이 400mm의 치수로 가공하였다. 시편은 Fig. 4와 같이 주축대 쪽의 끝 부분에 깎이지 않는 부분을 미리 가공하여 실험이 진행될때 절삭이 끝나는 지점에서 공구를 보호하도록 하였다.

3-2. 실험방법

공구호울더에 직접 붙인 압전형 AE 센서(25~800kHz)에서 검출한 AE 신호를 예비실험의 결과에 따라 전치 증폭기에서 40dB, 주 증폭기에서 20dB 증폭하였고 측정 오차를 유발하는 교란 요소로서 선삭시 선반 자체에서 발생하는 진동을 들 수 있는데, 오실로스코프에 의해 검과된 전기적인 잡음과 진동 주파수는 선반의 회전수에 따라 120~200Hz 사이에 분포하는 잡음들을 완전하게 차폐할 수가 없으므로 공구마멸 신호에 혼입되어 있는 잡음들은 플럭인 필터를 이용한 여과과정을 통하여 감소시킬 수 있다. 공구마멸 검출 성분의 주파수는 대역필터를 통과시키며, 대역필터를 통과한 AE 신호는 신호처리 시스템이 하드웨어적으로 구성된 LOCAN - AT에서 신호처리가 이루어지고, 공구마멸에 의한 탄성파의 주파수 영역은 100~300kHz에서 나타나므로 적어도 A/D변환 샘플링 주파수는 700kHz가 되어야 하며 시간정밀도(sampling time)는 0.25 sec이다. 2개의 채널을 동시에 관리하는 ICC(independent channel controller)에서 대부분의 작업이 수행되고 계산된 수치들은 하드디스크에 저장된다. 절삭력 측정은 공구동력계에서 검출한 절삭력 신호를 저역필터(100Hz)로 통과시켜 노이즈를 제거하고, 증폭기에서 증폭한 후 A/D 변환기에서 디지털 신호화하여 컴퓨터 하드디스크에 저장하고 절삭이 끝난 후 데이터를 분석하여 얻었다. CNC선반에서 절삭이 진행됨에 따라 공작물의 직경이 감소하므로 절삭속도를 일정하게 유지하기 위해서 지령 좌표치에 따라 자동적으로 회전수가 제어되는 주축일정 제어 기능을 프로그램에 사용하였고 AE 신호와 절삭력을 측정하기 위하여 공작물 절삭길이 300mm를 1회 절삭하는 과정 중에 100mm 가공 후 기계가 일시정지하도록 프로그램을 하여 1회 절삭중 3회 측정을 하도록 하였다. 공작물 전체 길이를 1회절삭 후에는 공구가 가공프로그램의 시작점에 복귀하여 정지되는 사이클로 반복되며 정지된 상태에 있는 동안 인서트 팁을 탈착하여 공구현미경으로 공구마멸을 측정하였으며, 동일한 방법으로 피삭재와 절삭공구를 바꾸어 실험하였다.

Table 1은 실험에 사용한 절삭조건이다.

Table 1 Cutting conditions

Materials	SM25C	STS304
cutting speed(m/min)	170	104
depth of cut(mm)	1.2	1.2
feedrate(mm/rev)	0.21	0.1
coolant	dry	dry

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 측면마멸과 절삭력 특성

Fig. 5는 SM25C 시편을 절삭하면서 측면마멸의 증가에 따른 절삭력의 변화를 측정하여 공구교환시기를 검출하고자 실험한 결과이다. ISO에서 규정하고 있는 초경공구의 공구수명 관정기준에 따르면 측면마멸폭 0.3mm를 기준으로 하는데 측면마멸이 0.25mm 이후인 급작마멸단계에서 주절삭력, 배분력, 이송분력의 3분력

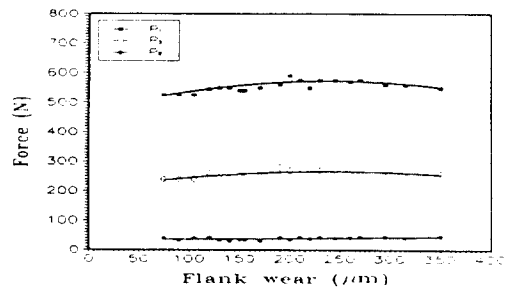


Fig. 5 Force vs. flank wear (material : SM25C)

이 뚜렷한 변화를 나타내고 있지 않다. 따라서 측면마멸폭 0.3mm 까지는 절삭력을 이용하여 공구교환시기를 예측하기가 곤란하다고 사료된다.

Fig. 6은 STS304 시편을 가공하면서 측면마멸의 증가에 따른 절삭력을 측정하여 나타낸 결과이다. 측면마멸의 증가에 따라 주절삭력, 배분력, 이송분력이 SM25C 시편보다는 절삭력이 약간 증가하는 경향을 보이지만 측면마멸폭 0.3mm를 공구수명 기준에 따르면 공구교환시기를 검출하기는 곤란하다고 생각된다.

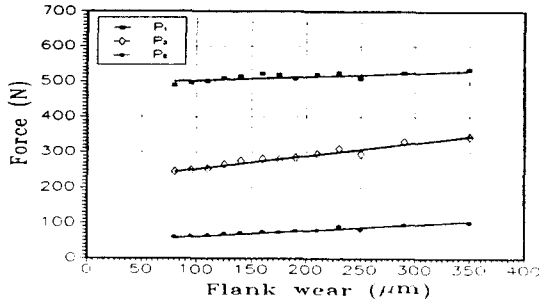


Fig. 6 Force vs. flank wear  
(material : STS304)

4-2. AE 신호 분석

절삭 초기에는 HDT(hit definition time) 800 sec, PDT(peak definition time) 400 sec, HLT(hit lockout time) 800 sec에서 탄성파가 잘 감지되었으나, 절삭가공이 진행되어 감에 따라 플랭크마멸로 인하여 HDT 1200 sec, PDT 600 sec, HLT 1200 sec에서 탄성파가 잘 감지되었다. 이는 플랭크마멸이 증가되어 탄성파 특성이 바뀌고 있음을 의미한다. 또한 공구마멸에 의해 탄성파가 발생되어 전파하는 경우, 종파, 횡파, 램브파 등의 합성파로서 전파되기 때문에 복잡한 파형으로 되어 있는 경우가 많다. 따라서 절삭가공시 발생하는 탄성파는 합성파로 읽어 들이는 것이 되므로 일정시간 동안 탄성파에 의한 주파수가 1주기 T에 대하여 평균한 것을 평균주파수( $F_{avg}$ )로 검출함으로써 공구수명의 판정 정도가 향상된다고 생각되며 탄성파를 정량화 하기 위해 예비실험을 통해 얻어진 자료를 기준으로 정하여 측정하려는 탄성파의 크기를 감쇠 시키지 않는 측정범위로 문턱 값을 조정해 돌발적인 잡음 신호가 들어와도 인프로세스 측정에 의한 공구수명의 판정에 악 영향을 미치지 않도록 설정하여 공구마멸의 증가에 따라 각각 평균주파수에 대한 음향방출 크기를 고찰해 보면 측면마멸 진전에 따라 방출 크기가 증가하는 경향을 볼 수 있다.

4-2-1. 측면마멸과 주파수 특성

Fig. 7은 탄소강인 SM25C를 가공시 측면마멸의 변화에 따른 음향방출 크기를 검출하여 공구마멸상태를 추정하기 위해 실험한 결과로서 인프로세스 측정에 대한 신뢰성과 적용 가능성에 대하여 검토하였다.

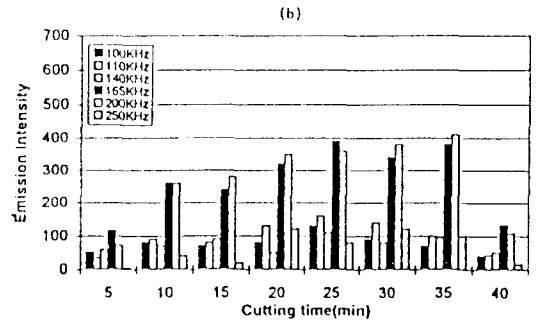
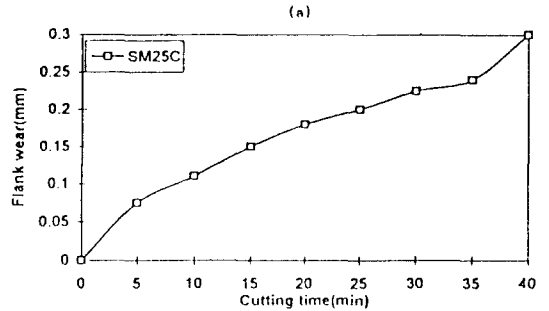


Fig. 7 (a)Flank wear (b)Emission intensity in turning  
(material : SM25C)

점진적인 공구마멸의 변화에 따라 상대적으로 AE 신호의 크기가 증가하는 평균주파수 100kHz, 110kHz, 140kHz, 165kHz, 200kHz, 250kHz 범위에서 공구마멸의 모델을 추출하였다.

본 실험에 사용된 일반강인 SM25C는 평균주파수 165kHz, 200kHz에서 측면마멸의 크기가 증가됨에 따라 탄성파의 크기가 뚜렷하게 증가되고, 측면마멸이 0.24mm 이상 되면 AE 신호의 크기는 증가한다고 생각할 수 있으나 Fig. 8을 통해 자세히 확인할 수 있듯이 크레이터마멸의 영향으로 공구 경사각이 증가하여 전단각이 커져 음향방출 크기는 이것으로 인하여 감소한다. 그리고 100kHz이하 300kHz이상 주파수는 측면마멸이 증가함에도 불구하고 무시할 정도로 방출강도의 크기가 미소하므로 측면마멸과 관계없는 주파수 영역으로 사료된다.

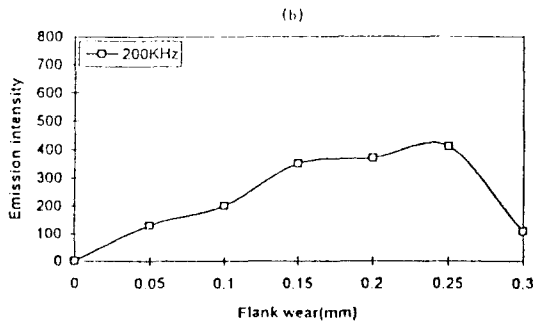
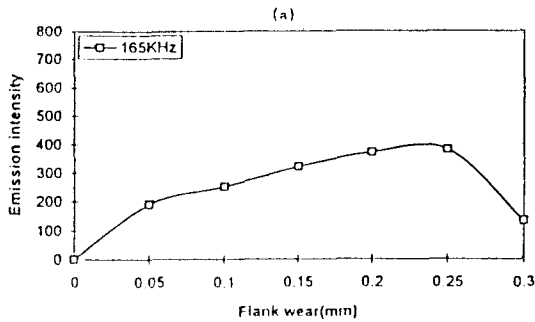


Fig. 8(a),(b) Flank wear vs. Emission intensity in turning (material : SM25C)

Fig. 9는 금속조직으로 오스테나이트제인 스테인레스강 STS304를 이용하여 측면마멸의 증가에 따른 음향방출 크기의 변화를 전체적인 평균주파수 영역으로 나타낸 것이다.

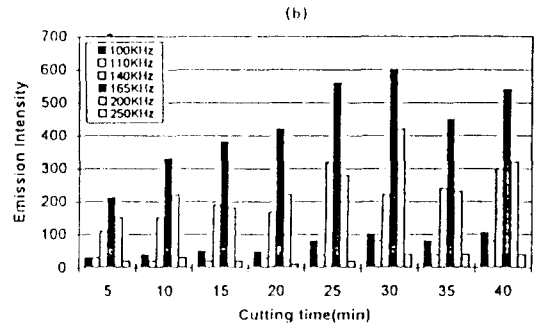
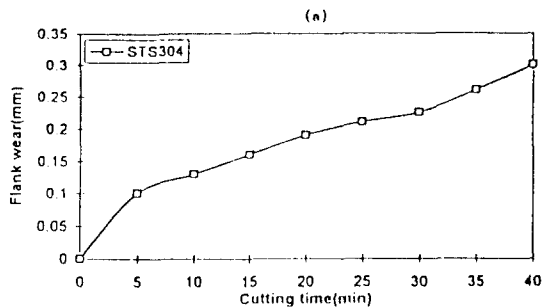
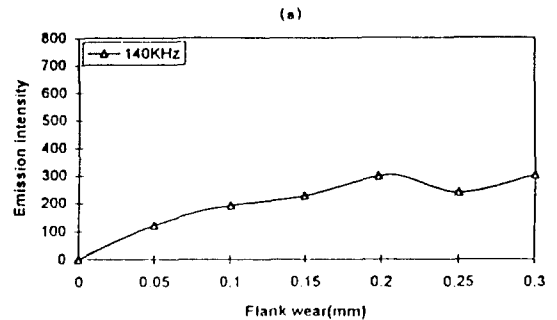


Fig. 9(a) Flank wear  
(b) Emission intensity in turning (material : SM25C)

Fig. 10은 평균주파수 140kHz, 165kHz, 200kHz에서 공구마멸 증가의 영향으로 탄성파의 크기가 뚜렷하게 큰 진폭으로 증가를 보이며, 측면마멸이 일정한 비율로 증가됨에 따라 상대적으로 급작마멸단계에서는 공구마멸에 의한 평균주파수의 값이 감소하다가 증가하는 불규칙한 현상이 발생하였다. 스테인레스강은 다른 일반강과 달라 절삭가공시 발생하는 문제 중에서 공구마멸의 증가와 동시에 심한 절입경계 이상손상, 치핑 등으로 급작마멸 단계에서 공구의 불규칙한 마멸형태가 나타나기 때문인 것으로 생각된다. 결과적으로 AE 신호 특성은 피삭재의 기계적 성질과 화학적 성분에 따라 밀접한 관계를 가지고 있으며 AE 발생에 미치는 영향 인자로서는 절삭 조건, 피삭재, 공구형상 그리고 측정장비 조건에 관련이 있다. 그리고 AE 신호 특성은 앞에서 설명한 것 이외에 다른 절삭 인자들이 내포하고 있으므로 아주 복잡한



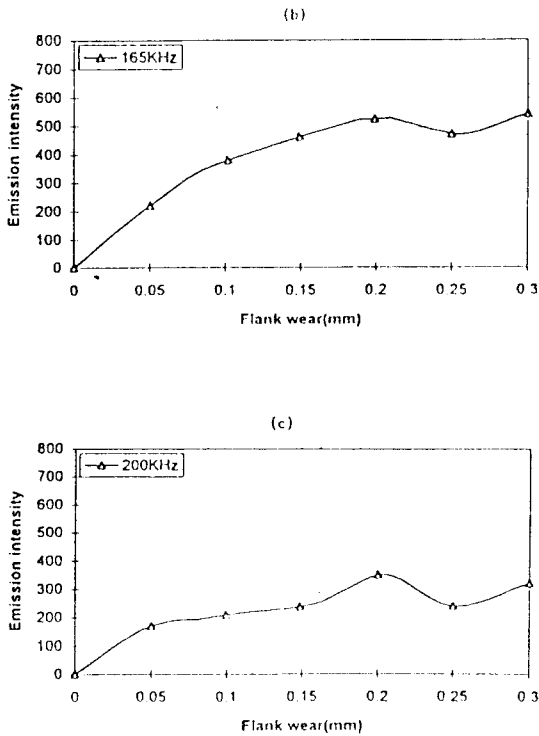


Fig. 10(a),(b),(c) Flank wear vs. Emission intensity in turning (material : STS304)

양상을 띄게 된다. 이런 복잡한 문제들로 인하여 사실 AE 측정 결과는 정량화 되기 어려운 문제가 대두되고 있지만 향후 반드시 연구되어야 과제이며 또한, 공구마멸의 인프로세스 측정 방법을 연구하기 위해서는 공구마멸에 따른 모델의 형성이 정량적으로 일치하는 변수들을 자동적으로 설정할 수 있도록 많은 연구가 필요하다.

### 5. 결 론

본 연구는 절삭저항의 3분력과 AE 신호를 이용하여 절삭과정의 공구마멸감시를 위한 자료를 얻고자 일반적으로 널리 사용하는 기계구조용 탄소강 SM25C, 난삭재료 분류할 수 있는 오스테나이트

트계 STS304를 선정하여 실험한 결과 ISO에서 규정하고 있는 공구수명인 측면마멸폭 0.3mm까지는 절삭력을 이용하여 공구교환시기를 예측하기는 곤란하다고 사료되며, AE 신호를 이용하여 분석해본 결과 일반강인 SM25C는 평균주파수가 165kHz, 200kHz일 때, 난삭재인 STS304는 평균주파수가 140kHz, 165kHz, 200kHz일 때 공구마멸진전에 따라 탄성파의 크기가 뚜렷하게 나타나 AE 신호를 이용하여 절삭과정의 공구마멸감시를 인프로세스 상태에서 관측할 수 있으므로 CNC 동작기계의 적응제어 시스템에 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

### 참 고 문 헌

1. M.Lan and Y.Naerheim, "Application of Acoustic Emission Monitoring in Machining", Proceedings of the 13th North American Manufacturing Research Conference, University of California, Berkeley, pp.310-313, 1985.
2. Iwata and Moriwaki, "Application of Acoustic Emission to In-Process Sensing of Tool Wear", Annals of CIRP, Vol.26, No.1, pp.21-26, 1977.
3. 황홍연, 이병찬, 김광준, "밀링가공시 발생하는 공구마멸과 AE신호에 관한 연구", 대한기계학 회 논문집, 제12권, 제5호, pp.1035-1042, 1988.
4. S.Rangwals, D.A.Dornfeld, "Sensor Integration Using Neural Networks for Intelligent Tool condition Monitoring", ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.112, August, pp.219-228, 1990.
5. R.I. Kegg, "On-line machine and process diagnostics", Ann.CIRP 32, pp.469-473, 1984.
6. J.B.Chung, Elijah Kannatey-Asibu, "Analysis of Acoustic Emission from Metal Cutting", CIRP Annals, pp.261-268, 1992.