

# Acoustic Emission을 이용한 工具破損 및 Chipping의 探知에 關한 研究

A Study on Detection of Tool Fracture and Chipping using  
Acoustic Emission

康 明 順\*, 韓 應 教\*, 金 祺 中\*, 崔 聖 周\*\*  
M.S. Kang, E. K. Han, K. C. Kim, S. J. Choi

## ABSTRACT

This study was investigated the feasibility of AE application on in-process detection of tool fracture and chipping.

Carbon steel SM45C workpiece with longitudinal slots was turned interruptedly on a lathe. AE RMS signal at tool fracture was observed and also the tangential force and the feed force were measured to compare with AE RMS signal. The sudden high level AE signal was observed at the time of tool fracture, the levels of tangential force and the feed force at the time of fracture decrease considerably.

In chipping, high level AE signal was observed but there were no changes of cutting force. Peak AE RMS squared is proportional to the area of tool fracture and resultant force.

Fracture model of tool fracture is proposed as

$$V_p = C_1 E_1 F (\Delta A)^{0.5}$$

and peak AE RMS shows strong correlation with the fracture parameter  $F (\Delta A)^{0.5}$ .

## 1. 序 論

機械工場의 FMS (Flexible Manufacturing System) 化 또는 FA (Factory Automation) System의 導入으로 여러臺의 NC 工作機械를 有機的으로 結合함으로써 融通性있는 多品種 小量生産 System을 開發하는 것이 매우 바람

직하다. 그런데 1臺의 工作機械에서 생긴 이상상태도 System全體에 미치는 影響이 매우 크므로 工具損傷 狀態의 檢出을 無人化하고 거기에 따른 빠른 조치가 필요하므로 이러한 상황을 반영하여 工具의 磨滅 및 破損을 檢出하려고 하는 研究가 많이 시도되고 있다. 또한 工作物의 損傷을 막기 위하여 예기치 못한 工

\* 한양대학교 정밀기계공학과

\*\* 한양대학교 대학원

具破損에 빠른 반응을 하는 신뢰성이 있는 감지기술이 필요하다. 가장 바람직한 것은 磨減進展의 感知와 工具에 작용하는 應力の 갑작스러운 변화에 기인하여 예기치 못한 破損이 일어날 가능성이 있으므로 그 損傷을 막기 위하여는 빠른 응답을 필요로 하며, 따라서 반응속도와 신뢰성은 가장 중요한 parameter이다. 工具損傷의 inprocess 檢出의 수법으로서 TV Camera 등에 의하여 工具面을 관찰하는 직접적인 방법과 工具의 磨減, 缺損과 함께 생기는 切削力, 切削溫度, 振動, 主電動機電流, 接觸電氣抵抗, 消費電力 등의 변화에 따라 檢出하는 간접적인 방법이 있다. 일반적으로 직접적인 방법은 精密度가 높지만 실용성에 결함이 있고, 간접적인 방법은 測定되는 각 parameter 들이 切削條件 등에 의존하므로 신속성 등의 관점에서 볼 때 충분하다고 하기에는 곤란하다. 그 중 신속성이 우수한 工具破損의 감지기술은 ①AE信號, ②切削力에 의한 工具破損 感知 등으로 집약할 수 있다. AE信號解析의 장점은 AE信號가 동상의 音 또는 振動과 비교하여 그 周波數 領域이 수십 kHz에서 수 MHz까지의 큰 周波數領域을 가지므로 가공할 때 발생하는 騒音과 振動 등에 큰 영향을 받지않고 inprocess 탐지를 할 수 있다는 것이다. 또 AE는 기본적으로 材料의 塑性變形과 破壞에 의하여 발생하는 것이고, 工具破損과 같이 비교적 큰 脆性破壞에 의하여 발생하는 돌발형 AE는 工具破損의 순간에만 檢出되고 工具破損이 생긴 후의 加工 process의 변화에 대하여는 檢出되지 않는다는 점에 유의할 필요가 있다. AE特性을 이용한 지금까지의 연구를 살펴보면 Dornfeld<sup>(1)</sup>는 부인화된 제작작업을 위한 process 감시법으로 AE信號를 이용하려는 시도로써 工具破損, 工具磨減, 칩 형성에 따른 신호의 해석에 대하여 연구를 발표하였으며, Iwata<sup>(2)</sup>는 磨減을 주로 하는 工具損傷의 검출에 AE信號를 사용할 수 있다는 가능성을 보고하였고, Kakino<sup>(3)</sup>는 AE의 周波數 解析과 더불어 工具破損의 크기와 AE信號의 크기와의 관계, 또한 AE tra-

nsducer의 적합한 부착위치에 대하여 조사하였고, Moriwaki<sup>(4)</sup>는 超硬合金 工具와 세라믹 工具를 사용하여 靜的破損實驗과 動的破損實驗을 수행하여 공구의 破斷面積, 負荷速度, 工具, 材種 사이의 관계에 대하여 검토하였다. 본 研究의 目的은 切削作業中 切削工具의 chipping 또는 破損의 감지에 대한 AE信號의 이용 가능성을 평가하려는 데 있으며 fracture model을 제안하여 실험을 통해서 그 妥當性을 입증하려는 데 있다.

## 2. 理論의 考察

### 2-1 工具破損과 chipping

機械 加工의 과정에서는 工具와 工作物의 상대적인 운동이 중요한 역할을 차지하고 있으므로 만일 工具에 損傷이 발생하면 加工過程에 큰 영향을 미치게 되므로 工具損傷의 豫測이 매우 중요하다. 工具의 破損은 工具날 끝이 부서져 떨어져 나가는 것이라고 定義하며 결과적으로 이 때 工具는 切削날의 상당한 부분을 잃게 되며, 工具의 chipping은 工具날 끝의 微少破壞라 定義하고 따라서 이 때 全體 工具의 幾何學의 形態는 현저히 변하지는 않는다. Tlusty<sup>(5)</sup>는 炭素 工具의 破損은 工具 윗면에 국부적인 最大引張應力의 발생으로 나타나는 脆性破壞 現狀이며 반면 chipping은 날 끝에서 높은 剪斷應力에 의한 延性破損이라고 결론을 내렸다.

切削工具 날 끝이 충분히 높은 온도에 도달하게 되면 공구의 기계적 강도 또는 경도가 저하하게 되므로 공구의 강도를 약화시킨다. 밀링작업과 같은 단속 절삭 중에 공구에 機械的 또는 熱的應力의 반복은 工具에 균열을 만들어 날 끝을 약화시키고 마침내는 破損을 일으킨다. 工具의 chipping은 工具面의 built up edge 또는 工作物의 반복되는 점착을 받아 날 끝의 떨어짐에 의해서 기인된다. 일반적으로 工具의 破損은 돌발적으로 발생하므로 예측하기가 어렵다.

2-2 AE와 工具破損

AE는 材料 內部에 저장되어 있는 變形에너지의 급격한 방출의 결과로 해방되는 彈性에너지라고 정의한다. 金屬 切削中에 발생하는 AE의 발생원과 切削 parameter들 사이의 관계가 Asibu<sup>(6)</sup>에 의하여 연구되었다. 2次元 절삭에서 工具의 접촉부 끝 부분이 工作物에 대하여 압력을 가하므로 工具 앞 部分의 材料에 剪斷이 일어나 칩으로 형성되는 塑性變形過程과 이 칩이 工具 윗면을 따라 미끄러짐이 일어나는 過程과 母材에서 칩이 분리됨으로써 새로 형성된 工作物 表面에서의 마찰 過程이 주목된다. 이 過程을 Fig. 1에 나타내었으며 일반적인 AE발생원의 주된 영역을 다음과 같이 구분한다.

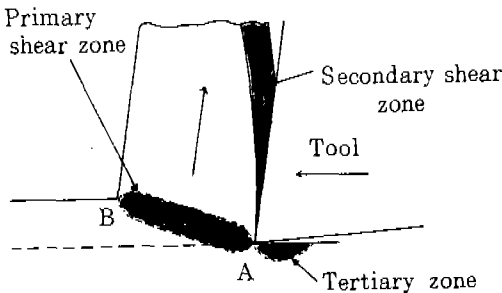


Fig. 1. Deformation zones affecting acoustic emission in the metal cutting process

- (a) 제 1 變形領域(剪斷領域)
- (b) 제 2 變形領域(工具-칩 接觸面)
- (c) 제 3 變形領域(工具앞면-工作物 接觸面)

정상적인 切削 作業中 발생하는 AE信號는 連續形信號라고 볼 수 있으며 工具가 破損될 때에는 돌발형의 AE가 발생한다. Fujimoto<sup>(7)</sup>는 金屬의 破壞中에 발생하는 AE에 대한 광범위한 연구를 하여 破壞에 관계된 AE는 轉位の 移動과 集積 등 다양한 微小過程을 포함한다는 결론을 내렸다. 따라서 切削工具로 광범위하게 쓰이는 W-C-Co 合金工具와 같이 높은 응력을 받는 낮은 延性材料의 破壞靱性은 應力擴大係數 또는 彈性變形에너지 방출율과 같은 線型破壞力學(LEFM)變數에 의하

여 표시될 수 있다. 이런 형태의 재료에서 느린 균열 진전에 대하여 다음 세 과정이 AE와 밀접한 관계를 가진다.

- (a) 소성영역의 성장
- (b) 균열선단 근처의 process 영역에서의 미소균열
- (c) 생성된 균열의 확장

절삭과정에서 발생하는 AE에너지에 비하여 공구파괴 과정에서의 미소균열과 소성변형에 밀접한 낮은 수준의 AE는 일반적으로 측정하기 어렵다. 따라서 앞으로 공구파괴에 관련되는 AE에너지 해석은 앞에서 이미 언급한 높은 온도와 충격 등의 원인에 기인하여 균열의 불안정한 진전의 결과로 마침내 공구파손이 일어난다고 가정한다.

선형파괴역학에서 응력  $\sigma$ 를 받고 균열길이  $L$ 을 포함하는 재료의 彈性에너지는 다음과 같다.

$$U = \frac{\pi \sigma^2 L^2}{4E} + \text{constant} \dots\dots\dots (1)$$

균열길이가  $\Delta L$ 만큼 늘어나면 대응하는 彈性에너지는

$$\Delta U = \frac{\pi \sigma^2 L \Delta L}{2E} \dots\dots\dots (2)$$

應力波의 발생은 균열성장을 동반하고 방출된 에너지의 일부는 AE信號로 탐지된다.信號의 RMS 값(信號의 에너지率)은 AE의 測定 가능한 特性으로서 사용되어 왔으며 AE발생원의 에너지率에 관계한다. insert에서 균열진전의 速度가 常數라고 가정하면 破壞에 동반하는 AE에너지는 다음과 같이 표시된다.

$$(\text{RMS})^2 \propto \frac{\Delta U}{\Delta t} \propto \frac{\Delta U}{\Delta L} = G = \frac{\pi \sigma^2 L}{2E} = \frac{K^2}{E} \quad (3)$$

식(3)은 균열길이와 가해진 應力の 函數이며 균열 전파 동안의 AE에너지로서 정의되지만 切削中 工具破壞에너지와 발생한 AE에 대한 명확한 관계는 工具形狀과 工具에 분포되는 應力분포의 복잡성으로 인하여 규명하기는 어렵다. 그러나 식(3)의 파손에 의하여 발생하는 AE에너지는 균열성장의 크기와 절삭력과 절삭 parameter들에 직접 관계되는 공구의 응

Table 1 Chemical Composition and Mechanical Properties of Works ( SM 45 C )

| works   | Chemical composition (Wt. %) |      |      |       |       | Mechanical properties                 |  |                |
|---------|------------------------------|------|------|-------|-------|---------------------------------------|--|----------------|
|         | C                            | Mn   | Si   | P     | S     | Yield Point<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | Tensile Strength<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | Elongation (%) |
| SM 45 C | 0.46                         | 0.75 | 0.25 | 0.019 | 0.035 | 32.75                                 | 65.71                                      | 18             |

력분포에 의존함을 보여주며 이때 균열성장의 크기는 파손면적에 의하여 결정되며 공구의 응력분포는 주절삭력과 이송분력의 합력으로 결정된다. 切削作業에서 가장 중요하게 작용되는 두 응력은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 垂直應력과 剪斷應力이며 工具에 作用하는 응력은 균일하게 분포하지 않으므로 工具破壞에 대한 AE에너지의 평가는 파괴시험에서의 경우처럼 선형적은 아니다.

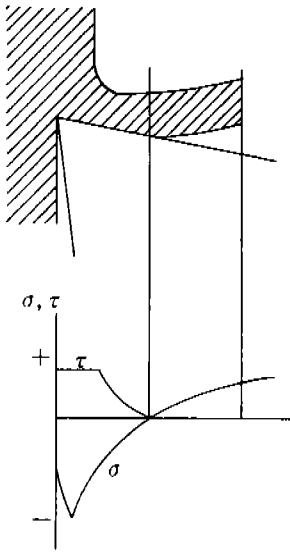


Fig. 2. Normal stress and Shear stress distribution on tool face

2-3 Fracture Model

切削時의 工具破壞과 chipping에 대한 AE信號의 민감성을 평가하기 위해 공구파손시의 AE RMS 값이 主切削력과 移送分力の 合成力, 工具의 破損面積에 비례한다고 가정한다.

이 관계를 기초로 하여 공구파손시 측정되는 AE RMS의 최대값을  $V_p$ 라 하고 절삭시험에서 공구 동력계를 통해서 얻어지는 합력  $F$ 와 공구의 파손면적  $\Delta A$ 로 다음과 같은 관계를 제안한다.

$$V_p = C_1 E_1 F(\Delta A)^{0.5} \dots\dots\dots (4)$$

여기서

$C_1$ : 比例常數

$E_1$ : 工具形狀에 관계되는 常數

$F$ : 工具破壞시의 主切削력과 移送分力の 合力

$\Delta A$ : 破損面積

3. 實驗裝置 및 方法

3-1 被削材와 工具

본 실험에서 사용한 被削材는 SM 45C 炭素鋼이며 그 화학적 성질과 기계적 성질은 Table 1.에 나타내었으며 斷續切削을 하기 위하여 Fig. 3과 같이 幅 11mm의 溝(Groove)을 被削材의 양쪽에 2개소 가공하였다. 工具는 4각형 insert type의 SPGN 120304를 사용하였고 insert 材種은 P 10과 P 20 (Coated)을 택하였으며 그 중요 성분을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Composition of Hardmetal Constituents

| Cutting tool | Constituents (%) |      |      |      |      |
|--------------|------------------|------|------|------|------|
|              | W                | Co   | Ti   | Ta   | C    |
| P10          | 50-80            | 4-9  | 8-20 | 0-20 | 7-10 |
| P20          | 60-83            | 5-10 | 5-15 | 0-15 | 6-9  |

破損의 조기 발생을 유도하기 위하여 Fig. 4와 같이 insert에 slot을 내었다.

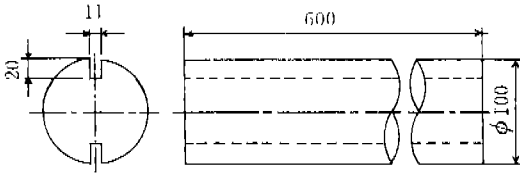


Fig. 3. Specimen for interrupted cutting

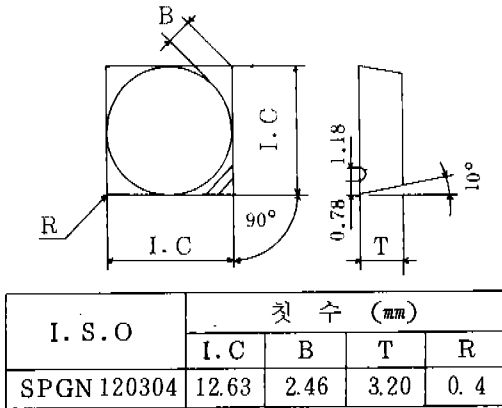


Fig. 4. Dimensions of slotted insert

3-2 實驗方法

본 실험에 실험장치의 개략도는 Fig.5에 나타내었다. 피삭재를 切削速度 32.2 m/min ~ 93.3 m/min 移送速度 0.36 mm/rev ~ 0.72 mm/rev 절삭깊이 1mm의 切削條件으로 斷續切削하여 공구에 破損과 chipping을 발생케 하였다. 이와 동시에 발생하는 AE信號를 측정하기 위해 AE transducer를 工具 옆면에 부착하였고 transducer 보호 box를 만들어 칩이 transducer에 직접 부딪히는 것을 방지하였으며, 수시로 공구를 冷却水로 冷却시켜서 transducer에 대한 熱의 영향을 배제하였다. transducer에서 검출된 AE信號는 pre-amp에서 20 dB로 증폭된 후 discriminator로 보내진다. 이 discriminator는 변별기능이외에 main-amp.와 band pass filter의 역할을 겸비하여 이信號를 20 dB 더 증폭하고

100kHz ~ 1MHz의 band pass filtering 하여 외부로 부터의 振動, 騒音 등에 동반하는 잡음을 배제하였다. 이 AE信號는 RMS Voltmeter에 의하여 RMS 값으로 변환되어 multi pen recorder로 보내진다. 또 절삭력信號는 공구동력계에서 dynamic Strain amp.로 보내지며 이 때 절삭력의 크기는 Strain 양으로 얻어지며 이信號도 역시 multi pen recorder로 보내져서 기록된다. 工具의 破損面積을 측정하기 위하여 工具顯微鏡을 사용하였으며 대부분의 破面은 사다리꼴 형태인 것이 관찰되므로 面積계산은 그 破面을 平面으로 간주하여 윗변, 아랫변, 높이를 배율(×3)으로 측정하여 구하였다.

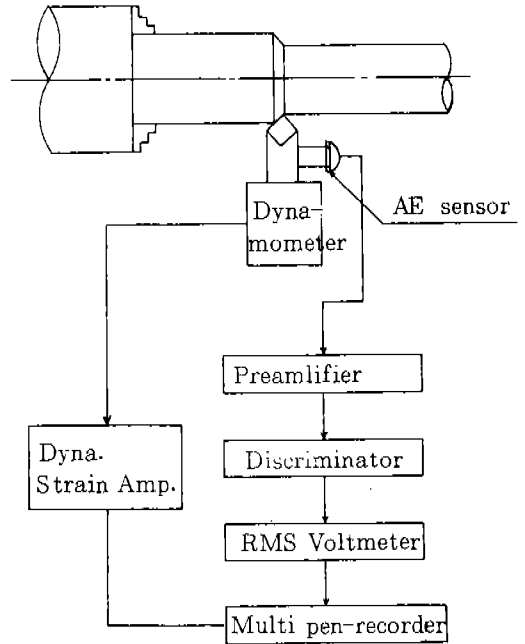


Fig. 5. The schematic diagram of Experimental apparatus

4. 實驗結果 및 考察

AE信號를 解析하는 데는 통계적인 방법도 많이 사용되지만 본 연구에서 RMS信號를 사용한 이유는 ①AE信號의 RMS 값이 그信號

의 에너지율에 직접적으로 관계되며, ② 다른信號보다 工具破損에 민감하고, ③ 工具破損을 결정하기 위한 threshold level 이 진전하는 공구마멸의 효과를 보정할 수 있도록 쉽게 조정되며, ④ raw AE信號로는 파손으로 방출되는 AE信號와 chip에 의한 noise와의 구분이 어렵기 때문이다.

破損의 순간에 AE RMS信號는 큰 振幅의 peak가 얻어지며 切削力信號와 비교하여 더 좋은 민감성을 가진다.

실제 반응시간에 있어서는 raw AE信號가 짧지만( $\sim \mu s$ ) 신뢰성에 있어서 工具破損의 탐지에는 AE RMS信號가 훨씬 효과적이다. 工具破損시 돌발형 AE와 그때의 切削力은 Fig. 6과 같이 얻어진다. chipping이 발생할 때는 insert의 부스러짐에 따라 AE RMS信號는 불규칙해지고 점차 증가되는 것을 볼 수 있다.

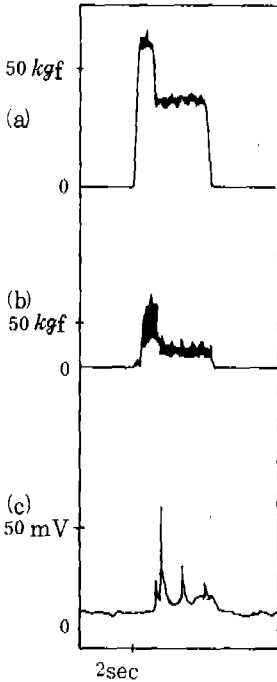


Fig. 6. The responses of feed force, tangential force, and AE RMS signal due to tool fracture  
(a) Tangential force  
(b) Feed force  
(c) AE RMS

이것은 부스러진 공구날 끝의 거친 형상으로 인해 切削할 때 발생하는 AE때문이다. Fig. 7에서 보는바와 같이 절삭력 신호로는 chipping이 발생하는 것을 탐지하기 어려우나 AE RMS信號를 보면 chipping이 발생하고 있음을 확실히 알 수 있고 被削材의 表面 변화로 확인할 때 chipping에 의한 공구의 表面 변화는 3번 일어났으며 RMS信號의 돌발형 peak도 3개가 탐지되었다.

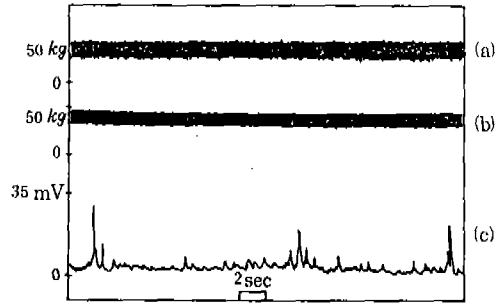


Fig. 7. The responses of feed force, tangential force, and RMS AE signal due to tool chipping  
(a) Tangential force  
(b) Feed force  
(c) AE RMS

따라서 工具破損과 chipping이 발생하였을 때 AE信號가 민감하다는 것이 확인되었으며 특히 chipping의 탐지에는 切削力信號보다 훨씬 신뢰성이 높은 것으로 나타났다. 실험을 통해서 얻어진 AE RMS 최대값, 주절삭력, 이송분력, 공구파손면적 등의 data를 Table 3에 나타내었다.

실험에 공구재종 P10과 P20 (Coated)를 사용하였는데 Fig. 8에서 보는 바와같이 log-log 좌표로 표시할 때 AE신호의 최대값은 파손 면적에 의존하는 것을 알 수 있으며 이 관계는 단순한 파괴시험에 의한 결과와 거의 같고 따라서 공구 결손의 크기는 검출된 AE신호 level로부터 추정할 수가 있다.

Fig. 9와 Fig. 10에서는 AE RMS의 최대값(peak)의 제곱은 工具의 破損面積에 거의 직선적으로 비례함을 알 수 있으며 본 실험법

Table 3 Test results at tool fracture

| 구 분<br>공구재종     | Tangential force<br>(kgf) | Feed force<br>(kgf) | Resultant force<br>(kgf) | Peak AE RMS<br>(mv) | Peak AE RMS Squared<br>( $\times 10^3$ mv) | Cross sectional area of fracture<br>( $mm^2$ ) | Fracture parameter<br>$F(\Delta A)^{0.5}$ |
|-----------------|---------------------------|---------------------|--------------------------|---------------------|--|--|---|
| P20<br>(coated) | 145.7                     | 52.7                | 154.9                    | 104.16              | 10.85                                      | 8.08   | 439.92                                    |
|                 | 163.09                    | 112.8               | 198.3                    | 129.15              | 16.68                                      | 9.15   | 598.87                                    |
|                 | 125.8                     | 30.3                | 129.4                    | 95.81               | 9.18                                       | 6.11   | 319.61                                    |
|                 | 105.8                     | 28.2                | 109.5                    | 77.78               | 6.05                                       | 5.90   | 266.1                                     |
|                 | 122.2                     | 60.2                | 136.2                    | 91.65               | 8.40                                       | 5.63   | 322.79                                    |
|                 | 48.0                      | 36.7                | 60.4                     | 53.57               | 2.87                                       | 4.85   | 132.88                                    |
|                 | 150.4                     | 56.5                | 160.6                    | 92.79               | 8.61                                       | 7.06   | 427.2                                     |
| P10             | 44.2                      | 26.4                | 51.5                     | 58.99               | 3.48                                       | 3.48   | 96.31                                     |
|                 | 54.1                      | 30.1                | 61.9                     | 40.5                | 1.64                                       | 3.12   | 109.56                                    |
|                 | 73.8                      | 45.5                | 86.7                     | 61.32               | 3.76                                       | 5.51   | 203.75                                    |
|                 | 98.7                      | 48.9                | 110.2                    | 89.67               | 8.04                                       | 7.04   | 292.03                                    |
|                 | 162.16                    | 49.7                | 169.6                    | 96.23               | 9.26                                       | 10.24  | 514.88                                    |
|                 | 130.8                     | 74.4                | 150.5                    | 100.6               | 10.12                                      | 10.26  | 481.6                                     |
|                 | 76.2                      | 26.4                | 80.6                     | 72.18               | 5.21                                       | 7.87   | 226.49                                    |

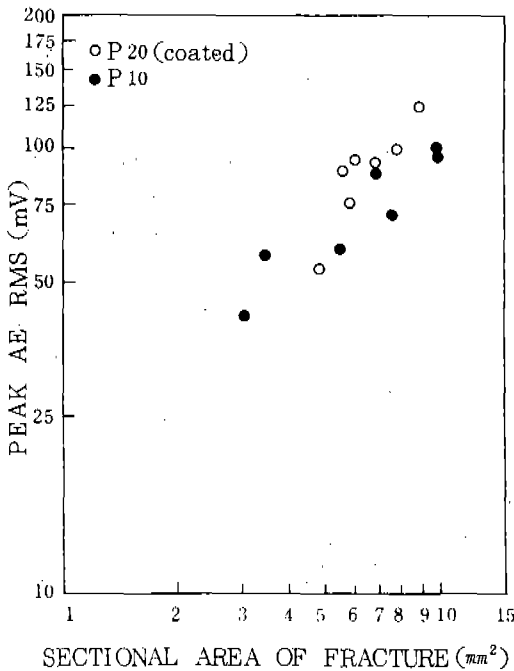


Fig. 8. Peak AE RMS versus sectional area of tool fracture

위에서는 P10 과 P20 (Coated) 사이에 현저한 차이가 나타난다. 동일 파단면적에 대하여 인성이 작고 더욱 취성적인 P10 쪽이 AE RMS 최대값이 작고 파단 면적의 변화에 보다 영향이 큰 것을 알 수 있으며 일반적인 경향으로는 인성이 작은 쪽이 동일 파단면적에 대하여 AE RMS 최대값이 작게 나타난다. 이것은 파손에 동반하여 해방되는 에너지가 작게 되는 것에 기인한다고 생각된다.

工具 파손시의 주절삭력과 이송분력의 합력에 대한 AE RMS 최대값과의 관계는 Fig.11에 나타내었다. 이미 예측하였듯이 공구 파손시 높은 파괴 에너지를 방출하고 있으며 큰 AE 에너지 방출이 관찰된다. 합력과 AE RMS 최대값은 직선적인 비례관계가 성립됨을 알 수 있다.

제안된 fracture model 에서 공구파손시의 AE RMS 최대값에 관계되는 주된 지표로  $F(\Delta A)^{0.5}$  를 fracture parameter 로 정의하였으며 Fig.12에서 보는 바와 같이 양자간에 밀

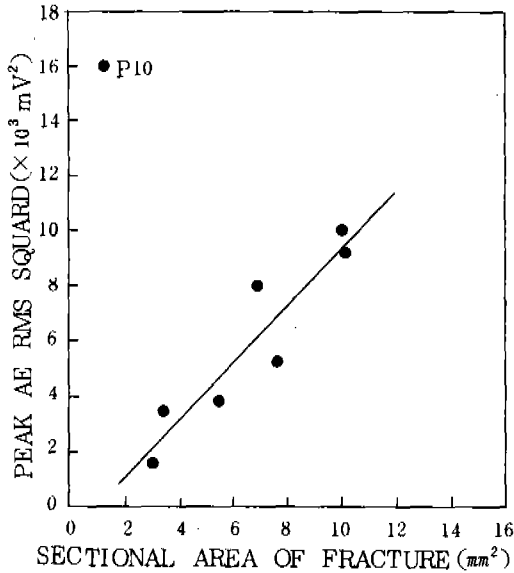


Fig. 9. Peak AE RMS squared of AE signal versus sectional area of tool fracture

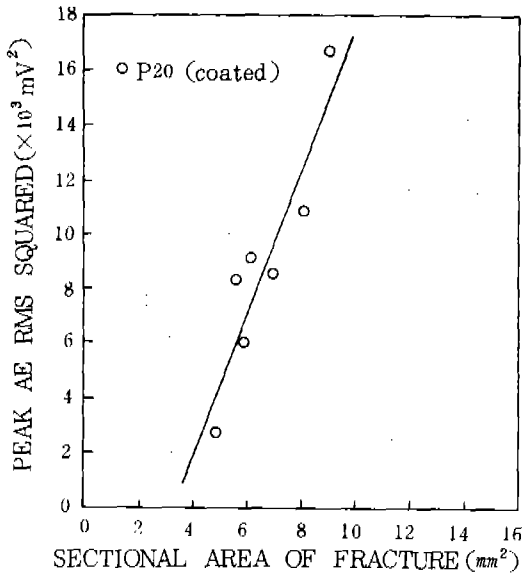


Fig. 10. Peak AE RMS squared of AE signal versus sectional area of tool fracture

접한 상관관계가 있는 것이 확인된다. 따라서 이 parameter 와 AE RMS 최대값이 함수관계로 결정되면 AE RMS level 을 알 때 공구 파손의 크기 등을 추정 가능케 한다.

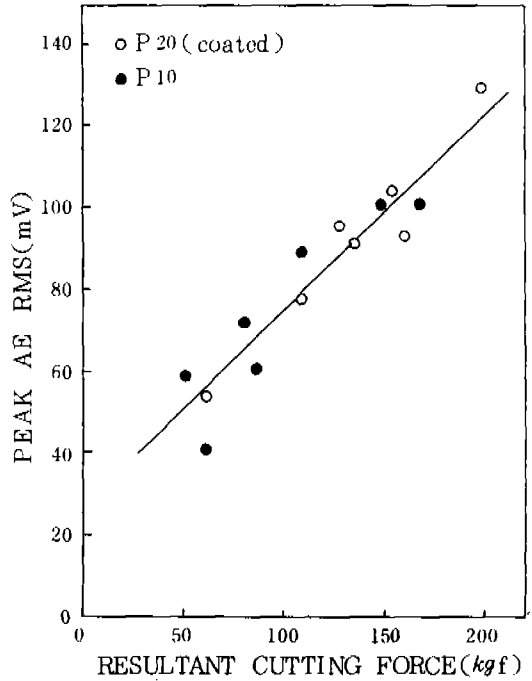


Fig. 11. Peak AE RMS as a function of the resultant cutting force at tool fracture

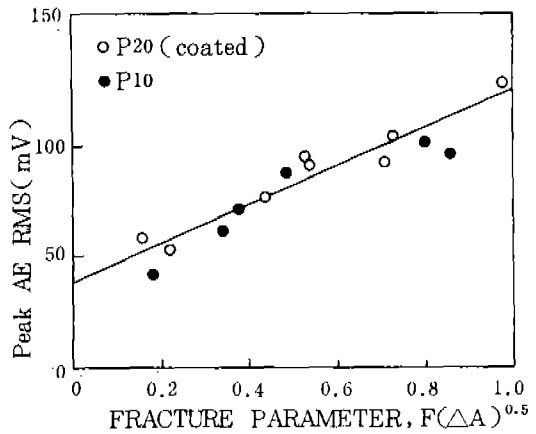


Fig. 12. Peak AE RMS versus the derived fracture parameter

실험결과 AE信號는 工具損傷에 민감하며 AE 발생에 대한 機構는 破壞過程 自體에 큰 관련이 있으므로 工具材種 등의 비교와 같은 기초적인 연구와 工具破損 또는 chipping 의 감시에 유용하게 적용될 수 있다고 판단된다.



## 5. 結 論

超硬合金工具로 SM 45 C 炭素鋼을 旋盤에서 斷續切削하여 工具破損 또는 chipping 발생시의 切削力信號와 AE RMS 信號를 측정하여 그 信號들의 민감성이 評價되었으며 工具損傷의 原因에 대한 AE 信號의 이용 가능성을 조사하였다. 이 연구로 부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 工具破損時 AE RMS 최대값의 제곱은 破損된 面積에 비례한다.
2. 工具破損時 높은 level 의 돌발형 AE 信號가 관찰되며 切削力信號는 level 의 강하가 나타난다.
3. chipping 발생시에도 높은 level 의 AE 信號가 나타나나 切削力信號는 변화가 거의 없다.
4. 工具破損時 AE RMS 최대값은 主切削力과 移送分力の 합력에 比例한다.
5. 工具破損의 Fracture Model 을 다음과 같이 제안하였으며

$$V_p = C_1 E_1 F(\Delta A)^{0.5}$$

工具破損時 AE RMS 최대값은 fracture parameter  $F(\Delta A)^{0.5}$  와 밀접한 상관관계를 가진다는 것을 확인하였다.

## REFERENCES

1. Dornfeld, D.A., "The Role of Acoustic Emission in Manufacturing Process Monitoring", 13th NAMRC 1985, SME pp. 69-74.
2. K. Iwata, T. Moriwaki, "Detection of Cutting Tool Damage by Acoustic Emission Signal", 日本精密機械 46卷7號 pp. 875 ~ 880.
3. Y. Kakino, M. Kobayashi, "In Process Detection of Tool Breakage by Making Use of Acoustic Emission", 日本精密機械 46卷3號 pp. 66 ~ 71.
4. T. Moriwaki, "Detection for Cutting Tool Fracture by Acoustic Emission Measurements", Annals of the CIRP, Vol. 29, 1980, pp. 35-40.
5. J. Tlustý and Z. Masood, "Chipping and Breakage of Carbide Tools", ASME J. of Engineering for Industry, Vol. 100, No. 4, 1978, pp. 403-412.
6. E. Kannatey-Asibu and D.A. Dornfeld, "Quantitative Relationships for Acoustic Emission and Metal Working-Survey of Potential and Examples of Applications", Preceedings 8th North American Manufacturing Research Conference, Univ. of Missouri, Rolla, Mo., May 1980, pp. 207-213.
7. K. Sano and K. Fujimoto, "Microscopic Aspects of Fracture and Acoustic Emission in Metals", Fundamental of Acoustic Emission, K. One, ed., UCLA, Los Angeles, Calif., 1979, pp. 131-164.