

音響放出을 이용한 가공중의 엔드밀 파손
검출에 관한 연구

尹鍾學*, 康明順**

**A Study on the In-process Detection of Fracture of Endmill by
Acoustic Emission Measurement.**

Jong-Hak Yoon,*, Myung-Soon Kang**

— Abstract —

Automatic monitoring of the cutting conditions is one of the most important technologies in machining.

In this study, the feasibility in applying acoustic emission(AE) signals for the in-process detection of endmill wear and fracture has been investigated by performing experimental test on the NC vertical milling machine with SM45C for specimen.

As the results of detecting and analyzing AE signals on various cutting conditions, the followings have confirmed.

(1) The RMS value of acoustic emission is related sensitively to the cutting velocity, but is not affected largely by feed rate.

(2) The burst type AE signals of high level have been observed when removing chips disorderly and discontinuously.

(3) When the RMS value grows up rapidly due to the increase of wear the endmill are generally broken or fractured, but when the endmills fracture at the conditions of smooth chip-flow or built-up-edge(BUE) occurred frequently, the rapid change of the RMS are not found.

And it is expected that this technique will be quite useful for in-process sensing of tool wear and fracture.

* 서울産業大學 機械工學科

** 漢陽大學校 精密機械工學科

주요기술용어

Key Words : acoustic emission (AE : 음향방출), automatic monitoring (자동감시), in-process detection (가공중 검출), RMS value (실효치), built-up-edge (구성인선), NC vertical milling machine (수치제어 밀링머신)

NOMENCLATURE

ΔA_s : 전단면적 mm^2	V : 절삭속도 m/min
ΔA_t : 칩의 접촉단면 mm^2	V_0 : 체적 mm^3
$\Delta b_w, \Delta b_c$: 밑날 및 옆날의 절삭폭 mm	W_b, W_s, W_m, W_0 : 밑날, 옆날, 마진, 마찰 등의 일률
C : 상수	δ_{ij} : 응력 kg/mm^2
ϵ_{ij} : 변형률	z_s : 피삭재의 전단응력 kg/mm^2
K_1, K_2 : 비례상수	V_s : 전단속도 m/min
ℓ_c : 칩과 공구의 이론적 접촉길이 mm	V_c : 칩 배출속도 m/min
ℓ_f : 공작물과 공구의 접촉길이 mm	W : 절삭일률
n, n : 미소요소의 수	

1. 서론

최근 생산성 향상이나 경영 합리화를 위한 공장 자동화가 급속도로 확산되어 가고 있다. 그 일환으로 기계공장에서는 무인 자동화의 실현을 목표로 여러 가지 기초적 기술의 개발이 이루어지고 있는데, 특히 공구파손의 가공중 검출기술은 불량품 발생에 의한 경제적 손실이나 안전성 등의 관점에서 볼 때 그 개발이 크게 요구되고 있다. 즉, 공구의 파손이나 마멸에 대한 수명예지로 적절한 시기에 공구를 교환해 줌으로써 생산성 향상을 도모하기 위함이다.

공구의 마멸상태를 검출하는 방법에는 공구의 기하학적 형상의 변화를 검출하는 직접적인 방법과 절삭에 따른 현상을 검출하는 간접적인 방법으로 대별할 수 있는데^{(1), (2)}, 전자는 광학적 방법이나 접촉 센서를 이용하여 공구의 마멸길이를 직접 검출하는 방법으로 가공중 검출은 곤란하다. 그러나 후자는 절삭면의 상태, 절삭저항, 주축 전동기와 기계진동, 음향방출(acoustic emission : AE)등을 감시하며 그 변화를 포착하는 방법으로 간접 검출이 가능하

지만 반복적인 작업에서의 신뢰성 등이 아직도 문제로써 제기되고 있다. 그러나 Moriwaki⁽⁴⁾ 등이 이미 선삭이나, 드릴, 연삭작업에서도 AE신호의 해석으로 공구의 교환시기를 결정해 줄 수 있다고 하였는데 이들과는 달리 단속 절삭을 하는 밀링에서의 적용은 아직 분명치 않다. 따라서 본 실험에서는 밀링가공에서도 소공구인 엔드밀을 사용할 때 공구마멸 및 파손의 자동 감지 기술로서 AE신호의 특성을 조사하고자 한다.

2. 이론적 고찰

작은 지름의 엔드밀 절삭은 주로 두개의 비틀림각을 갖고 있는 옆날에 의해서 이루어 진다.

엔드밀은 비록 일정한 속도로 회전운동을 하지만 밑날의 절삭속도는 날의 위치에 따라 변화하기 때문에 날끝에서 중심으로 갈수록 최적의 절삭속도를 벗어난다. 따라서 엔드밀로 절삭을 할 때의 칩은 절삭날의 각점에서 유출방향과 전단각이 각각 다른 상태로 생성되고, 그 과정 또한 복잡한 3차원의 소성변형

을 갖게 된다. 그러나 일반적인 엔드밀이나 드릴 등은 그 구조의 기하학적 복잡성에도 불구하고, 기본적인 절삭과정은 선삭공구와 일반적으로 유사하게 해석되고 있다. ⁽¹¹⁾

엔드밀의 절삭작용은 날끝의 모서리에서 가장 큰 압력을 받으며 진행되지만, 전단은 날의 전길에서 생긴다. 또한 생성되는 칩은 홈을 따라 배출되면서 변형되고 엔드밀은 경사면이나 랜드에서 마멸을 일으키는데 이때 AE의 발생원은 다음과 같이 분류하고 있다.

1. 칩 형성의 과정에서
 - 제1변형영역 : 전단면에서의 전단변형
 - 제2변형영역 : 경사면 및 홈에서 생기는 칩의 변형과 파괴
 - 제3변형영역 : 공구의 여유면과 공작물 사이의 미끄럼 마찰
2. 칩이 공작물을 떠나 서로 엉키거나 피삭재, 또는 공구등과 부딪칠 때의 충돌음
3. 그외 베어링, 기어, 모터등의 기계적, 전기적인 소음

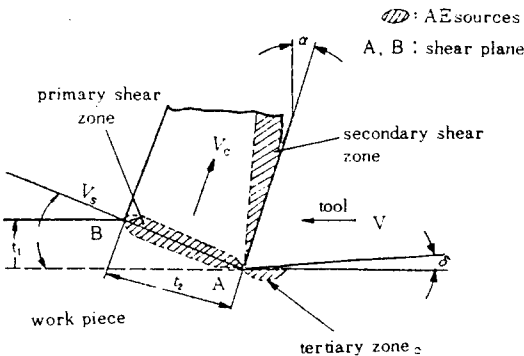


Fig.1 Deformation zones affecting AE in the metal cutting process at end edge

그런데 이들 과정에서 발생하는 AE에너지와 그 발생율은 재료의 변형률 속도, 가해진 응력, 변형되는 체적(V_0)등에 크게 관계되는 이들 관계는 다음과 같다. ⁽¹⁵⁾

$$W = V_0 \delta \epsilon dV_0 \dots\dots\dots (1)$$

$$RMS_{AE} = C (W + W + W + W_0)^{\frac{1}{2}} \dots (2)$$

그리고 일반적인 절삭조건에서 Ernst-Merchant와 Lee-Shaffer (11)의 모델을 근거로 위식을 유도하여 경사각, 절삭속도, 칩의 접촉길이 등을 이용하면 절삭과정에서의 RMS는 다음과 같게 된다. (11)

$$RMS_{AE} = C \sum_{i=1}^n z_s (\Delta A_s V_s + K_2 \Delta A_t A_c + K_1 \Delta b W V) + \sum_{i=1}^{nc} z_s (\Delta A_s V_s + K_2 \Delta bc l_c V_c)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (3)$$

3. 실험장치 및 실험방법

실험 장치의 계통도는 Fig. 2와 같다. 공작기계는 Bridge-Port사의 램형 NC밀링 머신을, 검파장비로는 일본의 NF 回路設計 Block(주)의 AE System을 사용했다. AE 센서의 부착위치는 날끝에 가까울수록 정확한 신호를 구할 수 있으나, 밀링 커터는 회전체이므로 공구에 부착 시킬수가 없다.

그러나 본 실험에서는 정확한 신호를 얻기 위하여 또 부착시키기도 편리하며, 영구적인 설치가 가능하므로 공작물과 가까운 위치에 있는 바이스에 구리스를 도포하여 센서를 부착시켰다. 그리고 일부는 피삭재의 뒷면에 역시 구리스를 도포하여 부착시켰다. 시편은 SM45C로 크기가 50×75×300mm의 각재를 표피의 산화피막만을 제거한 다음 시험편으로 사용했다. 절삭유는 사용하지 않았으며, 절삭공구는 지름 2mm의 2날 엔드밀을 사용했다.

절삭조건으로는 절삭속도와 깊이, 그리고 이송량을 변화시키며 공구의 마멸 및 파손에 대한 AE신호의 특성을 조사하였다. 작은 지름의 엔드밀을 사용하였기 때문에 마멸량보다는 마멸이 진행됨에 따라 증가되는 추력으로 공구가 파손될때 까지를 공구수명으로 했다. AE센서로 검출한 신호는 40dB로 증폭시켰으며, 다시 증폭된 이 AE신호는 discriminator에서 100-300KHz로 고정된 band pass filter를 통과하면서 날끝과 피삭재 또는 칩사이의 충돌음이나 베어링, 그외 기어 등을 비롯한 각종 기계적인

소음등을 최소화 시켰다.

이와같이 band pass filter에서 필터링된 모든 신호는 TEAC(주)의 tape recorder (Model-260)로 직접 녹음한 다음 A-D 변환기로 컴퓨터와 연결하여 각종 데이터를 정리하였다.

한편 시험중 AE의 원파형 등을 감시하기 위하여 주파수 분석기(FFT)와 오실로스코프를 사용하였다.

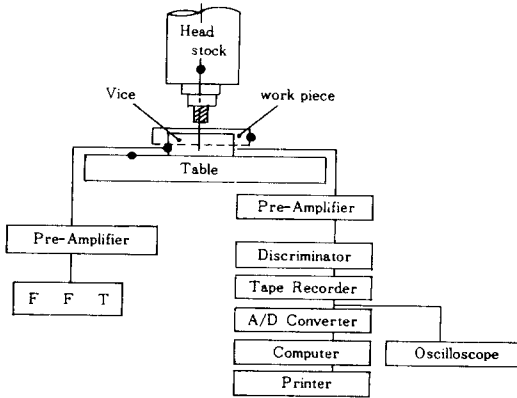


Fig.2 Schematic diagram of experimental system
note : [*] shows the spots where the sensors are placed

4. 실험결과 및 고찰

절삭가공중 AE파는 공구가 파손될 때 외에도 여러곳에 많은 방출이 일어나고 있기 때문에 센서 부착의 적합한 위치를 찾기 위한 실험이 그 동안 많은 사람에 의해 이루어졌으며⁽⁵⁾⁽⁷⁾, 이들을 종합하면 대부분 Fig.2의 검은 점이 있는 4개소로 모아지는데, 그중 가장 감응이 좋다고 하는 부위는 피삭재이며, 두번째로 좋은 곳이 바이스이다. 그러나 榎野義昭⁽¹⁾와 少林昌彦⁽²⁾, 그리고 大宮毅⁽⁵⁾ 등은 피삭재나 바이스는 일감을 교체하거나 장치의 영구적인 설치가 불편하기 때문에 주축지지용 베어링이나 기어, 기타 신호의 전달경로가 불량하고 기계의 소음 등으로 검출떨어지더라도 실용성을 고려하여 그들은 주축대나 테이블이 센서위치로 바람직하다고 했다.

본 실험에서는 실용성보다는 정확한 신호를 얻기

위하여 센서의 위치를 바이스로 선택했다. 그런데 절삭중에 AE의 발생원이나 시기는 앞절의 이론적 고찰에서 지적한 바와 같이 많은 요인이 내재하고 있으나 변동없이 일정하게 나타나는 진동이나 소음 등은 AE에 큰 영향을 주지 못하고 있다고 K.Iwata⁽⁴⁾ 등은 말하고 있다.

그러나 FFT 분석장치를 사용한 후 실험한 결과는 다르다. 즉, Fig.3의 (a), (b)와 같은 경우에는 100KHz이하의 범위에서 파워의 대부분이 존재하였

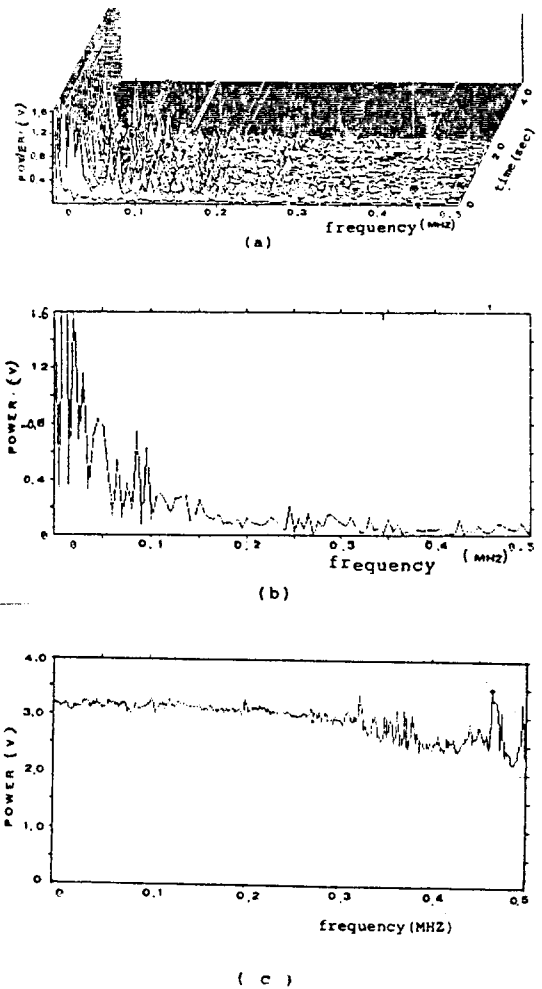


Fig.3 Power spectrum of acoustic emission Signals

는데, 이것은 지름 2ϕ 의 엔드밀로 SM45C강을 절삭 속도 $10m/min$ (1592 rpm), 이송량 $0.01mm/tooth$, 그리고 절삭깊이 $8mm$ 로 가공할 때 생기는 신호를 Single channel FFT Analyzer(Aco Type 8330 : Japan)로 분석하여 얻어진 결과이다. 그림에서 (a)는 정상적인 절삭이 이루어질 때 시간의 흐름에 따른 주파수와 파워 스펙트럼의 관계를 3차원으로 나타낸 것이며, (b)와 (c)는 정상 절삭을 할 때와 공구가 마멸되었을 때의 스펙트럼을 2차원으로 나타낸 것이다. (a), (b)에서 볼 수 있는 바와같이 정상절삭을 할 때는 100KHz이하의 범위에서 스펙트럼은 매우 높게 나타나지만, 그 이상의 주파수 영역에서는 거의 일정하게 나타나고 있다. 그러나 마멸된 공구로 가공하고 있는 (c)에서는 약 300KHz까지 계속 높은 파워가 지속된 다음, 진폭이 매우 거칠게 나타나고 있다. 이 파워는 대체로 높고 크게 나타났다. 즉, 공구의 마멸이 증가하면서 주파수의 스펙트럼도 증가하는 경향이다. 이와같은 현상은 특히 HS S공구에 의한 강절삭에서 보여지는데, 이는 구성인선(BUE) 등이 날끝에 용착하여 일어나는 점착마멸이 주요한 파손원인으로 알려져있다⁽¹¹⁾. 즉, 두 금속사이에 고압이 작용하고 반복절삭에 따른 온도변화에서 공구는 가공경화로 용착금속이 굳어지는데 파괴될 때는 모재에서 분리되며 마멸이 일어나는 현상이다.

그러나 이와같은 점착마멸은 어느 한계에 도달하면 온도상승과 더불어 공구의 경도가 급격히 저하하여 연화작용이 또한 급진전되며 마멸속도가 높아지고 파손을 가속시킨다. 이와같은 마멸에 의한 파손외에도 돌발적으로 절손이 발생할 수 있는데, 이것은 절삭조건이 부적합 하였거나 좁은 홈가공을 할 때 칩배출 불량으로 칩박힘이 발생하여 절손되는 경우 등이다. Fig. 4(a)는 $8m/min$ 의 절삭속도와 $0.02mm/tooth$ 의 이송속도에서 구멍깊이를 $8mm$ 로 되풀이 하면서 110개의 구멍을 가공하기까지 RMS의 변화도를 나타낸 것이다. (a), (b)는 다같이 초기에는 높은 RMS값을 보이기 시작했으며, 20~30개 정도의 구멍을 가공하면서 다시 변화를 가져오기 시작했다. (a)에서 볼 수 있는 바와같이 구멍수 40개 전후로부터 90개 가까이 까지 RMS는 안정 상태를 벗어

나 높은 레벨로 큰 파형을 나타내는 불안정한 상태가 계속 되었다.

그리고 공구의 파손을 앞두고 초기의 RMS값 보다 더 낮은 값으로 떨어진 후 다시 최대의 값으로 올라가면서 공구는 파손되었다. 초기에 RMS의 높은 값은 예리한 날끝이 일감에 부딪히면서 일어나는 미소 파괴현상으로 생각된다. 그리고 파손되기 직전에 큰 진폭으로 떨어진 후 다시 급상승한 것은 칩배출이 불량해지면서서 추력이 급증하며 날끝이 파손되었을 때 이므로 즉시 공구를 교환할 필요가 있겠다.

그림(b)는 같은 절삭속도에서 이송량만을 변화시킨 것이다. 즉, 절삭속도 $8m/min$, 이송량 $0.03mm/tooth$, 절삭깊이 $8mm$ 에서 가공한 경우로 가공한 구멍수는 50개였다. 이것은 (a)의 조건으로 가공했을 때(110개)의 절반도 되지 못한다. 엔드밀의 사용시간에 있어서도 (a)의 조건에서는 17.23min, (b)에서는 5.24min로 1/3도 안되어 수명이 다 되었다.

그러나 같은 절삭속도에서 이송량을 $0.01mm/tooth$ 로 바꾸었을 때는 Fig. 5(a)와 같이 무려 160개의 구멍을 가공할 수 있었고, 엔드밀의 수명도 50.27 min나 되었다. 또 RMS의 변화는 앞의 두 경우와는 달리 비교적 높고 (Max. 2.8V), 계속 거칠었다. 선삭실험에서도 마멸량이 작은 경우 AE신호는 이송량에 크게 영향을 받지만, 마멸이 커지면 이송이 작을수록 AE신호는 높은 레벨이 된다고 하였다.⁽¹⁰⁾ 이것은 이송량이 너무 작으므로 마찰이 커지고, 따라서 파형도 거칠게 나타나는 것으로 생각된다. 또 다른 이유는 피삭재의 가공경화 때문이라고 생각된다. 즉, 이송량이 작으면 칩두께도 얇아지므로 때로는 가공 경화층을 절삭해야 함으로 큰 절삭저항이 생기기 때문이다. Fig. 4 및 Fig. 5(a)와 같은 세 경우는 주요 절삭조건인 속도와 이송량 및 깊이 사이에 비교적 영향이 적다고 되어 있는 이송량에 대하여 실험한 결과이다. 즉, 절삭속도와 깊이는 일정하게 하였더라도 이송량이 적합하지 않을 때에는 떨림이 생기거나 공구의 수명단축에 큰 영향을 준다고 할 수 있다. 그러나 절삭속도가 높아지고 이송량이 커지면 RMS는 레벨도 높아지고 변화량이 매우 불규칙하게 파형을 일으킨다고 하였는데, 이러한 현상은 드릴링이나 단속절삭을 하는 밀링가공에서 주로 나타나고 있다.

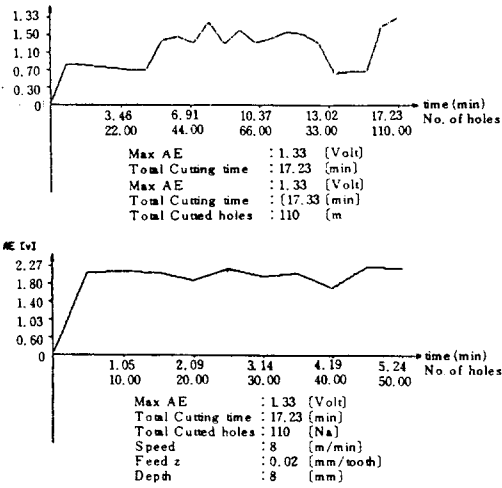


Fig. 4 Relation between cutting times and AE signals at 1273 rpm spindle speed

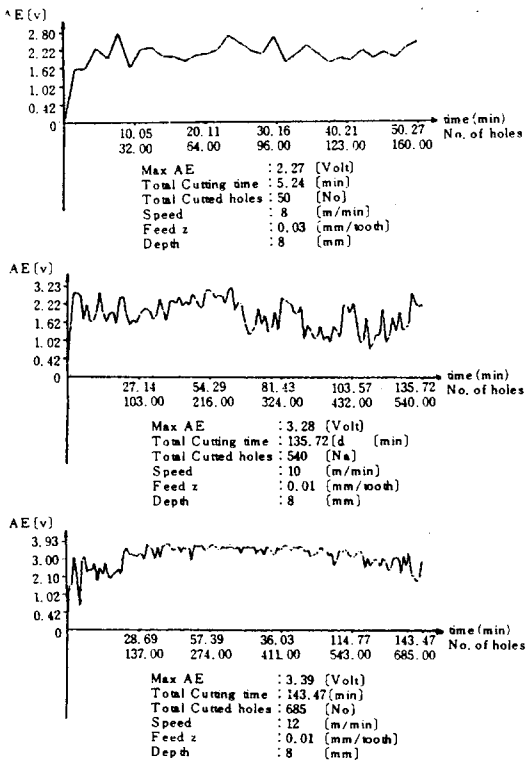


Fig. 5 Relation between total cutting times and AE signals according to change of spindle speed

이 때 칩의 형태는 대부분 불연속형으로서 칩배출이 불량하고, 돌발형의 신호가 발생하는 것으로 보아 칩이 과단되어 구멍벽이나 타물체(피삭재, 바이스, 절삭공구등)들과 충돌하면서 신호에 큰 영향을 주는 것으로 생각된다. Fig. 5는 절삭속도를 변화시키면서 실험한 결과이다. 즉, 이송량을 0.1mm/tooth에서 절삭속도를 1273rpm, (8m/min), 1592 rpm, (10m/min), 1910 rpm, (12m/min)로 바꾸어 가며 실험한 결과이다.

1273 rpm(a)에서는 평균 RMS값은 2.2V정도였으나 1592 rpm, 1920 rpm으로 되면서 그 값은 2.26V, 3.2V 정도로 상승되었다. 그리고 각각의 그림에서 RMS상태를 보면 처음과 끝에서 역시 변화 과정은 거칠게 나타났다. 선삭과는 달리 초기의 미소 파괴 등이 크게 일어나는 것으로 생각되며, 계속해서 불연속 칩이 생성되고 마멸이 급성장하여 공구수명이 다되어 갈수록 더욱 높은 레벨의 돌발형 AE신호가 검출되는 것을 확인할 수 있다. 또한 회전속도가 증가하면서 전단변형의 전단면 속도 Vs와 칩배출 속도 Vc가 증가하여 이론식(3)에서 볼 수 있는 바와 같이 RMS는 이들 절삭속도에 따라 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 절삭속도 10m/min, 이송량 0.02mm/tooth, 절삭깊이 8mm를 가공할 때, 가공개소의 수가 5일 때, 170개 일 때 및 345개일 때의 RMS를 약 1초씩 그대로 기록한 상태이다.

시간차에 따라 AE의 평균값은 점차 높아가고 있다. 즉, RMS는 공구 마멸에 따르기 때문에 절삭속도, 절삭깊이, 이송량등 절삭조건에 영향을 받으며 그 정도는 마멸이 진행되는 만큼 현저해지고 있다. 따라서 AE신호를 이용하여 공구의 마멸상태를 감시하는데 적절한 절삭조건이 존재하고 있음을 시사해 주고 있다. 그러나 Fig. 3(a), 또는 Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 날끝이 절손되기전 부터 RMS가 급격한 변화를 보이다가 절손되면서 상당히 높아지는 경우가 있는가 하면 Fig. 3(b) 및 Fig. 5와 같이 전혀 보이지 않을 때가 있다. 전자는 날끝의 마멸이 어느정도 진전되면 급격히 발달하여 추력의 급증으로 AE값도 함께 오르면서 절손에 이르게 되지만, 후자의 경우는 칩의 배출이 양호하게 이루어지면서

AE값의 변동은 나타나지 않고, 구성인선 현상이 돌연 심하게 되어 오히려 날끝이 절손된다.

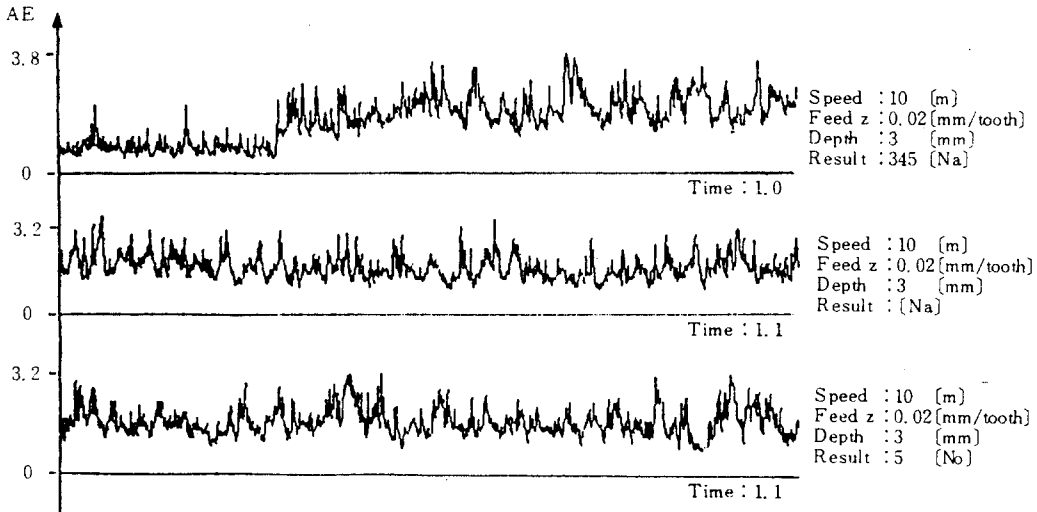


Fig. 6 RMS according to cutting length at $V=10\text{ m/min}$, $f=0.03\text{ mm/tooth}$, depth of holes = 8mm

4. 결론

본 연구에서는 AE신호를 이용한 엔드밀 파손예지의 가능성을 확인하기 위하여 엔드밀의 절삭상태와 가공중 검출에 관하여 실험했다.

절삭조건을 변화시켜 마멸진전에 따른 AE신호를 검출, 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) AE의 RMS값은 절삭속도가 증가하면 민감하게 증가하지만 이송량에는 크게 영향을 받지 않는다.
- (2) 절삭조건이 부적합하여 칩배출이 불량하게 되면 칩은 흙이나 구멍의 내벽에서 마찰이 심해지므로 높은 레벨의 돌발형 신호가 나타난다.
- (3) 마멸의 증가로 절손에 이르게 될 때 AE값은 일반적으로 급격하게 증가하면서 파손되지만 칩배출이 원활하더라도 구성인선 현상이 심하게 되어 파손될 때에는 RMS는 불안정한 진폭이 불규칙하게 나타나게 된다.

參 考 文 獻

- (1) 垣野 義昭, “超音波 振動を利用した 切削・研削加工の 監視技術”, 機械と 工具, pp. 72~78, 1983. 2
- (2) 垣野 義昭, Luo Dieu Chuong, 小林昌彦, “アコースティック エミッションによる 工具破損の 検出”, 精密機械 46卷 3號, pp. 66~71
- (3) 堅村幸辰, “ドリル 損耗検出に 關する 研究(第1報)”, 精密機械, 50卷 6號, pp. 25~29, 1984年 6月
- (4) K. Iwata, T. Moriwaki, “An Application of Acooustic Emission Measurement to In-Process Sensing of Tool Wool Wear”, CIRP. vol. 25/1 pp. 21~23, 1977
- (5) 大宮 毅, 稱崎一郎, 青山 兼詞郎, 酒井 勝, 萩尾雄一, “アコースティック エミッションによる ドリル 折損の イソプロセス検出”,

- 日本機械學會論文集(C編) 51卷 472號, pp. 3322~3328, (昭 60年 12月)
- (6) 이병찬, “밀링가공시 발생하는 공구마멸과 AE신호에 관한 연구”, 한국과학기술원 '87 논문집(MPE85284) p. 2
- (7) 小島造二, 稱崎一郎, 三完亮一, “アコースティック エmissions を利用した ドリル 折損の豫知”, 日本機械學會 論文集(C編), 51卷 467號, pp. 1838~1843
- (8) 江田 弘, 貴志造三, 白井 信行, 坦野毅昭, 兼原 彰彦, “アコースティック エmissions を用した 研削焼けの インプロセス検出”, 精密機械, 49卷 9號 pp. 103~108
- (9) 神田雄一, “AEによる 切削状態の 認識”, 機械 振興協會 技術研究所 pp. 1~13
- (10) 小島造二, 稱崎一郎, 三完亮一, “アコースティック エmissions を利用した 旋削プロセスの 監視”, 日本機械協會 論文集(C編), 52卷 474號, pp. 799~803
- (11) 李正根, “Acoustic Emission에 의한 Drill 切削狀態 및 磨滅感知에 관한 研究”, 漢陽大學院, '87. 12, 碩士學位 論文集', pp. 1~45
- (12) 坦野 義昭, “アコースティック エmissions を用した 切削工具の 破損檢出法”, 機械と工具, p. 140, 1980年 6月
- (13) 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, pp. 906~915, 1986