

## End Mill 가공시 공구파손 검출에 관한 연구

(A Study on the Cutting Tool Fracture Monitoring in End Milling)

채명병\*(홍익대 원), 맹민재(홍익대 원), 정준기(홍익대 기계공학과)  
M.B. Chae(Graduate School Hong-Ik Univ.), M.J. Maeng(Graduate  
School Hong-Ik Univ.), J.K. Chung(Hong-Ik Univ.)

Keywords : Acoustic emission(음향방출), Tool fracture(공구파손), Cutting force(절삭력)

ABSTRACT : The analysis of acoustic emission signals generated during machining has been proposed as a technique for studying both the fundamentals of the cutting process and as a methodology for detecting tool fracture on line.

In this study, AE signals detected during End Milling were applied as the experimental test to sensing tool fracture on the CNC vertical milling machine.

Because automatic monitoring of the cutting condition is one of the most important technologies in machining, the in-process detection of cutting tool life including fracture has been investigated by performing experimental test.

### 1. 서 론

최근 기계가공 시스템이 점차 무인화, 자동화되고 있고 기계가공의 대부분을 차지하고 있는 절삭가공은 공구의 마멸과 파손에 의해 유발되는 이상상태를 피할 수 없게 되었다.

생산 시스템 중에서도 특히 절삭공정이 제품의 양부에 직접 관여하는 부분이며 시스템의 기본이 되므로 절삭공정중에 있어 공구파손 및 마멸에 의한 불량품의 발생은 매우 심각한 문제이다.

따라서 절삭작업을 중단시키지 않고 공구파손을 예측하는 기준의 방법은 직접적인 방법과 간접적인 방법으로 대별할 수 있으며 직접적인 방법은 방사성원소를 이용한 센서, 공기압센서 등을 이용하여 마멸면을 직접 관찰하거나 마멸량을 직접 측정하는 방법인데 이 방법은 측정의 정확성을 높으나 장치가 복잡하고 비용이 많이 들며 예측을 위하여 절삭을 중단하여야 하기 때문에 자동화에는 적합하지 않다.

이에 반면 간접적인 방법은 공구마멸의 전전에 따른 절삭과정의 특성변화를 추적하여 간접적으로 마멸의 크기를 추정하는 방법으로 그 측정대상으로는 절삭력, 진동, 절삭면의 거칠기, 또는 AE(Acoustic Emission) 등이 있다. 간접적인 방법은 직접적인 방법보다 장치가 간단하며 신호의 측정이 쉬우나 공구마멸과 관련성 및 반복성, 신뢰성이 문제가 된다.

Moriwaki와 Iwata<sup>(1)</sup>는 AE을 이용한 공구파손 검출 방법을 제안하였다. Dornfeld<sup>(2)</sup>는 절삭과정중에 관계되는 AE에 대하여 광범위하게 연구하였으며 AE 발생원과 발생된 AE 신호의 절삭파라미터의 의존성을 확인하고자 하였다.

Kakino<sup>(3)</sup>는 단속 절삭에서 열균열이 발생하여 전전하고 드디어는 공구가 파손에 이르므로 열균열을 AE 신호에 의하여 검출하고 측정된 AE 신호를 적분하여 최종적인 공구파손을 예지하려 하였다.

Inasaki<sup>(4)</sup>는 불규칙하게 발생하는 돌발형 AE 신호에 화률의 개념을 적용한 새로운 변수를 도입하여 공구 상태를 설명하려 했다.

Kannatey-Asibu<sup>(5)</sup>는 AE 에너지와 가공변수간의 이론적 관계에 대한 연구를 수행하였다.

이러한 밀링 공정중 공구파손은 재료의 불균일성으로 인한 재료 강도의 증가 공구마멸에 의한 절삭력의 증가 등의 이유로 인하여 일어나게 되며, 일단 파손이 일어난 공구로 계속 절삭을 수행하게 되면 공작물의 표면조도에 영향을 줄뿐만 아니라 기계 자체에도 영향을 미쳐 심각한 피해를 주게 된다.

따라서 본 연구에서는 엔드밀 가공시 절삭 변수들의 영향 및 절삭력 특성과 AE 신호 특성을 평균비(average ratio)로 확인하였고 기준의 연구와 비교하여 신뢰성 높게 공구파손을 검출할 수 있는 알고리즘을 개발함으로서 공구교환시기를 예측하고자 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 AE의 발생기구

AE는 재료가 소성변형을 하거나 파손될때 재료 내의 탄성 변형 에너지가 해방되면서 생기는 음파로서 동적 운동에 의한 국부적인 방출로 발생하는 과도적인 탄성파로 정의하며 매우 높은 주파수(100kHz~1MHz)의 영역을 갖는다.

따라서 AE의 발생원은 재료 내에 국부적으로 생기는 과도의 불안정성이다. 또 AE는 재료 내의 제2상 입자의 분포와 전위밀도 등에도 매우 큰 관련이 있다. 재료 내의 포함되어 있는 AE의 발생원으로는 다음과 같은 것들이 있다.<sup>(6)</sup>

- ① 공작물의 전단 변형 영역(shear zone)에서의 소성 변형
- ② 칩과 공구 경사면 사이의 미끄럼 마찰
- ③ 공작물과 공구 플랭크면 사이의 미끄럼 마찰
- ④ 개재물의 분리
- ⑤ 칩의 충돌, 얹힘, 파괴, 공구가 공작물에 부딪힐 때의 충격

## 2.2 측면밀링가공에서 절삭력 및 칩발생길이와 두께

### 2.2.1 측면밀링가공특성

하향밀링은 공작물에 커터의 회전과 같은 방향으로 이송을 주는 절삭 작용이고 상향밀링은 공작물에 커터의 회전과 반대 방향으로 이송을 주는 절삭 작용이다.

### 2.2.2 절삭력<sup>(7)</sup>

일반적으로 하향밀링과 상향밀링에 있어 절삭력은 절삭 방향의 주분력  $F_n$ , 축에 직각인 반경 방향의 이송분력  $F_f$ , 접선방향의 힘성분  $F_t$ , 축에 직각방향의 힘 성분  $F_r$ 로 각각 나눌 수 있다.

Fig. 1에서 다음과 같은 관계가 성립된다.

#### 하향밀링

$$\begin{aligned} F_n &= -F_r \sin \phi + F_t \cos \phi \\ F_f &= F_r \cos \phi + F_t \sin \phi \end{aligned} \quad (1)$$

#### 상향밀링

$$\begin{aligned} F_n &= F_r \sin \phi + F_t \cos \phi \\ F_f &= F_r \cos \phi - F_t \sin \phi \end{aligned} \quad (2)$$

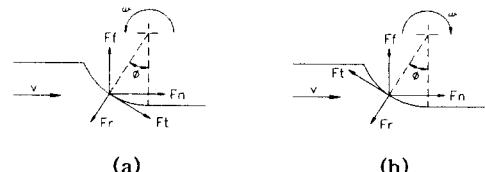


Fig. 1 Force components in (a)down milling and (b)up milling.

### 2.2.3 칩발생길이와 두께<sup>(8-9)</sup>

본 실험에서는 엔드밀이 일정한 위치에서 회전운동을 하고 공작물에 이송을 주어 절삭을 한다. 엔드밀 작업은 회전 인선들이 순차적으로 공작물을 절삭하며 엔드밀과 이송의 상대적 운동은 Fig. 2와 같이 사이를 로이드 곡선의 궤적을 갖게 된다. 서로 인접된 인선으로 형성된 사이클로이드 온선이 한 개의 칩이 되며 이송은 엔드밀 1회전당 이송을  $F_t$ 이라 하면  $F_r = F_t T$ 이 된다. 따라서 한 개의 절삭날이 절삭

하는 칩의 길이  $L$ 은 근사적으로 다음 식을 이용해서 구할 수 있다.

$$L = R \cos\left(\frac{R-d}{R}\right) \pm \frac{F_t}{\pi D} \sqrt{(Dd - d^2)} \quad (3)$$

칩의 최대두께는 절삭방향, 반경방향의 절삭깊이, 절삭날의 직경 및 절삭날당 이송, 즉  $F_t = \frac{F}{NT}$  등에

따라 칩의 최대두께가 변하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \frac{F_t d}{L} \quad (4)$$

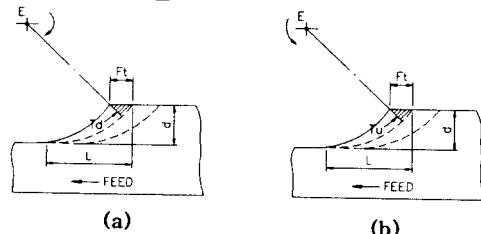


Fig. 2 Analytic the length of chip and chip thickness in (a)down milling and (b)up milling.

위에 서술한 이론 관계식을 적용하여 절삭방향에 따른 칩 발생 길이와 두께를 계산하여 보면 Table 1과 같다.

Table 1 Summary of the theoretical results.

Flute number	Milling operation	Feed per tooth $F_t$ (mm/tooth)	Feed per revolution $F_r$ (mm/rev)	Tool path length $L$ (mm)	Chip thickness $T$ (mm)
2	down milling	0.133	0.267	7.9604	0.0835
	up milling	0.133	0.267	8.0392	0.0827

\* spindle speed : 450(rpm), feed rate:120(mm/min)  
radial depth of cut : 5(mm)

### 2.3 공구파손과 치평

기계가공의 과정에서는 공구와 공작물의 상대적인 운동이 중요한 역할을 차지하고 있으므로 만일 공구에 파손이 발생하면 가공과정에 영향을 미치게 되므로 공구파손 검출이 매우 중요하다.

공구파손은 공구날 끝이 부서져 떨어져 나가는 것이라고 정의하며 결과적으로 이때 공구는 절삭날의 상당한 부분을 잃게 되며 공구치평은 실험자의 관점에 따라 여러 각도에서 정의될 수 있으나 여기서는 D. Dornfeld<sup>(10)</sup>의 정의에 따라 공구날 끝에 작은 양의 손실은 가져오나 전체 공구의 기하학적 형태는 현저히 변하지 않는 상태를 말한다.

Trusty<sup>(11)</sup>는 탄소공구의 파손은 공구윗면에 국부적인 최대 인장응력의 발생으로 나타나는 취성파괴현상이며 반면 치평은 날 끝에서 높은 전단응력에 의한 전단파손이라고 결론을 내렸다. 절삭 공구 날끝이 충분

히 높은 온도에 도달하게 되면 공구의 기계적 강도 또는 그 경도가 저하하게 되므로 공구의 강도를 약화 시킨다.

단속절삭 중에 공구에 기계적 또는 열적 용력의 반복은 공구에 균열을 만들어 날끝을 약화시키고 마침내는 파손을 일으킨다.

#### 2.4 공구파손 판정 알고리즘

Fig. 3은 본 연구에 적용된 공구파손 판정 알고리즘을 나타내는 흐름도이다.

절삭 공정 중에 다양한 발생 원인에 의해 여러 형태의 AE 신호가 발생하나 치평이나 공구파손등에 의해 발생하는 돌발형 신호의 진폭은 상당한 차이를 보인다. 이 사실로부터 돌발형 AE 신호의 진폭의 한계값을 설정함으로써 공구파손을 다른 영향으로부터 판별할 수가 있다. 공구가 파손된 직후 절삭력은 급격한 감소를 보이는데 이는 공구 인선의 탈락으로 인한 절삭깊이의 감소 때문이다. 실험에 의하면 공구가 파손되었을 때 AE 신호는 상당한 크기의 돌발형 신호를 발생하고 곧 이어서 절삭력의 급격한 감소가 발생하고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 신호들의 변화양상을 공구파손 검출에 이용하였고 알고리즘은 다음과 같다.

AE 신호의 검출단계에서 고려되어야 할 점은 공구파손에 의한 돌발형 신호와 다른 원인에 의한 돌발형 신호와의 정확한 판별이다. 이를 위해 다음 절차를 시행한다.

(1) 구간별 AE 평균(AE-mean[t])과 누적 AE 평균( $\Delta E-y$ )을 계산한다.

$$AE\text{-mean}[t] = \sum_{i=1}^N AE[i] \quad (5)$$

$$AE-y = (\sum_{i=1}^y AE\text{-mean}[t]) / y \quad (6)$$

여기서,  $N$ 은 구간당 A/D 데이터 수이고,  $y$ 는 구간의 수이다.

(2) 실험을 통해 공구파손으로 인한 돌발형 AE 신호의 샘플링 시간은 약  $1.67 \mu sec$ 이며, 샘플링 주파수가  $600kHz$ 일 때, 구간 비교 지표(AE-com[t])는 구간내 가장 큰  $f$ 개의 값의 평균으로 정의한다.

(3) 알고리즘은 구간 비교 지표와 누적 AE 평균을 비교한다. 만일  $AE\text{-com}[t]$ 가  $AE-y * LI-AE$ 보다 크다면 이것을 돌발형 AE 신호로 판별한다.

AE 비의 한계값(LI-AE)은 실험을 통해 결정한다.

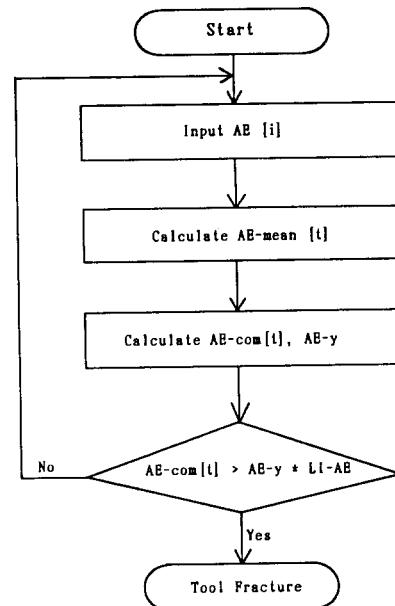


Fig. 3 Flow chart of Tool Fracture Monitoring Algorithm.

### 3. 실험장치 및 실험방법

#### 3.1 실험장치

본 실험에서 공구파손 검출을 위해 사용된 주요 실험장치의 계통도는 Fig. 4와 같고, 실험장치는 CNC 머시닝 센터, AE 변환자, AE 센서, 전치 증폭기, 공구동력계, 증폭기, 공구현미경등으로 구성되어 있다.

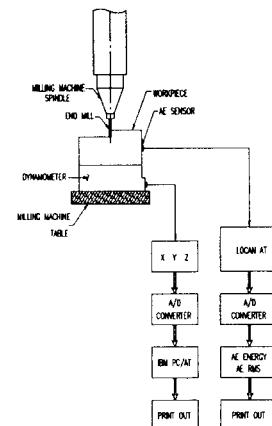


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus.  
3.2 공구, 시험편

본 실험에 사용된 공구의 형상은 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 표준 엔드밀(HSS)이고 공작물은 Fig. 6에 보인 것과 같이 일반적으로 많이 사용되고 있는 일반 구조용 탄소강 강재 SM45C를 사용하였으며 이의 화

학적 성분 및 기계적 성질은 Table 2와 같다.

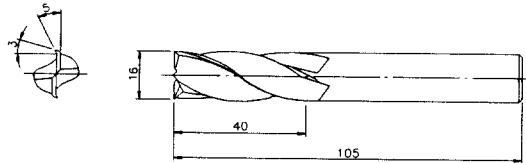


Fig. 5 Endmill apparatus.

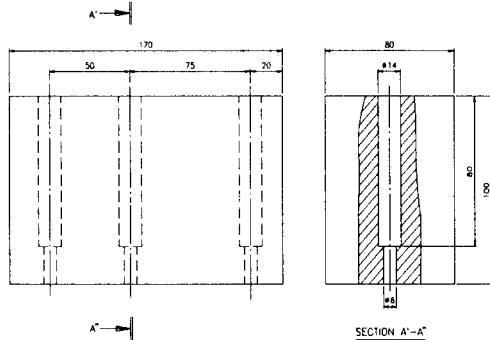


Fig. 6 Dimension of test specimen.

Table 2 Chemical compositions and Mechanical properties of material SM45C.

Chemical compositions (%)	C	Si	Mn	P	S
	0.45	0.31	0.75	0.016	0.012
Mechanical properties	Tensile strength	71.2 Kg/mm <sup>2</sup>			
	Yield strength	36.43 Kg/mm <sup>2</sup>			
	Elongation	18.5 %			
	Area reduction rate	31.4 %			
	Brinell hardness	217			

### 3.3 실험 방법

본 실험은 부착된 암전형 AE 센서(25~800kHz)로부터 신호의 민감도를 높이기 위해 전자 증폭기에서 40dB로 증폭시키고 주 증폭기에서 다시 20dB로 증폭하였다. 또한 전자 증폭기에 100~300kHz 대역 필터를 사용해서 밀링의 공회전시에 발생하는 120Hz 이하의 노이즈를 제거하였다. 대역 필터를 통과한 AE 신호는 신호처리 시스템이 하드웨어적으로 구성된 AE 변환자에서 공구파손에 따른 그 변화가 검출될 수 있었다.

절삭력은 공구 동력계에서 감지하여 증폭기에서 증폭시켜 측정하였으며 정상적인 절삭상태의 절단주파수는 15Hz에 해당되므로 저주파 필터를 100Hz로 설정하여 실험하였다.

시편을 Fig. 6과 같은 치수로 가공한 후 AE 신호의 감쇠현상을 최대한 줄이고 시편표면과 센서사이에 생기는 기포를 방지하며 가공시 발생하는 진동 등을 최소화하기 위해 시편 바닥에 그리스를 바른 후 공구동력계에 부착시켰다.

실험은 공구파손을 용이하게 발생시키기 위하여 Fig. 7과 같이 절삭날 한쪽 끝부분에 홈을 만들었으며 홈의 가공은 NC wire-cut 방전 가공기를 사용했고 건식 절삭하였다.

실험조건은 Table 3과 같이 16가지 절삭조건으로 실험을 하였다.

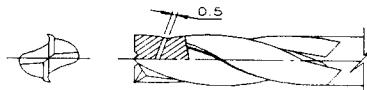


Fig. 7 Tool Tip slotted by wire EDM on the Rake face.

Table 3 Cutting condition for the experiment.

Test no.	Milling operation	Cutting speed (m/min)	Axial depth of cut (mm)	Feed rate (mm/min)
1	Down milling	23	6	80
2	Up milling	23	6	80
3	Down milling	46	6	80
4	Up milling	46	6	80
5	Down milling	23	9	80
6	Up milling	23	9	80
7	Down milling	46	9	80
8	Up milling	46	9	80
9	Down milling	23	6	120
10	Up milling	23	6	120
11	Down milling	46	6	120
12	Up milling	46	6	120
13	Down milling	23	9	120
14	Up milling	23	9	120
15	Down milling	46	9	120
16	Up milling	46	9	120

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 하향밀링과 상향밀링시 절삭력과 AE 신호 특성 비교

Fig. 8 ~ 9는 Table 3과 같은 절삭조건으로 실험을 행하여 절삭력과 AE 신호 특성간의 차이를 알아본 결과이다.

Fig. 8은 4가지 변수들에 대한 하향 및 상향밀링 작업시 합성력(Specific cutting force :  $F_s$ )의 평균비를 구해본 결과 절삭속도에 가장 큰 영향을 받음을 판별 할 수 있었다.

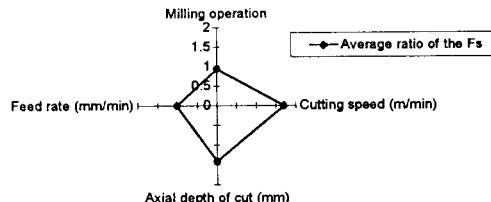


Fig. 8 Average ratio of the Specific cutting force.

Fig. 9는 4가지 변수들에 대해 하향 및 상향밀링 작업시 RMS의 평균비를 구해본 결과 Fig. 8과 같이 절삭속도에 큰 영향을 받음을 알 수 있었다.

따라서 하향 및 상향밀링작업시 절삭력과 AE 신호 값은 주어진 절삭조건에 따라 차이가 심하다는 것을 판별할 수 있다.

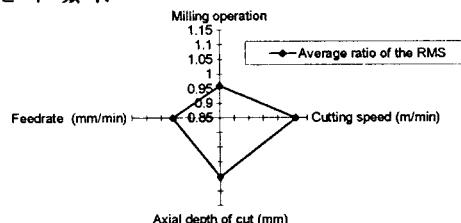


Fig. 9 Average ratio of the AE RMS.

##### 4.2 공구파손시 AE 신호와 절삭력의 관계

Fig. 10은 이송속도를 80, 100, 120mm/min으로 변화시켜가며 실험해 본 결과 공구가 파손되었을 시 이 송속도의 증가와 더불어 AE RMS값이 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타남을 판별할 수가 있었다. 이러한 현상은 AE RMS값은 이송속도에 크게 영향을 받는 것으로 사료된다.

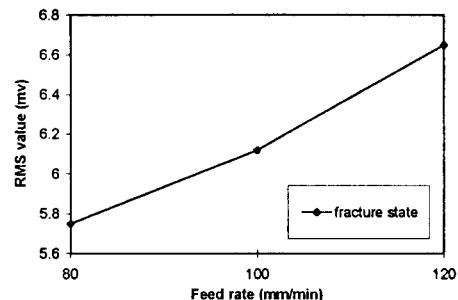


Fig. 10 RMS of AE signal according to increase feed rate.

Fig. 11은 일반 구조용 탄소강 강재 SM45C를 이용하여 이송속도 80mm/min, 절삭속도 23m/min, 절삭깊이 6mm의 절삭조건에서 가공 중 공구가 파손되는 순간 AE energy값의 변화를 나타낸 것이다. 공구파손 직후 AE energy값이 증가함을 알 수 있었는데 이는 전단영역에서 공구의 전단용력의 증가로 인해 일어나는 것으로 사료된다.

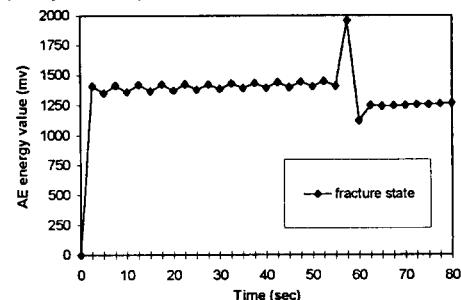


Fig. 11 AE energy according to increase cutting time.

Fig. 12는 이송속도 80mm/min, 절삭속도 23m/min, 절삭깊이 6mm의 절삭조건에서 상향밀링작업시 공구가 파손되었을 때 절삭력의 변화를 나타내고 있다.

절삭력은 공구파손 후 급격한 증가 직후 현저히 감소한다. 절삭력이 크게 증가한 경우는 파손부에서의 과도한 마찰력에 기인하고 감소한 경우는 공구파손으로 인해 절삭날의 길이가 줄어든 테 기인하는 것으로 판단된다.

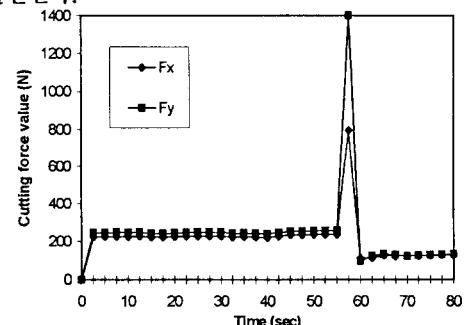


Fig. 12 Cutting force of Fracture state according to increase cutting time.

### 4.3 시뮬레이션 결과

돌발형 AE 신호의 샘플링 시간이 약  $1.67 \mu\text{sec}$ 이므로 적어도  $600\text{kHz}$  이상의 샘플링 주파수가 요구되며 따라서 돌발형 AE 신호의 안정된 검출을 위해  $800\text{kHz}$ 의 샘플링 주파수를 선정하였다.

구간별 AE 평균은 50개의 AE 데이터마다 계산된다. 비교 기준값(AE-y)은 전체구간별 평균의 평균이다. 입력되는 AE 신호마다 구간 비교 지표(AE-com[t])가 계산되고, 비교 기준값과 비교된다.

AE 신호의 비교 기준값에 대한 구간 비교 지표의 값을 AE 비(r-AE)라 정의한다. Fig. 13으로 부터 공구의 파손이 발생하였을 때 r-AE가 상당히 크게 증가함을 알 수 있다.

AE 비의 한계값(LI-AE)은 1.825로 설정하였다. 즉, AE 신호의 구간 비교 지표값이 비교 기준값의 1.825 배가 넘으면 공구가 파손되었음을 판정한다.

구간당 데이터수와 AE 비의 한계값을 조정함으로써 검출의 민감도와 신뢰도가 조정된다. 본 검출시스템은  $N=50$ , LI-AE = 1.825가 설정되었다.

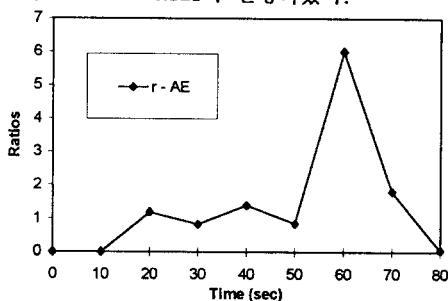


Fig. 13 Behavior of AE ratio in End Milling.

### 5. 결 론

본 연구에서는 표준 엔드밀 공구로 실험을 하여 절삭변수들의 영향에 따른 절삭력 특성과 AE 신호 특성을 평균비(average ratio)로 확인하였고 공구파손에 대한 절삭력 특성과 AE 신호 특성을 비교 판별한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 절삭력과 AE RMS값은 절삭조건에 따라 비례적으로 증가함이 검출되었다.

2) 공구파손시 절삭력은 증가 직후 급격히 감소하는 경향이 있다. 절삭력이 증가한 경우는 파손부에서의 과도한 마찰력에 기인하며 감소한 경우는 공구파손으로 인해 절삭날의 길이가 줄어든데 기인하는 것으로 사료된다.

3) 실험을 통해 얻어진 결과로부터 작성한 알고리즘을 적용해 본 결과 공구파손 검출이 용이함을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- (1) Iwata, K. and Moriwaki, T., 1977, "An Application of Acoustic Emission Measurement to In-Process Sensing of Tool Wear", Annals of the CIRP, Vol. 25, pp. 21-25.
- (2) Dornfeld, D. A., 1979, "An Investigation of Orthogonal Cutting Via Acoustic Emission Signal Analysis", Proceeding of the 7th NAMRC, pp. 270-274.
- (3) Yoshiaki Kakino., 1980, "In - Process Detection of Tool Breakage by Monitoring Acoustic Emission", Proceeding of ANINT CONF, ET. Mitchel. Kentucky U. S. A., pp. 25-39.
- (4) Inasaki, I., 1988, "AE - Monitoring Systems for the Detection of Single-Point and Multipoint Cutting Tool Failures", Japan Society of NDI, Vol. 7, pp. 179-184.
- (5) Kannatey-Asibu, E. Jr., 1980, "Investigation of the Metal Cutting Process Using Acoustic Emission Analysis", Ph.D. thesis, Dept. of Mech. Eng., Univ. of California-Berkely, C.A.
- (6) Diei, E. N., 1985, "Investigation of Milling Process Using Acoustic Emission Signal Analysis". Ph.D. thesis, Dept. of Mech. Eng., Univ. of California-Berkely, C.A.
- (7) I. Yellowley., 1985,"Observations on the Mean Values of Forces, Torque and Specific Power in the Peripheral Milling Process", Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 25. No. 4, pp. 337-346.
- (8) M. E. Martellotti., 1945, "An Analysis of the Milling Process, Part II - Down Milling", ASME Journal of Eng. for Ind., Vol.67. No. 5, pp. 233-251.
- (9) M. E. Martellotti., 1941, "An Analysis of the Milling Process", ASME Journal of Eng. for Ind., Vol. 63. Nom, pp. 677-700.
- (10) Dornfeld, D. A. and Lan, M. S., 1984, "In - Process Tool Failure Detection", Trans. ASME J. Eng. Mat and Tech., Vol. 106, pp. 111-118.
- (11) Tlusty, J. and Andrew, G. C., 1983, "A Critical Review of Sensor for Unmanned Machining", Annals of the CIRP, Vol. 32, pp. 563-572.