

〈論 文〉

## 이중신호에 의한 공구파손 검출에 관한 연구

윤재웅\* · 양민양\*\* · 박화영\*\*\*

(1991년 12월 20일 접수)

### A Study on Detection of Cutting Tool Fracture by Dual Signal Measurements

Jae Woong Youn, Min Yang Yang and Hwa Young Park

**Key Words:** Turning Process(선삭가공), Tool Fracture Detection(공구파손감지), AE(Acoustic Emission, 음향방출), Cutting Force(절삭력)

#### Abstract

Fracture of a cutting tool is one of the most serious problems in machining systems. Therefore, several methods have been proposed so far to detect cutting tool fracture. However, most of them have some problems from the viewpoint of practical applications. In this study, the feasibility of using acoustic emission and cutting force signals for the detection of massive tool breakages as well as small fracture of cutting tools were investigated. Turning experiments were performed using conventional carbide inset tools under realistic cutting conditions and the SM45C steel and heat treated SM45C steel were used as a workpiece. And the sensitivities of the AE and cutting force signals to the fracture of cutting tools were illustrated. Finally, a detection algorithm for the fracture of cutting tools was developed through the analysis of these dual signals in the several types of tool fracture.

#### 기 호 설 명

$a_n$ : 직각경사각(nomal rake angle)	$F_f$ : 절삭력의 이송분력(feed force)
$a_e$ : 유효경사각(effective rake angle)	$F_r$ : 절삭력의 배분력(radial force)
$A_c$ : 가공전 칩의 단면적	$F_t$ : 공구 여유면에 작용하는 수직력
$C_s$ : 옆면 절삭날각(side cutting edge angle)	$F'_t$ : 공구 부여유면에 작용하는 수직력
$i$ : 절삭날 경사각(inclination angle)	$F_s$ : 공구의 정사면에서 칩의 유동으로 인한 마찰 저항력
$\eta_c$ : 칩유출각(chip flow angle)	$F'_s$ : $F_s$ 의 수평성분
$\varphi$ : 가공이 일어나는 면에 수직인 면에서의 칩유출각(chip flow angle)	$F''_s$ : $F_s$ 의 수직성분
$\Delta y$ : 전단영역두께(shear zone thickness)	$V$ : 절삭속도(cutting speed)
$F$ : 절삭력의 합력(resultant tool force)	
$F_c$ : 절삭력의 주분력(cutting force)	

#### 1. 서 론

1970년대 후반 부터 생산공학 분야에서는 기계가공의 정밀도와 생산성을 향상시키기 위한 자동화기술이 급진적인 발전을 이루고 있다. 또한, 제품의

\*한국과학기술원 정밀공학과

\*\*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

\*\*\*정회원, 한국기계연구소 생산시스템실

형태가 다양화되면서 기존의 소품종 대량 생산 체계는 다품종 소량생산의 체계로 전환되고 있다. 이러한 생산 시스템의 변화에 따라 제품의 설계기술 및 가공기술의 유연성(flexibility)이 많이 강조되고 있으며, 이는 FMS 혹은 FMC 등을 운영하기 위한 필수적 기술이라 할 수 있다. 특히, 이러한 공장자동화 및 무인화 공장을 실현하기 위해 가장 기본적이고 중요한 것은 시스템의 모니터링(monitoring) 기술이며 그 요소기술로서 기계가공 공정중에 발생하는 공구파손(chipping or breakage)의 실시간(real time) 검출기법에 대한 필요성이 크게 강조되고 있다.

공구파손 감지의 가장 바람직한 형태는 공구의 점진적인 마멸 데이터로부터 공구의 파손을 예측하는 것이지만, 실제로는 가공물 재질의 갑작스런 특성변화나 혹은 가공칩의 엉킴으로 인한 파손등 예기치 못한 공구파손이 대부분이다. 따라서 공작물의 피해를 최소화하기 위해, 공구파손의 감지에서는 그 신뢰성과 감지속도가 결정적인 인자가 되는 것이다.

일반적으로 공구의 파손은 미소파괴(chipping)와 큰 파손(breakage)으로 나눌 수 있는데 공구의 미소파괴는 높은 전단응력에 의한 연성파괴로서 공구의 인선(edge)에 발생하는 것이고, 큰 파손은 공구의 경사면(rake face)에 국부적인 최대인장응력이 발생하여 파손되는 것으로 정의할 수 있다<sup>(1)</sup>.

공구의 이상상태를 감지하는 기법은 직접 혹은 간접등의 여러가지가 있지만<sup>(2)</sup> 본 연구에서는 보다 신뢰성 있는 신호의 검출을 위해 감도(sensitivity)가 뛰어난 AE신호와 절삭잡음(cutting noise)에 민감하지 않은 절삭력신호의 이중신호를 이용하고자 한다.

AE신호와 절삭력신호를 이용하여 공구의 이상상태를 감지하는 방법에 대해 지금까지 연구된 결과에 의하면, 일반적으로 공구가 마멸될 경우 AE신호의 평균 레벨(level)은 증가하고<sup>(3)</sup>, 절삭력 역시 증가한다고 보고된 바 있다<sup>(4,5,6)</sup>. 한편, 공구가 파손될 경우에는 AE의 평균 레벨이 높아지기도 하고<sup>(3)</sup>, 파손되는 순간에는 AE의 진폭이 크게 상승하는 모습을 볼 수 있으며<sup>(7,8,9)</sup> 상승된 AE의 진폭과 파손된 공구부분의 면적과의 정량적 관계에 대해서도 연구된 바 있다<sup>(8)</sup>. 그러나 드릴링 작업과 같이 절삭잡음(cutting noise)이 적은 경우 AE신호로부터 쉽게 공구파손의 정보를 얻을 수 있지만, 선삭

(turning)의 경우 잡음(noise)이 커서 공구파손 정보를 정확히 얻는 것이 매우 어렵다<sup>(10)</sup>.

절삭력의 경우에 있어서는, 공구가 매우 크게 파손되었을 경우(massive breakage) 절삭력의 세분력은 모두 갑자기 증가한 후 급격히 감소하였다가 다시 증가하는 것으로 발표된 바 있으며<sup>(11)</sup>, 혹은 절삭력이 갑자기 증가하는 것으로 보고된 바도 있다<sup>(12)</sup>. 즉, 절삭력의 급격한 변화는 공구의 파손으로 나타나는 것이라 할 수 있으나 공구파손에 대한 신호의 형태는 연구자에 따라 약간씩 다르게 나타나고 있다. 그러나 절삭력을 이용한 공구파손에 관한 연구는 대부분 공구의 매우 큰 파손(massive breakage)에 대한 신호변화를 나타내고 있으므로 파손의 정도가 작을 경우에는 그 결과를 신뢰할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 공구의 큰 파손에서부터 공구의 기하학적 형태가 크게 변하지 않는 작은 파손등 파손의 크기와 파손부위에 따른 신호의 형태를 조사하고자 한다. 그 방법으로서 가공재료로서는 SM45C강(steel)과 열처리한 SM45C강을 이용하였다. 공구파손에 따른 AE신호와 절삭력신호의 변화를 분석하기 위하여, AE신호의 경우는 RMS값을 택하고 그 진폭의 갑작스런 변화와 평균 레벨의 변화를 이용하여 파손의 순간을 감지하였고, 절삭력의 경우에는 절삭력의 주분력, 이송분력 그리고 배분력의 변화형태를 이용하여 공구의 이상상태를 알 수 있었으며, 이 두 신호의 변화를 동시에 관찰함으로써 임의의 가공조건에서 공구의 파손을 감지할 수 있는 알고리즘 개발의 기준을 마련할 수 있었다.

## 2. 공구파손과 AE신호

### 2.1 가공조건의 변화에 대한 AE신호

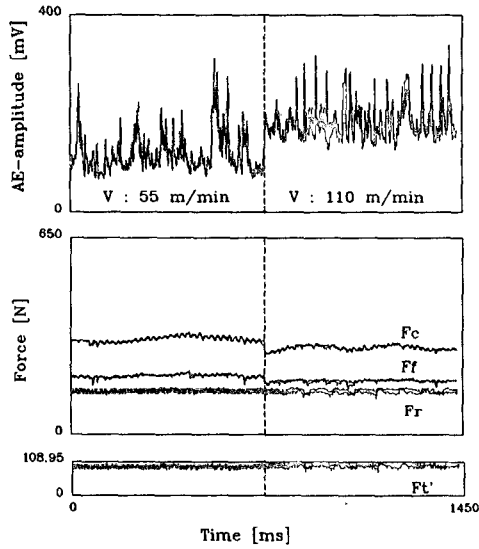
공구의 파손은 AE신호의 평균 레벨을 변화시킨다. 그러나 이러한 신호의 평균 레벨 변화는 가공조건에 의해서도 변화하는데, 보다 신뢰성 있는 검출을 위해서는 가공조건이 변화하더라도 파손을 감지할 수 있어야 한다. 즉, 가공조건의 변화에 의한 AE레벨의 변화와 공구의 마멸 혹은 파손에 의한 AE레벨의 변화를 구분할 수 있어야 한다. 2차원 절삭(orthogonal cutting)에서 AE신호의 RMS값에 대한 정량적인 연구에 의하면 그 값의 크기는 다음과 같다<sup>(13)</sup>

$$RMS = C_2 \left( k \frac{r_c \cos \alpha V_w U}{\sin \phi \Delta y} \right)^{1/2} \quad (1)$$

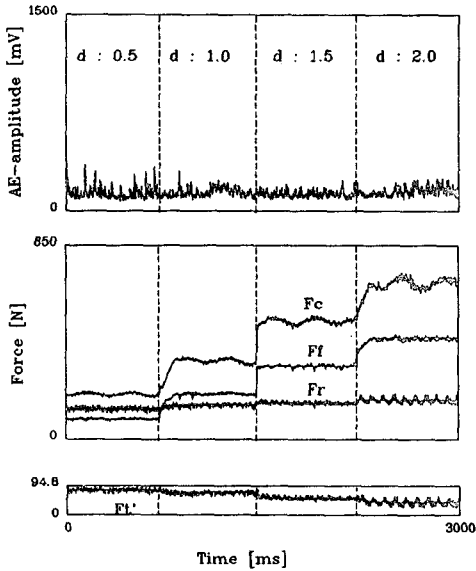
$C_2, k$  : material constants,  
 $r_3$  : chip thickness ratio,  
 $\alpha$  : rake angle,

$\phi$  : shear angle,  
 $V_w$  : cutting velocity,  
 $\Delta y$  : shear zone thickness,  
 $U$  : volume of participating material

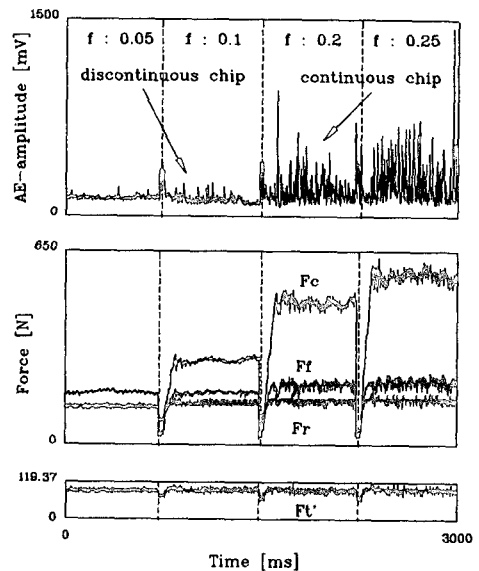
즉, 공구경사각(rake angle)이 작을수록, 그리고



(a) cutting speed



(b) depth of cut



(c) feedrate

Fig. 1 Variations of AE and force signals according to the different cutting conditions

가공에 참여한 부피가 클수록 RMS값은 증가한다. 그러나 실험결과는 강(steel)과 같이 연속형칩(continuous chip)이 발생하는 경우에 있어서는 이송량(feed rate)이 증가할 수록 RMS값은 감소하며 공구경사각이 증가할 수록 RMS값이 증가하여 식(1)과는 차이가 있음을 나타내고 있다. 연속형칩이 발생하는 공작물에 대해, 이렇게 식과 일치하지 않는 원인은 이송량이 증가할수록 그리고 공구경사각이 감소할 수록, 전단영역(shear zone)의 두께  $\Delta y$ 가 증가하는 등,  $\Delta y$ 가 가공조건에 따라 변하기 때문인 것으로 알려져 있다<sup>(14)</sup>.

한편, 가공조건에 따른 RMS값의 변화는 3차원 절삭(oblique cutting)의 경우, 그 경향은 2차원에서와 흡사하나 크기의 변화는 다르게 나타나고 있고, 정량적인 관계를 알 수가 없으며 이러한 분야에서의 연구는 현재 매우 미흡한 편이다. 따라서 임의의 절삭조건에서 가공할 경우 AE신호의 평균 레벨의 변화를 정확히 예측하는 것은 매우 어려운 일이라 할 수 있다. 그러나, Fig. 1에서 볼 수 있듯이 강을 3차원 절삭할 경우에, 절삭속도를 제외한 나머지 가공조건의 변화에 대해서는 칩의 잡음(noise) 형태만 변화하고 AE신호의 평균 레벨은 거의 변화하지 않음을 알 수 있는데, 이것은 가공조건에 관계없이 공구파손을 감지하는데 있어서 매우 중요한 요소이다.

## 2.2 공구파손과 AE신호

AE신호를 이용한 공구파손 감지는 이러한 RMS AE신호의 값만을 이용하는 경우에는 몇가지 어려움이 따르는데, 마멸이 일어난 공구는 정상적인 공구에서의 신호보다 큰 값을 보여 주고 있어 파손이 일어날 경우 그 전후의 값의 변화가 뚜렷하지 못하고, 칩(chip)이 공구주위에서 엉키게 될 경우에 칩잡음으로 인하여 실제 공구의 파손을 인식하기가 어려우며 공구의 파손 형태에 따라 그 레벨이 올라가거나 혹은 내려가는 등 그 변화가 신뢰성이 없으므로 신호처리를 신중히 해야한다. 결국, RMS AE신호로 부터 공구파손을 감지하기 위해서는 절삭가공중의 AE발생 메카니즘(mechanism)에 대한 이해가 필요하며 잡음의 효과적인 제거가 필요하다. 한편, 공구가 파손되는 순간에 AE의 진폭은 크게 상승하게 되는데 이러한 신호로서 공구파손을 감지하기도 한다<sup>(7,8,9)</sup>.

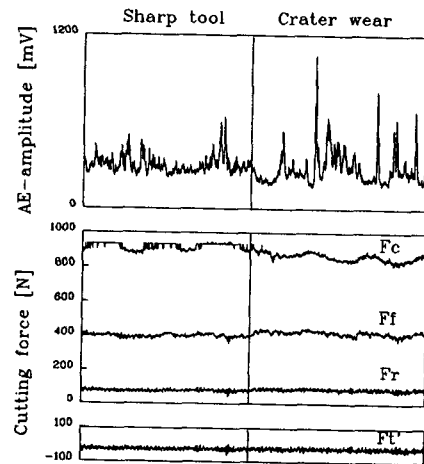
따라서 본 연구에서는, 평균 AE신호와 파손순간

의 AE-피크(peak) 신호를 모두 이용하고, 그 신호와 절삭력 신호를 연계하여 공구파손의 감지 수단으로 사용하고자 한다.

## 3. 공구파손과 절삭력신호

### 3.1 가공조건에 따른 절삭력 신호

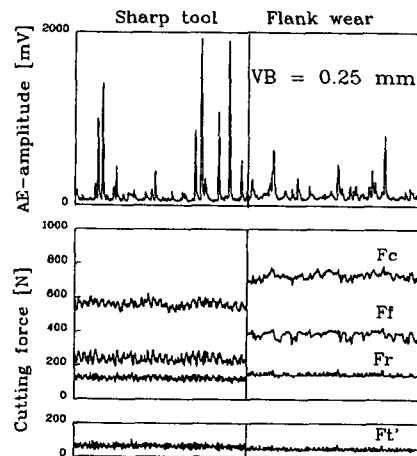
2차원절삭의 경우 가공에 필요한 절삭력은 다음과 같이 나타난다<sup>(16)</sup>.



Workpiece : SM45C

v : 125 m/min, f : 0.2 mm/r, d : 2.5 mm  
sampling time : 0.4 msec

(a) crater wear



Workpiece : SM45C

v : 125 m/min, f : 0.2 mm/r, d : 1.0 mm  
sampling time : 0.4 msec

(b) flank wear

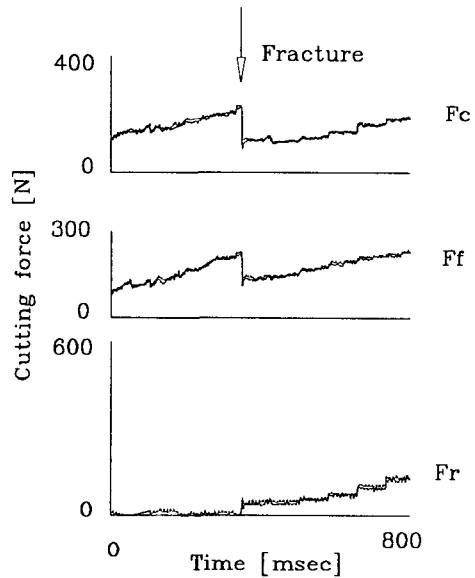
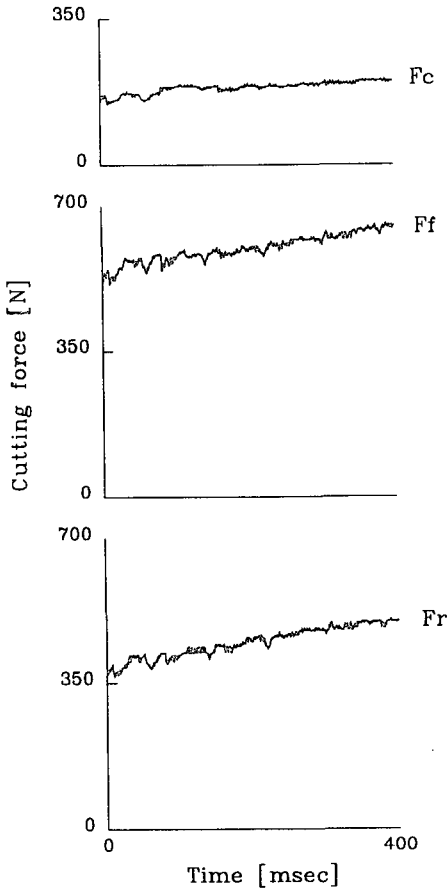
Fig. 2 Variations of AE and force signal to the tool wear

$$F = \frac{\tau_s A_c}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad (2)$$

F : resultant tool force,  
 $\tau_s$  : shear strength of the work material,  
 $A_c$  : cross-sectional area of the uncut chip,  
 $\phi$  : shear angle,  
 $\beta$  : mean angle of friction between chip and tool

즉, 이송량(feed rate) 혹은 절입량(depth of cut) 등을 증가시키면 절삭력은 증가하게 되는데 이것은 Fig. 1에서와 같이 3차원절삭일 경우에도 해당된다. 이와같이 절삭력신호는 공구부위의 절삭 참여

면적을 나타내는 것이므로 공구의 절삭 참여면적이 작아지도록 공구가 파손될 경우(breakage)에, 절삭에 참여하는 면적이 감소하므로 절삭력의 세분력 중 주분력(cutting force)과 이송분력(feed force)의 힘이 감소하게 될 것이다. 그러나 공구의 기하학적인 형태가 크게 변하지 않는 미소파괴(chipping) 혹은 작은 파손이 발생할 경우에는 공구의 절삭참여 면적은 거의 변하지 않으므로 절삭력의 주분력과 이송분력은 반드시 감소하지만은 않을 것이다. 한편, 배분력의 경우 Fig. 1에서도 볼 수 있듯이 가공조건의 변화에 의한 배분력의 크기는 거의 변화하지 않는 것으로 나타나고 있다. 이것은



Workpiece : SM45C  
 $V$  : 165 m/min,  $f$  : 0.05 mm/r,  
 $d$  : 1 mm

Workpiece : Heat treated SM45C  
 $V$  : 130 m/min,  $f$  : 0.05 mm/r,  
 $d$  : 0.5 mm

(a) chipped tool

(b) fractured tool

Fig. 3 The responses of force signal due to tool chipping and fracture

공구의 부절삭날(minor cutting edge)이 공작물과 항상 일정한 압력으로 접촉하기 때문이며<sup>(16,17)</sup> 공구의 여유면(flank face)이 마멸되어 접촉면적이 증가하거나 혹은 접촉면적이 증가하도록 공구가 파손되면 Fig. 2에서와 같이 배분력이 증가함을 볼 수 있다.

3.2 절삭력신호를 이용한 공구파손 검출

(1) 공구의 마모 및 파손에 대한 절삭력신호

절삭가공중 공구의 파손은 공구의 마멸과는 달리 순간적으로 발생하며 절삭력, 절삭온도, 가공물 표면에 급격한 변화를 가져온다. 그러나 이러한 변동은 예상치 못한 절삭조건의 변화에 의해서도 일어날 수 있으므로 이들의 감지로 부터 공구의 파손 여부를 판단하기 위해서는 공구 파손 이외의 환경 변화에 의한 측정치의 변동성분을 배제할 수 있는 방법이 제시되어야 한다. 즉, 절삭력의 변화가 가공조건의 변화에 의한 것인지 아니면 파손에 의한 것인지를 구분이 필요하게 된다.

Fig. 2, Fig. 3은 각각, 공구가 마멸되었을 경우와 파손 되었을 경우의 절삭력 변화를 나타내는 그림이다. Fig. 2 (a)의 그림은 정상적인 공구와, 이미 경사면 마멸(crater wear)이 발생한 공구의 절삭력을 비교한 그림이고 (b)는 여유면 마멸(flank wear)이 일어난 공구에서의 절삭력 변화이다. 그림에서 볼 수 있듯이 경사면 마멸이 발생한 경우에는 절삭력의 변동이 거의 없지만 여유면 마멸의 경우에는 절삭력의 세분력이 모두 증가하는 모습을 볼 수 있다.

한편, 공구에 미소파괴(chipping)가 발생한 경우에는 Fig. 3(a)에서와 같이 절삭력의 이송분력과 배분력이 계속해서 증가하는 것을 볼 수 있으며, 공구의 기하학적인 형태가 크게 변하는 파손(massive breakage)이 일어났을 경우에는 Fig. 3(b)에서와 같이 절삭력의 주분력과 이송분력은 갑자기 감소하지만 배분력은 갑자기 상승하는 모습을 볼 수 있다. 이러한 현상의 원인은 앞서서도 언급한 바와 같이 공구의 부여유면과 가공물이 일정한 압력으로 접촉하다가<sup>(16,17)</sup> 공구가 파손되면서 그 접촉면적이 증가하기 때문인 것으로 추측된다.

따라서, 공구의 부여유면에 작용하는 수직력은, 공구가 크게 파손된 경우에 파손을 나타내는 중요한 인자가 되며 본 연구에서는 공구의 부여유면(minor flank face)에 작용하는 수직력 성분을 공

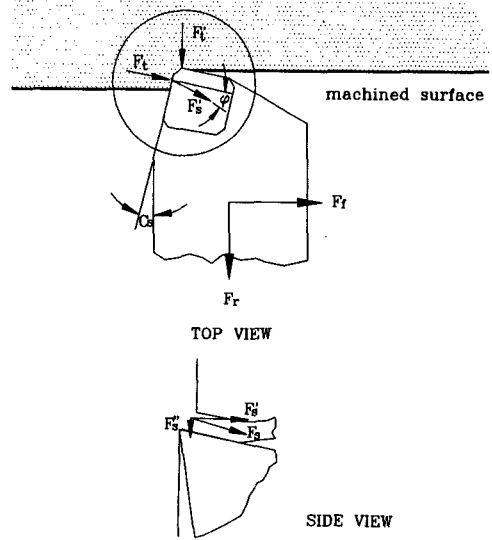


Fig. 4 Normal forces at the tool flank face

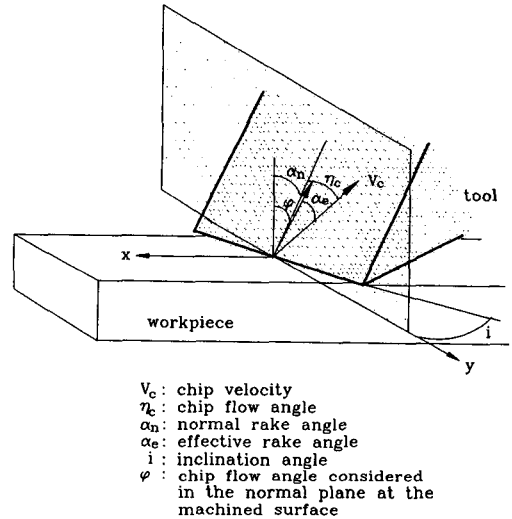


Fig. 5 Chip flow angle in the oblique cutting process

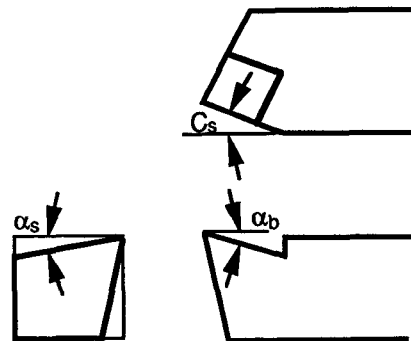


Fig. 6 Tool angles

Table 1 Calculated tool angles in the oblique cutting

Holder type	i	$\alpha_n$	$\alpha_c$	$\varphi$	$\sin C_s - \cos C_s \tan (C_s + \varphi)$
CSBPR/L	-1.558	5.965	6.003	1.403	-0.026
CSTPR/L	-3.008	5.959	6.101	2.707	-0.056
CSDPN	-4.250	5.951	6.235	3.821	-0.101
PSDNN	0.00	-11.788	-11.788	0.0	0.0
PCBNR/L	-4.250	-7.484	-7.125	4.830	-0.089

구의 기하학적 형태와 가공의 형태로 부터 산출하여 공구의 파손을 감지하고자 한다.

(2) 공구 부여유면에 작용하는 수직력

배분력으로 부터 공구 부여유면에 작용하는 수직력성분의 산출은 다음과 같이 이루어진다. 공구동력계로 부터 측정되는 이송분력과 배분력은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 여유면(flank face)과 부여유면에 작용하는 수직력  $F_t, F_t'$  그리고 공구 경사면(rake face)에서 칩의 유동으로 인하여 발생하는 마찰저항력  $F_s$ 의 합성된 결과이며, 이때  $F_s$ 는 수평력  $F_s'$ 와 수직력  $F_s''$ 로 분리될 수 있다.

Fig. 4, Fig.5의 공구 형상과 가공의 형태를 고려하여 이송분력과 배분력 각각에 대한 합력을 구하면 다음과 같다.

$$F_f = F_t \cos C_s + F_s'' \cos (C_s + \varphi) \quad (3)$$

$$F_r = F_t \sin C_s + F_s'' \sin (C_s + \varphi) + F_t' \quad (4)$$

$$\text{where } \cos \varphi = \frac{\cos \alpha_n \cos \eta_c}{\cos \alpha_c}$$

$$\eta_c = i, \quad C_s = \text{side cutting edge angle}$$

또한, 위와 같은 공구각은 Fig. 6에서와 같이 공구의 기하학적 형태로 부터 다음과 같이 계산된다.

$$\alpha_n = \tan^{-1} \{ (\tan \alpha_s \cos \alpha_s + \tan \alpha_b \sin \alpha_s) \cos i \} \quad (5)$$

$$\alpha_c = \sin^{-1} (\sin^2 i + \cos^2 i \sin \alpha_n) \quad (6)$$

$$i = \tan^{-1} (\tan \alpha_b \cos C_s - \tan \alpha_s \sin C_s) \quad (7)$$

식(3), (4)로부터  $F_s'$ 를 계산하면 다음의 식(8)과 같다.

$$F_s' = \frac{F_f - F_t \cos C_s}{\cos (C_s + \varphi)} = \frac{F_r - F_t \sin C_s - F_t'}{\sin (C_s + \varphi)} \quad (8)$$

결국, 식(8)로부터  $F_s'$ 를 소거하여  $F_t'$ 에 대한 식으로 표현하면 식(9)과 같이 된다.

$$\therefore F_t' = F_s' - F_r \tan (C_s + \varphi)$$

$$-F_t' (\sin C_s - \cos C_s \tan (C_s + \varphi)) \quad (9)$$

한편, 여러 형태의 공구 홀더(holder)에 대한 위의 각들과 식(9)의 우변 끝항은 식(5), (6), (7)로부터 계산할 수 있다. Table 1에서와 같이 일반적인 공구홀더에 대하여  $\varphi$ 가 기하학적으로 거의  $0^\circ$ 에 가까우며, 식(9)의 우변 끝항 값이 상대적으로 작기때문에 본 논문에서는 계산의 용이성을 위해 이항(term)을 무시하기로 하였다. 즉, 칩의 유동(flow)이 주절삭날(major cutting edge)과 수직하는 방향으로 이루어 진다고 가정하면 식(9)는 다음과 같이 된다.

$$F_t' = F_r - F_t \tan (C_s) \quad (10)$$

따라서 공구의 부여유면에 작용하는 수직력  $F_t'$ 는 배분력과 이송분력 그리고 공구의 형상에 의해 주어지는 옆면 절삭날각(side cutting edge angle)  $C_s$ 만으로 산출될 수 있다. 이렇게 산출된 수직력  $F_t'$ 의 그림이 각각 Fig. 1, Fig. 2에 함께 도시되어 있다. 그림에서 알 수 있듯이 가공조건(cutting speed, feedrate, depth of cut)의 변화에 의한  $F_t'$ 의 변화는 거의 없으며, 공구가 마멸되었을 경우에도 변화가 거의 없었다. 그러나 5장에서 언급하겠지만 공구가 파손되었을 경우에서만은  $F_t'$ 가 급격히 증가하는 모습을 볼 수 있으며, 따라서 공구파손 감지의 가능성을 잘 나타내 준다고 할 수 있다.

## 4. 실험

### 4.1 실험 장치

본 연구에 사용된 장비와 그 제원은 다음의 Table 2와 같다. Fig. 7은 이와 같은 장치를 구성한 순서도(flow chart)이다.

Table 2 specifications of experimental apparatus

품 명	제 원
선반(Lathe)	Ward사, Scholar capstan lathe(turret lathe)
공작물(Workpiece)	SM45C(Rc-25) Heat treated SM45C(Rc-55)
공구(Tool)	insert tip : P20-type carbide tool(SPGN120304) Tool holder : CSBPR/L-style(대한중석)
AE센서	Model AE-905S, NF Block Co.
Preamplifier	Model AE-911, NF Block Co. 40 dB gain 100kHz High pass filter
Discriminator	Model AE-922, NF Block Co.20 dB gain 100kHz-1MHz Band pass filter
공구 동력계	Sato, AST-TH
Strain amplifier	Kyowa, DPM-612A×3(300Hz, Low-pass filter)
A/D converter	Labin master, sampling time : 0.43msec
Micro-computer	IBM-PC(AT)

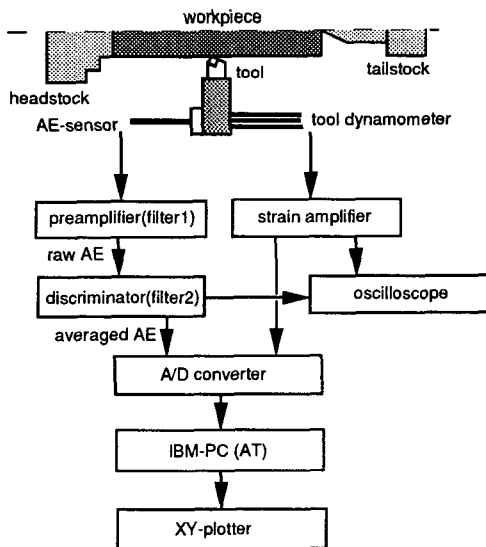


Fig. 7 Experimental set-up

#### 4.2 실험 방법

공구가 파손되는 순간의 RMS AE 신호와 절삭력신호를 얻기 위해서 실험은 두가지 방법으로 수행되었다. 먼저 공구의 큰 파손(massive breakage)을 유발시키기 위해서 사전에 공구의 끝부분에 Fig. 8과 같이 방전가공을 이용하여 홈(slot)을 만들어 놓았고 피삭재의 재료는 일반 SM45C를 사용하였다.

한편, 공구의 작은 파손을 발생시키기 위하여 공작물인 SM45C를 열처리 하였으며 그 결과 공작물의 경도가 Rc~25에서 Rc~55로 증가하였다. 이러한 공작물을 가공할 경우 공구는 쉽게 파손되었다. 5장에서 묘사되는 그림들은 새로운 공구를 사용해서 가공할 경우 공구가 파손된 그림으로서 0.43 msec의 샘플링 타임(sampling time)으로 5000개의 데이터를 받아서 파손 전후를 묘사한 것이다.

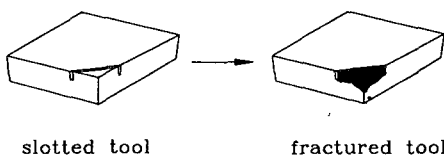


Fig. 8 The shapes of slotted tool and fractured tool

#### 5. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는 공구의 파손을, 미소파괴(chip-ping)를 제외하고 큰 파손(breakage)과 작은 파손의 두가지로 구분하였다. 먼저 공구의 큰 파손은 공구의 절삭참여 면적이 크게 변할 정도의 파손을



의미하고 작은 파손은 공구의 기하학적 형태는 변하지 않고 공구의 표면이 벗겨지거나 공구의 일부가 미세하게 떨어져 나간 상태로 정의하였다.

5.1 공구의 큰 파손(massive breakage)

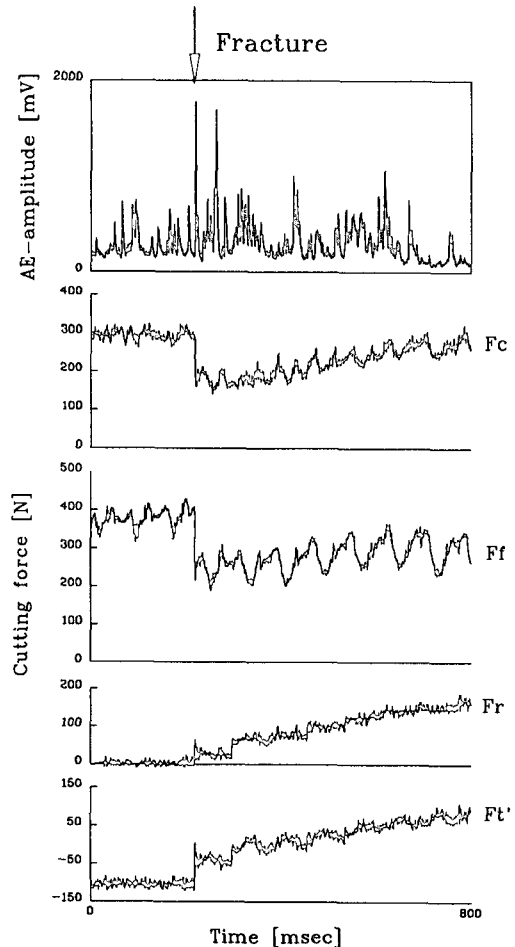
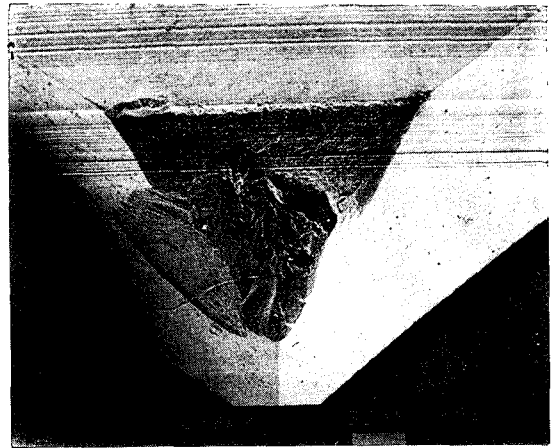
Fig. 9는 슬로팅(slotting)한 공구를 이용하여 가공하였을 경우 발생하는 RMS AE신호와 절삭력 신호의 모습, 그리고 파손된 공구의 사진을 나타낸 것이다. 공구가 슬로팅된 경우 공구의 경사면과 여유면이 연속적이지 않기 때문에 그 부분에 가공물의 일부분이 계속 용착되고 또 용착된 금속이 떨어져 나가면서 AE신호의 레벨이 일정하지 못하거나 혹은 절삭력도 안정되지 못하게 된다. 그러나 이러한 현상은 공구의 파손순간을 감지하는 것에는 영향이 없고 실제 가공에서는 발생하지 않는 현상이므로 본 연구에서는 무시하기로 하였다.

Fig.9와 같이 공구가 크게 파손된 경우에는, 먼저 AE신호의 경우, 파손 순간에는 항상 높은 피크가 발생하고 평균 AE값은 대체로 감소하지만 칩잡음으로 인하여 증가 혹은 변하지 않기도 한다. 이것은 앞에서 언급한 바 있듯이, 공구파손의 크기가 상당히 크고 실제의 절삭이 일어나는 부분은 감소하게 되어 그만큼 변형에 참여하는 부피가 작아지기 때문에 평균 AE값이 감소하는 것이다. 그러나 다른 관점에서 보면, 공구가 파손되면 공구의 선단과 공작물 사이의 접촉면적이 넓어져 평균 AE값이 증가할 수도 있는데, 그 둘 사이의 정량적 관계는 분석하기 어렵다.

절삭력의 경우 파손이전에는 일정한 힘을 유지하다가 파손되는 순간 주분력과 이송분력은 갑자기 감소하고 배분력은 증가한다. 또한, 공구 부여유면에 작용하는 수직력( $F_t'$ )은 파손순간에 급격한 증가를 보이고 있어 파손의 감지수단으로서 적절하다고 판단된다. 공구가 파손된 이후에는 공구와 피삭재사이의 접촉이 매우 불규칙해지고, 절삭이 제대로 이루어지지 않고 큰 소성변형등을 동반하므로 일반적으로는 세분력 모두 서서히 증가하거나 채터(chatter)를 발생시키게 된다.

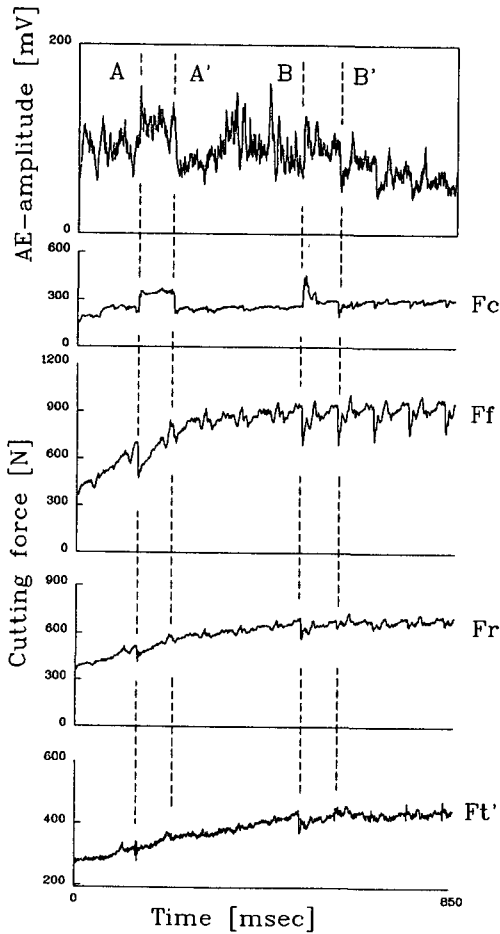
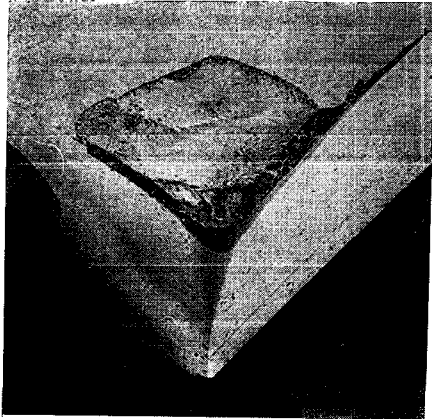
5.2 공구 경사면(Rake face)의 파손

Fig. 10은 공구의 경사면이 파손된 경우를 나타내고 있는데 공구가 A 지점과 B지점에서 각각 한 번씩 파손된 것이다. 또한, A'와 B'지점은 공구가 파손된 A, B 지점으로 부터 공작물이 정확히 한



Workpiece : SM45C  
 v : 120 m/min, f : 0.05 mm/r, d : 1 mm

Fig. 9 The responses of AE and force signal due to tool fracture(massive breakage)



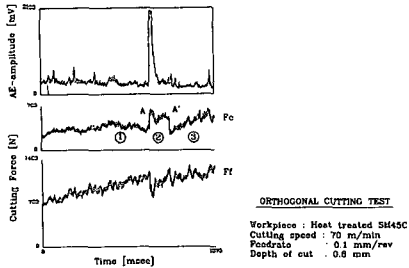
Workpiece : Heat treated SM45C  
 V : 125 m/min, f : 0.1 mm/r,  
 d : 1.0 mm

Fig. 10 The responses of AE and force signal due to tool fracture(rake face fracture)

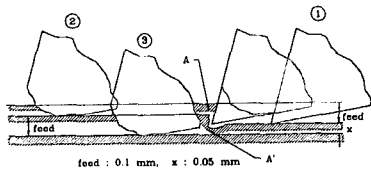
회전한 이후의 지점이다. 파손 순간인 A지점에서 AE신호는 피크가 발생한 후 그 평균 레벨이 증가하고 있고, 절삭력신호의 경우에는 주분력이 갑자기 증가하고 이송분력과 배분력은 갑자기 감소하고 있다. 그 후 AE레벨은 높게 유지되다가 A'에서 갑자기 감소하게 된다. 절삭력의 경우에는 주분력은 높게 유지되다가 A'에서 갑자기 감소하고 이송분력과 배분력은 계속해서 증가하는 경향을 나타낸다.

이러한 신호변화의 특이성을 좀 더 자세히 관측하기 위해 같은 재료의 피삭재를 2차원 절삭하는 보충실험을 수행하였다. 즉, 공구의 배분력을 제외시킨 상태에서의 신호변화를 관찰하기 위해 파이프(pipe) 형태의 공작물을 가공하여 보았다. 이때 얻어지는 결과는 3차원 절삭의 경우와 유사하게 나타났는데 그것은 Fig. 11과 같다. Fig. 11(a)는 2차원 절삭 실험의 신호를 나타낸 것이고 (b)는 그 공구의 이동경로와 파손 상태를 나타낸다. 또한 (c)는 각각 공구가 ①, ②, ③의 위치에 있을 때의 칩의 사진이고 (d)는 그 칩의 배면 사진이다. 신호의 변화와 그 현상을 분석하면 다음과 같다.

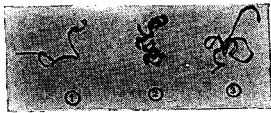
Fig. 11(b)에서와 같이, 파손을 전후한 공구의 이동경로는 그 순서에 따라 ①, A, ②, A', ③의 5가지로 나타낼 수 있다. 먼저 공구가 파손되기 전에 ①과 같이 가공할 경우, 이 때에는 Fig. 11(d)에서와 같이 칩의 두께나 폭은 다른 경우에 비해 작게 나타나며 칩의 배면도 상대적으로 매끈한 편이다. A 지점에 도달하기 전에 절삭력의 이송분력과 배분력이 서서히 증가하게 되는 것은 앞에서도 언급했듯이 공구의 미소파괴(chipping) 때문이다. 그러나 본 논문에서 미소파괴는 연구에서 제외하기로 하였다. 그 후 공구가 A지점에서 파손되는데 파손된 부분은 공작물에 부딪혀 공작물에 손상을 주기도 하고 그렇지 않을 수도 있다. 공구가 A지점에서 파손되면 그 순간 이송방향으로 공구와 공작물은 순간적으로 접촉력이 약해지므로 이송분력은 갑자기 감소하게 된다. 그 이후 공구는 이송방향으로 계속 전진하게 되고 이 때에는 공구의 파손된 면에 추가적인 미소파괴가 발생하거나 피삭재의 일부가 공구에 계속 용착되면서 이송분력은 서서히 증가하게 되는 것이다. 한편, A 지점에서 공구가 파손될 때 공구는 표면이 거칠어지고, 또 일반적으로 실질적인 경사각이 감소하도록 파손되어 주분력은 갑자기 증가하게 되는 것이다. 파손된 공구는 ②의 위치에



(a) The responses of AE and force signal



(b) Tool paths during one revolution of workpiece



(c) The variations of chip shape



(d) The rear faces of chip

Fig. 11 Tool fracture in the orthogonal cutting test

서 계속 가공하게 되는데 이 때에는 공구의 갑작스런 파손으로 인하여 칩의 유동이 공구면을 따라 매우 불안정하게 일어나고 칩의 배면과 공구의 경사면은 큰 마찰로 인하여 AE신호의 레벨도 증가하며, 그림(d)에서와 같이 칩의 폭과 두께는 공구가 ②의 위치에 있을 때 가장 크다. 즉, 공구는 A지점에서 갑작스런 파손으로 인하여 실질적인 이송량이 감소한 상태에서 칩의 폭과 두께가 커지고 칩의 유동도 많은 에너지를 필요로 하게 되어 주분력은 그동안 증가하게 되는 것이다. 그러한 상태로 불안정한 절삭이 공작물이 한 회전 하는 동안 계속 발생하다가 공구가 A'의 위치에 오게되면 이송분력은 경우에 따라 다시 갑자기 감소하기도 하고 계속 증가하는 추세를 나타내기도 하는데 이것은, 공구가 A지점에서 파손될 때 공구의 파손된 부분이 피

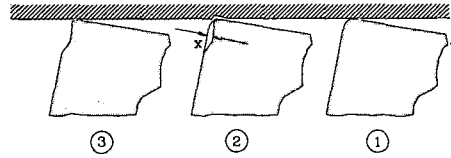


Fig. 12 Tool paths, (1) before fracture, (2) at fracture, (c) after fracture

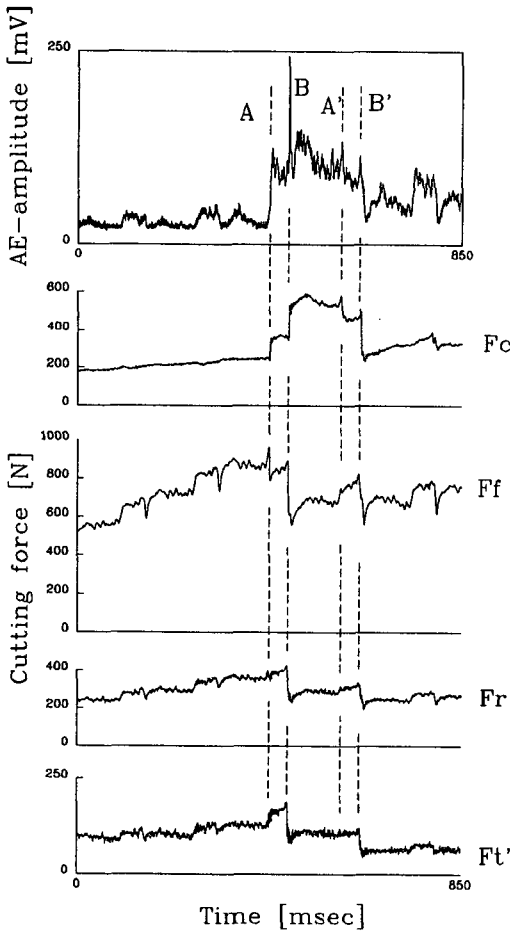
삭재에 손상을 주게될 경우에는 A'에서 이송분력이 갑자기 감소하고 그렇지 않을 경우에는 이송분력은 계속 증가하게 되는 것이다. 한편, 공작물의 이송량이 갑자기 증가하면서 칩의 유동등 가공은 안정화되는 것으로 추측되는데 그것은 칩의 폭과 두께가 ③에서 다시 작아지고 칩의 배면도 보다 매끄러워지는 것으로 부터 알 수 있다. 그리하여 AE의 레벨과 주분력은 A'에서 갑자기 감소하고 그 이후, ③의 위치에서는 그 상태로 계속 가공하게 되는 것으로 추측된다.

한편, 배분력의 경우에는 Fig. 12의 ①에서와 같이 공구와 공작물이 접촉한 상태에서 가공하다가 ②의 순간 공구가 파손될 때 역시 파손된 공구의 인선(edge)은 공작물에 그림과 같은 손상을 주게 된다. 또한, 공구의 파손은 경사면에만 발생했으므로 공구와 피삭재의 실제 접촉면적이 더 작아지게 되고 공작물과의 접촉력이 작아지므로 배분력은 갑자기 감소하게 되는 것이다. 그 후 공구가 ③의 위치에 오게되면 공구의 노즈(nose) 부분은 매우 미세하게 파손되면서 배분력은 서서히 증가하게 된다. Fig. 10은 이러한 파손이 A와 B에서 각각 발생한 경우를 나타내고 있다.

Fig. 13은 이러한 현상이 두번 한꺼번에 발생하는 경우로서 위의 설명을 잘 검증해 주고 있다. Fig. 10과 Fig. 13의 차이는 파손 이후의 이송분력과 배분력의 변화 양상인데 이송방향과 배분력방향으로 공구의 파손이 예리하게 일어난 경우는 Fig. 12와 같이 파손 이후에 이송분력과 배분력이 그 전보다 더 낮게 유지되는 것이다.

### 5.3 공구 주절삭날(major cutting edge)의 파손

Fig. 14는 공구의 주절삭날만이 미소하게 파손된 경우를 나타내고 있다. 그림의 주분력과 이송분력의 경우는 5.2절과 흡사하다. 그러나 배분력은 거의 변화없이 매우 완만하게 증가하고 있다. 이것은 파손의 형태가 주절삭날에 국한되어 있기 때문에

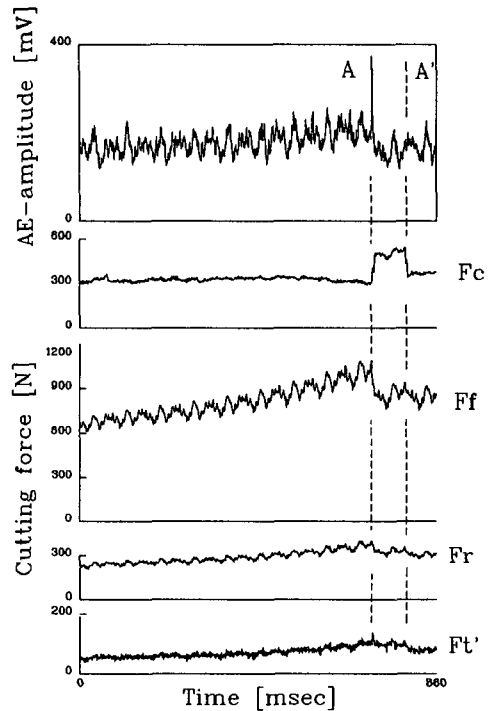
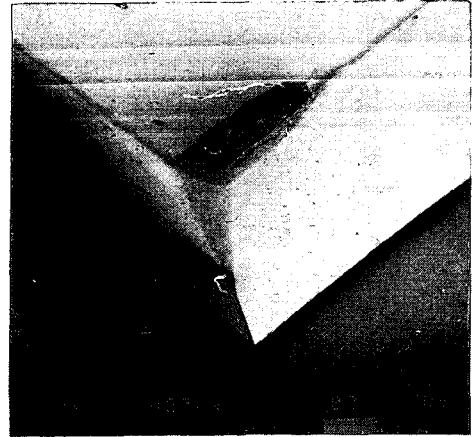


Workpiece : Heat treated SM45C  
 V : 58 m/min, f : 0.05 mm/r,  
 d : 1.0 mm

Fig. 13 The responses of AE and force signal due to tool fracture(rake face fracture)

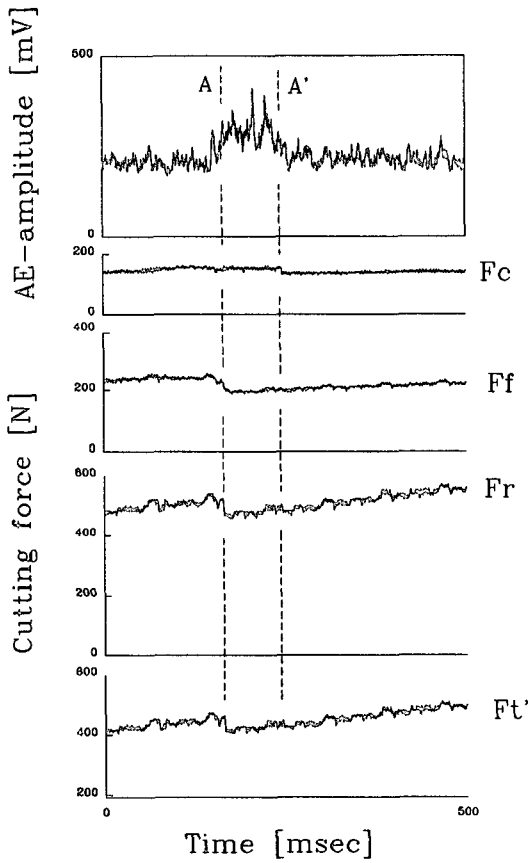
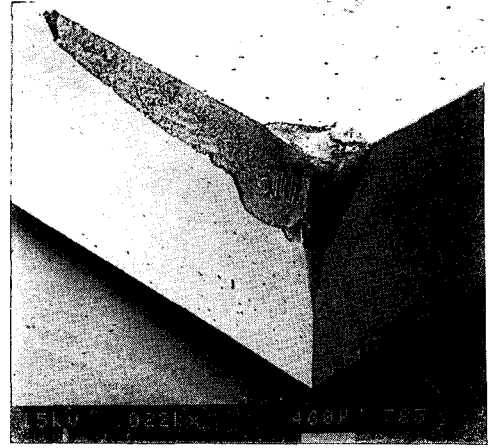
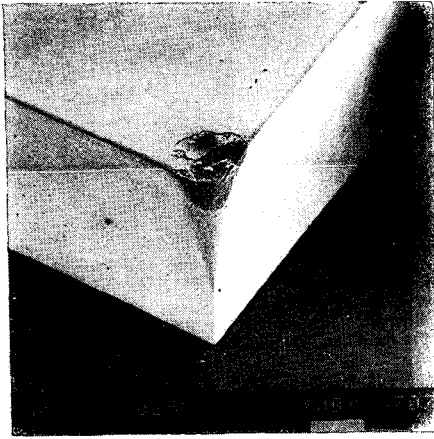
공구와 피삭재의 접촉이 배분력 방향으로는 변하지 않기 때문이다.

한편, AE신호는 일정한 레벨을 유지하다가 파손 순간에 피이크(peak)가 발생하고 그 후 AE-레벨은 감소한다.



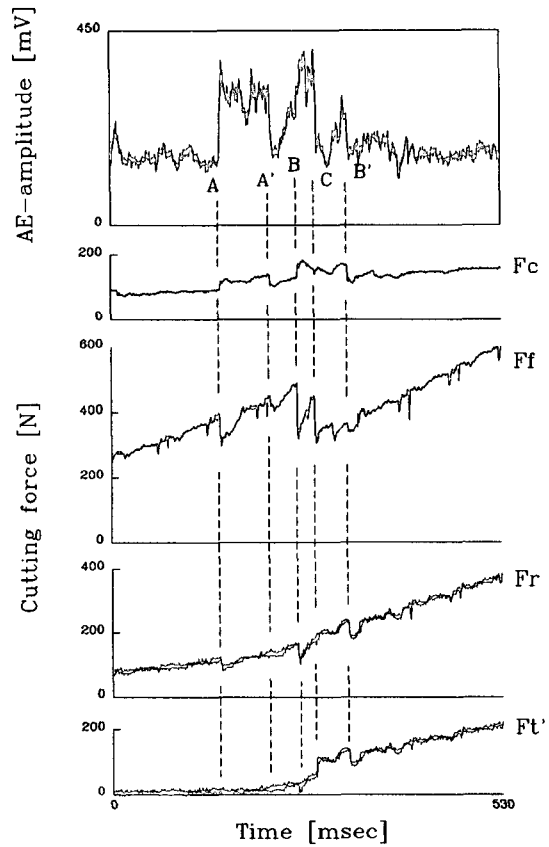
Workpiece : Heat treated SM45C  
 V : 110 m/min, f : 0.05 mm/r  
 d : 1.0 mm

Fig. 14 The responses of AE and force signal due to tool fracture(major cutting edge fracture)



Workpiece : Heat treated SM45C  
 V : 120 m/min, f : 0.1 mm/r,  
 d : 0.3 mm

Fig. 15 The responses of AE and force signal due to tool fracture(tool nose fracture)



Workpiece : Heat treated SM45C  
 V : 115 m/min, f : 0.05 mm/r  
 d : 0.5 mm

Fig. 16 The responses of AE and force signal due to tool fracture(minor cutting edge fracture)

5.4 공구 노우즈(Nose) 부분의 파손

Fig. 15는 공구의 노우즈가 공작물과 접촉하는 면적이 변할 만큼 크게 파손된 경우가 아니고 노우즈 반경은 거의 유지하면서 그 위쪽 경사면에 미세한 파손이 발생한 경우이다. 이것은 파손 자체는 미소하지만 이로 인해 발생하는 현상은 5.2절과 흡사하고 신호의 변화 크기만 작게 나타나고 있으나, 파손의 크기가 작을 수록 절삭력신호보다는 AE신호가 파손에 더욱 민감하게 나타나고 있다는 것을 주의해야 한다.

5.5 공구 부여유면(Minor flank face)의 파손

Fig. 16은 공구의 경사면이 약간 파손되고 공구의 노우즈와 부절삭날이 주로 파손된 경우이다. 신호의 형태로 알 수 있는 것은 A지점과 B지점에서 두번 공구의 경사면이 파손되었고 C지점에서 공구의 부절삭날이 파손된 것으로 보인다. 공구의 부여유면이 파손될 경우 그림에서와 같이 신호변화가 뚜렷하지는 않지만 AE신호와 주분력은 약간 감소하고 이송분력은 갑자기 감소하며 배분력은 갑자기 증가하는 것으로 나타난다. 즉, 신호의 모습은 공구의 큰 파손에서와 유사하고 신호의 변화 크기만 이 더 작다고 할 수 있다. 이것은 공구의 부절삭날이 파손되면서 공구의 부여유면과 피삭재의 접촉면적이 넓어지기 때문이다. 따라서  $Ff'$ 도 증가하게 되는 것이다.

6. 공구파손 판정 알고리즘

본 연구에서는 전술한 바와 같이, 공구의 파손을 그 크기에 따라 큰 파손과 작은 파손으로 나누고 작은 파손은 다시 파손의 형태에 따라 4가지 종류로 구분하였다. 각각의 경우에 대한 이증신호의 양상을 요약해 보면 다음과 같다.

(1) 공구의 큰 파손

파손 순간에 AE-피이크가 발생하고 절삭력중 주분력과 이송분력은 감소하며 배분력은 증가한다. 즉, AE-피이크가 발생하고 주분력은 감소하며  $Ff'$ 는 증가한다.

(2) 경사면의 파손

파손 순간에 AE-피이크의 발생 및 레벨이 상승되고 절삭력중 주분력은 증가하며 이송분력과 배분력은 감소한다. 단, 공구의 부절삭날이 동시에 손상된 경우 배분력은 증가한다. 즉, AE-피이크의

발생 및 레벨이 상승되고 주분력은 증가하며  $Ff'$ 는 감소 또는 증가한다.

(3) 주절삭날의 파손

파손 순간에 AE-피이크의 발생 및 레벨이 변화하고 주분력은 상승하며 이송분력은 감소한다. 그리고 배분력에는 변화가 없다. 즉, AE-피이크의 발생 및 레벨이 변화하고 주분력은 상승하며  $Ff'$ 에는 변화가 없다.

(4) 노우즈부분의 파손

(2)의 경우와 그 경향은 같으나 각 신호의 변화폭이 (2)보다 작게 나타난다.

(5) 부여유면의 파손

(1)의 경우와 그 경향은 같으나 각 신호의 변화폭이 (1)보다 작게 나타난다.

공구의 파손을 실제로 감지하기 위해서는 앞에서 언급한 바와 같이 가공조건의 변화에 의한 신호와 파손에 의한 신호의 차이를 구분해야 한다. 먼저, 가공조건중 절입량과 이송량의 변화에 대해 AE신호는 그 레벨의 변화가 없으며 절삭력신호는 주분력과 이송분력은 함께 증감하고 배분력은 변하지 않으므로 파손에서의 신호와 구분이 가능하다. 한편, 절삭속도가 변할 경우 AE신호는 그 레벨이 변하지만 절삭력신호는 거의 변하지 않으므로 파손신

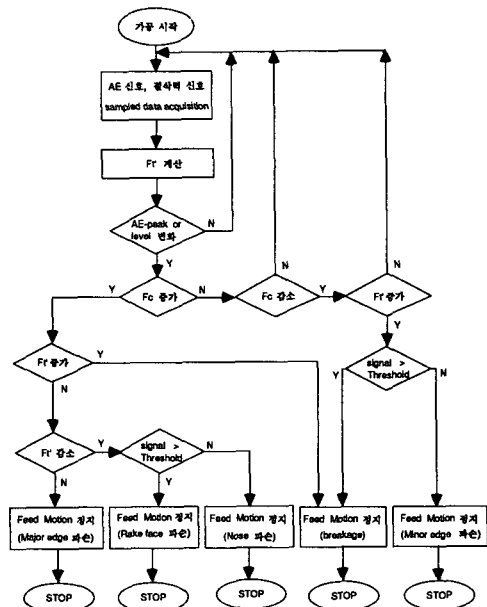


Fig. 17 The flow chart of tool fracture detection algorithm

호와 구분이 가능하다. 또한, 공구의 여유면이 마멸된 경우에는 AE신호의 레벨이 상승하고 절삭력도 세분력 모두가 증가했기 때문에 역시, 공구파손의 신호와 구분이 가능하다.

그러므로 AE신호와 절삭력신호의 이중신호를 이용할 경우, 가공조건의 변화나 공구마멸의 신호와 공구파손의 신호와는 정확한 구분이 가능하다. 또한 지금까지의 결과로 부터, 파손의 크기가 클수록 절삭력신호의 신뢰성이 높으며 파손의 크기가 작을수록 AE신호가 더 민감하게 변화하는 것을 알 수 있었다. 따라서 앞으로 수행되어야 할 공구의 미소파괴등을 고려한다면 공구의 파손은 일차적으로 AE신호의 측정이 선행되어야 할 것으로 생각된다. 이와 같은 결과를 순서대로 나타내면 Fig. 17과 같다.

실제 가공중 공구가 파손되었을 경우에는 파손을 감지하는 순간 동작기계를 정지시켜야 한다. 실제로 위와 같은 알고리즘을 사용하고자 할 때에는 각각의 경우 적당한 스톱레솔드값(Threshold)을 결정하는 일이 우선이라 할 수 있다. 이러한 스톱레솔드값의 결정은 공작물의 재질과 공구의 종류에 따라 결정되어야 할 것이다.

## 7. 결 론

본 연구에서는 공장 자동화 및 무인화 공장을 실현하기 위한 모니터링 기술중에서 가장 기본이 되는 공구파손의 실시간 검출에 관한 연구를 수행하였고 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 공구가 파손되는 순간, AE신호는 피이크가 발생하고 그 평균 레벨도 변화한다.

(2) 공구가 파손되는 순간, 절삭력의 세 분력은 파손부위에 따라 각각 그 특성을 가지면서 변화한다.

(3) 공구가 파손되는 순간, 위와 같은 이중신호의 변화를 관측함으로써 공구의 큰 파손(massive breakage), 경사면 파손, 주절삭날 파손, 부역유면 파손, 그리고 공구의 노우즈 부분 파손을 분리하여 감지할 수 있다.

위와 같은 연구 결과를 실제에 적용하기 위해서는 가공하고자 하는 공작물과 사용하고자 하는 공구의 재질 및 형상에 대한 몇차례의 실험을 수행하여 파손을 판정하기 위한 스톱레솔드 값을 결정하여

야 하며, 아울러 공구의 미소파괴(chipping)에 대한 감지가 추가적으로 수행되어야 할 것이다.

## 참고문헌

- (1) Tlusty, J. and Masood, Z. 1978, "Chipping and breakage of carbide tools," J.of Eng. for Ind., vol. 100, pp. 403~412.
- (2) Li Dan and Mathew, J. 1990 "Too wear and failure monitoring techniques for turning-A review," Int. J. Mach. Tools Marufact. Vol.30, No.4, pp. 579~598.
- (3) Inasaki, I. and Yonetsu, S. 1981, "In process detection of cutting tool damage by acoustic emission measurement," Proc. 22th Int. MTDR conf., pp. 261~268.
- (4) Micheletti, G.F., De Filippi, A. and Ippolito, R., 1968, "Tool wear and cutting forces in steel turning," Annals of the CIRP, Vol.16, pp. 353~360.
- (5) Takeyama, H. Sekiguchi, H. and Takada, K. 1970 "One approach for optimizing control in metal cutting," Annals of the CIRP, Vol.18, pp. 345~351.
- (6) König, W. Langhammer, A. and Schemmel, H. U. 1972, "Correlation between cutting force components and tool wear," Annals of the CIRP, Vol. 21/1, pp. 19~20.
- (7) Moriwaki, T. 1980, "Detection for cutting tool fracture by acoustic emission measurements" Annals of the CIRP, Vol.29, pp. 35~40.
- (8) Diei, E.N. and Dornfeld D.A., 1987, "A model of tool fracture generated acoustic emission during machining," J.of Eng. for Ind., Vol.109, pp. 227~233.
- (9) Lan, M.S. and Dornfeld, D.A. 1984, "In-process tool fracture detection." J.of Eng. Materials and Technology, Vol. 106, pp. 111~118.
- (10) Pond, James B. 1990, "Putting the brakes on broken tools," Cutting Tool Engineering, pp. 20~26.
- (11) Tlusty, J. 1983, "A critical review of sensors for unmanned machining," Annals of the CIRP, Vol.32/2, pp. 563~572.

- (12) Micheletti, G.F. De Filippi, A. and Ippolito, R., 1968, "Tool wear and cutting forces in steel turning," *Annals of the CIRP*, Vol. 116, pp. 353~360.
- (13) Elijah Kannatey-Asibu, Jr. and D.A.Dornfeld, 1981 "Quantitative relationships for acoustic emission from orthogonal metal cutting," *J. of Eng. for Ind.*, Vol. 103, pp. 330~340.
- (14) Kececioğlu, D. 1960, "Shear-zone size, compressive stress, and shear strain in metal cutting and their effects on mean shear-flow stress," *J. of Eng. for Ind.*, pp. 79~86.
- (15) Geoffrey Boothroyd, 1975, *Fundamentals of metal machining and machine tools* McGraw-Hill Book Co.
- (16) Connolly, R. and Rubenstein, C., 1968 "The mechanics of continuous chip formation in orthogonal cutting," *Int.J. of MTD*, Vol. 8, pp. 159~187.
- (17) 최중근, 양민양, 1989 "기계가공 최적화를 위한 가이드 시스템에 관한 연구", *한국정밀공학회지*, 제 6 권 제 4 호, pp.71~83.