

## 이송모터전류를 이용한 정면 밀링공구의 파손감시 시스템에 관한 연구

A Study on the Tool Breakage Detection System in Face Milling Process  
Using Motor Current Measurement

이강희\*, 허일규(서울대 대학원), 권원태(서울시립대 정밀기계공학과),  
주종남, 이장무(서울대 기계설계학과)

### Abstract

In milling process, monitoring and diagnosis system is very important to accomplish factory automation. In this study, to develop on-line tool breakage detection system in face milling operation, analysis and experiment were performed. The tool breakage detection experiment was performed in machining center and the effectiveness of the developed tool breakage detection algorithm and the usage of feed drive current as a detection signal were verified.

### 1. 서론

최근들어 생산성의 향상 및 고객의 다양한 요구사항 만족, 단축된 제품 사이클에 대한 적용, 노사분규등의 이유로 공장자동화(FA)에 대한 투자가 증가하고 있으며, 이러한 과정의 일환으로 생산공정의 기본 유닛의 하나인 공작기계의 자기진단기능과 조정기능을 갖춘 시스템화의 필요성이 제기되고 있다. 본 연구에서는 이러한 공작기계의 이상진단 및 감시에 있어서 밀링공정에 대한 공구파손현상 검출시스템의 개발을 목표로 연구를 수행하였다.

공구의 파손, 충돌, 과부하, 마모와 같은 이상현상에 대한 검출은 크게 직접적인 방법과 간접적인 방법으로 나뉘어지게 되는데, 최근의 연구동향은 간접적인 방법을 사용한 실시간 검출 시스템의 개발에 집중되어 있다. 즉 AE(Acoustic Emission), 절삭력, 모터인입 전류량, 진동 등의 신호와 이상현상간의 관계를 해석한 후, 이러한 신호를 감지함으로써 이상현상을 검출할 수 있도록 하는것이 이상진단 분야의 주요한 연구방향이 되어오고 있다.

본 연구에서 수행한 밀링절삭공정의 파손현상은 재료의 불균일성, 공구마모에 의한 절삭력 증가, 공구의 불량 등으로 인하여 예기치 않게 발생하며, 파손이 일어난 공구를 사용하여 절삭을 수행할 경우에는 공작물의 품질뿐만 아니라, 절삭력이 비정상적으로 발생함으로써 공작기계 자체에도 심각한 피해를 줄 수 있다. 이러한 밀링공구의 파손현상을 검출하기 위하여 많은 연구가 있어왔다. Dornfeld는 이송속도, 절삭력, 절입깊이등의 절삭인자들과 AE신호와의 관계를 해석함으로써, 공구파손을 검출하고자 하였고 [1][2], Matsushima등은 주축모터의 전류량을 감지를 통한 절삭력 측정을 이용하

여 검출을 시도하였다[3]. 절삭력신호의 시계열 분석법 (Time Series Analysis)를 통하여 검출 파라미터를 개발하고자 하는 노력이 Lan, Altintas 등에 의하여 제안되었으며[4][5], Tansel등은 주어진 절삭력 신호 데이터를 통한 신경망회로(Neural Network)의 구성을 공구파손검출에 이용하고자 하였고[6], Rangwala, Dornfeld 등은 여러가지 신호를 복합적으로 사용한 시스템의 구성을 제기하였다[7].

실용적인 밀링공구파손현상의 검출을 위해서는 시스템 자체의 신뢰성뿐만 아니라, 실제 가공공정에의 적용성, 경제성 등의 측면이 같이 만족되어야 한다. 즉 이상적인 밀링공구파손검출 시스템은 신뢰성과 동시에 시스템의 설치가 가공공정에 영향을 미치지 않아야 하며, 경제성 또한 만족되어야 한다. 현재 개발되어 있는 대부분의 시스템은 공구동력계(Tool Dynamometer)와 같은 고가의 장비를 사용하고 있으며, 이 경우에는 경제성 뿐만이 아니라 실제 가공공정에의 적용 또한 거의 불가능하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 밀링 공구파손현상의 실시간 검출 시스템 및 알고리즘을 개발하는 것을 목표로 하였으며, 검출시스템의 실용성에 중점을 두고 이송방향 모터 전류량을 파손검출 파라미터로 이용하였다. 공구파손현상의 정량적 해석을 위하여 절삭력 모델링을 수행하였으며 시뮬레이션 결과를 통하여 절삭조건과 무관한 검출 파라미터를 개발하였고, 이송방향 전류량과 절삭력의 관계를 실험적으로 해석하여 이의 감지를 통한 공구파손 알고리즘을 개발하였다.

### 2 밀링공정의 절삭력 해석을 통한 파손현상의 분석

Fig.1의 밀링 절삭 공정의 2차원 기구에서 보이는 바와 같이 절삭력의 접선방향 분력  $F_T$ 와 반경방향 분력  $F_R$ 은 식 (1)과 같이 나타내어 진다.

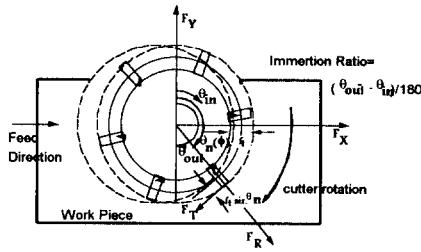


그림 1 2차원 밀링 절삭 메커니즘

Fig. 1 2-D Cutting Mechanism of Face Milling Process

$n$ : Cutter number  
 $\phi$ : Angle of Cutter Rotation  
 $\theta_n(\phi)$ : Angular Position of tooth  $n$  at the angle of cutter rotation  $\phi$   
 $K_t$ : Specific Cutting Force  
 $C$ : Chip Thickness  
 $K_r$ : Ratio of radial to tangential forces  
 $d$ : Axial depth of Cut  
 $f_i$ : Feed per tooth

$$\begin{aligned} F_T(n, \phi) &= K_t \cdot C(\theta_n(\phi)) \cdot d \\ F_R(n, \phi) &= K_r \cdot F_T(n, \phi) \\ C(\theta_n(\phi)) &= f_i \cdot \sin \theta_n(\phi) \end{aligned} \quad (1)$$

이러한 형태로 나타내어진 접선방향 분력과 반경방향 분력을 페이스밀링 커터의 기하학적 요소인 리이드 각 ( $\gamma$ ), 축방향 경사각( $\gamma_a$ ), 반경방향 경사각( $\gamma_r$ )을 도입하여 3차원적으로 해석하면 다음식(2)와 같이 되며[12], 이러한 회전좌표계상의  $F_T(n, \theta)$ ,  $F_R(n, \theta)$ ,  $F_A(n, \theta)$ 를 공구동력계를 사용하여 측정할 수 있는 고정 직각 좌표계상으로 변환시킨  $F_x(\theta)$ ,  $F_y(\theta)$ ,  $F_z(\theta)$ 는 식(3)과 같이 나타내어 지며, 이때  $\delta(\theta_n(\phi))$ 는 실제로 절삭이 일어나는가 여부를 판단하기 위하여 도입된 인자이다.

$$\begin{pmatrix} F_T(n, \phi) \\ F_R(n, \phi) \\ F_A(n, \phi) \end{pmatrix} = R \cdot \begin{pmatrix} F_x(n, \phi) \\ F_y(n, \phi) \\ F_z(n, \phi) \end{pmatrix}$$

transformed

$$R = \begin{pmatrix} S(r_s)C(r_s) & S(r_s)S(r_s)C(r_s) + C(r_s)S(r_s) & S(r_s)S(r_s)C(r_s) - C(r_s)S(r_s) \\ C(r_s)C(r_s) & C(r_s)S(r_s)S(r_s) - S(r_s)C(r_s) & S(r_s)S(r_s)C(r_s) + S(r_s)S(r_s) \\ -S(r_s) & C(r_s)S(r_s) & C(r_s)C(r_s) \end{pmatrix} \quad (2)$$

$S: \sin, C: \cos$

$$\begin{pmatrix} F_T(\phi) \\ F_Y(\phi) \\ F_Z(\phi) \end{pmatrix} = \sum_{n=1}^N \delta(\theta_n(\phi)) \begin{pmatrix} \cos \theta_n(\phi) & \sin \theta_n(\phi) & 0 \\ -\sin \theta_n(\phi) & \cos \theta_n(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_T(n, \phi) \\ F_R(n, \phi) \\ F_A(n, \phi) \end{pmatrix}$$

$$\delta(\theta_n(\phi)) = \begin{cases} 1 & \text{if } \theta_{in} \leq \theta_n(\phi) \leq \theta_{out} \\ 0 & \text{else case} \end{cases} \quad (3)$$

또한 식(1)의  $K_t$ 와  $K_r$ 은 Specific Cutting Energy와 Ratio of Radial Force to Tangential Force를 뜻하는 것으로써, Konigsberger[9]에 따르면 식(3)와 같이 절삭시 평균 침두께의 함수로 나타내어 짐이 알려져 있으며,

본 연구에서는 외날절삭(Fly Cutting)을 행하여 그 데이터로부터 곡선보간을 실시하여 값을 구하여 사용하였다.

공구파손이 일어나는 상황은 파손이 일어나면서 하나의 날이 절삭하여야 할 양을 절삭하지 못하는데에서 시작하며, 이는 파손이 일어난 절삭날의 다음 절삭날이 더 많은 양의 두께를 절삭하는 것이라고 할 수 있다.  $n-1$ 번째 절삭날에 파손이 일어나고,  $n$ 번째 절삭날이 파손이 일어난 바로 다음 절삭을 행하였다면, 다음 식(6)과 같이 침 두께가 유도되며, 그럼 2는 절삭력 모델링 결과와 공구동력계로부터 측정된 절삭력과의 비교이다.

$$K = K_1 \cdot \frac{\bar{C}_t^{(n)}}{C_t^{(n)}} \quad (4)$$

$$R = K_2 \cdot \frac{\bar{C}_t^{(n)}}{C_t^{(n)}} \quad (3)$$

$$\bar{C}_t = \text{average undeformed chip thickness}$$

$$\begin{cases} \text{if } f_i \cdot \sin \theta > (E_i - r_s) \\ \quad \left\{ \begin{array}{l} C_{i-1} = f_i \cdot \sin \theta_{i-1}(\phi) - E_i + r_{i-1} \\ C_{i-1} = f_i \cdot \sin \theta_i(\phi) + E_i + r_i \end{array} \right. \\ \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} C_{i-1} = 0 \\ C_{i-1} = 2 \cdot f_i \cdot \sin \theta_i(\phi) + E_i + r_i \end{cases}$$

$E_i$ : Length of fractured  $i$ th insert  
 $C_{t,n}$ : Chip thickness of  $n$ th insert  
 $r_n$ : run-out of  $n$ th insert

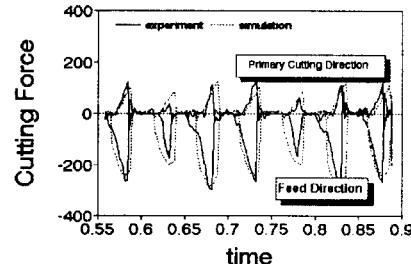


그림 2 밀링 절삭력 선도 (시뮬레이션, 실험)  
Fig.2 Cutting Force Diagram (Simulation and Experiment)

3 inserts, 400 rpm, 100 mm/min, 1mm d.o.c.

### 3. 공구파손 검출 알고리즘 개발

2절의 절삭력 모델링을 통한 파손 시뮬레이션 결과 공구의 파손시에는 주기적으로 절삭력의 변화가 관찰되나 진입시나 포켓 가공시, 이탈시에는 급격한 절삭력 변화가 일어난 뒤 거의 안정된 상태를 갖게 된다는 것을 알 수 있었다. 그러므로 주기적인 절삭력의 변화와 일시적 절삭력의 변화를 구별해 별 수 있는 알고리즘의 개발이 필요하며 절삭 공구의 런아웃에 의한 절삭력의 반복적 변화의 영향을 파손검출신호의 변화로부터 배제하는 방법이 강구되어야 한다.

밀링 주절삭 주파수성분에 의한 절삭력의 변화를 제거하기 위해서는 스피드들의 한 회전을 절삭날수로 나눈

평균절삭력의 사용이 타당하며, 균일한 절삭력 분포를 얻기 위해서 X, Y 방향 절삭력의 합력을 사용하였다.

$$F_R(t) = \sqrt{F_X(t)^2 + F_Y(t)^2}$$

$$F_{\text{av}}(t)_i = \int_{t_i - \frac{\omega}{N}}^{t_i + \frac{\omega}{N}} F_R(t) dt \quad (i = 1, \dots, N)$$

(5)

$\omega = \text{spindle rotating speed (rev/sec)}$   
 $N = \text{tooth number}$   
 $F_{\text{av}}(t) = \text{average cutting resultant force}$   
 $F_R = \text{cutting resultant force}$

즉, 평균절삭력  $F_{\text{av}}$ 는 밀링 커터의 한 회전당 밀링 커터 날 수 만큼 샘플링이 일어나는 값이 되며, 절삭 시스템에 변화가 생기지 않는 안정상태일 경우에는 일정한 값을 가지게 된다.

식 (5)에서의 절삭력  $F(t)$ 는 다음과 같은 AR(m)모델로 다시 나타낼 수 있다.

$$F(t) = \lambda_1 B \cdot F(t) + \lambda_2 B^2 \cdot F(t) + \dots + \lambda_m B^m F(t) + a(t) \quad (6)$$

$$= \lambda_1 \cdot F(t-1) + \lambda_2 \cdot F(t-2) + \dots + \lambda_m F(t-m) + a(t)$$

여기에서 각각의 계수들은 새로운 데이터가 입력됨에 따라 계속 조건에 알맞도록 적용(adaptation)하게 된다. 이러한 모델의 차수에 해당하는 m은 일반적으로 높은 차수일수록 적합한 모델링이 이루어지거나, 공구파손의 검출시에는 모델의 변화를 잔차(residual)  $a(t)$ 의 변화에 의하여 알아내는 것을 목표로 하므로 이러한 차수의 결정에는 다른 고려가 필요하다. 본 연구에서 사용할 평균 절삭력은 노이즈에 의한 영향 및 절삭시의 진동에 의한 동적성분의 영향을 최대한으로 줄일 수 있는 잇점을 가지고 있다. 그러나 이러한 평균절삭력에 절삭날 수(cutter number) N 이상의 고차 모델을 사용한다면, 스픈들의 한 회전 이전의 절삭력에 의해서도 현재의 절삭력이 영향을 받는 모델이 성립하게 된다. 즉 파손이 일어날 경우에도 절삭력은 스픈들 회전수에 끓기하여 본다면 일정한 값을 가지고 주기적으로 일어나게 되므로, 고차 모델에서는 잔차(residual)에 변화가 일어난 후, 곧 다시 정상상태로 적응하게 되는 결과를 가져오게 된다.

그러므로 일반적으로 적용할 수 있는 범용성을 가지기 위해서는 AR(1)모델을 사용하는 것이 타당하다고 생각되어 진다. AR(1) 모델링 기법은 절삭력의 변화에 민감하게 반응한다는 장점이 있으나, 데이터의 수집 과정에서 약간의 오차가 생기면 잔차의 값이 크게 변하게 된다는 단점이 있다. 이러한 이유로 그동안에는 AR(15) 차 모델등의 고차 모델을 사용한 연구가 주로 이루어져 왔다. 그러나 이러한 고차 모델링은 데이터 수집 사이에서 일어나는 오차를 충분히 보상할 수 있는 반면, 앞에서 언급한 바와 같이 계산량이 매우 많고, 잔차의 변화가 곧 정상상태로 바뀌게 되므로 본 연구에서는 스픈들 엔코더에서 인가해낸 신호 샘플링의 트리거링 신호로 이용하여 정확한 주기평균 절삭력을 구하여 이를 AR(1) 모델에 적용하였다.

그러나 이러한 AR(1) 모델에서 얻어지는 잔차(residual)를 그대로 이용하여 이의 임계값을 결정하여 그 임계값이 넘어 갈 경우 파괴가 일어났다고 하는 방식은 절삭력의 절대적인 크기에 따라서 임계값도 변하게되고, 전입 및 포켓가공시의 변화를 검출하는데에 어려움을 가지고 있으며, 런아웃이 큰 경우에는 런아웃에 의한 잔차의 변화폭과 공구파괴로 인한 잔차의 변화폭이 큰 차이를 보이지 않으므로 어느정도 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 AR(1) 모델에 기초하여 이러한 한계성을 극복하기 위하여 다음과 같은 검출인자를 개발하였다.

$$P(t) = \beta(t) \cdot \frac{a(t)}{AVE\_F_R(t)} \cdot i\_ratio \cdot n$$

$$a(t) = F_{\text{av}}(t) - \lambda(t-1) \cdot F_{\text{av}}(t-1)$$

$$\lambda(t) = \frac{F_{\text{av}}(t) - F_{\text{av}}(t-N)}{AVE\_F_R(t)} \cdot i\_ratio \cdot n$$

$$\left| \begin{array}{l} \beta(t) = 0 \quad \text{when} \quad \frac{F_{\text{av}}(t)_i}{F_{\text{av}}(t)_i (\text{before one rev})} \\ \qquad \qquad \qquad \text{is greater than } 1+e \\ \qquad \qquad \qquad \text{or smaller than } 1-e \\ \beta(t) = 1 \quad \text{in other cases} \\ e = \text{threshold value} \end{array} \right. \quad (7)$$

여기에서  $AVE\_F_R(t)$ 는 한 회전의 절삭력을 평균한 값이며  $i\_ratio$ 는 밀링 공구의 절입비,  $n$ 은 절삭날 수를 나타낸다. 또한  $a(t)$ 는 AR(1)모델링에 의해 예측된 값과 실제 측정치와의 차이 값이고 그 값을  $AVE\_Fr(t)$  값으로 나눔으로 무차원화 시키는 동시에 공구의 축방향깊이(d) 이송량(ft) 그리고 상수(Kt, Kr)들에 의한 영향을 배제하였다[5]. 공구가 포켓가공을 시작할 때 감자기 절삭력의 변화가 일어나므로 이를 공구 파괴로 오인 할 수 있는데 이런 가능성을 줄여주기 위하여  $\beta(t)$ 를 도입하였다. 즉 어떤 날에서 현재의 절삭력과 한 바퀴 이전의 절삭력의 차이가 크면 그것은 과도 절삭에 의한 것이므로 무시하고 아닐경우에만 예측값과 실제값의 차이를 추적하여 공구파손을 검출하게 된다. 물론 공구가 부러졌을 때에도 현재와 한 바퀴이전의 절삭력이 차이가 나지만 이 판단은  $r(t)$ 가 하게 되고  $r(t)$ 를 트리거링 신호로 하여  $P(t)$ 로 공구파손을 결정하게 되므로  $P(t)$ 에서 과도 절삭과 공구파괴의 차이를 인식하는  $\beta(t)$ 의 도입이 필요하게 된다. 마지막으로 올 꼽함으로써 절입비에 따른 공구의 런아웃 효과의 증감을 감소시켰다. 즉 절입비가 작을 경우 런아웃에 의한 효과가 커지는데 이 커진 양을 절입비를 곱하여 감소시킬수 있고 커질경우에는 런아웃에 의한 효과가 작아지는 데 작아진 양을 상대적으로 큰 절입비를 곱하여 상쇄시킬수 있다.

이러한 서로 다른 특성을 가진 파라메터를 도입함으로써 런아웃 및 과도절삭조건에 무관하게 공구파손검출

을 수행할 수 있는데 이를 사용한 공구파손 검출 알고리즘은 다음과 같다.

- (1) 데이터로 부터 잔차  $a(t)$ 를 계산한다.
- (2) 주어진 잔차  $a(t)$ 로 부터  $P(t)$  와  $r(t)$ 를 계산한다. 이때  $r(t)$ 가 주어진 임계값을 넘으면 이를 트리거링 신호로 하여  $P(t)$ 값의 감시를 시작한다.
- (3)  $P(t)$ 의 값이 주어진 임계값을 넘으면 파괴가 발생했다고 인식한다.
- (4) (1)의 단계로 돌아간다.

#### 4. 실험 및 해석

이송방향 모터전류의 측정을 통해 공구파손검출여부를 검증하기 위하여 실험 및 해석을 수행하였다. 실험장치의 구성도는 그림 3에 주어져 있다.

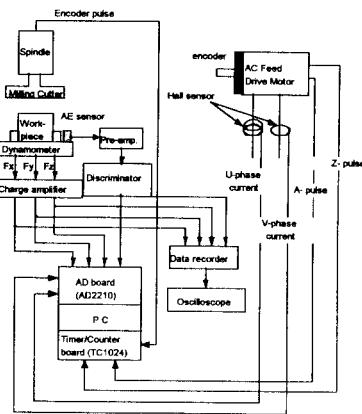


그림 3 이송모터전류량을 통한 밀링공구파손 검출 실험장치  
Fig.3 Experimental Set-up for Milling Tool  
Breakage Detection using Feed Drive Motor Current

실험에서 전류를 측정하기 위해 사용한 센서는 흔센서로서, 전선에 인가되는 전류량에 비례하여 전압을 내보내는 방식이다. 이물류 주기 평균 절삭력의 정확한 채집을 위하여 스핀들 엔코더를 설치하였으며 AC 성분의 등가 DC 성분을 구하기 위하여 AC모터 내부의 엔코더와 데이터수집부를 병렬로 연결하여 신호를 처리하였다. 절삭력과 전류량과의 정확한 비교를 위하여 KISTLER 9257 TYPE 공구동력계를 설치하였으며, 데이터는 AD 2210 보드를 사용하여 채집하였다. 공구는 대한중식 초경합금 인서트(P20, Chip Breaker Type)을 사용하였으며 Wire EDM으로 슬롯을 내어 파손을 용이하게 하였다. 실험에 사용한 머시닝 센터는 SAEIL HEAVY INDUSTRY 모델 MCII-10이며 수직형 밀링미시인에 공구동력계를 설치할 수 있도록 전용 지그를 제작하였다.

그림 4와 5은 실제 절삭과정에서 파손이 일어난 경

우를 보여주고 있다. 그림 4(a)와 그림 5(a)를 비교해 보면 절삭력의 절대값 뿐만이 아니라 파손이 일어나는 양상 또한 같지 않다는 것을 알 수 있으며 런 아웃의 영향 또한 작지 않음을 볼 수 있으나 검출 파라메터로 사용하는  $P(t)$ 와  $r(t)$ 의 경우에는 거의 일정한 형태를 가지고 변화함을 실험결과로부터 알 수 있다.

그림 6과 그림 7은 위의 case 1과 case 2에 대한 이송방향 모터 전류량의 등가직류량과 공구파손검출인자  $P(t)$ ,  $r(t)$ 를 여기에 적용하였을 때의 결과이다. 이 경우, 전류량과 절삭력간의 관계가 완전히 선형적으로 나타나지는 않으나 그 패턴은 거의 일치함을 알 수 있다. 또한 이송방향 모터전류량을 통한 공구파손검출이 가능함을 이 결과로부터 알 수 있다.

실제적으로 완전한 절삭력, 즉 주절삭방향, 이송방향 절삭분력을 이송방향 모터전류량으로부터 구해내기 위해 제어부의 특성을 포함한 두 신호사이의 전달함수를 구해내야 한다. 그러나 밀링 공구파손현상의 검출과 같은 절삭력의 주기적인 패턴이 중요한 경우나, 파부하의 감시와 같은 이상진단 분야의 경우에는 높은 정확도가 요구되지는 않음을 이 실험결과로부터 알 수 있다.

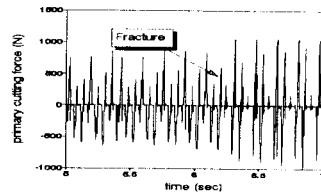


그림 4(a) 주절삭방향 분력  
Fig.4(a) Primary Cutting Force

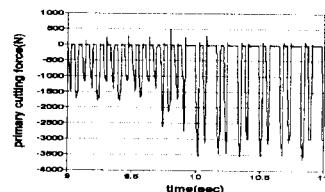


그림 4(b) 이송방향 절삭분력  
Fig.4(b) Feed Direction Cutting Force

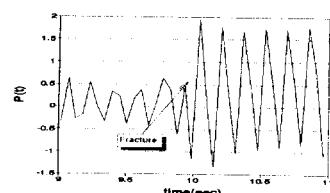


그림 4(c) 공구파손시  $P(t)$ 의 변화  
Fig.4(c) Variation of  $P(t)$  when Tool Breaks

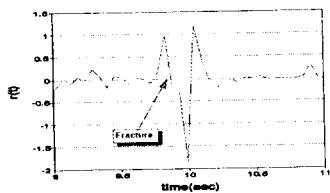


그림 4(d) 공구파손시  $r(t)$ 의 변화  
Fig.4(d) Variation of  $r(t)$  when Tool Breaks

그림 4 공구파손검출 실험 case 1 - 침삭력 측정 결과  
Fig.4 Tool Breakage Detection Experiment case 1 - Cutting Force  
Measurement 3 inserts, 400 rpm, feed 200mm/min, d.o.c 1mm

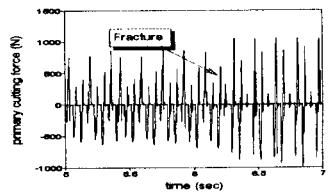


그림 5(a) 주침삭방향 분력  
Fig.5(a) Primary Cutting Force

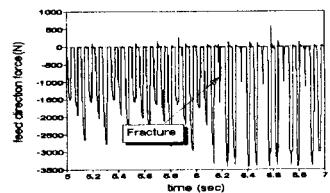


그림 5(b) 이송방향 침삭분력  
Fig.5(b) Primary Cutting Force

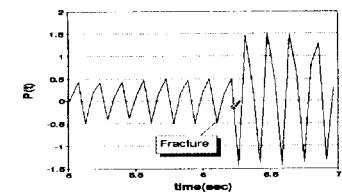


그림 5(c) 공구파손시  $P(t)$ 의 변화  
Fig.5(c) Variation of  $P(t)$  when Tool Breaks

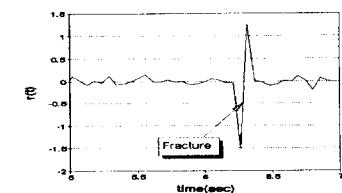


그림 5(d) 공구파손시  $r(t)$ 의 변화  
Fig.5(d) Variation of  $r(t)$  when Tool Breaks

그림 5 공구파손검출 실험 case 2 - 침삭력 측정 결과  
Fig.5 Tool Breakage Detection Experiment case 2 - Cutting Force  
Measurement 3 inserts, 400 rpm, feed 200mm/min, d.o.c 1mm

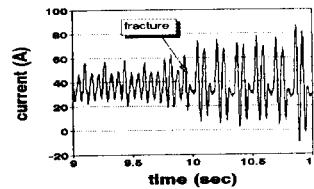


그림 6(a) 공구파손시 이송모터 전류의 Q 성분 변화  
Fig.6(a) Variation of Q component of Feed Drive Motor Current when Tool Breaks

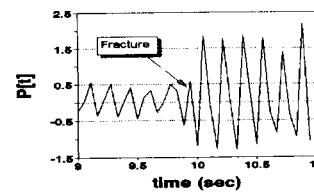


그림 6(b) 공구파손시 이송모터전류 Q 성분에 대한 P(t)의 변화  
Fig.6(b) Variation of  $P(t)$  in Q component Feed Drive Motor Current when Tool Breaks

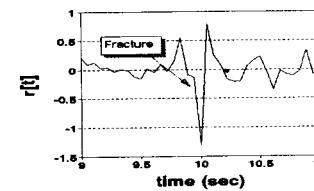


그림 6(c) 공구파손시 이송모터 전류 Q 성분에 대한 r(t)의 변화  
Fig.6(c) Variation of  $r(t)$  in Q component Feed Drive Motor Current when Tool Breaks

그림 6 공구파손검출 실험 case 1 - 이송모터전류 Q성분 측정 결과  
Fig.6 Tool Breakage Detection Experiment case 1 - Q component of Feed Drive Motor  
3 inserts, 400rpm, feed 200mm/min, d.o.c-2mm

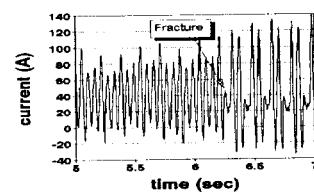


그림 7(a) 공구파손시 이송모터 전류의 Q 성분의 변화  
Fig.7(a) Variation of Q component of Feed Drive Motor Current when Tool Breaks

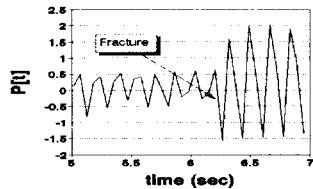


그림 7(b) 공구파손시 이송모터전류 Q 성분에 대한  $P(t)$ 의 변화  
Fig.7(b) Variation of  $P(t)$  in Q component Feed Drive Motor Current when Tool Breaks

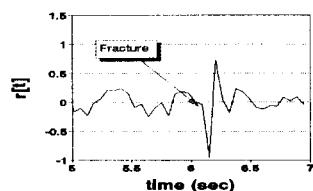


그림 7(c) 공구파손시 이송모터전류 Q 성분에 대한  $r(t)$ 의 변화  
Fig.7(c) Variation of  $r(t)$  in Q component Feed Drive Motor Current when Tool Breaks

그림 7 공구파손검출실험 case 1 - 이송모터전류 Q성분 측정 결과  
Fig.7 Tool Breakage Detection Experiment case 2 · Q component of Feed Drive- Motor  
3 inserts, 400rpm, feed 300mm/min, d.o.c- 1mm

## 6. 결론

본 논문에서는 새로운 밀링 검출 파라메터의 개발을 위해 다음과 같은 연구가 수행되었다.

- 1) 밀링공구파손 검출의 정량적인 해석을 위해 절삭력 모델링을 수행하였고, 실험을 통하여 모델을 검증하였다.
- 2) 모델링을 바탕으로 절삭조건에 무관한 공구파손검출 파라메터  $P(t)$ 와  $r(t)$ 를 개발하였고 실험을 통하여 이 파라메터들이 실제 공구파손 검출에 사용될수 있음을 증명하였다.
- 3) 이송축 모터전류를 측정하고 이를 등가 직류량으로 변환한 뒤 그 토오크의 변화량으로  $P(t)$ 와  $r(t)$ 를 계산하여 교류모터 전류로부터 공구파손 검출의 타당성을 제시하였다.

## 참 고 문 현

- [1] Dornfeld, D. A., Lan, M. S. "In-Process Tool Fracture Detection." ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 106, 1984, pp.111-118
- [2] Kannatey\_Asibu, Jr., E., and Dornfeld, D. A., "Quantitative Relationship for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting," ASME Journal of Engeneering for Industry, Vol. 106, pp. 330-340
- [3] Matsushima, K., Bertok, P., and Sata, T., "In-Process Detection of Tool Breakage by Monitoring Spindle Motor Current of a Machine Tool," Measurement and Control for Batch Manufacturing, The Winter Annual Meeting of ASME, Phoenix, Arizona, Nov. 13-19, 1982, pp.14-19
- [4] Lan,M.S., and Naerheim,Y., "In-Process Detection of Tool Breakage in Milling." ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 110, No.3, 1987, pp. 300-302
- [5] Altintas, Y., "In-Process Detection of Tool Brealage Using Time Series Monitoring of Cutting Forces," Int. J. Mach. Tools and Manufact. Vol. 28, No.2, 1988, pp.157-172
- [6] Tansel, I. N., and McLaughlin, C, "Detection of tool Breakage in Milling Operations-Neural Network Approach," Int. J. Mach. Tools and Manufact. Vol .33, No.4, 1993, pp. 545-558
- [7] Rangwala, S., Dornfeld, D. "Sensor Integration Using Neural Networks for Intelligent Tool Condition Monitoring." ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.112, No.3, 1990, pp.219-228
- [8] B. Kim, "A Study on the Prediction of Face Milling Cutting Force", M.S Thesis, Dept. of Mechanical Design and Production Engineering, Seoul Natl. Univ., 1988
- [9] Koenigsberger, F., and Sabberwal , A. J. P. "Chip Section and Cutting Force during Milling Operation," Annals of CIRP, 1960
- [10] Karl J Astrom, and Bjorn Wittenmark, "Computer controlled systems", Prentice-Hall International Editions, 1991
- [11] Pandit, S. M and WU, S. M., "Time Series and System Analysis with Applications". John Wiley & Sons,Inc.New York, 1983
- [12] Stein, J.L., Colvin, D., Clever, G. and Wang, C.H, "Evaluation of DC Servo Machine Tool Feed Drives as Force Sensors", ASME Journal of Dynamical Systems, Measurement and Control for Batch