

밀링시 공구 파손 검출을 위한 공구 파손 지수의 도출

Development of Tool Fracture Index for Detection of Tool Fracture in Milling Process

김 기대¹, 오 영탁, 황 지홍(서울대 대학원), 주 종남(서울대 기계설계학과)
Gi D. Kim¹, Young T. Oh, Ji H. Hwang(Graduate School, Seoul Nat'l Univ.),
Chong N. Chu(Dep't of Mechanical Design & Production Engineering, Seoul Nat'l Univ.)

ABSTRACT

A new algorithm for detection of tool fracture in milling process was developed. The variations of the peak-to-valley value of cutting load was used in this algorithm. Various kinds of vectors representing the condition of tool, such as tool condition vector, reference tool condition vector, tool condition variation vector were defined. Using these vectors, tool fracture index which represents the magnitude of tool fracture and is independent of tool run-outs is developed. Small and large tool fracture and chipping under various cutting conditions could be detected using proposed tool fracture index, which was proved with cutting force model and experiments.

Key words: Tool fracture(공구 파손), Peak-to-valley(극대-극소 차이), Tool condition vector(공구 상태 벡터), Tool fracture index(공구 파손 지수)

1. 서 론

생산 공정의 자동화/무인화 공정을 위하여 절삭 가공 중에 공구의 파손을 검출하려는 연구는 오래전부터 활발히 진행되어왔다. 공구의 파손을 검출하는 방법은 크게 절삭 가공 중의 절삭부하의 변동으로 인한 신호의 패턴을 이용하는 방법과 공구의 파손시 특이하게 나타나는 물리적 현상을 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. 전자의 방법으로 공구파손을 검출한 연구로는 절삭력[1-4] 및 절삭력과 비례한 이송 모터 전류[5-6] 신호나 주축 모터 전류 신호[7] 및 주축 회전 속도의 변화[8] 등을 이용한 방법이 있었으며, 후자의 대표적인 방법으로는 AE 센서를 이용한 방법이 있었다. 또는 복합센서를 사용하여 두가지의 방법의 장점을 결합하기도 하였다[9].

본 연구에서는 먼저 절삭부하의 패턴을 이용한 기존의 공구 파손 검출 방법을 살펴보면서 각 방법의 장점과 문제점을 밝혔다. 공구의 상태를 나타낼 수 있는 "공구 상태 벡터(Tool condition vector)"와 공구의 파손 정도를 측정할 수 있는 "공구 파손 지수(Tool

fracture index)"를 정의하였으며 이를 이용하여 공구의 칩핑(chipping), 파손(fracture)이 발생할 시 이를 검출할 수 있음을 보였다. 절삭력 모델 및 공구 파손 실험을 통해 공구 파손 지수로 공구의 파손을 검출할 수 있음을 검증하였다. 또한 일반적으로 하는 방법으로 미리 방전가공으로 인서트(insert)에 슬롯 가공을 하지 않은 채 공구를 파손시켜 실제 공구 파손 현상과 가깝게 하였으며 칩핑 및 파손이 발생할 때 이를 구별할 수 있는 방법을 연구하였다.

2. 기존의 공구파괴검출 알고리즘

2.1 Altintas, Yellowley, Tlustý 팀의 방법

밀링시 공구 파손 검출을 위해 현재 국내외에서 연구되고 있는 여러 가지 방법 중 Altintas 등이 가장 체계적이며 완성도가 높은 공구 파손 검출 방법을 발표하였다. 그들의 공구 파손 검출 방법을 살펴보면 크게 다음 2가지로 요약된다.

2.1.1 이웃날과의 1,2차 차이값을 이용하는 방법[3]

먼저 날당 평균 이송방향 절삭력 및 이를 이용한 “준평균 절삭력(quasi mean resultant force)”을 구하고 이웃날에 대한 1차 차이값(first difference)과 2차 차이값(second difference)을 구하여, 절삭조건에 무관한 값을 얻기 위하여 이들을 무차원화시켰다.

$$F_a = \sqrt{[F_{ax}]^2 + [F_{ay}]^2} \quad (2.1)$$

$$\Delta F_a(t) = \frac{F_a(t) - F_a(t-1)}{F_a(t-1)} \quad (2.2)$$

$$\Delta F_a^2(t) = \frac{\Delta F_a(t) - \Delta F_a(t-1)}{\Delta F_a(t-1)} \quad (2.3)$$

이들은 공구가 파손되면 1차 차이값이 매우 커지며, 2차 차이값은 더욱 커진다고 하였다. 이러한 방법은 매우 간단히 공구 파손을 검출할 수 있긴 하나 다음과 같은 문제점을 가지고 있다.

첫째, 공구의 파손에 의한 차이값과 공구의 런-아웃의 영향에 의한 차이값을 구별해내지 못하였다. 그러므로 공구 파손의 기준이 되는 한계값(threshold)의 설정을 “공구의 최대 런-아웃”의 양으로 정의하였다.

둘째, 가공중 절삭조건이 변경되었을 때도 큰 값의 1,2 차 차이값이 발생할 수 있다.

셋째, 공구의 파손을 구별짓는 한계값의 설정에 있어서 절입비(immersion ratio)의 영향이 매우 크다. 그러므로 실시간으로 절입비를 알아야만 하는 알고리즘이 추가로 필요하였다.

2.1.2 AR(1) 모델을 이용하는 방법[4]

순간 절삭력을 사용하여 날당 표본화 데이터(sampling data) 개수(p) 만큼 뒤쪽의 데이터와의 차이값을 구한 후 AR(1) 모델을 적용하여 잔차(residuals)를 구한다.

$$\hat{f}(t) = F(t) - F(t-p) = (1-B^p)F(t) \quad (2.4)$$

$$a(t) = \hat{f}(t) - \hat{f}(t-1) \quad (2.5)$$

$$\hat{f}(t-1) = \hat{f}(t-1) \quad (2.6)$$

또는 순간 절삭력을 사용하지 않고 준평균 절삭력을 사용하여 이웃한 날과의 차이값을 구한 후 AR(1) 모델을 적용하여 잔차(residuals)를 구한다.

$$f_a(t) = F_a(t) - F_a(t-1) = (1-B)F_a(t) \quad (2.7)$$

$$a(t) = f_a(t) - \hat{f}_a(t-1) \quad (2.8)$$

공구가 파손되었을 때는 이러한 잔차가 매우 커진다고 발표하였다. 그러나 이러한 방법도 또한 공구의 런-아웃에 의한 영향과 공구 파손에 의한 영향을 구별하지는 못하며, 절삭조건에 따른 빠른 변화에 큰 값의 잔차가 나타날 수 있다는 단점이 있다.

2.2 Advanced AR(1) 모델[6]

Altintas 등이 제시한 AR(1) 모델의 단점을 극복하기 위하여 이 장무 등은 기존의 AR(1) 모델에서 사용된 잔차, a(t) 외에 다음과 같은 지수를 한가지 더 도입하였다.

$$r(t) = \frac{F_a(t) - F_a(t-z)}{F_a(t-z)} \quad (2.9)$$

여기서 z는 날수이며 1회전 전 자신의 준평균 절삭력에 대한 현재 자신의 준평균 절삭력의 차이값을 무차원화시킨 값으로서 이러한 r(t)를 도입함으로써 공구 런-아웃에 의한 영향을 없앴다. 이 방법은 다음과 같은 문제점을 가지고 있다.

첫째, 공구파손이라고 판별하는 한계값(threshold)을 정의하는데 명확한 기준을 제시하지는 못하였다.

둘째, 공구가 파손되는지를 판별하는 기준이 되는 r(t)값은 공구가 파손되는 한 순간에만 변화가 있으므로 이 순간을 검출하지 못할 때는 공구 파손을 검출할 수 없다.

셋째, 가공중 이송속도, 절삭깊이 등이 도리어 감소하여 절삭력이 변화할 때는 공구의 파손과 구별할 수 없는 단점을 가지고 있다.

2.3 주축 회전 속도의 변동률을 이용한 방법[8]

각 날의 절삭부하로 인하여 주축은 정상적인 회전 속도에서 벗어난 회전속도의 변동을 가지고 회전하므로 이러한 회전속도의 변동률을 측정하여 공구 1회전당 다음과 같은 정상적인 회전속도에서 벗어난 비율을 이용하는 방법이다.

$$P=[H(1), \dots, H(z), L(1), \dots, L(z)] \quad (2.10)$$

여기서 z는 날수, H(i)와 L(i)는 정상적인 주축 회전 속도에 대해 절삭부하로 인한 주축 회전속도의 빠른 정도, 느린 정도를 나타내며 절삭조건에 무관한 양을 나타내기 위해 다음과 같은 방법으로 H(i)와 L(i)를 각각 평균값들에 대한 벗어난 정도로 무차원화시킨다.

$$H'(i) = \frac{H(i) - \bar{H}}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (H(i) - \bar{H})^2}}, \bar{H} = \frac{1}{z} \sum_{i=0}^z H(i) \quad (2.11)$$

예비실험을 통해 공구가 정상적인 상태일 때 절삭하여 기준값(reference)을 얻고 다음과 같이 현재값과 기준값과의 벡터적인 거리를 구하여 공구 파손을 구별하였다.

$$d = \sum_{i=0}^n [(H'(i) - H'_{ref}(i))^2 + (L'(i) - L'_{ref}(i))^2] \quad (2.12)$$

그러나 이 방법은 신뢰할 수 있는 기준값을 얻기 위해 예비실험을 통해 모든 절삭조건에 따라서 다양한 기준값을 얻어야 하는 문제점을 가지고 있어 실제적으로는 거의 응용할 수 없다는 치명적인 단점을 가지고 있다.

3. 공구 상태 벡터 (Tool condition vector) 및 공구 파손지수 (Tool fracture index)의 정의

3.1 공구 상태 벡터 (Tool condition vector)

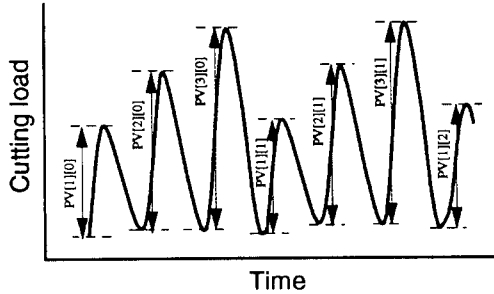


Fig. 1 Peak-to-valley of cutting load

밀링 절삭 공정이 이루어짐에 따라 공구의 런-아웃(runout)이 없다면 1날당 주기적으로 절삭력이 변화하지만, 실제로는 런-아웃의 존재로 공구 1회전당 주기적으로 나타난다. Fig. 1에서와 같이 시간 t 에서의 각 날당 신호의 PV 값을 순차적으로 나타내면 다음과 같다.

$$\{ PV[1][t], PV[2][t], \dots, PV[N][t] \} \quad (3.1)$$

N : Number of tooth, t : time

순차적으로 구해진 $PV[i][t]$ 를 지나간 일정한 시간 간격(공구 10회전) 마다 계속적으로 평균하여 나간다.

$$\{ PV_{Avg}[1][t], PV_{Avg}[2][t], \dots, PV_{Avg}[N][t] \} \quad (3.2)$$

$$PV_{Avg}[i][t] = \frac{1}{Rev} \sum_{j=1}^{Rev} PV[i][t-j]$$

(Rev = 공구 회전수, if $Rev > 10$, then $Rev = 10$)

절삭조건에 무관하고 공구의 상태만을 나타내는 벡터를 “공구 상태 벡터(Tool condition vector)”라고 정의하며 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$\{ 1, R[2][t], \dots, R[N][t] \} \quad (3.3)$$

$$R[i][t] = \frac{PV[i][t]}{PV[1][t]}$$

일정한 시간간격(공구 10회전)을 두고 계속적으로 평균한 “기준 공구 상태 벡터(Reference tool condition vector)”를 정의한다.

$$\{ 1, R_N[2][t], \dots, R_N[N][t] \} \quad (3.4)$$

$$R_N[i][t] = \frac{1}{Rev} \sum_{j=1}^{Rev} R[i][t-j]$$

(Rev = 공구 회전수, if $Rev > 10$ then $Rev = 10$)

공구에 무리가 가해져서 칩핑(chipping)이나 파손(fracture)이 발생하면 “공구 상태 벡터”는 “기준 공구 상태 벡터”와 많은 차이를 보인다. 그러므로 현재 공구의 상태가 기준 공구의 상태와 다른 정도를 나타내는 다음과 같은 “공구 상태 변화 벡터(Tool condition variation vector)”를 정의한다.

$$\{ 1, D[2][t], \dots, D[N][t] \} \quad (3.5)$$

$$D[i][t] = \frac{R[i][t]}{R_N[i][t]}$$

이러한 “공구 상태 변화 벡터”의 도입으로 공구의 공구의 런-아웃의 영향을 제거하였으며, 공구의 상태가 변함이 없고, 신호의 잡음의 영향을 무시한다면, 런-아웃이 존재하더라도 항상 $D[i][t]$ 값은 “1”의 값을 유지할 것이다.

3.2 공구 파손 지수 (Tool fracture index)

앞에서 구한 공구 상태 벡터를 이용하여 공구가 파손되었을 때 그 파손된 정도를 나타내는 양을 지수로서 “공구 파손 지수(Tool fracture index)”를 도입하여 다음과 같은 TFI의 5개 요소를 정의한다.

$$T_1 = \frac{1}{D[i][t]} \quad (3.6)$$

$$T_2 = D [i+1][t] \quad (3.7)$$

$$T_3 = \frac{PV [i-1][t]}{PV [i][t]} * \frac{PV_{Avg} [i][t]}{PV_{avg} [i-1][t]} \quad (3.8)$$

$$T_4 = \frac{PV [i+1][t]}{PV [i][t]} * \frac{PV_{Avg} [i][t]}{PV_{avg} [i+1][t]} \quad (3.9)$$

$$T_5 = \frac{PV [i+1][t]}{PV [i+2][t]} * \frac{PV_{Avg} [i+2][t]}{PV_{avg} [i+1][t]} \quad (3.10)$$

이상에서 밝힌 바와 같이 TFI 의 요소들인 T_i ($i=1,2,3,4,5$) 는 모두 절삭조건 및 공구의 런-아웃에 무관한 무차원 변수들로서 칩핑 및 파손 등이 발생하지 않고 공구의 상태가 변하지 않았다면 모두 그 크기가 "1"이 될 것이다.

다음과 같이 공구 파손 지수의 모든 요소들을 곱함으로써 공구가 파손된 정도를 나타내는 완성된 "공구 파손 지수(TFI)"를 얻는다.

$$TFI = T_1 * T_2 * T_3 * T_4 * T_5 \quad (3.11)$$

3.3 이웃한 날이 연속적으로 파손되었을 경우

순차적으로 구한 주축 전류 신호의 $PV[i][t]$ 에서 각 날의 바로 전 회전시 절삭부하와의 차이값을 계산해 나간다.

$$\{ DPV[1][t], DPV[2][t], \dots, DPV[N][t] \} \quad (3.12)$$

$$DPV [i][t] = PV [i][t] - PV [i][t-1]$$

잡음의 영향을 줄이고 절삭부하의 차이값의 기준값을 정하기 위해 순차적으로 구해진 $DPV[i][t]$ 를 지나간 일정한 시간 간격(공구 3회전) 마다 계속적으로 평균 하여 나간다.

$$\{ DPV_{Avg}[1][t], DPV_{Avg}[2][t], \dots, DPV_{Avg}[N][t] \} \quad (3.13)$$

$$DPV_{Avg} [i][t] = \frac{1}{Rev} \sum_{j=1}^{Rev} DPV [i][t-j]$$

(Rev = 공구 회전수, if $Rev > 3$, then $Rev = 3$)

현재의 절삭부하($PV[i][t]$) 에 대한 절삭부하 차이값의 변화 ($DPV_{Avg}[i][t] - DPV[i][t]$) 의 비율을 살펴 보면 공구의 상태가 변함이 없는 한 진입 및 진출 절삭시에는 그 크기가 상당히 작은 값을 가지나 파손되었을 경우에는 상당히 큰 값을 가진다. 이러한 경우 공구파손지수의 요소를 다음과 같이 수정한다.

$$\text{If } \frac{DPV_{Avg} [i][t] - DPV [i][t]}{PV [i][t]} > S.F \text{ and}$$

$$\frac{DPV_{Avg} [i+1][t] - DPV [i+1][t]}{PV [i+1][t]} > * S.F$$

Then 이웃한 2날의 연속적인 파괴의 가능성이 있으므로

	i 번째 날	(i+1) 번째 날
T_1	$\frac{1}{D [i][t]}$	$\frac{1}{D [i+1][t]}$
T_2	$D [i+2][t]$	
T_3	$\frac{PV [i-1][t]}{PV [i][t]} * \frac{PV_{Avg} [i][t]}{PV_{avg} [i-1][t]}$	$\frac{PV [i-1][t]}{PV [i+1][t]} * \frac{PV_{Avg} [i+1][t]}{PV_{avg} [i-1][t]}$
T_4	$\frac{PV [i+2][t]}{PV [i][t]} * \frac{PV_{Avg} [i][t]}{PV_{avg} [i+2][t]}$	$\frac{PV [i+2][t]}{PV [i+1][t]} * \frac{PV_{Avg} [i+1][t]}{PV_{avg} [i+2][t]}$
T_5	$\frac{PV [i+2][t]}{PV [i+3][t]} * \frac{PV_{Avg} [i+3][t]}{PV_{avg} [i+2][t]}$	

날이 여러개 존재할 때 이웃한 3날 이상이 동시에 파손되었을 경우에도 같은 방법으로 수정함으로써 공구 파손지수가 주기적으로 큰 값이 나타나게 하였다.

3.4 공구 파손 검출 알고리즘

공구가 파손되면 공구파손지수가 커진다. 그러나 잡음 등의 영향으로도 공구파손지수가 큰 값이 나올 수 있다. 그러므로 공구파손에 의한 공구파손지수값의 변화와 그렇지 않을 경우의 공구파손지수의 영향을 구별해야 할 필요가 있다.

만일 i 번째 날(tooth)이 파손되었다면 i 번째 날에서 공구 파손 데이터에 적용하기 전까지 공구 파손 지수의 크기가 계속적으로 주기적으로 큰 값을 보일 때는 공구 파손으로 간주하며, 주기적으로 나타나지 않을 때는 공구의 상태가 변함이 없고 잡음 등의 영향으로 간주한다.

4. 절삭력 모델을 통한 공구파손지수의 검증

4.1 H. J. Fu 의 절삭력 모델[10]

공구에 부과되는 절삭력을 예측하기 위하여 현재까지 여러 가지 많은 연구가 수행되었으나, 여기서는 H. J. Fu 가 제시한 절삭력 모델을 그대로 사용하기로 한다.

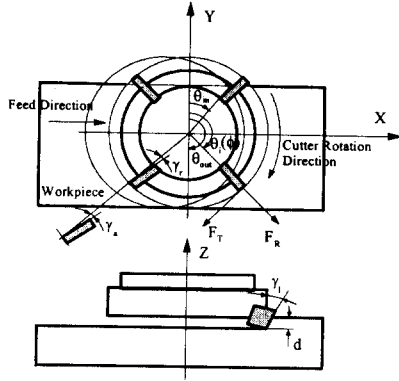


Fig. 2 Tool and workpiece shape in Face milling

순간 칩 두께(CI)는 날당 이송(feed per tooth)의 사인 함수로 근사화시킬 수 있다[11].

$$C_i(\theta_i(\phi)) \cong f_i(i) \sin \theta_i(\phi) \quad (4.1)$$

주축의 경사, 각 날의 비대칭 분포, 축방향의 런-아웃의 영향 등을 무시하며 절삭력의 크기에 크게 영향을 미치는 공구의 반경방향 런-아웃($\varepsilon(i)$)만을 고려하고 만일 i 번째 날에서 $t(i)$ 만큼 파손이 발생하였다면 이러한 공구 파손의 영향은 공구의 런-아웃의 영향과 비슷하게 생각할 수 있으며, 미변형 칩두께는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_i(\theta_i(\phi)) \cong f_i(i) \sin \theta_i(\phi) + \varepsilon(i) - \varepsilon(i-1) - t_f(i) + t_f(i-1) \quad (4.2)$$

정면밀링에서 공구와 공작물의 형상이 Fig. 2 과 같을 때 H. J. Fu 는 접선방향 절삭력(F_T), 반경방향 절삭력(F_R), 축방향 절삭력(F_A)을 Eq. 4.3 과 같이 나타낼 수 있다고 하였다.

$$\begin{Bmatrix} F_T(i, \phi) \\ F_R(i, \phi) \\ F_A(i, \phi) \end{Bmatrix} = K_T C_i(\theta_i(\phi)) \vec{d}(\theta_i(\phi)) \begin{Bmatrix} 1 + K_R \frac{\cos \tilde{\gamma}_L \tan \gamma_R}{\cos \gamma_A} \\ -\tan \gamma_R + K_R \frac{\cos \tilde{\gamma}_L}{\cos \gamma_A} \\ -\frac{\tan \gamma_A + K_R \frac{\sin \tilde{\gamma}_L}{\cos \gamma_A \cos \gamma_R}}{\cos \gamma_R} \end{Bmatrix} \quad (4.3)$$

여기에서 θ_i 는 각 날의 회전각도; ϕ 는 공구의 회전각도; K_T, K_R 은 접선 및 반경방향 비절삭저항; $\tilde{\gamma}_L$ 는 유효 리드각; γ_A, γ_R 는 축방향 및 반경방향 경사각; \vec{d} 는 절삭깊이, C_i 는 미변형 칩두께를 나타내고 있다. 공구동력계에서 측정할 수 있는 X, Y, Z 방향의 순간 절삭력은 Eq. 4.3 에서 구한 각 방향의 절

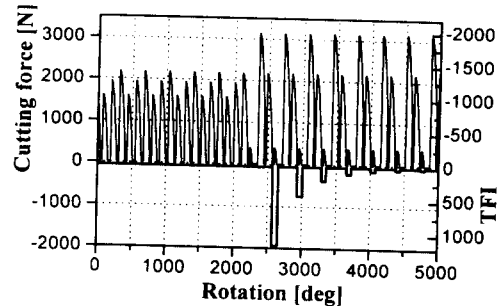
삭력을 회전변환시키고 절삭에 참여하고 있는 각 날의 절삭력의 합력으로 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} F_X(\phi) \\ F_Y(\phi) \\ F_Z(\phi) \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^{N_i} \delta(\theta_i(\phi)) \begin{bmatrix} \cos \theta_i(\phi) & -\sin \theta_i(\phi) & 0 \\ \sin \theta_i(\phi) & \cos \theta_i(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_T(i, \phi) \\ F_R(i, \phi) \\ F_A(i, \phi) \end{Bmatrix} \quad (4.4)$$

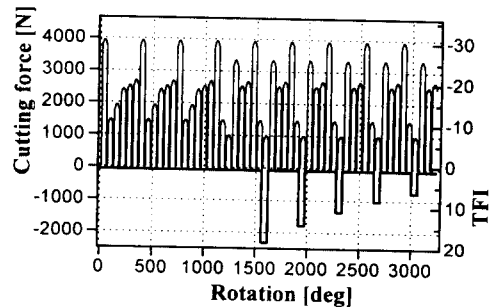
4.2 시뮬레이션을 통한 공구 파손 지수(TFI)의 변화

4.2.1 칩핑 또는 파손이 발생할 때

Fig. 3 는 3날 공구에서 큰 파손이 발생하였을 때와 런-아웃이 심한 6날 공구로서 공구에 칩핑이 발생한 경우에 대해 각각 절삭력의 변화와 TFI 값의 변화를 시뮬레이션으로 보여주고 있다. 공구의 상태가 변함이 없는 한 TFI의 크기는 "1"로서 변함이 없으며 공구가 파손되면 TFI의 값의 크기는 파괴된 정도에 어느정도 비례하여 큰 값을 주기적으로 나타낸다. 공구가 파손된 상태로 절삭이 진행됨에 따라 파손된 공구로의 절삭패턴에 적응함에 따라 더 이상의 공구파손이 발생하지 않는 한 주기적으로 나타나는 TFI의 값은 점차 감소하는 경향을 보인다.



(a) 3 teeth, fpt: 0.56 mm/tooth, doc: 2mm, 0.42 mm broken(fracture)



(b) 6 teeth, fpt: 0.44 mm/tooth, doc: 3mm, 0.122mm broken(chipping)

Fig. 3 Cutting force and TFI variations(simulation)

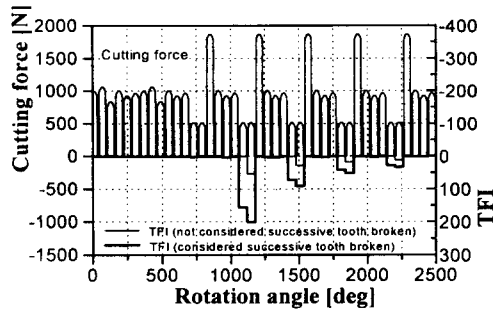


Fig. 4 In case of successive tooth broken

4.2.2 이웃날이 연속적으로 파손되었을 때의 TFI의 변화

Fig. 4 는 6날 공구가 절삭 중 이웃날이 연속적으로 파손되었을 경우에 3.3절에서 설명한 바와 같이 이웃날이 파손되었을 경우에 대한 TFI의 요소들을 수정하기 전과 수정한 후의 TFI의 값의 변화를 나타낸 것이다. 이웃날의 파손을 고려한 경우에는 파손된 이웃날과의 절삭부하와 비교하지 않고 파손되지 않은 날과 비교를 하기 때문에 파손된 날의 경우에는 모두 큰 값의 TFI 가 주기적으로 나타나고 있다.

4.2.3 절삭조건을 변경시 TFI 변화

절삭조건을 변경시켜가면서 공구의 상태, 즉 공구의 파손된 크기에 따른 TFI의 값의 변화를 살펴보았다. 공구가 파손되면 주기적으로 큰 값의 TFI가 나타나나 여기서는 파손되고 공구가 1회전 더 절삭한 후 나타나는, 즉 파손된 공구로의 절삭 패턴으로 적용되지 않은 상태일 때 나타나는 가장 큰 값을 기준으로 하였다.

Fig. 5(a) 는 날당 이송을 변경시켜가면서 공구의 파손된 크기와 TFI의 관계를 나타낸다. 절삭깊이 등 다른 절삭조건은 변화와는 달리 같은 양의 공구 파손이 발생하더라도 날당 이송이 작을수록 변화하는 절삭력의 패턴이 커진다. TFI의 크기는 결과적으로 공구가 파손될 때 절삭력 패턴이 변화하는 양으로 해석될 수 있으므로, 날당 이송이 작을수록 공구가 파손된 양에 비해 TFI의 값은 커진다. 날당 이송에 대한 공구의 파손된 크기의 비율에 따른 TFI의 변화를 살펴보면 날당이송이 변화하더라도 날당 이송에 대한 공구의 파손된 양의 비율이 같다면 TFI의 크기는 같다.(Fig. 5(b))

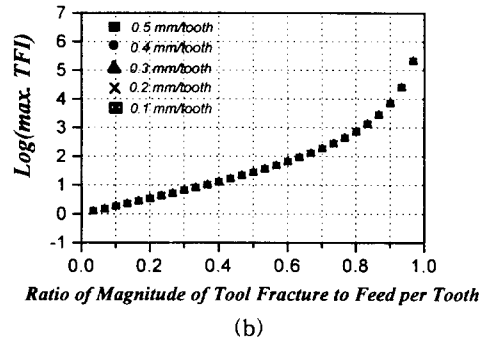
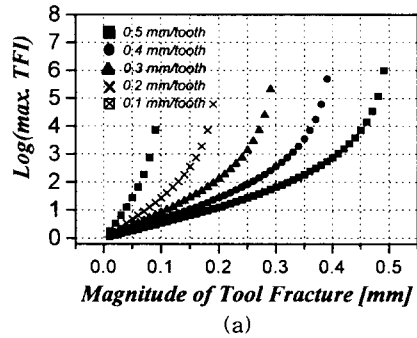


Fig. 5 TFI variations according to feed per tooth

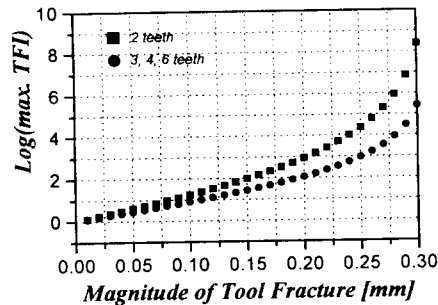


Fig. 6 TFI variations according to number of tooth

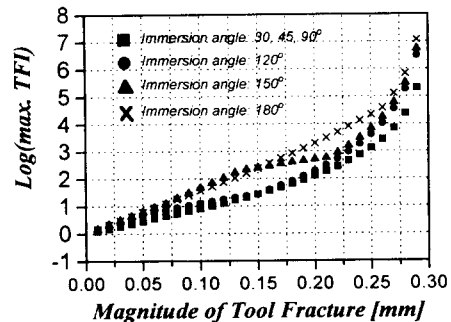


Fig. 7 TFI variations according to immersion ratio

Fig. 6 는 날수를 변경시켜가면서 공구의 상태에 따른 TFI의 크기를 나타낸 것이다. 공구가 3날 이상 일 때는 날수에 관계없이 공구의 상태와 TFI의 관계는 일정하나 2날일 때는 파손된 날과 이웃날과 비교하는 TFI의 구성요소들 중 T_4 를 제외한 T_1, T_2, T_3, T_5 값이 상대적으로 커지기 때문이다.

Fig. 7 는 절입비의 변화에 따른 TFI의 변화를 나타낸 것이다. 한날만이 절삭에 참여할 때(3날일 때 120° 미만)는 절입비에 관계없이 지수의 값은 일정하지만 두날이 절삭에 참여할 때는 일반적으로 절입비가 커질수록 TFI의 값은 커지는 것으로 나타났다.

5. 공구 파손 실험 및 결과

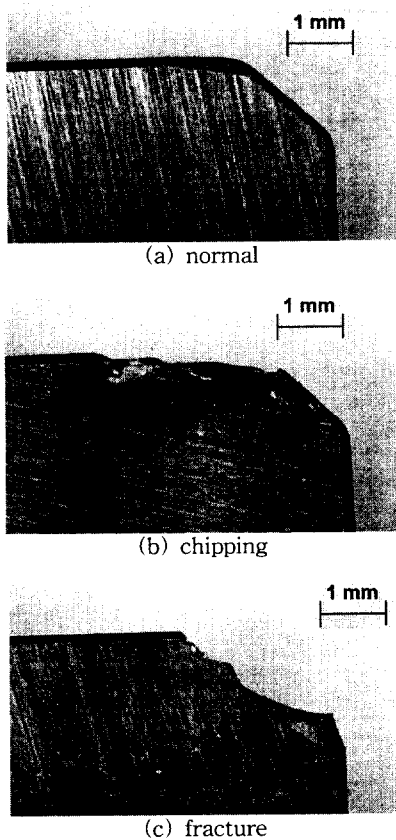


Fig. 8 Tool fracture pattern

실험에 사용된 공구는 직경이 100 mm인 정면밀링(face milling cutter)에서 초경 인서트(insert)를 사용하여 3날과 6날로 절삭하였으며, 직경이 20 mm 이며 2날일 평엔드밀(flat endmill)로도 절삭 실험을 행하였다.

Fig. 9는 6날 정면 밀링시 공구에 칩핑이 발생하였을 때(Fig. 8(b))의 절삭력의 변화와 그 때의 TFI의 변화를 보인 것이며 Fig. 10는 3날 정면 밀링시 공구 파손이 발생하였을 때(Fig. 8(c))의 절삭력의 변화와 그 때의 TFI의 변화를 보인 것이다. Fig. 11은 2날 평엔드 밀 가공시 공구 파손이 발생하였을 때의 절삭력의 변화와 그 때의 TFI의 변화를 보인 것이다. 모두 시물레이션일 때와 마찬가지로 공구의 상태가 변함이 없을 때는 TFI의 크기가 거의 "1"을 유지하다가 칩핑 또는 파손이 발생하여 공구의 상태가 변화하였을 때는 공구의 상태가 변화하고 1회전 후에 큰 값의 TFI의 값이 나타나고 주기적으로 반복되다가 차츰 감소하는 경향을 보이고 있다.

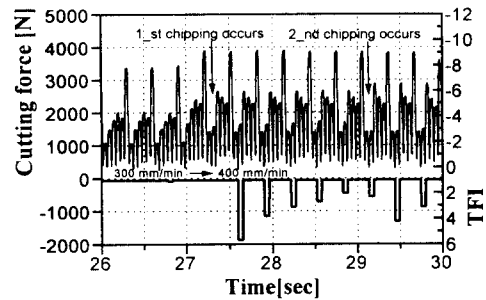


Fig. 9 Cutting force & TFI variations (6 teeth, 200 rpm, d.o.c.=3mm)

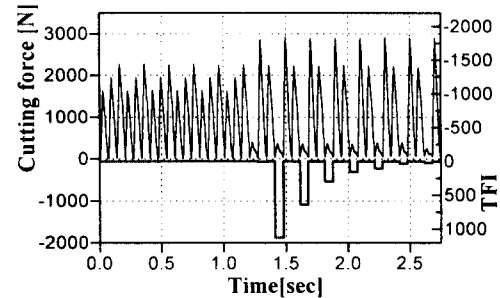


Fig. 10 Cutting force & TFI variations (3 teeth, 300 rpm, 0.56 mm/tooth, d.o.c.=2mm)

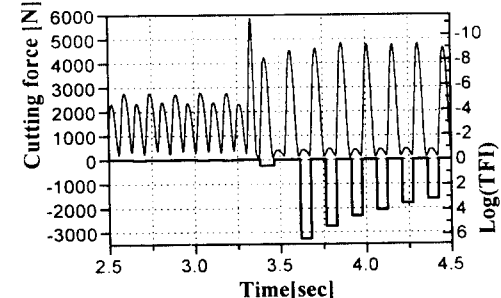


Fig. 11 Cutting force & TFI variations (2 teeth, 400 rpm, 0.3125 mm/tooth, d.o.c.=4mm)

6. 결 론

절삭조건 및 이에따른 절삭부하와 무관하게 오로지 공구의 상태만을 나타낼 수 있는 “공구 상태 벡터 (Tool condition vector)”와 “기준 공구 상태 벡터” 및 “공구 상태 변화 벡터”를 도입하여 공구의 런-아웃의 영향을 제거하였다. 이러한 벡터들을 이용하여 “공구 파손 지수(Tool fracture index)”을 도출하였고, 5 가지의 공구파손지수의 요소들을 이용하여 공구의 상태를 파악할 수 있었으며 절삭조건외의 변화와 관계없이 공구의 칩핑(chipping) 또는 파손(fracture)을 구별하여 검출할 수 있었다.

REFERENCES

- [1] J. Tlustý and Y. S. Tarng, “Sensing Cutter Breakage in Milling,” *Annals of the CIRP*, **37**, 45-51 (1988)
- [2] Y. Altintas, I. Yellowley and J. Tlustý, “The Detection of Tool Breakage in Milling Operations,” *ASME Journal of Engineering for Industry*, **110**, 271-277 (1988)
- [3] Y. Altintas and I. Yellowley, “In-process Detection of Tool Failure in Milling using Cutting Force Models,” *ASME Journal of Engineering for Industry*, **111**, 149-157 (1989)
- [4] Y. Altintas, “In-process Detection of Tool Breakages using Time Series Monitoring of Cutting Forces,” *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, **28**(2), 157-172 (1988)
- [5] Y. Altintas, “Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements,” *ASME Journal of Engineering for Industry*, **114**, 386-391 (1992)
- [6] J. M. Lee, D. K. Choi, J. Kim and C. N. Chu, “Real-Time Tool Breakage Monitoring for NC Milling Process,” *Annals of the CIRP*, **44**, 59-62 (1995)
- [7] K. Matsushima, P. Bertok and T. Sata, “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, 14-19 (1982)
- [8] S. Takata, T. Nakajima, J. H. Ahn, T. Sata, “Tool Breakage Monitoring by Means of Fluctuations in Spindle Rotational Speed,” *Annals of the CIRP*, **36**, pp. 49-52 (1987)
- [9] D. Yan, T.I.El-Wardany and M.A. Elbestawi, “A Multi-Sensor Strategy for Tool Failure Detection in Milling,” *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, **35**(3), 383-398 (1995)
- [10] H. J. Fu, R. E. DeVor, S. G. Kapoor, “A Mechanistic Model for the Prediction of the Force System in Face Milling Operations,” *ASME Journal of Engineering for Industry*, **106**, 81-88 (1984)
- [11] M. E. Martelotti, “Analysis of the Milling Process,” *ASME Journal of Engineering for Industry*, **63**, 667 (1941)