

# 밀링 공정시 공구 파손 검출 ( I )

## - 제 1 편 : 공구 파손 지수의 도출 -

김기대\*, 오영탁\*\*, 주종남\*\*\*

# Tool Fracture Detection in Milling Process ( I )

## - Part 1: Development of Tool Fracture Index -

Gi D. Kim\*, Young T. Oh\*\*, Chong N. Chu\*\*\*

### ABSTRACT

In order to increase productivity through unmanned machining in CNC milling process, in-process tool fracture detection is required. In this paper, a new algorithm for tool fracture detection using cutting load variations was developed. For this purpose, developed were tool condition vector which is dimensionless indicator of cutting load and tool fracture index (TFI) which represents magnitude of tool fracture. Through cutting force simulation, tool fracture index was shown to be independent of tool run-outs and cutting condition variations. Using tool fracture index, the ratio of the tool fracture to feed per tooth could be indentified.

**Key Words :** Tool fracture detection (공구 파손 검출), Tool condition vector (공구 상태 벡터), Tool fracture index (공구 파손 지수), Run-outs (런-아웃), Cutting condition variation (절삭 조건 변화), Feed per tooth (날당 이송)

### 1. 서 론

산업계에서 범용 공작기계를 NC, CNC 공작기계로 대체하고 있는 추세에 따라 자동화된 가공 라인에 대한 관심이 높아지고 있으며 이러한 자동화 및 무인화 가공이야말로 완전한 CIM/FMS 시스템을 구축하기 위하여 필수적인 요소라고 할 수 있다. 공작기계의 이상 진동인 chatter(cha-tter)와 공구 마모의 현상을 규명하려는 연구로부터 출발한 절삭 공정의 감시 연구는 NC/CNC 시스템이 보편화되기 시작한 1970년대부터 공구의 과부하를 방지하

기 위한 절삭력 추종제어와 공구의 파손을 검출하기 위한 연구 등으로 활발히 이어졌다.

밀링 공정 중 공구가 파손되면 공구 및 공작물에 심각한 손상을 야기하여 생산성의 저하 및 경제적 손실을 가져다 준다. 한 날의 파손은 이웃한 다음날의 파손을 야기시킬 가능성이 크며 결국 모든 날의 파손을 일으킬 수 있다. 특히 비교적 저가(低價)의 인서트(inserts)를 사용하는 정면 밀링(face milling) 가공시에도 인서트가 크게 파손되었을 때는 공구 홀더(cutter holder)까지도 손상시키며 이는 생산성 및 경제성의 관점에서 큰 손실이다.

\* 삼성자동차 기술연구소  
 \*\* 서울대학교 대학원 기계설계학과  
 \*\*\* 서울대학교 기계설계학과

또한 공구의 파손을 인지하지 못한 상태에서 파손된 공구로 계속적으로 절삭하면 이후의 공작물은 재절삭 공정을 해야 하든지 아니면 대부분 더 이상 사용할 수가 없게 된다. 그러므로 자동화, 무인화 가공을 위해서는 이러한 공구 파손 검출 시스템의 필요성을 아무리 강조해도 지나치지 않다.

밀링 공정 중 공구의 파손을 검출하기 위한 방법을 크게 두가지로 나누면 첫 째, 공구가 파손될 때 발생하는 물리, 화학적 현상을 이용하는 방법으로 AE 센서<sup>(6)</sup>, 초음파 진동<sup>(9)</sup> 등을 이용하는 방법이 있다. 두 번째 방법으로는 각 날의 주기적인 절삭부하의 변동을 이용하는 방법으로 절삭부하의 변동으로 인한 절삭력<sup>(1-4)</sup>, 모터 전류<sup>(5-6)</sup>, 주축 회전 속도의 변동<sup>(7)</sup> 등의 변화를 이용하는 방법이다. 그리고 이 두가지 현상을 모두 이용하여 이른바 복합센서<sup>(10)</sup>를 이용하는 방법이 있다. AE 신호의 진폭은 공구의 파손을 일으키는 응력 증가율이나 충격 속도에는 무관하고 공구 재료에 따라서 다양한 크기를 가진다고 알려져 있다.<sup>(8)</sup> 그러나 절삭이 이루어지는 지점에서의 센서 신호가 가장 잘 측정되어 센서의 부착 위치에 매우 민감하고 센서로 인한 절삭 공정의 방해 등으로 실용성이 떨어지는 단점을 가지고 있다.

밀링시 주기적인 절삭부하의 변동을 이용하여 공구의 파손을 검출하기 위하여 Y.Altintas<sup>(3)</sup> 등은 준평균 절삭력(quasi mean resultant force)을 구한 다음 무차원화시킨 준평균 절삭력의 이웃날(adjacent tooth)에 대한 1차 차이값(first difference)과 2차 차이값(second difference)을 이용하였다. 이들은 공구가 파손되면 1차 차이값이 매우 커지고 2차 차이값은 더욱 커지며, 이러한 차이값들을 이용하여 진입(entry) 및 진출(exit) 절삭과 공구 파손과의 구별이 가능하다고 하였다. 그러나 공구 파손에 의한 차이값과 공구 런-아웃의 영향에 의한 차이값을 구별해내지 못하여 "공구의 최대 런-아웃 양"을 공구 파손의 기준이 되는 한계값(threshold)으로 설정하였으며, 또한 한계값의 설정에 있어서 절입비(immersion ratio)의 영향이 매우 커서 실시간으로 절입비를 알아야만 하는 알고리즘이 추가로 필요하였다.

그들은 준평균 절삭력을 이용하는 또 다른 방법으로 AR(1) 모델을 적용하여 잔차(residuals)의 변화를 이용하기도 하였다.<sup>(4)</sup> AR 모델의 차수를 1차로 줄여서 계산량이 작아져 실시간으로 공구의 파손을 검출할 수 있는 토대를 마련하였으나 이러한 방법도 1,2차 차이값들을 이용하는 방법과 마찬가지로 공구 런-아웃에 의한 영향과

공구 파손에 의한 영향을 구별하지는 못하였으며 절삭 조건의 변화로부터도 큰 값의 잔차가 나타날 수 있다는 단점을 가지고 있다.

공구 런-아웃에 의한 영향과 공구 파손에 의한 영향을 구별하기 위하여 이 장무<sup>(6)</sup> 등은 Altintas의 AR(1) 모델에서 사용된 잔차 $a(t)$  뿐만 아니라 현재 날의 준평균 절삭력과 1 회전 전 자신의 준평균 절삭력의 차이값을 무차원화시킨 지수 $r(t)$ 를 한가지 더 도입함으로써 공구 런-아웃에 의한 영향을 제거하였다. 즉  $r(t)$ 가 큰 음수값을 가지고 동시에  $a(t)$ 가 큰 값을 가진다면 공구 파손에 의한 지수의 변화이며, 반면에  $a(t)$ 만 큰 값을 나타낸다면 이는 공구의 런-아웃에 의한 영향 또는 절삭 조건의 변화에 의한 절삭력의 변화로 간주하였다. 그러나 공구가 파손되는지를 판별하는 기준이 되는  $r(t)$ 값은 공구가 파손되는 한 순간에만 변화가 있으므로 이 순간을 검출하지 못할 때는 공구 파손을 검출할 수 없으며, 또한 절삭조건의 변화에 잘 대응하지 못하는 한계점을 가지고 있다.

T.Sata<sup>(7)</sup> 등은 절삭부하에 비례하여 변동하는 주축 회전속도의 변동률을 이용하여 밀링 공정 중 공구의 파손을 검출하였다. 즉, 예비 실험을 통해 공구가 정상적인 상태에서 절삭할 때 측정된 주축 회전 속도 기준 변동률과 현재의 주축 회전 속도 변동률을 측정된 뒤 현재값과 기준값과의 벡터적인 거리를 구하여 공구 파손을 검출하였다. 그러나 이 방법을 실제적으로 적용시키기 위해서는 예비 실험을 통해 모든 절삭 조건의 변화에 대해 신뢰할 수 있는 다양한 기준값을 얻어야 하며, 또한 기준값에서 정한 날의 고유 번호와 현재 날의 고유 번호를 일치시켜야하나 그러한 방법을 제시하지는 못하였다.

본 연구에서는 밀링 공정시 공구의 파손을 검출하기 위하여 절삭부하의 변동 상태를 나타내는 공구 상태 벡터(Tool Condition Vector)를 도입하였으며 이를 이용하여 공구 파손의 크기를 나타내는 공구 파손 지수(Tool Fracture Index)를 도출하였다. 또한 절삭력 모델을 이용한 공구 파손의 시뮬레이션을 통하여 도출된 공구 파손 지수를 이용함으로써 절삭조건의 변화에 관계없이 공구 파손을 검출할 수 있음을 보였다.

## 2. 공구 상태 벡터와 공구 파손 지수

### 2.1 공구 상태 벡터 (Tool Condition Vector)

밀링공정 중 다른 절삭 조건의 변화가 없다면, 주기적인 절삭부하의 변동으로 인하여 공구의 런-아웃(run-

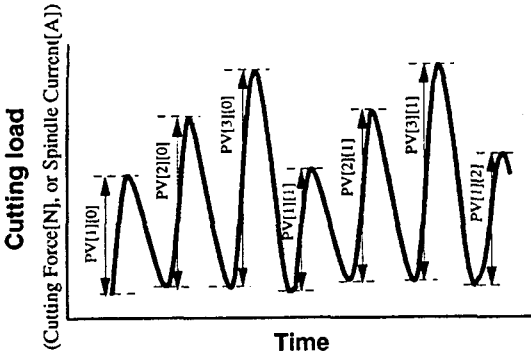


Fig. 1 Peak to valley cutting load (3 teeth)

outs)이 없을 경우에는 1 날당 주기적인 절삭부하가 나타나지만, 실제로는 런-아웃의 존재로 공구 1 회전을 주기로하여 절삭력 및 주축의 절삭토크가 나타난다. 이러한 주기적인 절삭부하의 변동을 표현하기 위하여 Fig. 1 에서와 같이 공구 회전수  $t$  에서의 각 날당 신호의 PV(최대 극대값에서 최소 극소값의 차이)값을 순차적으로 나타내면 식 (1)과 같고, 이를 지시간 일정한 시간 간격(공구 10 회전) 마다 계속적으로 평균하면 식 (2)와 같이 된다.

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

$N$ : No. of teeth,  $t$ : No. of tool revolution

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

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

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

가공 중 절삭 조건이 변화하더라도 공구의 상태가 변함이 없다면 공구 회전수( $t$ )가 변함에 따라 공구 1 회전당  $PV[i][t]$  ( $i=1,2,\dots,N$ ) 값은 서로 간의 비율을 일정하게 유지한 채 그 크기만 변화할 것이다. 그러므로 절삭 조건에 무관하고 오로지 공구의 상태만을 나타낼 수 있는 무차원화된 벡터를 식 (3) 과 같이 나타내며 이를 "공구 상태 벡터(tool condition vector)" 라고 정의하였다.

$$\{1, R[2][t], \dots, R[N][t]\} \quad (3)$$

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

가공 중 이송속도, 절삭깊이 등 절삭 조건이 변화할 때 이론적으로 공구의 상태가 변하지 않았다면 절삭 조건이 변화하는 순간의 공구 1회전을 제외하고는 공구 상태 벡터는 공구 1 회전을 주기로 하여 항상 일정한 값을 유지할 것이나 실제로는 신호의 잡음, 공작물의 비균일성 등의 영향으로 조금씩 다른 값을 가진다. 그러므로 다음과 같이 일정한 시간 간격(공구 10 회전)을 두고 계속적으로 평균한 "기준 공구 상태 벡터(reference tool condition vector)"를 정의하였다.

$$\{1, R_N[2][t], \dots, R_N[N][t]\} \quad (4)$$

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

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

절삭 공정이 정상상태(steady-state)일 때 공구 런-아웃이 존재하지 않고 잡음 등의 영향을 무시한다면  $R_N[i][t]$  ( $i=1,2,\dots,N$ ) 의 크기는 모두 "1"이 될 것이나 실제로 런-아웃의 존재로 다양한 값들을 나타낼 것이다.

공구에 무리가 가해져서 칩핑(chipping)이나 파손(fracture)이 발생하면 "공구 상태 벡터"는 "기준 공구 상태 벡터"와 많은 차이를 보일 것이다. 그러므로 공구의 현재 상태가 기준 상태와 다른 정도를 나타내는 벡터를 식 (5) 과 같이 나타내며 이를 "공구 상태 변화 벡터(tool condition variation vector)"라 정의하였다.

$$\{1, D[2][t], \dots, D[N][t]\} \quad (5)$$

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

이러한 "공구 상태 변화 벡터"의 도입으로 공구의 런-아웃의 영향이 제거되었다. 절삭공정이 정상상태일때 신호에 포함되어 있는 잡음의 영향을 무시한다면, 런-아웃이 존재하더라도 공구의 상태가 변함이 없다면  $D[i][t]$  값은 항상 "1"의 값을 유지할 것이다. 만일 절삭 가공 중 이송속도 또는 절삭 깊이가 갑자기 변경되었다면 절삭 조건이 변화하는 순간 공구 1회전의  $D[i][t]$  크기가 "1"이 아닌 값이 나타나고 이 영향에 의해 절삭 조건 변경 뒤 공구 2회전부터 정확한 "1"의 값이 아닌 "1"에 가까운 값이 나타나다가 공구가 10회전 더 회전한 뒤부터는 절삭 조건의 변화에 의한 값 변화가 평균값에 미치는 영향이 사라져서 다시 모든  $D[i][t]$  의 크기가 "1"이 될 것이다.

2.2 최대 극대값, 최소 극소값의 결정

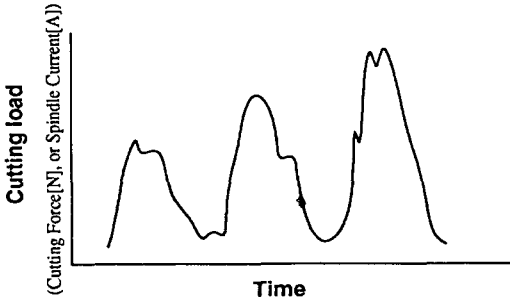


Fig. 2 Cutting load variations due to signal noise

절삭력이나 주축모터 RMS 전류 등으로 각 날당의 절삭부하를 구할 시에 아날로그 필터(analog filter) 및 신호처리 과정에서 이동평균(moving average) 값을 사용하여 신호에 포함되어 있는 잡음의 영향을 줄일 수 있으나, 잡음의 영향을 완전히 제거하지 못한 경우, 또는 신호의 주파수 대역폭 특성 등으로 인해 Fig. 2 에 나타난 것처럼 지역 극대값(local maximum) 또는 지역 극소값(local minimum)이 많이 나타날 수 있다. 이러한 지역적인 극대, 극소값이 아닌 각 날당 최대 극대값과 최소 극소값이 되기 위한 조건은 다음과 같다.

I : 날당 최소 극소값의 조건

- 1)  $(Cutting\_load[k-1] > Cutting\_load[k])$   
 $\& (Cutting\_load[k] < Cutting\_load[k+1])$
- 2) Minimum Cutting\_load[k] near time\_pv\_Avg[i][t]

$$time\_pv_{Avg}[i][t] = \frac{1}{Rev} \sum_{j=1}^{Rev} time\_pv[i][t-j]$$

(if Rev > 3, then Rev = 3) (6)

(time\_pv [i][t] : i 번째 날의 t 회전수에서의 Peak 에서 Valley 까지의 시간)

II : 날당 최대 극대값의 조건

- 1)  $(Cutting\_load[k-1] < Cutting\_load[k])$   
 $\& (Cutting\_load[k] > Cutting\_load[k+1])$
- 2) Maximum Cutting\_load[k] near time\_vp\_Avg[i][t]

$$time\_vp_{Avg}[i][t] = \frac{1}{Rev} \sum_{j=1}^{Rev} time\_vp[i][t-j]$$

(if Rev > 3, then Rev = 3) (7)

(time\_vp [i][t] : i 번째 날의 t 회전수에서의 Valley 에서 Peak 까지의 시간)

즉 I-1 과 II-1 의 조건은 표본화 주기에 따라 A/D 변환된 순차적인(1, 2, ..., k, ...) 데이터 신호가 극소값(valley) 또는 극대값(peak)이 되기 위한 조건이며, I-2 과 II-2 의 조건은 I-1 과 II-1 의 조건을 만족하는 극소값 또는 극대값 중에서 time\_pv\_Avg[i][t] 와 time\_vp\_Avg[i][t] 근처에서 최소 극소값과 최대 극대값이 되기 위한 조건이다.

2.3 공구 파손 지수(Tool Fracture Index)

공구가 파손되었을 때 그 파손된 정도를 나타내는 "공구 파손 지수(TFI:tool fracture index)"를 도입하기 위하여 다음과 같은 5 개의 공구 파손 지수의 요소를 정의하였다.

만일 공구가 t 회전 후, i 번째 날(tooth)이 파손되었다면 파손된 날의 절삭부하는 작아지고 그 다음(i+1\_th) 날은 파손된 공구가 절삭하지 않은 공작물의 양에 해당하는 만큼 더 절삭을 해야하기 때문에 절삭부하가 커진다. 그러므로 "공구 상태 변화 벡터"의 성분 중 i 번째 성분, D[i][t] 는 작아지고 i+1 번째 성분, D[i+1][t] 는 커진다. 따라서 공구가 파손된 정도를 나타내는 "공구 파손 지수"의 첫 번째 및 두 번째 요소를 다음과 같이 정의한다.

$$T_1 = \frac{1}{D[i][t]} \tag{8}$$

$$T_2 = D[i+1][t] \tag{9}$$

만약 1 번째 날(i=1)이 파손되었거나 마지막 날(i=N)이 파손되었다면 D[1][t] 는 그 크기가 항상 "1"이기 때문에 식 (8)-(9)에서 정의한 T<sub>1</sub>과 T<sub>2</sub> 로는 공구의 파손 정도를 나타낼 수가 없다. 그러므로 상태의 변화가 없는 날을 기준으로 하여 날의 번호(i)가 1 일 경우 T<sub>1</sub> 는 마지막 날을 기준으로 하고 날의 번호(i)가 N 일 경우 두 번째 날을 기준으로 하여 다음과 같이 계산한다.

$$T'_1 = \frac{R[N][t]}{R_N[N][t]} = D[N][t] \text{ (in case of } i=1) \tag{10}$$

$$T'_2 = \frac{R_N[2][t]}{R[2][t]} = \frac{1}{D[2][t]} \text{ (in case of } i=N) \tag{11}$$

공구 파손 지수의 3, 4, 5 번째 요소는 파손된 날의 이웃날들에 대한 절삭부하 비율의 관점에서 도출한다. 만일 i 번째 날이 파손되었다면 PV[i][t] 값은 상당히 작아져서

$PV[i][t]$ 에 대한  $PV[i-1][t]$ 와  $PV[i+1][t]$ 의 비율은 파손되기 전까지 신호의 PV 값을 일정한 시간 간격(공구 10 회전)으로 평균한  $PV_{Avg}[i][t]$ 에 대한  $PV_{Avg}[i-1][t]$ 와  $PV_{Avg}[i+1][t]$ 의 비율에 비해 상당히 커진다. 또한 파손된 다음( $i+1$ th)날은 큰 절삭부하가 걸리기 때문에  $PV[i+2][t]$ 에 대한  $PV[i+1][t]$ 의 비율은  $PV_{Avg}[i+2][t]$ 에 대한  $PV_{Avg}[i+1][t]$ 의 비율에 비해 커진다. 그러므로 "공구 파손 지수"의 세 번째, 네 번째, 다섯 번째 요소를 다음과 같이 정의한다.

$$T_3 = \frac{PV[i-1][t]}{PV[i][t]} * \frac{PV_{Avg}[i][t]}{PV_{Avg}[i-1][t]} \quad (12)$$

$$T_4 = \frac{PV[i+1][t]}{PV[i][t]} * \frac{PV_{Avg}[i][t]}{PV_{Avg}[i+1][t]} \quad (13)$$

$$T_5 = \frac{PV[i+1][t]}{PV[i+2][t]} * \frac{PV_{Avg}[i+2][t]}{PV_{Avg}[i+1][t]} \quad (14)$$

또한 날의 고유 번호에 관계없이 지수의 값이 일관성을 가지게 하기 위하여  $T_3$ 는 다음과 같이 간단히 수정하고  $T_4, T_5$ 도 같은 방법으로 수정하여 각 날의 번호가 달라지더라도 항상 같은 값을 가지게 하였다.

$$T'_3 = \frac{PV[(m-1)\%N+1][t]}{PV[m\%N+1][t]} * \frac{PV_{Avg}[m\%N+1][t]}{PV_{Avg}[(m-1)\%N+1][t]} \quad (15)$$

( $m=1, 2, \dots, m\%N+1=1, 2, \dots, N$ )  
 $m$ : 각 날에 해당하는 PV 값이 나타날 때 마다 1씩 증가,  
 $m\%N$ :  $m$ 에 날수( $N$ )를 나눈 나머지

이상에서 정의한 바와 같이 공구 파손 지수의 요소들인  $T_i(i=1, 2, 3, 4, 5)$ 는 모두 공구의 런-아웃에 무관한 무차원 변수들로서 잡음 등의 영향을 무시하고 공구의 상태가 변하지 않았다면  $T_i$ 는 모두 "1"이 되며, 절삭 공정 중 절삭 조건이 변화하는 경우에도 절삭 조건의 변화하는 순간에는 약간의 변동이 있을 수 있지만  $T_i$ 는 곧 "1"의 값을 되찾게 된다. 그러나 공구에 칩핑 및 파손 등이 발생하여 절삭부하의 주기적인 변화 양상이 변화하면 모든  $T_i$ 는 큰 값을 가진다.

### 3. 공구 파손 지수의 보완

#### 3.1 이웃한 날이 연속적으로 파손되었을 경우

가공 재료의 비균일성으로 경도가 높은 이물질이 존재하는 경우나 열처리가 되어있는 공작물 부분을 지나는 경우 또는 공작물 속에 파손된 드릴 공구의 잔해 등이 남아 있는 경우 등으로 인해 가공 중 이웃한 2 날 이상이 연속적으로 동시에 크게 파손되었을 경우, 이웃한 날간의 비율로서 공구의 파손된 정도를 계산하는 공구 파손 지수는 크지 않은 값이 될 수 있다. 이러한 경우 파손된 날과 비교하는 대상이 이웃하지는 않지만 파손되지 않은 날이 되어야만 하며, 다음과 같은 과정을 거쳐 이웃한 날의 연속적인 파손을 검출한다.

순차적으로 구한 절삭부하의  $PV[i][t]$ 에서 각 날의 바로 전 회전시 절삭부하와의 차이값을 계산해 나가며, 이를 지나간 일정한 시간 간격(공구 3 회전) 마다 계속적으로 평균하여 이를 절삭부하 차이값의 기준값으로 정한다.

$$\{DPV[1][t], DPV[2][t], \dots, DPV[N][t]\} \quad (16)$$

$$DPV[i][t] = PV[i][t] - PV[i][t-1] \quad (t \text{는 공구 회전수})$$

$$\{DPV_{Avg}[1][t], DPV_{Avg}[2][t], \dots, DPV_{Avg}[N][t]\} \quad (17)$$

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

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

$DPV[i][t]$  ( $i=1, 2, \dots, N$ )는 절삭 공정이 정상상태일 때는 크기가 "0"에 가까운 값을 가지지만 진입(entry) 또는 진출(exit) 절삭, 절삭 조건의 변화 등 과도 절삭(transient cutting)인 경우나 공구가 파손되었을 경우에 그 값의 변화는 커진다. 그러나 절삭부하 차이값의 변화( $DPV_{Avg}[i][t]-DPV[i][t]$ )를 살펴보면 과도 절삭인 경우는 그 크기가 상대적으로 작은 값을 나타내지만 공구가 파손되었을 경우 그 크기가 상대적으로 커진다. 이러한 절삭부하 차이값의 변화를 현재의 절삭부하 ( $PV[i][t]$ )로 나누어 그 값을 무차원화시킨 후, 이웃한 날의 모든 값이 일정한 안전계수(safety factor)보다 크다면 이는 이웃한 날( $i, i+1$ )이 연속적으로 파손되었을 가능성이 있는 것으로 간주하고, 공구 파손 지수의 요소를 다음과 같이 수정하여 계산한다.

$$\text{If } \left( \frac{DPV_{Avg}[i][t] - DPV[i][t]}{PV[i][t]} > \text{Safety Factor} \right)$$

$$\& \left( \frac{DPV_{Avg}[i+1][t] - DPV[i+1][t]}{PV[i+1][t]} > \text{Safety Factor} \right)$$

Then Modify the components of TFI as to Table 1. (18)

**Table 1 Modification of the components of TFI (Successive teeth fracture)**

|                | i 번째 날  | i+1 번째 날  |
|----------------|---|---|
| T <sub>1</sub> | $\frac{1}{D[i][d]}$   | $\frac{1}{D[i+1][d]}$   |
| T <sub>2</sub> | $D[i+2][d]$   |   |
| T <sub>3</sub> | $\frac{PV[i-1][d] \cdot PV_{Avg}[i][d]}{PV[i][d] \cdot PV_{avg}[i-1][d]}$     | $\frac{PV[i-1][d] \cdot PV_{Avg}[i+1][d]}{PV[i+1][d] \cdot PV_{avg}[i-1][d]}$ |
| T <sub>4</sub> | $\frac{PV[i+2][d] \cdot PV_{Avg}[i][d]}{PV[i][d] \cdot PV_{avg}[i+2][d]}$     | $\frac{PV[i+2][d] \cdot PV_{Avg}[i+1][d]}{PV[i+1][d] \cdot PV_{avg}[i+2][d]}$ |
| T <sub>5</sub> | $\frac{PV[i+2][d] \cdot PV_{Avg}[i+3][d]}{PV[i+3][d] \cdot PV_{avg}[i+2][d]}$ |   |

이렇게 공구 파손 지수의 요소들을 수정함으로써 이웃한 2 날이 동시에 파손되었을 경우에도 파손된 날이 나타날 때마다 파손된 날은 모두 큰 값의 공구 파손 지수(TFI)를 가지게 하였으며 날이 여러개 존재할 때 이웃한 3날 이상이 연속적으로 파손되었을 경우에도 비슷한 방법으로 수정함으로써 공구 파손 지수가 주기적으로 큰 값이 나타나게 하였다.

**3.2 공구 파손 지수의 최종 결정**

절삭조건이 변화하는 순간 및 신호 잡음의 영향으로 공구가 파손되지 않았을 때도 큰 값의 공구 파손 지수가 나타날 수 있으므로 다음과 같이 공구가 파손되고 난 후의 변화인지 아닌지를 판단하여, 파손되고 난 후의 변화가 아니라고 판단되면 공구 파손 지수(TFI)를 안정된 값을 나타내는 "1"의 값으로 환원해 주었다.

I : 공구가 파손되었을 경우에는 공구 파손 지수의 요소 중 T<sub>1</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub> 는 어떠한 경우라도 "1"보다 큰 값을 가진다.

$$\text{If } (T_1 < 1.0 \text{ or } T_3 < 1.0 \text{ or } T_4 < 1.0) \\ TFI = 1.0 \tag{19}$$

II : 공구가 파손되었을 경우에는 파손된 날의 현재까지의 절삭부하 평균값 (PV<sub>Avg</sub>[i][t]) 과 현재의 절삭부하 (PV[i][t]) 와의 차이는 현재까지 구한 해당 날의 절삭부하 차이값의 평균값(DPV<sub>Avg</sub>[i][t]) 보다도 크다.

$$\text{If } (PV[i][t] > PV_{Avg}[i][t] + DPV_{Avg}[i][t]) \\ TFI = 1.0 \tag{20}$$

III : 공구가 파손되었을 경우에는 파손된 다음 날의 절삭부하 (PV[i+1][t])는 현재까지의 절삭부하 평균값 (PV<sub>Avg</sub>[i+1][t]) 과 절삭부하의 차이값의 평균값 (DPV<sub>Avg</sub>[i+1][t])의 합보다도 크다.

$$\text{If } (PV[i+1][t] < PV_{Avg}[i+1][t] + DPV_{Avg}[i+1][t]) \\ TFI = 1.0 \tag{21}$$

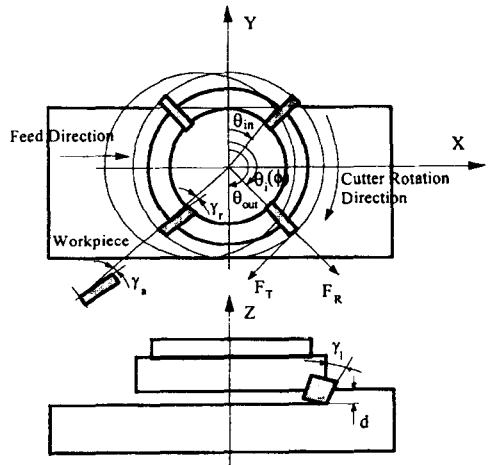
IV : I, II, III 의 조건을 모두 만족하지 않을 시에만 공구 파손 지수의 요소를 모두 곱하여 최종적인 공구 파손 지수를 얻음으로써 최대한 신뢰성을 부여하였다.

$$\text{If } (I), (II), (III) \text{ are not true} \\ TFI = T_1 * T_2 * T_3 * T_4 * T_5 \tag{22}$$

**4. 절삭력 모델을 통한 공구 파손 지수의 검증**

**4.1 절삭력 모델**

공구에 부하되는 절삭력을 예측하기 위하여 현재까지 여러 가지 많은 연구가 수행되었으나, 여기서는 정면 밀링에서 공구의 형상까지도 비교적 상세히 고려한 H. J. Fu<sup>(13)</sup> 가 제시한 절삭력 모델을 사용하기로 한다.



**Fig. 3 Tool and workpiece shape in face milling<sup>(13)</sup>**

먼저, 주축의 경사, 각 날의 비대칭 분포, 축방향의 런-아웃의 영향 등을 무시하고, 절삭력의 크기에 크게 영향을 미치는 공구의 반경방향 런-아웃 (ε(i))만을 고려한다

면 절삭력과 비례관계에 있는 미변형 칩두께 ( $C_i$ )는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_i^*(\theta_i(\phi)) \equiv f_i(i)\sin\theta_i(\phi) + \varepsilon(i) - \varepsilon(i-1) \quad (23)$$

만일  $i$  번째 날에서  $t_f(i)$ 만큼 파손이 발생하였다면 미변형 칩두께는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_i(\theta_i(\phi)) \equiv f_i(i)\sin\theta_i(\phi) + \varepsilon(i) - \varepsilon(i-1) - t_f(i) + t_f(i-1) \quad (24)$$

정면 밀링에서 공구와 공작물의 형상이 Fig. 3 과 같을 때 H. J. Fu는 접선방향 절삭력( $F_T$ ), 반경방향 절삭력( $F_R$ ), 축방향 절삭력( $F_A$ )을 식 (25) 와 같이 나타낼 수 있다고 하였다.

$$\begin{Bmatrix} F_T(i,\phi) \\ F_R(i,\phi) \\ F_A(i,\phi) \end{Bmatrix} = K_T C_i(\theta_i(\phi)) \vec{d}(\theta_i(\phi)) \cos\gamma_A \cos\gamma_R \begin{Bmatrix} 1 + K_R \frac{\cos\tilde{\gamma}_L \tan\gamma_R}{\cos\gamma_A} \\ -\tan\gamma_R + K_R \frac{\cos\tilde{\gamma}_L}{\cos\gamma_A} \\ \frac{\tan\gamma_A + K_R}{\cos\gamma_R} - \frac{\sin\tilde{\gamma}_L}{\cos\gamma_A \cos\gamma_R} \end{Bmatrix} \quad (25)$$

여기에서  $\theta_i$ 는 각 날의 회전각도;  $\phi$ 는 공구의 회전각도;  $K_T, K_R$ 은 접선 및 반경방향 비절삭저항;  $\tilde{\gamma}_L$ 는 유효 리드각;  $\gamma_A, \gamma_R$ 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 식 (25) 에서 구한 각 방향의 절삭력을 회전 변환시키고 절삭에 참여하고 있는 각 날의 절삭력의 합력으로 나타난다.

$$\begin{Bmatrix} F_X(\phi) \\ F_Y(\phi) \\ F_Z(\phi) \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^N \delta(\theta_i(\phi)) \begin{bmatrix} \cos\theta_i(\phi) & -\sin\theta_i(\phi) & 0 \\ \sin\theta_i(\phi) & \cos\theta_i(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_T(i,\phi) \\ F_R(i,\phi) \\ F_A(i,\phi) \end{Bmatrix} \quad (26)$$

## 4.2 공구 파손 지수(TFI)의 변화

### 4.2.1 공구 파손시 TFI 의 변화

Figure 4 는 3 날 정면 밀링에서 하향 밀링 시 공구에 큰 파손이 발생하였을 경우이며, Fig. 5 는 런-아웃이 심한 6 날 정면 밀링에서 공구의 런-아웃보다도 작은 미소한 파손이 발생한 경우에 대해 각각 절삭력 시뮬레이션을 통한 절삭력 변화와 그 때의 TFI 값의 변화를 보여주고 있다.

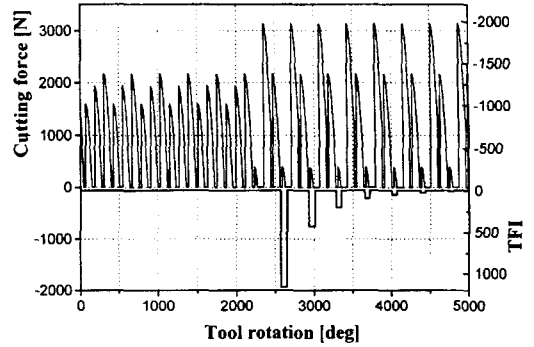


Fig. 4 Cutting force and TFI variations (Simulation) (3 teeth, 0.56 mm/tooth, DOC = 2 mm, 0.42 mm fractured)

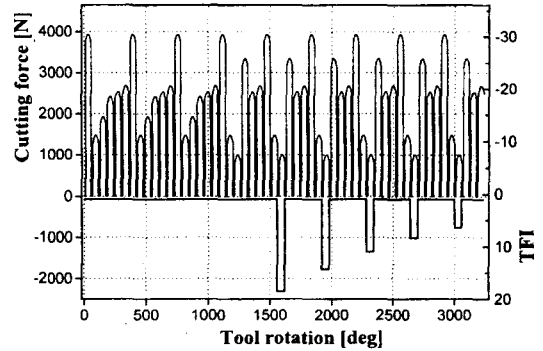


Fig. 5 Cutting force and TFI variations (Simulation) (6 teeth, 0.44 mm/tooth, DOC = 3 mm, 0.122 mm fractured)

공구에 런-아웃이 존재하더라도 공구의 상태가 변함이 없는 한 TFI 의 크기는 "1"로서 변함이 없었으며 파손 발생 후 1 회전 더 절삭하고 난 뒤부터 파손된 날이 나타날 때마다 큰 값의 TFI 가 주기적으로 나타나고 있다. TFI 값의 변화를 살펴보면 공구가 파손된 직후 가장 큰 값을 나타내고 또한 공구가 파손된 상태로 절삭이 계속 진행되어 파손된 공구로의 절삭 패턴에 적응됨에 따라 더 이상의 공구 파손이 발생하지 않는 한 파손된 날이 나타날 때마다 주기적으로 나타나는 TFI 의 값은 점차 감소하고 있다.

### 4.2.2 이웃날이 연속적으로 파손되었을 때 TFI 의 변화

Figure 6 는 6 날의 정면 밀링으로 절삭 가공 중 이웃한 날이 연속적으로 파손되었을 때 절삭력 신호와 TFI 의 변화를 시뮬레이션으로 보여주고 있다. 이웃날의 연속적인 파손을 고려하지 않을 시에는 비록 파손되었다고 할

지라도 이웃날에 대한 파손된 날의 절삭부하의 변화가 작기 때문에 TFI 는 "1" 또는 상대적으로 작은 값을 나타내었지만, 식 (18) 과 같이 이웃날의 연속적인 파손을 고려한 경우에는 파손된 날은 파손된 날이 나타날 때마다 모두 큰 값의 TFI 가 주기적으로 나타나고 있다.

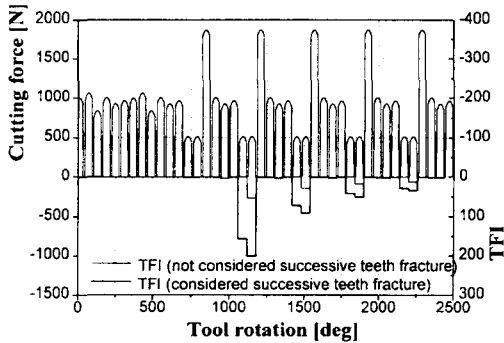


Fig. 6 Cutting force and TFI variations in case of successive teeth fracture (Simulation)

#### 4.2.3 절삭 조건 변경시 TFI 최대값의 변화

공구의 상태와 공구 파손 지수(TFI)와의 상관 관계를 규명하기 위하여 날당 이송(feed per tooth), 공구의 날 수(number of tooth), 절입비(immersion ratio) 등을 변경시켜가면서 공구가 파손된 형태 및 그 크기와 TFI의 크기 및 변화 양상과의 관계를 살펴보았다. 공구가 파손되면 공구 1 회전을 주기로 하여 큰 값의 TFI 가 계속적으로 나타나지만 여기서는 공구가 파손되고 1 회전 더 절삭한 직후 나타나는, 즉 파손된 공구로의 절삭 패턴으로 적응되지 않은 상태일 때 나타나는 최대 TFI 크기의 변화를 살펴보았다.

#### 날당 이송의 변경

같은 공구 파손량에 대해 날당 이송이 작을수록 절삭력의 상대적 변화는 커진다. TFI 의 크기는 결과적으로 공구가 파손될 때 공구 파손으로 인해 절삭력의 상대적 크기가 변화하는 양으로 해석될 수 있으므로, 같은 공구 파손량에 대해 날당 이송이 작을수록 TFI 의 값은 커진다. Figure 7은 4날 절삭일 경우 날당 이송을 변경시켜가면서 공구의 파손된 크기와 TFI 와의 관계를 나타내었다. 그러나 Fig. 8 과 같이 날당 이송에 대한 공구의 파손된 크기의 비율에 따른 TFI 의 변화를 살펴보면 날당 이송이 변화하더라도 날당 이송에 대한 공구 파손량의 비율이

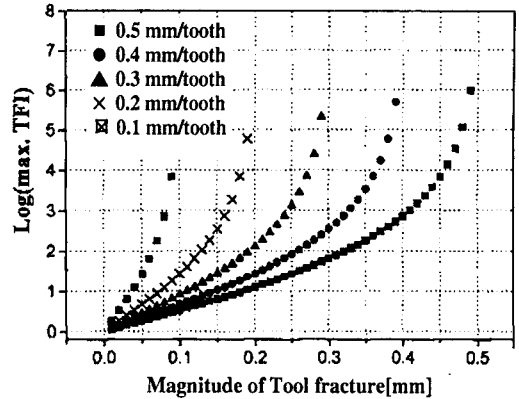


Fig. 7 TFI variations according to feed per tooth

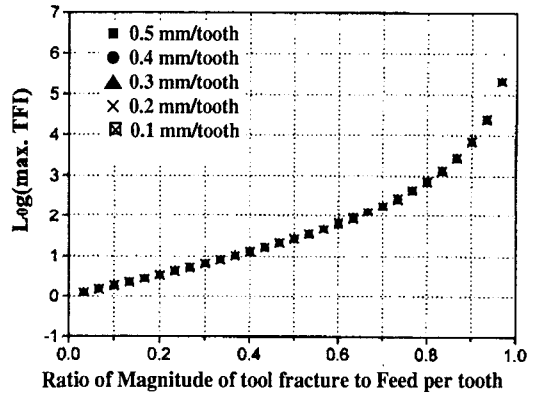


Fig. 8 TFI variations according to the ratio of tool fracture to feed per tooth

같다면 TFI 의 크기는 같다.

예를 들어 날당 이송에 대해 반(50%) 정도가 파손된 경우, 즉 0.2 mm/tooth 일 때 0.1 mm 정도, 0.4 mm/tooth 일 때 0.2 mm 정도 파손된 경우, 공구 파손 지수의 크기는 Fig. 8 에 나타난 바와 같이 모두  $10^{1.43}$ , 즉 27 정도의 크기를 가지는 것으로 나타났다.

#### 날수의 변경

Figure 9 는 공구의 날수를 변경시켜가면서 공구의 상태에 따른 TFI 의 크기를 나타낸 것이다. 한 날만 절삭에 참여하는 절입비로 가공을 할 때 공구가 3 날 이상일 때는 날수에 관계없이 공구의 상태와 TFI 와의 관계는 일정하였다. 2 날로 절삭할 때는 파손된 날과 파손되지 않은 이웃날을 비교하는 TFI 의 구성 요소들 중  $T_1$  를 제외



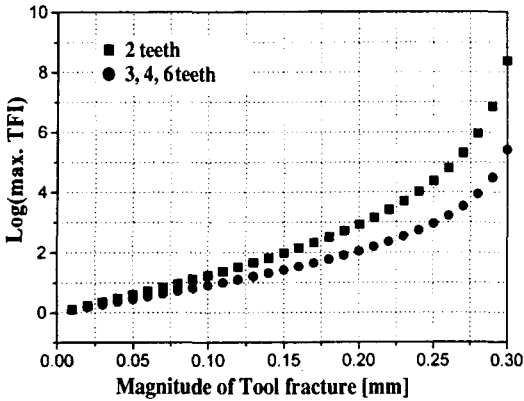


Fig. 9 TFI variations according to number of teeth

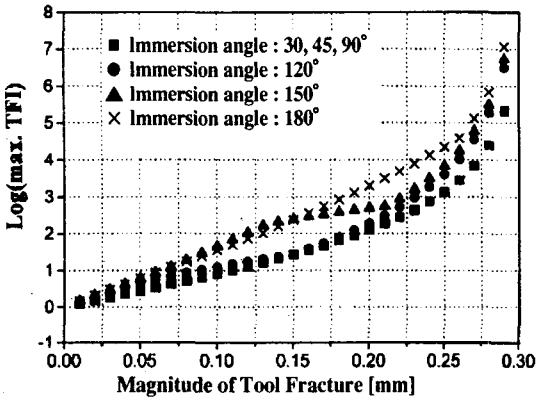


Fig. 10 TFI variations according to immersion ratio

한  $T_1, T_2, T_3, T_4$  값이 날수가 많을 때보다 상대적으로 커지기 때문에 같은 크기의 공구의 파손이 발생하였다고 할지라도 이들 요소들을 모두 곱함으로써 얻는 TFI의 크기는 커진다.

### 절입비의 변경

Figure 10은 4날 절삭일 경우 절입비의 변화에 따른 TFI의 변화를 나타낸 것이다. 한 날만이 절삭에 참여할 때는 절입비에 관계없이 TFI의 값은 일정하였지만 두 날 이상이 절삭에 참여할 때는 절입비가 커질수록 같은 공구 파손량에 대해 TFI의 값은 커지는 것으로 나타났다.

### 4.3 공구 파손 검출 알고리즘

절삭력 시뮬레이션을 통해 살펴보았듯이 공구가 파손되면 파손되고 난 1 회전 뒤 해당 날의 TFI가 커진다. 그

러나 공구 파손에 의한 TFI 값의 변화와 그렇지 않을 경우의 TFI의 영향을 구별해야 할 필요가 있다.

만일  $i$  번째 날이 파손되었다면 공구 1 회전이 지난 다음  $i$  번째 날에서 큰 값의 TFI가 나타나고 나머지 날에서는 작은 값 또는 "1"의 값을 가진다. 또한 파손된 공구로 절삭을 계속하는 동안에 파손된 공구로의 절삭 데이터에 적응하면서  $i$  번째 날에서 주기적으로 나타나는 큰 값의 TFI는 점차 감소한다. 그러므로  $i$  번째 날에서 공구 파손 데이터로 완전히 적응하기 전까지 TFI 크기가 공구 1 회전을 주기로 하여 반복적으로 큰 값을 보일 때는 공구 파손으로 간주하며, 주기적으로 보이지 않을 때는 공구의 상태가 변함이 없고 잡음 등의 영향인 것으로 간주한다.

## 5. 결론

- (1) 날당 절삭부하의 PV값 (날당 최대 극대값과 최소 극소값의 차이값)을 이용하여 각 날당 절삭부하의 변화를 관찰할 수 있었다.
- (2) 절삭 조건 및 이에 따른 절삭부하의 변화와 무관하게 오로지 공구의 상태만을 나타낼 수 있는 "공구 상태 벡터(tool condition vector)"를 도입하였으며, "기준 공구 상태 벡터" 및 "공구 상태 변화 벡터"를 도입하여 공구 런-아웃의 영향 및 절삭조건의 변화에 의한 영향과 공구의 파손을 구별하여 검출할 수 있었다.
- (3) "공구 상태 벡터"를 이용하여 5 가지 요소의 곱으로 나타나는 "공구 파손 지수(tool fracture index)"를 도출하였으며, 공구의 상태가 변함이 없는 한 지수의 크기는 "1"로서 변함이 없으며, 공구가 파손되어 절삭부하의 변화가 발생하면 파손되고 1 회전 뒤부터 파손된 날이 나타날 때마다 큰 값의 공구 파손 지수가 주기적으로 나타나며 지수의 값은 파손된 절삭 데이터로 적응함에 따라 점차 감소하였다.
- (4) 공구 파손 지수의 크기는 날당 이송에 대한 공구의 파손된 크기의 비율의 함수이며 3날 이상의 공구에서 한 날만이 절삭에 참여하고 있을 때는 날 수 및 절입비에 무관하였다.
- (5) 절삭력 모델을 이용한 공구 파손의 시뮬레이션을 통하여 공구 파손 지수의 변화를 살펴본 결과 공구 파손 지수를 이용하여 밀링시 공구의 파손을 검출할 수 있음을 알았다.

참 고 문 헌

1. J. Tlusty and Y. S. Tarn, "Sensing Cutter Breakage in Milling," *Annals of the CIRP*, **37**, 45-51, 1988.
2. Y. Altintas, I. Yellowley and J. Tlusty, "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. S. Takata, T. Nakajima, J.H. Ahn and T. Sata, "Tool Breakage by Means of Fluctuations in Spindle Rotational Speed," *Annals of the CIRP*, **36**, 49-52, 1987.
8. T. Moriwaki, "Detection of Tool Fracture by Acoustic Emission Measurement," *Annals of the CIRP*, **29**, 35-40, 1980.
9. S. R. Hayashi, C. E. Thomas and D. G. Wildes, "Tool Break Detection by Monitoring Ultrasonic Vibrations," *Annals of the CIRP*, **37**(1), 61-64, 1988.
10. 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.
11. M. E. Martelotti, "Analysis of the Milling Process," *ASME Journal of Engineering for Industry*, **63**, 667, 1941.
12. I. Yellowley, "Observations on the Mean Values of Forces, Torque and Specific Power In Peripheral Milling Process," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, **25**(4), pp. 337-346, 1985.
13. H. J. Fu, R. E. DeVor, and 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.
14. 김기대, 오영탁, 황지홍, 주종남, "밀링시 공구 파손 검출을 위한 공구 파손 지수 도출," 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, 881-888, 1997.