

절삭력 신호를 이용한 정면 밀링에서 공구 파손량 예측

김기대[†], 주종남^{*}

(2000년 8월 29일 접수, 2001년 4월 12일 심사완료)

Prediction of the Amount of Tool Fracture in Face Milling Using Cutting Force Signal

Gi Dae Kim and Chong Nam Chu

Key Words : Tool Fracture Index(*TFI*: 공구파손지수), Tool Fracture Amount(공구파손량), Face Milling(정면밀링), Cutting Force(절삭력), Transient Cutting(과도절삭)

Abstract

Tool fracture index(*TFI*) was developed in order not only to detect tool fracture but also to predict the amount of tool fracture in face milling. *TFI* is calculated by using peak-to-valley values of cutting force acting on teeth and their ratio between the adjacent teeth. When the tool fractures, a large value of *TFI* proportional to the amount of tool fracture was obtained periodically and decreased gradually. It was found that *TFI* is independent of cutter runout and it almost does not vary during transient cutting such as cutting condition change during machining. The threshold of tool fracture can be analytically determined by *TFI* developed in this paper, because the magnitude of *TFI* was shown to be dependent on the ratio of the amount of tool fracture to feed per tooth and immersion ratio. It was possible to predict the amount of tool fracture in experiments by using the proposed *TFI*.

기호설명

TFI : 공구파손지수

$PV[i][t]$: *t* 번째 회전시 *i* 번째 날에 걸리는 절삭력의 최대 높이의 산(peak)으로부터 최대 깊이의 골(valley)까지의 높이

$PV_{Avg}[i][t]$: *t* 번째 회전시 *i* 번째 날에 걸리는 절삭력 최대 높이의 산으로부터 최대 깊이의 골까지의 높이의 지난 10 회전 동안의 평균값

N : 공구 날수

ϕ : 공구 회전각도

$F_T(\phi)$: 접선방향 절삭력

$F_R(\phi)$: 반경방향 절삭력

F_c : 절삭합력

K_T : 비절삭저항

K_R : 접선방향 절삭력에 대한 반경방향 절삭력비

$C(\phi)$: 미변형 칩두께

d : 축방향 절삭깊이

f_t : 날 당 이송

ϕ_s : 절입각

E_i : *i* 번째 날의 런아웃 크기 또는 등가의 파손량

1. 서론

공구의 갑작스러운 파손, 공구의 과부하, 공작 기계의 채터, 과도한 공구 마모 등 NC 절삭 가공 중 발생하는 예기치 않은 여러 가지 이상 현상들을 여러 가지 센서를 사용하여 신뢰성 있게 검출

[†] 책임저자, 회원, 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

E-mail : gjdkim@cuth.cataegu.ac.kr

TEL : (053)850-2724 FAX : (053)850-2704

^{*} 회원, 서울대학교 기계항공공학부

하기 위하여 국내외에서 연구가 활발히 수행되고 있다. 특히 공구의 여러 날 중 한 날의 파손은 공작물의 표면을 손상시킬 뿐만 아니라, 파손된 채로 절삭 공정이 계속되면 과도한 절삭 부하로 인해 다른 모든 날이 파손될 가능성이 있으며, 결국 공구 홀더의 손상, 주축의 변형 등 공작기계에 치명적인 손상을 가져올 수 있다.

밀링 공정 중에 공구의 파손을 검출하기 위하여 Altintas 와 Yellowley⁽¹⁾는 한 날 당 준평균 절삭력(quasi mean resultant force)을 구하고 이들을 무차원화시켜 이웃한 날들에 대한 1 차 차이 값과 2 차 차이 값을 이용하였다. 이들에 의하면 공구가 파손되면 1, 2 차 차이 값이 매우 커지고 이러한 차이 값들을 이용하여 진입(entry) 및 이탈(exit) 절삭과 공구의 파손을 구분할 수 있다고 하였다. Altintas⁽²⁾는 또한 밀링 공정 중의 준평균 절삭력을 1차 Auto-regressive 모델에 적용하여 잔차(residuals)의 변화를 공구 파손을 검출하는 인자로 사용하였다. 그러나 위 두 가지 방법 모두 공구 파손에 의한 절삭력 변화와 공구의 런아웃(runout)에 의한 절삭력의 변화를 구별하지 못하였고, 공구 파손을 판단하는 기준이 되는 한계값(threshold)을 “받아들일 수 있는 공구 런아웃 크기의 최대값”으로 설정하였다. 공구 런아웃과 공구 파손에 의한 절삭력의 변화를 구별하기 위하여 Lee⁽³⁾ 등은 공구가 파손되었을 경우와 공구의 런아웃이 큰 경우 모두 큰 값을 나타내는 AR(1) 모델에서의 잔차 뿐만 아니라, 현재 날의 준평균 절삭력과 1 회전 전 자신의 준평균 절삭력의 차이 값을 무차원화시킨 지수를 한가지 더 도입함으로써 보다 신뢰성 있게 공구의 파손을 검출하는 알고리즘을 제시하였다.

그러나, 밀링 공정 중 절삭 부하의 패턴 변화를 이용하여 공구의 파손을 검출하기 위하여 현재까지 제시된 알고리즘의 한계점은 다음과 같다.

첫째, 계단형 공작물을 절삭할 때와 같이 절삭 깊이가 급격하게 감소하는 경우 등 절삭 가공 중 절삭 조건이 변화하는 과도 절삭(transient cutting) 시의 절삭력의 변화와 공구 파손시의 절삭력의 변화를 신뢰성 있게 구분할 수 없다.

둘째, 공구가 파손되었는지 아닌지를 판별하는 검출 인자의 한계값을 정할 때 실험에 의하여 임의로 결정하였으며, 그 한계값과 공구 파손량과의 명확한 관계를 제시하지 않았다.

셋째, 미리 정해진 한계값이 넘으면 공구가 파손된 것으로 판명하고 그렇지 않으면 정상이라고 하는 이분법적인 판단만 할 수 있었으며, 제시된

검출 인자만 가지고서는 공구가 얼마나 파손되었는지를 알 수 없다.

위와 같은 문제를 극복하기 위하여 김기대⁽⁴⁾ 등이 5 개의 무차원 지수를 결합한 공구파손지수를 발표한 바 있으나, 여기에서도 지수의 절대값이 가지는 명확한 물리적인 의미를 제시하지는 못하였다.

공구가 파손되었는지를 판단하는 변수의 한계값을 낮추면 검출시스템이 너무 예민하게 반응하여 공구가 파손되지 않았는데도 알람(alarm)을 울리고, 반대로 한계값을 높이면 공구가 파손되었는데도 검출을 하지 못하는 경우가 발생하게 된다. 또한 정삭과 황삭 등 밀링 공정의 종류에 따라 서로 허용할 수 있는 기준 공구 파손량이 달라진다. 일부 선진국에서 공구파손 검출시스템을 고가의 NC 공작기계에 부착하여 판매하고 있지만, 위와 같은 이유로 인해서 한계값을 결정하는데 여전히 어려움이 있다고 알려져 있다.

본 논문에서는 정면 밀링 공정 중 공구가 파손되었을 때, 절삭력 신호를 이용하여 공구의 파손량을 예측할 수 있는 공구파손지수를 개발하였다. 공구 파손량을 예측할 수 있으므로 산업 현장에서 허용할 수 있는 기준 공구 파손량을 결정지어 준다면 공구의 파손을 판별하는 한계값을 쉽게 결정 지을 수 있게 된다. 절삭력 시뮬레이션을 통하여 본 논문에서 제시한 공구파손지수를 정량적으로 분석하여 지수가 가지고 있는 물리적인 의미를 제시하였고, 이 지수가 공구의 런아웃에 무관하고 과도 절삭에도 거의 변함이 없음을 밝혔다. 또한 실제로 정면 밀링 실험을 통해 공구동력계로 측정 한 절삭력 신호를 이용하여 공구의 파손량을 신뢰성 있게 추정할 수 있음을 보였다.

2. 공구파손지수 (Tool fracture index)

2.1 공구파손지수의 정의

밀링 공정 중 정상상태(steady-state)에서의 절삭력은 공구 런아웃으로 인해 공구 1 회전을 주기로 하여 반복적인 패턴이 나타난다. 이러한 주기적인 절삭력의 크기의 변화를 나타내는 방법으로 한 날 당 걸리는 절삭력의 평균값들을 이용할 수도 있고 한 날에 걸리는 절삭력의 최대 높이의 산(peak)으로부터 최대 깊이의 골(valley)까지의 높이들을 이용할 수도 있다. Altintas^(1,2) 등이 이용한 절삭력의 준평균값을 이용한다면, 신호 잡음의 영향을 줄이는 효과가 있으나 절입비(immersion ratio)가 큰 경우에는 날 당 걸리는 절삭력의 미세한 차이를 충

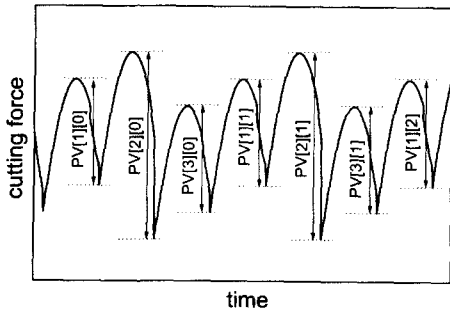


Fig. 1 Peak-to-valley of cutting force (3-tooth cutter)

분히 나타낼 수 없으므로, 본 연구에서는 각 날 당 절삭력의 최대 산으로부터 최대 골까지의 높이 (PV : peak-to-valley)를 이용하였다. 그리고 신호 잡음의 영향을 줄이기 위하여 절삭력 데이터의 이동 평균(moving average)을 사용하였다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 i 번째 날의 t 번째 회전에서의 PV 값을 $PV[i][t]$ 로 나타내었고 식 (1) 과 같이 N 개의 날에 대해 이들을 순차적으로 나타냄으로써 밀링 공정 중의 절삭력의 변화를 표현하였다. 공구가 t 회전한 시점에서 i 번째 날의 지난 10 회전 동안의 평균($PV_{Avg}[i][t]$)을 구하면 식 (2)와 같고 이들을 순차적으로 나타내면 식 (3) 과 같다.

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

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

$$n = t-1, \text{ if } t \leq 10 \quad (2)$$

$$n = 10, \text{ if } t > 10$$

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

만일 t 번째 회전에서 i 번째 날이 파손되었다면 i 번째 날에 걸리는 절삭력($PV[i][t]$)은 작아지고 그 다음날, 즉 $i+1$ 번째 날에 걸리는 절삭력($PV[i+1][t]$)은 i 번째 날에서 절삭하지 못했던 부분만큼 더 절삭을 해야 하므로 절삭력은 커진다. 따라서 이들의 이웃 날들에 대한 비율($PV[i+1][t]/PV[i][t]$)은 공구가 파손되기 전의 평균값들의 이웃 날들의 비율($PV_{Avg}[i+1][t]/PV_{Avg}[i][t]$)에 비하여 상당히 큰 값을 가지게 된다. 따라서 식 (4)와 (5)에 나타난 바와 같이 무차원화된 이들의 비율을 공구의 파손을 나타내는 공구파손지수 (TFI : Tool Fracture Index)로 정의하였다.

$$TFI = \frac{PV[i+1][t]}{PV[i][t]} \bigg/ \frac{PV_{Avg}[i+1][t]}{PV_{Avg}[i][t]} \quad (4)$$

$$= \frac{PV[i+1][t]}{PV[i][t]} \times \frac{PV_{Avg}[i][t]}{PV_{Avg}[i+1][t]}$$

$$TFI = \frac{PV[1][t+1]}{PV[N][t]} \times \frac{PV_{Avg}[N][t]}{PV_{Avg}[1][t+1]} \quad (\text{if } i = N) \quad (5)$$

2.2 공구파손지수의 변화

공구가 진입하고 최초 1 회전 절삭 시에 비교할 지난 평균 비율($PV_{Avg}[i+1][t]/PV_{Avg}[i][t]$) 값은 1로 두었다. 따라서 진입 절삭시 최초 1 회전 동안은 $PV[i+1][t]$ 에 대한 $PV[i][t]$ 의 비율만이 TFI에 반영되어 공구의 런아웃 영향에 의한 절삭력의 크기 변화가 그대로 나타나게 된다. 공구가 절삭에 참여하고 난 후 공구가 2 회전 이상 회전하였을 때는 절삭공정이 정상 상태가 된다. 이때부터는 $PV[i+1][t]/PV[i][t]$ 의 비율을 지나간 동안의 평균값인 기준비율($PV_{Avg}[i+1][t]/PV_{Avg}[i][t]$)로 나누어 줌으로써 공구 런아웃의 영향을 제거하였으며, 런아웃이 아무리 커더라도 TFI 값은 1에 가까운 값이 된다.

이탈 절삭시 절삭력의 변화를 살펴보면, 이송속도가 커질수록 이탈 절삭 중 절삭력이 감소되는 속도가 빨라져서 TFI의 변화 정도가 커지게 된다. 그러나 공구가 파손되지 않은 이상 이웃 날 간의 절삭력의 상대적인 크기 변화는 이전 크기 변화의 평균값에 비해 무시할 수 있는 정도로 작다. 따라서 이탈 절삭시에도 TFI의 변화는 거의 무시할 수 있다고 할 수 있다.

절삭 공정 중 절삭깊이 또는 이송속도가 변화하던지, 공작물의 형상이 변화하는 등 절삭 조건이 변화하여 주기적인 절삭력의 패턴이 변화할 경우를 살펴보면, 이웃 날 간의 상대적인 절삭력 크기 비율은 절삭조건이 변화하는 순간의 1 회전 절삭시에만 변화하고 곧 지난 평균값인 기준비율에 가까운 값으로 회복하게 된다. 따라서 절삭 공정 중 절삭 조건이 변화하는 과도 절삭인 경우에도 TFI의 변화는 거의 무시할 수 있다고 할 수 있다.

그러나 절삭 공정 중 공구가 파손되었거나, 칩핑(chipping)이 발생하여 주기적인 절삭력에 변화가 발생하였을 경우, 식 (4)와 (5)의 TFI 정의에 의하여 TFI의 값은 큰 값이 나타나게 된다.

3. 절삭력 시뮬레이션에 의한 TFI 검증

3.1 절삭력 모델

공구가 파손되었는가 아닌가, 혹은 공구가 얼마

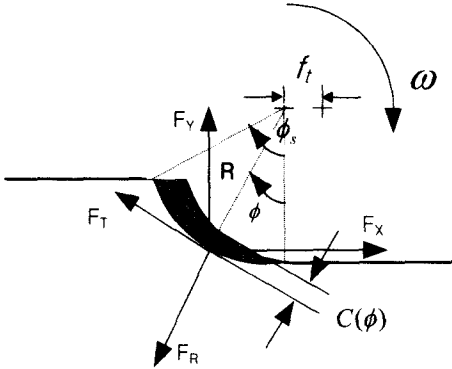


Fig. 2 Cutting force model in up milling

나 파손되었는가를 판단하기 위해서는 TFI의 변화 패턴 뿐 만 아니라, 공구 파손량과 TFI의 크기와와의 관계가 밝혀져야 한다. TFI의 크기는 Martellotti⁽⁵⁾와 Sabberwal⁽⁶⁾에 의하여 제안된 기본적인 절삭력 모델식으로부터 계산할 수 있다.

$$F_T(\phi) = K_T * C(\phi) * d \quad (6)$$

$$F_R(\phi) = K_R * F_T(\phi) \quad (7)$$

$$C(\phi) = f_i \sin \phi \quad (8)$$

여기서, $F_T(\phi)$ 와 $F_R(\phi)$ 는 공구에 걸리는 접선 및 반경 방향 절삭력; K_T 는 비절삭저항; $C(\phi)$ 는 미변형 칩두께; d 는 축방향 절삭깊이; K_R 는 접선방향 절삭력에 대한 반경방향 절삭력 비; f_i 는 날 당 이송(feed per tooth); 그리고 ϕ 는 공구의 회전 각도를 나타낸다.

만약 공구에 런아웃이 존재하거나 또는 가공 중 파손이 발생하면 미변형 칩두께는 다음과 같은 식이 된다.

$$C(\phi) = f_i \sin \phi - E_i + E_{i-1} \quad (9)$$

여기서 E_i 는 i 번째 날의 런아웃 크기 또는 파손량을 나타낸다. 실제로 공구는 불규칙한 형태로 파손되지만, 여기서는 해석의 편의를 위해 공구의 파손량을 런아웃과 같은 개념으로 사용하여 절삭깊이에 걸쳐 일직선으로 파손되었다고 가정한 등가의 파손량(equivalent tool fracture amount)으로 가정하였다.

x 방향 절삭력과 y 방향 절삭력은 접선 및 반경 방향 절삭력의 회전변환으로부터 계산되어지고 절삭합력 F_c 은 x, y 방향 절삭력으로부터 구해진다.

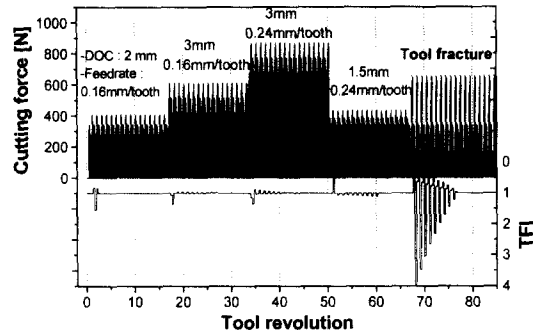


Fig. 3 Cutting force and TFI variations when cutting condition changes during machining

$$\begin{Bmatrix} F_X(\phi) \\ F_Y(\phi) \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^N \delta(\theta_i(\phi)) \begin{bmatrix} \cos \theta_i(\phi) & -\sin \theta_i(\phi) \\ \sin \theta_i(\phi) & \cos \theta_i(\phi) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_T(i, \phi) \\ F_R(i, \phi) \end{Bmatrix} \quad (10)$$

$$F_c = \sqrt{F_X^2(\phi) + F_Y^2(\phi)} \quad (11)$$

절입각(immersion angle)이 작아서 한 날만이 절삭에 참여할 경우 절삭합력은 다음과 같이 접선방향 절삭력과 비례하게 된다.

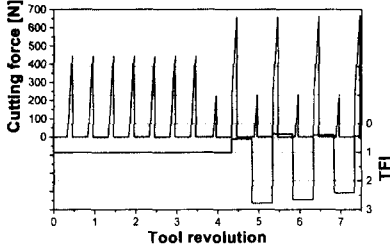
$$\begin{aligned} F_c &= \sqrt{F_X^2(\phi) + F_Y^2(\phi)} = \sqrt{F_T^2(\phi) + F_R^2(\phi)} \\ &= F_T(\phi) \sqrt{1 + K_R^2} \quad (12) \end{aligned}$$

$$F_c \propto F_T \propto (f_i \sin \phi - E_i + E_{i-1}) \quad (13)$$

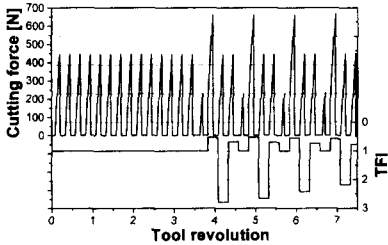
3.2 공구가 파손되었을 경우 TFI의 변화

절삭력 모델을 이용한 공구 파손 시뮬레이션을 통하여 본 연구에서 개발된 TFI의 변화를 살펴보았다. Fig. 3은 런아웃을 가진 3 날 공구로 가공 중 절삭 조건이 변화할 때 절삭력의 변화 및 이로부터 계산한 TFI의 변화를 나타내고 있다. 공작물은 최초 축방향 절삭깊이가 2 mm, 이송속도 0.16 mm/tooth로 가공되다가, 주축이 17 회전 절삭한 후 절삭깊이가 3 mm로 증가되었고, 34 회전 절삭한 후에는 이송속도가 0.24 mm/tooth로 증가되었다. 다시 50 회전 후 절삭깊이가 1.5 mm로 감소되었고, 67 회전 후 마침내 공구가 파손되었다.

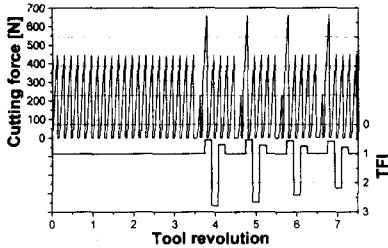
위와 같은 경우에 서론에서 소개한 기존의 공구파손 검출 알고리즘을 적용시켜보자. 우선 공구의 런아웃으로 인하여 이웃 날들 사이의 1차, 2차 차이 값은 커진다. 또한 주축이 17, 34, 50 회전한 직후 절삭 조건이 갑자기 변화하였을 때 절삭력의 변화가 매우 커져 AR 모델의 잔차는 굉장히 커진



(a) 2-tooth cutting



(b) 4-tooth cutting

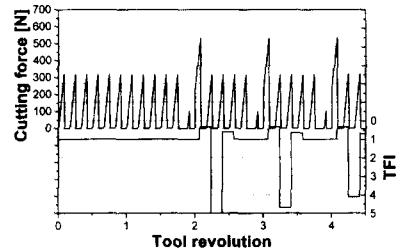


(c) 6-tooth cutting

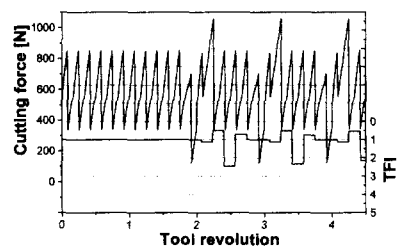
Fig. 4 TFI variations according to the number of teeth (45° immersion angle)

다. 특히 50 회전한 직후에는 AR 모델에서 사용된 잔차 뿐 만 아니라 현재 날의 준평균 절삭력과 자신의 날의 1 회전 전 준평균 절삭력의 차이 값도 공구 파손 시와 마찬가지로 큰 음의 값이 되어 결국 기존의 방법으로는 공구의 파손과 절삭 공정 중 절삭 조건의 변화를 구분할 수 없게 된다.

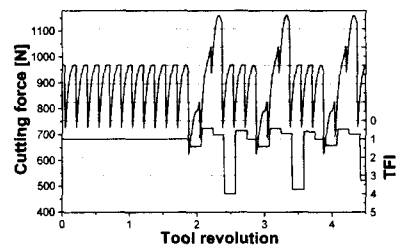
이제 Fig. 3 에 나타난 TFI 의 변화를 살펴보자. 진입 절삭 및 가공 중 절삭 조건이 변화하는 17, 34, 50 회전한 직후에 작은 변화가 있었지만 곧 안정된 값을 나타내는 크기 1로 되돌아간다. 그러나 67 회전 후 공구가 파손되었을 경우에는 매우 큰 값의 TFI 값이 주기적으로 나타나고 있다. 식 (4) 에 나타난 TFI 의 정의에 의해 알 수 있듯이 공구가 파손된 직후에 공구 파손으로 인한 현재비율, $PV[i+1][t]/PV[i][t]$ 이 지난 10 회전 동안의 기준비율,



(a) 30° immersion angle



(b) 90° immersion angle



(c) 135° immersion angle

Fig. 5 TFI variations according to the immersion angle (6 teeth)

$PV_{Avg}[i+1][t]/PV_{Avg}[i][t]$ 에 비해 최대로 크게 되어 TFI 값은 공구 파손 직후에 가장 크게 나타난다. 이후 공구가 파손된 채로 계속 절삭해감에 따라 파손된 공구로의 절삭 패턴에 점차 적응되어 $PV_{Avg}[i+1][t]/PV_{Avg}[i][t]$ 과 $PV[i+1][t]/PV[i][t]$ 의 차이가 점점 줄게 되며 결국 TFI 는 점점 감소하게 된다. 공구 파손 후 10 회전이 지나면 파손된 공구로의 절삭에 완전히 적응되어 TFI 값은 1 이 된다. 그러나, 공구가 10 회전 할 동안의 시간은 공구의 파손을 검출하기에 충분한 시간이다.

Fig. 4 와 5 는 절삭 공정 중 날 당 이송의 40% 에 상당하는 크기로 공구가 파손되었을 경우 날 수 및 절입각의 변화에 따른 절삭력 및 TFI 의 변화를 보여주고 있다. 절입각이 작아서 한 날만이 절삭에 참여한다면, 절삭력의 기본 모델식에서 계

산한 날 당 PV 값은 일정하므로 공구 날수는 TFI에 전혀 영향을 주지 않는다.

Fig. 5에서는 절입각의 영향을 살펴보았는데, 절입각이 커져서 절삭에 참여하는 날의 수가 두 날 이상이 되면 파손된 날 및 그 다음날에 걸리는 절삭력의 크기 및 패턴이 달라지기 때문에 이들로부터 계산되는 TFI 값도 변화한다. 따라서 TFI로부터 공구가 파손된 양을 정확하게 예측하기 위해서는 절입각에 대한 정보를 CAM 데이터로부터 얻어야 한다.

3.3 TFI 크기와 공구 파손량과의 관계

TFI로부터 공구 파손량을 예측하고 또한 공구의 파손을 판단하는 TFI 한계치를 결정하기 위해서는 TFI의 크기와 공구 파손량과의 관계를 규명해야 한다. 먼저, 절입각이 작아서 한 날만이 절삭에 참여하고 공구 런아웃이 없는 경우를 생각하자. i 번째 날이 파손된 직후에 나타나는 가장 큰 값의 TFI를 살펴보면, 우선 공구의 런아웃이 없으므로 $PV_{Avg}[i+1][t]/PV_{Avg}[i][t]$ 의 값은 1이 되고, $PV[i+1][t]/PV[i][t]$ 의 값은 식 (13)에 의하여 다음과 같이 된다.

$$TFI = \frac{f_t \sin \phi_s + E_i}{f_t \sin \phi_s - E_i} \quad (14)$$

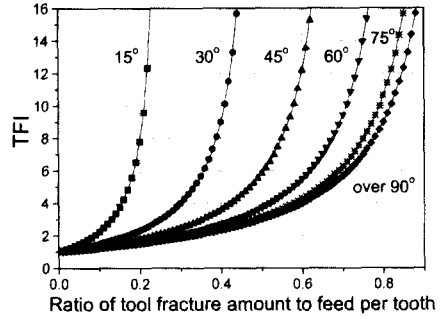
여기서, ϕ_s 는 절입각을 나타내고 E_i 는 i 번째 날의 등가의 공구 파손량을 나타낸다. 여기서 E_i 는 다음과 같이 날 당 이송에 대한 비율로 나타낼 수 있다.

$$E_i = r \times f_t \quad (0 \leq r \leq 1 \text{ and } r=1, \text{ if } r > 1) \quad (15)$$

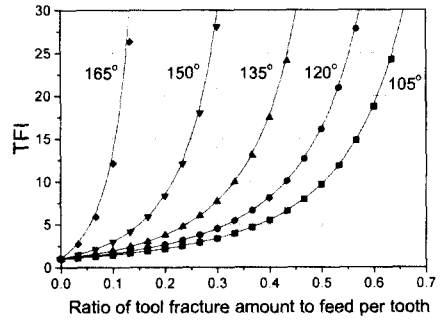
위식으로부터 TFI는 다음과 같이 절입각과 날 당 이송에 대한 공구 파손량 비율만으로 간단히 나타내어진다.

$$TFI = \frac{f_t \sin \phi_s + r \times f_t}{f_t \sin \phi_s - r \times f_t} = \frac{\sin \phi_s + r}{\sin \phi_s - r} \quad (16)$$

Fig. 6(a)는 식 (16)을 바탕으로 하여 날 당 이송에 대한 공구 파손량의 비율(r) 및 절입각(ϕ_s)을 변화시켰을 때 TFI의 크기가 어떻게 변화하는지를 보여주고 있다. 공구 파손량이 같다고 할지라도 절입각이 작으면 작을수록 공구 파손으로 인해 변화하는 절삭력이 전체 절삭력 변화에 미치는 영향이 커지므로 그 비율로서 계산되어지는 TFI는 커진다. 절입각이 90° 가 넘는 경우에는 절삭력의 최대 peak 값은 미변형 칩 두께가 최대일 때, 즉 공구 회전각이 90° 일 경우에 발생하므로 TFI의 크기의 변화는 절입각에 관계없이 일정하게 된다. 또한 전입각이 0° 인 상향 밀링 또는 이탈각이 0°



(a) 1 tooth involved in cutting



(b) More than 2 teeth involved in cutting

Fig. 6 TFI magnitude variations according to the tool fracture amount and immersion angle

인 하향 밀링이 아닌 경우에는 미변형 칩 두께가 최대인 지점에서의 각도를 기준으로 삼아야 한다.

두 날 이상이 절삭에 참여하는 경우에는 식 (16)과 같은 해석적인 결과를 도출하기 어려워 절삭력 모델을 이용한 공구파손 시뮬레이션을 이용하였다. 두 날 이상이 절삭에 참여하는 경우에는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 파손된 날의 절삭력 변화가 그 다음 날과 그 다음 다음 날까지의 절삭 합력에도 영향을 끼치게 되어 $PV[i+1][t]/PV[i][t]$ 보다는 오히려 $PV[i+2][t]/PV[i+1][t]$ 가 더 큰 값을 가지게 된다. 그 결과 Fig. 6(b)와 같이 절입각이 커질수록 TFI가 더 커지는 것으로 나타났다.

기존의 공구 파손 검출 알고리즘에서는 공구의 파손을 검출하는 변수와 공구 파손량과의 관계를 해석적으로 얻지 못하여 공구 파손을 판단하는 검출 인자의 한계값을 실험적으로 정할 수 밖에 없었다. 그러나 앞에서 밝힌 바와 같이 CAM 데이터로부터 절입각에 대한 정보를 얻고 NC 데이터로부터 날 당 이송에 대한 정보를 얻은 후, 절삭력

을 측정하여 본 연구에서 개발한 *TFI* 를 계산한다면, Fig. 6 으로부터 공구의 파손량을 예측할 수 있으며, 따라서 공구 파손을 판별하는 한계값도 실험적이 아닌 해석적인 방법으로 정의할 수 있게 된다.

4. 실험 결과 및 토의

4.1 실험 장치 및 조건

정면 밀링에서 가공중 절삭력의 변화를 측정하고 공구가 파손되었을 경우 *TFI* 의 변화를 살펴왔다.

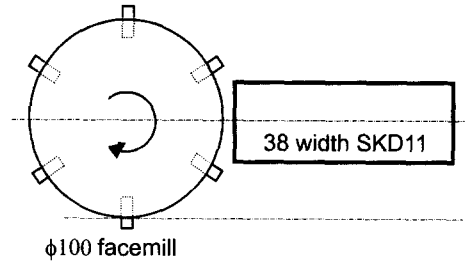
실험에 사용된 공작기계는 (주)통일중공업의 수평형 머시닝센터 MCH-10 이다. 절삭력을 측정하기 위하여 Kistler 9257B 공구동력계(tool dynamometer)를 사용하였으며 측정된 신호는 Kistler 5019A 4 채널 전하증폭기(charge amp.)를 통하여 필터링(filtering)하고 스케일(scale)을 조정하여 데이터 습득장치에 전압형태로 입력된다. 전하증폭기에서 300Hz 의 Low pass filter 를 사용하여 고주파수의 잡음을 제거하였다.

공구는 정면밀링(face milling) 커터를 사용하여 3 날 및 6 날을 장착하여 실험을 하였으며, 공작물은 SKD11 및 SM45C 를 사용하였다.

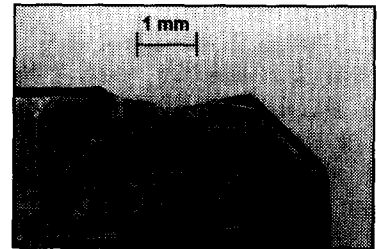
일반적으로 공구 파손 실험을 위해서는 날을 쉽게 파손시키기 위해서 공구 팁(tip)에 EDM 가공을 선행한다. 하지만 본 연구에서는 선행 가공을 하지 않은 상용 팁을 사용하였으며, 절삭깊이를 2-3mm 로 비교적 깊이주고, 절삭가공중 이송속도를 100 mm/min 로부터 500 mm/min 까지 100 mm/min 단위로 증가시켜가면서 공구에 과부하가 걸리게 함으로써 공구를 파손시켜 자연스러운 파손 형태를 얻도록 하였다.

4.2 실험 결과 및 토의

Fig. 7 는 공구 런아웃이 매우 심한 6 날 절삭으로 절삭깊이 3 mm, 주축 회전속도 150 rpm 으로 재질이 SKD11 인 공작물을 이송속도를 증가시켜가면서 가공하다가 이송속도가 300 mm/min 되는 시점에서 공구 런아웃보다 더 작은 크기로 공구 파손이 발생한 경우이다. Fig. 8 에서 이 때 공구동력계로 측정된 절삭력 신호 및 이를 이용하여 계산한 *TFI* 의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보여지는 바와 같이 공구 런아웃이 크더라도 *TFI* 의 값은 안정된 상태를 나타내는 1 에 가까운 값을 나타내었으며, 공구에 미소한 파손이 발생한 직후부터 주기적으로 큰 값의 *TFI* 가 나타나고 있음을 볼 수 있다. 최대 *TFI* 의 크기가 2.5 로 계산되어



(a) Shape of workpiece and tool



(b) Photograph of fractured tooth

Fig. 7 Workpiece, tool and fractured tooth (small fracture)

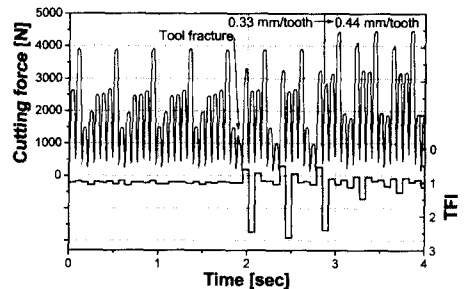
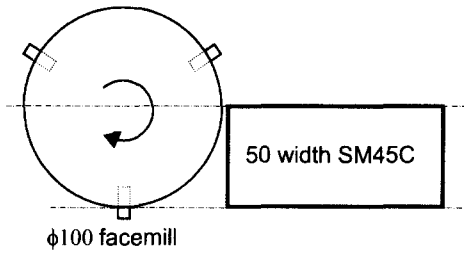


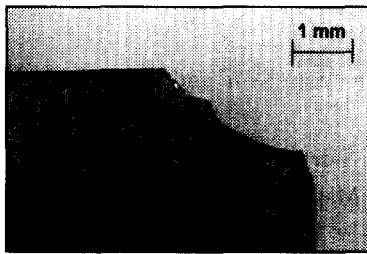
Fig. 8 Cutting force and *TFI* variations with small fracture (6 teeth, SKD11, $f_t = 0.33 \rightarrow 0.44$ mm/tooth, 150 rpm, and $d = 3$ mm)

진 이 때의 공구 파손량을 예측하여 보자. 절입각은 약 45° 로서 한 날만 절삭에 참여하고 있지만 Fig. 7(a)에 나타난 바와 같이 미변형 칩 두께가 최대가 되는 지점을 통과하고 있으므로 Fig. 6(a)에서 절입각이 90° 에 해당하는 경우를 참조해야 한다. *TFI* 크기 2.5 및 절입각 90° 는 Fig. 6(a)에서 날 당 이송에 대해 약 40% 정도가 파손된 것을 나타내고, 실험 중 날 당 이송이 0.33mm/tooth 일 때 파손이 발생하였으므로 $0.33 \times 0.4 \approx 0.13$ [mm] 정도의 미소 파손이 발생하였다고 추정할 수 있다. 실제로 Fig. 7(b)에서 보는 바와 같이 공구는 미소하게 파손되었다.

Fig. 9 는 3 날 절삭으로 절삭깊이 2 mm, 주축회



(a) Shape of workpiece and tool



(b) Photograph of fractured tooth

Fig. 9 Workpiece, tool and fractured tooth (large fracture)

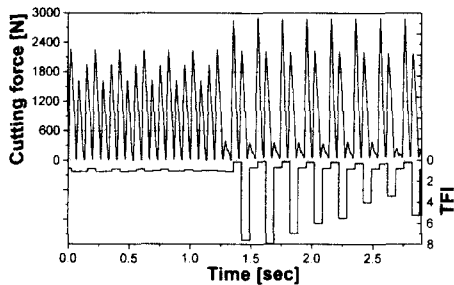


Fig. 10 Cutting force and TFI variations with severe fracture (3 teeth, SM45C, $f_t = 0.56$ mm/tooth, 300 rpm, and $d = 2$ mm)

전 속도 300 rpm 로 재질이 SM45C 인 공작물을 하향 절삭하다가 이송속도 500mm/min 에서 파손된 경우이다. Fig. 10 에 이 때 측정된 절삭력 신호와 TFI 의 변화가 나타나 있다. 이 경우에 최대 TFI 의 크기가 8 로 계산되었으며, Fig. 6(a)로부터 TFI 8 및 절입각 90° 는 날 당이송(0.56mm/tooth)의 약 78% 에 해당하는 크기로 공구가 파손되었다는 것을 알 수 있다. 결국 $0.56 \times 0.78 \approx 0.44$ [mm] 등가의 크기로 파손되었다고 추정할 수 있다. Fig. 9(b) 에서 보는 바와 같이 실제 공구 파손량은 비교적 크게 나타났다.

위 두 가지 실험의 경우는 절입각이 작아서 한

날만이 절삭에 참여한 경우로서 공구 파손량이 매우 잘 예측되는 경우이다. 그러나, 절입각이 커져서 두 날 이상이 참여하게 될 경우에는 Fig. 5 에서 보는 바와 같이 공구 파손시 발생하는 절삭력의 변화가 매우 복잡하여 TFI 크기가 예상치보다 더 크게 나타나는 경향이 있었다.

또한 실제로 산업 현장에서는 절삭력을 측정하기 위하여 공구동력계를 사용할 수 없다. 따라서 공구 파손을 실용적으로 검출하기 위해서는 공구에 걸리는 절삭력을 간접적으로 신뢰성있게 측정할 수 있는 방법이 먼저 개발되어야 할 것이다.

5. 결론

절삭력 신호를 측정함으로써 정면 밀링 공정 중 공구 파손량에 비례하여 계산되어지는 공구파손지수(TFI)를 개발하였다. 절삭력 모델을 통하여 개발된 TFI 의 값이 날 당 이송에 대한 공구 파손량의 비율로 나타남을 밝혔다. 개발된 TFI 는 공구 런아웃 및 과도 절삭에 거의 무관하였으며, 단지 공구가 미소하게나마 파손되었을 경우만 공구 파손량에 비례한 큰 값이 나타났다.

밀링 공정 중 절삭력 신호를 이용하여 TFI 를 계산하면 공구의 파손량을 예측할 수 있으므로, 예측된 공구 파손량이 작업자가 미리 입력한 허용할 수 있는 기준 공구 파손량을 넘었는지 아닌지를 판단하여 공구의 파손을 검출할 수 있다.

참고문헌

- (1) Altintas, Y., Yellowley, I. and Tlustý, J., 1988, "The Detection of Tool Breakage in Milling Operations," *Transaction of ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 110, pp. 271~277.
- (2) Altintas, Y., 1988, "In-process Detection of Tool Breakages using Time Series Monitoring of Cutting Forces," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 28, pp. 157~172.
- (3) Lee, J.M., Choi, D. K., Kim, J. and Chu, C. N., 1995, "Real-Time Tool Breakage Monitoring for NC Milling Process," *Annals of the CIRP*, Vol. 44, pp. 59~62.
- (4) 김기대, 오영탁, 주종남, 1998, "밀링 공정시 공구파손검출(1) - 공구파손지수의 도출," 한국정밀공학회지, 제 15 권, 제 5 호, pp. 100~109.
- (5) Martellotti, M. E., 1941, "An Analysis of the Milling Process," *Transaction of ASME*, Vol. 63, pp. 677~700.
- (6) Sabberwal, A. J. P., 1962, "Cutting Forces in Down Milling," *International Journal of Machine Tool Design and Research*, Vol. 2, pp. 27~41.