

# 향상된 절삭력 예측을 위한 Size Effect 모델의 개발

윤원수(포항공대 기계공학과), 조동우\* (포항공대 기계공학과)

## Development of the Size Effect Model for More Accurate Cutting Force Prediction

W. S. Yun(Mechanical Eng. Dept. POSTECH), D. W. Cho\* (Mechanical Eng. Dept., POSTECH)

### ABSTRACT

In this paper, a mechanistic model is first constructed to predict three-dimensional cutting forces, and the uncut chip thickness is calculated by following the movements of the position of the center of a cutter, which varies with the nominal feed, cutter deflection and runout. For general implementation to a real machining, this paper presents the method that determines constant cutting force coefficients, irrespective of the cutting conditions or cutter rotation angles. In addition, this study presents the approach which estimates runout-related parameters, the runout offset and its location angle, using only one measurement of cutting forces.

For more accurate cutting force predictions, the size effect has to be considered in the cutting force model. In this paper, two approximate methods are suggested since the strict approach is practically impossible due to a measurement problem. The size effect is individually considered for narrow and wide cuts.

**Key Words** : Mechanistic model (역학적 모델), Cutting force coefficients (절삭계수), Size effect (크기 효과), Narrow cut (좁은 절삭), Wide cut (넓은 절삭)

### 1. 서론

금속절삭에 대한 연구가 시작된 이래로 가공 공정의 기하학적 그리고 역학적인 거동을 예측할 수 있는 모델 개발에 지속적인 연구가 있어왔다.

일련의 논문들에서<sup>[1][2]</sup>, 절삭력 예측을 위한 역학적 모델들이 제안되었다. Altintas와 Spence<sup>[3]</sup>는 CSG(constructive solid geometry)에 근거하여 절삭력을 예측하는 모델을 개발하였다. Yucsan 등은<sup>[4]</sup> 공구 상면각(rake angle)과 칩 배출각(chip flow angle)을 고려하여 3 차원 절삭력을 예측하는 모델을 개발하였다. 그러나 이러한 연구들은 절삭력 예측값에 결정적인 영향을 미치게 되는 비 절삭저항 혹은 절삭계수값을 절삭조건 혹은 공구 회전각의 함수로 가정하여 이를 결정해 왔다. 이는 다수의 실험 데이터를 필요로 하며 다양한 절삭조건이 발생하는 일반적인 절삭공정에 적용하기 어렵다. 보다 해석적인 방법으로 Spiewak<sup>[5]</sup>은 절삭 지점의 궤적을 산출하여 절삭력과 가공 표면을 예측하는 모델을 개발하였다.

한편 보다 정확한 절삭력을 예측하기 위하여 치수효과(size effect)를 고려하는 것이 필요하다<sup>[6]</sup>. 치수효과는 미 변형 칩 두께(uncut chip thickness)가 아주 작아지는 영역에서 절삭저항이 커지는 현상을 말하는 것으로 Boothroyd와 Knight<sup>[7]</sup>는 둥근 공구 끝 단과 플랭크 면에서 발생하는 힘(plowing force)에 의해 치수 효과가 나타난다고 하였다. 치수 효과를 고려하기 위하여 절삭계수와 미 변형 칩 두께의 관계식이 Sabberwal<sup>[8]</sup>에 의해 제안되었으며 이후 다수의 연구자들에 의해 사용되었다<sup>[3][6][9]</sup>.

$$K = A \cdot (t_c)^p \quad (1)$$

여기서  $K$ 는 절삭계수이며 " $A$ "와 " $p$ "는 가공물과 공구 재질에 따른 상수값이다.

절삭계수 값들은 흔히 실험적으로 결정된다. 이러한 방법은 수행된 실험과 일부의 조건에 대해서만 적용될 수 있는 제한적인 기술이라고 할 수 있다. 금형가공등에서는 절삭 조건은 다양하게 변하고 이에 적용하기 위해서는 많은 양의 실험을 수행해야 한다. 본 논문은 절삭 조건에 관계없이 절삭계수와 공구 런아웃을 결정하는 방법에 대해 소

개한다. 관련 계수 값들을 결정하기 위하여 순간 절삭력 모델이 사용된다.

## 2. 역학적 모델 개발

엔드 밀링 공구는 미소 디스크 요소로 분할하여 각각의 미소 디스크에서의 순간 절삭력을 계산하고 최종적으로 이를 더함으로써 임의의 공구 회전각에 대해서 절삭력을 예측할 수 있다.

그림 1은 엔드 밀링 공정과 좌표계에 대한 개략도를 보여준다. 미소 디스크 요소와 공구 형상은 그림 2에 나타나 있다.

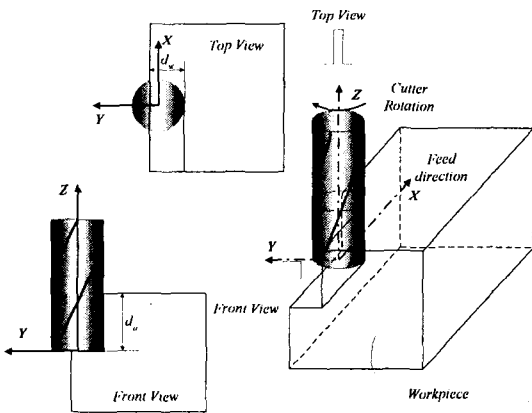


Fig. 1 Schematic views of end milling process geometry and coordinate.

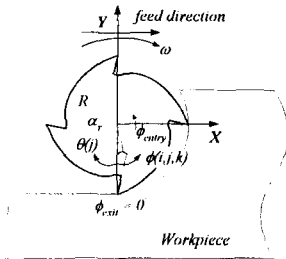


Fig. 2 Cutter rotation angle and cutting edge location angle on a cross section of an end mill cutter.

$j$  번째 공구 회전각에서 임의의  $k$  번째 디스크 요소의  $i$  번째 날의 공구 회전각 ( $\phi$ ) 은 다음과 같이 주어진다.

$$\phi(i, j, k) = \theta(j) + (i-1)\phi_c + (k\Delta a + \Delta a/2) \frac{\tan \theta_h}{R} \quad (2)$$

$$\theta(j) = -j\Delta\theta \quad (3)$$

여기서  $\theta_h$  와  $R$  은 헬릭스 각 과 공구의 반경을 나타낸다. 그리고  $\phi_c$  는 날간 간격이며  $\Delta a$  는 미소

디스크 요소의 높이,  $\Delta\theta$  는 공구의 미소 회전각이다. 이미 개발된 모델에서 공구 상면각에서 발생하는 3차원 절삭력 성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[10]</sup>.

$$\begin{aligned} F_x(i, j, k) &= \sum_k \sum_i F_{x(i, j, k)} \\ &= [C_1 K_n \cos(\phi - \alpha_r) + K_f K_n C_3 \cos \phi \\ &\quad - K_f K_n C_4 \sin(\phi - \alpha_r)] t_c(\phi) B_1 \\ F_y(i, j, k) &= \sum_k \sum_i F_{y(i, j, k)} \\ &= [C_1 K_n \sin(\phi - \alpha_r) + K_f K_n C_3 \sin \phi \\ &\quad + K_f K_n C_4 \cos(\phi - \alpha_r)] t_c(\phi) B_1 \\ F_z(i, j, k) &= \sum_k \sum_i F_{z(i, j, k)} \\ &= [-C_2 K_n + K_f K_n C_5] t_c(\phi) B_1 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,

$$C_1 = \cos \theta_h / \sin \theta_{ik}, \quad C_2 = \sin \theta_h / \sin \theta_{ik},$$

$$C_3 = \sin \theta_h (\sin \theta_c - \cos \theta_c \cot \theta_{ik}),$$

$$C_4 = \cos \theta_c / \sin \theta_{ik},$$

$$C_5 = \cos \theta_h (\sin \theta_c - \cos \theta_c \cot \theta_{ik}),$$

$$B_1 = \cos \alpha_r (\Delta a / \cos \theta_h),$$

$$\cos \theta_{ik} = \sin \alpha_r \cdot \sin \theta_h$$

$\alpha_r$  : 공구의 상면 경사각(rake angle)

미 변형 칩 두께( $t_c$ ) 와 절삭 계수값( $K_n, K_f, \theta_c$ )이 결정되면 식 (4)로부터 절삭력이 예측될 수 있다. 본 연구에서 미 변형 칩 두께는 공구의 지령 위치, 정적 힘, 그리고 런아웃에 의해 변화되는 공구의 중심좌표를 이용하여 계산된다<sup>[10]</sup>.

## 3. 절삭계수와 런아웃 변수의 결정

절삭 계수 값을 결정하기 위하여 식 (4)에서와 같이 공구 한 회전에 대한 측정된 절삭력 성분이 요구된다. 그러나, 측정된 연속적인 절삭력 성분의 샘플에 따라서 절삭계수는 다양한 값을 가지게 된다. 따라서 절삭 계수 값을 결정하기 위하여 절삭력 측정값과 시뮬레이션에서 요구하는 절삭력 값이 동기화 되어야 한다.

한편 런아웃 변수들은 미 변형 칩 두께를 계산하기 위하여 요구되는 값들이다. 절삭 계수값( $K_n, K_f, \theta_c$ )은 주어진 공구와 가공물에 대해 일정하다고 가정할 수 있다. 따라서 런아웃 변수는 역학적 절삭력 모델 식 (4)에서 절삭 계수값을 일정하게 유지하는 런아웃 값을 구함으로써 결정될 수 있다. 런아웃 변수와 절삭 계수값을 결정하는 알고리즘은 그림 3에 나타나 있다.

절삭 계수값을 결정하고 모델을 검증하기 위하여 표 1과 같이 21 회의 테스트 절삭을 수행하였다.

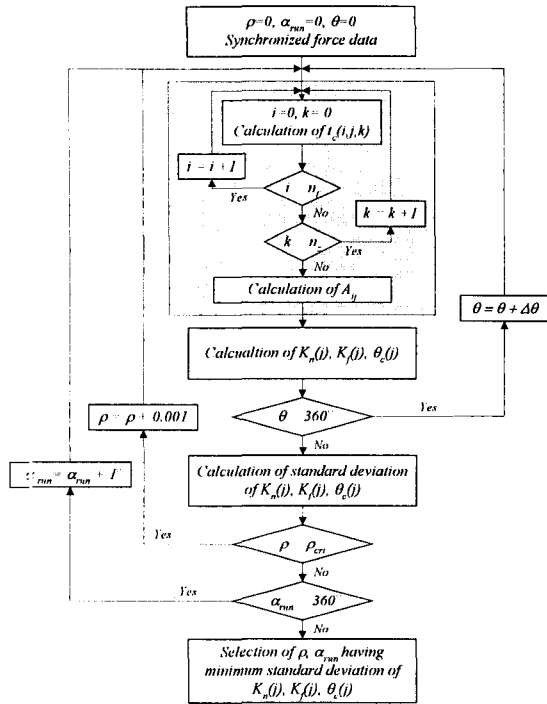


Fig. 3 Algorithm for selection of runout parameters ( $\rho$ : runout offset,  $\alpha_{run}$ : runout angle)

Table 1 Cutting type division for accounting for the size effect by approximate methods (N.C: Narrow Cut, W.C: Wide Cut).

No	$d_a$ (mm)	$d_w$ (mm)	$f_t$ (mm/tooth)	RPM	$\delta$ (deg.)	Cut Type
1	2.0	5.0	0.0375	1000	13.2	N.C
2	4.0	5.0	0.0375	1000	26.5	N.C
3	5.0	5.0	0.0375	1000	33.2	N.C
4	6.0	5.0	0.0375	1000	39.7	W.C
5	8.0	5.0	0.0375	1000	52.9	W.C
6	5.0	1.0	0.0375	1000	20.1	N.C
7	5.0	2.5	0.0375	1000	3.1	N.C
8	5.0	4.0	0.0375	1000	21.9	N.C
9	5.0	6.0	0.0375	1000	44.6	W.C
10	5.0	7.5	0.0375	1000	63.1	W.C
11	5.0	9.0	0.0375	1000	86.1	W.C
12	5.0	5.0	0.0250	1000	33.1	N.C
13	5.0	5.0	0.0300	1000	33.1	N.C
14	5.0	5.0	0.0350	1000	33.1	N.C
15	5.0	5.0	0.0400	1000	33.1	N.C
16	5.0	5.0	0.0450	1000	33.1	N.C
17	5.0	5.0	0.0500	1000	33.1	N.C
18	5.0	5.0	0.0375	800	33.1	N.C
19	5.0	5.0	0.0375	1200	33.1	N.C
20	5.0	5.0	0.0375	1500	33.1	N.C
21	5.0	10.0	0.0375	1000	123.1	W.C

모든 실험은 헬릭스 각이  $30^\circ$ , 공구 상면각이  $11^\circ$  그리고 직경 10mm 인 4 날 고속도강(HSS) 공구를 이용하여 수직형 머시닝 센터상(대우중공업㈜, ACE-V30)에서 수행되었다. 공구 동력계(Kistler, type 9257B)를 이용하여 3축 방향의 순간 절삭력을 측정하였다. 가공물 재질은 알루미늄 2014-T6 를 사용하였다.

이러한 과정을 거쳐서 계산된  $K_n$  값을 그림 4에 나타내었다. 그림에서 몇 가지의 절삭 조건에 대하여 계산된  $K_n$  값은 유사한 형태와 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이는 절삭조건은 절삭 계수값의 결정에 어떠한 영향도 미치지 않음을 말해 주고 있다. 또한 제안된 방법은 다이알 게이지를 이용한 런아웃 성분의 측정값에서도 검증된다. 측정된 값은 0.005-0.006mm 이며 이는 예측값과 일치한다.

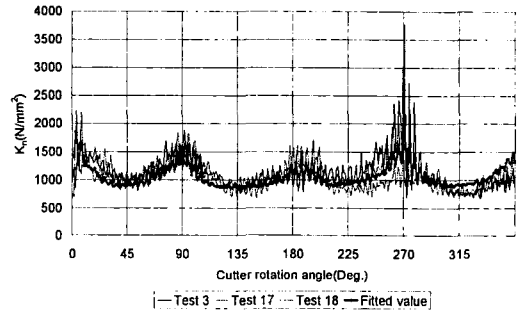


Fig. 4 Comparison of  $K_n$  obtained from different test cuts.

### 4. Size effect 의 고려

#### 4.1 엔드밀링에서 size effect

그림 5의 결과에서 알 수 있듯이 미 변형 칩 두께가 작아지는 부근에서  $K_n$  이 커지는 현상을 볼 수 있으며 이는 치수효과(size effect)로 설명된다.

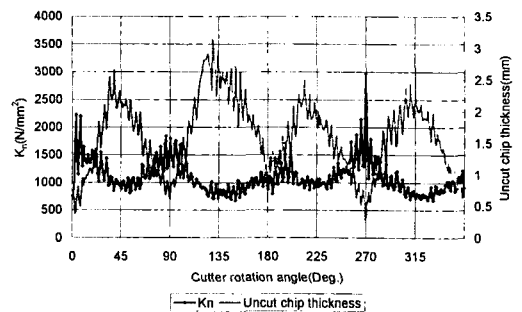


Fig. 5 Relationship between uncut chip thickness and  $K_n$  for Test 17

따라서 보다 정확히 절삭력을 예측하기 위해서는 치수 효과를 고려하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 치수 효과를 엄밀하게 고려하기 위해서는  $j$  번째 공구 회전각에서 임의의  $k$  번째 디스크 요소의  $i$  번째 날에서의 절삭 계수값과 미 변형 칩 두께의 관계식을 유도하여야 한다. 그러나 공구 동력계로부터 절삭력은  $F(i, j, k)$  형태로 측정될 수 없으며 단지  $F(j)$ 로만 구해질 수 있다. 이는 엄밀한 접근을 불가능하게 하는 요소이다.

근사적인 방법으로 치수 효과는  $K_n(i, j)$ 와  $t_c(i, j)$ 의 관계식 혹은  $K_n(j)$ 와  $t_c(j)$ 의 관계식으로 고려될 수 있다.  $K_n(i, j)$ 와  $t_c(i, j)$ 의 관계식을 얻기 위하여,  $F(i, j)$ 가 요구된다. 이 값은 날들이 동시에 절삭에 참여하지 않는 구간이 큰 절삭 조건으로부터 얻어질 수 있다. 이러한 조건식은 상대적으로 작은 값의  $t_c(i, j)$ 에 적용될 때, 두 날이 동시에 작은  $t_c(i, j)$ 를 가지는 경우에 각각의 경우에 치수 효과를 고려하는 결과를 가져와 절삭력을 과도하게 예측(overestimation)할 수 있다. 그림 6은 앞서 언급한 방법으로 결정된  $t_c(j)$ 와  $K_n(j)$ 를 보여주고 있으며 그 값들은 단지 하나의 날만이 절삭에 참여하는 구간에 대하여서는  $t_c(i, j)$ ,  $K_n(i, j)$ 와 동일한 값이다. 그림 6의 결과에서, 첫번째 날만이 절삭에 참여하고 있는 구간 "A"에서 미 변형 칩 두께가 작은 영역에서  $K_n(i, j)$ 이 커지고 있는 것을 볼 수 있으며 이는 치수 효과로 간주될 수 있다. 그러나 두번째 날만이 절삭에 참여하는 구간 "B"에서는 미 변형 칩 두께가 작음에도 불구하고  $K_n(i, j)$  값이 비교적 일정한 값을 유지하고 있음을 알 수 있다. 구간 "A"에서는  $\phi$ 가 작음으로 인해서  $t_c(i, j, k)$  값이 실제로 작지만 구간 "B"에서는 단지 절삭에 참여하는 디스크 요소의 갯수가 작을 뿐이며  $t_c(i, j)$ 의 값이 작은 것이 아니다.

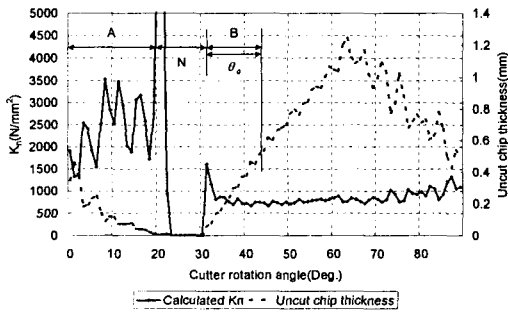


Fig. 6 Relationship between uncut chip thickness and  $K_n$  during 1/4 cutter revolution for Test 7.

이러한 문제에 대처하기 위한 다른 근사법으로  $t_c(j)$ 와  $K_n(j)$ 의 관계식을 이용하여 치수 효과를

고려하는 방법이 있다. 이러한 접근법은 앞서와 같이 절삭력을 과도하게 예측하지는 않지만 또 다른 문제점을 안고 있다. 다시 말해서  $t_c(i, j)$ 가 작은 값을 가질 지라도  $t_c(j)$  값은 큰 경우에는 치수 효과를 반영하지 못하는 단점을 가지고 있다. 이러한 근사법은 Test 3 and Test 7 과 같이 절삭 조건이 약한 경우에만 적용될 수 있다.

본 논문은 치수 효과를 근사적으로 고려함에 있어서 발생하는 이러한 문제들을 해결하기 위하여 절삭 조건과 관련하여 엔드 밀 공정을 두 가지로 구분하도록 한다.

$$\text{Narrow cut: } \delta = \left| \theta_{hl} - \left( \frac{\pi}{2} - \phi_{entry} \right) \right| \leq \varphi \quad (6)$$

$$\text{Wide cut: } \delta = \left| \theta_{hl} - \left( \frac{\pi}{2} - \phi_{entry} \right) \right| > \varphi \quad (7)$$

여기서 공구의 진입각 ( $\phi_{entry}$ )은 그림 1에 나타나 있으며 헬릭스 지체각(helix lag angle,  $\theta_{hl}$ )은 다음과 같이 주어진다.

$$\theta_{hl} = d_a \cdot \frac{\tan \theta_h}{R} \quad (8)$$

$\delta$ 의 값이 큰 경우(wide cut), 절삭에 포함된 두 날의  $t_c(i, j)$  값이 동시에 작은 값을 가지지 않는다. 따라서 과도하게 절삭력을 예측하는 경우가 발생하지 않게 된다. 이러한 경우는 Test 10 과 21 에서와 같이 절삭 깊이 ( $d_u$ ) 혹은 절삭 폭( $d_w$ )이 공구 반경보다 작은 경우에 흔히 나타난다.

한편,  $\delta$  값이 작은 경우(narrow cut), 절삭에 참여한 두 날에서 동시에 작은  $t_c(i, j)$  값을 가지게 된다. 따라서  $t_c(j)$ 와  $K_n(j)$ 의 관계식으로부터 치수 효과를 고려해야만 한다. 이러한 구분을 위하여 표 1에  $\delta$ 와 절삭 공정을 구분하여 나타내었다.

#### 4.2 Size effect 의 근사화

그림 5의 결과로부터  $t_c$ 와  $K_n$ 의 관계식은 얻어질 수 있다. 그러나 식 (1)의 직접적인 적용은 절삭 조건에 따라서  $K_n$  값을 변하게 한다. 이는 엔드 밀링에서 미 변형 칩 두께는 공구 회전각에서 임의의 디스크 요소에서 제거되는 미 변형 칩 두께의 합이기 때문이다. 이러한 효과는  $t_c(j)$ 를 다음의 식으로 재조정함(re-scaling)으로서 해결될 수 있다.

$$t_{cn}(j) = \frac{t_c(j)}{(t_{cg,max} - t_{cg,min})} \quad (9)$$

여기서  $t_{cn}(j)$ 는 재 조정된 미 변형 칩 두께이며  $t_{cg,max}$ 과  $t_{cg,min}$ 는 기하학적 미 변형 칩 두께 ( $f_t \cdot \sin(\phi)$ )의 최대, 최소값으로부터 얻어진다.  $f_t$

는 공구의 날당 이송량을 의미한다.  $t_{cn}(j)$  와 로그 스케일의  $K_n(j)$  는 식 (10)의 Boltzman 함수로 유도된다.

$$\ln(K_n) = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(t_{cn} - x_0)/dx}} + A_2 \quad (10)$$

Test 17 에 대하여 측정된 절삭력 값을 이용하여 계산된  $t_{cn}(j)$  와  $K_n(j)$  의 값과 식 (10)으로 유도된 추정값을 그림 7에 나타내었다. 식 (10)에 사용된 계수값은 다음과 같이 추정되었다.

$$A_1 = 12.912, A_2 = 6.7376, x_0 = -0.6239, dx = 0.4417$$

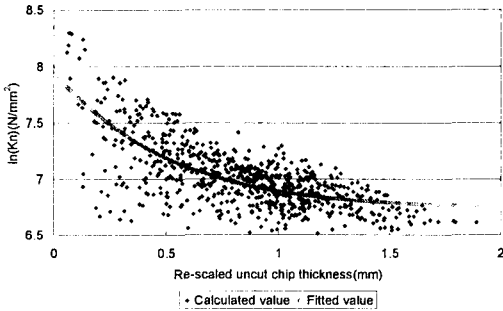


Fig. 7 Comparison of  $K_n(j)$  values computed from the pre-process and those fitted by Boltzman function with respect to the re-scaled uncut chip thickness  $t_{cn}(j)$ .

한편  $K_f(j)$  와  $\theta_c(j)$  는  $K_n(j)$  의 경우와는 달리 명확한 경향이 나타나지 않아서 일정한 값으로 결정하였다. 본 연구에서는 Test 17 에 대하여 얻어진  $K_f(j)$  와  $\theta_c(j)$  의 평균값을 일정한  $K_f, \theta_c$  값으로 각각 결정하였다. 결정된  $K_f, \theta_c$  값과 런아웃 변수값들을 표 2에 나타내었다.

Table 2 Estimated cutting force coefficients and runout parameters.

$K_f$	$\theta_c$ (rad.)	$\rho$ ( $\mu$ m)	$\alpha_{rm}$ (deg.)
0.8287	0.471	6	95

추정된  $K_n(j)$  값을 계산된 값들과 함께 그림 4에 나타내었다. 추정된 값들이 원래 값들과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

한편 큰  $\delta$  값을 가지는 와이드 컷에 대해서는 앞서 언급한 바와 같이  $t_{cn}(i, j)$  와  $K_n(i, j)$  의 관계식을 유도하여 치수효과를 고려하는 것이 바람직하며 식 (10)과 유사한 형태로  $t_{cn}(i, j)$  를 재조정한다.

$$t_{cn}(i, j) = \frac{t_c(i, j)}{(t_{cg, max} - t_{cg, min})} \quad (9)$$

그리고 식 (10)과 같이 Boltzman 함수에 적용하여 관계식을 유도한다. Test 7에서 측정된 절삭력을

이용하여 관련 계수들을 추정하였으며 다음과 같다.  $A_1=12.9767, A_2=6.4057, x_0=-1.2817, dx=0.8363$  마찬가지로 그림 8에 추정값과 원래 계산된 값을 함께 나타내었다.

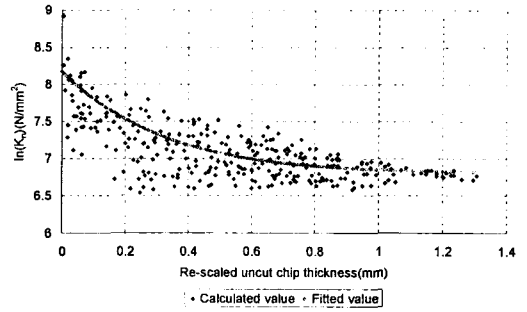


Fig. 8 Comparison of  $K_n(i, j)$  values computed from the pre-process and those fitted by Boltzman function with respect to the re-scaled uncut chip thickness  $t_{cn}(i, j)$ .

### 4.3.2 절삭력 예측값의 검증

제안된 방법을 검증하기 위하여 절삭력 예측이 다수 수행되었다. 표 2에 나열된 계수값들이 사용되었으며 절삭력 예측 과정 중에 미 변형 칩 두께에 대하여  $K_n(j)$  와  $K_n(i, j)$  값들은 추정되었다. 식 (4)를 이용하여 예측된 3축 방향의 절삭력 성분을 예측한다. 그림 9는 Test 3에 대하여 예측된 절삭력 값과 측정된 절삭력 값을 비교하고 있다. 또한 치수효과를 고려하지 않았을 경우, 즉 일정한  $K_n(j)$  값을 사용한 경우도 함께 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 치수효과를 고려한 경우가 절삭력을 보다 정확히 예측하고 있음을 알 수 있다.

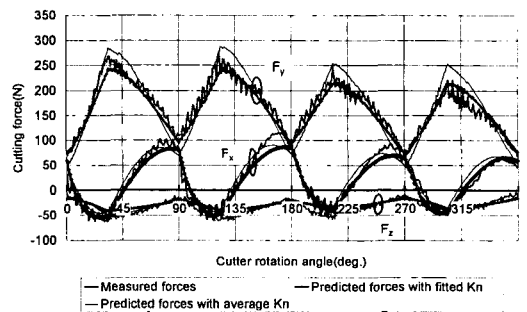


Fig. 9 Comparison of measured and predicted cutting forces for Test 3.

한편 큰  $\delta$  값을 가지는 와이드 컷에서의 절삭력 예측은 그림 10과 11에 나타나 있다. 그림 10은 7.5mm의 절삭 폭을 가지는 Test 10에 대하여 예측된 절삭력 값과 측정값을 보여주고 있다. 작은  $\delta$  값을 가지는 Test 3과 비교하여 다른 양상을 보여

주고 있다.

치수 효과를 제대로 반영하지 못하면 그림 10과 같은 절삭력 예측을 얻을 수 없다. 보다 큰 절삭 폭을 가지는 Test 11에 대한 결과는 그림 11에 나타내었다.

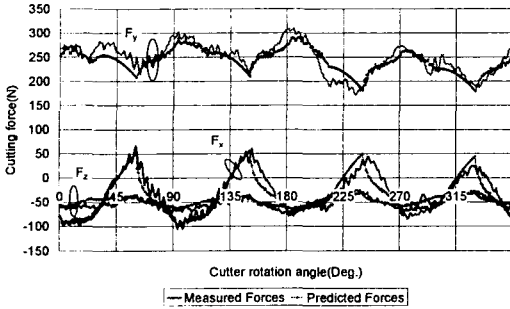


Fig. 10 Comparison of measured and predicted cutting forces for Test 10.

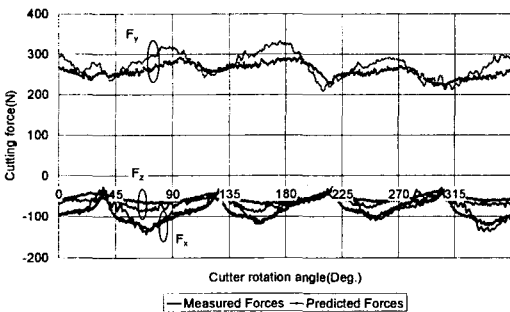


Fig. 11 Comparison of measured and predicted cutting forces for Test 11.

## 5. 결론

본 연구는 절삭 계수값과 런아웃 변수값을 추정하는 체계적인 방법을 제시하였다. 절삭 조건이 절삭 계수값에 별다른 영향을 미치지 않는다는 것이 밝혀졌다. 보다 정확한 절삭력 예측을 위하여 치수 효과에 대한 고려가 요구되며 본 연구에서는 이에 대한 근사적인 접근법을 제안하였다. 엔드 밀링 공정을 절삭 조건에 따라 와이드 컷(wide cut)과 내로우 컷(narrow cut)으로 구분하였으며, 미 변형 칩 두께를 재조정 함으로서 절삭 조건의 영향을 배제하였다.

절삭력 예측값과 측정값을 비교 함으로서 개발된 모델을 검증하였다. 이러한 방법은 절삭 조건에 따라 절삭 계수값을 다시 결정해야 하는 것이 아니므로 보다 일반적인 절삭과정을 시뮬레이션 하는데 손 쉽게 적용 될 수 있다.

## 참고문헌

1. Kline, W. A., DeVor, R. E., and Lindberg, R., 1982, "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts," *Int. J. Mach. Tool Des.*, Vol. 22, No. 1, pp. 7-22.
2. Sutherland, J. W., and DeVor, R. E., 1986, "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 108, pp. 269-279.
3. Altintas, T., and Spence, A. D., 1991, "End Milling Force algorithms for CAD systems," *Annals of the CIRP*, Vol. 40, No. 1, pp.31-34.
4. Yucesan, G, Xie, Q., and Bayoumi, A. E., 1993, "Determination of Process Parameters through a Mechanistic Force Model of Milling Operations," *Inter. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 33, No. 4, pp. 627-641.
5. Spiewak, S. A., 1995, "An Improved Model of the Chip Thickness in Milling," *Annals of the CIRP, Journal of Engineering for Industry*, pp.39-42.
6. Melkote, S. N., and Endres, W. J., 1998, "The Importance of Including Size Effect When Modeling Slot Milling," *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 120, pp. 68-75.
7. Boothroyd, G., and Knight, W. A., 1989, *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, Marcel Dekker Inc., pp. 83.
8. Sabberwal, A. J. P., 1961, "Chip Section and Cutting Force During the Milling Operation," *Annals of the CIRP*, Vol. 10, No. 3, pp. 197-203.
9. Feng, H. Y., and Menq, C. H., 1994, "The Prediction of Cutting Forces in the Ball-End Milling Process-I. Model Formulation and Model Building Procedure," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 34, No. 5, pp. 697-710.
10. Yun, W. S., Cho, D. W., and Ehmann, K. F., 1999, "Determination of Constant 3D Cutting Force Coefficients and of Runout Parameters in End Milling," *Trans. of NAMRI/SME*, Vol. XXVII, pp. 87-92.