

# 엔드밀링 가공에서 절삭력 계수 데이터베이스 구현을 위한 일반화된 방법론

안성호\*, 고정훈\*\*, 조동우#

## Generalized Method for Constructing Cutting Force Coefficients Database in End-milling

Seong Ho Ahn\*, Jeong Hoon Ko\*\*, Dong-Woo Cho#

### ABSTRACT

Productivity and machining performance can be improved by cutting analysis including cutting force prediction, surface error prediction and machining stability evaluation. In order to perform cutting analysis, cutting force coefficients database have to be constructed. Since cutting force coefficients are dependent on cutting condition in the existing research, a large number of calibration tests are needed to obtain cutting force coefficients, which makes it difficult to build the cutting force coefficients database. This paper proposes a generalized method for constructing the cutting force coefficients database using cutting-condition-independent coefficients. The tool geometry and workpiece material were considered as important components for database construction. Cutting force coefficients were calculated and analyzed for various helix and rake angles as well as for several workpiece. Furthermore, the variation of cutting force coefficients according to tool wear was analyzed. Tool wear was found to affect tool geometry, which results in the change of cutting force coefficients.

**Key Words** : Cutting Force Coefficients(절삭력 계수), Cutting Condition(절삭 조건), Tool Geometry(공구 형상), Workpiece Material(시편 재질), Tool Wear(공구 마모)

### 1. 서론

오늘날의 생산 환경은 대량 생산에서 다품종 소량 생산으로 생산의 패러다임(Paradigm)이 변화하고 있으며 시장은 점차 세분화되고 제품의 수명주기와 개발주기는 점차 줄어드는 실정이다. 따라서 기업이 이와 같은 상황에 효과적으로 대응하기

위해서는 이전보다 한층 향상된 생산성을 필요로 한다.

공작 기계를 이용한 절삭 가공은 조선, 자동차, 항공, 금형 산업 등 거의 모든 제조 분야에 사용되는 핵심적인 생산 방법이다. 제품의 전체 생산 과정에서 절삭 가공이 차지하는 비중이 매우 높기 때문에 절삭 공정의 효과적인 개선은 전체 생산성

접수일: 2003년 2월 4일; 게재승인일: 2003년 7월 11일

\* 현대자동차 남양연구소 샤시플랫폼 개발팀

\*\* 포항공대 자동차기전연구소

# 교신저자: 포항공과대학교 기계공학과

Email: dwcho@postech.ac.kr, Tel: (054) 279-2171

의 극적인 향상을 가져올 수 있다. 그러나 절삭 가공은 가장 널리 사용되고 가장 오래된 가공 방법 중의 하나이면서도 상대적으로 체계적인 가공 해석 및 가공 지식 정보화가 이루어지지 못하였다.<sup>1</sup>

절삭 가공 해석은 절삭 시 가공성과 생산성에 영향을 미치는 절삭력, 가공 표면 그리고 가공 안정성과 같은 절삭 성능을 예측하고 평가하는 것이다. 이것은 기존의 CAD/CAM 소프트웨어의 한계를 극복하고 최적화된 가공 환경의 설정을 통해 최고의 생산 효율을 가능케 한다.

가공 데이터베이스의 구축은 절삭 가공 해석을 위한 필수 요소이다. 이것은 가공 지식 정보화의 일부로서 숙련된 작업자의 경험이나 가공 데이터 핸드북에 의해 좌우되던 절삭 조건 및 가공 환경의 설정을 대체할 수 있다. 유용한 가공 정보의 공유를 통해 전체 생산성 향상에 기여할 수 있고, 검색 및 갱신의 효율성은 항상 최신의 가공 정보를 유지하도록 해준다.

절삭력 모델을 사용하여 절삭력 및 가공 성능을 예측하기 위해서는 절삭 공구와 가공 재질 사이의 물리적 상관 관계, 즉 절삭력 계수(Cutting force coefficients)가 정의되어야 한다. 그러나 기존의 연구<sup>2,3</sup>는 절삭력 계수가 절삭 조건에 의해 좌우되기 때문에 절삭력 계수를 정의하기 위해서는 절삭 조건의 조합에 따라 각각의 절삭력 계수를 모두 구해야 하는 문제점을 가지고 있다. 이것은 현실적으로 절삭력 계수 데이터베이스를 어렵게 만드는 요인이 된다. 이것을 극복하기 위해 Yun<sup>4,5,6</sup> 등은 절삭력 계수를 절삭 조건에 독립적인 함수로 정의하였다. 절삭력 계수 데이터베이스화는 절삭 조건에 독립적인 절삭력 계수를 이용하여 쉽게 구축될 수 있다. 본 논문에서는 절삭력 계수에 영향을 주는 핵심 인자인 공구 형상과 가공 재질에 따라 절삭력 계수를 정의하는 방법론 및 공구 마모에 따른 절삭력 계수의 변화 패턴을 제시하고자 한다.

## 2. 절삭력 모델

본 연구에서 사용된 공구 형상과 좌표계는 Fig. 1에 나타나 있다.  $j$  번째 공구 회전각에서  $i$  번째 날의  $k$  번째 축 방향 디스크 요소 위치각은 다음 식으로 주어진다.

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

$$\theta(j) = -j\Delta(\theta) \quad (2)$$

여기서  $\theta_h$  와  $R$  은 헬릭스각과 공구 반경을 나타낸다.  $\phi_c$  는 날간 간격,  $\Delta a$  는 미소 디스크 요소의 높이 그리고  $\Delta\theta$  는 공구의 미소 회전각이다. 엔드밀의 경사면(Rake face)에 작용하는 절삭력의 수직 분력( $dF_n$ )과 수평 분력( $dF_f$ )은 다음 식으로 주어진다.

$$dF_n(\phi) = K_n T(\theta) \bar{n}(\alpha) dA_c \quad (3)$$

$$dF_f(\phi) = K_f K_n T(\theta) \bar{T}_c(\alpha) dA_c \quad (4)$$

$$A_c = t_c(\phi) \cos \alpha_r (\Delta a / \cos \theta_h) \quad (5)$$

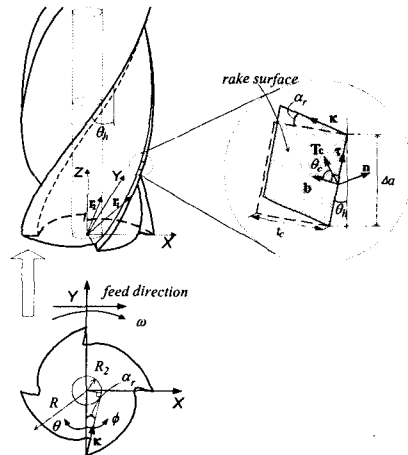


Fig. 1 Cutter geometry, coordinate system and unit vectors on the rake surface

여기서  $K_n$  과  $K_f$  는 절삭력 계수 중에서 비 절삭 저항을 나타내는 값이며  $\alpha_r$  은 공구의 경사각이다.  $\bar{n}$ ,  $\bar{T}_c$  는 공구 형상으로부터 계산되는 값으로 경사면 상의 수직·침 유동 벡터이다. 식 (4) 와 (5)를 이용하여 절삭력을 직교 좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$F_x(i, j, k) = [C_1 K_n \cos(\phi - \alpha_r) + K_f K_n C_3 \cos \phi - K_f K_n C_4 \sin(\phi - \alpha_r)] t_c(\phi) B_1 \quad (6)$$

$$F_y(i, j, k) = [C_1 K_n \sin(\phi - \alpha_r) + K_f K_n C_3 \sin \phi + K_f K_n C_4 \cos(\phi - \alpha_r)] t_c(\phi) B_1 \quad (7)$$

$$F_z(i, j, k) = [-C_2 K_n + K_f K_n C_5] t_c(\phi) B_1 \quad (8)$$

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

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

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

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

$$B_1 = \cos \alpha_r (\Delta a / \cos \theta_h), \quad \cos \theta_{ik} = \sin \alpha_r \cdot \sin \theta_h$$

실험을 통하여 측정된 절삭력으로로부터 공구 회전각에 대한 절삭력 계수( $K_n$ ,  $K_f$ ,  $\theta_c$ )를 구할 수 있다.

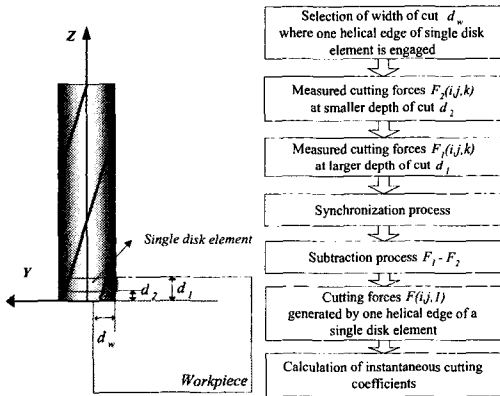


Fig. 2 Extraction of the cutting forces generated by one helical edge of a single disk elements<sup>6</sup>

절삭력의 측정 및 절삭력 계수의 계산은 Fig. 2와 같은 절차로 진행된다. 2 가지 절삭 깊이에 대하여 절삭력을 측정하고 측정된 절삭력의 차를 구하여 단위 디스크의 한 날에 의해 발생하는 절삭력을 얻는다. 이렇게 얻어진 절삭력은 절삭력 계수 계산을 위한 기본 입력값으로 사용된다.

### 3. 절삭 조건과 절삭력 계수

본 논문에서는 절삭 조건을 크게 두 가지로 구분하였다. 기본적인 절삭 조건(Primary cutting condition)은 이송 속도, 스피들 회전수, 절삭 깊이, 절삭 폭 등을 가리키고 반면에 부차적인 절삭 조건(Secondary cutting condition)은 공구 직경 및 날수,

공구 재질, 절삭유 사용 여부 등을 나타낸다.

절삭력 계수가 기본적인 절삭 조건에 영향을 받지 않는다는 것은 이미 검증된 사실이다.<sup>1,2</sup> 따라서 본 논문에서는 부차적인 절삭 조건, 즉 공구 재질, 절삭유 사용 여부와 절삭력 계수와의 관계를 실험적으로 검증하였다. 실험 조건은 Table 1과 같다. 실험으로부터 얻어진 절삭력 계수는 Weibull function을 사용하여 식 (9), (10), (11)로 근사화 된다.

$$\ln(K_n) = A_1 - (A_1 - A_2)e^{-(A_3 t_c)^{A_4}} \quad (9)$$

$$K_f = B_1 - (B_1 - B_2)e^{-(B_3 t_c)^{B_4}} \quad (10)$$

$$\theta_c = C_1 - (C_1 - C_2)e^{-(C_3 t_c)^{C_4}} \quad (11)$$

Table 1 Experiment condition

Carbide endmill(2 flutes)	
Feed rate = 100 mm/min, Spindle revolutions = 1000 rpm	
Test A (Tool material)	TiAlN coated carbide, Carbide, High speed steel
	Al2024-T4, w = 3 mm, d <sub>1</sub> /d <sub>2</sub> = 2 mm/1.5 mm
Test B (Coolant on/off)	Coolant on/off
	SCM 440, w = 2 mm, d <sub>1</sub> /d <sub>2</sub> = 2 mm/1.5 mm

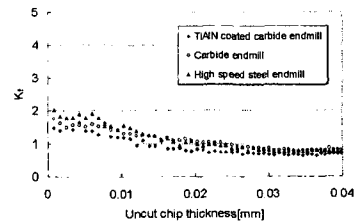


Fig. 3 Variation of  $K_f$  with respect to tool material.

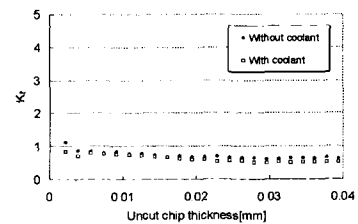


Fig. 4 Variation of  $K_f$  with respect to coolant on/off.

부차적인 절삭 조건은 절삭력 계수에 큰 영향을 미치지 않는다. 다만 공구 재질 및 절삭유 사

용 여부에 따라  $K_f$ 가 소폭 감소하는 것을 Figs. 3과 4에서 확인할 수 있다. 그러나 이것은 절삭력 예측에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 그 효과를 무시할 수 있다.

#### 4. 공구형상과 절삭력 계수

공구 형상은 절삭 성능에 직접적인 영향을 주며, 특히 헬릭스각과 경사각은 공구 형상 중에서도 핵심적인 요소이다. 헬릭스각과 경사각의 변화에 따른 절삭력 계수의 변화를 확인하기 위해 Table 2와 같은 조건 하에서 실험을 수행하였다.

Figs. 5, 6 그리고 7로부터  $K_n$ 과  $K_f$ 는 헬릭스각에 큰 영향을 받지 않으나  $\theta_c$ 는 헬릭스각에 의해 그 크기가 좌우되는 것을 알 수 있다. 헬릭스각의 증가에 따라  $\theta_c$ 가 거의 비례적으로 증가하는 사실을 Fig. 8에서 확인할 수 있다.

Table 2 Experiment Condition

Carbide endmill(2 flutes), Workpiece material : SM45C Feed rate=100 mm/min, Spindle revolutions=1000 rpm w =3 mm, d <sub>1</sub> /d <sub>2</sub> = 2 mm / 1.5 mm	
Helix angle(deg.)	Rake angle(deg.)
15	-16
20	-11
25	-6
30	3
35	8
40	13

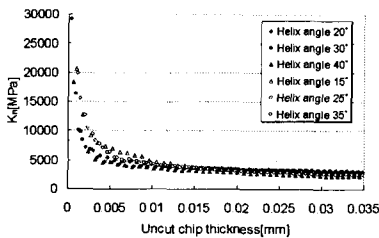


Fig. 5 Variation of  $K_n$  with respect to helix angles

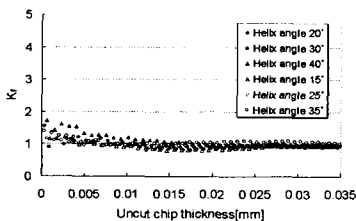


Fig. 6 Variation of  $K_f$  with respect to helix angles

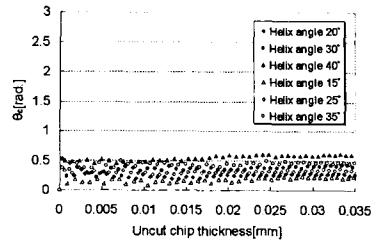


Fig. 7 Variation of  $\theta_c$  with respect to helix angles

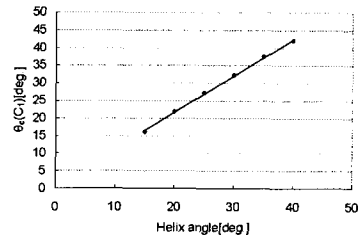


Fig. 8 Relationship between helix angle and  $\theta_c$

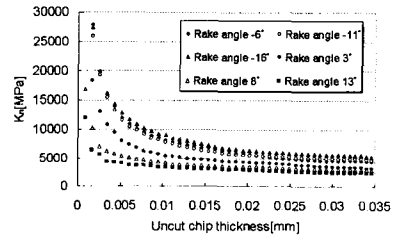


Fig. 9 Variation of  $K_n$  with respect to rake angles

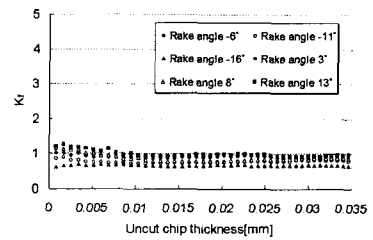


Fig. 10 Variation of  $K_f$  with respect to rake angles

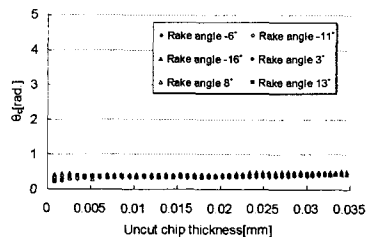


Fig. 11 Variation of  $\theta_c$  with respect to rake angles

Figs. 9, 10 그리고 11 은 경사각의 변화에 대한  $K_n$  과  $K_f$  의 결과를 보여준다. 경사각의 감소는  $K_n$  의 증가를 가져오고 상대적으로  $K_f$  는 경사각의 감소에 따라 줄어든다.  $K_n$  의 증가는 경사각 차이에 의한 전단각의 변화와 압괴력(Plowing force)의 변화로 나타난 결과이다. 또한 경사각의 감소에 따라 치수 효과가 현저히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 반면에 경사각은  $\theta_c$  에 별다른 영향을 미치지 않는다.

절삭력 계수 데이터베이스 상에서 헬릭스각의 변화에 따라  $K_n$  과  $K_f$  는 고정시키고  $\theta_c$  의 값만을 변화시켜 사용한다. 경사각의 경우에는  $\theta_c$  는 변화가 없으므로  $K_n$  과  $K_f$  의 실험 결과를 사용하되 실험 데이터 이외의 경사각에 대해서는 측정 값 사이의 보간을 이용한다.

### 5. 가공 재질과 절삭력 계수

가공 재질은 절삭력 계수를 결정하는 가장 중요한 요소이다. 사용되는 공구 형상은 공구 제작의 경제성 및 사용 용도에 따라 한정되어 있는 반면에 가공 재질은 매우 다양하여 강재의 경우만 해도 그 종류가 수십 여종에 이른다. 즉 절삭 가공에 사용되는 모든 재종에 대해 절삭력 계수를 실험적으로 구하는 것은 상당한 비용과 시간을 요구한다. 따라서 본 논문에서는 강의 경도를 절삭력 계수에 영향을 주는 변수로 선택하여 절삭력 계수 데이터베이스 작업을 수행하였다.

#### 5.1 강의 인장강도와 경도

재료의 인장 강도 및 전단 강도는 절삭력 계수에 지배적인 영향을 미친다. 그러나 인장 강도나 전단 강도는 실용적으로 사용하기가 까다롭다. 측정을 위해서는 규격에 맞는 표준 시편이 필요하고, 측정 장비 또한 다루기가 어렵다. 따라서 대개는 대상 재질의 기계적인 특성을 나타내는 척도로 경도가 많이 사용된다. 인장 강도와 경도는 측정 방법의 차이가 있지만 재료의 변형을 측정한다는 점에서는 근원적으로 유사하다. 따라서 인장 강도와 경도는 정성적인 연관성을 가진다. DIN 50160<sup>7,8,9</sup> 등에서는 경도와 인장강도 간의 변환 테이블이 제시되어 있다.

#### 5.2 경도 변화와 절삭력 계수

연속적으로 변하는 경도 조건 하에서 절삭력 계수의 특성을 분석하였다. 실험 대상 재질은 SKD11 로서, 적당한 열처리 과정을 통하여 실험 대상 경도로 조절된 재질이다. 경도는 10 ~ 40 까지 10 단위로 증가하도록 조절하였고, 모든 대상에 대해 동일한 절삭조건을 선택하였다. 각각의 실험 조건에 대하여 절삭력을 측정하고 절삭력 계수를 계산하였다. 각 경도에 대한 구체적인 절삭력 계수의 값은 Table 3 과 Fig. 12 에 나타나 있다. 경도 증가에 따라 비례적으로  $K_n$  이 증가하는 사실을 확인할 수 있다.

Table 3 Relationship between hardness and  $K_n$

Hardness	$K_n(A_1)$ (MPa)
12	2037.5
20	2297.6
30	2568.8
40	2769.1

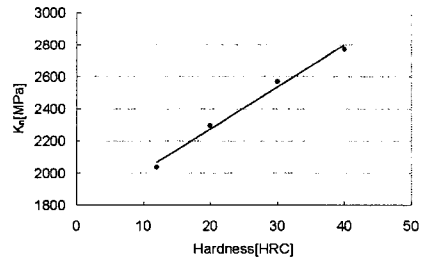


Fig. 12 Relationship between hardness and  $K_n$

#### 5.3 절삭력 계수의 추정 및 절삭력 예측

경도 측정값을 통해 추정된 절삭력 계수를 사용하여 예측된 절삭력과 실제 측정된 절삭력을 비교하였다. Table 3 과 Fig. 11 를 통하여 얻어진 경도와 절삭력 계수와의 관계는 식 (12)와 같다.

$$K_n(A_1) = 26.2 \cdot \text{hardness} + 1752.3 \quad (12)$$

절삭력 예측에 사용할 재료는 SKD61 과 SKD11 이다. 각 재질의 경도는 Table 4 에 나타나 있다. 식 (12)를 사용하여 계산된 각 재질의  $K_n$  은 Table 5 에 제시되어 있다.

Table 4 Material hardness

	SKD11	SKD61
Hardness(HRC)	50	17

Table 5  $K_n$  with respect to workpiece material

	SKD11	SKD61
$K_n(A_1)$ (MPa)	3058.1	2457.4

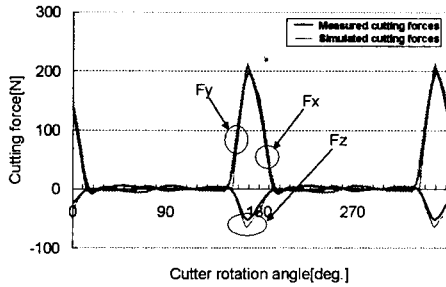


Fig. 13 Comparison between simulated and measured cutting forces (SKD11, HRC = 50, width of cut = 0.5mm, depth of cut = 2mm, feed rate = 200mm/min)

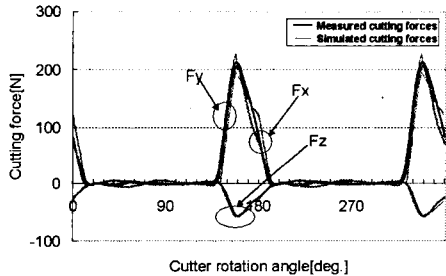


Fig. 14 Comparison between simulated and measured cutting forces (SKD61, HRC = 17, width of cut = 1 mm, depth of cut = 2mm, feed rate = 200mm/min)

Figs. 13 과 14 에서는 경도에 따라 계산된 절삭력 계수를 사용하여 예측된 절삭력과 실제 측정된 절삭력의 비교 결과를 보여주고 있다. 예측된 절삭력과 측정된 절삭력이 서로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

## 6. 공구 마모와 절삭력 계수

공구 마모(Tool wear)는 공구면과 가공물 사이의 상대적인 운동에 의해 공구 표면이 점진적으로 소멸되는 현상이다. 이것은 공구의 일정 부분이 소실되는 공구 형상 변화라고 생각할 수 있으므로

절삭력 계수에 직접적인 영향을 줄 수 있다.

절삭력 계수 데이터베이스는 절삭 해석 소프트웨어(Cutting analysis software)의 기본 입력 정보로서 사용되므로 공구 마모의 추출은 전적으로 절삭 해석 소프트웨어의 입력 변수 중에서 선택되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 마모 예측을 위한 변수로 스피들 회전수와 이송 속도를 마모 예측을 위한 인자로 선정하였다. 공구 마모는 공구 경사면의 칩 유동에 의해 생기는 경사면 마모(Crater wear)와 공구의 여유면과 가공물 간의 마찰에 의해 야기되는 여유면 마모(Flank wear)로 나눌 수 있다. 경사면 마모와 여유면 마모 모두 절삭력 계수에 영향을 준다. 그러나 본 연구에서는 마모를 검출하는 기준으로 측면 절삭날의 여유면 마모 길이(Wear land length)만을 선택하였다. 여유면의 마모량을 채택한 것은 상대적으로 경사면 마모보다는 여유면 마모가 마모량이 크고, 마모 측정이 용이하기 때문이다. 엔드밀의 경우 공구 장착 시 발생하는 런아웃(Run-out) 때문에 각 날마다 공구 마모량이 달라질 수 있다. 따라서, 각 날의 마모 길이를 측정하고 그 값을 평균하여, 마모길이를 사용하였다.

### 6.1 마모 길이와 절삭력 계수

마모 길이와 절삭력 계수와의 관계를 확인하기 위하여 실험 공구의 마모량을 Table 6 과 같은 조건으로 조절하였고 그에 대한 절삭력 계수를 구하였다. Table 7 과 Fig. 15로부터 공구 마모의 증가에 따라 전반적으로  $K_n$  이 증가하는 사실을 확인할 수 있다.

Table 6 Wear land length

	Tool 1	Tool 2	Tool 3	Tool 4
Wear land length ( $\mu\text{m}$ )	0	81.3	125.4	159.7

Table 7 Relationship between wear land length and  $K_n$

Wear land length( $\mu\text{ m}$ )	$\ln(K_n(A_1))$	$K_n(A_1)$ (MPa)
0	7.2736	1441.8
81.3	7.3713	1589.6
125.4	7.4974	1803.3
159.7	7.5815	1961.6

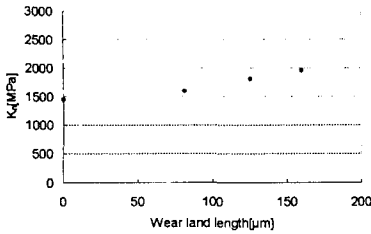


Fig. 15 Relationship between wear land length and  $K_n$

### 6.2 스피들 회전수 및 이송 속도와 공구 마모의 관계

스핀들 회전수와 이송 속도에 대한 공구 마모 특성을 확인하기 위해 Table 8 의 조건 하에서 실험을 수행하였다. 공구와 가공물의 상대적인 경도에 따라 마모량의 차이가 발생할 수 있으나 여기서는 단일 재질로 실험 대상을 한정하였다. 일정한 가공량을 수행한 뒤에 공구의 마모 길이를 측정하였다.

Table 8 Experiment condition

	Feed rate (mm/min)	Tool revolutions (rpm)	Cutting speed (mm/min)	Feed per tooth (mm/tooth)
Test 1	40	1000	31416	0.020
Test 2	60	1000	31416	0.030
Test 3	80	1000	31416	0.040
Test 4	100	1000	31416	0.050
Test 5	100	800	25133	0.063
Test 6	100	1200	37699	0.042
Test 7	100	1400	43982	0.036

절삭 길이(Cutting length)는 식 (13)에 의해 계산된다.

$$l_c = (2\pi R \cdot RPM) \cdot (l_g / F_d) \quad (13)$$

$l_c$ : Cutting length,  $l_g$ : Movement distance,  $F_d$ : Nominal feed rate

Figs. 16 과 17 은 절삭 거리에 대한 마모 길이의 변화를 보여준다. Fig. 16 의 결과는 스피들 회전수는 고정시키고 이송 속도에만 변화를 주어 마모와 이송 속도의 관계를 살펴본 것이다. 엔드밀의 마모 길이는 이송 속도에 따라 차이점을 나타내지 않는다. 이송 속도의 증감은 비례적으로 절삭력을 변화시킨다. 그러나 그에 따라 가공 시간 자체도 달라진다. 이송 속도가 80 mm/min 인 경우

는 40 mm/min 인 경우에 비해 절삭력은 증가하는 반면에 가공 시간은 감소한다. 따라서 마모에 대하여 절삭력 증가에 따른 영향과 가공 시간 감소에 따른 영향이 서로 상쇄되어 이송 속도에 따라 마모 길이가 큰 차이를 나타내지 않는다고 해석할 수 있다.

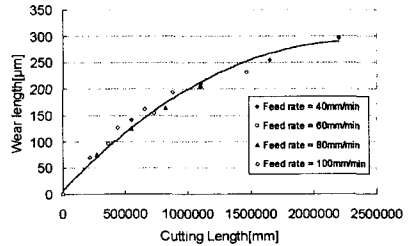


Fig. 16 Wear land length with respect to feed rate

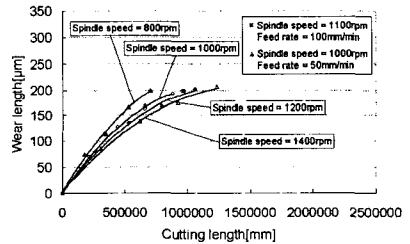


Fig. 17 Wear land length with respect to spindle speed

Fig. 17 은 이송 속도를 고정 시킨 상태에서 스피들 회전수를 변화시켜 얻은 결과이다. 동일한 절삭 거리에 대하여 스피들 회전수가 작을 수록 큰 마모 길이를 나타낸다. 이 경우는 이송 속도가 고정되어 있으므로 전체 절삭 거리는 스피들 회전수에 의해 좌우된다. 동일한 절삭 거리에 대하여 스피들 회전수가 작을수록 더 큰 마모 길이를 나타내는데 이것은 스피들 회전수의 감소에 의한 날당 이송량의 증가로 절삭력이 증가하기 때문으로 추정된다. 공구 마모는 이송 속도와는 큰 관계가 없으며 스피들 회전수와 절삭 거리에 의해 영향을 받는다는 사실을 알 수 있다.

### 6.3 마모량 추정에 의한 절삭력 예측

이송 속도와 절삭 조건을 통해 대략적인 마모 추정이 가능하고 추정된 마모량을 통해 Table 7 과 Fig. 15 의 관계로부터 계산된 공구의  $K_n$  을 가지고 절삭력을 근사적으로 예측할 수 있다. Fig. 17

의 결과로부터 마모량 예측을 통하여 얻어진 절삭력 계수  $K_n$  은 Table 9 에 나타나 있다.

이상의 결과를 바탕으로 예측된 절삭력과 측정된 절삭력의 비교는 Figs. 18 과 19 에 나타나 있다. 마모의 유무에 따라  $y$  축 방향의 절삭력은 약 25% 정도의 오차를 나타내지만 마모량을 고려한 절삭력 계수를 사용하면 절삭력을 잘 예측할 수 있음을 확인하였다.

Table 9 Experiment condition & predicted  $K_n$

	Feed rate (mm/min)	Spindle revolutions (rpm)	Cutting length (mm/min)	Predicted wear length (mm/min)	$K_n[A_1]$ (MPa)
Test 1	100	1100	967611	200	2068.0
Test 2	50	1000	659736	170	1953.5

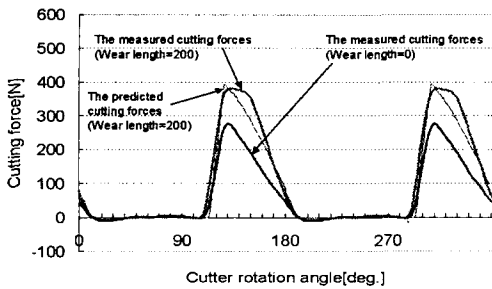


Fig. 18 Comparison between simulated and measured cutting forces (Test 1)

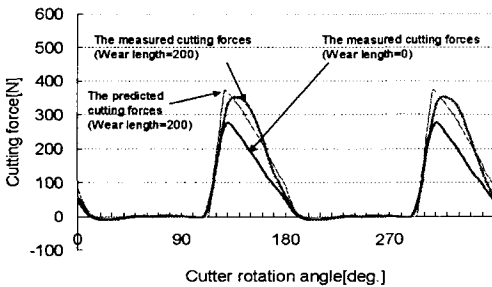


Fig. 19 Comparison between simulated and measured cutting forces (Test 2)

### 7. 결론

본 연구는 절삭 조건에 독립적인 절삭력 계수를 이용하여 절삭력 계수 데이터베이스를 구현하는 체계적인 방법을 제시하였다. 부차적인 절삭 조건과 절삭력 계수의 관계를 확인하였고 공구 형상의 변화에 대한 절삭력 계수의 변화를 실증하였

다. 강 의 경도 변화에 따라 절삭력 계수가 거의 비례적으로 변화하는 사실을 이용하여 가공 재질에 대한 절삭력 계수 데이터베이스의 방법을 제안하였다. 더불어 공구 마모는 절삭력 계수를 증가시키는 요인이 되며 공구 마모의 추정을 통해 근사적으로 절삭력 계수를 계산하여 절삭력을 예측할 수 있음을 확인하였다. 이상의 결과는 절삭 해석을 위한 가공 데이터베이스의 기초 자료로 사용되어 생산성 향상 및 절삭 성능 개선에 기여할 수 있다.

### 참고문헌

1. Lee, S. K., Ko, S. L., "Analysis on the Precision Machining in End Milling Operation by Simulating Surface Generation," J. of the KSPE, Vol. 16, No. 4, pp. 229-236, 1999.
2. Budak, E., Altintas, Y., Armarego, E. J. A., "Prediction of Milling Force Coefficients from Orthogonal Cutting Force Data," J. of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 118, pp. 216-224, 1996.
3. Kline, W. A., DeVor, R. E., Lindberg, J. R., "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts," Int. J. Machine Tools and Manufacture, Vol. 22, No. 1, pp. 7-22, 1982.
4. Yun, W. S., Cho, D. W., "Accurate 3D Cutting Force Prediction Using Cutting Condition Independent Coefficients in End Milling," Int. J. of Machine Tools and Manufacture, Vol. 41, Issue 4, pp. 463-478, 2001.
5. Ko, J. H., Cho, D. W., "Accurate 3D Cutting Force Prediction Using Cutting-Condition-Independent Coefficients In Ball-End Milling," Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME, pp. 321-328, 2002.
6. Ko, J. H., Yun, W. S., Cho, D. W., Ehmann, K. F., "Development of a Virtual Machining System, Part 1: Approximation of the Size Effect for Cutting Force Prediction," Int. J. of Machine Tools and Manufacture, Vol. 42, Issue 15, pp. 1595-1605, 2002.
7. American Standard Testing Material 180-84.
8. Deutsches Institut für Normung 50160.
9. International Standard Organization CD 18265.