

# 고속 엔드밀 가공에서의 절삭력 예측

정성찬\*, 김국원#

## Prediction of Cutting Forces in High Speed End Milling

Sung-Chan Jung\*, Kug Weon Kim #

### ABSTRACT

Recently researches for high speed machining have been actively performed. Few analytical studies, however, have been published. In this paper, a model of cutting forces is analytically studied to predict cutting characteristics in end mill process, especially considering both feed rate and spindle speed. The developed cutting model is based on Oxley's machining theory, which predicts the cutting forces from input data of workpiece material properties, tool geometry and cutting conditions. Experimental verification has been performed to verify the predictive cutting force model using tool dynamometer. It has been found that the simulation results substantially agree with experimental results.

**Key Words :** High Speed Machining(고속가공), Cutting Force(절삭력), Predictive cutting force model(예측 절삭력 모델)

### 1. 서 론

최근 고속, 초고속 가공에 대한 연구가 이전보다 활발히 진행되고 있다. 고속가공의 이점은 단순히 직접적인 가공비용이나 절삭시간만이 아니고 에너지 소비량이나 절삭유에 의한 환경문제 해결 등에 더 큰 비중을 차지하고 있다. 고속가공이 점점 실용화 되어 가고 있으나 이론적 연구가 극히 미미하여 절삭저항이나 절삭온도의 변화, 그리고 공구수명, 가공변질층의 영향 등에 관해서 현재까지 실험연구결과에 의존하고 있는 실정이다. 이러한 실험연구는 다양한 피삭재의 사용, 가공조건의 변화 등에 적절히 대응하지

못하고 있다.

절삭가공에 대한 이론적 연구는 Merchant에 의한 전단면 절삭모델을 기초로 연구가 시작되었고, 현재까지 다양한 모델이 개발되어지고 있다. Oxley의 절삭이론<sup>[1]</sup>을 통한 2차원 절삭모델은 진정한 의미의 예측절삭모델이라 볼 수 있으며 변형률, 변형률속도, 온도의 변화에 따른 피삭재의 유동응력 변화를 고려할 수 있는 특징이 있다. 최근 이를 기초로 한 다양한 밀링 절삭력 예측 연구<sup>[2~5]</sup>가 수행되었다. 또한 절삭이론을 통하여서 엔드밀 가공 시 발생하는 절삭력에 대한 예측에 관한 연구가 수행되어지고 있다. Li 등<sup>[6, 7]</sup>은 이 이론에 기초하여 절삭모델을 형성하고 다양한 절삭형태에 따른 절삭력 특성에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 기존의 2차원, 3차원 절삭이론을 이용하여 엔드밀 가공에서의 고속화에 따른 절삭력 특성을 예측하고자 한다. 가공의 고속화는 스피들 속도

\* 한국야금 생산기술연구소

# 교신저자: 순천향대학교 기계공학과

E-mail : kimkug1@sch.ac.kr

와 이송속도, 두 가지 관점에서 살펴볼 수 있으며 본 연구에서도 이 두 가지 속도변화에 따른 절삭력 변화를 살펴보았다. 엔드밀 가공에 대한 절삭력 예측모델을 완성하기 위해 Oxley의 2차원 절삭이론을 기초로 활용하였다. 본 연구는 향후 초고속가공에 대한 이론적 연구의 기초자료로 활용될 수 있다.

## 2. 절삭이론

### 2.1 2차원 절삭이론

절삭해석에 사용되는 2차원 정상상태의 칩 형성 모델이 Fig. 1에 나타나 있다.

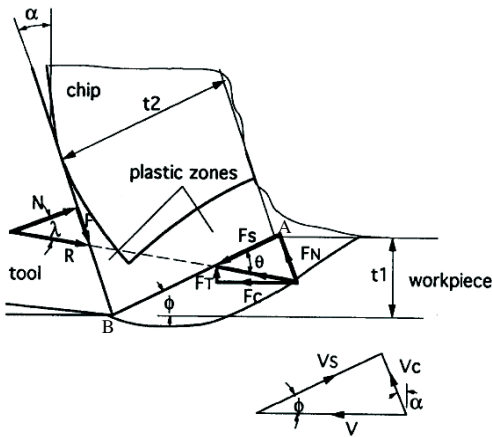


Fig. 1 Orthogonal chip formation model

Oxley의 예측 절삭이론에서 공구는 완전히 예리하다고 가정하고, 제 1소성영역의 중심에 있는 AB면과 칩-공구 접촉면은 최대 전단응력과 최대 전단변형률 속도의 방향이라 가정된다. 이 이론의 기본은 AB면과 칩-공구 접촉면의 응력을 전단각, 재료의 물성치 및 절삭조건 등으로 해석하고 AB면과 접촉면에 의해 전달되는 절삭력이 평형을 이루는 전단각,  $\phi$ 를 찾는 일이다.

일단  $\phi$ 가 알려지면 칩 두께,  $t_2$ 와 2차원 절삭요소들을 결정할 수 있으며 이를 이용하여 3차원 절삭가공에서의 절삭력을 구할 수 있다.

### 2.2 3차원 절삭이론

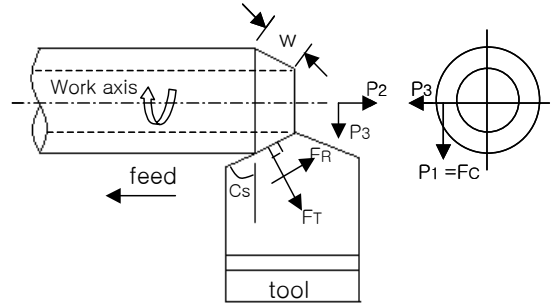


Fig. 2 Model for simple oblique cutting

Oxley의 예측 절삭이론에서 Fig. 2에서 보는 것과 같은 3차원 절삭과정에서의 주절삭력, 이송방향 그리고 횡방향 절삭력인  $P_1$ ,  $P_2$  그리고  $P_3$ 를 다음과 같이 식(1)을 통해서 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_1 &= F_C, \\ P_2 &= F_T \cos C_S + F_R \sin C_S, \\ P_3 &= F_T \sin C_S - F_R \cos C_S \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $C_S$ 는 공구 측면 절삭날 각이며,  $F_C$ ,  $F_T$  그리고  $F_R$ 은 주절삭력, 이송방향 그리고 횡방향의 절삭력이다. Oxley의 연구에 따르면  $C_S=0^\circ$ 일 때 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} F_C &= R \cos(\lambda - \alpha_n), \\ F_T &= R \sin(\lambda - \alpha_n), \\ F_R &= \frac{F_C(\sin i - \cos i \sin \alpha_n \tan \eta_c) - F_T \cos \alpha_n \tan \eta_c}{\sin i \sin \alpha_n \tan \eta_c + \cos i} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $\lambda$ 는 공구와 칩 사이에서의 마찰각이며,  $\alpha_n$ 은 공구의 수직 경사각이다. 또한  $\eta_c$ 는 칩 유출 각이며 Stabler의 연구에 따라 공구의 기울림 각  $i$ 와 같다고 가정한다. 합력  $R$ 은 다음과 같다.

$$R = \frac{k_{AB} t_1 w}{\sin \phi \cos \Theta} \quad (3)$$

여기서  $k_{AB}$ 는 AB면에서의 전단유동응력이며,  $t_1$ 는 미변형 칩 두께,  $w$ 는 절삭너비이다. 또한  $\phi$ 는 전단각이며  $\theta$ 는 전단면과  $R$ 에 의해 만들어진 각이다.

### 2.3 공구 날끝 영향 고려

2차원 절삭에서는 절삭 날의 수직방향으로 칩 흐름각이 형성된다. 하지만 기울림 각이 존재하는 3차원 절삭에서는 Stabler의 연구에 따라 기울림 각과 칩 유출각이 같다고 가정한다. 그러나 Oxley의 연구에 따르면 실제적인 절삭 실험에서 end effect(날끝 영향)로 Stabler의 가정과 다르게 기울림 각과 칩 유출각 사이에 오차가 발생한다. 이로 인하여 절삭력인  $P_1$ ,  $P_2$  그리고  $P_3$  중  $P_3$ 의 값이 계산치와 실험치 사이에 오차가 나는 것을 확인할 수 있다<sup>[1]</sup>. 그러므로 공구 끝단에서의 날끝 영향을 고려하여야 한다.

Colwell의 연구<sup>[8]</sup>에서 칩은 이송과 절입 깊이의 연장선에 수직 방향으로 흐른다고 가정하였다.(Fig. 3 참조) 이것을 이용하여 새로운 3차원 형상의 절삭날을 형성하고 이에 따른 새로운 기울림 각과 공구 측면 절삭날 각 그리고 상면 경사각을 정의하여 날끝 영향을 고려한, 보다 정확한 절삭력을 구할 수 있다.(Fig. 4.참조) 기존의  $C_s$ ,  $i$ ,  $\alpha_n$ ,  $\eta_c$ 의 값으로부터 변경된 값을 구하여 절삭력을 예측한다. 그러므로 수식 (1), (2)를 다음과 같이 바꾸어야 한다.

$$\begin{aligned} P_1 &= C_s, \\ P_2 &= F_T \cos C_s^* + F_R \sin C_s^*, \\ P_3 &= F_T \sin C_s^* - F_R \cos C_s^* \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $C_s^*$ 는 공구 측면 절삭날 각인  $C_s$ 로부터 계산된 등가 공구 측면 절삭날 각이다.

$C_s^* = 0$ 일 때,  $F_C$ ,  $F_T$ ,  $F_R$ 은 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} F_C &= R \cos(\lambda - \alpha_n^*), \\ F_T &= R \sin(\lambda - \alpha_n^*), \\ F_R &= \frac{F_C(\sin i^* - \cos i^* \sin \alpha_n^* \tan \eta_c^*) - F_T \cos \alpha_n^* \tan \eta_c^*}{\sin i^* \sin \alpha_n^* \tan \eta_c^* + \cos i^*} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $\lambda$ 는 칩-공구 사이의 마찰각이며,  $\alpha_n^*$ 는 공구의 수직 경사각인  $\alpha_n$ 으로부터 계산된 등가 공구 수직 경사각이며  $i^*$ 는 공구 기울림 각인  $i$ 로부터 계산된 등가 공구 기울림 각이다. 또한  $\eta_c^*$ 는 Stabler가 가정한 칩 유출 각에 따라 계산된 값이며 등가 공구 측면날 각에 따라서 변경되었다. 수식에서 “\*” 표시가

붙은 것은 날끝 영향으로 인해서 변경된 각들을 표시한 것이다. 그리고  $R$ 은 칩-공구 경계와 전단면에서의 합력이다. 절삭날 노우즈에 대한 영향은 절입 깊이에 비하여 절삭날 노우즈가 매우 작으므로 존재하지 않다고 가정한다.

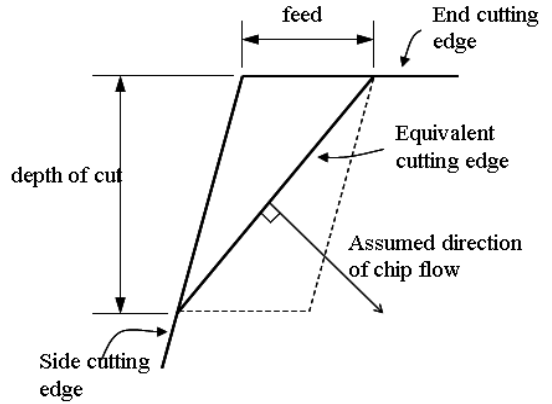


Fig. 3 Colwell's model of chip flow direction

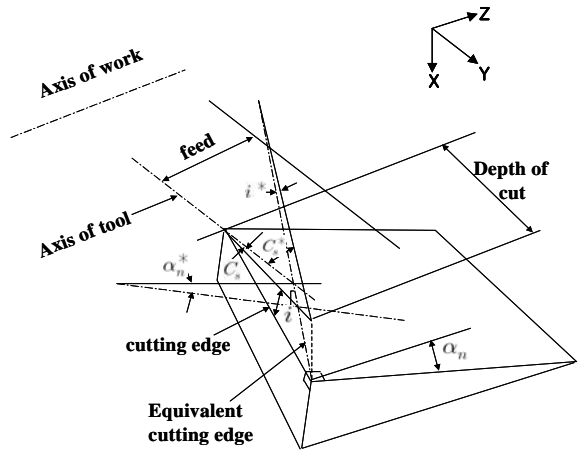


Fig. 4 Equivalent cutting edge

## 3. 절삭력 모델

### 3.1 엔드밀 가공 모델링

Li 등<sup>[6]</sup>에 의해서 제시된 것처럼 밀링 가공과정은 한 개의 주 절삭날을 가진 절삭과정이라 모델링한다.

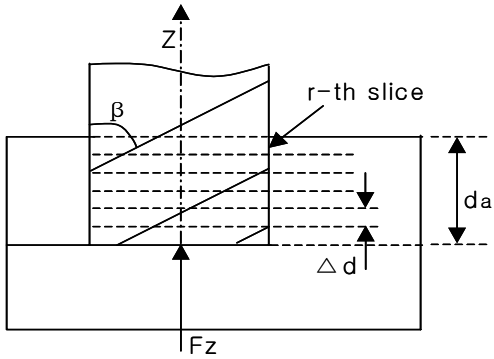


Fig. 5 Modeling for end milling process

Fig. 5에 나타난 것처럼 엔드 밀링 가공에서 공구는  $\beta$ 의 비틀림 각을 갖으며 축 방향으로 여러 개의 조각으로 나누어 해석한다. 그리고 각 조각을 갖는 각각의 날들의 절삭 형태는  $i$ 의 기울림 각을 갖는 3차원 절삭가공으로 모델링 한다. 그리고 공구를 축 방향으로 여러 개의 조각으로 나누어서 해석하는 과정에서 첫 번째 조각은 날끝 영향을 고려하였다.

엔드 밀링에서는 미변형 칩두께가 실시간으로 변하게 된다. 날당 이송을  $f_t$  라 하면 변화하는 미변형 칩두께는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_{u,v} = f_t \sin \phi_{u,v} \quad (6)$$

여기서  $\phi_{u,v}$ 는  $u$  번째 날에서  $v$  번째 조각에 대한 회전각이다. 이는 시계방향으로 측정한다. 절삭날의 표시는  $u = 1, 2, \dots, N_r$  이며 여기서  $N_r$ 는 공구의 날 수이다. 그리고 절삭날 조각들의 표시는  $v = 1, 2, \dots, r$  이며 여기서  $r$ 은 축 방향으로 나눈 조각의 수이다. 이 경우 각 조각의 길이는  $d_a/r$ 로 나타낼 수 있다. 여기서  $d_a$ 는 축방향 절입깊이이다. 따라서 절삭날의 위치  $\phi_{u,v}$ 는 공구의 회전속도에 의한 회전각에서 공구의 날 수 및 비틀림 각을 갖는 축방향 조각들의 영향을 고려하여 아래의 수식으로 표현할 수 있다.

$$\phi_{u,v}(t) = 2\pi n t - (u-1) \frac{2\pi}{N_r} - (v-1) \frac{2d_a \tan \beta}{rD} \quad (7)$$

여기서  $n$ 은 공구의 회전속도,  $t$ 는 시간,  $D$ 는 커터의 지름이다.

엔드 밀링 가공에서 절삭력을 모델링하기 위해서

UVW 좌표계를 이용하여 날의  $v$  번째 조각 요소에서 절삭날 끝은 Fig. 6과 같이 나타내어진다.

이 좌표계를 따르면 절삭날 끝 부분은 한 점의 절삭공구로 볼 수 있다. 그래서 이 부분에서 나오는 절삭력 요소들 즉,  $P_{1u,v}$ ,  $P_{2u,v}$  그리고  $P_{3u,v}$ 로 각각 표현할 수 있다.

또한 이 절삭력 요소들은 앞에서 설명한 3차원 절삭이론을 이용하여 구할 수 있다. 그러므로 커터에서 받는 총 절삭력은 각 날에서 받는 모든 힘들을 합하여 구할 수 있다.  $P_{1u,v}$ ,  $P_{2u,v}$  그리고  $P_{3u,v}$ 를 구하고, 이 날 끝 부분에서 받는 절삭력은 XYZ의 고정 좌표계의 형식으로 표현할 수 있다. 따라서 시간에 따른 엔드 밀링 커터의 총 절삭력은 식(8)과 같이 계산할 수 있다.

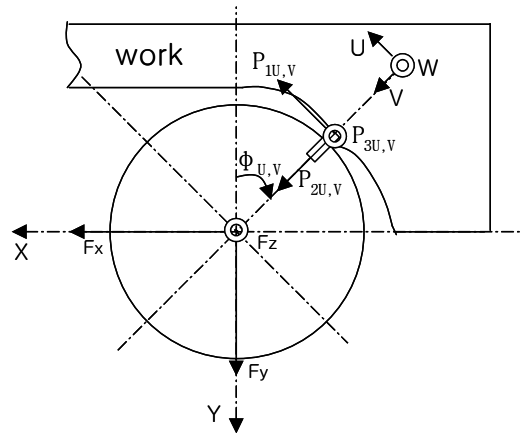


Fig. 6 Modeling for end milling process Coordinate systems for the  $v$ th slice of the milling cutter

$$\begin{aligned} F_x(t) &= \sum_{v=1}^r \sum_{u=1}^{N_r} (P_{1u,v} \cos \phi_{u,v} + P_{2u,v} \sin \phi_{u,v}) , \\ F_y(t) &= \sum_{v=1}^r \sum_{u=1}^{N_r} (-P_{1u,v} \sin \phi_{u,v} + P_{2u,v} \cos \phi_{u,v}) , \\ F_z(t) &= \sum_{v=1}^r \sum_{u=1}^{N_r} P_{3u,v} \end{aligned} \quad (8)$$

### 3.2 피삭재

실험에 사용된 피삭재는 0.2% 탄소강(SM20C)이며 그 상당응력은 다음과 같이 응력-변형을 관계로 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \sigma_1 \cdot \epsilon^n \quad (9)$$

여기서  $\sigma$ 와  $\epsilon$ 는 각각 상당응력과 상당변형률을 나타낸다. 응력  $\sigma_1$ 과 가공경화지수  $n$ 은 온도와 변형률속도의 함수이며 다음과 같이 정의되는 속도-수정 온도로 나타낼 수 있다.

$$T_{\text{mod}} = T \left\{ 1 - \nu_c \log \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right\} \quad (10)$$

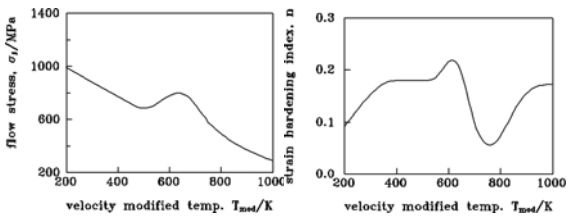
여기서  $T$ 는 온도,  $\dot{\epsilon}$ 는 변형률 속도 그리고  $\nu_c$ ,  $\dot{\epsilon}_0$ 는 물질상수이다. 물질상수  $\nu_c$ ,  $\dot{\epsilon}_0$ 는 각각 0.09, 1/s 이다. Fig. 7은  $\sigma_1$ 과  $n$ 을 속도-수정 온도에 대해 나타낸 그림이다.

피삭재의 열적성질 중 비열은 탄소함유량의 영향이 적기 때문에 모든 탄소강에 대해 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$C_p / (Jkg^{-1}K^{-1}) = 420 + 0.504T / ^\circ C \quad (11)$$

열전도도의 경우 탄소함유량의 영향을 무시할 수 없으며 본 연구에서 사용한 0.2% 탄소강은 다음과 같은 식이 된다.

$$k_c / (Wm^{-1}K^{-1}) = 54.17 - 0.0298T / ^\circ C \quad (12)$$



(a) flow stress (b) strain hardening index

Fig. 7 Flow stress results plotted against velocity modified temperature for 0.2% carbon steel

### 3.3 수치해석

절삭조건과 공구 형상 및 재료 물성치를 입력하여 각 절삭날 조각마다 절삭력을 계산한다. Fig. 8은 엔드밀 가공에서의 절삭력 예측의 흐름을 보여준다.

## 4. 실험 및 계산치와의 비교

### 4.1 가공조건

본 연구에서 제시한 절삭력 모델을 이용하여 재료의 물성치와 공구형상 그리고 절삭조건만을 입력함으로 엔드 밀링 가공에서의 절삭력을 계산하였다. 이론적 내용의 유용성을 확인하기 위해 밀링 절삭력 측정 실험을 수행하였다. 사용된 실험장치는 Table 1과 같다. Table 2는 실험에서의 절삭 조건을 나타낸다. 실험에서의 설치는 Fig. 9와 같다. 절삭 형태는 상향 절삭이었다.

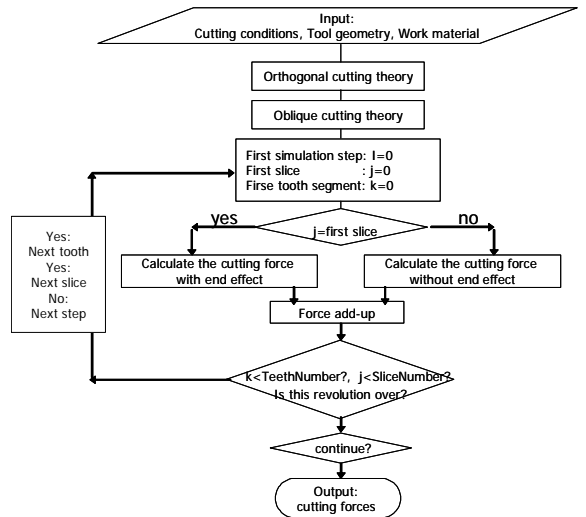


Fig. 8 Flowchart of the end-milling simulation system



Fig. 9 Experiment set-up

**Table 1 Experimental apparatuses**

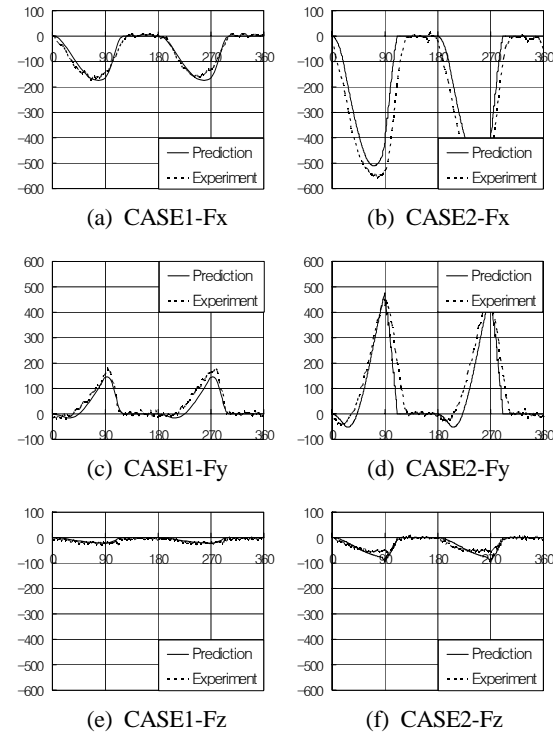
Milling machine	Hwacheon HMV-F
Tool	KORLOY SSE 2060
Dynamometer	KISTLER Type 9275B
Charge Amplifier	KISTLER Type 5019
A/D converter	NI 6035E
datacorder	LabVIEW(freq. 2kHz)

**Table 2 Cutting conditions**

Cutter body	Spindle speed [rpm]	Feedrate [mm/min]	Axial depth of cut [mm]	CASE
Diameter: 6mm Helix angle: 30° Rake angle: 0°	990	41	2	1
	750	127	2	2
	1400	41	2	3
				4

**4.2 결과비교**

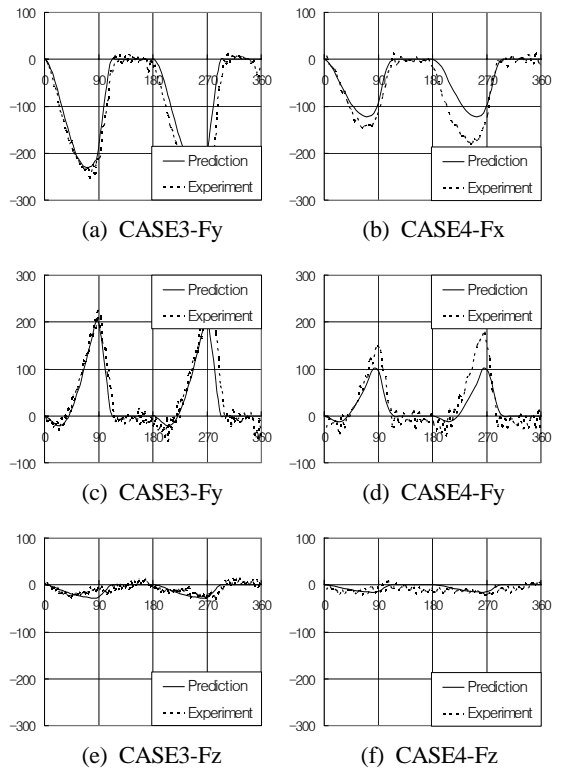
**4.2.1 이송속도에 따른 절삭력 비교**



**Fig. 10 Predicted and experimental cutting forces with feed rate variation**

Fig. 10의 이송속도의 증가(Table 2의 CASE 1과 2)에 따른 절삭력 변화를 실험 및 계산치를 비교한 그림이다. 절삭력의 세 분력 모두 실험치와 계산치가 잘 맞는 것을 볼 수 있으며, 이송속도가 증가하면 절삭력의 세분력 모두 증가함을 알 수 있다. 특히 이송속도가 약 3배 증가함에 따라 절삭력의 세 분력 모두 약 3배 증가함을 알 수 있다. 이는 이송속도에 의해 미변형절삭두께가 결정되므로 이송속도의 변화와 절삭력 증가는 거의 비례함을 확인할 수 있다.

**4.2.2 공구의 회전속도에 따른 절삭력 비교**



**Fig. 11 Predicted and experimental cutting forces with spindle speed variation**

Fig. 11은 엔드밀 회전속도 증가(Table 2의 CASE 3과 4)에 따른 절삭력 변화를 나타낸 그림이다. 여기서도 실험치와 계산치는 비교적 잘 일치하였다. 회전속도의 증가에 따라 절삭력 세 분력 모두 감소하였으며, 회전속도가 2배 정도 큰 CASE 4의 실험치와 계

산치의 세 분력 모두가 CASE 3에 비해 대략 2배 정도 차이가 난다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 엔드밀 가공에서의 고속화에 따른 절삭력 변화를 예측하였다. 구체적으로 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. Oxley의 절삭이론을 기초로 하여 엔드밀 가공에서 절삭력 모델을 개발하였다. 이 모델은 재료의 물성치와 공구 형상 그리고 절삭 조건들을 입력함으로써 어떠한 예비 실험 없이 엔드밀의 절삭력을 예측할 수 있었다.
2. 제시된 절삭력 모델을 검증하기 위하여 공구 회전속도와 이송속도의 변화에 따른 절삭실험을 수행하였다. 그 결과 절삭력의 최대치와 파형이 매우 유사함을 확인하였으며, 이로써 실험을 통한 절삭력 모델의 타당성을 검증하였다.
3. 이송속도의 증가는 절삭력 세 분력 모두 비례적으로 증가시켰으며, 회전속도의 증가는 반대로 절삭력 세 분력 모두를 비례적으로 감소시켰다.

## 후 기

본 연구과제는 2004년도 순천향대학교 학술연구조성비 일반연구과제로 지원을 받아 수행하였음.

## 참고문헌

1. Oxley, P. L. B., *Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability*, Ellis Horwood, Chichester, 1989.
2. Young, H. T., Mathew, P. and Oxley, P. L. B., "Predicting cutting forces in face milling," *International Journal of machine tool and manufacture*, Vol. 34, pp. 771-783, 1994.
3. Li, X. P., Nee, A. Y. C, Wong, Y. S. and Zheng, H.

- Q., "Theoretical modelling and simulation of milling forces," *Journal of Materials Technology*, Vol. 89-90, pp. 266-272, 1999.
4. Zheng, H. Q., Li, X. P., Wong, Y. S. and Nee, A. Y. C., "Theoretical modelling and simulation of cutting forces in face milling with cutter runout," *International Journal of machine tool and manufacture*, Vol. 39, pp. 2003-2018, 1999.
5. 김국원, "2차원 절삭이론을 이용한 정면밀링 절삭력 예측," *한국정밀공학회지*, Vol. 19, No. 12, 2002.
6. Li, H. Z., Zhang, W. B. and Li, X. P., "Modelling of cutting forces in helical end milling using a predictive machining theory," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, pp. 1711-1730, 2001.
7. Li, X. P. and Li, H. Z., "Theoretical Modelling of cutting forces in helical end milling with cutter runout," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 46, pp. 1399-1414, 2004.
8. Colwell, L. V., "Predicting the angle of chip flow for single point cutting tool", *Trans. ASME*, Vol. 76, pp. 199-204, 1954.