

정면 밀링 가공에서의 비절삭 저항 모델링 및 절삭력 예측

김국원*, 주정훈⁺, 이우영⁺⁺, 최성주⁺⁺
(논문접수일 2008. 7. 25, 심사완료일 2008. 8. 26)

Modeling of the Specific Cutting Pressure and Prediction of the Cutting Forces in Face Milling

Kug Weon Kim*, Jung Hoon Joo⁺, Woo Young Lee⁺⁺, Sung Joo Choi⁺⁺

Abstract

In order to establish automation or optimization of the machining process, predictions of the forces in machining are often needed. A new model for forces in milling with the experimental model based on the specific cutting pressure and the Oxley's predictive machining theory has been developed and is presented in this paper. The specific cutting pressure is calculated according to the definition of the 3 dimensional cutting forces suggested by Oxley and some preliminary milling experiments. Using the model, the average cutting forces and force variation against cutter rotation in milling can be predicted. Milling experimental tests are conducted to verify the model and the predictive results agree well with the experimental results.

Key Words : Face Milling(정면 밀링), Specific Cutting Pressure(비절삭 저항), Cutting Forces Prediction(절삭력 예측), Predictive Machining Theory(예측 절삭 이론)

1. 서론

절삭가공을 연구함에 있어서 가장 중요한 요소 중의 하나가 절삭력의 예측이다. 공구에 의해 피삭재로 전달되는 힘은 피삭재를 변형시켜 형상불량을 초래하거나 지정된 공차를 만족 못할 수도 있고, 공구가 받는 반력은, 만약 너무 크다면 공구파손의 원인이 된다. 절삭력과 절삭속도는 필요한 동력

을 결정하며 제품생산률을 예측할 수 있게 한다. 또한 새로운 공구의 설계 및 새로운 재질에 대한 가공계획 수립 시 요구 되는 시간과 비용을 절감할 수 있다.

정면 밀링 절삭력 예측에 대한 연구는 현재까지 크게 두 부류로 나눌 수 있다. 하나는 2차원 절삭이론을 바탕으로 3차원 절삭력 및 밀링 절삭력을 예측하는 방법이고, 다른 하나는 미변형 칩 단면적과 주절삭 분력이 비례한다고 가정하

* 순천향대학교 기계공학과 (kimkug1@sch.ac.kr)
주소: 336-745 충남 아산시 신창면 읍내리 646번지
+ 순천향대 대학원 기계공학과
++ 한국기술교육대학교 기계정보공학부

고 비절삭 저항을 구해 절삭력을 예측하는 방법이다. 2차원 절삭이론은 1940년대 초에 제안된 전단면 모델로부터 시작하며, 1960년대 이후에는 미끄럼선장법(slip line method)을 이용한 절삭 해석 연구가 있었고, 최근에는 유한요소법을 이용한 절삭 해석 연구가 진행되고 있다. 절삭이론에 대한 연구 중 주목할 만한 것은 Oxley의 연구이다⁽¹⁾. 그는 미끄럼선장법을 기초로 하여 피삭재의 유동응력을 포함하는 물성치와 절삭조건만으로 전단각, 전단응력 및 마찰각 등을 예측하고 이로부터 절삭력과 절삭온도를 계산하였다. 그의 이론은 예측 절삭이론으로 불리고 있으며 이를 이용하여 정면 밀링 절삭력⁽²⁻⁴⁾ 등을 해석하고자 하는 연구가 활발히 진행되었다. 그러나 예측 절삭이론에서는 피삭재의 유동응력에 대한 정보가 필요한데, 온도, 변형률, 변형률 속도의 함수인 유동응력을 구하는 일은 쉽지 않은 일이라 현재까지 탄소강, 알루미늄 등 몇 가지 재료에 대해서만 알려져 있다. 밀링 절삭력을 해석하는 또 다른 방법은 간단한 실험을 통하여 비절삭 저항을 구하고 이를 이용하여 다양한 조건에서의 밀링 절삭력을 예측하는 방법이다. 이 방법은 약간의 실험을 필요로 하는 단점이 있지만 밀링 가공과 같은 복잡한 가공의 절삭력 해석에 매우 유용하게 이용되어 왔다⁽⁵⁻⁸⁾.

본 연구에서는 비절삭 저항을 구하는 실험적 접근 방법과 Oxley의 예측 절삭이론에서 제시한 3차원 절삭력 모델링 방법을 이용하여 정면밀링 가공에서의 절삭력을 예측하는 새로운 방법을 연구하였다. Oxley에 의해 제시된 3차원 절삭력 정의에 따라 비절삭 저항을 새롭게 모델링 하였으며, 실험으로 얻어진 평균 절삭력을 이용하여 비절삭 저항을 계산하였다.

2. 절삭력 모델링

Fig. 1은 정면 밀링 가공을 나타낸 그림이다. 이송방향을 x 축으로 하고, 공구는 반시계 방향으로 회전한다고 가정한다. 각 인서트에서의 순간적인 칩 두께 C_L 은 회전위치 ϕ , 회전당 이송량 f_r 으로부터 아래와 같이 결정된다.

$$C_L = f_r \times \sin\phi \quad (1)$$

여기서 f_t : 인서트당 이송량(= f_r /인서트수)

따라서 순간적인 칩단면적 A_C 는 다음과 같이 유도된다.

$$A_C = C_L \times d = f_r \times \sin\phi \times d \quad (2)$$

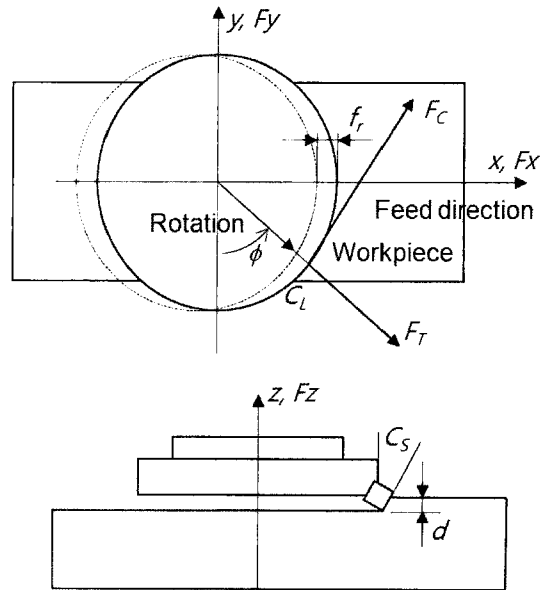


Fig. 1 Face milling process and forces

여기서 d : 절삭깊이

칩단면적 A_C 와 비절삭저항 K_C 로부터 각 인서트에 걸리는 절삭력의 주분력 F_C 와 배분력 F_T 는 다음과 같이 정의된다.

$$F_C = K_C \times A_C = K_C \times C_L \times d \quad (3)$$

$$F_T = K_T \times F_C \quad (4)$$

여기서 K_T : 무차원 수

절삭력의 또 다른 분력인 F_R 은 F_C , F_T 및 축방향 경사각 i , 반경방향 경사각 α , 칩유동각 η 등의 정보로부터 다음과 같이 정의될 수 있다⁽¹⁾.

$$F_R = \frac{F_C(\sin i - \cos i \sin \alpha \tan \eta) - F_T \cos \alpha \tan \eta}{\sin i \sin \alpha \tan \eta + \cos i} \quad (5)$$

인서트의 기하학적 조건에 의해 F_C , F_T , F_R 은 다음과 같은 좌표변환에 의해 P_1 , P_2 , P_3 로 변환된다. 여기서 C_S 는 리드각이다.

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos C_S & \sin C_S \\ 0 & \sin C_S & -\cos C_S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_C \\ F_T \\ F_R \end{Bmatrix} \quad (6)$$

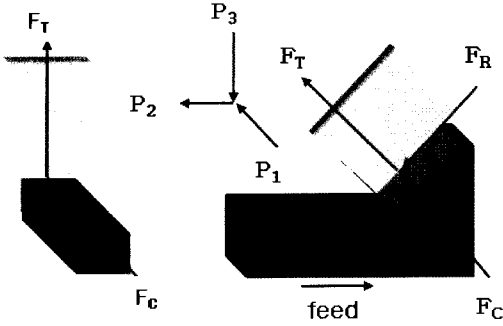


Fig. 2 Force components in the orthogonal and oblique cutting process

이를 x, y, z 좌표계로 바꾸면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ \sin \phi & -\cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

식 (3)-(7)로부터 비절삭 저항 K_C 와 무차원 수 K_T 가 결정된다면, 정면 밀링 커터의 주요 공구각(축방향 경사각, 반경방향 경사각, 리드각)이 고려된 절삭력 F_x, F_y, F_z 를 예측할 수 있다.

인서트의 개수가 여러 개인 경우 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^{N_i} \begin{Bmatrix} F_x(k) \\ F_y(k) \\ F_z(k) \end{Bmatrix} \quad (8)$$

여기서 N_i : 삽입된 인서트의 개수

3. 비절삭 저항 모델링

일반적으로 사용하는 비절삭 저항의 관계식은 다음과 같다.

$$K_C = a \times AC_L^b \quad (9)$$

$$K_T = c \times AC_L^d \quad (10)$$

여기서 AC_L : 평균 칩두께

a, b, c, d : 실험으로 결정해야 할 상수

평균 칩두께 AC_L 은 순간적 칩두께 C_L 을 모두 합하여 한 회전당의 총 절삭길이를 나눔으로써 얻을 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} AC_L &= \frac{1}{eo - ei} \int_{ei}^{eo} \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} f_r(i) \sin t \, dt \\ &= \frac{1}{N_i(eo - ei)} \sum_{i=1}^{N_i} (\cos ei - \cos eo) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 ei, eo : 절삭 개시각과 절삭 종료각

절삭실험에 의해 측정된 평균 절삭력을 이용하여 다음과 같이 K_C 와 K_T 를 구하는 것이 가능하다.

식 (6), (7)로부터 F_x, F_y, F_z 와 F_C, F_T, F_R 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$F_x = F_C \cos \phi + \sin \phi (F_T \cos C_S + F_R \sin C_S) \quad (12)$$

$$F_y = F_C \sin \phi - \cos \phi (F_T \cos C_S + F_R \sin C_S) \quad (13)$$

$$F_z = F_T \sin C_S - F_R \cos C_S \quad (14)$$

식 (12), (13)로부터 F_C 는 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$F_C = F_x \cos \phi + F_y \sin \phi \quad (15)$$

식 (3)을 이용하여 비절삭저항 K_C 로 나타내면 다음과 같다.

$$K_C = \frac{F_x \cos \phi + F_y \sin \phi}{C_L \times d} \quad (16)$$

마찬가지로 식 (12), (13)로부터 F_T 는 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$F_T = \frac{F_x \sin \phi - F_y \cos \phi - Q(F_x \cos \phi + F_y \sin \phi)}{Z} \quad (17)$$

$$\text{여기서 } Q = \frac{\sin C_S \sin i}{\cos i},$$

$$Z = \cos C_S - \frac{\sin C_S \tan \eta}{\cos i}$$

식 (3), (4)로부터 무차원 수 K_T 는 다음과 같이 표현된다.

$$K_T = \frac{1}{Z} \frac{F_x \sin \phi - F_y \cos \phi}{F_x \cos \phi + F_y \sin \phi} - \frac{Q}{Z} \quad (18)$$

4. 실험 및 비절삭 저항 계산

절삭력 측정을 위해 밀링머신에 공구동력계를 설치하고

각 실험조건에 따라 절삭 가공 후 받은 신호를 증폭기를 통해 증폭하여 DAQ 보드에서 저장하고 디지털 신호화 하여 데이터 값을 확인 하였다. 사용된 피삭재 및 공구는 다음과 같다. 사용된 실험장비는 Table 1에 나타내었다.

- Workmaterial : SM20C(length 100mm, width 45mm)
- Tool : Face milling cutter body(diameter 100mm)
axial rake angle : 7°
lead angle : 15°
radial rake angle : 0°

Table 2는 비절삭 저항을 구하기 위해 사용된 실험조건이다. 커터 바디에 3개의 인서트를 삽입하였고 회전속도와 이송속도를 변화시키는 실험조건을 선택하였다. Test No. 1, 2, 3은 일정한 절삭속도에 대하여 이송속도를 변화시킨 경우이며, Test No. 2, 5 및 3, 4는 이송속도를 고정시키고 회전속도를 변화시킨 경우이다. 절삭유는 사용하지 않았으며, 인서트의 반경방향 런아웃은 다이알게이지로 측정하였다. 측정된 반경방향 런아웃은 다음과 같다.

- 첫 번째 인서트 : 0.00
- 두 번째 인서트 : -0.05

- 세 번째 인서트 : -0.10
반경방향 런아웃은 칩두께의 변화를 초래하며 식 (1)은 다음과 같이 수정된다.

$$C_L = (f_i + r(i) - r(i+1)) \times \sin\phi \quad (19)$$

여기서 $r(i)$: i 번째 인서트의 반경방향 런아웃
 $r(i+1)$: $i+1$ 번째 인서트의 반경방향 런아웃

각각의 실험에서 F_x 와 F_y 를 측정하였고, 미변형 칩 두께가 존재하는 구간에서의 절삭력을 이용하여 평균값을 계산한 뒤 식 (16)과 (18)에 대입하여 K_C 와 K_T 를 계산하였다. Table 3은 각 실험 조건에서 계산된 K_C 와 K_T 를 나타낸다. 각 실험 조건에서 구한 K_C 와 K_T 는 선형회귀분석에 의해 최종적으로 다음과 같이 계산되었다.

$$K_C = 672.511 \times AC_L^{0.3126} \quad (20)$$

$$K_T = 0.2854 \times AC_L^{0.1532} \quad (21)$$

계산된 비절삭 저항의 타당성을 살펴보기 위해, Table 2의 각 실험에서 측정된 평균 절삭력과 비절삭 저항으로부터 예측되는 평균 절삭력을 계산하였다. Table 4는 측정결과와

Table 1 Equipments for experiment

Equipment	Specification	Maker
Milling machine	HMV-F1100	Hwacheon
Tool	9257B	KISTLER
Dynamometer		
Charge Amplifier	Type5019	KISTLER
A/D Converter	6035E	National Instruments

Table 2 Cutting conditions for calculating the specific cutting pressure

Test No.	Depth of cut (mm)	Feed rate (mm/min)	Cutting speed (rpm)
1	0.2	187	520
2	0.2	267	520
3	0.2	342	520
4	0.2	342	750
5	0.2	267	990

Table 3 Calculations of K_C and K_T for each experiment

Test No.	K_C	K_T	AC_L
1	1359.92	0.4033	0.1148
2	1199.92	0.3705	0.1639
3	1053.93	0.3714	0.2100
4	1268.93	0.3724	0.1460
5	1397.49	0.4185	0.0859

Table 4 Comparison of measured data with calculated values

Test No.	Average F_x (N)		Average F_y (N)	
	Measured	Calculated	Measured	Calculated
1	12.83	12.05	32.77	29.47
2	13.45	14.88	41.27	37.70
3	15.16	17.09	46.43	44.47
4	13.30	13.81	38.58	34.55
5	9.17	10.32	25.25	24.26

계산결과를 비교한 것으로써, 평균 F_x 는 약 8.2%, 평균 F_y 는 약 6.9% 정도의 오차를 보이고 있다. Fig. 3은 Test No. 1, 2, 3의 조건(절삭속도 520rpm, 이송속도를 변화시킨 경우)에 따른 평균 절삭력의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 F_x , F_y 모두 계산값은 실험값과 매우 잘 일치하며

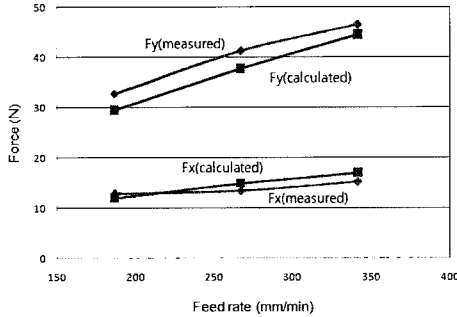


Fig. 3 Comparison of measured and calculated average forces variation with feed rate(test no. 1, 2, 3 in Table 2)

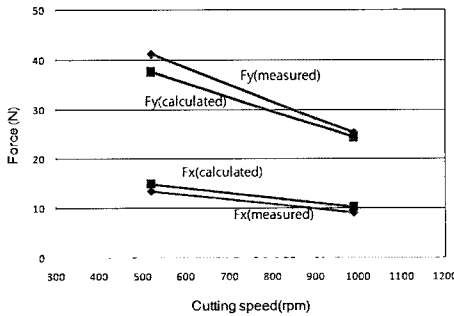


Fig. 4 Comparison of measured and calculated average forces variation with cutting speed(test no. 2, 5 in Table 2)

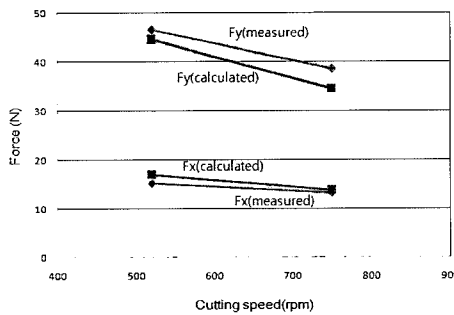


Fig. 5 Comparison of measured and calculated average forces variation with cutting speed(test no. 3, 4 in Table 2)

며 절삭력의 변화추이를 잘 나타내고 있다. Fig. 4, 5는 각각 Test No. 2, 5 및 3, 4의 조건(이송속도 267mm/min 및 342mm/min, 절삭속도를 변화시킨 경우)에 따른 평균 절삭력의 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 3의 경우와 마찬가지로 계산값과 실험값은 매우 잘 일치한다. 따라서 계산된 비절삭 저항은 절삭력 실험 결과를 잘 나타낸다고 볼 수 있다.

5. 비절삭 저항을 이용한 절삭력 예측

앞 절에서 구한 비절삭 저항을 이용하면, 다양한 절삭 조건을 가지는 밀링가공에서의 절삭력을 예측할 수 있다. 본 절에서는 비절삭 저항을 구하기 위해 사용한 절삭 조건인 Table 2와 다른 절삭 조건을 가지는 경우에 대해, 실험으로 얻어지는 절삭력 및 절삭력 파형과 비절삭 저항으로 예측되는 절삭력 및 절삭력 파형을 비교하였다.

새로운 밀링 가공을 위한 절삭 조건은 Table 5와 같다. 사용된 피삭재, 공구 및 실험장비는 앞 절과 동일하다.

Table 6은 Table 5의 각 실험 조건에 대해 측정된 평균 절삭력과 앞 절에서 구한 비절삭 저항에 의해 예측되는 평균 절삭력을 비교한 표이다. 평균 F_x 는 약 5.4%, 평균 F_y 는 약 7.6% 정도만의 오차를 보이고 있다. Figs. 6-9는 각각 Table 5의 각 실험조건에 대하여 측정된 절삭력 파형과 비절삭 저

Table 5 Cutting conditions for verifying the specific cutting pressure

Test No.	Depth of cut (mm)	Feed rate (mm/min)	Cutting speed (rpm)
6	0.4	267	750
7	0.4	342	750
8	0.4	187	370
9	0.4	267	370

Table 6 Comparison of measured data with predicted values

Test No.	Average F_x		Average F_y	
	Measured	Calculated	Measured	Calculated
6	24.70	23.99	55.86	58.63
7	29.87	27.76	70.95	69.47
8	30.62	29.75	82.94	74.54
9	39.08	35.59	108.43	93.35

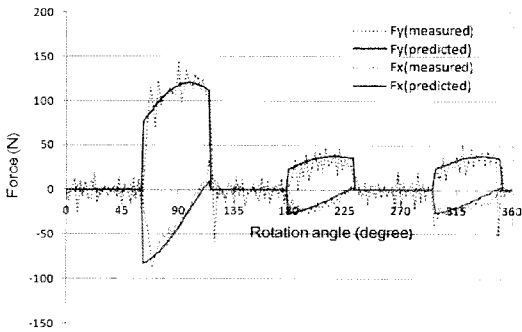


Fig. 6 Comparison of measured and predicted force variation(0.4mm depth of cut, 267mm/min feed rate, 750rpm)

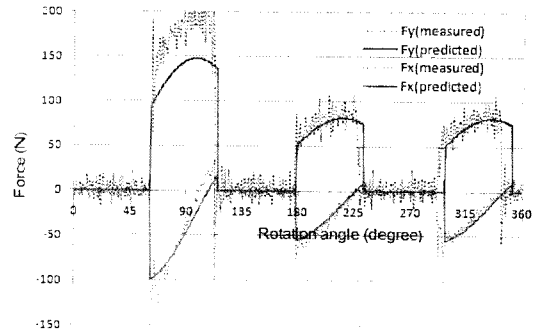


Fig. 9 Comparison of measured and predicted force variation(0.4mm depth of cut, 267mm/min feed rate, 370rpm)

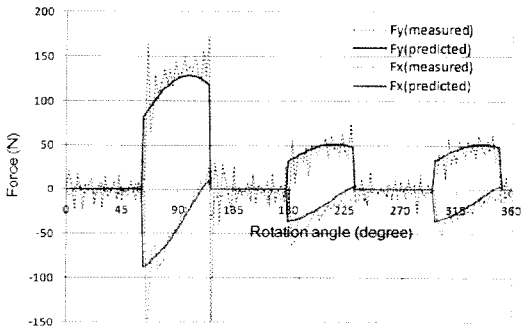


Fig. 7 Comparison of measured and predicted force variation(0.4mm depth of cut, 342mm/min feed rate, 750rpm)

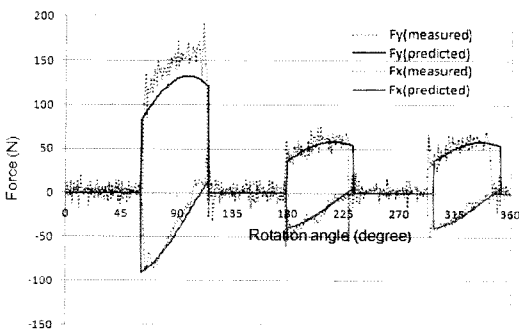


Fig. 8 Comparison of measured and predicted force variation(0.4mm depth of cut, 187mm/min feed rate, 370rpm)

항에 의해 예측되는 절삭력 파형을 나타낸 그림이다. 모든 경우에 있어서 예측된 절삭력 파형은 실험값을 잘 표현한다고 볼 수 있다. 다만, Test No. 6, 7의 경우 절삭력 파형의

변화 경향과 크기가 매우 잘 일치함에 비해 Test No. 8, 9의 경우 절삭력 크기에 있어서 상대적으로 오차가 증가함을 알 수 있는데, 이는 Test No. 8, 9의 절삭속도(370rpm)가 비절삭 저항을 구할 때 사용한 절삭속도(Table 2 참조)와 다르기 때문이다. 또한 절삭속도가 감소하여 절삭력이 증가하였음을 확인할 수 있다. 일반적으로 절삭속도는 절삭력에 큰 영향을 미치므로(Test No. 6, 9를 비교하면 오직 절삭속도만 750rpm에서 370rpm으로 감소하였는데 절삭력은 50-60% 증가함을 알 수 있다) 비절삭저항을 모델링함에 있어서 향후 이를 고려할 수 있는 방안을 찾는 것이 필요할 것이라 사료된다.

6. 결론

본 연구에서는 비절삭 저항을 구하는 실험적 접근 방법과 Oxley의 예측 절삭이론에서 제시한 3차원 절삭력 모델링 방법을 결합하여 비절삭 저항을 새롭게 모델링 하였다. 비절삭 저항을 구하기 위해 사용된 절삭력 데이터는 미변형 칩 두께가 존재하는 구간에서의 평균 절삭력을 사용하였고, 비절삭 저항과 절삭력간의 관계를 모델링함에 있어서 Oxley의 3차원 절삭력 유도식을 사용하였다. 계산된 비절삭 저항을 사용하여 평균 절삭력 및 절삭력 파형을 예측할 수 있으며, 이때 정면 밀링 커터의 주요 공구 경사각(축방향 경사각, 반경 방향 경사각, 리드각)을 고려할 수 있다. 새로운 비절삭 모델링 방법을 검증하기 위해 절삭조건(절입깊이, 이송속도, 절삭속도)을 변화시킨 밀링 가공 실험을 수행하였으며 그 결과 예측된 평균 절삭력 및 절삭력 파형은 실험 결과와 잘 일치함을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2005년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-042-D00022).

참 고 문 헌

- (1) Oxley, P. L. B., 1989, *Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability*, Ellis Horwood, Chichester.
- (2) Young, H. T., Mathew, P., and Oxley, P. L. B., 1994, "Predicting Cutting Forces in Face Milling," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 34, No. 6, pp. 771~783.
- (3) Li, X. P., Nee, A. Y. C., Wong, Y. S., and Zheng, H. Q., 1999, "Theoretical modeling and simulation of milling forces," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 89-90, pp. 266~272.
- (4) Kim, K. W., 2002, "Predicting Cutting Forces in Face Milling with the Orthogonal Machining Theory," *J. of KSPE*, Vol. 19, No. 12, pp. 150~157.
- (5) Fu, H. J., 1984, "A Mechanistic Model for the Prediction of the Force System in Face Milling Operations," *J. of Eng. for Ind., Trans. ASME*, Vol. 106, pp. 81~88.
- (6) Ryu, S.H. and Chu, C.N., 1997, "Prediction of Specific Cutting Pressure in Face Milling Considering Tool Rake Angles," *J. of KSPE*, Vol. 14, No. 2, pp. 169~177.
- (7) Kwon, W. T. and Kim, G. D., 2002, "A Mechanistic Model for 3 Dimensional Cutting Force Prediction Considering Ploughing Force in Face Milling," *Trans. of the KSMTE*, Vol. 11, No. 2, pp. 1~8.
- (8) Lee, S. Y. and Im, Y. M., 2004, "Prediction and Experiments of Cutting Forces in End Milling," *Trans. of the KSMTE*, Vol. 13, No. 4, pp. 9~15.