

정면밀링 절삭력 예측을 위한 이론적 모델링

김국원*, 이우영#, 최성주#

Theoretical Modeling for the Prediction of Face Milling Forces

Kug-Weon Kim*, Woo-Young Lee# and Sung-Joo Choi#

ABSTRACT

In order to design establish automation or optimization of the machining process, predictions of the forces in machining are often needed. In this paper, a theoretical model in face milling is presented based on Oxley's predictive machining theory, where the cutting forces are predicted from input data of fundamental work material properties, tool geometry and cutting conditions without any preliminary cutting experiment. A simulation system for the cutting forces in face milling is developed using the model. Milling experimental tests are conducted to verify the model and the predictive results are compared and discussed with the experimental results.

Key Words : Face milling(정면밀링), Cutting Force(절삭력), Predictive machining theory(예측 절삭이론)

1. 서 론

밀링 가공은 높은 재료 제거율과 우수한 표면 거칠기를 보이는 고효율의 가공법으로써 산업현장 전반에 걸쳐 널리 이용되고 있다. 따라서 오래전부터 밀링 가공에 대한 연구가 활발히 진행되었다.

현재까지 밀링가공에서의 절삭력 예측에 대한 연구는 두 부류로 나눌 수 있다. 첫 번째는 미변형 칩 단면적과 절삭력의 구분력이 비례한다는 가정으로부터 그 비례상수인 비절삭 저항을 약간의 실험으로부터 구하고 이를 이용하여 보다 다양한 절삭조건에서의 절삭력을 예측하는 방법이다. 이 방법은 비교적 간단하고 사용하기가 편리하여 밀링 가공과 같은 복잡한 가공의 절삭력 해석에 매우 유용하게 이용되어 왔다.^[1-4] 그러나 이 방법은 일반적으로 절삭조건 특

히 절삭속도가 크게 바뀌는 경우, 피삭재의 재질 혹은 밀링커터가 바뀌는 경우에는 예측되는 절삭력의 정확도가 떨어지게 되어 비절삭저항을 다시 구해야 하는 단점이 있다. 밀링 절삭력을 예측하는 다른 방법은 2차원 절삭 이론을 바탕으로 3차원 절삭력 및 밀링 절삭력을 예측하는 방법이다. 2차원 절삭이론은 1940년대 초에 제안된 전단면 모델로부터 시작하며, 1960년대 이후에는 미끄럼선장법(slip line method)을 이용한 절삭 해석 연구가 활발히 진행되었고, 최근에는 유한요소법을 이용한 수치해석적 방법이 연구되고 있다. 2차원 절삭이론에 대한 연구 중 주목할 만한 것은 Oxley의 연구이다.^[5] 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 밀링 절삭력 등을 해석하고자 하는 연구^[6-9]가 활발히 진행되었다.

* 순천향대학교 기계공학과 E-mail : kimkug1@sch.ac.kr

한국기술교육대학교 기계정보공학부

본 연구에서는 Oxley의 예측 절삭이론을 이용하여 정면밀링 절삭력 예측을 위한 이론적 모델을 개발하였다. 이 모델은 어떠한 절삭실험 없이 피삭재의 물성치와 절삭조건만으로 정면밀링 절삭력을 예측할 수 있다. 절삭속도, 이송속도 및 절입깊이가 바뀌는 밀링 절삭 실험을 수행하여 절삭력을 측정하였으며 본 모델의 예측값과 비교하였다.

2. 이론적 모델링

2.1 Oxley의 예측 절삭이론

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

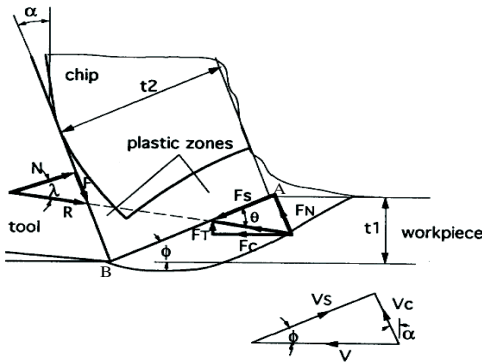


Fig. 1 Orthogonal chip formation model

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, ϕ 를 찾는 일이다. 일단 ϕ 가 알려지면 칩 두께, t_2 와 2차원 절삭력(주분력 F_C , 배분력 F_T)을 결정 할 수 있다.

Fig. 2와 같은 3차원 절삭과정에서의 절삭방향, 이송방향, 반경방향 절삭력 P_1, P_2, P_3 는 다음과 같이 구할 수 있다.

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

여기서 C_S 는 공구 측면각이며, F_C, F_T, F_R 은 $C_S = 0$ 일 때 다음 식과 같이 계산되는 절삭력의 분력들이다.

$$F_C = R \cos(\lambda - \alpha_n)$$

$$F_T = R \sin(\lambda - \alpha_n) \quad (2)$$

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

여기서 λ 는 공구와 칩 사이에서의 마찰각이며, α_n 은 공구의 상면 경사각이다. 또한 η_c 는 칩 유출 각이며 공구의 기울림 각 i 와 같다고 가정한다.

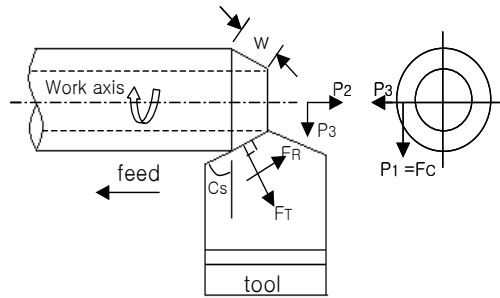


Fig. 2 Model for simple oblique cutting

식(2)는 기울임 각이 존재하는 3차원 절삭에서, F_C, F_T 는 기울임 각 i 와 무관하며 오직 F_R 만 기울임 각에 영향을 받는다고 가정한 것이다. 즉 F_C, F_T 는 기울임 각이 0인 2차원 절삭에서 계산되는 값과 같다는 의미이며, 이는 매우 단순한 가정임에도 불구하고 실험치와 잘 일치하는 결과를 보여주었다.

R 은 전단면, 칩-공구 접촉면에서의 합력이며 다음과 같다.

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

여기서 k_{AB} 는 AB면에서의 전단유동응력이며, t_1 은 미변형 칩 두께, w 는 절삭너비이다. 또한 ϕ 는 전단

각이며 θ 는 전단면과 R 에 의해 형성되는 각이다.

$$w = d / \cos C_s$$

2.2 정면밀링 가공 모델링

밀링가공에서는 절삭과정 중에 커터의 회전과 이송이 동시에 이루어져 절삭면적, 즉 미변형 칩두께가 연속적으로 변하게 된다. 실제 가공은 회전하는 밀링 커터와, 공구대에 의해 이송되는 피삭재에 의해 이루어지나 상대운동의 관점에서 피삭재는 고정되고 밀링커터가 회전과 이송을 동시에 한다고 가정하는 것이다. Fig. 3은 정면밀링 가공을 나타내고 있다.

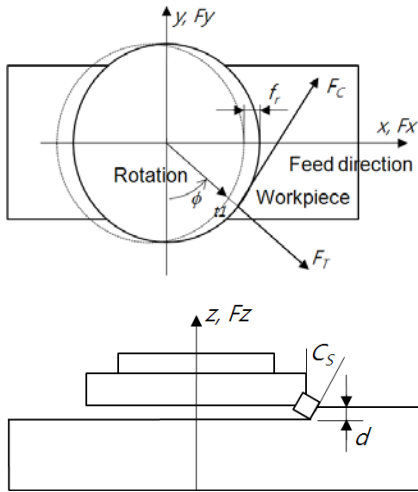


Fig. 3 Face milling process and forces

밀링 커터의 공구각들을 3차원 절삭이론에서 본다면, 커터의 반경방향 경사각, 축방향 경사각, 리드각은 각각 상면 경사각, 기울임 각, 측면각에 해당된다.

커터의 궤적을 고려한 미변형 칩두께 t_1 은 회전위치 ϕ , 회전당 이송량 f_r 로부터 다음 식으로 표시된다.

$$t_1(\phi) = f_t \times \sin\phi \quad (4)$$

여기서 f_t : 인서트의 1회전당 이송량(= f_r /인서트수)

리드각 C_s 에 의해 미변형 칩두께와 절삭너비는 다음과 같이 계산된다.

$$t_1(\phi) = f_t \times \sin\phi \times \cos C_s \quad (5)$$

여기서 d : 절입깊이

순간적으로 변하는 미변형 칩두께에 대해 앞절에서 Oxley 이론에 따라 P_1, P_2, P_3 가 결정되면 x, y, z 좌표계의 절삭력 F_x, F_y, F_z 은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi & 0 \\ \sin\phi & -\cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

인서트의 개수가 여러 개인 경우 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^{N_t} \begin{Bmatrix} F_x(k) \\ F_y(k) \\ F_z(k) \end{Bmatrix} \quad (7)$$

여기서 N_t : 삽입된 인서트의 개수

이상의 내용을 바탕으로 절삭력을 예측하는 프로그램을 작성하였다. 피삭재의 물성치, 절삭조건, 공구형상만을 입력함으로써 정면밀링 가공에서의 절삭력을 계산할 수 있다. Fig. 4는 절삭력 예측 프로그램의 흐름도를 보여준다.

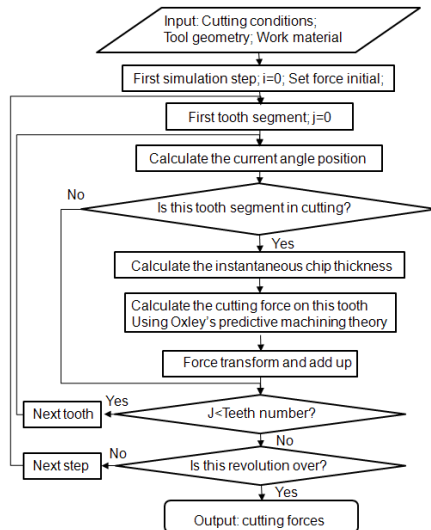


Fig. 4 Flowchart of the simulation system

3. 실험 및 계산치와의 비교

3.1 피삭재 물성치

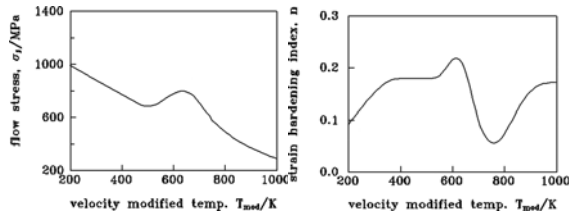
실험에 사용된 피삭재는 0.2% 탄소강(SM20C)이며 탄소강의 상당응력은 일반적으로 다음과 같이 응력-변형률 관계로 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \sigma_1 \epsilon^n \quad (8)$$

여기서 σ 와 ϵ 는 각각 상당응력과 상당변형률을 나타낸다. 응력 σ_1 과 가공경화지수 n 은 온도와 변형률 속도의 함수로 나타낼 수 있으며 이 때 다음과 같이 정의되는 속도-수정 온도 T_{mod} 로 나타낼 수 있다.

$$T_{mod} = T \left\{ 1 - \nu_c \log \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right\} \quad (9)$$

여기서 T 는 온도, $\dot{\epsilon}$ 는 변형률 속도 그리고 ν_c , $\dot{\epsilon}_0$ 는 물질상수이다. 물질상수 ν_c , $\dot{\epsilon}_0$ 는 각각 0.09, 1이다. Fig. 5는 σ_1 과 n 을 속도-수정 온도에 대해 나타낸 그림이다. 그림은 온도가 증가할 때 응력도 증가하는 dynamic strain-ageing(blue brittle)을 명확히 보여주고 있는데, 이는 탄소강의 대표적 성질중의 하나이다.



(a) flow stress (b) strain hardening index

Fig. 5 Flow stress results plotted against velocity modified temperature for 0.2% carbon steel

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

$$C_p [Jkg^{-1}K^{-1}] = 420 + 0.504 T [^{\circ}C] \quad (10)$$

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

$$k_c [Wm^{-1}K^{-1}] = 54.17 - 0.0298 T [^{\circ}C] \quad (11)$$

밀도는 7862 kg/m³이다.

3.2 가공조건

절삭력 측정을 위해 밀링머신에 공구동력계를 설치하고 각 실험조건에 따라 절삭 가공 후 받은 신호를 Amplifier를 통해 증폭하여 DAQ 보드에서 저장하고 디지털 신호화 하여 데이터 값을 확인 하였다. 사용된 피삭재 및 공구는 Table 1과 같다. 사용된 실험장비를 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Workmaterial and tools for experiment

Workmaterial	<ul style="list-style-type: none"> • SM20C • length 100mm, width 45mm
Tool	<ul style="list-style-type: none"> • diameter: 100mm • axial rake angle : 7° • lead angle : 15° • radial rake angle : 0°

Table 2 Equipments for experiment

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

Table 3은 실험에 사용된 절삭조건이다. 밀링커터에 각각 3개의 인서트를 삽입하였고 회전속도, 이송속도 및 절입깊이를 변화시키는 실험조건을 선택하였다. 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 (4)는 다음과 같이 수정된다.

$$t1(\phi) = (f_i + r(i) - r(i+1)) \times \sin\phi \quad (12)$$

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

Table 3 Cutting conditions

Case No.	Depth of cut (mm)	Feed rate (mm/min)	Cutting speed (rpm)
1	0.4	267	370
2	0.4	267	750
3	0.4	342	750
4	0.2	342	750

3.3 결과비교

Figs 6-9 는 각각 Table 3의 각 실험조건에 대하여 측정된 절삭력 파형과 이론적 모델에 의해 예측되는 절삭력 파형을 나타낸 그림이다. 모두 밀링커터 1회전에서의 절삭력 파형을 나타내고 있다. 또한 그림에서는 F_z 에 비해 매우 크며 절삭조건에 민감한 F_x, F_y 에 대해서 각각 실험값과 예측값을 비교하고 있다. Fig. 6, 7은 Table 3의 CASE 1, 2의 조건에 대한 그림으로, 절삭속도가 370 rpm에서 750rpm으로 약 2배 증가한 경우이다. 예측된 절삭력을 보면 회전 속도 증가에 따른 절삭력 감소 현상(절삭력의 최대값이 215N에서 140N으로 감소)을 잘 나타내고 있는데, 이는 본 모델이 변형률속도와 온도의 영향을 고려할 수 있기 때문이다. Fig. 7, 8은 Table 3의 CASE 2, 3의 조건으로 이송속도가 267mm/min에서 342mm/min으로 약 28% 증가한 경우이다. 예측된 절삭력은 이송속도 증가에 따른 절삭력 증가 현상(절삭력의 최대값이 140N에서 154N으로 증가)을 잘 나타내고 있다. Fig. 8, 9는 Table 3의 CASE 3, 4의 조건으로 절입깊이가 0.4mm에서 0.2mm으로 1/2로 감소한 경우이다. 일반적으로 절입깊이의 변화는 절삭력의 변화와 일치하

며, 예측된 절삭력 역시 절삭력의 최대값이 154N에서 77N으로 1/2로 감소한다. 고려된 절삭조건에 대하여 전반적으로 절삭력 크기에 있어서는 어느 정도 오차를 보이고 있지만, 절삭력 파형의 형태, 주기 및 절삭조건 변화에 따른 절삭력 변화를 보면 예측값은 실험값을 잘 추종한다고 볼 수 있다. 특히 본 이론적 모델이 어떠한 예비 절삭 실험이 필요하지 않다는 점을 감안한다면 본 모델은 절삭력 예측에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

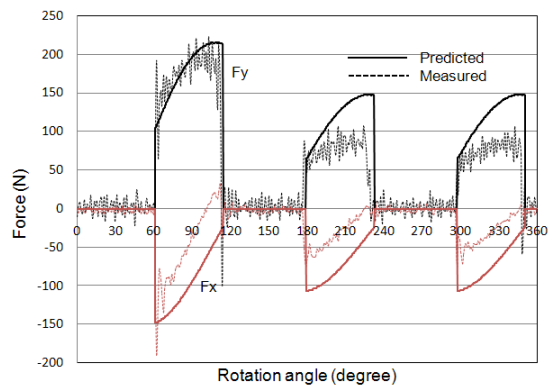


Fig. 6 Predicted and experimental cutting forces with 0.4mm depth of cut, 267mm/min feed rate and 370rpm cutting speed

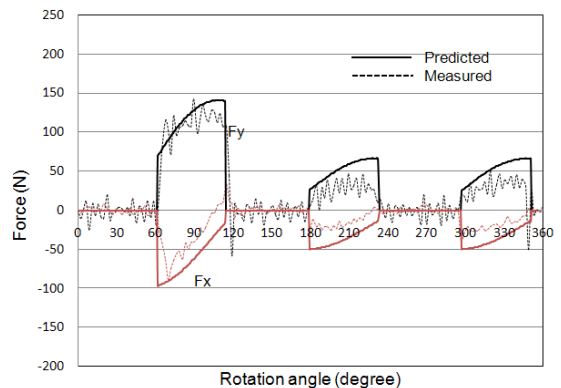


Fig. 7 Predicted and experimental cutting forces with 0.4mm depth of cut, 267mm/min feed rate and 750rpm cutting speed

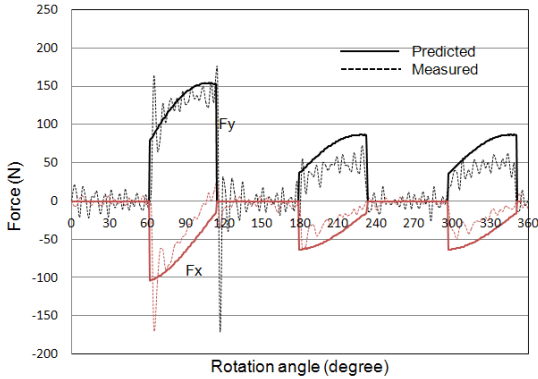


Fig. 8 Predicted and experimental cutting forces with 0.4mm depth of cut, 342mm/min feed rate and 750rpm cutting speed

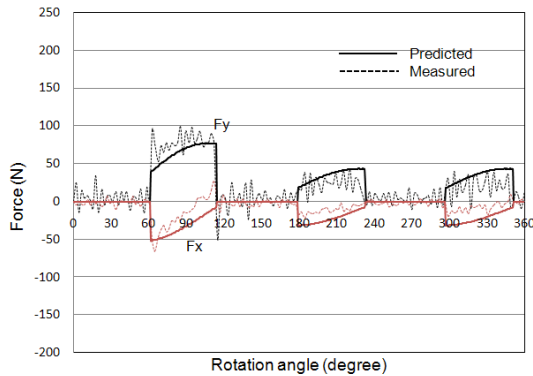


Fig. 9 Predicted and experimental cutting forces with 0.2mm depth of cut, 342mm/min feed rate and 750rpm cutting speed

4. 결 론

본 연구에서는 Oxley의 예측절삭 이론을 기초로 하여 정면밀링 가공에서 절삭력 모델을 개발하였다. 이 모델은 재료의 물성치와 공구 형상 그리고 절삭 조건들을 입력함으로써 어떠한 예비 실험 없이 정면밀링의 절삭력을 예측할 수 있다. 제시된 절삭력 모델을 검증하기 위하여 절삭조건(회전속도, 이송속도, 절입깊이)의 변화에 따른 절삭실험을 수행하였고, 본 모

델로 예측되는 절삭력과 비교하였다. 그 결과 고려된 절삭조건에 대하여 절삭력 크기에 있어서는 어느 정도 오차를 보이고 있지만, 절삭력 파형의 형태, 주기 및 절삭조건의 변화에 따른 절삭력 변화를 보면 예측값은 실험값을 잘 추종한다고 볼 수 있다.

후 기

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

참고문헌

1. Fu, H. J., "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, 1984.
2. 류시형, 주종남, "정면밀링에서 공구경사각을고려한 비절삭저항 예측", 한국정밀공학회지 제14권 제2호, pp. 169~177, 1997.
3. 권원태, 김기대, "정면밀링가공에서 쟁기력을 고려한 3차원 절삭력 모델링," 한국공작기계학회논문집 제11권 제2호, pp. 1~8, 2002.
4. 이신영, 임용목, "엔드밀 가공의 절삭력 예측 및 실험," 한국공작기계학회논문집 제13권 제4호, pp. 9~15, 2004.
5. Oxley, P. L. B., Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability, Ellis Horwood, Chichester, 1989.
6. Young, H.-T., Mathew, P. and Oxley, P.L.B., "Predicting Cutting Forces in Face Milling", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 34, No., 6, pp. 771 ~ 783, 1994.
7. Li, X.P., Nee, A.Y.C., Wong, Y.S. and Zheng, H.Q., "Theoretical modeling and simulation of milling forces", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 89-90, pp. 266~272, 1999.
8. 김국원, "2차원 절삭이론을 이용한 정면밀링 절삭

력 예측,” 한국정밀공학회지, 제19권 제12호, pp. 150~157, 2002.

9. 정성찬, 김국원, “고속 엔드밀 가공에서의 절삭력 예측,” 한국기계가공학회지, 제4권 제4호, pp. 21~27, 2005.