

평균 절삭력을 이용한 절삭계수의 효과적인 보정법

Efficient Calibration of Cutting Force using Average Cutting forces Models

*안일혁¹, #최우천²

*I. H. Ahn¹, #W.C. Choi(wcchoi@korea.ac.kr)²

¹ 고려대학교 기계공학과 대학원, ² 고려대학교 기계공학과

Key words : Cutting force, Cutting Coefficients, Calibration, Flat End milling

1. 서론

절삭 공정의 연구에 있어서 가장 중요한 주제 중에 하나는 정확한 절삭력의 예측이다. 가공 중 공구에서 발생하는 절삭력은 가공 오차를 발생 시키는 가장 중요한 인자이며, 공구의 마모, 공구 수명에 있어서도 중요한 인자로 작용한다. 많은 연구자들은 정확한 절삭력 예측을 위하여 다양한 절삭력 모델을 제안하였다. 그 중에서 가장 널리 받아지고 있는 모델 중에 하나가 바로 평균 절삭력 모델이다. 평균 절삭력 모델은 한 절삭 주기 동안 발생된 절삭력 평균을 이용하여 절삭계수를 구하는 모델로 절삭력을 측정하는 동력계의 동적 반응이나, 가공 중 발생하는 오차들에 대해서 상대적으로 덜 민감하기 때문에, 가장 실용적으로 받아들여지고 있다. 그러나, 평균 절삭력 모델은 절삭력의 예측에 사용되는 절삭력 캘리브레이션에 많은 절삭 실험이 필요하다는 단점을 가지고 있다. 하지만, 많은 장점을 가지고 있기 때문에 평균 절삭력 모델의 실험 수를 줄이는 연구가 필요하다. 본 논문에서는 평균 절삭력 모델의 캘리브레이션을 효과적으로 할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. 제안 모델

2.1 평균 절삭력 모델

평균 절삭력과 절삭계수와의 관계는 다음과 같이 정의한다.[1]

$$\overline{F_x} = \left\{ \frac{N_f \cdot d_a \cdot f_t}{8\pi} [K_r \cos 2\phi - K_t [2\phi - \sin 2\phi]] \right\}_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} \quad (1)$$

$$\overline{F_y} = \left\{ \frac{N_f \cdot d_a \cdot f_t}{8\pi} [K_t [2\phi - \sin 2\phi] + K_r \cos 2\phi] \right\}_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}}$$

$$\overline{F_z} = \left\{ \frac{N_f \cdot d_a \cdot f_t}{2\pi} [-K_a \cos \phi] \right\}_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}}$$

여기에서, $\overline{F_x}, \overline{F_y}, \overline{F_z}$ 평균 절삭력, N_f 날수, d_a 축방 방향 절입깊이, f_t 날당 이송량, K_r, K_t, K_a 접선, 반경, 축방향 절삭계수, ϕ 는 공구 회전각, ϕ_{st}, ϕ_{ex} 절삭 시작각, 절삭 종료각도를 나타낸다. 위 식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} K_t \\ K_r \\ K_a \end{Bmatrix} = T \cdot \begin{Bmatrix} \overline{F_x} \\ \overline{F_y} \\ \overline{F_z} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$T = \frac{N \cdot a \cdot f_t}{8\pi} \begin{bmatrix} C_1 & -C_2 & 0 \\ C_2 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C_1 = \cos(2\phi_{ex}) - \cos(2\phi_{st}) \quad (4)$$

$$C_2 = 2(\phi_{ex} - \phi_{st}) - [\sin(2\phi_{ex}) - \sin(2\phi_{st})]$$

$$C_3 = 4(\cos(\phi_{ex}) - \cos(\phi_{st}))$$

$$\phi_{st} = \cos^{-1}\left(\frac{d_r}{R} - 1\right), \quad \phi_{ex} = \pi \quad (5)$$

여기에서, d_r 은 반경방향 절입 깊이를 나타낸다.

2.2. Calculate calibration coefficients matrix [C]

식(1)를 보면, 각 방향에 평균 절삭력은 d_r, d_a, f_t 의 함수로 표현될 수 있음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \overline{F_x} &= C_{1x} + C_{2x} \left(\frac{d_r}{R}\right) + C_{3x} \left(\frac{d_a}{R}\right) + C_{4x}(f_t) \\ \overline{F_y} &= C_{1y} + C_{2y} \left(\frac{d_r}{R}\right) + C_{3y} \left(\frac{d_a}{R}\right) + C_{4y}(f_t) \\ \overline{F_z} &= C_{1z} + C_{2z} \left(\frac{d_r}{R}\right) + C_{3z} \left(\frac{d_a}{R}\right) + C_{4z}(f_t) \end{aligned} \quad (6)$$

여기에서, C_{ns} ($n=1\sim 4, s=x, y, z$) 는 calibration coefficients 로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \overline{F_{x1}} & \overline{F_{y1}} & \overline{F_{z1}} \\ \overline{F_{x2}} & \overline{F_{y2}} & \overline{F_{z2}} \\ \overline{F_{x3}} & \overline{F_{y3}} & \overline{F_{z3}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \overline{F_{xm}} & \overline{F_{ym}} & \overline{F_{zm}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{d_{r1}}{R} & \frac{d_{a1}}{R} & f_{t1} \\ 1 & \frac{d_{r2}}{R} & \frac{d_{a2}}{R} & f_{t2} \\ 1 & \frac{d_{r3}}{R} & \frac{d_{a3}}{R} & f_{t3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \frac{d_{rm}}{R} & \frac{d_{am}}{R} & f_{tm} \end{bmatrix} \cdot [C] \quad (7)$$

[C] 행렬은 least square method 를 이용하여 구할 수 있다. 구해진 calibration coefficients matrix [C]를 이용하여 각 방향으로의 평균 절삭력은 다음과 같이 예측 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \overline{F_{xp}} \\ \overline{F_{yp}} \\ \overline{F_{zp}} \end{bmatrix} = [C]^T \cdot \begin{Bmatrix} 1 \\ \frac{d_{rp}}{R} \\ \frac{d_{ap}}{R} \\ f_{tp} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

여기에서, d_{rp}, d_{ap}, f_{tp} 는 예측하고 싶은 절삭 조건을 의미한다.

3. 실험

제안된 절삭력 모델을 검증하기 위해서 절삭실험을 수행하였다. 공구는 YG1 사의 직경 12mm, 비틀림각 42o, 경사각 11o 인 2 날 초경 평엔드밀을 사용하였다. 절삭력을 측정하기 위해서 Kistler 사의 9257B 공구 동력계를 사용하여 절삭력을 측정하였으며, 시편은 Vertical type-machining center 를 이용하여 실험하였으며, 가공 조건은 건식 방식으로 하였다. 실험에 사용된 재료는 Al6061 을 사용하였다. 실험 조건은 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Test condition

Test	dr	da	ft	Spindle	Test usage
1	15	10	0.05	1000	Calibration
2	5	10	0.05	1000	
3	10	15	0.05	1000	
4	10	5	0.05	1000	
5	10	10	0.025	1000	
6	10	10	0.1	1000	
7	10	10	0.05	1000	Confirmation
8	10	7.5	0.05	1000	
9	10	10	0.075	1000	

4. 결과 및 고찰

기본적으로 Eq. (6)는 각각의 변수들은 서로 독립적이면, 평균 절삭력(average cutting forces)은 그러한 독립 변수들의 선형식으로 표시할 수 있다 라는 가정에서 식이 유도 되었다. 그래서, calibration coefficients matrix [C]는 각 변수들의 값의 변화에 따른 평균 절삭력의 변화량을 나타내는 행렬이다. 따라서, 그러기 위해서는 각 변수들의 변화량에 따른 평균 절삭력을 구하기 위해서는 최소 4 개의 실험이 필요하게 된다. 이는 미지수 개수와 동일한 회수로 가장 이상적인 실험이라고 할 수 있다. 그러나, 이런 경우에는 [C]를 구하기 위해서 사용되는 d_r, d_w, f_i 범위가 좁아지게 되고, 좁은 범위에서의 절삭 조건에 대한 예측만이 가능하게 된다. 본 논문에서는 예측 가능한 절삭 조건의 범위를 가능한 넓게 하기 위해서 6 개의 실험을 통하여 [C]를 구하였다. 구한 [C]는 다음과 같다.

$$[C] = \begin{bmatrix} 38.16 & -306.42 & 85.01 \\ -105.62 & 172.68 & -49.27 \\ 39.99 & 231.92 & -49.53 \\ 971.45 & 2694.42 & -770.39 \end{bmatrix} \quad (9)$$

행렬 [C]를 이용하여 Table 1의 검증용 실험 결과와 비교하여 다음에 나타내었다.

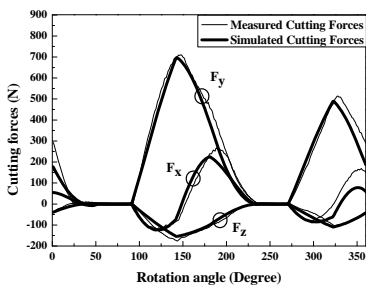


Fig.1 The comparison between predicted and simulated cutting forces in test 7

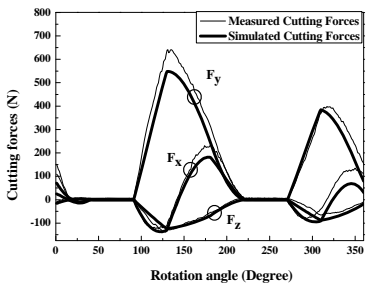


Fig. 2 The comparison between predicted and simulated cutting forces in test 8

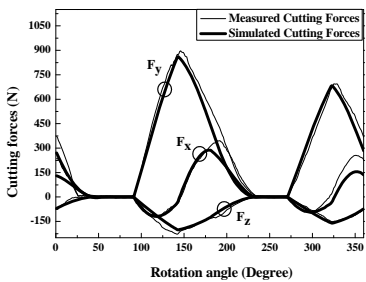


Fig. 3The comparison between predicted and simulated cutting forces in test 9

여기에서, 런아웃 계수들은 Wan[2]에서 사용한 모델을 사용하여 계수 값들을 구하여 사용하였다. Fig. 1~3에서 보이

는 것과 같이 일치하는 결과를 보여주고 있다. 그러나, d_r 과 평균 절삭력과의 관계가 비선형적이기 때문에 여기에서 선형 구간만을 이용하여 [C]를 구하였기 때문에 캘리브레이션을 할 수 있는 구간의 제약이 따른다는 단점이 있다. 또한, 세개의 변수가 모두 변할 경우 상당히 큰 오차를 발생시키기도 한다. 이는 각 방향의 오차들이 각각 평균 절삭력에 영향을 주어서 더 큰 오차를 만드는 것으로 판단된다. 이 방법의 이용은 제약이 존재하지만, 간단한 실험 계획만으로도 간단하게 캘리브레이션을 할 수 있다는 장점이 있다.

5. 결론

본 논문에서는 d_r, d_w, f_i 과 평균 절삭력과의 관계를 이용하여 캘리브레이션 행렬을 구하였고, 이를 이용하여 실험을 통하여 얻은 절삭력과 캘리브레이션 행렬을 이용하여 예측한 결과와 비교하여 보았다. 결과는 잘 일치하는 경향을 보여주었다. 그러나, 본 실험에서 구한 캘리브레이션 행렬은 반경방향 절입 깊이와 평균 절삭력의 비선형 관계를 선형구간으로만 제한하여 구하였기 때문에 반경방향 절입 깊이에 대한 제한이 존재하면 이를 개선하기 위한 차후에 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Y. Altintas, Manufacturing automation, Cambridge University Press, 2000.
2. M. Wan, W.H. Zhang, G.H. Qin, G Tan., Efficient Calibration of Instantaneous cutting force coefficients and runout parameters for genera end milling, International Journal of Machine Tools and manufacture, 47,1767-1776,2007..