

# Monte-Carlo 시뮬레이션을 이용한 캘리브레이션 데이터의 오차해석 Error Analysis of Calibration Data using Monte-Carlo Simulation

\*안일혁<sup>1</sup>, 황지홍<sup>2</sup>, #최우천<sup>3</sup>

\*I. L. Ahn<sup>1</sup>, J.H. Hwang<sup>2</sup>, #W.C. Choi.(wcchoi@korea.ac.kr)<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 고려대학교 기계공학과, <sup>2</sup> 서울산업대학교 제품설계금형공학과, <sup>3</sup> 고려대학교 기계공학과

Key words : Monte-Carlo simulation, Calibration data, Cutting forces

## 1. 서론

절삭력 예측은 절삭 과정에서 발생하는 다양한 현상들과 절삭 결과물에 대하여 예측 가능하게 한다. 따라서, 절삭력 예측은 절삭 연구에 있어서 가장 중요한 주제라고 할 수 있다. 이러한 절삭력 예측은 절삭계수를 캘리브레이션 함으로써 가능하다. 이전의 절삭력의 예측은 절삭력 모델의 개발을 함으로써 이루어져 왔다[1-4]. 그러나, 절삭력 예측의 정확성은 절삭력 모델의 정확성 뿐만 아니라 캘리브레이션 데이터에 포함되어 있는 오차에 따라서 결정이 된다. 그러므로, 절삭력 예측의 정확성 평가를 위해서는 캘리브레이션 과정에 사용되어 있는 데이터에 포함되어 있는 오차를 분석할 필요가 있다.

본 논문에서는 이러한 캘리브레이션 데이터의 오차를 Monte-Carlo 시뮬레이션을 이용하여 오차 분석을 수행하였다.

## 2. 오차 해석

### 2.1 절삭계수들에 대한 통계 해석

캘리브레이션 데이터에 포함되어 있는 오차는 결국 절삭계수의 오차로 나타나게 되는데, Fig. 1은 절삭 실험을 통하여 얻은 절삭력을 평균절삭력 모델을 이용하여 절삭계수를 구한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 1에 보여지는 것과 같이 동일 평균 미변형 칩 두께(AUCT, average uncut chip thickness)에서의 절삭계수 값은 동일한 값을 가지는 것이 아니라 일정한 범위에 존재하는 것을 알 수가 있다. 이와 같이 동일한 AUCT에 대하여 절삭계수들이 어떠한 분포를 따르는 지를 알아 보기 위하여 법선방향, 접선방향의 절삭계수들을 신뢰도 0.05로 정규분포에 대한  $\chi^2$ -goodness-of-fit 테스트를 수행하였다. 접선방향에 대한  $\chi^2_{0.05}(4)$ 는 8.4로 계산되었으면, 이론적인 4 자유도  $\chi^2_{0.05}(4)$  값이 9.49보다 작은 값을 보여주고 있었다. 이는 동일 AUCT의 접선방향 절삭계수는 정규분포를 따른다는 것을 의미하면, 법선방향 절삭계수도 동일하게 정규 분포를 따르는 것으로 나타났다.

일반적인 경우, 표본수가 30이 넘을 경우 표본 평균과 표준편차를 모평균( $\mu$ )과 모표준편차( $\sigma$ )로 생각할 수 있는데, 따라서, Table 1에는 실험의 통하여 구한 절삭계수들의 각각의 AUCT에서의 각 방향 절삭계수들의 평균과 표준편차를 보여주고 있는데, 이 값들은 모집단의 통계치로 사용이 가능하다. Fig. 2는 AUCT 변화에 따른  $3\sigma/\mu$ 의 관계를 보여주고 있다. 일정 AUCT에서의 절삭계수는 모평균( $\mu$ )를 기준으로  $\pm 3\sigma$  존재할 확률은 정규분포를 따르기 때문에 99.99%가 된다. 이는 동일 AUCT에서 실험을 하였을 경우 절삭계수는  $3\sigma/\mu$  이내의 오차를 가질 확률이 99.99%임을 의미한다.

### 2.2 Monte-Carlo 시뮬레이션

일반적인 캘리브레이션 곡선은 식(1)과 같이 표현이 되는데, 이를 Monte-Carlo 시뮬레이션에 이용하기 위해서는 무차원화된 식으로 바꾸어야만 한다. 식(2)는 무차원화된 캘리브레이션 곡선을 나타낸다. Fig. 3은 무차원화된 캘리브레이션 곡선과 최소, 최대 AUCT에서의  $3\sigma/\mu$  값을

Table 1 Population mean and standard derivation in population

$K_t$				
AUCT	$\mu$	$\sigma$	tests	$3\sigma/\mu$
0.01	2459	263	40	0.565
0.03	1687	234	82	0.416
0.05	1402	84	40	0.180
0.07	1258	65	40	0.155
$K_r$				
AUCT	$\mu$	$\sigma$	tests	$3\sigma/\mu$
0.01	1397	415	40	0.891
0.03	844	151	82	0.537
0.05	613	86	40	0.421
0.07	504	60	40	0.357

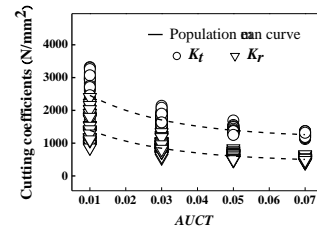


Fig. 1 Scattering of the cutting coefficients with AUCT

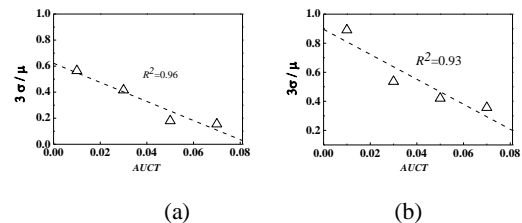


Fig. 2 Variation of  $3\sigma/\mu$  with AUCTs in a)  $K_t$ , b)  $K_r$

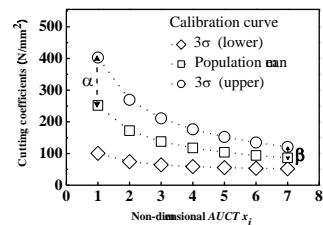


Fig. 3 Definitions of the parameters of  $\alpha$  and  $\beta$

$$K_q = K_i \cdot (AUCT)^{-m_i} \quad (1)$$

$$K_q = K_{si} \cdot (x_i)^{-m_i} \quad (2)$$

$$x_i = 1 \sim N, \quad K_{si} = K_i \cdot \left( \frac{AUCT_{max} - AUCT_{min}}{N} \right)^{-m_i}$$

$$MPE(\alpha, \alpha/\beta, n) = A_1 + A_2 \cdot (\alpha) + A_3 \cdot e^{-A_4 \cdot \alpha/\beta} \cdot e^{-A_5 \cdot n} \quad (3)$$

나타내는 파라메타인  $\alpha, \beta$  값을 나타내었다. Fig. 3,  $\alpha, \beta$

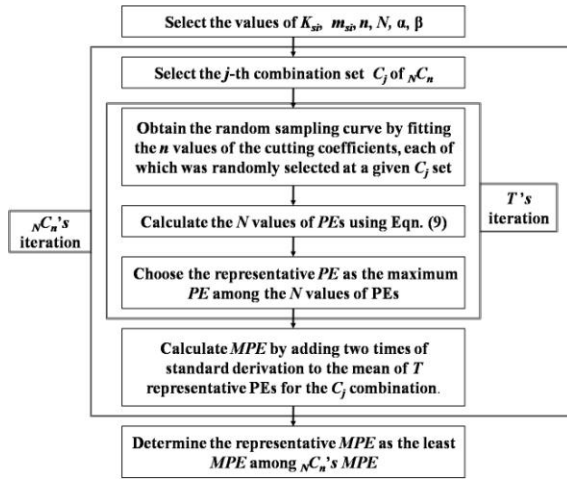


Fig. 4 Monte-Carlo simulation flow chart

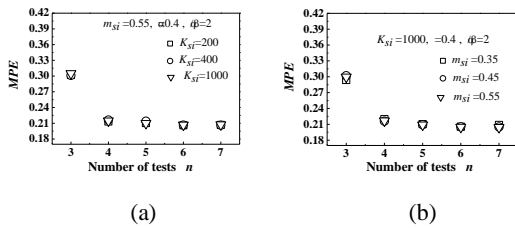


Fig. 5 Variation of MPE with (a)  $K_{sj}$  and (b)  $m_{si}$

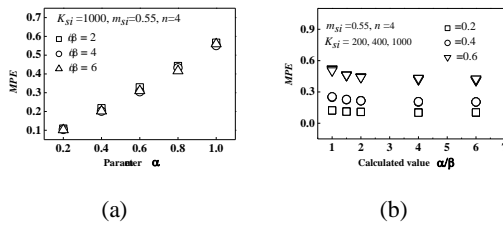


Fig. 6 Variation of MPE with  $\alpha$  and  $\alpha\beta$

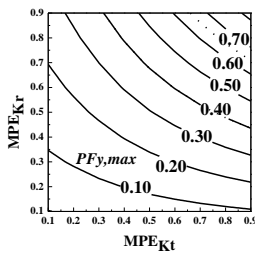


Fig. 7 Distribution of  $PF_{y,max}$  with  $AUCT=0.02mm$  ( $d_r/R=0.5$ ,  $RPM=2000rpm$ ,  $f_d=160mm/min$ )

와 식(2)를 이용하여 Monte-Carlo 시뮬레이션을 수행하였다.

### 3. 결과 및 토의

Monte-Carlo 시뮬레이션을 통하여 얻은 MPE와 입력 파라미터들과의 관계를 Fig. 5과 6에 나타내었다. 그림에서 보여지듯이 캘리브레이션 곡선의 특징을 나타내는 파라미터들은 MPE 값에 영향을 주고 있지 못함을 알 수 있으면,  $\alpha$ ,  $\beta$ 와 실험  $n$ 은 MPE에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 이러한 관계를 바탕으로 MPE와 입력 파라미터들 사이의 관계를 식(3)과 같은 제안하였다. 식(3)에서 파라미터들은  $A_1=-0.0453$ ,  $A_2=0.6188$ ,  $A_3=51.4246$ ,  $A_4=-0.0637$  and  $A_5=2.0540$  값을 나타내었다. 이 식은 법선, 접선 방향 절삭계수들에 대한  $\alpha$ 와  $\beta$  값이 주어지면, 각 방향에 대한 MPE 값을 얻을 수 있게 해준다. 각 방향의 MPE 값은 캘리브레이션 곡선

에서 발생할 수 있는 최대 오차로 실제 절삭력에서의 오차를 나타내지는 않는다. 식(4)와(5)는 MPE와  $y$  방향 절삭력에서의 퍼센트 오차를 나타낸다. 다양한 MPE에 대한  $y$  방향 최대 절삭력의 퍼센트 오차를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에 보이듯이 각 방향의 MPE 값에 따라서  $y$  방향 최대 절삭력에서의 오차는 다른 경향성을 보여줌을 알 수 있다.

다시 말해서 MPE에 영향을 미치는  $\alpha$ ,  $\beta$ 와 실험  $n$ 에 따라서  $y$  방향 최대 절삭력의 퍼센트 오차는 달라지게 된다. 이는 절삭 실험을 한 공작기계나 공구에 의한 불확실성을 나타내는  $\alpha$ ,  $\beta$ 와 캘리브레이션 실험 수  $n$ 에 따라서 예측 절삭력의 오차의 크기가 결정된다고 할 수 있다.

### 4. 결론

Monte-Carlo 시뮬레이션을 통하여 캘리브레이션 데이터에 존재하는 오차로 인한 캘리브레이션 곡선의 왜곡으로 인한 예측 절삭력 오차를 평가하였으면, Monte-Carlo 시뮬레이션이 오차가 포함되어 있지 못한 절삭 실험을 할 수 없는 상황에서 절삭계수에서 발생 가능한 오차를 시뮬레이션할 수 있는 방법으로 사용 가능성을 보여주었다.

### 참고문헌

1. M. Wan, W.H. Zhang, J.W. Dang, Y. Yang, A Novel Cutting Force modeling Method for Cylindrical End Milling, Applied Mathematical Modelling, **34**, 823-836, 2010.
2. W.S. Yun, and D.W. Cho, Accurate 3D cutting force prediction using cutting-condition-independent coefficients in end milling, International Journal of Machine Tools and manufacture, **41**, 463-478, 2001.
3. M. Asad, T. Mabrouki and F.F. Rigal, Finite-Element-Based Hybrid Dynamic Cutting Model for Aluminium Alloy Milling, Proc. IMechE Part B: Engineering Manufacture, **224**, 1-13, 2009.
4. E. Budak, Analytical Models for High Performance Milling, Part I: Cutting Forces, Structural Deformations and Tolerance Integrity, International Journal of Machine Tools and Manufacture, **45**, 1478-1488, 2005.