

◆특집◆ 선삭 가공 공정의 가공 정밀도 향상

선삭가공에서 공작물의 형상오차 예측에 관한 연구

이문재*, 김동현**, 이춘만#

A Study on the Geometric Error Prediction of Workpiece in Turning

Mun-Jae Lee*, Dong-Hyeon Kim**, Choon-Man Lee#

(Received 21 November 2011; received in revised form 5 December 2011; accepted 6 December 2011)

ABSTRACT

Any relative deformation between the cutting tool and the workpiece at machining point results directly in geometric and dimensional errors. The sources of relative deformations between the cutting tool and the workpiece at the contact point may be due to vibration, thermal deformation and cutting forces. In this paper, geometric error prediction of workpiece in turning has been investigated. To reach this goal, turning experiments are carried out according to selected cutting conditions. The variable cutting conditions are cutting speed, depth of cut and feed rate. The results will be useful as a guidance to select cutting conditions to improve the geometrical accuracy.

Key Words : Geometric Error(형상 오차), Cutting Force(절삭력), Turning(선삭가공), Shape Accuracy(형상 정밀도), Relative Deformation(상대 변형량)

1. 서 론

최근의 기계 가공분야에서 부품소재 산업은 복잡하고 다양한 형상의 가공품을 필요로 하고 있다. 따라서 고속·고정도·고능률화에 대한 요구가 증대되는 추세이다. 이에 따라 최종 가공물의 가공 오차의 원인을 파악하고 분석하는 것이 중요해지고 있다. 공작물의 가공정밀도에 직접적인 영향을 미치는 요소로는 절삭속도, 이

송속도, 절삭깊이 등이 있다. 따라서 가공조건의 변화에 따른 가공성의 평가가 필요하며 절삭가공 과정 중 발생되는 절삭력, chip 형상, 절삭온도, 공구마모 등의 방법에 의해 가공성을 평가하기 위한 연구가 진행되고 있다^[1-6]. 최근에는 유한요소방법을 이용하여 시편과 공구에서의 온도분포, 절삭력과 잔류응력 등을 예측하는 연구가 진행되고 있다^[7-10]. 하지만 가공정밀도에 직접적인 영향을 미치는 공작물 소재와 공구와의 상대적 변형량 예측에 대한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 선행연구^[10]에서 기 수행된 Al6061 소재의 선삭가공 실험결과를 참고하고, 실험계획법을 이용하여 가공성을 향상시킬 수 있는 최적 가공조건을 선정하고자 한다. 그리고 형상오차(shape error)를 예측할

* 두산엔진(주)

** 창원대학교 기계설계공학과

교신저자 : 창원대학교 기계설계공학과

E-mail : cmlee@changwon.ac.kr

수 있는 실험식을 제시하여 공구와 공작물의 상대적 변형량을 예측하고자 한다. 또한 Al6061 소재에 대해 15°의 가공각도를 추가하여 실험을 수행하였다.

2. 실험계획법

2.1 반응표면설계

실험배치를 위하여 특성치에 대한 각 인자들의 영향력을 분석하여 주요 인자를 선택할 필요가 있다. 본 실험에서는 요인선정을 위해 일반적으로 가장 많이 사용하는 방법인 2-level의 일부 실시 설계를 이용하였다. 요인 실험에서는 인자의 효과와 상호작용을 추정할 수 있다는 특징이 있다. 실험 설계는 3개의 인자인 절삭속도, 이송량, 절삭깊이에 대해 2-level 일부 실시 설계를 이용하였으며 특성치는 형상오차로 하였다. Table 1은 일부 실시 설계에 대한 실험결과를 나타낸다.

형상오차에 미치는 각 인자들의 영향을 분석하기 위해 MINITAB을 이용하여 실험결과를 분석하였다. 추정하고자하는 효과는 2차 교호작용까지로 하였으며 유의수준은 95%로 하였다. Fig. 1과 2는 실험 결과를 주효과와 교호작용의 그래프로 나타낸 것이다. 주효과는 절삭깊이가 특성치에 가장 큰 영향을 미치고 절삭속도, 이송량이 그 다음으로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 교호작용에 의한 영향은 없는 것으로 나타났다.

Table 1 Result of experiments for fractional factorial design

Run order	Cutting speed [m/min]	Feed rate [mm/rev]	Depth of cut [mm]	Shape error [μ m]
1	50	0.05	0.5	75.8
2	50	0.05	1	86.5
3	50	0.15	0.5	37.4
4	50	0.15	1	88.1
5	150	0.05	0.5	28.5
6	150	0.05	1	80.8
7	150	0.15	0.5	20.9
8	150	0.15	1	49.7

따라서 본 연구에서는 2-level 일부 실시 실험을 통해 절삭깊이, 절삭속도, 이송량의 3개 인자를 형상오차에 영향을 미치는 인자로 선정하고 반응표면실험을 설계하였다. 반응표면 실험방법은 반응변수와 설명변수들 사이의 관계를 실험이나 시뮬레이션을 통하여 다항식으로 구한 다음 반응변수의 값을 최대 또는 최소로 하는 설명 변수들의 수준 조합을 찾아내는 것으로서, 통계적으로 어떤 특성을 최적화하는 방법의 일종이다.

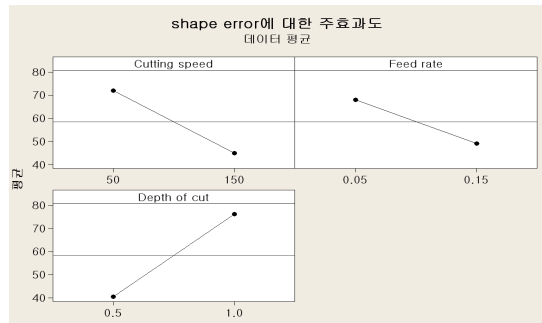


Fig. 1 Main effects plot for shape error

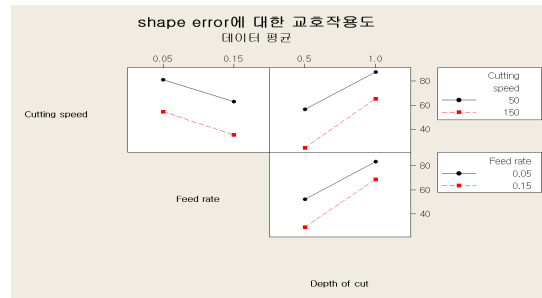


Fig. 2 Interaction plot for shape error

본 논문에서는 요인선정실험을 통하여 구한 절삭깊이, 절삭속도, 이송량의 3개 인자가 형상오차에 미치는 영향에 대한 반응조건 최적화 규명을 위하여 반응표면 실험을 수행하였다.

반응표면실험 설계를 위하여 중심합성법을 사용하였다. Table 2는 각 인자 및 인자의 수준을 나타내며 Table 3은 선삭가공에서의 실험결과를 보여주고 있다.

반응표면실험의 분석을 위해 MINITAB을 사용하였다. Table 3의 실험 결과를 이용하여 반응표면 모형을 구축한 후, 모형 적합을 이용하여 반응 값에 대한 모형

의 추정식을 구하였다.

Fig. 3은 반응표면실험에 의한 각 인자의 경향 분석을 위한 잔차도를 나타낸다. 잔차도에서 정규 확률도는 점들이 일직선에 가깝게 분포하면 정규분포이다. 정규분포이면 실험이 제대로 수행되었다는 의미이다. 잔차의 히스토그램은 종모양에 가까운 정규분포를 보이면 회귀모형이 맞다고 할 수 있다. 잔차 대 적합지는 어떤 특성이 없으면, 잔차의 분산이 상수값을 갖는다고 볼 수 있다. 잔차 대 데이터 순서의 경우 그림이 어떤 특성이 없으면, 잔차들이 서로 독립이라고 할 수 있다.

Table 2 Design factors and levels of experiments

Factor	Level	
	Low	High
Cutting speed [m/min]	50	150
Feed rate [mm/rev]	0.05	0.15
Depth of cut [mm]	0.5	1

선삭가공시 형상오차에 대한 반응표면 모형은 유의하지 않은 것으로 나타난 절삭속도×이송량, 절삭속도×절삭깊이, 이송량×절삭깊이의 교호작용과 절삭속도×절삭속도의 제곱 항을 풀링시켜 구하였다.

Table 3 Result of experiments for central composite design

Run order	Cutting speed [m/min]	Feed rate [mm/rev]	Depth of cut [mm]	Shape error [μ m]
1	150	0.15	0.50	20.9
2	150	0.05	0.50	28.5
3	100	0.10	1.17	83.4
4	100	0.18	0.75	40.1
5	184	0.10	0.75	35.4
6	100	0.10	0.75	68.4
7	100	0.10	0.75	63.2
8	50	0.05	1.00	86.5
9	150	0.15	1.00	49.7
10	16	0.10	0.75	90.1
11	50	0.05	0.50	75.8
12	50	0.15	1.00	88.1
13	150	0.05	1.00	80.8
14	100	0.10	0.33	38.4

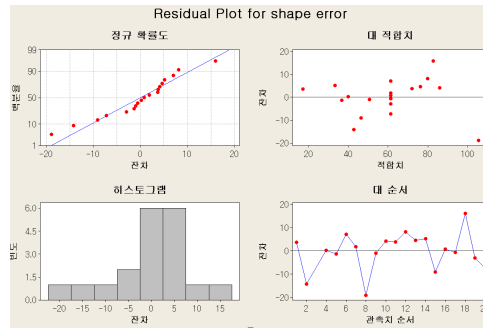


Fig. 3 Residual plot for shape error

반응표면 모형에 대한 적합성을 평가하기 위해 잔차분석과 분산분석, 결정계수를 이용하였다. 잔차분석 결과 정규분포를 잘 따르고, 분산분석결과 적합성 결여가 0.147이므로 선택한 회귀모형은 적합한 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 선삭가공시 절삭속도, 이송량, 절삭깊이에 따른 형상오차를 나타내는 2차 다항식을 최소자승법을 이용하여 구하면 식 (1)과 같다.

$$S = 62.7 - 0.29C - 392.25F + 95.32D + 685.56F^2 - 20.94D^2 \quad (1)$$

여기서, S: Shape error, C: Cutting speed, F: Feed rate, D: Depth of cut이다.

실험식을 이용하여 가공 조건들이 형상오차에 미치는 경향을 파악할 수 있으며, 정확한 형상 오차값을 예측하기 위해서는 보다 많은 실험이 필요할 것으로 판단된다. 그 이유는 실험 시 가공재료의 결함, 선반의 진동 등 미처 제어하지 못한 인자들과 측정 시 발생하는 오차에 의한 영향이 발생하기 때문이다.

2.3 최적 조건 선정

추정된 회귀모형을 이용하여 선삭가공에서 형상오차를 최소화 할 수 있는 최적 조건을 구하고, 개별 인자들이 특성치에 미치는 영향을 분석하였다.

Fig. 4는 인자들의 수준을 변화시켰을 때 얻을 수 있는 반응변수의 최적값과 그때의 개별인자들의 수준을 나타낸 것이다. D는 합성된 만족도를 나타낸다. 이는 반응변수가 여러 개인 경우 각 반응 변수의 개별만

속도에 대한 기하 평균이다. 따라서 D가 1에 가까울수록 반응변수가 추구하는 특성을 만족 한다. 분석결과 절삭속도 146m/min, 이송속도 0.18mm/rev, 절삭깊이 0.33mm에서 가장 큰 합성된 만족도 1을 만족한다. 따라서 선삭가공에서 형상오차를 고려할 때 정밀도를 극대화 하는 최적 수준 조합은 절삭속도 146m/min, 이송속도 0.18mm/rev, 절삭깊이 0.33mm이다. Fig. 5는 형상오차가 특정 범위 이내로 들어가는 자공조건의 범위를 구한 등고선도를 나타낸 것으로 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이 중 하나가 특정 수준으로 고정되고 나머지 인자가 변할 때 형상오차 20 μ m 이하로 나타나는 절삭조건의 범위를 나타내고 있다.

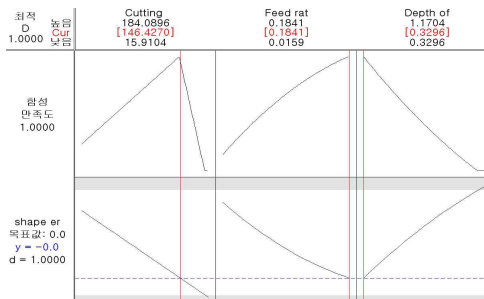
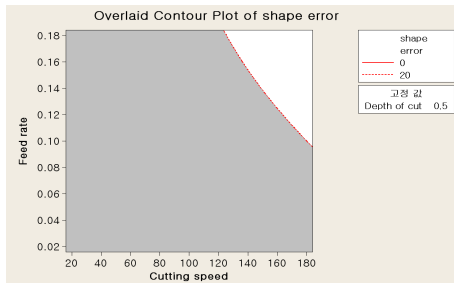
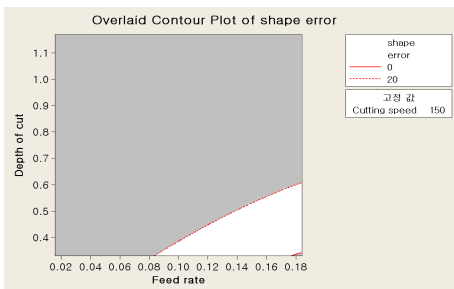


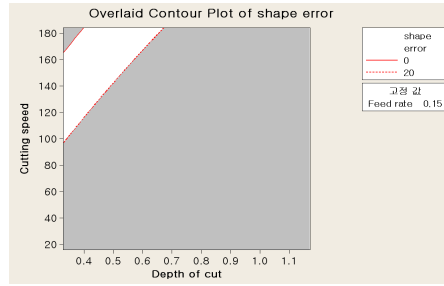
Fig. 4 Optimal cutting condition plot in turning



(a) Depth of cut = 0.5mm



(b) Cutting speed = 150m/min



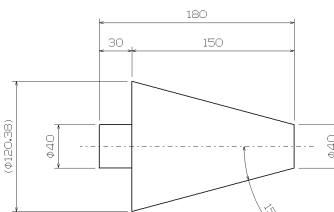
(c) Feed rate = 0.15mm/rev

Fig. 5 Overlaid contour plot in turning

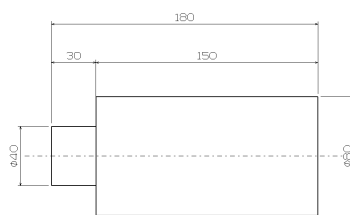
일반적인 가공작업에서는 특정 조건을 고정해야 하는 경우가 종종 발생한다. 따라서 이 경우 인자들의 특정 수준 조합에 따라 가공성이 크게 달라지는 것으로 나타나므로 인자들의 수준조합이 중요하다.

3. 실험장치 및 방법

본 논문에서는 Al6061 재질의 원통외경 선삭실험을 수행하였다. 하지만 재질과 형상에 대한 제한이 있으므로 보다 다양한 재질과 형상의 추가 실험이 필요할 것으로 판단된다. 이에 본 절에서는 Al6061 소재에 대해 15°의 테이퍼각을 추가하여 간단한 기초 실험을 수행하였다.

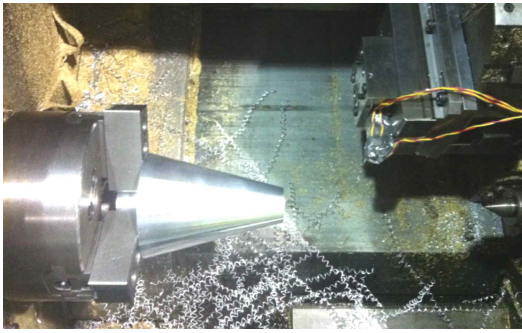


(a) Cutting angle 15°

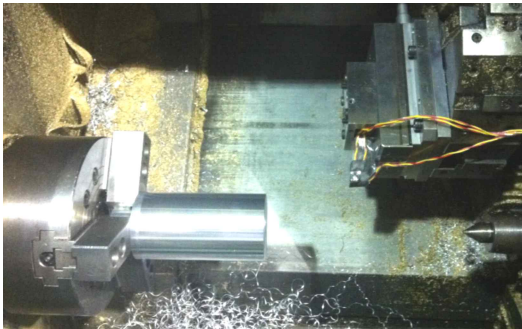


(b) Cutting angle 0°

Fig. 6 Dimension of the specimen



(a) Cutting angle 15°



(b) Cutting angle 0°

Fig. 7 Specimen set up

실험에 사용된 시편의 재질은 Al6061이며 Fig. 6과 같은 형상과 치수로 시편을 가공하여 사용하였다. Fig. 7과 같이 시편을 장착하여 실험하였다.

알루미늄 전용 절삭공구로 노즈반경이 0.4mm인 인서트(CCGT 120404 FL K10, TaeguTek)를 사용하였다. 공구홀더는 외경 선삭용(SCLCL 2525 M1, TaeguTek)을 사용하였다.

4. 실험결과 및 토론

제어 인자는 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이, 가공각도이며 Table 3은 실험배치를 나타낸다.

Table 4는 실험조건에 따른 주분력, 배분력, 이송분력 실험결과를 나타낸다. 형상오차의 경향을 알아보기 위한 기초실험으로 대체적으로 테이퍼각이 0°인 원통외경 선삭에 비해 테이퍼각이 15°인 테이퍼형태의 선삭에서 절삭력이 높게 나타났다. 주어진 가공조건

내에서 절삭속도 200m/min, 이송속도 0.3mm/rev, 절삭깊이 1mm, 테이퍼각 0°에서 절삭력이 가장 작게 측정되었고, 절삭속도 200m/min, 이송속도 0.3mm/rev, 절삭깊이 2mm, 테이퍼각 15°에서 절삭력이 가장 크게 측정되었다.

Fig. 8은 온도측정부의 최대온도 그래프를 나타낸다. 온도는 앞선 실험에서와 같이 3지점의 온도를 측정하였다. 온도변화는 평형의 원통과 테이퍼형태의 시편에서 동일하게 나타났으며, 절삭 깊이가 커질수록 절삭온도가 높아지는 것을 확인하였다.

Table 3 Experiment condition

Run order	Cutting conditions			
	Angle[°]	Cutting speed [m/min]	Feed rate [mm/rev]	Depth of cut [mm]
1	0	100	0.1	2
2	0	200	0.3	1
3	0	200	0.3	2
4	15	100	0.1	2
5	15	200	0.3	1
6	15	200	0.3	2

Table 4 Experimental results for cutting forces

No.	Cutting force [N]		
	Fx	Fy	Fz
1	173.1	4.1	67.5
2	60.2	5.1	24.8
3	254.2	18.5	65.3
4	175.4	10.8	68.9
5	201.6	11.9	42.9
6	368.4	30.5	76.3

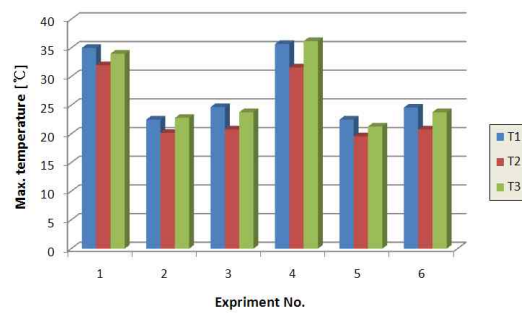


Fig. 8 Maximum temperature for each cutting conditions

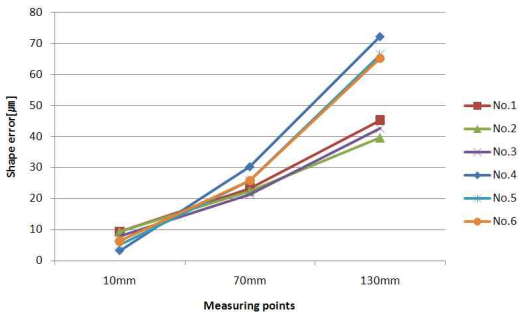


Fig. 9 Shape error

상대적 변형량은 접촉식 3차원 형상측정기를 사용하여 측정하였다. 가공 시작점에서부터 각각 10mm, 70mm, 130mm의 3지점의 지름을 측정한 다음 절삭 깊이에서의 오차를 산출하였다.

Fig. 9는 각 측정지점에서 형상오차를 나타낸다. 0에 가까울수록 정밀한 가공이 수행된 것이다. 형상 오차는 10mm지점에서부터 꾸준히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 가장 큰 온도상승이 있었던 실험 순서 1번과 4번에서 각각 가장 큰 오차가 발생한 것을 확인하였으며, 이는 앞선 실험 결과와 마찬가지로 가공이 진행될수록 절삭온도가 상승하여 열변형이 증가하는 것으로 판단된다. 또한 15°의 각도를 준 테이퍼형상의 시편이 일반 원통시편보다 더 큰 오차가 발생하였다. 이는 추후 더욱 다양한 시편의 실험을 통해 가장 적합한 오차 보정 및 가공조건 선정이 필요할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 Al6061 소재의 선삭가공 실험결과를 바탕으로 실험계획법을 이용하여 가공성을 향상시킬 수 있는 최적 조건을 선정하였다. 또한 Al6061 소재에 대해 15° 테이퍼각을 추가하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 가공조건의 범위에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 반응표면 분석을 통하여 가공조건에 따른 형상오차 실험식을 제시하였다. 제어인자들의 특정 수준 조합에 따라 형상오차가 달라지는 것으로 나타났다.

- 추정한 회귀모형을 이용하여 선삭가공에서 형상 오차를 최소화 할 수 있는 최적 조건을 구하였다. 주어진 조건에서 형상오차를 고려할 때 정밀도를 향상하는 최적 수준 조합은 절삭속도 146m/min, 이송속도 0.18mm/rev, 절삭깊이 0.33mm이다.
- 주어진 가공조건 내에서 절삭속도 200m/min, 이송속도 0.3mm/rev, 절삭깊이 1mm, 테이퍼각 0°에서 절삭력이 가장 작게 측정되었고, 절삭속도 200m/min, 이송속도 0.3mm/rev, 절삭깊이 2mm, 테이퍼각 15°에서 절삭력이 가장 크게 측정되었다.
- 15°의 테이퍼각을 준 시편이 일반 원통시편보다 더 큰 형상오차가 발생하였다. 이는 추후 더욱 다양한 시편의 실험을 통해 가장 적합한 오차 보정 및 가공조건 선정이 필요할 것으로 보인다.

후 기

이 논문은 2009~2010년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- Oh, M. S., Yoon, I. J. and Baek, D. K., "Study of the Thermal Deflection Error and the Deflection Error Induced by the Cutting Force", Journal of KSIA, Vol. 5, No. 4, pp. 373-378, 2002.
- Dornfeld, D., Lee, D. E., "Precision Manufacturing", Springer, 2007.
- Oh, S. H., "A Study on the Correlation between Machinability and the Cutting Condition in Machining Aluminum Alloy", Journal of KSMPE, Vol. 3, No. 4, pp. 56-62, 2004.
- Sim, G. J., Cheong, C. Y., Oh, S. H. and Seo, N. S., "A Study on the Classification and Prediction of the Chip Type under the Specified Cutting Condition in Turning", Journal of KSPE, Vol. 12, No. 8, pp. 53-62, 1995.
- Masuda, M., Torri, M., "The Influence of Cutting Force on Boundary Failure of Cutting Tool", Journal of JSPE, Vol. 53, No. 10, pp. 1596-1601, 1987.
- Levy, E. K., Tsai, C. L. and Groover, M. P.,

- "Analytical Investigation of the Effect of Tool Wear on the Temperature Variations in a Metal Cutting Tool", Trans, ASME, Vol. 98, No. 1, pp. 251-257, 1976.
7. Shih, Albert J., "Finite Element Analysis of Orthogonal Metal Cutting Mechanics", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 36, No. 2, pp. 255-273, 1996.
 8. Kim, K. W. and Sin, H. C., "Development of a Thermo-Viscoplastic Cutting Model using Finite Element Method", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 36, No. 3, pp. 379-397, 1996.
 9. Ng, E. G., Aspinwall, D. K., Brazil, D. and Monaghan, J., "Modelling of Temperature and Force When Orthogonally machining Hardened Steel", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 39, No. 6, pp. 885-903, 1999.
 10. Choi, T. K., Kim, J. S., Park, J. H. and Lim, H. J., "The Machinability Estimation Depending on Cutting Condition in Al6061-T6 Turning Operations", Journal of KSMTE, Vol. 18, No. 6, pp. 675-680, 2009.
 11. Lee, M. J., Hwang, Y. K. and Lee, C. M., "A study on the development of analysis model for prediction of relative deformation between cutting tool and workpiece", Journal of the KSPE, Vol. 27, No. 4, pp. 20-26, 2010.