반도체디스플레이기술학회지 제16권 제1호(2017년 3월)
Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 16, No. 1. March 2017.

STS304합금의 선삭가공에서 표면거칠기의 최적화

최만성[*†]
[*†]한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

Optimization of Surface Roughness of STS 304 in a Turning Process

Man Sung Choi[*†]
[*†]School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

ABSTRACT

The general manufacturing problem can be described as the achievement of a predefined product quality with given equipment, cost and time constraints. Unfortunately, for some quality characteristics of a product such as surface roughness it is hard to ensure that these requirements will be met. Stainless steels STS 304 is frequently used as shaft materials in small fiber reinforced polymer(FRP) fishing boats. In this work, the dry turning parameters of STS 304 are optimized by using Taguchi method. The experiments were conducted at three different cutting speeds with three different feed and three different depth of cut. The cutting parameters are optimized using signal to noise ratio and the analysis of variance. The effects of cutting speed and feed on surface roughness was analyzed. The results revealed that the spindle speed is the more significant parameter influencing the surface roughness.

Key Words : Turning operation, STS 304, Surface roughness, Taguchi method, Optimization

1. 서 론

항공, 선박, 반도체장비와 같은 현재 주요 산업에서는 기계가공에서 매우 높은 정밀도를 요구하고 있다. 그 중에서 표면품위기는 중요하게 인식되고 있는 것들 중에 하나이다. 또한 기계가공의 생산성향상 및 제품의 정밀도 요구로 인하여 이에 대해 많은 연구가 필요한 실정이다[1-3]. 또한 실질적 제조현장의 생산률과 인건비의 상승으로 인한, 기계의 자동화를 위해서는 최적화 연구가 더욱 필요하다[4-5]. 선삭가공에서 표면거칠기에 미치는 절삭인자는 절삭속도, 이송속도 및 이송량이 주요 변수인 것으로 알려져 있다[6]. 또한기존의 연구 중에는 가공변수와 표면 거칠기의 관계를 메커니즘적으로 규명한 문헌도 있다[7]. 이러한 연구는 많은 실험을 통해서 이루어지므로 시간적인 소모를 초래하게 된다. 실험계획법은 실험적인 횟수를 줄이면서 통계적인 방법을 사용하므로 현장에서 효율적인 가공조건을 찾는데 매우 유용한 방법이다. 실험계획법 중에서 다구찌법 (Taguchi method)은 기계, 화학, 전기, 전자 등 산업전반에 걸쳐 생산공정의 공정조건을 최적화 하고 품질손실비용을 줄일 수 있는 최적화 설계 기법이다[8-12]. STS304는 오스테나이트 조직으로 이루어져 있는 스텐레스강이다. 이 강은 높은 내식성을 갖고 있는데 주요 합금성분인 크롬 (Cr)이 강의 표면에 강한 산화피막을 형성하고, 그 피막이 더 이상의 산화를 방지하기 때문이다. STS304의 대표성분은 18%Cr-8%Ni이며, 고용화 열처리를 하고 가공경화성을 가지고 있어 절삭성이 떨어지는 강종이다. 주 용도는 항공기용, 반도체장비용, 화학플랜트 등에 이용된다. 본 연구에서는 STS304합금의 표면품위, 기능 및 안정성을 확보하고, 선삭가공 공정에서 우수한 표면 거칠기를 얻기 위해 절삭조건을 최적화하는 방법을 구하였다. 이를 위해 직교배열에 의한 실험계획표를

[†]E-mail: mschoi@koreatech.ac.kr

작성하고, 실험을 통하여 표면거칠기의 실험 자료를 얻었다. 이 자료를 기초로 하여 망소특성에 따른 SN(signal to noise) 비를 도출하였다. 그리고 분산분석 (analysis of variation, ANOVA)을 통하여 절삭조건과 그 수준에 따라, 표면거칠기에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 실험재료

실험에 사용된 선반은 대우중공업의 DL480이고, 선반의 주요 사양으로서는 테이블의 작업면적이 480*1000 mm, 주축회전수가 45~1900 rpm, 이송 거리 0.05~1 mm, 이송량 0.06~0.52 mm/rev, 주축 전동기의 동력이 0.5 KW이다. 표면조도측정기는 Kosaka회사 제품으로 모델명은 se500 시리즈이며 그 사진을 Fig. 1에 나타내었다.

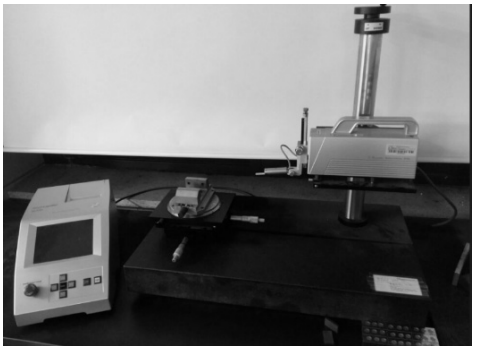
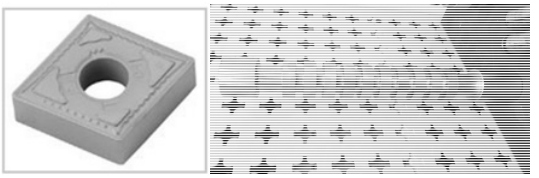


Fig. 1. Surface roughness tester: se-500 series.

Fig. 2(a)는 선삭실험에 사용된 절삭공구이며, 초경합금 재질의 선삭용인서트인 CNMG 12408-HM HM HC310T HERTEL이다. 이 공구회사의 추천 이송량은 0.15~0.35 mm/rev, 절삭 깊이는 1.0~3.5 mm 이며 칩브레이커가 부착된 공구이다. Fig. 2(b)는 실험에 사용된 STS304인 피삭재를 나타낸 것이다. 실험의 순서는 우선 길이 방향으로 평행을 맞추고, 센터를 맞춘 후 서피스게이지를 이용하여 조를 고정시킨다. 그리고 공구를 설치하고, 날 끝의 중심을 확인한 후 바이트의 높이를 1에서 1.5배 정도로 고정시킨다. 마지막으로 회전속도를 계산한 후 주축회전수를 설정하고 실험을 실시하였다. 피삭재인 STS304합금의 기계적 성질과 화학적 성질은 Table 1 및 Table 2와 같다.

실험방법으로는 STS304을 선정하여 길이 약 60 cm의 시편을 9개의 구간으로 나눈 시편을 준비한다. 이 시편을 선반에 장착한 뒤 절삭속도, 절삭 깊이, 이송량을 각각 3 수준(level)으로 바꾸어서 실험한 후 표면조도 측정장비에서 표면평균거칠기 [Ra] 값을 측정하였다. 표면거칠기는 정해진 표면길이 내에서 공정표면으로부터 측정한 수직편차의 평균값으로 정의된다. 따라서 L27의 직교 배열(orthogonal array)에 따른 실험설계표에 의해 반복 2회 실험하여 총 54회 실험을 실시 하였다. Table 3은 제어인자(control parameter)와 그 수준에 따라 실험을 한 내용을 나타내었다. 제어인자는 제품특성에 영향을 주고 제어가 가능한 변수이며, 산포를 줄이기 위해서 비용을 크게 상승시키지 않고 품질개선을 할 수 있는 인자를 설정하는 수단으로 이용된다. 여기서 단위는 주축회전수 [rpm], 절삭 깊이 [mm], 이송량은 [mm/rev] 이다.



(a) (b)

Fig. 2(a). Cutting tool and (b) Workpiece used.

Table 1. Mechanical properties of STS304

Tensile strength [MPa]	Elongation [%]	Hardness [HRB]
515	40	92

Table 2. Chemical composition of STS304

C	Mn	Si	P
<0.008	<2.0	<1.0	<0.04
S	Cr	N	-
<0.03	18～20	8.0～10.5	-

Table 3. Codes, parameters, and level values used for orthogonal array

Control parameters	Unit	L_1	L_2	L_3
A : Depth of cut	mm	0.1	0.3	0.50
B : Feed rate	mm/rev.	0.1	0.21	0.32
C : Spindle speed	rpm	175	350	630

2.2 Taguchi 법에 의한 실험

Taguchi 방법은 직교배열표 상에 제어인자와 잡음인자를 동시에 고려하여 SN비를 최대화하는 제어인자의 조건 즉, 잡음 하에서도 성능특성치의 분산이 작고 평균이 목표치에 근접하는 제어인자의 조건을 찾는 것이다. 평가특성치는 신호와 잡음비로 나타내는데 표면거칠기는 주로 규격하한을 적용하므로 특성치가 작으면 작을수록 좋

은 망소특성(smaller is the better)을 적용하였다. 망소 특성의 SN비는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$SN = -10\log_{10}\frac{1}{n}\sum_{i=1} y_i^2 \qquad (1)$$

여기서 y_i 는 실험에서 얻어진 데이터이고, n은 실험회수를 의미한다. 직교배열표를 활용하는 주목적은 재현성이 높은 요인효과에 중점을 둔다. 직교배열표는 인자배치에 있어서 작교성과 데이터 해석에 있어서 중요한 성질로서 분산분석을 통해 데이터의 전 분산을 인자별 분산합으로 분해하는 것이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험계획법에 의한 실험결과

Table 3의 실험조건에 따라, 초경합금공구를 사용하여, 선삭가공을 27회 실시하고 새로이 반복 실험을 통하여 얻은 표면거칠기와 그 값에 따른 SN비를 계산한 값을 나타낸 것이 Table 4이다. Table 4에서 N1과 N2는 표면거칠기를 2회 반복하여 측정한 값이다. 이 표에서 SN비는 특성값이 작으면 작을수록 좋은 망소특성에 관련된 식 (1)에 의해 구하였다.

3.2 표면거칠기의 정규성 검정

많은 통계적 절차는 데이터가 정규분포를 따른 다고 가정한다. 이러한 가정을 확인하기 위하여 데이터에 대한 정규성검정을 수행할 필요가 있다. 정규확률도에서 점들이 대부분 직선에 떨어지면 정규성 가정이 만족한다고 판정한다. 그리고 정규성을 검정하는 통계적 방법으로 여러 가지가 있으나, 여기서는 Anderson-Darling검정을 사용하였다. 이 검정은 경험적 누적분포함수를 기초로 한 검정 방법으로 좋은 검정력을 가지며, 분포의 높은 값과 낮은 값들에서 정규성으로부터 이탈을 탐지하는데 특히 효과적이다. Fig. 3은 표면거칠기의 정규확률도를 95% 신뢰 구간으로 나타낸 것으로 A^2 =2.6208에 해당되는 p-값이 0.005이고, 유의 수준 5%보다 낮으므로 대립가설을 채택한다. 따라서 정규분포를 따르지 않는다고 판정한다.

3.3 표면거칠기 분석

표면거칠기는 정량적 비교와 분석을 위하여 가공면의 거칠기를 한 개의 인자로 표현한다. 가장 흔히 쓰이는 인자가 산술평균거칠기 Ra로서 측정 단위는 보통 [㎛]이다. Table 4의 자료에 의해 분산 분석을 하면 Table 5와 같은 분산분석결과를 얻을 수 있다.

Table 4. Experiment results for surface roughness and their responding SN ratio for STS304

Run	Inner control factor array			Outer noise factor array		
				Ra		SN ratio
	A	B	C	N1	N2	
1	1	1	1	1.661	1.686	-4.473
2	1	1	2	3.292	3.317	-10.382
3	1	1	3	5.857	5.820	-15.326
4	1	2	1	1.299	1.300	-2.276
5	1	2	2	3.178	3.146	-9.999
6	1	2	3	5.391	5.425	-14.661
7	1	3	1	1.057	0.883	0.230
8	1	3	2	1.290	1.299	-2.242
9	1	3	3	3.785	3.833	-11.616
10	2	1	1	1.016	1.065	-0.347
11	2	1	2	2.227	2.109	-6.724
12	2	1	3	4.695	4.749	-13.483
13	2	2	1	0.976	0.979	0.198
14	2	2	2	2.012	2.004	-6.055
15	2	2	3	4.807	4.712	-13.552
16	2	3	1	0.806	0.912	1.304
17	2	3	2	2.135	2.155	-6.629
18	2	3	3	4.470	4.460	-12.996
19	3	1	1	0.853	0.844	1.427
20	3	1	2	1.723	1.732	-4.748
21	3	1	3	4.616	4.651	-13.318
22	3	2	1	0.742	0.751	2.539
23	3	2	2	1.856	1.842	-5.339
24	3	2	3	4.888	4.900	-13.793
25	3	3	1	0.715	0.709	2.950
26	3	3	2	1.905	1.897	-5.580
27	3	3	3	4.676	4.668	-13.390

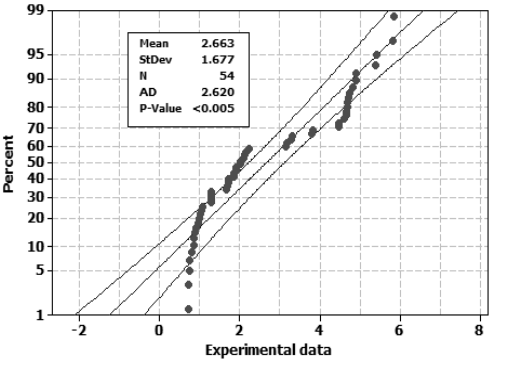


Fig. 3. Probability plot of experimental data (95% confidence interval).

Table 5. ANOVA analysis for cutting surface roughness

Source	df	Seq. SS	Adj. SS	Adj. MS	F	P
A	2	25.88	25.88	12.94	4.74	0.021
B	2	22.97	22.97	11.49	4.21	0.030
C	2	850.42	850.42	425.21	155.65	0.000
Error	20	54.64	54.64	2.73		
Total	26	953.91				

분산분석은 공정의 파라메터를 분석하기 위한 한 방법으로 각 인자들이 특성치에 미치는 유의성을 검정할 수 있다. Table 6의 분산 분석표에서는 모형의 각항에 대한 자유도 순차제곱합(sequential sum of squares), 수정제곱합(adjusteed sum of squares), 수정평균제곱(adjusted mean of square)을 사용하여 F-통계량, p-값을 구한다. 순차제곱합은 이전에 포함된 항에 하나의 새로운 항이 추가된 모형에서의 제곱합이고, 이 값은 모형의 차수에 따라 달라진다. 수정제곱합은 다른 항 모두가 모형에 이미 포함되어 있을 때 각 특정한 항을 추가 함으로써 결정되는 추가적인 제곱합이다. 이 값은 모형 차수에 따라 달라지지 않는다. 그리고 순차 제곱합을 선택한 경우에는 평균 제곱 및 F-검정에 이 값이 사용된다. Table 6에서 p의 값을 살펴보면 5% 유의수준에서 모든 인자가 유의함을 알 수 있다. 이 모형에서 결정계수 R^2은 95%, 수정 결정계수 R^2(adj)은 93%로 각 요인과 특성치의 관계는 충분히 설명할 수 있다고 볼 수 있다.

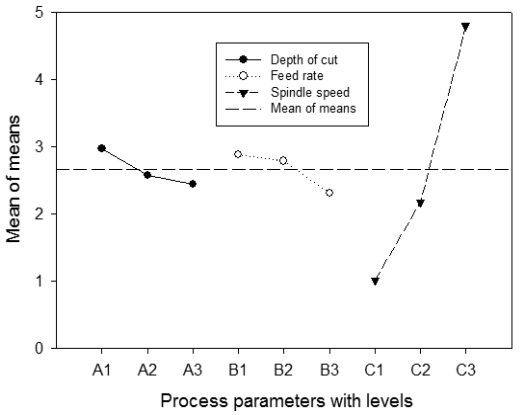


Fig. 4. Main effects plot of data means for surface roughness.

Fig. 4에서는 공정변수의 각 수준에 대응하는 표면 거칠기의 평균을 나타낸 것으로, 이 그림에서 가공조건에 따른 표면거칠기에 대한 효과의 상대적 크기를 비교할 수 있다. Fig. 4에서 살펴볼 때 효과의 상대적인 크기는 C, B, A 즉, 주축속도, 이송량, 절삭깊이 순으로 표면거칠기에 크게 영향을 미친 다는 것을 알 수 있다.

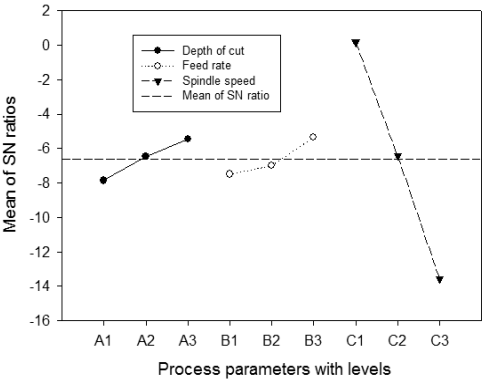


Fig. 5. Main effects plot of SN ratios for surface roughness.

Fig. 5는 신호 대 잡음비의 주효과를 특성치가 작으면 작을수록 좋은 망소특성으로 계산한 값으로 도시한 것으로 가공조건에 따라 표면거칠기에 미치는 영향이 매우 다름을 알 수 있다. 표면거칠기에 영향을 크게 미치는 최적가공조건은 C, A ,B, 즉, 주축속도, 절삭깊이, 이송량 순으로 표면거칠기에 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 따라서 가공공정을 최적제어하기 위해서는 주축속도를 제어하면 표면거칠기를 최적화 할 수 있다. 또한 최적제어의 수준에 따른 값은 이 실험에서 $C_1A_3B_3$ 이다.

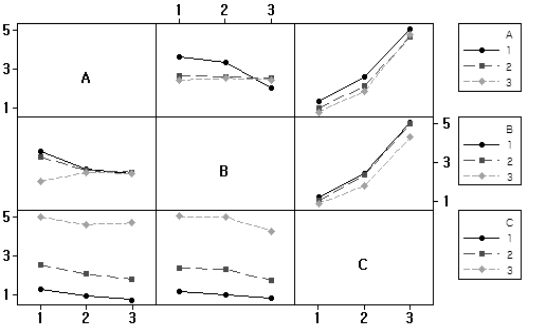


Fig. 6. Interaction plot of data means for surface roughness.

Fig. 6은 표면거칠기 실험자료의 평균에 대한 교호 작용의 효과(interaction effect)를 나타낸 것 이다. 교호작용의 효과는 어느 한 인자의 효과가 다른 인자의 수준에 따라 변화하여 나타나는 효과를 말한다. Fig. 6에서 실험자료의 평균에 따른 교호직용의 효과는 거의 존재하지 않는 것으로 나타났지만, A와 B의 2수준 및 3수준에서 약간의 교호작용이 보인다.. 이런 경우는 각각의 인자를 따로 고려하여 최적수준을 정한다.

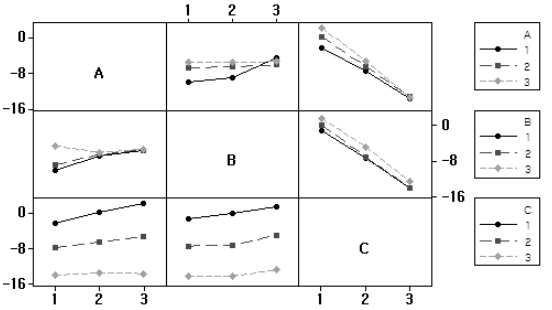


Fig. 7. Interaction plot of SN ratios for surface roughness.

Fig. 7은 표면거칠기 실험자료의 SN비에 대한 교호작용의 효과(interaction effect)를 나타낸 것이다. Fig. 5와 마찬가지로 각 인자 간의 교호직용의 효과는 거의 존재하지 않고, A와 B의 2수준 및 3수준에서 약간의 교호작용이 보인다.

3.4 표면거칠기의 다중회귀분석

다중회귀분석(multiple regression analysis)은 2개 이상의 예측변수와 1개의 반응변수와의 관계를 직선으로 가정하는 회귀분석을 말한다. 회귀함수가 얼마나 유효한가는 분산분석표를 작성하여 t-검정을 실시하거나, 실험에서 얻어지는 총 편차의 제곱합과 회귀제곱합으로부터 구해지는 결정 계수 R^2을 이용하여 평가한다. 각 인자들로부터 표면거칠기를 예측하기 위한 방법으로 Table 5의 자료를 이용하여 아래의 식 (2)와 같은 다중회귀식을 구할 수 있다.

$$\hat{Ra} = -0.56 - 0.27A - 0.29B + 1.89C \qquad (2)$$

여기서 $\hat{Ra}$는 표면거칠기의 추정식이다. 식 (2)에서 알 수 있듯이 표면거칠기를 최소화하기 위해서는 주축회전수 즉, 절삭속도를 높이면 된다. A와 B는 표면거칠기에 대해 음의 기울기를 가지므로 이 변수의 값이 클수록 표면거칠기가 좋아진다는 것을 알 수 있다. 그리고 중회귀분석을 한 결과 표면거칠기의 결정계수 R^2의 값은 90%로 나타 났는데 전체 변동 중 회귀식에 의해 설명되는 부분이 매우 높은 편이다. 따라서 식 (2)를 사용 하여 적응제어 등의 자동화에 응용할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 Taguchi법을 이용하여 STS304를 피삭재로 사용하여 선삭가공을 하였다. 이에 따른 표면거칠기의 영향을 분석한 결과에 따르면, 표면 거칠기를 가장 영향을 미치는 공정변수는 주축회전수이며, 절삭깊이와 이송량은 상대적으로 그 영향이 미미하였다. 또한. 각 공정변수에 수준에 따른 교호작용은 거의 없었다. 향후 STS304에 대한 선삭가공의 표면품위를 심도있게 연구하기 위해서는 금속조직현미경(SEM)에 의한 분석과 원자현미경(AFM)을 이용하여 합금성분의 분석이 필요할 것이라 생각된다. 또한 다양한 공정변수가 표면 거칠기에 미치는 영향을 분석하기 위해 마하라노 비스-다구찌 법을 적용하면 다양한 합금의 선삭가공에서 표면품위를 더욱 개선할 수 있을 것이라 여겨진다.

참고문헌

1. Lee, K.Y., Kang, M.C., Jeong, Y.H., Lee, D.W., Kim, J.S., “Simulation of the Surface Roughness and Profile in High Speed End Milling,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 113, pp. 410–415, 2001.
2. Abouelatta, O.B., Madl, J., “Surface Roughness Prediction Based on Cutting Parameters and Tool Vibrations in Turning Operations,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 118, pp. 269–277, 2001.
3. Jang, D.Y., Choi, Y.G., Kim, H.G., Hsiao, A.,” Study of the Correlation between Surface Roughness and Cutting Vibrations to Develop an on-Line Roughness Measuring Technique in Hard Turning,” International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 36, pp. 453–464, 1996.
4. Chen, C.-C.A., Liu, W.-C., Duffie , N.A., “A Surface Topography Model for Automated Surface Finishing,” International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 38, pp. 543–550, 1998.
5. Coker, S.A., Shin, Y.C., “In-Process Control of Surface Roughness due to Tool Wear using a New Ultrasonic System,” International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 36, pp. 411–422, 1996.
6. Davim, J.P., “A Note on the Determination of Optimal Cutting Conditions for Surface Finish Obtained in Turning using Design of Experiments,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 116, pp. 305–308, 2001.
7. Ehmann, K.F. Ehmann, Hong, M.S., “A Generalized Model of the Surface Generation Process in Metal Cutting,” CIRP Annals, Vol. 43, pp. 483–486, 1994.
8. Ghani, J.A., Choudhury, I.A., Hassan, H.H.,” Application of Taguchi Method in the Optimization of End Milling,” J. Mater. Process. Tech., Vol. 145(1), pp. 84–92, 2004.
9. Lin, T. R., “Experimental Design and Performance Analysis of Tin - Coated carbide Tool in Face Milling Stainless Steel,” J. Mater., Process. Technology, Vol. 5654, pp. 1-7, 2002.
10. Fuh, K.H., Wu, C.F., “A Proposed Statistical Model for Surface Quality Prediction in End-Milling of Al alloy,” Int. J. Mach. Tool Manuf., Vol. 35(8), pp. 1187–1200,

1995.
11. Bouzid, W., Zghal, A., L., “Taguchi Method for Design Optimization of Milled Surface Roughness,” Mater. Technol. Vol. 19(3), pp. 159–162, 2004.
12. Baek, D.K., Ko, T.J., Kim, H.S., “Optimization of Feed Rate in a Face Milling Operation using Surface Roughness Model,” Int. J. Mach. Tool Manuf., Vol. 41 (3), pp. 451–462, 2001.

접수일: 2017년 3월 11일, 심사일: 2017년 3월 20일,
게재확정일: 2017년 3월 20일