

회귀분석법을 이용한 로타리 공구의 절삭 특성

심승천*, 장성민**, 맹민재***, 정준기****

The Cutting Characteristics of Rotary Tools Using Regression Analysis

Soung-Chun Shim*, Sung-Min Jang**, Min-Jae Maeng***, Joon-Ki Chung****

Abstract

This paper deals with the study of feasibility of rotary carbide tools in the machining of aluminium alloy. A rotary tool holder was designed and manufactured for this work. Experiments were performed using Taguchi methods and regression analysis to analyse the influence of various factors and their interactions on the cutting characteristics of rotary carbide tools during machining. The cutting force is influenced the most greatly at the inclination angle. The surface roughness is influenced distinctly at depth of cut. It deduced an equation to predict cutting force and surface roughness. Hence, it could be concluded here that the proposed model agrees with the experimental data satisfactorily.

Key Words : Rotary carbide tools(로타리카바이드공구), Aluminium alloy(알루미늄합금), Taguchi methods(다구찌방법), Regression analysis(회귀분석), ANOVA(Analysis of variance, 분산분석), Inclination angle(경사각)

1. 서론

최근 현대 산업사회에서는 제조업을 바탕으로 발전되어 왔다. 그 중에서도 금속가공은 제조업을 기반으로 꾸준히 기여하고 있다. 또한 기계 산업에서는 여러 가지 금속재료가 개발되고 있으며, 수요자의 다양한 요구에 의해 알루미늄합금 및 복합재료에 이르기까지 다양한 종류의 재료를 필요로 하게 되었다⁽¹⁾. 이에 대한 우수한 성능을 가진 비철계금속 및 복합재료들이 개발되었다. 그러나 이러한 재료의 연구개발에 비해 절삭공구에 대한 연구개발 결과가 미비한 실정이다. 특히, 최근 무인화 절삭시스템에 관한 많은 연구가 진행되고 있는 시점에서 절삭공구의 특성이 현저하게

뒤떨어질 경우 시스템 자체의 효율성이 크게 저하 될 우려가 있다. 이로 인하여 국·내외적으로 비철계금속 및 복합재료의 절삭공구에 관한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 상대적으로 개발 실적이 미진하면서도 흥미 있는 분야가 로타리 공구(rotary tool)를 사용한 가공이다^(2,3). 기존의 공구를 사용한 절삭가공에서는 가공 중에 공구와 공작물 사이의 접촉이 국부적인 점접촉 형태로써 공구 날 부위(tool cutting part)에서 연속적으로 발생한다. 이때 일어나는 마찰에 의한 절삭열 상승으로 공구의 마모와 파손에 심각한 영향을 미친다⁽⁴⁾. 반면에 로타리 공구에

* 발표자, 홍익대학교 대학원 기계/시스템디자인공학과(sim1494@hanmail.net)
주소: 경기도 성남시 수정구 복정동 4232
** 인하대학교 대학원 기계공학과
*** 동서울대학 기계공학부
**** 홍익대학교 기계/시스템디자인공학과

의한 절삭(rotary cutting)은 원주 형태의 절삭 날이 고정된 축을 중심으로 연속적으로 회전하여 기존의 고정된 절삭선단과는 달리 전체적인 절삭선단이 일정한 시간 간격으로 회전하여 절삭선단의 국부적인 열 손상이 발생되지 않도록 고안된 절삭 공구이다. 이와 같은 공구의 부가적인 회전운동은 단속적인 공구와 공작물의 상호접촉을 하며, 이는 공구의 기계적인 강도에 영향을 미치지 않고도 효과적으로 공구와 공작물 사이의 접촉 형태를 조절할 수 있어 기존의 절삭 가공에 비하여 공구에 발생하는 온도와 마모를 줄이는데 있어 매우 획기적이다. 이러한 로타리 공구에 의한 절삭은 기존의 공구에 비해 공구 수명 향상, 양호한 표면 상태 그리고 경제적으로도 커다란 장점을 가지고 있다. 따라서 로타리 공구는 난삭재의 가공에 주로 사용되고 있으며, 향후 항공기 부품 등에 사용되는 고경도 재료의 정밀가공에 적용하여 발전 가능성이 높다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 이에 대한 기초 자료를 위해 설계·제작한 로타리 공구를 NC선반에 장착하여 비철 금속 재료인 알루미늄을 대상으로 절삭력과 표면거칠기를 측정하였다. 측정된 실험데이터는 분산분석(ANOVA)을 이용하여 로타리 공구의 기본적인 절삭특성과 각각의 인자들이 절삭력과 표면거칠기 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 회귀분석법(regression analysis)을 이용하여 로타리 공구의 절삭특성, 즉 절삭력과 표면거칠기를 예측할 수 있는 실험식을 도출하였다.

2. 로타리 공구

2.1 로타리 공구 이론

로타리 공구는 원형의 회전하는 공구를 사용함으로써 절삭 날의 위치를 가공 중 연속적으로 바꿔 가며 절삭할 수 있어 기존의 공구와는 달리 공구에 발생하는 높은 절삭열에 의한 마모를 줄일 수 있어 공구수명이 획기적으로 향상된다. 이러한 공구를 로타리 공구(rotary tool)라고 한다^(5,6). 로타리 공구는 외부 드라이브에 의해서 구동되는 외부 구동형(driven rotary tool, DRT)과 공작물과 공구간의 상호작용에 의해서 구동되는 자기 추진형(self-propelled rotary tool, SPRT)으로 나눌 수 있다. Fig. 1과 같이 자기 추진형 로타리 공구의 경우 공작물은 수직 절단면과 일정한 경사각을 유지하며, 공작물과 공구의 접촉시 공작물의 회전에 의해 발생하는 배분력과 주분력 사이의 힘에 의해서 공구는 회전하게 된다. 절삭가공 중에는 공구의 경사면과 여유면에 국부적으로 절삭열이 집중되어

발생한다. 이로 인한 손실, 즉 공구재질의 연화와 마모 그리고 이로 인한 파손을 억제할 수 있다.

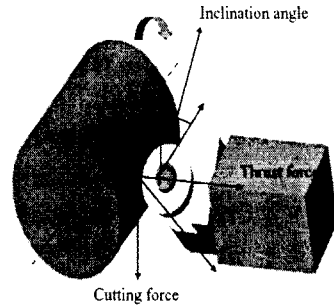


Fig. 1 Concept of inclination angle

2.1.1 로타리 공구의 설계 및 제작

공구설계는 Pro/E를 사용하였으며 공구의 회전에 중점을 두어 각 부품의 끼워 맞춤 공차를 고려하였다. 홀더의 형상은 NC선반에서 사용되는 규격으로 설계하였다.



Fig. 2 Rotary tool holder

Fig. 2는 인서트 팁을 장착한 로타리 홀더를 나타내고 있다. 경사각을 $0^\circ \sim 60^\circ$ 까지 15° 간격으로 조정할 수 있으며 바이트의 회전을 원활하게 하기 위해 볼 베어링(NMB L-1680 HH) 2개를 장착하였다. 절삭선단은 드로우 어웨이 형태의 인서트 팁(RCMX 200600 UF1)을 사용하였다.

2.2 실험계획과 회귀분석

2.2.1 실험계획

본 연구에서 로타리 공구의 특성을 파악하기 위해 가공중 절삭인자들이 특성치에 미치는 영향을 정량적으로 파악하

고자 다구치 실험계획법 이론을 적용하였다. 실험적으로 얻어지는 특성치는 절삭력과 표면거칠기로 선정하였으며 특성함수는 망소특성으로 하였다.

실험을 통해 얻어진 결과를 분석하기 위한 기초단계로서 S/N비를 사용한다. S/N비는 그 값이 크게 나올수록 제어가 불가능한 다양한 인자들에 대하여 영향을 더욱 적게 받을 수 있어 더 좋은 특성치 결과를 얻을 수 있다. 실험을 통해서 얻어진 반복적인 데이터들 $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ 라 하면 MSD(mean squared deviation)는 아래 식을 이용하여 계산한다.

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (1)$$

여기서, n 은 실험의 수, y_i 는 i 차 실험에서 실험값이다. 또한 식(1)은 특성치의 목표값이 0이 되는 것을 목적으로 하므로 0으로부터의 MSD를 의미한다. 결과적으로 S/N비는 다음 식으로 표현된다.

$$S/N = -10 \log(MSD) \quad (2)$$

2.2.2 회귀분석

본 실험에서는 사용된 변수들 간의 관련성을 규명하기 위해 임의의 수리적모형(mathematical model)을 가정하였다. 이 모형을 측정된 변수들의 데이터로부터 통계적 분석을 하고 절삭력과 표면거칠기를 예측하기 위해 회귀분석법(regression analysis)을 사용하였다. 특정치를 y 로 하고 이것에 영향을 주리라고 생각되는 인자인 절삭속도(x_1), 경사각(x_2), 이송속도(x_3), 절삭깊이(x_4)을 선택하여 인자들과 특성치간의 관련성을 함수의 형태로 파악할 수 있다. 이처럼 인자의 변화를 설명하기 위하여 k 개의 독립변수가 사용되며 각 독립변수의 어떤 흥미영역에서 종속변수의 관계가 선형으로 가정되는 회귀모형은 다음과 같이 표현된다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i \quad (3)$$

여기서, $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$ 이고 서로 독립, β_i : 미지모수 ($i = 1, 2, \dots, k$)이다.

미지모수들은 최소제곱에 의해서 추정된다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

Fig. 3은 가공중에 절삭력을 검출하기 위해 NC선반(PUMA 8HC-3A)에 부착한 실험장치를 보여준다. 공구는 공구동력계(KISLTLER 9257B) 위에 설치하였다. 기타 실험장치는 충전증폭기(Kistler-5019A)를 사용하였다. 시편의 표면조도검출은 촉침식(DCN001 Series5423L)을 이용하여 측정하였다.

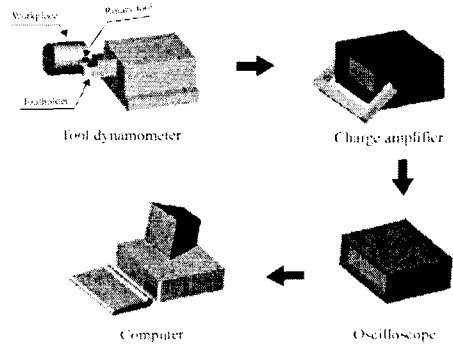


Fig. 3 Schematic of experimental setup

3.2 실험조건 및 방법

특성함수에 영향을 주는 독립변수(independent variable)를 제어인자로 하고 각각의 인자들에 대한 구분을 수준으로 하여 4인자 3수준으로 실험조건을 선정하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Independent variables and their levels

Variables	Feed rate (mm/rev)	Inclination angle (deg)	Cutting speed (m/min)	Depth of cut(mm)
Level 1	0.05	15	100	0.1
Level 2	0.1	30	200	0.2
Level 3	0.2	45	400	0.4

실험은 인자들에 대한 영향과 교호작용을 평가하기 위해, $L_{27}(3^{13})$ 직교배열표를 사용하여 건식 절삭하였으며 매 실험마다 새로운 인서트 팁을 사용하여 오차를 최소화 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 로타리 공구를 사용한 절삭에서 절삭력과 표면거칠기에 미치는 각각 절삭인자들의 영향을 파악하기 위해 실험계획법과 회귀분석법을 적용하였다.

4.1 절삭력에 대한 분석결과

Table 2는 절삭력에 대한 응답성과 인자들의 교호작용에 대한 결과를 분석하여 나타낸 분산분석(ANOVA)이다. 여기서 F는 검정통계량으로 인자의 중요도를 나타낸다.

Table 2 ANOVA for cutting force

Source	S	DOF	V	Fo	F	P	Contribution (%)
A	166.80	2	83.40	17.30	4.10	0.001	19.87
B	228.65	2	114.33	23.72	4.10	0.000	27.23
C	7.610	2	3.81	0.79	4.10	0.481	0.9
D	205.87	2	102.94	21.35	4.10	0.000	24.52
A×B	32.71	4	3.18	1.70	3.48	0.227	3.9
A×C	149.68	4	37.42	7.76	3.48	0.004	17.82
Error	48.21	10	4.82				5.74
Total	839.53	26					100

Table 2에 나타난 A, B, C, D는 본 연구에서 적용된 제어 인자들로 각각 이송속도, 경사각, 절삭속도, 절삭깊이를 나타낸다. A×B와 A×C는 각각 A와 B에 대한 교호작용과 A와 C에 대한 교호작용을 나타낸다. Table 2에 나타난 결과에서 절삭력에 가장 많은 영향을 미친 인자는 경사각이며 다음으로 절삭깊이, 이송속도의 순서로 나타났다. 실험결과에서 절삭속도는 그 영향이 무시할 정도로 나타났으며 경사각이 가장 크게 영향을 미치고 있다는 것에 주목할 필요가 있다. 일반적으로 경사각은 칩의 유동성에 크게 영향을 미친다. 본 연구에서 로타리 공구에 사용된 인서트 팁의 직경(φ20mm)이 매우 클 뿐 아니라 경사각의 변화에 따라 이송 방향으로 피삭재와 접촉면적이 변화하게 되는데, 이러한 결과에 의해 절삭력 크기에 영향을 미치는 것으로 판단된다(10).

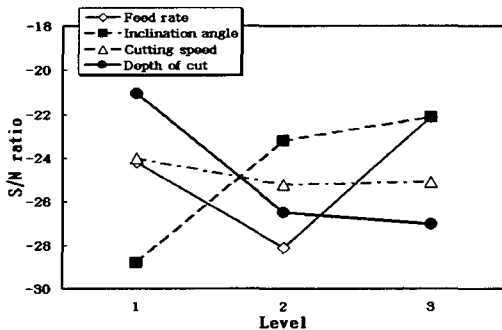


Fig. 4 Mean effect plot for S/N ratio

Fig. 4는 각각 제어인자에 대한 수준별 절삭력 크기에 대한 평균 S/N비 값의 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4에서 나타난 것처럼 경사각이 커짐에 따라 S/N비는 증가한다. 그러나 절삭속도와 절삭깊이가 증가하면 S/N비는 감소한다. 이러한 결과는 경사각, 절삭속도, 절삭깊이가 절삭력에 미치는 기존의 절삭이론과 일치하는 것을 알 수 있다. 이와 반대로 이송속도 0.05mm/rev에서 0.1mm/rev로 증가할 때 S/N비가 감소하다가 이송속도가 다시 0.2mm/rev로 증가하면서 S/N비가 급속히 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 실험결과는 Marshall와 Shaw에 의해 보고된 치수효과(7)의 영향인 것으로 사료된다.

4.2 표면거칠기에 대한 분석결과

Table 3은 표면거칠기에 대한 응답성과 인자들의 교호작용에 대한 결과를 분석하여 나타낸 분산분석(ANOVA)이다. 여기서 F는 검정통계량으로 인자의 중요도를 나타낸다.

Table 3 ANOVA for surface roughness

Source	S	DOF	V	Fo	F	P	Contribution (%)
A	21.065	2	10.532	1.59	4.10	0.251	5.73
B	22.551	2	11.276	1.71	4.10	0.230	6.1
C	12.5	2	6.25	0.95	4.10	0.421	3.4
D	133.54	2	66.771	10.11	4.10	0.004	36.33
A×B	37.650	4	9.412	1.42	3.48	0.295	10.2
A×C	74.151	4	18.538	2.81	3.48	0.085	20.2
Error	66.077	10	6.608				17.9
Total	367.53	26					100

Table 3에 나타난 결과에서 표면거칠기에 미치는 영향은 절삭깊이에 크게 작용하였으며 일반적인 선삭에서 표면거칠기에 영향을 미치는 이송속도와 경사각 그리고 절삭속도의 영향은 무시할 정도로 나타났다. 일반적으로 절삭깊이는 칩의 형상과 표면거칠기에 영향을 미친다. 절삭깊이가 커지면 가공표면에 접촉하는 절삭면적이 증가하여 기계진동의 영향을 받아 표면거칠기가 나빠진다. 따라서 본 실험에서 사용한 인서트 팁의 노즈반경이 일반 인서트 팁의 반경에 비하여 매우 크므로 절삭깊이 증가에 따른 절삭면적의 증가 비가 높을 것이며, 이에 따라 절삭깊이가 표면거칠기 크기에 미치는 영향이 증가하여 다른 인자들의 기여도가 감소한 것으로 볼 수 있다.

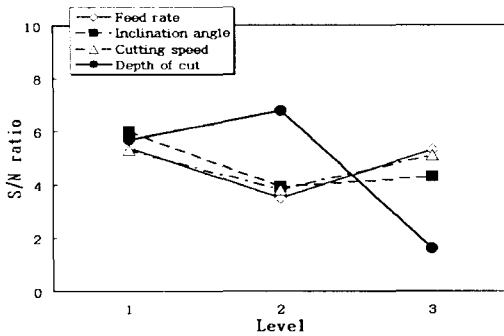


Fig. 5 Mean effect plot for S/N ratio

Fig. 5는 각각 제어인자에 대한 수준별 표면거칠기 크기에 대한 평균 S/N비 값의 결과를 나타낸 것이다. 일반적으로 절삭깊이의 증가에 따라 표면거칠기도 증가한다. 하지만 본 실험결과는 Fig. 5에서 나타난 것처럼 절삭깊이가 0.1mm에서 0.2mm로 증가할 때 S/N비도 증가하다가 절삭깊이가 0.2mm에서 0.4mm로 증가하면서 S/N비는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 실험결과는 절삭깊이가 0.1mm에서 0.2mm로 증가할 때 절인 반경과 절삭 메카니즘의 관계에 의한 것으로 절삭깊이가 작아 가공면에 버니싱(burnishing)작용⁽⁸⁾이 발생하여 표면거칠기가 감소한 것으로 판단된다.

4.3 회귀분석을 이용한 상관계수결정

본 실험에서 선택된 변수들간의 관련성을 규명하기 위해 회귀방정식을 사용하여 특성치인 절삭력과 표면거칠기에 인자들간의 복합적인 영향을 주어 값에 변화가 있을 때 이들 간의 함수관계를 나타내어 통계적인 방법으로 분석하였다. 본 논문에서는 중회귀모형의 관계식들을 적합시킨 후 C언어를 이용하여 회귀분석 모델식을 유도하였다. 4개의 인자에 대한 절삭력과 표면거칠기에 대한 통계적인 회귀분석 모델식은 각각 다음과 같다.

$$CF(N) = 0.24 - 46.3f - 0.388a + 0.00374v + 27.7d \quad (4)$$

$$SR(Ra, \mu m) = 0.309 - 0.227f + 0.00397a - 0.000067v + 1.08d \quad (5)$$

여기서, f 는 이송속도, a 는 경사각, d 는 절삭깊이 그리고 v 는 절삭속도이다. Fig. 6~7은 절삭력과 표면거칠기에 관

한 회귀분석 모델식을 사용하여 산출한 예측값과 실험값을 비교하여 제시하였다. 변동의 비율을 나타내는 변동계수(R-square)는 절삭력과 표면거칠기에 대한 모델식에서 각각 60.9%, 30.8%로 절삭력의 변동이 더 적은 것으로 나타났다. 결론적으로 예측값과 실험값이 비교적 잘 일치하는 것으로 볼 수 있다.

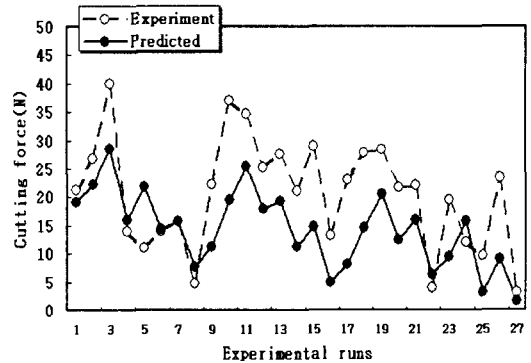


Fig. 6 Comparison of experimental vs. predicted cutting force

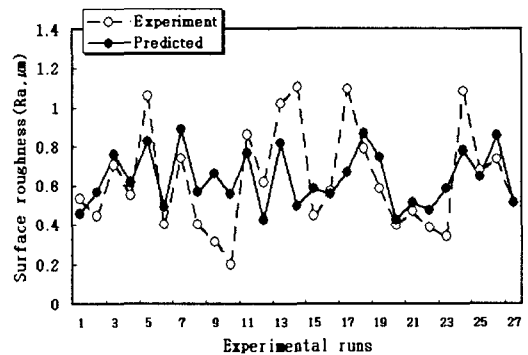


Fig. 7 Comparison of experimental vs. predicted surface roughness

5. 결론

선삭 가공시 로타리 공구를 통해 검출한 절삭력과 표면거칠기를 실험계획법과 회귀분석을 이용하여 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 절삭력은 경사각에 가장 크게 영향을 받으며, 절삭깊이, 이송속도의 순으로 나타났다. 또한 절삭속도의 영향은 미미한 것으로 확인된다.
- (2) 표면거칠기는 절삭깊이에 뚜렷하게 영향을 받으며

다른 절삭조건, 즉 이송속도, 경사각, 절삭속도는 조도에 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

- (3) 분산분석과 회귀분석을 이용하여 로타리 공구의 절삭공정시 절삭력과 표면거칠기를 예측할 수 있는 실험식을 도출하였다.

$$CF(N) = 0.24 - 46.3f - 0.388a \\ + 0.00374v + 27.7d$$

$$SR(Ra, \mu m) = 0.309 - 0.227f + 0.00397a \\ - 0.000067v + 1.08d$$

참 고 문 헌

- (1) Jun, J. U., Chung, J. S., Choi, C. S., and Ha, M. K., 2001, "Analysis of Cutting Specific in Non-ferrous Metal by Changed rake-angle and feed-rate adjustment at Turning," *ksmte*, PP. 32~37.
- (2) Venuvinod, P. K., and Reddy, P., N., 1981, *Some Studies on Cutting with Self-Propelled Rotary Tool* ASME Paper No. 81-WA/Pr od-16.
- (3) Venuvinod, P. K., 1970, *Analysis of Rotary Cutting Tool*, Ph, D, Thesis, University of Manchester.
- (4) Choi, G. H., Choi, G. S., and Kim, J. S., 1993, "A Study on Transient Chip Formation in Cutting with Self-Propelled Rotary Tools," *KSME*, Vol. 17, No. 8, PP. 1910~1920.
- (5) Armarego, E. J. A., Karri, V., and Smith, A. J. R., 1994, "Fundamental studies of driven and self-propelled rotary tool cutting process. I," *Int. J. Mach. Tools Manu fact.* Vol. 34, No. 6, PP. 785~801.
- (6) Armarego, E. J. A., Karri, V., and Smith, A. J. R., 1994, "Fundamental studies of driven and self-propelled rotary tool cutting process. II," *Int. J. Mach. Tools*, Vol. 34, No. 6, PP. 803~815.
- (7) Baker, W. R., Marshall, E. R., and Shaw, M. C., 1952, "The Size Effect in Metal Cutting," *TRANS. ASEM*, Vol. 74, PP. 61~72.
- (8) Kim, H. C., Hahm, S. D., Hong, W. P., Park, Y. W., and Kim, K. S., 2000, "The Comparison of Characteristics of PCD and MCD Tools in the Ultraprecision Turning of Aluminum Alloy," *Journal of KSPE*, Vol, 17, No. 12, December.
- (9) Dabade, A. D., Joshi, S. S., and Ramakrishnan, N., 2003, "Analysis of Surface Roughness and Chip Cross-sectional Area while Machining with Self-propelled Round Insert Milling Cutter," *Journal of Material Processing Technology*, 132, PP. 305~312.
- (10) Joshi, S. S., Ramakrishnan, N., Nagarwalla, H. E., and Ramakrishnan, P., 1999, "Wear of Rotary Carbide Tools in Machining Al/SiCp Composites," *Wear*, 230, PP. 124~132.
- (11) Joshi, S. S., and Ramakrishnan, N., 1998, "Study of Cutting Force While Turning Al/SiCp Composites Using Rotary Tools," *Material and Manufacturing Processes*, Vol. 13, No. 1, pp. 63~84.
- (12) Phabade, U. A., 1989, *Quality Engineering using Robust Design*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- (13) Montgomery, D. C., 1997, *Design and Analysis of Experiments*, 4Th ed., Wiley, New York.