

## 열간금형용강의 고속 엔드밀 가공인자의 영향에 대한 통계적 분석의 적용

배효준<sup>†</sup>·이상재·우규성<sup>\*</sup>·박흥식<sup>\*\*</sup>

### Application of Statistical Analysis for Working Factors Effect of High Speed End-Milling for STD61

Hyo-Jun Bae, Sang-Jae Lee, Kyu-sung Woo, Heung-Sik Park

**Key Words:** High speed End-milling(고속 엔드밀 가공), Coefficient of determination(결정계수), Design of experiment(실험계획법), Regression analysis(회귀분석)

#### Abstract

Recently the high speed end-milling processing is demanded the high-precise technique with good surface roughness and rapid time in aircraft, automobile part and molding industry. The working factors of high speed end-milling has an effect on surface roughness of cutting surface. Therefore this study was carried out to analyze the working factors to get the optimum surface roughness by design of experiment. From this study, surface roughness have an much effect according to priority on Spindle speed, feed rate, hardness and axial depth of cut. By design of experiment, it is effectively represented shape characteristics of surface roughness in high speed end-milling. And determination( $R^2$ ) coefficient of regression equation had a satisfactory reliability of 89.7% and regression equation of surface roughness is made by regression analysis.

#### 1. 서 론

여기에 서론을 입력하십시오.

최근 산업현장에서 널리 사용되는 고속가공기는 다양한 형상을 가진 재료의 가공에서 가공속도가 빠르기 때문에 가공시간을 단축할 수 있을 뿐만 아니라 인건비의 절감으로 인한 생산성의 향상과 일반의 범용 공작기계로 가공할 수 없는 가공물을 고정도로 가공할 수 있는 장점을 가지

고 있어 생산분야에 빠르게 이용되고 있다. 현재 고속가공기는 고속주축의 개발로 주축의 회전수가 10,000rpm에서50,000rpm의 고속주축을 탑재한 고속가공기가 널리 보급되고 있다.<sup>1,2</sup> 이 중에서 평면 엔드밀에 의한 고속가공은 슬롯, 포켓 및 표면가공 등 다양한 형상의 정삭 가공에 유용하게 사용되고 있다.

특히 금형가공에 있어서는 그것을 구성하는 각종 요소기술의 개발이나 코팅한 초경합금 공구 등의 성능이 향상됨으로서 종래에 방전가공이나 연삭가공에 의존하고 있었던 자동차 부품용의 주조나 단조 등에 이르기까지 공정집약, 고효율가공에 유용한 고속가공기의 사용빈도가 점차 증가하고 있는 추세에 있다. 이에 따라 정형가공 기술의 발달로 인하여 허용공차 이내로 표면정도를 유지하면서 가공시간을 감소시킬 수 있는 고정도의 가공기술이 필요한 실정에 있다.

† 동아대학교 기계공학과 대학원

E-mail : bhjrm@harmail.net

TEL : (051)200-6996 FAX : (051)200-7656

\* 부산기능대학 메카트로닉스학과

\*\* 동아대학교 기계산업시스템공학부

이처럼 엔드밀에 의한 고속가공의 경우 표면정도를 나타내주는 표면거칠기의 양부는 가공인자의 선정에 따라 결정되기 때문에 엔드밀에 의한 고속가공은 가공면의 표면정도를 향상시키기 위한 결삭조건<sup>3,4</sup>의 선정이 우선되어야 한다고 생각된다. 그러나 최적의 표면정도를 위한 각 가공인자와 수준(level)에 따른 실험은 많은 시간과 비용의 소요로 현실적 어려움이 따르므로 실험계획에 의한 통계적 기법의 도입이 필요하다.

실험계획법에 의한 통계적 기법은 가공조건에 따른 표면정도의 데이터를 분석하여 최소의 실험으로 최적의 가공조건에 대한 정보를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 특히 고속 엔드밀 가공에 있어서 특성치인 표면정도에 가장 많은 영향을 미치는 가공인자는 주축의 회전수, 이송속도, 절삭깊이, 공구의 형상 및 종류 등 여러 가지 인자들이 있지만,<sup>5</sup> 이들 인자들이 엔드밀 가공에 어느 정도 상호 영향을 미치는 지에 대한 연구는 아직 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구는 고속가공기를 이용하여 엔드밀 고속 가공조건 즉, 가공인자와 수준의 변화에 따른 표면정도를 통계적인 기법을 이용하여 정량적 분석을 행함으로써 고속 엔드밀 가공시 가공인자의 영향을 분석하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 실험계획법의 기초이론

### 2.1 분산분석과 다구찌 기법

고속 측면 엔드밀 가공에서 피삭재의 표면거칠기는 많은 인자들이 영향을 주고 있다고 인정되지만 어떤 특정한 하나의 인자만의 영향을 조사하기 위하여 각 인자의 일원 배치법에 의한 실험 결과를 분산분석<sup>6,7,8</sup>하였다.

Table 1에는 일원배치의 분산분석표를 나타낸 것이며, 이를 통하여 각 인자가 표면거칠기에 미치는 영향을 분석하고 최적의 가공조건을 조사하

Table 1 ANOVA table by one-way factorial design.

Factor	S	$\phi$	$V=S/\phi$	$F_0$	P
A	$S_A$	$l-1$	$V_A$	$V_A/V_e$	$P_A$
e	$S_e$	$l(m-1)$	$V_e$		
T	$S_T$	$lm-1$			

$$SN = -10 \log_{10} \sum_{j=1}^n \frac{y_j^2}{n} \quad (1)$$

기 위하여 다구찌 기법<sup>9,10</sup>의 손실함수(SN비)를 이용하여 특성치에 대한 망소특성을 조사하였다. 망소특성에 관한 손실함수는 식(1)과 같다.

여기서  $y$ 는 특성값(반응값),  $n$ 는 실험횟수를 나타내고 있다.

### 2.2 중회귀분석

어떤 종속변수(반응변수)의 변화는 두 개 이상의 독립변수(설명변수)에 의하여 영향을 받으며, 독립변수  $k$ 를 여러 개 선택하여 이들의 함수로서 종속변수가 변화하는 특성은 단순회귀에 비하여 보다 좋은 예측을 할 수 있다. 본 연구에서 이용하고자 하는 중회귀분석<sup>11,12</sup>은 열간 금형용강의 측면 엔드밀 가공에 있어서 표면거칠기를 종속변수로 잡고 여기에 영향을 주고 있는 독립변수(주축의 회전수, 공구이송속도, 절삭깊이 등)를 선택하여 독립변수와 종속변수간의 관련성을 규명하려는 통계적 분석방법으로, 이를 이용하여 가공인자간의 정량적인 함수관계를 구하였다. 이처럼 종속변수  $y$ 와  $n$ 개의 독립변수  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 에 대하여  $i$  번째 종속변수  $y_i$ 는 다음과 같다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_n x_{ni} + \varepsilon_i \quad (2)$$

회귀분석을 통한 회귀선은 그 적합성을 검정하기 위하여 분산분석의 작성이 필요하다. 여기서 추정된 회귀방정식의 정도를 측정하는 방법으로 많이 사용되는 측도(measure)는 Table 2와 같으며  $F_0$ 의 값이 크면 클수록 회귀방정식의 정도가 좋다고 말할 수 있다. 그리고 회귀방정식의 정도를 측정하는 방법으로 사용되는 것은 결정계수로서  $R^2$ 으로 식(3)과 같다. 이 값이 1에 가까울수록 높

Table 2 ANOVA for multiple linear regression model

Factor	S	$\phi$	V	$F_0$	P
Regression	SSR	$k$	MSR	MSR/MSE	$P_R$
Residual Error	SSE	$n-k-1$	MSE	-	-
Total	SST	$n-1$	-	-	-

은 정도를 갖는다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (3)$$

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치 및 실험재료

본 실험에 사용한 수직형 머시닝센터는 일본 OKADA사의 고속가공기로서 주축의 회전수는 최고 30,000 rpm, 공구 이송속도는 40,000mm/min이다. 본 연구에 사용된 절삭공구는 고속용 초경 엔드밀로서 TiAlN 코팅처리된 것을 사용하였으며 실험재료는 STD61를 30×20×20mm로 일정하게 가공하여 사용하였으며, 절삭깊이를 일정하게 하기 위하여 평면도가 0.01 mm 이하가 되도록 평면 연마한 후 사용하였다. 엔드밀의 고속 측면가공에서 가공방향은 시험편의 가로방향 30mm를 기준으로 하여 가공인자의 수준을 변화시켜 가공하였으며 이에 대한 영향을 분석하기 위하여 특성치(Response)인 중심선 평균거칠기  $Ra(\mu m)$ 를 측정하였다.

#### 3.2 실험방법

고속 측면 엔드밀 가공에 있어서는 정삭 가공이 대부분이므로 본 실험에서는 Table 3에서와 같이 절삭거리, 실험재료의 경도, 주축회전수, 이송속도 및 절삭깊이를 가공인자로 선정하고 각 인자는 3 수준(Level)으로 선정하였다.

실험은 직교배열표를 이용하여 실험을 실시하였으며, 여기서 가공면의 편평도 오차를 최소화하기 위하여 절삭깊이 0.01mm의 초기 측면 엔드밀 가공 후 본 실험에서 설정한 절삭깊이에 따라 고속 측면 엔드밀 가공실험을 하였다. 또한 가공인자인 절삭구간은 실험의 순서에 따라 3구간으

Table 3 Experimental conditions

Factors		Level		
		1	2	3
A	Section of cut	1	2	3
B	Spindle speed(rpm)	7,000	14,000	21,000
C	Feed(mm/min)	3,000	6,000	9,000
D	Hardness(HRC)	30	40	50
E	Axial depth of cut(mm)	2	4	6
F	Radial depth of cut(mm)	0.05	0.10	0.15

로 설정하여 오차를 줄이기 위한 초기절삭을 포함한 9번의 가공 후까지의 구간으로 나타내었다.

그리고 가공시 냉각방식은 절삭유와 공기를 혼합한 오일 미스트 스프레이 방식(oil mist spray)을 사용하였으며, 실험 후 특성치로서 가공면의 표면거칠기에 대하여 일원 배치 분산분석과 다구찌 기법을 통하여 특성치에 대한 가공인자의 영향과 최적조건을 조사하였다.

### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 가공인자의 영향

Table 4는 각 인자와 수준을 직교배열표에 의한 실험결과를 나타내었다. 그리고 실험인자는 절삭구간, 주축의 회전수, 공구이송속도, 재료의 경도, 축방향 절삭깊이 및 반지름 방향 절삭깊이로 설정하여 각각 3수준으로 설정하여 고속 측면 엔드밀 가공 후 피삭재의 가공인자와 수준변화에

Table 4 Surface roughness of orthogonal arrays experiment

Run order	A	B	C	D	E	F	Ra ( $\mu m$ )
1	1	7000	3000	30	2	0.05	0.447
10	2	7000	3000	30	2	0.10	0.409
14	2	7000	3000	30	2	0.15	0.380
4	1	7000	6000	40	4	0.15	0.381
11	2	7000	6000	40	4	0.10	0.435
20	3	7000	6000	40	4	0.05	0.313
7	1	7000	9000	50	6	0.05	0.362
15	2	7000	9000	50	6	0.15	0.375
21	3	7000	9000	50	6	0.10	0.275
2	1	14000	3000	30	6	0.10	0.117
12	2	14000	3000	30	6	0.15	0.107
22	3	14000	3000	30	6	0.05	0.107
5	1	14000	6000	40	2	0.15	0.252
16	2	14000	6000	40	2	0.05	0.262
23	3	14000	6000	40	2	0.10	0.258
8	1	14000	9000	50	4	0.15	0.290
24	3	14000	9000	50	4	0.05	0.313
27	3	14000	9000	50	4	0.10	0.246
3	1	21000	3000	30	4	0.15	0.057
17	2	21000	3000	30	4	0.05	0.058
25	3	21000	3000	30	4	0.10	0.045
9	1	21000	6000	40	6	0.05	0.202
18	2	21000	6000	40	6	0.10	0.207
26	3	21000	6000	40	6	0.15	0.167
6	1	21000	9000	50	2	0.05	0.156
13	2	21000	9000	50	2	0.10	0.193
19	3	21000	9000	50	2	0.15	0.300

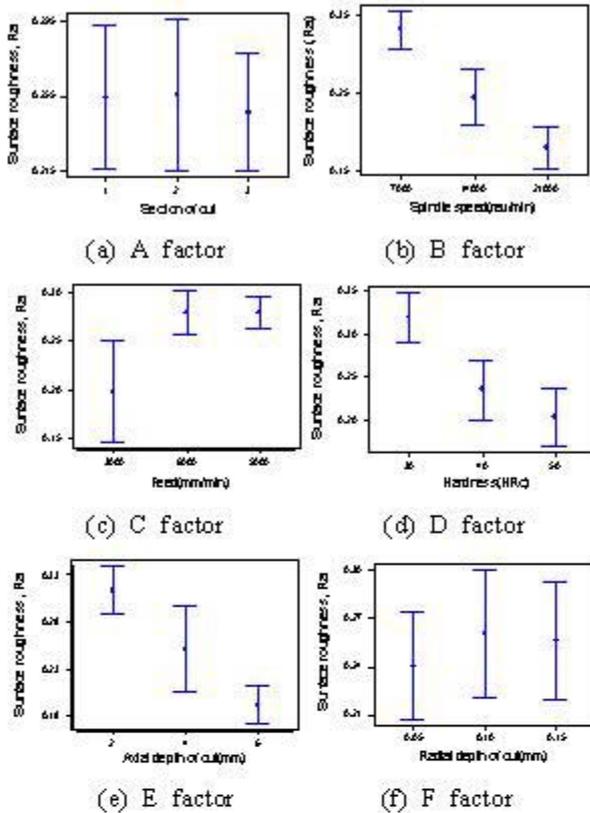


Fig. 1 Interval plot for surface roughness of working condition

다른 표면거칠기를 나타낸 것이다.

Fig. 1은 고속 엔드밀 정삭 가공시 가공인자에 따른 영향을 특성치인 표면거칠기에 대한 각 인자의 수준별 평균과 표준편차를 점과 편차구간으로 표시하였다. 그림에서 점은 평균 경향성을 나타내고 있으며 편차구간은 데이터의 변동성을 동시에 나타내고 있다. 그리고 각 가공인자의 수준변화에 따른 특성치의 편차구간이 크고 중복되는 경우에는 가공인자의 각 수준에서의 특성치의 편차가 크며 인자의 수준변화에 따라 특성치인 표면거칠기에 대한 영향이 적다고 할 수 있다. 따라서 Fig. 1의 (b), (c), (d), (e)에서 가공인자인 주축의 회전수, 공구이송속도, 재료의 경도, 축방향 절삭깊이는 수준간의 차가 크다는 것을 알 수 있으며 이는 가공인자의 수준변화에 따른 표면거칠기에 많은 영향을 주고 있다는 것을 알 수 있다. (b), (d), (e)의 경우 각 인자의 수준이 증가할수록 표면거칠기는 양호해지고 있으며 (c)의 경우, 공구이송속도가 증가할수록 표면거칠기는 증

Table 5 ANOVA of surface roughness for experiment condition

Factor	$S$	$\phi$	$V$	$F_0$	$P$
A	0.000500	2	0.000308	0.34	0.719
B	0.105521	2	0.052483	57.53	0.000
C	0.039945	2	0.018548	20.33	0.000
D	0.064672	2	0.032336	35.45	0.000
E	0.066029	2	0.033135	36.32	0.000
F	0.002426	2	0.002426	1.33	0.296
Error	0.012772	14	0.012772		
Total	0.291864	26			

가하고 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 (a)와 (f)에서 절삭구간과 반지름 방향 절삭깊이는 수준간의 차이가 크지 않고 중복되고 있으므로 수준변화에 따라 표면거칠기에는 영향이 크지 않다는 것을 나타내고 있다.

Table 5은 열간금형용강의 고속 엔드밀 정삭 가공에서의 가공인자에 따른 표면거칠기의 영향을 분산분석하여 나타내고 있다. 분산분석한 P-검정의 결과 고속 엔드밀 가공에서 주축의 회전수, 공구이송속도, 재료의 경도 및 축방향 절삭깊이는 표면거칠기에 많은 영향을 미치고 있다는 것을 알 수 있으며 절삭횟수와 반지름 방향 절삭깊이는 그 영향이 적다는 것을 알 수 있다. 여기서 주축의 회전수와 공구이송속도는 수준변화에 따라 공구 1개 낱당 절삭체적의 변화, 즉 주축의 회전수가 증가하고 공구이송속도가 감소할수록 절삭체적이 감소됨으로 표면거칠기는 양호하게 나타나며 그와 반대로 주축의 회전수가 감소하고 공구이송속도가 증가할수록 절삭체적이 증가되어 표면거칠기는 증가한다고 생각되며 재료의 경도와 축방향 절삭깊이가 증가할수록 공구날에 작용하는 구성인선이 적어짐으로 표면거칠기는 감소됨으로 고속 엔드밀 가공에서 표면거칠기에 많은 영향을 미치고 있다고 생각되어진다.

Fig. 2는 열간금형용강인 STD61의 고속 엔드밀 가공에 있어서 각 가공인자와 수준에 따른 표면거칠기에 대한 영향을 식 (1)에 의한 SN비로 나타내고 있다. 본 실험에서 설정한 가공인자와 수준에 있어서 주축의 회전수의 변화가 특성치인 표면거칠기에 가장 많은 영향을 미치고 있으며 그외의 가공인자는 공구이송속도, 재료의 경도, 축방향 절삭깊이 순으로 많은 영향을 미치고 있으며 반지름 방향 절삭깊이와 절삭구간에 있어서

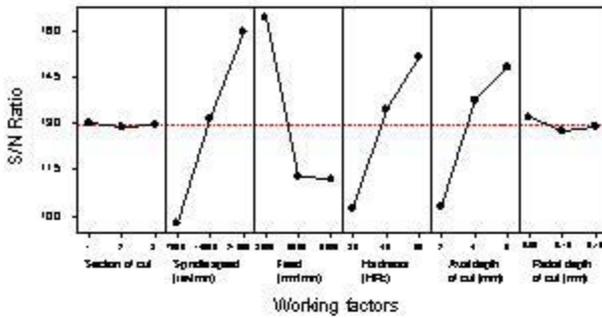


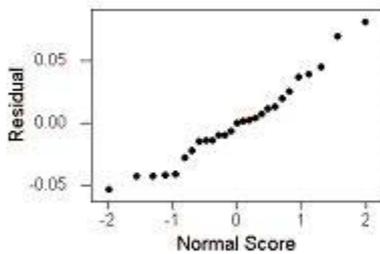
Fig. 2 S/N ratio of surface roughness with working factors

는 그 영향이 적다는 것을 알 수 있다.

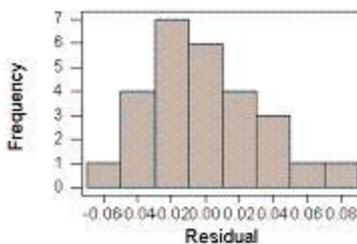
따라서 열간금형용강인 STD61의 고속 엔드밀 정삭 가공에 있어서는 주축의 회전수가 21,000 rpm 이상에서 공구이송속도는 3,000mm/min, 재료의 경도는 50HRC, 축방향 절삭깊이는 6mm일 때가 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있는 가공조건이라 생각된다.

4.2 중회귀분석에 의한 수학적 모형

Fig. 3은 열간금형용강인 STD61의 고속 엔드밀 정삭 가공 후 특성치인 표면거칠기를 각 실험에 따른 표면거칠기의 잔차를 분석하여 나타내고 있



(a) Normal plot of residuals



(b) Histogram of residuals

Fig. 3 Residual model diagnostics for surface roughness, Ra

으며, 정규성 그래프에서 잔차의 분포상태가 일직선에 가까운 정규분포를 하고 있다. 히스토그램에서는 하나의 정점을 가지고 있으며 대칭적 종모양을 갖고 있으므로 정규분포하고 있음을 알 수 있다.

따라서 Fig 3의 특성치에 대한 잔차분석을 통하여 회귀분석에 있어서의 회귀식의 모형 추정에 있어서의 정도를 가질 수 있다는 것을 알 수 있으며 고차항이 필요하지 않다는 것을 알 수 있다. 열간금형용강인 STD61의 고속 엔드밀 정삭 가공 후 표면거칠기를 중회귀분석을 통한 수학적 모형의 추정은 전술한 식 (2)로부터 추정된 Ra (μm)의 회귀방정식은  $x_1$ 을 주축회전수(rpm),  $x_2$ 를 공구 이송속도(mm/min),  $x_3$ 를 재료의 경도(HRC),  $x_4$ 를 축방향 절삭깊이(mm)라 할 때 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Ra = 0.677 - 0.000011x_1 + - 0.00581x_2 - 0. \quad (4)$$

이 추정된 회귀방정식으로부터 표면거칠기는 주축회전수( $x_1$ )와 재료의 경도( $x_3$ )와 축방향 절삭깊이( $x_4$ )가 증가함에 감소하는 경향을 나타내고, 공구이송속도( $x_2$ )가 증가함에 따라 증가한다는 것을 알 수 있다. 그리고 전술한 표준편차, 분산분석, 다구찌 기법에 의한 S/N비의 결과에서 가공인자, 절삭횟수 구간과 반지름 방향 절삭깊이는 특성치인 표면거칠기에 많은 영향을 미치고 있지 않고 있으므로 이들 가공인자는 회귀분석의 수학적모형에서 제외하였다.

Table 6은 열간금형용강인 STD61의 표면거칠기에 대한 중회귀의 분산분석을 나타낸 것으로 이를 통하여 추정된 회귀방정식의 정도를 측정할 수 있다. 또한 결정계수  $R^2$ 를 통하여 총 변동 중에서 회귀선에 의하여 설명되는 변동이 차지하는 비율을 나타낼 수 있다. 고속 엔드밀 정삭 가공에 있어서 추정된 회귀방정식(4)은 P-검정에서 가

Table 6 ANOVA of Multiple linear regression model for Surface roughness

Factor	S	σ	V	F0	P
Regression	0.261740	4	0.065435	47.79	0.000
Residual Error	0.030124	22	0.001369		
Total	0.291864	26			

공조조건에 따른 표면거칠기를 충분히 설명할 수 있다고 할 수 있으며 이를 회귀변동을 총변동으로 나눈 결정계수  $R^2$ 은 식 (3)에 의하여 89.7%의 정도를 나타내고,  $MSE$ 가 0.001369로 데이터의 산포가 작으므로 신뢰성이 양호하다고 생각된다.

## 5. 결론

열간금형용강(STD61)의 엔드밀 고속 가공에 있어서 가공인자가 가공면의 표면거칠기에 미치는 영향을 실험계획법에 의하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실험계획법을 통한 고속 평면 엔드밀링의 가공인자에 대한 통계적 분석이 가능하였다.
- (2) 엔드밀가공에서 가공인자의 영향은 주축의 회전수, 이송속도, 재료의 경도, 축방향 절삭깊이 순으로 표면거칠기에 영향을 미친다.
- (3) STD61의 고속 엔드밀링은 주축회전수 21,000rpm, 이송속도 3,000mm/min, 재료의 경도 50HRC, 축방향 절삭깊이 6mm일때 양호한 표면거칠기를 나타낸다.
- (4) 본 연구를 통하여 가공인자에 대한 회귀방정식의 모형을 구축하였다.

## 참고문헌

1. Nakamura, S., "High-Speed Spindles for Machine Tools," Int. J. Japan Soc. Prec. Eng. Vol. 30, No. 4, pp. 291-294, 1996.
2. Dewes, R. C., Apinwall, D. K., and Wise, M. L. H., "High Speed Machining Cutting Tools and Machine Requirements," Proceedings of the 31st Int. MATADOR Conf. Manchester, UK, pp. 455-461, 1995.
3. Elbestawi, M. A., Ismail, F. K. M., Yuen, "Surface Topography Characterization in Finish Milling," Int. J. Mach. Tools Manufact, Vol. 34, No. 2, pp. 245-255, 1994.
4. Lim, p., Jang, D. K., Lee, H. K., and Yang, G. E., "High speed machining of cavity pattern in prehardened mold using the small size tool," Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 133-139, 2004.
5. Bechhofer, R. E., and Dunnett, C. W., "Percentage points of multivariate Student distributions," American

- Mathematical Society, Vol. 11, 1938.
6. Ullman, N. R., "The Analysis of Means (ANOM) for Signal and Noise," Journal of Quality Technology, Vol. 21, pp. 111-127, 1989
7. Harter, H. L., "Order Statistics and Their Uses in Testing and Estimation," U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., Vol. 1, 1970.
8. Hayter, A. J., "A proof of the conjecture that the Tukey-Kramer multiple comparisons procedure is conservative," Annals of Statistics, Vol. 12, pp. 61-75, 1984.
9. Park, S. H., "Modern Design of Experiment," Minyung Co. pp. 67-109, 2002.
10. Lee, S. B., "Easy to Understand of Taguchi Technique," Sangcho Co., pp. 125-213, 2001.
11. Brown, C. C., "On a Goodness of Fit Test for the Logistic Model Based on Score Statistics," Communications in Statistics, Vol. 11, pp. 1087-1105, 1982.
12. Bhargava, A., "Missing Observations and the Use of the Durbin-Watson Statistic," Biometrika 76, Vol. 4, pp. 828-831, 1989.