

◆ 특집 ◆ 직선 · 회전모터 구동 이송 · 회전체 연구 XIV

## 실험계획법을 이용한 아노다이징 표면 처리된 Al7075 소재의 효율적인 슈퍼피니싱 조건 선정에 관한 연구

### Selection of the Efficient Superfinishing Condition on an Anodized Al7075 Surface in Experimental Design

이순종<sup>1</sup>, 최수현<sup>1</sup>, 조영태<sup>1</sup>, 정윤교<sup>1,✉</sup>, 정종윤<sup>2</sup>  
Soon-Jong Lee<sup>1</sup>, Su-Hyun Choi<sup>1</sup>, Young-Tae Cho<sup>1</sup>, Yoon-Gyo Jung<sup>1,✉</sup>, and Jong-Yun Jung<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 창원대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Changwon National University)

<sup>2</sup> 창원대학교 산업조선해양공학부 (School of Industrial Engineering and Naval Architecture, Changwon National University)

✉ Corresponding author: yjung@changwon.ac.kr, Tel: +82-55-275-6701

Manuscript received: 2016.10.17. / Revised: 2026.11.8. / Accepted: 2016.11.8.

*In today's manufacturing industries, the demand for light non-ferrous materials is considerable due to the need to improve productivity and manufacturability. Since the surface roughness of a material is important for improving the functionality of machined parts, various techniques for surface treatments have been developed to obtain non-ferrous materials with low roughness. A superfinishing method utilizing polishing films is generally applied to the anodized surface of Al7075 in order to improve its roughness. The objective of this research is to determine through experiment the parameters that facilitate the shortest processing time, using a superfinishing method, for reaching a roughness of Ra 0.2  $\mu\text{m}$ . This objective is met by applying the Taguchi method in the experiments. Through the experiments of superfinishing, the effectiveness of the parameters adopted for the surface treatment is demonstrated.*

KEYWORDS: Superfinishing (슈퍼피니싱), Anodizing surface treatment (아노다이징 표면 처리), Surface roughness (표면 거칠기), Daguchi method (다구찌 기법)

#### 1. 서론

최근 항공우주 산업의 발달로 기내의 부품 및 자재에 대한 수요가 증가하고 있다. 그 중 항공기 저장조는 항공기 내에서 각종 유압장치 및 회로의 유압유 손실을 보충하고 고압라인과 저압라인의 압력 균형을 유지하면서 유압유를 저장하는 중요

한 장치이다. 이러한 항공기 저장조는 135℃의 고온상태와 -40℃의 저온상태에서 피스톤운동에 의해 작동된다. 이 환경에서 항공기 저장조 내경부에 위치하는 피스톤이 원활히 작동하기 위해서는 저장조의 내면부 표면거칠기 Ra 0.2  $\mu\text{m}$ 가 요구된다. 또한 피스톤 운동으로 인해 표면 입자의 박리를 초래할 수 있어 소재의 내마모성과 내부식성을 향

상시키기 위해 표면에 경질 아노다이징 처리를 한다. 하지만 아노다이징 후 표면거칠기 값이 Ra 0.6 - 0.8  $\mu\text{m}$ 가 상승하여<sup>1</sup> 다시 Ra 0.2  $\mu\text{m}$ 로 낮추기 위한 가공이 필요하며, 현재 이 작업은 수작업에 의해 진행되고 있다. 이러한 수작업공정으로 인해 작업자의 피로에 따른 제조 수량 제한에 의한 생산성 저하 및 내경부의 불균일한 표면 상태를 초래하여 항공기 저장조의 기능을 저하시키는 원인이 된다. 이에 제조공정의 자동화 및 균일한 표면 연마를 위한 효율적인 연마 조건 선정에 관한 연구의 필요성이 대두되었다.<sup>14</sup>

연마 기법 중 수퍼피니싱은 다른 연마 기법에 비해 가공 방향성을 제거하여 Ra 0.2  $\mu\text{m}$ 에 준하는 경면 연마에 적합하며 많은 연구에 활용되고 있다.<sup>16</sup> 하지만 수퍼피니싱 공정에는 공작물 회전 속도, 연마부의 요동 속도, 연마재의 종류, 소재와 연마재의 접촉 상태 등 많은 인자와 조건이 작용하여 모든 조건을 고려하여 실험을 진행하게 되면 실험 횟수가 기하학적으로 증가한다. 이 때 실험 횟수를 줄이면서 신뢰성있는 실험결과를 도출할 수 있는 방법으로 실험계획법을 이용하는 방법이 있어 이에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.<sup>6-14</sup>

따라서 본 연구에서는 실험계획법을 이용하여 아노다이징 처리된 Al7075 표면의 효율적인 수퍼피니싱 조건을 선정하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 아노다이징 처리한 Al7075 시편을 수퍼피니싱한 결과를 토대로 다구찌 기법을 적용하여 SN비 해석과 ANOVA 해석을 진행했으며, 해석 결과에 대한 확인 실험을 진행했다.

**2. 실험장치 및 방법**

본 연구에서 사용된 수퍼피니싱 장치는 Fig. 1 과 같은 장치이며 제원은 Table 1과 같다. 이 장치는 연마필름을 연마재로 사용하며 연마필름의 공급 및 회수와 오실레이션 구동을 위한 수퍼피니셔부와 연마필름 이송 속도, 오실레이션 속도, 공기압을 통한 시편과 연마필름의 접촉압력 제어, 절삭유 공급 등 각종 기기 제어를 위한 제어장치부로 나눌 수 있다. Fig. 2는 수퍼피니싱의 기본원리를 나타낸 그림으로 한쪽의 롤러에는 사용되지 않은 필름이 감겨있는 공급롤러 (Supply Roller)가 있고 다른 쪽에는 필름을 감아주는 회수롤러 (Withdrawal Roller)가 있는데 필름을 일정 속도로 이동시키면서 작업물의 표면에 항상 새로운 필름 입자를 제공한다. 그

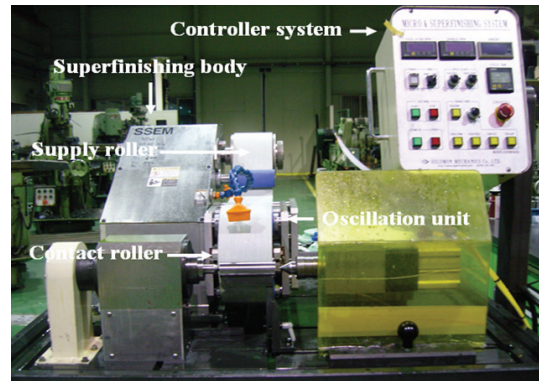


Fig. 1 Superfinishing machine

Table 1 Specification of superfinishing machine

Oscillation speed	0 - 1000 (rpm)
Spindle speed	0 - 1200 (rpm)
Coolant flow rate	0 - 36 (l/min)
Contact pressure	0 - 7 (bar)

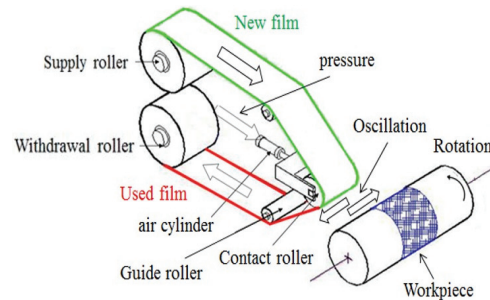


Fig. 2 Schematic diagram of superfinishing

리고 공작물과 접촉하여 연마를 하기 위한 접촉롤러 (Contact Roller)와 접촉롤러를 전진 및 후진, 이동과 연마 시 일정한 접촉압력을 하기 위한 공압 실린더 (Air Cylinder)로 구성되어 있다.<sup>2</sup> 오실레이션 장치 (Oscillation Unit)가 접촉롤러를 좌우 진동을 주며 접촉롤러에 있는 필름을 이용해 회전하고 있는 공작물의 연마를 진행한다. 그리고 수퍼피니싱은 1회당 연마시간을 3초로 설정하여 실험을 진행하였다.

**3. 연마 시간의 결정**

본 연구에서 사용한 결과 값은 아노다이징 표면 처리된 Al7075의 연마 후 표면거칠기가 0.2  $\mu\text{m}$ 에 도달할 때의 연마 시간 ( $T_0$ )이다. 여기서 중요

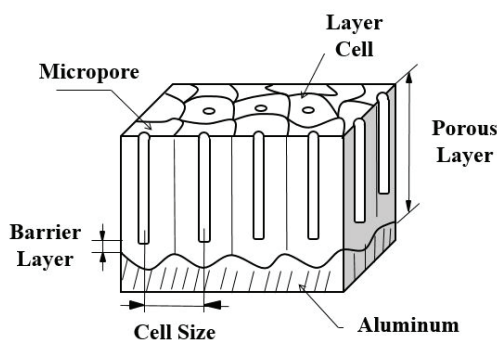


Fig. 3 Structure of porous layer in the anodizing surface

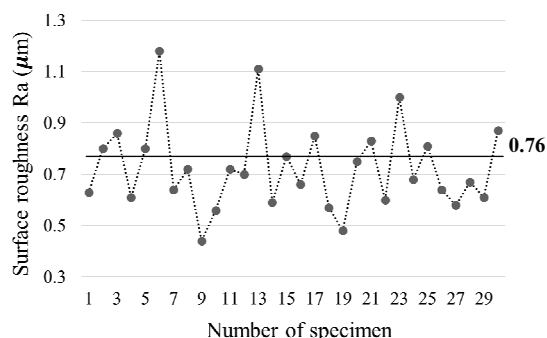


Fig. 4 Surface roughness distributions of the anodized surface

한 점이 Al7075 시편의 표면이 아노다이징 처리되었다는 점으로 아노다이징은 표면의 마모가 우려될 염려가 있는 곳에 표면 마모를 막기 위해 산소와 반응성이 큰 Al, Ti, Mg과 같은 금속표면에 산소와 양극처리하여 얇은 산화 피막을 만드는 방법이다. 생성된 산화 피막의 구조는 Fig. 3과 같으며, 매우 경하고 내식성이 커 소재 표면의 내부식성과 내마모성 향상이라는 이점이 있다.<sup>3,4</sup> 하지만 아노다이징 표면 처리를 하게 되면 기존 소재의 표면이 부식되면서 산화 피막이 생성, 성장하고 산화층 표면에 다공층이 형성되어 표면거칠기의 악화를 유발해 불규칙한 표면 상태를 초래한다.

Fig. 4는 실험에 사용된 아노다이징 처리된 Al7075의 초기 표면거칠기를 측정된 데이터로써 최소 0.4 μm - 최대 1.2 μm의 불규칙한 표면거칠기를 나타냄을 확인할 수 있다. 만일 측정된 초기 표면거칠기 값을 사용하여 수퍼피니싱 실험을 진행하여 결과를 도출해냈을 때 초기 표면거칠기 값에 따라  $T_0$  값의 신빙성이 떨어져 연마 전, 후의 데이터에 보정이 필요하다. 그 보정 방법은 Fig. 5

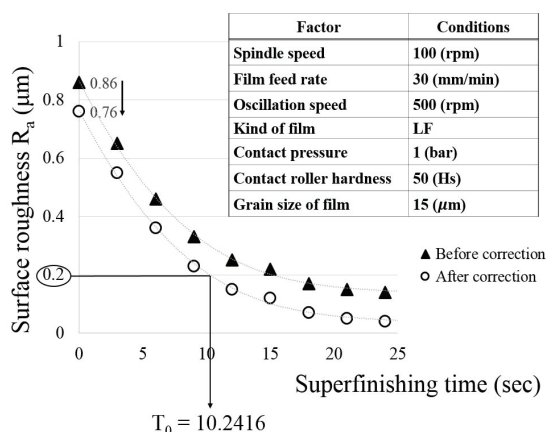


Fig. 5 Determination of optimum superfinishing time

에서와 같이 초기 표면거칠기 값 0.86 μm과 평균값인 0.76 μm의 편차 0.1 μm를 연마 후 데이터 각각에 동일하게 적용하여 보정을 실시하여 최종적으로  $T_0$  10.24초를 도출해 내었다.

#### 4. 다구찌 기법의 적용

##### 4.1 실험 인자 및 수준 선정

실험 결과에 영향을 미칠 것으로 예상되는 여러 인자 중 선행연구를 참고하여 선정된 제어인자로는 소재의 회전속도인 Spindle 속도와 필름의 이송속도인 Film Feed Rate, 수퍼피니셔 부의 요동속도인 Oscillation Speed, 사용된 연마 필름의 종류, 입도, 연마필름과 소재간의 접촉 압력, Contact Roller의 경도 총 7가지로 선정하여 각각 2수준으로 조건을 선정하였다.<sup>1-6</sup> 수준 선정은 최적수준을 선정하기 위한 실험 수준 선정이므로 실험장비 운용 가능 범위내의 수준 중 실험결과에 영향을 미칠 수준의 최소치와 최대치를 선행연구 또는 실험자의 경험에 따라 유동적으로 선정을 해야 한다. 본 실험에서는 Spindle 속도는 1수준으로 100 rpm, 2수준으로 300 rpm으로, Film Feed Rate의 1수준은 30 mm/min, 2수준은 60 mm/min, Oscillation Speed 1수준 100 rpm, 2수준 500 rpm, 연마필름의 종류는 LF 필름, MF필름, 접촉롤러의 경도는 50, 70 Hs, 접촉롤러와 소재간의 접촉압력은 1, 2 bar 그리고 연마필름의 입자의 크기는 15, 9 μm의 인자와 수준으로 Table 2와 같이 선정하여 직교배열표를 작성하여 직교배열표에 나타난 실험 조건에 따라 실험을 진행했다.

Table 2 Factors and levels were used in this experiments

Symbol	Factor	Level	
		1	2
A	Spindle speed (rpm)	100	300
B	Feed rate (mm/min)	30	60
C	Oscillation speed (rpm)	100	500
D	Type of film	LF	MF
E	Contact pressure (bar)	1	2
F	Roller hardness (Hs)	50	70
G	Film grain size (μm)	15	9

4.2 실험 및 해석 결과

Table 3이 실험에 사용된 2수준 7인자 직교배열 표 및 도출된 수퍼피니싱 시간 T<sub>0</sub>다. 실험 순서는 다구찌 기법에서는 순차적인 실험진행 시 작용하는 인자간의 교호작용 해석이 불가능하므로 실험 진행 순서는 직교배열표에서 정해진 순서가 아닌 임의로 정한 순서인 실험번호 1, 5, 8, 4, 6, 3, 7, 2 순으로 진행되었으며, T<sub>0</sub> 값을 적용한 다구찌 해석 결과 SN비는 Fig. 6과 같이 해석되었다. 이번 실험의 특성치로 T<sub>0</sub> 값을 사용하므로 수퍼피니싱 시간이 짧을수록 효율적이고 생산성 향상을 의미하므로 특성치의 값이 작을수록 좋은 특성을 의미하는 망소특성의 경우를 적용하여 SN비를 분석했다. 망소특성 시 특성치의 SN비 계산식은 식(1)과 같다. 식(1)에서 n은 잡음인자에 대한 실험결과의 총 수를 의미하며, y<sub>i</sub>는 i번째의 잡음인자에 대한 특성치의 값을 의미한다.

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

이러한 SN비는 신호 대 잡음을 뜻한다. 이는 잡음에 대한 제어 인자의 영향력 정도를 나타낸다. 즉, SN비가 클수록 실험결과에 대한 영향에서 실험자가 제어 가능한 인자의 영향이 제어 불가능한 잡음인자의 영향이 더 미비하다는 의미이다. 해석 결과로 SN비가 더 큰 수준을 최적조건 선정에 위한 수준으로 판단한다.

따라서 본 실험의 해석 결과로 Spindle Speed는 2수준 (300 rpm), Feed Rate 1수준(30 mm/min), Oscillation Speed 2수준(500 rpm), 필름 종류 2수준 (MF), 접촉 압력 1수준 (1 bar), 접촉롤러 경도 1수준 (50 Hs), 필름 입도 1수준 (15 μm)로 최적조건으로 해석되었다. 그리고 7개의 인자 중 유의한 영향을 미치는 인자를 선정하기 위해 ANOVA 해석

Table 3 Orthogonal array used in this study and T<sub>0</sub>

No.	Factor							T <sub>0</sub> (sec)
	A	B	C	D	E	F	G	
1	100	30	100	LF	1	50	15	10.2416
2	100	30	100	MF	2	70	9	17.3191
3	100	60	500	LF	2	70	9	16.9431
4	100	60	500	MF	1	50	15	5.0378
5	300	30	500	LF	1	50	9	15
6	300	30	500	MF	2	70	15	3.0028
7	300	60	100	LF	2	70	15	13.8784
8	300	60	100	MF	1	50	9	14.4238

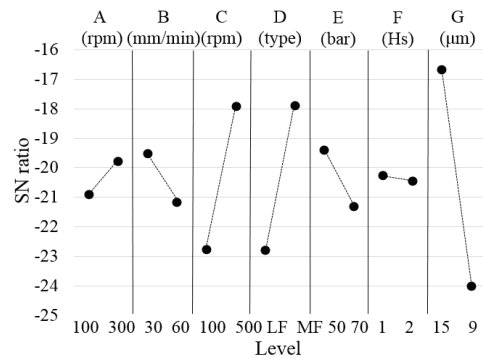


Fig. 6 Plots of SN-ratio

Table 4 Analysis result of significance probability using ANOVA

Factor	Significance probability (%)		
	1st pulling	2nd pulling	3th pulling
Spindle speed	28.9	-	-
Feed rate	39.4	-	-
Oscillation speed	74.8	94.8	95.7
Film type	75.4	95.1	96
Roller hardness	-	-	-
Contact pressure	49.1	70.8	-
Film grain size	86.8	99.2	99.6

을 진행했다. ANOVA 해석은 측정 데이터 전체의 분산 몇 개의 요인 효과에 대응하는 분산과, 그 나머지 오차 분산으로 나누어 검정이나 추정을 실시하는 것으로 유의 수준을 0.05로 설정하여 유의 수준과 유의확률 P값을 비교함으로써 SN비 해석을 마친 결과 중 수준을 변경하더라도 결과에 유의한 영향을 미치지 않는 인자를 색출해낼 수 있다. 이 때 P값을 이용한 해석 시에는 P값이 0.05보다 작으면 기준에 정립된 귀무가설을 기각한다는

Table 5 Confirmatory test results

No.	Factor							T <sub>0</sub> (sec)
	A	B	C	D	E	F	G	
1	300	30	500	MF	1	50	15	7.18
2	100	30	500	MF	1	50	15	8.81 (+1.09)
3	300	60	500	MF	1	50	15	8.90 (+1.18)
4	300	30	100	MF	1	50	15	11.06 (+3.88)
5	300	30	500	LF	1	50	15	18 (+10.82)
6	300	30	500	MF	2	50	15	7.41 (+0.23)
7	300	30	500	MF	1	70	15	7.18 (+0)
8	300	30	500	MF	1	50	9	12.48 (+5.30)

의미로 실험의 결과에 굉장히 유의한 영향을 미치는 인자로 판별할 수 있다.<sup>10,11</sup> 본 실험에서 세운 귀무가설의 경우 ‘해당 인자가 실험결과에 영향을 미치지 않는다.’로 P값이 0.05보다 작거나 같게 되면 이 귀무가설은 기각되고 해당인자가 실험의 결과에 영향을 미친다는 것으로 해석이 되는 것이다. 이는 유의 확률 (Significance Probability)로도 해석된다. 즉, 95%의 유의 확률보다 큰 확률을 나타내는 인자의 영향이 크다는 의미이다. 그래서 최종적으로 Table 4가 2차 폴링을 거친 해석 결과로 Oscillation Speed, 필름의 선정이 수퍼피니싱 결과에 영향을 미칠 것으로 해석되었다.

**4.3 실험 및 해석 결과 확인 실험**

선정된 최적조건의 영향을 확인해보기 위해 각 인자들의 수준을 최적조건이 아닌 수준으로 변경하여 실험해본 결과 Table 5와 같이 최적조건인 Spindle Speed는 2수준 (300 rpm), Feed Rate 1수준 (30 mm/min), Oscillation Speed 2수준 (500 rpm), 필름 종류 2수준 (MF), 접촉 압력 1수준 (1 bar), 접촉롤러 경도 1수준 (50 Hs), 필름 입도 1수준 (15 μm)의 조건으로 실험했을 때 T<sub>0</sub>가 7.18초가 나왔으며 유의하지 않은 인자인 Spindle Speed만 1수준으로 변경했을 때 + 1.09 초, Feed Rate 변경 시 + 1.18 초, 접촉 압력 변경 시 + 0.23 초, 접촉 롤러 변경 시 소수점 셋째자리에서의 차이를 보였다. 반면 유의 인자로 선정된 Oscillation Speed 변경 시 + 3.88 초,

필름 종류 변경 시 + 10.82 초, 필름 입도 변경 시 + 5.30 초의 연마 시간 증가를 확인하였다.

**5. 결론**

본 연구에서는 아노다이징 표면 처리 된 Al7075 소재의 연마필름을 이용한 수퍼피니싱 연마 시 영향을 미치는 인자 중 시편의 회전속도, 연마필름의 이송속도, 수퍼피니셔 부의 요동속도, 연마필름의 종류, 연마필름 입자의 크기, 시편과 연마필름간의 접촉 압력, 접촉 롤러의 경도 총 7가지 인자의 영향도를 실험계획법의 SN비 분석과 분산분석을 통해 해석하고 해석결과를 검증하기 위한 확인실험의 결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) SN비 분석을 통해서 시편의 회전속도(A), 수퍼피니셔 부의 요동속도(C), 연마필름의 종류(D)는 2수준, 연마필름 이송속도(B), 접촉 압력(E), 접촉 롤러의 경도(F), 연마 필름 입자의 크기(G)는 1 수준의 조건에서 수퍼피니싱 연마가 더 효율적임을 알 수 있다.

(2) SN비 분석을 토대로 진행된 분산분석을 통해서 표면거칠기 Ra 0.2 μm까지 수퍼피니싱 연마 시간 단축에는 수퍼피니셔 부의 요동속도(C), 연마필름의 종류(D), 연마 필름 입자의 크기(G)의 영향도가 타 인자보다 큰 것을 확인하고 확인실험 진행 결과 타 인자 (A, B, E, F)를 변경했을 시 0-1초의 연마시간의 지연이 보인 반면, 영향이 큰 인자 (C, D, G)의 경우 3-10초의 연마시간 지연을 확인하였다.

(3) 아노다이징 표면 처리된 비철금속을 연마 필름을 이용하여 수퍼피니싱 연마 시 MF 타입의 입자가 큰 연마필름을 사용하고 요동속도를 빠르게 할수록 효율적으로 연마를 진행할 수 있다.

**후 기**

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2015년도 산학연협력 기술개발사업(No. C0330062)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

**REFERENCES**

1. Kim, W. B., “A Study on Improvement of Manufacturing Process for Airplane Reservoir of Al7075,” M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Changwon National University, 2016.

2. Shin, O. C., Jung, S. R., and Jung, Y. G., "Development of Centerless Superfinishing System Using Abrasive Film," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, pp. 88-92, 2005.
3. Kim, W. B., Kim, T. H., Cho, Y. T., and Jung, Y. G., "Study on Improvement of Manufacturing Process for Airplane Reservoir of Anodized Al7075," *Proc. of KSPE Autumn Conference*, p. 21, 2015.
4. Kim, W. B., Cho, Y. T., Jung, Y. G., and Choi, J. D., "Manufacturing Process Improvement for Precision Inner Surface Polishing of Anodizing Treated Airplane Reservoir," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 15, No. 2, pp. 72-77, 2016.
5. Kim, S. K., Cho, Y. T., and Jung, Y. G., "Determination of Efficient Superfinishing Condition for Mirror Surface Finishing of Stainless Steel," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 12, No. 2, pp. 99-105, 2013.
6. Cho, K. S., Kim, S. K., Cho, Y. T., and Jung, Y. G., "A Experimental Study on Efficient Applicable Combination of Super Finishing Films for Mirror Surface Machining," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 13, No. 1, pp. 121-128, 2014.
7. Kim, P. H., Kim, J. S., Park, J. H., Kang, I. S., and Lee, J. H., "A Cutting Condition Optimization of Al7075 Turning Operation with Experimental Design Method," *Korea Society of Machine Tool Engineers*, pp. 406-408, 2010.
8. Cha, J. H. and Han, S. B., "Searching Optimal Cutting Condition for Surface Roughness in Turning Operation on Inconel 718 Using Taguchi Method," *Korea Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 19, No. 2, pp. 295-300, 2010.
9. Chi, L. Z., Lee, S. J., Park, H. M., Kwak, J. S., and Ha, M. K., "Surface Roughness Analysis of Surface Grinding by Design of Experiments," *Proc. of the KS MTE Autumn Conference*, pp. 54-59, 2004.
10. Lee, S. B., "Utilizing Taguchi Method Using Minitab," *Eretec*, pp. 35-80, 2015.
11. Park, J. C. and Shin, S. M., "A Simulation-Based Optimization of Design Parameters for Cooling System of Injection Mold by Using ANOVA with Orthogonal Array," *The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 11, No. 5, pp. 121-128, 2012.
12. Kim, N. H., "The Selection of the Optimal Condition of Plug Using the Taguchi Method," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 10, No. 6, pp. 109-114, 2011.
13. Kim, S. K., Yoon, Y. M., and Jung, Y. G., "The Evaluation of the Laser Machinability for Mechanical Materials Using Taguchi Experimental Method Design," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 11, No. 2, pp. 73-78, 2012.
14. Cho, C. Y. "Analysis of Cutting Edge Geometry Effect on Surface Roughness in Ball-End Milling Using the Taguchi Method," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 23, No. 6, pp. 569-575, 2014.