

## 래핑의 공정변수가 표면거칠기에 미치는 영향

최 만 성<sup>†</sup>

<sup>†</sup>한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

### Effect of Process Parameters on Surface Roughness in Lapping Operation

Mansung Choi<sup>†</sup>

<sup>†</sup>School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

#### Abstract

Lapping is a very complicated and random process resulting from the variation of abrasive grains in its sizes and shapes and from the numerous factors having an effect on the process quality. This paper presents a study of a 2<sup>4</sup> full factorial experimental design and analysis to optimize surface quality in lapping operation. The optimization of the factors to obtain minimum surface roughness was carried out by incorporating effect plots, main effect plots, interaction plots, analysis of variance(ANOVA), surface plots, and contour plots. The statistical design experiments, designed to reduce the total number of experiments required, indicated that, within the selected conditions, all the parameters influenced at a significance level of 5%. In addition, some of the possible interactions between these parameters also influenced the lapping process, especially those that were of third order. A regression model was suggested and fitted the experimental data very well.

**Key Words** : Lapping, Process parameters, Surface roughness, Full factorial design, ANOVA

#### 1. 서 론

최근 고능률의 생산성과 가공표면의 품위를 동시에 향상시킬 수 있는 반도체, 정밀 전자 부품, 전기기기, 생체, 광학에 관련된 가공기술에 대한 요구가 많아지고 있는 실정이다. 이러한 초정밀 경면가공법 중 하나가 바로 래핑(lapping)이다. 래핑은 고정도 표면생성에 널리 이용되고 있는 표면 다듬질방법으로 고품위의 제품을 얻고자 할 때 행하여지는 가공법이다. 래핑의 특징은 저속, 저압의 조건에서 연마입자에 의해 소량의 재료제거가 이루어진다는 점이다[1]. Le, Peterson 과 Davis [2, 3]는 엄격한 치수관리와 표면품위를 요구하는 정밀가공업체에서 래핑공정을 거친다고 보고하였다. 표면마무리가공은 치수정확도와 생산된 부품의 성질을 좌우한다. 원판 래핑에 관련하여 Deshpande [4]은 수 년간에 걸쳐 많은 연구를 하였다. 래핑공정에 영향을

미치는 인자로서는 래핑입자의 크기, 래핑 하중, 가공 속도, 랩제의 유량 및 시간 등으로 매우 다양하며 공정의 복잡성으로 인해 공정의 특성을 나타내는 모델이 가공환경이나 가공시스템마다 달라지기 때문에 이론적인 모델의 적용이 어렵다. 따라서 실험적인 특성규명 및 최적화가 요구된다. 본 연구에 사용된 SM20C 강은 일반적으로 기계구조용으로 널리 사용되는 강으로 탄소함유량은 0.18% ~ 0.23%이다. 기계구조용강은 장시간 사용 시 마모, 부식에 의한 수명단축이 심하게 발생한다. 또한 이 범위의 탄소강은 열처리 효과를 기대할 수 없으므로 비교적 강도를 필요로 하지 않는 곳에 사용되고 있다. 그러나 그 사용범위가 넓고, 조립부품에 사용될 때 표면품위를 향상시켜 코팅을 용이하게 하고, 내마모, 내부식성을 향상시켜 내구성을 증대시키는 것이 요구된다. SM20C의 고정도 표면생성을 위한 래핑공정의 특성화 및 최적화 방법으로 실험계획법 중에서 완전요인설계(full factorial design)를 이용하였다[5, 6]. 반응변수는 표면거칠기  $Ra$ 이며, 이 변수에 미치는 공

<sup>†</sup>E-mail : mschoi@koreatech.ac.kr

정변수들의 상대적인 영향의 크기를 구함으로써 최적의 변수조합을 구할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 래핑공정의 표면거칠기에 영향을 미치는 주요인자와 인자 간의 상호관계를 분산분석(ANOVA)을 실시하여 파악하였으며, 최적의 수준조합 및 모평균 추정에 의한 결과값을 예측하여 실험값과 비교하고 유의성을 검증하였다. 또한 분산분석에 의한 각 인자의 유의성을 검증한 후, 다항회귀식을 도출하여 래핑에서 표면거칠기의 예측식을 제시하였다.

## 2. 요인실험법

요인실험법이란 두 개 이상의 인자에 대해 한 실험에서 동시에 분석하는 실험방법으로 다루고자 하는 특성에 대해 실험적으로 분석하므로 실험목적의 달성에 가장 효율적인 분석방법이다[7-9]. 요인분석은 몇 가지의 인자를 포함한 반응에 있어 인자들의 상호관계를 연구하는데 필요한 분석에서 널리 사용되고 있다. 각 인자에 대해 2가지 수준에 의해 결정되며 수준의 범위를 벗어나는 예측 값은 대략 선형적이라는 가정이 필요하다. 완전요인설계법은 일반적으로 어떤 공정에서 실험인자가  $n$ 이고 각 인자의 수준수가  $k$ 인 실험계획법으로, 모든 인자간의 수준의 조합에서 실험이 이루어진다. 완전요인실험에서는 모든 요인효과, 즉 인자의 효과와 상호작용을 추정할 수 있다는 특징이 있다. 본 연구에서 사용된 2<sup>4</sup> 요인 실험에서 인자들의 처리조합은 모두 16가지이고 이 16가지 각각의 실험 조건에서 모두 실험이 이루어지게 된다. 모든 인자간의 수준의 조합에서 실험이 이루어지므로 2개 이상의 인자를 동시에 분석할 수 있고 모든 인자와 교호작용의 효과를 추정할 수 있다. 또한 공정이나 제품의 품질에 직접영향을 미치는 소수의 인자를 추출할 수 있는 특징이 있다.

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1. 실험장치

본 실험에 사용된 래핑 기계의 모델명은 TSP-380이고 Fig. 1과 같다.

또한 표면거칠기의 측정장비의 모델명은 SURF 5000이다. 실험에서 사용된 재료는 SM20C로 모든 시편의 초기 표면거칠기  $Ra$ 는 2.0  $\mu\text{m}$  ~ 2.6  $\mu\text{m}$ 의 비교적 거친 범위의 것을 사용했다. 가공시편의 크기는 31 mm  $\times$  31 mm  $\times$  10mm이다.



Fig. 1. Experimental set up.

### 3.2. 실험방법

실험방법으로는 먼저 공작물을 조절 링에 고정시킨 다음 원판을 회전시키면서 슬러리 수조(slurry tank)에 물, 램제, 수용성 절삭유를 100:20:5의 비율로 혼합시킨다. 그리고 이 슬러리를 원판에 떨어뜨리면서 래핑을 하였으며 한 개의 공작물 당 래핑시간은 10분으로 하였다. Table 1은 2<sup>4</sup>요인설계의 높은 수준과 낮은 수준에서 사용된 제어인자를 나타낸다. 제어인자로는 래핑입자의 크기(A), 래핑하중(B), 램제의 유량(C) 및 래핑의 회전속도(D)를 선정하였다.

Table 2는 2<sup>4</sup> 요인 실험을 하기 위한 실험계획표이다. 여기에서 표면거칠기는 2회 반복 측정된 값의 산술평균치이고, 계산의 편의를 위하여 부호화된 변수(coded variable)를 사용하였으며, 인자 간의 상호작용의 영향을 고려하여 완전요인실험을 하였다.

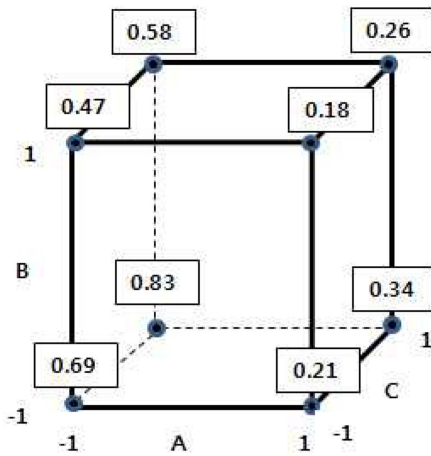
실험에 사용된 래핑입자의 크기는 #400일 때 숫돌입자의 크기는 0.40mm이고, #1200일 때 숫돌입자의 크기는 0.016mm이다. 램제의 유량은 펌프의 속도제어단위(speed control unit)의 레벨을 4단계와 11단계로 하여 슬러리 수조(slurry tank)에서부터 램제가 래핑 원판으로 유입되도록 하였다. 실험결과의 통계적 분석은 통

Table 1. Factors and levels used in the factorial design.

Factors	Low level (-1)	High level (+1)
(A) Grain size(#)	400	1200
(B) Lapping load(Kg)	2.75	7.25
(C) Flow rate of slurry	4	11
(D) Rotating speed (rpm)	10	40

**Table 2.** Design matrix and the results of the 2<sup>4</sup> full factorial design.

Run	A	B	C	D	Ra (μm)
1	-1	-1	-1	-1	0.69
2	+1	-1	-1	-1	0.21
3	-1	+1	-1	-1	0.47
4	+1	+1	-1	-1	0.18
5	-1	-1	+1	-1	0.83
6	+1	-1	+1	-1	0.34
7	-1	+1	+1	-1	0.58
8	+1	+1	+1	-1	0.26
9	-1	-1	-1	+1	0.45
10	+1	-1	-1	+1	0.26
11	-1	+1	-1	+1	0.46
12	+1	+1	-1	+1	0.15
13	-1	-1	+1	+1	0.74
14	+1	-1	+1	+1	0.34
15	-1	+1	+1	+1	0.59
16	+1	+1	+1	+1	0.20



**Fig. 2.** Cubic plot of Ra.

계해석 전용패키지인 미니탭 14를 이용하였다. Table 2의 실험결과를 분석함으로써 반응변수에 미치는 각 변수들의 영향을 비교한 후, 계산된 주효과, 상호효과 등의 유의성(significance)을 판단하였다.

Fig. 2는 래핑입자의 크기(A), 래핑하중(B), 랩제의 유량(C)의 각 수준에서의 실험값의 평균을 나타낸 육방체 그림이다.

**Table 3.** Analysis of variance for Ra (coded units).

Source	DF	Seq. ss	F	P
Main effects	4	0.646	70.94	0.000
2-Way Inter.	5	0.019	1.65	0.299
3-Way Inter.	1	0.014	6.07	0.057
Residual error	5	0.011		
Total	15	0.690		

**Table 4.** Estimated effects and coefficients for Ra.

Term	Effect	Coeff.	T	P
Const		0.4219	30.75	0.000
A	-0.3587	-0.1794	-13.08	0.000
B	-0.1212	-0.0606	-4.42	0.001
C	0.1262	0.0631	4.60	0.001
D	-0.0462	-0.0231	-1.69	0.123
AxBxD	-0.0588	-0.0294	-2.14	0.058

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1. 분산분석(ANOVA)

Table 2의 자료를 이용하여 분산분석한 결과를 Table 3에 나타내었다. 분산분석이란 두 표본에 의한 모평균의 차이를 알아보는 실험이나 관찰에서와 마찬가지로 세 개 이상의 실험의 조건이나 방법이 주어졌을 때 이들의 실험결과를 이용하여 판단할 경우에 많이 사용되는 통계적인 기법이다. 실험조건이나 방법을 처리라 부르고, 이에 따른 결과의 차이를 효과라고 하는데 계획된 실험에서는 처리에 따른 효과를 비교할 때 모집단의 분포가 같은 분산을 갖는 정규분포를 따른다고 가정한다. Table 3에서 주효과는 유의수준 10%에서 매우 유의하고, 2인자 상호작용은 유의하지 않다. 그리고 3인자 상호작용AxBxD는 유의한 것으로 나타났다. R<sup>2</sup>(adj.)은 93.45%로 나타나서 통계적인 모형(statistical model)은 매우 적정함을 알 수 있다.

Table 4에서는 회귀계수의 유의성을 검토하기 위하여 Student's t-test를 하였으며, 래핑의 회전속도 D(p=0.123)를 제외한 모든 효과들이 95% 신뢰구간에서 유의함을 볼 수 있다.

Table 4의 자료를 이용하여 래핑공정의 제어인자들과 종속변수인 표면거칠기의 함수식인 다중회귀식(multiple regression equation)을 구하면 다음과 같다.

$$\overline{Ra} = 1.72A^{-0.772}B^{-0.384}C^{0.378}D^{-0.015} \quad (1)$$

여기서,  $\overline{Ra}$ 는  $Ra$ 의 상용로그 값을 나타낸 것이고, 회귀분석에 의한 추정식이다. 이 식은 유의수준 5%에서 상수와 래핑속도(D)를 제외한 공정변수는 모두 유의하다. 식(1)의 다중회귀식은 래핑의 공정변수와 변수 간의 상호작용이 어떻게 표면거칠기에 영향을 주는지 알 수 있는 식이다. 아울러 공정변수가 표면거칠기에 미치는 효과의 크기는 래핑입자의 크기(A), 래핑하중(B), 랩제의 유량(C), 및 래핑입자의 크기 × 래핑하중 × 래핑속도(ABD)의 상호작용, 래핑속도(D)의 순위이다. 식(1)에서 각 계수의 부호인 (+)는 공정변수의 값이 증가하면 표면거칠기는 증가하고, 역으로 (-)이면 감소함을 나타낸다.

**4.2. 주효과에 따른 표면조도**

래핑공정의 변수들이 표면거칠기에 미치는 영향을 나타낸 것이 Fig. 3이다. 주효과 플롯은 회귀분석의 결과를 그대로 반영한 것과 같다.

주 효과 플롯은 요인의 각 수준에 대한 평균을 표시하는데 이러한 플롯을 사용하여 주 효과를 비교할 수도 있지만 분산분석에서 효과를 찾아 유의성을 평가함이 바람직하다. 그림에서 A, B, C의 순서대로 기울기가 크므로 유의성이 크고 상대적으로 D는 유의성이 떨어진다 것을 알 수 있다. 양과 음의 기울기는 회귀식의 부호와 일치하며, 낮은 수준에서 높은 수준으로 바뀔 때 표면조도의 변화를 알 수 있다. Fig. 3에서 표면거칠기를 가장 양호하게 하는 최적수준은 래핑입자의 크기가 #1200, 래핑하중 7.25 Kg, 슬러리의 유량이 4 단계, 원판의 회전속도가 40 rpm일 때이다.

**4.3. 상호작용에 따른 표면조도**

Fig. 4와 같이 설계에 포함된 각 인자인 쌍에 대해 2인자 상호작용 플롯을 생성할 수 있는데, 상호작용 플

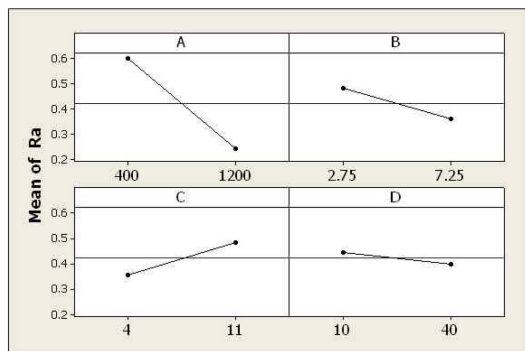


Fig. 3. Main effects plot for Ra.

롯은 요인의 각 수준과 고정 상수(두 번째 요인의 수준)의 평균을 표시한다.

두 변수 간의 상호작용은 첫 번째 요인과 두 번째 인자에 대한 낮은 수준과 높은 수준 사이의 반응변화가 서로 다른 경우에 발생한다. 즉, 두 번째 인자에 따라 첫 번째 인자의 효과가 달라진다. 상호작용 플롯을 사용하면 인자효과의 상대적 영향력을 비교할 수 있다. Fig. 4에서 래핑입자의 크기와 래핑속도, 래핑 입자의 크기와 랩제의 유량, 래핑입자의 크기와 래핑속도 간의 상호작용이 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 플롯을 사용하여 상호작용 효과를 비교할 수도 있지만 분산분석에서 그 효과를 찾아 유의성을 평가하는 것이 바람직하다.

**4.4. 반응표면과 등고선 플롯**

반응함수에 대한 표면플롯은 인자의 주효과와 상호작용효과를 이해하는데 매우 유용하다. Fig. 5는 표면거칠기에 대한 주효과와 상호작용효과를 나타낸 표면그림(surface plot)이다. 이 그림은 반응모델을 사용하여 계산된 것으로 각 인자를 저수준에 고정시키고, 각

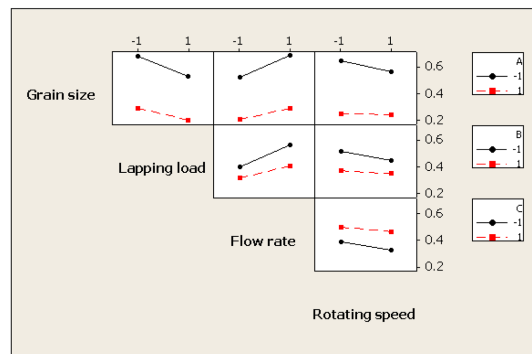


Fig. 4. Interaction effects plot for Ra.

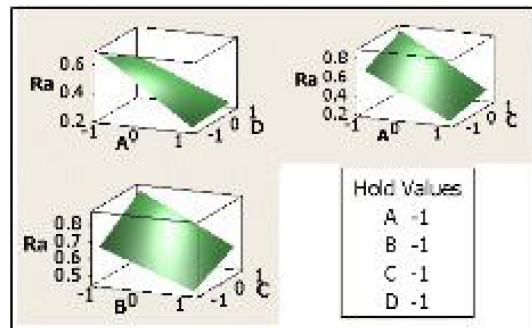


Fig. 5. Surface plot of Ra vs. control factors.

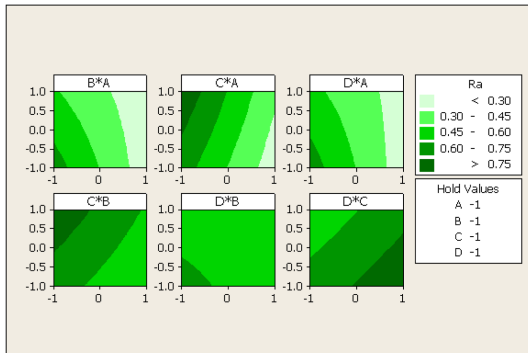


Fig. 6. Interaction effects plot for Ra.

인자를 변화시켜 표면거칠기의 평균을 나타낸 것이다. Fig. 5에서 인자의 수준변화에 따른 표면거칠기의 변화를 쉽게 볼 수 있다.

Fig. 6은 하나의 인자가 높은 수준에서 고정될 때, 반응표면의 등고선그림(contour plot)을 나타낸 것이다.

이 그림은 정규화된 독립변수들의 함수로서 추정된 표면거칠기를 보여준다. 여기서 표면의 높이가 표면거칠기이다. 2<sup>4</sup>완전요인설계로 인자들을 선택한 후, 반응 Ra의 표면등고선 플롯을 그려보면 Fig. 4의 상호작용 플롯의 결과와 동일함을 알 수 있다. 등고선 플롯이 곡선인 것은 2인자 상호작용의 향을 포함하고 있기 때문이다. Fig. 5와 Fig. 6에서 A인자의 효과는 B, C의 인자가 높은 수준에서 더 유의하고, B인자는 C인자가 낮은 수준에서 더 중요함을 알 수 있다. 여기서 양호한 표면거칠기를 구하기 위해서는 래핑입자의 크기(A), 래핑하중(B)를 높은 수준에서, 래핑의 유량(C)을 낮은 수준의 조건에서 가공해야 함을 알 수 있다.

### 5. 결 론

반도체, 정밀 전자 부품, 전기기기, 생체, 광학 공정에 관련된 래핑은 공정조건에 따라 표면정도가 달라진다. 따라서 이러한 공정기술에서 공정조건을 최적화하는 기법이 필요하다. 본 연구에서는 2<sup>4</sup>완전요인설계법을 이용하여 래핑의 공정조건에 따른 래핑 가공면의 표면거칠기를 예측하였다. 이에 따른 결과를 요약하면, 실험결과를 통하여 분산분석과 회귀분석을 이용하여

유의한 변수 및 표면거칠기의 실험식을 구하였다. 분산분석에서 제시된 모형의 수정상관계수는 93.45%로 적합한 통계적 모형은 매우 적정하였다. 아울러 2인자 상호작용은 모두 미미하였으나, 래핑입자의 크기, 래핑하중, 래핑속도의 3인자 상호작용은 유의하였다. 아울러 이러한 다양한 공정조건에 대하여 래핑의 최적가공조건에 대한 분석결과를 제시하였다.

### 참고문헌

- Lynah P., Hoffman PR., "Lapping," ASM Hand Book, 16 : 492-505, 1989.
- Le X., Peterson ML., "Material Removal Rate in Flat Lapping," J. of Manufacturing Process Vol. 6(1), pp. 71-78, 1999.
- Davis JR., "Surface Engineering of Carbon and Alloy Steels," ASM Handbook 5: pp.701-710, 1994.
- Deshpande LS., "Influence of Abrasive Material Properties on the Surface Generated in Flat Lapping," Published Master's Thesis, University of Oklahoma, Norman, OK, pp 19-30, 2005.
- Pronzato L., "Optimal Experimental Design and Some Related Control problems," Automatica, Vol. 44, pp. 303-325, 2008.
- Lee, K. and Kim, J., "Controller Gain Tuning of a Simultaneous Multi-Axis PID Control System Using the Taguchi Method," Control Eng. Practice., vol. 8, pp. 949-958, 2000.
- Kumar S., Kumar P., Shan H. S., "Effect of evaporative pattern casting process parameters on the surface roughness of Al7%Si alloy casting," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 182, pp. 615623. 2007.
- Griffiths W. D., Davies P. J., "The permeability of lost foam pattern coatings for Al alloy castings," Journal of Materials Science," Vol. 43, pp. 54415447, 2008.
- Vijian P., Arunachalam P., "Optimization of squeeze cast parameters of LM6 aluminium alloy for surface roughness using Taguchi method," J. of Materials Science and Technology, Vol. 180. pp 161166. 2006.

접수일: 2013년 11월 4일, 심사일: 2013년 11월 19일,  
 게재확정일: 2013년 11월 30일