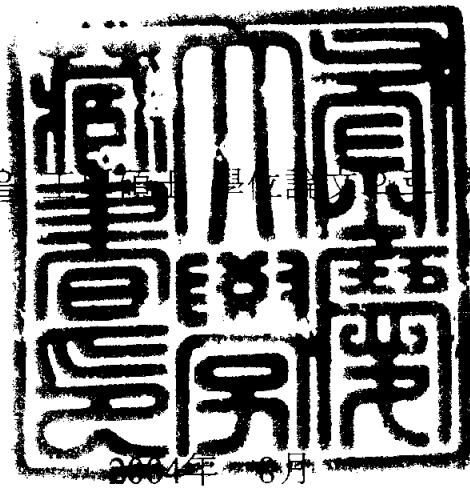


工學碩士 學位論文

Taguchi 및 반응표면기법을 적용한
최적연삭조건 선정과 표면거칠기 예측

指導教授 河 萬 景

이 論文을 工學碩士學位論文으로 提出함



2004年 8月

釜慶大學校 大學院

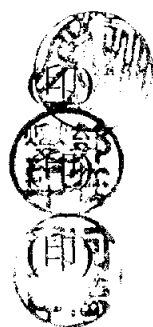
機械設計學科

金 聖 國

金聖國의 工學碩士 學位論文을 認准함

2004年 8月 日

主	審	柳 寅 壹
委	員	郭 在 燮
委	員	河 萬 景



목 차

Abstract	iii
Nomenclature	v
1. 서 론	1
2. 실험계획법	3
2.1 Taguchi 기법	6
2.2 분산분석 이론	10
2.3 반응표면분석 이론	13
3. 최적연삭조건 선정	18
3.1 실험계획	18
3.2 실험결과 분석	23
3.2.1 인자별 영향평가 및 최적조건 선정	27
3.2.2 인자의 상호결합에 의한 영향	30
3.3 분산분석 결과	32
4. 표면거칠기 예측 및 실험적 검증	34
4.1 S/N ratio를 이용한 표면거칠기 예측	34
4.2 반응표면분석에 의한 표면거칠기 예측	35
4.2.1 1차 반응표면 모델 개발	35
4.2.2 2차 반응표면 모델 개발	37

4.2.3 반응표면 모델의 유용성	44
4.3 실험적 검증	46
5. 결 론	47
참고문헌	48
APPENDIX	50

Grinding Condition Optimization and Surface Roughness Prediction Using Taguchi and Response Surface Methods

*Department of Machine Design Engineering,
Graduate School of Pukyong National University*

Sung-Gug Kim

ABSTRACT

Grinding is a finishing operation of products in various areas. Surface roughness of industrial components obtained in grinding operation is a critical quality measure but is a function of many operating parameters and their interactions. To achieve higher surface roughness and to identify the influence of grinding parameters on surface roughness, it is an ideal situation for using the design of experiments.

The Taguchi design method is a simple and robust technique for optimizing the process parameters. In this method, main parameters which are assumed to have influence on process results are located at different rows in a designed orthogonal array. With such an arrangement completely randomized experiments can be conducted. In general, signal to noise (S/N) ratio represents quality characteristics for the observed data in the Taguchi design of experiments. Depending on the experimental objective, there are several quality characteristics. From the S/N ratio, the effective parameters having influence on process results can be seen and the optimal sets of process parameters can be determined.

Often engineering experimenters wish to find the conditions under which a certain process attains the optimal results. That is, they want to determine the levels of the

design parameters at which the response reaches its optimum. The optimum could be either a maximum or a minimum of a function of the design parameters. One of methodologies for obtaining the optimum is response surface technique. Response surface methodology is a collection of statistical and mathematical methods that are useful for the modeling and analyzing engineering problems. In this technique, the main objective is to optimize the response surface that is influenced by various process parameters.

This paper presents an successful optimization of grinding conditions and prediction of surface roughness using the design of experiments. From the experimental verification tests, it was observed that this approach was useful as a robust design methodology for grinding operation.

Key Words : Taguchi method(다구찌 기법), Response surface method(반응표면 기법), Grinding conditions(연삭조건), Surface roughness(표면 거칠기), Optimization (최적화)

Nomenclature

A	:	Type of abrasives
B	:	Grain size number, Mesh
C	:	Depth of cut, μm
D	:	Table speed, m/min
E	:	The number of spark-out
F_0	:	Ratio of mean squares
$L(y)$	:	Loss function in Taguchi method
MRR	:	Material removal rate, mm^3/min
S_i	:	Sum of squares
V_i	:	Mean square
x_0	:	Stationary point
y_i	:	Measured data, μm
ε	:	Residual error
η	:	Signal-to-noise ratio, dB
η_{op}	:	S/N ratio at optimal condition, dB
μ	:	Average of measured data, μm
ξ_i	:	Independent variables
ρ	:	Percentage distribution, %
σ	:	Standard deviation, μm
ϕ	:	Degree of freedom

1. 서 론

연삭가공은 슷돌에 불균일하게 분포된 미소입자를 절인으로 사용하기 때문에, 입자당 금속제거량이 매우 적어 정밀한 가공표면을 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 연삭가공에는 관여하는 인자가 많고 그 인자들이 상호작용하여 가공물의 표면품위에 영향을 미치므로, 각 인자에 대한 평가 뿐만 아니라 인자들의 상호작용을 평가^[1,2]하는 것은 매우 중요한 일이다. 이와 같이 어떤 공정에 관여하는 인자와 인자들의 상호작용을 효과적으로 분석하는 방법이 실험계획법(design of experiments)이다. 실험계획법은 실험에 대한 계획 방법으로, 해결하고자 하는 문제에 대하여 어떠한 방법으로 실험 및 데이터를 획득하여 어떤 통계적 방법으로 분석하면 최소의 실험회수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이다. 실험계획법에서 일반적으로 널리 사용되는 데이터의 통계적 분석방법으로는 분산분석(analysis of variance), 상관분석(correlation analysis), 회귀분석(regression analysis), 반응표면 분석^[3] 등이 있다.

1980년대부터 미국은 많은 공산품의 품질향상을 위해서 실험계획법 및 자료분석방법에 관심을 가지기 시작하여 최근에는 AT&T, Ford 자동차회사, 제록스사를 포함한 많은 기업들이 실험계획법을 실제 생산현장에 적용하여 제품설계 및 생산단계에서 혁신적인 효과를 얻고 있다. 또한 일본에서도 Taguchi는 기존 실험계획법을 사용자들이 보다 효과적으로 적용하여 제품의 품질을 향상시킬 수 있도록 그 개념을 다시 정립한 것이 Taguchi 기법이다. 이는 오늘날 산업현장에서 많은 엔지니어들이 사용하는 최고의 품질개선 틀이고, 제조산업에서 필요로하는 문제를 해결하여 제품과 프로세스를 최적화^[4,5]하는데 매우 효율적인 방법으로 그 응용범위가 점차 확대되고 있다.

공학분야에서도 이러한 실험계획법을 이용하여 문제를 해결하기 위한 여러가지 시도와 연구가 이루어져왔다. Enemuoh^[6] 등은 적층된 탄소섬유강화

플라스틱 제품의 드릴링공정에서, 실험계획법을 이용하여 제품의 표면손상을 줄일수 있도록 드릴링 파라미터를 선정하는 최적설계기법을 활용하였다. Lin^[7,8]은 코팅공구에 의한 스테인레스강의 페이스밀링에서 공구수명과 가공면에 발생하는 버(burr)를 줄일 수 있는 가공조건을 선정하였고, 세라믹 게이지블록의 폴리싱공정에도 실험계획법을 적용하였다. 또한 Kim^[9] 등은 래핑공정에서 표면거칠기 향상을 극대화할 수 있는 가공조건을 선정하였다. 한편 Dhavlikar^[10] 등은 무심연삭공정에서 가공물의 진원도 오차를 최소화할 수 있는 최적가공조건을 구하였다.

본 연구에서는 평면연삭에서 표면거칠기에 영향을 미치는 주요인자를 선정하여 이들을 실험계획법의 직교배열에 따라서 실험을 실시하여, 각 인자들이 가공물의 표면거칠기에 미치는 영향정도를 평가하고, 가공조건 범위에서 가장 좋은 표면거칠기를 얻을 수 있는 최적연삭조건을 선정하였다. 또한 연삭조건에 따른 가공물의 표면거칠기를 예측할 수 있도록 S/N ratio와 반응표면기법으로 수학적 모델을 개발하여 실험적 검증을 통하여 그 유효성을 평가하였고, 산업현장에서 윤곽선도를 활용하여 정밀도와 생산성을 함께 고려하여 연삭조건을 선정할 수 있도록하였다.

2. 실험계획법

실험을 실시한 후에 데이터의 형태로 얻어지는 결과치에 대하여 각 원인들이 어떻게 영향을 미치고 관계되어 있는가를 이론적으로 또는 경험적으로 명백히 알아내기는 매우 힘들다. 왜냐하면, 일반적으로 결과치에 영향을 미치는 원인이 매우 많고 재료, 실험장치 및 숙련도 등에 따라 산포가 있고, 환경조건의 변동, 표본오차(sampling error) 등에 의해서도 영향을 받기 때문이다. 따라서 실험을 통하여 달성하고자 하는 목적은 실험의 결과치에 영향을 미친다고 과학적으로 생각할 수 있는 많은 원인에 대하여 다음과 같은 것들을 알아내고자 하는데 있다.

- (1) 어떤 요인이 결과에 유의한 영향을 주고 있는가를 파악하고 그 영향이 정량적으로 어느 정도 큰가를 알아낸다. (검정과 추정의 문제)
- (2) 작은 영향을 미치는 요인들이 전체적으로 어느 정도의 영향을 주고있으며, 측정오차는 어느 정도인가를 알아낸다. (오차항 추정의 문제)
- (3) 유의한 영향을 미치는 원인들이 어떠한 조건을 가질 때 가장 바람직한 효과를 얻을 수 있는가를 알아낸다. (최적조건 결정의 문제)

나아가 그 결과에 따라서 작업표준을 설정하거나 재료, 장치, 측정방법 등을 선택하는 기준을 제공하여 준다.

실험에 있어서 데이터에 산포를 준다고 생각되는 많은 원인들 중에서 실험에 직접 취급되는 원인을 인자(factor)라고 하고, 실험을 하기 위한 인자의 조건을 인자의 수준(level)이라고 한다. 예를 들면 온도를 인자로 택할 경우 150℃ 또는 200℃라고 하는 값이 그 수준이다. 실험계획법의 종류는 매우 다양하지만 비교적 많이 사용되는 것들을 실험을 배치하는 형태에 따라서 다음과 같이 분류할 수 있다.

(1) 요인배치법(factorial design)

인자의 각 수준의 모든 조합에 대하여 실험을 행하는 것으로 실험순서는 랜덤하게 정한다. 인자의 수에 따라서 인자가 하나인 경우에는 일원배치법

(one-way factorial design), 인자가 둘인 경우는 이원배치법(two-way factorial design), 그리고 인자가 세 개 이상인 경우는 다원배치법(multi-way factorial design)이라고 한다. 인자가 n 개 있고 각 인자가 2수준인 경우는 2^n 형 요인배치법, 3수준인 경우는 3^n 형 요인배치법이라 한다. 이를 변형시킨 가장 일반적인 형태가 Taguchi 기법에서 사용하는 직교배열법이다.

(2) 분할법(split-plot design)

요인배치법에서 실험순서가 완전히 랜덤하게 정해지지 않고, 실험전체를 몇 단계로 나누어서 단계별로 랜덤화하는 실험계획법을 분할법이라 한다. 따라서 분할법은 실험순서를 정하는 방법에 있어서 요인배치법과 다르다. 예를 들어 A 인자가 l 수준이고 B 인자가 m 수준이면, 2 인자의 실험을 이원배치법으로 하면 lm 개의 조합 전체를 랜덤화하여야 한다. 그런데 실험에 취급되는 인자의 종류에 따라 완전 랜덤화가 매우 곤란한 경우가 있다. 이때는 랜덤화 과정을 두 단계로 나누어 먼저 인자 A 에 대해서 랜덤화하고 다음에 인자 B 를 랜덤화할 수 있다.

(3) 교락법(confounding method)

요인배치법의 실험에서는 인자간의 모든 교호작용이 검출되지만 고차의 교호작용은 구하지 않아도 좋을 때가 많다. 검출할 필요가 없는 교호작용을 다른 요인과 교락하도록 배치하는 방법을 교락법이라 한다. 이 방법은 실험 회수를 늘리지 않고도 전체 실험을 블록화하여 간편하게 실험할 수 있는 장점이 있다.

(4) 일부실시법(fractional factorial design)

불필요한 교호작용이나 고차의 교호작용은 구하지 않고 각 인자의 조합중에서 일부만 선택하여 실험을 실시하는 방법을 일부실시법이라 한다. 교락법에서는 블록과 교호작용을 교락시키나 일부실시법에서는 불필요한 교호작용을 중요한 인자들과 교락시켜 주는 것이 보통이다. 이 실험계획법은 실험 회수를 가능한 한 작게 하고자 할 때 사용된다. 일부실시법을 계획할 때는 직교배열표를 사용하는 것이 편리하다.

(5) 반응표면 기법(response surface method)

통계적 분석방법의 하나인 반응표면분석을 염두에 두고 데이터 수집계획을 세울 때 사용되는 실험계획법으로 최근에 각 공정의 최적조건을 찾기 위해서 많이 사용된다. 중심합성계획법, 회전계획법, 심플렉스법 등이 여기에 속한다.

이상에서 살펴 본 바와 같이 실험계획법에는 여러 가지 종류가 있고, 이들을 연구자의 목적과 상황에 맞도록 적절히 선정하여 사용하는 것이 필요하다.

2.1 Taguchi 기법

일본의 Genechi Taguchi가 만든 직교배열표를 이용한 ‘Taguchi 기법’은 종래의 실험계획법에 비해 제어불가능한 조건들이 실험결과에 미치는 영향의 정도를 평가 특성치(measurement characteristic)로 변환하여, 산포를 작게하는 조건들의 값을 찾아내는 강건설계기법(robust design)^[11,12]이라 할 수 있다.

제품특성의 목표치가 m 이고, 제품의 실질 특성치가 y 인 경우에 손실함수(loss function)를 $L(y)$ 라 하면, 좋은 품질의 제품은 이 손실함수의 값이 작게 하여주는 것이다. 이러한 손실함수는 특정한 목표치가 주어져 있는 경우는 망목특성, 목표치가 작을수록 또는 목표치가 클수록 좋은 경우를 망소특성 및 망대특성이라 한다. 각각의 경우에 대한 손실함수를 나타내면 Fig. 1과 같다.

한편 손실함수 $L(y)$ 를 m 에 대하여 테일러 급수전개(Taylor series expansion)를 시키면 다음과 같다.

$$L(y) = L(m) + L'(m)(y - m) + \frac{L''(m)}{2!}(y - m)^2 + \dots \quad (2.1)$$

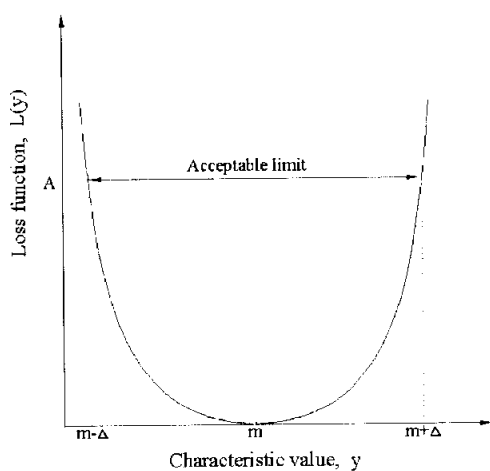
망목특성의 경우는 $L(m) = 0$ 와 $L'(m) = 0$ 가 성립하고, 3차 이상의 고차항을 무시하면 손실함수는 다음과 같다.

$$L(y) = k(y - m)^2 \quad (2.2)$$

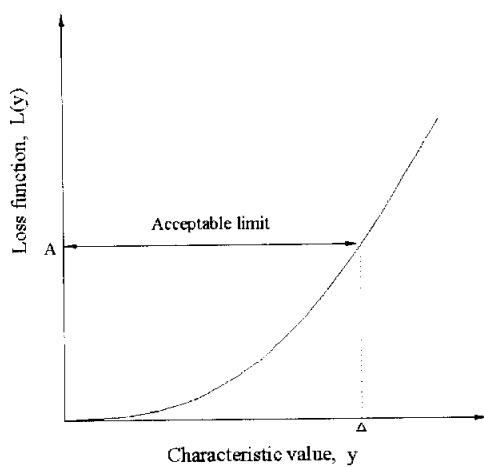
여기서, $k = L''(m)/2$ 로서 특성치가 소비자 허용한계점 $m \pm \Delta$ 에서 소비자의 손실이 A 라하면 k 는 다음과 같다.

$$k = \frac{A}{\Delta^2} \quad (2.3)$$

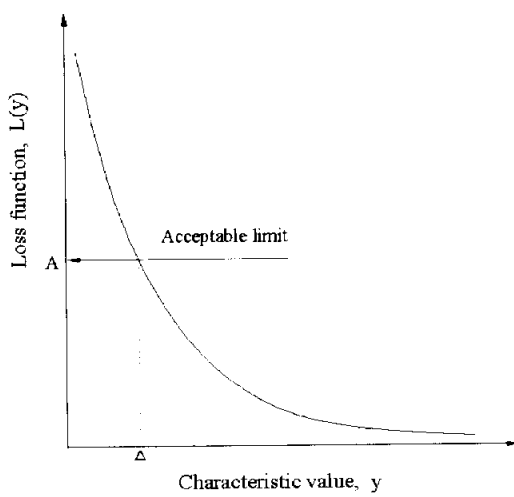
또한 망목특성에서 손실함수의 기대손실이 $E(y) = \mu$ 이고, 분산이 $V(y) = \sigma^2$ 인 경우에 손실함수의 기대값은 다음과 같이 된다.



(a) nominal-is-best characteristics



(b) small-is-better characteristics



(c) large-is-better characteristics

Fig. 1 Plots of loss function in design of experiments

$$\begin{aligned} L &= E[L(y)] = E[k(y-m)^2] \\ &= k[\sigma^2 + (\mu - m)^2] \end{aligned} \quad (2.4)$$

망소특성의 경우는 $m=0$ 이므로, 손실함수와 기대값은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L(y) = ky^2, \quad k = \frac{A}{\Delta^2} \quad (2.5)$$

$$L = kE(y^2) = k(\sigma^2 + \mu^2) \quad (2.6)$$

망대특성에서는 망소특성에서 y 를 $y' = \frac{1}{y}$ 로 변환하면, 손실함수와 기대값을 구할 수 있다.

$$L(y) = k\left(\frac{1}{y^2}\right), \quad k = A\Delta^2 \quad (2.7)$$

$$L = k\left(\frac{1}{\mu^2}\right)\left(1 + \frac{3\sigma^2}{\mu^2}\right) \quad (2.8)$$

Taguchi 기법에서는 평가 특성치를 주로 신호와 잡음의 비(S/N ratio, η)로 다음과 같이 세가지로 나타낸다.

(1) 망목특성 : 특정한 목표치가 주어져 있는 경우 (길이, 무게 등)

$$\eta = 10 \log\left(\frac{\bar{y}}{\sigma}\right) \quad (2.9)$$

(2) 망소특성 : 목표치가 작을수록 좋은 경우 (진동, 마모, 불량률 등)

$$\eta = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right) \quad (2.10)$$

(3) 망대특성 : 목표치가 클수록 좋은 경우 (효율, 수명 등)

$$\eta = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right) \quad (2.11)$$

여기서, y_i 는 실험에서 얻어진 데이터, $\bar{y}$ 는 데이터들의 평균, σ 는 표준편차를 나타내고 n 은 실험회수를 의미한다.

Taguchi 기법의 또 하나의 특징은 직교배열표(table of orthogonal arrays)를 이용한다는 것이다. 설계단계에서 다루어야 할 많은 설계인자들을 큰 그물과 같은 형태로 만들어 주된 효과와 기술적으로 예상되는 인자들 간의 상호작용은 고려하고 그 이외의 상호작용들을 희생시켜, 실험회수를 적게 할 수 있도록 만들어 놓은 표가 직교배열표이다. 따라서 직교배열표를 이용하면 최소의 실험으로 실험결과에 관여하는 인자가 미치는 영향을 효과적으로 평가할 수 있게 한다. 직교배열표에서 모든 열은 서로 직교하기 때문에 임의의 2열을 골라서 그 곱의 합을 구하면 영(zero)이 되는 성질을 갖고 있다. 이러한 성질은 실험조건을 정할 때에는 기존의 방법들과는 달리 여러 가지 인자를 동시에 조절할 수 있으며, 각 인자들은 항상 직교하기 때문에 독립적으로 평가가 가능하게 해준다. 또한 직교배열표에서는 각 인자별 및 조건별 동일한 회수의 실험이 이루어지도록 하는 성질이 있다.

2.2 분산분석 이론

분산분석은 특성치의 산포를 제곱합(sum of squares)으로 나타내고, 이 제곱합을 실험과 관련된 인자마다의 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 요인이 무엇인가를 찾아내는 분석방법이다. 각 요인의 제곱합을 그 요인의 자유도로 나누면 그 요인의 제곱평균이 되며 오차분산에 비하여 얼마나 큰가를 검토하게 된다. 따라서 분산분석이란 특성치의 산포를 요인별로 분해하여 어느 요인이 큰 산포를 나타내고 있는가를 규명하는 통계적 방법이 된다. 이때 얻어진 값들의 확률적 유의수준은 F-검증을 이용하여 평가한다.

만일 인자 A와 B의 수준수가 각각 l 과 m 이며 반복이 없이 모든 수준조합에서 한번씩의 실험이 이루어진 경우 측정된 데이터(x_{ij})의 구조식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_{ij} = \mu + a_i + b_j + e_{ij} \quad (2.12)$$

여기서, μ 는 실험전체의 모평균이고, a_i 와 b_j 는 각각 A_i 및 B_j 수준이 주는 효과이고 e_{ij} 는 x_{ij} 의 측정시 발생하는 오차이다. 이 경우에 측정치의 산포를 제곱합한 변동(S)은 다음과 같다.

$$S_T = \sum_i \sum_j (x_{ij} - \bar{x})^2 = \sum_i \sum_j x_{ij}^2 - CT \quad (2.13)$$

$$S_A = m \sum_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2 = \sum_i \frac{T_i^2}{m} - CT \quad (2.14)$$

$$S_B = l \sum_j (\bar{x}_j - \bar{x})^2 = \sum_j \frac{T_j^2}{l} - CT \quad (2.15)$$

여기서, CT 는 변동계산에서 사용되는 수정항으로 $CT = \frac{T^2}{lm}$ 인 관계가 성립한다.

또한 순수한 평균변동을 나타내는 순변동(S')과 전체변동에 대한 각 인자의 기여정도를 나타내는 기여율(percentage distribution, ρ)은 다음과 같이 계산된다.

$$S_c = S_T - S_A - S_B \quad (2.16)$$

$$S_A' = S_A - (l - 1) V_c = S_A - \frac{S_c}{m - 1} \quad (2.17)$$

$$S_B' = S_B - (m - 1) V_c = S_B - \frac{S_c}{l - 1} \quad (2.18)$$

$$S_c' = S_c + (l + m - 2) V_c = S_c \left(1 + \frac{l + m - 2}{(l - 1)(m - 1)} \right) \quad (2.19)$$

$$\rho_A = \frac{S_A'}{S_T} \times 100 \quad (2.20)$$

$$\rho_B = \frac{S_B'}{S_T} \times 100 \quad (2.21)$$

$$\rho_c = \frac{S_c'}{S_T} \times 100 \quad (2.22)$$

이러한 계산으로부터 얻어지는 결과를 표로 나타낸 것이 분산분석표 (analysis of variation, ANOVA)로 Table 1과 같이 구성된다.

여기서, ϕ 는 인자의 자유도를 나타내고, V 는 변동을 자유도로 나누어 준 값으로 제곱평균(mean square)이고, F_0 는 제곱평균비를 나타낸다.

A_i 수준과 B_j 수준에서의 측정치의 모평균을 각각 $\mu(A_i)$ 와 $\mu(B_j)$ 라고 하면 이들의 신뢰구간은 다음과 같이 얻어진다.

$$\bar{x}_{.i} \pm t(\phi_e; \frac{\alpha}{2}) \sqrt{\frac{V_e}{m}} \quad (2.23)$$

$$\bar{x}_{.j} \pm t(\phi_e; \frac{\alpha}{2}) \sqrt{\frac{V_e}{l}} \quad (2.24)$$

Table 1 ANOVA for two-way factorial design

Factor \	S	ϕ	V	F_0	S'	$\rho(\%)$
A	S_A	$l-1$	S_A/ϕ_A	V_A/V_e	S_A'	ρ_A
B	S_B	$m-1$	S_B/ϕ_B	V_B/V_e	S_B'	ρ_B
e	S_e	$(l-1)(m-1)$	S_e/ϕ_e		S_e'	ρ_e
T	S_T	$lm-1$			S_T	100%

또한 $A_i B_j$ 수준조합에서의 모평균 $\mu(A_i B_j)$ 의 추정값과 신뢰구간은 각각 다음과 같이 계산할 수 있고, 이때 최적조건은 추정치가 최대가 되는 $A_i B_j$ 가 된다.

$$\mu(A_i B_j) = \bar{x}_{i.} + \bar{x}_{.j} - \bar{x} \quad (2.25)$$

$$(\bar{x}_{i.} + \bar{x}_{.j} - \bar{x}) \pm t(\phi_e; \frac{\alpha}{2}) \sqrt{\frac{V_e}{n_e}} \quad (2.26)$$

여기서, n_e 는 유효반복수로 다음과 같이 구한다.

$$n_e = \frac{lm}{l+m-1} \quad (2.27)$$

이러한 방법으로 구한 최적조건 $A_i B_j$ 가 정확한지 확인하기 위해서는 r 회 확인실험을 실시하여 측정치의 평균 $\bar{x}$ 가 다음과 같은 구간범위 안에 포함되면, $100(1-\alpha)\%$ 의 예측구간을 만족하고, 이 실험에서의 결론이 타당함을 확인할 수 있다.

$$(\bar{x}_{i.} + \bar{x}_{.j} - \bar{x}) \pm t(\phi_e; \frac{\alpha}{2}) \sqrt{V_e \left(\frac{1}{n_e} + \frac{1}{r} \right)} \quad (2.28)$$

2.3 반응표면 분석 이론

반응표면 분석(response surface analysis)은 여러 개의 변수 $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k$ 가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응변수 ψ 에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법을 말한다. 여기서 변수는 반응에 영향을 주는 독립변수 또는 인자를 말하고, 반응변수는 변수의 영향을 받아서 어떤 반응을 나타내는 종속변수를 말한다.

예를 들어, 어떤 가공품의 표면품질 평가에 있어서 그 측정량이 온도와 시간에 따라 변화한다고 하면, 온도(ζ_1)와 시간(ζ_2)이 독립변수이고, 측정량

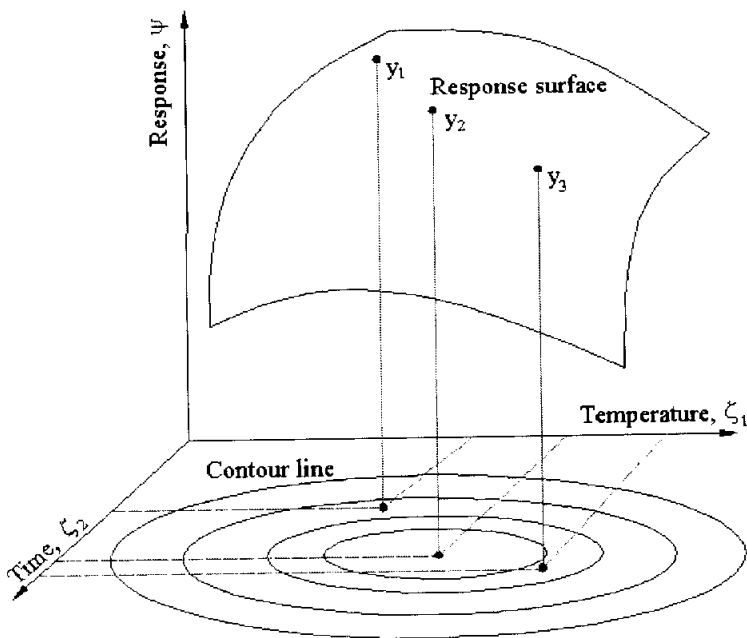


Fig. 2 Conceptual plot of response surface

(ψ)이 반응변수가 된다. ζ_1, ζ_2 의 변화에 따라 ψ 가 어떤 반응표면(response surface)을 Fig. 2와 같이 갖게 되며, 이 반응표면을 통계적 모형으로 만들어 ψ 와 ζ_1, ζ_2 간의 방정식으로 표현하여 주고자 하는 것이 반응표면 분석이다. 통계적인 접근방법은 인자들(ζ_1, ζ_2)에 대한 적절한 실험계획을 통하여 Fig. 2에서 보는 바와 같이 ψ 에 관한 측정치 y_1, y_2, y_3 등을 얻고, 이들을 분석함으로써 소기의 목적을 달성하게 되는 것이다.

일반적으로 반응표면 분석을 통하여 얻고자 하는 것은 다음과 같다.

- (1) 독립변수들($\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k$)과 종속변수(ψ) 간의 함수관계를 데이터로부터 추정하여 독립변수들의 값의 변화에 따라서 측정량이 어떻게 달라지는가를 예측한다.
- (2) 독립변수들이 어떤 값을 가질때 측정량이 최적화(optimize)될 것인가를 찾아낸다.
- (3) 작은 회수의 실험으로 좋은 정도를 주는 실험계획법이 무엇인가를 고찰하고, 데이터 분석을 통하여 추정되는 적합 반응표면(fitted response surface)의 통계적인 성질을 규명한다.

위의 3가지 내용은 반응표면 분석을 통하여 달성할 수 있으며, 이는 제품의 생산공정에서 인자들의 최적공정조건(optimum operating condition)^[13]을 찾는 데 사용되고 있다.

반응함수로서 일반적으로 가정되는 실용적인 반응표면 모형은 k 개의 독립변수에 대한 다중회귀모형이다. 이 가정은 독립변수들의 모든 값에서 만족할 필요는 없으며, 단지 실험자가 흥미를 가지고 있는 독립변수들의 어떤 영역에서만 만족하면 된다.

독립변수 $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k$ 를 선형변환(linear transformation)시켜서 새로운 독립변수 $x_1, x_2, \dots, x_k$ 를 정의하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_i = \frac{\zeta_i - \zeta_{0i}}{c_i} \quad (2.29)$$

또, 선형변환된 독립변수들의 중심이 실험자가 생각하는 흥미영역의 한 가운데에 위치한다고 하자. 이때 중심의 좌표는 다음과 같다.

$$\mathbf{x}_0 = (x_1, x_2, \dots, x_k) = (0, 0, \dots, 0) \quad (2.30)$$

식 (2.30)에서 ζ_{0i} 는 보통 ζ_i 의 측정된 값들의 평균치로 취하고, c_i 는 x_i 의 값을 간단하게 해주기 위한 상수이다. 대체로 x_i 의 값이 -1에서 +1사이에 위치하도록 c_i 를 잡아준다. 만약, x_i 들의 흥미영역에서 ψ 와 $x_1, x_2, \dots, x_k$ 간에 어떤 함수관계가 있고 함수 f 의 반응표면이 곡선으로 표현될 수 있다면, 다음과 같이 2차 반응표면 모델(second-order response surface model)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \psi &= f(x_1, x_2, \dots, x_k) \\ &= \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i \leq j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \end{aligned} \quad (2.31)$$

이것은 함수 $f(\mathbf{x})$ 를 원점($\mathbf{x} = \mathbf{0}$)에 대하여 이차 Taylor 급수전개를 하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} f(\mathbf{x}) &= f(\mathbf{0}) + \sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_{\mathbf{x}=\mathbf{0}} x_i \\ &\quad + \sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} \right)_{\mathbf{x}=\mathbf{0}} \frac{x_i^2}{2!} + \sum_{i \leq j}^k \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right)_{\mathbf{x}=\mathbf{0}} x_i x_j + \epsilon \end{aligned} \quad (2.32)$$

여기서 $f(\mathbf{0})$ 을 β_0 으로 놓고, $\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_{\mathbf{x}=\mathbf{0}}$ 와 $\left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} \right)_{\mathbf{x}=\mathbf{0}}/2!$ 및 $\left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \right)_{\mathbf{x}=\mathbf{0}}$ 를

각각 β_i , β_{ii} , β_{ij} 라 놓으면 식 (2.31)과 (2.32)는 동일한 결과를 얻는다.

만일 독립변수가 x_1, x_2 로서 $k=2$ 이고, 실험에서 얻어지리라고 생각되는 추정치가 y 라면 식 (2.31)은 다음과 같다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (2.33)$$

식 (2.33)은 행렬을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = \beta_0 + \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_{11} & \frac{\beta_{12}}{2} \\ \frac{\beta_{12}}{2} & \beta_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

$$= \beta_0 + \mathbf{x}' \mathbf{b} + \mathbf{x}' \mathbf{B} \mathbf{x}$$

y 를 최대 또는 최소화시키는 $\mathbf{x}$ 의 값을 구하기 위해서는 y 를 $\mathbf{x}$ 로 미분하면 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial \mathbf{x}} &= \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} (\beta_0 + \mathbf{x}' \mathbf{b} + \mathbf{x}' \mathbf{B} \mathbf{x}) \\ &= \mathbf{b} + 2\mathbf{B} \mathbf{x} \end{aligned} \quad (2.35)$$

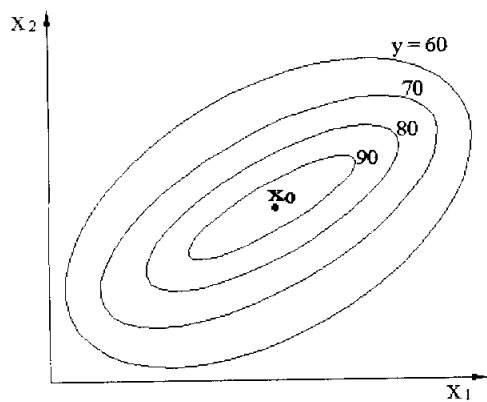
만일 어떤 점 $\mathbf{x}_s$ 가 식 (2.35)의 $\mathbf{x}$ 에 대입시켜 $\mathbf{b} + 2\mathbf{B} \mathbf{x}_s = \mathbf{0}$ 을 만족시킨다면 이점 $\mathbf{x}_s$ 를 정상점(stationary point)이라고 하며 다음과 같이 구해진다.

$$\mathbf{x}_s = -\frac{\mathbf{B}^{-1} \mathbf{b}}{2} \quad (2.36)$$

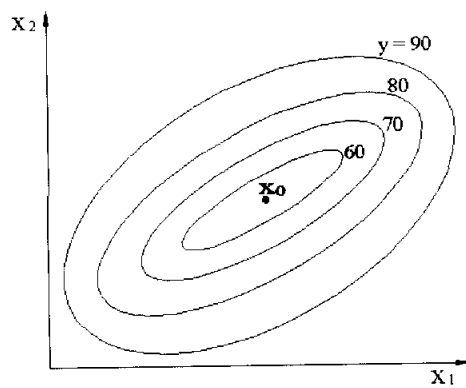
이 정상점은 2차반응표면에서 다음 세가지 중 하나가 된다.

- (1) y 가 최대가 되는 $\mathbf{x}$ 의 점
- (2) y 가 최소가 되는 $\mathbf{x}$ 의 점
- (3) y 가 최대도 최소도 아닌 $\mathbf{x}$ 의 안부점(saddle point)

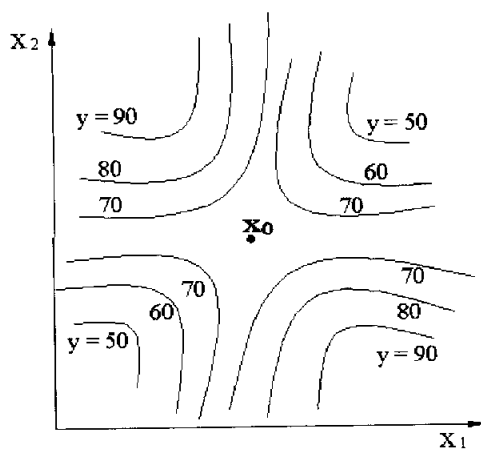
이러한 경우에 대하여 y 의 윤곽선도(contour chart)를 나타내면 Fig. 3과 같다. Fig. 3(a)에 나타낸 것과 같이 만일 $\mathbf{x}_0$ 가 최대점이면 $\mathbf{x}$ 가 $\mathbf{x}_0$ 에서 멀어질수록 y 의 값이 작아지고, 반대로 $\mathbf{x}_0$ 가 최소점이면 Fig. 3(b)에서와 같이 $\mathbf{x}$ 가 $\mathbf{x}_0$ 에서 멀어질수록 y 의 값이 커지게 된다. 만일 $\mathbf{x}_0$ 가 안부점이면 $\mathbf{x}$ 가 $\mathbf{x}_0$ 에서 멀어질 때 방향에 따라서 y 가 증가하는 쪽과 감소하는 쪽이 Fig. 3(c)와 같이 존재하게 된다.



(a) maxima point



(b) minima point



(c) saddle point

Fig. 3 Contour plots for differential stationary points

3. 최적연삭조건 선정

3.1 실험계획

평면연삭 가공물의 표면거칠기를 평가할 주요 인자(factor)로는 연삭입자의 종류, 입자의 크기, 절입깊이, 테이블 속도 및 스파크아웃으로 설정하였다. 각 인자의 수준(level)은 2단계로 변화시켰으며, 그 구체적인 값은 Table 2와 같다. 또한 고정인자로는 공작물의 종류, 연삭속도 및 습식연삭조건이 사용되었다. 실험에 사용된 공작물은 고속도강(SKH51)으로 그 기계적 성질 및 화학적 조성은 Table 3과 4에 나타내었다. 또한 본 연구에서 실시한 실험계획법에 의한 평가절차는 Fig. 4와 같다.

Table 2 Factors and their levels used in experiment

Factors	Code	Level 1	Level 2
Abrasive	A	WA	GC
Grain size(#)	B	120	200
Depth of cut(μm)	C	10	20
Table speed(m/min)	D	7.5	12.5
Spark-out(No.)	E	0	1
Constant factors	Workpiece : SKH51 (100×22×20mm) Wheel speed : 1800rpm Coolant : Wet		

Table 3 Mechanical properties of specimen

Tensile strength (kgf/mm^2)	230
Fracture strength (kgf/mm^2)	546
Fatigue strength (kgf/mm^2)	62
Young's modulus (kgf/mm^2)	22,100
Hardness (H_{RC})	62

Table 4 Chemical composition of specimen(% wt)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	W	V	Cu	Ni
0.8	0.37	0.38	0.03	0.03	3.90	4.70	6.23	1.76	0.21	0.23

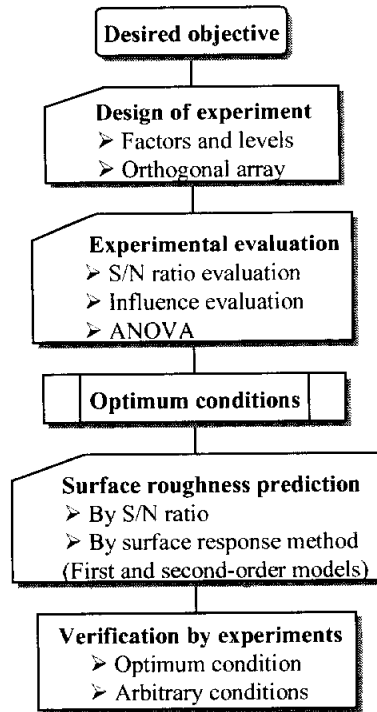


Fig. 4 An approach procedure for design of experiments

Fig. 4를 살펴보면, 평면연삭 가공에서 각 인자들이 표면거칠기에 미치는 영향을 평가하고 표면거칠기를 예측하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위하여 먼저 고려할 인자와 인자의 수준을 선정하고 이를 직교배열표에 반영한다. 직교배열표에 따라 실험을 실시하여 표면거칠기를 얻고, S/N ratio와 영향정도 및 분산분석을 실시한다. 이를 통하여 최적연삭조건을 선정한다. 다음으로 표면거칠기를 예측하기 위해서 S/N ratio와 반응표면 기법을 적용하여 수학적 모델을 개발하고, 실험을 통하여 수학적 모델의 유효성을 평가하는 것으로 구성되어 있다.

Table 5는 실험에 사용된 $L_{16}(2^{15})$ 표준 직교배열표를 나타낸 것이다. 직교배열표에는 15개의 열에 주요인자 및 상호작용이 예상되는 인자들을 A에서 E까지 부호화하여 배치하였고, 실험의 실시회수는 16회로 하였다. 직교배열

표에서 숫자 1과 2는 각 인자들의 수준을 의미하고, A, B, C, D, E의 모든 수준에서 실험이 반반씩 이루어지도록 배치하였다. $L_{16}(2^{15})$ 직교배열표의 경우, 주요인자(설계변수)가 5개이고 각 인자의 수준은 2수준이므로 일반적인 실험에서는 2^5 번, 즉 32번의 실험이 필요하지만 다구찌 기법을 이용하면 실험이 절반으로 줄고도 목적치에 가장 적합한 최적조합을 찾아낼 수 있다. 본 연구에서 목표치는 연삭가공물의 중심선 표면거칠기 값(R_a)으로 이를 최소화하고자 하였다. Photo. 1과 2는 각각 본 실험에서 사용한 연삭기와 표면 거칠기 측정장치의 사진을 나타낸 것이다.

Table 5 Standard $L_{16}(2^{15})$ orthogonal array

Factor Run	A	B	AB	C	AC	BC	DE	D	AD	BD	CE	CD	BE	AE	E
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

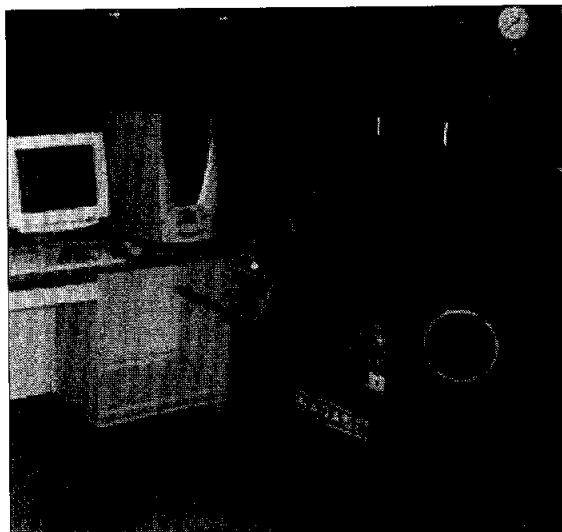


Photo. 1 Experimental setup

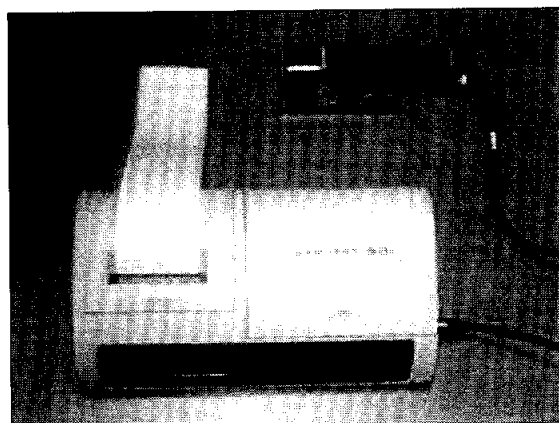


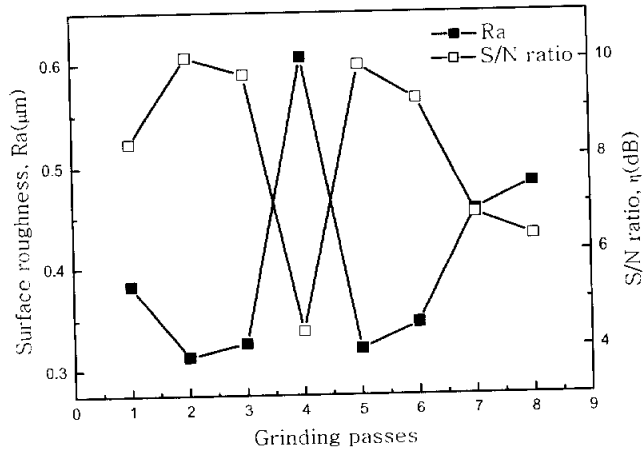
Photo. 2 Measuring instruments of surface roughness

3.2 실험결과 분석

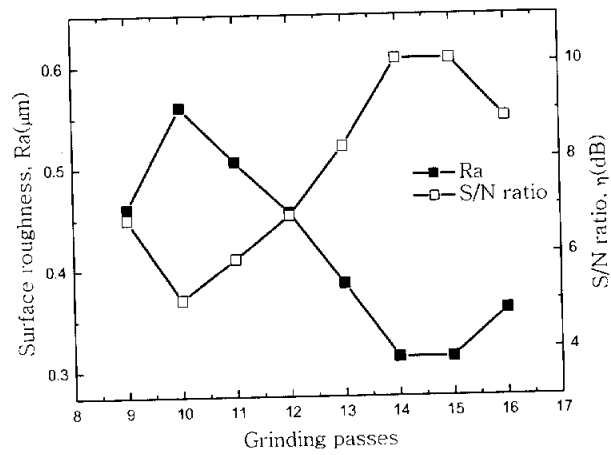
실험은 Table 5에 나타난 직교배열표에 따라서 실시하였고, 각 실험에서 표면거칠기는 3회씩 측정하였다. 표면거칠기 값은 작을 수록 좋으므로 S/N ratio의 계산은 식 (2.10)에 나타난 망소특성식을 이용하였다. 실험에서 얻어진 표면거칠기 값과 이로부터 계산된 S/N ratio는 Table 6과 같다.

Table 6 Experimental results and calculated S/N ratio of surface roughness

Run	Measured surface roughness, $R_a(\mu\text{m})$			S/N ratio, η (dB)
	R_a 1	R_a 2	R_a 3	
1	0.34	0.44	0.37	8.27
2	0.34	0.30	0.30	10.06
3	0.31	0.32	0.35	9.70
4	0.62	0.58	0.62	4.33
5	0.33	0.31	0.32	9.89
6	0.36	0.32	0.36	9.18
7	0.44	0.47	0.46	6.80
8	0.48	0.47	0.50	6.31
9	0.43	0.48	0.47	6.73
10	0.54	0.58	0.56	5.03
11	0.50	0.47	0.55	5.88
12	0.48	0.44	0.45	6.80
13	0.37	0.38	0.41	8.24
14	0.30	0.32	0.32	10.07
15	0.33	0.30	0.31	10.07
16	0.38	0.32	0.38	8.84



(a) grinding passes : 1~8



(b) grinding passes : 9~16

Fig. 5 Plots of measured surface roughness and calculated S/N ratio according to the grinding passes of experimental design

Fig. 5는 실험계획법의 실험절차에 따라 실험하여 측정된 표면거칠기와 그때 계산된 S/N ratio를 함께 나타낸 것이다. 실험결과를 보면, 실험순서에 따라서 표면거칠기의 변화경향이 일정하게 증가 또는 감소하지 않음을 알 수있다. 이것은 실험계획법이 갖는 큰 장점으로, 기존의 일반적인 실험에서는 특정한 한가지 조건만 변화시키고 나머지 조건들은 고정하는 반면 실험 계획법은 매 실험에서 두가지 이상의 조건들이 동시에 변하기 때문에 나타나는 결과이다. 결국 실험이 충분히 랜덤하게 이루어졌고, 측정된 결과치는 각 인자들의 영향을 동시에 반영하게 된다. 한편 S/N ratio의 변화경향은 표면거칠기에 완전히 반비례하여 나타남을 알 수 있다. 이것은 본 실험에서 표면거칠기가 망소특성을 갖기 때문이며 결국 S/N ratio가 크게 나타나는 것은 표면거칠기가 좋아지는 것을 의미한다.

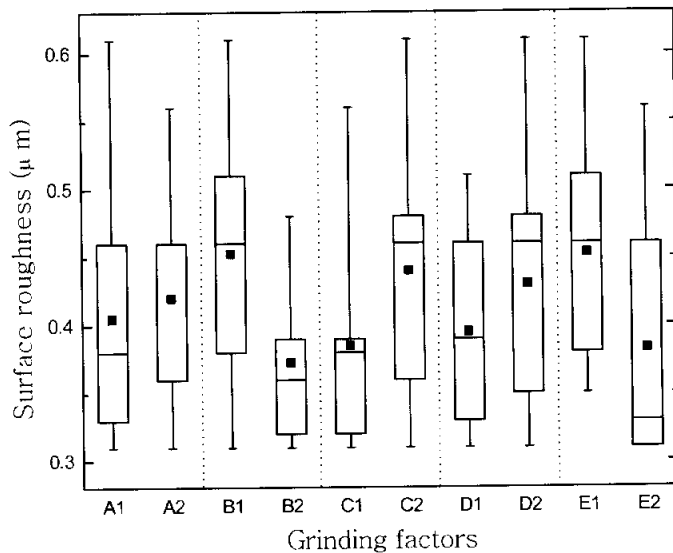


Fig. 6 Box and whisker displays for surface roughness

Fig. 6은 각 인자의 수준변화에 따른 표면거칠기를 박스형 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에는 실험에서 얻어진 표면거칠기의 최대, 최소, 중심값 및 전체 표면거칠기의 25%에서 75%까지 분포구간을 도시하였다. Fig. 6의 결과로부터 입자의 크기가 200(B₂) 일때와 절입깊이가 10 μ m(C₁)인 조건에서 매우 양호한 표면거칠기 값을 안정적으로 얻을 수 있고, 입자의 크기가 100(B₁) 일때와 스파크아웃을 행하지 않은(E₁) 조건에서는 표면거칠기가 나빠지면서 그 분포가 넓기 때문에 불안정적으로 표면거칠기가 얻어짐을 알 수 있다.

3.2.1 인자별 영향평가 및 최적조건 선정

Table 7은 Table 6의 S/N ratio를 이용하여 각 인자의 수준별 표면거칠기에 미치는 영향력(influence)과 인자별 영향력의 차(difference)를 나타낸 것이다. 예를들어, 입자의 크기(B)가 표면거칠기에 미치는 영향력과 영향력의 차는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$B_1 = \frac{1}{8} (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4 + \eta_9 + \eta_{10} + \eta_{11} + \eta_{12}) \quad (3.1)$$

$$B_2 = \frac{1}{8} (\eta_5 + \eta_6 + \eta_7 + \eta_8 + \eta_{13} + \eta_{14} + \eta_{15} + \eta_{16}) \quad (3.2)$$

$$\text{Differene} = \| B_1 - B_2 \| \quad (3.3)$$

Table 7 Result table of S/N ratio for each factor

Factor \	A	B	C	D	E
Level 1	8.072	7.105	8.439	8.202	7.077
Level 2	7.712	8.679	7.346	7.582	8.707
Difference	0.361	1.575	1.093	0.620	1.631

Fig. 7은 각 인자들의 수준이 변함에 따라서 표면거칠기에 대한 영향력을 도시한 것이다. 여기서 각 수준 변화에 따른 영향력 차가 크게 나타나는 인자일수록, 즉 기울기 변화가 큰 인자 일수록 가공물의 표면거칠기에 많은 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서 사용한 인자 중에서는 스파크아웃(E), 입자의 크기(B), 절입깊이(C)의 순서로 표면거칠기에 많은 영향을 미치고, 테이블 속도(D) 및 입자의 종류(A)는 가공물의 표면거칠기에 미치는 영향이 비교적 적은 것을 알 수 있다. 테이블 속도가 표면거칠기에 미치는 영향이

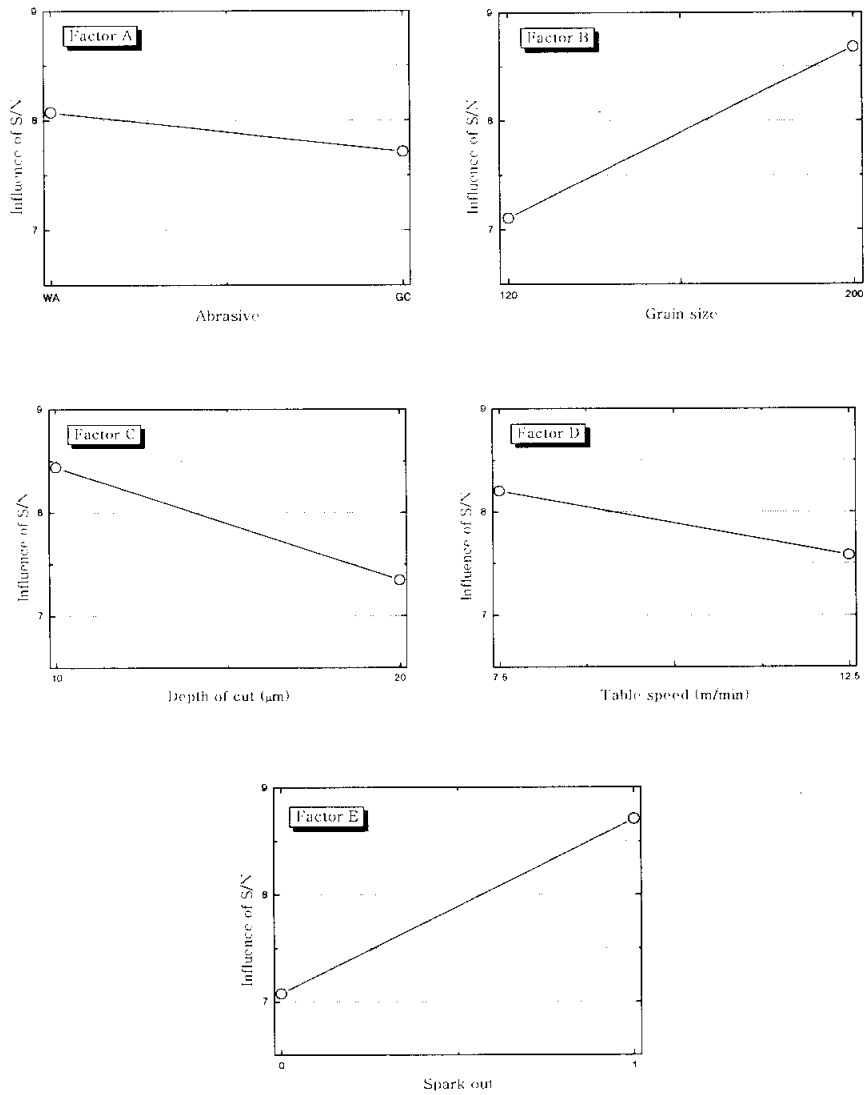


Fig. 7 Influence graph of S/N ratio for each factor

적은 것은, 통상적으로 연삭숫돌의 원주속도에 비하여 테이블 속도가 매우 느리기 때문에 연삭입자 한개 당 제거하는 공작물의 길이에는 큰 변화를 주지 못하므로 테이블 속도는 표면거칠기에는 미치는 영향이 적은 것으로 생각된다.

이상의 결과로부터 각 인자의 수준별 표면거칠기에 미치는 영향력이 큰 값을 연삭가공조건으로 선정하면 이것이 최적연삭조건이 되고, 본 연구의 실험조건 범위에서 적용가능한 최적연삭조건은 Table 8과 같다.

Table 8 Optimal grinding conditions of each factor

Factors	Notation	Conditions
Abrasive	A ₁	WA
Grain size(#)	B ₂	200
Depth of cut(μm)	C ₁	10
Table speed(m/min)	D ₁	7.5
Spark out(No.)	E ₂	1

3.2.2 인자의 상호결합에 의한 영향

한편, 연삭가공물의 표면거칠기는 각 인자별 수준변화에 따라서 영향을 받을 뿐만아니라 각 인자들의 상호결합에 의해서도 영향을 받는다. Table 9 는 인자들의 상호결합에 의한 영향력을 구해서 주요 영향인자들만 나타낸 것으로, 가령 입자의 크기와 스파크아웃이의 상호작용(BE)은 다음과 같이 계산된다.

$$B_1E_1 = \frac{1}{4} (\eta_1 + \eta_4 + \eta_{10} + \eta_{11}) \quad (3.4)$$

$$B_1E_2 = \frac{1}{4} (\eta_2 + \eta_3 + \eta_9 + \eta_{12}) \quad (3.5)$$

$$B_2E_1 = \frac{1}{4} (\eta_6 + \eta_7 + \eta_{13} + \eta_{16}) \quad (3.6)$$

$$B_2E_2 = \frac{1}{4} (\eta_5 + \eta_8 + \eta_{14} + \eta_{15}) \quad (3.7)$$

Table 9 Result table of S/N ratio for interaction

Interaction	BC	BD	CE	BE
Level 11	7.527	7.851	7.685	5.883
Level 12	6.683	6.859	9.192	8.327
Level 21	9.380	8.453	6.469	8.271
Level 22	7.978	8.405	8.223	9.088

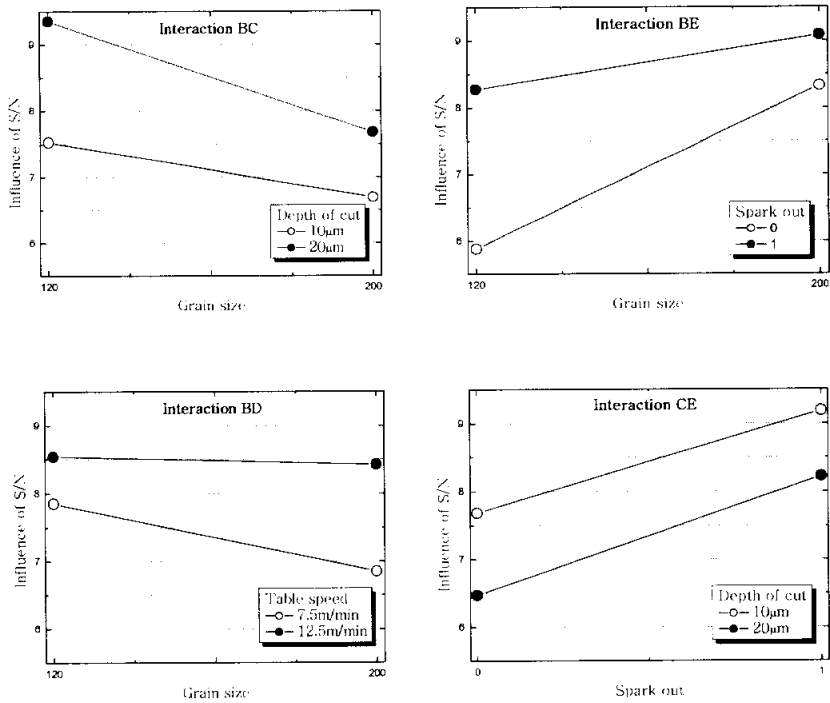


Fig. 8 Influence graph of S/N ratio for interactions

Fig. 8은 인자들의 상호결합에 의한 표면거칠기에 미치는 영향력을 도시한 것이다. 각 인자의 상호결합도 연삭가공물의 표면거칠기에 상당히 많은 영향을 미침을 알 수 있다. 특히 입자의 크기와 스파크 아웃의 상호결합(BE)은 표면거칠기에 가장 많은 영향을 미친다. 또한 입자의 크기와 절입깊이의 상호결합(BC), 절입깊이와 스파크아웃의 상호결합(CE), 입자의 크기와 테이블 속도의 상호결합(BD)도 표면거칠기에 많은 영향을 미침을 알 수 있다.

3.3 분산분석 결과

각 인자와 상호결합이 표면거칠기에 미치는 영향을 알아보기 위해서 분산 분석표를 Table 10에 나타내었다. 여기서 S 는 각 인자별 S/N ratio의 제공합을, ϕ_i 는 각 인자별 자유도(degree of freedom)를, V_i 는 제공평균을, F_{oi} 는 제공평균비를 나타낸다. 특히 *와 **는 F-검증을 통하여 각각 95% ($F_{0.05} = 4.35$) 및 99% ($F_{0.01} = 8.10$)의 유의수준을 만족함을 의미한다.

Table 10 ANOVA for S/N ratio

	S	ϕ_i	V_i	F_{oi}
A	0.008	1	0.008	0.57
B	0.154	1	0.154	11.00**
C	0.074	1	0.074	5.28*
D	0.023	1	0.023	1.64
E	0.166	1	0.166	11.85**
BC	0.691	1	0.691	49.35**
BD	0.288	1	0.288	20.57**
CE	0.298	1	0.298	21.28**
BE	0.691	1	0.691	49.35**
(e)	0.291	20	0.014	
Total	2.684	31		

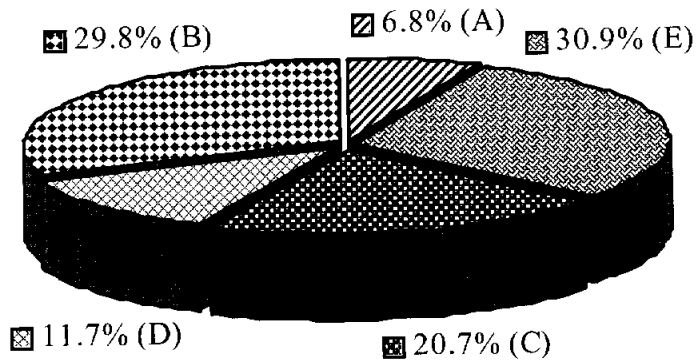


Fig. 9 Percentage distribution of surface roughness for each factor

Fig. 9는 주요인자들이 표면거칠기에 영향을 미치는 정도를 기여율 (percentage distribution)로 나타낸 것이다. 스파크아웃(E), 입자의 크기(B), 절입깊이(C)의 순으로 표면거칠기에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

4. 표면거칠기 예측 및 실험적 검증

4.1 S/N ratio를 이용한 표면거칠기 예측

S/N ratio의 평가를 통하여 본 연구에서 적용할 수 있는 최적연삭조건은 Table 8과 같이 선정되었지만, 이러한 최적연삭조건에서 얻을 수 있는 표면거칠기 값을 예측하였다. 또한, 임의의 연삭조건에서 얻을 수 있는 표면거칠기 값을 S/N ratio를 이용하여 예측하였다. 먼저 제어가능한 인자들의 최적조합은 $A_1B_2C_1D_1E_2$ 이므로 이로부터 표면거칠기를 예측하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\eta_{op} &= \bar{\eta} + (A_1 - \bar{\eta}) + (B_2 - \bar{\eta}) + (C_1 - \bar{\eta}) \\ &\quad + (D_1 - \bar{\eta}) + (E_2 - \bar{\eta}) = 10.531\end{aligned}\quad (4.1)$$

여기서 $\bar{\eta}$ 는 S/N ratio의 평균치로 7.892이다. 따라서 최적연삭조건에서 얻을 수 있는 표면거칠기는 다음과 같이 계산된다.

$$Ra(op) = 10^{-10.531/20} = 0.29\mu m\quad (4.2)$$

한편 S/N ratio를 이용한 표면거칠기 예측기법의 유효성을 알아보기 위해서, 최적연삭조건이 아닌 설정가능한 임의의 조건에서의 표면거칠기를 예측하였다. 임의의 두 연삭조건은 직교배열표에서 실험을 하지 않은 조건으로서 $A_1B_2C_2D_2E_1$ 과 $A_1B_1C_1D_1E_2$ 으로 선택하였다. 표면거칠기의 예측과정은 식 (4.3), (4.4), (4.5)와 같다.

$$\begin{aligned}\eta_{A_1B_2C_2D_2E_1} &= \bar{\eta} + (A_1 - \bar{\eta}) + (B_2 - \bar{\eta}) + (C_2 - \bar{\eta}) \\ &\quad + (D_2 - \bar{\eta}) + (E_1 - \bar{\eta}) = 7.188\end{aligned}\quad (4.3)$$

$$Ra(A_1B_2C_2D_2E_1) = 10^{-7.188/20} = 0.437\mu m\quad (4.4)$$

$$Ra(A_1B_1C_1D_1E_2) = 10^{-8.957/20} = 0.356\mu m\quad (4.5)$$

4.2 반응표면 분석에 의한 표면거칠기 예측

4.2.1 1차 반응표면 모델 개발

각 인자로부터 표면거칠기를 예측하는 또 다른 방법으로 1차 반응표면 모델을 식 (4.6)과 같이 가정하였다. 여기서 A, B, C, D, E는 각각 입자의 종류, 입자의 크기, 절입깊이, 테이블 속도, 스파크아웃을 의미한다.

$$Ra = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_4 D + \beta_5 E \quad (4.6)$$

식 (4.6)에 각 실험조건과 얻어진 표면거칠기를 대입하여 1차 반응표면 모델에서 얻고자 하는 계수행렬 $[\beta]$ 는 다음과 같이 구한다.

$$[\beta] = ([X'] [X])^{-1} [X'] [Y] \quad (4.7)$$

여기서 $[X']$ 는 각 실험조건으로 구성되는 $[X]$ 행렬의 전치행렬(transpose matrix), $[Y]$ 는 실험에서 얻어진 표면거칠기 값으로 구성되는 행렬이다. 실험조건과 표면거칠기를 대입하면, 각 인자들로부터 얻을 수 있는 1차 반응표면 모델은 다음과 같다.

$$Ra(ABCDE) = 0.49 + 0.015A - 0.079B + 0.053C + 0.035D - 0.077E \quad (4.8)$$

식 (4.8)에서 입자의 크기(B)와 스파크아웃 회수(E)가 증가할 수록 표면거칠기는 좋아짐을 알 수 있고, 또한 절입깊이(C)와 테이블 속도가 감소할 수록 표면거칠기는 좋아짐을 알 수 있다. 만일, 최적조건에서 얻은 연삭입자의 종류는 WA로, 스파크아웃은 1회 실시하는 것을 가정하면 1차 반응표면 모델은 다음과 같이 간단히 정리할 수 있다.

$$Ra(BCD) = 0.428 - 0.079B + 0.053C + 0.035D \quad (4.9)$$

한편, 구해진 표면거칠기를 예측할 수 있는 1차 반응표면 모델이 얼마나 유효한가를 평가하기 위해서 결정계수(R^2)를 구하였다. 일반적으로 결정계수의 크기는 $0 < R^2 < 1$ 이고, 1에 가까울 수록 1차 반응표면 모델의 정도가 좋다. 식 (4.8)에서 계산된 결정계수는 $R^2 = 0.736$ 이다. 또한 잔차의 제곱평균이 0.0027로 매우 작기때문에 구해진 1차 반응표면 모델은 충분히 유효함을 알

수 있다. 표면거칠기를 예측할 수 있는 1차 반응표면 모델에 대한 분산분석 표는 Table 11에 나타내었다. 1차 반응표면 모델의 자유도가 5이고 오차의 자유도가 10일 때의 F-검증표에 제시된 값이 95% 신뢰구간이 3.33이므로 본 연구의 1차 반응표면 모델에서 구해진 $F_{0.05} = 5.5917$ 로 더 큰 값을 갖는다. 따라서 본 1차 반응표면 모델의 신뢰구간은 예측되는 표면거칠기 값이 95% 범위에서 신뢰할 수 있음을 알 수 있다.

Table 11 Analysis of variance for first-order response surface model

	S	ϕ_i	V_i	F_{0i}
First-order Model	0.0755	5	0.0151	5.5917*
Residual	0.0270	10	0.0027	
Total	0.1025	15		

S/N ratio에서와 마찬가지로 식 (4.8)에서 구한 1차 반응표면 모델에 최적 연삭조건($A_1B_2C_1D_1E_2$) 및 임의의 두 조건($A_1B_1C_2D_2E_1$, $A_1B_1C_1D_1E_2$)을 대입하여 표면거칠기를 예측하면 각각 다음과 같다.

$$R_a(A_1B_2C_1D_1E_2) = 0.28\mu m \tag{4.10}$$

$$R_a(A_1B_2C_2D_2E_1) = 0.449\mu m \tag{4.11}$$

$$R_a(A_1B_1C_1D_1E_2) = 0.36\mu m \tag{4.12}$$

이들 결과는 S/N ratio에 근거하여 예측한 표면거칠기 값과 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

4.2.2 2차 반응표면 모델 개발

반응표면 모델의 개발에 있어서 얻고자하는 반응표면과 이에 관련 변수들이 선형적인 관계를 가질 때는 1차 반응표면 모델로 가정하고, 반응표면과 변수들이 곡선적인 관계를 가질 때는 2차 반응표면 모델을 구하여야 한다. 본 연구와 같이 구하고자하는 반응표면을 명확히 알 수 없을 때는 1차 및 2차 반응표면을 구하여 실제 결과와 비교하는 것이 필요하다. 따라서 2차 반응표면 모델을 개발하기 위해서 표면거칠기와 각 인자의 관계를 다음과 같이 가정하였다.

$$Ra(BCD) = \beta_0 + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_4 D + \beta_{22} B^2 + \beta_{33} C^2 + \beta_{44} D^2 + \beta_{23} BC + \beta_{24} BD + \beta_{34} CD \tag{4.12}$$

B, C, D는 입자의 크기, 절입깊이, 테이블 속도를 나타낸다. 1차 반응표면 모델과 동일한 방법으로 실험에서 얻어진 표면거칠기 값들을 대입하면 계수행렬 [β]를 구할 수 있고, 2차 반응표면 모델은 다음과 같이 완성된다.

$$Ra(BCD) = 0.8762 + 0.0024B - 0.0897C - 0.0077D - 0.0031C^2 + 0.0034D^2 - 0.0001BD + 0.0018CD \tag{4.13}$$

실험데이터로부터 계수행렬의 계산 과정에 필요한 과정들은 상용프로그램인 MATLAB을 이용하였다. 2차 반응표면 모델의 분산분석표는 Table 12에 나타내었다.

Table 12 Analysis of variance for second-order response surface model

	<i>S</i>	<i>φ</i>	<i>V_i</i>	<i>F₀</i>
Second-order Model	0.2113	9	0.0234	8.07**
Residual	0.0174	6	0.0029	
Total	0.2287	15		

그 결과를 살펴보면, 2차 반응표면 모델의 자유도가 9이고 오차의 자유도가 6일 때의 F-검증표에 제시된 값이 99% 신뢰구간이 7.98이므로 2차 반응표면 모델에서 구해진 $F_{0.01} = 8.07$ 이므로 2차 반응표면 모델의 신뢰구간은 예측되는 표면거칠기 값이 99% 범위에서 신뢰할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 1차 반응표면 모델보다 2차 반응표면 모델이 더 정확하게 표면거칠기 값을 예측할 수 있음을 의미한다.

Fig. 10과 11에는 각각 1차 및 2차 반응표면 모델로 예측한 표면거칠기와 직교배열표의 실험으로 얻은 표면거칠기 결과를 비교해서 나타낸 것이다. 1차 반응표면 모델에 의해서 예측한 결과는 2차 반응표면 모델에 비해서 산포도 크고, 또한 직선의 기울기가 1보다 작아짐을 알 수 있다.

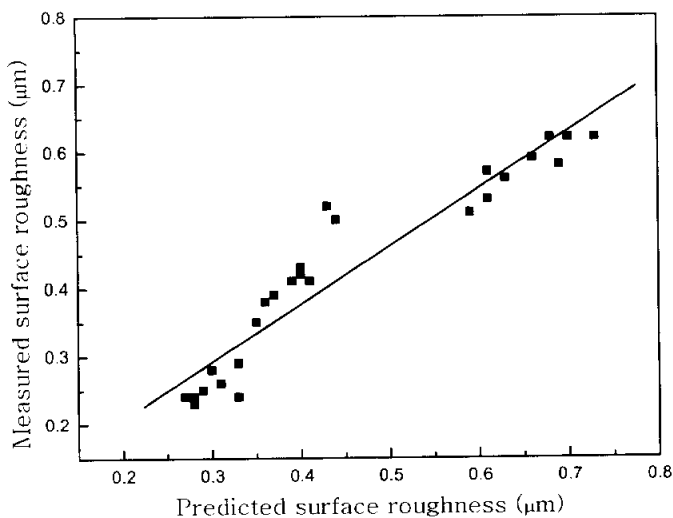


Fig. 10 Relationship between predicted and measured surface roughness by first-order response surface model

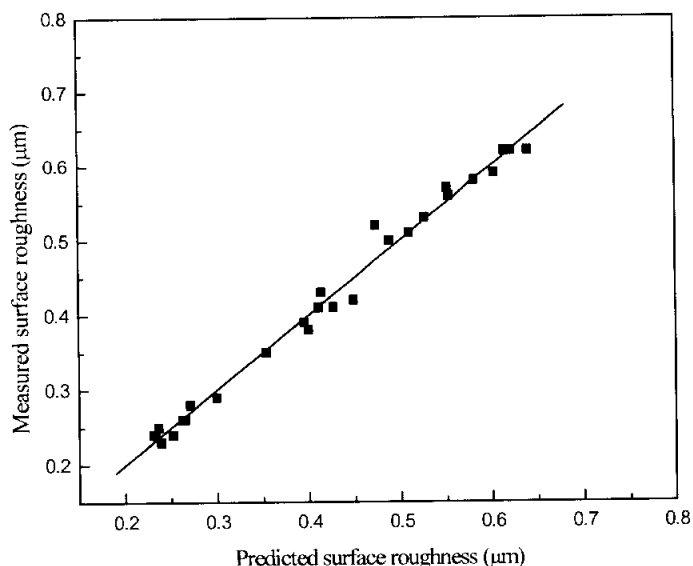


Fig. 11 Relationship between predicted and measured surface roughness by second-order response surface model

2차 반응표면 모델의 결과로부터 테이블 속도와 절입깊이 변화에 따른 표면거칠기를 예측할 수 있다. Fig. 12는 이러한 결과를 3차원 그래프에 칼라 바(color bar)를 추가하여 도시한 것이다. 절입깊이가 커질수록, 테이블 속도가 빨라질수록 표면거칠기가 나빠짐을 알 수 있다. 또한 동일한 절입깊이에서도 테이블 속도에 따라서 얻을 수 있는 표면거칠기를 입체적으로 확인할 수 있다. 이러한 3차원 그래프는 실제 산업현장에서 연삭 숙련공이 아니더라도 절입깊이와 테이블 속도에 따라서 얻을 수 있는 표면거칠기의 대략적인 값을 쉽게 얻을 수 있도록 해준다.

Fig. 13은 Fig. 12에서 보여준 3차원 그래프의 표면거칠기를 2차원화하여 윤곽선도로 나타낸 것이다. 윤곽선도의 장점은 동일한 표면거칠기를 얻을 수 있는 조건에서는 하나의 윤곽선으로 나타나 있기 때문에 보다 쉽게 연삭

조건을 선정할 수 있다. 가령 원하는 표면거칠기 값이 Ra로 $0.4\mu\text{m}$ 정도라고 하면 절입깊이 $20\mu\text{m}$ 에서는 테이블 속도를 15m/min 로 선정할 수 있고, 절입깊이가 $30\mu\text{m}$ 에서는 테이블 속도를 6.5m/min 로 선정하면 원하는 표면거칠기 값을 얻을 수 있을 것이다. 그러나 만일 산업현장에서 연삭기의 테이블 속도 조정범위가 매 5m/min 간격으로 조정할 수 있다고 가정하면, 원하는 표면거칠기 값 $0.4\mu\text{m}$ 를 얻기 위해서는 절입깊이 $20\mu\text{m}$ 와 테이블 속도 15m/min 으로 선정하는 것이 가능할 것이다.

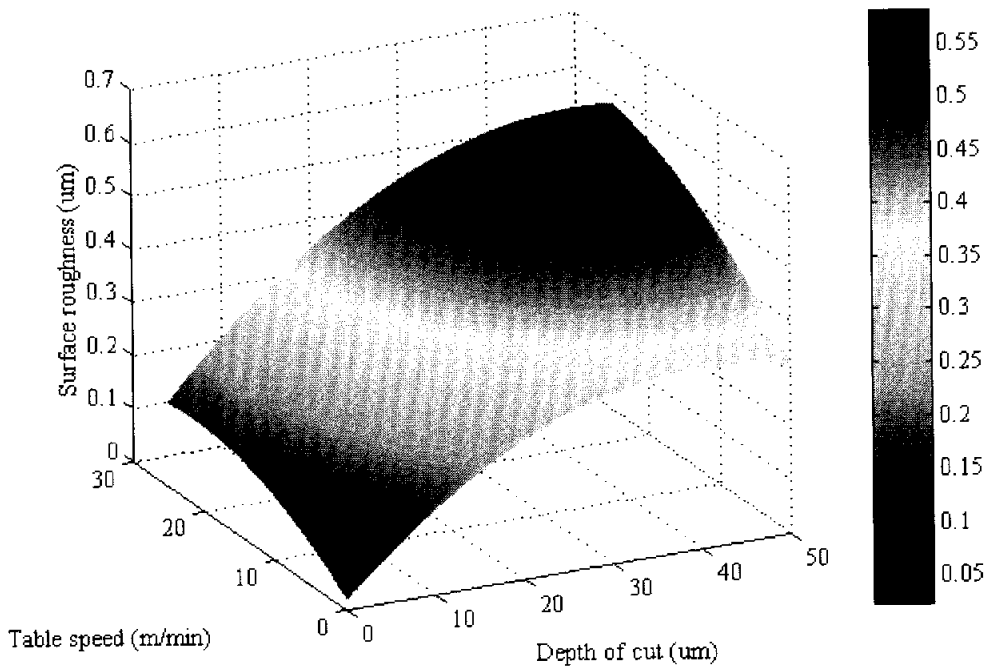


Fig. 12 3D plot of second-order response surface model for predicting surface roughness according to depth of cut and table speed

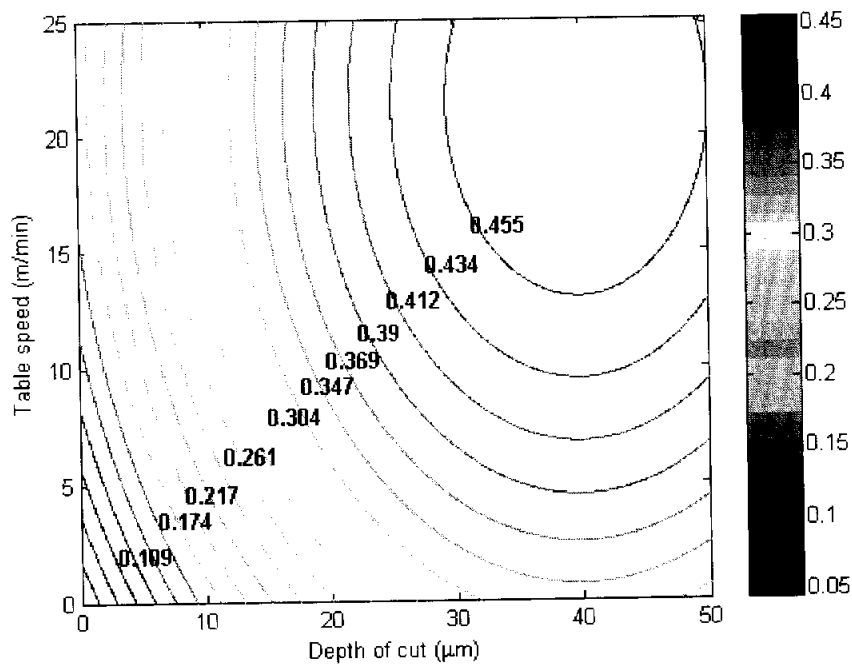


Fig. 13 Contour plot of second-order response surface model for predicting surface roughness according to depth of cut and table speed

Fig. 14는 연삭입자의 크기와 절입깊이에 따라 얻을 수 있는 표면거칠기를 3차원으로 도시한 것이다. Fig. 14에서 알 수 있듯이 절입깊이 변화보다는 연삭입자의 크기 변화가 표면거칠기에 더 큰 영향을 미침을 기울기로부터 알 수 있다. 따라서 연삭입자의 크기가 일정이상 커지면 절입깊이의 변화만으로는 원하는 표면거칠기 값을 얻지 못하는 경우가 생길 수 있음을 의미한다.

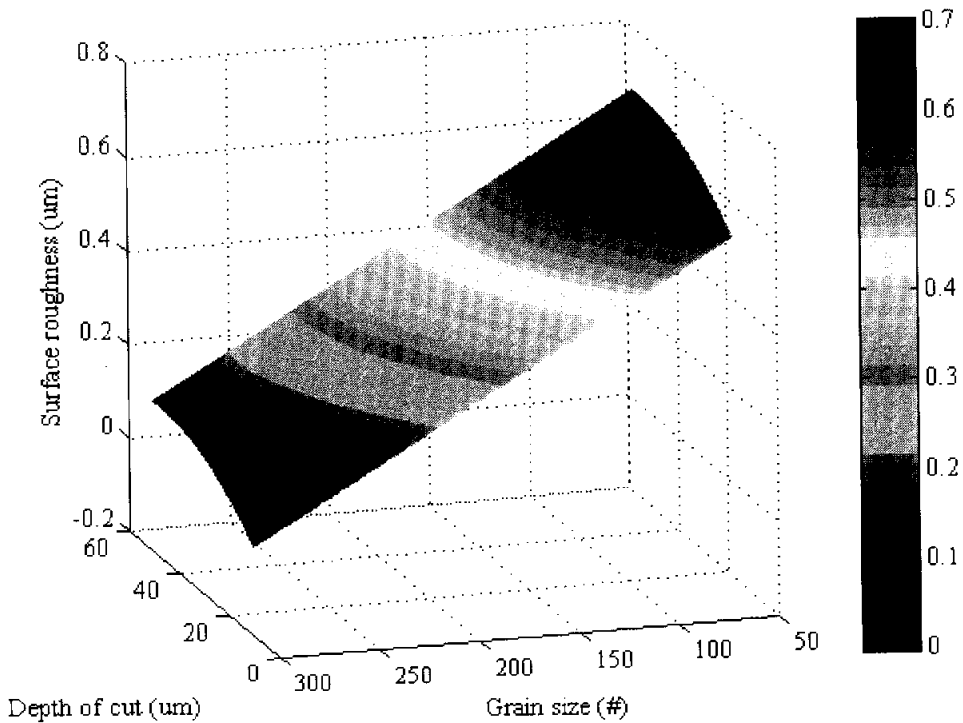


Fig. 14 3D plot of second-order response surface model for predicting surface roughness according to depth of cut and grain size

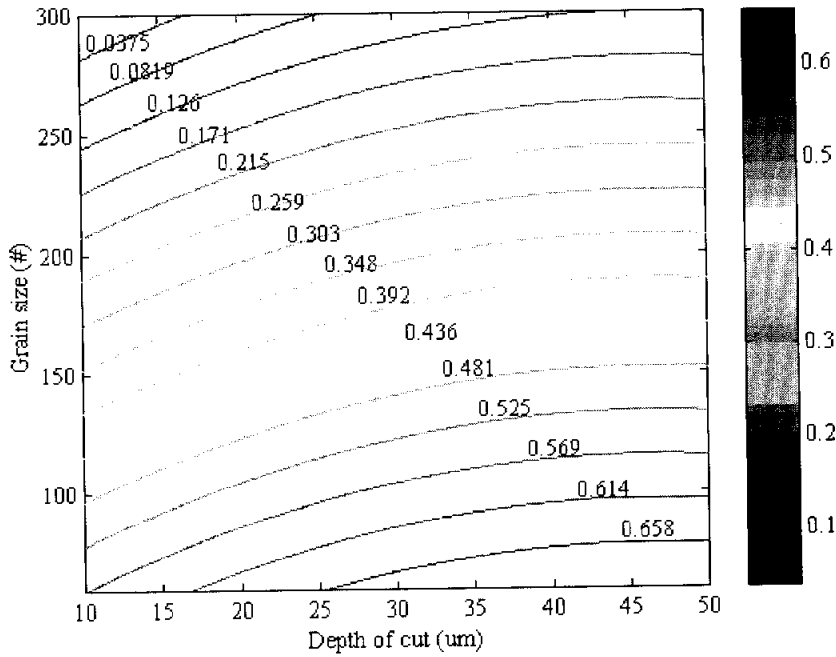


Fig. 15 Contour plot of second-order response surface model for predicting surface roughness according to depth of cut and grain size

Fig. 15는 절입깊이와 연삭입자의 크기에 따라서 얻을 수 있는 표면거칠기 값의 윤곽선도를 나타낸 것이다. Fig. 13에서와는 달리 연삭입자의 크기가 결정되면 절입깊이를 변화시키더라도 얻을 수 있는 표면거칠기는 상당히 제한적임을 알 수 있다. 이러한 경우에는 가능한한 절입깊이를 작게하여 공작물의 버닝현상이나 잔류응력 등을 최소화하는 것이 바람직하다.

4.2.3 반응표면 모델의 유용성

2차 반응표면 모델이 1차 반응표면 모델에 비하여 표면거칠기의 예측 정밀도가 더 우수함은 이미 설명하였다. 따라서 2차 반응표면 모델에서 원하는 표면거칠기 값을 얻기위해서 연삭조건을 선정할 때, 단순히 표면거칠기만을 고려한다고 하면 절입깊이를 적게하고 테이블 속도를 느리게 하면 우수한 표면거칠기를 얻을 수 있을 것이다. 그러나 실제 산업현장에서 이러한 연삭조건을 적용한다고 하면, 작업능률이 저하되어 생산성에 중대한 문제를 일으키게 된다. 따라서 가공조건의 선정에 있어서 원하는 표면거칠기 뿐만 아니라 생산성을 함께 고려하여 가공조건을 선정하여야만 한다. 연삭가공물의 생산성은 단위 시간당의 금속제거량(material removal rate, *MRR*)으로서 다음과 같이 표현된다.

$$MRR = C * D * w, \text{ (mm}^3/\text{min)} \quad (4.14)$$

여기서 *C*와 *D*는 각각 절입깊이(μm)와 테이블 속도(m/min)를 나타낸다. 또한 *w*는 연삭숫돌의 폭(mm)으로 본 연구에서는 20mm 를 사용하였다.

Fig. 16은 Fig. 13의 표면거칠기 윤곽선도에 금속제거량을 추가하여 도시한 것이다. 금속제거량은 $1500\sim6000\text{mm}^3/\text{min}$ 으로 3단계로 세분화하여 추가하였다.

그 결과를 살펴보면, A, B, C 세점은 모두 동일한 표면거칠기 값으로 R_a 가 $0.347\mu\text{m}$ 이다. 따라서 A, B, C 중 어느 점을 연삭조건으로 선정하더라도 표면거칠기 값은 같아진다. 그러나, A점 보다 B점을 선정하게 되면 금속제거량이 2배나 상승하게 된다. 만일 A점 대신에 C점을 선정하면 금속제거량은 4배나 상승하게 되는 것이다. 한편 A, D, E 세점은 모두 동일한 금속제거량을 가지므로 즉 생산량은 동일하다. A점과 D점을 비교해 보면 표면거칠기 값이 R_a 로 0.347에서 0.282로 향상됨을 알 수 있다. 또한 A점과 E점에서 보면 표면거칠기가 0.347에서 0.261로 향상됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 연삭조건을 선정에 따라 동일한 표면거칠기를 가지면서 생산량을 크게 증가시킬 수 있거나, 생산량을 일정하게 유지하면서도 표면거칠기를 향상시

키는 연삭조건이 존재함을 의미한다.

따라서 반응표면 모델의 윤곽선도가 갖는 중요성은 이와 같이 생산량의 증대 및 표면거칠기를 향상시킬 수 있는 연삭조건을 선정할 수 있도록 도와 준다는 것이다.

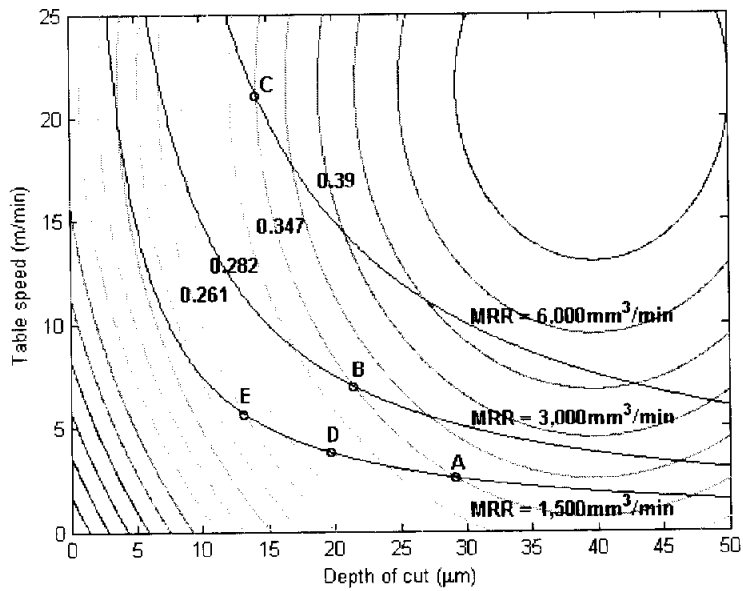


Fig. 16 Contour plot of surface roughness combined with material removal rate(MRR) according to depth of cut and table speed

4.3 실험적 검증

최적연삭조건과 임의의 두 연삭조건에 대하여 실험을 실시하여 표면거칠기를 측정하였다. 실험과정에서 생기는 오차를 최소화하기 위해서 각 조건에서의 실험은 3회씩 실시하고, 표면거칠기는 각 공작물에서 5회씩 측정하여 평균 값을 취하였다. Fig. 17은 각 연삭조건에서 S/N ratio와 반응표면 모델 및 실험을 통해서 얻어진 표면거칠기를 비교하여 나타낸 것이다. 그 결과를 살펴보면 전체적으로 실험결과에서 얻은 표면거칠기가 S/N ratio와 반응표면 모델로부터 구한 표면거칠기와 잘 일치함을 알 수 있다. 특히, 2차 반응표면 모델로부터 구한 표면거칠기는 실험을 통해서 얻어진 값과 거의 동일하다. 이는 이미 설명한 바와 같이 2차 반응표면 모델의 신뢰도가 매우 높기 때문에 가능하다. 따라서, 본 연구를 통하여 제한된 조건범위에서 표면거칠기를 예측하는 것이 가능함을 알 수 있다.

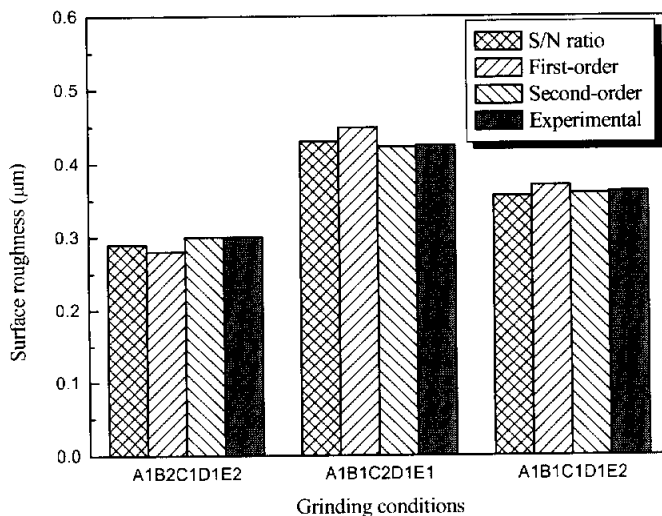


Fig. 17 Surface roughness comparison between expected and experimental result

5. 결 론

본 연구는 평면연삭에서 Taguchi 기법 및 반응표면 기법을 이용하여 최소의 실험으로 각 인자가 가공물의 표면거칠기에 미치는 영향을 평가하고, 표면거칠기를 향상시킬 수 있는 최적연삭조건을 선정하였다. 또한 S/N ratio와 반응표면 모델을 적용하여 표면거칠기를 예측하는 방법을 제시하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 표면거칠기 특성치인 S/N ratio를 이용하여 각 인자 및 인자들의 상호작용이 표면거칠기에 미치는 영향정도를 평가한 결과 스파크아웃, 입자의 크기, 절입깊이의 순서로 표면거칠기에 많은 영향을 미치고, 테이블 속도 및 입자의 종류는 가공물의 표면거칠기에 미치는 영향이 비교적 적은 것을 알 수 있었다. 또한 적용가능한 조건범위에서 표면거칠기를 가장 좋게 하는 최적연삭조건($A_1B_2C_1D_1E_2$)을 선정하였다.
2. 표면거칠기를 S/N ratio와 반응표면 모델을 이용하여 예측하였고, 이를 실험결과와 비교하였다. 이들 방법은 표면거칠기의 예측에 유효함을 알 수 있었고, 특히 반응표면 모델에서는 2차 반응표면 모델이 1차 모델에 비하여 우수한 예측결과를 나타내었다.
3. 2차 반응표면 모델의 3차원 그래프와 윤곽선도는 원하는 표면거칠기 값에 따라서 가공조건을 쉽게 선정할 수 있도록 할 뿐만아니라, 표면거칠기에 생산성을 추가로 고려하였다. 이를 통하여 동일한 표면거칠기에서 생산성을 증대시키거나, 동일한 생산성에서 표면거칠기를 향상시키는 가공조건을 선정할 수 있어 산업현장에서 활용 가능하도록 하였다.

참고문헌

1. S. Malkin, "Grinding technology-theory and applications of machining with abrasives," John Wiley & Sons, 1988.
2. H. Tonshoff, J. Peters and I. Inasaki, "Modeling and simulation of grinding processes," *Annals of CIRP*, Vol. 42, No. 2, pp. 677-688, 1992.
3. B. Nhattacharyya and S.K. Sorkhel, "Investigation for controlled electro chemical-machining through response surface methodology-based approach," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 86, No. 1-3, pp. 200-207, 1998.
4. P.V.S. Suresh, P.V. Rao and S.G. Deshmukh, "A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, No. 6, pp. 675-680, 2002.
5. A.V. Gopal and P.V. Rao, "Selection of optimum conditions for maximum material removal rate with surface finish and damage as constraints in SiC grinding," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, No. 13, pp. 1327-1336, 2003.
6. E.U. Enemuoh, A.S. Elgizawy and A.C. Okafor, "An approach for development of damage-free drilling of carbon fiber reinforced thermosets," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 41, No. 12, pp. 1795-1814, 2001.
7. T.R. Lin, "Experimental design and performance analysis of TiN-coated carbide tool in face milling stainless steel," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 127, No. 1, pp. 1-7, 2002.
8. T.R. Lin, "The use of reliability in the Taguchi method for the optimisation of the polishing ceramic gauge block," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 22, No. 3-4, pp. 237-242, 2003.
9. J.D. Kim and M.S. Choi, "Stochastic approach to experimental analysis of

- cylindrical lapping process," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 35, No. 1, pp. 51-59, 1995.
10. M.N. Dhavlikar, M.S. Kulkarni and V. Mariappan, " Combined Taguchi and dual response method for optimization of a centerless grinding operation," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 132, No. 1-3, pp. 90-94, 2003.
 11. R.V. Hogg and J. Ledolter, *Applied statistics for engineers and physical scientists*, Macmillan publishing company, New York, 1992.
 12. J.Y. Ahn, D.E. Kim, J.Y. Choi and K.H. Shin, "Friction properties of carbon coated ultra-thin film using Taguchi experimental design," *Journal of KSPE*, Vol. 20, No. 4, pp. 143-150, 2003.
 13. R.L. Hecker and S.Y. Liang, "Predictive modeling of surface roughness in grinding," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, No. 8, pp. 755-761, 2003.

<APPENDIX>

[S/N ratio 계산용 프로그램]

```

/*****
/*
/*          Calculating program for Taguchi S/N ratio          */
/*          by Sung-Gug Kim                                     */
/*
*****/

```

```
#include <stdio.h>
```

```
#include <math.h>
```

```
#include <conio.h>
```

```
void main(void)
```

```
{
```

```
    double average=0, In_A1=0, In_A2=0, In_B1=0, In_B2=0, In_C1=0,
        In_C2=0, In_D1=0, In_D2=0, In_E1=0, In_E2=0, Di_A=0,
        Di_B=0, Di_C=0, Di_D=0, Di_E=0, In_AB11=0, In_AB12=0,
        In_AC11=0, In_AC12=0, In_BC11=0, In_BC12=0, In_DE11=0,
        In_DE12=0, In_AD11=0, In_AD12=0, In_BD11=0, In_BD12=0,
        In_CE11=0, In_CE12=0, In_CD11=0, In_CD12=0, In_BE11=0,
        In_BE12=0, In_AE11=0, In_AE12=0, In_AB21=0, In_AB22=0,
        In_AC21=0, In_AC22=0, In_BC21=0, In_BC22=0, In_DE21=0,
        In_DE22=0, In_AD21=0, In_AD22=0, In_BD21=0, In_BD22=0,
        In_CE21=0, In_CE22=0, In_CD21=0, In_CD22=0, In_BE21=0,
        In_BE22=0, In_AE21=0, In_AE22=0 ;
```

```
    float e1=8.276, e2=10.064, e3=9.706, e4=4.336, e5=9.894, e6=9.188,
        e7=6.804, e8=6.312, e9=6.735, e10=5.032, e11=5.887,
```

e12=6.802, e13=8.244, e14=10.075, e15=10.072, e16=8.847 ;

```
printf("\n") ;
printf("/*****^n") ;
printf("/*                               */^n") ;
printf("/*      This program was made for calculating S/N ratio!      */^n") ;
printf("/*                               */^n") ;
printf("/*****^n") ;
printf("\n\n") ;
```

$\ln_A1 = (e1 + e2 + e3 + e4 + e5 + e6 + e7 + e8)/8.0 ;$
 $\ln_A2 = (e9 + e10 + e11 + e12 + e13 + e14 + e15 + e16)/8.0 ;$
 $Di_A = \text{fabs}(\ln_A1 - \ln_A2) ;$

$\ln_B1 = (e1 + e2 + e3 + e4 + e9 + e10 + e11 + e12)/8.0 ;$
 $\ln_B2 = (e5 + e6 + e7 + e8 + e13 + e14 + e15 + e16)/8.0 ;$
 $Di_B = \text{fabs}(\ln_B1 - \ln_B2) ;$

$\ln_C1 = (e1 + e2 + e5 + e6 + e9 + e10 + e13 + e14)/8.0 ;$
 $\ln_C2 = (e3 + e4 + e7 + e8 + e11 + e12 + e15 + e16)/8.0 ;$
 $Di_C = \text{fabs}(\ln_C1 - \ln_C2) ;$

$\ln_D1 = (e1 + e3 + e5 + e7 + e9 + e11 + e13 + e15)/8.0 ;$
 $\ln_D2 = (e2 + e4 + e6 + e8 + e10 + e12 + e14 + e16)/8.0 ;$
 $Di_D = \text{fabs}(\ln_D1 - \ln_D2) ;$

$\ln_E1 = (e1 + e4 + e6 + e7 + e10 + e11 + e13 + e16)/8.0 ;$
 $\ln_E2 = (e2 + e3 + e5 + e8 + e9 + e12 + e14 + e15)/8.0 ;$
 $Di_E = \text{fabs}(\ln_E1 - \ln_E2) ;$

$\ln_AB11=(e1 + e2 + e3 + e4)/4.0 ;$
 $\ln_AB12=(e5 + e6 + e7 + e8)/4.0 ;$
 $\ln_AB21=(e9 + e10 + e11 + e12)/4.0 ;$

$$\ln_AB22=(e13 + e14 + e15 + e16)/4.0 ;$$

$$\ln_AC11=(e1 + e2 + e5 + e6)/4.0 ;$$

$$\ln_AC12=(e3 + e4 + e7 + e8)/4.0 ;$$

$$\ln_AC21=(e9 + e10 + e13 + e14)/4.0 ;$$

$$\ln_AC22=(e11 + e12 + e15 + e16)/4.0 ;$$

$$\ln_BC11=(e1 + e2 + e9 + e10)/4.0 ;$$

$$\ln_BC12=(e3 + e4 + e11 + e12)/4.0 ;$$

$$\ln_BC21=(e5 + e6 + e13 + e14)/4.0 ;$$

$$\ln_BC22=(e9 + e10 + e15 + e16)/4.0 ;$$

$$\ln_DE11=(e1 + e7 + e11 + e13)/4.0 ;$$

$$\ln_DE12=(e3 + e5 + e9 + e15)/4.0 ;$$

$$\ln_DE21=(e4 + e6 + e10 + e16)/4.0 ;$$

$$\ln_DE22=(e2 + e8 + e12 + e14)/4.0 ;$$

$$\ln_AD11=(e1 + e3 + e5 + e7)/4.0 ;$$

$$\ln_AD12=(e2 + e4 + e6 + e8)/4.0 ;$$

$$\ln_AD21=(e9 + e11 + e13 + e15)/4.0 ;$$

$$\ln_AD22=(e10 + e12 + e14 + e16)/4.0 ;$$

$$\ln_BD11=(e1 + e3 + e9 + e11)/4.0 ;$$

$$\ln_BD12=(e2 + e4 + e10 + e12)/4.0 ;$$

$$\ln_BD21=(e5 + e7 + e13 + e15)/4.0 ;$$

$$\ln_BD22=(e6 + e8 + e14 + e16)/4.0 ;$$

$$\ln_CE11=(e1 + e6 + e10 + e13)/4.0 ;$$

$$\ln_CE12=(e2 + e5 + e9 + e14)/4.0 ;$$

$$\ln_CE21=(e4 + e7 + e11 + e16)/4.0 ;$$

$$\ln_CE22=(e3 + e8 + e12 + e15)/4.0 ;$$

```

In_CD11=(e1 + e5 + e9 + e13)/4.0 ;
In_CD12=(e2 + e6 + e10 + e14)/4.0 ;
In_CD21=(e3 + e7 + e11 + e15)/4.0 ;
In_CD22=(e4 + e8 + e12 + e16)/4.0 ;

In_BE11=(e1 + e4 + e10 + e11)/4.0 ;
In_BE12=(e2 + e3 + e9 + e12)/4.0 ;
In_BE21=(e6 + e7 + e13 + e16)/4.0 ;
In_BE22=(e5 + e8 + e14 + e15)/4.0 ;

In_AE11=(e1 + e4 + e6 + e7)/4.0 ;
In_AE12=(e2 + e3 + e5 + e8)/4.0 ;
In_AE21=(e10 + e11 + e13 + e16)/4.0 ;
In_AE22=(e9 + e12 + e14 + e15)/4.0 ;

average=(e1+e2+e3+e4+e5+e6+e7+e8+e9+e10
          +e11+e12+e13+e14+e15+e16)/16.0 ;

printf("\t\t [인자별 S/N ratio를 출력] \n") ;

printf("\t In_A1 = %.3f,    In_A2 = %.3f,    Di_A = %.3f\n",
       In_A1, In_A2, Di_A) ;
printf("\t In_B1 = %.3f,    In_B2 = %.3f,    Di_B = %.3f\n",
       In_B1, In_B2, Di_B) ;
printf("\t In_C1 = %.3f,    In_C2 = %.3f,    Di_C = %.3f\n",
       In_C1, In_C2, Di_C) ;
printf("\t In_D1 = %.3f,    In_D2 = %.3f,    Di_D = %.3f\n",
       In_D1, In_D2, Di_D) ;
printf("\t In_E1 = %.3f,    In_E2 = %.3f,    Di_E = %.3f\n",
       In_E1, In_E2, Di_E) ;

printf("\n\n");
printf("\t\t [상호결합 S/N ratio를 출력] \n") ;

```

```

printf("In_AB11 = %.3f, In_AB12 = %.3f, In_AB21 = %.3f,
      In_AB22 = %.3f\n", In_AB11, In_AB12, In_AB21, In_AB22) ;
printf("In_AC11 = %.3f, In_AC12 = %.3f, In_AC21 = %.3f,
      In_AC22 = %.3f\n", In_AC11, In_AC12, In_AC21, In_AC22) ;
printf("In_BC11 = %.3f, In_BC12 = %.3f, In_BC21 = %.3f,
      In_BC22 = %.3f\n", In_BC11, In_BC12, In_BC21, In_BC22) ;
printf("In_DE11 = %.3f, In_DE12 = %.3f, In_DE21 = %.3f,
      In_DE22 = %.3f\n", In_DE11, In_DE12, In_DE21, In_DE22) ;
printf("In_AD11 = %.3f, In_AD12 = %.3f, In_AD21 = %.3f,
      In_AD22 = %.3f\n", In_AD11, In_AD12, In_AD21, In_AD22) ;
printf("In_BD11 = %.3f, In_BD12 = %.3f, In_BD21 = %.3f,
      In_BD22 = %.3f\n", In_BD11, In_BD12, In_BD21, In_BD22) ;
printf("In_CE11 = %.3f, In_CE12 = %.3f, In_CE21 = %.3f,
      In_CE22 = %.3f\n", In_CE11, In_CE12, In_CE21, In_CE22) ;
printf("In_CD11 = %.3f, In_CD12 = %.3f, In_CD21 = %.3f,
      In_CD22 = %.3f\n", In_CD11, In_CD12, In_CD21, In_CD22) ;
printf("In_BE11 = %.3f, In_BE12 = %.3f, In_BE21 = %.3f,
      In_BE22 = %.3f\n", In_BE11, In_BE12, In_BE21, In_BE22) ;
printf("In_AE11 = %.3f, In_AE12 = %.3f, In_AE21 = %.3f,
      In_AE22 = %.3f\n", In_AE11, In_AE12, In_AE21, In_AE22) ;

printf("\n\t\t\t Eta_average = %.3f\n",average) ;
printf("\n\n End of program !\n") ;

getch( ) ;

```

!

감사의 글

1980년 기능인이 되고자 아버지의 손을 잡고 난생 처음으로 창원이라는 곳에 발을 딛고 창원기계공고에 정밀기계과에 입학하게 되었다.

어릴 때 내가 본 아버지는 시골에서 기술자였다. 그래서 그런지는 몰라도 나에게 거는 기대가 매우 크셨던 아버지였다. 중3학년인 나에게 아버지는 기능인으로써의 미래와 꿈을 다짐 받으셨다. 군 생활과 다를 바 없는 3년간의 기숙사 생활과 연식이라는 신기술 앞에 난 모든 것이 낯설고 힘들었지만 시골에서 고생하시는 아버지의 약속 때문에 나름대로 열심히 노력한 것 같다. 그 덕분에 국가기술자격증을 10개와 기계가공전문교사 자동차정비전문교사 용접전문교사를 할 수 있게 되었다. 졸업과 동시에 해병대에 차출되어 영장이 나왔는데 해병대에 가면 죽는 줄만 알았던 나는 특례보충력 5년을 마치게 되었고 지금 돌이켜 보면 나의 인생에 있어서 가장 힘든 기간 이었다. 힘든 공장생활과 과중한 작업이 계속되면서 기능인이 이렇게 힘든 줄은 미처 몰랐다. 또 다른 나를 찾기 위해 시작한 것이 공학도의 길이었다. 하지만 15년이 지난 지금도 기능인이자 기능장이다. 기능대학 다닐 때 어느 교수님의 강의 내용에서 많은 영향을 받은 것 같다. 기능대의 설립목적은 경영자와 기능인을 유기적으로 결합시켜줄 중간 관리자 양성이었다. 입사 후 승진과 더불어 위치가 바뀌면서 기능장의 위치를 버리는 경우가 많은 것이 직장의 현실이기 때문이다. 이러한 나의 생각에 동료들도 이해 못하는 경우를 보면 난 참으로 유별난 사람인가 보다 회사 생활 중 나에게도 승진의 기회가 4번 정도는 있었다 하지만 내가 다 거절 했으니 20년 기능인의 생활 중 10년은 생산현장 경험과 나머지 10년은 기술교사의 경험이 있긴 하지만 나는 생산직 기능인이자 기능장이다. 한번도 후회 해본적은 없으니까 말이다. 다변화 사회에서 기능인도 다기능화 되어야 된다는 생각으로 부경대대학원 기계설계학과에 입학하게 되면서 지금의 하만경 지도교수님을 만나게 되었으니 나의인생에 중요한 계기가 되었다. 본 논문이 완성되기까지 언제나 자상함과 세심한 지도로 많은 독려와 훈화말씀으로 지도해 주신

하만경 지도교수님께 감사의 인사 올립니다. 능력 없는 저에게 박사과정까지 할 사람이라고 타 교수님들께 당당히 소개시키셨던 잊지 못할 나의 지도교수님이시다.

늘 맑고 밝은 미소로 다정다감하신 박재섭 박사님 !

언제나 한결같이 긍정적 사고로 저의 논문에 남다른 사랑과 애착으로 실험 지도에 임해주신 박재섭박사님도 평생 잊지 못할 것입니다. 본 논문의 주심으로 많은 가르침을 주신 류인일 교수님께도 감사의 인사 올립니다. 대학원 생활동안 동문수학하며 나의 연구에 많은 지도와 도움을 주신 울산기능대학 박후명 교수님 오상록 교수님 전북기능대학 정진서 학장님 창원기능대학 이상진 교수님 이상태 박사님 한백직업전문학교 황영모 선생님 전재억 박사님 멀리 연변에서 오신 지용주 교수님 동생이면서 먼저 졸업한 이재용 석사 김진환 석사 장현석 석사께도 감사의 인사드립니다. 2년 반 동안 울산에서 부산 용당 캠퍼스까지 10년의 나이차를 극복하시고 대학원친구가 되어주신 현대중공업 기술연수원 안도경 차장님께도 감사의 인사 올립니다. 본 논문이 완성될 때까지 불편함이 없도록 도움을 주신 울산교육팀 교육학석사 강석현부장님 울산교육팀 오종환부장님 안상봉 과장님 김영욱 과장님 이형주 대리님 올바른 직장 윤리관을 갖게 하시고 오늘에 나를 있게 하신 송교만 차장님과 김효진 이사님 나에게 주사를 바로잡게 하시고 달라지는 나의 모습을 보며 감사해 하시던 울산교육팀 문기주 과장님과 강재영 과장님 직장 동료이면서 힘들 때 힘이 되어주셨던 프레스 금형공과 박두현 강사님 자동차정비공과의 안상규 강사님 김무진 강사님 자동화공과 이병철 차장님 기계제조공과 임종빈 과장님 컴퓨터공과 최용대 대리님 박혜숙 강사님 친동생처럼 사랑과 믿음을 주신 창원기계공고 2회 선배이신 박천화 형님 5회 선배이신 정권효님 박춘식님 전기전자공과 이태용 과장과 진주산업대학교 손 선생님께도 감사의 인사 올립니다. 중학교 친구인 부산일보 정치부 권기택 기자에게도 감사의 인사 전합니다. 새로운 부서에서 일할 수 있도록 많은 도움을 주신 엔진보전부 디젤엔진보전과 신1톤보전에 윤혁수 과장님 백옥종 기사님 심재운 형님 지원와서 많은 가르침을 주신 최만성 형님께도 감사의 인사 올립니다. 장모님의 사랑을 느끼게 하는 둘째처형 김명순 여사께도 감사의 인사 올립니다. 집안의 장손이시고 어려움을 함께하시는 김정수님 청

주요육대학교 김수환형님 멀리 중국에서 고생하시는 김종성형님 옛날이나 지금도 저희 집에 많은 도움을 주시는 문실 정수영형님과 아버님을 일찍 여위시고 자식 육 남매를 훌륭히 키워주신 당신 항상 성실을 몸소 실천하시며 자식사랑 하는 마음이 남다르신 어머님께 진심으로 감사의 인사 올립니다. 35년간 다닌 직장을 정연 퇴임하시는 존경하는 큰 자형과 누님 중학교 선생인 조카 상수 공학도의 길을 걷고 있는 진수 능력이면 능력 술이면 술 모든 부분에 박식하신 서울자형과 누님 교수님 같이 의젓한 조카 규진이 공주처럼 어여쁜 가영 이와 부산에서 여행업을 하시는 출성이 형님 대학1학년 때 갑작스럽게 돌아가신 아버지를 대신하여 학교를 휴학하고 세 명의 동생을 뒷바라지 하느라 너무나 고생하신 출성이 형님 내 중심적으로 생각하고 행동하는 나에게 가슴 찡하게 꾸짖던 형님! 형수님과 사랑하는 조카 장훈이 전문직의 길을 걷고 있는 사랑하는 동생 성남 이와 절에서 공부하고 있는 막내 동생 현자 모든 가족에게 감사의 마음을 드립니다. 언제나 묵묵히 옆에서 내조하여 준 사랑하는 나의 아내 명숙씨와 어릴 적 나의 모습 보다 훨씬 더 개발된 나의 후계자 아들 장환이 아내보다 더 챙겨주며 아내보다 더 걱정과 잔소리를 많이 하는 사랑스러운 나의 딸 수정이 에게도 고맙다고 전할게 연구 논문이 완성되는 날 난 강사의 길을 그만 두고 생산현장에서 참된 기능인으로 주어진 일에 최선을 다하고 있을 것이다.

23년 전 아버지께서 하신말씀을 생각하며 달려온 지금의 내 나이 40살 주경야독 나름대로 열심히 살았다고 생각하지만 부족함이 더 많은 것 같다. 오늘에서야 23년 전 아버지와 아들이 약속한 작은 사랑을 아들이 지켜드리게 되어 감사하며 이 논문과 자격증을 아버님의 영전에 바칩니다.

2004년 8월 김 성 국