

다중회귀분석을 이용한 BK7 글래스 MR Polishing 공정의 재료 제거 조건 분석

김동우*, 이정원⁺, 조명우⁺⁺, 신영재⁺⁺⁺
(논문접수일 2010. 2. 24, 심사완료일 2010. 3. 15)

Analysis of Material Removal Rate of Glass in MR Polishing Using Multiple Regression Design

Dong-Woo Kim*, Jung-Won Lee⁺, Myeong-Woo Cho⁺⁺, Young-Jae Shin⁺⁺⁺

Abstract

Recently, the polishing process using magnetorheological fluids(MR fluids) has been focused as a new ultra-precision polishing technology for micro and optical parts such as aspheric lenses, etc. This method uses MR fluid as a polishing media which contains required micro abrasives. In the MR polishing process, the surface roughness and material removal rate of a workpiece are affected by the process parameters, such as the properties of used nonmagnetic abrasives(particle material, size, aspect ratio and density, etc.), rotating wheel speed, imposed magnetic flux density and feed rate, etc. The objective of this research is to predict MRR according to the polishing conditions based on the multiple regression analysis. Three polishing parameters such as wheel speed, feed rates and current value were optimized. For experimental works, an orthogonal array L27(3¹³) was used based on DOE(Design of Experiments), and ANOVA(Analysis of Variance) was carried out. Finally, it was possible to recognize that the sequence of the factors affecting MRR correspond to feed rate, current and wheel speed, and to determine a combination of optimal polishing conditions.

Key Words : Magnetorheological Fluids(자기유변유체), Polishing(연마), MRR(재료 제거율), Regression analysis(회귀 분석), ANOVA(분산분석)

* 인하대학교 차세대 수송기계부품산학 공동사업단 (kdw@inha.ac.kr)
주소: 402-751 인천광역시 남구 용현동253
+ 인하대학교 기계공학과 대학원
++ 인하대학교 기계공학부
+++ 한국기계연구원

1. 서론

최근 광학, IT 및 의학 분야에 있어서 급속한 발전에 따라 산업 전반에 걸쳐 소자나 부품의 미세화, 초정밀화 및 다기능화에 대한 요구가 높아지고 있다. 이에 따라 초정밀 연마기술에 있어서도 요구되는 표면 거칠기를 얻기 위해 전기유변유체(Electrorheological fluids: ER fluids) 또는 자기유변유체(Magnetorheological fluids: MR fluids)를 이용한 새로운 연마방법이 개발되었다.^(1,2) 이러한 새로운 연마방법들은 기존의 방법과는 다른 공정변수가 존재하기 때문에 요구되는 생산성 및 표면 정도를 얻기 위해서는 이의 정확한 고찰이 필요하게 된다.⁽³⁾

따라서 원하는 결과를 얻기 위해서는 가공 특성 평가를 통하여 최적 가공 조건의 선정을 얻는 것은 필수적이라 할 수 있지만 많은 가공 변수와 가공 인자 사이의 교호작용 같은 영향 등으로 적절한 가공 조건을 선정하는 것은 매우 까다로운 작업이 아닐 수 없다. 특히 MR polishing 기술은 수많은 유체의 조성과 공정 조건으로 인하여 정확한 최적 조건과 재료 제거에 대한 식을 세우기가 용이하지 않다.

현재까지 최적의 가공 조건의 선정을 위한 연구들이 진행되고 있으나 가공 조건에 유의한 영향을 미치는 인자들에 대한 정량적인 데이터를 제시하고 있지 못하고 있으며 정량적인 상관관계에 관한 연구 또한 부족한 실정이다. 근래에 특정 변수에 영향을 끼치는 인자간의 상호작용을 파악하기 위해서 통계적인 분석방법을 사용하여 해석한 연구들이 제시되었다.^(4,5) 특히 회귀분석은 다양한 연마조건에 대한 인자들의 상호관계를 수학적 모형으로 수립할 수 있는 장점을 가지고 있으므로 MR 유체를 이용한 연마 공정에 있어서도 재료제거율 및 가공인자들의 상호관계를 추정할 수 있다.

따라서 본 연구는 BK7 글래스에 대한 MR polishing 공정에서 가공인자와 수준의 변화에 따른 재료제거율을 통계적인 기법을 이용하여 정량적 분석을 수행하여 그 결과를 고찰하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 관련 이론

2.1 MR 유체를 이용한 연마원리

MR 유체를 이용한 연마는 자기적으로 민감한 유체의 특성을 실시간으로 제어하여 응력과 전단력을 변화시켜 이를 표면에서의 가공력으로 활용하여 연마표면의 품위를 높이고자 하는 방법으로 Fig. 1에 그 원리를 간단히 나타내었다. 사용되

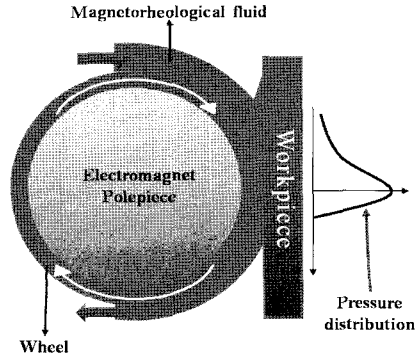


Fig. 1 Basic polishing principle using MR fluid

는 MR 유체는 자기장의 세기에 따라 유동특성이 실시간으로 제어되는 스마트 재료중 하나이며⁽⁶⁾, MR 유체에 사용되는 자성입자들의 직경은 수 μm 정도이고 30~40% 정도의 부피 비율로 포함되어 있다. MR 유체가 자기장에 노출되면 이 현탁액의 점성과 항복응력은 빠르게 증가하며, 이 유체에 연마입자를 첨가하여 가공물의 표면을 연마하는 작용을 하게 된다.⁽⁶⁾

본 연구에서 사용된 연마 시스템은 0.04~0.1 Pa·s (shear rate 800s⁻¹의 경우 40에서 100 cps)의 점성을 갖는 유체가 약 100~250 rpm의 속도로 회전하는 휠 표면 위에 공급된다. 이 휠은 직경이 120 mm 정도이며 MR 유체가 자기장의 영향을 받는 휠의 면에 공급이 되면서 유체의 점성은 수 밀리 초 동안에 수 단위 이상 증가하여 Bingham plastic 유체가 된다. 이러한 MR 유체의 변화는 항복응력을 갖는 Bingham 소성체로 나타내어지며 식 (1)과 (2)같이 나타내어질 수 있다.⁽⁷⁾

$$\tau = \tau_0 + \tau_0(H) \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) \quad (|\tau| \geq \tau_0(H)) \quad (1)$$

$$\dot{\gamma} = 0 \quad (|\tau| \leq \tau_0(H)) \quad (2)$$

여기서 τ 는 전단응력, τ_0 는 소성점도, $\dot{\gamma}$ 는 전단속도, $\tau_0(H)$ 는 자장에 의한 항복응력이다.

자장이 증가함에 따라 유체의 항복응력이 증가하므로 자성입자의 연결고리를 형성하기 위한 기계적인 에너지도 증가한다. 자장이 부가되지 않을 경우에는 일반적인 Newtonian 유체와 같은 거동을 한다.

2.2 다중회귀 분석

회귀분석의 주된 목적은 독립변수의 값을 지정했을 때에 종속변수가 갖는 값의 정확한 추정에 있으나, 상관분석에서는

양 변수의 산포의 상호관련성을 상관계수로부터 알아내고자 하는 데 있다. 본 논문에서는 BK7 글래스의 재료제거를 종속 변수로 설정하고 종속변수에 영향을 미치는 독립변수를 가공 변수로 설정하여 회귀분석을 수행하였다.

일반적으로 회귀분석은 단순회귀, 다중회귀 및 곡선회귀분석으로 구분하여 다루어진다.

이때 반응변수의 변화가 두 개 이상의 독립변수에 의하여 설명되면 이를 선형 다중 회귀모형 또는 다중회귀모형이라고 하며, 단순회귀에 비하여 높은 정도의 예측을 할 수 있다. 실험데이터를 n개의 관찰점으로 한데 묶어서 행렬을 사용하여 다중회귀모형을 나타내며 간단하게 식 (3)과 같은 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$y = X\beta + \epsilon \quad (3)$$

여기에서, y는 종속변수, X는 독립변수, ε는 미지의 모수, β는 오차값을 나타낸다. 오차제거의 합을 최소화하기 위하여 최소자승법을 이용하며, β를 미분하여 0으로 정의하면, β의 추정값 b는 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$(X'X)b = X'y \quad (4)$$

또한, 각 독립변수에 대한 추정값을 바탕으로 회귀분석에 의한 회귀선의 유의성 검증을 분산분석에 의하여 할 수 있으며, 이러한 회귀방정식 정도를 측정하기 위하여 결정계수(Coefficient of determination: R²)를 사용한다. 그러나 이러한 1차 다항회귀모델은 교호작용 등을 나타낼 수 없기 때문에, 교호작용이 유의한 경우에는 독립변수가 k개인 2차모델을 사용하여야 한다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (5)$$

여기에서는 두 인자의 곱으로 표현되는 교호작용항(Interaction term)이 있으며, β_{ij}를 교호작용 효과계수(Coefficient of interaction effect)라 부른다.

3. 실험 방법 및 장치

본 연구에서 실험에 사용된 MR polishing 시스템은 Fig. 2와 같이 구성되어 있다. 연마를 위한 전자석 휠은 테이블 위에 고정되어 있으며, 진공 척에 고정된 공작물은 3축 운동이 가

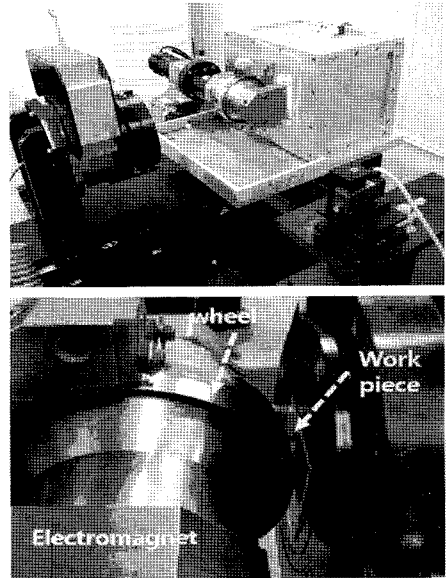


Fig. 2 Experimental setup for MR polishing system

Table 1 Experimental condition of Properties of MR fluids

CI-Powder	DI Water	Na ₂ CO ₃	Glycerin
50%	48%	1%	1%

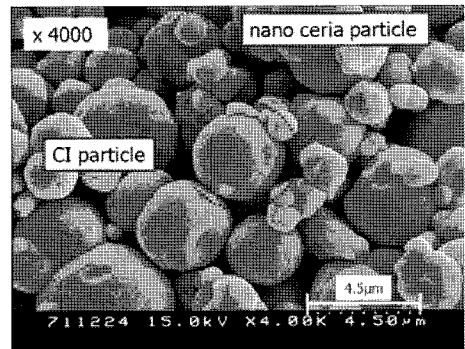


Fig. 3 SEM image of CI particles and nano ceria slurry particle

능하도록 제작되었다. 공작물의 정확한 고정과 setup의 정밀도는 연마공정의 효율성을 좌우하게 되며, 본 시스템은 고수준의 분해능을 가지는 레이저 센서를 사용하여 가공물의 고정 중에 발생하는 tilting을 측정하여 보정할 수 있도록 하였다.

MR Polishing 실험에 사용된 MR 유체와 연마 슬러리는

Table 1과 같이 조성하였다. Fig. 3에는 CI particle과 연마입자인 Nano Ceria slurry의 SEM 사진을, Fig. 4에는 Ceria 연마입자의 입도분석 결과를 각각 나타내었다. MR 유체를 이용한 연마공정에 적용되는 표준 슬러리는 자성입자, 연마입자, 그리고 운반유체인 DI-water로 구성되어 있으며, 여기에 분산안정제와 재료제거율을 높이기 위해 Cerium Oxide, Diamond powder, Al₂O₃ 입자 같은 비자성 연마제를 첨가한다.

연마 조건 실험은 각 요인의 주 효과를 이용하여 가공결과에 미치는 영향을 파악하고 회귀분석에 의한 근사 함수의 추정을 위한 데이터 확보를 위하여 실험계획법을 통하여 실험을 수행하였다. 반응변수인 연마제거량에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 휠의 속도, 인가전류 및 이송속도로 하여 3수준의 레벨로 선정하였으며, 이에 대한 자세한 실험 조건을 Table 2에 나타내었다. 공작물은 BK7 글래스를 사용하고 Raster 방식으로 평탄화 연마공정을 수행하였고, 그 결과를 비접촉식 3차원

형상측정 시스템(ZYGO-NV6200)을 이용하여 본 연구의 평가항목인 표면 거칠기와 가공깊이를 측정·분석하였다.

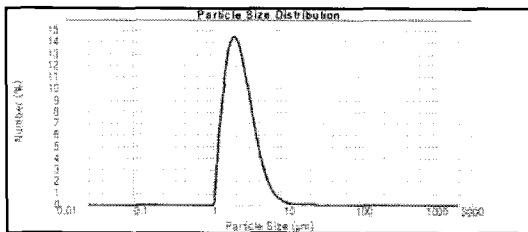
4. 실험 및 결과 분석

4.1 가공인자와 주효과

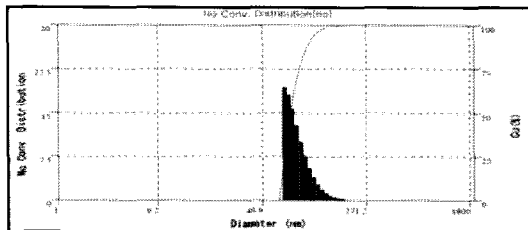
전술한 바와 같이 실험계획법(3인자 3수준)에 의하여 수행된 연마실험의 결과를 Table 3에 나타내었으며, 각 인자에 대

Table 3 Orthogonal array table for experimental design

No.	A	B	C	Machined depth(μm)
1	1	1	1	1.269
2	1	1	2	0.488
3	1	1	3	0.293
4	1	2	1	1.718
5	1	2	2	0.607
6	1	2	3	0.4154
7	1	3	1	1.978
8	1	3	2	0.735
9	1	3	3	0.493
10	2	1	1	1.567
11	2	1	2	0.537
12	2	1	3	0.388
13	2	2	1	1.871
14	2	2	2	0.608
15	2	2	3	0.388
16	2	3	1	1.448
17	2	3	2	0.816
18	2	3	3	0.286
19	3	1	1	0.900
20	3	1	2	0.331
21	3	1	3	0.220
22	3	2	1	1.273
23	3	2	2	0.470
24	3	2	3	0.302
25	3	3	1	1.587
26	3	3	2	0.612
27	3	3	3	0.343



(a) CI particle size analysis

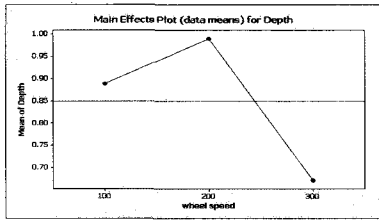


(b) Nano ceria slurry size analysis

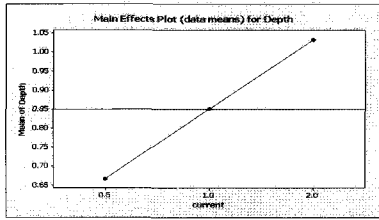
Fig. 4 Particle size analysis of MR fluids and nano ceria slurry

Table 2 Design of experimental

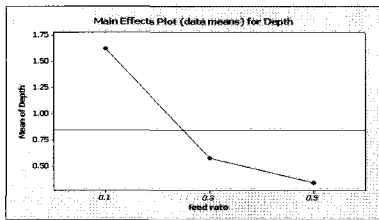
Polishing parameter	Symbol	Value each level		
		1	2	3
Wheel Speed (rpm)	A	100	200	300
Current (A)	B	0.5	1.0	2.0
Feed Rate (mm/s)	C	0.1	0.3	0.5



(a) Wheel speed(rpm)



(b) Current(A)



(a) Feed rate(m/min)

Fig. 5 Variation of machined depth according to the process parameters

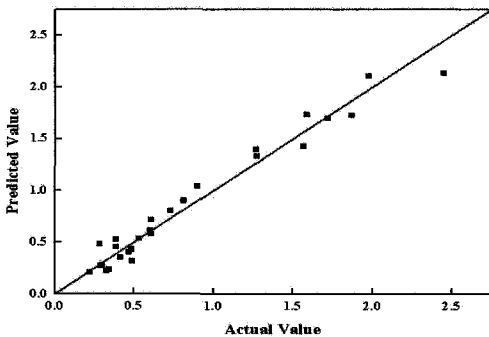


Fig. 6 Comparison of Predicted value and actual value of MRR

한 최적수준을 알아보기 위하여 인자에 대한 주효과(main effect)를 분석한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 각 그림은 인자의 수준이 가공결과인 가공깊이에 미치는 영향의 정도를 나타내는 것으로 가장 큰 값을 가질 때의 조건이 높은 재료제거

Table 4 ANOVA table for regression analysis

Model	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F-ration	R ²
Regression	9.8160	9	1.0907	49.14**	0.963
Residual	0.3773	17	0.222		
Total	10.1933	26			

율을 나타내며, 회전속도 200rpm, 인가전류 2A, 이송속도 0.1m/min에서 가장 높은 재료제거율을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

일반적인 연마원리에 의하면 회전속도가 높을수록 재료제거율이 높아지지만 본 실험의 경우에는 오히려 회전 속도가 300rpm에서 가공깊이가 저하되는 결과를 나타내었다. 이는 높은 회전속도의 경우 인가된 전자장에 의해 휠에 부착된 MR 유체가 공작물과 접촉 시 일종의 병목현상처럼 공작물의 입구에 쌓이는 현상을 보이는데 기인한 것이다. 따라서 휠과 공작물 사이에 투입되는 MR 유체의 유량이 낮은 속도의 경우보다 감소하는 현상이 발생하며, 결국 접촉 면적의 감소로 인하여 제거율이 저하되는 것으로 판단된다. 따라서 높은 속도에서의 연마 문제를 해결하기 위해서는 휠과 공작물의 간극, MR 유체의 농도, 인가전류의 적절한 선택으로 연마유체의 양에 대한 적절한 조절이 필요하다.

앞에서 언급한 회귀분석 이론을 기반으로 Table 3에 나타난 결과값을 이용하여 가공경향의 파악 및 가공결과 예측을 위한 회귀분석을 수행하였다. 분석에 사용된 회귀식은 2차식으로서 각 인자들의 교호작용을 반영할 수 있는 교호작용 효과계수(β_{ij})까지 포함한 예측식이며, 도출된 회귀분석식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 y = & 1.35 + 0.0063A + 0.9B - 8.72C \\
 & - 0.000021A^2 - 0.124B^2 + 10.2C^2 \\
 & - 0.000054A \times B + 0.00362A \times C \\
 & - 1.11B \times C
 \end{aligned} \tag{7}$$

여기에서 A는 휠의 회전수(rpm), B는 인가전류(A), C는 이송속도(m/min)를 각각 나타낸다.

Table 4로부터 도출된 회귀분석식의 정도는 결정계수인 R²으로 결정되며, R²값이 1에 가까울수록 회귀분석식의 정도가 높다는 것을 의미한다. 본 연구에서 추정된 회귀분석식의 결정계수는 0.963으로 높은 수준이므로 이 회귀분석식은 유의(significant)하다고 말할 수가 있으며, F-value 값 역시 99%

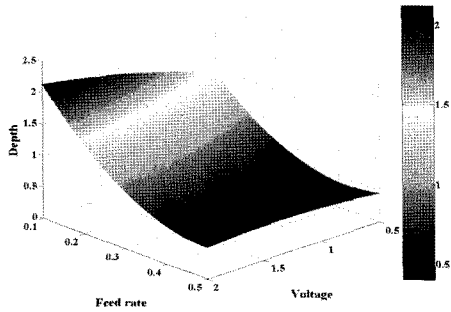


Fig. 7 3D graph of machined depth, (Wheel speed : 200rpm)

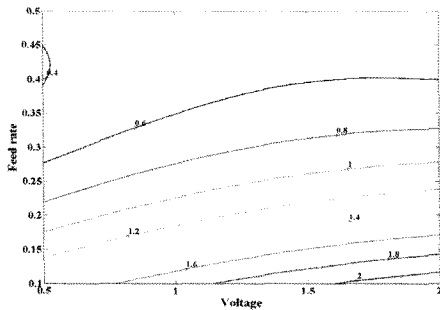
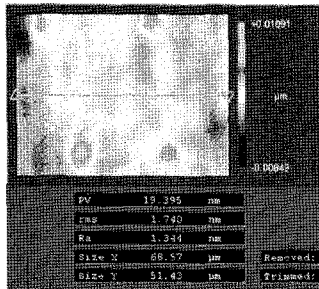
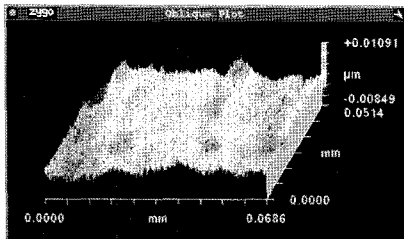


Fig. 8 Contour graph of machined depth



(a) Surface result (Ra: 1.344nm)



(d) 3D plot

Fig. 9 Surface profile for depth of machining, Wheel speed=200rpm(Ra:1.3nm)

이상에서 유의하다는 것을 알 수가 있다. Fig. 7에 실제 실험을 통하여 얻은 결과인 재료제거 즉 가공깊이 값과 회귀모델식을 이용하여 예측한 결과값을 비교하여 나타냈다. 관계식이 직선에 가까울수록 결과값과 예측값의 오차가 적다는 것을 의미하는데, 그림에서 보는 바와 같이 가공경향성이 잘 나타나 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 8과 9에 실험계획법을 통해 도출된 재료제거량의 반응 표면을 예측한 3D profile과 Contour 그래프를 나타내었으며, 주효과 분석에서 가장 적은 영향을 미치는 변수로 도출된 회전속도를 고정변수(200rpm)로 놓고, 다른 2개 인자를 변화시키며 그래프로 표시한 것이다. 추정된 가공량도 실제 가공결과와 같이 휠 속도를 제외한 각 인자의 최고 레벨로 가공할 경우에 가장 높은 값을 보여주는 것을 알 수 있다. 인가된 자장세기가 증가할수록 연마 패드 역할을 하는 MR 유체의 점성이 증가하여 가공물에 대한 압력과 전단력이 상승하며, 이로 인해 재료제거율이 증가하는 효과를 보인다. 또한 이송속도는 연마 압력을 일정하게 유지시키며 머무르는 시간 즉 체재시간을 제어하기 때문에 체재시간의 증가는 재료제거율을 선형적으로 증가시키는 것을 알 수 있다.

Fig. 9은 회전속도 200rpm, 전류의 세기는 1.0A, 연마 이송속도는 0.5mm/s에서 연마 후에 표면 조도를 측정한 것으로 대부분의 실험 조건에서 1nm 부근의 우수한 표면 조도를 얻을 수 있었다.

5. 결론

본 연구는 MR 유체를 이용한 연마 공정에서 실험계획법을 이용하여 휠 속도, 인가전류 및 공작물의 이송속도를 인자로 하고 다중회귀분석을 통하여 재료제거에 영향을 미치는 변수를 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) MR 유체를 이용한 연마가공 원리를 이용하여 연마 시스템을 구축하였고, 여러 실험을 통하여 얻은 결과로부터 BK7 글래스의 MR polishing 특성에 대한 고찰이 가능하였다.
- (2) MR 유체를 이용한 연마에 있어 이송속도가 낮을 수록 전류 상승에 따른 자장의 세기가 커지면 재료제거율이 증가하는 것을 알 수 있었다.
- (3) 회전속도가 300 rpm의 경우가 200 rpm의 경우보다 재료제거량이 저하되는 결과를 보였으며, 이는 일정 속도 이상에서는 MR 유체의 유량이 안정되지 못하고 감소하

는 현상에 기인한 것으로 판단된다.

- (4) 교호작용이 있는 경우 단순 중회귀분석에 의한 1차 추정식보다 2차 다항회귀모형에 의한 분석을 하는 것이 더욱 정도 높은 예측을 가능하게 하며, 가공 조건에 대한 재료 제거의 예측과 가공조건의 선정에 이용할 수 있는 회귀방정식을 도출하였다.
- (5) 향후 지속적인 실험과 고찰을 통하여 MR 유체와 연마 슬러리의 최적조건 검출과 연마 시스템의 성능 향상이 가능하리라 예상된다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구의 일부입니다. (No. 2009-0074199)

참 고 문 헌

- (1) Akami, Y. and Asari, K. L., 1998, "Characterization of particle motion for polishing and texturing under AC field by using particle dispersion type ER fluid," *J. Int. Mat. Sys. Struc.*, Vol. 9, pp. 672~675.
- (2) Kordonski, W. I. and Golini, D., 1999, "Progress update in magnetorheological finishing," *Int. Journal. Mod. Phys.*, Vol. 13, No. 14, pp. 2205~2212.
- (3) Hae, H. J. and Park, H. D., 2004, "Analysis of Working Factors for Improvement of Surface Roughness on High Speed End-Milling," *Journal. of KSPE*, Vol. 21, No. 6, pp. 52~59.
- (4) Bechhofer, R. E. and Dunnett, C. W., 1988, "Percentage Points of Multivariate Student t Distributions," *Selected Tables in Mathematical Studies*, ASME, R. I., Vol. 11, pp. 78~110.
- (5) Brown, M. B. and Forsythe, A. B., 1974, "Order Statistics and Their Uses in Testing and Estimation," *J. of ASA.*, Vol. 69, pp. 364~367.
- (6) Lee, J. W., Kim, D. W., Cho, M. W., Cho, W. S., and Shin, Y. J., 2008, "A Study on The Improvement in Ultra-Precision Surface of Si₃N₄ using Al₂O₃ Slurry in MR Polishing," *Trans.*, Proc. of the KSMTE Spring Conf., pp. 238~243.
- (7) Shin, Y. J., Kim, D. W., Lee, E. S., and Kim, K. W., 2004, "The Development of Polishing System a Magnetorheological Fluids," *J. KSPE.*, Vol. 21, No. 7, pp. 46~52.
- (8) Lee, S. J., Bae, H. J., Park, H. S., and Jun, T. O., 2003, "Presumption for Mutual Relation of The End-Milling Condition on Surface Roughness of Al Alloy by Regression Analysis," *Trans. of KSMTE.*, Vol. 12, No. 5, pp. 46~52.
- (9) Cho, B. M., Kim, S. J., Park, H. S., and Bae, M. I., 2008, "Effects of Machining Conditions for Improvement of Surface Roughness on Micro End-milling," *Trans. of KSMTE.*, Vol. 17, No. 2, pp. 71~76.
- (10) Park, H. S., Lee, S. J., Bae, H. J., Jin, D. K., and Kim, Y. H., 2004, "Quantative Analysis and Mathematical Model for Spindle Vibration of the End-Milling by Design of Experiment," *Journal. of KSPE.*, Vol. 3, No. 4, pp. 37~42.