

# Run to Run 제어 기법을 이용한 자기연마 공정 관리

안병운\*, 박성준<sup>+</sup>

(논문접수일 2008. 6. 9, 심사완료일 2008. 12. 15)

## Optimization of Magnetic Abrasive Polishing Process using Run to Run Control

Byoung-Woon Ahn\*, Sung-Jun Park<sup>+</sup>

### Abstract

In order to optimize the polishing process, Run to Run control scheme has been applied to the micro mold polishing in this study. Also, to fully understand the effect of parameters on the surface roughness a design of experiment is performed. By linear approximation of main factors such as gap and rotational speed of micro quill, EWMA (Exponential Weighted Moving Average) gradual mode controller is adopted as a optimizing tool. Consequently, the process converged quickly at a target value of surface roughness Ra 10nm and Rmax 50nm, and was hardly affected by unwanted process noises like initial surface quality and wear of magnetic abrasives.

**Key Words** : Magnetic Abrasive(자성연마입자), Design of Experiment(실험계획법), Run to Run Control(RtR제어), Process control(공정제어), Micro mold(미세 금형)

## 1. 서론

최근 과학 기술의 발전으로 인해 초정밀/초미세 제품들의 수요가 폭발적으로 증가하고 있다. 또한 Display 부품 및 CD와 DVD 광 픽업용 렌즈 등 다양한 분야에서 필수 부품으로 인정받고 있는 초정밀 렌즈는 대표적 초정밀/초미세 부품으로서 그 수요가 점차 증가하고 있어, 대량 생산에 대한 필요성이 대두되고 있다. 이의 대안으로 3차원 형상을 가지는 초정밀 금형 기술에 대한 연구가 진행되고 있으며, 초정

밀 금형 기술 중 대표적인 사출금형의 경우에는 프레스 금형과 달리 금형 표면의 형상과 표면 거칠기가 그대로 최종 제품에 전사되는 특징이 있다<sup>(1)</sup>. 그러므로 금형에 요구되는 표면 거칠기는 바로 최종 제품의 특성을 결정짓는 중요 요인이 된다. 광학제품의 경우에는 대부분 나노 스케일의 평균 거칠기를 요구하고 있어 이러한 표면을 얻기 위해서는 폴리싱 공정이 반드시 필요하다. 하지만 초정밀 금형의 경우 가공 기술을 포함한 정밀 부품 가공 시 형상 제작에 대한 연구에 비해 표면 개선에 대한 연구는 아직 성과 및 관심이 매우 부족

\* 한양대학교 기계설계·메카트로닉스공학과 대학원  
+ 교신저자, 충주대학교 기계공학과 (park@cjnu.ac.kr)  
주소: 380-702 충북 충주시 대학로 72

한 실정이다. 또한 렌즈 금형과 같은 3차원 형상의 마이크로 금형 폴리싱을 위해서는 일반적인 폴리싱 방법으로는 한계가 있다. 이에 새로운 폴리싱 방법에 대한 다각적이고 체계적인 연구의 필요성이 대두되고 있다. 지금까지 발표된 연구 결과를 보면, Kuriyagawa<sup>(2)</sup>는 인가된 전압의 크기에 비례하여 점성이 변하는 전기 유변 유체를 이용하여 비구면 렌즈 폴리싱에 대한 연구를 진행 하였으며, Yamaguchi<sup>(3)</sup>는 자기 유변 유체를 이용한 폴리싱 공정에서 표면 특성과 자기력, 공구 특성에 따른 가공 메커니즘 분석에 대한 연구를 진행 하였다. Park<sup>(4,5)</sup>은 이전 연구에서 결합된 자성연마입자를 슬러리 형태로 적용하여 금형의 선택적 폴리싱에 대한 연구를 진행하여 나노 스케일의 표면 거칠기를 구현 하였다. 하지만 자성연마입자를 이용한 폴리싱 공정은 표면 거칠기에 미치는 요인이 다양하고 이런 요인들의 정량적 관계 및 해석이 불분명하여 재현성에 대한 문제점이 발생되고 있다.

본 연구에서는 결합된 자성연마입자를 이용한 폴리싱(MAP: Magnetic Abrasive Polishing) 공정을 마이크로 사출 금형의 표면 개선에 적용하여 가공 특성을 분석 하였다. 또한 재현성 있는 나노 스케일 표면 가공 성능 구현을 위해 MAP 공정을 제어하여 나노미터 수준의 표면 거칠기를 구현, 유지하고자 하였다. 공정 제어기법으로는 Run to Run 제어 방식의 지수가중 이동평균기법(EWMA: Exponential Weighted Moving Average)을 이용하였으며, 업데이트에 의한 제어 인자 값이 매 공정 마다 새롭게 결정 되도록 하였다. 공정 제어 인자 선정과 인자들이 표면 거칠기에 미치는 영향을 파악하기위해 실험계획법을 통해 주 효과를 분석하였다. 이와 같은 방법으로 선정된 제어인자와 인자들의 영향력을 기준으로 나노미터 스케일의 표면 거칠기를 형성, 유지하는 것을 목표로 연구를 진행하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 자성연마입자를 이용한 폴리싱 원리

MAP 공정은 Preston 이론에서 설명하고 있는 재료 제거 원리에 의한 표면가공 기술로서 개략적인 가공기구를 Fig. 1에 나타내었다. Preston 이론(식 (1))은 재료 제거에 대한 기계적 메커니즘 중 가장 기본적으로 광범위하게 받아들여 지고 있다.

$$\frac{dz}{dt} = C_p \cdot \frac{L}{A} \cdot \frac{ds}{dt} \quad (1)$$

여기서, 좌변은 시간 변화에 대한 재료 높이의 변화량으로

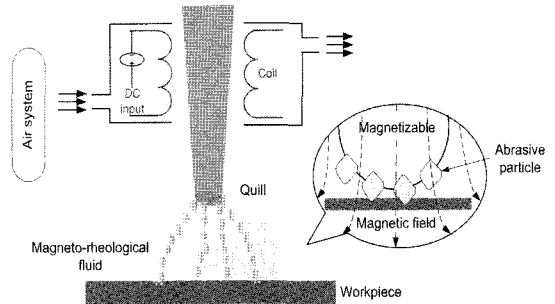


Fig. 1 Basic structure of magnetic polishing process

서 재료제거율을 의미한다.  $C_p$ 는 Preston 상수이며,  $L$ 는 가공압력,  $A$ 는 가공압력이 작용하는 면적이다. Preston 상수는 연마제, 가공물 등에 의하여 실험적으로 정해지는 상수이다.

Preston 이론에 의하면 재료 제거율은 단위면적당 가공압력과 공구와 공작물의 상대 속도와 비례한다. 즉 전자석에 의해 발생된 가공압력은 자성연마입자를 체인구조로 정렬시켜 가공물의 표면과 접촉하도록 하는 역할을 한다. 그리고 공구 회전에 의한 전단력에 의하여 표면에 스크래치가 발생되고, 이러한 작용에 의하여 재료가 제거 된다. 자성연마입자를 매개체로 간접적으로 가공압력을 전달하기 때문에 가공물의 표면 형상을 유지하면서 가공성을 향상시킬 수 있는 우수한 폴리싱 공정이다.

## 2.2 Run to Run control

### 2.2.1 기본 원리

RtR control은 불연속적 공정을 제어하기 위해 고안된 공정 제어 기법으로, 제어하고자 하는 공정의 정보와 매 공정 출력 값의 측정 정보를 활용 하여야 한다. 또한 폴리싱 공정과 같이 공정 진행 중 정보를 측정하기 힘든 경우에도 적용할 수 있으며, 최근에는 반도체 생산을 포함한 다양한 공정에 적용이 시도되고 있다. RtR control의 개략도는 Fig. 2에 나타내었으며 기본 구현식은 식 (2)와 같다<sup>(6)</sup>.

$$Y = Ax + C \quad (2)$$

여기서, 식 (2)는 선형 상태 공간방정식이며  $Y$ 는 출력 벡터(output vector)로서 각 공정의 측정 결과이다.  $A$ 는 모델 변수로서 경험적 데이터를 바탕으로 결정된다. 또한  $C$ 는 offset drift값이며,  $x$ 는 입력 벡터(input vector)값이다. 매 공정마다 모델에 의한 출력 값과 실제 공정 출력 값의 오차

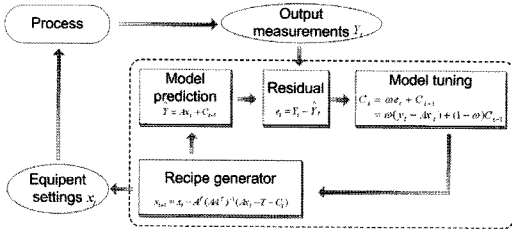


Fig. 2 Structure of Run-to-Run controller (EWMA)

를 기반으로  $C$  값이 업데이트 된다. 업데이트 된  $C$ 에 의하여 입력벡터  $x$ 는 매 공정마다 새롭게 결정 된다.

### 2.2.2 모델 업데이트

RtR control은 공정(Run)이 끝날 때마다 측정값을 출력 값으로 결정한다. 그리고 예측된 모델과 측정 값 사이의 오차를 기준으로 업데이트를 진행한다. 식 (3)은 제어 모델 업데이트에 대한 식이다<sup>(7)</sup>.

$$C_t = \omega(y_t - Ax_t) + (1 - \omega)C_{t-1} \quad (3)$$

여기서,  $\omega$ 는 EWMA 가중치 ( $\omega \leq 1$ )이다. 이 외의 정의는 식 (2)와 같다. 식 (3)은 지수가중 이동평균(이하 EWMA) 상수  $\omega$ 를 이용한 제어 모델 업데이트식이다. EWMA는 과거 측정값과 현재 측정값을 이용하여 공정을 판단하는 기법이다. 모델 파라미터가 고정된 상태이므로 offset drift만 개선한다.  $C_{t-1}$ 은 전 공정에서의 offset 항이다. 그리고 EWMA 상수  $\omega$ 값의 선정에 따라서 출력 값에 큰 영향을 미치게 된다.  $\omega$ 의 값이 1에 가까울수록 최근 측정값에 많은 비중을 두게 되며 반대로 0에 가까우면 과거 측정값에 많은 비중을 두게 된다. 즉  $\omega$ 값이 1에 가까우면 실제 외란에 대하여 더 나은 응답성을 나타낸다. 하지만 공정에 외란이 존재 할 경우에는 출력 값에 변화를 증가시키는 원인이 된다. 반면  $\omega$ 값이 0에 가까우면 실제 외란에 대해 작은 응답성을 나타내므로 값의 선정에 있어서 많은 고려를 하여야 한다.

offset drift 값의 업데이트를 기초로 하여 제어 인자의 값을 생성하기 위해 최적제어 이론을 적용하면 식 (4)와 같이 표시할 수 있다<sup>(7)</sup>.

$$\begin{aligned} \min & \|x_t - x_{t-1}\|_{Ax=b}^2 \\ L &= \frac{1}{2}(x_t - x_{t-1})^T(x_t - x_{t-1}) + \lambda^T(Ax_t - b) \\ b &= (T - C_{t-1}) \end{aligned} \quad (4)$$

$x_{t-1}$  : recipe from previous run

$A$  : parameter drift

$\lambda$  : Lagrange multiplier

$L$  : equation to minimize

식 (4)를 다시  $x$ 에 대해서 정리하면 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$x_t = x_{t-1} - A^T(AA^T)^{-1}(Ax_{t-1} - b) \quad (5)$$

제어인자의 값은 식 (5)에 의하여 최적제어 조건으로 매 공정마다 새롭게 결정되어 진다.

## 3. 폴리싱 시스템

MAP 시스템의 구성은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 자력발생장치인 전자석과 폴리싱 공구로 이루어진 가공 기구와 각 축 이송을 위한 머시닝센터로 구성된다. 가공 헤드는 공구교환방식을 통하여 착탈이 용이하도록 설계, 제작 하였다.

균일한 자기장 발생을 제어 할 수 있도록 전자석을 적용하였으며, 전자석은 구리 코일을 1800회 감고 50V, 5A의 전류를 부가하도록 설계하였다. 가우스미터를 이용하여 측정 한 결과 공구의 끝에서 약 0.6 Tesla의 자속 밀도를 얻을 수

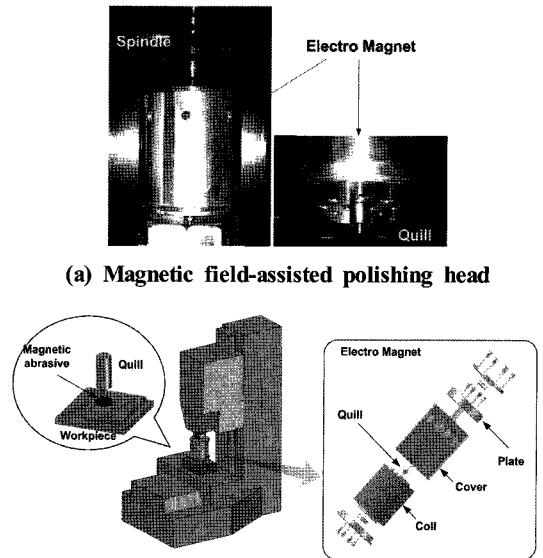


Fig. 3 Experimental set-up for magnetic polishing

있었다. 또한 전류에 의한 발열로 전자석의 성능 감소를 방지하기 위해 압축공기에 의한 냉각장치를 추가하여 시스템을 구성하였다. 폴리싱 공구의 재질은 자화 특성이 우수한 SM45C로 제작하였으며, 다른 구성요소들은 알루미늄을 사용하였다. 그리고 연마입자의 미끄러짐 현상을 방지하기 위해 공구 끝단에 홈을 형성하였다. 또한 공구의 회전 시 런아웃을 최소화하기 위하여 베어링으로 지지하였으며 베어링에 의한 누설장치가 생기지 않도록 세라믹 재질의 베어링을 사용하였다.

## 4. MAP 공정 특성 분석

### 4.1 실험계획법을 이용한 공정 파라미터 분석

MAP 공정은 가공물과 공구 사이에서 가공 영역이 형성되며 이 가공 영역에서 일어나는 물리적 현상에 대한 정량적인 해석은 매우 복잡하다. 그래서 폴리싱 성능에 대한 공정 파라미터의 선정은 실험에 의한 경험적 데이터를 기반으로 결정하고 있다. 하지만 본 연구에서는 폴리싱 공정 변수를 경험적 데이터에 의존 하지 않고 객관적으로 정량화하기 위하여 실험 계획법을 적용하여 분석하였다.

실험계획법을 진행하기 위해 우선 폴리싱 조건을 선정하여야 한다. Preston 이론과 기초 실험을 통해 폴리싱 성능에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석된 가공 변수는 가공압력이다. 그러므로 가공압력에 영향을 미치는 폴리싱 조건인 자성연마 입자 크기, 입자량, 간극과 전단력에 영향을 미치는 회전속도와 이송속도를 조건으로 선정 하였다. 선정된 조건을 인자로 하여 각 인자에 따른 수준을 Table 1에 나타내었다. 수준은 기초 실험을 통하여 얻은 결과를 이용하여 결정하였다. 가공물은 금형가공에서 주로 사용되는 스테인리스

Table 1 Levels and value of each factors

	Factors	Unit	Levels		
			0	1	2
A	Abrasive size	μm	25~75	75~125	125~150
B	Abrasive quantity	g	0.2	0.4	0.6
C	Gap	mm	0.5	0.75	1
D	rotational speed	rpm	500	1000	1500
E	Feed rate	mm/min	10	50	100

합금강인 STAVAX S136로 선정하였으며, 초기 표면 거칠기의 평균값은 약 Ra 890nm이다. 결정된 인자와 수준은 5인자 3수준이며 교호 작용을 고려하여 3수준 직교 배열표인 L<sub>27</sub>(3<sup>13</sup>)을 선택하였다. 설계된 직교 배열표를 이용하여 실험 조건을 결정하였으며 실험 순서를 랜덤화 하여 2회 반복 실험하였다.

### 4.2 분산 분석에 의한 특성 분석

직교 배열표를 이용한 실험계획법의 실험 결과를 표면 거칠기를 기준으로 정리하여 분산 분석기법을 이용하여 분석하였다.

표면 거칠기 Ra에 대한 분산 분석 결과로서 인자 C, D 그리고 교호 작용 A×C, B×C가 유의 수준 10%로 신뢰함을 알 수 있다. 또한 표면 거칠기 R<sub>max</sub>의 경우에는 인자 A, C, D가 유의 수준 10%로 신뢰함을 알 수 있다. 신뢰할 수 없는 인자는 오차 항으로 풀링 하였다. 그리고 표면 거칠기에 미치는 영향을 기여율로 나타내었다. 결과를 Table 2와 3에 나타내었다. 표면 거칠기 R<sub>a</sub>와 R<sub>max</sub> 기준으로 인자들의 영향력을 나타낸 주 효과는 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타내었다. 그래프에서 점선은 데이터 값의 평균이며, 각 수준의 산

Table 2 Analysis of variance for R<sub>a</sub> (after pooling)

Factor	S	φ	V	F	ρ (%)
A	105.2	2	52.6	2.33	3.93
B	66.1	2	330.0	1.46	2.45
C	1293.1	2	646.5	28.56*	48*
D	246.6	2	123.3	5.45*	9.15*
A×C	318.4	4	79.6	3.52*	11.8*
B×C	437.3	4	109.3	4.83*	16.2*
error	226.3	10	22.6		8.4
Total	2693.3	26			

Table 3 Analysis of variance for R<sub>max</sub> (after pooling)

Factor	S	φ	V	F	ρ (%)
A	21092	2	10546	3.0	7.63
C	153694	2	76847	22.1*	55.64*
D	32120	2	16060	4.6*	11.62*
error	69296	20	3465		25
Total	276202	26			

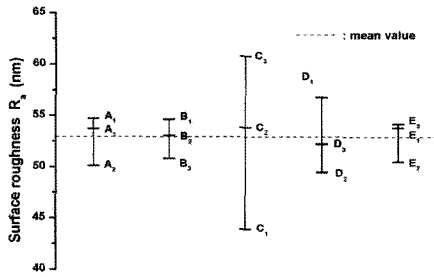


Fig. 4 Main effects between factors on  $R_a$

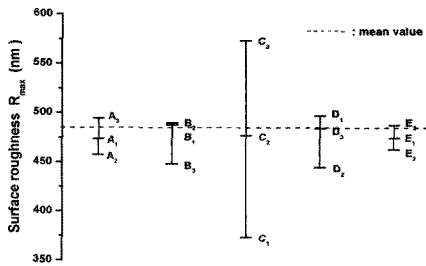


Fig. 5 Main effects between factors on  $R_{max}$

포와 평균을 나타내고 있다.

Table 2와 3에 나타난 분산분석표를 바탕으로 표면 거칠기  $R_a$ 에 의한 기여율 기준으로 나열하면  $C, B \times C, A \times C, D$  순이다. 또한 표면 거칠기  $R_{max}$ 에 기준으로 나열하면  $C, D$  순이다. 이때 표면 거칠기  $R_a$ 의 교호 작용은 간극과 관련된 인자들의 교호 작용이며, 표면 거칠기  $R_{max}$ 의 교호 작용은 인자  $C, D$ 에 비해 유의 수준이 매우 작아 고려하지 않았다. 그러므로 기여율 기준으로 보았을 경우  $R_a$ 와  $R_{max}$  가장 큰 영향을 미치는 인자는  $C, D$ 이다. 즉 분산분석결과 표면 거칠기에 영향을 크기 미치는 인자는 간극과 회전속도이다. 실험계획법을 이용하여 선정한 폴리싱 조건은 공정제어의 제어 인자로 적용 할 수 있다. 또한 기여율은 공정 모델 있어서 경험적 데이터에 의존하였던 공정 파라미터를 객관적으로 정립하도록 도우는 역할을 한다.

### 5. Run to Run 공정 제어

공정 제어의 목표 값은 렌즈 사출 금형에서 요구하는 표면 거칠기  $R_a$  10nm이하와  $R_{max}$  50nm이하로 설정 하였다. 기초 실험과 실험계획법에 의해 선정된 공정 제어 인자는 간극과 회전속도, 가공 시간이다. 선정된 제어 인자는 프레스톤 이론에서도 알 수 있듯이 가공에 가장 지배적인 영향을 미치

는 요소이다.

제어 인자 중 간극은 가공압력을 형성하는 인자로서 간극 이외에도 자성연마입자의 크기, 자기장의 세기 등으로 나타낼 수 있다. 그러나 세 가지 인자 중 자기장의 세기는 실험 장치에 의하여 그 한계 값이 결정되어 있어 제어인자로 선택하기에는 곤란하다. 또한 결합된 자성연마입자의 크기는 제어 인자의 업데이트에 의하여 정밀하게 조절할 수 없다. 그러므로 간극을 가공압력에 대한 제어인자로 선택하였다. 그리고 자성연마입자는 초기 표면 거칠기와 목표 표면 거칠기 값을 고려하여 실험계획법 결과를 기준으로 25~75 $\mu$ m 고정 하였다. 또한 초기 표면 거칠기의 변동을 방지하기 위해 동일한 시편에 폴리싱 위치를 변경하면서 RTR 공정 제어 실험을 진행하였다.

기초 실험과 실험계획법, 그리고 기계적 재료제거율에 대한 이론, 제어 수준을 고려하여 최종적으로 도출된 제어 인자는 간극, 회전속도, 가공 시간이다. 각 제어 인자에 대하여 Table 4에서 나타내고 있는 일정 범위 내에서 선형회귀분석을 한 결과 근사적으로 선형화 시킬 수 있었으며 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 제어 인자를 선형 근사화 시킬 수 있으므로 공정제어는 EWMA gradual mode 제어를 적용하여 실시하였다.

2.2절에서 나타낸 RTR control 공정 선형 모델식을 이용하여 마이크로 금형에서 요구하는 표면 거칠기를 최종 목표 값으로 공정을 제어 하였다. 최초 공정에서의 입력 값은 식 (6)에 나타내었다.

$$A = \begin{bmatrix} 0.48 & -0.09 & -0.1 \\ 0.62 & -0.04 & -0.1 \end{bmatrix}, \quad x_1 = \begin{bmatrix} 800 \\ 500 \\ 180 \end{bmatrix}$$

$$C_0 = \begin{bmatrix} -311 \\ -408 \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} 10 \\ 50 \end{bmatrix} \quad (6)$$

첫 공정에 의해 측정된 출력 값과 최초 공정의 입력 값을 이용하여 식 (3)에 의하여 공정 제어 모델이 업데이트 된다.

Table 4 Experimental design parameters

Factor	lower bound	upper bound
gap(mm)	0.2	1
rpm(rev/min)	250	1500
polishing time(sec)	120	480

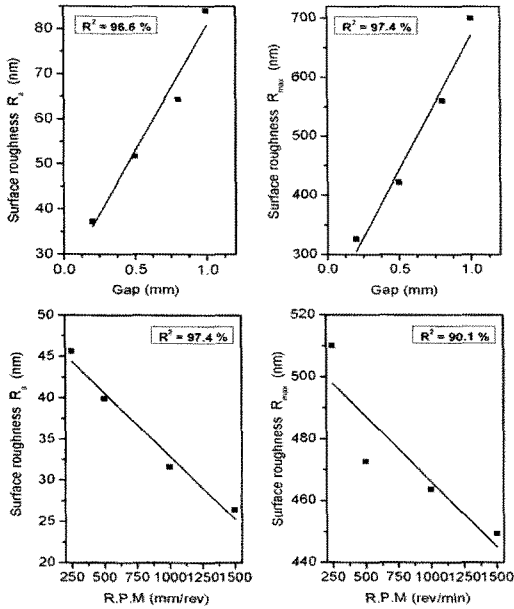


Fig. 6 Response surfaces for  $R_a$  and  $R_{max}$ (as a function of gap and tool rotation)

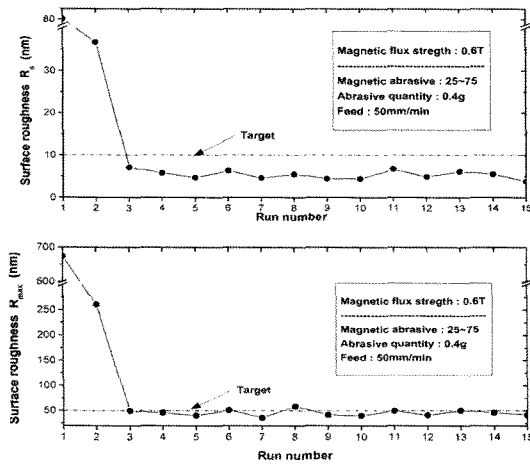


Fig. 7 Process control output( $R_a$  and  $R_{max}$ )

그리고 식 (5)에 의하여 각 제어 인자의 값(recipe)을 새롭게 결정할 수 있다. 초기 입력 값을 제외하곤 매회 실험이 반복 될 때 마다 입력 값(recipe)이 새롭게 업데이트 되며 입력 값에 의한 출력 값은 Fig. 7에 나타내었다. 그리고 공정이 진행되는 동안 입력 값의 변화를 제어 인자에 따라 Fig. 8에 나타내었다. RiR control 기법 중 EWMA gradual mode를

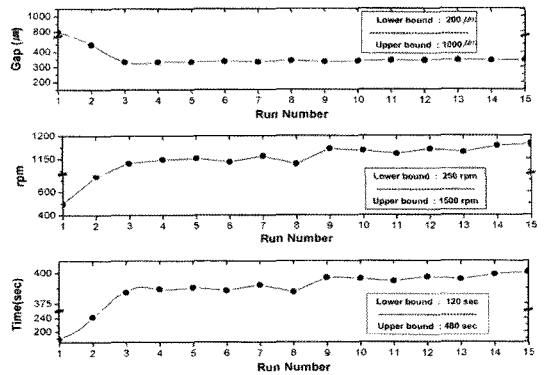
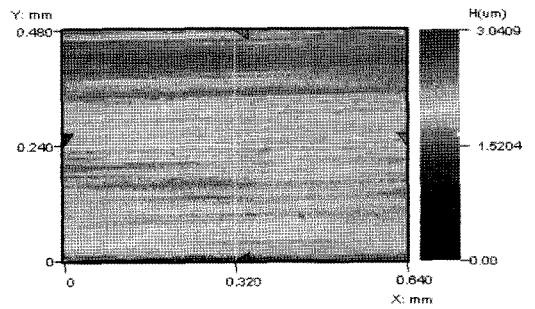
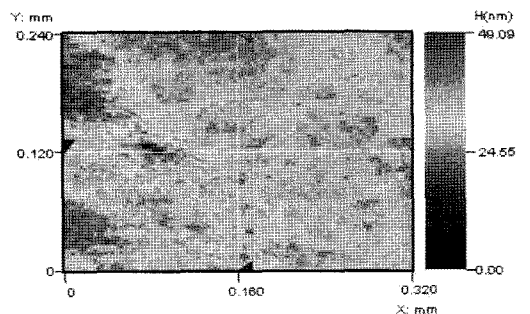


Fig. 8 Variation of control factors according to run number



(a) run number 1( $R_a: 133 \text{ nm}$ ,  $R_t: 2540 \text{ nm}$ )



(b) run number 15( $R_a: 3.47 \text{ nm}$ ,  $R_t: 49.03 \text{ nm}$ )

Fig. 9 measurement results of surface roughness

적용하여 표면 거칠기 개선을 위해 공정을 관리한 결과를 확인할 수 있다. 또한 3차원 나노 표면 거칠기 측정 시스템을 이용하여 측정된 결과 값을 Fig. 9에 나타내었다. 목표

값인 표면 거칠기  $R_a$  10nm와  $R_{max}$  50nm의 범위로 빠르게 수렴해 가며 공정이 진행되어도 관리가 이루어지는 것을 확인 할 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 렌즈 사출 금형과 같은 마이크로 금형 표면 개선에 결합된 자성연마입자를 이용한 폴리싱(MAP) 공정을 적용하여 마이크로 금형에서 요구하는 나노미터 수준의 표면 거칠기를 구현하고 지속적으로 공정관리를 하기 위하여 RtR 제어 기법 중 하나인 EWMA gradual mode 제어를 적용하여 성공적인 결과를 보였다. 또한 공정 변수를 객관적으로 정량화하기 위하여 실험계획법을 통하여 가공공정의 중요한 변수를 파악 하였으며 각 가공변수들이 폴리싱 성능에 미치는 영향을 표면 거칠기를 기준으로 하여 기여율로 나타내었다.

파라미터 분석을 통하여 결정된 공정 제어 모델을 이용하여 RtR 공정 제어를 진행 한 결과 목표 값인 표면 거칠기  $R_a$  10nm와  $R_{max}$  50nm 수준으로 빠르게 수렴해 가는 것을 확인하였으며, 목표 값에 도달한 후 연마입자의 마모현상, 가공 시편의 불균일한 초기 표면 거칠기 등 공정 외란이 발생 또는 존재하여도 목표 값을 유지하였다.

RtR 기법을 이용한 공정 제어를 통해 자기연마 공정에서 지적되고 있는 가공력 변화 및 입자 마모 현상들에 의해 발생되고 있는 가공 재현성 문제를 해결하였으며, 이를 통해 추후 폴리싱 공정 자동화 연구의 기반을 마련하였다.

## 참고 문헌

- (1) Choi, J. Y., Kim, H. H., Park, J. H., Jeong, H. D., and Seo, H. D., 2002, "A Study on Nano-polishing of Injection Molds using Fixed Abrasive Pad," *Journal of the KSPE*, Vol. 19, No. 10, pp. 212~220.
- (2) Kuriyagawa, T., Sacki, M., and Syoji, K., 2002, "Electrorheological Fluids Assisted Ultra precision Polishing for Small Three-dimensional Parts," *Journal of the Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, No. 26, pp 370~380.
- (3) Yamaguchi, H. and Shinmura, T., 2000, "Study of an Internal Magnetic Abrasive Finishing using a Pole Rotation System - Discussion of the Characteristic Abrasive Behavior," *Precision Engineering*, Vol. 24, pp. 237~244.
- (4) Park, S. J., Ahn, B. W., and Yoon, J. H., 2003, "Development of Ultraprecision Finishing Technique using Bonded Magnetic Abrasives," *Journal of the KSMTE*, Vol. 12, No. 5, pp. 59~66.
- (5) Park, S. J., Ahn, B. W., and Lee, S. J., 2004, "Nano-scale Precision Polishing Characteristics using a Micro Quill and Magnetic Chain Structure," *Journal of the KSPE*, Vol. 21, No. 8, pp. 34~42.
- (6) Emanuel, S. and Albert, H., 1995, "Run by Run Process Control: Combining SPC and Feedback Control," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 8, No. 1, pp. 26~43.
- (7) Moyne, J., Castillo, E., and Hurwitz, A. M., 2001, *Run-to-Run Control in Semiconductor Manufacturing*, CRC Press LLC, USA.