

실험계획법에 의한 파라미터 분석과 Run to Run 제어를 이용한 폴리싱 공정 제어

안병운* (서울산업대 대학원 기계공학과), 박성준 (연세대학교 나노과학기술연구원),
이상조 (연세대학교 기계공학부), 윤종학 (서울산업대 기계공학과)

Run-to-Run Process Control and the Analysis of Process Parameters using Design of Experiment in Surface Finishing

B. W. Ahn* (Mech. Eng. Dept., Seoul National Univ. of Tech.), S. J. Park (Center for Nano Technology, Yonsei Univ.),
S. J. Lee (School of Mech. Eng., Yonsei Univ.), J. H. Yoon (School of Mech. Eng., Seoul National Univ. of Tech.)

ABSTRACT

In this paper, polishing method using bonded magnetic abrasive particle has been applied to the micro mold polishing. Through process control using the Run-to-Run control, it tried to form the surface roughness. In order to grasp the influence of the surface roughness which is reached by selection of control factor and the factor, a design of experiment was processed. The study is processed with a purpose of to embody and to maintain the surface roughness of nano scale by the basis of an influence between a control factor and the factors which has been selected in this way. As a result, the result of the process control converged at a target value of surface roughness Ra 10nm and Rmax 50nm.

Key Words : Micro mold(마이크로 금형), Design of Experiment(실험계획법), Run to Run control(RTR 제어), EWMA(지수가중이동평균), Polishing (폴리싱)

1. 서론

최근 들어 전자, 광학, 의학 분야 등에 있어서 첨단 기술의 급속한 발전이 이루어 지고 있다. 그중 초정밀 렌즈, 도광판, 스텝퍼등 정밀 광학 부품에 대한 수요가 폭발적으로 증가 하고 있다. 대표적 광학부품인 초정밀 렌즈는 CD 와 DVD 광 픽업용 렌즈등 여러 분야에서 필수 부품으로 인정 받고 있으며 수요 또한 증가하고 있다.

이에 초정밀 렌즈의 생산성을 높이기 위하여 대량 생산이 용이한 사출 금형을 이용한 공정이 제안, 적용되고 있다. 사출 금형의 경우에는 프레스 금형과는 달리 금형의 표면 형상과 표면거칠기가 그대로 최종 제품에 전사되는 특징이 있다.⁽¹⁾ 그러므로 금형에 요구되는 표면 거칠기는 바로 최종제품의 특성을 결정짓는 요인이 된다. 광학제품의 경우에는 대부분 나노 스케일의 평균 거칠기를 요구하고 있어 이러한 표면을 얻기 위해서는 폴리싱 공정이 반드시 필요하다.

렌즈 금형과 같은 마이크로 금형의 폴리싱을 위해서는 일반적 폴리싱 방법으로는 한계가 있다. 이에 새로운 폴리싱 방법에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. Kuriyagawa.⁽²⁾는 인가된 전압의 크기에 비례하여 점성이 변하는 전기 유변 유체를 이용하여 비구면 렌즈 폴리싱에 대한 연구를 진행 하였다. 그 결과 나노 미터 수준으로 표면 거칠기(를 항상 시켰다. Park⁽³⁾은 이전 연구에서 결합된 자성연마입자를 슬러리 형태로 적용하여 금형의 선택적 폴리싱에 대한 연구를 진행하였다. 그 결과 나노미터의 표면 거칠기를 형성하였다.

본 논문에서는 결합된 자성연마입자를 이용한 폴리싱 시스템⁽⁴⁾을 마이크로 금형 폴리싱에 적용 하였다. 적용한 폴리싱 공정을 제어하여 나노미터 수준의 표면거칠기를 구현, 유지하고자 하였으며 공정 제어기법으로 Run to Run 방식의 지수가중 이동평균기법을 이용하였다. 또한, 업데이트에 의한 제어인자 값이 매 공정 마다 새롭게 결정 되어 지도 록 하였다. 제어 인자 선정과 인자들이 표면거칠기

에 미치는 영향을 파악하기 위하여 실험계획법을 진행하였다. 실험 결과 데이터 분산분석을 통하여 가공물의 표면 거칠기에 영향을 크게 미치는 폴리싱 조건들을 선정한다. 이와 같은 방법으로 선정된 제어인자와 인자들의 영향력을 기준으로 나노 스케일의 표면 거칠기를 형성, 유지하는 것을 목표로 연구를 진행한다.

2. 폴리싱 메커니즘

결합된 자성연마입자를 이용한 폴리싱 공정에서의 폴리싱 영역은 가공물과 공구 사이이다. 이 영역에서 발생하는 가공력에 대한 해석은 패드를 이용한 폴리싱 실험식인 Preston 이론을 적용할 수 있다. Preston 이론은 재료 제거에 대한 기계적 메커니즘에서 가장 기본적으로 광범위하게 받아들여지고 있다.

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

여기서, 좌변은 시간 변화에 대한 재료 높이의 변화로서 재료제거율을 의미한다. C_p 는 프레스턴 상수이며, L 는 가공압력, A 는 가공압이 작용하는 면적이다. Preston 상수는 연마재, 가공물의 재질에 의하여 정해지는 상수이다. Preston은 재료제거율을 가공압력 그리고 공구와 가공물의 상대속도와 비례한다고 하였다. Preston에 의하면 가공압이 클 경우 재료제거 즉 폴리싱의 효과는 우수해진다. Fig. 1은 간극과 자성연마입자의 크기에 따라 가공압력을 공구 동력계로 측정된 결과이다. 식(1)과 Fig. 1의 그래프를 통하여 가공압력과 폴리싱 성능을 비례하는 것을 알 수 있다. 가공압을 향상시키기 위한 폴리싱 조건으로는 간극, 연마입자의 크기 등이 있다. 하지만 가공압이 높아지면 가공물의 형상에 영향을 미칠 가능성이 있다. 또한 자성연마입자의 크기가 클수록 입자에 의한 큰 스크래치가 발생하므로 주의하여야 한다.

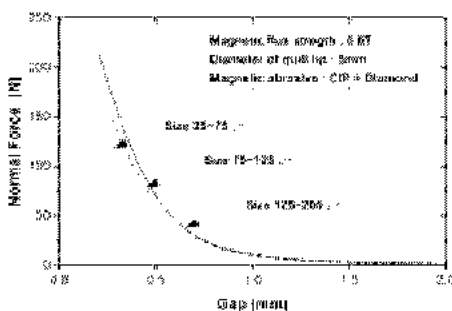


Fig. 1 Measured normal load acting on the surface

3. Run to Run control

3.1 Run to Run control(이하 RTR control)

RTR control은 불연속적 공정을 제어하기 위한 방법으로, 제어하고자 하는 공정의 정보와 매 공정 출력 값의 측정 정보를 활용하여야 한다. 또한 폴리싱 공정과 같이 공정 진행 중 정보를 측정하기 힘든 경우에도 적용할 수 있다. 최근에는 반도체 생산을 포함한 다양한 공정에 적용이 시도되고 있다. RTR control의 개략도는 Fig. 2에 나타내었으며 기본 구현식은 식 (2)와 같다.⁽⁶⁾

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

여기서, 식 (2)는 선형 상태 공간방정식이며 Y 는 out vector로서 각 공정의 측정 결과이다. A 는 model parameters로서 경험적 데이터를 바탕으로 결정된다. 또한 C 는 offset drift 값이며, x 는 input vector 값이다. 매 공정마다 모델에 의한 출력 값과 실제 공정 출력 값의 오차에 기인하여 C 가 업데이트 된다. 업데이트된 C 에 의하여 x 는 매 공정마다 새롭게 결정되어 지게 된다.

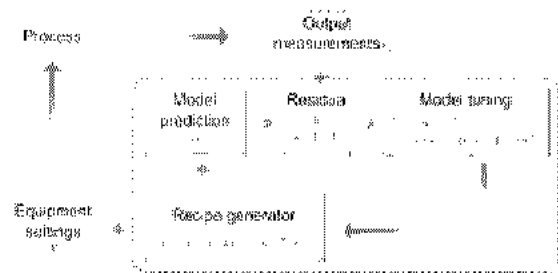


Fig. 2 Structure of Run-to-Run Controller (EWMA)

3.2 모델 업데이트

RTR control은 Run이 끝날 때마다 측정 값을 출력 값으로 결정한다. 그리고 예측된 모델과 측정 값 사이의 오차를 기준으로 업데이트를 진행한다. 식 3는 제어 모델 업데이트에 대한 식이다.⁽⁶⁾

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

여기서, ω 는 EWMA weights ($\omega \leq 1$)이다. 이 외의 정의는 식 (2)와 같다. 식 (3)는 지수가중 이동평균(이하 EWMA) 상수 ω 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 ω 값의 선정에 따라서 출력 값에 큰 영향을 미치게 된다. ω 의 값이 1에 가까울수록

최근 측정값에 많은 비중을 두게 된다. 반대로 0에 가까우면 과거 측정값에 많은 비중을 두게 된다. 즉 ω 값이 1에 가까우면 실제 외란에 대하여 더 나은 응답성을 나타낸다. 하지만 공정에 노이즈가 존재할 경우에는 출력 값에 변화를 증가시키는 원인이 된다. 반면 ω 값이 0에 가까우면 실제 외란에 대해 작은 응답성을 나타내므로 값의 선정에 있어서 많은 고려를 하여야 한다.

offset drift의 업데이트에 기인하여 제어 인자의 값을 생성하기 위해선 최적 제어 이론을 적용한다.⁽⁷⁾

$$\min \|x_t - x_{t-1}\|_{Ax=b}^2$$

$$L = \frac{1}{2}(x_t - x_{t-1})^T(x_t - x_{t-1}) + \lambda^T(Ax_t - b),$$

$$b = (T - C_{t-1}) \quad (4)$$

- x_{t-1} : recipe from previous run
- A : parameter drift
- λ : Lagrange multiplier
- L : equation to minimize

식 (4)을 다시 x 에 대해서 정리하여 식 (5)에 나타내었다.

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

식 (5)에 의하여 제어인자의 값이 최적 제어 조건으로 매 Run 마다 새롭게 결정 되어진다.

4. 공정 파라미터 분석과 공정 제어 결과

4.1 공정 파라미터 분석

본 연구에서는 결합된 자성연마입자를 이용한 폴리싱 방법을 보다 효율적으로 진행하기 위하여 3절에서 나타낸 RTR control 을 이용한 공정제어를 적용하였다.

RTR control 을 진행하기 위해서는 공정 파라미터를 결정 하여야 한다. 자성연마입자를 이용한 폴리싱 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 데이터로서 결정 되어 지고 있다. 이에 공정 파라미터를 경험적 데이터에 의존 하지 않고 객관적으로 정립하기 위하여 실험 계획법을 이용하였다.

실험계획법을 진행하기 위해 우선 폴리싱 조건을 선정 하여야 한다. 폴리싱 성능에 가장 큰 영향을 미치는 것은 2 절 에서 나타낸 가공압이다. 그러므로 가공압에 영향을 미치는 폴리싱 조건인 자성연

마 입자 크기, 입자량, 간극과 전단력에 영향을 미치는 회전속도와 이송속도를 조건으로 선정 하였다. 결정된 조건을 인자라 하였으며 각 인자에 따른 수준을 Table 1에 나타내었다. 수준은 기초 실험을 통하여 얻은 결과를 이용하여 결정하였다. 가공물은 렌즈 금형의 재질로 주로 사용되는 스텐레스 합금강인 STAVAX S136 로 선정하였다. 결정된 인자와 수준은 5 인자 3 수준이며 $A \times B$, $A \times C$, $B \times C$ 로 세개의 교호 작용을 고려하여 3 수준 직교 배열표인 $L_{27}(3^{13})$ 를 선택하였다. 설계된 직교 배열표를 이용하여 실험 조건을 결정하였으며 실험 순서를 랜덤 하게하여 2 회 반복 실험하였다.

Table 1 Level and value of factor

Sign	Factors	unit	Levels		
			1	2	3
A	abrasive size	μm	50	100	150
B	abrasive quantity	g	0.2	0.4	0.6
C	gap	mm	0.5	0.75	1
D	rotation	rev/min	500	1000	1500
E	feed	mm/min	10	50	100

4.2 분석 결과

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

표면 거칠기 R_a 에 대한 분산 분석 결과로서 인자 C , D 그리고 교호 작용 $A \times C$, $B \times C$ 가 유의 수준 10%로 신뢰함을 알 수 있다. 또한 표면 거칠기 R_{max} 는 인자 A , C , D 가 유의 수준 10%로 신뢰함을 알 수 있다. 신뢰하지 못한 인자는 오차로서 폴링 하였다. 그리고 표면 거칠기에 미치는 영향을 기여율로 나타내었다. 결과를 Table 2 와 3 에 나타내었다.

표면 거칠기 R_a 와 R_{max} 기준으로 인자들의 영향을 나타낸 주효과 그래프를 Fig. 3 과 Fig. 4 에 나타내다. 그래프에서의 점선은 데이터의 값의 평균이며, 각 수준의 산포와 평균을 나타내고 있다.

Table 2 와 3 에 나타낸 분산분석표를 보고 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 교호작용은 유의 수준 C , D 에 비해 매우 작아 고려하지 않는다. 기여율 기준으로 보았을 경우 가장 큰 영향을 미치는 인자는 C , D 이다. 즉 분산분석결과 표면 거칠기에 영향을 크기 미치는 인자는 간극과 회전속도이다. 실험계획법을 이용하여 선정된 폴리싱 조건은 공정제어의 제어 인자로 적용 할 수

있다. 또한 기여율은 공정 모델 있어서 경험적 데이터에 의존하였던 공정 파라미터를 객관적으로 정립하도록 도와 주는 역할을 한다.

Table 2 Analysis of variance for Ra (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 Rmax (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			

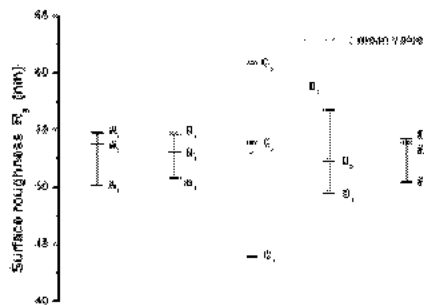


Fig. 3 Influence of factor to response (R_a)

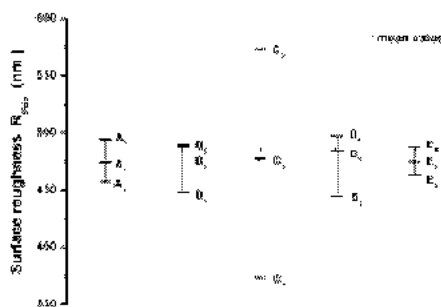


Fig. 4 Influence of factor to response (R_{max})

4.3 공정 제어 결과

공정 제어의 목표 값은 렌즈 사출 금형에서 요구하는 표면 거칠기 R_a 10nm 이하와 R_{max} 50nm이하로 설정 하였다. 공정 제어에서의 제어 인자는 실험계획법을 통하여 선정된 간극과 회전속도, 폴리싱 시간으로 결정하였다. 결정된 제어인자 중 간극은 가공압을 형성하는 인자이다. 이외에도 자성연마입자의 크기, 자기력으로 나타낼 수 있다. 하지만 자기력 그리고 결합된 자성연마입자의 크기는 실험 장치 등에 의하여 그 한계 값이 결정되어 있다. 그러므로 간극을 가공압에 대한 제어인자로 선택하였다.

최종적으로 결정된 제어인자인 간극과 회전속도, 폴리싱 시간은 Preston 이론에서도 알 수 있듯이 재료제거에 지배적인 영향을 미치는 요소이다. 또한 각 제어 인자에 따른 기여율을 실험계획법을 통하여 객관적으로 나타내었다. 이를 기준으로 모델 파라미터를 결정 하였다. 결정된 제어 인자를 Table 4에 나타내었다.

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

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

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

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

첫 공정에 의해 측정된 출력 값과 최초 공정의 입력 값을 이용하여 식 (3)에 의하여 공정 제어 모델이 업데이트 된다. 그리고 식 (5)에 의하여 제어 인자의 값이 새롭게 결정 되어졌다. 초기 입력 값을 제외하곤 매회 실험이 반복 될 때 마다 입력 값이 새롭게 결정 되어졌으며 입력 값에 의한 출력 값을 Fig. 5에 나타내었다. 그리고 공정이 진행되는 동안 입력 값의 변화를 제어 인자에 따라 Fig. 6에 나타내었다.

RTR control 법의 EWMA gradual mode 를 적용하여 렌즈용 사출 금형에서 요구하는 표면 거칠기 개

션을 위해 공정을 제어한 결과는 Fig. 5 그래프에서 알 수 있다. 목표 값인 표면 거칠기 Ra 10nm 와 Rmax 50nm 의 범위로 빠르게 수렴해 가는 것을 볼 수 있다.

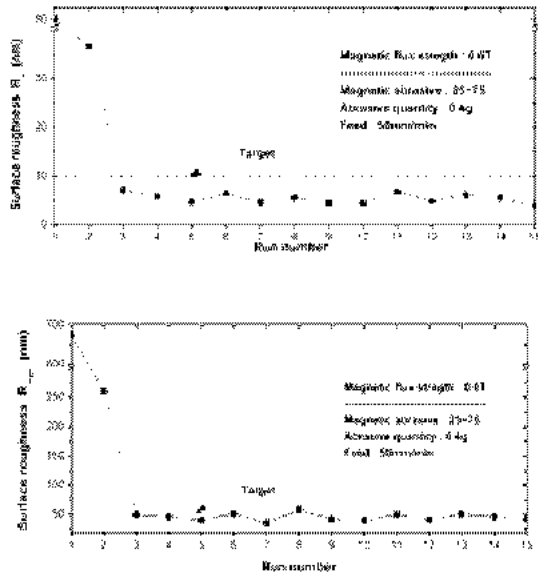


Fig. 5 Process control output (Ra and Rmax)

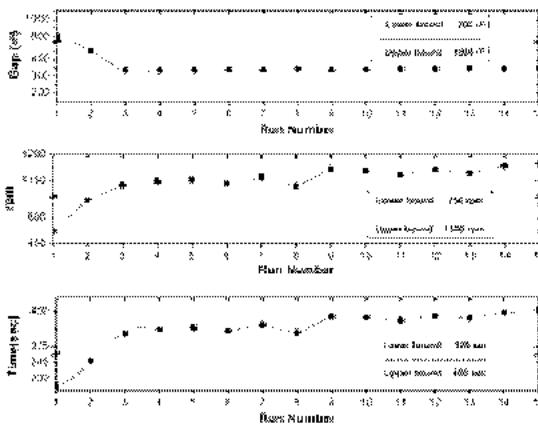


Fig. 6 Variation of control factor with run-to-run process control

5. 결론

본 연구에서는 렌즈 사출 금형과 같은 마이크로 금형 폴리싱에 결합된 자성연마입자를 이용한 폴리싱 공정을 적용하였다. 적용한 폴리싱 공정을 제어하여 마이크로 금형에서 요구하는 나노미터 수준의 표면 거칠기를 구현하고자 하였다.

제어 기법으로는 RTR control 의 EWMA gradual

mode 를 적용하였다. 또한 공정 파라미터를 객관적으로 정립화 하기 위하여 실험계획법을 통하여 공정상의 중요한 변수를 파악 하였다. 그리고 파악된 변수들이 폴리싱 성능에 미치는 영향을 표면 거칠기를 기준으로 하여 기여율로 나타내었다.

파라미터 분석을 통하여 결정된 공정 제어 모델을 이용하여 RTR 공정 제어를 진행 하였다. 그 결과 목표 값인 표면 거칠기 Ra 10nm와 Rmax 50nm로 빠르게 수렴해 가는 것을 볼 수 있었다. 또한 수렴 후 연마입자의 마모현상, 가공 시편의 불 균일한 초기 표면 거칠기등 공정 외란이 발생 또는 존재하여도 목표 값을 유지하였다. 지금까지의 결과를 기준으로 결합된 자성연마입자를 이용한 폴리싱 방법은 마이크로 금형 폴리싱 공정에 적용성이 우수함을 확인 하였다.

참고문헌

1. J. Y. Choi, H. H. Kim, J. H. Park, H. D. Jeong, H. D. Seo, "A Study on Nano-polishing of Injection Molds using Fixed Abrasive Pad," Journal of the KSPE., Vol. 19, No. 10, pp. 212~220, 2002.
2. T. Kuriyagawa, M. Saeki, K. Syoji, "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, 2002.
3. S. J. Park, B. W. Ahn, J. H. Yoon, "Development of Ultraprecision Finishing Technique using Bonded Magnetic Abrasives", Journal of the KSMTE, Vol. 12, No. 1, 2003.
4. S. J. Park, B. W. Ahn, S. J. Lee, "Nano-scale precision polishing characteristics using a micro quill and magnetic chain structure", Journal of the KSPE, Vol. 00, No. 0, 2004.
5. Emanuel Sachs, Albert Hu, Armann Ingolfsson, "Run by Run Process Control: Combining SPC and Feedback Control" IEEE Transactions on semiconductor manufacturing, Vol. 8, No. 1, pp 26~43, 1995.
6. James Moyne, Enrique del Castillo, Arnon Max Hurwitz, "Run-to-Run control in semiconductor manufacturing", CRC Press LLC, 2001.
7. Feign, S., Kremen, G, "Magnetic Abrasive Powder and Method of Producing the Same", United States Patent No. 5846270, 1998.