

실험 계획법을 이용한 초정밀 연마 가공에 관한 연구

김 홍 배*

A Study on the Ultra-precision Mirror Finishing Using the System of Experiments

Hong-Bae Kim*

Abstract

There have been so many study in the ultra-precision mirror finishing. Already Using system of experiments extract factors effecting surface roughness and find optimal machining conditions in 40 μm , 30 μm , 15 μm abrasive film. So in this study, Using Abrasive film of 12~3 μm extract factors effecting surface roughness and results are follows: Factor A(film feed) in 12 μm and 5 μm abrasive film, Factor A(film feed) and B(applied force) in 9 μm abrasive film, Factor C(grinding speed) in 3 μm abrasive film are main factor effecting surface roughness.

Key words : System of experiments(실험 계획법), Ultra-precision mirror finishing(초정밀 연마가공), Surface roughness(표면 거칠기), Film feed(필름이송속도), Applied force(가압력), Grinding speed(연마 속도), Abrasive film(연마 필름)

1. 서론

초정밀 산업의 발달과 함께 초정밀 가공품의 수요가 급증하고 있으나 아직도 생산 현장에서는 숙련공에 의한 다듬질 가공으로 이루어 지고 있다. 제조 공정의 30%를 차지하는 경면 가공을 위한 자동화, 고능률화, 고품질화의 기술에 관한 연구가 활발하게 이루어 지고는 있으나 아직까지 생산 현장에서 가격이 비싸고 높은 기술수준이 요구되기 때문에 이들 시스템을 생산 현장에 적용하기에는 많은 문제점을 가지고 있다.¹⁾²⁾

그러나 최근 초정밀 연마 가공용 필름의 등장과 함께

이의 이용에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며³⁾⁴⁾, 일부 생산 현장에서는 이미 실용화하고 있다. 하지만 연마 가공용 필름을 이용한 시스템은 제품 생산시 많은 가공 변수를 가지고 있기 때문에 생산 현장에서는 시스템이 효율적으로 운용되고 있지 않고 있으며, 연마 가공시 제품의 표면 거칠기를 예측하기가 거의 불가능한 실정이다. 따라서 시스템의 효율적인 운용을 위하여 연마 가공시 표면 거칠기에 영향을 주는 인자들을 선별하여 제어할 필요가 있다.

이미 40 μm , 30 μm , 15 μm 의 초정밀 연마 가공 필름을 이용하여 가공할 때 표면 거칠기에 영향을 주는 인자 및 연

* 충남대학교 기계공학과

마 가공시 최적 조건을 규명하였고, 15 μ m의 연마 필름을 사용하여 10nm의 표면 거칠기를 얻었으며, 이들 연마 필름을 사용할 때 필름 이송과 가압력, 연마 속도가 실험에서 표면 거칠기에 가장 많은 영향을 미치고 있다는 것을 알 수 있었다.⁵⁾ 따라서 본 연구에서는 12 μ m, 9 μ m, 5 μ m, 3 μ m의 연마 필름을 사용하여 미세 가공시 표면 거칠기에 영향을 미치는 인자로 추정되는 필름이송, 가압력, 연마속도의 인자를 이용하여 실험 계획법에 의하여 이들 인자를 배치하고 가장 좋은 표면 거칠기를 얻을 수 있도록 수준을 배치한 다음 실험을 실시 하였고, 분산분석을 통하여 각 연마 필름에서 가장 많은 영향을 미치는 인자를 규명 하였으며, 확인 실험을 통하여 검증 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

초정밀 연마 가공 필름을 이용하는 연마 가공 시스템의 원리는 Fig. 1과 같다. 초정밀 연마 가공 시스템의 원리는 그림에서 나타난 바와 같이 롤 형상의 마이크로 연마 필름은 장력(tension)조절 브레이크가 부착된 축에 장착되고, 가압 접촉 롤러를 통하여 필름 회수용 구동축에 감기어지도록 설치되며, 공작물을 홀더에 장착하고 회전시키면, 마이크로 연마 필름이 접촉지지 롤러 위를 낮은 속도로 연속적으로 지나가고, 접촉헤드는 연마 장치의 이송방향과 평행하게 일정 진동 주파수로 진동을 하게 되며, 공압 실린더에 의하여 접촉헤드가 동작하여 마이크로 연마 필름을 가압하고, 선반에서 좌우 이송을 주면서 가공이 시작된다. 가공시 연마칩 및 탈락된 연마 입자가 다시 연마 작업에 참여하여 표면 정밀도를 저하 시키지 않게 항상 청정 상태의 연마유가 공급되며, 마이크로 연마 필름의 연속적인 공급으로 새로운 입자가 연속적으로 가공물과 접촉하므로 가공면 전체에 대하여 일정한 표면 거칠기를 갖는 연마 가공이 이루어 진다.

초정밀 연마 가공 시스템은 Fig 2에 나타내었고, 그림에 나타난 바와 같이 선반의 복식 공구대를 제거한 후 설치 되었으며, 실험에 사용된 선반은 GEMA LZ200이고, 표면 거칠기의 측정은 Mitutoyo surfpak SV-500을 사용 하였다.

본 연구는 실험 계획법⁶⁾의 직교 배열표에 의하여 실시 되었으며 3수준 4인자의 조건을 갖추었으므로 L16(4³)의 직교 배열표를 사용하였으며 Table 1에 나타 내었다.

인자는 연마 필름을 이용한 가공시 가장 많은 영향을 미친다고 추정된 인자의 순서로 배치하였고, 인자의 수

준은 가장 좋은 표면 거칠기를 얻을수 있도록 배치 하였으며 Table 2에 실험에 사용된 인자의 표시방법 및 수준을 나타 내었다.

실험은 연마 필름을 이용하여 15 μ m의 연마 필름의 최적 조건인 필름 이송 10 mm/min, 가압력 57 kgf, 연마 속도 104 m/min, 가공시간 30 sec, 진동 주파수 10Hz의 연마 가공 조건을 이용하여 Ra 10nm로 연마 가공된 시험편(SM45C)을 사용 하였다. 시험편의 크기는 ϕ =100mm, L=100mm이고, 사용된 마이크로 연마 필름의 입자 크기는 12 μ m, 9 μ m, 5 μ m, 3 μ m이다. 실험 및 측정 결과분석의 순서는 초정밀 연마 입자 필름을 이용하여 직교 배열표에 의한 실험을 실시한 후, 각 시험편의 표면 거칠기 값을 측정하고 분산 분석을 실시 하였다.

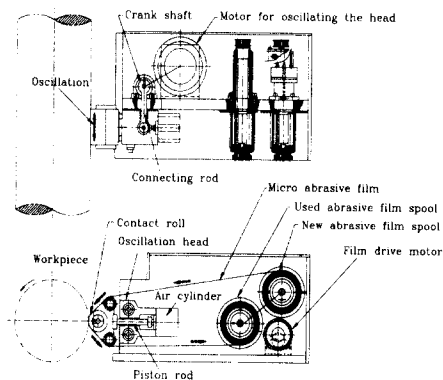


Fig. 1 Principle of the ultra-precision finishing system

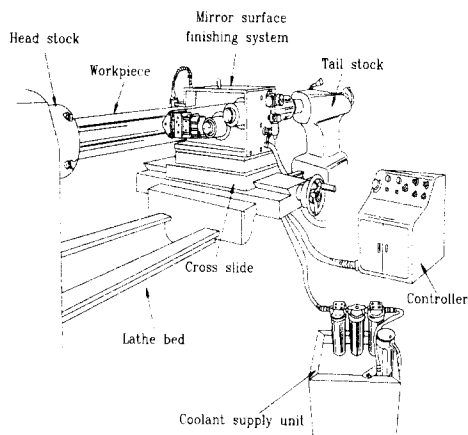


Fig. 2 Configuration of ultra-precision finishing system

Table 1 Orthogonal array table for L16(4³)

| | A | B | C |
|----|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 1 | 1 |
| 3 | 0 | 2 | 2 |
| 4 | 0 | 3 | 3 |
| 5 | 1 | 0 | 1 |
| 6 | 1 | 1 | 0 |
| 7 | 1 | 2 | 3 |
| 8 | 1 | 3 | 2 |
| 9 | 2 | 0 | 2 |
| 10 | 2 | 1 | 3 |
| 11 | 2 | 2 | 1 |
| 12 | 2 | 3 | 0 |
| 13 | 3 | 0 | 3 |
| 14 | 3 | 1 | 2 |
| 15 | 3 | 2 | 1 |
| 16 | 3 | 3 | 0 |

Table 2 Factors and levels used in experiment

| Sign | Factor | Level | | | |
|------|------------------------|-------|-----|-----|-----|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 |
| A | Film feed (mm/min) | 5 | 10 | 15 | 20 |
| B | Applied force (kgf) | 85 | 114 | 141 | 170 |
| C | Grinding speed (m/min) | 186 | 131 | 104 | 84 |

3. 실험 결과 및 고찰

Table 3~6은 12 μ m, 9 μ m, 5 μ m, 3 μ m의 초정밀 연마 필름을 이용하여 직교 배열표에 의한 연마 가공을 실시한 후 측정된 표면 거칠기 값을 분산 분석한 결과를 나타낸 것이다.

12 μ m의 초정밀 연마 필름으로 실험을 실시한 후 분산 분석한 Table 3에서는 일반 평균 변동의 기여율값이 90.19%로 매우 크고 인자 A(필름이송)의 기여율값이 3.79%로 타 인자에 비하여 크다. 따라서 12 μ m의 초정밀 연마 필름에서는 필름이송이 연마 가공시 표면 거칠기에 가장 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

9 μ m의 초정밀 연마 필름을 이용하여 실험을 실시한 후

분산 분석한 Table 4에서는 일반 평균 변동의 기여율값이 88.21%로 가장 크고 인자 A(필름 이송), 인자 B(가압력)의 기여율값이 각각 2.64%, 3.29%로서 9 μ m의 연마 필름에서는 필름 이송과 가압력 인자가 표면 거칠기에 가장 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

5 μ m의 초정밀 연마 필름을 이용하여 직교 배열표에 의한 실험을 실시한 후 측정결과를 분산 분석한 Table 5에서도 일반 평균 변동의 기여율 값이 98%로 매우 크고 인자 A의 기여율값이 1%, 인자 B의 기여율값이 0.67%로 C 인자에 비하여 매우 큰 값을 나타내고 있음을 알 수 있으며 이들 인자가 표면 거칠기 값에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

3 μ m의 초정밀 연마 필름을 이용하여 실험을 실시한 후 측정된 표면 거칠기 값을 분석한 Table 6에서도 역시 일반 평균 변동의 기여율 값이 96.46%로 매우크고 인자 C(연마 속도)의 변동율이 1.92%로 다른 인자에 비하여 매우 큰 것을 알 수 있다.

따라서 12~3 μ m의 초정밀 연마 필름으로 연마 가공을 실시하는 경우 12 μ m, 5 μ m의 연마 필름에서는 인자 A(필름이송)가 표면 거칠기에 가장 많은 영향을 미치고, 9 μ m에서는 인자 A(필름 이송), 인자B(가압력)가, 3 μ m의 연마 필름에서는 인자 C(연마 속도)가 표면 거칠기에 가장 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 그리고 각 연마 필름에서 일반 평균 변동의 기여율이 가장 큰 값을 가지며, 12 μ m, 5 μ m의 연마 필름에서는 인자 B(가압력), 인자 C(연마 속도)가 변화율에 영향을 미치지 못하고, 9 μ m의 연마 필름에서는 인자 C(연마 속도)가, 3 μ m의 연마 필름에서는 인자 A(필름이송), 인자 B(가압력)가 변화율에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

Table 3 ANOVA table of 12 μ m abrasive film

| Factors | S | σ | v | F0 | s' | ρ (%) |
|------------|-------------|----------|-------------|---------|-------------|------------|
| M | 0.001958062 | 1 | 0.001958062 | 119.965 | 0.00191 | 90.19 |
| A | 0.000082188 | 3 | 0.000027396 | 1.679 | 0.000033 | 3.79 |
| B | 0.000013188 | 3 | 0.000004396 | 2.693 | -0.00003578 | 0.61 |
| C | 0.00001963 | 3 | 0.000006543 | 4.009 | -0.0000293 | 0.9 |
| ϵ | 0.00097932 | 6 | 0.00001632 | | 0.000293 | 4.51 |
| Total | 0.002171 | 16 | | | 0.002171 | 100 |

Table 4 ANOVA table of 9 μ m abrasive film

| Factors | S | \emptyset | v | F0 | s' | ρ (%) |
|------------|------------|-------------|-------------|--------|-------------|------------|
| M | 0.00034225 | 1 | 0.00034 | 57.87 | 0.000334 | 88.21 |
| A | 0.00001025 | 3 | 0.000003416 | 0.58 | -0.0000142 | 2.64 |
| B | 0.00001275 | 3 | 0.0000045 | 0.7234 | -0.00001334 | 3.29 |
| C | 0.00000025 | 3 | 0.000000083 | 0.014 | -0.000106 | 0.06 |
| ϵ | 0.00003525 | 6 | 0.000005875 | | 0.000187 | 9.09 |
| Total | 0.000388 | 16 | | | 0.000388 | 100 |

Table 5 ANOVA table of 5 μ m abrasive film

| Factors | S | \emptyset | v | F0 | s' | ρ (%) |
|------------|-----------|-------------|-------------|---------|-------------|------------|
| M | 0.000441 | 1 | 0.000441 | 2656.63 | 0.0004408 | 98 |
| A | 0.0000045 | 3 | 0.0000015 | 9.036 | 0.00001 | 1 |
| B | 0.000003 | 3 | 0.000001 | 6.024 | 0.0000005 | 0.67 |
| C | 0.0000005 | 3 | 0.000000166 | 1 | -0.00000033 | 0.11 |
| ϵ | 0.000001 | 6 | 0.000000166 | | 0.00000803 | 0.22 |
| Total | 0.00045 | 16 | | | 0.00045 | 100 |

Table 6 ANOVA table of 3 μ m abrasive film

| Factors | S | \emptyset | v | F0 | s' | ρ (%) |
|------------|-------------------------|-------------|------------|--------|-------------|------------|
| M | 0.000563 | 1 | 0.000563 | 709.81 | 0.000562 | 96.46 |
| A | 0.0000021 | 3 | 0.0000007 | 0.882 | -0.00000168 | 0.36 |
| B | 0.00000258 | 3 | 0.00000086 | 1.085 | -0.00000152 | 0.44 |
| C | 0.00001123 | 3 | 0.00000374 | 4.721 | 0.00000137 | 1.92 |
| ϵ | 0.00000475 ₉ | 6 | 0.00000079 | | 0.0000233 | 0.82 |
| Total | 0.000584 | 16 | | | 0.000584 | 100 |

Fig. 3~6는 12 μ m, 9 μ m, 5 μ m, 3 μ m의 초정밀 연마 필름으로 직교 배열표에 의한 실험을 실시한 후 측정된 데이터들을 인자별로 배치하고, 각각의 인자마다의 평균을

구한다음 각 수준의 인자에 대하여 나타낸 그래프로서 1~4는 인자 A를, 5~8은 인자 B를, 9~12는 인자 C를 각각 나타낸다.

Fig. 3에서는 A인자의 변동 폭이 다른 인자보다 크게 나타남을 알 수 있고, Fig. 4, 5에서는 A, B인자의 변동 폭이 C인자에 비하여 크게 변동하고 있으며, Fig 6에서는 C인자의 변동 폭이 A, B인자에 비하여 매우 큰 변동 폭을 가지고 있음을 알 수 있다.

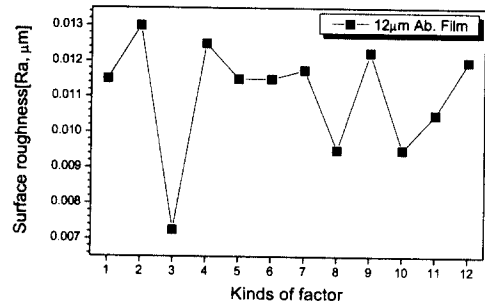


Fig 3 Graph of level average(12 μ m Abrasive Film)

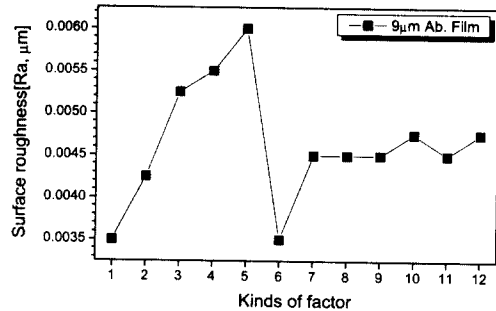


Fig. 4 Graph of level average(9 μ m Abrasive Film)

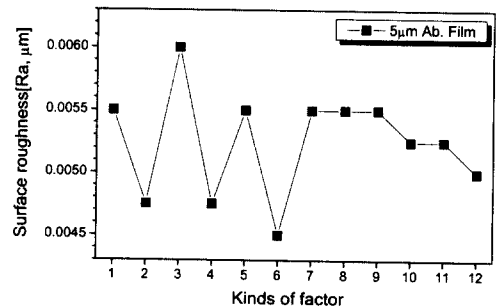


Fig. 5 Graph of level average(5 μ m Abrasive Film)

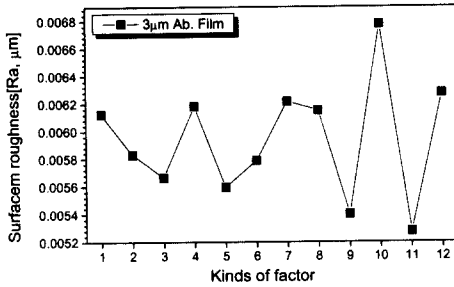


Fig. 6 Graph of level average(3μm Abrasive Film)

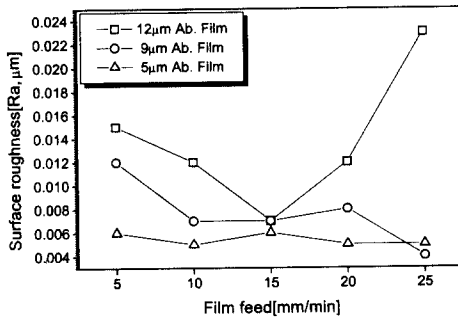


Fig. 7 Confirmative experiment about film feed

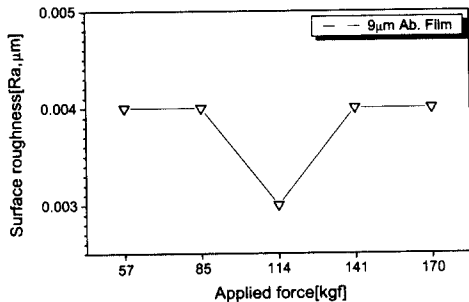


Fig. 8 Confirmative experiment about applied force

Fig. 7, 8, 9는 12~3μm의 연마 필름을 이용하여 실험 계획법에 의한 실험을 실시 한후 분산 분석에 의하여 얻은 표면 거칠기에 영향을 미치는 인자들을 변수로 하여 확인 실험을 실시한 결과이다. Fig. 7은 연마 가공시 12 μm, 9μm, 5μm에 영향을 미치는 인자인 필름 이송을 5~25 mm/min의 이송 속도로 변화시키고 가압력 141kgf, 연마 속도 131m/min, 가공시간 30sec의 가공 조건을 이용하여 확인 실험을 실시한 결과이다. 12μm의 연마 필름으로

실험한 경우 필름의 이송이 15mm/min의 가공 속도를 가질 때, 9μm, 5μm의 연마 필름의 경우 필름의 이송이 25mm /min의 가공 속도를 가질 때 최적의 표면 거칠기를 얻을 수 있었다.

Fig. 8은 9μm의 연마 필름에 영향을 미치는 인자인 가압력을 57~170kgf로 변화시키고, 필름 이송 속도를 25 mm/min, 연마 속도 131m/min, 가공시간 30sec의 가공 조건을 이용하여 확인 실험을 실시한 결과이다. 9μm의 연마 필름에서는 연마 필름이 공작물을 가압하는 힘이 114kgf일 때 양호한 표면 거칠기 값을 얻을 수 있었다.

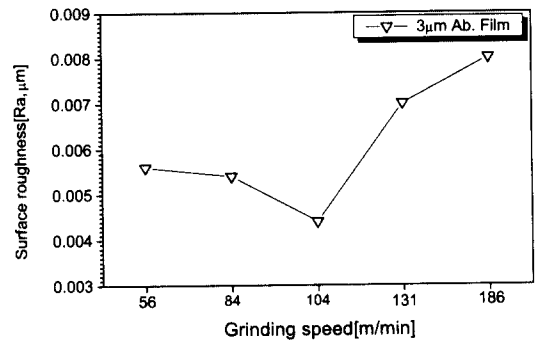


Fig. 9 Confirmative experiment about grinding speed

Fig. 9는 3μm의 연마 필름에 영향을 미치는 연마 속도 인자를 연마 가공 변수로 하여 실험한 결과를 나타낸 것이다. 3μm의 연마 필름에서는 연마 속도를 104kgf로 할 때 양호한 표면 거칠기 값을 얻을 수 있다.

4. 결 + 론

본 연구는 초정밀 연마 필름을 이용하여 각각의 연마 필름에서 표면 거칠기에 영향을 미치는 인자를 규명하고자 실험 계획법을 이용하였으며, 연구결과 얻은 결론은 다음과 같다.

12μm, 5μm의 연마 필름에서는 필름 이송이 표면 거칠기에 가장 많은 영향을 미치고, 9μm의 연마 필름에서는 필름 이송과 가압력이, 3μm의 연마 필름에서는 연마 속도가 표면 거칠기에 가장 많은 영향을 미치며, 각각의 연마 필름에서 영향을 미치는 인자 외의 인자는 영향이 없음을 알 수 있었다.

확인 실험을 실시하여 12μm의 연마 필름에서는 필름의 이송 속도를 15mm/min으로, 9μm의 연마 필름에서는 필름

의 이송 속도를 25mm/min으로, 가압력을 114kgf로, 5 μ m의 연마 필름에서는 필름의 이송 속도를 25mm/min으로, 3 μ m의 연마 필름에서는 연마 속도를 104m/min의 조건으로 연마 가공하는 것이 양호한 표면 거칠기 값을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Katsumasa Saito, "금형 다듬질 가공의 새로운 동향", 機械加工技術, pp. 34~39, 1997. 4
2. 김기수, 남궁 석, "마이크로 필름을 이용한 경면 가공 시스템에 관한 연구", '95 춘계 학술대회 논문집, 한국 정밀 공학회, pp. 273~278, 1995
3. Shizuichi Higuchi, Shigeru Akao, Yoshio Saito, Tadaki Hanaoka, "Finishing Performance of Lapping Films Applied to Cylinerical Surface", Int. J. Japan. Soc. Prec. Eng. Vol. 28, No. 2, pp. 117~122, 1994
4. Nobuyo Yasunaga, "Recent Advances in Ultraprecision Surface Finishing Technologies in Japan", Int. J. Japan. Soc. Prec. Eng. Vol. 28, No. 2, pp. 117~122, 1994
5. 배명일, 김홍배, 김기수, 남궁 석, "실험 계획법을 이용한 초정밀 경면 연마 가공에서 표면 거칠기에 영향을 미치는 인자의 검출", 한국 정밀 공학회, Vol. 15, No. 2, pp. 53~60, 1998
6. 박성현, "응용 실험 계획법", 영지 문화사, 1990