

실험 계획법을 이용한 초정밀 경면 연마 가공에서 표면 거칠기에 영향을 미치는 인자의 검출

배 명 일* , 김 흥 배* , 김 기 수** , 남궁 석***

Extraction of Factors Effecting Surface Roughness Using the System of Experiments in the Ultra-precision Mirror Surface Finishing

Myung-Il Bae* , Hong-Bae Kim* , Ki-Soo Kim** , Suk Namgung***

ABSTRACT

In this study, it is experimented to find factors effecting surface roughness using the system of experiments, in the mirror surface finishing system. (1) The film feed and oscillation frequency in $40\mu\text{m}$ abrasive film, grinding speed in $30\mu\text{m}$, and machining time in $15\mu\text{m}$ are the main factors effecting the surface roughness. (2) Applying the optimal finishing condition to $40\mu\text{m}$, $30\mu\text{m}$, $15\mu\text{m}$ abrasive finishing film in sequence, it is possible to obtain about Ra 10 nm surface roughness on SM45C workpiece. (3) Application of the system of experiments to the micro abrasive grain film finishing was very effective method in the extraction of main factor and optimal condition.

Key Words : ultra-precision mirror surface finishing(초정밀 경면 연마 가공), system of experiments(실험 계획법), surface roughness(표면 거칠기), abrasive grain size(연마 입자 크기), film feed speed(필름 이송 속도), oscillation frequency(진동 주파수), grinding speed(연마 속도), machining time(가공 시간)

1. 서 론

최근 산업의 발달과 함께 각종의 제품 제조에 사용되는 부품들의 고정밀도화를 추구하고 있으며, 반도체 소재인 실리콘 웨이퍼, 다면경(polygon mirror), 자기 헤드 등의 평면 가공과 자기 테이프 제조용 로울러, 인쇄용 로울러, 복사기 및 레이저 프린터용 드럼등의 원형 표면 가공에서 초정밀 경면 가공에 대한 요구가 증대되고 있다.

이들 제품은 서브 마이크론(sub-micron)단위의 치수 정밀도와 표면 거칠기를 필요로 하고 있으며, 이와 같은 요구 정도에 부응하기 위해서는 고정밀도, 고정밀도를 갖춘 가공 시스템, 각종의 계측 장비 및 가공 기술을 필요로 하고 있다⁽¹⁾. 이들 제품의 제조 공정은 선삭(turning), 밀링(milling) 등의 범용 가공과 연삭 가공(grinding), 래핑(lapping) 및 수퍼 피니싱(superfinishing), 폴리싱(polishing) 등의 가공 공정으로 이루어지며, 래핑, 수퍼

* 충남대학교 기계공학과 대학원
** 충남대학교 기술교육과
*** 충남대학교 기계공학과

파니싱, 폴리싱 등의 다듬질 가공 공정의 엄격한 관리 및 효율성에 의하여 생산성이 좌우되고 있다. 특히 작업자의 감각과 경험 즉, 숙련도에 의하여 제품의 품질이 좌우되고 있다. 이와 같은 작업자의 숙련도에 의존하는 기존의 가공 방식에서 탈피하여 고능률, 고정밀도화를 이루기 위한 많은 연구와 노력이 있어 왔지만 아직까지도 고능률, 고정밀도의 초정밀 경면 가공을 위해서는 고가의 가공 시스템 및 주변 설비가 필요하고, 또한 장비의 운용에 있어서도 상대적으로 높은 기술 수준이 요구되고 있다^(2,3). 따라서 기존의 가공 방법의 범위에서 벗어나지 않는 일반적인 기술을 적용하며, 능률적이고 저렴한 설비비를 갖춘 가공 시스템을 개발할 필요가 있다.

이러한 요구에 부응하여 최근에 폴리싱이 가능한 초미립자 연마 필름 및 이 필름을 이용한 초정밀 경면 가공 시스템의 개발이 이루어지고 있다. 이 초미립자 연마 필름은 폴리에스테르 필름에 수지 접착제를 이용하여 연마 입자를 코팅하여 제조된다. 기존 연마용 필름의 대표적인 예는 시트형, 벨트형, 원판 디스크 형상의 사포(sand paper)이며, 이들 형상 중 벨트형은 벨트 연마기에 사용하여 목재 가공이나 각종 금속 제품 가공용으로 이용되어 왔다. 이 벨트 연마 가공기는 연마 벨트를 한쌍의 폴리에스테르 필름에 장착하고, 공작물과의 상대 운동 즉, 일정한 연마 속도를 얻기 위하여 벨트 속도 10~30 m/sec의 매우 빠른 운동하고 있다. 따라서 가공기의 진동이 매우 심하고, 가공 시간의 증가에 따라 연마 입자의 탈락과 마멸 현상으로 인하여 일정한 가공 상태를 유지할 수 없으며, 지속적인 사용이 불가능하기 때문에 금속 제품의 버어(burr) 제거나 정밀도를 요구하지 않는 제품의 연마 가공에 주로 이용되어 왔다^(4,5).

그러나 최근에 벨트 연마기의 문제점을 개선하여 일정한 가공 조건을 유지하면서 예측 가능한 표면 거칠기를 생성시킬 수 있는 마이크로 연마 필름을 이용한 초정밀 경면 연마 가공 시스템이 개발되었다. 이 시스템은 테이프형 연마 필름을 사용하며, 연마 지점에 새로운 연마 필름을 연속적으로 공급하고 사용된 필름을 회수할 수 있는 기능, 그리고 연마 필름의 가압 및 진동 매커니즘, 절삭유 필터링(filtering) 및 공급 장치 등을 구비하고 있다. 이 시스템의 개발로 인하여 기존의 연마 가공법이 갖고 있는 문제점인 작업자의 숙련도, 고가의 장비, 상대적으로 높은 기술 수준을 요구하던 운영 기술 문제 등을 해결함으로써 보다 효율적인 초정밀 경면 가공을 실현할 수 있게 되었다^(6,7,8).

이 초정밀 경면 연마 가공 시스템을 이용하여 원통형 제품을 연마 가공할 경우, 가공 제품의 표면 거칠기는 연마 입자의 크기에 매우 의존적이지만 동일한 연마 입자 크기에서도 연마 속도, 필름의 이송 속도, 가압력, 진동 주파수 등의 연마 조건 변화에 의하여 가공품의 표면 거칠기 및 제거량 등에 영향을 미친다. 따라서 이 시스템을 보다 효율적으로 운용하기 위해서는 표면 거칠기 및 제거량에 영향을 미치는 인자들의 특성을 파악하고 체계화할 필요가 있다.

본 연구에서는 이들 인자가 표면 거칠기에 미치는 영향을 파악하기 위하여 실험 계획법을 이용하였으며, 실험 결과 분석을 토대로 표면 거칠기에 가장 많은 영향을 미치는 인자 및 추천할 수 있는 최적의 연마 조건을 도출하였다. 또한 각 연마 필름에서 최적이라고 추정되는 조건을 이용하여 SM45C 강의 경면 가공 실험을 수행하였다.

2. 실험 계획법

실험 계획법에서 실험후 얻어지는 데이터를 특성치(characteristic value)라 하고, 이 특성치에 영향을 주는 원인중에서 실험에 취급된 원인을 인자(factor), 실험을 하기 위한 인자의 실험조건을 인자의 수준(level)이라고 한다.

제품의 품질을 향상시키거나 불량율을 감소 시키려는 실험에서 일반적으로, 고려해야할 인자의 수는 많다. 이렇게 인자의 수가 많은 경우 특성치에 영향을 미치는 주 효과와 기술적으로 보아서 영향을 미칠 것 같은 2인자 상호 작용(interaction)을 검출하고, 영향을 미치지 않을 것으로 생각되는 2인자 및 고차의 상호 작용을 회생시켜, 실험 회수를 적게 하면서 특성치에 영향을 미치는 인자의 특성을 파악할 수 있도록 한 것이 직교 배열표이다.

그러나 인자의 수가 과다하게 많은 경우 상호 작용은 무시하고 인자들만을 배치하여 실험을 할 수 있도록 계획된 것이 확대 직교 배열표이다. 이것은 일반적으로 표준형 보다 열(column)의 수가 많으며, 두 열의 상호 작용이 어느 특정한 열에 나타나지 않고 다른 열에 산재해 있기 때문에 상호 작용은 배치할 수 없다.

본 실험에 사용된 직교 배열표는 연마 속도, 진동 주파수, 필름 이송 속도, 가압력, 가공 시간등 특성치에 영향을 미치는 인자 5개와 각 인자가 5개의 수준을 가지고 있기 때문에 5인자의 5수준을 갖추었으므로, Table. 2와 같은 L25(5⁵)형 확대 직교 배열표를 사용하였으며, 여기

에서 직교 배열표는 La(bc)의 기호로 표시 하였고 그 의 기는 a는 실험 회수, b는 수준수, c는 열을 의미한다.

또한 직교 배열표에 의한 측정값을 가지고 분산 분석 (analysis of variance)을 실시하였다.

인자 A, B, C, D, E가 모두 모수 인자이고 수준수가 각각 i, j, k, l, m이며 반복이 없이 모든 수준 조합에서 한 번씩의 실험이 이루어진 경우 데이터의 구조식은

$$x_{ij} = \mu + a_i + b_j + c_k + d_l + e_m + \epsilon_{ij} \quad (1)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기에서 μ 는 실험 전체의 모평균이고 a_i 는 A_i 수준이 주는 효과(effect), b_j 는 B_j 수준이 주는 효과이며, ϵ_{ij} 는 x_{ij} 의 측정시 발생하는 오차이다.

데이터가 0인 것이 가장 좋은 값인 경우에는 일반 평균 변동을 구하여 데이터가 0에서 얼마나 벗어나 있는지 알아보는 것이 좋으며 일반 평균 변동 (S_m)은 다음과 같이 구하였다.

$$S_m = \frac{T}{r} \quad (2)$$

(2)식에서 r은 전체 실험 회수를 나타내고, T는 전체 데이터의 합을 나타내며 다음과 같이 구한다.

$$T = \sum_{i=1}^5 a_i^2 + \sum_{j=1}^5 b_j^2 + \sum_{k=1}^5 c_k^2 + \sum_{l=1}^5 d_l^2 + \sum_{m=1}^5 e_m^2 \quad (3)$$

그리고 A, B, C, D, E각 인자의 변동은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$S_n = \sum_{n=1}^5 \frac{n_o}{r} - S_m \quad (4)$$

(4)식에서 $n = a, b, c, d, e$ 를 $o = i, j, k, l, m$ 를 나타낸다. 또한 인자의 변동 S'_n 은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$S'_n = S_n - \phi \cdot V_n \quad (5)$$

(5)식에서 은 A, B, C, D, E 인자의 자유도(degree of freedom, ϕ_n)를 나타내며 V_n 은 평균 제곱을 나타내며 다음과 같이 계산된다.

$$V_n = \frac{S_n}{\phi_n} \quad (6)$$

또한 인자의 기여율(ρ)은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\rho_n = \frac{S_n}{T} \times 100 \quad (7)$$

3. 실험 장치 및 실험 방법

초미립자 연마 필름을 이용하는 초정밀 경면 연마 가공 시스템은 Fig. 1과 같다.

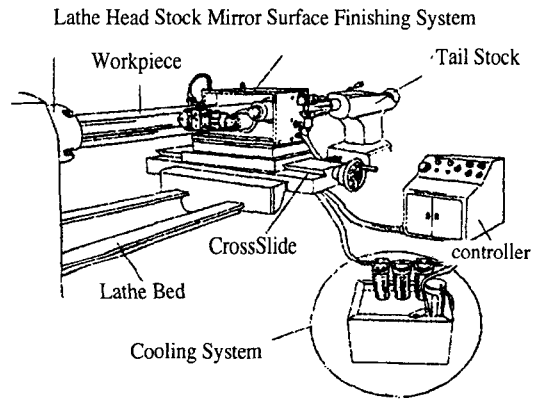


Fig. 1 Configuration of ultra-precision finishing system

그림에서 나타낸 바와 같이 이 시스템은 범용 선반, 필름 연마 가공기, 제어기, 절삭유 급유장치로 구성되어 있으며, 필름 연마 가공기는 연마 필름을 좌우로 진동시키는 진동 헤드, 시험편에 연마 필름을 가압시키는 가압부, 새로운 연마 입자 필름을 연속으로 공급하는 연마 필름 이송 장치로 구성되어 있으며 범용 선반의 복식 공구대를 제거하고 설치하였다. 제어기는 필름 연마 가공기 헤드의 좌우 진동 속도 및 연마 필름의 이송 속도, 전원을 제어하는 기능을 가지도록 설계한 것이며, 연마유 공급 장치는 연마유 탱크, 펌프, 필터로 구성되어 있고, 사용된 연마유는 범용 선반의 절삭유 탱크에 보내어져 침전되고, 부유물 제거장치를 거친다음 미세한 3중필터(20 μ m, 5 μ m, 1 μ m)를 거치며 연마 작업시 발생하는 연마 칩 및 연마 입자가 다시 연마 작업에 첨가되어 표면 정밀도를 저하시키지 않게 항상 청정상태의 연마유를 공급하게 하였다. 실험에 사용된 선반은 GEMA LZ 200이며, 표면 거칠기의 측정은 Taylor Hobson사의 Surtronic를 사용하였다.

본 실험은 실험 계획법의 직교 배열표에 의하여 수행되

어졌다.

실험 계획법에 의한 실험 조건의 선정을 위하여 예비실험을 실시하였고 그 결과는 Fig. 2 ~ 6과 같다.

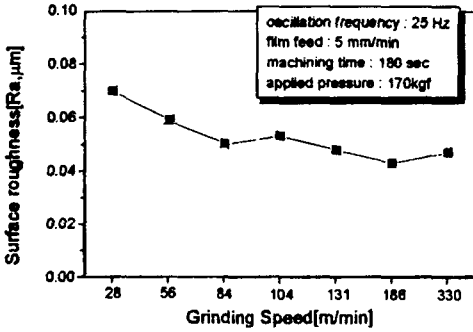


Fig. 2 Pre-experimental result with respect to grinding speed

Fig. 2는 연마 속도를 가공 변수로 하여 예비실험한 결과를 나타내고 있다. 연마 속도에 의한 표면 거칠기의 변화는 28m/min ~ 84m/min까지 작아지며 104m/min의 연마 속도에서는 조금 상승하고, 다시 표면 거칠기의 값이 감소하고 있다. 또한 330m/min의 연마 속도에서도 역시 조금 상승하므로 표면 거칠기의 값이 작아지기 시작하는 50m/min에서 연마 속도의 수준 선정을 시작하였으며, 연마 속도의 마지막 5수준은 330m/min의 연마 속도에서는 오히려 표면 거칠기 값이 상승하므로, 186m/min의 수준을 선정하였다.

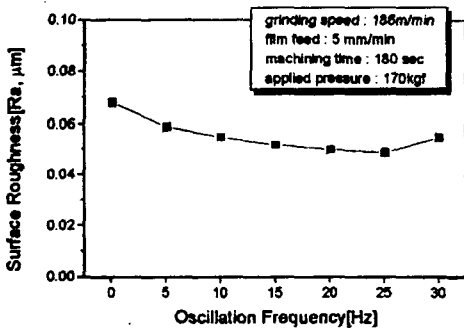


Fig. 3 Pre-experimental result with respect to oscillation frequency

Fig. 3은 진동 주파수를 가공 변수로 하여 예비 실험한 결과를 나타낸 것으로서 좌우 진동없이 공작물을 가공할 때에는 공작물의 표면 거칠기가 선삭한 후의 표면 거칠기

와 비교하여 볼 때 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 또한 25Hz이상의 진동수에서는 더 이상의 표면 거칠기 변화가 없음을 알 수 있다. 따라서 진동 주파수는 5~25Hz사이의 수준을 선정하였다.

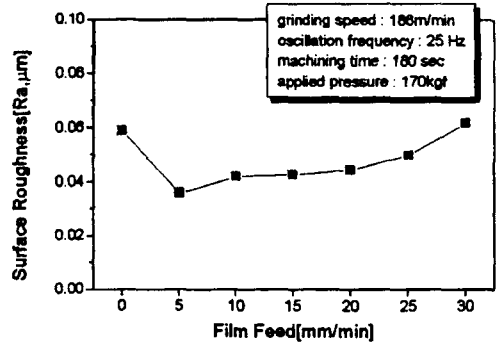


Fig. 4 Pre-experimental result with respect to film feed

Fig. 4는 필름의 이송을 가공 변수로 하여 예비 실험한 결과로서 이송이 정지되었을 때에는 오히려 공작물의 표면 거칠기가 좋지 않고 또한 25mm/min이상의 필름 이송 속도에서는 표면 거칠기의 생성값이 더 이상 좋아지지 않을 것으로 생각되었기 때문에 5~25mm/min의 필름 이송 속도를 선정하였다.

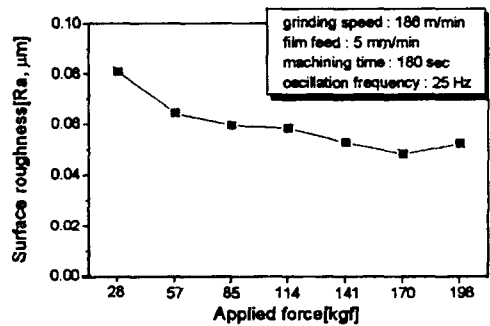


Fig. 5 Pre-experimental result with respect to applied force

Fig. 5는 가압력을 가공 변수로 하여 예비 실험한 결과를 나타내고 있다. 가압력이 높아짐에 따라서 전체적으로 표면 거칠기값이 낮아지고 있으며 198 kgf의 가압력에서는 오히려 표면 거칠기 값이 상승하고 있다. 따라서 낮은 압력의 인자와 높은 압력의 인자인 28 및 198 kgf를 제외한 수준들을 가압력의 수준으로 선정하였다.

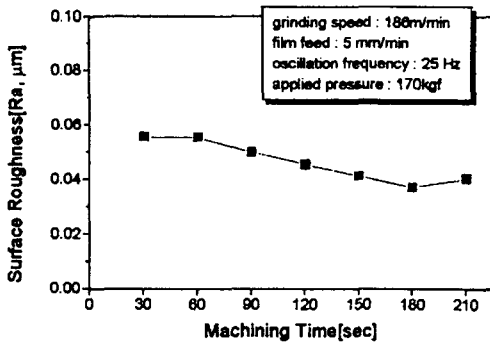


Fig. 6 Pre-experimental result with respect to machining time

Fig. 6은 가공 시간을 변수로 하여 예비 실험한 결과를 나타내고 있다. 전체적으로 가공 시간의 증가에 따라 표면 거칠기 값도 낮아지고 있으며, 150sec이상의 가공 시간에서는 표면 거칠기 값이 나빠지기 시작한다. 따라서 180sec과 210sec의 수준을 제외한 30~150sec의 수준을 선정하였다.

예비 실험을 통하여 표면 거칠기에 영향을 미친다고 생각되는 인자와 수준들을 5⁵의 혼합 직교 배열표를 이용하여 배치하였고, 이를 Table 1에 나타내었다.

인자는 실험 계획법^(9,10)에 의하여 초정밀 연마 입자에 큰 영향을 미친다고 추정되는 인자의 순서로 A, B, C, D, E에 배치하였다.

인자의 수준 배치는 연마 입자 필름 가공에 최적이라고 생각되고 있는 수준을 중심 수준으로 한 다음 각 수준이 등 간격을 갖도록 배치하였으며, Table 2에 실험에 사용된 인자의 표시 방법 및 수준을 나타내었다.

실험에 사용된 시험편은 Ra 0.8~1.2μm, Rmax 10~15μm로 선삭 가공된 φ=100mm, L=100mm의 시험편이고, 마이크로 연마 입자 필름은 40μm, 30μm, 15μm의 크기를 가지고 있으며, 연마 입자는 산화 알루미늄(Al₂O₃)이며, 접촉 지지 로울러는 Hs 60, 연마유는 유시로켄(S-60H)을 사용하였고, 초정밀 연마 입자 필름을 이용하여 직교 배열표에 의한 실험을 실시한 후, 각 시험편의 표면 거칠기 값을 측정 한 후 분산 분석의 순서로 실시되었다.

4. 실험결과 및 고찰

Table 3는 40μm의 초정밀 연마 입자 필름을 이용하여 직교 배열표에 의한 연마 가공 실험을 실시한 후 측정 한

Table 1 Orthogonal array table for L25(5⁵)

Expt. No.	Factor Assigned				
	A	B	C	D	E
1	0	0	0	0	0
2	0	1	1	1	1
3	0	2	2	2	2
4	0	3	3	3	3
5	0	4	4	4	4
6	1	0	1	2	3
7	1	1	2	3	4
8	1	2	3	4	0
9	1	3	4	0	1
10	1	4	0	1	2
11	2	0	2	4	1
12	2	1	3	0	2
13	2	2	4	1	3
14	2	3	0	2	4
15	2	4	1	3	0
16	3	0	3	1	4
17	3	1	4	2	0
18	3	2	0	3	1
19	3	3	1	4	2
20	3	4	2	0	3
21	4	0	4	3	2
22	4	1	0	4	3
23	4	2	1	0	4
24	4	3	2	1	0
25	4	4	3	2	1

Table 2 Factors and levels used in experiment

Sign	Factors	unit	Levels				
			0	1	2	3	4
A	Film feed	mm/min	5	10	15	20	25
B	Applied force	kgf	170	141	114	85	57
C	Grinding speed	m/min	186	131	104	84	56
D	Machining time	sec	150	120	90	60	30
E	Oscillation frequency	Hz	25	20	15	10	5

표면 거칠기 값을 분산 분석한 결과를 나타낸 것이다.

분석 결과 일반 평균 편동의 기여율 값이 94.18%로서 매우 크게 나타나고 있으며, 필름의 이송 속도(A인자) 및 연마 속도(C인자)의 인자가 가압력(B인자), 가공 시간(D인자), 진동 주파수(E인자)인자에 비하여 기여율의 값

이 1.51% 및 1.06%로서 A 및 C이외의 인자와 비교해 보면 표면 거칠기에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

Table 4는 40 μ m의 연마 입자 필름을 이용하고 Table 1의 직교 배열표에 의하여 실험을 실시한 후 측정된 표면 거칠기 값을 각각의 인자에 대하여 재배치 한 다음 그 평균값을 나타낸 것으로서 가장 큰 값을 찾아 Table 4의 일원표로부터 구한 인자의 최적 조건은 A₄B₄C₁D₃E₃가 됨을 알 수 있다.

Table 3 ANOVA table (Raw data of 40 μ m)

Factors	pool	S	σ	V	F0	S'	ρ (%)
M	N	0.3697	1	0.3696	796.69	0.3692	94.18
A	N	0.0078	4	0.0019	4.198	0.0059	1.51
B	N	0.003	4	0.0007	1.604	0.0011	0.29
C	N	0.006	4	0.0015	3.241	0.0042	1.06
D	Y	0.0017	4	0.0004			
E	Y	0.0012	4	0.0003			
ϵ		0.0056	12	0.0005		0.0116	2.96
Total		0.392	25			0.392	100

Table 4 One factor table of 40 μ m abrasive grain film

A0	A1	A2	A3	A4
0.5	0.52	0.64	0.64	0.74
B0	B1	B2	B3	B4
0.52	0.58	0.62	0.64	0.68
C0	C1	C2	C3	C4
0.56	0.69	0.67	0.48	0.64
D0	D1	D2	D3	D4
0.56	0.62	0.64	0.66	0.56
E0	E1	E2	E3	E4
0.62	0.62	0.54	0.64	0.62

Table 5는 30 μ m의 초정밀 연마 입자 필름을 사용하여 직교 배열표에 의한 실험을 실시하여 분석한 결과를 나타내고 있다.

Table 4에서의 결과와 유사하게 일반 평균 변동의 기여율 값이 97.93%로 매우 크게 나타나고 있으며, C인자인 연마 속도가 30 μ m의 연마 입자 필름을 이용한 연마 가공에서는 기여율의 값이 0.43%로 A, B, D, E인자에 비하여 표면 거칠기 값을 좌우할 수 있는 주요 인자로 나타나고 있음을 알 수 있다.

Table 6은 30 μ m의 연마 입자 필름을 이용하고 Table

Table 5 ANOVA table (Raw data of 30 μ m)

Factors	pool	S	σ	V	F0	S'	ρ (%)
M	N	0.1936	1	0.1936	1826.4	0.1935	97.93
A	Y	0.0003	4	0.0001			
B	N	0.0008	4	0.0002	1.887	0.00038	0.19
C	N	0.0013	4	0.0003	3.0189	0.00086	0.43
D	N	0.0006	4	0.0002	1.509	0.00022	0.11
E	Y	0.0003	4	0.0001			
ϵ		0.0013	12	0.0001		0.00265	1.34
Total		0.1976	25			0.1976	100

1의 직교 배열표에 의하여 실험을 실시한 후 측정된 표면 거칠기 값을 각각의 인자에 대하여 재배치 한 다음 그 평균값을 나타낸 것으로서 가장 큰 값을 찾아 Table. 6의 일원표로부터 구한 인자의 최적 조건은 A₀B₀C₄D₁E₀가 됨을 알 수 있다.

Table 6 One factor table of 30 μ m abrasive grain film

A0	A1	A2	A3	A4
0.47	0.45	0.42	0.42	0.44
B0	B1	B2	B3	B4
0.48	0.46	0.4	0.42	0.44
C0	C1	C2	C3	C4
0.42	0.42	0.40	0.46	0.5
D0	D1	D2	D3	D4
0.42	0.47	0.45	0.4	0.46
E0	E1	E2	E3	E4
0.47	0.44	0.42	0.45	0.42

Table 7은 15 μ m의 초정밀 연마 입자 필름을 이용하여 실험을 실시한 후의 표면 거칠기 값을 분산 분석한 결과를 나타내고 있다. 분산 분석의 결과 설정된 다섯 인자들 가운데에서 D인자 및 E인자의 기여율 값이 1.57% 및 1.21%로서 가공 시간 및 진동 주파수 인자가 실험중에 표면 거칠기를 결정하는 인자로 판명되었다.

결과적으로 40, 30, 15 μ m의 각 연마 입자 필름에서 일반 평균 변동이 변화율이 0으로 부터 많이 벗어나 있고 매우 큰 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 그리고 많은 영향을 미치고 있는 인자 이외의 인자들은 변화율에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

Table 8은 15 μ m의 연마 입자 필름을 이용하고 Table 1의 직교 배열표에 의하여 실험을 실시한 후 측정된 표면

거칠기 값을 각각의 인자에 대하여 재배치 한 다음 그 평균값을 나타낸 것으로서 가장 큰 값을 찾아 Table. 8의 일원표로부터 구한 인자의 최적 조건은 $A_2B_4C_2D_4E_3$ 이 됨을 알 수 있다.

Fig. 7, 8, 9는 측정된 표면 거칠기 데이터들의 평균을 구한 다음 각 수준의 인자에 대하여 나타낸 그래프로서 1~5는 인자A, 6~10은 인자 B, 11~15는 인자 C, 16~20은 인자 D, 21~25는 인자 E를 각각 나타낸다.

Fig. 7에서는 A 인자 변동의 폭이 타 인자보다 크고 Fig. 8에서는 C인자가, Fig. 9에서는 D인자 변동의 폭이 매우 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Table 7 ANOVA table (Raw data of 15 μ m)

Factors	pool	S	σ	V	F0	S'	ρ (%)
M	N	0.031	1	0.031	491.8	0.03092	92.02
A	N	0.0004	4	0.00011	1.667	0.00017	0.5
B	Y	0.0001	4	0.00003			
C	Y	0.0003	4	0.00008			
D	N	0.0008	4	0.0002	3.095	0.00053	1.57
E	N	0.0007	4	0.00017	2.619	0.00041	1.21
ϵ		0.0008	4	0.0001		0.00158	4.7
Total		0.0336	25			0.0336	100

Table 8 One factor table of 15 μ m abrasive grain film

A0	A1	A2	A3	A4
0.14	0.17	0.19	0.2	0.18
B0	B1	B2	B3	B4
0.18	0.18	0.17	0.16	0.19
C0	C1	C2	C3	C4
0.17	0.17	0.2	0.15	0.19
D0	D1	D2	D3	D4
0.17	0.15	0.16	0.17	0.23
E0	E1	E2	E3	E4
0.16	0.19	0.16	0.22	0.15

Fig. 10은 실험 계획법에 의하여 구한 최적 조건을 적용하여 초정밀 경면 연마 가공한 결과를 나타낸 것이다.

40 μ m의 연마 필름 입자에서 구한 필름 연마의 최적 조건은 필름 이송 25 mm/min, 가압력 57 kgf, 연마 속도 186 m/min, 가공시간 60 sec, 진동 주파수 10 Hz이고, 30 μ m의 연마 필름 입자에서 구한 필름 연마의 최적 조건은 필름 이송 5mm/min, 가압력 170 kgf, 연마 속도 56 m/min, 가공 시간 150 sec, 진동 주파수 25 Hz이며, 15 μ m의 연마 필름 입자에서 구한 필름 연마의 최적 조건은

필름 이송 10 mm/min, 가압력 57 kgf, 연마 속도 104 m/min, 가공 시간 30 sec, 진동 주파수 10 Hz이다.

연마 가공에 이용된 시험편은 Ra 0.8~1.2 μ m, Rmax 10~15 μ m로 선삭 가공한 기계 구조용 탄소강(SM45C)이며, 연마 가공 순서는 40, 30, 15 μ m의 순서로 이루어졌고, 15 μ m 연마 가공에서 Ra 10nm의 표면 거칠기를 갖는 경면을 얻을 수 있었다.

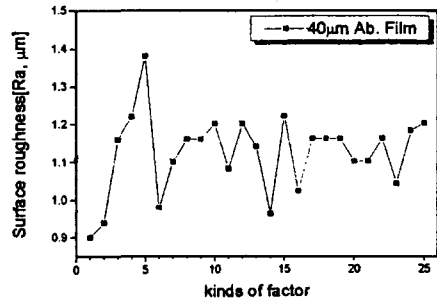


Fig. 7 Graph of level average(40 μ m Ab. Film)

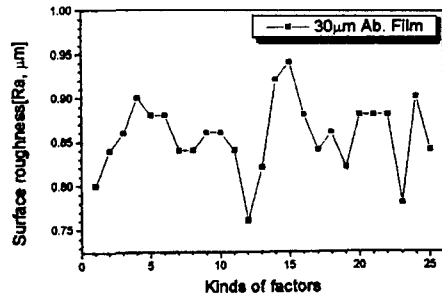


Fig. 8 Graph of level average(30 μ m Ab. Film)

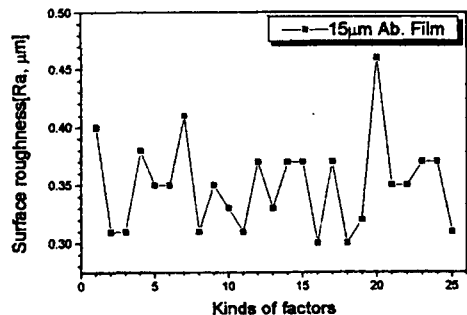


Fig. 9 Graph of level average(15 μ m Ab. Film)

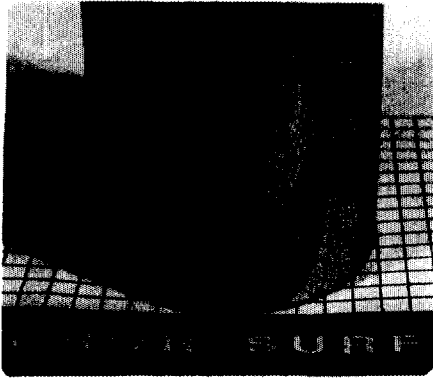


Fig. 10 Mirror finished surface (Ra 10nm)

5. 결 론

본 연구에서는 초미립자 연마 필름을 이용한 초정밀 경면 연마 가공 시스템에 있어서 표면 거칠기에 영향을 미치는 인자 및 최적 연마 가공 조건을 추출하고자 실험 계획법을 적용하여 연마 가공 실험 및 분석을 행하였고, 연구 결과 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 40 μm 의 연마 필름에서는 필름 이송 및 연마 속도, 30 μm 의 연마 필름에서는 연마 속도, 15 μm 의 연마 필름에서는 가공 시간이 표면 거칠기에 많은 영향을 미치고 있다.

2. 기계 구조용 탄소강(SM45C)을 표면 거칠기 Ra 0.8~1.2 μm , Rmax 10~15 μm 로 선삭 가공한 후 40, 30, 15 μm 의 연마 필름에서의 최적 연마 가공 조건을 이용하여 연마 가공한 결과 Ra 10nm의 가공면을 얻을 수 있었다.

3. 실험 계획법은 마이크로 연마 입자 필름 가공에서 표면 거칠기에 영향을 미치는 인자 및 최적 가공 조건을 도출하기 위한 유용한 방법이 됨을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Nobuyo Yasunaga, 'Recent Advances in Ultraprecision Surface Finishing Technologies in Japan', Int. j. Japan. Soc. Prec. Eng., Vol. 28., No. 3., pp. 1994.
2. Norman J. Brown, "Lapping: Polishing and Shear Mode Grinding", JSPE., Vol. 56, No. 5., pp. 24~29., 1990.
3. P. A. Milkeen., K. Carlisle., P. Shore and R. F. J. Read, "Ultra-precision, High Stiffness CNC Grinding Machines for Ductile Mode Grinding of Brittle Materials", JSPE., Vol. 56, No. 5., pp. 30~37., 1990.
4. G. Kuppuswamy., "An Investigation of the effect of magnetic Field on Electrolytic Diamond Grinding", Wear, Vol. 54, 1979.
5. T. Hanaoka., K. Sakamiya., A. Kobayashi and M. Harada, "Abrasive Belt Grinding Performance", Annals of the CIRP., Vol. 25., pp. 225~228, 1976.
6. Shizuichi Higuchi., shigeru Akao., Yoshio Saito., Tadaki Hanaoka., "Finishing Performance of Lapping Films Applied to Cylindrical Surfaces", Int. J. Japan. Soc. Prec. Eng., Vol. 28., No. 2., pp. 117~122., 1994.
7. K. Susuki et al., "Development of a New Mechanochemical Polishing Method with a Polishing Film for Ceramic Round Bars", Annals of CIRP., Vol. 41/1, pp. 389~342., 1972.
8. 김기수, 남궁석, "마이크로 필름을 이용한 경면 가공 시스템에 관한 연구", '95 춘계학술대회 논문집, 한국정밀공학회, pp. 273~278., 1995.
9. 박성현, "응용실험계획법", 영지문화사, 1990.
10. 박성현, "현대실험계획법", 영지문화사, 1990.