

평면과 경사면의 자기연마가공에서 공정변수가 표면거칠기에 미치는 영향

김상오⁺, 유만희⁺, 객재섭*
(논문접수일 2008. 1. 7, 심사완료일 2008. 6. 25)

Performance Evaluation of Magnetic Abrasive Polishing by Design of Experiments

Sang-Oh Kim⁺, Man-Hee You⁺, Jae-Seob Kwak*

Abstract

R/In order to satisfy the customer's variant needs for a product quality in recent years, a demand for developing higher precision machining technologies in a lot of application areas such as automobile, cellular phone and semiconductor has been increased more and more. Magnetic abrasive polishing(MAP) process is one of these precision technologies. In this study, to verify the parameters' effect of the MAP process on the surface roughness improvement of the plane and the inclined workpiece, well planned experiments which was called the design of experiments were carried out. Considered polishing factors were spindle speed, supplied current, abrasive type and working gap between the workpiece and the solid tool. As a result, it was seen that the supplied current and the working gap greatly affected the surface roughness improvement.

Key Words : Magnetic abrasive polishing(자기연마가공), Design of experiments(실험계획법), Surface roughness improvement(표면 거칠기 향상), Process parameter(공정변수)

1. 서론

산업이 발전됨에 따라 고정도, 고품질의 부품을 요구하는 경향이 커지고, 기계적 성질이 우수한 특수합금강, 알루미늄 합금, 표면 경화강 등의 난삭재들이 기계부품 및 각종 설비

용 부품으로 사용되고 있다. 따라서 그 품질을 향상시키기 위해 제품의 마무리 가공공정에 적용되는 연삭가공의 중요성은 더욱 더 증대하고 있다.

그러나 연삭가공은 공작물의 형상이나 재질에 따라 가공이 불가능 하거나 일정한 품질의 제품을 얻을 수 없는 단점

* 부경대학교 기계공학부 (jskwak5@pknu.ac.kr)

주소: 부산 남구 용당동 산 100번지

+ 부경대학교 대학원

을 지니고 있다.

예를 들어 직경이 매우 작은 파이프 내면의 연마가공은 파이프의 길이가 길어지면 내면의 연마가공이 매우 어려워진다. 또한 복잡한 형상을 갖는 금형(Mold)의 연마가공은 그에 맞는 전용 스톨의 제작이 불가능하기에 현재에도 수작업에 의존하고 있다⁽¹⁾.

이러한 한계를 극복하고자 제시된 방법 중 하나가 전자석을 이용한 자기연마법이다. 자기연마법은 자기장에 의해 형성된 자력선 방향으로 미세한 연마입자와 자성입자가 정렬하여 브러쉬(Brush) 역할을 수행한다^(2,3).

이러한 브러쉬가 금속표면을 연마하는 방법으로 공구의 형상이 유연성을 갖기 때문에 공작물 또는 가공부위의 형상에 구애를 받지 않는 강점을 지니고 있다. 기존의 자기연마법은 가공 대상의 전체 영역을 가공하기에는 적합하지만, 특정 미소 영역의 단차나 경사가 있는 부분을 작업하기는 어려운 점이 많다. 그 중 경사면에 대한 효율적인 연마 방법은 그 연구가 미진하다. 따라서 경사면의 연구가 이루어지고 더 나아가 자유곡면 연마에 대한 연구가 진행 된다면 금형과 같이 고품위의 표면을 요구하는 복잡한 형상의 제품의 자동 연마가공이 이루어 질 수 있게 될 것으로 보인다.

따라서 본 연구에서는 평면에서의 자기연마에서 표면거칠기에 많은 영향을 미치는 인자와 경사면에서의 그것을 비교하여 경사면에서의 효율적인 자기연마 조건을 선정하였다. 이는 독자적인 자유곡면의 자동화된 자기연마 시스템 연구를 위한 기초연구이다.

2. 자기연마의 이론적 배경

자기연마법의 개략적인 가공기구는 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1과 같이 Steel Pole에 코일을 감고 그 코일에 전류를 부가하면, 패러데이의 법칙(Faraday's law)에 의해 자기력

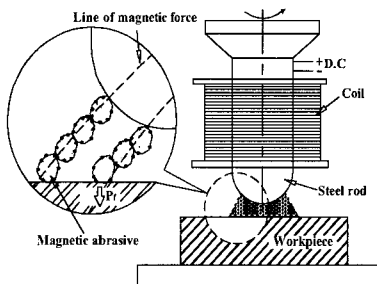


Fig. 1 Schematic drawing of MAP process

이 발생하는 연마공구가 된다. 공구의 끝단과 공작물 사이에 간극을 주고 그 공간에 자성체와 연마입자를 용융하여 분쇄한 일체형입자 또는 자성입자와 연마입자를 일정 비율로 혼합한 혼합형입자를 슬러리 형태로 공급한다. 전자석에 전류가 부가된 연마공구는 자성입자를 구속하게 된다. 구속된 자성입자는 사슬구조(Chain-like structure)로 정렬되며 연마입자는 자성입자들 사이에 위치하게 된다. 이처럼 사슬구조로 형성된 입자들은 유연성을 가지는 브러쉬 역할을 한다⁽⁴⁾.

Fig. 2와 같이 일체형 자기연마입자 1개는 코일에서 발생하는 자력에 의한 법선 방향의 힘 Δf_n , 공구의 회전에 의해 발생하는 접선 방향의 힘 Δf_t 를 받는다. 따라서 자기연마에서 발생하는 절삭력은 이 두 힘의 합력으로 표현될 수 있다. 여기서 힘 Δf_n 은 공구의 회전력에 따라 증감하며, 자성연마입자군과 공작물 사이에 발생하는 전체 법선 방향의 힘 F_n 은

$$F_n = \frac{B^2}{2\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_{fm}}\right) S \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 μ 는 투자율(H/m), S 는 자성연마입자와 공작물이 접촉하는 전체 면적을 나타낸다. 식 (1)에 따라서 법선방향의 힘은 자속밀도 B 에 따라 큰 폭으로 증감할 수 있음을 알 수 있다. 또한 자속밀도는 전류의 세기에 비례하므로 전류의 세기를 조절하여 절삭력의 세기를 조절할 수 있다.

3. 자기연마장치의 구성

본 연구의 실험을 위하여 MAP장치를 Fig. 3과 같이 구성하였다. 코일에 의한 전자석 역할을 수행하는 인덕터와 이곳에 전류를 공급하는 전원 공급장치 및 X-Y축 이송 제어장치로 구성되어 있다. MAP장치의 상세한 사양은 Table 1에 나타내었다. 여기서 공구 역할을 하는 인덕터는 공구의 헤드의

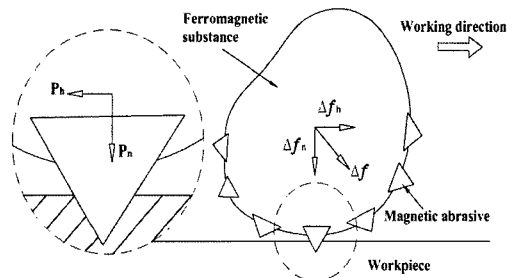


Fig. 2 Cutting forces in MAP process

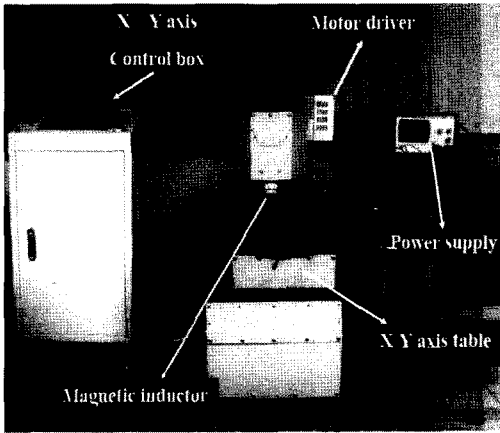


Fig. 3 Experimental set-up for MAP

Table 1 Specifications of MAP machine

| Items | Conditions |
|--------------------------|---------------------------|
| Motor | AC servo motor (0~60Hz) |
| Inductor | Ball end, flat end |
| Magnetic flux density | 0~0.2T |
| Power supply | 5A, 50V |
| X - Y axis control drive | 0~12m/min |
| Feed rate | 9m/min |
| Surface roughness tester | Surftester 301 (Mitutoyo) |

형상에 따라 ball type과 flat type으로 나눌 수 있고 본 실험에서는 넓은 면적의 자기연마를 위해 flat type을 선정하여 사용하였다. 그리고 공급된 전류에 의해 자화된 전자석의 자속밀도는 최대 0.2T이다. 실험에 사용된 공작물의 재질은 SM45C로 선정하였다.

4. 평면의 자기연마특성 평가

4.1 실험목적 및 방법

본 연구에서는 평면의 자기연마에 많은 영향을 미치는 인자들을 실험계획법을 통해서 평가하고 이를 통해 선정된 인자들을 이용하여 기율기면에서의 자기연마 특성을 평가하였다. 이를 통해 완전한 곡선을 가지는 자유곡면의 자동화된 자기연마의 특성을 예측할 수 있었다.

실험의 결과는 표면거칠기의 향상을 통해 평가하였다. 이는 자기연마의 특성상 매우 낮은 절삭력에 의해 표면이 연마

Table 2 Factors and levels used in plain experiments

| Factors | Level | | |
|---------------------------|-------|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 |
| Supplied current, A (Amp) | 1 | 2 | 3 |
| Working gap, B (mm) | 1.5 | 2.0 | 2.5 |
| Rotational speed, C (rpm) | 600 | 700 | 800 |
| Abrasive type, D (-) | 'a' | 'b' | 'c' |

Table 3 Magnetic abrasive type

| | Component | Grain size | Mixing form |
|-----|------------------------------------|------------------------|-------------|
| 'a' | Al ₂ O ₃ +Fe | 200 μ m | bonded |
| 'b' | Al ₂ O ₃ +Fe | 100 μ m | bonded |
| 'c' | 'a' + SiC | 200 μ m, 9 μ m | un-bonded |

됨으로써 가공치수 및 금속 제거율의 변화가 매우 미세하여 이를 측정대상으로 평가하기가 어렵기 때문이다.

자기연마 공정에서 각각의 인자들이 어느 정도의 영향력을 가지는지를 평가하기 위하여 실험계획법을 이용하였다. 실험은 직교배열표를 구성하여 진행하였다. 직교배열표에서 모든 열은 서로 직교하기 때문에 임의의 두열을 골라서 그 곱의 합을 구하면 영(Zero)이 되는 성질을 갖고 있다. 직교배열표의 이러한 성질때문에 기존의 방법들과는 달리 여러 가지 인자를 동시에 조절할 수 있으며, 각 인자들은 항상 직교하기 때문에 독립적으로 평가가 가능하게 해준다. 또한 직교배열표에서는 각 인자별 및 조건별 동일한 회수의 실험이 이루어지도록 하는 성질이 있다.

Table 2는 평면의 자기연마 실험에서 선택한 인자와 그 수준을 나타내었다. MAP장치에 사용된 인덕터의 전기용량이 0~3A이므로 본 연구에서는 전류의 세기를 1, 2, 3A로 선정하였다.

한편 공구의 회전속도는 서보모터의 용량이 0~60Hz로 약 0~3700rpm까지 조절가능하다. 그러나 1000rpm 이상에서는 연마입자들의 이탈이 많이 발생하여 효과적인 가공이 어렵기 때문에 이러한 점을 고려하여 회전속도를 1000rpm이하로인 600, 700, 800rpm으로 선정하였다. 공작물과 공구 사이의 간격은 입자의 크기와 공급되는 입자의 량을 고려하여 각각 1.5, 2.0, 2.5mm로 선정하였다. 마지막으로 입자의 종류는 단순 혼합형 형태의 입자와 플라즈마 용융법을 이용하여 결합된 형태의 입자 두 종류를 모두 사용하였다. 따라서 각각 플라즈마 용융법을 이용한 결합된 형태의 입자 두 종류와 같은 형태의 입자에 SiC 분말을 단순 혼합한 형태의

입자 한 종류를 선택하였다.

Table 4는 평면 자기연마 실험에 사용된 $L_9(3^4)$ 직교배열표를 나타낸 것이다. 직교배열표에는 4개의 열에 주요인자 및 상호작용이 예상되는 인자들을 배치하였고, 실험의 실시회수는 9회로 하였다.

4.2 실험 및 결과

평면의 자기연마특성을 평가하기 위한 실험은 Table 4에서 나타낸 직교배열표에 따라서 실시하였고, 그 결과로 m_1 , m_2 , m_3 의 지점에 대한 표면거칠기값의 향상 정도를 측정하였다. 표면거칠기의 향상정도는 그 값들이 클수록 좋으므로 S/N비의 계산식 중에 망대특성을 이용하여 계산하였다. 실험에서 얻어진 표면거칠기 향상정도의 측정값과 이로부터 계산된 S/N비는 Table 5와 같다. 이때 구해진 S/N비(η)는

식 (2)를 이용하여 계산하였다. 여기서 y_i 는 실험에서 얻어진 데이터이다.

$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i} \right) \quad (2)$$

실험결과를 보면, 실험순서에 따라서 특성치들의 변화경향이 일정하게 증가 또는 감소하지 않음을 알 수 있다. 그리고 S/N비 또한 측정치와 같은 경향을 따르고 있어서 S/N비가 망대특성의 평가 방법에 따라 측정치가 클수록 결과치가 좋음을 잘 보여준다. Fig 4에서 보듯이 입자의 종류(인자 D)의 영향력이 가장 큰 것을 알 수 있다.

그러나 실제 공정 중에 자기연마입자를 교환하거나 일정량을 보충하기가 매우 어렵다. 따라서 공정 중에 비교적 쉽게 조정이 가능한 인자 A와 C를 이용하여 표면거칠기를 향상시킬 수 있다. 그리고 Fig. 4를 통해 $A_3B_1C_2D_3$ 조합이 표면거칠기를 향상시키기 위한 최적의 조건임을 알 수 있다.

즉 전류세기는 3A, 공작물과 공구 사이 간격은 1.5mm, 회전속도는 700rpm, 연마입자는 'c' type일 때 가장 좋은 결과를 나타낸다. 실험의 유의성을 알아보기 위한 분산분석표를 Table 6에 나타내었다. 여기서 SS는 각 인자별 S/N비

Table 4 Orthogonal array for plain experiments

| No. | Factors | | | |
|-----|---------|-----|-----|-----|
| | A | B | C | D |
| 1 | 1 | 1.0 | 600 | 'a' |
| 2 | 1 | 2.0 | 700 | 'b' |
| 3 | 1 | 2.5 | 800 | 'c' |
| 4 | 2 | 1.0 | 700 | 'c' |
| 5 | 2 | 2.0 | 800 | 'a' |
| 6 | 2 | 2.5 | 600 | 'b' |
| 7 | 3 | 1.0 | 800 | 'b' |
| 8 | 3 | 2.0 | 600 | 'c' |
| 9 | 3 | 2.5 | 700 | 'a' |

Table 5 Experimental result and calculated S/N ratio

| No. | m_1 | m_2 | m_3 | Average | S/N ratio |
|-----|-------|-------|-------|---------|-----------|
| 1 | 0.11 | 0.1 | 0.07 | 0.093 | -20.6303 |
| 2 | 0.18 | 0.08 | 0.14 | 0.133 | -17.523 |
| 3 | 0.15 | 0.28 | 0.21 | 0.213 | -13.4324 |
| 4 | 0.22 | 0.38 | 0.27 | 0.290 | -10.752 |
| 5 | 0.05 | 0.12 | 0.14 | 0.103 | -19.7433 |
| 6 | 0.1 | 0.04 | 0.13 | 0.090 | -20.9151 |
| 7 | 0.09 | 0.15 | 0.23 | 0.156 | -16.1375 |
| 8 | 0.3 | 0.27 | 0.19 | 0.253 | -11.9376 |
| 9 | 0.31 | 0.14 | 0.14 | 0.196 | -14.1549 |

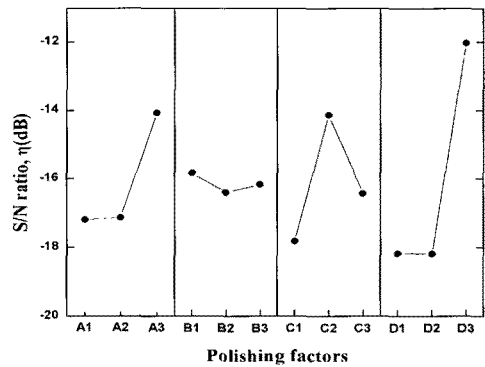


Fig. 4 Effect of polishing factors on surface roughness

Table 6 ANOVA for polishing factors

| | SS | DOF | V | F0 |
|-------|-----------|-----|-----------|----------|
| A | 0.00493 | 2 | 0.00247 | 15.432* |
| B | 0.00032 | 2 | - | - |
| C | 0.00627 | 2 | 0.00313 | 19.612** |
| D | 0.03053 | 2 | 0.01526 | 95.564** |
| Error | (0.00032) | (2) | (0.00016) | |
| Total | 0.01784 | 8 | | |

의 제곱합을, DOF는 각 인자별 자유도를, V는 제곱평균을, F₀는 제곱평균비를 나타낸다. 그리고 E는 오차항을 나타내고 있으며, 여기서 오차항 E는 가장 작은 영향력을 보이는 B인자로 풀링하였다.

분산분석 및 F-검증을 통하여 표면거칠기의 향상정도는 C, D 인자가 95%의 유의수준을 만족함을 알 수 있고, A 인자가 90%의 유의수준을 만족한다. 여기서 F검증에서 $\alpha=0.1$ 일 때 평가치는 9.0이고, $\alpha=0.05$ 일 때 평가치는 19.0이다.

5. 경사면의 자기연마

5.1 실험목적 및 방법

경사가 완만한 자유곡면의 효율적인 자기연마를 위하여 경로추종 없이 가공인자의 조절로 자기연마 가공이 가능하도록 하기위한 기초연구로써 경사면의 자기연마 특성을 평가하고자 한다. Fig. 5는 실험을 통해 얻어지는 표면거칠기의 측정 위치를 나타내고 있다. 공구와 가장 가까운 거리에 위치한 m₁지점부터 가장 먼 거리의 m₃지점까지 3개의 점에 대해 그 표면거칠기의 향상 정도를 계산한다.

5.2 실험 및 결과

실험에 사용된 인자는 평면에서의 자기연마 특성평가에서 선정된 주요인자를 이용하여 Table 7과 같이 구성하였다.

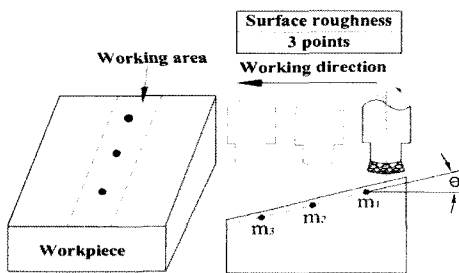


Fig. 5 Surface roughness measuring points

Table 7 Factors and levels used in inclined experiments

| Factor | Level | | |
|---------------------------|-------|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 |
| Rotational speed, A (rpm) | 700 | 800 | 900 |
| Supplied current, B (A) | 1 | 1.5 | 2 |
| Workpiece angle, C (°) | 1 | 2 | 3 |
| Abrasive size, D (μm) | 50 | 150 | 200 |

이때 공작물의 경사각은 1도에서 3도로 조정하여 실험하며 입자의 종류 대신 입자의 크기를 평가에 반영하였다. 이것은 평면의 자기연마 특성평가에서 입자의 크기가 작은 입자를 가질수록 표면거칠기의 향상에 큰 영향을 미침을 알았기 때문이다. 공구의 회전수는 입자의 이탈을 방지하기 위해 1000rpm 이하로 선택하였다.

Table 8은 경사면 실험에 사용된 L₉(3⁴) 직교배열표를 나타낸 것이다. Table 9는 3지점에 대한 표면거칠기의 향상 정도와 망대특성을 이용한 S/N비 값을 나타내었다.

Fig. 6-8에서 m₁~m₃지점에 따라 각각의 인자들이 미치는 영향력의 정도가 다르게 나타난다. 먼저 m₁지점에서는 Fig. 6과 같이 전류의 세기에 따른 영향력이 가장 크고, 입자의

Table 8 Orthogonal array for inclined experiments

| No. | Factor | | | |
|-----|--------|-----|---|-----|
| | A | B | C | D |
| 1 | 700 | 1 | 1 | 50 |
| 2 | 700 | 1.5 | 2 | 150 |
| 3 | 700 | 2 | 3 | 200 |
| 4 | 800 | 1 | 2 | 200 |
| 5 | 800 | 1.5 | 3 | 50 |
| 6 | 800 | 2 | 1 | 150 |
| 7 | 900 | 1 | 3 | 150 |
| 8 | 900 | 1.5 | 1 | 200 |
| 9 | 900 | 2 | 2 | 50 |

Table 9 Experimental result and calculated S/N ratio

| No | Experimental result | | | S/N ratio | | |
|-------|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | m ₁ | m ₂ | m ₃ | m ₁ | m ₂ | m ₃ |
| 1 | 0.29 | 0.15 | 0.02 | -10.752 | -16.478 | -33.979 |
| 2 | 0.56 | 0.24 | 0.02 | -5.0324 | -12.395 | -33.979 |
| 3 | 0.52 | 0.14 | 0.08 | -5.6799 | -17.077 | -21.938 |
| 4 | 0.31 | 0.12 | 0.09 | -10.172 | -18.416 | -20.915 |
| 5 | 0.47 | 0.25 | 0.04 | -6.5580 | -12.041 | -27.958 |
| 6 | 0.38 | 0.13 | 0.01 | -8.4043 | -17.721 | -40.000 |
| 7 | 0.36 | 0.3 | 0.19 | -8.8739 | -10.457 | -14.424 |
| 8 | 0.47 | 0.66 | 0.4 | -6.5580 | -3.6091 | -7.9588 |
| 9 | 0.59 | 0.25 | 0.23 | -4.5829 | -12.041 | -12.765 |
| Total | 3.95 | 2.24 | 1.08 | -66.6134 | -120.235 | -213.916 |

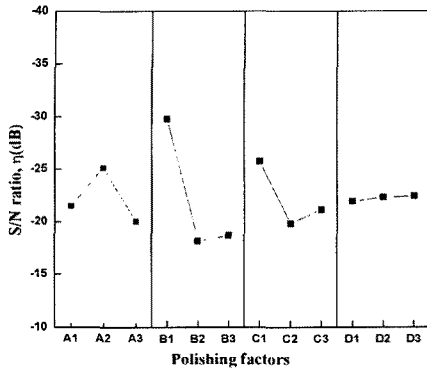


Fig. 6 Influence of polishing factors on surface roughness at m1 point

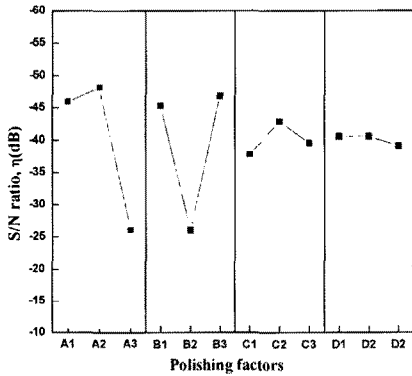


Fig. 7 Influence of polishing factors on surface roughness at m2 point

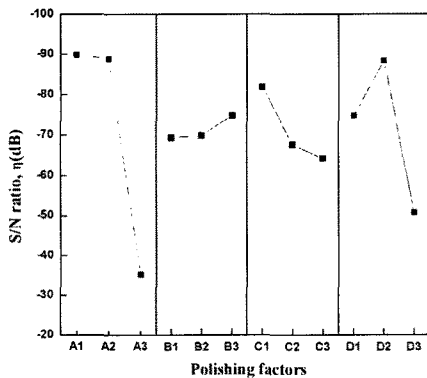


Fig. 8 Influence of polishing factors on surface roughness at m3 point

크기가 미치는 영향이 가장 작음을 알 수 있다. 반면 중간 지점인 m2지점에서는 공구의 회전수와 전류의 세기가 거의

Table 10 ANOVA for polishing factors at m1 point

| | SS | DOF | V | F ₀ |
|-------|------------|-----|------------|----------------|
| A | 4.641621 | 2 | 2.32081 | 91.82985** |
| B | 28.86839 | 2 | 14.4342 | 571.1325** |
| C | 6.444503 | 2 | 3.222251 | 127.4981** |
| D | 0.050546 | 2 | 0.025273 | - |
| Error | (0.050546) | (2) | (0.025273) | - |
| Total | 39.95452 | 8 | | |

Table 11 ANOVA for polishing factors at m2 point

| | SS | DOF | V | F ₀ |
|-------|----------|-----|----------|----------------|
| A | 98.42732 | 2 | 49.2137 | 206.47** |
| B | 72.46822 | 2 | 36.3841 | 152.65** |
| C | 4.3684 | 2 | 2.17422 | 9.17* |
| D | 0.4767 | 2 | 0.2383 | - |
| Error | (0.4767) | (2) | (0.2383) | - |
| Total | 176.0407 | 8 | | |

Table 12 ANOVA for polishing factors at m3 point

| | SS | DOF | V | F ₀ |
|-------|----------|-----|----------|----------------|
| A | 653.8581 | 2 | 326.92 | 112.24** |
| B | 5.8251 | 2 | 2.9125 | - |
| C | 58.3714 | 2 | 120.64 | 41.423** |
| D | 241.2981 | 2 | 29.185 | 10.020* |
| Error | (5.8251) | (2) | (2.9125) | - |
| Total | 953.52 | 8 | | |

유사한 영향력을 가지고 있다. 마지막으로 공구와의 거리가 가장 먼 m3지점에서는 회전수의 영향력이 가장 크며, 기울기에 대한 영향력이 가장 작음을 보여주고 있다.

이와 같은 결과는 공구와 공작물 사이의 간극에 따른 영향으로 볼 수 있다. 공구와 공작물 사이의 거리가 짧을 경우 각도에 따라 거리가 급격히 변화하므로 각도에 대한 영향이 크며, 반대로 거리가 멀수록 거리에 따른 영향이 급격히 감소하여 각도에 대한 영향 보다는 다른 인자들의 영향이 크게 작용함을 알 수 있다. 각 점에 대한 최적의 조건은 m1지점에서는 A2B1C1D3이며, m2지점에서는 A2C3C3D1이고, 마지막으로 m3지점에서는 A1B3C1D2이다. Table 10~12는 각 지점에서 인자들에 대한 분산분석표를 나타내고 있으며, 가장 영향이 작은 인자들을 각각 오차항으로 풀링하여 나타내었다.

6. 결론

본 연구에서는 MAP장치를 이용하여 평면과 경사면의 연마가공에서 가공인자들이 표면거칠기에 미치는 영향을 실험을 통하여 비교하고 평가하였다. 이상의 실험과 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 평면의 자기연마를 통한 표면거칠기 향상에 있어 자기연마입자의 종류가 가장 큰 영향을 미치고 있으나, 공정 중에 연마입자의 교환 및 정량적 투입이 어렵다. 따라서 이번 연구를 통해 공정 중 전류의 세기와 회전수를 조절하여 표면거칠기를 충분히 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다. 본 연구에서 사용된 시스템에서의 최적의 전류세기는 3A, 회전수는 700rpm이다.
- (2) 경사면의 자기연마 특성은 공구와 공작물 의 사이의 거리, 전류 및 공구의 회전수에 따라 크게 변화하였다. 본 연구에서 m_1 지점은 1.5A와 700rpm에서, m_2 지점은 1.5A와 900rpm에서, m_3 지점은 1A와 900rpm일 때 가장 최적의 표면거칠기를 얻었다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업(과제명: Pre-polymer 중합설비 설계 및 시

스템 최적화기술 개발, 과제번호: 20070130134117)으로 수행된 연구 결과임.

참 고 문 헌

- (1) Choi, M. S. and Kim, J. D., 1995, "Study on the rapid Magnetic Polishing System of Free-Surface Die/Mold," *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference*, pp. 102~107.
- (2) Park, W. G., Roh, T. W., Seo, Y. I., Choi, H., Lee, J. C., Jung, S. H., and Chae, S., 2001, "The internal Finishing Characteristics of Non-ferromagnetic Pipe Polished by Magnetic Abrasive Machining (II)," *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference*, pp. 960~963.
- (3) Cho, C. R., Park, S. R., Yang, S. C., and Jung, Y. G. 2004, "A Study on the Improvement of Performance of High Speed Cutting Tool using Magnetic Fluid Grinding Technique (1st Report), Production of Experimental Equipment," *Proceeding of Korean Society of Manufacturing Process Engineers Conference*, pp. 135~138.
- (4) Kim, H. N., Yun, Y. K., Kim, S. B., and Choi, H. S., 2004, "Magnetic Abrasive Polishing for Internal Face of Seamless Stainless Steel Tube Using Sludge Abrasive Grain," *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 12, No. 6, pp. 151~157.