

곡면 자기연마에서의 자기력 형성과 가공특성에 관한 연구[§]

김 상 오* · 곽 재 섭*[†]

* 부경대학교 기계공학과

Evaluations of Magnetic Abrasive Polishing and Distribution of Magnetic Flux Density on the Curvature of Non-Ferrous Material

Sang-Oh Kim* and Jae-Seob Kwak*[†]

* Department of Mechanical Engineering, Pukyong Nat'l Univ.

(Received June 21, 2011; Revised October 10, 2011; Accepted October 19, 2011)

Key Words : Magnetic Abrasive Polishing(자기연마), Polarity Control(극성 제어), Radius of Curvature(곡률반경)

초록: 비자성체의 자유곡면 자기연마 공정에서 자기력 세기의 향상은 매우 중요하다. 비자성체 자유곡면의 표면에 발생하는 자기력의 세기에 따라 자기연마 입자가 가지는 수직 절삭력이 변화하기 때문이다. 이러한 자기력 향상을 위하여 전자석 배열 테이블이 적용된 제 2세대 자기연마공정이 비자성체의 자유곡면 자기연마에 적용된다. 본 연구에서는 이러한 제 2세대 자기연마공정에서 전자석 배열 테이블에 발생하는 자기력 세기 향상을 위한 극성배열 방법을 제시하고 이를 알루미늄합금의 곡률 자기연마에 적용하였다. 그 결과 볼록 및 오목 형상에서 각각 S-N-S와 S-N-N-N-S 극성 배열에서 가장 높은 표면거칠기의 향상을 확인하였다. 또한 상승 가공경로에서 상대적으로 높은 표면거칠기 향상을 나타내었다.

Abstract: Automatic magnetic abrasive polishing (MAP), which can be applied after machining of a mold on a machine tool without unloading, is very effective for finishing a free-form surface such as a complicated injection mold. This study aimed to improve the efficiency of MAP of a non-ferrous mold surface. The magnetic array table and control of the electromagnet polarity were applied in the MAP of a free-form surface. In this study, first, the magnetic flux density on the mold surface was simulated to determine the optimal conditions for the polarity array. Then, the MAP efficiency for polishing a non-ferrous mold surface was estimated in terms of the change in the radius of curvature and the magnetic flux density. The most improved surface roughness was observed not only in the upward tool path but also in the working area of larger magnetic flux density.

- 기호설명 -

- Fm : 자기연마 입자의 법선력(N)
- Mt : 연마입자의 모멘트(N·m)
- B : 자속밀도(Tesla)
- μ : 투자율
- H : 자장의 세기(A/m)

1. 서 론

최근 금형의 최종 다듬질가공 많은 연구들이 진

행되고 있으며, 특히 자기연마를 이용한 금형의 자동화에 관한 연구들이 활발히 이루어지고 있다.⁽¹⁾ 자기연마공정은 자성입자와 연마입자로 구성된 공구를 이용하기 때문에 공작물의 형상에 대한 구애를 받지 않는다.⁽²⁾ 그러나 공작물의 자기력 특성에 따라 가공편차가 발생하는 특성을 가진다. 자기연마 입자가 공작물의 표면에 미치는 절삭력의 크기가 공작물 표면과 자기연마입자에 분포하는 자기력의 크기에 따라 변화하기 때문이다. 자기력의 세기가 감소할수록 자기연마입자의 절삭력은 감소하고 이는 낮은 표면거칠기 향상을 초래한다.

이러한 단점을 보완하기 위해 영구자석 및 전자석을 이용하는 방법이 제시되었다.^(3,4) 이와 같은 방법은 공작물의 반대편에 영구자석 및 전자석을

§ 이 논문은 2011년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계 학술대회(2011.6.30-7.1, 라마다프라자 제주호텔)발표논문임

[†] Corresponding Author, jskwak5@pknu.ac.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

고정으로 설치하여 비자성체의 표면에 임의적으로 자속밀도를 증가시키는 것이다. 증가된 자속밀도의 크기에 따라 가공효율이 상승한다.⁽⁵⁾

본 연구에서는 전자석 테이블이 설치된 제 2세대 자기연마 시스템으로 비자성체로 이루어진 곡면형상 금형에 대한 자기연마 특성을 평가하고자 한다. 이를 위해 자기력 형성 시뮬레이션을 수행하고 곡률형상 표면에 발생하는 자기력을 향상시킬 수 있는 전자석 극성배열을 제안하였다. 또한 볼록 및 오목형상의 비자성체 자기연마특성을 실험을 통해 분석하고 각 경로에 따른 표면거칠기 변화를 측정하고 결과를 통해 자기력 분포와 자기연마 가공성능에 대한 상관관계를 규명하였다.

2. 제 2 세대 자기연마에서의 자기력향상

2.1 제 2 세대 자기연마 시스템

2세대 자기연마는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 복잡한 자유곡면에 적용이 가능한 구성으로 되어있을 뿐 아니라 1세대 자기연마와 차별적으로 전자석을 이용한 전자석 테이블이 공작물 아래에 설치되어 모든 비자성체의 표면 정밀가공에도 적용될 수 있는 특징을 가진다. 비자성체의 가공에서 자기력향상을 위해 가공물 아래에 전자석 테이블이 설치되지 않을 경우, 공작물의 표면에서 철 입자와 같은 자성 입자가 연마입자에 가공에 필요한 만큼의 가공력이 발생하지 못한다. 따라서 이런 경우에는 효율적인 가공을 할 수 없다. 반면, 영구자석이나 전자석을 이용한 경우 연마입자가 공작물 아래에서 발생한 자기력에 의해 가공력이 증가하여 효율적인 가공을 할 수 있다.

2.2 전자석 배열 테이블을 이용한 자기력향상

자속밀도는 자기장 안의 어떤 점에서 자기장에 수직인 단위면적당의 자기력선의 수를 나타낸다. 즉, 전류의 세기가 증가할수록 자속밀도는 증가하

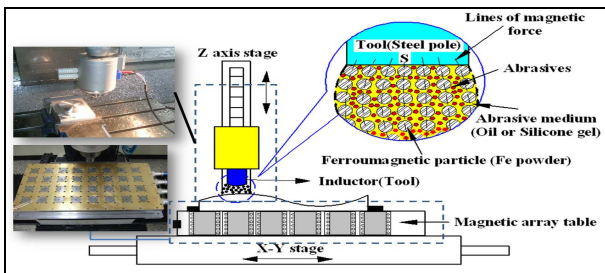


Fig. 1 Schematic diagram of 2nd generation magnetic abrasive polishing system

기 때문에 식 (1)의 관계가 성립한다.

$$B = \mu H \tag{1}$$

여기에서 B 는 자속밀도(Tesla), μ 는 투자율(H/m), H 는 자장의 세기(A/m)를 나타낸다. 자속밀도는 자장의 세기에 따라 이력곡선(Hysteresis loop)을 형성한다. 이러한 자력에 의한 힘의 특성과 공구의 회전력에 의한 접선방향의 힘의 특성이 동시에 작용하여 실제적인 연마가공을 수행한다. 따라서 자기연마에서는 공구의 회전속도와 공구에 인가되는 전류의 세기에 따라 그 성능에 영향을 미치게 된다. 여기에서 자성연마 입자군과 공작물 사이에 발생하는 전체 법선 방향의 힘은 아래의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 S 는 자성연마 입자와 공작물이 접촉하는 전체 면적을 나타낸다.

자기연마 입자에 적용되는 자기력 향상을 위해서 공구의 자속밀도 뿐만 아니라 공작물 표면의 전체적인 자속밀도를 향상시킬 필요가 있다. 따라서 효율적인 자속밀도 증가를 위해 공작물의 반대편에 전자석을 설치하는 방안을 제시하였다. 이때 Fig. 2와 같이 자기연마 공구에서 발생하는 자기력선과 공작물 반대편 전자석에서 발생하는 자기력선의 중첩으로 공작물의 표면에 생성되는 자속밀도를 증가시킬 수 있다. 전자석 테이블은 전류량으로 자기력의 크기를 조절할 수 있다.

3. 곡면에서의 자기력 분포와 향상방안

3.1 곡률형상의 자기력 분포 시뮬레이션 모델링

비자성체 곡률형상의 자기연마 공정에서 공구와 공작물 표면에 생성되는 자기력의 세기는 자기연마

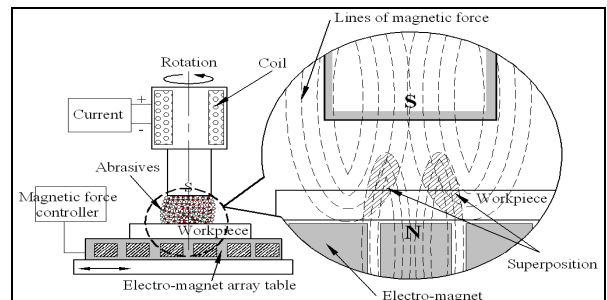


Fig. 2 Schematic diagram for improvement of magnetic flux density

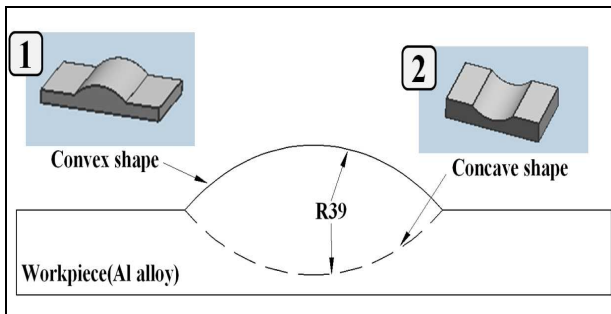


Fig. 3 Configuration of curvature in workpiece

입자의 연마력을 결정짓는 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 범용 해석툴인 ANSYS를 이용하여 곡률형상에 따른 자기력 분포 특성을 시뮬레이션하고 비자성체 표면에 발생하는 자기력 향상을 위한 전자석 극성배열을 결정하였다.

Fig. 3은 곡률 자기연마실험에 적용된 공작물의 형상 및 곡률을 나타낸다. 여기서 곡률의 형상은 반경 39의 볼록형상과 동일한 곡률의 오목형상으로 이루어졌다. 곡률 반경의 선정은 자기연마 공구의 끝단이 가지는 반경(R60, R30)에 적용이 가능한지의 여부를 토대로 선정하였다. 자기력 분포에 대한 시뮬레이션 구성은 실제 제작된 제 2세대 자기연마 공구와 전자석 테이블의 사양을 토대로 이루어졌다. 시뮬레이션의 구성은 곡률형상의 공작물과 자기연마 공구 그리고 5열로 구성된 전자석으로 이루어져 있다. 공구에서는 1000회의 권선수로 감긴 코일이 감겨있고 5.0A의 전류가 통전된다. 반면, 전자석은 코일이 4750회 감겨있고 0.08A의 전류가 공급되고 있다. 자기력 분포특성은 공작물에 발생하는 자속밀도의 크기로 분석하였고, 자기력 향상을 위해 전자석의 극성배열 조합을 변화시켰다. 극성배열의 조합은 공구 중심부 하단에 N극이 단독으로 걸리는 경우가 있고, S-N-S극으로 서로 조화를 이루어 걸리는 경우와 마지막으로 S-N-N-N-S로 5개의 전자석이 N극을 중심으로 S극을 생성하는 방법이 적용되었다.

3.2 볼록형상의 자기력 분포특성

볼록형상을 가지는 공작물의 표면에 발생하는 자속밀도의 크기에 대한 시뮬레이션 결과를 Fig. 4-6에 나타내었다.

Fig. 4의 경우 공작물 반대편에 설치된 전자석의 극성이 공작물의 중심에서만 N 극으로 존재할 때 공구와 공작물 사이에 최대 156.8mT가 발생하였다. 이때 공구는 공작물의 곡률 경사부분에 위치할 때의 자속밀도 특성을 나타낸다. Fig. 5는 전

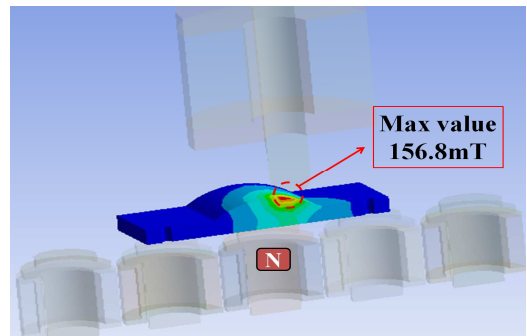


Fig. 4 Magnetic flux density(N pole)

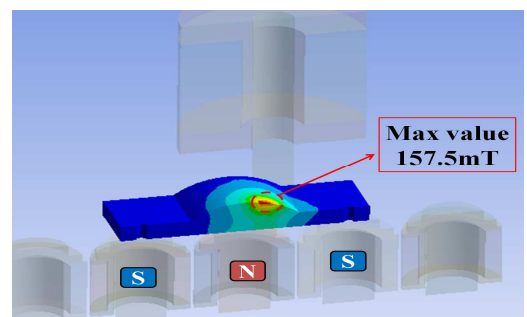


Fig. 5 Magnetic flux density(S-N-S pole)

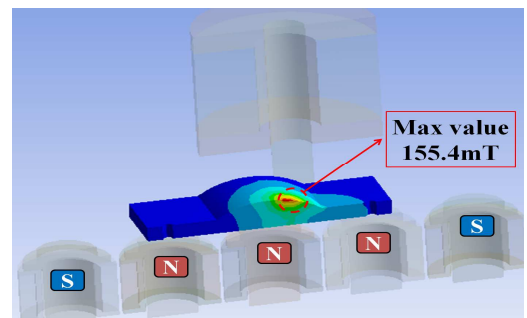


Fig. 6 Magnetic flux density(S-N-N-N-S pole)

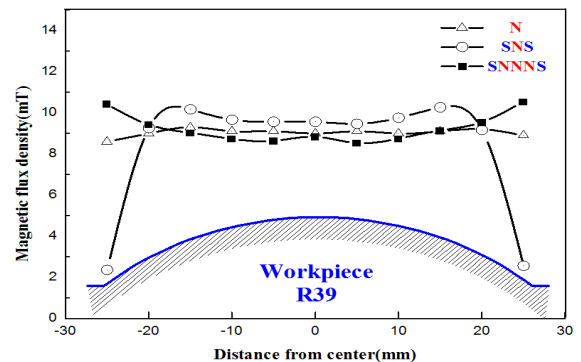


Fig. 7 Experimental verification of magnetic flux density

자석이 S-N-S로 배열되었을 때의 자속밀도 분포를 나타낸다. 최대 자속밀도는 공구의 끝단에 위치한 공작물 표면에 발생하고 그 값은 157.5mT이다. 또

한 전자석의 배열이 S-N-N-N-S일 때 Fig. 6과 같이 S-N-S배열과 동일한 위치에서 최대 155.43mT가 생성된다. 이러한 결과는 공작물의 곡률이 39일 때 S-N-S의 전자석 배열이 자기력 향상에 가장 우수함을 나타낸다. Fig. 7은 접촉식 테슬라메타(TM-701, Kanetec)을 이용하여 측정한 자속밀도 분포를 보여준다. 이때 결과는 공구의 자속밀도 간섭을 제외한 공작물표면의 자속밀도로서 S-N-S배열이 가장 높은 자속밀도를 나타낸다. 이러한 결과는 시뮬레이션에 의한 예측 결과와 잘 일치한다.

3.3 오목형상의 자기력 분포특성

오목형상을 가지는 공작물의 자기력 분포특성평가를 위한 시뮬레이션 작업을 수행하였다. 그 결과 Fig. 8은 N극의 전자석이 단독으로 곡률 아래에 작용할 경우의 자속밀도 분포를 나타내고 최대 127.78mT의 자속밀도가 공작물 표면에 생성된다. 반면 Fig. 9와 같이 S-N-S극의 배열적용 되었을 경우 최대 126.44mT가 공구 끝단의 공작물 표면에 발생하였다. 그리고 Fig. 10과 같이 최대 130.4mT의 자속밀도가 생성되었다. Fig. 11은 실험적 검증을 통한 오목형태의 곡률에서의 자력분포도를 나타낸것이다.

4. 자기력 분포에 따른 표면거칠기 변화

4.1 볼록형상의 자기연마 가공특성

시뮬레이션을 통해 곡률형상에서의 자속밀도 변화를 관찰한 결과 볼록형상의 곡률을 가지는 공작

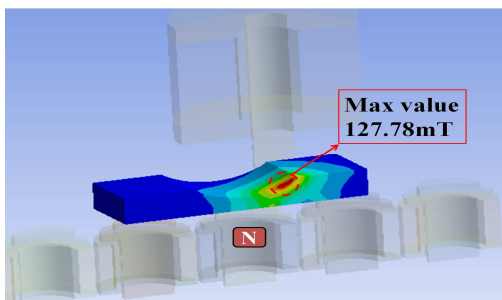


Fig. 8 Magnetic flux density(N pole)

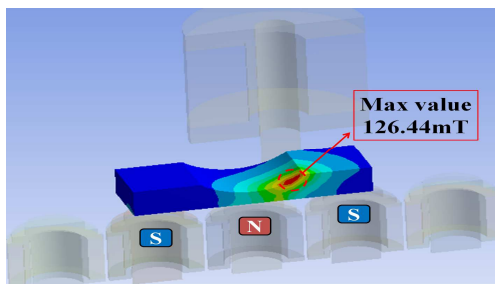


Fig. 9 Magnetic flux density(S-N-S pole)

물에서는 전자석이 S-N-S의 배열을 가질 경우 가장 높은 자속밀도를 가짐을 확인하였다. 반면 오목형상의 곡률을 가지는 공작물에서는 S-N-N-N-S의 전자석 배열에서 가장 높은 자속밀도를 확인할 수 있었다.

따라서 본 연구에서는 이러한 결과를 바탕으로 각 공작물 형상에서 자속밀도의 분포에 따른 자기연마 가공특성을 분석하고자 하였다. 시뮬레이션의 조건과 동일하게 구성된 공작물을 전자석 테이블에 설치하고 Table 1에 나타난 실험조건을 적용

Table 1 Experimental conditions for MAP of curvature

Item	Conditions
Workpiece	Al6061 (aluminum alloy)
Magnetic abrasive	GC grain(16 μm)+Iron powder (150 μm)+silicone gel(300,000cs) - 2.5g(one time)
Magnetic tool	Coil turns(1.2mm, 1000 th)
CNC	3 axis machining center (DMV-350S)
Electro-magnet table	32EA electro-magnet array (max. 0.8A)
Power supply	50V, 5A

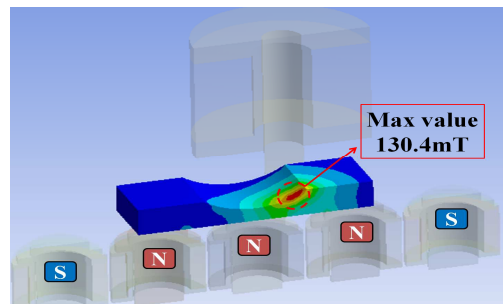


Fig. 10 Magnetic flux density(S-N-N-N-S pole)

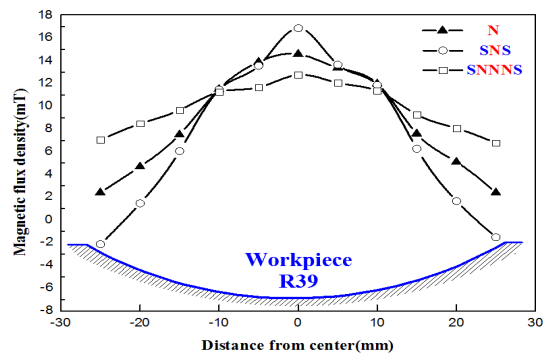


Fig. 11 Experimental verification of magnetic flux density for concave shape



Fig. 12 Experimental setup for 2nd generation MAP

하였다. 공작물은 알루미늄 합금으로 볼록 및 오목형상의 공작물을 CNC작업을 통해 제작하였고 적용된 자기연마 입자는 입도가 1500인 GC 연마 입자와 자성입자인 철분말을 점도가 300,000cs인 실리콘 겔과 혼합하여 사용하였다. 이는 공구의 회전력에 의해 공구에서 이탈하는 연마입자를 최소화 하기 위함이다. 그리고 공구에 생성되는 자속밀도를 최대 생성값인 150mT로 고정하기 위하여 5A의 전류를 공구의 코일에 인가하였다.

Fig. 12는 실험을 위해 구성된 실험장치를 보여 준다. 실험은 3축의 CNC에 설치된 자기연마 공구에 의해 수행되었다. Fig. 13은 볼록형상을 가지는 공작물의 가공경로를 나타낸다. 가공은 직선평면을 가공하며 이동하다가 경사면을 오르는 route 1과 곡률의 정상부분인 route 2, 그리고 경사면을 내려가는 route 3으로 이루어 졌다. 총 가공시간은 공구경로를 20회 반복하는 시간으로 하였다.

실험의 결과는 각 공구경로에서의 표면거칠기 향상값으로 나타내었다. 자기연마 공정에서 공정효율은 표면거칠기의 평탄화 정도로 나타낼 수 있기 때문이다. 결과는 Fig. 14에 나타난 것과 같다. 전체적으로 각 가공경로에서 전자석의 배열이 S-N-S일 때 다른 배열의 경우보다 높은 표면거칠기 향상을 나타내었다. 또한 route 1에의 표면거칠기 변화가 다른 경로에서 보다 높은 경향을 보인다. 이러한 결과를 종합해 보면 볼록형상의 곡률 자기연마에서 상승경로에서는 연마입자들이 공작물에 작용하는 절삭력이 상승하여 하강경로보다 약 40% 높은 가공효율을 나타내었다. 또한 전자석 테이블에 의한 자속밀도 향상으로 자기력 향상이 가장 높게 나타나는 S-N-S의 배열에서 N극, S-N-N-S극 배열보다 높은 가공효율을 나타냄을 확인할 수 있었다.

4.2 오목형상의 자기연마 가공특성

오목형상에서의 자기연마 가공특성 결과도 볼록형상의 특성평가와 같이 각 가공경로에 따른 표면

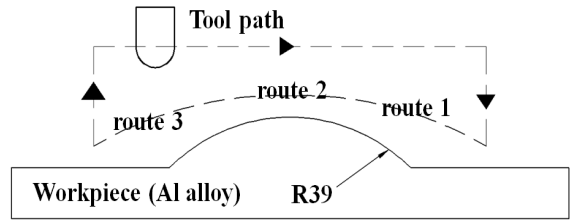


Fig. 13 Tool path of MAP for convex shape

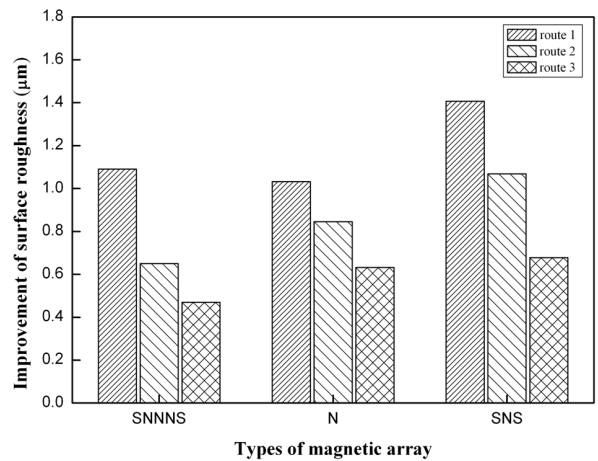


Fig. 14 Improved surface roughness after MAP

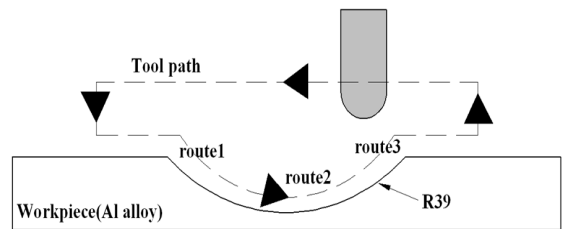


Fig. 15 Tool path of MAP for concave shape

거칠기의 변화로 나타내었다. 가공경로에서 route 1은 공구의 하강경로를 나타내고 route 2는 곡률 중심경로를 마지막으로 route 3은 상승경로를 나타낸다. 이때 적용된 가공조건은 볼록형태의 자기연마 조건과 동일하다. 총 가공시간은 공구경로를 20회 반복하는 시간으로 하였다. Fig. 15는 공작물의 곡률 형상과 공구경로를 나타낸 것이다.

실험의 결과는 Fig. 16에서 나타난 것과 같이 전체적으로 공구경로와 무관하게 전자석배열이 S-N-N-N-S일 때 가장 높은 표면거칠기 향상을 나타낸다. 이러한 결과는 오목형태 곡률형상에서의 자속밀도 크기와 동일한 결과이다. 그리고 각 가공경로에 따른 표면거칠기의 변화가 확연히 발생함을 알 수 있다. route 3의 상승경로에서 연마입자에 발생하는 연마압력의 증가로 표면거칠기의 향상이

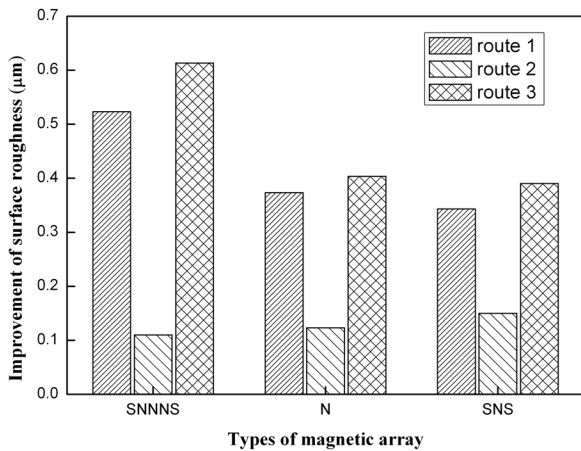


Fig. 16 Improved surface roughness according to arrangement of electro-magnets

route 1의 하강경로에 비해 약 12% 높게 나타났다. 그러나 route 2의 직선경로에서는 매우 낮은 표면 거칠기 향상을 가진다. 이러한 특성은 공구의 끝단의 반경이 곡률반경에 맞추어져 있어 직선경로상에 자기연마입자가 표면에 작용하는 면적이 매우 작기 때문이다.

즉 자기연마 입자가 직선경로상에서 매우 작은 면적만 가공하기 때문에 다른 경로에 비교하여 가공효율이 감소하는 경향을 보이는 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 비자성체의 효율적인 곡면형상 자기연마공정을 위하여 블록 및 오목형상의 공작물 표면에 생성되는 자속밀도의 분포특성 및 전자석 배열을 통한 자기력 향상 방안을 제시하고 이를 실험적으로 검증하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

(1) 블록형상의 비자성체 공작물에 대한 자속밀도 분포특성 시뮬레이션의 결과 전자석의 극성 배열에 따라 공작물 표면에서의 자속밀도 분포가 다르게 분포하였으며, 특히 S-N-S의 극성배열에서 공구와 공작물 사이에 가장 높은 157.5mT의 자속밀도를 가짐을 확인하였다. 실험적 검증 또한 동일한 분포특성을 가짐을 확인하였다.

(2) 오목형상을 가지는 비자성체 공작물에 대한 자속밀도 시뮬레이션 결과 전자석의 극성 배열이 공구의 중심에 대해 S-N-N-S일 때 공구와 공작물 사이에 발생하는 자속밀도가 가장 높게 형성

되었다. 이때의 최대 자속밀도는 130.4mT이다. 또한 실험적 검증결과도 동일한 분포를 따르고 있다.

(3) 블록형상의 비자성체 곡면자기연마 특성평가에서 S-N-S의 극성 배열에서 가장 높은 표면거칠기의 감소를 보였다. 이러한 결과는 자속밀도의 분포의 크기와 동일한 결과이다. 반면 상승 가공 경로에서 하강경로에 비하여 40% 높은 표면거칠기 감소를 보였다.

(4) 오목형상의 비자성체 자기연마 공정에서는 S-N-N-S의 전자석 극성배열에서 가장 많은 표면거칠기의 감소를 보였다. 또한 블록형태의 곡면 자기연마와 동일하게 상승경로에서의 가공효율이 하강경로에서보다 약12% 높게 나타났다. 그러나 직선경로에서는 공구의 반경으로 인해 가공면적이 좁아 가공효율이 현저히 낮게 나타났다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업임 (No. 2011-0003297).

참고문헌

- (1) Yun, Y. G. and Kim, H. N., 2010, "Magnetic Polishing Using Ba-Ferrite Magnetic Substance," *Journal of the Korean Society of machine Tool Engineers*, Vol. 19, No. 4, pp. 491~497.
- (2) Mori, T., Hirota, K. and Kawashima, Y., 2003, "Clarification of Magnetic Abrasive Finishing Mechanism," *Int. J. Materials Processing Tech.*, Vol. 143~144, pp. 682~686.
- (3) Kwak, J. S., 2009, "Enhanced Magnetic Abrasive Polishing of Non-ferrous Metals Utilizing A Permanent Magnet," *Int. J. Machine Tool Manufact.*, Vol. 49, No. 7~8, pp. 613~618.
- (4) Kim, S. O. and Kwak, J. S., 2010, "Study on Performance Improvement in Magnetic Abrasive Polishing Assisted by Silicone Gel Medium," *Trans. of the KSME A*, Vol. 34, No. 10, pp.1339~1554.
- (5) Shimura, T. and Aizawa, T., 1988, "Development of Plane Magnetic Abrasive Finishing Apparatus and its Finishing Performance (2nd Report, Finishing Apparatus Using a Stationary Type Electro-magnet)," *Journal of Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 54, No. 5, pp. 928~933.