

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.11.1643

ISSN 1226-4873

자기연마가공에서 마그네틱 어레이 테이블에 의한 극성 제어[§]

강한성* · 김태희* · 곽재섭**†

* 부경대학교 대학원, ** 부경대학교 기계공학과

Control of Polarity by Magnetic Array Table in Magnetic Abrasive Polishing Process

Han-Sung Gang*, Tae-Hui Kim* and Jae-Seob Kawk**†

* Graduate School, Pukyong Nat'l Univ.,

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

(Received May 13, 2010 ; Revised September 6, 2010 ; Accepted September 11, 2010)

Key Words : Magnetic Abrasive Polishing(자기연마), Magnetic Flux Density(자속밀도), Magnetic Array Table(마그네틱 어레이 테이블), Electro Magnet Analysis(전자기 해석)

초록: 비자성체의 자기연마 공정에서는 공작물 표면에 발생하는 자속밀도가 매우 낮아 자기연마입자에 작용하는 절삭력이 현저히 낮아진다. 따라서 공작물 반대편에 전자석을 설치하여 공작물 표면의 자속밀도를 효과적으로 증가시킬 수 있다. 본 연구에서는 전자석 배열 테이블을 비자성체의 자기연마에 활용하기 위해 전자석 배열에 따른 자속밀도 및 극성변화에 대한 시뮬레이션 및 실험적 검증을 수행하였다. 그 결과 전자석이 같은 극성을 가질 때 보다 중심부분 전자석을 기준으로 주변 전자석이 반대의 극성을 가질 때 중심부분의 전자석에서 가장 높은 자속밀도를 가지는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract: It is very difficult to polish non-magnetic materials by the magnetic abrasive polishing (MAP) process because magnetic force is required for MAP, but the magnetic force for non-magnetic materials is low. In this study, we aimed to develop a magnetic array table and control the magnetic polarity such that the magnetic force can be increased for the MAP of non-magnetic materials. The newly designed magnetic array table has 32 electro magnets, and the magnetic polarity of each electro-magnet can be easily controlled by changing the electric polarity. It was analytically verified that the magnetic flux density of non-magnetic materials can be varied by varying the applied magnetic polarity

- 기호설명 -

1. 서론

- A : 전류량
- B : 자속밀도
- F : 자기력의 세기
- H : 자장의 세기
- I : 전류량
- n : 코일 권선수
- S : 연마입자의 접촉면적
- f_n : 법선방향 힘
- μ_0 : 공기중 투자율
- μ_{fm} : 입자에 대한 투자율

자기연마법은 기존의 연마방법과 다르게 매우 유연성을 지닌 공구를 사용하여 연마하는 방식이다. 이때 사용되는 공구는 자성 입자와 비자성의 연마입자를 용융결합 또는 단순 혼합하여 사용된다.⁽¹⁾ 자기연마입자는 전자기장의 영향으로 인해 공작물과 공구사이에 브러쉬 형태로 배열되고, 공구의 회전력에 의해 연마공정을 수행한다.⁽²⁾ 가공은 공구의 회전력과 코일에 인가되는 전류에 의해 생성되는 자기력에 의해 진행되기 때문에 자기력의 세기는 자기연마의 성능과 매우 밀접한 관계를 가진다. 선행 연구를 통하여 전류의 공급량이 클수록 표면거칠기 및 MMR(금속제거율)이 개선된다는 것을 확인 할 수 있었다.⁽³⁾ 그러나 알루미늄이나 스테인레스 같은 비자성체의 자기연

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 생산및설계공학부문 춘계 학술대회(2010. 4. 22.-23., 제주 라마다프라자) 발표논문임

† Corresponding Author, jskwak5@pknu.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

마공정에서는 자성체보다 자기연마 공정의 효율이 현저히 감소함을 발견 할 수 있었다. 따라서 비자성체의 자기연마에서는 자기력 향상을 위한 방안이 적용되어야 하며, 선행연구결과 영구자석을 이용하여 공작물 표면의 자속밀도를 향상시킬 경우 표면거칠기의 향상에 좋은 것으로 나타났다.⁽⁴⁾

본 연구에서는 비자성체 자기연마의 자기력 향상을 위하여 비자성체 재료 아래에 전자석을 배열하고, 배열된 전자석의 순차적인 제어를 통해서 한정된 범위에서 자기력을 향상시키는 마그네틱 어레이 테이블을 개발하고자 한다. 마그네틱 테이블에 설치된 전자석은 각각의 극성에 따라 극성 및 자속밀도가 변화한다. 따라서 극성 변화에 따른 자속밀도의 변화는 CAE해석을 통해 분석하고 실험을 통해 검증하여 비자성체의 자기연마에 적합한 자속밀도 형성 조건을 찾고자 한다.

2. 자기력 형성

2.1 자기연마에서의 자기력 형성

자기연마는 Fig. 1과 같이 자기연마 입자가 자

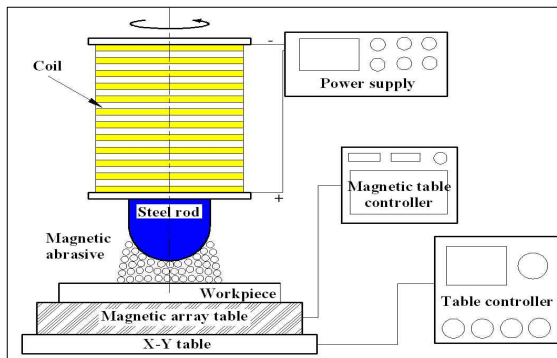


Fig. 1 Configuration of magnetic abrasive polishing

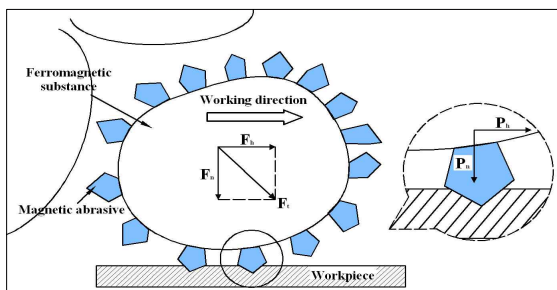


Fig. 2 Cutting force in magnetic abrasive polishing

화된 인덕터 공구에 일렬로 배열하여 유연성을 가진 브러쉬 역할을 수행한다. 따라서 자기연마의 가공성은 공구에 발생하는 자속밀도의 크기와 밀접한 관련이 있다.

자속밀도는 자기장 안의 어떤 점에서 자기장에 수직인 단위면적당의 자기력선의 수를 나타낸다. 즉, 전류의 세기가 증가할수록 자속밀도는 증가하기 때문에 식 (1)의 관계가 성립한다.⁽⁵⁾

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

여기에서 B 는 자속밀도(Tesla), μ 는 투자율(H/m), H 는 자장의 세기(A/m)를 나타낸다. 또한 자속밀도는 자장의 세기에 따라 이력곡선(Hysteresis loop)을 따른다. 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.

Fig. 2에 도시한 것과 같이 자기연마입자에 의해서 공작물에 작용하는 법선 방향의 전체 힘 f_n 과 공구의 회전에 의해 발생하는 접선 방향의 전체 힘 f_h 의 합력 f 를 받게 된다. 이때의 힘 f 에 의해 연마 가공이 이루어진다. 가공 중 실제 공작물의 표면을 연마하는 요소는 연마입자이다. 이러한 연마 입자 1개는 법선방향의 힘 P_n 과 접선방향의 힘 P_h 를 받는다. 따라서 연마 입자군이 공작물에 미치는 힘은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_n = mP_n, \quad f_h = mP_h \tag{2}$$

여기서 m 은 가공 중 공작물에 접촉하는 총 연마입자의 개수를 나타낸다. 또한 여기에서 자성 연마 입자군과 공작물 사이에 발생하는 전체 법선 방향의 힘 f_n 은⁽⁵⁾

$$f_n = \frac{B^2}{2\mu_0} \left(1 - \frac{1}{\mu_{fm}}\right) S \tag{3}$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 S 는 자성연마 입자와 공작물이 접촉하는 전체 면적을 나타낸다. 그

리고 자성연마 입자군과 공작물 사이에 발생하는 전체 접선방향의 힘 f_h 는⁽⁶⁾

$$f_h = \frac{dW}{dx} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 x 는 자력이 발생하는 공구의 중심에서 원주 방향의 거리를 나타낸다. 또한 W 는 입자군에 작용하는 인장력, 자기력, 반발력에 의해 발생하는 에너지 값을 나타낸다.

2.2 자기연마에서의 자기력 형성

전자석을 이용한 자기력 형성은 전자석 코일에 인가되는 전류에 의해 형성된다. 그리고 전자석에 코일 중심에 철심을 넣으면 철심의 자화로 인해 자기 특성은 현저히 증가하게 된다. 이러한 현상은 코일에 전류가 흐르면 코일 속은 자화되며 그 자계 중에 있는 철심도 자화되어 자석이 되기 때문에 전체 자계는 코일이 만드는 자기력과 철심에 의한 자기력의 합이 되어 자기 특성이 크게 증가하기 때문이다.

전자석에 형성되는 자기력의 세기는 코일의 권선수와 코일에 인가되는 전류의 크기에 따라 증감한다. 따라서 전자석의 자기력 세기는 식 (5)와 같이 나타난다.

$$F = nI \quad (5)$$

여기서 F 는 자기력의 세기(AT), n 은 코일의 권선수(Turn), I 는 전류값(A)을 나타낸다.

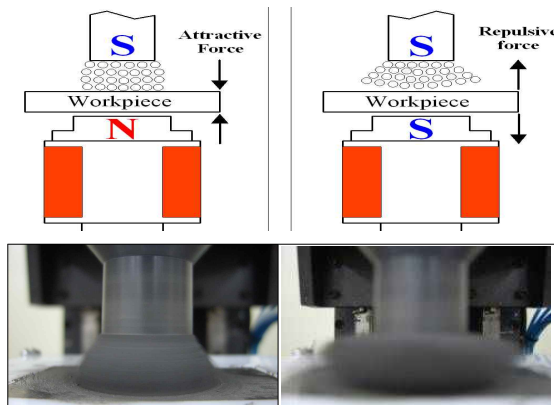


Fig. 3 Shape of magnetic abrasive brush according to the change of polarity

자기연마 공정에서 공구와 전자석의 극성에 따른 자기연마입자의 배열은 Fig. 3과 같이 나타난다. 공구의 극성을 S극으로 설정하였을 때, 전자석의 극성을 공구와 동일한 S극으로 하였을 때는 척력에 의해 입자가 분산되는 특성을 보이는 반면, N극으로 하였을 때는 공구와 공작물 사이에 인력이 강하게 발생하여 입자들이 수직에 가깝게 배열한다. 즉 자기력의 극성에 따라 자기연마 입자의 배열 형상이 변화한다.

3. 자기력 시뮬레이션 및 검증

3.1 자속밀도 시뮬레이션

마그네틱 어레이 테이블에 적용된 전자석의 자속밀도 형성 특징을 분석하기 위하여 CAE를 이용한 전자기장 해석을 활용하였다. Fig. 4는 시뮬레이션을 위해 모델링된 전자석을 나타낸다. 또한 Table 1은 전자석 및 자속밀도 측정 가우스미터의 구체적인 사양을 나타낸다. 시뮬레이션에 적용된 공작물은 비자성체로 투자율을 1로 적용하였다. 시뮬레이션은 동일 극성(N)의 전자석이 1개에서 3개까지 일렬로 놓였을 때와 극성이 교차하는 전자석 3개가 일렬로 정렬했을 때의 자속밀도를 나타낸다.

시뮬레이션에 대한 결과는 Fig. 5와 같다. 전자석이 1개일 경우에는 Node의 수는 41206개이고 Element의 수는 23719개로 모델링 되었다.

Table 1 Conditions of simulation for electro-magnet

Items	Conditions
Current	0.28A
Voltage	47V
Number of turns	4750
Workpiece	STS316
Magnet Core	HSS
Coil	Copper
Coil Bobbin	Nylon

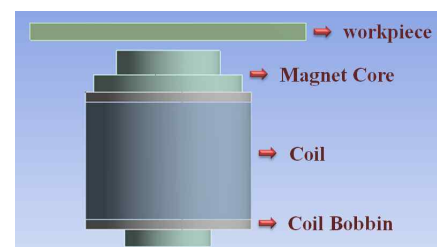


Fig. 4 Modeling of electro-magnet for simulation

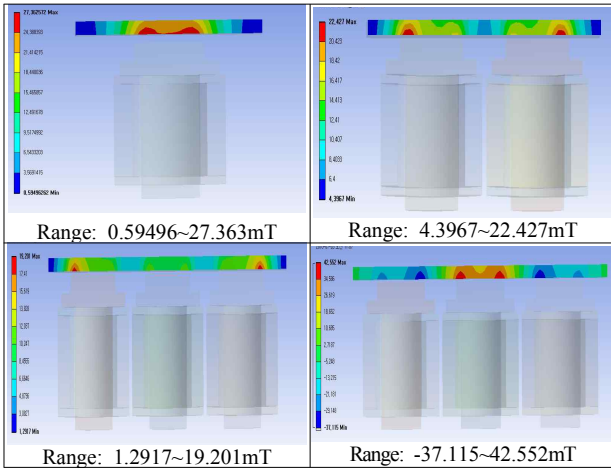


Fig. 5 Simulation results for magnetic flux density on a workpiece according to the array of electro-magnets

해석 결과는 자속밀도가 전자석 중심부분이 최고 27.363mT로 나타나며 양 끝단으로 갈수록 낮아짐을 확인 할 수 있다. 전자석이 2개일 경우에는 Node의 수는 97345개이고 Element의 수는 57112개이며 해석 결과는 자속밀도가 각 전자석의 중심부분에서 22.427mT로 크게 나타나며 전자석 사이와 양끝단으로 갈수록 낮아 졌다. 전자석이 3개일 경우에는 Node의 수는 194034개이고 Element의 수는 96649개이고 해석 결과는 3개의 전자석이 같은 극성으로 배열이 되었을 때는 자속밀도가 양쪽 전자석의 중심부분에서 19.201mT를 나타내며 가운데 전자석의 중심 부분은 자력선의 간섭으로 인해 양쪽보다 낮게 나타나고, 3개의 전자석에서 양쪽 전자석의 극성을 반대극성으로 배열하였을 때는 자속밀도값이 가운데 전자석의 중심부분에서 42.552mT로 같은 극성을 배열하였을 때보다 약 3배정도의 큰 자속밀도값을 얻을 수 있다. 반면 양쪽 전자석의 자속밀도값은 -37.115mT로 양쪽으로 갈수록 자속밀도가 감소하는 특성을 보인다. 여기서 (-)의 의미는 S극성의 방향을 나타낸다.

3.2 시뮬레이션의 검증

자기력 형성 특징 및 크기분석과 시뮬레이션 결과의 검증을 위하여 Fig. 6과 같이 테슬라 메타(TM-601, KANETEC)를 활용하여 Fig. 7과 같은 결과를 확인하였다. 그 결과 검증값은 시뮬레이션값보다 다소 큰 자속밀도를 나타내고 있으나, 전체적으로 시뮬레이션의 결과와 일치하는 유형

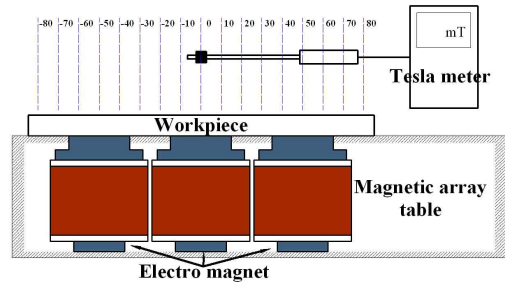


Fig. 6 Measuring method for magnetic flux density

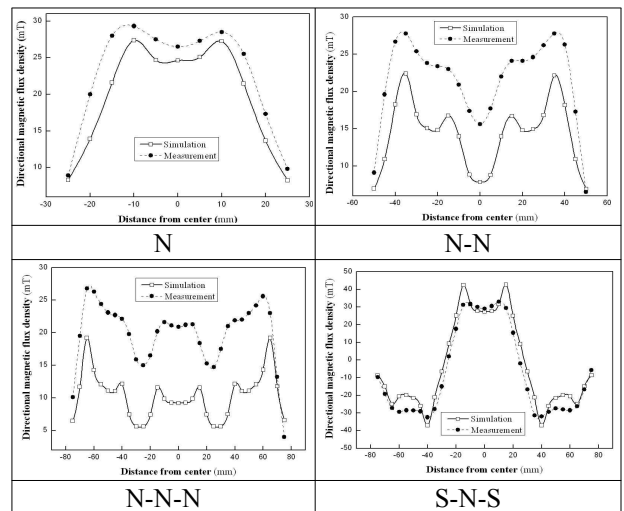


Fig. 7 Experimental verification of magnetic flux density according to array polarity

을 나타낸다. 자속밀도의 차이는 같은 극성이 배열되어 있을 때 크게 나타나며 이러한 현상은 시뮬레이션상에서 같은 극성에서의 간섭현상이 정확히 반영되지 못했기 때문이다. 자속밀도의 세기는 전자석의 개수에 무관하게 최대 29mT를 나타내고 있다. 3개의 전자석이 배열되었을 때 양쪽전자석을 가운데 전자석과 반대극성일 경우에는 약 35mT로 극성 교차를 통해 약 6mT정도 큰 자속밀도를 나타냈다.

4. 어레이 테이블의 자기력 형성 특징

비자성체의 자기연마 공정에서 공작물의 두께가 일정하지 않은 곡면과 같은 형상에서 두께에 두꺼운 부분에서 더욱 많은 자기력 향상이 필요로 한다. 따라서 국소적인 면적에 대한 자기력 향상 제어가 필요하다. 따라서 각 전자석 행렬의 극성 변화에 따른 자속밀도 형성 특징을 실험을 통해 분석하고 효율적 자기력 향상 방안을 제시하고자

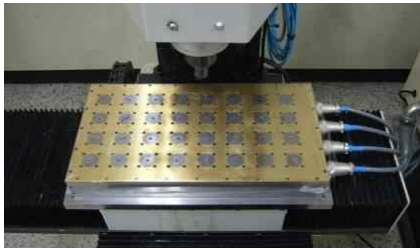


Fig. 8 Magnetic array table composed of electro-magnets

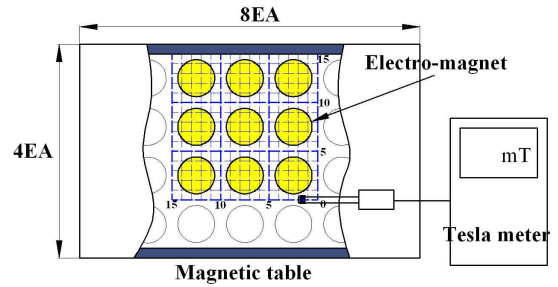
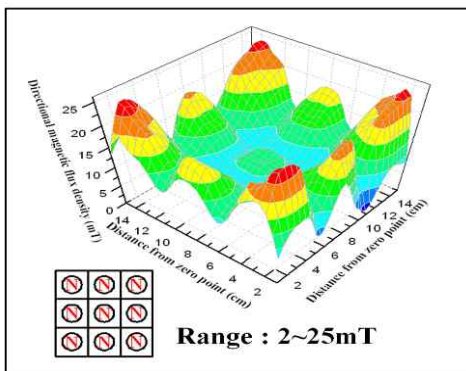
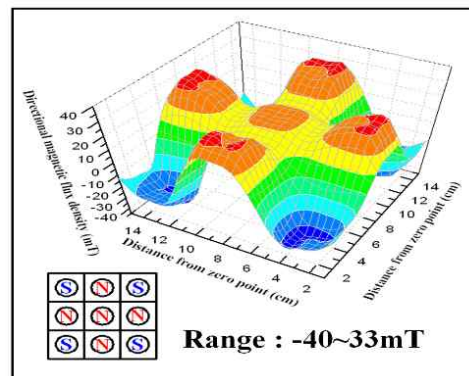


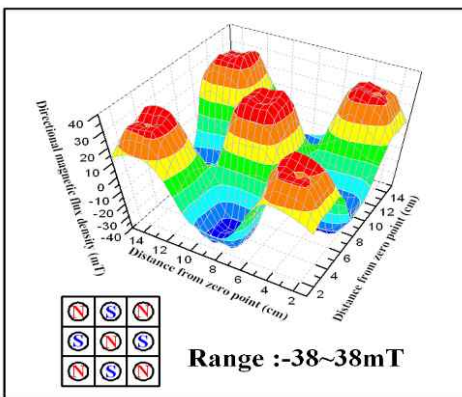
Fig. 9 Measuring method for magnetic flux density of magnetic array table



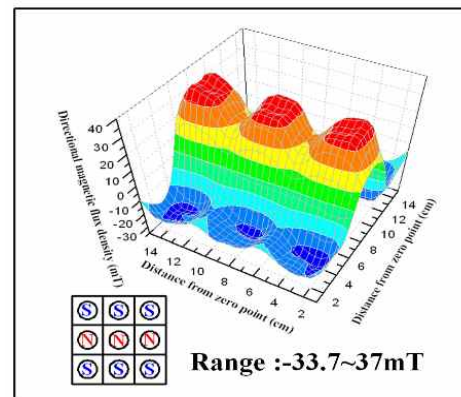
(a)



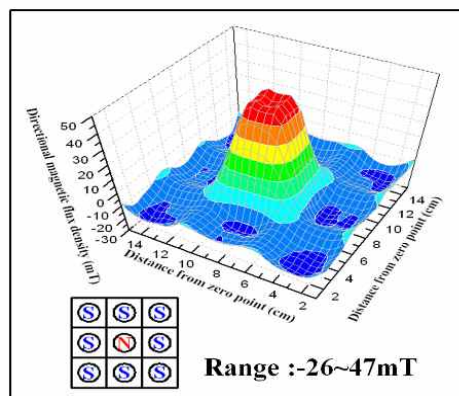
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 10 Magnetic flux density on electro-magnets array table

한다. Fig. 8은 32개의 전자석으로 이루어진 마그네틱 어레이 테이블의 설치형상이다. 각각의 전자석은 독립적으로 극성을 변화시킬 수 있다. 테이블을 이용한 자기연마에서 가공물의 크기가 큰 경우에는 자기연마의 공구의 경로에 따른 공작물 표면의 효율적인 자기력 제어가 필요하며 최소의 공간에서 최대효과를 내기 위해 최소 3X3배열이 필요하다.

그리고 Fig. 9는 3X3의 전자석 배열에서 자기 극성의 구성변화에 따른 자속밀도 측정 방법을 나타낸다. 오른쪽 끝단의 좌표점을 기준으로 각 좌표점에 대해 공작물 표면의 자속밀도를 측정하였다. 측정 결과 Fig. 10(a)와 같이 9개의 전자석이 동일하게 N극을 나타낼 때에는 최대 25mT의 자속밀도가 배열의 끝단 전자석에 치우쳐 나타나며, 중심부위에 위치한 전자석은 동일 방향의 자기력선의 중첩 현상으로 자속밀도가 상대적으로 낮게 나타난다. 다음은 Fig. 10(b)와 같이 십자가 형태로 N극이 배열 되었을 경우에도 중심부위에 위치한 전자석의 자속밀도가 약 20mT로 끝단에 위치한 N극의 최대 33mT라 보다 낮다. 또한 N극성 보다 모서리 부위의 S극에서 최대 40mT 자속밀도가 높게 나타난다. Fig. 10(c)와 같이 중심부에 N극이 존재하고 S극이 N극 사이사이에 위치할 경우 극성이 다르게 존재 할 뿐 최대 38mT의 고른 자속밀도를 나타낸다. Fig. 10(d)와 같이 중심선에는 N극이 외곽에는 S극이 일렬로 배열될 경우 N극성에는 최대 37mT가 S극에서는 다소 낮은 33mT가 발생한다. 마지막으로 Fig. 10(e)와 같이 중심부에 극성이 N극이고 주위의 모든 극성이 S극일 경우 중심부위의 N극에서 주위의 S극의 최대 26mT보다 약 2배정도 높은 47mT의 자속밀도가 생성된다. 이러한 극성 변화에 따른 자속밀도의 변화 형태는 N극과 S극이 교차할 때 모두 같은 극성을 나타내는 때보다 다소 높은 자속밀도를 나타내는 경향이 있다.

5. 결론

본 연구에서는 비자성체 재료의 효율적인 자기연마를 위해 시뮬레이션을 통해 마그네틱 테이블을 설계하고 마그네틱 테이블 전자석의 배열 및 극성변화에 따른 자속밀도 평가를 통해 자기연마를 위한 최적의 극성 조합을 연구하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 전자석 배열과 극성 변화에 따른 자속밀도 시뮬레이션의 결과로 모든 전자석이 같은 극성을

가질 때 보다 중심부분 전자석을 기준으로 주변 전자석이 반대의 극성을 가질 때 중심부분의 전자석에서 가장 높은 자속밀도를 가지는 것을 확인할 수 있었다.

(2) 마그네틱 테이블에서 자속밀도를 측정한 결과로 중심부분 전자석과 주변부분 전자석의 극성이 모두 같은 경우에 최대 25mT의 자속밀도 값을 가지고 중심부분 전자석을 기준으로 주변 전자석이 반대의 극성을 가질 때는 최대 자속밀도 값이 47mT로 모두 같은 극성을 가질 때보다 약 1.5배정도 높게 나타난다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2009-0065020).

참고문헌

- (1) Chang, G. W., Yan, B. H. and Hsu, R. T., 2002, "Study of Cylindrical Magnetic Abrasive Finishing using Unbonded Magnetic Abrasives," *Int. J. Machine Tool Manufact.*, Vol.42, No.5, pp. 575-583.
- (2) Singh, D. K. and Jain, V. K., 2005, "Analysis of Surface Texture Generated by a Flexible Magnetic Abrasive Brush," *WEAR*, Vol. 259, No. 7-12, pp. 1254-1261.
- (3) Shaohui, Y. and Takeo, S., 2004, "A Comparative Study: Polishing Characteristics and its Mechanisms of Three Vibration Modes in Vibration-assisted Magnetic Abrasive Polishing," *Int. J. Machine Tool Manufact.*, Vol. 44, No.4, pp.383-390.
- (4) 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.
- (5) Kim, S. O. and Kwak, J. S., 2008, "Improvement of Magnetic Force and Experimental Verification for Magnetic Abrasive Polishing of Aluminum Alloy," *Trans. of KSMTE*, Vol. 17, No. 5, pp. 23-29.
- (6) 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.