

◆ 특집 ◆ 세라믹 초정밀 가공 기술

세라믹 입자를 이용한 자기연마가공 기술 사례

Magnetic Abrasive Polishing Technology with Ceramic Particles

곽태수¹, 곽재섭^{2,✉}
Tae-Soo Kwak¹ and Jae-Seob Kwak^{2,✉}

¹ 경남과학기술대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Gyeongnam National Univ. of Science and Technology)

² 부경대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Pukyong National Univ.)

✉ Corresponding author: jskwak5@pknu.ac.kr, Tel: +82-51-629-6139

Manuscript received: 2013.11.2 / Accepted: 2013.11.18

Ceramic particles as polishing abrasives are often used in a magnetic abrasive polishing process because they have strong wear resistance. Non-ferromagnetic ceramic abrasives should be mixed with ferromagnetic iron particles for controlling the mixture within a magnetic brush during the polishing process. This study describes the application of the ceramic particles for the magnetic abrasive polishing. The distribution of the magnetic abrasives attached on a tool varies with magnetic flux density and tool rotational speed. From the correlation between abrasive adhesion ratio in the tool and surface roughness produced on a workpiece, practical polishing conditions can be determined. A step-over for polishing a large sized workpiece is able to be selected by a S curve, and an ultrasonic vibration assisted MAP produces a better surface roughness and increases a polishing efficiency.

Key Words: Ceramic Particle (세라믹 입자), Magnetic Abrasive Polishing (자기연마가공), Case Study (사례연구)

1. 서론

산업용 부품들의 정밀도에 대한 요구가 점차 증가하면서 기존 연삭가공(Grinding) 만으로는 제품에서 요구되는 정밀도를 달성하기 어려워지고 있다. 특히 수십 나노미터 이하의 표면거칠기는 특수가공으로 분류되는 전해연마나 CMP등과 같은 폴리싱 기술들이 사용되어야 달성이 가능한 실정이다.

자기연마가공(Magnetic abrasive polishing)은 이러한 산업계의 요구 정밀도를 충족시키기 위한 가공 방법들 중의 하나로, 비교적 간단한 장치의 구성으로 공작물 재질에 크게 구애 받지 않고 수십 나노미터급의 정밀도를 쉽게 얻을 수 있는 장점이

있다.^{1,2} 자기연마가공에서는 고경도의 연마입자를 전자석에 부착하여 공구로 사용하게 된다. 이때 주로 사용되는 연마입자로는 Al_2O_3 , SiC와 같은 세라믹 입자와 CBN이나 다이아몬드 등이 있고, 적용되는 입자의 종류에 따라서 얻어지는 공작물의 정밀도와 표면품질은 달라지게 된다.

본 논문에서는 세라믹 입자들을 자기연마가공의 연마입자로 사용했을 때, 연마입자들이 공구에 부착되는 특성과 우수한 공작물 표면을 얻기 위한 최적 가공조건 선정방법을 설명한다. 또한 다중경로(Multiple passes) 자기연마가공에서 적절한 스텝오버(Step-over)의 선정과 초음파 진동(Ultrasonic vibration)을 부가한 자기연마가공의 효과에 관해서 논하고자 한다.

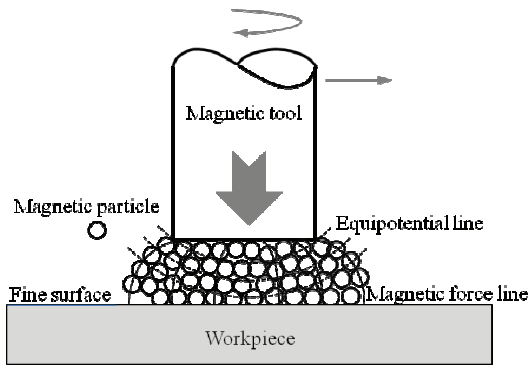


Fig. 1 Concept of typical magnetic abrasive polishing

2. 자기연마가공과 세라믹 입자

2.1 자기연마가공

자기연마가공은 기본적으로는 자기장의 영향을 받는 입자들을 전자석 공구에 구속시킨 후에, 공구의 회전운동을 통해서 공작물의 표면을 정밀하게 다듬질하는 가공기술이다. 결국 전기와 자기의 효과에 기계적 가공을 결합시켜 초정밀 표면을 얻을 수 있는 공정이다.

이러한 자기연마가공의 개념도를 Fig. 1에 간략히 나타내었다. 금속막대에 코일을 감고 직류전원을 인가하면 금속막대는 전자석(Electromagnet)이 되고 이것이 자기연마 공구(Magnetic tool)이다. 이때 공구의 끝단에서는 공구의 길이방향으로는 자기력선(Magnetic force line)이 형성되고, 직각방향으로는 등자위선(Equipotential line)이 생성된다. 이들의 영향 하에 자성입자들이 공구에 부착되어 구속되고, 유연성을 갖는 브러쉬 형상이 된다.

자기연마가공에서 전기장(E)과 자기장(H)의 세기 관계는 맥스웰(Maxwell)의 전자기방정식에 따라 다음과 같이 표현될 수 있다.³

$$E = \frac{\mu_0}{2} \int \chi H \cdot H dv \quad (1)$$

여기서, ν 는 공구에 부착된 입자들의 체적이고, μ_0 는 진공상태에서의 투과상수(Permeability)로 $1.26 \times 10^{-6} \text{ H/m}$ 의 크기이다. 또한 χ 는 자기연마가공에서 입자군의 자화율(Susceptibility)을 나타내고, 입자군의 구성에 따라서 자화율이 달라지게 된다.

2.2 세라믹 입자(Ceramic particle)

자기연마가공에서는 주로 수 내지 수십 마이크로

로미터 크기를 갖는 산화알루미늄이나 또는 탄화규소 세라믹 알갱이가 연마입자로 사용되고 있다. 세라믹 입자들은 자성을 띄지 않기 때문에 자기연마가공에서 연마입자로 활용하기 위해서는 고 점성의 오일 속에 철계 자성입자와 세라믹 입자를 함께 혼합시킨 상태로 사용하거나, 고온의 플라즈마를 이용하여 철계 자성입자를 완전 용융하여 세라믹 입자와 결합시켜 새로운 연마입자를 형성하는 방법이 사용되고 있다.^{4,5} 오일 속에 철계 자성입자와 세라믹 입자를 혼합시켜 사용하는 경우에는 세라믹 입자뿐만 아니라 사용하는 오일의 종류와 점도, 철계 입자의 크기와 사용량 등이 매우 중요한 공정인자로 작용하게 된다.⁶

일반적으로 비자성 세라믹 입자를 철계의 자성 입자와 혼합하여 사용하는 경우, 자기연마가공에서 입자 혼합물의 자화율은 다음과 같다.

$$\chi = \alpha \chi_m + (1-\alpha) \chi_c \quad (2)$$

여기서, χ_m 과 χ_c 는 각각 철계 자성입자의 자화율과 세라믹 입자의 자화율을 나타내고, α 는 전체 입자 혼합물에서 철계 자성입자가 차지하는 체적비(Volume ratio)를 나타낸다.

3. 세라믹 입자에 의한 자기연마 연구 사례

3.1 연마입자의 분포특성

자기연마가공에서는 연마입자들이 공구에 구속되는 형상특성에 따라 자기연마가공의 효율과 얻어지는 표면거칠기가 달라지게 된다. 따라서 공구에 대한 입자들의 분포특성과 자기연마가공 효과의 관계를 명확히 규명하는 연구가 필요하다.⁷

Fig. 2는 자기연마가공에서 100 μm 크기의 철계 자성입자와 8 μm 크기의 탄화규소 세라믹 입자를 혼합하여 사용했을 때, 가공조건에 따른 입자들의 분포특성을 나타낸 것이다. 가공조건으로는 공구의 자속밀도(Magnetic flux density)가 60mT이고, 공구의 회전수는 각각 1000, 1200 및 1800rpm으로 변화시켰다. 동일한 자속밀도에서는 공구의 회전수가 증가할수록 구속되는 입자의 양이 감소함을 알 수 있다. 이는 자기연마가공에서 입자를 구속하는데 필요한 힘인 자기력은 일정한데 반해 회전속도의 증가와 함께 입자를 공구로부터 탈락시키려는 힘인 원심력이 급격히 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 공구에 구속되는 연마입자의 양이 감소하더라도, 그 분포형상은 자기력의 영향을 받

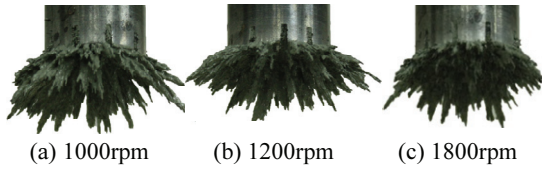


Fig. 2 Magnetic abrasive brushes according to spindle speed (at magnetic flux density of 60mT)

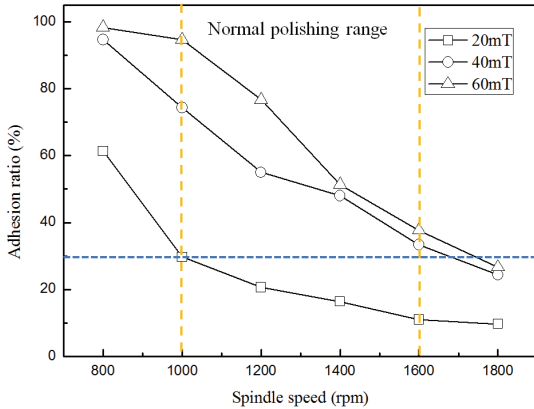


Fig. 3 Adhesion ratio of magnetic abrasives on a tool and determination of a suitable polishing condition

아서 매우 유사한 것을 확인 할 수 있다. 따라서 이러한 분포특성 때문에 공구에 구속되는 연마입자의 양이 다소 감소하더라도 자기연마가공에서는 어느 정도의 가공능력을 발휘할 수 있다고 하는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 자기연마가공에서 공구의 회전속도와 자속밀도의 변화에 따른 연마입자의 구속량 변화를 나타낸 것이다. 예비실험을 통해서 입자의 구속량이 초기 부착량의 30% 미만으로 되면, 표면거칠기의 변화가 급격히 일어남을 확인하였기 때문에, 가공물에서 얻을 수 있는 표면거칠기와 한번 부착으로 작업이 가능한 지속시간을 고려해서, 도시한 것과 같이 적절한 작업조건 범위를 선정할 수 있다.

Fig. 4는 공구의 회전속도 변화에 따른 공작물의 표면거칠기 향상정도(Improvement in surface roughness, ISR)를 나타낸 것이다. 앞서 설명한 바와 같이, 적절한 작업조건 범위에서는 표면거칠기의 향상이 있으나, 1600rpm 이상에서는 표면거칠기의 향상이 급속하게 둔화되는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 연마입자가 자기연마 공구에 구속되는 양과도 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

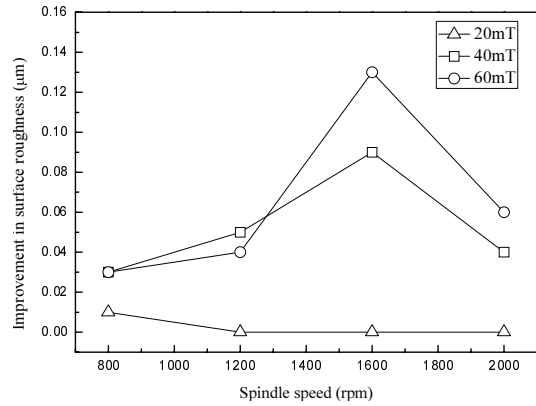


Fig. 4 Improvement in surface roughness according to spindle speed

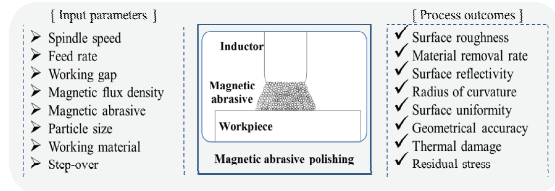


Fig. 5 Input parameters and process outcomes in magnetic abrasive polishing process

3.2 자기연마가공 공정조건 최적화

자기연마가공은 Fig. 5에 나타난 것과 같이, 가공공정에 관여하는 입력 파라미터들이 매우 다양하다. 이들 입력 파라미터는 가공물의 최종 표면 거칠기와 금속제거량 등 다양한 결과에 영향을 미치게 된다. 뿐만 아니라 이들 입력 파라미터들은 가공결과와 복잡한 비선형적인 인과관계를 가지고 있기 때문에 가공조건 선정에 있어서 많은 어려움이 따른다.⁸

Table 1은 이러한 입력 파라미터들을 적용 가능한 실험범위로 설정하여, 표면거칠기의 향상치에 미치는 영향과 최적조건을 선정하기 위한 실험조건표의 예시를 보여주고 있다. 파라미터들의 각 레벨에 사용된 실험조건치들은 현재 사용되고 있는 값과 이를 기준으로 하여 설정 가능한 범위에서의 변화량으로 결정하였다.

실험을 통하여 얻어진 결과를 분석한 그래프를 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 S/N 비(Signal to noise ratio)는 각 실험 파라미터들이 표면거칠기의 향상치에 미치는 효과를 나타내는 것이다.⁹ 어떤 입력 파라미터에서 S/N 비의 변화가 클수록 표면거칠기

Table 1 Polishing parameters and levels for experiments

Polishing parameters	Levels		
	1	2	3
A. Rotational speed, (rpm)	900	1200	1500
B. Magnetic flux density, (mT)	52	79	82
C. Applied table current, (A)	1.5	2.0	2.5
D. Working gap, (mm)	1.0	1.5	2.0

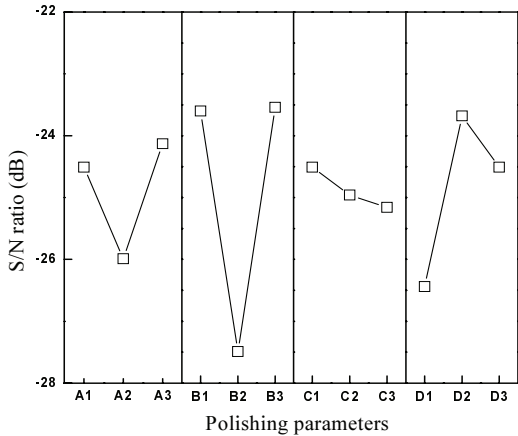


Fig. 6 Analysis of main effect for polishing parameters

의 향상치에 미치는 영향이 큼을 의미한다. 따라서 본 실험에서는 자속밀도가 공작물의 표면거칠기 향상에 가장 크게 영향을 미침을 알 수 있다. 또한 각 파라미터에서 최대의 S/N 비를 갖는 레벨들의 조합이 본 실험범위 내에서 표면거칠기의 향상치를 가장 좋게 할 수 있는 최적 자기연마가공 조건이 되기 때문에, 쉽게 최적 가공조건을 선정할 수 있고 이러한 방법은 산업현장에서도 활용이 가능 하리라 판단된다.

3.3 다중경로 가공에서 스텝오버 결정

최근 산업계의 요구에 의해서 대면적 공작물의 초정밀 가공기술에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 자기연마가공을 이용한 대면적 공작물의 가공에서는 단일 스트로크(Stroke)로 공작물 전체 표면을 가공하는 것이 거의 불가능하기 때문에, 단일 경로를 수회 또는 수십회 반복 가공하는 다중경로 가공이 필수적이다. 이때 매 스트로크 마다의 이송량, 즉 스텝오버의 선정이 가공물의 표면의 품질을 결정하는 매우 중요한 요소로 작용한다. Fig. 7은 대면적 공작물의 자기연마가공에서 스텝오버의 개념을 도식적으로 나타낸 것이다.

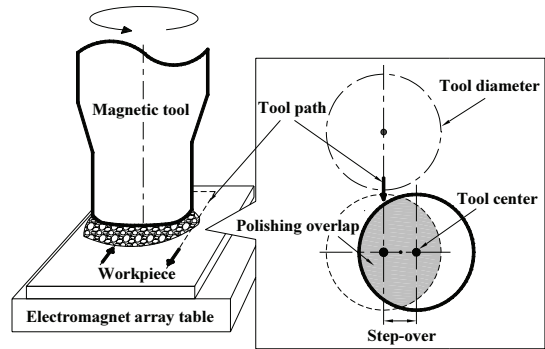


Fig. 7 Step-over in magnetic abrasive polishing for multiple passes of large sized workpiece

대면적 공작물의 자기연마가공을 위한 스텝오버의 결정에 있어서 회전공구의 반경거리에 따른 가공속도의 변화와 자속밀도의 차이에 의한 자기력의 미소 변화도 고려하여야 할 매우 중요한 사항이다. 대면적 가공에서는 이들의 변화 때문에 가공물의 표면거칠기가 크게 달라질 수 있다. 또한 대면적 가공에 적용한 스텝오버에 따라서 가공물 전체 표면에서 표면거칠기의 균일도(Uniformity)가 결정된다.

일반적으로 대면적 자기연마가공에서는 경험에 의해서 스텝오버량을 자기연마 공구의 반경보다 약간 작게 설정해서 사용하고 있다. 그러나 이러한 경험적 기준은 특수한 가공재료나 가공환경에서는 적용이 곤란한 경우도 많다. 따라서 실험적으로 공구의 반경거리에 따른 표면거칠기를 측정하여, 반경거리와 표면거칠기 향상치의 상관관계를 나타내는 수학적 모델을 개발하고 이에 근거하여 스텝오버량을 결정하는 것이 필요하다.¹⁰

Fig. 8은 대면적 공작물의 다중경로 자기연마가공에서 반경거리에 따른 표면거칠기 향상정도를 예시적으로 나타내었다. 그래프에서 알 수 있는 것처럼, 대면적 공작물 표면의 표면거칠기 향상정도는 알파벳 문자 S자 형상의 곡선을 하고 있음을 알 수 있다. 또한 공구가 스텝오버량 만큼 이동하면 연속되는 두 스트로크 사이에서 S곡선이 충족되는 구간이 존재하고, 이곳에서는 공작물의 표면거칠기 향상정도가 크게 증가할 뿐만 아니라 자기연마가공 된 표면의 균일도가 향상됨을 보여준다. 이는 최적 스텝오버량의 결정을 통해서 대면적 공작물의 표면거칠기 향상정도가 균일하게 얻어질 수 있음을 나타낸다.

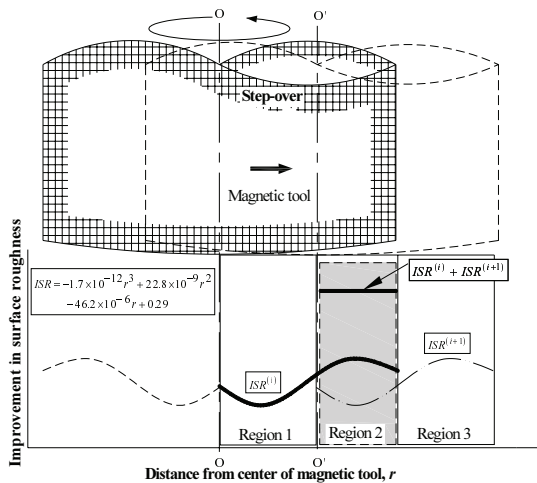


Fig. 8 S curve for improvement in surface roughness

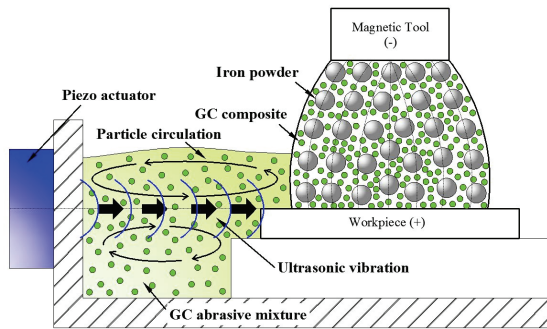
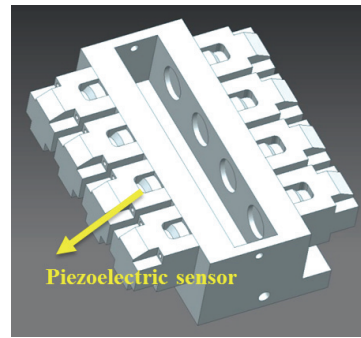


Fig. 9 Principle of ultrasonic vibration assisted MAP

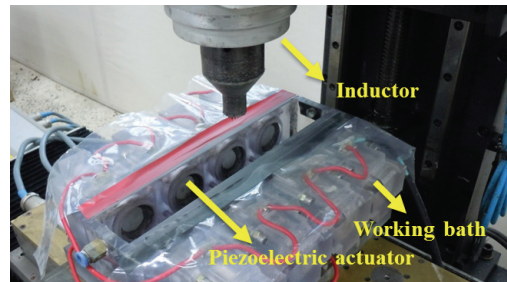
3.4 초음파 진동이 부가된 자기연마가공

자기연마가공의 효과를 증대시키기 위한 방법으로, Fig. 9에 도시한 것과 같이 자기연마가공에 초음파 진동을 추가적으로 부가하는 것이 가능하다. 초음파 진동은 기본적으로 16kHz 이상의 주파수 범위에서 주기성을 갖는 고주파수의 음파로, 자기연마가공과 같이 미세한 입자들이 공구의 회전으로 인하여 공작물 표면을 가공할 때 외부에서 추가적인 초음파 진동이 부가된다면 입자들의 상대운동을 더욱 증가시켜 가공효과를 극대화할 수 있다. 최근에는 초음파 진동을 응용하는 대부분의 산업용 장치에서는 압전센서(Piezoelectric sensor)를 이용하여 그 기능을 구현하고 있다.

Fig. 10은 자기연마가공에서 초음파 진동을 부여하기 위해 사용한 압전 구동기와 실험장치의 구성을 나타낸 것이다. 압전 구동기는 가공부의 좌우에 각각 4개씩 8개의 압전센서들을 배치하였고,



(a) Piezoelectric actuator for ultrasonic vibration



(b) Experimental setup

Fig. 10 Piezoelectric actuator and experimental setup for ultrasonic vibration assisted MAP

외부 전원장치에 의해서 진동을 제어할 수 있도록 제작 하였다. 또한 초음파 진동의 전달특성과 입자의 순환을 향상시킬 목적으로 모든 실험은 증류수 내에서 이루어지도록 구성하였다. 이와 같이 초음파 진동을 부가한 자기연마가공을 적용하면 기존의 자기연마가공과 비교하여 표면거칠기의 향상과 금속제거량 등의 증가가 가능할 것으로 판단 된다.

4. 결론

고경도 및 우수한 내마모 특성 때문에, 세라믹 입자들이 자기연마가공에서 연마입자로 널리 사용되고 있다. 본 논문에서는 자기연마가공의 기본적인 개념과 세라믹 입자를 이용한 자기연마가공의 응용사례들을 살펴보았다.

자기연마가공에서 공구에 부착되는 연마입자의 분포특성에서는 공구의 회전수와 자속밀도에 따라서 연마입자의 부착량이 달라지는 것을 확인하였다. 특히 표면거칠기와의 상관성 분석을 통해서 적절한 작업조건 범위의 선정이 가능함을 제시하였다. 실험계획법에 기초한 실험에서는 S/N 비로

결과를 분석할 수 있고, 이를 통해서 파라미터들이 실험결과에 미치는 영향을 평가할 수 있을 뿐만 아니라 최적 가공조건의 선정이 가능하였다.

대면적 공작물의 자기연마가공에서 공구의 반경거리에 따른 표면거칠기 향상정도를 S 곡선으로 나타내었고, 이를 이용하여 가공물의 표면 균일화와 표면거칠기 향상을 위한 최적의 스텝오버를 결정하는 것이 가능함을 보였다.

마지막으로 초음파 진동이 부가된 자기연마가공에서는 압전센서를 이용하여 초음파 진동장치를 제작하고, 수용액 내에서 가공이 이루어지게 함으로써 초음파의 전달특성과 입자의 순환을 향상시켜서 결과적으로 자기연마가공의 효과를 높일 수 있음을 제시하였다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2013R1A1A2007446).

참고문헌

1. Kim, T. and Kwak, J., "A Study on Deburring of Magnesium Alloy Plate by Magnetic Abrasive Polishing," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 11, No. 2, pp. 189-194, 2010.
2. Kim, T., Kang, D., and Kwak, J., "Application of Magnetic Abrasive Polishing to Composite Materials," *Journal Of Mechanical Science And Technology*, Vol. 24, No. 5, pp. 1029-1034, 2010.
3. Jayswal, S. C., Jain, V. K., and Dixit, P. M., "Modeling and Simulation of Magnetic Abrasive Finishing Process," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 26, No. 5-6, pp. 477-490, 2005.
4. Hanada, K., Yamaguchi, H., and Zhou, H., "New Spherical Magnetic Abrasives with Carried Diamond Particles for Internal Finishing of Capillary Tubes," *Diamond and Related Materials*, Vol. 17, No. 7-10, pp. 1434-1437, 2008.
5. Gogaev, K. A., Nepomnyashchii, V. V., Mosina, T. V., Neshpor, I. P., and Leonowicz, M., "Special Features of the Magnetic Abrasive Machining," *Refractories and Industrial Ceramics*, Vol. 47, No. 1, pp. 46-47, 2008.
6. Wang, A. C. and Lee, S. J., "Study the Haracteristics of Magnetic Finishing with Gel Abrasive," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, No. 14, pp. 1063-1069, 2009.
7. Shimada, K., Shuchi, S., Kanno, H., Wu, Y., and Kamiyam, S., "Magnetic Cluster and its Applications," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 289, pp. 9-12, 2005.
8. Givi, M., Tehrani, A. F., and Mohammadi, A., "Polishing of the aluminum sheets with magnetic abrasive finishing method," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 61, No. 9-12, pp. 989-998, 2012.
9. Kong, Y., Kang, D., Kim, T. and Kwak, J., "Development of Acoustic Emission Signal Parameter and its Application for Strength Estimation of Friction Welded Joints," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 14, No. 10, pp. 1783-1789, 2013.
10. Kwak, J., "Mathematical Model Determination for Improvement of Surface Roughness in Magnetic-Assisted Abrasive Polishing of AISI316 Material," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, No. 3, pp. 845-850, 2012.