

AE신호 분석을 통한 비자성체의 자기연마 모니터링에 관한 연구

이성호*, 김상오⁺, 곽재섭⁺⁺

(논문접수일 2010. 11. 29, 심사완료일 2011. 02. 14)

A Study on Monitoring of the MAP for Non-magnetic Material by AE Signal Analysis

Sung-Ho Lee*, Sang-Oh Kim⁺, Jae-Seob Kwak⁺⁺

Abstract

A monitoring system for magnetic abrasive polishing process is necessary to ensure the polishing products the high quality and integrity. Acoustic emission (AE) signal is known to reflect the material removal phenomena in other machining processes. In a case of the magnetic abrasive polishing of non-magnetic materials, application of AE method is very difficult because of lower machining force on the surface of workpiece and the level of AE signal is extremely lower. In this study, AE sensor-based monitoring system is applied to the magnetic abrasive polishing. The relation between the level of the AE RMS and the surface roughness during the magnetic abrasive polishing of magnesium alloy steel is investigated.

Key Words : Magnetic abrasive polishing(자기연마), Non-magnetic material(비자성체), Acoustic emission signal(음향방출신호)

1. 서론

최근 산업의 발달에 따라서 정밀가공 기술도 급속히 향상되고 있다. 그 중의 한 분야인 자기연마(Magnetic abrasive polishing)법은 자기장에 의해서 형성된 자력선 방향으로 미세한 연마 입자와 자성입자가 정렬하여 유연성이 있는 브러쉬(Brush) 형태의 공구가 형성되어 금속표면을 연마하는 방법이다. 이런 기술의 발달에 따라서 제품이 상용화되기 위해서는 높은 정밀도, 높은 생산성 등이 필요한데 이는 가공 과정에서 가공특성을 평가하는 모니터링 기술이 중요하게 작용한다.

자기연마 같은 정밀가공 분야에서는 절삭력이 아주 작기 때문에 지극히 미세한 변화에도 반응할 수 있는 민감성을 가지는 음향방출(Acoustic emission)센서가 많이 사용되고 있다⁽¹⁾. 본 논문에서는 자기연마가공 공정에서 미세가공 모니터링에

주로 사용되는 높은 감도의 AE센서로 신호를 획득하고 분석하여 자성체 및 비자성체의 자기연마가공 상태를 AE_{rms}신호와 표면거칠기 향상값으로 나타내고 두 값의 상관관계를 관찰하여 자기연마 모니터링의 가능성을 제시하고자한다.

2. 자기연마와 AE 신호분석

2.1 자기연마 특성

자기연마법은 Fig. 1과 같이 전자석으로 구성된 자기연마 헤드에 전류를 추가하면 패러데이 법칙(Faraday's law)에 의거해서 자기력이 발생하고, 그때 공구와 가공물 사이 간극에 자성체와 연마입자를 용융하여 분쇄한 일체형 입자나 자성체와 연마입자를 일정 비율로 혼합한 입자를 슬러리 형태로 공급한다. 이렇게 공급된 슬러리의 자성체는 자기력에 의해서 사슬구

* POSCO(포스코)

+ 부경대원 생산자동화전공

++ 교신저자, 부경대학교 기계공학과 (jskwak5@pknu.ac.kr)

주소: 부산 남구 용당동 산 100

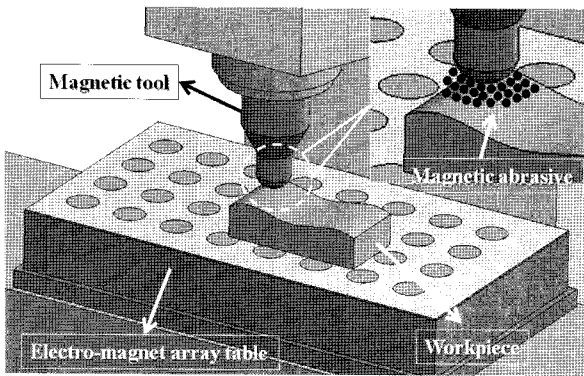


Fig. 1 Principle of Magnetic abrasive polishing

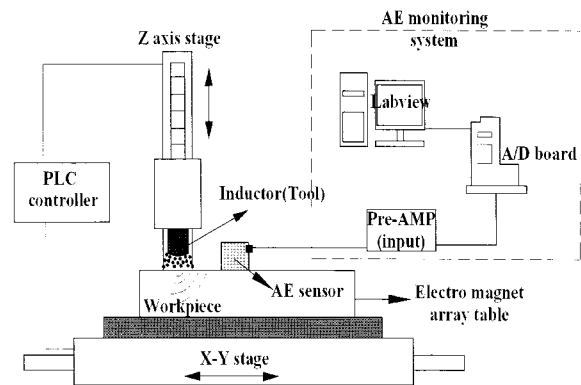


Fig. 2 Schematic of acoustic emission system for the monitoring of MAP

조로 정렬되면서 가공할 때 유연성을 가지는 브러쉬 형태의 공구를 형성하여 가공물 형상에 상관없이 가공물의 표면 연마가 가능하다⁽²⁾.

2.2 AE 신호분석

AE 시스템이란 물체가 어떠한 힘에 의해서 변형, 균열, 파괴가 일어날 때 발생하는 탄성파를 AE센서로 측정해서 물체의 결함 예측 및 판단을 가능하게 하는 것을 말한다. 이런 AE 시스템은 결함을 탐지하는 감도가 매우 높고, 실시간 검사가 가능해서 정밀·고속 가공 시스템 모니터링에 유리하다.

AE신호의 에너지 척도로는 실효치 전압(AE_{rms}) 값이 가장 일반적으로 사용되고, 이 값은 AE신호의 에너지량이며 AE발생원의 일량으로 해석이 가능하고 식 (1)로 나타낸다.

$$AE_s = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} V^2(t) dt} \quad (1)$$

여기서, V(t)는 AE의 원신호이고, ΔT는 AE_{rms} 값을 취하는 평균시간을 의미한다. 또한, AE 신호의 에너지 변화율 dE/dt는 식 (2)와 같이 나타낸다⁽³⁾.

$$\frac{dE}{dt} \propto [AE_s]^2 \quad (2)$$

3. 실험의 구성

Fig. 2는 AE 신호 측정시스템의 개략도를 나타낸다. PAC사의 광대역형 AE센서(100~750kHz)로부터 가공 과정에서 발생하는 신호는 전치증폭기(Preamplifier)를 사용해서 60dB로 증폭되어 진다. 그리고 A/D board에 의해 디지털 신호로 변환되고 이를 Labview를 통해 BPF 필터링 및 데이터 저장 과정이 진행된다. 이때 수집되는 AE 신호는 30kHz~1.5MHz의 고주파 영역 신호이기 때문에 고속샘플링이 가능한 NI사의 PCI-

Table 1 Experimental conditions

Items	Conditions
Current of magnetic tool	3.0A
Spindle speed	1000rpm
Current of array table	0.8A(9EA)
Workpiece	AZ31B(80×60×2t)
Working time	5min
Working gap	1.5mm
Magnetic abrasive	Iron-powder(150μm), GC (#3000), Oil or silicone gel

6132 A/D board로 데이터를 수집했다. 자기연마 가공에서 발생하는 AE 신호의 특성을 분석하기 위해서 Table 1의 가공조건으로 자기연마 실험을 수행 하였다. 여기서 전자석 어레이 테이블은 비자성체의 자기력 향상을 위해 설치되었다. 각각의 가공은 5분간 실행되었고 DAQ(Data Acquisition)장치를 이용해서 2MS/s의 샘플링 속도로 데이터를 획득하였다. 샘플링된 데이터는 AE 센서의 대역폭에 맞게 100~750kHz로 BPF 필터링 되었다.

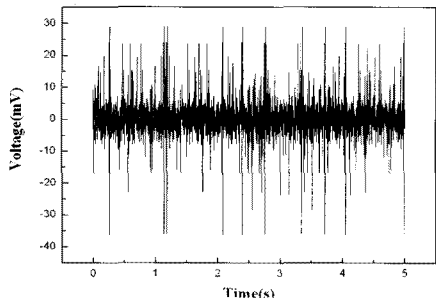
4. 실험결과 및 분석

4.1 소재 특성에 따른 자기연마 AE 신호특성

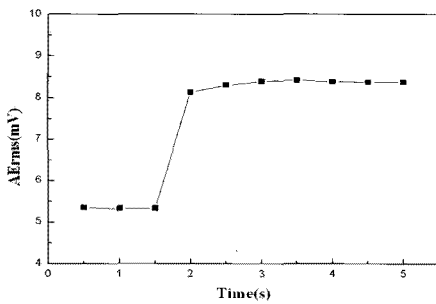
우선 본 연구에서는 선행 연구를 통해 자성체 자기연마의 경우 비자성체의 자기연마보다 공구에 의해 유도되는 자속밀도의 크기가 매우 높아 표면거칠기의 향상에 높은 효율을 가지고 있음을 알 수 있었다⁽⁴⁾. 이러한 원인은 자기연마 입자들이 공구의 회전력에 의해 공구와 공작물 사이의 작업 간극영역에서 이탈하려는 경향이 비자성체의 경우가 크기 때문이다. 이러한 특성을 인지하고 자성체의 자기연마와 비자성체의 자기연마의 AE 신호 특성을 분석하였다. 이때 사용된 연마입자는 Oil + Iron-powder + GC(#3000)의 혼합 연마제이다. 자성체

와 비자성체의 자기연마 신호분석 결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 AE 원신호와 0.55초 간격의 AE_{rms} 변환 값으로 나타냈다. 각 그래프의 (a), (b)는 자성체의 자기연마 가공 초기 5초를 나타낸 것이고 (c), (d)는 가공 3분 후의 신호를 나타낸다. Fig. 3(a), (c)와 Fig. 4(a), (c)의 원신호를 비교하면 자성체의 자기연마 경우보다 비자성체의 자기연마에서 높은 신호 값과 고주

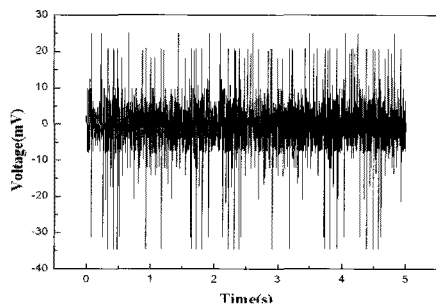
파 신호를 발견할 수 있다. 그리고 Fig. 3 (b)의 AE_{rms} 값은 가공 초기 공구가 회전하는 시점부터 확연히 증가하고 있어 연마가공이 활발히 이루어지고 있음을 짐작할 수 있다. 반면 Fig. 3 (d)와 같이 가공 후반으로 갈수록 실효치 값이 감소하고 있음을 확인할 수 있다. 가공 효율이 점점 감소하고 있음을 나타낸다. 따라서 가공 시간에 따른 RMS 값의 변화 특성 분석



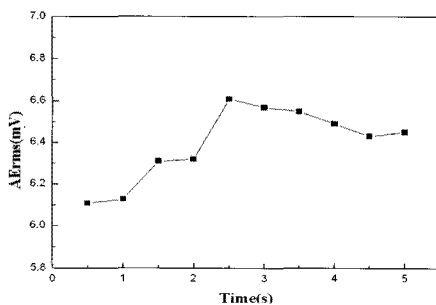
(a)



(b)

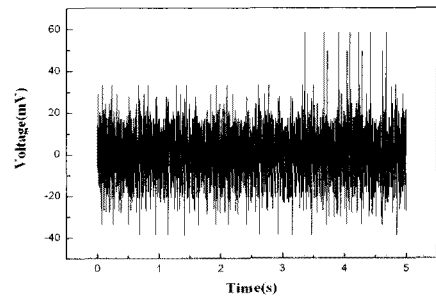


(c)

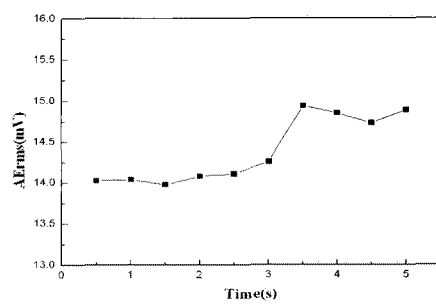


(d)

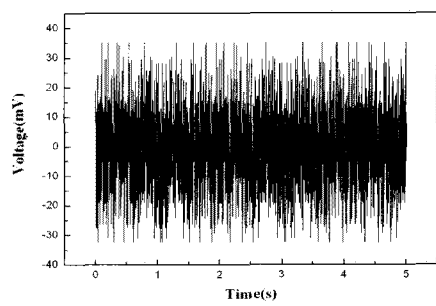
Fig. 3 AE raw signal and AE_{rms} during MAP of magnetic material



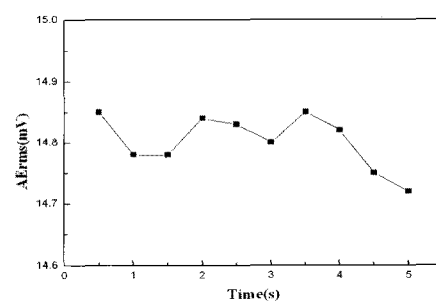
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4 AE raw signal and AE_{rms} during MAP of non-magnetic material

이 필요하다. 자성체의 자기연마와 비자성체의 자기연마에서의 RMS 값을 비교하면 Fig. 3 (b), (d)의 RMS 값은 초기에 8.5mV에서 점점 시간이 흐르면서 6.4mV정도까지 떨어진다. 즉 RMS 감소율은 24.7%를 나타낸다. Fig. 4 (b), (d)의 RMS 값은 초기에 15에서 14.7mV정도로 떨어진다. 이 경우 RMS의 감소율은 2%정도이다. 여기서 RMS 값의 변화는 자기연마의 효율을 나타낼 수 있다. 또한 시간이 흐름에 따라 RMS 값이 감소하는 이유는 가공 시간이 길어질수록 가공 특성에 따라 절삭력은 초기 값에 비해서 점차적으로 감소하기 때문이다. 그리고 자성체를 가공할 때 비자성체의 가공보다 감소율이 더 크기 때문에 자기연마에서는 자성체의 가공이 더 효율적이라는 것을 알 수 있다.

4.2 자기력 향상 방안 적용 후의 AE 신호특성

선행 연구를 통해 비자성체의 자기연마에서의 낮은 가공 효율을 극복하기 위한 방안으로 두 가지를 제시하였다. 실리콘 겔을 연마입자와 혼합하여 입자간의 응집력을 향상시켜 입자의 탈락을 방지하는 방법과 공작물의 반대편에 전자석으로 배열된 테이블을 설치하여 공작물 표면의 자기력을 향상시키는 방안이 그것이다.

본 연구에서는 각각의 자기력 향상방안이 적용된 자기연마 과정에서의 AE 신호 분석을 통해 그 가공 특성을 파악하고자 하였다. 실험의 결과로 연마입자에 실리콘 겔을 혼합하여 연마 입자간의 응집력을 증가시킨 경우의 AE 원신호 및 RMS 값이 Fig. 5와 같이 나타났다. 가공 초기의 AE 원신호 및 RMS 값이 자성체를 사용한 Fig. 3 (a), (b)의 경우와 매우 유사한 형태를 보인다. 반면 Fig. 3 (b), (d)의 RMS 값은 24.7%의 감소율을 보이는 반면, Fig. 5 (b), (d)에서의 RMS 값은 10에서 6.35mV 까지 감소한다. 따라서 RMS 그래프에서 얻어진 값의 감소율은 36.5%로 Fig. 3의 값보다 감소율보다 더 크게 나타난다. 이러한 결과는 비자성체의 자기연마 가공에서도 실리콘 겔을 이용하면 오일을 이용한 자성체의 자기연마 가공보다 더 큰 가공효율을 나타냄을 보인다. 또한 실리콘 겔을 포함한 입자로 비자성체를 가공 할 때 더욱 높은 연마 효율을 위해서 전자석 테이블을 가공물 아래에 설치하여 실험을 하였다. 여기서 전자석 테이블은 비자성체의 자기연마 가공에서 비자성체의 표면의 자기력을 효과적으로 증가시켜 높은 절삭력을 얻을 수 있다. 전자석 테이블과 실리콘 겔을 이용한 자기연마 실험의 결과는 Fig. 6에 나타난다. Fig. 6의 RMS 값을 보면 9.5에서 5.8mV까지 감소한다. 이 때 감소율은 대략 38.9%로 전자석 테이블을 사용하지 않은 경우보다 더 높은 감소율을 나타냈다.

다음은 얻어진 RMS 변화량을 분석해서 가공물의 표면거칠기 변화와 RMS 변화량의 관계를 알아보려고 한다. 비자성체

의 자기연마 가공전과 가공후의 표면거칠기는 Table 2에 나타났다. Fig. 7에는 비교 결과를 나타내었다. 그 결과, RMS값의 변화량이 클수록 표면거칠기의 향상 정도가 높았다. 특히, 비자성체의 자기연마에서 자기연마 입자에 실리콘 겔을 혼합하고 전자석 테이블을 이용하여 자기력을 향상시켰을 경우 표면 거칠기의 향상 정도가 가장 높았으며, 이 경우의 RMS 변화량

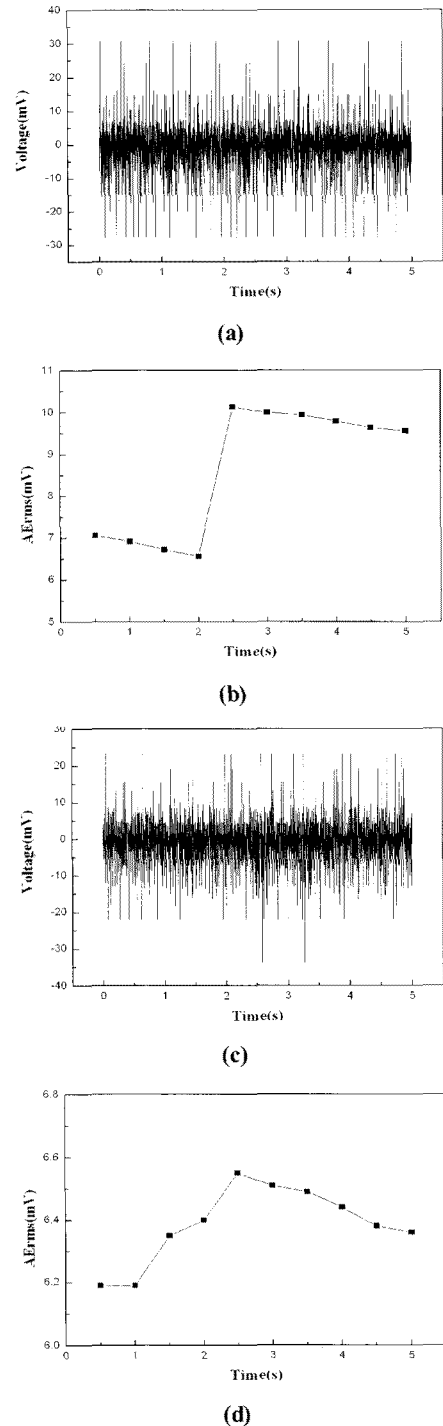


Fig. 5 AE raw signal and AE_{rms} during MAP of non-magnetic material using silicone gel medium

이 가장 크게 나타났다. 이러한 결과를 이용하여 비자성체 자기연마에서 가공조건에 따른 표면거칠기의 변화를 AE_{rms} 값을 통해 유추할 수 있을 것으로 기대된다.

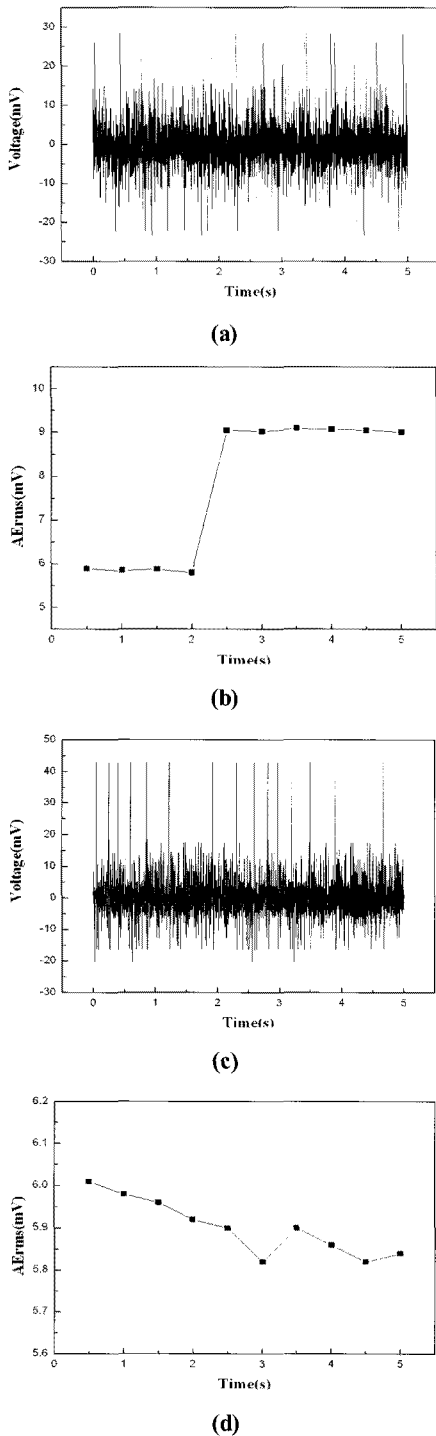


Fig. 6 AE raw signal and AE_{rms} during MAP of non-magnetic material using silicone gel medium and electro-magnet array table

Table 2 Results of surface roughness after MAP

Abrasive	Surface roughness(Ra, μm)		
	Before	After	ΔRa
Fe+Silicone+GC (Magnetic table On)	0.635	0.4625	0.1725
Fe+Silicone+GC (Magnetic table Off)	0.4375	0.32	0.1175
Fe+Oil+GC (Magnetic table Off)	0.605	0.5475	0.0575

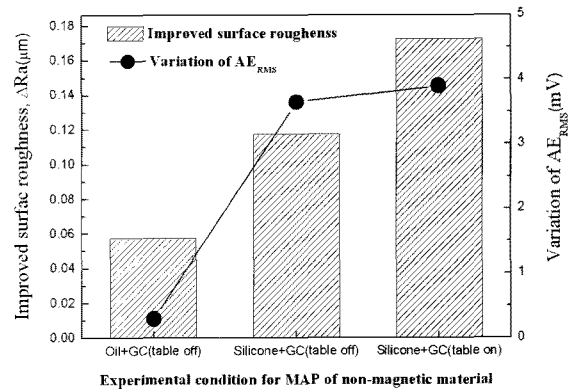


Fig. 7 Comparing to improved surface roughness and variation of AE_{rms} according to experimental condition

5. 결론

본 연구에서는 자기연마 가공에 따른 신호를 AE센서로 획득하고 가공성에 따른 효율을 AE_{rms} 값으로 분석하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- (1) Oil을 이용한 자성체의 자기연마와 Oil을 이용한 비자성체의 자기연마의 AE_{rms} 값을 분석했을 때 비자성체의 경우 자성체보다 RMS 변화량이 작고 이 결과로 자기연마에서는 자성체가 비자성체보다 더 큰 절삭력을 가진다는 것을 확인했다. 그리고 Oil보다 높은 점성을 가지는 실리콘 겔을 이용한 비자성체 자기연마 실험에서 AE_{rms} 변화가 3.65mV로 나타나 자성체 자기연마에서의 변화량 보다 컸다. 또한 가공물 아래에 전자석 테이블로 자기력을 향상시켰을 경우 더 큰 RMS 변화를 얻을 수 있었다. 이는 전자석 테이블에 실리콘 겔을 포함한 연마제로 비자성체를 가공할 때 더 나은 절삭력을 가지며, 이것은 RMS 값의 변화를 통해서 확인할 수 있었다.
- (2) 마그네슘 판재의 자기연마공정에서 RMS의 변화에 따른 가공물 표면거칠기의 특성을 분석하기 위해 RMS의 변화 값과 표면거칠기의 변화값을 단순 비교하였다. 그 결과,

RMS 값의 변화량이 감소 할수록 표면거칠기의 향상이 줄어들어 드는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 관찰된 마그네슘 관재의 자기연마 공정에서 RMS값의 감소량이 증가하면 더 좋은 표면거칠기를 얻을 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 향후 AE신호를 이용한 자기연마공정 모니터링이 가능함을 보여준다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0007932).

참 고 문 헌

- (1) Feng, J., Kim, B. S., Shih, A., and Ni, J., 2009, "Tool Wear Monitoring for Micro-End Grinding of Ceramic Materials," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 5110~5116.
 - (2) Kim, S. O., You, M. H., and Kawk, J. S., 2010, "Tool Geometry Optimization and Magnetic Abrasive Polishing for Non-ferrous Material," *Journal of the Korean society of Machine Tool Engineers*, Vol. 19, No. 3, pp. 313~320.
 - (3) Kim, S. R., Kim, H. Y., Kim, J. U., Yoon, H. M., and Ahn, J. H., 2005, "Relation of AE and Polishing Parameters for Polishing Process Monitoring," *Journal of the Korean society of Precision Engineering*, Vol. 22, No. 10, pp. 90~98.
 - (4) Kwak, J. S., 2009, "Enhanced Magnetic Abrasive Polishing of Non-ferrous Metals Utilizing A Permanent Magnet," *Int. Machine Tool Manufact.*, Vol. 49, No. 7~8, pp. 613~618.
- (1) Feng, J., Kim, B. S., Shih, A., and Ni, J., 2009, "Tool Wear Monitoring for Micro-End Grinding of Ceramic