

센서 융합을 이용한 MAF 공정 특성 분석

김설빔[†] · 안병운^{*} · 이성환^{**}

(2008년 12월 26일 접수, 2009년 3월 12일 수정, 2009년 3월 16일 심사완료)

Characterization of Magnetic Abrasive Finishing Using Sensor Fusion

Seol Bim Kim, Byoung Woon Ahn and Seoung Hwan Lee

Key Words : Acoustic Emission(AE, 음향방출), Surface Roughness(표면거칠기), Magnetic Abrasive Finishing(자성연마입자 피니싱), Force Sensor(가공력 센서), Artificial Neural Networks (인공지능신경망)

Abstract

In configuring an automated polishing system, a monitoring scheme to estimate the surface roughness is necessary. In this study, a precision polishing process, magnetic abrasive finishing (MAF), along with an in-process monitoring setup was investigated. A magnetic tooling is connected to a CNC machining to polish the surface of stavax(S136) die steel workpieces. During finishing experiments, both AE signals and force signals were sampled and analysed. The finishing results show that MAF has nano scale finishing capability (upto 8nm in surface roughness) and the sensor signals have strong correlations with the parameters such as gap between the tool and workpiece, feed rate and abrasive size. In addition, the signals were utilized as the input parameters of artificial neural networks to predict generated surface roughness. Among the three networks constructed -AE rms input, force input, AE+force input- the ANN with sensor fusion (AE+force) produced most stable results. From above, it has been shown that the proposed sensor fusion scheme is appropriate for the monitoring and prediction of the nano scale precision finishing process

기호설명

- μ : 마찰계수
- w : 단면폭
- F : 수직연마력
- V : 입자속도
- R : 입자반경
- A_g : 재료제거 단면적
- H_w : 경도

1. 서론

최근 들어 과학 기술의 발달과 더불어 초정밀/초미세 제품들에 대한 관심이 증대됨과 동시에 그에 대한 수요가 폭발적으로 증가하고 있다. 특히 초정밀 제품의 대량 생산을 위해 3 차원 형상을 가지는 초정밀 금형 기술에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 그 중 대표적인 사출 금형의 경우 프레스 금형과는 달리 금형의 표면 형상과 표면 거칠기가 그대로 최종 제품에 전사되는 특징이 있으므로⁽¹⁾ 금형의 표면 거칠기는 바로 최종 제품의 특성을 결정짓는 요인이 된다. 그럼에도 불구하고 초정밀 금형 기술의 경우 가공 기술을 포함한 정밀 부품 가공 시 형상 제작에 대한 연구와 비교하여 표면 개선에 대한 연구는 아직 성과 및 관심이 매우 부족한 실정이다. 따라서 다양한 공정에 적용할 수 있으며, 자동화가

[†] 한양대학교 대학원 기계설계 · 메카트로닉스 시스템공학과

^{**} 회원, 책임저자 (주연락자), 한양대학교 기계공학과

E-mail : sunglee@hanyang.ac.kr

TEL : (031)400-5288 FAX : (031)406-5550

용이한 피니싱 공정에 대한 체계적 연구가 절실하지만, 현재 진행되고 있는 나노 스케일의 표면 개선 방법으로는 EILD,⁽²⁾ CMP,⁽³⁾ 등과 같이 고정된 연마 입자 또는 고정 패드에 의한 공정이 주를 이루고 있어 3 차원 형상의 표면 개선에 적용하기에는 많은 문제점이 발생한다. 하지만 본 연구에서 적용하고자 하는 자성 연마 입자를 이용한 피니싱 공정(MAF: Magnetic Abrasive Finishing)의 경우 유연성 있는 유체성 패드를 이용하여 3 차원 구조물의 형상을 유지하면서 동시에 나노 스케일 표면 거칠기 구현이 가능하다는 연구 결과들이 발표되고 있다. Yamaguchi^(4,5)는 자기유변유체(MR:Magneto Rheological fluid)를 이용한 폴리싱 공정에서 표면 특성과 자기력, 공구 특성에 따른 가공 메커니즘 분석 및 SEM 을 이용한 미세 표면의 미시적 변화에 대한 연구를 진행하였다. 또한 Ahn⁽⁶⁾은 자성연마입자의 제조 및 이를 이용한 피니싱 공정 제어에 대한 연구를 통해 수 나노의 표면 품질을 유지하였다. 하지만 자기유변유체(자성연마입자)를 이용한 피니싱 공정은 표면 거칠기에 미치는 요인이 다양하고 이런 요인들의 정량적 관계 및 해석이 불분명하여 표면 거칠기를 공정 중에 예측/분석하는 것이 매우 어렵다. 공정 중 표면 거칠기 예측/분석 연구는 공정 자동화 및 가공 메커니즘 분석을 위해 반드시 필요하며, 이를 위해 공정 모니터링에 대한 연구 역시 반드시 병행되어야 하겠다. 본 연구에서는 초정밀부품의 표면 형상 정밀도를 나노 스케일로 구현 할 수 있는 MAF 공정의 자동화를 위해 반드시 수반 되어야 할 모니터링 및 표면 거칠기 예측/분석에 대한 연구를 진행하였다. 이를 위해 초정밀 가공 시 표면 거칠기와의 연관성이 입증된 AE 센서⁽⁷⁾ 및 force 센서⁽⁸⁾를 이용한 각각의 실시간 모니터링 시스템을 구현 하였으며, 모니터링 결과를 바탕으로 표면 거칠기를 예측/분석하였다. 신호의 신뢰성을 향상 시키기 위해 두개의 센서에서 획득된 센서신호를 융합하여 최적 입력 벡터를 선택한 후, 다양한 가공 조건 별 표면 거칠기 예측을 위한 인공지능 신경망을 재구성하였다. 연구 결과를 통해 MAF 공정 자동화에 대한 연구 기반 확립을 기대 할 수 있다.

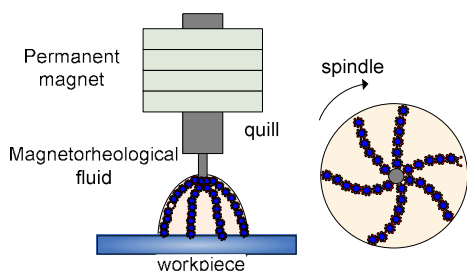


Fig. 1 Schematic of MAF

2. 이론적 배경

2.1 자성연마입자를 이용한 피니싱 원리

본 연구에서 적용한 자성연마입자를 이용한 피니싱 공정의 개략적인 구조를 Fig. 1 에 나타내었다. 가공압을 발생시키기 위한 자력발생장치로는 영구 자석을 이용하였으며, 영구 자석에 결합된 연마 공구의 끝단과 공작물 사이에 간극을 주고 그 공간에 결합된 자성연마입자로 구성된 자기유변 유체를 공급한다. 연마 공구가 자화 되어 자성연마 입자를 사슬구조(chain-like structure)로 정렬시킨다. 이처럼 사슬구조로 형성된 입자들이 유연성을 가진 연마숫돌의 역할을 하게 된다. 즉 가공압을 자기장으로 제어하여 자성연마입자에 간접적으로 가공력을 전달하는 방식이므로 가공물의 표면 형상을 유지하며, 재현성이 우수한 피니싱 방법이다. 그러므로 비구면과 같은 복잡한 형상의 표면 개선이 가능하다.

2.2 연마에 따른 AE 신호 분석

가공 공정에서의 AE 신호에 포함된 다양한 가공 정보를 시간 영역 및 주파수 영역 신호 처리 등에 의하여 현재의 가공 상태 판정 및 실시간 모니터링 등에 사용한다. Fig. 2 에서 MAF 공정 상태를 개략적으로 나타내었다. 가공 공정과 AE 신호와의 상관 관계는 다음과 같다. ω 를 연마입자가 가공면에 압입된 단면폭이라 하고 F를 수직연마력, 하나의 입자에 의해 발생하는 재료제거 단면적을 A_g 라 하면

$$F = \frac{1}{4} \pi \omega^2 \cdot H_w \quad (1)$$

$$A_g = R^2 \theta - \frac{1}{2} (R - \delta) \cdot \omega \quad (2)$$

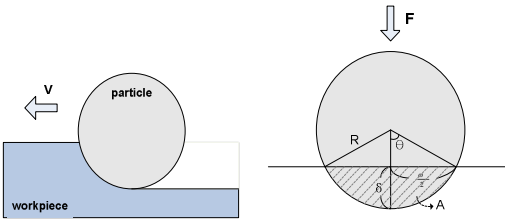
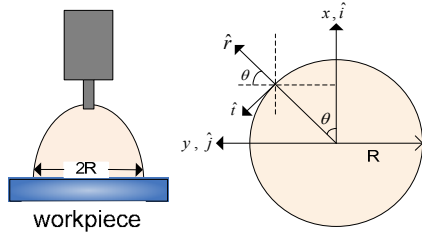
로 나타낼 수 있고 Fig. 2 의 기하학적 관계를 이용하여 A_g 에 관한 식으로 정리한 후에 연마속도 V와 벡터관계식으로 나타내면 재료제거율에 관한 식으로 정리할 수 있다.

$$MRR_{total} = K \cdot N \cdot \frac{F \cdot V}{H_w} \cdot \frac{\omega}{D} \quad (3)$$

유사하게 AE 신호의 에너지량과 AE 발생원의 일량을 분석하면

$$[AE_{rms}]^2 = c \cdot \sigma \cdot \dot{\epsilon} \cdot N \cdot \frac{F \cdot V}{H_w} \cdot \frac{\omega}{D} \quad (4)$$

위의 식에서 AE RMS는 수직 연마력, 연마속도, 연마입자와 관계가 있음을 알 수 있다.^(9,10)

Fig. 2 Abrasive action by the particle⁽⁹⁾Fig. 3 Coordinate definitions⁽¹¹⁾

2.3 연마에 따른 Force sensor 신호 분석

공구동력계의 기본적인 개념은 실제 작용하는 힘을 전기신호로 동력원의 출력을 수치화 하는 것이다. 본 연구에서 적용한 force 센서는 3 성분 측정 센서로서 가공물에 수평진단방향으로 작용하는 힘인 F_x 와 F_y , 그리고 수직 방향으로 작용하는 F_z 를 측정할 수 있는 센서로 구성되어 있다. Fig. 3 에서 MAF 공정 상태와 Force 신호 간의 상호관계를 설명하였다. 그림에서 원심력을 F_c , 접선력을 F_t 라고 하면 단위면적당 접선력은 f_t 로 나타낼 수 있다.

$$f_t = \mu n \hat{t} \quad (n=N/A, N:\text{수직력}) \quad (5)$$

$$\hat{r} = \hat{i} \cos\theta + \hat{j} \sin\theta, \quad \hat{t} = \hat{j} \cos\theta - \hat{i} \sin\theta \quad (6)$$

$$\hat{f}_t = \mu \cdot n \cdot (\hat{j} \cos\theta - \hat{i} \sin\theta) \quad (7)$$

따라서 전체 면적에 대한 접선력 및 마찰계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽¹¹⁾

$$\vec{F}_t = -R^2 \mu n \hat{t} \quad (8)$$

$$\therefore \mu = \frac{F_t}{R^2 \cdot n} = \frac{F_t}{R^2 \cdot \frac{N}{A}} = \frac{F_t \cdot \pi}{N} \quad (9)$$

3. MAF 시스템

공구는 자화 특성과 가공성을 고려하여 SM34C 를 재료로 선택하여 3 단계로 제작하고 영구자석

Table 1 Level and value of parameters

Sign	Factors	Unit	Levels		
			0	1	2
A	Rotative Velocity	rpm	500	1000	1500
B	Gap	mm	0.2	0.4	0.6
C	Abrasive size	μm	25~75	75~125	125~200
D	Abrasive quantity	g	0.2	0.4	0.6
E	Feed rate	mm/min	100	200	300



Fig. 4 CNC machine and tooling

과 결합하는 방식으로 공구 단에서 자기장을 발생하도록 하였다. 영구자석과 결합된 공구는 CNC 밀링 (MM-250S3) 에 부착하여 실험을 진행하였다. 공구의 헤드부분은 알루미늄으로 제작하여 자기장의 영향이 없도록 하여 CNC 밀링과의 결합과 분해를 쉽게 만들어 연마입자의 제거나 교환을 용이하게 했다. 또한 공구 단 형상은 공정 중 입자들의 미끄럼 현상을 고려하여 십자모양 홈을 내었다. 실험에 사용된 재료 Stavax (S136)는 경면가공성이 우수하고 내부식성도 좋으며 열에 의한 뒤틀림 현상이 최소화 되어 초정밀 렌즈 제작 용 사출 금형으로 사용되고 있다. 또한 피닝성 결과를 향상 시키기 위하여 자성연마입자는 여러 가지 제조방법 중 입자 제조시간이 짧고 공정이 간단하며 제조 비용 또한 저렴한 결합체에 의한 결합법⁽⁶⁾을 이용하여 자성입자와 연마입자를 결합하였다. 자성입자와 연마입자는 6:4 의 비율로 혼합하였고 자성입자는 Carbonyl Iron, 연마입자는 Silicon Carbide 를 선택하였으며 Cyanoacrylate 계열의 결합제를 사용하였다.

AE sensor 는 wideband type 의 PAC UT-1000 을 적용하였고 획득된 신호는 Pre-Amp 를 이용해 증폭하여 PAC-AEDSP-32 Board 를 통해 신호를 분석하였다. Force sensor 는 Kistler 9257B model 을 적용하였고 획득된 신호는 PCIM-DAS1602 보드를 통해 분석하였다.

표면 거칠기(Ra)는 Nano Surface Profiler (NV-P2020)을 이용하여 측정하였다.

4. 실험계획법에 의한 가공 특성 분석

MAF 공정 성능에 영향을 미치는, 여러가지 인자들의 조합에 따라 가공 결과는 변화한다. 따라서 우선적으로 중요 인자들이 가공성에 미치는 영향을 파악하여야 한다. 이를 위해 기초 실험을 통해 5 가지 인자를 선정하였으며 Table 1 에 나타내었다. 각 수준의 값은 기초실험을 통한 경험적인 데이터를 이용하여 결정하였다. 실험은 총 2 회 반복 실험 하였으며, 표면거칠기 (Ra)를 측정/분석하였다. 분산분석 결과를 기준으로 간극, 입자 크기, 이송 속도가 주요 인자로 결정되었다. 결정된 인자에 따라 MAF 공정에서 AE 센서와 Force 센서를 이용해 신호를 획득하고 분석, 뉴럴 네트워크를 통해 표면 거칠기를 예측하는 과정을 수행하였다.

5. MAF 가공 조건 변화에 따른 신호분석

5.1 간극 변화에 따른 AE 센서 신호

공구 회전속도 1000 rpm, 이송속도 200 mm/min, 입자 크기 125~200 μm , 입자량은 0.3g 으로 고정하고, 간극은 0.2, 0.4, 0.6mm 로 변화시켜 AE 신호 획득을 위한 실험을 진행하였다. Fig. 5 의 (a), (b), (c)는 각각의 경우에 대해 시간에 따른 AE 신호의 변화이며, (d)는 표면 거칠기(Ra)의 변화를 측정된 결과이다. AE spectrum 의 경우 시간 경과에 따른 누적값을 나타내었다. 아래 그림에서 시간의 경과

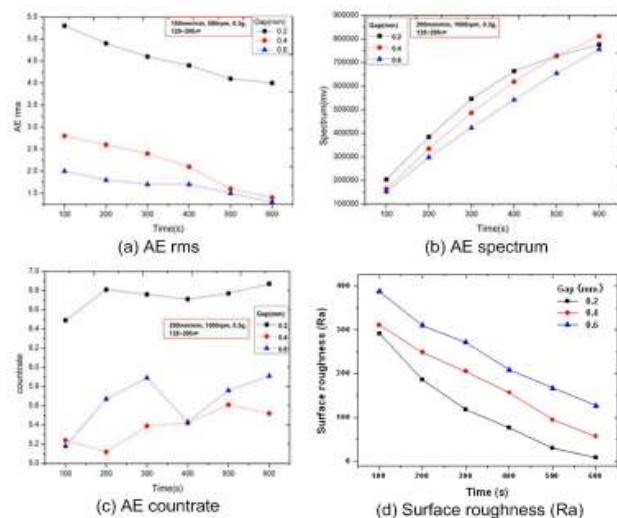


Fig. 5 AE signals and surface roughness variations with varying gap

에 따라 AE 에너지 (rms)와 Ra 값의 동반 감소가 관찰되었는데, 이는 표면의 미세화에 따른 (최소 Ra 8nm) AE 신호의 연계 변화를 의미한다.

5.2 이송 속도에 따른 AE 센서 신호

공구 회전속도 1000rpm, 간극 0.2mm, 입자 크기 125~200 μm , 입자량은 0.3g 으로 고정하고, 이송 속도는 100, 200, 300mm/min 로 변화시킨 실험 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. 이 경우도 시간 경과에 따라 AE rms 와 Ra 값은 전반적으로 감소하고, 스펙트럼과 count rate 값은 증가하는 경향을 보이고 있다.

5.3 입자 크기에 따른 AE 센서 신호

공구 회전속도 1000rpm, 간극 0.2mm, 이송 속도 200mm/min, 입자량 0.3g 으로 고정하고, 입자 크기는 25~200 μm 로 단계적으로 변화시킨 결과를 Fig. 7 에 나

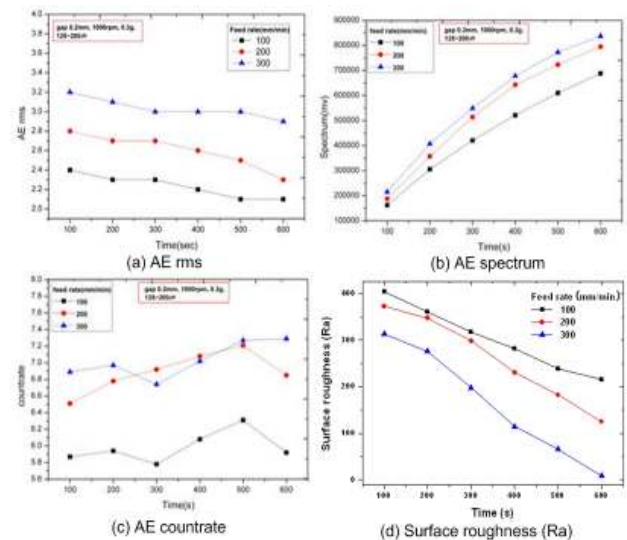


Fig. 6 AE signals and surface roughness variations with varying feed rate

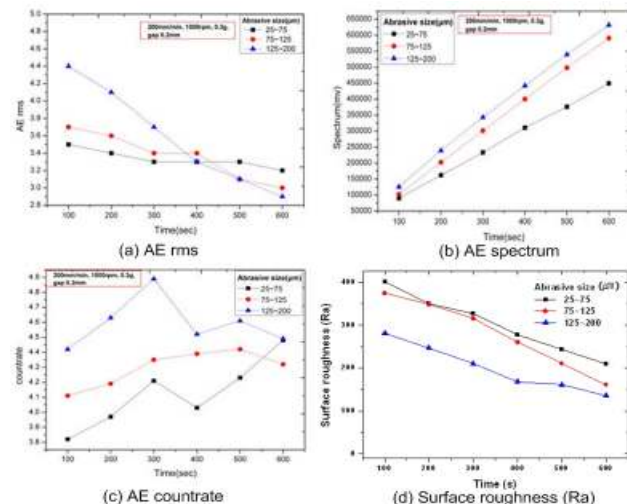


Fig. 7 AE signals and surface roughness variations with varying abrasive size

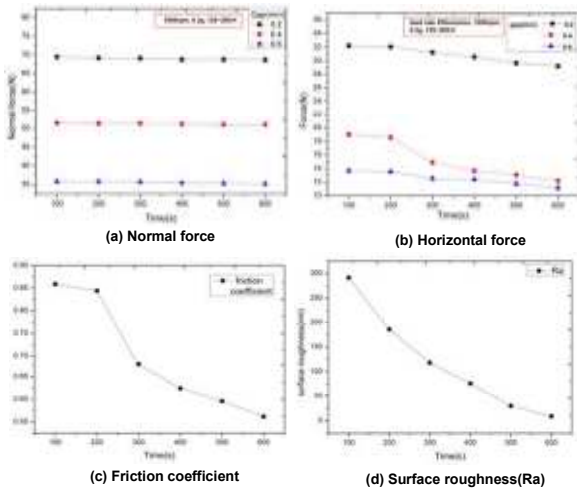


Fig. 8 Force signals and surface roughness variations with varying gap

타내었다. 그림 (a)의 400 초 부근에서 125~200 μm 입자의 값이 다른 입자의 AE rms 값 보다 작은 값을 보인다. 이것은 가공 초기에는 연마입자가 클수록 연마 효율성이 높지만 일정 시간이 지나면 작은 크기의 자성연마입자의 효율성이 높아지기 때문에 AE rms 값의 패턴의 변화가 일어난 것으로 보인다. 같은 내용을 식 (3)에서 재료제거율이 연마입자의 직경과 반비례하는 것에서도 확인할 수 있다.

5.4 간극에 따른 Force 센서 신호

MAF 공정에서 가공압에 영향을 주는 인자인 간극을 변화시켜가면서 수직력과 수평력을 측정하였다. 공구회전속도 1000rpm, 이송속도 200mm/min, 입자크기 125~200 μm, 입자량 0.3g 으로 고정시킨 후 간극을 0.2, 0.4, 0.6mm 로 변화시키면서 Force 센서 신호를 획득하였다. Fig. 8 의 (a)는 시간에 따른 수직력의 변화를 보여주고 있는데 거의 변화가 없이 일정하게 나타났다. (b)는 수평력의 변화를 나타내고 있으며, 시간이 지날수록 감소하는 경향을 보여준다. 이것은 폴리싱이 진행되면서 가공물이 받는 수평력이 미소하게 감소하기 때문으로 보여진다. Fig. 8 의 (c), (d)는 간극이 0.2mm 일 때의 마찰계수와 표면 거칠기(Ra)값을 나타내고 있는데 두 그래프 모두 시간에 따른 감소 경향을 보여주고 있다. 이는 간극에 따른 AE 신호의 분석 결과 (5.1 절)와 동일한 이유로 설명 할 수 있다.

5.5 입자크기에 따른 Force 센서 신호

공구 회전속도 1000rpm, 이송속도 200mm/min, 간극 0.2mm, 입자량 0.3g 으로 고정시킨 후 입자 크기를 25~200 μm로 변화시키면서 Force 센서 신호를 획득하였다. Fig. 9 의 (a), (b)는 시간 경과에 따른 수직력과 수평력의 변화를 보여주고 있다.

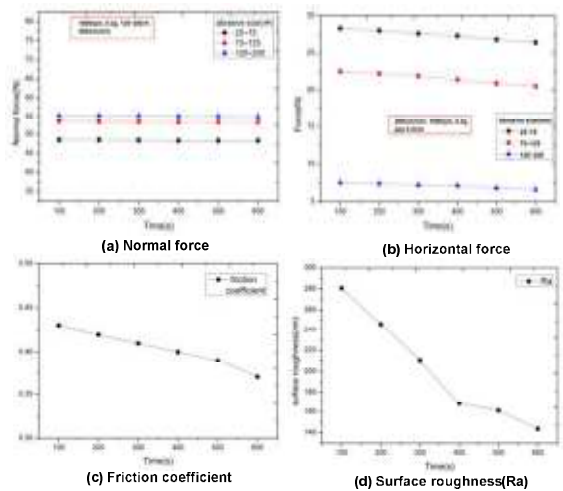


Fig. 9 Force signals and surface roughness variations with abrasive size

수직력은 간극을 변화하면서 측정했을 때와 마찬가지로 큰 변화는 없지만 수평력은 미세하게 감소하는 경향을 보여주고 있다. (c), (d)는 입자크기 125~200 μm인 경우의 마찰계수와 표면 거칠기인 Ra 를 나타내는데 시간이 경과함에 따라 감소하는 동일한 경향을 보여주고 있다.

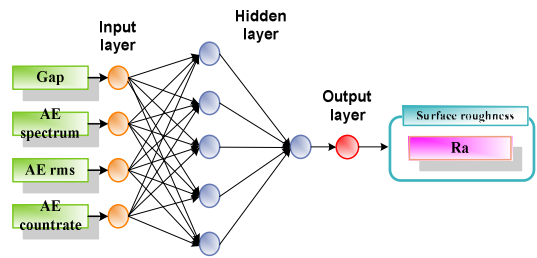


Fig. 10 Architecture of Neural Network for AE

6. 가공 조건 변화에 따른 신호 분석

6.1 AE 센서 신호 기준의 표면 거칠기 예측

뉴럴 네트워크는 출력 층의 오차신호를 이용하여 은닉 층과 출력 층간의 연결강도를 변경하고, 출력 층의 오차 신호를 은닉 층에 역전파하여 입력 층과 은닉 층과의 연결강도를 변경하는 학습방법인 BP(back propagation) 알고리즘을 사용하였다. 뉴럴네트워크의 입력, 은닉층, 결과값의 구성은 Fig. 10 에 나타내었다. 또한 뉴럴네트워크 수행을 위해 총 41 개의 데이터 그룹을 이용 하였으며, 트레이닝을 위한 26 개의 데이터 그룹과 뉴럴 네트워크 입력을 위한 15 개의 데이터 그룹으로 구성하였다. 트레이닝 및 입력 데이터 그룹은 AE rms, AE countrate, AE spectrum 등 AE 신호에서 얻을 수 있는 것과 자성연마입자의 요소 중 표면 거칠기에

많은 영향을 미치는 간극 값으로 선정하였다. AE spectrum 은 신호 값의 평균을 구하여 각 측정 시간까지 누적 값을 구하였다. AE countrate 는 기계 자체의 소음 및 주변의 환경 소음인 문턱 값 (threshold) 0.1 이상의 값을 측정하였다. 신경망을 수행하기 전에 입력과 출력값을 0 과 1 사이의 값으로 노말라이즈하였다. AE spectrum 은 누적된 spectrum 의 최종 값으로 각 수준의 값을 나누는 방식으로 최대값이 1 이 되도록 설정하였다. 목표 값은 표면 거칠기 값인 Ra 를 기준으로 하여 시료를 마무리 가공하기 전 표면 거칠기 값이 400nm 중후반대로 500nm 를 넘는 경우가 없는 것을 감안하

여 최대 표면 거칠기 값을 500nm로 가정한 후 측정된 표면 거칠기 값을 500nm 를 기준으로 0~1 사이 값으로 만들어 목표값으로 입력했다. 트레이닝결과 915544 반복학습 후 목표치 0.001 이하의 8.35713e-4 값에 도달하였다. Fig. 11 은 뉴럴네트워크를 트레이닝 시킨 후 예측된 Ra 값과 실제 측정된 Ra 값을 비교한 것으로 10% 내의 오차 범위를 나타내고 있다.

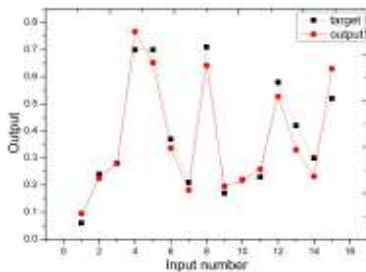


Fig. 11 AE results of Neural Network

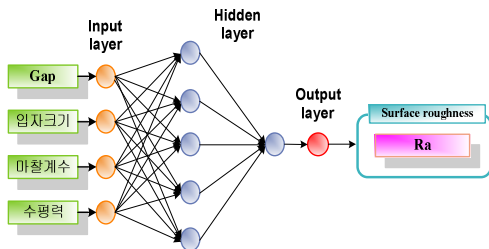


Fig. 12 Architecture of Neural Network for force

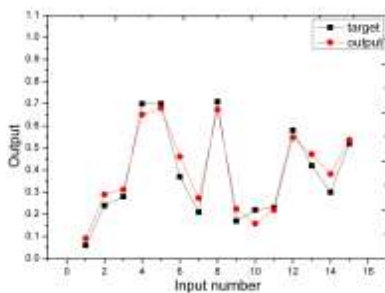


Fig. 13 Force results of Neural Network

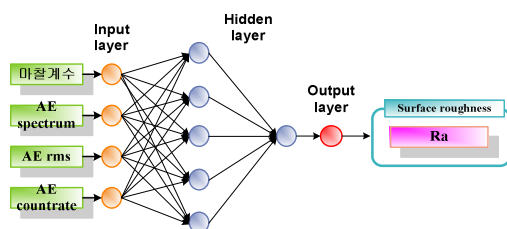


Fig. 14 Architecture of Neural Network for sensor fusion

6.2 Force 센서 신호 기준의 표면 거칠기 예측

뉴럴 네트워크의 입력 층과 은닉 층 그리고 결과값의 구성과 데이터 그룹의 수는 6.1 절과 동일하며, 입력 및 트레이닝 데이터 그룹은 간극, 입자크기, 마찰계수, 수평력으로 구성하였고 그 구성을 Fig. 12 에 나타내었다. 6.1 절과 동일하게 입력 값과 출력 값을 0~1 사이의 값으로 만들었고 목표 값 역시 최대 표면 거칠기 값을 500nm 로 가정한 후 측정된 표면 거칠기 값을 500nm 로 나누어주어 0~1 사이 값으로 입력했다. 4 개의 입력 값과 Ra 값을 0~1 사이의 값으로 변형시킨 목표 값을 바탕으로 뉴럴네트워크를 수행하였다. 트레이닝에 의한 출력 값과 실제 측정된 표면 거칠기 Ra 와 비교한 값을 Fig. 13 에 나타내었다. 트레이닝결과 973603 반복학습 후 목표치 0.001 이하의 9.38705e-4 값에 도달하였다

6.3 센서융합 신호 기준의 표면 거칠기 예측

뉴럴 네트워크의 입력 층과 은닉 층 그리고 결과값의 구성과 데이터 그룹의 수는 6.1 절과 동일하며, 입력 및 트레이닝 데이터 그룹은 Fig. 14 와 같이 AE

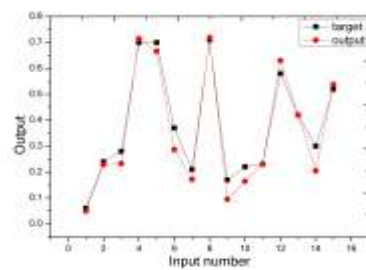


Fig. 15 Fusion results of Neural Network

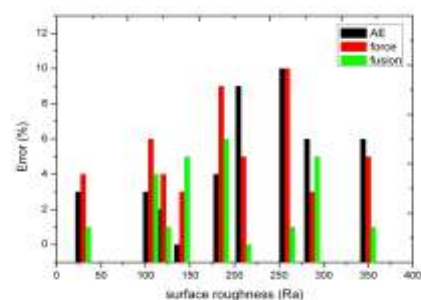


Fig. 16 Comparison of errors

rms, AE countrate, AE spectrum 등 AE 신호에서 얻을 수 있는 것과 force 센서에서 얻을 수 있는 마찰계수 값을 선정하여 입력 값으로 총 4 개를 선택하였다. 트레이닝결과 892388 반복학습 후 목표치 0.001 이하의 $8.902447e-4$ 값에 도달하였다. Fig. 15 는 센서융합 시 신호를 입력 값으로 했을 때 트레이닝 된 뉴럴 네트워크의 출력 값과 실제 측정된 표면 거칠기 값을 비교한 값을 나타낸 것이다.

Fig. 16 은 AE 센서 신호와 force 센서 신호의 값을 입력 값으로 하여 각각 뉴럴네트워크를 수행했을 때와 센서융합 시 값을 입력 값으로 뉴럴네트워크를 수행했을 때의 오차값을 비교한 그래프이다. AE 센서 신호의 경우 평균오차는 3.86%, force 센서 신호의 경우 평균오차는 4.33%, 센서융합의 경우 평균오차는 2.86%로 센서융합에 의한 입력 값으로 뉴럴네트워크를 수행하는 것이 가장 효율적임을 알 수 있다.

7. 결 론

본 논문에서 Stavax S136 을 시료로 하여 자성입자연마공정 중에 AE 센서와 Force 센서를 통해 신호를 획득하고, 획득된 신호를 입력 값으로 뉴럴 네트워크를 수행하여 표면 거칠기를 예측하는 실험을 진행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) MAF 공정에 영향을 크게 주는 인자는 간극, 입자크기, 이송속도였고 각각 인자에 따른 실험을 진행한 결과 AE rms 와 Force 센서의 수평력에서 얻은 마찰계수는 표면 거칠기 변화와 직접적 연관성이 있음을 알 수 있었다.

(2) MAF 공정 중에 실시간으로 얻을 수 있는 AE 센서와 Force 센서 신호를 분석하고 뉴럴 네트워크 입력 데이터 값으로 활용하여 10%이내의 오차로 표면 거칠기를 예측할 수 있었다.

(3) 뉴럴 네트워크를 통한 표면 거칠기 예측 시 AE 센서와 force 센서를 각각 사용하는 것보다 센서융합을 통한 예측 값의 평균오차가 감소하여 표면 거칠기 예측 신뢰성이 향상됨을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 미세 부품의 표면 품질은 약 8nm 의 표면 거칠기 값으로 향상 되었다. 또한 실시간으로 뉴럴 네트워크를 구동하여 공정 중 개선되고 있는 표면 거칠기 값을 예측/분석 할 수 있었다. 본 연구 결과를 자동 공정 제어 모델에 활용할 수 있어 MAF 공정 자동화 연구 기반을 마련하였다.

후 기

이 논문은 2006 년도 정부재원(교육 인적 자원부 학술 연구 조성 사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었습니다. (KRF-2006-041-D00311)

참고문헌

- (1) Choi, J. Y., Kim, H. H., Park, J. H., Jeong, H. D. and Seo, H. D., 2002, "A Study on Nano-Polishing of Injection Molds Using Fixed Abrasive Pad," *Journal of the KSPE.*, Vol. 19, No. 10, pp. 212~220.
- (2) Fleischer, J., Masuzawa, T., Schmidt, J. and Knoll, M., 2004, "New Applications for Micro-EDM," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 149, Issues 1-3, pp. 246~249.
- (3) Hocheng, H. and Hsieh, M. L., 2004, "Signal Analysis of Surface Roughness in Diamond Turning of Lens Molds," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, Issue 15, pp. 1607~1618.
- (4) Yamaguchi, H. and Shinmura, T., 2000, "Study of an Internal Magnetic Abrasive Finishing Using a Pole Rotation System- Discussion of the Characteristic Abrasive Behavior," *Precision Engineering*, Vol. 24, pp. 237~244.
- (5) Yamaguchi, H. and Shinmura, T., 2003, "Development of a New Precision Internal Machining Process Using an Alternating Magnetic Field," *Precision Engineering*, Vol. 27, pp. 51~58.
- (6) Ahn, B. W., 2003, "A Study on Nano Scale Precision Processing by Magneto-Rheological Fluid," M.S Thesis, Seoul National University of Technology.
- (7) Susi, E. and Grabec, I., 2000, "Characterization of the Grinding Process by Acoustic Emission," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, Issue 2, pp. 225~238.
- (8) Azouzi, R. and Guillo, M., 1997, "On-Line Prediction of Surface Finish and Dimensional Deviation in Turning Using Neural Network Based Sensor Fusion," *Int. J. of Mach. Tools and Manuf.*, Vol. 37, Issue 9, pp. 1201~1217.
- (9) Ahn, J. H., Lee, M. C., Jeong, H. D., Kim, S. R. and Cho, K. K., 2000, "Intelligently Automated Polishing for High Quality Surface Formation of Sculptured Die," *Journal of Materials Processing Technology*, 130-131, pp.339~344.
- (10) 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," *J. of KSPE*, Vol. 22, No. 10, pp. 90~98.
- (11) Kim, S. G., 2005, "A Study on the Relationship Between Machining Force Change and Surface Quality Improvement of Magnetic Abrasive Finishing Process," M.S. Thesis, Yonsei University.