

나노급 표면품위 유지를 위한 유연 자기연마시스템 개발

A flexible magnetic abrasive polishing system for the selective and stable finishing of nano scale precision parts

*오세룡¹, 안병운¹, #이성환²

*S. L. Oh¹, B. W. Ahn¹, #S. H. Lee(sunglee@hanyang.ac.kr)²

¹ 한양대학교 기계설계 및 메카트로닉스공학과, ² 한양대학교 기계공학과

Key words : Acoustic Emission, Surface Roughness, Magnetic Abrasive Finishing.

1. 서론

최근 초정밀 가공기술로 제작된 부품을 기반으로 하는 디스플레이/광학 시스템, 반도체, 그리고 바이오 기술 등 다각적인 분야의 발전으로 인해 반복정밀도 및 재현성이 우수한 나노급 공정 기술 개발에 대한 요구가 증가하고 있다. 필연적으로 초정밀/초미세 가공 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 다양한 부품형상 가공 기술에 대하여는 우수한 연구결과 및 상용화 성과가 발표되고 있다[1]. 하지만 마이크로-나노 부품의 표면 정밀도 향상에 대한 연구는 CMP[2], 전해연마[3] 등 광범위 평탄화 공정으로 편중 되어 다양한 부품 형상에 선택적이고 유연하게 적용할 수 있는 표면 정밀도 향상 기술이 필요하며, 이에 적합한 다목적 연마(Polishing)공정에 대한 연구가 반드시 진행되어야 한다. 초정밀/초미세 부품가공에 적용할 수 있는 폴리싱 공정 중 MAF(Magnetic Abrasive Finishing)공정은 자력을 이용하여 유연성 있는 연마 패드를 형성하는 기술로서 부품 손상 없이 서브 나노 스케일까지 표면 품위를 향상시킬 수 있어 유연성과 더불어 다양한 공정 조건에의 적용성이 뛰어난 특성을 가지고 있다[4].

본 연구는 마이크로-나노 스케일의 다양한 가공 구조물의 표면 품위 개선을 위한 polishing/finishing 시스템개발을 주요내용으로 한다. 먼저 기존 MAP 공정을 개선/보완하여 다양한 공정에 적합한 연마 입자 제조 및 공정조건 분석 등을 수행하고, AE 센서와 Force 센서의 센서융합을 통해 표면 거칠기를 예측/분석하였다[5]. 이러한 예측된 값을 활용하여 반복되는 작업 시 안정적으로 표면거칠기 값을 유지시키기 위한 Run-to-Run 통한 공정 제어 기술을 확립하는 연구를 진행하였다. 연구 결과를 통해 MAF 공정 자동화에 대한 연구 기반 확립을 기대 할 수 있다.

2. MAF 시스템

공구는 자화 특성과 가공성을 고려하여 SM34C 를 선택하여 3 단계로 제작하고 영구자석과 결합하는 방식으로 공구 끝단에서 자기장을 발생하도록 하였다. 영구자석과 결합된 공구는 CNC 밀링(MM-250S3)에 부착하여 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 재료 Stavax(S136)를 사용하였고 자성연마입자는 여러 가지 제조방법 중 입자 제조시간이 짧고 공정이 간단하며 제조 비용 또한 저렴한 결합제에 의한 결합법을 이용하여 자성입자와 연마입자를 결합하였다[3]. 자성입자와 연마입자는 6:4 의 비율로 혼합하였고 자성입자는 Carbonyle 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 이용하여 PAC-AEDSP-32 Board 를 통해 신호를 분석하였다. Force sensor 는 9257B model 을 적용하였고 획득한 신호는 PCIM-DAS1602 보드를 통해 분석하였다. 표면 거칠기는 Nano SurfaceProfiler(NV-P2020)을 이용하여 측정하였다.

3. 실험계획법에 의한 가공 특성 분석

Table 1 Level and value of parameters

Sign	Factors	Unit	Level 1	Level 2	Level 3
A	Rotative Velocity	rpm	400	600	800
B	Gap	mm	0.2	0.3	0.4
C	Abrasive size	μm	25~75	75~125	125~200
D	Abrasive quantity	g	0.2	0.3	0.4
E	Feed rate	mm/min	100	200	300

MAF 공정 성능에 영향을 미치는 인자들은 다양하며, 그 인자들의 조합에 따라 가공 결과는 변화한다. 따라서 우선적으로 중요 인자들이 가공성에 미치는 영향력을 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(R_a)를 측정/분석하였다. 분산 분석 결과를 기준으로 간극, 입자 크기, 이송 속도로 결정하였다.

4. MAF 가공조건 변화에 따른 신호 분석

간극 변화에 따른 AE 센서와 Force 센서 신호를 분석하였다. 가공 조건은 회전속도 1000rpm, 이송속도 200mm/min, 입자 크기 125~200μm, 입자량은 0.3g 으로 고정하였으며, 간극은 0.2, 0.4, 0.6mm 로 변화시켰다.

Fig. 1 의 (a), (b), (c)는 간극에 변화를 주면서 시간에 따른 AE 신호의 변화를 나타내었으며, Fig. 1 의 (d)는 간극과 시간에 변화를 주면서 표면 거칠기를 측정한 결과이다. AE spectrum 의 경우 시간 경과에 따른 누적 값을 나타내었으며, 가공 시간이 증가 할수록 AE 신호가 감소하는 경향을 나타냄을 알 수 있었다. 또한 R_a 값도 공정 시간이 증가하면서 8nm 로 감소하는 경향을 알 수 있었다. Fig. 1 을 통하여 AE 신호가 공정 시간 증가에 따라 감소하는 현상은 표면 거칠기가 점차적으로 감소함에 따른 현상으로 분석 할 수 있다.

Fig. 2 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. 2 의 (c), (d)는 간극이 0.2mm 일 때의 마찰계수와 표면 거칠기 (R_a) 값을 나타내고 있는데 시간이 지날수록 두 그래프 모두 감소하는 경향을 보여주고 있다. 간극에 따른 AE 신호의 분석 결과와 유사함으로 같은 이유로 분석 할 수 있다.

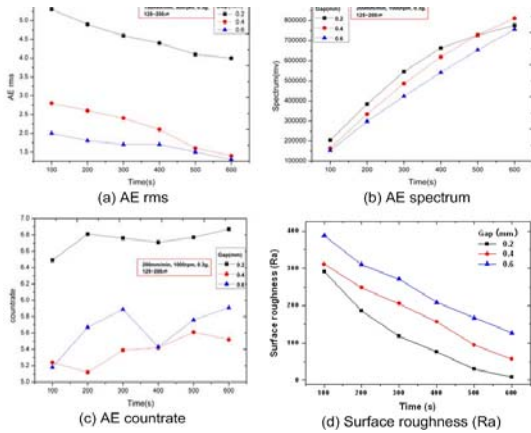


Fig. 1 Gap - AE signals

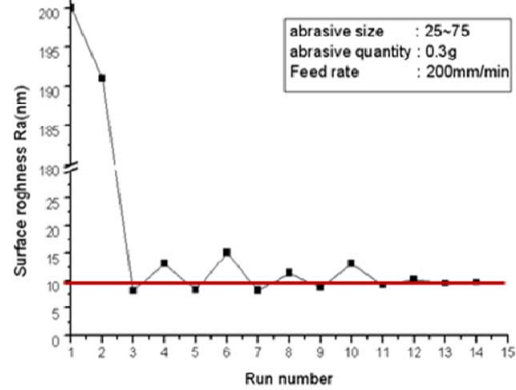


Fig. 3 Process control

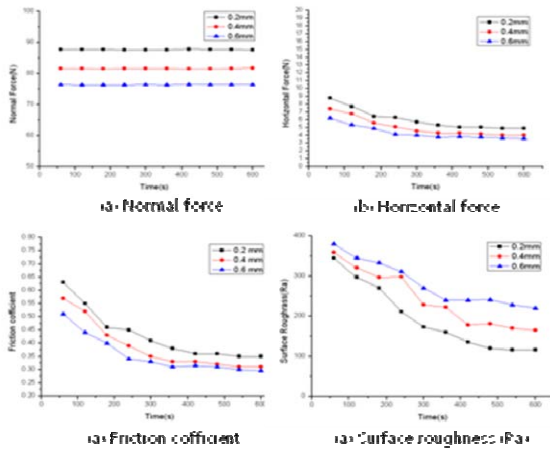


Fig. 2 Gap - Force signals

5. Sensor fusion 을 통한 표면거칠기 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. 뉴럴 네트워크 수행을 위해 총 41 개의 데이터 그룹을 이용 하였으며, 트레이닝을 위한 26 개의 데이터 그룹과 뉴럴 네트워크 입력을 위한 15 개의 데이터 그룹으로 구성하였다. 입력 및 트레이닝 데이터 그룹은 AE RMS, AE count rate, 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.

AE 센서 신호와 Force 센서 신호의 값을 입력값으로 하여 각각 뉴럴 네트워크를 수행하였을 때의 오차값을 분석한 결과 AE 센서 신호의 경우 평균 오차는 3.86%, Force 센서는 2.86%로 센서퓨전에 의한 입력 값으로 뉴럴 네트워크를 수행한 것이 효율적임을 알 수 있다.

6. 표면 품질 유지를 위한 공정제어(RTR control)

Run-to-Run control[6]은 불연속적인 공정 또는 특정한 기계의 공정이 최소의 오차와 변량을 갖게 하기 위한 방법으로 하나의 Run 이 끝날 때 마다 측정값을 출력값으로 하여 예측된 모델과 측정값 사이의 오차에 기초하여 업데이트를 진행하였다. 공정 제어 목표값은 금형공정에서 요구하는 표면 품질인 R_a 10nm 이하로 설정하였다.

첫 공정에 의해 측정된 출력값과 최초 공정의 입력값을 이용하여 제어모델이 업데이트 되고 모델 업데이트에 의한 제어 인자의 입력값이 새롭게 만들어 졌다. 초기 입력값을 제외하곤 매회 실험이 반복될 때 마다 입력값이 생성 되었고, 입력값에 의한 출력값, 즉 공정의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 표면 품질 유지를 위한 제어의 결과는 공정의 변화를 나타낸 그래프에서 알 수 있듯이 목표값인 표면 거칠기 R_a 10nm 범위로 빠르게 수렴해 가는 것을 볼 수 있었다.

7. 결론

1. 분산분석을 통하여 MAF 공정에 영향을 주는 인자로 간극, 입자크기, 이송속도임을 알 수 있었고 신호분석을 통하여 AE RMS와 마찰계수가 표면거칠기 변화에 직접적 연관성이 있음을 알 수 있었다.
2. 뉴럴 네트워크를 통해 표본 거칠기를 예측함에 있어서 AE 센서와 Force 센서를 각각 사용하는 것보다 센서융합을 통한 예측 값이 평균오차 2.86%로 가장 감소하여 표면 거칠기 예측 신뢰성을 향상시켰다.
3. 파라미터 분석을 통하여 결정된 공정 제어 모델을 이용하여 RTR 공정제어의 결과 목표값인 표면거칠기 R_a 10nm로 빠르게 수렴해 가는 것을 볼 수 있었다. 본 연구 결과를 통해 자동 공정 제어 모델에 활용할 수 있어 MAF 공정 자동화 연구 기반을 마련하였다.

참고문헌

1. J. Y. Choi, H. H. Kim, J. H. Park, H. D. Jeong, H. D. Seo, "A Study on Nano-polishing of Injection Molds using Fixed Abrasive Pad", Journal of the KSPE, Vol. 19, No. 10, pp. 212~220, 2002
2. J. Fleischer, T. Masuzawa, J. Schmidt and M. Knoll, "New applications for micro-EDM Journal of Materials Processing Technology", Vol. 149, Issues 1-3, pp. 246-249, 2004
3. H. Hocheng and M. L. Hsieh, "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, 2004
4. S. J. Park, B. W. Ahn, S. J. Lee, "Nano scale precision polishing characteristics using micro quill and magnetic chain structure" Journal of KSPE, Vol. 21, No. 8, pp. 34-42, 2004.
5. S. B. Kim, B. W. Ahn, S. H. Lee "Characterization of Magnetic Abrasive Finishing Using Sensor Fusion" KSME Journal, Vol. 5, Issue 33, 2009
6. B. W. Ahn, S. J. Park, S. J. Lee, J. H. Yoon, "Run-to-run process control and the analysis of process parameters using design of experiment in surface finishing" Proceedings of KSPE Conference, pp. 99-96, 2004