

자기유변유체를 활용한 연마공정에 대한 기초연구

황봉하*, 민병권, 이상조(연세대학교 기계공학부)

석종원(중앙대학교 기계공학부)

A Preliminary Study on Polishing Process using Magnetorheological Fluid

B. H. Hwang*, B.-K. Min, S. J. Lee (Sch. of Mechanical Eng., Yonsei Univ.),

J. Seok (Sch. of Mechanical Eng., Chung-Ang Univ.)

ABSTRACT

Among several polishing techniques for micro structures, polishing process using magnetorheological(MR) fluid has advantages in the finishing process of 3-D micro structures because abrasives in the fluid can reach surfaces with complex feature and play their role. Although many researchers have been trying to reveal its polishing mechanism of the MR polishing, it has not been successful because in-situ measurement of state variables is difficult and process parameters are complex. In fact, one of the key factors for applying process control methodologies, such as Run-to-Run control, is the measuring and monitoring of slurry quality because the process strongly depends on the fluid property. Therefore, it is necessary to maintain consistent slurry quality to guarantee the process repeatability. The proposed equipment achieves the longer life cycle of MR fluid and reduces the variability of products. A new method to measure the material removal rate in MRF polishing process is also proposed and discussed.

Key Words : Magneto-Rheological Fluid (MRF) polishing/finishing, Run-to-Run Control, Repeatability, Material Removal Rate

1. 서론

자기유변유체(Magneto-Rheological Fluid, 이하 MR 유체)를 이용한 마이크로 구조물의 연마 공정은 대상물의 표면 거칠기 개선, 특히 3차원 미세 구조물의 형상 정밀도를 유지하면서 연마가 필요할 때 사용할 수 있는 가공 방법이다. 이 때 사용하는 MR 유체는 인가되는 자기장의 세기나 형태에 따라 상이한 특성을 보이는 기능성 유체로써 다양한 분야에 널리 사용되고 있다. 그러나 이러한 MR 유체를 이용한 연마 공정은 화학-기계적 연마(Chemical Mechanical Polishing, CMP) 공정과 같이 공정의 입출력 변수간의 함수 관계가 명확히 규명되지 않았고, 공정 중에 원하는 상태 변수를 얻어내기가 힘들다는 문제점 때문에 현재까지 적절한 공정 제어 기법에 대한 연구가 이루어지지 않았다¹⁾.

한편 Run-to-Run 제어는 CMP나 photolithography 공정을 제어하기 위해 널리 사용되는 기법이다. 이

는 기존의 통계적 공정 제어 기법(Statistical Process Control, SPC)에 비해 가공 장치의 노화(aging)와 같이 가공 환경이 시간에 따라 변한다거나, 예상치 못한 외란(disturbance)이 발생했을 경우에 대한 유연한 대처가 가능하다는 장점이 있다. 즉, Run-to-Run 제어는 한 번의 단위 공정을 run 이라고 할 때, 각 run 을 마칠 때마다 얻어낸 측정 결과 및 축적된 통계 자료에 의한 피먹임(feedback)을 통해 다음 run의 가공 조건을 정하는 제어 알고리즘이다²⁾.

MR 유체를 이용한 연마공정은 전술한 바와 같이 CMP와 유사한 공정상의 문제점을 가지고 있다는 점에 착안하여 Run-to-Run 제어를 적용해보고자 한다. 그러나 가공 환경 및 조건에 따라 연마 패드로서의 역할을 하는 MR 유체의 점도 특성이 시간에 따라 크게 변하는데 이러한 MR 유체의 점도 변화는 일반적인 제어가 가능한 범위를 넘어서는 정도이다. 즉, 가공 시간이 지남에 따라 처음의 조건과는 전혀 다른 메커니즘으로 가공이 이루어지는 것이다. 결국

MR 유체의 점도를 일정한 수준으로 유지시켜 공정 상태를 시간에 대해 일정하게 유지시키는 것이 Run-to-Run 제어를 적용하는 데 있어 가장 중요한 기초 요구 조건이라고 할 수 있다.

이에 MR 유체를 이용한 연마 공정의 반복성(repeatability)을 보장하기 위한 새로운 장치를 고안하였다. 제작한 장치는 기존의 것에 비해 수 배 이상의 가공 수명을 보이며, 시간에 따른 가공 환경 및 조건의 변화를 최소화시킴으로써 MR 연마 공정에 있어 Run-to-Run 제어를 적용하여 가공 정밀도 향상 및 공정 최적화를 구현할 수 있는 기초 요구조건을 만족시킨다. 또한 시간이 지남에 따라 유체의 점도 변화뿐만 아니라 MR 유체와 연마제의 혼합물이 지속적으로 화학 반응을 함으로써 가공 성능이 떨어지게 되는데, 이 때 가공의 지속 가능성을 예측하기 위한 방법으로 시편의 재료제거율(Material Removal Rate, MRR)을 기준으로 하였고, 이를 측정하기 위한 새로운 방법을 도입하였다.

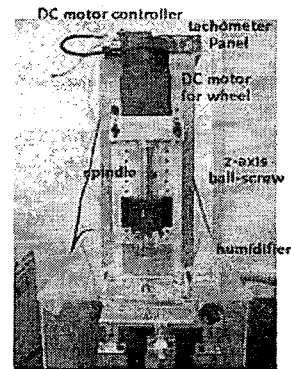
2. 실험 장치 구성

MR 유체를 이용한 연마 공정에서는 원하는 자기장을 인가시켜주는 것이 필수적인데 이를 위해 본 연구에서는 영구자석(permanent magnet)을 사용하여 시스템에 다양한 크기의 자기장을 부여할 수 있도록 하였다. 영구자석을 이용한 장치는 전자석의 경우와 비교하여 구조가 간단하며 비용 및 크기 측면에서 이점을 가지고 있다. 그러나 기존 장비의 경우 영구자석과 MR 유체의 분리 및 이의 재활용이 어렵다는 문제점이 있었다. 또한 물을 주요 용매로 사용하는 water-based MR 유체를 사용하기 때문에 시간이 지남에 따라 수분 증발에 따른 유체 점도의 심대한 변화가 나타나고 이로 인해 공정의 반복성(repeatability)을 보장하기가 현실적으로 불가능하였다. 즉, 상기 조건에서 유체의 특성 변화로 인한 외란은 일반적인 제어가 가능한 범위를 넘어서기 때문에 제어기법의 적용하는 것 자체가 불가능하다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하기 위해 새로운 장치를 설계, 제작하였다. 제작한 장비의 주요 특성을 정리하면 다음과 같다.

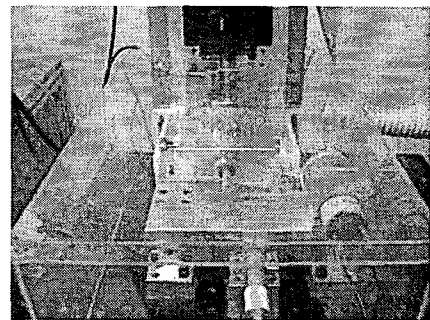
- 영구자석 사용 / 간단한 구조
- 공정의 반복성 향상
- MR 유체의 재사용 가능
- 가습기(humidifier)

Fig. 1은 실험을 위한 제작한 장비의 사진이다. 가공이 이루어지는 부분은 인클로저(enclosure)로 덮여 있으며 가습기를 이용하여 수분의 증발을 방지하

기에 적절한 습도를 유지할 수 있는 환경을 만들었다. 이는 MR 유체의 점도 변화에 의한 가공 결과의 변량을 최소화 시켜주기 위함이고, 실제로 유체의 수명 또한 크게 개선되어 한번 제조한 MR 유체를 이용하여 보다 많은 run의 실험이 가능할 수 있었다.



(a)



(b)

Fig. 1 Photographs of our novel polishing equipment: (a) the front view, (b) the top view

3. 재료 제거율 측정

MR 유체를 이용한 재료의 가공은 표면 거칠기 개선하고 동시에 형상 정밀도를 유지시킬 수 있는 장점을 가지고 있으므로, 시간이 지남에 따라 연마 공정의 성능(performance)을 측정하기 위해 공정 변수를 in-situ로 측정하는 것이 가장 이상적이다. 하지만 앞에서 설명한 바와 같이 미시적 재료제거 메커니즘을 정량적으로 해석하는 것은 매우 복잡하기 때문에 적절한 공정 변수를 선정하는 것은 쉬운 일이 아니다. 결국 가공 시편의 표면 거칠기와 재료 제거율을 계속해서 모니터링(monitoring)함으로써, 가공 조건 및 환경 변화에 따른 공정의 성능변화를 예측

하여야 한다.

일반적인 연마 공정에서 주로 표면 거칠기가 가공 결과를 판단하는 주된 기준으로 사용되었지만, MR 유체를 이용한 연마 공정의 경우 표면 거칠기뿐만 아니라 형상 정밀도의 유지 또한 중요한 관심 대상이므로 재료 제거율 또한 가공 성능을 판단하기 위한 중요한 기준이 된다.

3.1 측정 방법

우선 연마 공정에서 재료 제거율을 측정하기 위해 UV 레이저 가공법을 이용하여 웨이퍼 위에 요철 구조가 반복된 형상을 가지는 시편을 제작하였다. Fig. 2는 이러한 방법으로 제작한 scale 시편이다. 시편 위의 세 지점을 기준으로 하여 평형을 유지시키고 barrier를 설치하여 선택적으로 가공이 이루어지도록 한다. 그림에서 점선으로 표시된 직사각형의 내부가 실제로 가공이 이루어지는 부분이며 나머지 부분은 가공 전후 측정을 위한 기준면으로 이용한다. 이 때 사용한 시편은 가로 및 세로의 길이가 각각 2.3 mm, 10 mm로 가공 면적은 23 mm²이다.

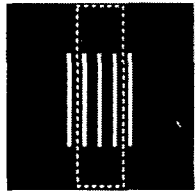


Fig. 2 The scale specimen for measuring MRR

Fig. 3에서는 측정 방법을 개략적으로 설명하고 있다. 가공이 이루어지면 첫 번째 그림에 도시한 것과 같은 초기의 요철구조가 두 번째 그림과 같이 바뀐다. 이 때, 기준선과의 높이 차이를 각 지점에서 측정하여 평균값을 얻을 수 있다.

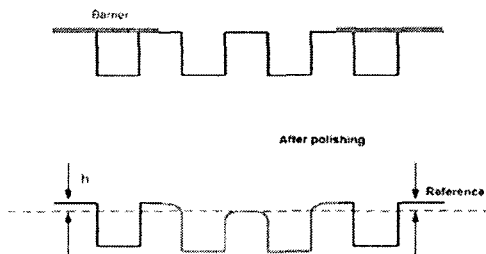


Fig. 3 The new method for measuring material removal rate in MRF polishing process

최종적으로 시간당 재료 제거율을 구하면 다음의

식(1)과 같다.

$$MRR = kA \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N h_n \quad (1)$$

여기서 k, A, N은 각각 비례상수, 연마 면적, 총 측정 횟수를 나타낸다.

다음의 Fig. 4는 연마 전후의 시편의 표면 상태 및 길이 변화 등을 위해서 관찰한 모습으로, 위상 변이 간섭계(phase-shift interferometer) 원리를 이용한 3차원 비접촉식 표면 측정기를 이용하여 측정한 것이다.

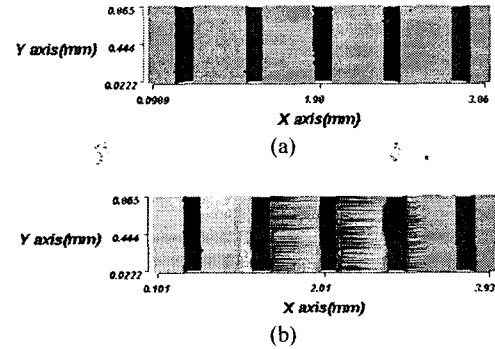
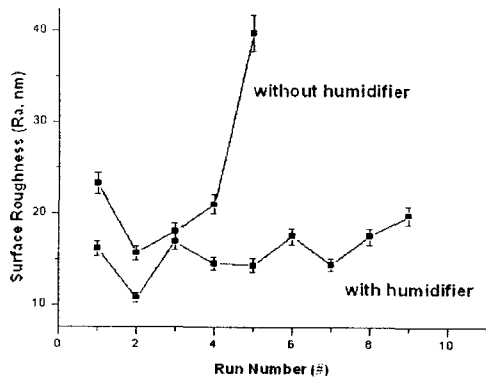


Fig 4 The top view of specimen for measuring MRR: (a) before polishing, (b) after polishing

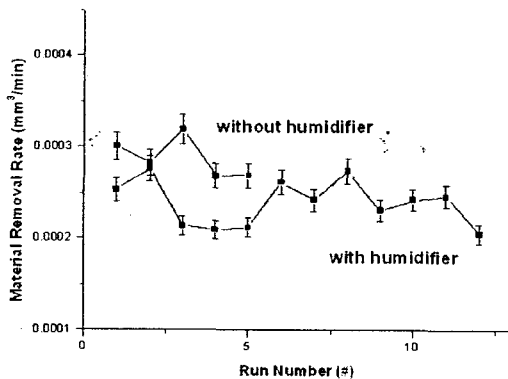
3.2 공정의 반복성(repeatability) 평가

본 연구에서는 한 번의 단위 공정은 1개의 웨이퍼를 연마하는 과정이다. 먼저 가습 조건의 유무에 따라 가공 성능을 측정하고 비교 평가하였다. 각 웨이퍼에 대해서 동일한 실험 조건을 적용할 경우, 웨이퍼 단위별로 발생할 수 있는 외란, 노이즈 등의 영향으로 인해 실제 가공 결과들의 변량(variance)이 나타난다.

다음의 Fig. 5는 가습 조건의 유무에 따라 가공 성능을 판단할 수 있는 인자인 시편의 재료 제거율과 가공 후의 표면 거칠기를 그래프로 나타낸 것이다. (a)와 (b) 경우를 비교해보면 일정 습도를 유지하여 MR 유체의 점도를 일정하게 유지시켜준 경우 유체 수명이 크게 증가함에 따라 좀 더 많은 run을 수행할 수 있을 뿐만 아니라, 가공 결과의 변량도 크게 줄어들었음을 확인할 수 있었다.



(a)



(b)

Fig. 5 The improvement of process repeatability: (a) surface roughness, (b) material removal rate

4. 결론

동일한 가공 조건을 적용하더라도 외란 등에 의해 공정 결과의 변량(variance)이 발생한다. 일반적으로 어떠한 시스템이든지 외란이 실제 출력에 영향을 미치게 되는데, 외란 제거(disturbance rejection) 모델링을 통해 이 점을 개선시킬 수 있다.

MR 유체를 이용한 연마 공정의 경우 시간에 MR 유체의 점도의 변화는 공정의 반복성을 구현하기 위해 반드시 고려해야 하지만, 이를 외란으로 모델링하기에는 무리가 있다. 즉, 연마 가공 시 마치 CMP에서 패드와 같은 역할을 하는 MR 유체의 점도 변화로 인해 가공 양상 자체가 바뀌기 때문에 이 점을 해결하지 못한다면 제어 기법의 적용을 통한 공정 최적화는 불가능하다. 이러한 이유로 MR 유체의 점도를 유지시키기 위한 장치를 제작하고 공정 성능을 평가하기 위한 방법을 고안하였으며 이를 통해 개선

된 장치의 유효성을 확인하였다. 또한 이러한 연구를 통해 MR 유체를 이용한 연마공정에 있어 Run-to-Run 공정 제어의 적용을 통한 공정 최적화를 구현하기 위한 기초 요구 조건을 만족시킬 수 있었다.

후기

본 연구는 산업자원부의 산업기술개발 조성사업인 마이크로 나노 점선 가공 구축기반 사업단의 지원으로 수행되었음

참고문헌

1. 이승환, 자기유변 유체를 이용한 미세 채널 구조물의 표면연마? 석사학위논문, 연세대학교, 2003
2. James Moyne, Enrique del Castillo, Arnon Max Hurwitz, "Run-to-Run Control in semiconductor manufacturing", CRC Press, 2001