

# 케미컬오일을 이용한 ERF 연마 특성

윤종호\*, 이재종+, 이응숙+, 이동주\*\*, 김영호\*\*\*

## Characteristics of ERF Polishing using Chemical-oil

Jong-Ho Yun\*, Jea-Jong Lee+, Eung-Sug Lee+, Dong-Ju Lee\*\*, Young-Ho Kim\*\*\*

### Abstract

Electro-rheological fluid is recently used for the micro polishing of 3-dimensional micro-aspherical lens. It's also used for polishing small area defects on the wide flat wafer. Since ER fluid shows a behavior of viscosity changing under certain electric fields, micro polishing efficiency may be enhanced for certain cases. In this paper, a perfluorinated carbonyl fluoride oil based ER fluids was used to improve surface polishing rate and submicron-scale accuracy. As the polishing electrodes, micro size cylindrical tools had been used for maximizing the electric field. An experimental device, which was applied for micro polishing a number of wafers of 4 inches in size and other workpieces, was made on a precision polishing system. It consisted of a steel electrode, a wafer fixture, 10mA current and DC 5kV power supply unit, and a controller unit. From the Experiments, the ER fluid is applicable for micro polishing of small parts.

**Key Words :** ERF(Electro-Rheological Fluid: 전기점성유체), Micro Polishing(미세 연마) Electric Field(전기장), Abrasives(연마재), Surface Roughness(표면 거칠기)

### 1. 서론

최근에 개발되고 있는 기술 중 미세화 부품을 개발하고 또 그 질을 높이는 연구가 요구되고 있다.

이러한 요구는 만족하기 위한 여러 가지 기술 중 초소형화한 부품의 표면 정도를 만족할 수 있

는 정도까지 도달하기가 쉽지 않다.

세계 반도체장비 및 재료협회(SEMI)와 미국의 각종 시장 전문조사기관들은 반도체 웨이퍼 연마기술과 관련이 있는 연마장치의 세계시장 규모가 매년 40%이상 성장할 것으로 예상 하고 있다.

초정밀가공에서는 기존의 기계가공으로 할 수

\* 발표자, 충남대학교 기계공학과(komang9@Kimm.re.kr)  
주소: 301-130 대전 중구 문화동 주공@ 202-203  
+ 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부  
++ 충남대학교 기계공학과  
+++ 한경대학교

있었던 서브미크론 단위를 벗어나 수나노급의 부품들을 요구하고 필요로 하고 있기 때문에 기계적인 공법과 병행하여 화학 및 전·자장에 의한 복합적인 마무리 공정이 요구 된다.

이러한 것을 해결하기 위해서 전기점성유체(ERF: Electro-Rheological Fluid)와 자성유체(MRF: Magneto-Rheological Fluid)를 사용하면 마이크로 폴리싱이 가능하다.

기존의 연마기법을 적용하여 부품을 가공했을 시에는 스톨이나, 연마재 등을 부품에 밀착하여 상대마찰운동에 의해 재료가 제거되어 원하는 형상을 만들었지만 정도나 품질에서의 한계에 이르렀다.

ER유체·MR유체는 반도체웨이퍼의 전역적 평탄화 기술인 화학적기계연마 (CMP: Chemical Mechanical Polishing)공정보다 고경질의 연마입자를 사용하기 때문에 고생산적 가공이 가능하고 소모성인 연마패드가 필요 없는 경제적인 가공기술이다. 또한 비접촉식 연마가 가능하기 때문에 가공 후 열에 의한 변형층이 최소화 되고, 표면의 잔류응력도 최소화 된다.

ER유체는 전기장을 인가하면 응답성이 빨라 그 점도가 변화하고 전기장의 세기에 따라 점성이 달라지기 때문에 전단력으로 사용할 수 있는 전단응력이 발생 한다. 하지만 ER유체의 자체 성분으로 경질의 재료를 연마하는 것은 한계가 있기 때문에 오일에 실리콘, 불소 등의 화학물질을 첨가한 ER유체를 사용하여도 화학물질의 침전 등으로 표면 조도가 Ra 200nm정도 나왔다. 하지만 기존의 ER유체에 녹말을 첨가 하면 연마재를 혼합하여도 침전되는 현상을 줄일 수 있기 때문에 보다 좋은 표면 조도를 얻을 수 있다.

전기장의 세기에 따라서 ER유체의 점성이 변하기 때문에 일정 이상의 전기장을 인가시키면 유체상태에서 클러스터가 형성되기 때문에 이를 규명 하려 했다.

본 연구에서는 종래의 실리콘오일과 녹말을 기반으로 하는 ER유체는 사용하지 않고, 연마특성 향상 및 침전으로 인한 클러스터(Cluster: 전기장에 의해 배열된 ER유체 미립자)끼집 현상을 제거하기 위한 방법으로 불소기반의 화학적 오

일을 이용하여 미소부품의 연마특성을 연구 했다.

## 2. 가공 특성

ER유체의 가공원리는 전기장의 세기에 따라 유체의 점도가 변하여 이를 전단응력으로 이용하면 혼합된 연마재가 공구의 회전으로 인해 ER유체와 함께 거동함으로써 연마 운동을 한다.

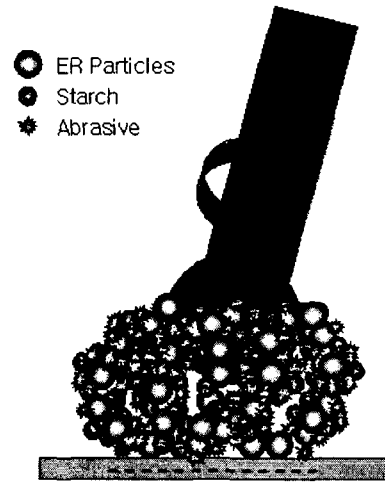


Fig. 1 Principle of Electrorheological Polishing

Fig. 1과 같이 ER-Particle이 연마재와 공구 사이의 양 전극사이에서 클러스터를 형성하는 과정에서 녹말과 연마재도 ER유체와 함께 거동하게 된다. 이때 녹말을 첨가하지 않고 연마재만을 ER유체 연마에 사용하면 처음 사용 시에는 원활한 가공이 이루어지지만 장시간 또는 반복사용 에는 연마재가 침전하는 현상이 나타난다.

가공 시에 가공물 표면의 극소 부위에 2~3ml의 ER유체를 공급한 후 공구와 가공물을 수십 $\mu$ m정도 간극을 두어 설치한 다음 양쪽전극에 전압을 걸어 주면서 회전시키면 전기장의 세기에 따라 화학기반오일에 첨가된 불소가 분사되면서 미소가공이 발생하며, 이때 오일과 연마재로 형성된 클러스터에 의해서 미소연마가

이루어진다.

### 3. ER유체의 종류와 운동 모드

#### 3.1 ER유체의 종류

ER유체는 입자계와 균일계의 2가지로 크게 분류되고 또 입자계(분산계) 중에서는 함수계 ER유체와 비수계 ER유체로 나뉘어 진다.

여기에서는 입자계를 사용하기에 이부분에 대해서만 설명하기로 한다.

입자계는 전기 절연유에 전기 분극성의 미립자를 분산시킨 콜로이드 용액으로 이러한 유체를 입자계 ER유체라 하고, 입자계 ER유체를 Fig.2 와 같이 나타냈다.

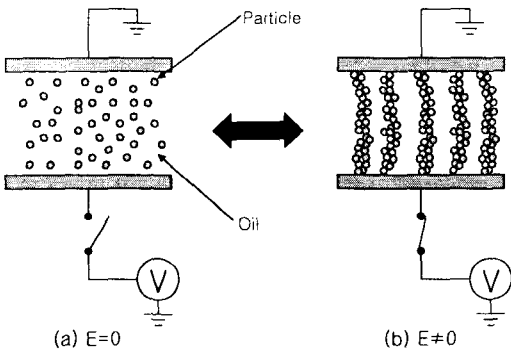


Fig. 2 dispersive ER Fluid

입자계 ER유체는 분산입자의 표면에 수분을 함유하는 함수계 ER유체와 수분을 포함하지 않는 비수계 ER유체로 나뉘고, 입자계 ER유체의 특징으로는 다음과 같다.

- ① 전기장의 세기에 따라 걸보기 점도 변화의 범위가 넓다.
- ② 전기장의 인가하면 msec정도로 빠른 시간내에 변한다.
- ③ 전기장으로 제어가 가능하고, 제거 시에 빠르게 원래의 성질을 순간적으로 회복한다.
- ④ 미립자의 침전에 의해 성능이 저하한다.

비수계와 함수계는 전기분극 현상이 나타나지만 분극현상의 메카니즘은 전기 이중층설로 설

명된다. 하지만 비수계 ER유체는 전장 중에 두면 입자 자신이 분극하여 클러스터를 형성한다. 따라서 함수계는 비수계보다 큰 전기점성 효과를 낼 수 있지만 고온에서 수분의 증발로 온도 변화가 생기기 때문에 ER효과의 성능저하를 가져올 수 있다. 전기장에 ER유체의 변화에 따른 항복 응력은 유체를 구성하는 용매의 종류와 점도, 입자의 종류와 크기 등 유체의 조성 조건에 따라 달라질 수 있다.

#### 3.2 ER유체의 운동 모드

ER유체의 거동을 측정하기 위한 유동 모드를 크게 3가지 유형으로 Fig. 3과 같이 나눌 수 있다. 두개의 전극중 하나는 고정되어 있고 다른 하나는 병진 운동 또는 회전을 하는 전단모드가 있으며 연마가공을 하기 위해서는 이 모드를 채택하여야 한다. 나머지 두 가지 모드 중 유동모드는 두개의 전극이 고정된 사이로 ER유체가 흐르는 형태이고, 압착모드는 두개의 전극 중 하나는 고정되어 있고 다른 하나는 고정되어 있는 전극의 수직 방향으로 민첩하게 움직이는 형태를 가지고 있다.

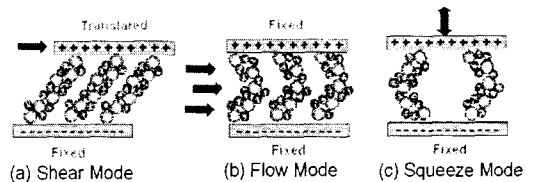


Fig. 3 Basic operation mode for ER Fluids

### 4. ER유체 연마 실험

#### 4.1 실험 시스템

케미컬오일을 이용한 실험 장비는 Fig.4 와 같이 구성 하였다. 주요 구성부는 스피들, 전극봉(공구), 회전형태이블, 전원공급 장치, 스피들과 테이블 속도 컨트롤러로 구성 하였다.

스피들은 1000RPM까지 사용할 수 있고 15° 정도 기울여 공구의 중심에서의 각속도  $\omega \neq 0$  이 되는 것을 방지 하였다.

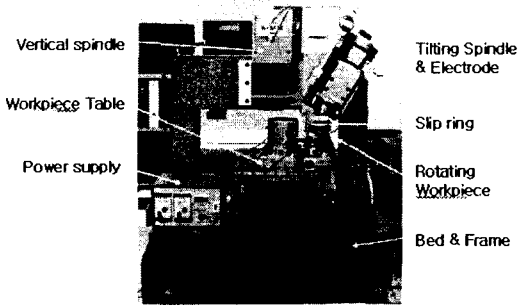


Fig. 4 Experimental set-up

전원은 DC 10kV, 10mA까지 사용할 수 있고 전기장인가 방식은 회전형 슬립링을 사용했다.

연마 시 실시간으로 모니터링 하기 위해서 CCD카메라를 설치해 감시 하였으며 실험 결과는 ZYGO(社)의 3차원 표면조도측정기를 이용하여 표면조도 값을 얻었다.

#### 4.2 실험방법 및 결과

케미컬오일을 이용한 ER유체 연마 실험은 Table.1에서 같은 조건에 의해 각각 상호 영향을 알아보는 실험을 수행 했다.

Table 1 Polishing Conditions

|           | Conditions#                      |
|-----------|----------------------------------|
| Abrasive  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   |
| Voltage   | 4kV                              |
| Ampere    | 0.3mA                            |
| Clearance | 50,80,100,150 $\mu$ m            |
| RPM       | 150,200,300,500,700,800,900,1000 |
| Work Time | 40,30,15,5min                    |

전압은 5kV이상을 인가하였을 시에는 기포와 함께 불꽃방전이 일어나는 현상을 볼 수 있는데 이는 코로나방전(Corona discharge)이 발생하기 때문에 4.5kV 이상은 인가하지 않았다.

코로나방전현상을 방지하기 위해서는 일단 전압을 낮추며, Clearance(공구와 가공물의 간격)도 멀리 해야 하지만 Clearance를 멀리하게 되면 전단응력이 약해져 연마가 이루어지지 않기 때문에 전압을 조정하여 실험 했다.

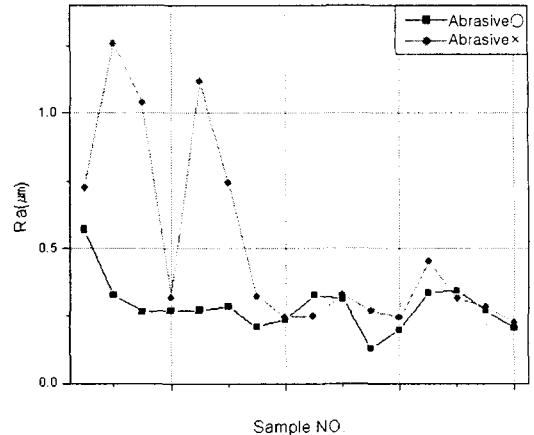


Fig. 5 Work time-Abrasive Relation

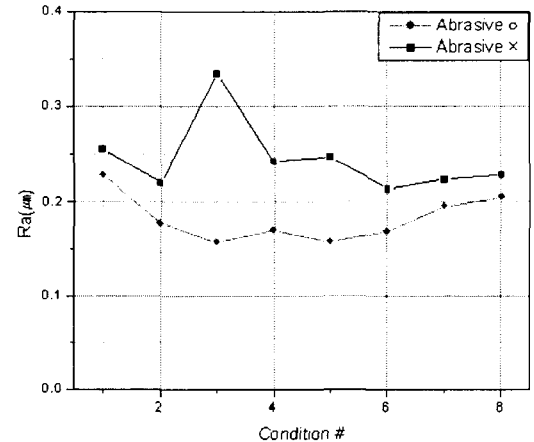


Fig. 6 Spindle Speed-Abrasive Relation

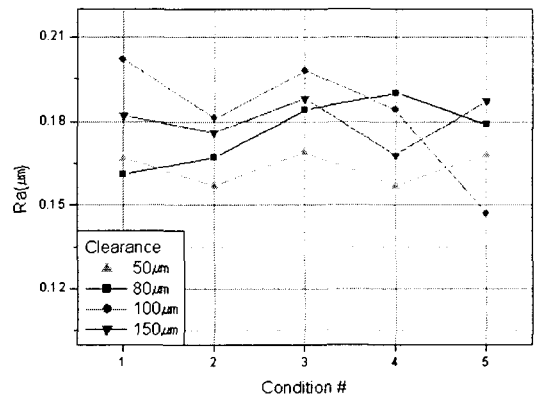


Fig. 7 Spindle speed-Clearance Relation

전극봉(Tool)은  $\varnothing 4$ 의 텅스텐 소재를 사용하여 SKD-11의 1Point를 연마하여 3차원표면조도측정기로 측정된 결과로 그 정도를 나타내었다. 연마제는 입자 Size  $0.05\mu\text{m}$ 의  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 파우더를 사용했다.

Fig. 5에는 (1)연마재 첨가와 가공시간이 변화함에 따라 가공 경향을 보면 사각심벌인 연마재를 첨가한 연마 방법이 Ra값에서 평균적으로  $50\text{nm}$ 이하 더 낮게 측정이 되었고, 가공시간은  $30\text{min}$ 에서부터 표면조도가 낮게 측정 되었다. Fig. 6은 (2)스핀들 스피드에 변화와 연마재 첨가에 따른 가공 경향을 나타내었다. 그래프를 보면 RPM 700에서 800사이에서 Ra값이 낮아졌다가 다시 높아지는 경향이 나타났다. Fig. 7에는 (3)스핀들 속도와 공구와 가공물 사이의 간격의 변화에 따른 가공 실험을 한 결과 간격이  $50\mu\text{m}$ 에서 가장 낮은 측정값을 얻었다. 하지만  $100\mu\text{m}$ 보다  $150\mu\text{m}$ 에서 더 좋은 결과를 얻은 것은 연마가 최소측정단위 보다 가공 되지 않아 래핑 면과 함께 측정되었기 때문이다.

케미컬 오일을 함유한 ER유체는 가공 방식에 의해가공 정도가 다르게 나오는 것을 볼 수 있었다. 위에서 언급한대로 함수계 ER유체는 장시간 사용을 하다 보면 미립자가 침전하고 또 수분을 포함하기 때문에 코로나방전을 하게 되면 수분도 증발하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 Fig. 7과 같은 조건으로 Fig. 8과 같이 가공방법을 (4)Open type에서 Close type으로 변경하여 실험을 해 보니 Fig. 9와 같은 결과를 얻었다.

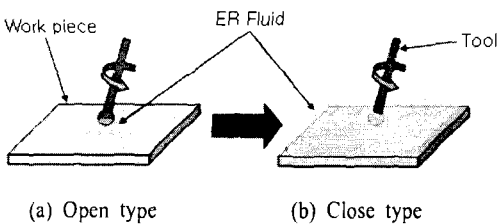


Fig. 8 Polishing type alteration

실선의 그룹은 변경전의 방법으로 가공하고자 하는 분위에 2~3ml의 ER유체를 분산시키고 연마

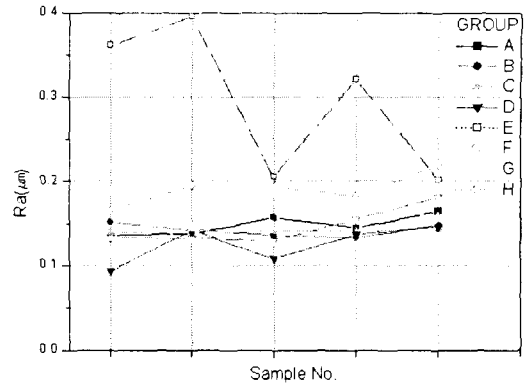


Fig. 9 Open type-Close type Relation

한 실험이고 점선은 공구의 끝단이 완전히 잠길 수 있도록 ER유체를 분산시켜 가공 하였으며, A,B,E,F SF-ER유체(실리콘·불소)를 C,D,G,H는 SFS-ER유체(실리콘·불소·녹말)를 사용하여 실험 하였다. 각각200, 300, 500, 700, 800 RPM을 주고 연마한 결과 Close type으로 RPM은 700, 800에서 낮은 표면조도 값 ( $150\text{nm}$ 이하)을 얻었고, SFS-ER유체가 SF-ER유체보다 좋은 결과 값이 나타났다.

Fig. 10은 3분씩 5회 연마 가공 후에 다시 전기장을 가했을 때의 클러스터 형상을 100배 확대 촬영한 사진이다.

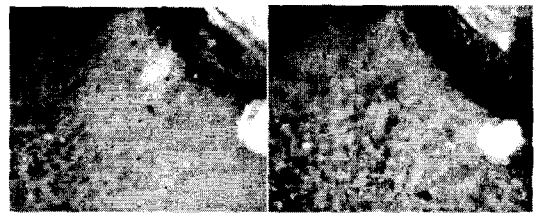


Fig. 10 Iteration experiment of cluster

Fig. 11은 (1)-(4)까지의 연마 실험 중 최적인 가공물의 표면조도를 측정된 결과이다.

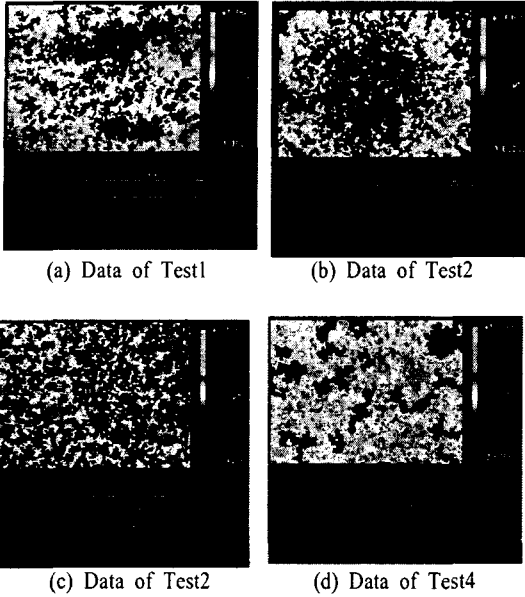


Fig. 11 Measured surface roughness

## 5. 결론

본 연구는 케미컬 오일을 ER유체에 첨가 하여 함수계 ER유체의 단점을 보완하려 하였으며 기존의 미세연마 방법에 있어서의 문제점을 파악해 새로운 연마기법과 시스템을 구축 하였다. 그리고 연마에 직접적으로 영향을 주는 조건을 선별하여 실험에 대입하여 ER유체를 이용한 미세연마 공정의 조건을 제시 하였다.

Silicone · Starch-oil에 분산시킨 ER유체와 연마재로 Alumina powder를 사용하여 SKD-11 랩핑 면에 대한 연마 가공실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. ER유체에 연마재를 첨가함에 따라 연마가공에 많은 영향을 끼치며 그 차이는 Ra 50nm 정도이고, 가공시간은 SKD-11의 경우 5min에서 가장 낮은 표면조도 값이 나왔고, 시간이 경과 하면서 다시 표면조도 값이 올라가는 경향이 나왔다.
2. 스피들 스피드는 ER유체의 점도를 고려해 700~800RPM일 때 가장 낮은 Ra156nm을 얻었다. 800RPM이상 되면 ER유체가 가공물과의

상대운동을 할 수 없어 공구회전 시 함께 회전 운동을 하지 못하는 현상으로 판단된다.

3. ER유체 연마 가공 시 5kV이상의 전기장을 인가했을 때에는 코로나방전으로 인해 연마 중 기포와 함께 불꽃방전이 생기기 때문에 필요시 5kV이상의 전기장을 인가할 시에는 clearance를 충분히 두어야 한다.
4. Clearance는 가까울 수록 연마효율이 상승하지만 50 $\mu$ m이하에서는 마찬가지로 코로나방전 현상을 보이기 때문에 이 현상이 일어나지 않는 50 $\mu$ m가 가장 낮은 표면 조도를 얻었다.
5. 가공시간이 장시간이며, 반복연마를 할 때에는 Fig. 8의 Open type 보다는 Close type 이 연마에 유리하고, SFS-ER유체를 사용하여 침전현상이 사라지기 때문에 낮은 표면 조도를 얻었다.

## 참고 문헌

- (1) J.J. Lee, E.S. Lee, K.H. Hwang and S.K. Min, "Micro-Polishing of Complex and Flat Parts using a Chemical Oil Based ER Fluid", ISBN Vol. 257-258, pp.477-482, 2004.
- (2) W.B.Kim, S.J.Lee, Y.J. Kim and E.S. Lee "Ultraprecision Polishing Technique for Micro 3-Dimensional Structures using ER Fluids", Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 19, No. 12, December 2002
- (3) B.G. Ahn, U.S. Choi, O.K. Kwon and T.J. Moon, " The Effect of the Activation of Phosphoric Ester Cellulose Particles on the Electrorheological Properties of

- Anhydrous ER Fluids", Journal of KSTLE, Vol. 14, NO. 3, pp. 7-16, 1998.
- (4) Akagami, Y., Nisimura, S., Ogawasara, Y., "Polishing of microholes using ER fluid under alternative electric Field", *Proceedings of the 6th international conference on Electro-Rheological Fluid, Magneto-Rheological Suspension and Their Applications*, pp. 803-808. 1997
- (5) T.Kuriyagawa, K.Syoji, "Development of ER fluid assisted machining for 3-D small parts," *J. of JSPE*, Vol. 65, No. 1, pp. 145-149, 1999.