

## CMP시 연마입자에 작용하는 마찰력에 관한 연구

김구연\*, 김형재\*, 박범영\*, 정영석\*, 정해도\*\*

부산대원\*, 부산대학교 기계공학부\*\*

### A study on the friction force caused by abrasives in chemical mechanical polishing

Goo-Youn Kim, Hyoung-Jae Kim\*, Beom-Young Park\*\*, Young-Suk Jeong\*\*, and Hae-Do Jeong

Pusan National University\*, Pusan National University\*\*

#### Abstract

Chemical Mechanical Polishing is referred to as a three body tribological system, because it includes two solids in relative motion and the slurry. On the assumption that the abrasives between the pad and the wafer could be a major reason of not only the friction force but also material removal during polishing. The friction force generated by the abrasives was inspected with the change of abrasive size and concentration in this paper. The variation of coefficient of friction with abrasive concentration and size could result from the condition of contact and load balance between wafer and abrasives carried by pad asperity. The simulation was performed in this paper and compared with the result of experiment. The material removal rate also estimated with abrasive concentration and size increasement.

**Key Words** : Friction Force, Abrasive Size, Abrasive Concentration, Chemical Mechanical Polishing

#### 1. 서론

화학 기계적 연마공정(Chemical Mechanical Polishing)은 슬러리(slurry)의 화학적인 작용과 연마입자의 기계적인 작용에 의해 전기 절연 층(Interlayer Dielectric Layer) 또는 금속 배선 층을 연마 하는 공정이다. 화학 기계적 연마기술은 연마 속도와 압력 외에도 패드(Pad)의 점탄성 거동, 슬러리의 유막, 슬러리의 화학 작용에 의해 웨이퍼의 표면에 발생하는 유기 박막, 온도, 습도 등의 다양한 변수로 인해 모든 변수를 포함한 연마 기구를 제안하기가 어렵다.

화학 기계적 연마는 상대 운동하는 두 고체인 패드와 웨이퍼(Wafer) 그리고 유막을 형성하는 슬러리로 이루어져있으므로 두 마찰면의 마찰계수(Coefficient of Friction)와 마멸(연마율)이 주요한

인자인 트라이볼로지 시스템(Tribological system)으로 인식 된다. 스트라이벡(Stribeck) 선도에서 무차원량인 Sommerfeld 수( $S = \eta v/p$ )에 따라 윤활 영역(Lubrication regime)이 경계층 윤활(Boundary lubrication), 혼합 윤활(Mixed lubrication), 탄성 유체 윤활(Elastohydrodynamic lubrication) 및 완전 유체 윤활(Hydrodynamic lubrication)으로 나누어 지고 이에 따라 연마기구가 달라지게 된다.

Runnel등은 완전 유체 윤활에 대한 화학 기계적 연마 공정의 모델을 제시하였다[1]. 그는 연구에서 완전 유체 윤활 상태에서 유체의 전단력과 슬러리의 압력이 연마율을 결정하는 것으로 가정한다. 반면, T.K. Yu등은 혼합 윤활 상태에서 패드와 웨이퍼의 직접 접촉을 가정한 모델을 제시하였다.

본 논문에서는 H.Y. Kim등이 제시한 바와 같이 패드와 웨이퍼의 직접접촉에 의한 입자의 긁어남(Ploughing)에 의해 연마가 일어난다고 가정하여

입자의 크기와 중량밀도(weight percent, wt%)에 따른 연마 결과를 고찰해 보았다[2].

## 2. 실험

### 2.1 실험 장치

실험에 이용된 장비는 지앤피 테크놀로지(주)의 4-6인치 화학적 기계적 연마 장비인 Poli-400장비를 사용하였다. 4인치의 열 산화막 웨이퍼를 연마 하였으며, 마찰력 측정에는 Kistler사의 9135B 힘 센서(Force sensor)를 사용하였다. 구체적인 실험 장치 구성은 표. 1에 나타내었다.

표 1. 실험 장치 구성

Equipment	Conditions
CMP Equipment	Poli-400
Pad	IC 1000(stack)
Pressure	500g/cm <sup>2</sup>
Velocity	60/60rpm
Wafer	4" Thermal Oxide
Sensor type	9135B(Piezo electric)

연마 시 발생하는 마찰력을 측정하기 위해서 그림. 1과 같이 공구 동력계를 연마헤드부에 설치하였다. 센서로부터 수신 된 신호는 전하 증폭기를 거쳐 A/D 변환기에서 디지털화 된 데이터로 변환 된 뒤 컴퓨터로 저장하여 처리하였다.

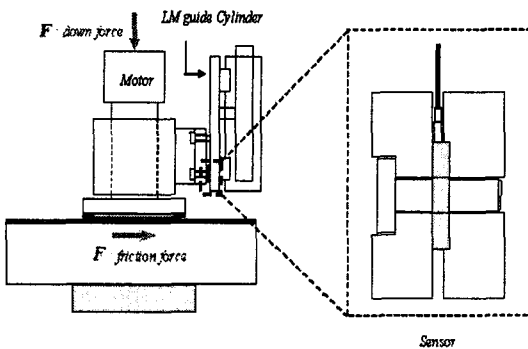


그림 1. 마찰력 측정 장치 개략도

### 2.2 실험 방법

입자 크기를 변화 시키면서 마찰력과 연마율 그리고 연마 균일도를 비교하였다. 입자는 콜로이드

실리카(Colloidal Silica)이며 크기는 18nm, 35nm, 80nm, 110nm로 변화 시키면서 4" 열산화 웨이퍼를 1분동안 연마하였다. 슬러리는 pH 2.3~2.5의 산성이었다.

또한, 입자의 중량밀도를 5, 10, 20, 30wt%로 희석하여 입자 크기에 따른 마찰력과 연마율 실험과 같은 조건으로 실험을 실시하였다. 구체적인 실험 조건은 표. 2에 나타내었다.

컨디셔닝(Conditioning)은 1분 연마 후 다이아몬드 컨디셔너(Diamond Conditioner)를 이용하여 60g/cm<sup>2</sup>의 압력에 60rpm의 속도로 30초간 컨디셔닝을 실시하였다. 입자의 크기가 다른 슬러리를 교체하기 전에 안정화(Break-in)를 위해 다이아몬드 컨디셔너를 이용하여 컨디셔닝을 3분간 실시 후 더미웨이퍼(Dummy Wafer) 가공을 실제 가공 조건과 같은 조건에서 2번 실시 하였다.

표 2. 실험 조건

	Conditions
Abrasive	Colloidal Silica
Size	18, 35, 80, 110nm
Concentration	5, 10, 20, 30wt%
pH	2.3-4
Polishing Time	1 min
Conditioning	Ex-situ
Temperature	22℃

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 한 개의 입자에 작용하는 마찰력

그림 2와 같이 입자가 웨이퍼 표면을 긁어 나갈 때 입자의 전반부만이 박막의 표면과 닿게 되며 또한 박막의 표면을 소성적으로 변형시키면서 진행하기 때문에 반경 R인 입자가 웨이퍼 표면을 긁어 나갈 때의 힘 f는 식(1) 같이 정의 된다.[3]

$$f = H_w R^2 \sin^{-1} \frac{a}{R} - \frac{a}{R} \left[ 1 - \left( \frac{a}{R} \right)^2 \right]^{1/2} + 2\tau R^2 \left[ 1 - \left( \frac{a}{R} \right)^2 \right] \quad \text{식(1)}$$

a는 입자의 접촉 반경, H<sub>w</sub>는 박막의 경도, τ는 입자와 박막이 접촉하는 면에서 작용하는 전단력이다. 입자의 압입 깊이가 반경에 비해 매우 작은 경우(a << R) 입자에 작용하는 마찰력은 식(2)와 같

이 나타낼 수 있다.

$$f = \left(\frac{2}{\pi^3}\right)^{1/2} R^{-1} H_w^{-1/2} w^{3/2} \quad \text{식(2)}$$

$\omega$ 는 입자에 작용하는 수직하중이며 식(2)에서 패드의 경도와 나머지 상수를  $k_1$ 이라는 새로운 상수로 고려하면 식(2)는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f = k_1 \cdot R^{-1} \cdot w^{3/2} \quad \text{식(3)}$$

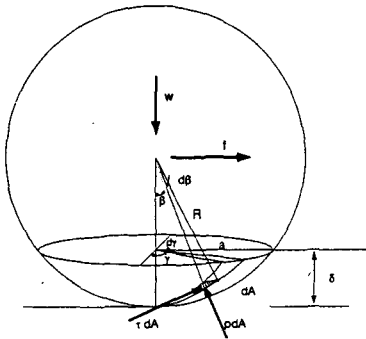


그림 2. 웨이퍼 표면을 긁어가는 입자

### 3.2 입자 크기와 중량농도에 따른 마찰력

입자의 크기를 18nm, 35nm, 80nm, 110nm로 변화 시키고 입자의 중량농도를 5, 10, 20, 30wt%로 증가 시키며 화학 기계적 연마 시 발생하는 마찰 계수를 측정된 결과를 그림 3.에 도시하였다. 입자 크기가 상대적으로 큰 경우 마찰계수의 크기가 급격히 증가하였다가 급격히 감소하고, 입자 크기가 상대적으로 작은 경우 마찰계수의 크기가 완만히 증가하였다가 완만히 감소하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 입자의 크기와 중량밀도에 따라 패드와 웨이퍼 사이에 존재하는 입자와 웨이퍼 사이의 접촉 조건이 달라지면서 나타나는 것으로 보인다.

그림 4.에서 보는 바와 같이 입자의 중량밀도가 큰 경우 패드의 직접 접촉 없이 입자만이 웨이퍼와 접촉한다고 가정하고 입자 하나에 작용하는 하중[2]으로부터 유도된 입자 한 개에 작용하는 마찰력( $f_{nc}$ )과 전체 마찰력( $F_{nc}$ )은 식(4),(5)와 같다.

$$f_{nc} = R^{-1} \cdot n^{-3/2} \quad \text{식(4)}$$

$$F_{nc} = K_2 \cdot R^{-1} \cdot n^{-1/2} \quad \text{식(5)}$$

$k_2$ 값은 패드의 경도, 입자가 연마에 참여할 확률 등을 포함하는 상수이며, R과 n은 각각 입자의 반경과 입자의 개수를 나타낸다.

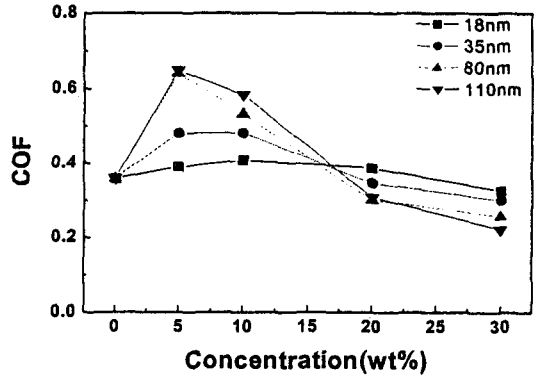


그림 3. 농도에 따른 마찰력 그래프

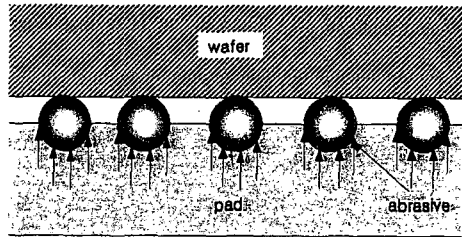


그림 4. 중량밀도가 높은 경우(non-contact mode)

그림 5.에 도시된 것과 같이 중량밀도가 낮은 경우 입자와 함께 패드도 웨이퍼와 접촉하게 된다. 이 경우 반경 R인 입자에 작용하는 하중은 패드의 탄성계수와 실 접촉 압력에 의해 결정된다[2]. 그리고 입자 하나에 작용하는 하중으로부터 유도된 입자 한 개에 작용하는 마찰력( $f_c$ )과 전체 마찰력( $F_c$ )을 식(6),(7)에 나타내었다.

$$f_c = k_2 \cdot R^2 \quad \text{식(6)}$$

$$F_c = n \cdot k_3 \cdot R^2 \quad \text{식(7)}$$

$k_3$ 값은 패드의 탄성 계수 및 패드에 작용하는 압력 등을 상수로 포함하고 있다. 식(5),(7)의 식을 이용하여 상대적으로 작은 임의의 입자 반경과 상대적으로 큰 임의의 입자 반경을 중량밀도의 함수로써 도시하면 그림 6.와 같이 나타내어진다. 접촉 조건이 변하는 천이 구간을 보간하면 시뮬레이션

결과에서도 실험에서와 같은 경향이 나타나는 것을 알 수 있다.

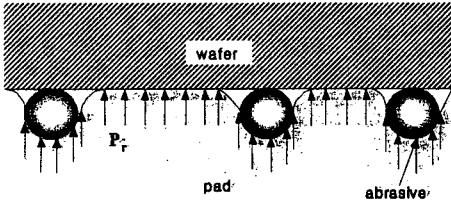


그림 5. 중량밀도가 낮은 경우(contact mode)

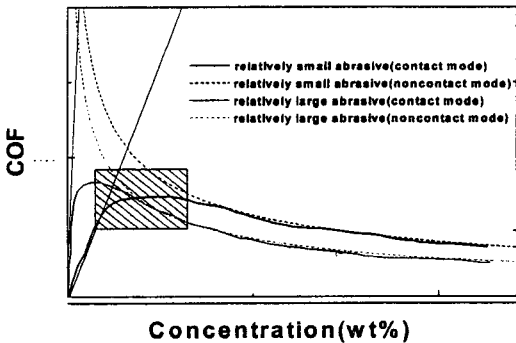


그림 6. 입자의 크기, 중량밀도에 따른 마찰계수 시뮬레이션 결과

### 3.3 입자 크기와 중량농도에 따른 연마율

입자 함량에 따른 연마율과의 관계를 그림 7.에 도시하였다. 입자 함량이 증가함에 따라 연마율이 선형적으로 증가함을 보인다. 입자 크기에 따른 연마율과의 상관관계는 그림 8.에 나타내었다. 입자가 동일한 중량밀도에서 직경이 작아질수록 연마에 참여하는 연마입자의 개수는 증가하게 되고 연마율이 증가하게 된다. 그러나, 입자 크기가 아주 작아지면 웨이퍼와 입자 사이의 직접 접촉 상태가 천이 되므로 연마율이 줄어드는 결과가 관찰되는 것으로 생각된다.

## 4. 결론

웨이퍼와 직접 접촉 상태에 있는 패드의 돌기와 웨이퍼 사이에 존재하는 연마 입자가 직접 연마에 참여하게 된다. 입자만이 웨이퍼에 접촉하는 상태와 입자와 패드가 같이 웨이퍼에 접촉하는 상태에 따라 입자에 작용하는 하중이 다르게 된다. 입자

크기, 함량에 따라 마찰력이 변하는 것은 입자-패드-웨이퍼사이의 하중균형에 의해 결정됨을 유도식과 시뮬레이션을 통하여 제시하였고 실험을 통하여 이를 검증하였다. 향후 과제로 연마 시의 압력에 변화를 주면서 접촉 조건에 따른 마찰력 변화 실험을 수행하는 것이 필요하겠다.

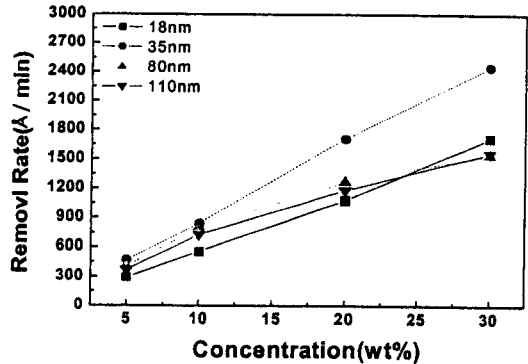


그림 7. 입자 중량밀도에 따른 연마율 그래프

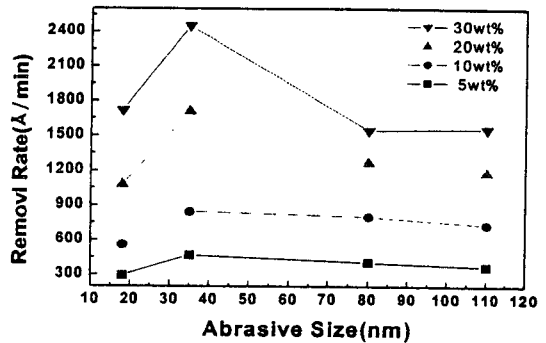


그림 8. 입자 크기에 따른 연마율 그래프

## 참고 문헌

- [1] Runnels S.R., Eyman L.M., Tribology Analysis of Chemical Mechanical Polishing, J.Electrochem. Soc. Vol. 141(6), p1698-1701, 1994.
- [2] 김형재, "CMP공정에서 재료 제거 기구에 영향을 미치는 접촉 계면 특성에 관한 연구", 부산대학교 공학박사 학위논문, 2003.
- [3] Suh N.P., Tribophysics. New Jersey, Prentice-Hall, 1986.