

CMP 공정에서 마찰에너지가 연마결과에 미치는 영향

이현섭* · 박범영* · 김구연* · 김형재* · 서헌덕* · 정해도**

(2004년 7월 8일 접수, 2004년 9월 3일 심사완료)

Effects of Friction Energy on Polishing Results in CMP Process

Hyunseop Lee, Boumyoung Park, Gooyoun Kim, Hyoungjae Kim, Heondeok Seo and Haedo Jeong

Key Words: Chemical Mechanical Polishing(화학기계연마), Friction Energy(마찰에너지), Coefficient of Friction(마찰계수), Removal Rate(연마율)

Abstract

The application of chemical mechanical polishing(CMP) has a long history. Recently, CMP has been used in the planarization of the interlayer dielectric(ILD) and metal used to form the multilevel interconnections between each layers. Therefore, much research has been conducted to understand the basic mechanism of the CMP process. CMP performed by the down force and the relative speed between pad and wafer with slurry is typical tribo-system. In general, studies have indicated that removal rate is relative to energy. Accordingly, in this study, CMP results will be analyzed by a viewpoint of the friction energy using friction force measurement. The results show that energy would not constant in the same removal rate conditions

1. 서론

CMP는 기계적 제거가공과 화학적인 제거가공을 하나의 가공방법으로 혼합한 연마공정을 말하며 웨이퍼 제조에서부터 소자 및 배선 형성 공정에 이르기 까지 광범위하게 적용되고 있는 기술이다.⁽¹⁾ ILD(interlayer dielectric)와 metal CMP는 디바이스 층의 모든 표면에서 지속적으로 적용되며 3차원 형상정밀도를 얻기 위해서 각 층을 광역평탄화(global planarization) 시키는 것이 목적이다. CMP 공정 중, 웨이퍼는 패드와 슬러리에 의해서 연마되어진다. 일반적인 CMP 장치에 있어서, 패드가 부착되어진 테이블은 단순한 회전운동을 하며, 웨이퍼를 지지하고 있는 헤드부는 회

전운동과 요동운동을 동시에 행하며 일정한 압력으로 가압한다. 웨이퍼는 표면장력 또는 진공 척(vacuum chuck)에 의해서 지지되어진다. 이러한 가압력과 캐리어(carrier) 자체 하중에 의해 웨이퍼 표면과 패드는 접촉하게 되고 이 접촉면의 미세한 틈 사이로 가공액인 슬러리(slurry)가 유동을 하여 슬러리 내부에 있는 연마입자와 패드의 표면 돌기들에 의해 기계적인 제거 작용이 이루어지고 슬러리내의 화학성분에 의해서는 화학적인 제거작용이 이루어진다.

CMP에서 연마율에 관하여 일반적으로 알려진 지배방정식에는 Preston 방정식⁽²⁾이 있다. 식 (1)에 나타낸 Preston 방정식은 연마율(removal rate)은 압력(P)과 상대속도(V)의 곱에 비례함을 나타내고, Preston 상수(k)는 패드의 특성, 슬러리의 특성 등과 같은 여러 가지 변수들을 포함하고 있다.

$$\text{Removal Rate(RR)} = kPV \quad (1)$$

CMP는 마멸을 막기 보다는 그것을 이용함으로써 재료를 제거해 나가는 공정이기 때문에 공정

* 책임저자, 회원 부산대학교 정밀기계공학과

E-mail : bestplay@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-3210 FAX : (051)518-8442

* 부산대학교 정밀기계공학과

** 회원, 부산대학교 기계공학부

에 따른 마찰력이 매우 중요하다. Ara Philipossian 은 그의 논문에서 동일한 상대속도 조건에서 압력이 높을수록 마찰계수는 커지지만, 일정 속도 이상에서는 압력의 영향을 찾을 수 없음을 보였다.⁽³⁾ A. K. Sikder는 슬러리 유량에 따라 마찰계수는 감소하고 상대속도에 따라서 마찰계수가 감소함을 보였다.⁽⁴⁾ 일반적으로 CMP의 연마율은 투입된 에너지와 비례한다고 알려져 있지만, 고려해야 할 변수가 많기 때문에 아직은 많은 연구가 진행되지 않았다. 본 논문에서는 CMP 공정중 동일한 외부온도, 슬러리 공급 조건에서 마찰에너지를 측정하여 연마결과와 비교 · 고찰함으로써 CMP 공정을 마찰에너지의 관점에서 접근해 보고자 하였다.

2. CMP의 트라이보 시스템

2.1 CMP 공정에서의 트라이볼로지

트라이볼로지(tribology)는 “tribos(문지르다) + -logy(학문)” 의 합성어로 널리 알려진 바와 같이 마찰(friction), 마멸(wear), 윤활(lubrication)에 관련된 학문이다.⁽⁵⁾ CMP 공정은 유체가 개입된 두개의 표면에서 상대속도와 압력으로 슬러리에 의해 급속히 반응하여 웨이퍼 표면에 산화층 또는 수화층이 형성되고 이 생성층 상에서 슬러리속의 입자에 의해 고상반응과 반응층 제거가 이루어진다. 이 때, 패드 - 슬러리 - 웨이퍼계 (CMP tribo -system) 사이에 마찰력과 마멸 및 온도가 발생하게 된다.(Fig. 1)

2.2. Stribeck 선도

유체가 개입된 상태에서 상대 운동하는 두 면의 접촉 상태는 Fig. 2에서 볼 수 있는 Stribeck 곡선에 의해 확인된다. Stribeck 곡선은 유체 배어

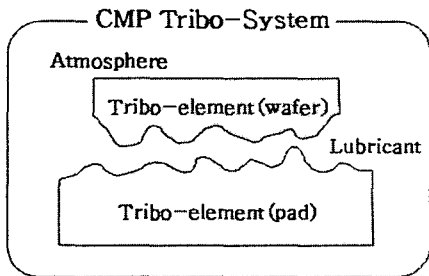


Fig. 1 CMP Tribo-System

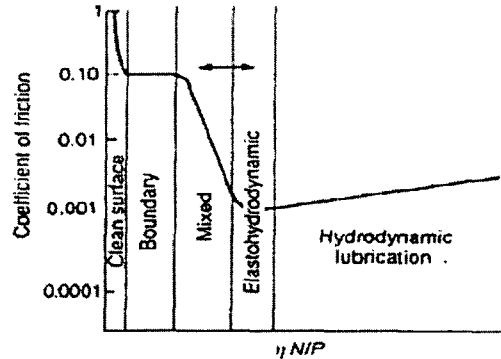


Fig. 2 Stribeck curve (η , N and P are viscosity, angular velocity and pressure)

링에서 유막의 두께와 마찰계수의 변화를 나타낸 것으로서 마찰계수에 대한 그래프에서 마찰계수 값이 최소값을 향해 변한 이후 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 적어도 하나 이상의 윤활 영역(lubrication regime)이 존재한다는 것을 말하며, 일반적으로 이 값은 표면 거칠기(σ)와 최소 유막 두께(h)에 따라 경계층 윤활(BL: boundary lubrication), 혼합윤활(ML: mixed lubrication), 탄성 유체윤활(EHL: elasto-hydro dynamic lubrication) 및 완전 유체 윤활(HL: hydrodynamic lubrication) 상태로 구분된다.

경계층 윤활에서는 하중이 크거나 속도와 점도가 낮은 조건에서 대부분 발생하며 두 면의 표면 돌기들이 직접 접촉하고 있거나 단 분자층 정도의 유체에 의해 분리되어 있다. BL은 정지 상태에서 상대운동을 시작할 때 발생하며 매우 높은 마찰계수 값을 가진다. 혼합 윤활 상태는 BL에서 EHL이나 HL로 전이할 때의 중간 영역으로서 돌기들의 직접 접촉이 접촉의 대부분을 차지하며 부분적으로 윤활막의 동압에 의해 지지되어 있다. 따라서 두면 사이의 응착(adhesion)이 발생하는 경우 계면에서의 마멸이 증가한다. EHL 영역은 유막에 의해 두 면이 완전히 분리되어 있으며, 부가된 하중은 모두 유체의 동압에 의해 지지되어 있다. 그러나 HL에 비하여 유막의 두께가 매우 작기 때문에 돌기들의 탄성 변형이 이루어지고 마멸입자 등이 개입되는 경우 유막의 파괴가 일어나게 된다. HL 영역은 표면 거칠기에 비해 유막의 두께가 매우 두꺼운 경우($h/\sigma > 5$)로서 두 면 사이의 마찰 현상은 유체의 점도와 유막 두께에 의존하며 압력에 대한 영향은 작다(Fig. 3)

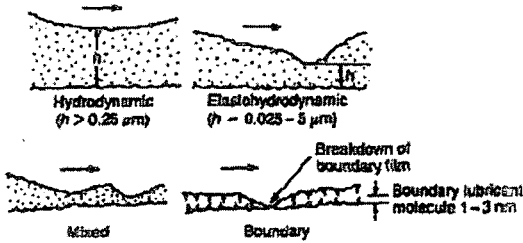


Fig. 3 Contact conditions along the lubrication regime

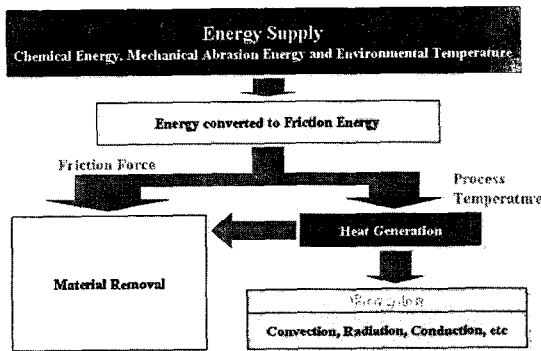


Fig. 4 Energy flow in CMP

결국 CMP에서는 공정 조건에 따라 이와 같은 윤활 영역 및 접촉 상태에서 실시된다.

2.3 CMP에서의 마찰에너지

CMP는 화학적 에너지, 기계적 에너지와 온도와 같은 공정 환경에 의한 에너지의 공급에 의해 재료를 제거해 나가는 공정이다.

CMP공정 중 에너지의 흐름은 Fig. 4에서와 같다. 공급된 에너지는 마찰에너지로 바뀌게 되고 그 에너지는 마찰력과 공정 중 온도로 바뀌게 되고 발생된 온도 중 일부는 손실되며 나머지는 슬러리의 온도를 상승시켜서 화학적인 에너지를 높이는데 참여한다. 재료의 제거는 마찰력과 온도의 상승에 의한 기계적 제거 작용과 슬러리의 화학적 작용에 의해서 발생하게 된다.

3. 실험장치 및 조건

3.1 마찰력 측정장치

실험은 G&P POLI400을 사용하였으며 POLI400 장비에 CMP시 발생하는 마찰력을 측정할 수 있

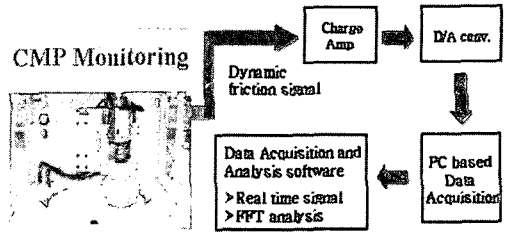


Fig. 5 Flow chart of CMP monitoring

Table 1 Experiment conditions

Slurry	ILD-1300(Rohm and Haas)
Slurry flow rate	150cc/min
Wafer	4in thermal-oxide (10000 Å)
Pressure	100 ~ 820g/cm ²
Velocity	30 ~ 110rpm
Conditioning	ex-situ
Pad	IC1000/Suba400 stacked
Temperature	23°C

는 센서(piezoelectric quartz sensor)를 장착하여 CMP시 발생하는 마찰력에 의하여 센서가 변위를 일으켜 그 전압값을 출력하게 되면, 이를 증폭·변환하여 실시간으로 마찰신호 값을 획득할 수 있게 하였다. 마찰에너지는 마찰력을 시간에 따라 적분하고 상대속도를 곱해주어 계산하였다.

3.2 실험조건

실험은 윤활영역을 확인하기 위하여 $n/v/p$ (sommerfeld No.) 값에 따른 마찰에너지를 측정하고, 슬러리 입자 함량에 따른 마찰에너지와 마찰계수, 마찰에너지와 연마율에 관해서 먼저 진행하였으며, Preston 방정식을 기초로 하여 연마율 예측한 후, 정해진 연마율에 따른 마찰에너지에 관한 실험을 실시하였다. 슬러리(slurry)는 Rohm and Haas사의 ILD-1300을 사용하였으며, 웨이퍼(wafer)는 4인치 thermal oxide 웨이퍼(10000 Å)를 사용하였다. 실험조건은 table 1에 나타내었다.

연마율은 RUDOLPH사의 AUTO-EL을 사용하여 edge 양끝 5mm를 제외한 웨이퍼 반경방향으로 5mm 간격으로 19포인트에서 박막의 두께를 측정하였다.

4. 실험 결과

4.1 마찰에너지와 Sommerfeld 수와의 관계

Fig. 6은 앞서 연마율을 예측한 조건에서의 $\eta v/p$ 값과 마찰에너지와의 관계를 나타낸 것이다. ILD CMP에서 연마압력과 속도 공정 조건을 감안한다면 패드 돌기와 웨이퍼 사이의 직접 접촉이 대부분을 차지하고 부분적으로 윤활막의 동압이 발생하는 혼합윤활 상태에서 연마가 실시된 것으로 보여 진다. 그림에서 보듯이, 동일한 $\eta v/p$ 값이라도 그 마찰에너지 값은 연마조건에 따라서 다르고 $p \times v$ 값이 서로 다르기 때문에 연마율도 달라짐을 알 수 있다.

4.2 마찰계수와 마찰에너지와의 관계

Fig. 7은 슬러리 입자함량이 변할 때, 압력 500g/cm², 헤드와 테이블의 상대속도 45.2m/min로

고정된 조건에서 마찰력 측정 장치를 통하여 측정된 마찰계수와 마찰에너지와의 관계를 나타낸 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이, 마찰계수와 마찰에너지는 대략 선형적인 관계를 보인다. 마찰계수는 마찰력과 선형적인 관계를 가지지는 않지만, 마찰에너지는 마찰력의 시간에 대한 적분 값과 상대속도 곱이기 때문에 마찰계수와 선형적인 관계를 가지는 것으로 보여 진다.

4.3 입자함량에 따른 마찰에너지, 마찰계수, 연마율의 관계

ILD CMP 공정에서 슬러리 입자함량이 변할 때, 압력 500g/cm², 헤드와 테이블의 상대속도 45.2m/min로 고정된 조건에서 입자함량에 따른 마찰에너지와 마찰계수를 Fig. 8에 나타내었다. 또한, Fig. 9에는 입자함량에 따른 연마율을 도시하였다. 입자함량에 따른 마찰계수 그래프의 특성과 입자함량에 따른 마찰에너지의 그래프는 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다.

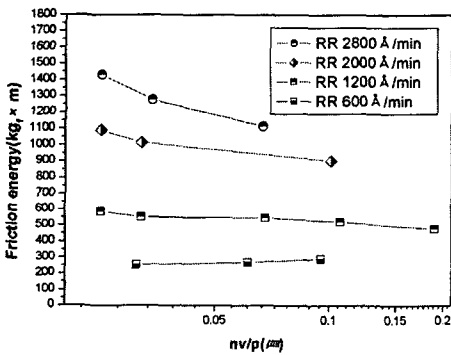


Fig. 6 Friction energy as a function of $\eta v/p$ (η , v and p are viscosity, angular velocity and pressure, respectively)

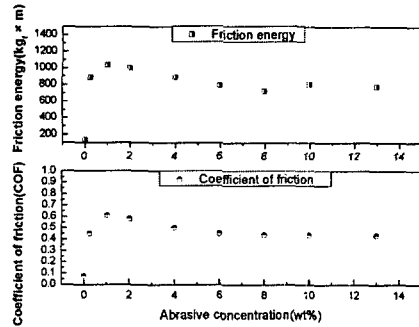


Fig. 8 Friction energy and coefficient of friction as a function of abrasive concentration

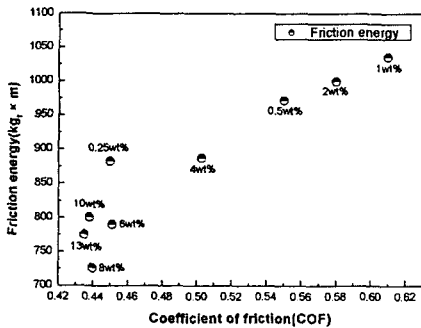


Fig. 7 Friction energy as a function of coefficient of friction along abrasive concentration

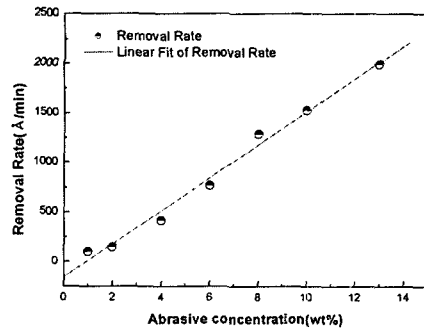


Fig. 9 Removal rate as a function of abrasive concentration

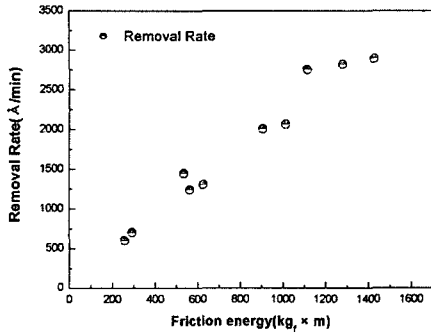


Fig. 10 Removal rate as a function of friction energy

마찰계수와 마찰에너지는 입자함량 2wt%까지 증가하다가 그 이후로 서서히 감소한다. 그 이유는 입자량이 적을 때는 입자가 패드와 웨이퍼 사이에서 미끄럼접촉을 하지만 임계값을 지나고 나면, 구름접촉을 하기 때문으로 보여 진다. 그리고, Fig. 9에서와 같이 입자량이 늘어나면서 재료의 제거량이 증가하는 이유는 입자함량에 따라서 연마에 참여하는 입자수가 달라지기 때문이라고 생각한다.⁽⁶⁾

4.4 마찰에너지와 연마율과의 관계

Fig. 10은 ILD1300 슬러리의 적정 사용 입자함량인 13wt%에서 가공 압력과 속도를 100 ~ 820g/cm²와 30 ~ 110rpm로 변화시키면서 마찰에너지와 연마율을 측정 한 결과이다.

마찰에너지와 연마율은 선형적인 관계를 가짐을 알 수 있다. 따라서 CMP공정에서 가공에너지는 연마율에 영향을 미친다고 할 수 있다. CMP 공정 중에는 슬러리의 화학적 제거와 압력과 상대속도로 인한 기계적 제거가 동시에 이루어지기 때문에 그로인해 나타나는 마찰에너지가 클수록 연마율도 커지는 것으로 보인다.

Fig. 11은 앞서 시행한 속도와 압력을 변화 시킨 실험을 통하여 연마율을 예측하고, 그 예측된 연마율 중 600Å, 1200Å, 2000Å, 2800Å (P×V = 7680, 19500, 36780, 53400) 조건에서 마찰에너지와 연마율과의 관계에 관하여 실험을 한 것이다. 이 실험을 통해서 동일한 연마율을 보이는 조건이라도 그 마찰에너지 값은 서로 다름을 알 수 있었다. 그 이유는 일정한 연마율을 보이려면 어

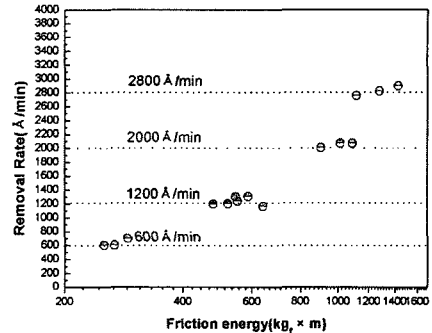


Fig. 11 Selected removal rate as a function of friction energy

는 정도 이상의 에너지가 필요로 하는데, 서로 다른 가공 조건에서 필요 이상의 에너지들은 열에너지와 진동에너지로 손실되기 때문이라고 생각한다.

5. 결론

본 연구에서는 CMP 공정시, 마찰력 측정 장치를 통하여 마찰에너지와 CMP 결과와의 관계에 대하여 고찰해 보았다. 그 결과, 같은 윤활영역이라도 마찰에너지 값은 연마조건에 따라 다르고 연마율 역시 달랐다. 또한, 입자함량에 따른 마찰에너지와 마찰계수, 마찰에너지와 연마율은 선형적인 관계를 가지지만, 같은 연마율을 가지는 조건이라도 마찰에너지는 다를 수 있다는 점을 알 수 있었다. 그 이유는 일정한 연마율을 얻기 위해서는 어느 정도 이상의 에너지가 필요로 하는데 가공 조건에 따라서 필요한 양 이상의 에너지들이 열에너지와 진동에너지로 손실되기 때문이라고 생각한다. 그리고, 입자함량에 따른 마찰에너지는 입자함량에 따른 마찰계수와 비슷한 경향을 보이며 입자함량이 증가할수록 연마율이 높아짐을 알 수 있었다. 따라서, CMP에서의 마찰에너지는 CMP 결과에 있어서 매우 중요하며, 원하는 연마율을 얻기 위해서는 적절한 마찰에너지가 연마에 참여할 수 있는 공정조건을 찾는 것이 중요하다고 할 수 있다.

참고문헌

(1) Yeau-Ren Jeng, Pay-Yau Huang and Wen-

- Chueh Pan, 2003, "Tribological Analysis of CMP with Partial Asperity Contact," *Journal of The Electrochemical Society*, 150 (10) G630-G637
- (2) Preston, F. W., 1927, *J. Soc. Glass Technol.*, 11, 214
- (3) Ara Philipossian and Erin Mitchell, 2004, "Mean Residence Time and Removal Rate Studies in ILD CMP," *Journal of The Electrochemical Society*, 151 (6) G402-G407
- (4) SILKDER, A.K., FRANK GIGLIO, JOHN WOOD, ASHOK KUMAR, and MARK ANTHONY, 2001, " Optimization of Tribological Properties of Silicon Dioxide During the Chemical Mechanical Planarization Process," *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, Vol. 30, No. 12
- (5) Bhushan, B., 1999, "Handbook of micro-nano tribology," CRC Press Inc, Boca Raton
- (6) Wonseop Choi, Seung-Mahn Lee and Rajiv K. Singh, 2001, "Effects of particle concentration in CMP," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 671, pp. M5.1.1-M5.1.6