

CMP 공정에서 마찰력 측정을 통한 마멸 및 윤활 특성에 관한 연구

박범영*, 김형재*, 서헌덕*, 김구연*, 이현섭*, 정해도**

부산대학교 정밀기계공학과*, 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소**

Characteristic of the Wear and Lubrication using the Friction Force Measurement in CMP Process

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

Precision and Mechanical Eng., Pusan National Uni., ERC, Pusan National Uni.**

Abstract

Chemical mechanical polishing(CMP) process was studied in terms of tribology in this paper. CMP performed by the down force and the relative motion of pad and wafer with the slurry is typically tribological system composed of friction, wear and lubrication. The piezoelectric quartz sensor for friction force measurement was installed and the friction force was detected during CMP process. Various coefficient of friction was attained and analyzed with the kind of pad, abrasive and the abrasive concentration. The lubrication regime is also classified with $\eta v/p$ (η , v and p ; the viscosity, relative velocity and pressure). Especially, the co-relation not only between the friction force and the removal per unit distance but also between the coefficient of friction and within-wafer-nonuniformity was estimated.

Key Words : chemical mechanical polishing(화학기계연마), friction force(마찰력), wear(마멸), lubrication(윤활), coefficient of friction(마찰계수)

1. 서론

CMP 공정은 웨이퍼 제조에서부터 소자 및 배선 형성 공정에 걸쳐 광범위하게 적용되는 기술이다 [1]. 화학적 재료 제거(etching)는 일반적으로 등방성을 띄지만, CMP는 패턴의 요철을 이방적으로 제거할 수 있는 특성을 가짐으로써 여러 평탄화 방법에 비하여 비교적 긴 평탄화 길이(planarization length)를 얻을 수 있다. 슬러리는 박막의 화학적 반응에서 에칭에 의한 재료 제거를 피하도록 설계됨으로, 대부분의 박막 재료 제거는 기계적인 마찰과 마멸 현상에 의해 이루어지게 된다. 따라서 본 연구는 이러한 재료 제거 기구를 트라이볼로지 관점으로 접근함을 목적으로 하며, 마

찰력 측정 장치를 CMP 장비에 설치하여 공정 중 마찰력 및 마찰계수를 실시간 획득하여 연마결과와 관계를 파악하고자 한다.

2. CMP 트라이보 시스템

2.1 CMP 공정과 트라이볼로지

트라이볼로지(tribology)는 상대 접촉 운동 중에 서로 상호 작용을 하는 두 표면과 이에 관련된 물체에 대한 과학·기술이다[2]. 즉, 트라이볼로지란 말은 “문지르다”라는 의미를 갖는 그리스의 말 “tribos”와 학문을 의미하는 “-logy”의 합성어로서 널리 알려진 바와 같이 마찰(friction), 마멸(wear), 윤활(lubrication)에 관련된 학문이다. 이를 배경으

로 CMP 공정은 슬러리(slurry)라는 유체가 개입된 두 개의 표면이 상대속도와 압력을 가지고 운동을 하는 전형적인 윤활과 마멸을 이용하는 공정이기 때문에 이러한 패드-슬러리-웨이퍼 계(CMP tribo-system)의 상호작용의 결과로서 연마 면에서 발생하는 마찰력과 온도, 표면의 마멸이 발생하게 된다(Fig. 1).

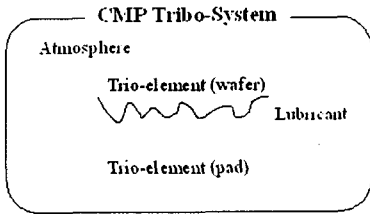


Fig. 1 CMP Tribo-System

2.2 Stribeck 선도

유체가 개입된 상태에서 상대 운동하는 두 면의 접촉 상태는 Fig. 2에서 볼 수 있는 Stribeck 곡선에 의해 확인된다[3]. Stribeck 곡선은 유체 베어링에서 유막의 두께와 마찰계수의 변화를 나타낸 것으로서 마찰계수에 대한 그래프에서 마찰계수 값이 최소값을 향해 변환 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), 혼합 윤활(ML: mixed lubrication), 탄성 유체 윤활(EHL: elastohydrodynamic 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. 결국 CMP에서는 공정 조건에 따라 이와 같은 윤활 영역 및 접촉 상태에서 실시된다.

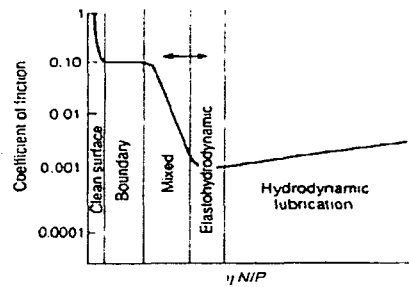


Fig. 2 Stribeck curve (η , N and P are viscosity, angular velocity and pressure)

3. CMP 공정에서 마찰력 측정

3.1 마찰력 측정 장치

CMP 공정에서 마찰, 마멸, 윤활 특성을 알아보기 위해 CMP 장비(GNP POLI 400)에 가공 중 마찰력을 측정할 수 있는 센서(piezoelectric quartz sensor)를 설치하였다(Fig. 3). CMP 중 발생하는 마찰력에 의해 가압된 센서는 변위를 일으켜 특정 전압값을 출력하게 되며 이를 증폭·변환하여 연마 실시간에 걸친 마찰신호값을 획득하게 된다.

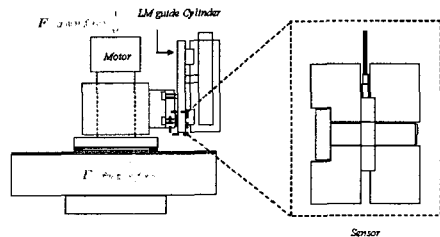


Fig. 3 Schematic of CMP polisher

3.2 CMP 공정과 마찰 측정

설치된 마찰력 측정 장치를 이용하여 ILD CMP

공정 중 발생하는 마찰 신호 값을 획득하였다. Fig. 4와 같이 연마시간 동안 마찰 신호는 연마 초기에 가장 높은 값을 보이면서 시간이 지남에 따라 마찰력은 감소하여 평형 상태에 가까워지고 있다. CMP 공정 초기 마찰 신호값의 큰 감소는 패드의 점탄성 변형에 의한 현상이라 생각되며 이후 지속적인 마찰 감소는 점탄성 변형은 물론 패드의 표면거칠기 감소 및 포어(pore)의 눈막힘 현상(glazing)에 관계하는 것으로 보인다. 공정간(ex-situ)으로 컨디셔닝(conditioning)이 되었을 경우 공정중(in-situ) 컨디셔닝 방법에 비해 마찰신호가 상대적으로 크게 감소함을 볼 수 있다. 하지만 다시 공정중 컨디셔닝이 적용되었을 경우 마찰력 신호가 공정간 컨디셔닝일 때 마찰력 신호값에 도달함을 볼 수 있다.

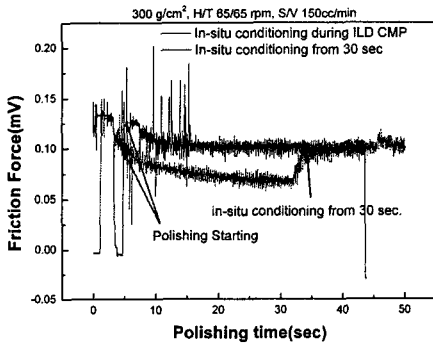


Fig. 4 Polishing time vs. friction force

4. CMP 공정에서 트라볼로지 실험

4.1 패드 종류에 따른 윤활 특성

마찰력 측정 장치를 이용하여 패드 종류에 따라 (IC1000/Suba400 stacked, IC1000) 압력(p), 상대속도(v)의 공정 조건을 변화 시켜서 윤활영역에 대한 마찰계수(COF: coefficient of friction)를 측정하였다. 슬러리는 ILD1300을 사용하였으며, 슬러리 유량은 150cc/min이다. 또한 연마압력을 100~600g/cm²까지 변화시킴으로써 동마찰계수(static COF)를 측정하여 그 범위를 Fig. 5에 나타내었다.

IC1000/Suba400 Stacked 패드의 경우 IC1000 하부에 연질의 패드가 접착되어 있어 패드의 압축률, 점탄성 거동 등과 같은 물리적 특성이 다르므로 nv/p의 전 범위에서 IC1000보다 낮은 마찰계수를 보이며 정마찰계수도 작게 나타난다. 그리고 연마

압력이 낮고 연마속도가 빠를수록 마찰계수는 빠르게 증가하고 있음을 볼 수 있다. ILD CMP에서 연마압력과 속도 공정 조건을 감안한다면 혼합윤활 상태에서 연마가 실시된다는 점을 알 수 있으며, 이때 패드 돌기와 웨이퍼 사이의 직접 접촉이 접촉의 대부분을 차지하고 부분적으로 윤활막의 동압이 발생할 것으로 생각된다.

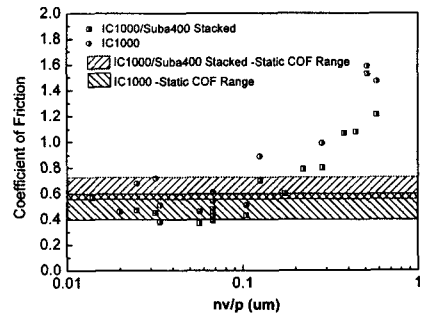


Fig. 5 nv/p vs. coefficient of friction (n , v and p are the viscosity, relative velocity and pressure)

4.2 연마입자 함량에 따른 마찰 특성

연마입자 함량에 따른 마찰 및 마멸 특성을 파악하기 위하여 13wt% 실리카(silica) 입자를 가지는 ILD1300 슬러리와 9wt% 세리아(ceria) 슬러리를 희석하여 연마압력 500g/cm², 상대속도 0.75m/sec의 동일한 조건에서 CMP를 실시하여 Fig. 6과 같은 결과를 얻었다.

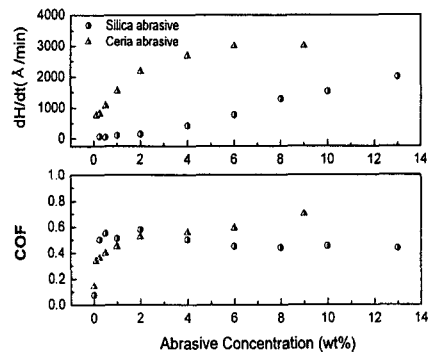


Fig. 6 Abrasive concentration vs. COF and removal rate

실리카 입자는 2 wt% 부근에서 최대 마찰계수를 나타내며 입자 함량이 증가하면서 오히려 마찰계수는 감소하여 6-13wt% 구간에서는 마찰계수의

변화는 거의 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. 이와 동시에 연마제거율(dH/dt)은 입자 함량이 증가하면서 증가한다. 실리카 입자와 비교하여 세리아 입자는 입자 함량이 증가할수록 마찰계수는 낮은 함량에서 빠르게 증가하다가 대략 2wt% 이후 큰 변화가 없다. 세리아의 연마제거율은 마찰계수와 유사하게 증가하지만 실리카 입자에 비해 낮은 함량에서 큰 연마제거율을 나타내고 있다.

4.3 마멸과 CMP 결과와의 관계

ILD CMP 공정에서 마찰과 마멸의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. 마찰력과 연마제거율(dH/dt)은 상관 관계가 없으나 단위 거리에 대한 연마제거량(dH/ds)과는 선형적인 관계를 이루고 있다.

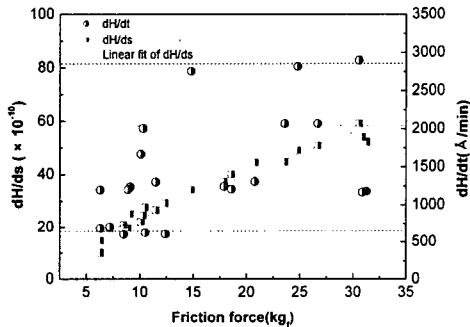


Fig. 7 Friction vs. dH/dt and dH/ds

Fig. 8은 마찰계수와 연마불균일도(WIWNУ)의 관계를 나타내고 있다. 연마불균일도는 혼합윤활, 탄성유체윤활, 완전 유체윤활의 3개의 영역에 대한 연마제거율이 대략 600, 1200, 2000, 2800 Å/min인 압력과 속도 조건에서 CMP를 실시하여 계산되었다. 결과 대체적으로 마찰계수가 증가할수록 연마불균일도는 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 패드와 웨이퍼에 작용하는 수직 응력[4]의 합(resultant force)이 웨이퍼와 패드 사이에 작용하는 마찰력의 장비 헤드부 회전 중심(gimbals center)에 대한 모멘트와 모멘트 평형을 이루기 위해 웨이퍼에 작용하는 지점과 관련되어진다. 즉, 마찰계수가 커질수록 웨이퍼 외주쪽으로 합력의 작용점이 이동하게 되어 웨이퍼 외주 부의 마멸량을 높임으로써 웨이퍼 전면에 걸친 불균일한 박막 제거를 일으키게 된다.

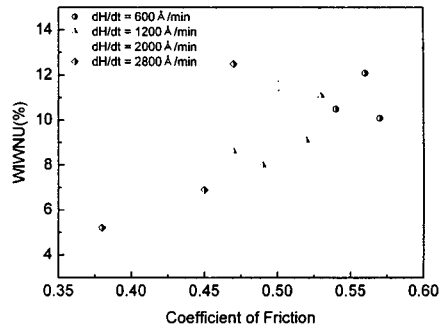


Fig. 8 Coefficient of friction vs. WIWNU

5. 결론

본 연구는 CMP 공정을 마찰력 측정 장치를 통하여 마찰, 마멸, 윤활을 총칭하는 트라볼로지 관점에서 고찰하였다. 그 결과, CMP 중 연마패드 종류에 따라 마찰 현상의 정도가 다르며 윤활 영역을 파악하여 접촉 상태를 예상할 수 있다. 또한 연마입자와 그 함량에 따라 다른 마찰 및 마멸 특성을 보인다. 마지막으로 마찰력은 단위 거리당 연마제거량에 비례하며, 마찰계수가 증가하면 연마불균일도가 증가함을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] A. K. Sikder, F. Gigio, J. Wood, A. Kumar, M. Anthony, "Optimization of tribology properties of silicon dioxide during the chemical mechanical planarization process", J. of Electronic Materials, Vol. 30, No. 12, 2001.
- [2] B. Bhushan, "Handbook of micro-nanotribology", CRC Press Inc, Boca Raton, 1996.
- [3] B. Bhushan, "Principles and applications of tribology", New York, John Wiley & Sons, 1999.
- [4] D. Wang, J. Lee, K. Holland, T. Bibby, S. Beaudoin, T. Cale, "Von-mises stress in Chemical Mechanical Polishing Process", J. of Electrochemical Society, Vol. 144(4), pp 1121-1127, 1997.