

CMP에서의 스틱-슬립 마찰특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Stick-slip Friction in CMP

이현섭¹, 박범영¹, 서헌덕¹, 박기현¹, 정해도^{2,a}

(Hyunseop Lee¹, Boumyoung Park¹, Heondeok Seo¹, Kihyun Park¹, and Haedo Jeong^{2,a})

Abstract

Stick-slip friction is one of the material removal mechanisms in tribology. It occurs when the static friction force is larger than the dynamic friction force, and make the friction curve fluctuated. In the friction monitoring of chemical mechanical polishing(CMP), the friction force also vibrates just as stick-slip friction. In this paper, an attempt to show the similarity between stick-slip friction and the friction of CMP was conducted. The prepared hard pad(IC1000/Suba400 stackedTM) and soft pad(Suba400TM) were tested with SiO₂ slurry. The friction force was measured by piezoelectric sensor. According to this experiment, it was shown that as the head and table velocity became faster, the stick-slip time shortened because of the change of real contact area. And, the gradient of stick-slip period as a function of head and table speed in soft pad was more precipitous than that of hard one. From these results, it seems that the fluctuating friction force in CMP is stick-slip friction caused by viscoelastic behavior of the pad and the change of real contact area.

Key Words : CMP(chemical mechanical polishing), Friction force, Friction force monitoring, Stick-slip, Viscoelastic behavior

1. 서론

CMP(chemical mechanical polishing)는 슬러리(slurry)의 화학적인 반응과 헤드와 테이블의 압력과 상대속도에 의한 기계적 가공을 이용하여 재료의 표면을 평탄화(planarization) 하는 공정이다. 일반적으로 ILD(inter layer dielectric) CMP나 STI(shallow trench isolation) CMP처럼 산화막을 제거하는 공정에서는 화학적인 작용보다 기계적인 제거작용이 주된 역할을 하지만, Metal CMP에서는 화학적인 작용이 더 크다고 알려져 있다. CMP에서의 마찰력 모니터링(monitring)은 이러한 화학적, 기계적 요인에 의한 마찰 신호의 변화를 감

지함으로써 연마 메커니즘을 연구하거나, CMP시 연마종질을 검출하는 등 많은 이점을 지니고 있다. 이러한 이유로 세계적으로 많은 연구자들이 마찰력 모니터링 장치를 이용한 연구에 몰두하고 있다. Philipossian등은[1] CMP의 마찰 특성을 저널베어링에서의 윤활이론과 접목시켜 CMP에서의 재료 제거 메커니즘을 설명하였다. Park 등은[2] CMP에서 슬러리의 종류에 따른 마찰특성의 차이를 입자의 구름과 미끄럼 운동의 관점에서 설명하였다.

이 논문에서는 마찰력 모니터링 장치를 이용하여 스틱-슬립 마찰 이론과 CMP에서의 마찰현상을 비교·분석하여 웨이퍼스캐일에서의 CMP 연마 메커니즘을 알아보려고 하였다.

1. 부산대학교 정밀기계공학과
(부산시 금정구 장전동 산 30)
2. 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소
a. Corresponding Author : hdjeong@pusan.ac.kr
접수일자 : 2005. 1. 27
1차 심사 : 2005. 3. 14
심사완료 : 2005. 3. 17

2. 스틱-슬립 마찰

2.1 스틱션

스티션(stiction)은 정지 상태에서부터 부드럽게 가

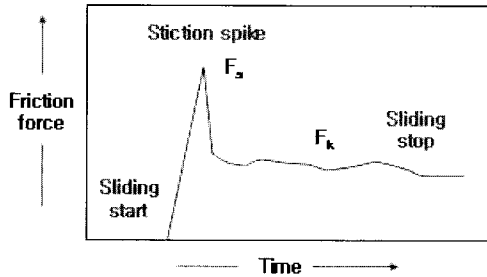


그림 1. 스틱션과 스틱션 스파이크.
Fig. 1. Stiction and stiction spike.

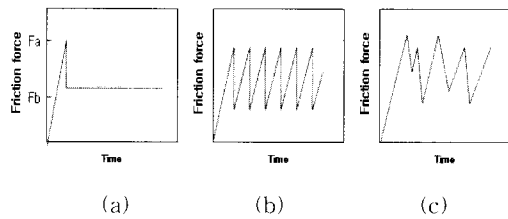


그림 2. 슬라이딩 운동역학 (a) 안정된 슬라이딩 (b) 주기적인 스틱-슬립 (c) 무질서한 운동.
Fig. 2. Sliding dynamics for three different cases (a) steady sliding (b) periodic stick-slip motion (c) chaotic motion.

속되는 것보다 갑자기 비트는 동작(jerk)을 일으키는 두 개의 움직이는 표면에 의해 얻은 높은 초기 마찰력 F_s 이다. 이것은 표면 손상과 마멸을 일으키는 주요 원인으로 알려져 있다.

스티크-슬립을 이해한다는 것은 스틱-슬립의 스파이크(spike)가 움직이는 운동부위의 파손과 마멸의 가장 큰 원인이고 진동 및 소음을 유발하기 때문에 트라이볼로지(tribology)에서는 실제적으로 가장 중요하다[3]. 그림 1에서 F_s 는 정지마찰력, F_k 는 운동마찰력을 뜻하며, 그림 2는 슬라이딩 운동 중 일어날 수 있는 마찰력의 변화율 도시한 것이다.

2.2 스틱-슬립 마찰 모델

2.2.1 거친 표면 모델

급격한 슬립은 한 표면의 돌기가 다른 표면의 돌기 위를 지나갈 때 발생 할 수 있다. 그림 3은 시스템의 탄성적 강성도가 높지 않을 때, 불규칙한 스틱-슬립을 만드는 거친 표면에 관련된 Rabinowicz 모델[3]을 보여주고 있다. 이 모델은 돌기의 높이, 기울기, 미끄럼 속도, 표면의 탄성한도, 움직

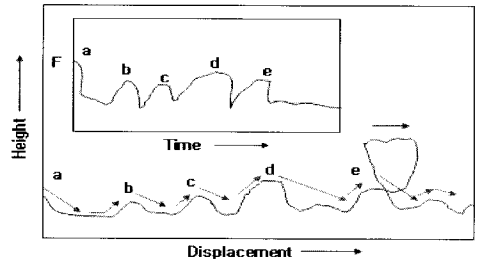


그림 3. 거친 표면의 스틱-슬립 모델.
Fig. 3. Stick-slip of rough surface model.

이는 면에 따라 달라지는 다양한 슬립을 할 것이다. 이것은 때때로 AFM(Atomic force Microscope) 탐에 의하여 측정되기도 한다[4,5].

2.2.2 속도에 의존하는 마찰 모델

경계막에서 마찰력이 미끄럼 속도(sliding velocity)를 증가시킴에 따라 감소한다면, 운동을 시작하는데 필요함 힘 F_s 는 운동을 유지하는데 필요한 힘 F_k 보다 더 높다. 즉, 미끄럼 속도 V_0 에 따른 고유마찰력(intrinsic friction force) F_0 의 감소는 사이클 당의 빠른 가속 동안에 빠른 감속을 따라서 수반하는 주기적인 패턴으로 이동하는 미끄럼 표면의 결과이며 미끄럼 속도가 커질수록 그 주기는 감소한다. 그림 4에서 V 는 슬라이딩 속도, V_c^* 는 스틱-슬립에 대한 임계속도를 의미한다. 스틱-슬립 현상은 일반적으로 슬라이딩 속도가 임계속도를 넘어서면 사라지게 된다[6].

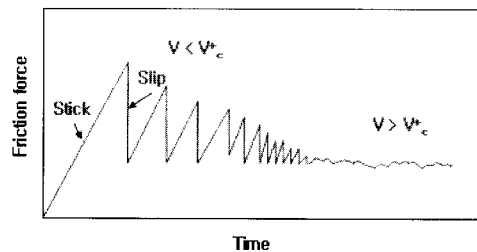


그림 4. 미끄럼 속도에 의존하는 스틱-슬립.
Fig. 4. Stick-slip depending on sliding velocity.

스티크-슬립을 기계적 평형 시스템으로 나타내면 그림 5와 같다.

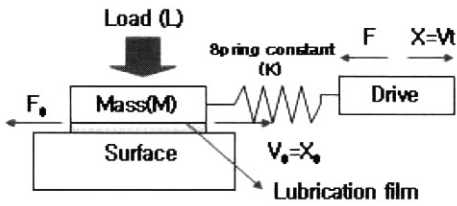


그림 5. 스틱-슬립의 기계적 평형시스템.
Fig. 5. Mechanical equilibrium system of the stick-slip.

미끄럼 표면의 운동은 식 (1)의 미분방정식[7]에 의해서 표현된다. $F_0=F_0(X_0, V_0, t)$ 는 전단 표면에서의 고유 또는 실제 마찰력이다. F 는 스프링에 작용하는 힘이다.

$$M\ddot{X}_0 + (X_0 - X)K - F_0 = 0 \quad (1)$$

2.2.3 상 전이 모델(phase transition model)

상 전이 모델에서의 스틱-슬립이란 미끄럼운동을 하고 있는 두 면사이의 얇은 계면 내에서 응고-용해 상변화로 인하여 막의 유동 특성에 관련된 갑작스러운 변화에 의해 마찰력이 주기적으로 변화하는 현상을 말한다[8]. 이 가정은 미끄럼 속도 V 와 함께 변하는 마찰이 아니라, 점착(sticking)과 미끄럼 상태에서 시스템의 시간 변화에 기초를 둔 것이다.

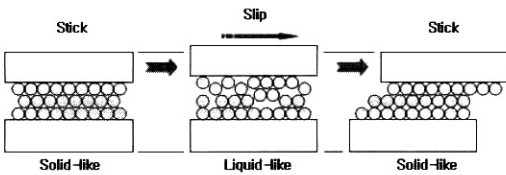


그림 6. 상 전이 모델.
Fig. 6. The schematic of phase transition model.

3. CMP의 마찰특성 분석

3.1 컨디셔닝 방법에 의한 마찰신호의 변화

그림 7은 압력 500 g/cm^2 , 헤드와 테이블 속도 60 rpm 의 실험 조건에서 DIW(de-ionized water)를 이용하여 컨디셔닝(conditioning)한 경우와 슬

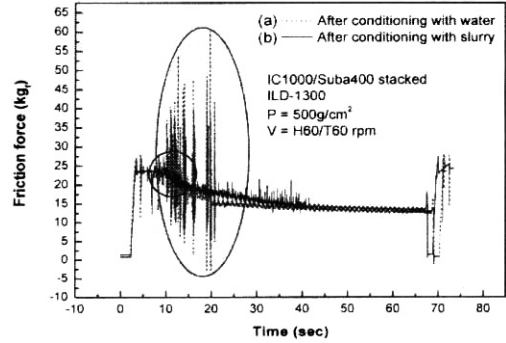


그림 7. 컨디셔닝 방법에 따른 마찰력 (a) DIW (b) 슬러리.
Fig. 7. Friction force according to the different conditioning methods. (a) DIW (b) slurry.

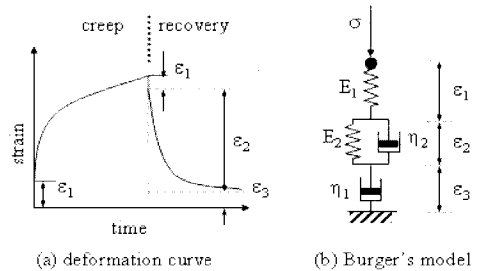


그림 8. 패드의 점탄성거동.
Fig. 8. Schematics of viscoelastic behavior of CMP pad.

러리(ILD1300TM)를 이용하여 컨디셔닝한 경우의 마찰력 변화를 도시한 것이다. 실험에는 G&P Technology(주)의 POLI400과 마찰력 측정장치[9]를 사용하였다. 초기 평균 마찰력은 슬러리로 컨디셔닝했을 때가 조금 더 높지만 시간이 지나면서 서서히 안정화되는 경향을 보인다. 언마가 시작되면서 슬러리가 웨이퍼와 패드 사이의 경계면으로 공급되는 순간 DIW로 컨디셔닝 한 경우 마찰력의 편차가 매우 커짐을 알 수 있다. 이는 컨디셔닝시 사용된 DIW가 언마가 시작되면서 슬러리로 교체되면서 발생하는 현상으로 보이며 포어의 눈막힘(glazing)과도 관계가 있을 것이다.

일반적으로 고분자 재료는 하중이 가해지는 시점에서 순간적인 탄성변형을 보이며 이후 시간이 지남에 따라서 변형이 증가하는 점탄성(viscoelasticity) 변형[10] 특성을 보이게 된다. 즉, 고분자 재료는 스프링과 댐퍼(damper) 요소를 가지는

구조(그림 8)를 이루고 있고 가압에 의해 패드의 압축, 회복이 반복되는 과정을 반복하게 되는 공정이기 때문에 CMP 초기에는 웨이퍼 내에 균일한 슬러리의 공급이 이루어지지 않아서 패드와 웨이퍼의 불균일한 마찰이 발생할 확률이 높아진다고 생각할 수 있다.

3.2 패드에 따른 마찰특성

CMP시 패드에 따른 마찰특성을 관찰하기 위하여 IC1000/Suba400 stacked™ 패드와 Suba400™ 패드를 사용하였다. IC1000/Suba400 stacked™ 패드는 경질인 IC1000™ 패드에 하부층으로 연질인 Suba400™을 접합시킨 패드이다. 표면의 경도는 Asker(type B) 고부경도계를 이용하여 측정하였고, IC1000/Suba400 stacked™ 패드는 쇼어경도 84, Suba400™ 패드는 쇼어경도 59.5였다.

그림 9는 두 패드를 사용하여 pH 10.8인 DIW로 연마하였을 경우의 마찰력을 보여주고 있다. 경도가 낮은 Suba400™ 패드는 경도가 높은 IC1000/Suba400 stacked™ 패드보다 마찰력이 더 크고 그 편차도 큰 것을 알 수 있다. 이는 경도가 낮은 경우 패드표면이 전단력을 받았을 때, 더 큰 변형량을 가지기 때문일 것이다. 반면 경도가 낮은 패드는 전단력에 의한 표면 변형량이 작으므로 경도가 높은 패드보다 마찰력과 그 편차가 작게 나타나는 것이라 할 수 있다.

하지만, 입자를 가진 슬러리의 경우에는 마찰특성이 다르게 나타난다. 그림 10은 SiO₂ 슬러리(ILD1300™)을 이용하여 연마 중 마찰력을 측정한 것이다. 킨디셔닝은 슬러리를 이용하였다.

그림 10에서 알 수 있듯이, IC1000/Suba400 stacked™ 패드의 경우 연마 초기에 마찰력이 많이 떨어지고 있음을 알 수 있다. 반면, Suba400™은 초기에 아주 짧게 마찰력이 떨어졌다. 이는 패드의 점탄성변형에 의한 효과와 패드의 연마 베커니즘의 차이 때문일 것이다. 슬러리가 패드 내부에 침투하지 않고 웨이퍼와 패드의 빈틈 혹은 접촉계면에만 존재하는 독립 발포체 패드[11]인 IC1000/Suba400 stacked™는 포어(pore)가 완전히 연마입자를 머금는데 시간이 오래 걸리는 반면, 패드 내의 슬러리 침투가 원활한 연속 발포체 패드[11]인 Suba400™의 경우는 입자를 부직포에 쉽게 머금기 때문에 초기에 마찰력이 떨어지는 시간이 적을 것이라고 생각된다. 그림 11은 패드의 단면사진을 보여주고 있다.

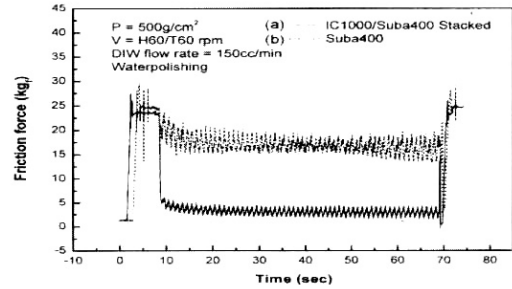


그림 9. Water polishing시 시간에 따른 마찰 특성 (a) IC1000/ Suba400 stacked™ (b) Suba400™ pad.

Fig. 9. The friction characteristics of water polishing (a) IC1000/ Suba400 stacked™ (b) Suba400™ pad.

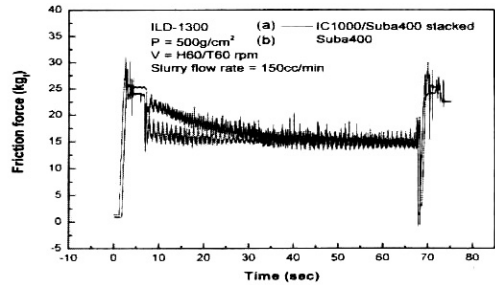


그림 10. CMP시 시간에 따른 마찰 특성 (a) IC1000/ Suba400 stacked™ (b) Suba400™ pad.

Fig. 10. The friction characteristics of CMP (a) IC1000/ Suba400 stacked™ (b) Suba400™ pad.

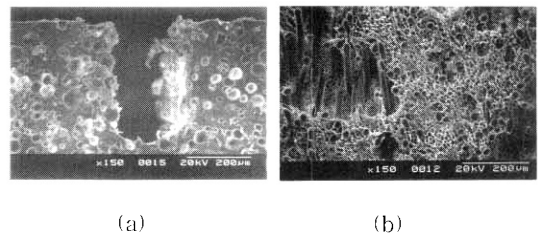


그림 11. (a) IC1000/Suba400 stacked™ 패드 단면사진 (b) Suba400™ 패드 단면사진.

Fig. 11. (a) Cross-section of IC1000 /Suba400 stacked™ pad (b) cross-section of Suba400™ pad.

그림 9와 10을 비교해보면 Suba400™ 패드의 경우는 DIW로 연마한 경우와 SiO₂ 슬러리를 이용하여 CMP한 경우의 마찰력이 거의 동일함을 알 수 있다. 하지만 IC1000/ Suba400 stacked™ 패드의 경우는 DIW로 연마할 때 보다 슬러리를 이용하여 연마할 때 더 큰 마찰력 보이고 있다.

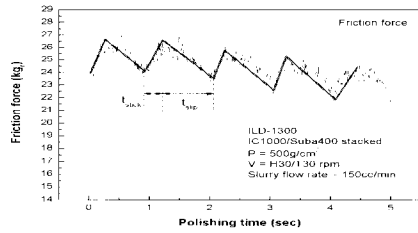
3.3 CMP에서의 스틱-슬립 마찰

앞서 언급했듯이, 스틱-슬립 마찰은 갑자기 비트는 동작을 일으키는 두 개의 움직이는 표면에 의해서 발생한다. 따라서 압력과 헤드와 테이블의 상대속도에 의해서 재료를 제거하는 CMP 공정은 어떠한 스틱-슬립의 특성을 갖는지에 대해서 알아보고자 한다.

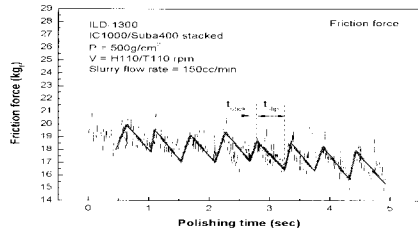
실험 전, 다이아몬드 컨디셔너로 압력 120 g/cm², 헤드와 테이블 속도 60 rpm의 조건으로 5분간 컨디셔닝 후, 4인치 thermal oxide 웨이퍼와 슬러리를 이용하여 압력 500 g/cm²과 헤드와 테이블 속도 60 rpm으로 break-in을 실시하였다. 이때, 마찰력을 모니터링 하면서 마찰력이 안정화될 때까지 break-in을 지속하였다. 실험은 헤드의 압력을 500 g/cm²으로 일정하게 두고 헤드와 테이블의 속도를 30, 60, 90, 110 rpm으로 조정하면서 시행하였으며, 오실레이션(oscillation)에 의한 영향을 배제하기 위하여 오실레이션은 실행하지 않았다. 슬러리는 상용 SiO₂ 슬러리인 ILD1300™을 사용하였다. 또한 컨디셔닝은 슬러리를 이용하여 압력 120 g/cm², 헤드와 테이블 속도 60 rpm으로 공정간 30초씩 실시하였다.

그림 12는 연마초기(연마 후 5초)의 마찰력의 변화를 도시한 것이다. SiO₂ 슬러리의 CMP인 경우, IC1000/Suba400 stacked™ 패드와 Suba400™ 패드를 비교해 볼 때, Suba400™의 마찰력 파형이 IC1000/Suba400 stacked™ 패드에 비하여 깨끗한 파형을 보였고, 두 패드 모두 스틱-슬립을 반복하는 형태의 마찰특성을 보였다. 이는 탄성체인 패드가 연마 시 상대속도에 의해 변형했다가 다시 회복하는 과정을 반복함을 의미한다고 할 수 있다.

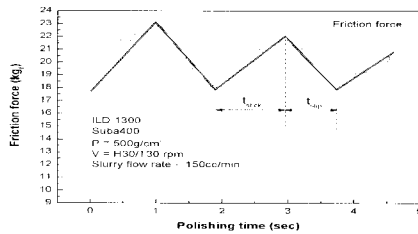
그림 13은 헤드와 테이블 속도의 증가에 따른 Suba400™ 패드와 IC1000/ Suba400 stacked™ 패드의 스틱-슬립 주기의 평균을 나타낸 것이다. Suba400 패드의 헤드와 테이블의 속도 증가에 따른 스틱-슬립 주기가 IC1000/Suba400 stacked™ 패드에 비하여 급격히 짧아짐을 알 수 있다. 이는 속도에 의존하는 마찰모델과 그 결과가 유사하며 패드의 수평방향 강성 혹은 패드표면의 경도와 헤



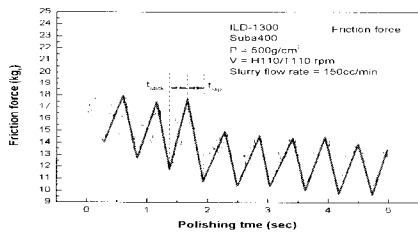
(a) IC1000/Suba400 stacked™, 30 rpm.



(b) IC1000/Suba400 stacked™, 110 rpm.



(c) Suba400™, 30 rpm.



(d) Suba400™, 110 rpm.

그림 12. IC1000/Suba400 stacked™와 Suba400™ 패드의 초기 5초간 스틱-슬립 마찰.

Fig. 12. The stick-slip friction of IC1000/ Suba 400 stacked™ and Suba400™ pad for initial 5 seconds.

드와 테이블 속도의 증가에 따른 실 접촉면적의 감소[12]와 관련이 있을 것이다.

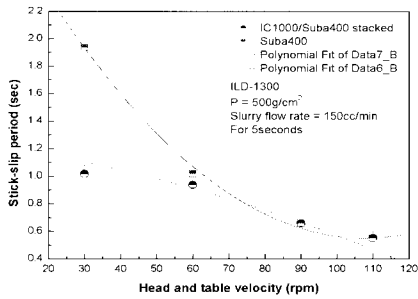


그림 13. 헤드와 테이블 속도에 따른 스틱-슬립 주기.
 Fig. 13. Stick-slip period as a function of head and table velocity.

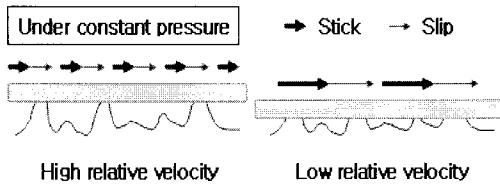


그림 14. 일정 압력하의 CMP시 스틱-슬립 마찰.
 Fig. 14. Schematics of stick-slip friction in CMP under constant pressure.

상대속도 방향으로 점탄성변형을 하는 패드 혹은 패드상의 돌기는 상대속도가 커짐에 따라서 변형의 가속 및 감속시간이 짧아지게 되어 스틱-슬립 주기가 줄어드는 것이라고 생각된다.

그림 14는 일정 압력하의 CMP시 스틱 슬립 마찰의 개략도이다.

압력에 의한 패드와 웨이퍼의 접촉면적의 영향 또한 스틱-슬립 마찰에 있어서 중요할 것이다. CMP의 경우는 가공 중 웨이퍼와 패드사이의 접촉면적이 변하기 때문에 연결 패드인 Suba400™을 이용하여 CMP시 압력의 변화에 따른 마찰력의 변화를 측정해 보았다(그림 15). 결과, 압력의 증가에 따라서 마찰력과 스틱-슬립 마찰의 편차 역시 커졌지만, 스틱-슬립 마찰의 평균주기는 변화가 없었다.

또한 CMP에서의 스틱-슬립 마찰은 표면특성에 영향을 미치는 pH에도 영향을 받을 것이다. 그림 17은 pH 10.8과 pH 6.3인 DIW로 연마 시 마찰력을 도시한 것이다.

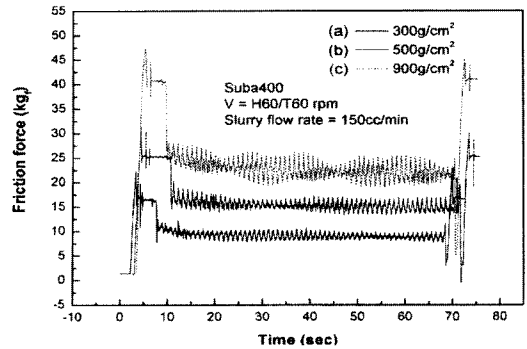


그림 15. 압력에 따른 마찰력의 변화 (a) 300 g/cm² (b) 500 g/cm² (c) 900 g/cm².
 Fig. 15. The change of friction force with the pressure (a) 300 g/cm² (b) 500 g/cm² (c) 900 g/cm².

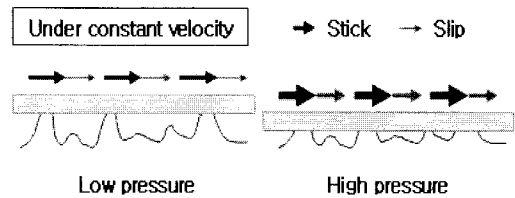


그림 16. 일정 속도하의 CMP시 스틱 슬립 마찰.
 Fig. 16. Schematics of stick-slip friction in CMP under constant velocity.

알칼리성의 DIW로 연마 시, 마찰력의 편차는 중성의 DIW로 연마했을 시보다 작음을 알 수 있다. 이는 SiO₂ 슬러리보다 CeO₂ 슬러리로 연마했을 때, 마찰력의 편차가 더 크게 나오는 이유 중 하나일 것이다.

그림 18은 pH 6.3인 CeO₂슬러리(입자함량 2 wt%)를 이용한 CMP시 얻은 마찰력의 변화를 도시한 것이다. CeO₂ 슬러리의 CMP시 마찰력의 파형은 스틱-슬립 마찰이 많이 발생하여 smoothing 처리를 하였으며, 보다 정확한 파형을 보기 위하여 연마초기 0.5초만을 도시 하였다. CeO₂ 슬러리로 연마 시 마찰력이 증가함을 알 수 있다. CeO₂ 슬러리는 연마도중 입자가 분쇄되고 응집이 일어난다고[13] 알려져 있다. 응집이 일어난 연마입자는 실 접촉면적을 크게 만들어 스틱-슬립 마찰을 일으킬 확률을 높이고 동시에 점착력을 높임으로써 마찰력이 상승하는 것이라고 생각된다.

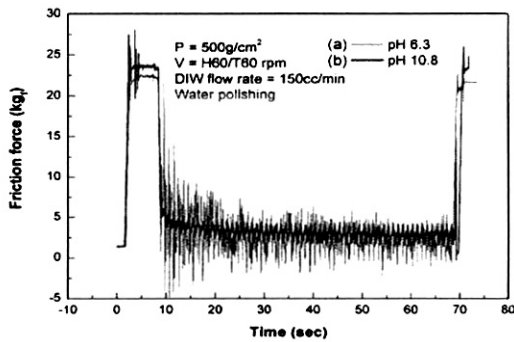


그림 17. 마찰력에 대한 pH의 영향 (a) pH 6.3 DIW (b) pH 10.8 DIW.

Fig. 17. The effect of pH on friction force (a) pH 6.3 DIW (b) pH 10.8 DIW.

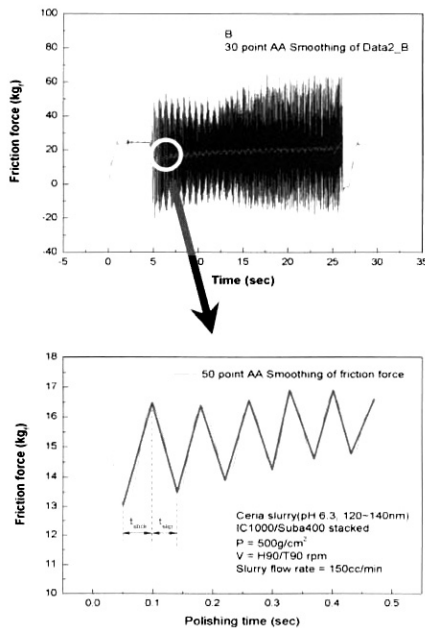


그림 18. CeO₂ 슬러리의 마찰특성.

Fig. 18. The friction characteristic of CeO₂ slurry.

4. 결론

마찰력 모니터링 시스템을 이용하여 CMP 공정에서의 마찰특성을 스틱-슬립 마찰의 관점에서 접근해 보았다.

CMP에서 스틱-슬립 마찰특성은 다음과 같다. CMP시 연질 패드를 사용했을 때, 경질 패드보다 스틱-슬립 마찰이 더욱 깨끗하게 나타났다. 이는 패드의 점탄성 거동에 의한 결과이며 그러한 패드의 성질이 스틱-슬립 마찰을 유발하는 것으로 보인다. 또한, 상대속도의 증가에 따른 접촉면적의 변화로 인하여 헤드와 테이블의 속도 증가에 따라 스틱-슬립 마찰의 주기가 감소하였고, 그 크기는 압력이 증가함에 따라 커지는 경향을 보였다. 따라서 웨이퍼 스케일에서 볼 때의 CMP에서 재료의 제거는 회전하는 웨이퍼와 패드 사이에 발생하는 스틱-슬립 마찰에 의해서 이루어진다고 할 수 있다.

이러한 스틱-슬립 마찰은 재료의 제거에 있어서 스크래치를 유발할 것으로 보이며, 앞으로 이에 관한 연구가 이루어져야 할 것으로 보인다.

참고 문헌

- [1] Ara Philipossian and Scott Olsen, "Effect of slurry flow rate on pad life during interlayer dielectric CMP", J. Electrochem. Soc., Vol. 151, No. 6, p. 436, 2004.
- [2] 박병영, 이현섭, 김형재, 서현덕, 김구연, 정해도, "CMP 결과에 영향을 미치는 마찰 특성에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 17권, 10호, p. 1041, 2004.
- [3] Rabinowich, "Friction and Wear of Materials", John Wiley, Chap. 4, 1965.
- [4] McClelland, "Adhesion and Friction", Springer, 1989.
- [5] McClelland and Cohen, "Chemistry and Physics of Solid Surfaces VII", Springer, 1990.
- [6] Bo N. J. Persson, "Sliding Friction", Springer, 2000.
- [7] Tomlinson, "A molecular theory of friction", Philos. Mag., Vol. 7, p. 905, 1929.
- [8] Israelachvili, J. N. and Wennerstrom, "Hydration or steric forces between amphiphilic surfaces", Langmuir, Vol. 6, p. 873, 1990.
- [9] 김구연, 김형재, 박병영, 이현섭, 박기현, 정해도, "CMP 연마입자의 마찰력과 연마율에 관한 영향", 전기전자재료학회논문지, 17권, 10호, p. 1049, 2004.
- [10] P. Powell, "Engineering with polymers", Chapman and Hall, New York, p. 89, 1983.

- [11] 이충훈, 송형수, 명중재, 박진구, “반도체 평탄화 CMP 기술”, 북스힐, p. 100, 2001.
- [12] H. J. Kim, “A Study on the Interfacial Characteristics and Its Effect on Material Removal in CMP”, ph. D. qualifying dissertation of Pusan National University, p. 62, 2003.
- [13] Naga Chandrasekaran, “Material removal mechanism of oxide and nitride CMP with ceria and silica based slurries - analysis of slurry particles pre-and post-dielectric CMP”, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 816, PP K9.2.1-K9.2.12, 2004.