

화학 기계적 연마에서 마찰력 감소에 관한 연구

권대희*, 김형재(부산대 대학원 정밀기계공학과), 정해도(부산대 기계공학부)

A study on the decay of friction force during CMP

D. H. Kwon, H. J. Kim(Precision and Mech. Eng. Dept., PNU), H. D. Jeong(Mech. Eng. Dept., PNU)

ABSTRACT

An understanding of tribological behavior in CMP(Chemical Mechanical Polishing) is one of the most important things to reveal the mechanism of material removal. In CMP, the contact type is thought to be semi-direct, elastohydrodynamic contact type from the Stribeck diagram, which is a combination of solid-solid direct contact and hydrodynamic lubrication with thin liquid film. This study is focused on the decay of friction force during CMP from two points of view, one of which is change of the real contact area and the other is the decrease of the elastic modulus of the pad caused by the increase of the temperature during CMP. Experiments are implemented with elastic modulus measuring system and tool dynamometer. Results show that the decay of friction force during CMP results from the decrease of the real contact pressure working on an abrasive, which is induced by the decrease of elastic modulus of pad caused by the increase of temperature. And, the phenomenon is thought to be happen specially in the case that the weight concentration of abrasive in slurry is small enough.

Key Words : CMP(화학 기계적 연마), Friction force(마찰력), Elastic modulus(탄성계수), Temperature(온도)

1. 서론

반도체 용량이 점점 커짐에 따라 칩의 크기는 점점 커지게 되고, 이러한 문제점을 극복하기 위해서 배선의 다층화와 선폭의 미세화, 그리고 대직경의 웨이퍼 채용이 불가피하게 되었다[1]. 이러한 요구에 대응하기 위해서 많은 기술들이 개발되었지만, 위와 같은 요구조건을 충분히 만족시키지는 못하였다. 그러나, 1980년대에 화학 기계적 연마(Chemical Mechanical Polishing, CMP)공정이 개발되어 광역 평탄화와 국소 평탄화의 효용성이 증명되면서 현재 가장 널리 쓰이는 기술이 되었다. Fig. 1은 화학 기계적 연마 장치의 개략도를 나타낸 것이다.

이처럼 화학 기계적 연마가 널리 쓰이게 되면서 그에 대한 활발한 연구가 진행되었는데, 연구자들의 주된 관심사 중에 하나가 연마 mechanism에 관한 것이었다. 1927년에 F. Preston이 유리연마에 대한 연마율에 대해서 발표하였다. 즉, $MRR = KPV$ 이다. 여기서, MRR 은 재료의 연마율, K 는 비례상수, P 는 연마 압력, V 는 가공물의 상대속도이다[2]. 현재 연마율을

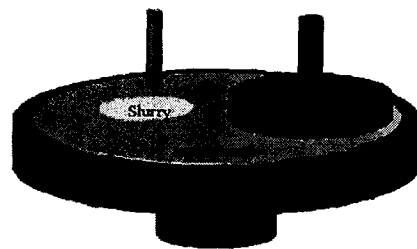


Fig. 1 The schematic of apparatus

예상하기 위해서 널리 쓰이는 식이나, 이것은 단순히 압력과 상대속도에 국한된 식이어서, 많은 변수들이 내재된 화학 기계적 연마에서는 그 차이가 있다. 예를 들면, 부드럽고 거친 패드를 사용하였을 경우, 연마율이 향상되는데, 이것은 Preston의 식에서는 설명이 되지 못한다. 또한, 부드러운 패드를 사용하였을 경우, 비선형의 연마율을 보이는데, 이 또한 단순히 Preston이 제안한 방정식만으로는 설명이 곤란하다[3].

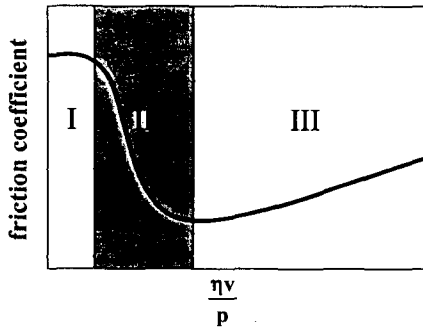


Fig. 2 Typical Stribeck diagrams ; I : boundary lubrication, II : mixed lubrication, III : full fluid lubrication

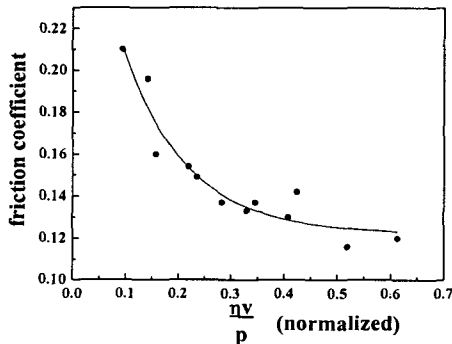


Fig. 3 Specified Stribeck diagram for CMP [4]

한편, 접촉 형태에 대한 연구도 진행이 되었는데, 크게 두 가지의 형태가 보고되었다. 첫 번째는 고체-고체 접촉 모델이고, 두 번째는 얇은 유막이 개재된 유체 윤활 모델이다. 그리고, 이 두 가지 접촉 형태가 혼재하는 형태의 접촉 모델도 보고되어졌다[5]. Fig. 2는 전형적인 Stribeck diagram을 나타낸 그림이다. Fig. 3은 CMP에서의 Stribeck diagram을 나타낸 것인데, Fig. 2에서의 영역 II(mixed lubrication)의 경향과 유사함을 알 수가 있다. 본 논문에서는 Fig. 3과 같이 CMP에서의 접촉 모델을 고체-고체 직접 접촉 형태와 slurry 박막이 혼재하는 elastohydrodynamic 형태의 접촉형태로 가정하였다. 그리고, CMP에서 가공이 진행됨에 따라 마찰력이 감소하는 현상을 발견하고 이에 대한 원인을 분석하였다.

2. 실험

2.1 패드의 온도에 따른 탄성계수 측정실험

Fig. 4과 같은 실험 장치를 구성하고 Rodel사의 IC 1400 패드의 온도별 제 1차 및 2차 탄성계수를 측정하였다. Dial gauge는 Mitutoyo사의 ID-S112이고,

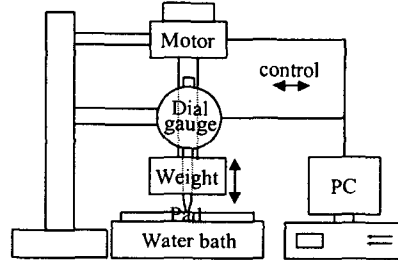


Fig. 4 Experimental apparatus for measuring of pad behavior

항온수조로 실험온도를 조절하였다. 실험 조건은 Table 1와 같다.

Table 1 Experimental conditions for measuring of 1st and 2nd moduli of pad

Parameters	Condition
Temperature	17°C, 27°C, 37°C, 47°C, 57°C
Pressure	300g/cm ²
Sampling time	200ms
Loading/Unloading frequency	0.004Hz

2.2 마찰력 측정 실험

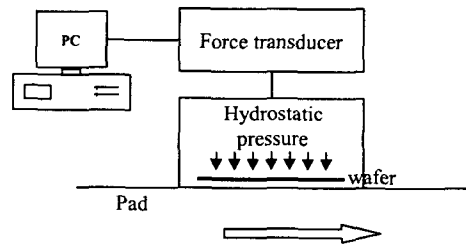


Fig. 5 Experimental apparatus for measuring of friction force

Fig. 5와 같은 실험 장치를 구성하고, 마찰력과 수직력을 측정하였다. 공구 동력계는 Kistler사의 5019B이고, 각각의 실험이 실행되기 전에 30초 가량의 conditioning을 수행하였다. 그리고, 그 밖의 다른 실험조건은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Experimental conditions for friction force measurement

Parameters / consumables	Condition or type
pad	IC 1400(Rodel)
slurry	ILD 1300(Rodel)
pressure	139, 315, 412g/cm ²
velocity	9.4, 28.3, 47.1, 65.9, 84.8, 103.6 m/min
work-piece	Thermal Oxide(SiO ₂), Glass

3. 결과 및 고찰

3.1 온도증가에 따른 패드의 탄성계수의 변화

열이 발생함에 따라 민감하게 물성치가 변화하는 CMP소버재 중에 하나가 polymer로 구성된 패드이다. Fig. 6은 가공 중 발생하는 패드의 온도변화를 열 영상 카메라로 촬영한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 패드 전면에서 온도가 증가한다.

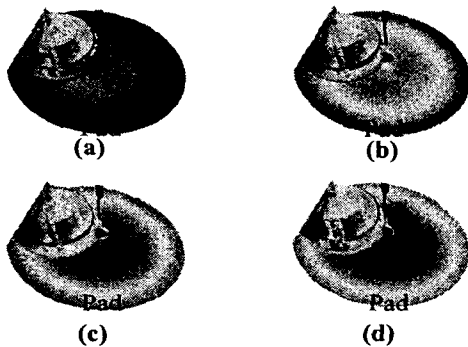


Fig. 6 Temperature increase of pad surface according to polishing time : (a) start, (b) 20sec later, (c) 60sec later, (d) 120sec later[6].

Fig. 7은 300g/cm²의 압력과 loading/unloading 주기가 0.004Hz인 조건에서의 Rodel사의 IC 1400 패드의 strain의 변화를 온도 변화에 대해서 나타낸 그래프이다. polymer는 주어진 하중에 대하여 탄성 영역과

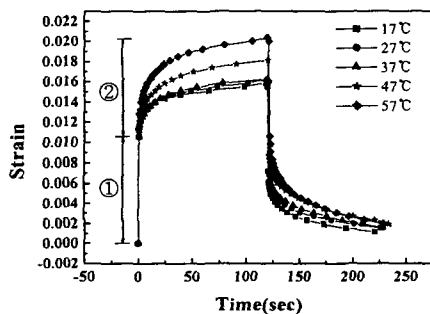


Fig. 7 Strain behavior of pad according to an increase of temperature

점탄성 영역의 거동이 혼합된 형태의 움직임을 보인다. Fig. 7에서 ①은 탄성 영역의 거동을, ②는 점탄성 영역의 거동을 나타낸 것이다.

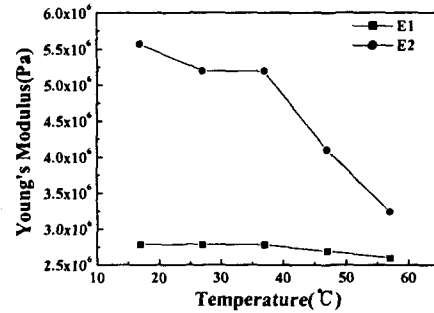


Fig. 8 An alteration of the 1st and 2nd elastic moduli of IC 1400 pad during variation of temperature

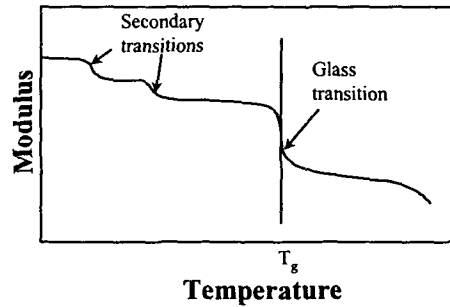


Fig. 9 Temperature dependence of modulus in a typical polymer[7].

Fig. 8은 온도가 증가함에 따른 제 1차 및 2차 탄성계수의 변화를 나타낸 그래프이다. 제 1차 탄성계수(E1)는 주어진 압력을 탄성 영역에서의 변화율로 나눈 값이고, 제 2차 탄성계수(E2)는 동일한 압력을 점탄성 영역에서의 변화율로 나눈 값이다. 측정 온도 범위 내에서는 전체적으로 E1의 감소가 E2보다는 미미하지만, 40°C 이후에서는 E2의 감소가 두드러지게 나타난다. 이는 온도가 올라감에 따라 분자간 체인 결합력이 약화되기 때문이다. Fig. 9는 전형적인 polymer의 온도에 대한 탄성계수의 변화 경향을 나타낸 그래프인데, Fig. 8에서의 온도 범위는 secondary 변위 영역내에 있는 것으로 생각된다. 속도가 84.8m/min, 압력이 415g/cm², ILD 1300 슬러리, IC 1400 패드인 조건으로 가공했을 경우, 가공 직후의 패드의 온도가 37°C까지 증가하였다[6]. 그러나, 가공 중에는 flash temperature의 형성에 의해서 더 높은 온도가 발생할 것이므로, 패드의 E1, E2의 감소가 더 증가할 것으로 생각된다.

3.2 마찰력의 변화

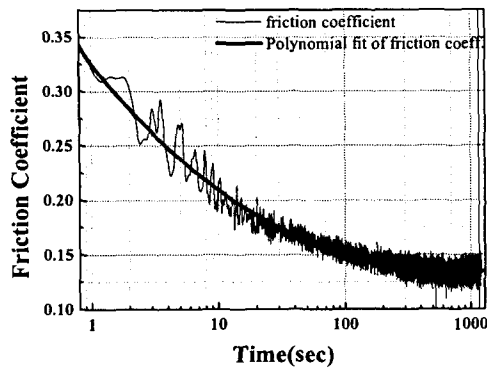


Fig. 10 Friction coefficient decay during CMP

Fig. 10은 conditioning없이 20분 동안 연속적으로 CMP가공을 수행했을 경우의 시간에 대한 마찰계수의 변화를 나타낸 그래프이다. 가공 초기의 10초 동안에는 약 0.13 정도의 크기로 마찰계수가 비교적 빠르게 감소되었고, 이후 약 0.06정도로 점진적인 마찰계수의 감소가 관찰되었다. 이는 유체(slurry)가 개입이 되고, 가공시 발생하는 온도에 의해 pad의 탄성계수가 변화하기 때문인 것으로 생각이 된다. Lei Shan(2000)[5]은 마찰력의 측정과 함께 웨이퍼의 반경방향의 유체 압력을 측정하였는데, 마찰력은 점점 감소하고, 유체 압력은 증가하는 것을 관찰하였다. 즉, 패드의 돌기 또는 슬러리의 입자(abrasive)가 웨이퍼와 직접 접촉하는 부분이 줄어들고, 유체막의 두께가 점차 증가함으로 해서 유압이 증가하고, 마찰력이 감소한다는 것이다.

한편, 고체-고체 접촉의 미끄러짐 운동에서 발생하는 마찰력에 의해서 접촉상태에 있는 물체의 돌기가 발생원이 되어 열이 발생하게 된다. 따라서, 온도의 증가에 비례하여 polymer 재질인 패드의 탄성계수가 감소하고[8], 패드의 웨이퍼에 대한 접촉면적이 증가한다[6]. CMP에서의 재료제거는 slurry내의 abrasive(연마입자)가 wafer에 침입하여 미끄러지면서 제거된다고 가정하였을 때, 제거량은 abrasive의 wafer에 대한 침입량과 가공에 참여하는 abrasive의 전체 숫자에 비례한다[9]. 여기서, abrasive의 침입량은 패드의 탄성계수에 비례하고, 가공에 참여하는 abrasive의 전체 숫자는 접촉면적에 비례한다. 만약, slurry내의 abrasive 질량의 농도가 낮다면, 비록 접촉면적이 늘어나더라도 가공에 참여하는 abrasive 숫자의 증가는 미미할 것이고, 패드의 탄성계수가 감소함에 따라 abrasive의 침입량은 줄어들게 된다. 따라서, abrasive의 농도가 낮은 경우 재료의 제거량은 감소하게 되고 마찰력의 감소가 발생하게 된다.

4. 결론

CMP가공 중에 발생하는 온도 상승에 의한 패드의 탄성계수의 감소는 연마 입자의 농도가 낮은 경우, abrasive의 웨이퍼내 침입량을 감소시켜 제거량의 감소와 동시에 가공 중에 발생하는 마찰력 감소의 한 원인이 된다.

참고문헌

1. 정해도, "차세대 반도체 제조를 위한 초정밀 가공 기술," 대한기계학회지, Vol. 36.3, pp.220-230, 1996.
2. F. W. Preston, "The Theory and Design of Plate Glass Polishing Machine," Journal of the Society of Glass Technology, V11, p.214, 1927
3. W. T. Tseng and Y. L. Wang, "Re-examination of pressure and speed dependence of removal rate during chemical-mechanical polishing processes," J. Electrochem. Soc., vol. 144, pp.115-117, 1997
4. 권대희, 김형재, 정해도, 이응숙, 신영재, "화학 기계적 연마시 발생하는 온도특성과 마찰력에 관한 연구," 한국 정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp.939-942, 2001
5. Lei Shan, "Mechanical interactions at the interface of chemical mechanical polishing," Ph. D. dissertation, Department of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA, 2000
6. H. J. KIM, D. H. Kwon and H. D. Jeong, "Tribological Aspects in Chemical Mechanical Polishing," Proc. of 7th inter. Chemical-Mechanical Planarization for ULSI Multilevel Interconnection Conference (CMP-MIC), pp.201-208, 2002
7. I. M. Ward and D. W. Hadley, "An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers," John Wiley & Sons, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore, p.88, 1993
8. Joseph M. Steigerwald, "Chemical Mechanical Planarization of Microelectronic Materials," John Wiley & Sons, Inc., USA, pp.66-78, 1997
9. Jianfeng Luo, "Material removal mechanism in CMP: Theory and Modeling," IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 14 Issue 2, pp.112-133, 2001.