

산화막 CMP에서 발생하는 온도가 연마특성에 미치는 영향

Effect of Temperature on Polishing Properties in Oxide CMP

김영진¹, 박범영², 김형재³, 정해도^{2,a}

(Youngjin Kim¹, Boumyoung Park², Hyoungjae Kim³, and Haedo Jeong^{2,a})

Abstract

We investigated the effect of process temperature on removal rate and non-uniformity based on single head kinematics in oxide CMP. Generally, it has been known that the temperature profile directly transfers to the non-uniformity of removal rate on the wafer, which has similar tendency with the sliding distance of wafer. Experimental results show that platen velocity is a dominant factor in removal rate as well as average temperature. However, the non-uniformity does not coincide between process temperature and removal rate, due to slurry accumulation and low deviation of temperature. Resultantly, the removal rate is strongly dependent on the rotational speed of platen, and its non-uniformity is controlled by the rotational speed of polishing head. It means lower WIWNU (With-in-wafer-non-uniformity) can be achieved in the region of higher head speed.

Key Words : Oxide CMP, Single head kinematics, Temperature, Removal rate, Non-uniformity

1. 서 론

화학기계적연마(Chemical Mechanical Polishing; CMP)는 슬러리와 대상재료의 화학적 작용과 동시에 슬러리, 패드, 대상재료 사이의 상대운동에 의한 기계적 작용으로 원자단위로 연마해 나가는 공정이다[1]. 반도체 집적 용량이 점점 증가함에 따라 배선의 다층화, 선폭의 미세화 등으로 디바이스 제조공정은 더욱 엄격해 지고 있다[2]. 그래서 필수 공정으로 자리 잡고 있는 CMP 또한 정밀한 공정 제어(process control)가 필요하다. 그래서 현재 CMP 기술에는 공정 모니터링 시스템(process monitoring system)이 많이 도입되어 있다. 정전용량(capacitance), 와전류(eddy current), 적외선 간섭(infrared interferometry), 슬러리 검출(slurry

constituent), 토크 검출(torque current), 진동해석(vibration analysis), 온도(temperature measurement) 등 많은 부분에 모니터링 시스템이 사용되고 있다 [3,4].

현재 칩 메이커에서는 라인에서 APC(advanced process control) 등 공정을 실시간으로 감시하며 생산을 관리하고 있다. 생산에 소요되는 시간비용, 소모재(consumable)비용 제품결함에 관련된 제비용들을 고려했을 때 반도체 제조기술 뿐만 아니라 모니터링 시스템도 매우 큰 의미를 가지게 된다. 본 연구에서는 산화막 CMP(oxide CMP)에서 온도 인자가 연마율(removal rate)과 연마 불균일도(non-uniformity of removal rate)와 같은 연마특성과 어떠한 관계를 가지는지 알아보려고 한다.

1. 부산대학교 정밀가공시스템전공
2. 부산대학교 기계공학부
(부산시 금정구 장전동 산 30)
3. 한국생산기술연구원 초정밀성형가공팀
a. Corresponding Author : hdjeong@pusan.ac.kr
접수일자 : 2007. 9. 10
1차 심사 : 2007. 12. 18
심사완료 : 2008. 1. 7

2. 온도와 기구학해석의 관계

연마 중 열 발생은 웨이퍼와 패드사이의 계면에서의 마찰로 인해 발생하고 그것은 곧 온도의 변화로 이어진다[5]. 그림 1은 정상상태의 온도일 때 측정하는 실험의 개념도이다.

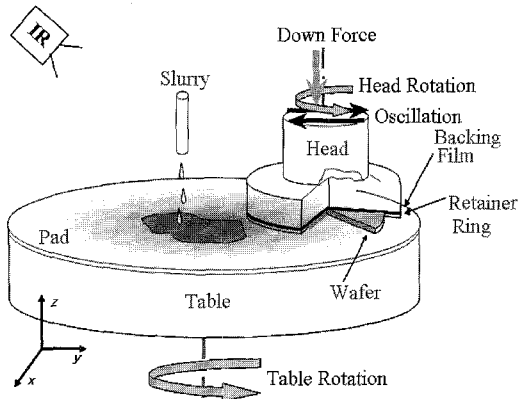


그림 1. CMP 중 정상상태의 개념도.
Fig. 1. Schematic diagram in steady state of CMP.

헤드부에 부착되어 있는 웨이퍼와 패드사이의 접촉면적에서 마찰열이 발생하고 열손실은 연마 중에 화학액(slurry)로 인한 쿨링과 접촉하지 않는 시간동안 주변 환경으로 열이 방출되면서 일어난다[1]. 열원이 되는 마찰에너지(frictional energy)는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 F , s , μ , N 는 차례로 마찰력, 마찰거리, 마찰계수, 수직항력이다.

$$\text{Frictional Energy} = F \cdot s = \mu N \cdot s \quad (1)$$

마찰에너지 즉 온도는 헤드가 패드 쪽으로 가하는 압력과 웨이퍼와 패드가 미끄러지는 거리에 비례한다. 압력이 같고 그 외 나머지 조건들이 동일하다면 온도는 미끄럼거리에 비례하게 될 것이고 결과적으로 헤드와 패드의 회전비에 따라 미끄럼 거리를 나타낸 그림 2와 같은 온도 프로파일(profile)을 얻을 수 있을 것이다. 여기서 R 은 웨이퍼의 회전속도(W_w)에 패드의 회전속도(W_p)를 나눈 값이다.

패드 상에 웨이퍼의 미끄럼 거리 분포(sliding distance distribution)는 식 (2)와 같이 상대속도를 시간에 대하여 적분하여 얻을 수 있는데 상대속도는 기구학 해석을 통하여 구한다.

$$S = \int_s ds = \int v dt \quad (2)$$

기구학 해석을 통한 상대속도의 해석은 몇몇 연구자들에 의해 연구되어져 왔다. H. J. Kim은 다음과 같이 제시하였다[5].

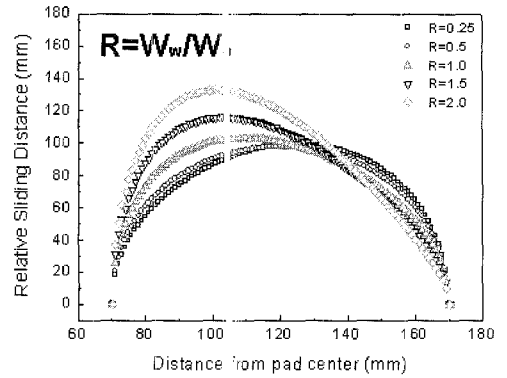


그림 2. 회전비에 따른 패드의 미끄럼 거리.
Fig. 2. Sliding distance of pad according to rotation ratio.

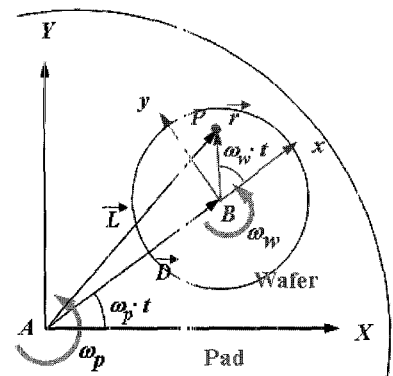


그림 3. 기구학적 분석의 개념도.
Fig. 3. Schematic diagram of kinematic analysis.

그림 3은 일반적인 회전형 CMP장비의 기구학 해석을 위한 개념도이다. 여기서 D 는 패드의 회전 중심과 웨이퍼의 회전 중심 사이의 거리이고 r 은 웨이퍼 회전 중심에서 임의의 점 P 까지의 거리이다. 그리고 ω_w , ω_p 는 각각 웨이퍼의 각속도, 패드의 각속도이다. 그래서 임의의 점 P 에서 웨이퍼와 패드의 상대속도는 식 (3)로 나타낼 수 있다.

$$\vec{v}_{p/w} = \vec{v}_p - \vec{v}_w = \vec{\omega}_p \times \vec{D} + (\vec{\omega}_p - \vec{\omega}_w) \times \vec{r} \quad (3)$$

식 (3)을 벡터연산과 표준화(normalize)를 통하여 식 (4)로 나타내었다.

$$v = \frac{v_{p/w}}{\omega_p D} = \sqrt{(\rho\zeta)^2 + 2\rho\zeta \cos\phi + 1} \quad (4)$$

$$\rho = \frac{r}{r_w}, \quad \zeta = \frac{r_w}{D}(1-R), \quad R = \frac{\omega_w}{\omega_p}, \quad \phi = \omega_w t$$

3. 실험

실험은 GNP Technology(주)사의 POLI400 장비를 사용하였으며 Rodel IC1400 K-groove 패드, 슬러리는 Rodel ILD1300을 사용하여 200 cc/min의 유량으로 300 g/cm²의 압력조건으로 1분간 4인치 산화막 웨이퍼를 헤드와 플레이트(platen)속도의 회전비에 따라 헤드와 플레이트 각각의 속도를 변화시켜가며 실험하였다.

3.1 연마 중 온도 측정

CMP 중의 온도측정은 적외선(IR)카메라로 측정하였고 장비는 NEC San-ei Instrument사의 Thermo Tracer TH9100WL 모델을 사용하였다. 측정시간은 정상상태(steady state)의 온도를 측정하기 위해 연마중점으로 하였고, 웨이퍼 상의 실제 접촉면의 온도에 근접하기 위해 그림 1과 같이 Polisher를 역회전시키며 정면에서 측정하여 연마하고 바로 나온 패드면의 온도 데이터를 획득하였다.

3.2 박막 측정

Oxide 두께측정은 K-MAC(주)사의 Spectra Thick ST5030SL을 이용하였으며 웨이퍼 반경방향으로 19포인트(edge exclusion 5 mm)를 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 회전비에 따른 온도 결과

온도는 웨이퍼가 패드와 접촉하는 동안 발생하는 마찰열에너지와 접촉하지 않는 시간동안 주변 환경으로 방출하는 에너지 사이의 평형에 의해 결정된다[1]. 온도의 관점에서 보았을 때 하나의 열 시스템을 이루고 있으며 CMP 중에 발생하는 정상상태의 온도는 근사적으로 압력과 속도에 대해 선형적인 관계를 보인다. 앞서 언급한 바와 같이 압력이 같고 나머지 조건들이 동일하다면 온도 프로파일은 미끄럼 거리를 따르게 될 것이다.

그림 4는 플레이트와 헤드를 각각 60 rpm의 속도로 고정했을 때 회전비에 따른 온도측정 결과이다. 웨이퍼의 실제 접촉구간은 0에서 80 pixel 정도이고 플레이트 속도가 고정된 그림 4(a)는 대체

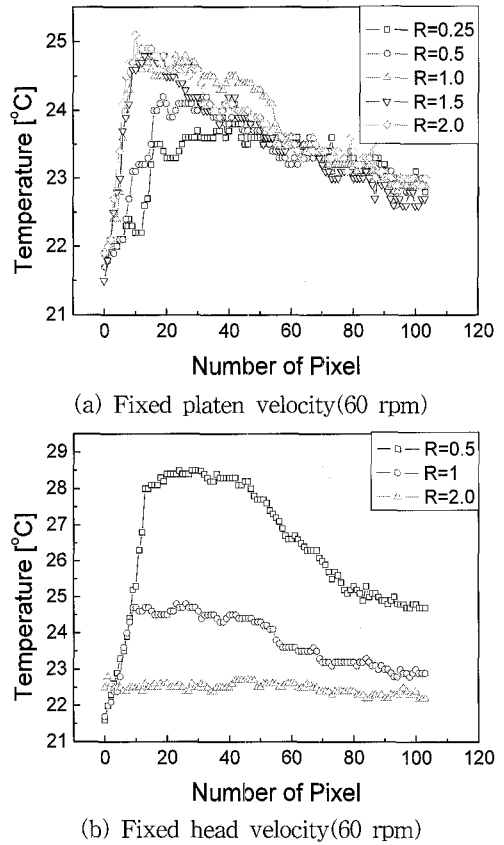
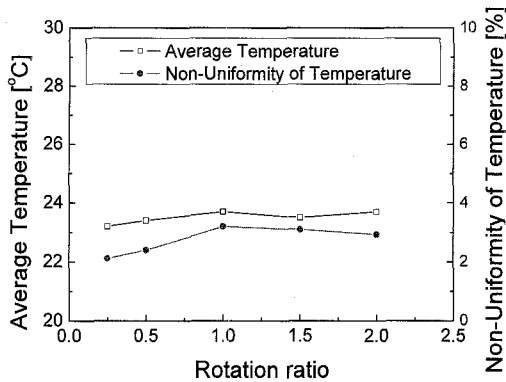


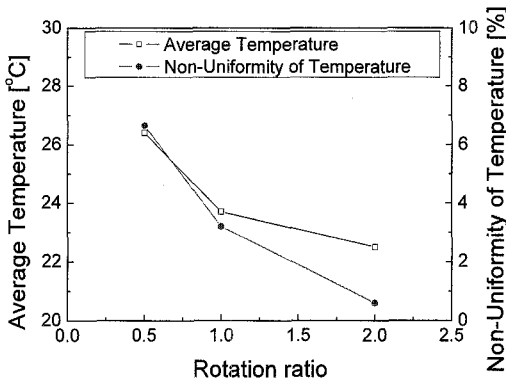
그림 4. 회전속도 60 rpm에서의 온도 profile.
Fig. 4. Temperature profile at the fixed velocity.

적으로 그림 2의 경향을 따른다. 패드의 중심부에서는 슬러리의 영향으로 온도가 상대적으로 크게 낮는데 이것은 CMP가 단순 기계적 연마가 아니기 때문에 슬러리와 같은 상대적인 비열이 큰 액체를 사용하므로 슬러리의 패드중심 부분에서 냉각작용으로 인해 온도가 급격하게 떨어지게 측정되었기 때문이다.

반면 헤드속도가 고정된 그림 4(b)는 그림 2와 전혀 다른 경향을 띄는 경우가 보인다. 이것은 회전비 R이 0.5, 1.0, 2.0일 때 각각의 플레이트 회전속도는 120 rpm, 60 rpm, 30 rpm이기 때문에 회전비가 2.0인 경우는 플레이트의 회전속도에 비해 슬러리의 유량이 많아 플레이트에 슬러리가 정체되면서 슬러리의 온도가 측정된 것이다. 30 rpm의 플레이트 회전속도에서는 200 cc/min 유량으로 공급되는 슬러리를 정상적으로 배출하지 못함을 알 수 있다. 헤드의 회전속도를 90 rpm으로 고정하였을



(a) Fixed platen velocity(60 rpm)



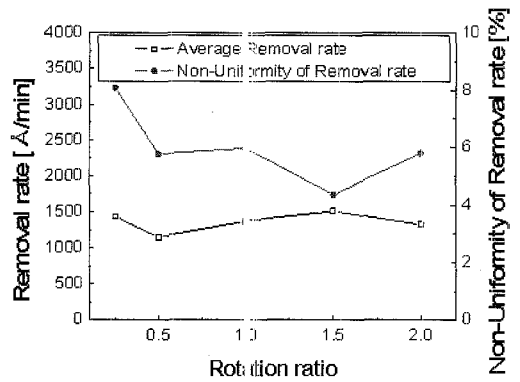
(b) Fixed head velocity(60 rpm)

그림 5. 회전비에 따른 평균온도와 온도불균일도.
Fig. 5. Average and non-uniformity of temperature with rotation ratio variation.

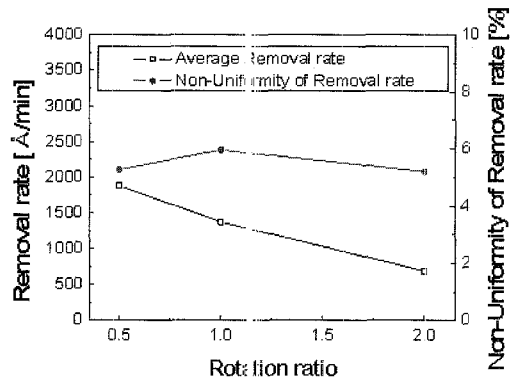
때 결과에서 플레이트의 회전속도가 45 rpm일 때 슬러리 정체현상이 발생하고 60 rpm일 때 발생하지 않으므로 200 cc./min의 유량에서의 슬러리 정체현상의 경계점은 대략 45 rpm에서 60 rpm 사이에 있다고 볼 수 있다.

4.2 회전비에 따른 연마 결과와 온도와의 관계

일반적으로 연마율은 가공 온도에 비례하고, 이것은 온도에 따라 슬러리의 활성도(activity)가 바뀌기 때문이다[6]. 하지만 과도한 온도상승은 슬러리의 pH변화를 가져오고 그에 따른 입자응집(abrasive concentration)의 발생과 재료의 표면상태 변화 등으로 인해 CMP 자체가 불안정해진다. 그림 5와 그림 6은 인위적인 온도변화가 아닌 공정자체의 정상적인 온도변화에서 연마결과와 온도와의 관계를 나타내주고 있다. 플레이트의 속도가 60 rpm일 때 각 회전비에 따라 평균온도는 23 °C



(a) Fixed platen velocity(60 rpm)



(b) Fixed head velocity(60 rpm)

그림 6. 회전비에 따른 연마율과 연마불균일도.
Fig. 6. Average and non-uniformity of removal rate with rotation ratio variation.

에서 24 °C사이로 거의 일정함을 볼 수 있고, 반면 헤드의 속도가 60 rpm일 때는 회전비가 증가함에 따라 26 °C정도에서 23 °C로 감소함을 볼 수 있다. 즉 온도변화는 헤드의 회전속도 변화에는 큰 영향을 받지 않고 플레이트의 속도변화에는 민감함을 알 수 있다. 이는 연마결과에서도 동일한 현상을 보인다.

그림 6(a)에서는 회전비에 따라 연마율이 1000 Å/min에서 1500 Å/min사이로 큰 변화가 없는데 반해 그림 6(b)에서는 회전비가 증가할수록 연마율이 2000 Å/min에서 500 Å/min로 크게 낮아졌다. 결과적으로 평균온도와 평균연마율은 상관관계(correlation)가 있다고 할 수 있다.

온도와 연마율의 불균일도는 ASTM규정으로 식(5)을 기준으로 산출하였다.

$$\text{불균일도} = \frac{\sigma}{X_{avg}} \times 100(\%) \tag{5}$$

그림 5와 그림 6에서 평균온도와 평균연마율과는 다르게 온도와 연마율의 불균일도는 상관관계를 가지지 않는다. 연마불균일도 결과에서 플레이튼속도가 고정된 그림 6(a)는 회전비에 따라 대체적으로 불균일도가 8 %에서 4 %로 낮아지고 그림 6(b)는 5 %로 일정하다. 그러나 온도불균일도 결과에서는 정반대의 현상이 나타나고 있다. 이는 슬러리 정체현상과 외부에서 측정하는 온도가 비열이 큰 액체의 영향으로 미세하게 발생하는 마찰열에 민감하게 반응을 못하기 때문이다. 만약 Copper CMP에서라면 산화막 CMP에 비해 발열도 많고 온도의 영향성이 크기 때문에 더 나은 결과가 예상된다.

불균일도를 연마결과에서만 살펴보면 그림 6(a)에서 회전비가 증가하면서 연마불균일도 또한 낮아진다. 반면 그림 6(b)헤드속도가 고정일 때는 큰 변화없이 5 %정도로 일정하다. 결과적으로 회전비가 증가하면서 연마 불균일도가 향상된다. 즉 다시 말해 헤드의 회전속도가 증가하면서 불균일도가 감소하고 플레이튼의 회전속도는 불균일도에 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

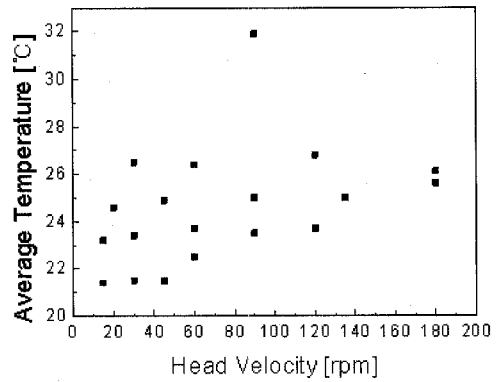
4.3 헤드와 플레이튼속도에 대한 통계적 검증

평균온도와 헤드와 플레이튼의 회전속도사이의 상관관계를 분석하기 위해 실험결과를 바탕으로 상용 통계소프트웨어(SPSS ver. 14.0)를 이용하여 상관분석과 그에 따른 중회귀분석을 실시하였다.

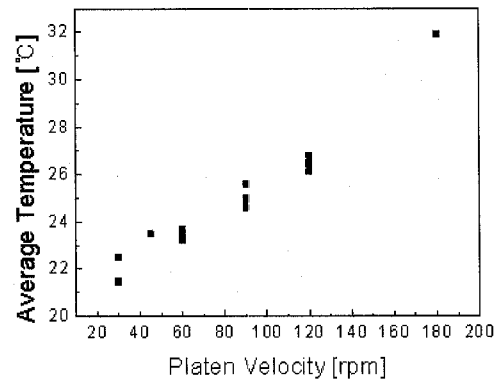
유의수준 $\alpha = 0.01$ 에서 헤드속도는 평균온도와 유의하지 못하였고 플레이튼속도는 Pearson 상관계수가 0.973으로 그림 7에 나타낸 산포도에서도 볼 수 있듯이 매우 강한 양의 상관관계를 가지고 있다. 그래서 중회귀분석 결과 유의수준 0.01에서 유의한 식 (6)의 선형중회귀식을 얻었다. 이 회귀식은 94 %의 설명력을 가지며 \hat{Y} 는 평균온도, X_1 는 헤드의 회전속도, X_2 는 플레이튼의 회전속도를 나타낸다.

$$\hat{Y} = 19.837 + 0.002X_1 + 0.058X_2 \quad (6)$$

헤드회전속도의 유의확률이 $0.528 > \alpha = 0.01$ 이므로 유의하지 못하며 플레이튼회전속도의 유의확률은 $0.000 < \alpha = 0.01$ 이므로 유의하다. 결론적으로 CMP중 평균온도의 변화를 설명하는데 있어 신뢰구간 99 %구간에서 플레이튼속도가 지배적인 역할을 한다고 말할 수 있다.



(a) Average temperature with head velocity



(b) Average temperature with platen velocity

그림 7. 산포도.

Fig. 7. Scattering diagram.

5. 결론

산화막 CMP에서 모니터링 인자로서 온도의 영향성을 연구하였다. 온도는 마찰에너지의 상승으로 기인하고 동일 압력과 실험조건에서는 미끄럼 거리에 비례하게 된다. 실험결과 온도의 profile은 미끄럼 거리와 유사한 경향을 보이고 있는데 슬러리 유량에 비해 낮은 플레이튼속도에 있어서는 슬러리 정체현상으로 인해 온도의 모니터링은 효용성이 없다. 평균온도는 각 회전비에 따라 연마율과 관계를 하고 특히 플레이튼의 회전속도에 지배적인 영향을 받는다.

온도의 불균일도는 연마율의 불균일도와 경향을 같이 하지 않는다. 그것은 플레이튼의 회전속도가 낮은 경우 슬러리의 정체현상이 발생하여 출구에서 온도 측정시 실제 웨이퍼와 패드사이의 접촉면에 발생하는 온도에 근접하지 못하기 때문이며, 또 슬러리 배출이 정상적인 조건에서도 프로파일은 미끄럼거리를 따른다 할지라도 실제 온도의 편차

가 크지 않기 때문에 불균일도를 설명하기에는 부족하다. 상대적으로 온도의 영향성이 큰 Copper CMP에서는 설명될 것으로 예상된다.

연마율은 앞서 밝힌 바와 같이 플레이튼의 회전 속도에 큰 영향을 받지만 연마 불균일도는 헤드의 회전 속도에 영향을 받는다. 플레이튼의 회전 속도가 일정할 때 회전비가 증가할수록, 즉 헤드의 속도가 증가할수록 연마 불균일도는 낮아진다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업(R15-2006-022-01003-0)과 한국과학재단 특정기초연구(R01-2006-000-11275-0(2007))지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] 김형재, "CMP 공정에서 발생하는 연마온도 분포에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 20권, 3호, p. 42, 2003.
- [2] H. D. Jeong, "Development of CMP process for global planarization of ULSI", J. of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 36, No. 3, p. 220, 1996.
- [3] J. Sorooshian, "Tribological, thermal and kinetic characterization of dielectric and metal chemical mechanical planarization process", University of Arizona, p. 71, 2005.
- [4] M. R. Oliver "Chemical-Mechanical Planarization of Semiconductor Materials", Springer, p. 158, 2003.
- [5] 김형재, "회전형 CMP장비의 속도 및 마찰력 분포 해석", 한국정밀공학회지, 20권, 5호, p. 41, 2003.
- [6] 권대회, "CMP특성과 온도의 상호관계에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 19권, 10호, p. 161, 2002.
- [5] 박범영, "CMP 결과에 영향을 미치는 마찰 특성에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 17권, 10호, p. 1041, 2004.