

## CMP특성과 온도의 상호관계에 관한 연구

권대희\*, 김형재\*, 정해도\*\*, 이응숙\*\*\*, 신영재\*\*\*

### A Study on the Correlation between Temperature and CMP Characteristics

Dae Hee Kwon\*, Hyoung Jae Kim\*, Hae Do Jeong\*\*, Eng Suk Lee\*\*\* and Young Jae Shin\*\*\*

#### ABSTRACT

There are many factors affecting the results of CMP (Chemical Mechanical Polishing). Among them, the temperature is related to the removal rate and WIWNU (Within Wafer Non-Uniformity). In other words, the removal rate is proportional to the temperature and the variation of temperature distribution on a pad affects the non-uniformity within a wafer. In the former case, the active chemistry improves the rate of chemical reaction and the removal rate becomes better. But, there are not many advanced studies. In the latter case, a kinematical analysis between work-piece and pad can be obtained. And such result analysed from the mechanical aspect can be directly related to the temperature distribution on a pad affecting WIWNU. Meanwhile, the temperature change affects the quantities of both slurry and pad. The change of a pH value of the slurry chemistry due to a temperature variation affects the surface state of an abrasive particle and hence the agglomeration of abrasives happens above the certain temperature. And the pH alteration also affects the zeta potential of a pad surface and therefore the electrical force between pad and abrasive changes. Such results could affect the removal rate and etc. Moreover, the temperature changes the 1st and 2nd elastic moduli of a pad which are closely related to the removal rate and the WIWNU.

**Key Words** : CMP(화학 기계적 연마), Temperature(온도), IR thermal image(적외선 열 영상), Zeta potential (Zeta 전위)

#### 기호설명

E1 = the elastic modulus related to the elastic deformation

E2 = the elastic modulus related to the viscoelastic deformation

#### 1. 서론

반도체 집적 용량이 점점 증가함에 따라 그에 따른 칩의 크기는 점점 더 커지게 되었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 배선의 다층화와 선폭의 미세화, 그리고 대직경의 웨이퍼 채용이 불가피하게 되었다<sup>(1)</sup>. 특히, 서브마이크론(sub-micron) 영역의 선폭으로 다층화를 진행함에 있어서 평탄화 공정이 필수 불가결한 공정으로 자리잡게 되었는데, 이를 해결하기 위해 등장한 것이 화학 기계적

2002년 2월 5일 접수  
\* 부산대 대학원 정밀기계공학과  
\*\* 부산대학교 기계공학부  
\*\*\* 한국기계연구원

연마(Chemical Mechanical Polishing)이다. 또한, 배선을 형성하기 위한 노광 공정에 있어서 분해능과 초점 심도는 전 공정의 화학 기계적 연마에 의한 연마 불균일(within wafer non-uniformity)에 의해 직접적인 영향을 받게 된다. 그리고, 공정시간을 단축하기 위해서는 연마율을 향상시킬 필요가 있다. 연마율을 올리기 위해서는 가공 압력과 상대 속도를 증가시키게 되는데, 이는 가공 시 발생하는 온도의 증가를 초래한다. 본 논문은 이러한 온도의 증가가 화학 기계적 연마의 특성에 어떠한 영향을 미치는가를 파악하고자 하는데 그 목적이 있다.

## 2. 열 영상 측정 장비를 이용한 가공간의 온도 측정

### 2.1 온도 발생의 주된 인자와 그 영향

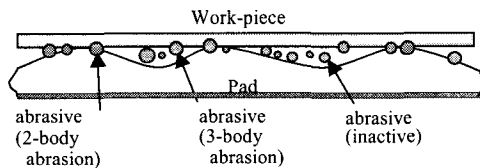


Fig. 1 The general abrasion modeling during CMP

CMP의 제거 모델은 Fig. 1과 같이 생각할 수 있다. 즉, 연마 입자가 패드에 침입하여 하나의 개체처럼 거동하면서 피가공물을 제거하는 2-body abrasion과 따로 분리되어 가공에 참여하는 3-body abrasion으로 구분되어질 수 있다<sup>(2,3)</sup>. 이 때, 2-body abrasion을 야기하는 연마 입자가 주로 제거에 참여하며, 마찰열을 발생시키는 주요한 발열원(Heat source)으로 알려져 있다.

CMP 가공의 평가에 주로 이용되는 특성으로는 연마율(removal rate)과 연마 불균일(within wafer non-uniformity)을 들 수 있다. 상기 두 가지의 특성에 영향을 미치는 인자는 압력, 상대 속도, pH, 패드의 물성치, 온도, 온도의 분포 등 여러 가지가 있을 수 있다. 여기서, 온도와 가장 밀접한 관련을 가지고 있는 인자들은 가공 압력과 상대 속도이다.

온도의 변화에 의해서 slurry와 패드의 물성치가 영향을 받게 되는데, slurry의 경우에는 pH의 불안정과 이에 따른 거대입자의 발생 가능성이 높아지게 되고<sup>(4)</sup>, 패드인 경우에는 pH의 변화에 따라 표

면의 상태가 달라지고, 온도의 변화에 따라 패드의 탄성 계수가 달라지게 된다<sup>(5)</sup>.

### 2.2 적외선 열 영상을 이용한 온도측정 실험

#### 2.2.1 적외선 실험 장치 및 방법

온도를 지니고 있는 모든 물체는 적외선을 방출한다. 완전한 암흑일지라도 임의의 물체에서 방출되는 적외선을 감지함으로써 그 물체의 온도를 계산할 수 있다. 이 때, 측정하고자 하는 물체의 복사율(emissivity,  $\epsilon$ ), 주위 공기의 온도, 카메라의 자체 복사 에너지, 렌즈 등의 요소를 고려해 주어야 한

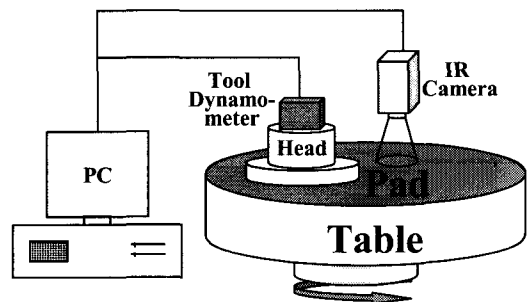


Fig. 2 The schematic of experimental apparatus

다. Fig. 2와 같은 실험 장치를 구성하고, 가공 중 실시시간으로 패드의 열 영상을 촬영하였다. 측정 카메라는 Nikon사의 Thermal Vision LAIRD-S270 모델이며, Rodel IC1400K groove의 연마 패드, 그리고 슬러리는 Rodel사의 ILD 1300을 사용하였다. 카메라는 카메라 자체에서 반사되어 다시 돌아오는 적외선을 회피하기 위하여 일정한 경사각을 유지한 채 설치하였다. 139, 315, 412g/cm<sup>2</sup>인 3가지 압력 조건과 10, 30, 50, 70, 90RPM인 5가지 회전수 조건에서 실험하고 촬영하였다. 주위 분위기 온도는 23℃ 이고, 패드의 복사율(emissivity)은 0.9로 설정하였다.

#### 2.2.2 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 온도와 압력, 속도와의 관계를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 온도는 압력과 상대속도 모두에 비례함을 알 수 있다. 전자의 경우는 압력이 증가함에 따라 실험측 면적이 증가하고<sup>(6)</sup> 가공에 참여하는 2-body abrasion의 입자수가 증가함에 따른 것으로 생각이 되고, 후자의 경우는 발생하는 마찰열의 공급 주기가 외부로 방출되어 나가는 주기보다 빨라져서 열이 축적되기 때문인 것으로 생

각된다.

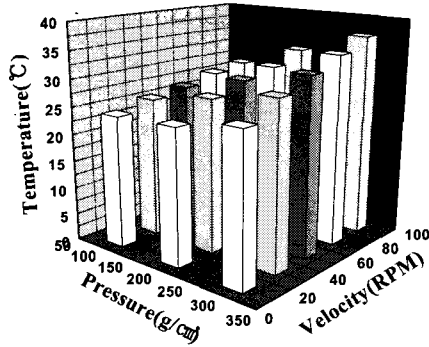


Fig. 3 The relationship between pressure, velocity and temperature

패드와 웨이퍼가 같은 속도를 가지고 서로 회전 운동할 때 패드의 미끄럼 거리를 나타내면 다음과 같다<sup>(7)</sup>.

$$S = 2R \cos^{-1} \left( \frac{x^2 + R^2 - r^2}{2xR} \right) \quad (1)$$

여기서,  $x$ 는 패드 중심으로부터의 반경거리이고,  $R$ 은 패드 중심과 웨이퍼 중심과의 거리이며,  $r$ 은 웨이퍼의 반경이다.

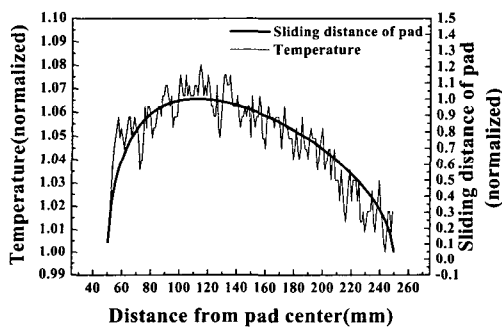


Fig. 4 The relationship between temperature and sliding distance of pad

위의 식 (1)을 기초로 해서 반경 105mm인 웨이퍼가 패드 중심과 125mm의 편심 거리를 두고 상대 운동할 때 발생하는 패드의 미끄럼 거리를 나타낸

그래프와 압력 412g/cm<sup>2</sup>, 테이블 및 헤드 회전수 50RPM인 조건으로 가공 실험을 수행해서 구한 온도 분포 그래프를 Fig. 4에 함께 도시하였다. 이론적인 패드의 미끄럼 거리 그래프와 반경별 온도 분포 그래프를 비교, 분석하였을 때 그 경향의 유사성을 쉽게 발견할 수 있다. 이는 마찰열은 2-body abrasion의 연마 입자가 웨이퍼 표면과 접촉하는 과정에서 국부적으로 발생하는 열에 의하여 주로 생성되고<sup>(8,9)</sup>, 이러한 국부적인 발열양은 식 (1)에 의한 패드의 미끄럼 거리에 비례하기 때문이다.

### 3. 온도와 CMP 소모품 특성의 상호 관계

#### 3.1 온도와 연마 제거율

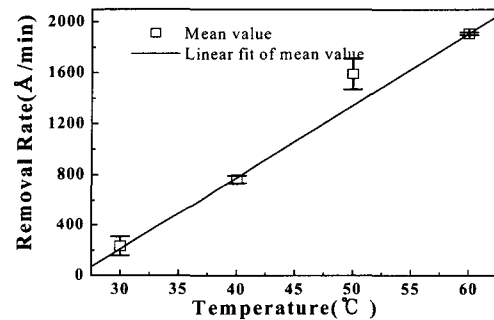


Fig. 5 The removal rate is proportional to the temperature

Fig. 5는 압력 200g/cm<sup>2</sup>, 테이블 및 웨이퍼 회전수 40RPM인 조건에서 2분간 가공했을 때의 온도와 연마율(Removal rate)과의 관계를 나타낸 그림이다. 그래프에서 알 수 있듯이, 동일한 가공 조건일지라도 연마율은 가공 온도에 비례한다. 이것은 온도가 증가할수록 슬러리의 활성도(activity)가 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

또한, 패드에 미치는 측면에서 살펴보면, 온도를 증가시키면 패드의 경도는 감소하는데, 이는 패드의 시간에 대한 변형율을 증가시켜서 연마 균일도(uniformity)를 증가시키고, 평탄도(planarity)를 떨어뜨린다. 반대로, 온도를 감소시키면 패드의 경도는 증가하여서 가공 중 변형이 작게 발생하므로 평탄도는 향상된다. 이러한 가공 중에 발생하는 열을

조절시켜 주는 방법은 공급되는 슬러리의 온도 조절, 정반(platen)의 온도 조절, 웨이퍼의 배면 열선을 삽입하는 방법 등이 알려져 있다<sup>(10)</sup>.

### 3.2 온도와 슬러리 특성

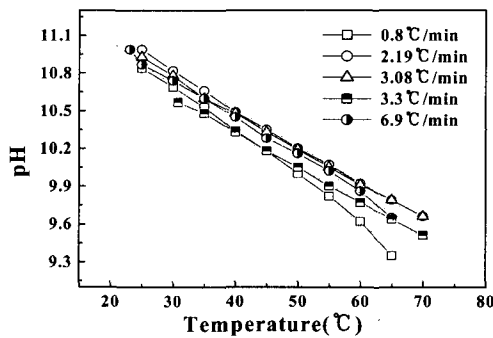
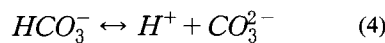
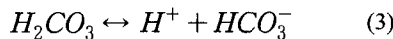
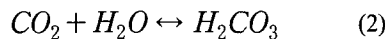
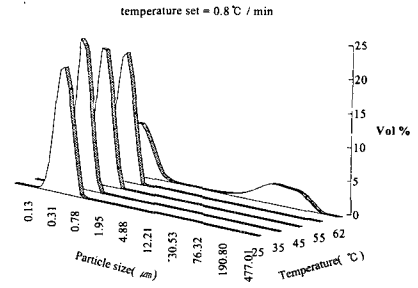


Fig. 6 Temperature vs. pH

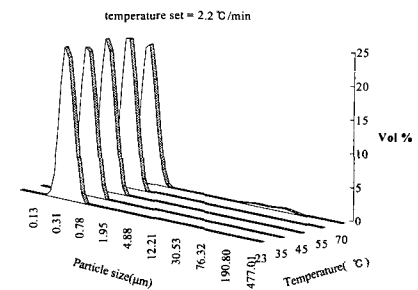
Fig. 6은 Rodel사의 ILD 1300 슬러리의 온도의 변화에 따른 pH의 변화를 나타낸 그래프이다. 온도가 증가할수록 pH가 감소하는데 이것은 염기성 용액인 ILD 1300 슬러리내의 용존 이산화 탄소(CO<sub>2</sub>)가 OH<sup>-</sup>와 반응을 해서 탄산(H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)을 형성하여 H<sup>+</sup> 이온의 농도를 증가시키기 때문인 것으로 알려져 있다.



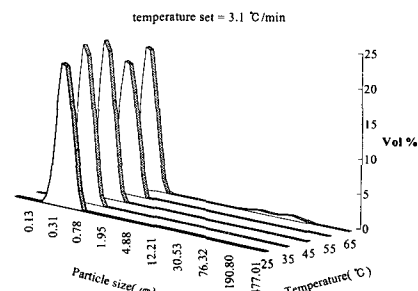
절연막의 평탄화에 사용되는 슬러리인 Rodel사의 ILD 1300인 경우 pH 9~12에서 요구되는 기준 이상의 연마율을 나타내는데(연마율 600 Å/min 이상), 이는 슬러리내의 연마입자의 pH에 따른 상이한 분산성에 기인한 것으로 알려져 있다. 분산성이 향상되면 가공에 참여하는 연마입자의 수가 증가하고 연마율이 향상되며<sup>(11)</sup>, 거대입자의 발생가능성이 적어지므로 결함(defect)이 발생할 가능성도 떨어진다. Fig. 7은 Rodel사 ILD 1300 슬러리의 각각 다른 3가지의 온도 증가율에서의 연마입자의 크기의 분포를 나타내고 있다. 60°C 이상에서 모두 거대입자가



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 The variation of abrasive size of ILD1300 :

(a) Temperature rising rate is 0.8°C/min,

(b) Temperature rising rate is 2.2°C/min, and

(c) Temperature rising rate is 3.1°C/min

생성되었다. 이는 온도가 증가하면서 연마입자의 운동이 활발해져서 서로 충돌하거나 pH의 변화에 의한 반발력의 감소로 인한 것으로 생각된다. 회전수 10~90 RPM, 압력 139~412g/cm<sup>2</sup>에서는 60°C 미만의 온도가 관측되었으나, 이보다 가혹한 조건이나 flash temperature를 가정하였을 때는 연마 입자가 거대해짐에 따른 결함이나 부분적인 연마율 상승 효과를 고려해야만 할 것으로 생각된다.

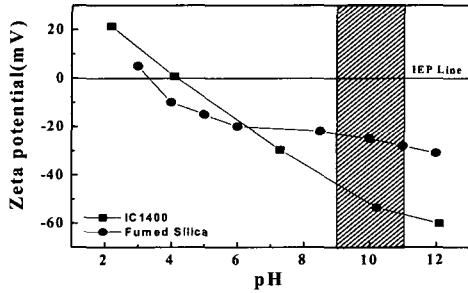


Fig. 8 A change of zeta potential according to the pH in pad IC 1400 and fumed silica

### 3.3 온도와 패드 특성

#### 3.3.1 패드와 연마입자 표면 전하의 변화

Fig. 8은 Rodel사의 IC1400 패드와 ILD1300 슬러리의 연마입자인 fumed silica의 pH의 변화에 따른 zeta전위의 변화를 나타낸 그래프이다. ILD1300은 25℃~70℃에서 pH 11에서 9정도로 낮아지는데 사선으로 표시된 부분에서 그에 따른 zeta전위를 나타내었다. pH가 낮아질수록 표면의 zeta전위는 패드와 연마입자 공통적으로 음의 값에서 양의 값으로 변하는 방향으로 움직인다. 이런 현상은 초기에는 염기성 용액내의 OH<sup>-</sup>이온이 용액에 담겨진 물체의 표면에 부착되어 음의 전위를 보였으나, 점차 산성으로 갈수록 H<sup>+</sup>이온이 용액 속에 증가하면서 OH<sup>-</sup>이온 대신 표면에 부착되어 전위가 양의 값으로 변하여 나타난 것으로 생각된다. 이는 패드와 연마 입자간의 zeta전위의 변화에 의한 양자간의 반발력의 감소가 예상되고, 따라서 2-body abrasion의 증가와 3-body abrasion의 감소가 예상된다.

#### 3.3.2 패드의 실접촉 면적의 변화

Fig. 9는 온도에 따른 IC1400 패드의 실접촉 면적의 변화를 나타낸 그래프이다. 패드의 실접촉 면적이 증가함에 따라 가공에 참여하는 연마 입자의 유효 숫자는 증가하게 되고 연마율의 증가를 예측할 수 있다. 반면에, 일정한 하중에서, 접촉면적이 늘어남으로 인해 상대적으로 압력이 감소하므로 연마 입자가 피가공물을 침입하는 깊이가 줄어들고 그에 따른 제거량이 감소하게 되므로 연마율이 감소하게 됨을 예측할 수 있다. 따라서, 온도의 증가

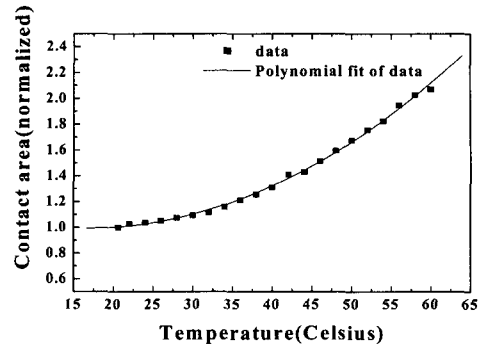


Fig. 9 The increase of contact area according to the temperature rising

에 의한 실접촉 면적의 증가로 인한 전체적인 연마율의 거동은 상기와 같은 두 가지 서로 상이한 효과로 인해 그 증감을 예측하기가 어렵기 때문에 향후 연구되어야 할 과제라고 생각된다.

#### 3.3.3 패드의 탄성 계수의 변화

Fig. 10은 IC 1400 패드에 서로 다른 두 가지의 주기로 일정한 시간동안 하중이 가해지고 난 후 제거되었을 때의 시간에 대한 변위량을 도시한 그래프이다. 하중의 loading/unloading 주기가 빠를수록, 그에 대한 strain은 주기가 느린 것보다 상대적으로 적어지게 된다. 한편, 패드는 탄성 거동(elastic behavior)과 함께 점탄성 거동(viscoelastic behavior)을 동시에 하는 고분자 재질로 만들어져 있기 때문에 온도가 올라갈수록 동적 전단계수(dynamic shear modulus)가 떨어진다<sup>(5)</sup>. 즉, 동일한 하중이 주어질 때, 온도가 올라갈수록 변위량이 커지게 된다.

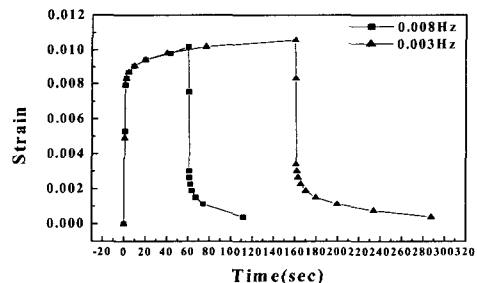


Fig. 10 Time vs. strain of IC 1400 pad in a different loading/unloading period

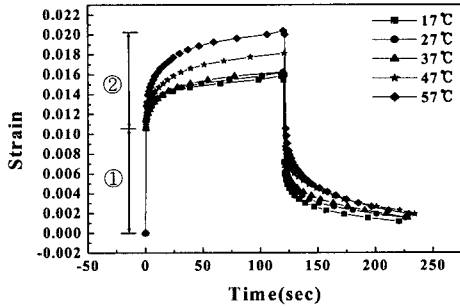


Fig. 11 The behavior mixed with elasticity and viscoelasticity of Rodel IC1400 in different temperature

이러한 거동은 Fig. 11에 잘 나타나고 있다. Fig. 11은 여러 가지 다른 온도에서 압력 300g/cm<sup>2</sup>의 loading / unloading 주기가 0.004Hz인 조건으로 IC 1400의 시간에 대한 strain의 변화를 실험한 결과를 나타낸 그래프이다. 온도가 증가할수록 점탄성적 strain이 뚜렷이 증가하는 반면, 탄성적 strain은 증가량이 미미하다. 57°C에서의 탄성적 strain을 ①에, 점탄성적 strain을 ②에 나타내었다.

Fig. 12는 이러한 탄성 계수의 변화를 나타낸 그래프이다. 1차 탄성계수 E1은 탄성 변위에 관한 탄성 계수이고, 2차 탄성계수 E2는 점탄성 변위에 관한 탄성 계수를 나타낸다. 1차 탄성 계수는 연마율과 비례하고, 2차 탄성 계수는 웨이퍼내의 연마 불균일(WIWN)과 반비례한다고 알려져 있다<sup>(12)</sup>. 그러므로, Fig. 4와 같은 패드상에 불균일하게 발생하는 열에 의해 E2가 불균일하게 되고, 이는 연마 불균일 측면에서 또 다른 문제를 일으킨다고 할 수 있다.

#### 4. 결론

CMP시 발생하는 열은 연마율과 연마 불균일에 영향을 미친다. 이러한 열은 온도로써 측정이 가능하고 CMP에 다음과 같은 영향을 미친다.

1. 가공 시 발생하는 온도는 가공 압력과 상대 속도에 비례한다.
2. 패드상의 온도 분포는 불균일한데, 이는 패드가

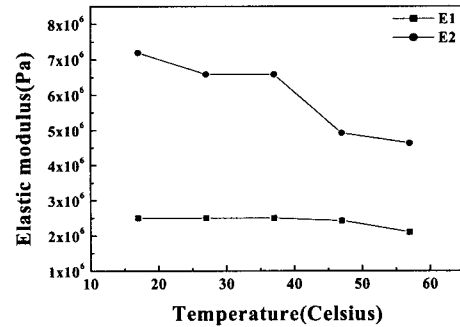


Fig. 12 The change of 1st and 2nd young's modulus of IC 1400 in various temperature

에 따라 다르기 때문이고, 평탄도에 좋지 않은 영향을 미칠 것으로 생각된다.

3. Rodel사의 ILD 1300 슬러리인 경우 온도가 증가하여 약 60°C 이상이 되면 거대 입자가 생성되는데 이것은 연마율 증가와 결함 발생을 일으킬 것으로 생각된다.
4. 온도가 변화해서 생기는 패드와 연마 입자 표면의 zeta전위의 변화로 서로간의 정전기력의 변화가 발생하여 척력이 감소하게 되고 2-body abrasion의 증가와 3-body abrasion의 감소를 야기할 것으로 예상된다.
5. 온도의 증가에 따라 가공에 참여하는 입자수가 증가하게 되어 연마율 향상을 가져오지만, 연마 압력의 감소를 가져오므로, 전체적인 연마율의 증감은 추후 더 연구되어야 할 과제이다.
6. 온도 변화에 따른 패드의 2차 탄성 계수의 불균일은 연마 불균일에 악영향을 미칠 것으로 생각된다.

#### 후 기

이 연구는 국가 지정 연구실 사업(National Research Laboratory)으로부터 지원받아 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. H. D. Jeong, "Development of CMP Process for

- Global Planarization of ULSI," Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, 36(3), pp. 220-230, 1996.
2. Stachowiak, Batchelor, "Engineering Tribology," Elsevier, Amsterdam, London, New York, Tokyo, pp. 561-562, 1993.
  3. Jianfeng Luo, David A. Dornfeld, "Material Removal Mechanism in Chemical Mechanical Polishing: Theory and Modeling," IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 14, No. 2, pp. 113-114, 2001.
  4. Shin Hwa Li, Robert O. Miller, "Chemical Mechanical Polishing in Silicon Processing," Academic Press, San Diego, San Francisco, New York, pp. 143-145, 2000.
  5. Joseph M. Steigerwald, "Chemical Mechanical Planarization of Microelectronic Materials," John Wiley & Sons, Inc., USA, pp. 66-78, 1997.
  6. K. L. Johnson, "Contact mechanics," Cambridge University Press, Cambridge, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney, pp. 397-423, 1985.
  7. 이성훈, 김형재, 정해도, "화학기계적연마(CMP) 컨디션에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제16권, 제5호, pp. 40-47, 1999.
  8. K. L. Johnson, "Contact mechanics," Cambridge University Press, Cambridge, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney, p. 375, 1985.
  9. Stachowiak, Batchelor, "Engineering Tribology," Elsevier, Amsterdam, London, New York, Tokyo, p. 552, 1993.
  10. Shin Hwa Li, Robert O. Miller, "Chemical Mechanical Polishing in Silicon Processing," Academic Press, San Diego, San Francisco, New York, pp. 24-25, 2000.
  11. 정해도, 김경준, "Slurry의 pH가 CMP특성에 미치는 영향," 한국정밀공학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 963-966, 1998.
  12. 김형재, "화학 기계적 연마 시 연마결과에 영향을 미치는 패드특성에 관한 연구," 부산대학교, 석사 학위 논문, 2000.