

논문 17-10-5

CMP 연마입자의 마찰력과 연마율에 관한 영향

Effect of Abrasive Particles on Frictional Force and Abrasion in Chemical Mechanical Polishing(CMP)

김구연¹, 김형재¹, 박범영¹, 이현섭¹, 박기현¹, 정해도^{2,a}

(Gooyoun Kim¹, Hyoungjae Kim¹, Boumyoung Park¹, Hyunseop Lee¹, Kihyun Park¹, and Haedo Jeong^{2,a})

Abstract

Chemical Mechanical Polishing (CMP) is referred to as a three body tribological system, because it includes two solids in relative motion and the CMP slurry. On the assumption that the abrasives between the pad and the wafer could be a major reason not only for the friction force but also for material removal during polishing, the friction force generated during CMP process was investigated with the change of abrasive size and concentration of CMP slurry. The threshold point of average coefficient of friction(COF) with increase in abrasives concentration during interlayer dielectric(ILD) CMP was found experimentally and verified mathematically based on contact mechanics. The predictable models, Mode I (wafer is in contact with abrasives and pad) and Mode II (wafer is in contact with abrasives only), were proposed and used to explain the threshold point. The average COF value increased in the low abrasives concentration region which might be explained by Mode I. In contrast the average COF value decreased at high abrasives concentration which might be regarded to as Mode II. The threshold point observed seemed to be due to the transition from Mode I to Mode II. The tendency of threshold point with the variation of abrasive size was studied. The increase of particle radius could cause contact status to reach transition area faster. The correlation between COF and material removal rate was also investigated from the tribological and energetic point of view. Due to the energy loss by vibration of polishing equipment, COF value is not proportional to the material removal rate in this experiment.

Key Words : Friction force, Abrasives size, Abrasives concentration, Chemical mechanical polishing

1. 서론

화학 기계적 연마공정(Chemical Mechanical Polishing)은 슬러리(slurry)의 화학적인 작용과 연마입자의 기계적인 작용에 의해 전기 절연 층(Inter-

layer Dielectric Layer) 또는 금속 배선 층을 연마하는 공정이다. 화학 기계적 연마기술은 연마속도와 압력 외에도 패드(Pad)의 점탄성 거동, 슬러리의 유막, 슬러리의 화학 작용에 의해 웨이퍼의 표면에 발생하는 유기 박막, 온도, 습도 등의 다양한 변수로 인해 모든 변수를 포함한 연마 기구를 제어하기가 어렵다.

화학 기계적 연마는 다른 화학적인 재료 제거 과정과는 달리 이방적으로 요철을 제거해 나가므로 비교적 긴 평탄화 특성을 가지게 된다. CMP공정에서 화학적 에칭율의 증가는 평탄화 특성을 나

1. 부산대학교 정밀기계공학과

2. 부산대학교 기계공학부

(부산시 금정구 장전2동 산30)

a. Corresponding Author : hdjeong@pusan.ac.kr

접수일자 : 2004. 8. 27

1차 심사 : 2004. 9. 8

심사완료 : 2004. 9. 17

빠게 하는 요인이 되므로 이러한 현상을 피하도록 슬러리를 제조하게 된다. 따라서 대부분의 박막 재료 제거의 최종 역할은 기계적인 마찰과 마멸현상에 의해 이루어지게 된다. 이러한 이유 때문에 CMP공정은 상대 운동하는 두 고체인 패드 또는 연마입자와 웨이퍼(Wafer) 그리고 유막을 형성하는 슬러리로 이루어져있으므로 두 마찰면의 마찰계수(Coefficient of Friction)와 마멸(연마율)이 주요한 인자인 트라이볼로지 시스템(Tribological system)으로 인식 된다.

스트라이벡(Stribeck) 선도에서 무차원량인 Sommerfeld 수($S = \eta v / p$)에 따라 윤활 영역(Lubrication regime)이 경계층 윤활(Boundary lubrication), 혼합 윤활(Mixed lubrication), 탄성 유체 윤활(Elasto-hydrodynamic lubrication) 및 완전 유체 윤활(Hydrodynamic lubrication)로 나뉘어 지게 되는데 윤활 영역에 따라 연마기구가 달라진다.

Runnel등은 완전 유체 윤활상태에서 화학 기계적 연마가 일어난다고 가정하고 재료 제거 기구를 제시하였다[1]. 그는 연구에서 완전 유체 윤활 상태에서 유체의 전단력과 슬러리의 압력이 연마율을 결정하는 것으로 가정하였다. 반면, H.J. Kim, T.K. Yu등은 혼합 윤활 상태에서 패드와 웨이퍼의 직접 접촉에 의한 재료 제거 기구를 제시하였다[2,3]. 본 논문에서는 H.J. Kim등이 제시한 바와 같이 패드와 웨이퍼의 직접접촉에 의한 입자의 긁어 나감에 의해 연마가 일어난다고 가정하였다. 주어진 상대 속도와 압력에서 패드와 웨이퍼 사이에 존재하는 연마입자와 웨이퍼 표면의 직접 접촉에 의해 마찰이 발생하게 되고 마멸에 의해 웨이퍼 표면의 화학적으로 반응된 박막이 제거 되어 나가게 된다. 따라서 연마 시 발생하게 되는 마찰력의 크기를 측정함으로써 재료 제거기구의 이해를 도울 수 있다.

본 논문에서는 ILD(Inter Layer Dielectric) CMP 시 직접 연마에 참여할 것으로 예상되는 연마입자의 크기와 중량밀도(weight percent, wt%)를 변화시켰을 때 마찰력의 크기변화와 연마 결과를 고찰해 보았다.

2. 실험

2.1 실험장치 및 조건

실험에는 지앤피 테크놀로지(주)의 4-6인치 화학적 기계적 연마 장비인 Poli-400장비를 사용하였고

연마 시 발생하는 마찰력 측정을 위하여 Kistler사의 피에조 힘 센서(Piezoelectric Force sensor)를 연마 헤드(Head) 후면부에 장착하였다. 구체적인 실험 장치 구성은 그림 1에 나타내었다. 센서로부터 수신된 신호는 전하 증폭기를 거쳐 A/D 변환기에서 디지털화 된 데이터로 변환된 뒤 컴퓨터로 저장하여 처리하였다.

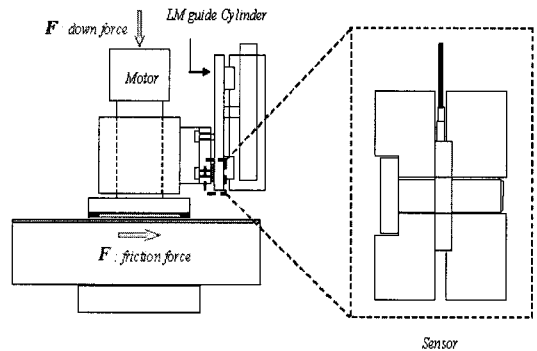


그림 1. 마찰력 측정 장치 개략도.

Fig. 1. Schematic of CMP equipment with friction monitoring system.

표 1. 실험 장치 및 조건.

Table 1. Experimental apparatus and condition.

Equipment	Conditions
CMP Equipment	Poli-400
Pad	IC 1000(stack)
Wafer	4" Thermal Oxide
Sensor type	9135B(Piezo electric force sensor)
Pressure	500g/cm ²
Velocity	60/60rpm
Polishing time	1 min
Conditioning	Ex-situ(30sec)

4인치 열산화막 웨이퍼를 사용하여 1분간 연마를 실시하였다. 연마에 사용된 패드는 Rohm and Hass사의 IC 1000(stack)을 선택하였으며 이것은 서브패드(Sub-pad)로 suba계열의 패드가 접합되어 있는 패드이다. 컨디셔닝(Conditioning)은 1분 연마 후 다이아몬드 컨디셔너(Diamond Conditioner)를 이용하여 60 g/cm²의 압력에 60 rpm/60 rpm의 속도로 30초간 컨디셔닝을 실시하였다. 입자의 크기

가 다른 슬러리로 교체하기 전에 패드의 안정화(Break-in)를 위해 다이아몬드 컨디셔너를 이용하여 컨디셔닝을 3분간 실시 후 더미웨이퍼(Dummy Wafer) 가공을 실제 가공 조건과 같은 조건에서 2번 반복하여 수행하였다. 구체적인 실험 장치 및 실험 조건은 표 1에 나타내었다.

2.2 실험방법

첫 번째 실험에서 사용된 슬러리 내의 입자의 크기는 18 nm, 35 nm, 80 nm, 110 nm이다. 각각의 크기의 입자를 30 wt%의 입자함량 만큼 함유하는 상용 슬러리(Beuhler)를 5 wt%, 10 wt%, 20 wt%로 희석하여 사용하였다. 이때 슬러리의 pH는 질산을 이용하여 2.3~2.5의 산성이 유지되도록 하였다. 또한 비교를 위해서 Rohm and Hass사의 ILD1300 슬러리의 농도를 희석하여 마찰력의 변화를 관찰하였다. ILD1300의 경우 입자의 크기는 175 nm, pH는 10.8이다. 구체적인 슬러리의 실험 조건은 표 2에 나타내었다.

표 2. 실험 조건.

Table 2. Experimental condition.

	Slurry I	Slurry II
Manufacturer	Beuhler, German	ILD1300, Rohm and Hass
Abrasive Size	18, 35, 80, 110nm	175nm
Abrasive Conc.	5, 10, 20, 30wt%	2, 4, 6, 8, 13wt%
pH	2.3~2.5	10.8
Abrasive type	Colloidal silica	Fumed silica

3. 결과 및 고찰

3.1 수학적 모델링

3.1.1 한 개의 입자에 작용하는 마찰력

그림 2와 같이 입자가 웨이퍼 표면을 긁어 나갈 때 입자의 전반부만이 박막의 표면과 닿게 되며 또한 박막의 표면을 소성적으로 변형시키면서 진행하기 때문에 반경 R인 입자가 웨이퍼 표면을 긁어 나갈 때의 힘 f 는 식(1) 같이 정의 된다[4].

$$f = H_w R^2 \sin^{-1} \frac{a}{R} - \frac{a}{R} [1 - (\frac{a}{R})^2]^{1/2} + 2\tau R^2 [1 - [1 - (\frac{a}{R})^2]^{1/2}] \quad (1)$$

a 는 입자의 접촉 반경, H_w 는 박막의 경도, τ 는 입자와 박막이 접촉하는 면에서 작용하는 전단력이다. 입자의 압입 깊이가 반경에 비해 매우 작은 경우($\delta \ll R$) 입자에 작용하는 마찰력은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다[2].

$$f = (\frac{2}{\pi^3})^{1/2} R^{-1} H_w^{-1/2} w^{3/2} \quad (2)$$

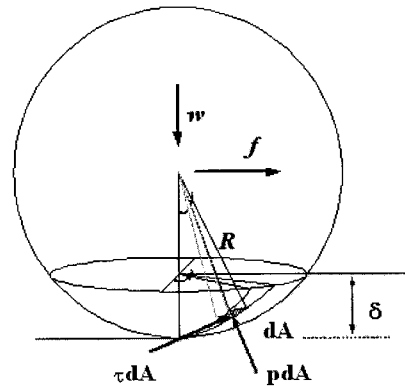


그림 2. CMP시 한 개의 입자에 작용하는 마찰력. Fig. 2. Friction force acting on single abrasive during Chemical Mechanical Polishing.

3.1.2 Mode I(입자의 농도가 낮은 경우)

그림 3에 도시된 것과 같이 증량밀도가 낮은 경우 입자와 함께 패드도 웨이퍼와 접촉할 것으로 예측된다. 이 경우 반경 R인 입자에 작용하는 하중(w)은 식(3)과 같이 접촉 압력에 의해 결정된다[2].

$$W_c = \frac{8\sqrt{2}}{3} E^* R^2 (1 - P_r/E_p)^{-3/2} \quad (3)$$

E^* 는 입자와 패드에 대한 복합탄성계수이고, E_p 는 패드의 탄성계수 그리고 P_r 은 실 접촉 압력이다. Mode I에서는 패드가 웨이퍼와 접촉하므로 입자 한 개에 작용하는 마찰력은 f_c , 전체 마찰력은 F_c 로 표기하였다. 식(3)을 식(2)에 대입하면 입자 한 개에 의해 발생하는 마찰력(f_c)을 식(4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_c = k_1 \cdot R^2 \quad (4)$$

입자의 반경크기 R 만을 변수로 하고 입자의 종류, 패드의 종류, 압력 및 속도 조건 등은 동일 조건에서 연마되므로 나머지 변수들은 상수 k_1 로 나타낼 수 있다. 전체 마찰력(F_c)은 식(4)에 입자의 개수 n 을 곱함으로써 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$F_c = n \cdot k_1 \cdot R^2 \quad (5)$$

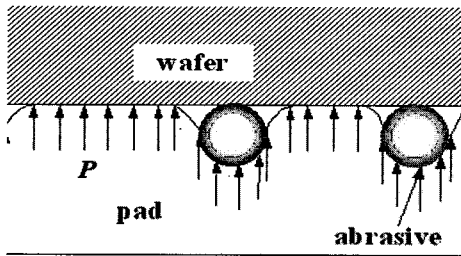


그림 3. Mode I: 입자의 농도가 낮은 경우 웨이퍼, 패드와 입자의 접촉 상태.

Fig. 3. Mode I: Wafer-Pad-abrasive contact at low concentration slurry.

3.1.3 Mode II(입자의 농도가 높은 경우)

그림 4에서 보는 바와 같이 입자의 증량밀도가 높은 경우 패드의 직접 접촉 없이 입자만이 웨이퍼와 접촉할 것으로 가정하고 반경 R 인 입자에 작용하는 하중은 식(6)과 같이 나타내어진다.

$$W_{nc} = \frac{F_N}{n} \quad (6)$$

F_N 은 웨이퍼에 의해 패드 돌기 전체에 작용하는 하중이다. 연마입자만이 웨이퍼와 접촉한 상태이므로 입자의 개수 n 으로 나누어 주면 입자 한 개에 작용하는 하중이 된다. Mode II에서는 패드가 웨이퍼와 접촉하지 않으므로 입자 한 개에 작용하는 마찰력은 f_{nc} , 전체 마찰력은 F_{nc} 로 표기하였다. 식(6)을 식(2)에 대입하면 입자 한 개에 작용하는 마찰력(f_{nc})은 식(7)로 나타낼 수 있다.

$$f_{nc} = k_2 \cdot R^{-1} \cdot n^{-3/2} \quad (7)$$

역시 식(4)와 마찬가지로 변수인 입자의 반경 R

과 입자의 개수 n 을 제외한 다른 변수는 동일하므로 상수 k_2 로 간주 할 수 있다. 전체 마찰력(F_{nc})은 식(8)과 같이 식(7)에 입자의 개수 n 을 곱한 것과 같다.

$$F_{nc} = k_2 \cdot R^{-1} \cdot n^{-1/2} \quad (8)$$

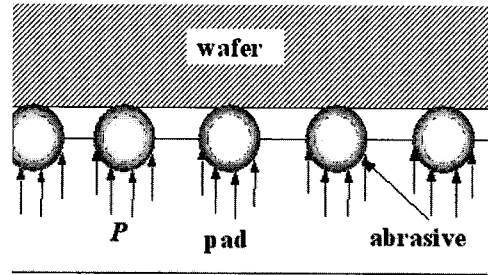


그림 4. Mode II: 입자의 농도가 높은 경우 웨이퍼, 패드와 입자의 접촉 상태.

Fig. 4. Mode II: Wafer-Pad-abrasive contact at high concentration slurry.

식(5)와 식(8)을 그래프로 도시한 것을 그림 5에 나타내었다. 입자의 함량이 낮은 상태(Mode I)에서 마찰력은 농도에 대해서 선형으로 증가하고 높은 상태(Mode II)로 바뀔 경우 지수적으로 감소한다.

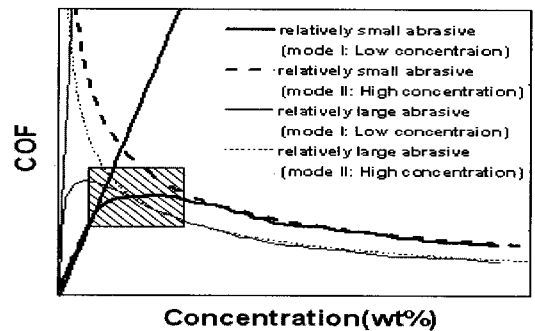


그림 5. 입자의 함량과 크기변화에 따른 COF값의 수학적 모델링.

Fig. 5. Mathematical prediction of COF with various abrasives size and concentration.

본 실험에서는 모두 같은 압력조건에서 수행 하였으므로 식 (9)로 정의되는 COF(Coefficient of

Friction)의 변화는 Friction Force의 변화와 같은 경향성을 가지는 것으로 간주 될 수 있다.

$$COF = \frac{F_f(\text{Friction Force})}{F_n(\text{Normal Force})} \quad (9)$$

3.2 입자 크기와 농도에 따른 마찰력변화

입자의 크기를 18 nm, 35 nm, 80 nm, 110 nm로 변화 시키고 입자의 중량농도를 5, 10, 20, 30 wt%로 희석하여 화학 기계적 연마 시 발생하는 마찰계수를 측정하였다. 그 결과를 그림 6에 도시하였다.

농도가 높아질수록 마찰계수는 증가하다가 천이 구간을 지나면서 서서히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 3.1절에서 이론적으로 예측 하였던 것과 같은 경향을 보여준다. 즉 농도가 낮은 상태에서 높은 상태로 변하게 되면 웨이퍼와 패드 그리고 입자 사이의 접촉 조건이 변하게 되고 이에 따라 연마 시 발생하는 마찰력의 크기에 변화가 생기게 되며 낮은 농도(Mode I)와 높은 농도(Mode II)사이에 천이구간이 존재하는 것을 보여준다.

입자 크기가 상대적으로 큰 경우 마찰계수의 크기가 급격히 증가하였다가 급격히 감소하고, 입자 크기가 상대적으로 작은 경우 마찰계수의 크기가 완만히 증가하였다가 완만히 감소하는 경향을 보인다.

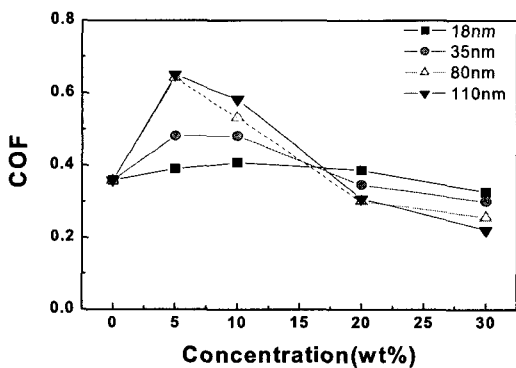


그림 6. 산성 슬러리에서 입자의 농도에 따른 마찰력 그래프.

Fig. 6. COF as a function of abrasives concentration at acid base slurry.

그림 5에서 이론적으로 도시된 그래프에서도 같은 경향을 보인다. 천이구간이 전체적으로 이동함

을 알 수 있다. 즉 입자의 크기가 클수록 패드와 연마입자 그리고 웨이퍼가 같이 접촉하는 Mode I에서 입자와 웨이퍼만이 직접 접촉하는 Mode II의 상태로 더 낮은 농도에서 천이됨을 뜻한다.

일반적인 ILD CMP에 적용되는 슬러리가 알칼리영역에서 입자가 분산되어 있는데 반해 Beuhler사의 슬러리는 산성영역에서 입자가 분산되어 있다. 따라서 비교의 목적으로 Rohm and Hass사의 ILD1300 슬러리로 희석 실험을 하였다. 이 실험의 결과를 그림 7에 도시 하였다.

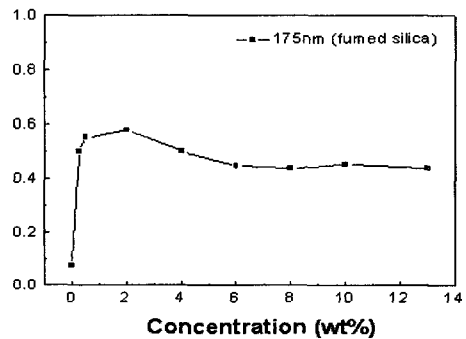


그림 7. 알칼리 슬러리에서 입자의 농도에 따른 마찰력 그래프.

Fig. 7. COF as a function of abrasives concentration at alkali base slurry,

그림 7과 그림 6 그리고 그림 5를 비교해보면 입자의 농도가 낮은 경우에서 높은 경우로 바뀌면 산성 슬러리뿐 아니라 알칼리 슬러리에서도 마찰력의 천이 구간이 존재함을 알 수 있다.

3.3 입자 크기와 중량농도에 따른 연마율 변화

많은 선행 연구자들에 의해서 재료의 제거율은 에너지 관점에서 해석되어져 왔다[2],[5]. 연마 시 재료 들어가는 에너지는 마찰에너지로 변환되고 마찰에너지에 의해 연마가 발생하게 된다. 또한 마찰에너지는 연마 중 진동에너지 또는 열에너지로 손실되는데 이러한 에너지의 손실은 연마율을 떨어뜨리는 역할을 한다. 이러한 개념의 모식도를 그림 8에 도시하였다. 재료 제거에 이용되는 에너지와 마찰에너지 그리고 열과 진동에 의한 에너지 손실관계를 수식으로 표현하면 식(10)과 같이 표현할 수 있다.

$$E_{RR} = E_f - E_{th} - E_{vib} \quad (10)$$

E_{RR} 은 연마에 사용되는 에너지이고 E_f 는 마찰에 에너지, E_{th} 는 열로써 손실되는 에너지, E_{vib} 는 진동으로 손실되는 에너지를 각각 나타낸다.

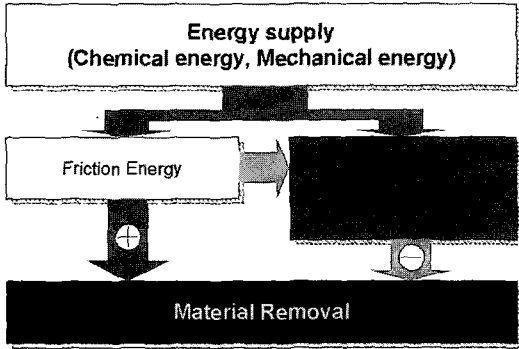


그림 8. 연마 시 재료제거에 영향을 미치는 에너지의 흐름도.

Fig. 8. Energy flow in CMP process.

입자 함량에 따른 연마율의 변화를 그림 9에 도시하였다. 입자 함량이 증가함에 따라 연마율이 선형적으로 증가함을 보인다. 실험 결과 농도가 낮을 때 그림 6에 나타나듯이 COF 값이 높음에도 불구하고 농도가 높아질수록 연마율이 증가하는 이유는 진동, 열전달 등에 의한 에너지의 손실에 의해 E_{RR} 이 줄어들어에 의한 것으로 추정된다.

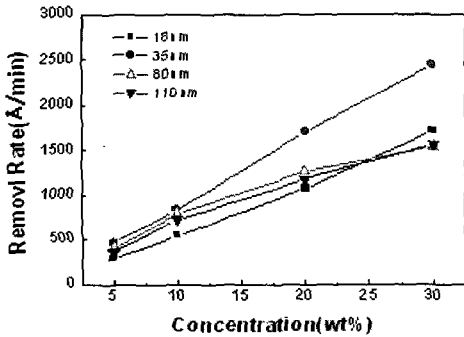


그림 9. 입자 농도에 따른 연마율 그래프.

Fig. 9. Removal rate as a function of abrasive concentration.

연마시 발생하는 진동 강도(Vibration Intensity)를 비교하기 위해서 그림 10과 같이 원 신호(raw signal)를 고주파 필터(High-pass filtering)를 거쳐 RMS(Root Mean Square)값을 취하여 비교하였다. 각각의 입자 크기와 농도에 따른 진동강도를 비교하기 위해 앞서 취해진 RMS값의 평균을 취하여 그림 11에 도시하였다. 그림 11에 나타나듯이 농도가 낮을수록 즉 웨이퍼와 패드 그리고 연마입자가 같이 접촉하는 상태 즉 농도가 낮을수록 진동이 많이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 E_{RR} 을 감소시키는 진동에너지가 커짐을 알 수 있다.

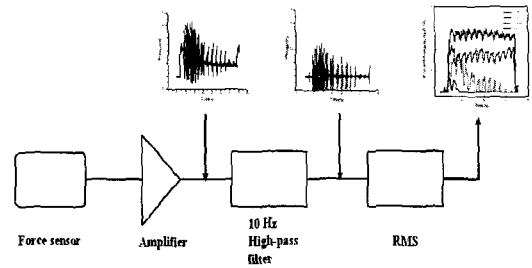


그림 10. 진동강도를 얻기 위한 흐름도.

Fig. 10. Flow chart to gain vibration intensity from raw signal.

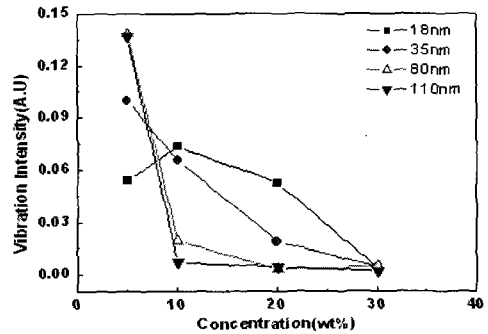


그림 11. 입자 농도에 따른 연마율 그래프.

Fig. 11. Vibration Intensity as a function of abrasive concentration.

4. 결론

웨이퍼와 직접 접촉 상태에 있는 패드의 돌기와 웨이퍼 사이에 존재하는 연마 입자와 웨이퍼의 직

접 접촉에 의한 연마입자의 굵어 나감에 의해서 연마가 일어나게 된다. 입자의 농도 변화에 따라 입자와 패드가 같이 웨이퍼에 접촉하는 상태에서 입자만이 웨이퍼에 접촉하는 상태로 접촉 상태가 바뀌게 되고 이에 따라 입자에 작용하는 하중이 다르게 된다. 따라서 낮은 농도에서 높은 농도로 변환될 때 마찰력 변화의 천이구간이 존재하였다. 입자 크기, 함량에 따라 마찰력이 변하는 것은 입자-패드-웨이퍼사이의 하중균형에 의해 결정됨을 유도식과 시뮬레이션을 통하여 제시하였고 실험을 통하여 이를 검증하였다.

또한 에너지 관점에서 마찰력이 연마율에 미치는 영향을 고찰하였다. 농도가 낮을수록 COF값의 증가로 연마율이 증가 될 것으로 예상되나 장비의 진동에 의한 마찰에너지의 손실이 발생하여 연마율이 낮아졌다.

참고 문헌

- [1] Runnels S. R. and Eyman L. M., "Tribology analysis of chemical mechanical polishing", J. Electrochem. Soc. Vol. 141(6), p. 1698, 1994.
- [2] 김형재, "CMP공정에서 재료 제거 기구에 영향을 미치는 접촉 계면 특성에 관한 연구", 부산대학교 공학박사 학위논문, 2003.
- [3] Yu T. K., Yu C. C., and Orłowski M., "Combined Asperity Contact and Fluid Flow Model for Chemical-Mechanical Polishing", IEEE 1994, p. 29, 1994.
- [4] Suh N. P., "Tribophysics. New Jersey", Prentice-Hall, 1986.
- [5] White D., Melvin J., and Boning D., "Characterization and modeling of dynamic thermal behavior in CMP", J. of The Electrochemical Society, Vol 150(4), p. G271, 2003.