Tribol. Lubr., Vol. 34, No. 3, June 2018, pp. 115~122
Tribology and Lubricants
Review

ISSN 1229-4845(Print) • 2287-4666(Online)
http://Journal.tribology.kr
DOI https://doi.org/10.9725/kts.2018.34.3.115

화학기계적 연마(CMP) 공정에서의 트라이볼로지 연구 동향

이 현 섭[1,2,†]

[1]동명대학교 기계공학부, [2]동명대학교 융합기계기술연구소

Tribology Research Trends in Chemical Mechanical Polishing (CMP) Process

Hyunseop Lee[1,2,†]

[1]*School of Mechanical Engineering, Tongmyong University*
[2]*Center for Mechanical Convergence Engineering, Tongmyong University*
(Received April 21, 2018; Revised May 15, 2018; Accepted May 16, 2018)

Abstract – Chemical mechanical polishing (CMP) is a hybrid processing method in which the surface of a wafer is planarized by chemical and mechanical material removal. Since mechanical material removal in CMP is caused by the rolling or sliding of abrasive particles, interfacial friction during processing greatly influences the CMP results. In this paper, the trend of tribology research on CMP process is discussed. First, various friction force monitoring methods are introduced, and three elements in the CMP tribo-system are defined based on the material removal mechanism of the CMP process. Tribological studies on the CMP process include studies of interfacial friction due to changes in consumables such as slurry and polishing pad, modeling of material removal rate using contact mechanics, and stick-slip friction and scratches. The real area of contact (RCA) between the polishing pad and wafer also has a significant influence on the polishing result in the CMP process, and many researchers have studied RCA control and prediction. Despite the fact that the CMP process is a hybrid process using chemical reactions and mechanical material removal, tribological studies to date have yet to clarify the effects of chemical reactions on interfacial friction. In addition, it is necessary to clarify the relationship between the interface friction phenomenon and physical surface defects in CMP, and the cause of their occurrence.

Keywords – chemical mechanical polishing(화학기계적 연마), tribology(트라이볼로지), friction force(마찰), wear(마모), stick-slip(스틱-슬립), real area of contact(실접촉면적)

1. 서 론

화학기계적 연마(chemical mechanical polishing; CMP) 공정은 반도체 제조공정의 하나로 반도체용 기판(substrate)으로 널리 사용되고 있는 실리콘 웨이퍼(silicon wafer)의 제조에서 표면거칠기 확보에서부터 소자의 분리(shallow trench isolation; STI), 층간 절연막(inter layer dielectric; ILD)의 형성, 금속배선 형성을 위한 상감법(damascene) 및 이중 상감법(dual damascene)까지 널리 활용되고 있는 기술이다[1-3].

CMP 공정은 그 이름이 내포하는 바와 같이 화학적, 기계적인 재료제거 방식이 융합된 연마가공 기술을 의미하며 반도체 제조에서는 박막 증착(deposition) 이후 발생하는 미세한 요철을 제거하는 목적에 주로 활용하기 때문에 “화학기계적 연마”라는 용어 대신 “화학기계적 평탄화(chemical mechanical planarization)”로 불리기도 한다.

CMP 공정은 비록 화학적인 재료제거 작용 혹은 소

†Corresponding author: hslee@tu.ac.kr
Tel: +82-51-629-1597, Fax: +82-51-629-1419
http://orcid.org/0000-0003-4717-3147
ⓒ 2018, Korean Tribology Society

재의 화학적 표면반응을 활용하고 있지만, 재료제거 메커니즘(mechanism)에 있어 많은 부분은 기존의 기계적 연마(mechanical polishing)에 기반을 두고 있다. 따라서, CMP 분야에서는 연마입자(abrasive)에 의한 가공 대상소재의 마찰(friction)과 마모(wear)현상에 대한 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 CMP 공정의 가공 메커니즘에 대하여 간략히 정리하고, 이와 관련된 트라이볼로지(tribology) 연구에 대해 소개하고자 한다. 또한, 기존 연구에 대한 리뷰를 통해 CMP 공정 기술의 이해와 발전을 위해 필요한 트라이볼로지 연구에 관하여 제안하고자 한다.

2. CMP 재료제거 메커니즘

CMP 공정은 일반적으로 화학액과 연마입자가 함유된 슬러리(slurry)를 미세 돌기(asperity)를 가진 연마패드(polishing pad) 위로 공급해 주면서 웨이퍼 표면에 생성되는 화학 반응층을 연마입자에 의해 기계적으로 제거하는 재료제거 메커니즘을 가진다(Fig. 1)[4, 5]. 이때 연마입자에 의한 기계적 재료제거를 위해 웨이퍼에 압력을 가하면서 연마패드와 웨이퍼를 회전시켜 상대속도를 발생시킨다.

CMP 공정에 사용되는 연마입자는 주로 실리카(SiO_2), 세리아(CeO_2), 알루미나(Al_2O_3) 등이며 가공하고자 하는 소재의 특성에 따라 다양한 입자를 선정할 수 있다[6, 7]. CMP용 연마입자의 크기는 수십 nm에서 수백 nm 정도의 크기이며 슬러리 내 입자의 함량을 조절하여 가공 효율을 조절한다.

연마패드는 폴리우레탄(polyurethane)으로 제조되거나 폴리우레탄이 함침된 부직포의 형태가 사용되고 있으며, 슬러리의 원활한 공급과 가공에 사용된 슬러리와 제거된 소재의 찌꺼기(debris)가 배출될 수 있도록 한다[8]. 또한, 다이아몬드 컨디셔너(conditioner)를 이용해 공정 중 연마패드의 표면에 적절한 표면거칠기를 유지한다(Fig. 2).

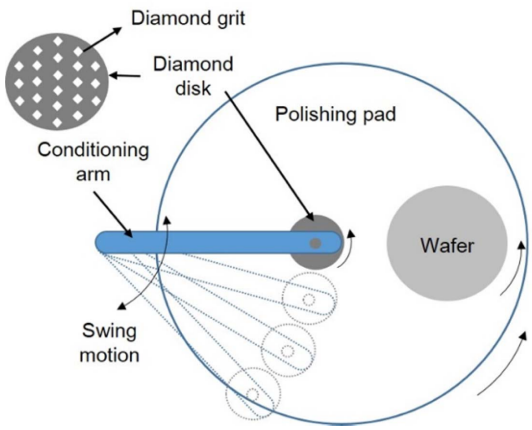

Fig. 2. Schematic of CMP conditioning.

3. CMP Tribo-System

앞서 언급한 바와 같이, CMP 공정은 입자에 의한 재료제거를 기반으로 하고 있어 가공 중 마찰현상을 수반하다. Park 등[9]은 CMP의 트라이보 시스템(tribo-system)을 기판-슬러리-연마패드의 상호작용으로 정의하였다. CMP에서의 마찰 및 마멸현상은 앞서 언급한 3개 요소의 상대운동 의해 발생하게 된다(Fig. 3).

몇몇 연구[9, 10]에서는 두 면 사이에 유체가 개입된 상태에서 상대운동이 발생할 때, 미끄럼속도에 의한 마찰계수(coefficient of friction; COF)의 변화를 저널베이링(journal bearing)에서의 Stribeck 곡선으로 설명하고 있다. Stribeck 곡선(Fig. 4)은 윤활유의 점도(η), 축의 회전수(N), 단위면적당 부하(P)에 따른 마찰계수의 변화를 나타내고 있으며, 세 변수들의 조합에 따라 경계윤활(boundary lubrication)영역, 혼합윤활(mixed-film lubrication)영역, 탄성유체윤활(elastohydrodynamic lubrication)영역, 완전유체윤활(hydrodynamic lubrication)

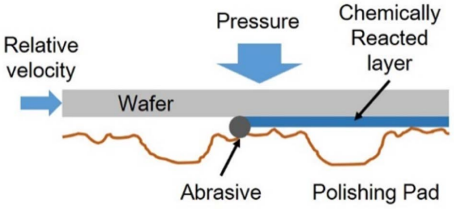

Fig. 1. Material removal mechanism of CMP.

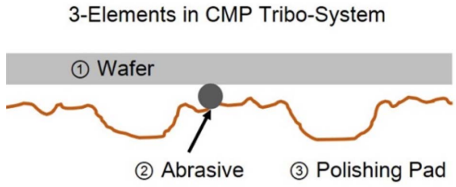

Fig. 3. 3-elements in CMP tribo-system [9].

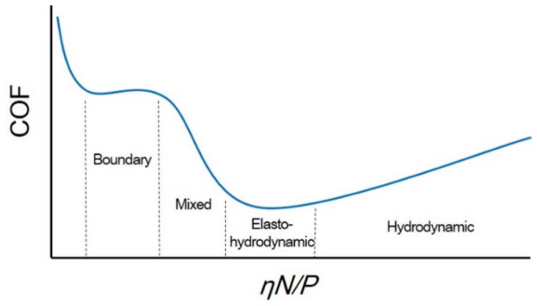

Fig. 4. Coefficient of friction as a function of *ηN/P* (Stribeck curve).

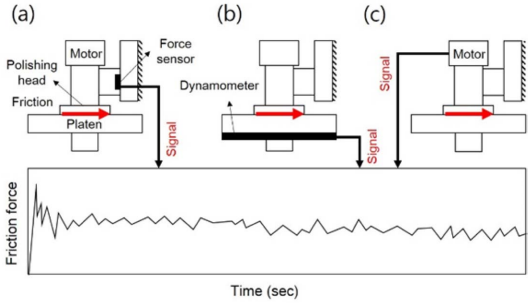

Fig. 5. Three kinds of friction force monitoring systems for CMP.

영역으로 구분된다.

저널베어링에서의 Stribeck 곡선 외CMP 공정에서의 마찰현상에 대한 모델은 아직 보고되지 않고 있다. 하지만, CMP에서 재료의 제거가 이루어지는 윤활영역에 대해서는 명확한 설명이 이루어지지 않고 있다. 따라서 웨이퍼와 연마패드의 계면에서 발생하는 마찰현상을 명확히 밝히기 위해서는 앞서 언급한 CMP 트라이보 시스템에 대한 연구가 지속적으로 이루어 져야 한다.

4. 연구동향

4-1. 마찰력 모니터링 시스템

CMP 트라이보 시스템을 이해하기 위해서는 공정 중 발생하는 마찰력 측정이 선행되어야 한다. CMP 공정에서 마찰력을 측정하는 방식은 크게 3가지로 구분된다. 첫 번째 방식(Fig. 5(a))은 연마헤드에 힘 센서를 부착하는 방법이다[11]. 웨이퍼에 작용하는 마찰력을 측정하기 위해 회전하는 연마패드의 접선방향에 힘 센서를 포함하는 지그(jig)를 위치시키는 방법과 연마헤드와 장비의 체결부 사이에 센서를 장착하는 방법이 있다. 본 방식은 센서의 장착이 간단하지만, 기판에 작용하는 접선방향의 힘만 측정되는 단점이 있다. 또한, 반도체 공정에 적용되는 양산장비에 적용하는데 한계가 있다.

두 번째 방식(Fig. 5(b))은 회전하는 정반에 작용하는 힘을 측정하는 방법이다[12]. 본 방식에는 공구동력계를 활용할 수 있으며 공구동력계에서 측정 가능한 축 방향의 모든 힘을 측정할 수 있는 장점이 있지만 시스템의 구성이 복잡하다는 단점이 있다.

세 번째 방식(Fig. 5(c))은 모터전류의 모니터링을 통한 간접적인 마찰력의 측정이다. 그러나 모터전류를 이용한 모니터링 방식은 마찰력의 절대값을 측정하기 어려워 가공 상태의 상대적인 비교만이 가능하기 때문에 연구의 용도로 활용하기는 곤란하다.

이러한 마찰력 모니터링 방식들은 계면마찰에 대한 연구뿐만 아니라 CMP 공정의 연마 종점 검출(end point detection)에 활용하고 있다[13].

4-2. CMP에서의 마찰현상

본 절에서는 CMP에서의 마찰현상에 대한 연구를 소개하고자 한다. Park등[9]은 실리카 슬러리를 활용하여 CMP에서의 마찰현상에 관하여 연구하였다. 그들의 연구결과에 따르면, 산화막 CMP 실험에서 마찰력은 연마 초기에 순간적으로 높아졌다가 서서히 감소하여 일정 마찰력을 유지하는 특성을 보인다(Fig. 6). Park 등은 공정 초기의 큰 마찰력 감소는 연마패드의 점탄성 변형에 의한 현상이며, 이후 계속되는 마찰력의 감소는 패드의 변형과 표면거칠기의 감소 및 연마패드의 눈막힘 현상(glazing)에 의한 것으로 설명하고 있다. 그들의 이를 In-situ 패드 컨디셔닝과 ex-situ 패드 컨디셔닝에서의 마찰력 차이로 증명하고 있다. CMP 가공 중 연마패드의 표면거칠기를 일정하게 유지시켜주는

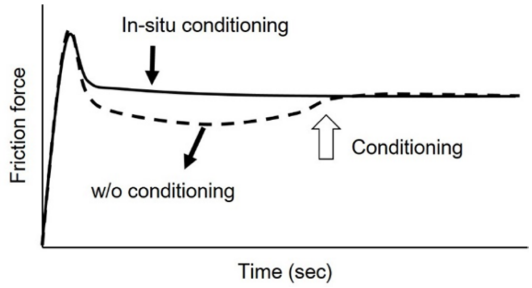

Fig. 6. Effect of pad conditioning on friction force [9].

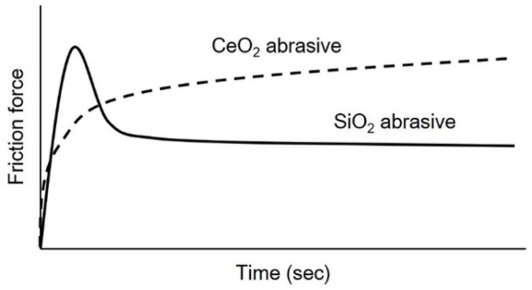

Fig. 7. Frictional characteristics of CMP with SiO_2 and CeO_2 abrasives [9].

in-situ 컨디셔인의 경우 ex-situ 컨디셔닝의 경우보다 연마시간에 따른 마찰력의 감소가 작다는 것을 확인할 수 있으며 이러한 현상은 연마패드의 표면거칠기가 계면마찰에 미치는 영향을 설명해 주고 있다(Fig. 7).

반면, STI CMP에 주로 사용되는 세리아 슬러리를 동일한 산화막의 제거에 사용하는 경우, 실리카 슬러리와는 달리 마찰력이 서서히 증가하는 경향을 보인다. 저자들은 이러한 경향이 산화막에 비해 경도나 낮은 세리아 입자가 연마 중 비중이 높은 슬러리 내에서 부서지면서 발생하는 현상으로 예상하고 있다.

CMP 공정의 가장 일반적 가공 변수인 압력과 회전속도에 대한 마찰의 변화를 살펴보면 압력이 증가할수록 마찰력이 증가하는 경향을 보이고, 회전속도가 증가하면 마찰력이 다소 감소하게 된다. 속도 증가에 따른 마찰력의 감소현상에 대해 많은 연구자들은 슬러리에 의한 동압 효과로 설명하고 있다.

Lee 등[14]은 연마압력과 회전속도에 따른 마찰에너지와 재료제거율(material removal rate; MRR)은 선형적인 관계를 가진다고 보고하였다. 그러나 입자함량(중량농도)에 따른 마찰에너지는 입자함량이 낮을 때 증가하는 경향을 보이지만, 입자함량이 2 wt% 이상에서는 서서히 감소하는 경향을 보였다. Lee 등은 이러한 현상을 미끄럼 접촉에서 구름접촉으로의 입자운동 변화로 설명하였다.

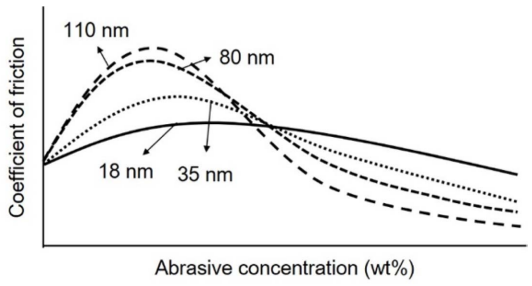

Fig. 8. Coefficient of friction as a function of abrasive concentration [15].

Kim 등[15]은 Lee 등에 비하여 다양한 입자 크기(18 nm, 35 nm, 80 nm, 110 nm)의 조건에서 입자함량(5 wt%, 10 wt%, 20 wt%, 30 wt%) 변화에 따른 마찰계수의 변화를 측정하였으며 Lee 등과 유사한 실험결과를 얻었다. 입자함량이 증가할 때 MRR은 선형적으로 증가하는 경향을 보이며, 마찰계수, 마찰력, 마찰에너지와는 선형적 관계를 보이지 않는다. Kim 등은 이러한 현상을 설명하기 위해 가공 중 진동 강도를 측정하였다. 그 결과 입자 함량이 낮을수록 더 높은 진동 강도가 측정되었으며 마찰계수가 높음에도 불구하고 입자함량이 낮을 때 MRR이 낮은 이유는 에너지의 손실로 판단할 수 있다고 주장하였다. 또한 마찰력(마찰계수)의 변화를 수학적 모델링을 통해 설명하였다. 하나의 입자에 작용하는 마찰력은 입자가 웨이퍼로 압입되는 깊이가 반경에 비하여 매우 작다는 가정 하에 아래 식 (1)과 같이 표현하였다[15, 16].

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

여기서 H_w는 박막의 경도, R은 입자의 반경, w는 입자에 가해지는 하중이다.

입자함량이 낮은 경우 입자와 함께 연마패드의 일부도 웨이퍼와 접촉할 것으로 예측되며 반경 R인 입자에 작용하는 하중(w_c)은 아래와 같이 표현된다[15, 16].

$$w_c = \frac{8\sqrt{2}}{3} E^* r^2 \left(1 - \frac{P_r}{E_p}\right)^{-3/2} \tag{2}$$

여기서 E^*는 입자와 패드에 대한 복합탄성계수이고, P_r은 입자의 실 접촉 압력, E_p는 연마패드의 탄성계수이다.

슬러리 내 입자의 함량이 낮을 경우, 입자에 의해

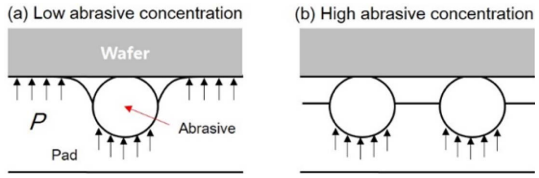

Fig. 9. Wafer-abrasive-pad contact under low and high abrasive concentrations; (a) low abrasive concentration and (b) high abrasive concentration [15, 16].

발생하는 전체 마찰력(F_c)은 아래 식과 같다[15, 16].

$$F_c = n \cdot k_1 \cdot R^2 \tag{3}$$

여기서 n은 가공에 참여하는 총 연마입자의 수를 나타낸다.

슬러리 내 입자의 함량이 높을 경우, 패드-웨이퍼 계면에서는 패드와 웨이퍼의 직접 접촉 없이 입자와 웨이퍼의 접촉만 발생할 것으로 가정할 수 있다. 입자함량이 높을 때 입자에 작용하는 하중(w_{nc})은 아래와 같다[15, 16].

$$w_{nc} = \frac{F_N}{n} \tag{4}$$

여기서 F_N은 패드 돌기 전체에 작용하는 하중을 말한다. 이 때, 입자에 의한 전체 마찰력(F_{nc})은 다음과 같이 표현된다[15, 16].

$$F_{nc} = k_2 \cdot R^{-1} \cdot n^{-1/2} \tag{5}$$

식 (3)과 (5)에 따르면 입자함량이 낮은 조건에서 마찰력은 입자의 함량에 따라 선형적으로 증가하고 입자함량이 높은 조건에서는 지수적으로 감소하는 특성을 보인다.

Choi 등[17] 역시 실리콘 산화막의 CMP에서 실리카 입자의 크기(0.2 μm, 0.5 μm, 1.0 μm, 1.5 μm)와 함량에 따른 마찰력의 변화를 측정하였으며, 0.2 μm의 실리카 입자를 사용한 CMP 조건에서는 입자함량이 30 wt%까지 증가하는 동안 지속적인 마찰력과 MRR의 상승현상을 발견하였으며, 0.5 μm 크기 이상의 실리카 입자를 사용하였을 경우 Kim 등의 연구와 유사한 경향을 보임을 확인하였다. 그러나, 입자함량에 따른 MRR의 변화는 Kim 등의 연구에서와는 달리 입자함량 30 wt%까지 모든 입자크기의 조건에서 지속적으로 상승하는 결과를 보였다.

앞서 언급한 동일한 접근의 연구결과들에서 그 결과의 차이는 CMP 공정에 사용되는 연마패드와 슬러리의 다양성으로 인한 특성의 차이로 보여진다. Luo 등[18]은 CMP 공정의 MRR 모델링에 있어 슬러리 내 입자의 크기 분포 및 웨이퍼-패드 실접촉면적(real area of contact; RCA)에서의 참여 입자(active particle)가 재료제거 특성에 영향을 줄 것이라고 하였다. 앞의 연구들에서 보여지는 다양한 마찰 특성 역시 CMP 공정에 사용되는 다양한 소모품의 특성과 관련 있을 것으로 보인다.

Lee 등[19]은 13 nm, 22 nm, 61 nm, 118 nm 크기의 실리카 입자를 이용한 CMP에서 MRR은 61 nm 입자크기까지 증가하다가 그 이상에서는 감소함을 보였다. 그들의 연구에서는 Luo 등과 유사하게 슬러리 내 연마입자 크기의 분포(particle size distribution; PSD)와 연마패드 돌기의 분포에 따른 패드와 웨이퍼의 실접촉면적의 계산을 통하여 MRR의 변화를 설명하고 있다.

4-3. 실접촉면적 및 연마패드의 표면거칠기

CMP 공정에 대한 많은 연구들에서 패드와 웨이퍼 사이의 실접촉면적과 연마패드의 표면거칠기 제어의 중요성에 관하여 다루고 있다. 이에 CMP 공정에서는 실접촉면적과 연마패드의 표면거칠기의 제어를 위해 다이아몬드 디스크를 이용한 패드 컨디셔닝을 공정 중 실시간으로 진행하고 있다[20]. CMP 공정에서 실접촉면적이 중요한 이유는 웨이퍼와 연마패드 돌기의 접촉면에서 실질적으로 연마입자가 재료제거에 참여하게 되기 때문이다.

Park 등[21]은 불규칙한 다이아몬드 입자 분포를 가지는 컨디셔너(random diamond disk; RDD)와 균일한 다이아몬드 입자 분포를 가지는 컨디셔너(uniform diamond disk; UDD)를 활용해 연마패드 컨디셔닝 후의 실접촉면적 변화를 측정하였다. 접촉면적은 Fig. 10과 같이 유리판 위로 연마패드를 가압 후, 광학 현미경을 활용하여 측정하였다.

측정된 이미지는 이미지 처리과정을 통해 전체 측정면적에 대한 접촉면적의 비율(%)로 표현된다. Park 등의 연구에서는 컨디셔닝이 적용되기 전 연마패드의 경우 압력 350 g/cm^{2}하에서 0.27%의 접촉면적 비율을 가지며, RDD로 컨디셔닝 공정을 진행 후 접촉면적은 0.89%로 증가한다. 그리고 UDD를 활용하는 경우 실

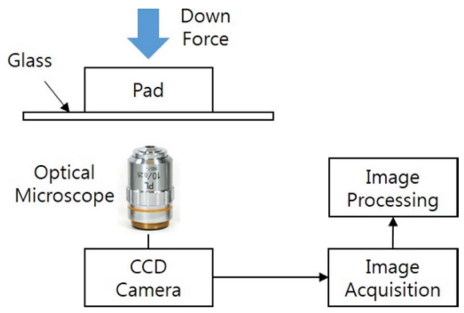

Fig. 10. Measuring system for real area of contact.

접촉면적의 비율은 1.45%까지 증가하는 것을 확인하였다. 연마패드의 중심선 평균 거칠기(Ra)의 경우 RDD를 활용한 경우 가장 높은 값을 보이지만, 접촉면적과는 큰 상관관계를 보이지 않는다. 반면, 왜도(skewness)의 경우 컨디셔닝 전의 연마패드는 음의 값을 가지며 컨디셔닝 후 양의 값을 가지게 된다. 특히 UDD를 활용한 컨디셔닝 후 가장 높은 값을 보인다. 이러한 표면의 변화는 슬러리를 연마패드 위로 공급하였을 때 접촉각의 변화에 영향을 준다. RDD를 이용한 컨디셔닝 후 접촉각은 90°~95°인 반면, UDD를 이용한 컨디셔닝 후 접촉각은 65°~70°의 접촉각을 보여 CMP 공정에서 슬러리가 보다 원활하게 재료제거 작용에 참여할 수 있도록 한다.

CMP에서 실접촉면적을 예측하기 위해 많은 연구자들이 평면과 랜덤한 거칠기를 가지는 표면의 접촉에 관한 Greenwood-Williamson의 모델을 활용하고 있다. 여기서 연마패드의 돌기 분포는 정규분포를 따른다고 가정한다. 식 (6)은 Johnson[22]이 제안한 실접촉면적에 관한 식이다.

$$A_r = C^{-1}\left(\frac{\beta}{\sigma}\right)^{\frac{1}{2}}\frac{L}{E^*} = C^{-1}\left(\frac{\beta}{\sigma}\right)^{\frac{1}{2}}\frac{PA_0}{E^*} \tag{6}$$

여기서 C는 h/σ가 0.3에서 0.4 사이 값을 가지는 상수이며 Qin등[23]은 CMP 공정에서의 계면 접촉상태를 만족하고 있다고 주장하였다. 이후의 연구들에서는 C값을 0.3과 0.4의 중간치인 0.35를 취하여 많은 연구가 이루어졌다.

Jeong 등[24]은 CMP 가공 중 컨디셔닝이 적용되지 않았을 때 웨이퍼와 연마패드의 실접촉면적에 관하여 연구하였으며, 연마시간이 증가함에 따라 패드 표면의 눈막힘 현상에 의해 돌기의 반경과 실접촉면적이 증가함을 밝혔다. 결과적으로 실접촉면적의 증가는 실접촉압력의 감소로 이어지고 MRR이 감소하게 됨을 실험적으로 밝혔다. Yeruva 등[25]은 광학적 측정 방식을 통해 웨이퍼에 가해지는 하중이 커질수록 실접촉면적이 증가함을 실험적으로 검증하였다.

4-4. 스틱-슬립 현상

두 재료간 정지마찰과 운동마찰이 연속적으로 발생하게 되는 경우 스틱(stick)-슬립(slip) 현상이 발생하게 되며 이는 표면 손상과 마멸을 일으키는 주요 원인으로 알려져 있다. CMP 공정은 고분자 소재의 연마패드를 활용하고 있어 기판의 미끄럼에 따른 스틱-슬립 현상이 발생하는 공정이다. Kim 등[26]은 CMP에서의 스틱-슬립 현상을 통해 채터(chatter) 스크래치 발생 원인에 관하여 연구하였다. CMP에서의 재료제거는 돌기 혹은 실접촉면적에서 기판으로 압입된 입자의 미끄럼에 의해 발생하며 슬라이딩 운동과 동시에 연마패드의 돌기는 아래 Fig. 11과 같이 변형하게 된다.

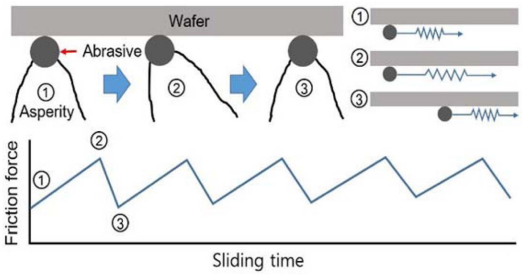

Fig. 11. Stick-slip phenomenon in CMP.

연마패드 돌기와 웨이퍼의 계면에 위치하는 연마입자는 돌기의 움직임에 따라 웨이퍼 표면을 긁고 지나가며 이러한 입자의 운동을 간단한 스프링 모델로 표현할 수 있다. 스틱 구간에서는 인장응력이 입자의 뒤쪽에 형성되며, 축적된 표면 응력이 표면 파단의 원인이 될 만큼 충분히 커지면 채터 스크래치가 발생하게 된다.

Lee 등[27]은 CMP에서의 거시적 스틱-슬립 현상은 연마패드의 기계적 물성(탄성)과 웨이퍼와 패드의 회전속도에 따라 크게 달라질 수 있음을 보였다. 미시적 관점에서 입자의 스틱-슬립 현상은 Jeong 등[28]의 유한요소 해석을 통해 연구되었으며 가공 대상 소재의 물리적 특성에 따라 스틱-슬립의 주기가 변화하며 특히 소재의 밀도가 증가함에 따라 그 주기가 증가하고, 입자의 크기가 클수록 주기가 짧아짐을 확인하였다.

5. 향후 과제

본 논문에서는 CMP 공정에 관한 트라이볼로지 연구 동향에 관하여 논하였다. CMP 공정에서의 트라이볼로지 연구는 마찰력 모니터링 장치를 통한 슬러리, 연마패드 등 소모품의 변화에 따른 계면 마찰현상에 대한 연구와 접촉역학을 활용한 재료제거율의 모델링, 실접촉면적에 대한 연구, 스틱-슬립 마찰과 스크래치에 관한 연구 등이 있다.

CMP 공정은 슬러리와 웨이퍼의 화학적 반응을 적

극적으로 이용하는 공정임에도 불구하고 현재까지 CMP에서의 트라이볼로지 연구는 대부분 화학적 반응이 계면마찰에 미치는 영향을 명확하게 밝혀내지 못하고 있다. 이를 위해서는 화학반응 이론과 접촉역학이 결합된 이론 모델의 개발이 요구될 것으로 보인다.

또한, 계면마찰 현상과 CMP에서의 물리적 표면결함과의 연관성과 그 발생 원인에 대한 명확한 규명이 필요하며 트라이볼로지 분야에서의 다양한 연구가 이를 위한 초석이 될 수 있을 것으로 보인다.

Acknowledgements

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2015R1D1A1A01059266).

References

[1] Ko, B. G., Yoo, H. C., Park, J. G., "Effects of pattern density on CMP removal rate and uniformity", *J. Kor, Phys. Soc.*, Vol. 39, pp. S318-S321, 2001.

[2] Lee, H., Park, Y., Lee, S., Jeong, H., "Effect of wafer size on material removal rate and its distribution in chemical mechanical polishing of silicon dioxide film", *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol. 27, No. 10, pp. 2911-2916, 2013.

[3] Nanz, G., Camilletti, L. E., "Modeling of chemical-mechanical polishing: A review", *IEEE Trans. Semicon. Manufact.*, Vol. 8, No. 4, pp. 382-389, 1995.

[4] Lee, H. S., Jeong, H. D., "Chemical and mechanical balance in polishing of electronic materials for defect-free surfaces," *CIRP Ann. Manufact. Technol.*, Vol. 58, pp. 485-490, 2009.

[5] Lee, D., Lee, H., Jeong, H., "Slurry components in metal Chemical Mechanical Planarization (CMP) Process: A review," *Int. J. Precis. Eng. Manufact.*, Vol. 17, No. 12, pp. 1751-1762, 2016.

[6] Lee, H., Lee, D., Jeong, H., "Mechanical aspects of the chemical mechanical polishing process: A review", *Int. J. Precis. Eng. Manufact.*, Vol. 17, No. 4, pp. 525-536, 2016.

[7] Hayashi, S., Koga, T., Goorsky, M. S., "Chemical mechanical polishing of GaN", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 155, No. 2, pp. H113-H116, 2008.

[8] Lu, H., Obeng, Y., Richardson, K. A., "Applicability of dynamic mechanical analysis for CMP polyurethane pad studies", *Mater. Charact.*, Vol. 49, Issue 2, pp. 177-186, 2002.

[9] Park, B., Lee, H., Kim, H., Seo, H., Kim, G., Jeong, H., "Characteristics of friction affecting CMP results", *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, Vol. 17, No. 10, pp. 1041-1048, 2004.

[10] Bahr, M., Sampurno, Y., Han, R., Phillipossian, A., "Improvements in stribeck curves for copper and tungsten chemical mechanical planarization on soft pads", *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, Vol. 6, No. 5, pp. P290-P295, 2017.

[11] Lee, H. S., Park, B. Y., Park, S. M., Kim, H. J., Jeong, H. D., "The characteristics of frictional behavior in CMP Using an integrated monitoring system", *Key Eng. Mater.*, Vol. 339, pp. 152-157, 2007.

[12] Scarfo, A. M., Manno, V. P., Rogers, C. B., Anjur, S. P., Moinpour, M., "In situ measurement of pressure and friction during CMP of Contoured Wafers", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 152, No. 6, pp. G477-G481, 2005.

[13] Hocheng, H., Huang, Y. L., "A comprehensive review of end point detection in chemical mechanical polishing for deep-submicron integrated circuits manufacturing", *Int. J. Mater. Prod. Technol.*, Vol. 18, Issue 4-6, pp. 1-18, 2003.

[14] Lee, H., Park, B., Kim, G., Kim, H., Seo, H., Jeong, H., "Effect of friction energy on polishing results in CMP process", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A.*, Vol. 28, No. 11, pp. 1807-1812, 2004.

[15] Kim, G., Kim, H., Park, B., Park, K., Jeong, H., "Effect of abrasive particles on frictional force and abrasion in Chemical Mechanical Polishing (CMP)," *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, Vol. 17, No. 10, pp. 1049-1055, 2004.

[16] Kim, H. J., A Study on the Interfacial Characteristics and Its Effect on Material Removal in CMP, Doctoral Thesis, Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Korea, 2004.

[17] Choi, W., Abiade, J., Lee, S. M., Singh, R. K., "Effects of slurry particles on silicon dioxide CMP", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 151, No. 8, pp. G512-G522, 2004.

[18] Luo, J., Dornfeld, D. A., "Effects of abrasive size distribution in chemical mechanical planarization: modeling and verification", *IEEE Trans. Semicon. Manufact.*, Vol. 16, No. 3, pp. 469-476.

[19] Lee, H. S., Jeong, H. D., Dornfeld, D. A., "Semi-empirical material removal rate distribution model for SiO_2 Chemical Mechanical Polishing (CMP) processes", *Precis. Eng.*, Vol. 37, pp. 483-490, 2013.

[20] Lee, H., Lee, S., "Investigation of pad wear in CMP with swing-arm conditioning and uniformity of material removal," *Precis. Eng.*, Vol. 49, pp. 85-91, 2017.

[21] Park, K., Jeong, H., "Investigation of pad surface topography distribution for material removal uniformity in CMP process", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 155,

No. 8, pp. H595-H602, 2008.
[22] Johnson, K. L., Contact Mechanics, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
[23] Qin, K., Moudgil, B., Park, C. W., "A chemical mechanical polishing model incorporating both the chemical and mechanical effects", *Thin Solid Films*, Vol. 446, pp. 277-286, 2004.
[24] Jeong, H., Lee, H., Choi, S., Lee, Y., Jeong, H., "Prediction of real contact area from microtopography on CMP pad", *J. Adv. Mech. Des. Sys. Manufact.*, Vol. 6, No. 1, pp. 113-120, 2012.
[25] Yeruva, S. B., Park, C.-W., Rabinovich, Y. I., Moudgil, B. M., "Impact of Pad-Wafer contact area in chemical mechanical polishing", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 156, No. 10, pp. D408-D412, 2009.
[26] Kim, H. J., Yang, J. C., Yoon, B. U., Lee, H. D., Kim, T., "Nano-Scale stick-slip friction model for the chatter scratch generated by chemical mechanical polishing process", *J. Nanosci. Nanotechnol.*, Vol. 12, pp. 5683-5686, 2012.
[27] Lee, H., Park, B., Seo, H., Park, K., Jeong, H., "A Study on the Characteristics of Stick-Slip Friction in CMP," *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, Vol. 18, No. 4, pp. 313-320, 2005.
[28] Jung, S., Sung, I. H., "Observation on the relationship between surface defects and stick-slip friction in chemical-mechanical polishing", Proc. of the KSTLE, Jeju, Korea, September, 2012.