

화학-기계적 연마 공정의 물질제거 메커니즘 해석 Part I: 연성 통합 모델링

석종원[†] · 오승희* · 석종혁**

[†]중앙대학교 기계공학부, *중앙대학교 기계공학부 대학원

**인하공업전문대학 화공환경공학과

An Analysis on the Material Removal Mechanism of Chemical-Mechanical Polishing Process Part I: Coupled Integrated Material Removal Modeling

Jongwon Seok[†], Seunghee Oh* and Jonghyuk Seok**

[†]Sch. of Mech. Eng. at Chung-Ang Univ., *Grad. Sch. of Mech. Eng. at Chung-Ang Univ.,

**Dept. of Chem. and Environ. Tech. at Inha Tech. Col.

ABSTRACT

An integrated material removal model considering thermal, chemical and contact mechanical effects in CMP process is proposed. These effects are highly coupled together in the current modeling effort. The contact mechanics is employed in the model incorporated with the heat transfer and chemical reaction mechanisms. The mechanical abrasion actions happening due to the mechanical contacts between the wafer and abrasive particles in the slurry and between the wafer and pad asperities cause friction and consequently generate heats, which mainly acts as the heat source accelerating chemical reaction(s) between the wafer and slurry chemical(s). The proposed model may be a help in understanding multi-physical interactions in CMP process occurring among the wafer, pad and various consumables such as slurry.

Key Words : Chemical-Mechanical Polishing, Thermal-Chemical-Mechanical Modeling, Contact Mechanics, Arrhenius Equation

1. 서 론

화학-기계적연마(Chemical-Mechanical Polishing; CMP)는 다층 상호접속(multilevel interconnect)을 위한 다마신 금속배선 공정(Damascene metal wiring process) 등 현대 반도체 공정에서 평탄화를 위한 필수적인 공정이 되었다. CMP장비를 이용한 연마공정 중 웨이퍼는 하부에 부착된 돌기(Asperities)를 가지는 유연한 패드에 일정한 압력을 가하며 회전하게 되며, 이때 연마입자(Abrasives)를 포함하는 슬러리(Slurry)가 웨이퍼와 패드의 압착면 사이에 공급된다. 이 과정에서 웨이퍼와

패드 및 연마입자 사이에는 화학적 반응과 기계적 연마작용[1]이 함께 발생하여 웨이퍼의 표면을 평탄화 시키게 된다. 최근에 이르기 까지, 이러한 CMP공정 중 발생하는 물질제거 메커니즘(Material Removal Mechanism)을 밝혀내기 위해서 수학적 모델링에 대한 많은 연구가 수행되었다. 그러나 이전의 대부분의 연구에서는 기계적 효과에 따른 물질제거 메커니즘[2, 3, 4]과 기저부(Substrate)와 슬러리 사이의 화학적 반응에 의한 물질제거 메커니즘[5, 6, 7, 8]을 분리시켜 다른 한쪽의 영향은 무시하거나 단지 보조적인 역할로 국한하여 가정한 모델링이 주로 수행되었다. 실제 CMP공정에서 물질제거 메커니즘은 슬러리의 화학적 작용에 의하여 연화된 기저부의 표면이 연마입자에 의하여 발생하는 연마작용을 용이하게 하고, 한편으로 연마작용을

[†]E-mail : seokj@cau.ac.kr

통하여 발생한 마찰열은 화학반응을 더욱 활성화시키는 역할을 한다고 알려져 있다[9]. 따라서, 연마모델의 대상에 따라 화학-기계적 연성이 무시될 수 없는 경우 이전의 모델들은 이러한 기계적 효과와 화학적 효과가 연성되어 나타나는 실제 CMP공정의 물질제거 메커니즘을 설명하기에는 부족하다.

또한 CMP공정의 기계적인 연마 메커니즘을 설명하는 많은 모델들에서 물질제거 메커니즘은 주로 프레스톤 방정식(Preston Equation)[10]을 따르는 결과를 보여주고 있으나[11], 실제 공정 중에서의 물질제거율은 압력 혹은 상대속도의 변화에 따라 비선형적으로 증가하는 경향을 보이는 영역이 존재한다고 알려져 있다[12]. 이러한 영역은 특히 높은 하중이 가해지는 영역, 즉 고압영역에서 두드러지게 나타나는 데, 이러한 현상은 고압영역에서 큰 영향을 미치는 화학적 효과로 설명할 수 있다. CMP공정 중, 물질제거에 영향을 주는 여러 인자들, 즉 인가압력, 웨이퍼와 패드의 상대속도, 소모품(Consumables)의 종류 등과 같이 온도는 가장 큰 영향을 미치는 인자 중 하나로 인식이 되며 이를 통하여 상기 영역에서 나타나는 비프레스토니안 거동(Non-Prestonian Behavior)의 설명이 가능하다. 패드와 웨이퍼의 상대운동으로 발생하는 마찰은 CMP프로세스 내의 온도에 영향을 주며[9, 13], 슬러리는 웨이퍼의 표면과 반응하여 새로운 부동태 층(Passivation layer)을 형성하는 과정에서[14, 15] 물질제거율(Material Removal Rate; MRR)은 온도의 함수인 아레니우스 방정식(Arrhenius Equation)으로 표현되는 반응계수의 지배를 받는다[16, 17].

본 연구에서는 기계적 효과로써 웨이퍼와 돌기 및 연마입자 사이의 탄소성접촉을 통하여 발생하는 연마효과를 고려하고, 웨이퍼와 연마입자 및 패드 사이의 마찰에 의해 발생하는 열전달 시스템을 모델링하였다. 또한 이러한 마찰열에 의한 온도변화에 의존하여 변화하는 반응속도를 아레니우스 방정식을 통하여 집중변수방법(Lumped Parameter Method)으로 모델링하여 기존의 기계(열 및 접촉역학)와 화학적 연성효과를 고려한 새로운 TCM(Thermal-Chemical-Mechanical) 통합모델을 제시하고자 한다.

2. 기계적 접촉 및 마찰 메커니즘

2.1. 접촉모델을 이용한 물질제거율

본 연구에서는 접촉역학(Contact Mechanics)을 기초로 기계적 연마작용(Abrasion Action)에 의한 물질제거율을 고려하였다. Zhao등 [18]은 웨이퍼와 연마입자,

연마입자와 패드 사이의 접촉에 대하여 각각 소성과 탄성 접촉을 가정하여 상기 세가지 구성요소들 사이에 존재하는 힘의 분포를 고려하여 힘의 평형방정식을 구하고 웨이퍼에 대한 입자의 새김깊이(Indentation Depth)를 계산하였다. 이때, 접촉면에 분포하는 입자는 웨이퍼에 소성변형을 야기하고 이로 인해 물질제거가 발생하며 이때의 새김깊이에 의하여 전체 물질제거율이 결정된다. 탄성접촉을 하는 패드와 연마입자 그리고 소성접촉을 하는 웨이퍼와 연마입자 사이의 각각 입자의 직경에 대한 기하학적 경계조건을 고려한 아래와 같은 힘의 평형조건을 만족시킨다.

$$F_{asp-p} = \frac{4}{3}E_{asp-w}\sqrt{\frac{D_p}{2}} \cdot (D_p - \delta_w)^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

$$F_{w-p} = H_w \pi \cdot D_p \cdot \delta_w \quad (2)$$

$$\delta_w^3 + \left(\frac{9\pi^2}{8} \frac{H_w^2}{E_{asp-w}} - 3 \right) D_p \delta_w^2 + 3D_p^2 \delta_w - D_p^3 = 0 \quad (3)$$

여기서, F_{asp-p} 와 F_{w-p} 는 각각 돌기와 연마입자 및 웨이퍼와 연마입자 사이의 접촉력이며, E_{asp-w} 는 돌기와 웨이퍼의 유효 영률, D_p 는 연마입자의 직경, 그리고 δ_w 는 새김깊이를 각각 나타낸다.

한편, 패드는 유연한 다공성의 폴리머로 표면은 비교적 랜덤(Random)한 높이를 가지는 돌기들로 구성되어 있다. 따라서, 이러한 돌기의 높이는 가우스 분포(Gaussian Distribution)를 가진다고 가정할 수 있으며 [19] 각 돌기의 실제 접촉면적을 합한 총 접촉면적과 접촉력을 Hertz의 접촉모델[20]과 Greenwood-Williamson방법[21]을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$A_c = \eta \cdot A_w \cdot \pi \cdot R_{asp} \int_d^\infty (z-d) \cdot \phi(z) dz \quad (4)$$

$$W_c = \frac{4}{3} \eta A_w E_{asp-w} \sqrt{R_{asp}} \int_d^\infty (z-d)^{\frac{3}{2}} \phi(z) dz \quad (5)$$

여기서, η 는 패드 돌기의 밀도, A_w 은 웨이퍼의 면적, W_c 는 접촉력, R_{asp} 는 돌기 선단의 반지름을 각각 나타내며 ϕ 는 가우스 분포의 확률밀도 함수를 나타낸다.

CMP공정에서 사용하는 슬러리는 일반적으로 다량의 연마입자를 포함하는데 이중 일부의 연마입자들만이 물질제거에 기여한다. 이때 물질제거에 기여하는 입자를 유효입자로 정의하며 이는 총 물질제거량에 지대한 영향을 주므로 이를 구하기 위한 지금까지 많은 연구가 진행되었다[18, 22]. 이중 Zhao등[18]은 슬러리에 부유하는 입자가 일정한 선밀도를 가진다고 가정하고 이를 접촉면적에 적용하여 유효 입자 수를 계산하

였다.

$$N_a = A_c \left(\frac{6\chi}{\pi D_p^3} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

여기서, χ 는 슬러리내 분포하는 연마입자의 선밀도를 의미한다. 이러한 유효입자 및 간단한 기하학적 형상을 고려한 계산을 통하여 연마입자와 웨이퍼의 접촉 면적 및 연마입자와 돌기의 접촉면적을 구할 수 있다.

웨이퍼-연마입자-패드 사이의 접촉은 웨이퍼와 연마입자의 접촉과 연마입자와 돌기의 접촉, 웨이퍼와 돌기의 접촉 등 세 부분으로 나누어 생각해 볼 수 있다. 연마입자와 웨이퍼의 표면 사이에는 탄성영역을 초과하는 큰 접촉응력이 발생하므로 이들 사이에는 소성접촉이 발생한다고 가정할 수 있으며 이때 연마입자는 웨이퍼 표면에 입자의 직경에 비하여 매우 작은 새김깊이 δ_w 만큼 새김이 되어 다음과 같은 접촉면적이 형성된다.

$$A_{p-w} = N_a \pi D_p \delta_w \quad (7)$$

반면, 연마입자는 상대적으로 낮은 영률(Young's Modulus)의 패드의 돌기와는 탄성접촉을 한다고 가정할 수 있으며 이때 연마입자는 유연한 패드 돌기의 내부로 충분히 삽입되어 이들 사이에 입자의 직경만큼의 접촉면적 A_{asp-p} 이 발생한다고 가정할 수 있다.

$$A_{asp-w} = A_c - A_{asp-p} = A_c - N_a \pi \left(\frac{D_p}{2} \right)^2 \quad (8)$$

식 (7)과 (8)을 이용하여 웨이퍼에 발생하는 접촉면적을 구할 수 있으며 이는 다음 절에서 논의 될 열전달 시스템을 구성하는 열원의 역할을 하는 마찰열을 발생시키는 마찰 메커니즘에 상기 두 가지의 상이한 접촉에 따른 마찰계수들이 독립적으로 고려 되어야 함을 의미한다.

기계적 연마작용에 의하여 계산되는 총 물질제거율은 웨이퍼에 새김된 연마입자의 새김깊이에 의한 단면적으로 결정된다. 연마입자의 새김에 의해 형성되는 단면적과 패드와 웨이퍼의 상대속도의 곱은 웨이퍼 표면에서 단위시간 당 제거되는 물질의 부피로 계산되며 이를 접촉응력에 의한 기계적인 물질제거율로 표현할 수 있다.

$$MRR_{mech} \cong \frac{N_a \sqrt{D_p} \delta_w^{\frac{3}{2}} v_{rel}}{A_w} \quad (9)$$

여기서 v_{rel} 은 웨이퍼의 패드에 대한 상대속도를 의미한다.

2.2. 마찰에 의한 기계적 일률

전 절에 기술한 바와 같이 연마입자와 패드의 돌기가 웨이퍼와 접촉하여 이들 접촉면에서 발생하는 마찰은 열에너지를 발생시키고 이는 다음 절에서 제시될 열전달 모델에서 주된 열원이 된다.

식 (7), (8)에서 표현된 바와 같이 웨이퍼에는 연마입자 및 패드의 돌기와 두 가지 상이한 기계적 접촉이 이루어 지므로 이에 따른 접촉 마찰력 또한 독립적으로 고려되어야 한다. 식(6)에서 정의된 유효입자에 식(2)에서 계산된 웨이퍼와 연마입자 사이의 소성접촉력과 식(1)에서 계산된 패드의 돌기와 연마입자 사이의 탄성접촉력을 곱하면 웨이퍼와 연마입자 및 패드의 돌기 사이에 발생하는 총 접촉력을 계산할 수 있다.

여기서 W_p 와 W_{asp} 는 각각 웨이퍼와 연마입자 및 웨이퍼와 돌기사이의 접촉력을 의미한다.

식 (10)과 (11)에서 얻은 접촉력에 의해 발생하는 마찰력은 기계적 에너지를 생성시킨다. 본 연구에서는 웨이퍼와 입자의 접촉, 웨이퍼와 돌기의 접촉 시 발생하는 마찰기구는 Amonton의 마찰식[23]에 따르며 이때 발생한 마찰열은 각 접촉면적에 대하여 고르게 분포한다고 가정하였다. 따라서, 입자와 패드의 마찰계수 μ_p , μ_{asp} 에 대하여 마찰에 의하여 가해지는 총 기계적 일률은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$W_p = N_a \cdot F_{w-p} = N_a \cdot F_{asp-p} \quad (10)$$

$$W_{asp} = W_c - W_p \quad (11)$$

$$W_{mech} = (\mu_p W_p + \mu_{asp} W_{asp}) \cdot v_{rel} \quad (12)$$

3. 웨이퍼-슬러리-패드의 열전달 모델

CMP 공정에서 온도는 물질제거율에 가장 큰 영향을 주는 인자 중 하나이다. 정영석 등[25]은 패드 표면의 온도변화에 따라 물질제거율의 변화를 실험적으로 고찰하였다. White 등[24]은 집중요소 모델(Lumped Element Model)을 통하여 온도 영향을 고려한 CMP공정을 전기 회로로 상사하여 모델링하고 실험으로 이의 타당성을 증명하였다. 석종원[26]은 정확한 온도분포를 예측하기 위하여 물리적 파라미터를 도입하고 차원해석을 통한 CMP 공정의 열전달 모델을 제시하였다. 본 연구에서는 석종원[26]이 제안한 열전달 모델을 기초로, 집중인자 모델(Lumped Parameter Model)을 도입하여 웨이퍼와 패드 및 슬러리 사이의 열전달을 고려하였다.

3.1. 웨이퍼의 열전달 모델

웨이퍼에서 일어나는 열전달은 주로 슬러리와 대

류를 통하여 이루어지며 다음과 같은 1차 미분방정식으로 표현될 수 있다.

$$\rho_w c_p^{(w)} T_w = \frac{f_0^{(w)}}{V_w} - \frac{h_f}{b_w} (T_w - T_f) \quad (13)$$

여기서, ρ_w , $c_p^{(w)}$, V_w , b_w 는 각각 웨이퍼의 밀도, 정압비열, 부피 및 두께를 나타내며 h_f 는 슬러리의 대류열전달 계수를, $f_0^{(w)}$ 는 마찰에 의하여 발생한 기계적인 에너지가 변환된 열원을 나타낸다. 또한 T_w , T_f 는 각각 웨이퍼와 슬러리의 온도를 의미한다. 한편, 본 연구에서는 웨이퍼는 헤드로부터 충분히 단열된다고 가정하여 전도성 열전달은 무시하였으며 마찰에 의하여 발생한 기계적인 마찰열은 패드와 웨이퍼에 균등히 배분된다고 가정하였다.

3.2. 패드의 열전달 모델

패드의 온도장은 주로 슬러리의 유동 및 대기와의 접촉에 의한 대류열전달에 지배를 받는다고 가정하여 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$\rho_p c_p^{(p)} T_p = \frac{f_0^{(p)}}{V_p} - \frac{h_f}{b_p} (T_p - T_f) - \frac{h_a}{b_p} (T_p - T_a) \quad (14)$$

여기서 T_p 는 패드의 온도장, $f_0^{(p)}$ 는 패드에 열원항이며, ρ_p , $c_p^{(p)}$ 는 각각 패드의 밀도와 정압비열을 표시한다. 또한 V_p , b_p 는 각각 패드의 부피와 두께를 나타내며, h_f 와 h_a 는 각각 슬러리 및 대기로의 대류열전달 계수를, T_a 는 슬러리의 온도를 나타낸다.

3.3. 슬러리의 열전달 모델

슬러리는 패드와 웨이퍼의 사이를 통과하며 열 이송-대류의 특성을 가진다. 슬러리의 열전달을 관찰하기 위한 검사체적은 웨이퍼에 고정하고 흐름은 충분히 발달된 층류유동을 가정하였다.

$$\dot{\rho}_f c_p^{(f)} (T_f - T_{f0}) + 2h_f T_f \cong h_f (T_w + T_p) \quad (15)$$

식 (15)로부터 슬러리의 온도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_f = \frac{\dot{\rho}_f b_f c_p^{(f)} T_{f0} + h_f (T_w + T_p)}{\dot{\rho}_f b_f c_p^{(f)} + 2h_f} \quad (16)$$

여기서 $\dot{\rho}_f$ 는 단위 부피당 슬러리 유체의 질량유량이며 $c_p^{(f)}$ 는 슬러리 유체의 정압비열, T_{f0} 는 슬러리의 입구단에서의 온도를 의미하며 b_f 는 슬러리 유막의 두께를 의미한다.

식(13)~(16)에서 나타낸 바와 같이 1차의 미분방정

식으로 표현된 각 요소의 열전달식은 상호 연성되어 있으며 수치적으로 계산이 가능하다. 열전달 모델을 통하여 계산된 CMP공정에서의 온도 변화는 다음 절에서 설명하는 슬러리와 기저부의 화학반응을 지배하는 작용[9]을 하며 본 연구에서는 CMP공정에서 물질제거에 대한 기계적 효과를 화학적 효과와 연성시키는 주된 인자로 취급하였다.

4. 집중계수방법을 이용한 화학반응 모델

Subramanian 등[27]은 CMP공정에서 슬러리와 기저부의 화학반응을 표현하기 위해 웨이퍼-슬러리-패드 에 대한 2차원 모델링을 제안하였다. 이때 다공성의 패드는 반복되는 셀과 슬릿으로 단순화하여 패드와 웨이퍼 사이의 공간에서의 반응을 연속교반 액상 반응기 (Continuous Stirred Tank Reactor; CSTR)로 가정하여 반응물의 질량수송을 계산하였다. 그러나, 셀 및 슬릿 등에 사용한 기하학적 데이터는 물리적인 근거가 부족하여 실제 모델에 적용시키기에는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 CMP공정에서 슬러리와 기저부의 화학반응을 CSTR로 모델링하는 한편, 2.1절의 접촉모델에서 구한 웨이퍼와 패드의 분리거리 (Separation Distance)를 사용하여 슬러리의 평균 두께를 구함으로써 상기 기하학적 데이터에 대한 물리적 근거를 마련하였다.

한편, 본 연구에서는 2.2절에서 구한 웨이퍼의 온도에 따른 반응속도를 계산하고 화학적 반응에 의한 물질제거율을 구하였다. 이때 모델의 단순화를 위하여 웨이퍼와 패드의 상대속도는 웨이퍼의 중심점을 기준으로 한 평균거리를 사용하였다.

상대운동을 하는 패드와 웨이퍼에서 패드의 임의의 고정점이 ω 의 각속도로 회전하는 웨이퍼를 지나가는데 걸리는 시간을 반응이 일어나는 시간으로 가정하면, 식 (16)과 같이 표현된다.

$$\tau_{sw} = \frac{2\pi}{\omega_0} \quad (17)$$

셀과 슬릿의 집합체로 가정한 슬러리의 기하학적 평균두께를 β 로 정하고 화학반응에 의한 슬러리 내의 화학성분의 농도변화는 다음과 같다.

$$C = C_0 e^{-\beta k t} \quad (18)$$

여기서 C_0 는 초기농도, k 는 아레니우스 방정식[13]으로 표현할 수 있는 반응속도상수이며, t 는 반응시간을 나타낸다. 따라서, 단위 셀과 슬릿에 유입되는 슬러리와 반응하는 웨이퍼 표면에 대한 반응속도는 다음 식(19)과 같이 표현할 수 있다.

$$F_A = kv_{rel}C \quad (19)$$

$$k = k_0 \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (20)$$

여기서 R 은 기체상수, T 는 온도, Q 는 활성화에너지를 나타낸다. 한편, 화학적 효과에 의한 물질제거율은 식 (20)의 화학반응이 전체 웨이퍼 영역에 대해 균등하게 일어난다고 가정하면 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$MRR_{chem} = \int_{d_0-r_0}^{d_0+r_0} \int_0^{r_{sw}} \frac{F_A \cdot C_f}{A_w} dt d(d_1) \quad (21)$$

여기서 d_0 는 패드의 중심에서 웨이퍼 중심까지의 거리, r_0 웨이퍼의 반경이고, C_f 는 다음 식으로 표현되는 환산계수이다.

$$\begin{aligned} C_f &= C_{f1} \cdot C_{f2} \cdot C_{f3} \\ &= \left(7.092 \cdot 10^{-3} \frac{L}{mol}\right) \cdot \left(\frac{1 \text{ mol}}{2 \text{ mol}}\right) \cdot \left(6 \cdot 10^{10} \frac{nm \cdot s}{m \cdot min}\right) \\ &= 2.1277 \cdot 10^8 \left[\frac{L}{mol} \frac{nm \cdot s}{m \cdot min}\right] \end{aligned} \quad (22)$$

여기서 C_{f1} 은 구리의 원자량에 대한 환산식이며, C_{f2} 는 슬러리의 웨이퍼의 반응 몰수비, C_{f3} 는 단위 변환이다.

상기 식 (19)-(22)을 이용하면 화학적 효과에 의한 물질제거율을 계산 할 수 있으며, 계산결과는 White 등 [20]이 언급한 바와 같이 식 (9)의 기계적 물질제거보다 더 큰 값을 가진다.

5. 결 론

화학-기계적 효과가 함께 나타나는 CMP프로세스의 모델링에서 기존의 많은 연구는 기계 혹은 화학적 효과를 단독적으로 고려한 효과를 설명하는데 국한되었다. 본 연구에서는 기계적인 접촉모델을 고려할 뿐 아니라 웨이퍼와 패드, 웨이퍼와 입자 사이의 마찰을 고려함으로써 CMP공정 내 온도 변화와 그에 따른 화학적 효과를 반응공학을 이용하여 함께 모델링 하였다. 이를 통하여 열-화학-기계적으로 연성된 물질제거율을 설명할 수 있는 TCM(Thermal Chemical Mechanical) 통합모델을 제안하여 비프레스토니안 거동 등 기존의 모델들이 가지는 한계를 극복하고자 하였다. 본 연구에서 제안한 모델은 집중인자방법을 이용하여 웨이퍼의 국부적인 물질제거율을 예측하는 것은 한계가 있지만 추후 차원을 증가시킨 모델에 대한 연구를 수행하여 이를 확장시킬 계획이다.

감사의 글

“이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임”(KRF-2005- 041-D00099).

참고문헌

1. 석종원, “CMP프로세스의 통계적인 다규모 모델링 연구”, 대한기계학회 논문집 A권, 제 27권 12호, pp. 2110-2117, 2003.
2. J. Seok, C.P. Sukam, A.T. Kim, J.A. Tichy, and T.S. Cale, “Multiscale material removal modeling of chemical mechanical polishing”, *Wear*, 254, pp. 307-320, 2003.
3. F.G. Shi, and B. Zhao, “Modeling of chemical-mechanical polishing with soft pads”, *Applied physics A: Materials Science & Processing*, 67, pp. 249-252, 1998.
4. G. Fu, A. Chandra, S. Guha, and G. Subhash, “A plasticity-based model of material removal on chemical-mechanical polishing(CMP)”, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 14, 4, pp. 406-417, 2001.
5. P.H. Chen, B.W. Huang, and H.C. Shih, “A chemical kinetics model for a mixed-abrasive chemical mechanical polishing”, *Thin Solid Films*, 483, 239-244, 2005.
6. E. Paul, “A model of chemical mechanical polishing”, *Journal of the Electrochemical Society*, 148, 6, pp. G335- G338, 2001.
7. C.L. Borst, D.G. Thakurta, W.N. Gill, and R.J. Gutmann, “Surface kinetics model for SiLK chemical mechanical polishing”, *Journal of the Electrochemical Society*, 149, 2, pp. G118- G127, 2002.
8. K. Osseo-Asare, “Surface chemical process in chemical mechanical polishing”, *Journal of the Electrochemical Society*, 149, 12, pp. G651-G655, 2002.
9. H.J. Kim, H.Y. Kim, H.D. Jeong, E.S. Lee, and Y.J. Shin, “Friction and thermal phenomena in chemical mechanical polishing”, *Journal of Materials Processing Technology*, 130-131, pp. 334-338, 2002.
10. F.W. Preston, “The theory and design of plate glass polishing machines”, *Journal of the Society of Glass Technology*, 11, pp. 214-256, 1927.
11. C. Zhou, L. Shan, J.R. Hight, and S. Danyluk, “Influence of colloidal abrasive size on material removal rate and surface finish in SiO₂ chemical mechanical polishing”, *Tribology Transactions*, 45, 2, pp. 232-238, 2002.
12. W.T. Tseng, and Y.L. Wang, “Re-examination of pressure and speed dependences of removal rate during

- chemical-mechanical polishing processes”, *Journal of the Electrochemical Society Letters*, 144, 2, pp. L15-L17, 1997.
13. 김성준, K. Takeo, 강현구, 김민석, 박재근, “나노 세리아 슬러리에 첨가된 연마입자와 첨가제의 농도가 CMP 연마관 온도에 미치는 영향”, *한국반도체장비학회 추계학술대회 논문집*, pp. 122-125, 2003.
 14. J.M. Steigerwald, S.P. Murarka, R.J. Gutmann, and D.J. Duquette, “Chemical processes in the chemical mechanical polishing of copper”, *Materials Chemistry and Physics*, 41, pp. 217-228, 1995.
 15. F.B. Kaufman, D.B. Thompson, R. E. Broadie, M. A. Jaso, W. L. Guthrie, D. J. Pearson, and M. B. Small, “Chemical-mechanical polishing for fabricating patterned W metal features as chip interconnects”, *Journal of the Electrochemical Society*, 138, 11, pp. 3460-3465, 1991.
 16. Y. Gotkis, and S. Guha, “Cu-CMP for dual damascene technology: Prestonian vs. non-Prestonian regimes of Cu removal”, *Journal of Electronic Materials*, 30, 4, pp. 396-399, 2001.
 17. J. Sorooshian, D. DeNardis, L. Charns, Z. Li, F. Shadman, D. Boning, D. Hetherington, and A. Philiposian, “Arrhenius characterization of ILD and copper CMP processes”, *Journal of the Electrochemical Society*, 151, 2, pp. G85-G88, 2004.
 18. Y. Zhao, and L. Chang, “A micro-contact and wear model for chemical-mechanical polishing of silicon wafers”, *Wear*, pp. 252, 220-226, 2002.
 19. M. Leung., C.K. Hsieh, and D.Y. Goswami, “Application of Boltzmann statistical mechanics in the validation of the Gaussian summit-height distribution in rough surfaces”, *Journal of Tribology*, 119, 4, pp. 846-850, 1997.
 20. K.L. Johnson, *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 90-106, 1985.
 21. J.A. Greenwood, and J.B.P. Williamson, “Contact of nominally flat surfaces”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 295, 1442, pp. 300-319, 1966.
 22. J. Luo, and D.A. Dornfeld, “Material removal mechanism in chemical mechanical polishing: Theory and modeling” *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 14, 2, pp. 112-133, 2001.
 23. Y.M. Mamontova, and A.S. Akhmatov, “Departures from Amonton's law of friction”, *Russian Physics Journal*, 17, pp. 1553-1556, 1974.
 24. D. White, J. Melvin, and D. Boning, “Characterization and modeling of dynamic thermal behavior in CMP”, *Journal of the Electrochemical Society*, 150, 4, pp. G271- G278, 2003.
 25. 정영석, 김형개, 정해도, “CMP 공정중 패드 표면의 온도분포에 관한 연구”, *대한기계학회 춘계학술대회 논문집*, pp. 1283-1288, 2003.
 26. 석중원, “화학기계적 연마 프로세스의 동적 열전달 모델링 연구”, *대한기계학회논문집 A*, 28, 5, pp. 617-623, 2004.
 27. R.S. Subramanian, L. Zhang, and S.V. Babu, “Transport Phenomena in chemical mechanical polishing”, *Journal of the Electrochemical Society*, 146, 11, pp. 4263-4272, 1999.
 28. L. Guo, and R.S. Subramanian, “Mechanical removal in CMP of copper using alumina abrasives”, *Journal of the Electrochemical Society*, 151, 2, pp. G104-G108, 2004.