

CMP 프로세스의 통계적인 다규모 모델링 연구

석 종 원[†]

(2003년 7월 21일 접수, 2003년 10월 20일 심사완료)

A Statistical Study of CMP Process in Various Scales

Jongwon Seok

Key Words : CMP(화학기계연마), Modeling in Various Scales(다규모모델링), Material Removal Model(물질제거모델), Joint Probability Distribution Function(연성 확률분포함수)

Abstract

A physics-based material removal model in various scales is described and a feature scale simulation for a chemical mechanical polishing (CMP) process is performed in this work. Three different scales are considered in this model, *i.e.*, abrasive particle scale, asperity scale and wafer scale. The abrasive particle and the asperity scales are combined together and then homogenized to result in force balance conditions to be satisfied in the wafer scale using an extended Greenwood-Williamson and Whitehouse-Archard statistical model that takes into consideration the joint distribution of asperity heights and asperity tip radii. The final computation is made to evaluate the material removal rate in wafer scale and a computer simulation is performed for detailed surface profile variations on a representative feature. The results show the dependence of the material removal rate on the joint distribution, applied external pressure, relative velocity, and other operating conditions and design parameters.

기호설명

a_a : 돌기의 접촉면적
 $c_a, c_b, k_1 - k_4$: 계산결과로 얻어진 상수들
 d_p : 연마입자의 직경
 E_a : 돌기의 영률 (Young's modulus)
 f_a : 돌기의 접촉력
 f_p : 한개의 연마입자에 가해지는 외력
 h : 웨이퍼와 돌기높이의 평균면 사이의 분리거리
 h_0 : 돌기 높이의 평균면에서 측정된 돌기 높이의 최대치
 H_w : 웨이퍼의 표면경도 (surface hardness)
 P_w : 외부적으로 웨이퍼에 가해지는 압력

r_a : 돌기선단부 반경
 r : 돌기반경의 최소값
 r_0 : 돌기반경의 최대값
 s : RMS 표면거칠기
 V_r : 웨이퍼와 패드의 상대속도
 V_m^a : 물질체적의 시간변화량
 \bar{V}_m^a : 하나의 돌기 선단부에 대한 물질 제거율의 앙상블 평균치
 V_v^p : 한개의 연마입자에 의해 단위 시간당 제거되는 웨이퍼 표면물질의 체적
 w : 돌기의 수직변형량
 z : 돌기 높이
 z_0 : 기준면에서 측정된 돌기 높이의 평균값
 α, q : 비선형 회귀분석을 이용하여 얻어지는 상수들
 δ : 돌기의 평균 변형의 앙상블 평균
 ∇ : 구배연산자 (del operator)
 Δ : 표본거리
 η : 돌기밀도 (단위면적당 돌기의 갯수)
 φ : 웨이퍼 표면의 위치를 정의하는 함수

[†] Department of Mechanical, Aerospace and Nuclear Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, 12180-3590, USA
 E-mail : seokj@alum.rpi.edu
 TEL : (518)276-8003 FAX : (518)276-8761

- φ_t : φ 의 시간변화율
- κ : 연마입자의 기하학적 형상인자
- λ : 웨이퍼 표면과 돌기사이에 간헐 고착된 각각의 연마입자의 물질제거량에 대한 평균기여인자
- μ : 돌기 선단반경의 평균값
- ψ : 연성된 표준 양변차 가우스 확률분포함수 (joint standard bivariate Gaussian probability distribution function)
- $\bar{\Pi}_t$: 물질 제거율의 기대치
- ρ_w : 웨이퍼 표면물질의 밀도
- σ : 돌기 선단반경의 표준편차
- $\bar{\sigma}_A$: 웨이퍼 표면의 특정부분에서 하나의 돌기가 표본거리를 지나며 발생하는 평균접촉응력
- θ : 돌기높이와 돌기선단반경간의 상호 관계계수
- ν_a : 돌기의 프와송비 (Poisson's ratio)

들이 표면돌기들을 통해 마모입자들에 전달되는 가를 연구하는데 있다. 후에 추가로 설명하겠지만 이 결과들은 웨이퍼에 형성된 하나의 대표적 인 피쳐(feature)가 CMP 과정을 거치며 평탄화 되는 과정을 설명하는 데 이용된다.

이번 연구에서는 패드의 표면은 등균성, 즉 통계적인 성질이 표면을 따라 불변하고 등방성, 즉 표면에 따라 측정, 계산된 자기관계 함수 (autocorrelation function)가 측정방향에 대해 독립적인 것으로 가정한다.^(4,5) 또한 패드면의 돌기들의 길이 및 반경의 분포는 이차원 상의 랜덤변수(random variable)로 가정한다. 반면 비등방성의 거친 표면의 통계적 특성들, 즉 돌기들의 분산 (variance), 주 평균 자승구배(principle mean square slopes), 주 평균 자승곡률(principle mean square curvature) 등은 참고문헌 (6) 에 잘 설명이 되어있다.

1. 서론

현재 보편적으로 사용되는 회전식 CMP 프로세스에서 회전하는 웨이퍼(wafer)는 유연한 캐리어 필름(carrier film)이 비교적 단단한 구조의 웨이퍼고정대(wafer holder)와 고착, 고정되어 있는 구조로 되어있다. 웨이퍼는 회전하는 패드(pad)를 주어진 일정 압력으로 누르는 한편 마모입자들(abrasive particles)을 다량 포함하는 슬러리(slurry)가 그 압착면 사이에 연속적으로 공급된다. 최근에 발표된 실험적⁽¹⁾ 및 이론적^(2,3)인 연구결과들은 패드와 웨이퍼의 직접적인 접촉으로 연마과정이 일어남을 잘 설명해 준다. 이 연마과정은 패드면의 돌기들(asperities) 사이에 마모입자들이 고착되고 이때 문지름작용(rubbing)에 의해 웨이퍼 표면이 연마되어 웨이퍼의 표면에 있는 물질들이 제거되는것으로 설명이 된다. 결론적으로 CMP 에 있어서 주된 물질제거 메카니즘은 연마마모(abrasive wear), 즉 슬러리 안에 존재하는 매우 단단한 마모입자들이 웨이퍼와 패드의 상대운동에 의해 웨이퍼 표면을 따라 이동하며 이때 깔여진 웨이퍼 표면의 물질들이 슬러리와 함께 웨이퍼 밖으로 이송되는 과정이라고 사료된다. 물론, 실제 CMP 메카니즘은 매우 복잡한 기계 및 화학적 효과들이 복합적으로 조합되어 있으나 본 논문에서는 화학적인 효과는 웨이퍼 표면을 약화시켜 물질을 탈루시키기 용이하게 하는 과정으로 설명한다. 즉, 화학적 작용은 표면의 기계적 물성치들(표면경도, 영률, 프와송비 등)을 변화시키는 요인으로만 간주하여 포함시키며 주로 기계적 마모과정을 중심으로 다루기로 한다. 따라서 이 논문의 첫째 목표는 웨이퍼규모에서 외력의 분산과정을 추산하며 어떻게 이 힘

2. 이론

2.1 연마입자규모 모델

슬러리에 포함된 연마입자들은 크기가 수십 나노미터에 불과하며⁽⁷⁾ 보편적으로 미시적 모델링을 위해 원자단위(또는 격자단위)의 단순화된 수학적 모델에 몬테카를로 시뮬레이션(Monte-Carlo Simulation)을 적용하는 방법이 사용된다.⁽⁸⁾ 하지만 본 연구에서는 이론적 접근방법으로써 물리법칙에 기초한 모델링(physics-based modeling)을 기초로 하여 연마입자들의 거시적인 특성들에 초점을 맞추어 모델링을 하였다. 먼저 연마입자들은 그 형상이 구형의 매우 단단하고 균질한 물질로 구성되어 있다고 가정한다(Fig. 1 참조). 이 연마입자들은 웨이퍼 표면과 패드의 돌기들 사이에 간헐 일정순간 고착, 고정되며 이때 접촉 하는

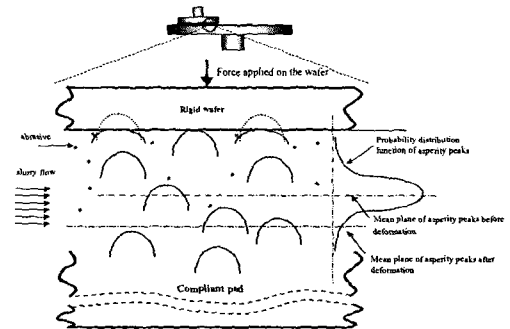


Fig. 1 A schematic of the model in various scales, including abrasive particles and asperities distributed on the rough surface of the compliant pad

Table 1 Parameter values for contact force and contact area curve fits.

Param.	c_a	c_b	k_1	k_2	k_3	k_4
Value	1.57	5.56	0.14	1.86	0.86	1.16

완전 소성변형된 웨이퍼 표면의 물질을 깎아 제거한다고 가정한다.⁽⁹⁾ 한개의 연마입자에 의한 물질제거량은 앞에서 설명한 기하학적인 관계에 따라 다음과 같이 구해진다.

$$V_v^p = \frac{4V_r}{3d_p} \sqrt{\left(\frac{f_p}{\pi H_w}\right)^3} \quad (1)$$

여기서 V_v^p 는 한개의 연마입자에 의해 단위 시간당 제거되는 웨이퍼 표면물질의 체적이고 d_p 는 연마입자의 직경, f_p 는 한개의 연마입자에 가해지는 외력, H_w 는 웨이퍼의 표면경도(surface hardness) 그리고 V_r 은 웨이퍼와 패드의 상대속도를 나타낸다.

2.2 돌기규모 모델

연마과정에 따라 외력은 패드의 돌기부와 연마입자들에 의해 웨이퍼의 표면과 패드 사이로 전달된다. 다공성 패드의 기계적 특성은 선형 탄성이론으로 잘 설명이 되지만 돌기의 거대변형은 이 이론의 한계를 벗어나므로 초탄성 모델(hyperelastic model)⁽¹⁰⁾을 도입하였다. 유한요소법(finite element method or FEM)을 이용한 상용 소프트웨어인 ANSYSTM(¹¹)을 이용하여 돌기의 접촉력과 접촉면적을 돌기의 수직변형량 w 와 돌기선단부 반경 r_a 의 함수로 표시하면 다음과 같은 식으로 나타낼수 있다.⁽³⁾

$$f_a(w, r_a) = \frac{c_b E_a r_a^{k_1} w^{k_2}}{(1-\nu_a^2)} \quad (2)$$

$$a_a(w, r_a) = c_a \pi r_a^{k_3} w^{k_4} \quad (3)$$

이때 E_a 와 ν_a 는 각각 돌기의 영률(Young's modulus)과 프와송비(Poisson's ratio)를 나타내며 c_a, c_b 와 k_1-k_4 는 계산결과로 얻어진 상수들이다. 이들 상수값들은 Table 1 에 기술하였다.

한편 하나의 돌기부에 의해 제거되는 물질체적의 시간변화량 V_m^a 은 앞서 설명한 기구학 및 기하학적인 관계에 의해 다음식으로 표시할 수 있다.⁽¹²⁾

$$V_m^a(w, r_a) = \frac{2\lambda \rho_w V_r a_a}{3\pi} \sqrt{\left(\frac{f_a}{\kappa a_a H_w}\right)^3} \quad (4)$$

여기서 λ 는 웨이퍼 표면과 돌기사이의 간격이고 착된 각각의 연마입자의 물질제거량에 대한 평균

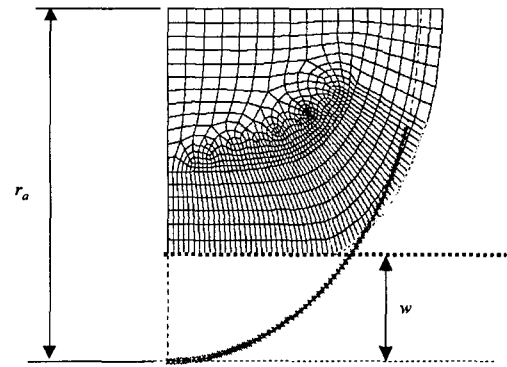


Fig. 2 Cross sectional view of one-half of a deformed mesh for the asperity/wafer contact model. The dotted line indicates the original shape (r_a is the radius of the hemispherical asperity cap, w is the deformation)

기여인자로 이는 실험적으로 구해질수 있으며 0 과 1 사이의 값을 갖는다. 또한 ρ_w 는 웨이퍼 표면물질의 밀도를 나타내며 κ 는 연마입자의 기하학적 형상인자로 응력집중현상을 보상하는 역할을 하며 0 과 1 사이의 값을 갖는다. 이때 사용한 유한요소모델의 반단면을 기호와 함께 Fig. 2 에 도시하였다. 여기서 점선은 변형전의 요소의 모습을 보여주며 r_a 는 돌기선단부의 반경을, w 는 변위를 나타낸다. 식 (2)와 (3)을 곡선적합하기 위해 돌기의 변형량은 최대 변형전 돌기 높이의 20 %까지 계산하여 사용하였다. 이는 선형 탄성한계를 넘어선 양임에 유의한다.

2.3 웨이퍼규모 모델

실제 패드표면의 미시적 구조는 작게는 수 마이크로에서 크게는 수십 마이크로까지의 작은 돌기들이 표면에 불규칙적으로 뒤덮혀 거친면을 형성하고 있음을 보여준다(Fig. 1 참조). 본 연구에서 제안하는 웨이퍼규모 모델은 공칭적으로 편평한⁽¹³⁾ 거친 패드의 표면을 다룬다. 이때 거친 표면은 균질적이고 등방성인 이차원 랜덤변수로 수학적 모델링이 되는 돌기들의 높이분포에 의해 표현될 수 있다. 또한 본 연구에서는 각각의 돌기들이 충분히 분산되어있어 이 돌기들에 가해지는 힘들의 상호작용은 없다고 가정한다. 따라서 돌기들의 미소 접촉면들은 충분히 넓게 떨어져 있으므로 기계적으로 서로 독립적으로 취급한다. 또한 패드는 근사적으로 구형의 선단부를 갖는 돌기들이 충분한 밀도로 덮고 있다고 가정한다. Greenwood-Williamson 이론(이후로는 G-W 로 명기함)⁽¹³⁾은 많은 접촉면들에서 돌기들의 높이는 가우스분포를 갖는다는 실험적인 관측에 기초를 두고 있으며 돌기들은 동일한 반경의 구형 선단

부를 갖는다고 가정한다. 따라서 G-W 이론에서는 돌기 높이의 표준편차, 하나의 고정된 상수의 돌기 선단반경 그리고 단위 면적당 돌기들의 밀도로 거친 표면이 표현된다. Whitehouse-Archard (이후로는 W-A 로 명기함)⁽⁴⁾는 돌기들이 서로 다른 선단반경을 갖는다는 사실에 주목하여 G-W 이론을 확장하였다. 이 이론은 또한 평균적으로 하부보다는 상부에 위치한 돌기선단부가 더 날카롭다는 실험적 관측에 기초하고 있다. 여기서 표면형상은 기하급수적인 자기관련 함수를 갖는다고 가정하여 돌기 높이와 곡률의 연성된 함수로 확률밀도함수를 유도하였는데 이 확률밀도함수는 표면형상의 표본추출거리에 따라 변화한다. W-A 이론으로 거친 표면을 기술하기 위해서는 G-W 이론에서 사용된 인자들과 더불어 상호 관계거리 (correlation distance) 라고 불리는 표면형상의 자기관계함수의 지수가 사용된다. Nayak⁽⁵⁾은 표면의 거칠기 (roughness)와 이에 따른 돌기 높이와 반경의 연성된 분포를 수학적으로 모델링하였다. 이 모델에서는 표면의 높이, 구배 그리고 곡률 모두를 가우스 확률밀도 함수로 표시할 수 있으며 표면의 통계적 특성들(돌기 높이의 분포, 돌기 밀도, 평균 돌기표면 구배, 평균 돌기 선단반경 곡률등)이 표면형상의 파워스펙트럼 밀도의 함수들로 표시될 수 있다고 가정한다.

Yu 등⁽¹⁴⁾은 패드 돌기의 높이 및 반경의 랜덤 분포를 CMP 과정의 모델링에 적용하였다. 여기서 돌기의 높이와 반경의 분포들은 서로 독립적이라고 가정하였다. 이같은 돌기의 높이와 반경 분포들의 독립성은 Zhang 등⁽¹⁵⁾의 모델에서도 가정되었다. 한편 Onions 등⁽¹⁶⁾은 돌기 선단반경들의 랜덤분포와 돌기 높이에 대한 돌기 선단반경의 의존성은 실제 접촉면적에 작용하는 압력과 돌기들이 소성변형될 확률에 지대한 영향을 미친다고 주장하였다. 따라서 본 연구에서는 돌기 높이와 반경의 연성된 분포가 CMP 패드의 특징을 통계적으로 나타낸다고 가정하였다.

이전에 설명했듯이 공학적 용도로 쓰이는 많은 기계요소들의 접촉면들은 통계적으로 가우스 분포를 갖거나 또는 개략적으로 가우스 분포로 나타낼 수 있다는 사실이 실험적으로 관측되었다. 실제 표면의 거칠기 측정을 통계적인 제한조건으로 한 볼츠만 통계 모델에 기초하여 균질-등방성을 갖는 거친표면은 가우스 분포를 보인다는 사실이 제시되었다.⁽¹⁷⁾ 여기서 제시된 실험결과에 의하면 CMP 에 쓰이는 거친 패드의 돌기 높이 분포는 대략적으로 가우스 분포를 따른다.^(14,18) 본 논문에서는 돌기 높이 (z)와 돌기 선단반경 (r_a)은 부(-)의 상호 관계계수(correlation coefficient)를 포함하는 연성된 표준 양변차 가우스 확률분포함수(joint standard bivariate Gaussian

probability distribution function)⁽¹⁹⁾를 따른다고 가정한다. 이때 가우스 확률분포함수는

$$\psi(z, r_a) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}Q(z, r_a)\right)}{2\pi\sigma\sqrt{(1-\theta^2)}} \quad (5)$$

와 같이 표시되며 여기서

$$Q(z, r_a) = \frac{1}{(1-\theta^2)} \left[\left(\frac{z-z_0}{s} \right)^2 - 2\theta \times \left(\frac{z-z_0}{s} \right) \left(\frac{r_a-\mu}{\sigma} \right) + \left(\frac{r_a-\mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (6)$$

이며 θ 는 돌기 높이 (z) 와 돌기 선단반경 (r_a) 간의 상호 관계계수, (일반적으로 $-1 < \theta < 0$ 의 값을 갖음), σ 와 μ 는 각각 돌기 선단반경의 표준편차와 평균값을 나타내며 s 는 RMS 표면거칠기, z_0 는 기준면에서 측정된 돌기 높이의 평균값을 나타낸다. 만약 기준면이 돌기 높이의 평균치와 일치한다면 (이는 일반적으로 사용하는 방법임) $z_0=0$ 이다. 여기서 θ 는 부(-)의 값을 갖으며 이는 평균적으로 돌기의 반경이 커지면 그 길이는 줄어든다는 실험적 관찰을 기초로 하고 있다.

식 (4)- (6)으로부터 하나의 돌기 선단부 하나에 대한 물질 제거율의 앙상블 평균치는 다음과 같은 형태로 구해진다.

$$\bar{V}_m^a = \int_{h_0}^{h_1} \int_{r_0}^{r_1} V_m^a(z-h, r_a) \times \psi(z, r_a) dz dr_a \quad (7)$$

이때 h 는 웨이퍼와 돌기 높이의 평균면 사이의 분리거리이고 h_0 는 돌기 높이의 평균면에서 측정된 돌기 높이의 최대치이고 r 과 r_0 는 각각 돌기반경의 최소 및 최대값이다. 따라서 물질 제거율의 기대치는

$$\bar{\Pi}_l = c_l V_r K_{\frac{1}{2}(3k_2-k_4), \frac{1}{2}(3k_1-k_3)}(h) \quad (8)$$

와 같고 여기서

$$c_l = \frac{2\lambda\eta}{3} \sqrt{\frac{1}{c_a} \left(\frac{c_b E_a}{\kappa\pi(1-\nu_a^2)H_w} \right)^3} \quad (9)$$

$$K_{n,m} = \int_{h_0}^{h_1} \int_{r_0}^{r_1} (z-h)^n (r_a)^m \times \psi(z, r_a) dz dr_a \quad (10)$$

이며 η 는 돌기밀도 (단위면적 당 돌기의 갯수)이다. 외부적으로 웨이퍼에 가해지는 압력 P_w 는 웨이퍼와 접촉하는 모든 돌기들에 가해지며 힘의 평형관계식에 따라

$$P_w = \frac{\eta c_b E_a}{(1-\nu_a^2)} K_{k_1, k_2}(h) \quad (11)$$

이 유도된다. 한편 이로부터 웨이퍼와 돌기 높이의 평균면 사이의 분리거리 h 값이 얻어진다. 또한 돌기의 평균 변형의 양상불 평균 δ 는

$$\delta = K_{1,0} = \int_0^{r_0} \int_0^0 (z-h) \times \psi(z, r_a) dz dr_a \quad (12)$$

와 같이 구해진다.

2.4 하나의 대표피처에 대한 물질제거 컴퓨터 시뮬레이션

본 모델의 장점중 하나는 블랭킷 웨이퍼에서 얻어진 결과를 이용하여 피처(돌)면의 시간 변화를 얻을 수 있다는 것이다. 이를 위해 물질 제거율과 외압과의 관계를 식 (8)~(11)을 이용하여 구하여 나타내면

$$\bar{\Pi}_t = \alpha V_r (P_w)^q \quad (13)$$

이고 여기서 α 와 q 는 비선형 회귀분석을 이용하여 얻어지는 상수들이다. 웨이퍼에 발생하는 접촉 응력을 분석하기 위해 ANSYS™(11)가 사용되었으며 표면의 시간변화를 구하기 위해 레벨 셋 방법(level set method)⁽¹⁹⁾이 사용되었다. 이때 적용된 레벨 셋 방정식은

$$\varphi_t - \alpha V_r (\Delta \sqrt{\eta \bar{\sigma}_A})^q |\nabla \varphi| = 0 \quad (14)$$

와 같이 표시된다. 여기서 φ 는 웨이퍼 표면의 위치를 정의하는 함수이고 φ_t 는 φ 의 시간변화율, ∇ 는 구배연산자 (del operator), $\bar{\sigma}_A$ 는 웨이퍼 표면의 특정부분에서 하나의 돌기가 표본거리 Δ 를 지나갈때 발생하는 접촉응력의 평균값이다. 한편 표본거리 Δ 는 분리된 하나의 피처보다는 크지만 주위의 다른 피처들에 의해 크게 영향을 받지 않을 만큼 작아야 한다.

3. 결과 분석 및 고찰

본 절에서는 이전 절들에서 유도된 모델을 이용한 수치해석 결과를 설명한다. 수치해석에 사용된 패드 표면의 통계적 특성들(돌기들의 높이와 반경의 평균 및 표준편차 등)과 기하학적/기계적 인자값들을 Table 2 에 표시하였다. 식 (9)에 표시된 인자 c_t ($=1.7 \times 10^3$)를 구하기 위해 웨이퍼에 가해지는 외압 $P_w=18$ kPa, 웨이퍼와 패드의 상대속도 $V_r=0.6$ m/s 에서의 물질 제거율 (110 nm/min)⁽¹⁸⁾을 사용하였다. 외압에 대한 물질제거율의 변화를 Fig. 3 에 도시하였다. 이때 물질제거율에 정의된 인자들(α 와 q)의 값은 비

Table 2 Parameter values used in the simulations

Param.	Value	Unit
E_a	3.0	MPa
ν_a	0.49	-
θ	-0.5	-
z_0	0	μm
s	3.0	μm
h_0	9.0	μm
η	5.5E8	m^{-2}
μ	5	nm
σ	5/3	μm
r	0	μm
r_0	10.0	μm
V_r	0.6	m/s
P_w	18.0	kPa
r_a	5.0	μm

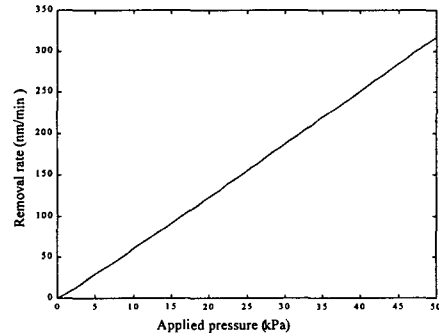


Fig. 3 Removal rate versus applied pressure for a correlation coefficient $\theta=-0.5$

선형 회귀분석으로 얻을 수 있다. 또한 높이가 1.8 μm 이상인 돌기들만이 웨이퍼 표면과 접촉하며 선단부에 고착된 연마입자들을 통해 물질제거 메카니즘에 기여한다고 생각된다. 이때 웨이퍼 면에 따른 돌기변형의 양상불 평균들의 평균치는 $\delta=0.5$ μm 로 계산되었다. Fig. 4 에 돌기 높이와 반경과의 상호 관계계수 θ 를 가로축으로, 웨이퍼와 돌기 높이의 평균면사이의 분리거리 (h) 의 변화량 및 웨이퍼 면에 따른 돌기변형의 양상불 평균들의 평균치 (δ)를 세로축으로하여 도시하였다. 여기서 웨이퍼에 가해지는 외압은 $P_w=18$ kPa 로 고정하였다. 이 그림은 상호관계가 멀어질수록 분리거리는 증가하며 평균변형은 감소함을 보여준다. 분리거리의 최대값 및 평균변형의 최소값은 상호 관계계수가 0 일때 구해진다. 즉, 돌기 높이가 돌기 선단반경과 무관할 때 얻어진다.

돌기변형의 평균값은 G-W 접근법을 이용하여 돌기규모 모델과 웨이퍼규모 모델을 통계적으로 결합하여 구한다. 여기서 접촉응력장은 돌기 높이와 돌기 선단반경의 연성된 확률분포함수로부터

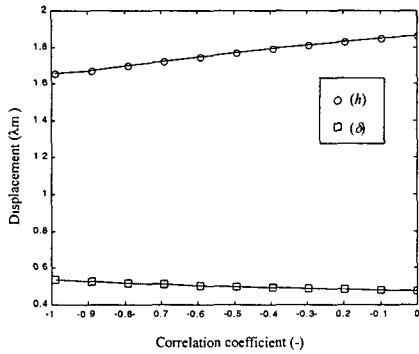


Fig. 4 Displacements versus correlation coefficient (externally applied pressure of 18kPa)

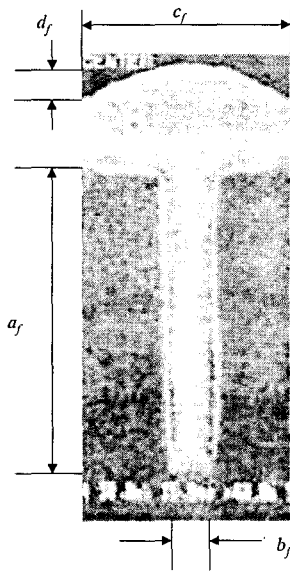


Fig. 5 SEM image of experimental ECD Cu in a single trench⁽²¹⁾

터 표면화한 평균돌기의 ANSYSTM 유한요소 모델을 이용하여 해석하였으며 연마입자규모 및 돌기 규모의 물질제거모델과 더불어 시간에 따른 피쳐 표면의 변화를 구하는 데 사용된다. 이전 절에서 이미 설명하였듯이 블랭킷 웨이퍼의 물질제거율은 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다. ANSYSTM 를 이용한 유한요소법과 식 (14)를 사용하여 대표적인 피쳐 표면의 시간에 따른 변화를 시뮬레이션 하였다. 일반적으로 이 피쳐면은 구리 (Cu)의 전기화학적 적층법(electrochemical deposition 또는 간단히 ECD)에 의해 구성될 수 있다. 돌기의 유한요소 모델에서 돌기의 외주면은 80 개의 등간격 요소들로 나누었으며 웨이퍼 상의 특정한 x 위치에서의 접촉응력값은 이때 얻은 평

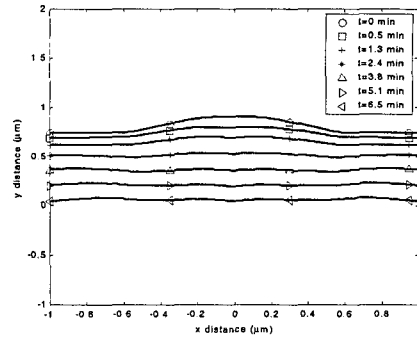


Fig. 6 Two-dimensional plots showing the surface profile at different times

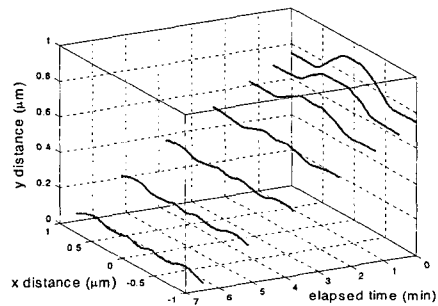


Fig. 7 Three-dimensional plots showing the time evolution of the surface

균 돌기의 접촉응력을 선형내삽(linear interpolation) 하여 구하였다. 평균 접촉응력은 먼저 하나의 평균 돌기가 401 개의 등간격으로 나눈 표본거리 Δ 를 훑고 지나갈 때 발생하는 접촉응력들을 평균하여 구한다. , CMP 과정중 일반적으로 사용되는 외압 (P_w) 의 범위 0 에서 50 kPa 내에서 선형화하여 (즉 $q=1$) 구한 인자 α 의 값은 $\alpha=1.7 \times 10^{-13}$ (m/Pa-s) 이었다. 이번 시뮬레이션에서는 계산을 단순화 기 위해 이때 구한 선형화된 인자들이 사용되었다. 한편 이 시뮬레이션은 하나의 트렌치(trench)에 적층된 비선택적인(non-selective), 즉 균질한 하나의 동일물질을 연마하기 위한, CMP 과정을 설명하는데 그 초점을 두었다. 접촉응력은 각각의 선택된 시간에 웨이퍼 상의 위치의 함수로 표시되고 그 평균과정은 다른 크기의 돌기들이 피쳐를 훑고 지나가는 것을 함축적으로 내포하고 있다. Fig. 5 에서는 시뮬레이션에 사용된 대표적 피쳐의 SEM 이미지를 보여준다. 이 피쳐는 West 등⁽²¹⁾이 행한 실험결과에서 발췌하였다. 적층된 돌출부(bump)의 높이 d_f 는 대략 $0.15 \mu\text{m}$ 이고 너비 c_f 는 대략 $0.8 \mu\text{m}$ 이며 트렌치 높이 a_f 는 대략 $1 \mu\text{m}$ 이다. 표본거리 Δ 는 $2 \mu\text{m}$ 로 정하였으며 컴퓨터 시뮬레이션은 $t=6.5$ 분까지 수행하였다. Fig. 6 은 웨이퍼 표면의 시간에 따른 변화를 이차원 평면상에 도시

한 것이며 Fig. 7 은 이를 가상 삼차원 공간상에 도시한 것이다. 앞에서 언급했듯이 이 시뮬레이션에 사용된 모델은 실제 실험에서 구한 트렌치 상부에 적층된 구리 (Cu)의 돌출부를 기초로하여 구한 것이다. 한편, 본 모델에 사용된 형상외에 다른 형상으로 적층된 돌출부들의 SEM 파단 이미지들은 참고문헌 (21-23)에 잘 예시되어 있다.

4. 결론

본 연구에서는 돌기의 높이와 반경의 연성된 확률분포를 고려하여 대규모 CMP 과정을 통합적으로 모델링하였으며 이 결과를 이용하여 특정 피처(feature) 위에 적층된 구리 (Cu) 돌출부의 기계적 연마과정을 시뮬레이션 하였다. 이때 구한 모델의 수치해석결과 돌기 높이와 반경이 연성된 확률분포함수를 고려한 경우 돌기변형의 웨이퍼면에 따른 앙상블 평균함수(ensemble averaged function)의 평균치와 웨이퍼/체적평균면 사이의 분리거리는 연성된 정도(상호 관계계수; correlation coefficient)에 영향을 받는다는 것이 밝혀졌다. 이 결과를 블랭킷 웨이퍼(blanket wafer)에 적용하여 평균 질량 제거율(average material removal rate)을 구하고 이를 이용하여 CMP 과정에 따른 웨이퍼 표면형상의 시간변화를 시뮬레이션하였다. 이 결과는 CMP 과정의 정량적 예측이 가능함을 보여준다. 이 연구가 주로 CMP 의 기계적인 연마과정에 중점을 두고있지만 향후 이 연구에서 제시된 모델의 적절한 수정을 통해 화학적인 역할도 함께 고려할 수 있으리라고 기대된다.

참고문헌

- (1) Shan, L., Levert, J. A., Tichy, J. and Danyluk, S., 2000, "Interfacial Fluid Mechanics and Pressure Prediction in Chemical Mechanical Polishing," *Journal of Tribology*, Vol. 122, No. 3, pp. 539-543.
- (2) Tichy, J., Levert, J., Shan, L. and Danyluk, S., 1999, "Contact Mechanics and Lubrication Hydrodynamics of Chemical Mechanical Polishing," *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 146, pp. 1523-1528.
- (3) Kim, A. T., Seok, J., Sukam, C. P., Tichy, J. A. and Cale, T. S., 2001, "A Multiscale Model for Chemical Mechanical Planarization," *Proceedings of the Advanced Metallization Conf. (AMC) in 2001*, McKerrow, A., Shacham-Diamond, Y., Zaima, S., Ohba, T. (Eds), MRS, Montreal, Canada, pp. 405-410.
- (4) Whitehouse, D. J. and Archard, J. F., 1970, "The Properties of Random Surfaces of Significance in Their Contact," *Proceedings of the Royal Society London*, Vol. A 316, pp. 97-121.
- (5) Nayak, P. R., 1971, "Random Process Model of Rough Surfaces," *Journal of Lubrication Technology*, Vol. F 93, pp. 398-407.
- (6) Bush, A. W., Gibson, R. D. and Keogh, G. P., 1979, "Strongly Anisotropic Rough Surfaces," *Journal of Lubrication Technology*, Vol. 101, pp. 15-20.
- (7) Nanz, G. and Camilletti, L. E., 1995, "Modeling of Chemical-Mechanical Polishing: A Review," *IEEE Trans. Semicon. Manufact.* Vol. 8, No. 4, pp. 382-389.
- (8) Grimmett, G. R. and Stirzaker, D. R., 1992, *Probability and Random Processes*, Oxford Science Publications.
- (9) Liang, H., Kaufman, F., Sevilla, R. and Anjur, S., 1997, "Wear Phenomena in Chemical Mechanical Polishing," *Wear*, Vol. 211, pp. 271-279.
- (10) Lai, W. M., Rubin, D. and Krempl, E., 1993, *Continuum Mechanics*, 3rd Ed., Pergamon.
- (11) ANSYSTM Theory Ref. Manual, 1999, Faculty/Research Release 5.6, ANSYS Inc., Canonsburg PA.
- (12) Seok, J., Sukam, C. P., Kim, A. T., Tichy, J. A. and Cale, T. S., 2003, "Multiscale Material Removal Modeling of Chemical Mechanical Polishing," *Wear*, Vol. 254, pp. 307-320.
- (13) Greenwood, J. A. and P. Williamson, J. B., 1966, "Contact of Nominally Flat Surfaces," *Proceedings of the Royal Society London*, Vol. A 295, pp. 300-319.
- (14) Yu, T. K., Yu, C. C. and Orłowski, M., 1993, "A Statistical Polishing Pad Model for Chemical-Mechanical Polishing," *IEEE International Devices Meeting*, paper 93-865, pp. 865-868.
- (15) Zhang, F., Busnaina, A. A. and Ahmadi, G., 1999, "Particle Adhesion and Removal in Chemical Mechanical Polishing and Post-CMP Cleaning," *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 146, No. 7, pp. 2665-2669.
- (16) Onions, R. A. and Archard, J. F., 1973, "The Contact of Surfaces Having a Random Structure," *Journal of Physics, D: Applied Physics*, Vol. 6, pp. 289-304.
- (17) Leung, M., Hsieh, C. K. and Goswami, D. Y., 1997, "Application of Boltzmann Statistical Mechanics in the Validation of the Gaussian Summit-Height Distribution in Rough Surfaces," *Journal of Tribology*, Vol. 119, pp. 846-850.
- (18) Shan, L., 2000, "Mechanical Interactions at the Interface of Chemical Mechanical Polishing," *Ph.D. Thesis*, Georgia Institute of Technology.
- (19) Sethian, J. A., 1999, *Level Set Methods and Fast Marching Methods*, Cambridge University Press.
- (20) West, A. C., Mayer, S. and Reid, J., 2001, "A Superfilling Model that Predicts Bump Formation," *Electrochemical Solid State Letters*, Vol. 4, No. 7, pp. C50-C53.
- (21) Cao, Y., Taephaisitphongse, P., Chalupa, R. and West, A. C., 2001, "Three-Additive Model of Superfilling of Copper," *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 148, No. 7, pp. C466-C472.
- (22) Josell, D., Wheeler, D., Huber, W. H. and Moffat, T. P., 2001, "Superconformal Electrodeposition in

- Submicron Features," *Physical Review Letters*, Vol. 87, No. 1, pp. 016102-1~016102-4.
- (23) Moffat, P., Wheeler, D., Huber, W. H. and Josell, D., 2001, "Superconformal Electrodeposition of Copper," *Electrochemical Solid State Letters*, Vol. 4, No. 4, pp. C26~C29.