

# 화학기계적 연마 프로세스의 동적 열전달 모델링 연구

석 종 원\*

(2003년 11월 17일 접수, 2004년 3월 24일 심사완료)

## A Dynamic Thermal Modeling of Chemical Mechanical Polishing Process

Jongwon Seok

**Key Words :** CMP(화학기계적 연마), Dynamic Thermal Modeling(동적 열전달 모델링), Material Removal Model(물질제거모델), Transient Thermal Analysis(과도 열전달 해석)

### Abstract

This paper describes a dynamic thermal model for a representative dual axis rotational Chemical-Mechanical Polishing (CMP) tool. The model is one-dimensional but configured in the two-dimensional space and consists of three sub-models (pad, wafer and slurry fluid), with the first and the second that are time-dependent heat conduction-convection models with linear stationary (wafer) and nonlinear moving (pad) boundary conditions, and the last one that is a heat transport-convection model (slurry fluid). The modeling approach is validated by comparing the simulation results with available experimental data.

### 기호설명

$b_p, b_w$  : 패드 및 웨이퍼의 두께  
 $c_p^{(a)}, c_p^{(f)}, c_p^{(p)}, c_p^{(w)}$  : 대기, 슬러리, 패드 및 웨이퍼의 정압 비열 (specific heat at constant pressure)  
 $g_p(x, y), g_w(x, y)$  : 패드 및 웨이퍼의 열원함  
 $H()$  : 헤비사이드 계단함수 (Heaviside Step Function)  
 $h$  : 대류 열전달 계수 (convection heat transfer coefficient)  
 $h_a, h_f$  : 대기 및 슬러리의 대류 열전달 계수  
 $k$  : 열전도 계수 (thermal conductivity)  
 $k_a, k_f, k_p, k_w$  : 대기, 슬러리, 패드 및 웨이퍼의 열전도 계수  
 $L$  : 특성 길이 (characteristic length)  
 $\dot{m}_f$  : 슬러리의 단위 길이당의 질량유동률  
 $Nu$  : Nusselt 수  
 $P_{ext}$  : 웨이퍼에 가해지는 외부압력  
 $Pr$  : Prandtl 수

$Pr_a, Pr_f$  : 대기 및 슬러리의 Prandtl 수  
 $q_f$  : 체적 유동률 (volumetric flow rate)  
 $q_{loss}^{(p)}, q_{loss}^{(w)}$  : 패드 및 웨이퍼의 열손실  
 $R_0$  : 패드 중심과 웨이퍼 중심의 직선거리  
 $Re_t$  : Reynolds 수  
 $R_p, R_w$  : 패드 및 웨이퍼의 일차원 상사길이  
 $T_f, T_{in}, T_0$  : 슬러리 온도장 (temperature field), 슬러리 입구단 및 각 부의 초기 온도  
 $T_p, T_w, T_\infty$  : 패드, 웨이퍼 및 자유흐름 (free stream)의 온도장  
 $x$  : 패드에 고정된 좌표계  
 $v_0$  : 웨이퍼 중심점의 패드에 대한 선형 상대속도  
 $\beta_p, \beta_w$  : 패드와 웨이퍼에 작용하는 열저항 계수 (thermal resistance coefficient)  
 $\Gamma_f, \Gamma_\infty$  : 슬러리 및 자유흐름에 노출된 패드의 부분영역  
 $\mu$  : 점성 계수 (viscosity)  
 $\nu$  : 동점성 계수 (kinematic viscosity)  
 $\nu_a, \nu_f$  : 대기 및 슬러리의 동점성 계수  
 $\rho$  : 밀도  
 $\rho_a, \rho_f, \rho_p, \rho_w$  : 대기, 슬러리, 패드 및 웨이퍼의 밀도

\* 회원, 삼성전자 주식회사  
 시스템가전총괄 가전연구소 요소기술그룹  
 442-742 경기도 수원시 영통구 매탄 3 동 416  
 E-mail : Jongwon.seok@samsung.com  
 TEL : (031) 218-5235 FAX : (031) 218-5196

- $\omega_0$  : 패드의 회전 각속도  
 $\xi$  : 웨이퍼에 고정된 좌표계

## 1. 서론

근래의 급격한 정밀 기계기술의 발달로 촉발된 초 정밀 연마는 정밀 기계부품의 가공에서부터 광학 렌즈의 분야에 걸쳐 현재까지 많은 연구가 수행되어 왔다. 이들 응용분야의 대표적인 반도체 소자 가공의 필수적인 공정인 화학-기계적 연마 (Chemical Mechanical Polishing; CMP) 는 금속 배선 형성시 텅스텐, 구리 등과 같은 금속의 상감법(damascene) 연마가 도입된 이래로 점점 더 중요한 기초 기술로 인식되기 시작했다. 한편 계속적인 반도체 소자의 고 집적화 요구에 따라 다층 배선 기술이 중요한 과제로 대두 되면서 칩 규모 (chip-scale) 뿐 아니라 웨이퍼 규모 (wafer-scale)에 걸친 지역적 및 광역적 평탄화 기술 (local and global planarization technique)의 확보가 반도체 전체 공정의 성패를 가름하는 중요한 기반기술이 되었다.<sup>(1)</sup> 이에 따라 최근까지 이러한 반도체의 초정밀 연마공정을 이해하기 위한 수학적 모델링 연구가 활발히 진행 되었는데 가장 대표적으로는 연마모델 (abrasive model)로써 각각의 연마인자들을 기하학적 통계를 이용하여 접근한 모델링 기법<sup>(2)</sup> 과 접촉역학 (contact mechanics)과 프레스톤의 물질제거식<sup>(3)</sup>을 균질화 과정<sup>(4)</sup>을 통해 다양한 규모로 확장시킨 모델링 기법<sup>(5,6)</sup>이 있으며 이외에도 CMP 메카니즘을 유체가 연마면에 충돌하는 과정으로 단순화하여 해석한 침식 모델 (erosion model)<sup>(7)</sup>과 슬러리 내의 연마입자가 덩어리져서 생기는 웨이퍼 표면의 흠집 및 초음파등을 이용한 이들 슬러리의 응집된 연마입자에 대한 분산도 향상에 대한 연구<sup>(8)</sup> 등 현재까지 많은 연구가 수행이 되고 있다. 한편으로 금속의 연마과정에는 기계적 연마뿐 아니라 화학적 연마도 물질제거율을 특징짓는 중요한 인자로 작용하기 때문에 이를 지배하는 웨이퍼 표면의 온도특성에 대한 연구가 중요한 분야로 대두 되었다.<sup>(9)</sup> 그럼에도 불구하고 현재까지 이에 대한 연구는 매우 드물게 이루어 지고 있는 실정이다. White 등<sup>(10)</sup>은 최근에 CMP 과정에 대한 온도의 영향을 연구하기 위해 집중 요소 모델 (lumped-element model)을 제안하였다. 또한 이를 전기회로로 상사하여 수치적인 시뮬레이션을 행하는 한편 실험을 통하여 이의 타당성을 입증하였다. 이 모델은 CMP의 대략적인 열적 거동을 간단히 예측하기 위해서는 유익하다고 판단되지만 해석공간의 차원이 실제 상황을 표현 하기에는 부족하기 때문에 웨이퍼 표면의 온도 분포등을 예측하

기에는 다소 부적합하다. 따라서 본 연구에서는 웨이퍼 표면의 온도 분포등을 예측하고 이를 이용하여 공정의 주요 개선점을 도출하기 위하여 웨이퍼, 패드 및 슬러리의 주된 물리적 차원을 포함하는 CMP 공정의 새로운 열전달 모델을 제안하고자 한다.

## 2. CMP 공정의 열전달 모델링

본 연구에서 제안하는 열전달 모델은 크게 일차원의 세가지 세부모델들 (웨이퍼, 패드 및 슬러리)이 이차원 해석공간에 구성이 되어 있다 (Figs. 1,2 참조). 웨이퍼와 패드의 열원은 각각 시간 의존적인 열 전도-대류 특성을 갖는 선형 고정 열원 (linear stationary heat source)과 비선형 운동 열원 (nonlinear moving heat source)으로 모델링 하였으며 슬러리의 열전달은 열 이송-대류 특성을 갖도록 모델링 하였다. 한편, 본 연구에서는 웨이퍼와 패드에 평행한 방향의 열 전도는 수직 방향에 비해 상대적으로 적기 때문에 무시하였으며 이는 CMP 기구의 Biot 수<sup>(11)</sup>가 매우 작게 나타나는 구조적으로 얇은 기하학적 특징과 슬러리의 평균 회전속도가 열 전도에 비해 매우 크기 때문에 가능하다. 따라서 본 연구에서는 웨이퍼, 패드 및 슬러리의 두께방향의 온도 구배는 무시할 수 있다고 가정하였다. 한편 Fig. 2에 표시한 모델에서  $\Gamma_r$ 와  $\Gamma_w$ 는 각각 슬러리와 대기 자유 흐름에 노출된 부분 영역들을 표시하며  $R_w$ 는 웨이퍼의 전체 직경,  $\omega_0$ 와  $v_0$ 는 각각 패드의 회전 각속도와 웨이퍼 중심점의 상대 속도를 나타낸다. 또한  $T_w$ ,  $T_p$ ,  $T_s$ 와  $T_f$ 는 각각 자유흐름, 웨이퍼, 패드와 슬러리의 온도들을 나타내며 이들은 모두 열적인 등방성을 갖는다고 가정하였다.

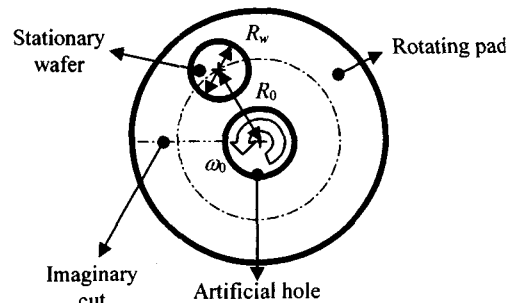


Fig. 1 Plan view of a dual axis rotational CMP tool under consideration

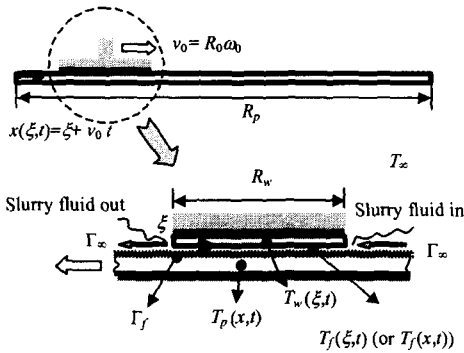


Fig. 2 Schematic figure of thermal CMP model under consideration

2.1 열전달 모델링에 필요한 추가 가정

- 본 연구에서 수행하는 CMP 공정의 동적 열전달 모델링을 위한 추가적인 가정들은 다음과 같다.
- (1) 슬러리는 웨이퍼의 앞단 (leading edge)에서 분사되어 웨이퍼와 패드 사이로 유입된다.
- (2) 슬러리의 고형성분의 비율은 매우 작기 때문에 본 해석에서는 이의 영향을 무시한다.
- (3) 출구단에서 유출된 슬러리의 구체적 거동은 본 연구 수행에 있어 고려의 대상에서 제외한다.
- (4) 패드와 슬러리, 그리고 슬러리와 웨이퍼 사이에서 일어나는 열교환에서 패드 및 웨이퍼에 대한 슬러리의 역할은 열원으로 취급하여 해석한다.
- (5) 입력되는 열원은 웨이퍼와 패드에 고르게 분포되어 유입된다.
- (6) 웨이퍼와 패드에서 유출되는 열손실은 열저항 계수를 도입하여 계산하며 전체 해석공간의 열손실을 보정하는 목적으로 사용된다. 이때 접촉면의 온도는 자유 흐름의 온도와 같다고 가정한다.

2.2 패드의 과도 열전달 모델

패드 표면의 고정된 한점을 기준으로  $x$  축을 위치시키고 (Fig. 2 참조) 패드의 일차원 상사 길이를  $R_p$ 로 표시하고 패드와 웨이퍼의 중심거리를  $R_0$ 로 표시한다. 이때 패드의 열전달 모델은 다음과 같은 일차 미분방정식으로 특성화시킬 수 있다.

$$\rho_p c_p^{(p)} \frac{\partial T_p(x,t)}{\partial t} = \frac{1}{b_p} g_p(x,t) \quad (1)$$

여기서  $T_p(x,t)$ 는 패드의 온도장 (temperature field)이고  $\rho_p$ 와  $c_p^{(p)}$ 는 각각 패드의 밀도와 비열을 나타내며  $b_p$ 는 패드의 두께를 표시한다. 또한  $g_p(x,t)$ 는 패드에 유입되는 열원을 나타내며 다음 식과 같이 표시할 수 있다.

$$g_p(x,t) = h_f \{ T_f(x,t) - T_p(x,t) \} \times \{ H(x - v_0 t) - H(x + R_w - v_0 t) \} \quad (2)$$

여기서  $h_f$ 는 슬러리의 흐름에 따른 대류 열전달 계수(convective heat transfer coefficient)를 나타내며  $T_f$ 는 슬러리의 두께에 대해 평균한 온도장을 표시하며  $H(\cdot)$ 는 헤비사이드 계단함수를,  $b_p$ 는 패드의 두께를 표시한다.

2.3 웨이퍼의 과도 열전달 모델

패드에 대해 상대적으로 움직이는 웨이퍼의 운동을 고려하기 위해 원점이 웨이퍼 끝단에 고정되어 있는 운동 좌표계  $\xi$ 를 도입하면 (Figs. 1과 2 참조) 웨이퍼의 과도 열전달 모델은 다음과 같이 표시된다.

$$\rho_w c_p^{(w)} \frac{\partial T_w(x,t)}{\partial t} = \frac{1}{b_w} g_w(x,t) \quad (3)$$

여기서  $T_w(x,t)$ 는 웨이퍼의 온도장을 나타내며  $\rho_w$ 와  $c_p^{(w)}$ 는 각각 웨이퍼의 밀도와 비열을, 그리고  $b_w$ 와  $g_w(x,t)$ 는 각각 웨이퍼의 두께와 열원항을 나타낸다. 이때 열원항은

$$g_w(\xi,t) = h_f \{ T_f(\xi,t) - T_w(\xi,t) \} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다.

2.4 슬러리 유동의 과도 열전달 모델

이전에 설명한 바와 같이 CMP 과정에서는 웨이퍼는 패드에 대면하여 적절한 압력으로 눌러지며 이때 슬러리에 포함된 연마제는 여러가지 화학적 조성물질들과 섞여 웨이퍼와 패드의 접촉면 사이로 유입된다. 이때 슬러리 용액의 역할은 주로 웨이퍼 표면을 부드럽게 하거나 금속을 이온화 시켜 직접적인 연마작용을 일으키는 역할을 한다고 알려져 있다.<sup>(1)</sup>

본 연구에서 수행한 CMP 공정의 열전달 해석에서 슬러리는 상대 운동을 하는 두개의 판, 즉 패드와 웨이퍼 사이로 일정한 유량으로 유입되는 유체로 모델링하였다. 이때 유체 온도의 국부적인 시간 변화율은 공간상의 온도변화에 대해 상대적으로 작기 때문에 무시하였다. 한편 웨이퍼에 고정되어 있는 운동 좌표계  $\xi$ 는 관측자에 또한 고정되어 있다고 가정한다. 또한 유체의 열전달 모델링을 위한 검사체적(control volume)은 웨이퍼에 고정되어 있으며 충분히 발달된 층류유동 (fully developed laminar flow)으로 가정하였다 (Fig. 3 참조). 이러한 가정하에서 슬러리의 유도에 따른 열전달 모델은 다음과 같은 미분 방정식과 경계조건으로 표현할 수 있다.

$$m_f c_p^{(f)} \frac{\partial T_f(\xi,t)}{\partial \xi} - 2h_f T_f(\xi,t) \quad (5)$$

$$= -h_f (T_w(\xi,t) + T_p(\xi,t)) \quad (6)$$

$$T_f(\xi,t) \Big|_{\xi=R_w} = T_{R}$$

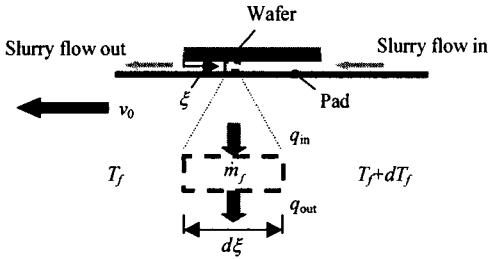


Fig. 3 Element of thermal model for slurry fluid flow

여기서  $\dot{m}_f$ 는 단위 길이당 유체의 질량유동량이며 Fig. 3 과 같은 조건에서는 양의 값 (positive value) 을 갖는다. 한편,  $c_p^{(f)}$ 는 유체의 정압 비열을 나타내며  $T_{Rf}$ 는 슬러리의 초기 유입온도를 나타낸다.

### 3. 해석 결과 및 컴퓨터 시뮬레이션

#### 3.1 온도장 해석 결과

식 (1)- (6) 을 이용하여 얻은 패드, 웨이퍼 및 슬러리 유동의 온도장에 대한 준 정상상태 (quasi-steady state) 해들은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$T_\zeta(x, t)|_{t=t_f} = \frac{1}{\rho_\zeta c_p^{(\zeta)}} \int_{t_{f-1}}^{t_f} g_\zeta(x, \tau) d\tau + T_\zeta(x, t)|_{t=t_{f-1}} \quad (7)$$

$$T_f(\xi, t)|_{t=t_f} = e^{2\nu_f(R_f - \xi)} [T_{Rf}(t)|_{t=t_f} e^{-2\nu_f(R_f - \xi)} - \nu_f \int_\xi^{R_f} T_{wp}(\sigma, t)|_{t=t_f} e^{-2\nu_f\sigma} d\sigma] \quad (8)$$

여기서

$$\zeta = p, w \text{ 이고}$$

$$\nu_f = \frac{h_f}{\dot{m}_f c_p^{(f)}} \quad (9)$$

$$T_{wp}(x, t) = T_w(x, t) + T_p(x, t) \quad (10)$$

이다.

#### 3.2 대류 열전달 계수의 계산

CMP 공정시 패드와 웨이퍼 사이를 흐르는 슬러리의 흐름은 두 평판 사이를 흐르는 유동으로 상사 시킬 수 있다. 이때 표면의 온도구배를 나타내는 무차원 인자인 Nusselt 수는 웨이퍼 및 패드 표면에서 일어나는 대류 열전달을 나타내는데 중요한 요소로 이해할 수 있다. 점성을 무시한 균질한 유체의 비압축, 정상유동을 가정하면 전체 평판에 대해 평균한 Nusselt 수는 다음과 같이 근사식으로 표현할 수 있다.<sup>(11)</sup>

Table 1 Parameter values used in the computer

Par.	Val.	Unit	Par.	Val.	Unit
$R_0$	0.152	m	$R_p$	0.951	m
$b_p$	1.270	mm	$b_w$	0.730	mm
$R_w$	0.203	m	$v_0$	0.951	m/s
$\rho_a$	1.177	kg/m <sup>3</sup>	$\rho_p$	1100	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_w$	2330	kg/m <sup>3</sup>	$\rho_f$	1040	kg/m <sup>3</sup>
$c_p^{(a)}$	1005	J/kg°C	$c_p^{(p)}$	1130	J/kg°C
$c_p^{(w)}$	712	J/kg°C	$c_p^{(f)}$	4010	J/kg°C
$k_a$	0.026	W/m°C	$k_p$	0.02	W/m°C
$k_w$	148	W/m°C	$k_f$	0.608	W/m°C
$Pr_a$	5	-	$Pr_f$	10	-
$\nu_a$	1.57	10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s	$\nu_f$	1.86	10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s
$P_{ext}$	231.1	W	$d_p$	0.492	m
$q_f$	4.17	mL/s	$T_0$	23.5	°C
$T_\infty$	23.5	°C	$T_{Rf}$	23.5	°C
$\beta_p$	0.001	°C/W	$\beta_w$	0.001	°C/W
$h_a$	7.5	W/m <sup>2</sup> °C	$h_f$	2025	W/m <sup>2</sup> °C

simulation

$$Nu = hL/k = 0.664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3} \quad (11)$$

여기서  $h$ 는 대류 열전달 계수이고  $L$ 은 특성길이 (characteristic length),  $k$ 는 열전도 계수,  $Re_L$ 와  $Pr$ 는 각각 Reynolds 수와 Prandtl 수를 나타낸다. 따라서 슬러리의 흐름에 따른 대류 열전달을 계산하기 위한 대류 열전달 계수는 식 (10)에서 보는 바와 같이 모든 식의 우측에 있는 모든 인자들을 알 수 있다면 쉽게 구할 수 있다.

#### 3.3 열 손실 해석

CMP 공정중에 웨이퍼는 뒷면이 얇은 캐리어 필름 (carrier film)과 접하며 연마면, 즉 앞면은 회전하는 원형판에 붙어있는 연마 패드에 접하게 된다. 이때 패드에서 원형판으로, 그리고 웨이퍼에서 캐리어 필름으로 유출되는 열량은 각각 다음과 같이 열저항 계수를 도입하여 나타낼 수 있다.

$$q_{loss}^{(\zeta)}(x, t) = \frac{\beta_\zeta k_\zeta}{b_\zeta} \{T_\zeta(x, t) - T_\infty\}, \quad \zeta = p, w \quad (12)$$

여기서  $b_p$ 와  $b_w$ 는 각각 패드에서 원형판으로, 그리고 웨이퍼에서 캐리어 필름으로 흐르는 열 유동에 저항하는 비율을 나타내는 열 저항계수이다. 한편 열 저항은 열전도에 저항하는 표면의 특성을 의미하며 열원의 원동력 (driving potential)과 이에 대한 열 전달율의 비율을 나타낸다.

3.4 컴퓨터 시뮬레이션

실제 CMP 공정의 동적 열전달 해석을 통한 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 현재 얻을 수 있는 가용 인자들을 모두 사용하였으며<sup>(10)</sup> 웨이퍼와 패드의 접촉시 발생하는 마찰열은 접촉면에 고르게 분포되어 유입된다고 가정하였다. 이때 사용한 평균 마찰계수는 0.18 이며<sup>(10)</sup> 이는 웨이퍼에 작용하는 외부압력이 균일하다고 가정하여 실험적으로 구한 값이다. 또한 패드와 웨이퍼의 마찰에 의해 발생하는 열원은 각각에 균등한 비율로 유입된다고 가정하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 사용한 인자 및 조건들을 Table 1 에 나타내었으며 상기 조건에서 0.01 초의 간격으로 200 초 동안의 동적 열전달 모델을 Matlab<sup>TM(12)</sup> 을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션 하였다.

4. 결과 분석 및 고찰

Fig. 4 에 도시한 바와 같이 웨이퍼의 중심에 고정된 직교 좌표계 (x,y)를 기준으로 패드위의 좌표  $x=0, y=0, \pm 0.75R_w/2, \pm 0.50R_w/2, \pm 0.25R_w/2$  을 통과하는 각 점들의 온도분포를 컴퓨터 시뮬레이션으로 구하였다. 이들 점들은 각각의 패드의 중심점을 기준으로 구성되는 일단의 원형 일차원 좌표  $\xi$  의 y 축상의 교차점들을 대표로 표시한 것이다. 이때 좌표축  $\xi$  상의 값들은 실제 곡선길이를 표시함에 유의 하여야 한다.

Fig. 5 (a), (b) 는 각각 Fig. 4 에서 설명한 웨이퍼에 붙은 좌표계, 즉 웨이퍼의 끝단 (trailing edge)에서 시작하여 웨이퍼의 앞단 (leading edge)에서 끝나며  $y=0$  를 지나는 동심원상의 좌표계를 기준으로 웨이퍼와 슬러리의 온도변화를, Fig. 5 (c) 는 웨이퍼상의  $y=0$  점을 지나는 패드상의 1 차원 좌표계를 기준으로 패드의 온도변화를 시간축과 공간축을 포함하는 3 차원 좌표로 도시한 것이다. 이때 Fig. 5 (a), (b)의 공간좌표축의 원점은 웨이퍼의 끝단 (trailing edge)을 의미하고 Fig. 5 (c)의 공간좌표축의 원점은  $y=0$  및 웨이퍼의 끝단을 지나는 점을 의미하는 것에 유의한다. 한편 Fig. 5 (d) 는  $y=0$  및 웨이퍼의 끝단을 지나는 점에서의 웨이퍼,

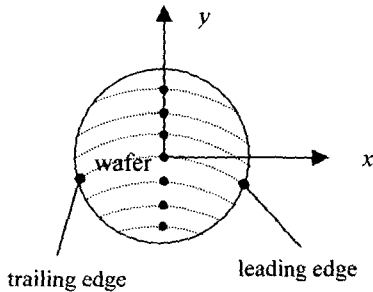


Fig. 4 Coordinate system attached to the wafer center (wafer top view)

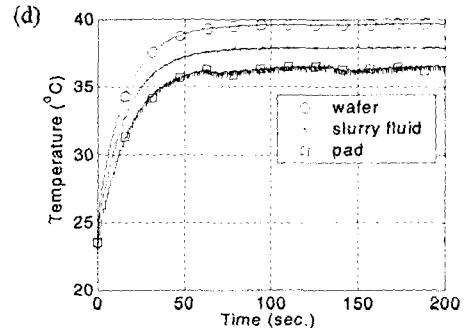
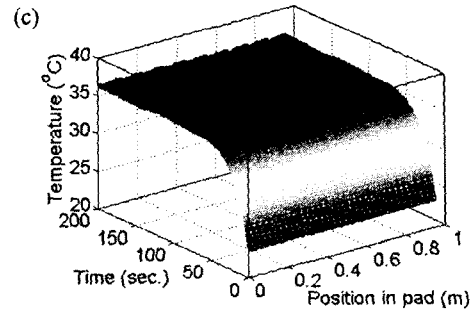
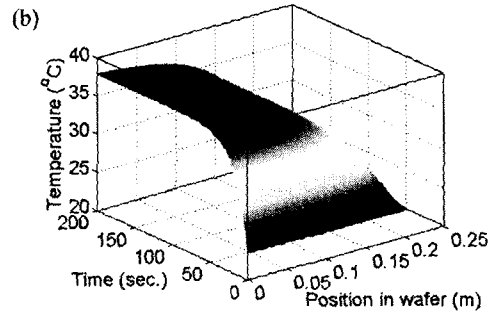
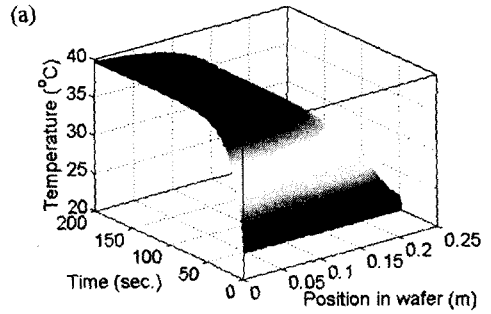


Fig. 5 Plots of temperature variations at  $y=0$  and the trailing edge

- (a) 3-D plot of temperature variation on the wafer,
- (b) 3-D plot of temperature variation of slurry fluid,
- (c) 3-D plot of temperature variation on the pad,
- (d) 2-D time plot of all three.

슬러리 및 패드의 시간에 따른 온도변화를 2 차원 좌표에 도시한 그림이다. 이들 그림에서 보여주는 바와 같이 웨이퍼 상의 온도는 패드나 슬러리의 온도에 비해 상대적으로 높은 값들을 가지며 슬러리가 웨이퍼 앞단에서 끝단으로, 그리고 비록 상대적으로 적은 양이지만 웨이퍼에서 패드로 열을 수송(transport)하는 역할을 함을 알 수 있다. 이때 보여지는 패드 온도의 작은 주기적 변화들은 패드의 주기적 회전 때문에 가열과 냉각의 반복적인 현상 때문에 생기는 것으로써 이의 크기는 패드로부터 발생하는 열손실에 비례한다. 이러한 현상은 패드의 열전도 특성이 회전 주기에 비해 상대적으로 낮은 시상수 (time constant)<sup>(13)</sup> 를 갖기 때문에 나타난다.

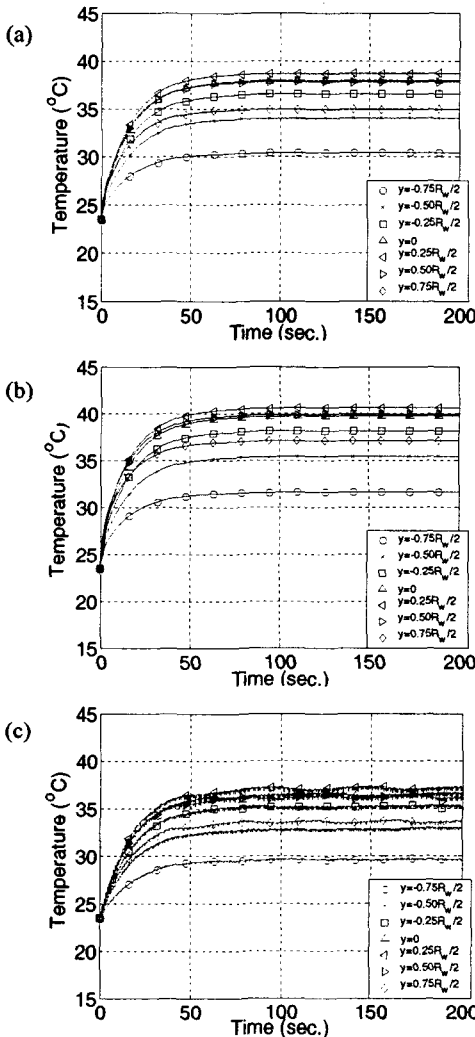


Fig. 6 Highest temperature variations with time at different locations of the wafer (a) wafer, (b) slurry fluid, (c) pad

한편 이들 온도변화는 CMP 공정중의 금속재의 물질제거율 (MRR)에 큰 영향을 주게 되는 데 이는 높은 접촉력 (contact force)와 빠른 선속도를 갖는 웨이퍼의 최외곽선 근처에서 역시 높은 온도가 발생하고 이는 이 근처에서 높은 물질제거율을 야기한다. 또한 패드에서 관찰할 수 있는 주기적 형태의 온도변화는 초기 단계에 있어서 상대적으로 큰 변화율을 나타내기 때문에 웨이퍼의 국부적인 비 균일한 물질제거율에 영향을 준다고 생각된다. 따라서 연마 시간, 슬러리 종류, 슬러리 분사 위치 및 단순 마찰에 의한 기계적인 연마특성 뿐 아니라 온도변화 역시 웨이퍼의 CMP 연마특성을 결정 짓는 중요한 요인으로 작용함을 알 수 있다. 한편 CMP의 하나의 전형적인 조건에서 계산된 결과를 보여주는 아래 그림에서 보여주는 바와 같이 CMP 시작후 약 100 초 동안 급격한 온도변화가 있음을 알 수 있는데 이는 실제 CMP 공정이 대략 1-2 분내에서 이루어 지기 때문에 이러한 온도의 과도 응답은 전체 연마 특성에 반드시 고려 되어야만 하는 특성임을 알 수 있다.

Fig. 6 (a)-(c) 는 각각 웨이퍼 끝단을 좌표 동심원들이 접하는 점들에 대해 웨이퍼, 슬러리 및 패드의 시산에 따른 온도 변화를 도시한 그림이다. 이들 그림에서 보는 바와 같이  $y=0.25R_w/2$  와  $y=0.5R_w/2$  사이의 영역에서 가장 높은 온도분포를 보여주며  $y=0.75R_w/2$  에서는 비교적 낮은 온도분포를 보여준다. 이는 웨이퍼의 회전을 정지시키고 수행하는 금속의 CMP 공정에서는 중앙 상단에서 물질 제거율의 파동식 (wave-like) 변화가 나타남을 보여준다.

Fig. 7 은 실험적으로 측정된 패드상의 온도변화와 이를 집중 질량계로 모델링하여 수행한 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 White 등<sup>(10)</sup> 의 논문에서 발췌한 것이다. 본 연구결과로 얻은 Fig. 6 (c) 와 매우 유사한 결과를 보여주며 이는 본 동적 모델링이 정량적으로 타당함을 보여준다.

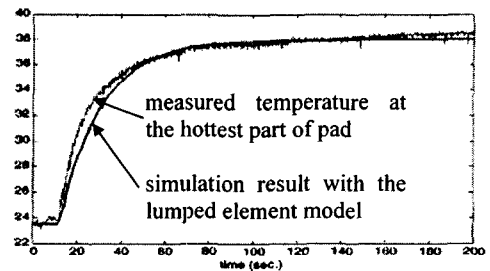


Fig. 7 Experimentally measured pad temperatures and their comparison to the computed temperatures with a lumped-element model, taken from White et al.<sup>(10)</sup>

### 5. 결론

본 연구에서는 현재 금속의 CMP 공정에 널리 사용되고 있는 이중축 회전형 CMP 기구 (dual axis rotational CMP tool)의 열전달 특성을 고려하여 수학적으로 모델링하였다. 본 수학적 모델은 이차원 공간상에 전개한 일차원 등방성 모델이며 이때 주된 해석부로는 웨이퍼, 패드 및 슬러리를 포함한다. 본 연구에서 제안한 모델은 CMP 공정중 나타나는 열적인 효과들에 대한 기본적인 이해를 돕기 위한 것이며 이 모델을 이용하여 얻은 결과에서부터 CMP 공정중의 과도 열전달 특성 뿐 아니라 물질 제거율이 기계적인 마찰에 의한 연마작용 외에 열적인 온도분포 특성에도 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 한편 본 연구에서 제안한 모델을 컴퓨터 시뮬레이션 한 결과는 실험결과와 잘 일치하며 따라서 본 동적 열전달 모델은 추후 기계적 연마과정을 설명하는 접촉모델과 연계하여 화학-기계적 특성들을 모두 고려하는 금속의 연마과정을 잘 묘사하는 모델을 개발하는 데 유용하게 사용될 수 있다.

### 참고문헌

(1) Steigerwald, J. M., Muraka, S. P. and Gutmann, R. J., 1997, *Chemical Mechanical Planarization of Microelectronic Materials*, New York, John Wiley & Sons.  
 (2) Luo, J. and Dornfeld, D. A., 2001, "Material Removal Mechanism in Chemical Mechanical Polishing: Theory and Modeling," *IEEE Trans. Semicon. Manufact.* Vol. 14, No. 2, pp. 112~133.  
 (3) Preston, F., 1927, "The Theory and Design of Plate

Glass Polishing Machines," *J. Soc. Glass Technol.* Vol. 11, pp. 214~256.  
 (4) 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.  
 (5) 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.  
 (6) 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.  
 (7) Runnels, S. R., Eyman, L. M., 1998, "Tribology Analysis of Chemical-Mechanical Polishing," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 141, No. 6, pp. 1698~1701.  
 (8) Cho, S. H., Kim, H. J., Kim, H. Y., Seo, H. D., Kim K. J. and Jeong, H. D., 2001, "A Study on the Improvement of the Slurry Dispersibility in CMP," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 25, No. 10, pp. 1535~1540.  
 (9) Kwon, D. H., Kim, H. J., Jeong, H. D., Lee, E. S., Shin, Y. J., 2001, "A Study of Temperature Behavior and Friction Force Generated by Chemical Mechanical Polishing," *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Fall Meeting*, pp. 939~942.  
 (10) White, D., Melvin, J. and Boning, D., 2003, "Characterization and modeling of dynamic thermal behavior in CMP," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 150, No. 4, pp. G271~G278.  
 (11) Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 1985, *Introduction of Heat Transfer*, New York, John Wiley & Sons.  
 (12) Mathworks, *Matlab™ Version 6.1*, 2001, Mathworks Inc.  
 (13) Bejan, A., 1988, *Advanced Engineering Thermodynamics*, New York, John Wiley & Sons.