

변분근사법을 이용한 FAM 과정의 접촉응력 해석

석 종 원*

(2003년 12월 2일 접수, 2004년 5월 31일 심사완료)

A Contact Stress Analysis in a FAM Process Using Variational Approximation Procedure

Jongwon Seok

Key Words : FAM(자유연마입자가공), CMP(화학기계연마), Contact Stress(접촉응력), Variational Approximation Procedure(변분근사법), Airy Stress Function(Airy 응력함수)

Abstract

A variational approximation procedure is introduced to study the contact stresses between a representative asperity and a feature generally happening in superfinishing processes such as FAM. After a description of the model under consideration is presented, a system of governing equation for the model is derived followed by the assumptions made in order to make progress in model development. Final computation is made to evaluate contact stresses on an elastic asperity tip in small scale in size and a computer simulation is performed for detailed surface profile variations on a representative feature. Numerical results are presented along with a discussion of the conclusions that can be drawn from this analysis.

————— 기호설명 —————

$a_f, b_f, c_f, d_f, h_f, R_f$: 피연마면 돌기(feature)의 형상 인자들
 a_n, b_n, c_n, d_n : Airy 응력함수의 우함수 계수들
 E : 돌기의 영률(Young's modulus)
 f_0 : 한개의 연마입자에 가해지는 외력
 f_n : Airy 응력함수의 n 번째 우함수
 (\bar{i}, \bar{j}) : Cartesian 좌표계 (x, y) 의 단위벡터
 N : 도입한 형상함수의 최대수
 \bar{n} : 물질의 표면에 수직한 단위벡터
 \bar{n}_f : 피처(feature)의 표면에 수직한 단위 벡터
 r_0 : 돌기선단의 반경
 (r, θ) : 극좌표계

$(\bar{r}, \bar{\theta})$: 극좌표계 (r, θ) 의 단위벡터
 S : 물질의 면적
 S_N : 견인벡터 \bar{t} 가 규정된 부분의 물질표면
 S_C : 변위벡터 \bar{u} 가 규정된 부분의 물질표면
 S_{TOTAL} : 돌기의 전체 표면
 S_{CONT} : y 방향의 변위 \bar{u}_y 가 규정된 부분의 물질 표면
 \bar{t} : 표면에 규정된 견인벡터(traction vector)
 (x, y) : Cartesian 좌표계
 \bar{u} : 변위벡터
 \bar{u} : 물질표면에 규정된 변위벡터
 V : 물질의 부피
 ∂ : 편미분 연산자
 δ : 변분연산자
 \bar{T} : 물질 수직면에 대한 견인벡터
 $(T_x^{(n)}, T_y^{(n)}), (T_r^{(n)}, T_\theta^{(n)})$: 물질 수직면에 대한 $(x, y), (r, \theta)$ 방향의 견인벡터
 $(u_x, u_y), (u_r, u_\theta)$: $(x, y), (r, \theta)$ 방향의 변위벡터
 $u_r^{(a,n)}, u_r^{(b,n)}$: u_r 을 구성하는 상수성분들
 $u_\theta^{(a,n)}, u_\theta^{(b,n)}$: u_θ 을 구성하는 상수성분들

* 회원, 중앙대학교 기계공학부
 E-mail : seokj@alum.rpi.edu
 TEL : (031) 215-3319 FAX : (031) 215-3319

- ∇ : 구배연산자
- Δ : 표본거리 (sampling distance)
- Δ_x : 시뮬레이션에 사용된 이동거리의 단위 증가분
- $\bar{\epsilon}$: 변형량텐서
- $\epsilon_{rr}, \epsilon_{r\theta}, \epsilon_{\theta\theta}$: 변형량텐서의 극좌표 이차원 성분들
- $\epsilon_{xx}, \epsilon_{xy}, \epsilon_{yy}$: 변형량텐서의 직교좌표 이차원 성분들
- $\bar{\tau}$: 응력텐서
- $\tau_{rr}, \tau_{r\theta}, \tau_{\theta\theta}$: 응력텐서의 극좌표 이차원 성분들
- $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$: 응력텐서의 직교좌표 이차원 성분들
- $\tau_{rr}^{(a,n)}, \tau_{rr}^{(b,n)}$: τ_{rr} 을 정의하기 위한 상수성분들
- $\tau_{r\theta}^{(a,n)}, \tau_{r\theta}^{(b,n)}$: $\tau_{r\theta}$ 을 정의하기 위한 상수성분들
- ν : 물질의 푸아송비 (Poisson's ratio)
- χ : 평면변형률에 대한 Airy 응력함수
- χ_n : Airy 응력함수 χ 의 n 번째 Fourier 성분해
- σ_c : 피쳐의 표면에 수직인 접촉응력

1. 서론

변분법(calculus of variation)은 지난 몇 세기에 걸쳐 수학의 가장 중요한 한 분야로 인식 되어 왔으며 이에 대한 연구⁽¹⁻⁴⁾ 또한 활발히 진행되어 왔다. 특히 자연경계조건(natural-type boundary conditions)의 홀로노믹계(holonomic system)뿐만 아니라 제한경계조건(constraint-type boundary conditions)의 홀로노믹계나 회전이 포함된 비홀로노믹계(nonholonomic system)를 d'Alembert 원리⁽⁵⁾를 이용하여 확장시킨 확장변분원리^(1,6)는 탄성체의 변형 및 거동해석에 많이 이용되고 있다.

현재 보편적으로 사용되는 정밀연마프로세스의 하나인 자유연마입자가공(Free Abrasive Machining; FAM)⁽⁷⁾이나 특히 FAM 과 원리적으로 유사한 화학기계적 연마가공(Chemical-Mechanical Polishing; CMP)⁽⁸⁾에서 피연마물은 회전하는 패드(pad)를 주어진 일정 압력으로 누르는 한편 마모입자들(abrasive particles)을 다량 포함하는 슬러리(slurry)가 그 압착면 사이에 연속적으로 공급된다. 이러한 과정은 패드면의 돌기들(asperities) 사이에 마모입자들이 고착, 연마되어 웨이퍼의 표면에 있는 물질들이 제거되는 것으로 설명이 된다.

한편 이러한 물질제거 메카니즘(material removal mechanism)을 수학적으로 기술하기 위해 돌기와 연마면의 접촉응력에 대한 해석에 많은 연구가 수행되었는데 특히 최근에 하나의 반원형의 돌기의 선단면과 기하학적으로 일치된 연마면의 접촉응력을 유한요소법(Finite Element Method; FEM)으로 해석한 후 이를 통계적인 균질화 과

정(statistical homogenization procedure)을 통해 돌기들의 평균 접촉응력을 계산하는 방법이 제안되었다.⁽⁹⁾ 하지만 연마면의 접촉응력을 계산하는 과정에서 적용한 수치해석적인 방법은 돌기가 준정적과정(quasi-steady state)으로 수행하는 연마과정의 해석에서 요구되는 많은 계산량을 고려해보면 다소 부적절 하다. 따라서 이 논문의 첫째 목표는 돌기규모(asperity scale)에서 반원형의 이차원 돌기와 같은 규모의 거친 연마면에 작용하는 접촉응력을 변분원리를 이용하여 해석적인 해를 구하는데 있다. 이 결과들은 연마면에 형성된 하나의 대표적인 피쳐(feature)가 FAM 이나 CMP 과정을 거치며 평탄화 되는 과정을 설명하는 데 이용된다.

2. 이론

2.1 접촉부의 모델링을 위한 도입가정

본 연구에서는 돌기의 접촉변형을 해석적으로 구하기 위해 패드의 돌기는 평면 변형률의 이차원 반원형의 선단부를 가지며 연마면의 돌기와 기하학적으로 일치된 접촉(comforming contact)⁽¹⁰⁾을 한다고 가정하였다. (Fig. 1 참조) 여기서 특이해(singular solution)를 배제하기 위해 돌기중심점은 고정되었으며 그 돌기의 평면부는 y 방향으로 변위가 제한되나 x 방향으로 자유롭게 변형할 수 있다고 가정하였다. 한편 돌기의 재질은 등방성이고 선형 탄성이론의 지배를 받는다고 가정하였으며 접촉면의 마찰은 무시하였다.

2.2 돌기선단부의 모델링을 위한 기초탄성이론

d'Alembert 원리를 이용하여 제한경계조건을 포함하도록 확장된 해밀턴원리(extended

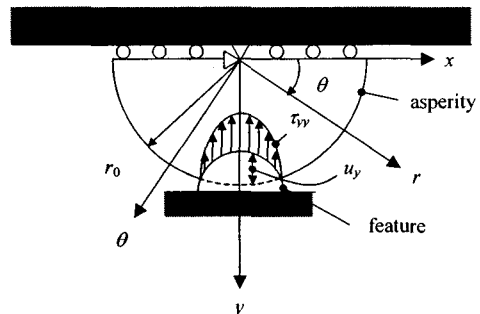


Fig. 1 Schematic of an asperity in contact with a feature

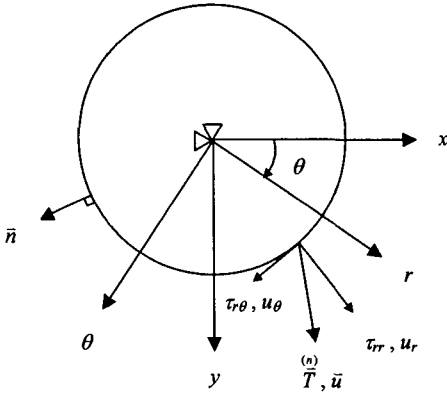


Fig. 2 Traction representation on the asperity contact surface

Hamilton's principle)⁽¹⁾를 본 문제에 적용하면 삼차원 변분등식(three-dimensional variational equation)은 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_V (\nabla \cdot \bar{\tau}) \cdot \delta \bar{u} dV + \int_{S_C} (\bar{\tau} - \bar{n} \cdot \bar{\tau}) \cdot \delta \bar{u} dS + \int_{S_N} (\bar{u} - \bar{u}) \cdot \delta (\bar{n} \cdot \bar{\tau}) dS = 0 \quad (1)$$

이때 V 는 체적, $\bar{\tau}$ 는 응력텐서(stress tensor), \bar{u} 는 변위벡터(displacement vector), S_N 은 견인벡터(traction vector) $\bar{\tau}$ 가 작용하는 면, S_C 는 변위벡터 \bar{u} 가 규정된 면, \bar{n} 은 표면에 수직한 단위벡터(unit normal vector), δ 는 변분연산자(variational operator), 그리고 ∇ 는 구배연산자(gradient operator)이다.

u_r 을 반경방향의 변위를, u_θ 를 원주방향의 변위를 나타내는 성분이라고 하면 변형량텐서 $\bar{\epsilon}$ 의 각 방향의 성분을 극좌표계에서 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.⁽¹¹⁾

$$\epsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad (2)$$

$$\epsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r}, \quad (3)$$

$$\epsilon_{r,\theta} = \epsilon_{\theta,r} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \right). \quad (4)$$

한편 극좌표계를 이용하여 평면변형을 조건에서 응력텐서 $\bar{\tau}$ 의 구성방정식(constitutive equations)을 나타내면 다음 식 (5)~(7)과 같다.

$$\epsilon_{rr} = \frac{1}{E} \left[(1-\nu^2) \tau_{rr} - \nu(1+\nu) \tau_{\theta\theta} \right], \quad (5)$$

$$\epsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{E} \left[(1-\nu^2) \tau_{\theta\theta} - \nu(1+\nu) \tau_{rr} \right], \quad (6)$$

$$\epsilon_{r,\theta} = \epsilon_{\theta,r} = \frac{(1+\nu)}{E} \tau_{r,\theta} = \frac{(1+\nu)}{E} \tau_{\theta,r}. \quad (7)$$

이때 E 와 ν 는 각각 돌기의 영률(Young's modulus)과 푸아송비(Poisson's ratio)이다.

식 (1)의 부피에 대한 적분 함수형(Functional) 성분은 체력(body force)을 무시하고 다음 공간미분방정식

$$\nabla \cdot \bar{\tau} = \bar{0} \quad (8)$$

을 만족시키면 소멸되며 이때 평면변형을 조건에서 필요한 성분을 Airy 응력함수⁽¹¹⁾를 이용하여 나타내면

$$\nabla^2 \nabla^2 \chi = 0 \quad (9)$$

와 같이 표시된다. 이때 응력 성분들과는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\tau_{rr} = \frac{1}{r} \frac{\partial \chi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \chi}{\partial \theta^2}, \quad (10)$$

$$\tau_{\theta\theta} = \frac{\partial^2 \chi}{\partial r^2}, \quad (11)$$

$$\tau_{r,\theta} = \tau_{\theta,r} = -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \chi}{\partial \theta} \right). \quad (12)$$

2.3 반원형 탄성 돌기의 Airy 응력함수의 해

Fig. 1 과 2 의 x 축에 대한 대칭성을 고려하면 식 (9)의 근을 변수분리를 이용하여 다음과 같은 삼각함수의 우함수로 가정할 수 있다.

$$\chi(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \chi_n(r, \theta), \quad (13)$$

$$\chi_n(r, \theta) = f_n(r) \cos(n\theta). \quad (14)$$

이때 n 은 양의 정수이고 $f_n(r)$ 은 반경방향 r 에 대한 함수이다. 식 (13), (14)를 식 (9)에 대입하여 전개하면 해는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\chi_0(r) = a_0 \log(r) + b_0 r^2 + c_0 r^2 \log(r) + d_0, \quad (15)$$

$$f_1(r) = a_1 r + b_1 r^3 + c_1/r + d_1 r \log(r), \quad (16)$$

$$f_n(r) = a_n r^n + b_n r^{2+n} + c_n/r^n + d_n r^{2-n}, \text{ for } n \geq 2. \quad (17)$$

이때 $a_n, b_n, c_n, d_n, n=0, 1, 2, \dots$ 는 임의의 상수들이다.

한편, 좌표축상의 원점에서 탄성체의 변위가 고정되었기 때문에 식 (15) ~ (17)의 특이점에서의 변위가 유한하다는 조건을 이용하면 2 개의 상수만이 남게 되며 이는 원형체의 표면에 대한 2 개의 경계조건들에 의해 결정된다.

이들 Airy 응력함수를 식 (10) ~ (12)에 대입하면 다음과 같이 응력성분들을 구할 수 있다.

$$\tau_{rr} = b_0 \tau_{r,\theta}^{(b,0)}(r) + b_1 \tau_{rr}^{(b,1)}(r) \cos(\theta) + \sum_{n=2}^{\infty} (a_n \tau_{rr}^{(a,n)}(r) + b_n \tau_{rr}^{(b,n)}(r)) \cos(n\theta) \quad (18)$$

$$\tau_{r,\theta} = b_0 \tau_{r,\theta}^{(b,0)}(r) + b_1 \tau_{r,\theta}^{(b,1)}(r) \sin(\theta) + \sum_{n=2}^{\infty} (a_n \tau_{r,\theta}^{(a,n)}(r) + b_n \tau_{r,\theta}^{(b,n)}(r)) \sin(n\theta) \quad (19)$$

한편 식 (18), (19) 및 식 (2) ~ (4) 와 식 (5) ~ (7)을 이용하면 변위성분들은 다음과 같이 구해진다.

$$u_r = b_0 u_r^{(b,0)}(r) + b_1 u_r^{(b,1)}(r) \cos(\theta) + \sum_{n=2}^{\infty} (a_n u_r^{(a,n)}(r) + b_n u_r^{(b,n)}(r)) \cos(n\theta) \quad (20)$$

$$u_\theta = b_0 u_\theta^{(b,0)}(r) + b_1 u_\theta^{(b,1)}(r) \sin(\theta) + \sum_{n=2}^{\infty} (a_n u_\theta^{(a,n)}(r) + b_n u_\theta^{(b,n)}(r)) \sin(n\theta)$$

$$u_\theta = b_0 u_\theta^{(b,0)}(r) + b_1 u_\theta^{(b,1)}(r) \sin(\theta) + \sum_{n=2}^{\infty} (a_n u_\theta^{(a,n)}(r) + b_n u_\theta^{(b,n)}(r)) \sin(n\theta) \quad (21)$$

따라서 이들 응력성분 식 (18), (19) 와 변위성분 식 (20), (21)에 변분을 취하면 임의의 상수인 a_n ($n=2,3,\dots$)과 b_n ($n=0,1,2,\dots$)의 변분으로 변환된다.

2.4 접촉메커니즘에 대한 지배변분등식

본 연구에서 다루는 접촉모델은 돌기선단부의 일부는 변위가 규정되고 나머지 부분은 접촉응력이 규정되기 때문에 혼합형 경계조건의 접촉문제를 근본적으로 내포한다. 이러한 접촉문제는 해석적인 엄밀해(exact solution)를 구할 수 없기 때문에 접촉하는 두 물질의 영역을 세분하여 나눈후 접촉여부를 판정하여 구하는 FEM 등 수치해석으로 구하는 방법들이 많이 알려져 왔다.⁽¹²⁾ 도입부에서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 변분근사법을 도입하여 개략해(approximate solution)를 해석적으로 구한 후 접촉면만 세분하여 나누고 이를 최적화 과정을 도입하여 해를 구하는 방법을 제시한다.

S_{TOTAL} 을 돌기선단의 전체 노출경계면이라 하고 S_{CONT} 를 \bar{u}_y 가 규정된 부분면이라 하면 식 (1), (9)에서 최종 변분등식은 다음과 같이 얻어진다.

$$- \int_{S_{CONT}} T_x \delta u_x dS + \int_{S_{CONT}} (u_y - \bar{u}_y) \delta T_y dS - \int_{S_{TOTAL}} (\tau_{rr} \delta u_r + \tau_{r\theta} \delta u_\theta) dS = 0 \quad (22)$$

따라서 식 (22)와 식 (18) ~ (21)에서 접촉모델의 변분등식은 좌표변환에 의해 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$- \int_{\theta_{TOTAL}} r_0 d\theta \left[\left(\tau_{rr} \cos^2(\theta) - \frac{\tau_{r\theta}}{2} \sin(2\theta) \right) \delta u_r + \left(\tau_{r\theta} \sin^2(\theta) - \frac{\tau_{rr}}{2} \sin(2\theta) \right) \delta u_\theta \right]_{r=r_0} + \int_{\theta_{CONT}} r_0 d\theta \left[\left\{ \left(u_r \sin^2(\theta) + \frac{u_\theta}{2} \sin(2\theta) \right) - \bar{u}_y \sin(\theta) \right\} \delta \tau_{rr} + \left\{ \left(u_\theta \cos^2(\theta) + \frac{u_r}{2} \sin(2\theta) \right) - \bar{u}_y \cos(\theta) \right\} \delta \tau_{r\theta} \right]_{r=r_0} - \int_{\pi-\theta_{CONT}} r_0 d\theta \left[\left(\tau_{rr} \sin^2(\theta) + \frac{\tau_{r\theta}}{2} \sin(2\theta) \right) \delta u_r + \left(\tau_{r\theta} \cos^2(\theta) + \frac{\tau_{rr}}{2} \sin(2\theta) \right) \delta u_\theta \right]_{r=r_0} = 0 \quad (23)$$

한편, 식 (23)에서 첫째 적분항을 소멸시키면 식은 축소된다. 이는

$$\tau_{rr} \cos^2(\theta) - \frac{\tau_{r\theta}}{2} \sin(2\theta) = 0, \quad (24)$$

$$\tau_{r\theta} \sin^2(\theta) - \frac{\tau_{rr}}{2} \sin(2\theta) = 0 \quad (25)$$

을 만족시키면 소멸되며 이때

$$\tau_{rr} \cos(\theta) = \tau_{r\theta} \sin(\theta) \quad (26)$$

가 만족된다. 식 (26)은 각 임의 계수들인 a_n , b_n 의 관계를 구속하여 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$a_n = f_n(b_0, b_1, b_2, \dots, b_n), \quad n=2,3,\dots \quad (27)$$

따라서 최종 남은 변분등식을 수치계산을 위하여 차분하여 나타내면

$$\sum_{(\theta \in \theta_{CONT})} \left[\left\{ \left(u_r \sin^2(\theta) + \frac{u_\theta}{2} \sin(2\theta) \right) - \bar{u}_y \sin(\theta) \right\} \delta \tau_{rr} + \left\{ \left(u_\theta \cos^2(\theta) + \frac{u_r}{2} \sin(2\theta) \right) - \bar{u}_y \cos(\theta) \right\} \delta \tau_{r\theta} \right]_{r=r_0}^{\theta=\theta_0} - \sum_{(\theta \in \theta_{CONT})} \left[\left(\tau_{rr} \sin^2(\theta) + \frac{\tau_{r\theta}}{2} \sin(2\theta) \right) \delta u_r + \left(\tau_{r\theta} \cos^2(\theta) + \frac{\tau_{rr}}{2} \sin(2\theta) \right) \delta u_\theta \right]_{r=r_0}^{\theta=\theta_0} = 0 \quad (28)$$

과 같이 표현된다. 한편 피처의 표면이 식 $y=f(x)$ 로 표시되며 단위 수직벡터를 $\bar{n}_y(x)$ 로 나타낼 수 있다고 하면 접촉응력은

$$\sigma_c(x) = \bar{T}^{(n)}(x) \cdot \bar{n}_y(x) \approx - \frac{T_y^{(n)}(x)}{\sqrt{1+f'(x)^2}} \quad (29)$$

과 같이 구할 수 있다. 이때 $\sigma_c(x)$ 는 웨이퍼 표면의 특정부분에서 하나의 돌기가 표본거리 Δ 를 지나갈 때 발생하는 각 위치에 대한 접촉응력이다. 평균 접촉응력을 구하기 위해서는 표본거리 Δ 에 대해서 각각의 응력값들을 구한 후 이를 앙상블평균(ensemble average)하는 과정이 필요하다. 한편 이를 위해서는 선택한 표본거리는 분리된 하나의 피처보다는 크지만 주위의 다른 피처들에 의해 크게 영향을 받지 않을 만큼 작아야 한다. 본 논문에서는 이를 다루지는 않았지만 이러한 과정은 참고문헌 (9), (13)에 잘 설명되어있다. 또한 임의로 가정한 피처의 변위를 반복적인 방법으로 최적화를 통해 개선(update)하며 이때 최적화를 위한 목적함수는 다음식과 같다.

$$\min \int_{\Gamma} T_y(r_0, \theta) d\Gamma \quad \text{for } T_y(r_0, \theta) \geq 0 \quad (30)$$

s.t. $u_y - \bar{u}_y \leq 0$

이때 Γ 는 접촉면을 포함하는 돌기선단면을 나타낸다.

따라서 본 연구에서는 기하학적 조건들을 이용하여 돌기선단에 대한 피처의 침투(penetration)를

가정한 후 식 (28), (29)를 풀어 식 (30)을 만족시킬 때 까지 반복적으로 계산하는 과정을 도입하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

3. 결과 분석 및 고찰

본 절에서는 이전 절들에서 유도된 모델을 이용한 수치해석 결과를 설명한다. 수치해석에 사용된 접촉모델의 기하학적 혹은 기계적 인자값들을 Table 1에 표시하였다.

피처와 돌기선단부의 접촉응력을 계산하기 위하여 Airy 응력함수의 해 180 개를 사용하였으며 접촉면의 변위는 최대 $\bar{u}_y = 0.1 \mu\text{m}$ 로 하였다. 한편 본 연구에서 대상으로 한 돌기선단부의 피접촉물은 하나의 트렌치(single trench) 내에 실제 전기-화학적 적층법(electrochemical deposition; ECD)로 증착한 SEM 이미지에 기초한 대표적인 피처의 형상을 기초로 하였다.⁽¹⁴⁾ 이때 증착후 피처의 최대 높이와 너비는 각각 $d_f \sim 0.15 \mu\text{m}$, $c_f \sim 0.8 \mu\text{m}$ 이며 트렌치의 높이와 너비는 각각 $a_f \sim 1 \mu\text{m}$, $b_f \sim 0.2 \mu\text{m}$ 이다. (Fig. 3 참조)

Fig. 1의 좌표계를 기준으로 표본거리 $\Delta = -0.5 \mu\text{m}$, 거리증가량 $\Delta_x = -0.1 \mu\text{m}$ 으로 하여 $x=0$ 부터 $x=\Delta$ 까지 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. (Figs. 4, 5의 a) ~ f)에 해당) 돌기의 차분모델에서 돌기의 외주면은 360개의 등간격 요소들로 나누었으며 웨이퍼 상의 특정한 x 위치에서의 접촉응력값은 하나의 평균 돌기가 등간격으로 나눈 표본거리 Δ 를 훑고 지나갈 때 발생하는 접촉응력들을 평균하여 구할 수 있다. 한편 Fig. 3의 피처의 형상을 기하학적으로 표현하기 위해 디지털라이저(digitizer)를 이용하여 얻은 좌표점들을 곡선적합법(curve fitting)을 사용하여 내삽(interpolation)

하여 표면의 곡면함수를 구하였다. 이때 구한 곡면함수를 푸리에 급수(Fourier series)로 전개하여 32개의 정현함수들을 구하였으며 이를 다시 역

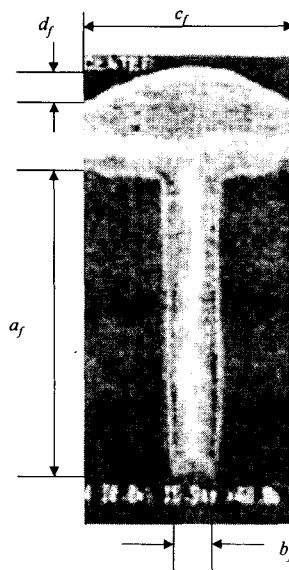


Fig. 3 SEM image of experimental ECD Cu in a single trench⁽¹⁴⁾

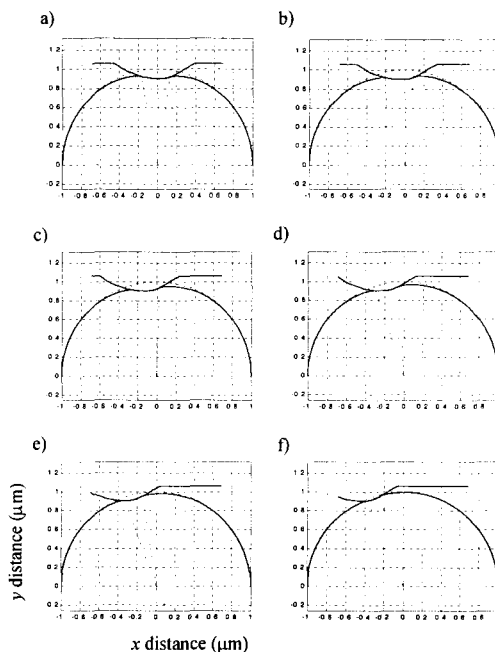


Fig. 4 Deformation of the asperity and the feature at different locations. Figures a) ~ f) correspond to $x=0 \sim x=-0.5 \mu\text{m}$, respectively

Table 1 Parameter values used in the simulations

Param.	Value	Unit
r_0	1.0	μm
a_f	1.0	μm
d_f	0.15	μm
Δ_x	0.05	μm
Δ	0.5	μm
\bar{u}_y	0.1	μm
b_f	0.2	μm
c_f	0.8	μm
E	8.2	MPa
ν	0.47	-
N	180	-

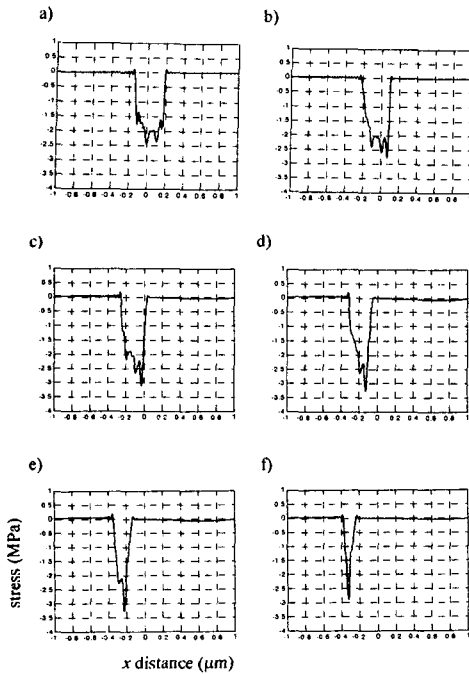


Fig. 5 Contact stresses at the interface between the asperity and the feature. Figures a) ~ f) correspond to $x=0 \sim x=-0.5 \mu\text{m}$, respectively

푸리에 변환(inverse Fourier Transform)하여 곡면함수를 특이점을 제거한 연속함수로 전개하였다.

Fig. 4는 돌기의 선단부가 피쳐의 표면을 누르며 지나갈 때 돌기의 변형을 나타낸다. 이때 돌기는 각 그림들 a) ~ f)의 하부에, 피쳐는 각 그림들의 상부에 도시하였다. 이는 FAM 과정을 모사(simulation)하여 피쳐의 표면에 가해지는 접촉응력을 산출하기 위해 수행한 결과이며 피쳐의 중심부에서 멀어질수록 접촉면은 감소하는 결과를 보여준다. 한편 Fig. 5는 상기 기술한 좌표축상의 거리 또는 시간에 피쳐 (또는 돌기) 표면에 작용하는 접촉응력의 크기 및 변화를 나타낸다. 한편 상기한 곡면함수의 푸리에 급수로 부터 표면에 비록 작지만 비교적 일정한 주기의 파동성을 갖는 거칠기가 존재함을 알 수 있었으며 응력성분이 변위함수의 각 좌표축에 대한 미분항으로 표현되기 때문에 변형량 및 접촉응력의 변화는 표면의 형상변화에 상당히 민감하다. 따라서 그림에 나타난 접촉응력의 피크성분은 표면의 거칠기에 주로 영향을 받는다는 것을 보여준다. 본 연구에서 도입한 피쳐는 대체적으로 대칭의 형상을 갖기 때문에 적분한 평균접촉응력 또한 대칭의 구조를 갖는다는 것을 쉽게 예측할 수 있지만 실제 연마시 국부적인 피쳐의 형상변화에 따른 접촉응력의 변화량에 따라서 피쳐표면의 파동성

(waviness)이 영향을 받는 것을 알 수 있다. 한편 본 연구는 두 접촉표면이 일치된 상태의 특성만을 보여주기 때문에 실제 거친표면의 연마과정을 정확히 기술하기에는 어려운 면이 있지만 FAM이나 CMP 등의 예에서 보여주는 바와 같이 비교적 매끄러운 피쳐 표면을 부드러운 패드가 지나갈 때 돌기부에 발생하는 접촉응력에 비례하는 연마특성을 잘 나타낸다.

전술한 바와 같이 본 연구에서 수행한 시물레이션에 사용된 모델은 실제 실험에서 구한 트랜치 상부에 적층된 구리(Cu)의 돌출부를 기초로 하여 구한 것이다. 한편, 본 모델에 사용된 형상 외에 다른 형상으로 적층된 돌출부들의 SEM 파단 이미지들은 참고문헌 (15 ~ 17)에 잘 예시되어 있다.

4. 결론

본 연구에서는 반원형의 돌기와 임의의 형상을 갖는 ECD 피쳐의 접촉부에서 발생하는 접촉응력을 변분원리를 이용한 변분근사법을 이용하여 반해석적으로(semi-analytically) 구하였다. 다규모(multiscale) FAM 혹은 CMP 과정을 통합적으로 모델링하기 위해 기계적 연마과정중 발생하는 접촉응력은 확률분포를 고려하여 평균화 되어야 하는데⁽¹⁸⁾ 실제 접촉문제는 비선형으로 이를 수치적으로만 접근할 경우 시간적인 제약이 큰 문제가 된다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 변분근사법과 최적화 과정을 통해 접촉응력을 구하는 매우 효율적인 알고리즘을 개발하였다.

실제 ECD로 적층한 피쳐를 패드가 지나가며 발생하는 접촉응력문제를 수치적으로 정량화 시킨 결과는 FAM이나 CMP 과정의 접촉응력 해석에 본 연구에서 제안한 알고리즘의 사용이 가능함을 보여준다. 본 연구가 주로 FAM이나 CMP의 기계적인 연마과정에 중점을 두고 있지만 향후 본 연구에서 제시된 모델의 적절한 수정을 통해 전기 혹은 화학적인 역할도 함께 고려할 수 있으리라고 기대된다.

참고문헌

- (1) Tiersten, H. F., 1969, *Linear Piezoelectric Plate Vibrations*, Plenum Press.
- (2) Hildebrand, F. B., 1976, *Advanced Calculus for Applications: 2nd Edition*, Prentice-Hall.
- (3) Moisewitsch, B. L., 1966, *Variational Principles - Interscience monographs and texts in physics and astronomy*, R. E. Marshak (Ed), John Wiley & Sons.
- (4) Morse, P. M. and Feshbach, H., 1953, *Methods of Theoretical Physics*, McGraw-Hill.
- (5) Lanczos, C., 1949, *The Variational Principles of*

- Mechanics*, University of Toronto Press.
- (6) Tiersten, H. F., 1968, "Natural Boundary and Initial Conditions from a Modification of Hamilton's Principle," *Journal of Mathematical Physics*, Vol. 9, pp. 1445~1451.
 - (7) Chauhan, R., Ahn, Y., Chandrasekar, S. and Farris, T. N., 1993, "Role of Indentation Fracture in Free Abrasive Machining of Ceramics," *Wear*, Vol. 162-164, pp. 246~257.
 - (8) Steigerwald, J. M., Murarka, S. P. and Gutmann, R. J., 1997, *Chemical Mechanical Planarization of Microelectronic Materials*, John Wiley and Sons.
 - (9) 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.
 - (10) Johnson, K. L., 1985, *Contact mechanics*, Cambridge University Press.
 - (11) Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., 1970, *Theory of Elasticity 3rd Edition*, McGraw-Hill.
 - (12) 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.
 - (13) Seok, J., 2003, "A Statistical Study of CMP Process in Various Scales," *Transactions of the KSME (A)*, Vol. 27, No. 12, pp. 2112~2118.
 - (14) 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.
 - (15) 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.
 - (16) 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.
 - (17) 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.
 - (18) Greenwood, J. A. and Williamson, J. B. P., 1966, "Contact of Nominally Flat Surfaces," *Proceedings of the Royal Society London*, Vol. A 295, pp. 300~319.