

경계 요소법에 의한 직교 이방성 다결정 재료의 응력해석에 관한 연구

김동은*, 이상훈*, 정일중*, 이석순#

A Study of Stress Analysis of Multi-Grain Orthotropic Material by BEM

Dong -Eun Kim*, Sang -Hun Lee*, Il -Jung Jeong* and Seok-Soon Lee#

ABSTRACT

As the application of the MEMS parts increases, the structural safety of MEMS appears importantly. A lot of MEMS parts are made by a multi-grain silicon wafer, which is an orthotropic material. Moreover directions of the materials on each grain are distributed randomly. The stress analysis for the multi-grain is important factor in order to apply the MEMS parts to industrial applications. The finite element method (FEM) is commonly used by a stress analysis method but the boundary element method (BEM) is known as the result of the BEM is more accurate than that of the FEM since the fundamental solution are used. In this study, we derived the boundary integration equation for the orthotropic material by applying fundamental solutions with complex variables. The multi-region analysis procedure for the BEM and the multi-grain generation procedure by a random process technique are developed in order to apply the analysis of the multi-grain orthotropic material. The discontinuous element is used in order to remove the corner problem in the BEM. The results of the present method are compared with those of the finite element method in order to verify the present procedure.

Key Words : Multi-Grain (다결정), Boundary Element Method (경계요소법), Orthotropic Material (직교 이방성 재료)

1. 서론

다결정 박막의 MEMS에서의 역할과 MEMS 분야의 자체 성장으로 인해 다결정 박막의 기계적 성능이 중요한 연구 주제로 성장하고 있다. 저항체에 압력을 가하면 저항이 변화하는 현상인 Piezo-Resistive 현상의 발견 이후로 MEMS 분야는 범위가 상당히 커지고 있다. 또한 기계 부품 재료로서

의 실리콘의 우수성이 Petersen¹에 의해서 입증되었고, 연구 결과는 MEMS의 발전을 가속화시켰다.

Eisner²의 단결정 실리콘 인장 시험 후에 MEMS를 위한 많은 실험기법이 개발되고 있다. Beam-bending 테스트와 직접인장 시험법 등이 MEMS의 재료특성을 측정하는데 이용되고 있다.^{3,4}

접수일: 2007년 10월 2일; 게재승인일: 2008년 2월 4일

* 경상대학교 대학원 기계공학과

교신저자: 경상대학교 기계항공공학부

E-mail: leess@gsnu.ac.kr Tel. (055) 751-5314

이들 시험에 의한 MEMS 의 다결정 부품의 재료 특성의 측정과 더불어 응력해석에 대한 연구의 필요성이 높아지고 있다. 수치해석 방법 중에서 유한요소법을 적용한 MEMS 의 다결정 부품의 응력 해석을 수행한 연구 사례는 많이 찾아 볼 수 있다.^{5,6} Choi⁶ 는 다결정 박막을 역추출법을 적용하여 다결정 그룹을 모사하고, 이에 유한요소법을 적용하여 등가 탄성계수 및 등가 푸와송비를 산출하였다.

경계요소법은 기초해를 사용하므로 해의 정밀도가 높은 것으로 알려져 있다.⁷ 특히 접합계의 응력해석에서는 매우 우수하다고 알려져 있고,⁸ 접합계면 균열의 응력 강도 해석에 적용하고 있다.⁹ 경계요소법을 다결정 박막의 응력해석에 적용하기 위하여는 직교이방성 재료의 기초해를 적용한 경계요소법과 다물체를 해석할 수 있는 프로그램의 개발이 필요하다.

직교 이방성 재료의 기초해에 대한 연구는 많이 진행되어 왔고,^{7,10} 등방성에 재료에 대하여 경계요소법을 적용한 다물체 해석에 대한 연구는 이루어져 있다.¹¹ 다결정 재질에서와 같이 직교이방성 재료를 갖는 다물체 해석에 대한 연구는 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 직교 이방성 재질을 다룰 수 있고, 다물체를 해석할 수 있는 경계 요소법 프로그램을 개발하고, 그 결과를 기존의 해석 방법인 유한요소법과 비교하고자 한다.

2. 직교 이방성 재료의 응력-변형률 관계

2-D 기준 좌표축에서 응력-변형률 관계에 의해서 직교 이방성 재료의 응력-변형률 관계는 식 (1) 과 같다.¹²

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{26} \\ S_{16} & S_{26} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

σ_{ij} 와 ε_{ij} ($i,j=1,2$) 는 응력과 변형률을 각각 의미한다. 그리고 계수 S_{ij} 는 재료의 탄성 컴플라이언스를 나타낸다. 이러한 컴플라이언스는 탄성계수와 푸와송비 항으로 바꾸어 쓸 수 있고, 식 (2)의 관련식들로 그 항을 표기 하였다.

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{1}{E_1}, \quad S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2}, \\ S_{16} &= \frac{\eta_{12,1}}{E_1} = \frac{\eta_{1,12}}{G_{12}}, \quad S_{26} = \frac{\eta_{12,2}}{E_2} = \frac{\eta_{2,12}}{G_{12}}, \\ S_{22} &= \frac{1}{E_2}, \quad S_{66} = \frac{1}{G_{12}} \end{aligned} \quad (2)$$

E_k 는 x_k 방향의 탄성 계수이며, G_{12} 는 x_1 - x_2 평면에서의 전단계수이다. 그리고 ν_{ij} 는 푸와송비다. 직교 이방성의 경우는 $S_{16}=S_{26}=0$ 이고, $\nu_{12} = \nu_{21} = \nu$ 일 반적이다. 식 (2)의 관련식을 적용하여 식 (3)으로 표현되는 특성 방정식에 대입한다.

$$S_{22} - 2S_{26}\mu + (2S_{12} + S_{66})\mu^2 - 2S_{16}\mu + S_{11}\mu^4 = 0 \quad (3)$$

식 (3)은 식 (4)와 같은 켈레복소수를 근으로 가진다. 이 근을 경계요소 해석에 직교 이방성 재료의 물성값으로 입력한다.

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \alpha_1 + i\beta_1, \quad \mu_2 = \alpha_2 + i\beta_2, \\ \mu_3 &= \bar{\mu}_1, \quad \mu_4 = \bar{\mu}_2 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 α_i 와 β_i 는 실수이고 i 는 허수이다. 또한 $\bar{\mu}_i$ 는 μ_i 의 공액 복소수이다.

MEMS 부품의 제작 과정에 사용되는 실리콘 기판의 경우 생성되는 결정의 방향성은 무작위로 결정된다. 단일 재료에서 임의의 방향성을 가지는 직교 이방성 재료를 고려한 응력-변형률 관계식은 식 (5)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 \bar{S}_{ij} 는 식 (1)에서 S_{ij} 의 성분을 γ 각도 만큼 회전된 좌표에서의 성분으로 (6)의 관련 식들로 표현된다.

$$\begin{aligned} \bar{S}_{11} &= V_1 + V_2 \cos 2\gamma + V_3 \cos 4\gamma \\ \bar{S}_{12} &= V_4 - V_3 \cos 4\gamma \\ \bar{S}_{22} &= V_1 - V_2 \cos 2\gamma + V_3 \cos 4\gamma \\ \bar{S}_{16} &= V_2 \sin 2\gamma + 2V_3 \sin 4\gamma \\ \bar{S}_{26} &= V_2 \sin 2\gamma - 2V_3 \sin 4\gamma \\ \bar{S}_{66} &= 2(V_1 - V_4) - 4V_3 \cos 4\gamma \end{aligned} \quad (6)$$

또한 식 (6)의 요소들 중 불변치(invariants)인 (V_1, V_2, V_3, V_4) 는 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{1}{8}(3S_{11} + 3S_{22} + 2S_{12} + S_{66}) \\ V_2 &= \frac{1}{2}(S_{11} - S_{22}) \\ V_3 &= \frac{1}{8}(S_{11} + S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \\ V_4 &= \frac{1}{8}(S_{11} + S_{22} + 6S_{12} - S_{66}) \end{aligned} \quad (7)$$

3. 직교 이방성 재질의 경계요소법

직교 이방성 재질에의 경계요소법 적용은 다음 식 (8)로 표현된다.⁷

$$\begin{aligned} C_{ij}(z_k^0)u_j(z_k^0) + \int_{\Gamma} T_{ij}(z_k, z_k^0)u_j(z_k)d\Gamma(z_k) \\ = \int_{\Gamma} U_{ij}(z_k, z_k^0)t_j(z_k)d\Gamma(z_k) \end{aligned} \quad (8)$$

$j, k = 1, 2$

여기서 $T_{ij}(z_k, z_k^0)$ 와 $U_{ij}(z_k, z_k^0)$ 는 변위와 표면력 기초해이고, $u_j(z_k)$ 와 $t_j(z_k)$ 는 경계에서의 변위와 표면력이다.

C_{ij} 는 국부적 경계에 의해 결정되는 수이다. z_k 는 평면의 경계 Γ 의 복소수 변수항이고 식(9)와 같이 표현할 수 있다.

$$z_k - z_k^0 = [x_1' + \mu_k x_2'](\zeta - \zeta^0) \quad (9)$$

x_i' 은 국부 좌표를 미분한 값이며, ζ^0 항은 국부 좌표에서 z_k^0 의 위치를 의미한다.

변위와 표면력(traction)의 기초해는 각각 다음 식 (10)의 관계식들과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} U_{ij} &= 2\text{Re}[r_{j1}A_{i1}\ln(z_1 - z_1^0) + r_{j2}A_{i2}\ln(z_2 - z_2^0)] \\ T_{i1} &= 2n_1\text{Re}[\mu_1^2 A_{i1}/(z_1 - z_1^0) + \mu_2^2 A_{i2}/(z_2 - z_2^0)] \\ &\quad - 2n_2\text{Re}[\mu_1 A_{i1}/(z_1 - z_1^0) + \mu_2 A_{i2}/(z_2 - z_2^0)] \\ T_{i2} &= 2n_1\text{Re}[\mu_1 A_{i1}/(z_1 - z_1^0) + \mu_2 A_{i2}/(z_2 - z_2^0)] \\ &\quad - 2n_2\text{Re}[A_{i1}/(z_1 - z_1^0) + A_{i2}/(z_2 - z_2^0)] \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)의 관계식에서 상수 항인 r_{ij} 는 다음 식

(11)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} r_{1j} &= S_{11}\mu_j^2 + S_{12} - S_{16}\mu_j \\ r_{2j} &= S_{12}\mu_j + S_{22}/\mu_j - S_{26} \end{aligned} \quad (11)$$

그리고 n_j 는 x_1-x_2 좌표계와 관련된 외향 단위 법선 성분이다. 그리고 A_{jk} 는 식 (12)에서 구해지는 복소수 성분이다. 한 식 (12)의 δ_{ij} 는 크로네커 델타이다.

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & -1 \\ \mu_1 & -\mu_1 & \mu_2 & -\mu_2 \\ r_{11} & -r_{11} & r_{12} & -r_{12} \\ r_{21} & -r_{21} & r_{22} & -r_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{j1} \\ \bar{A}_{j1} \\ A_{j2} \\ \bar{A}_{j2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{j2}/2\pi i \\ -\delta_{j1}/2\pi i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

물체의 경계를 경계요소로 분할하고 적분을 수행하면 식(8)은 다음과 같은 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$HU = GT \quad (13)$$

여기서 H 와 G 는 식(8)의 수치적분 행렬이고, U 와 T 는 경계절점에서의 변위와 표면력 벡터이다.

4. 다결정 경계요소법

두 물체가 서로 접하고 있는 형상을 Fig. 1과 같이 나타내었다. 2개의 세부 영역 V_1, V_2 를 가지는 전체 영역 V 를 고려한다. 이때 영역 V 는 각각의 세부 영역간에 경계면(interface)을 지닌다. Fig. 1에서 S_1 은 영역간의 경계면이다. 다결정 경계요소 해석에서 기본 식은 식 (14)과 같다.

$$HU_I = GT_I \quad (14)$$

2개 영역간의 발생된 변위는 동일하다는 식 (15)에 따라, 영역 k 에서의 표면력 T^k 와 변위 U^k 사이의 상호관계는 식 (16)과 같이 표현된다.

$$U_1 = U_2 = U \quad (15)$$

$$K^k U^k = T^k \rightarrow \begin{cases} K^1 U^1 = T^1 \\ K^2 U^2 = T^2 \end{cases} \quad (16)$$

식 (15)와 식 (16)에 따라 경계면에서의 표면력과 변위의 관계는 식 (17)과 같다.¹¹

$$(K^1 + K^2)U = T, \quad T = T^1 + T^2 \quad (17)$$

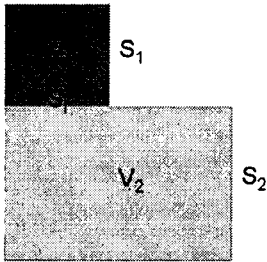


Fig. 1 The geometry of multiple region

5. 다결정 재료 형상 정보 추출

결정 격자의 형성과 이들의 경계요소 형상 정보 추출을 위해서 FORTRAN 프로그램으로 구성하여 임의의 형상 정보를 추출하였다. Random Process를 이용하여 결정되는 원자 핵을 중심으로 결정핵 주위에 같은 수의 정수 그룹을 두어 결정의 형상을 생성시킨다. 임의의 형상을 가지는 결정의 형상을 Fig. 2 에 나타내었다. 이렇게 생성된 결정의 형상정보를 가지는 행렬변수와, 전체 결정의 개수, 각 결정핵의 x,y 좌표 등을 입력하여 새로이 작성된 격자생성 프로그램으로 경계 절점 좌표를 생성하였다. 위의 입력 변수를 가지고 결정과 결정이 만나는 지점과, 전체 도메인의 코너 등을 이루는 꼭지점을 생성한다. 이렇게 생성된 각각의 결정에서 꼭지점의 연결 방향을 고려하여 각 영역별 경계 절점을 추출한다.⁶ 적용된 방향은 반시계 방향이다. 이러한 과정을 통하여 얻어진 경계요소 절점을 이용하여 보여진 형상을 Fig. 3 에 나타내었다.

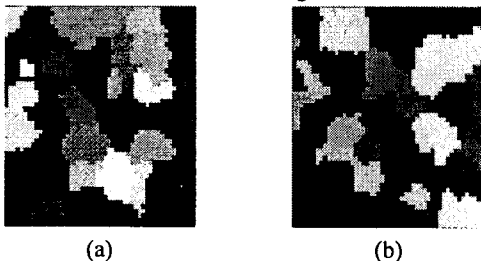


Fig. 2 Multiple region generation (a) region 35 and (b) region 40

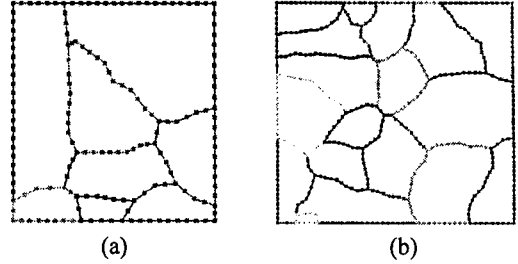


Fig. 3 Extracted geometry region 8 (a) and region 18 (b)

6. 불연속 경계요소 모델링

경계요소 해석에서 난해한 문제로 떠오른 모서리 문제(Edge and Corner Problem)는 모서리 절점에서의 법선 벡터의 부정확한 정의로 인해서 발생된다. 이러한 문제 해결의 방법으로 모서리 부위의 경계 절점의 위치를 이동하여 해석 결과의 오차를 줄일 수 있다.

불연속 요소(discontinuous elements)⁷는 모서리 문제 해결을 위해서 제시된 방법의 하나이다. 미지의 변위와 인력은 경계절점에서 식 (18)에 나타난 값 만큼 절점의 위치가 이동되어 정의된 불연속 경계요소에 의해 근사된다. 불연속 요소 형상은 2 차원 연속 요소 방정식인 식 (19)과 같이 근사된다.

$$\zeta = -\frac{2}{3}, \quad \zeta = +\frac{2}{3} \quad (18)$$

$$x_i(\zeta) = N_d^n(\zeta)x_i^n, \quad n = 1, 2, 3 \quad (19)$$

식 (19)에서 $N_d^n(\zeta)$ 는 불연속 요소의 형상함수(shape function)이며, x_i^n 는 절점의 좌표이다.

Cauchy의 적분 관계에 따라서 식 (8)의 적분항은 식 (20)로 대신할 수 있다.

$$\int_{\Gamma} T_{ij}(z_k, z_k^0)u_j(z_k)d\Gamma(z_k) = u_j^n \int_{-1}^1 T_{ij}(z(\zeta), z(\zeta^0))N_d^n(\zeta)J(\zeta)d\zeta = F_{ij}^n(\zeta, \zeta^0)u_j^n \quad (20)$$

식 (20)에서 u_j^n 는 절점의 변위이다. 그리고 J는 변환된 좌표계의 자코비안이며, $J=L/2$ 로 주어

진다. 이 때 L 은 요소의 길이를 의미한다. 또한 F_{ij}^n 은 식 (21)과 같이 표현된다.

$$F_{ij}^n(\zeta, \zeta^0) = \text{Re} \left[\frac{1}{[x_1 + \mu_1 x_2]} q_{j1} (\mu_1 n_1 - n_2) A_{i1} + \frac{1}{[x_1 + \mu_2 x_2]} q_{j2} (\mu_2 n_1 - n_2) A_{i2} \right] \int_{-1}^1 \frac{N_j^n}{\zeta - \zeta^0} d\zeta \quad (21)$$

여기서

$$q_{ij} = \begin{bmatrix} \mu_1 & \mu_2 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$$

이다.

마찬가지 방법으로, 표면력은 식 (22)과 같이 표현된다.

$$\int_{\Gamma} U_{ij}(z_k, z_k^0) t_j(z_k) d\Gamma(z_k) = t_j^i \int_{-1}^1 U_{ij}(z(\zeta), z(\zeta^0)) N_j^n(\zeta) J(\zeta) d\zeta = L_{ij}^n(\zeta, \zeta^0) t_j^n \quad (22)$$

식 (22)의 $L_{ij}^n(\zeta, \zeta^0)$ 는 식 (23)와 같이 표현된다.

$$L_{ij}^n(\zeta, \zeta^0) = 2 \text{Re} [r_{j1} A_{i1} \ln(\zeta - \zeta^0) + r_{j2} A_{i2} \ln(\zeta - \zeta^0)] \quad (23)$$

여기서 r_{ij} 는 식(11)로 주어지고, A_{ij} 는 식(12)에서 구한 값이다.

7. 수치해석의 적용과 해석결과

수치해석을 위한 경계형상 정보는 Fig. 4 의 (a) 에 나타난 8 개의 영역을 가지는 형상을 이용하였다. 또한 해석 결과의 검증을 위한 유한요소 해석 모델은 Fig. 4(a)와 같고 경계요소법은 Fig.4(b)와 같다. 해석을 위한 유한요소모델은 Altair HyperMesh 를 이용하여 모델링하였다.¹³ 또한 직교 이방성 다결정 형상은 모든 영역이 임의의 방향성을 지닌다. 이러한 방향성을 해석에 포함하기 위해서 경계요소 해석이 진행되는 과정 중에 각 영역의 재료 방향을 고려하여 E_1, E_2, ν, G 값을 계산하여 각 영역별로 적용하였다. 계산된 영역별 재료 물성치는 Table 1 에 나타내었고, 각 영역별 요소 및 절점 수는 Table 2 와 같다.

해석을 위한 경계조건은 Fig. 4 의 (b)과 같이 좌

측 부위에 자유도 1 과 2 를 구속하였으며, 우측에는 x 방향으로 10N 의 균일하중을 부여하였다. 이 경계조건은 해석의 결과를 비교하기 위해 유한요소 모델 및 경계요소 모델에 동일하게 적용하였다. 유한요소 해석을 위한 해석기는 ABAQUS V6.6/Standard 를 사용하였다.¹⁴

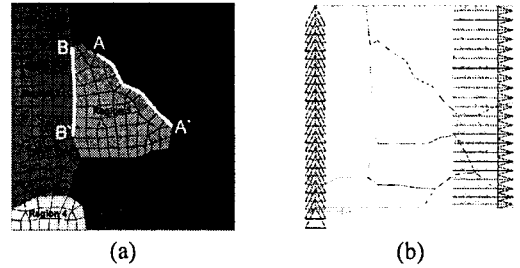


Fig. 4 FEM mesh (a) and BEM element(b) and boundary condition for stress analysis

Table 1 Material properties of each region

Region No.	E1	E2	ν	G
1	198373.0	204073.0	0.2936	78449.69
2	197844.3	205489.8	0.2908	78200.41
3	209803.8	197017.6	0.3001	77247.72
4	199086.3	202683.5	0.2962	78641.28
5	197477.1	206849.3	0.2880	77925.13
6	209231.4	197077.1	0.3005	77385.28
7	199994.7	201392.5	0.2984	78750.46
8	210000.0	197000.0	0.3000	77200.00

Table 2 Element and node number of each region

Region No.	FE model		BE model	
	Element	Node	Element	Node
1	146	167	26	53
2	120	141	25	51
3	47	62	15	31
4	22	30	9	19
5	65	80	18	37
6	23	32	11	23
7	12	19	7	15
8	41	51	13	27

각각의 구조해석을 통해서 얻을 수 있는 결과 값은 유한요소 해석의 경우 응력이고, 경계요소 해석의 경우는 표면력이다. 유한요소 해석 결과는 절점에서 가지는 표면력으로 환산하여 경계요소법과 비교해야 한다. 표면력을 구하기 위해서 필요한 변수는 유한요소해석을 통해서 얻을 수 있는 s_{11} 과 s_{12} , 그리고 절점의 좌표로부터 구한 각 절점의 법선 벡터이다.

이러한 변수들을 이용하여 유한요소 해석으로 인해서 얻어진 응력 분포 값을 표면력으로 환산하여 경계요소 해석결과와 비교하였다. 경계를 이루는 절점의 결과값을 그래프를 Fig. 5 와 Fig. 6 에 나타내었다. 경계요소 해석을 위한 경계요소가 불연속 요소로 구성되어 있기 때문에 기존의 절점에서의 식 (17)에 나타난 값만큼 절점의 위치를 이동된 위치에서 표면력이 구해지므로, 유한요소 절점에서의 값과 비교하기 위하여 경계요소법에서 구한 표면력의 평균을 취하여 유한요소법에 의한 표면력과 비교하였다.

Fig. 5 는 Fig. 4(a)의 A-A' 구간의 절점에 대한 결과를 비교하였고, Fig. 6 는 B-B' 구간의 절점에 대한 결과를 비교하였다. 두 개의 그래프와 표면력의 비교 결과에서 알 수 있듯이 매우 비슷한 결과 값을 가진다. 개발된 불연속 경계요소를 이용한 경계요소 해석기의 정확도가 우수함을 확인하였다. Fig. 5 와 같은 결과인 Table 3 에서 음영으로 표시한 절점에서는 결과값의 차이가 다른 절점에서의 값보다 큰 절점이 존재함을 확인할 수 있다. 이러한 원인은 표면력의 법선 벡터가 완벽하게 정의할 수 없는 절점, 즉 모서리(Corner) 절점에 있다.

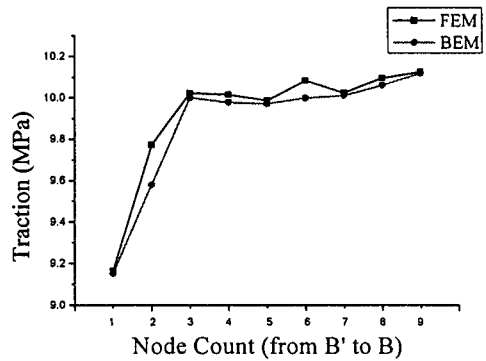


Fig. 6 Comparison of the result at B - B'

Table 3 Comparison of traction by FEM and BEM

ABAQUS	BEM	ABAQUS	BEM
5.9787	5.9695	9.1628	9.1522
5.7770	5.7694	9.7723	9.5798
5.5766	5.5820	10.0226	10.0001
7.5716	7.3345	10.0153	9.9780
9.089	9.0863	9.9868	9.9714
6.9696	6.6760	10.0834	9.9989
4.2575	4.2457	10.0231	10.0107
6.3100	6.0357	10.0951	10.0607
7.8254	7.8115	10.1245	10.1184
7.2258	7.1247		
6.409	6.4174		

이 모서리 절점에서는 표면력 계산을 위한 절점 위치가 직선상에 있지 못하여 절점에서 2 개의 서로 다른 법선벡터가 정의됨으로 인한 계산 오차로 판단된다

8. 결론

경계 요소법에 의한 직교 이방성 다결정 재료의 응력해석에 관한 본 연구의 결과는 유한요소법의 결과와 비교로 매우 잘 맞음을 확인하였다.

본 연구에서 확보된 경계요소법에 의한 다물체 해석과 Random procedure 에 의한 다결정 형상 정보 추출 방법은 실리콘 기판을 사용하여 제작되는 MEMS 부품의 신뢰성 평가에 적용할 수 있을 것으로 예상하고 있고, 관련 연구를 수행하고 있다.

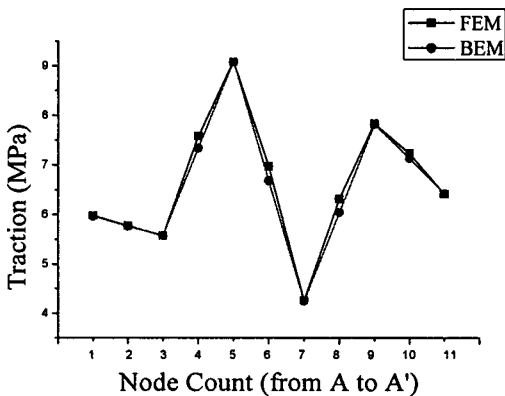


Fig. 5 Comparison of the result at A - A'

후 기

본 연구는 2 단계 지역대학 육성사업(BK21)과, 첨단기계사업단(NURI)의 지원에 의해서 연구되었다. 모든 지원들에 대해서 감사 드린다.

참고문헌

1. Kovacs, G. T. A., Maluf, N. I. and Petersen, K. E., "Bulk Micromachining of Silicon," Proceedings of the IEEE, Vol. 86, No. 8, pp. 1536-1551, 1998.
2. Eisner, R. L., "Tensile Tests on Silicon Whiskers," Acta Metall., Vol. 3, No. 4, pp. 414-415, 1955.
3. Greek, S. and Johansson, S., "Tensile Testing of Thin Film Microstructures," Proc. SPIE, Vol. 3224, pp. 344-351, 1997.
4. Jones, P. T., Johnson, G. C. and Howe, R. T., "Micromechanical Structures for Testing of Brittle Thin Films," Proc. MEMS ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Vol. 59, pp. 325-330, 1996.
5. Rasskazove, A. O., "Calculation of a Multilayer Orthotropic Shallow Shell by the Method of Finite Elements," International Applied Mechanics, Vol. 14, No. 8, pp. 826-830, 1978.
6. Choi, J. W., "Statistical Approach to the Elastic Property Extraction and Planar Elastic Response of Polycrystalline Thin-Films," Ph.D. Thesis, Ohio State University, pp. 42-69, 2004.
7. Aliabadi, M. H., "The Boundary Element Method - Applications in Solids and Structures," John Willy & Sons LTD., Vol. 2, pp. 74-76, 2002.
8. Oh, H. W., Kim, S. H., Kim, S. J. and Yang, I. S., "Stress Analysis of Brazed Interface in Dissimilar Materials by BEM," J. of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 20, No. 7, pp. 171-176, 2003.
9. Cho, S. B., Jeong, H. W. and Kim, J. K., "Determination of Stress Intensity Factor Cracks in Dissimilar Materials by Using the RWCIM," J. of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 180-185, 2000.
10. Rizzo, F. J. and Shippy, D. J., "A Method of Stress determination in plane anisotropic bodies," Journal of Composite Materials, Vol. 4, No. 1, pp. 36-61, 1970.
11. Beer, G., "Programming the Boundary Element Method - An Introduction for Engineers," John Willy & Sons LTD., pp. 247-285, 2001.
12. Gibson, R. F., "Principles of Composite Material Mechanics," McGRAW-Hill, pp. 46-58, 1994.
13. Altair Engineering, "HyperMesh 8.0 User's Guide," Altair Engineering, pp. 128-150, 2007.
14. ABAQUS, "Analysis User's Manuals," Version 6.6, ABAQUS, pp. 17.2.1-1~17.2.1-9, 2006.