(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2009-0001651
(43) 공개일자 2009년01월09일

(51) Int. Cl.
G06Q 50/00 (2008.03)
(21) 출원번호 10-2007-0044332
(22) 출원일자 2007년05월08일
심사청구일자 없음

(71) 출원인
인하대학교 산학협력단
인천 남구 용현동 253 인하대학교
(72) 발명자
원태영
서울 강남구 대치동 506 선경아파트 7-504
김한건
경기 부천시 소사구 범박동 현대 홈타운 306-1806호
(뒷면에 계속)

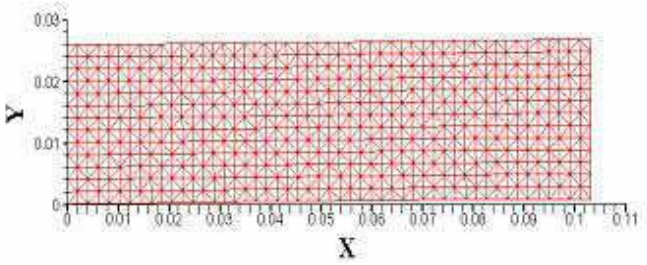
전체 청구항 수 : 총 1 항

(54) 자기변형 멤스 작동기의 거동 예측 프로그램 개발

(57) 요 약

본 발명은 자기변형 작동기의 거동 예측을 위한 2차원 비선형 유한요소 해석 코드 개발에 관한 것이다. 자기변형 재료는 선형 탄성 거동 및 비선형 자기 거동을 하는 것으로 가정하였으며, 자기장의 해석에서는 자기 포텐셜(magnetic potential)을 이용한 수식화기법이 적용되었다. MEMS 작동기의 자기변형 현상을 전산모사 하기위해서는 정확한 자기변형계수(magnetostrictive coefficient) 측정이 필수적이다. 따라서 자기변형 박막에 대해 자기변형 박막의 탄성에너지가 고려된 이론식을 적용하여 자기변형계수를 계산하였고, 이를 탄성에너지가 무시된 경우의 자기변형계수와 비교함으로써 자기변형 계수의 정확한 측정을 실시하였다. 자기변형 현상을 이용하는 대부분의 미소 작동기는 기판 위에 증착된 자기변형 박막의 신장 변형에 따른 굽힘 현상을 이용하기 때문에, 변형에 따른 변위를 측정하기 위해 일차원 보 요소와 이차원 판 요소를 제안하여 자기변형 작동기의 거동을 해석하는 프로그램을 개발하였다.

대 표 도 - 도9c



(72) 발명자

김영규

인천 남구 용현1동 98-48번지 제성빌라 302호

박순열

인천 부평구 부평5동 169-7

조범구

인천 계양구 작전1동 동보2차아파트 105동 1701호

이승배

서울 용산구 이태원2동 대림아파트 107동 405호

특허청구의 범위

청구항 1

자기변형 작동기의 거동 현상을 보다 정확히 예측할 수 있는 제안되어진 방법에 있어서,

(a) 탄성에너지를 고려한 자기변형계수 추출 단계; 및

(b) 유한요소법 적용을 위해 제안된 보 요소와 판 요소.

명 세 서

발명의 상세한 설명

발명의 목적

발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

<16> 본 발명은 자기변형 캔틸레버를 대상으로 자기변형 박막의 탄성에너지가 자기변형상수의 측정에 미치는 의 영향을 정량적으로 검증하고 이를 바탕으로 자기변형 작동기의 거동 예측을 위한 2차원 비선형 유한요소 해석 코드를 개발 것이다. 최근 MEMS 기술의 발달과 더불어 MEMS 소자의 기본이 되는 자기 변형 계수와 이에 따른 변위를 측정법이 요구되고 있다.

<17> 자기변형 박막의 정확한 자기변형계수(magnetostrictive coefficient) 측정은 자기변형현상을 응용하는 MEMS 작동기의 설계에 있어 매우 중요하다. 자기변형계수는 측정하고자 하는 자기변형 박막이 증착된 캔틸레버의 횡 방향 변위를 측정함으로써 측정할 수 있는데 이것은 캔틸레버의 횡 방향 변위가 자기변형계수에 선형적으로 의존하기 때문이다. 최근까지 캔틸레버의 횡 방향 변위를 자기변형계수, 탄성계수, 포와송 비 등의 함수로 보다 정확하게 표현하려는 이론적인 연구가 지속적으로 진행되어왔다. 그러나 이러한 대부분의 연구는 '자기변형 박막의 두께가 기판(substrate)에 비해 훨씬 작기 때문에 자기변형 박막의 탄성에너지는 무시할 수 있다' 고 가정하고 있다. 그러나 이러한 가정의 타당성은 지금까지 전혀 검증된 바가 없다. 또한 Honda 등에 의해 제작된 Tb-Fe 박막과 Sm-Fe film 박막이 증착된 캔틸레버의 경우 역시 회전 자기장을 인가하고 캔틸레버의 횡 방향 변위를 측정하였지만 Honda 등은 그들의 논문에서 기판 및 자기변형 재료의 기계적 물성을 보고하지 않았다. 따라서 자기 변형 재료의 기계적 물성을 파악하고 탄성에너지를 고려한 정확한 자기변형계수를 구 할 수 있는 새로운 방법이 모색되어야 한다.

발명이 이루고자 하는 기술적 과제

<18> 따라서 본 발명의 목적은 자기변형 재료에 따른 탄성에너지를 고려한 정확한 자기변형 계수를 구하고 미소 작동기의 변위 예측을 유한 요소법에 적용하기 위해 보 요소 및 판 요소를 제안해 선형 탄성 거동 및 비선형 자기 거동 해석 방법을 제공하는 것에 그 목적이 있다.

발명의 구성 및 작용

<19> 상기 목적을 달성하기 위해서 본 발명의 보 요소 및 판 요소를 제공한다. 자기변형 박막의 정확한 자기변형계수(magnetostrictive coefficient) 측정은 자기변형현상을 응용하는 자기변형 작동기의 설계에 있어 매우 중요하다. 자기변형 박막에 대해 자기변형 박막의 탄성에너지가 고려된 이론식을 적용하여 자기변형계수를 계산하고, 이를 탄성에너지가 무시된 경우의 자기변형계수와 비교함으로써 타당성을 고찰하였다. 또한 보 요소와 판 요소를 제안하고 이를 유한 요소법에 적용하여 자기변형 작동기의 선형 탄성 거동 및 비선형 자기 거동을 해석하는 프로그램을 개발하였다.

<20> - 자기-탄성에너지 및 탄성에너지 모델링

<21> 본 발명에서는 도1에 보이는 바와 같이 자기변형 박막이 기판의 윗면과 아랫면에 증착된 캔틸레버를 고려하였다. 윗면(또는 아랫면)에만 증착된 경우는 아랫면(또는 윗면)에 증착된 자기변형 박막의 두께를 0으로 설정함으로써 간단히 고려될 수 있다.

<22> 외부 자기장이 x_1 방향으로 인가되는 경우, 자기변형 박막에 유도되는 단위면적당 자기-탄성에너지는 다음과 같

다.

수학식 1

$$\tilde{E}_f^{me} = -\frac{\lambda_f E_f}{2(1-\nu_f^2)}\{(2-\nu_f)\varepsilon_{11} - (1-2\nu_f)\varepsilon_{22}\} - \frac{\lambda_f^2 E_f (1-2\nu_f)}{4(1-\nu_f^2)}$$

<23>

수학식 2

$$\tilde{E}_g^{me} = -\frac{\lambda_g E_g}{2(1-\nu_g^2)}\{(2-\nu_g)\varepsilon_{11} - (1-2\nu_g)\varepsilon_{22}\} - \frac{\lambda_g^2 E_g (1-2\nu_g)}{4(1-\nu_g^2)}$$

<24>

<25> 여기서 E는 탄성계수, v는 포와송 비, λ는 자기변형계수, ε_{11}, ε_{22}, ε_{33}은 각각 x_1, x_2, x_3축 방향으로의 변형율이다. 하첨자 f와g는 각각 윗면과 아랫면의 자기변형박막을 표시한다. 또한 기판 및 자기변형 박막에 저장되는 탄성에너지는 다음과 같이 표현된다.

수학식 3

$$\tilde{E}_f^{el} = \frac{E_f}{2(1-\nu_f^2)}\left(\varepsilon_{11}^2 + \varepsilon_{11}^2 + 2\nu_f \varepsilon_{11}\varepsilon_{22}\right) + \frac{E_f \lambda_f^2 (1-2\nu_f)}{8(1-\nu_f^2)}$$

<26>

수학식 4

$$\tilde{E}_g^{el} = \frac{E_g}{2(1-\nu_g^2)}\left(\varepsilon_{11}^2 + \varepsilon_{11}^2 + 2\nu_g \varepsilon_{11}\varepsilon_{22}\right) + \frac{E_g \lambda_g^2 (1-2\nu_g)}{8(1-\nu_g^2)}$$

<27>

수학식 5

$$\tilde{E}_s^{el} = \frac{E_s}{2(1-\nu_s^2)}\left(\varepsilon_{11}^2 + \varepsilon_{11}^2 + 2\nu_s \varepsilon_{11}\varepsilon_{22}\right)$$

<28>

<29> 여기서 하첨자 s는 기판을 표시한다. 한편 캔틸레버의 횡 방향 변위가 작을 경우, x_1, x_2 방향의 변형율은 다음과 같이 표현할 수 있다.

수학식 6

$$\varepsilon_{11} = -\frac{x_3}{R_1} \equiv -\frac{x_3 \alpha_1}{t_s}$$

<30>

수학식 7

$$\varepsilon_{22} = -\frac{x_3}{R_2} \equiv -\frac{x_3 \alpha_2}{t_s}$$

<31>

<32> 여기서 R_1 과 R_2 는 도1에서 보는바와 같이 각각 $x_1 o x_2$ 와 $x_1 o x_3$ 평면에서의 곡률 반지름이다. 수학식 6과 수학식 7을 수학식 8 ~ 수학식 13에 대입한 후 각 해당면적에 대해 적분하면 다음과 같다.

수학식 8

$$E_f^{mc} = -\frac{V_f \lambda_f E_f}{2(1-\nu_f^2)}\left(\beta + \frac{t_f}{2t_s}\right)\{(2-\nu_f)\alpha_1 - (1-2\nu_f)\alpha_2\} - \frac{V_f \lambda_f^2 E_f (1-2\nu_f)}{4(1-\nu_f^2)}$$

<33>

수학식 9

$$E_g^{mc} = -\frac{V_g \lambda_g E_g}{2(1-\nu_g^2)}\left\{-(1-\beta) - \frac{t_g}{2t_s}\right\}\{(2-\nu_g)\alpha_1 - (1-2\nu_g)\alpha_2\} - \frac{V_g \lambda_g^2 E_g (1-2\nu_g)}{4(1-\nu_g^2)}$$

<34>

수학식 11

$$E_s^{el} = \frac{V_s E_s}{2(1-\nu_s^2)}\left(\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + 2\nu_s \alpha_1 \alpha_2\right)\left(\beta^2 - \beta + \frac{1}{3}\right)$$

<35>

수학식 12

$$E_f^{el} = \frac{V_f E_f}{2(1-\nu_f^2)}\left(\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + 2\nu_f \alpha_1 \alpha_2\right)\left\{\beta^2 + \beta\left(\frac{t_f}{t_s}\right) + \frac{1}{3}\left(\frac{t_f}{t_s}\right)^2\right\} + \frac{V_f E_f \lambda_f^2 (1-2\nu_f)}{8(1-\nu_f^2)}$$

<36>

수학식 13

$$E_g^{el} = \frac{V_g E_g}{2(1-\nu_g^2)}\left(\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + 2\nu_g \alpha_1 \alpha_2\right)\left\{(1-\beta)^2 + (1-\beta)\left(\frac{t_g}{t_s}\right) + \frac{1}{3}\left(\frac{t_g}{t_s}\right)^2\right\} - \frac{V_g \lambda_g^2 E_g (1-2\nu_g)}{8(1-\nu_g^2)}$$

<37>

<38> 여기서 v는 부피, t는 두께, β는 중립면의 위치를 나타내는 무차원 변수이다. 수학식 8 ~ 수학식 13의 각항을 더하면 자기장이 인가되는 경우 캔틸레버에 유발되는 총에너지를 구할 수 있다. 캔틸레버 시스템의 최소 에너지의 원리를 적용하면 다음과 같다.

수학식 14

$$\left(2P + \frac{2DM}{\lambda_f} + \frac{2EN}{\lambda_g}\right)\alpha_1 + \left(2P\nu_s + \frac{2DM\nu_f}{\lambda_f} + \frac{2EN\nu_g}{\lambda_g}\right)\alpha_2 = D\left(\beta + \frac{t_f}{2t_s}\right)(2-\nu_f) + E\left\{-(1-\beta) - \frac{t_g}{2t_s}\right\}(2-\nu_g)$$

<39>

수학식 15

$$\left(2\nu_s P + \frac{2DM\nu_f}{\lambda_f} + \frac{2EN\nu_g}{\lambda_g}\right)\alpha_1 + \left(2P + \frac{2DM}{\lambda_f} + \frac{2EN}{\lambda_g}\right)\alpha_2 = -D\left(\beta + \frac{t_f}{2t_s}\right)(1-2\nu_f) - E\left\{-(1-\beta) - \frac{t_g}{2t_s}\right\}(1-2\nu_g)$$

<40>

수학식 16

$$-D\{(2-\nu_f)\alpha_1 - (1-2\nu_f)\alpha_2\} - E\{(2-\nu_g)\alpha_1 - (1-2\nu_g)\alpha_2\}$$

$$+\left(\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + 2\nu_s \alpha_1 \alpha_2\right)(2\beta - 1) + \frac{D}{\lambda_f}\left(\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + 2\nu_f \alpha_1 \alpha_2\right)\left\{2\beta + \left(\frac{t_f}{t_s}\right)\right\}$$

$$+\frac{E}{\lambda_g}\left(\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + 2\nu_g \alpha_1 \alpha_2\right)\left\{-2(1-\beta) - \left(\frac{t_g}{t_s}\right)\right\} = 0$$

<41>

<42> 따라서 회전 자기장(rotating magnetic field)상태에서 측정되는 캔틸레버의 횡 방향 변위는 다음과 같이 표현할 수 있다.

수학식 17

$$\delta = \frac{l^2}{2t_s}\left(\alpha_1^f - \alpha_1^w\right)$$

<43>

<44> - 수치적 계산 결과와 검증

<45> 본 발명에서는 문헌에 보고 된 자기변형 캔틸레버를 대상으로 자기변형 박막의 탄성에너지가 자기변형상수의 측정에 미치는 의 영향을 정량적으로 검증하였다.

<46> · 기판의 한쪽 면에만 자기변형 박막이 증착된 경우

<47> 도2에서 보는바와 같이 Quandt 등에 의해 제작된 캔틸레버를 먼저 고려하였다. 그들은 실험을 통해 캔틸레버의 길이방향으로 인가되는 자기장에 의한 횡 방향 변위를 측정하였다. 구해진 횡 방향 변위로부터 자기변형상수를 계산하였다. 두 번째로 Honda 등에 의해 제작된 Tb-Fe 박막과 Sm-Fe film 박막이 증착된 캔틸레버가 고려되었다. 그들 역시 회전 자기장을 인가하고 캔틸레버의 횡 방향 변위를 측정하였다. 그러나 Honda 등은 그들의 논문에서 기판 및 자기변형 재료의 기계적 물성을 보고하지 않았다. 이에 본 발명에서는 비슷한 화학적 조성을 갖는 자기변형 박막의 물성을 이용하였다. 앞에서 했던 방법과 똑같이 Tb-Fe 박막과 Sm-Fe 박막의 자기변형 상수가 계산되었으며 이를 도4와 도5에 각 각 나타내었다. Tb-Fe 박막의 경우 계산된 두 자기변형 상수들은 거의 두 배에 달하는 매우 큰 차이가 발생함을 확인할 수 있다. Sm-Fe 박막의 경우 역시 상당한 차이가 관찰되었다.

<48> · 기판의 양쪽 면에 자기변형 박막이 증착된 경우

<49> 앞서 자기변형 박막의 탄성에너지가 무시되는 경우 낮은 자기변형상수가 얻어짐을 확인하였다. 본 발명에서는 이렇게 낮은 자기변형상수가 자기변형 MEMS 작동기의 성능평가에 미치는 영향을 고찰하였다. 도5에 나타난 캔틸레버는 양의 자기변형을 갖는 Tb-Fe 박막과 음의 자기변형을 갖는 Sm-Fe 박막이 기판의 윗면과 아랫면에 각각 증착된 캔틸레버를 보여준다. 도4의 결과를 수학식 8 ~ 수학식 13에 적용하여 횡 방향 변위를 계산하였다. 본 발명에서는 자기변형박막의 탄성에너지가 고려된 경우로부터 얻어진 자기변형 상수를 이용된 경우의 횡 방향 변위가 최대 47㎛ 크게 나타났다. 그러나 중립축의 위치를 나타내는 β는 두 경우에 대해 동일하게 0.3487로 나타났다.

<50> 다음은 미소 구동기의 변위를 해석하기 위해 유한요소법 일차원 요소인 보 요소에 관한 것이다. 자기변형 현상을 이용하는 대부분의 미소 구동기는 기판 위에 증착된 자기변형 박막의 신장 변형에 따른 굽힘 현상을 이용한다. 이러한 미소 작동기의 설계 및 평가에서 캔틸레버의 변위에 관한 정보는 매우 중요하다. 앞서 언급한 바와 같이 매우 많은 이론적인 연구결과가 변위 예측을 위해 제안되었으나 고려 대상이 하나의 자기변형 박막이 기판 위에 증착된 경우이기 때문에 여러 개의 자기변형박막으로 구성되는 다층박막 시스템의 경우에는 적용될 수 없다. 또한 지금까지 제안된 유한요소 모델에서는 자기변형의 이방성이 직접적으로 고려될 수 없다. 이를 해결하기 위해 본 발명에서는 도6에 보이는 간단한 일차원 보 요소(beam element)를 제안하였다. 자기변형 박막의 휨 강성(flexural rigidity)이 기판의 휨 강성에 비해 무시할 수 없을 경우 캔틸레버의 굽힘에 미치는 자기변형 박막의 영향은 반드시 고려되어야 한다. 본 발명에서는 제안된 자기변형 요소의 강성행렬 및 힘 벡터 계산 시 두께 방향으로의 적분을 수행함으로써 이러한 효과를 고려하였다

<51> 보 요소의 요소 강성행렬은 다음과 같이 표현된다.

수학식 18

$$K = \int_0^{L_e}\int_{h_i}^{h_{i+1}} [B(\eta,\xi)]^T E_i [B(\eta,\xi)] w \, d\xi \, d\eta$$

<52>

<53> 여기서 E_i은 각각 i번째 층의 탄성계수, h_i는 i번째 층의 높이,w는 보의 폭, L_e는 보 요소의 길이, $B(\eta,\xi)$는 변위-변형율 행렬이다. 자기변형에 의한 등가 절점력을 계산하기 위해서는 자기변형의 이방성이 고려되어야 한다. 본 논문에서는 이를 위해 등가 자기변형 응력(equivalent magnetostrictive stress)을 도입하였다. 등가 자기변형 응력은 이방성을 갖는 자기변형 과 동일한 변형을 유발하는 등방성 응력을 말한다. 등가 자기변형 응력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

수학식 19

$$\sigma_i = \frac{1+\nu_s}{1-\nu_s} b$$

<54>

<55> 여기서 ν_s는 기판의 포와송 비이며 b는 자기변형 박막의 자기-기계연성계수이다. 기판의 등가 자기변형응력은 물론 0이다. 유한요소의 힘 벡터는 다음과 같이 표현할 수 있다.

수학식 20

$$F = \int_0^{L_e} \int_{h_i}^{h_{i+1}} [B(\eta,\xi)]^T \sigma_i w \, d\xi \, d\eta \qquad (i = 0,1,\cdots,n)$$

<56>

<57> 앞서 제안된 일차 원 보 요소는 보의 굽힘에 미치는 보의 폭의 영향을 고려할 수 없다. 또한 외부 자기장의 방향이 자기변형 박막의 자기 축(magnetic easy axis)과 일정한 각도를 유지하면서 가해지는 경우 자기변형 박막에는 비틀림이 유발되기 때문에 평면 내(in-plane)변형을 가정하는 보 요소로는 이를 고려할 수 없게 된다. 본 발명에서는 앞서 언급된 보 요소로는 고려할 수 없는 평면 외 변형(out of plane deformation)을 고려하기 위해 일차 원 보 요소에 적용된 개념을 이차원으로 확장한 판 요소를 제안하였다. 도7은 제안된 판 요소를 보여준다. 보 요소와 유사하게 판 요소의 강성행렬은 아래의 식과 같이 표현된다.

수학식 21

$$K_b = \int_A \int_{h_i}^{h_{i+1}} [B_f(\eta,\xi,\zeta)]^T D_{f,i} [B_f(\eta,\xi,\zeta)] \, d\zeta \, d\eta \, d\xi$$

<58>

<59> 여기서 K_b, K_s는 각각 굽힘 및 전단 강성행렬이다. $D_{f,i}$는 굽힘 응력-변형율에 대한 구성행렬, $D_{s,i}$ 는 전단응력-변형율에 대한 구성행렬이다. h_i와 h_{i+1}는 i번째 박막의 z좌표이며,A_e는 요소의 면적이다. 또한 $B_f(\eta,\xi,\zeta)$, $B_s(\eta,\xi,\zeta)$는 각각 변위-굽힘 변형율, 변위-전단변형율 행렬이다. 등가 절점력은 보 요소와 마찬가지로 등가 자기변형응력을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

수학식 22

$$F = \int_A \int_{h_i}^{h_{i+1}} [B_f(\eta,\xi,\zeta)]^T \sigma_{f,i} \, d\eta \, d\xi \, d\zeta$$

<60>

<61> 여기서 $\sigma_{f,i}$는 i번째 자기변형 박막의 등가 자기변형 응력이며 행렬형태로 표현하면 다음과 같다.

수학식 23

$$\sigma_{f,i} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx,i} & \sigma_{yy,i} & 0 \end{bmatrix}^T$$

<62>

<63> 여기서 외부 자기장의 자기 축과 평행하게 가해지는 경우 $b_{xx,i}$는 i번째 층의 자기장 방향으로의 등가 자기변형응력이며, $b_{yy,i}$는 i번째 층의 자기장에 수직한 방향으로의 등가 자기변형응력이다. 앞서 제안한 보 요소와 판 요소를 바탕으로 유한요소 코드의 개발에는 다음과 같은 유한요소 정식화가 사용되었다. 선형 탄성거동 및 비선형 자기적 거동을 가정하는 경우 자성재료의 구성방정식은 다음과 같이 표현된다.

수학식 24

$$\sigma(B,\varepsilon) = [c]\varepsilon + \sigma^*(B)$$

<64>

수학식 25

$$H(B,\varepsilon)=\frac{\partial\sigma^{o}(B)}{\partial B}\varepsilon+H(B,0)$$

<65>

<66> 여기서 H는 자기장, B는 자속, σ는 응력 텐서, ε는 변형율 텐서, [c]는 탄성구성방정식 행렬, [v]는 자기저항행렬, [α]는 자기-탄성 연성행렬이며 σ^{0}(B)는 자속에 의해 유도되는 응력이다. 수학식 24 와 수학식 25의 각 항은 다음과 같이 표현할 수 있다.

수학식 26

$$\sigma^{o}(B)=[c]\varepsilon^{o}(B)$$

<67>

수학식 27

$$H(B,0)=[\nu^{o}(B)]B$$

<68>

수학식 28

$$\frac{\partial\sigma^{o}(B)}{\partial B}=[\eta^{o}(B)]B$$

<69>

<70> 따라서 수학식 26 ~ 수학식28 을 수학식 24 ~ 수학식 25에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

수학식 29

$$\sigma(B,\varepsilon)=[c]\varepsilon+\sigma^{o}(B)=[c]\varepsilon+[c]\varepsilon^{o}(B)=[c][\varepsilon+\varepsilon^{o}(B)]$$

<71>

수학식 30

$$\begin{aligned}H(B,\varepsilon)&=\frac{\partial\sigma^{o}(B)}{\partial B}\varepsilon+H(B,0)=[\eta^{o}(B)]B\,\varepsilon+[\nu^{o}(B)]B\\&=([\eta^{o}(B)]\varepsilon+[\nu^{o}(B)])B=[\tilde{\nu}(B,\varepsilon)]B\end{aligned}$$

<72>

<73> 한편 외부 자기장이 인가되었을 때 자성재료의 포텐셜 에너지는 다음과 같다.

수학식 31

$$W(B,\varepsilon)=\int_{\Omega}\left(\int_{0}^{B}H'(B',0)dB'+\int_{0}^{\varepsilon}\sigma'(B,\varepsilon')d\varepsilon'\right)d\Omega$$

<74>

<75> 또한 외부응력 및 인가 자기장에 의한 일(work)은 다음과 같다.

수학식 32

$$T(B,\varepsilon)=\int_{\Omega}A\cdot j\,d\Omega+\int_{\Gamma_{h}}A\cdot H\times\hat{n}\,d\Gamma+\int_{\Omega}u\cdot f^{\Omega}\,d\Omega+\int_{\Gamma_{\sigma}}u\cdot f^{\Gamma}\,d\Gamma$$

<76>

<77> 여기서 A는 자기벡터포텐셜, j는 전류밀도, u는 변위, f^{Ω}은 체적력, f^{r}는 표면력이다. 수학식 31 과 수학식 32에 의해 범함수(functional), Π(B,ε),는 다음과 같이 표현된다.

수학식 33

$$\Pi(B,\varepsilon) = W(B,\varepsilon) - T(B,\varepsilon)$$

$$= \int_{\Omega}\left(\int_{0}^{B}[\tilde{\nu}(B',\varepsilon)]B'dB'\right)d\Omega + \frac{1}{2}\int_{\Omega}\varepsilon^{t}[c]\varepsilon d\Omega + \int_{\Omega}\sigma^{r}(B)\varepsilon d\Omega$$

$$- \int_{\Omega}A\cdot j\,d\Omega - \int_{\Gamma_1}A\cdot H\times\hat{n}\,d\Gamma - \int_{\Omega}u\cdot f^{\Omega}\,d\Omega - \int_{\Gamma_2}u\cdot f^{\Gamma}\,d\Gamma$$

<78>

<79> 해석영역이 이산화 된 후, 각 유한요소에서의 범함수는 다음과 같이 나타내어진다.

수학식 34

$$\Pi^{e}(B,\varepsilon) = \int_{\Omega^{e}}\left(\int_{0}^{B}[\tilde{\nu}(B',\varepsilon)]B'dB'\right)d\Omega + \int_{\Omega^{e}}\sigma^{r}(B)\varepsilon d\Omega + \int_{\Omega^{e}}\frac{1}{2}\varepsilon^{t}[c]\varepsilon d\Omega$$

$$- \int_{\Omega^{e}}A\cdot j\,d\Omega - \int_{\Gamma_1}A\cdot H\times\hat{n}\,d\Gamma - \int_{\Omega^{e}}u\cdot f^{\Omega^{e}}\,d\Omega - \int_{\Gamma_2}u\cdot f^{\Gamma^{e}}\,d\Gamma$$

<80>

<81> 위의 범함수를 최소화 함으로써 다음과 같은 유한요소 방정식을 얻는다

수학식 35

$$[S(B,\varepsilon)]\{\tilde{A}\} = \{J_s\} + \{J_i(B)\}$$

$$[K]\{\tilde{u}\} = \{F_s\} + \{F_i(B)\}$$

<82>

<83> 본 발명에서는 도8과 같은 해석 예제를 해석함으로써 개발된 프로그램의 해석 신뢰성 및 응용성을 검증하였다. 즉 크기 100×26×2.5mm의 Terfenol 박판이 균일한 인가 자기장(H = 25 kA/m)하에 놓여있을 때 자기변형을 해석하였다. 해석에 사용된 자기변형 재료의 투자율 및 자기-변형율 계수를 구하였으며 도9는 해석결과를 보여준다.

<84> 전술한 내용은 후술할 발명의 특허 청구 범위를 더욱 잘 이해할 수 있도록 본 발명의 특징과 기술적 장점을 다소 폭넓게 개선하였다. 본 발명의 특허 청구 범위를 구성하는 부가적인 특징과 장점들이 이하에서 상술 될 것이다. 개시된 본 발명의 개념과 특정 실시예는 본 발명과 유사 목적을 수행하기 위한 다른 구조의 설계나 수정의 기본으로서 즉시 사용될 수 있음이 당해 기술 분야의 숙련된 사람들에 의해 인식되어야 한다.

<85> 또한, 본 발명에서 개시된 발명 개념과 실시예가 본 발명의 동일 목적을 수행하기 위하여 다른 구조로 수정하거나 설계하기 위한 기초로서 당해 기술 분야의 숙련된 사람들에 의해 사용될 수 있을 것이다. 또한, 당해 기술 분야의 숙련된 사람에 의한 그와 같은 수정 또는 변경된 등가 구조는 특허 청구 범위에서 기술한 발명의 사상이나 범위를 벗어나지 않는 한도 내에서 다양한 진화, 치환 및 변경이 가능하다.

발명의 효과

<86> 이상에서 상술한 바와 같이, 본 발명의 자기변형 작동기의 거동 예측 프로그램을 이용하면, MEMS 소자의 성능을 미리 예측할 수 있어 설계 비용측면에서 커다란 장점을 지닌다. 또한 자기변형 재료의 기계적 물성인 탄성에너지를 고려하여 자기변형 계수를 구하였으므로, 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 더욱 높일 수 있다. 더 나아가 새로운 MEMS 소자 구조를 변형하여 그에 따른 효과를 시뮬레이션 할 수 있어 새로운 구조의 소자 제작에도 널리 쓰일 수 있는 효과를 제공한다.

도면의 간단한 설명

<1> 도1은 종래 기술에 따른 자기 변형 캔틸레버를 나타내는 도면.

<2> 도2는 종래 기술에 따른 Quandt에 의해 제작된 자기변형 캔틸레버를 나타내는 도면.

<3> 도3은 종래 기술에 따른 기판의 한쪽 면에만 자기변형 박막이 증착된 경우의 자기변형 캔틸레버를 나타내는 도면.

<4> 도4a는 본 발명에 따라 계산된 Tb-Fe 박막의 자기변형계수를 나타내는 도면

<5> 도4b는 본 발명에 따라 계산된 Sm-Fe 박막의 자기변형계수를 나타내는 도면.

<6> 도5는 종래 기술에 따른 기판의 양쪽 면에 자기변형 박막이 증착된 경우의 자기변형 캔틸레버를 나타내는 도면.

<7> 도6은 본 발명에 따라 자기변형을 위해 제안된 보 요소를 나타내는 도면.

<8> 도7은 본 발명에 따라 자기변형을 위해 제안된 판 요소를 나타내는 도면.

<9> 도8a는 본 발명에 따라 균일한 자기장에 놓여있는 Terfenol 박판에 2차원 비선형 자기변형 유한요소 코드의 적용을 나타내는 도면.

<10> 도8b는 본 발명에 따라 2차원 비선형 자기변형 유한요소 코드의 적용을 위해 유한요소 격자를 나타내는 도면.

<11> 도8c는 본 발명에 따라 2차원 비선형 자기변형 유한요소 코드의 적용을 위해 자기장 해석의 경계조건을 나타내는 도면

<12> 도8c는 본 발명에 따라 2차원 비선형 자기변형 유한요소 코드의 적용을 위해 탄성 해석의 경계조건을 나타내는 도면.

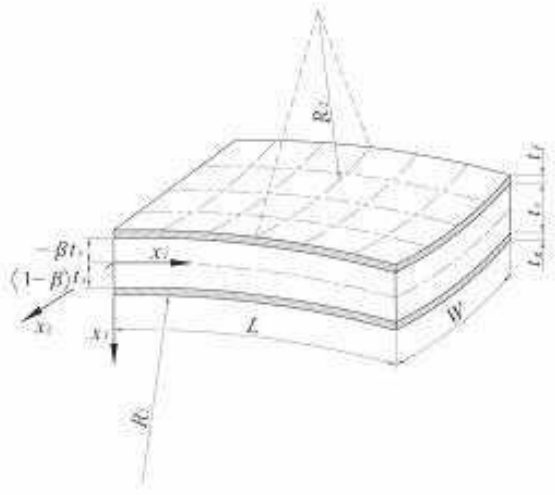
<13> 도9a는 본 발명에 따라 2차원 비선형 자기변형 유한요소 코드의 적용 결과에서 자기 포텐셜 분포를 나타내는 도면.

<14> 도9b는 본 발명에 따라 2차원 비선형 자기변형 유한요소 코드의 적용 결과에서 자기장 분포를 나타내는 도면.

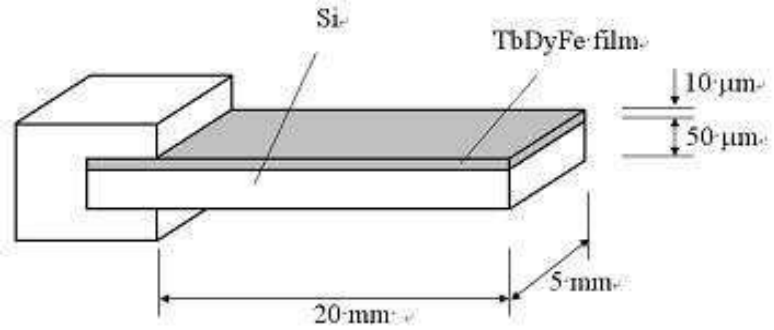
<15> 도9c는 본 발명에 따라 2차원 비선형 자기변형 유한요소 코드의 적용 결과에서 Terfend 박판의 자기변형을 나타내는 도면.

도면

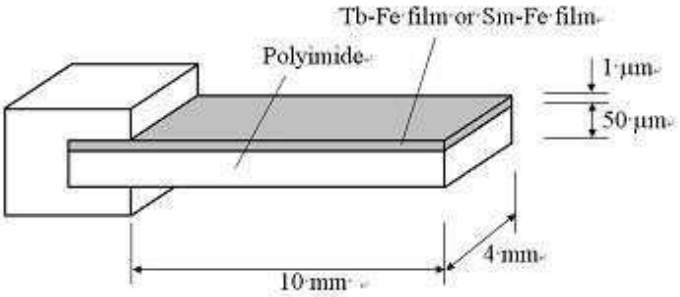
도면1



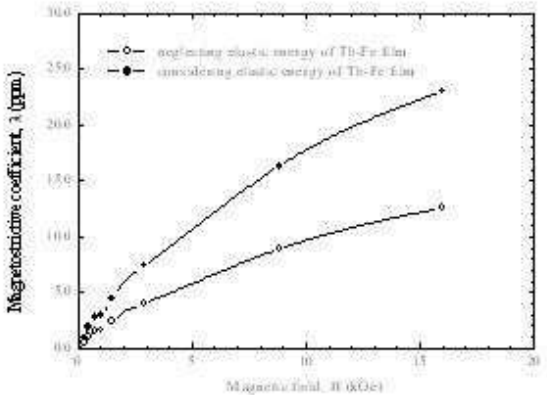
도면2


Si
TbDyFe film
10 μm
50 μm
5 mm
20 mm

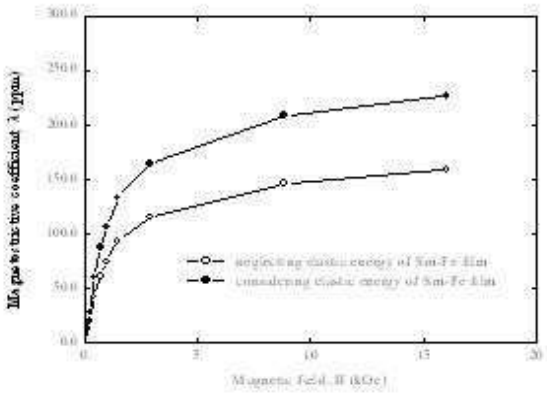
도면3


Tb-Fe film or Sm-Fe film
Polyimide
1 μm
50 μm
4 mm
10 mm

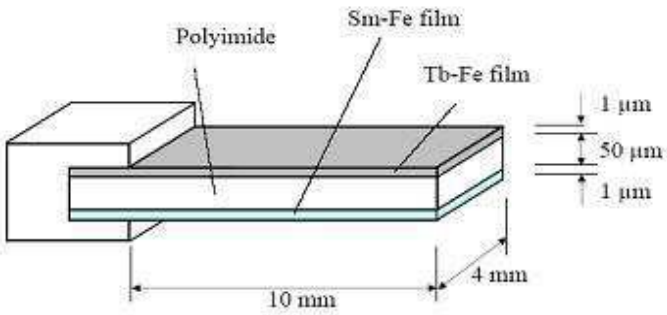
도면4a


Magnetostriction coefficient, λ (ppm)

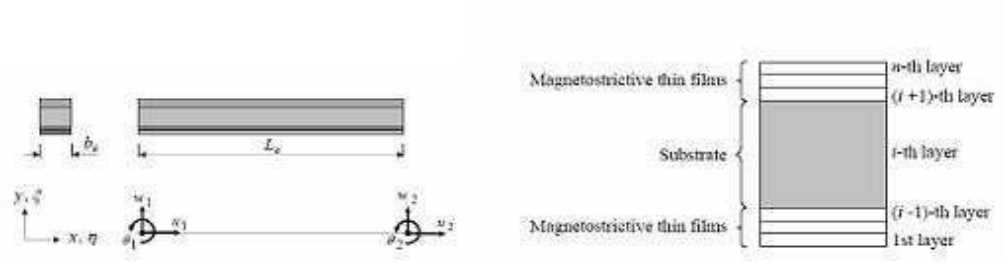
도면4b



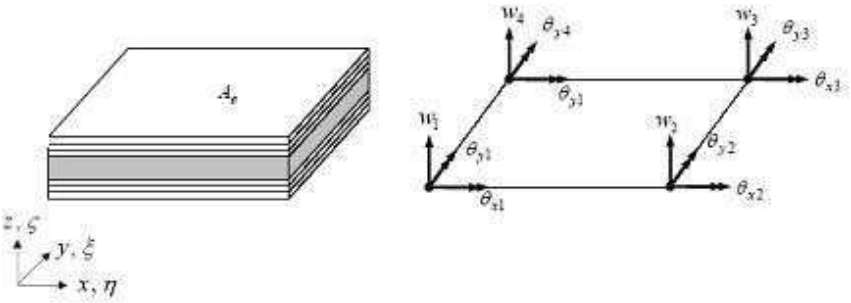
도면5


Polyimide
Sm-Fe film
Tb-Fe film
1 μm
50 μm
1 μm
4 mm
10 mm

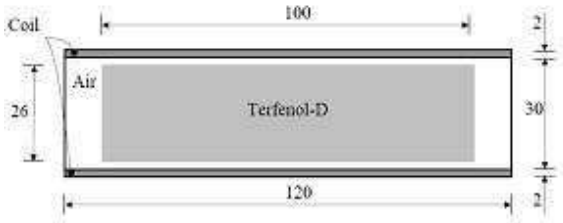
도면6


Magnetostrictive thin films
Substrate
Magnetostrictive thin films
n-th layer
(i +1)-th layer
i-th layer
(i -1)-th layer
1st layer

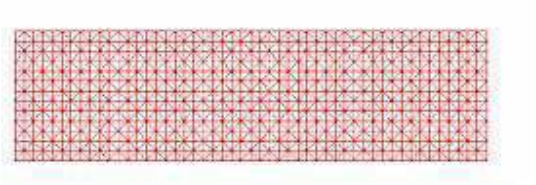
도면7



도면8a



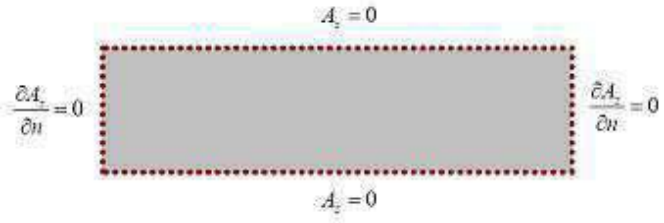
도면8b



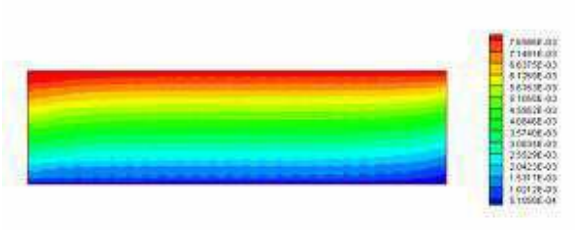
도면8c



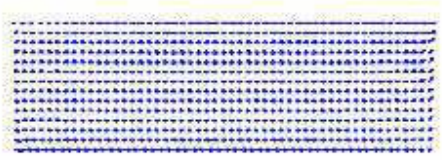
도면8d



도면9a



도면9b



도면9c

