

자왜 Tonpilz 변환기의 음향특성 해석 프로그램 개발 Program Development for the Underwater-Acoustic Characteristic Analysis of Magnetostrictive Tonpilz Transducer

정은미* · 김재환**
E. M. Jung, Jaehwan Kim

Key Words : FEM (유한요소법), Magnetostrictive materials (자왜재료), Tonpilz Transducer (톤필즈 변환기), Terfenol-D.

ABSTRACT

Magnetostrictive materials are used low frequency sonar transmitter instead of piezoelectric materials. But it is difficult to analyze due to the nonlinearity and hysteresis of magnetostrictive materials. This paper deals with the program development for the finite element modeling of magnetostrictive tonpilz transducers and for analyzing their acoustic characteristics. To take into account the nonlinearity of magnetostrictive materials, the magnetic field calculation is separated from the displacement calculation, and a curve fitting is adopted for the nonlinear behavior of the magnetic and mechanical strain fields. At first, the magnetic field is obtained by using a commercial FEM software and the displacement of the transducer is calculated by plugging the obtained magnetic field into forcing term. To verify the accuracy of the developed program, a comparison is made with a commercial code, ATILA.

1. 서론

자왜재료는 상온에서 재료의 변형방향과 평행하게 자기장을 인가하면 변형이 발생하는 자왜현상(Magnetostriction)이 있는 재료로 변형방향은 자기장의 부호에 관계없이 항상 양의 방향으로 변형하는 지능재료이다. Terfenol-D는 자왜 변형이 매우 크기 때문에 최근에 압전재료를 대체하여 저주파 수중음향 변환기에 많이 사용되고 있다.

자왜재료의 과도응답을 해석하기 위해 모델링이 필요한데 이에 본 논문에서는 비선형 모델을 개발하였다.[1] 이 모델은 Maxwell 방정식과 역학 관계식을 사용하여 유한차분법으로 풀었으며 이 식에서 필요한 기계적, 자기적 재료 계수는 자계 60kA/m 일 때의 값으로 구하였다. 또한, 자왜재료의 기계-자기장간의 비선형성을 모델링하기 위해 준정적(Quasi-static) 변분 원리와 유한요소법을 바탕으로 모델링을 하였다.[2,3] 그러나, 반복계산에 의한 구성방정식의 변화와 변위장을 풀어야 하기 때문에 시간이 많이 걸리는 문제가 있다. 한편 이 문제를 해결하기 위해 상용프로그램인 ATILA에서는 재료가 선형이라 가정하고 자왜재료의 유한요소정식화를 하여 반복적인 방법으로 해석하였다.[4] 이 식에서 와류전류는 고려하지 않았고 주파수는 충분히 낮아 정자기(Magnetostatic)라고 가정하였다.

본 논문에서는 자왜재료의 비선형적인 변위대 자기장간의 관계식을 직접 이용하여 변위를 구하되 자기장 해석과 변위장 해석을 나누어 수행하였다. 자기장 해석은 상용 소프트웨어인 ANSYS를 사용하여 해석한 결과를 개발 해석 프로그램(USAP; Underwater Sensor Analysis Program)에 입력하여 변위해석과 음향특성을 해석하였다. Tonpilz 변환기를 예제로 하여 자왜재료 상용 전용 해석프로그램(ATILA)과 개발 프로그램(USAP)의 해석 결과를 비교하였다.[5]

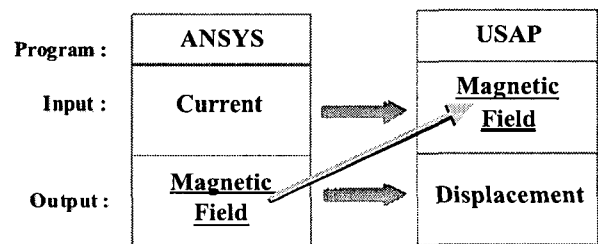


Fig. 1 Data Flow of USAP

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 인하대학교 기계공학과
E-mail : jaehwan@inha.ac.kr
Tel : (032) 872-7925, Fax : (032) 868-1716

2. 이론

2.1 유한요소 정식화

복합구조 수중음향센서는 탄성체의 구조재료 및 압전재료나 자왜재료와 같은 능동재료, 그리고 물이나 공기와 같은 유체의 영역으로 나눌 수 있다. 여기서, 구조재료 및 능동재료로 구성된 탄성체 영역의 부분은 유한하며 유체의 영역은 무한하다고 볼 수가 있다.

(1) 자왜재료

자왜재료는 자기장에 의해 변형이 발생하는 재료로 대표적인 것으로는 Terfenol-D ($Tb_xDy_{1-x}Fe_2$)가 있다. Fig.2 에서 보는 바와 같이 이 재료는 상온에서 재료의 변형방향과 평행하게 자기장을 인가하면 변형이 발생하는데 이때의 변형방향은 자기장의 부호에 관계없이 항상 양의 방향으로 변형한다. 또한 프리로드(preload)를 가하면 변형량이 급격하게 늘어나는 성질을 가지고 있다.

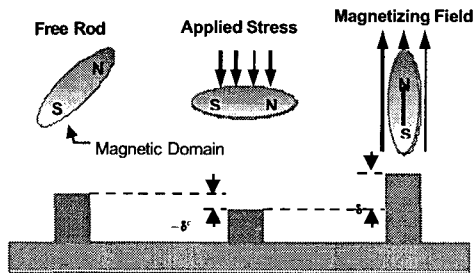


Fig. 2 Magnetostriction Phenomenon of Terfenol-D

Terfenol-D의 특징은 다음과 같다.

- 큰 변형량과 높은 출력
- 작동 온도의 범위가 넓음
- 수명 사이클 무제한
- 빠른 응답속도

(2) 자왜-탄성 연성계의 유한요소 정식화

자왜-기계 연성계의 선형 구성방정식은 다음과 같다.

$$S = s^H T + d^T H_M \quad (1)$$

$$B_M = dT + i^T H_M$$

또는,

$$T = c^H S - e^T H_M \quad (2)$$

$$B_M = eS + i^S H_M$$

이다. 여기서,

T : 응력 텐서

S : 변형율 텐서

H_M : 자기장의 세기

B_M : 자속의 세기

i^T, i^S : 투자율

c^H : 일정한 자기장에서 측정된 강성

s^H : 일정한 자기장에서 측정된 유연성

e : 자왜 응력 상수

d : 자왜 변형율 상수

식(1)과 (2)는 압전재료의 구성방정식과 동일하나, 자왜 상수들이 비선형적이기 때문에, 물성의 비선형성이 고려된 유한요소식이 필요하다. 그러나, 본 연구에서는 자기장과 변형을 나누어 해석하였기 때문에 ANSYS에서 자기장을 해석한 후 변형 해석에 도입하여 식(2)에서 자기장 H 를 안다는 가정하에 첫 번째 식만을 고려하여 유한요소 정식화를 하였다. 이 과정을 거치면 유한요소식은 다음과 같다.

$$M\ddot{u} + Ku = F_H + F \quad (3)$$

여기서,

$$M = \int \rho N^T d\Omega \quad (4)$$

$$K = \int B^T C^H B d\Omega \quad (5)$$

$$F_H = \int B^T e H d\Omega = \int B^T C^H d H d\Omega \quad (6)$$

식(3)에서 F_H 는 자기장에 의해 발생하는 절점력으로 ANSYS로부터 자기장 H 가 자왜재료의 각 절점(node)에 해당하는 값이 나오면 이로부터 계산되는 값이다. dH 는 자왜 변형율 상수 d 에 자기장 H 를 곱한 것으로 자기장에 따른 변형율이 Fig.3과 같이 비선형적이다.

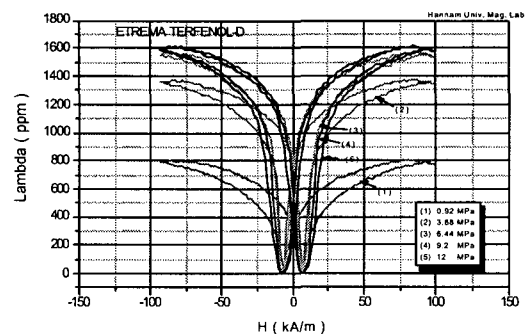


Fig. 3 Magnetic field-strain curve for Terfenol-D

임의의 프리로드 조건에서, 자기장 세기(H)에 따른 Terfenol-D의 변형률(ϵ)은 Fig.3 과 같이 변하는데 이 커브를 각각의 P 상태에 따른 6 차 다항식을 이용하여 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\epsilon_{33} = a_0 + \sum_{n=1}^6 a_n H^n \quad (7)$$

여기서, ϵ_{33} 값은 $d_{33}H$ 에 해당하는 변형률로 식(7)에 의해 H 값에 따라 계산된다. 즉, 각 요소의 절점에서 나온 자기장 값은 형상함수를 이용하여 Gaussian 점에서의 자기장 값으로 계산되고 이에 대응되는 변형률 $d_{33}H$ 는 식(7)에 의해 계산되어 F_H 를 구성하게 된다.

2.2 2차원 축 대칭 요소의 적용

봉 형태의 자왜재료 작동기의 성능을 해석하기 위해 축 대칭 요소를 사용하였다. 축 대칭 요소는 2 차원 요소를 축을 중심으로 각도를 회전했을 경우의 요소로, 2 차원 요소와 같은 단면을 하고 있으나 강성행렬을 구성하기 위해 회전 방향으로의 적분이 필요하다. 축 대칭에서는 θ 방향의 응력과 변형률이 영이다. 즉, $\tau_{r\theta} = \tau_{\theta z} = \gamma_{r\theta} = \gamma_{\theta z} = 0$ 이다. 또한, 회전각에 대해 적분을 하게 되면, 축 대칭 요소의 강성행렬 K_{AXIS} 및 질량행렬 M_{AXIS} 을 계산하면 다음과 같다.

$$K_{AXIS} = \int_A \int_{-\pi}^{\pi} B^T C B r d\theta dA = \sum B^T C B 2\pi r |J| W_i \quad (8)$$

$$M_{AXIS} = \rho \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-\pi}^{\pi} N^T N r d\theta |J| d\xi d\eta = \rho \sum N^T N 2\pi r |J| W_i \quad (9)$$

여기서, r 은 대칭축에서 요소의 적분점까지의 거리이고, W_i 는 가우시안 (Gaussian) 적분 가중치이다. 축 대칭 요소는 축 대칭 문제의 해석 시간 및 모델링 시간을 줄일 수 있는 장점이 있으며 특히, 축 방향의 변형이 중요할 경우 이 요소를 효율적으로 이용할 수 있다.

2.3 3차원 선형 블록 요소의 적용

3 차원 자왜재료 작동기의 성능을 해석하기 위해 선형 Brick 요소를 사용하여 모델링 하였다. Brick 요소에 대한 강성행렬 K 및 질량행렬 M 을 구하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K = \int_V B^T C B dV = \sum B^T C B |J| W_i \quad (10)$$

$$M = \rho \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 N^T N |J| d\xi d\eta d\zeta = \rho \sum N^T N |J| W_i \quad (11)$$

3. 유한요소 모델링

3.1 자왜 Tonpiliz 신호변환기의 유한요소 모델링

본 연구에서 개발된 자왜/탄성 연성계에 대한 프로그램을 검증하기 위해 다음 Fig.4 에서 보는 바와 같이 봉 형태의 자왜 Tonpiliz 신호변환기를 예제로 택하여 2차원은 축 대칭 요소를, 3차원은 선형 블록요소를 적용하여 모델링하였다. 자왜 Tonpiliz 변환기는 $\varnothing 20 \times 200$ mm 의 Terfenol-D 봉으로 되어있으며 그 주위에는 두께가 0.05mm 인 코일이 감겨 있어 이 봉을 따라 자기장이 생기도록 하였다. 또한 봉의 양 끝에는 Head Mass 와 Tail Mass 가 달려있다.

Table 1은 위의 모델링을 위해 자왜 해석상용프로그램인 ATILA 와 개발 프로그램인 USAP 에서 사용된 Terfenol-D, Head Mass 등 재료의 각종 계수를 나타낸 표이다.

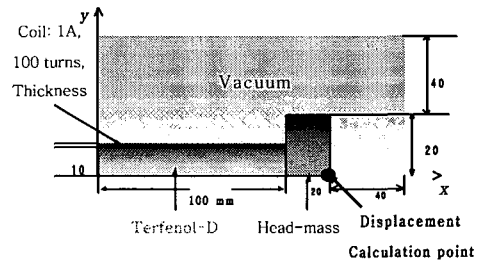


Fig. 4 Terfenol-D Tonpiliz Transducer

Table. 1 Material properties of Tonpiliz Transducer

Material	Material Property
Head Mass (Aluminum)	<ul style="list-style-type: none"> • Density : 2,780 [kg/m³] • Young's Modulus : 71.4 [GPa] • Poisson's ratio : 0.344
Terfenol-D	<ul style="list-style-type: none"> • Density : 9,100 [kg/m³] • Compliance Matrix [$\times 10^{-12}$ [m²/N]] : $\begin{bmatrix} 25.0 & -1.8 & -16.7 & 0 & 0 & 0 \\ -1.8 & 25.0 & -16.7 & 0 & 0 & 0 \\ -16.7 & -16.7 & 40.0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 180.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 180.0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 53.6 \end{bmatrix}$ • Permeability Matrix [$\times 10^{-7}$ [H/m]] : $\begin{bmatrix} 56.9 & 0 & 0 \\ 0 & 56.9 & 0 \\ 0 & 0 & 27.1 \end{bmatrix}$

(1) 2차원 모델링

앞의 예제 모델인 Tonpiliz 변환기를 상용 해석 프로그램인 ANSYS 를 사용하여 Fig.5 와 같이 108 개의 4 절점 축 대칭 요소로 Terfenol-D 봉, Head Mass 를 2 차원 모델링을 하였으며 자기장의 손실이 없도록 외곽 부분은 자기장에 대해 완전 절연된다는 경계조건을 주었다. 코일은 100 회 감아 1A 의 전류를 가하였고, Fig.6 은 ANSYS 에서 구한 자속밀도 B_M (Magnetic Flux Density) 를 나타낸 것이다.

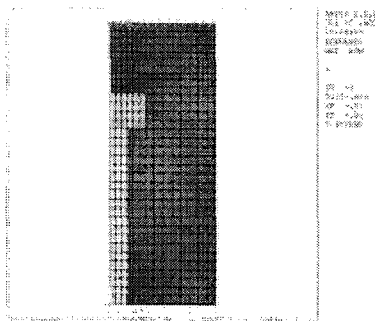


Fig. 5 Modeling and Boundary Condition of 2D Tonpiliz Transducer

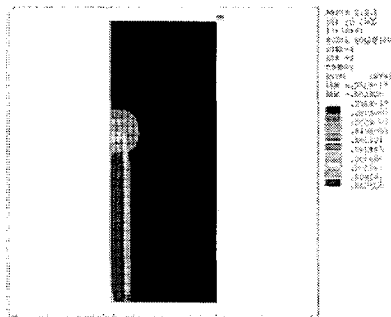


Fig. 6 Result of Magnetic Flux Density in 2D Model

(2) 3차원 모델링

앞의 예제 모델인 Tonpiliz 변환기를 Fig.7 과 같이 상용 해석 프로그램인 ANSYS 를 사용하여 720 개의 8 절점 3 차원 선형 Brick 요소를 사용하여 대칭축을 중심으로 1/4 모델링 하였으며, 2 차원 모델링과 마찬가지로 외곽 부분은 자기장에 대해 완전 절연된다는 경계조건을 주었다. Fig.8 은 코일을 100 회 감아 1A 의 전류를 가하였을 때, 자속밀도 B_M (Magnetic Flux Density) 의 분포를 나타낸 것이다.

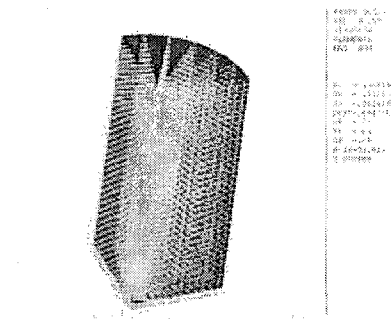


Fig. 7 Modeling and Boundary Condition of 3D Tonpiliz Transducer

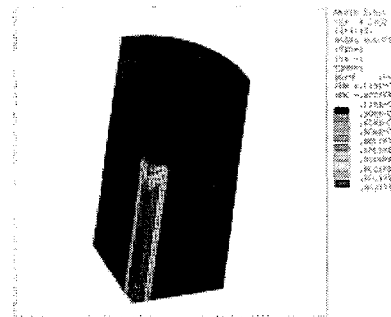


Fig. 8 Result of Magnetic Flux Density in 3D Model

4. 해석 결과

4.1 정적해석 결과

Fig.9 는 2 차원 Tonpiliz 변환기에 대해, Fig.10 은 3 차원 Tonpiliz 변환기에 대해 USAP 에서 구한 정적해석 결과이다. 이때 발생하는 변위를 구하기 위하여, 공기부분을 모델링 한 유한요소를 제거하였으며 preload 가 없고, 1A 의 전류를 인가하였을 때 자기장에 의해 발생하는 변위를 계산한 것이다

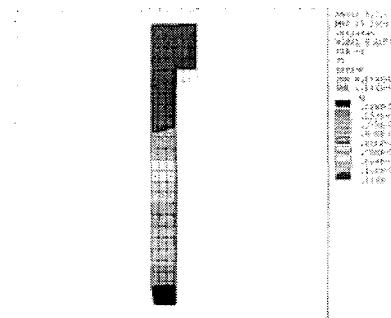


Fig. 9 Result of Displacement by Magnetic Field in 2D Model

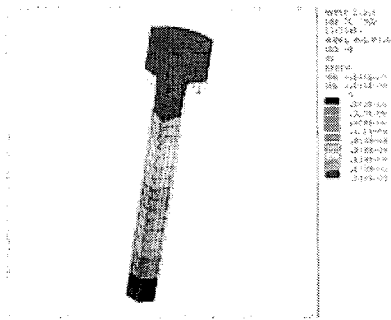


Fig. 10 Result of Displacement by Magnetic Field in 3D Model

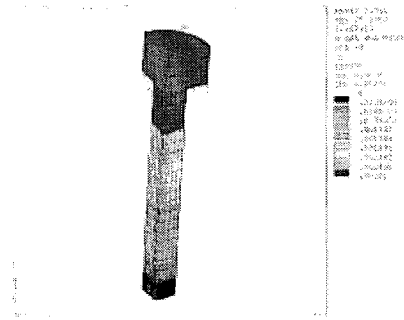


Fig. 13 Deformation of Transducer in 3347Hz

4.2 조화해석 결과

Fig.11, Fig.12 는 2 차원 Tonpitz 변환기에 대해, Fig.13, Fig.14 는 3 차원 Tonpitz 변환기에 대해 USAP 에서 구한 조화해석 변형에 대한 결과이다. 2 차원의 경우에는 Head Mass 의 110 번 절점에서의 최대변위와 압축변위를 나타낸 것이고, 3 차원의 경우에는 782 번 절점에서의 최대변위와 압축 변위를 나타낸 것이다.

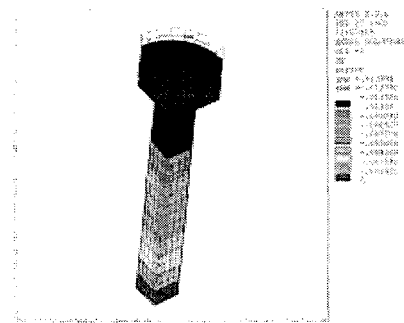


Fig. 14 Deformation of Transducer in 3348Hz

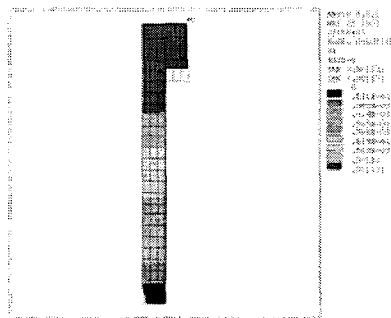


Fig. 11 Deformation of Transducer in 3417Hz

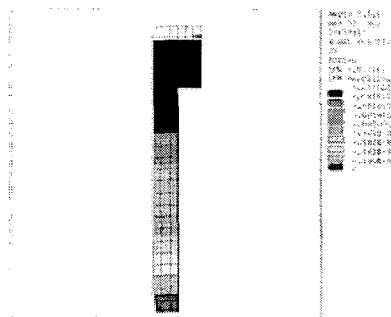


Fig. 12 Deformation of Transducer in 3418Hz

4.3 ATILA 결과값과 비교 검증

USAP 에서 0~5kHz 의 주파수 대역에서 구한 결과로 2D 의 경우 공진주파수는 3418Hz 이며 3D 의 경우 공진주파수는 3347Hz 로, ATILA 에서 구한 공진 주파수는 3419Hz 로 거의 일치함을 볼 수 있다.

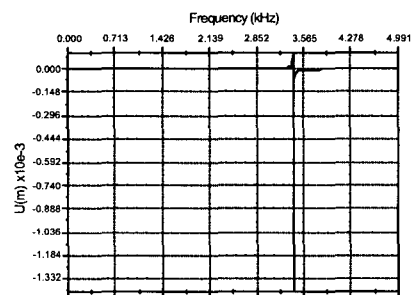


Fig. 15 2D Harmonic Analysis in USAP

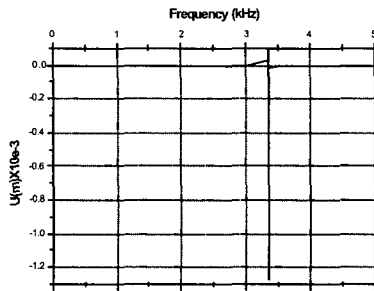


Fig. 16 3D Harmonic Analysis in USAP

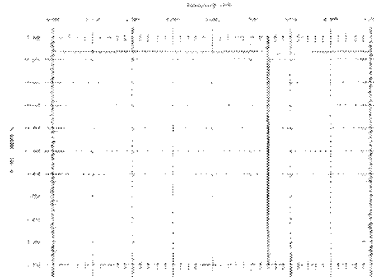


Fig. 17 2D, 3D Harmonic analysis in ATILA

Table. 2 Comparison USAP and ATILA

	USAP (Hz)	ATILA (Hz)
2D Model	3418	3419
3D Model	3348	3419

Table.2 에서와 같이 개발 프로그램인 USAP (Underwater Sensor Analysis Program) 과 자왜 해석 전용 프로그램인 ATILA 의 결과가 거의 일치함을 볼 수 있다.

4.4 유체/구조 연성계

앞에서 해석한 기계/자왜 복합 구조물의 해석 기능을 바탕으로 음향특성인 TVR (Transmitting Voltage Response) 을 구하기 위해 Fig.18 과 같이 모델링을 하였다. 해석 결과는 현재 진행 중에 있다.

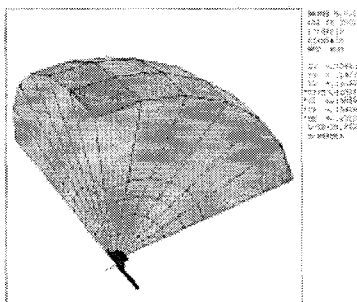


Fig. 18 3D Model of Magnetostrictive Tonpilz Acoustic Transducer

5. 결론

본 논문에서는 기계/자왜 복합 구조물의 해석을 위해 유한요소법을 이용하여 USAP 이라는 수중 음향센서 해석 프로그램을 개발하였고, 자왜 Tonpilz 변환기를 예로 들어 해석에 적용하였다. 이 결과를 검증하기 위해서 ATILA 라는 자왜 전용 해석 프로그램의 결과 값과 비교함으로써 비선형 재료의 연성계에 대한 해석을 수행하였다.

기계/자왜 재료의 유한요소해석은 자기장과 변위장을 분리해서 해석하였으며 우선 상용해석 프로그램으로 자기장을 해석하고 그 결과를 현재 개발중인 프로그램에서 변위를 계산하도록 하였다. 또한, 일차적으로 구한 자기장 값으로부터 비선형적인 자왜재료의 변형률을 다항식으로 보간하여 구함으로써 반복없이 자왜재료의 비선형성을 처리하도록 하였다.

현재 본 연구에서는 이전에 개발한 유체/구조 연성계에 대한 해석 기능과 기계/자왜 복합 구조물의 해석 기능을 바탕으로 음향특성인 방사해석, TVR, 산란해석, RVS 에 대해서 연구 중에 있다.

후 기

본 연구는 수중음향특화센터의 지원으로 수행된 과제 (UA 32) 의 일부이며, 관계자 여러분께 감사 를 드립니다.

참고문헌

- (1) L. Kvarsjö and G. Engdahl, 1991, Nonlinear 2-D Transient Modeling of Terfenol-D Rods, IEEE Trans. on Magnetics, Vol.27, No.6, pp.5349~5351.
- (2) K. S. Kannan and A. Dasgupta, March, 1997, A nonlinear quasi-static finite element scheme for magnetized and deformable bodies including Magnetostrictives, SPIE's Int. Symp. On Smart Structure and Materials, San Diego, CA , USA, Vol. 3041, pp.652~664.
- (3) K. S. Kannan and A. Dasgupta, Nonlinear finite element scheme for modeling the magnetoelastic response of magnetostrictive smart structures, SPIE's Int. Symp. On Smart Structure and Materials, Vol.2190, pp.182~193.
- (4) F. Claeysen, D. Bouchen, K. Anifrani, R. Bossut and J. N. Decarpigny, 1989, Analysis of Magnetostrictive transducers by the ATILA finite element code, J. Acoust. Soc. Am. 75, Suppl, 1, LL4.
- (5) 김재환, 손선봉, 조철희, 조치영, 2001 년 1 월, 압전 수중음향센서 음향특성의 유한요소해석, 한국음향학회지, 제 20 권 제 1 호, pp. 68~76.
- (6) B. A. Auld, 1973, Acoustic Fields and Waves in Solids, John Wiley & Sons.