

전기-기계 연성해석 코드 ATILA를 이용한 수중 음향 트랜스듀서 설계

A Study on Design of Underwater Acoustic Transducers Using the Electro-mechanical Coupling Analysis Code ATILA

김정석* · 이정민* · 조요한*

Jung-suk Kim, Jeong-min Lee and Yo-han Cho

(2005년 9월 14일 접수 : 2005년 10월 6일 심사완료)

Key Words : Underwater Acoustic Transducer(수중음향 트랜스듀서), Transducer Design(트랜스듀서 설계), Finite Element Method(유한요소법), ATILA

ABSTRACT

Underwater acoustic transducers are widely used for SONAR application, whose important design parameters are shapes, materials, dimensions and supporting structures. Practical design method of transducers consists of manufacturing, experiments and modifications so that it requires much time and expenses. In this study, an analytical method was developed for the Tonpitz type transducers using the commercial finite element analysis code ATILA which can solve the electro-mechanical coupling problems. A finite element model was established including the transducer elements such as ceramic stack, head mass, tail mass, tensile bolt, and molding layers. The proposed model was verified and modified by comparing the in-air and in-water test results of prototypes. The developed analysis method will be effectively used for the sensitivity analysis of design parameters in transducer design process.

기 호 설 명

c : 유체의 음속
 F : 압전 효과에 의한 힘(force resulting from piezoelectricity)
 $[H_f]$: 유체의 압축성 행렬(fluid compressibility matrix)
 I : 전류(current)
 $[K_{uu}]$: 강성 행렬(structural stiffness matrix)
 $[K_{\phi\phi}]$: 유전 강성 벡터(dielectric stiffness vector)
 $[K_{u\phi}]$: 압전 강성 벡터(piezoelectric stiffness vector)

$[L]$: 구조와 유체의 결합 행렬(connectivity matrix between solid structure and fluid)
 $[M]$: 질량 행렬(mass matrix)
 $[M_f]$: 유체의 질량 행렬(fluid mass matrix)
 P : 압력 벡터(pressure vector)
 Φ : 가해진 전압(applied voltage)
 ϕ : 유체 경계에 수직인 압력 구배(pressure gradient normal to the fluid domain boundary)
 ρ : 유체의 밀도
 U : 변위(Displacement)

1. 서 론

수중에서 음파를 이용하여 표적을 탐지, 추적, 식별하기 위한 소나용 트랜스듀서로는 주로 압전 소자를 중심으로 양쪽이 일반 금속 재료로 된 전면 추와

* 책임저자 : 정희원, 국방과학연구소
 E-mail : caekim@add.re.kr
 Tel : (055) 540-6183, Fax : (055) 542-3737
 * 국방과학연구소

후면 추로 구성된 Tonpilz형 진동체가 사용되고 있다.^(1~3) 이러한 Tonpilz형 트랜스듀서의 설계 변수로는 각 구성 요소들의 형상, 재료, 치수 및 고정 방법 등이 있는데 여러 가지 설계 사양을 동시에 만족하는 진동체를 설계하는 것은 쉽지 않다. 일반적으로 트랜스듀서를 설계하기 위해 운용 주파수, 출력 등의 사양이 제시되면 이를 만족하기 위해 압전 소자, 전면 추, 후면 추 등의 형상과 재질을 결정하고 간단한 이론 해석을 통해 각 구성 요소의 치수를 설계한다. 이러한 기초 설계를 바탕으로 진동체를 제작하고 그 특성을 실험으로 측정, 분석하여 설계 사양 만족 여부를 평가한 뒤 사양을 만족할 때까지 설계, 제작, 시험 과정을 반복한다. 이와 같은 시행 착오를 통한 설계 방법은 진동체의 제작, 실험, 수정 과정의 반복으로 개발에 많은 시간과 비용이 요구되며 설계 사양 변경에 효율적으로 대처하기 어렵다. 그러므로, 개발에 따르는 시행 착오를 최소화하고, 다양한 요구 성능을 만족하는 트랜스듀서의 설계를 위하여 해석을 통한 이론적이고, 체계적인 설계 기법을 확립하는 것이 필요하다⁽⁴⁾.

트랜스듀서의 특성을 해석하는 기법은 등가회로를 이용한 방법과 유한요소법과 같은 수치해석을 이용한 방법이 널리 사용되고 있다. 등가회로 방법은 비교적 간단한 모델에 대해서 짧은 시간 안에 트랜스듀서의 특성 및 경향을 해석할 수 있다는 장점이 있지만^(5~8), 이를 위해 전기, 기계, 음향 특성이 반영된 등가 회로의 각 인자에 대한 깊은 이해가 필요하고, 형상이 복잡해지면 해석이 불가능하게 된다. 이에 비해, 유한 요소법을 이용한 트랜스듀서의 해석은 비교적 복잡한 모델을 해석할 수 있고, 각 설계 변수의 변화에 따른 특성 변화를 쉽게 파악할 수 있다. 이러한 해석 코드 중의 하나가 ATILA이다^(9~10). 이 연구의 목적은 전기-기계 연성 해석을 할 수 있는 상용 유한 요소 해석 코드인 ATILA를 이용하여 저주파 능동소나에 적용하기 위한 Tonpilz형 수중 음향 트랜스듀서를 모델링하고 실험 결과를 바탕으로 모델의 타당성을 검증하는 것이다.

2. ATILA를 이용한 기본 모델 설계

유한요소 해석 코드인 ATILA는 소나 트랜스듀서를 모델링하여 해석하기 위해 프랑스에서 개발되었다. 개발 목적부터 수중음향 트랜스듀서를 해석하기

위한 것임으로 트랜스듀서의 전기-기계적 특성과 유체의 결합 효과를 효과적으로 모델링할 수 있으며, 정적인 하중을 받아 선형적으로 변형하는 대부분의 트랜스듀서 설계에 적용할 수 있다.

수중 음향 트랜스듀서의 음향 방사 문제를 해석하기 위해서는 트랜스듀서 구조와 이를 둘러싸고 있는 유체를 모델링해야 하는데, 유체 요소의 외곽을 이루는 유한 요소는 방사된 음파를 모두 흡수하는 경계조건을 가진다. 이와 같이 모델링된 트랜스듀서의 방사

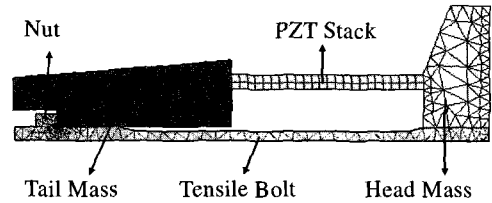
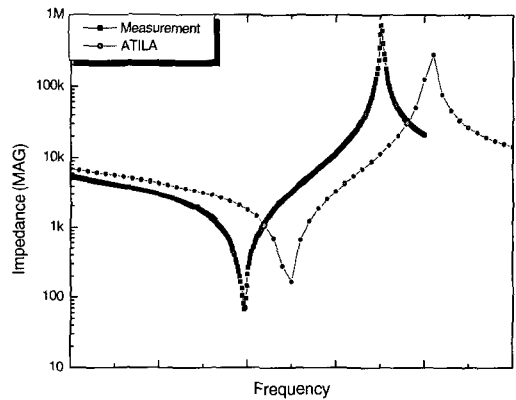
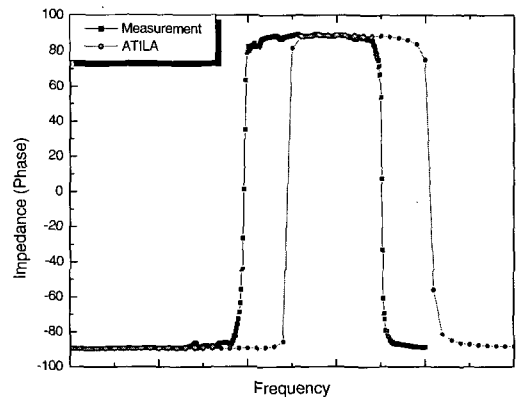


Fig. 1 Finite element model of Tonpilz type transducer



(a) Magnitude



(b) Phase

Fig. 2 Impedance characteristic of transducer in air (major frequency span : 10 kHz)

특성은 구조물의 탄성 법칙, 유체에서의 Helmholtz 방정식, 탄성체와 압전 재료에서의 Poisson 방정식을 이용하여 식 (1)과 같이 계산된다^(9~10)

$$\begin{pmatrix} [K_{uu}] - w^2[M] & K_{u\phi} & -[L] \\ K_{u\phi}^T & K_{\phi\phi} & 0 \\ -\rho^2 c^2 w^2 [L]^T & 0 & [H_f] - w^2[M_f] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U \\ \phi_o \\ P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F \\ -\frac{I}{j\omega} \\ \rho c^2 \phi \end{pmatrix} \quad (1)$$

ATILA를 이용하여 Fig.1과 같이 Tonpitz형 트랜스듀서를 유한요소 모델링하였다. 그림에서 보는 것과 같이 축대칭으로 모델링하였으며, 압전 세라믹의 물성치는 표준 PZT4를 사용하였다. 이러한 모델을 이용하여 트랜스듀서의 중심 주파수에서 송신 전압 감도가 요구 사양을 만족하도록 세라믹 스택, 전면 추, 후면 추, 장력 볼트 등을 설계하였고, 이를 검증하기 위해 시험 시제를 제작하여 공기 및 수중에서 실험하였다. Fig.2는 ATILA를 이용한 해석 결과와 시험 시제의 공기 중에서의 임피던스 특성을 비교하여 나타내고 있는데, 중심 주파수가 설계 주파수보다 500 Hz 이상 낮게 나타나고 있으며, 음향 원도우를 고려하여 해석한 수중에서의 특성도 실험 결과와 1.0 kHz 이상 차이를 나타내었다. 이러한 차이는 크게 해석에 사용된 물성치와 시험 시제의 제작 상태에 기인한 것으로 판단된다.

3. 해석 모델의 보완

트랜스듀서를 설계할 때 가장 먼저 설계해야하는 부분이 압전 세라믹 스택이다. 일반적으로 Tonpitz형 트랜스듀서의 경우 링 형태의 세라믹을 적층하여 사용하는데, 이 연구에서는 PZT4 세라믹 링을 적층하여 3-3모드(length mode)로 구동하도록 하였다.

압전 세라믹은 제작사에서 발표하는 물성치도 대략 10% 정도의 오차를 포함하고 있다. 따라서 문헌이나 세라믹 제작사에서 제공하는 표준 물성치를 적용한 해석 결과는 실제 제작된 트랜스듀서의 시험 결과와 다소 차이를 나타낼 수 있는데, 우선 PZT4 세라믹 링의 임피던스 특성을 측정하여 표준 PZT4의 특성과 비교하였다. Fig.3은 시험 시제에 사용된 PZT4 링 1개의 3-3 모드에 대한 공기 중 임피던스와 표준

PZT4의 물성치를 이용하여 ATILA로 계산한 임피던스를 나타내고 있다. 실험 결과가 공진의 경우 약 2.0kHz, 반공진의 경우 약 1.6kHz 정도 낮게 나타났다. 즉, 표준 PZT4의 물성보다 제작된 시제의 물성이 다소 강성이 낮은 것으로 생각된다.

한편, 세라믹이 적층되는 과정에서 세라믹 사이에 전극 판을 끼워 넣고, 접착제로 접착시키게 된다. 세라믹 사이에 존재하는 접착제는 일반적으로 세라믹 스택의 강성을 떨어뜨리게 되어 있어서, 세라믹이 적층됨에 따라 공진주파수가 세라믹만 있을 때보다 떨어지게 된다. Fig.4는 6개의 시험 시제에 사용된 PZT4 세라믹 스택의 실험과 표준 PZT4 물성치를 이용한 ATILA의 해석 결과를 나타내고 있는데, 접착제 등이 추가되면서 시험 시제의 경우 해석 결과보다 공진 및 반공진 주파수가 1.0kHz 정도 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 유한요소 해석에서 접착제와 전극 판을 모델링 해주어야 세라믹 스택의 특성을 정확하게 해석하고 설계에 반영할 수 있다. 그러나, 두께가 0.1 mm 이하인 전극판과 접착제를 유한요소 모델링한다면, 축대칭 모델이라 할지라도 엄청나게 요소의 개수가 늘어나게 되어 유체가 결합된 상태에서의 Tonpitz 모델의 해석은 거의 불가능하다. 따라서, 이 연구에서는 세라믹 스택 상태에서의 임피

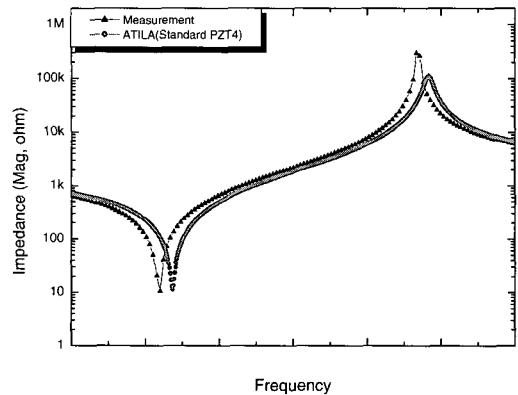


Fig. 3 Impedance characteristic of one PZT4 ring in air(major frequency span : 10 kHz)

Table 1 Modified material properties for ceramic stack

	Standard PZT4	Modified PZT4
S_{33}^E	$15.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$	$19.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$
d_{33}	$289 \times 10^{-12} \text{ C/N}$	$300 \times 10^{-12} \text{ C/N}$

던스 특성을 이용하여 해석에 사용할 PZT4의 물성치를 추정하였는데, 3-3모드의 공진 주파수에 주로 영향을 미치는 S_{33}^E 값과 공진과 반공진의 간격에 영

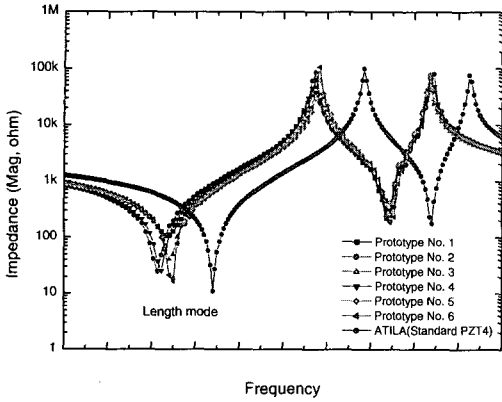
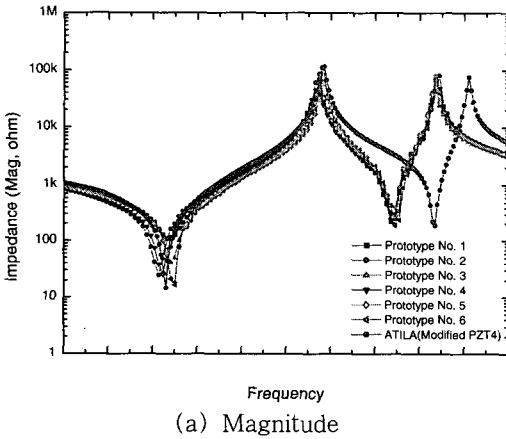
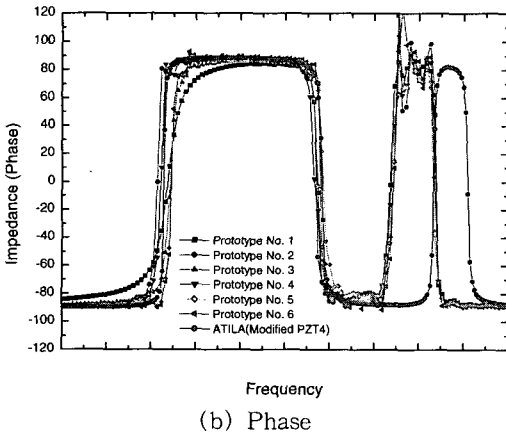


Fig. 4 Impedance characteristic of ceramic stack in air(major frequency span : 1 kHz)



(a) Magnitude



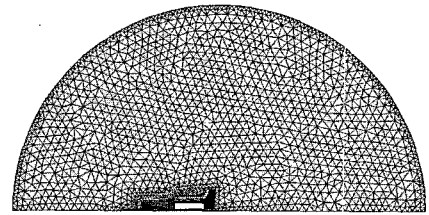
(b) Phase

Fig. 5 Impedance characteristic of ceramic stack in air using modified PZT4 material properties(major frequency span : 1 kHz)

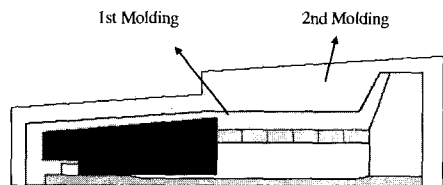
향을 미치는 d_{33} 값을 Table 1과 같이 조정하였고, 이를 이용한 해석 결과는 Fig. 5와 같다.

이와 같이 조정된 물성치를 이용하여 Tonpilz의 특성을 해석한 결과는 Fig. 2의 실험 결과와 잘 일치하였다. 따라서, 트랜스듀서를 모델링하고 설계하기 위해 세라믹 스택을 최소 단위로 하고 실험 결과를 통해 전극 판, 접착제, 압축력(pre-loading), 일숨씨 등이 포함된 세라믹 스택의 물성치를 보정하여 유한요소 모델링을 하는 것이 타당하다고 판단되고, 이를 바탕으로 각 설계 요소의 형상 및 재료 등의 변화에 따른 트랜스듀서 설계에 있어서 시행착오를 많이 줄일 수 있다고 생각한다.

한편, 트랜스듀서를 제작하여 사용할 때 수밀 및 진동체의 보호를 위해 몰딩을 추가하게 된다. 따라서, 앞에서 도출한 세라믹 스택의 물성치를 Fig. 6과 같이 몰딩 층이 포함된 트랜스듀서 해석 모델에 사용하여 그 특성을 해석하였다. Fig. 7은 몰딩 층이 포함된 해석 모델의 송신 전압 감도를 실험 결과와 비교하여 나타내고 있다. Fig. 1과 같은 진동체 상태에서는 해석과 실험 결과가 잘 일치하였지만, 그림에서 보는 것과 같이 몰딩 층이 포함된 후, 실험 결과보다 중심 주파수가 500 Hz 정도 낮게 나타났고, Q값도 높게 나타나는 등 송신 전압 감도의 전체적인 경향이 다소 다르게 나타났다. 이러한 결과의 원인은 Fig. 6의 (b)와 같은 형상으로 제작된 시험 시제 트랜스듀서의 반경 방향의 1차 몰딩과 2차 몰딩이 접착되지 않은 것



(a) Finite element modeling with fluid



(b) transducer with molding layers

Fig. 6 Finite element modeling of transducer with molding layers

에 따른 것으로 판단되어 유한요소 해석 모델을 변경하게 되었다. 몰딩 층의 비접착 상태를 모델링하기 위해서는 크게 몰딩 재료의 물성치를 조절하는 방법, gap 요소(gap element)를 사용하는 방법 및 물리적인 박리를 직접 모델링하는 방법 등이 있을 수 있다. ATILA에서는 gap 요소나 접촉 요소(contact element)를 제공하지 않으므로 이 방법은 사용할 수 없고, 몰딩 재료의 물성치를 조절하는 방법은 요구 사양에 따라 트랜스듀서 각 구성품의 형상 및 재질이 변경될 때마다 실험 결과에 맞는 물성치를 찾아서 역으로 해석에 사용해야하므로 설계 과정에 사용할 수 없다. 따라서, 이 연구에서는 1차 몰딩과 2차 몰딩 사이에 물리적인 박리를 직접 모델링하여 해석하였는데, Fig. 8과 같이 시험 시체의 실험 결과와 비교적으로 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

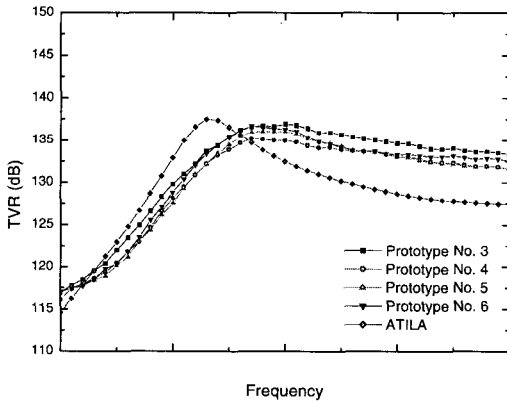


Fig. 7 Characteristic of transmitting voltage response(major frequency span : 1 kHz)

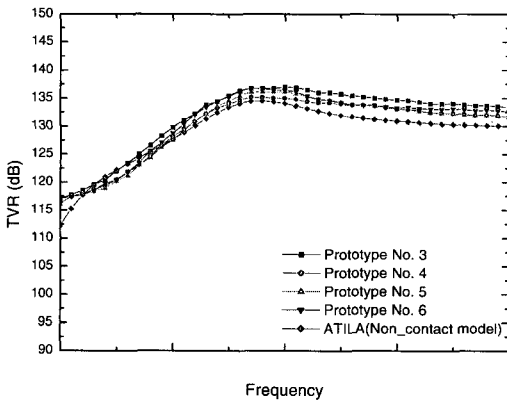


Fig. 8 Characteristic of transmitting voltage response of modified model(major frequency span : 1 kHz)

4. 결 론

이 연구에서는 전기-기계 연성 해석을 할 수 있는 상용 유한 요소 해석 코드인 ATILA를 이용하여 수중 음향 트랜스듀서를 설계하고자 하였다. 소나 트랜스듀서로 널리 활용되고 있는 Tonpitz형 트랜스듀서를 대상으로 유한 요소 해석을 통해 그 특성을 예측하고 실험 결과와 비교하였다. 해석의 정확도를 높이기 위해 실험 결과를 바탕으로 세라믹 스택의 물성치를 조정하고, 몰딩 층의 비접착 상태를 고려하여 해석 모델을 수정하였다.

이 연구를 통해 얻어진 설계 기법을 활용하여 형상, 재료 등 각 설계 인자에 따른 특성 변화를 예측할 수 있으며, 주어진 사양을 만족하는 최적 설계를 도출할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 궁극적으로 트랜스듀서 개발에 따르는 시행착오를 최소화하여 개발에 소요되는 시간과 비용의 절감 효과를 기대할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Langevin, D., 1921, British Patent 145691.
- (2) Berlincourt, D., 1982, Piezoelectric Ceramics : Characteristics and Application, J. Acoust. Soc. Am., 70(6).
- (3) 윤희규, 서희선, 1994, "고출력 수중 음향 센서의 설계 I", 국방과학연구소 기술보고서 ATRC-517-940660.
- (4) 조치영, 김인수, 윤희규, 1995, "수중 음향 트랜스듀서용 샌드위치형 압전 진동체의 설계", 한국소음진동공학회논문집, 제 5 권, 제 4 호, pp.577~583.
- (5) Chen, Y. C., et. al., 1999, "PSPICE Simulation of Tonpitz Transducer with Different Metal Material Loaded on Both Ends", Ferroelectrics, Vol. 220.
- (6) Inoue, T., et. al., 1987, "Equivalent Circuit Analysis for Tonpitz Piezoelectric Transducer", Trans. IEICE, Vol E70, No. 10.
- (7) Krimholtz, R., et. al., 1970, "New Equivalent Circuits for Elementary Piezoelectric Transducers", Electro. Lett., Vol. 6, No. 13.

(8) Chen, Y. C., et. al., 1997, "Analysis and Simulation of Stacked Segment Electro Mechanical Transducers with Partial Electrical Excitation by PSPICE", Japan. J. Appl. Phys., Vol. 36, No. 10.

(9) Smith, R. R., et. al., 1973, "Finite Element Analysis of Acoustically Radiating Structures with

Application to Sonar Transducers", J. Acoust. Soc. Am., 54(5).

(10) ATILA Finite Element Analysis for Piezoelectric and Magnetostrictive Structures Version 5.2.2 User's Manual, 2003, Institut Supérieur d'Electronique du Nord Acoustics Laboratory.