

압전 수중음향센서 음향특성의 유한요소해석

Finite Element Analysis for Acoustic Characteristics of Piezoelectric Underwater Acoustic Sensors

김재환*, 손선봉**, 조철희***, 조치영****

(Jaehwan Kim*, Sun-Bong Son**, Chulhee Joh***, Chee-Young Joh****)

*인하대학교 기계공학과, **인하대학교 대학원 기계공학과, ***인하대학교 선박해양공학과,

****국방과학기술연구소

(접수일자: 2000년 10월 31일; 수정일자: 2000년 12월 14일; 채택일자: 2000년 12월 28일)

유한요소법을 이용하여 압전 수중음향센서의 모델링 및 음향특성을 해석하였다. 압전 수중음향센서의 해석에서 기본적인 압전-탄성 구조물과 유체-구조물의 연성해석을 위한 유한요소 정식화를 하였으며 무한영역의 음향유체를 처리하기 위하여 IWEE (Infinite Wave Envelop Element)를 도입하였다. Tonpilz형 수중음향센서를 수중 산란체로 볼 경우 입사파가 산란체의 표면을 가진할 때 산란체로부터 발생하는 산란파는 IWEE로 인하여 무한 유체영역에서의 산란파의 감소특성을 갖게 되어 무한영역을 유한영역으로 나눈 인위적인 경계에서 반사가 일어나지 않게 되므로 산란파의 음압을 정확히 구할 수 있었다. 또한, 이러한 산란해석을 바탕으로 입사파에 대한 음향센서 내부의 전기적 응답특성인 RVS (Receiving Voltage Signal)를 구하였다. 이러한 일련의 연구 과정들은 소나 시스템을 정확히 해석하고 음향특성을 예측하는데 큰 도움이 될 것이다.

핵심용어: 소나 음향특성해석, 유한요소해석, 무한요소, RVC

투고분야: 수중음향 분야 (5.6)

Sonar is the system that detects objects and finds their location in water by using the echo ranging technique. In order to have excellent performance in variable environment, acoustic characteristics of this system must be analyzed accurately. In this paper, based on the finite element analysis, modeling and analysis of acoustic characteristics of underwater acoustic sensors are performed. Couplings between piezoelectric and elastic materials, and fluid and structure systems associated with the modeling of piezoelectric underwater acoustic sensors are formulated. In the finite element modeling of unbounded acoustic fluid, IWEE (Infinite Wave Envelop Element) is adopted to take into account the infinite domain. When an incidence wave excites the surface of Tonpilz underwater acoustic sensor, the scattered wave on the sensor is founded by satisfying the radiation condition at the artificial boundary approximately. Based on this scattering analysis, the electrical response of the underwater acoustic sensor under incidence, so called RVS (Receiving Voltage Signal) is founded accurately. This will devote to design Sonar systems accurately.

Key words: Acoustic characteristic analysis of sonar, Finite element analysis, IWEE (Infinite wave envelope element), RVS (Receiving voltage signal)

Subject classification: Underwater acoustics (5.6)

I. 서 론

소나와 같은 수중의 음탐장비와 음향대항 장비등 음파를 이용한 수중장비들이 다양한 외부환경의 변화 가운데서도 뛰어난 성능을 갖게 하기 위해서는 이들의 음향특성을 정확하게 파악하는 것이 매우 중요하다. 수중음향센서는 수

중의 음향신호를 정확히 탐지하는 센서이다. 그러나 수중 음향센서는 목적으로 하는 외부신호만이 아니라 각종 구조적, 환경적 요인들에 의한 여러 가지 소음 성분들, 센서에 가해지는 급격한 충격이나 주위를 둘러싼 각종 경계조건의 변화, 센서가 설치된 플랫폼의 진동, 수중의 유동박력에 의한 소음 등 여러 가지 소음 성분들에 노출되어 있다. 이들로 인한 잡음의 신호는 실제로 그 강도가 높아서 측정하고자 하는 음향신호를 저해하는 경우가 많다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 복합구조 수중음향

센서의 특성 해석 프로그램이 필요하다. 기존의 유한요소 해석 프로그램, 예를 들면 ANSYS를 사용하여 이러한 해석을 할 수도 있다. 그러나 여러 가지 해석 기능이 있는 범용 프로그램을 사용할 때 기능의 일부만 사용하므로 다루기가 번거로운 점이 발생하고 프로그램의 내부가 블랙박스이므로 일부 기능을 강화하고자 했을 때 수정할 수 없는 기술의 패쇄성이 발생한다.

이러한 이유로 지금까지 다양한 전용프로그램들이 개발되었으며 목적에 맞는 수중음향센서를 설계하고 종합적인 성능을 예측할 수 있는 기술들은 선진국에서는 상당한 수준에 도달한 것으로 알려져 있으나 공개적으로 발표된 예는 드물다. 선진국에서는 복합 구조형 수중음향센서를 설계하고 성능을 평가할 수 있는 S/W를 자체에서 개발한 독특한 알고리즘을 사용하여 구현하여 필요에 따라 기능을 보완하여 음향센서 전반에 걸친 설계에 이용하고 있다. 대표적인 것 중 하나는 프랑스의 ISEN에서 개발한 ATILA가 있다[1]. 압전, 자왜재료와 유체영역의 연성계에 대하여 정적해석, 조화해석, 모드해석 및 과도 응답해석을 할 수 있으며 유체의 무한영역을 처리하기 위하여 흡수 댐퍼 (absorbing damper)를 사용한다. 다른 예로, 독일의 Lerch 교수 팀이 개발한 CAPA가 있다 [2]. CAPA는 기계공학에서 발생할 수 있는 연성계의 해석을 위해 개발된 시뮬레이션 프로그램으로서 유한요소법과 경계 요소법을 바탕으로 하고 있다. CAPA는 자동차 엔진 등의 음향방사, 압전 센서 및 작동기, 혹은 자왜재료를 이용한 장비 해석에 적용한 예가 있으며, 현재 비선형 해석과 관련된 개발을 하고 있다.

본 논문에서는 고유의 독자적인 복합구조 수중음향센서 해석 전용 프로그램 개발을 위하여, 압전 수중음향센서의 음향특성을 유한요소법을 사용하여 해석하는 과정을 연구하였다. 구체적으로 기본적인 압전-탄성 구조물과 유체-구조물의 연성해석을 위한 유한요소 정식화를 하였으며 무한영역의 음향유체를 처리하기 위하여 IWEE (Infinite Wave Envelop Element)를 도입하였다. 수중음향센서에 입사파가 들어올 때 센서로부터 발생되는 산란파의 해석을 위하여, 유체영역을 무한영역과 유한영역으로 나누고 두 영역의 경계면에서 비반사 조건을 만족시키기 위하여 IWEE를 사용하므로 산란파의 음압을 정확히 구한다. 이러한 유한 요소법을 이용한 산란해석을 바탕으로 Tonpilz형 음향센서의 입사파에 대한 전기적 응답특성인 RVS (Receiving Voltage Signal)를 구한다.

II. 이 론

2.1. 압전 복합구조 수중음향센서 해석을 위한 유한요소 정식화

복합구조 수중음향센서는 탄성체의 구조재료 및 압전 재료와 같은 능동재료 그리고 물이나 공기와 같은 유체의 영역으로 나눌 수가 있다. 구조재료 및 능동재료로 구성된 탄성체의 영역의 부분은 유한하며 유체의 영역은 무한하다고 볼 수가 있다.

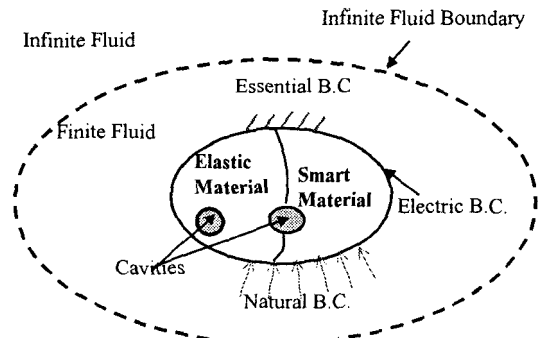


그림 1. 개념적인 수중음향센서 모델
Fig. 1. A schematic diagram of underwater acoustic sensor model.

능동재료를 구성하고 있는 압전재료와 구조재료를 구성하고 있는 탄성재료가 연결된 문제의 유한요소정식화는 다음과 같다[3].

$$\begin{bmatrix} M & O \\ O & O \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ \Phi \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{uu} & K_{u\phi} \\ K_{\phi u}^T & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ \Phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ Q \end{Bmatrix} \quad (2)$$

U 는 탄성체 및 압전체의 절점변위, Φ 는 압전체의 절점 전기장, F 는 절점력, Q 는 압전체에 인가되는 절점 전하 벡터이다. M 는 탄성체 및 압전체의 질량행렬, K_{uu} 는 이들의 강성행렬, $K_{u\phi}$ 와 $K_{\phi\phi}$ 는 압전체의 유전행렬이다. 재료가 이방성이든지 등방성이든지 위의 식은 적용될 수 있으며 K_{uu} , $K_{u\phi}$, $K_{\phi\phi}$ 를 복소수나 나타내면 재료의 탄성 및 유전 그리고 압전연성의 감쇄 특성을 처리 할 수 있다. 이 때 U , Φ , F , Q 도 복소수이어야 한다.

구조물과 유체가 연성되어 있을 때 구조물은 변위의 동적 탄성 방정식으로 표현되고 유체영역은 압력 또는 속도장의 음향방정식이나 변위의 운동방정식으로 표현될 수 있다. 유체영역을 Lagrangian 방식을 따라 변위를 사용하여 표현했을 때 유체와 탄성체간의 방정식의 차이가 없으므로 유체와 탄성체를 연결시켜주기 위한 특별한 처리가 필요하지 않지만 Eulerian 방식을 사용하게 되면 유체영역을 압력변수를 사용하여 정식화하므로 유체영역에서는 자유도가 줄어든다. 하지만, 구조물과 유체의 경계면에서 압력과 변위를 연결시켜 주는 일종의 접속요소가 필요하게 된다. 압력을 변수로 사용하는 것이 유체의 경계조건을 지정하는데 편리하므로 일반적으로 압력장을 많이 사용한다. 압력을 사용한 탄성-유체 연성계의 유한요소 방정식은 다음과 같다[4].

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ \rho Q^T & E \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & -Q \\ 0 & H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서 M , C , K 는 탄성체 구조물의 질량, 감쇄, 강성행렬이고 E , A , H 는 유체의 질량행렬, 감쇄행렬 및 강성행렬이며 Q 는 구조물과 유체의 연성행렬이다. f_1 과 f_2 는 구조

이며 Q 는 구조물과 유체의 연성행렬이다. f_1 과 f_2 는 구조물에 작용하는 외력 및 파동에 의한 작용력을 나타낸다. 만일 조화해석인 경우 시간에 대한 미분이 주파수의 값으로 바뀌므로 유한요소 방정식은 다음과 같다[5].

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 M + i\omega C + K & -Q \\ -\omega^2 \rho Q^T & -\omega^2 E + i\omega A + H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

이 식은 비대칭형이다.

2.2. 무한유체영역의 처리

무한의 음향유체 영역은 인위적 경계를 도입하여 유한하게 나누어서 이 유한한 영역을 유한요소법이나 기타 다른 수치적 방법을 도입하여 모델링할 수 있다. 이 때 인위적 경계에서는 산란파가 반사되어 유한요소 해에 오류를 주는 인위적인 반사가 발생하게 된다. 따라서 인위적인 경계에서는 인위적인 반사가 생기지 않는 비반사 경계조건을 만족시켜야 한다[6]. 이 조건을 만족하지 않을 때 유한 요소 해석의 결과에 오류가 생기며, 특히 경계적분방정식법 (Boundary Integral Equation Method)은 비균일주파수 (Irregular frequency)에서 해석결과가 맞지 않는 문제가 발생한다[7]. 이에 대한 해결책으로 Burton과 Miller에 의하여 제안된 CONDOR (Composite Outward Normal Derivative Overlap Relation) 방법과 Schenck에 의해서 제안된 CHIEF (Combined Helmholtz Integral Equation Formulation)방법 등이 있다[8, 9]. 그러나, 이러한 방법으로 비균일 주파수의 문제를 처리하는데 한계가 있다. 해석 주파수가 높아지게 되면 해석모델의 고유모드가 많아지므로 비균일 주파수가 많아져서 효과적이지 못하다. 무한영역을 유한하게 나눈 유한요소 모델의 외부 경계면에서 필요한 조건은 Sommerfeld 방사조건이다. 이 조건을 만족시키기 위한 연구가 많이 있었다. 흡수경계조건 (Absorbing Boundary Condition, ABC)은 Sommerfeld 방사조건을 원음장에서 근음장으로 일치시키되 근사화로 인한 오차와 반사를 적게 한 것이다[10]. 최근에는 DtN (Dirichlet-to-Neumann)이라는 일종의 완전한 비국부적 비반사 경계조건이 발표되었다[11, 12]. 무한영역의 해로부터 인위적 경계면에서 속도장과 그 미분치의 관계를 DtN map이라 하고 이것을 유한요소의 경계조건으로 사용한다. 그 외에도 인위적인 경계면에 흡은 영역을 위주로 두고 이곳에서 반사장을 소산시키는 filtering scheme이나 감쇄 경계조건 등을 사용하는 방법이라든가 속도장의 미분치를 penalty 방법을 이용하여 추가적으로 만족시키는 방법[13] 등이 무한영역의 산란을 다루기 위한 방법으로 연구되었다.

비반사조건을 직접 만족시키지 않고 근사적으로 파동의 감쇄를 묘사하는 방법으로 무한요소 (infinite element)를 사용하는 방법이 있다. 무한요소는 산란파 또는 방사파의 원음장 특성을 나타내는 형상함수를 이용한 반무한 격자이다[14]. 무한요소 중에서도 특히 파동의 성질을 추가한

IWEE는 일반적인 무한요소보다 파동의 성질이 추가됨으로 인하여 비교적 높은 주파수까지 방사나 산란해석에 결과를 보인다[15, 16]. 본 연구에서는 IWEE를 사용하여 무한영역을 모델링하고 방사해석 및 산란해석을 수행하였다.

IWEE는 형상함수에서 원음장의 특성과 파동적 변화의 특성을 동시에 나타내고 있으며 형상함수의 공액복소수를 가중함수로 사용하는 변형된 Galerkin법을 사용하고 있다[17]. 기존의 유한요소와 결합하여 유한요소의 바깥쪽 경계면인 인위적인 경계에 IWEE를 사용함으로써 무한영역의 방사나 산란문제를 유한영역으로 나타내어 해석할 수 있다. 그림 2는 무한영역을 IWEE를 이용하여 모델링하는 개념을 나타내고 있다. IWEE가 기존의 무한요소와 다른 점은 크게 다음의 세가지로 요약된다. 첫째는 실좌표계에서 무한영역으로 사상시키는 사상함수 (mapping function)이다. 두 번째는 외부로 전파되어 나가는 파동의 특성과 거리에 따라 음장의 크기가 감소하는 원음장의 특성을 갖는 형상함수 (shape function)이다. 세 번째는 가중함수 (weighting function)이다. 기존의 유한요소가 형상함수를 그대로 사용하는 반면 IWEE는 형상함수의 공액복소수를 취함으로써 형상함수에서 계산되는 복소수지수를 소거하게 된다. 따라서 요소행렬의 수치적분 계산량이 줄게 된다. 유한요소 정칙과 IWEE를 사용할 때의 정칙은 동일하고 단지, 유한요소의 형상함수와 가중함수가 조금 다르다는 것 뿐이다. 자세한 유도과정은 참고문헌 [18]에 잘 나와 있으므로 본 논문에서는 생략하고 이를 사용하여 Tonpliz 변환기의 음향특성을 해석하기 위한 산란해석에 초점을 두고자 한다.

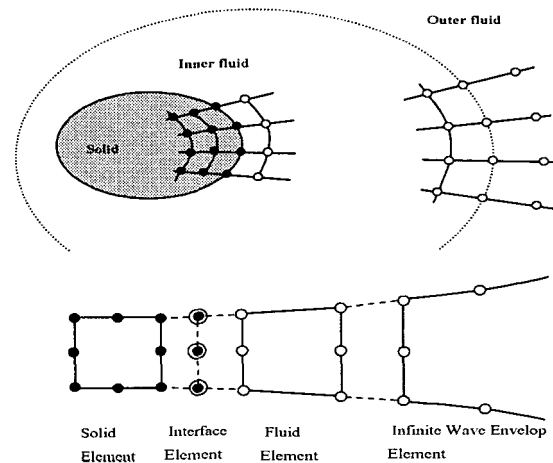


그림 2. 유체-구조 연성 시스템
Fig. 2. Fluid-structure coupled system.

2.3. 산란해석

압전 복합구조 수중음향센서의 음향특성에 있어서 방사문제 뿐만 아니라 산란문제도 매우 중요하다. 예를 들

전기적 응답을 구하기 위해서는 산란파의 음압을 정확히 구해야 한다. 산란문제에 있어서 입사파가 산란체를 만나면 산란파가 생기게 되며 산란파와 입사파가 합해져서 임의 지점에서 전체의 음압을 이루게 된다. 따라서 임의의 형상을 갖는 탄성체의 산란을 수치적으로 해석하기 위해서는 탄성체와 연계해서 풀어야 한다. 유체-탄성체가 연계된 문제에서 전체음압은

$$p = p_i + p_s \quad (4)$$

여기서 p 는 전체음압, p_i 는 입사음압 그리고 p_s 는 산란파의 음압을 나타낸다. 식 (2)에 전체 음압 p 를 대입하면 p_s 는 입사파에 의하여 주어지는 값이고 p_i 는 미지수이므로 p_s 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ \rho Q^T & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \dot{p}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{p}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K & -Q \\ 0 & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ p_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 + Qp_i \\ f_2 - (E\dot{p}_i + Ap_i + Hp_i) \end{bmatrix} \quad (5)$$

만일 조화해석인 경우는

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 M + i\omega C + K & -Q \\ -\omega^2 \rho Q^T & -\omega^2 E + i\omega A + H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ p_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 + Qp_i \\ f_2 - (-\omega^2 E p_i + i\omega A p_i + H p_i) \end{bmatrix} \quad (6)$$

위 식에서 우측 항은 입사 음압이 주어짐에 따라 구할 수 있는 값들이므로, 따라서 유한요소와 무한요소를 사용하여 무한영역을 모델링하여 산란장의 음압을 구할 수 있다.

III. 결과 및 고찰

3.1. Tonpitz형 변환기의 2차원 산란해석

가장 기본적인 형태의 음향센서인 Tonpitz형 변환기를 해석 모델로 선정하였다. Tonpitz형 변환기는 원형의 압전재료를 Head Mass와 Tail Mass 사이에 놓고 압축력을 가한 것으로 Head Mass 전방에는 음향장이 붙어 있고 음향장은 유체와 접촉하고 있다. Tonpitz형 변환기는 축대칭형으로 여러 개의 요소가 배열되어 Hydrophone을 이루며 각 요소는 Onion Skin과 Corprene으로 쌓여 있어서 서로간의 접촉을 막아 주고 있다. Tonpitz형 변환기가 축대칭형이므로 반단면을 취하여 2차원으로 모델링하였다. 그림 3은 Tonpitz형 변환기의 2차원 모델을 나타낸다. 유한요소법의 전처리 과정을 통하여 433절점과 123개의 8절점 이차요소를 생성하였으며 총 9가지 재료를 사용하였다. 경계조건은 대칭형이므로 중심축과 Corprene 외벽에 대하여 y방향으로 고정시키고 Onion Skin Paper에서 축방향으로 힘을 받아 주는 부분을 x 방향으로 고정시켰다. 표 1은 본 모델에 사용한 재료의 물성치를 나타내고 있다.

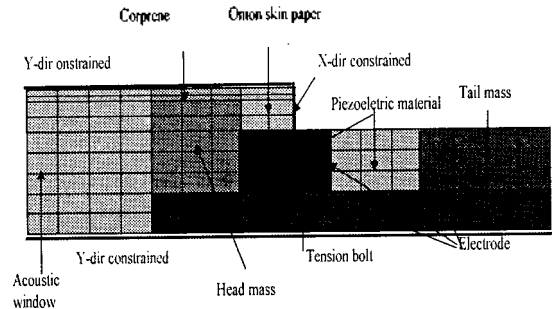


그림 3. Tonpitz 변환기의 2차원 모델
Fig. 3. 2D-model of tonpitz transducer.

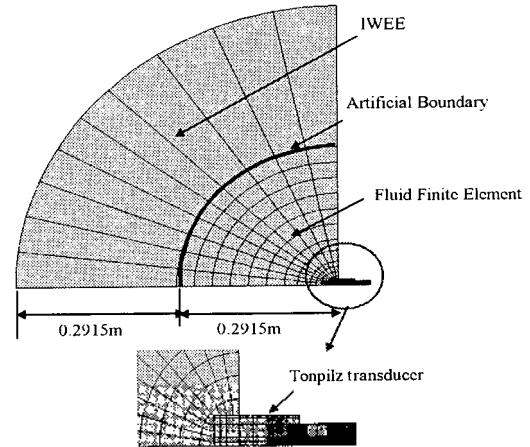


그림 4. Tonpitz 변환기의 산란해석을 위한 2차원 모델
Fig. 4. Two dimensional model for scattering analysis of Tonpitz transducer.

표 1. Tonpitz 변환기의 재료 물성치
Table 1. Material properties for Tonpitz transducer.

Material name	Density	Material Constant		
Matching Layer	1120	$C = \begin{bmatrix} 10.735D9 & 7.157D9 & 0 \\ 7.1571D9 & 10.735D9 & 0 \\ 0 & 0 & 1.7892D9 \end{bmatrix}$		
Tension Bolr	7920	$C = \begin{bmatrix} 242.898D9 & 94.4602D9 & 0 \\ 94.4602D9 & 242.898D9 & 0 \\ 0 & 0 & 74.188D9 \end{bmatrix}$		
Metal Shell	2690	$C = \begin{bmatrix} 110.437D9 & 58.1688D9 & 0 \\ 58.16882D9 & 11.437D9 & 0 \\ 0 & 0 & 26.1338D9 \end{bmatrix}$		
Head Mass	2690	$C = \begin{bmatrix} 110.437D9 & 58.1688D9 & 0 \\ 58.16882D9 & 11.437D9 & 0 \\ 0 & 0 & 26.1338D9 \end{bmatrix}$		
Tail Mass	7850	$C = \begin{bmatrix} 246.631D9 & 102.912D9 & 0 \\ 102.9122D9 & 246.631D9 & 0 \\ 0 & 0 & 80.8594D9 \end{bmatrix}$		
Skin Paper	1000	$C = \begin{bmatrix} 1.7129D9 & 1.1428D9 & 0 \\ 1.1428D9 & 1.7129D9 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2857D9 \end{bmatrix}$		
LowerPZT (PZT4)	7500	$C = \begin{bmatrix} 11.5D10 & 7.3D10 & 0 \\ 7.2D10 & 13.2D10 & 0 \\ 0 & 0 & 2.6D10 \end{bmatrix}$ $e = \begin{bmatrix} 5.841D-9 & 0 & 14.1 & 0 \\ 0 & 5.841D-9 & -4.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10.5 \end{bmatrix}$		
UpperPZT (PZT4)	7500	As same Lower PZT except		

Tonpilz형 변환기를 무한 유체영역 속에 놓여 있는 수중 산란체라 보고 무한 유체영역에서의 산란장을 해석하고자 그림 4와 같이 2차원 해석 모델을 설정하였다. ANSYS 유한요소 프로그램의 전처리 과정을 통하여 711개의 절점과 8절점의 이차요소 200개 그리고 차수가 5인 이차 IWEE를 10개 생성하였다. 반경 0.2915m의 경계면을 설정하여 이 경계면 내부는 8절점의 이차 유체요소를 사용하여 모델링하였고 외부는 산란체에서 인위적인 경계면까지의 거리인 반경 0.2915m 만큼의 거리로 이차 IWEE를 사용하여 무한영역을 나타내었다. Tonpilz형 변환기가 축대칭 이므로 반단면을 취하여 2차원으로 모델링하였고 유체영역은 원형의 1/4만을 모델링하여 Tonpilz형 변환기와 결합하였다. 전술한 유한요소 정식화에 따라 산란 음압을 구할 수 있는 유체 및 고체 유한요소와 IWEE를 지원하는 유한요소 프로그램을 FORTRAN으로 작성하였다.

유체영역으로부터 입사각이 0인 100Pa의 평면파가 입사하여 산란체를 가진할 때 가진 주파수 변화에 따른 유체영역에서의 산란장의 음압을 구해서 유한요소법의 후처리 과정을 통하여 나타내었다. 그림 5는 2차원 해석모델의 100kHz에서의 산란 음압을 나타낸 것이며 탄성 산란체와 인접한 유체영역에서의 산란 음압의 변화를 볼 수 있으며 평면 입사파 입사 압력 100Pa의 거의 2배에 달하는 202.56Pa까지 변화함을 볼 수 있었다. 이는 탄성 산란체인 Tonpilz형 변환기와 유체의 상호작용의 연성효과로 인한 유체영역에서의 음압의 변화를 나타낸 것이다. 10kHz 미만의 가진 주파수 영역에서는 평면 입사파의 입사 압력장과 동일한 압력장으로 산란장의 음압을 구할 수 있었고 이는 탄성 산란체인 Tonpilz형 변환기와 유체의 상호작용에 의한 연성 효과가 거의 없음을 나타낸다.

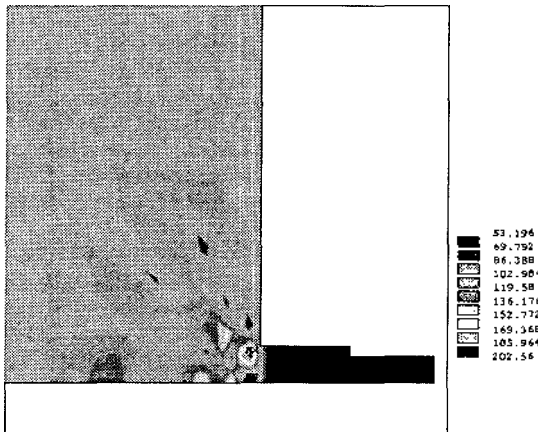


그림 5. 2차원 Tonpilz 모델의 산란 압력장 (100kHz, 100Pa, 수직입사)
Fig. 5. Scattered pressure of 2-D Tonpilz model (100kHz, 100Pa, Normal incidence).

3.2. 2차원 Tonpilz형 변환기의 RVS

소나는 센서로 사용될 때, 음압 신호를 전기적신호로

변환하는 장치이므로 음압에 따라 발생하는 전압과 관련된 응답이 중요하다. 본 연구에서 구하고자 하는 RVS는 단위 음압의 평면파가 입사될 때 변환기의 전기적 터미널에 발생하는 전압을 말한다. 이것은 개회로 일파의 응답이다. RVS를 정확히 구하려면, 센서 표면에 작용하는 전체 음압을 정확히 구해야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 IWEE를 통한 무한 유체영역을 모델링해서 입사파로 인한 탄성 산란체에 의하여 생성되는 산란파의 무한영역에서 감소특성을 처리하게 되어 인위적인 경계에서 반사가 일어나지 않게 함으로서 유체와 접한 소나 변환기의 음향장 표면에서의 전체 음압을 구하였다. 전체 음압이란 입사파와 산란파의 음압을 더한 것으로서 식 (6)에서 산란 음압을 구하고 이에 입사 음압을 더함으로써 구하였다.

그림 6은 2차원 해석모델에서 각각 유체영역으로부터 입사각이 0인 100Pa의 평면파가 입사될 때 1Hz에서 130kHz까지의 가진 주파수 변화에 따른 Tonpilz형 소나 변환기의 전기적 응답인 RVS를 구한 것이다. 여기서 보면, 거의 영에 가까운 응답을 보이다가 64.6kHz와 123.8kHz에서 높은 응답이 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 Tonpilz형 변환기의 공진모드로 인한 것으로 보인다.

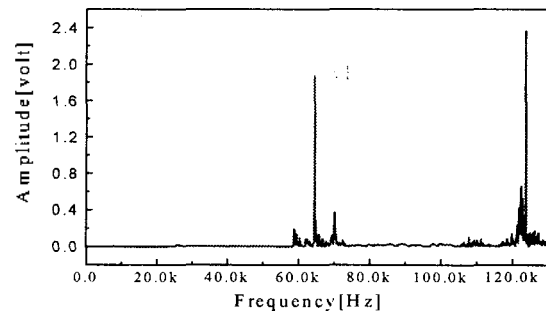


그림 6. 2차원 Tonpilz 모델의 RVS (100Pa, 수직입사)
Fig. 6. Receiving voltage signal of 2-D Tonpilz model (100 Pa, Normal incidence).

앞에서 발견된 공진모드를 확인하기 위하여 상용 프로그램인 ANSYS를 사용하여 Tonpilz형 변환기의 모드해석을 수행하였다. 표 2는 그림 3에서 유체영역을 제외한 Tonpilz형 소나 변환기 부분을 해석모델로 모드해석을 통하여 구해진 공진 주파수들을 나타낸 것이다. 그림 7은 4번째와 10번째 공진 주파수에서의 모드형상을 나타내고 있다. 여기서 알 수 있는 것은 4번째 모드는 변환기의 길이방향으로 변형하는 모드로서 수직 입사에 대하여 가장 큰 음압을 방사할 수 있는 모드임을 알 수 있고, 10번째 모드는 압전재료 부분에서는 굽힘이 일어나고 음향장 부분에서는 그 다음으로 방사를 많이 일으키는 모드임을 알 수 있다. 다시 말해서, 앞서 구한 입사파에 대한 Tonpilz형 소나 변환기 내부의 전기적 응답 특성인 RVS 값으로부터 추정되는 공진 주파수 64.6kHz, 123.8kHz는

모드해석으로부터 구해진 공진 주파수 62.101kHz, 123.79kHz와 거의 일치함을 확인하였다.

표 2. 2차원 Tonpilz 모델의 고유진동수
Table 2. Natural frequencies for 2-D Tonpilz model.

Modal Analysis using ANSYS	Result of RVS
3.135 KHz	-
44.225 KHz	-
53.316 KHz	-
62.101 KHz	64.6 KHz
87.514 KHz	-
93.662 KHz	-
95.079 KHz	-
100.14 KHz	-
104.32 KHz	-
123.79 KHz	123.8 KHz

또 다른 중요한 사실은, 그림 6에서 Tonpilz형 소나 변환기의 공진 주파수를 제외하고는 거의 영에 가까운 응답을 보이고 있다는 것이다. 만약에 무한 영역을 인위적으로 나눈 인위적 경계에서 인위적인 반사가 있었다면 아마 납득할 수 없는 산란 압력의 피크들이 나타날 것이다. 따라서, IWEE를 사용하여 인위적인 반사가 없어졌기 때문에 130kHz에 이르는 넓은 주파수 영역에서 공진 모드를 제외하고 거의 영에 가까운 응답을 나타냈다고 할 수 있다. 다시 말하면, IWEE의 사용은 인위적인 반사를 효과적으로 줄일 수 있는 한 방법이다.

그림 8과 9는 Tonpilz형 변환기에서 가장 큰 산란 음압이 발생하는 64.6kHz와 123.8kHz에서의 산란 음압 분포를 나타낸 것이다.

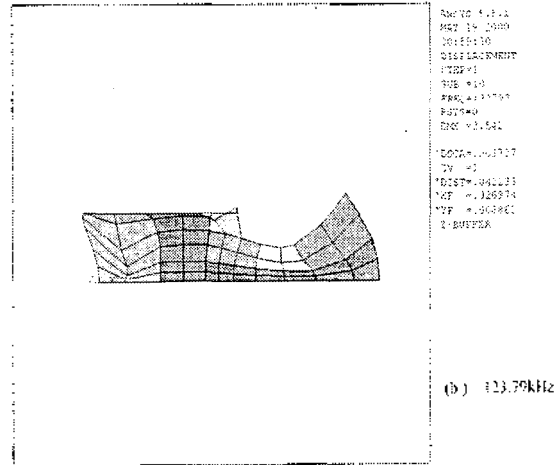


그림 7. 2차원 Tonpilz 모델의 모드형상
Fig. 7. Mode shape for 2-D Tonpilz model.

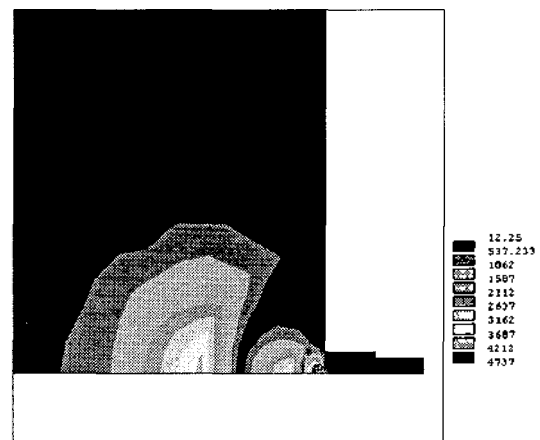


그림 8. 2차원 Tonpilz 모델의 산란 음압 분포 (64.4kHz, 100 Pa, 수직입사)
Fig. 8. Scattered pressure distribution at 64.4kHz (100Pa, Normal incidence).

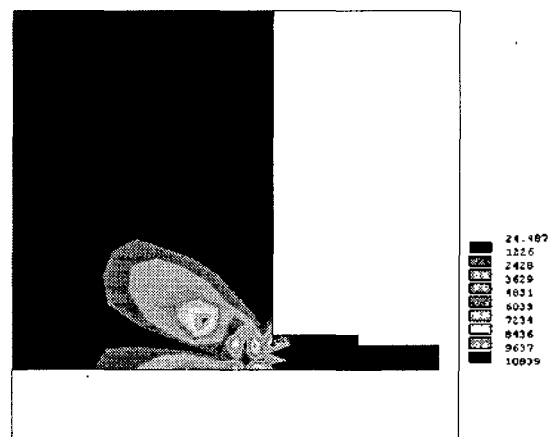
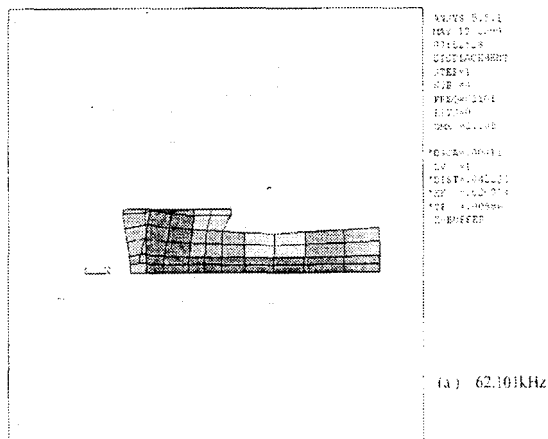


그림 9. 2차원 Tonpilz 모델의 산란 음압 분포 (123.8kHz, 100 Pa, 수직입사)
Fig. 9. Scattered pressure distribution at 123.8kHz (100Pa, Normal incidence).

그림 10은 주파수가 64.6 kHz이고 입사각이 45인 경우 산란장의 음압분포를 나타낸 것이다. 최대 음압이 1919 Pa로서 수직입사의 경우 (4737Pa)보다 작은 것을 알 수 있다. 그림 11은 입사각이 45일 때 2차원 Tonpitz 모델의 RVS를 나타낸다.

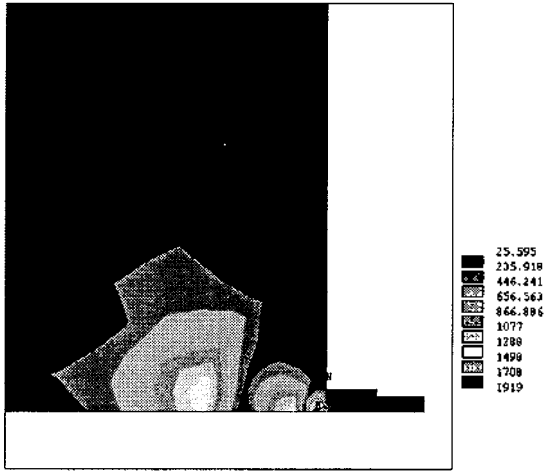


그림 10. 2차원 Tonpitz 모델의 산란 음압 분포 (64.4kHz, 100 Pa, 경사입사: 45)
 Fig. 10. Scattered pressure distribution at 64.4kHz (100Pa, Oblique incidence: 45).

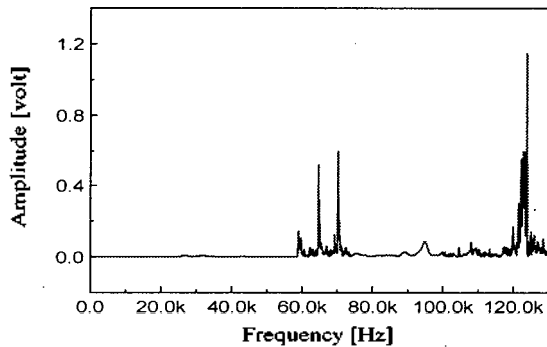


그림 11. 2차원 Tonpitz 모델의 RVS (100 Pa, 경사입사: 45)
 Fig. 11. Receiving voltage signal of 2-D Tonpitz model (100 Pa, Oblique incidence: 45).

3.3. Tonpitz형 수중음향센서 모델의 3차원 음향특성 해석

Tonpitz형 변환기를 무한 유체영역속에 놓여 있는 수중 산란체라 보고 무한 유체영역에서의 산란장을 해석하고자 그림 12와 같이 3차원 해석 모델을 설정하였다. 2차원 모델은 축대칭요소를 사용함으로써 간단하게 모델링할 수 있는 반면에, 비대칭의 가진입력이 들어왔을 때 처리가 어렵다. 3차원 모델은 모델이 커지는 단점이 있지만, 비대칭을 포함한 다양한 가진입력 조건을 처리할 수 있는 장점이 있다. 3차원의 경우 1562개의 절점과 8절점

선형 요소 1026개 그리고 차수가 2인 선형 IWEE를 27개 생성하였다. 0.15m의 경계면을 설정하였고 내부는 8절점 선형 유체요소를 외부는 선형 IWEE로 모델링하여 무한 영역을 나타내었다. Tonpitz형 변환기는 1/8만 취하여 3차원으로 모델링하였고 유체영역 또한 구형의 1/8만 모델링하여 Tonpitz형 변환기와 결합하였다.

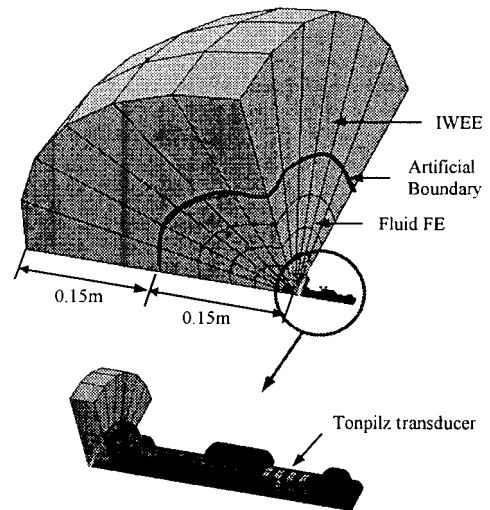


그림 12. Tonpitz 변환기의 3차원 모델
 Fig. 12. Three dimensional model for Tonpitz transducer.

그림 13은 수직입사이고 주파수가 86kHz일 때의 산란 음압 분포를 나타낸다. 그림 14는 3차원 해석모델에서 유체영역으로부터 입사각이 0 인 100Pa의 평면파가 입사하여 탄성 산란체인 소나 변환기를 가진할 때 주파수 변화에 따른 Tonpitz형 소나 변환기의 RVS를 구한 것이다. 86kHz에서 높은 응답이 발생한 것을 알 수 있다.

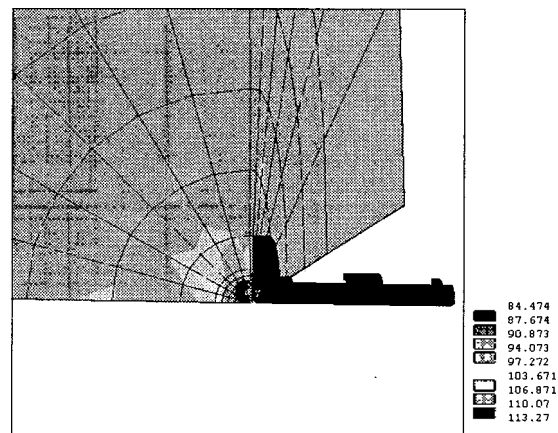


그림 13. 3차원 모델의 산란 음압분포 (86KHz, 수직입사)
 Fig. 13. Scattered pressure distribution of 3-D model (1st resonance mode, Normal incidence).

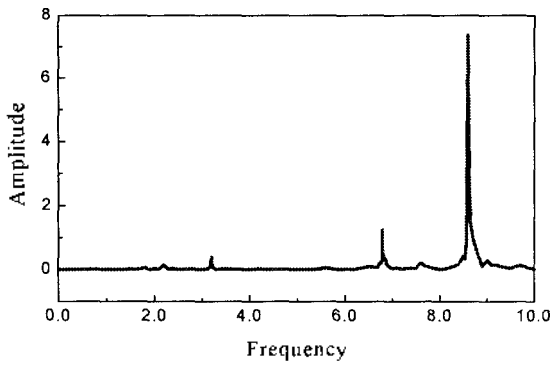


그림 14. 3차원 모델의 RVS (86KHz, 수직입사)
 Fig. 14. Receiving Voltage Signal of 3-D model (Normal incidence)

IV. 결 론

유한요소법을 이용하여 압전 수중음향센서의 모델링 및 음향특성을 해석하였다. 압전 수중음향센서의 해석에서 기본적인 압전-탄성 구조물과 유체-구조물의 연성해석을 위한 유한요소 정식화를 하였으며 부한영역의 음향유체를 처리하기 위하여 IWEE를 도입하였다. 예제로서 가장 기본적인 형태의 음향센서인 Tonpilz형 변환기를 택하여 2차원 및 3차원 모델링을 하였으며, 입사파가 센서에 입사될 때 산란파의 음압 분포 및 RVS를 구하였다. 그 결과 산란 음압이 Tonpilz형 변환기의 공진 주파수에서 아주 높은 값을 가지고 그 외의 주파수에서는 거의 영에 가까운 응답을 보였다. 이것은 IWEE를 사용하여 인위적인 경계에서 인위적인 반사가 일어나지 않게 하였기 때문에 산란 파의 음압의 분포를 정확하게 구할 수 있었다. 이러한 일련의 연구 과정들은 소나 시스템을 정확히 해석하고 음향특성을 예측하는 데 큰 도움이 될 것이다.

참 고 문 헌

1. A. C. Hennion, R. Bossut, J. N. Decarpigny and C. Audoly, "Analysis of the scattering of a plane acoustic wave by a periodic elastic structure using the finite element method: application to compliant tube gratings," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 87, pp. 861-1867, 1990.
2. R. Lerch, H. Landes, M. Kaltenbacher and F. Lindinger, "Piezoelectric CAD-System," *Sensor 95*, S. 297-302, Nuremberg, May 1995.
3. J. Kim, V. V. Varadan and V. K. Varadan, "Finite Element Modeling of Structures Including Piezoelectric Active Device," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 40, pp. 817-832, 1997.
4. O. C. Zienkiewicz and P. Bettess, "Fluid-structure dynamic interaction and wave force : An introduction to numerical treatment," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 13, pp. 1-16, 1978.
5. G. C. Everstine, "A symmetric potential formulation for fluid-structure interaction," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 79 (1), pp. 157-160, 1981.
6. B. Engquist and A. Majda, "Radiation boundary conditions for acoustic and elastic wave calculations," *Comm. Pure Appl. Math.*, Vol. 32, pp. 313-357, 1979.
7. S. Liapis, "Method for suppressing the irregular frequencies from integral equations in water-structure interaction problems," *Comput. Mech.*, Vol. 12, pp. 59-68, 1993.
8. A. J. Burton and G. F. Miller, "The application of integral equation methods to the numerical solution of some exterior boundary value problems," *Proc. R. Soc. London. Ser. A* 323, pp. 201-210, 1971.
9. H. A. Schenck, "Improved integral formulation for acoustic radiation problems," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 44, pp. 41-58, 1968.
10. A. Bayliss and E. Turkel, "Radiation boundary conditions for wave-like equations," *Comm. Pure Appl. Math.*, Vol. 33, pp. 707-725, 1980.
11. D. Givoli and J. B. Keller, "Non-reflecting boundary conditions for elastic waves," *Wave Motion*, Vol. 12, pp. 261-279, 1990.
12. I. Harari and T. J. Hughes, "Analysis of continuous formulations underlying the computation of time-harmonic acoustics in exterior domains," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, Vol. 97, pp. 103-124, 1992.
13. J. Kim, V. V. Varadan and V. K. Varadan, "Finite element modeling of scattering problems involving infinite domains using drilling degrees of freedom," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, Vol. 134, pp. 57-70, 1996.
14. P. Bettess, "Infinite elements," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 11, pp. 53-64, 1977.
15. L. Cremers, K. R. Fyfe and J. P. Coyette, "A Variable Order Infinite Acoustic Wave Envelope Element," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 171(4), pp. 483-508, 1994.
16. O. C. Zienkiewicz, K. Banedo, P. Bettess, C. Emoson and T. C. Chiam, "Mapped Infinite Elements for Exterior Wave Problems," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 21, pp. 1229-1251, 1985.
17. O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, *The Finite Element Method*, Vol. 1, 4th Ed. McGraw Hill, 1991.
18. 김재환, 김세환, "수중 산란체의 수치적 산란해석," *한국음향학회지 제9권 제4호*, pp. 84-92, 2000.

▲ 김 재 환 (Jachwan Kim)
 한국 음향학회지 제19권 4호 참조

▲ 손 선 봉 (Sun-Bong Son)



1998년 2월: 인하대학교 선박해양공
학과(공학사)

2000년 8월: 인하대학교 대학원 기계
공학과(공학석사)

2000년 8월~현재: LG 전자 에어컨
사업부 에어컨 연구 2실
연구원

※ 주관심분야: 음향센서 해석, 유한요소법

▲ 조 철 희 (Chulhee Joh)



1984년 2월: 인하대학교 선박해양공
학과(공학사)

1985년 5월: 미국 스티븐슨공대 해양
공학(공학석사)

1991년 8월: 미국 텍사스A&M대학
해양공학(공학박사)

1991년~1992년: 미국 Intec Engineering

1992년~1997년: 현대중공업 설치기술
부서장

1997년~현재: 인하대학교 선박해양공학과 조교수

※ 주관심분야: 해양공학, 해양 구조물

▲ 조 치 영 (Chee-Young Joh)

한국 음향학회지 제14권 5호 참조