

유한요소법과 하이브리드형 무한요소법의 결합에 의한
 축대칭 변환기의 음향 특성해석(I); 방사임피던스,
 지향성 및 압전자간의 결합효과

Acoustic Characteristics Analysis of the Axi-symmetric
 Transducer by the combined Finite Element Method and
 Hybrid Type Infinite Element Method, Part I ; Radiation
 Impedance, Directivity and Transducer Coupling Effect

윤 종 략*, 윤 형 규**, 김 대 환**, 김 천 덕***

(Jong-Rak Yoon*, Hyeong-Kyu Yoon**, Dae-Whan Kim**, Chun-Duck Kim***)

요 약

본 논문은 두 편으로 연결된 논문의 첫 논문으로 무한음향 매질내의 축대칭음향 변환기 음향특성 해석을 위한 유한요소법과 하이브리드형 무한요소법의 결합 알고리즘을 제시하고 이를 이용한 음향변환기의 방사 임피던스, 지향성 및 압전자간의 결합 효과에 대한 수치해석 결과를 제시하였다. 두번째 논문에서는 첫논문의 결과를 기초로 광대역 배역 변환기를 설계하고 설계된 변환기의 음향특성을 해석하였다.

ABSTRACT

This is the first of two companion papers which suggests the algorithm of the combined Finite Element Method and Infinite Element Method for the analysis of the axi-symmetric acoustic transducer in the open boundary. Using the algorithm, the numerical analysis for the transducer radiation impedance, directivity, and coupling effect between transducer elements are also conducted. In the second paper, the wideband array transducer is designed and its acoustic characteristics are examined on the basis of the results of the first paper.

I. 서 론

무한음향 매질내에서 구동되는 압전변환기는 전기·기계·음향방사계가 결합되어 있어 변환기의 성능평가나 설계를 위해서는 일체의 시스템으로 그 특성이 해석되어야 한다. 그러나 서로 다른 계 사이의 에너지

변환에 기초한 전체계의 자메미분방정식의 해석적 풀이는 경계조건이 이상적인 경우에는 가능하지만 복잡한 형상의 실제 변환기에 대해서는 불가능하다. 따라서 초기의 음향변환기를 특성연구는 전기기계계와 음향방사계의 분리가 가능한 이상적인 경계조건 문제를 주로 다루었고 분리된 각각의 계의 음향특성을 결합하여 계 전체의 특성으로 하였다.

이들중 대표적인 해석 기법은 등가회로 해석모델로 Crombrugge^[1] 등은 진공중의 압전변환기에 대한 전기·기계 임피던스 및 주파수 대역 특성 해석에 이

*부산수산대학교 정보통신공학과

**국방과학연구소

***부산수산대학교 전기공학과

접수일자: 1993년 11월 22일

기술을 적용하였다. 또한 Nimura^[2]는 무한 강벽에 구속된 유한 원통 압전자의 방사면 진동속도가 일정하게 주어진 경우 음향계의 방사임피던스 및 지향특성을 이론적으로 해석하였고 Schenck^[3]는 임의 진동속도 분포함수가 주어진 경우 미분방정식으로 부터 유도되는 적분방정식에 경계적분법을 적용하여 음향계의 방사임피던스를 해석하였다. 최근에는 컴퓨터의 계산능력을 이용하여 유한요소법에 의한 전기·기계임피던스 특성 연구도 활발히 진행중이다^[4,5] 6]. 그러나 이러한 연구의 단점은 각 계에 대한 연구 결과를 결합하여 변환기를 설계해야하는 번거로움과 각 계에서 가정한 경계조건들이 일치해야 한다는 점이다.

이러한 단점을 보완하기 위해 Smith^[7] 등은 경계적분법을 이용한 방사임피던스 수치 프로그램과 전기·기계 특성 해석용 유한요소 수치프로그램을 결합하여 단일 코드의 프로그램을 개발하여 변환기의 전체적 특성을 해석하였고 Jarng^[8]은 유한요소법과 경계요소법을 결합하여 계전체 특성을 연구하였다. 이러한 기술은 임의의 형상, 복잡한 구조의 변환기 해석에 적용할 수 있다는 장점을 갖는다.

본 연구에서는 Tsuchiya^[9] 등이 초음파 현미경의 음향특성 해석에 적용한 유한요소법과 무한요소법의 결합기법을 응용하여 원통형 압전자란 이용한 축대칭 변환기의 음향특성을 해석하고자 한다. 본 기법을 이용하여 수중용 변환기에 필수적으로 부가되는 음향 원도우가 미치는 영향을 방사임피던스, 지향성 및 압전자간의 결합효과 측면에서 고찰하였다.

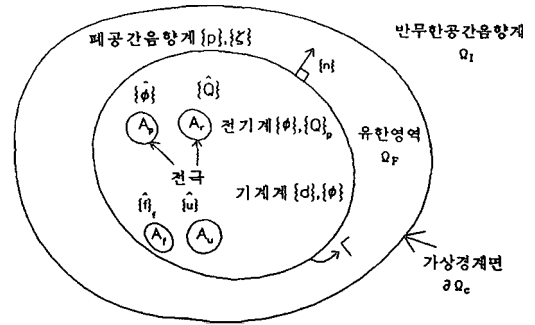
II. 무한음향 매질내의 변환기 해석 모델

II.1 전기·기계·음향 결합계의 유한요소 지배방정식

그림 1은 압전변환기가 개영역(open boundary)내에서 동작하는 모델이다. 유한요소법은 영역이 유한한 경우에만 적용가능하므로 그림에서와 같이 Sommerfeld의 방사조건을 만족하는 원거리음장영역에 가상경계면 $\partial\Omega_c$ 가 설정되어야 한다^[10].

저자들이 이미 소개한 전기기계계와 음향계의 경계면 Γ 내부의 유한요소해석모델^[6]은 변위에 의한 구동력이 없고 ($\{\dot{u}\}=0$) 전극에 전하가 주어지지 않는 경우 ($\{\dot{Q}\}=0$) 다음과 같이 주어진다.

$$([K] + j\omega[R] - \omega^2[M])\{d\} + [\Theta]\{\phi\} = \{\hat{f}\}_r \quad (1)$$



- A_p : 전위 벡터 $\{\hat{\phi}\}$ 가 주어질 전극면
- A_r : 전하 벡터 $\{\dot{Q}\}$ 가 주어질 전극면
- A_r : 구동변위 벡터 $\{\hat{u}\}_r$ 가 주어질 경계면
- A_w : 구동변위 벡터 $\{\hat{u}\}$ 가 주어질 경계면
- $\{P\}, \{Q\}$: 음향계의 음압 및 변위 벡터
- $\{\phi\}, \{Q\}_p$: 전기계의 전위 및 전하 벡터
- $\{d\}$: 기계계의 변위 벡터
- Γ : 압전기계계와 음향계의 경계면

그림 1. 압전진동자의 전기·기계·음향계 결합모델

$$[\Theta]^T\{d\} - ([G] + j[R_g])\{\phi\} = \{Q\}_p \quad (2)$$

- 여기서, $\{d\}$: 절점변위 벡터 $[R]$: 기계계 손신행렬
- $\{\phi\}$: 절점전위 벡터 $[R_g]$: 전기계 손신행렬
- $[K]$: 기계계 강성행렬 $\{Q\}_p$: 전극 전하행렬
- $[M]$: 기계계 질량행렬 $[G]$: 정전행렬
- $[\Theta]$: 전기기계 결합행렬 $\{\hat{f}\}$: 외력벡터

또한 그림에서 가상경계면 내부의 폐공간 음향계에 대한 유한요소 표시는 다음과 같이 주어진다.

$$([M_L]/j\omega + j\omega[K_L])\{\hat{p}\} = j\omega\rho_L\{\zeta_L\} \quad (3)$$

$$[Y_L]\{\hat{p}\} = j\omega\{\zeta_L\} = \{\tilde{Q}_L\} \quad (3)$$

- 여기서, $[K_L]$: 음향계의 강성행렬
- $[M_L]$: 음향계의 질량행렬
- $\{\hat{p}\}$: 절점 음압 벡터
- $[Y_L]$: 음향 어드미턴스 행렬
- $\{\zeta_L\}$: 구동변위 벡터 $\{\tilde{Q}\}$: 구동 속도 벡터
- ρ_L : 음향계 유체밀도
- $[Y_L]$: 음향 어드미턴스 행렬

식(1), (2) 및 (3)으로 주어지는 가상경계면 내부의 전기·기계계와 음향계는 경계면 Γ 에서 식(1)의

구동 외력벡터 $\{\hat{f}\}_i$ 및 절점변위 $\{d\}$ 가 각각 식(3)의 음압 $\{\hat{p}\}$ 및 구동변위 $\{\zeta\}$ 와 다음과 같은 관계식으로 상호 결합되어 있다.

$$\{\hat{f}\}_i = -[W]\{\hat{p}\}, \quad \{\zeta\} = -[W]^T\{d\} \quad (4)$$

여기서 $[W]$ 는 배분행렬로 진동경계면 Γ 에서 음향계 절점 음압과 절점 구동변위가 진동계의 각 절점에 배분되는 형태와 역으로 진동계의 각 절점 외력과 절점 변위가 음향계 요소절점에 배분되는 형태를 나타내는 행렬이다. 따라서 전기·기계계와 음향계는 배분행렬 $[W]$ 로 결합되어 있으며 $[W]$ 는 유한요소의 국소 면적 좌표계와 경계면 음압과 경계면 수직변위 성분과의 관계에 의해 구해진다¹⁰⁾.

II.2 하이브리드형 무한요소법

식(1)~(4)는 가상경계면 $\partial\Omega_c$ 내부의 전기·기계계 및 음향계의 유한요소 지배방정식으로 변환기가 무한 음향 매질내에서 구동하는 경우 이들의 풀이는 식(3)에 표시된 어드미턴스 행렬중 가상경계면의 절점에 대한 어드미턴스 성분이 주어져야 가능하고 이를 구하는 알고리즘 중의 하나가 하이브리드형 무한요소법이다.

통상의 유한요소법에서는 경계조건을 만족하고 요소절점의 경계에서 플릭스(음압)의 연속조건이 성립하므로 요소경계와 요소내의 포텐살은 상호의존적이다. 그러나 하이브리드형 무한요소법에서는 요소경계의 플릭스는 요소내의 포텐살과는 독립으로 선택되고 요소내의 플릭스는 계의 지배 미분방정식을 만족하도록 선택된다. 즉 그림1의 반무한 공간 음향계에서 파동에너지는 무한영역으로 흡수되고 원거리음장 영역에서 음파는 구면파로 전파되므로 반무한 영역내의 각 요소에 대한 플릭스(음압)는 파동방정식의 일반해를 만족하는 형태로 가정할 수 있다.

그림 2는 가상경계면 외부에 부채꼴의 무한요소 e를 표시한 것으로 이에 대한 하이브리드형 범함수는 다음과 같이 주어진다¹⁰⁾

$$L = \int_{\partial\Omega_c} \tilde{p}(q-\tilde{q})dl + \frac{1}{2} \int_{r \rightarrow \infty} jkP^2 dl - \frac{1}{2} \iint_{\Omega_1} [(\nabla P)^2 - k^2 P^2] dx dy \quad (5)$$

단, $q = \partial p / \partial n \cdot \vec{p}$, \tilde{q} 는 가상경계 $\partial\Omega_c$ 상에서 정의되는 음압 및 구동속도이고 p 는 무한영역에 대한 음압이다. n 은 $\partial\Omega_c$ 로 부터 유한영역 Ω_F 방향이 양의 방향이다. 통상의 유한요소 범함수와 다른 점은 가상경계면에 대한 음압 \tilde{p} 와 무한 영역에 대한 음압 p 가 독립

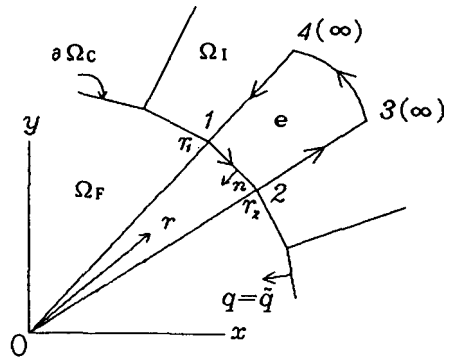


그림 2. 무한요소

으로 나타난다는 점이다. 여기서 \tilde{p} 는 식(3)의 음압 변수와 동일하다. p 는 반무한 영역의 음압으로 무한영역으로 파동에너지는 흡수되고 무한영역에서 0으로 되어야 한다는 Sommerfeld의 방사조건으로 부터 다음식과 같이 극좌표에 대한 일반해로 주어진다.

$$p = \beta_0 H_0^{(2)}(kr) + \sum_{i=1}^N (\beta_i \cos i\theta + \beta_{i+N} \sin i\theta) H_i^{(2)}(kr) \quad (6)$$

여기서 $H_0^{(2)}$ 는 제 2종 Hankel 함수, β_i 는 임의 상수이다.

식(5)에 식(6)을 대입하여 계산하면 범함수 L은

$$L = \int_{\partial\Omega_c} \tilde{p}(q-\tilde{q})dl - \frac{1}{2} \int_{\partial\Omega_c} pq dl \quad (7)$$

따라서 가상경계면 및 무한영역 Ω_1 에 대한 하이브리드형 범함수는 가상경계면의 경계적분으로 표현되어 이산화된 범함수는 다음식으로 주어진다.

$$L = \frac{1}{2} \{\tilde{p}\}^T [S]_{\infty} \{\tilde{p}\}_c - \{\tilde{p}\}^T \{\tilde{Q}\}_c \quad (8)$$

정유성 $\delta L = 0$ 로 부터 $\partial\Omega_c$ 상의 절점에 대한 이산화 방정식은 다음과 같다.

$$[S_{cc}] \{\tilde{p}\}_c = \{\tilde{Q}\}_c \quad (9)$$

여기서 S_{cc} 는 가상경계면 $\partial\Omega_c$ 로부터 외측을 본 어드미턴스 행렬로 경계상의 내삽함수의 차수와 식(6)의 일반해의 차수에 의해 결정된다. 또한 $\{\tilde{p}\}_c$ 및 $\{\tilde{Q}\}_c$ 는 각각 경계면 절점의 음압벡터 및 가상경계면에 작용하는 구동속도 행렬에 대응된다.

II.3 유한요소법과 무한요소법의 결합

식(3)'로 표시되는 폐공간 음향계에 대한 유한요소 지배방정식을 경계면 $\partial\Omega_c$ 에 있는 성분과 폐공간음향계 Ω_F 에 있는 성분으로 분리하여 행렬로 표시하면

$$\begin{bmatrix} [Y]_{FF} & [Y]_{FC} \\ [Y]_{CF} & [Y]_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{\tilde{p}\}_F \\ \{\tilde{p}\}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{\tilde{Q}\}_F \\ \{\tilde{Q}\}_C \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서 첨자가 다른 성분은 경계면에서 서로 다른 절점간의 등가어드미턴스 성분, $\{\tilde{Q}\}_F$ 는 (3)'식의 오른쪽 항에서 전기-기계계의 진동면 구동속도 성분, $\{\tilde{Q}\}_C$ 는 가상경계면의 구동속도 성분이다. 식(9)를 식(10)에 대입하면

$$\begin{bmatrix} [Y]_{FF} & [Y]_{FC} \\ [Y]_{CF} & [Y]_{CC} - [S]_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{\tilde{p}\}_F \\ \{\tilde{p}\}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{\tilde{Q}\}_F \\ \{0\} \end{bmatrix} \quad (11)$$

로 되어 식(3)'의 $[Y_L]$ 에 가상경계면의 어드미턴스 $[S_{cc}]$ 가 부가된 형태로 식(9)에 의해 폐공간 음향계와 반무한 음향계는 결합되어 전체계의 특성은 식(1), (2), (4), (11)로 해석된다.

III. 수치모의 실험결과 및 고찰

II장에서 소개된 알고리즘을 코드화하여 축대칭 변환기의 정규화 방사임피던스, 지향성 및 압전자 배열의 결합효과 해석에 적용하여 본 연구에서 소개한 기법의 유용성을 확인하였다.

III.1 정규화 방사임피던스 및 지향특성

그림 3은 무한강벽에 구속된 원통형 진동자모형 및 방사면의 속도분포가 V_0 로 일정한 경우 헬름홀츠방정식의 풀이로 얻어지는 정규화 방사임피던스 특성^[2]으로 정규화 방사지향은 ka 증가에 따라 1에 수렴

하고 정규화 방사리액턴스는 ka 증가에 따라 0에 수렴하는 특성을 보인다.

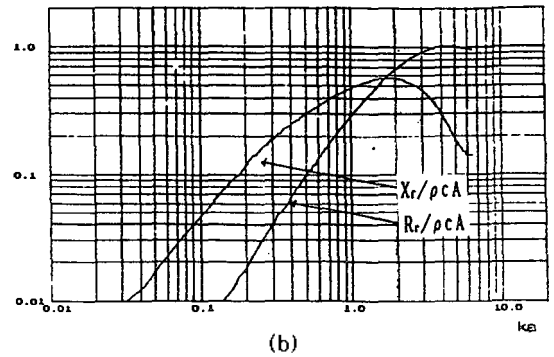
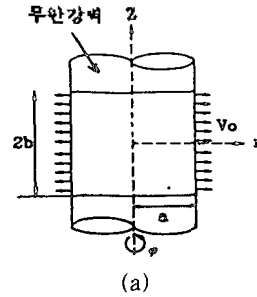


그림 3. 무한 강벽조건인 원통형진동자 모형 및 정규화 방사임피던스 특성
(a) 진동자 모형(b/a = 0.5)
(b) 정규화 방사임피던스

수중에서 사용되는 실제의 변환기는 보호 및 절연 목적으로 음향원도우가 압전자 외측에 부가되어 그림 3과 같은 무한 강벽의 이상적인 경계조건이 되지 못한다. 따라서 이론적인 해석이 어려운 이러한 변환기 모델에 II장에서 소개된 수치해석기법을 적용하여 정규화 방사임피던스를 구하고 그림3의 결과와 비교 해석하였다.

그림 4는 압전자의 외벽에 폴리우레탄 윈도우가 부가된 경우의 변환기모드 특성, 정규화 방사임피던스 및 지향특성으로 그림은 모델 단면의 1/4만을 보인다. 가상경계면이 유한요소법적용 영역을 폐쇄하는 경우에만 무한요소법 적용이 가능하므로, 수치해석에서 적용한 가상경계면은 변환기 진동면으로부터 축방향 7.5cm, 경방향 3.75cm 위치에 설정하여 수중인 경우 약 45kHz 이하에서 원거리 음장조건을 만족

하도록 하였다. 사용된 압전자는 경방향 분극의 PZT-4로 외경 50.8mm, 내경 40.4mm, 높이 25.4mm로 전기·기계적 특성상수는 표준규격^[11]을 적용하였다. 또한 4mm두께의 폴리우레탄(영율: 0.25×10^{10} N/m², 포아송비: 0.4, 밀도 1020kg/m³, 기계적 손실계수: 0.2)을 음향원도우로 하였다.

그림 4-(a)의 모드특성은 압전자의 진동에너지가 폴리우레탄으로 전달됨을 보이고 그림 4-(b)는 방사 임피던스 특성으로 이상적인 경계조건을 갖는 그림 3의 이론적인 결과와 전체적으로 일치하나 $ka=0.2 \sim 0.4$ 의 특정주파수 대역에서 극치를 보인다. 이는 압전자 정측면부 진동면 이외의 폴리우레탄 진동에

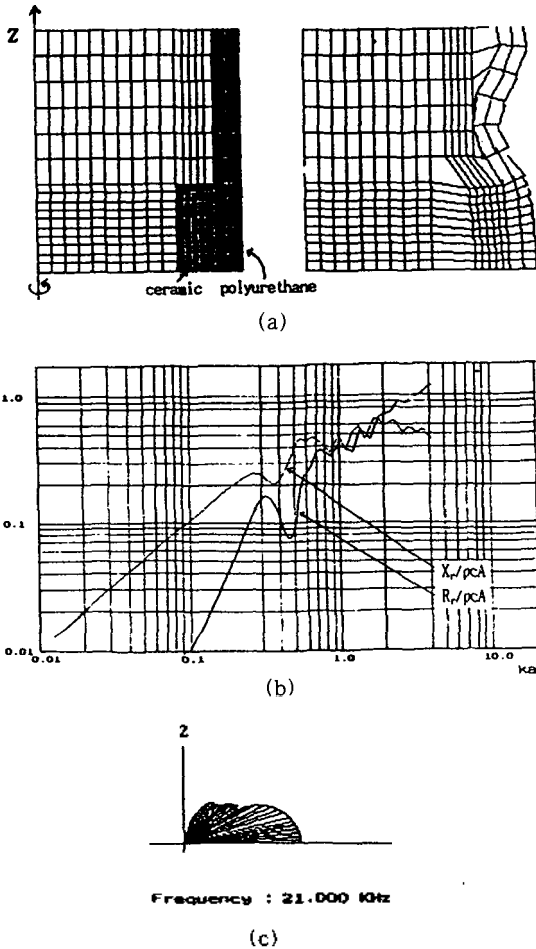


그림 4. 4mm 원통형 폴리우레탄 원도우조건외 음향특성.
 (a) 기계적 경계조건 및 모드특성
 (b) 정규화 방사임피던스
 (c) 지향특성 (주파수: 21KHz)

의한 간섭현상과 폴리우레탄 두께의 함수인 임계주파수 영향으로 해석된다. 압전자가 단일 주파수로 구동된다면 폴리우레탄 두께를 조절하여 이러한 현상을 제거할 수 있으므로 폴리우레탄은 음향적으로 투명하게 될 것이다. 그림 4-(c)는 지향특성으로 경방향 분극 압전자에 대한 일반적 지향특성을 보인다.

그림 5은 원통상자형 폴리우레탄 원도우가 부가된 것으로 가장 간단한 형태의 실제 변환기 모형이다. 그림 5-(b)의 정규화 방사임피던스는 그림 3의 이상적인 경계조건에 대한 이론적인 결과와 비교하면 그림 4의 모델보다 더 큰 오차를 보인다. 또한 그림 5-(c)는 지향특성으로 경 방향은 물론 측방향에도 강한 지향성이 있음을 보이고 이는 그림 5-(a)의 모드특성이 다극(multipole)음원 특성을 보이는 것과 일치

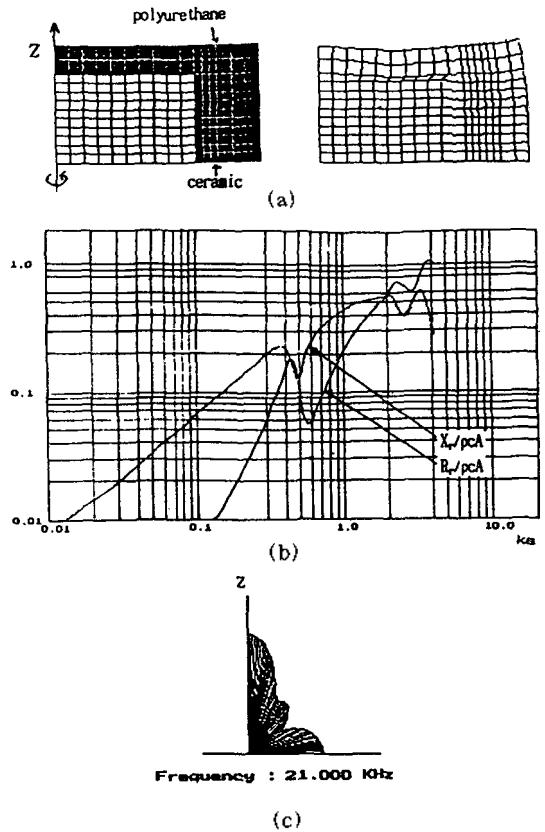


그림 5. 4mm원통상자형 폴리우레탄 원도우 조건외 음향특성
 (a) 기계적 경계조건 및 모드특성
 (b) 정규화 방사임피던스
 (c) 지향특성 (주파수: 21KHz)

한다. 결론적으로 동일규격의 압전자를 사용한 변환기일 경우에도 기계적 경계조건에 따라 그 음향적 특성은 다르므로 본 연구에서 제안한 수치해석 기법은 실제 변환기 해석에 유용하다고 사료된다.

III.2 폴리우레탄에 의한 인접압전자와의 결합효과

III.1절의 진동모드 해석으로 부터 압전자의 진동에너지는, 폴리우레탄으로 전달됨을 알 수 있다. 따라서 공진주파수가 서로 다른 두 압전자가 그림 6과 같이 폴리우레탄 원도우로 연결되는 경우 폴리우레탄의 탄성에 의해 두 압전자는 결합 될 것이다. 결합의 크기는 폴리우레탄의 기계적 감쇠인자 및 두 압전자간의 거리에 좌우될 것이다. 그림에서 두 압전자는 외경, 두께, 높이 및 공진주파수가 각각(50.8mm, 5.2mm, 25.4mm, 22.5KHz)와 (45.7mm, 5.2mm, 10.0mm, 25.7KHz)로 그림에서와 같이 압전자간의 축방향 거리 d 를 각각 4mm, 20mm로 하여 수치해석에 의한 진공중의 입력임피던스 특성을 해석하였다. 그림은 단면의 1/2을 보인다.

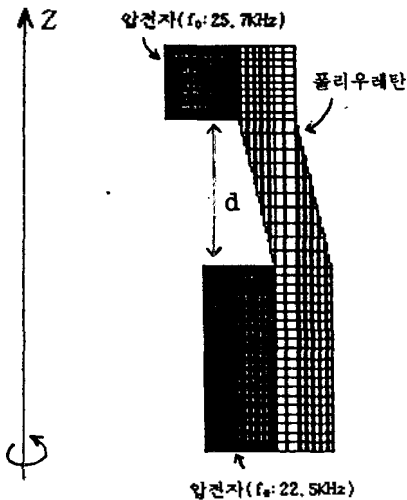


그림 6. 압전자 결합효과 해석모델
(a) 4mm두께 폴리우레탄 원도우 ($d = 4mm$)
(b) 4mm두께 폴리우레탄 원도우 ($d = 20mm$)

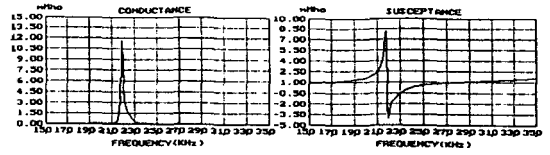
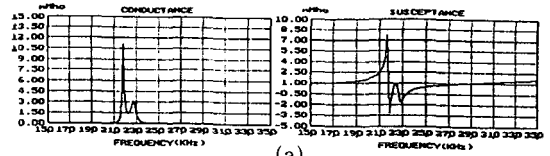


그림 7. 그림 6 모델에 대한 입력어드미턴스 특성 (공진주파수 22.5KHz 압전자에 1V 전압인가)
(a) $d = 4mm$ (b) $d = 20mm$

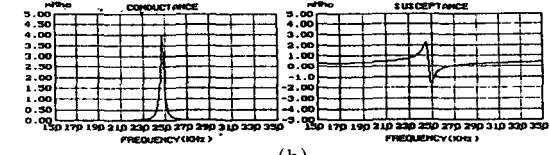
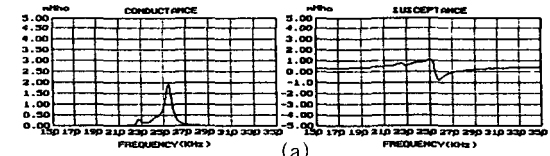


그림 8. 그림 6 모델에 대한 입력어드미턴스 특성 (공진주파수 25.7KHz 압전자에 1V 전압인가)
(a) $d = 4mm$ (b) $d = 20mm$

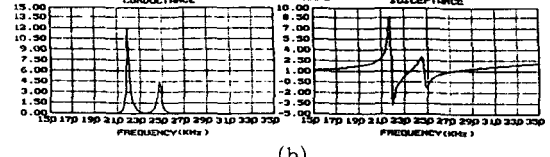
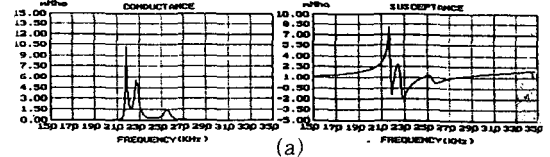


그림 9. 그림 6 모델에 대한 입력어드미턴스 특성 (두 압전자에 1V 전압 동시 인가)
(a) $d = 4mm$ (b) $d = 20mm$

그림 7은 공진주파수 22.5KHz의 압전자에만 1V전압을 인가하여 해석한 각각의 입력 어드미턴스 특성으로 거리 $d=4\text{mm}$ 인 경우 부가 질량에 의해 공진주파수는 약 21.8KHz로 천이되어 나타나고 22.8KHz에 제2의 공진주파수가 나타난다. 그러나 거리 $d=20\text{mm}$ 인 경우는 21.8KHz의 단일 공진주파수만 나타난다. 따라서 압전자간의 거리가 상대적으로 작은 $d=4\text{mm}$ 인 경우 측정되는 22.8KHz의 제 2 공진주파수는 결합효과에 의한 것으로 해석된다. 또한 그림 8은 공진주파수 25.7KHz의 압전자에만 1V전압을 인가한 특성으로 $d=4\text{mm}$ 인 경우 그림 7에 비해 명확하지는 않지만 결합효과가 존재하고 $d=20\text{mm}$ 인 경우는 결합효과가 무시되어 단일 공진주파수만 나타난다. 그림 7에 비해 결합효과가 상대적으로 미약한 이유는 공진주파수 25.7KHz의 압전자는 기계특성의 물리량이 작기때문에 인접한 22.5kKHz의 압전자에 전달되는 진동에너지가 적기 때문이다.

또한 그림 9는 1V전압이 두 압전자에 병렬로 동시에 인가된 경우로 $d=4\text{mm}$ 인 경우는 결합효과에 의해 각 압전자 고유의 공진주파수 특성을 보이지 않고 또한 어드미턴스도 병렬회로에서의 일반적 산술합으로 계산되지 않는다. 그러나 결합효과를 무시할 수 있는 $d=20\text{mm}$ 인 경우는 고유 공진주파수 특성을 보이고 어드미턴스 특성은 병렬회로에서의 산술합으로 계산될 수 있음을 보인다. 또한 폴리우레탄이 제거된 경우는 압전자간의 거리 d 에 무관하게 어드미턴스는 산술합으로 계산됨을 확인하였다.

IV. 결 론

본 연구에서는 유한요소법과 하이브리드형 무한요소법을 결합하여 원통형 PZT-4 압전자를 이용한 음향변환기의 방사임피던스 특성을 수치해석하였다. 단일 압전자에 원통형 폴리우레탄 원도우가 부가된 경우 방사임피던스는 전 주파수 대역에서 무한강벽 조건의 이론치와 잘 일치하나 특정주파수에서 상대적으로 큰 오차를 보이고 원통상자형 폴리우레탄 원도우가 부가된 경우는 방사임피던스는 전체적으로 이론치와 일치하지만 변환기가 multipole 특성을 갖게 되어 지향성에 크게 영향을 미친다. 또한 두 개의 압전자가 폴리우레탄으로 연결될 때 결합효과가 나타나 각 압전자에 전압이 병렬로 인가될 때 어드미턴스는 병렬회로에서의 산술합으로 합성되지 않는다.

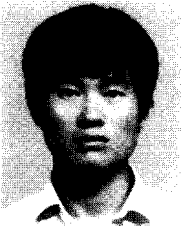
결합의 크기는 압전자간의 거리에 반비례하고 거리 20mm 이상일 때는 결합효과는 무시되어 변환기의 어드미턴스는 병렬회로의 산술합으로 계산될 수 있음을 보인다. 제안된 변환기의 수치해석 기법은 변환기의 경계조건이 해석적으로 처리될 수 없는, 실제 변환기의 음향특성 해석 및 설계에 응용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. M. V. Crombrugge and W. Thompson, Jr., "Optimization of the Transmitting characteristics of a Tonpiltz-type Transducer by Proper choice of Impedance Matching Layers," JASA, Vol.77 No.2, pp 747-752, 1985.
2. T. Nimura and Y. Watanabe, "Sound Radiation from Zonal Radiators," Sci. Rep. Ritu, B-(Elect. Comm.) Vol.5 No.3, 4, pp 153-195, 1953.
3. H. A. Schenck, "Improved Integral Formulation for Acoustic Radiation Problems," JASA, Vol.44 No.1, pp 41-58, 1968.
4. Y. Kagawa and T. Yamabuchi, "IEEE Trans. on Sonic and Ultrasonics," Su-23, pp 379-385, 1976.
5. 山淵龍夫, 加川幸雄(Y. Kagawa), "復合壓電招音波變換機의 有限要素 Simulation," 일본음향학회지, 34권 12호, pp 711-719, 1978.
6. 김천덕, 서희선, 김대환, 윤종락 "유한요소법을 이용한 원통형 압전 변환기의 입력 임피던스 해석," 한국음향학회지, 11권 6호, pp 32-40, 1992.
7. R. R. Smith, J. T. Hunt and D. Barach, "Finite Element Analysis of Acoustically Radiating Structures with Applications to Sonar Transducers," JASA, Vol 54 No.5, pp 1277-1288, 1973.
8. S. S. Jang, "Sonar Transducer Analysis and Optimization Using the Finite Element Method," Ph. D. Dissertation, Univ. of Birmingham, 1991.
9. T. Tsuchiya, Y. Kagawa and T. Yamabuchi, "Finite Element Analysis of Focusing Transducers and their Response," 日本 電子情報通信學會 論文誌, Vol.J74-A No7, pp 929-938, 1991.
10. 加川幸雄 "開領域問題를 위한 有限/境界要素法," 사이언스社, pp 102-134, 1983.
11. O. E. Mattiat, "Ultrasonic Transducer Materials," Plenum Press, pp 90-107. 1971.

▲윤 종 락 1954년 6월 17일 생
현재 : 부산수산대학교 정보통신공학과 조교수(1992년 제11권 6호 참조)

▲윤 형 규 1953년 7월 22일 생
1976년 2월 : 울산공대 전기및 전자공학과 졸업(학사)
1981년 2월 : 한국과학원 전기및 전자공학과 졸업(석사)
1981년 4월 ~ 현재 : 국방과학 연구소 수중음향센서 연구실 선임연구원



▲김 대 환 1954년 3월 31일 생
현재 : 국방과학연구소 수중음향센서 연구실장(1992년 제11권 6호 참조)

▲김 천 덕 1946년 5월 23일 생
현재 : 부산수산대학교 전자공학과 교수(1992년 제11권 6호 참조)