

Tonpizl 압전변환기의 방사임피던스 해석

조성일*, 박순중**, 윤종락***, 김무준***, 김천덕***

*:부경대학교 대학원 음향진동공학과 석사과정, **:삼양무선공업(주) 부설연구소, ***:부경대학교

Radiation Impedance Analysis for Tonpizl Piezoelectric Transducer

Sung-II Cho*, Soon-Jong Park**, Jong-Rak Yoon***, Mu-Jun Kim***, Chun-Duck Kim***

요약

Tonpizl 압전변환기에 관하여 유한요소법을 사용하여 공기중의 동특성 해석과 수중의 방사임피던스를 해석하였다. 공기중에서 트랜스듀서의 구조를 변화시키면서 입력 어드미턴스 특성과 진동모드를 해석하여 압전변환기를 모델링하였다. 음향 윈도우를 압전변환기 전면에 부착한 후 유한요소법(FEM)에 의하여 매질의 영향을 고려한 입력 어드미턴스 특성을 해석하였으며, 또한 방사 임피던스 계산 루틴을 추가하여 무한 배율의 경계조건하에서 방사 임피던스를 해석하였다. 공기중과 수중에서의 해석을 통하여 Tonpizl 압전변환기 단일소자의 구조 변경 및 기계 부재의 추가 등에 따라 변동하는 변환기의 특성 및 방사 임피던스를 해석하므로써 평면 배열형 음향 트랜스듀서의 설계에 필요한 파라미터를 구할 수 있다.

I. 서론

평면 배열형 음향 트랜스듀서는 수중 물체의 탐지에 사용되고 있는 전기-기계-음향변환기로서 여러개의 음향 트랜스듀서를 적절히 조합 배열한 후 수중에 음파를 방사하거나 음파를 전기적으로 변환하는 시스템이다.

Tonpizl 압전변환기는 Fig. 1과 같이 평면 배열형 음향 트랜스듀서를 구성하는 단일 소자로서 전기 입력에 대하여 기계적 진동을 일으키는 압전진동자, 압전진동자의 기계적 진동을 음향 매질로 전달하는 머리추(Head Mass), 타력을 얻기 위한 꼬리추(Tail Mass), 전극, Insulator, 전기적 절연과 차폐를 위한 음향 윈도우 등으로 복잡한 구조를 이루고 있다.

위와 같은 복잡한 구조를 가진 Tonpizl 압전변환기의 동작특성 및 음향특성을 사전에 예측하는 것은 매우 중요하며 지금까지는 등가회로 해석과 같은 이론적 해석방법 등이 활발히 연구되어 왔고, 지속적으로 연구되어 지고 있는 실정이다[1]~[5]. 그러나, 등가회로 해석법은 진동자의 기하적인 형상 등에는 적용하기 곤란한 점이 많고, 이론적인 해석 또한 복잡하여 그 특성을 연구하는데 많은 어려움이 있다.

본 연구에서는 진동자의 부가재의 기하학적 형태 해석에 쉽고, 전기-기계-음향계가 결합되어 있는 압전변환기에 대한 해석이 가능한 유한요소법과 하이브리드형 무한요소법을 결합한 알고리즘을 이용하여 목적대역의 공진주파수를 가지는 압전변환기를 설계하였으며, 음향 윈도우를 부가한 후 수중에서의 동특성 및 무한 배율을 가진 경우의 방사임피던스 해석을 수행하여 평면 배열형 트랜스듀서 설계 및 효율 계산등의 기초자료로 사용하고자 한다.

II. 등가회로와 방사임피던스

Tonpizl 압전변환기는 전기 구동부, 전기계와 기계계를 결합한 압전진동자, 음향계를 유발하는 머리추 및 음향 매질로 크게 구분되는 전기-기계-음향계가 결합된 트랜스듀서이다.

압전진동자는 변위를 크게 하기 위하여 분극 방향을 상반되도록 하여 석출하는 구조로 되어 있다. 임피던스 정합

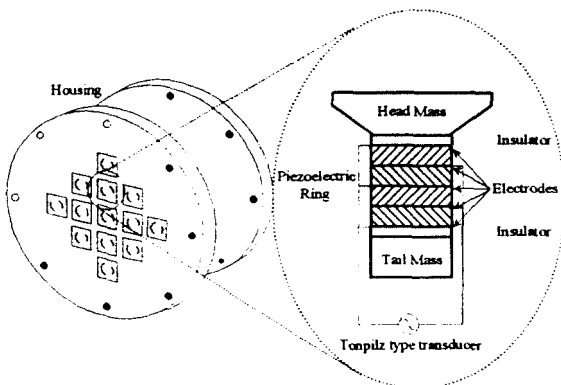


Fig. 1 Tonpizl type transducers.

과 음파 발생면을 넓히기 위한 머리추가 결합되어 있고, 머리추는 알루미늄과 같은 가벼운 재질로 가정했으며 꼬리추는 머리추와는 달리 무거운 재질로 구성하여 타격을 얻게 모델링하였다. 또한, 압전사의 압전력과 팽창력을 크게 하기 위하여 일반적으로 머리추와 꼬리추 사이에 압전진동자를 관통하는 고정 막대(Clamping rod)로 연결된다. 머리추의 전면과 음향매질의 사이에는 질연 및 보호를 위한 음향원도우가 부가된다[1]~[6].

위와 같이 압전진동자로 구성된 음향변환기를 선가적인 등가회로로 나타내면 압전진동자를 구동하는 전원부, 전기계와 기계계를 결합하고 음발생의 구동원인 압전진동사와 진동체 및 압전진동사에서 발생된 음파가 방사되는 음향매질로 간략하게 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

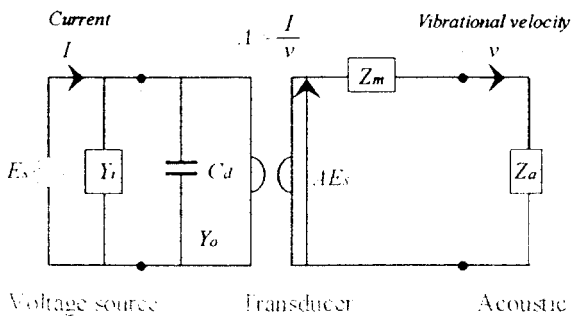
전기 입력단의 입력 어드미턴스는 제동 어드미턴스와 동 어드미턴스의 합으로 식 (1)과 같이 주어진다[7]~[9].

$$Y_i = Y_d + Y_{in} = Y_i + Y_o + \frac{A^2}{Z_m + Z_a} \quad (1)$$

여기서 Z_a 는 음향 매질의 부가에 의한 방사임피던스이고, 음향변환기의 효율, 방사패턴, 지향성 빔패턴 등을 예측하기 위한 중요한 파라미터이며, 평면 배열형 트랜스듀서의 최적 설계에 기초적 자료를 제시한다.

일반적으로 방사임피던스의 해석은 공기중에서의 방사임피던스가 기계임피던스 Z_m 에 비해 매우 작아 무시할 수 있다는 가정을 하여, 공기중과 수중에서의 전기 입력 어드미턴스를 구하여 방사임피던스를 해석을 하고 있다[10].

본 연구에서는 유한요소법과 하이브리드형 무한요소법을 결합한 해석 방법을 사용하여 음파 방사면에서의 변위와 음압을 구한 후 음향 매질에 의한 방사 임피던스를 직접



- Y_i : Inner admittance of source
- Y_o : Damped admittance of vibrator
- Z_m : Mechanical impedance
- Z_a : Radiational impedance
- A : Forcefactor

Fig. 2 Equivalent circuit of transducer

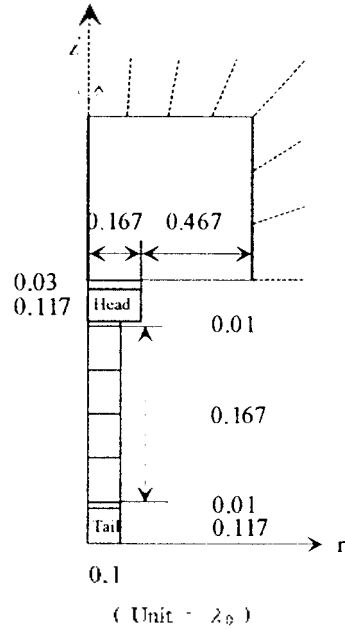


Fig. 3 FEM model of Tonpitz type transducer.

계산하는 방법으로 해석하였다.

III. 해석 모델

Tonpitz 압전변환기는 전장에서 서술한 바와 같이 다중의 계가 결합된 복합변환기이기 때문에 유한요소법을 적용하여 수치해석하기 위해서는 전기-기계-음향계가 결합된 3차원 알고리즘 혹은 한 축을 기준으로 대칭인 구조체에 적용되는 2차원 축대칭 알고리즘의 사용이 가능하다[11].

본 연구에서는 Fig.3의 음향축(z)을 대칭으로 한 모델을 설정하여 전기계, 기계계 및 음향계의 일정 거리까지는 유한요소법을 적용하고, 음향계에 가상의 경계면을 설정하여 하이브리드형 무한요소법을 유한요소법에 결합한 전기-음향변환기를 해석용 유한요소법 코드를 변형하여 사용한다.

수치해석에 사용된 유한요소 모델을 Fig. 3에 나타낸다. 압전진동자는 PZT-4 원판으로 선정하였으며, 분극 방향이 두께 방향으로 서로 엇갈리게 분극 처리하며 적층형으로 구성한다. 압전진동자와 머리추와 꼬리추 사이에 전기적 전연을 위한 전연체층 삽입하며 재질은 글래스로 설정한다. 추력을 얻기 위한 꼬리추는 압전진동자의 후면에 장치하며 재질은 스티로 가정하고, 압전진동자의 전면에는 알루미늄 재의 머리추를 장치하는 것으로 한다. 압전변환기의 음향 해석을 하기 위해 특성 임피던스기 물에 가까우며 손실계수가 0.2인 폴리우레탄 음향원도우를 방사면에 부가하였다

상기 Fig. 3의 해석 모델은 1개의 압전진동자 원관을 기준으로 해석 알고리즘을 사용하여 다른 구조체를 추가하는 방법으로 반복 계산을 통하여 최종적으로 수중에서 목적의 주파수 대역에서 동작하는 모델을 설정한 것이다.

IV. 유한요소 해석 결과

선설의 모델에 있어서 음향 윈도우와 음향 매질의 영향을 고려하기 전에 먼저 공기중에서의 압전변환기의 입력 어드미턴스 특성을 구한 것이 Fig. 4와 같으며 여기에서

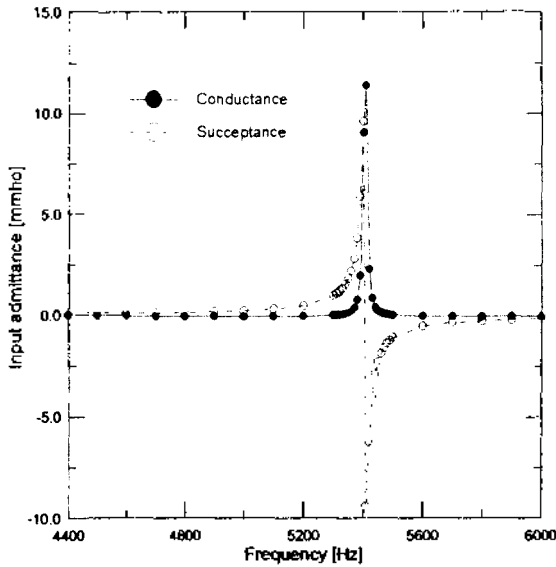


Fig. 4 Input admittance characteristic(in air).

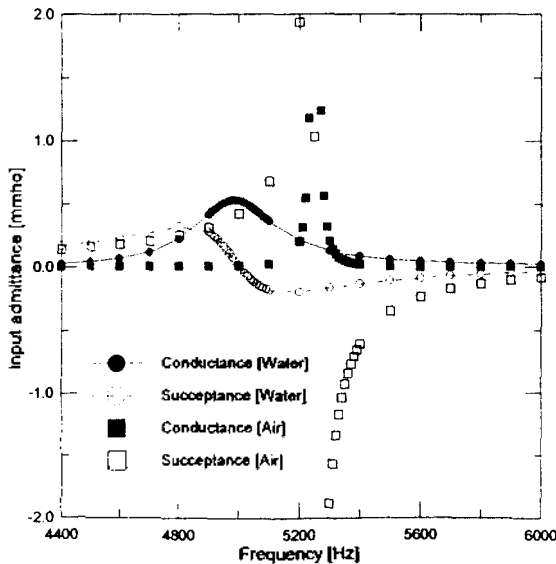
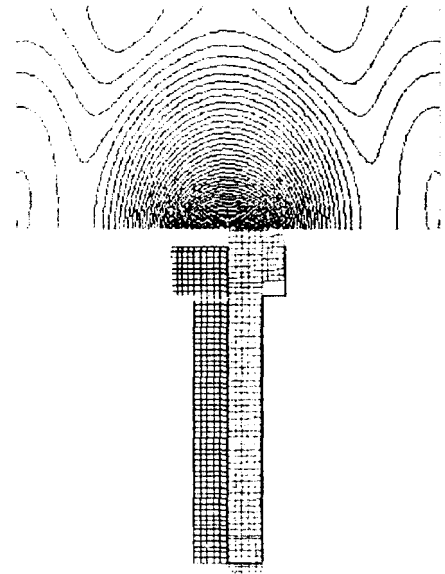


Fig. 5 Input admittance characteristic.
(with acoustic window)

공진주파수는 5320Hz로 해석되었다. 여기에서 공진주파수 부근에서의 입력 어드미턴스의 값은 일반적으로 유한요소법에 의한 계산치가 실측치보다 상당히 높게 나타나지만 공진주파수와 특성 곡선의 경향은 실측치와 거의 일치하는 것으로 알려져 있다.

Fig. 5는 압전변환기의 머리추 전면에 두께 1cm의 음향 윈도우를 부착한 모델에 대한 공기중 해석과 수중에서의 어드미턴스 해석 결과를 비교한 것이다. 음향 윈도우를 부착함으로써 공기중에서의 공진주파수가 5320Hz에서 5250Hz로 감소하였으며 그 결과는 진동체의 질량 증가에 의한 효과이다. 또한, 음향 윈도우를 부착한 수중에서의 공진주파수는 5000Hz로 감소하였으며, 진폭도 감소하는 결과를 나타내었다. 이것은 음향 매질의 부가에 의한 효과이며, 식(1)의 방사 임피던스의 추가로 인한 동 어드미턴스 값의 감소에 의한 것이다.

음향 윈도우를 부착하여 수중에서 구한 상기의 공진주파수로 압전변환기를 구동하였을 때의 압전변환기의 동특성과 정상상태의 음장해석 결과를 Fig. 6에 나타낸다. 그림에서 왼쪽 아래는 구동전의 압전변환기의 형태를 나타내며, 오른쪽 아래의 그림은 구동후의 진동 모드로서 팽창 수축 진동을 하고 있다는 것을 나타낸다. 또한, 머리추 부분은 거의 일정한 변위를 가지며 피스톤 운동에 가까운 형태라는 것을 알 수 있다. 음압분포의 경우 방사면의 중심으로 부터 음파가 구면파의 형태로 전달되어 가는 것을 확인할 수 있다.



55 Fig. 6 Resonance mode and acoustic field characteristic.

V. 결 론

평면 배열형 트랜스듀서의 구성 소자인 Tonpitz 음향변환기를 모델로 하여 전기-기계-음향계가 결합된 유한요소법과 하이브리드형 무한요소법 알고리즘을 사용하여 동특성과 음상해석을 행하였다.

공기중의 해석을 통하여 압전전동자, 부가 Mass, Insulator, 음향윈도우 등을 고려한 모델을 설계하였다. 실성된 모델에 음향매질을 부가하여 음상해석을 수행한 결과 부가질량 효과에 의한 공진주파수의 감소와 음향 임피던스와 음향 윈도우의 부가 저항 성분때 의한 입력 어드미턴스 값의 감소를 확인하였다. 또한, 정상상태의 음향 매질내의 음압분포를 규명하였다. 방사 임피던스를 구하는 주된을 추가하여 무한 배플 조건하에서의 방사 임피던스를 해석하여 이론치에 거의 일치하는 결과를 얻었다.

제한된 해석 기법은 Tonpitz 음향변환기의 구조 변경 및 기계 부재의 추가에 따른 변환기 설계 및 음향 특성을 예측하는데 적용될 수 있음은 물론 평면 배열형 트랜스듀서의 설계 제작에 유용하게 이용할 수 있을 것으로 생각한다.

REFERENCES

- [1] Diana F. Mc Cammon, William Thompson, Jr., "The design of Tonpitz piezoelectric transducers using nonlinear goal programming," JASA, Vol. 68-1, 754-757 (1980).
- [2] M. D. McCollum, B. F. Harmon, O.B. Wilson, Transducers for sonics and ultrasonics, Technomic Publishing Co. (1992)
- [3] J. K. Lee, I. C. Seo, "A prediction of radiation power for the planar array acoustic transducer considering mutual coupling effects," JASK, Vol. 15-1, 17-22 (1996).
- [4] C. Y. Joh, et al, "Optimal beam design of underwater acoustic planar array transducer considering radiation impedance," JASK, Vol. 15-1, 40-45 (1996).
- [5] C. Y. Joh, et al, "Equivalent circuit modeling of underwater acoustic piezoelectric transducer," JASK, Vol. 15-4, 77-82 (1996).
- [6] C. D. Kim, et al, "Input impedance analysis of piezoelectric cylinder transducer using finite element method," JASK, Vol. 11-6, 32-40 (1992).
- [7] Fuji ceramic, Piezoelectric ceramic technical handbook, Fuji ceramic Co.
- [8] Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Fundamentals of acoustics, Top Press (1981).
- [9] Lawrence E. Kinsler, et al, Fundamentals of acoustics(third edition), John Wiley & Sons (1980).
- [10] J.K. LEE, and I.C. SEO, "Self-Radiation Impedance of Rectangular Acoustic Sensor without Baffle," JASK, Vol. 14-4, 82-88(1995).
- [11] J. N. Decorpigny, et al, "In-air analysis of piezoelectric Tonpitz transducers in a wide frequency band using a mixed finite element-plane wave method," JASA, Vol. 78-5, 1499-1507 (1985).
- [12] J. R. Yoon, et al, "Acoustic characteristics analysis of the axi-symmetric transducer by the combined finite element method and hybrid type infinite element method, Part I," JASK, Vol. 13-2, 60-67 (1994).

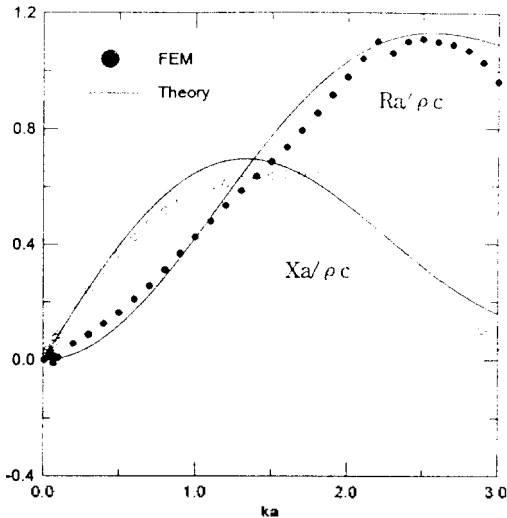


Fig. 7 Radiation impedance of Tonpitz type transducer with infinite baffle.

Fig. 7은 Tonpitz 음향 변환기가 Fig. 3과 같은 모델로서 무한 배플의 경계조건에서 구동될 때의 방사임피던스 특성을 나타낸 것이다. ka 의 변화는 0.01에서 3.0까지로 하였으며, 그 이유로는 유한요소법이 가지는 자체의 오차가 진저에 많은 영향을 미치게 되고, 근접한 결과를 얻기 위해서는 요소분할을 많이 하므로서 계산 시간이 길어지기 때문에 공진주파수($ka=1.0$)의 3배 정도로 대역을 한정하였다. 또한, 사용 주파수 대역을 크게 벗어나게 되면 센서로서의 정확도가 감소한다는 단점이 있기 때문에 공진주파수의 3배 정도로 해석 범위를 설정하였다.

실선은 이론치로서 무한 배플판에 끼워진 진동면상의 변위가 일정한 가진 원판의 방사 저항($Ra/\rho c$)이며, 점선은 방사 리액턴스($Xa/\rho c$)이다. 고주파수 영역($ka \gg 1$)으로 갈수록 방사 저항은 음향 매질의 특성 임피던스에 일치하며 방사 리액턴스 성분은 영에 접근한다는 것을 나타낸다 [9]. 이론치와 유한요소법에 의한 해석치의 비교는 ka 가 1.0 부근까지는 거의 일치하는 결과를 보이고 있으며 고주파수 쪽으로 갈수록 약간의 오차가 발생하고 있다는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 위와 같이 유한요소법을 사용하여 무한 배플을 가진 Tonpitz 압전변환기의 방사 임피던스를 규명하므로서, 유한 배플을 가진 실제의 Tonpitz 압전변환기의 자기 방사임피던스(Self Radiation Impedance)해석도 실측치에 근접한 계산이 가능할 것이다.