Tonpilz형 트랜스듀서의 방사임피던스 해석에 관한 연구

(A Study on Analysis of Radiation Impedance for Tonpilz-type Transducer)

*조성일, **김무준, ***김천덕
* 부경대학교 대학원 음향진동공학과
** 부경대학교 물리학과
*** 부경대학교 전기공학과

I. 서 론

수중에서 압전 Tonpilz형 트랜스듀서의 광대역 송수파기는 하드웨어적으로 어군탐지 및 군사용등의 특수 목적에 따라 1960년대 후반부터 개발되었다. 설계방법은 Monson의 등가회로법, 1980년대의 W.Thompson의 비선형 요소를 보탠 등가회로법 등이 있고 목적하는 tonpilz 사양에 따라 각종 파라메타를 적용해야하는 복잡함과 번거로움이 있었다. 이런 점을 감안하여 종래에는 유한요소법을 이용한 설계 및 해석을 행하고 있다.

수중물체 탐지에 이용되는 소나는 복수의 Tonpilz형 트랜스듀서를 평면배열을 하거나 돔형배열 등으로 구성되어 있다. 소나의 센서부로 사용되는 Tonpilz형 트랜스듀서는 그 개별 특성에 따라 상호간섭 등에 많은 영향을 주는데 소나의 제특성을 알기위해서는 먼저 단일소자인 Tonpilz형 트랜스듀서의 해석이 선행되어야한다[1]-[5].

본 연구에서는 Tonpilz형 트랜스듀서의 제특성을 해석하기 위해 기계적진동 및 전기어드미턴스 해석은 ANSYS 프로그램, 음압분포계산은 SYSNOISE 프로그램, 방사임피던스는 유한요소프로그램을 이용해 구한다.

특히, 방사임피던스의 계산시 기존의 해석적인 접근으로는 방사면의 경계에 대한 고려가 힘들다. 그러나 실제 사용된는 트랜스듀서의 어레이 등 이외의 음향윈도우, 비강체 음향배플등을 사용하므로 이에 대한 고찰이 요구되고 있다. 본 연구에서는 이에 대한 고찰을 하기 위하여 유한요소법에 의한 접근을 시도하고 그 기초단계로써 배플이 없을 경우에 대한 방사임피던스를 계산하였다.

II. Tonpilz 형 트랜스듀서

본 연구의 수치해석에 사용된 Tonpilz형 트랜스듀서의 모델은 그림 1과 같다.

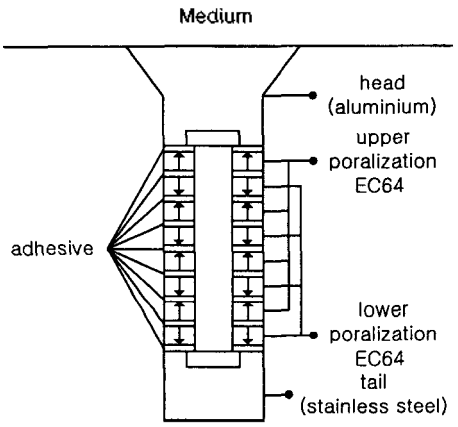

그림 1. Tonpilz 형 트랜스듀서(단면도)

수치해석은 압전진동자의 단일요소에 대하여 수치시뮬레이션과 측정실험에 의해 전기적 어드미턴스를 구하였다. 그리고 원판형, 사각형의 진동면인 머리부분과 링형의 압전체로 구성된 Tonpilz형 트랜스듀서에 대해서도 시뮬레이션으로 전기적 어드미턴스 및 진동모드를 구하였다. 다음으로 ANSYS 결과데이타를 SYSNOISE에 입력하여 음압분포도를 구하였고, 3차원20노드 요소를 사용한 유한요소프로그램에 입력하여 방사임피던스를 구하였다.

Tonpilz형 트랜스듀서는 링형압전체(EC64)와 원형 및 사각head부분과 원형 tail부분으로 구성되어져 있다[7]. head와 tail의 재질은 각과 알루미늄과 스텐레스스틸 등을 사용한다. Tonpilz의 구동원리는 압전체로 입력된 전기에너지가 기계에너지로 변환되어 head에서 음을 방사한다. 본 연구에서는 head의 형태를 원형과 콘형, 사각형으로 모델링하여 수치시뮬레이션 하였다. 그림 1은 콘

형모델을 나타냈다. 원판형 head경우는 압전진동자로부터 힘이 head의 밑 중심에서 편중되어 힘이 전달되고, 콘형 head는 head의 밑 중심에서 방사면까지 힘이 고르게 전달될수 있도록 되어있다. Tonpilz의 각 부위별 밀도 분포는 tail > piezo > head > medium으로 되어있어 head에서 음이 매질로 방사될 때 역류가 생기지 않게 되어있다. 또한 압전체에 prestress효과를 주기위해서 head와 tail을 볼트로 고정한다.

III. 압전진동자의 전기적 특성

Tonpilz형 압전트랜스듀서는 압전효과에 의해 전기적 구동력을 인가하면 기계적인 변위가 생기고 head의 기계적변위가 매질로 음을 방사하는 트랜스듀서이다. 따라서 ANSYS에서 압전진동자를 2차원 및 3차원 전기·기계결합요소로 모델링하였고, 3차원 해석에서는 노드 개수를 줄이고 계산시간을 단축하기 위하여 Tonpilz를 1/4만 모델링하고 대칭조건을 주어 시뮬레이션을 하였다.

ANSYS에서 압전진동자의 전기기계결합계에 대한 운동방정식은 식(1)과 같이 주어진다.

$$\{T\} = [c]\{S\} - [e]\{E\}$$
$$\{D\} = [e]^T\{S\} + [\varepsilon]\{E\} \quad (1)$$

여기서 {T}는 stress vector, {D}는 electric flux density vector, {S}는 strain vector, {E}는 electric field vector이고 [c]는 elastic matrix, [e]는 piezoelectric matrix, [ε]는 dielectric matrix이다.

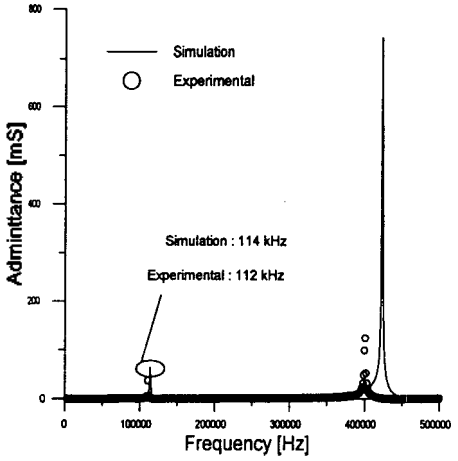

그림 2(a) 한 개 전기어드미턴스

그림 2(a)는 tonpilz형 트랜스듀서를 구성하는링형압전체가 한 개 일 때 전기어드미턴스, 그림2(b)는 2개를 적층했을 때 전기어드미턴스의 수치시뮬레이션과 실제측정에 의해 구한 값을 나타냈다.

그림(2)에서 링형압전체의 경방향 공진주파수가 먼저 나타나고 실험과 수치해석결과와 약 2kHz정도 차이가 나고 있다. 그림 3은 압전진동자를 4, 6, 8개를 적층시 전기어드미턴스의 수치해석을 나타내고 있다. 압전진동자를 4개 이상 적층하였을 때 접착상 문제로 인해 실험데이타가 값이 일정하지 않아 계산값과 실험값을 비교하기 곤란하였다.

그림 3에서는 축방향 공진주파수가 압전체를 다수개 적층하게 되면서 경방향 공진주파수보다 낮은주파수에서 나타남을 알 수 있다.

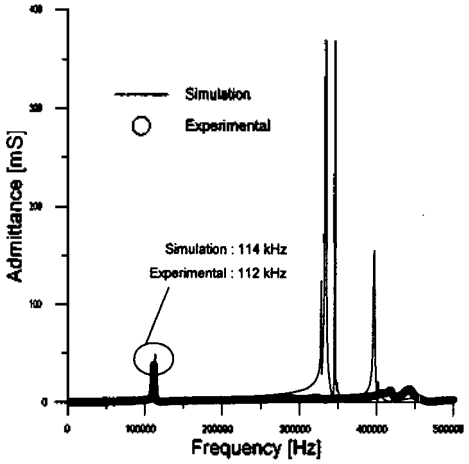

그림 2(b) 2개 전기어드미턴스

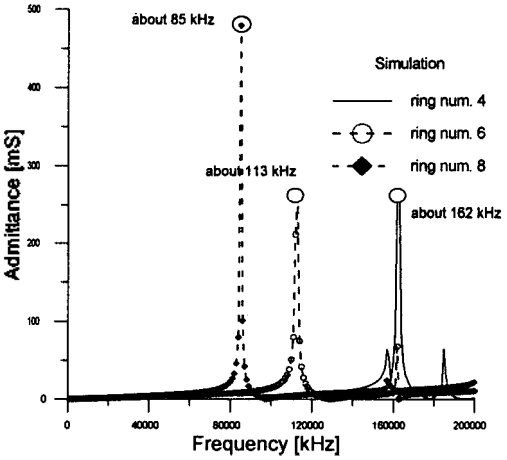

그림 3. 압전진동자 개수에 따른 공진주파수 변화

IV. 공진모드

본 연구에서는 압전진동자를 8개를 적층시킨 모델의 축방향 공진주파수를 고려하여, head와 tail의 치수를 결정하였다. tail의 모양은 원통형으로 고정하고 head의 모양을 원형과 콘형, 사각형으로 바꾸어 수치시뮬레이션을 행하였다. 원형보다 사각형 head의 장점은 방사면적이 넓고 mounting할 때 여백이 적다는 것이 있다. 통상으로 사각형 head를 많이 사용하므로 사각형 head를 중적으로 데이터를 출력하였다. 그림 4는 사각형 head의 전기어드미턴스 특성을 나타내고 있다.

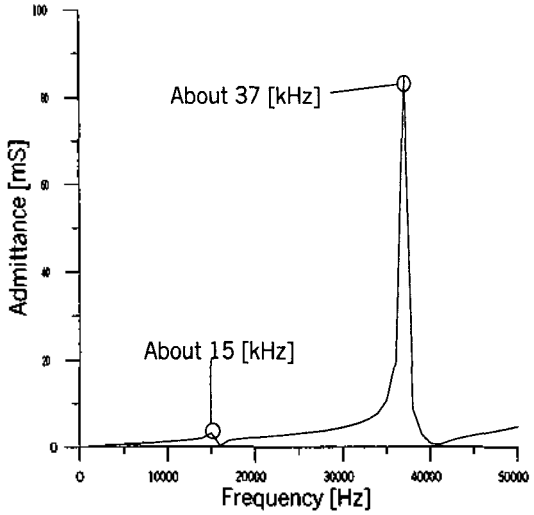

그림 4 사각형 head의 전기어드미턴스

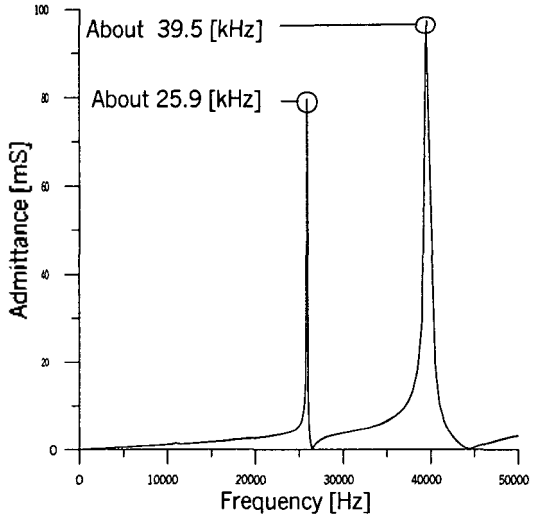

그림 5 콘+사각형 head의 전기어드미턴스

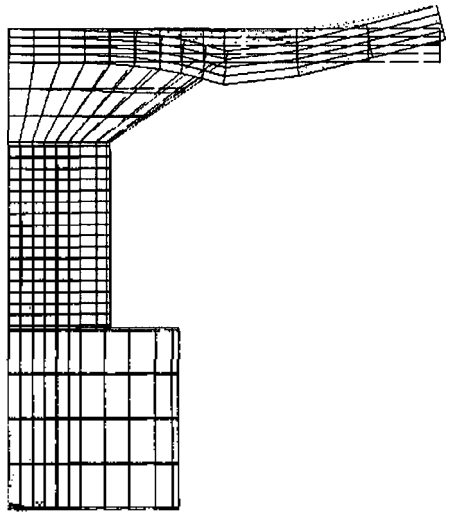

그림 6 콘+사각형 head의 공진모드

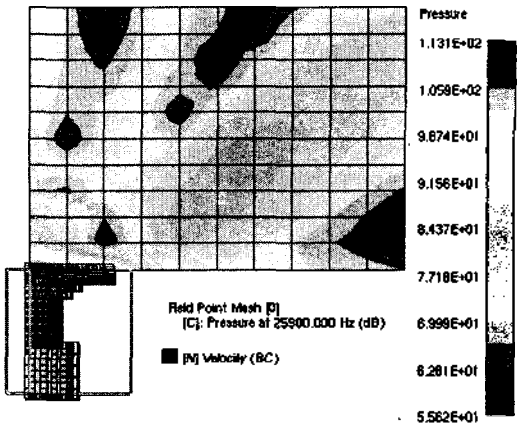

그림 7 콘+사각형 head의 음압분포도

약 15kHz에서 축방향공진이 미세하게 일어나고 있음을 알 수 있다. 그림 5는 콘형+사각형 head의 전기어드미턴스를 나타내고 있고 축방향공진은 약 25.9kHz에서 나타나고 있음을 알 수 있다.

그림 6은 콘형+사각형 head의 공진모드이며 flapping mode가 일어나는 것을 알 수 있다. flapping mode는 tonpilz의 배열시 lip mounting을 하므로서 해결할 수 있다. 콘+사각형 head가 사각형 head보다 높은 공진주파수를 가지는 것은 head의 질량감소가 많은 영향을 미친 것으로 사료된다.

그림 7은 SYSNOISE에서 계산한 음압분포이다. 음압분포가 방사면에 집중되어 있는 것을 알 수 있다. 지향성을 보기위해 축방향에 평행하게 마이크로폰을 세웠을 때의 수치해석 음압분포도이다.

V. Tonpilz 트랜스듀서의 방사임피던스 계산

그림 8은 원형 head를 식(2)를 사용한 2차원 축대칭 유한요소법을 사용하여 ka=10까지 방사임피던스를 계산한 것이다.

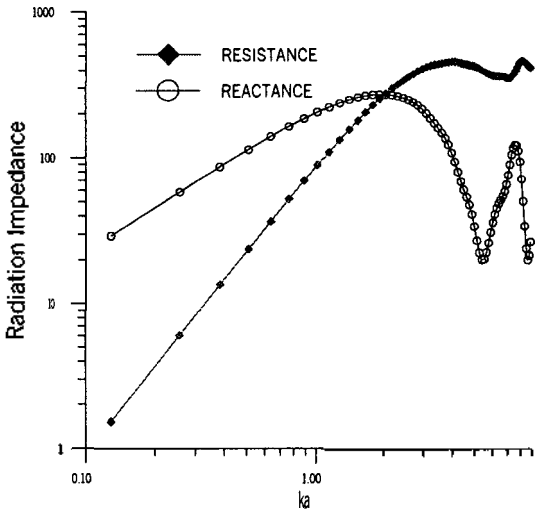

그림 8 원형 head의 방사임피던스

$$Z_r = \frac{F}{j\omega u_n} = \frac{1}{j\omega u_n}\int\int_{\Gamma_d} p_d ds \qquad (2)$$

방사면이 원형이므로 축대칭을 이용한 유한요소프로그램을 사용하였다. ka=10이상에서 발산하는 것을 알 수 있었다. 이는 노드의 개수는 한정되어있는데 ka값이 증가하므로 즉 반경 a는 고정되어있고, 주파수 성분이 커지므로 일어나는 현상과 축대칭이므로 방사면이 모드가 생기면은 축대칭이 되지않으므로 일어난 것으로 추측된다.

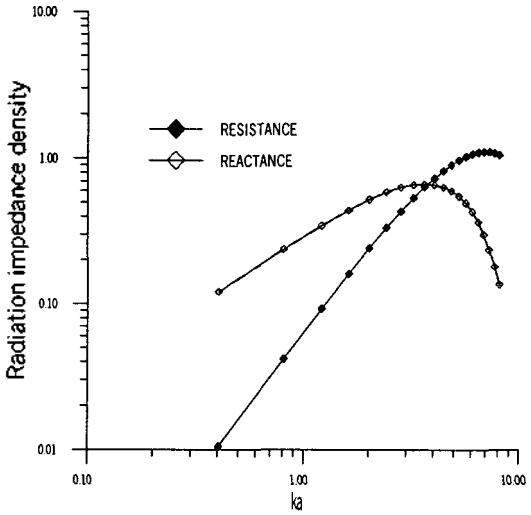

그림 9 콘+사각형 head의 방사임피던스

그림 9는 20노드 요소를 사용한 3차원 유한요소프로그램으로 1/4대칭조건으로 계산한 결과이다. 유한요소프로그램에서 방사면의 노드들의 면적과 ANSYS에서 head의 방사면의 변위데이타로 방사임피던스를 구하였다. 그림 9도 마찬가지로 ka 값이 10 이상이되면 발산하는데 그림 8에 비하면 좀 안정적이었다. 이는 그림 8보다는 계산노드가 많고 공진시 나타나는 모드를 예측할 수 있기 때문인 것으로 사료된다.

VI. 결론

Tonpilz형 트랜스듀서의 방사임피던스를 구하기 위하여 원형 head, 사각형 head를 가진 tonpilz를 모델링하였고 범용 소프트웨어인 ANSYS를 이용하여 원형 head, 사각형 head를 가진 tonpilz형 트랜스듀서를 전기어드미턴스곡선 및 공진모드를 해석하였다. head의 체적이 작아질수록 공진주파수가 높아지는 것을 알았다.

SYSNOISE를 이용하여 음압분포를 해석을 하였다. 또한 2차원 축대칭유한요소법 및 3차원 유한요소법을 이용하여 방사임피던스 구하였다. ka 값이 10이상에서는 다소의 오차가 나타나므로 향후 이 문제에 대하여 계속 연구를 진행할 예정이다.

본 연구는 트랜스듀서의 배플 및 음향원도를 고려하지 않은 모델로 수중용으로 사용되는 소나용 트랜스듀서 해석에 있어서 초보단계이다. 차후 유한요소프로그램에 음향원도 및 배플을 고려하여 방사임피던스를 구할예정이다.

※ 본 연구는 수중음향특화연구센터의 연구비 지원에 의해 이루어졌으며 관계자여러분께 사의를 표합니다

참고문헌

[1] Diana F. Mc Cammon., William Thompson Jr., "The design of Tonpilz piezoelectric transducers using nonlinear goal programming," JASA, Vol. 68-1, 754-757(1980).

[2] M. D. McCollum, B. F. Hamonic, O.B. Wilson, Transducers for sonics and ultrasonics, Technomic Publishing Co.(1992).

[3] 이종길, 서인창, "상호 간섭 영향을 고려한 평면 배열형 음향 트랜스듀서의 방사 출력 예측," 한국음향학회지, 제15권 제1호, 17-22(1996).

[4] 조치영, 서희선, 이정민, "방사 임피던스를 고려한 평면 배열 수중 음향 트랜스듀서의 최적 빔 설계," 한국음향학회지, 제15권 제1호, 40-45(1996).

[5] 조치영, 서희선, 이정민, "수중 음향 압전 트랜스듀서의 등가 회로 모델링," 한국음향학회지, 제15권 제4호, 77-82(1996).

[6] B.F.Hamonic, O.B.Wilson, Power Transducers for Sonic and Ultrasonics, Springer-Verlag, 86-108(1991).

[7] Fuji ceramic, Piezoelectric ceramic technical handbook, Fuji ceramic Co.

[8] Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Fundamentals of acoustics, Top Press(1981).