

Class IV Flextensional 트랜스듀서의 주파수 특성 변화에 관한 연구

강국진* · 노용래**

*경북대학교 센서공학과

**경북대학교 센서공학과/전자전기공학부

A Study on the frequency characteristics of a Class IV Flextensional Transducer

Kuk-jin Kang* and Yongrae Roh**

*Department of Sensor Engineering, Kyungpook National University

**Department of Sensor Engineering/School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University

*kjk@aslab.kyungpook.ac.kr, **yryong@eeg.kyungpook.ac.kr

요약

본 연구에서는 Class IV Flextensional 트랜스듀서의 구조를 설정하고, 여러 형상 및 물성 변수들이 공진 트랜스듀서의 주파수에 미치는 영향을 유한 요소법을 이용하여 해석하였다. 그 결과 공진 주파수에 영향을 가장 많이 미치는 것은 장축 길이, 단축 길이, 셸의 두께, 셸의 물성 변수이다. 반면에 Insert의 부피, 세라믹 적층의 물성과 두께는 상대적으로 적은 영향을 미치고, Nodal-plate의 두께는 공진 주파수와 무관한 경향을 나타내었다. 다음으로 위 연구결과를 바탕으로 수중에서 중심 주파수 1 kHz를 가지는 트랜스듀서를 유한 요소 모델로 제작하여 음압을 측정하였다. 본 연구에서 얻어진 결과는, 다양한 중심 주파수를 가지는 Class IV Flextensional 트랜스듀서를 구현함에 있어 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

I. 서론

Flextensional 트랜스듀서는 셸의 모양에 따라 대략 5 종류로 나눌 수 있으며, 그 중 타원 모양의 셸을 사용하는 Class IV Flextensional 트랜스듀서의 효율이 가장 좋다고 알려져 있다[1]. Class IV Flextensional 트랜스듀서는 세라믹 적층에 전계를 인가하면 세라믹 적층의 두께 방향으로 작은 변위가 발생된다. 이때 발생된 변위는 상대적으로 유연한 타원형 셸에 전달되고, 지레 효과에 의하여 단축 방향으로 큰 변위를 발생시키기 때문에 사용되는 중심 주파수 대역에서 고효율을 가진다. 수중에서 낮은 중심 주파수를 가지는 음향 탐지기를 사용할 경우, 잡음은 줄어들며 탐지 범위도 넓어지지만 효율성은 저하되는 문제가 있다[2]. 탐지 범위와 음향 탐지기의 효율은 각각의 사용환경에 따라 다르게 요구되고 따라서 사용환경에 알맞은 중심 주파수를 가지는 음향 탐지기의 설계가 매우 중요하다.

그간 Class IV Flextensional 트랜스듀서에 대한 많은 연구가 수행되어져 왔고, 다양한 공진 주파수에 따른 여러 종류의 Class IV Flextensional 트랜스듀서가 개발되어 사용되고 있다. 그러나 현재까지 Class IV Flextensional 트랜스듀서의 여러 설계변수들 중 대표적

인 몇 가지만의 영향에 대한 보고는 있으나[3-5], 트랜스듀서의 모든 설계변수가 주파수 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석한 자료는 보고된 바가 없다.

따라서 본 연구에서는 먼저 Class IV Flextensional 트랜스듀서의 구조를 설정하여 여러 형상 변수와 물성 변수들이 공진 주파수에 미치는 영향을 유한 요소법을 이용하여 해석하고, 위 결과를 바탕으로 수중에서 중심 주파수 1 kHz를 가지는 트랜스듀서를 유한 요소 모델로 제작하여 음압을 측정하고자 한다.

II. 이론적 배경

일반적으로 Class IV Flextensional 트랜스듀서의 공진 주파수는 셸의 3가지 진동모드, 즉 제1 Flextensional 진동모드, 제2 Flextensional 진동모드, 그리고 Breathing 진동모드와 세라믹 적층의 두께 진동모드의 결합으로 이루어진다[6].

선행 연구결과들에 의하면 먼저 타원형 셸의 제1, 2 Flextensional 진동모드의 공진 주파수는 셸을 두 개의 bar로 가정했을 때 식 (1)로 표현될 수 있다[7].

$$f_{Shell} = \frac{\pi}{8} \frac{t}{\sqrt{12}} \frac{S^2}{L^2} \sqrt{\frac{Y_{Shell}}{\rho_{Shell}}} \quad (1)$$

여기서, t = 셸 두께,
 S = number in series 3, 0.112, 5, 7, .
 L = $\pi\sqrt{0.5(a^2 + b^2)}$,
 a = 반 장축 길이,
 b = 반 단축 길이,
 Y_{Shell} = 셸 영률,
 ρ_{Shell} = 셸 밀도

다음으로 셸의 Breathing 진동모드의 공진 주파수는 원주와 파장이 같을 때 나타나는 것으로 식 (2)로 표현된다.

$$f_{Shell, B} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{Y_{Shell}}{\rho_{Shell}}} \quad (2)$$

변수는 위의 (1)식과 동일하다.

세라믹 적층의 두께 진동모드 공진 주파수는 식 (3)

으로 표현되어진다.

$$f_{Ceramic} = \frac{1}{2d} \sqrt{\frac{Y_{Ceramic}}{\rho_{Ceramic}}} \quad (3)$$

여기서, d = 세라믹 적층의 두께,
 $Y_{Ceramic}$ = 세라믹 적층의 영률,
 $\rho_{Ceramic}$ = 세라믹 적층의 밀도

그러나 위의 (1), (2), (3)식은 셸과 세라믹 적층 각각에 대해서는 적용될 수 있으나, 실제로 복합 구조를 가지는 Class IV Flextensional 트랜스듀서에 대해서는 다른 변수들의 영향을 고려하지 못하므로 정확성이 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 먼저 Class IV Flextensional 트랜스듀서의 구조를 설정하여 여러 형상 변수와 물성 변수들이 공진 주파수에 미치는 영향을 유한 요소법을 이용하여 해석하고, 위 결과를 바탕으로 수중에서 중심 주파수 1 kHz를 가지는 트랜스듀서를 유한 요소 모델로 제작하여 음압을 측정하고자 한다.

III. Class IV Flextensional 트랜스듀서의 유한 요소 모델링

본 연구의 대상인 Class IV Flextensional 트랜스듀서의 수치 모델링은 유한 요소 상용 package인 ANSYS 5.3을 사용하여 구성하였고, 약 4,000개의 노우드와 약 2,500개의 요소로 형성되어 있으며, 이를 그림 1에 나타내었다. 모델링 해석 시 Class IV Flextensional 트랜스듀서의 대칭성을 고려하여 1/8에 해당하는 모델을 구현하였고, x, y 및 z 방향으로 대칭처리 하였다. 경계 조건으로는 Class IV Flextensional 트랜스듀서의 모든 부분을 자유상태로 가정하였다.

IV. 결과 및 고찰

4.1. Class IV Flextensional 트랜스듀서의 진동 모드 해석

Class IV Flextensional 트랜스듀서는 셸의 3가지 진동모드, 세라믹 적층의 두께 진동모드의 결합으로 이루어지는데 본 연구에서는 이들의 진동모드를 해석하여 그림 2와 3에 나타내었다. 해석시 사용된 Flextensional 트랜스듀서의 형상 및 물성 변수는 다음과 같다. 반 장축 길이(a)는 200 mm, 반 단축 길이(b)는 80 mm, 셸 두께는 20 mm, 셸, Nodal-plate, Insert 물성은 Aluminum, 세라믹 적층의 두께(d/2)는 120 mm, Nodal-plate 두께는 8 mm, Insulator 두께는 4 mm, 셸 높이는 150 mm, 그리고 세라믹 적층의 물성은 PZT-8을 사용하였다.

위 해석의 결과 각각의 진동모드 공진 주파수는 식 (1), (2), (3)과 잘 일치하였고, Class IV Flextensional 트랜스듀서의 공진 주파수에 지배적인 영향을 미치는 것은 타원형 셸의 공진 주파수임을 확인할 수 있었다. 그리고 전체 Class IV Flextensional 트랜스듀서의 진동모드는 셸의 제1 Flextensional 진동 모드와 일치한다.

4.2. 장축 길이에 따른 공진 주파수 변화

다음으로 셸 두께는 40 mm, b/a는 0.4로 고정시킨 상태에서 반 장축 길이(a)를 150~300 mm 까지 50

mm 간격으로 변화시키면서 Class IV Flextensional 트랜스듀서의 장축 길이 변화에 따른 공진 주파수 변화를 분석하였고, 그 결과를 그림 4에 나타내었다.

4.3. 셸 두께 변화에 따른 공진 주파수 변화

다음으로 셸의 두께만 10~40 mm까지 10 mm 간격으로 변화시키면서 셸 두께 변화에 따른 공진 주파수 변화를 분석하였고, 그 결과를 그림 5에 나타내었다.

4.4. 셸 물성에 따른 공진 주파수 변화

다음으로 셸 물성에 따른 공진 주파수 변화를 보고자 표 1에 사용되어진 셸 물성을 나타내었다. 해석 결과를 보면, GRP를 사용했을 때 1016, Steel일 때 1045, Titanium일 때 1127, Aluminum일 때 1223, S-Glass일 때 1244, Graphite일 때 1911 Hz 이었다. 이상의 결과는 셸의 영률이 낮고 밀도가 높을수록 공진 주파수가 감소하는 식 (1)의 경향과 잘 일치한다.

4.5. b/a 변화에 따른 공진 주파수 변화

다음으로 a는 200 mm, 셸 두께는 20 mm로 고정시키고 b 길이를 변화시키면서 b/a에 따른 공진 주파수 변화를 분석하였다. 해석 결과를 그림 6에 나타내었다.

4.6. 세라믹 적층 두께 변화에 따른 공진 주파수 변화

다음으로 세라믹 적층의 두께(d/2)를 120 mm에서 160 mm까지 변화시키면서 공진 주파수 변화를 분석하였다. 셸의 두께는 20 mm, a는 200 mm, b/a는 0.4이었고, 해석 결과를 그림 7에 나타내었다.

4.7. 세라믹 적층 물성에 따른 공진 주파수 변화

다음으로는 세라믹 적층의 물성으로 압전 물질인 PZT-4, PZT-5A, PZT-5H, PZT-8로 한정하여 공진 주파수 변화를 관찰하였다. 여기서 세라믹 적층은 Poling 방향이 서로 반대인 PZT 조각을 적층으로 쌓아서 적층 중 효과를 이용하고자 하였다. 세라믹 적층의 물성은 참고문헌 (8)의 값을 인용하였다. 이상의 결과를 그림 8에 나타내었다.

4.8. 셸 높이에 따른 공진 주파수 변화

다음으로 셸 높이에 따른 공진 주파수 변화를 분석하였는데, 본 연구에서 셸 높이는 대칭성을 고려했을 때 각각 45, 80, 115, 150 mm이었다. 해석 결과를 그림 9에 나타내었다.

4.9. Insert 물성 및 형상에 따른 공진 주파수 변화

다음으로 Insert 물성 및 형상 변수에 따른 공진 주파수 변화를 분석하였다. 본 연구에서는 Insert의 물성으로 Aluminum 과 GRP, 그리고 영률이 매우 낮은 Rubber, 영률이 매우 높은 Steel 의 4가지 경우에 대하여 해석을 실시하고 Insert의 물성과 그때의 결과를 표 2에 나타내었다. 그리고 Insert 형상을 5가지로 정하고 각각 경우를 유한 요소 모델을 제작하여 해석을 시행하였는데, 두 결과를 보면 Insert 물성 중에서 영률이 낮을수록 공진 주파수는 낮아지고, 형상에서는 Insert 부피가 작을수록 공진 주파수는 낮아진다.

4.10. Nodal-plate 두께에 따른 공진 주파수 변화

다음으로 Nodal-plate의 두께에 따른 공진 주파수 변화를 분석하였다. 대칭성을 고려하여 Nodal-plate 두께를 0~12 mm까지 변화시키면서 공진 주파수 변화를 해석하였다. 해석 결과를 그림 10에 나타내었다.

4.11. 트랜스듀서의 음압 측정

이상의 결과를 바탕으로 수중에서 중심 주파수 1 kHz를 가지는 트랜스듀서를 유한 요소 모델로 제작하여 음압을 측정하였다. 물론 수중에서의 Flextensional 트랜스듀서의 모델은 그림 1의 모델에서 Rubber층, End-plate층, FSI층, Fluid층이 더해지는 구조가 된다. 그리고 그 대표적인 경우로서 쉘은 Aluminium을 사용하고, 두께가 8, 14, 20 mm일 때 단축 방향의 음압의 크기를 그림 11에 나타내었다. 음압의 최고 크기는 6 Pa정도이다.

V. 결론

본 연구에서는 Class IV Flextensional 트랜스듀서의 여러 형상 변수와 물성 변수들이 공진 주파수에 미치는 영향성을 유한 요소법을 이용하여 해석하였는데, 낮은 중심 주파수를 가지는 Class IV Flextensional 트랜스듀서를 구현하려면, 먼저 장축을 크게 하고, 쉘의 두께는 얇게, 영율이 낮고 밀도는 높은 쉘을 사용하여야 한다. 다음으로는 b/a와 Insert의 부피는 작게 하고 세라믹 적층은 PZT-5계열을 사용하는 것이 유리하다. 그리고 쉘의 높이는 낮게, 세라믹 적층의 두께는 크게 하면 낮은 중심 주파수를 가지는 Class IV Flextensional 트랜스듀서를 구현 할 수 있을 것이다. 그리고 이상의 결과를 이용하여 수중에서 중심 주파수 1 kHz를 가지는 트랜스듀서를 유한 요소 모델로 제작하여 단축방향에서 음압의 크기를 측정하였는데, 쉘 두께가 얇을수록 더 큰 음압을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

본 연구의 결과는 향후 다양한 중심 주파수를 가지는 Class IV Flextensional 트랜스듀서를 구현함에 있어 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 수중음향특화센터의 지원을 받아 수행된 과제에 일부이며, 동 센터의 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Kenneth D. Rolt, "History of the flextensional electroacoustic transducer", J. Acoust. Soc. Am. 87(3), pp.1340-1348, 1990.
2. D. Boucher, "Trends and Problems in Low Frequency Sonar Projectors Design", Proc. of the International Workshop, pp.100-120, Lille, France, May 26 and 27, 1987.
3. J. Oswin and J. Dunn, "Frequency, Power and Depth Performance of Class IV Flextensional Transducers", Proc. of the International Workshop, pp.121-133, Lille, France, May 26 and 27, 1987.

4. G. Bromfield, "Class IV Flextensional Transducers", Proc. of the International Workshop, pp.48-59, Toulon, France, June 12 and 13, 1990.
5. J. R. Oswin and A. Turner, "Design Limitations of Aluminium shell, Class IV Flextensional Transducers", Proc. Inst. Acoustics, Vol.6, pt.3, pp.94-101, 1984
6. J. C. Debus, J. N. Decarpigny and B. Hamonic, "Analysis of a Class IV Flextensional Transducer Using Piece-Part Equivalent Circuit Models", Proc. of the Third International Workshop, pp.181-197, Orlando, U.S.A, May 6 and 8, 1992.
7. Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1980, Chap.3, pp.75-76.
8. Oscar Bryan Wilson, Introduction to Theory and Design of Sonar Transducers, Peninsula, Los Altos, 1988, chap.4.

Table 1. Shell materials.

	Young's modulus (GPa)	Density (kg/m ³)	Poisson's ratio
Aluminum	68.9	2710	0.3
Graphite	110	1500	0.41
GRP	27.4	1920	0.25
S-Glass	48	2000	0.26
Steel	210	7500	0.31
Titanium	110	4400	0.33

Table 2. Resonant frequency vs Insert materials.

	Young's modulus (Pa)	Density (kg/m ³)	Poisson's ratio	Resonant Freq. (Hz)
Aluminum	68.9E9	2710	0.3	1235
GRP	27.4E9	1920	0.25	1172
Rubber	3.02E7	1150	0.475	523
Steel	192E9	7900	0.31	1261

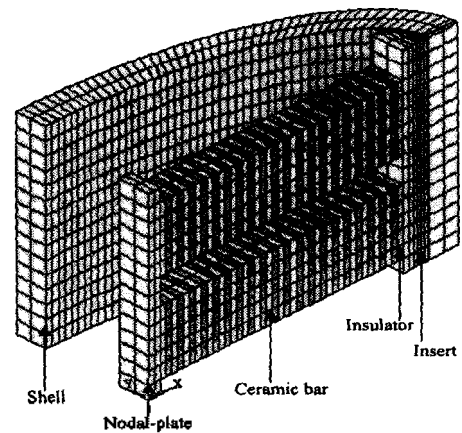


Fig. 1. Finite Element Model of the Class IV Flextensional transducer.

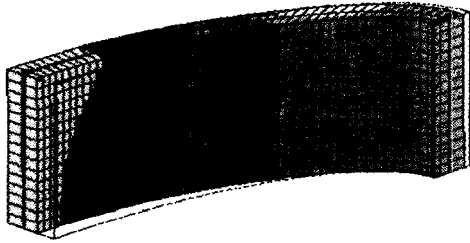


Fig. 2. The first Flextensional mode shape of the Shell.

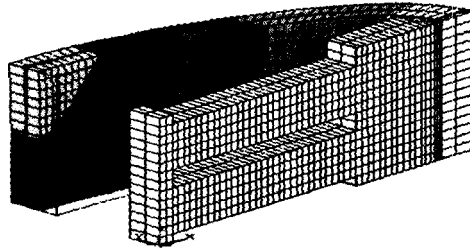


Fig. 3. Overall mode shape of the Class IV Flextensional transducer.

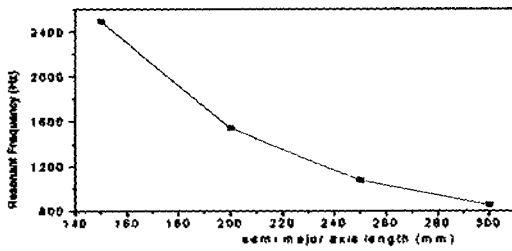


Fig. 4. Resonant frequency vs semi major axis length.

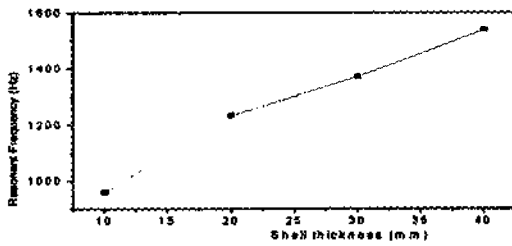


Fig. 5. Resonant frequency vs Shell thickness.

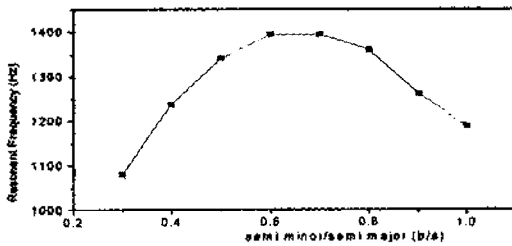


Fig. 6. Resonant frequency vs b/a.

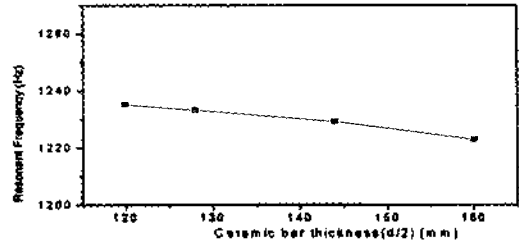


Fig. 7. Resonant frequency vs Ceramic bar thickness.

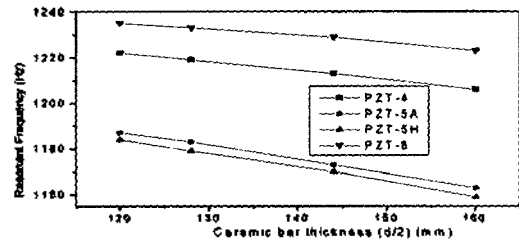


Fig. 8. Resonant frequency vs Ceramic bar materials.

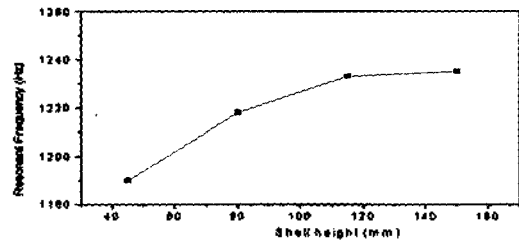


Fig. 9. Resonant frequency vs Shell height.

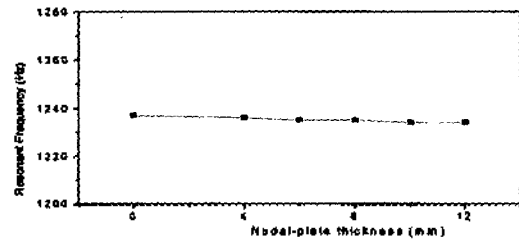


Fig. 10. Resonant frequency vs Nodal-plate thickness.

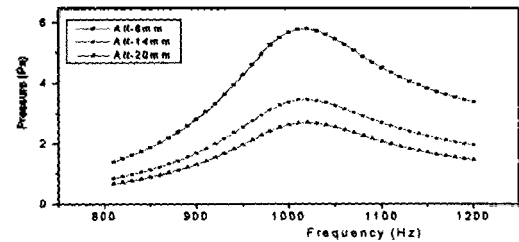


Fig. 11. Sound Pressure vs. Shell thickness.