

Class I Flextensional 변환기의 주파수 특성 변화

Frequency Characteristics Variation of a Class I Flextensional Transducer

강국진¹, 백종후², 이영진^{2,a}
(Kookjin Kang¹, Jonghoo Paik², and Youngjin Lee^{2,a})

Abstract

We constructed a Class I flextensional transducer, and analyzed the variation of the resonance frequency of the transducer in relation to its structural and material variables. We used the FEM for the analysis. Total length of the transducer, thickness and material properties of the shell have large effects on the resonance frequency. While outer radius of the ceramic stack and material properties of the ceramic stack have no effect on the resonance frequency. In addition, the validation of the FE model was verified by manufacturing and comparison of the impedance analysis. Results of the present work can be utilized to design a Class I flextensional transducers of various resonance frequency.

Key Words : Flextensional transducer, FEA, Frequency characteristic, Impedance analysis

1. 서론

수중에서 음파를 송수신하는 음향 변환기는 1차 세계대전 당시 잠수함 탐지를 위해 개발되어 2차 세계대전 전후에 급속히 발달하여 오늘날 매우 정밀한 변환기가 사용되고 있다. 수중에서 사용하는 음향 변환기는 반력을 받쳐주는 플랫폼(Platform)의 표면에 설치되어 주로 수중 음파의 송수신기로 작동하는 Tonpitz형과, 변환기가 잠겨진 상태에서 독자적으로 작동하는 flextensional형의 두 가지로 크게 나눌 수 있다. Tonpitz형 변환기는 두께방향의 진동을 이용하기 때문에 제작이 용이하고, 배열형에 적용하기 쉬우며 수십 kHz 대역에서 고출력 수중 음향 변환기로 주로 사용된다 [1-5]. 반면에 flextensional 변환기는 사용하는 주파수 대역에서 부피와 무게는 크게 줄이면서 큰 부피 변위 진폭을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 잠겨진 상태에서 모든 방향으로 음파를 발생할 수 있

기 때문에 고출력 수중 음향 변환기로 주로 사용되고 있다. 그리고 flextensional형 변환기는 성능 면에서도 기존의 Tonpitz형 변환기에 비해 몇 배에 이르는 큰 진폭 및 음압을 발생시키는 것으로 연구 결과가 나와 있고, 구조적인 특성상 안정성이 뛰어나 우수한 내구성을 가지는 것으로 증명되어 장시간에 걸쳐 큰 출력을 필요로 하는 곳에 가장 적합한 것으로 알려져 있다[6-10].

Flextensional 변환기는 사용되는 셸의 모양에 따라 대략 7 종류로 나눌 수 있으며, 그 중 타원 모양의 셸을 사용하는 Class IV flextensional 변환기의 효율이 가장 좋으나 제작성이 좋지 못하여 실제 사용은 많이 되고 있지 않고, 대신에 효율은 약간 떨어지지만 제작성이 용이한 Class I flextensional 변환기가 가장 널리 사용되고 있다. Flextensional 변환기는 압전세라믹 적층에 전계를 인가하면 세라믹 적층의 두께(장축) 방향으로 작은 변위가 발생된다. 이때 발생된 변위는 지레 효과에 의하여 상대적으로 유연한 셸에 전달되어 단축 방향으로 큰 변위를 발생시키기 때문에 사용하는 중심 주파수 대역에서 다른 변환기에 비하여 고출력을 가진다.

그간 flextensional 변환기에 대한 많은 연구가 수행되어져 왔고, 다양한 설계법에 의해 다양한 공

1. 한국섬유기계연구소 연구기획실
2. 요업기술원 광·전자세라믹본부 전자부품팀
(서울 금천구 가산동 233-5)
a. Corresponding Author : yjlee@kicet.re.kr
접수일자 : 2008. 12. 29
1차 심사 : 2009. 1. 16
심사완료 : 2009. 1. 22

진 주파수를 가지는 여러 종류의 flextensional 변환기가 개발되어 사용되고 있다. G. Brigham과 W. Lam 등은 수학적으로 flextensional 변환기를 해석하였고[11,12], C. Debus등은 등가회로 해석법으로 변환기를 해석하고자 하였으며[13], D. Ring과 G. Wojcik등은 다른 해석법에 비해 정확성이 월등히 뛰어난 유한요소 해석법으로 flextensional 변환기를 해석하고 설계하였다[14,15]. 일반적으로 flextensional 변환기는 사용하는 중심 주파수 대역의 파장에 비해 그 크기가 작기 때문에 무지향성 방사체로 볼 수 있으나, S. C. Butler등은 압전 세라믹에 인가되는 전압의 위상을 제어하여 지향성을 가지는 flextensional 변환기 개발에 대한 연구를 진행하기도 하였다[16]. 하지만 이들 대부분의 결과들은 Class IV flextensional 변환기에 대한 것으로서, 제작성이 뛰어나 실제 많이 사용되고 있는 Class I flextensional 변환기에 대한 연구는 다소 미진하였다[17,18].

낮은 중심 주파수를 가지는 수중 음향 변환기를 사용할 경우, 잡음은 줄어들며 탐지 범위도 넓어지지만 효율성은 저하되는 문제가 있다[19]. 탐지 범위와 음향 변환기의 효율은 각각의 사용 환경에 따라 다르게 요구되고 따라서 사용 환경에 알맞은 중심 주파수를 가지는 음향 변환기의 설계가 매우 중요하다. 그간 다양한 공진 주파수에 따른 여러 종류의 Class I flextensional 변환기가 개발되어 사용되고 있으나, 현재까지 변환기의 여러 설계변수들이 주파수 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석한 자료는 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 먼저 Class I flextensional 변환기의 구조를 설정하여 여러 형상 변수와 물성 변수들이 공진 주파수에 미치는 영향을 유한요소해석 하고자 한다. 또한 실제 변환기를 제작하여 임피던스 특성을 비교함으로써 유한요소해석의 타당성을 검증하고자 한다.

2. Class I Flextensional 변환기 모델링

본 연구의 class I flextensional 변환기는 그림 1에서 보는 바와 같이 각각의 세라믹 조각을 병렬로 묶어서 적절한 진동자, 음향 방사체 역할을 하는 셸(shell), 중심점을 잡아주고 물의 침입을 막아주며 진동자와 셸을 연결하는 역할을 하는 Endplate, 적절한 진동자와 Endplate를 전기적으로 분리하는 절연체(Insulator), 전체 구조체를 조합하는 볼트 및 너트 등으로 이루어진다. 본 연구의 대상인 Class I flextensional 변환기의 수치 모델링은 유

한요소 상용도구인 ANSYS를 사용하여 구성하였다. 모델 구성 시 변환기의 대칭성을 고려하여 2차원 축 대칭 모델을 사용하였고, 적층 진동자는 ANSYS의 element library중 기계-전기-자기-열의 coupled element인 plane 13을, 변환기의 기타 구조체 모델링 시는 isometric element인 plane 42를 적용하여 모델링 하였으며 변환기의 모든 부분은 자유상태로 가정하였다. 공진 주파수 해석 시 진동 모드 해석을 행하였고, 변환기의 임피던스 특성은 세라믹 적층에 동일한 전압을 인가하고 조화해석을 행하였다. 표 1에 본 연구의 Class I flextensional 변환기 구성품의 물성을 나타내었다.

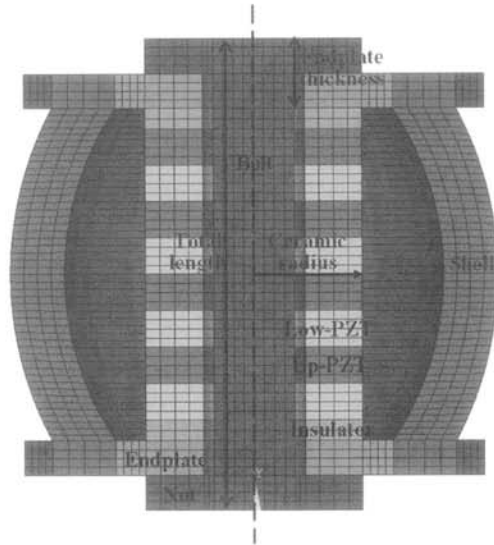


그림 1. Class I flextensional 변환기 구조.
Fig. 1. Structure of a Class I flextensional transducer.

표 1. 변환기 각 구성품들의 물성.
Table 1. Material properties of the parts in the transducer.

	Young's modulus (Pa)	Density (kg/m ³)	Poisson's ratio
Shell (Al)	70.3E9	2,770	0.33
Endplate(S45C)	206.0E9	7,955	0.30
Insulator	80.0E9	7,500	0.30
Ceramic stack	PZT-4		

3. 결과 및 고찰

일반적으로 flextensional 변환기의 공진 주파수는 셸의 3가지 진동모드, 즉 제1 flextensional 진동모드, 제2 flextensional 진동모드, 그리고 Breathing 진동모드와 적층 진동자의 두께 진동모드의 결합으로 이루어진다[13]. 선행 연구결과들에 의하면 먼저 셸의 제1, 2 flextensional 진동모드의 공진 주파수는 셸을 두 개의 수직 bar가 결합한 것으로 단순화하여 가정했을 때 식 (1)로 표현될 수 있다[20].

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

, where t = thickness of the shell,
 S = vnumber in series 3, 0112, 5, 7, ...,
 $L = \pi \sqrt{0.5(a^2 + b^2)}$,
 a = major axis length,
 b = minor axis length,
 Y_{Shell} = Young's modulus of the shell,
 ρ_{Shell} = Density of the shell

단, 식 (1)은 셸 내부의 세라믹 적층 진동자등의 영향은 모두 무시하고 내부가 비어있는 셸만의 특성을 본 것이다. 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 식 (1)과 동일하다. 세라믹 적층 진동자의 두께 진동모드 공진 주파수는 식 (3)으로 표현되어진다.

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

, where d = thickness of the ceramic stack,
 $Y_{Ceramic}$ = Young's modulus of the ceramic stack,
 $\rho_{Ceramic}$ = Density of the ceramic stack

그러나 위의 (1), (2), (3)식은 셸과 세라믹 적층 진동자 각각에 대해서는 적용될 수 있으나, 셸과 세라믹 적층이 결합한 상태인 복합 구조를 가지는 flextensional 변환기에 대해서는 다른 변수들의 영향을 고려하지 못하므로 경향성은 파악할 수 있으나, 정확한 주파수를 계산하기는 불가능하다.

먼저 제1 flextensional 진동모드 주파수가 20

kHz 이상을 갖는 임의의 기본모델을 구성하여 각각의 진동모드를 해석하였다. 진동모드 해석 시 전체 변환기 길이 68 mm, Shell 두께 8 mm, 세라믹 적층 진동자 두께 42 mm, Endplate 10 mm, Insulator 6 mm를 적용하였고, 그 결과를 그림 2-5에 나타내었다. 50 kHz까지의 결과를 보면 전체 변환기의 진동모드는 셸의 진동모드와 동일한 형태를 나타내고 따라서 flextensional 변환기의 주파수에 지배적인 영향을 미치는 것은 셸의 주파수라 할 수 있다.

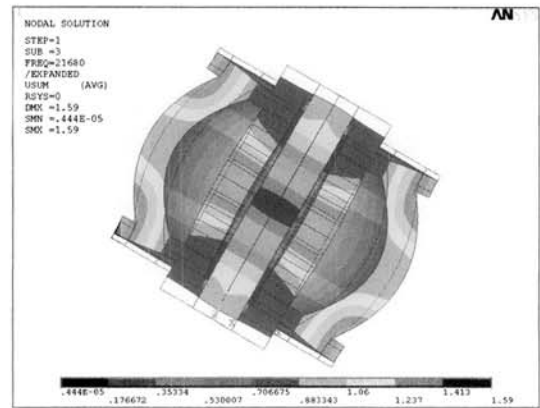


그림 2. 변환기의 제 1 flextensional 진동모드.
 Fig. 2. The first flextensional vibration mode of the transducer.

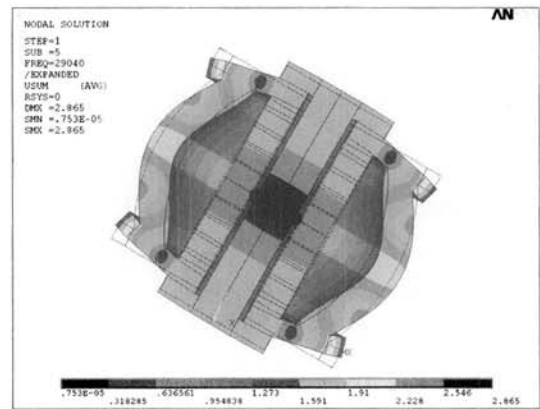


그림 3. 변환기의 제 2 flextensional 진동모드.
 Fig. 3. The second flextensional vibration mode of the transducer.

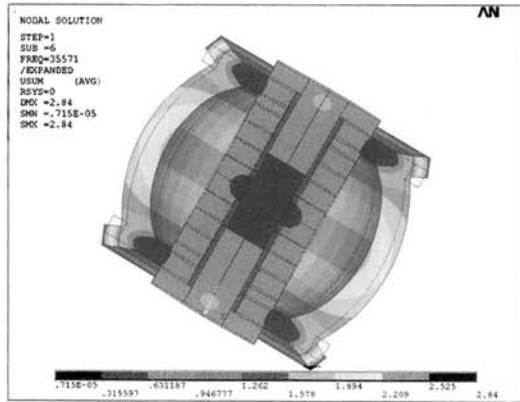


그림 4. 변환기의 breathing 진동모드.
Fig. 4. The breathing vibration mode of the transducer.

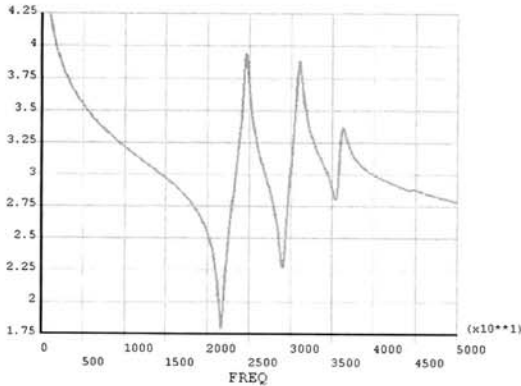


그림 5. 기본모델의 임피던스 특성.
Fig. 5. Impedance characteristics of the basic model.

다음으로 변환기 전체 길이를 기본모델의 1.5, 2.0인 모델 즉, 102 mm, 136 mm인 모델을 구성하여 주파수 변화를 관찰하였다. 다른 모든 치수들을 변환기 전체 길이가 증가하는 만큼 비례적으로 증가시키면서 변환기 전체 크기 증가에 따른 주파수 변화를 관찰하고자 하였다. 그림 6의 결과를 보면 변환기 전체 길이가 증가함에 따라 Class I flextensional 변환기의 공진 주파수는 급격하게 감소하는 경향성을 보였다. 이는 수식 (1)에서 셸의 공진 주파수는 변환기 전체 길이가 증가하면 전체적으로 L 이 증가하여 Class I flextensional 변환기의 공진 주파수가 감소하는 것으로 설명될 수 있다.

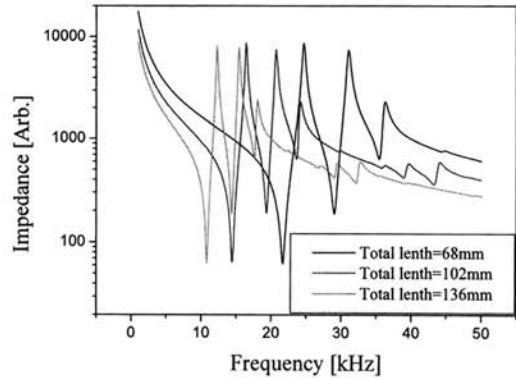


그림 6. 변환기 전체 길이에 따른 공진 주파수 변화.
Fig. 6. Resonance frequency vs. total length of the transducer.

셸 두께 변화에 따른 공진 주파수 변화를 분석하였다. 다른 변수들은 모두 고정시키고, 셸의 두께만 6, 8, 10 mm로 변화시키면서 공진 주파수의 변화를 관찰하였다. 셸 중심으로부터 $\pm 3, 4, 5$ mm로 증가시켰기 때문에 셸의 두께가 증가할수록 내부 빈 공간은 줄어든다. 그림 7의 결과를 보면, 셸의 두께가 증가할수록 공진 주파수는 증가하는 경향을 보였는데, flextensional 변환기의 공진 주파수는 셸의 공진 주파수 변화에 많은 영향을 받는데, 식 (1)에서 나타내는 것처럼 셸 두께가 증가하면 셸의 공진 주파수가 증가하게 되어 변환기의 공진 주파수가 증가하는 경향을 보였다.

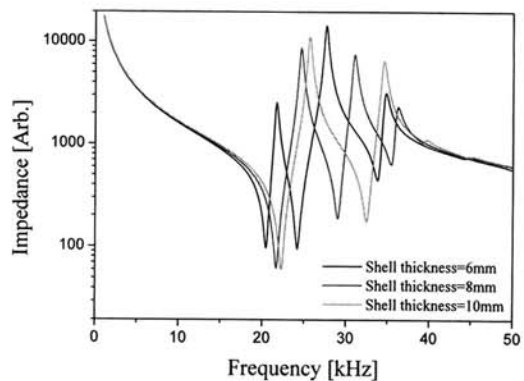


그림 7. 셸 두께에 따른 공진 주파수 변화.
Fig. 7. Resonance frequency vs. thickness of the shell.

다음으로 셸의 물성을 변화시키면서 공진 주파수 변화를 분석하였다. 셸의 종류로는 일반적으로 수중 음향 변환기에 적용 가능한 Aluminum, Graphite, GRP(Glass Reinforced Plastic), S-Glass, Steel, Titanium의 6가지로 정하였고, 이들 물성을 표 2에 나타내었다. 위의 해석 결과, 셸의 재질이 GRP일 때 공진 주파수가 가장 낮고, Graphite일 때 가장 높은 값을 나타내었는데, 이상의 결과는 셸의 영율이 낮고 밀도가 높을수록 공진 주파수가 감소하는 식 (1)의 경향과 잘 일치한다.

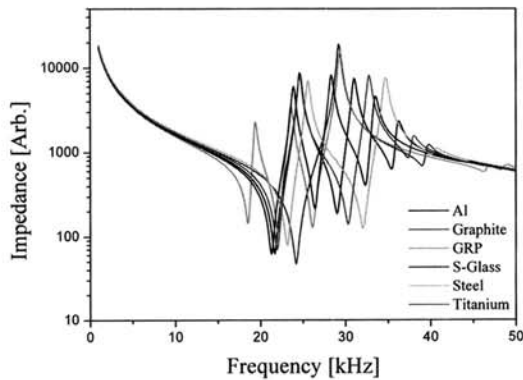


그림 8. 셸 물성에 따른 공진 주파수 변화.
Fig. 8. Resonance frequency vs. material properties of the shell.

표 2. 셸 물성에 따른 공진 주파수 변화.
Table 2. Variation of resonance frequency in relation to material properties of the shell.

	Young's modulus (GPa)	Density (kg/m ³)	Poisson's ratio	Resonance frequency (kHz)
Aluminum	70.3	2770	0.33	21.7
Graphite	110.0	1500	0.41	24.2
GRP	27.4	1920	0.25	18.5
S-Glass	48.0	2000	0.26	21.3
Steel	210.0	7500	0.30	23.2
Titanium	110.0	4,400	0.33	22.0

세라믹 적층 진동자의 외경을 14-18 mm까지 1 mm간격으로 변화시키면서 공진 주파수 변화를 관찰하였다. 모든 부분이 고정되고 진동자의 외경만 변화 시켰으므로 변환기 내부의 빈 공간은 진동자 외경이 증가함에 따라 감소한다. 그림 9의 결과를 보면, 세라믹 적층의 외경이 증가함에 따라 공진 주파수는 미세하지만 조금씩 증가한다. 이는 세라믹 적층 진동자의 외경이 증가함에 따라 변환기 내부 빈공간이 줄어들고 이로 인해 공진 주파수가 증가하는 것으로 판단된다.

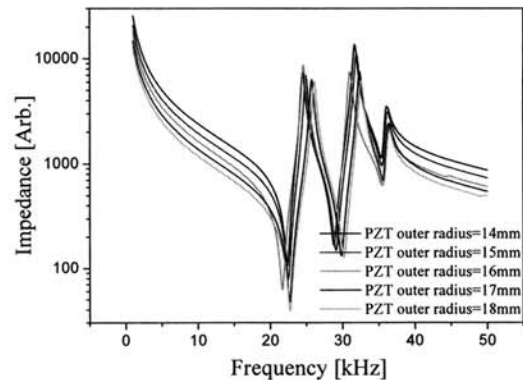


그림 9. 세라믹 적층 진동자 외경에 따른 공진 주파수 변화.
Fig. 9. Resonance frequency vs. outer radius of the ceramic stack.

본 연구 항목에서는 세라믹 적층의 종류를 PZT-4, PZT-5A, PZT-5H, PZT-8, 그리고 최근 세정용으로 많이 적용되고 있는 Fujiceramic사의 C-213의 다섯 종류로 변화시키면서 공진 주파수 변화를 해석하였다[21]. 본 연구의 Class I flextensional 변환기에 사용되는 세라믹 적층 진동자는 분극(Poling) 방향이 서로 반대인 세라믹 조각을 적층으로 쌓아서 적층 중 효과를 이용하고자 하는 것이다. 세라믹 적층의 분극 방향이 반대인 경우 세라믹 물성치에서 압전상수항의 부호를 반대로 하여 ANSYS에 대입하였다. 그리고 Fujiceramic사의 C-213의 물성은 표 3과 같은데, 표 3의 물성으로는 유한요소해석도구인 ANSYS에서 대입하는 것이 불가능하여 압전방정식의 상호관계식들을 이용하여 ANSYS에 대입 가능한 물성으로 변경하였다. 이상의 다섯가지 압전세라믹 물성을 표 4에 나타

내었고, 해석결과를 그림 10에 나타내었다. 결과를 보면 사용된 세라믹 적층 진동자의 물성에 따라서 공진 주파수 변화는 미미하지만, PZT-5 계열을 사용했을 때 공진 주파수가 낮고, 그 다음으로 PZT-4, PZT-8, 그리고 C-213을 사용했을 때 공진 주파수가 가장 높은 값을 나타내었다. 이 결과는 PZT-5 계열이 PZT-8보다 등가 영율이 낮기 때문인 것으로, 수식 (3)과 일치하는 경향성을 나타낸다. 통상적으로 soft한 PZT-5 계열은 높은 전계와 기계적인 응력 하에서 감극(Depolarization)되기 때문에 높은 전계를 필요로 하는 고풍력 음향 방사기(High power acoustic radiating transducer)에 부적합하고, 수중 청음기(Hydrophone)이나 가속도계(Accelerometer)와 같은 음향 감지기(Acoustic sensors)에 적합하다고 알려져 있다. 그리고 상대적으로 hard한 PZT-4와 PZT-8은 유전 손실(Dielectric loss)이 적고 높은 전계에서 감극이 되지 않기 때문에 고풍력 수중 음향 방사기에 가장 적합하다고 할 수 있으므로, 향후 Class I flexensional 변환기 제작시에는 세라믹 적층 재질로 PZT-8을 적용하고자 한다.

표 3. Fuziceramic사의 C-213 재질의 물성들.

Table 3. Material properties of the C-213.

	Unit		Value
Coupling factors		k_{33}	0.70
		k_t	0.48
Frequency constants	$m \cdot Hz$	N_t	2,090
Dielectric constants		$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	1,590
		$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	1,470
Piezoelectric charge constants	$10^{-12} (C/N)$	d_{31}	-135
		d_{33}	310
		d_{15}	510
Young's modulus	$10^{10} (N/m^2)$	$Y_{11}^E = 1/s_{11}^E$	8.2
		$Y_{33}^E = 1/s_{33}^E$	6.6
		$Y_{55}^E = 1/s_{55}^E$	2.6
Poisson's ratio		ν	0.29
Density	kg/m^3	ρ	7,800

표 4. 세라믹 적층 진동장의 물성들.

Table 4. Material properties of the ceramic stack.

	PZT-4	PZT-5A	PZT-5H	PZT-8	C-213
c_{11}^E	13.9	12.1	12.6	14.9	14.58
c_{33}^E	11.5	11.1	11.7	13.2	13.03
c_{44}^E	2.56	2.11	2.30	3.13	2.6
c_{66}^E	3.06	2.26	2.35	3.40	3.17
c_{12}^E	7.78	7.54	7.95	8.11	8.22
c_{13}^E	7.43	7.52	8.41	8.11	8.56
$\epsilon_{33}^S/\epsilon_0$	635	830	1470	600	736
$\epsilon_{11}^S/\epsilon_0$	730	916	1700	900	826
e_{31}	-5.2	-5.4	-6.55	-4.1	-4.24
e_{33}	15.1	15.8	23.3	14.0	17.28
e_{15}	12.7	12.3	17.0	10.3	13.26
ρ	7,500	7,750	7,500	7,600	7,800

ϵ^S/ϵ_0 : relative dielectric constant, clamped.

$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} [C^2/Nm^2]$

e : piezoelectric stress constants at constant electric field [C/m^2]

c^E : elastic stiffness at constant electric field [$10^{10} N/m^2$]

ρ : density [kg/m^3]

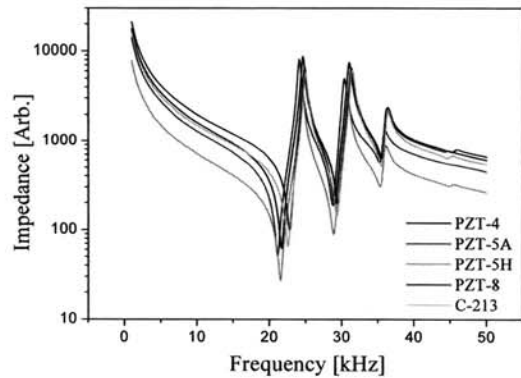


그림 10. 세라믹 적층 진동자 물성에 따른 공진 주파수 변화.

Fig. 10. Resonance frequency vs. material properties of the ceramic stack.

중심점을 잡아주고 물의 침입을 막아주며 진동자와 셀을 연결하는 역할을 하는 Endplate 두께에

다른 공진 주파수 변화를 해석하였다. 해석 시 Endplate 두께를 8-16 mm까지 2 mm 간격으로 변화시키면서 해석하여 결과를 그림 11에 나타내었다. 결과를 보면 Endplate 두께가 증가함에 따라 공진 주파수는 감소하는데, 이는 모든 부분이 고정된 상태에서 Endplate 두께가 증가하면 전체 변환기 길이가 증가하게 되고 따라서 공진 주파수가 감소하는 경향을 나타내게 되는 수식 (1)의 경향과 잘 일치한다고 할 수 있다.

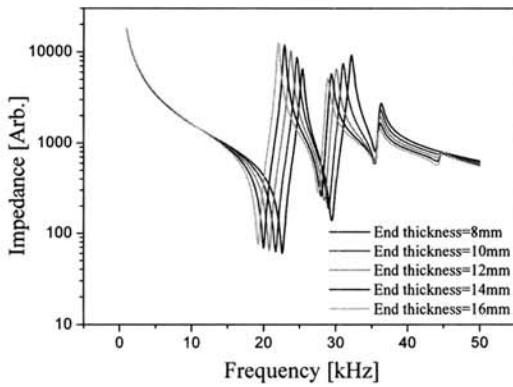


그림 11. Endplate 두께에 따른 공진 주파수 변화.
Fig. 11. Resonance frequency vs. thickness of the Endplate.

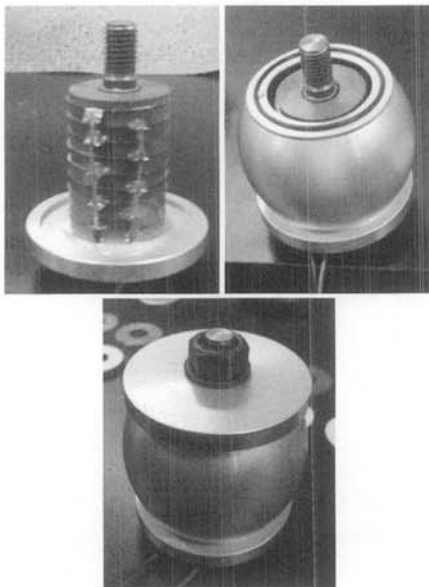


그림 12. Class I flextensional 변환기 시제품.
Fig. 12. Prototype of the Class I flextensional transducer.

이상의 변환기 여러 변수들에 따른 공진 주파수 변화 경향성 결과를 검증하기 위하여 기본모델의 치수로 Class I flextensional 변환기를 제작하였다. Endplate, 셸은 SUS304 재질을 이용하여 제작하였으며, 볼트 및 너트는 일반 steel 재료를 이용하였다. 제작된 변환기를 그림 12에 나타내었고, 실제 변환기의 임피던스 특성을 그림 13에 나타내었다. 그림 13의 임피던스 특성에서 알 수 있듯이 실제 변환기는 공진 주파수 21.5 kHz를 가졌고, 이는 본 연구의 유한요소해석결과와 잘 일치한다. 따라서 본 연구에서 여러 변수들에 따른 Class I flextensional 변환기의 공진 주파수 변화 해석 결과는 충분한 타당성을 가진다고 할 수 있다.

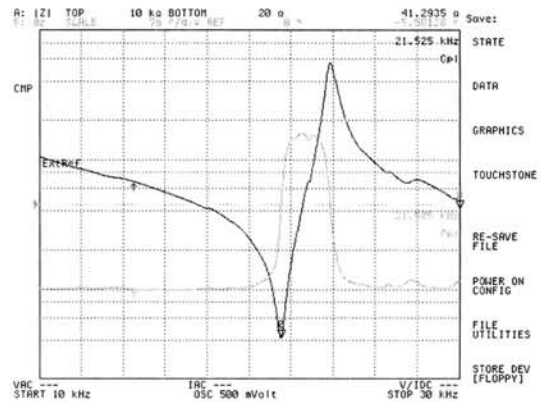


그림 13. 시제품의 임피던스 특성.
Fig. 13. Impedance characteristics of the prototype.

4. 결론

본 연구에서는 수중에서 잠겨진 상태에서 독자적으로 작동 가능하고, 고출력 특성과 우수한 내구성 및 제작이 용이하여 고출력 수중 음향 변환기로 각광을 받고 있는 Class I flextensional 변환기의 구조를 설정하고, 여러 형상 및 물성변수들에 따른 공진 주파수 변화를 유한요소해석 하였다. 그 결과 변환기의 공진 주파수에 가장 영향을 많이 미치는 것은 변환기의 전체 길이였고, 다음으로 셸의 물성, 셸의 두께, 그리고 Endplate 두께였다. 반면에 세라믹 적층 진동자의 외경과 재질은 공진 주파수 변화에 미미한 영향을 미쳤다. 나아가 유한요소해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여 실제 Class I flextensional 변환기를 제작하여 임피던스

특성을 평가하였는데, 유한요소해석 결과와 잘 일치하였다. 따라서 본 연구에서 유한요소해석 한 결과들은 그 타당성을 충분히 가진다고 할 수 있고, 향후 다양한 공진 주파수를 가지는 Class I flextensional 변환기를 설계/제작함에 있어 매우 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부 "토양·지하수오염방지기술개발사업"으로 지원받은 과제임.

참고 문헌

- [1] 강국진, 노용래, "충격 특성을 고려한 Tonpizl 변환기의 최적구조 설계", 전기전자재료학회 논문지, 21권, 11호, p. 987, 2008.
- [2] O. B. Wilson, "Introduction to theory and design of sonar transducers", Peninsular Publishing, Los Altos, Chap. 4-6, 1988.
- [3] K. R. Dhilsha, "Performance of a low-frequency, multi-resonant broadband Tonpizl transducer", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 111, No. 4, p. 1692, 2002.
- [4] D. W. Hawkins and P. T. Gough, "Multiresonance design of a Tonpizl transducer using the finite element method", IEEE UFFC, Vol. 43, No. 5, p. 782, 1996.
- [5] S. Kaneko and K. Ohya, "Load characteristics of a bolted Langevin torsional transducer", Ultrasonics, Vol. 34, p. 239, 1996.
- [6] K. J. Kang and Y. R. Roh, "Optimization of structural variables of a flextensional transducer by the statistical multiple regression analysis method", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 114, No. 3, p. 1454, 2003.
- [7] 강국진, 노용래, "적용환경을 고려한 flextensional 변환기의 최적구조 설계", 전기전자재료학회 논문지, 21권, 12호, p. 1063, 2008.
- [8] J. R. Oswin and J. Dunn, "Frequency, power and depth performance of Class IV flextensional transducers", Power sonics and ultrasonic transducers design, Springer-Verlag, Berlin, 1988.
- [9] P. Dufourcq, J. Adda, M. Letiche, and E. Sermit, "Transducers for great depths", Power transducers for sonics and ultrasonics, Springer-Verlag, Berlin, 1991.
- [10] J. R. Oswin and A. Turner, "Design limitations of aluminium shell, Class IV flextensional transducers", Proc. Inst. Acoustics, Vol. 6, No. 3, p. 94, 1984.
- [11] G. Brigham, "Analysis of the class IV flextensional transducer by use of the wave mechanism", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 56, p. 31, 1974.
- [12] Y. W. Lam, "Mathematical model of a class IV flextensional transducer and its numerical solution", Applied Acoustics, Vol. 36, p. 123, 1992.
- [13] J. C. Debus, J. N. Decarpigny, and B. Hamonic, "Analysis of a class IV flextensional transducer using piece-part equivalent circuit models", Power sonics and ultrasonic transducers design, Springer-Verlag, Orlando, 1992.
- [14] M. D. Ring, "Two methods for modeling the longitudinal resonance of class IV flextensional transducers", Power sonics and ultrasonic transducers design, Springer-Verlag, Orlando, 1992.
- [15] G. Wojcik, J. Mould, D. Tennant, R. Richards, H. Song, D. Vaughan, N. Abboud, and D. Powell, "Studies of broadband PMN transducers based on nonlinear models", Proc. IEEE Ultrason. Symp., 1997.
- [16] S. C. Butler, J. L. Butler, A. L. Butler, and G. H. Cavanagh, "A low-frequency directional flextensional transducer and line array", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 102, No. 1, p. 308, 1997.
- [17] D. T. I. Francis, C. J. Bayliss, and R. F. W. Coates, "The development of a low frequency barrel-stave transducer for tomography applications using finite element and boundary element modeling", IEEE Proc. Oceans, Vol. 94, No. 1, p. 371, 1994.
- [18] S. S. Jarnig, D. T. I. Francis, J. Dunn, and B. V. Smith, "Optimization of sonar transducer using a coupled FE-BE method", Proc. Inst. Acoust., Vol. 12, No. 4, p. 76, 1990.

- [19] D. Boucher, "Trends and problems in low frequency Sonar projectors design", Power sonics and ultrasonic transducers design, Springer-Verlag, Berlin, 1988.
- [20] L. E. Kinseler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, "Fundamentals of acoustics", John wiley & Sons, Inc, New York, Chap. 3, 2000.
- [21] <http://www.fujicera.co.jp>
- [22] <http://www.morgantechnicalceramics.com>