

Class IV Flextensional 트랜스듀서의 최적설계 및 특성해석

강국진* · 노용래**

*경북대학교 센서공학과

**경북대학교 센서공학과/전자전기공학부

Optimal design and analysis 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

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

요 약

본 연구에서는 저주파 대역에서 고출력 수중 음향센서로 사용되는 Class IV Flextensional 트랜스듀서의 여러 설계변수들에 따른 음압 변화 및 열 발생 경향성을 유한요소 해석법으로 해석하였다. 나아가 해석되어진 결과를 바탕으로 최대 음압을 구현하고, 열 발생이 최소인 중심 주파수 1 kHz를 가지는 Class IV Flextensional 트랜스듀서의 최적구조를 설정하였다. 본 연구에서 설정한 최적구조는 기본모델에 비해 음압이 2배 이상 크고, 열 발생은 아주 작은 것으로 나타났다.

본 연구의 결과는 향후 다양한 중심 주파수 및 최대 음압을 구현하고 열 발생이 최소인 Class IV Flextensional 트랜스듀서를 설계함에 있어 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

I. 서 론

본 연구의 목적은 저주파 대역에서 사용가능하고, 우수한 내구성을 가지며 고출력을 필요로 하는 곳에 가장 적합한 것으로 알려진[1] Class IV Flextensional 트랜스듀서의 작동원리를 규명하고, 설계변수들에 따른 공진 주파수 변화, 음압 변화, 열 발생에 미치는 영향성을 해석하여 Class IV Flextensional 트랜스듀서의 최적구조를 설정하는데 있다. 본 연구와 연관된 논문[2]에서는 Class IV Flextensional 트랜스듀서의 작동원리를 규명하고, 구조를 설정하여 설계변수에 따른 공진 주파수 변화 경향성을 분석하였다. Class IV Flextensional 트랜스듀서의 고출력 특성을 분석하기 위해서는 설계변수에 따른 음압 변화의 경향성을 해석하여야 하고, 열 발생에 따른 성능저하를 막기 위한 방안을 세우기 위해서는 열 전달특성과 열 발생에 미치는 영향성을 분석하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 Class IV Flextensional 트랜스듀서의 최적구조를 설정하기 위하여 앞서 행한 연구결과[2]를 바탕으로 여러 설계변수들에 따른 음압 변화, 열 발생에 미치는 영향성을 유한요소 상용 package인 ANSYS 5.3을 이용하여 분석하였다. 나아가 위 결과들을 바탕으로 최대 음압을 구현하고, 열 발생이 최소인

중심 주파수 1 kHz를 가지는 Class IV Flextensional 트랜스듀서의 최적구조를 설정하고자 한다.

II. FEM을 이용한 Class IV Flextensional 트랜스듀서 모델링

수중에서 사용되는 Class IV Flextensional 트랜스듀서는 각각의 세라믹 조각을 병렬로 묶어서 능동 구동자 역할을 하는 세라믹 적층, 음향 방사체로 작용하는 타원형의 셸, 셸과 구동자를 전기적으로 분리시키는 절연체, 중심점을 잡아주고 세라믹 적층의 처짐을 방지하는 Nodal-plate, 세라믹 적층과 셸의 중간에서 전달자 역할을 하는 Insert, 물의 침입을 방지하기 위한 End-plate, 셸과 End-plate 틈새 물의 침입을 방지하고 셸의 부식을 방지하기 위한 Rubber층, 물 그리고 물과 구조체의 Interface층(FSI)으로 구성되고 이를 그림 1에 나타내었다.

본 연구의 대상인 Class IV Flextensional 트랜스듀서의 수치 모델링은 유한 요소 상용 package인 ANSYS 5.3을 사용하여 구성하였고, 약 13,000개의 node와 약 10,000개의 element로 형성되어 있다. 모델 구성 시 세라믹 적층은 ANSYS의 element library중 기계-전기-자기-열의 coupled element인 solid5를 사용하였고, Class IV Flextensional 트랜스듀서의 기타 구조체 모델링 시는 isometric element인 solid45를 이용하여 3차원 모델을 구성하였다. 그리고 물과 FSI층은 fluid element인 fluid30을 사용하였다. 모델 구성 시 Class IV Flextensional 트랜스듀서의 대칭성을 고려하여 1/8에 해당하는 모델을 구현하였고, x, y 및 z 방향으로 대칭 처리 하였다. 경계 조건으로는 Class IV Flextensional 트랜스듀서의 모든 부분을 자유상태로 가정하였다. 그리고 물의 최 외각층은 무반사 경계조건을 적용하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 음압에 미치는 영향 해석

본 연구에서는 앞서 행한 공진 주파수 변화[2] 경향성을 바탕으로 공기중이 아닌 수중 사용환경을 고려하여 중심 주파수 1 kHz를 가지는 Class IV Flextensional 트랜스듀서를 유한요소 모델로 구성하여 여러

변수들의 변화에 따른 음압 변화의 경향성을 해석하였다. 해석 시 사용되어진 변수들의 범위를 표 1에 나타내었고, 고정시킨 물성 변수들의 특성을 표 2에 나타내었다. 그리고 음압의 상대적인 크기를 비교하기 위하여 세라믹 적층에 단위 길이당 같은 전압을 인가하고, 각각의 음압 크기를 셀 단축방향에서 측정하여 비교하였다.

먼저 반 장축 길이 변화에 따른 음압 변화의 경향성을 해석하였다. 중심 주파수 1 kHz를 가지는 기본 모델을 구현하여, 반 장축 길이를 100 ~ 200 mm인 경우에 대하여 해석하였다. 중심 주파수 1 kHz를 가지는 기본 모델의 경우 반 장축 길이(a)는 160 mm, 셀 두께는 14 mm, b/a는 0.4, 세라믹 적층 두께(d/2)는 120.4 mm, 세라믹 적층 폭(w/2)은 21.5 mm, Rubber 두께는 10 mm, 셀 높이는 80 mm, 그리고 세라믹 적층 물성은 PZT-8이다. 해석 결과를 그림 2에 나타내었다. 결과에서 반 장축 길이가 증가함에 따라 Class IV Flexextensional 트랜스듀서의 음압의 크기는 작아지는 경향성을 보였다. 음압의 크기는 주파수의 4제곱과 부피 변위 진폭의 제곱에 비례하는데, Class IV Flexextensional 트랜스듀서의 부피가 작아지면 공진 주파수와 부피 변위 진폭이 증가하여 중심 주파수 대역에서 큰 음압을 발생시키는 것으로 판단되어진다.

다음으로 셀 두께 변화에 따른 음압 변화의 경향성을 해석하였다. 다른 변수들은 모두 고정시키고, 셀의 두께만 8 mm에서 20 mm까지 3 mm 간격으로 변화시키면서 음압 변화의 경향성을 해석하였다. 본 연구의 결과를 그림 3에 나타내었다. 결과를 보면, 셀의 두께가 증가할수록 공진 주파수와 음압의 크기가 증가하는 경향을 보였다. 이는 Class IV Flexextensional 트랜스듀서의 부피가 증가하면 부피 변위 진폭은 감소하고 공진 주파수는 증가하는데, 주파수의 영향이 부피 변위 진폭의 영향보다 월등히 크기 때문에 중심 주파수 대역에서 큰 음압을 발생시키는 것이라 판단되어진다.

단축과 장축 길이의 비에 따른 음압 변화의 경향성 해석결과 단축/장축비가 클수록 음압은 감소하였다. 그리고 세라믹 적층의 두께 변화에 따른 음압 변화의 경향성 해석결과 세라믹 적층의 두께가 증가할수록 음압이 증가하였고, 셀 높이가 증가함에 따라 음압의 크기가 증가하는 경향성을 나타내었다. 그리고 Insert 형상을 6가지로 정하고 각각 경우의 유한 요소 모델을 제작하여 음압 변화 경향성을 해석하였는데 Insert와 셀이 접하는 면적이 넓을수록 음압이 크게 나타났다.

세라믹 적층 폭의 변화에 따른 음압 변화의 경향성을 해석하였는데, 세라믹 적층의 폭이 넓을수록 음압이 증가하는 경향성을 나타내었고, Rubber층 두께 변화에 따라서는 Rubber층의 두께가 얇을수록 음압이 증가하는 경향성을 나타내었다. 그리고 세라믹 적층의 물성에 따라 음압 변화의 경향성을 해석한 결과 PZT-5H를 사용했을 때 음압이 가장 크고, PZT-8을 사용했을 때 음압이 가장 작은 것으로 나타났다.

수중에서 사용하는 트랜스듀서는 사용깊이에 따라 성능 변화가 일어난다. 대부분의 경우 사용깊이가 깊어지면 성능이 열화된다. Class IV Flexextensional 트랜스듀서의 경우도 마찬가지이며 사용깊이가 바뀌면 stress-stiffening 효과에 의해서 공진 주파수가 달라지게 되어 구동 주파수를 고정시킨다면 많은 손실을 가져오게 된

다[3]. 따라서 본 연구에서는 Class IV Flexextensional 트랜스듀서 구조체의 최 외각에 각각의 사용깊이에 해당하는 정수압을 인가하여 공진 주파수 변화를 해석하였고, 결과를 그림 4에 나타내었다. 결과를 보면 사용 깊이가 깊어지면 깊어질수록 공진 주파수가 감소하는 것을 알 수가 있다. 이는 구조체의 최 외각에 인가되는 정수압값이 커지면 Class IV Flexextensional 트랜스듀서의 장축은 늘어나고 단축은 줄어드는 비율이 더 증가하게 되고 결국은 단축과 장축 비가 감소하게 되어 공진 주파수도 낮아지게 되는 것이다. 이는 앞서 행한 단축과 장축 비가 작으면 공진 주파수가 낮아지는 결과[2]의 경향과 일치한다.

3.2. 열 발생에 미치는 영향 해석

Class IV Flexextensional 트랜스듀서의 열 전달 특성을 해석하기 위해 세라믹 적층에 2 kV/cm 전압을 인가하고, 구조체의 최 외각층에 일정한 온도 20 °C를 인가하여 20 sec 간격으로 Transient 해석을 행하여 시간에 따른 열 전달 특성 결과를 그림 5에 나타내었다. 해석 결과 세라믹 적층에서 발생하는 열은 일정한 시간이 지나야 셀로 전달되는 것을 알 수가 있었고, 셀의 장축방향(X)에서 단축방향(Y)으로 점차적으로 전달되는 것을 알 수 있었다. 그리고 셀에 전달되는 열의 양을 온도변화로 관찰하였는데, 온도 변화값이 매우 작은 것을 알 수 있었다.

Class IV Flexextensional 트랜스듀서의 반 장축 길이 변화에 따른 셀에서 측정되는 온도 변화의 경향성을 해석하였고, 결과를 그림 6에 나타내었다. 결과를 보면 반 장축 길이가 증가함에 따라 셀에서 측정되는 온도는 증가하였다. 이는 반 장축 길이가 증가하면 세라믹 적층 두께와 폭도 그만큼 증가하고, 세라믹 적층 두께와 폭이 증가하면 열원으로 작용하는 세라믹 적층에서 많은 열이 발생한다. 때문에 셀에 더 많은 열이 전달되었고, 전달된 열을 온도로 측정하였기 때문에 측정된 온도가 높은 것은 당연한 결과라 판단되어진다.

다음으로 셀 두께 변화에 따른 셀에서 측정되는 온도 변화의 경향성을 해석하였는데, 셀의 두께가 증가할수록 셀에서 측정되는 온도는 감소하는 경향성을 보였다.

단축과 장축 길이의 비에 따른 셀에서 측정되는 온도 변화 경향성 해석결과를 그림 7에 나타내었다. 결과를 보면 b/a비가 클수록 셀에서 측정되는 온도가 감소하는 경향성을 나타내었다. 이는 Class IV Flexextensional 트랜스듀서에서 열원으로 작용하는 세라믹 적층의 열량은 일정한데, 열이 전달되는 매체의 부피가 증가하면 단위 부피 당 전달되는 열량은 작아지고 이는 곧 측정되는 온도의 감소를 의미한다.

세라믹 적층의 두께 변화에 따른 셀에서 측정되는 온도 변화 경향성 해석결과, 세라믹 적층 두께가 증가할수록 셀에서 측정되는 온도가 증가하는 경향성을 나타내었다. 그리고 셀 높이가 증가함에 따라 셀에서 측정되는 온도가 증가하였고, 세라믹 적층 폭이 넓을수록 측정되는 온도는 증가하였다. 한편 Insert의 형상에 따라서는 거의 무관한 경향을 보였다.

Rubber층 두께 변화에 따른 셀에서 측정되는 온도 변화의 경향성 해석결과를 그림 8에 나타내었는데, Rubber층 두께가 얇을수록 셀에서 측정되는 온도가 감소하는 경향성을 나타내었다. 이는 열원으로 작용하는

세라믹 적층에서 발생하는 열량은 동일하지만 발생된 열량이 전달될 수 있도록 하는 기준온도 값의 영향도에 따라 전달되는 열량은 차이가 날 수 밖에 없다. 본 연구에서는 Rubber층의 외각과 End-plate 외각에 기준온도 20 ℃를 인가하였다. 따라서 Rubber층 두께가 얇아지면 기준온도 20 ℃의 영향이 증가하기 때문에 셸의 장축방향과 단축방향에서 측정되는 온도가 낮은 것이라 판단되어진다.

3.3. 최적구조 설정

앞서 해석한 공진 주파수 변화[2], 음압 변화, 열 발생 경향성 결과를 바탕으로 최대 음압을 구현하고, 열 발생이 최소인 중심 주파수 1 kHz를 가지는 Class IV Flextensional 트랜스듀서의 최적구조를 설정하였다.

Class IV Flextensional 트랜스듀서의 공진 주파수는 반 장축 길이, 셸 두께, 셸 물성에 의해서 많은 영향을 받는데, 본 연구에서는 셸 물성을 Aluminum으로 고정시키고, 세라믹 적층은 주로 많이 사용하는 PZT-8로 고정시킨 상태에서 중심 주파수 1 kHz를 구현하였다. 그리고 음압이 높게 나오는 순서와 셸에서 측정되는 온도가 낮은 순서를 아래에 나타내었다.

● 음압이 높게 나오는 순서

- (1) 반 장축 길이가 작을수록
- (2) 셸 두께가 두꺼울수록
- (3) 셸 높이가 높을수록
- (4) 세라믹 적층 두께(d/2)가 두꺼울수록
- (5) b/a가 작을수록
- (6) Rubber 두께가 얇을수록
- (7) 세라믹 적층 폭이 넓을수록

● 셸에서 측정되는 온도가 낮은 순서

- (1) Rubber 두께가 얇을수록
- (2) 반 장축 길이가 작을수록
- (3) 셸 높이가 낮을수록
- (4) 세라믹 적층 두께(d/2)가 얇을수록
- (5) 세라믹 폭이 좁을수록
- (6) b/a가 클수록
- (7) 셸 두께가 두꺼울수록

이상의 결과를 바탕으로 최대 음압을 구현하고, 열 발생이 최소인 중심 주파수 1 kHz를 가지는 Class IV Flextensional 트랜스듀서 최적구조 규격을 아래와 같이 결정하였다.

- (1) 반 장축 길이(a) : 125 mm
- (2) 셸 두께(t) : 8 mm
- (3) 셸 높이(h/2) : 105 mm
- (4) 세라믹 적층 두께(d/2) : 3.4 × 28 mm
- (5) 단축/장축 비(b/a) : 0.35
- (6) Rubber 두께 : 2 mm
- (7) 세라믹 적층 폭 : 19.4 mm

설정된 최적 구조와 기본 모델의 주파수에 따른 음압 변화 해석 결과를 그림 9에 나타내었다. 결과를 보면 본 연구에서 설정한 최적구조의 최대 음압이 기본 모델의 최대 음압 보다 2배 이상 높은 것을 알 수 있다. 그

리고 최적구조의 열 전달 특성을 해석하였는데 셸의 장축방향에서 21.98 ℃, 셸의 단축방향에서 20.96 ℃로 측정되었다. 이는 본 연구에서 설정한 최적구조가 열 발생도 아주 작은 것을 의미한다.

IV. 결론

본 연구에서는 저주파 대역에서 고출력 수중 음향센서로 사용되는 Class IV Flextensional 트랜스듀서의 여러 설계변수들에 따른 음압 변화, 열 발생 경향성을 유한요소 해석법으로 해석하였다. 나아가 해석되어진 결과들을 바탕으로 최대 음압을 구현하고, 열 발생이 최소인 중심 주파수 1 kHz를 가지는 Class IV Flextensional 트랜스듀서의 최적구조를 설정하였다. 본 연구에서 설정한 최적구조는 기본모델에 비해 음압이 2배 이상 크고, 열 발생은 아주 작은 것으로 나타났다.

본 연구의 결과는 향후 다양한 중심 주파수 및 최대 음압을 구현할 수 있는 Class IV Flextensional 트랜스듀서를 설계함에 있어 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

후 기

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

참고문헌

1. 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.
2. 강국진, 노용래, "Class IV Flextensional 트랜스듀서의 주파수 특성 변화에 관한 연구," 한국음향학회 학술발표대회 논문집, 제18권 제1(s)호, pp.375-378, 1999.7.
3. D. J. W. Hardie, "The effect of depth pressure on a flextensional transducer," Controller HMSO, London, 1990.

Table 1. Structure and material variables constructed in this research

변 수	범 위
Semi major axis length (a)	100 ~ 200 mm
Shell thickness (t)	8 ~ 20 mm
minor/major axis length ratio (b/a)	0.35 ~ 0.6
Ceramic bar thickness (d/2)	86 ~ 120.4 mm
Shell height	30 ~ 105 mm
Insert shape	6가지
Ceramic bar width	19 ~ 24 mm
Rubber thickness	2 ~ 10 mm
Ceramic bar materials	PZT-4, 5A, 5H, 8

Table 2. Material Properties of the assembly parts in the Class IV Flextensional transducer

	Young's modulus (Pa)	Density (kg/m ³)	Poisson's ratio
Shell, Insert, Nodal-plate	68.9E9	2710	0.3
Rubber	2.99E7	1100	0.495
Insulator	5.8E9	2900	0.25
End-plate	210E9	7500	0.3

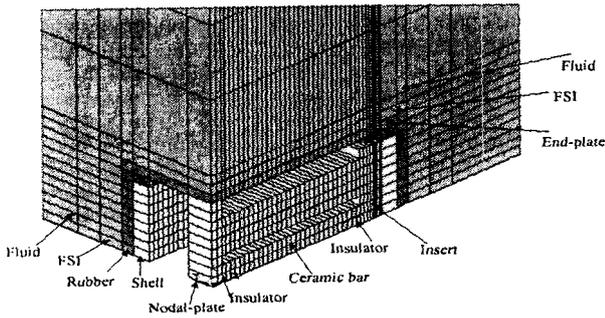


Fig. 1. Finite Element Model of the Class IV Flextensional transducer

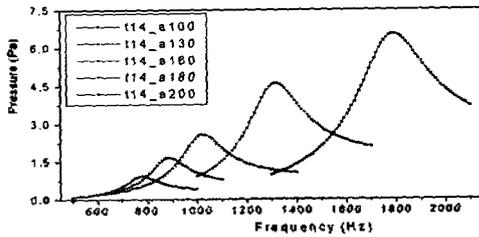


Fig. 2. Pressure vs. semi major axis length

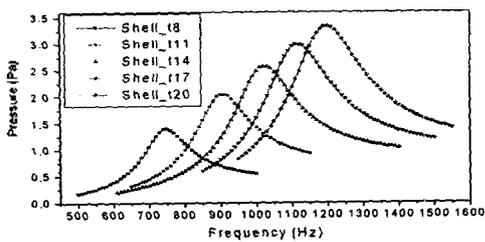


Fig. 3. Pressure vs. Shell thickness

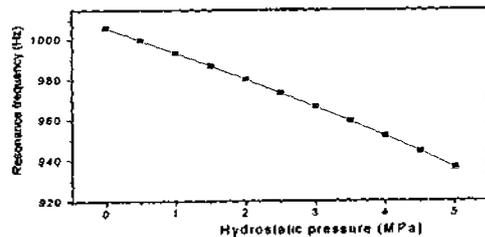


Fig. 4. Resonance frequency vs. hydrostatic pressure

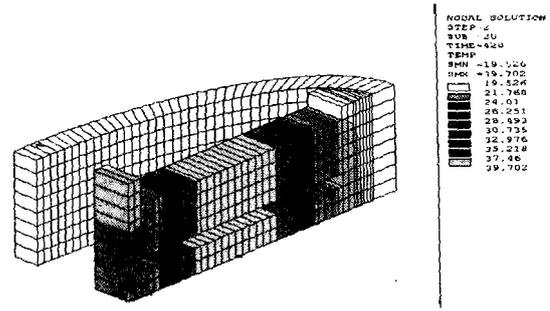


Fig. 5. Thermal distribution after Time 420 sec

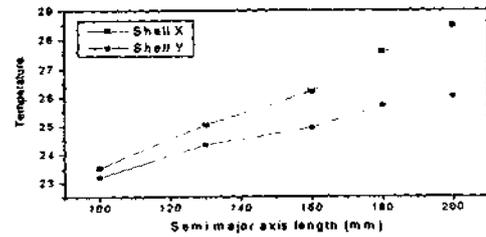


Fig. 6. Temperature vs. semi major axis length

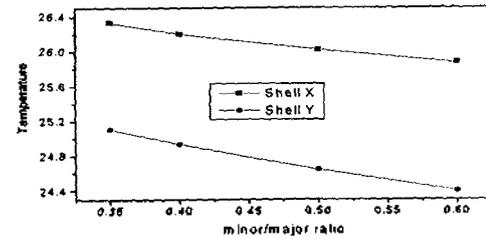


Fig. 7. Temperature vs. b/a

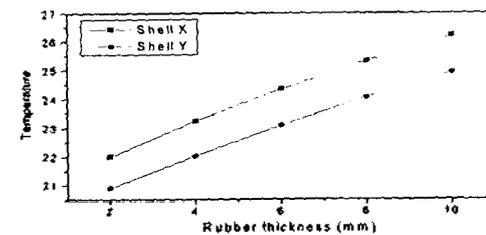


Fig. 8. Temperature vs. Rubber thickness

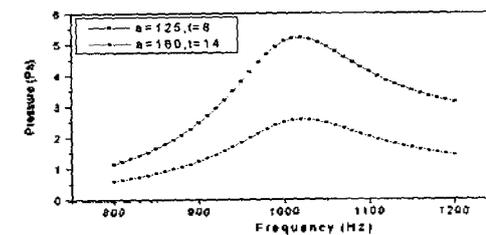


Fig. 9. Pressure vs. frequency (optimal dimension)