

FEM을 이용한 Push-Pull형 고출력 초음파 트랜스듀서의 설계

윤양기*, 노용래**

* 경북대학교 센서공학과

** 경북대학교 센서공학과/전자전기공학부

Design of a Push-Pull Type High Power Ultrasonic Transducer with the FEM

Yanggi Yoon*, Yongrae Roh**

*Department of Sensor Engineering, Kyungpook National University

** Dept. of Sensor Eng./School of Elec. and Elec. Eng., Kyungpook National University

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

요 약

기존의 Push-Pull 트랜스듀서보다 간단한 구조를 가지며 출력을 한층 더 높이기 위해서 실린더 중앙에 구동부를 둔 새로운 구조의 Push-Pull 트랜스듀서를 설계하고자 한다. 유한 요소 상용 Package인 ANSYS를 이용하여 트랜스듀서의 모델을 구성한 후, 분석 시 고려되어 지는 길이, 반경, Endcap Edge 형상에 대해 변수로 설정, 변수들의 변화에 대한 음압의 변화 경향을 조사하여 최대 음압을 구현하기 위한 최적 길이, 반경, Endcap Edge 형상을 설정하였다. Endcap의 형상이 수직, 삼각형 형태의 트랜스듀서에서 나타난 결과에서 힘의 전달이 Edge형상이 수직일 때보다는 삼각형일 때가 더 좋은 것을 볼 수가 있었다. 또한 기존의 트랜스듀서를 유한 요소로 설계를 하여서 분석을 하였고, 기존의 트랜스듀서와 비교해 본 결과, 최적 설계한 트랜스듀서가 구조적으로 더 단순한 구조임에도 불구하고 더 큰 음압을 구현할 수 있는 고출력 트랜스듀서라는 것을 입증하였다.

I. 서 론

초음파 세정의 메커니즘은 대단히 복잡하고 아직 해명되어 있지 않은 부분도 있지만 초음파 가속도 에너지, 캐비테이션에 의한 에너지가 상승적으로 작용하여 세정력을 갖는 것으로 알려져 있다[1]. 캐비테이션은 비교적 저주파에서 발생하고, 음압이 클수록 캐비테이션의 발생도가 크다[2]. 기존의 Push-Pull 트랜스듀서는 실린더의 양끝에 두개의 진동자를 배치하는 구조로서 각 진동자가 같은 특성을 가지도록 정확한 조정을 하는 과정을 거쳐야 하는 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하고 고출력의 초음파를 발생시킬 수 있는 새로운 형태의 트랜스듀서로서, 중앙의 진동소자를 랑즈벡 형태와 같이 볼트로 고정하고 진동소자의 압축 신장력이 양 끝 금속 질량체에 전달되도록 Bar로 연결하여 결국 이들을 둘러싼 셸의 직경 변화를 일으키는 구조의 PushPull 트랜스듀서를 설계하였다. 본 논문에서는 구동부의 설계변수와 발진부의 설계변수에 대해서 구분을 하고 이들 각 변수들에 따른 음압의 변화 경향을 관찰하고, 그 결과로서 원하는 주파수 20~25 kHz 부근에서 최대 음압을 가지는 Push-Pull 트랜스듀서의 최적 구조를 설계하였다.

나아가 기존 Push-Pull 트랜스듀서의 성능을 평가하여, 본 연구에서 최적 설계한 트랜스듀서의 성능과 비교해 봄으로써, 본 연구에서 설계한 새로운 구조의 우수성을 입증하였다.

II. Push-Pull 트랜스듀서 설계

2. 1. 구동부

구동부는 큰 파워에 적합하게 설계가 되어진 볼트로 조인 랑즈벡형 진동자이다. 이것은 볼트로 각 부품을 고정된 것으로 열 팽창 계수에 대한 문제도 없고 압전 소자에 강력한 정적 압력을 걸 수가 있다. 랑즈벡형 진동자의 장점으로서는 기계적 품질계수가 높고, 고온까지 사용할 수가 있다는 것이다. 일반적으로 진동자는 PZT가 많이 사용되고 있다. 압전 세라믹의 기계적인 강도는 압축력에 대한 내성이 인장력에 대한 내성 보다 10 배 이상이 크기 때문에 볼트에 의한 조임 압력을 적정화함으로써 매우 큰 진동 에너지를 얻을 수가 있다. 특히 PZT 계열 중에서 PZT-4와 PZT-8은 낮은 유전손실과 탄성손실을 가지고 있어서 고출력 트랜스듀서에 적합하다[3]. 본 연구에서는 진동소자로 PZT-8을 사용하였다.

2. 2. 발진부

트랜스듀서의 공진 주파수는 셸이 가지고 있는 특성에 의해서 결정이 되며 셸의 재료물성 중에서도 밀도와 영율이 공진 주파수에 크게 영향을 준다. 저주파 공진을 위해서 이상적인 물질로는 낮은 영율과 높은 밀도를 가져야 하는데 반해, 높은 대역폭과 효율을 가지기 위해서는 낮은 밀도를 가지는 셸이 요구되어진다[4]. 본 연구에서는 표 1에서와 같은 여러 물질 중 가장 적합한 것으로 생각되는 티타늄을 발진부로 사용하기로 한다. 발진부의 전체적인 모델 구조는 기존의 실린더 형태이다.

III. Push-Pull 트랜스듀서의

유한요소해석

3. 1. Push-Pull 트랜스듀서의 모델링

유한 요소 해석 프로그램인 ANSYS 프로그램으로

Push-Pull 트랜스듀서는 구동부와 발전부 그리고 물을 포함한 전체구조에 대한 8분의 1 모델로서 3500개의 요소와 노드로 구성되어 되어 있다.

3. 2. Push-Pull 트랜스듀서 설계 변수 설정

본 연구의 목적은 세정용 고출력 초음파 트랜스듀서를 설계하는 것이다. 따라서 Push-Pull 트랜스듀서 설계에 있어서 최대 음압을 낼 수 있는 구조를 찾아내기 위해서 크게 다음의 3 부류에 대해서 세부적인 설계 변수를 설정하였다.

- 1) Endcap의 형상
- 2) 전체 길이
- 3) 전체 반경

3. 2. 1. Endcap의 형상에 대한 변수

Endcap형상에 대한 변수는 아래와 같이 변수를 설정을 하였다.

- 1) 평면형 Endcap의 형상
- 2) 삼각형 Endcap의 형상
- 3) 만곡(Round)형 Endcap의 형상

Endcap Edge 형상이 삼각형인 경우, 전체 길이가 100 mm, Endcap 길이가 20 mm인 경우를 대표적으로 들어서 내부 구조에 변화를 가했을 때 나타나는 음압 변화를 관찰함으로써 Endcap Edge 형상의 영향을 분석하였다. 그림 1은 만곡(Round)형 Endcap의 형상으로 Endcap의 끝 부분에서 시작되어진 만곡이 가운데 부분까지 타원형을 이루는 형태로서, 전체 길이가 80 mm일 때 Endcap 길이 20mm를 제외한 나머지 길이 60 mm를 Y축으로 셸이 가질 수 있는 최대 반경으로 하고, 이를 4구간으로 세분하여 셸의 Y축 방향 반경이 15 mm, 30 mm, 45 mm, 60 mm일 때의 음압 변화를 관찰하였다.

3. 2. 2. 전체 길이에 대한 변수

전체 길이에 대한 변수에서 세부적인 변수는 Endcap 길이, PZT 길이, Bar의 길이이다. 전체 길이는 작동 주파수가 20 kHz 이상이라는 조건에 의해 80, 100, 120, 140 mm의 4구간을 선정하였다.

3. 2. 3. 전체 반경에 대한 변수

전체 길이에 대한 변수에서 각각 한 경우를 설정하고 이에 대한 전체반경의 변수를 설정하였다. PZT 반경과 Bar의 반경은 아래의 조건을 만족을 하는 경우에 대해서 변수로 설정을 하였다.

- ① 바의 반경 \geq 실린더의 내 반경 $\times 1/3$
- ② PZT의 반경 \geq 바의 반경 + 5 mm
- ③ 셸의 두께는 전체적으로 3 mm으로 고정

①의 조건은 트랜스듀서의 작동 중 연결 봉의 굽힘을 방지하기 위해서는 연결 봉의 반경이 어느 크기 이상이어야 한다는 점에서 셸 내 반경의 1/3이상으로 설정하였고, ②의 설정 조건은 PZT가 두께 모드로 안정적으로 작동하기 위해서는 그 두께에 비해 평면 규격이 더 커야

한다는 점에서 설정하였으며, ③의 조건은 셸이 지나치게 얇으면 작동 중 역시 굽힘이 일어날 수 있고, 너무 두꺼우면 경직(stiffening)효과에 의해 발생 진폭이 매우 작을 수 있다는 면을 고려해 적절한 값으로 설정한 것이다.

IV. Push-Pull 트랜스듀서의 유한요소 해석 결과

20 ~ 25 kHz에서 전체 길이의 변수들에 대한 음압 변화 경향을 그림 2에 나타내었다. 전체 길이의 증가와 PZT 길이의 증가에서 전체 길이가 80 mm 인 경우가 100, 120, 140mm 일 때 보다 큰 음압을 나타내었고 점차 길이가 길어지면서 음압이 떨어지는 것을 볼 수가 있다. 이것은 Endcap의 길이는 고정시킨 채 내부 공간의 길이만 증가시킨 것으로 내부공간이 길어질수록 최대 음압을 얻기 위한 PZT 길이는 점점 더 짧아져야함을 알 수 있다. 다음으로 트랜스듀서 반경의 영향을 알아보면, 그림 3에서 전체 길이를 80 mm로 고정을 한 후 PZT의 반경과 Bar의 반경을 4 mm씩 증가를 했을 경우 음압이 증가하는 것을 볼 수가 있다. 이것은 PZT의 반경과 Bar의 반경이 일정한 비로 증가했을 때 음압도 이에 비례하는 것을 알 수가 있다. 그러므로 PZT의 반경이 큰 구조가 음압을 높게 낸다는 것을 알 수 있다. 그림 4는 전체 길이와 전체 반경이 고정된 상태에서 PZT 반경이 커짐에 따라 음압이 증가하는 것을 나타내었다. 반대로 PZT의 반경이 일정할 때 Bar의 반경이 작을 수록 음압이 커지는 것을 볼 수가 있다. 그림 5는 Endcap의 형상이 삼각형일 때의 결과이다. PZT의 길이가 증가할수록 음압도 증가하는 것을 볼 수가 있는데, 이때 수직형 Endcap 형상의 길이 변화에 대한 음압 변화 보다 좋은 경향을 보이고 있다. 그림 6은 만곡형 Endcap에서 반경에 대한, 21 kHz 에서의 음압 변화를 나타낸 것이다. 셸의 반경이 변함으로써 음압이 비례하여 증가하는 경향을 볼 수가 있다.

V. 기존 Push-Pull 트랜스듀서의 비교 분석

이상에서 최적 설계한 Push-Pull 트랜스듀서의 성능을 비교, 평가하기 위하여 기존 Push-Pull 트랜스듀서를 역시 유한요소 해석법에 의해 분석하여 그 결과를 본 연구에서 최적 설계한 것과 비교하려 하였다. 상용 유한요소 패키지인 ANSYS를 사용하여 앞 절에서와 동일한 요령으로 모델을 구성하였다. 그림 7은 전체적인 모델의 1/2 에 대한 개략도이다. 해석 대상으로 삼은 기존 트랜스듀서는 중심주파수가 25 kHz 이고 작동 시 길이 방향으로 3개의 파장을 발생시키는 형태인데, 그림 8에서와 같은 modal 해석 결과, 모드 형상은 1.5파장을 보이고 있으며, 이 모델이 길이 방향으로 트랜스듀서의 1/2만을 묘사하고 있다는 점을 고려하면 이 결과는 기존 트랜스듀서의 작동 상태를 적절히 묘사하고 있다고 할 수 있다. 그림 9는 기존의 Push-Pull 트랜스듀서의 음압 크기를 조화 분석을 통하여 해석한 결과이며, 예상대로 25kHz 주위에서 큰 음압을 보이는 극대치가 나타났으며, 최대 260 Pa 정도의 음압을 구현하는 것으로 나타났

다. 반면에 본 연구에서 설계한 새로운 구조의 Push-Pull 트랜스듀서는 그림 6에서 약 870 Pa 정도의 음압을 구현하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 최적 설계한 Push-Pull 트랜스듀서는 기존 트랜스듀서에 비해 더 큰 음압을 구현할 수 있는 고효율 트랜스듀서라는 것이 입증되었다.

VI. 결 론

본 연구에서는 기존의 Push-Pull 트랜스듀서보다 간단한 구조를 가지며 출력을 한층 더 높이기 위해 실린더 중앙에 구동부를 둔 새로운 구조의 Push-Pull 트랜스듀서를 설계하고자 하였고, 유한 요소 해석을 통해 20 ~ 25 kHz 대역에서 최대 음압을 구현할 수 있는 트랜스듀서의 최적 규격을 설정하였다. 나아가 기존 Push-Pull 트랜스듀서의 성능을 평가하여 본 연구에서 설계한 트랜스듀서의 성능과 비교해 본 결과, 본 연구에서 설계한 Push-Pull 트랜스듀서는 구조적으로 더 단순함에도 불구하고 더 큰 음압을 구현할 수 있는 고효율 트랜스듀서라는 것이 입증되었다.

참 고 문 헌

1. 이 종락, 초음파와 그 사용법, 세화 출판사, 1판 1997.
2. 羅慶安, 쉬운 초음파의 응용, 기전 연구사, 1992.
3. B. Hamonic, O. B. Wilson and J. N. Decarpigny (Eds), "Power Transducers for Sonics and Ultrasonics," Proceedings of the international Workshop, Held in Toulon, France, Jun 12 and 13, 1990.
4. B. Hamonic and J. N. Decarpigny, "Power Sonic and Ultrasonic Transducers Design," Proceedings of the international Workshop, Held in Lille, France, May 26 and 27, 1987.

표 1. 일반적인 셀 물질의 트랜스듀서에 미치는 영향.

MATERIAL	STRENGTH	DENSITY	STIFFNESS	FREQUENCY	BANDWIDTH
Aluminium	medium	low	medium	medium	wide
Steel	high	high	high	medium	narrow
Titanium	high	medium	medium	medium	medium
GRP	medium	low	low	low	wide
Plastic	low	low	low	low	wide
Carbon	high	low	high	high	wide

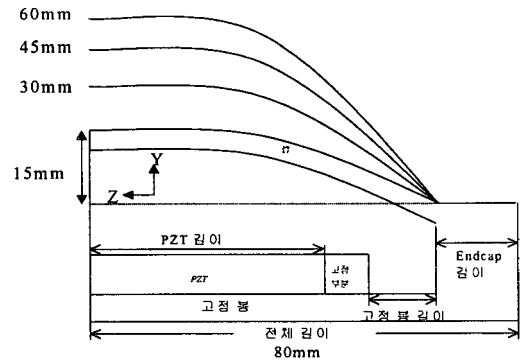


그림 1. 반곡형 Endcap Push-Pull 트랜스듀서의 변수.

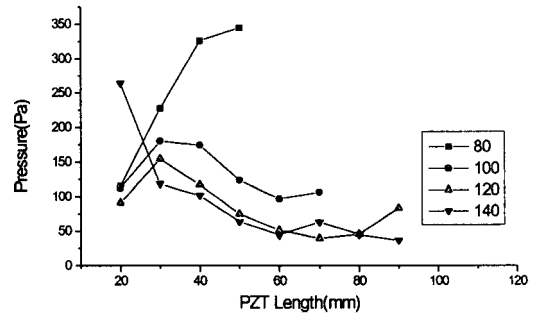


그림 2. 전체 길이의 변화와 PZT 길이의 변화에 의한 음압 변화.(Endcap Length = 20 mm)

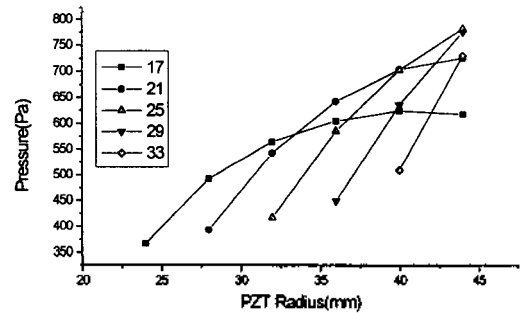


그림 3. Bar 반경 변화와 PZT 반경 변화에 의한 음압 변화. (Total Length = 80 mm, Total Radius = 50 mm)

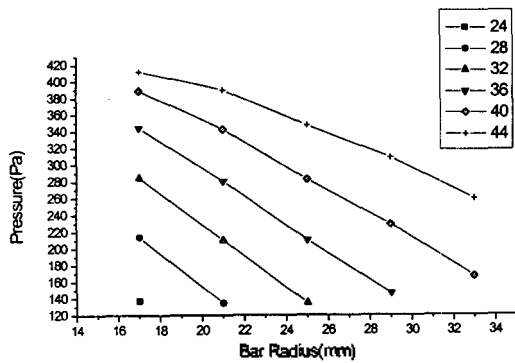


그림 4. PZT 반경의 변화와 Bar 반경의 변화에 따른 음압. (Total Length = 100 mm, Total Radius = 50 mm)

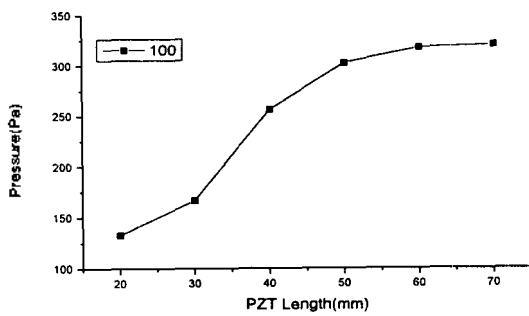


그림 5. 삼각형 Endcap에서 PZT 길이 변화에 의한 음압. (Total Length = 100 mm, Endcap length = 20 mm)

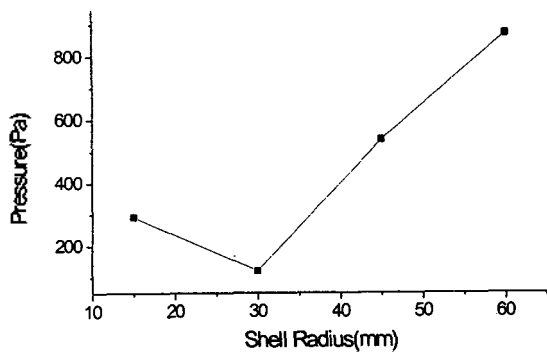


그림 6. 만곡형 Endcap에서 셸의 반경 변화에 따른 음압. (Total Length = 80 mm)

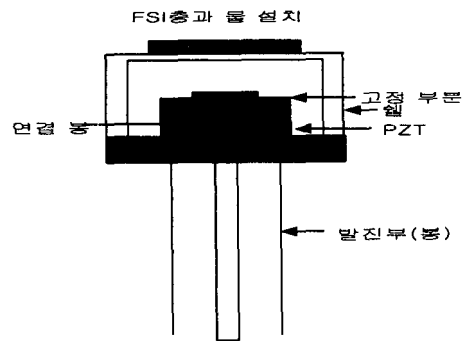


그림 7. 기존 Push-Pull 트랜스듀서의 개략도.

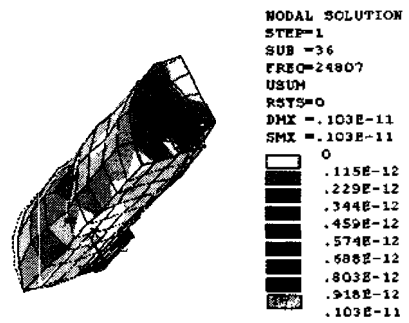


그림 8. 기존 Push-Pull 트랜스듀서의 modal 해석 결과.

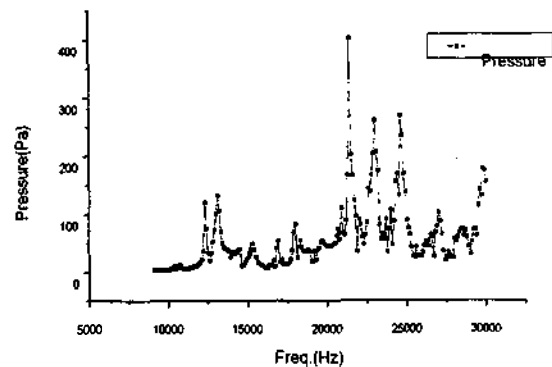


그림 9. 기존 Push-Pull 트랜스듀서의 조화 해석 결과.