

유한요소해석을 이용한 푸쉬-풀형 고출력 초음파 트랜스듀서 설계

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

윤 양 기*, 강 국 진*, 노 용 래**
(Yanggi Yoon*, Kukjin Kang*, Yongrae Roh**)

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 패키지인 ANSYS를 이용하여 트랜스듀서 모델을 구성한 후, 각종 구조 변수들, 즉, 길이, 반경, Endcap Edge 형상등의 변화에 대한 음압의 변화경향을 조사하여 최대 음압을 구현하기 위한 최적 길이, 반경, Endcap Edge 형상을 설정하였다. 기존 트랜스듀서 보다 구조적으로 더 간단하면서도 더 큰 음압을 구현할 수 있는 새로운 구조의 고출력 트랜스듀서를 개발하였고, 그 성능을 기존 트랜스듀서의 성능과 비교 평가함으로써 개발된 트랜스듀서의 우수성을 입증하였다.

핵심용어: Push-Pull, 유한요소해석, 초음파, 변환기

투고분야: 초음파 및 탄성파 분야(4.1)

ABSTRACT

This work is aimed to develop a new type of the Push-Pull ultrasonic transducer that can provide higher sound pressure level and simpler internal structure than conventional types. The driving part of the newly designed transducer is positioned in the middle of the cylinder, and its optimum geometry is determined by using the FEM package, ANSYS. Through FEM model analysis, the effects of all of its geometrical variables such as transducer length, transducer radius, and the edge shape of the end cap have been examined, and the results have led to the optimum geometry. The newly designed transducer has been found to give better performance than that of traditional ones.

Key words: Push-Pull, FEM, Ultrasonics, Transducer.

I. 서 론

세정 및 정화 방법 중에 강력한 초음파를 이용하는 방법이 있다. 이것은 세정액 내에 강력 초음파를 방사하여 세정조 내의 액을 진동시키는 방법으로, 이 진동 에너지에 의해 세정 및 정화를 촉진 할 수가 있다. 초음파의 세정 메커니즘은 대단히 복잡하고 아직 해명되어 있지 않은 부분도 있지만 일반적으로는 초음파의 가속도에너지와 캐비테이션에 의한 기포 파괴시의 에너지가 상승적으로 작용하여 세정력을 갖는 것으로 알려져 있다[1]. 세정 및 정화용 트랜스듀서로는 1985년 K. Freirk가 개발한 것으로, 발진부분만 수중에 넣은 상태에서 초음파를 발생시키

는 것이 있다[2]. 하지만 구동부는 밖에 두어야 하는 단점이 있어 이를 보완하기 위해서 발진부와 구동부가 같이 수중에서 존재할 수 있는 트랜스듀서가 1993년에 M. Walter에 의해서 개발되었다[3]. 이것은 세정 튜브 안에서 공간적인 제약을 받지 않고, 원하는 주파수대역의 초음파를 발생시키는 것으로 Push-Pull 트랜스듀서라고 한다.

기존의 Push-Pull 트랜스듀서는 실린더의 양끝에 진동소자를 마주보게 하는 형태를 취하고 있으며 진동자의 압축과 신장에 의한 셀의 직경 변화를 이용하고 있다. 이 때 셀의 변화가 수중에서 초음파를 발진시키는 음원의 역할을 하게 되며, 현재 25 kHz, 40 kHz의 두 주파수를 가지는 Push-Pull 트랜스듀서가 사용되고 있다[4]. Push-Pull 트랜스듀서의 장점으로는 주파수, 출력, 크기를 자유롭게 선택할 수 있고 유지, 보수에 있어서 다른 세정 트랜스듀서보다 쉽다는 것 등을 들 수 있다. 본 연구에서는 이런 장점

* 경북대학교 센서공학과

** 경북대학교 센서공학과/전자전기공학부

접수일자: 1999년 11월 22일

을 그대로 유지하면서 기존 트랜스듀서보다 더 단순한 구조를 가지는 독자적인 Push-Pull 트랜스듀서를 설계하고자 하였다. 진동자가 실린더 양쪽에 있는 대신 Cymbal-type 트랜스듀서, Flexensional 트랜스듀서와 같이 트랜스듀서 중앙에 위치하여 압축, 신장 운동이 그대로 셸로 전달되는 구조이다. 이러한 구조를 가지는 Push-Pull 트랜스듀서가 최적의 성능을 가지게 하기 위해서 상용 유한요소 패키지인 ANSYS를 이용하여 모델을 구현하고, 구동부와 발진부에서 고려될 수 있는 각 세부 변수들의 변화에 따른 음압의 변화 경향을 파악하였다. 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 구조

그림 1은 본 연구에서 설계하고자 하는 Push-Pull 트랜스듀서의 전체적인 구조를 나타낸다. 트랜스듀서는 압전 세라믹과 금속 링의 결합체인 구동부와 이를 둘러싸면서 이 진동소자의 운동을 이용해 수중에서 초음파를 발생시키는 음원 역할을 하는 Endcap과 셸, 즉 발진부의 크게 두 부분으로 나눌 수 있다.

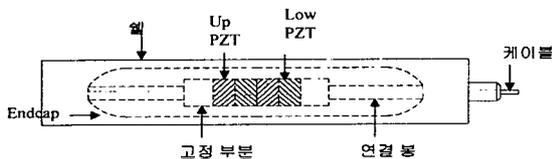


그림 1. 새로운 Push-Pull 트랜스듀서 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of the newly designed Push-Pull ultrasonic transducer.

동부는 다시 압전 세라믹, 금속 링, 그리고 이들을 Endcap에 연결하는 연결봉의 세 부분으로 구성되어 있다. 압전 세라믹 진동소자를 금속 안에 샌드위치형으로 끼워 볼트로 강하게 고정을 시킨 랑즈벡 진동자 형태를 가지고 있으며, 구조적으로 견고하며 기계적 Q가 높다는 특성을 가진다. 압전 진동소자로는 PZT-8을, 그리고 이들을 Endcap에 연결하는 연결봉의 재질로는 강철을 사용하였다. 발진부를 이루는 셸은 트랜스듀서의 주파수 특성에 큰 영향을 미치며, 그 중에서도 특히 밀도와 영율이 중요한 역할을 한다. 저주파 공진을 위한 이상적인 재질로는 낮은 영율과 높은 밀도를 가져야 하고, 반면에 높은 대역폭을 가지기 위해서는 낮은 밀도를 가지는 셸이 요구된다. 표 1에서 일반적인 Flexensional 트랜스듀서의 성능에 미치는 여러 가지 재질들의 영향을 정리하였다

[5][6]. 이 중 티타늄은 가격이 비싸다는 단점은 있지만 표 1에서 보듯이 물리적으로 좋은 특성을 가지고 있으며, 기능 면에서도 견고성, 경량성, 내부식성 등의 우수한 특성을 보유하고 있다. 따라서 본 연구에서는 발진부의 셸 재질로 티타늄을 선택하였다.

표 1. 셸 재료 물질들과 특성.
Table 1. Shell materials and their effect on the transducer performance.

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

III. Push-Pull 트랜스듀서의 유한요소 해석

3.1. Push-Pull 트랜스듀서의 모델링

본 연구의 대상인 Push-Pull 트랜스듀서의 수치 모델은 유한 요소 상용 패키지인 ANSYS를 사용하여 구성하였고, 구동부와 발진부 그리고 물을 포함한 전체 구조의 대칭성을 이용해 8분의 1인 모델로 약 3,500개의 요소와 4,400개의 절점으로 구성하였다.

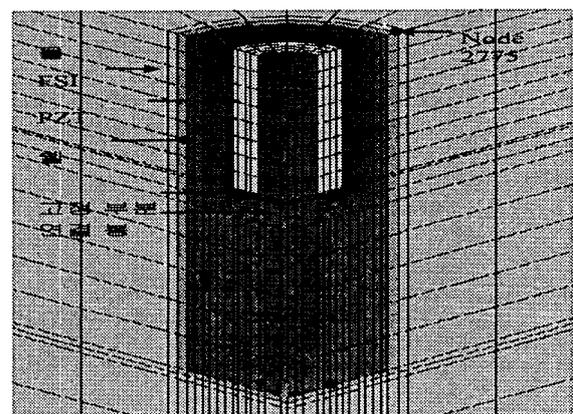


그림 2. 새로운 Push-Pull 트랜스듀서 유한 요소 모델
Fig. 2. Finite element model of the newly designed Push-Pull transducer.

그림 2는 ANSYS를 이용하여 구성한 유한요소 모델을 나타내고 있다. 압전 물질은 온도, 전압, 자장, X, Y, Z축 변위를 자유도로 가지는 Solid 5로 설계하였고 구동부의

나머지 부분인 헬, Endcap, 연결 봉은 X, Y, Z축 변위등 5개의 자유도를 가지는 Solid 45로 하였다. 본 연구의 Push-Pull 트랜스듀서는 수중에서 사용하기 때문에 구조체 외곽에 물을 설치하였는데, 물은 압력성분 하나만을 자유도로 가지는 Fluid 30으로 설계하였고, 구조체와 물의 접촉충충(FSI)은 압력, X, Y, Z축 변위를 자유도로 가지는 Fluid 30의 확장된 형태로 설계하였다. Push-Pull 트랜스듀서의 대칭성을 고려하여 8분의1에 해당하는 모델은 X, Y 및 Z축 방향으로 대칭 처리하였다. 경계 조건으로는 구조체의 모든 부분을 자유상태로 두었고, 물의 최외곽 층은 무반사 경계 조건을 적용하였다.

3.2. Push-Pull 트랜스듀서 설계 변수

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

1. Endcap Edge의 형상
2. 길이
3. 반경

3.2.1. Endcap Edge의 형상

그림 3은 헬과 Endcap이 만나는 부분이 수직인 형태를 보이고 있다. Edge의 형상에 따라 구동부에서 발생된 진동에너지가 헬로 전달하는 효율에 차이가 있을 것으로 예상되며, 따라서 Endcap Edge의 형상으로서 대표적인 세가지 경우, 즉 직각인 경우, 삼각형인 경우, 만곡인 경우에 대한 해석을 하였다.

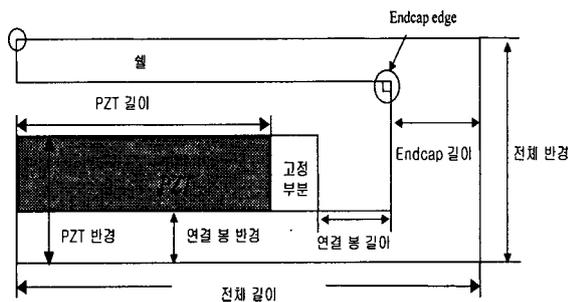


그림 3. 설계 변수
Fig. 3. Design variables.

3.2.2. 길이

길이에 대한 변수에서 고려되어지는 것은 그림 3에서 전체 길이, PZT 길이, Endcap길이, 연결 봉의 길이 등이다. PZT 길이는 그림 3에서 연결 부분 위에 설치되어 있는 길이를 의미하고, 연결 봉 길이는 Endcap과 고정 부분

사이의 길이를 의미한다. 전체길이는 작동 주파수가 20 kHz 이상이라는 조건에 의해 80, 100, 120, 140 mm의 4 구간을 선정하였고, 각 전체 길이 경우에 대해 다시 Endcap, PZT, 연결봉의 길이를 세분해서 변화시켜 개별 부분 및 전체 길이 변화에 따른 트랜스듀서의 특성 변화를 관찰하였다. 세부적인 길이 변수들은 각 전체 길이를 유지하는 범위 내에서 Endcap 길이 20 ~ 70 mm, PZT 길이 20 ~ 110 mm, 연결 봉 길이 5 ~ 95 mm로 하였다. 이들 길이의 범위는 많은 예비 해석을 통해 20 kHz 이상, 25 kHz 이하의 범위에서 원하는 형태의 진동 모드를 발생시킬 수 있는가를 사전 확인하여 설정한 값이다.

3.2.3. 반경

길이 변수에 따른 해석에서 전체 길이당 음압이 가장 크게 나온 경우를 각 한 경우씩 설정하고 이에 대한 반경 변수를 설정하였다. 전체 반경을 13, 20, 30, 40, 50 mm로 선정하고, 각 전체 반경을 유지하는 범위 내에서 연결 봉 반경 3 ~ 33 mm, PZT 반경 8 ~ 44 mm로 하였다. 모드 해석결과 반경에서의 변수는 PZT 반경, 연결 봉 반경, 전체반경 등이 있다. 그림 3에서 PZT 반경은 연결 봉의 반경을 포함하고, 연결 봉 반경은 PZT내부 구멍의 반경을 의미하고, 전체 반경은 헬을 포함한 전체 트랜스듀서의 반경을 의미한다. 반경 변화의 영향 해석에 사용된 트랜스듀서의 길이 규격은 앞 절의 분석 결과를 바탕으로 다음의 세가지 경우를 설정하였다.

- (1) 전체 길이 80 mm, Endcap 길이 20 mm, PZT 길이 50 mm, 연결봉 길이 5 mm
- (2) 전체 길이 100 mm, Endcap 길이 40 mm, PZT 길이 30 mm, 연결봉 길이 25 mm
- (3) 전체 길이 120 mm, Endcap 길이 60 mm, PZT 길이 50 mm, 연결봉 길이 5 mm

이상의 트랜스듀서 길이의 경우에 대해 헬의 반경을 최대 50 mm 이내에서 아래 표와 같이 변화시키며, 각 변화의 영향을 평가하였다. 표의 변화범위를 설정함에 있어서 PZT 반경과 연결 봉의 반경은 아래의 조건을 만족하도록 설정하였다.

- ① 연결 봉의 반경 \geq 헬 내반경 $\times 1/3$
- ② PZT의 반경 \geq 연결 봉의 반경 + 5 mm
- ③ 헬의 두께는 전체적으로 3 mm로 고정

위에서 ①의 조건은 트랜스듀서의 작동 중 연결 봉의 굽힘을 방지하기 위해서는 연결 봉의 반경이 어느 크기 이상이어야 한다는 점에서 헬 내반경의 1/3이상으로 설정하였고, ②의 조건은 PZT가 두께 모드로 안정적으로 작동하기 위해서는 그 두께에 비해 평면 규격이 더 커야 한다는 점에서 설정하였고 ③의 조건은 헬이 지나치게 얇으면 작동 중 역시 굽힘이 일어날 수 있고, 너무 두꺼우면 경직(stiffening)효과에 의해 발생 진폭이 지나치게 작을 수 있다는 면을 고려해 적절한 값으로 설정한 것이다.

IV. Push-Pull 트랜스듀서의 유한 요소 해석 결과

4.1. 수직 Edge형 트랜스듀서

4.1.1. 길이

길이 변수들의 변화에 따른 발생 음압의 변화를 20 ~ 25 kHz 대역에서 관찰한 결과를 그림 4 ~ 6에 나타내었다. 그림 4에서 전체 길이가 80 mm인 경우가 100, 120, 140 mm일 때 보다 큰 음압을 나타내었고, 길이가 길어질수록 최대 음압이 발생하는 주파수가 점점 낮아지는 것을 알 수 있다. 이것은 Endcap의 길이는 고정시킨 채 연결 봉 길이와 PZT의 길이를 변화시킨 것이다. 이러한 현상은 전체 길이가 길어질수록 트랜스듀서의 중심주파수는 점점 더 낮아지게 되는데, 관찰 대역인 20 ~ 25 kHz에 이 중심주파수를 위치시키기 위해서는 내부의 경직한 부분, 즉 PZT의 길이를 감소시켜야만 되는 것으로 해석된다. 그러나 그렇게 하더라도 전체 길이가 140 mm의 경우에는 이 주파수 대역에 위치시키기 어렵고, 100, 120 mm의 경우에도 최대 음압의 크기가 80 mm일 때에 비해서 상대적으로 작음을 알 수 있다. 즉, 트랜스듀서 전체 길이의 변화에 따른 중심주파수의 변화를 전적으로 PZT의 길이만 조절함으로써 조절함은 비효율적임을 알 수 있고, 따라서 또 다른 길이 변수인 Endcap의 길이도 함께 조절해야만 원하는 주파수 대역에서 충분한 크기의 음압을 구현할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 다음으로 전체 길이가 일정 할 때 최대 음압을 내기 위한 Endcap 길이와 PZT 길이의 관계를 그림 5와 6에 나타내었다. 그림 4에 나타낸 경우 중 대표적인 경우로 전체 길이가 80 mm와 120 mm인 경우에 대한 결과로서, 두 경우 모두 20 ~ 25 kHz 대역에 트랜스듀서의 중심 주파수가 위치하기 위해서는 각 Endcap의 길이에 대해 PZT의 길이도 특정 값을 가져야 하고, 전반적으로 Endcap의 길이가 길어질수록 발생 음압은 커짐을 보여주고 있다. 즉, Endcap의 길이가 길어질수록 PZT의 길이도 따라서 길어져야만 최대 음압을 구현할 수 있음을 알 수 있다. 이상의 결과는 트랜스듀서의 전체 길이는 변하더라도, 20 ~ 25 kHz 대역에 발생하는 음압을 결정하는 것은 결국 내부 공간, 즉 연결 봉의 길이이며, 이 내부 공간의 길이를 일정하게 유지시켜주기 위해서는 트랜스듀서의 길이가 늘어남에 따라 Endcap과 PZT의 길이도 일정한 비율로 커져서, 내부 공간 길이를 일정 값 근처로 유지시켜야 이 주파수 대역에서 최대 음압을 발생할 수 있음을 보여준다. 따라서 그림 5와 6에 나타난 결과로부터, 최적 길이 규격을

- (1) 전체 길이 80 mm, Endcap 길이 20 mm, PZT 길이 50 mm
- (2) 전체 길이 100 mm, Endcap 길이 40 mm, PZT 이 50 mm
- (3) 전체 길이 120 mm, Endcap 길이 60 mm, PZT 길이 50 mm

로 선정하였다. 이들 중 최대 음압을 구현하는 것은 (1)번의 경우이고 이 때 작동 모드도 더 명확히 구현되는

것으로 나타났으나, 나머지 경우들도 트랜스듀서의 실제 적용 상황에서는 견고성이나 제작성을 고려하여 채택할 수도 있을 것이다. 전체 길이가 140 mm인 경우는 Endcap의 길이를 조정하더라도 20 ~ 25 kHz 대역에 트랜스듀서의 중심 주파수를 위치시키기가 여의치 않아 배제하였다.

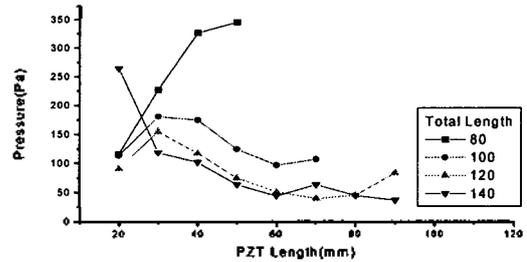


그림 4. 4가지 서로 다른 전체 길이에 대한 PZT 길이 변화에 따른 음압(Endcap 길이 = 20 mm)

Fig. 4. Acoustic pressure vs. PZT length for four different cases of total length (Endcap length = 20 mm).

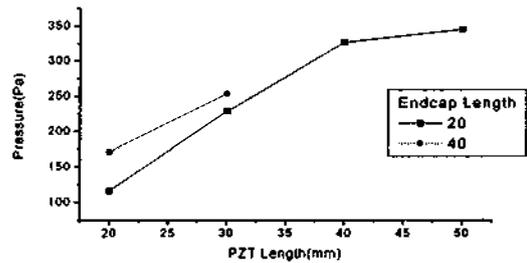


그림 5. 2가지 서로 다른 Endcap 길이에 대한 PZT 길이 변화에 따른 음압(전체 길이 = 80 mm)

Fig. 5. Acoustic pressure vs. PZT length for two different cases of Endcap length (Total Length = 80 mm).

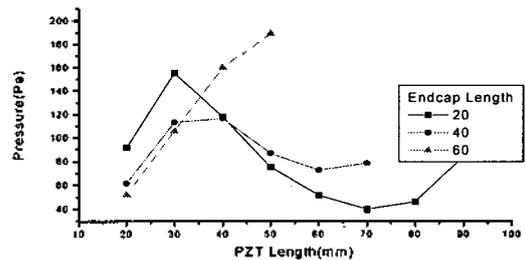


그림 6. 3가지 서로 다른 Endcap 길이에 대한 PZT 길이 변화에 따른 음압(전체 길이 = 120 mm)

Fig. 6. Acoustic pressure vs. PZT length for three different cases of Endcap length (Total Length = 120 mm).

4.1.2 반경

다음으로 트랜스듀서 반경 변화의 영향을 그림 7 ~ 9에 나타내었다. 전체 길이가 80 mm, 100 mm, 그리고 120 mm인 경우에 각 반경요소의 변화 영향을 나타내었다. 그림 7에서 보면 PZT의 반경이 증가할수록 음압도 증가하는

것을 볼 수가 있고, 이런 경향은 다른 그림에서도 동일하게 나타난다. 에너지 공급원인 PZT의 단면적이 커짐에 따라 공급하는 진동 에너지가 커지고, 따라서 음압이 커지는 것은 자연스러운 현상이다. 반면에 그림 8과 9에서 PZT의 반경이 작을 때는 연결봉의 반경이 증가함에 따라서 음압이 감소하는 경향이 있으나, 어느 크기 이상의 PZT 반경에서는 도리어 연결봉의 반경이 커질수록 음압도 커진다. 그리고 전반적으로 PZT의 반경과 연결봉의 반경이 일정한 비로 증가했을 때 음압도 이에 비례하여 커지는 것을 알 수가 있다. 이는 연결봉의 반경이 어느 정도까지는 커질수록 PZT에서 발생한 진동 에너지를 Endcap으로 잘 전달하는 기능을 수행하지만, 그 이상의 크기에서는 도리어 진동자인 PZT의 유효 단면적을 지나치게 축소시켜 충분한 에너지 공급이 이루어지지 못하게 하는데 기인한다. 따라서 PZT 반경과 연결봉의 반경은 어느 특정한 비율을 유지하되, 트랜스듀서 전체의 최대 반경 5 mm 이내에서는 둘 다 커질수록 발생 음압을 높이는 데 유리하다고 할 수 있다. 그리고 본 Push-Pull 트랜스듀서의 작동 모드가 기본적으로 길이 방향의 신축 작용에 의한 쉘의 팽창-수축이므로, 반경 요소들의 변화가 길이 요소들만큼 트랜스듀서의 중심주파수를 크게 변화시키지는 않는 것으로 나타났고, 따라서 그림 7 ~ 9의 결과들은 앞 절의 길이 요소들에 비해 보다 명확한 경향성을 보여주었다. 이상의 결과에 의해 각 최적 길이당 가장 적절한 반경 요소들은 다음과 같이 결정되었다.

- (1) 전체 길이 80 mm인 경우: PZT 반경 44 mm, 연결봉 반경 25 mm
- (2) 전체 길이 100 mm인 경우: PZT 반경 44 mm, 연결봉 반경 17 mm
- (3) 전체 길이 120 mm인 경우: PZT 반경 44 mm, 연결봉 반경 29 mm

이들 중 최대 음압을 구현하는 것은 (1)번의 경우이고 이 때 작동 모드도 더 명확히 구현이 되는 것으로 나타났으나, 나머지 경우들도 트랜스듀서의 실제 적용 시 견고성이나 제작성을 고려하여 채택할 수도 있을 것이다.

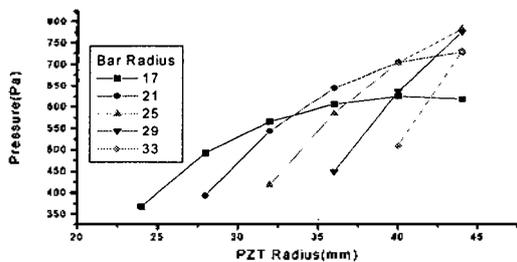


그림 7. 5가지 서로 다른 연결 봉 반경 변화에 따른 PZT 반경에 따른 음압(전체 길이 = 80 mm, 전체 반경 = 50 mm)
Fig. 7. Acoustic pressure vs. PZT radius for five different cases of connecting bar radius (Total length = 80 mm, Total radius = 50 mm).

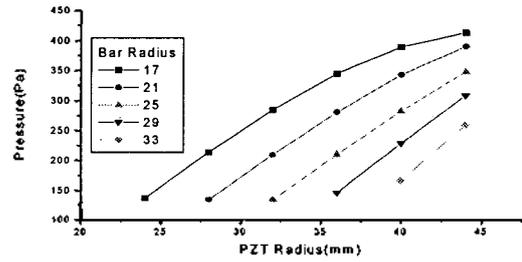


그림 8. 5가지 서로 다른 연결 봉 반경 변화에 따른 PZT 반경에 따른 음압(전체 길이 = 100 mm, 전체 반경 = 50 mm)
Fig. 8. Acoustic pressure vs. PZT radius for five different cases of connecting bar radius (Total length = 100 mm, Total radius = 50 mm).

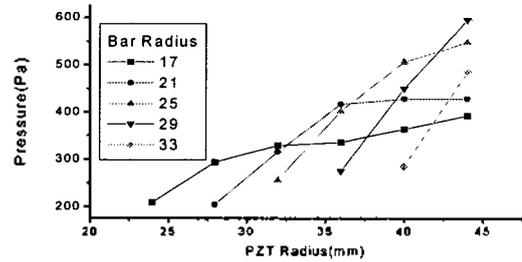


그림 9. 5가지 서로 다른 연결 봉 반경 변화에 따른 PZT 반경에 따른 음압(전체 길이 = 120 mm, 전체 반경 = 50 mm)
Fig. 9. Acoustic pressure vs. PZT radius for five different cases of connecting bar radius (Total length = 120 mm, Total radius = 50 mm).

4.2. 삼각형 Edge형 트랜스듀서

Endcap Edge형상이 삼각형인 경우, 전체 길이가 100 mm, Endcap 길이가 20 mm인 경우를 대표적으로 들어서 앞 절에서와 같은 내부 구조에 변화를 가했을 때 나타나는 음압 변화를 관찰함으로써 Endcap Edge 형상의 영향을 분석하였다. 분석 시 경우의 수는 Edge 형상이 수직일 때와 동일하게 설정하였으며, 대표적인 결과를 그림 10 ~ 11에 나타내었다. 그림 10에서는 PZT의 길이가 증가할수록 음압도 이에 비례하여 커지는 것을 볼 수가 있는데, 이때 수직 Edge의 길이 변화에 대한 음압 변화 보다 좋은 경향을 보이고 있다. 이것은 힘의 전달이 Edge형상이 수직일 때보다는 삼각형일 때가 더 좋을 것을 보여준다.

다음으로는 전체 반경이 13, 30, 40, 그리고 50 mm일 때, 그림 10에서 제일 큰 음압을 내는 PZT 길이가 70 mm인 경우에 대해서 반경 요소의 변화에 대한 음압 변화의 분석 결과를 그림 11에 나타내었고, 수직 Edge에 대한 결과와 비슷한 경향을 보이고 있다. 앞에서와 마찬가지로 PZT의 반경이 증가 할 수록 음압도 증가하는 것을 볼 수가 있고, PZT의 반경이 작을 때는 연결 봉의 반경이 증가함에 따라서 음압이 감소하나, 어느 크기 이상의 PZT 반경에서는 연결 봉의 반경이 커질수록 음압도 커진다. 그리고 PZT 반경과 연결봉의 반경은 어느 특정한 비율을 유지하되, 트랜스듀서 전체의 최대 반경 50 mm이내에서

는 둘 다 커질수록 발생 음압을 높이는데 유리한 것으로 나타났다. 그러나 Edge 형상이 수직일 때에 비해서 전체적인 경향성이 명확하지 않은 것으로 나타났는데, 이는 Edge가 기울어짐으로 인해서 반경 방향의 진동 모드와 길이 방향의 진동 모드간의 결합이 증가하였기 때문으로 판단된다. 그리고 발생 음압의 크기에 있어서는 앞 절의 수직 Edge에 대한 결과와 비교해 향상된 결과를 보였다. 결론적으로 트랜스듀서 내부 Endcap의 Edge 형상은 수직 형태보다는 삼각형이 더 높은 음압을 발생시키는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 이 Edge의 형상으로 삼각형만을 고려하였으나, 반경 방향과 길이 방향간의 진동 모드 결합을 증대시키기 위해서 다양한 곡률 반경을 가지는 만곡형 Edge를 고려할 필요가 있다.

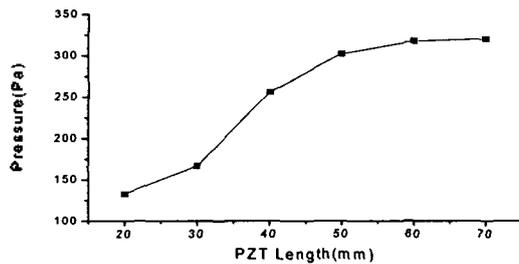


그림 10. PZT 길이 변화에 따른 음압 분포(전체 길이 = 100 mm, Endcap 길이 = 20 mm)
 Fig. 10. Pressure vs PZT length (Total length = 100 mm, Endcap length = 20 mm).

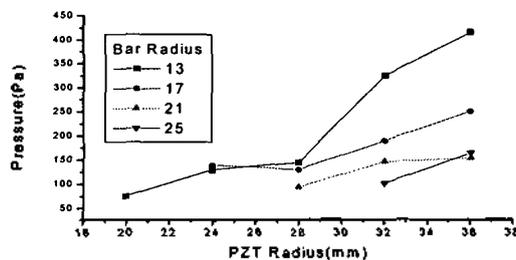


그림 11. 4가지 서로 다른 연결 봉 반경 변화에 따른 PZT 반경에 따른 음압(전체 반경 = 40 mm)
 Fig. 11. Acoustic pressure vs. PZT radius for four different cases of connecting bar radius (Total radius = 40 mm).

4.3. 만곡형 트랜스듀서

Endcap의 형상이 수직, 삼각형 형태의 트랜스듀서에서 나타난 결과에서 Edge 형상이 곡면일수록 힘의 전달이 용이하고 따라서 발생 음압의 크기도 향상시킬 수가 있는 것을 알 수 있었다. Edge의 형상이 더 곡면화 한다면, 이는 셸의 구조적 면에서 Class II Flextensional 트랜스듀서에 유사한 구조로 볼 수가 있다. 그림 12는 Endcap의 끝 부분에서 시작되어진 만곡이 가운데 부분까지 타원형

을 이루는 형태로서, 전체 길이가 80 mm일때 Endcap 길이 20 mm를 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. 트랜스듀서의 나머지 세부적인 규격은 앞에서 구한 최적 규격을 선택하였다. 셸의 반경이 변함에 따라 공진 주파수는 각각 21 kHz, 22 kHz, 23.2 kHz에서 나타났으며, 그중 21 kHz에서 나타나는 음압의 변화는 셸의 반경의 증가에 비례하여 음압이 증가하는 경향을 그림 13에서 볼 수가 있으나, 다른 주파수들에서는 뚜렷한 연관성을 볼 수가 없었다. 이때의 최대 음압은 약 870 Pa에 이르는 것으로 나타났으며, 따라서 앞 절에서 구한 수직 및 삼각형 Edge를 가진 트랜스듀서의 출력보다 훨씬 더 큰 값을 보였다. 결론적으로 Endcap의 Edge 형상이 수직이나 삼각형 일때 보다는 만곡을 가지는 구조가 보다 원활한 반경 방향과 길이 방향간의 진동 모드 결합을 이룬다는 것을 알 수가 있다. 그리고 셸의 곡률 반경은 셸의 길이의 반과 동일하게 두는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

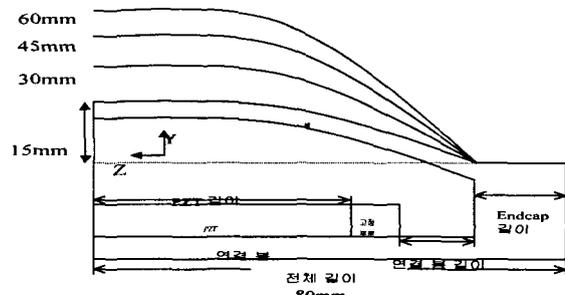


그림 12. 만곡형 트랜스듀서
 Fig. 12. Schematic diagram of round type transducer.

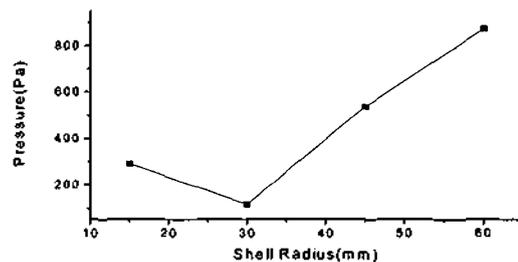


그림 13. 셸 반경 변화에 대한 최대 음압의 변화
 Fig. 13. Pressure vs Shell radius.

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 앞 절의 결

파들과 비교해 보았다. 상용 유한요소 패키지인 ANSYS 를 사용하여 앞 절에서와 동일한 요령으로 모델을 구성 하였으며, 그림 14는 구성된 모델의 개략도를 나타낸다. 해석 대상으로 삼은 기존 트랜스듀서는 중심주파수가 25 kHz 이고 작동시 길이 방향으로 3개의 파장을 발생시키는 형태인데, 그림 15에서 구한 모드 형상은 1.5파장을 보이고 있고, 이 모델이 길이 방향으로 트랜스듀서의 1/2 만을 묘사하고 있다는 점을 고려하면 이 결과는 기존 트랜스듀서의 작동 상태를 적절히 묘사하고 있다고 할 수 있다. 다음으로 이렇게 검증된 모델을 이용하여, 4절에서 수행하였던 것과 동일한 방법으로 트랜스듀서의 반경 방향으로 방사되는 음압의 크기를 조화 분석을 통하여 구 하였고, 그 결과를 그림 16에 보였다. 예상대로 25 kHz 주위에서 큰 음압을 보이는 극대치가 나타났고, 이 극대치를 전후해서 또 다른 극대치들이 몇 개 더 관찰되었다. 트랜스듀서의 기본 공진주파수가 5.1 kHz인 점을 고려하면 이들 극대치들은 기본 모드들의 고차 모드 혹은 길이 방향, 횡방향 모드들의 결합 모드들인 것으로 판단되며, 이들은 트랜스듀서의 효율적인 사용면에서는 바람직하지 않은 것들로서, 향후 연구를 통해 제거해야 할 필요가 있는 것들이다.

그림 16의 결과를 보면 기존 트랜스듀서는 중심 주파수 약 25 kHz에서 최대 260 Pa 정도의 음압을 구현하는 것으로 나타났다. 반면에 본 연구에서 설계한 새로운 구조의 Push-Pull 트랜스듀서는 그림 7에서 약 870 Pa 정도의 음압을 구현할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 최적 설계한 Push-Pull 트랜스듀서는 기존 트랜스듀서에 비해 더 큰 음압을 구현할 수 있는 고출력 트랜스듀서라는 것이 입증되었다. 그리고 이 비교는 단지 출력 음압만을 비교한 것이고, 트랜스듀서의 구조를 비교해 볼 때, 본 연구의 트랜스듀서는 진동자를 단지 한 개만을 이용하는 것이고, 기존 트랜스듀서는 양단에 두개를 사용하는 것이므로, 구조면에서도 본 트랜스듀서가 더 간단하다는 장점을 가지고 있다.

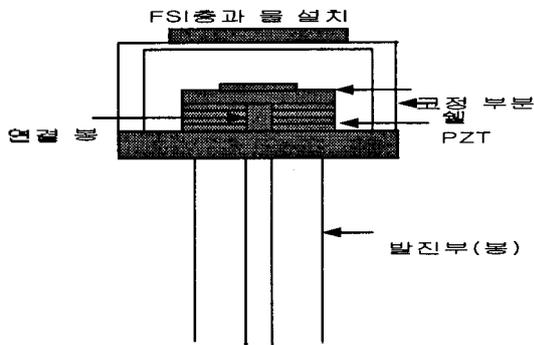


그림 14. 기존의 Push-Pull 트랜스듀서 개략도
Fig. 14. Schematic diagram of a conventional Push-Pull transducer.

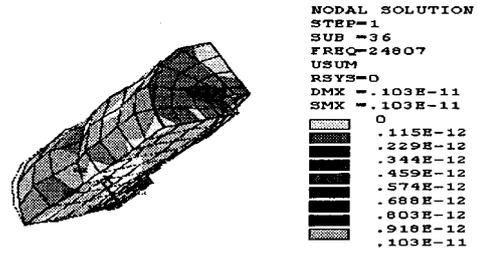


그림 15. 기존의 Push-Pull 트랜스듀서의 모드 해석 결과.
Fig. 15. Modal analysis results of the conventional Push-Pull transducer.

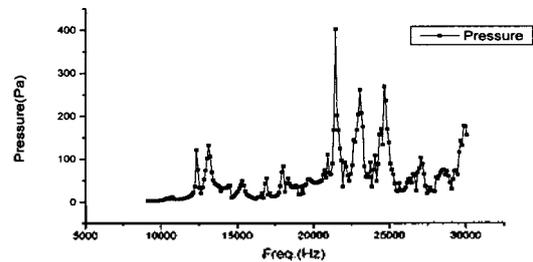


그림 16. 기존 Push-Pull 트랜스듀서의 조화 해석 결과
Fig. 16. Harmonic analysis results of the conventional Push-Pull transducer.

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 설계 하고자 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 고출력 트랜스듀서라는 것이 입증되었다.

참 고 문 헌

1. 이 종락, "초음파와 그 사용법," 세화 출판사, 1판 1997.
2. K. Freirk, Apparatus For Generation And Radiating Ultrasonic Energy. U.S Patent, 4, 537, 511, 1985.
3. M. Walter and D. Weber, Ultrasonic Transducer, U.S Patent, 5, 200, 666, 1991.
4. Crest Ultrasonic Corporation Catalogue, 1999.
5. B. Hamonic O. B. Wilson and J. N. Decarpigny (Eds.) Power Transducers for Sonics and Ultrasonics, pp. 36-40,

Toulon, France, 1990.

6. B. Hamonic and J. N. Decarpigny, Power Sonic and Ultrasonic Transducers Design, pp. 121-133, Lille, France, 1987.

▲ 윤 양 기(Yanggi Yoon)

1998년 2월 : 대구대학교 제어계측과 졸업

1999년 3월~현재 : 경북대학교 센서 공학과(석사 과정)

※ 주관심 분야 : 수중음향

▲ 강 국 진(Kukjin Kang)

1998년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사)

2000년 2월 : 경북대학교 센서공학과 졸업(공학석사)

2000년 3월~현재 : 경북대학교 센서공학과 박사과정
재학중

※ 주관심 분야 : 수중음향, 초음파

▲ 노 용 래(Yongrae Roh)

한국음향학회지 제 19권 2호 참조