한국음향학회지 제38권 제3호 pp. 256~265 (2019)
The Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.38, No.3 (2019)
https://doi.org/10.7776/ASK.2019.38.3.256

pISSN : 1225-4428
eISSN : 2287-3775

심벌 트랜스듀서의 종류별 음향 특성 비교 분석

Comparative analysis of the acoustic characteristics of different types of cymbal transducers

최유지,[1] 심하영,[1] 노용래[1†]

Youji Choi,[1] Hayeong Shim,[1] and Yongrae Roh[1†])

[1]경북대학교 기계공학부

(Received November 21, 2018; accepted May 20, 2019)

초 록: 수중 탐지용으로 사용되는 심벌 트랜스듀서에는 여러 가지 종류가 연구되어져 왔는데, 대표적인 종류로 Moonie 트랜스듀서, 컨벡스 심벌 트랜스듀서, 그리고 컨케이브 심벌 트랜스듀서 등이 있다. 본 연구에서는 수중 광대역 프로젝터용으로 이들 세 종류의 트랜스듀서의 특성을 분석하고 비교하였다. 트랜스듀서의 구조 변수들이 각 트랜스듀서의 음향 특성에 미치는 영향을 분석하고 이를 바탕으로 각 트랜스듀서 종류가 특정 중심주파수를 가지면서 대역폭이 최대가 되는 구조를 도출하였다. 최적화된 구조를 가지는 트랜스듀서들의 성능을 비교한 결과, 컨벡스 심벌 트랜스듀서가 광대역과 고출력, 두 측면에서 모두 가장 우수하다는 것을 확인하였다.
핵심용어: Moonie 트랜스듀서, 컨벡스 심벌 트랜스듀서, 컨케이브 심벌 트랜스듀서, 유한요소해석

ABSTRACT: Several types of cymbal transducers used for underwater detection have been studied. Representative types are Moonie, convex cymbal, and concave cymbal transducers. In this study, we analyzed the characteristics of these three types of transducers for underwater broadband projectors and compared them together. First, the influence of structural variables on the acoustic characteristics of the transducers was analyzed. Based on this, we derived the structure of each transducer type to have a specific center frequency and the maximum bandwidth. As a result of comparing the performance of the optimized transducers, the convex cymbal transducer turned out to be best in terms of both broad bandwidth and high power.
Keywords: Moonie transducer, Convex cymbal transducer, Concave cymbal transducer, Finite element analysis

PACS numbers: 43.30.Yj, 43.38.Fx

I. 서 론

수중 탐지 및 통신용으로 사용되는 플렉스텐셔널 트랜스듀서는 1920년대 처음으로 개발되었는데, 높은 정수압 내에서 작동 가능하고 넓은 대역폭과 높은 출력을 낸다는 장점 때문에 1950년대부터 활발하게 사용되어져 왔다.[1] 플렉스텐셔널 트랜스듀서는 압전 혹은 자기변형의 구동장치와 기계적인 일을 하는 셸로 구성된다. 이 셸은 세라믹의 높은 임피던스, 작은 인장 변형을 낮은 임피던스, 큰 굽힘 변형으로 변환시키는 역할을 한다. 플렉스텐셔널 트랜스듀서는 모양에 따라서 7개의 클래스로 나누어지며, 크기와 무게가 아주 다양하고 사용 가능한 주파수 범위도 300 Hz – 3000 Hz로 아주 넓어서 저주파의 강한 신호를 멀리 보내기 위한 용도로 많이 사용 된다.[2] 한편 심벌 트랜스듀서는 플렉스텐셔널 트랜스듀서 클래스 Ⅴ에서 발전된 것으로 기존의 플렉스텐셔널 트랜스듀서들 보다 매우 작은 크기를 가져 배열에 용이하다. 현재까지 심벌 트랜스듀서에는 여러 가지 종류가 연구되어져 왔는데, 대표적인 예로는 Moonie 트랜스듀서, 컨벡스 심벌 트랜스듀서, 그리고 컨케

†**Corresponding author:** Yongrae Roh (yryong@knu.ac.kr)
School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, 80 Daehakro, Bukgu, Daegu 41566, Republic of Korea
(Tel: 82-53-950-6828, Fax: 82-53-943-8716)
"이 논문은 2018년도한국음향학회 추계 학술대회에서 발표하였던 논문임."

이브 심벌 트랜스듀서 등이 있다.[3-5] Fig. 1과 같이 빈 공간이 달 모양을 닮아 이름 붙여진 Moonie 트랜스듀서는 압전세라믹 디스크의 상하면에 내부가 오목한 금속 캡이 부착된 구조를 가지며 Xu et al.에 의해 개발되었다.[6] 이것은 압전세라믹 원판과 금속 캡 사이에 존재하는 빈 공간을 이용해 큰 힘과 변위를 발생시킨다. Moonie 트랜스듀서는 기존의 플렉스텐셔널 트랜스듀서보다 구조가 간단해서 제작하기 쉽고, 대량생산이 가능하다는 장점을 가진다.[7] Newnham *et al.*은 Moonie 액추에이터의 출력을 향상시키기 위한 다양한 방안에 대해 연구한 바 있다.[8]

하지만 Moonie 트랜스듀서는 빈 공간을 완벽하게 곡면으로 만들기 어렵고 셸의 특정 지점에 응력이 집중된다는 문제가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 Fig. 2와 같이 심벌즈의 형상을 닮은 컨벡스 심벌 트랜스듀서가 개발되었다.[3] 원판형 압전세라믹이 Moonie 트랜스듀서 보다 더 얇은 두께의 볼록한 금속 캡들 사이에 끼여 있는 형상을 가진다. 이 트랜스듀서는 크기에 비해 낮은 중심주파수와 고출력 특성을 가지고 있고 배열형으로 사용될 경우 광대역 특성을 나타내므로 많은 연구들이 수행되었다.[7] Tressler *et al.*은 컨벡스 심벌 트랜스듀서의 치수와 재료 물성이 공진주파수와 커플링 계수에 미치는 영향에 대해 연구하였고,[9] Ochoa *et al.*은 컨벡스 심벌 트랜스듀서의 장단점을 조사하였다.[10] Bejarano *et al.*은 단일 컨벡스 심벌 트랜스듀서의 비대칭성이 여러 개의 공진 모드를 생성시키고 효율을 떨어뜨린다는 것을 증명하고, 금속 링과 볼트가 추가된 새로운 디자인을 제시하기도 했다.[11] Sheng *et al.*은 적층 컨벡스 심벌 트랜스듀서의 설계 방안에 대해,[12] 그리고 Feeney와 Lucas는 다중 공진을 생성하는 방법에 관해 연구하였다.[13] 이와 같이 컨벡스 심벌 트랜스듀서에 관한 많은 연구가 수행되었지만 이 트랜스듀서는 두께가 얇고 볼록한 캡 구조로 인해 통상 200 m 이하의 수심에서만 사용할 수 있다는 단점이 있다.[4] 정수압이 특정 임계값을 초과하면 금속 캡이 영구적으로 변형되어 변위 증폭 효과가 사라진다.

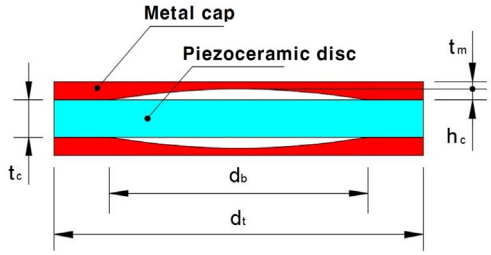

Fig. 1. Schematic structure of the Moonie transducer.

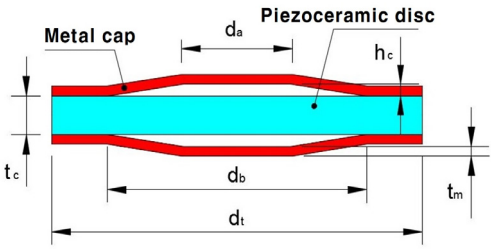

Fig. 2. Schematic structure of the convex cymbal transducer.

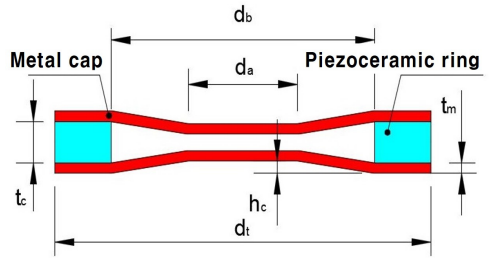

Fig. 3. Schematic structure of the concave cymbal transducer.

Fig. 3에 보인 컨케이브 심벌 트랜스듀서는 컨벡스 심벌 트랜스듀서의 단점을 보완해서 높은 정수압 하에서도 신뢰성 있게 작동시킬 목적으로 개발되었다. 이 트랜스듀서의 금속 캡은 오목한 형상을 가지고, 원판형 대신 고리형 압전세라믹이 사용된다. 오목한 금속 캡 형상으로 인해 수심 200 m 이상의 높은 정수압 환경에서도 사용이 가능하고, 세라믹과 금속 캡의 진동 간에 위상차가 없다는 장점을 가진다.[3,4] Zhang *et al.*은 컨케이브 심벌 트랜스듀서를 단일형과 배열형으로 사용했을 시의 송신전압감도(Transmitting Voltage Response, TVR)를 비교하고,[4] Jenne은 압력과 세라믹 링 두께 변화에 따른 송수신감도를 해석하였다.[14]

이와 같이 1990년대부터 최근까지 여러 분야에 활용하기 위해서 Moonie 트랜스듀서, 컨벡스 심벌 트랜스듀서와 컨케이브 심벌 트랜스듀서 특성에 대한 연구가 지속적으로 수행되어 왔다. 하지만 각 종류에 대한 개별적인 연구만 수행되었을 뿐 세 트랜스

듀서를 동시에 비교 분석하는 연구는 수행된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 최초로 이 세 종류의 심벌 트랜스듀서 특성을 종합적으로 분석하고 비교하여 수중 광대역 프로젝터용으로 가장 적합한 트랜스듀서를 찾고자 하였다. 우선 세 종류의 심벌 트랜스듀서의 기본 구조를 설정한 다음, 각 트랜스듀서별로 구조 변수들이 중심주파수, TVR과 대역폭에 미치는 영향을 유한요소법을 이용하여 분석하였다. 그리고 그 결과에 따라 트랜스듀서 성능에 큰 영향을 미치는 중요 설계 변수들을 도출하였다. 도출된 설계변수들을 사용하여 세 트랜스듀서의 정확한 음향특성 비교를 위해 세 트랜스듀서가 동일한 공진주파수를 가지며 최대의 대역폭을 가지도록 세 트랜스듀서의 구조를 설계하고, 최적설계된 구조를 가지는 세 종류의 트랜스듀서의 음향특성을 비교하였다.

II. 기본 모델 생성 및 분석

Moonie 트랜스듀서, 컨벡스 심벌 트랜스듀서와 컨케이브 심벌 트랜스듀서는 5가지의 구조 변수를 공통적으로 가지고, 컨벡스 심벌 트랜스듀서와 컨케이브 심벌 트랜스듀서는 추가적으로 한 가지 공통 구조변수를 더 가지며,[13,15-18] Figs. 1 ~ 3에 각각 나타내었다. 이들 트랜스듀서의 특성을 해석하기 위한 기본 구조로서 압전세라믹 두께(t_c), 공동 높이(h_c), 공동 아래 직경(d_b)과 총 직경(d_t)은 모두 동일한 치수를 가지도록 하였다. Moonie 트랜스듀서는 금속 캡의 두께가 일정하지 않으므로 캡의 가장 얇은 부분 두께를 금속 캡 두께(t_m)로 설정하고, 그 치수를 나머지 트랜스듀서의 금속 캡 두께(t_m)와 일치시켰다. 컨벡스 심벌 트랜스듀서와 컨케이브 심벌 트랜스듀서가 가지는 빈 공간의 맨 위 직경을 공동 위 직경(d_a)이라고 지정하였다. Moonie 트랜스듀서는 빈 공간이 타원형이기 때문에 공동 위 직경(d_a)이 존재하지 않는다. 다음으로 References [12]와 [15-18]을 참고하고 시행착오적 사전해석을 통해 공통의 중심주파수(f_0)를 가지는 각 트랜스듀서의 기본 치수를 찾아내었고, 그 값을 Table 1에 나타내었다.

트랜스듀서들의 금속 캡 재료로는 황동, 압전세라믹 재료로는 PZT-5A를 사용하였다. PZT-5A는 소프트 계열의 압전세라믹의 대표적인 재료로서 물성은 References [19]를 참고하였다. 이들 기본 치수를 가지는 트랜스듀서들의 특성을 분석하기 위해 Figs. 1 ~ 3과 같은 2D 축대칭 유한요소해석 모델을 생성하여 각 트랜스듀서의 TVR을 계산하였다. 해석 도구로는 상용 프로그램인 PZFlex®를 사용하였다. 각 트랜스듀서 모델의 상하좌우로 원거리 음장 조건을 충분히

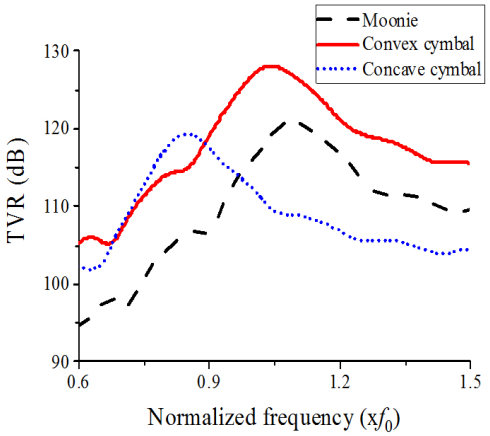

Fig. 4. TVR spectra of the three types of cymbal transducers.

Table 1. Basic dimensions of the three cymbal transducers.

Base diameter (mm)	Apex diameter (mm)	Total diameter (mm)	Cavity height (mm)	Cap thickness (mm)	PZT thickness (mm)
d_b	d_a	d_t	h_c	t_m	t_c
14.0	6.0	20.0	0.6	0.5	2.0

Table 2. Acoustic characteristics of the three basic cymbal transducers.

Transducer type	Center frequency (xf0)	Peak TVR (dB re 1μPa/V @ 1 m)	Fractional bandwidth (%)
Moonie	1.1	120.9	14.0
Convex cymbal	1.0	128.0	15.7
Concave cymbal	0.9	119.3	15.8

만족하는 크기의 물을 설치하였다. 이때 물의 경계면에서는 음파의 반사가 일어나지 않도록 흡수 경계조건을 설정하였다. Fig. 4는 이 모델들을 사용한 유한요소해석을 통해 구한 TVR 스펙트럼인데, 세 유형의 심벌 트랜스듀서들의 TVR을 중심주파수(f_0)에 정규화해서 보인 그래프이다. 본 연구에서는 광대역 송신용 트랜스듀서의 설계가 목적이므로, 트랜스듀서의 송신특성으로 최대 TVR, 중심주파수, 대역폭을 분석하였다. 이때 중심주파수는 TVR이 최대가 되는 주파수 값이다. 세 트랜스듀서에 대한 이들 특성의 정량적인 값은 Table 2에 정리하였다. 비대역폭은 최대 TVR 값에서 -3 dB 만큼 낮은 TVR을 보이는 주파수 대역폭을 중심주파수로 나누어 백분율로 나타낸 값이다.

그러나 Table 2의 값들은 기본 모델들의 중심주파수가 완전히 일치하지 않아 이 상태로 이 모델들의 음향 특성을 서로 비교하는 것은 정확하지 않다. 따라서 다음 절에서 최적화 과정을 거쳐 트랜스듀서들이 동일한 중심주파수를 가지도록 설계한 후, 그때의 음향 특성을 비교한다.

III. 트랜스듀서 성능에 미치는 구조 변수 영향

광대역 송신 트랜스듀서의 설계를 위해서 우선 구조 변수가 각 심벌 트랜스듀서에 미치는 영향을 분석하였다. 변수들의 영향을 보기 위해 Table 1에 보인 6개의 구조 변수들 중 트랜스듀서 전체 직경(d_t), 금속 캡 두께(t_m)와 압전세라믹 두께(t_c)는 기본 치수를 기준으로 5 %, 10 %씩 증감시켰다. 공동 아래 직경(d_b)은 기본 치수를 기준으로 10 %, 20 %씩 증감시켰고, 공동 위 직경(d_a)은 기본 치수를 기준으로 15 %, 30 %씩 증감시켰다. 공동 높이(h_c)는 기본 치수를 기준으로 25 %, 50 % 증감시켰다. 트랜스듀서의 음향 특성으로는 기본 모델과 동일하게 정규화된 중심주파수, 최대 TVR, -3 dB 대역폭을 분석하였다. 특정 구조 변수의 영향을 파악하기 위한 해석에서 그 구조 변수를 제외한 나머지 변수들은 일정한 값으로 유지하였고, 특히 컨케이브 심벌 트랜스듀서는 압전세라믹이 고리 형태이므로 부피를 일정하게 유지시키면서 변수 값을 변화시켰다.

Fig. 5는 위 6가지 구조 변수에 따른 트랜스듀서들의 중심주파수 변화를 나타낸다. 세 종류의 심벌 트랜스듀서 모두 중심주파수의 변화 경향성이 유사하다. 6개의 구조 변수 중에서 특히 d_b의 영향이 큰데, d_b가 증가함에 따라 금속 캡의 기울기가 완만해지고 따라서 트랜스듀서 전체 강성이 감소하여 중심주파수가 매우 크게 감소한다. d_b와 반대로 h_c가 증가할수록 트랜스듀서의 전체 강성이 증가하기 때문에 중심주파수는 증가한다. t_m은 증가함에 따라 강성이 증가하므로 중심주파수 또한 증가한다. 따라서 금속 캡과 압전세라믹 사이의 빈 공간의 형상과 금속 캡의 두께가 중심주파수에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 이에 반해, d_a, d_t 그리고 t_c는 중심주파수에 별 영향을 미치지 않는다. 따라서 빈 공간의 윗부분을 결정하는 기울기나 접착되는 직경은 중심주파수와 크게 상관없음을 알 수 있다. 그러므로 심벌 트랜스듀서의 중심주파수는 공동의 치수, 특히 d_b를 제어함으로써 효과적인 결과를 얻을 수 있다.

Fig. 6은 구조 변수의 변화에 따른 트랜스듀서 최대 TVR의 변화를 나타낸다. d_a, h_c, t_m, 그리고 t_c에서 세 트랜스듀서 모두 유사한 경향이 나타난다. d_a와 t_m은 고려되는 치수 변화 범위 내에서 TVR에 미치는 영향을 거의 무시할 수 있다. h_c를 증가시키고 t_c를 최대한 감소시키면 향상된 TVR을 얻을 수 있다. 압전세라믹에 걸어주는 전압은 일정하므로 t_c가 증가할수록 변형량이 감소하고 따라서 TVR이 감소하게 된다. d_b와 d_t의 영향에서는 트랜스듀서마다 다른 경향성을 보인다. d_b에 대해서 Moonie 트랜스듀서의 TVR만 증가하는 이유는, Moonie 트랜스듀서는 금속 캡의 두께가 일정하지 않아서 d_b를 증가시킬수록 t_m이 얇아져서 더 큰 변형과 출력이 나타나기 때문이다. 반대로 컨벡스 심벌 트랜스듀서와 컨케이브 심벌 트랜스듀서의 최대 TVR은 감소하는 경향을 나타낸다. 이로부터 d_t에서 d_b를 뺀 길이, 즉 금속 캡과 압전세라믹이 접착되는 부분의 길이가 출력에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다. d_b와 반대로 d_t를 늘리면 금속 캡과 압전세라믹이 접착되는 길이가 늘어나 최대 TVR이 증가할 것임을 예상할 수 있다. 따라서 d_t가 증가함에 따라 컨벡스 심벌 트랜스듀서와 컨케이브

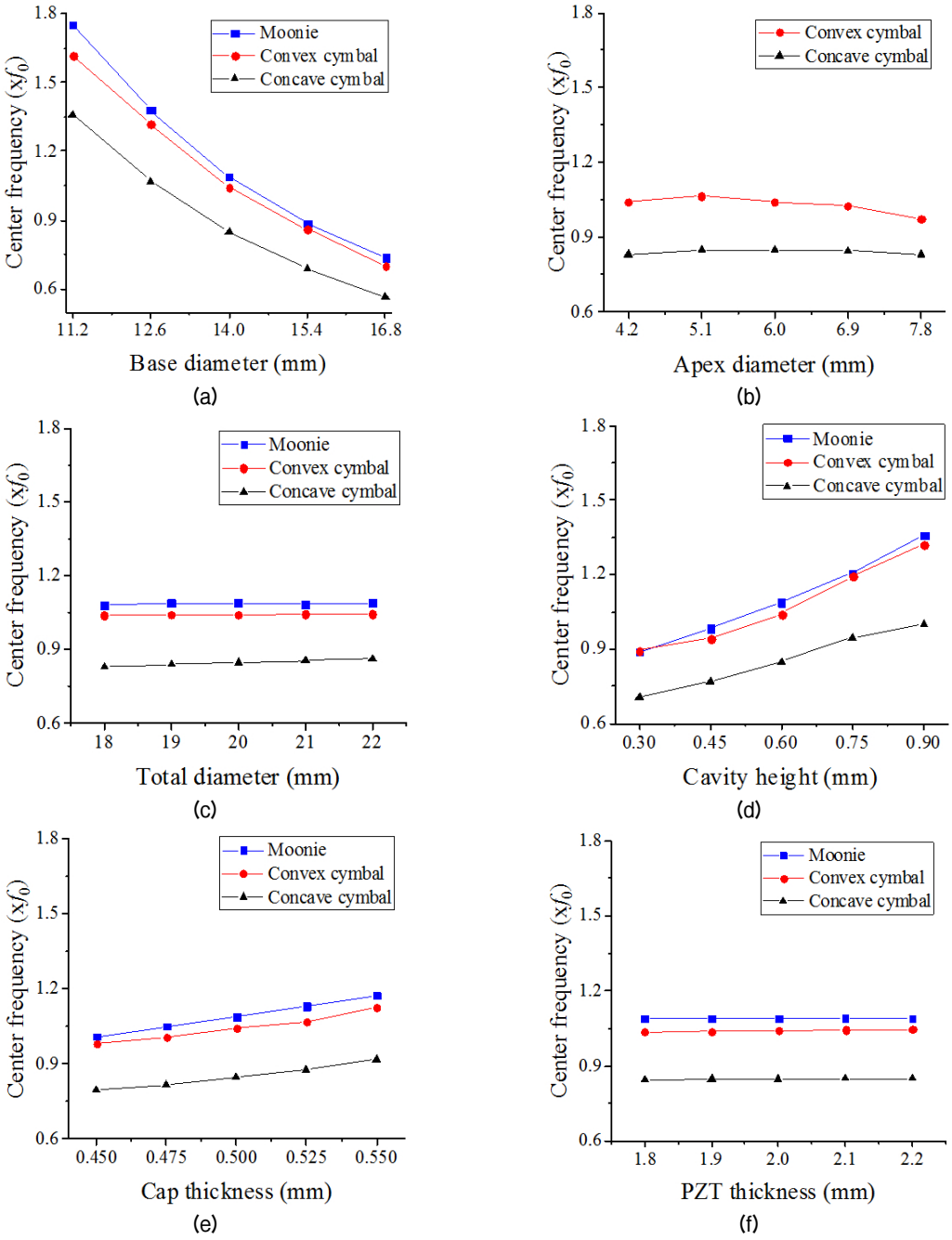

Fig. 5. Analysis of the effect of the structural variables on the center frequency of the cymbal transducers : (a) base diameter (d_b), (b) apex diameter (d_a), (c) total diameter (d_t), (d) cavity height (h_c), (e) cap thickness (t_m), (f) PZT thickness (t_c).

심벌 트랜스듀서의 최대 TVR이 증가하는 경향을 나타냈다. 하지만 Moonie 트랜스듀서의 TVR은 감소하는 경향을 띠는데, 이는 d_t가 늘어남에 따라 금속 캡의 평균적인 두께가 증가해서 출력을 떨어뜨리는 요인이 되기 때문이다. 또한 세 트랜스듀서 중 d_t의 영향을 가장 덜 받는 트랜스듀서는 컨벡스 심벌 트랜스듀서임을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 구조 변수의 변화에 따른 트랜스듀서 대역폭의 변화를 나타낸다. d_t를 제외한 나머지 변수들의 영향은 세 트랜스듀서 모두 유사하고, 중심주파

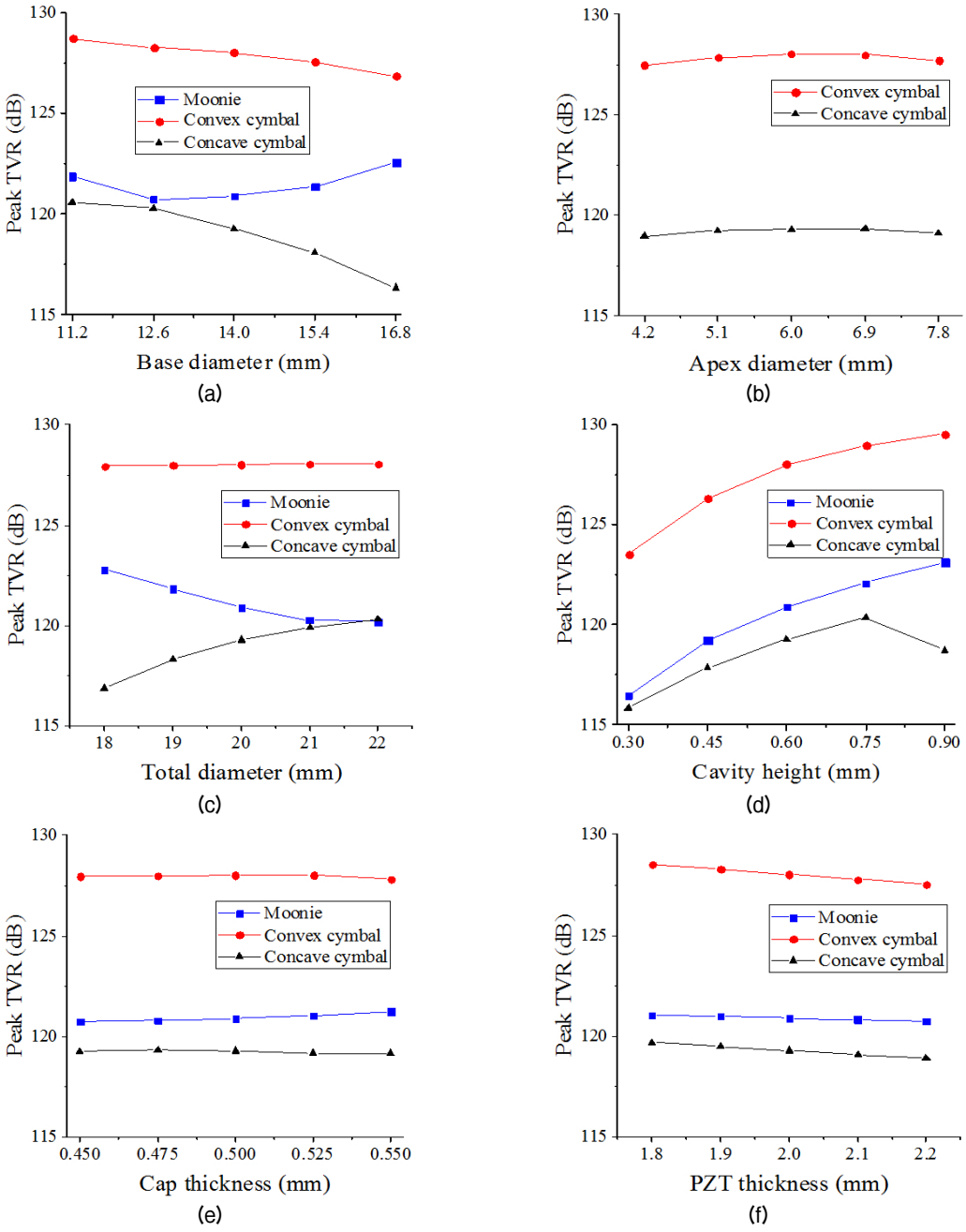

Fig. 6. Analysis of the effect of the structural variables on the peak TVR of the cymbal transducers : (a) base diameter (d_b), (b) apex diameter (d_a), (c) total diameter (d_t), (d) cavity height (h_c), (e) cap thickness (t_m) (f) PZT thickness (t_c).

수에 대한 영향을 보이는 그래프와도 개형이 비슷하다. 대역폭에 큰 영향을 미치는 구조 변수는 d_b와 h_c다. d_b가 증가할수록 빈 공간의 부피가 커져 전체적인 강성이 낮아지고 잔류진동 시간이 증가하여 대역폭이 크게 감소한다. 반면에 h_c를 증가시킬수록 강성이 커지고 잔류진동이 감소하므로 대역폭은 크게 증가한다. t_m은 대역폭과 비례하는 경향성 띤다. t_c 영향은 해석에서 고려된 치수 변화 범위 내에서 거의 무시할 수 있다. d_t가 증가하면 Moonie 트랜스듀서와 컨케이브 심벌 트랜스듀서의 대역폭은 증가하나, 컨벡스 심벌 트랜스듀서의 대역폭은 감소하는 경향을 나타낸다. 하지만 컨벡스 심벌 트랜스듀서의 대역폭

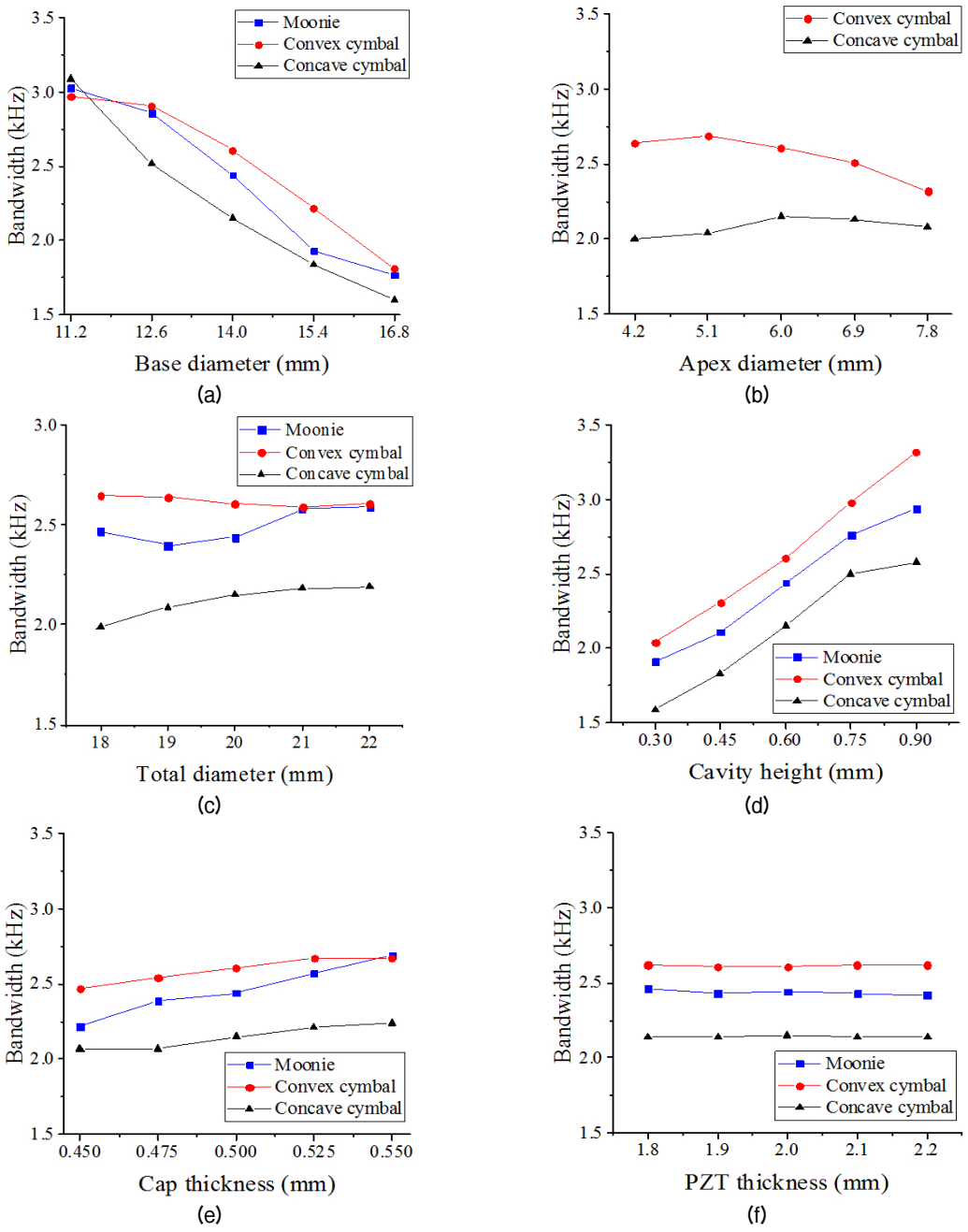

Fig. 7. Analysis of the effect of the structural variables on the bandwidth of the cymbal transducers : (a) base diameter (d_b), (b) apex diameter (d_a), (c) total diameter (d_t), (d) cavity height (h_c), (e) cap thickness (t_m) (f) PZT thickness (t_c).

변화 범위가 작기 때문에 고려된 치수 변화 범위 내에서 무시할 수 있다. 결론적으로 d_b, h_c, t_m을 잘 조절한다면 특정 중심주파수에서 고출력을 내고 광대역인 트랜스듀서를 설계할 수 있다.

IV. 광대역 트랜스듀서 구조 설계

세 트랜스듀서의 기본 모델은 각 트랜스듀서의 중심주파수가 조금씩 달라 성능의 정확한 비교가 불가능하기 때문에, 중심주파수를 일치시킬 필요가 있다.

본 절에서는 세 트랜스듀서들에 대해 동일한 중심주파수를 가지면서 최대 대역폭을 갖는 구조를 설계하였다.

Target function : Maximize bandwidth

$$\text{Subject to } 0.99 \le \text{Normalized center frequency } (x/0) \le 1.01 \quad (1)$$
$$\text{Peak TVR} \ge 122 \text{ dB},$$

최적화 목적 함수는 Eq. (1)과 같이 대역폭을 최대화하는 것이다. 제한조건은 두 가지로, 중심주파수가 기본 값(f_0)을 기준으로 0.99f_0 이상 1.01f_0 이하의 범위에 드는 것과 References [7]을 참고하여 심벌 트랜스듀서의 피크 TVR값이 수중 광대역 트랜스듀서로 쓰기 위해 요구되는 최소값인 122 dB 이상이 되는 것이다. 최적화 설계 변수는 세 가지로, 3절에서 도출한 공동 아래 직경(d_b), 공동 위 직경(d_a), 공동 높이(h_c)이다. 차후 실제 제작할 때의 여건을 고려하여 금속 캡 두께(t_m)와 압전세라믹 두께(t_c)는 일정 값으로 고정시켰다. 트랜스듀서 전체 직경(d_t) 또한 금속 캡과 압전세라믹의 접착 부분 폭을 6 mm로 일정하게 유지하기 위해 d_b 변화에 따라 함께 변한다고 설정하여 설계 변수에 포함시키지 않았다. 그리고 최적화 설계 변수의 변화 범위는 Table 3과 같이 설정하였다. 최적 설계를 위한 표본은 3^k 요인 배치법과 Box-Behnken 법을 이용하여 선정하였고, 유한요소해석을 통해 각 표본 모델의 음향 특성을 분석하였다.[20,21] Moonie 트랜스듀서는 9가지의 경우, 컨벡스 심벌 트랜스듀서와 컨케이브 심벌 트랜스듀서는 총 17가지 경우의 표본으로 다중 회귀분석을 이용하여 2차 회귀방정식을 도출하였다.[22] 도출된 회귀방정식과 최적화 알고리즘인 OQ-NLP 알고리즘을 이용하여 Eq. (1)의 제한조건을 만족시키면서 대역폭을 최대화시키는 d_b, d_a 그리고 h_c의 최적 조합을 도출하였다. 여기서 OQ-NLP (OptQuest-Nonlinear Programming) 알고리즘은 다변수 비선형문제에서 광역 최소점을 찾아내는 Multistart 휴리스틱 알고리즘이다.[23] 세 트랜스듀서의 최적화된 설계 변수 값들을 Table 4에 나타내었다.

세 트랜스듀서 모두 h_c와 d_b가 기본 치수에 비해 최적화 치수가 증가한 것으로 보아 h_c와 d_b는 클수록 대역폭을 넓히는 데에 긍정적으로 기여한다고 볼 수 있다. 이에 반해 d_a의 최적 치수는 기본 치수에 비해 감소하였고 최적화 전후 치수의 차이가 컨벡스 심벌 트랜스듀서는 1.3 mm, 컨케이브 심벌 트랜스듀서는 0.2 mm로, 컨케이브 심벌 트랜스듀서에는 d_a가 크게 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있다. h_c와 d_a는 앞서 구한 경향과 잘 일치하게 증가하고 감소했지만 d_b에 대해서는 앞선 경향에 따르면 세 트랜스듀서 모두 감소해야 하는데 증가하였다. 그 이유는 d_b가 중심주파수에 큰 영향을 미치는데 중심주파수가 제한조건으로 작용하였기 때문이다. 결론적으로 제한조건 내에서 d_b와 h_c는 최대한 증가시키고 d_a는 감소시키면 광대역 특성을 가지는 트랜스듀서를 설계할 수 있다. 최적화된 세 트랜스듀서들의 TVR 스펙트럼을 Fig. 8에, 그리고 정량적인 음향특성 값을 Table 5에 나타내었다.

최적 설계된 세 트랜스듀서의 비대역폭은 기본 모델에 비해 모두 증가하였으며, 최대 TVR 또한 증가

Table 3. Variation range of the design variables.

Variation range	Base diameter d_b (mm)	Apex diameter d_a (mm)	Cavity height h_c (mm)
Miminum	11.2	4.2	0.3
Basic	14.0	6.0	0.6
Maximum	16.8	7.8	0.9

Table 4. Optimized dimensions of the three cymbal transducers.

Transducer type	Base diameter d_b (mm)	Apex diameter d_a (mm)	Cavity height h_c (mm)
Moonie	15.4	-	0.8
Convex cymbal	15.7	4.7	0.9
Concave cymbal	14.1	5.8	0.9

Table 5. Acoustic characteristics of the three optimized cymbal transducers.

Transducer type	Center frequency (xf0)	Peak TVR (dB re 1μPa/V @ 1 m)	Fractional bandwidth (%)
Moonie	1.0	122.4	14.6
Convex cymbal	1.0	129.2	17.5
Concave cymbal	1.0	121.0	17.4

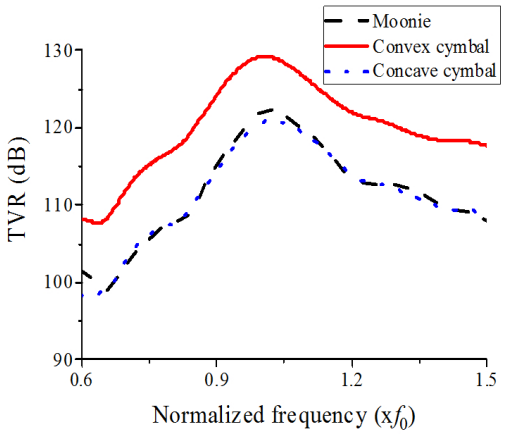

Fig. 8. TVR spectra of the three optimized cymbal transducers.

하였다. 따라서 OQ-NLP 알고리즘을 이용한 최적 설계가 잘 수행된 것을 확인할 수 있다. Table 5를 보면 세 트랜스듀서 중에서 컨벡스 심벌 트랜스듀서의 비대역폭이 17.5 %로 가장 높다. 컨케이브 심벌 트랜스듀서의 비대역폭은 컨벡스 심벌 트랜스듀서와 0.1 %의 근소한 차이를 가지지만 TVR이 8.2 dB나 더 낮은 121 dB이기 때문에 설계 제한조건인 122 dB 이상 이어야 한다는 조건을 충족시키지 못하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 세 트랜스듀서 중 컨벡스 심벌 트랜스듀서가 대역폭과 출력 면에서 가장 높은 값을 가져서 광대역과 고출력에서 모두 우수하다고 할 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 심벌 트랜스듀서의 세 가지 종류인 Moonie 트랜스듀서, 컨벡스 심벌 트랜스듀서와 컨케이브 심벌 트랜스듀서의 성능을 비교하여 수중탐지용 광대역 송신 트랜스듀서로 가장 적합한 종류를 선정하고자 하였다. 우선 세 종류의 심벌 트랜스듀서의 기본 구조를 설정한 다음, 각 트랜스듀서별로 구조 변수들이 중심주파수, TVR과 대역폭에 미치는 영향을 유한요소법을 이용하여 분석하였다. 그 후 세 트랜스듀서의 정확한 음향특성 비교를 위해 세 트랜스듀서가 동일한 공진주파수를 가지며 광대역 특성을 가지도록 세 트랜스듀서의 최적 구조를 도출하였다. 마지막으로 수중 광대역 프로젝터로 가장 적합한 트랜스듀서를 찾기 위해 최적구조를 가지는 세 종류의 트랜스듀서의 음향특성을 비교하였다. 그 결과 컨벡스 심벌 트랜스듀서의 비대역폭이 가장 높았으며 최대 TVR 또한 가장 높아 광대역 송신 트랜스듀서로 가장 우수하다는 것을 확인하였다. 본 연구의 결과는 향후 초광대역 특성을 가지는 배열형 심벌 트랜스듀서 설계에 활용될 것이다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었음(계약번호 UD170023DD).

References

1. K. D. Rolt, “History of the flextensional electroacoustic transducers,” J. Acoust. Soc. Am. **87**, 1340-1349 (1990).
2. W. J. Hughes, *Transducers, Underwater Acoustic* (Digital Encyclopedia of Applied Physics, Germany, 2003), pp. 76-77.
3. A. Dogan, K. Uchino, and R. E. Newnham, “Composite piezoelectric transducer with truncated conical endcaps cymbal,” IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, **44**, 597-605 (1997).
4. J. Zhang, W. J. Hughes, A. C. Hladky-Hennion, and R. E. Newnham, “Concave cymbal transducers,” Mat. Res. Innovat. **2**, 252-255 (1999).
5. J. F. Tressler and R. E. Newnham, “Doubly resonant cymbal-type transducers,” IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, **44**, 1175-1177 (1997).
6. Q. C. Xu, S. Yoshikawa, J. R. Belsick, and R. E. Newnham, “Piezoelectric composites with high sensitivity and high capacitance for use at high pressures,”

IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, **38**, 634-639 (1991).
7. J. Zhang, W. J. Hughes, P. Bouchilloux, Jr., R. J. Meyer, K. Uchino, and R. E. Newnham, "A class V flextensional transducer: the cymbal," Ultrasonics, **37**, 387-393 (1999).
8. R. E. Newnham, A. Dogan, Q. C. Xu, K. Onitsuka, J. F. Tressler, and S. Yoshikawa, "Flextensional Moonie actuators," Proc. IEEE Ultrason. Symp. 509-513 (1993).
9. J. F. Tressler, W. Cao, K. Uchino, and R. E. Newnham, "Ceramic-metal composite transducers for underwater acoustic applications," Proc. 10th IEEE Int. Symp. Appl. Ferroelectr. 561-564 (1996).
10. P. Ochoa, J. L. Pons, M. Villegas, and J. F. Fernandez, "Advantages and limitations of cymbals for sensor and actuator applications," Sens. Actuators A: Phys. **132**, 63-69 (2006).
11. F. Bejarano, A. Feeney, and M. Lucas, "A cymbal transducer for power ultrasonics applications," Sens. Actuators A: Phys. **210**, 182-189 (2014).
12. W. Sheng, Z. Tiemin, Z. Jiantao, and Y. Xiuli, "Optimal design of cymbal stack transducer in a piezoelectric linear actuator by finite element method," Enrg. Harv. Sys. **2**, 169-176 (2015).
13. A. Feeney and M. Lucas, "A comparison of two configurations for a dual-resonance cymbal transducer," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, **65**, 489-496 (2018).
14. K. E. Jenne, *Acoustic Cymbal Transducers-design, Hydrostatic Pressure Compensation, and Acoustic Performance*, (M. S. thesis, Naval Postgraduate School, 2004).
15. A. Dogan, S. Yoshikawa, K. Uchino, and R. E. Newnham, "The effect of geometry on the characteristics of the Moonie transducer and reliability issue," Proc. IEEE Ultrason. Symp. 935-939 (1994).
16. R. E. Newnham, A. Dogan, D. C. Markley, J. F. Tressler, J. Zhang, E. Uzgur, R. J. Meyer, Jr., A. C. Hladky-Hennion, and W. J. Hughes. "Size effects in capped ceramic underwater sound projectors," Proc. OCEANS'02, 2315-2321 (2002).
17. A. Dogan, E. Uzgur, D. C. Markley, R. J. Meyer, Jr., A. C. Hladky-Hennion, and R. E. Newnham "Materials for high performance cymbal transducers," J. Electroceram. **13**, 403-407 (2004).
18. A. Dogan and E. Uzgur, "Size and material effects on cymbal transducer for actuator applications," Ferroelectrics, **331**, 53-63 (2006).
19. J. L. Butler and C. H. Sherman, *Transducers and Arrays for Underwater Sound* (Springer, Switzerland, 2016), pp. 552.
20. D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments* (John Wiley & Sons, New Jersey, 2017), pp. 405-408.
21. S. L. Ferreira, R.E. Bruns, H. S. Ferreira, G. D. Matos, J. M. David, G. C. Brandao, E. G. da Silva, L. A. portugal, P. S. dos Reis, A. S. Souza, and W. N. L. dos Santos, "Box-Behnken design: an alternative for the optimization of analytical methods," Anal. Chim. Acta. **597**, 179-186 (2007).
22. H. Kim, Y. Lim, and Y. Roh, "Study on the wideband Tonpilz transducer with a cavity-type head mass" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **33**, 94-101 (2014).
23. Z. Ugray, L. Lasdon, J. Plummer, F. Glover, J. Kelly, and R. Martí, "Scatter search and local NLP solvers: A multistart framework for global optimization," INFORMS J. Comput. **19**, 328-340 (2007).

저자 약력

▸ 최 유 지 (Youji Choi)

2014 3월 ~ 현재: 경북대학교 기계공학부 학사 과정

▸ 심 하 영 (Hayeong Shim)

2013 3월: 경북대학교 기계공학부 학사
2017 3월 ~ 현재: 경북대학교 기계공학부 석사 과정

▸ 노 용 래 (Yongrae Roh)

1984년 2월: 서울대학교 자원공학과(공학사)
1986년 2월: 서울대학교 자원공학과(공학석사)
1990년 5월: 미국 펜실베니아주립대학교 (공학박사)
1990년 5월 ~ 1994년 2월: 포항산업과학연구원 선임연구원
1994년 3월 ~ 현재: 경북대학교 기계공학부 교수
<관심분야> 음향/초음파 트랜스듀서, 압전 Device, 전자재료, 파동해석