한국해양공학회지 제22권 제2호, pp 65-71, 2008년 4월 (ISSN 1225-0767)

1-3형 압전 복합체를 이용한 광대역 수중 통신용 음향 트랜스듀서에 관한 연구

이경우* · 소형종* · 임실묵** · 김원호*** · 조운현***
*경원 훼라이트공업(주) 부설 연구소
**한국산업기술대학교 신소재공학과
***국방과학연구소 6기술본부

A Study of a Wideband Acoustic Transducer for Underwater Communication Using 1-3 Type Piezoelectric Transducer

KYUNG-WOO LEE*, HYOUNG-JONG SO*, SIL-MOOK LIM**, WON-HO KIM*** AND WUN-HYUN CHO***

*Kyungwon Ferrite Ind. Co., Ltd., Shihung, Korea
**Korea Polytechnic University, Shihung, Korea
***Agency of Defence and Development, Jienhea, Korea

KEY WORDS : Acoustic transducer 음향센서, Wide band 광대역, Underwater communication 수중 통신, Piezoelectric composite 압전복합체, Transmission loss 전송손실

ABSTRACT: *Recently, many researches in relation to data transmission with faster speed and greater volume, many researches have been carried out on sonar systems for underwater communication. According to these researches, an acoustic transducer for underwater communication requires wide bandwidth properties. In domestic researches for underwater communication sonar, an operating frequency in the range of 20~40 kHz is used. In this paper, we propose anon-resonance type acoustic transducer for underwater communication. The TVR (transmitting voltage response) characteristics increased linearly as the frequency increased, and the RVS (receiving voltage sensitivity) characteristics were constant as the frequency increased. Traditional techniques for wide bandwidth transducershave a limit and a transmission loss difference at lower and higher frequency operating ranges. In this paper, the new transducer proposed decreased the transmission loss under some conditions. It was optimized with the FE analysis tool (ATILA) and evaluated using the TVR and the RVS characteristics in the range of 10~90 kHz. The value of TVR was 138 dB at 20 kHz and 148 dB at 40 kHz, and the differences was 12 dB. The value of RVS was 195±2 dB and nearly constant. From theseresults, it is certain that the developed transducers can be used for an underwater communication network in the 1.3 km range with both a 20 kHz bandwidth and 30 kHz center frequency.*

1. 서 론

최근의 수중 통신 시스템에 있어서 수중 통신 기술의 발달로 인하여 보다 멀리, 보다 빠른 속도로 많은 양의 정보량을 전송하기 위해 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 수중 통신용 트랜스듀서는 수중통신의 신호전송방식이 FSK(Frequency shift keying)에서 PSK(Phase shift keying)로 변화해 가면서 송수신특성의 광대역화가 요구되어지고 있다(임용곤 등, 2003).

이러한 음향 트랜스듀서는 기계 공진 모드를 이용하여 높은 전기 기계 변환 효율을 가지며 좁은 주파수 대역에서 높은 음압을 발생시키는 공진형 음향트랜스듀서와 전기-기계 변환 효율은 낮지만 넓은 주파수 대역폭은 확보하기 위해 공진영역 이외의 영역을 사용하는 비공진형으로 구분이 된다. 전통적으로 사용되어 왔던 송신용 음향 트랜스듀서에는 공진형 방식이, 수신용 음향 트랜스듀서에는 비공진형 방식이 주로 사용되었다. 그러나 종래의 송신용 음향 트랜스듀서의 주파수 대역폭은 음향센서의 구조적인 문제로 인하여 제한된다. 이러한 단점을 극복하기 위해 음향창의 다단매칭 기법, 비대칭 구조를 이용한 다수개의 공진모드 생성기법, 밴딩모드 생성기법등이 연구되어 오고 있다(Lee et al., 2004; Butler, 2002; Stansfield, 2003). 하지만 이러한 광대역 기법의 적용에도 불구하고 공진형 수중 음향 트랜스듀서의 주파수 대역폭은 현재의 수중 통신에서 요구하는 10kHz 이상의 대역폭을 만족시키기에는 여전히 부족하다. 또한 넓은 주파수 범위의 음원을 사용하는 경우, 사용 주파수 대역내에서의 주파수 차이는 주파수에 따른 전달 손실의 차이를 발생시켜 궁극적으로 수중 통신 시스템의 성능을 저하시키는 요인이 된다.

본 연구에서는 이러한 공진형 광대역 음향 트랜스듀서의 단점을 보완하기 위해 1-3형 압전 복합체를 이용하여 주파수에 증가에 따라 송신전압감도가 선형적으로 증가하고, 수신 전압감도는 주파수에 변화에 대해서 일정한 크기를 가지는 비공진

교신저자 이경우: 경기도 시흥시 정왕동 1260-5
031-433-5501 kwlee@kwfi.co.kr

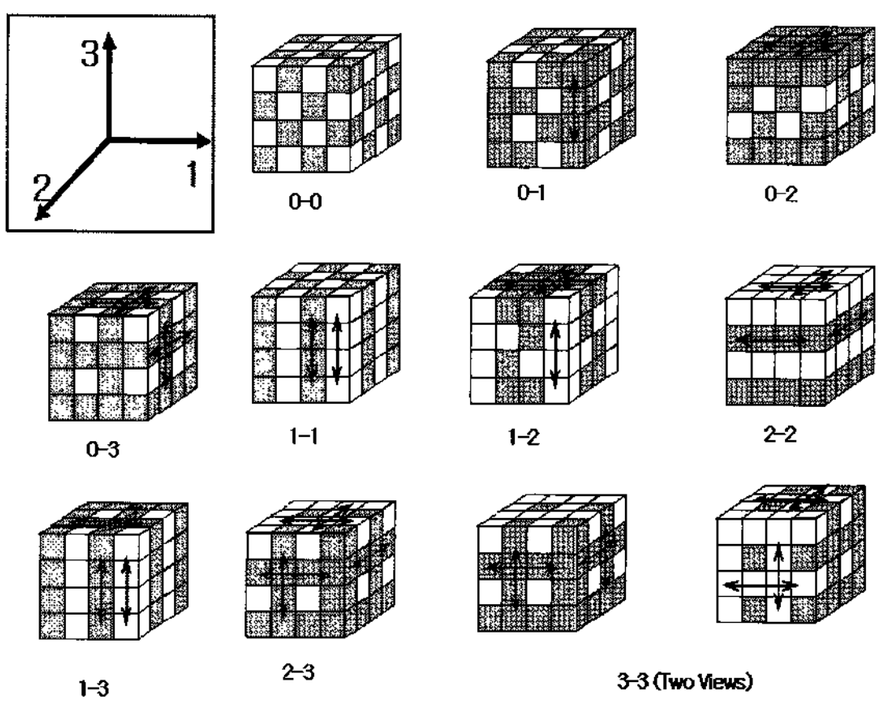
형 수중 음향 트랜스듀서를 개발하였다. 또한 개발된 수중 음향트랜스듀서를 수중 통신용 트랜스듀서로 이용하기 위한 적용 가능성을 검토하였다.

2. 이론적 고찰

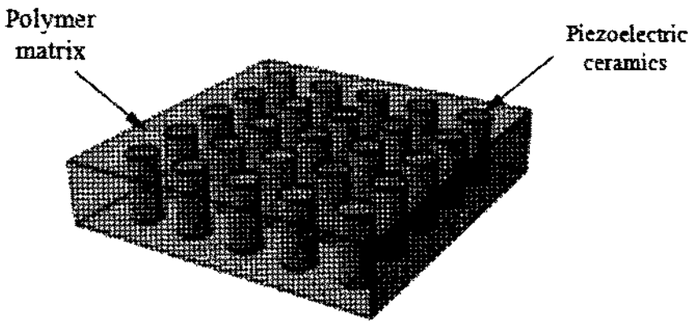
2.1 1-3형 압전 복합체 음향트랜스듀서 설계 이론

압전 복합체는 압전 세라믹과 폴리머로 구성되는 구조로 각 동질상의 연결 형태에 따라서 Fig. 1의 (a)와 같이 10종의 구조로 나뉜다. 10종의 구조 중 Fig. 1의 (b)와 같이 압전세라믹이 하나의 연결도와 폴리머가 세 방향의 연결도를 가지는 압전 복합체가 1-3형 압전 복합체이다. 압전세라믹 주위에 폴리머 복합체가 압전세라믹의 길이 방향 변위에 따른 측 방향 변형을 흡수하여 길이 방향 변형 효율을 증가시키는 구조의 압전 복합재료로 단일상의 압전세라믹에 비해 길이방향의 효율이 증대되며, 넓은 대역폭 확보가 가능하고 낮은 음향 임피던스를 가지고 있어 물과의 음향매칭이 우수하며, 곡면 형상의 구조가 가능하다는 장점을 가지고 있다(Newnham et al., 1978).

수중 음향 트랜스듀서의 성능을 나타내는 주요 인자로서 성능계수(Figure of merit : FoM)를 주로 사용하는데, 성능계수



(a) Connectivity of piezoelectric composite : white color - piezoelectric ceramic, gray color - polymer matrix



(b) Fundamental structure of 1-3 piezoelectric composite

Fig. 1 Connectivity of piezoelectric composite and fund-amental structure of 1-3 piezoelectric composite

(Figure of merit : FoM)는 다음과 같이 표현된다.

$$FoM = d_h \bullet g_h \tag{1}$$

$$d_h = d_{33} + 2\,d_{31}\,, \tag{2}$$

$$g_h = \frac{d_h}{\epsilon_0} \bullet K_{Pzt}, \tag{3}$$

$$\hat{d_h} = \hat{d_{33}} + 2\hat{d_{31}} = d_{33} + 2\,V_{Pzt}\,d_{31} \tag{4}$$

$$\hat{g_h} = \frac{\hat{d_h}}{\epsilon_0} \bullet [V_{Pzt}K_{Pzt} + (1 - V_{Pzt})K_{Polymer}] \tag{5}$$

여기서 첨자 h는 정수압 상태, d_h는 압전세라믹 압전변형상수, g_h는 압전세라믹 압전전압상수, d_{33}은 압전세라믹의 3방향 압전변형상수, d_{31}은 압전세라믹의 1방향 압전변형상수, ϵ_0는 비유전율, K_{Pzt}는 압전세라믹의 유전상수, V_{Pzt}는 압전세라믹의 체적비, $\hat{d_h}$는 압전복합체 압전변형상수, $\hat{g_h}$는 압전복합체 압전전압상수, $\hat{d_{33}}$은 압전복합체의 3방향 압전변형상수, $\hat{d_{31}}$은 압전복합체의 1방향 압전전압상수, $K_{Polymer}$는 폴리머의 유전상수를 각각 나타낸다.

d_h는 식 (2)와 같이 표현되는데 d_{31}과 d_{33}에 의한 변형 방향이 반대이기 때문에 매우 작은 값을 가진다. 하지만 $\hat{d_h}$는 $\hat{d_{31}}$과 $\hat{d_{33}}$에 의한 변형 방향이 반대 방향이지만 $\hat{d_{31}}$ $(= V_{Pzt}\,d_{31})$은 압전세라믹과 폴리머의 체적분율에 반비례하기 때문에 $\hat{d_{31}}$에 의한 변형의 크기가 작아져 $\hat{d_h}$은 상대적으로 크다. $\hat{g_h}$ 도 또한 단일상의 g_h보다 크기 때문에 FoM은 단일상에 비해 수배~수십 배 증가한다(Levinson, 1987).

따라서 음향트랜스듀서와 1-3형 압전복합체는 단일압전세라믹에 비해 높은 FoM 가지며, 결과적으로 이 값을 증대시키기 위한 방법, 즉 d_{33} 값을 유지하면서 d_{31}값을 줄이는 방향이 압전 복합체 설계의 기본이 된다.

2.2 수중 음향 전달 손실

수중에서 음파의 전달은 여러 환경 요인에 의해서 변화하기 때문에 정량화 하기는 매우 어렵다. 이러한 음파의 전송 손실은 음파의 이동 거리와 주파수 및 수온의 영향만을 고려하면 다음의 식과 같이 계산되어 진다.

$$TL = 20\log R + \alpha R \times 10^{-3} \quad \text{dB} \tag{6}$$

$$\alpha = \frac{0.17 \times f^2}{(T+18)} \qquad \text{dB/km} \tag{7}$$

여기서 R은 전송거리 m, α는 감쇠계수 (dB/km), f는 주파수 (kHz), T는 온도 (℃)를 각각 나타낸다. 전송 손실은 전송 거리, 사용 주파수와 수온에 따라 변화하는데 Fig. 2는 주파수에 따른 감쇠계수 α의 변화를 나타낸다.

Fig. 2 Attenuation constant α around 10~50 kHz frequency range when sea temperature is 5℃

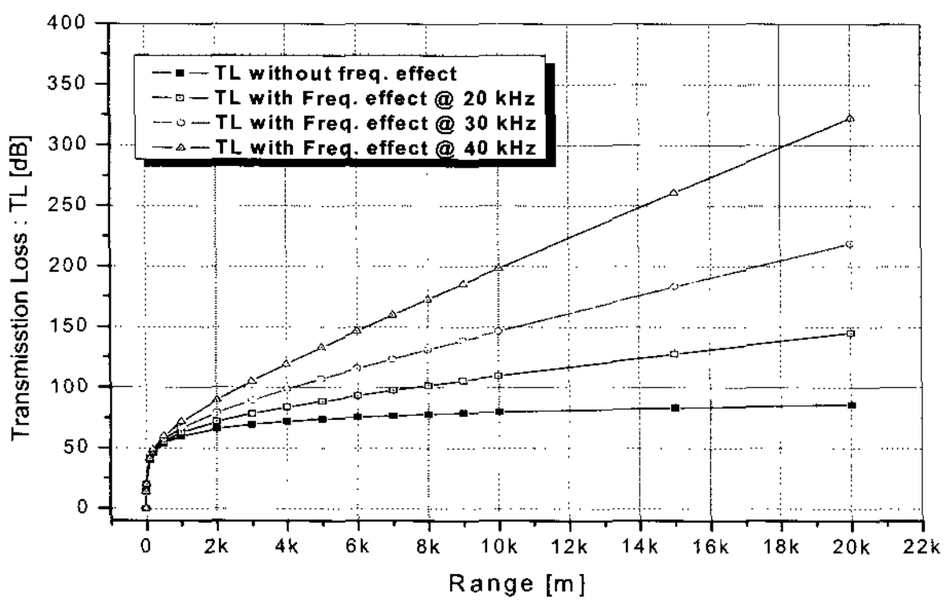


Fig. 3 Transmission loss curve as a transmission range

주파수의 증가에 따라서 감쇠계수 α가 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다. 국내의 해양 환경에서 주로 사용되는 주파수 범위는 30kHz를 중심주파수로 한다. Fig. 3은 20, 30, 40kHz에서의 거리에 따른 전송 손실의 이론적인 결과 값이다. 전송거리 1km인 경우 20kHz의 음원은 62.9dB의 손실 값을, 40kHz인 경우에는 71.8dB의 음원 손실이 발생하여 40kHz에서의 전송손실이 20kHz에서의 전송손실에 비해 8.9dB 많음을 알 수 있다. 송신 음향 트랜스듀서부와 1km 떨어진 지점에서의 수신신호 획득 시 40kHz의 성분의 크기가 20kHz부분의 크기보다 8.9dB 작음을 의미하며, 전송 데이터의 손실로 인한 신호대 잡음비(Signal to noise ratio : SNR) 및 전송 효율을 저하시키는 원인이 된다.

음향 트랜스듀서에서 발생되는 음원의 세기가 주파수에 따라서 Fig. 3과 같은 특성을 보인다고 가정하면 근거리 수중 통신 시스템 입장에서는 동일한 크기의 수신 신호를 확보 할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 20~40kHz 주파수 대역에서 Fig. 3과 같은 송신특성을 가지는 수중 음향 트랜스듀서를 1-3형 압전 복합체를 이용하여 설계, 제작 평가하였다.

3. 음향트랜스듀서의 설계 · 제작

3.1 음향 트랜스듀서의 설계

압전 복합체는 폴리머로 감싸져 있는 압전세라믹의 두께 방향의 변형을 이용하는데 두께 방향의 변형을 최적화시키기 위해서는 가로대세로비(Aspect ratio)가 2.5이상을 유지하는 것이 바람직하다. 가로대 세로비(Aspect ratio)를 2.5이상으로 구현하기 위해서는 길이방향으로 긴 압전세라믹 또는 반경방향으로 매우 작은 크기를 가지는 형상으로 적용되어야 하는데, 두께 방향으로 길어지는 경우에는 구동하기 위한 전계가 높아지기 때문에 1-3형 압전 복합체에서는 반경이 작은 압전세라믹의 적용이 유리하다. 하지만 이러한 압전세라믹의 제작에는 공정상의 어려움이 있다.

Table 1 Piezoelectric properties of KPZ14 powder

Material	Density	Piezoelectric charge constant		Dielectric constant	Coupling Factor
	ρ [kg/m^3]	d_{33} [pC/N]	d_{31} [pC/N]	ϵ/ϵ_0 [-]	K_{33} [%]
KPZ14	7,800	333	-135	1,180	62

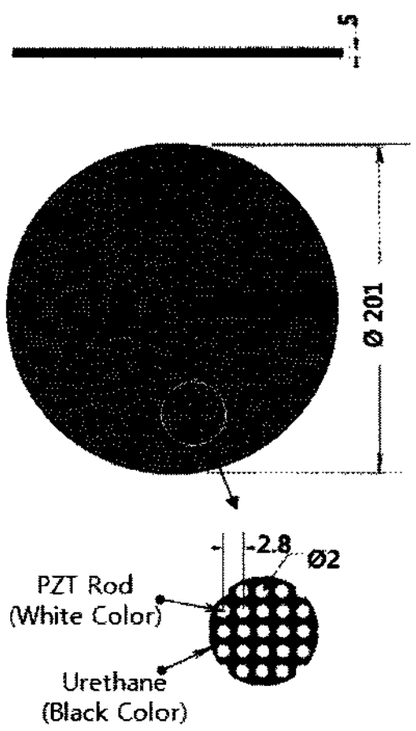
Table 2 Materials of transducer

Item	Material
Active element	PZT (KPZ14)
Passive element	Urethane
Backing layer	Bakelite
Acoustic window	Urethane
Housing (Middle housing, Cover, ring)	Aluminum 2024

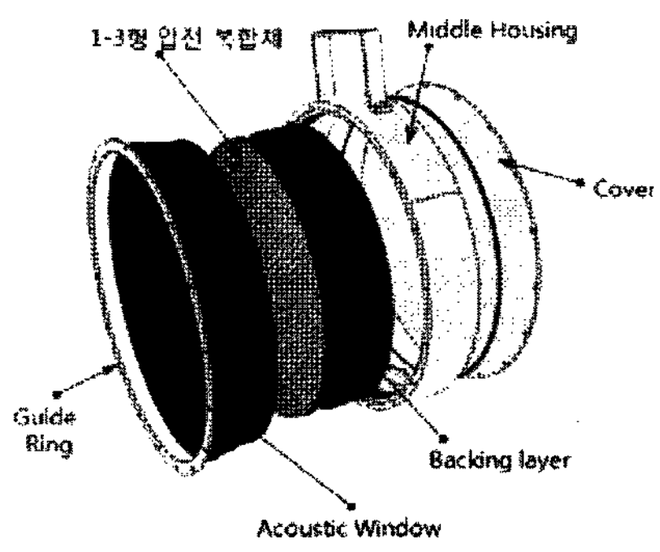
또한 1-3형 압전 복합체를 이용한 수중 음향 트랜스듀서에 있어서 송수신 음향 특성은 복합체를 구성하는 압전세라믹의 체적분율에 의해 그 특성이 다양하게 변화한다. 송신용 음향 트랜스듀서의 경우에는 압전세라믹의 체적분율이 50% 이상, 수신용 음향트랜스듀서의 경우에는 체적분율 15~25%, 송수신을 겸용하는 음향트랜스듀서에서는 30~50%에서 최적 성능을 구현 할 수 있다 (김용혁 등, 1998; Bowen et al., 1993).

따라서 본 연구에서는 압전 복합체의 능동소자(Active element)인 압전세라믹을 외경 2.0mm, 두께 5.0mm의 봉 형상으로 설계하여 적용하였다. 1-3형 압전 복합체는 외경 200mm, 두께 5mm의 폴리머 배열구조(Matrix)에 압전세라믹의 체적비율 40%로 하여 약 4,000개의 봉 형상 압전세라믹이 원형 배열되어진 구조로 설계 하였다. 사용된 압전세라믹은 경원훼라이트공업(주)의 모델명 KPZ14이며, 압전 특성은 Table 1에 나타내었다.

Fig. 4는 설계된 1-3형 압전 복합체의 기본 구조도와 설계된 음향트랜스듀서의 내부 구조도이다. 1-3형 압전 복합체에 백킹층(Backing layer)을 부착 한 후 폴리우레탄으로 음향창을 형성하는 구조이다.



(a) Structure of 1-3 piezoelectric composite

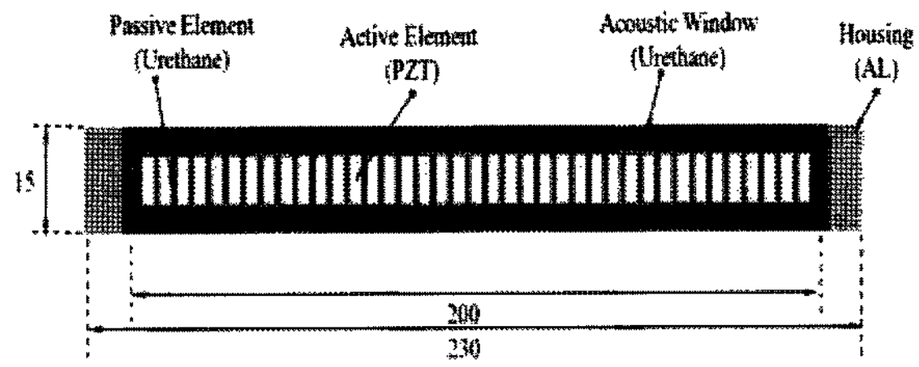


(b) Structure of acoustic transducer

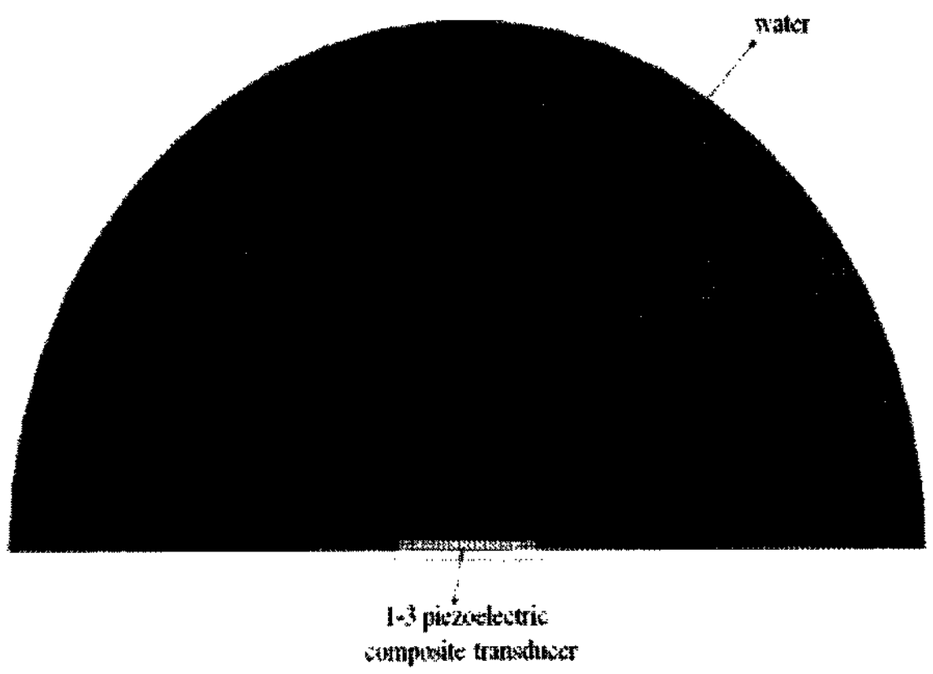
Fig. 4 Designed structure of 1-3 piezoelectric composite and transducer

3.2 음향 트랜스듀서 유한요소 해석

본 연구에서 개발하고자 하는 음향트랜스듀서의 관심 주파수 대역은 공진영역이 아닌 20~40kHz 대역의 비공진영역을 사용하지만 이 영역에서 선형적인 특성을 확보하기 위해서는 해당 주파수 대역 내에 어떠한 공진모드의 생성이 되지 않아야 한다. 기본 설계된 1-3형 압전 복합체를 상용 유한요소 해석 코드를 이용하여 특성을 예측하였다. 사용된 상용 유한요소 코드는 ATILA로 압전체의 전기-기계 연성 해석을 위한 전용 프로그램이다. Fig. 5의 (a)는 기본 설계된 1-3형 압전 복합체의 공기 중 특성을 해석하기 위한 간략화 된 2D 모델로, 1-3형 압전 복합체가 폴리우레탄으로 몰딩 되어 있고 이를 금속 하우징으로 감싸는 구조이다. Fig. 5의 (b)는 수중 특성을 해석하기 위한 2D 해석 모델이다 해석에 사용된 재료의 대표적인 물성은 Table 3에 나타내었다. Fig. 6은 해석 결과로서 임피던스 특성을 나타낸다. 7kHz에서의 해석모델의 길이방향으로의 공진모드가 생성되며, (b)와 같이 40kHz 이하에서는 반경방향의 3^{rd}, 5^{th} 공진 모드가 미세하게 생성됨이 예측되었다. 294kHz에서 두께 방향으로의 공진주파수가 생성 되었다.



(a) Analysis model in air



(b) Analysis model in water

Fig. 5 FE analysis 2-D mode

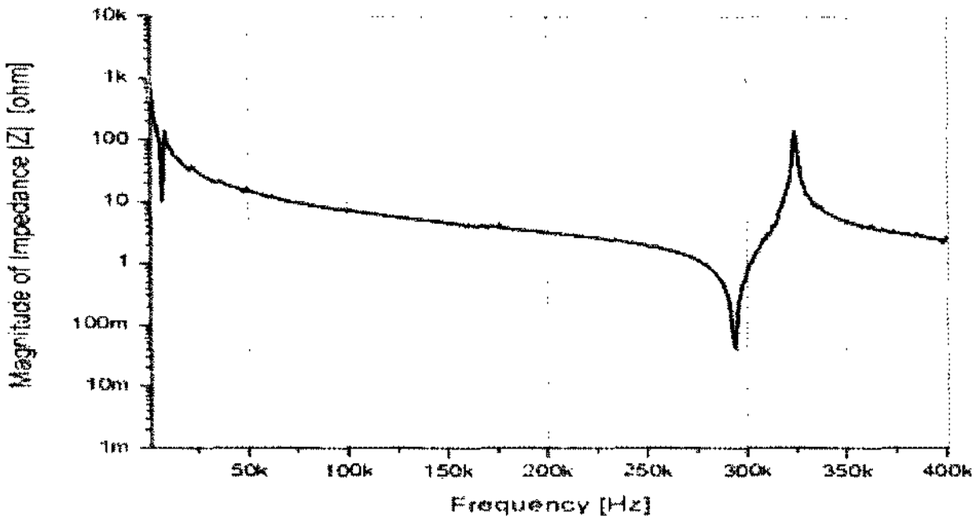
Table 3 Material properties of FE analysis model

Material	Density [kg/m^3]	Strain constant			Compliance				
		d_{31} [10^{-12} C/N]	d_{33} [10^{-12} C/N]	d_{15} [10^{-12} C/N]	s^E_{11} [10^{-12} m^2/N]	s^E_{12} [10^{-12} m^2/N]	s^E_{13} [10^{-12} m^2/N]	s^E_{33} [10^{-12} m^2/N]	s^E_{44} [10^{-12} m^2/N]
PZT	7,800	-135	333	500	13.3	-3.6	-3.5	12.3	49.5

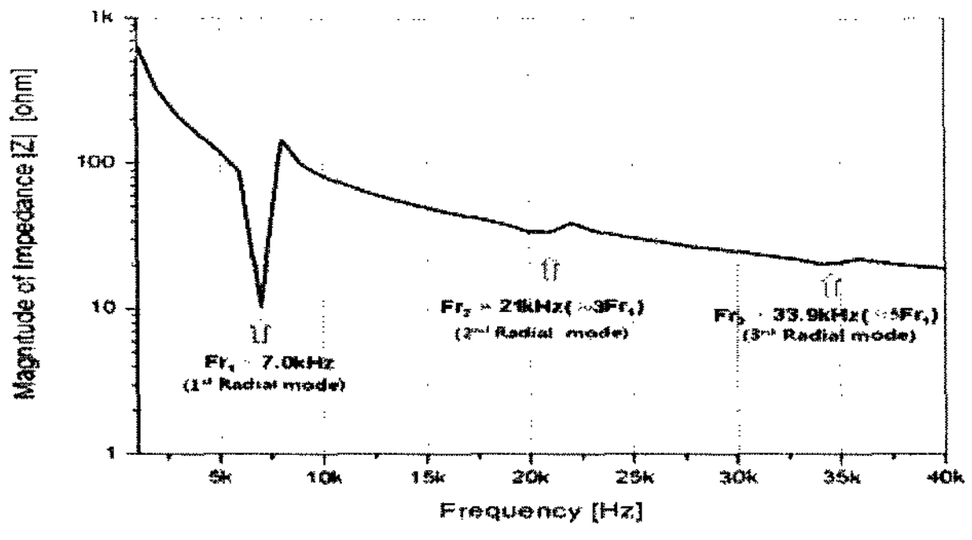
Material	Density [kg/m^3]	Young's modules [GPa]	Poisson's ratio [-]
Urethane(1)	1,120	3.0	0.38
Urethane(2)	980	1.0	0.40
Aluminum	2,870	71.4	0.344

따라서 1차 설계된 음향트랜스듀서의 송수신 전압 감도의 각각의 공진 모드 사이에서 특성의 급격한 감소가 예상된다. 이를 극복하기 위해서는 1-3형 압전 복합체의 압전 세라믹간의 디커플링(Decoupling) 되지 못한 것에서 기인하는 것으로 예측되어 폴리머 배열구조(Matrix) 재질을 보다 연질의 폴리우레탄으로 설정하여 해석 하였고 그 결과는 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 6의 해석결과와 다르게 40kHz 미만에서의 반경 방향의 공진모드의 생성이 없음을 확인 할 수 있다. 이때의 두께 방향 공진 주파수는 267kHz로 Fig. 6의 (a)와 비교하여 27kHz 감소한 결과를 보이고 있다.

Fig. 8은 수중에서의 송신 전압 감도의 해석 결과로 10kHz에서 141dB, 50kHz에서 162dB, 90kHz에서는 172dB의 크기를 나타냄을 예측하였고 Fig. 8로 부터 10~90kHz에서 선형적인 증가를 예측할 수 있었다.



(a) Magnitude of impedance around 1~400kHz



(b) Magnitude of impedance around 1~40kHz

Fig. 6 FEA result (1) : Magnitude of impedance of 1-3 piezoelectric composite transducer in air

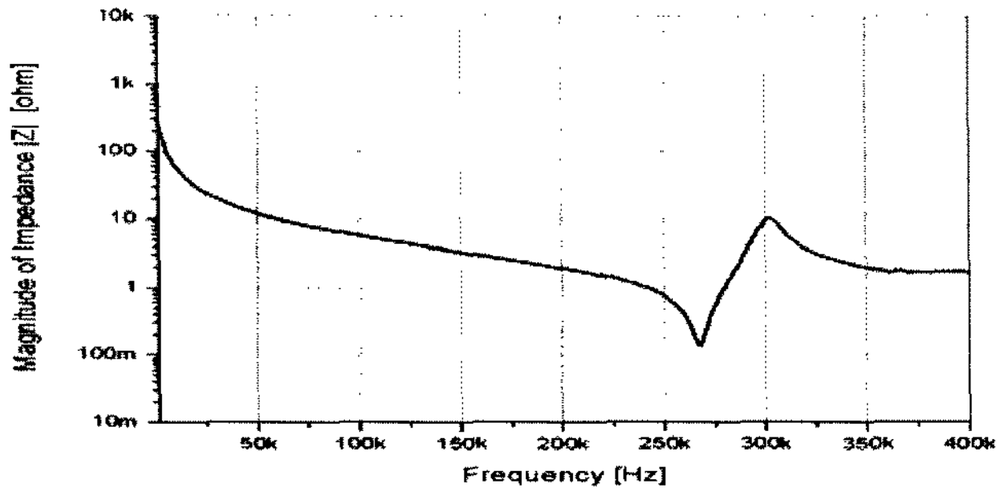


Fig. 7 FEA result (2) : Magnitude of impedance of 1-3 piezoelectric composite transducer with lower hardness material as a polymer matrix in air

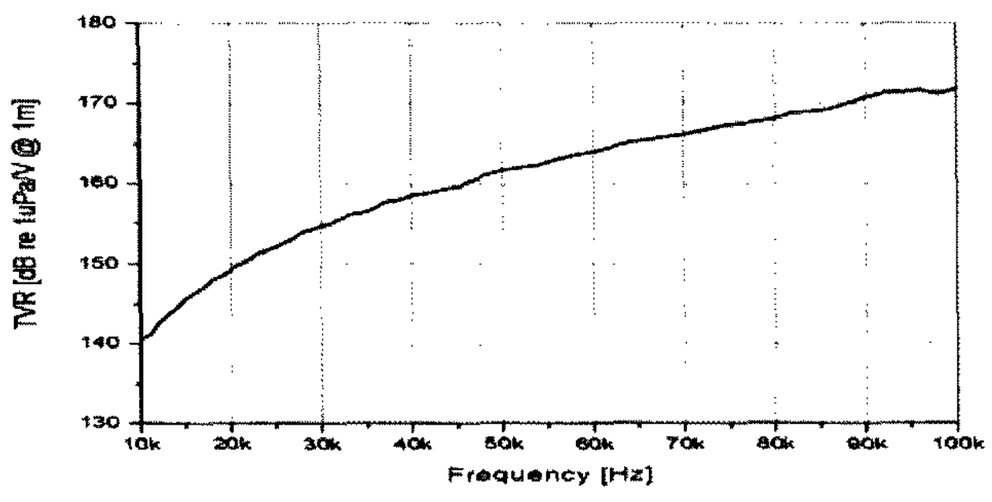


Fig. 8 FEA result (3) : TVR characteristics of 1-3 piezoelectric composite transducer with lower hardness material as a polymer matrix in water

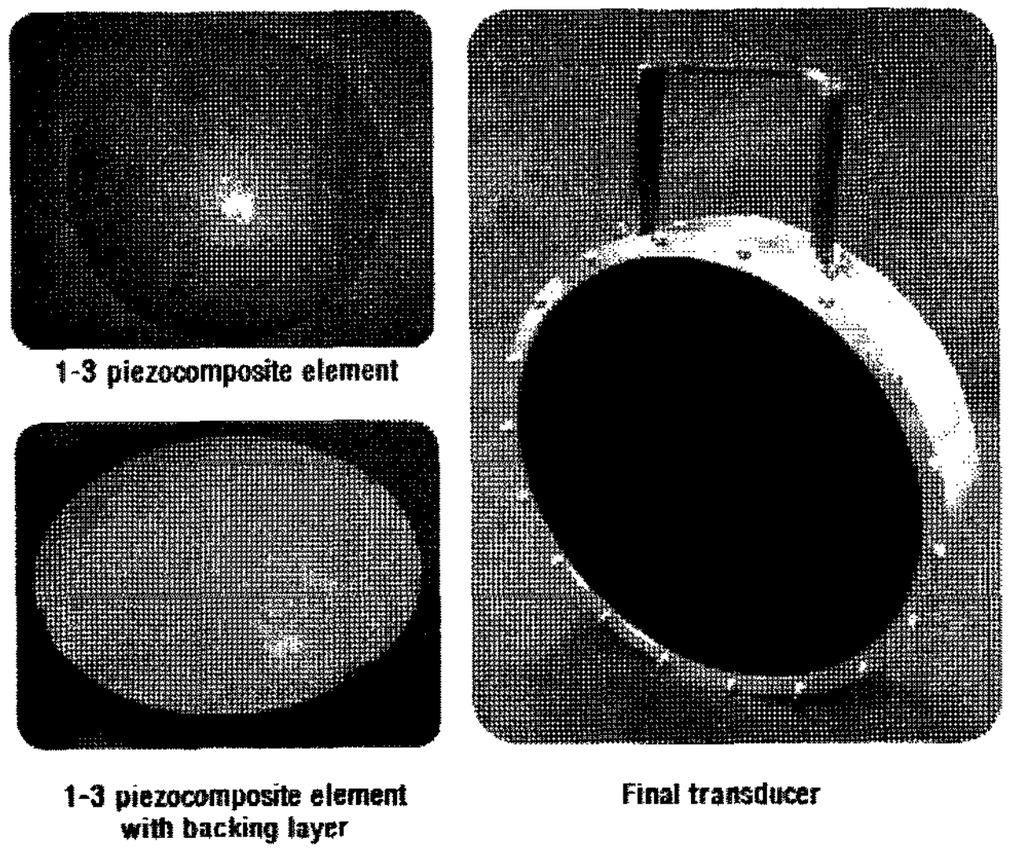


Fig. 9 Photos of manufactured 1-3 piezoelectric composite and transducer

3.3 음향 트랜스듀서의 제작

해석 결과를 바탕으로 제작된 음향트랜스듀서는 Fig. 9와 같다. 1-3형 압전 복합체에 외부전극이 인쇄되기 전 모습, 구리(Copper) 외부전극이 증착된 모습 및 완성된 음향트랜스듀서의 모습을 나타내고 있으며 제작된 음향트랜스듀서는 외경 235mm, 두께 60mm, 중량 5kg의 제원을 가진다.

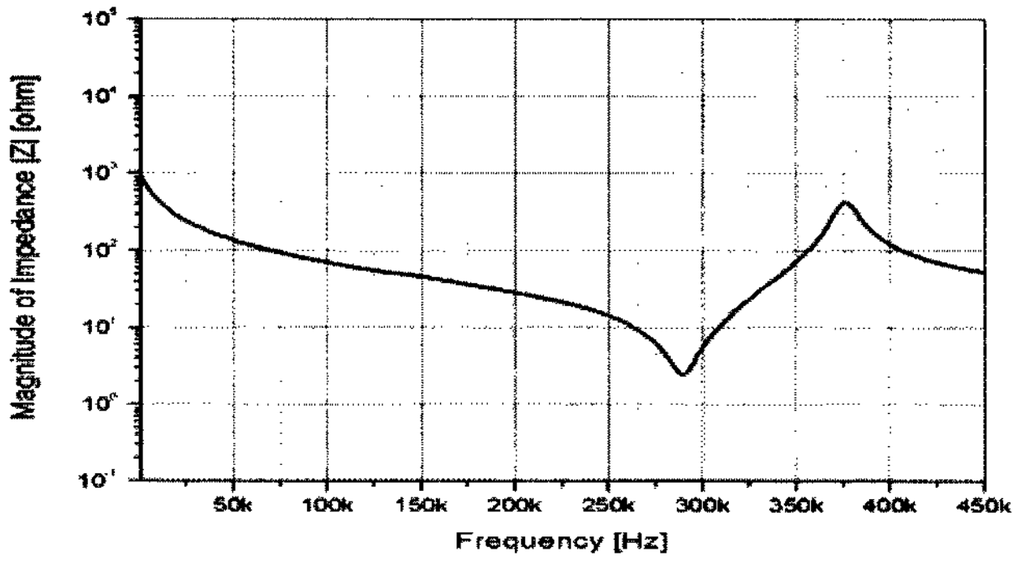
4. 음향트랜스듀서의 평가 및 해석

4.1 공기 중 특성 평가

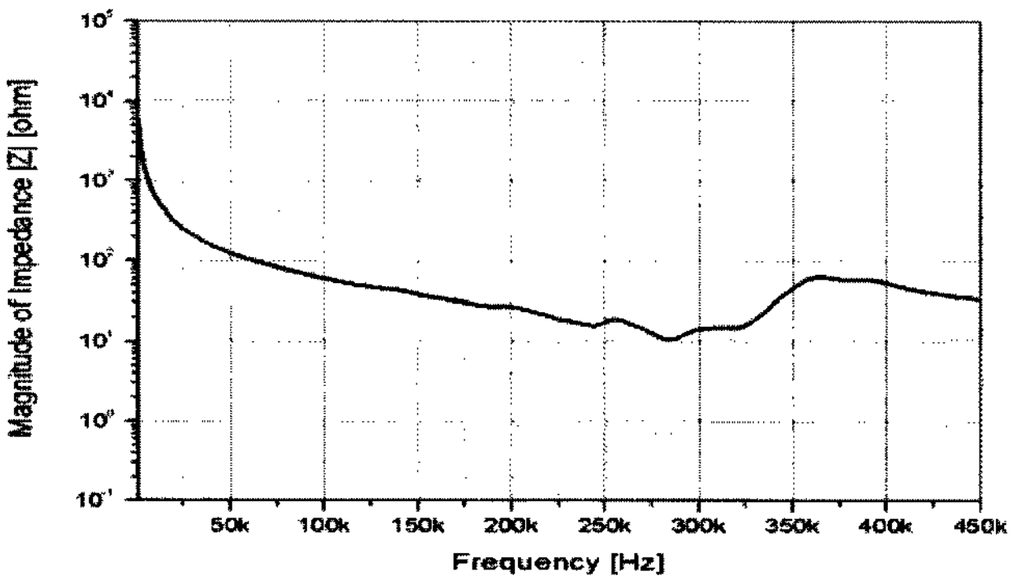
제작된 1-3형 압전 복합체는 Impedance gain-phase analyzer(HP 4194A)를 이용하여 공기 중의 임피던스를 측정하였다. Fig. 10의 (a)는 음향창을 형성하기 전의 공기 중의 임피던스 크기 특성을 나타내고 있다. 두께 방향의 공진 주파수가 약 288kHz에서 생성됨을 알 수 있으며, 두께 모드 공진 주파수 이외의 공진 모드는 나타나지 않았으며 이는 폴리머 배열구조(Matrix)가 충분한 디커플링(Decoupling) 역할을 한 것으로 적정한 재료 선정에서 기인한 것이다. (b)는 음향창을 형성한 후의 공기 중의 임피던스 크기 특성을 나타낸다. 음향창 형성 전에 비해 공진 주파수 282kHz 주변에 기생 주파수의 생성이 확인 되었다. 이는 음향창과 압전복합체, 하우징 간의 연결 구조에서 기인한 것으로 판단된다. 또한 음향창 몰딩 전에 비해 약 6kHz의 공진주파수의 감소현상이 확인 되었다.

4.2 수중 특성 평가

제작된 시제품의 수중 음향 특성은 국방과학연구소 6기술본부 수조실에서 평가하였다. 측정 주파수 대역은 10~90kHz로 수중 어드미턴스, 송신전압감도(TVR), 수신전압감도(RVS) 및 빔 패턴을 측정하였다. Fig. 11은 측정 결과를 나타낸다. (a)는 수중 어드미턴스를 나타내고 있다. 측정 범위내에 어떠한 공

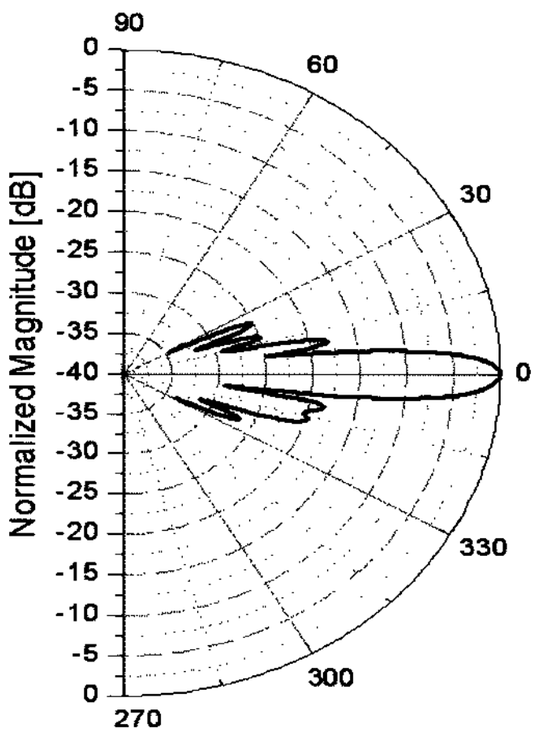


(a) Magnitude of impedance characteristics of before acoustic window molding in air



(b) Magnitude of impedance characteristics of after acoustic window molding in air

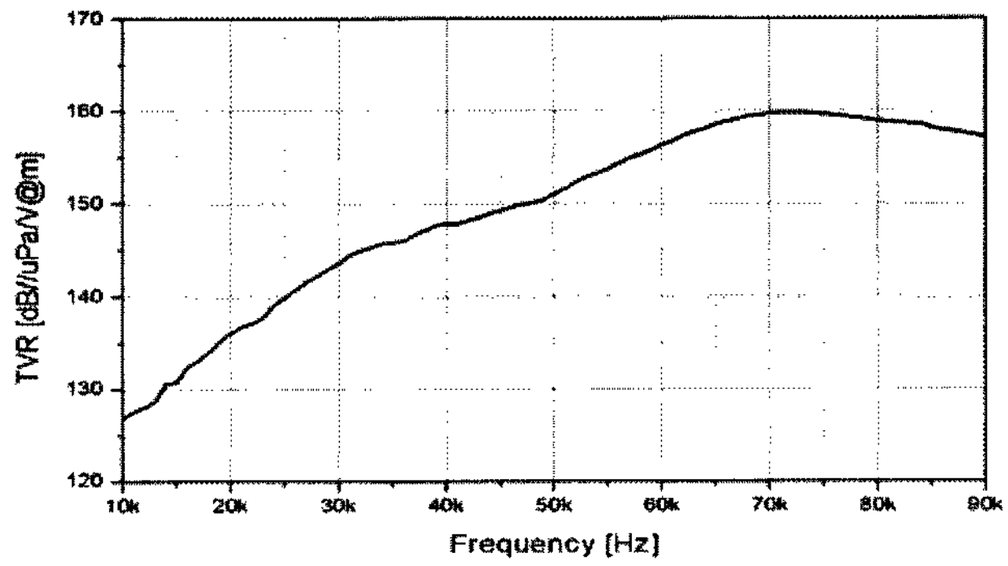
Fig. 10 Measurement Result (1) : Magnitude of impedance characteristics of 1-3 piezoelectric composite transducer in air



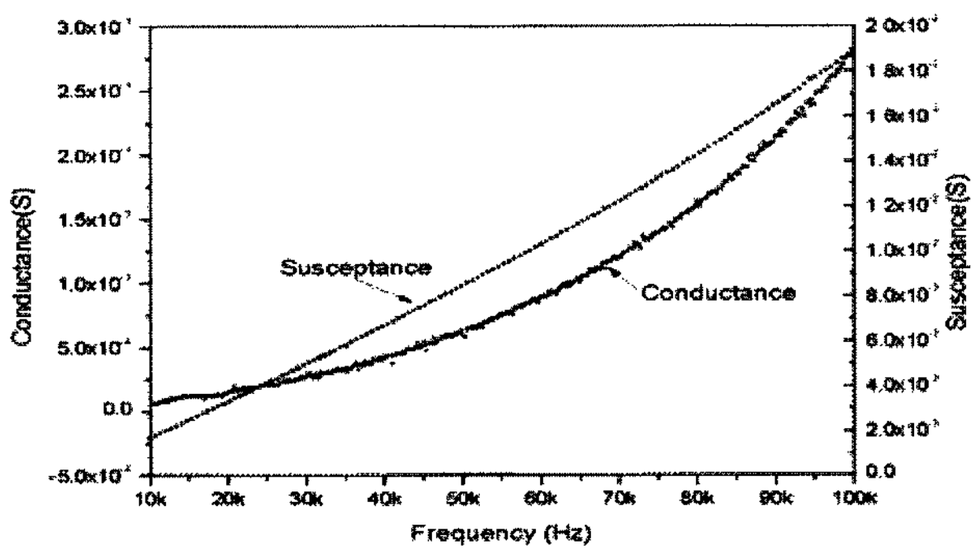
(d) Beam Pattern at 60 kHz

Fig. 11 Acoustic characteristics of 1-3 piezoelectric composite transducer in water

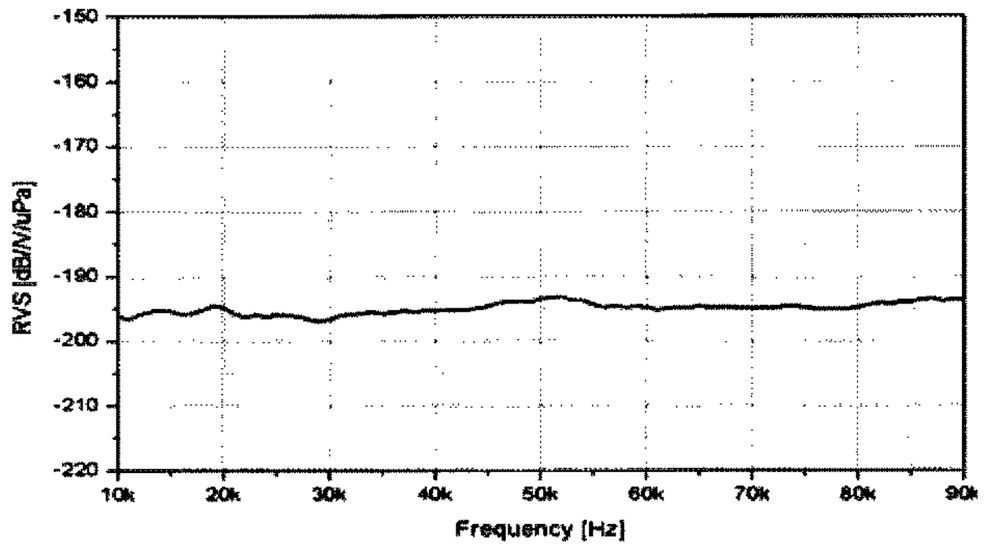
진점도 확인되지 않음을 알 수 있다. (b)는 송신전압감도로 70kHz에서 최고 160dB의 값을 나타내었으며, 10~70kHz까지 주파수에 대해 선형적으로 증가하는 특성을 보이고 있다.



(b) TVR characteristics in water



(a) Admittance characteristics in water



(c) RVS characteristics in water

(c)는 수신전압감도의 특성으로 10~90kHz 범위에서 -195±2dB의 크기를 가짐을 확인 하였다. (d)는 60kHz에서의 전반향의 방사 패턴을 보이고 있으며 약 7°의 3dB 빔폭을 가짐을 확인 하였다. 특히 송신전압감도의 크기는 20kHz에서 136dB, 30kHz에서 143.6dB, 40kHz에서 148dB의 크기를 가짐을 확인 하였고 20~40kHz 범위에서 12dB의 차이를 확인하였다.

Fig. 11의 (b) 송신전압감도 특성을 바탕으로 하여 음향트랜스듀서의 입력전압을 100Vrms라 가정하면 송신음압출력(Sound level : SPL)은 20kHz에서 176dB, 40kHz에서는 188dB의 성능이 예측되며 수중 음향 전달 손실을 고려하면 Table 4와 같은 결과가 예측된다.

20kHz와 40kHz의 송신음압출력이 12dB 차이가 나며 이는 1.2 km 전송 시의 전송손실과 비슷한 수준이다.

Table 4 Compare TL and SPL characteristics of developed transducer

Freq. [kHz]	TVR [dB]	SPL @ 100 Vrms [dB]	TL [dB]		
			@1km	@1.2km	@1.5km
20	136.0	176.0	63.0	66.1	68.0
30	143.6	183.6	66.7	70.9	73.5
40	148.0	188.0	71.8	77.7	81.3
Difference level	12.0	12.0	8.8	11.4	13.3

5. 결 론

본 연구에서는 1-3형 압전복합체를 이용하여 주파수가 증가함에 따라 송신전압감도가 선형적으로 증가하는 특성을 가지는 음향 트랜스듀서를 개발하였다. 주파수가 증가함에 따라 증가하는 전달손실을 보상하여 특정 거리가 떨어진 곳에서 일정한 크기의 수신신호를 획득함으로서 수중 통신 시스템의 주파수 대역폭의 증가와 신호대잡음비(SNR)를 개선하여 향상된 전송속도를 확보 할 수 있는 음향 트랜스듀서를 구현 하고자 하였다.

수중 음향 트랜스듀서의 구현을 위해서 1-3형 압전 복합체 구조를 가지는 평판형 수중 음향 트랜스듀서를 유한요소해석을 통해 설계 최적화 하여 제작 및 평가 하였다. 개발된 음향 트랜스듀서의 송신전압감도는 20kHz에서 136dB, 30kHz에서 143.6dB, 40kHz에서 148dB의 크기로 주파수가 증가할수록 발생음압이 증가하는 특성을 확인하였고, 수신 전압 감도는 10~90kHz 영역에서 -195±2dB임을 확인 하였다. 음향트랜스듀서에 입력되는 전압을 100Vrms라 가정하면, 송신음압출력(Sound level)은 176~188dB 값을 가질 수 있다. 또한 1.2~1.3km 간격으로 구성된 수중 통신 중계 네트웍망을 가정하면, 개발된 수중 음향 트랜스듀서를 이용한 수중 통신은 주파수 대역폭 20kHz인 통신채널을 확보할 수 있다. 이러한 결과는 수중 통신의 전송속도 향상과 함께 신호대 잡음비(SNR)를 향상시킬 수 있어, 현 수중 통신 시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 근본적인 기술이라 사료된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소에서 주관하는 2005~2007년 국방혁신기술개발사업의 일환으로 수행되었음을 밝히며 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

김용혁, 김호기, 김진수, 이덕출 (1998). "PZT/Epoxy (1-3형) 압전복합재료의 두께 변화에 따른 압전 특성", 한국세라믹학회지, Vol 25, No 1, pp 7-14.

임용곤, 김시문, 박종원, 김승근, 최영철 (2003). 초음파를 이용한 수중 영상 정보전송기술 개발, 해양연구원 보고서.

Butler, S.C. (2002). "Triply Resonant Broadband Transducers", Oceans apos. 02 MTS/IEEE Vol 4, Issue, 29-31, pp 2334 -2341.

Stansfield, D. (2003). Underwater Electroacoustics Transducers, Peninsyla Publishing.

Lee, K.W., Kim, D.Y. and Ylim, Y.G. (2004). "Acoustic Impedance Matching Methode Using Triple Matching Plate for Wideband Ultrasonic Underwater Acoustic Characteristics", The 5th Seminar on Naval Weapon Systems Development, pp 376-382.

Levinson, M.L (1987). Electronics Ceramics, MARCEL DEKKER INC, NewYork and Basel.

Bowen, L., Gentlman, R., Fiore, D. and Pham, H. (1993). " Injecton Molded Fine, Scale Piezoelectric Composite Transducer", IEEE Ultrasonics Symposium, pp 499-503.

Newnham, R.E, Skinner, D.P. and Cross, L.E.(1978). " Connectivity and Piezoelectric-pyroelectric Composite", Mat. Res. Bull, Vol 13, pp 525-536.

2007년 11월 30일 원고 접수
2008년 4월 4일 최종 수정본 채택