

1-3형 압전복합체를 이용한 광대역 수중 음향 트랜스듀서 개발 Development of Underwater Wide-band Acoustic Transducer Using the 1-3 Piezoelectric Composite

이 경 우† · 소 형 중* · 임 실 목** · 김 원 호*** · 김 대 연***
Kyung-Woo Lee, Hyoung-Jong So, Sil-Mook Lim, Won-Ho Kim
and Dae-Yun Kim

(2007년 12월 7일 접수 ; 2008년 3월 14일 심사완료)

Key Words : Wide-band Acoustic Transducer(광대역 음향 트랜스듀서), 1-3 Piezoelectric Composite(1-3형 압전 복합체), Low Frequency(저주파), Tonpilz Transducer(톤필츠 트랜스듀서)

ABSTRACT

Recently, it is required that acoustic transducers for underwater detection and communication sensor have wide bandwidth and low operating frequency. In this research, the new acoustic transducer is proposed. This transducer is tonpilz type, and made of 1-3 piezoelectric composites as a driving parts. The developed transducer is evaluated the TVR(transmission voltage response) and RVS(receiving voltage sensitivity) characteristics around 4~14 kHz frequency range and is compared to conventional tonpilz transducer made of solid piezoelectric ceramics as a driving parts. The resonance frequency of the developed transducer is decreased by 30% and the -3 dB bandwidth is increased by 90 %, compared to conventional transducer with same dimensions. The value of TVR is decreased by 9 dB and The value of RVS is the same at resonance frequency.

기 호 설 명

c : 유체의 음속
 d : 압전체의 압전변형상수
 d_{33} : 압전세라믹의 3-3방향 압전변형상수
 d_{31} : 압전세라믹의 1방향 압전변형상수
 ϵ_0 : 비유전율
 F : 압전효과에 의한 힘
 F_0 : 가해지는 힘
 f_r : 공진주파수

f_a : 반공진 주파수
 g : 압전세라믹 압전전압상수
 h : 정수압 상태
 $[H_f]$: 유체의 압축성 행렬
 $\hat{}$: 압전 복합체를 의미
 I : 전류
 K : 탄성계수
 K_{Pzt} : 압전 세라믹 유전상수
 $K_{Polymer}$: 폴리머의 유전상수
 K^2 : 결합계수(coupling factor)
 $[K_{uu}]$: 강성행렬
 $[K_{\phi\phi}]$: 유전강성 벡터
 $[K_{u\phi}]$: 압전강성 벡터
 $[L]$: 구조와 유체의 결합 행렬
 $[M]$: 질량 행렬
 $[M_f]$: 유체의 질량 행렬

† 교신저자 : 정회원, 경원웨어라이트공업(주) 부설연구소
E-mail : kwlee@kwfi.co.kr
Tel : (031)433-5501, Fax : (031)433-5506
* 경원웨어라이트공업(주)
** 한국산업기술대학교 신소재공학과
** 국방과학연구소 6기술본부

- ω : 각속도
- P : 압력 벡터
- Φ : 가해진 전압
- ϕ : 유체의 경계면에 수직인 압력 구배
- r : 마찰계수
- ρ : 유체의 밀도
- S : 음향센서의 강성
- t : 시간
- U : 변위
- u : Mass의 진동속도
- V_{Pzt} : 압전세라믹 체적비

1. 서론

최근의 해양 환경 감시 또는 탐지용 및 수중 통신용 Sonar는 원거리 탐지, 높은 해상도, 높은 data 전송속도 및 전송량을 요구하고 있으며, 이러한 요구를 충족시키기 위해 저주파, 광대역의 음향 센서가 요구되어지고 있다. 하지만 전통적인 저주파수, 중주파수 대역의 고출력의 음원을 발생하는 Tonpilz형 음향센서는 구조적으로 넓은 대역폭을 확보하기 어렵다. 따라서 이러한 음향센서의 대역폭을 보다 넓게 확보하기 위해 음향창의 다단매칭을 통해 광대역 특성을 확보하거나^(1,2) 비대칭 구조를 이용하여 운용주파수 대역 내에 다수개의 공진주파수를 생성하는 구조의 음향센서⁽³⁾, 이와 유사하게 flapping mode를 이용하는 방법⁽⁴⁾ 등이 연구되어지고 있다.

100 kHz 이상의 고주파수 음향센서의 경우에는 1-3형 압전복합체를 사용함으로써 종래의 Tonpilz형 음향센서나 단일 압전세라믹 형태의 음향센서에 비해 넓은 대역폭과 낮은 음향 임피던스, 보다 높은 효율 등의 특징을 이용하여 side scan sonar 또는 mine hunting sonar 등의 음향센서로 널리 사용되고 있다.

이 연구에서는 종래의 Tonpilz형 음향센서에 1-3형 압전 복합체를 접목함으로써 보다 1-3형 압전 복합체의 넓은 대역폭, 낮은 음향 임피던스, 높은 효율의 특성을 적용하여 종래의 음향센서에 비해 낮은 공진주파수와 넓은 대역폭을 가지는 음향센서를 설계, 제작 및 평가하였다. 공기 중에서의 공진주파수가 약 9 kHz인 종래의 Tonpilz형 음향센서의 구조에서 단일 압전세라믹 부분을 1-3형 압전복합체로 대체하여 설계, 제작하였고, 제작된 음향센서는 국방과

학연구소 6기술본부 수조실에서 4~14 kHz 대의 주파수 영역에서의 송·수신 전압감도(TVR, RVS)를 평가하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 Tonpilz형 음향센서 기본 설계 이론

수중에서 사용되는 음향센서는 Fig. 1과 같이 단일상의 압전 세라믹을 중심으로 전면과 후면에 금속물(전면추, 후면추)을 볼트로 체결한 구조를 가진다. 이러한 형태의 Tonpilz형 음향센서는 Fig. 2와 같이 기계적인 등가 회로로 구성이 가능하며, 식 (1)과 같은 운동 방정식을 가진다. 또한 트랜스듀서의 질량 M 과 강성 S 에 의해서 트랜스듀서의 공진주파수가 결정이 된다. 식 (2)는 공진주파수와 질량 M 과 강성 S 에 의한 관계식이다.

$$m \frac{du}{dt} + ru + K \int u dt = F_0 e^{i\omega t} \quad (1)$$

$$f_r \propto \sqrt{\frac{S}{\rho}} \quad (2)$$

식 (1)로부터 종래에는 전기적인 등가회로로 변환

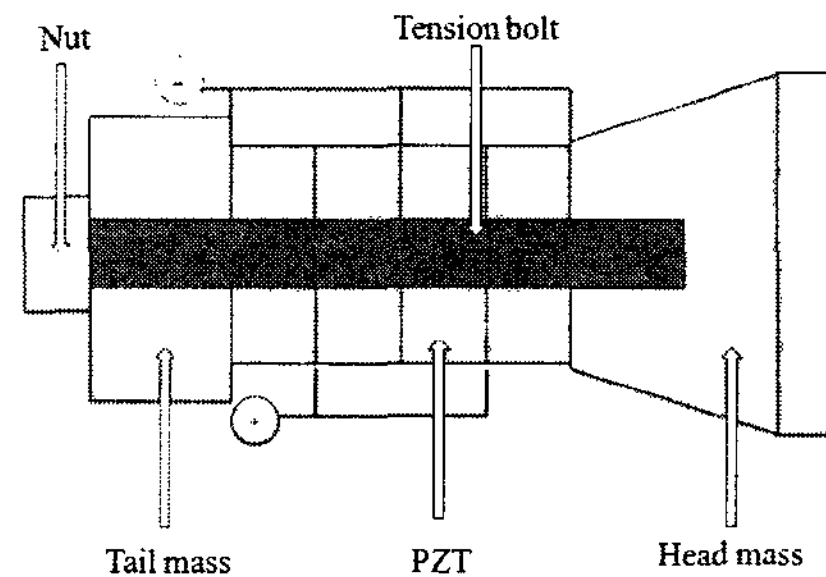


Fig. 1 Fundamental structure of tonpilz type acoustic transducer

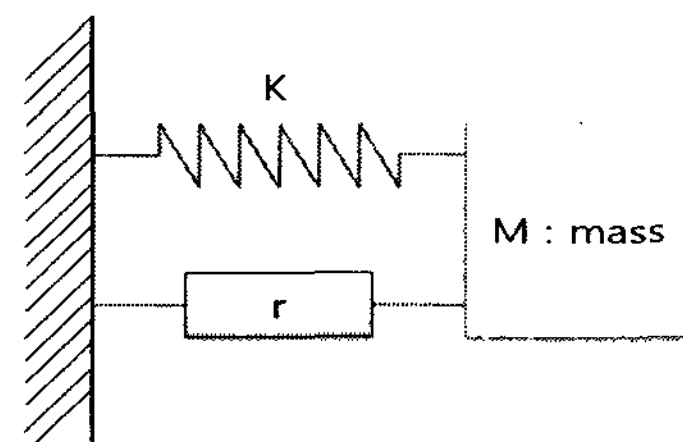


Fig. 2 Equivalent model of tonpilz type acoustics transducer

하여 트랜스듀서의 설계 변수를 설계하였으나 최근에는 FEM을 이용한 수치 해석을 사용하여 설계되어진다. 트랜스듀서의 설계에 적합한 상용 FEM code중의 하나인 ATILA를 해석틀로 사용하였다. ATILA는 전기-기계적 특성과 유체의 결합 효과에 대한 모델링이 가능하며 선형적인 해석이 가능하다. 모델링된 트랜스듀서의 방사 특성은 구조물의 탄성의 법칙, 유체에서의 Helmholtz 방정식, 압전재료에서의 Poisson 방정식을 이용하면 식 (3)과 같이 표현이 가능하다^(5,6). ATILA 또한 식 (3)을 바탕으로 연산된다.

$$\begin{bmatrix} [K_{uu}] - \omega^2 [M] & K_{u\phi} & -[L] \\ K_{u\phi}^T & K_{\phi\phi} & 0 \\ -\rho^2 c^2 \omega^2 [L]^T & 0 & [H_f] - \omega^2 [M_f] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ \Phi_0 \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ -I \\ \rho c^2 \phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 1-3형 압전복합체

(1) 기본 설계이론

압전복합체는 압전 세라믹과 폴리머 복합체로 구

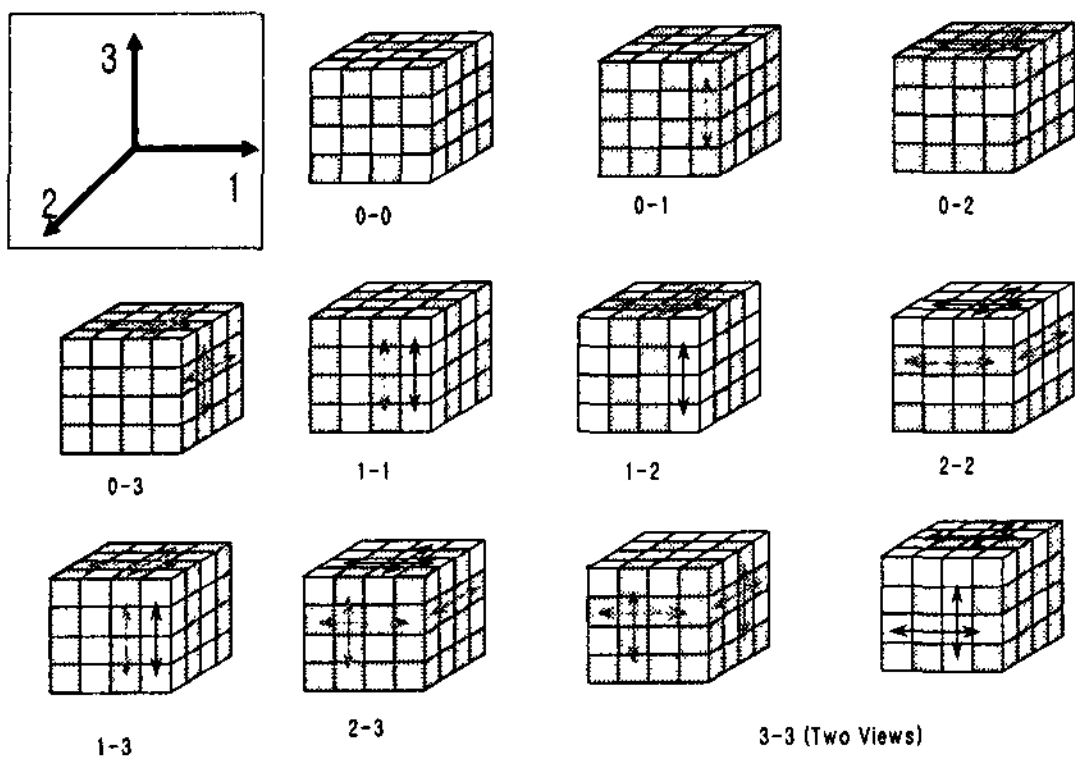


Fig. 3 Connectivity of piezoelectric composite : 10 types

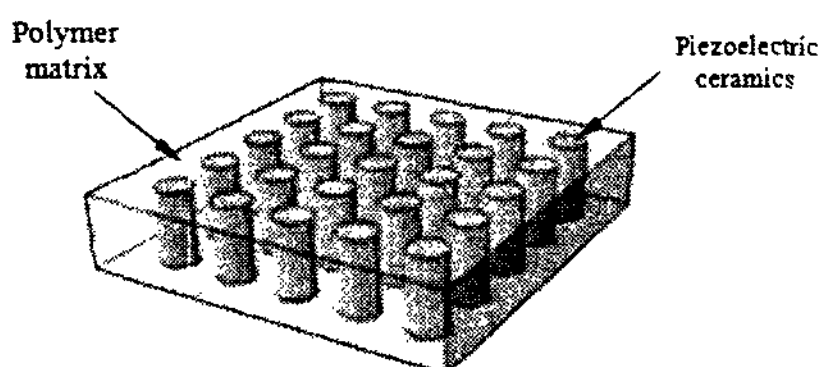


Fig. 6 Structure of 1-3 piezoelectric composite

성되는 구조로 각 동질상의 연결 형태에 따라서 Fig. 3과 같이 10종의 구조로 나뉜다⁽⁷⁾. 10종의 구조 중 Fig. 4와 같이 압전세라믹이 하나의 연결상과 폴리머가 세방향의 연결상을 가지는 압전복합체가 1-3형 압전복합체이다. 압전세라믹 주위에 폴리머 복합체가 압전세라믹의 길이 방향 변형에 따른 측방향 변형을 흡수하여 길이 방향 변형의 효율을 증가시키는 구조의 압전복합체로 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.

(2) 압전복합체의 주요 설계 요소

: Figure of Merit(FoM)

수중음향센서의 성능지표를 나타내는 중요 인자로서는 figure of merit(이하 FoM)을 사용되는데 다음과 같이 표현된다.

$$FOM = d_h \cdot g_h \text{ [m}^2/\text{N]} \quad (4)$$

$$d_h = d_{33} + 2d_{31} \quad (5)$$

$$g_h = \frac{d_h}{\epsilon_0} \cdot K_{Pzt} \quad (6)$$

$$\hat{d}_h = \hat{d}_{33} + 2\hat{d}_{31} = d_{33} + 2V_{Pzt} d_{31} \quad (7)$$

$$\hat{g}_h = \frac{\hat{d}_h}{\epsilon_0} \cdot [V_{Pzt} K_{Pzt} + (1 - V_{Pzt}) K_{Polymer}] \quad (8)$$

d_h 는 식 (5)와 같이 표현되는데 d_{31} 과 d_{33} 의 변형 방향의 반대이기 때문에 매우 작은 값을 가지지만 \hat{d}_h 는 \hat{d}_{31} 이 \hat{d}_{33} 과 반대 방향의 변위를 가짐에도 \hat{d}_{31} ($=V_{Pzt} d_{31}$)은 압전세라믹과 폴리머의 체적분율에 반비례하기 때문에 \hat{d}_h 은 상대적으로 크다. \hat{g}_h 도 또한 단일 상의 g_h 보다 크기 때문에 FoM은 단일상에 비해 크기 증가하는데 많게는 200배 이상 증가한다⁽⁸⁾. 따라서 음향센서와 1-3형 압전복합체는 단일압전세라믹에 비해 높은 FoM을 가지며, 결과적으로 이 값을 증대시키기 위한 방법, 즉 d_{33} 값을 유지하면서 d_{31} 값을 줄이는 방향이 압전복합체 설계의 기본이 된다.

3. 음향센서의 설계 및 제작

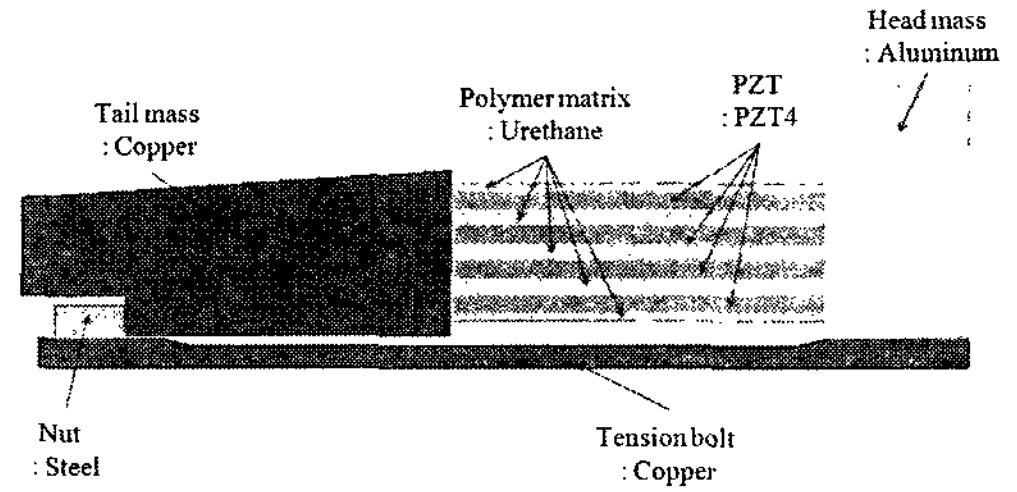
3.1 음향 센서의 설계

(1) 단일 세라믹을 적용한 Tonpilz형 음향센서

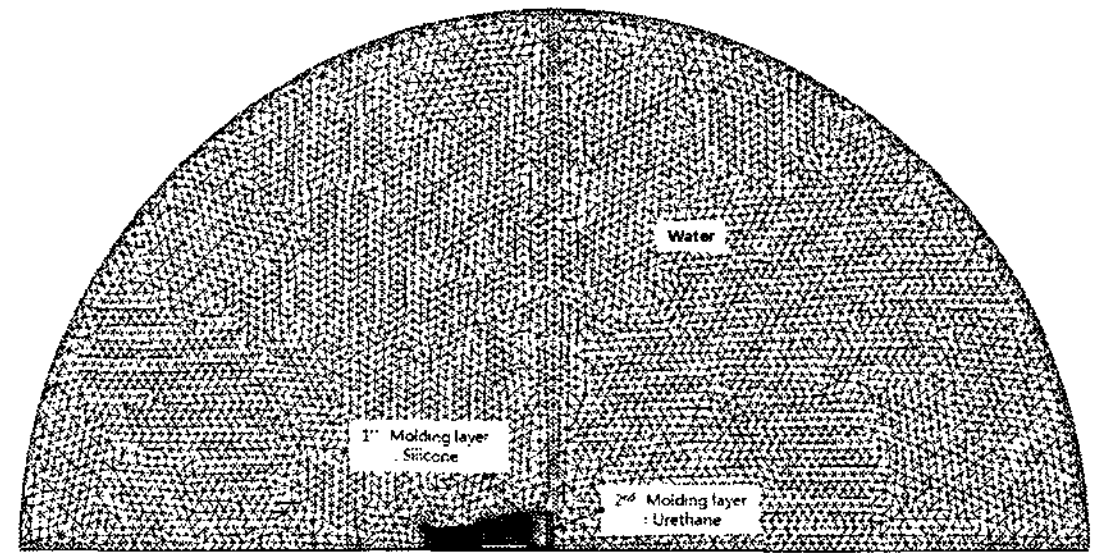
단일 세라믹과 이를 적용한 Tonpilz형 음향센서의 구조와 단일 세라믹 구조는 Fig. 5와 같다. 단일세라믹은 외경 60 mm, 내경 15mm, 두께 5mm이며 이들 12개를 병렬로 연결하여 Tonpilz형 음향센서의 구동부로 구성하였다.

(2) 1-3형 압전복합체를 적용한 Tonpilz형 음향센서

Fig. 5와 같은 구조에서 단일 세라믹을 1-3형 압전복합체로 대체하기 위해서 압전복합체는 단일 세라믹의 형상과 동일한 크기를 가지도록 설계 되었다. Fig. 6과 같이 외경 60 mm, 내경 15 mm, 두께 5 mm의 압전복합체 12개를 병렬 연결하여 음향센서의 구동부로 설계하였다. 1-3형 압전복합체에는 외



(a)



(b)

Fig. 7 FEM analysis model : (a) in air and (b) in water

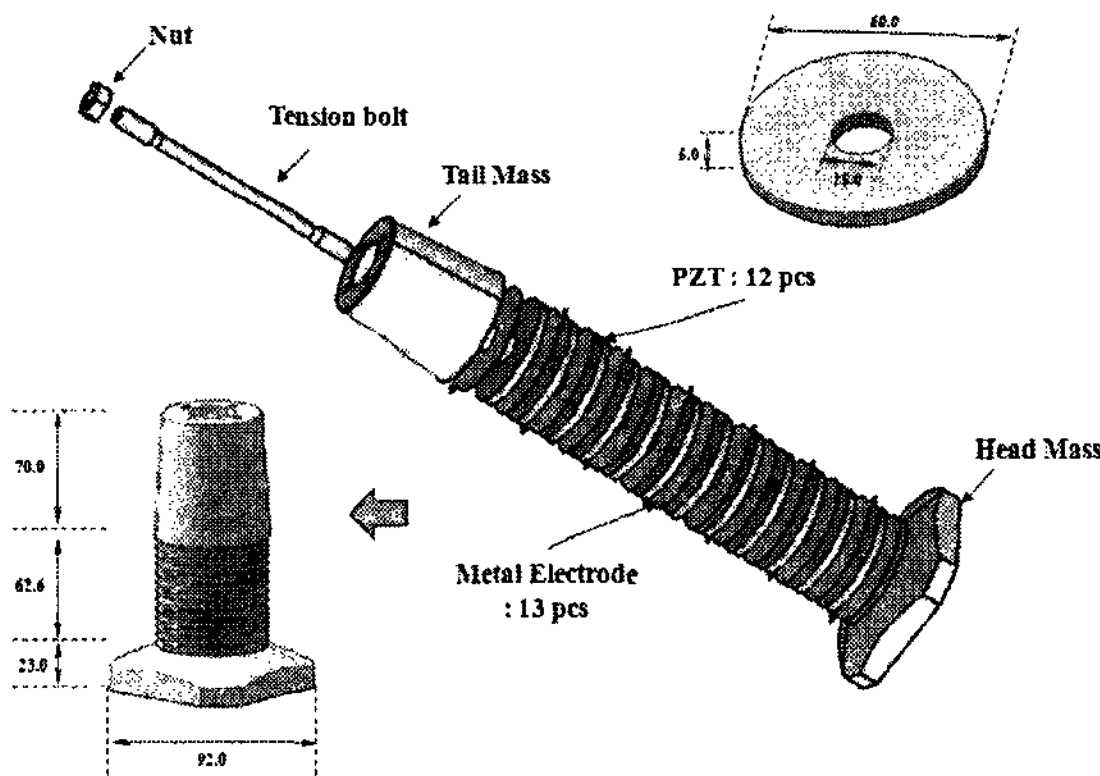


Fig. 5 Structure of conventional tonpilz transducer

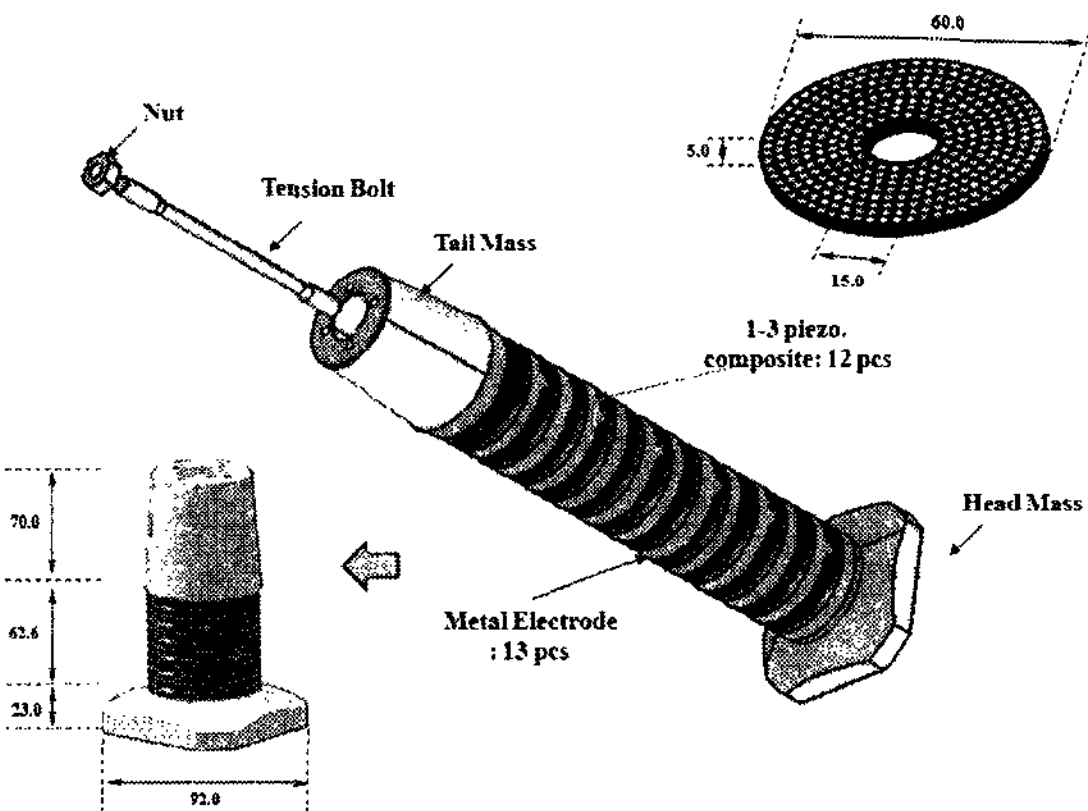
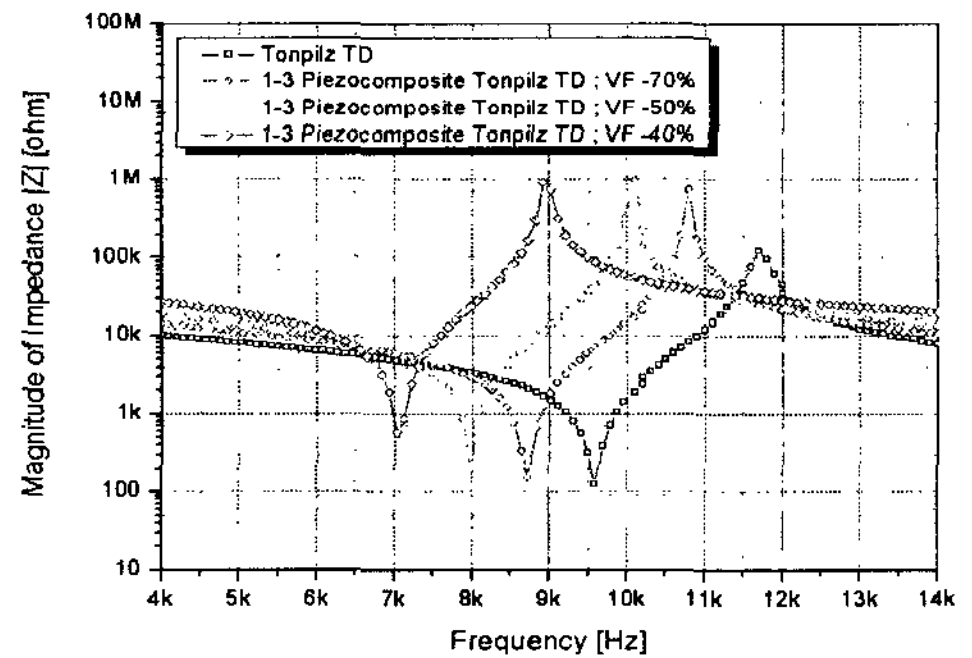
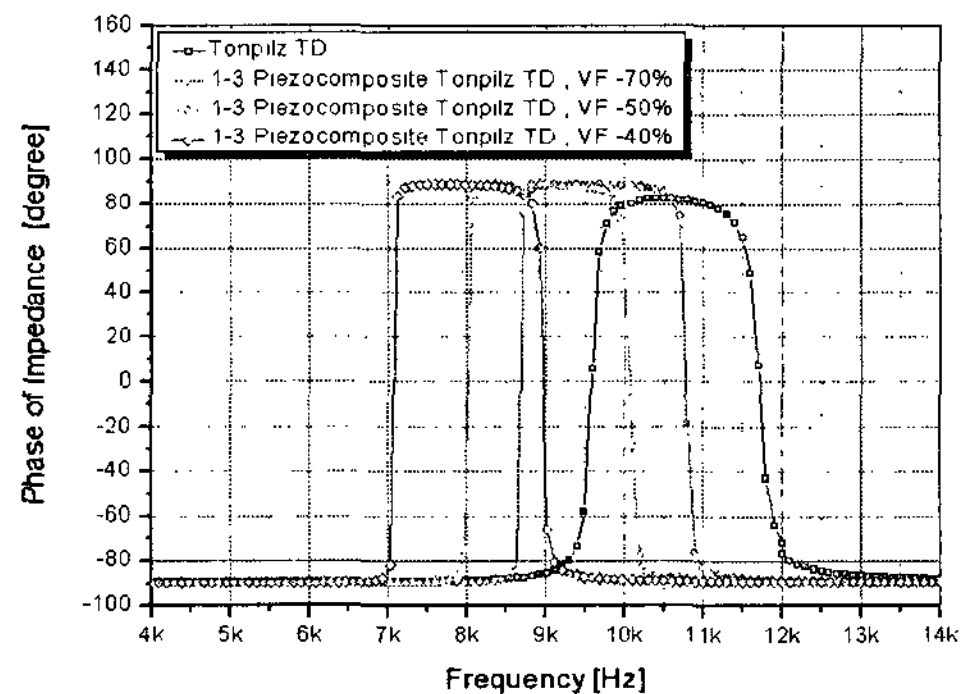


Fig. 6 Structure of tonpilz transducer with 1-3 piezoelectric composite



(a)



(b)

Fig. 8 FEA result (1) : impedance characteristics of tonpilz transducer with 1-3 piezoelectric composite as a PZT volume fraction in air : (a) magnitude and (b) phase

경 2.0 mm, 두께 5.0 mm인 rod형 압전세라믹을 체적비 40%로 배열된 구조를 가지고 있다.

(3) 음향 센서의 FEM 해석

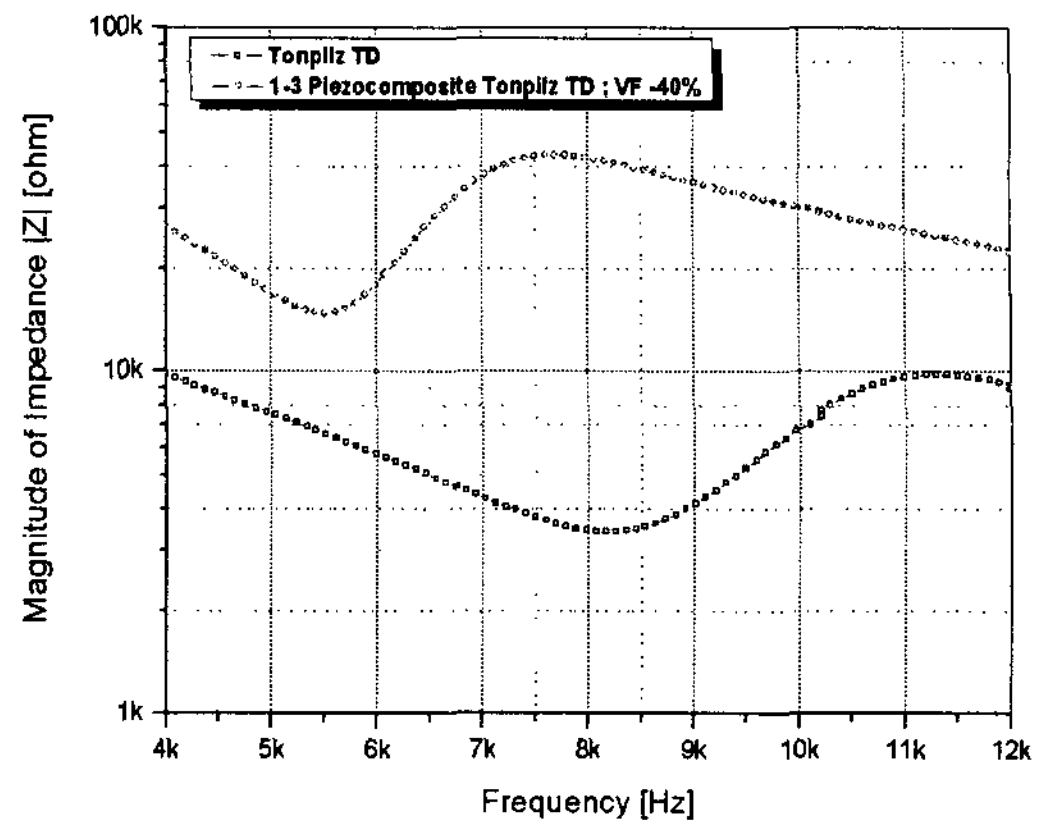
Fig. 5와 6과 같은 음향센서의 구조를 바탕으로 하여 FEM 해석을 통해 성능을 예측하였다. Fig. 7의 (a)는 공기 중 전기-기계적 특성을 예측하기 위한 해석 모델이며, (b)는 수중 음향 특성을 예측하기 위한 해석 모델이다.

하지만 Fig. 7과 같은 해석 모델에 있어서 1-3형 압전복합체의 구현이 이루어지지 않지만 음향센서 주파수 특성과 음향특성은 압전세라믹의 강성과 체적에 지배적인 영향을 받기 때문에 이를 통한 경향 파악을 하였다. 1-3형 압전복합체를 적용한 경우에는 압전세라믹과 폴리머의 체적비를 변경하면서 음향센서의 구동부의 강성 변화에 의한 음향센서의 주파수 특성의 변화를 예측하였으며, 그 결과를 Fig. 8과 Table 1에 나타내었다. PZT의 체적비가 감소할수록 공진주파수는 낮아지는 것을 예측 할 수 있다.

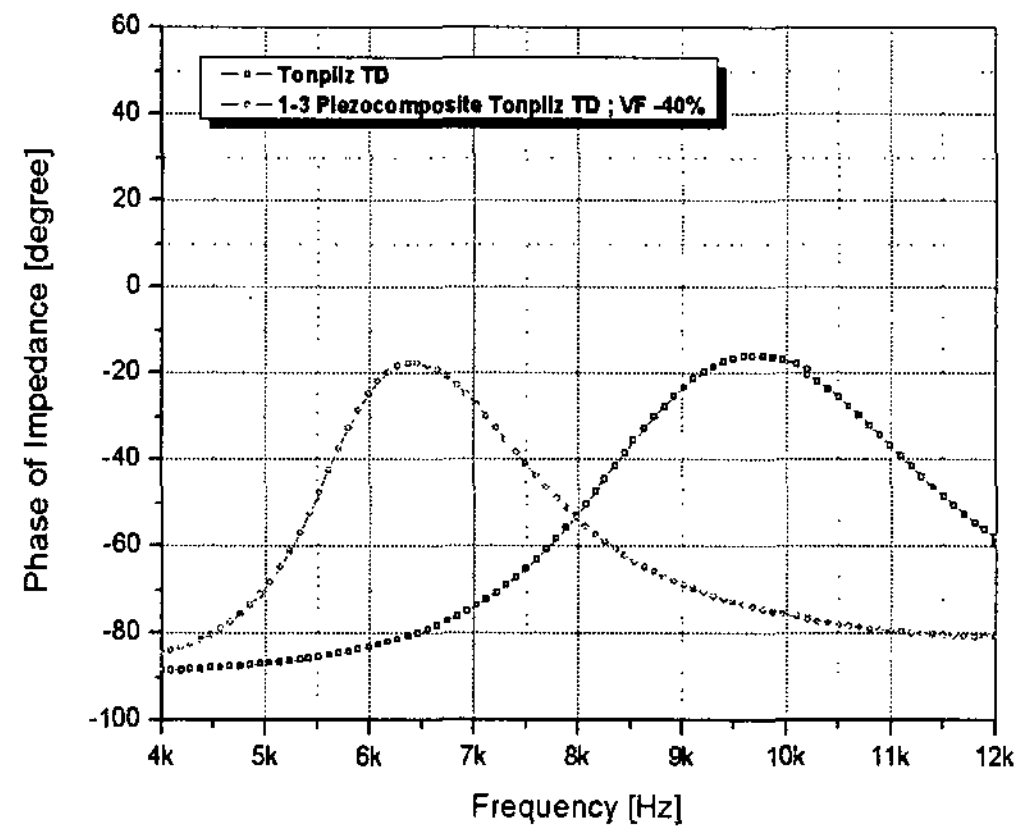
Fig. 9는 Table 1의 결과를 통해 1-3형 압전복합체에서 압전세라믹의 체적비 40% 경우의 음향센서의 수중 임피던스 특성과 송신전압감도 특성 예측 결과이다. Fig. 7의 (b)와 같은 해석 모델을 통해서 수중에서의 임피던스 특성을 예측한 결과이다. 단일상은 8.2 kHz의 공진주파수를 가지며, 1-3형 압전복합체를 적용한 경우에는 5.5 kHz의 공진주파수를 가짐을 알 수 있다. Fig. 10은 송신전압감도의 해석 결과이다. 단일상 압전체의 경우 8.7 kHz에서 147.8 dB의 크기를 가지며, 1-3형 압전복합체의 경우에는 5.7 kHz에서 142.9 dB의 송신전압감도를 나타냄이 예측되었다.

Table 1 FEA result (2) : resonance frequency of tonpilz transducer with 1-3 piezoelectric composite as a PZT volume fraction in air

Type	f_r	f_a	K^2	
Unit	[kHz]	[kHz]	[%]	
PZT	9.6	11.7	0.32	
1-3 Piezo. composite	Volume ratio 70%	8.78	10.9	0.35
	Volume ratio 50%	8.02	10.2	0.38
	Volume ratio 40%	7.07	8.96	0.37



(a)



(b)

Fig. 9 FEA result (3) : impedance characteristics of tonpilz transducer and with 1-3 piezoelectric composite in water : (a) magnitude and (b) phase

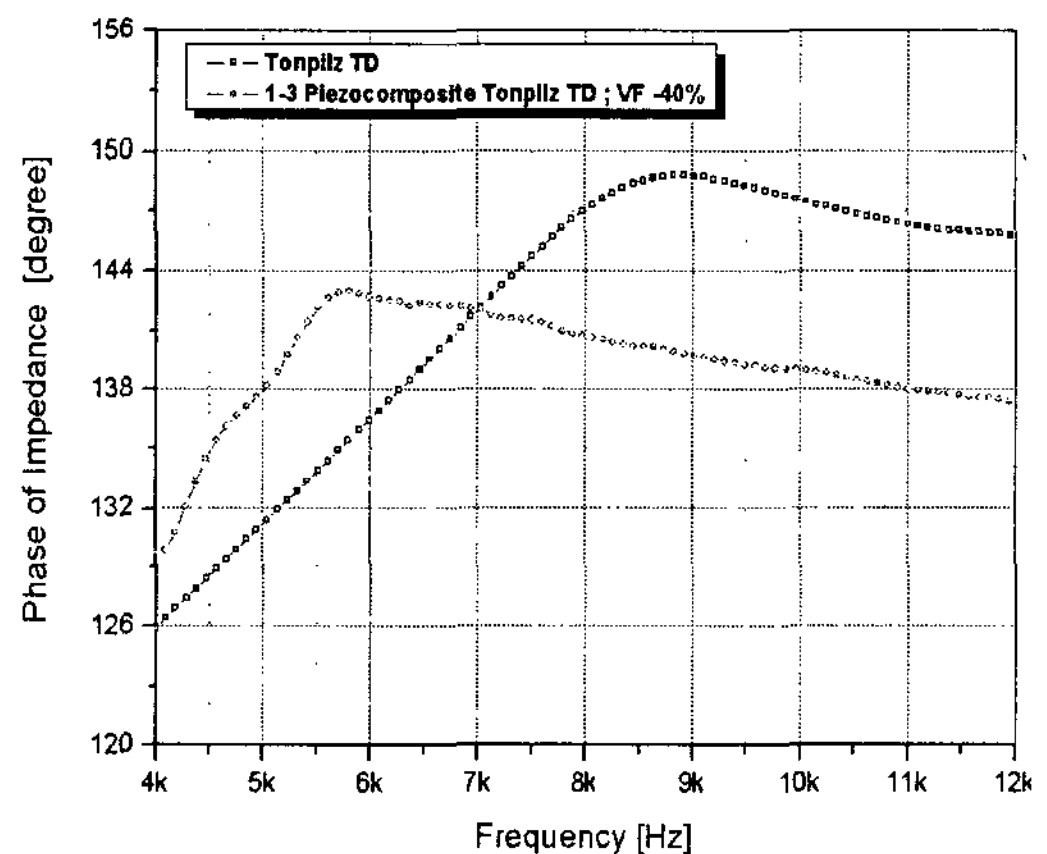


Fig. 10 FEA result (4) : transmitting voltage response (TVR) characteristics of tonpilz and with 1-3 piezoelectric composite in water



Fig. 11 Driving part of tonpiliz transducer : (a) PZT ceramics and (b) 1-3 piezoelectric composite

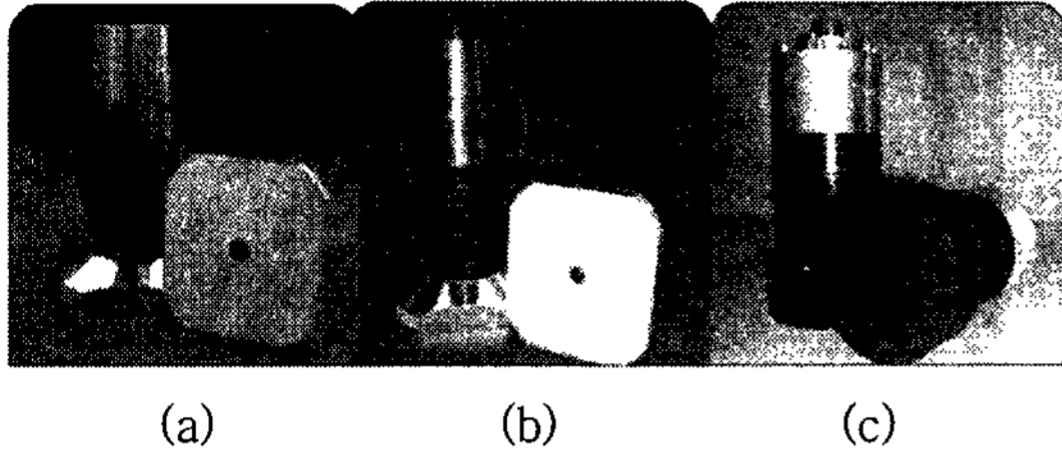


Fig. 12 Developed tonpiliz transducers : (a) tonpiliz transducer with PZT ceramic, (b) tonpiliz transducer with 1-3 piezoelectric composite and (c) molded tonpiliz transducer

3.2 음향 센서의 제작

Fig. 11의 (a)는 제작된 단일세라믹의 모습이며, (b)는 1-3형 압전복합체의 모습이다. Fig. 12의 (a)는 제작된 단일 압전세라믹으로 구성된 음향센서의 모습으로 음향센서는 폴리우레탄 계열의 음향창을 적용하였다. (b)는 1-3형 압전복합체를 적용한 음향센서의 제작된 실물 모습이다. 음향센서 제작 시, 전면추, 후면추 및 압전세라믹(또는 1-3형 압전복합체)와 인장볼트는 (a), (b) 모두 1200 kgf·cm의 조립 토크로 조립되었다.

4. 특성 평가

4.1 특성 평가 방법

공기 중 임피던스 특성은 Impedance /gain -phase analyzer(Hp 4194A)를 이용하여 측정하였고 수중에서의 음향특성 평가는 국방과학연구소 음향수조(18 m×10 m×10 m)와 음향측정시스템(ATF: acoustic test facility)을 이용하여 자유 음장하에서 측정하였다. 수중 임피던스 특성은 ATF를 이용하여 제작된 센서의 입력 전압과 전류를 측정 후 수치적으로 계산하였으며, 송신전압감도 측정은 표준 하이드로폰 USRD-H23를 이용하여 수심 5m, 센서간의 거리 5m에서 측정하였고, 수신전압감도 측정은 표준 프로젝터 USRD-F40과 표준 하이드로폰 USRD-H23을 이용하여 비교 측정방법으로 측정하였다.

4.2 음향센서의 평가

Fig. 13은 공기 중에서의 음향센서의 임피던스 특성으로 단일세라믹에 의한 음향센서의 경우 공진주파수는 8.45 kHz임을 확인 할 수 있다. 1-3형 압전복합체가 적용된 음향센서의 공진주파수는 6.4 kHz임을 확인 할 수 있다. 단일세라믹의 경우보다 약 2 kHz 감소함을 알 수 있다.

Fig. 14는 수중에서의 음향센서의 임피던스 특성으로 단일세라믹에 의한 음향센서의 경우 공진주파수는 8.3 kHz, 1-3형 압전복합체가 적용된 음향센서는 6.0 kHz임을 확인하였다. 단일세라믹의 경우보다 공진주파수가 약 2.3 kHz 작음을 알 수 있으며 공기 중 에서와 비교하여 공진주파수가 약 0.15~0.4 kHz 감소한 특성을 보인다.

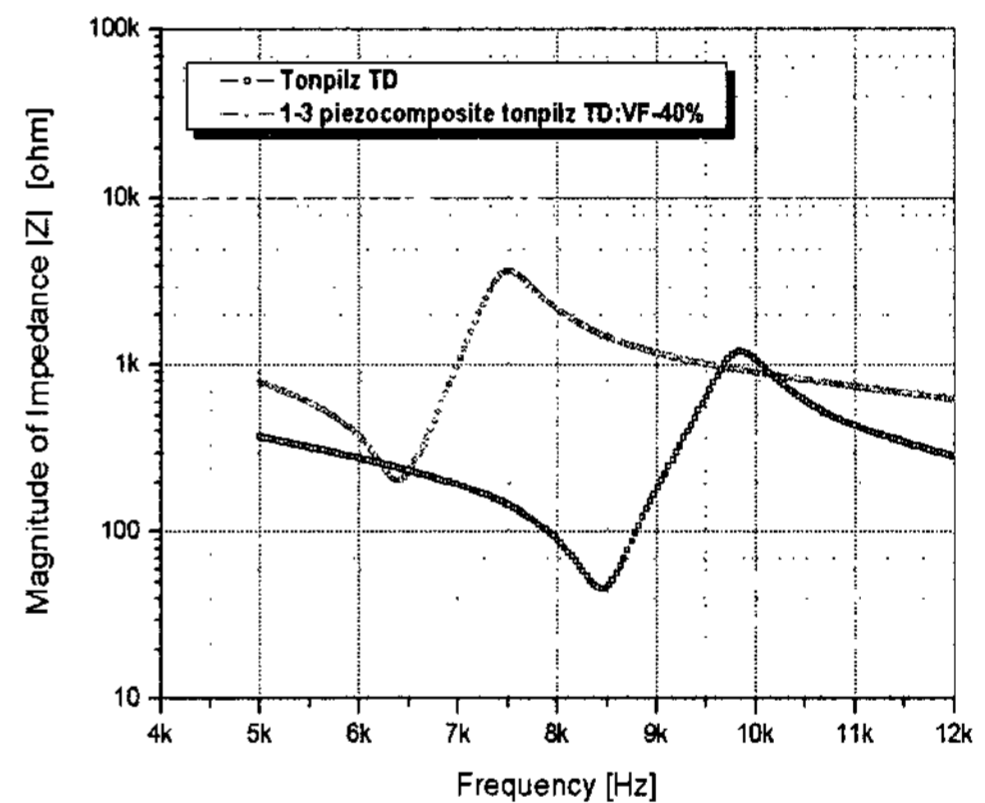


Fig. 13 Measurement result (1): impedance characteristics of tonpiliz transducer and with 1-3 piezoelectric composite in air

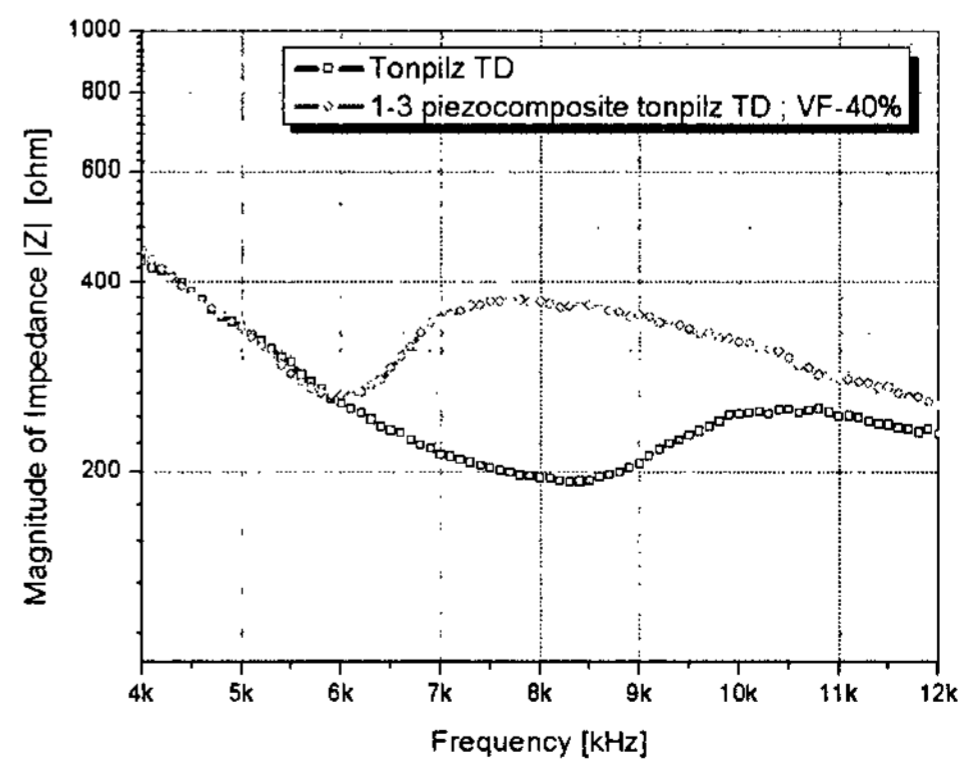
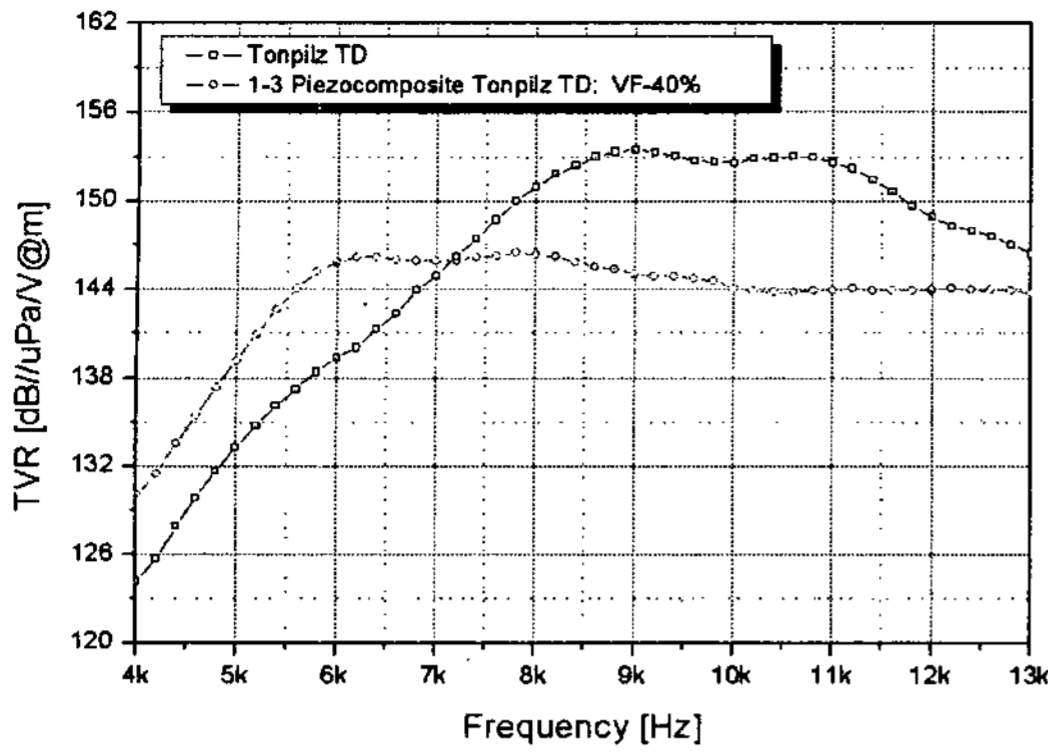
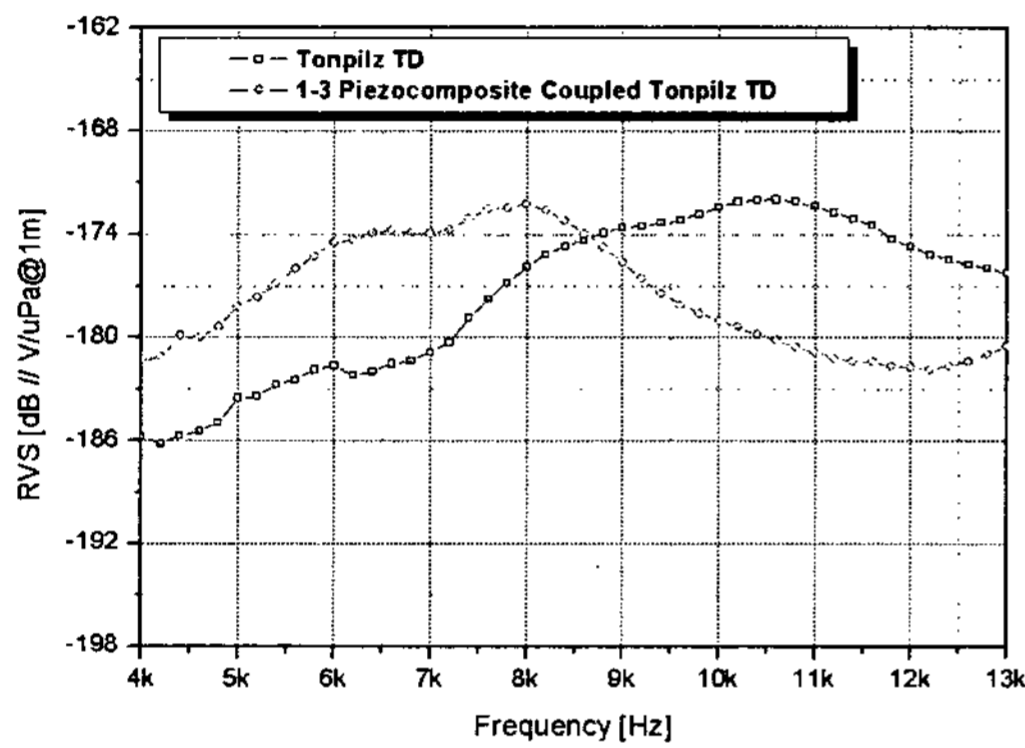


Fig. 14 Measurement result (2): impedance characteristics of tonpiliz transducer and with 1-3 piezoelectric composite in water



(a)



(b)

Fig. 15 Measurement result (3) : TVR and RVS characteristics of developed two types tonpilz transducer in water : (a) TVR and (b) RVS

Fig. 15는 송신전압감도 특성을 나타낸다. 단일 압전 세라믹을 적용한 음향센서의 경우 9 kHz 근처에서 153.4 dB의 크기를 가지며, 1-3형 압전복합체를 적용한 경우에는 6.2 kHz에서 146.2 dB의 크기를 가짐을 알 수 있다. 3-dB 대역폭은 단일상의 경우 약 4 kHz 정도이며, 압전복합체를 적용한 경우에는 2배 수준인 7.5 kHz의 대역폭을 가짐을 알 수 있다. (b)는 수신 전압감도 특성을 나타내는데 단일상의 경우에는 10.9 kHz에서 -172 dB의 크기를 가지며 압전복합체를 적용한 경우에는 그 보다 낮은 주파수 7.8 kHz에서 -172 dB를 가짐을 알 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 1-3형 압전복합체를 적용한 Tonpilz형 음향센서와 종래의 방식의 동일한 크기의

음향센서를 설계, 제작 및 비교 평가 하였다. 평가 결과 이 연구에서 제안된 음향센서는 종래의 음향센서에 비해 동일한 크기에서 약 20% 낮은 공진주파수를 확보하였으며, 각각의 경우 공진주파수가 다르기 때문에 송신전압감도의 상대 비교가 어렵지만 공진주파수를 기준으로 하여 제안된 음향센서는 단일 세라믹을 적용한 경우의 피크 치에 비해 약 9 dB 낮은 송신전압감도를 보이지만 그 대역폭은 80% 이상 증대한 3 dB 대역폭을 확인하였다. 동등한 수준의 수신전압감도 특성을 나타낸다. 이러한 결과는 최근 Sonar에서 요구되는 음향센서의 추세와 일치되는 경향으로 이 연구 성과를 적극 활용하여 종래의 Tonpilz형 음향센서의 주파수 대역폭 개선뿐만 아니라 저주파 음향센서개발에 있어 사이즈의 감소를 통한 음향센서부의 소형, 경량화 시킬 수 있는 획기적인 기술이라 사료된다.

후 기

이 연구는 국방기술연구소에서 주관하는 2005~2007년 국방 혁신기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 연구비 지원에 깊은 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Miyama, T., Nada, T., Inoue, T., Takahashi, S. and Konno, M., 1987, "Investigation for Tonpilz Piezoelectric Transducer with Acoustic Matching Plates", Ultrasonics Symposium, pp. 779~784.
- (2) 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.
- (3) Butler, S. C., 2002, "Triply Resonant Broadband Transducers", Oceans apos. 02 MTS/IEEE Vol. 4, Issue, 29-31, pp. 2334~2341.
- (4) Hawkins, D. W. and Gough, P. T., 1996, "Multi-resonance Design of a Tonpilz Transducer Using the Finite Element Method", Ultrasonics, Ferro-electrics and Frequency Control, IEEE

Transactions on Vol. 43, Issue 5, pp. 782~790.

(5) Smith, R. R, et. al., 1973, "Finite Element Analysis of Acoustically Radiation Structures with Application to Sonar Transducers", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 54, No. 5 pp. 1277~1288.

(6) ATILA Finite Element Analysis for Piezoelectric and Magnetostrictive Structures Version 5.2.2 User's Manual, 2003, Institut Superieur d'Electronique du Nord Acoustics Lab.

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

(8) Levinson, L. M., 1987, "Electronic Ceramics, MARCEL DEKKER, New York and Basel.

(9) Kim, J. H., Son, S.-B., Joh, C. H. and Joh, C.-Y., 2001, "Finite Element Analysis for Acoustic Characteristics of Piezoelectric Underwater Acoustic Sensors", Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 20, No. 1, pp. 68~76.

(10) Yu, N., Kim, H. S., Kim, J. H., Roh, Y. R. and Joh, C. Y., 2005, "Dynamic Analysis of Piezoelectric Sonar Transducer", Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 196~200.