

논문 99-8-1-03

## 도플러효과에 의한 주파수 변화에 대응하는 수중 초음파변환자의 제안

김정환\*, 김무준\*\*, 하강열\*\*

An Underwater Acoustic Transducer Responding to Frequency Shift  
by Doppler Effect

Jung-Whan Kim\*, Moo-Joon Kim\*\*, Kang-Lyeol Ha\*\*

## 요 약

수중에서 초음파변환자가 이동하면서 정지하고 있는 물체를 탐지하는 경우, 도플러(Doppler)효과에 의해 생기는 반사파의 주파수 편이 때문에 수신감도가 저하하게 된다. 이를 막기 위한 방법으로 본 연구에서는 기존의 주파수 가변형 초음파변환자의 기계임피던스 가변용 압전층에 새로이 설계·제작한 유속감지형 가변콘덴서를 부착함으로써, 변환자의 이동속도에 따라 공진주파수가 자동적으로 추종하는 수중 초음파변환자를 제안하고, 그 특성을 조사하였다. 그 결과, 1~10%의 속도범위에서 이론 계산치와 실험치는 비교적 좋은 일치를 나타내어, 도플러 효과에 의한 수신감도의 저하를 막을 수 있음이 확인되었다.

## Abstract

When a moving piezoelectric transducer detects an object in water, its receiving sensitivity is attenuated by Doppler effect. In this paper, a method for compensating the effect is suggested by using a newly designed condenser of which capacitance is varied according to the moving speed of the transducer. Using the method, the receiving resonant frequency of the transducer can be changed automatically. As a result, there is good agreement between the results of experiment and those of calculation. It is confirmed that the response sensitivity degradation of transducers due to Doppler effect can be compensated in the range of 1~10% moving speed.

## 1. 서 론

수중에서 정보획득의 한 수단으로써 압전변환자로 제작한 소나 시스템<sup>[1]</sup>을 사용하는 경우가 많다. 이것은 수중에 음파를 방사하여 탐지대상 물체로부터 반사되어오는 음향신호를 분석함으로써 정보를 획득하는 장치이나, 많은 경우, 탐지대상 물체로부터의 반사파는 그 진폭뿐만 아니라 주파수, 위상 등 여러 가지 요소

에 있어서 방사된 음파와 달라지게 된다. 그런데, 탐지대상 물체와 소나 시스템간에 상대적인 속도가 존재할 경우에는 도플러효과가 반사파의 주파수 성분을 변화시키는 한 요인이 된다<sup>[2-4]</sup>.

소나 시스템에서는 주로 PZT 압전세라믹 변환자를 사용하는데, 이것은 공진특성이 강하여 비교적 좁은 대역폭을 가진다<sup>[5]</sup>. 따라서, 단일 변환자로 송수신을 하는 경우 상술한 도플러효과에 의한 수신파의 주파수 변화로 그 수신감도가 현저히 떨어지는 경우가 있다.

한편, 저자 등은 압전체의 전기단자에 전기적인 임피

\* 대원전자(주) 연구개발실 (Dept. of R&D, Dae-Won Electronic Co., Ltd.)

\*\* 부경대학교 물리학과 (Dept. of Physics, Pukyong National University)

<접수일자 : 1998년 10월 30일>

던스를 접속하여 그 전기적인 임피던스의 변화를 기계적인 임피던스의 변화로 바꾸어주는 기계임피던스 가변용 압전층을 사용한 주파수가변 초음파변환자를 제안하고<sup>[6]</sup>, 전기적인 임피던스를 코일의 인덕턴스에 의한 것으로 할 때 그 공진주파수는 넓은 범위에 걸쳐 가변될 수 있음을 보고하였다<sup>[7]</sup>. 그러나 이 경우 압전체의 제동용량과 코일의 인덕턴스에 의한 공진효과에 의하여 감도곡선의 대역폭이 줄어들어 인가한 전기신호에 비해 방사되는 펄스의 지속시간이 길어지는 등 임펄스응답특성이 좋지 않게 된다<sup>[8]</sup>.

본 논문에서는 분포정수형 등가회로를 이용하여 기계임피던스 가변용 압전층의 전기단자에 용량성 임피던스를 접속할 경우 그 용량의 값에 따른 공진주파수의 가변범위를 파악하고, 임펄스 응답특성을 이론 및 실험에 의해 구하였다. 또한, 변환자가 이동하며 정지하고 있는 대상물을 탐지하는 경우에 있어서, 이동속도에 따라 전기용량이 변하는 유속감지형 가변콘덴서를 제작, 부착함으로써 도플러효과로 인한 수신감도저하에 대응하여 공진주파수가 자동적으로 추종하는 수중 초음파변환자를 제안, 그 특성을 파악하였다.

## 2. 이 론

그림 1에 한 장의 구동용 압전층과 전기단자에 전기적 용량  $C_e$  에 의한 전기적인 임피던스  $Z_e$ 를 접속한 한 장의 기계임피던스 가변용 압전층을 갖는 다층구조 주파수가변 초음파변환자의 구조를 나타내었다. 여기서  $Z_b$ ,  $Z_m$  및  $Z_r$ 은 각각 배면재와 음향정합층 및 음향부하 매질의 특성임피던스이다. 변환자의 특성해석을 위하여, 본 연구에서는 그림 2와 같은 분포정수형 등가회로를 사용하였다. 계산의 편의를 위해 구동용 압전층 [B]와 등가 기계임피던스 가변용 압전층 [C]는 특성이 같은 압전층을 사용하였다. 이에 따라, 압전체 [C]의 전기단자에 접속한 전기적 용량의 영향으로 인한 기계임피던스의 변화분  $z$ 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$z = -\frac{\sigma C_o h^2}{j\omega} \quad (1)$$

여기서,

$$\sigma = \frac{1}{1 + C_o/C_e} \quad (2)$$

이며,  $\omega$ 는 각주파수,  $l$ 은 각 압전체의 두께,  $\epsilon$ 은 유전율,  $S'$ 는 단면적,  $h$ 는 압전 h상수이다. 압전체의 제동용량  $C_o$ 는  $\epsilon S'/l$  이 된다.  $C_e$ 는 기계임피던스 가변용 압전층의 전기단자에 접속한 전기적 용량인데,  $C_e$ 의 값에 따라  $z$ 가 변하게 된다.

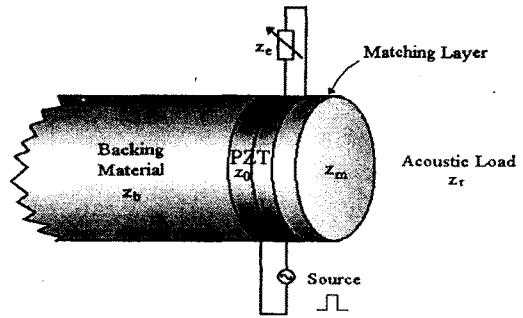


그림 1. 다층구조 주파수가변 초음파변환자의 구조  
Fig. 1. Schematic construction of multi-layered frequency variable ultrasonic transducer

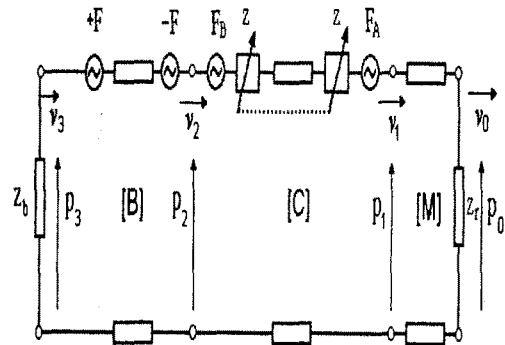


그림 2. 다층구조 주파수가변 초음파변환자에 대한 분포정수형 등가회로

Fig. 2. Equivalent circuit for multi-layered frequency variable ultrasonic transducer

등가회로에 있어서, 각 압전층의 단면에 나타나는 입자속도를 각각  $v_0, v_1, v_2, v_3$ 라 두면,  $F_A, F_B$ 는 각각  $-v_2z, -v_1z$ 로 주어지는 힘의 양이다. 압전체의 고유음향 임피던스를  $Z_o$ , 압전체에서의 파수를  $\gamma$  라고 하면, 각 매질의 음향특성을 나타내는 종속행렬은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

단,  $B_{11} = B_{22} = \cos \gamma l$ ,  $B_{12} = jz_o \sin \gamma l$ ,

$$B_{21} = j \frac{1}{z_o} \sin \gamma l,$$

$$C_{11} = C_{22} = \frac{\frac{z_o}{j \tan \gamma l} + z}{\frac{z_o}{j \sin \gamma l} + z},$$

$$C_{12} = \frac{z_o^2 + \frac{2z_o(1 - \cos \gamma l)}{j \sin \gamma l} z}{\frac{z_o}{j \sin \gamma l} + z},$$

$$C_{21} = \frac{1}{\frac{z_o}{j \sin \gamma l} + z}$$

또한, 음향정합층의 길이를  $l_m$ , 파수를  $\gamma_m$ , 고유 음향 임피던스를  $z_m$ 이라 두면 음향정합층에 대한 종속행렬은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

단,  $M_{11} = M_{22} = \cos \gamma_m l_m$ ,  $M_{12} = jz_m \sin \gamma_m l_m$ ,

$$M_{21} = j \frac{1}{z_m} \sin \gamma_m l_m,$$

그림 2에 나타난 등가회로를 이용하여 초음파변환자의 효율을 계산하면 다음과 같이 구해진다<sup>[9]</sup>.

$$\eta = \frac{4R_o z_r A^2}{(z_r + z_f)(R_o + Z_f)} \quad (6)$$

여기서,  $R_o$ ,  $z_r$ 는 각각 전원의 내부 임피던스의 저항 성분과 부하매질의 특성 임피던스를 나타내고 있다.

$A$ ,  $z_r$ ,  $Z_d$ ,  $Z_f$ 는 각각 변환자의 역계수, 기계임피던스, 계동임피던스, 자유임피던스를 나타내고 있으며, 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$A = -j \frac{hz_t}{\omega} \left\{ \frac{E_{22} - D_{22}}{z_t} + j(E_{21} - D_{21}) \right\} \quad (7)$$

$$z_t = \frac{D_{22} z_b - D_{12}}{D_{11} - D_{21} z_b} \quad (8)$$

$$Z_d = -\frac{1}{j\omega C_o} - \left( \frac{h}{\omega} \right)^2 \left[ (B_{21} E_{11} + B_{22} E_{21} - E_{21}) \{ z_t (D_{21} - E_{21}) + D_{22} - E_{22} \} + B_{21} \right] \quad (9)$$

$$Z_f = Z_d - \frac{A^2}{z_t + z_r} \quad (10)$$

$$\text{단, } \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} \\ E_{21} & E_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} \\ E_{21} & E_{22} \end{bmatrix}$$

결과적으로 (6)식에 나타낸 변환자의 효율함수는 전기적인 용량  $C_e$ 의 값에 따라 변하게 되는데, 이  $C_e$ 를 이용한 주파수 가변 초음파변환자를 제작하기 위해서는 기계 임피던스 가변용 압전체의 전기단에 직렬로 콘덴서를 접속하여야 한다. 특히 변환자가 수중에서 움직일 때 변환자의 이동속도에 따라 주파수가 자동적으로 바뀌게 하기 위해서는 유속감지형 가변콘덴서가 필요하다. 여기서는, 콘덴서의 용량이 전극판 간의 간격에 반비례하는 점에 착안하여 유전물질인 절연유축착스폰지를 사용하여 탄성을 가지는 가변 콘덴서를 제작하였다.

변환자가 탐지대상 물체에 접근할 경우 도플러효과에 의해 반사파의 주파수는 높아지는데, 이에 대응하여 초음파변환자의 공진주파수를 높이기 위해서는 접속한 콘덴서의 전기용량이 작아져야 하므로 전극간의 간격이 넓어져야 한다.

변환자가 수중의 일정 수심에서 이동할 때 면적  $A$ 인 면이 받는 압력을  $\Delta P$ 라고 하면, 그 면이 받는 힘  $\Delta F$ 는 베르누이 방정식<sup>[10]</sup>으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta F = A \Delta P = \frac{1}{2} \rho_w v_f^2 A \quad (11)$$

본 연구에서는 이 힘  $\Delta F$ 에 의해 용량이 변하는 유속 감지형 가변콘덴서를 제작하여 사용하였다. 그림 3에 그 모식도를 나타내었다. 이 그림을 보면 외부압력이 없는 경우에는 탄성계수  $k_c$ 를 갖는 용수철에 의해 스펀지로 만들어진 유전체는 압축상태를 유지하고 있으나 상대속도에 의한 외부압력이 가해지면 용수철은 늘어나게 되고 유전체는 그 압축상태가 풀리면서 전극간의 간격  $d$ 가 커지게 된다. 여기서 피스톤의 면적을  $A$ , 물의 밀도를  $\rho_w$ , 이동 중인 변환자의 물에 대한 상대속도를  $v_f$ 라 하면, 물 속에서 피스톤이 받는 힘은 다음과 같이 된다.

$$\frac{1}{2} \rho_w v_f^2 \cdot A = (k_s - k_c)x \quad (12)$$

- $k_s$  : 용수철의 탄성계수
- $x$  : 용수철의 늘어난 길이
- $k_c$  : 유전체의 등가탄성계수

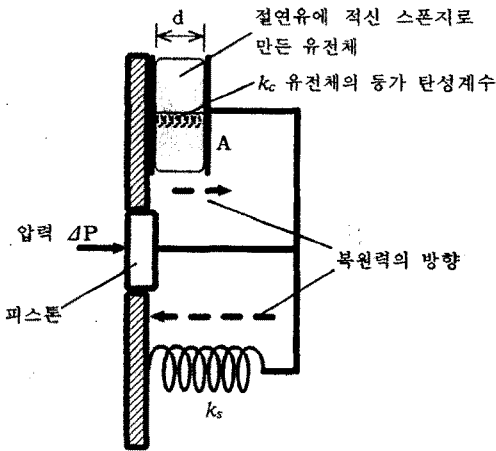


그림 3. 유속감지형 가변콘덴서의 모식도  
Fig. 3. Variable capacitor for fluid speed sensing

그림 3으로부터 알 수 있듯이 용수철이  $x$ 만큼 늘어나면 가변콘덴서의 전극간격은  $d+x$ 가 되어, 물체의 이동속도의 제곱에 반비례하여 콘덴서의 용량이 증가함을 알 수 있다. 한편 탐지대상 물체와 트랜스듀서간에 상대속도  $v_f$ 가 존재하고 트랜스듀서에서  $f_0$ 라는 주파수의 신호를 방사할 때, 도플러 효과에 의해 수신되는 신호의 주파수 이동은 다음과 같다<sup>[11]</sup>.

$$\Delta f = \frac{2v_f}{c} f_0 \quad (13)$$

여기서  $c$ 는 매질내의 음속이다.

### III. 실험 및 결과

본 연구에서는 먼저 주파수 가변 초음파변환자의 특성을 확인하기 위하여 그림 4에 나타낸 것과 같이 물성이 동일한 두 장의 PZT 압전체를 도전성 접착제로 접착하고, 부하매질 쪽의 PZT에는 스위치를 연결하여 스위치를 단락 및 개방함으로써 변환자의 특성이 바뀌게 했다. 실험에 사용한 PZT는 밀도가  $7750\text{kg/m}^3$ , 압전 h상수가  $3.46 \times 10^9 \text{N/C}$  유전율이  $6.6773 \times 10^{-9} \text{F/m}$  두께가  $2.95 \times 10^{-3} \text{m}$ , 음속이  $4350 \text{m/s}$ 인 물질상수를 가진다. 그리고, 정합층은 음속이 2524m/s, 고유음향 임피던스가 3.7Mrayl인 베크라이트(Bakelite)를 사용하였고, 3M사 다용도 접착제로 변환자에 접착하였다.

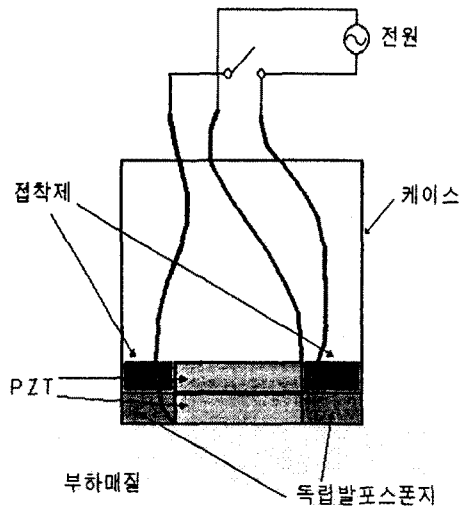
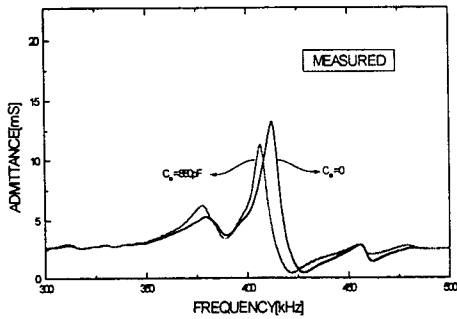


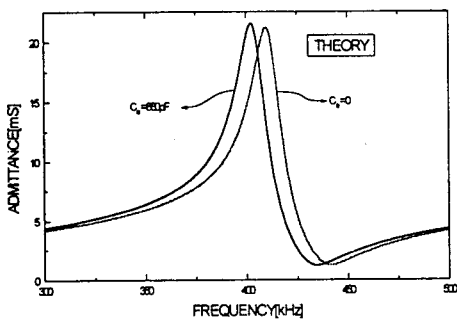
그림 4. 특성 측정용 주파수 가변 초음파변환자  
Fig. 4. Frequency variable ultrasonic transducer for measurement of characteristics

변환자의 공진주파수 변화를 확인하기 위하여, 먼저 제작한 초음파변환자를 공기 중에서 구동시켰을 때의

자유어드미턴스 변화특성을 측정하였는데, 그 결과를 그림 5a에 나타낸다. 기계임피던스 가변용 압전층의 전기단자를 개방( $C_e=0$ )하였을 경우에는 약 412kHz 부근에서 공진을 나타내고, 기계임피던스 가변용 압전층의 전기단자에 880pF의 용량을 접속하였을 경우에는 약 407kHz부근으로 공진주파수가 이동함을 알 수 있다. 이것은 그림 5b에서의 이론계산 결과와 잘 일치함을 보여주고 있다. 또한, 부하매질을 물로 했을 때, 즉 수중에서의 공진주파수 변화를 보기 위해 그림 6과 같은 실험장치를 구성한 다음 펄스에코법으로 실험하였다. 이 실험에서는 변환자와 반사체의 거리는 6cm로 하였으며, 33cm×20cm×26cm 크기의 수조 내에 직경 10cm의 원판 단소강을 반사체로 사용하였다. 그림 7은 전기적인 입력



(a)



(b)

그림 5. 주파수 가변 초음파변환자의 자유 어드미턴스 특성 (a) 실험치 (b) 이론치

Fig. 5. Free admittance characteristics for frequency variable ultrasonic transducer (a) Measured (b) Calculated

펄스를 나타내고, 그림 8은  $C_e=0$ 와  $C_e=880\text{pF}$ 일 때의 각각의 반사파를 FFT를 취하여 주파수 영역으로 나타낸 것이다. 그림 8로부터 전기용량  $C_e$ 의 값에 따라 공진주파수가 418kHz( $C_e=880\text{pF}$ )에서 423kHz( $C_e=0$ )로 변하는 것을 알 수 있다. 실험시 케이블의 인덕턴스에 의한 영향으로 부하매질이 물일 때의 공진주파수가 부하매질이 공기일 때보다 조금 높게 나타고 있으나, 공진주파수의 변화폭은 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

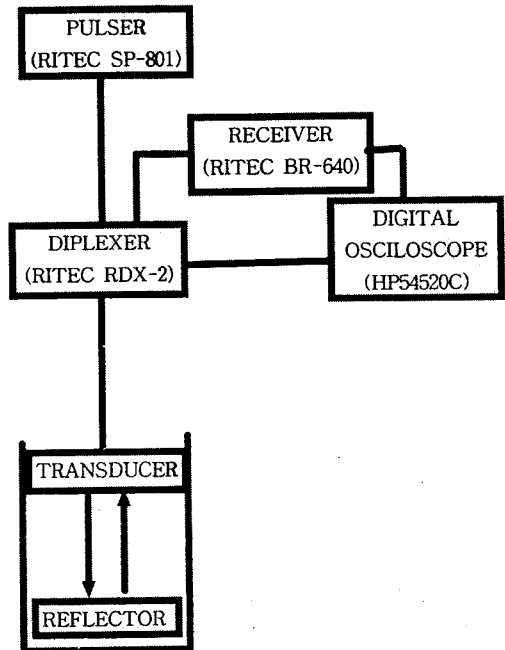


그림 6. 실험 장치도

Fig. 6. Schematic diagram of the experimental system

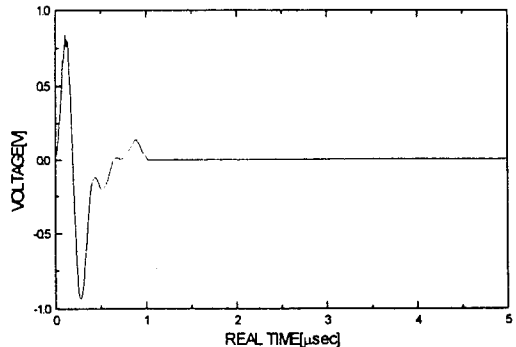


그림 7. 전기적인 입력펄스 파형

Fig. 7. Waveform of electrical input pulse

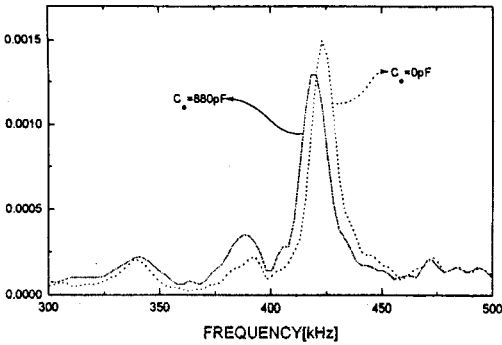


그림 8.  $C_e = 0$  와  $C_e = 880\text{pF}$  에서의 반사파의 주파수 스펙트럼

Fig. 8. Frequency spectra of reflected pulses for  $C_e = 0$  and  $C_e = 880\text{pF}$

이와 같은 공진 주파수의 변화를 변환자의 이동속도에 따라 자동적으로 맞추어 주기 위하여 본 연구에서는 그림 3에 표시한 가변콘덴서를 그림 9와 같은 구조로 제작하였다. 그림 9에서 빗금 친 부분은 스폰지를 절연유에 적신 유전물질이고, 병렬 연결된 전극판은 면적  $12 \times 4\text{cm}^2$  인 구리판을 사용하였다. 그림과 같이 콘덴서의 형태를 다층구조로 함으로써 콘덴서의 용량변화가 상대속도의 변화범위에 대응하도록 하였다. 제작된 가변콘덴서가 목적인 유속변화에 대응하여 그 용량이 변화하는가를 확인하기 위하여 전극판 위에 저울추를 사용하여 하중을 가하면서 콘덴서의 용량 변화를 측정하고, (12)식을 이용하여 하중의 변화를 상대속도의 변화로 환산한 결과를 이론 계산 결과와 함께 그림 10에 나타내었다. 또한 상대속도 변화에 따른 가변콘덴서의 용량변화가 공진 주파수의 변화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 기계임피던스 가변용 압전층의 전기단자에 제작한 가변콘덴서  $C_e$ 를 접속하고, 앞서와 같은 방법으로  $C_e$ 를 변화시켜가며 측정된 변환자의 공진주파수의 변화 형태를 이론계산 결과와 함께 그림 11에 나타내었다. 이들 결과를 보면 이론계산 결과들은 이론에서 고려하지않은 절연유의 점성에 의한 효과에 의해 측정결과들과 차이를 보이고 있으나 주어진 가변콘덴서의 용량변화 범위에서는 좋은 일치를 보인다. 또한 도플러 효과에 의한 주파수 이동에 따라 본 연구에서 제안한 트랜스듀서의 공진주파수가 그에 대응해 주는 것을 확인하기 위하여 그림 10의 결과와 그림 11의 결과로부터  $C_e=0$ 일 때의 공진주파수(412kHz)를 기준으로

하여 그 주파수 변화폭에 따른 상대속도의 변화를 이론계산 결과와 함께 그림 12에 나타내었다. 이때 이론 계산에 있어서는 수중의 음속  $c$ 를 1500m/s, 기준주파수  $f_0$ 를 412kHz로 두고 식(13)을 이용하여 계산하였다. 이 결과를 보면 실험결과와 이론 계산결과가 좋은 일치를 보이고 있어 본 연구에서 제안한 유속 감지형 가변콘덴서가 부착된 주파수 가변 초음파변환자를 사용하면 상대속도가 1~10%의 범위인 경우에 대하여 도플러효과에 의한 수신감도의 저하를 막을 수 있음을 알 수 있다.

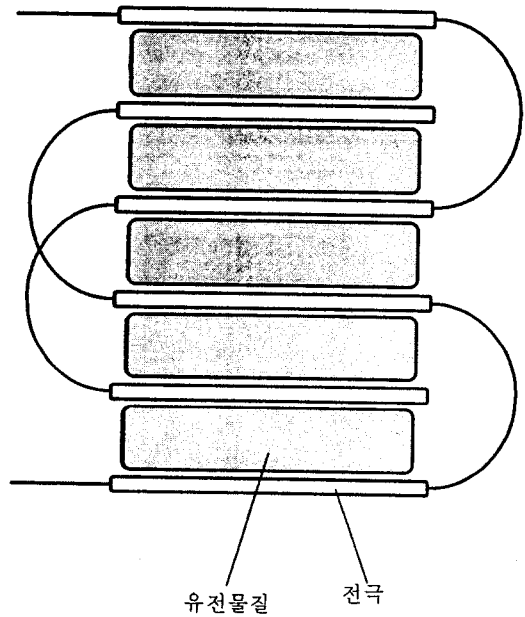


그림 9. 가변 콘덴서의 구조

Fig. 9. Schematic construction of variable capacitor

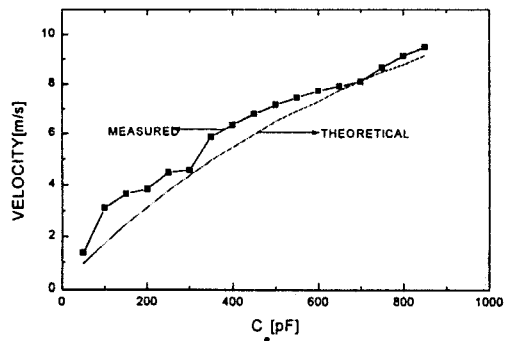


그림 10. 속도 변화에 따른  $C_e$  값의 변화

Fig. 10. Variation of  $C_e$  according to change of velocity

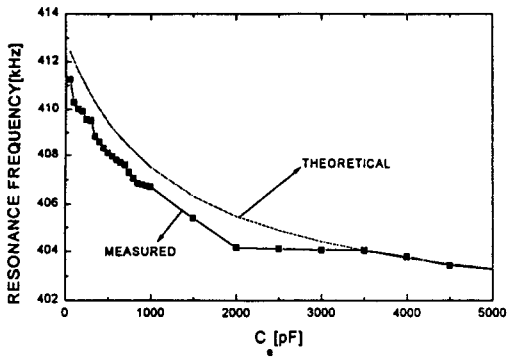


그림 11.  $C_e$  값의 변화에 따른 공진주파수의 이동

Fig. 11. Resonance frequency shift due to change of  $C_e$

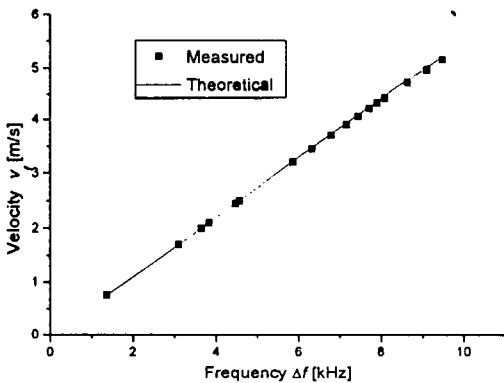


그림 12. 주파수 변화폭에 따른 상대속도의 변화

Fig. 12. Relative velocity vs. Doppler frequency shift

#### IV. 결 론

수중에서 압전변환자가 이동하며 대상물을 탐지하는 경우, 그 문제점의 하나인 도플러효과에 의한 수신감도의 저하를 막기 위하여, 본 연구에서는 유속 감지형 가변콘덴서가 부착된 주파수가변 초음파변환자를 제안하고, 그 특성을 파악하였다. 새로이 제안된 변환자는 가변 인덕터를 사용하는 기존의 주파수가변 초음파변환자에서의 가변 인덕터 대신에 유속 감지형 가변 콘덴서를 부착시킨 것으로, 변환자의 이동속도에 따라 공진 주파수가 자동적으로 변화함으로써 도플러효과에 의한 수신감도의 저하를 보상할 수 있도록 한 것이다. 이론 계산 및 실험결과, 1~10%의 속도범위에서 도플러효과에 의한 수신감도의 저하를 막을 수 있음이 확인되었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] P. H. Milne, *Underwater Acoustic Positioning System*, pp. 93-96, E. & F. N. SPON, New York.
- [2] R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, pp. 322-324, McGraw-Hill, New York.
- [3] C. S. Clay, H. Medwin, *Acoustical Oceanography*, pp. 334-337, John Wiley & Sons, New York.
- [4] W. S. Burdic, *Underwater Acoustic System Analysis*, pp. 231-232, Prentice-Hall, New Jersey.
- [5] D. G. Tucker, B. K. Gazey, *Applied Underwater Acoustics*, pp. 25-29, Pergamon Press, Oxford.
- [6] 中鉢 憲賢, 金 茂俊, "厚み縦振動モード壓電振動子の傳送線路モデル等價回路による多層構造超音波トランスジューサの特性解析について", *電子情報通信學會(日本)*, US92, No. 9, pp. 67-72, 1992.
- [7] N. Chubachi and M. J. Kim, "A Transmission-Line Model Equivalent Circuit for Piezoelectric Transducers Including the Effect of Electrical Terminal Impedance", *Japanese Journal of Applied Physics* Vol. 35, Part 1, No. 5B, 1996.
- [8] 김정환, 김무준, 하강열, "다층구조 압전층을 이용한 초음파 트랜스듀서의 임펄스응답특성 제어", *한국음향학회 학술발표회 논문집 제15권 제1호*, pp. 369-372, 1996.
- [9] 菊池, 中鉢, 山水, "超高周波用多層膜超音波トランスジューサの解析", *日本電子通信學會 論文誌* Vol. 55-a, No. 7, pp. 331-338, 1972.
- [10] 고재걸, 박덕규, 최상돈, *대학 물리학*, pp. 151-155, 청문각, 1995.
- [11] L. E. Kinsler, *Fundamental of Acoustics*, pp. 415-416, John Wiley & Sons, New York, 1982.

이 논문은 1997년도 부경대 학술진흥재단연구비  
지원에 의한 논문임

著 者 紹 介



김 정 환

1996년 부경대학교 물리학과 졸업 (이학사),  
1998년 부경대학교 대학원 물리학과 졸업 (이학석사),  
1998년~현재 대원전자(주) 부설연구소 연구원



김 무 준

1985년 부경대학교(구 부산수산대학) 응용물리학과 졸업 (이학사),  
1990년 부경대학교( " ) 대학원 응용물리학과 졸업 (이학석사),  
1994년 일본 東北大學 대학원 공학연구과 졸업 (공학박사),

1995년~현재 부경대학교 물리학과 조교수



하 강 열

1978년 부경대학교(구 부산수산대학) 어업학과 졸업 (수산학사),  
1982년 부경대학교( " ) 대학원 수산물리학과 졸업 (수산학석사),  
1990년 일본 東北大學 대학원 공학연구과 졸업 (공학박사),

1991년~현재 부경대학교 물리학과 부교수