

電磁誘導形 水中音源의 제작과 특성 해석

An Electromagnetic Induction Underwater Acoustic Transducer Design And Its Characteristics

박 윤 규*, 하 강 열*, 장 지 원*

(Yoon-Kyu Park*, Kang-lyeol Ha*, Jee-Won Chang*)

요 약

電磁誘導形 音源裝置는 짧은 펄스의 음파를 수중에 放射시킬 수 있어, 높은 距離分解能이 요구되는 해저 탐사용 음원 또는 수중 음파전달 특성시험용 음원등으로 널리 이용될 수 있다. 본 연구에서는 Eisenmenger가 제안한 형태의 電磁誘導形 音源裝置를 설계 제작하여, 放射되는 음파의 파형을 관찰하고, 그 주파수 특성을 분석하였다. 제작된 음원으로부터는 약 100μs 주기의 짧은 충격 펄스의 초음파가 얻어졌으며, 그 음압은 진동판의 두께가 얇은 경우에 크며, 콘덴서의 용량에 비례하여 증가하였다. 발생된 초음파의 중심 주파수는 振動板의 두께가 두꺼운 경우에 높으며, 콘덴서 용량이 증가할수록 낮아지고, 대역폭도 좁아졌다.

ABSTRACT

An electromagnetic induction transducer which radiates an impulsive ultrasonic wave, could be useful for high power sound source in underwater acoustical survey. The aim of this study is to investigate the waveforms and the spectral characteristics of the waves produced by the transducer which was on the basis of the design criteria proposed by Eisenmenger. It was found that the sound pressure levels of the impulsive ultrasonic waves were directly proportional to the capacitance of the energy stored in the capacitor and inversely proportional to the thickness of the vibrating copper foil, while the center frequencies and the fractional bandwidths were vice versa.

I. 서 론

導體膜에 인접하여 설치된 捲線 코일에 콘덴서를 통하여 전류를 흘리면 電磁誘導에 의하여 導體膜에는 渦電流(Eddy-current)가 유도되며, 이 渦電流에 의한 자기장과의 상호 작용으로 導體膜은 진동하게

된다. 이 원리를 이용하여 水中에 음파를 발생 시키는 장치는 1960년대 초 Eisenmenger에 의해 처음으로 제안되었으며, 電磁誘導形 音源裝置라고 부른다¹⁾. 이 電磁誘導形 音源裝置는 매우 짧고 강력한 펄스의 음파를 발생시킬 수 있어 음波 物性 연구나 해저 지층 탐사등에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대되고 있다²⁾.

일반적으로 電磁誘導形 音源裝置에 사용되는 導體膜은 銅이나 알루미늄 등의 反磁性體 金屬薄板이며,

*부산수산대학교 물리학과
접수일자: 1992. 5. 4.

방사되는 펄스의 파형은 콘덴서나 코일 및 導體膜의 전기적 특성과 형태에 따라 달라진다. 따라서 실용적인 장치의 제작을 위해서는 전기적 및 기계적인 諸條件을 충분히 고려해야 하며^(4, 5), 실제로 따라서는 초음파 진단이나 비파괴 검사용으로 이용될 수 있는 數 MHz帶의 高周波音源의 제작도 가능하다^(6, 7).

본 연구에서는 지속시간이 짧은 충격 펄스의 水中音源을 만드는 것을 목적으로 電磁誘導形 音源裝置를 설계 제작하고, 水中에 방사되는 음파의 파형을 측정, 분석하여, 그 주파수 특성을 구하였다. 導體膜으로써는 두께가 30 μ m와 50 μ m인 2장의 銅薄板을 사용하고, 각각에 대하여 콘덴서 용량을 1 μ F, 2 μ F, 4 μ F, 6 μ F등으로 변화시키면서 측정함으로써, 振動板 두께 및 콘덴서 용량에 따른 펄스의 파형과 그 중심 주파수 및 比帶域幅을 구하였다.

II. 電磁誘導形 水中音源의 구조 및 구동력

2-1. 誘導 渦電流에 의한 구동력

그림 1은 電磁誘導形 水中音源장치의 기본 구조를 나타낸다⁽¹⁾. 捲線을 가는 銅線으로 치밀하게 감았을 경우, 각 回線은 반지름이 각각 다른 同心圓으로 간주될 수 있다. 그 반지름을 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n, \dots, a_{s-1}$ 라고 하면, 중심축 Z상에 있는 P점에서의 磁氣誘導 B_z 는 Biot-Savart 법칙에 의하여 다음과 같이 주어진다.

$$B_z = \frac{2\pi i}{c} \sum_{n=0}^{s-1} \frac{a_n^2}{(a_n^2 + Z^2)^{3/2}} K \quad (1)$$

여기서, i 는 코일에 흐르는 전류, $1/c = \mu_0/4\pi$ (μ_0 는 진공에서의 투자율), a_n 은 n 번째 同心圓의 반지름, z 는 원점 0에서 P점까지의 거리. K 는 z 축 방향의 단위 벡터이다.

P점에 진동판을 설치하면, 코일의 미소 線分에 흐르는 전류에 의하여 진동판에 誘導된 渦電流가 받는 Lorentz력 $dF_n(t)$ 는

$$dF_n(t) = i'(t) dl' \times B_z \quad (2)$$

이다. 여기서 i' 는 진동판의 표면에 흐르는 誘導 渦電流이며, dl' 는 코일의 미소 길이이다. 만약, 捲線 코일과 진동판 사이의 간격(Δz)이 매우 작으면, 진동판 표면에 흐르는 유도전류 i' 는 나선형(spiral) 코일에 흐르는 전류 i 에 대해 Lenz법칙을 적용시킴으로

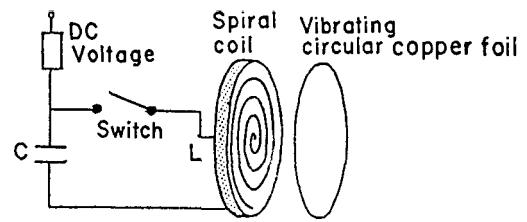


Fig. 1. Basic acoustic source system by electromagnetic induction acoustic transducer.

서 구해지는데 크기는 간격에 따라 다소 다르나 i 에 비례한다고 볼 수 있다. 따라서,

$$F_n(t) = i'(t) B_z 2\pi a_n = K i(t) B_z 2\pi a_n \quad (3)$$

라고 할 수 있다. 여기서 K 는 비례상수이다. i' 와 B_z 는 서로 수직이고 fdl' 은 $2\pi a_n$ 이므로, (1)식을 (3)식에 대입하면 다음과 같다.

$$F_n(t) = \frac{4K\pi^2 i(t)^2}{c} \sum_{n=0}^{s-1} \frac{a_n^3}{(a_n^2 + \Delta z^2)^{3/2}} K \quad (4)$$

한편, 음원장치의 勵起回路는 RLC회로로 볼 수 있으므로 회로상에 흐르는 전류 $i(t)$ 는 시간 t 가 매우 짧은 범위에서는 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$i(t) = I_0 \sin \omega t \exp(-\beta t) \quad (5)$$

(5)식에서 $\omega = [(R/2L)^2 - 1/LC]^{1/2}$ 이고, $\beta = -R/2L$ 이다. (5)식을 (4)식에 대입하여 정리하면 구동력 $F(t)$ 는 (6)식과 같다.

$$F(t) = F_0 \sin^2 \omega t \exp(-2\beta t) \quad (6)$$

여기서,

$$F_0 = K\mu_0 \pi I_0^2 \sum_{n=0}^{s-1} \frac{a_n^3}{(a_n^2 + \Delta z^2)^{3/2}} \quad (6)$$

이다. 식(6)은 銅薄板上에 유도된 渦電流와 자장과의 상호작용으로 인하여 진동판이 받게 되는 힘을 나타낸다.

2-2 진동판의 기계적 진동

본 연구에서 제작한 電磁誘導形 수중음원 장치의 진동판은 가장자리가 고정된 원형薄板이다. 이 薄板의 두께를 $2t_0$, 반지름을 a , 구동력을 F

라고 할때 이러한 振動薄板의 진동방정식은

$$(\nabla^4 - k^4)\xi = \frac{3(1-\sigma^2)}{2Et_0^3} F \quad (7)$$

이다⁽⁸⁾. 여기서,

$$\nabla^4 = \left[\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right]^2$$

$$k^4 = \frac{3\rho(1-\sigma^2)}{Et_0^2} \omega^2$$

이며, E는 Young률, ρ 는 진동판의 체적밀도, σ 는 Poisson 비, k는 파수이다.

이 振動薄板에 대한 경계조건은

$$\xi(r=a) = 0, \quad \frac{d\xi}{dr}(r=a) = 0 \quad (8)$$

이다. F = 0일때의 기계적 자유진동은 (7)식에서

$$(\nabla^4 - k^4)\xi = 0 \quad (9)$$

이며, (9)식의 해(solution)는

$$\xi = \{A J_0(kr) + B I_0(kr)\} \exp(j\omega t) \quad (10)$$

로 주어진다. (8)식의 경계조건으로부터

$$\frac{J_0(kr)}{J_1(kr)} = - \frac{I_0(kr)}{I_1(kr)} \quad (11)$$

이며, J_i 와 I_i ($i, j = 0, 1$)은 Bessel 함수이다. 이 방정식을 만족시키는 kr 의 α_m ($m = 1, 2, 3, \dots$)은 Bessel 함수표로부터 구할 수 있다. 따라서 ω_m 은

$$\omega_m = \frac{\alpha_m}{a^2} \frac{t_0 \sqrt{E}}{[3\rho(1-\sigma^2)]^{1/2}} \quad (12)$$

가 되어 모드에 따라 일정한 고유진동수의 음파가 발생한다.

진동판의 변위 ξ 는

$$\xi = \sum A_m \theta_m \exp(j\omega_m t) \\ = \frac{1}{2k\rho} \sum \frac{1}{\omega_m - \omega^2} A_m \theta_m \exp(j\omega_m t) \quad (13)$$

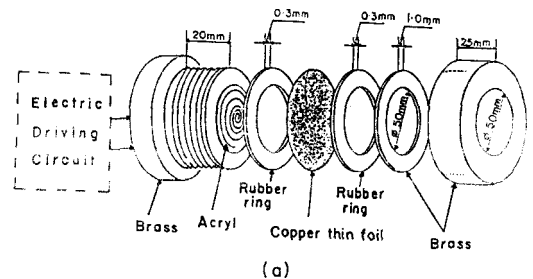
로 주어진다. 여기서 A_m 는 전계상수이며, θ_m 은 함수 열이다.

진동판의 진동은 전기적구동력에 의한 충격적인 강제진동에 이어 동판의 기계적 자유진동으로 이어지며, 강제진동은 전기적 특성에 따라 진동주파수가 정해지지만, 기계적 자유진동은 진동판의 크기, 무게, Young율, 밀도등에 따라 변하며 전기력에 의한 것과는 다소 차이가 생긴다. 본 電磁誘導形 음원에서는 전기적 강제진동과 기계적 자유진동이 합성된 음파가 방사된다고 생각된다.

III. 音源裝置의 제작 및 실험방법

3-1 電磁誘導形 水中音源의 제작

그림 2(a)는 본 연구에서 제작한 電磁誘導形 水中音源裝置의 음파 발생부이고, 그림 2(b)는 이 유원 장치의 구동 전기회로도이다. 그림 2(a)에서 捲線 코일을 지지하는 절연체로써는 지름이 50mm인 아크릴막대를 사용하였다. 전기회로에 의해 축적된 전기에너지의 흐름에 견딜 수 있도록 권선 코일의 감기는 0.5mm로 하고, 아크릴 봉의 직경을 고려하여 권선수를 40회로 하므로써 감긴 코일의 전체 직경이 14mm가 되게 하였다. 코일과 銅薄板은 고무링을 사용하여 0.3mm 간격으로 고정하였으며, 銅薄板은 두께 30 μ m와 50 μ m의 것을 사용하였다. 각 부분을 그림 2(a)에 나타낸 바와같이 순서대로 조립한 후 아크릴 지지봉에 나사를 넣어 靑銅(brass) 뚜껑의 나사로 고정시켰다. 그림 2(b)에서 저항 R₁은 콘덴서에 충전한 전하를 방전시킬때 전류의 逆流을 막기 위한 것이며, 스위치로써는 SCR를 사용하였다. 저항 R₁은 60k Ω , R₂은 2k Ω , R₃은 100k Ω 이다. 또 SCR의 gate에 인가되는 전압은 DC 3V로 불연속적으로 작동시켰다. 콘덴서 C₁은 내압이 DC 1kV이고 용량은 1 μ F, 2 μ F, 4 μ F, 6 μ F의 4종류를 사용하였다. C₁의 양단에 인가되는 전압은 DC 500V였다. C₂는 0.01nF, 코일의 인덕턴스 L은 20 μ H이다.



(a)

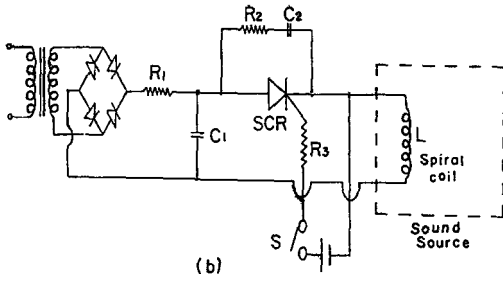


Fig. 2. Schematic diagram of structure (a) and electric driving circuit (b) of proposed electromagnetic induction acoustic transducer.

3-2 펄스 파형의 측정 및 분석

그림 3은 제작된 음원장치로부터 방사되는 음파의 측정에 사용한 음파 수신장치의 구성도이다. 가로, 세로, 높이가 각각 100cm, 60cm, 50cm의 수조에서 제작한 음원장치를 바닥으로부터 약 15cm위에 설치하고, 수평으로 30cm 떨어진 곳에 수중청음기(B&K 8100)를 설치하여 방사되는 음파를 수신하였다. 이 30cm는 kHz帶 以上の 초음파에 대해서 충분히 원거리 음장 영역이라고 할 수 있다. 수신된 음파를 광대역 증폭기(B&K 2606)로 40dB 증폭시킨 후 기억형 디지털 오실로스코프로 관찰하였다. 음파의 주파수 분석은 디지털 오실로스코프에 저장된 파형을 시간 간격 1 μ s로 128점 샘플링하여 퍼스날 컴퓨터에 입력시킨 후 FFT 알고리즘에 의하여 분석하였다.

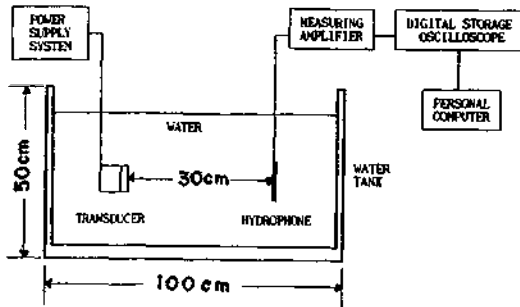


Fig. 3. Experimental setup for sound pressure measurement

IV. 결과 및 고찰

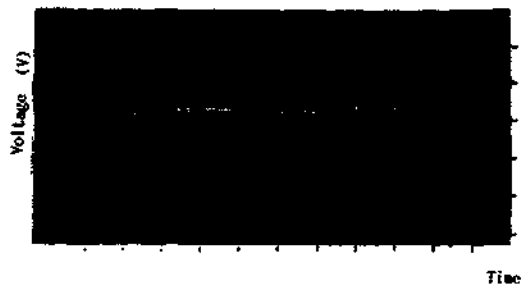
그림 4(a)와 (b)는 제작된 음원장치로부터 방사된 음파를 측정된 파형의 一례이다. 이 때의 勵起 콘덴서 용량은 6 μ F이다. 振動薄板 두께 30 μ m, 50 μ m의 각 경우에 있어서 침투 출력전압은 약 27V와 17V이었다. 이것은 증폭기의 이득(40dB)과 수중청음기의 수

신감도(-56 μ V/Pa)를 고려하여 계산하면 194dB re μ Pa과 190dB re μ Pa에 해당된다. 각 파형들은 지속 시간이 한 주기 정도로 매우 짧은 전형적인 충격파의 형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 각 파형들은 그림 4(a)에 표시한 것처럼 세부분으로 분리되어 있는데 파형의 첫 주기에 해당하는 'A' 부분은 전기적 구동력에 의한 강제진동이고, 'B' 부분은 振動板의 기계적 자유진동이며, 'C' 부분은 複板射 등에 起因하는 잡음으로 추정된다. 트랜스듀서의 주파수 특성은 'A' 및 'B'부분의 파형을 주파수 분석하므로써 얻어지며, 'B'부분은 'A'부분과 거의 유사한 파형이면서 다소의 시간 지연이 있으므로 주파수 영역에서는 'A', 'B'부분의 파형의 간섭으로 인하여 스펙트럼상에 골목이 나타난다. 물체의 탐지에 있어서 중요하며 중심 주파수 부근의 대역을 형성하는 주 성분이 되는 것은 'A'부분으로, 본 논문에서는 'A'부분만을 대상으로 주파수 분석을 행하였다.



vertical scale : 10 V/div.
horizontal scale : 50 μ s/div.

(a) with thickness of 30 μ m foil



vertical scale : 10 V/div.
horizontal scale : 50 μ s/div.

(b) with thickness of 50 μ m foil

Fig. 4. Observed waveforms from two vibrating copper foils with the thicknesses of 30 μ m and 50 μ m.

그림 5는 그림 4(a), (b)의 각 파형의 'A'부분을 주파수 분석한 결과이다. 각각의 중심 주파수는 31.3kHz와 46.8kHz로써, 두께 50 μ m의 振動板이 30 μ m보다 높은 주파수의 음파를 발생시킴을 알 수 있다. -3dB점을 기준으로한 比帶域幅은 振動薄板 두께 30 μ m과 50 μ m에서 각각 약 65%와 70%로써 50 μ m의 경우가 다소 높게 나타났다.

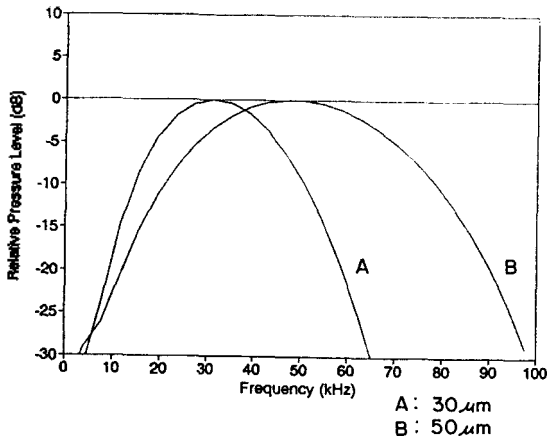


Fig. 5. Power spectra of the measured acoustic waves from two vibrating copper foils with the thickness of 30 μ m and 50 μ m.

그림 6은 콘덴서 용량을 변화시킴으로써 방전시에 공급되는 전기 에너지를 다르게 하였을 때의 파형의 변화를 나타낸다. 이 변화를 보면 두께 30 μ m의 경우가 50 μ m에 비하여 2dB~4dB정도 높은 음압을 나타내며, 콘덴서 용량, 즉 공급되는 전기 에너지의 크기

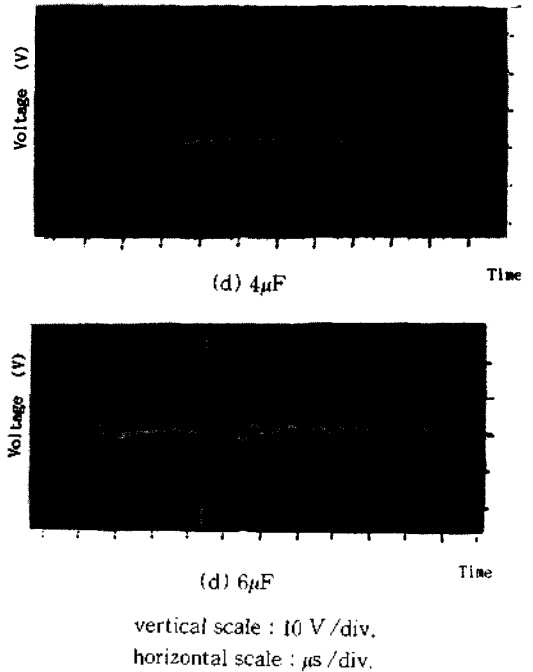
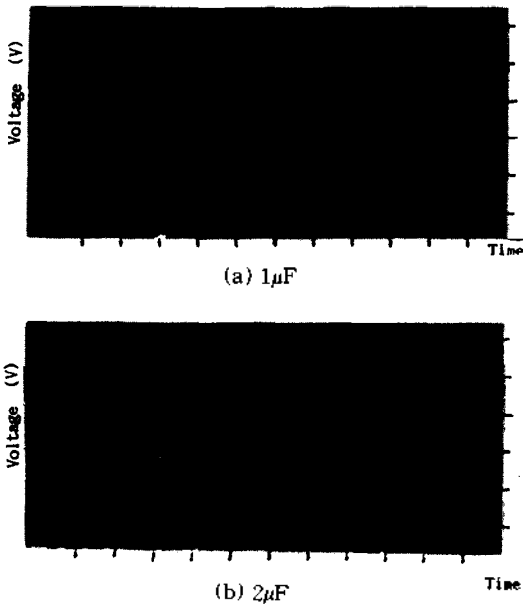
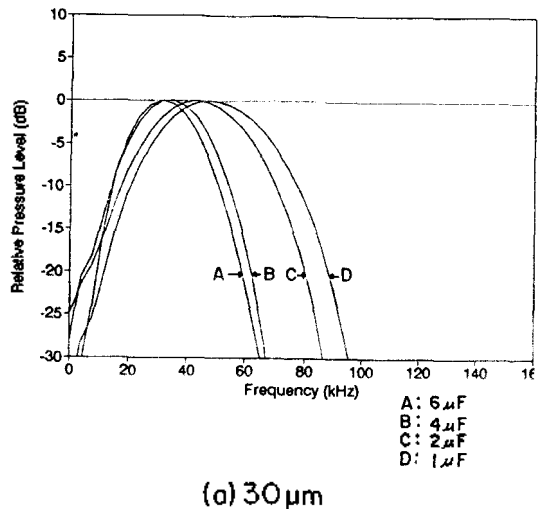


Fig. 6. Observed waveforms from the acoustic source with each of four different capacity energizing condensers.

에 비례하여 방사파의 음압이 증대함을 알 수 있다. 이 파형들의 주파수 분석 결과는 그림 7(a), (b)에 각각 나타내었으며, 이로부터 구한 중심 주파수, 比帶域幅을 그림 6로부터 산출한 음압레벨과 함께 표 1과 그림 8에 나타내었다. 이 결과를 보면 중심 주파수는 振動薄板의 두께가 30 μ m인 경우가 50 μ m에 비해 15kHz~19kHz정도 낮으며, 비대역폭도 전반적으로 다소 좁아지는 경향을 나타내고 있다. 그리고, 콘덴



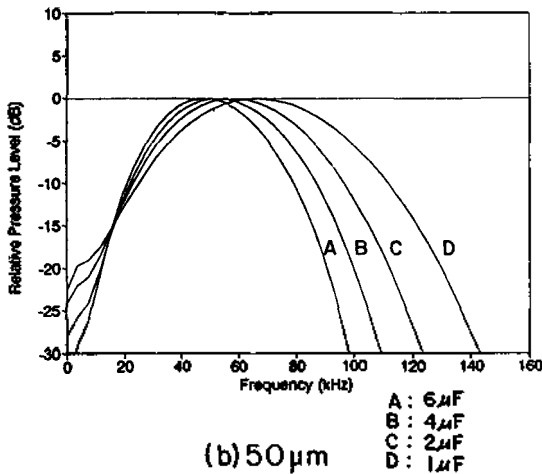


Fig. 7. Power spectra of the acoustic waves radiated from the source with each of four different capacity energizing condensers.

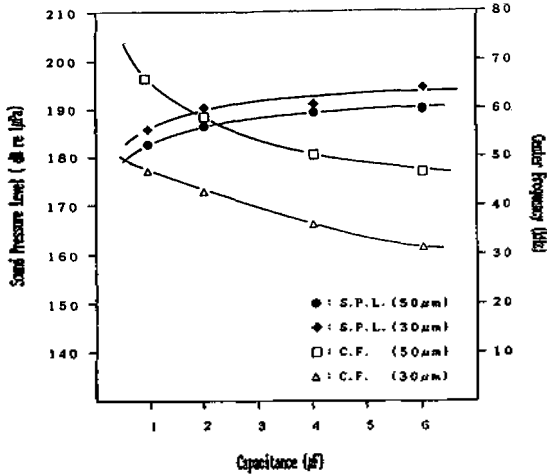


Fig. 8. Comparison of the center frequency(C.F.) and the sound pressure level(S.P.L.) between the source with thickness of vibrating copper foils of 30 μ m and 50 μ m

Table. 1. The variations of sound pressure level (S.P.L.), the center Frequency(C.F.) and the fractional bandwidth(F.B.W) in the thicknesses of vibrating copper foil of 30 μ m and 50 μ m.

Capacitance (μ F)	Thickness of Vibrating Copper foil					
	30 μ m			50 μ m		
	S.P.L. (dB re μ Pa)	C.F. (kHz)	F.B.W. (%)	S.P.L. (dB re μ Pa)	C.F. (kHz)	F.B.W. (%)
1	186	46.9	73	183	66.4	73
2	190	43.0	71	187	58.6	72
4	191	35.2	67	189	50.8	72
6	194	31.3	65	190	46.9	70

서의 용량이 증가함에 따라 음압이 높고 주파수가 낮은 음파가 발생되나, 대역폭은 좁아지며, 두 진동판에서의 차는 콘덴서의 용량에는 무관하게 거의 일정하게 나타남을 알 수 있다. 또한, 콘덴서의 용량이 증가하면 比帶域幅은 감소하는 경향을 나타내고 있다.

V. 결 론

電磁誘導形 水中音源裝置를 제작하고, 그 방사되는 음파의 파형을 관찰한 결과 짧은 충격 펄스가 얻어짐을 알 수 있었다. 음압 레벨은 콘덴서의 용량이 크고, 振動薄板의 두께가 얇은 경우에 크게 나타나며, 중심 주파수는 콘덴서의 용량에 반비례하여 증가하고, 중심 주파수가 높을수록 帶域幅도 넓어진다는 것을 알 수 있었다. 본 연구는 數십 kHz帶의 음파를 발생시키는 音源 제작에 限定하였으나, 수백 kHz帶의 주파수 범위까지도 콘덴서 및 전압, 捲線 코일의 크기등을 조정함으로써 용이하게 주파수 및 음압을 변화시킬 수 있다. 따라서, 여기서 논한 電磁誘導形 음원장치의 원리 및 실험결과는 용도에 따라 적합한 형태의 수중 펄스 音源의 제작에 쉽게 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. W. Eisenmenger, "Elektromagnetische Erzeugung Von Ebenen Druckstossen in Flussigkeiten," Acustica, Vol. 12, pp.185~201, 1962.
2. W. Eisenmenger, "Experimentelle Bestimmung Der Stossfrontdicke Aus Dem Akustischen

Frequenzspektrum Elektromagnetisch Erzeugter Stosswellen in Flussigkeiten Bei Einen Stossdruckbereich von 10Atm bis 100Atm," Acustica, Vol. 14, pp.187~204, 1964.

- 3. 實吉純一, 菊池喜充, 能本乙彦, "招音波技術便覽", 7th Ed., 日刊工業新聞社, pp. 1540~1544, 1989.
- 4. 奥島基良, 本岡誠一, "誘導形送波器の低周波化に関する研究(第4報)", 日本音響學會講演論文集, pp.143~144, 1964.
- 5. 奥島基良, 本岡誠一, "誘導形送波器の低周波化に関する研究(第5報)", 日本音響學會講演論文集, pp.29~30, 1965.

- 6. 遠藤信行, 面一辛, 加久義孝, "球狀放射面"をもつ電磁誘導形インパルス送波器", 日本音響學會講演論文集, pp. 713~714, 1984.
- 7. 清水 洋, A. J. BAHR, "NDEのための非接觸超音波"トランスジューサ," 日本電子電氣通信學會超音波研究會, Vol.32, pp.21~27, 1977.
- 8. L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens and J. V. Sanders, "Fundamentals of Acoustics," 3rd Ed., John Wiley & Sons, pp.92~95, 1982.

▲ 박 윤 규



1967년 3월 13일생
 1988년 2월 : 인제대학교 물리학과 졸업(이학사)
 1990년 10월 : 부산수산대학교 물리학과 조교
 1992년 2월 : 부산수산대학교 대학원 응용물리학과 졸업(이학석사)

▲ 장 지 원



1930년 2월 5일생
 현재 : 부산수산대학교 물리학과 교수
 (1990년 9권 5호 참조)

▲ 하 강 열



1955년 1월 17일생
 1978년 2월 : 부산수산대학교 어업학과 졸업
 1978년 3월 : 국방과학연구소 연구원
 1982년 8월 : 부산수산대학교 대학원 수산물리학과 졸업

1983년 3월 : 부산수산대학교 응용물리학과 조교
 1985년 1월 : 일본 도오후쿠대학교 대학원 공학연구과 연구생
 1990년 3월 : 일본 도오후쿠대학교 대학원 공학연구과 전기 및 통신공학 전공 졸업(공학박사)
 1991년 3월 ~ 현재 부산수산대학교 물리학과 전임강사