

## 잡음지수를 고려한 압전형 하이드로폰에 관한 연구

### A Study on Piezoelectric Hydrophone with Noise Factor Consideration

\* 김 형 동 (Kim, H.D.)

\*\* 성 광 모 (Sung, K.M.)

#### 요 약

본 논문에서는 원통형 압전세라믹을 이용하여 2종류의 하이드로폰을 제작한 결과를 제시하고 있다. 한 종류는 방사선 방향으로 단일 분극화된 압전소자의 양끝을 금속궤으로 밀폐하여 제작되었고, 다른 종류는 신호대 잡음비를 높이기 위해 원통형 소자의 전극을 4부분으로 나누어 교번 분극화하여 유기된 전압이 합해지도록 제작하였다.

특성을 측정된 결과, 4 - 교번 분극화된 하이드로폰이 단일 분극화된 경우보다 40Hz ~ 1000Hz 주파수 범위에서 전기적 잡음 동가음압이 평균 10 dB 정도 낮아지게 되어 그 성능이 향상되었다.

#### ABSTRACT

Two types of hydrophones are made of piezo-ceramic cylinders and the results are presented. One of them is made of an end-capped piezoceramic cylinder which is simply radially polarized. Another type is made of the same piezoceramic cylinder, but the electrode of the cylinder is divided into 4 parts and alternately polarized in order to improve SNR.

The characteristics of the hydrophones are measured, and the results show that 4-alternately polarized hydrophone has about 10dB less the noise-equivalent acoustic pressure than the simply polarized case in the frequency range of 40 Hz-1000 Hz.

---

\* 서울대학교 대학원 전자공학과

\*\* 서울대학교 전자공학과 조교수

## I. 서 론

수중에서 음향신호를 전기적 신호로 변환시켜주는 변환기를 하이드로폰 (Hydrophone) 이라 하는데 공기중에서 사용되는 마이크로폰 (Microphone) 과 근본적으로는 동일하나, 수중에서 사용되므로 방수가 잘 되어야 하고 침식되지 않아야 한다. 심해에서는 음향잡음이 적고 전파특성이 좋기때문에 깊은 바다에서 하이드로폰을 사용하는 경우가 많은데, 이런 경우에는 강한 수압에도 견딜 수 있어야 한다.

하이드로폰은 수중에서 군사적 또는 비군사적인 산업용으로 많이 사용되고 있으며, 주로 압전물질에 의해 제작되고 있다. 변환기로 주로 사용되는 압전물질은 압전세라믹 (piezoceramic) 과 PVDF (polyvinylidene fluoride) 가 있는데 심해에서 사용되는 하이드로폰 제작에는 압전세라믹을 많이 사용한다.

본논문에서는 저주파용 (1KHz 이하) 하이드로폰의 제작시 하이드로폰의 감도와 용량, 전치증폭기의 잡음특성을 고려한 최적성능의 하이드로폰 설계규칙을 이론과 실험을 통해 제시하고자 한다. 그리고 제작된 전치증폭기의 잡음특성과 제시된 설계규칙을 근거로 원통형 압전세라믹을 4부분으로 나누어 교번분극화한 저주파용 하이드로폰을 제작하고, 또한 설계규칙에 관계없이 단일분극화된 원통형 압전세라믹을 사용해 제작한 하이드로폰과 그 특성을 측정하여 비교하였다.

## II. 하이드로폰의 이론

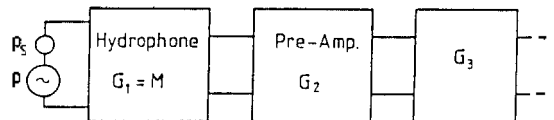
수중 (바다)에서는 바람이나 다른 자연적인 음원에 의한 주변잡음이 항상 존재한다. 이러한 주변잡음은 원하는 음향신호와 항상 같이 하이드로폰에 의해 수신되므로 주변잡음보다 작은 음향신호는 관별할 수 없으며, 따라서 수신가능한 음향신호에 외부적으로 한계가 생긴

다. 이런 주변잡음의 스펙트럼과 그 잡음의 음원에 대해서는 Wenz 에 의해 많이 연구되었다 [ 4 ]. 바다에서 존재하는 음향주변잡음은 주로 저주파 스펙트럼을 갖고 있어서 저주파수 영역에서 매우 큰 영향을 미치므로, 저주파용 하이드로폰 제작시 매우 중요하다.

탐지가능한 음향신호의 한계를 외부적으로 결정하는 잡음은 주변잡음외에 열잡음이 있다. 이 열잡음은 하이드로폰에 접해있는 불입자의 Brown 운동에 따른 열적 자극에 의한 열잡음과 하이드로폰 자체의 전기적 손실에 의한 전기적 열잡음이 있는데 음향 - 전기 변환효율이 좋은 하이드로폰에서는 전기적 열잡음은 무시할 만하다 [ 3 ]. 열잡음은 주파수에 비해서 저주파 영역에서는 Wenz 에 의한 주변잡음보다 훨씬 낮은 값을 가지므로 저주파용 하이드로폰에서는 큰 영향을 미치지 않는다. Wenz 에 의한 주변잡음과 열잡음에 의한 외부 음향잡음은 식(1)과 같이 주파수 f 의 함수로 표시할 수 있다 [ 2 ].

$$P_s = \sqrt{10^{-3}f^{-3} + 4 \cdot 10^{-5}f^{-2} + 4 \cdot 10^{-7}f^{-1} + 10^{-10} + 3.2 \cdot 10^{-20}f^2} \text{ (Pa} / \sqrt{\text{Hz}}) \dots\dots (1)$$

한편 하이드로폰이 탐지할 수 있는 신호의 한계를 내적으로 결정하는 중요한 성분이 있는데, 이는 하이드로



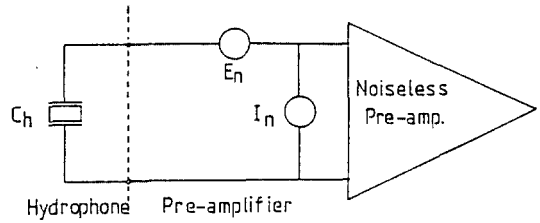
$P_s$  : 외부음향잡음 (주변잡음+열잡음)

$P$  : 수신음향신호

$G_1, G_2, G_3$  : 각단의 증폭계수

(그림 1) 잡음지수에 의한 전기증폭기의 증폭의 영향

폰을 어떻게 설계하느냐에 따라 그 영향을 변화시킬 수 있다. 이를 살펴보기 위해 (그림 1) 과 같은 블록선도를 고려하기로 한다.



(그림 2) 전기증폭기의 잡음의 영향

일반적으로 잡음지수 ( Noise Figure ) F는 식(2)와 같다.

$$F = \text{입력신호대 잡음비} / \text{출력신호대 잡음비} \\ = ( S_i / N_i ) / ( S_o / N_o ) \dots\dots\dots (2)$$

(그림 1) 과 같이 여러 단계가 차례로 연결된 시스템에서 각단의 잡음지수를  $F_1, F_2, F_3$  라 하면 전체잡음지수 F는 식(3)과 같이 된다. [ 5 ]

$$F = F_1 + (F_2 - 1) / G_1 + (F_3 - 1) / G_1 G_2 \dots\dots\dots (3)$$

(그림 1) 에서 하이드로폰의 전기적 열잡음은 매우 적으므로 하이드로폰의 잡음지수  $F_1$  은 거의 1이 되며, 전치증폭기의 전압이득  $G_1$  가 크면  $F_2$  의 영향은 줄어들게 되어 전체잡음지수 F를 결정하는 가장 큰 요소는 전치증폭기의 잡음지수  $F_2$  와 하이드로폰의 감도  $G_1$  이 된다. 보통 저잡음 시스템이라 하면 잡음지수가 2, 즉 3dB 이하인 시스템을 말하는데 [ 5 ], 이것을 만족하려면 전치 증폭기의 잡음지수  $F_2$  를 줄이고,  $G_1$  즉 하이드로폰의 감도 M을 크게해서 전체잡음지수 F가 2보다 작게 해야한다. 잡음지수  $F = 2$  인 경우에는 하이드로폰의 외부잡음  $P_n$  에 의한 영향과 전기증폭기에 의한 잡음의 영향이 꼭 같은 상태를 말하며, 잡음지수  $F < 2$  인 경우에는 전기증폭기에 의한 영향이 외부잡음  $P_n$  의 영향보다 작은 상태를 말한다.

전치 증폭기의 잡음의 영향을 전체적으로 알아보기 위해 (그림 2) 와 같이 일반적인 잡음모형을 이용해서 생각해 보기로 한다.

(그림 2) 에서 전기적 동가입력 잡음  $E_{ni}$  는 식(4)와 같다.

$$E_{ni}^2 = E_n^2 + I_n^2 / ( \omega \cdot C_h )^2 \dots\dots\dots (4)$$

$C_h$  : Hydrophone Capacitance

따라서 식(4)는 전치증폭기에 의한 전기적 잡음을 나타내는데 이를 수중음압에 해당하는 전기적 잡음동가음압  $P_n$  으로 나타내면 식(5)와 같다.

$$P_n = E_{ni} / M = \frac{1}{M} \sqrt{ E_n^2 + \frac{I_n^2}{\omega^2 \cdot C_h^2} } \dots\dots\dots (5)$$

(그림 1) 과 (그림 2) 에서 전체잡음지수 F를 구하면 식(6)과 같이 된다.

$$F = ( \text{입력신호대 잡음비} ) / ( \text{출력신호대 잡음비} ) \\ = \frac{ \frac{P^2}{P_n^2} }{ \frac{M^2 P^2}{( M^2 P_n^2 + E_{ni}^2 )} } \\ = 1 + \frac{P_n^2}{P_n^2} \dots\dots\dots (6)$$

식(6)에서 잡음지수  $F \leq 2$  의 하이드로폰을 제작하기 위해서는  $P_n \leq P_n$  의 조건을 만족해야 하는 것을 알 수 있다.  $P_n \leq P_n$  의 조건을 만족시키기 위해서는 식(5)에서 알 수 있는 바와 같이 전치증폭기의 잡음을 나타내는

$E_n, I_n$  이 적은 증폭기를 사용해야하며, 일단 전치증폭기의 잡음  $E_n, I_n$  이 결정되면 하이드로폰의 감도  $M$ 과 용량  $C_h$  를 크게 해야한다. 그러나 압전물질과 구조가 결정되면 감도  $M$ 과 용량  $C_h$  는 서로 상반관계에 있어서 두가지를 동시에 증가시키는 것은 근본적으로 불가능하다.

Rijnja 는 이 두가지 크기를 고려한 하이드로폰 계수 (Hydrophone Factor) 를  $H = M \sqrt{C_h}$  로 정의하였는데 [ 2 ], 이 값은 압전물질과 구조가 결정되면 일정한 값을 갖게된다. 따라서 어떤 최적의 상태에서 감도  $M$ 과 용량  $C_h$  를 결정해야 한다. 전기증폭기의 잡음  $E_n, I_n$  이 결정되었을때 하이드로폰의 최적성능의 상태는 출력신호대잡음비를 최대로하는 상태, 즉 식(6)의 잡음지수  $F$  를 최대로하는 상태를 말한다.  $H = M \sqrt{C_h}$  를 이용해서 잡음  $F$  를  $C_h$  의 함수로 표시하면 식(7)과 같이 된다.

$$F = 1 + \frac{1}{P_s^2} \cdot \frac{C_h}{H^2} \left( E_n^2 + \frac{I_n^2}{\omega^2 \cdot C_h^2} \right) \dots (7)$$

잡음지수  $F$  를 최소로 하기위해 식(7)을  $C_h$  에 대해 미분해서 그 미분치를 0으로하는  $C_h$  를 구하면 식(8)과 같이 된다.

$$(C_h)_{opt} = I_n / (\omega \cdot E_n) \dots \dots \dots (8)$$

그러므로 식(8)의 조건을 만족하도록 하이드로폰의 용량을 결정한 후  $M = H \sqrt{C_h}$  의 관계식에 의해 감도  $M$  을 결정할때 주어진 하이드로폰 계수에서 최적의 성능을 갖는 하이드로폰이 된다. 그리고 전치증폭기를 포함한 잡음지수  $F$  가 3dB이하인 하이드로폰을 제작하기 위

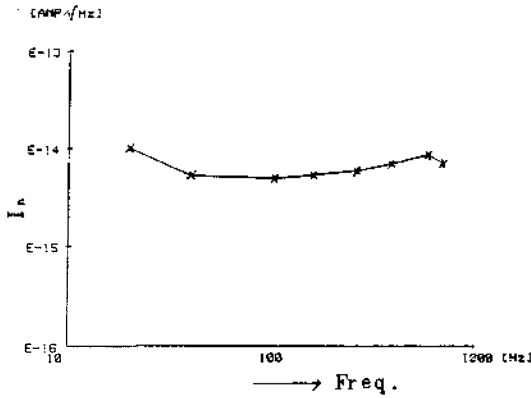
한 하이드로폰 계수를 결정하려면 식(8)에 의해 사용주파수에서 최적용량을 결정하고 식(7)에 의해  $F \leq 2$  의 조건으로부터 하이드로폰 계수  $H$  를 결정할 수 있다.

### III. 하이드로폰의 설계 및 제작

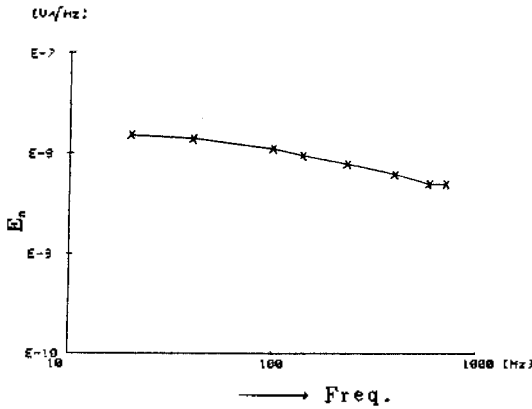
전치증폭기는 하이드로폰에 대한 부하작용에 의한 전압강하를 줄이기위해 입력저항이 커야하고 전치증폭기 다음단의 역시 같은 영향을 줄이기위해 출력저항이 작아야 하므로 본연구에서는 저잡음 FET 2N3821을 Common - Source 로하고 pnp - Bipolar Transistor 를 Emitter Follower 로 하여 2단 전치증폭기를 제작하였다. 제작된 전치증폭기의 잡음특성을 알기위해 주파수 분석기와 잡음측정용 High - gain Low - noise Pre - amp 를 사용하여 소위 "Sine Wave Method" [ 5 ] 에 의해  $E_n, I_n$  을 측정하였으며 그 결과가 ( 표 1 ) 과 ( 그림 3 ) 에 제시되어 있다. 또한 잡음측정결과 ( 표 1 ) 와 식(8)의 최적용량을 이용해 최적성능의 하이드로폰 용량을 주파수에 따라 계산한 결과가 ( 표 2 ) 에 제시되어 있다.

( 표 1 ) 제작된 전치증폭기의 잡음측정 결과

주파수 ( Hz )	$I_n$ ( A / $\sqrt{Hz}$ )	$E_n$ ( V / $\sqrt{Hz}$ )
20	$1 \times 10^{-14}$	$1.5 \times 10^{-8}$
40	$5.3 \times 10^{-15}$	$1.4 \times "$
100	$5.0 \times "$	$1.1 \times "$
150	$5.4 \times "$	$9.2 \times 10^{-9}$
270	$6.1 \times "$	$7.4 \times "$
400	$7.2 \times "$	$6.2 \times "$
580	$8.8 \times "$	$5.0 \times "$
700	$7.1 \times "$	$5.0 \times "$



(그림 3) - (a) 전치증폭기의  $I_n$  측정결과

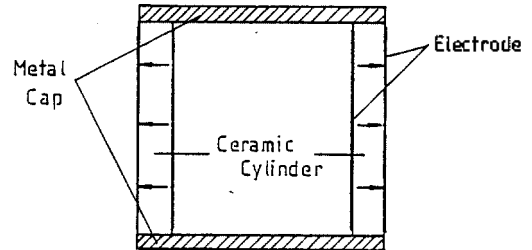


(그림 3) - (b) 전치증폭기의  $E_n$  측정결과

(표 2) 제작된 전치증폭기에 따른 최적 하이드로폰 용량

주파수 [ Hz ]	최적하이드로폰 용량 [ nF ]
20	5.3
40	1.5
100	0.72
150	0.62
270	0.49
400	0.46
580	0.48
700	0.32

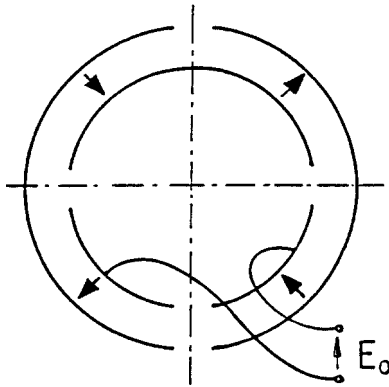
일반적으로 (그림 4) 와 같이 방사형으로 분극화되고 금속Cap으로 밀폐시킨 원통형 구조는 감도가 좋고 큰 용량을 갖는 구조, 즉 하이드로폰 계수가 큰 구조라고 알려져 있는데 [ 1 ], 본연구에서는 ( 표 3 ) 의 크기와 특성을 갖는 Channel 5500 Lead Zirconate Titanate ( PZT ) 원통형 구조를 사용하여 제작하였다. 구입한 원통형 압전소자는 방사형으로 단일분극화되어 있었다.



(그림 4) 캡으로 밀폐시킨 원통형 압전세라믹 하이드로폰

(표 3) 사용된 압전세라믹 실린더의 크기와 특성

형 태	원 통 형
외 경 ( 2b )	76.2 mm ( 3inch )
내 경 ( 2a )	66.04 mm ( 2.6inch )
높 이 ( L )	25.4 mm ( 1inch )
용 량 ( C <sub>b</sub> )	17nF
유 전 율 ( ε <sub>33</sub> <sup>T</sup> )	1750ε <sub>0</sub>
Young's Modulus ( Y <sup>D</sup> )	7.4 × 10 <sup>10</sup> [ N/m ]
ρ <sub>33</sub>	25.3 × 10 <sup>-3</sup> [ Vm/N ]
ρ <sub>31</sub>	-11.9 × 10 <sup>-3</sup> [ Vm/N ]
Poisson Ratio ( σ <sup>D</sup> )	0.54



(그림 5) 교번분극화한 원통형 압전세라믹  
하이드로폰

본연구에서는 저주파용 하이드로폰을 제작하고자 하므로 (표 2)의 결과에서 사용 중심주파수인 100Hz 인 경우를 살펴보면 최적용량은 0.72nF임을 알 수 있는데, (표 3)에 주어진 원통형 압전세라믹의 용량은 17nF이므로 그대로 하이드로폰을 제작할때 최적성능을 나타낼 수 없게된다. 따라서 본연구에서는 원통형 압전 세라믹을 (그림 5)와 같이 4부분으로 나누어 (그림 4)의 단일형태의 분극화를 교번분극화 (Alternately polarized) 형태로 다시 분극화하여 각 부분에서 유기되는 전압이 더해지도록 전극을 형성하였으며, 이에 따라 그 만큼 감도가 올라가고 용량이 최적용량에 근접 하여 주어진 원통형으로 최적성능의 하이드로폰을 제작 하였다.(그림 4)와 같은 구조의 하이드로폰에 대해서 많은 분석이 이루어져 있으며 [ 1, 6 ] 그 결과는 거의 마찬가지로 (그림 5)와 같은 구조에도 적용된다. n개의 부분으로 나누었을때 감도는 n배만큼 커지고 용량은  $\frac{1}{n^2}$ 로 줄어들게 된다. 본연구에서는 기계적 안전성을 고려하여 모두 원통형 내부에 Silicon Rubber를 주입하였다. 이와 같은 경우에 이론적인 감도는 식(9)와 같이 표시될 수 있다 [ 6 ].

$$M = b \{ g_{31}^2 [ \gamma ( 1 - \rho ) + \beta - \rho \alpha ] + g_{33} [ ( 1 - \rho ) / ( 1 + \rho ) ] ( \beta + \rho \alpha ) \} \dots \dots \dots (9)$$

단,  $\rho = a / b$

여기서  $\alpha, \beta, \gamma$ 는 압전세라믹 실린더의 경계조건에 의해 결정되며 상기 참고문헌에 자세히 설명되어 있다. 한편 하이드로폰의 용량은 식 (10)과 같다.

$$C_n = \epsilon_{33} \gamma \frac{\pi ( a + b )}{b - a} \cdot L \dots \dots \dots (10)$$

위의 두 식을 이용하여 이론적인 감도와 용량을 계산해 보면 (그림 4)와 같이 단일분극화 형태일때 감도는 -189dB re 1V/ $\mu$ Pa이며, 용량은 17nF이고 (그림 5)와 같이 교번분극화 형태일때 감도는 -177dB re 1V/ $\mu$ Pa이며, 용량은 1.1 nF가 된다.

### IV. 측정 및 결과분석

제작된 하이드로폰의 감도를 측정하기 위해서 소위 "Moving Column Calibration" [ 7 ] 방법을 사용하였으며 측정주파수 범위는 10Hz~1kHz이었다. 또한 하이드로폰의 용량은 LCR meter로 측정하였으며 측정된 평균감도와 용량이 (표 4)에 제시되어 있다.

(표 4) 제작된 하이드로폰의 감도와 용량

	평균 감도		용량[nF]
	[mV/Pa]	[dB re 1V/ $\mu$ Pa]	
HYD 4 - 1	0.89	-181	1.1
HYD 4 - 2	0.89	-181	1.1
HYD1	0.22	-193	17

HYD 4 - 1, HYD 4 - 2 : Silicon Rubber를 주입한  
4 교번분극화 하이드로폰

잡음지수를 고려한 압전형 하이드로폰에 관한 연구

**HYD1 : Silicon Rubber 를 주입한 단일분극화 하이드로폰**

( 표 4 ) 의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 두개의 4교번분극화 하이드로폰 모두 평균감도가  $-181\text{ dB re } 1\text{ V}/\mu\text{Pa}$ 이며 단일분극화 하이드로폰은  $-193\text{ dB re } 1\text{ V}/\mu\text{Pa}$ 이다. 4 교번분극화 하이드로폰의 경우에 측정된 평균감도  $-181\text{ dB re } 1\text{ V}/\mu\text{Pa}$  은 설계시의 이론적 예상감도인  $-177\text{ dB re } 1\text{ V}/\mu\text{Pa}$  보다  $4\text{ dB}$  떨어지는데 그 원인은 다음과 같이 열거할 수 있다.

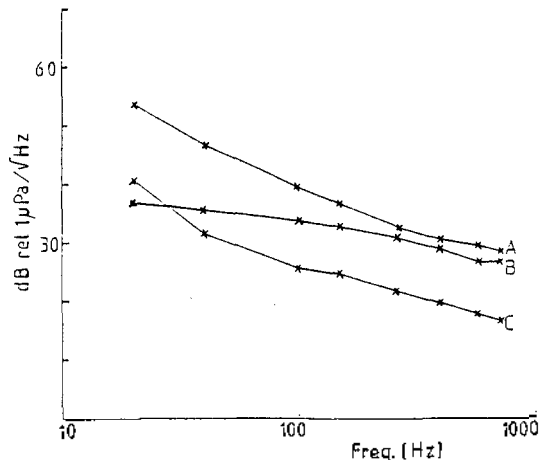
① 4 부분으로 교번분극화시 제작자 ( Chanel Industry ) 가 제공한 압전 상수에 도달하지 못한 부분이 생겼을 가능성이 있다.

② 원통형 압전세라믹의 양끝에 의해 원통의 방사선 방향운동이 억제되어 감도가 떨어지는 결과를 가져온다.

③ 4 부분으로 교번분극화된 결과로 생기는 누설용량의 영향

④ 최종적으로 하이드로폰 전체를 덮은 네오프렌 보호층 및 접착면의 영향

한편 전치증폭기를 포함한 하이드로폰이 잡음지수  $3\text{ dB}$  이하의 저잡음 시스템을 만족하는지, 그리고 4 교번분극화된 하이드로폰이 단일교번분극화된 하이드로폰에 비해 어느정도 최적화 되었는지 알아보기 위해 전치증폭기의 잡음특성결과 ( 그림 3 ) 와 하이드로폰에 대한 측정결과로부터 전기적잡음 등가음압  $P_n$  을 구해서, 음향잡음에 대한 Wenz 의 결과와 함께 ( 그림 6 ) 에 제시하였다. ( 그림 6 ) 의 결과에 의하면 단일분극화된 하이드로폰이나 4 교번분극화된 하이드로폰 모두  $3\text{ dB}$  이하의 저잡음 시스템을 만족하고 있음을 알 수 있다. 그리고  $40\text{ Hz}$  이상의 주파수에서 감도가 큰 4 교번 분극된 하이드로폰이 단일분극된 하이드로폰에 비해 훨씬 성능이 좋음을 알 수 있고 따라서 같은 크기의 원통형 구조에서 하이드로폰 용량을 식(8)에 의해 최적화 할때 보다 더 좋은 성능을 갖는 하이드로폰을 제작할 수 있음을 알 수 있다.



A : Wenz  
 B : 단일분극화 하이드로폰  
 C : 4 교번분극화 하이드로폰  
 ( 그림 6 ) 하이드로폰의 전기적잡음 등가음압

또한  $20\text{ Hz}$  영역에서는 4 교번분극된 하이드로폰이 감도는 크지만 신호대잡음비로 본 성능은 단일분극된 하이드로폰보다 좋지 않음을 알 수 있는데 이는 감도가 크다고 해서 잡음을 고려한 성능도 항상 좋은 하이드로폰이라고 말할 수 없음을 입증시켜주고 있다.

**V. 결 론**

저주파용 하이드로폰 제작시 신호대 잡음비 ( SNR ) 을 크게 하기 위하여, 우선 하이드로폰에 연결되는 저잡음 전치증폭기를 설계, 제작하였다. 제작된 전치 증폭기의 잡음특성에 의거하여 최적의 하이드로폰 용량을 결정하고, 이에 따라 원통형 압전소자의 전극을 4 부분으로 나누어 교번 분극화하여 제작된 하이드로폰의 감도는  $-181\text{ dB re } 1\text{ V}/\mu\text{Pa}$ 이며 동시에 Wenz 의 수중주변잡음보다 낮은 전기적 잡음 등가음압을 나타내었

다. 같은 전기증폭기를 사용하면서 최적용량을 고려하지 않고 단순히 단일 분극화된 소자를 사용한 경우는 평균 감도가 앞의 경우에 비해 12 dB 떨어지고, 전기적 잡음 등가음압에 있어서도 40Hz ~ 1000Hz 주파수 범위에서 평균 10 dB 가 높게 나타나 성능이 크게 떨어짐을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. G.W. McMachon, "Sensitivity of Liquid-Field, End-Capped, Cylindrical, Ceramic Hydrophones", J.A.S.A., 36(4), pp. 695-696, 1964.
2. H.A.J. Rijnja, "Small Sensitive Hydrophones", Acustica, 27, p. 182, 1972.
3. P.M. Kendig, "Factors that determine the Equivalent Noise Pressure, Free-Field Voltage Response and Efficiency of a Transducer at Low Frequency", J.A.S.A., 33(5), p. 674, 1961.
4. G.M. Wenz, "Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources", J.A.S.A., 34(12), p. 1936, 1962.
5. C.D. Motchenbacher and F.C. Fitchen, "Low Noise Electric Design", Wiley, 1973.
6. W.D. Wilder, "Electroacoustic Sensitivity of Ceramic Cylinders", J.A.S.A., 62(3), p. 769, 1977.
7. F. Schloss and M. Strasberg, "Hydrophone Calibration in a Vibrating Column of Liquid", J.A.S.A., 34(7) p. 958, 1962.