

연안목적용 저출력 어군탐지기 음향계의 개발에 관한 연구

박 주 삼*

* 전남대학교 수산과학연구소

A Study on Development of the Low Electrical Power Echo Sounder System for Coastal Use

Ju-Sam Park*

* The Fisheries Science Institute, Chonnam National University, Yeosu, 550-749, Korea

요 약 : 연안에서 목적으로 하는 어업에 적합하도록 소형 어군탐지기를 효율적으로 설계하고 평가할 수 있는 방법에 대해 검토하기 위하여 일반적으로 사용되고 있는 어군탐지기의 특성과 탐지범위 등에 대해 조사하였다. 먼저 일반적인 어군탐지기의 빔폭은 주파수와 송신전력이 상승함에 따라 좁아지고 송수파기의 직경은 송신전력이 증가함에 커지는 경향을 보였다. 이 특성을 이용하여 상업적으로 사용되는 일반적인 어군탐지기의 신호대 잡음비를 유도하였다. 탐지거리와 탐지폭으로 구성되는 탐지범위는 이 신호대 잡음비(SNR)로부터 얻을 수 있다. 탐지거리는 주파수의 증가와 함께 증가하였지만 고주파에서는 흡수계수의 영향으로 원거리 탐지가 어려워진다. 즉 송수파기 직경, 송신전력의 증가에 따른 효과는 저주파에서는 크고, 고주파에서는 적은 경향을 보인다. 탐지범위 등을 종합적으로 응용하여 휴대용 어군탐지기의 설계 범용도를 작성하였다. 범용도에는 SN비를 송수파기의 직경, 빔폭, 탐지거리를 변수로하여 주파수에 대해 표시하였다. 범용도에서 SN비가 높고 실용성이 높은 적절한 설계영역을 표시하였다. 설계영역에서 설계점을 정하면 전체적으로 적절한 설계를 할 수 있다. 설계범용도는 어군탐지기의 성능평가에도 응용할 수 있다.

핵심용어 : 어군탐지기, 송신전력, 신호대 잡음비, 탐지거리, 탐지폭, 탐지범위, 설계범용도

Abstract : The expression of signal to noise ratio (SNR) is derived for the individual echo sounder and for the general specifications of commercial echo sounder. The SNR is depicted by several factors on transmitting and receiving, sound propagation, scattering by fishes, and mainly self ship noise. The detection ranges of echo sounders in depth and breadth are derived by finding the border of an acceptable SNR. The detection ranges are computed for the echo sounders of individual and general specifications. Generally, the detection range is larger for low frequencies. Increasing an electrical power and a diameter of transducer is not as effective for high frequencies as for low frequencies to increase the detection range. The theoretical results of the detection range can be applied to design low electrical power echo sounder for coastal use, to select an appropriate echo sounder, to know the capability of a sounder, and to interpret echograms. A method for evaluating and designing low electrical power echo sounder is developed. A universal diagram for the basic design of the low electrical power echo sounder where SNR is plotted against frequency is developed. An appropriate frequency, transducer diameter, and beam width are easily determined by using the diagram.

Key Words : Echo sounder, Electrical power, Signal to noise ratio, Detectable distance, Detectable breadth, Detectable range, Universal diagram

1. 서 론

수중 음향기술은 수중의 정보를 탐색하는 유일한 방법이라 해도 과언은 아니다. 수중음향기기의 연구는 1912년 타이타닉 호의 빙산 충돌사고를 계기로 1914년 R.A. Fessenden이 가청음을 이용하여 빙산 탐지장치를 개발한 것이 그 시초라 할 수 있다(The National Academy of Sciences, 2009). 그 후 소나와 측심기 등 주로 군사목적으로 수중음향기기의 연구가 진행

되었으며, 어군탐지기에 대한 연구는 1939년 노르웨이의 Sund가 측심기의 기록으로부터 어군의 예코를 탐지한 것이 그 시작이다. 특히 우리나라에서는 수산물에 대한 수요가 높아 어업기술과 어선성능의 향상과 더불어 어군탐지기가 보급되게 되었다. 그러나 어획효율의 향상과 자원관리의 소홀로 자원의 고갈을 초래하여 자원량추정이 우선하게 되어 어획 향상을 위해 개발되었던 어군탐지기는 자원량추정의 계측기기, 즉 계량 어군탐지기로 발전하게 되었다.

어군탐지기가 개발된 이후 수천 m에 달하는 심해어장을 탐색하는 대형어군탐지기, 플랑크톤 계측용 어군탐지기(Liu et

* 대표저자 : 정희원, hanna@chonnam.ac.kr , 061-659-2743

al., 1999), 수생생물에 부착하여 수생생물 주변의 플랑크톤을 계측하기 위한 초소형 어군탐지기(Miyamoto et al., 2004), 어체장 어군탐지기 등 특수 목적용 어군탐지기도 개발되고 있다. 최근에는 레저 보트용의 휴대용 어군탐지기도 개발되어 활용되고 있다.

이와 같이 최근의 어군탐지기는 무분별한 어획보다는 자원량 추정 및 선택적인 어획을 보조하기 위한 수단으로 개발되고 있다. 그러나 목적에 적합한 다양한 어군탐지기가 개발되었음에도 불구하고 연안 어장에서 조업을 하는 소형선에는 대부분 어군탐지기가 탑재되어 있지 않고 선원의 경험에 의존하여 조업을 수행하고 있다. 소형선이 조업을 하는 우리나라 연안은 대부분 100m 이천이며, 수산유용생물이 풍부하고 종류도 다양하다. 그래서 어획이 선택적으로 이루어지지 않을 경우 자원의 관리는 어려울 것이다.

연안의 소형선에서 어군탐지기를 탑재하지 않는 원인으로 대형 어군탐지기의 경우 가격이 비싸고 설치 및 관리가 어렵다는 문제점을 들 수 있다. 또한 휴대용 어군탐지기의 경우 가격이 저렴하고 설치와 관리가 쉽지만 정보량이 적어 자원량을 정량적으로 평가할 수 없다는 점을 들 수 있다. 지금까지의 어군탐지기의 설계를 살펴보면(古澤, 1990; Liu et al., 1999), 탐지거리를 크게 하고 대상물을 정확하게 계측하기 위해 고효율, 고정도에 설계 중점을 두어 시스템이 대형화됨으로서 가격, 설치, 관리 등에 문제가 그대로 남는다. 또한 휴대용 어군탐지기의 경우 송수파기를 작게 해야 하기 때문에 송신전력을 크게 할 수 없어 자원을 정량적으로 평가하기는 어렵다.

따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 어군탐지기를 소형, 경량으로 만들어 저렴하고 설치와 관리가 쉽도록 하며, 100m 이천의 연안에서 보다 정량적으로 이용될 수 있도록 설계하면 될 것이다. 또한 전지를 사용하는 어군탐지기인 경우 전지의 수명을 연장하기 위해서 전지의 수명을 고려한 설계가 필요하다. 이와 같은 소형 어군탐지기는 송신전력을 낮게 하기 때문에 지금까지 연구 되었던 古澤(1990)과 Liu et al.(1999)의 어군탐지기 설계방법에 따라 설계하는 것이 어렵다. 이들은 탐지거리를 크게 하고 고정도로 계측하기 위하여 캐비테이션의 발생시점까지 송신전력을 높여 설계하기 때문에 주파수가 높은 소형의 어군탐지기에는 적합하지 못하다.

따라서 본 연구에서는 연안에서 사용할 수 있는 소형 저출력 어군탐지기를 효율적으로 설계하고 평가할 수 있는 방법을 개발하였다. 소형 어군탐지기를 단순히 어군의 탐색에만 이용하는 것이 아니라, 소형 경량으로 휴대할 수 있으며 탐지거리가 짧지만 변수의 정확한 이해에 의해 정량화할 수 있는 방법으로 하였다. 일반적으로 사용하고 있는 어군탐지기의 특성에 대해 조사한 후 기존의 방법(박, 2005)에 소형 어군탐지기의 변수를 대입하여 탐지범위를 검토하였다. 또한 이 탐지범위를 이용하여 소형 저출력 어군탐지기의 설계 방법을 개발하였다.

2. 방법

본 연구의 전체를 이해하기 위하여 간략하게 신호대 잡음비(SN비)에 대해서 설명한다. SN비를 설명하기 위하여 SI 기본단위와 유도단위를 사용하였으며, 일부에서 계산의 편의를 위하여 공학단위와 SI 접두어를 사용하였다. SI 접두어와 공학단위를 사용한 값에 대해서는 본문에 단위를 나타내었다. 또한 본 논문에서는 반사체의 방사 강도(Target Strength : TS), 지향성이득, SN비, 잡음스펙트럼계수의 선형값에 대응하는 두 개의 문자를 대문자로 변환하여 데시벨값으로 나타내었다. 즉 TS의 선형값을 T_S 데시벨값을 TS 와 같이 통일하였다.

2.1 신호대 잡음비

어군탐지기의 송수파기에 수신된 신호에는 목적으로 하는 에코음압과 잡음의 수신음압이 포함되어 있다. 송수파기에 수신된 에코음압 P_F 는

$$P_F^2 = P_0^2 10^{-0.2\alpha r} r^{-4} b^2 T_S \quad (1)$$

이 된다. 여기서, P_0 는 송파음압, b 는 지향성함수, r 은 전달거리, α 는 흡수계수, T_S 는 반사체의 반사강도 TS이다.

송파음압은 소리가 종파로서 진행방향에 수직으로 전달되면서 단위면적을 단위시간에 통과하는 에너지로 표현된다.

$$P_0^2 = I\rho c = \frac{\rho c \eta W D_I}{4\pi r_0^2} \quad (2)$$

여기서 I 는 음의 세기, ρ 는 해수의 밀도, c 는 수중에서의 음속을 나타내며, η 는 전기음향변환효율, W 는 송신전력, D_I 는 송수파기의 지향성이득, r_0 은 기준거리(1m)이다.

지향성 함수는 계산을 간단히 하기 위해 Hamilton et al.(1977)에 의한 다음의 간략식을 이용하였다.

$$b \cong \exp\left(-\left(\frac{\pi f a}{c}\right)^2 \theta^2\right) \quad (3)$$

여기서 f 는 주파수, a 는 송수파기의 반경, θ 는 지향성 주축으로부터의 각도이다.

송수파기에 수신된 잡음음압 P_N 은

$$P_N^2 = \frac{N_P^2 \Delta f}{D_I} \quad (4)$$

이 된다. 여기서 N_P 는 잡음스펙트럼 레벨, Δf 는 수신계의 대역폭이다.

수신 잡음에는 자선의 선박잡음, 환경잡음, 전기적잡음이 있지만, 선박에 의해 어군을 탐지하는 경우 강한 추진력과 잡음원이 가까이 있기 때문에 일반적으로 자선의 선박잡음에 가장 크게 영향을 받는다. 선박잡음은 선박의 종류, 선속, 송수파기의 설치방법, 해황 등에 의해 변하여 복잡하지만(Mitson 1995), 본 연구에서는 西村(1969)에 의해 단순화된 다음의 잡음스펙트럼 레벨을 이용한다.

$$N_P^2 = N_{P0}^2 f^{-1.8} \quad (5)$$

여기서 N_{P0} 는 선박의 크기, 종류, 선속 등에 의해 변하는 주파

수대역 1Hz에서의 잡음스펙트럼계수이다.

음을 발사할 때 (2)식의 송파음압과 음을 수신할 때 (4)식의 잡음음압은 송수파기의 지향성이득 D_I 에 의해 SN비가 증가한다. 반경 a 인 원형 송수파기의 경우 $k=2\pi/\lambda$, λ 는 파장)를 파수라 하면 지향성이득은 다음 식으로 근사한다(Clay and Medwin, 1997).

$$D_I = (ka)^2 = \left(\frac{2\pi fa}{c}\right)^2 \quad (6)$$

따라서 수신음압과 잡음음압으로부터 신호대 잡음비 S_N 는

$$S_N = \frac{4\pi^3 \rho \eta W a^4 f^{5.8} \exp[-2(\pi a f/c)^2 \theta^2] 10^{-0.2\alpha r} T_S}{c^3 r^4 N_0^2 \Delta f} \quad (7)$$

이 된다.

2.2 어군탐지기의 현상

시판되고 있는 어군탐지기의 주파수, 송신전력, 빔폭의 특성을 어군탐지기 제작회사로부터 수집, 청취하여 Fig. 1에 나타내었다. 표식을 채운 A사와 표식을 채우지 않은 B사의 어군탐지기는 주파수와 전기출력에 따라 다양한 빔폭을 가지고 있음을 알 수 있다. A사의 제품은 송수파기의 반경으로부터 빔폭을 계산하였고, B사의 제품은 제품사양에 포함되어 있는 빔폭을 이용하였다. 빔폭 B_W 는 지향성 주축으로부터 감도가 3dB 떨어진 곳에서의 각도의 폭으로 주파수와 송수파기 반경에 반비례하여 다음과 같이 간략식으로 나타낼 수 있다(古澤, 1990).

$$B_W = \frac{1.6c}{\pi a f} \quad (8)$$

B사 제품(점선)의 빔폭이 A사 제품(실선) 보다 선형식을 기준으로 50kHz에서 4.6°, 100kHz에서 2.9°정도 넓었다. A사와 B사의 어군탐지기는 주파수와 송신전력이 상승함에 따라 빔폭이 좁아지고 있다. 또한 어군탐지기는 송신전력의 범위와 송수파기 직경의 범위가 크다.

Fig. 1에서 송수파기의 반경 a 와 송신전력 W 는 상관관계가 있기 때문에 송신전력으로 송수파기 반경의 2승을 기준화하여 송신전력으로 기준화한 반경과 주파수의 관계로부터 다음 식을 유도하였다.

$$a^2 = 10^{-2.99} W f^{-0.58} \quad (9)$$

또한 송수파기의 반경과 송신전력의 관계가 주파수에 의해 어떤 특성을 가지는지를 검토하였다. 어군탐지기에서는 일반적으로 SN비를 크게 하기 위하여 송신전력을 높게 하지만 너무 높게 하면 캐비테이션이 발생하게 된다. 이 캐비테이션의 발생시점을 I_c (W/m^2)라 하며 실용식은 다음과 같다(古澤, 1990).

$$I_c = 0.17 \tau^{-0.22} 10^{m+3} (1 + r_t/10 + T)^2 \quad (10)$$

$$m = 0.116 f^{0.52}$$

여기서 τ (ms)는 펄스폭, r_t 는 송수파기의 수심, T (atm)는 해수의 항장력이다. 주파수 f (kHz)가 지수함수적으로 관여하여 주파수와 함께 크게 증가하고 있음을 알 수 있다.

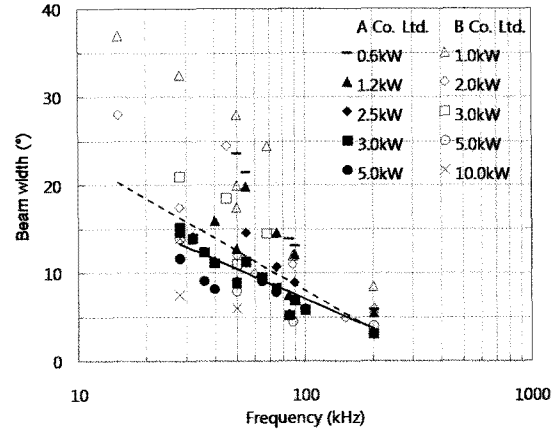


Fig. 1. Beam widths of commercial echo sounders of function of frequency with parameter of electrical power.

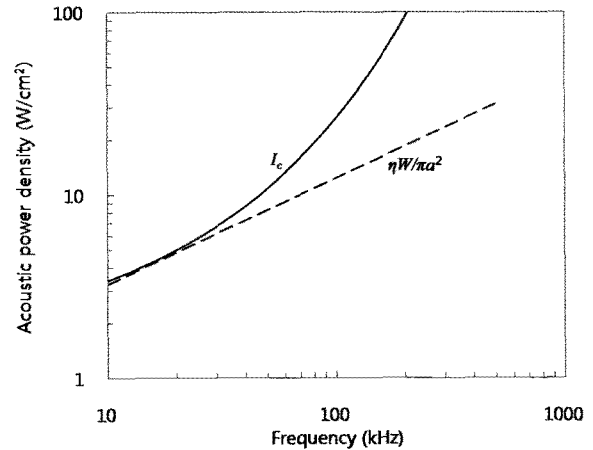


Fig. 2. Comparison of cavitation threshold I_c and acoustic power density ($\eta W/\pi a^2$).

I_c 를 이용하여 송파음압을 표현하면

$$P_0^2 = \frac{\rho c \pi a^2 I_c D_I}{4\pi r_0^2} \quad (11)$$

이 된다.

(2)식과 (11)식으로부터 I_c 를 송수파기의 단위면적당 음향세기로 표준화 할 수 있다.

$$I_c = \eta W/\pi a^2 \quad (12)$$

Fig. 2에 송수파기의 반경과 송신전력의 주파수 특성을 검토하기 위하여 I_c 와 $\eta W/\pi a^2$ 를 비교하여 나타내었다. 이때 전기음향변환효율 η 는 0.5를 가정하였으며, (10)식에서 r_t 는 1m, τ 는 2ms, T 는 2atm를 대입하여 계산하였다. 약 40kHz이하에서는 캐비테이션이 발생하는 한계에서 송수파기면적과 출력을 설계하고 있음을 알 수 있었다. 40kHz 이상에서는 송수파기면적에 대해 출력을 충분히 투입하지 않고 있음을 알 수 있었다. 이 값은 Furusawa et al.(1999)가 제시한 50kHz와 비슷하

였다.

2.3 탐지범위

탐지범위에는 탐지거리, 최대탐지거리(Maximum detectable distance, r_m), 탐지폭, 최대탐지폭(Maximum detectable breadth, B_m)과 이들에 의해 구성되는 탐지영역(Detectable area, A)과 탐지체적(Detectable volume, V)이 포함된다(박, 2005). 탐지범위는 신호대 잡음비(SN비)로부터 얻을 수 있다. Fig. 1에서와 같이 어군탐지기는 송신전력의 범위와 송수파기 직경의 범위가 크며, 각 주파수에서 송신전력 W 의 변화에 따라 탐지거리 r , 빔폭 B_W , 송수파기의 직경 $2a$ 가 달라진다. 또한 송신전력은 휴대용으로 사용할 경우에는 전지의 수명을 단축시키는 가장 큰 원인이 되기도 한다. 따라서 저자는 앞선 연구(박, 2005)에서와는 달리 소형 어군탐지기의 변수 값을 고려하여 탐지범위를 계산하였다. (7)식에서 SN비는 주파수 f 송신전력 W , 송수파기의 반경 a 등에 크게 의존하기 때문에 어군탐지기의 고유사양인 f , a , W 의 변화에 따라 탐지범위를 검토하였다. 이것은 어군탐지기의 사양이 주어진 경우 어군탐지기를 평가하는데 유용하게 사용될 수 있다. 또한, (7)식의 SN비에는 주파수, 송수파기의 반경 등 변수가 많아 복잡하다. 따라서 어군탐지기의 현상에서 분석된 자료를 이용하여 간략한 일반적인 어군탐지기의 SN비를 유도하여 어군탐지기의 탐지범위를 계산하였다. 여기에서도 연안에서 사용할 수 있는 소형 어군탐지기의 변수 값을 고려하여 탐지범위를 계산하였다.

(7)식에서 수신계의 대역폭 Δf 는

$$\Delta f = Q/f \tag{13}$$

로 변환하였다. 여기서 Q 는 공진의 예리함을 나타내는 값으로 일반적으로 20정도이다.

(7)식에 (9), (13)식을 대입하면 SN비는

$$S_N = \frac{A\eta W^3 Q f^{3.64} \exp(-BWf^{1.42}\theta^2) 10^{-0.2\alpha r} T_S}{r^4 N_0^2} \tag{14}$$

$$A = 4.2 \cdot 10^{-6} \pi^3 \rho / c^3$$

$$B = 2.1 \cdot 10^{-3} \pi^2 / c^2$$

이 된다.

(14)식을 이용하여 ρ 와 W 를 주요변수로 한 r 과 θ 에 대한 어군탐지기의 탐지범위를 구하였다. 탐지범위를 계산하기 위하여 SN비를 $S_N=10\log S_N=0\text{dB}$, 잡음스펙트럼계수를 $N_0=20\log N_0=45\text{dB}$, TS를 $TS=10\log T_S=-43\text{dB}$ 로 하였으며, $\Delta f=2.5\text{kHz}$, $\rho=1025\text{kg/m}$, $c=1500\text{m/s}$, $\eta=50\%$ 의 값을 사용하였다. 흡수계수 α 는 François and Garrison(1982)의 식에 의해 계산하였다. 여기에 필요한 변수의 값은 염분농도 34psu, 수온 15°C, pH 8, 심도 50m인 평균적인 값을 사용하였다.

2.4 연안목적용 저출력 어군탐지기의 설계

지금까지 수산자원 측정을 위한 어군탐지기의 설계(古澤, 1990), 동물플랑크톤의 산란 측정 및 이용을 위한 초음파 송수

신계의 설계(Liu et al., 1999), 어류의 상세한 추적을 위한 바 이오텔레메트리 음향계의 설계(朴과 古澤, 2002) 등 음향계의 설계방법에 대한 연구가 다양하게 수행되어 왔다. 여기에서는 이러한 설계 방법을 응용함과 동시에 본 연구에서 검토한 탐지범위 등을 종합적으로 고려하여 연안에서 사용할 수 있는 소형 어군탐지기의 설계방법을 개발한다.

어군탐지기에서는 일반적으로 SN비를 크게 하기 위하여 송신전력을 높게 하지만 너무 높게 하면 캐비테이션이 발생하게 된다. 따라서 수산자원 측정을 위한 어군탐지기의 설계에서는 SN비를 크게 하기 위하여 캐비테이션의 발생시점을 고려하여 설계방법을 개발하였다. 이 경우 Fig. 2에서와 같이 40kHz 이상에서는 I_c 가 과대하게 평가되어 일반적인 어군탐지기보다 높은 송신전력을 사용하게 된다. 일반적인 어군탐지기는 송신전력의 범위와 송수파기 직경의 범위가 크며, 각 주파수에서 송신전력의 변화에 따라 탐지거리, 빔폭, 송수파기의 직경이 달라진다. 또한 송신전력은 휴대용으로 사용할 경우에는 전지의 수명을 단축시키는 가장 큰 원인이 되기도 한다. 이러한 원인 등에 의해 어군탐지기의 탐지범위 검토 및 설계부분에서 송신전력을 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 연안에서 사용할 수 있는 소형 어군탐지기의 설계에 주목하여 송신전력을 고려한 설계방법을 개발하였다.

어군탐지기의 설계에서는 측정오차와 측정거리의 관점에서 SN비가 가장 중요하다. 보통 단체 에코의 SN비가 가장 작기 때문에 설계단계에서는 (7)식을 이용하였다. 또한 탐지범위의 검토결과를 종합적으로 이용하여 설계방법을 개발하였다.

(7)식에서 SN비는 주파수 f 송신전력 W , 송수파기의 반경 a 및 거리 r 에 크게 의존한다. 따라서 SN비를 a , W , r 를 변수로 하여 f 에 대해 나타내면 특성을 쉽게 알 수 있다. 또한 탐지범위를 예상하기 위해 빔폭 B_W 를 변수로 사용하였다. 이때 NP_0 , TS , Δf , ρ , c , η 의 값은 상수로 하였으며, 지향성 함수의 항은 1로 가정하였다. 변수 중 ρ , c , η 의 값은 정수로 가정하여도 변화하지 않지만, NP_0 , TS , Δf 및 지향성 함수 b 항의 값은 상황에 따라 변화할 수 있다. (7)식에서 NP_0 , TS , Δf , b 의 값은 직접적이기 때문에 이들 값의 변화에 대해서는 간단히 세로축의 값을 조절하면 계산할 수 있다.

이 방법에 의하면 모든 요소들의 영향을 평가할 수 있으며, 종합적인 연안목적용 저출력 어군탐지기의 설계가 가능하다.

3. 결과

3.1 탐지범위

Fig. 3은 송수파기의 직경 $2a$ 와 주파수 f 의 변화에 의한 탐지범위의 변화를 나타낸 것이다. TS 값은 체장 14cm인 어류에 해당하는 값 -43dB를 가정하였으며(古澤, 1990), 송신전력은 소형 어군탐지기를 고려하여 0.5kW로 하였다. 가로축이 탐지폭, 세로축이 탐지거리이며, 축적비를 동일하게 하였다. 저주파에서는 $2a$ 의 증가와 함께 최대 탐지거리가 급격하게 증가

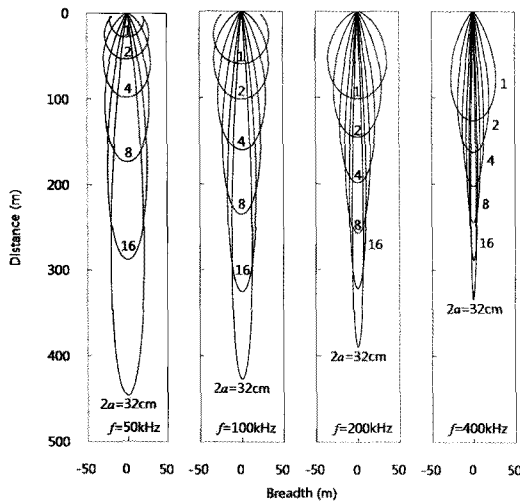


Fig. 3. Detection range dependence on transducer diameter for frequencies of 50kHz, 100kHz, 200kHz, and 400kHz.

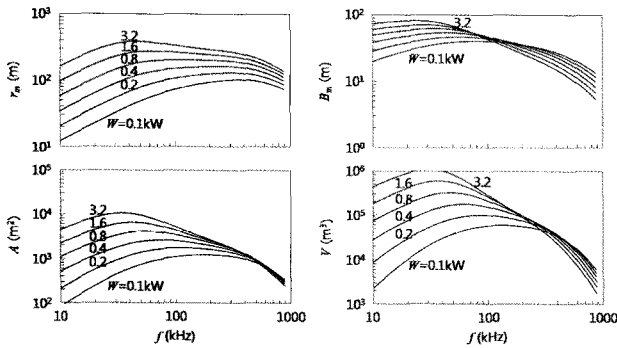


Fig. 4. Frequency dependence of maximum detectable distance (r_m), maximum detectable breadth (B_m), detectable area (A), detectable volume (V) for general specification of sounder with parameters of electrical power from 0.1 to 3.2kW.

하지만 고주파가 되면 흡수감쇠의 증가에 의해 $2a$ 가 증가하여도 원거리를 탐지하기가 어려워진다. 그러나 고주파의 근거리에서는 작은 $2a$ 로 상당히 먼 거리의 탐지를 할 수 있음을 알 수 있다. 즉 50kHz에서는 100m를 탐지하기 위하여 $2a=4$ cm가 필요하지만, 200kHz 이상에서는 $2a=1$ cm로 가능하다. 또한 50kHz에서는 $2a$ 가 커도 탐지범위를 크게 할 수 없지만, 200kHz에서는 $2a$ 가 작아도 탐지범위를 크게 할 수 있다. 저출력 소형 어군탐지기에서 원거리 탐지, 장수명, 휴대의 편의성 등을 위하여 송수파기의 직경을 작게 하며 고주파를 사용하는 이유를 알 수 있었다.

Fig. 4는 일반적인 어군탐지기에서 송신전력 W 의 변화에 따른 최대탐지거리(r_m), 최대탐지폭(B_m), 탐지영역(A), 탐지체적(V)의 주파수 특성이다. r_m 은 W 의 증가와 함께 증가하고 있으며, 최대치를 나타내는 f 는 저주파로 이동하고 있다. B_m ,

A , V 도 W 의 증가와 함께 증가하지만 80kHz, 400kHz, 200kHz 이상에서는 W 의 증가와 함께 소폭으로 감소하고 있다. 또한 이 그림에서는 각 주파수에서 r_m 을 탐지하기 위한 W 을 구할 수 있다. 즉 200kHz에서 100m를 탐지하기 위해서는 0.2kW는 필요하다. Fig. 4는 수산자원 측정을 위한 어군탐지기나 계량어군탐지기(Furusawa et al., 1999; 박, 2005)의 r_m 과 B_m 보다 짧고, 좁게 나타났다. 특히 저주파에서는 탐지거리가 크지만 고주파에서는 매우 작다. 또한 고주파에서는 W 를 크게 하여도 저주파보다 효과가 크지 않지만 수산자원 측정용 어군탐지기보다는 고주파 쪽에서도 W 에 의한 효과가 있음을 알 수 있었다.

이상의 탐지범위의 검토에서 알 수 있듯이 고정도(좁은 빔폭) 탐지를 위해서는 고주파수 또는 직경이 큰 송수파기를 선택해야만 한다. 특히 송수파기를 작게 하기 위해서는 고주파수를 선택해야 한다. 탐지거리를 길게 하기 위해서는 송신전력을 크게 해야 한다. 그러나 송신전력을 크게 하면 송수파기의 직경이 커지게 된다. 설계의 부분에서 합당한 값을 결정해야 하는 이유이다.

3.2 연안목적용 저출력 어군탐지기의 설계

(7)식에 나타난 것처럼 신호대 잡음비(SN비)는 주파수 f 송수파기 반경 a , 거리 r 에 크게 의존하고 있다. 따라서 SN비를 a , r 을 변수로 하여 f 에 대해 나타내었다. Fig. 5는 최대탐지거리 $r_m=30$ m, 50m, 100m, 200m에 대한 SN비의 주파수 특성이 다. 실선은 송수파기의 직경 $2a$ 를, 점선은 빔폭 B_W 를 변수로 한 SN비의 주파수 특성이다. Fig. 5에서 f 는 10kHz~1MHz, $2a$ 는 1~32cm(실선), B_W 는 $5^\circ \sim 80^\circ$ (점선)범위로 하였다.

$r_m=50$ m이상의 SN비는 저주파에서 $f^{5.8}WT_S/\Delta f$ 항에 의해 급격하게 증가하지만, 고주파에서는 α 의 급격한 증가로 인해 감소하게 된다. 또한 SN비는 a^4 항에 의해 $2a$ 와 함께 12dB/oct로 증가한다. Fig. 5에서 주요 변수의 SN비에 대한 의존성을 명확히 알 수 있다. 예를 들어 SN비가 상승하다 하강하는 변곡점은 거리는 멀수록 주파수가 낮아진다. 또한 Fig. 5에서 최대탐지거리를 가정하면 설계점을 간단히 결정할 수 있다. 따라서 이 그림을 연안에서 사용할 수 있는 소형 어군탐지기의 기본 변수를 결정하기 위한 설계범용도라 한다.

소형 어군탐지기의 설계에서 주파수의 하한은 흡수계수 α 이다. 고주파의 경우 해수의 수온과 염분 등의 변수의 변화에 의해 α 는 급격하게 증가하여 α 를 정확하게 측정하는 것은 어렵다. 왕복 전달하는 어군탐지기에 의한 각종 추정치에 영향을 미치는 오차는 $2r\Delta\alpha$ (dB)로 나타낼 수 있다. $\Delta\alpha$ 는 α 의 추정오차의 기준이 된다(古澤, 1985). 수산자원 측정을 위한 어군탐지기에서는 $\Delta\alpha$ 의 하한을 3dB 정도로 계산하고 있으나, 소형 어군탐지기에서는 그 2배에 해당하는 6dB로 하였다. $\Delta\alpha$ 를 6dB로 하면 거리 100m에서 주파수의 하한은 220kHz, 거리 200m에서 120kHz가 된다. 50m에서는 흡수감쇠의 제한은 중요한 요소가 아니지만 800kHz에서 $\Delta\alpha=6$ dB을

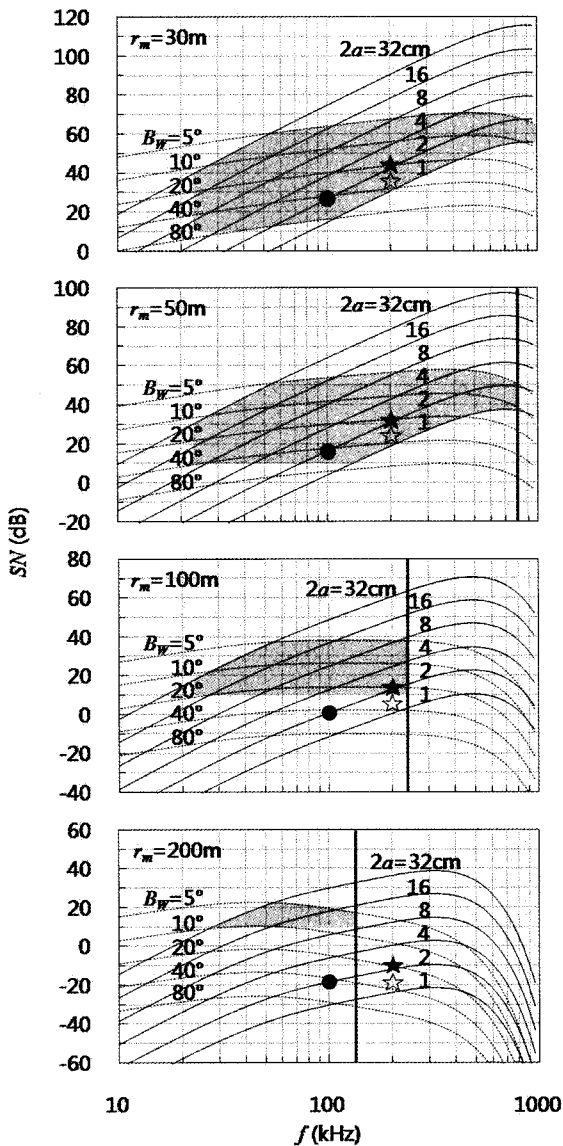


Fig. 5. Universal diagram for basic design of low electrical power echo sounder for coastal use. SNR for single echo is plotted against frequency with parameter of transducer diameter (solid lines). Constant beam width curves are superimposed (dashed lines). Range are 30m, 50m, 100m, and 200m. Shaded area shows an example for suitable design point.

나타내었다.

펄스 에코법을 사용하는 어군탐지기에서 주파수의 상한은 펄스에코의 시작시간이다. 주파수가 낮으면 펄스폭을 크게 해야 하며 따라서 거리분해능이 떨어지게 된다. 분해능을 50cm 보다 크게 하기 위해서는 주파수는 22kHz보다 높아야 한다 (古澤, 1990).

송수파기의 직경은 (7)식에 나타난 것처럼 SN비가 a^4 에 비례하기 때문에 큰 송수파기를 사용하면 SN비를 높일 수 있다.

따라서 휴대의 편의성, 송수파기의 장치 등 실용성을 감안하여 가능한 큰 송수파기를 선택해야만 한다.

샘플체적은 대략 송수파기 빔폭의 자승(B_w^2)에 비례하기 때문에 빔폭은 좁으면 샘플체적이 작아 추정량의 변동이 커진다. 또한 송수파기의 흔들림에 의한 오차(Stanton, 1982; Furusawa and Sawada, 1991)도 송수파기 빔폭을 제한한다. 그러나 개체추정에서는 단체에코를 분리하기 위해 좁은 빔폭이 필요하다. 따라서 단체에코 분리와 추정량의 변동 등을 고려한 적절한 빔폭을 선택한다.

Fig. 5에는 필요한 SN비, 실용적인 송수파기의 직경 및 빔폭, 허용할 수 있는 계측오차를 경계로하여 적당한 설계영역을 검정색으로 중복 표시하였다. SN비는 0dB 이상, 송수파기의 직경은 1cm~32cm, 빔폭은 5°~80°, 주파수는 위에서 설명한 범위를 초과하지 않도록 하였다. 각각의 설계 범위는 각각의 측정거리에 대해 적절한 주파수, 직경, 빔폭의 영역을 나타내고 있다. W , NP_0 , TS , Δt 의 영향은 직접적이어서 이들 값의 변화에 대해서는 세로축의 설계범위를 이동시켜 그들에 대한 영향을 평가할 수 있다.

설계범용도로부터 14cm의 어류를 거리 100m의 범위에서 계측할 경우 적당한 주파수의 범위는 22~220kHz, 송수파기의 직경은 2~32cm, 빔폭은 5~25°이다. Fig. 5에 최대탐지거리가 36m인 낚시용 어군탐지기와 소형으로 사용되고 있는 어군탐지기의 설계점을 ☆와 ★로 나타내었다. 대부분 휴대하기 편리하도록 송수파기의 직경을 감안하여 주파수 200kHz를 사용하고 있다. 전지를 사용하는 경우에는 송신전력을 0.1kW까지 낮추고 외부전원을 사용하는 경우에는 송신전력을 1kW 정도로 사용하고 있다. 빔폭은 전지를 사용하는 경우에는 34°(☆), 외부전원을 사용하는 경우에는 20°(★) 정도이다. 이것은 전지를 사용하는 경우 휴대가 편리하도록 송수파기를 가능한 작게 만들기 때문이라 생각된다. 이 그림은 $W=0.5kW$ 를 이용하고 있다. 전지를 사용하는 0.1kW의 어군탐지기에서는 설계점에 -7dB, 외부전원을 사용하는 1.0kW의 소형 어군탐지기에서는 설계점에 +3dB을 하여 세로축을 이동시켜 설계점을 정한다. 근거리를 대상으로 하는 낚시용 어군탐지기에서는 설계범용도에 ●로 나타난 것처럼 주파수를 100kHz로 낮추고, 송수파기의 직경을 2cm로 하면 빔폭을 40°까지 넓힐 수 있어 목적에 맞게 어군탐지기를 사용할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 최대탐지거리가 100m로 늘어나면 주파수를 낮추어 설계할 경우 빔폭이 작아지고 송수파기의 직경이 커져 소형으로 휴대하기에는 어렵게 되기 때문에 주파수를 높이는 것이 효과적임을 알 수 있다. 최대탐지거리를 200m까지 늘리기 위해서는 송신전력을 높게 하고, 주파수를 낮게 하며, 빔폭을 좁고, 송수파기의 직경을 크게 해야 하기 때문에 이 경우에는 어군탐지기가 대형이 되어 수산자원 측정용 어군탐지기의 설계방법에 따라 개발하는 것이 유리하다고 생각된다. 이상의 이론에 의해 200m 이전의 연안에서 목적에 맞게 사용할 수 있는 어군탐지기의 설계를 할 수 있다.

4. 고찰

이상 연안에서 목적에 맞게 사용할 수 있는 소형 어군탐지기의 설계방법에 대해서 검토하였다. 어군탐지기는 종래의 수산자원 측정을 위해 개발된 이후 최근에는 휴대용으로 개발되어 연안에서 레크리에이션에도 폭넓게 이용되고 있다. 종래의 수산자원 측정을 위한 어군탐지기에서는 원거리 탐지가 가능하도록 송신전력을 크게 하기 위하여 (11)식의 캐비테이션 발생시점을 계산하여 어군탐지기를 설계하였다. 그러나 레크리에이션에 이용되는 소형 어군탐지기의 경우에는 휴대하기 편하고 전지를 사용하여 긴 시간동안 사용할 수 있도록 송수파기의 직경을 작게 하고 송신전력을 낮게 설계하고 있다. 따라서 소형 어군탐지기에서는 (2)식의 송신전력을 이용하였다. 소형 어군탐지기에 대해 보다 실용적으로 설계할 수 있으며, 평가할 수 있을 것이라 생각된다.

외부전원을 사용하는 어군탐지기의 경우에는 캐비테이션이 발생하지 않는 범위 내에서 실용성만을 고려하여 송신전력을 선택하지만, 전지를 사용하는 어군탐지기에서는 전지의 수명, 휴대의 편의성 및 실용성 등을 고려하여 송신전력을 선택하는 것이 바람직하다. 원거리 탐지를 위해서는 송신전력을 크게 해야 하지만, Fig. 1에서와 같이 각 주파수에서 송신전력이 커짐에 따라 빔폭이 좁아지고, (8)식에 의해 송수파기의 직경이 커지게 된다. 따라서 송신전력이 커지면 전지의 수명이 짧아지고, 휴대하기가 불편하며, 연안에서 광범위한 탐지가 어렵게 된다. 특히 어군탐지기를 정치용으로 사용하고자 하는 경우에는 전지의 수명에 대한 고려가 가장 중요할 것이다. 어군탐지기에 사용되는 전지의 수명 H 는

$$H = \frac{C}{I_F \frac{\tau}{T} + I_R \frac{2d/c}{T} + I_0} \quad (15)$$

로 계산할 수 있다. 여기서 C 는 전지용량, I_F 는 송신전류, I_R 은 수신전류, I_0 는 대기전류이다. τ 는 펄스폭, T 는 펄스반복주기, τ/T 는 송신 듀티비, d 는 거리, $2d/c$ 는 기록시간, $(2d/c)/T$ 는 수신 듀티비이다. (15)식에 $W = VI$ (V 는 전압)식을 대입하면 W 와 H 의 관계를 구할 수 있다. 일반적으로 전지의 수명은 송신 듀티비와 수신기의 디스플레이 크기, 종류 등에 의해 결정된다. 디스플레이의 종류와 크기는 다양하여 수신전류를 정확하게 계산할 수 없지만 디스플레이를 제외한 수신전류만을 대상으로 할 경우 전지의 수명은 송신 듀티비에 의해 좌우된다. 바이오텔레메터리 음향계의 설계(朴과 古澤, 2002)에서와 같이 수명은 낮은 송신전력에서는 $I_F \frac{\tau}{T} \leq I_R \frac{2d/c}{T} + I_0$ 가 되기 때문에 거의 일정하지만 송신전력이 어떤 값 이상이 되면 송신전력의 증가와 함께 급격하게 감소하게 된다. 수명을 길게 하기 위해서는 송신전력을 작게 하고 송신듀티비를 작게 해야만 한지만, 이러한 변수는 어장의 상황에 맞게 적절하게 선택해야 할 것이다. 이와 같이 휴대용 어군탐지기에서 송신전력과 수명과의 관계는 아직까지 이론 되어 지지 못했다. 보다

효율적으로 설계하고 평가하기 위해서는 앞으로의 연구가 기대된다.

어군탐지기의 설계에서는 (7)식 SN비를 이용하였다. (7)식에서 잡음스펙트럼계수 $N_{F0}=145\text{dB}$ 은 총톤수 220톤의 철선이 선속 11knot로 항주할 때의 값이다. N_{F0} 의 SN비에 대한 영향은 크고, 선박의 종류, 선속, 해황 등 측정조건에 의해 크게 달라지기 때문에 검토할 필요가 있다. 일반적으로 N_{F0} 는 선박이 작을수록 선속이 느릴수록 작다. 또한 휴대용 어군탐지기의 경우에는 정치하여 사용하는 경우도 많다. 이 경우 잡음원은 선박의 항주잡음이 아니고 환경잡음을 고려해야한다. 자신의 항주잡음의 주파수특성은 거의 환경잡음의 주파수특성과 비슷하다. 또한 항주잡음의 레벨은 Wenz(1962)의 환경잡음의 최대치 보다 12dB 정도 높다. 이 경우 일반적으로 설계범용도의 세로축을 조절하여 SN비를 대응시킬 수 있다. 그러나 설계에서는 잡음이 많은 환경에서의 실험도 생각하여 N_{F0} 값 145dB을 그대로 적용하였다.

본 연구의 어군탐지기 설계에서는 주파수의 상한과 하한을 결정할 때 TS에 대한 영향을 고려하지 않았다. 일반적으로 수산자원 측정을 위한 어군탐지기에서는 보다 정량적으로 측정하기 위하여 주파수의 상한과 하한을 결정할 때 TS가 주요한 변수로 작용한다. 즉 TS의 오차 범위를 예를 들어 12cm의 어류를 대상으로 5dB 이내로 제한하기 위하여 주파수의 상한과 하한을 결정할 경우, 주파수의 상한은 부레를 가진 어류를 대상으로 하면 100kHz, 부레를 가지지 않는 어류를 대상으로 하면 25kHz가 되고, 주파수의 하한은 12.5kHz가 된다. 이와 같이 TS의 자세에 의한 변동폭을 적게 하기 위해서는 가능한 저주파를 이용해야 하지만 이 경우 송신전력이 커지고 송수파기의 직경이 커져 소형 어군탐지기로는 설계하기 부적합하게 된다.

5. 요약

휴대용 어군탐지기를 효율적으로 설계하고 평가할 수 있는 방법에 대해 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 일반적으로 사용되고 있는 어군탐지기의 현상을 검토하였다. 송수파기의 직경이 송신전력이 증가함에 커지는 경향을 보였고 따라서 주파수와 송신전력이 상승함에 따라 빔폭은 좁아졌다.
2. 어군탐지기의 신호대 잡음비는 (7)식과 같으나, 상업적으로 사용되고 있는 일반적인 어군탐지기의 신호대 잡음비는 (14)식과 같이 유도되었다.
3. 탐지거리는 주파수의 증가와 함께 증가하였지만 송수파기의 직경, 송신전력이 커짐에 따라 최대치를 나타내는 주파수는 저주파로 이동하고 있다. 즉 송수파기 직경, 송신전력의 증가에 따른 효과는 저주파에서는 크고, 고주파에서는 적은 경향을 보인다.
4. 탐지범위를 이용하여 각 주파수에서 송수파기의 직경 및

송신전력을 구할 수 있었다. 고정도 탐지를 위해서는 고주파수 또는 직경이 큰 송수파기를 선택해야하며, 특히 송수파기를 작게 하기 위해서는 고주파수를 선택해야 한다. 탐지거리를 길게 하기 위해서는 송수파기의 직경을 고려하여 송신전력을 크게 해야 한다.

5. 지금까지 연구되어진 설계 방법과 탐지범위 등을 종합적으로 응용하여 연안에서 목적에 맞게 사용할 수 있는 소형 어군탐지기의 설계 범용도를 작성하였다. 범용도에는 신호대 잡음비를 송수파기의 직경, 빔폭, 탐지거리를 변수로하여 주파수에 대해 표시하였다. 범용도에서 신호대 잡음비가 높고 실용성이 높은 적절한 설계영역을 표시하였다. 설계영역에서 설계점을 정하면 전체적으로 적절한 설계를 할 수 있다. 설계범용도는 어군탐지기의 성능평가에도 응용할 수 있다.

사 사

이 논문은 2007년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(기초과학분야 : KRF-2007-359-F00008)

참 고 문 헌

[1] 박주삼(2005), 수산음향계측장치의 탐지범위에 대한 연구, 한국어업기술학회지, 제41권, 제1호, pp. 54-63.

[2] 西村 實(1969), 魚群探知機の最適周波數に關する研究, 博士論文, 東海大學, 仙台, p. 104.

[3] 朴柱三, 古澤昌彦(2002), 超音波バイオテレメト리의音響系の評價および設計方法, 日本水産學會誌, 第68卷, 第3号, pp. 334-344.

[4] 古澤昌彦(1990), 水産資源推定のための超音波による魚群探知に關する研究, 水産工學研究所研究報告, 第11号, pp. 173-247.

[5] 古澤昌彦(1985), 魚群探知機のTVGについての檢討, 水産工學研究所技報(漁船工學), 第6号, pp. 33-49.

[6] Clay, C. S. and Medwin, H.(1997), Acoustical oceanography: Principle and applications, John Wiley and Sons Inc., New York, pp. 146-149.

[7] François, R. E. and Garrison, G.R.(1982), Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 72, Issue 6, pp. 1879-1890.

[8] Furusawa, M., Asami, T. and Hamada, E.(1999), Detection range of echo sounder, 3th JSPS Inter. Semi. Sustainable Fishing Technology in Asia towards the 21st Century, TUF International JSPS Project, pp. 207-213.

[9] Furusawa, M. and Sawada, K.(1991), Effects of transducer motion on quantifying single fish echoes, Nippon Suisan Gakkaishi, Vol. 57, No. 5, pp. 857-864.

[10] Hamilton, D., Lozow, J., Suomala Jr, J., and Werner, R.(1977), A hydroacoustic measurement program to examine target quantification methods, Rapp. P. -v. Réun. Cons. int. Explor. Mer, Vol. 170, pp. 105-121.

[11] Liu Xuezheng, Furusawa M., Hamada Y. and Aoyama C.(1999), Designing acoustic transmitting-receiving system for volume backscattering measurement of zooplankton, Fisheries Science, Vol. 65, No. 3, pp. 410-419.

[12] Mitson, R. B.(1995), Underwater noise of research vessels: Review and recommendations, ICES Cooperative Research Report No. 209, p. 61.

[13] Miyamoto, Y., Sakai, T., Furusawa, M. and Naito, Y.(2004), Development of high-frequency micro echo Sounder, Fisheries Science, Vol. 70, No. 3, pp. 381-388.

[14] Stanton, T. K.(1982), Effects of transducer motion on echo-integration techniques, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 72, Issue 3, pp. 947-949.

[15] The National Academy of Sciences(2009), sounding out the ocean's secrets, <http://www.beyonddiscovery.org/>.

[16] Wenz, G. M.(1962), Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 34, Issue 12, pp. 1936-1956.

원고접수일 : 2009년 06월 23일

원고수정일 : 2009년 07월 06일 (1차)
2009년 08월 15일 (2차)

게재확정일 : 2009년 08월 28일