

## 수중 잔향음 신호 모의 Simulation of underwater reverberation signals

오 선 택\*, 나 정 열\*  
(Suntaek Oh\*, Jungyul Na\*)

### 요 약

잔향음이 우세한 환경하에서 소나 시스템의 성능을 평가할 때 대부분의 음향 모델인 음압 준위(power level) 모델에 비해 수중 잔향음 신호 모의 모델은 매우 유용하게 이용된다. 본 논문에서는 소나 시험에 필요한 잔향음 신호(reverberation time series)를 모의하였다. 우선 주파수 영역에서 밴드의 폭이 변하고 가우시안 분포(Gaussian distribution)를 갖는 표준화된 스펙트럼(normalized spectrum)을 수신 시간 간격에 따라 구하였다. 두번째로, 기존의 음향 모델의 결과인 시간에 따른 잔향음 준위를 각각의 표준화된 스펙트럼의 준위와 합성하였다. 마지막으로 음원 신호의 스펙트럼과 잔향음 스펙트럼을 곱(product)하고 이 결과를 역푸리에 변환(inverse Fourier transform)을 이용하여 신호를 모의하였다.

### Abstract

Simulation of sonar reverberation time series is very useful because most acoustic models are power level models and have a difficulty when performance of hardware system is evaluated under the reverberant condition. Thus, in this paper, the simulation of reverberation time series is attempted. First, normalized spectrum, whose bandwidth is varying in the frequency domain and which has zero-mean Gaussian distribution, is calculated at pre-selected receiving time. Second, reverberation levels given by underwater acoustic model are combined with normalized spectrum in the frequency domain. Finally, nonstationary sonar reverberation time series are simulated by IFT(Inverse Fourier Transform).

### I. 서 론

수중에서 신호를 방사했을 경우 그 신호는 소나 시스템과 환경의 특징을 포함하여 원래의 신호와는 다른 형태(잔향음)로 되 돌아온다. 그 가운데 매질의 비균질성(inhomogeneity)·랜덤하게 분포하는 수면 상태, 저질 상태, 해수층 산란체의 분포와 수중 음속 구조의 변화등에 의한 영향이 가장 크게 작용한다. 이

러한 비균질성에 의한 잔향음(reverberation)은 크게 나누어서 경계면(boundary) 잔향음과 체적(volume) 잔향음으로 나뉜다.

능동 소나(active sonar)를 운용할 시 탐지 거리에 제한이 되는 환경은 잡음 제한 환경(noise limited condition)과 잔향음 제한 환경(reverberation limited condition)으로 나뉜다. 음원 준위가 낮은 경우 잡음 제한 환경이 되며 음원 준위가 높은 경우에는 거리에 따라서 잔향음이 감소되는 것에 비해서 반향음(echo)이 더 빨리 감소될 수 있다. 이러한 조건에서 탐지 거리는 잔향음에 의해서 제한이 되고 이를 소위 잔향음

\*한양대학교 지구해양학과  
접수일자: 1994년 7월 29일

제한환경(reverberation limited case)이라고 한다. 일반적으로 고주파를 사용하는 소나에서 표적(target)을 탐지하기 위하여 원하지 않는 신호인 잔향음을 효과적으로 제거하는 것이 필요하다. 잔향음은 음원의 속도와 해수면의 움직임에 의한 도플러 변이와 주파수 broadening 및 체적에 존재하는 산란체의 움직임에 의한 주파수 broadening의 영향으로 표적의 주파수 특징과는 다르게 나타나기 때문에 notch 필터를 이용하면 쉽게 잔향음을 제거할 수 있다. 그런데 현재 사용되는 음향 모델의 대부분이 단위 시간당의 에너지 분포만을 나타내는 음압 준위 모델이므로 모의 시험의 경우에는 부적합하며 실제 해양에서 하드웨어 시험할 경우 많은 인력과 경비가 소요되기 때문에 수중 잔향음 신호(time series) 모델이 필요하게 된다.

이러한 이유로 개발된 기존의 모델에는 REVGEM(Princehouse, 1977)과 REVSIM(Chamberlain, 1983)이 있다<sup>2, 3</sup>. REVGEM은 point scattering model-해양에 산란체가 랜덤하게 분포한다는 가정하에 일정 거리에서 산란체 각각의 산란 강도를 계산하여 시간별로 합하는 방법-을 이용하여 잔향음 준위를 계산한 후 잔향음의 특징을 가우시안 분포를 갖는 스펙트럼으로 가정하여 신호를 모의하는 방법을 이용한 것이다. 그리고 REVSIM은 cell scattering model-해양을 많은 산란체가 존재하는 일정한 구역으로 나누어 각 구역별로 전체 산란 강도를 계산하여 시간별로 합하는 방법-을 이용하여 잔향음을 계산한 후 선형 스펙트럼 예측법(linear spectral prediction)에 의해 잔향음 스펙트럼을 가정하여 신호를 모의한 것이다. 그런데 REVGEM의 경우 잔향음의 일반적인 통계적 특징을 만족하지 못한다. 그리고 REVSIM의 경우 한 빔에 대해 한개의 잔향음 spectra를 사용한다. 그런데 같은 형태를 갖는 빔이 같은 지향각을 서로 반대 방향을 향하는 경우 실제로는 두개의 빔에 대한 신호는 서로 상관성이 없어야 하지만 REVSIM과 같은 경우 두빔에 의한 신호는 완전히 일치하게 되는 경우가 생기게 된다는 문제가 있다.

반면 본 논문에서 모의된 신호는 REVGEM, REVSIM과는 달리 해양의 경계면과 체적에서의 개개의 산란체에 대한 산란 강도 및 전달 손실 등을 계산하고 산란되어 되돌아오는 잔향음의 다중 경로를 고려한 모델<sup>4, 5, 6</sup>을 근거로 하고 있다. 또한 잔향음의 특징인 주파수 영역에서 밴드의 폭이 변하고 가우시안

분포를 갖는 표준화된 스펙트럼을 이미 정해진 수신 시간 간격에 따라서 계산하였다. 이를 이용하여 기존의 음향 모델의 결과로부터 얻은 시간에 따른 잔향음 준위를 각각의 표준화된 스펙트럼의 준위로 입력한 후 역푸리에 변환을 통하여 시간 영역에서의 신호를 모의하였다. 여기서 음향 모델의 결과를 참고로 하여, 잔향음의 특징에 따라 밴드의 폭을 임의로 조정하였으며 거리에 따른 신호의 전파 손실을 계산하여 보상하였다. 이러한 방법으로 빔 패턴과 음원 수심을 변화시켜 신호를 모의하였다.

## II. 잔향음 신호 모델링

잔향음은 경계면과 체적에 분포하는 산란체에 의해 발생하는 신호이며 일반적으로 잔향음 준위는 음원에서 방사되는 음원 준위에 비례하고 체적 잔향음 준위는 아래의 식에서  $RL_{(v)(s, v)} \propto$ 와 roct를 이용하면  $1/t^2$ 으로 감소되고 해수면과 해저면 잔향음 준위는  $1/t^3$ 으로 감소되는 특징을 알 수 있다<sup>7, 8</sup>.

$$RL_V = 10 \log\left(\frac{I_0}{r^4} s_v \frac{c\tau}{2} r^2\right) - \text{체적잔향음}$$

$$RL_{s, b} = 10 \log\left(\frac{I_0}{r^4} s_{s, b} \frac{c\tau}{2} r \phi\right) - \text{경계면잔향음}$$

여기서  $I_0$ : 음원의 음압 강도

$r$ : 필스의 길이

$\psi, \phi$ : 빔폭

또한 잔향음은 밴드제한 신호(bandlimited signal)이며 시간에 따라 신호의 모양이 변하는 비정규(non-stationary) 또는 준정규(quasi-stationary) 신호다. 따라서 잔향음은 통계적으로 샘플의 수가 증가하게 되면 가우시안 분포를 갖게 된다는 중심 제한 정리(central theorem)를 만족하며 잔향음의 in-phase와 out of phase 성분은 가시한 분포를 갖는다<sup>9, 10, 11</sup>. in-phase와 out of phase 성분에 대하여 결합 확률 밀도 함수(joint probability density function)를 구하면 진폭은 레일리(Rayleigh) 분포이며, 위상은 유니폼(uniform) 분포를 갖는다고 알려져 있다.

이를 이용하여 수중 잔향음 신호를 표시하면 다음과 같다.

$$n(t) = n_c(t) \cos [2\pi ft] + n_s(t) \sin [2\pi ft]$$

$$=r(t) \cos [2\pi ft + \phi(t)]$$

여기서  $n_c(t)$  : in-phase 성분

$n_s(t)$  : out of phase 성분

$$r(t) : [n_c(t)^2 + n_s(t)^2]$$

$$\psi(t) : \tan^{-1}[n_s(t)/n_c(t)]$$

어떤 시간에 이 신호의 in-phase와 out of phase 성분의 샘플을 각각  $N_c(t)$ ,  $N_s(t)$ 라고 하며, 중점 제한 정리에 의해 평균이 0, 분산이  $\sigma^2$ 인 가우시안 분포를 갖게 된다. 이에 대한 결합 확률 밀도 함수를 구해서 좌표를 변환하여 나타내면 다음과 같다.

$$f_{R, \psi}(r, \phi) = \frac{r}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}$$

여기서  $R$ 과  $\psi$ 가 통계적으로 독립이므로 다음과 같이 나누어 쓸 수 있다. 진폭은

$$f_R(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}, & r \geq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

로 레일리 분포를 나타내고 위상은

$$f_\psi(\phi) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi}, & 0 \leq \psi \leq 2\pi \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

로 유니폼 분포를 갖는다.

잔향음의 특성을 재현하기 위하여 통계적으로 in-phase와 out of phase 성분이 가우시안 분포를 갖는 산란 함수를 만들어야 한다. 밴드 패스 필터(bandpass filter)를 통과시킨 랜덤 신호(random signal)는 그 밴드에 한하여 in-phase와 out of phase 성분의 통계적 특성이 그대로 보존된다. 따라서 가우시안 분포를 갖는 랜덤신호를 발생시켜 512 샘플씩 밴드 패스 필터를 통과시켰다. 여기서 필터는 FIR이며 시간에 따른 주파수의 변화는 Hanning window를 이용하여 width를 조정하므로써 고려하였다. 각각 계산된  $H_s$ (해수면 잔향음 스펙트럼),  $H_b$ (해저면 잔향음 스펙트럼),  $H_v$ (체적 잔향음 스펙트럼)는 표준화된 값(normalized values)이다.

잔향음 신호 모의에 필요한 잔향은 준위를 계산시 사용되는 산란 모델은 다음과 같다<sup>12, 13</sup>.

우선 산란 모델에서 이용하는 기본 개념은 ① 잔향음은 산란된 음이고, ② 산란체로부터 산란된 음이 도

착한 후부터 끝날때까지 만의 산란 현상이며, ③ 다중 산란은 무시되고, ④ 산란은 산란체의 분포에 비례한다는 것이다. 이러한 개념에 의해 계산하는 것은 결국 음원과 산란체간의 closed path를 찾기 위한 eigenray를 계산하고 각 시간별로 체적과 경계면에서 발생하는 산란 구역을 계산하는 것이다. 임의의 산란체로 이루어진 구역을  $\Delta R^{(i)}$ 라 하고 이 산란 구역에 해당하는 전달 손실 및 입사각을  $P_1^{(i)}$ ,  $P_2^{(i)}$ ,  $\theta_{a,1}^{(i)}$ ,  $\theta_{a,2}^{(i)}$ 라 할 때의 잔향음 준위는 Fig. 1에 의해 다음과 같이 표시할 수 있다.

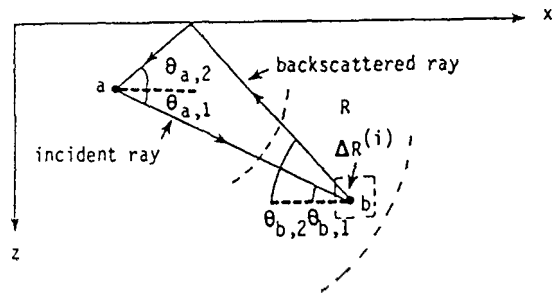


Fig. 1. Closed ray path used in reverberation calculations.

$$|P_{rev}|^2 = \sum |P_0 \eta_t(\theta_{a,1}^{(i)}) P_1^{(i)} P_2^{(i)} \eta_r(\theta_{a,2}^{(i)})|^2 \times \mu^{(i)} \Delta R^{(i)}$$

여기서  $P_{rev}$  : 잔향음 음압

$P_0$  : 음원 음압

$P_1^{(i)}$  : 음원에서 산란체까지의 전달 손실

$P_2^{(i)}$  : 산란체에서 음원까지의 전달 손실

$\eta_t(\theta_{a,1}^{(i)})$  : 음원 지향 특성

$\eta_r(\theta_{a,2}^{(i)})$  : 수신 지향 특성

$\mu^{(i)}$  : 후방 산란 강도

이러한 과정에 의거 체적 잔향음은 index (i)가 (i, j)로 바뀌어서 다음과 같이 표시할 수 있다(Fig. 2).

$$|P_v|^2 = \sum |P_0 \eta_t(\theta_{a,1}^{(i,j)}) P_1^{(i,j)} P_2^{(i,j)} \eta_r(\theta_{a,1}^{(i,j)})|^2 \times \mu_v x^{(i)} \Delta x^{(i,j)} \Delta z^{(i)} \Delta \phi$$

여기서  $\mu_v$  : 체적 산란 강도

$x^{(i)} \Delta x^{(i,j)} \Delta z^{(i)} \Delta \phi$  : 산란체의 체적

해수면의 경우 Chapman-Harris<sup>7</sup>의 해수면 산란 모

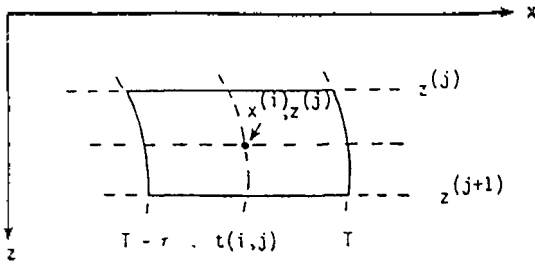


Fig. 2. Insonified region used in reverberation calculations.

델을 이용한 것으로 이것은 해수면의 풍속과 사용 주파수 그리고 입사각의 함수이다. 식으로 표시하면

$$\mu_s = 3.3 \times \beta \log_{10} \left( \frac{\theta}{30} \right) - 42.4 \log_{10} \beta + 2.6$$

$$\text{여기서 } \beta : 158(vf^{\frac{1}{3}})^{-0.58}$$

$\mu_s$ : 해수면 산란 강도

$v$ : 풍속

$f$ : 사용 주파수

이고 해저면 산란 강도는 다음과 같은 해저면의 성질과 입사각의 함수인 Mackenzie 모델(Lambert's law)<sup>7</sup>을 이용한다.

$$\mu_b = 10 \log \mu + 10 \log(\sin^2(\theta))$$

여기서  $\mu$ : 직각으로 입사되었을 때의 후방 산란 강도

이러한 방법에 의해 나온 잔향음 준위는 결국 신호를 모의하기 위한 해수면, 해저면, 체적 잔향음의 스펙트럼 각각의 산란 함수(scattering function)인  $H_s$ ,  $H_b$ ,  $H_v$ 를 계산하는 기초 자료가 된다(Fig. 3).

위의 잔향음 신호의 특성과 잔향음 준위 계산을 위한 산란 모델을 이용하여 수중 잔향음 신호를 모의하기 위한 식을 정의하면 다음과 같다.

$$RL(f, t) = R_{tot}(t) \times [T(f) \times \max\langle H_s(f, t), H_b(f, t), H_v(f, t) \rangle]$$

여기서  $RL(f, t)$ 은 모의 수중 잔향음 신호  $R_{tot}(t)$ 는 시간에 따라 계산된 잔향음 준위 결과,  $T(f)$ 는 음원 신호를 푸리에 변환한 값 그리고  $H_s(f, t)$ ,  $H_b(f, t)$ ,  $H_v(f, t)$ 은 각각 시간에 따른 해수면, 해저면, 체적

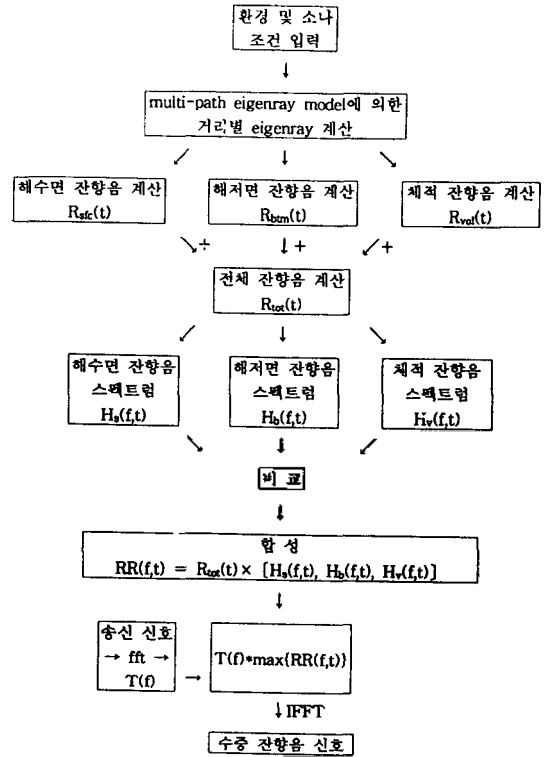


Fig. 3. Processing flow of sonar reverberation time series model.

잔향음의 스펙트럼이다. 시간에 따라 주파수적인 특징이 변하는 신호의 특성을 고려하기 위해서는 각각의 수신된 시간에서의 지배적인 영향을 고려하여 산란 함수(scattering function)인  $H_s$ ,  $H_b$ ,  $H_v$ 를 음원 신호의 절반이 되는 256 샘플씩 half overlapping하여 만들었다. 따라서 위의 식은 음원 신호의 스펙트럼과 3개의 잔향음 스펙트럼 중 지배적인 영향을 미치는 요소로 선택된 성분을 곱한 후 모델에서 계산된 전체 잔향음 준위와 합성하는 것을 나타낸다. 계산된 잔향음 준위에서 지배적인 영향을 미치는 요소에 의해 잔향음의 스펙트럼이 결정되므로 본 연구에서는 수치적으로 비교하여 선택하였다.

여기서 잔향음을 정규 신호의 연속이고 음원 신호의 길이(pulse length)내에서 신호의 특징이 변하지 않는 정규 신호라고 가정하고 각 수신 시간에서의 스펙트럼을 계산하였다. 또한 경계면과 체적 잔향음의 경우, 음원 신호에 대하여 주파수 broadening이 각각 다르게 나타나기 때문에 각 단위 시간(혹은 단위거리)별로 밴드폭에 변화를 준다. 일반적으로 알려진 바에

의하면 해수면과 체적의 주파수 broadening 정도를 비교하면 해수면의 움직임에 의한 분산이 체적의 움직임에 의한 분산에 비해 크다고 알려져 있다. 그런데 시간 혹은 거리에 따른 주파수 broadening에 대하여 정확한 계산이 따르지 않았기 때문에 본 연구에서는 1993년 한국 동해 남부 해역에서 얻은 실측 잔향음 자료를 근거로 그 양을 결정하였다.

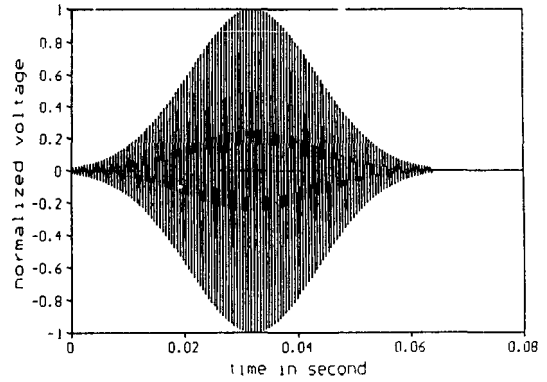
기존의 음향 모델에서는 해수면, 해저면, 체적, 전체 잔향음 등의 4가지의 잔향음 준위를 시간별로 계산하며 결과는 전달 손실을 포함한 것이므로 역으로 보상하였다. 여기서 계산된 잔향음 준위를 경계면과 체적에 대한 표준화된 산란 함수의 음압 준위로 나타내어 음원 신호와 주파수 영역에서 합성한 후 FFT bin (512-sample)에 따라서 역 푸리에 변환을 통하여 잔향음 신호를 계산하였다.

### III. 모의 결과

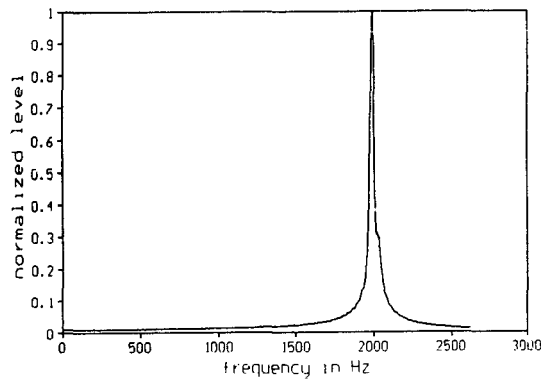
수중 잔향음 준위는 음원의 수심, 지향 방향 및 음속 구조에 의해 산란되는 면적과 체적의 크기에 따라 결정이 된다. 음향 모델을 이용하여 잔향음 준위를 계산한 후 그 결과를 이용하여 다음과 같은 상황에서 신호를 모의하였다.

여기에 쓰인 음원 신호는 Fig. 4와 같이 주파수가 2kHz인 CW 신호를 이용하였으며 음속 구조는 Fig. 5와 같이 음의 기울기 형태다. case A의 경우 Table 1과 같이 파라미터를 정하였다. 빔 패턴은 Fig. 6과 같이 임의로 -3dB의 폭이 10°인 경우와 15°인 경우를 고려하였다. case B는 음원 수심을 300m로 하고, 빔 패턴은 case A와 같이 두가지 경우를 가정하였다.

최대 거리는 2256m이며 거리 증분은 48m이므로 잔향음 스펙트럼의 수는 47개를 만들었다. case A에서 빔 패턴은 -3dB의 폭이 10°인 경우로 잔향음 계산 결과에서 초기에는 체적 잔향음의 영향이 지배적이다. 체적 산란 강도는 경계면 산란 강도에 비해 상대적으로 약하므로 시간이 지남에 따라서 150m에서 1400m까지 해수면 잔향음의 효과가 우세하고 1400m 지나면서 해면 잔향음이 크게 나타났다. 이에 비해서 -3dB의 폭이 15°인 경우 1000m부터 해저면의 영향이 나타났다. Fig. 7은 case A인 경우의 잔향음 계산 결과이다. 여기서 굵은 점선은 체적 잔향음, 실선은 해수면 잔향음, 점선은 해저면 잔향음, 굵은 실선은 전체 잔향음을 나타낸다. 체적 산란 강도가 해수면



(a)



(b)

Fig. 4. Source signal. (a) time domain (b) frequency domain

Table 1. Parameters for case A

Parameter	value	units
reverberation type	surface, bottom, volume	
maximum range	2256	m
range interval	48	m
beam pattern	narrow	
source depth	50, 300	m
bottom depth	500	m
sound speed type	profile	m/s
sonar speed	10	knot
carrier frequency	2	kHz
sampling frequency	8	kHz

및 해저면 산란 강도에 비해 약하기 때문에 0.1초 이후부터 해수면과 해저면의 효과가 크게 나타나고 있다. Fig. 8은 case A인 경우 즉 음원의 수심이 50m인 경우 시간에 따라서 스펙트럼의 변화를 나타낸 것으로 (a)는 빔폭이 10°인 경우, (b)는 빔폭이 15°인 경

우물 (c)는 (a)의 경우를 보기 쉽게 나타낸 것이다. (c)에는 음원의 속도에 의한 도플러 변이가 포함되어 있으며 체적에서 산란되었을 경우와 경계면에 산란되었을 경우 주파수 broadening의 양이 변하는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 음원의 수심이 50m인 경우 잔향음 신호를 모의한 결과로 (a)와 (b)는 각각 빔폭이 10°와 15°인 경우를 나타낸다. 여기서 각 거리 증분내

에서 준위는 일정하다. Fig. 10의 (a)와 (b)는 case B이 경우를 나타낸 것으로 음원의 수심이 300m이며 빔폭에 따라 잔향음 준위의 차이가 크게 나타난다. 이러한 차이는 빔에 의해 해저면에 형성되는 면적의 차이가 크기 때문이다. Fig. 11은 case B에서의 신호를 모의한 것이다. 빔 패턴의 영향으로 (a)에 비해서 (b)의 경우 잔향음의 진폭이 크게 보인다.

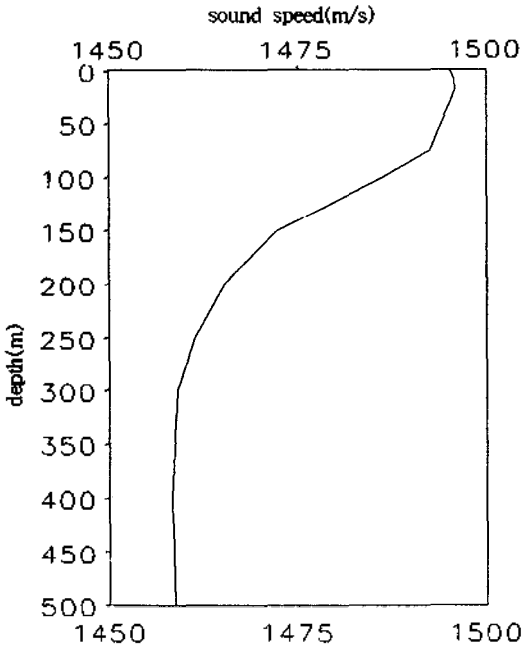


Fig. 5. Sound speed profile.

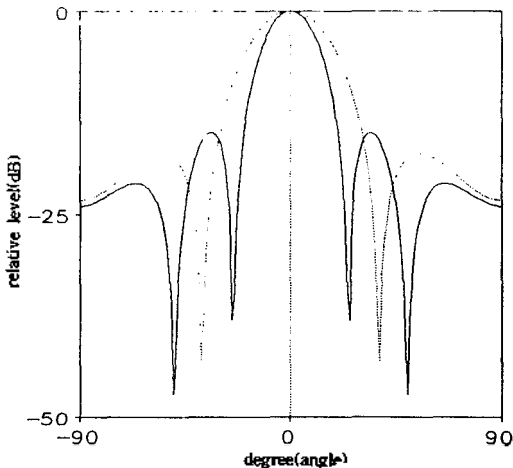


Fig. 6. Beam patterns (Half beamwidth of solid line and dotted line is 10° and 15°, respectively)

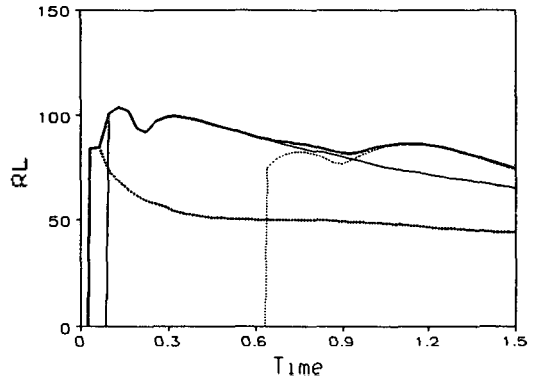
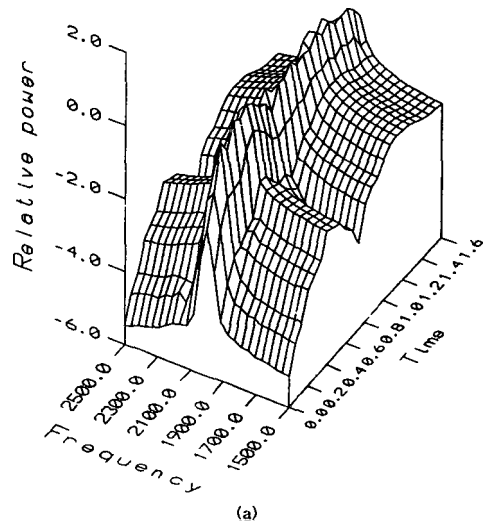


Fig. 7. Reverberation power level versus time by using acoustic model. (heavy dotted line : volume, dotted line : bottom, solid line : surface, heavy solid : total)



(a)

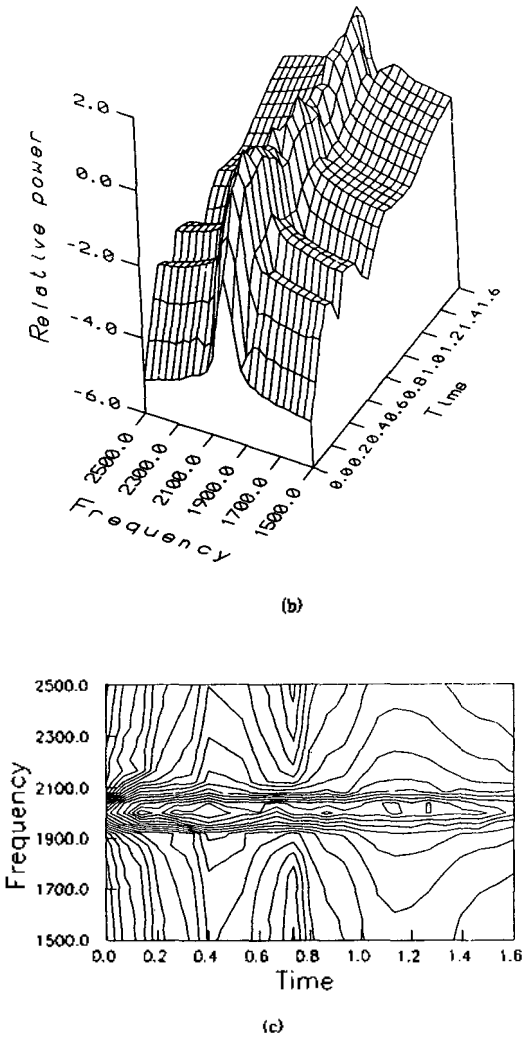


Fig. 8. (a)–(c) Reverberation spectrogram and contour plots for case A. (a) beam width : 10° (b) beam width : 15° (c) contour plot of the beam width 10°

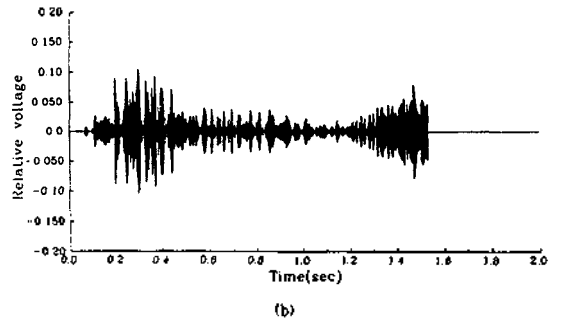
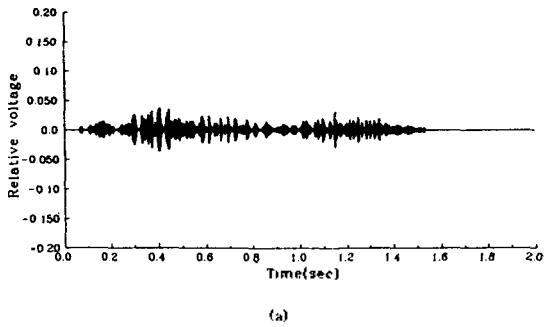
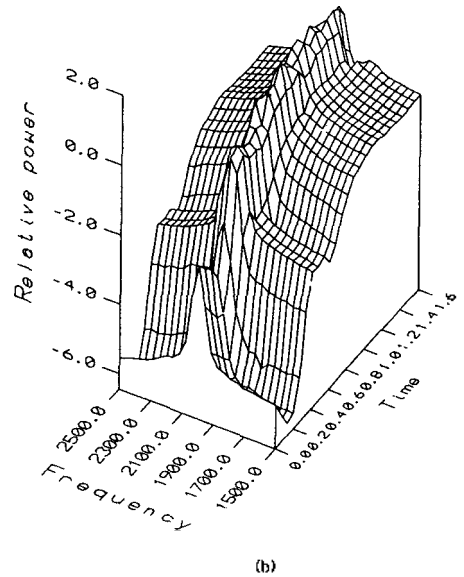
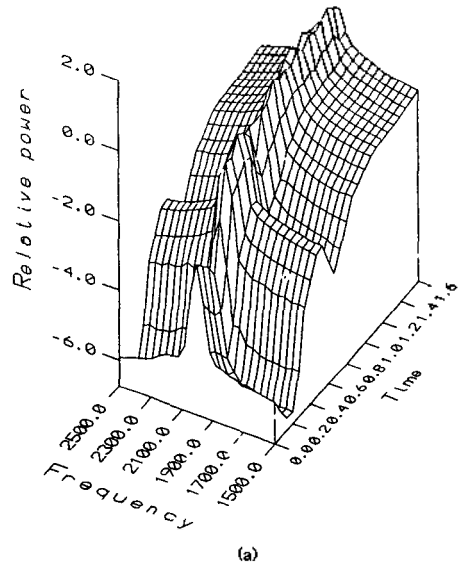


Fig. 9. Simulated reverberation time series for case A. (a) beam width : 10° (b) beam width : 15°



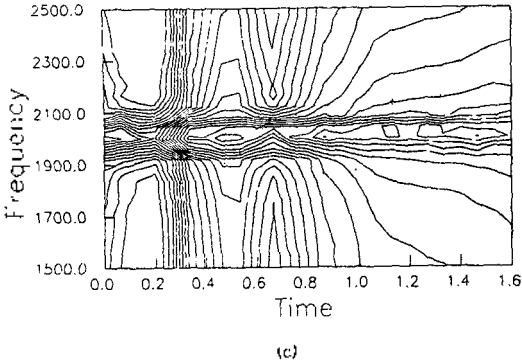


Fig. 10. (a) - (c) Reverberation spectrogram and contour plots for case B. (a) beam width :  $10^\circ$  (b) beam width :  $15^\circ$  (c) contour plot of the beam width  $10^\circ$

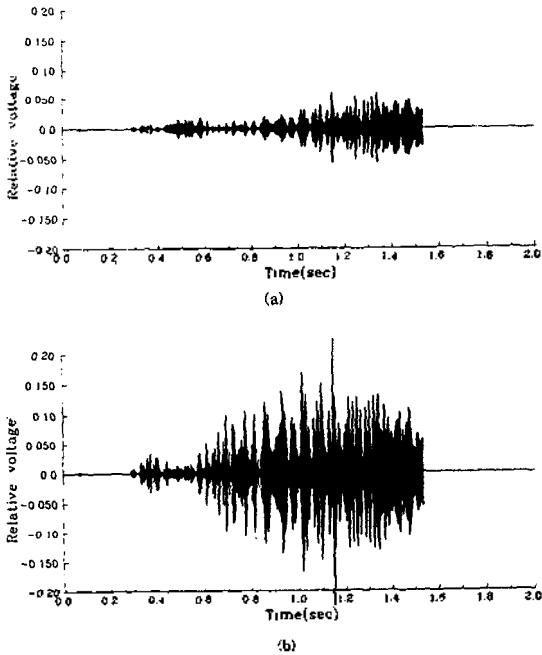


Fig. 11. Simulated reverberation time series for case B. (a) beam width :  $10^\circ$  (b) beam width :  $15^\circ$

#### IV. 결론 및 토의

본 논문에서는 기존의 음향 모델을 이용하여 비정규 수중 잔향음 신호를 모의하는 방법과 결과를 보여 주었다. 이러한 방법에 의한 모의 신호는 소나 시스템과 환경 조건을 정확하게 적용한 것이다. 각 시간

에서의 잔향음 준위가 주어졌을 때, 각각의 시간에 따른 표준화된 스펙트럼을 계산하였다. 시간에 따라 변화하는 스펙트럼에서 잔향음 준위는 모델에서 계산된 잔향음 결과와 합성하였다. 좀더 정확한 신호를 모의하기 위해서 환경에 영향을 받는 산란 함수의 밴드 폭 변화의 특징을 고려해야 하겠다.

#### 참 고 문 헌

1. P. Faure, "Theoretical model of reverberation noise," *J. Acoust. Soc. Am.* 36, 259-266 (1964).
2. S. G. Chamberlain and J. C. Galli, "A model for numerical simulation of nonstationary sonar reverberation using linear spectral prediction," *IEEE J. Ocean. Eng.*, OE-8, no. 1, 21-36 (1983).
3. J. C. Luby and D. W. Lytle, "Autoregressive modeling of nonstationary multibeam sonar reverberation," *IEEE J. Ocean. Eng.*, OE-12, no. 1, 116-129 (1987).
4. H. Weinberg, "A continuous-gradient curve fitting technique for acoustic-ray analysis," *J. Acoust. Soc. Am.* 50, 975-984 (1971).
5. H. Weinberg and R. Burridge, "Horizontal ray theory for ocean acoustics," *J. Acoust. Soc. Am.* 55, 63-79 (1974).
6. H. Weinberg, "Application of ray theory to acoustic propagation on horizontally stratified oceans," *J. Acoust. Soc. Am.* 70, 1736-1742 (1975).
7. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, New York: McGraw-Hill, 1983.
8. P. C. Etter, *Underwater Acoustic Modeling*, Elsevier Applied Science, 1991.
9. A. V. Oppenheim, and A. S. Willsky, *Signals and Systems*. Prentice-Hall International Editions, 1983.
10. J. S. Bendat, and A. G. Piersol, *Random Data Analysis and Measurement Procedures*, John Wiley & Sons, 1986.
11. J. G. Proakis, and D. G. Manolakis, *Digital Signal Processing*, Maxwell Macmillan International Editions, 1992.
12. J. Y. Na, "Prediction of reverberation of a moving body," ADD Tech. Rep., Korea, 1992.
13. J. Y. Na, "Target and environmental signal simulation and target motion analysis in the inhomogeneous medium," ADD Tech. Rep., Korea, 1993.



## ▲나 정 열(Na Jung-Yul)

현재 : 한양대학교 지구해양과학과 교수

(한국음향학회지 8권6호 참조)

## ▲오 선 택(Oh Sun-Taek) 1969년 2월 14일생

1992년 2월 : 한양대학교 지구해  
양과학과 졸업(이  
학사)

1992년 8월 ~ 현재 : 한양대학교  
대학원 지구해양과  
학과 석사과정 재학

