

선박 방사소음의 측정방법 및 정확도 해석

Ship Radiated Noise Measurement Methods and Accuracy Analysis

이 필 호† · 윤 종 략*

Phil-Ho Lee and Jong-Rak Yoon

(2005년 3월 23일 접수 : 2005년 5월 10일 심사완료)

Key Words : Ship Radiated Noise(선박방사소음), Source Level Estimation(음원준위 추정), Radiated Noise Measurement(방사소음측정), Hydrophone Array(수신기배열), Transmission Loss Anomaly(전달손실 변이)

ABSTRACT

The ship radiated noise level fluctuates by the difference of interference and reverberation according to measurement methods and environmental conditions. These phenomena cause error of the source level estimation even in the same environment conditions. This paper describes a quantitative analysis and a reduction method for an error value to the source level estimation in spatial and temporal interference environment. The design criteria of the radiated noise measurement array composed of omni-directional hydrophones and the source level accuracy in the deep water range are given. The source level accuracy in the shallow water range is also derived based on the statistical model of the multiple reflection paths. The results are verified using the water tank experiment and the sea trial.

1. 서 론

선박 방사소음의 준위나 특징은 소음의 발생기구에 대한 이론적인 해석이나 실제 해양 환경에서의 실험 연구를 통해 추정 가능하다.⁽¹⁻⁵⁾ 그러나 선박 방사소음의 이론적인 예측은 여전히 불완전 할 뿐만 아니라 많은 오차가 포함될 수 있어 대부분은 실측 자료에 바탕을 두어 평가가 이루어지고 있다. 선박소음의 측정 과정은 음파전달 과정에 영향을 줄 수 있는 측정 환경 조건에 대한 검토와 영향 정도의 정량적 평가가 필요하다. 측정결과에 신뢰도에 영향을 미치는 환경요소는 수중배경소음, 음속구조, 해저지질 특성, 수심조

건 및 해상상태 등의 다양한 요소가 음장의 시공간적인 변화에 영향을 주고 있다. 특히, 반사파 간섭현상은 음원준위(source level) 추정에 주요 오차원인으로 작용하고 있다. 이 연구에서는 음파의 간섭현상이 실제 선박의 방사소음 측정에 미치는 영향을 정량적으로 규명하고 정확한 측정/분석 방법에 대해 제시하고자 한다.

실제, 선박 소음측정시 경계면 반사파 간섭을 최소화할 수 있는 수심 200 m 이상의 심해환경에서 측정하는 방법을 선택하거나 지향성을 갖는 수신센서를 적용하고 있다. 그러나 측정방법에 따라 환경적 영향에 의해 측정오차가 0.1~6.4 dB 가량 발생할 수 있음을 지적하고 있다.⁽⁶⁾ 특히, 오차의 가능성이 큼에도 접근의 편의성 혹은 음향측정의 요구목적 등에 따라 천해환경에서 음향측정이 이루어지기도 한다.^(7,8) 일반적으로 복잡한 음장이나 다중경로에 의해 영향을 받는 천해역 조건에서는 통계적인 접근법에 의해 해석되고 있다. 기존의 연구결과로 수심이 90~100 m의 환경에

† 책임저자 : 정희원, 국방과학연구소

E-mail : phlee285@add.re.kr

Tel : (055) 540-6832, Fax : (055) 542-3737

* 정희원, 부경대학교 정보통신공학과

서 중주파수 대역의 수신음압의 통계적 변동특성이 Rayleigh 분포를 이루나⁽⁹⁾, 고주파수 신호는 해저면에 의한 산란음장의 평균음압이 불완전한 Rayleigh 특성을 보이는 것으로 연구된 바 있다.⁽¹⁰⁾ I. Dyer는 복반사와 산란에 의한 전달손실 변동량은 평균경로의 전달손실을 기준으로 약 5.6 dB의 표준편차를 갖는 것으로 보고하고 있다.⁽¹¹⁾ 또한, 해저면이 경사를 이루는 천해역에서 광대역 단극 음원의 음원준위 추정 에 대한 통계적인 모델을 통하여 수직으로 배열한 센서수의 함수로 바이어스 및 표준편차를 해석하기도 하였다.⁽¹²⁾

이 연구에서는 해수면 반사파만이 존재하는 심해역에서의 간섭특성을 해석하여 수신기 배열기준과 음원준위 추정치의 오차범위를 분석하였으며, 천해역에서는 복반사 음장환경을 완전 잔향음장의 통계모델과 비교하고, 통계모델에 의한 음원준위 추정치의 오차범위를 제시하였다. 아울러 동일한 선박을 대상으로 제안된 기법을 적용한 천해역 및 심해역 방사소음 추정치를 비교하여 변동 특성을 검토하였다.

2. 심해역 방사소음 특성

2.1 해면 반사파에 의한 전달손실 변이

수상 선박의 음원은 해면상에 있거나 해면에 근접한 수심에 위치하게 된다. 심해역에서 측정하게 될 경우 해저면에 반사된 음파는 직접파나 해면 반사파에 비해 상대적으로 긴 경로를 갖게 되어 해저면 반사파는 무시할 수 있다. Fig. 1에 보인 바와 같이 음원이 수심 d 의 깊이에 위치하고 수중 청음기의 수심이 h_1, h_2, \dots 에 위치한다면 수신기에 도달하는 음선은 직접파와 해면 반사파로 구성된다. 따라서 i 번째 수중 청음기에 수신되는 음압은 식 (1)로 주어진다.

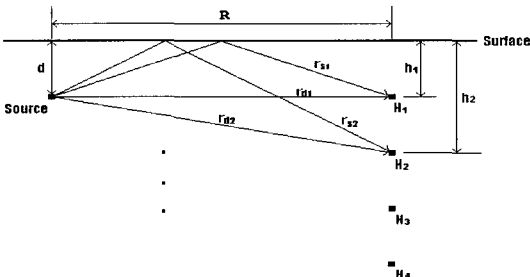


Fig. 1 Schematic diagram of source and hydrophone array in deep water range

$$\begin{aligned}
 p_i &= \frac{A}{r_{di}} e^{j(\omega t - kr_{di})} - \frac{\mu A}{r_{si}} e^{j(\omega t - kr_{si})} \\
 &= A \left(\frac{e^{-jkr_{di}}}{r_{di}} - \frac{\mu e^{-jkr_{si}}}{r_{si}} \right) e^{j\omega t} = A \Phi_i e^{j\omega t} \\
 &= P_i e^{j\omega t}
 \end{aligned} \tag{1}$$

- 여기서 A : 소음원의 1m 위치에서 기준 음압
 r_{di} : i 번째 수중 청음기의 직접파 경로
 r_{si} : i 번째 수중 청음기의 해면반사파 경로
 μ : 해면의 음압 반사계수
 Φ_i : 경로차에 의한 복소 음압 변화량
 P_i : i 번째 수중 청음기의 복소 음압

식 (1)로 부터 음압은 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$P = |p_i| = A \sqrt{\left(\frac{1}{r_{di}}\right)^2 + \left(\frac{\mu}{r_{si}}\right)^2 - \frac{2\mu}{r_{di} r_{si}} \cos \theta} \tag{2}$$

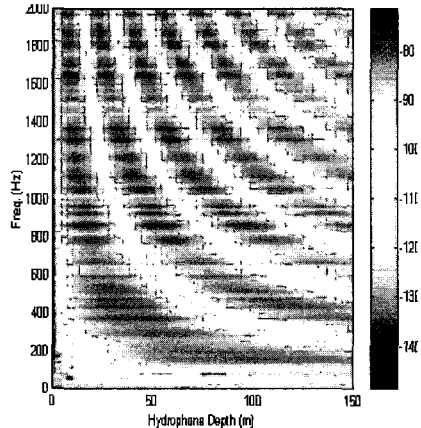
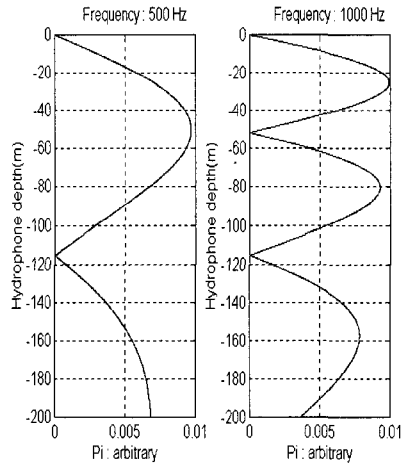


Fig. 2 Sound pressure variation as a function of depth and frequency ($R: 200, d: 3 \text{ m}, \mu: 1$)

여기서, $\theta = k(r_{di} - r_{si})$ 는 직접파와 해면 반사파와의 위상차이고,

$$r_{di} = \sqrt{R^2 + (d - h_i)^2},$$

$$r_{si} = \sqrt{R^2 + (d + h_i)^2},$$

$$\theta = \frac{2\pi f}{c} (\sqrt{R^2 + (d - h_i)^2} - \sqrt{R^2 + (d + h_i)^2})$$

각 수신기에서 측정되는 음압은 소음원과 수신기간 수평거리 R , 수신기 및 소음원 깊이 d , 소음원 주파수 f 의 함수로 주어진다. 따라서 동일한 기준 음압을 갖는 경우에도 주파수에 따라 다른 θ 인자에 의해 측정되는 음압은 달라진다. Fig. 2는 $R = 200$ m, $d = 3$ m, $\mu = 1$ 인 경우 수신기의 깊이에 따른 음압의 주파수별 변화와 백색잡음 소음원인 경우의 주파수별 음압변동특성이다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 수심에 따라 음압은 심한 변동현상을 보이고 있으며, 주파수에 따라서도 변하고 있다. 결과적으로 동일한 기준 음압을 갖는 경우에도 수신기 깊이나 주파수에 따라 서로 다른 크기의 음압으로 측정된다.

수신 음압으로부터 추정되는 음원준위 SL 은 직접파 수신음압에 전달손실을 보정하여 구해져야 하므로 음원준위 추정치 SL' 은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$SL' = SL + (TL - TL_{di}) = SL + \Delta_i \quad (3)$$

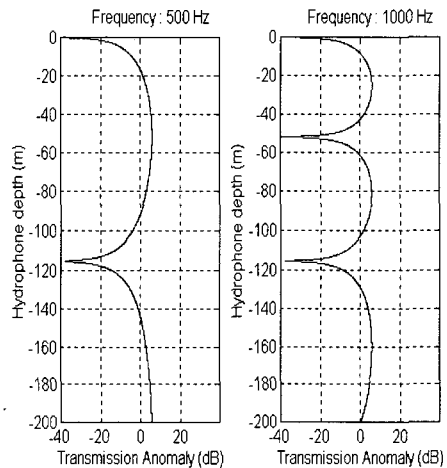
여기서 $SL = 20 \log A$,

$$TL = 10 \log \left(\frac{1}{r_{di}^2} + \frac{1}{r_{si}^2} - 2 \frac{\mu \cos \theta}{r_{di} r_{si}} \right)$$

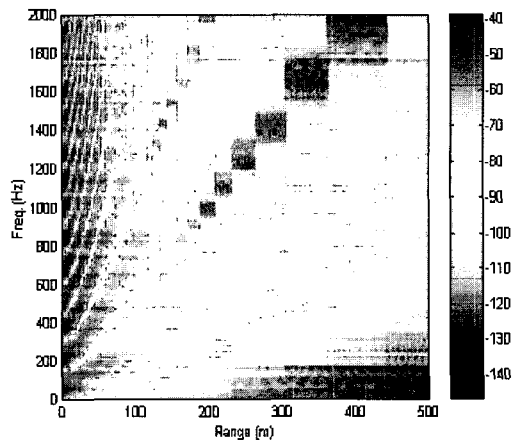
$$TL_{di} = 10 \log \frac{1}{r_{di}^2}$$

식 (3)으로부터 해면 반사파가 있는 경우의 전달손실 TL 과 직접파의 전달손실 TL_{di} 와의 차이인 Δ_i 는 전달손실 변이이며 음원준위 추정치의 바이어스 오차가 된다. Fig. 3(a)는 Δ_i 의 주파수별 수신기 깊이에 따른 변화특성이다. 식 (3)으로부터 추정치에 직접파만의 전달손실을 보정한다면 수신기의 깊이에 따라 $-\infty \sim 6$ dB의 범위에서 실제 음원준위와 다르게 추정될 것이다. 또한, 특정 수심에 대한 예로서, 만일 50 m 위치에 수신기가 있는 경우 500 Hz의 경우에는 6 dB 높게 음원준위가 추정되나 1 kHz의 경우는 실제보다 약 40 dB 낮게 추정될 것이다. 실제

측정과정에서는 CPA(closest point of approach)를 기준으로 선박음원이 직선 기동하므로 수평거리 R 이 변함에 따라 직접파와 반사파의 경로차가 연속 변하는 현상이 발생한다. 이를 연속적으로 시간에 따라 도시할 경우 수심에 따른 변화특성과 유사한 형태의 음압변동 현상으로 나타나게 되며, Fig. 3(b)와 같이 잘 알려진 bath tube형 간섭패턴을 형성하게 된다. Bath tube형 간섭패턴의 형상은 식 (2)의 직접파와 반사파와의 위상차 θ 의 해석으로부터 이해할 수 있다. 직선 기동중인 선박음원의 CPA 거리를 R_c , CPA로부터 기동중인 선박까지의 거리를 R_M 이라 하면,



(a) Transmission anomaly



(b) Bath tube interference

Fig. 3 Depth and frequency dependency of the transmission anomaly and the interference pattern ($R : 200$ m, $d : 3$ m, $\mu : 1$)

$$\theta = \frac{2\pi f}{c} (\sqrt{R_c^2 + R_M^2 + (d-h)^2} - \sqrt{R_c^2 + R_M^2 + (d+h)^2}) \approx \frac{2\pi f}{c} (2dh/\sqrt{R_c^2 + R_M^2}), \quad (4)$$

$(R_c^2 + R_M^2) \gg d \text{ and } h$

따라서 식 (4)에서 2π 의 정수배가 되는 경우 수신 음압은 0이 된다. 즉 선박음원이 광대역 특성인 경우, 다음의 주파수에서 음압은 0이 된다.

$$f_B = \frac{c\sqrt{R_c^2 + R_M^2}}{2dh} B, \quad B = 1, 2, \dots \quad (5)$$

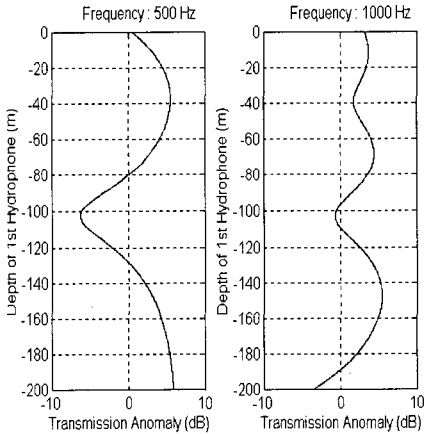
식 (5)의 각각의 B 값에 대해 이동 거리 R_M (시간×속도)에 대한 주파수는 Fig. 3(b)에서 보이는 쌍곡선으로 주어진다.(쌍곡선의 반쪽만 표시) 따라서

bath tube형 간섭패턴으로부터 선박음원의 깊이 추정 이 가능하므로 고속 항해 시에 우세한 광대역 프로펠러 음원의 깊이 추정도 가능하다.

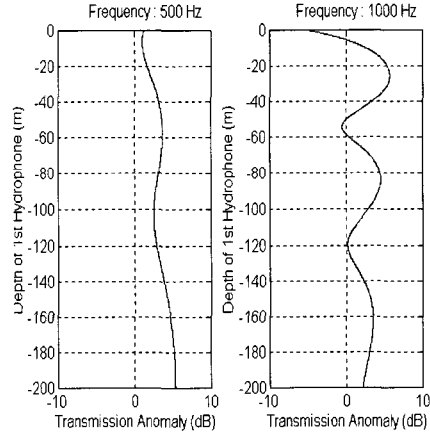
2.2 음원준위 추정 및 수중청음기 배열방법

2.1절에서 해석한 바와 같이 수신음압으로부터 음원준위를 산출하기 위해 보정해야할 전달손실은 주파수 f , 음원깊이 d , 수신기 깊이 h , 수평거리 R 의 함수로 결정된다. 청음기의 깊이만 변화시킨다고 가정하면 깊이에 따른 변동성분은 깊이 방향으로 청음기를 배열하여 각 수신신호에 대해 조화 평균을 취함으로써 변동의 편차를 줄일 수 있다.⁽¹⁵⁾

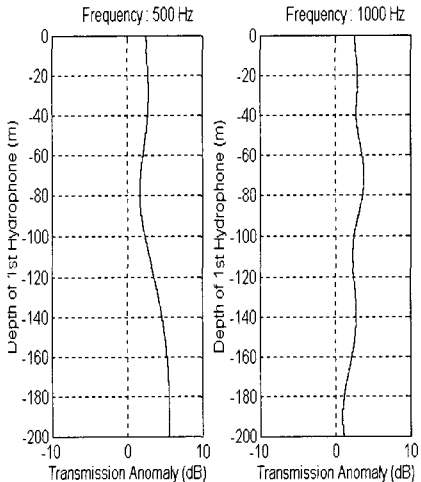
$$\langle SL' \rangle = 10 \log \left(\sum_{i=1}^M \frac{|P_i r_{\#i}|^2}{M} \right) = SL + \Delta \quad (6)$$



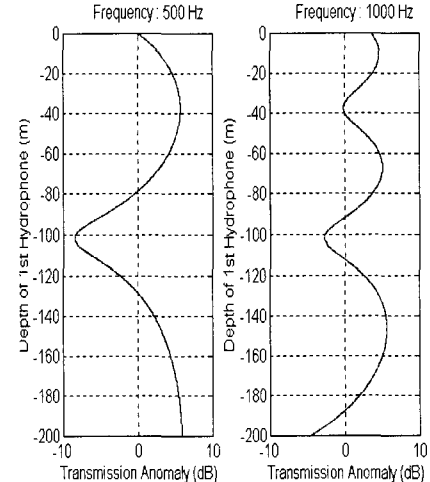
(a) No. of elements : 3 spacing : 15 m



(b) No. of elements : 3 spacing : 60 m



(c) No. of elements : 12 spacing : 2.7 m



(d) No. of elements : 12 spacing : 10.9 m

Fig. 4 Dependency of transmission anomaly on depth, hydrophone numbers and array spacing ($R : 200 \text{ m}$, $d : 3 \text{ m}$, $\mu : 1$)

M 은 배열의 개수, $\Delta = 10 \log \left(\sum_{i=1}^M \frac{|\Phi_i r_{di}|^2}{M} \right)$ 은 청음기 바이어스 오차의 평균치

Fig. 4는 배열의 폭, 청음기의 개수 및 주파수에 따른 Δ 의 특성을 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 3개의 청음기를 15m 간격으로 배열한 경우 Δ 의 수심별 특성으로 Fig. 2의 단일 청음기 특성에 비해 변동범위가 약 ± 5 dB 이내로 감소되고 있으나 여전히 수심에 따른 변동이 심하게 나타나고 있다. Fig. 4(b)는 청음기 간격이 60m로 (a)에 비해 깊이에 따른 변동이 완화됨을 보인다. 이는 Fig. 2의 단일 청음기에 대한 Δ 구배 폭보다 배열길이가 크게 되어 공간적인 조화평균이 이루어진 결과이다.

Fig. 4(c), (d)는 각각 (a), (b)와 같은 배열길이에 청음기 수를 12개로 증가시킨 결과로 Δ 의 범위는 0 dB~5dB 이내로 2~3 dB 향상됨을 보이 있다. 특히, 배열크기가 단일 청음기의 Δ 구배 폭보다 크고 청음기 개수가 12개로 증대된 Fig. 4(d)의 경우는 배열의 깊이에 따른 Δ 의 변동은 현저히 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 청음기 개수를 증가시키더라도 Δ 의 바이어스 오차는 약 2~3 dB 정도로 변화하지 않는다.

Fig. 5는 배열청음기 개수에 따른 Δ 의 평균 및 표준편차 특성으로 청음기 개수가 5개 이상이 되면 Δ 의 바이어스와 표준편차는 각각 3 dB 및 1 dB로 일정한

특성을 보인다. 결론적으로 청음기 배열을 이용하여 소음준위를 측정하는 경우 측정 주파수의 최저 주파수에 대한 단일 청음기의 깊이 방향 Δ 특성으로부터 Δ 의 구배 폭을 결정하고 구배 폭 이상의 배열크기를 결정한 후 배열크기 이내에 5개 이상의 청음기를 배열하는 것이 요구된다.

2.3 수조실험 결과

2.2절에서 제안한 방사소음 측정용 수중 청음기 배열기준 및 음원준위 추정치의 특성을 검증하기 위하여 음향수조에서 실험을 수행하였다. Fig. 6은 실험

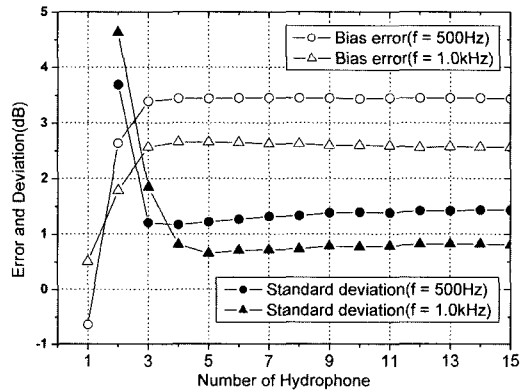


Fig. 5 Bias error and standard deviation characteristics with respect to the number of hydrophones(array length : 120 m, R : 200 m, d : 2 m, μ : 1)

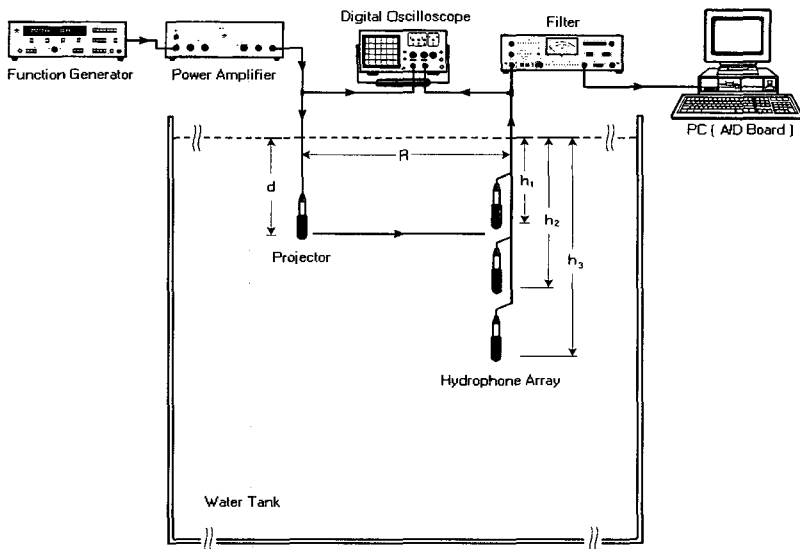


Fig. 6 Water tank test setup to verify the hydrophone array criteria and the source level estimation method

장치 구성도로 음원 및 배열 청음기는 B&K 8103으로 하였고 실험장치의 기하학적 배치와 주파수는 축적 약 1/100이 되도록 하였다.

Fig. 7은 Fig. 2에 대응되는 것으로 단일 청음기에 수신되는 깊이 방향의 음압 변동특성이다. 축적 1/100이므로 Fig. 2의 500 Hz 이하의 특성과 Fig. 8을 비교하면 예측된 결과와 일치한다. Fig. 8은 단일 청음기 및 3개 청음기를 배열하여 구한 Δ 특성이다. 청음기와 음원과의 수평거리가 축적과 일치하지 않아 직접 비교는 어려우나 Δ 는 5dB 이내이며 3dB의 바이어스 오차를 보상하면 Δ 는 ± 2 dB로 2.2절에서 해석한 Fig. 2 및 Fig. 4(b) 특성과 유사하다.

2.4 결 과

선박소음을 점 음원으로 가정하고 해면 반사파 영

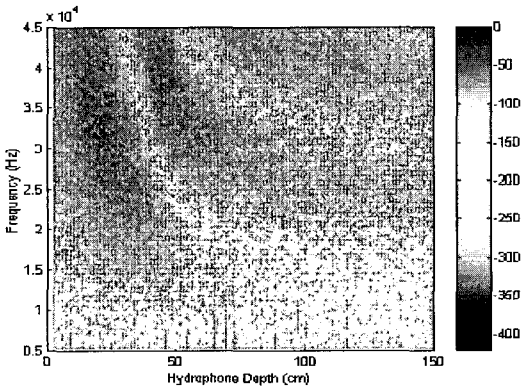


Fig. 7 Sound pressure variation of single hydrophone as a function of depth

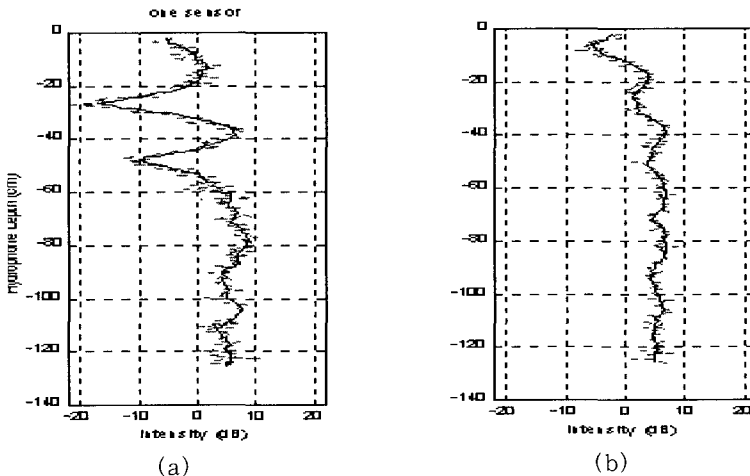


Fig. 8 Transmission anomaly characteristics of single hydrophone (a) and three hydrophone (b) ($d : 5$ cm, $R : 30$ cm, $f_c : 45$ kHz, BW : 100 Hz)

향만을 가정한 경우에 청음기 배열의 설계기준을 제시하고 이때의 전달손실 변이 Δ 특성과 추정된 소음준위 오차특성을 해석하였다. 수중청음기 배열 크기는 측정하고자 하는 소음원의 최저주파수에 의해 결정되는 깊이 방향의 Δ 의 구배 폭 이상이 되어야 하고 배열의 개수는 5개 이상이 요구된다. 이 경우 바이어스 오차는 약 3dB, 표준편차는 약 1dB이며 소음 준위를 추정하기 위해서는 각 청음기 수신 신호를 세기 평균한 후 3dB의 바이어스 오차를 보상해야 한다. 축적 1/100의 수조실험 결과는 수치모의실험 결과와 ± 1 dB 이내에서 유사성을 보이며 bath tube형 간섭무늬도 수치모의 실험 결과와 일치한다.

이상의 결과는 소음원을 점 음원으로 가정한 결과로 실제 선박의 음원특성을 고려하면 점 음원으로 가정할 수 있는 프로펠라 음원이나 수중합과 같은 몰수체 음원의 경우에는 이 연구결과를 직접적으로 활용할 수 있다. 그러나 수상선박의 기계류 음원은 일반적으로 깊이 방향으로 지향성을 갖게 되어 해면 반사파가 존재하지 않거나, 해면 가까이 위치한 저주파수의 기계류 음원은 쌍극 음원특성을 갖게 되어 해면 반사파성분이 무시될 수 있다. 이러한 경우 해면 반사파에 의한 깊이 방향의 Δ 는 무시할 수 있다. 따라서 설계한 배열구조를 그대로 적용하면 3 dB인 Δ 의 바이어스 오차는 0 dB가 되며 전체 배열 크기 범위에서 측정되는 방사소음의 평균특성을 얻게 된다.

3. 천해역 방사소음 특성

3.1 천해역 음장의 통계적 특성

심해역과 달리 천해역에서는 해면과 해저면에 의해 음파의 다중경로 형성과 도파관 효과로 음원준위의 추정이 용이하지 않다. 그러나 천해환경에서 음파의 왜곡현상에도 불구하고 접근의 이점, 특정 요구조건 및 음향 상태관리의 상대적 평가에 의미를 갖고 있어 천해역 측정이 이루어지고 있다.

천해역의 경우 청음기에 수신되는 음파는 직접파와 해면과 해저면에 의한 복반사로 이루어진다. Fig. 9는 수심 H_s 가 CPA 거리 보다 작은 천해역 조건에서 해저 반사파 경로 BR이 직접파 경로 DR 및 해면 반사파 경로 SR과 비슷하거나, 입사각 θ_s 가 큰 경우 전 반사(total reflection)가 일어날 수 있다. 이 경우 수신신호에 대한 해저 반사파의 기여도는 직접파 및 해면 반사파와 유사하게 되고 복반사에 의한 잔향음파도 고려돼야 한다. 또한 각 성분파의 진폭과 위상은 확정적으로 해석할 수가 없어 음장은 통계적으로 해석하는 방법이 제시되고 있다.^(11~14)

3.2 천해역 방사소음 추정을 위한 통계적인 모델

천해환경 음장을 통계적으로 해석하기 위해서는 천해음장과 상사성을 갖는 잔향실 음장예측 모델을 적용할 수 있다.⁽¹⁴⁾ 이의 이론적 배경은 (1) 잔향실의 크기가 파장에 비해 상대적으로 크고, (2) 임의의 점에서 음장은 랜덤한 평면파의 합성으로 주어지며, (3) 측정점이 1/2 파장 이상 떨어져 있어 위상이 상호 독립인 경우, 이들 점들에서 측정된 단일 주파수의 음압에 대한 확률 밀도함수는 식 (7)과 같이 지수 함수 분포 특성을 갖는다.

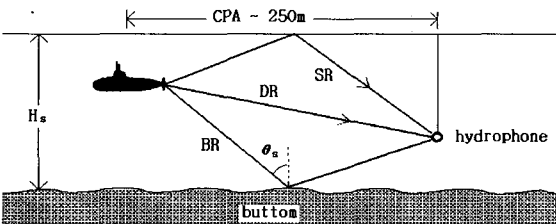


Fig. 9 Schematic diagram of the radiated noise measurement in shallow water range

$$f_x(x) = \exp(-x) \quad (7)$$

여기서, x 는 수신 음압세기를 직접파만의 수신 음압세기로 정규화한 확률변수이며 식 (8)로 주어진다.

$$x = \left| \sum_{n=0}^N p_n \exp(j\theta_n) \right|^2 / \rho c \quad (8)$$

N 은 수신되는 반사파의 개수이며 p_n 과 θ_n 은 랜덤한 특성을 갖는 반사파의 정규화 음압 실효치 및 위상이고 $n=0$ 인 경우는 직접파에 해당한다. 확률변수 x 는 식 (1)의 복소 음압 세기를 직접파만의 수신 음압세기로 정규화한 것과 동일한 표현이지만 식 (1)의 경우에는 수신 청음기의 위치가 깊이 방향으로 구속되는 반면, 식 (8)의 경우는 음장내 모든 위치를 가정하므로 진폭과 위상은 랜덤한 특성을 갖게 된다. 각 반사파의 진폭이 동일하다고 가정하고 식 (7)의 확률 변수를 $Y = X^{1/2}$ 로 변환하면 음압은 식 (9)와 같이 Rayleigh 분포 특성이 된다.

$$f_Y(y) = 2y \exp(-y^2) \quad (9)$$

실제의 해양환경은 완전 잔향조건이 아니므로 수신기에 도달하는 각 반사파의 음압이 동일하지 않아 식 (7), (9)와는 다른 특성을 보인다. 그러나 복반사파의 개수가 약 10개 이상이면 식 (7) 및 (9)와 유사한 특성을 보이는 것으로 알려져 있다. 이는 1개 지점에서 측정된 자료의 통계적 특성이며 M 개의 측정자료를 평균한 경우의 확률 밀도 함수는 식 (10)으로 주어진다.⁽¹⁴⁾

$$f_x(x) = (M^M / (M-1)!) x^{M-1} \exp(-Mx) \quad (10)$$

이 경우 x 는 식 (6)의 로그변수와 동일한 표현으로 식 (11)과 같다.

$$x = \sum_{m=1}^M \left| \sum_{n=0}^N p_{nm} \exp(j\theta_{nm}) \right|^2 / M \rho c \quad (11)$$

여기서, M 은 측정점의 개수로 각 측정점은 대상으로 하는 주파수의 1/2 파장 이상 떨어져야 하며 측정점의 공간적 위치에는 제한이 없다. p_{nm} , θ_{nm} 은 각각 M 번째 측정점에서의 반사파의 정규화 음압 실효치 및 위상으로 랜덤한 특성이다. 식 (11)로 주어지는 평균세기 준위의 추정치와 실제 구하고자하는 각 측정점에서 수신되는 직접파만의 평균세기 준위와

의 바이어스 오차 B 는 다음과 같이 주어진다.

$$B = 10 \log_{10} \left(\sum_{m=1}^M \left| \sum_{n=0}^N p_{nm} \exp(j\theta_{nm}) \right|^2 / M\rho c \right) - 10 \log_{10} \left(\sum_{m=1}^M p_{0m}^2 / M\rho c \right) \quad (12)$$

따라서 바이어스 오차는 직접파와 복반사 성분 준위와의 차이라 할 수 있고 해면 반사파만이 있는 2장의 심해역 측정조건을 식 (12)에 적용하면 바이어스 오차는 3 dB가 되어 2장의 해석결과와 일치한다. 식 (7)과 (10)이 만족되는 완전 잔향조건에서 단일 수신기에 수신되는 강도에 대한 표준편차는 5.57 dB로 알려져 있다. M 이 증가할수록 표준편차는 $1/M$ 으로 낮아지는 것으로 알려져 있어 2장의 심해역에 대한 표준편차 특성과 일치한다.

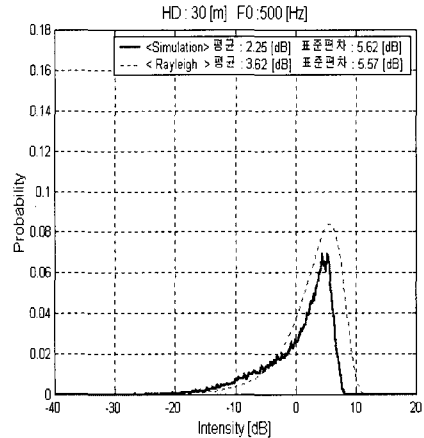
3.3 통계적 모델 모의실험 결과

수심 100 m, 주파수가 각각 100 Hz와 500 Hz인 단극음원에 대한 단일 청음기에 수신되는 음압세기의 통계적인 특성을 모의 해석하였다. 해수에 대한 해저면의 음향 임피던스 비는 1.1과 1.8로 하여 반사파의 개수는 직접파를 포함하여 9개로 하였다. 음원을 고정하고 수신 청음기의 위치를 변화시키는 대신 2개 청음기를 음원으로부터 수평거리 100 m, 깊이 각각 30 m와 50 m 위치에 고정하고 음원의 위치를 변화시켰다. 수직 방향 음원의 위치는 전체 수심을 음원 주파수의 1/2 파장 간격으로 나누고, 수평 방향으로는 CPA를 중심으로 $\pm 45^\circ$ 범위로 하였다. 아울러 해저면 입사각도에 따라 반사 강도를 달리하고 해저면에서의 위상변화는 고려하지 않았다.

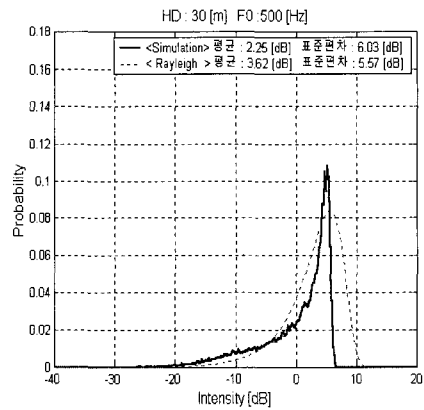
Fig. 10은 임피던스 1.1, 1.8의 경우 주파수 500 Hz, 수신기 수심 30 m에서의 경우이며, 다른 조건에서의 모의 해석결과는 Table 1에 나타내었다. Rayleigh 분포특성과는 동일하지 않지만 전체적으로는 일치한다. 불일치 요인은 해저면의 반사강도가 낮아 반사파의 기여도가 낮은데 원인이 있다. 침두치가 높은 것은 해면 반사파 및 직접파의 기여도가 높기 때문으로 판단되며 해저면의 음향 임피던스비가 상대적으로 큰 1.8의 경우 해저면 반사파의 기여도가 크게 되어 침두치가 작아진다. 각각의 결과에서 평균치 및 표준편차는 이론적인 예측치와 각각 약 2 dB 및 1 dB 이내에서 일치한다. 따라서 천해에서 단일 청음기로 방사소음을 측정하는 경우 음원준위 추정치의 바이어스 오차 및

표준편차는 각각 이론적인 예측결과인 약 3.6 dB와 5.6 dB라 할 수 있다.

따라서 천해 측정 자료로부터 음원준위를 추정하기



(a) Impedance 1.1



(b) Impedance 1.8

Fig. 10 Probability density function of the normalized acoustic intensity with acoustic impedance

Table 1 Variation of mean and standard deviation (Rayleigh : mean 3.62, SD 5.57)

Impedance	Hydrophone depth(m)	Freq. (Hz)	Mean (dB)	SD (dB)
1.1	30	100	2.45	5.66
		500	2.25	6.03
	50	100	1.47	5.41
		500	1.86	5.59
1.8	30	100	2.45	5.54
		500	2.25	5.62
	50	100	1.65	5.53
		500	1.86	5.62

위해서는 가능한 해저면 반사파가 우세한 해역이 요구되며 청음기의 위치는 측정 목적으로 하는 최저 주파수 파장의 1/2 배 이상 떨어져야 하며 청음기 개수는 심해역에 대한 기준인 5개 이상으로 하는 것이 요구된다.

4. 해상실험

2장과 3장에서 제안한 심해역과 천해에서의 방사소음 추정방법은 표준음원 장치로 검정하는 것이 바람직하지만 Table 2와 같이 선박 2척에 방사소음 측정 자료를 비교하여 제시된 기법의 타당성을 검정하였다.

A 선박에 대한 실험은 수심 68m와 1000m 환경에서, B 선박은 12.5m, 1000m 환경에서 측정하였다. Table 2에서 보는 바와 같이 A 선박의 경우 청음기 깊이는 각각 30m, 50m에 설치하였으며, B 선박의

경우는 심해는 70m, 천해는 12m에 설치하였다.

심해에서 측정한 Fig.11(a) 11 knot와 (b) 17 knot의 스펙트로그램에서 저속조건의 경우는 2kHz 이하에서 기계적 소음성분인 다수의 선스펙트럼이 나타나는 반면, 고속조건에서는 프로펠러 캐비테이션이 발생함에 따라 소수의 선스펙트럼만 확인되고 있다. 또한, Fig. 11(a)의 경우에는 2.4절에서 기술한 바와 같이 기계적 소음의 깊이 방향 지향성에 의해 해면 반사파가 없어 Fig.3과 같은 bath tube 특성이 나타나지 않고 있다. Fig. 11(b)의 경우에서도 수면하에 있는 프로펠러에 의한 캐비테이션 소음이 단극음원 특성이므로 해면 반사파 간섭이 존재할 가능성은 있으나 대상선박의 프로펠러 깊이는 3m 이하로 음원이 수면에 매우 근접하여 bath tube형 간섭 현상은 약하게 확인된다.

반면, Fig. 12의 천해측정 결과에서는 bath tube형 간섭현태가 매우 뚜렷함을 볼 수 있는데 이는 해저면 반사파의 영향이 심해역에 비해 상대적으로 우세하기 때문이다. 저속조건보다는 고속조건이 보다 강한 형태의 간섭이 발생하고 있으며, 측정 수심 30m와 50m 간에도 서로 상이한 형태로 나타난다. 아울러, 약하지만 저속조건에서도 수심에 따라 서로 다른 것은 기계적 소음의 지향성, 음속구조와 관련된 매질의 영향 및 CPA와 수신기 깊이에 따른 전달손실 변이 Δ 의 특성과 관련이 있다. 결과적으로 수신기 깊이에 따라 소음의 크기가 다르게 수신됨으로 방사소음의 음원준위에 대한 산출 오차를 줄이기 위해서는 2장과 3장에서 제시된 방법으로 서로 다른 위치의 수신신호

Table 2 Experiments of ship noise measurement

Experiment	Hydrophone depth(m)	Speed (knot)	Bottom type	Water depth(m)	
Ship A	1	30	Clay	1000	
		50			
	2	30	17	1000	
		50			
	3	30	11	Find sand	68
		50			
30		17			
50					
Ship B	5	6	Clay	1000	
	6	6	Mud	12.5	

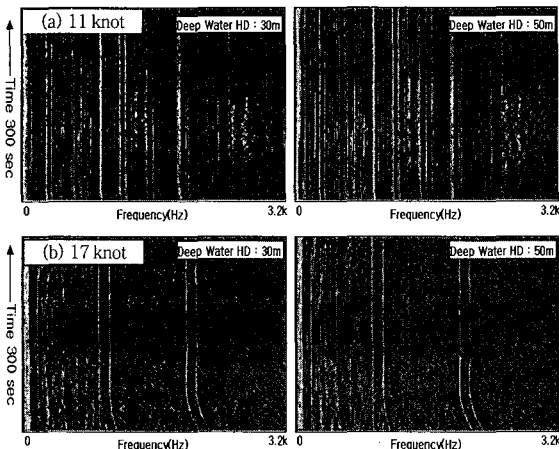


Fig. 11 Spectrogram features in deep water measurement of ship A(Exp. #1, 2)

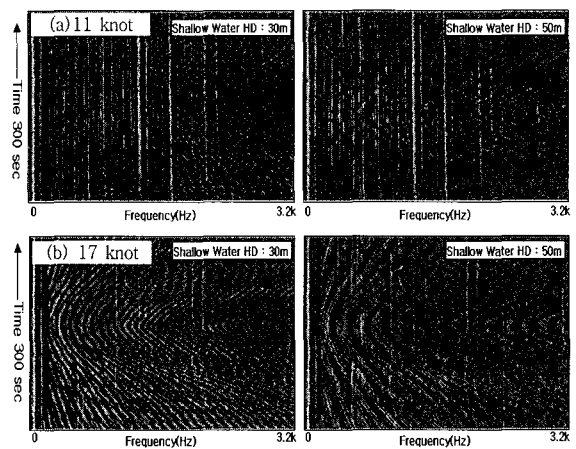


Fig. 12 Spectrogram features in shallow water measurement of ship A(Exp. #3, 4)

를 평균해야 한다.

Fig. 13은 A 선박에 대한 1/3 octave 대역의 음원 준위이다. CPA를 중심으로 10초간 평균한 후 2개 중심 자료를 다시 조화 평균한 결과이다. 70~250 Hz을 제외한 대역에서는 천해역과 심해역 음원준위는 3dB 이내로 유사성을 보이니 저주파수 대역에서는 단일 청음기 사용시 표준편차 범위인 5.57 dB 수준으로 유사한 값을 얻기 위해서는 보다 많은 수의 수신점이 요구된다.

B 선박에 대한 실험은 해역수심이 1000 m와 12.5 m로 극단적으로 대별되는 환경에서 수행되었다. 12.5

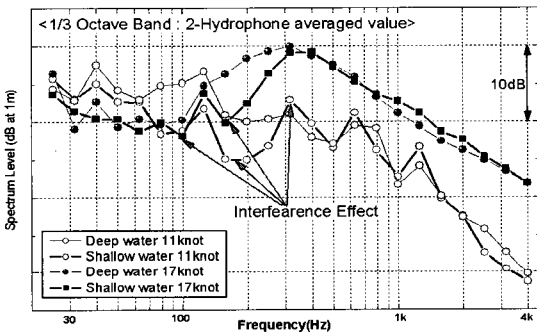


Fig. 13 Source level variation of the ship A with measurement condition

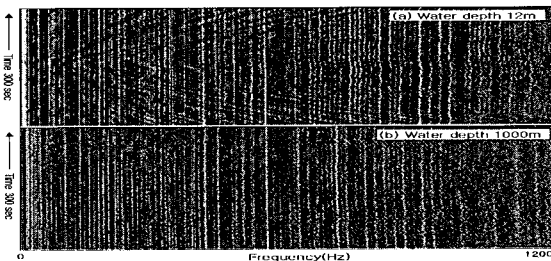


Fig. 14 The spectrogram of the ship-B measured in shallow and deep water(Exp. #5, 6)

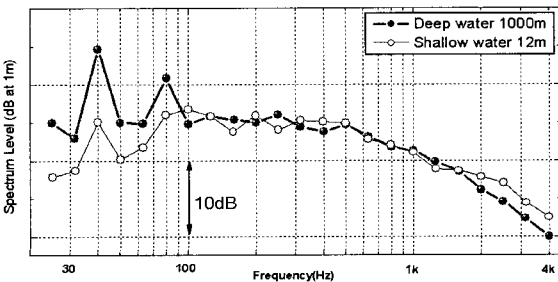


Fig. 15 A source level of the ship-B measured in shallow and deep water(Exp. #5, 6)

m 천해역의 경우 해저 저질이 연성의 Mud 성분으로 음파의 반사계수가 크지 않은 환경이다. Fig. 14는 B 선박소음에 대한 스펙트로그램으로 천해역 자료에서 보이는 bath tube형 간섭형태는 해저 반사파에 의한 영향이다. Fig. 15는 1/3 octave 대역의 음원준위를 나타낸 것으로 100 Hz 이상에서는 2 dB 이내에서 유사한 값을 보이고 있으나, 그 이하 주파수에서는 5~9 dB 가량 천해에서 낮게 측정되고 있다. 천해환경에서 저주파수가 낮게 측정되는 것은 도파관 효과에 의한 mode cut-off 현상으로 이 논문과는 별도의 관점에서 다루어져야할 부분이다.

결론적으로 실제 선박음원을 이용한 심해역과 천해역의 방사소음 음원준위 추정치는 매우 유사한 경향을 보이고 있으며, 통계적 관점에서 경계면 반사파에 의한 음원준위 추정오차를 감소시키기 위해서는 2장과 3장에서 제시하는 기준으로 수중 청음기를 배열하여 각각의 수신 음압세기를 평균하는 것이 적합하다.

5. 결론

심해에서 방사소음 측정시 직접파와 해면 반사파 영향만을 고려한 조건에서 오차를 감소시킬 수 있는 수신기 수와 배열기준을 제안하였다. 음원준위 추정치의 바이어스 오차 및 표준편차가 각각 약 3dB와 약 1dB 이내로 되기 위해서 배열의 크기는 측정하고자 하는 최저 주파수의 전달손실 변이의 구배 폭 이상으로 해야 하고 배열의 개수는 5개 이상이 적합하다. 축소 수조실험 결과나 수치모의 실험결과도 실측치와 유사성이 있음을 확인하였다.

심해와는 달리 천해에서는 해면과 해저에 의한 복 반사와 해저면 반사파의 주파수 및 입사각도에 따른 위상이 랜덤하게 변화하므로 음장에 대한 통계적인 특성으로부터 방사소음이 추정되어야 한다. 주파수나 환경조건을 달리한 단극음원의 음원준위 추정에 통계적 해석모형을 적용한 결과 이론적인 Rayleigh 분포 특성과 유사한 경향을 보였으며, 음원준위 추정치의 평균 및 표준편차는 각각 2 dB 및 1 dB 이내에서 이론적인 예측결과와 유사하였다.

제안된 기법을 이용한 심해 및 천해에서의 선박 방사소음 실험결과, 1/3 옥타브 대역 음원준위는 이론적으로 예측되는 표준편차 범위에서 확인되었다. 경계면 반사에 의해 발생하는 편차를 줄이기 위해서는 통계

적 관점에서 수중청음기의 개수를 증가시켜 각 청음기의 수신음압의 세기를 조화평균 하는 것이 바람직하다. 이 기법의 추가적인 검정을 위해서는 해역환경에 따른 음파전달에 대한 엄밀한 통계적 특성 해석과 광대역 특성을 갖는 수중 물수 표준음원을 사용하여 심해역과 천해역 측정 자료를 비교하는 연구가 요구된다.

후 기

이 연구는 2004년도 BB21 사업의 일부 지원을 받았습니니다.

참 고 문 헌

- (1) Ross, D., 1976, *Mechanics of Underwater Noise*, Pergamon Press.
- (2) Urick, R. J., 1983, *Principles of Underwater Sound*, 3rd ed., McGraw-Hill.
- (3) Scrimger, P. and R. M. Heitmeyer, 1991, Acoustic Source-level Measurements for a Variety of Merchant Ships, *JASA*, 89(2).
- (4) Arveson, P. T. and Vendittis, D. J., 2000, Radiated Noise Characteristics of Modern Cargo Ship, *JASA*, 107(1).
- (5) Jean-Alain, R., "Measurement of Ships' Under-water Radiated Noise on Ranges", UDT Pacific 1998.
- (6) McCloghrie, M. and Stan Thomas, Sep. 1997, Noise Ranging Submarine and Ships, *Journal of Defence Science* Vol. 1, No. 4, pp. 466~477.
- (7) Korkolis, M., 1984, NATO STANAG 1136 (Edition 2), Nov. 2.
- (8) Llonaid, W. C., 1975, NATO STANAG 1090 (Edition 3).
- (9) Mackenzie, K. V., 1962, Long-Range Shallow-Water Signal-Level Fluctuations and Frequency Spreading, *JASA*, 34(1).
- (10) Lyons, A. P. and Abraham, D. A., 1999, Statistical Characterization of High-frequency Shallow Water Seafloor Backscatter, *JASA*, 106(3).
- (11) Dyer, I., 1970, Statistics of Sound Propagation in the Ocean, *JASA*, 48(1).
- (12) Chotiros, N. P., 1988, Source Level Estimation of a Monopole Source at Rest in the Presence of Multipath, *JASA*, 84(2).
- (13) Brown, M. V., 1969, Intensity Fluctuations in Reflections from the Ocean Surface, *JASA*, 46(1).
- (14) Waterhouse, R. V., 1968, Statistical Properties of Reverberant Sound Fields, *JASA*, 43(6).
- (15) 윤종락, 1998, 선박방사소음의 측정 및 평가 방법, 한국소음진동공학회논문집, 제 8 권, 제 2 호 pp. 232~238.