

# 서해에서 측정된 수중 주변 소음의 공간 코히런스 분석

## Spatial Coherence Analysis of Underwater Ambient Noise Measured at the Yellow Sea

권혁종, 김정훈,\* 최지웅, 강돈혁,\*\* 조성호,\*\* 정섬규,\*\* 박경주\*\*\*†

(Hyuckjong Kwon, Junghun Kim,\* Jee Woong Choi, Donhyug Kang,\*\* Sungho Cho,\*\* Seom-Kyu Jung,\*\* and Kyeongju Park\*\*\*†)

한양대학교 해양융합과학과 해양음향연구실, \*STX 엔진 주식회사, \*\*한국해양과학기술원, \*\*\*해군사관학교

(Received April 23, 2015; revised July 15, 2015; accepted August 10, 2015)

**초 록:** 코히런스 분석은 두 수신신호의 유사성을 분석하는 방법으로, 수중음향에서는 음파의 시간 및 공간 특성을 나타낼 수 있는 유용한 분석 방법이다. 본 논문에서는 한국해양과학기술원과 한양대학교가 공동으로 수행한 해양음향 실험의 일부로, 3개의 수중청음기로 구성된 수직선배열센서를 이용하여 수중에서 주변 소음을 측정하였다. 조사선 발전기가 작동할 때와 정지했을 때, 총 두 가지 경우에 대하여 주변 소음이 측정되었고 각각에 대한 코히런스 분석을 수행하였다. 조사선 발전기가 작동하는 경우의 코히런스 결과는 조사선 발전기 소음의 전달 손실을 고려하여 계산된 방향 밀도함수를 이용한 코히런스 결과와 비교되며, 조사선 발전기가 정지한 경우인 주변 소음의 코히런스 결과는 해수면 소음원, 해저면 구성성분 및 원거리 선박 소음이 반영된 코히런스 모델 결과와 비교, 분석되어진다.

**핵심용어:** 공간 코히런스, 주변 소음, 해저면 저질, 수직선배열센서

**ABSTRACT:** Coherence describing the similarity between physical quantities of two signals is a very useful tool to investigate the temporal and spatial characteristics of signals propagating in underwater acoustic waveguide. Ambient noise measurements were made by the vertical received array consisting of three hydrophones as part of the KIOST-HYU joint acoustics experiment, and the coherence for the underwater ambient noise was analyzed. In this paper, the coherence results in cases that the generator in the research vessel was off and turned on are presented. The coherence estimated in the case of the generator operation mode are compared to the predictions obtained using the theoretical model with the directional density function dominated by vertical components propagating downward from the ship. In the case of the generator switch-off, the results are compared to the model predictions with directional density function including the effects of sea surface noise and long-distance shipping noise.

**Keywords:** Spatial coherence, Ambient noise, Bottom type, Vertical line array

**PACS numbers:** 43.30.Nb, 43.30.Re

### 1. 서 론

2013년 5월 2일부터 6일까지 서해의 태안반도 기 준 서쪽 6km 해역의 경기만 지역에서 한국해양과학기술원과 한양대학교가 공동으로 해양 음향 실험이 실시되었으며, 이와 함께 고정밀 수심자료, 천부 및

중천부 지층 자료, 그랩(grab) 샘플링, 풍향풍속, 수직 음속구조, 선박통행량 등 다양한 해양 환경 자료가 수집되었다.<sup>[1]</sup> 실험 해역은 20~70 m의 수심 분포를 보였으며, 전 수층에서 약 1473 m/s의 균일한 수직 음속구조를 형성하고 있었다. 표층 퇴적물은 자갈에서 펄까지 다양한 퇴적상을 보였으며, 퇴적층 상부에는 사구, 모래파 등의 다양한 크기의 베드폼이 존재했다. 본 논문에서는 여러 목적의 음향실험들 중의 하나로 측정된 주변 소음 측정 실험 자료를 이용하여

†Corresponding author: Kyeongju Park (parkkj9@gmail.com)  
Republic of Korea Naval Academy, Jinhae 51686, Republic of Korea  
(Tel: 82-55-549-1220)

“이 논문은 2014년도 한국음향학회 추계학술대회에서 발표하였던 논문임.”

표층 퇴적층 성분에 따른 주변 소음의 코히런스 특성을 파악하고자 하였다.

코히런스 분석은 두 수신기에 수신된 신호의 상관관계를 정량화하는 것을 의미하며, 이 분석 방법을 이용하여 음파 전달에 따른 해양환경의 특성을 확인할 수 있다. 코히런스는 분석 방법에 따라 공간 코히런스(spatial coherence)와 시간 코히런스(temporal coherence)로 나눌 수 있다.<sup>[2]</sup> 공간 코히런스 분석은 공간적으로 분리되어 있는 두 수신기에서 동일한 측정 시간에 수신된 두 신호 간의 유사성을 분석하는 방법을 말하며, 시간 코히런스 분석은 동일한 수신기에서 측정시간이 다른 두 수신 신호 간의 유사성을 분석하는 방법을 말한다.

해양에는 해상 상태, 강수, 생물 소음과 같은 자연적인 소음원과 선박 이동에 따른 소음 등의 인위적인 소음원 같이 서로 독립적인 여러 음원에서 발생한 불규칙적이고 다양한 신호들이 존재하고 있다. 이러한 소음들은 해저면, 해수면 및 수층 내에 존재하는 모든 경계면의 영향을 받으며 해양 도파관 내의 다양한 경로를 통해 전파된다.

특히 천해에서는 얕은 수심으로 인해 경계면 반사를 통한 전파 경로가 많아짐에 따라 해저면 및 해수면의 영향을 상대적으로 많이 받게 된다. 따라서 해양 환경의 물리적 성질을 반영하고 있는 주변 소음의 코히런스를 분석함으로써 측정 해역의 음향학적 특성에 대한 이해 및 추정이 가능할 수 있다.

최근 코히런스 분석에 대한 연구로 공간 코히런스 분석 모델을 이용한 심해에서의 해수면 소음 감쇠에 따른 코히런스 변화 연구,<sup>[3]</sup> 해수면 산란 신호들의 코히런스 분석 결과와 이론적인 모델링 결과와의 비교,<sup>[4]</sup> 여러 개의 수신기로 구성된 선배열센서의 코히런스 분석을 통해 빔형성 기법을 활용한 해저면 반사 손실 연구<sup>[5]</sup> 등과 같이 기본적인 코히런스 분석 방법을 발전시킨 응용 연구 사례들이 있다. 국내에는 코히런스와 관련된 연구가 국외에 비해서 활발하지는 않지만 동해에서 측정된 천해의 주변 소음을 이용하여 코히런스 분석 및 빔형성 분석을 수행하였으며,<sup>[6]</sup> 최근 남해와 동해에서 주변 소음, 표적신호, 해수면 잔향음에 대해 중주파수 대역의 음향배열 신호를 측정하고, 신호의 공간 코히런스를 분석한 연구

결과가 보고된 바가 있다.<sup>[7]</sup>

본 논문에서는 코히런스 분석에 대한 기본적인 이론 및 특성을 확인한 후, 해상실험에서 획득한 소음의 코히런스 분석을 통해 이론적인 코히런스 함수 결과와 비교하였다.

## II. 코히런스 특성

공간적으로 분리되어 있는 두 개의 수신기에 수신된 주변 소음의 음압 변동에 대한 코히런스는 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\Gamma_{12} = \frac{\langle S_{12} \rangle}{\sqrt{\langle S_{11} \rangle \langle S_{22} \rangle}} \quad (1)$$

$S_{12}$ 는 두 수신기에 수신된 각 신호의 상호 스펙트럼 밀도(cross spectral density)이며,  $S_{11}$ ,  $S_{22}$ 는 각각의 수신기에 수신된 신호들의 파워 스펙트럼 밀도이다.  $\langle \rangle$ 는 앙상블 평균을 의미한다.

천해에서의 소음환경이 공간적으로 균일하다고 가정할 때, 다양한 소음원에서 발생한 소음은 불규칙하게 중첩되어 평면파의 형태로 전방위로 전파된다.<sup>[8]</sup> 이 때의 소음환경은 입사각( $\theta$ )에 따른 소음 강도의 분포를 나타내는 방향밀도함수  $F(\theta)$ 를 갖는 소음장을 형성하며, 천해 소음환경에서 수직 방향으로 거리  $d$ 만큼 떨어진 두 수신기에 대한 이론적인 코히런스 함수는 아래 식과 같이 계산할 수 있다.<sup>[9]</sup>

$$\Gamma_{12}(kd) = \frac{1}{2} \int_0^\pi \sin \theta F(\theta) \exp(-ikd \cos \theta) d\theta \quad (2)$$

수직 선배열 센서에서 두 수신기 사이의 중간점을 기준으로 수평축을 고려하면, 방향밀도함수  $F(\theta)$ 는 아래 식과 같이 수평축에 대하여 우함수  $F_e(\theta)$ 와 기함수  $F_o(\theta)$ 의 합으로 표현할 수 있다.<sup>[8]</sup>

$$F(\theta) = F_e(\theta) + F_o(\theta) \quad (3)$$

코히런스 함수의 실수부와 허수부는 각각 아래 식으로 표현 가능하다.

$$Re[\Gamma_{12}(kd)] = \frac{1}{2} \int_0^\pi F_e(\theta) \cos(kd \cos \theta) \sin \theta d\theta, \quad (4)$$

$$Im[\Gamma_{12}(kd)] = -\frac{1}{2} \int_0^\pi F_o(\theta) \sin(kd \cos \theta) \sin \theta d\theta, \quad (5)$$

여기서 실수부는 두 수신 신호의 유사한 정도와 소음장의 수평축에 대한 대칭성과 관련이 있으며, 허수부는 비대칭성과 관련이 있다. 일반적으로 천해에서 원거리 선박 소음에 의한 소음장은 수평 성분이 우세해 수평적으로 대칭적 특성을 보이며, 수신기 상부에서 발생한 해수면 소음은 수직 성분이 우세해 일반적으로 수평적으로는 비대칭적 특성을 보인다.

수층 내에서 측정된 공간 코히런스는 주파수와 수신기 간격의 함수로, 다음과 같은 무차원의 단위를 사용한다.

$$\Omega = \omega d/c = kd, \quad (6)$$

여기서  $\omega$ 는 각주파수,  $c$ 는 수층의 음속,  $d$ 는 수신기 간격이다.

### 2.1 등방성 및 비대칭 소음장에서의 코히런스 특성

등방성 소음장(isotropic noise field)은 수신기를 중

심으로 소음원들이 균등하게 분포되어 있다고 가정한다. 이 때의 방향밀도함수  $F(\theta)$ 는 아래 식과 같이 표현할 수 있으며,

$$F(\theta) = 1, \quad 0 \leq \theta \leq \pi. \quad (7)$$

Eq.(2)에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\Gamma_{12}(kd) = \frac{\sin(kd)}{kd}. \quad (8)$$

Fig. 1. (a), (b)는 각각 등방성 소음장의 방향밀도함수 및 그에 따른 코히런스 결과로써, 실수부는  $kd$ 가  $\pi$ 의 배수에서 0과 교차하면서 감소하고, 이 때, 비대칭성과 관련되어 있는 허수부는 존재하지 않는다.

비대칭 소음장의 예로는 등음속을 갖는 심해 환경에서 해수면의 운동으로 발생된 소음이 아랫방향으로만 전파되는 환경을 가정할 수 있다. 이 때, 두 수신기의 수평축을 기준으로 위에서 아래로 향하는 음파만 존재하고, 아래에서 위로 전파되는 음파는 존재하지 않는다고 가정하면 수직방향밀도 함수는 Eq.(9)처럼 가정할 수 있다.<sup>[10]</sup>

$$F(\theta) = \begin{cases} 4\cos\theta, & 0 \leq \theta \leq \pi/2, \\ 0, & \pi/2 \leq \theta \leq \pi. \end{cases} \quad (9)$$

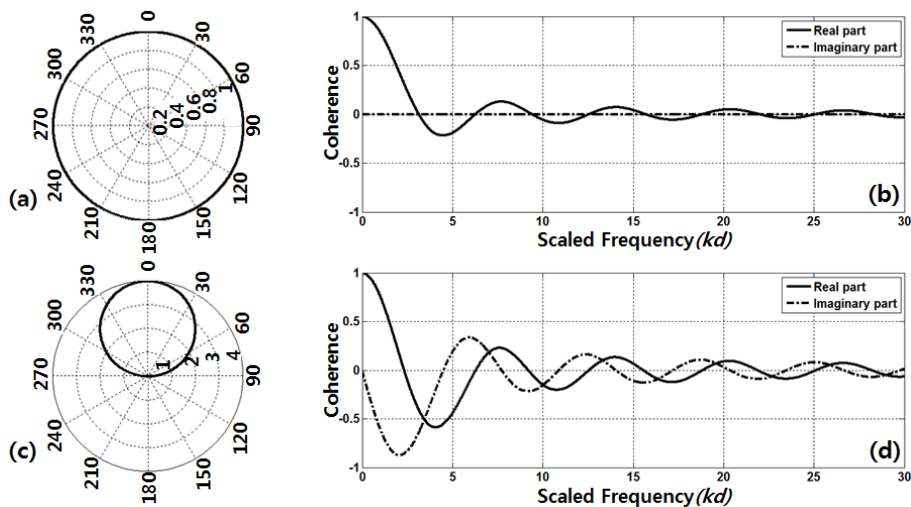


Fig. 1. (a) Vertical directional density function, (b) the coherence result for isotropic noise field, (c) vertical directional density function, and (d) the coherence result for asymmetrical noise field.

Fig. 1. (c)는 Eq.(9)로부터 계산되어진 비대칭소음 환경에서의 방향밀도함수이고 (d)는 이로부터 얻어진 코히런스 결과이다.  $0 \leq kd \leq 1$  부분에서 허수부가 음의 값을 나타내는 것은 소음이 아랫방향으로 전파되고 있음을 의미한다.<sup>[8]</sup> 또한 등방성 소음장일 때와는 다르게 실수부가 0과 교차하는 첫 번째 지점이  $\pi$ 보다 작은  $kd$ 에서 존재하며,  $kd$ 가 증가함에 따라서 허수부의 감소가 등방성 소음장인 경우에 비해 완만한 것을 관찰할 수 있다.

### 2.2 수직 방향 밀도 함수의 변화에 따른 코히런스 변화

방향밀도함수  $F(\theta)$ 는 소음장의 수직성분과 수평성분의 합으로 나타내는데 각 성분의 우세한 정도에 따라 소음장의 특성이 결정되고, 이에 따른 코히런스도 달라지게 된다. 예를 들어 수직 성분이 우세한 해수면 소음과 같은 비대칭 소음장에서는 비대칭성을 나타내는 허수부의 진동폭이 커지게 된다[Fig 1.(d)].

Ligett과 Jacobson<sup>[11]</sup>은 해상 상태 및 여러 환경 변수를 고려해 조절이 가능한 변수  $A$ 를 포함한 방향밀도함수  $F(\theta)$ 를 Eq.(10)과 같이 제시했다. 이는 앞서 Cron 과 Sherman<sup>[10]</sup>이 제시했던 방향밀도함수 Eq.(9)와 비교했을 때,  $\theta = 0$ 에서 최대가 아니기 때문에 다양한 소음장을 모의할 수 있다는 특징을 갖는다.

$$F(\theta) = 2A \exp(A \cos \theta) / [\exp(A) - 1], \quad 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2},$$

$$= 0, \quad \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi. \tag{10}$$

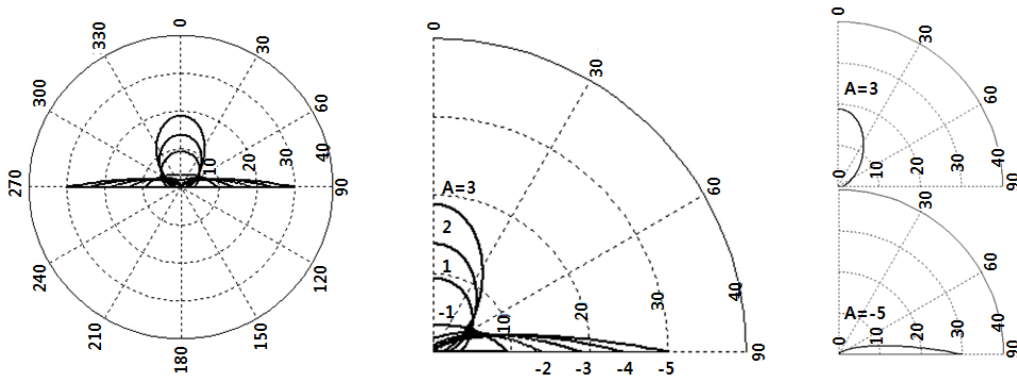


Fig. 2. Vertical directional density function presented by Liggett and Jacobson<sup>[11]</sup>.

Fig. 2에서  $A > 0$ 인 경우에는 수직성분이 우세한 소음환경의 수직방향밀도를 나타내며,  $A < 0$ 인 경우에는 수평성분이 우세한 소음환경의 수직방향밀도를 나타낸다.

Fig. 3은 Eq.(10)에서 제시한 방향밀도함수  $F(\theta)$ 를 사용한 이론적 코히런스 결과이다. 수직 성분이 우세한 환경( $A > 0$ )에서 실수부와 허수부의 진동폭이 커짐을 확인할 수 있으며, 반대로 수평 성분이 우세( $A < 0$ )해지면 실수부와 허수부 모두 진동폭이 감소하며 0과 교차하는 영점교차점의 위치  $kd$ 도 어느 정도 증가하는 것을 알 수 있다.

### 2.3 천해 소음환경에서 해수면 소음의 수직 코히런스 모델링

해수면 소음의 주된 소음원은 바람에 의해 파도가 부서지면서 생긴 공기방울의 공진이다. 일반적으로 공기방울 군집이 공진할 때는 500 Hz 이하의 주파수 대역을 갖는 소음을 발생시키며, 독립적인 공기방울의 공진은 500 Hz 이상의 주파수 대역을 갖는 해수면 소음을 형성한다.<sup>[12-16]</sup> 따라서 일반적인 환경의 해수면 소음장을 모델링하기 위해서, 쇄파 현상에 의한 시·공간적으로 독립된 불규칙 분포를 갖는 수많은 음원들이 해수면 바로 아래에 분포하고 있다고 가정할 수 있다.<sup>[8,17-19]</sup> Deane *et al.*은 천해 소음환경에서 해수면에 의한 소음장을 모의한 코히런스 모델을 아래와 같이 제시하였다.<sup>[8]</sup>

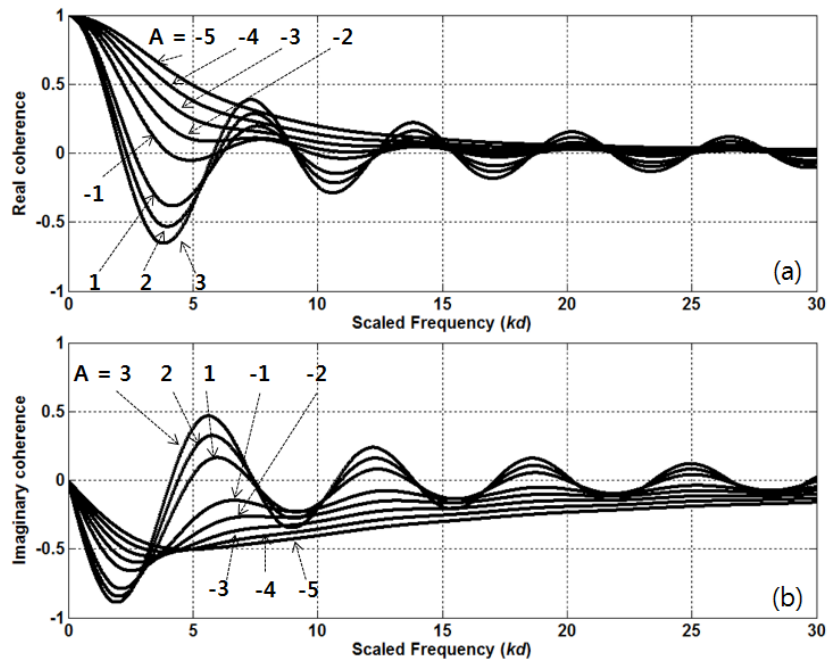


Fig. 3. Coherence results with various vertical directional density functions, (a) real coherence, (b) imaginary coherence.

$$\Gamma_{ij} = \frac{\langle S_{12} \rangle}{\sqrt{\langle S_{11} \rangle \langle S_{22} \rangle}} = \frac{\int_0^\infty p_h G_{1p} G_{2p}^* dp}{\left[ \int_0^\infty p_h |G_{1p}|^2 dp \int_0^\infty p_h |G_{2p}|^2 dp \right]^{1/2}}, \quad (11)$$

여기서  $p_h$ 는 수평 파수,  $G_p$ 는 파동 방정식의 해를 나타낸다. 이 수직 코히런스 모델은 수심, 수층 및 퇴적층의 수평적, 수직적 파수와 음속 등을 고려할 수 있는 모델로 천해 환경에서 해저 퇴적층의 구성 성분에 따른 코히런스 변화를 모의할 수 있다.

### III. 주변 소음 측정

주변 소음 측정은 2013년 5월 4일, 서해의 충남 태안군 의항항으로부터 서쪽으로 약 6km 떨어진 정점 (36°52'8.45"N, 126° 7'0.30"E)에서 실시되었으며, 실험 정점의 해저면 저질의 주성분은 자갈펄로 분석되었다(Fig. 4).

실험은 약 50 m 수심에서 총 3개의 수신기(ch.A : TC-4014, Reson, ch.B : TC-4032, Reson, ch.C : Type

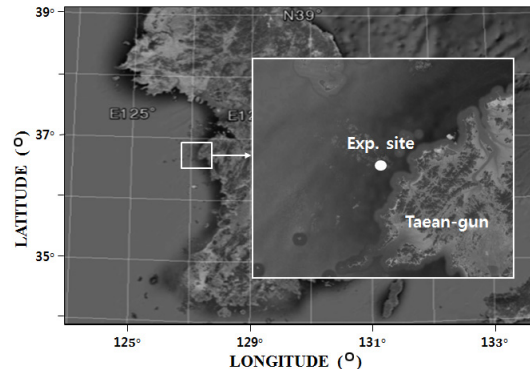


Fig. 4. Location of ambient noise measurements.

8106, B&K)가 3.5 m 간격으로 배열되어 있는 수직선 배열 센서를 사용했으며, 수신기들의 정확한 수심은 각 수신기 상단에 설치된 심도기록계(DR-1050, RBR)를 이용하여 측정하였다[Fig. 5. (a)]. 주변 소음 측정 당시 심도기록계에 의한 각 수신기의 간격은 처음에 설치 시 고정된 수신기 수심과 비교했을 때 약 1.2 - 1.6m 정도 차이를 나타내는 것을 확인하였다(Table 1).

실험 정점에서의 수직 음속 구조는 CTD(Conductivity, Temperature, Depth)를 이용하여 측정되었으며, 측정된 음속은 전 수층에서 약 1473 m/s로 일정하였다[Fig. 5. (b)]. 주변 소음은 조사선의 발전기가 작동할

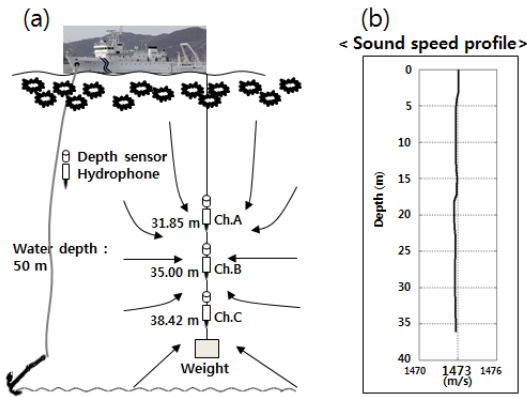


Fig. 5. (a) Experimental layout for ambient noise measurements and (b) sound speed profile of the water column taken by CTD casts.

Table 1. Deployment depth errors of vertical line array.

	Ch.A	Ch.B	Ch.C
Planned depth	33 m	36.5 m	40 m
Measured depth	31.8 m	35 m	38.4 m
Depth error	1.2 m	1.5 m	1.6 m

Table 2. Wind speeds and current speeds during the ambient noise measurements.

	Wind speed	Current speed
Generator turned on	2.9 m/s	0.42 m/s
Generator turned off	4.3 m/s	0.04 m/s

Table 3. Grain-size distribution of surficial sediment at experimental site.

Gravel	Sand	Silt	Clay	Mean grain size
9.1 %	29.3 %	26.2 %	35.4 %	5.9 $\phi$

때와 정지했을 때의 두 가지 경우에 대해 측정되었으며, 조사선 발전기는 전력 공급용 발전기를 의미한다. 측정 시 평균 풍속과 평균 유속은 Table 2와 같다. 풍속은 풍향풍속계를 이용하여 5 s 간격으로 측정되었으며 유속은 국립해양조사원에서 제공한 유속 자료를 참고하였다.<sup>[20]</sup>

측정 해역의 표층 입도는 그랩 샘플링을 이용하여 분석한 결과 평균입도 5.9  $\phi$  [ $\phi = -\log_2(d/d_0)$ ,  $d$ 는 입자의 직경(mm),  $d_0$ 는 기준 길이(1 mm)]를 갖는 자갈펄로 분석되었다(Table 3).

#### IV. 코히런스 분석 결과 및 토의

Fig. 6은 측정된 주변 소음의 파워 스펙트럼 밀도를 나타낸다. 파워 스펙트럼 밀도는 50 %의 오버랩, 해닝 윈도우, 1/2 Hz 간격의 푸리에 변환을 사용하여 계산되었다. Fig. 6에서 실선은 조사선 발전기가 작동하는 경우이며, 점선은 조사선 발전기를 정지시킨 경우의 주변 소음을 나타낸다.

일반적으로 10 Hz~1 kHz의 광대역 소음은 주로 산업 활동에 의한 공사 소음, 선박에서 발생하는 소음이 주요 원인으로 작용하며, 해상 상태에 의한 소음의 주파수 대역은 300 Hz~수 kHz까지 존재하게 된다.<sup>[2]</sup> Fig. 6에서 선박소음이 우세한 300 Hz 미만의 주파수 대역에서는, 발전기가 작동할 때에 100~105 dB, 발전기가 정지한 경우에는 85~90 dB로 약 15 dB 정도의 소음 준위 차이를 보였다. Arveson과 Vendittis<sup>[21]</sup>는 선박 발전기에 의한 소음 발생 시, 엔진의 회전수, 종류에 따라 수 Hz 간격으로 토널 성분이 존재한다고 보고한 바 있으며, Fig. 6의 발전기가 작동하는 경우에도 100 Hz~2 kHz 주파수 대역에서 약 15 Hz 간격으로 토널 성분이 나타난다. 또한 본 실험에서 발전기 작동 유무에 따른 주변 소음 측정 시, 해상 상태는 약 1-2에 해당하는 비교적 안정적인 환경이었으며, 발전기가 작동하는 경우에 풍속이 더 낮게 나타났다. 따라서 조사선 발전기 작동 유무에 따른 소음 준위 차이는 해상 상태에 의한 영향보다는 조사선 발전기의 영향이 우세한 것으로 판단할 수 있다.

한반도 연근해에서 선박 소음 및 해상 상태에 의한 주변 소음의 스펙트럼 준위는 수년간의 측정 자료를 통계적으로 분석하여 경험식으로 보고된 바가 있다.<sup>[22]</sup> 이 경험식에 의하면 이번 주변 소음 측정 실험 환경과 같은 해상 상태에서의 스펙트럼 준위는 300 Hz 이하의 주파수 대역에 대하여, 선박 통행이 많은 곳에서는 약 80 dB, 선박 통행이 적은 곳에서는 65~70 dB를 나타낸다. 이 경험식을 근거로 이번 실험 해역은 선박통행량이 많은 해역에 해당하며, 실제 실험 당시의 AIS(Auto Identification System) 자료에서도 다수의 선박이 통행 중이었음을 확인할 수 있다 (Fig. 7).

공간적으로 분리된 2개 수신기에 수신된 광대역

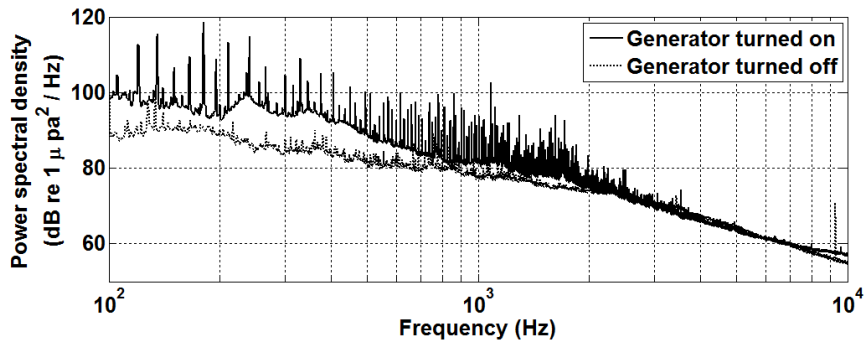


Fig. 6. Power spectral densities of ambient noise measured when the generator of R/V Eardo was on and off.

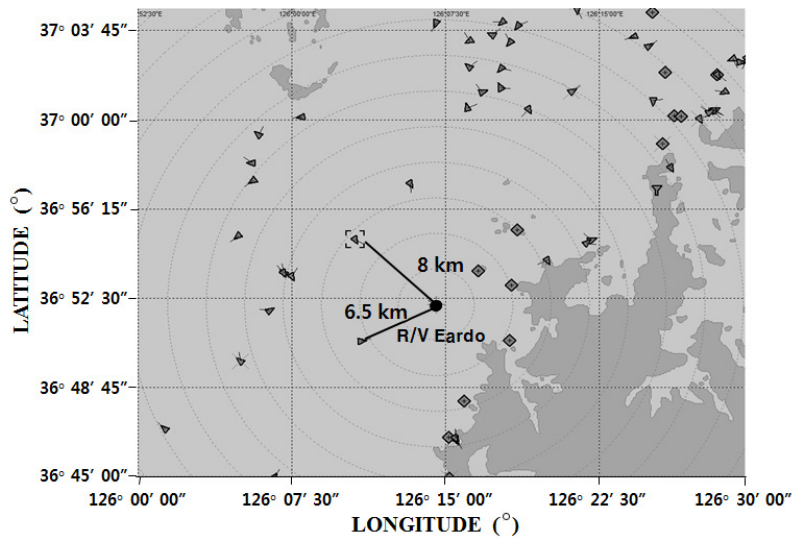


Fig. 7. Ships distribution around the R/V Eardo acquired from AIS data during the acoustic measurements [ship(▲), lighthouse(◇)].

신호는 코히런스를 분석하기 위해 신호의 시계열 신호를 푸리에 변환을 통해 주파수 영역으로 변환시킨 후, Eq.(1)에 대입하여 코히런스를 계산하였다. 발전기가 작동하는 경우에는 총 12분동안 수신한 소음 자료를 1s씩 앙상블 평균하여 코히런스를 계산하였으며, 발전기가 정지한 경우에는 총 8분동안 수신한 소음 자료를 1s씩 앙상블 평균하여 코히런스를 계산하였다.

#### 4.1 조사선 발전기 작동 시 코히런스 결과

조사선 발전기가 작동하는 경우는 수직 선배열 센서의 상부에 있던 발전기에 의해 수직 성분의 소음이 우세한 비대칭 소음 환경으로 볼 수 있다. 따라서 코히런스 결과도 II장에서 언급한 비대칭 소음장에

서의 코히런스 결과와 비슷하게 허수부의 부호가 음의 값으로 시작하는 것을 볼 수 있다(Fig. 9). 이는 소음이 해수면에서 아래 방향으로 전파되고 있음을 의미한다.

이러한 코히런스 특성을 이론적으로 모델링하기 위하여, 조사선 발전기에 의한 소음은 조사선 바닥 전체가 소음원이고 각각의 점음원에서 발생하는 소음은 균일한 에너지로 전 방향으로 방사된다고 가정하였다. 또한 조사선 주변의 해수면 소음 및 기타 소음은 발전기 소음에 비해 무시 가능하다고 가정하였다. 따라서 이 때의 소음장은 조사선과 수직선배열 센서의 수평거리가 증가함에 따른 전달손실이 고려된 수직방향밀도를 가지게 되므로 수평 거리가 가장 짧을 때 최대값을 가지며, 수평거리가 멀어짐에 따라 전달 손실이 증가하는 방향밀도함수[Fig. 8. (a)]를

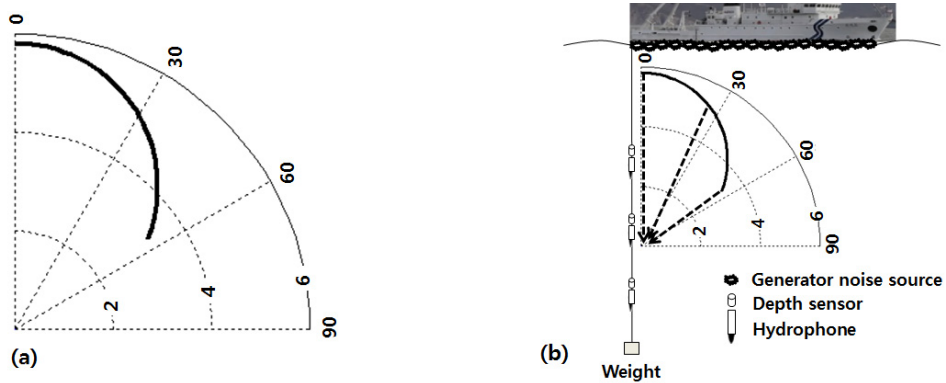


Fig. 8. (a) Vertical directional density function by the assumed transmission loss fields of ship's generator noise and (b) layout of experimental environments.

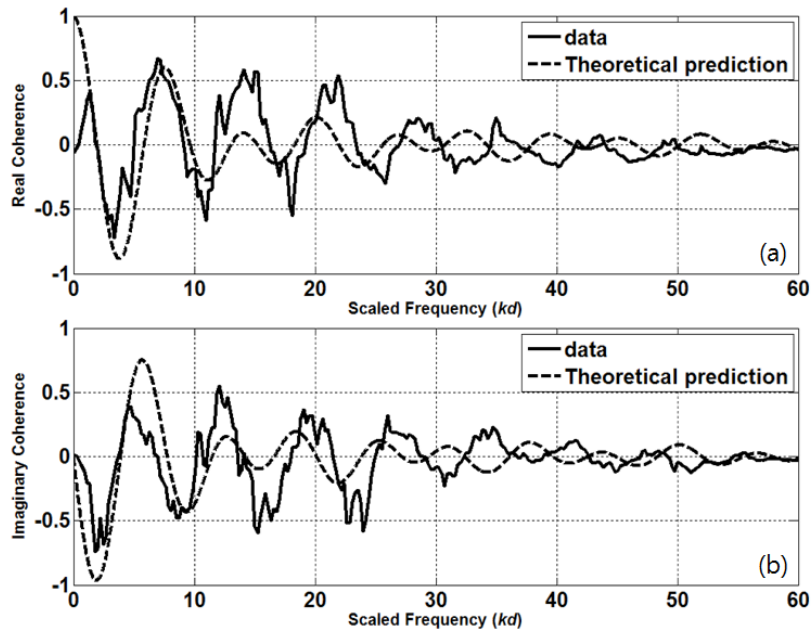


Fig. 9. Comparison of the measured coherence to the model prediction in case of generator turned on, (a) real coherence, (b) imaginary coherence.

구성하여 Eq.(2)에 대입하였다.

Fig. 9은 조사선 발전기 소음에 의한 실측 신호의 코히런스 결과와 모델링 결과를 비교한 그림이다. 전반적으로 해수면으로부터 아랫방향으로 전파되는 코히런스 양상은 잘 보여주고 있으나, 실측 신호의 코히런스 결과에 비해 모델링 결과는 각각 0 축과 교차하는 영점교차점들에서 약간의 차이가 있고 그 크기도 실측치와 차이를 보인다. 이러한 차이는 수직선배열센서의 기울어짐에 의해 발생한 것으로 판단되며, Table 1에서 계획 수심과 실제 수심을 이용하여 계산하면 수직선배열센서가 약 16° 기울어져 있

을 가능성이 있음을 확인하였다.

#### 4.2 조사선 발전기가 정지 시 코히런스 결과

조사선 발전기가 정지한 경우의 소음은 실험 해역의 주변 소음으로 코히런스 결과는 Fig. 10의 실선과 같다. 실수부는 급격히 상승한 이후에  $kd$ 가 증가함에 따라 서서히 감소하는 반면, 허수부는 0에 근접한 작은 값( $< 0.2$ )을 가진다.

Cron *et al.*<sup>[23]</sup>에 의해 수평 성분 및 준 수평 성분의 선박 소음이 수직선배열센서에 수신될 때 코히런스의 실수부는 대부분의 주파수 대역에서 진동하지 않



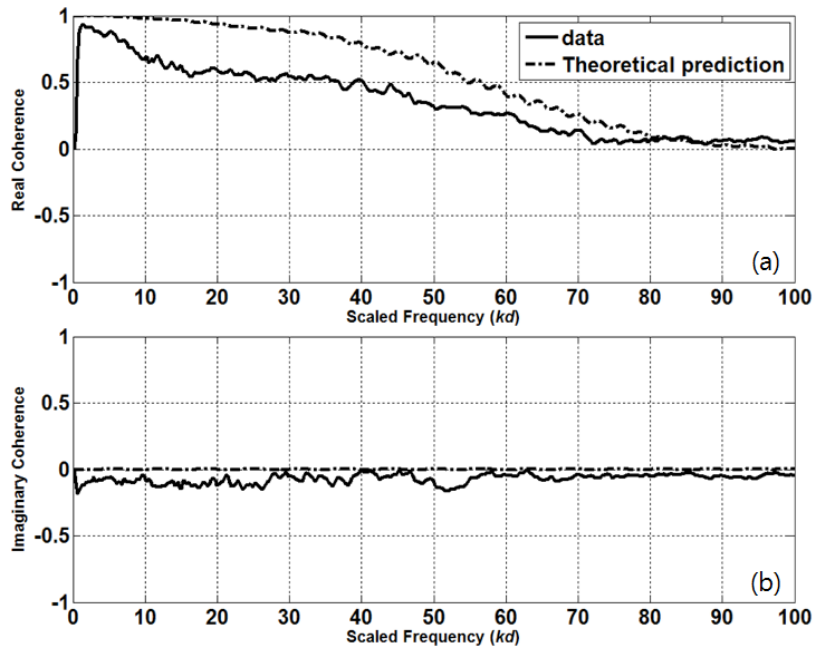


Fig. 10. Comparison of the measured coherence to the model prediction in case of generator switch-off, (a) real coherence, (b) imaginary coherence.

고 양의 값을 갖는다고 보고된 바 있으며, Buckingham과 Jones<sup>[24]</sup>도 수평 성분이 우세한 환경에서 코히런스의 실수부가 진동하지 않고 양의 값을 갖는다고 보고하였다. 따라서 이와 같은 결과는 소음장이 수평축에 대해 상당히 대칭적인 소음 환경임을 의미하며, 주변 소음 측정 당시 실험 해역에서 많은 선박 운항으로 발생된 수평 성분이 우세한 원거리 선박 소음의 영향으로 실수부의 전체적인 준위가 상승된 결과를 나타낸 것으로 판단된다. 또한 실측값의 실수부에서 저주파 대역의 코히런스 값이 1에서 시작해야 하지만, 그보다 낮은 값에서 급격한 상승을 보이는 것은, 음파의 전파와 관련되어 있지 않고, 수신기 주변의 와류로 인한 유체소음의 영향으로 보인다.<sup>[25]</sup>

Fig. 10에서 점선은 해상 상태에 의한 해수면 소음과 선박통행에 따른 선박 소음의 영향을 고려하여 Deane *et al.*<sup>[25]</sup>이 제시한 코히런스 모델을 사용하여 예측한 코히런스 곡선이다. 코히런스 모델에 입력된 환경 변수들은 수신기 주변에서 측정된 실험 환경과 같게 설정하였다. 수층에서의 음속은 1473 m/s로 수심에 관계없이 일정하며, 측정된 퇴적층 평균입도 ( $5.9 \phi$ )와 유사한 퇴적층 ( $6 \phi$ )의 환경을 모의하였다. 이 모델은 해수면에서 발생한 소음 환경에서의 코히

런스를 모의하며, 등음속 구조의 수층과 균질한 퇴적층 환경을 가정한다. 실험 환경에서 선박 소음의 영향은 Reference [8]에서 제시한 방법과 유사하게 Eq.(11)의 상호 스펙트럼 밀도와 자기 스펙트럼 밀도에 선박 소음에 의한 에너지를 인코히어런트하게 더함으로써 고려되었으며 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\Gamma_{ij+ship} = \frac{\int_0^{\infty} p_h G_{1p} G_{2p}^* dp + E_{ship}}{\left[ \left( \int_0^{\infty} p_h |G_{1p}|^2 dp + E_{ship} \right) \left( \int_0^{\infty} p_h |G_{2p}|^2 dp + E_{ship} \right) \right]^{1/2}} \quad (12)$$

Eqs.(11)과 (12)에서  $G_{1p}$ ,  $G_{2p}$ 는 해수면 소음에 의해 각각의 수신기에 수신된 소음장을 의미하며 아래식과 같이 표현할 수 있다.

$$G_{ip} = \frac{\sin \eta_1 z'}{\eta_1} \left\{ \frac{(\eta_1 + b\eta_2) \exp[j\eta_1 z_i] + (\eta_1 - b\eta_2) \exp[j\eta_1 (2h - z_i)]}{(\eta_1 + b\eta_2) + (\eta_1 - b\eta_2) \exp[2j\eta_1 h]} \right\} \quad (13)$$

$P_h$ 는 수평 파수,  $\eta_1$ 은 수층에서의 수직 파수( $\eta_1 = \sqrt{k_1^2 - p_h^2}$ ,  $k_1 = \omega/c_1$ ),  $\eta_2$ 는 퇴적층에서의 수직 파수

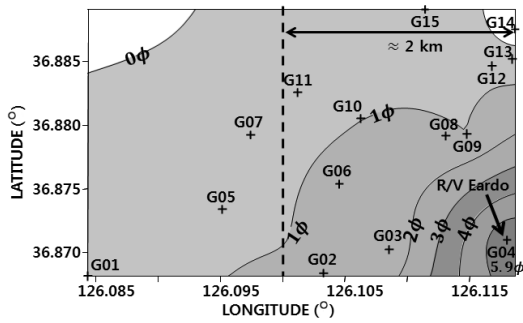


Fig. 11. Grain-size distribution around the experimental site.

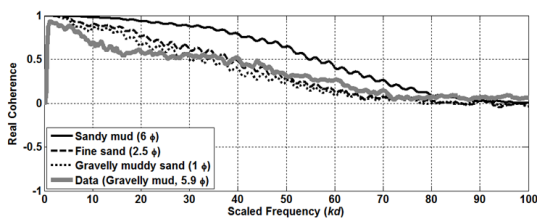


Fig. 12. Coherence result for the ambient-noise field dominated by the long-distance ship noise and its comparison to the model predictions obtained using various mean particle sizes.

( $\eta_2 = \sqrt{k_2^2 - p_h^2}$ ,  $k_2 = \omega/c_2$ )를 의미하며,  $b$ 는 수층과 퇴적층의 밀도비( $\rho_1/\rho_2$ ,  $\rho_1$ : 수층의 밀도,  $\rho_2$ : 퇴적층의 밀도),  $h$ 는 수층의 총 수심,  $z$ 와  $z'$ 은 각각 수신기와 송신기 수심을 나타낸다. 퇴적층의 음속, 밀도, 감쇠계수  $\beta$ 는 각각 1517 m/s, 1525 kg/m<sup>3</sup>, 0.0057의 값을 사용했으며, 이는 Buckingham<sup>[26]</sup>이 제시한 퇴적층 특성 모델을 이용하여 계산하였다. 또한 코히런스 모델을 수행하는데 사용된 적분 방법은 사다리꼴 수치 적분법(trapezoidal numerical integration)이며, 파수 적분 간격은 0.001로 하였다.

선박 소음에 의한 에너지는, 본 실험에서 측정된 선박이 존재할 때의 주변 소음 세기를 선박이 존재하지 않을 때의 주변 소음 세기(해수면 소음에 의한 에너지 세기)로 나누어 선박 소음과 해수면 소음에 의한 에너지 세기의 비율을 계산한 후, 이론적 코히런스 모델에서 제시한 해수면 소음에 의한 소음장 ( $|G_p|^2$ )에 곱하였다. 이 때 사용된 선박이 존재하지 않을 때의 주변 소음 세기는 한반도 근해의 주변 소음 경험식을 이용하여 계산되었다.<sup>[22]</sup>

Fig. 10에서 측정된 주변 소음의 코히런스의 결과

는 모델링 결과와 차이를 보이는데, 이러한 차이는 실험 해역 해저면의 공간적 분포에 의한 것일 수 있다. 앞서 언급한 표층 퇴적층 분석 결과에서 실험 해역의 평균 입도는 5.9  $\phi$ 였지만, 실험 해역을 기준으로 반경 약 1 km를 제외한 해역의 퇴적층은 주로 0~2  $\phi$ 의 사질 퇴적층이었다(Fig. 11). 소음원인 원거리의 선박에서 방사된 소음은 주로 낮은 차수의 모드들이 음원과 수신기 사이의 해저면의 지음향 특성에 의해 영향을 받으며 전파되어 수신기에 수신된다.<sup>[8]</sup> 주변 소음 측정 시 조사선 위치를 기준으로 반경 10 km 이내에 약 18대의 선박이 운행 중에 있었으며, 조사선과 가장 가까운 선박은 약 6.5 km에 위치하고 있었기 때문에 전달 해역의 주변 입도 성분인 사질 퇴적층의 영향을 가장 많이 받았을 것으로 판단된다. 따라서 평균 입도 1  $\phi$ 와 2.5  $\phi$ 를 갖는 사질 퇴적층에 대한 모델링을 수행한 후 실측값과 비교하였다(Fig. 12). 모델링에 사용된 환경 정보는 Buckingham<sup>[26]</sup>이 제시한 퇴적층 특성 모델로부터 계산되었으며, 1  $\phi$ 에 해당하는 퇴적층의 음속, 밀도, 감쇠계수는 각각 1746 m/s, 2044 kg/m<sup>3</sup>, 0.01019의 값을, 2.5  $\phi$ 는 각각 1650 m/s, 1964 kg/m<sup>3</sup>, 0.007925의 값을 사용하였다. 그 결과, 조사선이 위치하고 있는 해역의 퇴적층과 유사한 평균 입도 6  $\phi$ 를 사용하여 예측된 모델링 결과에 비해 비교적 유사한 경향을 보이는 것을 확인하였다.

## V. 결 론

본 논문에서는 자갈펄로 구성된 퇴적층의 단일 정점에서 조사선 발전기가 작동하는 경우와 정지한 경우에 대해 측정된 주변 소음으로부터 코히런스를 계산한 후에 모델과의 비교를 통하여 주변 소음의 공간적 특성을 파악하고자 하였다. 조사선 발전기가 작동할 때의 코히런스 결과는, 조사선 바닥 전체에서 형성된 균일한 음원과 수직선배열센서와의 수평 거리에 따른 전달 손실을 고려한 방향밀도함수를 사용하여 모의한 코히런스 결과와 비교하였으며, 비교 결과는 발전기 소음의 우세한 주파수 대역인 2 kHz 이하에 해당하는  $kd \leq 20$ 에서 매우 유사한 경향을 나타내었다.

조사선 발전기가 정지한 경우, 즉 실험 해역의 주

변 소음을 이용한 코히런스 결과는 해수면 소음장을 모의한 이론적 코히런스 결과와 비교하였다. 원거리 선박 소음에 의한 소음 환경에서의 코히런스 결과는 Deane<sup>[25]</sup>이 제시한 해수면 소음장 코히런스 모델에 원거리 선박에 의한 영향을 인코히어런트하게 더해 줌으로써 고려하였다. 주변 소음의 코히런스 결과는 원거리 선박 소음에 의한 영향으로 실수부의 전체적인 준위가 높게 형성되어있으며, 그에 비해 허수부는 매우 작은 값을 보였다. 이와 같은 결과는 실험 해역의 소음장이 수평축에 대한 대칭성이 우세한 수평적 전달 특성을 갖는 소음장임을 의미한다. 또한 코히런스 모델과의 비교를 통하여 측정된 소음장이 실험 정점 하부의 해저면에 의한 영향보다 원거리 전파에 따른 주변 해역의 해저면 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다.

본 논문에서는 서해의 태안반도 주변의 해역에서 측정된 수중 소음의 공간 코히런스 분석을 수행하였으며, 사질 퇴적층이 우세한 해역의 퇴적층 환경을 잘 반영한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 본 실험을 통해 공간 코히런스 분석을 통해 실험 해역의 퇴적층 환경을 유추할 수 있는 가능성을 확인하였으며, 추후에는 다양한 환경에서의 코히런스 실험을 통해 퇴적층 구성 성분에 따른 주변 소음의 공간 코히런스 특성 연구가 지속적으로 진행되어야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술원의 천해 지질환경과 음파전달 환경과의 상호 연계 연구(PE98978)의 지원으로 수행되었다.

## References

1. S. Cho, D. Kang, C. -K. Lee, S. -K. Jung, J. W. Choi, and S. Oh, "Overview of Results from the KIOST-HYU Joint Experiment for studying on Acoustic Propagation in Shallow Geological Environment" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **34**, 411-422 (2015).
2. X. Lurton, *An introduction to underwater acoustics* 2nd ed. (Springer, Heidelberg, 2002).
3. M. J. Buckingham, "Theory of the directionality and spatial coherence of wind-driven ambient noise in a deep ocean with attenuation," *J. Acoust. Soc. Am.* **134**, 950-958 (2013).
4. P. H. Dahl, W. J. Plant, and D. R. Dall'Osto, "Vertical coherence and forward scattering from the sea surface and the relation to the directional wave spectrum," *J. Acoust. Soc. Am.* **134**, 1843-1853 (2013).
5. L. Muzi, M. Siderius, J. E. Quijano, and S. E. Dosso, "High resolution bottom-loss estimation using the ambient-noise vertical coherence function," *J. Acoust. Soc. Am.* **137**, 481-491 (2014).
6. S. Cho and J. W. Choi, "Vertical coherence measurements of ambient noise in shallow water off the east coast of Korea," *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 07HG01-1-4(2011).
7. J. S. Park and H. R. Kim, "Measurement of spatial coherence of active acoustic sensor array signal" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **31**, 205-213 (2012).
8. G. B. Deane, M. J. Buckingham, and C. T. Tindle "Vertical coherence of ambient noise in shallow water overlying a fluid seabed," *J. Acoust. Soc. Am.* **102**, 3413-3424 (1997).
9. H. Cox, "Spatial correlation in arbitrary noise fields with application to ambient sea noise," *J. Acoust. Soc. Am.* **54**, 1289-1301 (1973).
10. B. F. Cron and C. H. Sherman, "Spatial correlation function for various noise models," *J. Acoust. Soc. Am.* **34**, 1732-1736 (1962).
11. W. S. Liggett Jr. and M. J. Jacobson, "Noise covariance and vertical directivity in a deep ocean," *J. Acoust. Soc. Am.* **39**, 280-288 (1966).
12. S. W. Yoon, L. A. Crum, A. Prosperetti, and N. Q. Lu, "An investigation of the collective oscillations of a bubble cloud," *J. Acoust. Soc. Am.* **89**, 700-706 (1991).
13. A. Prosperetti, "Bubble-related ambient noise in the ocean" *J. Acoust. Soc. Am.* **84**, 1042-1054 (1988).
14. W. M. Carey and D. G. Browning, *In sea surface sound*, edited by B. R. Kerman (Kluwer Academic, Dordrecht, 1988), pp. 361.
15. M. L. Banner and D. H. Cato, *In sea surface sound*, edited by B. R. Kerman (Kluwer Academic, Dordrecht, 1988), p. 429.
16. H. Medwin and M. M. Beaky, "Bubble sources of the Knudsen sea noise spectra," *J. Acoust. Soc. Am.* **86**, 1124-1130 (1989).
17. M. J. Buckingham, "A theoretical model of ambient noise in a low-loss, shallow water channel," *J. Acoust. Soc. Am.* **67**, 1186-1192 (1980).
18. B. F. Cron and C. H. Sherman, "Spatial correlation function for various noise models," *J. Acoust. Soc. Am.* **38**, 885 (1965).
19. W. A. Kuperman and F. Ingenito, "Spatial correlation of surface generated noise in a stratified ocean," *J. Acoust. Soc. Am.* **67**, 1988-1996 (1980).
20. *Korea Hydrographic and Oceanographic Administration*, [http://sms.khoa.go.kr/koofs/kor/introduce/sea\\_wf.asp?wf=current\\_survey](http://sms.khoa.go.kr/koofs/kor/introduce/sea_wf.asp?wf=current_survey), 2010.

21. P. T. Arveson, D. J. Vendittis, "Radiated noise characteristics of a modern cargo ship," J. Acoust. Soc. Am. **107**, 118-129, (2000).
22. B. K. Choi, B. -C. Kim, C. S. Kim, and B. -N. Kim, "Analysis of dependence on wind speed and ship traffic of underwater ambient noise at shallow sea surrounding the Korean Peninsula" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **22**, 233-241 (2003).
23. B. F. Cron, B. C. Hassell, and F. J. Keltonic, "Comparison of theoretical and experimental values of spatial correlation," J. Acoust. Soc. Am. **37**, 523-529 (1965).
24. M. J. Buckingham and S. A. S. Jones, "A new shallow-ocean technique for determining the critical angle of the seabed from the vertical directionality of the ambient noise in the water column," J. Acoust. Soc. Am. **81**, 938-946 (1987).
25. G. B. Deane, "Long time-base observations of surf noise," J. Acoust. Soc. Am. **107**, 758-770 (2000).
26. M. J. Buckingham, "Theory of acoustic attenuation, dispersion, and pulse propagation in unconsolidated granular materials including marine sediments," J. Acoust. Soc. Am. **102**, 2579-2596 (2000).

**저자 약력**

▶ 권혁종 (Hyuckjong Kwon)



2013년 2월 : 한양대학교 학사  
2013년 ~ 현재 : 한양대학교 석·박사 통합과정

▶ 김정훈 (Junghun Kim)



2007년 2월 : 제주대학교 해양산업공학전공 학사  
2009년 2월 : 제주대학교 석사  
2015년 8월 : 한양대학교 박사  
2015년 8월 ~ 현재 : STX 엔진 주식회사

▶ 최지웅 (Jee Woong Choi)



1996년 2월 : 한양대학교 학사  
1998년 2월 : 한양대학교 석사  
2002년 8월 : 한양대학교 박사  
2002년 11월 ~ 2007년 8월 : Applied Physics Lab., Univ. of Washington, USA, Research Associate  
2004년 ~ 현재 : 미국음향학회 수중음향 기술위원회 위원  
2007년 9월 ~ 현재 : 한양대학교 해양융합 과학과 부교수

▶ 강돈혁 (Donhyug Kang)



1992년 2월 : 한양대학교 이학사  
1994년 8월 : 한양대학교 이학석사  
2002년 2월 : 한양대학교 이학박사  
2002년 11월 ~ 2004년 10월 : 일본 북해도 대학 특별연구원  
2005년 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 해양 방위연구센터 책임연구원

▶ 조성호 (Sungho Cho)



2005년 2월 : 한양대학교 이학사  
2007년 2월 : 한양대학교 이학석사  
2012년 2월 : 한양대학교 이학박사  
2012년 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 해양방위연구센터 연구원

▶ 정섬규 (Seom-Kyu Jung)



1991년 2월 : 부산대학교 이학사  
1993년 8월 : 부산대학교 이학석사  
2011년 2월 : 인하대학교 이학박사  
1997년 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 해양방위연구센터 책임연구원

▶ 박경주 (Kyeongju Park)



1990년 3월 : 해군사관학교 이학사  
1998년 2월 : 군사과학대학원 이학석사  
2003년 2월 : 한양대학교 이학박사  
2010년 ~ 현재 : 해군사관학교 해양학과 조교수