

# 동해 묵호항 근처에서의 난류세기인자에 따른 음향수신신호의 위상분산 추정

## Estimation of Phase Variance of Acoustic Signals Depending on Turbulence Strength Near the Mukho Port in the East Sea of Korea

김 정 훈\*, 북 태 훈\*\*, 팽 동 국\*\*, 심 태 보\*\*\*, 김 영 규\*\*\*\*, 박 정 수\*\*\*\*  
(Jung Hun Kim\*, Tae-Hoon Bok\*\*, Dong-Guk Paeng\*\*,  
Taebo Shim\*\*\*, Youngkyu Kim\*\*\*\*, Joung-Soo Park\*\*\*\*)

\*한국해양연구원 해양생물자원부 수산음향분야, \*\*제주대학교 해양과학대학 해양정보시스템공학과,  
\*\*\*숭실대학교 정보통신전자공학부, \*\*\*\*국방과학연구소  
(접수일자: 2009년 2월 2일; 수정일자: 2009년 3월 3일; 채택일자: 2009년 4월 28일)

음향수신신호의 위상은 매질에 대한 정보를 포함하고 있기 때문에 위상 변동을 연구하는 것은 매질에 대한 연구와 동반되어야 한다. 또한 SAS (Synthetic Aperture Sonar)나 수중통신 등의 신호처리 시 수신신호의 위상변동 보정이 필요하다. 본 연구에서는 미세구조 난류에 의한 수신신호의 위상분산을 고찰하였다. 국지적으로 등방성이고 균질한 난류 환경 하에서 난류세기인자를 구하였고 음파 전달경로에 따라 난류세기가 미치는 영향을 고려하여 위상분산을 계산하였다. 난류세기 계산에 필요한 CTD자료와 ADCP자료는 묵호항 근처에 설치된 부표에서 획득하였으며 음파 전달경로는 Bellhop알고리즘을 이용한 음선 모델을 사용하였다. 결과적으로 난류세기인자는 주로 수온과 유속의 변화에 의해 결정되었으며 수신신호의 위상분산에 영향을 주었다. 이러한 위상분산은 소나 운용에 고려되어야 할 사항으로 여겨진다.

**핵심용어:** 음향수신신호, 위상분산, 난류세기인자, Bellhop알고리즘

**투고분야:** 수중음향 분야 (5.6)

Phase variance of the acoustic signals has to be investigated with the research of the medium, because the phase of the acoustic signals carries the information of the medium. The phase compensation of the received signals is required for the signal processing of SAS (Synthetic Aperture Sonar) and underwater communication. In this paper, the phase variance of the acoustic signals was studied depending on the micro-scale-turbulence of ocean. The turbulence strength of the locally isotropic and homogeneous turbulence was calculated, and the phase variance affected by the turbulence strength was computed along the ray paths. The CTD and ADCP data were acquired from a buoy system near the Mukho port in the East Sea of Korea and the ray paths were calculated by the Bellhop algorithm. As a result, the turbulence strength was mainly determined by the variation of temperature and flow speed, changing the phase variance of the received signals. Hence, we thought the phase variance should be considered in the sonar operating system.

**Keywords:** Acoustic signal, Phase variance, Turbulence strength, Bellhop algorithm

**ASK subject classification:** Underwater Acoustics (5.6)

### I. 서론

해양에서 음파 전달 시 매질 경계층과 매질 내 임피던스의 차이, 표층부에 포함된 공기방울, 내부파, 난류 (Tur-

bulence) 운동 등은 음향수신신호의 위상을 변화시킬 수 있다 [1-3]. 이러한 음향수신신호의 위상은 신호처리 시 중요한 요소로 작용한다. 그 예로서 SAS (Synthetic Aperture Sonar)의 이미지 합성 시 위상 보정에 따라 이미지의 질이 결정되고 [4] 통신시스템에서 위상변조방식을 사용할 경우 위상의 정확성에 따라 BER (Bit Error Rate)에 영향을 준다 [5]. 또한 선체 고정형 소나 (Hull Mounted Sonar)에서 표층해양환경으로 인한 위상변동이 신호의

책임저자: 팽 동 국 (paeng@jejunu.ac.kr)  
제주도 제주시 제주대학교 66번지 제주대학교 해양과학대학  
해양정보시스템공학과  
(전화: 064-754-3484; 팩스: 064-756-3483)

왜곡을 준다 [6]. 이 밖에도 해양 토모그래피 등 다양한 분야에서 음향수신신호의 위상이 고려된다 [7].

본 논문에서 다루고 있는 수신신호의 위상분산은 미세 구조 난류에 의한 것으로서 현재는 수중음향에서 주로 사용중인 저 주파수 대역에서 영향이 미비하여 많은 고려가 되지 않았다. 하지만 점차 중·고 주파수 대역에서 소나의 활용이 많아지고 있고 이에 따라 미세구조 난류환경에서의 위상분산을 고려하지 않을 수 없다. 난류환경과 파동의 전달과의 연구는 1937년 Rytov에 의해서 시작되었으며 초기에는 대기 난류환경에서 빛의 전달이나 전파의 전달에 관한 연구가 주를 이루었다. Ewing, Jardetzky and Press (1957)와 Brekhovskikh (1960)가 충을 이루는 난류 환경에서의 파동 전달에 대해 다루기 시작하면서 해양환경에서의 연구가 시작되었다 [8]. 현재는 이론뿐만 아니라 실험을 통하여 난류세기를 직접 측정하여 음파 전달과 상관성을 모의할 수 있을 정도로 발전 되었지만 [9-13] 현재 까지도 해양난류와 음파의 전달과의 상관성을 설명하기에는 어려운 점이 많이 있다.

본 논문에서는 해양에서 음파전달 시에 미세구조 난류 세기가 변함에 따른 수신신호 위상분산을 추정하였다. 먼저 미세구조 난류세기에 유속의 영향을 고려하는 새로운 식을 제안하였고 음파전달 시 위상과의 상관성을 설명하였다. 수신신호의 위상분산에 영향을 주는 난류세기인자를 구하기 위해 묵호항 근처에 계류 중인 부표에서 CTD (Conductivity Temperature Depth)와 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)자료를 획득하였으며 이를 이용하여 난류세기를 구하고 Bellhop 알고리즘을 이용한 음선 모델을 적용하여 수신신호의 위상분산을 모의하였다.

논문의 구성은 2장에서 위상분산 추정모델과 난류세기 이론에 대해 기술하였고 3장에서 2장의 위상분산 추정 모델이론을 묵호항 근처지역의 환경에 적용하여 모의실험을 하였으며 4장에서 결론을 도출하였다.

## II. 이 론

### 2.1. 위상분산 추정모델

수중에서 음파 전달 시 난류환경에 의해서 진폭과 위상이 변동하게 되는데 진폭의 변동은 크기가 미비하여 무시되었고 위상의 변동만을 고려하였다 [3].

$$\phi = k \int_{path} u(\mathbf{x}) dx \quad (1)$$

여기서  $k$ 는 음파의 파수,  $u(\mathbf{x})$ 는 공간적으로 변화하는 굴절지수,  $x$ 는 수평거리이다. 식 (1)의 굴절지수  $u(\mathbf{x})$ 는 평균이 0인 랜덤 함수이므로 위상변동의 분산을 계산하면 식 (2)와 같다.

$$\Phi^2 = \langle \phi^2 \rangle = k^2 \iint_{path} \langle u(x_1)u(x_2)^* \rangle dx_1 dx_2 \quad (2)$$

좌표계를 평균 ( $x_s$ )과 편차 ( $x_d$ )로 변환하고 음선의 길이 ( $L$ )가 난류의 척도보다 매우 크다고 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi^2 = k^2 \int_0^L dx_s \left[ \int_{-\infty}^{\infty} dx_d \beta_t(x_d, x_s) \right] \quad (3)$$

여기서  $\beta_t(x_d, x_s)$ 는 난류의 자기상관함수이고 다음과 같이 정의된다 [3].

$$\beta_t(x_d, x_s) = 4\pi x_d^{-1} \int_0^{\infty} S_u(K; z(x_s)) K \sin(Kx) dK \quad (4)$$

여기서  $S_u(K; z(x_s))$ 는 등방성이면서 국지적으로 균질한 미세구조 (1 m 이하) 난류환경에서의 3차원 굴절지수 스펙트럼,  $K = 2\pi\nu^{-3/4} \varepsilon^{1/4}$ 는 점성차단 파수,  $z$ 는 수심,  $\nu$ 는 운동점성계수,  $\varepsilon$ 는 운동에너지 소멸율이다. 다음과 같이 정의된다 [3].

$$S_u(K; z(x_s)) = \frac{A_u(z)}{(K^2 + k_t^2)^{11/6}} \frac{K^2}{(K^2 + k_t^2)} R_B(K) \quad (5)$$

여기서  $A_u$ 는 난류세기인자,  $k_t = 2\pi / L_0$ 는 저주파 차단 파수,  $L_0$ 는 난류의 외부 스케일,  $R_B(K)$  다음과 같다 [3].

$$R_B(K) = \exp[-q(K/k_B)^2] \quad (6)$$

여기서  $k_B = (\varepsilon/\nu\kappa^2)^{1/4}$ ,  $\kappa$ 는 해수의 열확산성,  $q$ 는 상수로서 3.7을 사용하였다. 식 (5)의  $K^2/(K^2 + k_t^2)^{-2}$ 는 고주파 통과필터 역할을 하고  $R_B(K)$ 는 고주파 차단 역할을 한다. 식 (5)를 (4)에 대입한 후 그 결과를 다시 (3)에 대입하면 다음과 같다.

$$\Phi^2 = (2\pi)^2 k^2 I \int_0^L A_u(z(x_s)) dx_s \quad (7)$$

여기서  $I$ 는 다음과 같이 정의된다 [3].

$$I = \int_0^\infty K^3 (K^2 + k_i^2)^{-17/6} R_B(K) dK \tag{8}$$

$$= \frac{1}{2} k_i^{-5/3} \psi \left( 2, \frac{1}{6}, q(k_i/k_B)^2 \right), k_B \square k_i$$

여기서  $\psi$ 는 합류 초기하함수 (Confluent hypergeometric function)이다. 식 (8)을 식 (7)에 대입하면 최종적으로 난류에 의한 수신신호의 위상분산식을 얻을 수 있다.

$$\Phi^2 = 0.604 k^2 L_0^{5/3} \int_0^L A_\mu(z(x)) dx \tag{9}$$

식 (9)에서 음향수신신호의 위상분산을 결정짓는 인자는 난류의 세기를 나타내는  $A_\mu$ 의 특성이라 할 수 있다.

### 2.2. 난류 (turbulence) 세기 인자

난류세기를 나타내는  $A_\mu$ 는 굴절지수 변동의 구조상수 (Structure constant)로서 다음과 같이 정의된다 [3].

$$A_\mu = 2\varepsilon^{-1/3} \chi_\mu \tag{10}$$

여기서  $\varepsilon$ 는 운동에너지 소멸율이고  $\chi_\mu$ 는 굴절지수 변동의 소멸율로 다음과 같다 [3].

$$\chi_\mu = (1.35a)^2 \chi_T \tag{11}$$

식 (11)에서  $a$ 는 온도계수로 다음의 식으로 구해진다 [14].

$$c^{-1} \frac{\partial c}{\partial z} = a \frac{\partial T}{\partial z} + b \frac{\partial S}{\partial z} \tag{12}$$

여기서  $c$ 는 음속,  $b$ 는 염분계수,  $S$ 는 염분이고  $\chi_T$ 는 온도 소멸률로 다음과 같이 정의된다 [3].

$$\chi_T = \left[ \frac{2\Gamma_m}{N^2} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] \varepsilon \tag{13}$$

위 식에서  $\Gamma_m$ 은 혼합효율 (0.2)이고,  $T$ 는 온도,  $N$ 은 부력주파수로 다음과 같다 [15].

$$N(z) = \sqrt{-g / \rho_o \frac{d\rho_i}{dz}} \tag{14}$$

여기서  $g$ 는 중력가속도,  $\rho_o$ 는 해수의 평균밀도이고  $\rho_i$ 는 해수의 잠재밀도식에 현상 수온 ( $T$ )을 대입한 값이다.

F. S. Henyey 외 3명이 제안한 운동에너지 소멸율 [3]은 내부파에 의한 것으로 여기서는 내부파의 영향이 아닌 깊이에 따른 유속구배와 운동점성계수로 이루어진 운동에너지 소멸율을 적용하였다 [16].

$$\varepsilon = \frac{15}{2} \nu \left( \frac{\partial(\sqrt{u^2+v^2})}{\partial z} \right)^2 \tag{15}$$

여기서  $\nu$ 는 운동점성계수,  $u$ 는 수평방향 유속의  $x$  성분,  $v$  수평방향 유속의  $y$  성분이고 식 (10)~(15)을 간단하게 정리하면 다음과 같다.

$$A_\mu = 2(1.35a)^2 \left( \frac{15}{2} \nu \right)^{2/3} \left( \frac{\partial(\sqrt{u^2+v^2})}{\partial z} \right)^{4/3} \frac{2\Gamma_m}{N^2} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \tag{16}$$

본 논문에서 사용된 운동점성계수( $\nu$ )는  $10^{-3} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 을 가정하였다 [15]. 그림 1은 난류세기에 영향을 미치는 요소들을 나타내고 있고 이러한 인자들을 이용하여 난류세기를 구하였다 (그림 2). 수온구조와 유속구조의 기울기가 클수록, 부력주파수가 작을수록 난류세기가 커지는 것을 알 수 있다.

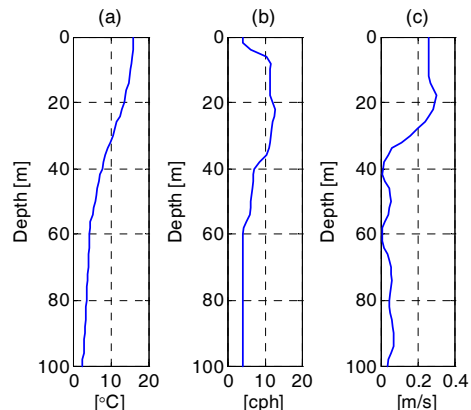


그림 1. 난류세기에 영향을 주는 해양 환경 인자 (수온구조 (a), 부력주파수구조 (b), 유속구조 (c))  
 Fig. 1. Ocean environmental factors affecting turbulence strength (temperature profile (a), buoyancy frequency profile (b), flow speed profile (c)).

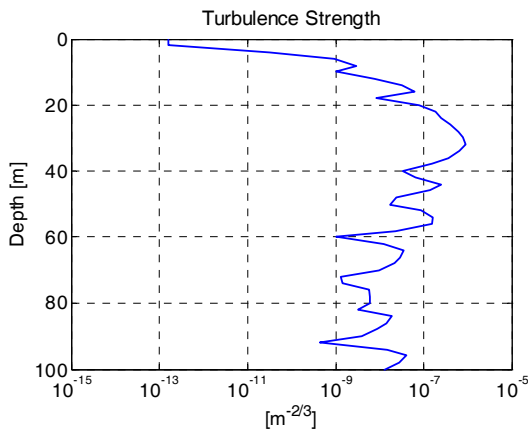


그림 2. 난류세기인자  
Fig. 2. Turbulence strength.

난류세기를 계산한 후 Bellhop 음선 모델로 경로를 추적하고 음선 좌표와 대응되는 난류세기 값을 얻는다. 그 값을 전달거리에 따라 적분하고  $0.604k^2 L_0^{5/3}$  를 곱하게 되면 식 (9)의 위상분산을 구하게 된다.

### III. 결과 및 토의

#### 3.1. 난류세기 변화에 따른 수신 신호의 위상 분산

앞 절에서 설명한 위상분산식은 일반적으로 모든 해역에 적용이 가능하나 난류세기인자를 구하기 위해서는 CTD자료와 ADCP자료가 필요하기 때문에 본 논문에서는 동해 묵호항 근처 해상 (그림 3 (a), (129.12°E, 37.32°N))에서 2008년7월 3일에 배에서 측정한 CTD (SBE 25, Sea-Bird Electronics, Inc., USA)자료와 같은 정점에서 얻은 부표 시스템 (그림 3 (b))의 ADCP (Workhorse Monitor Direct-reading 300 kHz ADCP, Teledyne RD Instruments, USA)자료를 이용하여 모의실험을 수행하였다. 정점의 최대수심은 136.4 m이고 CTD는 수심 100 m까지 1 m 간격으로 11시부터 23시까지 한 시간마다 측정되었다. 부표에 설치된 ADCP는 300 kHz의 주파수를 이용하여 수심 120 m까지 4 m 간격으로 측정되었고 기간은 5월부터 7월까지 10분마다 측정된 자료 중 7월 3일의 자료를 이용하였다. 모의 실험에서는 정점의 최대수심을 100 m로 하였고 2 km범위에서 수심 별 난류세기가 동일하다고 가정하여 정점에서 2 km떨어진 지점의 위상분산을 예측하였다. 또한 4 m 수심간격의 유속구조는 1 m 간격으로 linear interpolation을 수행하였다. 이상의 자료를 제안된 난류세기 식 (16)에 적용하였다 (그림 4). 난류세기인자는 수심 0~35 m 정도까지 가장 크게 나타나고 60 m정

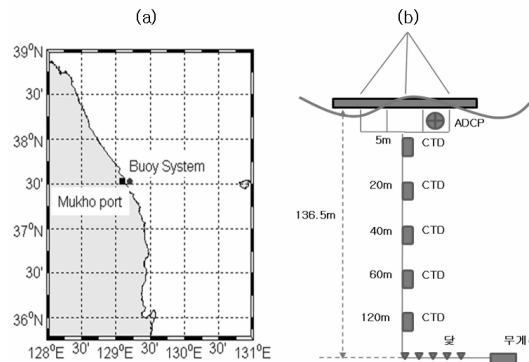


그림 3. 부표 시스템의 설치된 장소 (a)와 부표 시스템의 모식도 (b)  
Fig. 3. Location of a Buoy system (a) and its description (b).

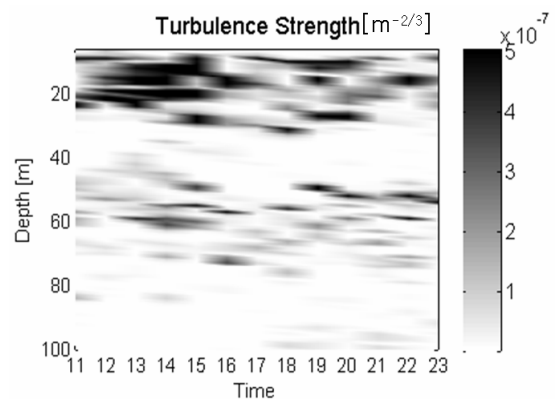


그림 4. 12시간 동안 변화하는 난류세기 인자 (2008년 7월 3일)  
Fig. 4. Temporal variation of turbulence strength for 12 hours on July 3<sup>th</sup> 2008.

도에서도 표층보다는 작지만 큰 값을 보이는데 이는 수온 구조변동과 유속구조변동이 크게 나타나는 수심이다.

난류세기를 이용하여 위상분산을 추정하기 위해 음선 모델을 수행하였다. 음선은 세가지 경우로 나누어 모델링 하였다. Case 1은 표층에 음원을 두고 접지각이 -30°인 경우, Case 2는 음원의 위치는 그대로 두고 접지각을 0°로 한 경우, Case 3은 수심 70 m에 음원을 위치시키고 접지각이 0°인 경우이다. 각각의 자세한 입력 변수를 표 1에 나타내었다. 입력변수 중 중요하게 여겨지는 수온구조와 염분구조는 시간에 따라 변화하므로 자료가 많이 표현하지 않았고 음선 경로 또한 시간에 따라 변화하므로 7월 3일 11시에 세가지 경우의 음선 경로만을 나타내었다 (그림 5). 세가지 경우로 나누어서 음선을 추적한 이유는 각각의 음선 경로가 표층과 바닥에서 반사되는 경우와, 표층을 지나지만 수면에 반사되기 전에 굴절되고 바닥에서는 반사되는 경우, 그리고 표층을 지나지 않고 굴절되고 바닥에 반사되는 경우의 위상분산을 비교하기 위해서이다.

위상분산 계산시 사용된 주파수는 10 kHz이고 0.3rad<sup>2</sup>

이하의 위상분산을 보인다 (그림 6 (실선)). Case 1의 경우 위상분산을 보면 음선의 길이가 가장 길기 때문에 위상분산 또한 가장 클 것이라 생각되지만 결과를 보면 Case 2와 비슷하게 나타나는데 이는 전체 음선의 길이보다는 전달 거리에 따른 음선이 난류세기가 큰 수심에 얼마나 더 머무느냐에 따라 달라지기 때문이다. Case 1인 경우 음선이 난류세기가 가장 큰 수심인 0~35 m에 머물 때 총 전달거리는 706.6 m, Case 2인 경우 905.4 m로 198.8 m 더 길고 따라서 위상분산 값도 Case 2가 조금 더 큰 값을 갖는다. 또한 Case 1, 2의 경우 시간에 따라 난류세기가 변동함에 따라 수신신호의 위상이 변동하는

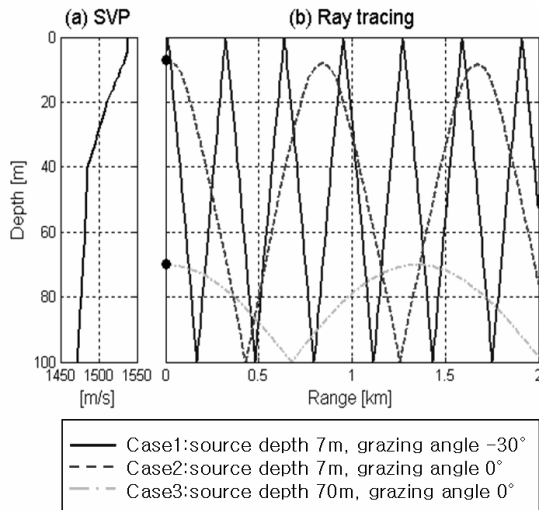


그림 5. 음속구조 (2008년 7월 3일 11시) (a), 음선 경로 (Case 1, 2, 3) (b)  
 Fig. 5. Sound velocity profile (at 11 o'clock, July 3<sup>rd</sup>, 2008) (a), the results of the ray tracing (Case 1, 2, 3) (b).

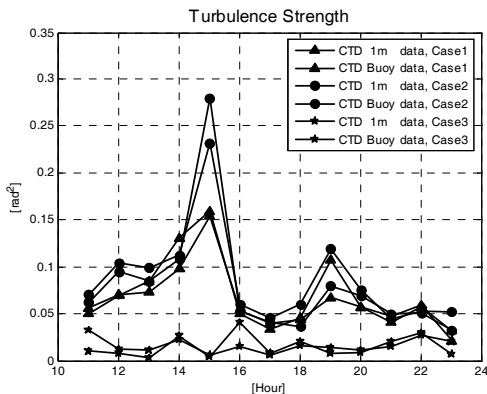


그림 6. 배에서 측정된 수심 1 m 간격의 CTD 자료를 이용하여 구한 위상분산 값 (실선)과 부표시스템에 장착된 CTD 자료를 이용하여 구한 위상분산 값 (점선) 비교 (Case 1, 2, 3) (2008년 7월 3일)  
 Fig. 6. Comparison of the phase variance calculated using CTD data from the research vessel at every 1 m depth (solid lines) and the Buoy system (broken lines) (Case 1, 2, 3) (July 3<sup>rd</sup> 2008).

것을 보이는데 15시에 위상변동이 가장 크기 때문에 난류 세기 또한 15시에 가장 크게 나타남을 알 수 있다. Case 3의 경우는 음선이 난류세기가 약한 수심 70 m 이하만을 통과하기 때문에 위상분산 또한 작게 나타나고 70 m 이하의 난류세기는 시간에 따라 변동이 작기 때문에 위상분산 역시 시간에 따른 변동이 크지 않다. 1 m 수심간격의 CTD 자료는 7월 3일의 자료만을 가지고 있으므로 좀 더 많은 자료의 분석을 위해 같은 정점의 부표 시스템에서 얻은 CTD (SBE 37, Sea-Bird Electronics, Inc., USA) 자료를 이용하여 3개월 동안의 자료를 분석하고자 한다. 하지만 미세구조 난류는 1 m 이하의 크기를 가정 하였기 때문에 CTD자료의 수심간격이 1 m 이하인 것을 사용하는 것이 적합하나 부표시스템의 CTD는 5, 20, 40, 60, 120 m에서만 측정되기 때문에 수심간격이 넓은 단점이 있다 (그림 3 (b)). 따라서 7월 3일의 수심간격이 1 m인 CTD 자료를 이용하여 구한 위상분산 결과 (그림 6 (실선))와 같은 날 같은 시간의 부표시스템에서 얻은 CTD를 이용하여 구한 위상분산 결과 (그림 6 (점선))를 비교하였다. 그 결과 위상 분산의 오차는 있지만 Case 1,2,3 모두 비슷한 양상으로 변화하였다. 따라서 부표시스템의 3개월 동안의 CTD 자료를 이용하여 위상분산 추정모델에 적용하였다. 부표 시스템의 CTD와 ADCP 자료는 5월 10일 00시부터 7월 31일 23시까지 10분 간격으로 측정되었고 이를 이용하여 난류세기를 구하였다 (그림 7). 대부분 표층에서 수심 40 m까지 크게 나타나고 때에 따라서는 60 m까지 큰 값이 가지는 경우도 있고 표층부터 100 m까지 모두 작은 값을 나타내는 경우도 있다 그리고 70 m이하로는 난류세기가 모두 작게 나타난다.

5월 10일 00시부터 7월 31일 23시까지 변화하는 난류

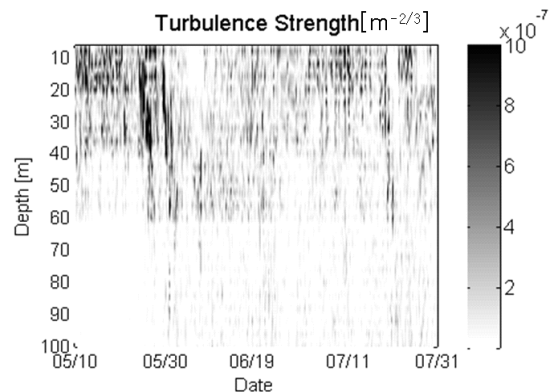


그림 7. 3개월 동안 변화하는 난류세기인자 (2008년 5월 10일부터 7월 31일까지)  
 Fig. 7. Temporal variation of turbulence strength for three months (between May 10<sup>th</sup> and July 31<sup>st</sup> 2008).

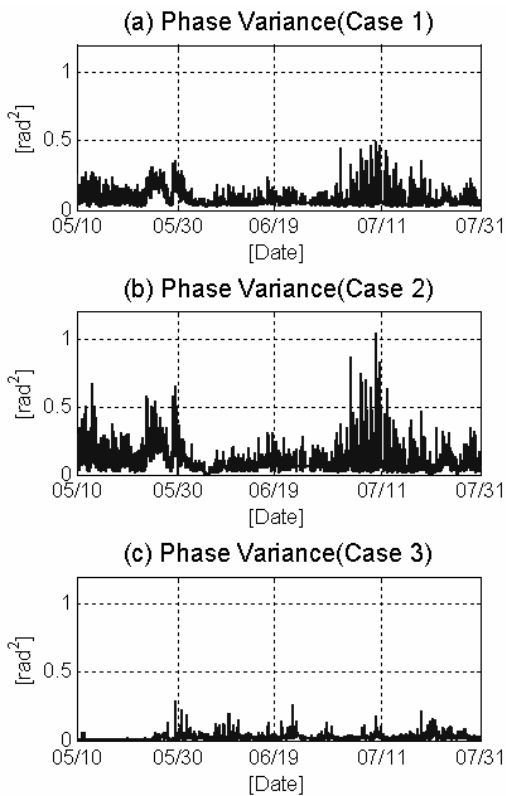


그림 8. Case 1,2,3에 대하여 3개월 동안 변화하는 위상분산 값 (2008년 5월 10일부터 7월 31일까지)  
 Fig. 8. Temporal variation of phase variance for three months (Case 1, 2, 3) (between May 10<sup>th</sup> and July 31<sup>st</sup> 2008).

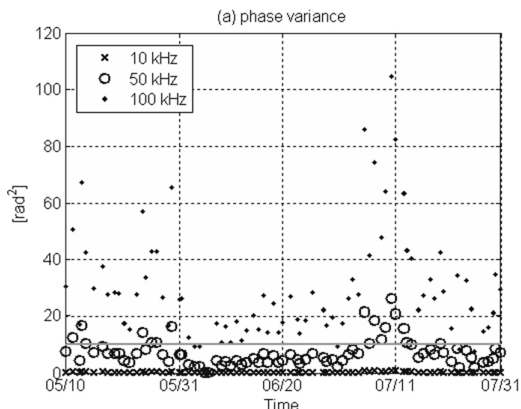


그림 9. 음원 주파수에 따른 위상분산변화  
 Fig. 9. Phase variance at different frequencies of the acoustic sources (between May 10<sup>th</sup> and July 31<sup>st</sup> 2008).

환경에서 음선 모델을 이용하여 음선 경로를 추적하고 위상분산을 구하였다 (그림 8). 음선 모델의 입력변수는 표 1과 동일하게 세가지 경우에 대해서 모델링 하였다. Case 1의 경우보다 Case 2 경우가 위상분산이 좀 더 크게 나타나고 Case 1, 2의 경우 난류세기가 큰 날에 위상분산 역시 큰 값을 나타낸다. Case 3 경우는 음선이 난류세기

가 작은 70 m 이하의 수심을 통과 하므로 위상분산 역시 모두 작은 값을 보인다. 또한 위상분산을 보면 6월의 경우에는 0.2rad<sup>2</sup>을 넘지 않는 반면에 5월과 7월에는 0.3rad<sup>2</sup>보다 큰 값을 나타내는데 이는 난류세기 인자가 6월보다 5월과 7월에 크게 나타남을 말한다. 여기서 5월과 7월에 난류세기가 큰 이유는 깊이에 따른 수온구배와 유속구배의 크기가 동시에 큰 값을 보이기 때문이다.

주파수의 영향에 따른 위상변동을 보기 위해서 임의의 주파수 10, 50, 100 kHz에서 하루 중 난류세기가 가장 큰 시간의 위상변동을 비교하였다 (그림 9). 여기서 음선의 입력변수는 위상변동이 가장 크게 나타난 Case 2의 경우만을 나타내었다. 위상분산은 주파수의 제곱에 비례하기 때문에 주파수가 높을수록 위상분산이 커지는 것을 볼 수 있다. 위상분산 값은 1보다 매우 적을 경우 ( $\Phi^2 \ll 1$ ) 소나 운용 시 큰 영향을 주지 못하고 1보다 매우 클 경우 ( $\Phi^2 \gg 1$ ) 소나 운용 시 악 영향을 주게 되는데 [6] 이를 기준으로 1보다 매우 클 때의 값을 10rad<sup>2</sup>이라 가정하면 주파수 100 kHz에서는 거의 모든 날 난류세기의 영향으로 소나 운용효율이 떨어지는 것을 예측할 수 있다.

### 3.2. 환경변수변화에 따른 난류세기

수온구조, 부력주파수구조, 유속구조는 난류세기를 구하기 위한 환경변수이다. 이러한 변수들이 난류세기에 주는 영향을 비교하기 위해서 식 (8)의  $(\partial T / \partial z)^2$ ,  $(\partial T / \partial z)^2$ ,  $(\partial(\sqrt{u^2 + v^2}) / \partial z)^{4/3}$  와 난류세기를 나타내었다 (그림 10). 수심은 16 m로 5~7월의 난류세기 분포를 확인한 결과 가장 큰 세기를 갖는 지점이다 (그림 11). 여기서 난류세기 수심 별 분포도 계산은 5~7월의 난류세기를 수심 별로 합한 후 각각 100을 곱하고 난류세기의 총합으로 나눈 결과이다.

난류세기 (그림 10 (d))에 영향을 주는 수온구조 항 (그림 10 (a))은 1보다 작은 값을 보이고 6월 5일경에 수심 16 m에서의 온도변화가 아주 미비하여 10<sup>-10</sup>까지 작아지는 것을 볼 수 있다. 부력주파수구조 항 (그림 10 (b))은 절대값의 크기가 다른 두 항 보다 크게 나타나고 수온구조 항이 클 때 작아지고 작아질 때 커지는 것을 보이는데 이는 분모에 위치한 부력주파수 (식 (6))가 밀도의 함수이고 밀도 역시 상태방정식으로 구해지는 수온의 함수이기 때문이다. 유속구조 항 (그림 10 (c))은 절대값의 크기가 1보다 작고 시간에 따른 변동폭이 다른 두 항보다 크게 나타난다.

수온구조와 유속구조가 난류세기에 미치는 영향을 한 눈에 비교하기 위해서 수온의 영향을 받는 부력주파수구

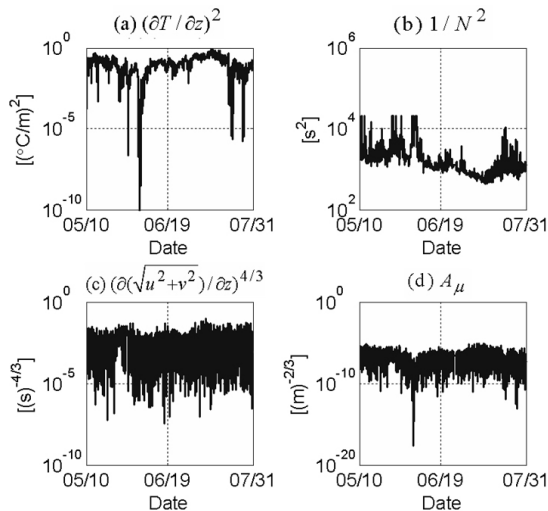


그림 10. 수심 16 m에서 시간에 따라 변화하는  $(\partial T / \partial z)^2$  (a),  $1 / N^2$  (b),  $(\partial(\sqrt{u^2+v^2}) / \partial z)^{4/3}$  (c), 난류세기인자 (d) (2008년 5월 10일부터 7월 31일까지)

Fig. 10. Temporal variation of  $(\partial T / \partial z)^2$  (a),  $1 / N^2$  (b),  $(\partial(\sqrt{u^2+v^2}) / \partial z)^{4/3}$  (c) and turbulence strength (d) at 16 m depth for three months (between May 10<sup>th</sup> and July 31<sup>st</sup> 2008).

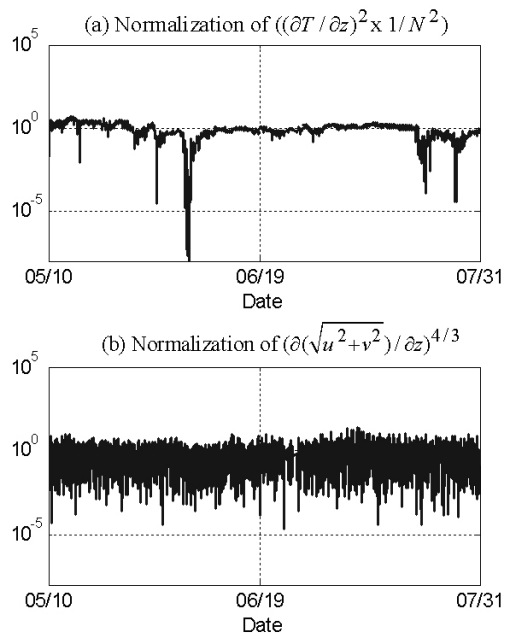


그림 12. 수심 16m에서 시간에 따라 변화하는  $(\partial T / \partial z)^2 \times 1 / N^2$  (a)와  $(\partial(\sqrt{u^2+v^2}) / \partial z)^{4/3}$  (b)를 3개월 평균값(a)평균:172, (b)평균:0.003)으로 나눈 결과

Fig. 12. Normalized temporal variation of  $(\partial T / \partial z)^2 \times 1 / N^2$  (a), and  $(\partial(\sqrt{u^2+v^2}) / \partial z)^{4/3}$  (b) by the average values (172 for (a), 0.003 for (b)) at 16m depth for three months (between May 10<sup>th</sup> and July 31<sup>st</sup> 2008).

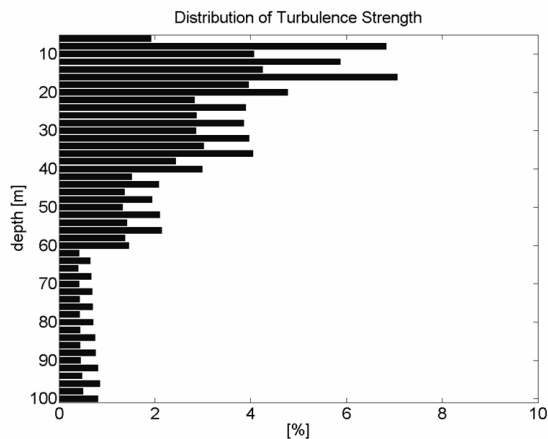


그림 11. 3개월 동안 난류세기의 수심 별 분포도 (2008년 5월 10일부터 7월31일까지)

Fig. 11. Distribution of turbulence strength with depth for three months (between May 10<sup>th</sup> and July 31<sup>st</sup> 2008). The percentages at all depths are summed to be 100%.

조 항 (그림 10 (b))을 수온구조 항 (그림 10 (a))에 곱하고 세달 동안의 평균으로 나누어서 변화량을 보았다 (그림 12 (a)). 유속구조 항 역시 세달 동안의 평균으로 나누어 변화량을 구하고 수온구조 변화량과 비교하였다 (그림 12 (b)). 수온구조 항과 부력주파수구조 항을 곱한 결과 평균은 172이고 유속구조의 평균은 0.003이다. 난류세기는 두 항의 곱과 비례하는데 이 두 개의 항 중 172배를 한 수온구조 항과 부력주파수구조 항을 곱한 결과보다 0.003배를 한 유속구조 항이 난류세기에 더 큰 영향을

미치는 것을 알 수 있다. 변화량을 보면 유속구조의 변화량은 큰 변동폭을 보이고 수온구조 항과 부력주파수구조 항의 곱의 변화량은 몇몇 일에 크게 변동하고 나머지는 1에 근사한 값을 보인다. 따라서 몇몇 일을 제외하면 난류세기의 변동에도 유속구조 변화가 더 큰 영향을 보인다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 동해 묵호항 근처 해역에서 음파전달 시 미세구조 난류로 인한 수신신호 위상분산을 예측하였다. 첫째로 CTD와 ADCP 자료를 이용하여 난류세기를 구하였는데 난류세기 계산시 내부파 영향의 운동에너지 소멸율을 유속구조의 영향의 운동에너지 소멸율로 대체하는 방법을 제안하였다. 둘째로 Bellhop 음선 모델을 위상분산식에 적용하였으며 끝으로 두 개의 과정을 결합하여 위상분산을 계산하였다. 난류세기를 계산하여 분석한 결과 전체적으로 유속구조가 수온구조보다 난류세기와 난류세기 변화에 더 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 이상의 난류세기에서 위상분산을 계산한 결과 난류세기는 표



층에 크게 분포하기 때문에 음선의 진행 경로가 표층을 통과할 경우 난류세기가 큰 시간에서 위상분산이 크게 나타나고 음선의 진행 경로가 표층을 통과하지 않을 경우 시간에 상관없이 작은 값을 보인다. 또한 난류세기는 6월 보다 5월과 7월에 크게 나타나므로 위상분산도 5월과 7월에 크게 나타나는 것을 확인하였다. 그리고 음선의 경로와 난류세기에 상관없이 위상분산은 주파수의 함수이므로 주파수가 증가할수록 위상분산이 커짐을 알 수 있었다.

향후 보완되어야 할 연구는 난류모델에서 참고문헌을 통하여 취해진 특정변수들을 실 해역 실험을 통하여 정량화 하고 위상분산식에서 얻은 결과를 실제 음파의 수신신호 위상분산과 비교하여 검증하는 것이다. 또한 본 논문의 모의 실험 결과는 거리 독립적인 해양환경을 가정하여 수행되었으므로 추후에 거리 종속적인 환경에서 음선의 경로와 난류세기인자를 각각 계산하여 위상분산을 모의할 계획이다.

### 감사의 글

본 연구는 국방과학연구소의 지원 (UD070001DD)으로 수행되었으며 이에 대해 깊이 감사 드립니다.

### 참고 문헌

1. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, Wiley, New York, pp. 155-160, 2000.
2. 박창주, "천해음파 전달에 미치는 내부파의 영향," *한양대학교 석사학위논문*, 2003.
3. F. S. Henyey, D. Rouseff, J. M. Grochocinski, S. A. Reynolds, K. L. Williams and T. E. Ewart, "Effects of internal waves and turbulence on a horizontal aperture sonar," *IEEE J. Ocean, Eng.* vol. 22, no. 2, pp. 270-280, 1997.
4. P. T. Gough, "A Synthetic Aperture Sonar System Capable of Operating at High Speed and in Turbulent Media," *IEEE J. Ocean, Eng.* vol. 11, no. 2, pp. 333-339, 1986.
5. 김영완, "PSK 고차모드 위상전송을 위한 저 잡음증폭 주파수 변환기의 위상 잡음 해석," *한국해양정보통신학회논문지* 12권, 7호, 1180-1186쪽, 2008.
6. T. Musha and T. Kikuchi, "Adaptive signal processing for reducing nearby generated flow noise," *Applied Acoustics* vol. 66, no. 10, pp. 1206 - 1217, 2005.
7. 오선태, 나정열, 오택환, 박정수, 나영남, 김영규, "한국 동해에서 토모그래피용 신호를 이용한 음파 도달시간의 시변동성," *한국음향학회지* 20권, 5호, 92-99쪽, 2001.
8. S. M. Flatte, *Sound Transmission Through a Fluctuation Ocean*, Cambridge University Press, New York, pp. 85-158, 1979.

9. R. M. Kennedy, "Phase and Amplitude Fluctuations in Propagating through a Layered Ocean," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 46, no. 3, pp. 737-745, 1969.
10. S. J. Stanic, R. R. Goodman, R. W. Meredith, and E. Kennedy, "Measurements of High-Frequency Shallow-Water Acoustic Phase Fluctuations," *IEEE J. Ocean, Eng.* vol. 25, no. 4, pp. 507-515, 2000.
11. M. H. Alford, D. W. Gerdt and C. M. Adkins, "An Ocean Refractometer: Resolving Millimeter-Scale Turbulent Density Fluctuations via the Refractive Index," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* vol. 23, no. 1, 2006.
12. J. D. Irish and W. E. Nodland, "Evaluation of metal-film temperature and velocity sensors and the stability of a self-propelled research vehicle for making measurements of ocean turbulence," *IEEE Oceans* vol. 10, no. 10, pp. 180-187, 1978.
13. T. E. Ewart, "Acoustic fluctuations in the open ocean-A measurement using a fixed refracted path," *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 60, no. 1, pp. 46-59, 1976.
14. T. F. Duda, S. M. Flatte, and D. B. Creamer, "Modeling meter-scale intensity fluctuations from ocean fine structure and microstructure," *J. Geophys. Res.* vol. 93, no. c5, pp. 5130-5142, 1988.
15. 윤재열(역), *해양역학입문*, 청문각, 서울, 34쪽, 111-115쪽, 1999.
16. N. S. Oakey, "Statistics of mixing parameters in the upper ocean during JASIN phase 2," *J. Phys. Oceanography*, vol. 15, no. 12, pp. 1662-1675, 1985.

---

### 저자 약력

---

• **김 정 훈 (Jung Hun Kim)**

2007년 2월 : 제주대학교 해양산업공학전공(이학사)  
 2007년 3월~2009년 2월 : 제주대학교 해양정보시스템학과(공학석사)  
 2009년 2월~현재 : 한국해양연구원 해양생물자원부 수산음향분야

• **복 태 훈 (Tae-Hoon Bok)**

한국음향학회지 제28권 3호 참조

• **팽 동 국 (Dong-Guk Paeng)**

한국음향학회지 제28권 3호 참조

• **심 태 보 (Taebo Shim)**

한국음향학회지 제27권 7호 참조

• **김 영 규 (Youngkyu Kim)**

한국음향학회지 제26권 2호 참조

• **박 정 수 (Joung-Soo Park)**

한국음향학회지 제23권 4호 참조