

석사학위논문

동해 묵호항 근처에서의 난류세기인자에
따른 음향수신신호의 위상변화

제주대학교 대학원

해양정보시스템공학과

김 정 훈

2009년 2월

Phase variance of acoustic signals depending on turbulence strength near the Mukho port in the East Sea of Korea

Jung Hun Kim
(Supervised by Professor Dong-Guk Paeng)

A Thesis submitted in partial fulfillment of the
requirement for the degree of Master of Engineering

2009. 2

Department of Oceanic Information and System Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

동해 묵호항 근처에서의 난류세기인자에
따른 음향수신신호의 위상변화

지도교수 팽 동 국

김 정 훈

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2009년 2월

김정훈의 공학석사 학위논문을 인준함

심사위원장 조 일 형 인

위 원 방 익 찬 인

위 원 팽 동 국 인

제주대학교 대학원

2009년 2월

동해 묵호항 근처에서의 난류세기인자에 따른 음향수신신호의

위상변화

요약문

음향수신신호의 위상은 매질에 대한 정보를 포함하고 있기 때문에 위상 변화 연구는 매질에 대한 연구와 동반 되어야 한다. 본 연구에서는 미세구조 난류에 의한 수신신호의 위상변화를 고찰하였다. 국지적으로 등방성이고 균질한 난류 환경하에서 난류세기인자를 구하였고 음파 전달경로에 따라 난류세기가 미치는 영향을 고려하여 위상변화를 계산하였다. 난류세기 계산에 필요한 CTD(Conductivity Temperature Depth)자료와 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)자료는 묵호항 근처에 설치된 부표에서 획득하였으며 음파 전달경로는 Bellhop 알고리즘을 이용한 음선 모델을 사용하였다. 결론적으로 난류세기인자는 주로 수온과 유속의 변화에 의해 결정되며 수신신호의 위상변화에 영향을 주었다. 이러한 위상변화는 소나 운용에 고려되어야 할 사항으로 여겨진다.

Phase variance of acoustic signals depending on turbulence strength near the Mukho port in the East Sea of Korea

Abstract

The phase of the acoustic signal includes the information of the characteristics of the medium of which the acoustic wave travels. Hence the research of phase variance has to be accompanied by the knowledge of the medium. In this paper, the phase variance depending on the micro-scale-turbulence of ocean was studied. The turbulence strength in the environment of the locally isotropic and homogeneous turbulence was calculated and the phase variance was computed through the turbulence strength along the ray path. The CTD (Conductivity Temperature Depth) and ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) 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 using the acquired temperature and flow speed data. As a result, the turbulence strength was dependent on the variation of temperature and flow speed, so that it affected the phase variance of the received signal. Based on this result, the phase variance affected by the turbulence strength should be considered in the sonar operating system.

목 차

요 약 문.....	i
Abstract.....	ii
목 차.....	iii
그림 목차.....	iv
표 목차.....	vii
제1장 서 론.....	1
1.1. 연구배경.....	1
1.2. 연구내용.....	2
제2장 이 론.....	3
2.1. 위상변화 모델I.....	3
2.2. 난류(Turbulence) 세기 인자.....	5
2.3. Bellhop 음선 모델.....	7
2.4. 위상변화 모델II.....	11
제3장 부표 시스템.....	13
제4장 결 과.....	15
4.1. 수온, 부력주파수, 유속이 난류세기에 미치는 영향.....	15
4.2. 하루 동안 변화하는 난류세기와 음선 경로에 따른 수신 신호 위상 변동.....	20
4.3. 한달 동안 변화하는 난류세기와 음선 경로에 따른 수신 신호 위상 변동.....	33
제5장 토 의.....	42
제6장 결 론.....	47
참 고 문 헌.....	48
감사의 글.....	51

그림 목차

Fig. 2-1. Ocean environmental factors affecting turbulence strength (temperature profile (a), buoyancy frequency profile (b), flow speed profile (c)).....	7
Fig. 2-2. Turbulence strength.....	7
Fig. 2-3. Schematic of 2-D ray geometry.....	1 0
Fig. 2-4. Ray path and its corresponding turbulence strength(sound velocity profile (a), ray (b), turbulence strength (c)).	1 1
Fig. 2-5. Turbulence strength depending on transmission range.	1 2
Fig. 3-1. Location of buoy system.	1 3
Fig. 3-2. Buoy System.....	1 4
Fig. 4-1. 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) near 16m depth during three months (between May 10 th and July 31 st 2008).	1 6
Fig. 4-2. Distribution of turbulence strength with depth during three months (between May 10 th and July 31 st 2008). The percentage at each depth is summed to be 100%......	1 7
Fig. 4-3. Normalization of 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) using average value (average value of (a): 161, average value of (b): 0.003) near 16m depth during a day (between May 10th and July 31st 2008).....	1 8
Fig. 4-4. Comparison of horizontal flow speed ($\sqrt{u^2+v^2}$) (a) and gradient of flow speed($(\partial(\sqrt{u^2+v^2})/\partial z)^{4/3}$) (b) during three months (between May 10 th and July 31 st 2008).....	1 9
Fig. 4-5. Temporal variation of temperature profile (a), buoyancy frequency profile (b) and flow speed profile (c) during a day (July 1 st 2008).	2 1

Fig. 4-6. Temporal variation of turbulence strength during a day (July 1 st 2008).	2 2
Fig. 4-7. Temporal variation of turbulence strength during a day (July 15 th 2008).	2 3
Fig. 4-8. Temporal variation of turbulence strength during a day (July 31 st 2008).	2 3
Fig. 4-9. Distribution of turbulence strength during a month (July 2008).	2 4
Fig. 4-10. 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) near 16m depth during a day (July 1 st 2008).	2 5
Fig. 4-11. Normalization of 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) using average value (average value of (a): 112.8, average value of (b): 0.0041) near 16m depth during a day (July 1 st 2008).	2 6
Fig. 4-12. The maximum normalization value of temporal variation of $(\partial T/\partial z)^2 \times 1/N^2$ (°) and $(\partial(\sqrt{u^2+v^2})/\partial z)^{4/3}$ (·) using average value every day over a month (July 2008).	2 7
Fig. 4-13. Sound velocity profile (00:10 ^분 July 1 st 2008) (a) ray tracing (case 1, 2, 3) (b).	2 9
Fig. 4-14. Phase variance (case 1, 2, 3) (July 1 st 2008).	3 0
Fig. 4-15. Phase variance (case 1, 2, 3) (July 15 th 2008).	3 1
Fig. 4-16. Phase variance (case 1, 2, 3) (July 31 st 2008).	3 1
Fig. 4-17. Phase variance due to turbulence strength (July 1 st 2008).	3 2
Fig. 4-18. Temporal variation of temperature profile (a), buoyancy frequency profile (b) and flow speed profile (c) during a month (July 2008).	3 4
Fig. 4-19. Temporal variation of turbulence strength (July 2008).	3 5
Fig. 4-20. Temporal variation of turbulence strength (May 2008).	3 5
Fig. 4-21. Temporal variation of turbulence strength (June 2008).	3 6
Fig. 4-22. 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) near 16m depth during a month (July 2008).....	3 7
Fig. 4-23. Normalization of 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) using average value (average value of (a): 145.2 average value of (b): 0.0049) near 16m depth during a month (July 2008).....	3 8
Fig. 4-24. Phase variance (case 1, 2, 3) (May 2008).....	3 9
Fig. 4-25. Phase variance (case 1, 2, 3) (June 2008).....	3 9
Fig. 4-26. Phase variance (case 1, 2, 3) (July 2008).....	4 0
Fig. 4-27. Phase variance due to turbulence strength.....	4 1
Fig. 5-1. Comparison of temperature profile between KOCD data and buoy data.....	4 3
Fig. 5-2. Comparison of phase variance (grazing angle -30°) (July 3 th 2008).....	4 4
Fig. 5-3. Comparison of phase variance (grazing angle 0°) (July 3 th 2008).....	4 4
Fig. 5-4. Averaged phase variance (July 2008).....	4 5
Fig. 5-5. Correlation between phase variance(Case 2) and $(\partial T/\partial z)^2 \times 1/N^2$ (a), correlation between phase variance(Case 2) and $(\partial(\sqrt{u^2+v^2})/\partial z)^{4/3}$ (b), correlation between phase variance(Case 2) and turbulence strength (between May 10 th and July 31 st 2008)..	4 6

표 목차

Table 4-1. Input parameters of Bellhop ray tracing program. 2 8



제1장 서론

1.1. 연구배경

해양에서 음파 전달 시 매질 경계층과 매질 내 임피던스의 차이, 표층부에 포함된 공기방울, 내부파, 난류(Turbulence) 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 왜곡을 준다[6]. 이 밖에도 해양 토모그래피 등 다양한 분야에서 음향수신신호의 위상이 고려된다[7].

본 논문에서 다루고 있는 수신신호의 위상변동은 미세구조 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 위상변동을 고려하지 않을 수 없다. 난류환경과 파동의 전달과의 관계는 1937년 Rytov에 의해서 시작 되었으며 초기에는 대기 난류환경에서 빛의 전달이나 전파의 전달에 관한 연구가 주를 이루었다. Ewing, Jardetzky and Press(1957)와 Brekhovskikh(1960)가 층을 이루는 난류 환경에서의 파동 전달에 대해 연구하기 시작하면서 해양환경에서의 연구가 시작 되었다[8]. 현재는 이론뿐만 아니라 실험을 통하여 난류세기를 직접 측정하여 음파전달과 상관성을 모의할 수 있을 정도로 발전 되었지만[9-13] 현재 까지도 해

양난류와 음파의 전달과의 상관성을 설명하기에는 어려운 점이 많이 있고 더 많은 연구가 필요하다.

1.2. 연구내용

본 논문에서는 해양에서 음파전달 시에 미세구조 난류세기가 변함에 따른 수신신호 위상변화 양상을 논의하였다. 먼저 미세구조 난류세기가 어떻게 정의되는지에 대해 살펴 보았고 음파전달 시 위상과의 상관성을 설명하였다.

수신신호의 위상변화에 영향을 주는 난류세기인자를 구하기 위해 목호항 근처에 계류 중인 부표에서 CTD(Conductivity Temperature Depth)와 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)자료를 획득하였으며 이를 이용하여 난류세기를 구하고 난류세기에 크게 영향을 주는 해양 환경 요소들과의 관계를 논의하였다. 또한 해양 환경요소의 변동이 난류세기 변동에 주는 영향을 모의하였다.

Bellhop 알고리즘을 이용한 음선 모델 이론을 설명하고 목호항 해양환경에서의 음속을 고려하여 음선 모델을 시뮬레이션 하였으며 난류세기인자를 고려하여 수신신호의 위상변화를 모의하였다.

논문의 구성은 2장에서 위상변화 모델, 난류세기, Bellhop알고리즘에 대해 기술하였고 3장에서는 해양환경변수 측정 장치에 대해 설명하였고, 4장에서 모의실험의 결과를 나타내었으며 5장의 토의를 거쳐 6장에서 본 연구의 결론을 도출하였다.

제2장 이론

2.1. 위상변화 모델I

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[14].

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

여기서 $S_u(K; z(x_s))$ 는 등방성이면서 국지적으로 균질한 미세구조(1m 이하) 난류

환경에서의 3차원 굴절지수 스펙트럼, $K = 2\pi\nu^{-3/4}\varepsilon^{1/4}$ 는 점성차단 파수, z 는 수심, ν 는 운동점성계수, ε 는 운동에너지 소멸율이다. $S_u(K; z(x_s))$ 다음과 같이 정의되었다[15].

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

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.

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

여기서 $k_B = (\varepsilon/\nu\kappa^2)^{1/4}$, κ 는 해수의 열확산성, q 는 상수로서 3.7을 사용하였다 [15]. 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 정의 되었다.

$$\begin{aligned} I &= \int_0^\infty K^3 (K^2 + k_t^2)^{-17/6} R_B(K) dK \\ &= \frac{1}{2} k_t^{-5/3} \psi\left(2, \frac{1}{6}, q(k_t/k_B)^2\right), k_B \square k_t \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 ψ 는 합류 초기하함수(Confluent hypergeometric function)[16, eq.(13.5.10)]이

다. 식(8)을 식(7)에 대입하면 최종적으로 난류에 의한 수신신호의 위상변동 분산 식을 얻을 수 있다.

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

식(9)에서 음향수신신호의 위상분산을 결정짓는 인자는 난류의 세기를 나타내는 A_μ 의 특성이라 할 수 있다.

2.2. 난류(Turbulence) 세기 인자

난류세기를 나타내는 A_μ 는 굴절지수 변동의 구조상수(Structure constant)로서 다음과 같이 정의되었다[14].

$$A_\mu = 2\varepsilon^{-1/3} \chi_\mu \quad (13)$$

$$\varepsilon = \frac{15}{2} \nu \left(\frac{\partial(\sqrt{u^2 + v^2})}{\partial z} \right)^2 \quad (14)$$

$$\chi_\mu = (1.35a)^2 \chi_T \quad (15)$$

$$\chi_T = \left[\frac{2\Gamma_m}{N^2} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] \varepsilon. \quad (16)$$

$$c^{-1} \frac{\partial c}{\partial z} = a \frac{\partial T}{\partial z} + b \frac{\partial S}{\partial z}. \quad (17)$$

$$N(z) = \sqrt{g / \rho_o \left| \frac{d\rho}{dz} \right|} \quad (18)$$

여기서 ε 는 운동에너지 소멸율, χ_μ 는 굴절지수 변동의 소멸율, ν 는 운동점성계수, u 는 수평방향 유속의 x성분, v 수평방향 유속의 y성분, z 는 수심, a 는 온도계수 χ_T 는 온도 소멸률, Γ_m 는 혼합효율(0.2), N 은 부력주파수, T 는 온도, c 는 음속, b 는 염분계수, S 는 염분, g 는 중력가속도, ρ_o 는 해수의 평균밀도, ρ 는 해수밀도를 나타낸다 [3][17]. 식(13)~(18)을 간단하게 정리하면 다음과 같다.

$$A_\mu = 2(1.35a)^2 \left(\frac{15}{2} \nu \right)^{2/3} \left(\frac{\partial(\sqrt{u^2+v^2})}{\partial z} \right)^{4/3} \frac{2\Gamma_m}{N^2} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \quad (19)$$

난류세기를 계산하기 위해서는 운동점성계수(ν)를 측정해야 하지만 본 논문에서는 $10^{-3} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 를 사용하였다[18]. 그림2-1은 난류세기에 영향을 미치는 요소들을 나타내고 있고 이러한 인자들을 이용하여 난류세기를 구하였다(그림2-2). 수온구조와 유속구조의 기울기가 클수록, 부력주파수가 작을수록 난류세기가 커지는 것을 알 수 있다.

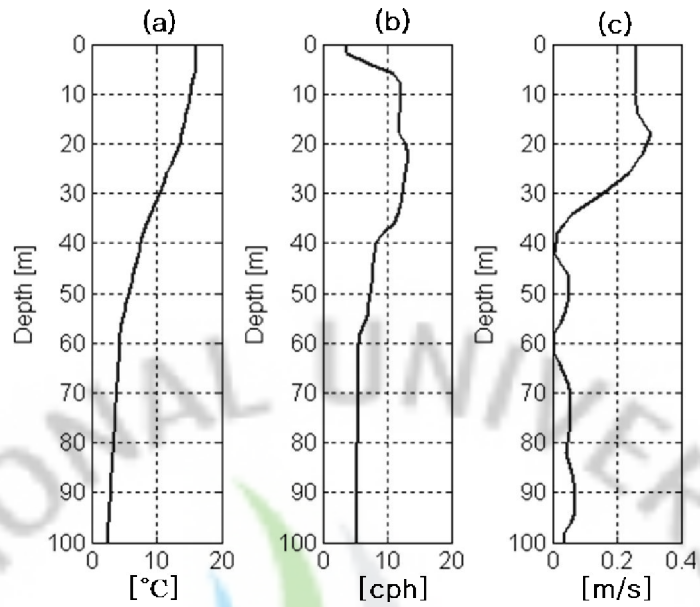


Fig. 2-1. Ocean environmental factors affecting turbulence strength (temperature profile (a), buoyancy frequency profile (b), flow speed profile (c)).

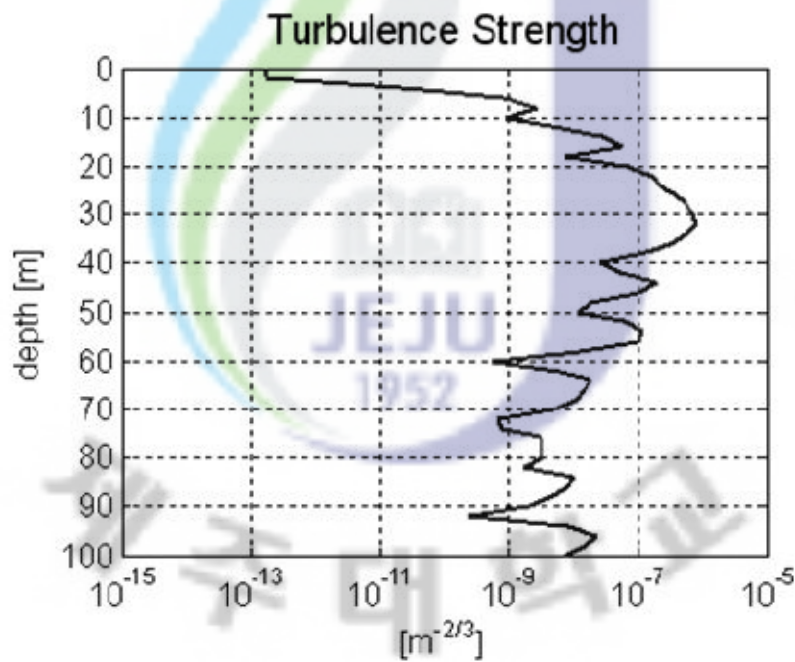


Fig. 2-2. Turbulence strength.

2.3. Bellhop 음선 모델

난류 세기를 음향 모델에 적용하기 위하여 Bellhop 음선 모델을 사용하였다

[19]. 음선 모델은 1960년대 초부터 수중음향에 사용되기 시작했으며 빠른 계산으로 음선의 경로를 예측할 수 있는 장점이 있다. Bellhop 음선 이론은 파동 방정식으로부터 유도된다. 일반적인 파동 방정식은 식(20)과 같다.

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (20)$$

여기서 p 는 음압, c 는 음속, t 는 시간이다. 음파 방정식의 일반해(식(21))를 식(20)에 대입하면 시간에 독립적인 헬름홀츠(Helmholtz) 방정식을 구할 수 있다(식(22)).

$$p = \psi(x, y, z)e^{i\omega t} \quad (21)$$

$$\nabla^2 \psi + \frac{\omega^2}{c^2} \psi = 0 \quad (22)$$

음선 방정식을 얻기 위해서 헬름홀츠 방정식의 해를 식(23)라 하고 식(22)에 대입하게 되면 아이코날(Eikonal) 방정식을 얻을 수 있다(식(24)).

$$\psi(x) = e^{i\omega\tau(x)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_j(x)}{(i\omega)^j} \quad (23)$$

$$|\nabla\tau|^2 = \frac{1}{c^2(x)} \quad (24)$$

여기서 τ 는 음파의 파면이고 $\nabla\tau$ 는 음선의 진행방향이다. 아이코날 방정식을 이용하기 위해서는 다음의 세 가지 조건을 만족시켜야 한다(Boyles, 1984). 첫째, 음선의 방향이 한 파장의 거리 내에서 크게 변하지 않아야 한다. 둘째, 굴절률이 한 파장의 거리 내에서 크게 변하지 않아야 한다. 셋째, 한 파장의 거리 내에서 A 의 변화가 작아야 한다. 이상의 세 조건을 만족하는 아이코날 방정식에서 x 을

임의의 음선 벡터, s 를 음선의 길이로 정의할 때, $d\mathbf{x}/ds$ 는 파면에 대한 단위 법선으로 다음과 같이 정의 된다.

$$\frac{d\mathbf{x}}{ds} = c\nabla\tau \quad (25)$$

여기서 τ 을 제거하고 오직 c 에 대한 함수를 만들기 위해 식(25)을 s 로 미분하면 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{ds}\left(\frac{1}{c}\frac{d\mathbf{x}}{ds}\right) = -\frac{1}{c^2}(\nabla c) \quad (26)$$

원통형좌표(r, z)에서의 식(26)의 음선 방정식을 1차 미분 방정식으로 나타내었다

$$\frac{dr}{ds} = c\xi(s), \quad \frac{d\xi}{ds} = -\frac{1}{c^2}\frac{dc}{dr} \quad (27)$$

$$\frac{dz}{ds} = c\zeta(s), \quad \frac{d\zeta}{ds} = -\frac{1}{c^2}\frac{dc}{dz} \quad (28)$$

여기서 r 은 수평거리 z 는 수심, $c\xi(s)$ 와 $c\zeta(s)$ 는 접선벡터이다. 그림2-3과 같이 음선의 초기지점을 r_s, z_s 라 하고 초기 접지각을 θ 라 하면 다음을 구할 수 있다.

$$r = r_s, \quad \xi = \frac{\cos\theta}{c(0)} \quad (29)$$

$$z = z_s, \quad \zeta = \frac{\sin\theta}{c(0)} \quad (30)$$

여기서 식(29)와 식(30)의 두 번째 식이 Snell의 법칙이고 ξ 와 ζ 각각은 음선 하나에 대해서 일정한 값을 갖는다. 이 성질을 이용하여 음선 추적을 할 수 있다.

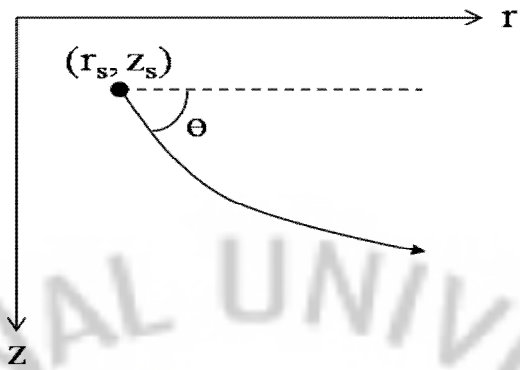


Fig. 2-3. Schematic of 2-D ray geometry



2.4. 위상변화 모델II

Bellhop 음선 모델로 경로를 구하고 그에 해당하는 난류세기 값을 내삽법을 이용하여 구한다(그림2-4). 그 후 음선 경로에 따라 적분하고 $0.604k^2L_0^{5/3}$ 를 곱하게 되면 식(1)의 위상변화 분산을 구하게 된다. 그림2-5는 전달경로에 따른 난류세기를 막대 그래프로 나타낸 것이다. 막대의 면적을 모두 합하면 적분 값을 얻는다.

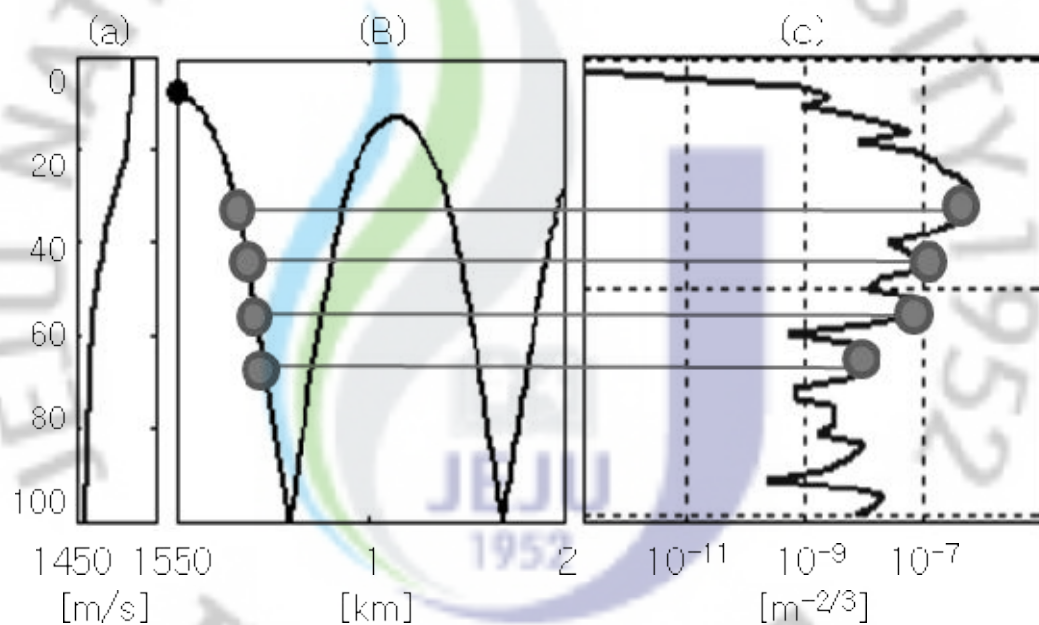


Fig. 2-4. Ray path and its corresponding turbulence strength(sound velocity profile (a), ray (b), turbulence strength (c)).

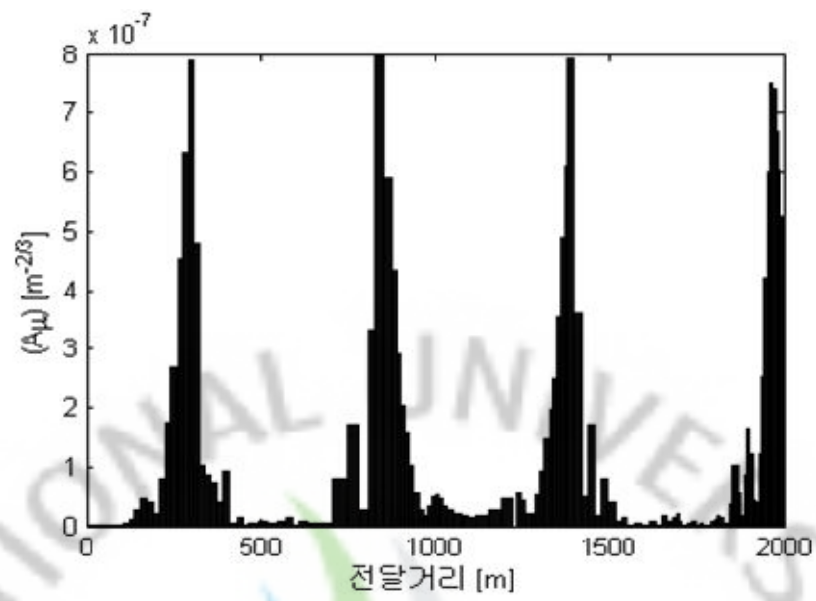


Fig. 2-5. Turbulence strength depending on transmission range.



제3장 부표 시스템

난류세기 계산에 필요한 ADCP(Workhorse Monitor Direct-reading 300kHz ADCP, Teledyne RD Instruments, USA)의 수평방향 유속 자료와 CTD(SBE 37-IM MicroCAT, Sea-Bird Electronics, Inc., USA)자료는 2008년 5월 10일부터 7월 31일까지 10분 간격으로 최대수심 136.5m인 동해 묵호항 근처 해상(129.12° E, 37.32° N)에 설치된 부표에서 획득되었다(그림3-1). ADCP는 부표에 고정되어 있고 기계적 장치를 이용하여 부표가 흔들려도 음향센서 헤더 방향이 한곳을 지향하도록 설계되었으며 300kHz의 주파수를 이용하여 수심 120m까지 4m간격으로 유속을 측정하였다. CTD는 수심의 5, 20, 40, 60, 120m에 고정되도록 설계되었으며(그림3-2) 전기 전도도와, 온도, 압력이 측정된다.

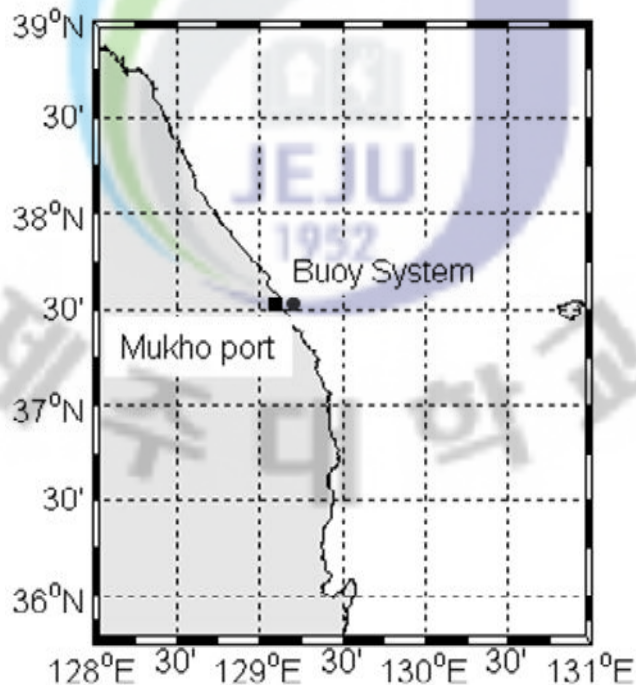


Fig. 3-1. Location of buoy system.

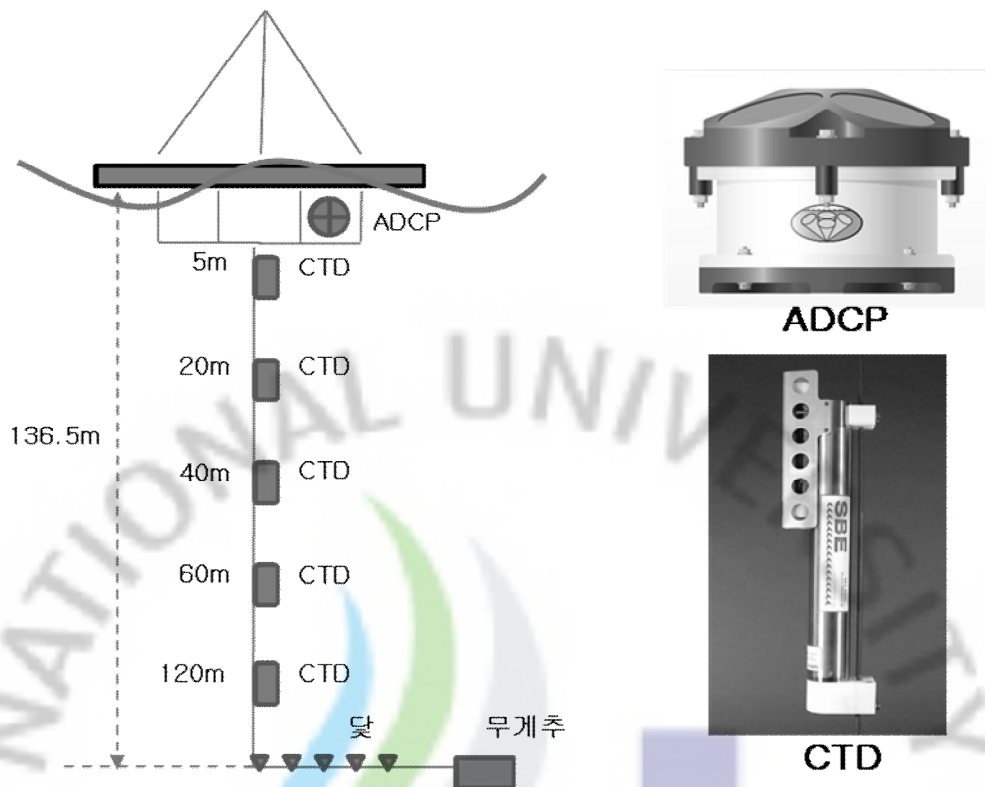
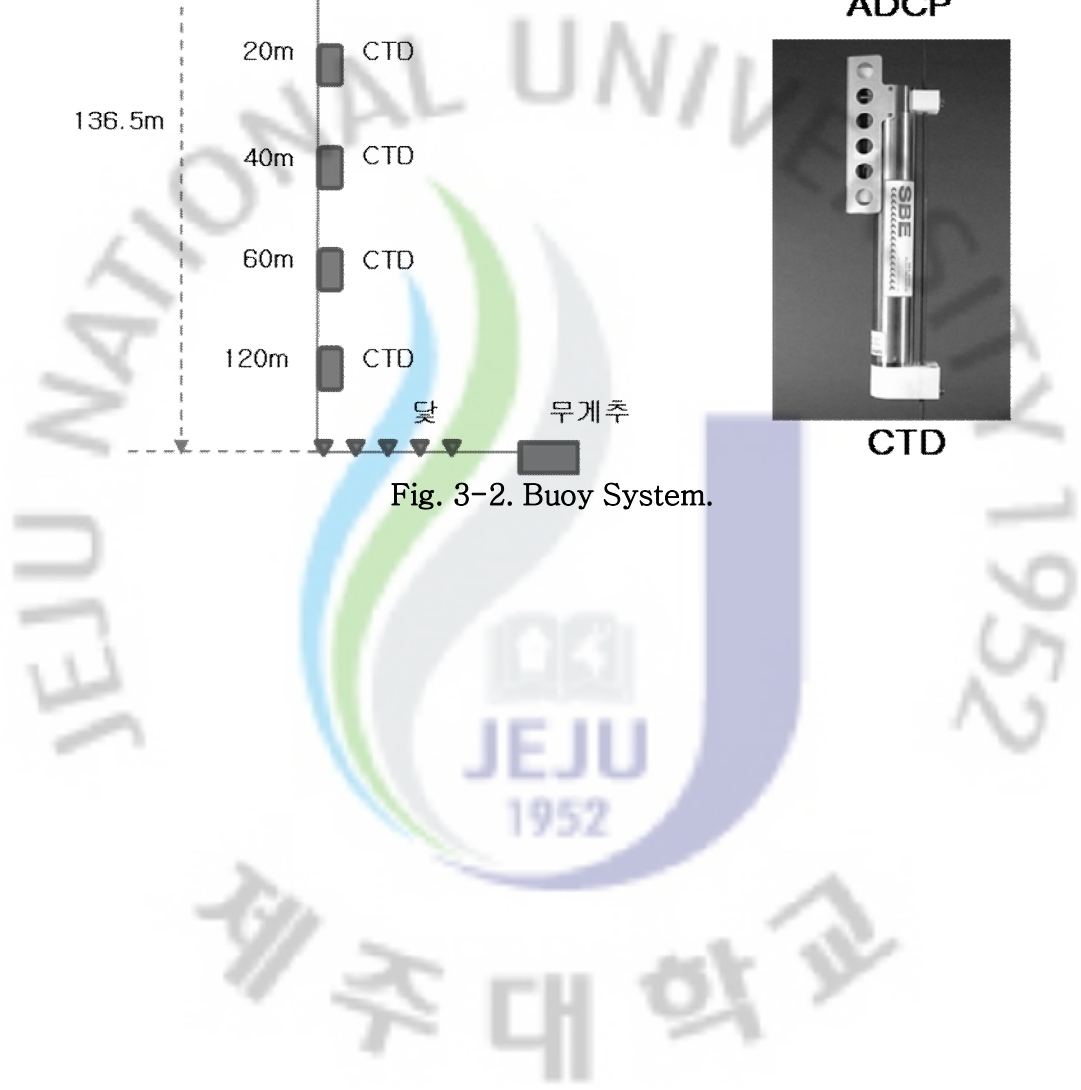


Fig. 3-2. Buoy System.



제4장 결 과

4.1. 수온, 부력주파수, 유속이 난류세기에 미치는 영향

수온구조, 부력주파수구조, 유속구조는 난류세기를 구하기 위한 환경변수이다. 이러한 변수들이 난류세기에 주는 영향을 비교하기 위해서 식(19)의 $(\partial T/\partial z)^2$, $1/N^2$, $(\partial(\sqrt{u^2+v^2})/\partial z)^{4/3}$ 와 난류세기를 나타내었다(그림4-1). 수심은 16m로 5~7월의 난류세기 분포를 확인한 결과 가장 큰 세기를 갖는 지점이다(그림4-2). 여기서 난류세기 수심 별 분포도 계산은 5~7월의 난류세기를 수심 별로 합한 후 각각 100을 곱하고 난류세기의 총합으로 나눈 결과이다.

난류세기(그림4-1(d))에 영향을 주는 수온구조 항(그림4-1(a))은 1보다 작은 값을 보이고 6월 5일경에 수심 16m에서의 온도변화가 아주 미비하여 10^{-10} 까지 작아지는 것을 볼 수 있다. 부력주파수구조 항(그림4-1(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(18))가 밀도의 함수이고 밀도 역시 상태방정식으로 구해지는 수온의 함수이기 때문이다. 유속구조 항(그림4-1(c))은 절대값의 크기가 1보다 작고 시간에 따른 변동폭이 다른 두 항보다 크게 나타난다.

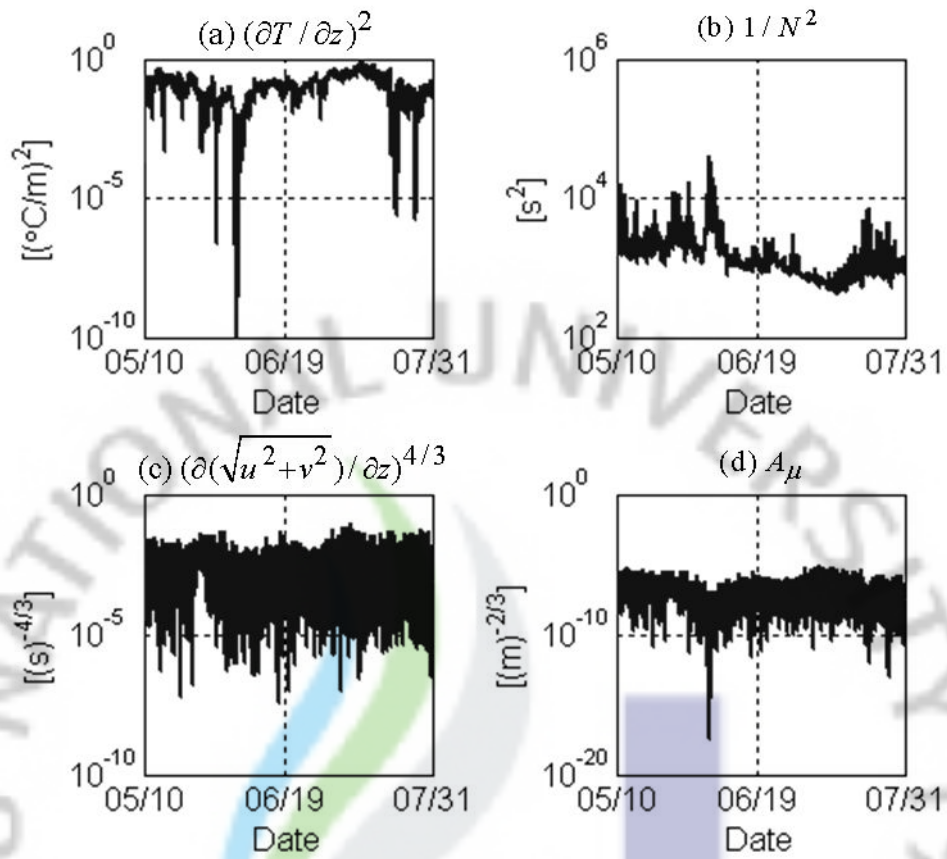


Fig. 4-1. Temporal variation of $(\partial T / \partial z)^2$ (a), $1/N^2$ (b), $(\partial(\sqrt{u^2+v^2})/\partial z)^{4/3}$ (c) and turbulence strength (d) near 16m depth during three months (between May 10th and July 31st 2008).

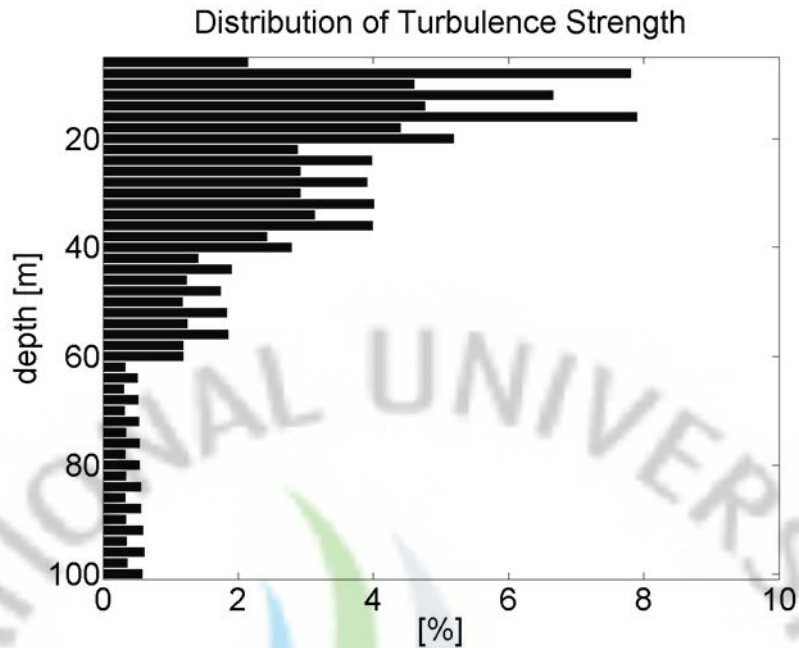


Fig. 4-2. Distribution of turbulence strength with depth during three months (between May 10th and July 31st 2008). The percentage at each depth is summed to be 100%.

수온구조와 유속구조가 난류세기에 미치는 영향을 한 눈에 비교하기 위해서 수온의 영향을 받는 부력주파수구조 향(그림4-1(b))을 수온구조 향(그림4-1(a))에 곱하고 세달 동안의 평균으로 나누어서 변화량을 보았다(그림4-3(a)). 유속구조 향 역시 세달 동안의 평균으로 나누어 변화량을 구하고 수온구조 변화량과 비교하였다(그림4-3(b)). 수온구조 향과 부력주파수구조 향을 곱한 결과 평균은 161이고 유속구조의 평균은 0.003이다. 난류세기는 두 향의 곱과 비례하는데 이 두 개의 향 중 161배를 한 수온구조 향과 부력주파수구조 향을 곱한 결과보다 0.003배를 한 유속구조 향이 난류세기에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 변화량을 보면 유속구조의 변화량은 큰 변동폭을 보이고 수온구조 향과 부력주파수구조 향의 곱의 변화량은 몇몇 일에 크게 변동하고 나머지는 1에 근사한 값을 보인다. 따라서 몇몇 일을 제외하면 난류세기의 변동에도 유속구조 변화가 더 큰 영향을 보인다.

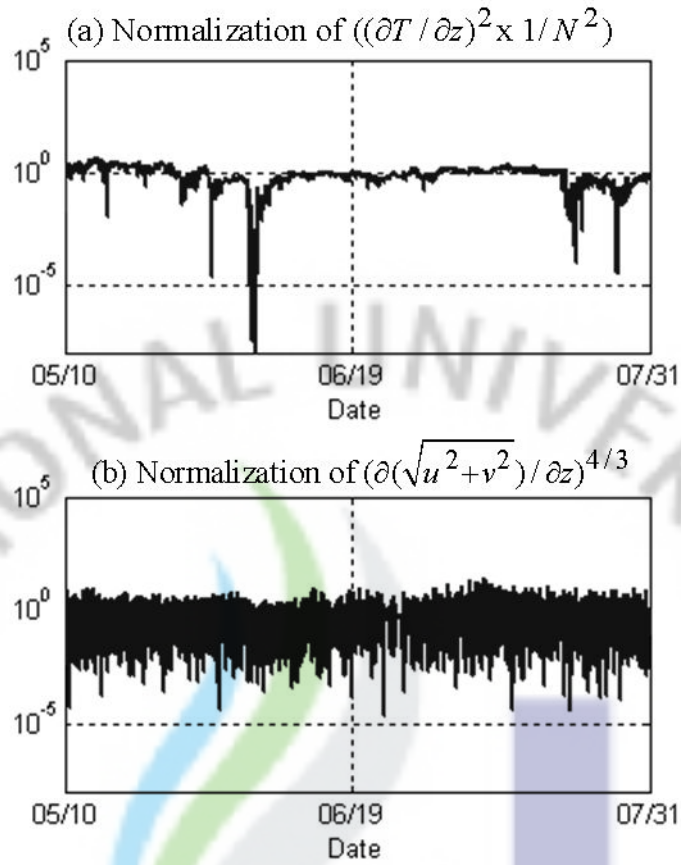


Fig. 4-3. Normalization of temporal variation of $(\partial T / \partial z)^2 \times 1 / N^2$ (a), and $(\partial(\sqrt{u^2 + v^2}) / \partial z)^{4/3}$ (b) using average value (average value of (a): 161, average value of (b): 0.003) near 16m depth during a day (between May 10th and July 31st 2008).

여기서 수평방향 유속성분($\sqrt{u^2 + v^2}$)만을 분석해 보면 5월 말경에 1m/s로 가장 큰 값을 나타내고 있지만(그림4-4(a)) 난류세기에 적용되는 깊이에 따른 유속 구배는 7월 초가 더 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다(그림4-4(b)).

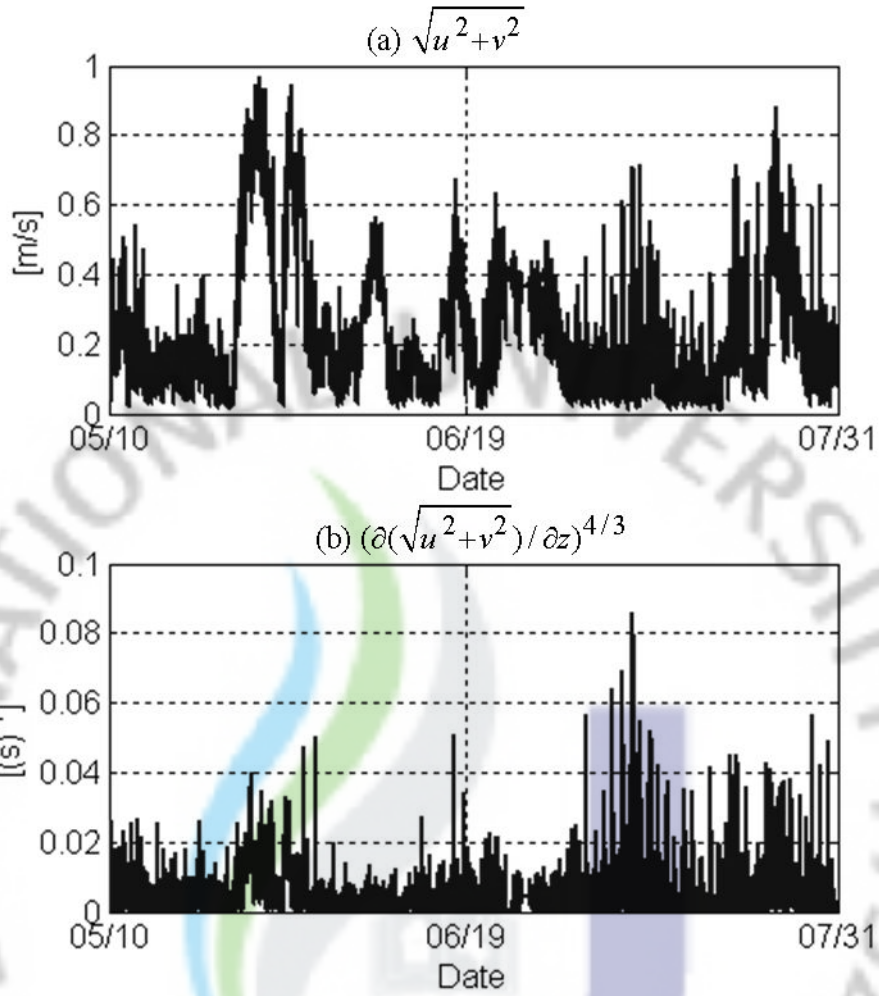


Fig. 4-4. Comparison of horizontal flow speed ($\sqrt{u^2+v^2}$) (a) and gradient of flow speed $(\partial(\sqrt{u^2+v^2})/\partial z)^{4/3}$ (b) during three months (between May 10th and July 31st 2008).

4.2. 하루 동안 변화하는 난류세기와 음선 경로에 따른 수신

신호 위상 변동

앞 절에서 살펴 본 난류세기에 영향을 주는 요소를 토대로 하루 동안 난류세기의 변화와 음선 경로에 따른 음파수신신호의 위상변동을 살펴 보았다. 난류세기에 영향을 미치는 수온, 부력주파수, 유속구조의 2008년 7월 1일 하루 동안 변화를 보면(그림4-5) 수온구조와 부력주파수는 표층에서 크게 나타남을 알 수 있고 시간에 따라 변화하는 것을 알 수 있다. 유속구조는 수온구조와 부력주파수가 표층에서 크게 나타나는 것과 달리 전 층에서 변동이 나타난다.

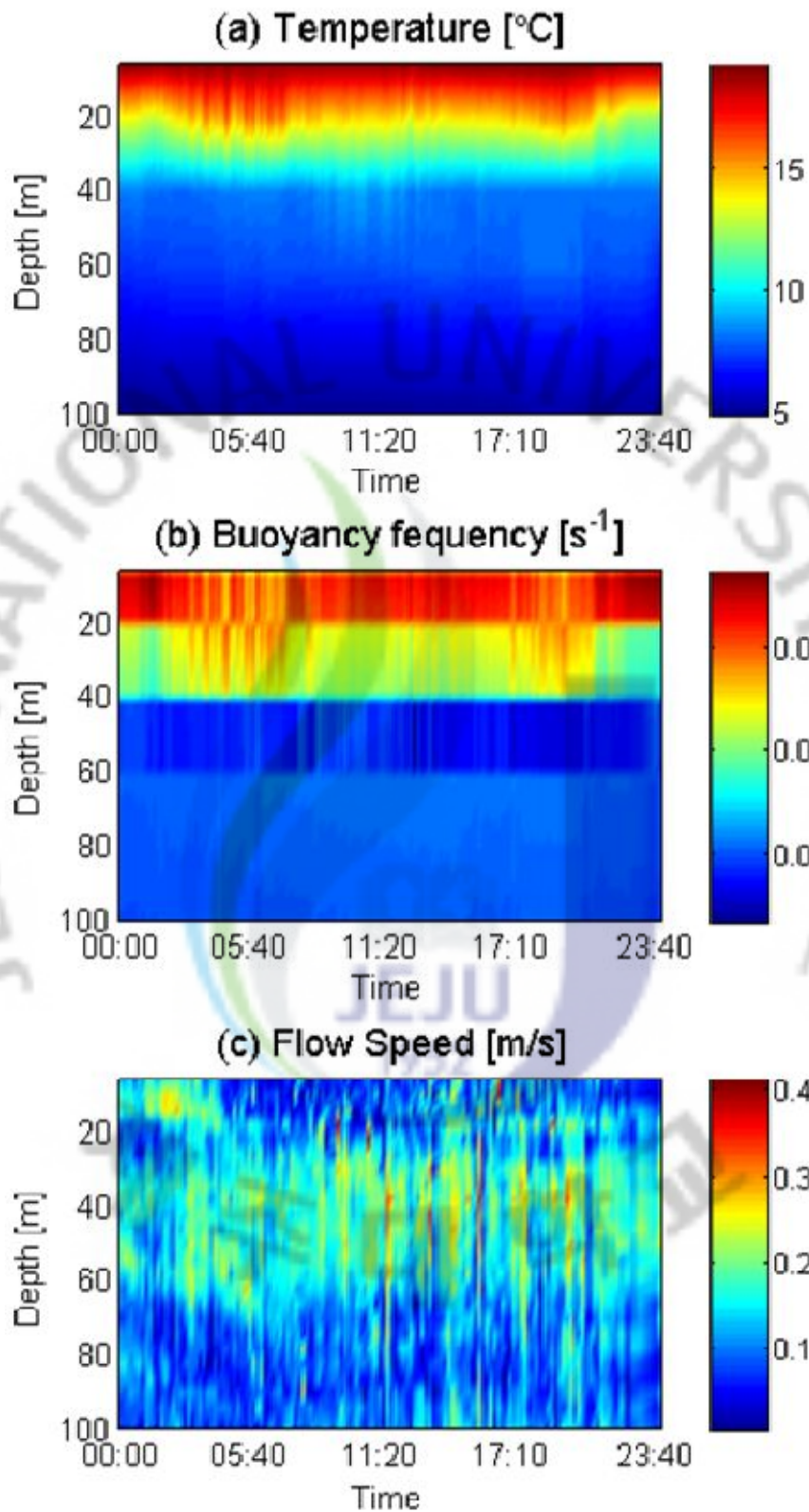


Fig. 4-5. Temporal variation of temperature profile (a), buoyancy frequency profile (b) and flow speed profile (c) during a day (July 1st 2008).

이상의 수온구조, 부력주파수, 유속을 이용하여 난류세기를 구하였다(그림4-6). 수온구조의 변동이 큰 표층에서 난류세기가 크게 나타나고 시간에 따라 변화한다.

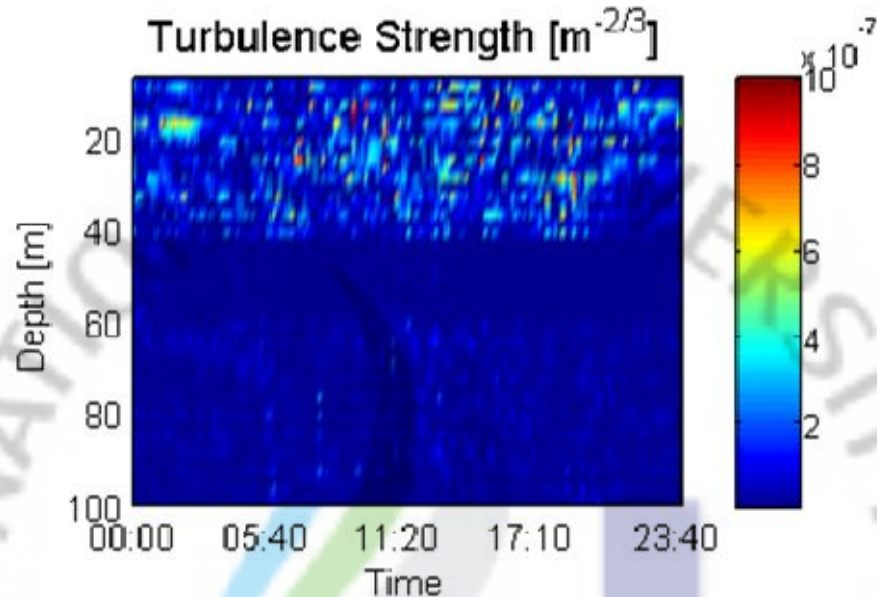


Fig. 4-6. Temporal variation of turbulence strength during a day (July 1st 2008).

7월 15일과 31일의 난류세기를 계산한 결과도 표층에서 세기가 크고 시간에 따라 변화하는 것을 보았다(그림4-7, 8). 그러나 수심 별 난류세기에서 차이를 보였는데 예를 들어 50m 난류세기 평균을 비교하면 7월 1일은 $4.74 \times 10^{-9} \text{ m}^{-2/3}$, 15일은 $3.38 \times 10^{-8} \text{ m}^{-2/3}$, 31일은 $3.4 \times 10^{-8} \text{ m}^{-2/3}$ 로 7월1일이 7월 15일과 31일에 비해 10배 정도 더 작게 나타난다. 5월부터 7월까지의 난류세기를 계산해보면 모든 날 표층에서 세기가 큰 것을 확인하였고 수심 별, 시간 별로 하루 동안 변화를 보였다.

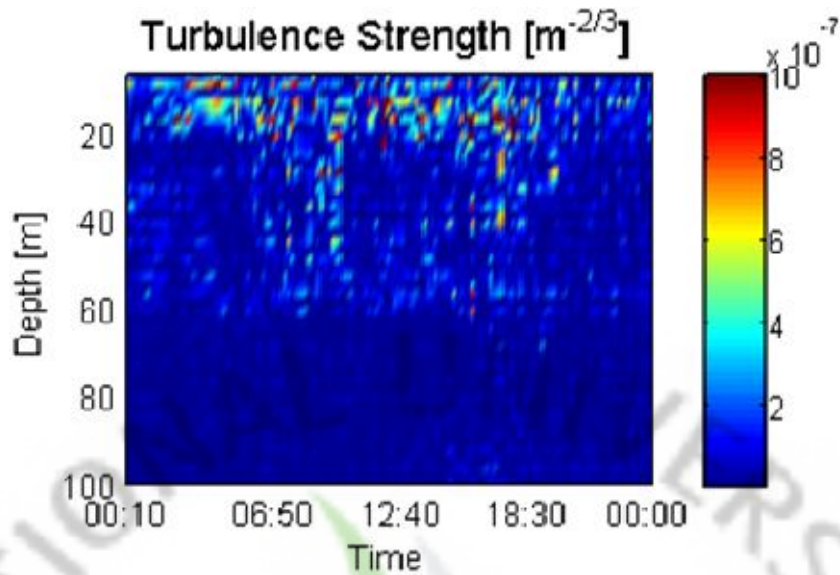


Fig. 4-7. Temporal variation of turbulence strength during a day (July 15th 2008).

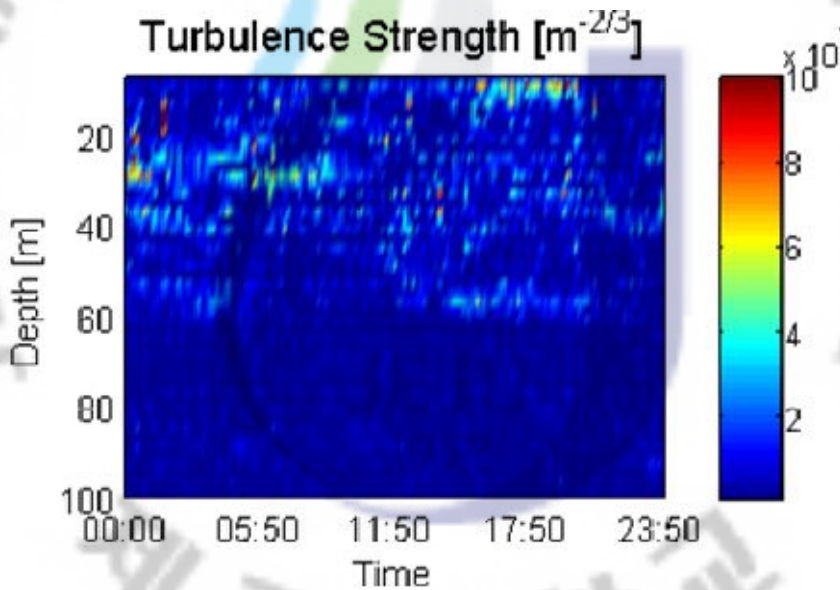


Fig. 4-8. Temporal variation of turbulence strength during a day (July 31st 2008).

하루 동안 변화하는 난류세기에 영향을 미치는 요소를 알아보기 위해 수온구조, 부력주파수구조, 유속구조의 변화량을 비교하였다. 7월 한달 동안 난류세기의 수심 별 분포도(그림4-9)를 보면 5, 6, 7월의 난류세기를 수심 별로 모두 합하여 계산한 결과(그림4-4)와 같이 16m에서 가장 큰 값을 보이므로 난류세기가 가장 크게 분포하는 수심 16m에서 각각을 비교하였다.

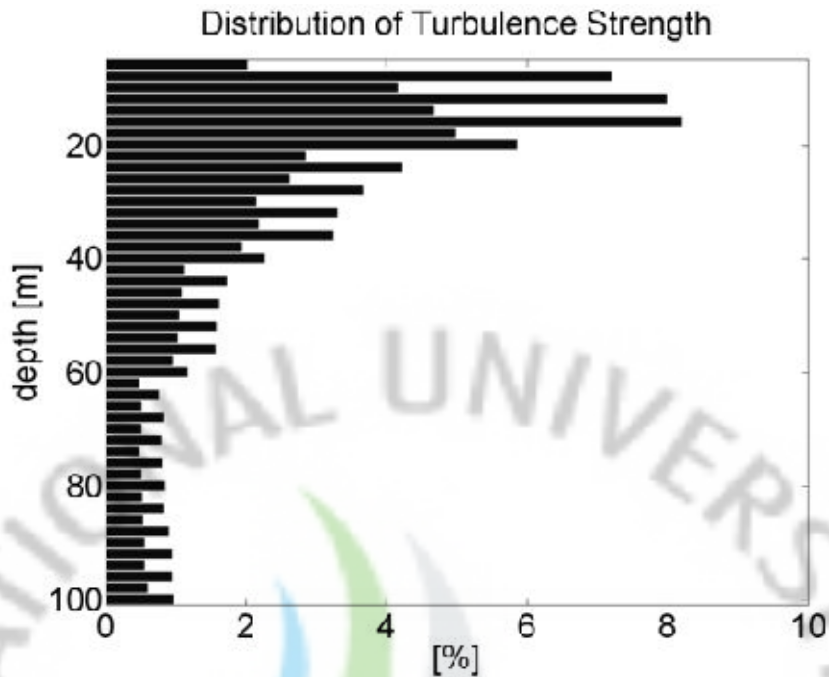


Fig. 4-9. Distribution of turbulence strength during a month (July 2008).

또한 각각의 영향을 쉽게 파악하기 위해서 식(19)의 $(\partial T/\partial z)^2$, $1/N^2$, $(\partial u/\partial z)^{4/3}$ 와 난류세기를 따로 나타내었다(그림4-10(a), (b), (c), (d)). 2008년 7월 1일 하루 동안 수온구조 항(그림4-10(a))은 0.03과 0.2사이에서 변동하고 부력주파수 항(그림4-10(b))과 서로 반대 양상을 보인다. 유속구조 항은 다른 두 항보다 변동이 크기 때문에 난류세기(그림4-10(d))에 크게 영향을 미쳐 유속구조 항과 난류세기가 비슷한 양상으로 변화하고 있다. 4.1절의 결과(그림4-1)와 비교했을 때 수온구조의 변동이 더 작게 나타나 난류세기 변화에 큰 영향을 주지 못하는데 이는 하루 동안에 수온구조의 변화가 크지 않기 때문이라고 생각된다.

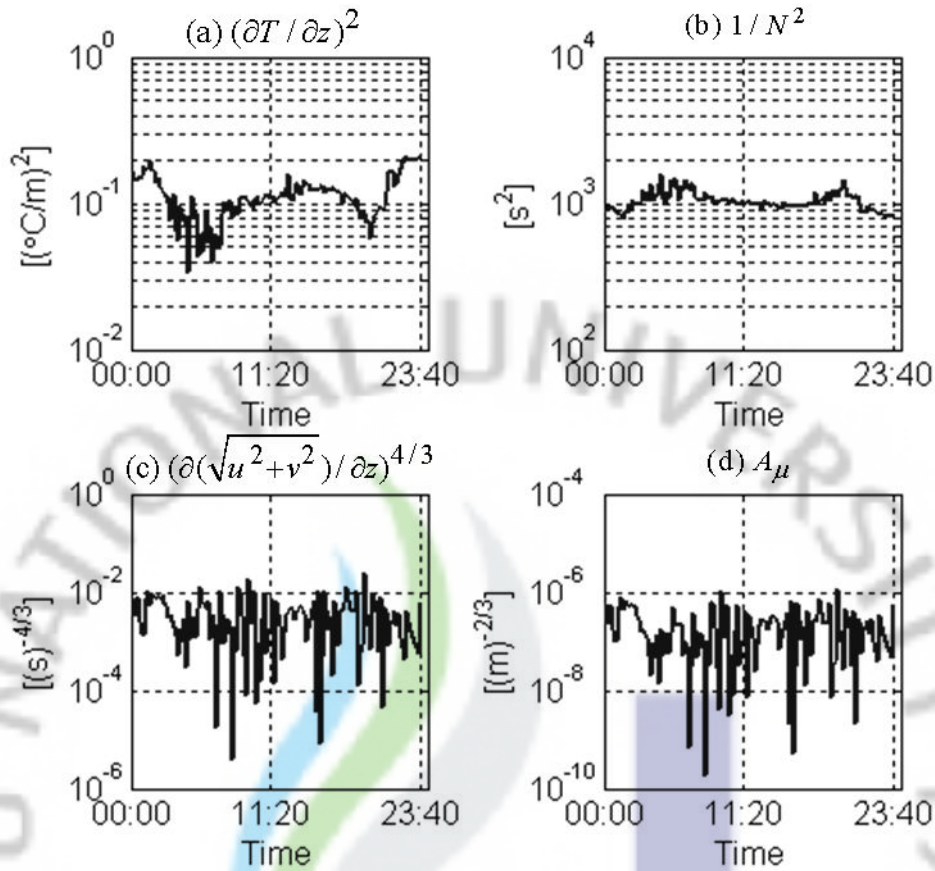


Fig. 4-10. Temporal variation of $(\partial T/\partial z)^2$ (a), $1/N^2$ (b), $(\partial(\sqrt{u^2+v^2})/\partial z)^{4/3}$ (c) and turbulence strength (d) near 16m depth during a day (July 1st 2008).

4.1절에서 언급한 것처럼 수온구조 항(그림4-10(a))과 부력주파수구조 항(그림4-10(b))은 모두 수온의 함수이므로 수온구조의 영향을 보기 위해서 각각을 곱하고 하루 동안의 평균으로 나누어서 변화량을 보았다(그림4-11(a)). 유속구조 항 역시 하루 동안의 평균으로 나누어 변화량을 구하고 수온구조 변화량과 비교하였다(그림4-11(b)). 수온구조 항과 부력주파수구조 항의 곱의 평균은 112.8이고 유속구조의 평균은 0.0041으로 112.8배와 0.0041배를 비교하면 유속구조의 영향이 난류세기에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 변화량 또한 유속구조 항의 변화량이 수온구조 항과 부력주파수구조 항을 곱한 결과의 변화량 보다 크게 나타나 난류세기 변화에 큰 영향을 미친다. 위와 같은 방법으로 2008년 7월 1일부터 31일까지

지 수온구조와 유속의 하루 동안 변화량을 계산하였고 하루 중 난류세기가 가장 큰 시간에서 각각의 값을 취하였다(그림4-12). 2008년 7월 20일을 제외하고 모든 날 수온구조 항과 부력주파수구조 항의 곱의 변화율은 1에 근사한 값을 보이는 반면 유속구조 항의 변화율은 더 큰 값을 보이고 있다. 5~6월 동안 하루하루를 계산하여도 같은 결과를 얻었고 이는 하루 동안 난류세기가 변하는데 있어서 유속구조의 변화가 큰 영향을 미친다는 것이다.

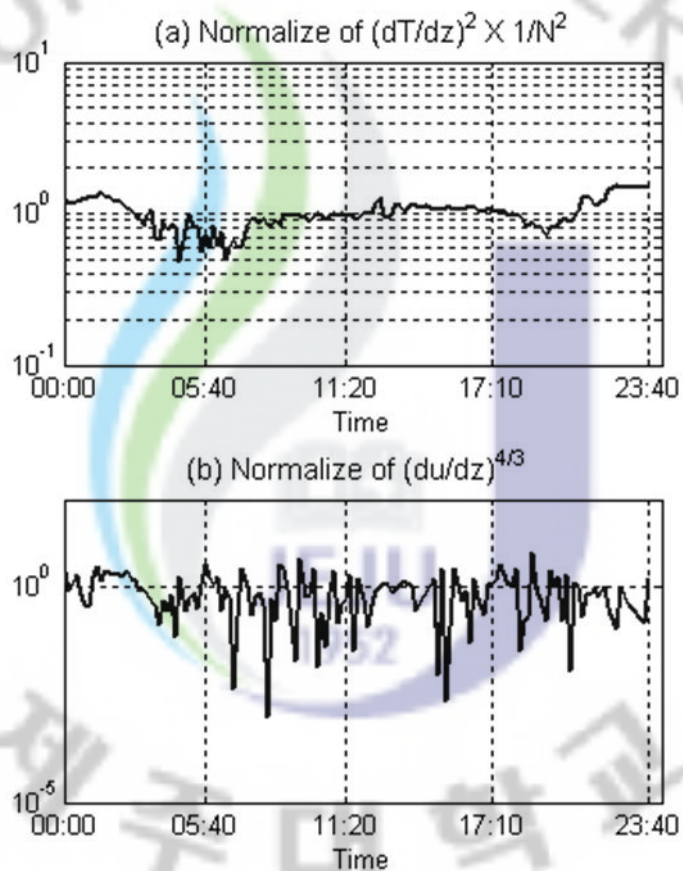


Fig. 4-11. Normalization of temporal variation of $(\partial T/\partial z)^2 \times 1/N^2$ (a), and $(\partial(\sqrt{u^2+v^2})/\partial z)^{4/3}$ (b) using average value (average value of (a): 112.8, average value of (b): 0.0041) near 16m depth during a day (July 1st 2008).

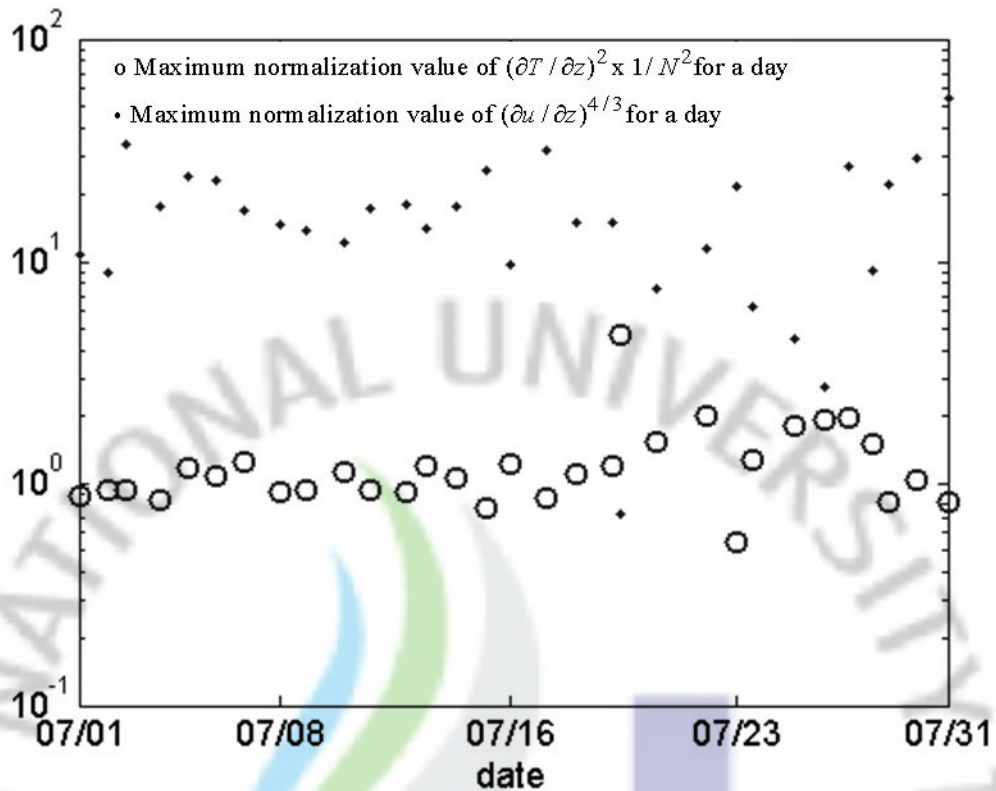


Fig. 4-12. The maximum normalization value of temporal variation of $(\partial T/\partial z)^2 \times 1/N^2$ (\circ) and $(\partial(\sqrt{u^2+v^2})/\partial z)^{4/3}$ (\bullet) using average value every day over a month (July 2008).

지금까지 계산된 난류세기 하에서 음선 모델을 이용하여 음의 경로를 추적하고 수신신호의 위상변화를 계산하였다. 음선은 세가지 경우로 나누어 모델링 하였다. Case 1은 표층에 음원을 두고 접지각이 0° 인 경우, Case 2는 음원의 위치는 그대로 두고 접지각을 -30° 로 한 경우, Case 3은 수심 60m에 음원을 위치시키고 접지각이 0° 인 경우이다. 각각의 입력 변수를 표4-1에 나타내었다.

Table 4-1. Input parameters of Bellhop ray tracing program.

Input parameter	Input Value		
	Case 1	Case 2	Case 3
수심 (m)	100	100	100
수평거리 (km)	2	2	2
바닥	평탄면	평탄면	평탄면
표층	평탄면	평탄면	평탄면
음원수심 (m)	7	7	60
접지각 (°)	-30	0	0

입력변수 중 중요하게 여겨지는 수온구조와 염분구조는 시간에 따라 변화하므로 자료가 방대하여 표현하지 않았고 음선 경로 또한 수온구조와 염분구조에 따라 변화하므로 모두를 보여주지는 못하고 여기서는 7월 1일 00:10분에서 세가지 경우의 음선 경로만을 나타내었다(그림4-13). 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 위상변화를 비교하기 위해서이다. 위상변화 계산시 사용된 주파수는 10kHz이다.

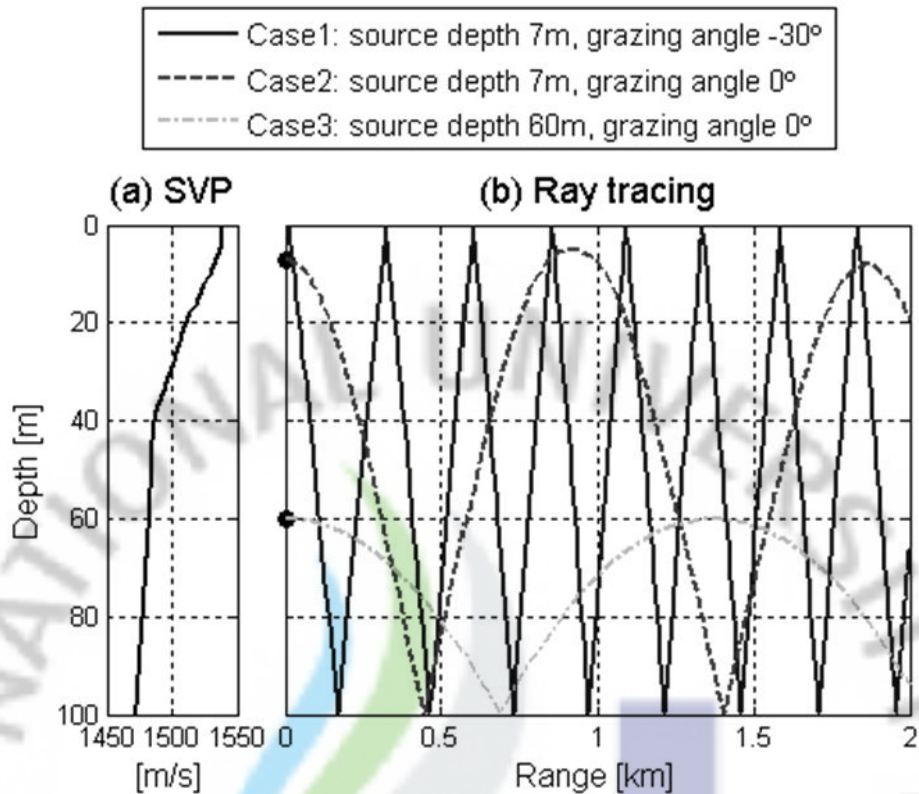


Fig. 4-13. Sound velocity profile (00:10분 July 1st 2008) (a) ray tracing (case 1, 2, 3) (b).

Case 1의 경우 7월 1일의 하루 동안의 위상변화를 보면 음선의 길이가 가장 길기 때문에 위상변화 또한 가장 클 것이라 생각되지만 결과를 보면 Case 2와 비슷하게 나타나는데 이는 전체 음선의 길이보다는 전달 거리에 따른 음선이 표층에 얼마나 더 머무느냐에 따라 달라지기 때문이다. Case 1인 경우 음선이 수심 0~40m에 머물 때 총 전달거리는 958.5m, Case 2인 경우 1142m로 183.5m의 차이를 보이고 이로 인해 위상변화 값도 Case 2가 조금 더 큰 값을 갖는다. Case 3의 경우는 음선이 난류세기가 약한 심층부분만을 통과하기 때문에 위상변화 또한 작게 나타나게 된다. 또한 Case 1, 2의 경우 표층 난류세기가 하루 동안 변동함에 따라 수신신호의 위상이 변동하는 것을 보인다(그림4-14).

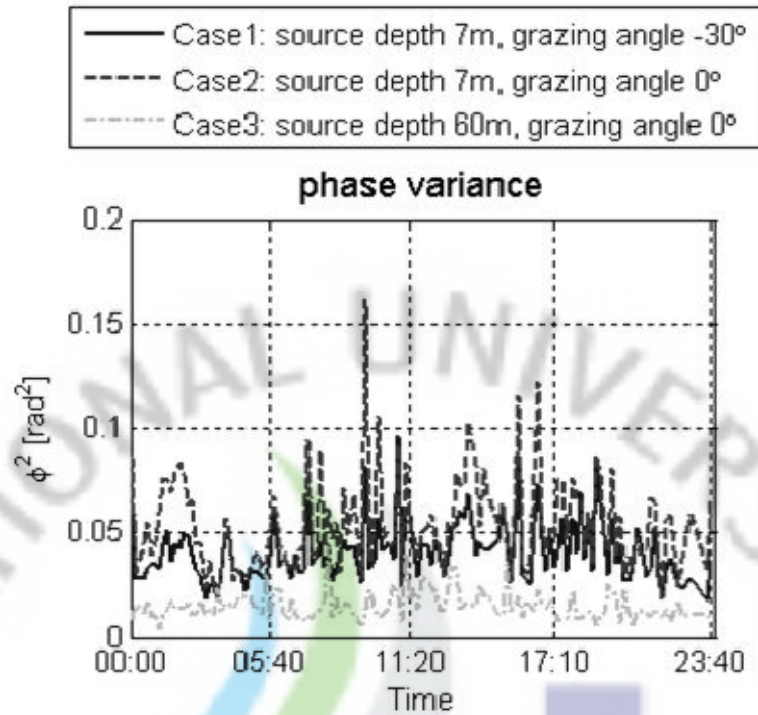


Fig. 4-14. Phase variance (case 1, 2, 3) (July 1st 2008).

7월 15일과 31일의 결과에서도 Case 2인 경우 수신신호의 위상변화가 대부분 가장 크고 Case 1, 3 순으로 크게 나타났다(그림4-15, 16).

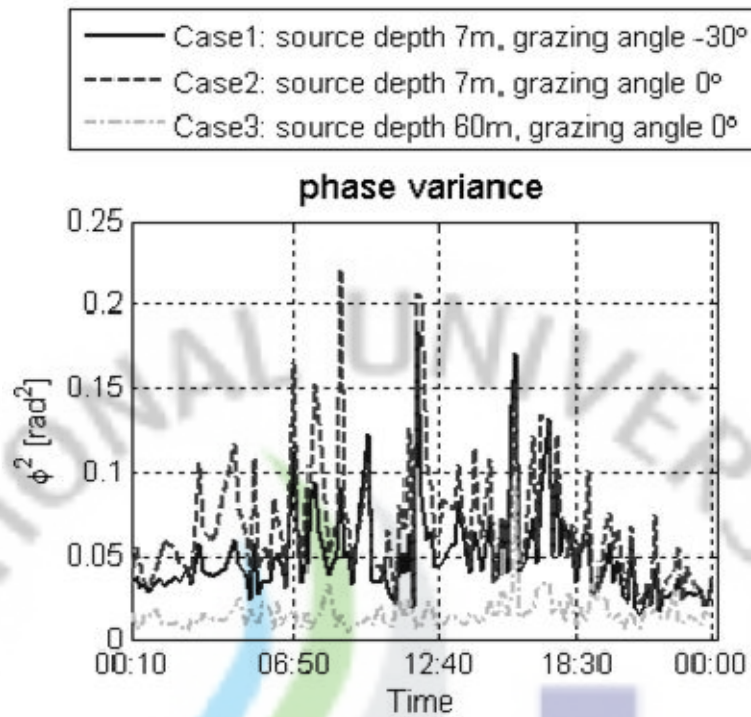


Fig. 4-15. Phase variance (case 1, 2, 3) (July 15st 2008).

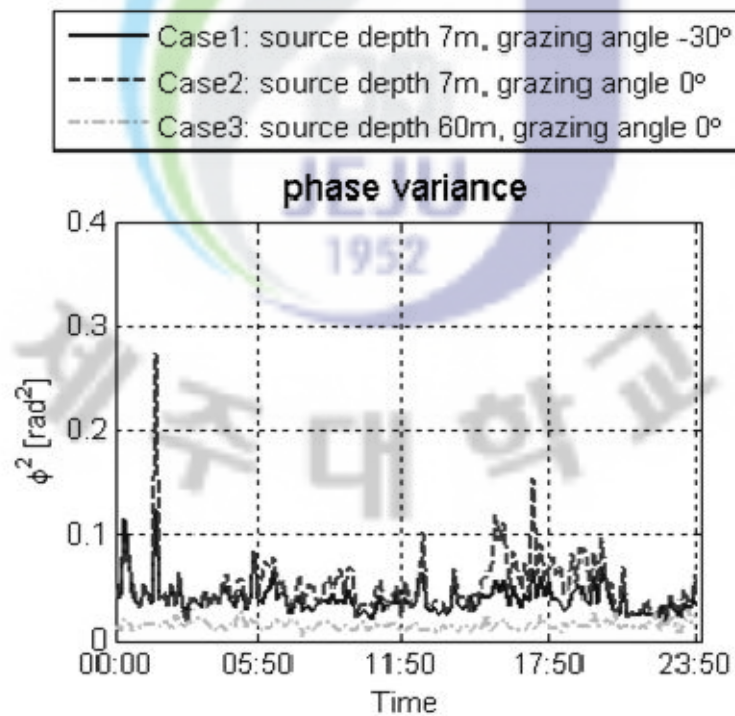


Fig. 4-16. Phase variance (case 1, 2, 3) (July 31st 2008).

주파수의 증가에 따른 위상변화를 보기 위해서 Case 2인 경우에 주파수를 10kHz, 50kHz, 100kHz로 정하여 위상변화를 계산하였다(그림4-17). 10분 간격으로 계산하였을 경우 각각의 주파수에서 비교하기가 복잡하여 시간 간격을 약 한 시간으로 하였다. 위상분산식은 주파수의 제곱에 비례하기 때문에 주파수가 높을수록 위상분산이 커지는 것을 볼 수 있고 Case 1, 3의 경우 또한 같은 결과를 얻는다.

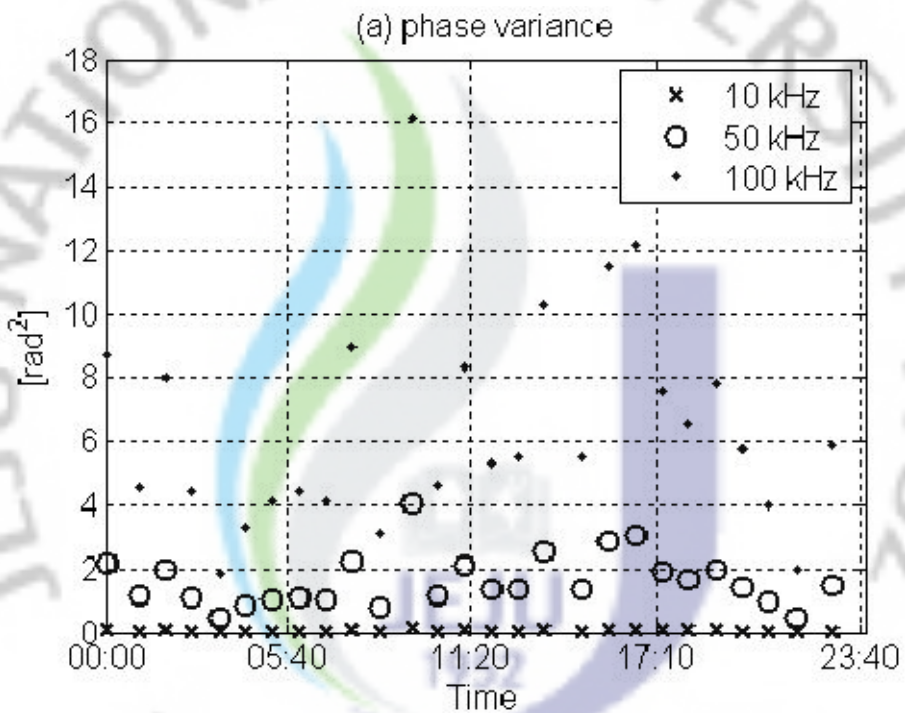


Fig. 4-17. Phase variance due to turbulence strength (July 1st 2008).

4.3. 한달 동안 변화하는 난류세기와 음선 경로에 따른 수신

신호 위상 변동

한달 동안의 난류세기변화를 알아보기 위해서 수온구조, 부력주파수, 유속구조를 살펴보았다(그림4-18). 수온구조는 7월 초부터 20일까지 수온약층이 수심 15~20m 부근에 존재하다가 20일 이후로 40m까지 내려가는 것을 볼 수 있다. 부력주파수는 수온구조와 비슷한 양상을 보이고 유속구조는 9일경에 표층에서만 변화를 보였다가 25일경에는 더 깊은 층까지 변동을 보인다.

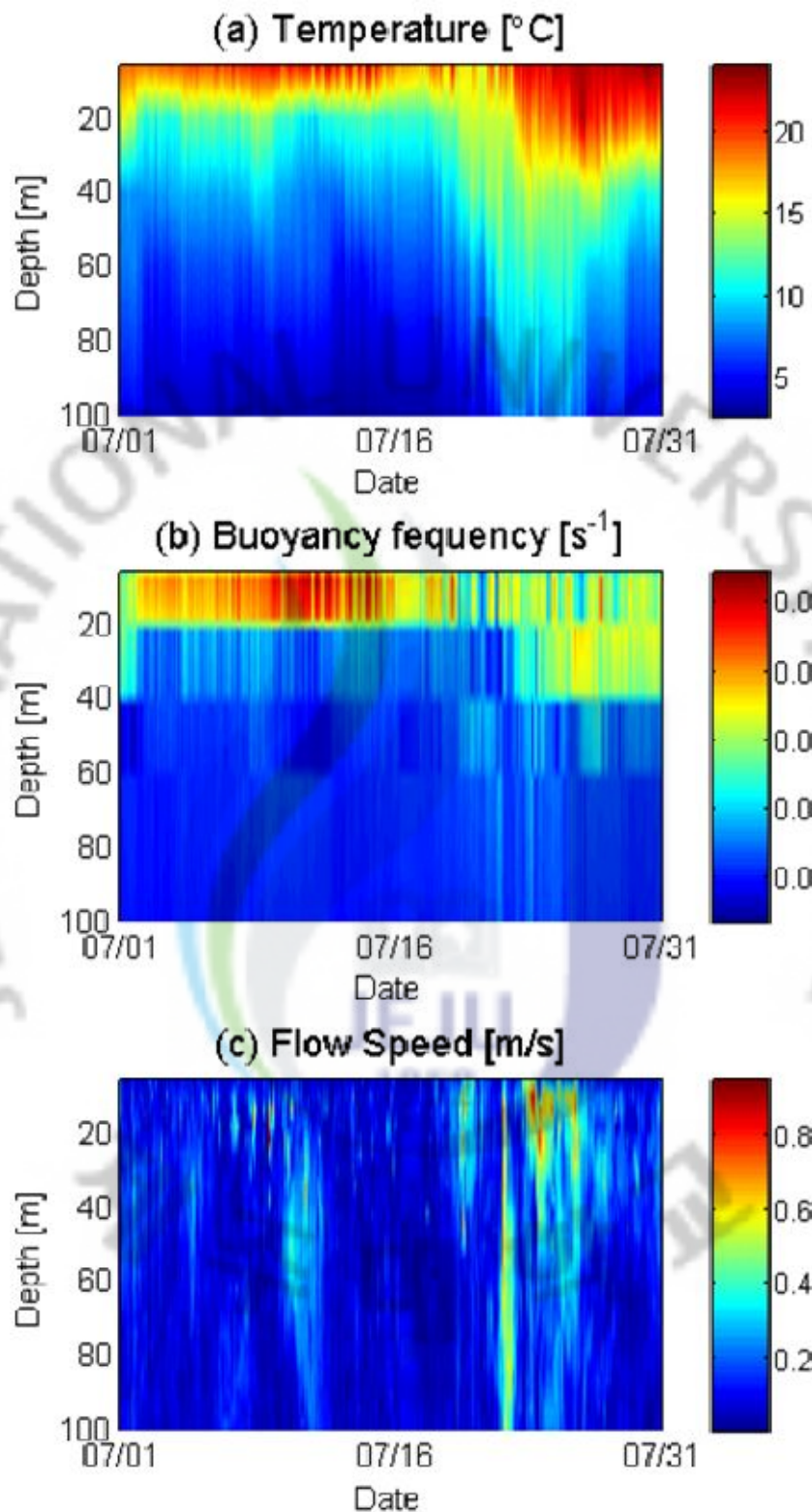


Fig. 4-18. Temporal variation of temperature profile (a), buoyancy frequency profile (b) and flow speed profile (c) during a month (July 2008).

한달 동안 변화하는 수온구조, 부력주파수구조, 유속구조를 이용하여(그림4-18) 난류세기를 구하였다(그림4-19). 난류세기는 표층에서 크게 나타나고 시간적으로 변동하는 것을 볼 수 있고(그림4-19) 5월과 6월의 난류세기 또한 표층에서 크게 나타나고 시간 별, 수심 별에 따라 변동이 나타난다(그림4-20, 21).

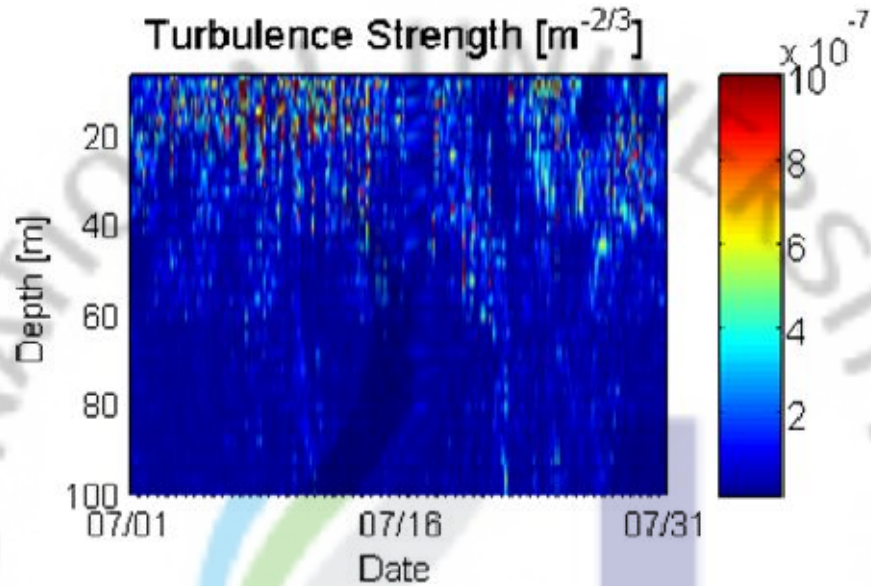


Fig. 4-19. Temporal variation of turbulence strength (July 2008).

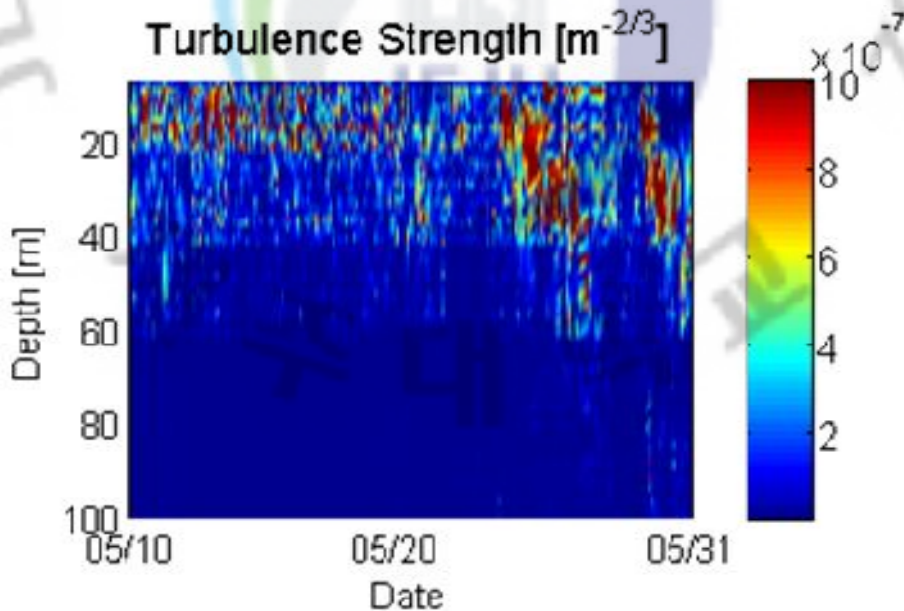


Fig. 4-20. Temporal variation of turbulence strength (May 2008).

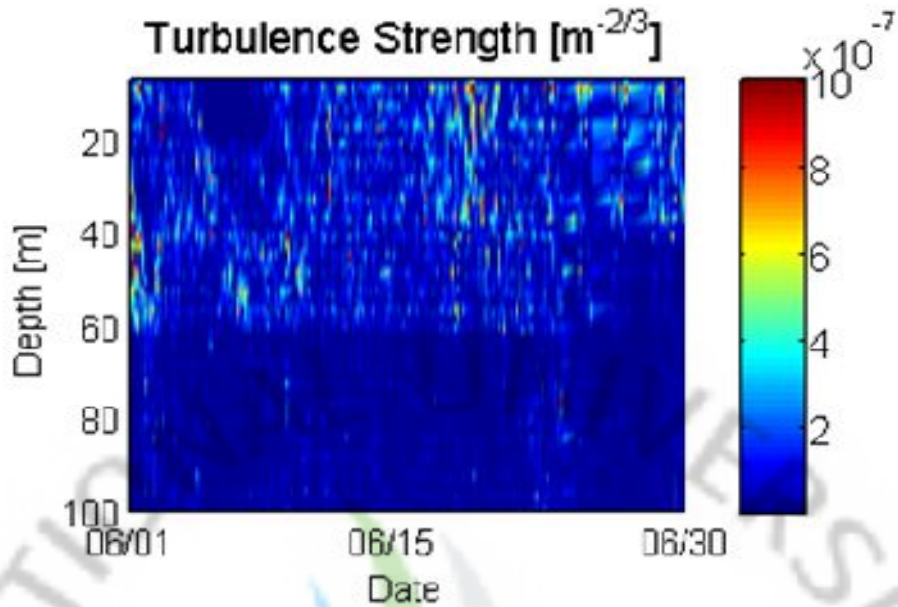


Fig. 4-21. Temporal variation of turbulence strength (June 2008).

한달 동안 변화하는 난류세기와 수온구조, 부력주파수구조, 유속구조의 상관성을 판단하기 위해서 식(19)의 $(\partial T/\partial z)^2$, $1/N^2$, $(\partial u/\partial z)^{4/3}$ 과 난류세기를 계산하여 상관성을 살펴 보았다(그림4-22). 2008년 7월 1일부터 16일까지는 수온구조 향(그림4-22(a))의 변동이 작게 나타나다가 이후로 큰 변동을 보이는 날이 보이고 난류세기(그림4-22(d))에 반영되는 것을 볼 수 있다. 부력주파수구조 향(그림4-22(a))은 수온구조 향과 반대양상을 보이고 유속구조 향의 변동량은 전체적으로 다른 두 향보다 크게 변화하여 난류세기에 변화에 큰 영향을 준다.

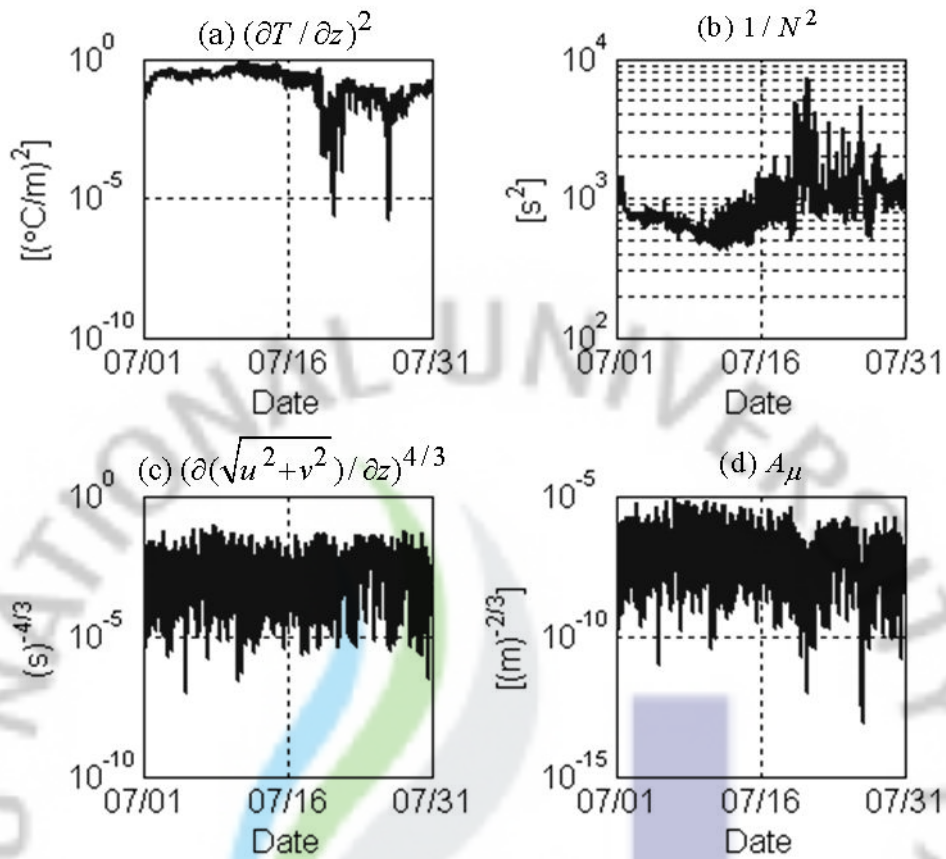


Fig. 4-22. Temporal variation of $(\partial T/\partial z)^2$ (a), $1/N^2$ (b), $(\partial(\sqrt{u^2+v^2})/\partial z)^{4/3}$ (c) and turbulence strength (d) near 16m depth during a month (July 2008).

4.2절에서 계산한 방식으로 수온구조 항과 부력주파수구조 항을 곱하고 월 평균으로 나누어 변화량을 보았고(그림4-23(a)) 유속구조 항 역시 월평균으로 나누어 변화량을 계산하고(그림4-23(b)) 수온구조의 영향과 비교하였다. 수온구조 항과 부력주파수구조 항의 곱의 평균은 145.2이고 변화량을 보면 7월 16일 전에는 1에 근사함으로 변동량이 아주 작다가 이후로 큰 변동을 보이는 날이 보인다. 유속구조 항의 평균은 0.0049로 난류세기에 큰 영향을 미치고 뿐만 아니라 변동량도 전체적으로 크기 때문에 난류세기 변동에도 크게 영향을 미치게 된다.

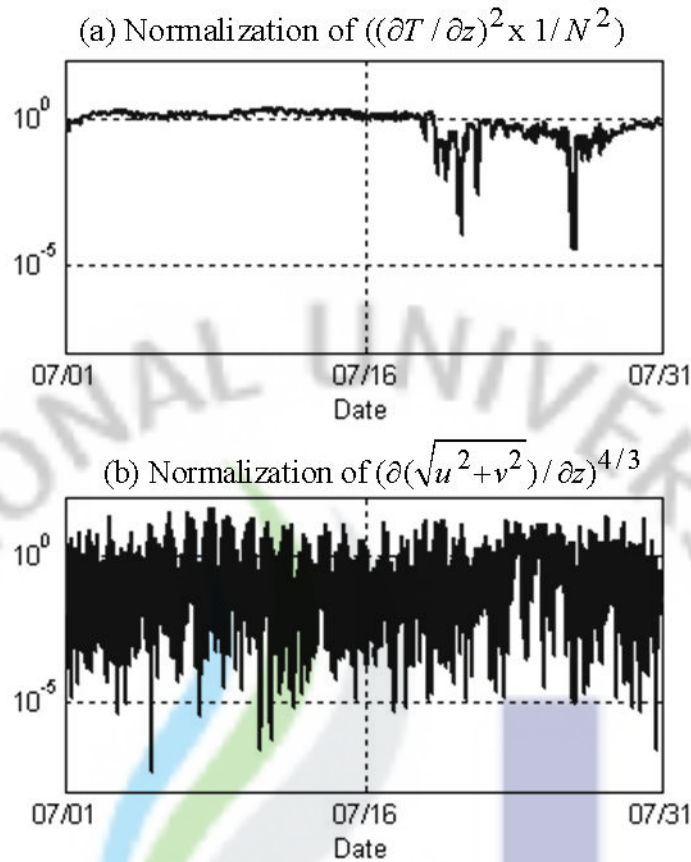


Fig. 4-23. Normalization of temporal variation of $(\partial T/\partial z)^2 \times 1/N^2$ (a), and $(\partial(\sqrt{u^2+v^2})/\partial z)^{4/3}$ (b) using average value (average value of (a): 145.2 average value of (b): 0.0049) near 16m depth during a month (July 2008).

한달 동안 변화하는 난류환경에서 음선 모델을 이용하여 음선 경로를 추적하고 위상변화를 구하였다. 음선 모델의 입력변수는 4.2절과 같이 세가지 경우이고 5, 6, 7월 각각에 대해서 계산하였다(그림4-24, 25, 26). Case 1의 경우와 Case 2 경우 난류세기가 큰 날에 위상변화 역시 큰 값을 나타내고 Case 3 경우는 음선이 난류세기가 작은 심층만을 통과 하므로 모두 작은 값을 보인다. 또한 5~7월의 난류세기를 비교해 보면 6월보다 5월과 7월에 난류세기가 크기 때문에(그림4-19, 20, 21) 위상변화에 영향을 주어 6월의 경우에는 0.2rad^2 을 넘지 않는 반면에 5월과 7월에는 0.3rad^2 보다 큰 값을 갖기도 한다(그림4-24, 25, 26). 여기서 5월과 7월에 난류세기가 큰 이유는 깊이에 따른 수온구배와 유속구배의 크기가 동시에 커지기 때

문이다.

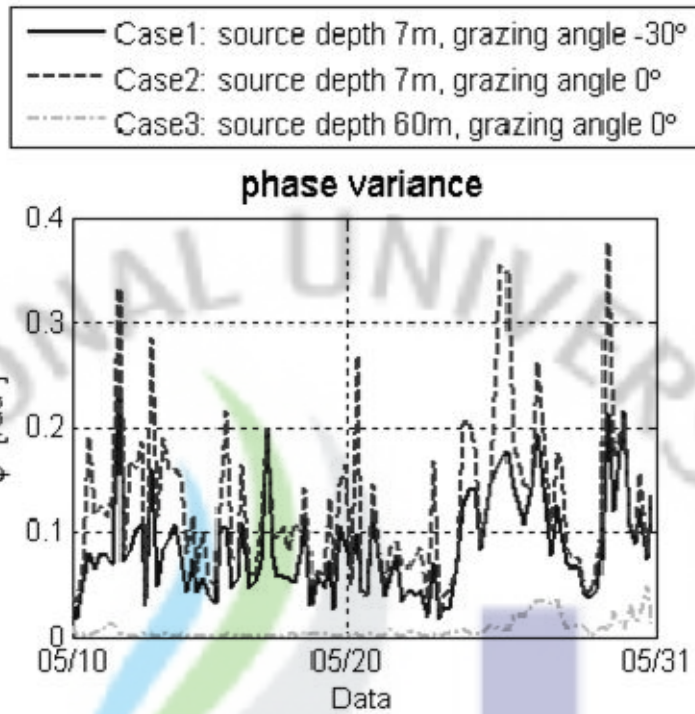


Fig. 4-24. Phase variance (case 1, 2, 3) (May 2008).

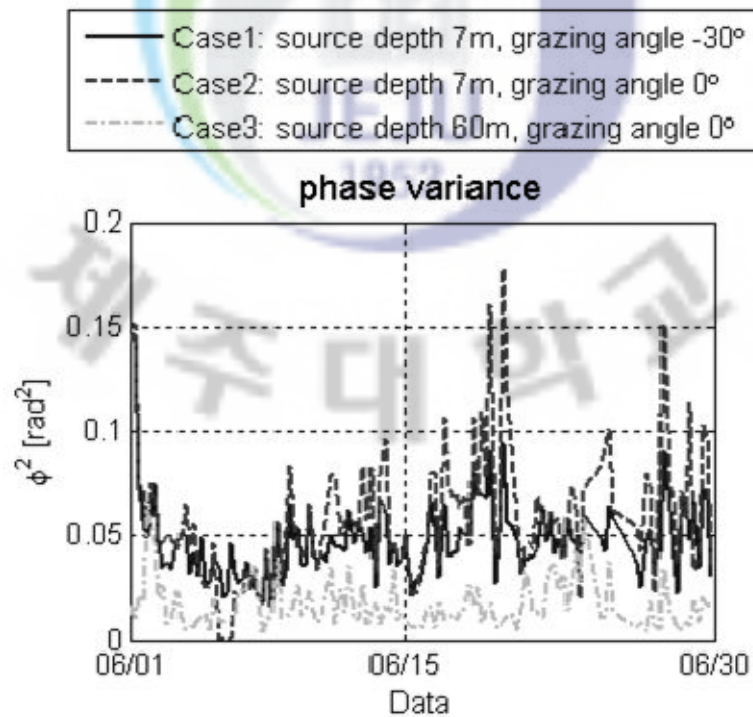


Fig. 4-25. Phase variance (case 1, 2, 3) (June 2008).

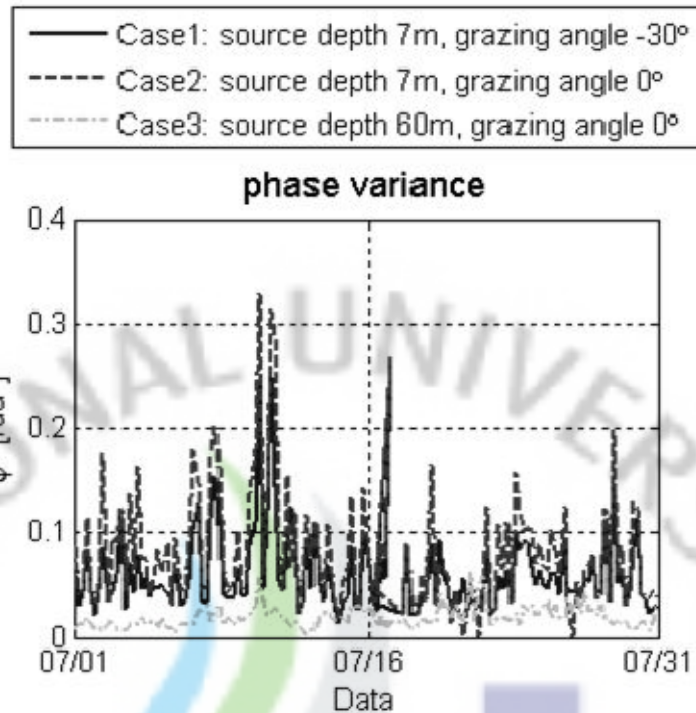


Fig. 4-26. Phase variance (case 1, 2, 3) (July 2008).

7월 한달 동안 변화하는 난류환경에서 하루 중 난류세기가 가장 큰 시간에서 한달 동안 음선 모델을 이용하여 위상을 구한 결과를 나타내었다(그림4-27). 음선 모델의 입력변수는 Case 2의 경우만을 사용하였고 음향신호의 주파수를 임의로 10kHz, 50kHz, 100kHz로 정하여 계산하였다. 7월의 난류세기(그림4-22(d))와 위상변화(그림4-26)를 비교하면 난류세기가 큰 날에 위상변화도 큰 값을 보인다. 위상변화 값은 1보다 매우 적을 경우에는($\Phi^2 \ll 1$) 소나 운용 시 큰 영향을 주지 못하고 1보다 매우 클 경우 ($\Phi^2 \gg 1$) 소나 운용 시 악 영향을 주게 된다[6]. 이를 기준으로 매우 클 때의 값을 10rad^2 하면 주파수100kHz에서는 거의 모든 날에 운용효율이 떨어지는 것을 예측할 수 있다.

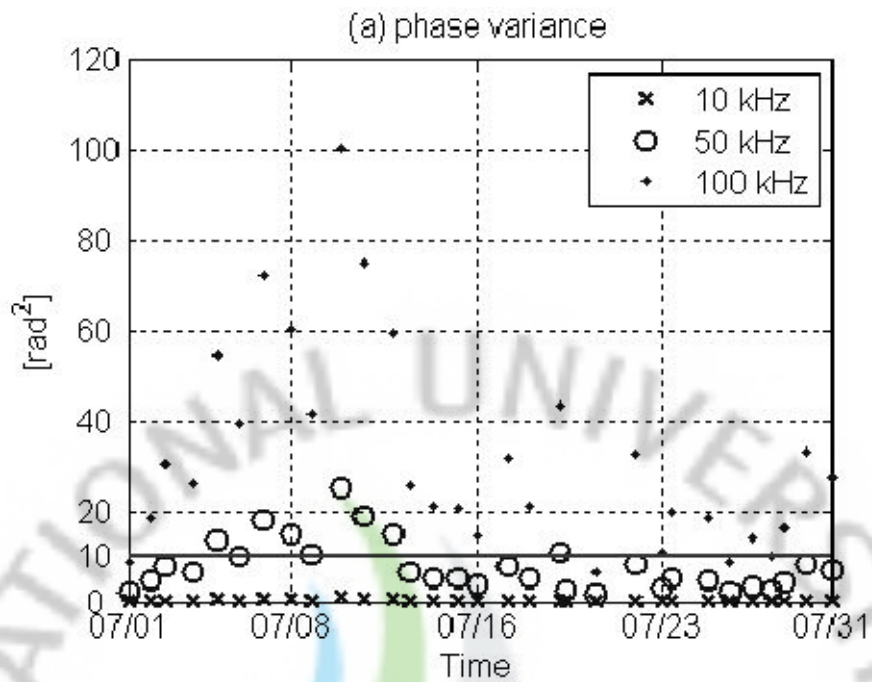


Fig. 4-27. Phase variance due to turbulence strength.

5월과 6월의 자료를 이용하여 계산한 결과에서도 음선의 경로와 상관없이 주파수가 커짐에 따라 분산 값도 커진다.

제5장 토 의

위상변화 모델을 통해 음파수신신호의 위상변동을 계산하기 위해서는 난류세기와 음선의 경로를 추정해야 한다. 따라서 난류세기와 음선 모델에 대한 연구가 필요하다. 본 논문에서는 수온구조, 부력주파수구조, 유속구조가 난류세기에 미치는 영향에 대해 알아 보았고 음선의 경로에 따라 위상변화가 어떻게 달라지는가에 대해 살펴 보았다. 여기서 가정된 난류는 1m 이하의 크기를 갖는 미세구조 난류이므로 난류세기를 계산하기 위해서는 CTD와 ADCP자료를 수심 1m 간격으로 측정하는 것이 보다 정확하다. 하지만 현재 부표 시스템에 설치된 CTD는 수심 간격이 넓어 수온구조 변화에 오차가 있으므로 이를 보정하기 위해 KODC (Korea Oceanographic Data Center) 6월 10년치 자료를 분석하여 부표 시스템의 CTD 자료와 비교하였다(그림5-1). 비교 결과 수온약층 부근의 KODC 10년치 자료 변화량과 부표 시스템의 변화량이 비슷하였고 이는 수온구조의 전체적인 변화량에는 큰 오차가 없음을 설명한다. 음선의 경로가 Case 2인 경우에 KODC 10년 평균 수온에 표준편차를 더하여(그림5-1 우측실선) 위상변화를 계산하고 부표자료의 수온평균에 표준편차를 더하여(그림5-1 우측점선) 위상변화를 계산한 결과 각각 0.0208rad^2 과 0.0114rad^2 값으로 0.0094rad^2 의 차를 보였고 KODC 10년 평균 수온에 표준편차를 뺀 후(그림5-1 좌측실선) 위상변화를 계산하고 부표자료의 수온평균에 표준편차를 뺀 후(그림5-1 좌측점선) 위상변화를 계산한 결과 각각 0.0104rad^2 과 0.0057rad^2 으로 0.0047rad^2 의 차를 보였다.

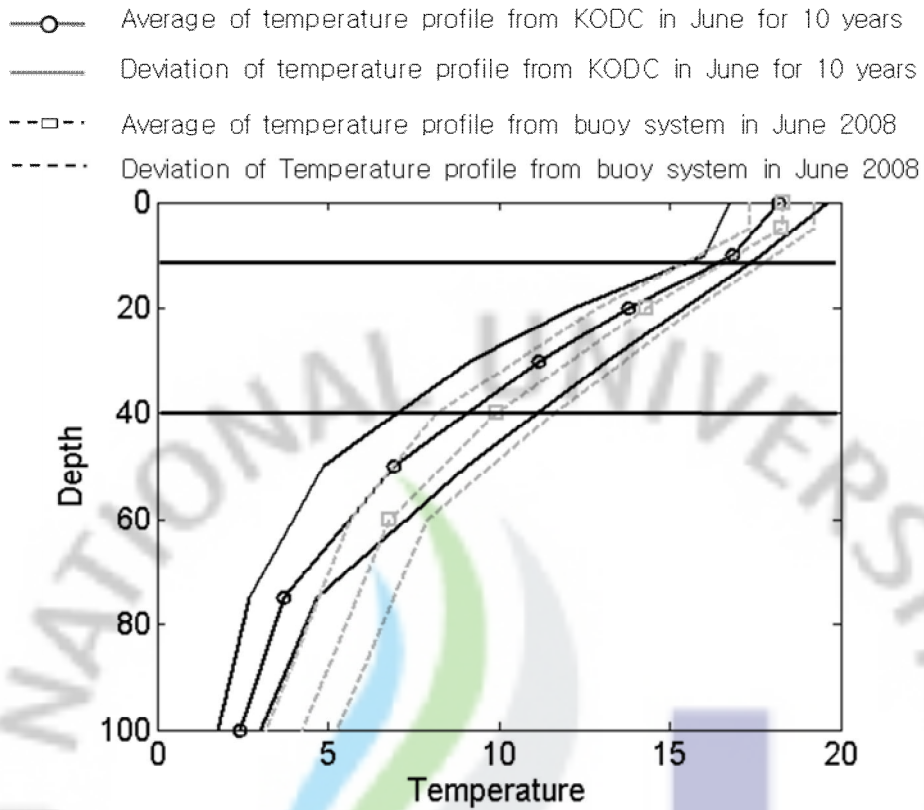


Fig. 5-1. Comparison of temperature profile between KODC data and buoy data.

또한 7월 3일 목호항에서 1m 간격으로 측정한 CTD 자료를 이용하여 위상변화를 계산한 결과와 부표 시스템의 자료를 이용하여 계산한 결과(그림5-2,3)를 비교해 보면 위상 변동의 오차는 있지만 비슷한 양상으로 변화하는 것을 볼 수 있다.

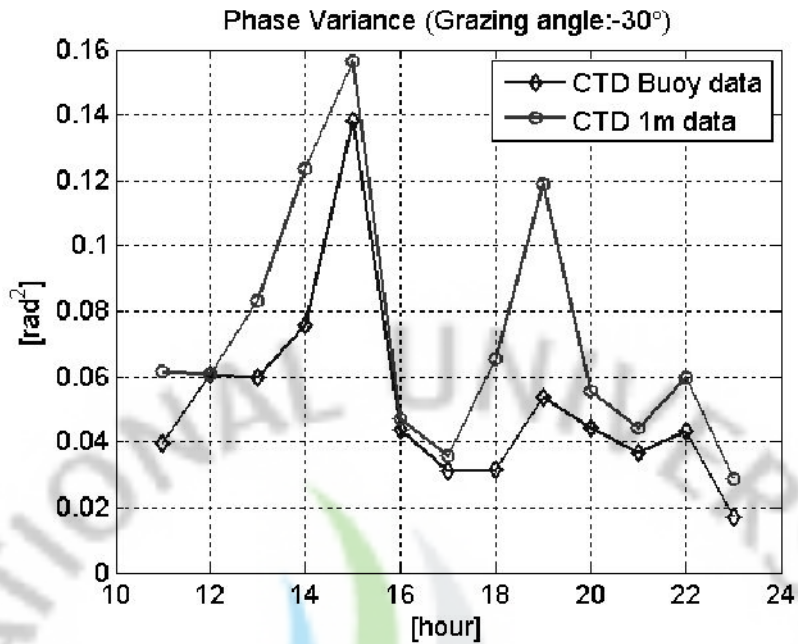


Fig. 5-2. Comparison of phase variance (grazing angle -30°) (July 3th 2008).

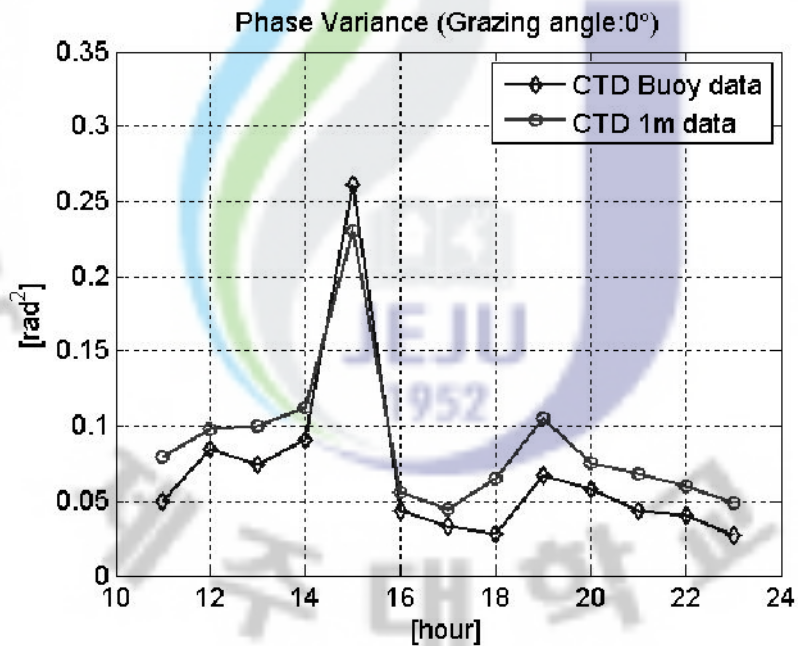


Fig. 5-3. Comparison of phase variance (grazing angle 0°) (July 3th 2008).

부표 시스템의 자료를 이용하여 난류세기를 분석한 결과 유속구조가 수온구조보다 난류세기와 난류세기 변동량에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 그리고 결과에서 언급하지 않았지만 7월 한달 동안 하루치를 평균하여 난류세기를 구하고 위상변화를 계산한 결과 06시부터 18시까지의 큰 값을 가지는 주기성을

나타냈다(그림5-4). 하지만 5, 6월의 자료를 분석해 본 결과 7월 평균과 달리 하루 동안에 특정한 주기를 발견할 수 없었다. 세달 동안의 측정된 자료만을 가지고 있기 때문에 이외의 달에서 월평균을 취하여 비교할 수 없었고 추후에 더 많은 자료를 획득하여 월평균과 연평균을 분석할 계획이다.

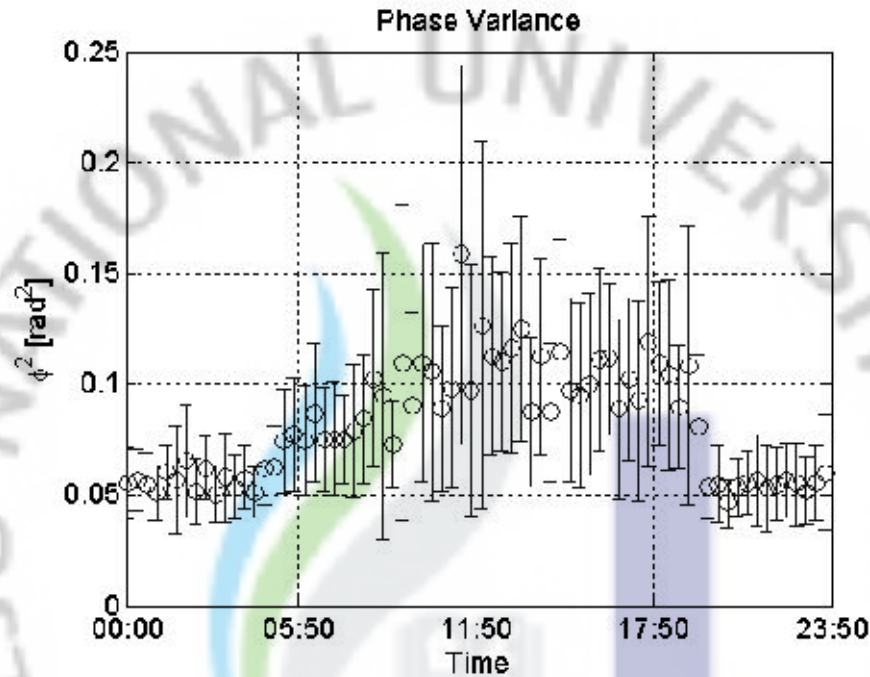


Fig. 5-4. Averaged phase variance (July 2008).

위상변화와 수온구조, 유속구조 그리고 난류세기의 연관성을 한 눈에 보기 위해서 상관성 함수를 사용하여 상관계수를 구하였다. Case 1의 경우 수온구조 항과 부력주파수 항을 곱한 것과 위상변화와의 상관계수는 0.14이고 유속구조 항과 위상변화와의 상관계수는 0.58, 난류세기와 위상변화와의 상관계수는 0.61을 나타내었다. Case 2의 경우도 각각 0.26, 0.58, 0.66의 비슷한 값을 보였다. Case 3의 경우는 난류세기 영향이 미비한 경로로 음이 진행하므로 상관계수가 Case 1, 2보다 작은 값을 보인다. Case 1, 2의 상관계수 결과에서 알 수 있듯이 위상변화는 난류세기에 큰 영향을 받고 난류세기에 영향을 주는 환경변수 중 수온구조보다 유속구조의 영향을 더 크게 받는 것을 알 수 있다.

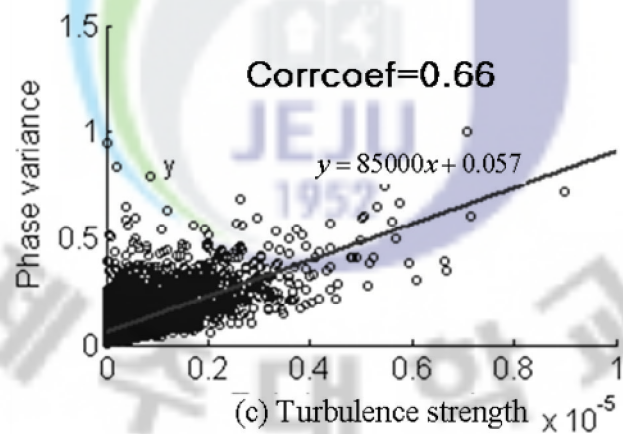
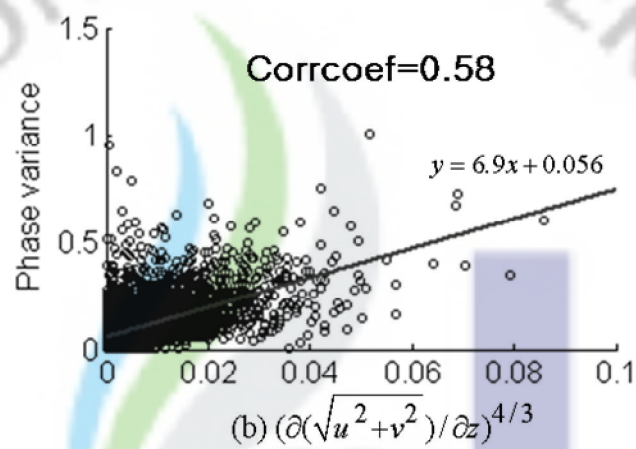
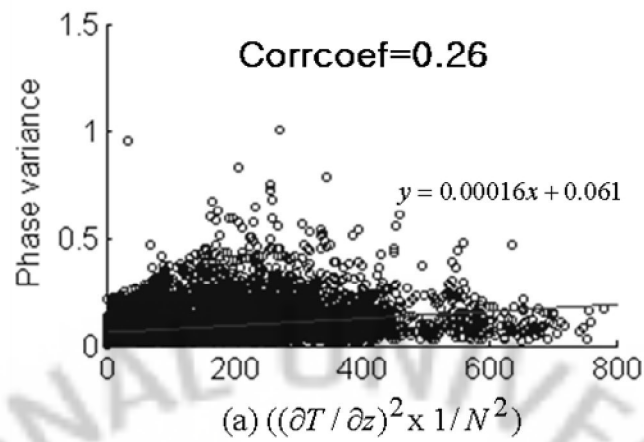


Fig. 5-5. Correlation between phase variance(Case 2) and $(\partial T / \partial z)^2 \times 1 / N^2$ (a), correlation between phase variance(Case 2) and $(\partial(\sqrt{u^2 + v^2}) / \partial z)^{4/3}$ (b), correlation between phase variance(Case 2) and turbulence strength (between May 10th and July 31st 2008)

제6장 결론

본 논문에서는 동해 묵호항 근처 해역에서 음파전달 시 미세구조 난류로 인한 수신신호 위상변화 정도를 모의 하였다. 첫째로 CTD와 ADCP 자료를 이용하여 난류세기를 구하였고 둘째로 Bellhop 음선 모델을 위상변화 식에 적용하기 위해 수정하였으며 끝으로 두 개의 과정을 결합하여 위상변화를 계산하였다. 난류세기를 계산하여 분석한 결과 전체적으로 유속구조가 수온구조보다 난류세기와 난류세기 변화에 더 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 하지만 7월 16일 이후에 보였던 것처럼 수온 구조의 변화가 난류세기 변동에 큰 영향을 보이기도 한다. 이상의 난류세기에서 위상변화를 계산한 결과 난류세기는 표층에 크게 분포하기 때문에 음선의 진행 경로가 표층을 통과할 경우 난류세기가 큰 시간에서 위상변화가 크게 나타나고 음선의 진행 경로가 표층을 통과하지 않을 경우 시간에 상관없이 작은 값을 보인다. 또한 난류세기는 6월보다 5월과 7월에 크게 나타나므로 위상변화도 5월과 7월에 크게 나타나는 것을 확인하였다. 그리고 음선의 경로와 난류세기에 상관없이 위상변화는 주파수의 함수이므로 주파수가 증가할수록 위상변화가 커짐을 알 수 있었다.

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

참 고 문 헌

- [1] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, J. V. Sanders, Fundamentals of Acoustics, Wiley, New York, 155-160, 2000.
- [2] 박창주, “천해음과 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. 22(2), 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. 11(2), 333-339, 1986.
- [5] 김영완, “PSK 고차모드 위상전송을 위한 저 잡음증폭 주파수 변환기의 위상 잡음 해석,” 한국해양정보통신학회논문지 12(7), 1179-1186, 2008.
- [6] T. Musha and T. Kikuchi, “Adaptive signal processing for reducing nearby generated flow noise,” Applied Acoustics 66, 1206-1217, 2005.
- [7] 오선택, 나정열, 오택환, 박정수, 나영남, 김영규, “한국 동해에서 토모그래피용 신호를 이용한 음파 도달시간의 시변동성,” 한국음향학회지 20(5), 92-99, 2001.
- [8] S. M. Flatte, Sound Transmission Through a Fluctuation Ocean, Cambridge University Press, New York, 85-158, 1979.

- [9] R. M. Kennedy, "Phase and Amplitude Fluctuations in Propagating through a Layered Ocean," *Journal of the Acoustical Society of America* 46(3), 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.* 25(4), 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* 23(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* 10, 180-187, 1978.
- [13] T. E. Ewart, "Acoustic fluctuations in the open ocean-A measurement using a fixed refracted path," *Journal of the Acoustical Society of America* 60(1), 46-59, 1976.
- [14] A. Ishimaru, *Wave Propagation and Scattering in Random Media*, Academic Press, New York, 1978
- [15] T. F. Duda, S. M. Flatte, and D. B. Creamer, "Modeling meter-scale intensity fluctuations from ocean fine structure and microstructure," *J. Geophys. Res.* 93, 5130-5142, 1988.
- [16] M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions*, U.S. Government Printing Office, Washington DC, 1972

[17]N. S. Oakey, "Statistics of mixing parameters in the upper ocean during JASIN phase 2," J. Phys. Oceanography. 15, 1662-1675, 1985.

[18]윤재열(역), 해양역학입문, 청문각, 서울, 111-115, 1999.

[19]F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, H. Schmidt, Computational Ocean Acoustics, American Institute of Physics, New York, 149-155, 1993.



감사의 글

2년간의 석사과정은 저에게 학문적 결실을 맺고 인생수양을 할 수 있는 시기였습니다. 배움이 컸던 만큼 힘든 일도 많았지만 나 자신을 한 발 더 나아갈 수 있게 했던 인생의 중요한 시기였습니다. 이러한 경험과 결실을 맺을 수 있도록 저를 이 자리에 있게 해주신 분이 바로 팽동국 교수님입니다. 학부시절 아무것도 모르는 저에게 음향학이라는 학문을 통하여 배움의 즐거움을 알게 해주셨고 석사과정 동안 끈임 없는 관심과 지도를 해주신 교수님께 고개 숙여 감사 드립니다. 그리고 하나뿐인 사수 태훈이 형, 교수님이 부재중일 때는 저에게 교수님 대신으로 지도해 주셨고 선배로서는 아낌없는 조언을 해주시신 점 잊지 않겠습니다. 감사합니다. 바쁘신 와중에도 논문의 심사를 맡아 세심하게 검토해 주신 조일형 교수님과 방익찬 교수님께 진심으로 감사 드립니다.

대학원 과정에서 많은 가르침을 주신 배진호 교수님, 김준영 교수님, 이종현 교수님 감사합니다. 논문에 조언을 해주신 숭실대학교의 심태보 교수님 감사드립니다. 그리고 초음파 연구실에 잉과 지금은 졸업을 하고 안 계신 남권호 박사님 감사합니다. 학부시절과 대학원 시절을 함께 지내면서 많은 의지가 되어준 정희형 감사합니다. 해양정보시스템공학과 연구실에 혁준이형, 승우형, 태희, 마노의 공학 실험실에 관석이형과 레디 숭실대학교 수중통신연구실의 병욱이형, 낙훈이, 진형이 모두에게 감사드립니다.

오래 두고 사귄 벗 재형, 경배, 승현, 철중, 정수, 진기, 진우, 현섭, 관부, 장용, 진호, 우석, 문댕, 우재 모두에게 감사합니다.

끝으로 석사과정을 무사히 마칠 수 있도록 물심양면으로 도와주신 사랑하는 우리가족 할아버지, 아버지, 어머니, 형님께 이 논문을 바칩니다.