한국음향학회지 제20권 제5호 pp. 92~99 (2001)

한국 동해에서 토모그래피용 신호를 이용한 음파 도달시간의 시변동성

Temporal Variability of Acoustic Arrivals in the East Sea of Korea Using Tomographic Method

오 선 택*, 나 정 열*, 오 택 환*, 박 정 수**, 나 영 남**, 김 영 규**
(Suntaek Oh*, Jungyul Na*, Taekhwan Oh*, Joung-Soo Park**, Young-Nam Na**, Young-Gyu Kim**)

* 한양대학교 지구해양과학과, ** 국방과학연구소(진해)

(접수일자: 2001년 3월 6일; 채택일자: 2001년 3월 26일)

1999년 10월에 수행한 한국 동해 중북부 해역의 토모그래피 실험은 저주파수 음원을 블라디보스톡 부근의 대륙붕 해역에 위치시켰고 수직선배열 수신기를 울릉도 부근에 고정시켜 원거리 음향 신호의 변화 특성을 파악코저 하였다. 음원은 위상 변조된 신호이며 울릉도 부근해역의 수직선배열 수신기를 이용하여 자료를 수집하였다. 수신된 자료에 대해 도달시간 및 그 변화를 파악하였다. 이를 위해 위상 변조된 신호를 복조하였으며 특성을 파악하기 위해 도달시간 확산 및 상관성 분석을 수행하였다. 분석결과 단주기성 변화가 존재하고 있으며 이는 내부파에 의한 매질의 수직 변동에 의한 영향이라 할 수 있다.

핵심용어: 해양음향 토모그래피, 시변동성, 한국 동해, 상관성, 도달시간 확산
투고분야: 수중음향 분야 (5.5)

To measure temporal variability of long- range transmission in northern part of the East Sea of Korea, low frequency acoustic sources were deployed on the continental shelf 0.4km south of Cape Shultz near the port of Vladivostok during October 1999. The transmissions of the phase modulated signals were recorded by VLA moored on the northern slope of Ulleung-do. The measured signals were processed for the acoustic arrivals and their variability in time. The temporal signal processing involves pulse compression of the phase-encoded signal, time spread and temporal coherence processing. Variability of the ocean sound speed field in time scales of short period seems to be dominated by random fluctuations caused by sound speed perturbation due to the vertical displacements associated with internal waves.

Keywords: Ocean acoustic tomography, Temporal variability, East Sea of Korea, Coherence, Time spread
ASK subject classification: *Underwater acoustics (5.5)*

I. 서 론

해양에서 음파는 해수내의 물리적 성질인 수온, 염분, 압력 등의 변화에 커다란 영향을 받는다. 따라서 매질내의 변화는 음파의 전달경로 및 도달시간의 변화를 초래하게 된다. 이러한 매질의 변화 특성을 음파를 이용하여 관측하는 방법이 해양음향 토모그래피 (OAT: ocean acoustic tomography)이다[1]. 해양음향 토모그래피는 Munk와 Wunsch에 의해 제안되었으며[2] 이후 대양에서는 해양내부의 수온 변화 및 이를 이용한 지구규모의 온난화, 천해에서는 유속관측과 같은 응용단계로 접근해 가고 있다[3]. 한국 동해의 경우 대한해협을 통해 공급되는 고온수와 동해 북부 저온수가 남하하여 형성된 전선

책임저자: 오선택 (stoh@ihanyang.ac.kr)
425-744 경기도 안산시 사1동 1271번지
한양대학교 지구해양과학과 해양음향연구실
(전화: 031-400-4154; 팩스: 031-406-6458)

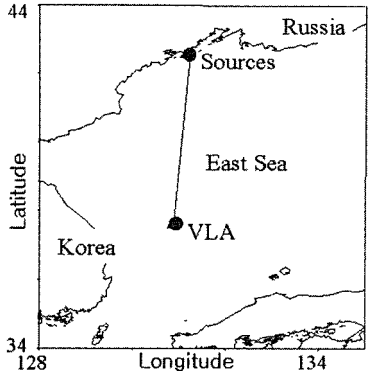


그림 1. 동해 음향실험 해역
Fig. 1. Geographic location of the sources and VLA in the East Sea.

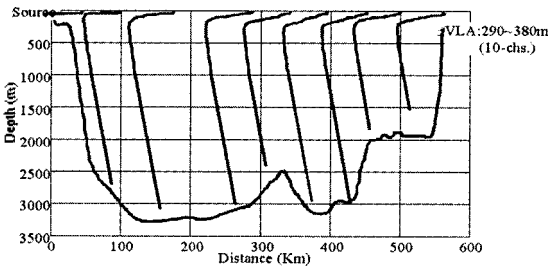


그림 2. 동해 음향실험 해역 수심 단면
Fig. 2. Bathymetry along the acoustic track.

주위에 소용돌이 (eddy) 가 다양한 크기로 출현한다고 알려져 있다. 이러한 중규모 해양현상을 모니터링하기 위한 방법으로 기존의 현장에서의 직접 관측에서 벗어나 원격탐사를 이용한 간접 관측방법을 동원하는 해양탐사가 다양한 방법으로 제시되고 수행되고 있다. 최근에 원격탐사 기법의 하나로 인공위성을 이용한 해수면 수온 관측이 있으나, 이는 해수면으로부터의 적외선 복사에너지를 측정하기 때문에 대기중의 구름이나 수증기 등에 의한 제한을 받으며, 특히 표층수온의 관측에 국한되는 제한을 갖고 있다. 반면에 음파를 이용한 해양 탐사 방법인 해양음향 토모그래피는 해수 중에서의 음파 전파 특성과 해수의 물리적 성질과의 밀접한 관계를 이용하므로 인해 장기적인 해양관측을 위한 방법이라고 할 수 있다.

따라서 이러한 목적으로 지금까지 동해에서 국내 해양음향 토모그래피 실험은 2회 실시되었다[4,5]. 그러나 이때 사용된 폭발성 광대역 음원은 그 특성상 정확한 수신시간을 산출하기 어려웠고 또한 음원의 반복성이 없기 때문에 단일 신호만을 수신하여 대략적인 해양매질의 특성을 추정할 수 밖에 없었다. 그러나 음원으로 m-시퀀스 (maximal-length sequence)를 이용할 경우 신호 대 잡음비가 낮은 경우에도 정합 필터 (matched-filter) 처리에 의한 정확한 도달시간의 분석이 가능하다[6,7].

본 논문은 1999년 9월부터 10월 사이에 실시된 음향실험 자료를 이용하여 동해에서 음파가 원거리 전파시 신호의 변화 특성을 파악하기 위해 수신신호의 시간적 변화 특성을 중점적으로 분석하였다. 이 실험은 러시아 연안에서 울릉도까지의 음파의 전파는 소위 극전선 (polar front)이라는 동해 북부해역의 냉수와 남부해역의 온수 경계를 통과해야 하므로 극전선의 시공간적 변화 및 이에 수반될 수 있는 내부파의 변화도 염두에 둔 실험이다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 음향 실험을 실시한 해역의 환경 개요 및 음원과 수신기 배치와 특성에 대해 설명하고, III장에서는 m-시퀀스 수신신호를 이용한 처리 및 시퀀스별 도달 특성을 분석한다. 마지막으로 IV에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 실험개요

실험해역은 그림 1에 표시한 바와 같이 동해 북부의 블라디보스톡 부근해역에 음원을 설치하였으며 수신기는 울릉도에서 수 km위치의 부근해역에 수직 선배열로 설치하였으며 총 송신 기간은 1999년 9월 13일에서 10월 23일까지이다. 음원과 수신기 사이의 수심 및 음속구조는 그림 2에 나타난 바와 같으며 음원 위치로부터 300-400km거리의 최소 음속축 (sound channel axis)의 수심이 주변보다 깊이 존재하는 것으로 나타났고 음원과

표 1. 음원 및 수신기 설치 위치
Table 1. Locations of sources and receivers.

Mooring	Latitude	Longitude	Water Depth	Source/Reveiver
250 Hz	42 34.724N	131 09.275E	25 m	Bottom
260 Hz	42 26.817N	131 11.266E	76 m	Bottom
366 Hz	42 34.724N	131 09.275E	25 m	Bottom
406 Hz	42 34.518N	131 09.165E	39 m	Bottom
634 Hz	42 34.518N	131 09.165E	39 m	Bottom
VLA	37 32.346N	130 46.160E	418 m	290-380 m

표 2. 송신신호 특성
Table 2. Transmission descriptions.

	250 Hz	260 Hz	366 Hz	406 Hz	634 Hz
Cycles/digit	8	5	8	8	8
Digit Duration	0.032 sec	0.01923	0.02186	0.01970	0.0126
3 dB Bandwidth	31.25 Hz	32.5	45.75		
Sequence Duration	16.352 sec	9.827	11.169	10.069	6.448
Off time	16.352 sec	None	22.338	None	None
Sequence repetition	110	10	107	10	10

수신기 사이의 거리는 약 560km이다. 계산된 음속은 1999년 10월 10일 러시아의 해양조사선인 R/V *Professor Gagarinskiy*에 의해 측정된 CTD (conductivity, temperature, depth sensor)에 의한 자료이다.

음원은 연안에 설치되었으며 수신기는 최소음속층에 해당되는 수심에 설치하였다. 음원 및 수신기의 설치 위치, 수심 등은 표 1과 같다. 음원은 대륙사면이 시작되는 Cape Schultz. 부근에 설치하였으며 송신 주파수는 250 Hz, 260 Hz, 366 Hz, 406 Hz, 634 Hz를 사용하였으며 신호 대 잡음비를 향상시키기 위해 특성 다항식 (characteristic polynomial)이 x^9+x^4+1 이며 511 digit인 m-시퀀스를 사용하였다. 각 송신 신호에 대한 송신 주파수, 밴드폭, 송신 횟수 등에 대한 세부내용은 표 2에 나타내었다. 음원은 각 주파수에 따라 250 Hz와 366 Hz는 4시간마다 1시간씩, 260 Hz는 매 2시간 간격으로 약 2분간, 그리고 406 Hz와 634 Hz는 매 4시간 간격으로 약 2분간 송신하였다. 수신기는 수직 선배열로 해저수심 418m인 해역에 계류하여 10m간격의 수직 선배열 수신기를 수심 290~390m에 위치시켰으며 1999년 10월 20일부터 10월 21일까지 연속으로 수신하였다. 수직 선배열 수신기의 상단에는 DGPS (differential global positioning system)를 설치하여 수신기의 위치를 기록하였다. 수신된 신호는 실시간으로 RF (162.25 MHz)를 이용하여 육상으로 전송하였으며 대역통과 여파기로 200~800 Hz에 대한 신호를 아날로그 녹음기에 기록하였다.

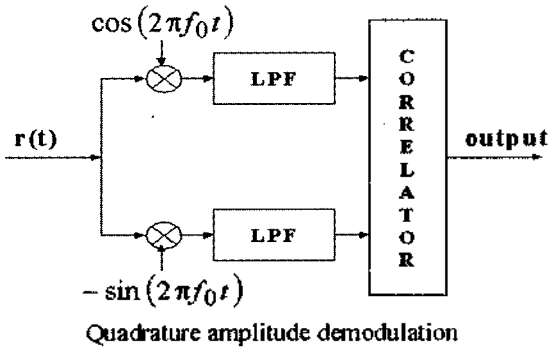


그림 3. 복조 상관기
Fig. 3. Routine of quardrature amplitude demodulation.

III. 시변동성

2.1. 신호처리

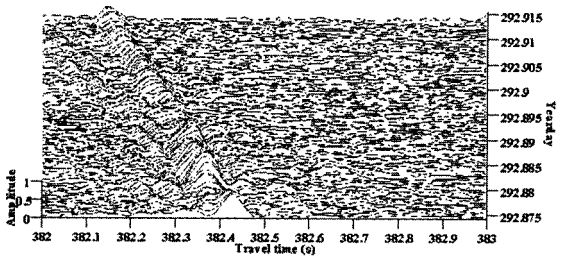
본 논문에서는 음원 주파수 250 Hz와 366 Hz에 대한 수신신호를 대상으로 복조 상관기를 이용한 펄스 압축방법을 이용하여 음파 도달 특성을 분석을 시도하였다 (그림 3). 이를 위해 아날로그로 녹음된 수신신호를 A/D 변환시 송신 주파수의 정수배를 유지하기 위해 모든 수신신호에 대해 4배의 샘플링 주파수를 유지하였다. 복조를 위해 수신된 신호는 직교 진폭 복조 (quardrature amplitude demodulation)를 통해 동위상 (inphase)과 직교 (quardrature) 성분으로 분리하여 저주파수대역 통과 필터를 사용한 후 상관도를 산출하는 방법을 이용하였다.

그러나 실험 후 러시아측에서 제공한 실제 송신 주파수는 음원의 공진상 이점을 얻기 위해 약간 다른 주파수 (250.26 Hz, 260.04 Hz, 366.26 Hz, 405.66 Hz, 634.56 Hz)를 사용에 따라 수신단에서의 비정수 (non-integer) 샘플율이 문제가 되었고 이에 따른 보상을 위해 식 (1)을 이용하여 주기 불일치 (period-mismatch)를 보상하였다 [8].

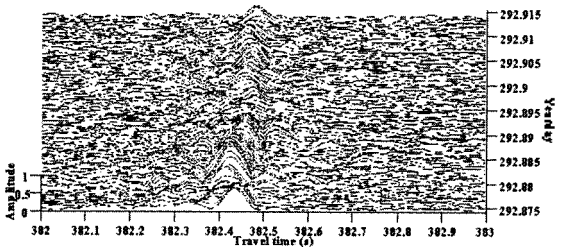
$$x(t-t_d) \xleftrightarrow{f} e^{-j\omega t_d} X(e^{j\omega}) \tag{1}$$

여기서 t_d는 $T_s - \frac{fix(T_s F_s)}{F_s}$ 이며 T_s는 송신신호 길이, F_s는 샘플링 주파수, 그리고 'fix' 는 소수점이하 버림을 택하는 정수화 함수이다.

이러한 처리에 대한 효과는 그림 4와 5에서 같이 250 Hz 수신신호 및 366 Hz 수신신호의 주기 불일치를 보상하지



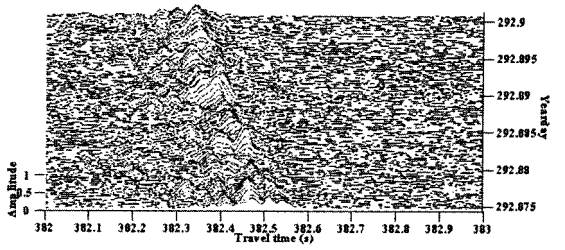
(a) 비보정 도달 구조



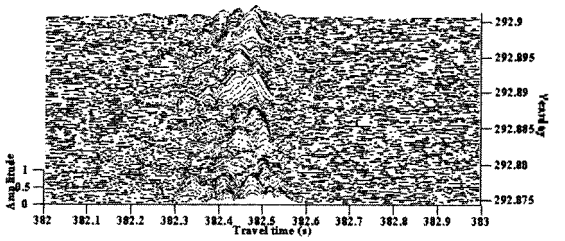
(b) 보정된 도달 구조

그림 4. 250Hz 수신신호 110개 시퀀스의 주기 불일치 비보정 및 보정 도달 구조

Fig. 4. Uncorrected and corrected period-mismatched arrival structures of 110 consecutive m-sequences in a single 250Hz transmission.



(a) 비보정 도달 구조



(b) 보정된 도달 구조

그림 5. 366Hz 수신신호 106개 시퀀스의 주기 불일치 비보정 및 보정 도달 구조

Fig. 5. Uncorrected and corrected period-mismatched arrival structures of 106 consecutive m-sequences in a single 366Hz transmission.

않을 경우 도달시간의 왜곡에 의해 상관 평균 (coherent averaging)시 신호의 해상도가 감소한다는 것을 예측할 수 있다. 그림에서 오른쪽의 세로축은 1999년 1월 1일을 기준으로 계산된 일수를 나타내며 왼쪽은 신호 강도, 가로축은 도달시간을 나타낸다. 그림 4와 5에서 음원으로부터 수신기까지 음파의 도달시간은 최대 에너지를 갖는 시간을 기준으로 382.4-382.5초이다.

2.2. 신호분석

산출된 신호 중에서 수심 290m에서 수신된 250 Hz 수신신호의 110개 시퀀스를 대상으로 도달시간 확산을 계산하고 최적의 상관 평균 시간을 계산을 수행하였다. 이를 위해 수신신호에서 가장 강하게 도달된 신호를 중심으로 1초간의 도달 구조를 추출하였으며 이때 계산된 최대 및 최소 신호 대 잡음비는 각각 약 22.29dB와 11.06dB이다. 또한 같은 방법으로 366 Hz 106개 시퀀스에 대한 최대 및 최소 신호 대 잡음비는 각각 약 24.25dB와 16.40dB이다. 여기서 신호 대 잡음비의 계산은 최대 수신신호를 수신신호 평균으로 나누는 방법을 사용하였다. 수심에 따른 각각의 수직 선배열 수신기에서 동일한 시퀀스를 수신한 경우 수심별 신호 대 잡음비를 계산한 결과 366 Hz의 경우 거의 같은 값을 나타냈으나 250 Hz는 수심이 증가함에 따라 신호 대 잡음비가 감소하는 경향을 보였다. 이러한 기준을 근거로 도달시간 확산 (time spread) 을 계산한 결과 평균적으로 대부분의 에너지는 약 0.5초에 존재하고 있으며 250 Hz가 366 Hz에 비해 도달시간 확산이 작은 것으로 나타났다. 여기서 도달시간 확산 특성은 송신신호가 매질의 간섭효과 (주변소음, 내부파, 전달손실 등)에 의해 수신시 손실되는 것을 나타내며 다중경로 효과를 포함하는 음파의 분해능 측면에서 366 Hz가 250 Hz에 비해 상대적으로 우수하다고 판단할 수 있다.

일반적으로 동일한 음원에 의한 수신신호의 특성을 분석하기 위한 방법으로 상관성 (coherence) 분석이 사용된다. 상관성 분석을 수행하는 경우 여러 수신신호 사이의 선형적 의존성을 판단할 수 있다. 이를 해양음향 토모그래피에서 이용하는 경우 신호 대 잡음비 (signal to noise ratio)를 향상시키기 위해 시간에 따른 도달신호의 크기 및 시간 지연 (time delay)을 고려한 신호처리를 수행할 수 있으며 수신신호의 시간에 따른 도달특성을 파악할 수 있게 된다. 신호의 상관성을 계산하기 위한 과정은 첫 번째로 위상 변조 (phase modulated) 신호를 사용하여 발생시킨 송신 복제 신호와 상관기 (correlator) 를 이용하여 수신신호를 복조 (demodulation) 한다. 두번째로 복조된 각 수신신호의 최대치와 수신신호합의 최대치를 이용하여 신호의 상관성을 계산할 수 있다. 이를 식으로 표

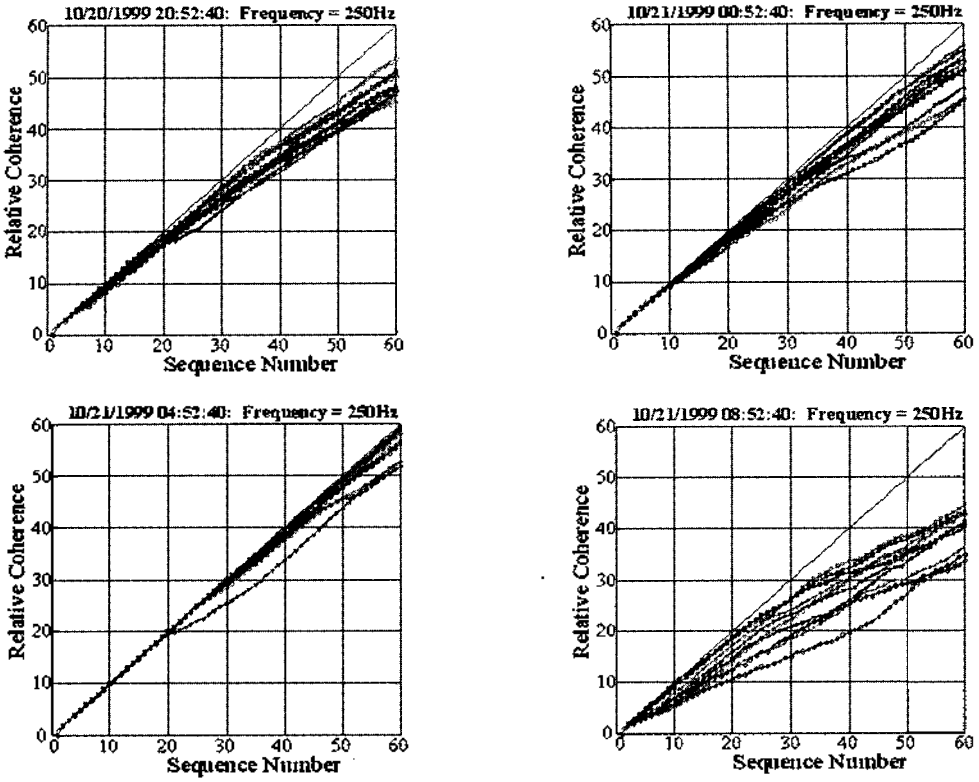


그림 6. 250 Hz 수신신호 상관성
Fig. 6. Coherence for 250 Hz signals.

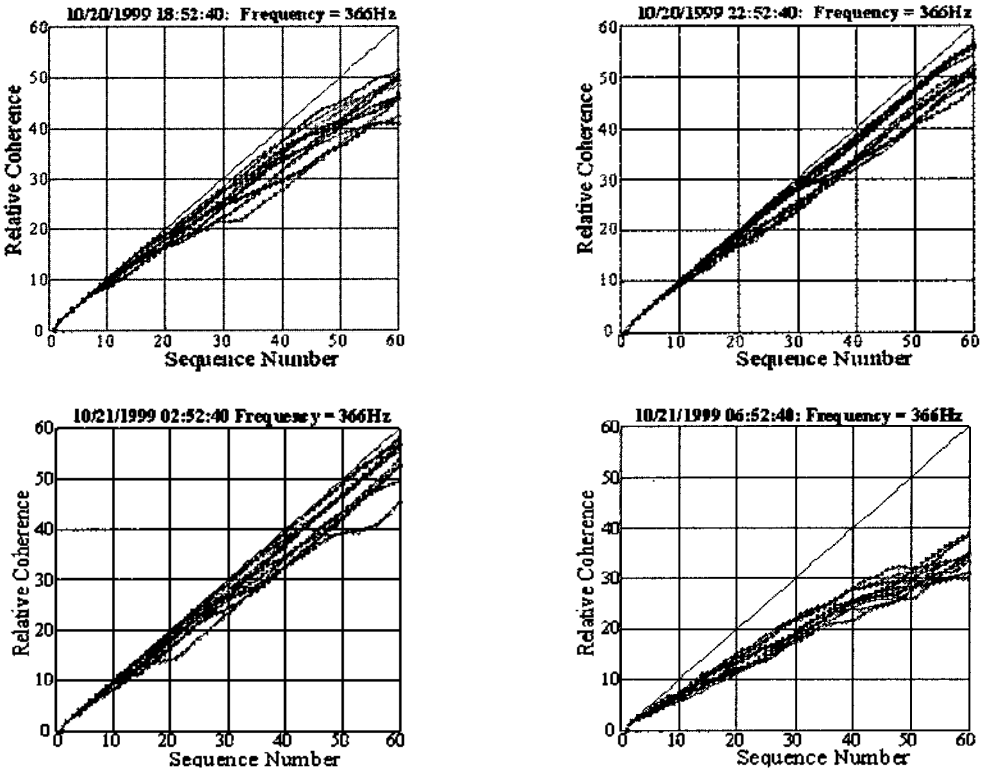


그림 7. 366 Hz 수신신호 상관성
Fig. 7. Coherence for 366 Hz signals.

시하면 식 (2)과 같이 정의할 수 있다.

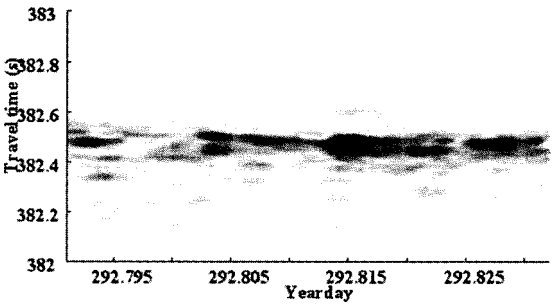
$$Coh_{N,k} \equiv \frac{\max_i \left| \sum_{n=k}^{k-N+1} S_{i,n} \right|}{\sum_{n=k}^{k-N+1} \max_i \left| S_{i,n} \right|} \times N \qquad (2)$$

여기서 $S_{i,n}$는 n번째 수신신호에서 i번째 복소수 샘플(complex sample)을 나타낸다. 식 (2)의 우변 항에서 N을 곱한 것은 N개의 수신신호에 대한 상관성을 상대적으로 나타내기 위한 것이다. 만일 완전히 동일한 신호들이 수신된 경우 $Coh_{N,k}$의 값은 N이 되며 $Coh_{N,k}$은 k번째 수신된 신호를 기준으로 N개의 연속적인 수신신호의 합에 대한 상관성을 나타내게 된다. 따라서 Coh_N은 N개의 연속적인 수신신호에 대한 상관성을 표시한다.

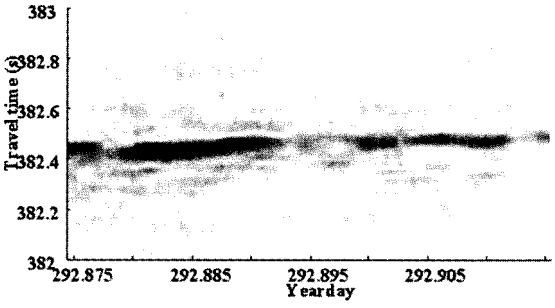
그림 6과 그림 7은 $Coh_{N,k}$ 즉 첫번째 시퀀스를 기준으로 60개의 연속된 수신신호에 대한 상관성을 나타낸 것으로 10개의 수신기에 대해 상관성 분석을 수행하였다. 그림에서 가로축은 시퀀스의 수를 나타내며 세로축은 시퀀스 수에 대한 상대적인 상관성을 표시하였으며 분석자료는 1999년 10월 20일 18시 52분부터 대략 10월 21일 9시까지 2시간 간격으로 250 Hz와 366 Hz 신호를 포함하고 있다. 그림에서 10월 21일 6시 52분 (366 Hz)과 8시52분 (250 Hz) 자료는 상관성 90% 이상을 유지하는 지속시간은 10분 이하로 분석되고 이 자료를 제외하고 전반적으로 시퀀스의 수가 증가함에 따라 상관성이 증가하는 것으로 나타났다. 특히 10월 21일 4시 52분 (250 Hz) 자료의 경우 상관성이 가장 양호하게 나타나 약 25분으로 분석되었다. 전체적으로 상관성을 90%로 설정한 경우 수신기별로 산출된 평균적인 지속시간은 약 3분에서 25분으로 나타났으며 평균은 약 16.5분이다. 상관성에 영향을 미치는 요인은 위에서 언급했듯이 매질의 간섭효과에 의해 신호대 잡음비에 영향을 미쳤다고 할 수 있다. 이 실험에서 시간에 따른 상관성은 약 30분 이상에서는 나타나지 않은 것으로 분석되었으며 주된 요인으로는 도달시간의 변화가 큰 영향을 미치는 것으로 판단되며 시각적으로 그림 4와 그림 5에서 시퀀스별로 가장 강하게 수신된 신호가 약 1시간 동안에도 약 100ms 정도의 차이를 갖는 것으로 나타난다.

수신신호의 시퀀스별 신호강도 측면에서 분석하기 위해 250 Hz와 366 Hz에 대해 4시간 간격으로 1시간 동안 수신된 결과를 분석하였다. 366 Hz의 경우 10월 20일 18시 52분부터 19시 52분까지 그리고 22시 52분부터 23시 52분까지 매 약 30초마다 수신된 각 106개 신호를 도달시간에 따라 나타내었으며 250 Hz의 경우 10월 20일 20시 52분부터 21시 52분까지 매 약 30초마다 수신된 110개 신호를 같은 방법으로 나타내었다 (그림 8(a),(b),(c)). 그림 Fig 8(a) 366 Hz의 경우 도달신호의 강도가 약 15분 내외의 주기로 강하게 나타났으며, 4시간 뒤의 수신신호 분석 결과인 그림 8(b)의 경우 약 15분간 지속되는 강한 수신신호가 나타났다. 반면에 그림 8(b)의 경우 신호강도가 상대적으로 약하며 시간에 따라 도달형태가 다양하게 나타났다.

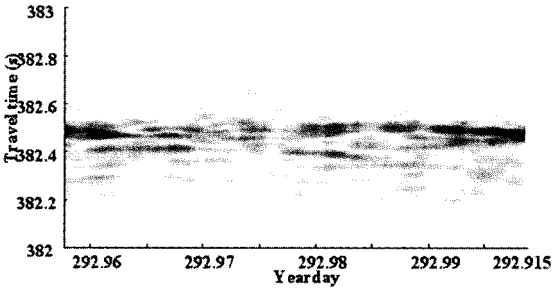
동해 중북부 해역에서 위와 같은 음파 도달시간 및 신호 강도의 변화를 일으키는 원인은 송수신기 사이의 매질 구조에 의한 영향 중 내부파와 같은 단주기 변동에 의한 영향이라고 추정할 수 있다. 지금까지 연구된 바에 의하면 내부파의 생성 기작에 대해서는 정확하게 알려져 있지



(a) 366 Hz



(b) 250 Hz



(c) 366 Hz

그림 8. 수신신호 강도 특성
Fig. 8. Variations of signals characteristics.

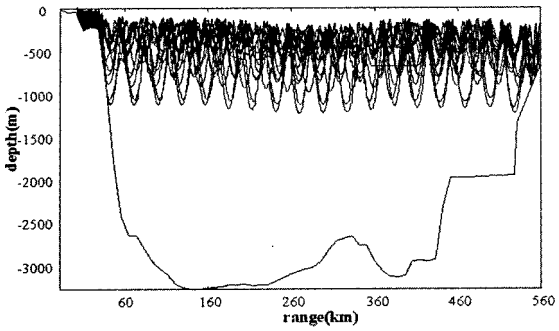


그림 9. RAY 모델을 이용한 모의 결과
Fig. 9. RAY simulation result.

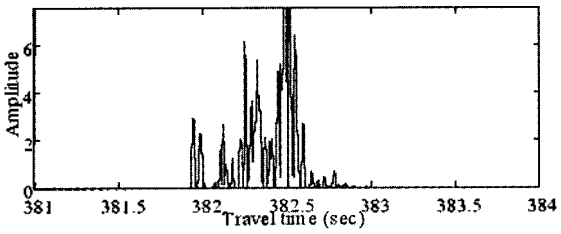


그림 10. RAY 모델을 이용한 도달구조
Fig. 10. The modeled signal arrival structure using RAY model.

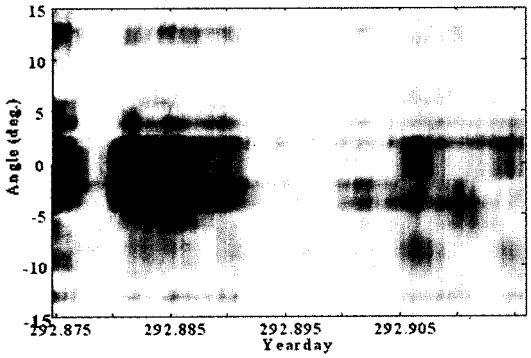


그림 11. 250Hz 수신신호 10채널에 대한 빔형성
Fig. 11. Beamforming of VLA consisting of 10 sensors in 250 Hz transmissions.

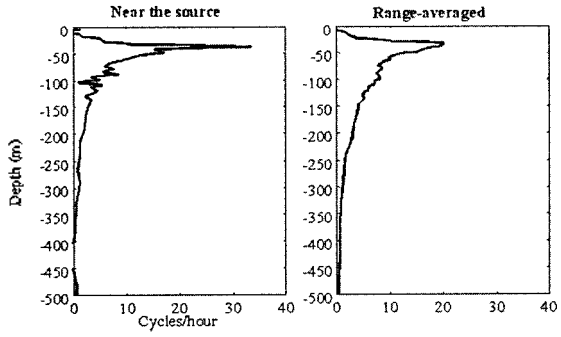


그림 12. 부력주파수의 수직 분포
Fig. 12. Vertical distributions of buoyancy frequency.

않으나 성층화된 해양에서는 지구 자전에 의한 관성주파수부터 해양매질에 의한 부력주파수 사이의 주파수를 갖는 다양한 주기 및 진폭의 내부파가 발생될 수 있으며 내부파에 의한 소규모의 시공간적 해양 매질의 변화에 의해 음파 전달시 진폭 및 위상을 변화시킬 수 있다고 알려져 있다[9-11]. 그림 9는 러시아 해양조사선이 측정한 CTD (conductivity, temperature, depth sensor) 자료를 이용하여 음선 모델인 RAY를 이용하여 250 Hz음원과 수직선배열 중 280m에 위치한 수신기 사이의 고유음선 (eigenray)을 계산한 결과이며 그림 10은 RAY 모델에 의한 고유음선 정보에 의한 수신신호 도달 구조를 나타낸 것이다[12].

고유음선 정보에 의하면 주된 도달각은 ±5도 사이로 나타났으며 10월 20일 20시 52분부터 21시 52분까지 매 약 30초마다 수신된 250 Hz 110개 시퀀스에 대해 10채널에 대해 빔형성 출력을 계산한 결과 주된 신호는 ±5도 사이에서 강하게 나타났다 (그림 11). 그림 9에서 나타나 있는 것과 같이 음파는 음원으로부터 대륙사면에 도달되기까지 해저면과 많은 상호작용이 있으며 그 이후 최소 음속층을 따라 굴절하며 수신기까지 도달하게 되며 일반적으로 내부파가 발생할 수 있는 지역인 음원 부근에서 대륙사면까지의 범위에서 주된 음파의 전달 경로를 변형이 일어난다고 할 수 있다. 이러한 영향을 추정하기 위해 음원과 수신기 사이의 평균적인 수온구조에 의해 발생될 수 있는 주기적인 움직임을 산출하기 위해 그림 12에서와 같이 수심별 부력주파수를 계산하였다. 그림 12(a)는 음원 부근에서의 CTD 관측결과에 의한 것이며 그림 12(b)는 음원과 수신기 사이의 CTD 관측 결과를 평균하여 계산한 부력주파수의 수직분포를 나타낸 것으로 이때 나타날 수 있는 주기는 부력주파수 계산에 의한 2분에서 관성 주기인 20시간 사이로 계산되었다. 따라서 이는 천해역에서의 내부파에 의한 매질의 변화가 수신신호의 도달시간 및 신호강도를 변화시키는 것이라 추정되며, 1984년 9월 블라디보스톡 부근에서 측정된 내부파의 주기는 약 12분에서 20분으로 알려져 있는 기존의 관측 결과와 부합된다고 할 수 있다[13].

위의 분석 결과를 종합해 보면 도달시간 확산 계산결과 대부분의 에너지는 0.5초에 존재하고 있으며 366 Hz가 250 Hz에 비해 신호 대 잡음비 및 도달시간 시간확산 측면에서 우수하다고 판단된다. 또한 신호의 상관성은 두 개 주파수 대역에서 상관성 90%를 기준으로 3분에서 25분 사이로 나타났으며 평균적으로 16.5분으로 나타났다. 이는 신호강도의 시간별 분포에서도 15분 내외의 주기가 강하게 나타났다.

IV. 결론 및 토의

1999년 9월부터 10월까지 한국 동해 중북부 해역에서 저주파수 장거리 음파전달 특성을 규명하기 위해 저주파수 음원에 의한 m-시퀀스를 이용하여 음향실험을 실시하였다.

수신신호는 상관기를 이용하여 처리하여 분석한 결과, 첫번째로 약 560km거리에서의 음파전달 경로에 의한 도달시간 확산은 약 0.5초로 계산되었으며 두번째로 시퀀스별 상관성은 약 3분에서 25분 내외의 변동성을 포함하고 있다. 이러한 변화는 음원 부근의 매질의 변동에 의한 영향으로 음파는 초기 음원 위치에서 대륙사면까지 해저면과 많은 상호작용이 있으며 그 이후 최소 음속층을 따라 수신기까지 도달하게 된다. 따라서 이는 천해역에서의 내부파에 의한 영향이라 추정되며 1984년 블라디보스톡 부근해역에서 관측된 내부파의 주기와 거의 일치하는 결과로 음파의 시간적 변화 양상을 잘 재현했다고 판단된다.

반면에 본 실험에서 수신기의 정확한 위치 및 배열 형태의 시간적 변화 파악 및 장기 관측이 이루어지지 않아 중간 매질에서의 중규모 해양운동 (전선 및 소용돌이 등)의 관측이 불가능하였다. 따라서 해양에서 존재할 수 있는 주기적인 매질의 변동 요소인 단주기 내부파에서 중규모 및 대규모 해양순환을 모니터링하기 위해서는 장기간의 해양음향 토모그래피 실험이 필수적이라 하겠다. 또한 향후 수신신호로부터 정확한 도달시간을 실시간으로 추출하여 해양매질의 변동을 모니터링하기 위해서는 음원 신호의 최적주기 설계 및 수신신호의 시간지연, 수직도달각, 도달시간, 도플러 효과, 시간 동기화 (time synchronizing) 기법 등의 파라미터 정밀 추정 연구가 필수적이다. 이를 위해서는 수신기 하드웨어 구성시 수신기의 위치, 각 수심별 청음기의 위치 및 DGPS 등과의 연동을 통해 수신시간 모니터링이 가능해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초 연구 (1999-2-135-002-3) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. W. Munk, P. Worcester, and C. Wunsch, *Ocean Acoustic Tomography*, Cambridge University Press, London, Chap. 1, pp. 1-29, 1995.
2. W. Munk, and C. Wunsch, "Ocean acoustic tomography: A scheme for large scale monitoring," *Deep Sea Res.* 26, 123-161, 1979.
3. P. Worcester, B. Cornuelle, and R. Spindel, "A review of ocean acoustic tomography," *Rev. Geophys. Supplement*, 557-570, 1991.
4. 나정열, 한상규, 이재학, 심태보, 김구, "동해에서 해양음향 토모그래피에 의한 중규모 현상관측," 한국해양학회지-바다, Vol. **4**, 170-179, 1999.
5. S Oh, J. Na, and J. W. Choi, "Inverting vertical-slice tomography measurements in the East Sea using explosive charges," The 10th PAMS/JECSS Workshop, Chap. **8**, 5-8, 1999.
6. T. G. Birdsall and K. Metzger, "Factor inverse matched filtering," *J. Acoust. Soc. Am.*, **79**, 91-99, 1986.
7. R. L. Peterson, R. E. Ziemer, and D. E. Borth, *Introduction to spread-spectrum communications*, Prentice Hall, New Jersey, Chap. **3**, pp. 89-148, 1995.
8. A.V. Oppenheim and R. W. Schafer, *Discrete-time signal processing*, Prentice-Hall, New Jersey, Chap. **8**, pp. 536-547, 1989.
9. J. A. Colsi, S. M. Flatte, and C. Bracher, Internal-wave effects on 1000 km oceanic acoustic propagation: simulation and comparison with experiment, *J. Acoust. Soc. Am.*, **96**, 452-468, 1994.
10. S. M. Flatte, R. Dashen, W. Munk, and K. M. Watson, *Sound transmission through a fluctuating ocean*, Cambridge University Press, London, Chap. **8**, pp. 120-144, 1979.
11. C. Garrett and W. Munk, "Internal waves in the ocean," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **11**, 339-369, 1979.
12. Bowlin, J. B., J. L. Spiesberger, T. F. Duda, and L. F. Freitag, *Ocean Acoustical Ray-Tracing Software RAY*, Tech. Rep. WHOI-93-10, Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Mess., pp. 49, 1992.
13. N. Serebriany, "Long life inversions of temperature and internal waves on a shelf," *Oceanology*, **35**, 495-504, 1995.

저자 약력

● 오 선 택 (Suntaek Oh)
1992년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 (이학사)
1995년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 대학원 (이학석사)
1999년 3월~현재: 한양대학교 지구해양과학과 대학원 박사과정
※ 주관심분야: 해양음향 토모그래피, 수중음향 신호처리, 수중음향 모델링

● 나 정 열 (Jungyul Na)
한국음향학회지 제8권 제6호 참조

● 오 택 환 (Taekhwan Oh)
2000년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 (이학사)
2000년 3월~현재: 한양대학교 지구해양과학과 대학원 석사과정
※ 주관심분야: 수중음향 신호처리, 수중소음, 정합장 처리

● 박 정 수 (Joung-Soo Park)
한국음향학회지 제16권 제6호 참조

● 나 영 남 (Young-Nam Na)
한국음향학회지 제15권 제3E호 참조

● 김 영 규 (Young-Gyu Kim)
1983년 2월: 서울대학교 해양학과 (이학사)
1985년 2월: 서울대학교 해양학과 대학원 (이학석사)
1996년 2월: 서울대학교 해양학과 대학원 (이학박사)
1996년 3월~1999년 7월: 서울대학교 해양연구소 특별연구원
1999년 7월~현재: 국방과학연구소 선임 연구원
※ 주관심분야: 물리 해양학, 해양음향 토모그래피