

## 동해에서 SUS-해양음향 토모그래피를 적용한 해양내부 수온관측 : 예비결과

한상규, 나정열, 이성욱

한양대학교 지구해양과학과

심태보, 최진혁, 정문섭, 박정수

국방과학연구소

### Submerged Temperature Measurements using SUS-Ocean Acoustic Tomography Technology in the East Sea : Preliminary Results

Sang Kyu Han, Jung Yul Na, and Seong Wook Lee

Department of Earth and Marine Sciences, Hanyang University

Taebo Shim, Jin Hyuk Choi, Mun Sub Jurng, and Joung Soo Park

Agency for Defense Development

본 논문은 한국과학재단 연구비(96-0703-0201-3) 및 수중음향특화연구센터 연구비 지원에 의한 결과임

동해 울릉분지에서 해양내부의 수온구조 파악을 위하여 수중 폭발성 음원인 SUS를 이용한 해양음향 토모그래피 실험을 1998년 8월에 실시하였다. 토모그래피 실험은 30, 60 km 반경으로 36개의 지점에서 항공기를 이용하여 SUS를 투하하고 관측해역 중앙에 위치한 선박에서 선배열수신기(10개의 수신기 배열)로 수신하였다. 토모그래피 실험에 의한 역산 결과를 비교하기 위하여 AXBT를 이용한 수온관측이 동시에 수행되었다. AXBT 관측으로 울릉분지에서 자주 나타나는 난수성 소용돌이가 관측되었으며 이는 관측해역의 남동쪽에 위치하고 있으며 남서방향에서 북동방향으로 진행하는 형태를 보이고 있다. 음파의 도달시간 차이를 이용한 역산결과는 해양내부의 수온분포를 보여주는데 오차가 거의 새로운 해양음향 토모그래피 기법의 도입 필요성을 제시한다.

## 1. 서론

해양음향 토모그래피를 적용한 해양탐사 방법은 해양내부의 해황을 추정하는 기술로서 대양의 해양내부 수온변화 관측과 천해의 유속감지와 같은 응용단계로 접근해 가는 수준에 이르고 있다. 해양음향 토모그래피를 이용한 해양탐사는 음파 도달시간의 정확성 및 높은 분해능 때문에 음원과 수신

기를 대상해역에 고정설치하는 방법이 널리 이용된다. 나 (1996)[1]은 동해에서 실시간 해양탐사를 위한 방법으로 송신기와 수신기를 고정설치하는 방법보다 폭발성 음원인 SUS (signal underwater sound)를 이용한 해양음향 토모그래피 방법을 제시한 바 있다. SUS를 이용한 토모그래피 실험은 폭발수심과 폭발시간 측정의 불확실성으로 실제 실험이 활발하지 않으나 최근에 지중해와 동

해에서 SUS를 음원으로 사용한 해양음향 토모그래피의 성공적인 실험결과를 보고한 바 있다[2][3][4].

본 논문에서는 지난 97년 실험에 이어 두번째 실험인 98년 SUS-OAT 실험결과를 분석하여 울릉분지의 중규모 해양 현상을 관측하였다.

## 2. SUS-OAT '98 실험

SUS 해양음향 토모그래피 현장실험 해역은 Fig. 1에 표시한 바와 같이 평균 수심 2000 m인 동해의 울릉분지 ( $36^{\circ}25' - 37^{\circ}25'N$ ,  $129^{\circ}55' - 131^{\circ}10'E$ )이다. 실험은 1998년 8월 11일에 실시하였다. 수신선박은 실험해역의 중앙에 위치하였으며 ( $36^{\circ}55'N$ ,  $130^{\circ}30'E$ ) 선배열수신기를 270 m부터 360 m까지 10 m 간격으로 설치하였다. SUS는 항공기에서 음원 위치를 기준으로 원형으로 투하하였으며 폭발수심은 약 244 m (800 ft)이고 내원과 외원의 반경은 30 km와 60 km였다. 내원은 30도 간격으로 12발, 외원은 15도 간격으로 24발로 36개의 음원을 설정하였다. 또한 토모그래피 역산결과를 비교를 위하여 16개 징점에서 SUS 투하와 함께 AXBT (airborne expendable bathythermograph)를 투하하여 실제 수온 분포를 측정하였다.

Fig. 2는 실험해역의 장기간 수온관측값으로부터 구한 표준해양에서의 음선 전파경로이다. 음원과 수신기의 수평거리가 29 km 정도 떨어진 경우는 해저면 반사가 한번, 56 km 떨어진 경우는 두번의 해저면 반사후에 수신기에 도달하며 각 음선별 도달시간을 음향모델을 이용하여 구하면 Fig. 3과 같다. Fig. 2의 음선경로에 도달시간 차례로 음선 식별자 (ray identification) 번호를 부여하였으

며 각각의 음선식별자에 따라 도달시간의 기준을 정한다.

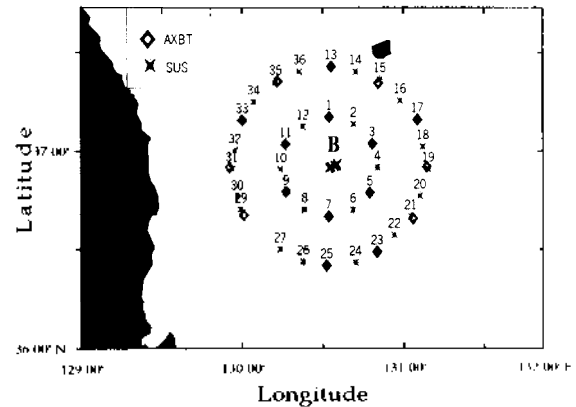
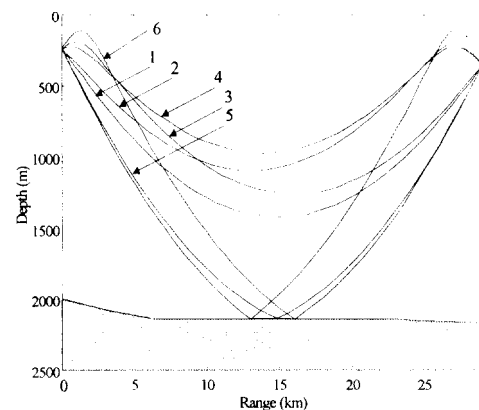
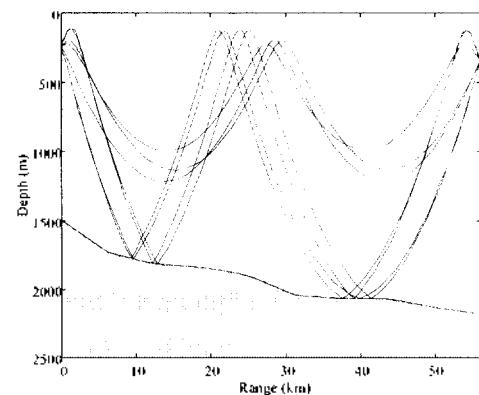


Fig. 1. Location map the SUS-OAT experiment.



a) 29 km range



b) 56 km range

Fig. 2 Eigenray tracing in the canonical ocean.

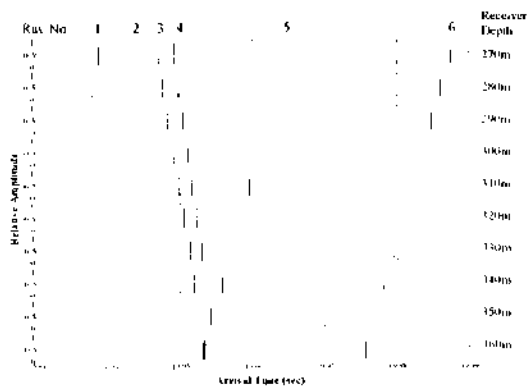


Fig. 3. Calculated arrival time structure in the canonical ocean.

SUS와 같은 음원을 이용한 실험에서 중요한 분석의 하나는 음파의 도달시간, 폭발수심 및 폭발위치 등의 정확한 측정이다. 항공기 속도와 고도가 일정하면 SUS 투하 시간부터 수면까지의 도달시간 계산은 비교적 용이하나 해수면부터 폭발수심까지 하강 시간은 투하해역의 밀도 수직분포 및 수면에서의 투하 상태의 영향을 받는다. 본 실험에서는 대기중에서 자유낙하를 가정하였다. 수면에 도달한 SUS는 처음에는 등가속도로 감속하다 어떠한 수심부터는 일정한 속도로 폭발수심까지 하강하게 되는데[5] 이를 관계로부터 폭발시간을 산정할 수 있다. 즉, SUS의 폭발시간은 대기중 낙하시간, 해수면에서 등속도 하강시작 수심까지의 낙하시간 및 이후 폭발수심까지의 낙하시간의 합으로 표시 된다. 이때 등속도 낙하 시작 수심은 해수밀도, SUS의 밀도 및 부피, 그리고 마찰계수의 함수로 주어진다. 심해용 MK64의 경우 폭발수심은 약 244 m (800 ft) 이고 폭발수심의 오차는 약 10%이다.

본 실험의 관측 오차는 항공기와 수신선박의 위치오차, 대기와 해수중의 하강시간과 폭발수심 및 폭발시간에 의한 오차로

구분할 수 있다. 해수면에서 폭발수심까지 하강하는 시간은 해수의 밀도와 폭발수심에 따라 달라진다. 해수 밀도차에 의한 폭발시간 오차는 약 0.2%로 이에 따른 오차는 약 54.0 ms이고 폭발수심에 따른 오차는 약 10% 정도로 나타나는데 충격파와 첫번째 기포파의 시간간격은 폭약의 무게와 폭발수심에 따라 결정되므로[6] 폭발수심  $d$ 는 경험식,  $d = (w^{1/3} K / T_1)^{6/5} - 33 ft$ , 을 사용하여 보정이 가능하다. 여기서  $w$ 는 폭약의 무게 (0.06 lb),  $K$ 는 비례상수 (=4.35),  $T_1$ 은 충격파와 첫번째 기포파와의 시간 간격이다. 항공기가 118 m (400 ft) 상공에서 수중음원을 투하한 경우 대기중에서 낙하시간은 약 4.92 초 정도이고 이 경우 바람 등에 의한 오차를 1%라 가정하면 오차는 약 49.2 ms가 된다. 투하위치와 수신 선박의 위치는 사용한 GPS 특성상 약 50 m 이내의 평균오차를 나타내며 이는 도달시간에서 약 33.3 ms의 오차를 유발한다

### 3. 신호분석 및 도달시간 관측

SUS 신호는 충격파와 기포파들로 구성 되어 있고 해수중에서 음파의 나중경로 현상, 음파의 굴절 및 반사효과에 의한 신호의 확장 및 주파수 변이 등으로 인하여 수신신호는 매우 복잡한 형태로 나타난다 (Fig. 4). 또한 해수중의 주위잡음은 SUS 신호와 유사한 형태의 주파수 특성을 가지고 있어 수신신호의 탐지 및 식별에 장애요인으로 작용하고 충격파에 이어서 기포파가 도달하므로 기포파를 제거하거나 충격파와 기포파를 분리할 수 있어야 정확한 음선별 도달시간을 추측할 수가 있다. 기포파를 제

거하기 위하여 deconvolution 방법[7]이나 inverse filtering과 같은 여러가지 신호처리 기법이 사용된다. deconvolution을 이용한 기포파의 제거는 음원의 신호형태를 정확히 입력하여야 하는데 SUS의 음원신호는 폭발 수심 및 폭약의 무게에 따라 신호형태가 달라져 오차를 포함하게 된다.

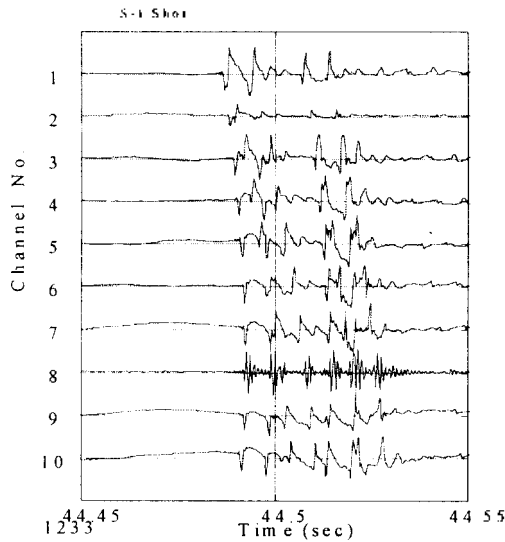


Fig. 4. Time series of observed signal.

본 연구에서는 수신신호의 주파수 대역별 신호를 분리하는 방법에 근거한 wavelet 방법을 사용하여 충격파와 기포파를 분리하여 음선별 도달시간을 관측하였다. 즉, 200 Hz 이하의 주파수 대역에서는 기포파의 에너지가 높고 그 이상에서는 충격파의 에너지가 높으므로 수신신호를 주파수 대역별로 분리하면 충격파와 기포파를 쉽게 분리할 수 있다. Fig. 5는 수평거리가 29 km 떨어진 S-1으로부터 수신한 신호를 wavelet 방법을 이용하여 주파수 대역별(256~512 Hz)로 분리한 결과로 충격파와 기포파의 시간간격을 계산 결과와 일치하므로 충격파의 도달시간을 쉽게 산출할 수가 있었다.

Fig. 5의 제일 먼저 도달하는 음선의 수

심별 도달시간 분포는 표준해양에서의 도달 시간(Fig. 3)과 다른 기울기를 가지고 있는데 이는 선배열 수신기가 해류 및 해상풍 등의 요인으로 인해 남서방향으로 약 20도 정도 기울어 있기 때문이다. 세번째와 네번째 도달하는 음선의 도달시간 분포는 표준해양에서와 같은 기울기를 가지나 첫번째 도달하는 시간과의 차이가 작아지는데 이는 실험해역의 표층음속이 증가한 결과로 판단된다. 결론 및 토의 부분에서 다루겠지만 이를 이용하여 상대적 음파 도달시간 차이를 구하면 SUS를 이용하는 해양음향 토모그래피의 오차가 줄어들 것이다.

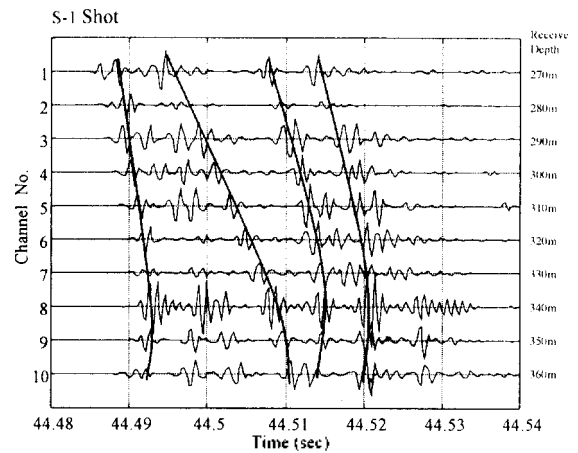


Fig. 5. Observed arrival time structure by using wavelet method for S-1 shot..

#### 4. 수온역산 예비결과

수평단면의 수온분포를 관측하기 위하여 실험해역을 부채꼴 모양의 24개의 격자로 나누어 SVD (singular value decomposition) 방법으로 역산을 시도하였다. 역산모델은 표준해양에서 구한 음파 도달시간과 wavelet 방법으로 구한 음파도달시간의 차이를 이용하였으며 각 수신기의 도달시간은 선배열

수신기의 기울기를 고려하여 보정하였다.

Fig. 6은 AXBT로 관측한 200 m 수심의 수온분포로 실험해역의 남동쪽에 강한 고온수를 보이는데 역산결과에서는 고온수가 미약하게 나타나며 남동방향에 오히려 저온수가 나타난다(Fig. 7). 역산에서의 차이는 음파 도달시간의 관측오차와 역산을 위한 격자구성의 분해에 기인한 것으로 판단된다. 이러한 오차를 줄이는 방법으로 격자의 수를 늘리는 방법이 있는데 이는 수온역산 결과의 분해능을 저하시킬 수도 있다. 아직 역산 예비단계로 1차적인 시도를 하였으며 계속되는 연구를 통하여 오차를 최소화하고자 한다.

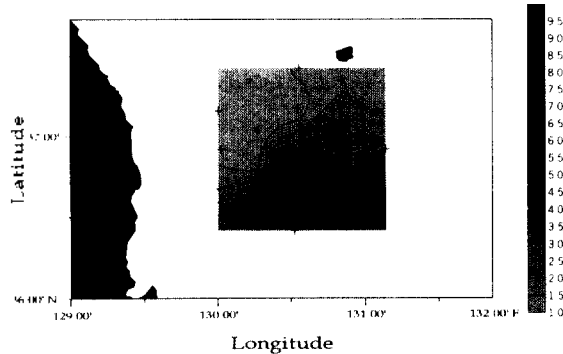


Fig. 6. Observed horizontal distribution of temperature fields at 200 m.

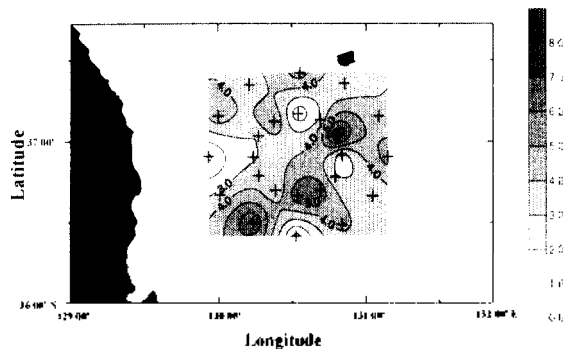


Fig. 7. Horizontal distribution of temperature fields at 200 m depth obtained from the horizontal slice inversion.

## 5. 결론 및 토의

본 연구에서는 동해 울릉분지에서 폭발성 음원인 SUS를 이용한 해양음향 토모그래피 실험을 수행하여 중규모 해양관측을 수행하였다. 수신기를 중심으로 두개의 반경을 가지는 원형으로 음원을 투하하여 중심의 수직선배열 수신기에서 수신한 신호의 음파 도달시간 차이로부터 수평단면에 대한 수온분포를 역산하였다. 역산결과는 실제 관측한 수온분포와 차이를 보이는데 이는 역산의 격자구성, SUS의 폭발수심오차 및 선배열수신기의 경사 등에 의한 것으로 판단된다.

향후 연구에서는 이러한 오차를 최소화하는 방법에 대한 연구가 수행될 예정이다. 폭발수심 및 선배열 수신기의 경사 오차를 최소화하기 위해 다음과 같은 방법을 제시할 수 있다. 즉, Fig. 2의 음선경로를 보면 제일 먼저 도달하는 음선은 음속의 변화가 거의 없는 층을 통과하고 수신기에 도달하므로 이 음선의 도달시간은 항상 같을 것이다. 따라서 수신한 신호중에서 제일 먼저 도달한 음선의 도달시간을 표준해양에서의 도달시간과 같다고 가정하고 그 후에 도달한 음선은 음속의 변화가 심한 표층을 통과한 음선으로 이들 음선의 상대적인 도달시간 차이를 구하여 역산을 시도하는 방법이다.

## 6. 참고문헌

- [1] 나정열, 1996, 해양음향 토모그래피를 이용한 해양탐사 기술 연구, 한국과학재단 연구보고서 93-0700-04-01-3, 135pp.
- [2] J. K. Lynch, von der Heydt, C. Eck, D. Peters, C.-S. Chiu, K. Smith and J. Miller, 1997,

Acoustics Portion of the New England Shelfbreak Front PRIMER Experiment, Internet web site, <http://www.oal.who.edu/AO/topics/Primer>.

[3] S. K. Han and J. Y. Na, 1997, Ocean acoustic tomography to observe the mesoscale variability of temperature fields in shallow water, WESTPRAC IV, 19-21 Nov. 1997, Hong Kong, 430-435.

[4] J. Y. Na, S. K. Han and T. Shim, 1998, Ocean acoustic tomography using explosive charges to observe the submerged mesoscale oceanic variability in the East Sea of Korea, 16<sup>th</sup> ICA and 135<sup>th</sup> ASA, 20-26 Jun., 1998, Seattle, 389-390.

[5] J. A. Knauss, 1978, Introduction to Physical Oceanography, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 338pp.

[6] R. H. Cole, 1948, Underwater Explosions, Dover Pub., Inc., New York, 437pp.

[7] J. M. Hovem, 1970, Deconvolution for removing the effects of the bubble pulses of explosive charges, *J. Acoust. Soc. Am.*, 47, 281-284.