

## 동해에서 해양음향토폴그래피에 의한 중규모 현상 관측

나정열 · 한상규 · 이재학<sup>1</sup> · 심태보<sup>2</sup> · 김 구<sup>3</sup>

한양대학교 지구해양학과, <sup>1</sup>한국해양연구소 해양물리연구부  
<sup>2</sup>국방과학연구소, <sup>3</sup>서울대학교 해양학과 · 서울대학교 해양연구소

### Observation of the Mesoscale Phenomena by Ocean Acoustic Tomography in the East Sea

JUNGYUL NA, SANG-KYU HAN, JAE HAK LEE<sup>1</sup>, TAEBO SHIM<sup>2</sup> AND KUH KIM<sup>3</sup>

*Department of Earth and Marine Sciences, Hanyang University, Ansan 425-791, Korea*

*<sup>1</sup>Physical Oceanography Division, Korea Ocean Research and Development Institute, P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

*<sup>2</sup>Agency for Defense Development, P.O. Box 18, Chinhae 645-600, Korea*

*<sup>3</sup>Department of Oceanography and Research Institute of Oceanography, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea*

동해 울릉분지에서 해양내부 수온구조를 파악하기 위하여 폭발성 수중음원(signal underwater sound, SUS)을 이용하여 해양음향 토폴그래피 실험을 1997년 6월에 실시하였다. 토폴그래피 실험은 120×120 km 격자 바깥쪽 경계선에 SUS 21개를 항공기에서 단시간에 투하하였고 그 신호는 관측해역 남쪽에서 수직선배열 수신기로 수신하였다. 수평단면 역산모델로 얻어진 수온 분포는 150-200 m 수심에서 난수성 소용돌이가 존재함을 보여주어 AXBT에 의한 실측 수온분포와 유사하게 나타났다. 수직모델 역산결과 수직 음속구조 형태는 AXBT 관측결과와 유사하나 250 m 보다 얕은 수심에서는 실제 관측값보다 높은 값을 나타내었다. SUS가 폭발한 수심과 시간이 갖는 불확실성을 고려하여 임의 오류값을 입력한 역산 실험결과는 150-200 m 수심에서 난수성 소용돌이 형태를 보여 주나 절대 수온값이 2°C 정도 낮게 나타났다. 이러한 결과는 SUS를 음원으로 이용할 때 폭발 위치 및 폭발 시간 측정에 오류가 있음에도 불구하고 잘 발달된 중규모 해양현상을 추적하는데 SUS를 이용한 해양음향 토폴그래피 적용 가능성이 매우 높음을 보여준다.

The SUS (Signal, Underwater Sound)-OAT experiment was carried out in the Ulleung Basin of the East Sea on 3 June 1997. The SUS-OAT system consisted of aircraft deployed shots as sources and a vertical line array (VLA) tethered by a receiver ship was used to survey a large area where a mesoscale warm eddy appears frequently. The experiment was carried out such that explosive charges set to detonate at 800 ft depth were dropped in a rectangular (120×120 km). Sources were a rapidly deployable SUS charge (MK 61 MOD 0), and receiver is a fixed VLA, 90 m in length (150-240 m in receiver depth), composed of 10 elements equally spaced. The reference ray paths are computed by range-dependent acoustic model in canonical ocean based on the historical data. The singular value decomposition (SVD) method is used to obtain the horizontal perturbation of the temperature fields. Horizontal distributions of temperature fields at 150 m and 200 m depth show a weak warm eddy observed by AXBT and the inversely estimated temperature shows similar patterns in terms of the location of the warm eddy. In conclusion, the SUS-OAT experiment has been successful to estimate the position of warm eddy and its temperature field in the East Sea of Korea.

### 서 론

바다에서 중규모 현상인 소용돌이와 전선 등은 소위 해양의 날씨를 조절하는 인자로서 매우 중요한 물리적 과정으로 이해되고 있다. 동해는 대한해협을 통하여 공급되는 고온수와 동해 북부 저온수가 남하하여 형성된 전선 주위에 소용돌이가 다양한 크기로 자주 출현한다. 난수성 소용돌이는 특히 울릉도 부근에서 가장 빈번하게 관측되며 이 해역에서 일어나는 해황 변동에 중요한 역할을 하기 때문에 소용돌이 변동에 일으키는 기작에 대

한 이해는 기후변화, 수산 및 해양방위에 필요한 연구대상이 되었다. 신 등(1995)은 울릉도 부근해역에서 소용돌이의 수평 크기가 100-200 km이고 150 m 수심까지 계속되는 수직구조를 유지하는 것을 관측하였다. 이는 울릉분지에서 소용돌이가 표층뿐만 아니라 심층순환까지 역학적인 영향을 미치고 있음을 의미하기 때문에 소용돌이 존재 여부를 파악하는 것이 이 해역에서 해황을 판단하는데 일차적으로 필요한 사항이라 할 수 있다.

선박을 이용하여 이러한 중규모 현상을 관측하려면 막대한 조

사비용이 요구되어 해양학자들에게 큰 부담이 되어 왔으며 이로 인하여 원격탐사에 의한 조사에 관심을 가지게 되었다. 특히, 인공위성 적외선영상(AVHRR)에서 얻어지는 해표면온도 분포는 광역에서 자료를 동시에 반복적으로 얻을 수 있는 장점으로 표층에서 일어나는 해황구조를 추적하는 가장 적절한 방법이다. 그러나 이 경우에도 표층을 제외한 해황구조를 관측하는 것이 불가능하며, 여름철에는 전체 해수면이 가열되므로 추적조차도 용이하지 않는 한계성이 있다. 한편, 해양내부를 원격으로 관측하기 위하여 라그랑쥐안 추적이 가능한 부유체들이 여러 형태로 고안되어 실용화되고 있지만 유속장 추정이 주된 목적이어서 일반적인 해수특성 분포는 충분히 제공하지 못하고 있다.

해양음향 토모그래피는 Munk and Wunsch(1979)가 해양내부 해황을 추정할 수 있는 기술로 제안한 후 꾸준한 연구가 계속되어 대양에서는 해양내부 수온변화 감시와 천해에서는 유속 감시와 같은 응용 단계에 접근해 가고 있으며(Worcestor *et al.*, 1991), 현재 기술적인 측면에서 자료를 실시간에 전달하고 실험의 기동성을 높이는 연구에 초점이 모아지고 있다. 시공간적인 변동이 심한 중규모 해양현상을 관측하기 위한 토모그래피 실험에서는 높은 관측 분해능이 요구되기 때문에 실험의 기동성이 매우 중요한 변수가 된다. 나(1996)는 동해에서 해양음향 토모그래피를 운영하여 실시간 해양탐사를 수행하기 위해서는 송신기와 수신기를 고정설치하기 보다는 어느 하나를 신속히 이동시키는 것이 더 유리하다고 판단하고 폭발성 수중음원(SUS)을 이용한 해양음향 토모그래피 가능성을 제시한 바 있다. SUS를 이용한 해양음향 토모그래피 실험은 폭발수심과 폭발시간 측정의 어려움 때문에 실제 실험은 활발하지 않은 편이지만 최근 Lynch *et al.*(1997)은 성공적인 실험을 보고한 바 있다.

동해에서 해양음향 토모그래피를 이용하여 중규모 현상의 변동성을 측정하기 위한 연구로 Han *et al.*(1996)은 수평단면 및 수직단면 모의 실험 결과 그 응용 가능성이 있음을 보여준 바 있다. 이를 바탕으로 다음 단계 연구로서 SUS를 음원으로 사용한 해양음향 토모그래피로 여름철 울릉분지 내부에 나타나는 소

용돌이를 추정하는 것이 가능한지 보기 위한 현장실험을 실시하였는 바 본 논문에서 실험결과를 설명하고자 한다. SUS 해양음향 토모그래피에서 음향 신호처리 등 방법적인 부분은 다른 논문을 통하여 보고할 예정이며, 여기에서는 SUS 해양음향 토모그래피 실험결과와 역산 부분을 중점적으로 기술하였다. 제 2장과 3장에서는 각각 현장실험에 대한 개요와 SUS 해양음향 토모그래피에 대하여 설명하였고, 제 4장에서는 역산 결과를 논의하였다.

### 현장 실험 개요

SUS 해양음향 토모그래피 현장실험 해역은 Fig. 1에 표시한 바와 같이 평균 수심 2,000 m 이상인 동해 울릉분지(36° 10'~37° 20'N, 130° 00'~131° 20' E)이다. 실험은 1997년 6월 4일 10시 30분부터 15시 30분까지 5시간 동안 실시하였다. 음원은 실험해역의 외곽을 따라 21개 정점에 항공기를 이용하여 투하하였다. 정확한 음파 도달시간 관측을 위하여 SUS 투하 지점 부근 8개 정점에서 305 m(1,000 ft) 깊이에 sonobuoy 수신기(AN/SSQ-53A)를 설치하여 폭발시간과 근거리 음파 도달시간을 측정하였다. 음파 수신은 Fig. 1에 A로 표시한 SUS 투하해역 남쪽(36° 12' N, 130° 24' E)에 위치한 선박에서 수심 150~240 m에 설치한 19개 수신기를 이용하였다. 토모그래피 역산결과를 비교하기 위하여 16개 정점에서 SUS 투하와 함께 AXBT(airborne expendable bathythermograph)를 투하하여 실제 수온 분포를 측정하였다(Fig. 2). 또한 SUS가 폭발한 정확한 위치와 시간관측을 위하여 GPS(NOVADEL사의 OEM Series)를 이용하여 항공기와 수신선박에 설치한 Time Code Reader(CHRONO-LOG, IRIG-B type)의 시간을 동기화하고 Time Code Reader의 신호를 수신신호와 함께 녹음하였다. GPS의 위치오차는 약 50 m이고 Time Code Reader의 분해능은 약 1/100 ms이다. 녹음된 아날로그 신호는 AD 보드(DT 2,831, 12 bit)를 이용하여 4,096 Hz 간격의 디지털 신호로 변환하였다.

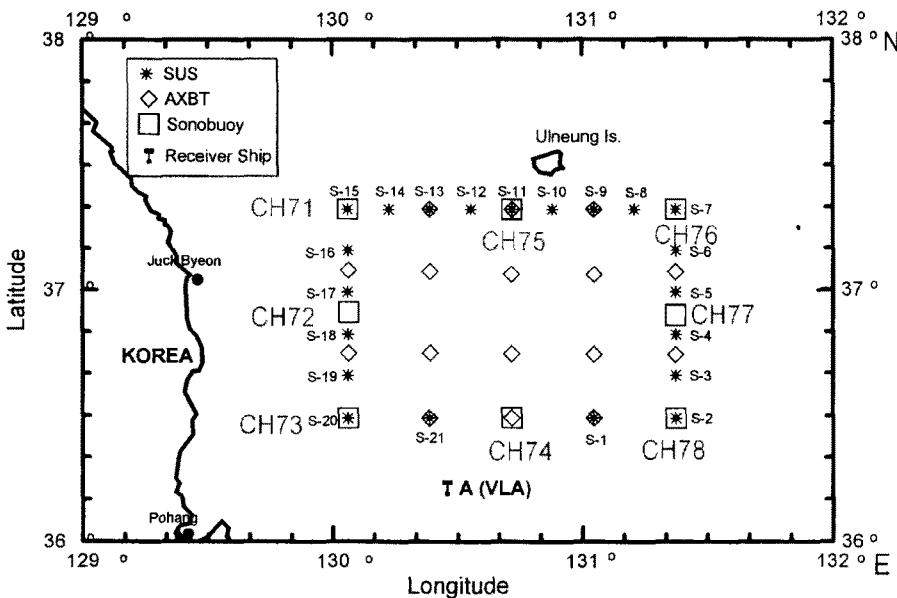


Fig. 1. Location map of the SUS-OAT experiment. The positions of the SUS, AXBT and sonobuoy drops are marked with "\*", "◇", and "□", respectively.

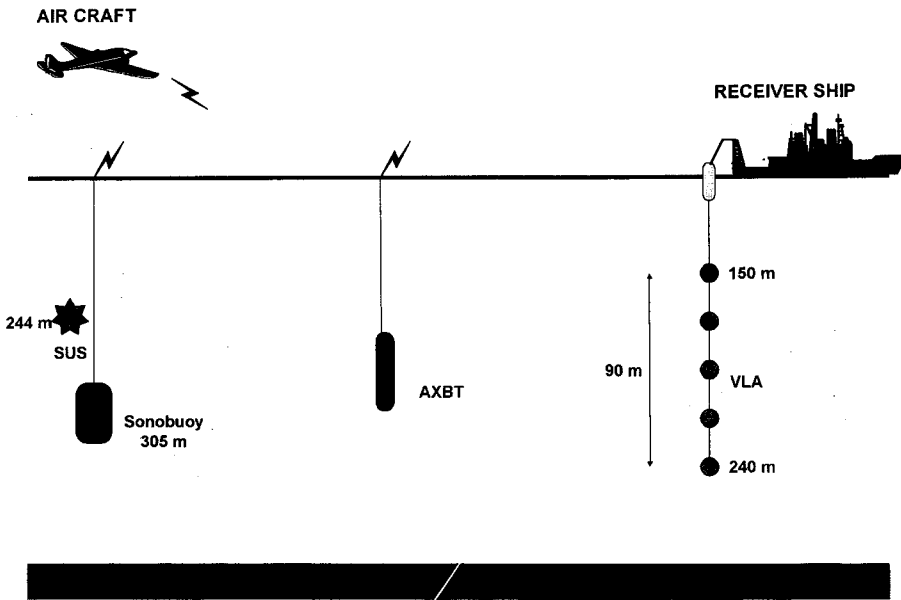


Fig. 2. Geometry of the experiments. The source (charge) depth is 244 m, the sonobuoy receiver depth is 305 m, and the vertical line array depths are from 150 m to 240 m (19 elements).

SUS 실험의 특성

SUS 신호특성

폭약이 폭발할 때 나타나는 음압방사로 충격파가 발생하고 이에 따라 기포가 형성되고 붕괴되면서 나타나는 기포파들로 SUS 신호가 구성되며 폭발하는 수심과 폭약무게에 따라 신호 특성이 달라지는데 SUS가 갖는 신호특성 및 주파수 특성은 여러 실험을 통하여 잘 알려져 있다(Arons, 1948; Blaik and Christian, 1965; Chapman, 1985). 음원이 폭발하여 충격파가 발생하면 주위 음압이 증가하여 음파 전파속도가 빨라진다. 음원이 폭발하는 순간 음속은 약 3,000 m/s로 해수중 음속의 2배가 되지만 시간에 따라 급격히 감소하여 해수중 음속과 같은 속도로 전파된다. 음파가 해수중의 음속보다 빠르게 전파되는 거리는 약 0.1에서 0.001 cm로 매우 짧은 시간동안(약 4 μs 정도) 일어나므로 음압증가에 의한 전파시간 차이는 무시할 수 있다(Herring, 1981). 충격파와 기포파가 갖는 주파수 범위는 10~20,000 Hz 대역으로 광대역 신호이며 50~100 Hz 대역에서 가장 높은 에너지 분포를 갖고 있으며 200 Hz 이하에서는 기포파가 높은 에너지를 가지고 그 이상부터는 충격파 음압준위가 우세하다. 충격파가 발생한 후 기포파들이 발생할 때까지의 시간차는 수중음원 폭발수심에 의해 결정되며 음압은 폭약무게에 따라 달라진다. 본 연구에서 사용한 SUS는 심해용 MK61 MOD 0(이하 MK61)로 244 m(800 ft)에서 폭발하면 폭약 폭발후 0.24 ms( $\tau_s$ )에 충격파가 발생하며 2.49 ms( $\theta_s$ )동안 지속된다. 충격파 발생후 19.44 ms( $T_1$ ) 후에 첫번째 기포파가 형성되고 13.71 ms( $T_2$ ) 후에 두번째 기포파가 나타난다(Fig. 3). SUS는 한번 폭발하여 음파를 방사하므로 신호가 반복되지 않고 신호의 지속시간이 짧기 때문에 신호식별이 토모그래피 실험에서 가장 중요한 부분의 하나다. 만일 수신된 신호가 충격파와 기포파가 섞인 복합 형태로서 분리가 불가능하면 음선별 도달시간 차이를 구할 수 없기 때문에 신호식별이 중요한 음향토모그래피에서 응용 가능성이 낮아진다.

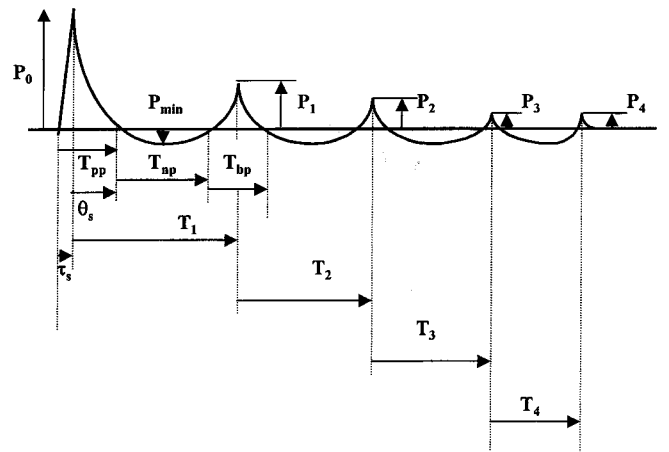


Fig. 3. Parameters of the pressure-time history of explosive charge. The parameters including pressures P, shock and bubble pulse period T, and phase duration  $T_p$ .

음파 도달 시간 예측

SUS와 같은 수중음원을 이용한 실험에서 중요한 문제는 음파 도달시간, 폭발수심 및 폭발위치를 어떻게 정확히 측정할 수 있는가이다. 항공기 속도와 고도가 일정하면 SUS 투하시간으로부터 수면도달에 걸리는 시간은 계산이 비교적 용이하다. 그러나 해수면으로부터 폭발수심까지 하강시간은 투하해역의 밀도 수직 분포 및 수면 입수상태에 따라 달라진다. Fig. 4는 SUS가 투하되고 폭발하는 것을 나타낸 모식도이다. 본 실험에서는 비행기로부터 해수면까지는 대기중 마찰을 무시한 자유낙하를 가정하였다. 수면에 도달한 SUS는 처음에는 등가속도로 감속하다 어떠한 수심부터는 일정한 속도로 폭발수심까지 하강하게 되는데(Knauss, 1978) 이들 관계로부터 폭발시간을 산정할 수 있다. 즉, SUS 폭발시간은 대기중 낙하시간, 해수면에서 등속도 낙하 시작 수심까지 낙하시간 및 이후 폭발수심까지 낙하시간의 합으로 표시된다. 이때 등속도 낙하시작 수심은 해수밀도, SUS의

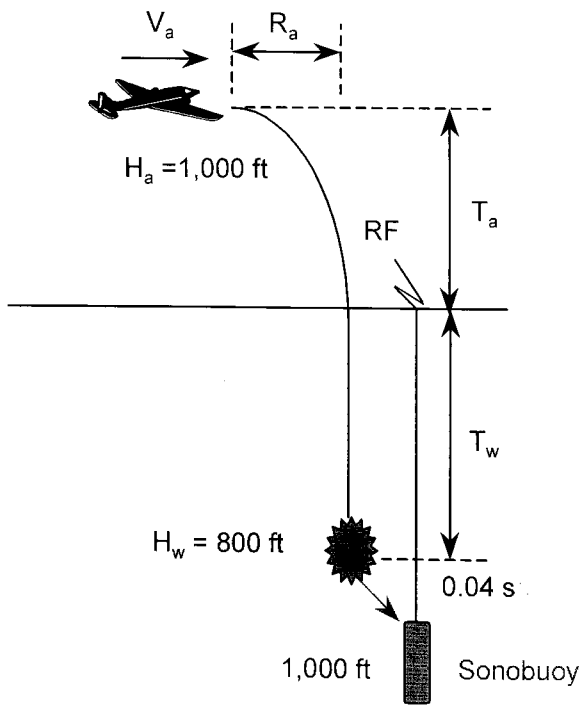


Fig. 4. Geometry of the detonation time measurement of SUS charge.  $T_a$  is a dropping time in air and  $T_w$  is a sinking time in water.

밀도 및 부피, 그리고 마찰계수의 함수로 주어진다. 심해용 MK61의 폭발수심은 약 244 m(800 ft)이고 오차는 약 10%이다.

**관측오차**

본 실험에서 관측오차는 항공기와 수신선박의 위치오차, 대기와 해수중 낙하시간과 폭발수심 및 폭발시간에 의한 오차로 구분할 수 있다. 해수면에서 폭발수심까지 하강하는 시간은 해수밀도와 폭발수심에 따라 달라진다. 실험해역인 울릉분지의 평균 밀

Table 1. Differences of the explosion time of the SUS charges due to sea water density and explosion depth variations

Sea water density (kg/m <sup>3</sup> )	Detonation Depth (ft)		
	720	800	880
1025	42.17574 sec	46.97333 sec	51.77092 sec
1026	42.22430 sec	47.02744 sec	51.83057 sec
1027	42.27295 sec	47.08163 sec	51.89032 sec
1028	42.32167 sec	47.13591 sec	51.95015 sec

Table 2. Possible sources of error in SUS-OAT

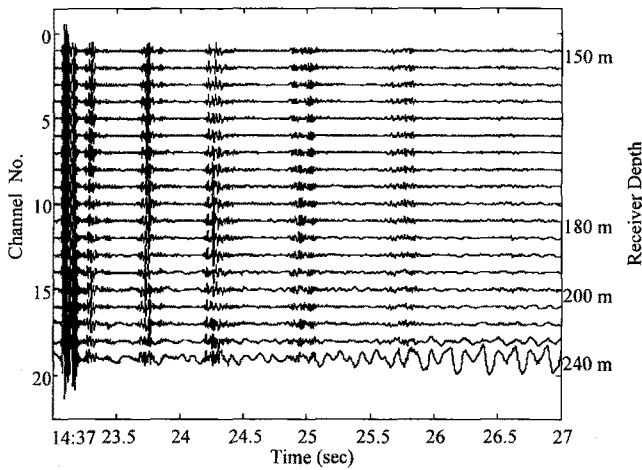
Sources	Range or Depth (m)	Elapsed Time (s)	Error on Travel Time (ms)	Remarks
Receiver Ship Position (GPS)	± 50		± 33.3	Rms error
Aircraft Position (GPS)				
Drop Time in Air	± 50		± 33.3	Rms error
Sinking Time in Water		7.88	± 78.8	Estimated error
Maximum Detonation Depth Error	± 24	47.08	± 54.2	Rms error
			± 4,808.8	Corrected
Total Error			± 199.6	

도변화를 고려하면 해수밀도차에 의한 폭발시간 오차는 약 0.1%로 이에 따른 오차는 약 54.2 ms이고 MK61의 폭발수심은 약 10% 범위에서 변할 수가 있는데 이를 침강시간으로 계산하면 오차는 약 10% 정도로 나타난다(Table 1). 충격파와 첫 번째 기포파의 시간간격은 폭약무게와 폭발수심에 따라 결정되고 (Cole, 1948) 폭발수심  $d$ 는 경험식,  $d(w^{1/3}K/T_1)^{6/5} - 33ft$ 를 사용하여 보정 가능하므로 이는 음파도달시간 관측오차에 포함하지 않았다. 여기서  $w$ 는 폭약무게(1.8 lb),  $K$ 는 비례상수, 그리고  $T_1$ 은 충격파와 첫 번째 기포파와의 시간 간격이다. 항공기가 305 m(1,000 ft) 상공에서 수중음원을 투하할 경우 대기중에서 낙하 시간은 약 7.89 초 정도이고 이 경우 바람 등에 의한 낙하시간 오차를 1%라 가정하면 오차는 약 78.9 ms가 된다. 투하위치와 수신 선박의 위치는 사용한 GPS 특성상 약 50 m 이내의 평균오차를 나타내며 이는 도달시간에서 약 33.3 ms의 오차를 유발한다. Table 2는 본 실험에서의 가능한 오차의 범위를 정리한 것이다.

**신호처리**

SUS 신호는 충격파와 기포파들로 구성되어 있고 해수중에서 음파의 다중경로 현상, 음파의 굴절 및 반사효과 및 주파수 변이 등으로 인하여 수신신호는 매우 복잡한 형태로 나타난다(Fig. 5). 해수중 주위잡음은 SUS 신호와 유사한 주파수 특성을 가지고 있어 수신신호를 탐지하고 식별하는데 장애요인으로 작용한다. 충격파에 이어서 기포파가 도달하므로 기포파를 제거하거나 충격파와 기포파를 분리할 수 있어야 정확한 음선별 도달시간을 추출할 수가 있다. 기포파를 제거하기 위하여 디콘볼루션(deconvolution) 방법(Hovem, 1970)이나 역필터링(inverse filtering)과 같은 여러가지 신호처리 기법이 사용된다. 디콘볼루션 방법을 이용하여 기포파를 제거하려면 음원 신호형태를 정확히 입력하여야 하는데 SUS 음원신호는 폭발수심 및 폭약무게에 따라 신호형태가 달라져 오차를 포함하게 된다.

본 연구에서는 수신신호를 주파수 대역별로 분리하는 방법에 근거한 wavelet 방법을 사용하여 충격파와 기포파를 분리하여 음선별 도달시간을 관측하였다(Fig. 6). 즉, 200 Hz 이하 주파수 대역에서는 기포파의 에너지가 높고 그 이상에서는 충격파의 에너지가 높으므로 수신신호를 주파수 대역별로 분리하면 충격파와 기포파를 쉽게 분리할 수 있다. Fig. 6은 수평거리가 108 km 떨어진 S-4로부터 수신한 신호를 wavelet 방법을 이용하여 주파수 대역별로 분리한 결과이다. 128~256 Hz 대역에서는 기포파의 에너지가 높아 충격파와 구별이 어렵지만 256



**Fig. 5.** Time series of observed signal. Left axis means the channel number of vertical line array and right axis indicates corresponding receiver depths. The time is not arrival time of the signal of which first arrival time is about 73.78 second.

~512 Hz 대역에서는 기포파의 에너지가 낮아져 충격파가 우세하게 나타난다. Fig. 6b)에서 충격파와 기포파의 시간간격은 계산 결과와 일치하며 이를 활용하여 충격파 도달시간을 산출하였다.

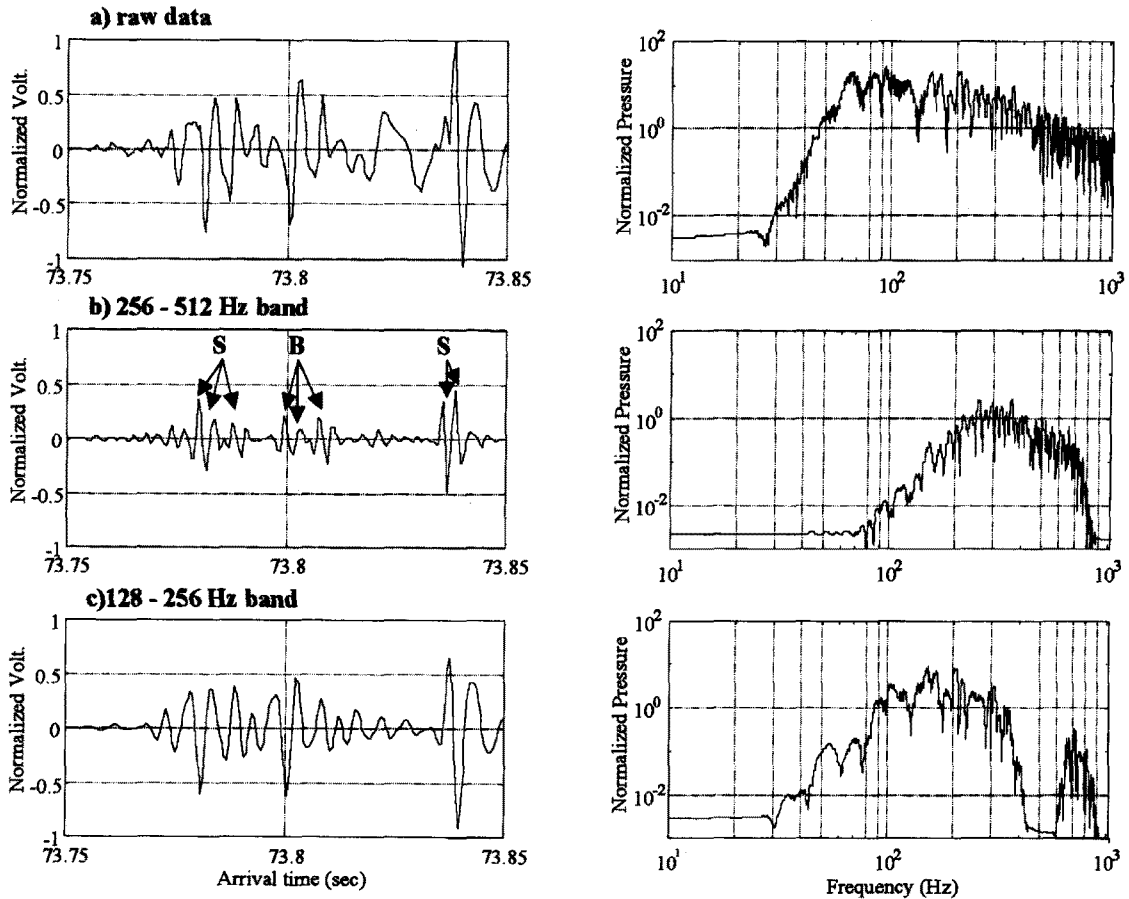
## 역 산

현장실험 결과를 처리하여 얻은 SUS 음원으로부터 수신기까지 음파전달 시간을 이용하여 수평단면모델과 수직단면모델에 의한 역산을 하였다. 표준해양은 국립수산진흥원(FRDA, 1986)의 정선관 측자료의 평균값으로 설정하였으며, 기준 음선경로 및 음선식별자 (ray identifier)는 표준해양에서 거리종속(range-dependent) 음향모델로 계산하였다(Fig. 7,8).

수평단면 또는 수직단면 역모델은 행렬식,  $Ax=b$ 로 표현된다. 여기서  $x$ 는 미지수로 각 격자가 갖는 음속변동량이며  $b$ 는 표준해양에서 음파 도달시간과 실험에서 얻어지는 실험해양에서 음파 도달시간의 차이로 알고 있는 벡터다.  $A$ 는 각 격자의 크기와 표준해양이 갖는 음속으로 계산되어 주어지는 인자를 갖는 계수행렬이다. 다음에 설명할 수평 및 수직단면 모델들은 설정된 단면에 있는 격자수와 단면을 통과하는 음선의 수에 따라 역모델 특성이 결정된다. 역모델 산정 과정은 여러 문헌에서 찾을 수 있다(예, Munk *et al.*, 1995). 역모델은 일반적인 해법인 SVD(singular value decomposition, Lee, 1993)을 이용하였다.

### 수평단면 역산

수평단면 역모델을 구성하기 위하여 조사해역을 1/6도 간격을



**Fig. 6.** (Left) The separated time series of SUS signal for S-4 charge. (Right) The frequency spectra of time series.

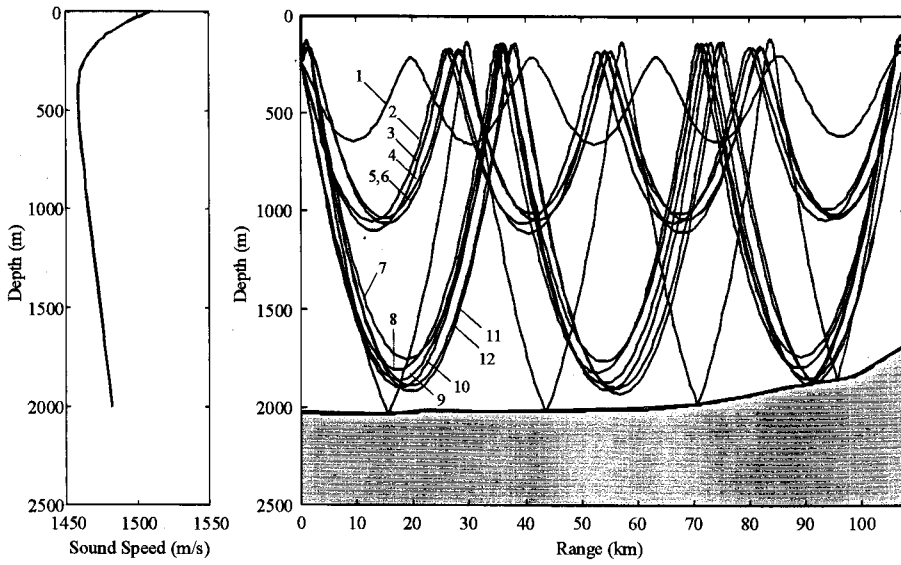


Fig. 7. Sound speed profile and eigenray which connect ray source and receiver in the canonical ocean. The horizontal range is 108 km, source depth is 244 m, and receiver depth is 200 m. The numbers in eigenray corresponding to ray identifier.

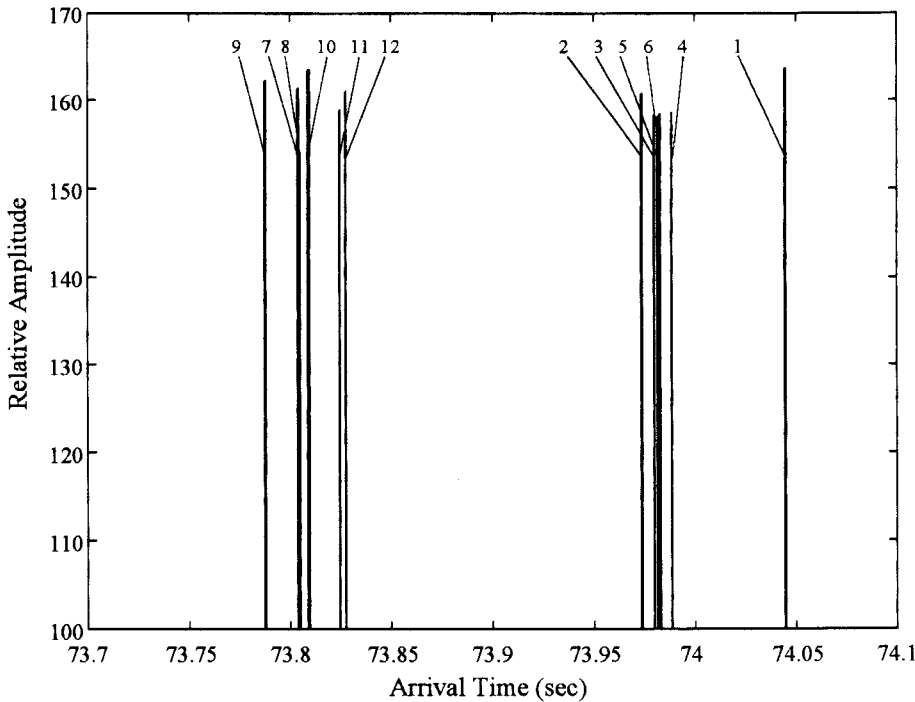


Fig. 8. Arrival time structure and normalized ray identifier amplitude in the canonical ocean. The numbers to the top mean the ray identifiers corresponding to the Fig. 7.

갖는 50개 격자로 나누었다. 100 m, 150 m, 200 m 수심에 대한 수평단면 역추정을 시도하였다. 100 m, 150 m 수심은 overdetermined 시스템으로 하고, 200 m 수심은 단면을 통과하는 음선의 수는 충분히 많으나 도달시간을 추출하기 어려워 underdetermined 시스템이 되도록 역문제를 구성하였다. Fig. 9는 100 m, 150 m, 200 m 수심에서 수평단면 역모델을 이용하여 계산한 수온 수평분포이다. 세계 수심에서 모두 실험해역 왼쪽에 난수성 소용돌이 형태가 나타나고 있으며 수심이 증가할수록 동해안 쪽으로 중심이 이동하고 있음을 보여준다. 이러한 수온 분포를 AXBT로 관측한 실제 수온분포(Fig. 10)와 비교하여 보면 100 m 수심에서 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 즉, 100 m 수심에서 실제 수온분포는 울릉도 남동쪽과 관측해역 남서쪽 경계 해역에 각각 동서방향으로 전선이 나타나고, 남동쪽

해역에서 12°C 이상인 최고 수온을 중심으로 서쪽으로 10°C 이상인 고온수가 띠형태로 분포하고 있다. 그러나 역산에 의한 계산에서는 9°C 이상인 소용돌이를 중심으로 동쪽과 서쪽에 남북방향으로 전선형태를 나타내어 실제 수온분포를 보여주지 못하고 있다. 100 m 수심에서 이러한 오차가 나타나는 것은 여름철 음속구조의 특성상 음선이 표층근처에는 도달하지 못하고 100 m 이하수심에서 굴절하는 하는 경향이 있어(Fig. 7의 음선 경로 참조) 표층에서 정확한 도달시간 차이를 얻지 못하기 때문이다. 수심 150 m에서는 실제 수온분포도 난수성 소용돌이 형태를 나타내어 역산 결과가 실제 수온 분포와 근접함을 알 수 있다. 그러나 소용돌이 가장자리 쪽은 실제 수온분포와 상당히 다른 결과를 보여준다. 200 m 수심에서는 역산결과 소용돌이의 위치와 수온 값이 실제 분포와 더욱 가깝게 나타났다. 요약하면

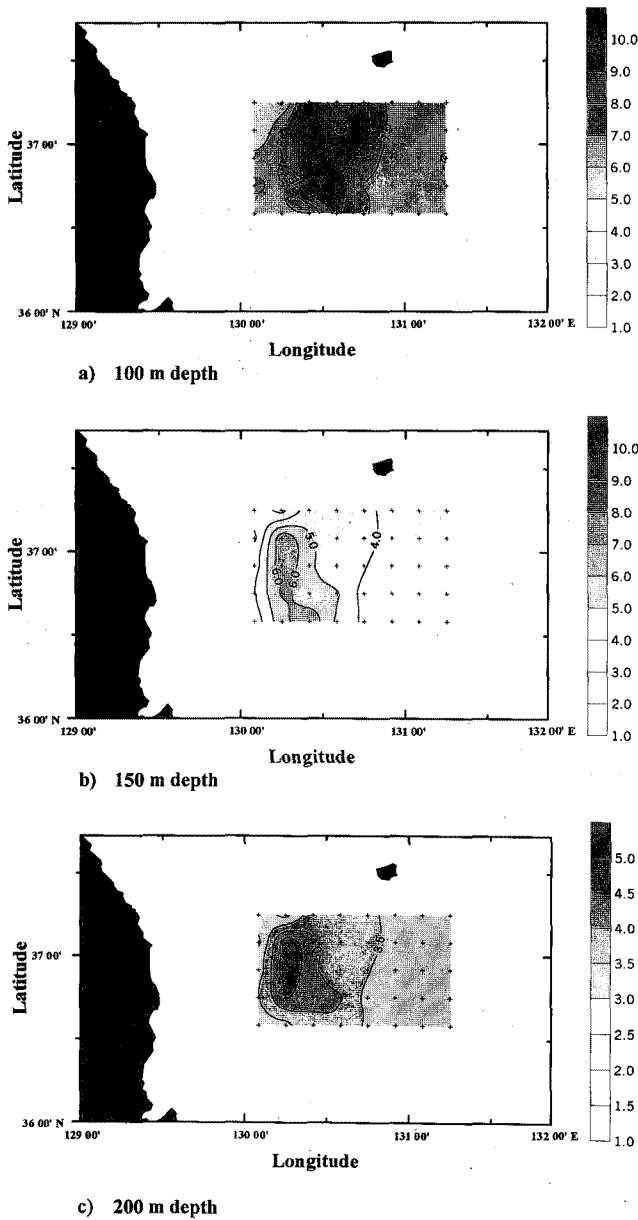


Fig. 9. Horizontal distribution of temperature fields at a) 100 m, b) 150 m, and c) 200 m depth obtained from the horizontal slice inversion. The symbol “+” indicates the horizontal grid position.

실제로 소용돌이의 형태가 뚜렷한 수심에 이룰수록 역산 결과가 유사하게 얻어졌고 소용돌이 형태가 불분명한 상층에서는 큰 오차를 갖는 결과를 보여주었다. 표층을 통과하는 음선이 적어 100 m, 150 m 수심에서 나타나는 역산 결과의 오차를 줄이기 위한 방법으로는 음원의 수심을 바꾸는 방법과 음선 중에서 해저면 및 해수면 반사 후 수신기에 도달하는 음선의 도달시간 차이를 역산모델에 사용하는 방법이 있다. 두번째 방법은 해저면 반사 후 반사각이 변화할 것으로 예상되므로 이를 해결하기 위한 모델이나 방법에 대한 연구가 필요하리라 판단된다. 겨울철과 같이 표층 수온이 낮아 음속이 높지 않은 경우에는 표층을 통과하는 음선이 많으므로 이러한 문제는 없을 것이다.

다음 계산에서는 SUS 폭발수심과 폭발시간의 불확실성에 의

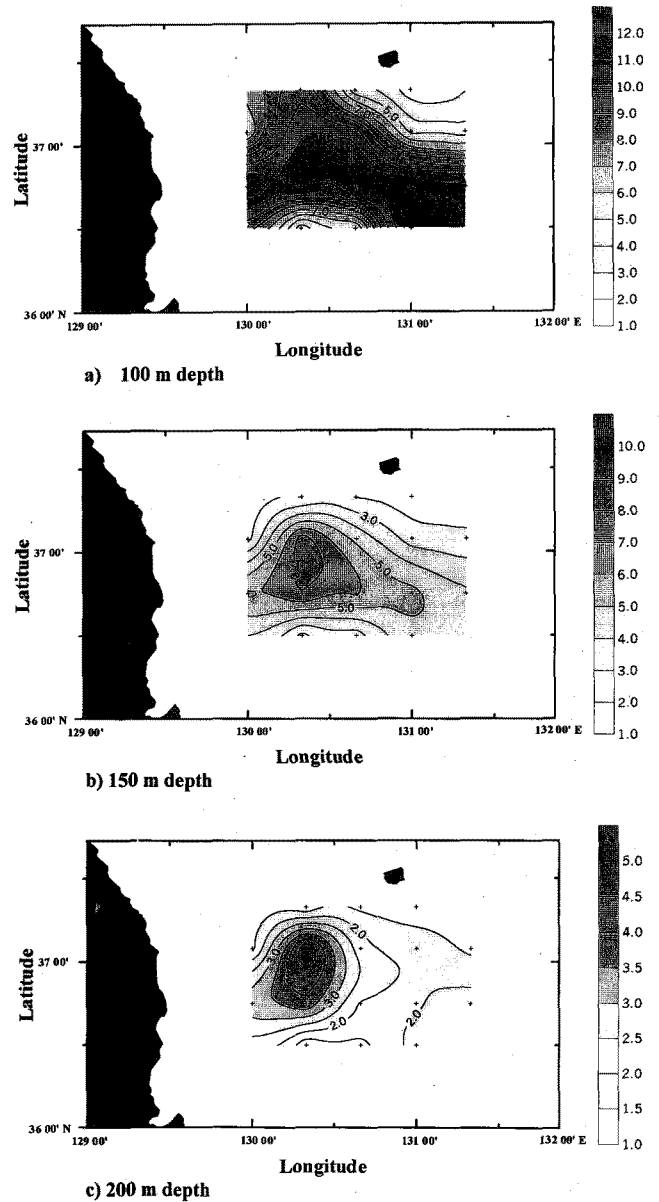


Fig. 10. Observed horizontal distribution of temperature fields at a) 100 m, b) 150 m, and c) 200 m depth. The symbol “+” indicates the observed position.

한 오류를 감안하여 측정된 음파전달 시간에 불규칙적인 임의의 오류값을 추가시켜 역산을 해 보았다. Fig. 11은 Table 2의 total error를 더한 자료에서 얻어진 150 m와 200 m 수심에 대해 계산한 결과이다. 150 m 수심에서 계산한 결과는 오류값을 더하지 않고 계산한 결과와 비교하여 소용돌이의 형태는 변함없지만 그 위치가 변하였으며 수온값은 1°C 정도 낮아져 실제 관측값과 차이가 더 크게 나타났다. 200 m 수심에서는 수온은 유사하나 소용돌이가 확장된 형태로 나타나며 소용돌이 서쪽에서 저온이 나타나고 동쪽에서는 2.5°C 정도 높게 고온수가 띠모양으로 나타났다. 본 논문에는 표시하지 않았지만 오류값을 다르게 더한 경우 150 m 수심에서는 소용돌이의 형태를 가지면서 수온값만 달라지지만 200 m 수심에서는 소용돌이의 형태

결론 및 토의

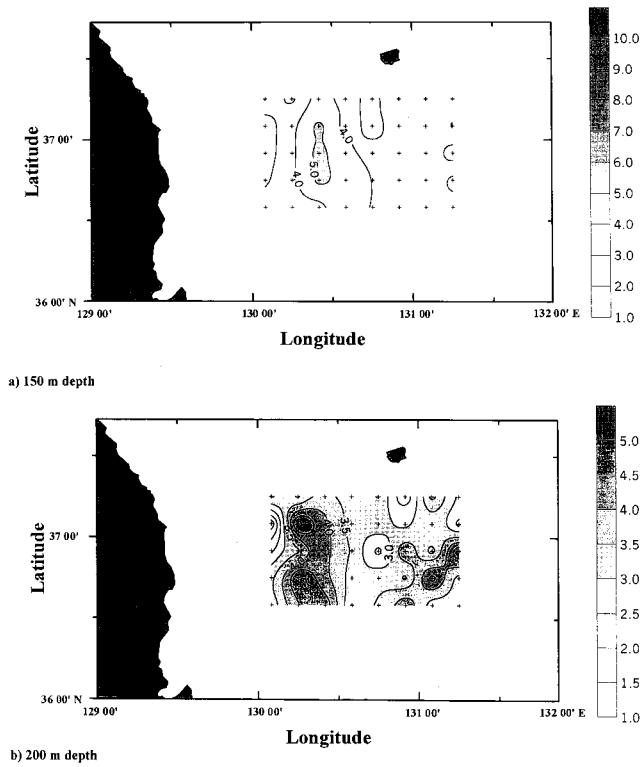


Fig. 11. The inversion results with the data containing arbitrary errors.

도 달라지고 수온값도 큰 차이를 보인다. 이러한 결과들은 SUS 폭발수심과 폭발시간의 오차가 클 경우 해양음향 토모그래피를 적용하여 중규모 현상을 추적하는 것은 불가능함을 보여준다.

수직단면 역산

수직단면 역모델은 수직적으로 해수면에서부터 150 m까지 한 층, 400 m 수심까지 매 50 m 두께를 갖는 5개층, 그리고 400-1000 m 및 1000-2000 m로 나누어 총 8개층으로 구성하였다. 역산은 각 SUS 투하지점과 선박에 장치한 수신기 사이의 음파 도달시간을 이용하여 실시하였다. Fig. 12는 실제 음원과 수신기 사이의 평균 음속구조와 역산결과를 함께 나타낸 것이다. AXBT로 수온관측은 약 324 m(1,062 ft)까지만 수행되어 그 이하 수심에서는 표준해양 음속구조를 표시하였다. 또한 AXBT의 관측 분해능은 약 0.28°C이고 200 m이하 수심에서는 AXBT 관측 자체에서 많은 오차를 포함하고 있다. 역산결과와 전반적인 경향을 보면 수심 250 m까지 상부 3층에서는 거의 모든 계산에서 역산에 의한 음속이 실제 음속보다 크게 나타난 반면 400 m 이하인 하부 2층에서는 두 음속의 차이가 매우 작게 나타났다. 역산값과 실제 관측한 음속과의 최대 차이는 S-9의 두번째 층에서 나타났으며 그 차이는 약 10 m/s로 이를 수온으로 환산하면 2.1°C에 해당한다. 이러한 차이도 수평역산과 마찬가지로 상부의 층들을 통과하는 음선이 적어 해수특성 정보가 충분하지 못하였기 때문으로 판단된다. 그러나, 음속의 수직 변화율은 모든 층에서 실제 관측값과 일치하여 SUS 해양음향 토모그래피가 해양내부의 수직구조를 추정하는데 유용할 수 있음을 시사해 준다.

1997년 6월 국내에서는 처음으로 동해 울릉분지에서 중규모 현상을 추적하기 위하여 폭발성 음원을 이용한 해양음향 토모그래피 현장실험을 실시하였다. Fig. 13은 AXBT 관측에 의한 해수면 온도 분포인 바 전선이나 소용돌이와 같은 특별한 중규모 현상이 보이지 않는 반면 수심 150, 200 m(Fig. 9)에서는 난수성 소용돌이가 잘 발달되어 있음을 나타낸다. 이러한 경우 해수중 중규모 현상의 존재 여부에 대하여 인공위성 원격탐사 자료는 어떠한 해답도 주지 못하며 조사선박에 의한 현장관측이 유일한 방법이었다. 조사선박을 이용하여 현장관측을 하는 경우 관측시간이 차이가 날 수 밖에 없으므로 이러한 관측방법을 이용해서 단주기 해양현상을 관측하기는 불가능하다. 해양음향 토모그래피를 적용한 해양내부 관측방법은 해양의 물리적 성질 변화에 따른 음파 전파특성을 역이용하는 방법으로 음파는 해수중에서 그 전파시간이 빨라 동시에 광역 해양을 관측할 수 있을 뿐만 아니라 에너지 감쇠가 적어 원거리까지 전파가 가능하므로 전 지구적 규모로 해양현상 관측이 가능하다.

본 연구에서 수평단면 역산결과 100 m 수심에서 실제 수온 분포와 많은 차이가 있지만 150, 200 m 수심에서 수온 분포는 소용돌이의 형태와 위치를 잘 추정해 주었으며 수온도 실제 관측값과 비교하여 큰 차이가 없었다. 수직단면 역산 결과는 상층에서 오차가 크게 나타나지만 전체적인 음속구조는 잘 일치하며 상층에서의 오차도 약 2°C 이내로 음원과 수신기 사이의 평균 수온값을 고려한다면 이는 실제 음속구조를 잘 재현한다고 판단된다.

이러한 오차가 생기는 원인으로 음파 도달시간 관측오차, 토모그래피 방법오차, 역산과정에서 발생하는 오차, 그리고 역산결과 해석오차로 구분할 수가 있다. 해양음향 토모그래피를 적용한 수온 및 음속 관측결과는 각 격자에서 거리 및 수심의 평균값을 의미하므로 한 정점에서 실제 관측값과 다를 수가 있어 정확하게 비교하기는 어렵다. 역산모델은 음선별 도달시간 차이를 근거로 방정식의 수가 성립되고 구하고자 하는 미지수의 수는 격자에 따라 결정되므로 미지수와 방정식의 수에 따라 역산 결과는 달라질 수 있을 것이다. 또한 수직단면 역산 모델에서 상층과 하층의 굴절수심을 정확하게 파악하여 수직단면 격자에서 음선별 전파거리를 계산하여야 한다. 또한 여름철과 같이 표층으로 음선이 진행하지 못하는 경우 표층으로부터 음속변화에 따른 정확한 도달시간 정보를 제공 받지 못하므로 역산에 오차를 포함한다. 이러한 오차들을 최소화하기 위한 연구는 계속 진행되어야 할 것이다.

해양음향 토모그래피 실험에서 SUS는 폭발수심과 폭발시간이 갖는 불확실성 때문에 음원으로 사용에 제약이 있어왔지만 신호처리 기술이 발달하여 성공적으로 이용된다는 보고가 있다 (Lynch et al., 1997). 본 연구에서는 최종 처리된 충격파와 기포파의 분리와 소노부이(sonobuoy) 수신기를 이용한 폭발시간 측정 등으로 음파 도달시간 산정 오차를 줄이도록 하여 역산 결과의 신뢰도를 높이고자 하였다. 폭발수심을 정확하게 관측하기는 불가능하지만 수신신호에서 충격파와 기포파의 시간 차이를 이용하면 추정이 가능하다.



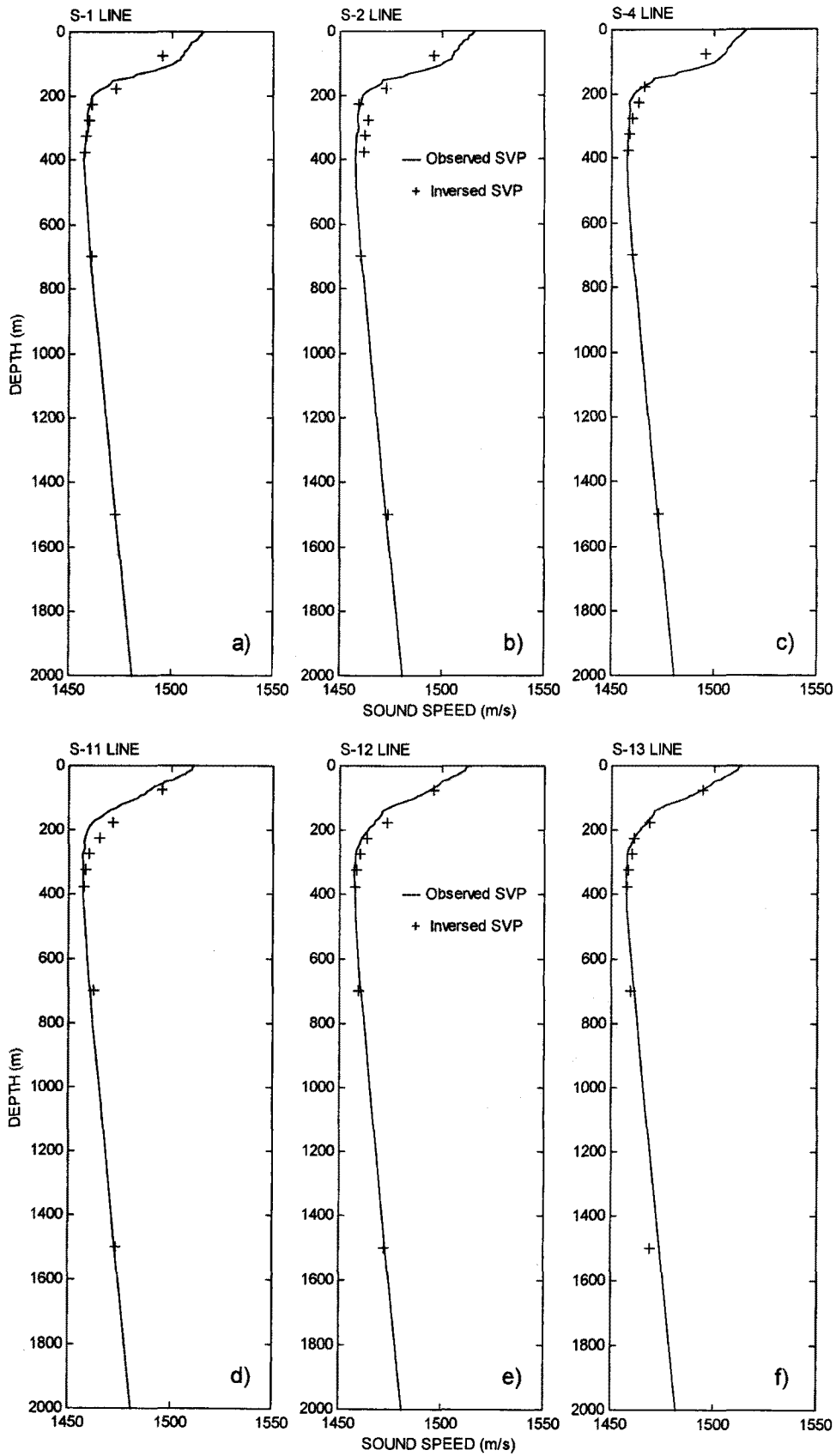


Fig. 12. Vertical sound velocity profiles obtained from the vertical slice inversion. a) S-1, b) S-2, c) S-4, d) S-11, e) S-12, and f) S-13 charges to VLA receiver. Solid line and symbol “+” corresponding to the observed data from AXBT and inversely estimated sound speed, respectively.

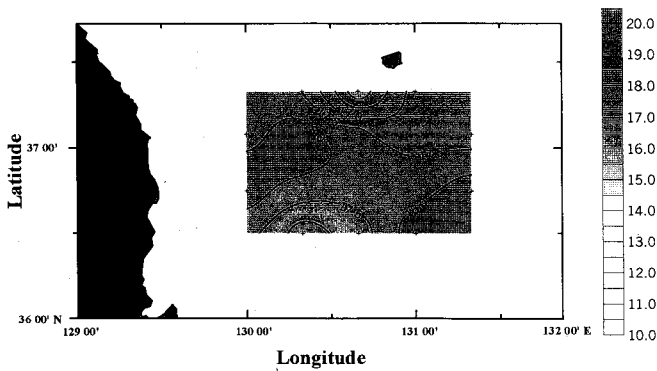


Fig. 13. Sea surface temperature distribution observed by AXBT.

연구결과를 종합하면 동해에서 중규모 해양면동성을 추적하기 위하여 SUS 해양음향 토모그래 기법을 응용하는 것이 일정수준의 오차 한계내에서 가능함을 보여준다. 따라서 연속 관측을 수행한다면 중규모 해양현상에 대한 시공간적 변동 특성을 파악할 수 있으리라 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 연구비(과제번호: 96-0703-0201-2)로 수행되었으며 두번째 저자는 학술진흥재단 박사후연수과정 지원으로 본 연구를 수행하였다. 토모그래피 현장실험에 도움을 주신 국방과학연구소 조사선 승조원 여러분과 협조해 주신 항공기 운영담당자에게 감사 드립니다.

### 참고문헌

나정열, 1996. 해양음향토모그래피를 이용한 해양탐사 기술연구, 한국과학재단 연구보고서, KOSEF 93-0700-04-01-3, 200 pp.  
 신흥렬, 변상경, 김철수, 황상철, 신창웅, 1995. 1992년 울릉도 북서부해역에서 관측된 난수성 소용돌이의 구조특성. 한국해양학회지, **30**: 39-56.

Arons, A.B., 1954, Underwater explosion shock wave parameters at large distance from the charges. *J. Acoust. Soc. Am.*, **26**: 343-346.  
 Blaik, M. and E.A. Christian, 1965, Near-surface measurement of deep explosions. I. Pressure pulses from small charges. *J. Acoust. Soc. Am.*, **38**: 50-56.  
 Chapman, N.R., 1985, Measurement of the waveform parameters of shallow explosive charges. *J. Acoust. Soc. Am.*, **78**: 672-681.  
 Cole, R.H., 1948, Underwater Explosions. Dover Pub., Inc., New York, 437 pp.  
 FRDA, 1986, Mean Oceanographic Charts of the Adjacent Seas of Korea. Fisheries Research and Development Agency, Korea, 186 pp.  
 Han, S.K., J.Y. Na and J.H. Lee, 1996. Numerical experiments of ocean acoustic tomography in the East Sea of Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **31**: 64-74.  
 Herring, C., 1981, Physics of Sound in the Sea, Peninsula Pub., California, 566 pp.  
 Hovem, J.M., 1970, Deconvolution for removing the effects of the bubble pulses of explosive charges. *J. Acoust. Soc. Am.*, **47**: 281-284.  
 Knauss, J.A., 1978, Introduction to Physical Oceanography, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 338 pp.  
 Lee, J.H., 1993, A review of tracer inverse problems in oceanography. *Ocean Res.*, **15**: 53-69.  
 Lynch, J., K. 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.whoi.edu/AO/topics/Primer>.  
 Lynch, J., D. Frye, K. Peal, S. Liberatore, S. Kery E. Hobart, A. Newhall and S. Smith, 1992, Real-Time Tomography Mooring, WHOI Tech. Report, WHOI-92-29, 146 pp.  
 Munk, W., P. Worcester and C. Wunsch, 1995, Ocean Acoustic Tomography, Cambridge Univ. Press., New York, 433 pp.  
 Munk, W. and C. Wunsch, 1979, Ocean acoustic tomography: A scheme for large scale monitoring. *Deep-Sea Res.*, **26**: 123-161.

1998년 10월 30일 원고 접수

1999년 3월 30일 수정본 채택