

거제도 남쪽해역에서 쌍방향 음파전파 해양음향 토모그래피를 이용한 유속측정

변상경 · 김봉채 · 최복경 · Arata Kaneko¹ · Noriaki Gohda¹
한국해양연구소 해양물리연구단, ¹히로시마대학교 공과대학 환경기초학교실

Current Speed Measurements by Using Ocean Acoustic Tomography of Reciprocal Sound Transmission in the Southern Water of Koje Island

SANG-KYUNG BYUN, BONG-CHAE KIM, BOK KYOUNG CHOI,
ARATA KANEKO¹ AND NORIAKI GOHDA¹

*Physical Oceanography Division, Korea Ocean Research and Development Institute,
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*
¹*Department of Environmental Sciences, Faculty of Engineering, Hiroshima University,
Higashi-Hiroshima 739, Japan*

해양음향 토모그래피에 의한 유속측정의 유효성을 검증하기 위하여 1997년 4월 거제도 남쪽해역에서 쌍방향 음파전파 토모그래피 실험을 실시하였다. 이 실험은 해양음향 토모그래피에 의한 실시간 유속관측 시스템을 구축하기 위한 현장 기초실험으로 시도되었다. 실험 당시의 해양물리 환경을 고려하면서 음파 전파시간 차이에 의한 유속측정 결과를 초음파 유속계(ADCP)에 의한 실측유속과 비교 분석하였다. 그 결과 두 실측치는 상관계수 0.943으로써 매우 양호한 상관관계를 보였으며 해양음향 토모그래피에 의한 방법이 연안해역에서 유속측정 방법으로서 향후 크게 활용될 수 있으리라 판단된다.

In order to investigate the validity of acoustic tomography for current measurement, an experiment of reciprocal sound transmission was conducted in April, 1997 in the southern water of Koje island. This experiment was attempted as a preliminary field study on coastal ocean acoustic tomography for construction of real-time current observation system. Examining the physical oceanography environments, the current data obtained by travel time difference of reciprocal sound wave was compared with the data of Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). The result shows the correlation coefficient of 0.943, very good relation between the two data, and therefore the ocean acoustic tomography could be a useful method for current measurement in the coastal area.

서 론

해수층을 전파하는 음파는 해양의 물리적인 성질에 관한 정보를 그 안에 포함하고 있기 때문에 해양의 물리적인 성질이 음향신호의 전파에 어떠한 영향을 미치는가를 명확히 알 수 있다면, 역으로 수파된 음향신호로부터 해양에 관한 정보를 추출할 수 있다. 이러한 원리로부터 Munk와 Wunsch(1979)는 음파전파를 이용하여 해수의 물리적 특성, 즉 수온 및 유속을 측정할 수 있는 해양음향 토모그래피(ocean acoustic tomography)를 제안하였다. 이에 관한 기초이론 및 초기의 실험결과에 관하여는 김과 변(1992)이 해설한 바 있다. 현재까지도 많은 연구자들이 해양음향 토모그래피에 관한 다양한 연구를 실시하고 있으며, 지금까지 얻어진 연구결과에 관하여는 Munk 등(1995)이 자세히 기술하고 있다.

해양음향 토모그래피 기술의 해양내 응용은 밀도분포와 해류구조를 파악하려는 두 가지 방향으로 현재 연구가 진행되고 있다.

다시 말하면, 해수의 특성, 즉 수온과 밀도를 대상으로 수평 및 수직분포와 변화량에 대한 시도는 지구 기후변화, 중규모 소용돌이, 전선 등의 연구에 기여하고 있으며 국내에서도 한 등(1996)에 의해 중규모 소용돌이의 연구가 추진된 바 있다.

한편, 해양에서 해류를 측정하려는 연구는 Worcester(1977) 및 Worcester 등(1991)에 의하여 쌍방향 음파전파의 방법으로 거리 10~1000 km에서 성공적으로 수행되었으나, 이 연구는 모두 외해에서 시도된 것이다. 해안에 가까운 천해의 경우에는 일반적으로 수중음파의 전파환경이 외해에 비하여 불량하므로 외해에서 사용한 토모그래피 시스템과는 다른 새로운 시스템의 구성이 요구된다. Ko 등(1989)은 천해용 음향 토모그래피 시스템을 개발하여 플로리다 해협내 약 20 km 거리에서 실험을 실시하였는데, 쌍방향 음파전파 시간측정으로부터 유속을 측정할 수 있는 가능성을 입증하였으나 음파전파 시간측정 정밀도 등의 한계로 인해 완벽한 결과를 얻지 못하였다. Zheng 등(1997)은 새로운 연안음향 토모그래피

시스템(Coastal Acoustic Tomography System) 개발을 시도함으로써 내해에서 쌍방향 수중음파 전파시간을 정밀하게 측정하고 유속측정의 가능성을 실험적으로 보여 주었다. 그러나 이 연구에서는 토모그래피에 의해 구한 유속측정 결과를 다른 측정장비에 의한 결과와 장시간 연속적으로 비교하지는 못하였다.

이 연구의 목적은 천해에서 쌍방향 음파전파 해양음향 토모그래피 실험을 통해 음향 토모그래피 기법에 의한 유속관측의 유효성을 밝히는 데 있다. 이를 위해서 내해를 벗어난 연안의 천해에서 조류변화를 감지할 수 있는 비교적 긴 시간 동안 토모그래피 실험을 실시하여 유속변화를 관측하고, 이것을 실측유속 결과와 비교함으로써 토모그래피에 의한 유속측정 방법의 타당성을 입증하고자 하였다. 아울러 쌍방향 음파전파를 이용한 해양음향 토모그래피 실험방법 및 토모그래피 자료 분석기법을 검토함으로써, 실시간 유속장을 모니터링하기 위한 본격적인 해양음향 토모그래피 시스템 구축에 필요한 현장실험의 기초자료를 얻고자 하였다.

음파 전파시간을 이용한 유속 및 음속의 계산

Fig. 1과 같이 해류가 있는 해양내에서 쌍방향으로 동시에 음파가 전파하는 경우를 생각해 보자. 해수중 정점 A에서 펄스음파를 송파하여 정점 B에서 음파를 수파하는 경우 음파 도달시간을 t_1 이라 하고, 정점 B에서 음파를 송파하여 정점 A에서 수파하는 경우 음파 도달시간을 t_2 라고 하면, 음파 도달시간은 각각 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다(Zheng 등, 1997).

$$t_1 = \int_{rc(r)+u(r)} \frac{ds}{c(r)+u(r)} \tag{1}$$

$$t_2 = \int_{rc(r)-u(r)} \frac{ds}{c(r)-u(r)} \tag{2}$$

여기서, ds 는 음선경로 Γ 에 따른 미소거리, $c(r)$ 및 $u(r)$ 은 각각 음선경로상의 위치 r 에 있어서 음속 및 유속이다. 그리고 $u(r)$ 은 정점 A에서 정점 B로 향하는 성분을 양(+)으로 취하고 있다.

두 정점 사이의 해양내에서 평균음속 및 평균유속을 각각 c_m 및 u_m 이라 하자. 두 정점 사이의 수평거리가 수심에 비하여 매우 크다고 가정하면, (1)식 및 (2)식은 각각 다음과 같이 근사하여 나타낼 수 있다.

$$t_1 = \frac{R}{c_m + u_m} \tag{3}$$

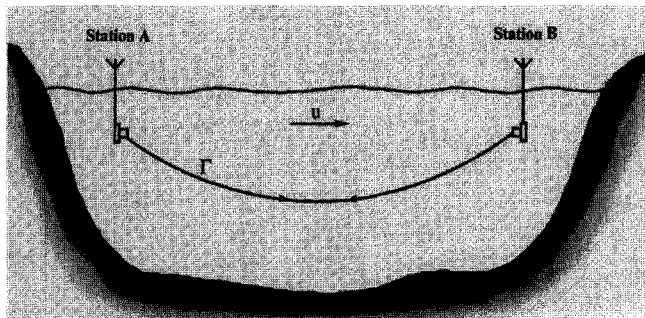


Fig. 1. Sketch of reciprocal sound transmission experiment.

$$t_2 = \frac{R}{c_m - u_m} \tag{4}$$

여기서 R 은 두 정점 사이의 수평거리이다. (3)식 및 (4)식으로부터 c_m 및 u_m 을 구하면 각각 다음과 같다.

$$c_m = \frac{R}{2} \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right) = \frac{R\bar{i}}{t_1 t_2} \approx \frac{R\bar{i}}{\bar{i}^2} = \frac{R}{\bar{i}} \tag{5}$$

$$u_m = \frac{R}{2} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) = \frac{R\Delta t}{2t_1 t_2} \approx \frac{R\Delta t}{2\bar{i}^2} = \frac{c_m^2 \Delta t}{2R} \tag{6}$$

여기서, $\bar{i} = \frac{1}{2}(t_1 + t_2)$, $\Delta t = t_2 - t_1$ 이고, $\bar{i} \approx t_1 \approx t_2$ 라고 가정하였다. (5)식 및 (6)식으로부터 평균음속과 평균유속의 상대오차 δu_m 및 δc_m 은 각각 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\delta c_m}{c_m} &= \frac{\bar{i}}{R} \delta \left(\frac{R}{\bar{i}} \right) = \frac{\bar{i}}{R} \left(\frac{i\delta R - R\delta \bar{i}}{\bar{i}^2} \right) \\ &= \frac{\delta R}{R} - \frac{\delta \bar{i}}{\bar{i}} \approx \frac{\delta R}{R} \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta u_m}{u_m} &= \frac{2R}{c_m^2 \Delta t} \delta \left(\frac{c_m^2 \Delta t}{2R} \right) = \frac{2\delta c_m}{c_m} + \frac{\delta(\Delta t)}{\Delta t} - \frac{\delta R}{R} \\ &= \frac{\delta R}{R} + \frac{\delta(\Delta t)}{\Delta t} - \frac{2\delta \bar{i}}{\bar{i}} \approx \frac{\delta R}{R} \end{aligned} \tag{8}$$

여기서, δR 은 두 정점 사이의 거리 오차, $\delta(\Delta t)$ 는 음파 전파시간 차의 오차, $\delta \bar{i}$ 는 음파 전파시간 평균의 오차이고, $\frac{\delta R}{R} \gg \frac{\delta \bar{i}}{\bar{i}}$ 및 $\frac{\delta R}{R} \gg \frac{\delta(\Delta t)}{\Delta t}$ 이라고 가정하였다. 예로써 $R=10$ km, $\delta R=144$ m, $c_m=500$ m/s 및 $u_m=0.2$ m/s의 경우 (7)식과 (8)식으로 구한 음속의 측정오차는 약 21.6 m/s이고, 유속의 측정오차는 0.003 m/s이다.

해양음향 토모그래피 시스템의 구성

해양음향 토모그래피 실험에서는 일본 히로시마대학에서 개발한 연안음향 토모그래피 시스템(Coastal Acoustic Tomography System)을 이용하였다(Zheng 등, 1997). 그 주요한 구성은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 송파기(transmitter), 하이드로폰(hydrophone), GPS 수신기 및 시스템을 제어하는 개인용 컴퓨터 등 4부분으로 되어 있다.

GPS 수신기는 위치를 구하는 데 사용될 뿐 아니라 시스템의 시계를 동기(synchronize)시키는 데에도 쓰인다. GPS 수신기로부터 출력되는 정밀도 0.1 μ s인 1 Hz 및 1 kHz 펄스신호를 사용하여 서로 멀리 떨어져 있는 두 시스템을 동기시키고 있으므로 실험에 사용된 이 시스템의 시각 동기 정밀도는 0.1 μ s이다. 수중음파 송파는 컴퓨터의 송파기 제어신호에 의해 신호발생기에서 송파신호를 발생시키고 이것을 증폭기에서 증폭하여 송파기에 보냄으로써 이루어졌다. 이 때 송파신호로서 반송파(carrier wave) 5.5 kHz인 12차 M계열(M-sequence)을 사용하였다(Munk 등, 1995). 이 경우 M계열의 단위 시간폭을 반송파 3주기인 545.45 μ s ($= \frac{1}{5500} \times 3s$)로 설정하였고, M계열 펄스 길이는 2.234s ($= 545.45 \times 10^{-6} \times (2^{12} - 1)s$)였다. 이러한 M계열 음파를 매 2분 간격으로 반복하여 송파하였다. 두 시스템 사이의 해양내를 전파한 음파는 하이드로폰 8개로 구성된 어레이로 수파하였다. 각각의 하이드로폰에서 수파한 신호는 전치 증폭기, 대역통과 필터 및

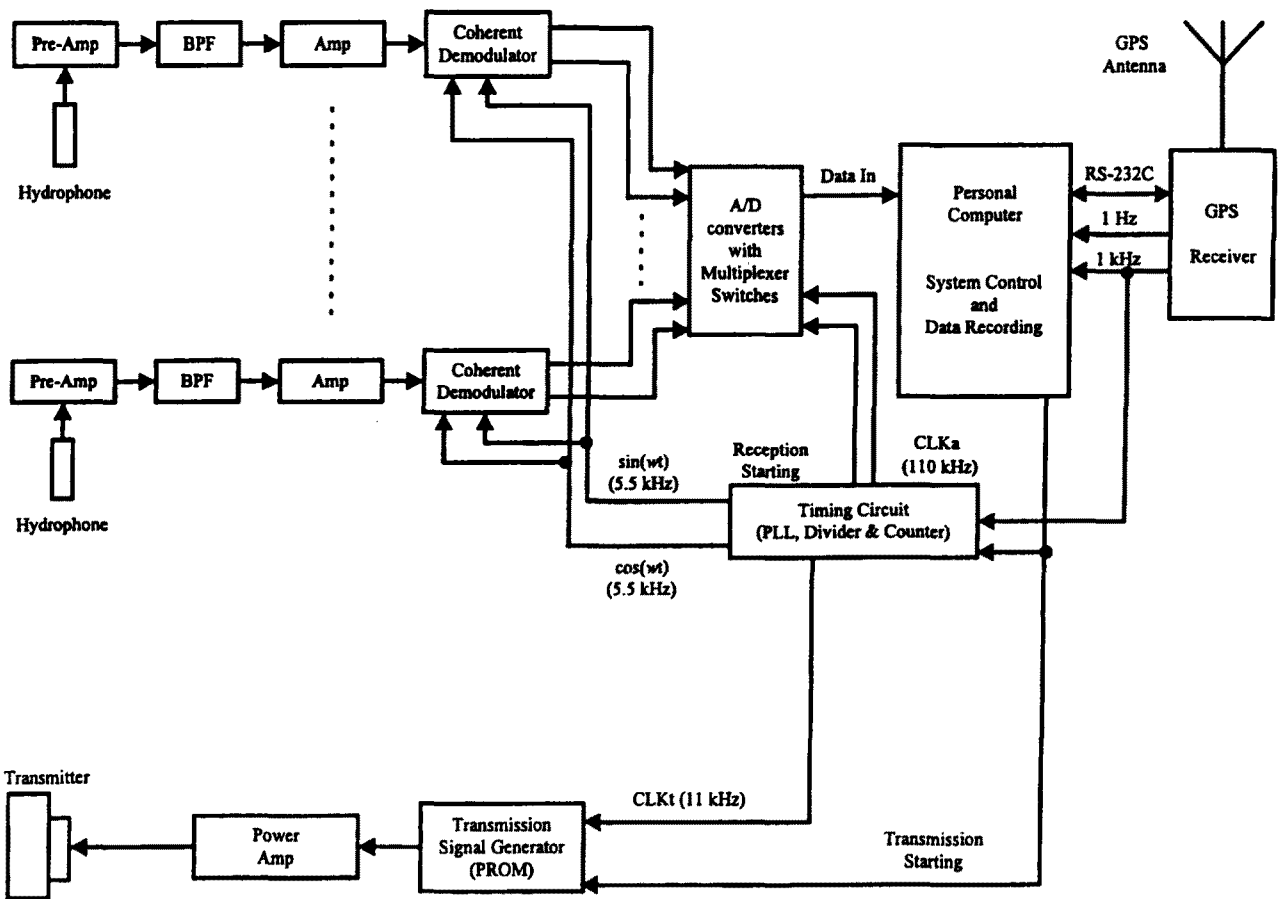


Fig. 2. Block diagram of coastal acoustic tomography system.

증폭기를 거쳐 복조된 다음, 컴퓨터에서 미리 설정된 지연시간 이후부터 27.5 kHz의 주파수로 샘플링되어 컴퓨터에 저장되었다. 이때 수신음과 자료의 기록시간은 매 회 4.766 s였다.

이번 실험에서와 같이 두 정점 사이의 거리가 10 km인 경우, 구하려는 최소 유속치를 0.01 m/s라고 하고 평균음속을 1500 m/s라고 하면, (6)식으로부터 Δt 의 값은 88.9 μs 이다. 이것은 시스템의 시간 분해능 $72.7 \mu s (= \frac{2}{27.5 \times 10^3 s})$ 보다 크기 때문에 이 실험의 경우 약 0.01 m/s의 정밀도까지 유속을 측정할 수 있었다.

실험방법 및 자료처리

거제도 남쪽에 위치한 실험해역은 해수의 흐름이 북동향인 해류보다 남서~북동 방향의 조류가 더 우세하고 순압성을 나타내며(국방과학연구소, 1989), 해저에는 니질사(muddy sand)인 퇴적물이 분포하고 있는 것으로 알려져 있다(곽희상, 1996). 따라서 Fig. 3과 같이 해저수심 경사가 완만한 곳에 두 정점 P1과 P3을 선정하여 각각의 정점에 선박(한국해양연구소 연구선 이어도호 및 올림픽 5호)을 표박시켰다. 이 때 두 정점 사이의 수평거리는 약 10 km였으며 해저수심은 약 75 m로 대체로 평탄하였다. 실험장비는 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 두 정점 P1 및 P3의 연구선에서 송파기 및 하이드로폰 어레이를 해수중에 내려 설치하였다. 이 때 송파기를 수심 10 m에 위치하도록 하였으며, #1~#4 하이드로폰을

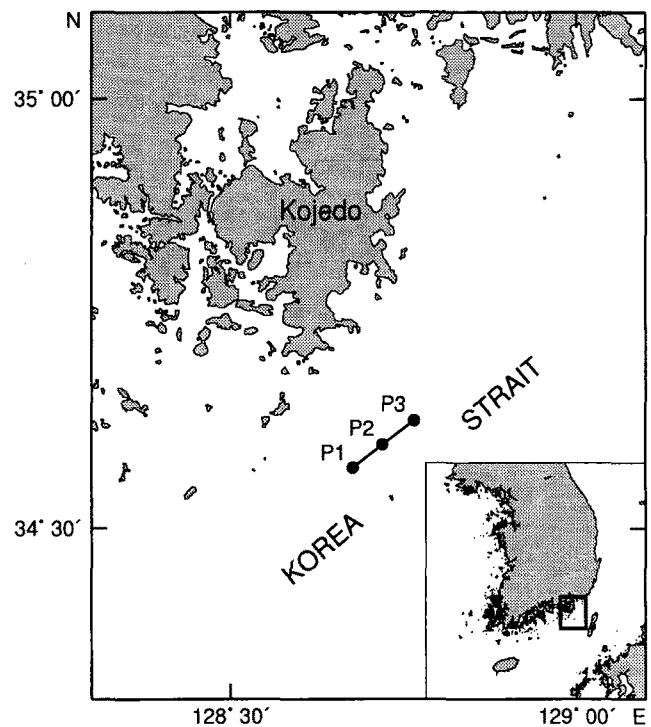


Fig. 3. Location map of coastal ocean acoustic tomography experiment.

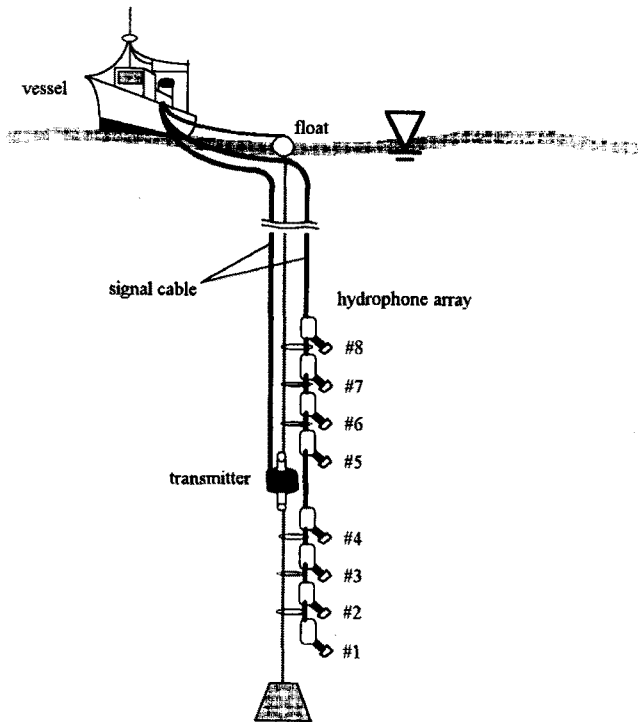


Fig. 4. Floating system of transmitter and hydrophone array.

1 m의 간격으로 각각 수심 14~11 m에 설치하였고, #5~#8 하이드로폰을 각각 9~6 m에 위치하도록 하였다.

협정 세계표준시(UTC: universal time coordinated)로 1997년 4월 19일 00시부터 06시까지 약 6시간 동안 쌍방향 음파전파의 해양음향 토모그래피 실험을 실시하였다. 두 정점 P1 및 P3에서 동시에 매 2분 간격으로 M계열 음파를 송신하였다. 해수중에 송파한 음파의 음원 밴드레벨(주파수 밴드: 4.125~6.875 kHz) 음원 준위(SL: source level)는 191.9 dB(re 1 μPa at 1 m)이었다. 토모그래피 실험해역에서 음파의 전달손실(TL: transmission loss)은 직접 측정되지 못했으나 5월에 황해 중앙부(수심 약 85 m)에서 관측된 자료를 이용하여 구할 수 있었다. 주파수 5 kHz 음파의 경우 전달거리에 대한 전달손실은 다음과 같은 실험식(음원수심: 18 m, 하이드로폰 수심: 10 m)으로 나타냈다(해군본부, 1997).

$$TL = -29.4 + 31.75 \log_{10} R \tag{9}$$

여기서, R은 음파 전달거리(m)로 1852 m ≤ R ≤ 74080 m이다. (9)식을 사용하여 R=10000 m일 때 전달손실을 추정하면 약 97.6 dB이다. 하이드로폰에서 수신되는 음파 수신레벨(RL: receiving level)은

$$RL = SL - TL \tag{10}$$

으로 나타낼 수 있고 약 94.3 dB이었다. 따라서 하이드로폰에서 수신되는 음파의 신호 대 잡음비(SNR: signal-to-noise ratio)는 다음 식으로 구해진다.

$$SNR = RL + PG - NL \tag{11}$$

여기서, PG는 M계열 신호에 의한 처리이득(processing gain)으

로서 이 시스템의 경우 36.1 dB이다. 그리고 NL은 잡음 밴드레벨(noise band level)로서 해수중 주위잡음과 하이드로폰 자체잡음에 의하여 정해진다. 실험 당시 측정결과에 의하면, 해수중 주위잡음의 밴드레벨(주파수 밴드: 4.125~6.875 kHz)은 111.7 dB이었으며, 하이드로폰 제조회사에서 제공된 하이드로폰 자체잡음 밴드레벨(주파수 밴드: 4.125~6.875 kHz)은 96.8 dB이었다. 따라서 전체 잡음 밴드레벨은 111.8 dB이었다. 이러한 값들을 (11)식에 대입하여 토모그래피 실험시 신호 대 잡음비를 구하면 약 18.6 dB이었다. 이 값은 0 dB보다 충분히 크기 때문에 거리 R=10000 m에서 토모그래피 음파를 안정적으로 수파할 수 있음을 나타낸다.

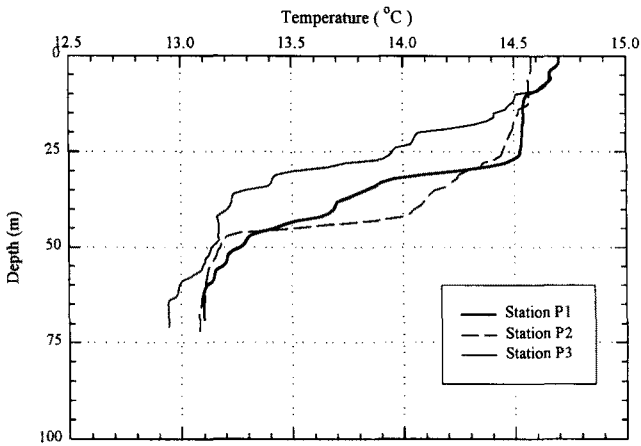
자료의 수신 샘플링은 두 정점 사이의 거리 및 CTD 관측으로부터 구한 음속분포를 고려하여 음파송신 시작 시각으로부터 6~6.5초 지연시간을 두고 개시하였다. M계열로 위상변조된 수신음파 신호와 컴퓨터에 저장되어 있는 M계열 신호와의 상관계수를 계산하여, 이 계수의 피크가 나타나는 시각으로부터 두 정점 P1 및 P3에서 수신한 음파의 전파시간을 구하였다.

토모그래피 실험을 실시한 정선상의 수온구조 및 음속구조를 파악하기 위하여 정점 P1, P2 및 P3에서 CTD(Seabird, SBE911) 관측을 실시하였다. 음속은 CTD 관측자료로부터 실험식을 이용하여 계산하였다(Chen and Millero, 1977). 한편 쌍방향 음파전파 실험을 실시하는 동안 정점 P1에서는 연구선에 장착된 ADCP(R&D Instrument, 사용주파수 150 kHz)를 이용하여 매 1분 간격으로 전층에 걸쳐 유속을 측정하였다. 이 때 측정자료를 10분 동안 이동평균하였고 수심 9 m부터 65 m까지 4 m의 간격으로 15개의 층에서 유속 자료를 구하였다. 이러한 자료로부터 전체 수심에 대한 남북방향 성분 및 동서방향 성분의 평균유속을 구한 후 다시 이로부터 토모그래피 실험 정선을 따르는 평균유속의 성분(정점 P1로부터 정점 P3를 연결한 직선 방향의 유속성분, 북으로부터 58° 방향)과 실험정선을 가로지르는 평균유속의 성분(북으로부터 328° 방향)을 각각 구하였다.

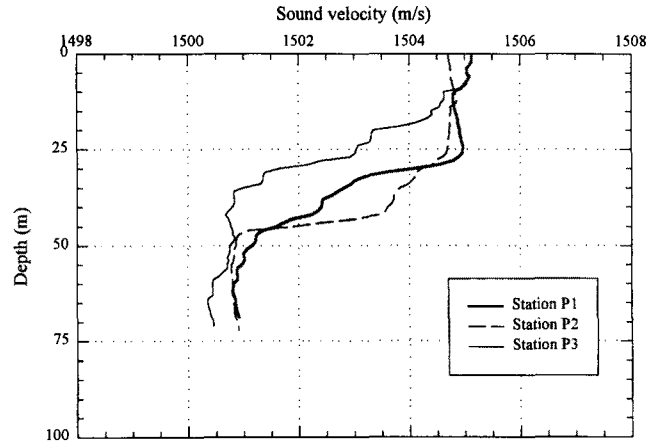
결과 및 고찰

정점 P1, P2 및 P3에서 관측된 수온 연직구조 및 연직단면 분포도를 Fig. 5에 나타내었다. 전체적으로 수온은 수심이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내며 특히 정점 P3에서 현저하게 감소하였다. 정점 P1 및 P2에서 수온 연직구조를 살펴보면, 해표면으로부터 수심 약 25 m까지 그리고 수심 약 50 m로부터 해저까지 사이에서는 수심이 증가함에 따라 수온이 매우 서서히 감소하였으나, 수심 25~50 m의 범위에서는 수심 증가에 따라 수온이 급격히 감소하는 수온약층이 존재하고 있었다. 그러나 정점 P3에 있어서 수온 수직분포는 두 정점과는 약간 달라 해표면으로부터 수심 약 40 m까지에서는 수온이 급격히 감소한 반면, 수심 40 m로부터 해저까지에서는 수심이 증가함에 따라 수온이 매우 서서히 감소하였다. 그리고 정점 중에서 가장 남쪽에 위치한 정점 P1에서의 수온은 가장 북쪽에 위치한 정점 P3에서의 수온에 비하여 동일 수심에서 약간 높은 값을 보였다.

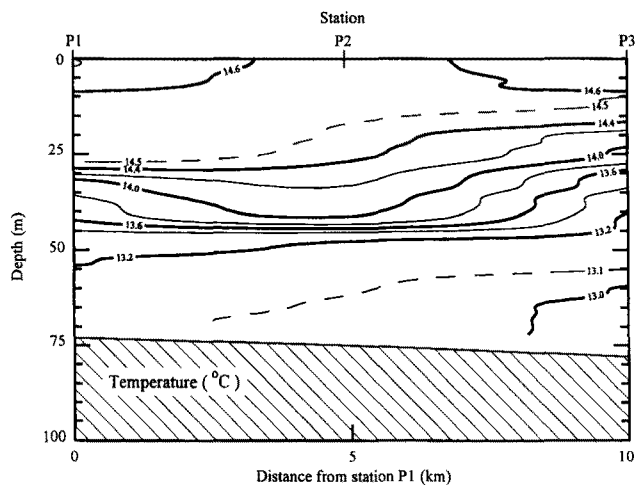
정점 P1, P2 및 P3에서 실시한 CTD관측 자료로부터 계산된 음속의 연직구조 및 연직단면 분포도를 Fig. 6에 나타내었다. 실험해역의 음속은 수온의 영향을 가장 크게 받고 있으므로 전체적



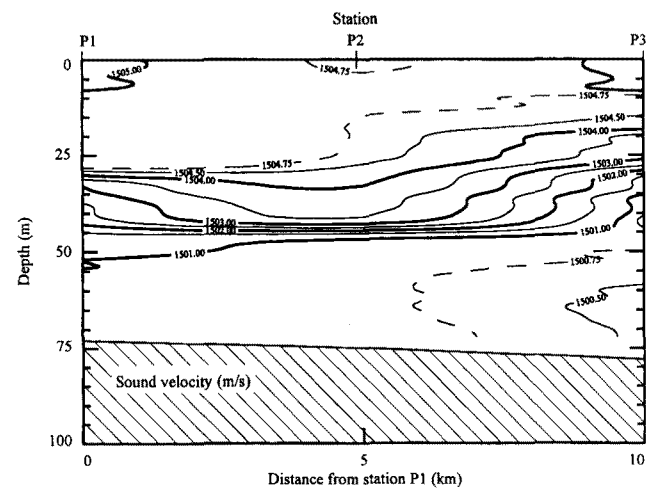
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 5. Distribution of water temperature measured by CTD. (a) Vertical profile. (b) Sectional profile.

Fig. 6. Distribution of sound velocity measured by CTD. (a) Vertical profile. (b) Sectional profile.

인 음속분포는 수온분포와 매우 유사하게 나타났다. 정점 P1과 P2에서는 해표면으로부터 수심 약 25 m 사이에 표층 음파통로 (surface duct)가 불완전하게 형성되어 있었으나, 정점 P3에서는 해표면으로부터 수심이 증가함에 따라 음속이 급격히 감소하여 표층 음파통로가 형성되어 있지 않았다. 표층 혼합층이 형성되어 해표면 가까이에 표층 음파통로가 만들어져 있는 경우, 음파통로 내

에서 음속은 수심증가와 함께 서서히 증가하므로 음파가 상향으로 굴절하여 해저면에서는 반사하는 일이 없이 해표면에서만 반사하면서 전파하기 때문에 음파통로 내에서 발생된 음파는 음파통로에 갇혀 먼 거리까지 잘 전파하는 것으로 알려져 있다(Urick, 1983). 그러나 실험 당시 실험해역내 수중음파 전파환경은 불량한 것으로 나타났다.

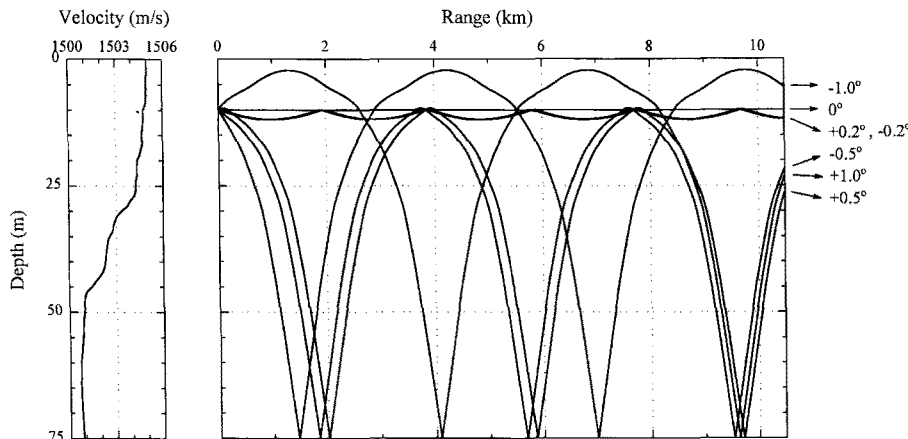


Fig. 7. Acoustic rays with averaged sound velocity profile.

Table 1. Ray length and travel time in the case of the range R=10495 m

Departure Angle	Ray Length (m)	Travel Time (ms)
-1.0°	10502.42	6983.34
-0.5°	10505.35	6988.04
-0.2°	10495.03	6974.53
0.0°	10495.00	6974.53
+0.2°	10495.03	6974.53
+0.5°	10505.29	6987.96
+1.0°	10502.29	6983.17

Fig. 7은 정점 P1, P2 및 P3에서의 음속을 합산하여 구한 평균음속과 이러한 환경하에서의 음선을 나타내고, 각각의 음선에 대한 전체길이 및 음파의 전파시간을 계산하여 Table 1에 표시하였다. 여기에서 음원의 수심은 토모그래피 실험의 경우와 같이 10 m였으며 전달거리는 10495 m로 하였고, 양(+)인 각도는 수평방향에 대하여 위쪽으로 그리고 음(-)인 각도는 아래쪽으로 음원에서 방사된 것을 의미한다. 이 결과에 의하면, 출발각이 오직 $-0.2^{\circ} \sim +0.2^{\circ}$ 이내에 들어오는 음선만이 해저 및 해표면에 닿지 않고 주어진 거리를 곧바로 전파하는 것으로 나타났다. 출발각이 $-1.0^{\circ} \sim -0.2^{\circ}$ 또는 $+0.2^{\circ} \sim +1.0^{\circ}$ 이내에 들어오는 음선의 경우에는 해저에서 2~3회 반사하면서 주어진 거리를 전파하고 있었으며, 출발각이 -1.0° 또는 $+1.0^{\circ}$ 보다 큰 경우에는 해저에서 수많은 반사를 반복하면서 전파하였다. 이에 따라 토모그래피 실험 당시 수중음파 전파환경은 Fig. 6으로부터 예상할 수 있었던 것과 같이 매우 불량함을 확인할 수 있었다. 그리고 출발각 $-0.2^{\circ} \sim +0.2^{\circ}$ 이내의 음선이 주어진 거리에 가장 먼저 도달하였고, 출발각 $-1.0^{\circ} \sim -0.2^{\circ}$ 또는 $+0.2^{\circ} \sim +1.0^{\circ}$ 이내의 음선은 이것보다 약 9~14 ms 늦게 주어진 거리에 도달하는 것으로 나타

났다.

정점 P1에서 ADCP를 사용하여 1997년 4월 19일 00시부터 06시까지 6시간 동안 매 1분의 간격으로 측정된 유속자료로부터 얻어진 전체 수심에 대한 평균유속을 Fig. 8에 나타내었다. 실험 정선에 평행인 유속성분(Fig. 8a)은 시간에 따라 크게 변동하고 있었으나 실험정선에 수직인 유속성분(Fig. 8b)은 시간에 관계없이 매우 작은 값을 보이고 있었다. 이는 실험해역의 흐름이 이미 알려진 바와 같이 남서~북동 방향으로 우세하고 남동~북서 방향으로 는 미약하다는 사실과 잘 부합하고 있다. 그리고 실험정선을 따르는 유속성분의 시간 변화를 보면, 1997년 4월 19일의 02시(120분) 부근에서 약 0.35 m/s로 최대를 보이고 있었으며, 05시(300분) 부근에서 약 0 m/s로 되었고, 06시(360분)에는 약 -0.10 m/s가 되어 05시(300분)부근에서 흐름이 북동향에서 남서향으로 전이하고 있음을 보였다.

토모그래피 실험기간 동안 정점 P1 및 P3에 각각 고정된 연구선 두 척의 위치자료로부터 구한 토모그래피 시스템 사이의 시간에 따른 수평거리를 Fig. 9에 나타내었다. 두 토모그래피 시스템 사이의 거리는 약 10300~10800 m의 범위내에서 시간에 따라 약간 변동하고 있었다. 이것은 GPS 자체의 위치 오차 (± 50 m) 뿐만 아니라 각각의 정점에 맞도록 고정된 연구선이 유속변화에 따라 실제로 위치가 약간 변함으로써 기인된 것으로 생각된다. Fig. 10은 동시에 쌍방향으로 전파하는 음파 전파시간의 시간 변화를 보이고 있다. Fig. 10(a)는 정점 P3에서 송신한 수중음파를 정점 P1에서 수신한 음파 전파시간을 나타내고, Fig. 10(b)는 정점 P1에서 송신한 음파를 정점 P3에서 수신한 시간을 나타내었다. 실험 기간 동안 정점 P1에서는 #4 하이드로폰 그리고 정점 P3에서는 #5 하이드로폰에서 수파된 음향신호가 다른 하이드로폰에 비해 가장 안정적이었고, 신호 대 잡음의 비도 또한 가장 양호하였

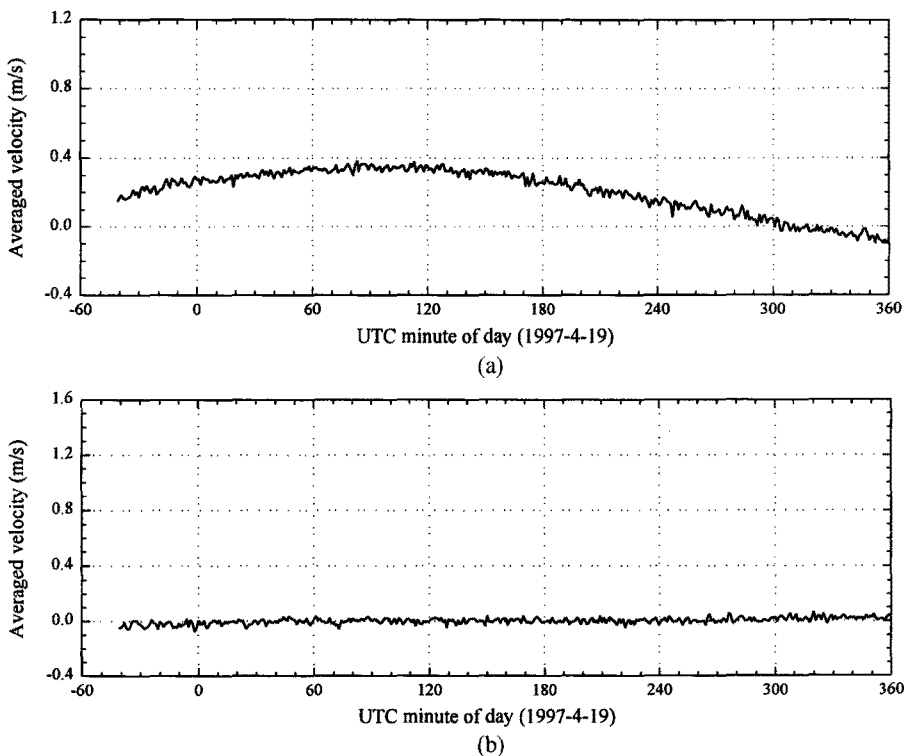


Fig. 8. Time plot of depth-averaged current velocity measured by ADCP at station P1. (a) Velocity component along the section connected from station P1 to station P3. (b) Velocity component across the section connected from station P1 to station P3.

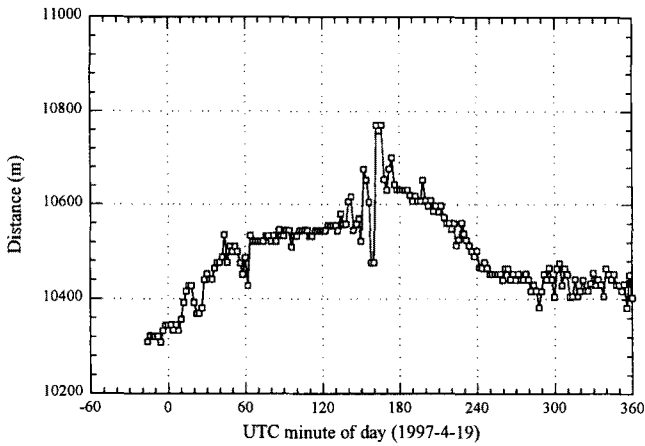
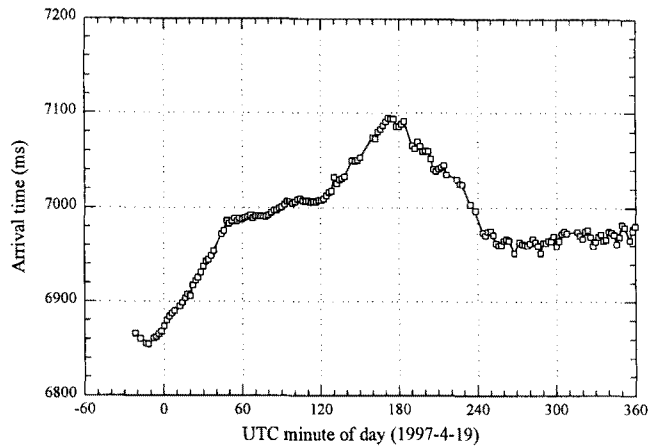
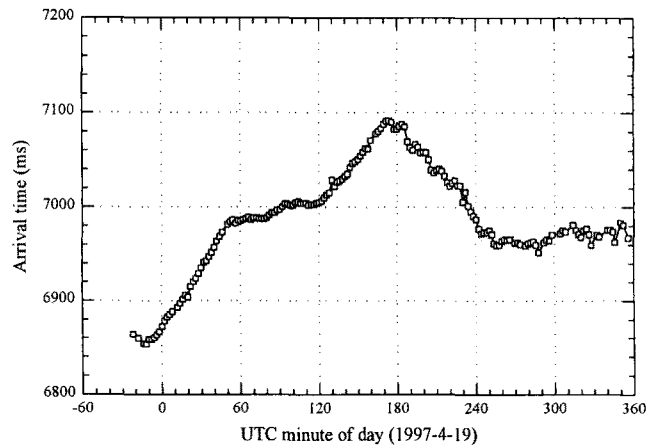


Fig. 9. Time plot of distance between two tomography systems.



(a)



(b)

Fig. 10. Time plot of acoustic wave arrival time. (a) Data obtained at station P1. (b) Data obtained at station P3.

기 때문에 이 두 신호들을 분석에 사용하였다. 여기에서 보이는 바와 같이 음파의 전파시간은 6850~7100 ms의 범위내에서 시간에 따라 변동하고 있었다. Fig. 11은 음파전파 시간의 차를 보이고 있는데 이것은 정점 P3에서 송파하여 정점 P1에서 수파한 음파전파 시간으로부터 정점 P1에서 송파하여 정점 P3에서 수파한 음파전파 시간을 빼어 구하였다. 전체적으로 음파전파 시간의 차는

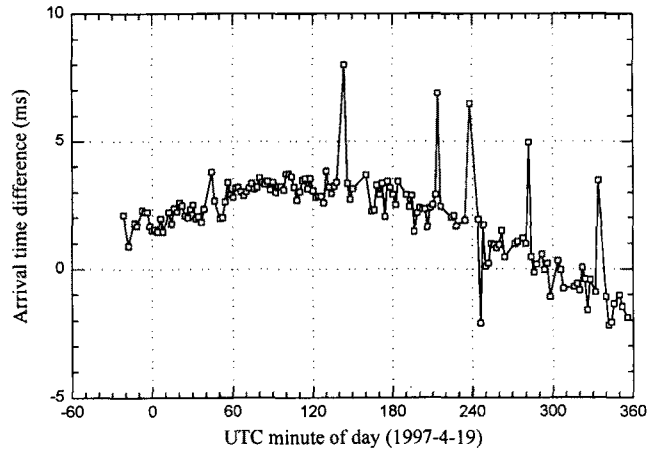


Fig. 11. Time plot of difference of acoustic wave arrival time between the data obtained at station P1 and the data obtained at station P3.

약 $-2.0 \sim +3.5$ ms의 범위내에서 시간에 따라 변동하고 있으며, 이 가운데 몇 개의 값은 평균 측정치를 크게 벗어나고 있는데 이 원인에 대하여는 더 자세한 분석이 요구된다.

토모그래피 실험으로부터 구한 두 시스템 사이의 수평거리 및 쌍방향 음파전파 시간차를 (5)식 및 (6)식에 대입하여 두 시스템 사이 해양의 평균음속 및 평균유속을 구하여 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12(a)는 평균음속이고, Fig. 12(b)는 정점 P1로부터 정점 P3를 연결한 직선방향 성분의 평균유속을 나타낸 것이다. 평균음속은 1997년 4월 19일의 00시를 기준으로 160~170분 근방에 나타난 커다란 피크값을 제외하면, 시간경과에 따라 약 ± 10 m/s의 범위내에서 변동하면서 매우 서서히 감소하는 경향을 보였다. 이는 앞의 Fig. 5에서 보인 바와 같이 실험해역의 남서부에 위치한 P1의 수온이 북동부의 P3 수온보다 높은 환경(Fig. 6의 경우 P1의 음속이 P3의 음속보다 높음)에서 해수가 P1에서 P3로 흐르다가 점차 흐름 방향이 바뀌어 P3에서 P1로 흐르게 됨에 따라 수온이 낮아지면서 평균음속도 점차 낮아지게 되기 때문으로 판단된다. 이때 전체 평균음속은 1502.1 m/s이고, 표준편차는 4.9 m/s로 나타났는데 송수파기 사이를 실제 전파한 이 음속은 CTD 관측에 의해 계산된 음속값(Fig. 7의 왼쪽 참조)과 매우 잘 일치하고 있다. 평균유속의 경우 단지 몇 개의 값이 평균치를 크게 벗어나고 있는 것을 제외하면 시간에 따라 규칙적으로 변화하고 있음을 잘 나타내고 있다. 전체적으로 평균유속은 1997년 4월 19일의 00시를 기준으로 시간이 경과함에 따라 서서히 증가하는 경향을 보여 120분 부근에서 약 0.39 m/s로 피크를 보였다. 그리고 그 이후에는 시간이 지남에 따라 평균유속은 서서히 감소하여 310분에서 0 m/s가 되었고, 그 후 유향이 바뀌어 360분에서 약 -0.20 m/s가 되었다.

ADCP 및 토모그래피에 의해 얻어진 실험정신을 따르는 평균유속의 시간 변화를 Fig. 13에 나타내었다. 여기에서 가는 실선은 토모그래피에 의한 유속이 최소오차를 갖도록 커브 피팅(curve fitting)한 것이고, 굵은 실선은 ADCP에 의하여 실측된 유속을 나타내고 있다. 전체적으로 두 방법에 의한 결과는 매우 잘 일치하고 있다. 그러나 유속이 미약한 부분에서는 최대 약 0.10 m/s 정도의 차이를 보여주고 있는데 이는 ADCP에 의한 유속이 한 지

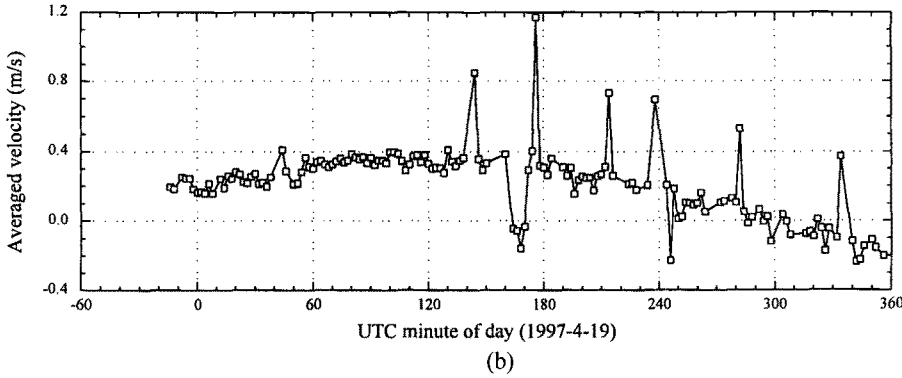
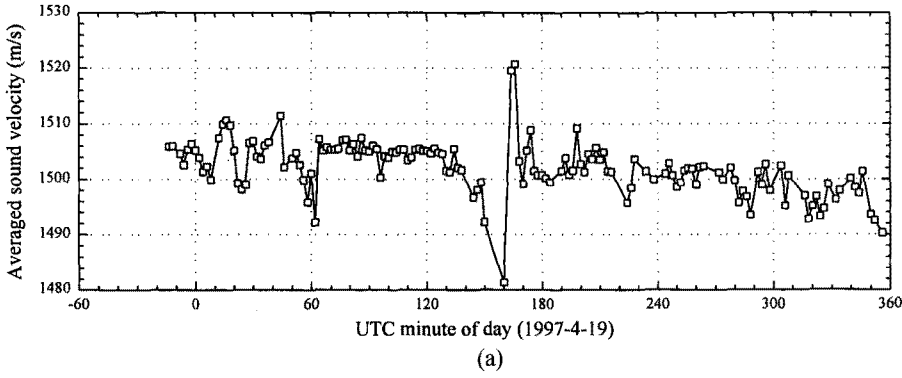


Fig. 12. Time plot of mean data calculated by tomographic measurement. (a) Averaged sound velocity. (b) Averaged current velocity along the section connected from station P1 to station P3.

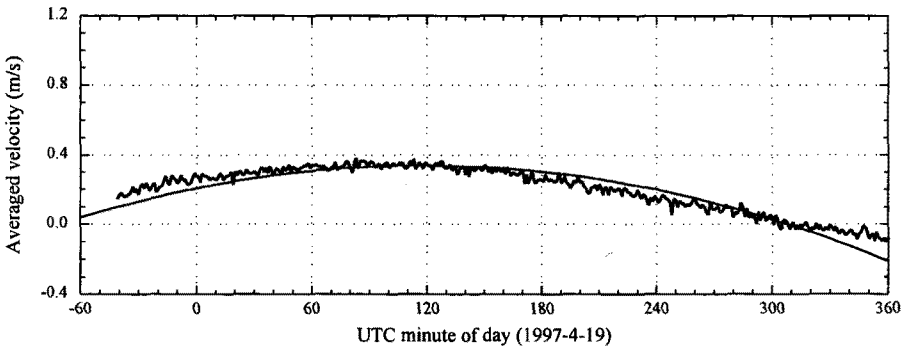


Fig. 13. Time plot of depth-averaged current velocity along the section connected from station P1 to station P3. Here the thin smoothed line indicates the data calculated from the tomographic measurement by least square method and the thick line indicates the data obtained by ADCP measurement at station P1.

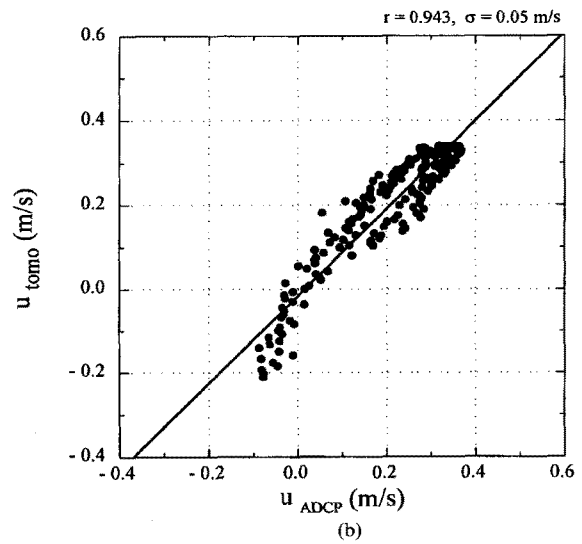
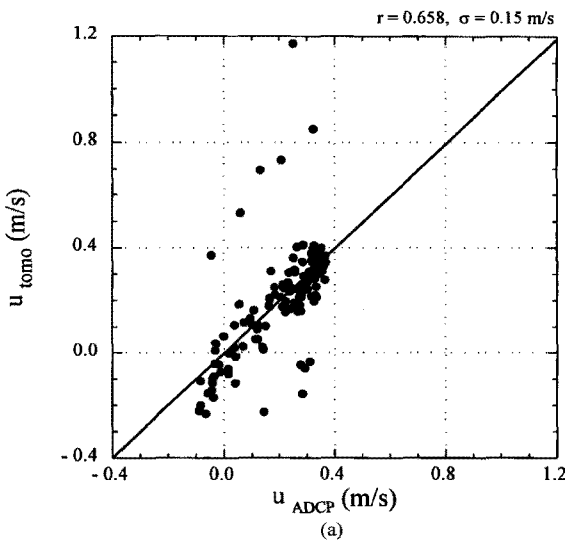


Fig. 14. Relationship between current velocity data measured by ADCP (u_{ADCP}) and the data by tomographic method (u_{tomo}). r and σ represent correlation coefficient and standard deviation respectively. The u_{tomo} is the raw data (a) and the curve fitting data (b).

점인 정점 P1에서 관측된 평균유속인 반면 토모그래피에 의한 유속은 정점 P1과 P3 사이 해양 전체의 평균유속을 나타내기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 14에는 ADCP에 의하여 구한 유속과 토모그래피에 의한 유속과의 상관관계를 나타내었다. 여기에서 토모그래피에 의한 유속의 경우 Fig. 14(a)에서는 직접 얻은 원시자료를 사용하였고, Fig. 14(b)에서는 이러한 자료를 커브 피팅하여 구한 것을 사용하였다. 그리고 이들 자료로부터 1차 회귀방정식을 구하여 이로부터 계산한 값을 실선으로 동시에 표시하였다. 토모그래피에 의하여 구한 유속을 직접 사용한 경우 몇 개의 측정치는 Fig. 12(b)에 보인 몇 개의 커다란 피크 때문에 실선으로부터 크게 벗어나 분포하고 있었으나, 전체적으로 토모그래피로 구한 유속은 ADCP로 측정된 유속과 매우 좋은 상관을 보였다. 이때 상관계수와 편차는 커브 피팅한 경우(0.943과 0.05 m/s)가 원시자료의 경우(0.658과 0.15 m/s)보다 훨씬 더 양호하게 나타났다.

결 론

1997년 4월에 거제도 남쪽 해역에서 연안음향 토모그래피 시스템을 사용하여 유속장 관측을 위한 해양음향 토모그래피 실험을 실시하였다. CTD관측으로부터 계산된 음속구조에 의하면 수중음파의 전파환경은 매우 불량한 것으로 나타났지만, 연안음향 토모그래피 시스템은 전파거리 10 km에서 비교적 양호하게 수중음파를 송수파할 수 있었다. 토모그래피에 의해 얻어진 유속은 1차 회귀 분석을 실시한 결과 ADCP에 의해 관측된 유속과 매우 잘 일치하여 유속장 관측을 위한 해양음향 토모그래피의 유효성을 확인할 수 있었다. 따라서 쌍방향 음파 전파에 의한 해양음향 토모그래피는 향후 연안에서 원격적인 유속측정 방법으로 크게 활용될 수 있으리라 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국해양연구소 1997년도 고유연구사업 지원사업(과제번호: PE00615)의 도움으로 수행되었습니다. 연구수행을 위한 실험 및 자료처리에서 많은 지원을 하여 준 한국해양연구소 해양물리연구단의 김철수 박사, 신창웅 박사, 이대하, 김평중 제씨에게 사의를 표합니다. 그리고 많은 시간을 할애하여 논문을 심사하여

주시고 귀중한 조언을 하여 주신 익명의 심사자분들께도 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- 곽희상, 1996. 한국해양해양환경도: 제3권 대한해협. 한국해양연구소, 180 pp.
- 국방과학연구소, 1989. 동남해역 해·조류 및 파고 관측 보고서, 393 pp.
- 김봉채, 변상경, 1992. 해양음향 토모그래피. 한국음향학회지. **11**: 71-77.
- 해군본부, 1997. 해양특성조사 요약집(7) (서해해역). 103 pp.
- Chen, C.-T. and F.J. Millero, 1977. Speed of sound in seawater at high pressures. *J. Acoust. Soc. Am.*, **62**: 1129-1135.
- Han, S.K., J.Y. Na and J.H. Lee, 1996. Numerical experiment of ocean acoustic tomography in the East Sea of Korea, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **31**: 64-74.
- Ko, D.S., H.A. DeFerrari and P. Malanotte-Rizzoli, 1989. Acoustic tomography in the Florida Strait : Temperature, current, and vorticity measurements. *J. Geophys. Res.*, **94**: 6197-6211.
- Munk, W.H. and C. Wunsch, 1979. Ocean acoustic tomography: A scheme for large scale monitoring. *Deep Sea Res.*, **26**: 124-161.
- Munk, W.H., P. Worcester and C. Wunsch, 1995. Ocean Acoustic Tomography. Cambridge University Press, New York, 433 pp.
- Urick, R.J., 1983. Principles of Underwater Sound. 3rd ed. McGraw-Hill, New York, pp. 147-201.
- Worcester, P.F., 1977. Reciprocal acoustic transmission in midocean environment. *J. Acoust. Soc. Am.*, **62**: 895-905.
- Worcester, P.F., B.D. Dushaw and B.M. Howe, 1991. Gyre-scale reciprocal acoustic transmissions. In: Ocean Variability and Acoustic Propagation, edited by Potter, J. and A. Warn-Varnas, Kluwer, Dordrecht, pp. 119-134.
- Zheng, H., N. Gohda, H. Noguchi, T. Ito, H. Yamaoka, T. Tamura, Y. Takasugi and A. Kaneko, 1997. Reciprocal sound transmission experiment for current measurement in the Seto Inland Sea, Japan. *J. Oceanogr.*, **53**: 117-127.

1998년 10월 21일 원고 접수

1999년 4월 29일 수정본 채택