

유속장 관측을 위한 해양음향 토모그래피 실험

Ocean acoustic tomography experiment
for current field measurement

1998. 2

한국해양연구소

제 출 문

한국해양연구소장 귀하

본 보고서를 “유속장 관측을 위한 해양음향 토모그래피 실험” 과제의 최종 보고서로 제출합니다.

1998년 2월

연구책임자 : 김봉채 (해양물리연구부)

연 구 원 : 변상경 (")

김철수 (")

최복경 (")

신창웅 (")

이대하 (")

김평중 (")

요 약 문

I. 제 목

유속장 관측을 위한 해양음향 토모그래피 실험

II. 연구개발의 목적

실시간 유속장 감시체계 구축을 위한 해양음향 토모그래피의 기초실험으로서 해양음향 토모그래피에 의한 유속관측의 유효성을 조사하고 토모그래피의 실험방법 및 토모그래피 자료의 분석기법을 확립하기 위함

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 일본 히로시마 대학과 공동으로 해양음향 토모그래피 실험을 실시하여 실험방법 및 분석기법을 확립함
2. 해양음향 토모그래피에 의하여 구한 유속자료와 ADCP에 의하여 구한 유속자료와의 비교를 통하여 유속장 관측을 위한 해양음향 토모그래피의 유효성을 조사함

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

1. 해양음향 토모그래피는 유속장을 관측하는 데 있어서 매우 유용한 수단임을 확인함
2. 해양음향 토모그래피 실험 및 분석에 관한 기법은 실시간 유속장 감시체계 구축을 위한 해양음향 토모그래피에 관한 본격적인 연구의 기초자료로 활용할 수 있을 것임

SUMMARY

I . Title

Ocean acoustic tomography experiment for current field measurement

II. Objectives of the study

This is a basic experiment on ocean acoustic tomography for observation system construction of real-time current field. The purpose of this study is to investigate the validity of tomographic method for current measurement through the field experiment. Also it is intended to establish the methods of the experiment and the tomographic data analysis.

III. Contents

1. To establish the methods of ocean acoustic tomography experiment and tomographic data analysis through joint field experiment on ocean acoustic tomography with researchers of Hiroshima University
2. To investigate the validity of ocean acoustic tomography for current measurement through comparison between current data obtained by tomography and the data by ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

IV. Suggestions

1. It is confirmed that the ocean acoustic tomography is a very useful method for current measurement in the sea.
2. The results of this study are available to develop the ocean acoustic tomography system for surveillance of real-time current field.

목 차

요약문	3
영문 요약문	5
그림목차	9
제 1장 서 론	11
제 2장 유속 측정이론	13
제 3장 시스템의 구성 및 실험 방법	16
제 4장 결과 및 고찰	22
제 5장 결 론	46
참고문헌	47

List of Figures

Fig. 1. Sketch of reciprocal sound transmission.	15
Fig. 2. Block diagram of reciprocal acoustic tomography system.	19
Fig. 3. Location map of ocean acoustic tomography experiment.	20
Fig. 4. Floating system of transmitter and hydrophone array.	21
Fig. 5. Distribution of water temperature obtained by CTD observation.	28
(a) Vertical profile.	
(b) Contour plot.	
Fig. 6. Distribution of sound velocity obtained by CTD observation.	30
(a) Vertical profile.	
(b) Contour plot.	
Fig. 7. Profile of averaged sound velocity and acoustic rays.	32
Fig. 8. Vertical distribution of current velocity obtained by ADCP measurement at station P4.	33
(a) Velocity component along the section directed from station P4 to P5.	
(b) Velocity component across the section directed from station P4 to P5.	
Fig. 9. Time plot of averaged current velocity obtained by ADCP measurement at station P4.	35
(a) Velocity component along the section connected from	

station P4 to P5.

- (b) Velocity component across the section connected from station P4 to P5.

Fig. 10. Position distribution of the research vessel obtained by GPS receiver.	37
(a) Data of research vessel Eardo at station P4.	
(b) Data of research vessel Olympic No.5 at station P5.	
Fig. 11. Time plot of distance between two research vessels.	39
Fig. 12. Time plot of sound arrival time.	40
(a) Data obtained by research vessel Eardo at station P4.	
(b) Data obtained by research vessel Olympic No.5 at station P5.	
Fig. 13. Time plot of sound arrival time difference between the data obtained by research vessel Eardo at station P4 and the data obtained by research vessel Olympic No.5 at station P5.	42
Fig. 14. Time plot of mean data calculated by tomographic measurement.	43
(a) Averaged sound velocity.	
(b) Averaged current velocity along the section directed from station P4 to P5.	
Fig. 15. Time plot of averaged current velocity component along the section directed from station P4 to P5.	45

제 1장 서론

해수중을 전파하는 음파는 해양의 물리적인 성질에 관한 정보를 그 안에 포함하고 있다. 해양의 물리적인 성질이 음향신호의 전파에 대하여 어떠한 영향을 미치는가를 명확히 알고 있으면, 수파된 음향신호로부터 해양에 관한 정보를 역으로 추출할 수 있다. 이러한 생각으로부터 Munk와 Wunsch (1979)는 음파전파를 이용하여 해수의 물리적인 성질, 즉 수온 및 유속을 측정할 수 있는 해양음향 토모그래피를 제안하였다. 이에 관한 기초이론 및 초기의 실험결과에 대하여는 김과 변 (1992)이 기술해설에서 설명하고 있다. 현재까지도 많은 연구자들이 해양음향 토모그래피에 관한 다양한 연구를 실시하고 있으며, 지금까지 얻어진 연구결과에 관하여는 Munk 등 (1995)이 저술한 단행본에서 잘 고찰되어 있다.

해양에 있어서 쌍방향 음파전파에 의하여 해류를 측정하려는 연구는 Worcester (1977) 및 Worcester 등 (1991)에 의하여 거리 10~1,000 km의 스케일에서 성공적으로 수행되었으나, 이 연구는 모두 외해에서 실험한 것이다. 한편, 연안 가까이에 위치한 천해의 경우에는 수중음파의 전파환경이 외해의 경우에 비하여 매우 불량하므로 외해에서 사용한 토모그래피 시스템을 그대로 사용하는 것은 거의 불가능하다. Zheng 등 (1997)은 새로운 연안음향 토모그래피 시스템 (Coastal Acoustic Tomography System)을 개발하여, 이것으로 내해에서 쌍방향 수중음파의 전파시간을 정밀하게 측정하여 유속측정의 가능성을 실험적으로 시사하였다. 그러나 내해를 벗어난 연안의 천해에서 충분한 시간동안 실험하여 완전하게 이 시스템의 유속관측 유효성을 입증하지는 않았다.

본 연구의 목적은 일본 히로시마대학의 연구원과 공동으로 해양음향 토모그래피 실험을 실시하여 해양음향 토모그래피에 의한 유속관측의 유효성을 조사하고, 해양음향 토모그래피의 실험방법 및 토모그래피 자료의 분석기법을 확립함으로써 실시간 유속장을 모니

터링하기 위한 본격적인 해양음향 토모그래피 시스템 구축연구의 기초자료를 확보하는 데 있다.

제 2장 유속 측정이론

그림 1에 모식적으로 나타낸 것과 같이 유속이 있는 해수중에서 쌍방향 음파전파 실험을 실시하는 경우를 생각한다. 정점 A에서 펄스음파를 해수중에 송파하여 정점 B에서 음파를 수파하는 경우의 음파 도달시간을 t_1 이라 하고, 정점 B에서 음파를 송파하여 정점 A에서 수파하는 경우의 음파 도달시간을 t_2 라고 하면, 이들은 각각 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$t_1 = \int_r \frac{dr}{c(r) + u(r)} \quad (1)$$

$$t_2 = \int_r \frac{dr}{c(r) - u(r)} \quad (2)$$

여기서, $c(r)$ 및 $u(r)$ 은 각각 음선경로를 따르는 음속 및 유속이다. 그리고 $u(r)$ 은 정점 A에서 정점 B로 향하는 것을 플러스의 방향으로 취하고 있다.

두 정점 사이의 수평거리가 수심에 비하여 충분히 크다고 하고, 두 정점 사이의 해수중에 있어서 평균음속 및 평균유속을 각각 c_m 및 u_m 으로 나타내면, (1) 및 (2)식은 각각 다음과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다.

$$t_1 = \frac{R}{c_m + u_m} \quad (3)$$

$$t_2 = \frac{R}{c_m - u_m} \quad (4)$$

여기서, R 은 두 정점 사이의 수평거리이다. (3) 및 (4)식으로부터

c_m 및 u_m 을 구하면 각각 다음과 같다.

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

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

여기서, $\bar{t} = \frac{1}{2}(t_1 + t_2)$, $\Delta t = t_2 - t_1$ 이다.

(6)식에서 두 정점 사이의 거리 R 이 일정하다고 하면, 평균유속 u_m 를 정확히 계측하기 위하여는 음파 도달시간의 차 Δt 를 정밀하게 측정할 필요가 있다. 그리고 계측하려는 최소 평균유속치 u_m 이 정해지면, Δt 의 크기는 거리 R 에 비례한다. 연안의 천해에서는 보통 음파전파의 거리가 외해에 비하여 매우 짧으므로 높은 시간계측 정밀도가 요구된다.

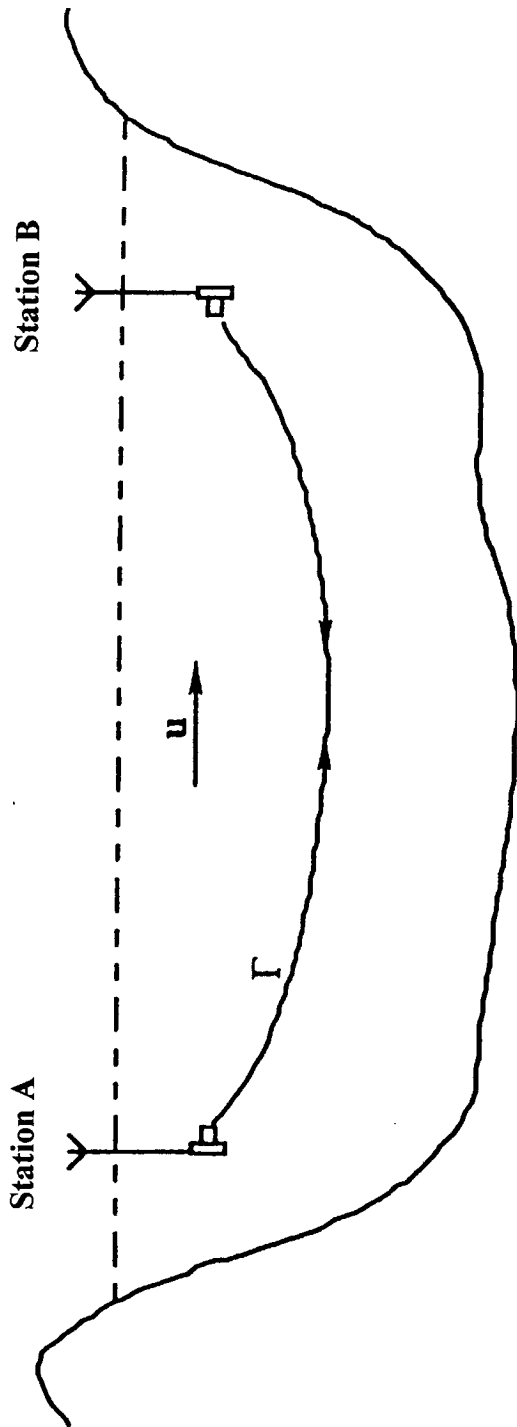


Fig. 1. Sketch of reciprocal sound transmission.

제 3장 시스템의 구성 및 실험 방법

1. 음향 토모그래피 시스템

해양음향 토모그래피 실험에는 일본 히로시마 대학에서 개발한 연안음향 토모그래피 시스템 (Coastal Acoustic Tomography System)을 사용하였다 (Zheng 등, 1997). 이 시스템의 구성을 그림 2에 나타낸다. 이 시스템은 크게 송파기 (ITC-2011), 수중 마이크로폰 (Bentos AQ-1), GPS 수신기 (Magellan사) 및 시스템을 제어하는 컴퓨터로 구성된다.

GPS 수신기는 시스템의 위치를 구하는 데 사용될 뿐 아니라 시스템의 클럭 (clock)을 동기시키는 데 사용된다. GPS 수신기로부터 출력되는 정밀도 $0.1 \mu s$ 의 $1 Hz$ 및 $1 kHz$ 의 펄스신호를 사용하여 떨어져 있는 두 정점에 있어서 시스템을 동기시키고 있으므로 이 시스템 시각의 동기 정밀도는 $0.1 \mu s$ 이다.

컴퓨터의 송파기 제어신호에 의해 신호발생기에서 송파신호를 발생시키고, 이것을 증폭기에서 증폭하여 해수중에 음파송파를 개시하였다. 이 때 사용된 송파신호는 $5.5 kHz$ 의 반송파 3 주기를 단위 (디지트)로 하여 12 차의 M계열로 위상변조한 것으로 송파펄스의 길이는 $2.234 s$ 였다. 그리고 이러한 음파송파를 매 2분의 간격으로 반복하도록 설정하였다.

해수중에 송파한 음파를 수중 마이크로폰으로 수파한 다음, 이 신호를 전치 증폭기, 대역통과 필터 및 증폭기를 거치게 하여 처리하였다. 그리고 나서 이 신호를 복조시킨 다음, 컴퓨터에서 미리 설정한 지연시간 이후부터 샘플링 주파수 $27.5 kHz$ 로 샘플링을 행하여 컴퓨터에 저장하도록 하였다. 이 때 자료 각각의 기록시간은 $4.766 s$ 였다.

이번 실험에서와 같이 두 정점 사이의 거리가 10 km의 경우, 구하려는 최소 유속치를 1 cm/s 라고 하고, 평균음속을 1,500 m/s 라고 하면, (2)식으로부터 Δt 의 값은 88.9 μs 가 된다. 이 값은 시간 분해능 72.7 μs 보다 크므로, 이번 실험에서는 약 1 cm/s의 오더로 유속을 계측할 수 있다.

2. 현장 실험

그림 3에 실험해역을 나타내고 있다. 거제도 남쪽의 해역에 위치한 두 정점 P4와 P5에 한국해양연구소 조사선 이어도호 및 올림픽 5호를 각각 닻으로 고정하였다. 이 때 두 정점 사이의 거리는 약 10 km였으며, 두 정점 사이에서 해저수심은 약 75 m로 대체로 매우 평탄하였다. 그리고 그림 4에 나타낸 것과 같이 각각의 조사선에서 송파기 및 수중 마이크로폰 어레이(수중 마이크로폰 8개로 구성)를 해수중에 내려 설치하였다. 이 때 송파기를 수심 약 10 m에 위치하도록 하였으며, No.0 ~ No.3 수중 마이크로폰을 1 m의 간격으로 각각 수심 약 14 m, 13 m, 12 m 및 11 m에 위치하도록 하였다. 그리고 No.4 ~ No.7 수중 마이크로폰을 각각 수심 약 9 m, 8 m, 7 m 및 6 m에 위치하도록 하였다.

세계 협정시(UTC)로 1997년 4월 19일 00시부터 06시까지 6시간 동안 해양음향 토모그래피 실험을 실시하였다. 이 때에는 각각의 조사선에서 동시에 매 2분의 간격으로 음파를 송파하였으며, 음파수신 데이터의 샘플링은 두 정점 사이의 거리 및 토모그래피 실험 전날 실시한 CTD관측으로부터 구한 음속분포를 고려하여 음파송파로부터 6~6.5초의 지연시간을 두고 개시하였다. M계열로 위상변조된 수신음파의 신호와 컴퓨터에 저장되어 있는 M계열 신호와의 상호상관을 계산하여, 이 계수의 피크가 나타나는 시각으로부터 각각의 조사선에서 수신한 음파의 도달시간을 구하였다. 그

리고 토모그래피 실험기간 동안 정점 P_4 에 위치한 조사선 이어도 호에서는 조사선에 장착된 ADCP (R&D Instrument사, 주파수 150 kHz) 를 사용하여 매 1분의 간격으로 연속적으로 유속을 측정하였다. 이러한 ADCP에 의한 측정자료는 60초 동안을 평균하여 한 개의 앙상블 (ensemble)이 만들어지게 하였으며, 빈 (bin)의 길이는 4 m로 하였다. 그리고 이 유속자료의 남북방향 성분 및 동서방향 성분으로부터 토모그래피 실험정선을 따르는 유속의 성분 (정점 P_4 로부터 정점 P_5 를 연결한 직선 방향의 유속성분, 정북에 대하여 58° 방향임) 과 실험정선을 가로지르는 유속의 성분 (정북에 대하여 328° 방향임)을 각각 구하였다.

실험해역의 수온구조를 파악하기 위하여 토모그래피 실험 전날 두 정점 P_4 , P_5 및 두 정점 사이에 위치한 정점 P_4-1 에서 CTD (Seabird, SBE911) 관측을 실시하였다. 그리고 CTD자료를 사용하여 국제연합 교육과학기구 (UNESCO)에서 추천한 공식에 의한 음속을 계산하였다(Chen and Millero, 1977).

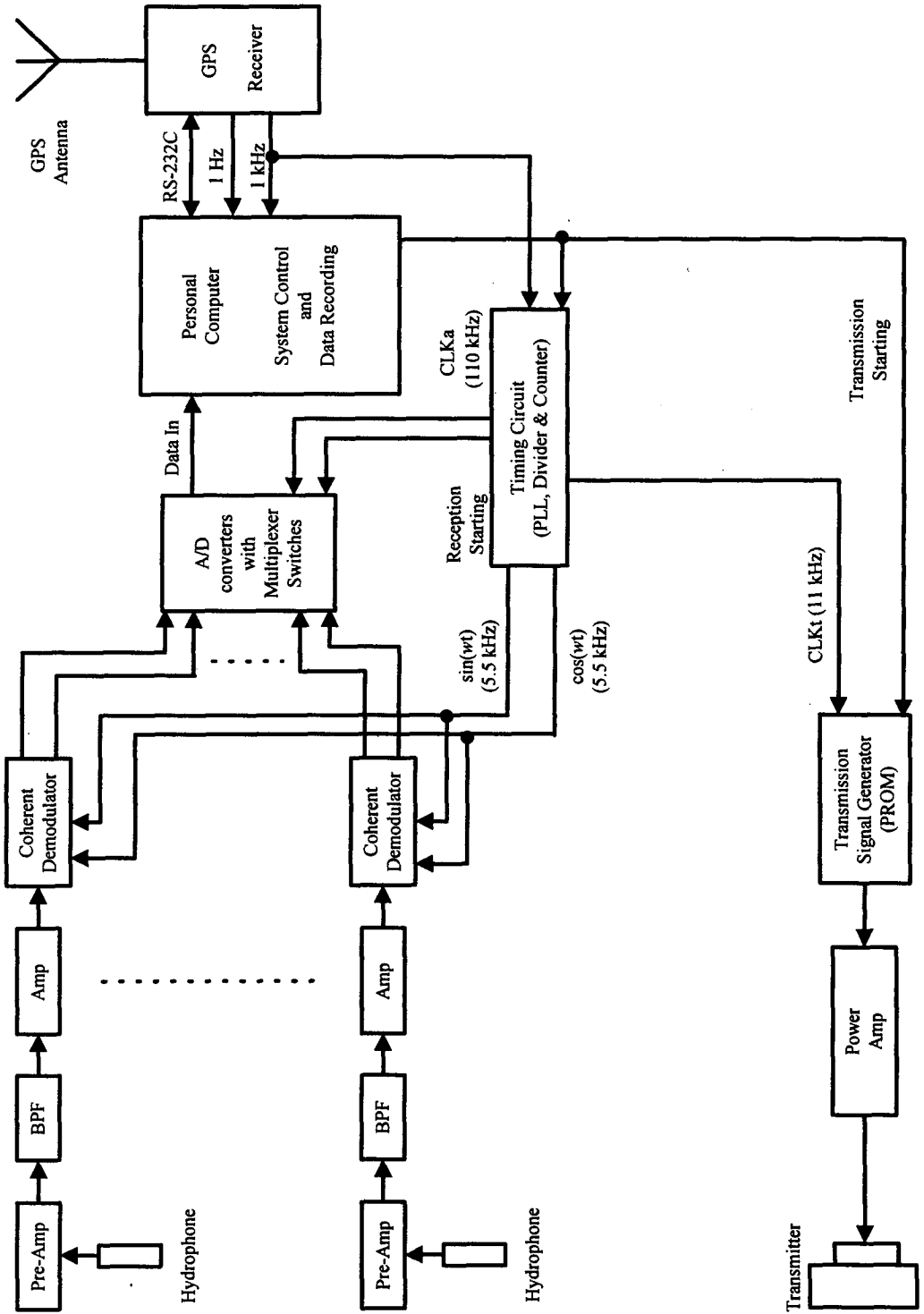


Fig. 2. Block diagram of reciprocal acoustic tomography system.

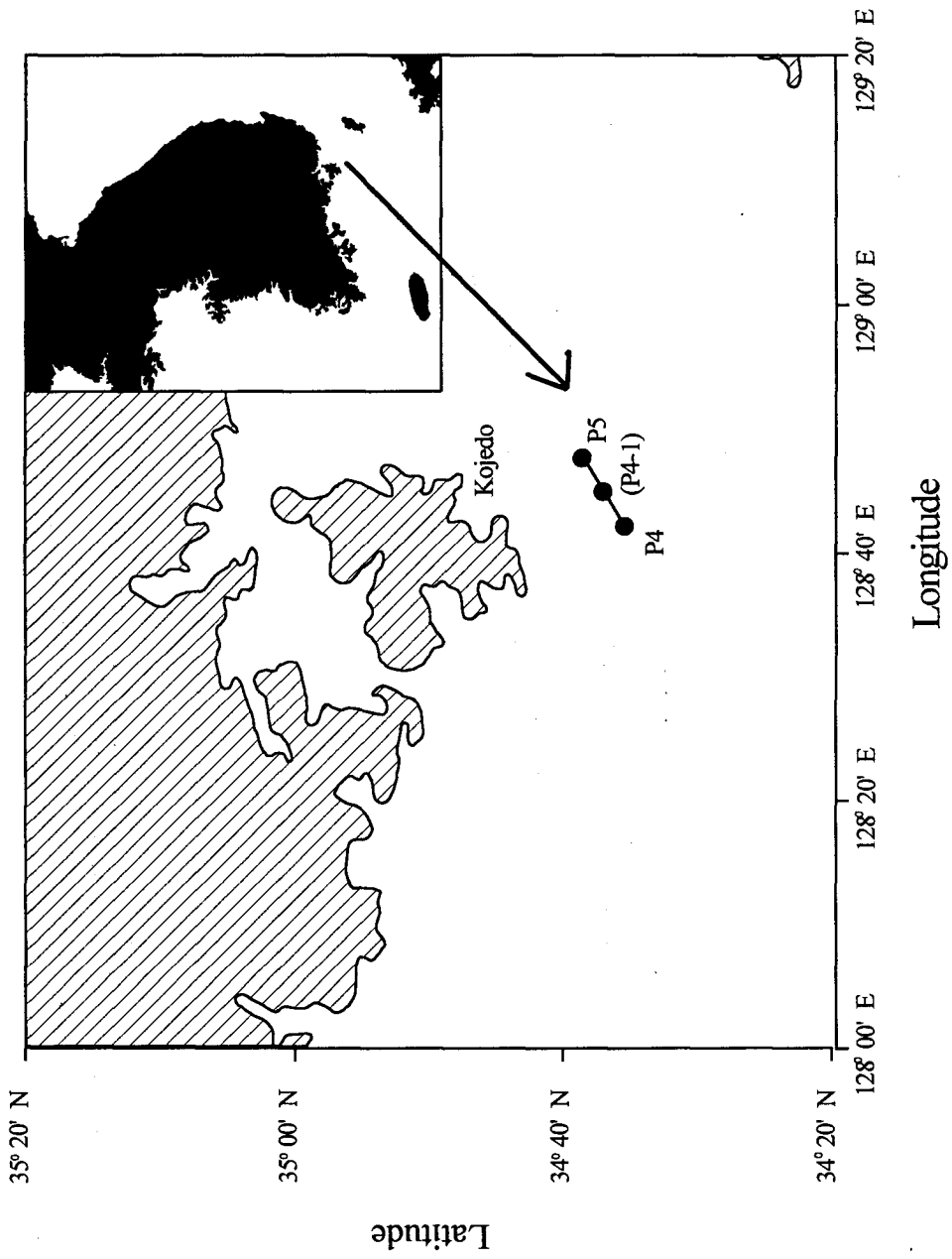


Fig. 3. Location map of ocean acoustic tomography experiment.

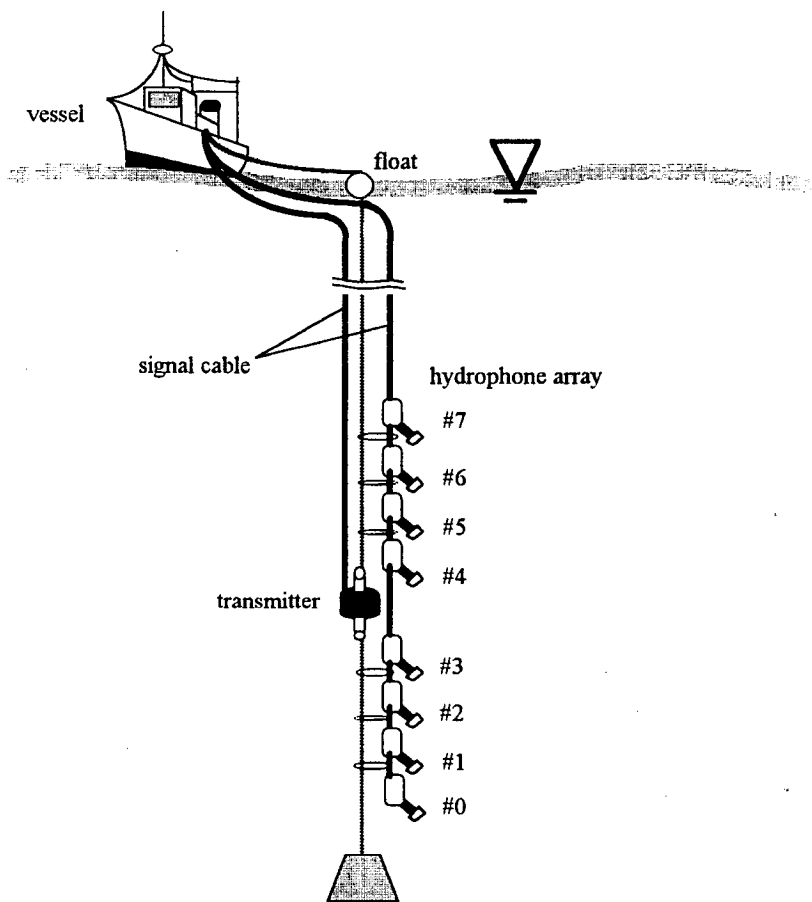


Fig. 4. Floating system of transmitter and hydrophone array.

제 4장 결과 및 고찰

1. CTD의 측정 결과

정점 P_4 , P_4-1 및 P_5 에서 실시한 CTD관측으로부터 수온의 수직 프로파일 및 등치선도 (contour plot)를 구하여 그림 5에 나타내었다. 전체적으로 수온은 수심이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있었으며, 특히 이러한 현상은 정점 P_4 에 비하여 정점 P_5 에서 현저하게 나타났다. 정점 P_4 및 P_4-1 에 있어서 수온의 수직분포를 살펴보면, 해표면으로부터 수심 약 25 m 까지 그리고 수심 약 50 m로부터 해저까지에서는 수심이 증가함에 따라 수온이 매우 서서히 감소하였으나, 수심 25~50 m의 범위에서는 수심이 증가함에 따라 수온이 급격히 감소하였다. 그러나 정점 P_5 에 있어서 수온의 수직분포에 의하면, 해표면으로부터 수심 약 40 m까지에서는 수심이 증가함에 따라 수온이 급격히 감소한 반면, 수심 40 m로부터 해저까지에서는 수심이 증가함에 따라 수온이 매우 서서히 감소하였다. 그리고 정점 중에서 가장 남쪽에 위치한 정점 P_4 에서의 수온분포는 가장 북쪽에 위치한 정점 P_5 에서의 수온분포에 비하여 동일한 수심에서 약간 큰 값을 보이고 있었다.

정점 P_4 , P_4-1 및 P_5 에서 실시한 CTD관측 자료로부터 음속의 수직 프로파일 및 등치선도를 구하여 그림 6에 나타내었다. 해수중에서의 음속은 수온의 영향을 가장 크게 받고 있으므로 전체적인 음속의 분포는 수온의 분포와 매우 유사하게 나타나고 있었다. 정점 P_4 및 P_4-1 에 있어서는 해표면으로부터 수심 약 40 m의 사이에 표층 음파통로 (surface duct)가 불완전하게 형성되어 있었으나, 정점 P_5 에 있어서는 해표면으로부터 수심이 증가함에 따라 음속이 급격히 감소하여 표층 음파통로가 형성되어 있지 않았다.

정점 P_4 , P_4-1 및 P_5 에서의 음속으로부터 구한 평균음속과 이러한 환경하에서의 음선을 계산하여 그림 7에 나타내었다. 이 그림에서 음원의 수심은 토모그래피 실험의 경우와 같이 10 m 로 설정하였다. 그리고 음선에 있어서 플러스 기호의 각도는 음원표면의 직각방향에 대하여 상향으로 음원에서 방사된 것을 의미하고 마이너스 기호의 각도는 하향으로 방사된 것을 의미한다. 이 결과에 의하면, 단지 $\pm 0.2^\circ$ 이내에 들어오는 음선만이 해저 및 해표면에서 반사되는 일이 없이 거리 10 km 를 전파하는 것으로 나타났다. 그리고 송파각 $\pm 0.2 \sim \pm 1.0^\circ$ 이내에 들어오는 음선의 경우에는 해저에서 2~3회 반사하면서 거리 10 km 를 전파하고 있었으며, $\pm 1.0^\circ$ 이상의 음선의 경우에는 해저에서 수많은 반사를 반복하면서 전파하였다. 이러한 결과로부터 토모그래피 실험 때에 있어서 수중음파의 전파환경은 그림 6으로부터 예상할 수 있었던 것과 같이 매우 불량함을 확인할 수 있었다.

2. ADCP의 측정 결과

정점 P_4 에 위치한 조사선 이어도호에서 ADCP를 사용하여 세계 협정시로 1997년 4월 19일 00시부터 06시까지 6시간 동안 매 분의 간격으로 유속을 측정하였다. 그 중에서 몇 개의 대표적인 유속의 분포를 그림 8에 나타내었다. 이들 그림에서 상자 안에 표시된 수치는 세계 협정시로 1997년 4월 19일 00시부터 경과된 시간을 분 단위로 나타내고 있다. 그리고 이 중에서 그림 (a)는 실험정선을 따르는 유속의 성분(정북에 대하여 58° 방향임)이고, 그림 (b)는 실험정선을 가로지르는 유속의 성분(정북에 대하여 328° 방향임)이다. 전체적으로 실험정선을 따르는 유속의 성분은 시간의 경과와 함께 크게 변동하고 있었으나, 실험정선을 가로지르는 유속의 성분은 시간의 경과에 관계없이 매우 작은 값을 보이고 있었다. 그리고 실험정선을 따르는 유속성분에 있어서 수심에 따른 유속의 크기를 살펴보면, 수심 약 40 m 의 부근에서 최대를 보이고 있었으

며, 해표면 및 해저의 가까이에서 최소를 보이고 있었다. 그러나 실험정선을 가로지르는 유속성분에 있어서는 수심에 따른 유속 크기의 변동은 거의 확인할 수 없었다.

정점 P_4 에서 ADCP를 사용하여 매 분의 간격으로 측정된 유속의 자료로부터 전체 수심에 대한 평균유속을 구하여 그림 9에 나타내었다. 이 중에서 그림 (a)는 실험정선을 따르는 유속의 성분(정북에 대하여 58° 방향임)이고, 그림 (b)는 실험정선을 가로지르는 유속의 성분(정북에 대하여 328° 방향임)이다. 그림 8의 결과로부터 예측할 수 있었던 것과 같이 실험정선을 따르는 유속의 성분은 시간의 경과와 함께 변동하고 있었으나, 실험정선을 가로지르는 유속의 성분은 시간의 경과에 관계없이 매우 작은 값을 보이고 있었다. 그리고 시간의 경과에 대한 실험정선을 따르는 유속성분의 크기를 살펴보면, 세계 협정시로 1997년 4월 19일의 02시(120분) 부근에서 약 0.35 m/s 로 최대를 보이고 있었으며, 05시(300분) 부근에서 약 0 m/s 로 되었고, 06시(360분)에는 약 -0.10 m/s 가 되었다.

3. 토모그래피 실험 결과

먼저, 토모그래피 실험기간 동안 닷을 사용하여 정점 P_4 및 P_5 에 각각 고정시킨 조사선 이어도호 및 올림픽 5호의 위치를 그림 10에 나타내었다. 이것은 GPS 수신기에 의하여 관측한 자료이다. 그리고 이 중에서 그림 (a)는 이어도호의 위치를 나타내고 있고, (b)는 올림픽 5호의 위치를 나타내고 있다. 이 결과에 의하면, 조사선의 위치는 한 점에 고정되어 있지 아니하고, 약 $\pm 140\text{ m}$ 의 범위내에서 변동하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 위치 자료에는 GPS 수신기 자체의 위치 오차($\pm 50\text{ m}$) 뿐만 아니라 유속 및 풍속에 따라 해상에서 조사선의 위치가 실제로 변동한 것이 포함되어 있을 것이다. 구면삼각법에 의하여 두 조사선의 위치 자료로부터

구한 두 조사선 사이의 거리를 세계 협정시의 시간에 대하여 그림 11에 나타내었다. 두 조사선 사이의 거리는 약 10,300~10,800 m의 범위내에서 시간에 따라 약간 변동하고 있는 것으로 나타났다.

쌍방향 음파 전파실험으로부터 구한 음파의 전파시간을 세계 협정시의 시간에 대하여 그림 12에 나타내었다. 이 중에서 그림 (a)는 정점 P5에 위치한 조사선 올림픽 5호에서 송파한 수중음파를 정점 P4에 위치한 조사선 이어도호에서 수파한 음파 전파시간을 나타낸 것이고, 그림 (b)는 정점 P4의 이어도호에서 송파한 음파를 정점 P5의 올림픽 5호에서 수파한 음파의 전파시간을 나타낸 것이다. 그리고 여기에서 정점 P4에 위치한 이어도호의 경우에는 No.3 수중 마이크로폰으로 수파한 음향신호를 사용하였으며, 정점 P5에 위치한 이어도호의 경우에는 No.4 수중 마이크로폰으로 수파한 음향신호를 사용하였다. 이것은 전체의 쌍방향 음파 전파실험 기간 동안 각각 이들의 수중 마이크로폰에서 수파한 음향신호가 가장 안정적이었고, 신호 대 잡음의 비가 가장 양호하였기 때문이다. 음파의 전파시간은 6,850~7,100 ms의 범위내에서 시간에 따라 약간 변동하고 있었다. 그리고 이러한 음파 전파시간의 자료로부터 그 차를 구하여 그림 13에 나타내었다. 여기에서 음파 전파시간의 차는 정점 P5의 올림픽 5호에서 송파한 음파를 정점 P4의 이어도호에서 수파한 음파 전파시간으로부터 정점 P4의 이어도호에서 송파한 음파를 정점 P5의 올림픽 5호에서 수파한 음파 전파시간을 빼어 구하였다. 이 결과에 의하면, 음파 전파시간의 차는 약 -2.0~+3.5 ms의 범위내에서 시간에 따라 변동하고 있었다. 그러나 도중에 불규칙적으로 큰 값을 보이는 몇 개의 잘못된 측정치도 보이고 있었다.

토모그래피 실험으로부터 구한 두 조사선 사이의 거리 및 쌍방향 음파 전파시간 차의 자료를 (5)식 및 (6)식에 대입하여 두 정점 사이의 해수중에 있어서 평균음속 및 평균유속을 구해 그림 14에 나타내었다. 이 중에서 그림 (a)는 세계 협정시로 시간의 경과에 따

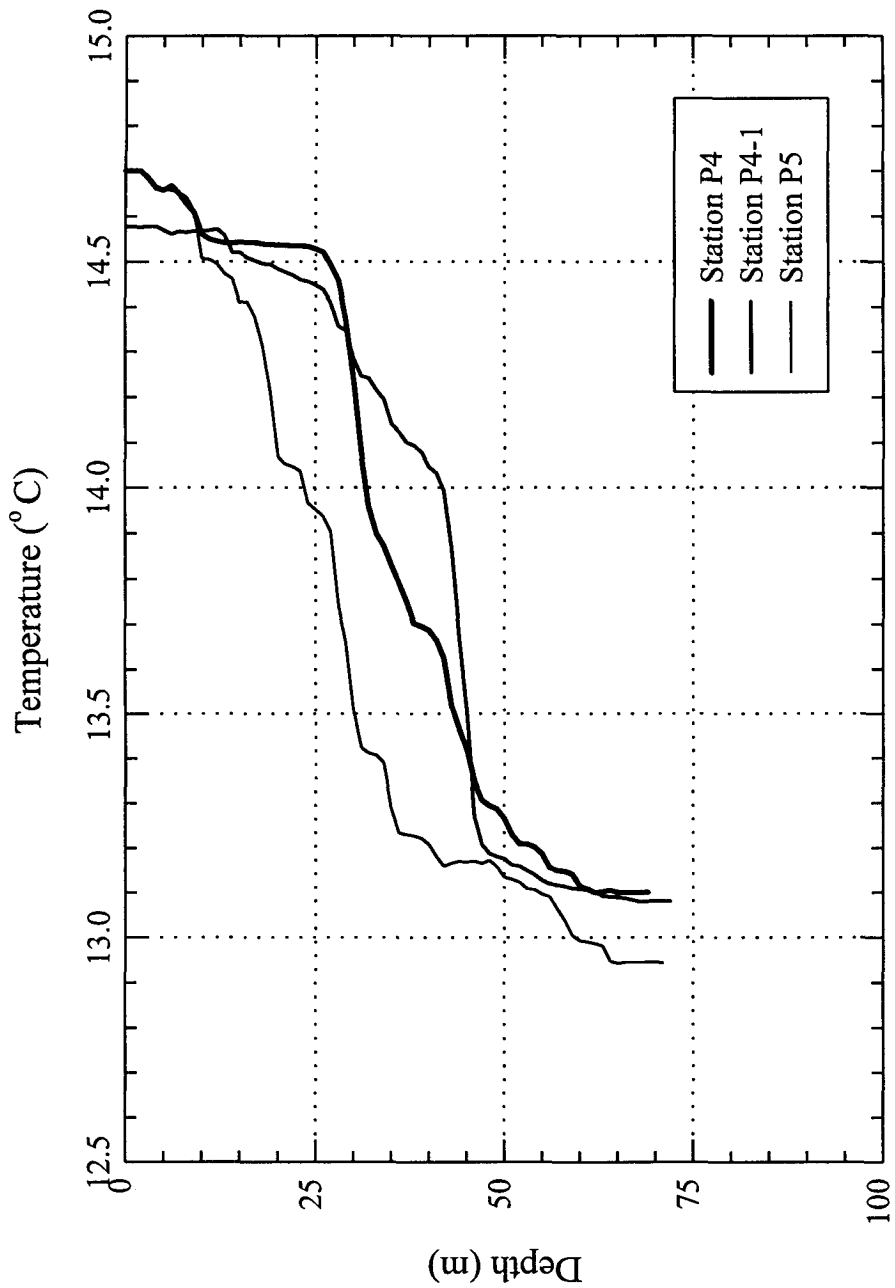
른 평균유속을 나타내고 있고, 그림 (b)는 평균유속으로서 정점 P_4 로부터 정점 P_5 를 연결한 직선 방향의 성분을 나타내고 있다. 그리고 이 그림에서 진한 실선은 토모그래피로부터 구한 평균유속을 2차식을 사용하여 오차가 최소가 되도록 커브 피팅 (curve fitting)한 결과이다. 먼저, 평균유속은 세계 협정시 1997년 4월 19일의 00시를 기준으로 160~170분에서 측정된 커다란 피크의 값을 제외하면, 시간의 경과에 따라 $\pm 10 \text{ m/s}$ 의 범위내에서 변동하면서 매우 서서히 감소하는 경향을 보이고 있었다. 그리고 이 평균유속의 평균치는 약 $1,502.1 \text{ m/s}$ 였고, 표준편차는 4.9 m/s 인 것으로 나타났다. 평균유속의 경우에는 몇 개의 커다란 잘못 측정된 값을 제외하면, 시간의 경과에 따라 규칙적으로 변동하고 있음을 잘 나타내고 있었다. 전체적으로 평균유속은 세계 협정시 1997년 4월 19일의 00시를 기준으로 시간이 경과함에 따라 서서히 증가하는 경향을 보이다가 120분의 부근에서 약 0.39 m/s 로 피크를 보였다. 그리고 그 이후에는 시간이 지남에 따라 서서히 감소하여 310분에서 0 m/s 로 되었고, 그 다음에는 유향이 바뀌어 360분에서 약 -0.20 m/s 가 되었다.

4. 고찰

시간의 경과에 대하여 ADCP 및 토모그래피에 의해 구한 실험 정선에 따르는 유속성분을 그림 15에 나타내었다. 여기서, 가는 실선은 토모그래피에 의하여 구한 유속성분을 나타내고 있고, 굵은 실선은 ADCP에 의하여 구한 유속성분을 나타내고 있다. 전체적으로 두 방법에 의한 결과는 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 유속이 미약한 부분에 있어서는 최대 약 0.10 m/s 정도의 차이가 있음을 보여주고 있다. 이것은 ADCP에 의한 유속은 정점 P_4 의 한 지점에 있어서 평균유속을 관측한 것인데 비하여 토모그래피에 의한 유속은 정점 P_4 와 P_5 사이의 해수중에 있어서 평균유속을 관측한 것이기 때문으로 생각된다.

수중음파를 수파하기 위하여 수중 마이크로폰 8개로 구성된 어레이를 사용하였지만, 여기에서는 신호가 가장 양호한 한 개씩의 수중 마이크로폰 수파신호만을 사용하였다. 앞으로 모든 수중 마이크로폰의 수파신호를 사용하는 빔 형성기법을 개발하여 해수중 미소구간에 있어서 유속을 구하는 연구를 추진하여야 할 것이다.

그리고 실제의 해양환경에서 유속장을 측정하는 데 해양음향 토모그래피를 사용하기 위하여는 더욱 편리한 디스플레이 기법의 개발과 함께 비교적 장기간에 걸쳐 다양한 해양환경에서 해양음향 토모그래피의 적용실험이 실시되어야 하리라고 생각된다.



(a)

Fig. 5. Distribution of water temperature obtained by CTD observation.

(a) Vertical profile.

(b) Contour plot.

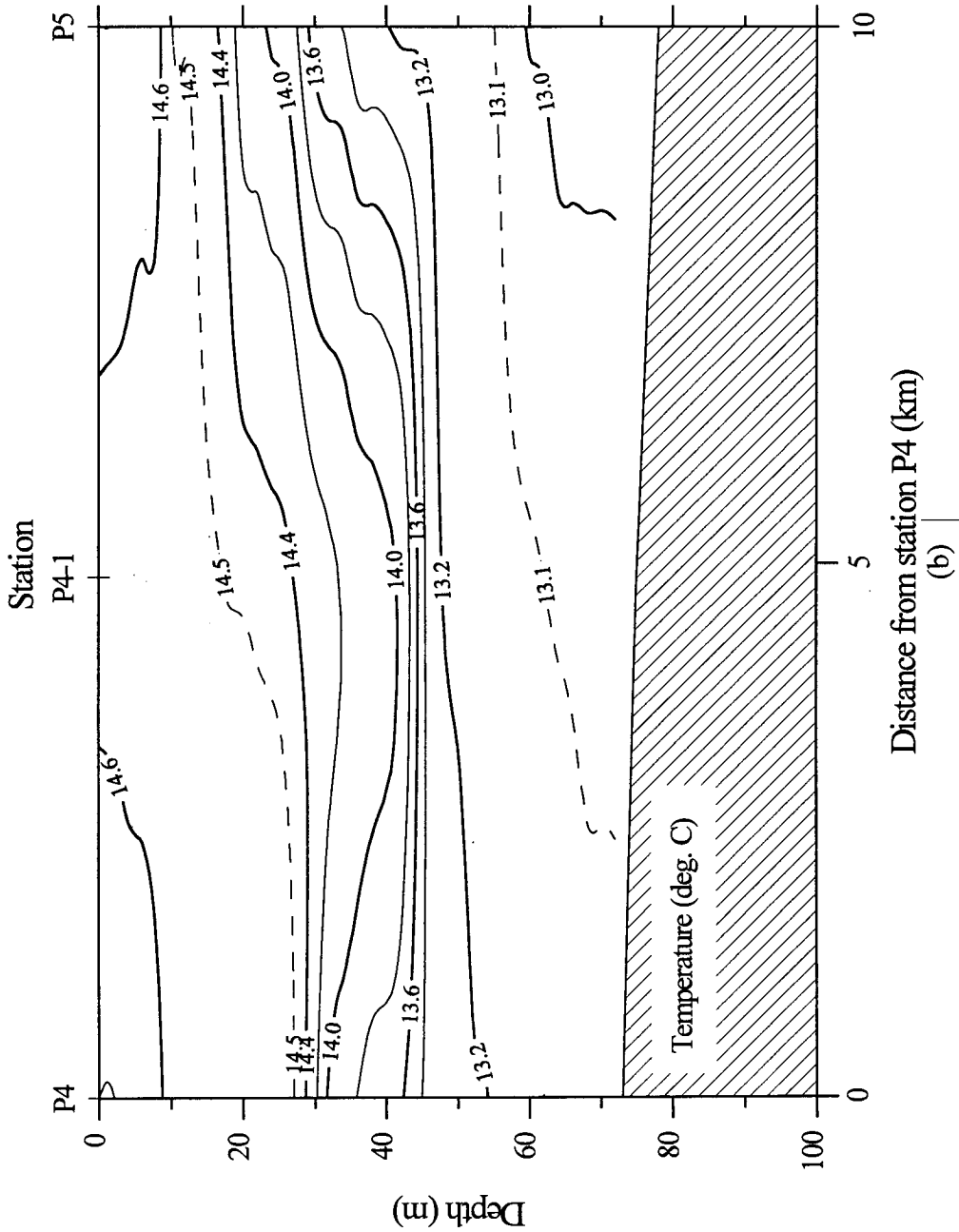
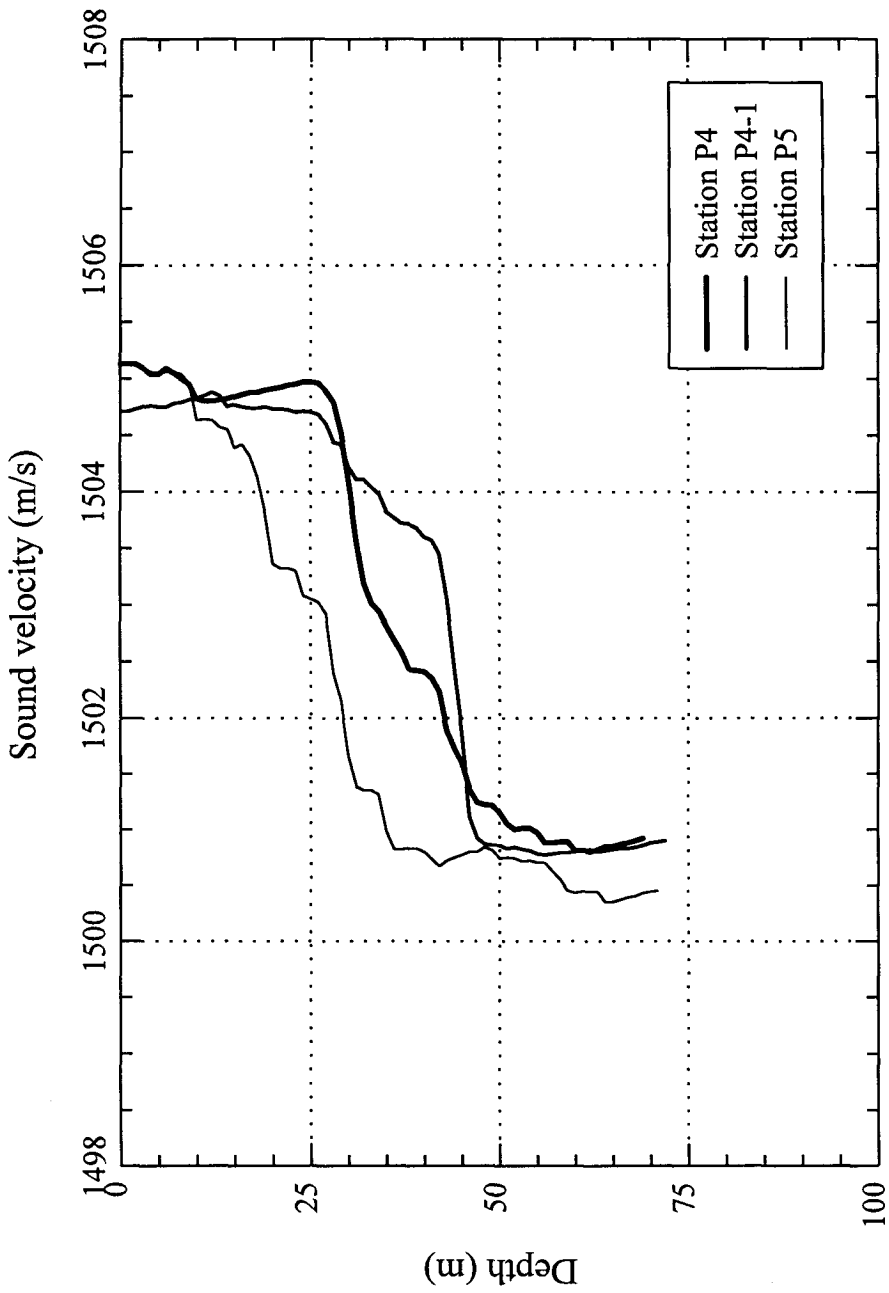


Fig 5. (continued)



(a)

Fig. 6. Distribution of sound velocity obtained by CTD observation.

(a) Vertical profile.

(b) Contour plot.

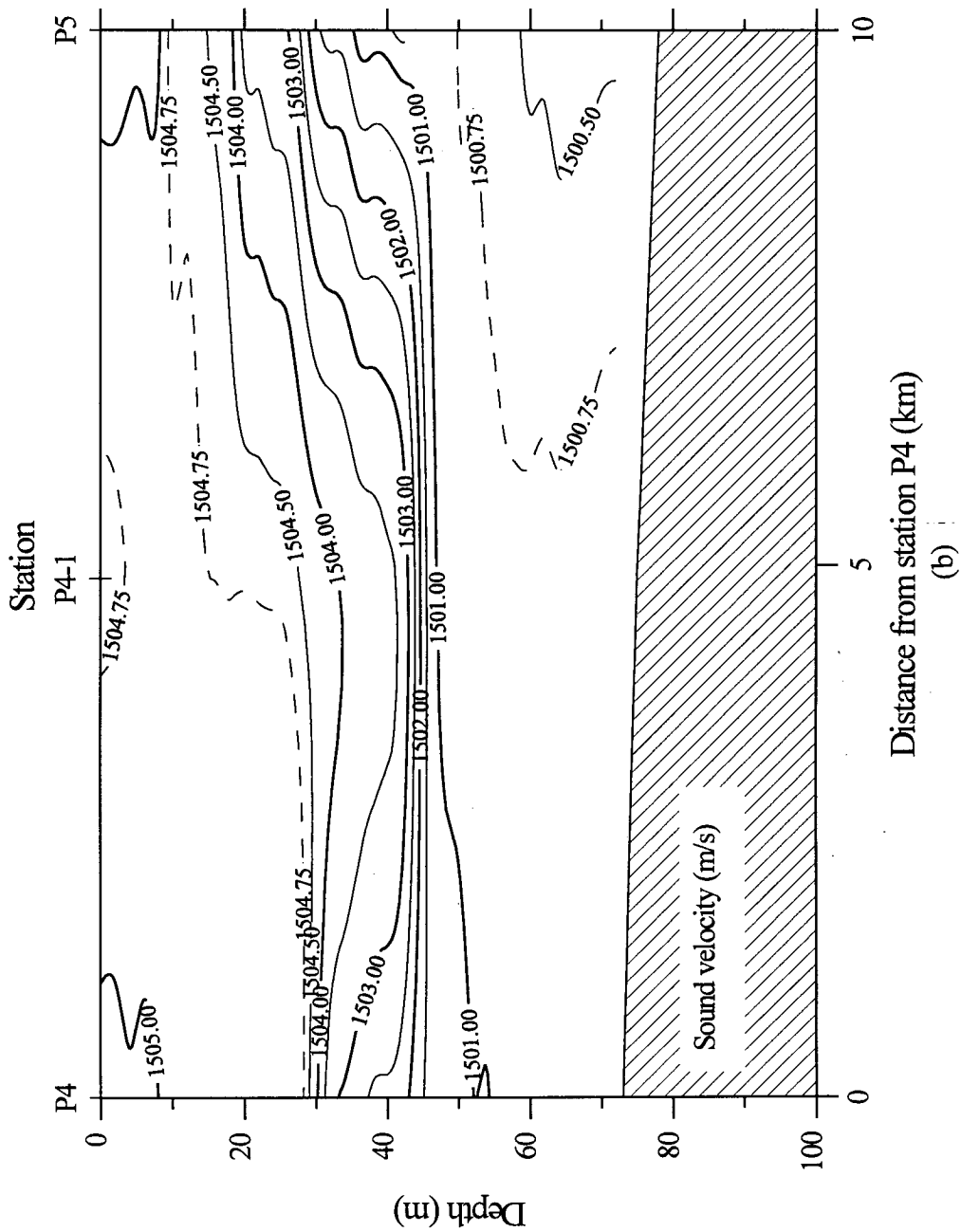


Fig 6. (continued)

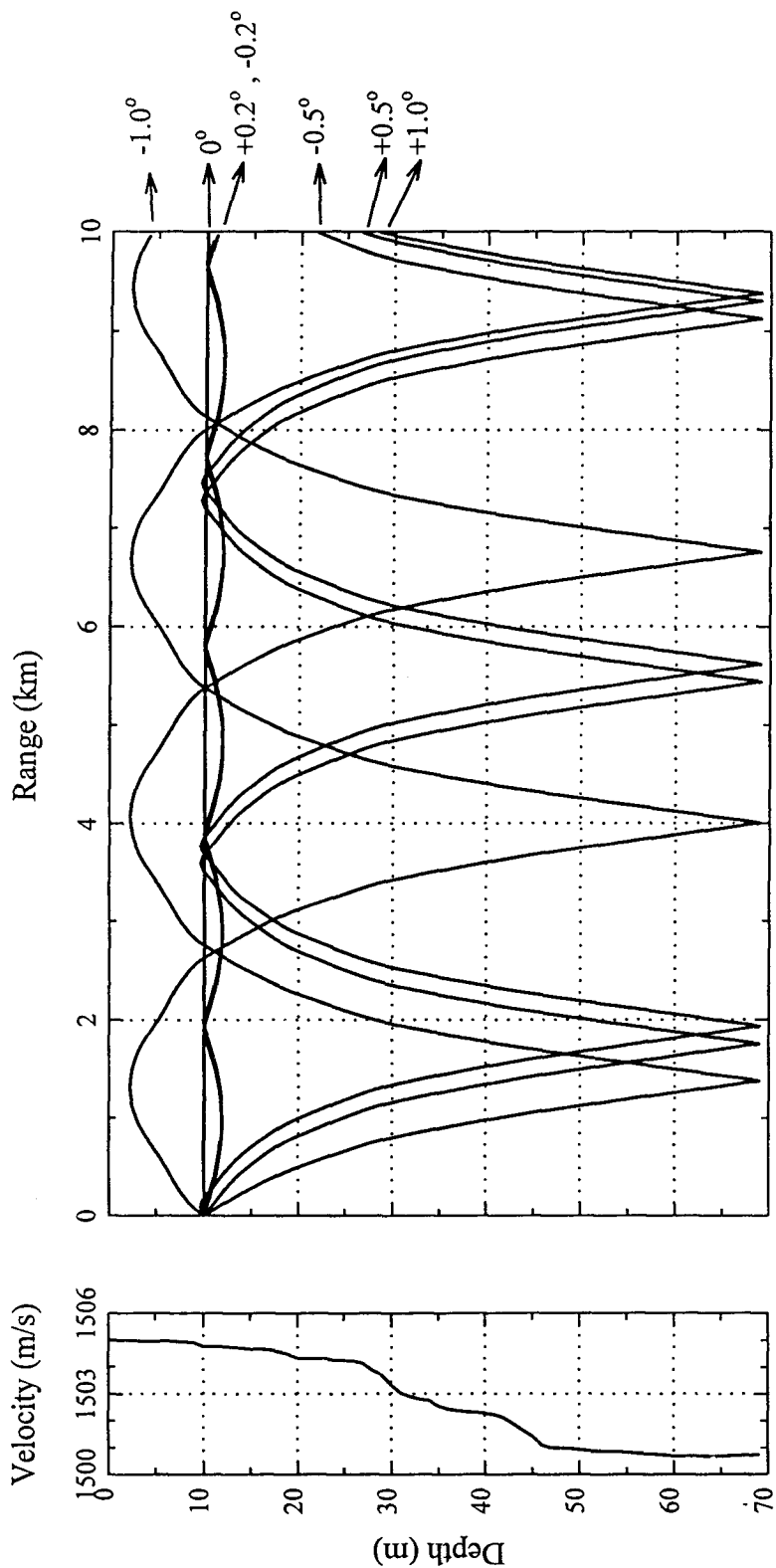


Fig. 7. Profile of averaged sound velocity and acoustic rays. Here the plus in degree means upward departure ray and the minus means downward departure ray to the normal direction of the transmitter surface.

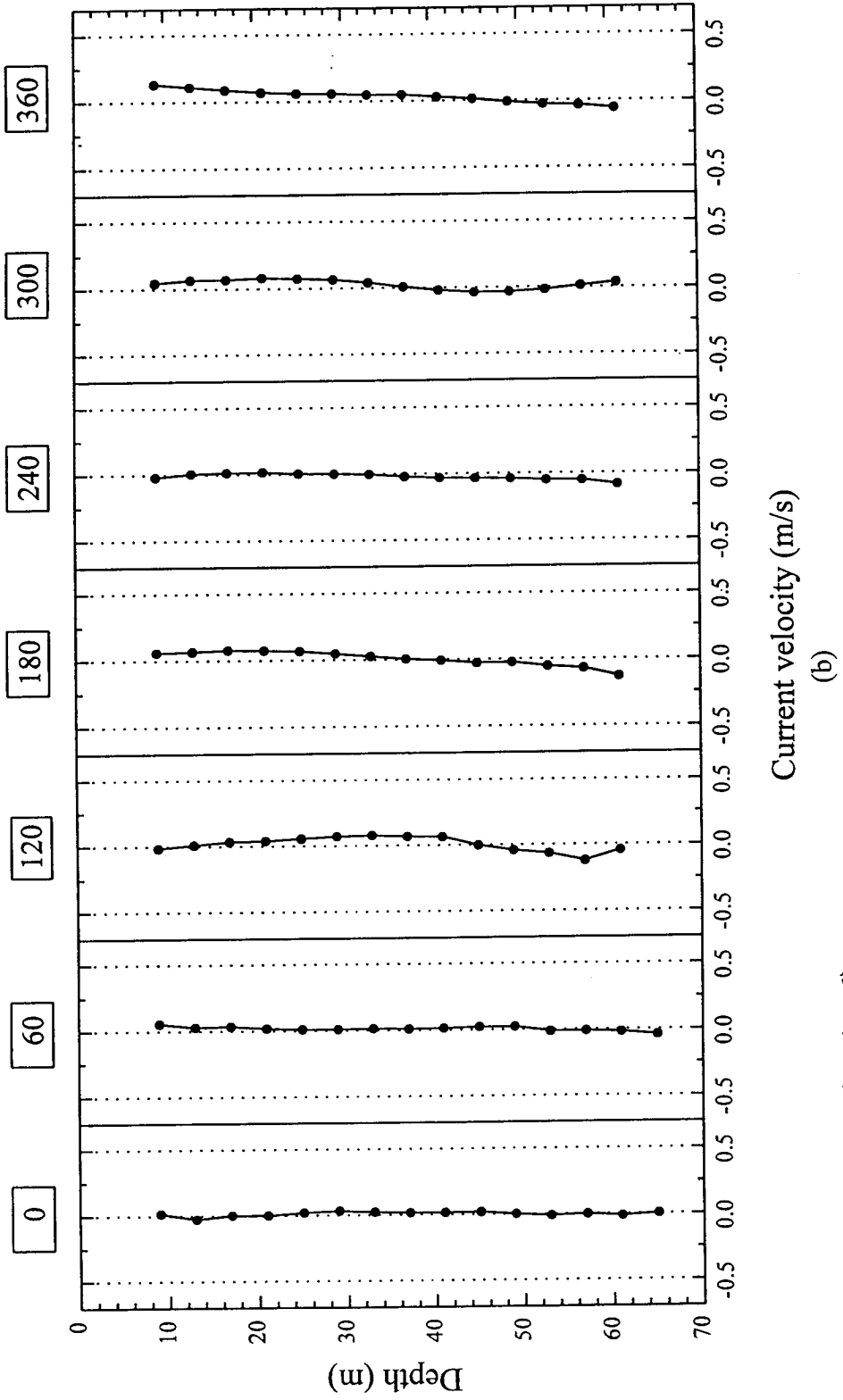
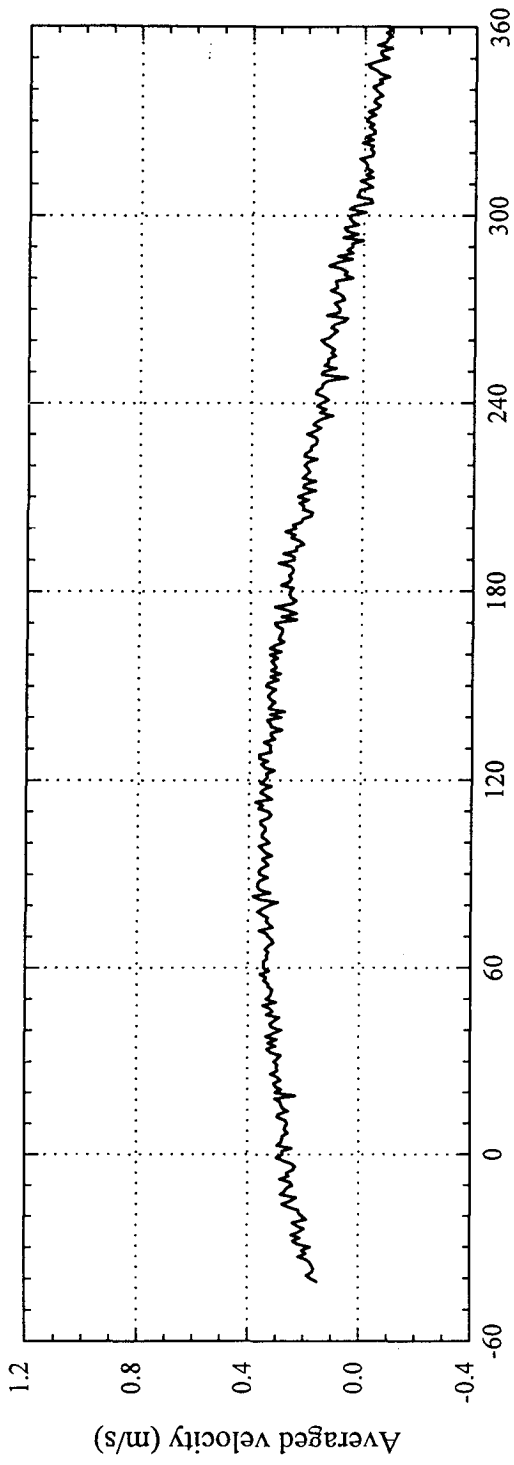


Fig 8. (continued)



(a)

Fig. 9. Time plot of averaged current velocity obtained by ADCP measurement at station P4.

(a) Velocity component along the section connected from station P4 to P5.

(b) Velocity component across the section connected from station P4 to P5.

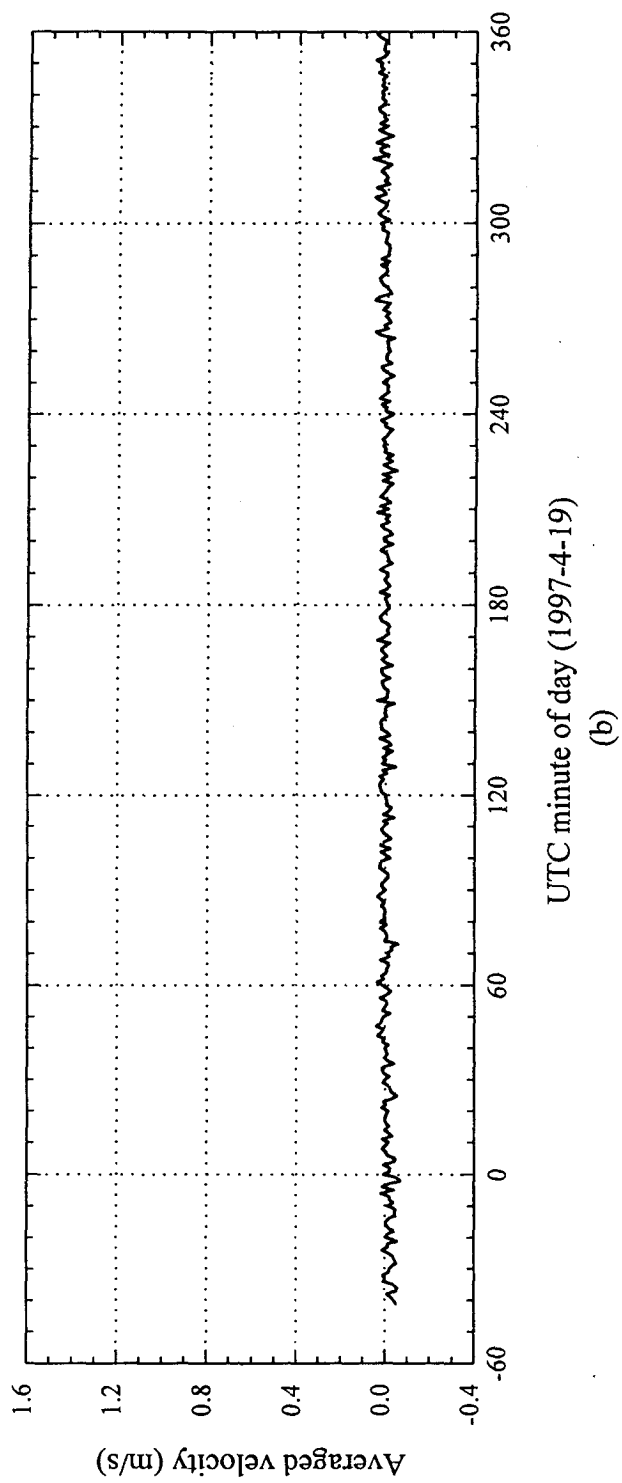


Fig 9. (continued)

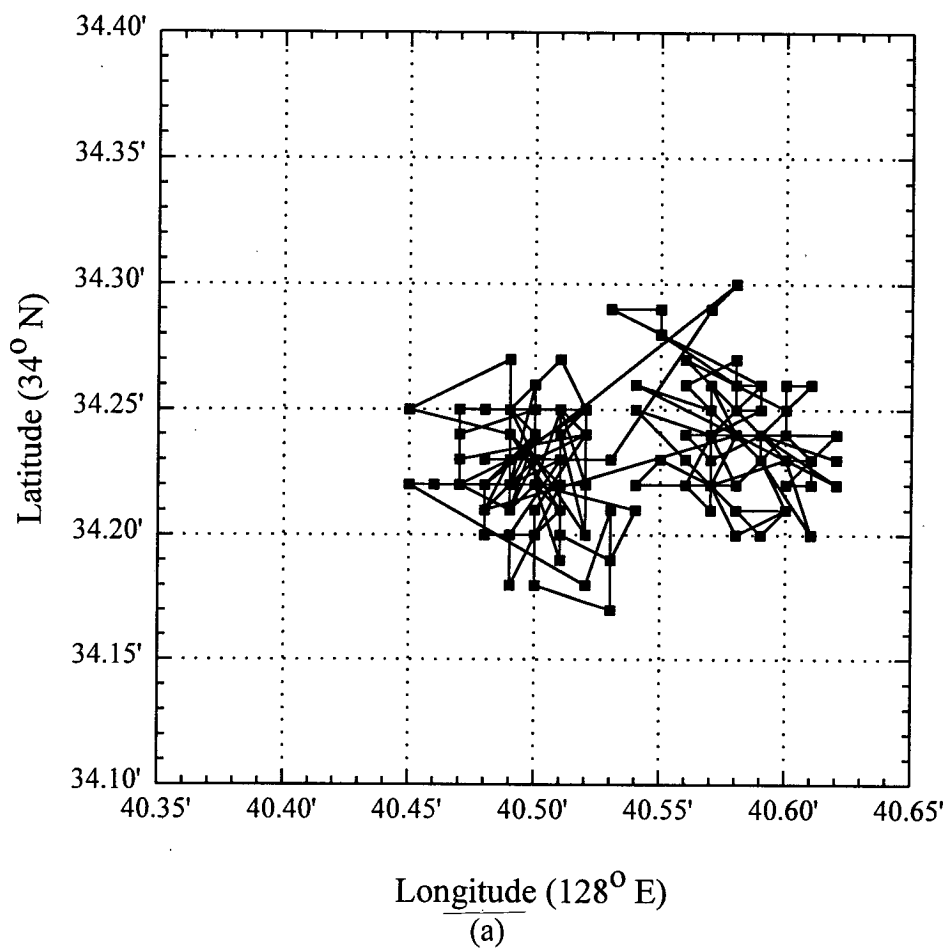


Fig. 10. Position distribution of the research vessel obtained by GPS receiver.

(a) Data of research vessel Eardo at station P4.

(b) Data of research vessel Olympic No.5 at station P5.

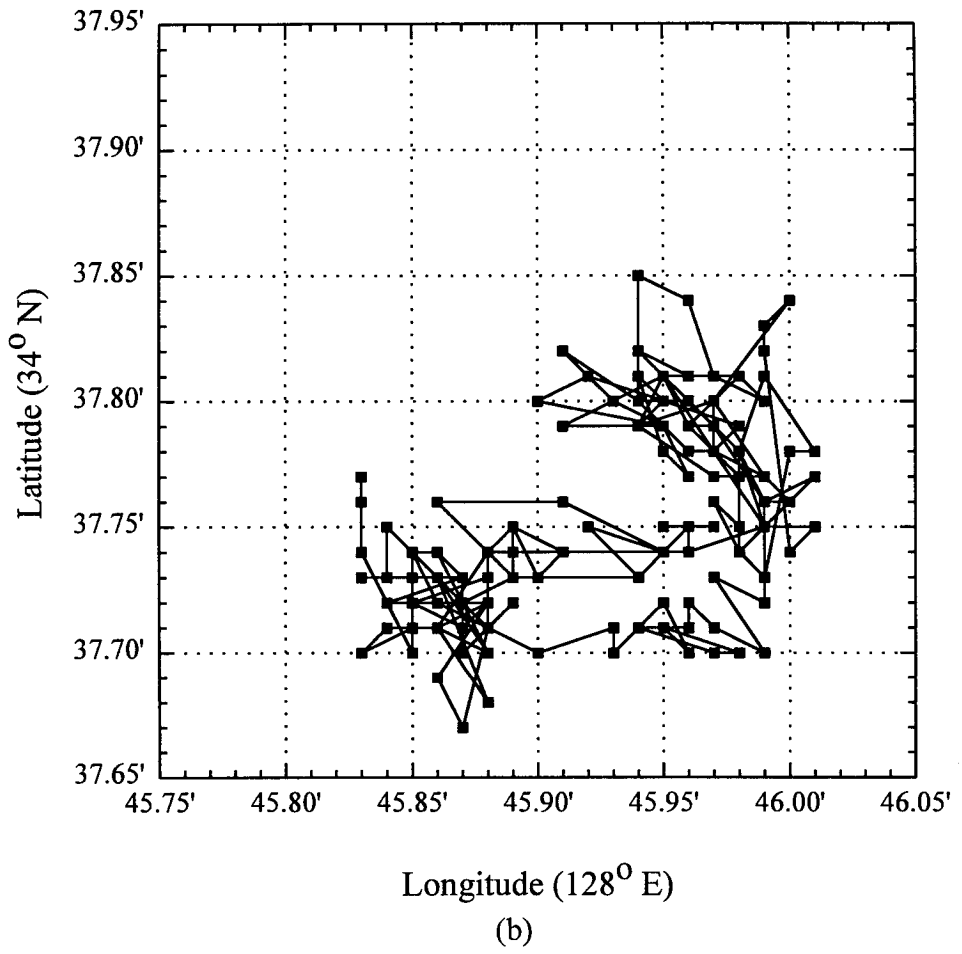


Fig 10. (continued)

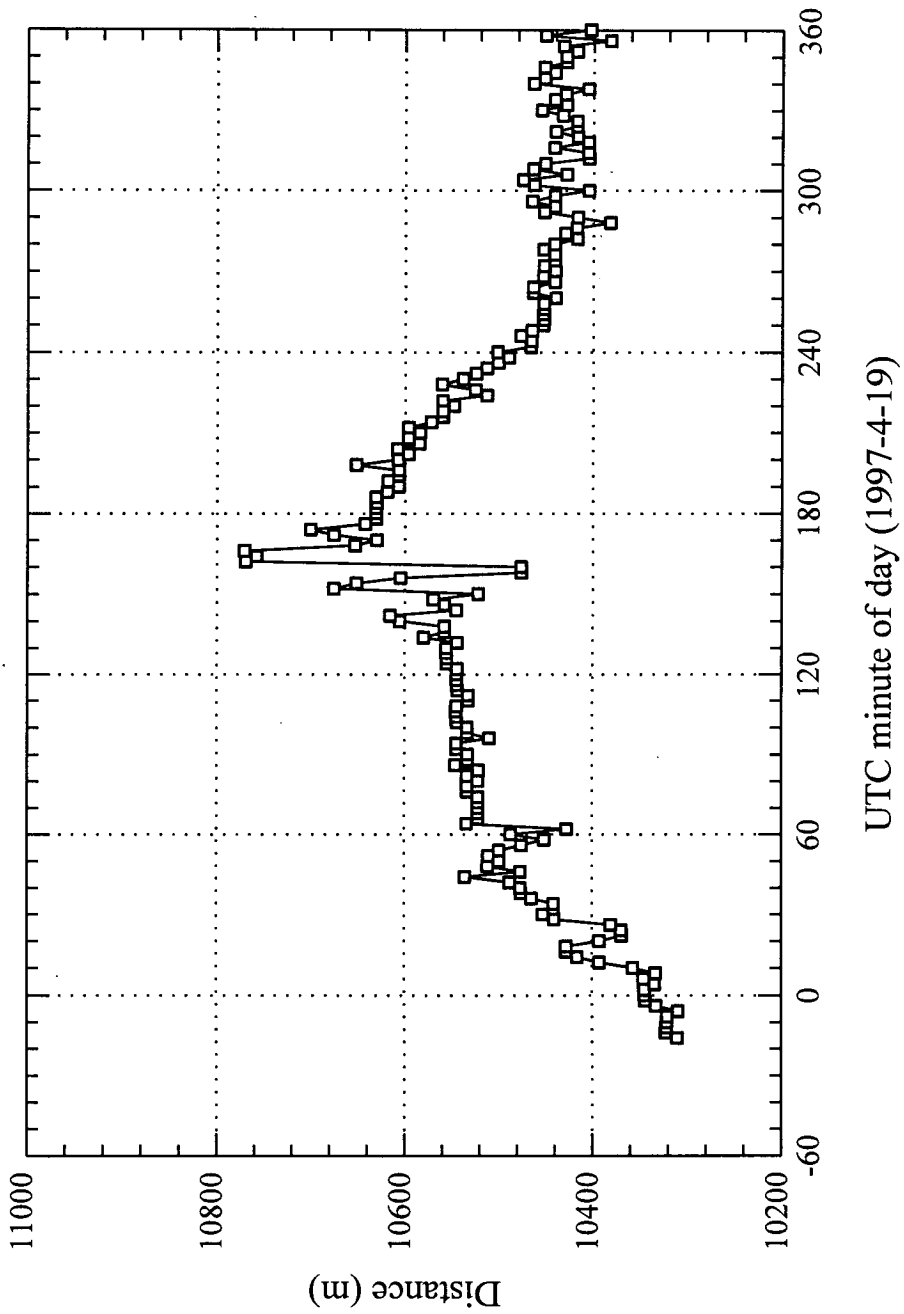


Fig. 11. Time plot of distance between two research vessels.

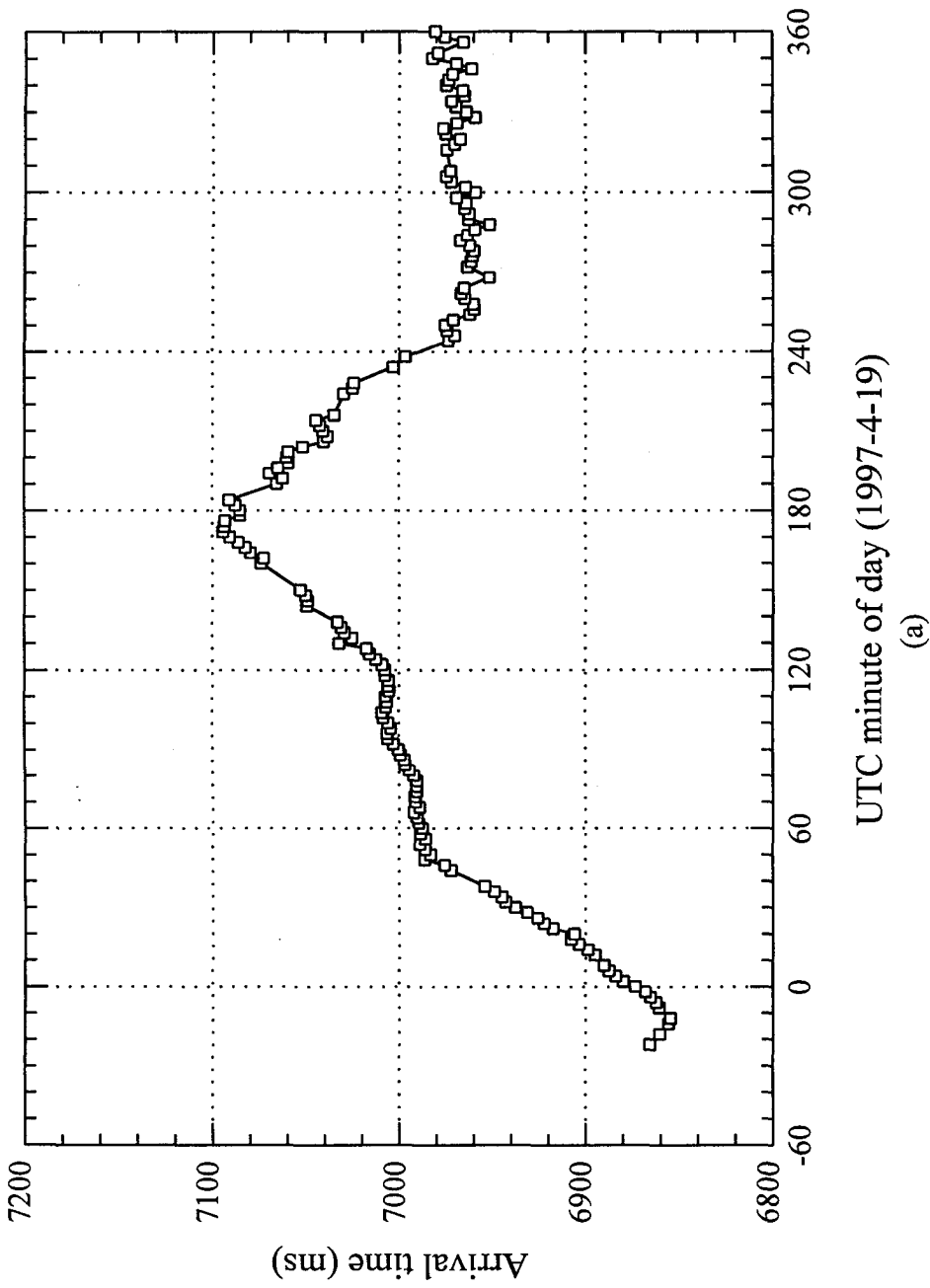


Fig. 12. Time plot of sound arrival time.

(a) Data obtained by research vessel Eardo at station P4.

(b) Data obtained by research vessel Olympic No.5 at station P5.

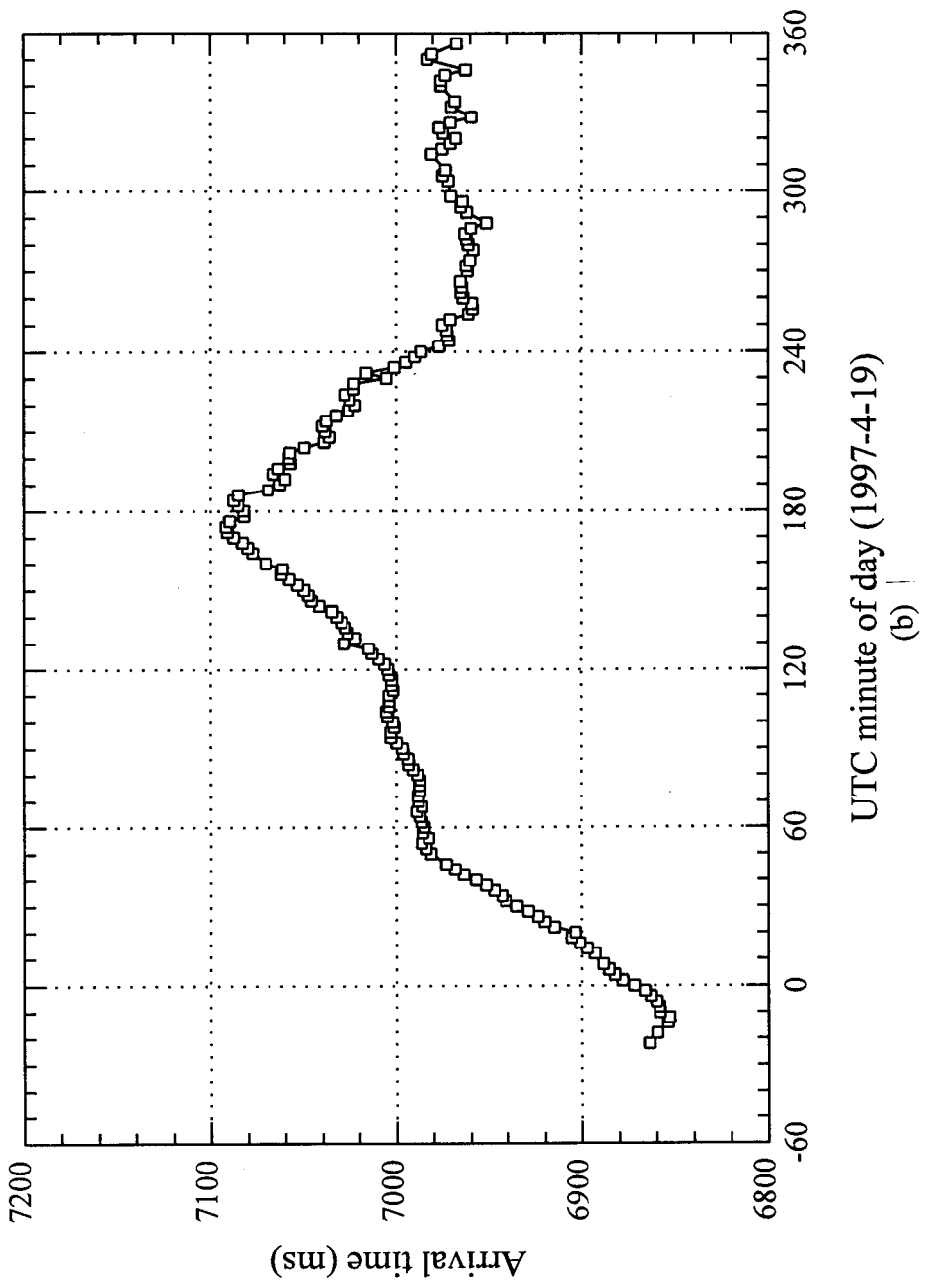


Fig 12. (continued)

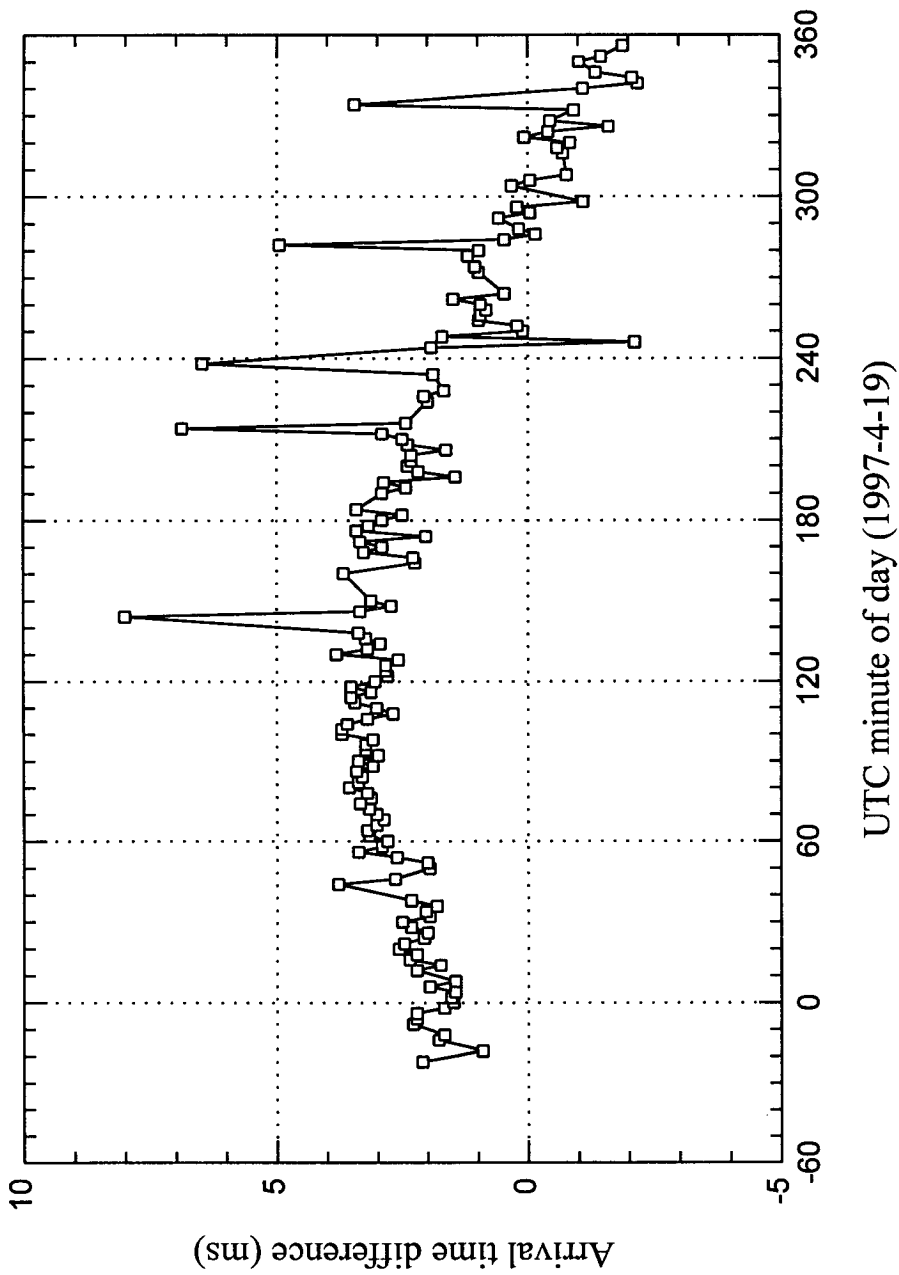


Fig. 13. Time plot of sound arrival time difference between the data obtained by research vessel Eardo at station P4 and the data obtained by research vessel Olympic No.5 at station P5.

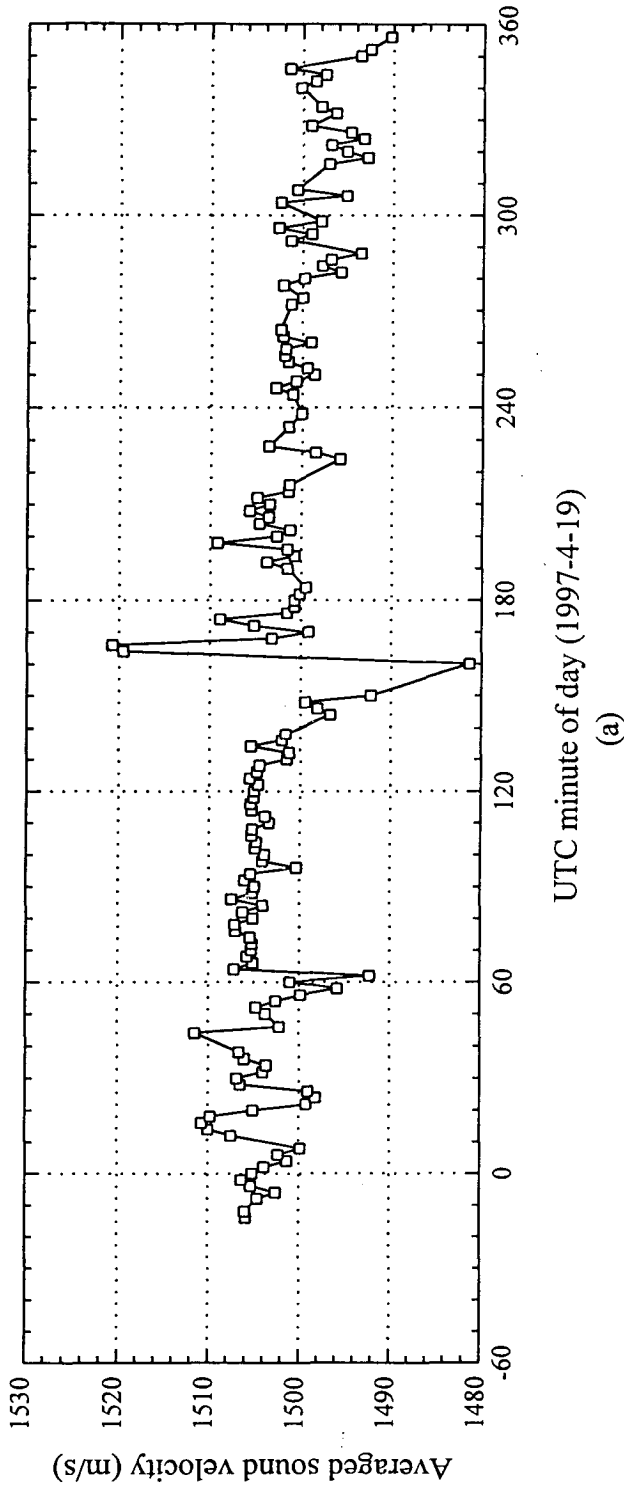
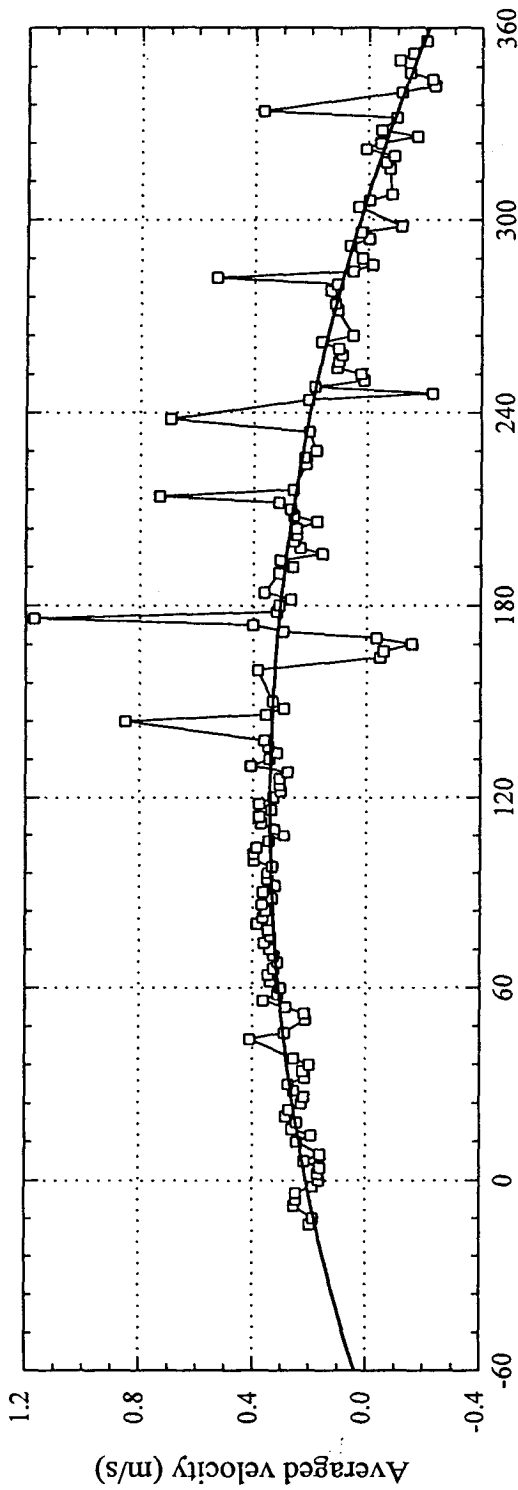


Fig. 14. Time plot of mean data calculated by tomographic measurement.

(a) Averaged sound velocity.

(b) Averaged current velocity along the section directed from station P4 to P5.



UTC minute of day (1997-4-19)

(b)

Fig 14. (continued)

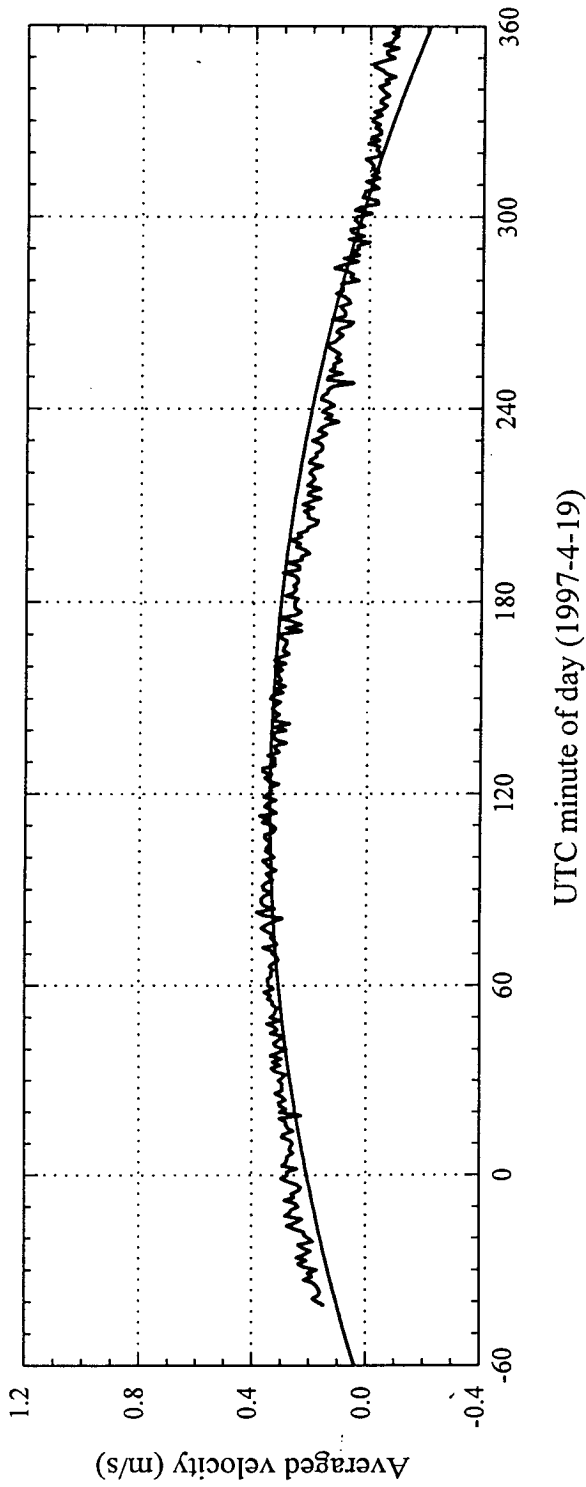


Fig. 15. Time plot of averaged current velocity component along the section directed from station P4 to P5. Here the thin line indicates the data calculated from the tomographic measurement by least square method. And the thick line indicates the data obtained by ADCP measurement at station P4.

제 5장 결론

1997년 4월 19일 중 거제도 남쪽의 해상에서 일본의 히로시마 대학에서 개발한 연안음향 토모그래피 시스템을 사용하여 유속장 관측을 위한 해양음향 토모그래피 실험을 실시하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. CTD관측으로 구한 음속구조에 의하면 수중음파의 전파환경은 매우 불량하였지만, 연안음향 토모그래피 시스템은 전파거리 10 *km*에서 비교적 양호하게 수중음파를 송수파할 수 있었다.
2. 토모그래피에 의해 구한 유속은 ADCP에 의해 구한 유속과 매우 잘 일치하였으며, 유속장 관측을 위한 해양음향 토모그래피의 유효성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- 1) Munk, W. H. and C. Wunsch. 1979. Ocean acoustic tomography : A scheme for large scale monitoring. *Deep Sea Res.* 26, 124-161.
- 2) 김봉채, 변상경. 1992. 해양음향 토모그래피. 한국음향학회지. 11권 5호, 71-77.
- 3) Munk, W. H., P. Worcester, and C. Wunsch. 1995. *Ocean Acoustic Tomography*. Cambridge University Press, New York, 433pp.
- 4) Worcester, P. F. 1977. Reciprocal acoustic transmission in midocean environment. *J. Acoust. Soc. Am.*, 62, 895-905.
- 5) Worcester, P. F., B. D. Dushaw, and B. M. Howe. 1991. Gyre-scale reciprocal acoustic transmissions. In *Ocean Variability and Acoustic Propagation*, eds. J. Potter and A. Warn-Varnas, Kluwer, Dordrecht, 119-134.
- 6) 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.
- 7) Chen, C.- T. and F. J. Millero. 1977. Speed of sound in seawater at high pressures. *J. Acoust. Soc. Am.*, 62, 1129-1135.