

쌍방향 음파전파의 해양음향 토모그래피를 이용한 유속측정

변상경, 김봉채, 최복경, Arata Kaneko*, Noriaki Gohda*

한국해양연구소 해양물리연구부, *히로시마대학교 공과대학 환경기초학 교실

Current measurements by using ocean acoustic tomography of reciprocal sound transmission

Sang-Kyung Byun, Bong-Chae Kim, Bok Kyung Choi, Arata Kaneko*, and Noriaki Gohda*

Physical Oceanography Division, Korea Ocean Research and Development Institute
*Department of Environmental Sciences, Faculty of Engineering, Hiroshima University

요약

해양음향 토모그래피는 해수층을 전파하는 음파의 전파시간을 측정하여 이것으로부터 수온 및 유속의 분포를 구하는 새로운 관측기법이다. 해양음향 토모그래피에 의한 실시간 유속측정 시스템을 구축하기 위한 기초실험으로서 해양음향 토모그래피의 유속측정 유효성을 검증하기 위하여 쌍방향 음파전파의 해양음향 토모그래피 실험을 1997년 4월중에 제주도 남쪽해역에서 실시하였다. 실험시의 해양물리 환경을 고찰하고 토모그래피에 의한 유속측정 결과를 초음파 유속계(ADCP)에 의한 유속측정 결과와 비교 분석하였다. 그 결과 토모그래피에 의한 유속측정은 매우 양호하게 나타나, 향후 유속측정법으로 활용성이 크리라 기대되었다.

1. 서론

해수층을 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 km에서 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 연안

음향 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 시간 동안 실험하여 완전하게 이 시스템의 유속관측 유효성을 입증하지는 못하였다.

이 연구의 목적은 해양음향 토모그래피 실험을 실시하여 해양음향 토모그래피에 의한 유속관측의 유효성을 조사하고, 해양음향 토모그래피의 실험방법 및 토모그래피 자료의 분석기법을 확립함으로써 실시간 유속상을 모니터링하기 위한 본격적인 해양음향 토모그래피 시스템 구축연구의 기초자료를 확보하는 데 있다.

2. 유속측정 이론

그림1에 모식적으로 나타낸 것과 같이 유속이 있는 해수층에서 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 음성경로 r 를 따르는 음속 및 유속이다. 그리고 $u(r)$ 은 정점 A에서 정점 B로 향하는 것을 양의 방향으로 취하고 있다.

두 정점 사이의 수평거리가 수심에 비하여 충분히 크다고 하고, 두 정점 사이의 해수층에 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.

3. 실험방법

해양음향 토모그래피 실험에는 일본 히로시마 대학에서 개발한 연안음향 토모그래피 시스템(Coastal Acoustic Tomography System)을 사용하였다(Zheng 등, 1997). 이 시스템은 크게 송파기, 수중 마이크로폰 어레이, GPS 수신기 및 시스템을 제어하는 컴퓨터로 구성되어 있다.

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 시스템에 있어서 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(디지털)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 설정된 지연시간 이후부터 샘플링 주파수 $27.5 kHz$ 로 샘플링을 행하여 컴퓨터에 저장하도록 하였다. 이 때 자료 각각의 기록 시간은 $4.766 s$ 였다.

그림 2에 실험해역을 나타내고 있다. 거제도 남쪽의 해역에 위치한 두 정점 P4와 P5에 한국해양연구소 조사선 이어도호 및 울림픽 5호를 각각 닢으로 고정하였다. 이 때 두 정점 사이의 거리는 약 $10 km$ 였으며, 두 정점 사이에서 해지수심은 약 $75 m$ 로 대체로 매우 평탄하였다. 그리고 각각의 조사선에서 송파기 및 수중 마이크로폰 어레이(수중 마이크로폰 8개로 구성)를 해수중에 내려 설치하였다. 이 때 송파기를 수심 약 $10 m$ 에 위치하도록 하였으며, 수중 마이크로폰을 $1 m$ 의 간격으로 각각 수심 약 $6 \sim 14 m$ 에 위치하도록 하였다.

세계 협정시(UTC)로 1997년 4월 19일 00시부터 06시까지 약 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 전달 실시한 CTD관측으로부터 구한 음속분포를 고려하여 음파송파로부터 $6 \sim 6.5$ 초의 지연시간을 두고 개시하였다. M계열로 위상변조된 수신음파의 신호와 컴퓨터에 저장되어 있는 M계열 신호와의 상호상관을 계산

하여, 이 계수의 피크가 나타나는 시각으로부터 각각의 조사선에서 수신한 음파의 도달시간을 구하였다.

토모그래피 실험기간 동안 정점 P4에 위치한 이어도호에서는 조사선에 장착된 ADCP(R&D Instrument, 주파수 $150 kHz$)를 사용하여 매 1분의 간격으로 연속적으로 유속을 측정하였다. ADCP에 의한 각각의 측정자료는 60초 동안을 평균하여 만들어지게 하였으며, 이 때 수직방향의 수심간격은 $4 m$ 로 하였다. 그리고 이 유속자료의 남북방향 성분 및 동서방향 성분으로부터 토모그래피 실험정선을 따르는 유속의 성분(정점 P4로부터 정점 P5를 연결한 직선 방향의 유속성분, 정점에 대하여 58° 방향임)와 실험정선을 가로지르는 유속의 성분(정점에 대하여 328° 방향임)을 각각 구하였다.

실험해역의 수온구조를 파악하기 위하여 토모그래피 실험 전달 두 정점 P4, P5 및 두 정점 사이에 위치한 정점 P4-1에서 CTD(Seabird, SBE911) 관측을 실시하였다. 그리고 CTD자료를 사용하여 국제연합 교육과학기구(UNESCO)에서 추천한 공식에 의한 음속을 계산하였다(Chen and Millero, 1977).

4. 결과 및 고찰

정점 P4, P4-1 및 P5에서 실시한 CTD관측으로부터 수온의 수평 분포도를 구하여 그림 3에 나타내었다. 전체적으로 수온은 수심이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있었으며, 특히 이러한 현상은 정점 P4에 비하여 정점 P5에서 현저하게 나타났다. 정점 P4 및 P4-1에 있어서 수온의 수직분포를 살펴보면, 해표면으로부터 수심 약 $25 m$ 까지 그리고 수심 약 $50 m$ 로부터 해저까지에서는 수심이 증가함에 따라 수온이 매우 서서히 감소하였으나, 수심 $25 \sim 50 m$ 의 범위에서는 수심이 증가함에 따라 수온이 급격히 감소하였다. 그러나 정점 P5에 있어서 수온의 수직분포에 의하면, 해표면으로부터 수심 약 $40 m$ 까지에서는 수심이 증가함에 따라 수온이 급격히 감소한 반면, 수심 $40 m$ 로부터 해저까지에서는 수심이 증가함에 따라 수온이 매우 서서히 감소하였다. 그리고 정점 중에서 가장 남쪽에 위치한 정점 P4에서의 수온분포는 가장 북쪽에 위치한 정점 P5에서의 수온분포에 비하여 동일한 수심에서 약간 큰 값을 보이고 있었다.

정점 P4, P4-1 및 P5에서 실시한 CTD관측 자료로부터 음속의 수평 분포도를 구하여 그림 4에 나타내었다. 해수중에서의 음속은 수온의 영향을 가장 크게 받고 있으므로 전체적인 음속의 분포는 수온의 분포와 매우 유사하게 나타나고 있었다. 정점 P4 및 P4-1에 있어서는 해표면으로부터 수심 약 $40 m$ 의 사이에 표층 음파동로(surface duct)가 불완전하게 형성되어 있었으나, 정점 P5에 있어서는 해표면으로부터 수심이 증가함에 따라 음속이 급격히 감소하여 표층 음파동로가 형성되어 있지 않았다. 대체적으로 수중음파의 전파환경은 불리한 것으로 나타났다.

정점 P4에 위치한 조사선 이어도호에서 ADCP를 사용하여 세계 협정시로 1997년 4월 19일 00시부터 06시까지 6시간 동안 매 1분의 간격으로 유속을 측정하였다. 이 유속의 자료로부터 전체 수심에 대한 평균유속을 구하여 그림 5에 나타내었다. 이 중에서 그림 (a)는 실험정선을 따르는 유속의 성분이고, 그림 (b)는 실험정선을 가로지르는 유속의 성분이다. 이 결과 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 유속성

분의 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.

토모그래피 실험기간 동안 닷을 사용하여 정점 P4 및 P5에 각각 고정시킨 조사선 이어도호 및 올림픽 5호의 위치 자료로부터 구한 두 조사선 사이의 거리를 세계 협정시의 시간에 대하여 그림 6에 나타내었다. 두 조사선 사이의 거리는 약 $10,300\sim 10,800\text{ m}$ 의 범위 내에서 시간에 따라 약간 변동하고 있었다. 그리고 쌍방향 음파 진파실험으로부터 각각의 조사선에서 음파의 전파시간을 측정하여 이 자료로부터 그 차를 구하여 그림 7에 나타내었다. 여기에서 음파 전파시간의 차는 정점 P5에서 송파한 음파를 정점 P4에서 수파한 음파 전파시간으로부터 정점 P4에서 송파한 음파를 정점 P5에서 수파한 음파 전파시간을 빼어 구하였다. 이 결과에 의하면, 음파전파 시간의 차는 약 $-2.0\sim +3.5\text{ ms}$ 의 범위내에서 시간에 따라 변동하고 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 8에 나타내었다. 이 중에서 그림 (a)는 세계 협정시로 시간의 경과에 따른 평균음속을 나타내고 있고, 그림 (b)는 평균유속으로서 정점 P4로부터 정점 P5를 연결한 직선 방향의 성분을 나타내고 있다. 먼저, 평균음속은 세계 협정시 1997년 4월 19일의 00시를 기준으로 $160\sim 170$ 분에서 측정된 커다란 피크의 값을 제외하면, 시간의 경과에 따라 $\pm 10\text{ m/s}$ 의 범위내에서 변동하면서 매우 서서히 감소하는 경향을 보이고 있었다. 그리고 이 평균음속의 평균치는 약 $1,502.1\text{ m/s}$ 였고, 표준편차는 4.9 m/s 인 것으로 나타났다. 평균유속의 경우에는 몇 개의 커다란 잔물 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.

시간의 경과에 대하여 ADCP 및 토모그래피에 의해 구한 실험정선을 따르는 유속성분을 그림 9에 나타내었다. 여기서, 가는 실선은 토모그래피에 의하여 구한 유속성분을 오차가 최소가 되도록 커브 피팅(curve fitting)한 것을 나타내고 있고, 굵은 실선은 ADCP에 의하여 구한 유속성분을 나타내고 있다. 전체적으로 두

방법에 의한 결과는 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 유속이 마약한 부분에 있어서는 최대 약 0.10 m/s 정도의 차이가 있음을 보여주고 있다. 이것은 ADCP에 의한 유속은 정점 P4의 한 지점에 있어서 평균유속을 관측한 것인데 비하여 토모그래피에 의한 유속은 정점 P4와 P5 사이의 해수중에 있어서 평균유속을 관측한 것이기 때문으로 생각된다.

5. 결론

1997년 4월중 거제도 남쪽의 해상에서 연안음향 토모그래피 시스템을 사용하여 유속장 관측을 위한 해양음향 토모그래피 실험을 실시하였다. 그 결과, CTD관측으로 구한 음속구조에 의하면 수중음파의 전파환경은 매우 불량하였지만, 연안음향 토모그래피 시스템은 전파거리 10 km 에서 비교적 양호하게 수중음파를 송수파할 수 있었다. 그리고 토모그래피에 의해 구한 유속은 ADCP에 의해 구한 유속과 매우 잘 일치하고 있었으므로 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. 한국해양학회지. 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.

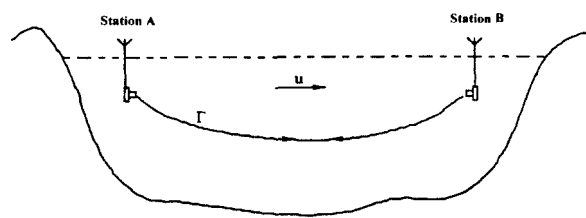


Fig.1. Sketch of reciprocal sound transmission.

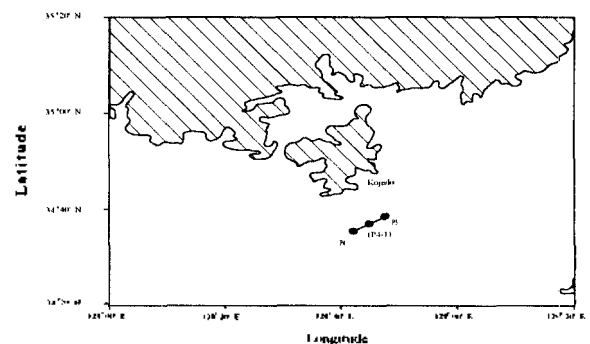


Fig.2. Location map of tomography experiment.

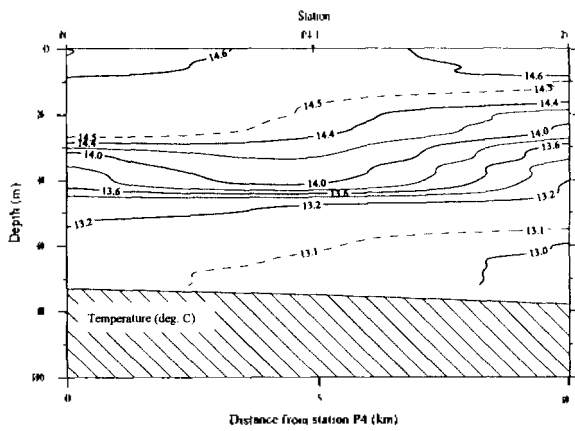


Fig.3. Distribution of water temperature obtained by CTD observation.

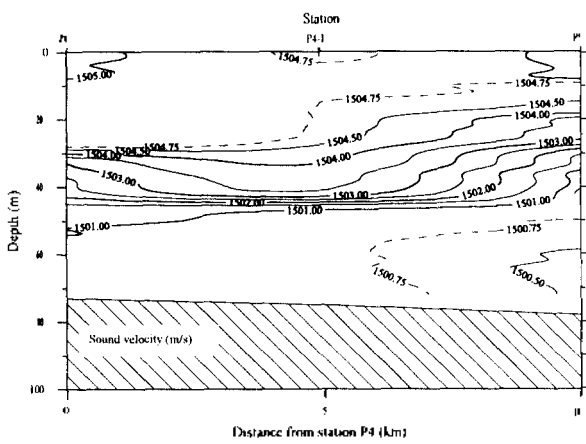
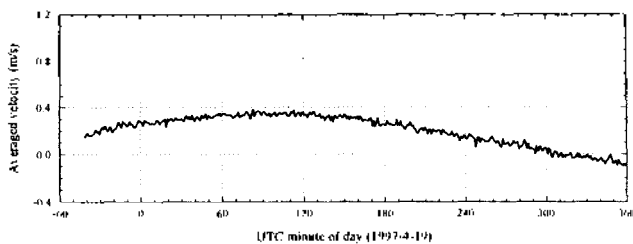
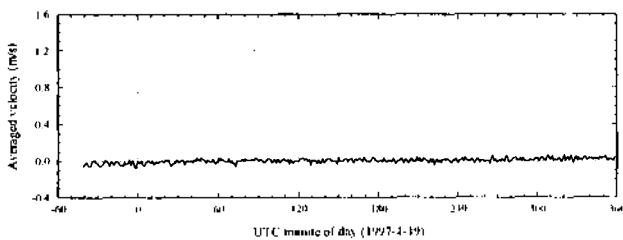


Fig.4. Distribution of sound velocity obtained by CTD observation.



(a) velocity component along section from P4 to P5



(b) velocity component across section from P4 to P5

Fig.5. Time plot of averaged current velocity obtained by ADCP measurement at station P4.

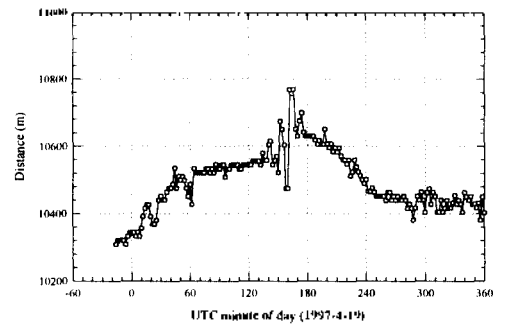


Fig.6. Time plot of distance between two research vessels.

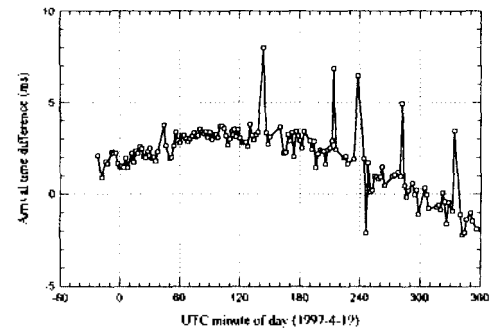
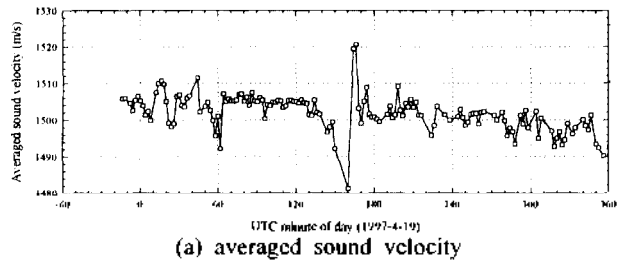
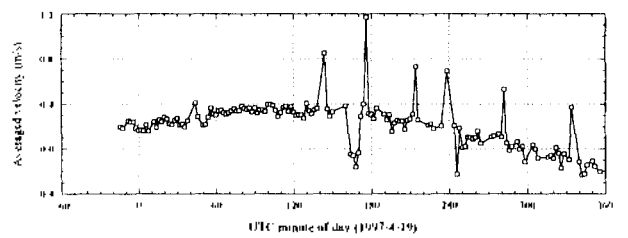


Fig.7. Time plot of sound arrival time difference.



(a) averaged sound velocity



(b) averaged current velocity

Fig.8. Time plot of data obtained by tomographic measurement.

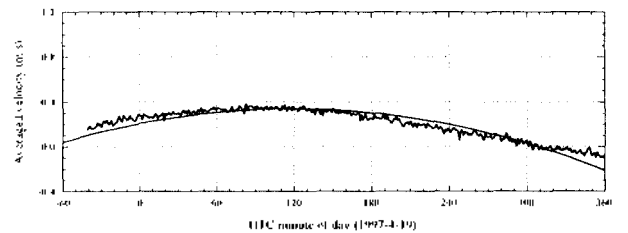


Fig.9. Time plot of averaged current velocity component along section from P4 to P5. Here thin line and thick line indicate the data obtained by tomographic method and ADCP measurement, respectively.