

[단 보]

EM120(multi-beam echo sounder)을 이용한 지형조사 시 적용되는 해수 중 음속 측정의 중요성; 수중음속 측정장비의 특성 비교

함동진* · 김현섭 · 이근창
한국해양연구원 심해-해저자원연구부

Effect of Sound Velocity on Bathymetric Data Acquired by EM120(multi-beam echo sounder)

DONG JIN HAM*, HYUN SUB KIM, AND GUN CHANG LEE

*Deep-sea and Marine Georesources Research Department, Korea Ocean Research & Development Institute,
P.O. Box 29, Ansan 425-600, Korea*

다중음향측심기에 의한 해저 지형조사는 해양 연구에 기본적인 자료를 제공한다. 지형조사를 위해 수층의 음속을 측정하는데 정확한 수심별 음속 측정은 지형조사 결과에 큰 영향을 미친다. 광역 지형조사 시 공간의 이동에 따라 수층별로 음속의 변화를 일으키는 요인이 발생할 수 있고, 측정 기기별(Sound Velocity Profiler, Conductivity-Temperature-Depth, eXpendable BathyThermograph) 특성에 의해 음속을 달리 측정할 가능성이 있다. 이 연구에서는 음속수직분포도(sound velocity profile)가 달라짐에 따라 발생하는 해저 지형의 변화를 MB-System을 이용하여 비교하였다. 분석 결과 표층의 음속 변화에 비해 수온약층의 음속변화가 획득지형자료에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 각 기기별로 측정된 음속의 차이는 크지 않았고 해저 지형 결과에 큰 영향을 주지 않은 것으로 나타났다. 해저 지형조사를 위해 위 음속측정기기 중 어떠한 것을 사용하여도 무방하나 해저 지형조사 측선은 수층의 온도변화가 작은 방향으로 선정하는 것이 더 바람직하다.

Bathymetric data collected using a multi-beam echo sounder during marine scientific survey is essential for geologic and oceanographic research works. Accurate measurement of sound velocity profile(SVP) in water-column is important for bathymetric data processing. SVP can vary at different locations during the survey undertaken for wide areas. In addition, an observational error can occur when different equipments (Sound Velocity Profiler, Conductivity Temperature Depth, eXpendable BathyThermograph) are used for measuring SVP at the same water column. In this study, we used an MB-system software to show changes in bathymetry caused by variation of SVP. The analyses showed that the sound velocity(SV) changes due to the depth and thickness of thermocline had more significant effects on the resulting bathymetric data than those of surface mixed layer. The observational errors between SVP measuring instruments did not cause much differences in the processed bathymetric data. Bathymetric survey line is better to be established to the direction that the change of temperature can be minimize to reduce the variation of SVP during the data acquisition along the survey line.

Keywords: Multi-beam Echo Sounder, Bathymetry, Sound Velocity Profile

서 론

다중 음향 측심기(multi beam echo sounder)를 이용한 지형 조사는 음파를 발생시켜 음파가 수층(water column)을 통해 해저면에 반사되어 각각의 수신기에 도달하는 시간을 이용하여 수심을 측정한다. 이에 따라 해수 중 음파 진행속도의 측정은 정확한 지형 자료 획득에 매우 중요하며, 음속의 측정이 정확하지 않을 경우 해저지형의 측정치에 오류를 발생시킨다. Caress and Chayes(1996)는 음속이 바뀌었을 때 최초 측정되었던 지형과 얼마나 차이가 나

는지를 보고하였다. 표층 80 m이내의 음속이 1,540 m/s에서 1,550 m/s로 증가하면, 수심의 2%이내 즉, 수심 5,000 m인 경우 100 m 이내로 외곽빔(outer beam)으로 갈수록 측정 수심이 실제 수심에 비해 많아진다고 하였다.

한국해양연구원의 조사선인 온누리호에 장착되어 해저지형자료 획득에 활용 중인 Kongsberg사의 EM 120의 경우 선저의 발신기에서 1°로 음파신호(ping)를 발생시켜 해저면에 반사된 음파를 수신기에서 2°로 수신한다. 수신된 음파를 동일각(Equi-angle) 또는 동일거리(Equi-distance)로 191개로 분할한 후 각 반사 시간을 계산하여 수심을 측정한다. 이 때 조사선 직하방 음파(center beam)와 외곽음파 사이에는 해수 중 이동 거리에 큰 차이가 있다. 이는

*Corresponding author: djham@kordi.re.kr

지형조사 시 부정확한 음속수직분포도(sound velocity profile)를 입력하였을 때 전체 수심의 오류뿐만 아니라 측정된 지형이 외곽 음파로 갈수록 더 얕아지거나 깊어질 수 있다는 것을 의미한다. 즉 해수 중 음속의 측정이 실제보다 더 빠르거나 느릴 경우 수심이 더 깊거나 더 얕게 측정될 뿐만 아니라 조사선 직하방 수심과 외곽수심과의 차이가 발생하므로, 지형의 원 형상과 달리 오목 혹은 볼록한 형태로 나타나게 된다. 이는 수심 뿐 아니라 조사 지점의 수평 위치에 대한 오차도 발생시켜, 해저지형지물의 스케일 변화를 초래하게 된다.

이 연구에서는 해수 중의 음속을 측정할 수 있는 기기인 Sound Velocity Profiler(SVP), Conductivity Temperature Depth profiler(CTD), Expendable Bathy-Thermograph(XBT)를 이용하여 측정된 음속의 차이를 분석하고 지형자료에 입력하여 획득지형에 어떤 영향을 미치는지 비교해보았다. 특히 사용이 가장 간단하고 조사선이 운항 중에도 실시간으로 음속수직분포도를 획득할 수 있는 XBT에 의해 계산되어진 음속값이 얼마나 정확한지 비교하였고, 향후 지형 조사에 활용할 수 있는지를 판단하기 위해 실제 지형자료에 입력하여 지형변화 양상을 분석하였다.

넓은 지역을 대상으로 수행되는 해양지형조사의 경우 조사선의 이동에 따라 최초 측정되었던 음속수직분포도와 다른 양상으로 음속이 변화할 가능성이 있다. EM 120의 운용 프로그램인 SIS (Seafloor Information System)는 표층(수심 5 m) 음속 변화를 관찰할 수 있는 기능을 제공하고 있다. 표층의 음속이 입력된 음속 수직분포도와 3 m/s 이상 차이가 나면 경고를 의미하는 노란색, 5 m/s 이상 차이가 나면 오류를 의미하는 붉은색으로 바탕색이 바뀐다. 붉은색이 나타나면 즉시 음속수직분포도를 다시 측정하여 입력해야 한다. 그러나 지형 조사 중 표층 이하의 음속에 대한 변화는 실시간으로 관찰할 수 없는 문제가 있다. 표층 이하 수층에서의 음속 변화가 지형조사에 큰 영향을 미친다면 그 층의 음속 변화도 지속적으로 측정할 필요가 있다. 따라서 수층별 음속의 변화가 지형자료에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하고자 하였다. 또한 대양에서 지형조사를 하는 경우 위경도별 수온 분포를 비교하여 상부 수층 중 수온 변화가 가장 큰 수온약층의 변화가 일으키는 음속에 변화에 대해서도 함께 검토하여 대양에서 지형조사를 할 때 효율적인 조사측선을 설정할 수 있는 방안을 제시하였다.

재료 및 방법

이 연구에서 사용한 음속 및 지형자료는 2007년 온누리호 시험 항해 중 동해에서 CTD 시험을 시행한 2개 정점에서 획득하였다. 정점명은 st.1과 st.2로 정하였으며 각 정점의 위·경도 및 자료 획득 시간은 Table 1(a)와 같다.

음속 측정에는 다음의 기기들을 사용하였다.

1. sound velocity profiler SVPlus(구형, S/N 3486), SVPlus(신형, S/N 3565); Applied Microsystems 사
2. XBT (MK-21) T-5 model; Sippican 사
3. CTD; Seabird 사

기기별 음속 획득 방법 및 기기 특성은 다음과 같다.

SVP는 음속, 수온, 압력을 측정하는 기기로 음속측정 센서의 송수신기로 음파를 발생시켜 특정거리에 설치된 반사판에 반사되어

Table 1. (a) Location of study site and sampling time. (b) Maximum depth(m) of each station measured by different equipments.

(a)			
Station	Latitude	Longitude	Time(yyyy-mm-dd hh:mm)
st.1	36°39.73'N	130°31.66'E	2007-05-07 19:46
st.2	37°32.38'N	131°17.65'E	2007-05-08 23:36
(b)			
Station	CTD	SVP	new SVP
st.1	1965.1	1989.8	1971.1
st.2	1928.0	1948.15	1930.51

오는 시간을 측정하여 음속을 계산한다. 구형은 최대 2,000 m, 신형은 최대 5,000 m의 수심까지 측정이 가능하다.

CTD는 수온, 염분, 압력을 측정하여 Chen and Millero(Chen and Millero, 1977), Del Grosso(Del Grosso, 1974), Wilson(Wilson, 1960) sound speed 식에 의해 음속을 계산한다. 이 연구에서는 Chen and Millero sound speed 식에 의해 계산된 음속을 사용하였다. Chen and Millero sound speed 식은 CTD뿐만 아니라 XBT를 이용한 음속계산에도 사용되는 식으로 국제 표준 계산법이다.

XBT는 온도만을 측정하는 기기로 염분은 CTD로 얻어진 표층 염분값을 입력하고 압력은 센서부인 추의 해수 내 낙하 시간으로 분할하여 추정된 후 Chen and Millero sound speed 식으로 음속을 계산한다(Sippican Inc., 2003). 이 연구에 사용된 XBT(model, T-5)의 경우 수심 0 m~1,830 m를 측정한다. 이외에도 수심 630 m까지 측정할 수 있는 T-7 모델이 있다. XBT를 이용한 음속측정 시 각 모델별로 조사선의 최대속도를 제한하여 수심측정에 정확도를 기하고 있다. T-5 모델의 경우 6 knots, T-7 모델은 30 knots로 조사선의 최대속도를 제한한다.

지형자료의 획득은 Kongsberg사의 EM 120을 사용하였고 음속 비교의 정확도를 높이기 위해 CTD운용 시 프레임에 SVP 2대를 장착하여 동시에 음속을 측정하였고, 측정 후 즉시 동일한 정점에서 XBT를 이용한 음속 측정을 실시하였다. CTD는 사전 보정작업을 마친 상태였으며, XBT의 경우 재현성을 알아보기 위해 각 정점별로 2회 측정하였다.

수층별 음속변화가 획득자료에 미치는 영향을 알아보기 위해 st.1에서 획득한 지형자료의 음속 종단면도를 표층에서 수심 50 m까지 1,500 m/s, 100 m까지 1,497 m/s로 수정한 자료를 사용하였다. 음속의 변화가 가장 큰 수온약층부의 비교를 위하여 st.1에서 획득한 지형자료에 음속수직분포도의 경향이 크게 다른 st.2의 음속 수직분포도를 사용하였다.

XBT는 자체 프로그램내의 필터링을 할 수 있는 기능이 추가되어 있어 경향을 벗어나는 노이즈 값 등을 제거할 수 있다. 이번 연구에서는 Noise Threshold는 4.0, Averaging Window는 9로 설정하여 필터링한 후의 값을 원본 XBT자료와 비교하였다. Noise Threshold를 4.0으로 설정하면 연속된 자료 중 이전의 값과 4.0 m/s 이상 차이가 나면 그 자료를 제거하고, Averaging Window를 9로 설정하면 연속된 9개의 자료를 평균화한다.

SIS에 입력되는 음속수직분포도는 자료 획득 후 SVP Editor를 통해 12,000 m로 연장(extend)하고 thinning factor를 0.1로 입력하여 음속이 0.1 m/s 이하로 변하는 값을 제거한 후 사용하였다.

SVP Editor에 의한 연장은 기기 특성별로 한계 수심까지 측정된 음속 종단면을 대수심까지 사용할 수 있도록 지정된 음속값을 지정하여 12,000 m까지 연장한다. 지정된 음속값은 2,500 m에서 1,500 m/s, 4,000 m에서 1,524.1 m/s, 6,000 m에서 1,558.2 m/s, 8,500 m에서 1,602.8 m/s, 12,000 m에서 1,669 m/s로 지정된다. 기기별로 획득된 음속자료의 비교는 동일한 조건으로 후처리하여 분석하였다. XBT의 음속자료는 정점별로 1개 자료만을 활용하여 다른 기기들과 비교 분석하였다.

비교 지형자료는 st.1과 st.2에서 구형 SVPlus 음속 자료를 입력하여 획득한 지형 중 음속이 변화했을 때 지형변화의 정도를 파악하기 쉬운 비교적 평탄한 지형 중에서 1개의 수심자료 신호를 선별하였다. st.1에서 선정한 지형의 평균수심은 약 2,109 m이고 st.2에서 선정한 지형의 평균수심은 약 1,628 m이다.

MB-System(Caress and Chayes, 2006)을 이용하여 구형 SVP의 음속수직분포도를 입력하여 측정된 원본지형자료에서 1개 신호를 추출하여 음속을 분리한 후 다른 기기들로 측정된 음속수직분포도를 입력하여 신호의 각 빔별로 수심을 다시 계산하였다.

결 과

XBT에 의해 측정된 해수 중의 음속

st.1에서 관측한 2개의 XBT 음속수직분포도를 비교한 결과 수심 약 400 m 까지는 표층에서 4.03 m/s, 수심 239.4 m에서 최대 4.15 m/s의 음속차를 나타냈다. 그러나 그 이하의 수심에서는 음속차가 0.2 m/s 이하로 아주 정확히 일치하는 것을 볼 수 있으며 전반적인 경향 또한 잘 일치한다. st.2에서 수행한 2회의 XBT 음속분포 측정에서 표층 음속의 1.2 m/s 차이를 제외하고는 수심 63.3 m에서 최대 0.85 m/s의 음속차를 보이며, 전반적으로 음속의 변화가 감소하는 수심 180 m 이하에서는 음속차가 최대 0.3 m/s를 넘지 않고 유사하게 측정이 되었다. 원본 XBT자료와 필터링된 자료를 비교한 결과 전반적인 음속수직분포도는 변하지 않는다(Fig. 1A). 수심 0~200 m 구간을 확대해서 비교해 보면 음속수직분포가 좀 더 부드럽게 평균화되었고, 특히 표층에서 높게 나온 음속값이 모두 제거되었다(Fig. 1B).

기기별 측정된 해수 중의 음속

2개 정점에서 측정된 음속 종단면을 비교해보면 기기별로 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타난다. 단, XBT의 경우 다른 기기들에 비해 음속이 전반적으로 빠르게 측정되었다. st.1의 경우 0~400 m 수심에서 다른 기기들과의 음속차가 더 큰 것을 볼 수 있다. XBT의 음속수직분포도는 다른 기기(CTD, SVP)에 비해 수심 25~85 m 구간에서는 느려지는 경향을 보이고 100 m 구간부터 다시 더 빨라져 180 m 구간에서 최대차이를 보인 후 400 m 이하부터는 거의 차이를 보이지 않는다. XBT를 제외한 다른 기기들은 음속이 급격히 변하는 구간에서는 5 m/s 정도의 차이를 보이는 경우도 있으나, 그 구간을 제외하고는 모두 0.5 m/s 이내의 차이를 보인다(Fig. 2A). st.2에서는 st.1에 비해 기기별 음속의 차이가 더 작게 측정이 되었다. 수심 60~170 m까지 그 차이가 커지다가 이 후 차이가 급격히 감소하여 수심 400 m 이후부터는 거의 차이가 나지 않는다(Fig. 2B).

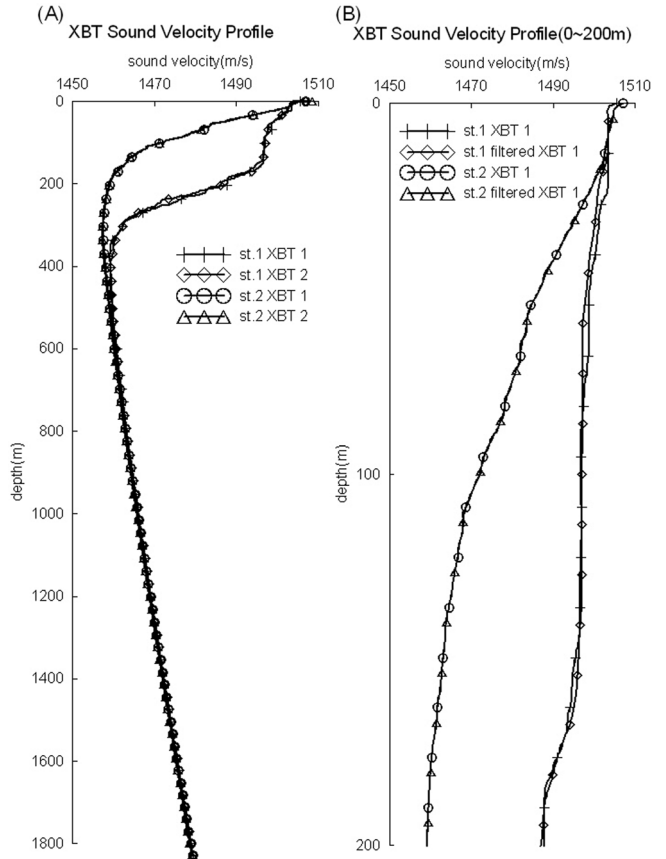


Fig. 1. (A) Sound velocity profiles measured by XBT at st. 1 and st. 2. Duplicate measurements with XBT were performed at each station (XBT 1 and 2). (B) Comparison of raw and filtered sound velocity profile for depth interval between 0 and 200 m at each station. The noise signals observed in raw data were removed in filtered data within surface layer.

수심 400 m까지 두 정점 모두 일부 구간을 제외하고는 XBT > 구형SVPlus > CTD > 신형SVPlus의 순으로 음속이 빠르게 측정되었고, 수심 400 m 이하에서는 XBT > CTD > 구형SVPlus > 신형SVPlus의 순으로 음속이 빠르게 측정되었다. 1,000 m 이하의 수심에서는 구형 SVPlus의 음속이 가장 느리게 측정되었다.

수층별 음속 변화에 따른 지형변화

st.1에서 실측된 지형자료 중 1개 신호를 추출하여 표층음속을 변환한 음속수직분포도와 st.1과 수온약층의 음속수직분포도의 차이가 크게 나타난 st.2의 음속수직분포도를 입력하여 수심 변화를 비교해 보았다(Fig. 3). 원본 음속수직분포도의 경우 표층음속이 1,503 m/s이다. 이 음속수직분포도의 수심 0~50 m를 1,500 m/s로 변환한 경우(corrected SVP 1) 외곽 빔에서 -0.2 m, 중심 빔에서 0.08 m 수심변화를 보였다. 두 빔의 수심차는 0.28 m로 평균 수심 2,109 m의 약 0.01%이다. 음속수직분포도의 수심 0~100 m를 1,497 m/s로 변환한 경우(corrected SVP 2)에는 외곽 빔에서 -0.68 m, 중심 빔에서 0.2 m의 수심변화가 나타났다. 두 빔의 수심차는 0.88 m로 평균 수심의 약 0.041%이다. st.1의 지형자료에 st.2의 음속수직분포도를 입력하여 지형자료를 재처리한 결과 외곽 빔에서 -10.92

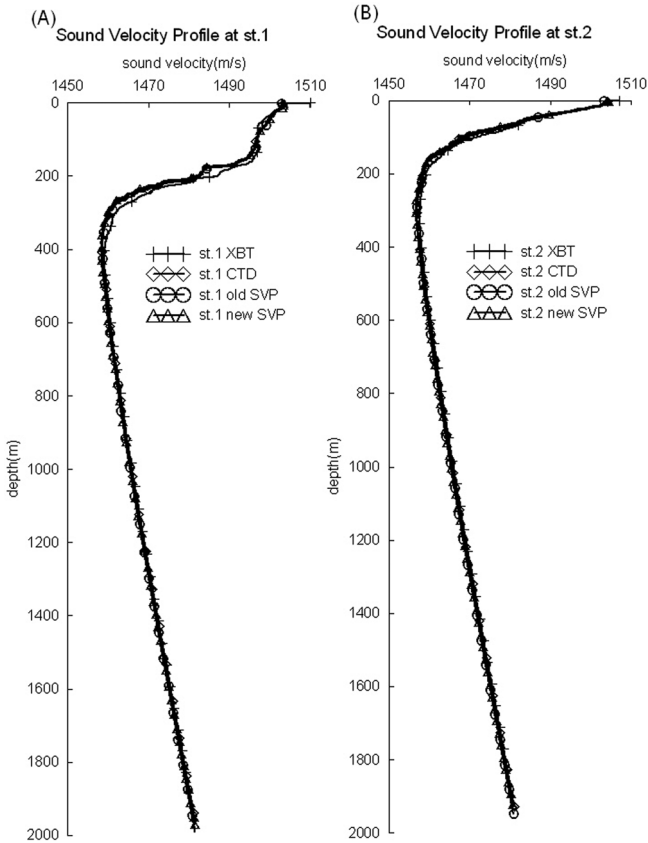


Fig. 2. Sound velocity profiles measured by different equipments at st. 1 (A) and st. 2 (B)

m, 중심 빔에서 3.92 m의 수심변화가 나타났다. 두 빔의 수심차는 14.84 m이며 평균 수심의 0.703%이다.

기기별로 측정된 음속에 따른 지형자료의 변화

각 정점에서 구형 SVP의 음속수직분포도를 입력하여 실측한 지형자료에 다른 기기들의 음속 종단면도를 입력하여 재처리한 결과 수심의 큰 변화를 나타내지 않았다(Fig. 4). 신형 SVP의 음속 수직분포도를 입력했을 때 수심의 변화가 st.1에서 평균수심(2,109 m)의 0.022%, st.2에서 평균수심(1,628 m)의 0.027%로 가장 작은 변화가 나타났고, XBT의 음속수직분포도를 입력한 경우 st.1에서 평균수심의 0.231%, st.2에서 평균수심에 대해 0.098%의 수심차가 나타나 가장 큰 지형변화가 나타났다.

토 의

음속은 다중음향측심기를 이용한 해저 지형측정 과정에서 매우 중요한 요소이며 수온, 염분, 압력의 변화에 따라 그 값이 달라질 수 있다. 따라서 음속값의 측정은 측심 장비의 운용에 매우 중요한 요소이다. Chen and Millero sound speed 식(Chen and Millero, 1977)은 음속계산을 위해 해수 중의 수온, 염분, 압력 등의 3가지 요소를 필요로 한다. XBT는 수온만을 측정하고 압력(수심)은 센서부 추의 해수내 자유낙하 속도로 추정하며 염분은 CTD등에 의해 측정된 표층 염분값을 입력하여 음속수직분포도를 계산한다. 조사선의 이동 중에 측정하는 XBT는 일정한 정점에서의 수직적인 음속분포가 아닌 측정 시작점과 끝점의 위치가 다른 공간적인 음속 분포를 측정한다. 또한 음속측정시마다 달라질 수 있는 조사

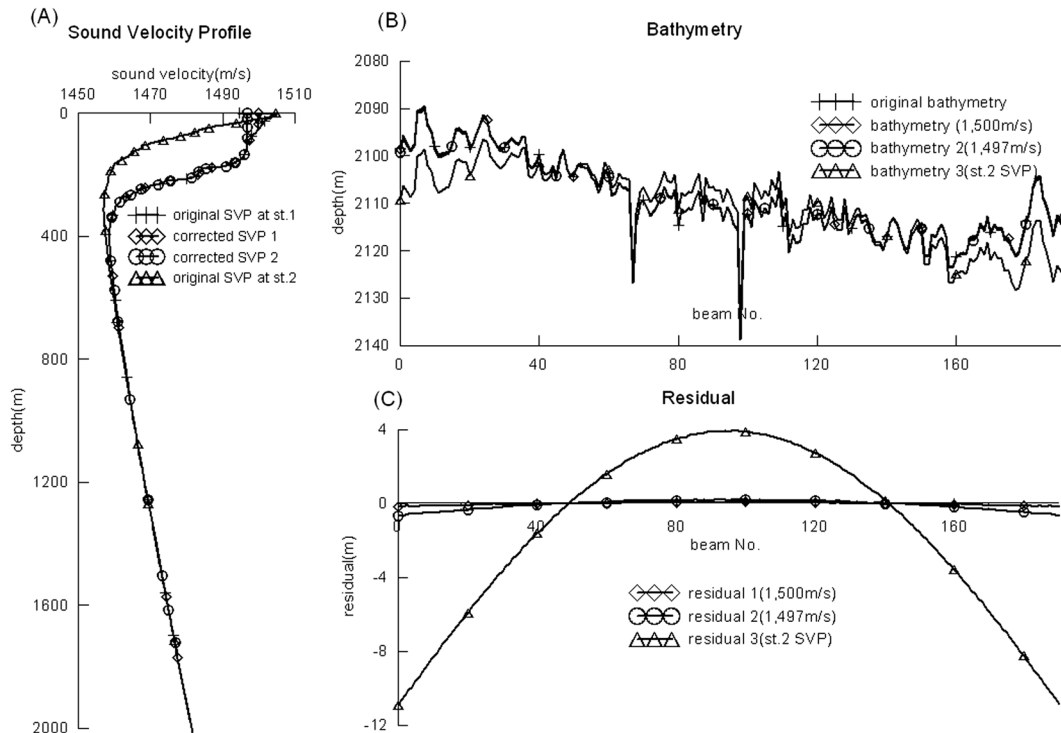


Fig. 3. Effect of change in sound velocity profile on the resulting bathymetric data. (A) Modified sound velocity profile data for the processing of bathymetric data. (B) Change of bathymetry resulted from the modification of sound velocity profile. (C) Residuals of original and modified bathymetry.

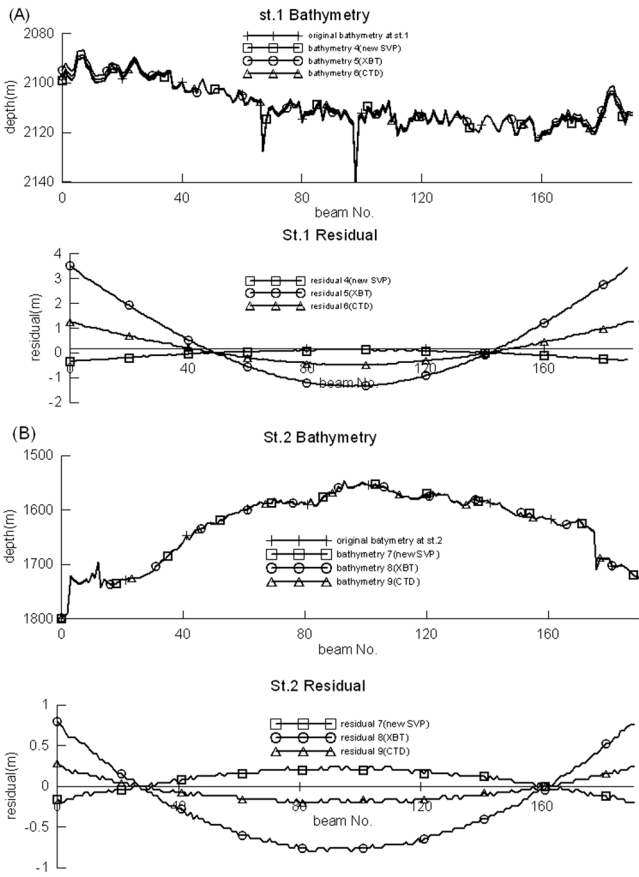


Fig. 4. Change of bathymetry and residual resulted from variation of sound velocity profiles measured by different equipments at st. 1 (A) and st. 2 (B).

선의 속도에 따라 센서부 추의 낙하속도도 달라질 수 있으며 이에 따른 음속값의 측정 수심과 압력값도 부정확하게 측정될 가능성이 있다. 이것은 XBT로 측정된 음속수직분포도가 상대적으로 부정확할 수 있으며, XBT로 같은 정점에서의 연속적 음속측정 과정에서 측정상호간에 음속수직분포도의 차이가 발생할 가능성이 있다는 것을 의미한다.

이 연구에서는 2개의 다른 정점에서 XBT를 복수로 투하하여 측정된 음속수직분포도의 재현성을 비교해 보았다. 두 정점 모두 표층에서 가장 큰 차이를 나타냈다. 이 원인은 해수를 접지(ground)로 사용하여 해수에 닿는 순간 회로가 완성되어 측정을 시작하는 XBT의 기기특성상 측정을 시작하는 순간에 발생하는 오류이거나, 조사선 저장소에 보관된 XBT를 온도 안정화 없이 해수 중으로 투하할 때 프로브의 온도와 해수 온도 차에 의해 발생하는 것으로 생각된다. 또한 음속이 급격히 변하는 구간, 즉 st.1의 경우 수심 0~400 m, st.2의 경우 수심 0~200 m 구간에서 그 이하 수심에 비해 음속의 차이가 더 크게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 수온약층이 발달한 구간에서는 음속분포가 수온의 분포와 유사한 것을 알 수 있다(Fig. 5). st.2보다 st.1에서 XBT로 획득한 음속의 편차가 더 크게 나타난 것은 st.1의 수온약층이 변화가 더 크기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 수온약층의 변화가 심한 해역에서의 지형조사 시에는 음속측정에 더 많은 주의가 필요할 것으로 생각된다.

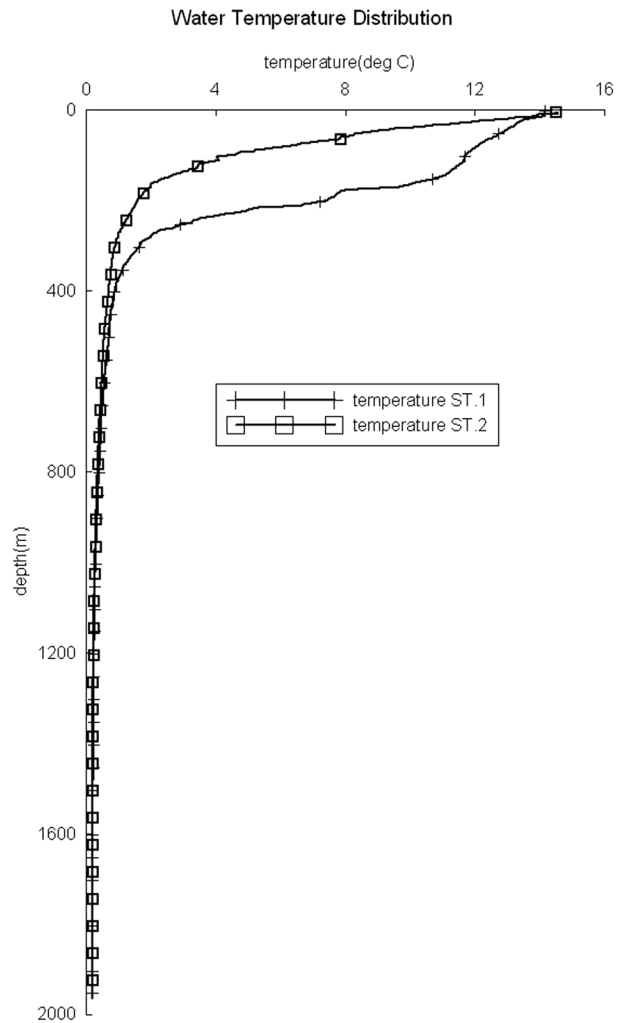


Fig. 5. Temperature profiles within water column at st. 1 and st. 2.

XBT를 운용하는 프로그램이 가지고 있는 필터링 기능을 이용하여 자료를 재처리한 결과, 경향에서 크게 벗어나는 값이 제거되어 좀더 재현성이 높아지는 것을 확인할 수 있었고 특히, 표층에서 발생하였던 이상값이 제거되었다. 이 결과로 미루어 볼 때 XBT로 측정된 음속수직분포도는 필터링 기능을 이용하여 재처리한 후 사용해야 할 것으로 판단된다.

각 정점별·기기별로 측정된 음속수직분포도를 비교한 결과 두 정점 모두 CTD와 SVP의 음속수직분포도가 유사하게 측정된 반면, XBT의 값은 특정 구간을 제외하고는 가장 낮은 음속값을 보이지만, 수심 400 m 이하에서는 기기별 차이가 거의 나타나지 않았다(Fig. 2). CTD는 3가지 요소(수온, 염분, 압력)를 모두 직접 측정하여 음속을 계산한다. 음속을 직접 측정하는 또 다른 장비인 SVP는 부착된 transducer를 이용하여 반사판에 반사되어 돌아오는 음파의 왕복시간을 계산하여 해수내의 음속을 측정하는 방식을 사용한다. 따라서 음속을 계산하는 3가지 요소(수온, 염분, 압력)를 측정하는 CTD는 XBT에 비해 좀 더 정확한 음속수직분포도를 획득할 수 있고, 해수 중의 음속을 직접 측정하는 SVP가 가장 정확한 음속수직분포도를 측정할 수 있다고 판단된다.

기기별로 획득된 음속수직분포도에서 특이한 점은 CTD와 SVP가 동일한 프레임에 장착되어 운용되었음에도 불구하고 측정된 최대 수심의 차이가 관찰된 것이다(Fig. 2). 특히 구형 SVP의 경우, st.1에서 CTD의 최대 수심과 무려 24.7 m의 차이가 날 정도로 수심이 가장 깊게 측정되었다. 신형 SVP와 CTD 간의 최대 수심은 st.1에서 6 m, st.2에서 2.51 m 차이로 측정되었다(Table 1(b)). 수심이 다르게 측정된다는 것은 동일한 음속값을 가지는 수괴가 다른 수심대역에 위치하는 것으로 오판될 수 있으며, 이는 각 기기별로 측정된 음속차이가 음속측정방식에 의한 차이가 아닌 압력 측정의 오류에 따른 편차인 것으로도 판단할 수 있다. 이것은 각 기기들에 부착되어 있는 수심센서의 정확도 차이에서 비롯된 결과로 판단되며 향후 기기별 수심센서 보정작업뿐 아니라 기기간의 상호보정(inter-calibration)이 필요함을 의미한다.

해양지형조사는 광범위한 지역에서 오랜 시간동안(최소 수 일 이상) 이루어진다. 이때 해수 중의 음속수직분포도가 최초 측정된 것과 달라질 경우 획득되는 지형자료의 정확도는 감소할 수밖에 없다. 표층해수의 물리적 변화는 태양 복사열의 인입, 강우에 의한 염분도 저하 등에 따라 발생하는 해수 유동이 주요한 요인이다. 이에 따른 음속의 변화는 음파 송수신기 주변의 수괴에서 유발되어 초기 음파 발사각에 실시간으로 영향을 준다. 지형조사 시 송수신기 주변의 음속은 선저에 설치된 음속센서에 의해 실시간으로 확인할 수 있다. 송수신기 주변의 음속변화에 의해 유발되는 지형자료의 변화를 비교해본 결과, 표층에서 수심 100 m까지의 음속을 1,497 m/s로 변화시킨 음속수직분포도를 입력했을 때 지형자료의 수심이 0.88 m 달라졌다. 반면 수온약층부는 위도나 계절적으로 그 수심이 달라지고 이에따라 음속수직분포도 차이가 나타난다. 수온약층부의 음속수직분포도 차이가 큰 다른 정점의 음속값을 입력하여 지형자료를 재처리한 결과 수심이 14.84 m 변화하였다(Fig. 3). 두 정점은 서로 약 118.57 km(≈64 nautical mile) 떨어져 있지만 송수신기 주변 수심의 음속차이는 1 m/s 이하로 나타났다. 이 결과는 실시간으로 확인할 수 있는 송수신기 주변 음속변화에만 주의를 기울일 경우 추가적인 음속측정이 불필요할 것으로 판단할 수 있지만, 두 정점의 수온약층이 나타나는 수심은 약 100 m 가량 차이가 나고(Fig. 5) 이에 따라 달라진 음속수직분포도가 송수신기 주변 음속변화에 비해 지형측정에 더 큰 영향을 주는 결과로 보아 송수신기 주변 음속뿐 아니라 그 이하 수온약층수심에 대한 음속의 주기적인 반복측정이 필요하다는 것을 의미한다.

구형 SVP 음속수직분포도를 입력하여 획득한 실측지형자료에 신형 SVP, CTD, XBT로 획득한 음속수직분포도를 입력하여 재처리한 지형자료 사이에는 수심차이가 크게 나타나지 않았다(Fig. 4). Kongsberg(2005)에 따르면 동일거리(equi-distance)로 측정할 때, 191개로 분할된 각 빔은 음파신호의 송출 각도를 90°로 설정하면 수심의 1%, 120°로 설정하면 2%, 140°로 설정하면 3%의 간격을 가진다. 이는 음파신호의 송출 각도가 커지거나 측정수심이 깊어질수록 1개의 빔이 갖는 간격이 커지는 것을 의미하며, 이때 지형조사의 정밀도는 감소할 가능성이 있다. 또한 Kongsberg는 음파각도 송신 1°×수신 2° 심해사양의 측정범위(swath width)를 수심 4,000 m 이상에서 저질의 종류에 따라 구분하였다. 저질이 자갈(gravel, -20 dB)인 경우 측정범위를 약 27 km, 모래(sand, -30

dB)는 약 23 km, 진흙(mud, -40 dB)은 약 17 km 이다. 또한, 음파의 송출각도에 따른 수심의 정밀도를 구분하고 있다. 송출각도가 90° 일 때 수심의 0.2%, 120° 일 때 수심의 0.3%, 120~140° 사이일 때 수심의 0.5%로 수심의 정밀도를 정하고 있다. 이 연구에서 지형자료는 EM 120의 음파 송출각도를 65°로 설정하여 획득하였고, 이 경우 EM 120의 오차범위한계는 실제수심의 0.5%이다. 각 기기들로 측정된 음속수직분포도를 입력하여 재처리한 지형자료는 모두 EM 120 오차범위내의 변화를 나타냈다. 따라서 신형 구형 SVP, CTD, XBT로 측정된 음속수직분포도는 EM 120을 이용한 지형조사 시 어떤 것을 사용하여도 무방할 것으로 판단된다. 또한 지형조사의 정밀도를 높이기 위해서는 191개로 구분된 각 빔의 간격을 최소로 하여야 한다. 이를 위해 측정수심이 깊어질수록 음파신호의 송출각도를 줄이거나, 일정한 지형공간내에 최대한 많은 빔으로 지형측정을 할 수 있도록 수평으로 이어진 측선을 측정범위가 겹치도록 정하여야 할 것으로 사료된다.

태평양 심해저 광구지역의 경우 경도에 비해 위도에 따른 수온약층의 변화가 크다. 이는 지형조사를 할 때 남-북 방향으로 이동을 하면 해수 중의 음속수직분포도가 지속적으로 변화할 수 있으며, 따라서 이는 많은 횡수의 음속측정이 필요하다는 것을 의미한다. 이에 따라 지형조사 측선을 위도와 수평한 방향(동서 방향)으로 설정하고 위도가 변할 때 음속을 다시 측정하는 방법을 사용하는 것이 음속측정 횟수를 최소화하면서 더 나은 지형자료를 획득하는데 유리한 것으로 판단된다.

SVP나 CTD를 이용한 음속자료 획득은 조사선을 정선한 후 해저 원치를 이용해야 하며 수시간이 소요된다. 하지만 예상할 수 없는 표층이하의 음속변화를 측정하기 위해 조사선을 수시로 정선하는 것은 무리가 있다. XBT로 획득한 음속 분포도가 지형에 크게 영향을 주지 않는 결과로 미루어 볼 때 XBT를 이용하여 주기적으로 음속을 관찰할 필요가 있다. XBT 모델 중 760 m까지 음속을 측정할 수 있는 T-7 모델의 경우 음속의 측정 시 최대 선속을 30 knots로 정하고 있다. EM 120을 이용한 지형조사시 일반적으로 약 10 knots의 조사선 속도를 유지한다. 따라서 T-7 모델을 활용하여 주기적으로 수온약층 부근의 음속 변화를 관찰해야 할 것으로 생각된다. 수온약층에서 음속변화가 크게 관찰되면 최대선속 6 knots, 최대 수심이 1,830 m인 T-5 모델을 활용하여 조사선의 속도를 6 knots 이하로 유지한 후 음속을 획득하여 지형조사에 활용할 수 있다. 이러한 방법을 적용하면 조사선의 정선 없이 지속적인 지형자료 획득이 가능하며 탐사과정에서 지형조사 시간을 단축시킬 수 있을 것이다.

결론

해양에서의 해수층의 음속은 매질의 물리적특성에 따라 변화한다. 표층 해수의 경우 대기에 직접 노출되어 있으므로 수온, 염분이 수시로 변하며 이에 따라 음속 또한 달라진다. 수온약층부는 수온이 급격히 변하는 구간으로 음속도 가장 큰 변화를 나타낸다. 이 두 층의 음속변화가 EM 120으로 획득된 수심에 미치는 영향을 비교한 결과 수온약층부의 음속변화가 지형조사결과에 16배 더 큰 영향을 미쳤으며 따라서, 표층뿐만 아니라 표층 이하 수온약층부의 음속수직분포도에 대한 주기적인 관찰이 필요하다. SVP,

CTD, XBT로 측정된 음속수직분포도는 유사하였고, 각 기기별로 획득된 음속수직분포값들을 입력한 수심의 변화가 EM 120의 오차범위내로 한정되어 어떠한 음속측정기기를 사용해도 무방하다는 결론을 얻을 수 있었다. 그러나 지형조사의 정밀도를 높이기 위해서는 조사 해역의 수심에 따라 음파송출 각도를 조정할 필요가 있고 측정범위가 겹쳐지도록 측선을 정해야 할 것으로 생각된다.

넓은 대양에서 지형조사를 수행할 때, 사전에 XBT 등을 이용하여 수온의 분포를 조사하여 수온의 변화가 작은 방향으로 측선을 정해야 한다. 태평양 심해저 광구지역의 경우 수온약층의 수심 변화가 적어 음속수직분포도의 경향이 유사한 동서 방향으로 측선을 선정하는 것이 조사의 정확도를 높일 수 있고 음속측정 횟수를 최소화하여 조사의 효율성을 높일 수 있다.

사 사

본 연구는 한국해양연구원 “태평양 심해저 광물자원 개발사업(PM51102)”의 일환으로 수행되었습니다. 본 논문에 많은 조언을 주신 김종욱, 고영탁 박사님과 자료처리에 도움을 주신 정미숙, 김영준씨에게 감사를 드립니다. 또한 세밀한 심사와 교정에 시간을 할애하여 주신 두분의 심사위원님께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- Caress, D.W. and D.N. Chayes, 1996. Improved processing of hydrosweep DS Multibeam data on the R/V Maurice Ewing. *Marine Geophysical Research*, **18**(6): 631–650.
- Caress, D.W. and D.N. Chayes, 2006. MB-System version 5.0.
- Chen, C.T. and F.J. Millero, 1977. Speed of sound in seawater at high pressures. *J. Acoust. Soc. Am.*, **62**(5): 1129–1135.
- Del Grosso, V.A., 1974. New equation for the speed of sound in natural waters(with comparisons to other equations). *J. Acoust. Soc. Am.*, **56**(4): 1084–1091.
- Kongsberg, 2005. Product description Installation manual EM120 Multibeam echo sounder Base version. pp. 4–7.
- Sippican Inc., 2003. MK-21/USB Bathythermograph Data Acquisition System Installation, Operation and Maintenance Manual. pp. 5–51.
- Wilson, W.D., 1960. Equation for the speed of sound in sea water. *J. Acoust. Soc. Am.*, **32**(10): 1357.

2008년 5월 5일 원고접수

2008년 7월 11일 수정본 채택

담당편집위원: 이경용