한국음향학회지 제33권 제5호 pp. 273~281 (2014)
The Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.33, No.5 (2014)
http://dx.doi.org/10.7776/ASK.2014.33.5.273

pISSN : 1225-4428
eISSN : 2287-3775

수온약층이 존재하는 천해역 수중음향 채널의 장거리 신호 전달 특성

Long-Range Sound Transmission Characteristics in Shallow-Water Channel with Thermocline

변성훈,† 김시문, 임용곤

(Sung-Hoon Byun,† Sea-Moon Kim, and Yong-Kon Lim)

한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

(접수일자: 2014년 6월 19일; 채택일자: 2014년 8월 15일)

초 록: 본 논문은 수온약층이 존재하는 제주도 근처 천해역 환경에서 획득한 수중음향 실험 데이터를 이용하여 장거리 신호 전달에 수온약층이 미치는 영향을 분석한 결과를 제시한다. 제주도 인근 해역에 서 장기간 측정된 한국해양자료센터의 수온 및 염분 관측자료는 계절에 따라 수온약층이 형성되는 것을 보여주며, 수온약층이 형성되는 시기에는 음향 신호가 해저면 방향으로 굴절하며 전파되므로 해저면에서의 반사 손실이 장거리 전파에 매우 큰 영향을 가진다. 본 연구에서는 2013년 5월에 수행한 제주 음향 통신 실험 (JACE13) 데이터를 이용하여, 수온약층이 존재할 때의 해저면 반사 손실을 추정하였다. 추정된 반사 손실은 약 3 dB 미만의 손실 값을 가지는 것으로 나타났으며, 수신기의 수심이 깊을수록 수신 신호 준위가 높게 나타났다. 이는 수온약층이 형성되는 천해역 환경에서는 수온약층 아래의 음향 트랩핑이 장거리 신호 전달의 주요 경로가 될 수 있음을 보여준다.
핵심용어: 수중음향학, 수중통신, 천해역 수중 채널, 수온약층, 제주 음향 통신 실험 (JACE13)

ABSTRACT: This paper analyzes the effect of a thermocline on the long-range acoustic signal propagation using the experimental data acquired in the shallow water near Jeju island. Temperature and salinity measurement data in Korea Oceanographic Data Center (KODC) show that the seasonal thermocline exists near Jeju island, and, under the thermocline, the bottom loss property strongly affects the long-range propagation of acoustic signal along the down-ward refractive paths. We estimate the bottom loss under the thermocline using experiment data obtained near Jeju island in May, 2013. The result shows that the estimated bottom losses are below 3 dB and the higher level signal is received at the deeper receiver depths. This shows that the acoustic trapping under the thermocline can be a viable long-range signal transmission channel in the shallow water with a thermocline.
Keywords: Underwater acoustics, Underwater acoustic communication, Shallow-water acoustic channel, Thermocline, Jeju acoustic communication experiment (JACE13)
PACS numbers: 43.30.Es, 43.30.Gv

I. 서 론

수중음향 채널은 흡음 및 잡음 특성에 의해 사용 가능한 대역폭이 제한되며, 시간에 따라 변화하는 시변 다중경로 특성을 가진다. 또 지리적 위치와 해역 수심 그리고 계절 등에 따라 매우 다양한 변화를 보여주므로 아직까지 육상 통신에서와 같은 표준 채널 모델은 확립되어 있지 않다.[1-3] 이중에서 천해역 수중음향 채널(shallow-water acoustic channel)은 수심이 10 m에서 200 m이내의 범위를 가지는 해역을 일컬으며, 해수면 및 해저면에서의 반사와 산란 효과에 의해 큰 영향을 받는다.[4] 이와 함께 천해역에서는 수층 내부의 비균질성(inhomogeneity)으로 굴절과

†**Corresponding author:** Sung-Hoon Byun (byunsh@kriso.re.kr)
KRISO 32, 1312 Beon-Gil, Yuseong-Daero, Yuseong-Gu, Daejeon 305-343, Republic of Korea
(Tel: 82-42-866-3841, Fax: 82-42-866-3819)
"이 논문은 2014년 한국음향학회 춘계학술대회에서 발표하였던 논문입니다."

산란이 빈번히 발생하여 10 kHz 이상의 고주파 신호는 복잡한 전파 특성을 갖게 된다.

수심이 100 m 이상인 천해역 수중음향 채널은 수온약층의 영향도 매우 중요하다. 수온약층은 표층에서 수심이 깊어짐에 따라 수온이 빠르게 감소하는 해수층을 의미하며, 뚜렷한 계절이 존재하는 위도에서 태양열에 의해 표층의 수온은 증가하는 반면 깊은 수심의 수온은 상대적으로 일정하게 유지되므로 발생한다. 따라서 이러한 계절적인 수온약층은 여름철에 강화되고 겨울철에는 약해지는 특성을 보여주어, 수중음향 채널의 특성이 계절에 따라 변화하는 가장 큰 원인이 된다.

이러한 수온약층이 수중음향 통신 시스템의 성능에 미치는 영향은 Reference 5에서 이미 확인된 바 있다. Reference 5에서는 하와이 인근 수심 100 m의 천해역에서 측정된 실험 자료로부터 수온약층의 깊이와 수중음향 모뎀 성능 간에 서로 상관관계가 있음을 발견하였다. 해수면 근처에서 바람이 강해질 경우 표층 해수의 온도가 평준화되고 수온약층의 두께가 얇아져 수온약층에 의한 음향 신호 트랩핑 효과가 감소한다. 이에 따라 수온약층 아래에 위치한 수신기에서는 수온약층의 두께가 감소할수록 모뎀의 통신 성능이 저하되었다. 그리고 전반적으로 해수면 근처에서 보다는 수온약층 아래에 위치한 수신기에서 더 낮은 비트 오류율이 검출되어, 수온약층과 수신기의 수심에 따라 수중음향 통신 성능이 달라지는 것을 확인하였다.

이는 수온약층이 존재할 경우 수온약층이 시작되는 수심과 해저면 사이에 신호가 먼 거리까지 전파될 수 있는 채널이 형성되는 것을 뜻하며, 이 경우 해저면에서 발생하는 반사 손실의 크기가 장거리 전파의 중요한 이슈가 된다. 본 연구는 KRISO에서 2013년에 수행한 제주 음향 통신 실험 자료(Jeju Acoustic Communication Experiment 2013, JACE13)를 이용하여 수온약층이 장거리 신호 전달에 미치는 영향과 해저면 반사 손실을 분석한 결과를 제시하고자 한다. 채널 측정을 위해 송신된 광대역 신호를 분석하여 송수신기 사이의 거리가 약 1, 2, 4, 8 km일 때의 채널 임펄스 응답(Channel Impulse Response, CIR)의 변화를 관측하고, CIR로부터 해저면 반사 손실을 추정하였다.[6,7]

본 연구 결과는 한국 근해에 보편적으로 존재하는 계절적 수온약층이 신호 전달에 미치는 영향을 다양한 거리에서 관측하고, 송수신기의 수심에 따라 달라지는 신호 전달 특성과 해저면 반사 손실을 실험 자료로부터 실측하여 제시하였다는 점에 의의가 있다. 이를 통해 해양 환경과 송수신기의 위치에 따라 변화하는 수중음향 통신 시스템의 성능 예측과 분석에 활용될 수 있기를 기대한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 장기간 측정된 한국해양자료센터 수온 및 염분 자료를 이용해 제주도 근처에 형성되는 수온약층의 계절적 차이를 관찰한 결과를 설명하고, 제3장에서는 JACE13의 실험 방법과 실험 데이터로부터 추정된 CIR을 제시한다. 제4장에서는 CIR로부터 해저면 반사 손실을 추정하고, 이를 이용한 음선 추적 모델링 결과와 실측된 전달 손실을 비교하였다. 끝으로 제5장에서는 결론을 제시하고자 한다.

II. 수온약층과 음파 전달

앞서 설명한 바와 같이, 계절 변화가 뚜렷한 위도에서는 계절적인 수온약층이 존재하며, 이는 제주도 근처에서도 뚜렷이 관찰된다.[8] 본 연구에서도 실해역 실험에 앞서 한국해양자료센터[9]의 자료를 이용해 실험 해역의 수온약층의 형성과 변화 추이를 관찰하였다. 사용된 자료는 정선해양관측자료로 Fig. 1에 표시된 위치(205-05, N33.6217° E128.153°)에서 측정

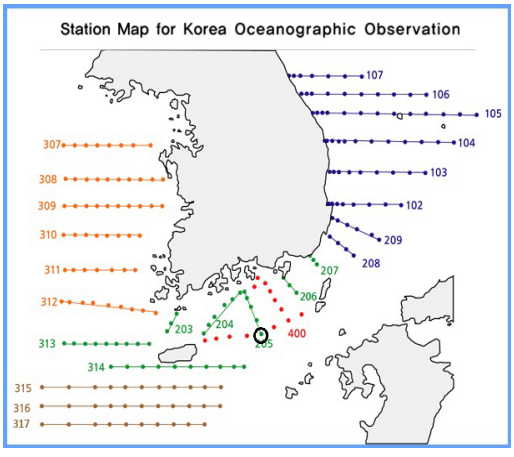

Fig. 1. Location (205-05, N33.6217° E128.153°) of the analyzed KODC data (circle).[9]

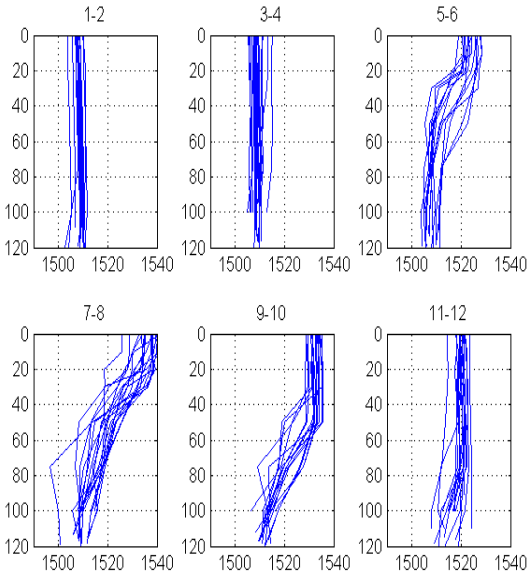

Fig. 2. Sound speed profiles calculated from the temperature and salinity data of KODC from 1995 to 2012. The upper numbers show the month of measurement.

된 자료이며, 1995년부터 2012년까지의 자료를 이용하였다.

정선해양관측자료의 수온과 염분 자료는 표층부터 30 m까지는 10 m 간격으로, 그 이상의 수심은 30 m 이상의 간격으로 측정된 자료이며, 2개월 간격으로 측정되었다. 단, 측정 시점은 해마다 다소 변동이 있다. Fig. 2는 한국해양자료센터의 수온 및 염분 자료로부터 Medwin 음속 공식[10]을 이용하여 음속을 추정한 결과이다. 해마다 거의 규칙적인 음속 수직분포(Sound Speed Profile, SSP)가 형성되는 것을 알 수 있는데, 대략 5월부터 10월까지 수온약층이 뚜렷하고 여름철에 해당하는 7월 ~ 8월 중에 표층과 심층의 수온 차이가 가장 커지는 것을 알 수 있다. 9월-10월에는 수온약층의 시작 수심이 아래로 이동하여 수온약층의 두께가 감소하는 경향을 보여주며, 11월 ~ 12월에는 수온약층의 수심이 더 내려가 거의 사라지는 모습을 보여준다.

수온약층이 형성되면 음파는 해저면 쪽으로 굴절하며 전파하게 되는데, 이 경우 장거리 전달 손실은 해수면 산란의 영향보다는 해저면 반사 혹은 산란 손실의 영향을 더 많이 받게 된다. Fig. 3은 JACE13 실험에서 측정된 샘플 음속 수직분포에 대하여 Bellhop

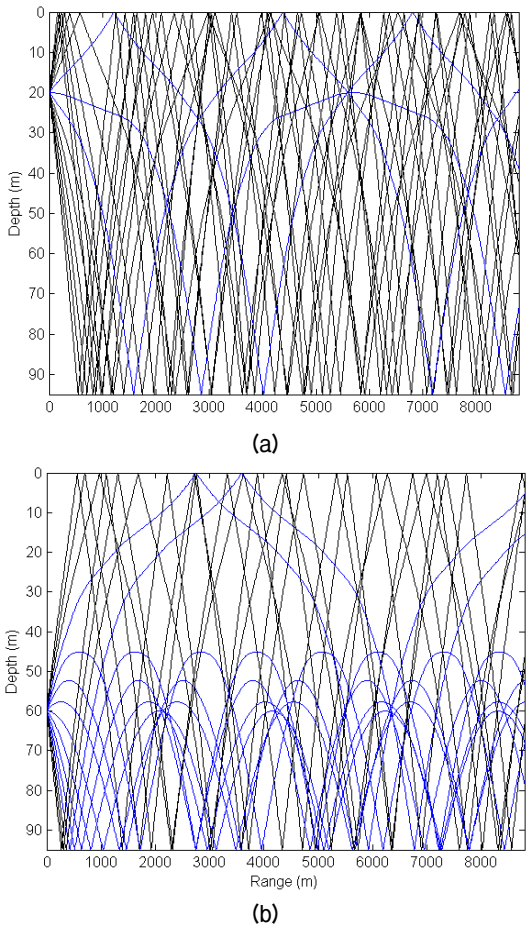

Fig. 3. Result of ray tracing for a channel with thermocline (a) when the source depth is 20 m and (b) when the source depth is 60 m (below the thermocline). The input SSP was selected from the JACE13 SSP data shown in Section III and rays were traced using Bellhop program.

프로그램[11]을 이용해 음선 추적을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 결과에서 보는 바와 같이, 송신기의 수심이 얕은 경우에는 수온약층에 의해 굴절되어 해저면 반사만 거치는 경로와 해수면 반사를 거치는 두 가지 경로가 존재하는 반면, 수심이 깊은 경우에는 송신되는 신호의 대부분이 수온약층에 의해 형성되는 채널 안에 머무르면서 전파된다. 따라서 송신기의 수심이 깊을 경우, 해저면 반사 손실의 크기가 장거리 신호 전달에 큰 영향을 미칠 것임을 짐작할 수 있다.

III. 제주 음향 통신 실험

KRISO에서는 지난 2013년 4월 29일부터 5월 2일

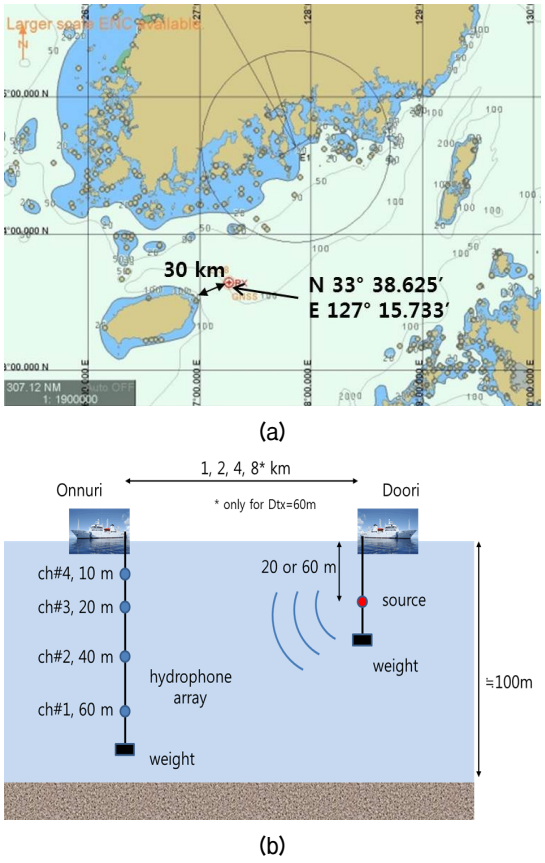

Fig. 4. JACE13 experiment description (a) location (b) sensor configuration.

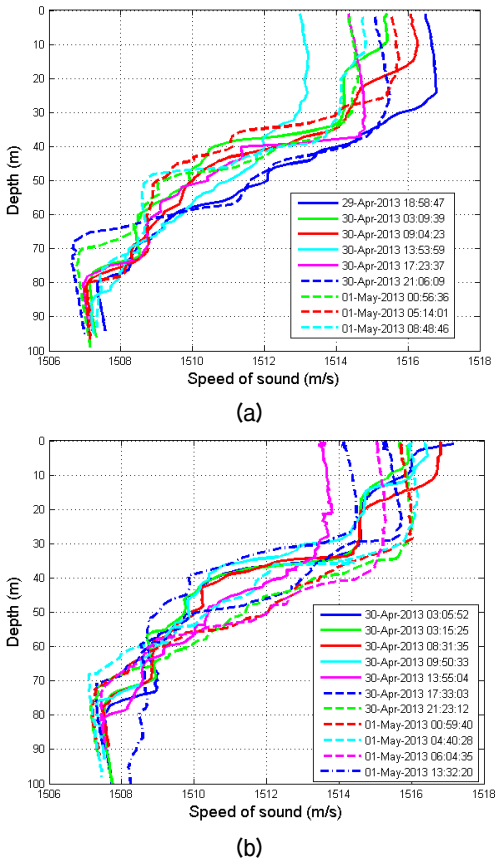

Fig. 5. Sound speed profiles measured in JACE13 (a) at the transmitter side and (b) at the receiver side. Date is shown in UTC (UTC = LOCAL TIME − 9 hours).

까지 4일간에 걸쳐 제주도 동방 해역에서 제주 음향 통신 실험(JACE13)을 수행하였다.[12] 실험의 목적은 100 m 전후의 수심을 가지는 천해역 수중음향 통신 채널 환경을 분석하고 수중음향 통신 시스템 개발에 필요한 채널 정보를 수집하기 위함이다. 실험 장소는 제주도에서 북동쪽으로 약 30 km 떨어진 해역(Fig. 4a)으로 앞 절에서 소개한 KODC 205-05 위치(Fig. 1)보다는 더 제주도에 가까운 위치이다. Fig. 4b는 JACE13의 실험 방법을 나타낸 그림이다. JACE13에서는 10, 20, 40, 60 m 수심에 총 4개의 하이드로폰(Reson TC4032)를 장착하여 신호를 수집하였으며, 송신은 하나의 센서(Neptune D/11)를 20 m, 60 m 에 번갈아 두고 신호를 송신하였다. 송신, 수신 센서 모두 해저에 고정되지 않았으므로, 표류로 인해 센서 간 거리는 시간에 따라 변동이 있다.

Fig. 5는 JACE13 실험에서 얻어진 음속 수직분포를 나타낸다. 송신측에서는 수온과 염분의 수직구조를 관측해 음속을 계산하였고, 수신측에서는 음속 프로파일러(sound velocity profiler)를 이용해 직접 수직 음속분포를 측정하였다. 짧은 기간 동안 측정된 데이터이므로 수온약층의 수심 변화는 그다지 크지 않으나 표층의 음속은 측정 시간에 따라 변화하였다. 측정된 음속 수직분포는 KODC의 자료(Fig. 2)와 비교할 때 실제 측정 시기와 가까운 5월 ~ 6월 자료와 비슷한 양상을 보여주며, 수온약층은 대략 수심 30 m 에서부터 시작되는 것을 확인할 수 있다.

실험에서는 장거리 신호 전달의 다중경로 특성과 시변 특성을 관찰하기 위하여, 광대역 신호와 순음 신호를 번갈아 송수신하였으나 본 논문에서는 M 수열로 만들어진 광대역 신호 만을 이용하였다. Table 1은 실험에서 사용된 신호의 사양을 정리한 것이다. 6 kHz와 12 kHz의 두 주파수에서 측정하였고 사용된 M 수열 신호의 심볼율은 각각 2.5 kHz와 5 kHz이다. 본 논

Table 1. Signal parameters used in JACE13 experiment.

Parameter	Value
Carrier Frequency	fc = 6, 12 kHz
Symbol Rate	2.5 kHz for fc = 6 kHz 5 kHz for fc = 12 kHz
Pulse Shaping Filter	Root-raised Cosine
Roll-off Factor	1
Symbol Length	255, 511 symbols for fc = 6 kHz 511, 1023 symbols for fc = 12 kHz

문에서는 JACE13 실험 데이터로부터 송수신기의 수심과 거리에 따른 CIR의 변화를 관찰하였다. CIR은 수신 신호를 기저 대역으로 주파수 이동한 후 송신 신호의 펄스 성형에 사용된 것과 같은 RRC(Root-Raised Cosine)필터를 통과시켜 기저 대역 신호를 얻은 다음, 송신된 M 수열과의 상호상관함수를 계산하는 방식으로 추정하였다.

Figs. 6과 7은 각각 송신기 수심이 20 m 일 때와 60 m 일 때, 12 kHz (511 심볼) 신호를 이용해 획득한 거리별 CIR 추정 결과를 나타낸 것이다. 실험 일정상의 문제로 8 km 거리의 실험은 송신기 수심이 20 m일 때에는 수행하지 못하고, 60 m일 때만 수행하였다. 표시된 결과는 10 s 동안 수신된 총 98개의 M 수열 블록으로부터 추정된 CIR을 겹쳐서 표시한 것이며, 오래될수록 희미하게 처리하였다.

결과를 보면, 송신기 수심이 깊을 경우에는 송수신기 간의 거리가 멀어짐에 따라 관측되는 다중경로가 매우 간결해지는 경향을 보여준다. 이는 송신 수심이 깊을 경우에는 먼 거리까지 전파되는 작은 입사각의 다중경로 성분이 해수면과의 접촉 없이 수온약층 하부층에서만 전파되기 때문이다. 이러한 경향은 Figs. 6과 7의 1, 2, 4 km의 결과를 비교하면 명확해진다. 반면 얕은 송신 수심에서는 4 km까지도 상당한 크기의 다중경로 성분이 남아 있는 것을 볼 수 있다(Fig. 6c). 또 한 가지 중요한 특징은 수신기의 수심에 따라 CIR 이 서로 상이하고 전반적으로 수신기 수심이 깊을 때 더 임펄스의 크기가 증가하는 경향을 보여주는 점이다. 송신기 수심이 60 m일 때, 2, 4, 8 km 결과를 보면 이러한 특징이 뚜렷하게 나타나는데, 특히 8 km의 경우에는 수신기가 40 m와 60 m 에 있을 때에만 임펄스가 관측되고 표층에 위치한 수신 센서에

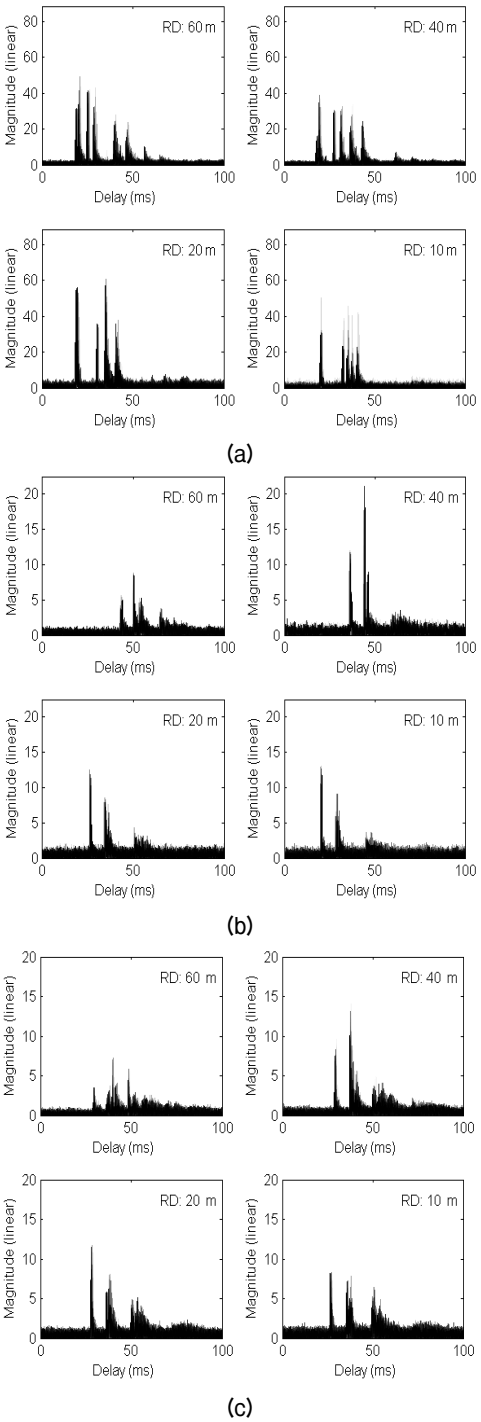

Fig. 6. Channel impulse responses from JACE13 data (12 kHz) when the transmitter depth is 20 m and the transmitter-receiver ranges are (a) 1 km (b) 2 km (c) 4 km. 'RD: xx' in each figure shows the receiver depth. Totally 10 seconds of data were processed and the CIR's of each M sequence data block are overlayed such that older ones are dimmed. For this transmitter depth, data were not gathered at 8 km range due to limited experiment schedule.

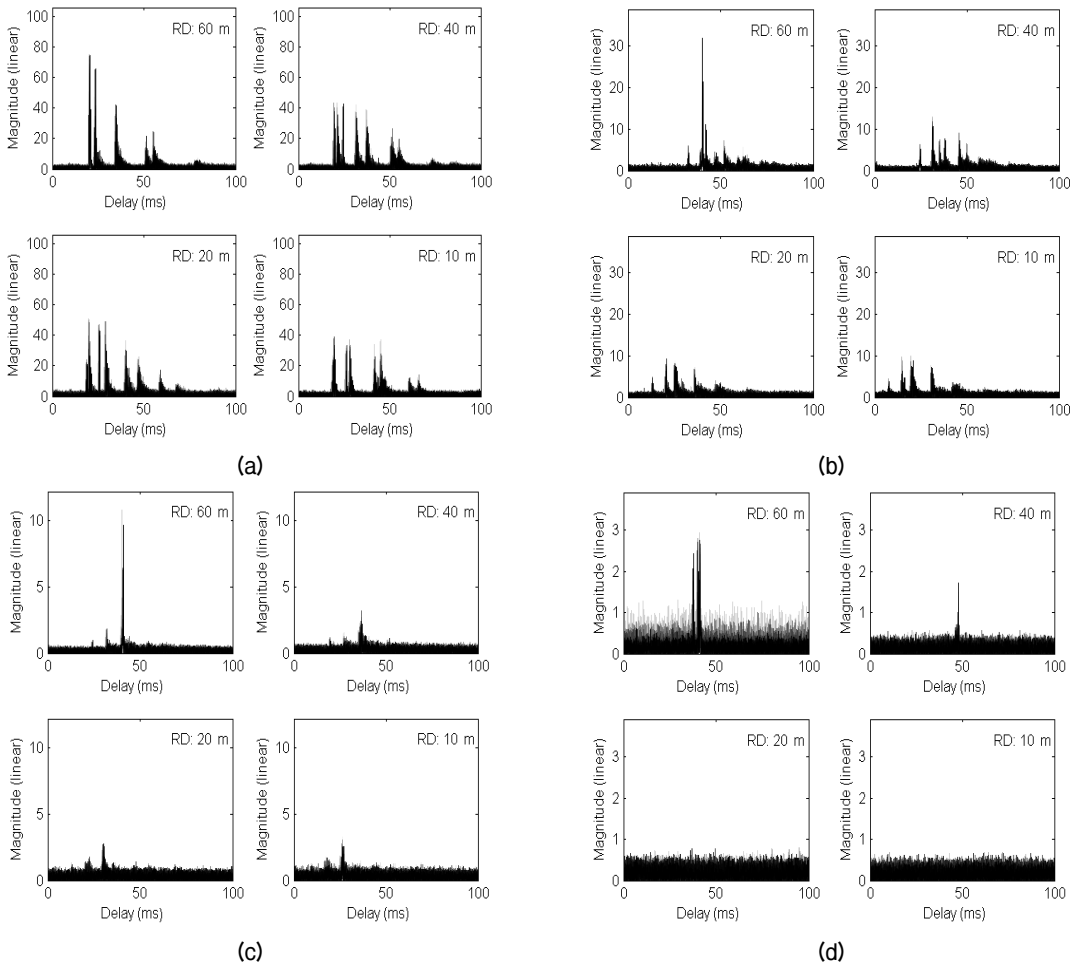

Fig. 7. Channel impulse responses from JACE13 data (12 kHz) when the transmitter depth is 60 m and the transmitter-receiver ranges are (a) 1 km (b) 2 km (c) 4 km (d) 8 km. 'RD: xx' in each figure shows the receiver depth. Totally, 10 seconds of data were processed and the CIR's of each M sequence data block were overlayed such that older ones are dimmed.

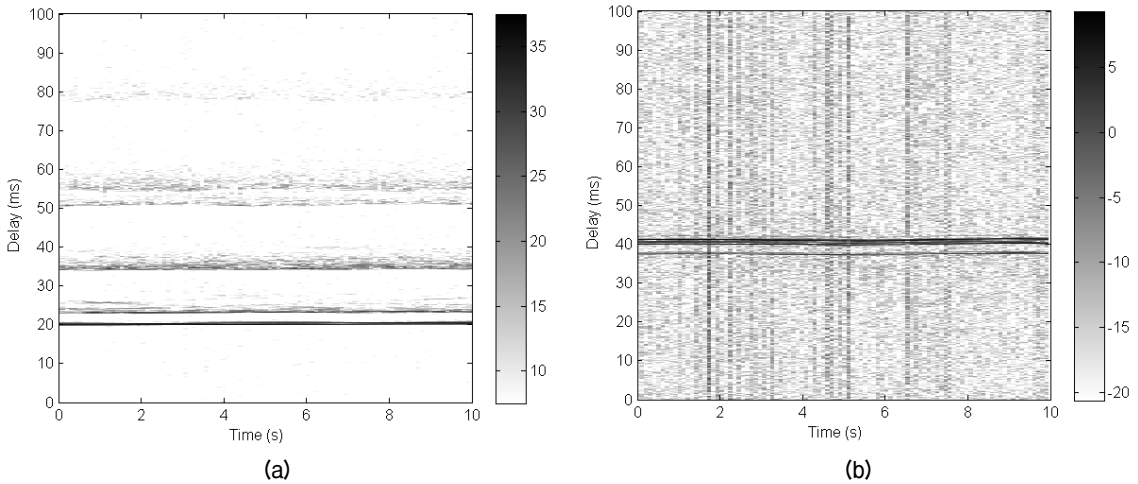

Fig. 8. CIR (12 kHz) variation vs. time when both the transmitter and the receiver are at 60 m. The transmitter-receiver ranges are (a) 1 km and (b) 8 km, respectively.

서는 의미 있는 크기의 임펄스가 관측되지 않았다.

Fig. 8은 시간에 따른 CIR의 변화를 비교한 것으로 Fig. 8a는 1 km에서의 CIR, Fig. 8b는 8 km에서의 CIR을 나타낸 것이다. 수온약층에 의해 형성된 장거리 전달 경로(Fig. 8b)는 Fig. 8a에 나타난 해수면 반사 경로(지연 시간 > 25 ms)에 비해 시간에 따른 변화가 크지 않고 산란에 의한 잔향이 적은 특징을 보여준다.

IV. 해저면 반사 손실 추정

앞 절에서 살펴본 바와 같이, 수온약층은 해수면 산란의 영향을 받지 않으면서 신호가 안정적으로 먼 거리까지 전파될 수 있는 채널을 형성한다. 해수면과의 접촉이 없으므로, 이때의 전달 손실은 해저면 반사 손실에 의해 크게 영향을 받는다. 본 절에서는 측정된 데이터 중에서 가장 가까운 거리인 1 km 거리 데이터를 이용하여 해저면 반사 손실을 추정한 결과를 제시한다.

본 연구에서는 Reference 13에서 제시된 방법을 이용해 해저면 반사 손실을 추정하였다. 다만 Reference 13에서는 JACE13보다는 송수신기 사이의 거리가 가까워 해저면 입사각이 임계각 근처인 반면, JACE13 데이터는 1 km의 거리에서 측정되어 임계각보다는 작은 각도로 입사될 것으로 예상된다. 또, Reference 13에서는 짧은 길이의 순음 신호를 사용한 반면 본 연구에서는 광대역 신호를 사용하였다.

Fig. 9는 CIR을 이용하여 지연시간과 측정 수심에 대하여 나타낸 것으로 수신된 신호의 파면(wavefront)을 추정할 수 있다. 직접 경로와 해저면 반사 경로의 크기를 비교하면, 반사 손실의 크기를 예측할 수 있는데, 이 때, 송수신기 사이의 거리가 멀면 확산 손실(spreading loss)과 음선 굴절의 영향을 무시할 수 없으므로, 실험 데이터와 인접한 시간에 관측된 음속 수직분포 데이터를 이용해 확산 및 굴절 효과를 보정하였다. 또한 해수면 반사파와 직접파의 지연시간 차이가 작을 경우 간섭에 의한 페이딩(fading)에 의해 추정 오차가 발생할 수 있으므로, 두 경로가 뚜렷하게 구분되는 센서의 데이터를 사용하였다(예를 들어 Fig. 9a의 경우에는 1번(60 m), 2번(40 m) 센서의 데이터만을 이용하였다).

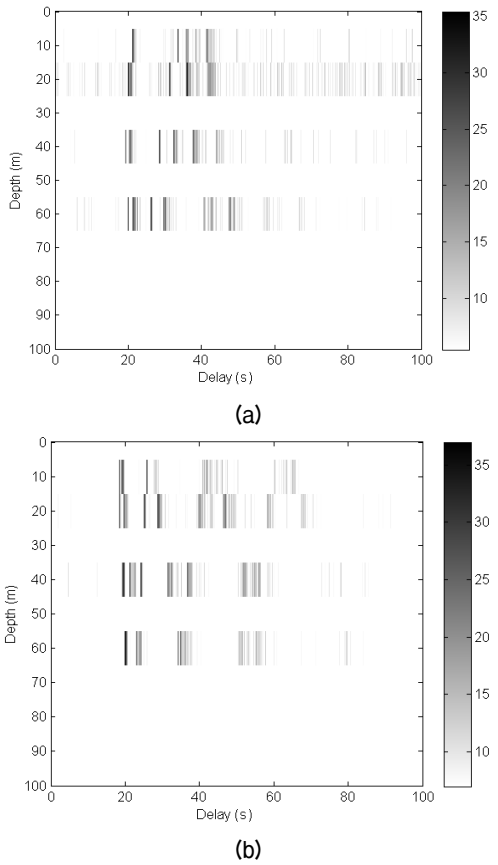

Fig. 9. Channel impulse response at 1 km when the transmitter depths are (a) 20 m and (b) 60 m. The first to the third wavefronts show the direct, the surface-reflected, and the bottom-reflected paths, respectively. In (b), the surface-reflected path overrides with the bottom-reflected path at the receiver depth 60 m.

먼저 CIR로부터 추정된 직접파와 해저면 반사파의 신호 크기를 각각 L_D, L_B라 하면, 두 신호의 크기 차이는 다음의 관계식으로 표현된다.

$$L_D - L_B = (SL - TL_D) - (SL - TL_B - BL), \quad (1)$$

여기서 SL은 음원 준위를, TL_D와 TL_B는 직접파와 해저면 반사파의 전달 손실을 의미하며, BL은 본 연구에서 구하고자 하는 반사 손실을 나타낸다. 이를 다시 정리하면,

$$BL = (TL_D - TL_B) + L_D - L_B \quad (2)$$

이고 L_D, L_B는 데이터로부터, $TL_D - TL_B$은 모델링

을 이용해 추정하면 반사 손실 BL을 구할 수 있게 된다. 본 연구에서는 Bellhop[11]을 이용해 전달 손실을 추정하였다.

Fig. 10는 이와 같은 방법을 이용해 얻은 해저면 반사 손실 추정 결과이다. 송수신 센서 모두 고정되지 않았으므로 상대 위치가 시간에 따라 변화한다. 따라서 송수신기 사이의 거리에 의해 영향을 받는 해저면 입사각(grazing angle)도 각 데이터마다 조금씩 상이하게 나타났다. 그래프의 해저면 입사각은 음선 추적으로부터 계산된 값이다. 추정된 반사 손실은 입사각이 6.7°와 8.4° 사이일 때, 대략 0 dB에서 3 dB 사이의 값을 가지는 것으로 나타났다. 결과에서 0 dB 이하의 반사 손실이 나타난 것은 작은 입사각으로

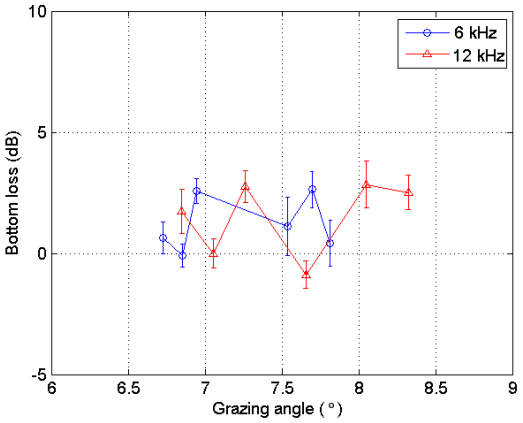

Fig. 10. Bottom losses estimated from JACE13 experiment data. The error bar denotes standard deviation. The grazing angles fluctuate slightly according to the research vessel drift.

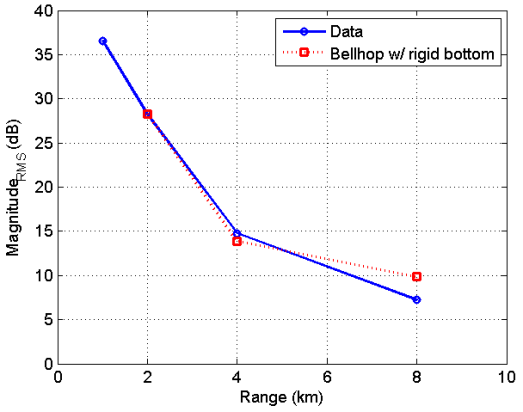

Fig. 11. Comparison of maximum peak between the measured CIR and ray tracing model with acoustically rigid bottom.

인하여 반사 손실 크기가 작고, Eq.(2)에서 사용되는 전달 손실 값에 추정 오차가 존재하기 때문으로 판단된다. 중심 주파수에 따른 반사 손실의 차이는 그다지 크지 않았는데, 이는 해저면 입사각이 매우 작은 값을 가지기 때문이다. 실제 이론적인 반사 손실 모델에서도 임계각 이하의 작은 입사각에서는 주파수에 따른 차이를 구분하기 어렵다([13]의 Fig. 5 참조).

Fig. 11은 앞에서 얻은 CIR 피크 크기와 음선 추적 모델에서 얻어진 다중경로 성분의 최대값 크기를 서로 비교한 것이다. 음원의 수심이 60 m 일 때이므로, 신호의 대부분은 아래로 굴절하는 경로(Fig. 3b)를 통해 전파된다. 결과에서 CIR 피크의 크기는 10초 동안 얻어진 CIR에서 해저면 반사 경로 최대값의 제곱평균제곱근을 구하여 나타낸 것이다. 단, 거리 1 km의 경우에는 음원 수심이 60 m일 때 해수면 반사와 해저면 반사 경로가 서로 겹치므로, 직접 경로의 크기를 나타내었다. 실험 데이터와 음선 추적 모델의 음원 준위를 일치시키기 위하여, 음선 추적 모델의 결과는 CIR의 결과와 2 km에서 일치되도록 그래프를 이동시킨 것이다. 이를 통해 해저면 반사 손실이 없다고 가정하고 계산한 모델과 실제 실험에서 측정된 신호의 거리에 따른 감소폭을 비교할 수 있는데, 결과에서 나타난 바와 같이 두 그래프가 4 km에서는 거의 일치하고, 8 km에서는 약 3 dB 정도의 차이가 나타나, 유사한 범위로 해저면 반사 손실을 예측한 Fig. 10의 결과를 뒷받침한다.

V. 결 론

본 연구는 제주도 인근에서 측정된 실험 데이터를 이용해 천해역 환경에서 수온약층이 음향 신호 전파에 미치는 영향을 분석하였다. 실험에서 측정된 광대역 신호 데이터를 이용해 추정한 해저면 반사 손실은 약 3 dB이하의 값을 가지는 것으로 나타났다. 다양한 수심에서 얻어진 채널 임펄스 응답 추정 결과는 수온약층에 의한 하방 굴절과 해저면 반사가 장거리 신호 전파에 중요한 채널을 형성하는 것을 보여준다. 한국해양자료센터의 정선해양관측자료에서 보듯이 이러한 수온약층은 계절에 따라 주기적으로 형성되므로, 본 연구에서 나타난 장거리 신호

전달 특성도 계절에 따라 규칙적으로 나타날 가능성이 클 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행하고 있는 "수중 광역 이동통신 시스템 개발" 과 한국지질자원연구원의 지원으로 수행하고 있는 "수중 고주파수음파 관측시스템 및 수중음향 무선통신 채널 구축" 연구 결과의 일부이다. 제주 음향 통신 실험에 참여한 한국해양과학기술원의 김선정, 남해연구소의 김덕진, 선박해양플랜트연구소의 조아라, 이정희, 김길용, 이상원, 과학기술연합대학원대학교의 정동영 님께 감사드립니다.

References

1. D. B. Kilfoyle and A. B. Baggeroer, "The state of the art inunderwater acoustic telemetry," IEEE Journal of Oceanic Engineering **25**, 4-27 (2000).
2. M. Stojanovic and J. Preisig, "Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization," IEEE Communications Magazine **47**, 84-89 (2009).
3. J. Potter, M. B. Porter, and J. Preisig, "UComms: a conference and workshop on underwater communications, channel modeling, and validation," IEEE Journal of Oceanic Engineering **38**, 603-613 (2013).
4. T. C. Yang, "Properties of underwater acoustic communication channels in shallow water," J. Acoust. Soc. Am. **131**, 129-145 (2012).
5. M. Siderius, M. B. Porter, P. Hursky, V. McDonald, and the KauaiEx Group, "Effects of ocean thermocline variability on noncoherent underwater acoustic communications," J. Acoust. Soc. Am. **121**, 1895-1908 (2007).
6. S. H. Byun, S. M. Kim, and Y. K. Lim, "Estimation of seabed bottom loss using wideband signal for underwater acoustic communication," J. Acoust. Soc. Am. **135**, 2301 (2014).
7. S. H. Byun, S. M. Kim, D. Y. Jeong, and Y. K. Lim, "Analysis of 6 kHz, 12 kHz broadband signal transmission Characteristics near Jeju Island" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. Suppl. 1(s) **33,** 132-134 (2014).
8. J. H. Kim, T. H. Bok, D. G. Paeng, I. C. Pang, and C. Lee, "Acoustic channel formation and sound speed variation by low-salinity water in the western sea of Jeju during summer" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **32**, 1-13 (2013).
9. *Korea Oceanographic Data Center*, http://kodc.nfrdi.re.kr/
10. H. Medwin and C. S. Clay, *Fundamentals of Acoustical Oceanography* (Academic Press, Boston, 1998), pp. 85.
11. M. B. Porter, *The BELLHOP Manual and User's Guide: PRELIMINARY DRAFT*, Heat, Light, and Sound Research, Inc, 2011.
12. S. M. Kim, S. H. Byun, S. G. Kim, S. J. Kim, D. J. Kim, and Y. K. Lim, "Analysis of underwater acoustic channel around Jeju island using 6 kHz and 12 kHz signals" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. Suppl. 2(s) **32,** 233-234 (2013).
13. J. W. Choi and P. H. Dahl, "Mid-to-high-frequency bottom loss in the east China Sea," IEEE Journal of Oceanic Engineering **29**, 980-987 (2004).

저자 약력

▸ 변 성 훈(Sung-Hoon Byun)

1998년 2월: 서울대학교 조선해양공학과 학사
2000년 2월: 서울대학교 조선해양공학과 석사
2012년 8월: 서울대학교 조선해양공학과 박사
2000년 8월 ~ 현재: 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 선임연구원
2014년 8월 ~ 현재: Georgia Institute of Technology 방문연구원
<관심분야> 소나 이미징, 수중음향 원격탐사, 수중음향 전파 및 배경 잡음

▸ 김 시 문(Sea-Moon Kim)

1992년 2월: KAIST 기계공학과(공학사)
1994년 8월: KAIST 기계공학과(공학석사)
2001년 2월: KAIST 기계공학과(공학박사)
2001년 3월 ~ 현재: 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원
2004년 3월 ~ 현재: 과학기술연합대학원대학교 해양정보통신공학과 부교수
2006년 2월 ~ 2007년 2월: University of California, San Diego 방문연구원
<관심분야> 소나 신호처리, 수중음향 채널 모델링, 수중 위치 탐지

▸ 임 용 곤(Yong-Kon Lim)

1979년 2월: 충남대학교 전기공학과(공학사)
1984년 2월: 충남대학교 전력전자공학과 (공학석사)
1994년 2월: 아주대학교 전자공학과(공학박사)
1980년 7월~현재: 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원