

SAVEX15 실험 해역에서 측정된 전달손실 자료를 이용한 음파 전달 조건의 변환점 추정

Estimation of a transition point of sound propagation condition using transmission loss data measured in SAVEX15

권혁중,¹ 최지웅,[†] 김병남²

(Hyuckjong Kwon,¹ Jee Woong Choi,^{1†} and Byoung-Nam Kim²)

¹한양대학교 해양융합공학과 해양음향공학연구실, ²한국해양과학기술원

(Received November 21, 2017; revised January 3, 2018; accepted January 30, 2018)

초 록: 천해 환경에서 음파 전달은 경계면에 의해 구형 분산에서 원통형 분산으로 음파 전달 조건이 전환되는데, 이 지점을 음파 전달 조건의 변환점(transition point)이라고 정의한다. 이론적으로 거리에 따른 전달손실을 이용하여 음파 전달 조건의 변환점을 계산할 수가 있으며, 본 논문에서는 포물선 방정식 기반 음향모델을 이용하여 Pekeris 도파관에서 송·수신기가 수층의 중심에 위치한 경우 전달손실을 모의한 후 변환점을 도출하였다. 계산된 변환점은 수층과 퇴적층의 음속비로 계산된 임계각으로 추정된 임계거리와 비교, 분석되었으며, 동일한 환경에서 수층에 음향채널이 존재하는 경우와 음원 수심 변화에 따른 변환점 변동성을 확인하였다. 최종적으로 2015년 5월, 제주도 서남쪽으로 약 65 km 떨어진 SAVEX15(Shallow Water Acoustic Variability EXperiment 2015) 실험에서 획득한 천해 환경에서의 거리에 따른 저·중주파수 음파 전달 실험의 전달손실 자료를 이용하여 실험 해역에서의 음파 전달 조건 변환점을 도출하였으며, 이를 실험해역의 해양환경과 비교를 통하여 음전달 특성을 파악하였다.

핵심용어: 음파전달, 전달손실, 변환점, 구형 분산, 원통형 분산

ABSTRACT: Sound propagation in shallow water changes from spherical spreading to cylindrical spreading, depending on boundary conditions, and this point is defined as a transition point of the sound propagation condition. Theoretically, the transition point can be estimated using the transmission loss as a function of source-receiver range. In this paper, the transmission loss curve in a Pekeris waveguide is predicted using a parabolic-equation based acoustic propagation model and using this transmission loss curve, the range from the source of the transition point is estimated, which is compared to the critical distance calculated using the sound speed ratio of water to sediment. In addition, the effects of the sound speed profile and source depth change on the transition point are investigated. Finally, the transition point is estimated using the transmission loss data measured during the period of the SAVEX15 (Shallow Water Acoustic Variability EXperiment 2015) conducted 65 km southwest of Jeju Island in May 2015, and it is compared to the ocean environmental parameters to understand the properties of sound propagation in the experimental area.

Keywords: Sound propagation, Transmission loss, Transition point, Spherical spreading, Cylindrical spreading

PACS numbers: 43.30.Ma, 43.30.Pc

1. 서 론

해양에서의 음파 전달은 해저면 구성성분, 해상상태, 주변소음 등과 같은 다양한 환경적인 요인들에 의한 영향을 받으며 전파된다. 특히 천해에서는 해수면 및 해저면과 같은 해양 경계면 조건에 의해 그

[†]Corresponding author: Jee Woong Choi (choijw@hanyang.ac.kr)
Department of Marine Science and Convergence Engineering,
Hanyang University, 55 Hanyangdaehak-ro, Sangnok-gu, Ansan,
15588, Republic of Korea

(Tel: 82-31-400-5531, Fax: 82-31-406-6255)

“이 논문은 2017년도 한국음향학회 수중음향학 학술발표회에서 발표하였던 논문임”

음파 전달 특성이 크게 달라지며, 수온, 염분 및 압력에 의해 결정되는 수층의 음속구조(Sound Speed Profile, SSP)^[1]는 음파 전달 경로에 영향을 준다. 따라서 천해 해양 환경에서 음파 전달을 모의하기 위해서는 수층의 음속구조와 경계면에 대한 영향을 고려하는 것이 중요하다.

천해를 단순한 두 개의 등속 유체 층으로 구성되었다고 가정하는 Pekeris 모델^[2]은 음파 전달에 영향을 미치는 파라미터별 음파 전달 특성을 이해하는데 유용한 모델이다. 이러한 이유로 천해 음파 전달 연구를 수행하기 위해 간단한 Pekeris 도파관에서 소나 파라미터별 음전달 특성을 파악하고자 하는 많은 연구가 진행되어 왔다.^[3-6] 본 논문에서는 Pekeris 도파관의 천해 해양 환경을 가정한 후 음파 전달이 구형 분산에서 원통형 분산으로 전환되는 변환점(transition point)을 임계각과 관련지어 조사하였다. 임계각은 수층 및 퇴적층의 음속비를 이용하여 정의되므로 변환점과 임계각과의 연관성 파악은 해저면 지음향인자에 의한 음파 전달 양상을 이해하는데 중요한 정보를 제공할 수도 있다는 것이 본 연구의 동기이다. 음파가 음원으로부터 전파되기 시작하여 경계면에 의한 간섭을 겪기 전까지는 일반적으로 구형 분산으로 음이 전파되다가 경계면과의 간섭이 시작되면서 차츰 원통형 분산으로 전환되기 시작한다.^[1,7] Tang *et al.*^[8]은 SW06(Shallow Water Experiment 2006) 실험으로부터 획득한 중주파 전달손실 자료로부터 변환점을 이용한 실제 해양에서 음전달을 이해하고자 하였다. 본 논문에서는 Pekeris 도파관 하에서 음전달에 영향을 미치는 여러 해양인자 및 기하학적 인자들의 조건을 변화시키면서 그 변화에 따른 변환점의 변동성을 이해하고자 하였으며, 더 나아가 퇴적층의 음속 변화에 따른 변환점의 변동성 확인을 통해 측정된 전달 손실의 변환점을 사용한 퇴적층 음속의 역추정 가능성을 확인하고자 하였다.

또한 2015년 5월에 제주도 남서쪽으로 65 km 떨어진 천해 환경에서 수행된 SAVEX15(Shallow Water Acoustic Variability EXperiment 2015) 실험 중, 저·중주파수 음파 전달 특성 확인 실험에서 측정된 전달 손실 자료를 이용하여 변환점을 추정하고자 하였으며, 당시의 해양환경 인자 변화와 연관시켜 음전달

특성을 이해하기를 시도하였다.

II. 해상실험 및 환경

SAVEX15 실험은 제주도 남서쪽 65 km 해역(32° 30'N, 126° 05'E ~ 32° 35'N, 126° 12'E)에서 2015년 5월에 수행된 여러 가지 목적의 수중음향 실험이었다(Fig. 1). 여러 가지 목적의 실험 중, 본 논문에서 분석한 저/중주파수 음파전달 실험은 조사선인 온누리호에 의해 예인되는 음원으로부터 송신된 음파를 고정되어 있는 수직 선배열(Drift Vertical Line Array, DVLA)에서 수신한 실험이다. 음원을 예인한 거리는 약 590 m - 6300 m로, 조사선은 고정된 수신기로부터 멀어지는 방향으로 평균 3.5 knot의 속도로 음원을 예인하였다. 실험 해역의 수직 음속 구조는 UCTD(Underway CTD, Conductivity, Temperature, Depth, Sea-Bird)를 이용하여 측정되었다. 실험 당시의 수층은 수심이 약 102 m 정도인 천해 환경임에도 특이하게 심해 음속 구조 특성인 음향 채널이 형성되어 있었다(Fig. 2(a)). 이러한 해양환경에서 송수신기 거리 2 km, 송신기 및 수신기 수심이 각각 23 m와 51 m에 해당하는 고유음선 추적 결과는 Fig. 2(b)와 같다. 멀티빔 음향 측심기(Multi-Beam Echo Sounder, MBES, Kongsberg EM 120)로 조사된 실험 해역의 지형은 평균 102 m 수심의 비교적 평탄한 해저면에 약 5 m의 높이의 사구

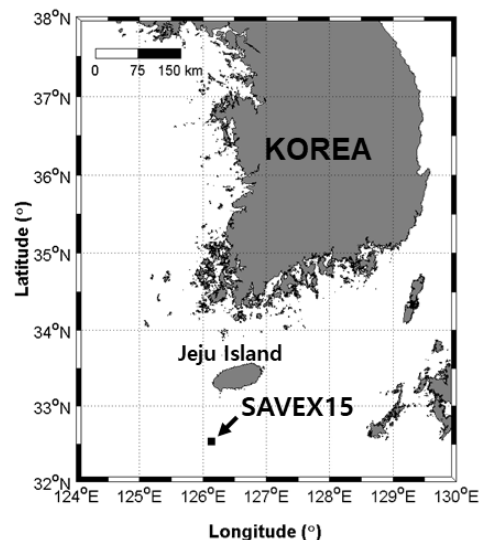


Fig. 1. Location of the SAVEX15 site.

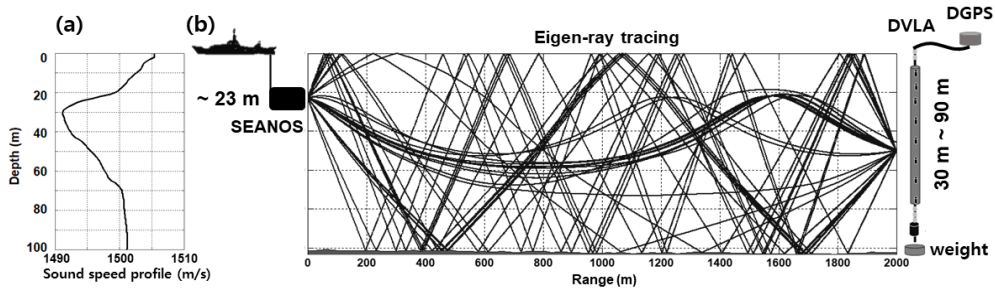


Fig. 2. Experimental layout of the acoustic measurements. (a) SSP of the water column measured by UCTD casts. (b) eigenray tracing results from source-receiver range of 2000 m.

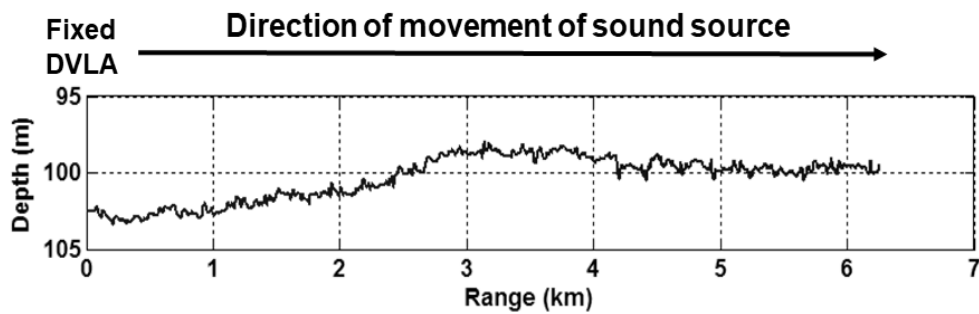


Fig. 3. Bathymetry of the experimental site measured by MBES.

가 부분적으로 존재하고 있었다(Fig. 3). 실험 해역의 표층 퇴적물은 그랩(grab) 채취 후 입도분석을 실시하였고, 그 결과 실험해역의 퇴적층은 평균 입도가 약 7ϕ 인 사니질 퇴적층으로 분석되었다.

실험에 사용된 음원은 한국해양과학기술원(Korea Institute Ocean Science and Technology, KIOST)에서 보유하고 있는 저주파 음원인 SEANOS였으며, 송신 신호는 140 Hz, 240 Hz, 410 Hz, 605 Hz, 800 Hz, 930 Hz의 멀티 톤 형태의 연속파(Continuous Wave, CW) 신호였다. 수직 선 배열은 수신기 길이 60 m를 갖는 21개 채널의 네스티드 어레이였으며, 각각의 수신기의 수신 감도는 $-172.5 \text{ dB re } 1 \text{ V}/\mu\text{Pa}$ 로 동일하였고, 샘플링 레이트는 8192 Hz였다. 실험에 사용된 송·수신기 시스템에는 수심 측정 장치 및 DGPS(Differential Global Positioning System)를 부착하여 측정 시 시스템의 수심과 거리를 모니터링하였다.^[9] 송신기는 평균 23 m 수심을 유지하면서 예인되었으며, 수신기는 수층 30 m-90 m 범위에 위치되었다. 송신신호는 6개 주파수로 구성되어 있었지만, 저주파 영역에서의 낮은 신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio, SNR)로 인해 본 논문에서는 SNR이 제일 좋은 930 Hz 신호에 대해서 전

달손실 분석을 수행하였다.

III. 음파 전달 조건 변환점의 이론적 접근 및 모의

Pekeris 도파관은 수층과 퇴적층이 각각 등밀도와 등음속을 가지는 이층구조 형태의 음향 도파관으로 정의된다. 천해 해양 환경을 가정한 Pekeris 도파관에서 수층의 중심에 위치한 무지향성 음원으로부터 방사된 음파는 최초에 구형 분산으로 전파되다 해수면 및 해저면과 같은 경계면과의 간섭에 의해 차츰 원통형 분산으로 전환된다(Fig. 4). 이때 두 분산의 변환점(R_0)은 실제로는 명확히 구분하기 어려우나, 음파가 임계각(θ_c) 보다 큰 수평 입사각에서는 반사 손실로 인해 음 에너지가 빠르게 감소하여 무시할 수 있으며 임계각(θ_c) 보다 작은 수평 입사각으로 전파되는 음파는 전반사되어 장거리 전파가 가능하므로^[7,9] 임계각에 해당하는 수평거리로 변환점을 정의할 수 있다. 본 논문에서는 변환점에 대한 이해를 돕기 위해, 간단한 Pekeris 도파관을 가정하여 경계면에서의

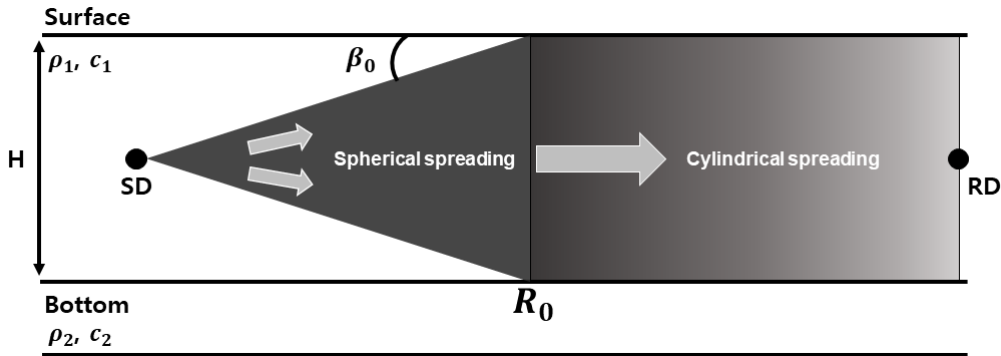


Fig. 4. Sound propagation condition in Pekeris waveguide. At R_0 , sound propagation is changed from spherical spreading to cylindrical spreading.

반사 및 굴절에 의한 에너지 손실이 고려되지 않은 이상적인 음파 전달 환경을 가정하였다. 이때의 구형 방사손실($20\log R$)과 원통형 방사 손실($10\log R$)의 변환점은 임계각에 관한 Eq. (1)으로 표현할 수 있으며, 전달손실(Transmission Loss, TL)은 변환점을 기준으로 Eqs. (2)와 (3)과 같이 표현할 수 있다.^[7]

$$R_0 = \frac{H}{2\tan\theta_c}, \quad (1)$$

$$TL = 20\log r + \alpha r, \quad (r < R_0), \quad (2)$$

$$= 20\log R_0 + 10\log \frac{r}{R_0} + \alpha r, \quad (r > R_0), \quad (3)$$

r 은 음파의 전달 거리(m)이며, $20\log r$ 과 $10\log r$ 은 각각 구형 분산과 원통형 분산인 경우의 전달손실을 나타낸다. α 는 수층의 흡수손실계수이다. 음파의 전달손실은 수층과 퇴적층의 음속 비, 수층의 수직 음속 구조, 수층의 총 수심 등과 같은 환경적 요인에 영향을 받으며 변환점 역시 이러한 해양환경 파라미터들의 특성에 따라 달라질 수 있다. 특히 임계각은 해저면에 입사하는 음파가 전반사 되는 범위를 결정하는 파라미터로써 수층과 퇴적층의 음속비에 의해 결정되므로 특정 해역에 대해 추정된 변환점은 특정 해양 환경의 지층 특성 나타내는 지표로 사용될 가능성이 있다.

Eq. (3)으로부터 계산된 전달손실에서 원통형 분산에 대한 전달손실인 $10\log r$ 과 흡수 손실인 αr 를

빼주면 Eq. (4)와 같이 $10\log R_0$ 로 표현할 수 있는데 이를 보상 전달손실(reduced transmission loss)라 정의하며,^[8] 이를 이용하면 구형 분산으로부터 원통형 분산으로 전환되는 변환점을 추정할 수 있게 된다. 또한 변환점이 임계각에 해당하는 수평거리라는 가정하에 이 변환점을 Eq. (1)에 대입하면 임계각을 추정할 수 있게 되며 나아가 해저면의 음속도 추정할 수 있을 것임을 알 수 있다.

실제 측정된 거리에 따른 전달손실 곡선에서 $10\log r + \alpha r$ 을 빼줌으로써 획득된 보상 전달손실은 거리에 따라 일정 dB 값을 기준으로 상하 진동하게 된다. 따라서 Eq. (5)에서처럼 평균을 취한 후 그 값을 여분 전달손실(extra transmission loss)이라고 정의한다.^[8] 최종적으로 이 여분 전달손실을 이용하여 변환점(R_0)을 추정할 수 있게 된다.

$$TL_{Reduced} = 20\log R_0 + 10\log \frac{r}{R_0} + \alpha r - (10\log r + \alpha r), \quad (4)$$

$$= 10\log R_0$$

$$TL_{Extra} = \text{mean}(10\log R_0), \quad (5)$$

본 논문에서는 Pekeris 도파관 하에서 송·수신기가 수층의 중심에 위치한 경우 포물선 방정식 기반의 음파 전달 모델(RAM)^[10]을 이용하여 예측한 음파 전달손실 곡선을 사용하여 탐색된 음파 전달 조건 변환점과 임계각과 수심을 대입해 Eq. (1)로부터 계산된 음파 전달 조건 변환점을 상호 비교한다. 편의상 본 논문에서는 Eq. (5)로부터 계산된 변환점과 비

교하기 위해 Eq. (1)로부터 계산된 변환점을 임계 거리(critical distance)라 칭한다.

임계 거리는 Eq. (1)로부터 수층과 퇴적층의 음속 비를 이용하여 계산할 수 있다. 임계 거리와 변환점의 관계를 확인하기 위해, 수층의 음속이 1500 m/s로 등음속 수직 음속 구조를 갖는 수심 102 m인 Pekeris 도파관에서 주파수 930 Hz, 송·수신기 수심이 51 m 인 환경을 모의하여 퇴적층의 흡수손실이 고려되지 않는 경우($\alpha_s = 0$)의 임계 거리와 포물선 방정식을 이용하여 평가된 변환점의 관계를 비교하였다. 또한 실제 측정된 음파 전달손실로 계산되는 변환점은 음파의 해저면 반사 시 발생하는 감쇠손실에 의한 영향을 받으므로 이를 고려하였을 경우 임계 거리와 변환점 사이에 발생하는 차이점을 조사하였다. 각 평균 입도에 해당하는 퇴적층의 지음향 인자는 경험식에 의한 변환 값을 사용하였다.^[11] 퇴적층의 평균 입도(Mean Grain Size, MGS)에 따른 음속(c_s), 밀도(ρ_s), 감쇠 계수(α_s)는 Table 1과 같다.

Fig. 5에서 수층의 음속($c_w = 1500$ m/s)보다 퇴적층의 음속이 느려지는 지점에서부터는 임계각이 존재

하지 않게 되고 오히려 전투과각이 발생함에 따라 임계 거리가 계산되지 않으며, 따라서 변환점 발생 거리도 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. $c_s > c_w$ 범위에 해당하는 범위에서 평가된 임계 거리(Δ)는 감쇠 계수를 고려하지 않은 퇴적층에서 포물선 방정식을 이용하여 탐색된 변환점(+)과 비교하여 평균적으로 불과 24m의 차이를 보이면서 퇴적층의 평균 입도가 작아질수록(ϕ 가 증가할수록) 변환점 발생거리는 증가하였다. 퇴적층의 감쇠손실을 고려하였을 경우 변환점(○)과 임계거리와의 차이는 평균 약 55 m로 증가하였다. 퇴적층의 감쇠 계수가 증가하는 1-4 ϕ 범위(Table 1)에서 임계거리와 변환점 발생거리가 점점 증가하는 경향을 보면 감쇠손실은 구형 분산에서 원통형 분산으로 변환되는 시점(거리)지연시키는 요인이 됨을 알 수 있다. 이와 같은 모의 결과로부터 변환점은 임계각과 밀접한 관련이 있으며, 임계 거리보다는 약간 원거리에서 음파 전달 조건이 변환됨을 확인할 수 있다. 또한 Eq. (5)에서 보상 전달손실의 평균을 취하는 거리 구간에 따라 변환점이 다소 차이가 있을 수 있으며, 송신기로부터 임계 거

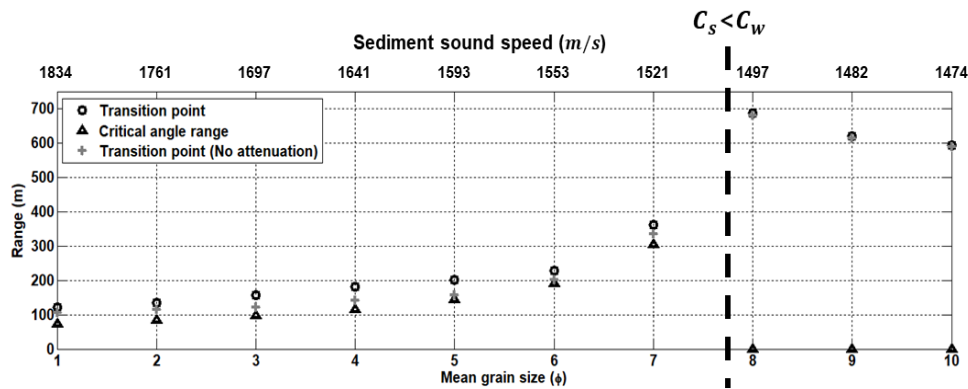


Fig. 5. Transition points estimated including sediment attenuation (○) and without sediment attenuation (+) and their comparison with the critical range (△) for a Pekeris waveguide.

Table 1. Geoacoustic parameters estimated by the empirical relationship with the mean grain size.

MGS	1 ϕ	2 ϕ	3 ϕ	4 ϕ	5 ϕ	6 ϕ	7 ϕ	8 ϕ	9 ϕ	10 ϕ
c_s (m/s)	1834	1761	1697	1641	1593	1553	1521	1497	1482	1474
ρ_s (g/cm ³)	2.16	2.01	1.88	1.76	1.65	1.56	1.47	1.41	1.35	1.31
α_s (dB/ λ)	0.88	0.89	0.97	1.14	0.72	0.22	0.13	0.09	0.08	0.09

리의 최소 3배 이상 되는 구간에 대한 평균 계산을 하는 경우에 임계 거리에 수렴하였다.

다음 단계로 음속 구조와 음원 수심의 변화에 따른 변환점의 변동성을 파악하고자, 퇴적층의 감쇠 계수를 고려하지 않은 Pekeris 도파관에서 SAVEX15 실험 당시의 측정된 수직 음속 구조와 음원 수심이 중층에 위치하지 않은 경우에 대해 각각 RAM 모델을 이용하여 전달손실을 모의한 후 변환점을 추정하고 임계거리와 비교하였다. Fig. 6은 수층 음속이 1500 m/s로 일정한 경우 퇴적층 음속이 1521 m/s인 평균 입도 7 ϕ 의 사니질 퇴적층을 가정한 Pekeris 도파관에서 송·수신기 수심 51 m에서 930 Hz 신호의 전달손실 예측 결과이다. 회색 실선은 모의된 거리에 따른 전달손실 곡선이며 검정색 실선은 보상 전달손실 곡선이다. 보상 전달손실은 약 25.3 dB의 여분 전달손실(점선)을 기준으로 거리에 따라 상하 진동하는 것을 확인할 수 있으며, 이 값으로부터 추정된 변

환점은 음원으로부터 약 335 m 지점이 된다. 동일한 Pekeris 도파관 환경에서 수직 음속 구조만 SAVEX15 실험해역의 음속구조[Fig. 2(a)]를 갖는 경우의 모의 결과는 Fig. 7과 같다. 계산된 보상 전달손실은 약 23.2 dB의 여분 전달손실을 가지며, 이 경우 변환점은 약 211 m로 등음속일 경우에 비해 약 125 m 짧아진다. 이는 음향채널을 통해 전파되는 다양한 경로의 음선들이 서로 간섭을 일으켜 해양 경계면에 의한 반사 신호가 영향을 미치지 이전부터 원통형 분산 환경으로 전환됨을 의미한다.

이와 같이 수층 음속구조에 따른 변환점 차이는 퇴적층 입도가 거칠어질수록 줄어든다(Fig. 8). 예를 들어 퇴적층의 음속이 1697 m/s의 사질 퇴적층일 경우 수층 음속구조에 따른 차이는 불과 5 m 이내로 줄어든다. 이는 퇴적층의 음속이 빨라짐에 따라 임계 거리가 줄어들고, 따라서 음향채널에 의해 발생하는 굴절파들의 상호 간섭이 영향을 일으키기 전에 해저

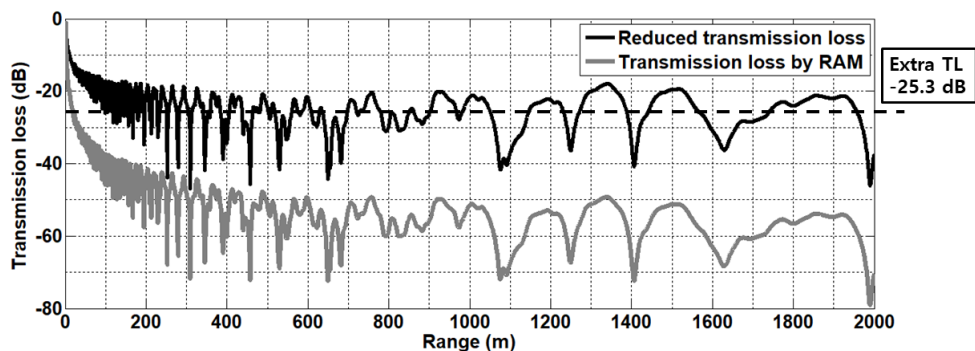


Fig. 6. Simulation results of transmission loss (gray line), reduced transmission loss curve (black line) and extra transmission loss line (dashed line) predicted in Pekeris waveguide without consideration of sediment attenuation.

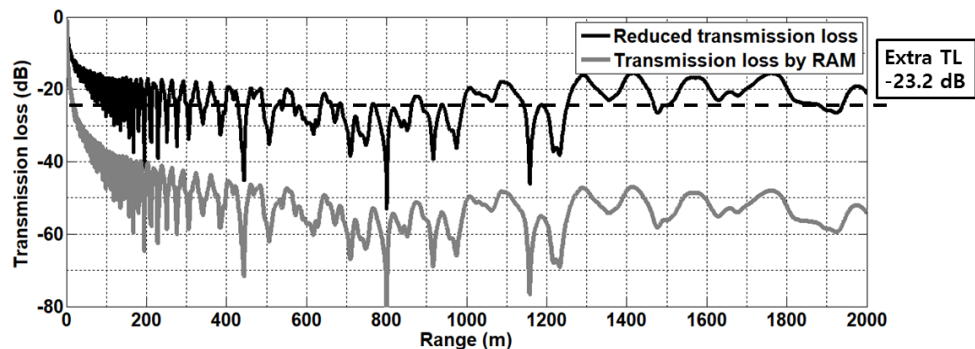


Fig 7. Simulation results of transmission loss (gray line), reduced transmission loss curve (black line) and extra transmission loss line (dashed line) predicted using the SSP measured at SAVEX15 in Pekeris waveguide without consideration of sediment attenuation.

면 반사파에 의한 간섭이 음전달 조건을 구형에서 원통형으로 변환시키는 요인으로 작용함을 의미한다. 반면에 수층의 음속이 퇴적층의 음속보다 큰 경우에는 등음속일 경우 변환점 거리가 큰 폭으로 증가하는 반면, 음향채널을 형성하는 경우 변환점 거리가 완만하게 소폭 증가하였다. 이는 해저면 반사파의 큰 감쇠손실에 의해 음향에너지가 음향채널을 중심으로 전파되어짐을 의미한다.

또한 변환점의 주파수 의존성을 확인하기 위해 해상 실험에서 사용한 140 Hz, 240 Hz, 410 Hz, 605 Hz, 800 Hz, 930 Hz에 대해 동일한 Pekeris 도파관에서 계산된 변환점은 약 310 m~390 m로 주파수에 따른 경계면에 의한 반사 특성의 차이로 인한 변동성이 발생할 수 있음을 확인하였으며, 마찬가지로 수층의

수직 음속 구조만 SAVEX15 실험해역의 음속구조를 갖는 경우의 모의 결과에서도 변환점이 150 m~290 m의 주파수에 따른 변동폭을 갖는 것으로 확인되었다.

다음 단계로 앞서 모의한 동일한 Pekeris 도파관에서 SAVEX15 실험 해역의 음속 구조를 갖는 경우에 실제 음원 수심이었던 23 m의 경우와 수층의 중심인 51 m에 음원이 존재할 경우에 대한 변환점 차이를 조사하였다(Fig. 9). 음원 수심이 중심보다 얕은 수심(23 m)에 위치할 때 모의된 변환점 거리는 25 m~65 m 범위에서 증가하였으며, 평균입도가 작아질수록 그 차이가 증가하는 양상을 보였다. SAVEX15 실험 해역의 표층 퇴적층 평균 입도인 약 7 ϕ 의 경우에는, 음원 수심이 51 m에서 23 m로 이동할 때 약 26 m 거리만큼 변환점 거리가 증가하는 것으로 모의되었다.

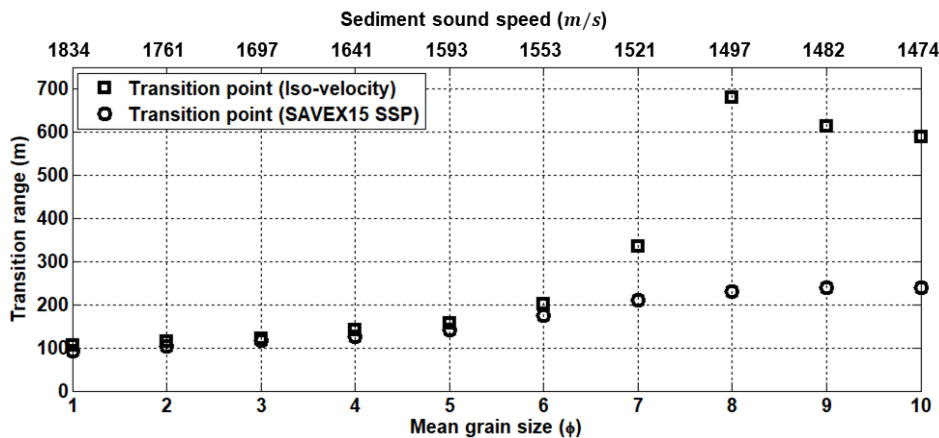


Fig 8. Comparison of transition points predicted using constant SSP and the SVP of SAVEX15 in Pekeris waveguide without consideration of sediment attenuation.

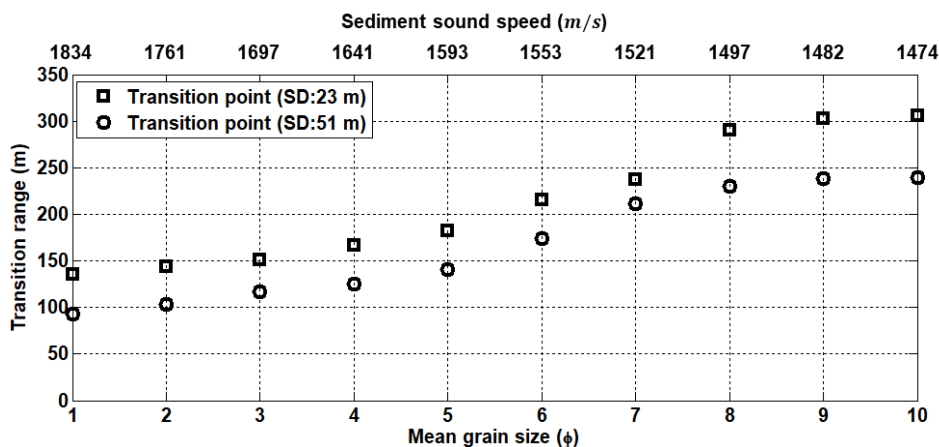


Fig 9. Comparison of transition points for source depths of 23 m and 51 m predicted using the SVP of SAVEX15 in Pekeris waveguide without consideration of sediment attenuation.

이와 같이 측정된 전달 손실 곡선을 이용하여 계산된 변환점은 주파수, 음원 수심, 음속 구조의 변화 등과 같은 환경 변동성에 의해 어느 정도의 차이를 나타낼 수 있으며, 변환점 추정을 통한 임계 거리에 측 및 퇴적층 음속 추정과 같은 연구를 수행함에 있어서 다양한 환경 변동성을 고려한 시뮬레이션 결과와 그 영향을 정확히 파악하는 과정이 필요함을 알 수 있다.

IV. 해상실험 자료를 통한 변환점 추정

II장에서 언급되었듯이 SAVEX15 실험에서는 저주파 예인 음원이 송수신기 거리 590m~6300m 범위에서 음원 수심 23m을 유지하면서 신호를 송신하였다. 수직 네스티드 선배열 수신기에는 수심변화를 모니터링하기 위해 심도 기록계가 장착되어있었으며, 실험이 진행되는 동안 수직 선배열은 조류에 의한 영향으로 약 5m의 수심 변화가 발생했다. 따라서 각 수신기에 수신된 신호로부터 거리에 따른 전달손실을 추정 후 인접한 수신기에서 수신된 전달손실과 내삽법을 이용해서 수심 변동성을 보정한 거리 및 수심에 따른 전달손실 음장을 도출하였다. 이렇게 획득한 실험 해역의 전달손실 음장으로부터 특정 수심에서 거리에 따른 전달손실을 추출하였으며, 이 전달손실 곡선을 이용하여 음파전달 조건의 변환점을 평가하였다. 수신기로부터 약 590 m~6300 m 범위에서 측정된 전달손실 중에서 해저면이 102 m의 평균 수심에서 ± 1 m 이내로 비교적 평탄한 해저면을 갖는 범위인, 수신기로부터 거리 약 2000 m 이내의 음장 중 수층의 중심인 수심 51 m에 해당하는 전달손실(회색 실선)을 이용하여 변환점을 추정하였다. Fig. 10(a)는 앞서 제시된 Eq. (5)을 이용하여 계산된 보상 전달손실(검은색 실선)과 여분 전달손실(점선)을 보여준다. 보상 전달손실 계산에 사용한 거리에 따른 수층에서의 흡수손실(α)은 주파수 1 kHz에서 5.7×10^{-5} dB/m로, 계산에 사용된 2000m 거리 내에서 약 0.1 dB 이내의 손실을 가지므로 무시 가능하다.^[12] 평가된 여분 전달손실은 약 25.3 dB이며, 이로부터 약 339m의 변환점 거리를 추정할 수 있다.

추정된 변환점은 음파 전달 모델인 RAM을 이용

하여 모의된 전달손실로부터 예측한 결과와 비교하였다. 모델 입력에 사용된 수층의 음속과 지형 정보는 SAVEX15 실험 해역에서 측정된 UCTD와 멀티빔 음향측심기 자료를 사용하였으며, 퇴적층 지음향인 자료는 실험 해역의 표층 평균 입도 (7ϕ)에 해당하는 지음향 인자 예측치(음속: 1521 m/s)가 사용되었다.^[11] 수심 23 m에서 예인되는 음원에서 송신한 음파가 수심 51 m의 고정되어 있는 수신기에서 수신되는 음파 전달을 모의하기 위해 가역정리(Reciprocity principle)를 적용, 고정된 음원에서 거리별 전달손실 모의를 통해 모의되었다. 이렇게 얻은 전달손실 중 실제 분석에 사용되어진 송수신기 거리 590m~2000 m 범위의 전달손실만을 이용하여 보상 전달손실이 추정되었으며, 여분 전달손실은 약 25 dB, 이를 이용하여 계산된 변환점 거리는 약 315 m로 예측되었다 [Fig. 10(b)]. 음전달 모델로부터 예측된 변환점은 앞서 실제 측정된 전달손실을 이용한 변환점과 유사한 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있었으며, 발생된 거리 오차는 약 25 m로 이는 해저면 감쇠계수 및 음속의 부정확성을 고려하면 충분히 발생할 수 있는 오차 범위 안에 위치하는 것으로 판단된다. 이와 같은 방법으로 앞서 SAVEX15에서 추정된 여분 전달손실(25.3 dB)과 변환점(339 m)에 해당하는 퇴적층 음속을 음파 전달 모델인 RAM을 이용하여 역으로 추정해본 결과 퇴적층 음속이 1510 m/s인 경우에 유사한 여분 전달손실(25.3 dB)과 변환점(340 m)을 갖는 것으로 확인되었다. 이는 실험 해역의 표층 평균 입도(7ϕ)에 해당하는 지음향 인자 예측치(음속 : 1521 m/s)^[11]와 유사하게 나타났으며, 이를 통해 측정된 전달 손실을 이용하여 빠르고 간단하게 실험 해역의 퇴적층 물성을 대략적으로 파악할 수 있음을 확인하였다.

III장에서 소개되어진 변환점은 수층과 퇴적층의 음속비에 의해 결정되는 임계 거리와 유사한 지점에서 발생함을 확인하였으며, 변환점을 계산하기 위해 사용되는 여분 전달손실은 송·수신기간 거리가 0 m에서부터 임계 거리의 최소 3배 이상인 거리에 대한 전달 손실 곡선을 사용하여 추정한 경우에 변환점이 임계거리에 수렴한다. 하지만 SAVEX 15 실험에서는 590m~2000m 구간의 전달손실 측정치를 사용하

여 추정되었기 때문에 추정된 변환점 거리는 송수신기 거리 0 m ~ 590 m까지의 누락된 전달손실로 인하여 실제 실험해역의 변환점과는 차이를 보일 수도 있다. 따라서 실측치와 유사한 모의 결과를 보인 Fig. 10(b)의 전달손실 곡선 전구간 즉, 0 m ~ 2000 m 구간을 이용하여 보상 전달손실 및 여분 전달손실을 재추정 하였다[Fig. 11(a)]. 재추정된 여분 전달손실은 23.8 dB, 변환점 거리는 약 240 m로, 0 m ~ 590 m까지

의 보상 전달손실이 누락된 경우의 변환점과는 약 75 m의 차이를 보였다.

위의 환경에서 음원 수심을 수층의 중심인 51 m로 이동한 경우의 예측 결과에서는 여분 전달손실이 약 23.2 dB, 변환점 거리는 약 210 m로 예측되었다[Fig. 11(b)]. III장의 결과에서 거리에 따라 수심이 일정한 환경에서 퇴적층의 평균입도가 7ϕ 인 경우 음원 수심이 23 m에서 51 m로 이동할 때 약 26 m 거리만큼 변환

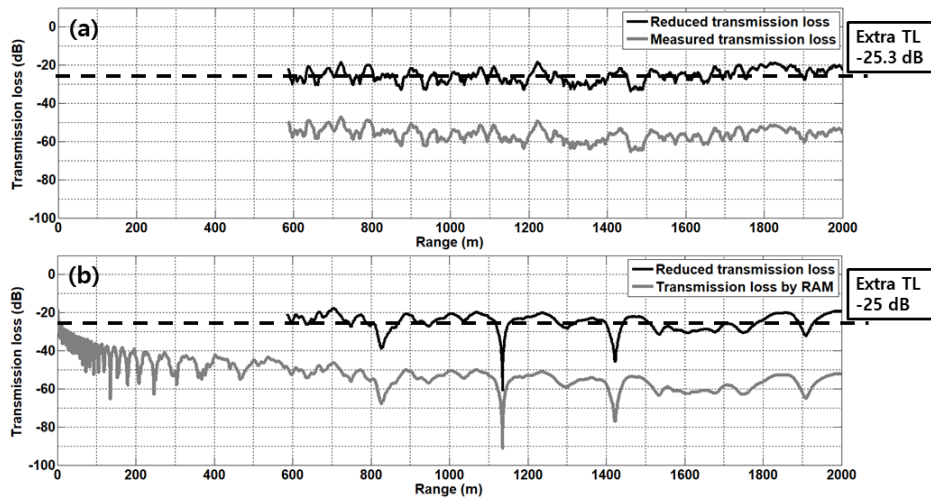


Fig. 10. Transmission loss (gray line), reduced transmission loss curve (black line) and extra transmission loss line (dashed line) (a) measured at SAVEX15 and (b) simulated by the RAM acoustic model using the geoacoustic parameters corresponding to the mean grain size of surficial sediment of SAVEX15 site. The source depth was 23 m and the transmission loss data corresponding to the range of 590 m - 2000 m were used.

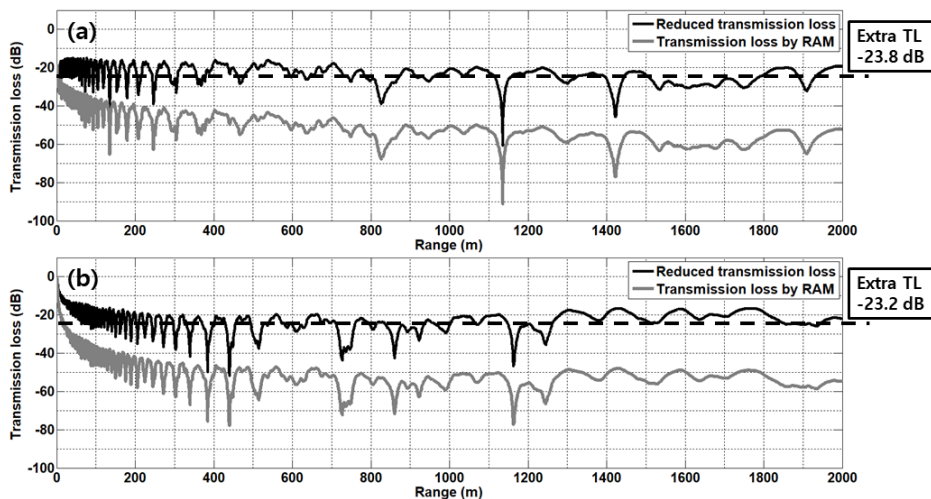


Fig 11. (a) Transmission loss (gray line), reduced transmission loss curve (black line) and extra transmission loss line (dashed line) simulated using the geoacoustic parameters corresponding to the mean grain size of surficial sediment of SAVEX15 site. The source depth was 23 m and the transmission loss data corresponding to the range of 0 m - 2000 m were used. (b) same as (a) except for source depth. The source depth was 51 m.

점 거리의 감소를 보였는데, SAVEX 15 해역의 실제 수심을 이용하여 모의한 예측 결과에서는 약 30m의 변환점 거리 차이를 보였다. 따라서 SAVEX 15 실험 환경을 모의한 음파 전달 모델의 변환점 예측 결과로부터, 송신기로부터 약 210m 떨어진 위치가 이 실험 해역에서 음원 수심이 수층의 중심(51 m)에 위치한 경우의 음파 전달 조건 변환점으로 판단할 수 있으며, 이 결과로부터 SAVEX15 환경에서는 변환점을 결정하는 우세인자가 해저면 특성 보다는 음향채널 특성임을 알 수 있다.

V. 요약 및 결론

본 논문에서는 천해 해양환경에서 측정된 거리에 따른 전달손실 곡선을 이용하여 음파 전달조건이 구형 분산에서 원통형 분산으로 전환되는 변환점을 예측하고 이 변환점과 해저면 음속과의 관계를 파악하고자 하였다. 결론적으로 수층의 음속이 등음속일 경우 변환점은 해저면 임계각과 밀접한 관계가 있다. 하지만, 수층의 음속이 등음속이 아닐 경우와 음원과 수신기의 위치가 수층의 중심에 위치하지 않을 경우 이에 대한 고려가 필요하며, 해저면 감쇠계수의 차이에 따라 변환점은 실제 임계거리에 비해 다소 증가함을 알 수 있었다. 또한, 주파수 차이에 따른 경계면에서의 음파 반사 및 간섭 특성에 의한 변환점의 변동성도 나타나는 것을 확인하였다. 이와 같이 변환점은 음원 수심, 음속 구조, 주파수 등의 환경 변동성에 의해 추정치의 차이를 나타낼 수 있고, 다양한 환경 변동성들에 따라 변환점 추정 결과의 범위 오차 역시 증가할 수 있으므로 다소 복잡한 해양 환경에서의 변환점 추정은 음파 전달 환경의 다양한 환경 변동성을 고려한 시뮬레이션을 이용하여 변동 가능성에 대한 다양한 검증 및 접근 방법이 필요하다. 이러한 결과들을 응용한다면 수층의 음속 변화를 무시할 수 있을 경우 수신된 전달손실을 이용하여 해저면 음속 및 감쇠계수 추정이 가능할 수도 있을 것으로 판단된다.

본 논문에서는 SAVEX15 실험에서 측정된 거리에 따른 전달손실 자료로부터 실험해역의 변환점을 추정하기 위한 분석을 수행하였고, 실제 음원 수심이

있던 23 m의 조건에서 변환점은 약 240 m로 추정되었다. 또한 음원을 수층의 중심인 51 m로 이동시킨 후 추정된 변환점은 약 210m로 추정되었다. 이는 등음속인 경우에 실험해역의 평균입도에 해당하는 지음향 인자를 이용하여 모의된 전달손실로부터 추정된 변환점 거리(335 m)보다 약 125 m 짧은 것으로 SAVEX15 환경에서는 변환점을 결정하는 우세인자가 해저면 특성 보다는 음향채널임을 보여준다.

SAVEX15 실험해역은 퇴적층의 음속이 비교적 낮은, 입자의 크기(평균입도 7ϕ)가 작은, 따라서 해저면 반사손실이 비교적 큰 지역이다. 이러한 해역에서 수층에 음향채널이 존재함에 따라 음전달이 음향채널에 크게 영향을 받는(일반적으로 천해로서는 발생 빈도가 매우 드문) 특이한 음전달 특성을 보였다. 추후 다양한 퇴적층 구성성분에 따른 중장거리 음전달 실험을 통한 변환점 추정 및 이와 해저면 지음향 인자와의 연관성 연구가 지속적으로 수행된다면 변환점 분석을 통한 해저면 지음향 인자 추정 가능성이 파악하는데 도움이 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술원의 남서해 천해역 해저퇴적층 지음향 특성 연구(PE99531)의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. R. J. Urick, *Principle of Underwater Sound 3rd ed.* (Mcgraw-Hill, New York, 1983), pp. 111-114.
2. C. L. Pekeris, *GSA Memoirs, Propagation of Sound in the Ocean*, <https://pubs.geoscienceworld.org/books/book/33/chapter/3786458/>
3. G. V. Frisk and J. F. Lynch, "Shallow water waveguide characterization using the Hankel transform," *J. Acoust. Soc. Am.* **76**, 205-216 (1984).
4. D. R. Del Balzo, C. Feuillade, and M. M. Rowe, "Effects of water-depth mismatch on marched-field localization in shallow water," *J. Acoust. Soc. Am.* **83**, 2180-2185 (1988).
5. J. W. Choi and P. H. Dahl, "First-order and zeroth-order head waves, their sequences, and implications for geoaoustic inversion," *J. Acoust. Soc. Am.* **119**,

3660-3668 (2006).

6. M. J. Buckingham and E. M. Giddens, "On the acoustic field in a Pekeris waveguide with attenuation in the bottom half-space," *J. Acoust. Soc. Am.* **119**, 123-142 (2006).
7. X. Lurton, *An Introduction to Underwater Acoustics 2nd ed.* (Springer, Heidelberg, 2002), pp. 35-36.
8. D. Tang, F. S. Henyey, Z. Wang, K. L. Williams, D. Rouseff, P. H. Dahl, J. Quijano, and J. W. Choi, "Mid-frequency acoustic propagation in shallow water on the New Jersey shelf: Mean intensity," *J. Acoust. Soc. Am.* **124**, EL85 (2008).
9. G. V. Frisk, *Ocean and Seabed Acoustics : a theory of wave propagation* (Prentice-Hall, New Jersey, 1994), pp. 145-167.
10. M. D. Collins, "User's guide for RAM versions 1.0 and 1.0p" Naval Research Laboratory, Tech. Rep., Washington, DC, 1-14, 1995.
11. R. T. Bachman, "Acoustic and physical property relationships in marine sediment," *J. Acoust. Soc. Am.* **78**, 616-621, (1985).
12. R. E. Francois and G. R. Garrison, "Sound absorption based on ocean measurements: Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption," *J. Acoust. Soc. Am.* **72**, 1879-1890 (1982).

▶ 김 병 남 (Byoung-Nam Kim)



1997년 2월: 세명대학교(학사)
 1999년 8월: 성균관대학교(석사)
 2007년 8월: 성균관대학교(박사)
 2007년 8월 ~ 현재: 한국해양과학기술원
 책임연구원

저자 약력

▶ 권 혁 중 (Hyuckjong Kwon)



2013년 2월: 한양대학교(학사)
 2013년 ~ 현재: 한양대학교 석·박사 통합
 과정

▶ 최 지 웅 (Jee Woong Choi)



1996년 2월: 한양대학교(학사)
 1998년 2월: 한양대학교(석사)
 2002년 8월: 한양대학교(박사)
 2002년 11월 ~ 2007년 8월: Applied Physics
 Lab., Univ. of Washington, USA, Research
 Associate
 2007년 9월 ~ 현재: 한양대학교 해양융합
 공학과 교수