

Article

황해에서 저주파 음파의 해저손실 변동

김 봉 채*

한국해양연구원 해양환경연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29

Bottom Loss Variation of Low-Frequency Sound Wave in the Yellow Sea

Bong-Chae Kim *

Marine Environment Research Department, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : The sound wave in the sea propagates under the effect of water depth, sound speed structure, sea surface roughness, bottom roughness, and acoustic properties of bottom sediment. In shallow water, the bottom sediments are distributed very variously with place and the sound speed structure varying with time and space. In order to investigate the seasonal propagation characteristics of low-frequency sound wave in the Yellow Sea, propagation experiments were conducted along a track in the middle part of the Yellow Sea in spring, summer, and autumn. In this paper we consider seasonal variations of the sound speed profile and propagation loss based on the measurement results. Also we quantitatively investigate variation of bottom loss by dividing the propagation loss into three components: spreading loss, absorption loss, and bottom loss. As a result, the propagation losses measured in summer were larger than the losses in spring and autumn, and the propagation losses measured in autumn were smaller than the losses in spring. The spreading loss and the absorption loss did not show seasonal variations, but the bottom loss showed seasonal variations. So it was thought that the seasonal variation of the propagation loss was due to the seasonal change of the bottom loss and the seasonal variation of the bottom loss was due to the change of the sound speed profile by season.

Key words : sound propagation loss, bottom loss, spreading loss, absorption loss, sound speed profile

1. 서 론

해수중에서 음파는 수심, 음속구조, 해표면 거칠기, 해저면 거칠기 및 해저지질의 음파특성 등의 영향을 받으면서 전파하는 것으로 알려져 있다(Urick 1982). 천해의 경우 해저지질은 공간적으로 다양하게 분포하고 있고, 해수중의 음속구조도 시공간적으로 심하게 변동하고 있다. 음파가 수심이 얇은 천해의 해수중을 전파하는 경우 음파는 해표면 및 해저면으로부터 빈번한 반사를 수반한다. 그런

데 해표면 반사에 의한 저주파 음파의 손실은 비교적 작은 반면, 해저면 반사에 의한 저주파 음파의 손실은 무시할 수 없을 정도로 상당히 큰 것이 보통이다.

특히 천해에서는 해저지질이 수중음파 전파에 지대한 영향을 미치고 있는 것으로 알려져 있다(Urick 1983). 천해에서 해저지질이 수중음파 전파에 미치는 영향에 관한 연구결과는 여러 연구자에 의해 활발하게 보고되어 왔다(Rogers *et al.* 1993; Tollefsen 1998). 그리고 최근에는 천해의 음파전파로부터 역방법을 사용하여 해저 표층퇴적물의 음속, 밀도 및 흡수계수 등 해저지질의 음향특성을 구하려는 연구도 시도되고 있다(Zhou 1985; Pignot and

*Corresponding author. E-mail : bckim@kordi.re.kr

Chapman 2001; Potty *et al.* 2003).

해수중 음속구조는 수중음파의 굴절에 영향을 미치므로 천해의 음파전파에서 중요하다. 계절에 따라 심하게 변동하는 천해의 수중 음속구조가 저주파 음파전파에 미치는 영향에 관해 일찍부터 관심을 갖기 시작하였다. 수중음파 전파실험을 실시함으로써 수심방향의 음속 기울기가 양(positive)의 값을 갖는 겨울철에 저주파 수중음파의 전파가 가장 양호하였고, 음속 기울기가 음(negative)의 가장 큰 값을 갖는 여름철에 저주파 수중음파의 전파가 가장 불량한 것을 밝히기도 하였다(Macpherson and Forthergill 1962; Kibblewhite and Denham 1968). 그러나 이러한 연구들은 오래 전에 실시된 것으로 체계적인 분석이 실시되지 못하였다.

황해에서 저주파 수중음파의 전달특성을 조사하기 위하여 황해 중앙부분에 위치하는 동일한 정선에서 봄철, 여름철 및 가을철 등 서로 다른 계절에 수중음파 전파실험을 실시하였다. 그리고 이때에는 수중음파 전파환경을 파악하기 위하여 CTD(conductivity, temperature, and depth) 관측을 실시하였다. 여기에서는 황해에서 측정된 해수중 음속 프로파일 및 수중음파 전달손실의 계절변동에 관하여 고찰하였다. 그리고 수중음파 전달손실의 계절변동을 일으키는 주요 원인으로서 해저손실에 주목하여 해저손실과 해수중 음속구조와의 관련을 조사하였고, 해저손실의 계절변동을 고찰하였다.

2. 수중음파 전파실험

황해에서 저주파 음파의 전달특성을 조사하기 위하여 Fig. 1에 나타낸 YV 정선(YV-Line)에서 수중음파 전파실험을 실시하였다. 황해의 중앙부분에 위치한 정선에서 1996~1997년 중 봄철(5월 상순), 여름철(9월 상순) 및 가을철(11월 하순) 등 서로 다른 계절에 동일한 방법으로 실험하였다. YV 정선의 전체거리는 약 74 km이며, 정점

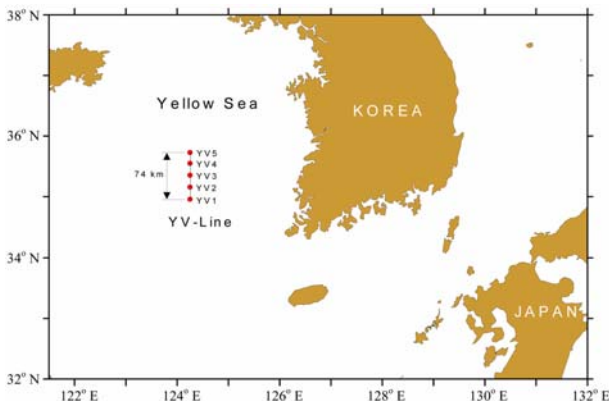


Fig. 1. Site map for sound propagation experiment.

YV1이 음파를 수신한 위치이다. 정점 YV1로부터 정점 YV5의 방향으로 정선을 따라 이동하면서 미리 정한 위치에 폭발성 음원(explosive source)을 투하하여 해수중에서 폭발시킴으로써 발생되어 전파하는 음파를 정점 YV1에 위치한 연구선에서 해수중에 내린 수중청음기로 수신하였다. 이때의 음원으로는 TNT 0.82 kg이 장전된 SUS(signal underwater sound)를 사용하였다. 이러한 음원을 약 2.78 km의 일정한 간격으로 수중음파의 전파거리가 약 1.85 km로부터 약 74.08 km까지 되도록 투하하였으며, 매 회의 전파실험에서 SUS 27개를 사용하였다. 이때 SUS의 폭발수심을 18 m로 설정하였고, 수중청음기를 각각 수심 약 8 m, 32 m 및 56 m에 위치시켰다.

수중청음기로 수신된 음파신호는 데이터 레코더에 의해 기록되었다. 음원 투하위치와 수중청음기 위치와의 거리에 따라 수중청음기에 도달하는 음파의 음압진폭이 변하므로 오실로스코프로 수신음파의 파형을 관찰하면서 측정용 증폭기의 증폭도를 적절히 조절하여 적정한 레벨의 음파신호가 수신되도록 하였다.

수중음파의 전달손실을 구하기 위해 수신한 음파신호를 신호분석기에 의하여 1/3 옥타브 밴드로 63~2000 Hz 범위의 16개 중심주파수에서 음향에너지 속밀도(acoustic energy flux density)의 분석값을 구하였다. 이때 이러한 분석값은 다중경로에 따른 음파전파의 영향을 고려할 수 있도록 약 2.4초 동안 신호분석기에서 적분하여 얻어지도록 하였다. 그 다음 수중청음기의 수신감도, 측정용 증폭기의 증폭도 및 주파수의 밴드 폭 등을 고려하여 각각의 중심주파수에서 음향에너지 속밀도의 수신레벨을 산출하였다. 이때에는 해수중 주위잡음의 영향도 고려하였다. 그리고 나서 각각의 중심주파수에서 SUS의 음원레벨(source level)(Gaspin and Shuler 1971)과 수중음파 수신레벨과의 차이로부터 각각의 전파거리에 대한 수중음파의 전달손실을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

수중음파의 전파환경

수중음파 전파실험을 실시하는 동안 해표면상에서 풍속은 약 5 m/s 이내로서 해상상태 3 이하였다. 따라서 해표면이 저주파 음파전파에 미치는 영향(Norton and Novarini 1996)은 매우 미약하였을 것으로 생각된다. 수중음파 전파실험을 실시한 정선에서 해저수심은 83~88 m의 범위로서 대체로 평탄하였으며, 해저수심의 평균은 약 85 m이었다. 실험정선에서 해저의 표층퇴적물은 대부분 점토로 구성되어 있는 것으로 보고되고 있다(KORDI 1987).

수중음파 전파실험을 실시할 때 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 실험정선에서 약 18.52 km(10마일)의 수평거리 간격

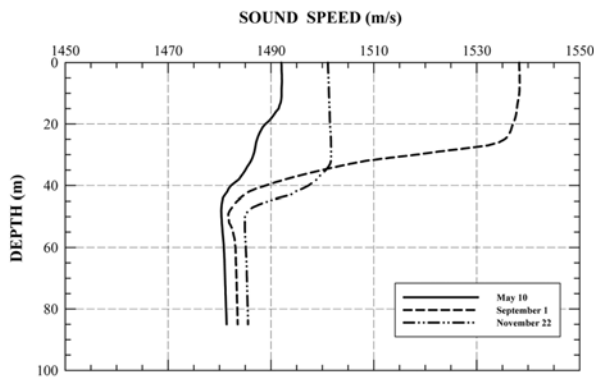


Fig. 2. Sound speed profiles by various seasons.

으로 YV1~YV5의 5개 정점을 설정하였고, 각각의 정점에서 CTD 관측을 실시하여 해수중 음속 프로파일을 구하였다. 동일한 계절의 경우 정점별 음속 프로파일은 거의 동일하였으므로 계절별로 평균하여 해수중 음속 프로파일을 구해 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 의하면 수심 약 50 m 보다 얇은 부분은 해수중 음속이 계절에 따라 심하게 변동하였지만, 수심 약 50 m 보다 깊은 부분은 계절에 관계없이 해수중 음속이 거의 일정하였다.

봄철(5월 상순)의 해수중 음속 프로파일에 의하면, 해표면으로부터 수심 약 14 m까지 표면 혼합층이 형성되어 음속은 1492 m/s로 일정하였다. 수심 14~50 m의 사이에서 음속은 수심의 증가와 함께 서서히 감소하였다. 그리고 수심 50 m부터 해저면까지의 사이에서는 등온층이 형성되어 음속은 약 1482 m/s로 일정하였다. 전체적으로 수직방향의 음속 기울기는 음의 작은 값이었다.

여름철(9월 상순)의 해수중 음속 프로파일에 의하면, 해표면으로부터 수심 약 24 m까지 표면 혼합층에 의해 음속은 1536~1538 m/s로 거의 일정하였으나, 수심에 대하여 매우 작은 음의 기울기를 갖고 있었다. 수심 24~50 m의 사이에서 수온약층이 형성되어 음속은 수심의 증가와 함께 급격히 감소하였다. 그리고 수심 약 50 m로부터 해저면까지의 사이에서 등온층이 형성되어 음속은 1482~1484 m/s로 거의 일정하였다. 전체적으로 수직방향의 음속 기울기는 음의 매우 큰 값을 갖고 있었다.

가을철(11월 하순)의 해수중 음속 프로파일에 의하면, 해표면으로부터 수심 약 33 m까지 표면 혼합층에 의해 음속이 1501~1502 m/s로 거의 일정하였다. 그러나 수심 약 33~50 m의 사이에서 수온약층이 형성되어 음속은 수심의 증가와 함께 감소하였다. 그리고 수심 약 50 m로부터 해저면까지의 사이에서는 등온층이 형성되어 음속은 1485~1486 m/s로 거의 일정하였다.

해저수심 단면, 해수중 음속 프로파일 및 해저의 표층 퇴적물 분포 등을 고려하면, 실험정선에서의 수중음파 전파환경은 대체로 거리에 따라 환경이 변하지 않는 거리독

립 환경(range-independent environment)으로 간주할 수 있었다.

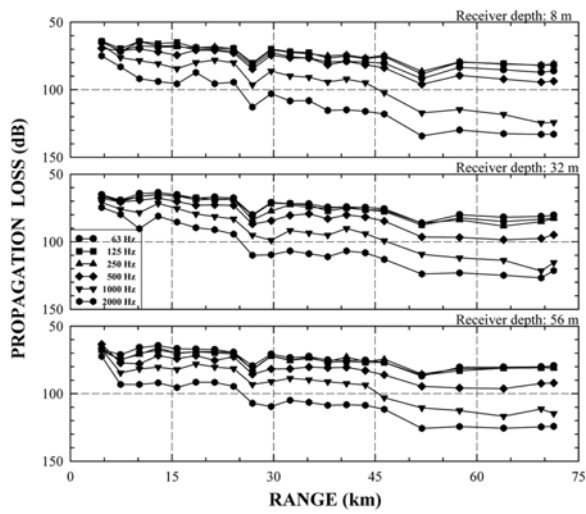
수중음파의 해저손실

수중음파 전파실험에 의해 측정된 전파거리에 대한 몇 개의 주파수 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz 및 2000 Hz 음파의 전달손실을 Fig. 3에 나타내었다. 그리고 전파거리 및 주파수에 대하여 측정된 전달손실을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3 및 Fig. 4에서 음원수심은 약 18 m이고, 수중청음기 수심은 각각 약 8 m, 32 m 및 56 m이다. 그리고 Fig. 3(a) 및 Fig. 4(a)는 봄철(5월 상순)의 측정결과이고, Fig. 3(b) 및 Fig. 4(b)는 여름철(9월 상순)의 측정결과이며, Fig. 3(c) 및 Fig. 4(c)는 가을철(11월 하순)의 측정결과이다.

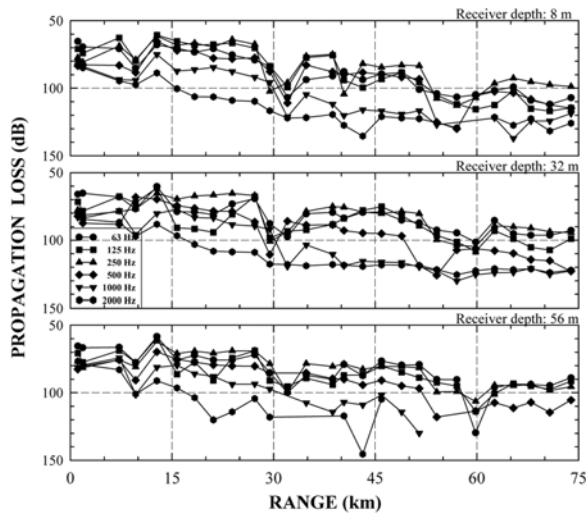
대체로 전파거리가 증가할수록 수중음파의 전달손실은 증가하였으며, 주파수 63~200 Hz의 경우 전달손실은 주파수에 의존하지 않았으나, 주파수 500 Hz 이상의 경우 전달손실은 주파수의 증가와 함께 증가하였다. 그리고 전달손실은 계절에 따라 서로 다르게 분포하고 있었으며, 가을철에 측정된 전달손실은 봄철 및 여름철에 측정된 전달손실보다 작게 나타난 반면, 여름철에 측정된 전달손실은 봄철 및 가을철에 측정된 전달손실보다 크게 나타났다. 특히 봄철과 여름철의 경우 전파거리 약 25~30 km의 간격으로 전달손실이 갑자기 증가하는 경향을 보이고 있었으며, 이러한 전달손실의 변동은 봄철의 경우보다 여름철의 경우가 더욱 현저하였다. 그러나 가을철의 경우에는 전파 거리에 따른 전달손실의 급격한 변동이 일어나지 않았다. 시간의 경과에 따른 해수중 음속구조를 연속적으로 직접 측정하지 않았기 때문에 전달손실의 급격한 변동을 일으키는 정확한 원인을 밝힐 수가 없지만, 이것은 봄철과 여름철에 황해에서 빈번하게 발생하여 전파하는 내부파에 의한 영향(Dahl *et al.* 1998)으로 추정된다.

Fig. 3(a) 및 Fig. 4(a)에 나타낸 봄철에 측정된 수중음파 전달손실의 결과에 의하면, 주파수에 대한 전달손실의 의존성은, 주파수 63~250 Hz의 경우 전달손실이 주파수의 영향을 받지 않았다. 그러나 주파수 500 Hz 이상의 경우 전달손실은 주파수에 의존하여 주파수의 증가와 함께 전달손실도 크게 증가하고 있었다. 그리고 수중청음기 수심의 차이에 대한 전달손실의 차는 약 10 dB 이내로 작게 나타나 전달손실은 수중청음기 수심에 거의 의존하지 않았다.

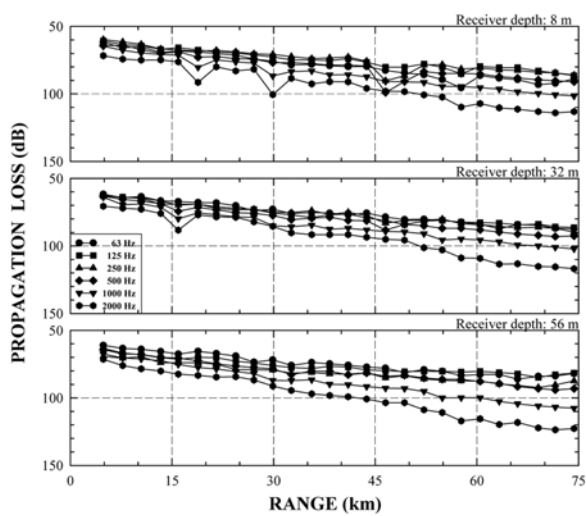
Fig. 3(b) 및 Fig. 4(b)에 나타낸 여름철에 측정된 수중음파 전달손실의 결과에 의하면, 여름철의 전달손실은 봄철 및 가을철의 전달손실에 비하여 크게 나타났으며, 전파 거리에 대한 전달손실의 변동도 다른 계절에 비하여 매우 심하게 나타나고 있었다. 이것은 해수중 음속 프로파일이



(a) May 10

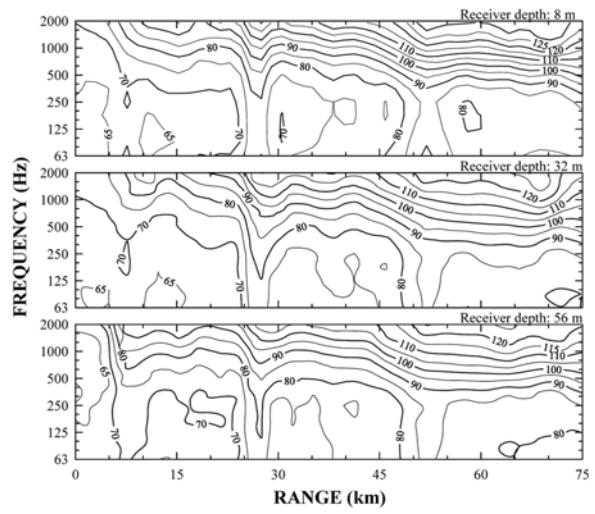


(b) September 1

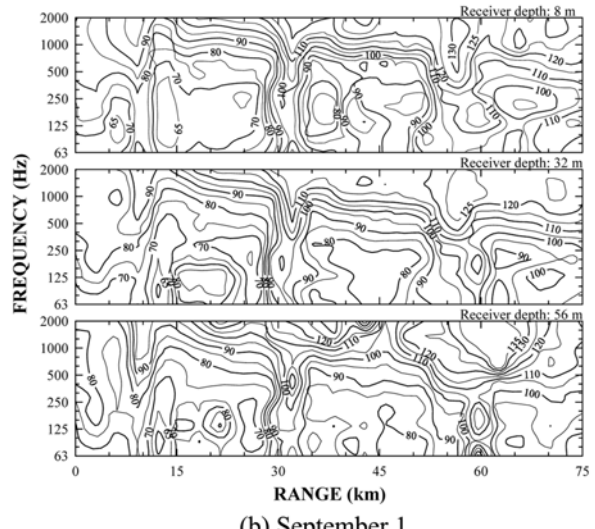


(c) November 22

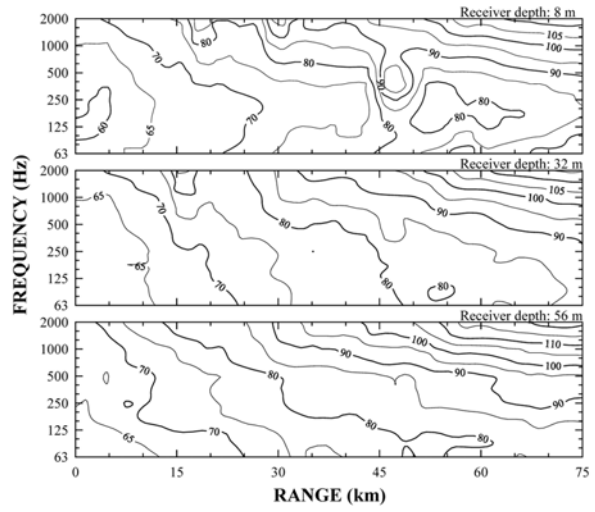
Fig. 3. Measured propagation loss versus range for 18 m deep source by various seasons.



(a) May 10



(b) September 1



(c) November 22

Fig. 4. Measured propagation loss versus range and frequency for 18 m deep source by various seasons (unit: dB).

급격한 음의 음속 기울기를 갖고 있는 것과 내부파의 영향으로 해수중 음속구조가 시간에 따라 변동함으로써 발생한 것으로 생각된다. 전달손실의 주파수에 대한 의존성은, 주파수 63~315 Hz의 경우 전달손실이 주파수에 거의 의존하지 않았지만, 주파수 500 Hz 이상의 경우 전달손실이 주파수에 의존하여 주파수의 증가와 함께 전달손실도 급격히 증가하고 있었다. 그리고 수중청음기 수심의 차이에 대한 전달손실의 차는 약 30 dB 이내로 비교적 크게 나타났다.

Fig. 3(c) 및 Fig. 4(c)에 나타낸 가을철에 측정된 수중음파 전달손실의 결과에 의하면, 가을철의 전달손실은 봄철 및 여름철의 전달손실에 비하여 작게 나타났으며, 주파수에 대한 전달손실의 의존성은 봄철 및 여름철의 경우에 비하여 작게 나타났다. 주파수 63~200 Hz에서는 전달손실이 주파수에 거의 의존하고 있지 않았으나, 주파수 315 Hz 이상에서는 주파수의 증가와 함께 전달손실이 서서히 증가하고 있었다. 그리고 수중청음기 수심의 차이에 대한 전달손실의 차는 약 20 dB 이내로서 주파수가 높을수록 전달손실의 차가 크게 나타났다.

계절별 수중음파의 전파양상을 조사할 목적으로 Fig. 2에 나타낸 해수중 음속 프로파일을 사용하여 음선경로를 계산해 Fig. 5에 나타내었다. 여기서, 음원수심은 18 m이다. 그리고 보기에 편리하도록 수평방향에 대해 각각 +10°, 0° 및 -10°로 음원에서 방사된 경우의 음선만을 도시하였고, 전파거리도 10 km 이내로 한정하여 도시하였다.

봄철의 경우 해수중 음속 프로파일은 작은 음의 음속 기울기를 갖고 있었으므로 Fig. 5(a)에 나타낸 음선경로에 의하면, 수중음파는 아래쪽으로 굴절하면서 전파하여 해저반사를 반복하였다. 봄철에 음원에서 0°로 방사된 음파는 약 1.61 km마다 해저반사를 되풀이하였고, 음원에서 각각 +10° 및 -10°로 방사된 음파는 각각 약 0.89 km마다 해저반사를 되풀이하였다. 여름철의 경우 해수중 음속 프로파일은 급격한 음의 음속 기울기를 갖고 있었으므로 Fig. 5(b)에 나타낸 음선경로에 의하면, 수중음파는 아래쪽으로 급격히 굴절하면서 전파하여 매우 빈번하게 해저반사를 반복하였다. 여름철에 음원에서 0°로 방사된 음파는 약 1.18 km마다 해저반사를 되풀이하였고, 음원에서 각각 +10° 및 -10°로 방사된 음파는 각각 약 0.68 km마다 해저반사를 되풀이하였다. 가을철의 경우 잘 형성된 표면 혼합층과 수직방향의 작은 음의 음속 기울기 때문에 Fig. 5(c)에 나타낸 음선경로에 의하면, 일부의 수중음파는 표면 혼합층 내부에서 전파하였고, 그 밖의 수중음파는 아래쪽으로 굴절하여 해저반사를 반복하였다. 가을철에 음원에서 0°로 방사된 음파는 해저에서 반사되는 일이 없이 표면 혼합층 내부에서 전파하였고, 음원에서 각각 +10° 및 -10°로 방사된 음파는 각각 약 0.86 km마다 해저반사를 되풀이

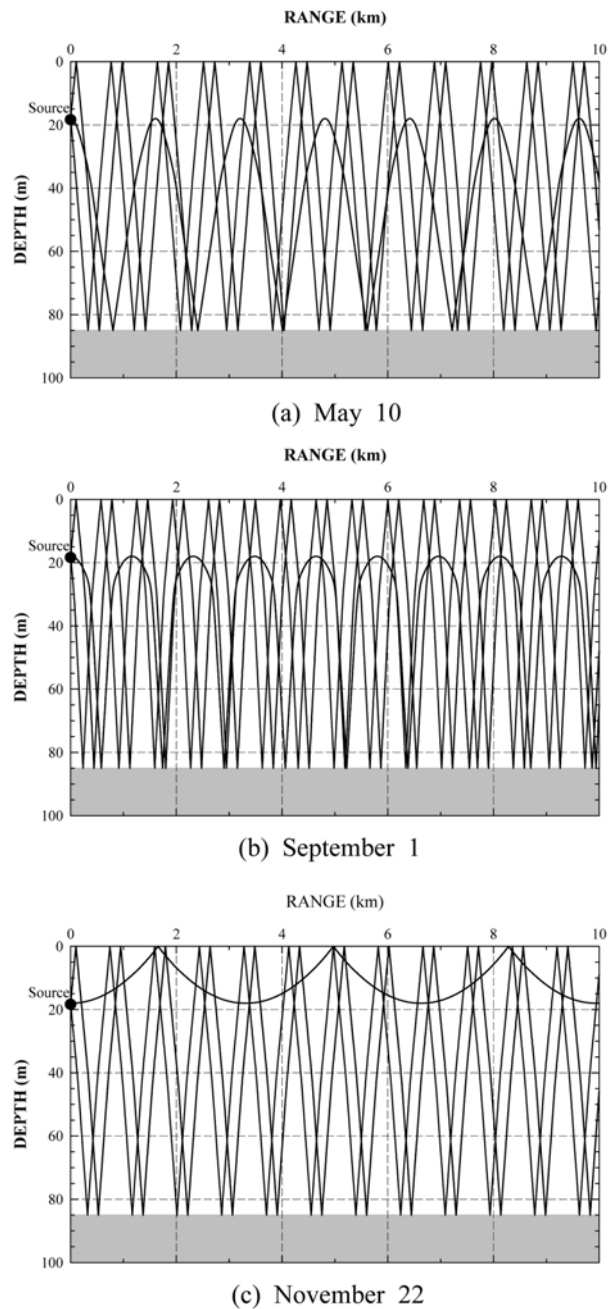


Fig. 5. Acoustic ray paths calculated by a numerical ray model for 18 m deep source by various seasons.

이하였다.

전체적으로 음파의 전파경로에 의하면, 봄철, 여름철 및 가을철 중에서 가을철의 경우 수중음파의 전파가 가장 양호하리라고 생각되고, 여름철의 경우 수중음파의 전파가 가장 불량하리라고 생각된다. 그리고 이것은 계절별 전달손실의 측정결과와 일치하였다. 따라서 Fig. 3 및 Fig. 4에 나타낸 수중음파 전달손실의 계절변동은 계절에 따른 해수중 음속 프로파일의 차이 때문에 음파가 해저와 상호작용

용하는 빈도가 달라짐에 따라 발생하는 것으로 생각된다.

거리독립 전파환경의 해수층을 전파하는 음파의 경우, 전달손실은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Dosso and Chapman 1987).

$$TL(r) = TL_S(r) + TL_A(r) + TL_B(r) \quad (1)$$

여기서, TL 은 전달손실(dB)이고, r 은 수중음파의 전파거리(km)이다. 그리고 TL_S 는 수중음파가 전파할 때 공간적으로 확산됨에 따라 생기는 손실(dB)이고, TL_A 는 음파흡수에 의한 손실(dB)이며, TL_B 는 수중음파가 전파할 때 해저에서 상호작용함에 따라 생기는 손실(dB)이다. 거리독립 전파환경의 경우 확산손실, 흡수손실 및 해저손실은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$TL_S(r) = 10 \log(r_0 r) \quad (2)$$

$$TL_A(r) = \alpha r \quad (3)$$

$$TL_B(r) = \beta r \quad (4)$$

여기서, r_0 는 해저수심이고, β 는 해저손실 계수(dB/km)이며, α 는 음파 흡수계수(dB/km)로서 다음 식으로 계산할 수 있다(Urick 1983).

$$\alpha = 1.094 \left[\frac{0.1f^2}{f^2+1} + \frac{40f^2}{f^2+4100} + 0.000275f^2 + 0.003 \right] \quad (5)$$

여기서, f 는 주파수(kHz)이다.

수중음파의 전파거리, 주파수 및 해저수심이 정해지면, 수중음파의 확산손실은 (2) 식에 의해 추정할 수 있고, 수중음파의 흡수손실은 (5) 식 및 (3) 식에 의하여 추정할 수 있다. 측정된 전달손실로부터 확산손실과 흡수손실을 빼면, 해저손실의 성분을 구할 수 있고, 이것으로부터 해저손실 계수도 구할 수 있다. 일반적으로 천해의 경우 수중음파의 확산손실 및 흡수손실은 계절변동을 무시할 수 있는 데 비하여, 해저손실은 수직방향의 음속구조에 따라 음파와 해저와의 상호작용 횟수가 달라지므로 계절변동이 생기는 것으로 생각된다.

예로서 봄철의 수중음파 전파실험으로부터 음원수심 18 m, 수중청음기 수심 32 m인 경우 주파수 100 Hz, 400 Hz 및 1600 Hz 음파의 해저손실 계수를 구한 결과, 그 값은 각각 약 0.25 dB/km, 0.39 dB/km 및 0.87 dB/km로서 주파수가 증가함에 따라 증가하고 있었다. 그리고 이때의 확산손실, 흡수손실 및 해저손실 각각을 구하여 Fig. 6에 나타내고 있다. 이들 그림에는 확산손실, 흡수손실 및 해저손실의 합에 의한 전달손실 추정값도 동시에 표시하고 있다.

Fig. 6에 의하면, 전달손실의 추정값은 전달손실의 측정

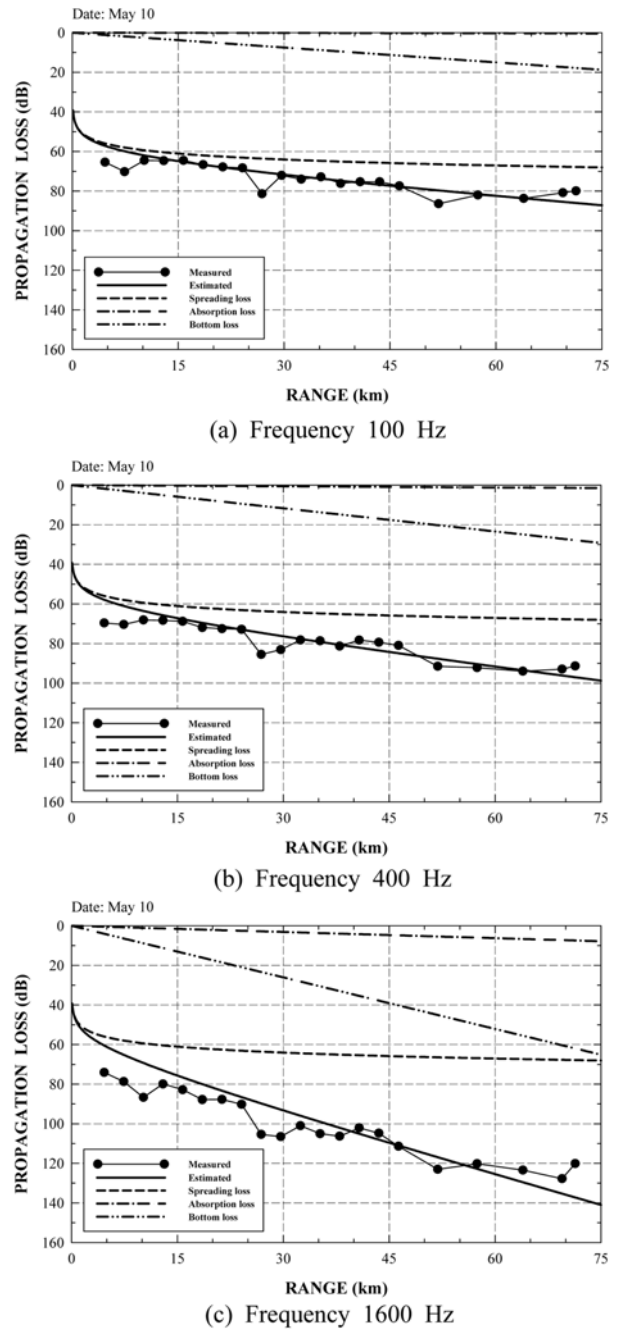


Fig. 6. Measured and estimated propagation loss versus range at selected frequencies for 18m deep source depth and 32 m deep receiver in spring-time.

값을 대체로 잘 표현하고 있다. 확산손실은 주파수에 의존하지 않았지만, 해저손실과 흡수손실은 주파수가 증가함에 따라 증가하여 주파수에 의존하였다. 그리고 확산손실이 전체의 수중음파 전달손실에 미치는 영향은 매우 두드러진 반면, 흡수손실이 전체의 전달손실에 미치는 영향은 매우 미약하였다. 주파수 및 전파거리가 각각 증가함에 따

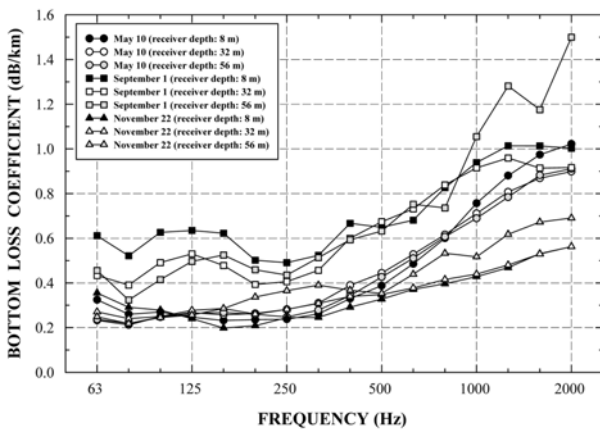


Fig. 7. Bottom loss coefficient versus frequency for 18 m deep source by various seasons.

라 해저손실은 증가하여 전체의 전달손실에 미치는 영향이 점점 증가하였다.

계절, 수중청음기 수심 및 음파 주파수에 대한 전달손실의 모든 측정값을 사용하여 해저손실 계수를 구해 Table 1 및 Fig. 7에 나타내었다. 이 결과에 의하면, 해저손실 계수는 0.20~1.50 dB/km의 범위에서 계절, 수중청음기 수심 및 주파수의 각각에 따라 변동하였다. 대체로 해저손실 계수는 동일한 조건의 경우 주파수 63~315 Hz의 범위에서 주파수에 관계없이 거의 비슷한 값을 보인 반면, 주파수 400~2000 Hz의 범위에서 주파수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있었다. 동일한 조건의

경우 수중청음기 수심에 대한 해저손실 계수의 의존성은 매우 미약한 것으로 나타났지만, 주파수 100 Hz 이하의 대역에서 수중청음기 수심이 얕을수록 해저손실 계수가 약간 증가하는 경향을 보였고, 주파수 1000 Hz 이상의 대역에서 수중청음기 수심이 깊을수록 해저손실 계수가 약간 증가하는 경향을 보였다. 그리고 동일한 조건일 때 여름철의 해저손실 계수가 가장 크게 나타난 반면, 가을철의 해저손실 계수가 가장 작게 나타나고 있었다. 이러한 계절에 따른 해저손실 계수의 변동은 계절에 따라 변동하는 수직 음속구조의 영향에 의해 수중음파가 전파할 때 해저면과 상호작용하는 횡수의 차이에 의하여 생기는 것으로 보인다.

Table 1에 나타낸 해저손실 계수를 사용해 수중음파 전파거리 및 주파수에 대한 계절별 및 수중청음기 수심별 해저손실을 계산하여 Fig. 8에 나타내었다. 대체로 동일한 조건일 때 주파수 63~315 Hz의 경우 해저손실은 주파수에 거의 의존하지 않았으나, 주파수 400 Hz 이상의 경우 해저손실은 주파수의 증가와 함께 증가하였다. 그리고 해저손실은 계절에 따라 서로 다르게 분포하고 있었으며, 가을철의 해저손실은 봄철 및 여름철의 해저손실보다 작게 나타난 반면, 여름철의 해저손실은 봄철 및 가을철의 해저손실보다 크게 나타났다. 따라서 전달손실의 계절변동은 수직 음속구조의 영향으로 생기는 해저손실의 계절변동에 의해 발생하는 것으로 생각된다. 봄철의 경우 수중청음기 수심의 차이에 대한 해저손실의 차는 약 10 dB 이내로 작

Table 1. Bottom loss coefficient versus frequency for 18 m deep source by various seasons (unit: dB/km)

Date	May 10			September 1			November 22		
	Receiver depth	8 m	32 m	56 m	8 m	32 m	56 m	8 m	32 m
Frequency (Hz)									
63	0.33	0.23	0.24	0.61	0.43	0.46	0.36	0.27	0.25
80	0.26	0.21	0.22	0.52	0.39	0.32	0.29	0.24	0.22
100	0.27	0.25	0.25	0.63	0.49	0.42	0.28	0.25	0.25
125	0.25	0.27	0.26	0.63	0.53	0.50	0.24	0.28	0.26
160	0.23	0.26	0.27	0.62	0.48	0.53	0.20	0.29	0.29
200	0.24	0.26	0.26	0.50	0.39	0.46	0.21	0.26	0.34
250	0.24	0.28	0.25	0.49	0.41	0.44	0.24	0.28	0.37
315	0.26	0.31	0.28	0.52	0.46	0.51	0.25	0.31	0.39
400	0.33	0.39	0.34	0.67	0.60	0.59	0.29	0.34	0.37
500	0.39	0.44	0.43	0.65	0.67	0.63	0.33	0.35	0.35
630	0.49	0.53	0.51	0.68	0.73	0.75	0.37	0.38	0.44
800	0.60	0.62	0.61	0.83	0.84	0.74	0.40	0.42	0.53
1000	0.76	0.71	0.69	0.94	0.91	1.05	0.43	0.44	0.52
1250	0.88	0.81	0.78	1.01	0.96	1.28	0.47	0.48	0.62
1600	0.97	0.87	0.88	1.01	0.91	1.18	0.53	0.53	0.67
2000	1.02	0.90	0.91	1.00	0.92	1.50	0.56	0.56	0.69

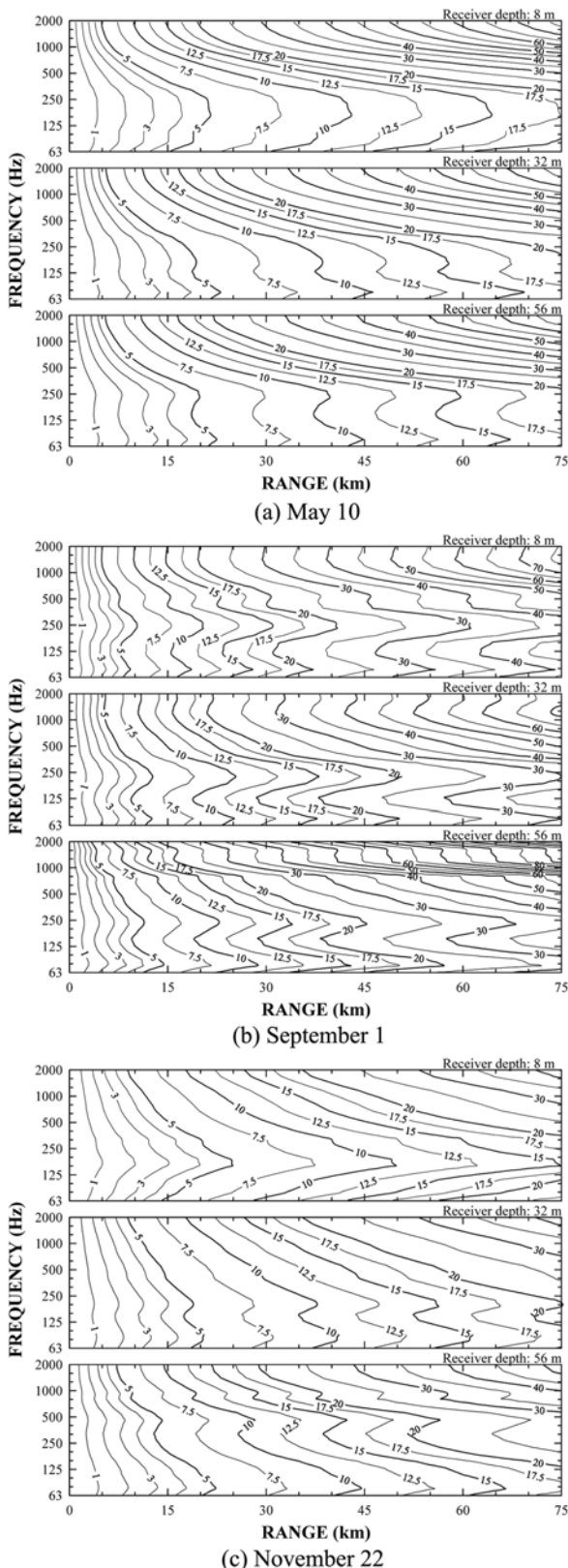


Fig. 8. Estimated bottom loss versus range and frequency for 18 m deep source by various seasons (unit: dB).

게 나타나 해저손실은 수중청음기 수심에 거의 의존하지 않았다. 그러나 여름철의 경우 수중청음기 수심의 차이에 대한 해저손실의 차는 약 30 dB 이내로 비교적 크게 나타났다. 그리고 가을철의 경우 수중청음기 수심의 차이에 대한 해저손실의 차는 약 20 dB 이내로서 주파수가 높을수록 해저손실의 차가 크게 나타났다.

4. 결 론

항해에서 저주파 수중음파의 전달특성을 조사하기 위하여 황해 중앙부분에 위치한 하나의 정선에서 봄철, 여름철 및 가을철 등 서로 다른 계절에 수중음파 전파실험을 실시하였다. 이들 실험으로부터 측정된 수중음파 전달손실의 전달특성에 관하여 고찰하였고, 수중음파 전달손실의 계절변동을 일으키는 주요 원인으로서 해저손실의 변동을 조사하였다.

수중음파의 전달손실은 계절에 따라 서로 다르게 분포하였다. 가을철에 측정된 수중음파의 전달손실은 봄철 및 여름철에 측정된 전달손실보다 약간 작게 나타났고, 여름철에 측정된 수중음파의 전달손실은 봄철 및 가을철에 측정된 전달손실보다 크게 나타났다. 계절에 의한 수중음파 전달손실의 차이는 주파수 및 전파거리의 증가와 함께 증가하였다. 수중음파 전달손실을 발생원인에 따라 확산손실, 흡수손실 및 해저손실 등의 성분으로 나누어 정량적으로 조사하였다. 그 결과 수중음파의 확산손실 및 흡수손실은 계절변동을 무시할 수 있었다. 그러나 해저손실은 수직방향의 음속구조에 따라 음파와 해저와의 상호작용 횟수가 달라지므로 계절변동이 생기는 것으로 나타났다. 해저손실 계수는 0.20~1.50 dB/km의 범위에서 계절, 수중청음기 수심 및 주파수의 각각에 따라 변동하였다. 대체로 동일한 조건일 때 주파수 63~315 Hz의 경우 해저손실은 주파수에 거의 의존하지 않았으나, 주파수 400 Hz 이상의 경우 해저손실은 주파수의 증가와 함께 증가하였다. 그리고 가을철의 해저손실은 봄철 및 여름철의 해저손실보다 작게 나타난 반면, 여름철의 해저손실은 봄철 및 가을철의 해저손실보다 크게 나타났다. 따라서 전달손실의 계절변동은 수직 음속구조의 영향으로 생기는 해저손실의 계절변동에 의해 발생하는 것으로 생각된다.

사 사

본 논문을 검토해 주시고 유익한 조언을 해주신 숭실대학교 심태보 교수님과 익명의 심사위원께 감사드립니다. 그리고 현장실험과 자료처리에 도움을 준 김병남 박사(2007년 8월 학위취득 예정)와 조홍상씨에게 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- Dahl, P.H., C.J. Eggen, D.J. Tang, and R.C. Spindel. 1998. Low-Frequency Sound Propagation in the Yellow Sea: Results from the 1996 China-U.S. Experiment. Technical Report, APL-UWTR 9804.
- Dosso, S.E. and N.R. Chapman. 1987. Measurement and modeling of downslope acoustic propagation loss over a continental slope. *J. Acoust. Soc. Am.*, 81(2), 258-268.
- Gaspin, J.B. and V.K. Shuler. 1971. Source Levels of Shallow Underwater Explosions. Naval Ordnance Laboratory Report, NOLTR 71-160.
- Kibblewhite, A.C. and R.N. Denham. 1968. Experiment on sound propagation in shallow water with velocity structure. *J. Acoust. Soc. Am.*, 44(1), 104-112.
- KORDI(Korea Ocean Research and Development Institute). 1987. Oceanographic Atlas of Korean Waters, Vol. 1, Yellow Sea. p. 107-109.
- Macpherson, J.D. and N.O. Fothergill. 1962. Study of low-frequency sound propagation in the Hartlen Point region of the Scotian Shelf. *J. Acoust. Soc. Am.*, 34(7), 967-971.
- Norton, G.V. and J.C. Novarini. 1996. The effect of sea-surface roughness on shallow water waveguide propagation: A coherent approach. *J. Acoust. Soc. Am.*, 99(4), 2013-2021.
- Pignot, P. and N.R. Chapman. 2001. Tomographic inversion of geoacoustic properties in a range-dependent shallow-water environment. *J. Acoust. Soc. Am.*, 110(3), 1338-1348.
- Potty, G.R., J.H. Miller, and J.F. Lynch. 2003. Inversion for sediment geoacoustic properties at the New England Bight. *J. Acoust. Soc. Am.*, 114(4), 1874-1887.
- Rogers, A.K. Rogers, T. Yamamoto, and W. Carey. 1993. Experimental investigation of sediment effect on acoustic wave propagation in the shallow ocean. *J. Acoust. Soc. Am.*, 93(4), 1747-1761.
- Tollefsen, D. 1998. Thin-sediment shear-induced effects on low-frequency broadband acoustic propagation in a shallow continental sea. *J. Acoust. Soc. Am.*, 104(5), 2718-2726.
- Urlick, R.J. 1982. Sound Propagation in the Sea. Peninsula Publishing, Los Altos.
- Urlick, R.J. 1983. Principles of Underwater Sound. Peninsula Publishing, Los Altos. p. 147-201.
- Zhou, J.-X. 1985. Normal mode measurements and remote sensing of sea-bottom sound velocity and attenuation in shallow water. *J. Acoust. Soc. Am.*, 78(3), 1003-1009.

Received Apr. 18, 2007

Accepted May 14, 2007