

황해에서 저주파 광대역 음원을 이용한 전달손실의 계절변동 연구

A Study on Seasonal Variation of Propagation Loss in the Yellow Sea Using Broadband Source of Low Frequency

김 봉 채*, 최 복 경*
(Bong-Chae Kim*, Bok Kyoung Choi*)

* 한국해양연구원 해양환경·기후연구본부

(접수일자: 2001년 11월 5일; 수정일자: 2002년 1월 29일; 채택일자: 2002년 2월 22일)

해수중에서 음파는 수심, 음속구조 및 해저지질 등의 영향을 받으면서 전파한다. 특히 천해의 경우 해수중의 음속구조는 시공간적으로 심하게 변동하고 있고, 해저지질도 공간적으로 다양하게 분포한다. 황해에 있어서 저주파 음파전파의 계절변동을 조사하기 위하여 황해의 중앙부분에 위치하는 동일한 정선에서 봄철, 여름철, 가을철 등 서로 다른 계절에 저주파 광대역 음원을 이용하여 음파 전파실험을 실시하였다. 그리고 이 때에는 수중음파 전파환경을 파악하기 위하여 해수중 음속구조를 측정하였다. 이 논문에서는 황해에 있어서 음속구조 및 음파 전달손실의 측정결과에 관하여 고찰하였고, 음파 전달손실의 계절변동을 조사하였다. 그 결과 여름철에 측정된 전달손실은 봄철 및 가을철에 측정된 전달손실보다 크게 나타났고, 가을철에 측정된 전달손실은 봄철에 측정된 전달손실보다 다소 작게 나타났다. 그리고 계절에 의한 전달손실의 차이는 주파수 및 전파거리의 증가와 함께 증가하였다.

핵심용어: 음파 전달손실, 해수중 음속구조, 황해

투고분야: 수중음향 분야 (5.1)

The sound wave in the sea propagates under the effect of water depth, sound velocity structure, sea surface and bottom roughness, and bottom sediment distribution. In particular the sound velocity structure in shallow water varies with time and space, and the sediment distributes very variedly with place. In order to investigate the seasonal variation of low-frequency sound propagation in the Yellow Sea, the propagation experiments were conducted along the same track in the middle part of the Yellow Sea at various seasons of spring, summer, and autumn. In this paper we consider the measurement results on the propagation loss with the sound velocity structure, and investigate the seasonal variation of the propagation 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 seasonal change of the propagation loss increased with the rise of sound frequency and the propagation range.

Keywords: Sound propagation loss, Sound velocity structure in the sea, Yellow Sea

ASK subject classification: Underwater acoustics (5.1)

I. 서론

해수중에 있어서 음파는 수심, 음속구조, 해표면 및 해저면 등 경계면의 거칠기, 해저지질 분포 등의 영향을 받으면서 전파하는 것으로 알려져 있다[1]. 천해의 경우 해수중의 음속구조는 시공간적으로 심하게 변동하고 있고, 해저지질도 공간적으로 다양하게 분포한다. 천해에서는 수심이 얇기 때문에 음파가 해수중을 전파할 때 해표면 및 해저면으로부터 빈번한 반사를 수반한다. 그런데 해표면에 의한 저주파 음파의 반사손실은 비교적 작은 반면, 해저면에 의한 저주파 음파의 반사손실은 무시할 수 없을 정도로 상당히 큰 것이 보통이다. 따라서 천해에서는 해저지질이 음파전파에 중요한 영향을 미치고 있는 것으로 알려져 있다[2]. 천해에 있어서 해저지질이 음파전파에 미치는 영향에 관한 연구결과는 현재까지도 활발하게 보고되고 있으며[3,4], 특히 최근에는 음파전파로부터 역방법을 사용하여 해저 표층퇴적물의 음파특성(음속, 감쇠계수 등)을 추정하려는 연구도 시도되고 있다[5].

음파의 굴절에 영향을 미치는 해수중 음속구조도 또한 천해의 음파전파에 중요한 영향을 미치고 있다. 계절에 따라 심하게 변동하는 천해의 수중 음속구조가 음파전파에 미치는 영향에 관하여 일찍부터 관심을 갖기 시작하여, 수심방향의 음속 기울기(sound velocity gradient)가 정(positive)의 값을 갖는 겨울철에 음파전파가 가장 양호하였고, 음속 기울기가 부(negative)의 가장 큰 값을

갖는 여름철에 음파전파가 가장 불량한 것을, 음파 전파실험으로 밝히기도 하였다[6]. 그런데 이러한 연구결과는 오래 전에 실시된 것으로 다소 체계적이지 못한 면이 있다.

황해에 있어서 저주파 음파전파의 계절변동 특성을 체계적으로 조사하기 위하여 황해 중앙부에 위치하는 동일한 정선에서 봄철, 여름철, 가을철 등 서로 다른 계절에 걸쳐 음파 전파실험을 실시하였다. 그리고 이 때에는 수중음파 전파환경을 파악하기 위하여 CTD (conductivity, temperature, and depth)관측으로부터 해수중 음속구조를 구하였다. 여기에서는 황해에 있어서 음속구조 및 음파 전달손실의 측정결과에 관하여 고찰하였고, 음파 전달손실의 계절변동을 조사하였다.

II. 실험방법 및 자료처리

천해에 있어서 저주파 음파전파의 계절변동 특성을 조사하기 위하여 황해의 중앙부분에 위치하는 한 정선에서 1996~1997년 중 봄철(5월 초순), 여름철(9월 초순) 및 가을철(11월 하순) 등 서로 다른 계절의 3회에 걸쳐 동일한 방법을 사용하여 수중음파 전파실험을 실시하였다. 음파 전파실험을 실시한 해역을 그림 1에 나타내고 있다. 여기서 YV 정선(YV-Line)이 실험을 실시한 곳으로서 이 정선의 전체 거리는 약 74 km이며, 정점 YV1이 음파를 수신한 위치이다. 항공기가 정점 YV1로부터 정점 YV5와

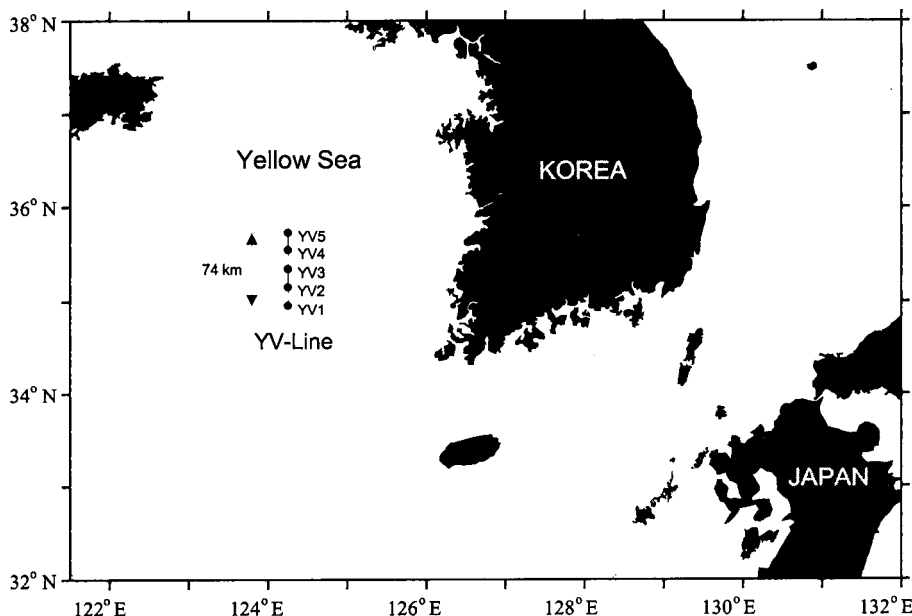


그림 1. 음파 전파실험 해역도
Fig. 1. Site map for the sound propagation experiment.

방향으로 정선을 따라 비행하면서 폭발물 음원 (explosive source)을 투하하여 해수중에서 폭발시킴으로써 발생되어 전파하는 음파를 정점 YV1의 위치에 묘박한 조사선에서 해수중에 내린 수중청음기 (hydrophone)로 수신하여 전파실험을 실시하였다. 즉, 이 실험에서는 북쪽에서 남쪽으로 전파하는 음파를 수신하였다. 이 때의 음원으로는 TNT 0.82 kg으로 되어 있는 SUS (signal underwater sound)를 사용하였다. 이러한 음원을 약 2.78 km (1.5마일)의 일정한 간격으로 음파의 전파거리가 약 1.85 km (1마일)로부터 약 74.08 km (40마일)까지가 되도록 투하하였으며, 매 회의 전파실험에서 SUS 27개를 사용하였다. 이 때 SUS를 수심 18 m에서 폭발되도록 설정하였고, 수중청음기를 각각 수심 약 8 m, 32 m 및 56 m에 위치시켜 동시에 음파를 수신하여 데이터 레코더 (data recorder)에 기록하였다. 음원과 수중청음기 사이의 거리에 따라 수중청음기에 도달하는 음파의 세기가 변하므로 오실로스코프 (oscilloscope)로 수신음파의 파형을 관찰하면서 측정용 증폭기의 증폭도 (gain)를 적절히 조절하여 적절한 레벨 (level)이 되도록 하였다.

수신한 음파신호를 신호분석기에 의하여 1/3 옥타브 밴드 (octave band)로 63 ~ 2000 Hz 범위 이내의 16개 중심주파수에서 음향에너지 속밀도 (acoustic energy flux density)의 분석값을 구하였다. 이 때 이러한 분석값은 다중경로에 따른 음파전파의 영향을 고려할 수 있도록 충분한 시간 동안 (약 2.4초) 신호분석기에서 적분하여 얻어지도록 하였다. 그 다음 수중청음기의 수신감도, 측정용 증폭기의 증폭도 및 주파수의 밴드폭 (bandwidth) 등을 고려하여 각각의 중심주파수에 있어서 음향에너지 속밀도의 수신레벨을 산출하였다. 이 때에는 해수중 주위잡음 레벨의 영향도 고려하였다. 그리고 나서 각각의 중심주파수에 있어서 SUS의 음원레벨 (source level)[7]과 음파 수신레벨과의 차이로부터 전파거리에 대한 음파의 전달손실을 구하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 음파 전파환경

음파 전파실험을 실시하는 동안 해표면상에 있어서 풍속은 약 5 m/s 이내로서 해상상태 (sea state) 3 이하였으므로, 해표면의 거칠기가 저주파 음파전파에 미치는 영향[8]은 매우 미약하리라 생각되었다.

음파 전파실험을 실시한 정선에 있어서 해저수심의 단면

을 그림 2에 나타내고 있다. 여기서 0 km (정점 YV1)인 곳이 음파수신의 위치이다. 전체적으로 수심은 83~88 m의 범위 이내로서 대체로 평탄하였으며, 그 평균은 약 85 m이었다. 실험정선에 있어서 해저의 표층퇴적물은 대부분 점토질 (clay)로 구성되어 있는 것으로 보고되고 있다[9].

음파 전파실험을 실시할 때 정선상에 있어서 약 18.52 km (10마일)의 수평거리 간격으로 YV1~YV5의 5개 정점에서 CTD관측을 실시하여 음속을 구하였다. 그 결과를 그림 3에 나타내고 있다. 전체적으로 동일한 계절의 경우 정점별 음속구조는 거의 동일한 것으로 나타난 반면, 계절에 따른 음속구조는 서로 매우 다르게 나타났다. 즉 음속구조는 뚜렷한 계절변동을 보여주고 있었다.

그림 3의 (a)에 나타낸 봄철 (5월 초순)의 음속구조에 의하면, 해표면으로부터 수심 약 14 m까지에서는 표면 혼합층 (surface mixed layer)이 형성되어 음속은 1492 m/s로 일정하였다. 수심 14~50 m의 사이에서는, 음속이 수심의 증가와 함께 서서히 감소하였다. 수심 50 m부터 해저면까지의 사이에서는 등온층 (isothermal layer)이 형성되어 음속은 약 1482 m/s로 일정하였다. 전체적으로 수심방향의 음속 기울기는 부의 작은 값이었다.

그림 3의 (b)에 나타낸 여름철 (9월 초순)의 음속구조에 의하면, 해표면으로부터 수심 약 24 m까지에서는 표면 혼합층에 의하여 음속이 1536~1538 m/s로 거의 일정하였으나, 수심에 대하여 매우 작은 부의 기울기를 갖고 있었다. 수심 24~50 m의 사이에서는 수온약층 (thermocline)이 형성되어 음속은 수심의 증가와 함께 급격히 감소하였다. 수심 약 50 m로부터 해저면까지의 사이에서는 등온층이 형성되어 음속은 1482~1484 m/s로 거의 일정하였다. 전체적으로 수직방향의 음속 기울기는 부의 매우 큰 값을

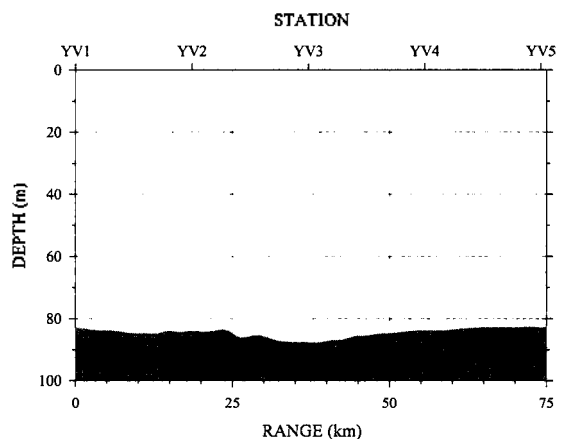


그림 2. 해저수심 단면도
Fig. 2. Water depth profiles along the experiment track.

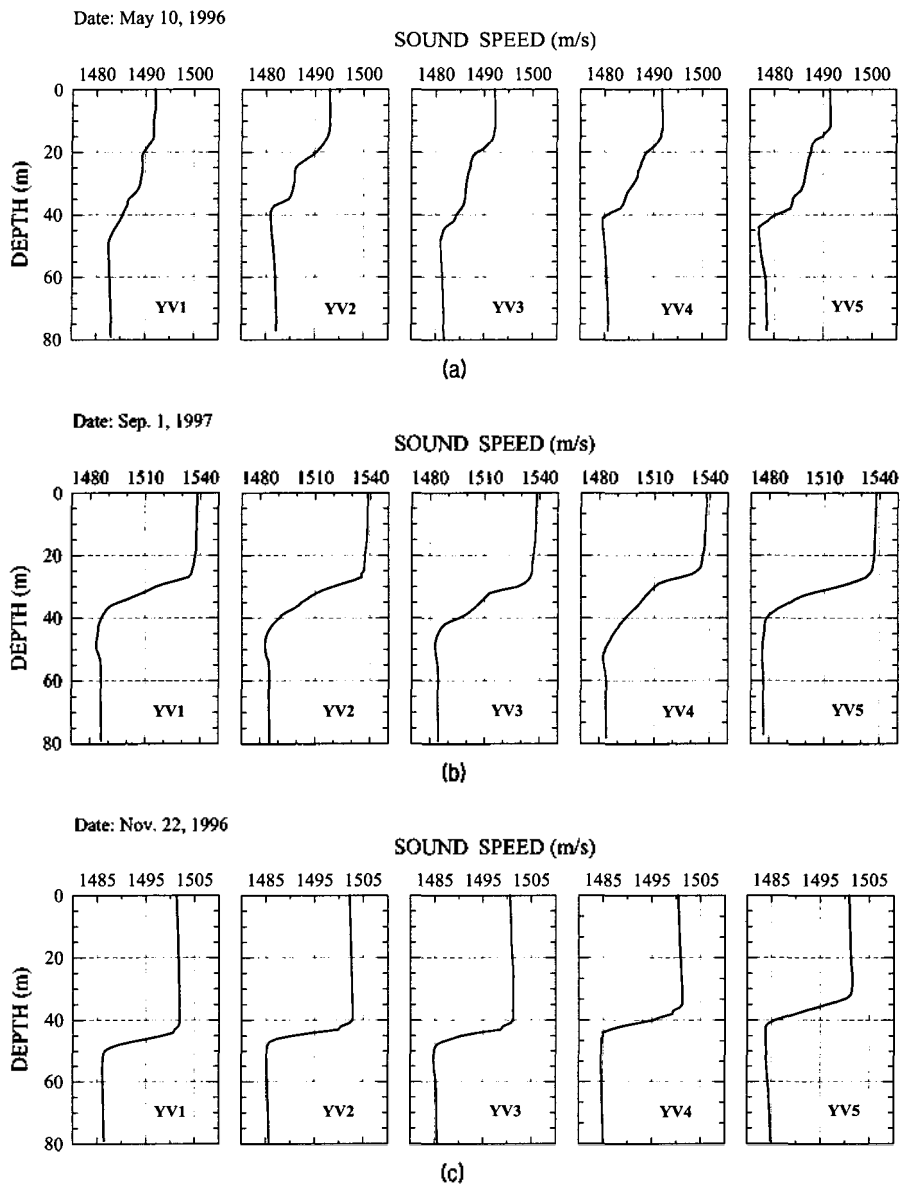


그림 3. 음속의 수직단면도
 Fig. 3. Sound velocity profiles along the experiment track.

갖고 있었다.

그림 3의 (c)에 나타난 11월의 음속구조에 의하면, 해표면으로부터 수심 약 33 m까지에서는 표면 혼합층에 의하여 음속이 1501~1502 m/s로 거의 일정하였다. 그러나 수심 약 33~50 m의 사이에서는 수온약층이 형성되어 음속은 수심의 증가와 함께 감소하였다. 수심 약 50 m로부터 해저면까지의 사이에서는 등온층의 형성으로 음속은 1485~1486 m/s로 거의 일정하였다.

해저수심 단면, 해저의 표층퇴적물 분포 및 해수층 음속구조 등 수중음파 전파환경을 종합해 보면, 실험정선에서의 음파 전파환경은 대체로 거리독립 환경 (range-

independent environment)으로 간주할 수 있을 것으로 생각된다.

3.2. 음파 전달손실

음파 전파실험으로부터 구한 주파수 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz, 800 Hz 및 1600 Hz 음파의 전달손실을 그림 4에 나타내고 있다. 여기서 음원수심은 약 18 m이고, 수중청음기 수심 (RD)은 각각 약 8 m, 32 m 및 56 m이다. 그림 4의 (a)는 봄철 (5월 초순)의 측정결과이고, 그림 4의 (b)는 여름철 (9월 초순)의 측정결과이며, 그림 4의 (c)는 가을철 (11월 하순)의 측정결과이다.

음파의 전달손실은 대체적으로 주파수가 증가할수록 증가하고 있었으며, 전파거리가 증가할수록 증가하고 있었다. 그리고 측정된 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 km의 간격으로 전달손실이 갑자기 증가하는 경향을 보이고 있었으며, 이러한 전달손실의 변동은 봄철의 경우보다 여름철의 경우가 더욱 현저하였다. 그러나 가을철의 경우에는 전파거리에 따른 전달손실의 급격한 변동이 일어나지 않았다. 시간의 경과에 따른 해수층 음속구조를 연속적으로 직접 측정하지 않았기 때문에 전달손실의 급격한 변동을 일으키는 정확한 원인을 밝히기가 곤란하지만, 이것은 봄철과 여름철에 황해에서 빈번하게 발생하여 전파하는 내부파에 의한 영향[10]으로 추정된다.

그림 4의 (a)에 나타난 봄철에 측정된 음파 전달손실의 결과에 의하면, 주파수에 대한 전달손실의 의존성은 주파수 100~200 Hz의 경우 전달손실이 주파수에 의존하고 있지 않았다. 그러나 주파수 400 Hz 이상의 경우 전달손실이 주파수에 의존하여 주파수의 증가와 함께 전달손실도 크게 증가하고 있었다.

그림 4의 (b)에 나타난 여름철에 측정된 음파 전달손실의 결과에 의하면 전달손실은 봄철 및 가을철의 전달손실에 비하여 크게 나타났으며, 전파거리에 대한 전달손실의 변동도 다른 계절에 비하여 매우 심하게 나타나고 있었다. 이것은 평균적인 음속구조가 급격한 부의 음속 기울기를 갖고 있는 것과 내부파의 영향으로 음속구조가 시간에 따라 변동함으로써 발생한 것으로 생각된다. 전달손실의 주파수에 대한 의존성은 주파수 100~200 Hz의 경우 전달손실이 주파수에 거의 의존하지 않았지만, 주파수 400 Hz 이상의 경우 전달손실이 주파수에 의존하여 주파수의 증가와 함께 전달손실도 급격히 증가하고 있었다.

그림 4의 (c)에 나타난 가을철에 측정된 음파 전달손실의 결과에 의하면 전달손실은 봄철 및 여름철의 전달손실에 비하여 작게 나타났으며, 주파수에 대한 전달손실의 의존성은 봄철 및 여름철의 경우에 비하여 작게 나타났다. 주파수 100~200 Hz에서는 전달손실이 주파수에 거의 의존하고 있지 않았으나, 주파수 400 Hz 이상에서는 주파수의 증가와 함께 전달손실이 서서히 증가하고 있었다.

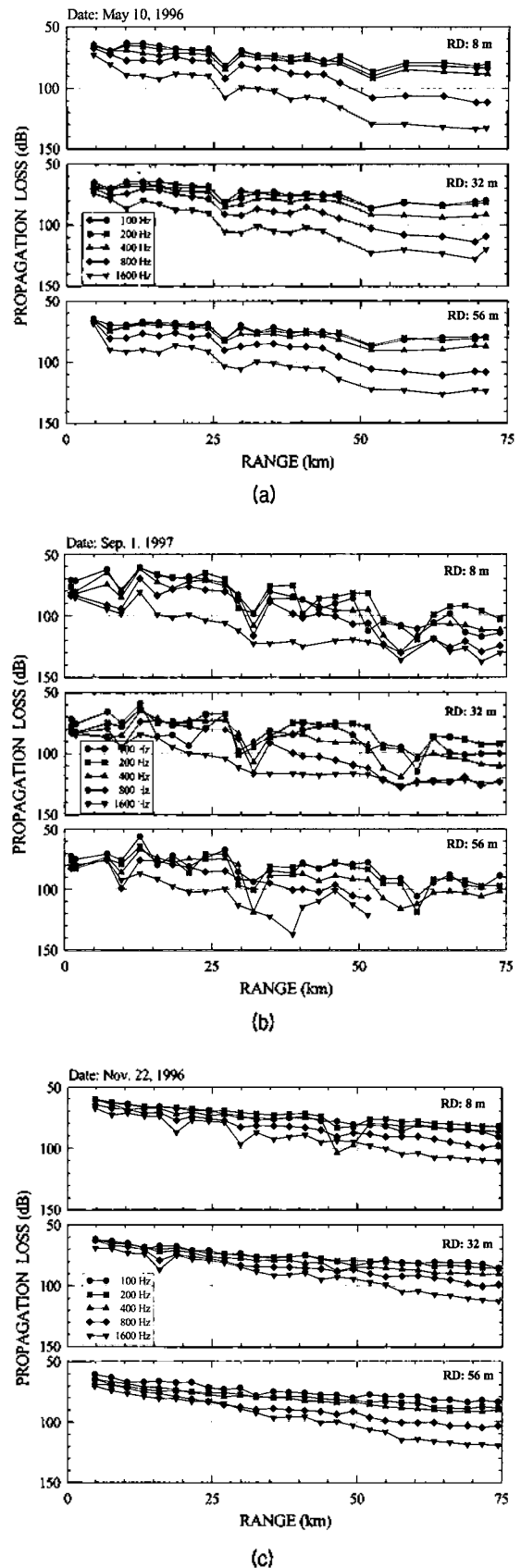


그림 4. 계절별 전달거리에 대한 측정된 음파의 전달손실
Fig. 4. Measured propagation loss versus range by various seasons.

천해에서는 음파 전달손실이 최소가 되는 최적주파수가 존재하는 것으로 알려져 있으며 이것은 수심, 해저지질 및 음속구조와 밀접한 관련이 있는 것으로 보고되고 있다[11]. 음파 전파실험의 측정결과에 의하면, 음원이 위치한 해수층의 음속과 수중청음기가 위치한 해수층의 음속이 거의 동일한 경우, 실험정선에 있어서 음파전파가 가장 양호한 최적주파수는 대체적으로 약 200 Hz 부근인 것으로 생각된다.

수중청음기 수심이 전달손실에 미치는 영향을 조사하기 위하여 전달손실 측정자료로부터 주파수 100 Hz, 400 Hz 및 1600 Hz만의 전달손실을 뽑아내어 그림 5에 나타내고 있다. 여기서 음원수심은 약 18 m이고, 수중청음기 수심 (RD)은 각각 약 8 m, 32 m 및 56 m이다. 그림 5의 (a)는 주파수 (Freq) 100 Hz의 측정결과이고, 그림 5의 (b)는 주파수 400 Hz의 측정결과이며, 그림 5의 (c)는 주파수 1600 Hz의 측정결과이다.

그림 5의 (a)에 나타낸 바와 같이 주파수 100 Hz 음파의 경우, 봄철 (5월 초순)과 가을철 (11월 하순)에 측정된 전달손실은 수중청음기의 수심과 관련없이 거리가 증가함에 따라 서서히 증가하는 경향을 보이고 있었으며, 여름철 (9월 초순)에 측정된 전달손실은 수중청음기의 수심에 상관없이 거리가 증가함에 따라 다소 심한 불규칙적인 변동을 보여주었다. 그림 5의 (b)에 나타낸 바와 같이 주파수 400 Hz 음파의 경우, 봄철과 여름철에는 전달손실이 수중청음기의 수심과 관련이 거의 없었으나 가을철의 전달손실은 수중청음기의 수심과 관계가 다소 있어 수중청음기 수심 8 m에서의 전달손실은 수중청음기 수심 32 m 및 56 m의 경우보다 동일한 거리에서 약 5 dB 정도 작게 나타났다. 그리고 그림 5의 (c)에 나타낸 바와 같이 주파수 1600 Hz 음파의 경우, 봄철과 여름철에는 전달손실이 수중청음기 수심과 관련이 거의 없는 것으로 나타났으나, 가을철의 전달손실은 수중청음기의 수심과 관련이 있었으며 수중청음기 수심 8 m 및 32 m에서의 전달손실은 수중청음기 수심 56 m의 경우보다 동일한 거리에서 약 10 dB 정도 작게 나타났다.

전달손실의 측정결과 어느 경우에는 동일한 전파거리라 하더라도 수중청음기 수심에 따라 전달손실이 다소 다르게 나타나고 있었다. 이것은 그림 2에 나타낸 바와 같이 봄철과 여름철에는 충분한 수심까지 표면 혼합층이 잘 형성되어 있지 않았으나, 가을철에는 수심 약 33 m 부근까지 표면 혼합층이 잘 발달되어 있었고, 음원도 또한 수심 약 18 m에 위치하여 표면 혼합층 이내에 있었기 때문에 표면 혼합층이 음파채널 (sound channel)을 형성

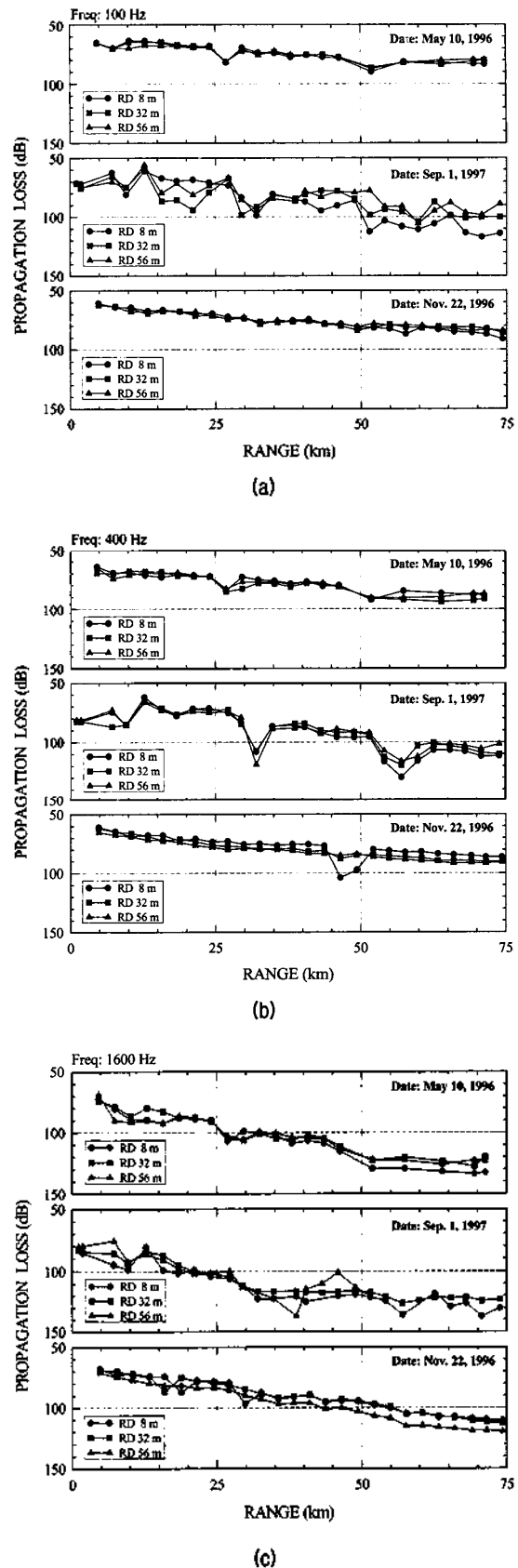


그림 5. 주파수별 전달거리에 대한 측정된 전달손실
 Fig. 5. Measured propagation loss versus range by various frequencies.

하였던 것과 관련이 있는 것으로 생각된다. 표면 혼합층이 음파채널을 형성하는 경우, 채널 내에 갇혀 전파할 수 있는 음파의 최대파장은, $\lambda_{max} = 8.5 \times 10^{-3} H^{1.5}$ 로 주어진다(2). 여기서 λ_{max} 는 최대파장 (m)이고, H 는 표면 혼합층의 두께 (m)이다. 가을철에 형성된 두께 약 33 m인 음파채널의 경우, 여기에 갇힐 수 있는 음파의 최대 파장은 약 1.6 m이다. 즉, 주파수 약 930 Hz 이상의 음파는 이 음파채널에 갇혀 비교적 잘 전파할 수 있다. 따라서 가을철에 있어서 주파수 1600 Hz 음파의 경우 수중청음기 수심 8 m 및 32 m에서의 전달손실은 수중청음기 수심 56 m에서의 전달손실에 비하여 비교적 작게 나타난 반면, 주파수 100 Hz 음파의 경우 전달손실은 수중청음기의 수심과 거의 관련이 없었고, 주파수 400 Hz 음파의 경우 수중청음기 수심 8 m의 전달손실은 수중청음기 수심 32 m 및 56 m의 전달손실보다 약간 작게 나타나고 있었다. 그리고 봄철과 여름철의 경우에는 충분한 수심까지 표면 혼합층이 잘 형성되어 있지 않았으므로 수중청음기의 수심과 음파 전달손실과는 관련이 거의 없었다.

음파 전달손실의 계절변동을 조사하기 위하여 음파 전파실험으로부터 구한 측정자료로부터 주파수 100 Hz, 400 Hz 및 1600 Hz만의 전달손실을 뽑아내어 그림 6에 나타내고 있다. 여기서 음원수심은 약 18 m이고, 수중청음기 수심은 각각 약 8 m, 32 m 및 56 m이다. 그리고 그림 6의 (a)는 수중청음기 수심 (RD) 8 m의 측정결과이고, 그림 6의 (b)는 수중청음기 수심 32 m의 측정결과이며, 그림 6의 (c)는 수중청음기 수심 56 m의 측정결과이다.

전체적으로 여름철 (9월 초순)의 전달손실은 봄철 (5월 초순) 및 가을철 (11월 하순)의 전달손실에 비하여 약 30 dB의 범위 이내에서 크게 나타나고 있었다 (각각 주파수 1600 Hz 및 전파거리 74 km 이내). 그리고 가을철의 전달손실은 봄철의 전달손실에 비하여 다소 작게 나타나고 있었다. 즉 봄철, 여름철 및 가을철 중에서 가을철의 경우 음파전파가 가장 양호한 것으로 측정되었고, 여름철의 경우 음파전파가 가장 불량한 것으로 측정되었다. 계절에 의한 전달손실의 차이는 주파수 및 전파거리의 증가와 함께 증가하였다. 수중청음기 수심이 전달손실의 계절변동에 미치는 영향은 수중청음기 수심이 얇게 위치할수록 크게 나타나고 있었다. 즉, 수중청음기가 수심 8 m에 위치하는 경우가 32 m 및 56 m의 경우에 비하여 계절에 의한 전달손실의 차이가 크게 나타났다. 이러한 전달손실의 측정치는 동일한 실험정선에서 실시한 전파실험의 결과이므로 계절에 의한 전달손실의 차이는 계절에 따라 변동하는 음속구조의 영향에 의하여 생기는 것으로 생각

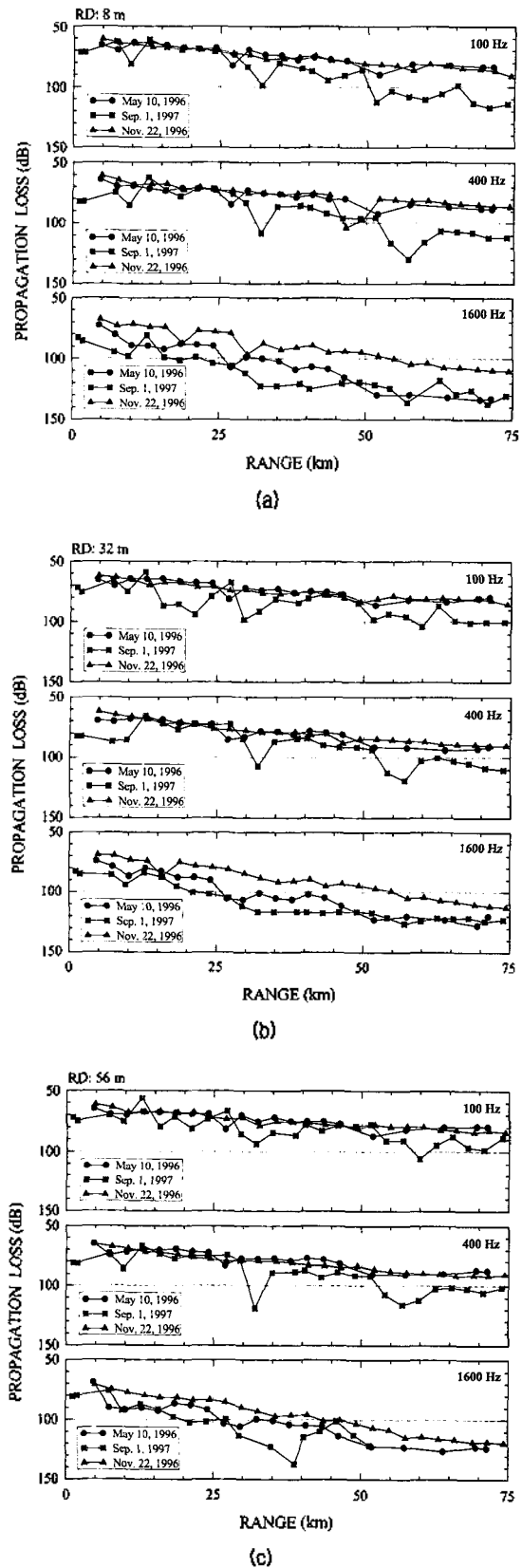


그림 6. 수중청음기의 수심별 전달거리에 대한 음파의 전달손실
Fig. 6. Measured propagation loss versus range by various hydrophone-depths.

된다. 이에 관련된 자세한 고찰에 대하여는 측정자료의 정밀분석 및 음파전파 수치모델 등을 통하여 현재 추진 중에 있으므로 추후에 다시 보고할 예정이다.

IV. 결론

황해에 있어서 저주파 음파전파의 계절변동을 조사하기 위하여 황해 중앙부분에 위치한 동일 정선에서 봄철, 여름철 및 가을철 등 서로 다른 계절에 저주파 광대역 음원을 이용하여 수중음파 전파실험을 실시하였다. 이 실험으로부터 측정된 음속구조 및 전달손실의 결과에 관하여 고찰하였고, 음파 전달손실의 계절변동을 조사하였다.

전체적으로 전달손실은 계절에 따라 서로 다르게 분포하고 있었다. 여름철에 측정된 전달손실은 봄철 및 가을철에 측정된 전달손실보다 크게 나타났고, 가을철에 측정된 전달손실은 봄철에 측정된 전달손실보다 다소 작게 나타났다. 계절에 의한 전달손실의 차이는 주파수 및 전파거리의 증가와 함께 증가하였다. 이러한 전달손실의 측정치는 동일한 실험정선에서 실시한 전파실험의 결과이므로 계절에 의한 전달손실의 차이는 계절에 따라 변동하는 음속구조의 영향에 의하여 생기는 것으로 생각된다. 봄철과 여름철의 경우 전파거리 약 25 km의 간격으로 전달손실이 갑자기 증가하는 경향을 보이고 있었으나, 가을철의 경우에는 전파거리에 따른 전달손실의 급격한 변동이 일어나지 않았다. 주파수에 대한 전달손실의 의존성은 주파수 100~200 Hz에서는 전달손실이 주파수에 거의 의존하고 있지 않았으나, 주파수 400 Hz 이상에서는 주파수의 증가와 함께 전달손실이 증가하고 있었다. 대체적으로 이 해역의 경우 음파전파가 가장 양호한 최적 주파수는 약 200 Hz 부근인 것으로 나타났다. 봄철과 여름철에는 충분한 수심까지 표면 혼합층이 잘 발달되어 있지 않았으나, 가을철에는 충분한 수심까지 표면 혼합층이 잘 발달되어 음파채널을 형성하고 있었다. 따라서 가을철의 경우 동일한 전파거리에서 수중청음기 수심에 따라 전달손실이 다소 다르게 나타난 반면, 봄철과 여름철의 경우에는 동일한 전파거리에서 수중청음기의 수심과 음파 전달손실과는 관련이 거의 없었다.

참고 문헌

1. R. J. Urick, *Sound Propagation in the Sea*, Peninsula Publishing, Los Altos, 1982.
2. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound, 3rd edition*, Peninsula Publishing, Los Altos, 147-201, 1983.
3. A. K. Rogers, T. Yamamoto, and W. Carey, "Experimental investigation of sediment effect on acoustic wave propagation in the shallow ocean," *J. Acoust. Soc. Am.*, **93**, 1747-1761, 1993.
4. D. Tollefsen, "Thin-sediment shear-induced effects on low-frequency broadband acoustic propagation in a shallow continental sea," *J. Acoust. Soc. Am.*, **104**, 2718-2726, 1998.
5. J. X. Zhou, "Normal mode measurements and remote sensing of sea-bottom sound velocity and attenuation in shallow water," *J. Acoust. Soc. Am.*, **78**, 1003-1009, 1985.
6. A. C. Kibblewhite and R. N. Denham, "Experiment on sound propagation in shallow water with velocity structure," *J. Acoust. Soc. Am.*, **44**, 104-112, 1968.
7. J. B. Gaspin and V. K. Shuler, *Source Levels of Shallow Underwater Explosions*, Naval Ordnance Laboratory Report, NOLTR 71-160, 1971.
8. G. V. Norion and J. C. Novarini, "The effect of sea-surface roughness on shallow water waveguide propagation: A coherent approach," *J. Acoust. Soc. Am.*, **99**, 2013-2021, 1996.
9. KORDI (Korea Ocean Research and Development Institute), *Oceanographic Atlas of Korean Waters, Yellow Sea*, vol. 1, 107-109, 1987.
10. P. H. Dahl, C. J. Eggen, D. J. Tang, and R. C. Spindel, *Low-Frequency Sound Propagation in the Yellow Sea: Results from the 1996 China-U.S. Experiment*, Technical Report, APL-UWTR 9804, 1998.
11. F. B. Jensen and W. A. Kuperman, "Optimum frequency of propagation in shallow water environments," *J. Acoust. Soc. Am.*, **73**, 813-819, 1983.

저자 약력

● 김 봉 채 (Bong-Chae Kim)



1977년 2월: 부산수산대학 어업학과 (수신학사)
 1985년 3월: 일본 토카이대학 대학원 해양공학과 석사과정 (공학석사)
 1988년 3월: 일본 토카이대학 대학원 해양공학과 박사과정 (공학박사)
 1978년 5월~1987년 4월: 국립수산진흥원 어선어구과 수산연구사
 1990년 5월~1996년 2월: 한국해양연구원 해양물리연구부 선임연구원

1995년 2월~1996년 2월: 중국과학원 음향학연구소 객원연구원
 1996년 3월~ 현재: 한국해양연구원 해양환경·기후연구본부 책임연구원
 ※ 주관심분야: 해수중 음파전파, 해수중 주위잡음, 해수중 음파전향, 해양음향 토모그래피

● 최 복 경 (Bok Kyoung Choi)



1991년 9월~1996년 12월: 한국해양연구원 해양물리연구부 위촉연구원
 1989년 2월: 성균관대학교 이과대학 물리학과 (이학사)
 1991년 2월: 성균관대학교 대학원 물리학과 (이학석사)
 1996년 2월: 성균관대학교 대학원 물리학과 (이학박사)
 1997년 1월~ 현재: 한국해양연구원 해양환경·기후연구본부 선임연구원

※ 주관심분야: 물리음향, 해수중 음파전파, 해수중 주위잡음, 기포음향, 해수중 음파전향