

음속의 수직분포에 따른 해수중 주위잡음의 의존성

Dependence of Oceanic Ambient Noise Due to the Vertical Distribution of Sound Velocity

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

※본 논문은 한국해양연구소 연구정책지원 사업비(과제번호 PE653)에 의해서 수행된 연구결과임.

요 약

해수중 주위잡음에 미치는 음속구조의 영향을 조사하기 위하여 다양한 수직 음속분포를 가지는 경우에 대한 음파전달 모델의 결과를 논의하였다. 그리고 해수중 주위잡음의 실측자료와 이러한 모델결과와 비교하여 고찰하였다. 특히 표층 도파관(surface waveguide)이 형성되는 조건에 대하여 조사하였다. 주위잡음의 실측자료와 모델결과를 비교한 결과, 표층 도파관은 수심의 증가에 따라 음속이 증가하는 양의 음속 기울기를 가질 때 뿐만 아니라 음속이 어느 수심에서 급격히 감소하여 상하 두 층의 음속 균일층이 존재하는 환경에서도 잘 형성되고 있었다. 특히, 표층 도파관내의 주위잡음 레벨은 도파관 이심의 주위잡음 레벨보다 높게 나타나고 있음을 실험적으로 확인할 수 있었다. 그리고 이러한 결과는 음파전달 모델에 의한 수치계산 결과로부터도 입증할 수 있었다.

ABSTRACT

To investigate the effect of the vertical structure of sound velocity on oceanic ambient noise, it was discussed the computation result by sound propagation model in the case of the vertically various distributions of sound velocity. The measured data of oceanic ambient noise were compared with the model results. It was especially investigated the formation condition of surface waveguide. From comparison between the measured data of ambient noise and the model results, it was shown that the surface waveguide was formed very well not only in the case of the positive gradient of sound velocity as increasing depth but also in the case of two layers as long as there are two different iso-velocities with rapidly-decreasing interface. It was experimentally confirmed that the level of ambient noise within the surface waveguide was higher than the level under the waveguide. This fact was proven by the computation result from the sound propagation model.

I. 서 론

해양에서 주위잡음에 관한 연구는 소나 등 수중음향 기기에서 발생하는 신호의 효율적 활용을 위한 신호대 잡음비의 선정이나 음향기뢰의 활용 그리고 주위잡음 발생기구에 관한 관심 등으로 제 2차 세계대전 이후 Knudsen[1] 및 Wenz[2]의 연구를 시작으로 그 후 많은 연구자들[3, 4]에 의해 활발히 연구되어 왔다. 해수중의 주위잡음에 관한 현재까지의 연구결과에 의하면, 주위잡음은 발생주파수 대역에 따라 대략 다음의 6가지로 세분할 수 있다[5]: 극초저주파수(<1 Hz), 초저주파수(1~20 Hz), 저

주파수(20~200 Hz), 중주파수(200 Hz~2 kHz), 고주파수(2~20 kHz), 초고주파수(>20 kHz) 잡음대역, 극초저주파수 잡음은 해저 지진 및 해수면의 운동으로 인한 압력 변화 등으로 생기고, 초저주파수 잡음은 함정 등의 스크루 회전으로 인한 방사잡음이 한 원인으로 추정되며, 저주파수 잡음은 먼 거리 선박의 운항에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 그리고 중주파수 잡음은 해상교통과 해수면 교란에 의해 발생되고, 고주파수 잡음은 해수면 교란에 의해 생기며, 초고주파수 잡음은 해수 분자의 열적 교란에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 특히 중주파수와 고주파수 대역의 경우, 해수면 위의 바람에 의한 해수면 교란으로 발생하는 주위잡음 레벨은 풍속이 2배 증가할 때마다 약 6 dB씩 증가하는 특징을 보인다.

그 외 간헐적인 잡음으로는 강우와 수중동물에 의한

*한국해양연구소 해양물리연구부
접수일자: 1997년 10월 22일

것이 있다. 강우에 의한 잡음은 물방울의 해수면 충격에 의하여 모든 주파수 대역에 걸친 주위잡음 레벨의 상승과 물방울 충격시 해수면 아래에 생성된 기포의 공진주파수 방사에 의한 13-16 kHz 주변의 잡음레벨 상승으로 밝혀져 왔다[6-8]. 그리고 수중동물에 의한 잡음 중 강력한 잡음으로는 돌고래에 의한 고주파수 발생음으로서 30 kHz부터 120 kHz까지 광범위한 주파수 영역을 포함하고 있다[9, 10].

해양에 형성된 주위잡음은 주파수, 해저수심 그리고 음속 기울기에 따라 다양한 변화를 보인다. 주위잡음은 음속 기울기의 영향이 없는 경우, 흡수손실의 영향으로 고주파수 잡음보다는 저주파수 잡음이 큰 레벨을 유지하게 됨은 잘 알려진 사실이다. 그러나 천해와 같이 해저수심이 얕은 경우에는 해양 자체가 일종의 음향 도파관 역할을 하게 되므로 해저수심에 비해 상대적으로 큰 파장을 가지는 저주파수의 음파는 손실이 커져 결과적으로 특정대역의 주파수 성분만이 해수중에 남게 되며, 이것은 최저주파수 대역으로 알려져 있다[11].

음속 기울기의 수직분포가 음파의 전달에 미치는 영향은 음속 기울기의 형태가 간단한 경우 이론적으로 잘 해석되어 있다[12, 13]. 예를 들면, 음속이 수심의 증가에 따라 증가하는 경우(양의 기울기), 해수면 가까이 발생된 음파는 음속이 작은 해수면 쪽으로 굴절하게 되어 주된 음파의 에너지가 해저면과의 반사가 없이 잘 전달하게 된다(표층 도파관 형성). 반대로 음속이 수심의 증가에 따라 감소하는 경우(음의 기울기), 음파는 해저면 쪽으로 굴절하여 해저면과의 잦은 반사로 인해 손실이 커져 음파는 거리가 증가함에 따라 급격히 감쇠하게 된다. 양의 음속 기울기를 가질 때, 표층 도파관이 형성되고 이러한 효과로 인하여 표층 도파관내의 잡음레벨이 표층 도파관 이심의 잡음레벨보다 높게 나타난다는 보고가 있었다[14].

본 연구는 남해의 한 정점에서 1995년 2월 및 11월중에 주위잡음 레벨을 측정된 자료를 토대로 음속의 수직분포의 변화에 따라 주위잡음 레벨을 수심별로 추출한 것으로서 파동방정식을 parabolic equation(PE)계열로 유도된 음파 전달 모델(IFD: Implicit Finite Difference model)을 사용한 계산결과와 비교하여 해석하였다[15]. 기존에 주위잡음 모델링에 관한 이론적 연구가 진행되어 왔으나[12, 16], 다양한 해양환경 때문에 모든 경우에 적용할 완벽한 모델은 아직 개발되어 있지 않은 상황이다.

따라서 여기서는 표층 도파관내의 주위잡음의 문제를 다루고 있으므로, 표층 도파관이 형성되어 있을 때와 형성되어 있지 않을 때의 조건하에 음파전달 모델을 이용한 계산결과를 측정자료와 비교하였다. 해수중 주위잡음을 측정할 정점은 해저수심이 약 100 m인 곳으로서 계절에 따라 표층에 수온 혼합층(mixed layer), 즉 표층 도파관(surface waveguide)이 계절에 따라 형성되거나 형성되지 않은 조건을 구비하고 있었다.

본 연구에서는 표층 도파관 형성시 주위잡음의 수심에 따른 변화에 초점을 맞추어 측정결과를 제시하였으며, 음파전달 모델을 통해 음파 전달손실의 수심 의존도를 해석하고 주위잡음과의 관련성을 논의하였다.

II. 표층 도파관내의 음파전달 해석

해수면이 대기와의 활발한 열교환으로 인해 수심의 증가에 따른 온도 기울기가 없는 혼합층이 표층에 형성되면, 이 층 내에서 음속은 수심의 증가에 따라 서서히 증가하게 되어 음파가 해수면 쪽으로 굴절하게 되는 음향 도파관이 형성되게 된다. 또한 음속이 어느 수심에서 급격히 감소하여 서로 다른 두 개의 음속 균일층으로 분리되는 경우도 도파관과 같은 역할을 하게 되는 데, 여기서는 이와 같은 경우들을 비교하기 위해 그림 1과 같이 음속의 수직분포가 다른 세 가지의 경우를 선정하였다. 그림 1에서 (a)는 음속이 균일한 경우, (b)는 양의 기울기를 갖는 경우, (c)는 음속이 균일한 두 개의 층으로 구분된 경우를 나타내고 있다.

이론적으로 해석하기 위해 음파전달 모델인 IFD 모델을 사용하여 표층 도파관내의 음파 전달손실을 계산하였다. 음파전달 모델에 의한 계산결과와 여러 여부를 확인하기 위해 우선 벤치마킹 과정을 통해 검증하여 문제가 없음을 확인하였다[13]. 음원은 수심 10 m에 위치시켰으며, 음원방사의 조건으로서 Gaussian 음장을 적용하였고, 방사 범위는 wide angle condition을 적용하였다. 그리고 수직 및 수평 방향의 거리 분해능은 각 계산을 위한 대상주파수의 1/4파장 이내로 설정하여 정밀한 계산이 되도록 하였다. 전달거리는 10 km까지 계산하였으며, 일정 수산수

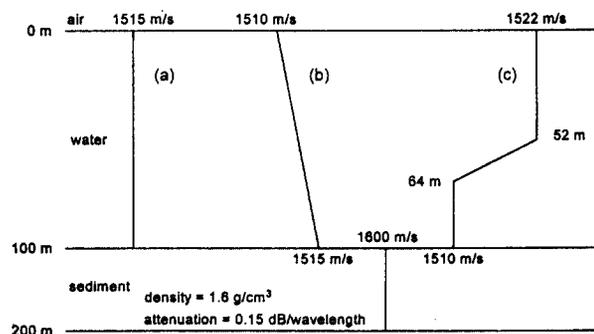


그림 1. IFD 모델에 의하여 음파 전달손실을 계산하기 위한 음속의 수직분포
(a) 일정음속, (b) 양의 음속 기울기,
(c) 상하 두 층의 일정음속.

Fig. 1 Vertical distributions of sound velocity for propagation loss calculation by IFD model;
(a) constant sound velocity,
(b) positive gradient of sound velocity,
(c) two constant sound velocity layers.

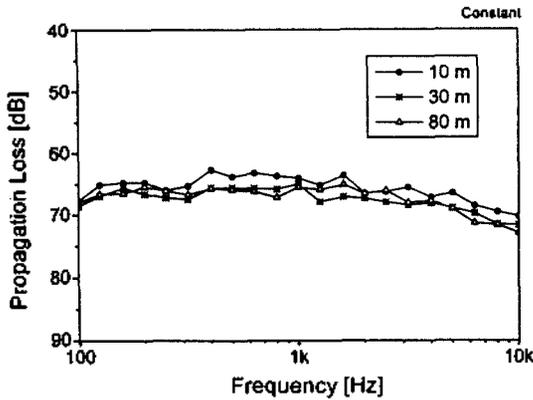


그림 2 일정음속의 경우에 IFD model로 계산한 음파 전달손실 (각 심볼은 수신수심을 표현한다)

Fig. 2 Propagation loss in the case of constant sound velocity by IFD model(each symbol represents a receiving depth).

심에서 거리 5 km부터 10 km까지 음파 전달손실을 평균 하여 이 값을 그 수심에 있어서 주위잡음의 평균 음파 전달손실로 취하였다. 주파수는 100 Hz부터 10 kHz까지 계산하였으며, 계산시간은 Pentium 150 MHz의 개인용 컴퓨터에서 한 주파수당 평균 1시간 이내가 소요되었다.

이 계산결과를 측정된 주위잡음의 레벨과 정확히 비교 할 수는 없지만, 표층 도파관내의 음장 형상에 관한 물리적인 해석에 참고할 수 있다. 주위잡음이란 불특정 음원에 의해 해수중에 발생된 잡음이 오랜 시간이 지나면서 충분히 감쇠한 후에도 주파수에 따라 일정한 음압레벨을 유지하고 있는 잡음으로서, 이는 마치 특정음파가 해수중을 멀리 전파한 후 해수중에 잔존하는 것으로 생각할 수 있다.

그림 2에 음속이 균일한 경우 세 가지의 수신기 수심에 대해 주파수에 따른 음파전달 모델결과를 나타내었다. 음원으로부터 출발한 음파는 해수중에서 굴절없이 직접적인 경로와 반사경로만을 따라 전달되므로 수심에 따른 영향이 작을 것으로 예측할 수 있다. 그림 2의 모델 결과를 보면 100 Hz부터 10 kHz까지 수신기 수심에 따른 차이는 수신기 수심 10 m의 음파 전달손실이 모든 주파수에서 조금 작게 나타났으나, 음파 전달손실의 수신기 수심에 따른 차이는 3 dB 이내로 작은 편이었다. 모든 주파수 영역에서 얇은 수심의 음파 전달손실이 작은 이유는 음원의 위치가 해수면 가까이(10 m)에 위치함으로써 10 km까지의 음파전달은 직접적인 경로로 인한 영향이 미쳤기 때문으로 판단된다.

그림 3은 양의 음속 기울기를 갖는 경우에 대한 모델 결과이다. 여기서 기울기는 $+0.05 \text{ s}^{-1}$ 로 하였다. 수심의 증가에 따라 음속이 증가하고 있으므로 음원으로부터 방사된 음선은 음속이 작은 해수면 쪽으로 굴절하게 되며, 이는 곧 해저면에서의 반사횟수가 작게 되어 전체적으로 손실이 작게 되고 또한 얇은 수심층에 도달하는 음파의

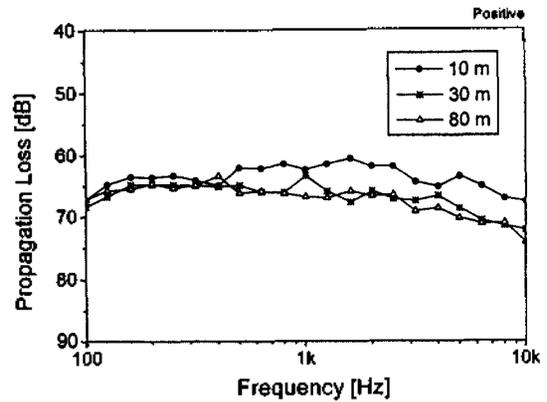


그림 3 양의 음속 기울기를 갖는 경우에 IFD model로 계산한 음파 전달손실(각 심볼은 수신수심을 표현한다)

Fig. 3 Propagation loss in the case of positive gradient of sound velocity by IFD model(each symbol represents a receiving depth).

손실이 더욱 작을 것으로 예측할 수 있다. 그림 3의 모델 결과를 보면, 400 Hz 이상에서 수신기 수심 10 m에서의 음파 전달손실이 다른 수심에 비해 약 5 dB 정도 작게 나타나고 있다. 여기서 400 Hz 이하의 음파 전달손실이 수심에 따라 별 차이가 나타나지 않는 것은 해저수심이 100 m이므로 이 경우 차단 주파수가 약 320 Hz가 되어 이 주파수보다 낮은 저주파수의 음파가 이러한 해수중에서 전달되기에는 부적합하기 때문으로 파악된다[11]. 이 경우 음속 기울기가 해저수심까지 일정하므로 음향 도파관의 깊이는 해저수심과 같은 100 m로 볼 수 있다.

그림 4는 두 개의 음속 균일층으로 분리된 경우에 대한 음파전달 모델결과이다. 수심 약 52 m부터 64 m까지 수심의 증가와 함께 음속이 급격히 감소하는 환경을 주었으며, 분리된 두 층 내에서는 각각 일정한 음속을 주었다. 이러한 환경을 선정한 이유는 음속이 수심의 증가에 따

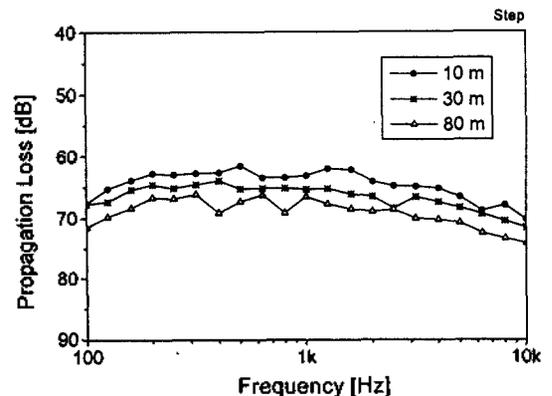


그림 4 동음속의 두 층으로 나뉜 경우에 IFD model로 계산한 음파 전달손실(각 심볼은 수신수심을 표현한다)

Fig. 4 Propagation loss in the case of two constant sound velocity layers by IFD model(each symbol represents a receiving depth).

라 양의 기울기를 갖지 않더라도 음속이 어느 수심에서 갑자기 변하는 경우 두 층 사이의 음파 전달손실은 어떤 영향을 받는가를 알아보기 위해서이다. 그림 4의 결과를 보면, 모든 주파수대역에서 수신기 수심의 증가에 따라 음파 전달손실이 커지고 있음을 알 수 있다. 즉 음속이 수심의 증가에 따라 양의 기울기를 갖지 않고 어느 수심에서 계단형태의 급격한 음속변화를 보이는 경우에도 두 층간의 음향 임피던스 차이로 인해 두 층의 경계면에서 반사가 발생하여 일종의 음향 도파관 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 여기서 각각 동일한 층 내에 있는 수신기 수심 10 m와 30 m에서 주파수에 따라 음파 전달손실의 차이가 생기는 것은 그림 2에서 설명한 효과로 볼 수 있다.

이와 같이 세 경우의 환경에 대하여 음파전달 모델에 의한 음파 전달손실의 계산에서 얻어진 결론은 천해(보통 수심 200 m 이내)의 표층 도파관은 두 경우에서 발생할 수 있는 데, 그 하나는 수심의 증가에 따라 음속이 증가하는 효과에 의한 것이며, 또 다른 하나는 음속이 급격히 변하는 층이 존재할 경우의 효과에 의한 것임을 알 수 있었다. 해양의 환경변화에 따른 해수중 주위잡음의 측정결과를 해석하는 데에 위의 이론해석을 적용할 것이다.

III. 측정 및 분석 방법

해수중 주위잡음 레벨을 측정하기 위하여 해저수심이 100 m인 해역에서 해상에 정지된 조사선에서 수중 청음기를 각각 수심 10 m, 30 m 및 80 m의 해수중에 위치시켜 주위잡음을 각각 48시간 동안 녹음하였다. 녹음은 매 시간당 10분씩 연속적으로 수행되었다. 측정하는 동안 조사선의 주기관 및 보조기관 등 선내 잡음원의 가동을 중지하였으며, 측정을 위한 모든 가동전원은 축전지로부터 직류/교류 변환기를 거친 110 VAC를 사용하였다. 해수중의 강력한 저주파수 음파의 유입을 막기 위해 차단 주파수 22.4 Hz의 고역 통과필터를 사용하였다. 측정중에 매 5분의 간격으로 레이더에 의한 조사선 주위선박의 방위, 거리 및 척수를 조사하였으며, 풍속계로 풍속을 관측하였다.

사용된 수중 청음기(Bruel & Kjaer #8101)는 무지향성의 수신감도를 가지고 있으며, 1 Hz~60 kHz에서 편차 2 dB 이내의 평탄한 주파수 특성을 갖고 있다. 측정용 증폭기(Bruel & Kjaer #2636)는 2 Hz~200 kHz에서 편차 0.5 dB을 가지며, 음향전용 녹음기(Bruel & Kjaer #7006)는 40 Hz~60 kHz에서 편차 3 dB을 갖고 있다.

녹음된 신호를 분석실에서 녹음기로 재생한 다음, 신호 분석기(Bruel & Kjaer #2035)에 의해 주파수 25 Hz~10 kHz의 27개의 중심 주파수를 가지는 1/3 옥타브 밴드 레벨로 분석하였다. 연속적인 주파수 스펙트럼의 자료 256 개를 선형평균하여 대표값으로 하였고, Hanning window를 사용하였다. 주위잡음의 스펙트럼 레벨은 구해진 분석값에 수중 청음기의 수신감도, 측정용 증폭기의 증폭

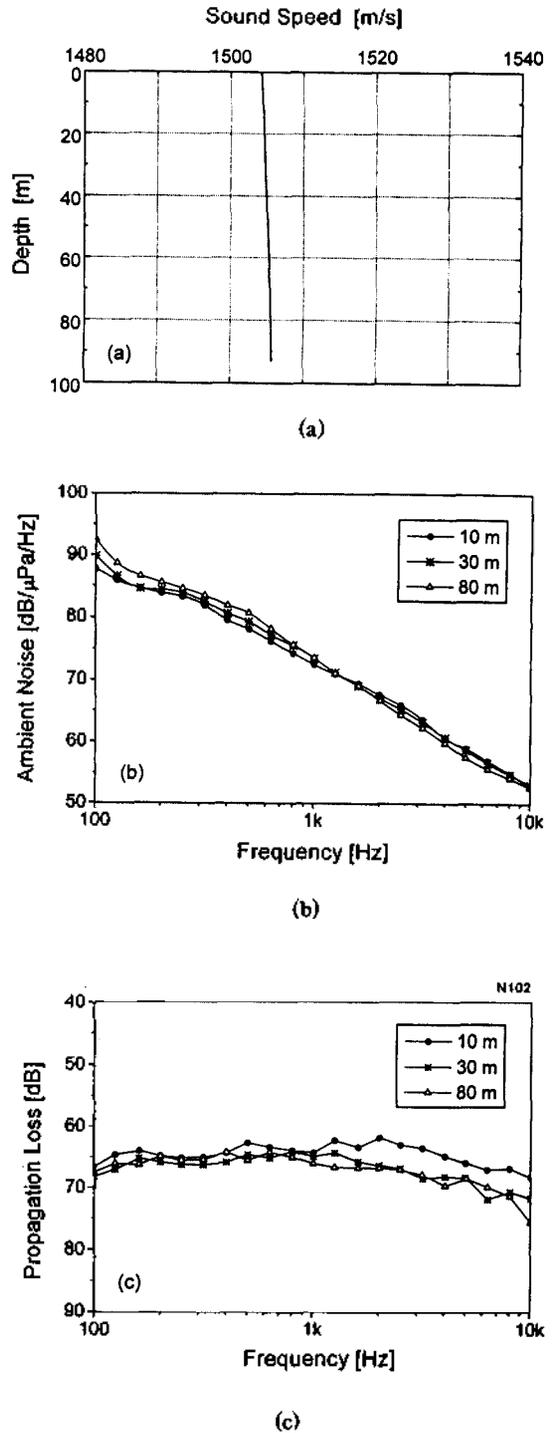


그림 5. 남해에서 2월에 측정된 주위잡음과 IFD model로 계산된 음파 전달손실
(a) 음속의 수직분포, (b) 측정된 주위잡음, (c) IFD model로 계산된 음파 전달손실.

Fig. 5 Ambient noise observed in the South Sea in February and propagation loss calculated by IFD model;
(a) vertical distribution of sound velocity, (b) observed ambient noise, (c) propagation loss calculated by IFD model.

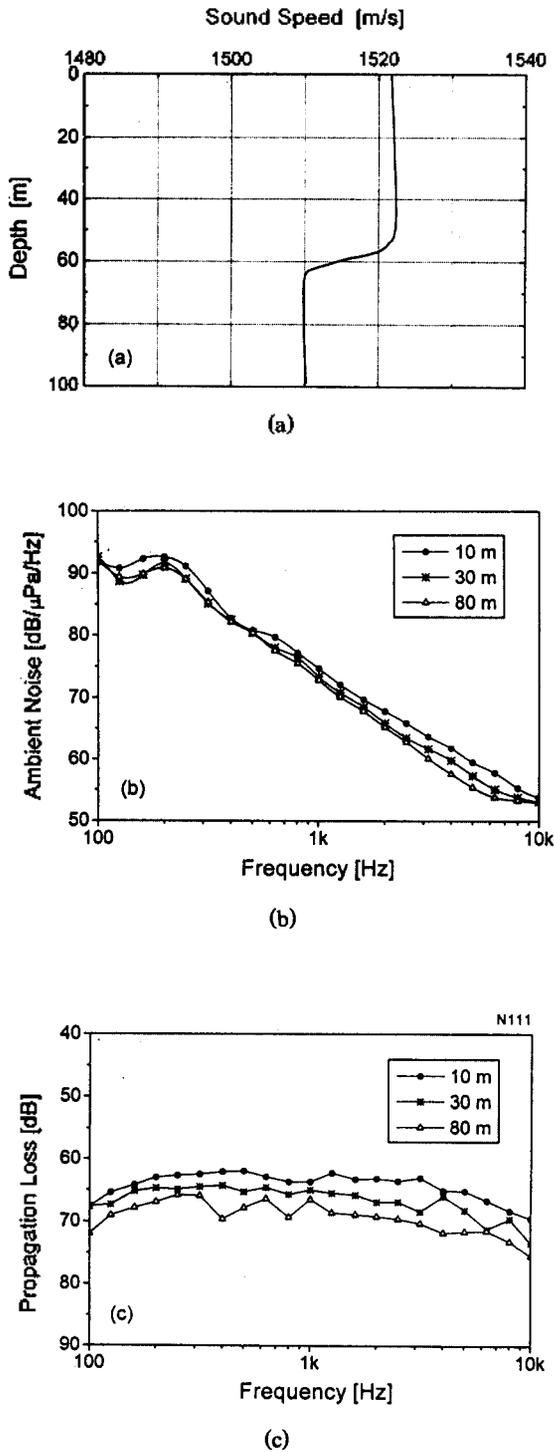


그림 6. 남해에서 11월에 측정된 주위잡음과 IFD model로 계산된 음파 전달손실

(a) 음속의 수직분포, (b) 측정된 주위잡음, (c) IFD model로 계산된 음파 전달손실.

Fig. 6 Ambient noise observed in the South Sea in November and propagation loss calculated by IFD model;

(a) vertical distribution of sound velocity, (b) observed ambient noise, (c) propagation loss calculated by IFD model.

도, 녹음기의 감쇠도 및 주파수별 녹음감도 등을 보상하여 수중음압 레벨 산정의 기준인 1 μPa을 기준으로 한 1 Hz 밴드로 환산하여 dB로 표시하였다.

IV. 해수중 주위잡음의 측정결과

4.1 2월 측정

그림 5는 남해의 수심이 100 m인 해역에서 1995년 2월 중에 관측된 음속의 수직분포, 해수중 주위잡음 레벨 및 음파 음파전달 모델의 계산결과를 나타낸 것이다. 음속은 수심의 증가에 따라 변화가 거의 없었으며, $+0.016 \text{ s}^{-1}$ 의 약한 음속 기울기를 갖고 있었다(그림 5(a)). 측정된 24시간의 자료 중에서 조사선 반경 3마일 이내에 선박이 1척만 존재하는 경우(12회)만을 추출한 후 평균한 주위잡음 레벨을 나타내었다. 측정시 수중 청음기의 수심은 10 m, 30 m 및 80 m였다. 주파수 범위는 100 Hz에서 10 kHz까지 나타내었으며, 동일 수심의 경우 잡음레벨은 주파수에 따라 다소 변동하였지만 큰 차이는 보이지 않았다(그림 5(b)).

그림 5(c)에 음파전달 모델로 계산한 음파 전달손실을 보이고 있다. 1 kHz 이상의 주파수에서 10 m 층의 손실이 작은 것을 제외하고는 대체로 모든 주파수에서 수심에 따른 음파 전달손실의 차이가 작았다. 1 kHz 이상의 주파수에서 얇은 수심층의 손실이 작은 이유는 수직 음속분포가 약한 양의 기울기를 가지는 영향과 그림 3의 경우에서 설명한 차단 주파수의 영향이 함께 나타난 것으로 해석할 수 있다.

4.2 11월 측정

그림 6은 동일 정점에서 1995년 11월중에 관측된 음속의 수직분포, 해수중 주위잡음 레벨 및 음파전달 모델의 계산결과를 나타낸 것이다. 음속의 수직분포는 수심 60 m 부근에서 급격한 변화를 보이는 곳을 경계로 일정한 음속의 두 층으로 구분되어 있음을 알 수 있다(그림 6(a)). 이것은 음파 전달손실의 가상 환경으로 이미 논의한 그림 1(c)의 경우와 유사한 환경임을 알 수 있다. 다른 점은 그림 6(c)의 경우 위층에서 음속이 $+0.014 \text{ s}^{-1}$ 인 양의 음속 기울기를 갖고 있다는 것이다.

주위잡음의 측정조건은 2월의 경우와 동일하였다. 이 경우에도 2월 측정자료와 마찬가지로 조사선 반경 3마일 이내에 선박이 1척만 존재하는 경우의 주위잡음 레벨을 평균한 자료만을 사용하였다. 수심에 따른 잡음레벨의 변화는 2월의 경우에 비해 다소 크게 나타났으며, 모든 주파수대역에서 수심이 얇은 층의 잡음레벨은 수심이 깊은 층의 잡음레벨보다 다소 높게 나타나는 경향을 보이고 있었다(그림 6(b)). 그림 6(c)에 음파전달 모델로 계산한 음파 전달손실을 나타내었다. 모든 주파수에서 수심에 따른 음파 전달손실의 차이가 크게 나타났다. 이러한 11월의 음속의 수직분포는 그림 1(c)의 가상 환경과 매우

유사하며, 측정결과도 그림 4와 유사하게 나타나고 있었다. 즉, 이 경우 수심에 따른 주위잡음 레벨의 차이는 음속이 급격히 변하는 환경에 의한 도파관 형성의 영향이 우세하게 나타났고, 상층부에서 수심의 증가에 따른 양의 음속 기울기에 의한 표층 도파관의 영향이 함께 나타난 것으로 결론지을 수 있다.

그림 7은 음속이 거의 일정한 2월 환경의 경우에 음파 전달 모델로 계산한 음파 전달손실의 거리 및 수심에 따른 수직 단면도를 나타내고 있다. 주파수로서 100 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 5 kHz 및 10 kHz의 경우에 대하여 계산하였다. 여기에서 흰색일수록 음파 전달손실이 작음을 나타내고(즉 잡음레벨이 높음), 검은 색일수록 음파 전달손실이 큼을 나타내고 있다(즉 잡음레벨이 작음). 그림 8은 표층 도파관이 형성되어 있는 11월 환경의 경우에 대한 모델 계산결과이다. 두 환경에 대한 모델 계산결과를 비교해 보면, 11월의 경우가 2월에 비해 5 km 이상 전달되었을 때 얇은 수심층 쪽으로 전달이 잘 되고 있음을 볼 수 있다(음파 전달손실이 해수면 쪽으로 작게 나타남). 이들 그림에서 확연하게 그 차이가 나지 않은 것은 음파 전달손실의 차이는 5 dB 이내인 반면, 명암의 표현 분해능이 5 dB 정도로 거칠게 표현되었기 때문이다. 거리 5 km 부터 10 km까지 각각의 수심(10 m, 30 m 및 80 m)에 대

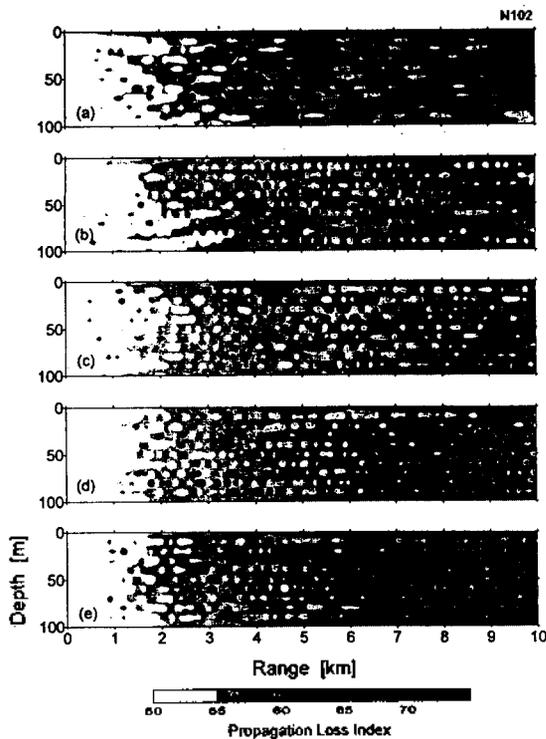


그림 7. 그림 5의 경우에 대해 IFD model로 계산한 음파 전달 손실의 수직단면 분포

(a)100 Hz, (b)500 Hz, (c)1 kHz, (d)5 kHz, (e)10 kHz.

Fig. 7 Vertical contour of propagation loss calculated by IFD model in the case of Fig. 5

(a)100 Hz, (b)500 Hz, (c)1 kHz, (d)5 kHz, (e)10 kHz.

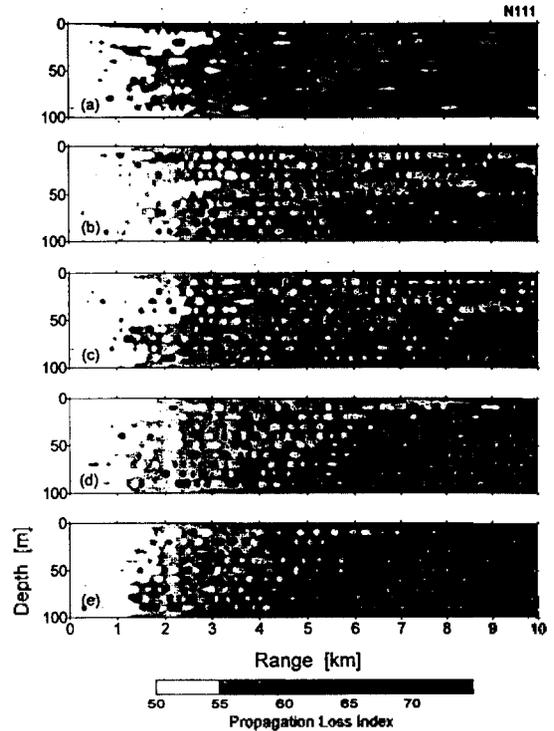


그림 8. 그림 6의 경우에 대해 IFD model로 계산한 음파 전달 손실의 수직단면 분포

(a)100 Hz, (b)500 Hz, (c)1 kHz, (d)5 kHz, (e)10 kHz.

Fig. 8 Vertical contour of propagation loss calculated by IFD model in the case of Fig. 6

(a)100 Hz, (b)500 Hz, (c)1 kHz, (d)5 kHz, (e)10 kHz.

한 음파 전달손실을 평균하여 나타낸 것이 그림 6(c)와 그림 7(c)이다.

결과적으로 2월과 11월 환경의 주된 차이는 음속이 급격하게 변하는 조건이다. 음속이 급격하게 변하는 경우 충분히 음향 도파관이 형성됨을 알 수 있었으며, 여기에 부가적으로 양의 음속 기울기로 인한 표층 도파관 형성의 영향도 포함되어 있음을 알 수 있었다. 기존의 연구들은 표층 도파관의 형성은 수심의 증가에 따른 양의 음속 기울기가 주된 도파관 형성에 기여한다고 기술되어 왔으나, 이 연구의 결과는 음속 기울기의 영향 외에 음속이 급격히 변하는 환경에서도 충분히 좋은 음향 도파관이 형성되어 있음을 나타내고 있다.

V. 결 론

천해의 해수층에서 수심에 따른 음속분포의 차이에 의해 음향 도파관이 어떻게 형성되며 그 영향은 어떠한가를 조사하기 위하여 우선 음파전달 모델을 통해 가상 환경에서 음파(잡음)의 전달양상을 알아보고, 실제의 환경에서 주위잡음의 측정자료와 음파전달의 모델결과와

비교하여 해석하였다. 그 결과, 음향 도파관은 수심의 증가에 따라 양의 음속 기울기를 가지는 경우뿐만 아니라 음속이 상이한 상하의 두 층으로 분리된 경우에도 형성될 수 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 음향 도파관이 형성되면 주위잡음의 수심별 레벨의 차이가 존재한다는 것을 실험적으로 확인하였으며, 이러한 현상은 음파전달 모델을 통하여도 확인할 수 있었다. 그러나 표층 도파관이 주위잡음에 미치는 영향을 좀 더 엄격하게 증명하기 위해서는 여기에서 사용한 음파전달 모델에서 음원분포 구성을 개량한 주위잡음 모델링 연구를 통하여 보다 자세한 비교고찰이 필요하다고 사료된다.

참 고 문 헌

1. V. O. Knudsen, R. S. Alford, and J. W. Emling, "Underwater ambient noise," *J. Mar. Res.*, 7, 410-429, 1948.
2. Wenz, "Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources," *J. Acoust. Soc. Am.*, 34, 1936-1956, 1962.
3. R. J. Urick, *Ambient Noise in the Sea*, Peninsula Publishing, Los Altos, 1986.
4. 김봉채, 최복경, 변상경, "속초연안의 천해에서 해수중 주위잡음 레벨의 풍속의존성", *해양연구*, 18(2), 93-99, 1996.
5. 김호철, 김민근, 서상준, 윤석왕, 김영환, *물리음향학 I*, 민음사, 1994.
6. H. C. Pumphrey, L. A. Crum, and L. Bjørnø, "Underwater sound produced by individual drop impacts and rainfall," *J. Acoust. Soc. Am.*, 85(4), 1518-1526, 1989.
7. J. A. Nystuen, "Rainfall measurements using underwater ambient noise," *J. Acoust. Soc. Am.* 79, 972-982, 1986.
8. 김봉채, 최복경, 송희천, 변상경, "강우에 의하여 발생된 해수중 주위잡음의 측정", *한국음향학회지*, 13(3), 71-77, 1994.
9. K. J. Diercks, R. T. Trochta, C. F. Greenlaw, and W. E. Evans, "Recording and analysis of dolphin echolocation signals," *J. Acoust. Soc. Am.*, 49, 1729-1732, 1971.
10. 김봉채, 최복경, "동해 중부 연안에서 관측된 흰줄머리 돌고래 발생음의 음향 특성", *한국음향학회 제 11회 수중음향학 학술발표회 논문집*, 51-54, 1996.
11. R. J. Urick, *Sound Propagation in the Sea*, 3rd ed., Peninsula Publishing, Los Altos, 1982.
12. P. C. Etter, *Underwater Acoustic Modeling*, 2nd ed., E & FN Spon, London, 1996.
13. W. S. Burdic, *Underwater Acoustic System Analysis*, 2nd ed., Prentice Hall, New Jersey, 1991.
14. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1983.
15. D. Lee and S. T. McDaniel, *Ocean Acoustic Propagation by Finite Difference Methods*, Pergamon Press, Oxford, 1988.
16. F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics*, AIP Press, New York, 1994.

▲최 복 경(Bok Kyoung Choi)

한국음향학회지 15권 4E호 참조

현재:한국해양연구소 해양물리연구부 해양음향연구실 선임연구원 (아학박사)

▲김 봉 채(Bong Chae Kim)

한국음향학회지 15권 4E호 참조

현재:한국해양연구소 해양물리연구부 해양음향연구실 책임연구원 (공학박사)