

해저면 경사가 일정한 천해에서의 광대역 간섭 유형

Broadband Interference Patterns in Shallow Water with Constant Bottom Slope

오 철 민*, 이 성 욱*, 오 선 택*, 나 정 열*
(Cheolmin Oh*, Seongwook Lee*, Suntaek Oh*, Jungyul Na*)

*한양대학교 지구해양학과

(접수일자: 2001년 11월 21일; 수정일자: 2002년 5월 29일; 채택일자: 2002년 6월 9일)

수심이 변하는 천해 환경에서 이동하는 선박 방사소음의 광대역 간섭 유형을 고찰하였다. 수심 변화율이 일정한 음도파관에 대해 단열 모드 이론에 근거하여 거리-주파수 영역에서의 보강 (또는 상쇄) 간섭 발생 유형을 나타내는 음도파관 불변인자 (waveguide invariant index, β)를 유도하였다. 이를 이용하여 수심 변화에 의한 광대역 간섭 형태 변형을 해석하였다. 해석적 방법으로 고찰한 간섭 유형은 해상 실험과 수치 모델을 이용한 모의 실험에서도 나타남을 확인하였다.

핵심용어: 천해 환경, 수심 변화 효과, 광대역 간섭 형태, 음도파관 불변인자

투고분야: 수중음향 분야 (5.1)

Broadband interference patterns are studied using ship as an acoustic source in shallow waters with varying bathymetry. Waveguide invariant index (β) indicating the pattern of constructive (or destructive) interference in range-frequency domain is derived in a waveguide with constant bottom slope based on adiabatic mode theory. Using this invariant, changes of the interference patterns resulting from the variation of bottom bathymetry are analyzed. Results of the analytic interpretation is compared with those from sea experiments and numerical simulations.

Keywords: Shallow water, Effect of depth variation, Broadband interference pattern, Waveguide invariant
ASK subject classification: Underwater acoustics (5.1)

I. 서론

신호의 주파수 및 거리 (또는 시간) 변화에 따른 변동성을 동시에 나타내는 스펙트로그램 (spectrogram)은 선박과 같은 광대역 음원에 대한 여러 가지 판단 정보를 포함하고 있으므로 수중 음향 분야에서 식별 또는 진단 목적의 징표 (signature) 추출을 위해 자주 사용하는 분석 방법이다. 선박의 방사소음 스펙트럼은 특정 주파수에서 강하게 나타나는 선 스펙트럼 성분과 넓은 주파수 대역에 걸쳐 나타나는 연속 스펙트럼 성분으로 구성된다. 선 스펙트럼 성분은 스펙트로그램에서 시간 축에 평

행한 선의 형태로 나타나는데 식별 또는 진단 목적을 위해서는 선 스펙트럼을 이용하는 것이 일반적이다[1]. 이동 중인 선박 또는 예인 음원을 이용하여 수심 변화가 거의 없는 천해에서 측정된 신호에 대한 광대역 스펙트로그램 분석에서는 선 스펙트럼뿐만 아니라 거리 (또는 시간) 축에 대해 일정한 기울기를 가지면서 선 스펙트럼 보다는 폭이 넓은 여러 개의 줄 무늬가 함께 나타나는 것으로 보고된 바 있다[2,3]. Bachman과 Kaye[3]는 넓은 주파수 대역에 걸쳐 발생하는 줄 무늬들이 음원과 수신기 사이의 거리가 수심의 수 배 이내로 가까운 경우에는 직접파와 해수면 반사파 사이의 간섭을 의미하는 Lloyd mirror 효과에 의해 형성되고 거리가 수심의 수 배 이상 되는 거리에서는 해수면 및 해저면에서 여러 번 반사되고 전달 경로가 서로 다른 성분들 사이의 간섭을 의미하

책임저자: 이성욱 (swlee65@ihanyang.ac.kr)
425-791 경기도 안산시 사1동 1271번지
한양대학교 지구해양학과
(전화: 031-400-4156; 팩스: 031-406-6458)

는 다중 경로 (multi-path) 효과에 의해 형성됨을 음선 이론을 이용하여 설명하였다. Baranov와 Grigorev[4]는 음선 이론뿐만 아니라 정상 모드 (normal or proper mode) 이론 및 파수 적분 이론에 근거한 수치 모델을 이용하여 주파수-거리 평면에서의 광대역 간섭 음장의 변형을 고찰한 바 있다. Vianna와 Soares-Filho[5]는 Pekeris 도파관 (waveguide) 모델 환경에 대하여 정상 모드뿐만 아니라 가상 모드 (virtual or improper mode)까지 포함하는 완전한 광대역 간섭 음장 계산을 통하여 모드 간섭으로 음압이 높게 나타나는 부분을 연결한 선은 주파수-거리 평면에서 기울기가 다른 여러 개의 직선으로 나타남을 보였다.

주파수-거리 평면에서 음압이 높게 나타나는 선들의 기울기는 해석적인 방법으로도 구할 수 있다. 완전 반사하는 경계면을 갖는 이상적인 도파관에 대해 정상 모드 이론을 적용하면 최대 음압이 발생하는 선의 기울기는 다음과 같은 관계식으로 표현된다[6].

$$\frac{d\alpha}{dr} = \beta \frac{\omega}{r} \tag{1}$$

여기서 ω 는 각 주파수를 의미하고 r 은 음원으로부터의 거리를 나타낸다. 또한 β 는 아래의 관계식으로 정의된다.

$$\begin{aligned} \beta &= -d\left(\frac{1}{c^p}\right) / d\left(\frac{1}{c^g}\right) = -\frac{dS^p}{dS^g} \\ &= -\frac{x_{mn}}{\omega} / \frac{dx_{mn}}{d\omega} \end{aligned} \tag{2}$$

c^p 와 c^g 는 위상 속도 (phase velocity)와 군 속도 (group velocity)이고 S^p 와 S^g 는 각각 위상 기울기 (phase slowness)와 군 기울기 (group slowness)로서, 위상 속도와 군속도의 역수로 정의된다. 그리고 x_{mn} 는 $x_m \dots x_n$ 로서 m 번째 모드와 n 번째 모드의 수평 파수 (wavenumber) 차이를 의미한다. 이상적인 도파관인 경우 β 는 주파수, 음원과 수신기의 수심, 음원과 수신기 사이의 거리 등에 관계없이 $\beta=1$ 의 값을 갖는 일종의 불변인자 (invariant index)이다[6,7]. 따라서 임의의 거리에서 음압이 높게 나타나는 선의 기울기는 주파수가 증가함에 따라 기울기가 커지는 직선임을 알 수 있다. 또한 식 (1)을 β 가 일정한 거리 구간에 대해 적분하여 나타내면 거리, 주파수 및 기울기 사이의 관계를 나타내는 식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\omega_2 = \omega_1 \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^\beta \tag{3}$$

그러나 천해의 가장 중요한 특징의 하나는 심해에 비해 수심 변화가 큰 환경이라고 할 수 있다. D'Spain과 Kuperman[8]은 최근 수심이 변하는 천해 환경에서 해저면 부근에 설치된 청음기를 이용하여 수신한 이동 음원 신호에 대한 스펙트로그램에서는 간섭으로 인한 줄 무늬가 직선이 아니고 기울기가 변하는 곡선으로 나타남을 보고한 바 있다. 또 이를 설명하기 위해 거리와 방위에 따라 수심이 변하는 환경에서 측정된 스펙트로그램의 불변인자 (β)에 대한 식을 해석적인 방법으로 유도하고 수심 변화율이 일정한 경우에는 음원 위치에서의 수심과 수신기 위치에서의 수심의 비, 즉

$$\beta = \frac{d(src)}{d(rcv)} \tag{4}$$

로 불변인자를 나타내었다. 여기서 $d(src)$ 와 $d(rcv)$ 는 음원 및 수신기 위치에서의 수심을 의미한다.

식 (4)에 따르면 수신기가 수심이 얇은 곳에 있고 음원은 거리가 멀어짐에 따라 수심이 깊어지는 (또는 거리가 가까워짐에 따라 수심이 감소하는) 방향으로 이동하는 경우에 β 는 1보다 큰 값을 가지며 점차적으로 증가하여 (또는 감소하여) 전체적으로는 아래로 오목한 (concave) 형태의 줄 무늬를 예측할 수 있다. 하지만 D'Spain과 Kuperman[8]의 실험과 유사하게 수신기가 고정되어 있고 음원을 이동시킨 본 연구의 실험에서는 식 (4)의 예측과는 다르게 위로 볼록한 (convex) 형태로 나타남을 발견할 수 있었다. 따라서 본 논문에서는 수심이 거리에 따라서 변하는 환경에서의 불변인자를 다시 유도하고 이를 이용하여 수심 변화 양상이 거리-주파수 영역 광대역 간섭 특성에 미치는 효과를 예측하고 해상 실험을 통해 획득한 결과와 비교하고자 한다.

II. 수심이 변하는 환경에서의 불변인자 (β) 및 광대역 간섭 형태

2.1. 거리 종속 환경에 대한 불변인자 유도

수중 환경의 거리 종속성이 미약하여 단열 모드 이론의 적용이 가능한 경우에 불변인자는

$$\beta = -\frac{dS^p(r_0)}{dS^g} = -\frac{x_{mn}(r_0) \omega}{\frac{1}{r_0} \int_0^{r_0} \frac{dx_{mn}}{d\omega} dr} \tag{5}$$

로 나타낼 수 있다[9]. 해수면과 해저면이 음압 해제 (pressure release) 경계면이고 수중 음속은 균일한 (homogeneous) 이상적인 도파관에서 수심이 변한다고 할 때, 임의의 거리에서의 수직 방향 파수 (wavenumber)는 $\gamma_m(r) = m\pi/d(r)$, $m=1, 2, \dots$ 와 같이 국지값 (local value)으로 나타낼 수 있다. 이를 이용하면 m 번째 모드의 위상 속도의 역수인 위상 기울기는 이항 정리를 적용하면

$$S_m^p \equiv \frac{x_m(r)}{\omega} = \frac{[k^2 - \gamma_m^2(r)]^{1/2}}{\omega} \quad (6)$$

$$\approx \frac{k}{\omega} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\gamma_m^2(r)}{k^2} \right) = \frac{1}{c} - c \frac{\gamma_m^2(r)}{\omega^2}$$

로 쓸 수 있으며 n 번째 모드에 대해서도 같은 방법으로 구할 수 있다. 따라서 임의의 두 모드 사이의 수평 방향 파수 차이 x_{mn} 은

$$x_{mn}(r) = \omega [S_m^p - S_n^p] = \frac{1}{2} \frac{c}{\omega} [\gamma_m^2(r) - \gamma_n^2(r)]$$

$$= \frac{1}{2} \frac{c}{\omega} \frac{\pi^2}{d^2(r)} (n^2 - m^2) \quad (7)$$

이 되고, 이로부터

$$\frac{x_{mn}(r)}{\omega} = \frac{1}{2} \frac{c}{\omega^2} \frac{\pi^2}{d^2(r)} (n^2 - m^2) \quad (8)$$

및

$$\frac{\partial x_{mn}(r)}{\partial \omega} = -\frac{1}{2} \frac{c}{\omega^2} \frac{\pi^2}{d^2(r)} (n^2 - m^2) \quad (9)$$

을 얻을 수 있다. 식 (8)과 (9)를 거리 종속 환경에서의 불변인자에 대한 식 (5)에 대입하여 정리하면

$$\frac{1}{\beta(r_0)} = \frac{d^2(r_0)}{r_0} \int_0^{r_0} \frac{1}{d^2(r)} dr \quad (10)$$

이 된다. 수심 변화 기울기가 일정한 경우 $d(r) = d(0) + ar$ 로 쓸 수 있고 이를 이용하여 적분하면

$$\int_0^{r_0} \frac{1}{d^2(r)} dr = \int_0^{r_0} \frac{1}{[d(0) + ar]^2} dr$$

$$= \frac{r_0}{d(0)d(r_0)} \quad (11)$$

을 얻을 수 있다. 따라서 수심 변화율이 일정한 거리 종속 환경에서의 불변인자는

$$\beta = \frac{d(0)}{d(r_0)} \quad (12)$$

로 나타낼 수 있다. $d(0)$ 는 음원과 수신기 사이의 거리가 0일 때의 수심을 의미하고 $d(r_0)$ 는 거리 r_0 에서의 수심을 나타낸다. 식 (12)는 불변인자를 수심의 함수로 나타낼 수 있음을 보여준다. 실제로 수심 변화가 없는 거리 독립 환경이라면 $\beta=1$ 이 됨을 알 수 있다. 또한 만일 음원이 고정되어 있고 수신기가 이동하는 경우에 식 (12)는

$$\beta = \frac{d(src)}{d(rcv)} \quad (13)$$

로 쓸 수 있다. 반대로 수신기가 고정되어 있고 음원이 이동하는 경우에는

$$\beta = \frac{d(rcv)}{d(src)} \quad (14)$$

가 된다.

식 (3)과 식 (13)을 이용하면 수심이 변하는 환경에서 음원은 고정되어 있고 수신기가 이동할 때 수신되는 신호의 주파수-거리 스펙트로그램에서 나타나는 간섭 형태 예측이 가능하다. 그리고 식 (3)과 식 (14)를 이용하면 음원이 이동할 때 고정된 수신기에 수신되는 신호의 주파수-거리 스펙트로그램에서 나타나는 간섭 형태를 예측할 수 있다.

D' Spain과 Kuperman[8]은 이동하는 대상이 음원인지 혹은 수신기인지에 대한 고려없이 수심이 변하는 환경에 적용 가능한 불변인자를 식 (13)의 형태로 제시하고(참고 문헌 8의 식 (26)), 수신기는 고정되어 있고 음원이 이동하는 경우에 측정된 간섭 형태 해석을 위해 식 (13)을 적용하였다. 하지만 본 연구의 결과는 이러한 경우에 식 (14)를 이용하여야 함을 나타내고 있다.

2.2. 불변인자를 이용한 광대역 간섭 형태 예측

그림 1은 식 (3)과 (14)를 이용하여 수심과 수중 음속이 20 m와 1496 m/s로 일정하고 경계면에서는 완전 반사하는 이상적인 도파관에서 음원과 수신기가 10 m 수심에 위치할 때 최대 음압이 나타날 수 있는 선의 예를 나타낸 것이다. 거리 2 km에서 1 kHz, 2 kHz 및 3 kHz에서 음압이 강하게 나타난다고 할 때 거리가 100 m까지 가까워짐에 따라 최대 음압이 나타나는 주파수를 변화를 나타낸 것으로 $\beta=1$ 이기 때문에 1차 함수적인 특성을 보여준다.

그림 2는 경사진 해저 환경에서 수심이 깊은 곳에서 앞

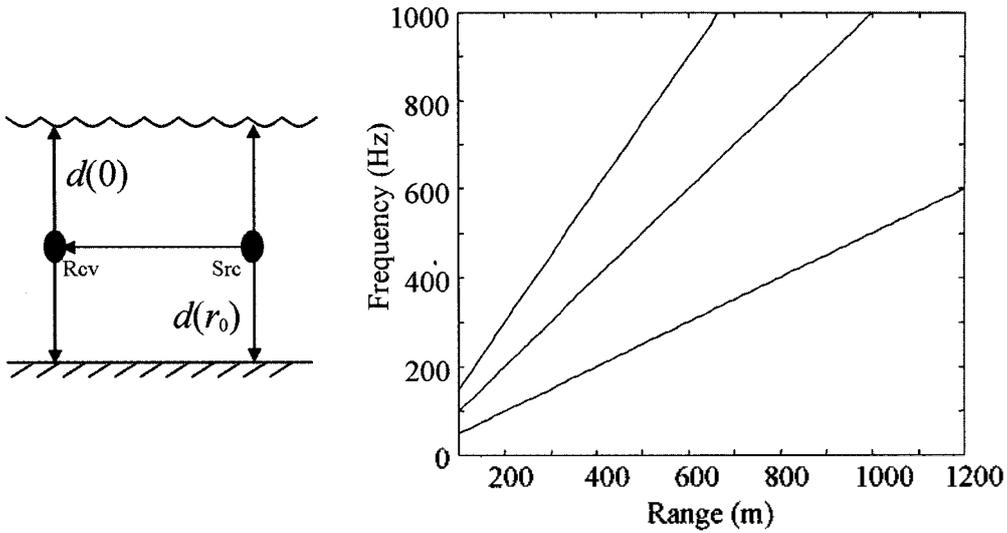


그림 1. 수심이 평탄한 이상적인 도파관 (왼쪽)에서의 최대 간섭 발생 선에 대한 예 (오른쪽), $d(0) = d(r_0) = 20m$
 Fig. 1. Example of the lines of interference maxima (right) for ideal waveguide with flat bottom (left), $d(0) = d(r_0) = 20m$.

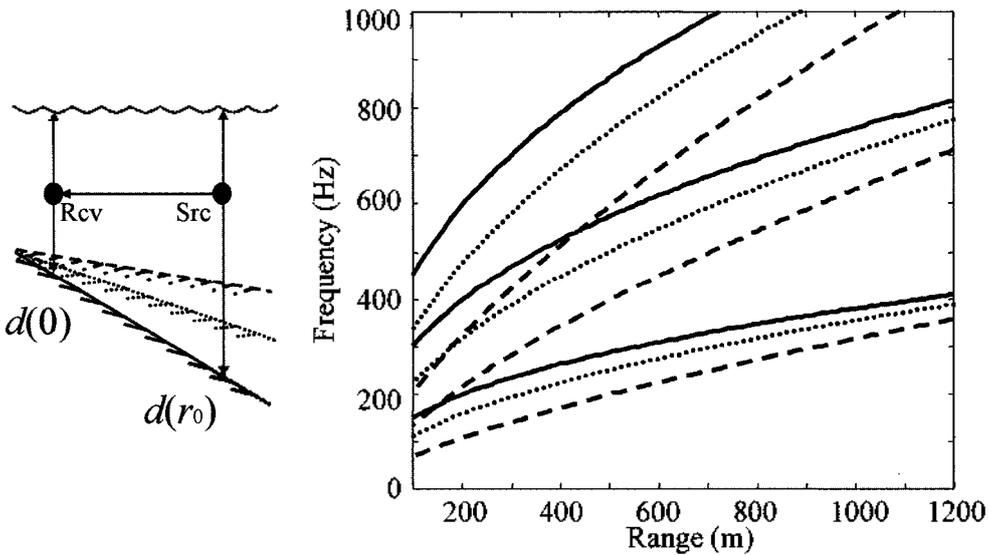


그림 2. 수심이 변하는 이상적인 도파관 (왼쪽)에서의 최대 간섭 발생 선에 대한 예 1 (오른쪽), $d(0) = 20m$, $d(r_0) = 50m$ (solid),
 40m(dotted), 30m(dashed)
 Fig. 2. Example 1 of the lines of interference maxima (right) for ideal waveguide with sloped bottom (left), $d(0) = 20m$,
 $d(r_0) = 50m$ (solid), 40m(dotted), 30m(dashed).

은 곳으로 음원이 이동할 때 수심이 얇은 곳에 설치된 청음기에서 나타날 수 있는 간섭 형태를 나타낸 것이다. 수신기가 위치하는 곳의 수심은 그림 1의 경우와 동일하게 20m로 하였고 음원이 처음 위치하는 곳의 수심은 실선일 때가 50 m, 점선일 때가 40 m, 긴 점선일 때가 30 m에 해당한다. 각각의 경우에 대해 거리 2 km에서 0.5 kHz, 1.0 kHz 및 1.5 kHz에서 음압이 세게 나타난다고 할 때 거리 변화에 따른 최대 음압 발생 주파수의 변화를 나타내었다. 수심 변화가 없는 경우 (그림 1)와는 다르게 전반

적으로 아래로 굽는 즉, 볼록한 (convex) 곡선 형태로 나타남을 볼 수 있다. 곡률은 수심 변화 경사가 증가할수록 커지는 양상을 보이고 있다.

그림 3은 그림 2와는 반대로 수신기는 수심이 깊은 곳에 있고 음원이 얇은 곳에서 깊은 곳으로 이동할 때 나타날 수 있는 간섭 형태를 나타낸 것이다. 처음 음원이 위치하는 곳의 수심은 20 m이고 수신기가 위치하는 곳의 수심은 실선일 때가 50 m, 점선일 때가 40 m, 긴 점선일 때가 30 m에 해당한다. 각각의 경우에 대해 거리 2 km에

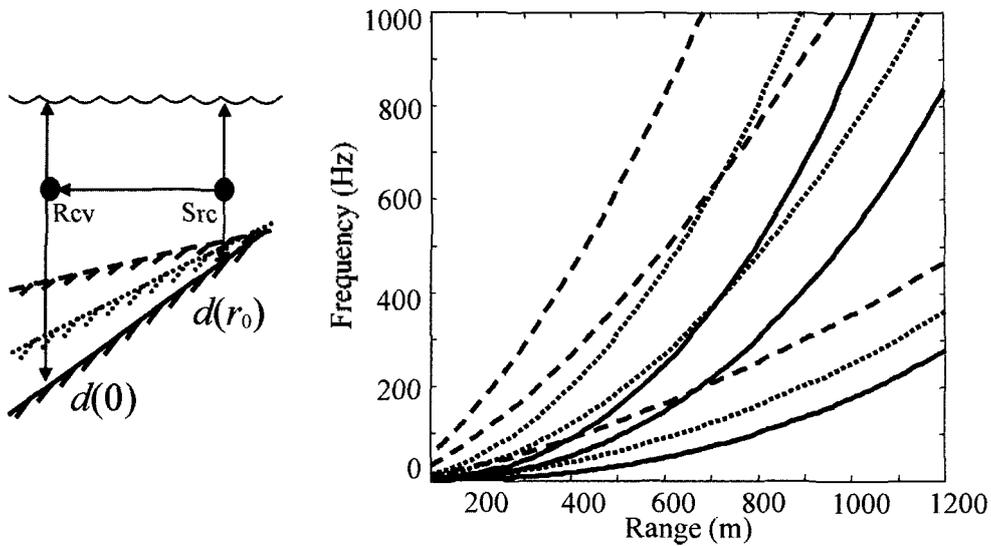


그림 3. 수심이 변하는 이상적인 도파관 (왼쪽)에서의 최대 간섭 발생 선에 대한 예 2 (오른쪽), $d(0) = 50m$ (solid), $40m$ (dotted), $30m$ (dashed), $d(r_0) = 20m$
 Fig. 3. Example 2 of the lines of interference maxima (right) for ideal waveguide with sloped bottom (left), $d(0) = 50m$ (solid), $40m$ (dotted), $30m$ (dashed), $d(r_0) = 20m$.

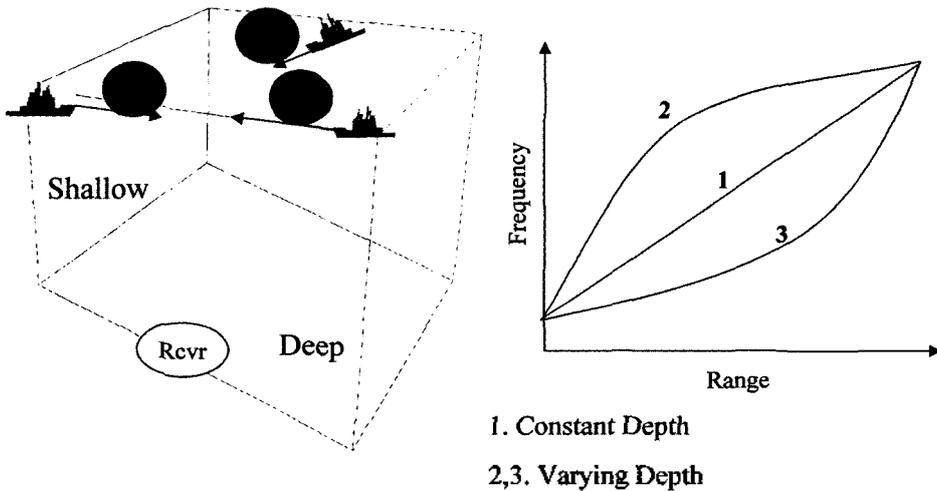


그림 4. 수심이 변하는 환경에서의 광대역 간섭 유형에 대한 도식적 요약
 Fig. 4. Schematic summary of the broadband interference patterns in an environment with varying bottom bathymetry.

서 1 kHz, 3 kHz 및 5 kHz에서 음압이 세게 나타난다고 할 때 거리 변화에 따른 최대 음압 발생 주파수의 변화를 나타내었다. 이 경우에도 직선이 아닌 곡선 형태로 나타남을 볼 수 있다. 그러나 그림 2의 경우와는 반대로 전반적으로 위로 굽는 즉, 오목한 (concave) 형태의 곡선으로 나타남을 볼 수 있다. 곡률은 그림 2의 경우와 마찬가지로 경사가 증가할수록 곡률이 커지는 양상을 나타낸다.

이상의 내용을 도식적으로 요약하면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 경사진 해저면에 청음기가 설치되어 있고 음원인 선박이 수심이 일정한 경로 (1번 경로)로 접근해

오는 경우에는 $\beta = 1$ 이므로 광대역 간섭 형태는 그림의 오른쪽에서 처럼 기울기가 직선인 형태로 나타난다. 음원이 수심이 깊은 곳에서 청음기 쪽으로 접근하는 경로 2의 경우에는 $\beta < 1$ 이기 때문에 거리가 가까워짐에 따라 기울기가 증가하여 전체적으로는 아래로 휘는 곡선 형태를 나타낸다. 반대로 음원이 수심이 얇은 쪽으로부터 접근하는 경로 3의 경우에는 $\beta > 1$ 이므로 거리가 가까워짐에 따라 기울기가 감소하여 전체적으로는 위로 휘는 곡선 형태를 나타낸다.

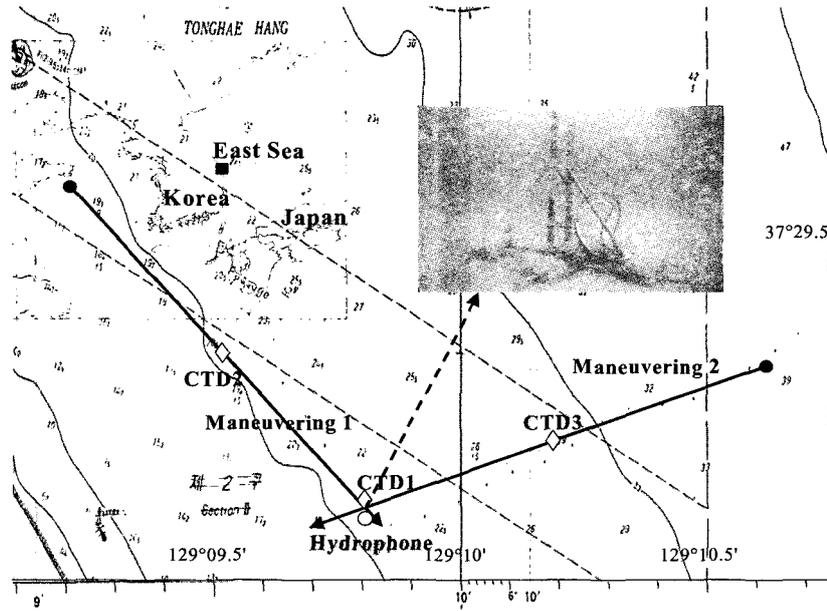


그림 5. 실험 위치 및 선박 기동 경로
Fig. 5. Location of the sea experiment and tracks of ship.

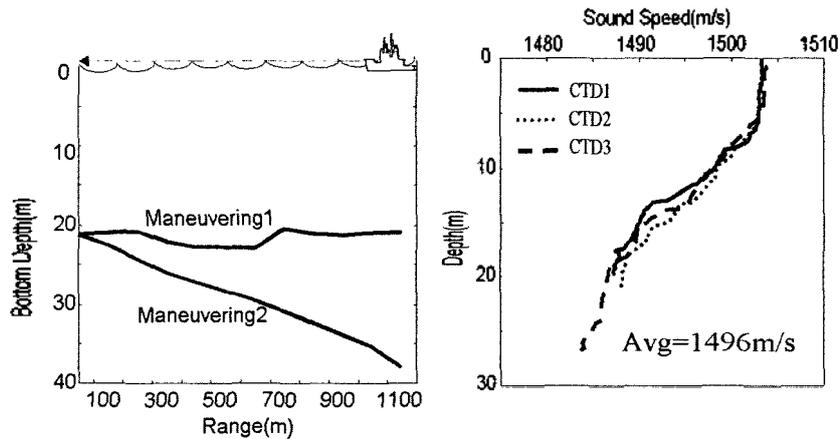


그림 6. 실험 해역의 수심 (왼쪽) 및 음속 (오른쪽) 분포
Fig. 6. Bathymetry and sound speed profiles at the experiment area.

III. 천해에서의 광대역 간섭 형태: 실험 및 수치 모의 결과

3.1. 실험 개요

앞 절에서 예측한 수심 변화에 의한 광대역 간섭 형태 변형을 확인하기 위하여 2001년 5월에 동해 연안에서 2척의 소형 선박을 이용하여 해상 실험을 수행하였다 (그림 5).

신호 수신 선박에서는 2점 모박 후 수신기의 요동에 의한 자체 소음 유입을 차단하기 위해 수심 20m 부근의 해저에 고정 설치하였다. 청음기는 해저면으로부터 0.4 m와 1.0 m 높이에 2조를 설치하였다. 또한 신호 수신 선박에

의한 소음 유입을 방지하기 위해 선박의 모든 전원을 끄고 분석 장비에 공급되는 전원은 배터리를 사용하였다. 분석은 해저면에서 0.4 m 떨어진 청음기에 수신된 신호에 대해서만 수행하였다.

음원 역할을 하는 선박은 방사 소음 준위를 일정하게 유지하기 위해 축 회전 속도를 1650 RPM으로 일정하게 유지하면서 기동하였다. 이때 선박의 속도는 8.5-9.0노트 범위에서 변화하였다. 선박의 기동은 수심 변화가 거의 없는 경로 (maneuvering 1)와 수심이 일정하게 감소하는 경로 (maneuvering 2)에 대하여 수행하였다. 수신기와 선박의 위치는 선박의 GPS (Global Positioning System)

를 이용하여 획득하였고 이를 이용하여 음원과 수신기 사이의 거리로 환산하였다.

수심 자료는 선박에 설치된 측심기를 이용하여 획득하였다(그림 6). 경로 1의 평균 수심은 21.5 m이고 최대 수심 차이가 2.1 m로 거의 평탄한 해저면이라 할 수 있다. 그리고 경로 2에서는 수신기로부터 1.2 km 떨어진 곳에서는 40 m이고 수신기쪽으로 접근하면서 거의 일정한 기울기로 감소하는 것을 볼 수 있다.

수중 음속 분포는 선박 기동이 끝난 후 수신기 위치와 가동 경로의 중간 지점에서 CTD(Conductivity, Temperature, Depth) 센서를 이용하여 3회 획득하였다(그림 6). 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 공간적인 차이에 의한 음속 변화는 거의 없음을 알 수 있다. 수직적으로는 수심 약 5 m까지는 일정하다가 수심이 깊어질수록 서서히 감소하는 형태를 보인다. 음속의 3개 연직 분포를 수심에 대해 평균한 값은 1496 m/s이다.

3.2. 실험 결과

그림 7은 음원 이동 경로에 대한 수심 측정 결과(그림 6)로부터 식 (14)를 이용하여 계산한 β 값을 나타낸 것이다. maneuvering 1에서의 β 는 약 0.9로 거의 일정한 값을 갖는다고 볼 수 있고 maneuvering 2에서는 거리(즉, 수심) 변화에 따라 β 가 지속적으로 변화함을 볼 수 있다.

신호 분석 결과는 주파수-거리 영역에서의 스펙트로그램으로 나타내었다(그림 8, 그림 9). 스펙트럼 분석은 도플러 효과에 의한 주파수 변이를 포함하도록 대역폭을 선정하고 청음기 수신 감도와 신호 증폭기 이득 등을 보상한 후 1 Hz 대역 폭일 때의 준위로 나타내었다. 480 Hz

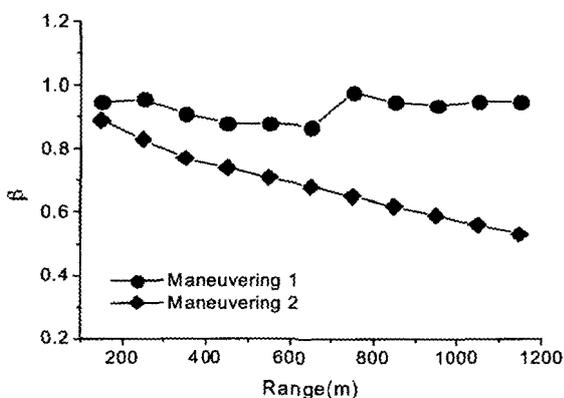


그림 7. 선박 이동 경로 1과 2에 대해 식 (14)를 이용하여 계산한 β
Fig. 7. β for ship maneuvering track 1 and 2, calculated from Eq. (14).

부근에서 나타나는 선 스펙트럼 성분의 거리에 따른 주파수 변화가 거의 없는 사실에서 알 수 있듯이 도플러 효과에 의한 주파수 변위는 거의 나타나지 않고 있다.

그림 8은 음원이 수심이 평탄한 maneuvering 1을 따라 이동할 때 수신기에 수신된 신호의 스펙트로그램을 나타낸 것이다. 보강 간섭으로 음압이 높게 나타나는 부분들이 실험 환경에서도 거의 직선 형태의 줄 무늬로 나타나고 있음을 볼 수 있다. 비교를 위해 $\beta=1$ 일 때와 maneuvering 1에 대한 β 의 평균 값인 $\beta=0.9$ 일 때의 보강 간섭 발생 위치의 변화를 실선 및 일점 쇄선으로 나타내었다. 하지만 실제로 음압이 높게 나타나는 선의 기울기를 나타낸 $\beta=0.8$ 과는 기울기 차이가 있음을 볼 수 있다. 이는 실제 해저면이 완전 반사 해저면으로 보기는 어려운 사질(sand type)이기 때문에 해저면 내에서 굴절되어 수층으로 되돌아오는 성분들의 영향이 부분적인 원인일 수도 있을 것이라 생각된다.

그림 9는 음원이 그림 5에 maneuvering 2로 표시된 수심이 감소하는 경사진 해저면을 따라 이동할 때 수신된 신호의 스펙트로그램을 나타낸 것이다. 평탄한 해저면을 따라 이동할 때와 마찬가지로 음압이 높게 나타나는 부분이 여러 개의 줄 무늬로 나타나지만 줄 무늬는 직선이 아니라 거리에 따라 기울기가 계속 변하는 곡선으로 나타남을 볼 수 있다. 실선으로 나타낸 부분은 실험 환경에 대한 모드 1과 모드 2의 간섭에서 음압이 높게 나타나는 형태를 식 (3)과 (14)를 이용하여 나타낸 것이다. 모드 파수는 식 (7)로부터 구할 수 있다. 불변인자를 이용한 예측 식은 실험에서 나타나는 간섭 선의 변화를 매우 잘 근사하고 있음을 볼 수 있다.

3.3. 수치 모의 결과

선박을 광대역 음원으로 이용한 해상 실험은 연안에 매우 인접한 곳에서 수행하였기 때문에 수신기가 수심이 깊은 외해쪽에 있고 음원이 수심이 얕은 곳에서 깊은 곳으로 이동할 때의 간섭 음장은 측정할 수가 없었다. 이를 보완하기 위해 거리 종속 정상 모드 모델인 KRAKEN[10]을 이용하여 광대역 음장을 모의하였다. 본문에 제시하지는 않았지만 maneuvering 2의 환경에 대해 수치 모델을 이용하여 산출한 광대역 전달손실은 실제 측정된 신호의 스펙트로그램(그림 9)과 매우 유사하게 나타나기 때문에[11] 실험에서 수행하지 못한 조건에 대해서 수치 모델을 이용하여 모의 실험 결과를 산출하는 것도 의미가 있으리라 생각된다.

그림 10은 그림 9의 경우와는 반대로 수신기는 수심 40 m인 곳에 위치하고 음원은 수심 20 m인 곳에서 수심이 깊어지는 방향으로 이동할 때의 전달 손실을 2 Hz 간

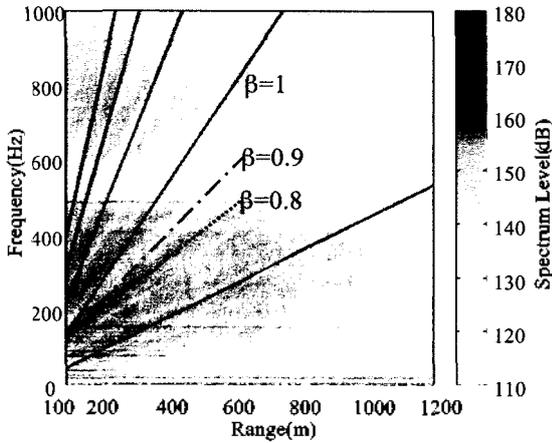


그림 8. maneuvering 1에 대한 스펙트로그램
Fig. 8. Spectrogram for maneuvering 1.

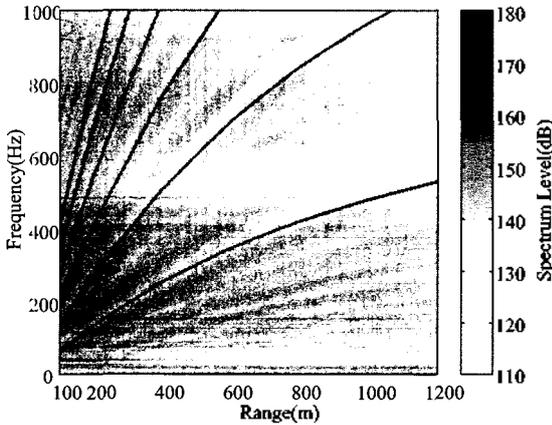


그림 9. maneuvering 2에 대한 스펙트로그램
Fig. 9. Spectrogram for maneuvering 2.

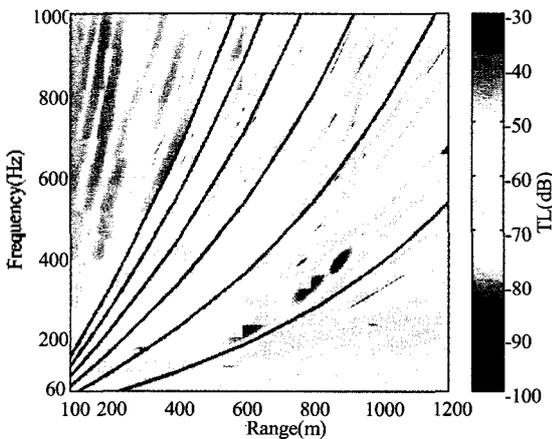


그림 10. 수심이 변하는 이상적인 음도파관에서 음원이 얕은 곳에 있고 수신기가 깊은 곳에 있는 경우에 KRAKEN 모델을 이용하여 계산한 광대역 전달손실, $d(0) = 40m$, $d(r_0) = 20m$
Fig. 10. Broadband transmission loss calculated using KRAKEN model for shallow source and deep receiver configuration in ideal waveguide with sloping bottom, $d(0) = 40m$, $d(r_0) = 20m$.

격으로 나타낸 것이다. 그림 9와는 다르게 음압이 높게 나타나는 부분이 위로 휘는 곡선 형태로 나타나는 것을 볼 수 있다. 실선은 앞의 경우와 마찬가지로 모드 1과 모드 2에 의한 간섭 유형을 식 (3)과 (14)를 이용하여 예측한 것으로 수치 모델 결과에서 나타나는 기울기 변화를 매우 잘 근사하고 있음을 볼 수 있다. 특정 주파수의 전달손실에서 불연속 선이 발생하는 것은 주파수 증가에 따른 모드 수의 증가가 불연속적이기 때문에 생기는 것이다.

지금까지는 수심이 일정하게 감소하거나 증가하는 방향으로 음원이 수신기를 향하여 이동할 때 수심 변화에 의한 간섭 형태 변형을 불변인자를 이용하여 예측하고 이를 실험 및 모델 결과와 비교하였다.

그림 11은 음원인 선박과 9 km 떨어진 거리의 수신기 20m에 위치하는 수신기 사이에 해저 산이 존재하여 음원이 접근하는 동안에 수심이 100 m에서 20 m로 일정하게 감소하다가 다시 100 m로 증가하는 가상적인 모델 환경을 나타낸 것이다.

그림 12는 그림 11의 환경에서 음속은 균일하고 해저면

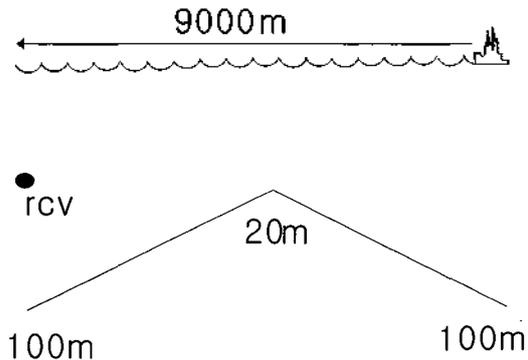


그림 11. 음원과 수신기 사이에 해저 산이 존재하는 모델 환경
Fig. 11. Model environment with sea mount between source and receiver.

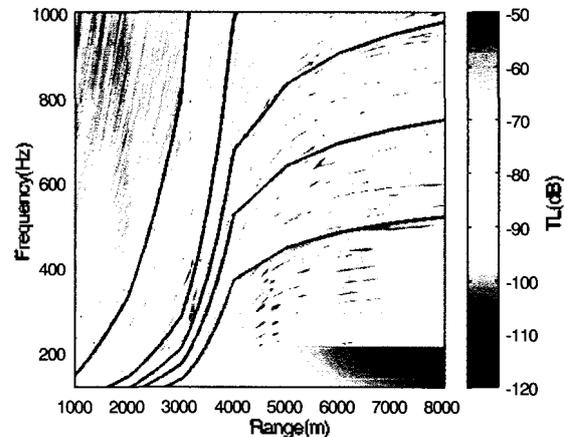


그림 12. 그림 11의 환경에 대한 광대역 전달손실
Fig. 12. Broadband transmission loss for model environment of Fig. 11.

을 완전 반사하는 경계면이라 할 때의 전달 손실을 나타낸 것이다. 앞의 결과들로부터 짐작할 수 있듯이 음압이 높게 나타나는 선이 수심이 감소할 때는 아래로 휘는 곡선 형태를 보이다가 수심이 증가할 때는 위로 휘는 곡선 모양으로 나타나고 있음을 볼 수 있다. 실선으로 나타낸 것은 식 (3)을 이용하여 1 km 간격으로 β 를 계산하고 식 (14)를 이용하여 간섭 형태를 예측한 것으로 수치 모델 결과가 보여주는 간섭 형태 변화를 잘 근사하고 있음을 볼 수 있다.

IV. 결론

천해에서 측정된 광대역 음원 신호의 거리-주파수 영역 스펙트로그램에는 전달 경로가 서로 다른 성분들 사이의 보강 간섭으로 음압이 상대적으로 높게 나타나는 부분들이 줄 무늬 형태로 나타난다. 이러한 줄 무늬 형태는 정상 모드 이론에서 유도되는 불변인자를 이용하여 설명이 가능하다. 이에 따르면 이상적인 음 도파관에서는 줄 무늬는 직선으로 나타난다 (그림 1, 그림 8).

본 논문에서는 완전 반사하는 경계면 사이에 존재하는 수층은 균일하고 수심만이 거리에 따라 변하는 거리 종속 음 도파관에 대한 불변인자를 음원과 수신기 사이의 거리와 음원과 수신기 위치에서의 수심의 함수로 나타내었다 (식 (12)-(14)). 이를 이용하여 수심 변화 양상에 따른 광대역 간섭 형태를 예측하였다 (그림 2-4). 이러한 간섭 형태는 실제 해상 실험 결과와 수치모델을 이용한 모의 실험 결과에서도 나타남을 확인하였다 (그림 9-12). 본 연구의 결과를 이동하는 표적의 방사소음 합성 연구[12]에 적용하면 표적이 천해에서 기동할 때의 모의 신호 재생시 수심 변화에 의한 신호 변형 효과 등을 고려할 수 있어 보다 현실성 있는 모의 신호를 합성할 수 있을 것으로 사료된다.

또한 수심 분포를 정확히 알고 있는 해역에 수신기가 설치되어 있다고 가정할 경우에는 단일 센서에 수신된 신호의 광대역 스펙트로그램으로부터 음원의 이동 경로에 대한 정보를 추출하는 것이 가능할 수도 있음을 암시하는 것이라 할 수 있다. 향후 이에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 수중음향 특화 연구센터의 연구비 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

1. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, 3rd ed., McGraw-Hill, chap. 10, 1983.
2. D. E. Weston and K. J. Stevens, "Interference of wide-band sound in shallow water," *J. Sound and Vibration*, 21 (1), 57-64, 1972.
3. R. T. Bachman and G. T. Kaye, "Broadband interference patterns in shallow water," *J. Acoust. Soc. Am.*, 74 (2), 576-580, 1983.
4. V. A. Baranov and V. S. Grigorev, "A water layer as a measuring instrument," *Sov. Phys. Acoust.*, 28 (5), 349-353, 1982.
5. M. L. Vianna and W. Soares-Filho, "Broadband noise propagation in a Pekeris waveguide," *J. Acoust. Soc. Am.*, 79 (1), 78-83, 1986.
6. L. M. Brekhovskikh and Y. P. Lysanov, *Fundamentals of Ocean Acoustics*, 2nd ed., Springer-Verlag, 140-145, 1991.
7. G. A. Grachev, "Theory of acoustic field invariants in layered waveguides," *Sov. Phys. Acoust.*, 39 (1), 33-35, 1993.
8. G. L. D'Spain and W. A. Kuperman, "Application of waveguide invariants to analysis of spectrograms from shallow water environments that vary in range and azimuth," *J. Acoust. Soc. Am.*, 106 (5), 2454-2468, 1999.
9. S. D. Chuprov, "Interference structure of a sound field in a layered ocean," *Ocean Acoustics, Current State*, edited by L. M. Brekhovskikh & I. B. Andreev, Nauka, Moscow, 71-91, 1982.
10. M. B. Porter, *The Kraken Normal Mode Program*, SACLANT Undersea Centre, La Spezia, Italy, 1992.
11. 오철민, 천해의 광대역 신호 간섭 특성, 석사 학위 논문, 한양대학교, 지구해양학과, 2001.
12. 배재환, "이동하는 표적의 방사소음 합성 기법 연구," 한국군사과학기술학회지, 3 (1), 58-65, 2000.

저자 약력

● 오 철 민 (Cheolmin Oh)



1994년 3월: 해군사관학교 해양학과 (이학사)
 2002년 2월: 한양대학교 지구해양학과 (이학석사)
 1994년 3월~현재: 해군 제6전단
 ※ 주관심분야: 수중음향

● 이 성 욱 (Seongwook Lee)

1989년 2월: 한양대학교 지구해양학과 (이학사)
 1991년 2월: 한양대학교 지구해양학과 (이학석사)
 1991년 3월~1998년 2월: 국방과학연구소 (연구원)
 1998년 3월~현재: 한양대학교 지구해양학과 (박사과정)
 ※ 주관심분야: 수중음향

● 오 선 택 (Suntaek Oh)

한국음향학회지 제20권 제5호 참조

● 나 경 열 (Jungyul Na)

한국음향학회지 제8권 제6호 참조