

천해에서 측정된 선박 방사소음 스펙트로그램의 줄무늬 패턴에 나타나는 해저면 전단성 영향

Influence of the Shear Property of Seabed Appearing in the Striation Pattern of the Spectrogram of Ship-radiated Noise Measured in a Shallow Sea

이 성 욱*, 한 주 영*, 백 운*, 나 정 열*
(Seongwook Lee*, Jooyoung Hahn*, Woon Baek*, Jungyul Na*)

*한양대학교 지구해양과학과
(접수일자: 2003년 10월 1일; 채택일자: 2004년 2월 2일)

천해에서 측정된 선박 방사소음의 거리-주파수 영역 스펙트로그램에 나타나는 줄무늬 패턴 기울기의 부호 변화 원인에 대한 분석 결과를 수록하였다. 모드 이론에 근거한 수치 모델을 이용하여 해저면 음향 특성을 변화시켜 가며 모의한 줄무늬 패턴과 분산 특성을 분석한 결과는 측정 신호에 나타나는 줄무늬 패턴 기울기의 부호 변화가 해저면의 전단성, 보다 구체적으로는 두께가 약 $3\pm 1\text{m}$ 정도일 것으로 예상되는 퇴적층의 하부에 존재하는 기반암의 전단성에서 기인한 특징임을 보여주었다.

핵심용어: 선박 방사소음, 거리-주파수 영역 스펙트로그램, 줄무늬 패턴, 모드 간섭, 해저면 전단과 영향
투고분야: 수중음향 분야 (5.1)

This paper represents the results of interpretation on the cause of sign changing of the striation slopes appearing in the range-frequency domain spectrogram of ship-radiated noise measured in a shallow sea. Striation patterns and dispersion characteristics simulated from a numerical model based on mode theory at various seabed conditions show that the sign changing of the striation slopes appearing in measured signal is caused by the shear property of seabed, more specifically by the shear property of the basement lying below the sediment which is estimated about $3\pm 1\text{m}$ thick.

Keywords: Ship-radiated noise, Range-frequency domain spectrogram, Striation pattern, Mode interference, Influence of seabed shear property

ASK subject classification: Underwater acoustics (5.1)

I. 서론

수중에서의 원거리 목표물 탐지 또는 소나 성능 예측 목적으로 음장을 정확히 예측하기 위해서는 환경에 적합한 음향 모델의 선택과 환경 입력 자료가 필수적이다. 음향 모델은 이론 및 연산 속도의 발달과 더불어 여러 복잡한 환경을 보다 정확히 고려할 수 있는 수치 모델이 과거 수십년 동안 지속적으로 개발되어왔다. 해양 환경 측면에서는 연안역 방위의 군사적 중요성이 강조됨에 따라 수심이 얇은

천해 해역에 대한 관심이 점차 고조되고 있는 추세이다.

수심이 얇은 천해 해역에서의 원거리 수중 음파 전달은 무엇보다도 해저면의 성질에 크게 영향을 받으므로 음장을 정확히 예측하기 위해서는 해저면의 음향 특성과 관련된 인자를 충분히 고려하는 것이 필요하다. 특히 육지에 인접해 있는 연안 해역의 해저면은 육상 기반암이 연장되어 해저에 노출되어 있거나 또는 기반암 위에 퇴적층이 분포하더라도 퇴적층의 두께가 얇은 경우가 있을 수 있다. 이러한 환경에서는 해저면의 음향 인자들 중에서 전단파 (shear wave) 특성이 전달 손실에 큰 영향을 미칠 수 있으므로[1] 이에 대한 정보가 중요하다고 할 수 있다.

해저면의 전단파 특성을 산출하기 위하여 사용하는 방법으로는 직접적인 측정 방법과 간접적인 역산 (inversion)

기법을 들 수 있다. 직접적인 측정으로는 현장에서 획득한 시료를 실험실에서 분석하거나(2) 현장에서 해저에 센서를 매설한 다음에 퇴적물 속에서 전단파를 발생시키고 수신하여 측정하는 방법을 들 수 있다(3). 이 방법들은 전단파 인자 특성에 대한 측정은 가능하지만 시료를 획득하거나 퇴적물속에 신호 송신기와 수신기를 묻어야 하는 어려움이 있고, 이로 인해 고결 (consolidated) 퇴적물에서는 이용할 수 없다는 제한이 따른다고 할 수 있다.

따라서 고결 퇴적물에 대해서도 사용할 수 있는 방법으로 음향 신호와 해저면 전단파 영향을 고려할 수 있는 음향 모델을 함께 사용하는 역산 기법을 도입하는 것이 보다 일반적이라 할 수 있다. 이때 역산에 필요한 실험 결과는 광대역 신호를 발생시키는 폭발물을 이용하여 해저면 부근에 충격을 가하고 이때 발생하는 경계면 지진파 (seismic interface wave, Scholte wave or Stoneley wave)를 음원으로부터 일정한 거리만큼 떨어진 해저면 부근에서 청음기 또는 지진계로 수신한 자료를 이용하는 것이 대표적인 방법이다(4,5,6). 하지만 이 방법으로 음향 신호를 획득하기 위해서는 폭발물 또는 이와 유사한 효과를 낼 수 있는 별도의 음원이 있어야 가능하다.

이에 본 논문에서는 별도의 음원을 사용하지 않고 선박이 기동할 때 지속적으로 방사되는 광대역 소음을 음원 신호로 이용하여 해저면의 음향 특성, 특히 전단파 속도에 대한 정보를 획득하는 것이 가능한지를 고찰하고자 한다. 이를 위하여 천해에서 측정된 선박 신호의 거리-주파수 영역 스펙트로그램에 나타나는 줄무늬 패턴 특성을 해저면 음향 인자 변화의 관점에서 수치 모델을 이용하여 모의하고 분석하였다. 이러한 접근은 선박소음을 이용한 지음향 (geoacoustic) 인자 역산 연구의 가능성에 대한 고찰에도 도움이 될 것이라 생각한다.

II. 해상 실험 및 결과

선박 신호의 광대역 줄무늬 형태 측정은 2001년 5월에 동해 연안에서 수행하였다 (그림 1). 수신기는 수심 20m 지점의 해저면에 바닥으로부터 0.4m와 1.0m 높이에 2조를 설치하였다. 음원 역할을 하는 선박은 방사소음 준위를 일정하게 유지하기 위해 축 회전 속도를 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)로 구분하여 수행하였다. 경로 1의 평균 수심은 약 21.5m 정도이고 최대 수심 차이가 2.1m 정도로 거의 평탄한 해저면이라 할 수 있다. 그리고 경로 2는 수신기로부터 1.2km 떨어진 곳에서의 수심이 약 40m이고 수신기쪽으로 접근하면서 거의 일정한 기울기로 감소하는 수심 분포를 가지는 경로이다. 수신기와 선박의 위치는 GPS (Global Positioning System)를 이용하여 획득하였고 이를 이용하여 음원과 수신기 사이의 거리로 환산하였다.

수중 음속 분포는 선박 기동 경로의 중앙 부분과 수신기 설치 지점에서 CTD를 이용하여 3회 획득하였다 (그림 1, 그림 2). 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 음속의 공간적인 변화는 거의 없음을 알 수 있다. 수직적으로는 수심 약 5m까지는 일정하다가 수심이 깊어질수록 서서히 감소하는 형태를 보인다. 음속의 3개 연직 분포를 수심에 대하여 평균한 값은 약 1496m/s 정도이다.

한편 실험 해역 부근의 해저면은 국부적으로 사질 퇴적물이 얇게 피복되어 있지만 기반암이 해저 표면에 여기저기 노출되어 있는 것으로 별도의 조사를 통해 최근에 보고된 바 있다(8,9). 지질학적으로 전기 고생대 석회암층으로 판단되는 기반암의 음파 및 전단파 전달 속도는 육상에서 채

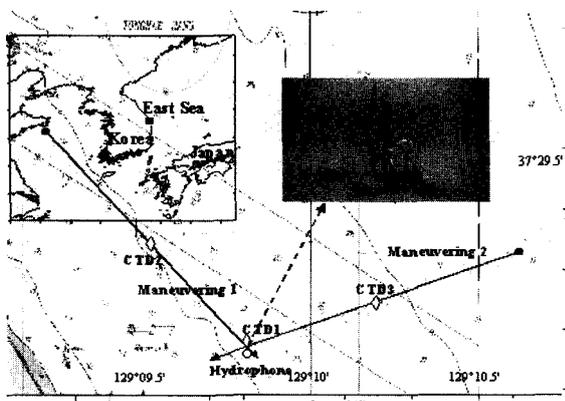


그림 1. 실험 해역 위치 및 선박 기동 경로(7)
Fig. 1. Location of the experiment area and the tracks of ship maneuvering(7).

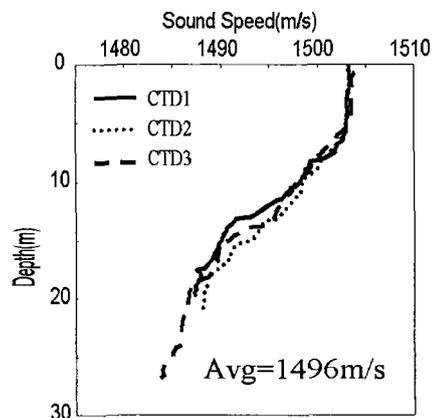


그림 2. 수중 음속의 수직 분포(7)
Fig. 2. Vertical profiles of the sound speed in water(7).

취한 암석 시료의 분석 결과로부터 5320~6030m/s와 2640~2970m/s 범위의 값을 갖는 것으로 나타났고(8) 이들의 평균 값은 5804m/s와 2806m/s 이다. 그리고 기 반암 위에 얇게 피복되어 있는 사질 퇴적물의 밀도와 음파 전달 속도의 평균값은 1.9kg/m³와 1650m/s 이다(9).

그림 3은 선박이 수심 변화가 거의 없는 경로 1을 따라 접근할 때 해저면에서 0.4m 떨어진 청음기에서 수신한 신호를 거리-주파수 영역의 스펙트로그램으로 처리하여 나타 낸 것이다. 임의의 주파수에서 음의 세기(intensity)의 거리에 따른 변화는 세기가 강하게 나타나는 검은색 부분 과 세기가 약하게 나타나는 흰색 부분이 번갈아 나타남을 볼 수 있는데 이는 서로 다른 경로를 통해 전달된 음파의 간섭(또는 중첩)에서 기인한다. 한 개의 주파수가 아니라 특정 주파수 대역 범위에서는 음압이 세게 나타나는 부분 이 거리-주파수 영역의 스펙트로그램에서 줄무늬의 형태로 번갈아 나타남을 볼 수 있다.

거리-주파수 영역 스펙트로그램에 나타나는 줄무늬의 기 울기는 일정한 것이 아니라 수중음속 구조(11) 또는 수심 (7,12)이 변화함에 따라 변할 수 있음이 설명된 바 있다. 하지만 그림 3의 줄무늬 패턴에서 특이한 사항은 간섭으로 발생하는 줄무늬의 기울기가 주어진 거리-주파수 영역에서 주파수가 낮아짐에 따라 기울기가 주파수 축에 평행해졌다 가 60Hz 이하에서는 반대의 기울기를 가지는, 즉 기울기의 부호가 (+)에서 (-)로 변하는 양상이 나타남을 볼 수 있다. 다음 절에서는 이러한 현상의 원인을 해저면의 전단 파 특성과 관련지어 고찰하였다.

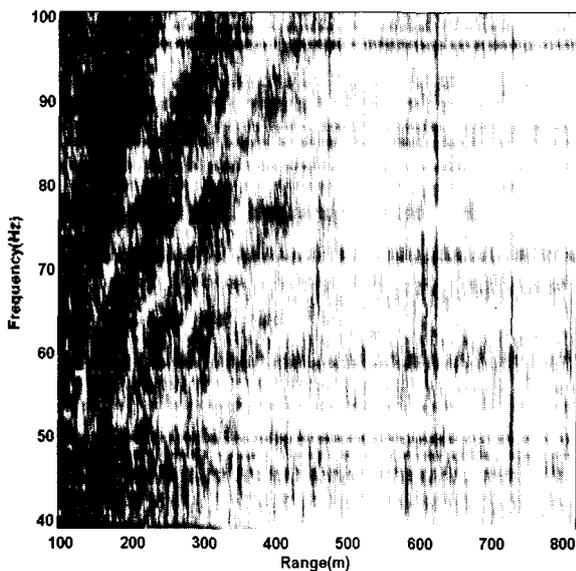


그림 3. 선박 소음의 스펙트로그램에 나타나는 줄무늬 패턴
Fig. 3. Striation pattern appearing in the spectrogram of ship noise.

III. 줄무늬 패턴과 모드 간섭

거리-주파수 영역의 스펙트로그램에 나타나는 광대역 줄 무늬 현상은 정상 모드 이론을 이용하여 모드 간섭으로 설 명하면 편리하다. 임의의 거리 및 주파수에서의 줄무늬의 기울기는

$$\frac{r}{\omega} \frac{d\omega}{dr} \equiv \beta \equiv - \frac{\Delta S_{lm}^p}{\Delta S_{lm}^g} \quad (1)$$

로 정의할 수 있다(13). 여기서 ΔS_{lm}^p 와 ΔS_{lm}^g 는 l 번 제 모드와 m 번 제 모드의 위상 기울기(phase slowness)와 군 기울기(group slowness)의 차이로서

$$\Delta S_{lm}^p = \frac{1}{v_l} - \frac{1}{v_m}, \quad \Delta S_{lm}^g = \frac{1}{u_l} - \frac{1}{u_m} \quad (2)$$

를 의미한다. v_l 과 u_l 는 l 번 제 모드의 위상 속도와 군 속도로서

$$v_l = \frac{\omega}{x_l}, \quad u_l = \frac{d\omega}{dx_l} \quad (3)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 ω 는 각 주파수(angular frequency)이고 x_l 은 l 번 제 모드의 수평 방향 파수 이다.

모드의 위상 속도는 음원으로부터 방사되는 수평 각(grazing angle)과 관련이 있다. 차수가 낮은 모드 일수록 수평 방향 파수가 큰 값을 가지므로 보다 느린 속도로 보다 수평에 가까운 방향으로 진행하는 파동에 해당한다. 따라서 $m > l$ 인 경우에 서로 다른 모드 사이의 위상 기 울기 차이는 양의 부호가 되는 값을 가진다.

모드의 군 속도는 음파 전달 환경 및 음원과 수신기의 배치가 정해진 상태에서 모드 전달에 소요되는 시간과 관 련이 있다. 도파관 내부에서의 수직 음속 분포가 균일하여 경계면에서의 반사만 발생하는 경우에는 차수가 낮은 모드 일수록 수평에 가까운 방향으로 진행하여 전달 거리가 고차 모드보다 상대적으로 짧으므로 속도가 빠르고 차수가 높은 모드일수록 수직에 가까운 방향으로 전달되므로 전달 거리가 상대적으로 증가하여 늦게 도달하게 된다. 이러한 경우 에 군 기울기는 부호가 음인 값을 갖고 위상 기울기와 군 기울기는 서로 반비례하는 관계가 된다. 결과적으로 β 는 양 의 부호를 갖는 값을 가진다. 대표적으로 이상적인 음 도파 관 환경에서는 $\beta \approx +1$ 이다. 즉, 주어진 거리-주파수 영역 에서의 줄무늬 기울기는 한 개의 일정한 값을 가진다(13).

하지만 심해 환경처럼 수심도 깊고 수중 음속 구조에 최소 음속층이 존재하여 음 전달이 경계면에서의 반사보다는 수층 내부에서의 굴절에 의해 결정되는 환경에서 음원과 수신기가 최소 음속층 부근에 위치하는 경우에는 차수가 낮은 모드일수록 군 속도가 느리고 고차 모드일수록 빨리 전달된다. 이러한 경우에 군 기울기는 양의 부호값을 가지고 위상 기울기와 군 기울기는 서로 비례하는 관계가 된다. 결과적으로 β 는 음의 부호를 갖는 값을 가진다. 예를 들어 최소 음속층이 해수면 가까이 위치하고 수심이 깊어 질수록 음속이 일정 비율로 증가하는 북극해 같은 환경에서는 $\beta \approx -3$ 이다[13].

앞의 두 경우에서처럼 특수한 환경에서는 거리-주파수 영역 스펙트로그램의 임의의 점에서의 줄무늬 기울기, 즉 β 가 1개의 값으로 나타나지만 반사 및 굴절 효과가 복합적으로 작용하는 보다 일반적인 해양 환경에서는 1개의 값이 아니라 여러 기울기가 존재하는 분포의 양상을 띠므로 [14]. 특정한 조건에서는 그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 기울기의 부호가 반대인 줄무늬가 나타나는 것도 생각해 볼 수 있을 것이다.

VI. 해저면 음향 특성 변화에 따른 줄무늬 패턴 변화

그림 3의 선박 소음 스펙트로그램에 나타나는 줄무늬와 해양 환경적 요인과의 관련성을 고찰하기 위하여 정상 모드 방법에 기반한 음장계산 모델(15)을 이용하여 해저면 음향 인자 변화에 따른 광대역 간섭 패턴을 모의하였다 (표 1, 그림 4~그림 5). 이때 해저에서의 감쇠 효과는 고려하지 않았다.

4.1 거리-주파수 영역 줄무늬 패턴 모의

그림 4~그림 5는 표 1에 주어진 입력 환경을 적용하여 모의한 전달 손실을 그림 3의 스펙트로그램 양식으로 나타낸 것이다. 수치 모의 결과는 실험 결과와의 비교를 위해 거리는 2m 간격으로 주파수는 1Hz 간격으로 계산한 후 각각의 주파수의 100m~800m 범위에서의 최소 및 최대 전달손실값이 1과 0이 되도록 정규화(normalization)하여 나타내었다. 검은색으로 나타나는 1에 가까울수록 상대적으로 전달손실이 적은, 즉 그림 3에서와 같이 음의 세기가 강한 부분을 의미한다.

먼저 실험 해역의 해저면을 밀도 2.2kg/m³, 음속 2400m/s인 유체로 가정한 경우의 줄무늬 패턴 (그림 4(a))은 73Hz를 기준으로 음장 특성이 뚜렷이 구분됨을 볼 수 있다. 73Hz 이하의 주파수 대역에서는 수신 음압의

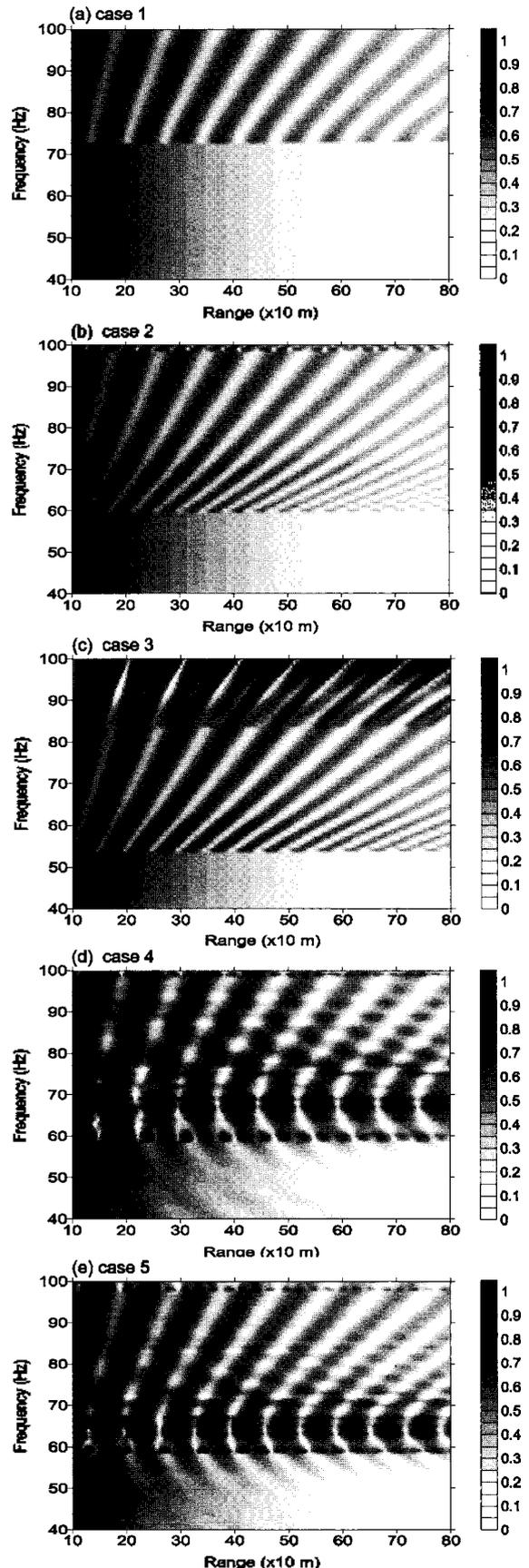


그림 4. 환경 인자가 표 1의 case 1~case 5인 경우의 줄무늬 패턴
Fig. 4. Striation patterns for the environmental parameters of case 1~case 5 of Table 1.

표 1. 음장 모의실험을 위한 모델 입력 인자

Table 1. Model input parameters for acoustic field simulation.

	water		sediment			basement		
	density (kg/m ³)	sound speed (m/s)	density (kg/m ³)	sound speed (m/s)	thickness (m)	density (kg/m ³)	sound speed (m/s)	shear speed (m/s)
case 1	1.0	Fig. 2	-	-	-	2.2	2400	-
case 2			-	-	-	2.7	5250	-
case 3			1.9	1650	5	2.7	5250	-
case 4			-	-	-	2.7	5250	2500
case 5			-	-	-	2.7	5804	2806
case 6			1.9	1650	1	2.7	5804	2806
case 7			1.9	1650	3	2.7	5804	2806
case 8			1.9	1650	5	2.7	5804	2806
case 9			1.9	1650	10	2.7	5804	2806

※ bottom depth : 20.0m, source depth : 3.0m, receiver depth : 19.5m

세기가 거리가 증가함에 따라 일정하게 감소만 하는 경향을 보이지만 73Hz 이상에서는 일정하게 감소만 하는 것이 아니라 높고 낮음이 반복적으로 나타나면서 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다. 이것은 음장에 기여하는 모드의 수가 주파수에 따라 변하는 것으로 설명할 수 있다.

해양을 수중의 밀도와 음속은 균일하고 해수면에서는 압력이 소멸하고 해저면은 음속과 밀도가 균일하면서 수중보다 큰 반 무한 유체가 가정하는 Pekeris 도파관이라 하면 도파관, 즉 음파 전달 환경의 특성에 의해 결정되는 모드 차단 주파수 f_n^c 은

$$f_n^c = \frac{(n-1/2)c}{2h\sqrt{1-(c/c_1)^2}}, \quad n=1,2,\dots \quad (4)$$

으로 주어진다(16). 여기서 n 은 모드 번호, h 는 수심, c 는 수중에서의 음파 속도, c_1 은 해저면에서의 음파 속도를 의미한다. 위 식은 주어진 환경에서 각각의 모드가 존재할 수 있는 주파수 대역을 나타낸다.

식 (4)를 이용하여 그림 4(a)의 환경에 대하여 제 2모드의 차단 주파수를 구하면 약 73Hz이다. 따라서 그림 4(a)의 결과는 73Hz 이상에서는 1번과 2번의 2개 모드가 존재하기 때문에 모드 상호간의 보강 또는 상쇄 간섭 효과로 음압의 변동, 즉 줄무늬가 나타나지만 73Hz 이하에서는 2번 모드는 차단되고 1번 모드만 존재하여 모드 간섭이 발생하지 않기 때문에 줄무늬가 나타나지 않는 것임을 알 수 있다.

그림 4(a)의 제 2 모드 차단 주파수인 73Hz는 그림 3의 실험 결과에서 볼 수 있는 약 60Hz 부근의 제 2 모드 차단 주파수라 생각되는 부분 보다 높게 나타난다. 수중 음속과 수심이 일정한 경우에 차단 주파수가 낮아지기 위해서는 해저면 음속이 증가하여야 한다. 따라서 그림 3을 적절히 설명하기 위해서는 실험 해역의 해저면 음속이

2400m/s보다 큰 값을 가져야 함을 짐작할 수 있다.

그림 4(b)는 해저면 음속이 보다 큰 값인 5250m/s인 경우에 대한 간섭 형태를 나타낸 것이다. 해저면 음속의 증가에 따라 제 2 모드의 차단 주파수가 보다 낮은 주파수인 60Hz로 이동할 뿐만 아니라 99Hz 이상에서는 제 3 모드의 기여가 시작됨을 볼 수 있다. 줄무늬 패턴이 그림 4보다는 실험 결과에 보다 가까이 근접했다고 볼 수 있겠다. 하지만 그림 4(b)에서도 실험 결과에서는 나타나는 60Hz 부근에서의 간섭 무늬 기울기의 부호 변화와 60Hz 이하에서의 간섭 양상은 나타나지 않음을 알 수 있다.

그림 4의 (a)와 (b)는 표 1의 case 1과 case 2에 해당하는 것으로 해저면을 유체의 성질을 갖는 1개의 반 무한 층으로 고려한 경우이다. 이러한 경우는 퇴적층이 존재 하더라도 두께가 두꺼워서 기반암의 영향을 무시할 수 있거나 퇴적층이 없이 기반암이 노출되어 수층과 맞닿아 있는 경우라 할 수 있다. 한편 표 1의 case 3은 실험해역의 수층과 기반암 사이에 두께가 비교적 얇은 사질 퇴적층이 분포하는 경우를 가정한 것이다. 그림 4(c)에 나타난 이 환경에 대한 줄무늬 패턴에서도 실험 결과에서 볼 수 있는 특징이 나타나지 않음을 알 수 있다. 다만 퇴적층의 존재로 인하여 기반암까지의 깊이가 증가하여 제 2 및 제 3 모드의 차단 주파수가 54Hz와 84Hz로 그림 4(b)의 경우보다 낮아졌음을 볼 수 있다.

그림 4(d)는 표 1의 case 4에 대한 수치 모의 결과를 나타낸 것이다. case 2와 해저면에서의 음파 속도는 동일 하지만 해저면을 유체가 아닌 탄성이 있는 매질로 고려하여 전달파 속도까지 포함한 경우이다. 이 경우에서야 비로소 실험 결과와 유사하게 줄무늬 기울기가 주파수 축에 평행하게 되는 부분이 나타날 뿐만 아니라 60Hz 이하에서도 기울기의 부호가 역전된 줄무늬가 나타남을 볼 수 있다.

그림 4(e)는 최근에 보고된(8) 실험 해역의 기반암에 대한 지음향 특성값을 입력하여 모의한 결과로서 표 1의

case 5에 해당한다. 이때 기반암의 밀도에 대한 값은 보고된 결과가 없으므로 case 4의 경우와 동일한 값을 적용하였다. 그림 4(d)와 비교할 때 현격한 차이는 보이지 않지만 해저면에서의 음속 증가로 인해 줄무늬 기울기의 부호 변화가 발생하는 주파수가 보다 낮은 쪽으로 이동하였음을 볼 수 있다.

그림 4의 결과들은 해저면을 탄성이 있는 매질로 고려하여야 실험 결과에 나타나는 줄무늬 기울기의 부호 변화를 설명할 수 있음을 보여주는 것이라 할 수 있다.

그림 4(e)를 그림 3의 실험 결과와 비교하면 줄무늬의 출현 양상에 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 먼저 그림 4(e)에서는 거리 800m까지 줄무늬가 뚜렷이 나타나지만 그림 3에서는 거리가 증가함에 따라 줄무늬가 희미해지다가 약 600m 이상에서는 거의 나타나지 않음을 볼 수 있다. 이것은 그림 4(e)의 모델 결과가 해저에서의 음파 및 전단파의 감쇠 효과를 고려하지 않았기 때문일 수 있다. 또는 선박의 소음 수준이 충분히 높지 않아서 거리 600m 이상에서는 배경소음 수준에 묻혀버렸기 때문일 수도 있을 것이다. 여기에서는 더 이상 논의하지 않겠지만 전자의 영향일 가능성이 큰 것으로 생각된다. 향후에 신호대 잡음비가 보다 양호한 실험을 통해 확인할 필요가 있는 사항이라 생각된다.

그리고 100Hz에서의 음 세기의 거리 변화에 따른 변동 양상을 보면 음의 세기가 강한, 즉 검은색 부분이 나타나는 지점이 서로 일치하지 않음을 볼 수 있다. 이것은 실험 해역 기반암에 대한 음파 및 전단파 속도값이 5320~6030m/s 및 2640~2970m/s의 범위 값을 가지는 것으로 보고 되었으나 그림 4(e)에서는 평균값인 5804m/s와 2806m/s를 이용한 것에서 기인한 것일 수 있다. 또는 정확한 두께는 알 수 없지만 실험 해역의 해저 표면에 얇게 퍼브되어 있는 것으로 보고된(9) 사질 퇴적물을 고려하지 않은 것도 한 요인일 것으로 생각된다. 실제로 그림 1에 제시된 청음기 설치 상태 촬영 당시에 육안으로 확인한 해저 표면은 사질 퇴적물이 분포되어 있었으므로 후자의 영향이 클 것이라 생각된다.

퇴적물의 두께 변화에 따른 간섭 패턴 변화 양상을 고찰하기 위하여 표 1의 case 6~case 9에서와 같이 퇴적물의 두께가 1~10m 범위에서 변하는 경우에 대한 음장 모의 결과를 그림 5에 나타내었다.

그림 5의 결과들은 주어진 환경에서 퇴적물의 두께 변화에 따라 간섭 패턴이 민감하게 달라질 수 있으며 이것으로부터 퇴적물의 두께를 추정하는 것도 가능할 수 있음을 보여주는 것이라 할 수 있다.

실험 해역에서의 퇴적물 두께에 대해서는 알려진 바가 없으므로 정확한 두께를 알 수는 없으나 실험과 모델 결과

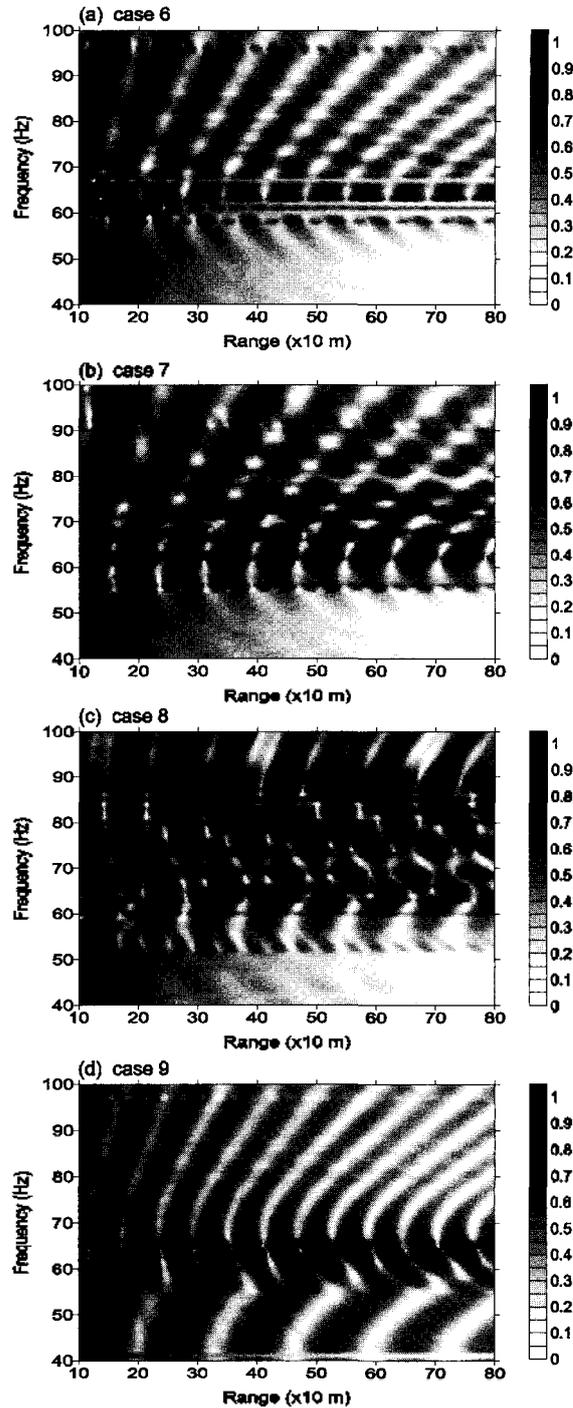


그림 5. 환경 인자가 표 1의 case 6~case 9인 경우의 줄무늬 패턴
Fig. 5. Striation patterns for the environmental parameters of case 6~case 9 of Table 1.

의 줄무늬 패턴에 대한 정성적 (qualitative)인 비교를 토대로 판단해보면 퇴적물 두께가 5m 이상인 경우에는 실험 결과와 많은 차이가 있음을 볼 수 있다. 퇴적물 두께가 1m와 3m일 때가 비교적 실험 결과와 유사하나, 앞에서 언급한 100Hz에서의 음압 변동 특성과 줄무늬 기울기의 부호가 변하는 주파수를 판단 기준으로 하여 비교해보면

두께 3m일 때의 모델 결과가 실험 결과와 거의 유사함을 알 수 있다. 따라서 그림 5의 결과와 그림 5에서 모의하지 않은 경우까지 감안하여 판단할 경우에 실험 해석의 사실 퇴적물 두께는 약 $3 \pm 1m$ 정도일 것으로 예상해 볼 수 있겠다.

그림 4와 그림 5의 결과를 종합해보면 실험 결과에 나타나는 줄무늬 기울기의 부호변화는 해저면의 전단성 (shear property). 보다 구체적으로는 기반암의 전단성에서 기인한 현상임을 알 수 있다. 사실 퇴적물의 전단파 속도까지 고려한 경우를 본문에 제시하지는 않았지만 일반적으로 알려진 속도를 고려하여 모의한 결과는 그림5(b)와 거의 차이가 없음을 볼 수 있었다. 이것은 퇴적물이 사실인 경우에는 전단파의 속도값이 매우 작아 거의 유체의 성질을 가지기 때문이라고 할 수 있다. 다만 기반암 위에 퇴적물이 얇은 두께로 분포하는 경우에는 음파가 퇴적층과 기반암 경계에서 반사될 때 발생하여 퇴적층 내에서 전달되는 전단파의 감쇠 효과가 중요할 수 있고(17), 이로 인하여 줄무늬 패턴에 변화가 있을 수도 있으므로 별도의 논의가 필요한 부분이라고 생각된다.

4.2 모드 분산 (dispersion) 특성 분석

식 (1)에서 볼 수 있듯이 간섭 줄무늬의 기울기는 정상 모드 이론의 관점에서는 위상 기울기와 군 기울기의 비로 정의가 가능함을 알 수 있다. 이 경우에 줄무늬가 주파수 축에 평행해지기 위해서는, 즉 $\beta \approx \infty$ 가 되기 위해서는 임의의 2개 모드 사이의 군 기울기 차이가 없어야 하고 이것은 곧 군 속도가 같음을 의미한다. 또 $\beta \approx \infty$ 인 주파수를 전후하여 줄무늬 기울기의 부호가 변하기 위해서는 2개 모드의 군 속도 차이의 부호가 바뀌어야 가능하다.

여기서는 줄무늬 기울기의 부호 변화와 해저면 성질 사이의 관련성을 고찰하기 위하여 모드 위상 속도와 군 속도

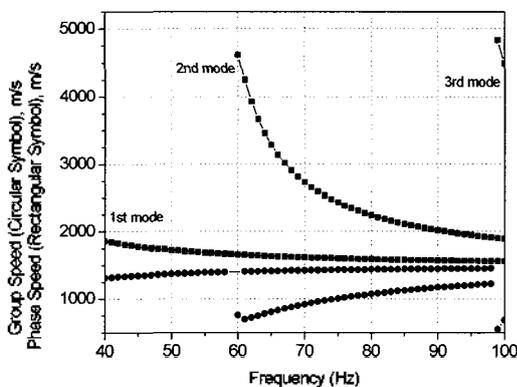


그림 6. 환경 인자가 표 1의 case 2인 경우의 모드 위상 속도 및 군 속도

Fig. 6. Modal phase speeds and group speeds for the environmental parameters of case 2 of Table 1.

의 분산 특성을 분석하고자 한다.

그림 6은 해저면을 탄성이 없는 유체로 고려한 표 1의 case 2 환경에 대한 음장 (그림 4(b))에 기여하는 모드의 위상 속도와 군 속도의 분산 곡선을 나타낸 것이다. 모드의 위상 속도와 군 속도가 주파수에 따라 달라지는, 즉 파장에 따라 전달 속도가 다른 분산 성질과 모드 차단 주파수를 잘 나타내주고 있다. 하지만 서로 다른 모드 사이에 군 속도가 같은 값을 갖는, 즉 서로 교차하는 주파수가 발생하지 않음을 볼 수 있다. 이로 인해 그림 4(b)에서는 $\beta \approx \infty$ 와 β 의 부호 변화가 발생하지 않을 수 있음을 알 수 있다.

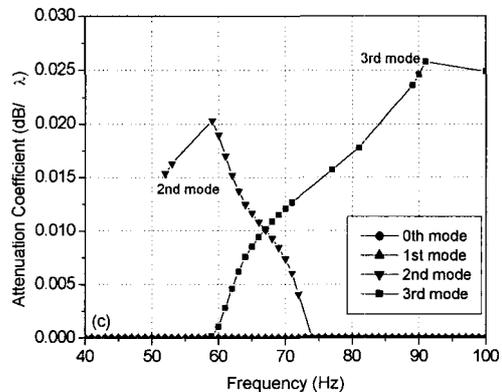
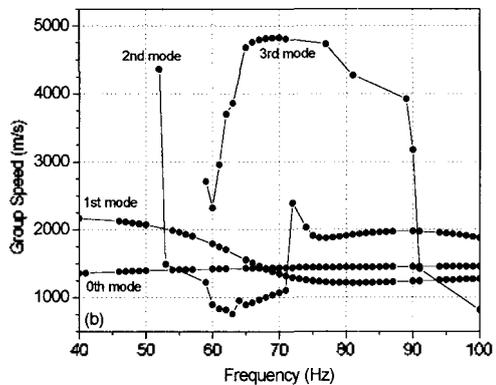
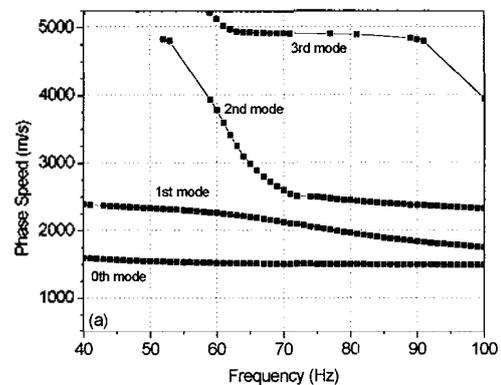


그림 7. 환경 인자가 표 1의 case 4인 경우의 모드 위상 속도 (a), 군 속도 (b) 및 감쇠 계수 (c)

Fig. 7. Modal phase speeds (a), group speeds (b) and attenuation coefficients (c) for the environmental parameters of case 4 of Table 1.

그림 7에는 그림 6과의 비교를 위해 해저면 전단성을 고려한 경우인 case 4에 대한 음장(그림 4(d))에 기여하는 모드의 위상 속도와 군 속도 및 감쇠 계수를 나타내었다.

먼저 그림 7(a)의 모드 위상 속도의 특성을 보면 해저를 유체로 고려하는 경우에는 없던 0번 모드가 나타남을 볼 수 있다. 이 성분은 Scholte wave라고도 하는 성분으로 해저면 탄성을 고려하는 경우에만 발생하는 파이다 [18]. 또 모드 차단 주파수가 보다 낮은 주파수로 이동하였음을 볼 수 있다.

그림 7(b)의 군 속도 분산 곡선은 그림 6과는 다르게 서로 다른 모드 사이에 군 속도가 같아지는 주파수가 여러 곳에서 발생함을 볼 수 있다. 특히 0번 모드와 1번 모드가 교차하는 58Hz는 그림 4(d)에서 줄무늬가 주파수 축에 평행해지는 주파수와 일치함을 알 수 있다. 또한 그림 4(d)에서 58Hz를 전후하여 간섭 줄무늬 기울기의 부호가 변하는 것은 이 주파수를 전후하여 군 속도 차이의 부호가 바뀐에서 기인한 결과임을 알 수 있다(식 (1)과 (2) 참조). 따라서 그림 4(d)에 나타나는 간섭 패턴은 0번 모드와 1번 모드가 우세하게 기여한 결과임을 알 수 있다.

한편 2번 모드도 53Hz와 71Hz 부근에서 0번 및 1번 모드와 교차하는 주파수가 발생하는데 그림 4(d)에서는 이들 주파수에서 $\beta \approx \infty$ 가 되는 뚜렷한 징후가 나타나지 않음을 볼 수 있다. 이것은 그림 7(c)의 모드 감쇠 계수 분포에서 볼 수 있듯이 2번 모드가 74Hz 이하에서는 감쇠가 있는 모드이므로 74Hz이하의 음장 형성에는 기여도가 작기 때문이라고 판단할 수 있다.

해저면 감쇠를 포함하지 않았는데도 모드의 감쇠가 발생하는 까닭은 음 에너지의 일부가 전단파로 바뀌어 손실되기 때문이다.

하지만 74Hz 이상에서는 2번 모드가 감쇠가 거의 없는 모드로 전환됨을 볼 수 있다. 따라서 음장 형성에 기여할 수 있음을 짐작할 수 있다. 이 효과는 그림 4(d)의 74Hz 이상에서 양의 기울기를 갖는 줄무늬와 음의 기울기를 갖는 줄무늬가 중첩되어 나타나는 듯한 양상에서 발견할 수 있다. 이 주파수 대역에서 0번 모드와 1번 모드의 간섭에 의한 줄무늬 기울기는 (+) 부호이지만 0번 모드와 2번 모드의 간섭에 의한 줄무늬 기울기는 (-) 부호가 됨을 그림 7(b)와 식 (1) 과 (2)로부터 알 수 있다.

V. 결론

본문에 제시한 분석 결과들을 토대로 판단해 보면 해상 실험을 통해 획득한 선박 방사소음 신호에 나타나는 줄무늬 기울기의 부호 변화 특징은 해저면 전단성, 특히 기반

암의 전단성에서 기인한 특징이라 할 수 있겠다.

또한 퇴적물의 두께를 달리하며 모의한 결과와 실험 결과를 비교해보면 기반암 위에 분포하는 사질 퇴적물의 두께는 $3 \pm 1m$ 정도가 될 것으로 생각된다. 하지만 이는 기반암 속도에 대한 평균 값을 적용하였을 때의 결과임과 동시에 정성적인 비교 결과임을 염두에 두어야 한다. 향후에 보다 객관적인 패턴 비교 기법을 적용하여 정량적인 추정 연구를 수행해 볼 필요가 있을 것이다.

이 논문에 나타낸 결과들은 선박 신호를 측정하여 얻을 수 있는 광대역 줄무늬 패턴이 해저면의 음향 특성에 따라 다르게 나타날 수 있음을 보여주는 것이라 할 수 있으므로 향후에 줄무늬 패턴을 이용한 지음향 인자 역산 연구가 필요하다 고 생각한다. 이러한 접근은 기존의 방법들보다 경제성 및 실험의 편의성 측면에서 이점이 있을 것이라 여겨진다.

감사의 글

이 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. F. B. Jensen, "Excess attenuation in low-frequency shallow-water acoustics", in *Shear Waves in Marine Sediments* (Kluwer, Dordrecht, 1991) edited by J. M. Hovem, D. Richardson and R. D. Stoll, 421-430.
2. G. Y. Kim, D. C. Kim, "Shear wave velocity in unconsolidated marine sediments of the western continental margin, the East Sea", *J. Acoust. Soc. Kor.*, 22(4E), 167-175, 2003.
3. A. Barbagelata, M. Richardson, B. Miaschi, E. Muzi, P. Guerrini, L. Troiano and T. Akal, "ISSAMS : An in situ sediment acoustic measurement system", in *Shear Waves in Marine Sediments* (Kluwer, Dordrecht, 1991) edited by J. M. Hovem, D. Richardson and R. D. Stoll, 305-312.
4. D. M. F. Chapman and P. R. Staal, "Summary of DREA observations of interface waves at the seabed", in *Shear Waves in Marine Sediments* (Kluwer, Dordrecht, 1991) edited by J. M. Hovem, D. Richardson and R. D. Stoll, 177-184.
5. H. B. Ali and M. K. Broadhead, "Shear wave properties from inversion of Scholte wave data", in *Full Field Inversion Methods in Ocean and Seismo-Acoustics* (Kluwer, Dordrecht, 1995) edited by O. Diachok, A. Caiti, P. Gerstoft and H. Schmidt, 371-376.
6. L. D. Bibee and L. M. Dorman, "Full waveform inversion of seismic interface wave data", in *Full Field Inversion Methods in Ocean and Seismo-Acoustics* (Kluwer, Dordrecht, 1995) edited by O. Diachok, A. Caiti, P. Gerstoft and H. Schmidt, 377-382.

7. 오철민, 이성욱, 오선태, 나정열, "해저면 경사가 일정한 천해에서의 광대역 간섭 유형", 한국음향학회지, 21(5), 485-493, 2002.
8. 이치원, 민건홍, 이호영, 진재학 등, "체계살치해역의 탄성파층서 및 심부시 추 자료획득: 제3차 연차보고서", 국방과학연구소 기술보고서, NSDC-417-030266, 42-44, 2003.
9. 이치원, 민건홍, 이호영, 진재학 등, "체계살치해역의 탄성파층서 및 심부시 추 자료획득: 제2차 연차보고서", 국방과학연구소 기술보고서, NSDC-417-020167, 146, 2002.
10. 김성일, 김영규, 심태보, "Waveguide invariant 이론과 응용", 제17회 수중음향학 학술발표회 논문집, 107-109, 한국음향학회, 2002.
11. Seongil Kim, Young-Gyu Kim and Taebo Shim, "Group-phase speed structure of acoustic propagation in a fluctuating ocean", Proc. of Inter-noise 2003, 4301-4303, Korea, Aug., 2003.
12. S. V. Burenkov, "Distinctive features of the interference structure of a sound field in a two-dimensionally inhomogeneous waveguide", Sov. Phys. Acoust. 35(5), 465-467, 1989.
13. L. M. Brekhovskikh, Y. P. Lysanov. *Fundamentals of Ocean Acoustics*, 3rd ed., (AIP, New York, 2003), 143-148.
14. D. Rouseff and R. C. Spindel, "Modeling the waveguide invariant as a distribution", in *Ocean Acoustic Interference Phenomena and Signal Processing* (AIP, Melville, 2002) edited by W. A. Kuperman, G. L. D'Spain, 137-148.
15. M. B. Porter, "The KRAKEN normal mode program", Naval Research Lab. Tech. Report, NRL/MR/5120-92-6920, 1992.
16. G. V. Frisk, *Ocean and Seabed Acoustics* (Prentice Hall, 1994), Chap. 5, 150-152.
17. D. Tollefsen, "Thin-sediment shear-induced effects on low-frequency broadband acoustic propagation in a shallow continental sea", J. Acoust. Soc. Am. 104(5), 2718-2726,

1998.

18. D. D. Ellis and D. M. F. Chapman, "A simple shallow water propagation model including shear wave effects", J. Acoust. Soc. Am. 78(6), 2087-2095, 1985.

저자 약력

• **이성욱 (Seongwook Lee)**

한국음향학회지 제 21권 제 5호 참조

• **한주영 (Jooyoung Hahn)**

한국음향학회지 제 23권 제 1호 참조

• **백운 (Woon Baek)**



1993년 3월: 해군사관학교 조선공학과 (이학사)
 1993년 4월~현재: 해군 제 000 부대
 2002년 3월~2004년 2월: 한양대학교 지구해양학과 (이학석사)

*주관심분야: 수중음향

• **나정열 (Jungyul Na)**

한국음향학회지 제 22권 제 2호 참조