

이동 표적에 의한 광대역 간섭패턴의 지음향 인자 영향

Influence of the Geoacoustic Parameters of Seabed Appearing
in the Broadband Interference Pattern by Moving Targets

한 주 영* **이 형 욱*** **이 봉 기***
Hahn, Joo-Young Lee, Hyeong-Uk Lee, Bong-Ki

ABSTRACT

A range-frequency interference pattern is analyzed in the course of the propagation of ship noise in shallow water. It has been shown to exhibit striated bands of intensity maxima and minima in the spectrogram. The slope of the striations is an invariant of the modal interference and is described by a waveguide invariant parameter β . It turns out that this interference pattern is useful for identifying the physical properties of the waveguide such as seabed properties. In this article, the interference pattern is analyzed using image processing techniques to produce the distribution of the beta and the effects of sediment types and geoacoustic parameters on beta distribution are examined and characterized by moments of the distributions.

주요기술용어(주제어) : Ship-Radiated Noise(선박 방사소음), Range-Frequency Domain Spectrogram(거리-주파수 스펙트로그램), Striation Pattern(줄무늬 패턴), Mode Interference(모드간섭), Geoacoustic Parameters(지음향인자)

1. 서론

수중에서의 원거리 표적 탐지 또는 소나 성능 예측 목적으로 음장을 정확히 예측하기 위해서는 환경에 적합한 음향 모델의 선정과 환경 입력 자료가 필수적이다. 음향 모델은 이론 및 연산 속도의 발달과 더불어 여러 복잡한 환경을 보다 정확히 고려할 수 있는 수치 모델이 과거 수십 년 동안 지속적으로 개발되어 왔다. 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 물리적 성질에 크게 영향을 받으므로 음장을 정확히 예측하기 위해서는 해저면의 음향 특성과 관련된 인자(퇴적층내의 음속, 밀도, 감쇄계수, 두께)를 충분히 고려하는 것이 필요하다^[1].

이에 본 논문에서는 별도의 음원을 사용하지 않고 선박이 기동할 때 지속적으로 방사되는 광대역 소음을 음원 신호로 이용하여 해저면의 음향 특성에 대한 정보를 획득하는 것이 가능한지를 고찰 하고자 한다. 이를 위하여 천해환경에서 모의한 이동표적 신호의 거리-주파수 영역 스펙트로그램에 나타나는 줄무늬

† 2007년 3월 5일 접수~2007년 4월 27일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : jyhahn@add.re.kr

패턴 특성을 해저면 지음향 인자 변화의 관점에서 수치 모델을 이용하여 모의하고 분석 하였다. 이러한 접근은 선박소음을 이용한 지음향 인자 역산 연구의 가능성에 대한 고찰도 도움이 될 것이라 생각한다.

2. 광대역 연속신호의 간섭패턴

음도파관 불변인자(β)는 주어진 환경에서 음파의 분산적인 전파특성을 표시하는 스칼라(scalar)량으로 해양에서 광대역음원에 의해 나타나는 스펙트로그램의 줄무늬 간섭 기울기와 방향을 알 수 있게 해준다.

거리-주파수 영역의 스펙트로그램에 나타나는 광대역 줄무늬 현상은 정상 모드 이론을 이용하여 모드 간섭으로 설명할 수 있다. 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^[2]. 여기서 ΔS_{lm}^p 와 ΔS_{lm}^g 는 1번째 모드와 m번째 모드의 위상 기울기(phase slowness)와 군 기울기(group slowness)의 차이로서

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

를 의미한다. v_l 과 u_l 은 1 번째 모드의 위상속도와 군 속도로서

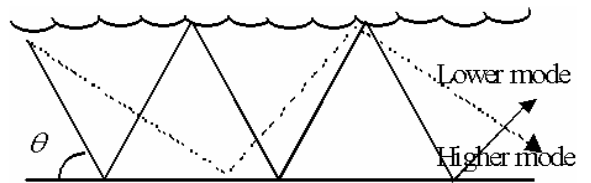
$$v_l = \frac{\omega}{\chi_l}, \quad u_l = \frac{d\omega}{d\chi_l} \quad (3)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 ω 는 각주파수(angular frequency)이고 χ_l 은 1 번째 모드의 수평 방향 파수이다.

모드의 위상 속도는 음원으로부터 방사되는 수평각(grazing angle)과 관련이 있는데, 차수가 낮은 모드일수록 수평 방향 파수가 큰 값을 가지므로 보다 느

린 속도로 수평에 가까운 방향으로 진행하는 파동에 해당한다. 따라서 $v_m > v_l$ 인 경우에 서로 다른 모드 사이의 위상 기울기 차이는 양의 부호가 되는 값을 가진다^[2].

모드의 군속도는 음파 전달 환경 및 음원과 수신기의 배치가 정해진 상태에서 모드 전달에 소요되는 시간과 관련이 있는데, 도파관 내부에서의 수직 음속 분포가 균일하여 경계면에서의 반사만 발생하는 경우에는 차수가 낮은 모드일수록 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(그림 1). 이러한 경우에 군 기울기는 부호가 음인 값을 갖고 위상 기울기와 군 기울기는 서로 반비례하는 관계가 된다. 결과적으로는 양의 부호를 갖는 값을 가진다. 대표적으로 이상적인 해양 도파관 환경(Ideal Waveguide)에서는 1이다. 즉 주어진 거리-주파수 영역에서의 줄무늬 기울기는 한 개의 일정한 값을 가지게 된다^[3].



[그림 1] 천해 해양환경에서 모드전파

이와 같이 특수한 환경에서는 거리-주파수 영역 스펙트로그램의 임의의 점에서의 줄무늬 기울기, 즉 하나의 값으로 나타나지만 반사 및 굴절 효과가 복합적으로 작용하는 보다 일반적인 해양 환경에서는 한 개의 값이 아니라 여러 기울기가 존재하는 분포의 양상을 띠므로^[4], 특정한 조건에서는 줄무늬 기울기의 분포를 고려해야 한다.

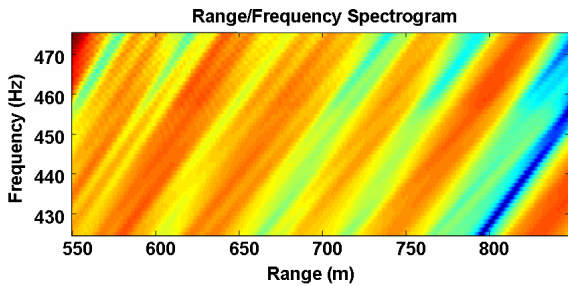
3. 음도파관 불변인자 분포의 모델링

해양 경계면에서 전반사가 일어나는 이상적인 천해 음도파관에서는 β 가 1인 값에서 높은 준위를 갖지만,

퇴적층 내에서의 음파의 상호작용으로 이루어지는 복잡한 형태의 실제 해양에서는 음장은 거리와 주파수에 따라 다른 그룹의 모드에 의해 결정되게 되고 β 는 복잡한 양상을 갖게 된다. 따라서 계측된 수신 신호의 β 분석을 위해서는 수신음의 세기를 거리와 파수의 관계를 포함한 분포함수로의 표현이 필요하다.

가. 라돈변환을 통한 β 분포추출

일반적으로 간섭패턴은 거리-주파수 영역 스펙트로그램에서 수직 축으로부터 기울어진 직선 형태로 나타내어 진다(그림 2).



[그림 2] 거리-주파수 축에서의 광대역 신호 간섭이미지

라돈 변환은 직교 좌표계의 (r, ω) 좌표를 (θ, x') 로 표현되는 라돈 영역으로 변환하는 것으로 라돈 변환에 의해 2차원 신호는 1차원의 투영신호(projection)들로 변환된다. 라돈 변환의 수학적 의미는 각 θ 에서 $I(r, \omega)$ 를 따르는 선적분을 의미한다.

$$\vec{R}(x, \theta, I(r, \omega)) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} I(x \cos \theta - y \sin \theta, x \sin \theta + y \cos \theta) dy \quad (4)$$

여기에서

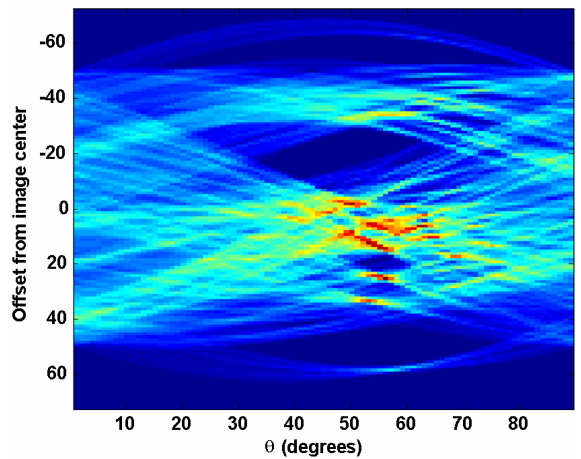
$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \omega \end{bmatrix} \quad (5)$$

이다.

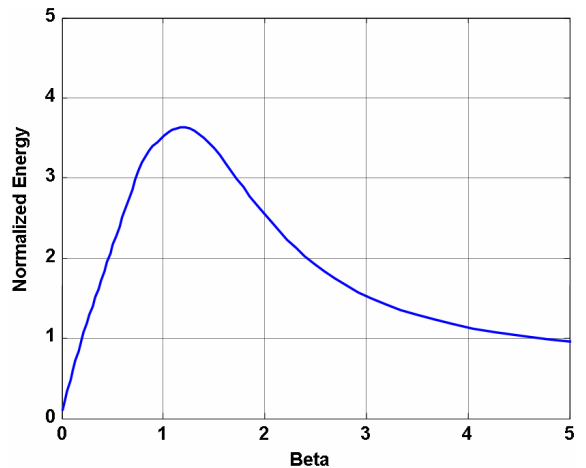
수신 신호의 음의세기 $I(r, \omega)$ 는 식에서 보인 라돈 변환에 의해 투영신호 \vec{R} 로 변환된다. 이 때 투영신

호들은 간섭패턴의 2차원 푸리에 변환과 같은 특성을 갖는다^[5].

라돈변환 이미지상의 각으로 표시된 수평축을 β 단위로 변환시키기 위해서 식 (1)이 이용되고, 이 때 변환 대상이 될 창 의 수평거리는 변환대상의 거리 폭보다 충분히 멀어야 하고, 중심주파수의 범위는 대역폭에 비하여 충분히 높아야 한다. 그림 3은 라돈 변환된 결과값이고, 그림 4는 위 간섭패턴을 β 분포로 표현한 그림이다. 그림 3의 라돈공간의 수평축은 간섭 이미지 상에서 간섭 줄무늬의 기울기를 의미하고, 그림 4의 y축은 β 에 대한 간섭 에너지 강도를 나타낸



[그림 3] 거리-주파수 간섭이미지의 라돈변환 결과



[그림 4] 거리-주파수 간섭패턴의 β 분포곡선

다. 이러한 방법으로 β 는 하나의 단일 스칼라 값이 아닌 분포로서 표현이 가능해 진다.

나. 통계처리를 통한 불변인자 정량화

모형화된 베타의 분포(그림 4)는 다음 식에 의해 왜도(skewness)와 첨도(kurtosis)로서 특징 지워질 수 있다.

$$Skew(x_1 \dots x_N) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[\frac{x_j - \bar{x}}{\sigma} \right]^3 \quad (6)$$

$$Kurt(x_1 \dots x_N) = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[\frac{x_j - \bar{x}}{\sigma} \right]^4 \right\} \quad (7)$$

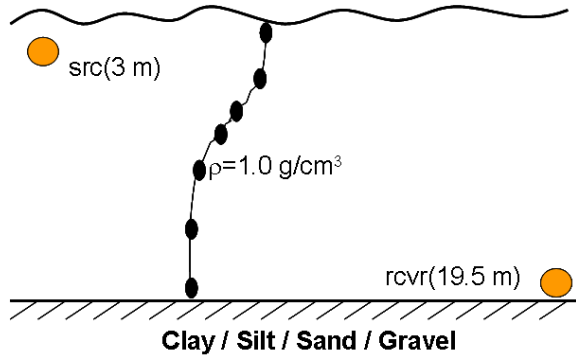
여기에서 \bar{x} 는 분포의 평균이며, $\sigma(x_1 \dots x_N)$ 은 표준편차이다. N은 전체 라돈 변환 시 선적분이 이루어진 횟수로서 계산된 Θ 의 개수와 같다.

왜도란 분포의 평균값으로부터 첨두치가 한 방향으로 치우친 정도를 나타내는 척도로 그 값이 음수이면 x의 분포는 평균값보다 왼쪽으로 치우치게 되고, 양수이면 그 반대의 경우가 된다. 또한 그 절대값으로부터 x가 얼마만큼 평균값으로부터 치우쳐 분포하는지 판단할 수 있고 그 값의 상대적인 크기로부터 해양 도파관에서 모드의 굴절과 반사를 해석할 수 있다. 첨도는 대칭 분포에서 테일(tail)이 두터운 정도를 나타내는 척도로서 분포의 테일이 두터운 경우 β 분포가 분산(diffuse)되어 나타난다는 의미이므로, 도파관내 발생하는 모드의 상대적인 진폭을 해석에 사용할 수 있다. 정규분포의 경우에는 왜도는 0 첨도는 3이다. 물론, 왜도가 0, 첨도가 3이라고 해서 모두 정규분포일 수는 없지만, 이러한 통계적 성질을 이용하여 도파관 내 불변인자 해석에 이용될 수 있는 것이다.

4. 분석

본 장에서는 전형적인 해양 퇴적층의 4가지(clay, silt, sand, gravel)와 지음향인자(퇴적층 내의 음속,

밀도, 감쇄계수, 두께)를 각각 독립적으로 변화시켜 가면서 지음향 인자변화에 따른 β 분포의 민감도 분석을 수행하였다. 수치실험은 실제 천해 해상실험에서 얻어진 음의 기울기를 갖는 수온구조를 이용하였다. 해역의 수심은 20m, 음원 수심은 3m, 수신기 수심은 19.5m로 가정 하였다. 광대역 음원으로서는 이동하는 표적의 모의를 위해서 1.2Km의 거리에서 수신기의 위치까지 8kts의 속도로 기동하는 것으로 가정 하였고, 500~900m 거리에서 수신된 신호에 대해서 분석을 하였다. 수신 신호는 중심주파수 350Hz에서 대역폭 50Hz로 가정하였으며, 정상모드이론을(KRAKEN) 이용하여 음장을 계산하고 β 분포를 모의 하였다(그림 5).



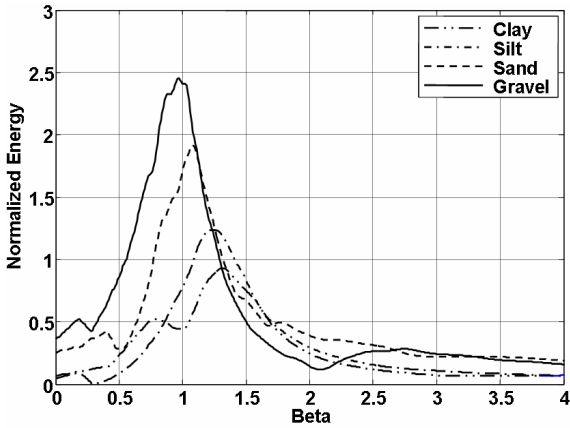
[그림 5] 수중 음속의 수직 분포

가. 퇴적층 종류에 따른 베타분포 모의

4가지 퇴적층의 종류에 따른 지음향인자는 표 1에 표시 하였다. 퇴적층에 따른 지음향 인자들은 Hamilton의 퇴적물별 지음향인자 공식에 의하여 계산하였으며 이는 퇴적층의 물성을 나타내는데 일반적으로 널리 사용되고 있는 방법이다(Hamilton, 1980)^[6].

[표 1] 퇴적물 유형에 따른 지음향인자 특성값

Bottom Type	Clay	Silt	Sand	Gravel
Sound speed(m/s)	1,500	1,575	1,650	1,800
Density(g/cm ³)	1.5	1.7	1.9	2.0
Attenuation(dB/)	0.2	1.0	0.8	0.6



[그림 6] 퇴적물 유형에 따른 음도파관 불변인자 분포의 영향

그림 6은 각각의 퇴적층 유형에 따른 β 분포의 변화양상을 보여준다. 분포의 형태(shape)와 첨두치의 위치(location of peak)는 퇴적층의 종류에 따라 변화되는 모습을 보이고 있는데, 상대적으로 강한(hard-gravel) 퇴적층일 때의 분포의 형태는 상대적으로 약한(soft-clay) 퇴적층인 경우 보다 날카로운 첨두치를 가지고 있으며, β 값은 1로 접근하는 양상을 보였다. 이는 퇴적환경에 따라 음전달에 영향을 미치는 모드의 개수로 설명을 할 수 있는데, Gravel인 경우 13개, Clay인 경우에는 6개의 모드생성으로 두배 이상의 모드가 생성됨을 알 수 있다(표 2).

[표 2] 퇴적물 유형에 따른 모드의 갯수

Bottom Type	Clay	Silt	Sand	Gravel
Number of modes	6	8	10	13

해저면이 상대적으로 강한 퇴적층인 경우, 약한 퇴적층이 존재할 때보다 거리-주파수 간섭패턴 상에 기여하는 모드의 수가 많아지고, 고차모드의 감쇄가 적어 거리-주파수 이미지 상에 미세(detail)한 정보를 제공하고, 베타분포상에 날카로운 피크가 존재하게 된다. 또한 상대적으로 고차모드는 해저면과 더욱 빈번하게 상호작용을 하게 되는데(그림 1), 약한 해저면일수록 다중반사에 의해 고차모드의 감쇄가 더욱 심

해지게 되므로, 고차모드가 사라지고, 고차모드가 적어질수록, 분포곡선에서 음장에서 미세한 정보는 없어지게 되어, 분포의 첨두치가 낮아지며 넓게 퍼지게 된다. 표 3에는 표 1에서 설명한 각각의 퇴적종류에 따른 베타분포의 왜도와 첨도를 나타내었다. 퇴적환경이 Clay인 경우에 왜도와 첨도가 각각 -1.18, 2.92에서 Gravel인 경우 -2.44, 8.83으로 각각 두배 이상 증가하는 것으로 나타났다.

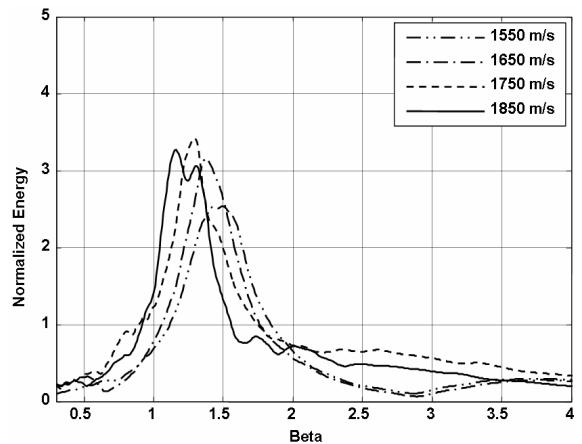
[표 3] 퇴적물 유형에 따른 음도파관 불변인자 분포의 왜도와 첨도

Bottom Type	Clay	Silt	Sand	Gravel
Skewness	-1.18	-1.87	-2.28	-2.44
Kurtosis	2.92	5.50	7.12	8.83

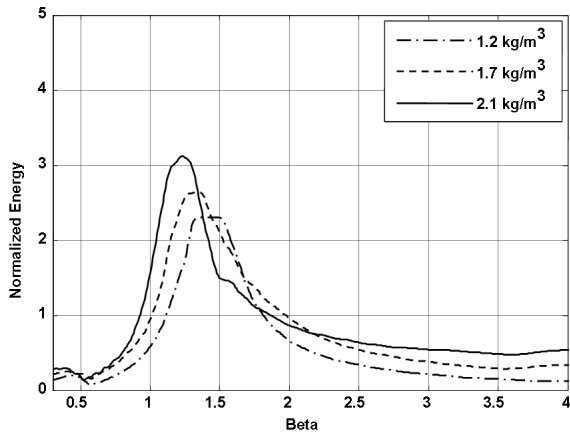
나. 지음향인자 변화에 따른 베타분포 모의

그림 7은 지음향 인자변화(종파속도 (a), 밀도 (b), 감쇠계수 (c), 퇴적층 두께 (d)에 따른 베타분포의 변화양상을 보여준다. 모의를 위한 지음향인자는 모래질(sand - 표 1)을 기준으로 하였으며, 각각에 해당되는 지음향 인자에 수치적인 변화를 주었다. 표 4는 퇴적층 내 지음향 인자변화에 따른 왜도와 첨도의 변화양상을 정리하였다.

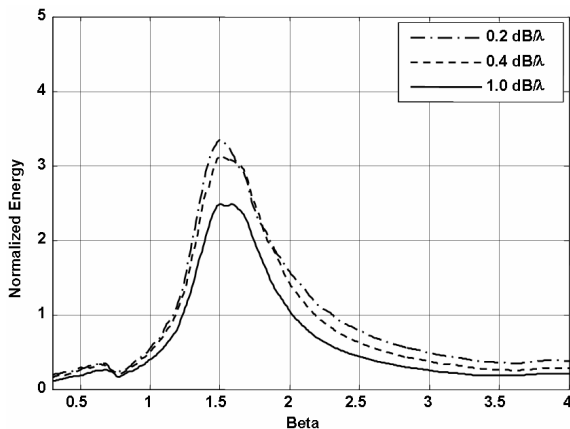
각 지음향 인자의 변화에 따른 베타분포의 영향을



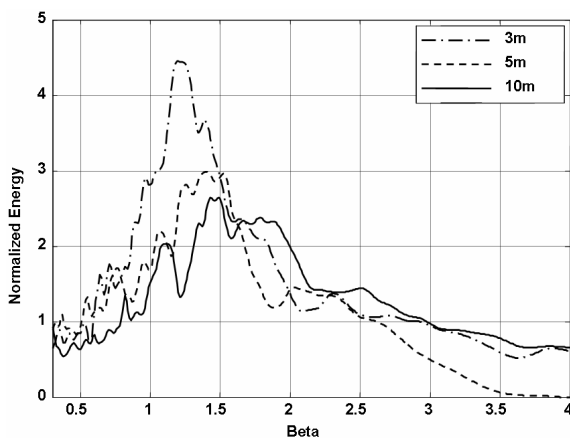
[그림 7a] 퇴적층내 음속에 따른 베타분포의 변화



[그림 7b] 퇴적층내 밀도 다른 베타분포의 변화



[그림 7c] 퇴적층내 감쇄계수에 따른 베타분포의 변화



[그림 7d] 퇴적층 두께에 따른 베타분포의 변화

[표 4a] 퇴적층내 음속변화에 따른 베타분포의 왜도와 첨도

Sound Speed(m/s)	1550	1650	1750	1850
Skewness	-1.34	-1.57	-1.78	-1.96
Kurtosis	3.14	5.35	5.42	4.93

[표 4b] 퇴적층내 밀도변화에 따른 베타분포의 왜도와 첨도

Density(g/m ³)	1.2	1.7	2.1
Skewness	-1.31	-1.37	-1.43
Kurtosis	3.14	3.53	3.89

[표 4c] 퇴적층내 감쇄계수 변화에 따른 베타분포의 왜도와 첨도

Attenuation(dB/λ)	0.2	0.4	1.0
Skewness	-1.33	-1.36	-1.38
Kurtosis	3.89	3.53	3.17

[표 4d] 퇴적층 두께변화에 따른 베타분포의 왜도와 첨도

Thickness(m)	3	5	10
Skewness	-2.01	-1.43	-0.9
Kurtosis	5.1	3.98	3.05

정리하면 다음과 같다. 수치모의 결과 퇴적층 내 음속이 1550m/s에서 1850m/s로 증가함에 따라 왜도는 -1.34에서 -1.96으로 감소하며 분포상 첨도치의 위치가 1에 접근하는 경향을 보였다. 첨도의 경우 그 값과 분포상 첨도치의 진폭과 큰 상관관계가 없으므로 나타났지만, 음속이 1550m/s의 경우는 상대적으로 작은 첨도치와 진폭을 보였다. 퇴적층의 밀도가 1.2g/m³에서 2.1g/m³로 변화함에 따라 분포의 왜도는 -1.31

에서 -1.43으로 감소하였고, 침도는 3.14에서 3.89로 증가하는 양상을 보이는데, 이는 밀도가 높은 퇴적층일수록 퇴적층에서의 반사가 우세하여, 분포상 침두는 날카로운 모양으로 변화하였으며, 베타 값은 1로 이동하였다. 퇴적층 밀도변화에 따른 베타분포로 미루어 봐서, 퇴적층의 밀도변화는 퇴적층의 음속보다 높은 상관관계를 가지고 있음을 알 수 있다. 감쇠계수를 $0.2\text{dB}/\lambda$ 에서 $1.0\text{dB}/\lambda$ 로 변화해 가는 경우, 분포의 왜도는 평균 -1.36로 거의 같은 값으로 남아 있었으나, 침도는 0.72 만큼 감소함으로 나타났는데, 침두치의 진폭은 감쇠계수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 이것은 해저면으로의 입사각이 큰 고차모드가 강하게 감쇠하므로 진폭이 줄어든 것으로 해석할 수 있다. 퇴적층의 두께변화에 따른 분포양상 변화에서는 음향학적 기반암 위에 3m, 5m, 10m의 모래질 퇴적층을 가정 하였다. 3m의 퇴적층인 경우 왜도와 침도가 -2.01과 3.05로 상대적 크기가 10m 퇴적층보다 높게 나타났으며, 피크가 날카로운 형태를 가졌으며, 피크의 위치는 베타의 낮은 값으로 이동하였다. 이는 고차모드의 기여로 여겨지는 분포상의 미세구조는 음파에너지의 소실이 거의 없는(lossless) 음향학적 기반암을 가정하였고 퇴적층의 두께가 얇을수록 기여도가 크기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결론

이동 표적에 의해 발생하는 신호를 이용하여 퇴적층의 지음향인자가 광대역 간섭무늬에 끼치는 영향을 분석하여 보았다. 분석을 위하여 모의 수신신호의 스펙트로그램으로부터 β 의 분포를 생성하기 위해 이미지 프로세싱 방법의 하나인 라돈 변환(radon transform)을 통한 분석방법을 제안하였고, 퇴적층 종류와 이를 구성하고 있는 지음향인자의 변화에 따른 불변인자 분포의 영향을 분석하였다. 불변인자 분포를 통계학적 특성치인 왜도(skewness)와 침도(kurtosis)로 정량화하여 통계적인 특징을 분석 하였다. 분석 결과 도파관 내의 음전달에 기여하는 모드의 수에 따라서 간섭패턴에서의 미세한 선구조에 영

향을 끼쳤으며, 기여하는 모드의 숫자는 퇴적층의 정도와 관련이 있음을 알았다. 지음향 인자의 변화에 따른 간섭 패턴 변화 양상은 퇴적물의 두께가 다른 인자들 보다 가장 큰 영향을 끼친 것으로 나타났으며, 퇴적층의 음속은 베타 분포의 침두치의 위치 즉 간섭패턴 상의 기울기와 직접적인 관련이 있었으며, 감쇠계수는 침두치의 강도 즉 간섭패턴 상 동일한 기울기를 갖는 패턴에 대한 영향으로 판단되었고, 퇴적층의 밀도는 분포의 침두치의 위치와 그 강도 두가지 모두 관련성을 갖는다고 판단된다.

추후 연구과제로서 본 연구의 궁극적인 목표는 광대역 연속신호로부터 지음향 인자의 역산을 수행하는데 있다. 하나의 수신기만으로도 지음향 인자 역산이 가능하다는 실험의 용이성이 큰 장점이 될 수 있는데, 선박은 해상 실험에서 가장 쉽게 사용할 수 있는 음원일 뿐 아니라 빠른 속도로 이동하는 선박은 넓은 주파수 대역에서 신호와 잡음의 비가 양호한 신호를 발생시킨다. 또한 음파는 주파수에 따라 해저면 내부로의 투과 깊이가 주파수에 따라 다를 수 있다는 점을 염두에 두고 광대역 간섭 패턴을 몇 개의 주파수 대역으로 구분하여 고 주파수 대역의 패턴으로부터는 해저 표면의 음향 인자를 역산하고 보다 낮은 주파수 대역의 간섭 패턴으로부터는 보다 깊은 곳의 인자를 구하는 방안을 적용하면 퇴적 깊이에 따른 해저 지음향 인자 역산도 가능할 수 있으리라 생각되므로 향후 이에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. b. Porter and H. Schmidt, Computational Ocean Acoustics, AIP Press, Chap. 1, 39-44, 2000.
- [2] 이성욱, 한주영, 백운, 나정열, “천해에서 측정한 선박 방사소음 스펙트로그램의 줄무늬 패턴에 나타나는 해저면 전단성 영향”, 한국음향학회지, 23 (5), 199-200, 2004.
- [3] L. m. Brekhovskikh, Y. P. Lysanov, Fundamentals of Ocean Acoustics, 3rd ed., (AIP, New York, 2003), 143-148.

- [4] D. Rouseff and R. C. Spindel, "Modeling the Waveguide Invariant as a Distribution", in Ocean Acoustic Inteference Phenomena and Signal Processing(AIP, Melville, 2002) edited by W. A. Kuperman, G. L D'Spain, 137-148.
- [5] Bracewell, Ronald N., "Two-Dimensional Imaging", Prentice Hall, pp. 505~537, 1995.
- [6] Hamilton, E. EL, "Geoacoustic modeling of the sea floor", J. Acoust. Soc. Am. 68, 1313-1340, 1980.