

광역주파수 음향반사자료의 감쇠특성 분석을 위한 지질음향모델링 기법 연구

장재경¹⁾, 양승진¹⁾

Geoacoustic Modeling for Analysis of Attenuation Characteristics using Chirp Acoustic Profiling data

Jae-Kyeong Chang and Sung-Jin Yang

요 약 : Chirp sonar 시스템을 이용하여 획득한 광역주파수 음향반사자료의 감쇠특성을 나타내는 음향학적 분류변수를 고안하였다. 분류변수는 퇴적물 물성에 따른 분산효과에 의한 감쇠특성을 나타내며, 음향반사신호의 푸리에 변환을 이용한 unwrapped 위상의 미분치로부터 구하였다. 그리고 각기 다른 퇴적상을 나타내는 지점에서 획득된 음향반사신호의 지질음향모델링을 통하여 퇴적물 물성에 따른 감쇠특성을 평가하였다. 그 결과, 분류변수는 입자크기와 성분에 따른 퇴적물 형태와 해저면 굳기에 따라 값의 차이를 보였으며, 이는 음향자료로부터 직접 해저면을 분류하는데 효과적으로 사용할 수 있다.

Abstract : We introduce a new acoustic parameter for the classification of seafloor sediments from chirp sonar acoustic profiling data. The acoustic parameter is defined as a derivative of the unwrapped phase of the Fourier transform of acoustic profiling data. Consequently, it represents the characteristics of attenuation by dissipative dispersion in sediments. And we estimated acoustic properties by geoacoustic modeling using Chirp data obtained from the different sedimentary facies. Our classification results, when compared with the results of analysis of sampled sediments, show that the acoustic parameter discriminates sedimentary facies and bottom hardness. Thus the method in this paper is expected to be an effective means of geoacoustic modeling of the seafloor.

Keywords : Chirp sonar 시스템, 감쇠특성, 분류변수, 분산효과, 지질음향모델링

서 론

해저면은 다양한 형태의 퇴적물 혹은 노출된 암반 등으로 구성되어 있으며 퇴적상에 따라 각기 다른 물성(physical properties)을 나타낸다. 그리고 퇴적상에 따른 물성차이는 음파를 사용하는 지구물리탐사방법에 의해 각기 다른 음향반응(acoustic response)으로 나타난다. 따라서 퇴적물의 물성에 따른 특성을 음향학적으로 분류·표현하는 지질음향모델링(geoacoustic modeling)을 통하여 음향학적 분류변수를 고안한다면 이를 통하여 직접적으로 퇴적물의 물성을 유추하여 해저면의 분류가 가능하다.

해저면 퇴적물의 분류는 일반적으로 코아 혹은 그래프에 의해 직접 채취된 퇴적물의 물성을 실험실에서 측정하여 결정된다. 그러나 이러한 방법은 시간적인 면에서나 비용적인 면에서 혹은 조사지역의 환경적인 면에서 한계가 있을 뿐만 아니라 몇 개의 지점에서 채취된 퇴적물만으로 전체 조사지역의 퇴적상을 해석해야 하는 어려움과 부정확성을 가지게 된다. 이와 같은 이유에서 최근 들어 고주파 음원을 사용하는 천부단성과 분

야에서 해저면에서 반사된 신호를 탄성과 처리기법을 응용하여 음향특성을 분석하므로써 해저면을 분류하는 연구들이 이루어지고 있다. Bolus *et al.*(1982)는 반사신호의 크기와 위상 분석을 통해, Cobo-Parra and Ranz-Guerra(1989)는 주파수 영역에서 반사자료의 역산을 통해 임피던스를 유도하였다. 또한 Panda and LeBlanc(1994)은 가중최소자승법(weighted least-squares method)을 이용하여 퇴적층에서의 임펄스반응을 결정하고, 순간주파수(instantaneous frequency)를 이용하여 중심주파수의 변화정도로부터 감쇠계수를 평가하여 해저면을 분류하고 물성을 예측하였다. 이들 연구의 가능성은 해저면에서 반사된 음향자료가 해저면을 구성하는 물질에 따른 음향임피던스(acoustic impedance)와 음향감쇠(acoustic attenuation)와 같은 정보를 포함하고 있고, 이들 음향학적 특성은 퇴적물의 입자크기(grain size), 공극율(porosity), 강성률(rigidity) 그리고 체적 밀도(bulk density)와 같은 물성과 밀접한 관계를 가지고 있어 해저면 퇴적물의 종류와 분포상태를 유추할 수 있는 중요한 단서를 제공하기 때문이다(Hamilton *et al.*, 1956; Hamilton, 1971,

*1999년 9월 15일 접수

1) 한양대학교 자원공학과 (Department of Mineral Petroleum Engineering, HanYang University)

1972, 1974: Shumway, 1960: 해양연구소, 1990, 1991, 1998: LeBlanc *et al.*, 1992).

이 연구에서는 해저면에서 반사된 광역주파수 음향신호의 분산효과(dispersive effect)에 의한 감쇠특성을 나타내는 음향학적 분류변수를 고안하고, 지질음향모델링을 통하여 해저면 퇴적물의 분류 가능성을 평가하였다. 지질음향모델링을 위한 음향반사자료는 1995년 해양연구소에서 수행된 제주-육지간 해저광케이블 매설을 위한 해양조사사업 중 제주 성산포 해역에서 서로 다른 퇴적상을 나타내는 9개 지점을 선택하여 고해상도 해저지층탐사기인 Chirp sonar 시스템을 이용하여 획득되었다. 음향학적 분류변수는 여기서 얻은 감쇠된 음향신호의 푸리에 변환(fourier transform)을 통한 unwrapped 위상의 미분치로부터 구하였다.

Chirp Sonar 시스템의 특성

음향반사신호 획득에 사용된 Chirp sonar 시스템은 1~10 kHz의 광대역폭 주파수변조(wide-band FM) 신호를 음원으로 사용하는 고해상도의 해저지층탐사장비로 해저면 퇴적물의 분류를 위하여 LeBlanc과 Mayer 등에 의해 개발되었다(Mayer and LeBlanc, 1983; Schock *et al.*, 1986). Chirp sonar 시스템은 마이크로 컴퓨터에 의해 음원의 발생과 반사된 신호의 수신 및 처리과정이 디지털 방식으로 조절된다. Chirp sonar는 음원출력시 정밀한 음원파형 제어를 위하여 먼저 시스템의 주파수 반응에 따른 진폭과 위상이 보정된 신호를 D/A과정을 거쳐 1.2 kW의 파워앰프로 증폭시킨 후 음원파를 발생시킨다. 음원파형은 시간에 따라 주파수가 증가하는 스위프 신호(sweep signal)로서 시간영역에서 Blackman-Harris 윈도우 함수를 적용시켜 주파수 영역에서 가우시안(Gaussian) 형태의 스펙트럼을 나타

낸다. 그러므로 기존의 짧은 펄스를 음원으로 사용하는 3.5 kHz 해저지층탐사기에서 일반적으로 나타나는 음원잔향 (source ringing) 현상을 방지하여 분해능을 향상시킨다. 뿐만 아니라 음원발생시 소로브(side-lobes)의 감소를 통해 신호대 잡음비를 향상시키고, 해저면에서 반사·투과된 음향신호는 에너지가 감쇠되나 그 대역폭은 유지되므로 자료처리과정을 통하여 심도에 관계없이 일정한 수직분해능을 유지시킬 수 있다 (Schock and LeBlanc, 1990). Fig. 1은 이 연구의 자료획득에 이용된 DataSonics사의 Chirp sonar 시스템인 CAP6000W 모델의 구성도이다.

Fig. 1에서 보듯이 해저면에서 반사된 신호는 프리앰프에서 증폭된 후 16-bit로 A/D 변환된다. 그리고 컴퓨터에 내장된 디지털 자료처리기에서 Fig. 2와 같은 자료처리 과정을 거치게 된다. Fig. 2a는 수신신호로서 사각형 부분은 해저면에서 반사된 신호를 나타낸다. Fig. 2b는 사각형 부분의 반사신호를 정합필터링(matched filtering: Turin, 1960)한 결과이다. 이 과정을 통하여 해저면에서 반사된 수신신호성분 중 음원신호와 상관성이 없는 잡음성분은 제거되고, 신호부분은 Klauder 파형으로 압축되어 중첩되어 있던 근접한 반사 이벤트들을 분리하여 신호대 잡음비 향상과 더불어 수직분해능을 향상시킨다. 그리고 압축된 파형은 Hilbert 변환(Claerbout, 1976)에 의해 Fig. 2c와 같이 엔벨로프(envelope)가 계산되고 전달거리에 따른 확산손실(spreading loss)이 보정된다. 그리고 계산된 엔벨로프의

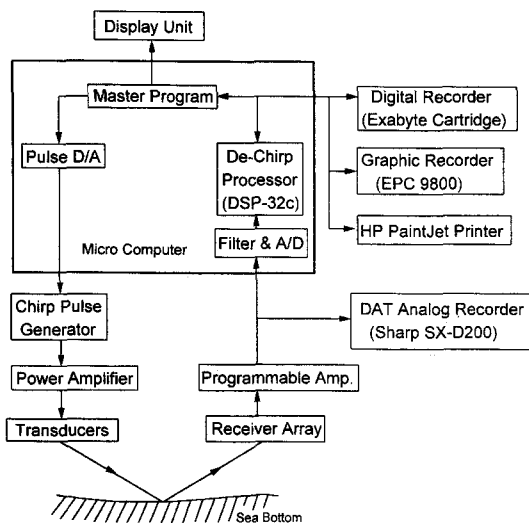


Fig. 1. A schematic configuration of Chirp sonar system (model: DataSonics CAP6000W).

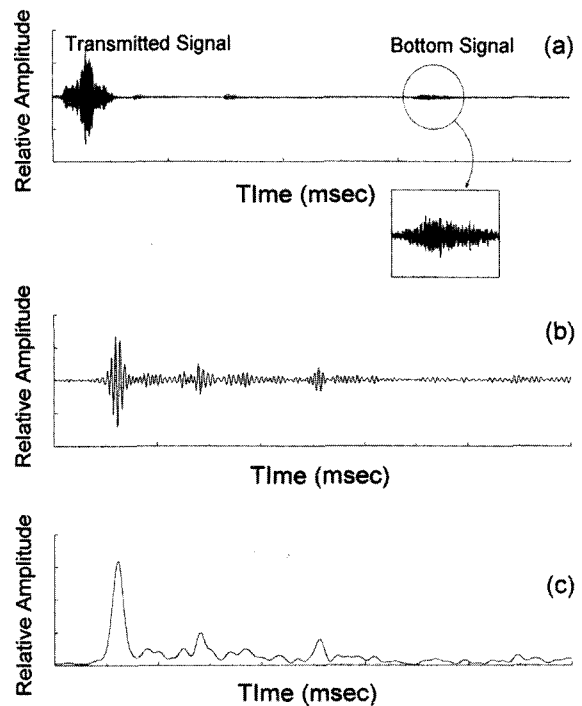


Fig. 2. Processing sequence in Chirp sonar system. (a) a typical return signal from sea bottom, (b) matched filtered return signal shown in the rectangle in (a), (c) envelope of matched filtered signal in (b).

크기에 따라 색상등급을 주어 해저단면을 출력하게 된다. 또한 처리되기 전의 원시신호는 Analog DAT 장치에 저장되어 후 처리과정에 이용될 수 있다. 이 연구에서는 여기에 저장된 원시신호를 이용하여 음향특성을 분석하였다.

지질음향 모델링

음향특성 중 감쇠현상은 퇴적물의 물성과 직접적인 관련을 갖는 음향변수로 음파가 실제 해저면에서 반사되었을 때 음향 신호의 에너지 소산현상(dissipative effects)을 의미한다. 이는 크게 해저면을 구성하는 퇴적물의 감쇠계수에 의한 진폭 감쇠(dissipative attenuation)와 위상속도차에 의한 분산(dissipative dispersion) 그리고 불규칙한 해저면에서의 음파의 산란(scattering) 등이 포함된다. 그러므로 해저면에서 반사된 음파는 이러한 감쇠현상을 겪게 됨에 따라 진폭이 감소하고, 펄스의 모양이 변화되며, 주파수에 따라 분산이 일어나게 된다. 이들 감쇠현상은 모두 주파수의 함수로써 다중주파수 음원을 사용하는 Chirp sonar에 의해 획득된 반사신호의 음향특성을 분석하여 감쇠특성을 파악할 수 있다.

이 연구에서는 감쇠현상 중 분산효과에 의한 감쇠특성을 나타내는 음향학적 분류변수를 고안하고, 서로 다른 퇴적상을 나타내는 지점에서 획득된 광역주파수 음향반사신호에 대해 지질음향모델링을 수행하여 분류변수로부터 해저면 퇴적물의 분류 가능성을 평가하였다.

분류변수 이론

해저면에서 반사되어 감쇠된 음향신호는

$$u(x, t) = u_0 \cdot e^{-i\alpha x} \cdot e^{iKx} \tag{1}$$

와 같이 표현할 수 있다(Futterman, 1962). 여기서 음향신호 u 는 평면파(plane wave)로 가정하고, x 와 t 는 각각 전달거리와 시간을 나타내며, α 는 각주파수 그리고 K 는 파수(wave number)를 나타낸다. 파수는 복소함수로써 $K(\omega) = k(\omega) + i\alpha(\omega)$ 로 표현된다. 그러므로 (1)식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u(x, t) = u_0 \cdot e^{-\alpha x} \cdot e^{i(kx - \omega t)} \tag{2}$$

(2)식에서 α 와 k 는 주파수의 함수로 흡음(absorption)에 의한 감쇠성분과 위상분산(phase dispersion)에 의한 감쇠성분을 나타낸다. 흡음과 위상분산에 의한 감쇠는 퇴적물의 물성과 직접 관계되는 음향변수로 퇴적물 분류에 중요한 단서를 제공한다. 이 연구에서는 위상분산에 의한 감쇠특성 분석을 위하여 음향 반사신호인 (1)식의 $u(x, t)$ 를 푸리에 변환하여 위상정보로부터 음향학적 분류변수를 고안하였다. $U(\omega)$ 를 $u(x, t)$ 의 푸리에 변환이라 한다면,

$$U(\omega) = u(0, \omega) \cdot e^{iKx} = |A(\omega)| \cdot e^{i\Phi(\omega)} \tag{3}$$

로 표현된다. (3)식에서 보듯이 (1)식의 감쇠된 신호 $u(x, t)$ 는 푸리에 변환에 의해 주파수 영역에서 흡음에 의해 감쇠된 진폭 스펙트럼 $|A(\omega)|$ 과 위상속도 차이에 의해 분산된 위상스펙트럼 $\Phi(\omega)$ 로 표현된다. 여기서 $\Phi(\omega)$ 는 2π 내에서 변하는 불연속적인 주파수의 함수로 나타나기 때문에 위상속도 차이에 따른 분산효과와 감쇠특성간의 상관관계를 직접적으로 표현하기에는 어려움이 있다. 이를 극복하기 위하여 (3)식의 위상성분을 Tribolet Algorithm(Tribolet, 1977)을 사용하여 unwrapping 하고 연속적인 함수로 나타내었다. 이때 unwrapped된 위상을 $\arg[U(\omega)]$ 라 한다면, 이는 감쇠된 음향신호의 대역폭에서 주파수 변화에 따른 위상속도의 함수로 표현되며 감쇠되지 않은 Chirp 음원신호의 위상성분과는 퇴적물 물성에 따라 각기 다른 양상을 나타낸다. 이러한 현상은 분산효과에 의한 감쇠특성

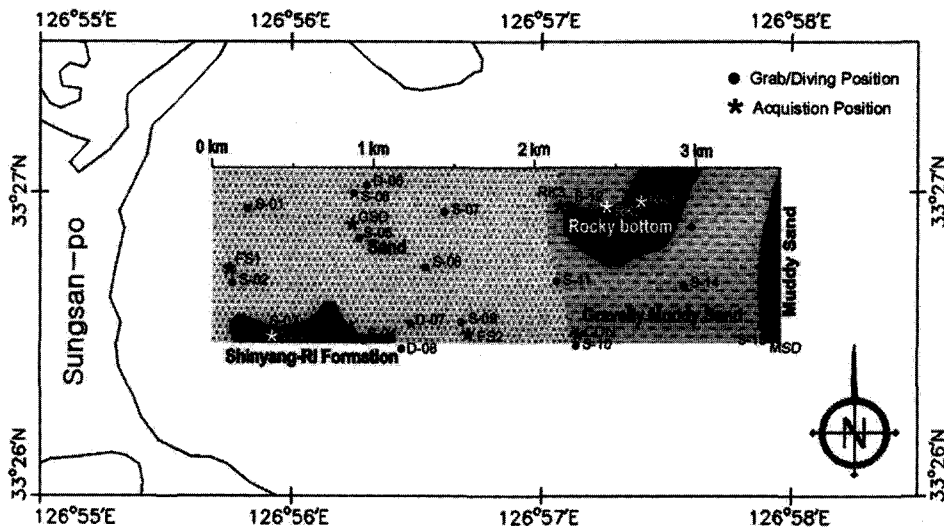


Fig. 3. Map showing the synthesized seafloor image, Grab/Diving sampling positions, and acoustic data acquisition positions offshore sungsan-po, Cheju Island.

을 나타내며 이를 수치적인 지수(index)로 표현하기 위하여 unwrapped된 위상성분을 0에서 1사이의 값으로 규격화(normalizing) 한 후, 이를 미분하여 음향신호의 대역폭에서 일정하게 나타나는 값을 분류변수로 정의하였다. 이 값을 분산지수(dispersion index)라 정의하고,

$$D.I. = \frac{d}{d\omega} \arg[U(\omega)] \quad (4)$$

와 같이 표현하였다.

음향자료 획득 및 처리

음향자료의 획득은 해저광케이블 매설을 위한 해양조사사업(한국통신, 1995) 중 제주 성산포 천해해역에서 이루어졌다. 이 지역은 Chirp sonar를 이용한 해저지층탐사 뿐 아니라 측면주사소나(side scan sonar) 조사와 그랩 및 잠수조사에 의해 채취된 퇴적물 분석을 통하여 해저면 퇴적상(Fig. 3)과 퇴적물의 물성(Table 1)이 잘 해석된 지역이다. 또한 이 연구에 앞서 산란 효과에 의한 감쇠특성으로부터 해저면 분류연구(장재경 외, 1998)가 수행된 바 있다.

성산포지역의 퇴적상은 Fig. 3에서 보듯이 전반적으로 대부분 모래로 구성되어 있고 수심이 깊어지면서 세립질 퇴적물인 뿔질모래로 변하는 양상을 나타낸다. 그리고 화산암이 돌출되어 나타나는 지역과 단단한 화산재로 이루어진 신양리층이 해석되어 있다. 또한 Table 1의 채취된 퇴적물 분석자료를 보면 S-12 지점은 돌출된 암반 주변으로 암석파편과 자갈 등이 함유된 모래퇴적층이 분포되어 있다. S-02와 S-09 지점은 다른 지점에 비해 비교적 세립질의 모래층이 나타나며, S-05와 S-10 지점에서는 부분적으로 자갈이 섞인 모래층과 반고화된 단단한 모래층이 분포하고 있다. 따라서 음향자료는 이와 같이 서로 다른 퇴적상을 나타내는 9개의 지점들을 선택하여 획득

되었다. 이들 지점들은 Fig. 3에 함께 표시되어 있다.

각 지점들에서 Chirp sonar에 의해 획득된 음향자료는 Fig. 4와 같은 처리과정을 거쳐 지질음향모델링에 이용된다. 우선 아날로그 DAT 저장장치에 항적자료와 함께 48 kHz 샘플율로 기록된 원시신호는 16-bit로 A/D 변환하고, 각 지점 당 10개의 근접한 트레이스자료들을 취합한다. 한 개의 트레이스자료는 총 10,000개의 샘플로 샘플간격은 0.02 msec 이다. 그리고 정밀측심자료로부터 구한 수심을 이용하여 해저면에서의 반사신호(bottom signal)를 추출한다(Fig. 4a). 반사신호는 무작위 잡

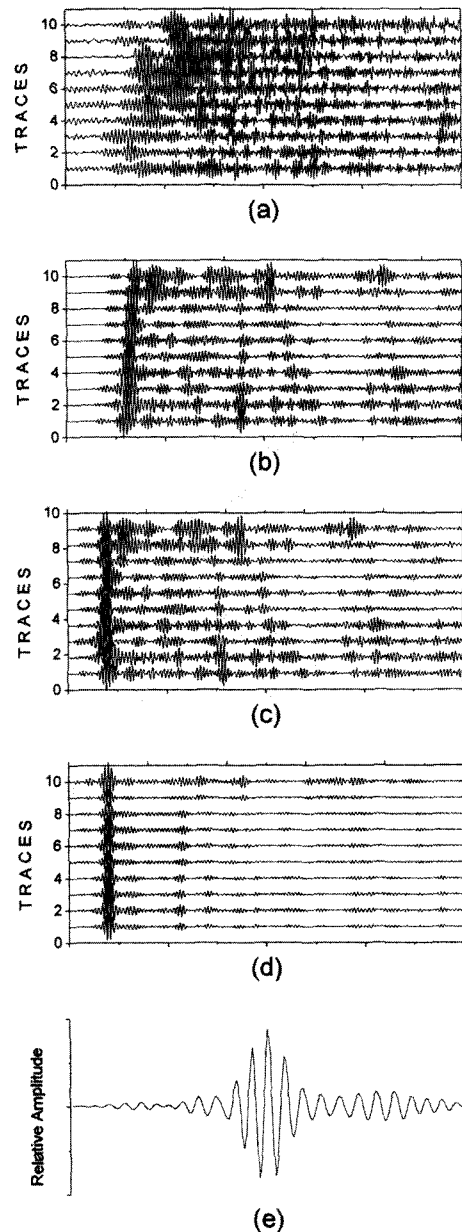


Fig. 4. Processing sequence for extracting an attenuated signal for geoaoustic modeling. (a) ten-consecutive bottom reflected signal, (b) after band-pass and matched filtering, (c) after time alignment for K-L transform, (d) the reflected signal component after K-L transform, (e) the attenuated signal for geoaoustic modeling.

Table 1. The result of bottom sediment analysis (S=Grab sample, D=diving Sample), (한국통신, 1995)

| Sample no. | Sediment texture (%) | | | | Type | Mean (Φ) | Standard deviation |
|------------|----------------------|-------|-------|-------|------|-----------------|--------------------|
| | Gra. | Sand | Silt | Clay | | | |
| S-01 | | 99.94 | 0.06 | - | S | 2.12 | 0.64 |
| S-02 | | 99.92 | 0.08 | - | S | 2.43 | 0.59 |
| S-03 | | 99.88 | 0.12 | - | S | 2.06 | 0.70 |
| S-04 | 2.16 | 97.63 | 0.21 | - | (g)S | 2.31 | 1.06 |
| S-05 | 0.27 | 99.57 | 0.16 | - | (g)S | 1.93 | 0.82 |
| S-06 | | 99.78 | 0.22 | - | S | 2.18 | 0.69 |
| S-07 | | 99.82 | 0.18 | - | S | 2.17 | 0.64 |
| S-08 | | 99.78 | 0.22 | - | S | 2.27 | 0.64 |
| S-09 | | 99.50 | 0.50 | - | S | 2.35 | 0.65 |
| S-10 | 0.19 | 99.67 | 0.14 | - | (g)S | 1.46 | 0.83 |
| S-11 | | 99.89 | 0.11 | - | S | 2.16 | 0.67 |
| S-12 | 52.77 | 46.77 | 0.46 | - | sG | -0.98 | 1.68 |
| S-14 | 36.2 | 35.08 | 8.23 | 20.47 | msG | 2.39 | 4.92 |
| S-15 | 7.90 | 47.64 | 15.09 | 29.36 | gmS | 4.68 | 4.57 |
| D-05 | | 99.95 | 0.05 | - | S | 2.22 | 0.65 |
| D-06 | | 99.95 | 0.05 | - | S | 1.97 | 0.70 |
| D-07 | | 99.93 | 0.07 | - | S | 2.01 | 0.69 |
| D-08 | | 99.83 | 0.17 | - | S | 2.34 | 0.61 |

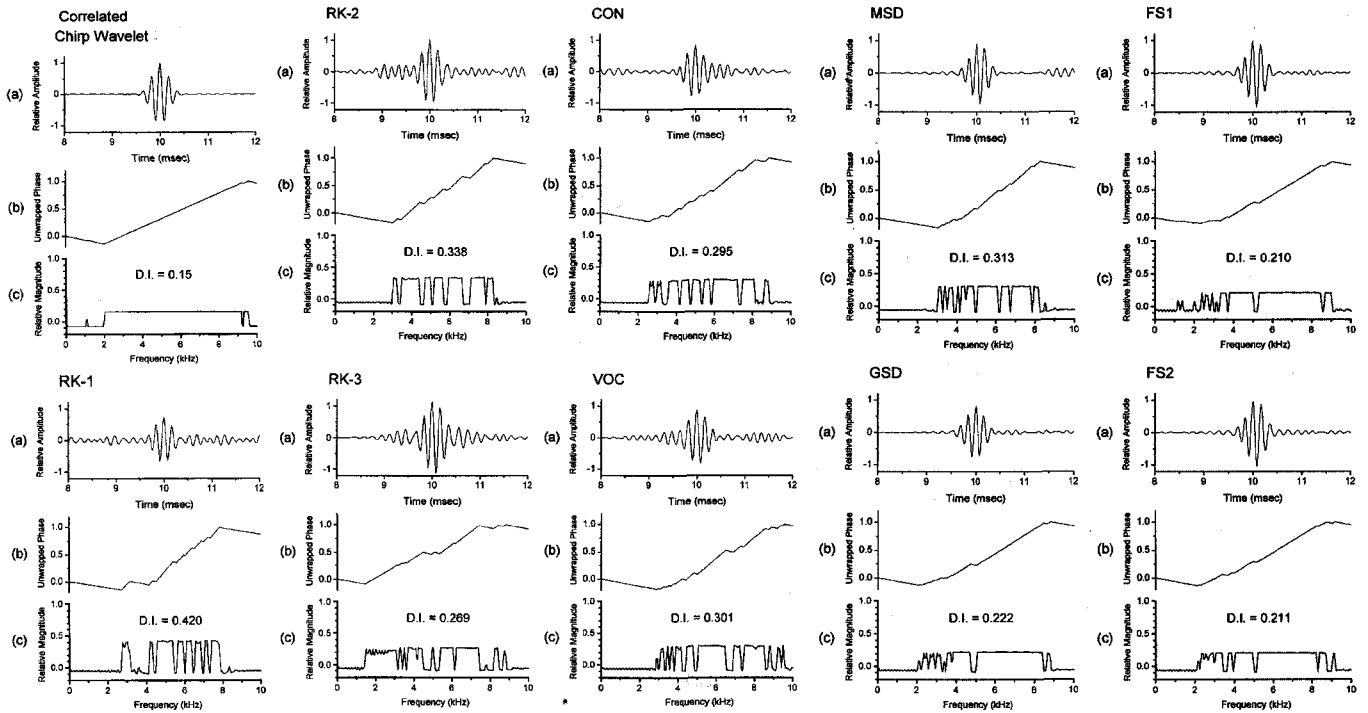


Fig. 5. Processing sequence for computing acoustic parameter. (a) an attenuated signal for geoacoustic modeling, (b) unwrapped phase spectrum, (c) the derivative of (b) and the estimated dispersion index.

음 제거와 신호대 잡음비 향상을 위하여 대역필터링과 정합필터링을 수행하고(Fig. 4b), 일정시간대로 정렬한 후(Fig. 4c), K-L 변환(Jones, 1985)을 실시하여 근접한 트레이스들 사이의 선형적인 유사도가 최대가 되는 공통된 반사신호성분을 추출(Fig. 4d)하여 지질음향모델링을 위한 감쇠된 음향신호(Fig. 4e)로 사용하였다. 그리고 Fig. 5와 같이 Chirp 음원신호와 각 지점들에서 추출한 감쇠된 음향신호성분에 대해 지질음향모델링을 수행하여 퇴적물 물성에 따른 분산지수를 계산하였다. Fig. 5a는 음향신호성분이며 Fig. 5b는 Fig. 5a를 푸리에 변환 후 위상성분을 Tribolet Algorithm을 사용하여 unwrapping 한 것이다. Fig. 5c는 Fig. 5b의 미분치로 음향신호의 주파수 대역에서 일정하게 나타나는 값을 분산지수(D.I.)로 나타낸 것이다.

분류변수 평가

지질음향모델링을 수행한 결과 Fig. 5에서 보듯이 Chirp 음원신호에서 분산지수는 0.15의 값을 가지며, 각 지점들에서 계산된 분산지수는 퇴적상에 따른 분산효과에 의한 감쇠특성에 따라 값을 차이를 보였다. 일반적으로 분산지수는 감쇠특성이 크게 나타날수록 높은 값을 보였다. Fig. 6은 각 지점들에서 계산된 분산지수를 입자크기와 성분에 따른 퇴적물 형태 그리고 해저면 굳기에 따라 감쇠특성을 분석한 도표이다. 여기서 퇴적물 형태에 따른 감쇠특성 양상은 굵은 선으로 해저면 굳기에 따른 감쇠특성 양상은 가는 선으로 나타내었다. 그리고 점선으로 나타낸 부분은 성산포 지역에는 존재하지 않는 퇴적상으로

제주도 외해쪽에서 시행된 코어분석된 지점 중 모래질펄과 고화되지 않은 뿔퇴적층에서 획득된 음향자료로부터 계산된 분산지수를 인용(장재경 외, 1999)하여 감쇠특성의 양상을 전체적으로 나타낸 것이다.

Fig. 6에서 보듯이 분산지수는 돌출된 암반 지점에서 획득된 RK1에서 가장 큰 감쇠특성을 보이며, 모래층에서 획득된 RK2, RK1, GSD, FS1, FS2에서는 퇴적물 성분이 균질할수록 그리고 입자크기가 작을수록 감쇠특성이 감소하는 경향을 나타낸다. 그러나 뿔질모래층에서 획득된 MSD에서는 다시 감쇠특성

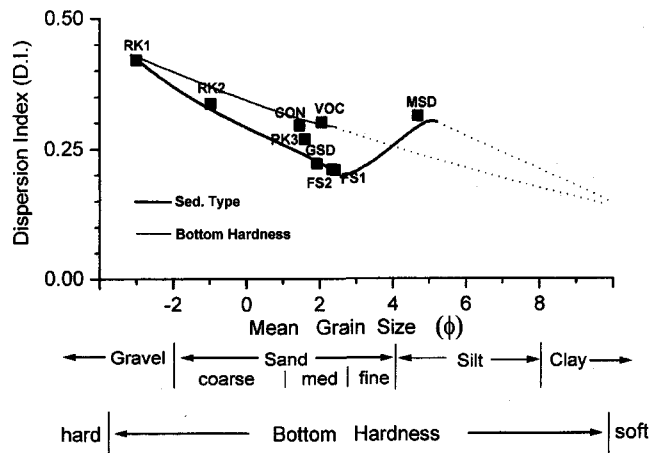


Fig. 6. The characteristic curve of dispersion index according to sediment type based on grain size and bottom hardness.

이 크게 증가하는데 이는 흡음효과에 의한 감쇠특성이 세립질 모래와 조립질실트 입도에서 최대가 되는 특성과 잘 일치하고 있다(Hamilton, 1972). 비교적 단단한 퇴적상을 이루는 지점에서 획득된 VOC와 CON에서는 비슷한 입도의 모래퇴적층에서 보다 감쇠특성이 크게 나타나 해저면 굳기가 분산효과에 의한 감쇠현상에 비교적 크게 작용함을 알 수 있다.

결 론

이 연구에서는 음향학적 분류변수인 분산지수를 고안하고 지질음향모델링을 통하여 해저면 퇴적물의 분류 가능성을 평가하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 해저면에서 반사된 음파는 감쇠현상을 겪게 됨에 따라 진폭이 감소하고, 펄스의 모양이 변화되며, 주파수에 따라 분산이 일어나게 된다. 그리고 이들 감쇠현상은 모두 주파수의 함수로써 다중주파수 음원을 사용하는 Chirp sonar에 의해 획득된 반사신호의 음향특성을 분석하여 감쇠특성을 파악할 수 있다.
2. 감쇠현상 중 분산효과에 의한 감쇠특성을 나타내는 음향학적 분류변수인 분산지수는 감쇠된 음향반사신호의 푸리에 변환을 통한 unwrapped 위상의 미분치로부터 고안하였다. 분산지수는 감쇠되지 않은 Chirp 음원신호에서 0.15의 값을 가지며, 분산효과에 의한 감쇠특성이 크게 나타날수록 높은 값으로 나타난다.
3. 지질음향모델링 결과, 암반, 고화된 퇴적층, 불균질한 퇴적층에서 감쇠특성이 높게 나타났으며 모래퇴적층에서는 입자크기가 작을수록, 성분이 균질할수록 감쇠특성은 작게 나타났다. 따라서 이 연구에서 고안된 분산지수는 입자크기와 성분에 따른 퇴적물 형태와 해저면 굳기에 따라 값의 차이를 보여 음향자료로부터 직접 해저면을 분류하는데 효과적으로 사용할 수 있다.

사 사

이 연구는 한국해양연구소에서 1995년에 수행된 제 2 제주-육지간 해저광케이블 매설을 위한 해양조사사업에서 획득된 자료를 이용하였습니다. 자료를 제공해 주신 사업 책임자인 석봉출 박사님과 자료처리과정에서 많은 도움을 주신 김한준, 주형태, 유해수 박사님께 감사드립니다. 그리고 본 원고 내용에 대해 세심하게 조언해 주신 심사위원분들께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 장재경, 김한준, 주형태, 석봉출, 박건태, 유해수, 양승진, 1998, 광역주파수 음향반사자료의 K-L 변환을 이용한 해저면 분

류: 지질음향 모델링을 위한 유용한 방법: 해양학회지, 3(3), 158-164.

2. 장재경, 유해수, 김성렬, 최동립, 박찬홍, 1999, 광역주파수 음향반사자료의 감쇠특성분석을 통한 해저면 분류연구: (발표예정).

3. 한국통신, 1995, 제 2 제주-육지 해저광케이블 시스템 보고서: 한국통신, 280p.

4. 해양연구소, 1990, 한반도 주변해역 해저퇴적물의 음향학적 특성연구 (II)-음향반사특성: BSPG 00107-297-5, 115p.

5. 해양연구소, 1991, 한반도 주변해역 해저퇴적물의 음향학적 특성연구 (III)-감쇠계수 특성: BSPG 00123-378-5, 162p.

6. 해양연구소, 1998, 퇴적분지 및 해저지형 해석을 위한 탄성파 및 음향자료의 분석기법연구: BSPE 97621-00-1046-5, 23-81.

7. Bolus, R. L., Sivaprasad, K. U. and Frost, A. D., 1982, Subbottom acoustic impedance profiles from magnitude and phase analysis of echoes: IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., GE-20, 338-342.

8. Claerbout, J. F., 1976, Fundamentals of Geophysical Data Processing: McGraw-Hill, New York.

9. Cobo-Para, P. and Ranz-Guerra, C., 1989, Impedance profile and overall attenuation estimation of layered sea bottoms from their normal incidence acoustic reflection response: J. Acoust. Soc. Am., 85, 2388-2393.

10. Futterman, W. I., 1962, Dispersive body wave: J. of Geophysical Research, 67, 5279-5291.

11. Hamilton, E. L., Shumway, G., Menard, H. W. and Shippek, C. J., 1956, Acoustic and other physical properties of shallow-water sediments off SanDiego: J. Acoust. Soc. Am., 28, 1-15.

12. Hamilton, E. L., 1971, Prediction of in-situ acoustic and elastic properties of marine sediments: Geophysics, 37, 266-284.

13. Hamilton, E. L., 1972, Compressional-wave attenuation in marine sediments: Geophysics, 37, 620-646.

14. Hamilton, E. L., 1974, Geoacoustic models of the seafloor: In: L. Hampton (Editor), Physics of sound in Marine Sediments, Plenum Press, New York, 181-221.

15. Jones, I. F., 1985, Application of the Karhunen-Lo ve transform in reflection seismology: Ph.D. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 242p.

16. LeBlanc, L. R., Mayer, L. A., Rufino, M., Schock, S. G. and King, J., 1992, Marine sediment classification using the Chirp sonar: J. Acoust. Soc. Am., 91, 107-115.

17. Mayer, L. A. and LeBlanc, L. R., 1983, The chirp sonar: a new quantitative high-resolution profiling system: In: Acoustics and the Seabed, edited by Pace, N.G., Bath University Press, Bath, England, 436p.

18. Panda, S. and LeBlanc, L. R., 1994, Sediment classification based on impedance and attenuation estimation: J. Acoust. Soc. Am., 96, 3022-3035.

19. Schock, S. G., LeBlanc, L. R. and Mayer, L. A., 1986, Sediment classification using a wideband, frequency-modulated sonar system: Proceedings 18th Annual Offshore Technology Conf., Houston, 389-398.

20. Schock, S. G. and LeBlanc, L. R., 1990, Chirp sonar: New technology for sub-bottom profiling: *Sea Technolo.*, **31**, 35-43.
21. Shumway, G., 1960, Sound speed and absorption studies of marine sediments by a resonance method: Part I, Part II. *Geophysics*, **25**, 451-467, 659-682.
22. Tribolet, J. M., 1977, A new phase unwrapping algorithm *IEEE Trans. on Acoustics, speech, and signal processing ASSP-25(2)*, 170-177.
23. Turin, G. L., 1960, An introduction to matched filters: *Inst Radio Eng., Trans. Inf. Theory*, IT-6, 311-329.