

광역주파수 음향반사자료의 K-L 변환을 이용한 해저면 분류: 지질음향 모델링을 위한 유용한 방법

장재경 · 김한준 · 주형태 · 석봉출 · 박건태 · 유혜수 · 양승진¹

한국해양연구소 해양지질부, ¹한양대학교 자원공학과

Seabed Classification Using the K-L (Karhunen-Loève) Transform of Chirp Acoustic Profiling Data: An Effective Approach to Geoacoustic Modeling

JAE-KYEONG CHANG, HAN-JOON KIM, HYEONG-TAE JOU, BONG-CHOO L SUK, GUN-TAE PARK,
HAI-SOO YOO AND SUNG-JIN YANG¹

Marine Geology and Geophysics Division, Korea Ocean Research and Development Institute,
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

¹Department of Natural Resources Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

광역주파수변조(wide-band FM) 신호를 음원으로 사용하는 Chirp sonar 시스템을 이용하여 획득한 음향반사 자료의 통계학적 처리를 통하여 해저면을 분류하였다. 음향학적 분류변수로서 Chirp 자료의 K-L(Karhunen-Loève) 변환을 이용하여 계산된 유사도 지수(similarity index)를 고안하였다. 유사도 지수는 근접한 트레이스 자료들에 포함된 공통된 반사신호성분의 양을 지시하므로 해저면 퇴적물의 성분에 따른 음향학적 거침도를 반영한다고 할 수 있다. 유사도 지수는 0에서 1사이의 값을 가지며, 각기 다른 퇴적상을 나타내는 지점에서 획득된 Chirp 자료를 처리한 결과, 퇴적물의 성분이 균질할수록, 입자의 크기가 작을수록, 그리고 연한 퇴적층일수록 증가하는 것을 관측할 수 있었다. 실제의 응용 예로서 제주도 성산포 해역을 이 방법으로 분류하였으며, 그 결과를 검증하기 위해 동일해역에서 획득된 side-scan sonar 자료 및 퇴적물로부터 해석된 해저면의 퇴적상과 비교하였다. 그 결과 음향자료의 유사도 지수에 의해 분류된 해저면은 실제의 퇴적상을 매우 잘 반영할 뿐만 아니라 퇴적물 성분의 특성에 따른 음향반응을 더욱 세밀히 나타내었다. 그러므로 이러한 방법은 음향자료로부터 직접 해저면을 분류하는 지질음향 모델링으로서 매우 효과적이다.

We introduce a statistical scheme to classify seabed from acoustic profiling data acquired using Chirp sonar system. The classification is based on grouping of signal traces by similarity index, which is computed using the K-L (Karhunen-Loève) transform of the Chirp profiling data. The similarity index represents the degree of coherence of bottom-reflected signals in consecutive traces, hence indicating the acoustic roughness of the seabed. The results of this study show that similarity index is a function of homogeneity, grain size of sediments and bottom hardness. The similarity index ranges from 0 to 1 for various types of seabed material. It increases in accordance with the homogeneity and softness of bottom sediments, whereas it is inversely proportional to the grain size of sediments. As a real data example, we classified the seabed off Cheju Island, Korea based on the similarity index and compared the result with side-scan sonar data and sediment samples. The comparison shows that the classification of seabed by the similarity index is in good agreement with the real sedimentary facies and can delineate acoustic response of the seabed in more detail. Therefore, this study presents an effective method for geoacoustic modeling to classify the seafloor directly from acoustic data.

서 론

해저면은 노출된 암반 혹은 퇴적물로 구성되어 있으며, 퇴적상에 따라 각기 다른 물성을 나타낸다. 해저면의 분류는 일반적으로 코아 혹은 그래프에 의해 채취된 퇴적물의 물성을 측정하여 결정된다. 그러나 이러한 방법은 시간적인 면에서나 비용적인

면에서 또는 조사지역의 환경적인 면에서 한계가 있을 뿐만 아니라 몇 개의 지점에서 채취된 퇴적물만으로 전체 조사지역의 퇴적상을 해석해야 하는 어려움과 부정확성을 가지게 된다. 이러한 이유에서 최근 들어 고주파 음원을 사용하는 천부탄성파 탐사 분야에서 해저면에서 반사된 신호의 음향특성을 분석하여 해저면을 분류하는 많은 연구들이 이루어지고 있다. 특히, 음향

반사자료로부터 구해지는 임피던스와 감쇠계수는 해저면 퇴적물의 물성인 입자크기(*grain size*), 공극율(*porosity*), 체적밀도(*bulk density*), 그리고 강성률(*rigidity*)과 밀접한 관계를 가지고 있어 퇴적물 분류에 중요한 단서가 된다(김한준 등, 1990; 해양연구소, 1990, 1991; LeBlanc *et al.*, 1992). Bolus *et al.*(1982)은 반사신호의 크기와 위상분석을 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. 이와 같이 반사자료의 음향특성을 이용한 해저면 분류연구는 다중채널 탄성파자료 처리기법을 응용함으로써 많은 성과를 거두고 있다.

이 연구에서는 고해상도의 해저지층탐사기인 Chirp sonar 시스템을 이용하여 획득된 반사자료의 음향특성을 분석하여 해저면의 퇴적상을 분류하였다. 분류의 기준인 음향변수로서, 다중채널 탄성파자료 처리기법의 하나인 K-L(Karhunen-Loève) 변환을 Chirp 자료에 적용하여 해저면 퇴적물 성분의 음향학적 거침도를 반영하는 유사도 지수(*similarity index*)를 고안하였다. 그리고 이 연구에서 고안한 방법의 검증을 위하여 제주 성산포지역에서 획득된 Chirp 자료의 유사도 지수에 의해 분류된 해저면과 동일 해역에서 *side-scan sonar* 기록과 그래프 및 잠수조사에 의해 채취된 퇴적물 분석으로부터 해석된 퇴적상과 비교하였다.

Chirp sonar의 특성

Chirp sonar 시스템은 광대역 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 조절되어, 기존의 짧은 펄스를 음원으로 사용하는 3.5 kHz 해저지층탐사기에서 음원발생시 일반적으로 나타나는 음원잔향(*source ringing*) 현상을 방지한다. 뿐만 아니라 수신된 신호를 디지털 자료처리기에서 실시간 처리하여 해저면의 천부퇴적구조를 자세히 파악할 수 있다. Fig. 1은 한국해양연구소에서 보유하고 있는 DataSonics사의 Chirp sonar 시스템인 CAP6000W 모델의 구성도로 음원의 발생, 신호의 수신 및 처리 그리고 자료의 도출 및 저장되는 과정의 흐름을 간략히 보여주고 있다.

음원의 출력을 위해서는 마이크로 컴퓨터에 의해 2~10 kHz 대역폭의 Chirp 신호를 이용한다. Chirp 신호는 시간에 따라 주파수가 증가하는 스위프신호(*sweep signal*)로서, 시간영역에서 Blackman-Harris window 함수를 적용시켜 주파수 영역에서 가우시안(*Gaussian*) 형태의 스펙트럼을 나타낸다. 이러한 음원파형은 음원발생시 소로브(*side-lobe*)를 감소시키고, 해저면에서 반사·투과된 후에도 음원의 에너지는 감소되나 그 대역폭은 유지된다. 그러므로 자료처리과정을 통하여 심도에 관계없이 일정한 수직분해능을 유지시킬 수 있다(Schock and LeBlanc, 1990). 그리고 정밀한 음원파형의 제어를 위하여 먼저 시스템의 주파수 반응에 따른 진폭과 위상에 대해 음원신호를 보정한다. 보정된 음원신호는 D/A과정을 거쳐 1.2 kW의 파워앰프로 증폭시킨 후 음원파를 발생시킨다. 이와 같은 정밀한 음원파형의 제어는 수신된 자료의 처리과정에서 신호 대 잡음비를 향상시키는 요인으로 작용한다. 해저면에서 반사되어온 신호는 프리앰프에서 증폭된 후, 16-bit로 A/D변환된다. 변환된 신호는 컴퓨터에 내장된 디지털 자료처리기에서 정합필터링(*matched filtering*; Clarence and Herman, 1977) 된다. 이 과정을 통하여 해저면에서 반사된 수신신호성분중 음원신호와 상관성이 없는 잡음성분은 제거되고, 신호부분은 Klauder 파형으로 압축되어 신호 대 잡음비의 향상과 더불어 수직분해능을 향상시킨다. 압축된 파형은 Hilbert 변환(Claerbout, 1976)에 의해 엔베로프(*envelope*)가 계산되고 전달거리에 따른 확산손실(*spreading loss*)이 보정된다. 그리고 계산된 엔베로프의 크기에 따라 색상등급을 주어 해저단면을 출력하게 된다. Chirp sonar 시스템의 음원의 발생과 신호의 수신 및 처리과정은 Fig. 2와 같다. Figs. 2a, 2b는 1~10 kHz 대역폭의 Chirp 신호를 시간과 주파수 영역에서 나타낸 것이며, Fig. 2c는 수신신호로서 사각형 부분은 해저면에서의 반사신호를 나타낸다. Fig. 2d는 사각형 부분의 반사신호를 정합필터링한 결과로서 증첩되어 있던 근접한 반사 이벤트들을 Klauder 파형으로 압축시켜 분해능과 신호 대 잡음비가 향상되었음을 볼 수 있다. 그리고 Fig. 2e는 반사신호를 파형의 극성과 위상에 관계없이 진폭으로 나타내기 위하여 에너지 엔베로프로 표현한 그림이다.

K-L(Karhunen-Loève) 변환

K-L 변환은 오래 전부터 영상자료처리에 활용되어온 신호처리 기법으로 탄성파자료 처리시 잡음을 제거하고 공통된 반사신호를 추출하는 데 사용되었다(Ahmed and Rao, 1975; Jones,

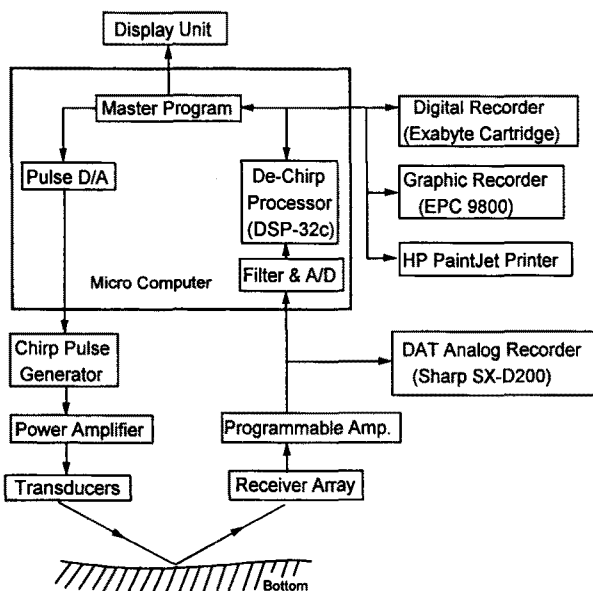


Fig. 1. A schematic configuration of Chirp sonar system (model: DataSonics CAP6000W).

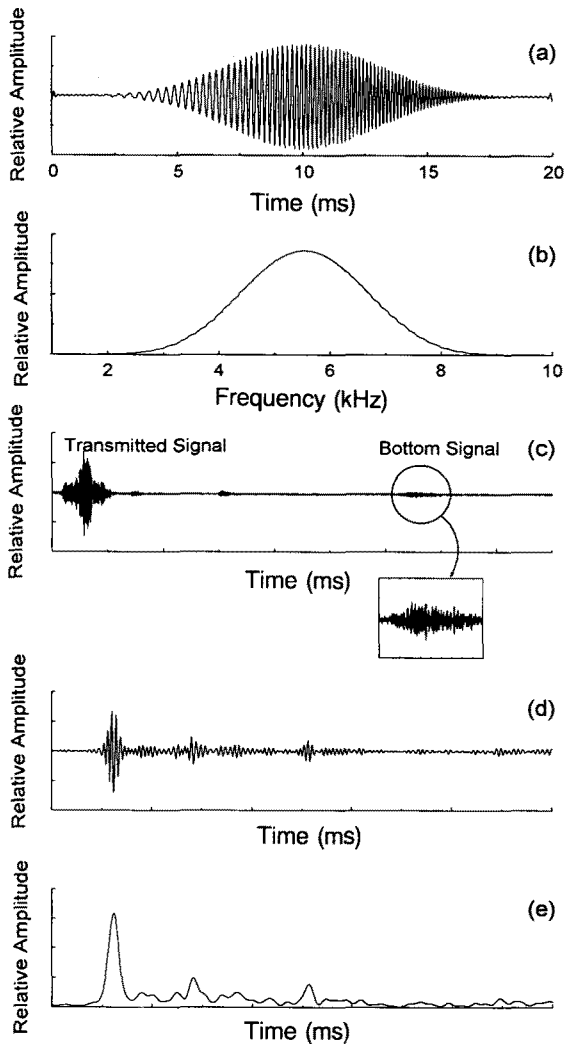


Fig. 2. Linear FM Chirp signal in (a) time domain, and (b) frequency domain. (c) Return signal obtained offshore Cheju Island. (d) Matched filtered return signal shown in the rectangle in (c). (e) Envelope of matched filtered signal in (d).

1985). K-L 변환은 여러 가지 방법중 Freire and Ulyrch(1988)가 제안한 특이치분해(singular value decomposition)에 의한 방법으로 쉽게 구현된다. 이 방법은 공통된 신호성분을 갖는 근접한 트레이스 자료들을 선형적인 유사도가 최소한의 성분으로 압축 표현되는 주성분(principal component)들의 집합과 유사도의 크기를 나타내는 특이치(singular value)들로 분해한다. 이때 특이치의 범위를 지정함으로써 트레이스 자료들을 재구성하고 특정 신호성분만을 추출할 수 있다. X 를 N 개의 샘플을 가진 M 개의 트레이스로 구성된 음향반사자료라 할 때($M < N$), 이를 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$X = [x_{ij}], \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

식 (1)을 특이치 분해하면,

$$X = \sum_{i=1}^r \sigma_i u_i v_i^T \quad (2)$$

로 쓸 수 있다. 여기서 r 은 행렬 X 의 등급(rank), u_i 는 XX^T 의 i 번째 고유벡터(eigenvector), v_i^T 는 $X^T X$ 의 i 번째 고유벡터의 전치(transpose) 그리고 σ_i 는 X 의 i 번째 특이치($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_M$)로서 공분산(covariance) 행렬 $X^T X$ 의 고유치(eigenvalue)의 제곱근과 같다. u_i, v_i^T 는 X 의 주성분으로 특이치의 범위($1 \sim r$)를 지정하여 특정 신호성분만을 추출하여 재구성할 수 있다. 즉, K-L 변환은 트레이스 자료들을 서로간에 선형적인 상관성이 없는 주성분들의 집합으로 분해한다. 그리고 i 번째 특이치의 크기는 i 번째 주성분 내에 존재하는 상관된 에너지의 양에 상응하므로 상당히 큰 특이치만으로 재구성된 신호들은 각 트레이스 자료 중에서 상관성이 높은 신호만을 추출하는 효과를 가진다. 만일 트레이스 자료가 크기만 다를 뿐 동일한 기본신호들로 이루어졌다면, 공분산 행렬 $X^T X$ 의 모든 특이치는 σ_1 을 제외한 나머지는 0이 되며 첫번째 주성분은 기본신호의 진폭만 변화시킨 것이다. 그리고 트레이스들 사이에 상관성이 없다면, $X^T X$ 는 대각성분만을 가지게 되며 K-L 변환의 효과는 없게된다.

유사도 지수(similarity index)

해저면에서 반사된 음향자료는 해수와 지층경계면의 임피던스차이에 의한 반사신호성분과 퇴적물 성분의 불균질성, 입자크기, 그리고 굳기 등에 따른 산란신호성분 및 무작위 잡음성분으로 구성되어 있다. 그러므로 음향반사자료를 K-L 변환한 후, 첫번째 특이치만을 이용하여 재구성하면 근접한 트레이스들 사이에서 선형적인 유사도가 가장 큰 반사신호성분을 복원할 수 있다. 그리고 나머지 특이치를 이용할 경우 유사도가 상대적으로 작은 산란신호성분 및 무작위 잡음성분을 추출할 수 있다. 즉, K-L 변환에 의해 위의 두 종류의 신호성분을 분리하여 재구성할 수 있다. 이렇게 전체신호성분에 대해 재구성된 반사신호 성분비는 해저면 퇴적물 성분의 음향학적 거침도를 반영한다고 볼 수 있다. 이를 유사도 지수(similarity index)라 정의하면 아래 식으로 표현할 수 있다.

$$S.I. = \frac{\sigma_1^2}{\sum_{k=1}^r \sigma_k^2}, \quad (0 < S.I. \leq 1) \quad (3)$$

유사도 지수는 0에서 1사이의 값을 가지며 퇴적물 성분이 균질할수록, 입자크기가 작을수록, 그리고 연한 퇴적층일수록 1에 가까운 값을 나타낸다. Fig. 3은 암반지역, 사질퇴적층 지역 그리고 니질퇴적층 지역에서 각기 획득한 Chirp 자료를 처리하여 구한 유사도 지수를 나타낸 그림이다. Fig. 3a는 근접한 10 개의 트레이스 자료로 구성된 Chirp 자료이며, Fig. 3b는 10 개의 트레이스 자료들을 일정 시간대로 정렬시킨 것이다. Fig. 3c는 K-L 변환을 이용하여 전체 트레이스 자료 중 선형적인 상관도가 가장 큰 반사신호성분만을 재구성한 것이고, Fig. 3d는 선형적인 상관도가 낮은 나머지 특이치를 이용하여 퇴적물 성분에 의한 산란신호성분 및 무작위 잡음성분을 재구성한 것이다. 그리고 Fig. 3e는 상대적인 유사도 크기를 나타내는 특이치들의 곡선으로 전체 트레이스 자료들의 선형적인 상관성 양상을 보여주고 있다. 식 (3)에 의해 계산된 유사도 지수의 값은 Fig. 3e

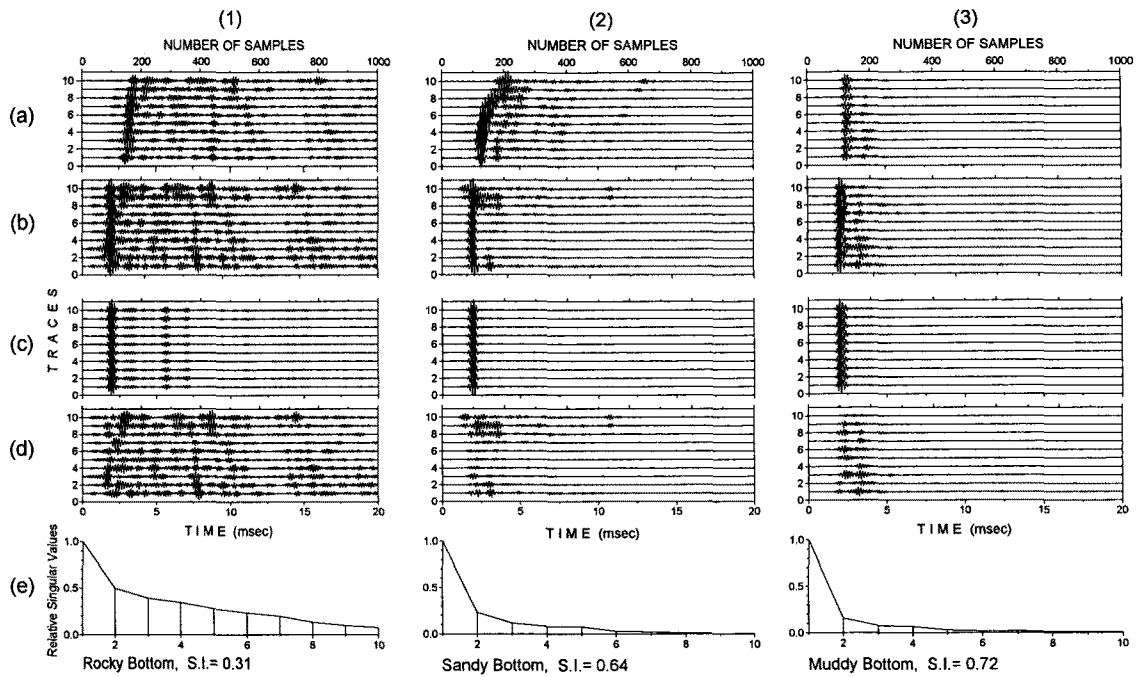


Fig. 3. Ten consecutive return signal traces from (1) rocky, (2) sandy, and (3) muddy bottoms (a) before and (b) after time alignment. (c) The reflected signal component after K-L transform. (d) The scattered signal and noise component after K-L transform. (e) The plots of relative singular values in decreasing order and the computed similarity index.

에 나타나있다. 이 그림에서와 같이 유사도 지수는 암반지역에서 0.4 이하의 낮은 값을 보이며, 사질퇴적층 지역에서는 0.5~0.7, 그리고 균질한 니질퇴적층 지역에서는 0.7 이상의 높은 값을 나타내었다. 이와 같이 서로 다른 퇴적상을 나타내는 지역에서 획득한 Chirp 자료를 처리한 결과 유사도 지수는 각기 상이한 값의 차이를 나타내었고, 또한 해저면 퇴적물 성분의 입자크기와 표면의 균기 정도에 따라 값의 차이를 나타내므로, 해저면의 퇴적상을 분류할 수 있는 음향변수로 유용하게 사용할 수 있음을 짐작 할 수 있다. 이와 같이 해저면에서 반사된 음향신호를 이용하여 해저면을 분류하는 것은 지질음향모델링의 유용한 방법이라 할 수 있다.

실제자료의 처리 및 분석

제주와 육지를 잇는 해저광케이블 매설을 위하여 제주도 성산포 천해지역에서 Chirp sonar를 이용한 천부지층탐사, side-scan sonar 조사, 그리고 퇴적물 채취가 수행되었다(Fig. 4; 한국통신, 1995). 이 연구에서 제시한 방법을 검증하기 위해, 이 때 얻은 Chirp sonar 자료를 처리하여 구한 유사도 지수를 이용하여 해저면을 분류하고, 그 결과를 side-scan sonar 기록 및 채취된 퇴적물로부터 해석된 퇴적상과 비교하였다. 표층퇴적물은 그랩과 잠수조사에 의해 각각 15 개 및 9 개 정점에서 채취되었으며, 그 분석결과는 Table 1과 같다. Fig. 5는 표층퇴적물의 분석

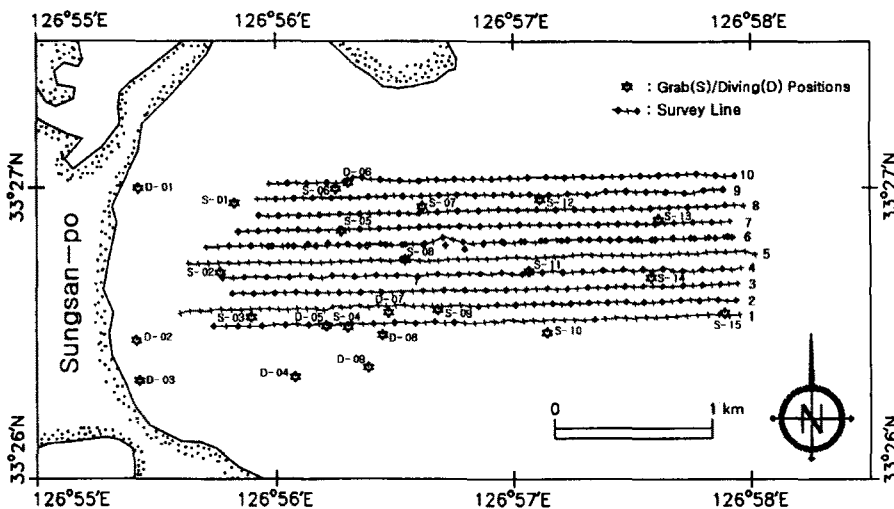


Fig. 4. The geophysical lines of coincident chirp sonar profiling and side-scan sonar survey offshore Sungsan-po, Cheju Island. Positions of grab/diving sampling stations are superposed.

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-02	0.08	99.75	0.17	—	(g)S	2.29	0.77
D-03		99.90	0.10	—	S	2.44	0.60
D-04		99.86	0.14	—	S	2.19	0.62
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
D-09		99.95	0.05	—	S	2.24	0.64

자료와 side-scan sonar 자료로부터 해석된 해저면 퇴적물의 분포 상황도이다. 해석결과에 의하면 조사지역의 해저면 퇴적물은 대부분 모래로 구성되어 있고, 수심이 깊어지면서 세립질 퇴적물인 뿔질모래(muddy sand)로 변한다. 그리고 신양리층이 나타나는 지역은 화산재로 구성된 단단한 퇴적물로 구성되어 있다. 또한 화산암으로 이루어진 암반이 돌출되어 분포하고 있는 지역도 있는데, 여기에서는 매우 불규칙한 해저지형을 보이고 있다.

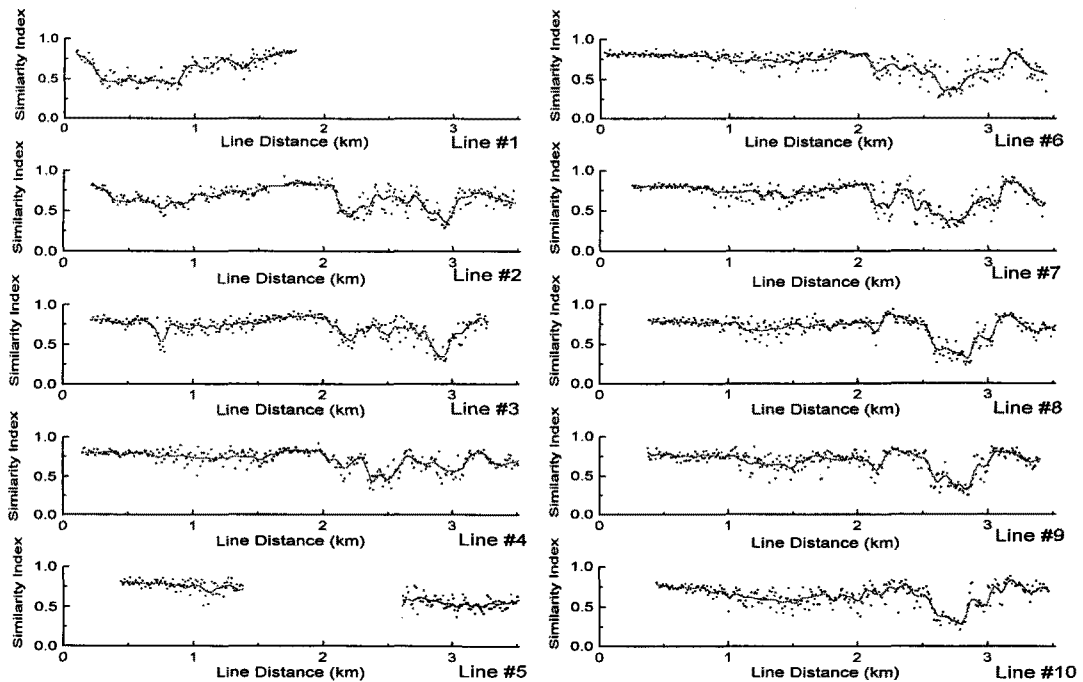


Fig. 6. The computed similarity index along the survey lines.

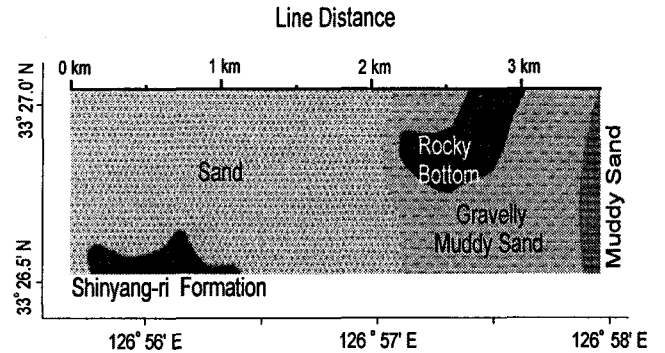


Fig. 5. The seafloor image map synthesized from sediment sample analysis and side-scan sonar records.

Chirp sonar를 이용한 음향반사자료는 10 개의 조사측선에서 획득하였다. 각 조사측선의 길이는 약 3.5 km이며 조사측선간의 간격은 100 m이다. 조사지역은 수심 100 m 이하의 천해지역으로 음원발생 간격을 0.25 초로 하고, 조사선의 속도를 5 노트로 하여 한 조사측선에서 총 6000 개의 트레이스를 획득하였다. 현장에서 획득된 Chirp 자료는 아날로그 저장장치에 48 kHz 샘플링으로 저장되었으며, 자료처리를 위해 16 bit A/D 변환한 후, 트레이스 당 10,000 개의 샘플을 0.02 ms 간격으로 취합하였다. 취합된 자료에 대해서는 무작위 잡음제거와 신호 대 잡음비 향상을 위하여 대역필터링과 정합필터링을 수행하였다. 그리고 정밀측심자료로부터 구한 수심을 이용하여 해저면에서의 반사신호를 추출하여 일정시간대로 정렬한 후, 근접한 트레이스간 K-L 변환을 실시하여 선형적인 유사도가 최대가 되는 반사신호 성분 그리고 산란신호성분 및 무작위 잡음성분으로 재구성하였다. 그리고 조사측선을 따라 유사도 지수를 계산하고 평활화

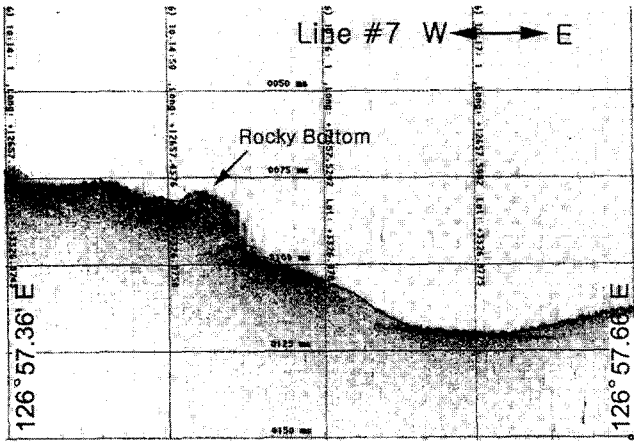


Fig. 7. A Chirp sonar profile for rocky bottom.

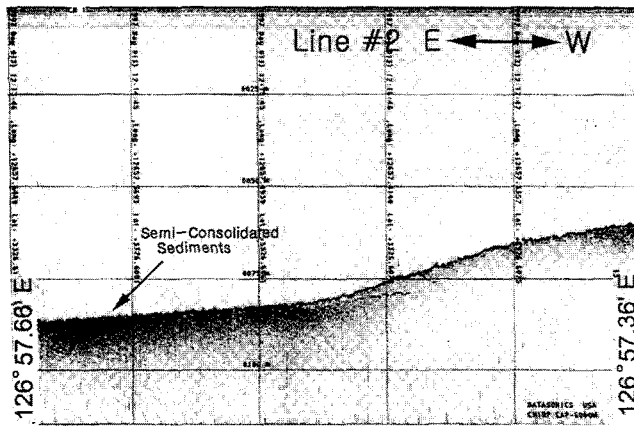


Fig. 8. A Chirp sonar profile for semi-consolidated sediments.

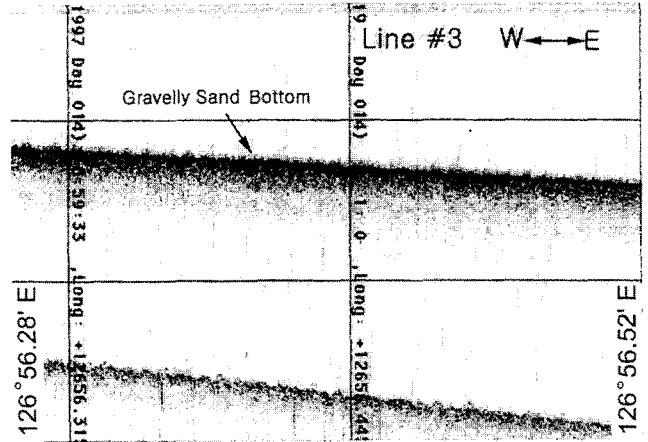


Fig. 9. A Chirp sonar profile for gravelly sand bottom.

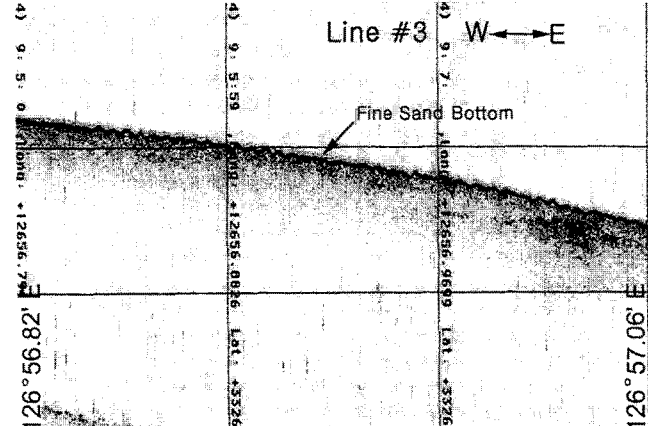


Fig. 10. A Chirp sonar profile for fine sand bottom.

(smoothing)시킨 후, 항적자료에 투입하였다(Fig. 6). Fig. 6에서 조사측선 1번과 5번의 일부 자료가 나타나 있지 않은데, 이것은 원시신호가 저장되지 않았기 때문이다.

각 조사측선별 유사도 지수의 양상(Fig. 6)을 퇴적물 분포결과(Fig. 5)와 비교하여 보면, 조사지역 내만쪽에서는 해저면 퇴적물이 균질하고 가는 입자의 사질 퇴적물로 유사도 지수가 0.8 정도의 높은 값을 나타낸다. 그리고 화산암이 돌출되어 있는 조사측선 6번에서 10번까지의 2.6~2.8 km 구간에서는 유사도 지수가 0.4 이하로 감소하는 양상을 보이고, 그 주변의 퇴적물은 자갈을 함유한 사질퇴적물로 유사도 지수를 감소시키고 있다. Fig. 7은 이 지역의 Chirp sonar 기록으로 돌출되어 있는 화산암을 잘 보여주고 있다. 해저면이 단단한 화산재로 구성된 신양리층이 나타나는 조사측선 1번의 300~900 m 구간에서 유사도 지수는 다른 측선에 비해 0.5 정도로 낮은 값을 보이고 있다. 또한 조사측선 2번과 3번의 2.9~3 km 구간에서도 유사도 지수는 낮은 값을 보이고 있는데, 이곳의 Chirp sonar 기록을 보면 반고화된 단단한 퇴적층으로 보여진다(Fig. 8). 한편 조사측선 1번에서 7번의 내만쪽에서 유사도 지수는 0.8 정도의 높은 값을 보이다가 다소 감소하여 1.8~2 km 구간에서 다시 0.8 정도의 높은 값을 보이고 있다. 이것은 Table 1의 그래프자료 분석에 의하면 조사정점 S-04와 S-05 지점에서 역질모래(gravelly

sand)의 퇴적층이 나타나 유사도 지수를 다소 감소시킨 때문으로 보인다. 이 지역에서의 Chirp sonar 기록(Fig. 9)을 보면 균질한 사질퇴적층에서의 Chirp sonar 기록(Fig. 10)에 비하여 퇴적물성분에 의한 산란신호성분에 의해 기록이 다소 검게 나오고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 11은 각 조사측선에 따라 계산된 유사도 지수로부터 해저면 퇴적물의 분포상황을 전체적으로 나타낸 그림이다. 이

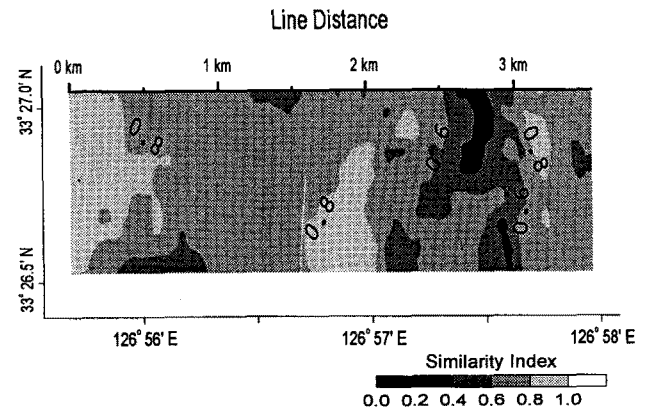


Fig. 11. The classified seafloor image by the similarity index.

림은 Fig. 5에서 나타난 균질한 사질퇴적층 지역, 암반돌출 지역과 그 주변에 자갈등을 포함한 사질퇴적층 지역, 그리고 화산재로 이루어진 단단한 퇴적층인 신양리층의 분포를 잘 나타내준다. 또한 Fig. 5에는 나타나 있지 않은 반고화된 퇴적층과 혼합물질 혹은 입자크기에 따른 사질퇴적층 지역이 보다 세밀하게 분류되어 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 유사도 지수를 이용한 음향반사자료의 통계학적 처리를 통하여 실시간 영역에서 광범위한 지역의 해저면 퇴적물의 특성을 분류할 수 있는 가능성을 입증한다.

결 론

이 연구에서는 Chirp sonar 시스템을 이용하여 획득한 광역주파수 음향반사자료의 K-L 변환을 이용하여 해저면을 분류하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. Chirp sonar 시스템을 이용하여 획득된 음향반사자료에 K-L 변환을 적용시켜 해저면에서의 반사신호성분과 해저면 퇴적물 성분의 불균질성, 입자크기, 그리고 굳기 등에 따른 산란신호성분 및 무작위잡음성분을 분리할 수 있었다.

2. K-L 변환을 통하여 분리된 반사신호성분비로부터 해저면 퇴적물 성분의 음향학적 거침도를 반영하는 유사도 지수를 고안하였다. 유사도 지수는 0에서 1사이의 값을 가지며, 각기 다른 퇴적상을 나타내는 지점에서 획득한 Chirp 자료를 처리한 결과, 암반지역에서는 0.4 이하의 낮은 값을, 사질 퇴적층 지역에서는 0.5~0.7의 값을, 그리고 균질한 니질 퇴적층 지역에서는 0.7 이상의 높은 값을 나타내었다. 즉, 유사도 지수는 해저면의 퇴적물 성분이 균질할수록, 입자크기가 작을수록, 그리고 연한 퇴적층일수록 1에 가까운 값을 나타내었다. 이와 같이 유사도 지수는 서로 다른 퇴적상을 나타내는 지역에서 각기 상이한 값의 차이를 나타내었고 또한 퇴적물 성분의 입자크기와 표면의 굳기 정도에 따라서도 값의 차이를 나타내므로, 음향자료로부터 직접 전체적인 퇴적상을 분류할 수 있는 지질음향모델링(geoacoustic modeling)을 가능하게 한다.

3. 이 논문에서 제시한 방법을 검증하기 위해 제주도 성산포 해역에서 얻은 Chirp 자료로부터 분류한 결과를 동일해역에서 획득한 side-scan sonar 자료와 퇴적물을 분석하여 해석한 퇴적상과 비교하였다. 그 결과 유사도 지수에 의해 분류된 해저면은 실제의 퇴적상과 잘 일치하고 있을 뿐만 아니라 퇴적물 성분의 특성에 따른 음향반응을 더욱 세밀히 나타내고 있음을 알 수 있다.

사 사

본 연구는 한국해양연구소 1997년도 기본연구사업인 퇴적물 지 및 해저지형 해석을 위한 탄성파 및 음향자료의 분석기법 연구(BSPE 97621-00-1046-5)의 일부 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 본 원고 내용에 대해 세심하게 조언해 주신 심사위원분들께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 김한준, 석봉출, 김성렬, 한상준, 1990. 한반도 주변해역 해저표층퇴적물의 음파감쇠계수와 생물기원 기체함량. 한국해양학회지, **25**: 26—35.
- 한국통신, 1995. 제 2 제주-육지 해저광케이블 시스템 보고서. 280 pp.
- 해양연구소, 1990. 한반도 주변해역 해저퇴적물의 음향학적 특성연구 (II)—음향반사특성. BSPG 00107-297-5, 115 pp.
- 해양연구소, 1991. 한반도 주변해역 해저퇴적물의 음향학적 특성연구 (III)—감쇠계수 특성. BSPG 00123-378-5, 162 pp.
- Ahmed, N. and K.R. Rao, 1975. Orthogonal Transforms for Digital Image Processing. Springer-Verlag, New York, pp. 189—224.
- Bolus, R.L., K.U. Sivaprasad and A.D. Frost, 1982. Subbottom acoustic impedance profiles from magnitude and phase analysis of echoes. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **GE-20**: 338—342.
- Claerbout, J.F., 1976. Fundamentals of Geophysical Data Processing. McGraw-Hill, New York, 274 pp.
- Clarence, S.C. and M. Herman, 1977. Acoustical Oceanography: Principles and Applications. John Wiley & Sons, New York, 544 pp.
- Cobo-Para, P. and C. Ranz-Guerra, 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.
- Freire, S.L.M. and T.J. Ulrych, 1988. Application of singular value decomposition to vertical seismic profiling. *Geophysics*, **53**: 591—600.
- Jones, I.F., 1985. Application of the Karhunen-Loève Transform in Reflection Seismology. Ph. D. Thesis, University of British Columbia, Vancouver (Canada), 242 pp.
- LeBlanc, L.R., L.A. Mayer, M. Rufino, S.G. Schock and J. King, 1992. Marine sediment classification using the Chirp sonar. *J. Acoust. Soc. Am.*, **91**: 107—115.
- Mayer, L.A. and L.R. LeBlanc, 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 (UK), 436 pp.
- Panda, S. and L.R. LeBlanc, 1994. Sediment classification based on impedance and attenuation estimation. *J. Acoust. Soc. Am.*, **96**: 3022—3035.
- Schock, S.G. and L.R. LeBlanc, 1990. Chirp sonar: New technology for sub-bottom profiling. *Sea Technol.*, **31**: 35—43.
- Schock, S.G., L.R. LeBlanc and L.A. Mayer, 1986. Sediment classification using a wideband, frequency-modulated sonar system. Proceedings of 18th Annual Offshore Technology Conference, Houston, pp. 389—398.

1998년 5월 6일 원고 접수

1998년 6월 30일 수정본 채택