

음향후방산란신호의 나카가미 확률밀도함수를 이용한 해저퇴적물 분류

Seafloor Sediment Classification Using Nakagami Probability Density Function of Acoustic Backscattered Signals

복 태 훈*, 팽 동 국*, 박 요 섭**, 공 기 수***, 박 수 철****
(Tae-Hoon Bok*, Dong-Guk Paeng*, Yosup Park**, Gee-Soo Kong***, Soo Chul Park****)

*제주대학교 해양과학대학 해양정보시스템공학과, **한국해양연구원 해양위성·관측기술연구부,
한국지질자원연구원 석유해저자원연구부, *충남대학교 자연과학대학 해양학과
(접수일자: 2008년 10월 8일; 수정일자: 2009년 2월 11일; 채택일자: 2009년 3월 13일)

해양 탐사에 있어서 해저퇴적물의 물성을 파악하는 것은 해양 연구의 기초 자료로서 활용되고 있다. 이러한 해저퇴적물의 물성을 파악하기 위해서는 시추를 통한 직접적인 방법이 있지만 경제적, 시간적 손실이 크고 공간적인 한계가 있다. 이에 음향 장비를 이용한 해저퇴적물 분류 연구가 활발히 진행 중에 있다. 본 논문에서는 해저 지형 조사 장비의 일종인 음향측심기에 의한 음향 신호의 나카가미(Nakagami) 분포를 분석하여 해저퇴적물의 특성을 분류하는 연구를 수행하였다. 나카가미 변수인 m 값의 변화에 따라 해저퇴적물의 물리적 특성이 달라지는 것을 확인하였고, 이는 해저퇴적물 특성 연구의 기초 자료로 활용되리라 여겨진다.

핵심용어: 해저퇴적물 분류, 나카가미 변수, 확률밀도함수, 음향후방산란신호

투고분야: 수중음향 분야 (5,3)

The physical properties of a seafloor sediment have been used as a basic data for the ocean survey. Conventional methods such as a coring, a drilling, and a grabbing have been used to explore the physical properties but these methods have a number of shortcomings as it is time consuming, expensive and spatially limited. To overcome these limitations, seafloor sediment classification using acoustic signals has been studied actively. In this paper, we obtained the backscattered signal from the seafloor sediment using an echo sounder which is one kind of seafloor topography equipment. Nakagami probability density function of the backscattered signals from the seafloor sediment was computed and a Nakagami parameter was compared with the physical properties of the seafloor sediment. We have confirmed that Nakagami parameter, m is correlated with the physical properties of a seafloor sediment. This study will be utilized as a basic data of the seafloor sediment research.

Keywords: Seafloor sediment classification, Nakagami parameter, Probability density function, Acoustic Backscattering signal

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5,3)

I. 서론

해양지질, 지질공학, 해양환경 등의 연구분야에 있어서 해저퇴적물의 종류와 물리적 특성은 중요한 자료로 인식되고 있다. 이러한 해저퇴적물의 종류 및 물성을 연구하기 위해 일반적으로 사용되는 기법은 시추기 (Coring),

채니기 (Grab) 등으로 직접 해저퇴적물을 채취하고 분석하여 그 특성을 연구하는 것이다 [1]. 하지만 상기 언급된 기법들은 광활한 해저퇴적물을 연구하기에는 시·공간적으로 많은 제약이 따른다. 이에 해저퇴적물 연구를 위해 실시간 원거리 측정이 가능한 수중음향의 이론이 활용되고 있다. 이러한 가운데, 1960년대 이후 해저 지형 관측을 위한 SeaBeam 시스템이 미국에서 개발되었고, 1970년대에 이르러 다중 빔 음향 측심기 (Multi beam echo sounder)가 사용되었다 [2-3]. 1980년대 이후 컴퓨터의

책임저자: 팽 동 국 (paeng@jejunu.ac.kr)
690-756 제주도 제주시 아라리동
제주대학교 해양과학대학 해양시스템공학과
(전화: 064-754-3484; 팩스: 064-756-3483)

급속한 성능 향상으로 대용량과 초고속 신호처리가 수반되는 다중 빔 음향 측심기의 발전과 아울러 그 사용 빈도 또한 증가되었다 [4].

음파의 후방산란신호 분석을 해양 지질 연구에 적용한 예는 다음과 같다. 1996년 캐나다에서 발생한 홍수에 의한 퇴적층에서의 음파후방산란의 시공간적 변이의 원인을 규명하였고 [5], 다중 빔 음향 측심기의 후방산란 음압 자료를 이용하여 가리비 (*Placopten magellanicus*)의 자원량을 산정하는 기초 자료로 활용하는 연구를 제시하였다 [6]. 또한 해저지질을 분류하는 상용소프트웨어 (QTC View, Quester Tangent Corporation)를 이용하여 실 해양 테스트 연구가 수행되었다 [8]. 1990년대 이후 다중 빔 음향 측심기가 도입되어 대륙붕 지역과 자원탐사 활동에 사용되었으나, 주로 해저지형관측 내지는 자료의 가시화 등에만 제한되었다 [7]. 다중 빔 음향 측심기의 1차적인 용도가 해저 지형 탐사이기 때문에 해저 지형 자료만으로는 해저퇴적물 분류 연구에 있어서 제약이 따를 수밖에 없다. 해저퇴적물 특성 연구는 주로 한국지질자원연구원에서 진행된 '황해종합조사'를 통해 이루어졌다 [9]. 하지만 고정된 특정 정점에서 채취한 퇴적물의 분석을 통해 이루어 졌기 때문에 매우 한정적이라 할 수 있다. 또한 다중 빔 음향 측심기의 도입 이후 대륙붕 지역과 자원 탐사 활동에 활용되었지만, 해저퇴적물 분류 보다는 해저 지형관측이나 자료의 가시화 등 제한적 연구가 수행되었거나 [7], 실 해양 테스트 정도에 지나지 않았다 [8]. 국외의 경우, 국내보다 상대적으로 연구가 활발하여 다중 빔 음향 측심기에서 획득한 후방 산란 강도의 분포를 측정하고, 통계 분포를 연구하였다 [10]. 기존의 해저 퇴적 양상과 관련된 연구는 특정 정점에서의 샘플링을 통한 국지적인 측정에 기초를 두어 그 자료가 매우 한정적이었고, 결과적으로 해저 퇴적 양상 파악을 위한 기본 정보가 미흡한 실정이었다. 음향 장비를 이용한 해양 지질 원격 탐사는 다중 빔 음향 측심기에만 국한하지 않고, 천부 지층 탐사기 (Sub-bottom profiler)를 이용하여 해저퇴적물 연구뿐만 아니라 천부 지층에 대한 연구로도 활용되고 있다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 천부 지층의 구조를 모의한 후에 칩 (Chirp) 소나 신호를 이용하여 천부 지층을 분류하는 연구가 수행되었고 [11], 다중 빔 천부 지층 탐사기를 통하여 천부 지층 내의 매질물 탐사에 대한 연구도 보고된 바 있다 [12]. 또한 최근에는 천부 지층 탐사기에 의해 지층 간의 흡음비, 반사율, 음향 임피던스 등 지층변수 추정하는 방법도 제시되고 있다 [13].

본 연구는 해저퇴적물에서 산란되어 돌아오는 미가공

음향자료 (Raw data)를 활용하여 신호처리 기법에 의한 산란신호의 통계적 분포를 분석하였다. 음향 자료의 경우, 나카가미 (Nakagami) 확률 분포, K-분포 등 음파 산란체의 분포 및 물리적 특성에 따른 음향 신호의 특성 연구가 활발히 수행되고 있으며, 이러한 기법들을 음향 측심기의 음향 자료에 적용하여 해저퇴적물 산란체의 특성을 파악한다면 해저퇴적물 분류가 가능하리라고 판단된다. 이를 위하여 본 논문에서는 다중 빔 음향 측심기와 천부 지층 탐사기를 이용하여 실험실과 실 해양에서 센서 검·교정 및 해저퇴적물 음파 산란 실험을 실시하여 획득한 음향 자료를 분석하였다. 이는 해저퇴적물 산란 신호가 퇴적물의 물리적 특성, 즉 평균입도, 분급, 공극률 등에 영향을 받기 때문에 음향 신호 처리 기법의 개발이야말로 해저퇴적물 분류를 위한 주요 연구라고 여겨진다. 특히 표층 퇴적 양상을 밝히는 것은 향후 한반도 주변 대륙붕 연구를 위해 선행되어야 할 중요한 연구이다. 이와 같은 연구는 향후 해저 표층 퇴적 현황을 파악하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있고, 심해저 및 대륙붕 해양 자원 탐사 지역의 자원 특성을 파악하는데 도움이 되리라고 여겨진다.

본 논문은 총 5장으로 구성되었고, 2장에서는 나카가미 확률분포에 관한 이론을, 3장에서는 실내 수조와 해상에서 이루어진 실험 내용 및 분석 방법을, 4장에서는 각각의 실험에 대한 결과 및 토의 내용을 기술하였으며, 마지막 5장에서 결론을 논하였다.

II. 이론

음파 반사신호나 후방산란신호들의 분석을 통하여 해저퇴적물의 물리적 특성을 규명하기 위한 여러 연구들이 수행되었다 [14-19]. 대부분의 이러한 연구들은 음향 특성 임피던스가 바뀌는 거칠기 (Roughness)를 갖는 경계면에서 산란된 음향신호를 분석하여 해저퇴적물의 물리적 특성을 파악한다. 반면, 본 논문에서는 이와 같은 거칠기를 갖는 해저 경계면에서 반사된 음파 신호를 배제하고, 해저 경계면을 투과한 음파가 퇴적물에서 산란된 체적후방산란신호를 획득하여 분석하였다. 이 후방산란신호의 확률밀도함수 (Probability Density Function, PDF)를 구하여 그 PDF가 해저퇴적물의 특성에 따라 어떻게 달라지는지를 연구하였다. 후방산란신호는 산란체의 통계적 변화에 따라 다양한 형태의 확률밀도함수를 보인다 [10]. 이에 후방산란신호의 확률밀도함수를 비교함으로써

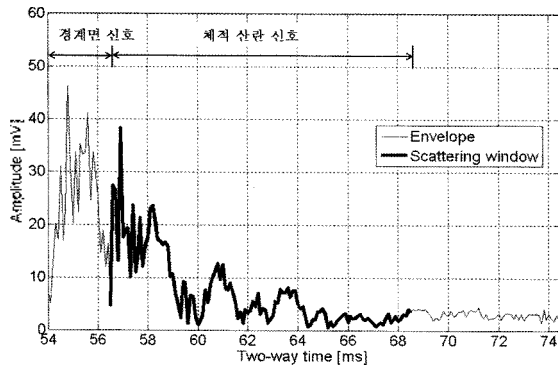


그림 1. 천부 지층에 의한 후방산란신호의 포락선
Fig. 1. The envelope of backscattering signal from the sub-bottom.

서 산란체의 특성을 분류할 수 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이, 해저 경계면에 의한 신호를 배제하고, 바로 밑 해저퇴적물에 의한 후방산란신호의 시계일 전압량 (Voltage value)을 힐버트 변환(Hilbert transform)하여 포락선 (Envelope, R)을 구하였다. 이렇게 구하여진 후방산란 포락선 신호의 나카가미 확률밀도함수, $f(R)$ 을 구하기 위하여 다음과 같은 식을 사용하였다 [20].

$$f(R) = \frac{2m^m R^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} \exp\left(-\frac{m}{\Omega} R^2\right) U(R) \quad (1)$$

여기서 $\Gamma(\cdot)$ 와 $U(\cdot)$ 는 각각 감마함수와 단위계단함수이고, 나카가미 변수 (m)와 스케일링 변수 (Ω)는 다음과 같이 표현된다.

$$m = \frac{[E(R^2)]^2}{E[R^2 - E(R^2)]^2} \quad (2)$$

$$\Omega = E(R^2) \quad (3)$$

여기서 $E(\cdot)$ 는 앙상블 평균이다.

이러한 나카가미 분포는 후방산란체의 물리적 특성에 따라 크게 세 가지 형태의 확률밀도함수 분포로 구분된다. 나카가미 확률밀도함수의 최대값이 x 축 상에서 어느 위치에 있는냐에 따라 레일리 (Rayleigh) 분포보다 왼쪽으로 치우친 프리-레일리 (Pre-Rayleigh) 분포 ($m < 1$), 레일리 분포 ($m = 1$), 오른쪽으로 치우친 포스트-레일리 (Post-Rayleigh) 분포 ($m > 1$)로 구분된다.

III. 실험 및 분석

3.1. 수조 실험

해상 실험에 앞서 모의 테스트를 위하여 수조에서의

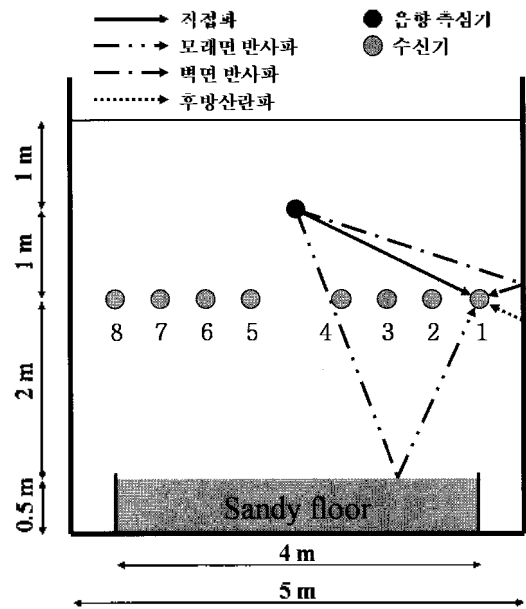


그림 2. 수조 실험 모식도
Fig. 2. Setup of lab experiment.

실험을 실시하였다. 음향측심기 (ScaBat8101, RESON Inc, Goleta, CA, USA)의 주파수는 240 kHz, 수평 빔 폭은 150°, 수직 빔 폭은 1.5°의 빔 형태를 보인다. 그림 2에서 보는 바와 같이, 음향 측심기를 모래면 중앙 상단 3 m, 수심 1 m의 위치에 고정해 두고, 수신기 (TC1014, RESON Inc, Goleta, CA, USA)를 우측 벽면에서 2 m 떨어지고 수심이 2 m인 위치 (1번 위치)에 놓고, 0.5 m 간격으로 1번에서 4번으로 수평으로 위치를 바꾸면서 신호를 송수신하였다. 4번 위치에 도달한 후에는 좌측으로 1 m를 옮겨 5번 위치에 놓고 다시 0.5 m 간격으로 5번에서 8번으로 위치를 바꾸면서 측정하였다. 이는 음향측심기가 있는 세로축을 중심으로 수신기의 간격 (0.5 m)을 동일하게 하기 위함이다. 측심기의 빔 폭이 150°이므로 한 지점의 수신기에서 동시에 수신되는 신호는 크게 4가지로 구분된다. 즉, 수신기에 직접 도달하는 신호 (→, 직선 화살), 시멘트 벽면 반사 신호 (←→, 1점 쇄선 화살), 모래면 반사 신호 (—→, 2점 쇄선 화살), 그리고 시멘트 벽면 (혹은 모래면) 후방산란신호 (.....→, 점선 화살)이다. 이 가운데 수신기가 4번과 5번 위치에서는 거시적으로 모래면에 의해서만 후방산란신호가 존재하고, 그 외의 지점에서는 벽면에 의해서만 존재한다. 이로 인해 본 연구에서는 산란체의 특성을 구분 지을 수 있는, 모래면에 의한 후방산란신호와 시멘트 벽면에 의한 후방산란신호를 나카가미 확률밀도함수로 나타내어 비교 분석하였다.

3.2. 해상 실험

해상실험에서 음향측심기를 이용할 경우에 미가공 신호를 획득할 수가 없고, 수조실험에서와 같이 따로 수신기 설치가 불가능하여 천부지층탐사기 (Squid 2000, Applied Acoustic Engineering Ltd., Great Yarmouth, NR, UK)를 이용하였다. 2006년 11월 전라북도 군산 금강 하구에서 해양탄성과 반사법 탐사가 수행되었고, 2007년 3월 태안반도 북쪽 해역에서 바다모래 지층분포조사 및 그랩 샘플러 (McIntyre grab sampler and Van Veen grab sampler)를 이용한 표층퇴적물 채취조사가 수행되었다.

천부지층탐사기를 이용한 해양탄성과 반사법 탐사는 조사선박에 의한 잡음을 최소화하기 위해 천부지층탐사기 센서와 신호를 수신하는 반사파 수신용 단채널 음향수신기 (Single Channel Hydrophone Streamer)를 선박 후미에서 약 20 m 이상 최대한 이격시켜 조사를 수행하였다. 음원의 주파수는 1 kHz, 출력은 300 J, 선박의 속도는 5 kn, 자료의 송/수신 간격을 0.25 s로 설정하였다.

그림 3에서 보는 바와 같이 태안반도 북쪽 해역 (Site-I: 126°06'54"E ~ 126°06'55"E, 37°02'44"N ~ 37°04'01"N)과 금강 하구의 두 해역 (Site-II: 126°42'32"E ~ 126°42'39"E, 35°59'31"N ~ 35°59'58"N, Site-III: 126°42'21"E ~ 126°42'42"E, 35°59'33"N ~ 35°59'36"N)을 이동하면서 해저퇴적물에 의한 음향 신호를 획득하고, 식 (1)의 나카가미 확률밀도함수를 구하여 해저퇴적물 물성에 따른 차이점을 비교, 분석하였다.

표층 퇴적물의 입도 특성을 파악하기 위하여 채취된 시료를 약 150 g씩 1000 ml 비커에 넣고 순수 쇄설성 퇴적 입자만 남도록 10%의 묽은 과산화수소 (H₂O₂)와 24시간 동안 반응시켜 유기물을 완전히 제거시키고, 증류수로 염분과 분해된 유기물을 씻어 낸 후, 다시 1N 염산 (HCl)

을 첨가하여 탄산염질 생물기원 물질을 완전히 제거하였다. 시약 처리된 시료는 4 Ø (0.0625 mm) 체를 통과하도록 습식 체질 (wet sieving)하여 체에 남은 4 Ø 이하의 조립질과 체를 통과한 4 Ø 이상의 세립질 퇴적물로 분리하였다. 건조된 조립질 퇴적물은 0.5 Ø 간격의 체가 단계별로 장착된 자동 로탭 진탕기 (Ro-tap sieve shaker)에 넣어 15 분 간 체질하여 입도 별로 무게를 구하였다. 세립질 퇴적물은 약 2 g씩을 50 ml 비커에 넣고 0.1% 분산제 (Calgon)를 300 ml를 첨가하여 균질하게 분산시킨 후 X-선 입도분석기 (Sedigraph 5000D, Particle & Surface Sciences Pty. Limited, Gosford, New South Wales, Australia)로 각 입도 별 분포를 구한 후 각 시료의 입도 별 백분율을 구하여 입도 성분 및 특성을 분석하였다 [21].

IV. 결과 및 토의

이상에서 살펴본 실험 과정을 토대로 나카가미 모델을 이용하여 확률밀도함수와 이에 영향을 미치는 나카가미 변수 (m)를 계산하였다.

그림 4는 수조 실험에서 시멘트 벽면에 의한 후방산란 신호와 모래 바닥에 의한 후방산란신호의 나카가미 확률 밀도함수를 나타내고 있다. 파선 (---)은 그림 2에서 수신기가 1번 위치에 있을 때 벽면에 의한 후방산란신호를, 점선 (.....)은 2번 위치에 있을 때 벽면에 의한 후방산란신호를, 1점 쇄선 (-.-)은 3번 위치에 있을 때 벽면에 의한 후방산란신호를, 실선 (—)은 4번 위치에 있을 때 모래 바닥에 의한 후방산란신호를 각각 나카가미 확률밀도함수로 나타낸 것이다. 또한 수신기가 음향 측심기를 중심으로 좌우 대칭의 모양으로 이동하였기 때문에 우측 결과 (그림 4-(a))와 좌측 결과 (그림 4-(b))를 각각 나타내고 있다. 그림에서도 알 수 있듯이 모래 바닥에 의한 나카가미 분포 (실선)는 레일레이 분포를 따르고 있고, 나카가미 변수 또한 1에 가깝다. 반면, 벽면에 의한 나카가미 분포 (파선, 점선, 1점 쇄선)는 중심축이 레일레이 분포보다 오른쪽으로 치우친 포스트-레일레이 분포를 보이고 있고, 나카가미 변수는 1 이상의 값들 (2.2 ~ 2.4)을 나타내고 있다. 이는 벽면을 구성하는 산란체들이 바닥을 구성하는 산란체들보다 상대적으로 더 비균질하며 상대적으로 거친 입자들이 많이 분포하고 있다는 것을 의미한다. 이러한 분포는 모래면과 시멘트 벽면을 이루는 입자 (산란체)들의 조합을 통해서도 알 수 있다.

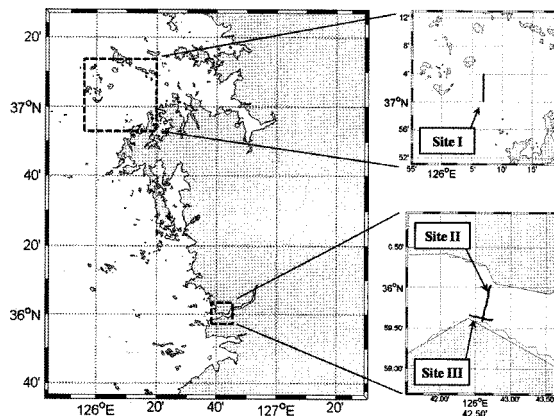


그림 3. 해상 실험 위치
Fig. 3. Site map of field experiment.

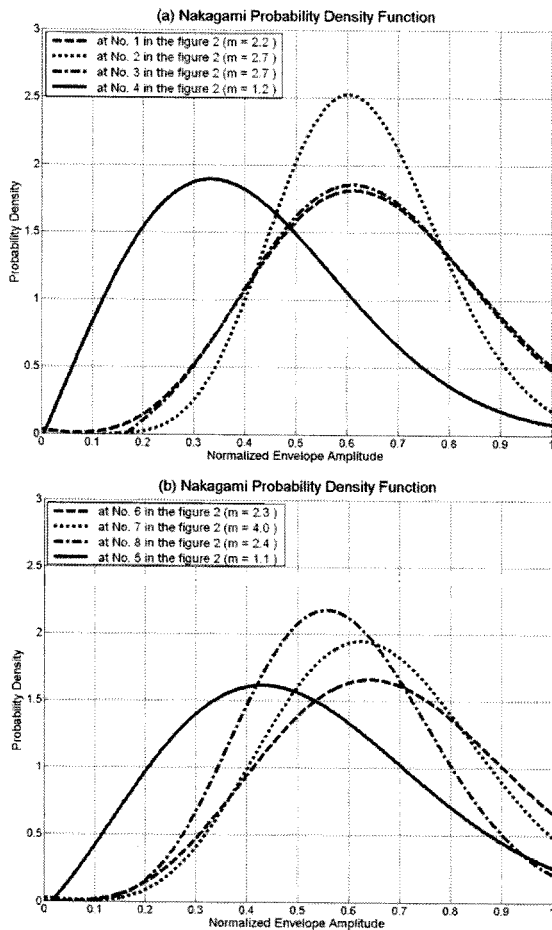


그림 4. 수조 실험에서 시멘트 벽면(실선)에 의한 후방산란신호와 모래 바닥(파선, 점선, 1점 쇄선)에 의한 후방산란신호의 나카가미 확률밀도함수. (a)그림 2의 1번~4번 위치에서의 나카가미 PDF, (b)그림 2의 5번~8번 위치에서의 나카가미 PDF

Fig. 4. Nakagami probability density function of the back-scattered signal from the wall (solid line) and from the sandy floor (dashed, dotted and dotted-dashed line) at lab. (a)Nakagami PDF at the point of 1~4 in the Figure 2. (b)Nakagami PDF at the point of 5~8 in the Figure 2.

그림 5는 수조 실험에서 측정된 신호의 나카가미 확률 밀도함수의 최대값의 x축 위치와 나카가미 변수 (m)의 상관관계를 나타내고 있다. 원 (○)은 그림 2에서 수신기가 1번과 6번 위치에 있을 때 각각 우측과 좌측 벽면에 의한 후방산란신호에 대한 값이고, 점 (●)은 수신기가 2번과 7번, 사각형 (□)은 수신기가 3번과 8번 위치에 있을 때 각각 우측과 좌측 벽면에 의한 후방산란신호에 대한 값들이다. 그리고 덧셈 기호 (+)는 수신기가 4번과 5번에 있을 때 모래 바닥에 의한 후방산란신호에 대한 값이다. 벽면 후방산란신호에 의한 m값들은 3.57 ± 0.74 , 2.80 ± 1.09 , 2.74 ± 1.01 등 1이상의 상대적으로 큰 값들을 보이고, 이와 아울러 나카가미 확률밀도함수의 최대값들은 x

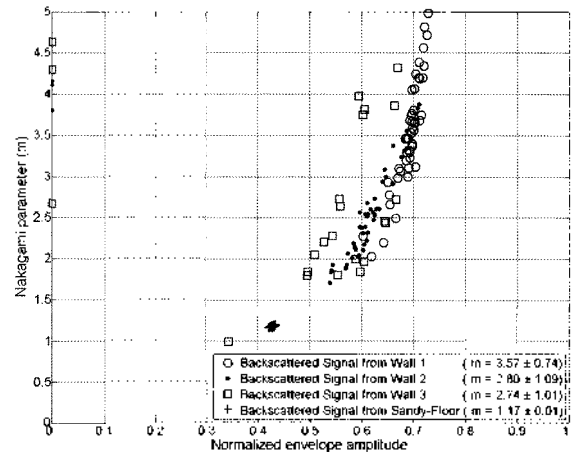


그림 5. 수조 실험에서 획득한 신호의 나카가미 확률분포함수에서 최대값의 x축 위치와 나카가미 변수의 상관관계
Fig. 5. The interrelation between the x-axis value corresponding to the maximal value of Nakagami PDF and Nakagami parameter corresponding to the Nakagami PDF; at lab.

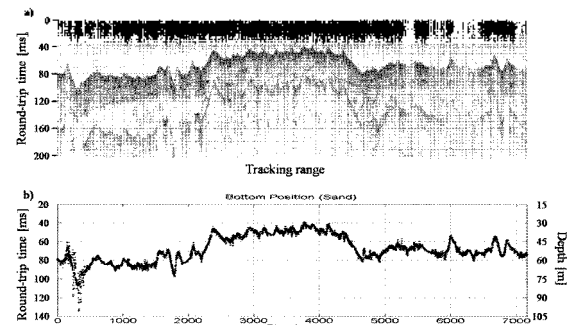


그림 6. 태안반도 북쪽 해역(Site-1)에서 측정된 해저 단면도 이미지(a)와 시계열 음향 신호에서 해저퇴적물로 추정되는 신호의 위치(b)
Fig. 6. The longitudinal image of sub-bottom at the Site-1(a) and the estimated location of bottom in the time sequence signal(b).

축의 0.5 이상에서 나타나며 이는 포스트-레이레이 분포의 특성을 보여준다. 반면 모래 바닥 후방산란신호의 경우, m 값들은 1.17 ± 0.01 로 1에 가까운 수치를 나타내고 있고, 나카가미 확률밀도함수의 최대값들의 x축 위치는 0.4 ~ 0.5로 레일레이 분포에 가깝다. 다시 말해서 그림 4에서와 마찬가지로 산란체의 물리적 특성이 달라짐에 따라 후방산란신호의 나카가미 변수 (m)와 나카가미 확률밀도함수의 분포 역시 달라짐을 확인할 수 있고, 이러한 현상을 이용하여 해저퇴적물의 물성에 따른 분포를 음향신호를 이용하여 추정할 수 있는 가능성을 보였다.

그림 6(a)는 천부지층탐사기를 선박에 부착하여 태안반도 북쪽 해역 (Site-1)에서 선박 이동 중에 측정된 해저 지형 단면도를 나타내고 있다. 0 ms는 천부지층탐사기의 깊이를 의미하고, 세로축은 선박을 중심으로 수직 방향

으로의 음파의 송수신 왕복 시간을 나타내며, 가로축은 선박이 이동한 구간이다. 즉, 선박이 이동하면 연직 방향으로 음파를 송수신하여 획득한 연속적인 시계열 신호들을 영상화한 것이다. 해저 경계면의 위치는 전반적으로 50 ms에서 100 ms 사이에서 불규칙적인 높낮이로 분포하고 있다. 100 ms에서 200 ms 사이에 해저 경계면의 높낮이 영상과 비슷한 양상으로 보이는 부분은 다중 반사에 의한 신호로 볼 수 있다. 그림 6(b)에서 보는 바와 같이 실험하는 동안 약 7000개의 신호를 획득하였는데 각각의 신호에서 50 ms ~ 100 ms의 해저 경계면으로 추정되는 신호의 위치를 그림 6(b)로 나타내었다.

해상 실험 시에 채취된 해저퇴적물 채취 시료의 입도 분석 결과, 표 1에서 보이는 것과 같이 Site-I에서는 전반적으로 모래 (Sand, S)나 자갈질 모래 (Gravelly sand, gS)의 특성을 나타내고 있다. 반면 그림 7에서 보는 바와 같이, Site-II에서는 전반적으로 찰니질 모래 (Silty sand)나 점토 (Clay)의 특성 등 Site-I에 비해 세밀한 입자의 퇴적물 성분 특성을 보인다 [22]. 한편, Site-III에서의 지질 자료는 측정되지 않았다.

그림 6(b)와 같은 음향신호를 이용하여 해저 경계면으로 추정되는 위치에서 약 한 파장에 해당하는 2.5 ms 뒤에서부터 5배 정도 지난 시간대역인 12 ms 신호를 취하여 (그림 1) 모래 해저퇴적물, 진흙 해저퇴적물에 의한 음향신호를 나카가미 확률밀도함수와 나카가미 변수를 계산하여 그림 8에 나타내었다. 그림 8(a)는 태안반도 북쪽 해역 (Site-I)에서 측정된 모래 해저퇴적물에서의 나카가미 변수들의 분포이고, 그림 8(b), (c)는 금강 하구의 두 지점 (Site-II, III)에서 측정된 진흙 해저퇴적물에서의 나카가미 변수들의 분포이다. 진흙 해저퇴적물의 경우, 거의 모든 지점에서 1보다 작은 값들을 보인다. Site-II에서 나카가미 변수(m)는 평균 0.76와 표준편차

0.24를 보이고, Site-III에서 역시 평균 0.57과 표준편차는 0.08이다. 이는 확률밀도함수로 볼 경우 프리-레일레이 분포라고 할 수 있다. 반면에 모래 해저퇴적물 (Site-I)의 경우, 나카가미 변수가 평균 1.86에 3.15의 표준편차를 보이고 있고, 그림에서도 볼 수 있듯이 m 값이 0에서 3 사이에 넓게 분포하고 있는데, 진흙 해저퇴적물과의 비교를 위해 세로축을 0에서 3까지 표기하였지만, 3 이상의 값도 부분적으로 나타났다. 이는 모래로 이루어진 해저퇴적물 바닥이 부분적으로 다른 물질들 (암석, 암반 등)이 뒤섞여서 균일하지 않은 구성 성분 분포를 보이고 있기

표 1. 태안반도 북쪽 해역(Site-I)의 해저 표층부 퇴적물 특성 (S: Sand, gS: Gravelly sand, gmS: Gravel-muddy sand)
Table 1. The geological properties of the sediment of sea bottom (S: Sand, gS: Gravelly sand, gmS: Gravel-muddy sand).

Gravel	Composition (%)			Sediment type
	Sand	Silt	Clay	
0.00	99.99	0.01	0.00	S
0.00	93.73	3.09	3.18	S
0.00	96.85	1.57	1.58	S
1.05	98.94	0.01	0.00	S
10.70	89.19	0.12	0.00	gS
0.63	99.30	0.07	0.00	S
0.00	99.58	0.12	0.31	S
0.00	97.27	1.02	1.71	S
0.26	99.67	0.07	0.00	S
0.28	98.26	0.55	0.91	S
5.74	56.19	16.19	21.88	gmS
27.67	72.33	0.01	0.00	gS
0.00	94.40	2.52	3.08	S
49.04	50.83	0.13	0.00	gS
33.58	60.92	2.64	2.86	gS
14.46	85.48	0.06	0.00	gS

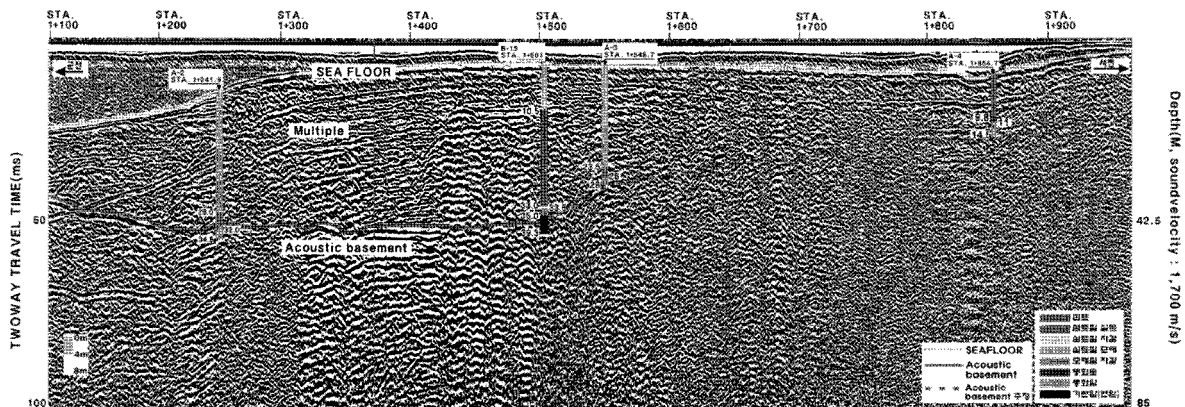


그림 7. 군산 금강 하구(Site-II)에서 측정된 해저 단면도 이미지와 4 정점에서 시추 결과
Fig. 7. The longitudinal image of sub-bottom at the Site-II and the coring results at 4 stations.

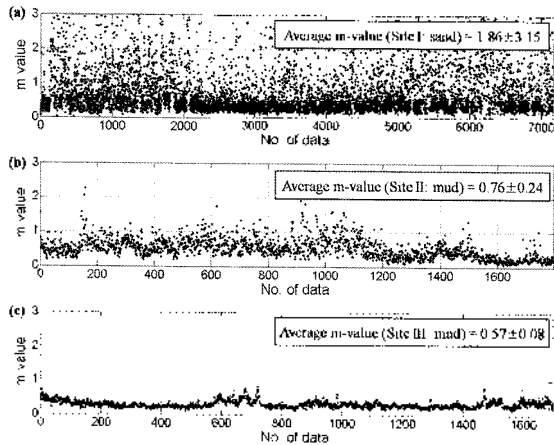


그림 8. 모래 해저퇴적물과 진흙 해저퇴적물에서 측정된 후방산란신호의 나카가미 변수 분포. (a) Site-I: 모래 해저퇴적물. (b) Site-II: 진흙 해저퇴적물. (c) Site-III: 진흙 해저퇴적물

Fig. 8. The Nakagami parameters distribution of the back-scattered signals measured from sandy bottom and from muddy bottom. (a) Site-I: sandy bottom, (b) Site-II: muddy bottom, (c) Site-III: muddy.

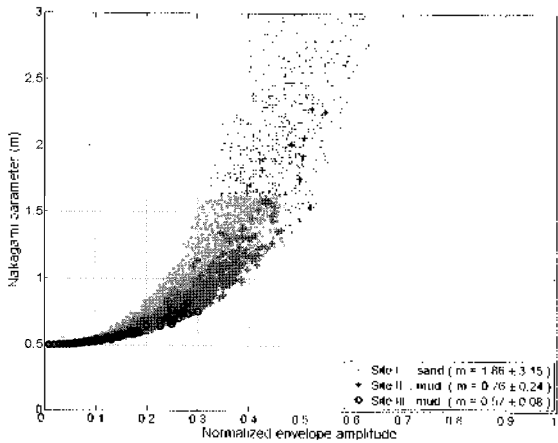


그림 9. 해상 실험에서 획득한 신호의 나카가미 확률분포함수에서 최대값의 x축 위치와 나카가미 변수의 상관관계

Fig. 9. The interrelation between the x-axis value corresponding to the maximal value of Nakagami PDF and Nakagami parameter corresponding to the Nakagami PDF; in field.

때문이라고 생각된다. 진흙 해저퇴적물보다 확연히 큰 표준편차 (3.15)는 이를 뒷받침한다.

그림 9는 해상 실험에서 측정된 신호의 나카가미 확률밀도함수의 최대값의 x축 위치의 나카가미 변수 (m)의 상관관계를 나타내고 있다. 점 (●)은 Site-I (모래 퇴적물)에서 획득한 후방산란신호에 대한 값이고, 덧셈 기호 (+)는 Site-II (진흙 퇴적물)에서, 원 (○)은 Site-III (진흙 퇴적물)에서 획득한 후방산란신호에 대한 값이다. Site-I에서는 나카가미 변수 (m) 값들이 1.86±3.15, 나카가미 확률밀도함수의 최대값의 x축 위치들이 0.6 이하의 분포

를 보이고 있다. 반면 Site-II, III의 경우 m은 각각 0.76±0.24, 0.57±0.08, 나카가미 확률밀도함수의 최대값의 x축 위치는 각각 0.2~0.4와 0.2 이하에서 집중적으로 보이는 프리-레이네어 분포를 나타내고 있다. Site-I (모래 퇴적물)의 결과를 수소 실험의 결과 (그림 5)와 비교하여 보면, m 값이 각각 1.17±0.01과 1.86±3.15로서 평균값의 차이는 크지 않지만, 표준편차에서는 큰 차이를 보인다. 나카가미 확률밀도함수의 최대값의 x축 위치를 비교해 보면, 수소와 해상은 각각 0.42 부근에서 집중적으로 그리고 0.6 이하에서 골고루 나타나는 레일레이 분포의 경향을 보이고 있다. 이는 해양 실험에 따른 제한적 요소에 의한 결과로서 선박이 약 8 km의 거리를 이동하며 음향 신호를 획득하고, 그 가운데 표 1에서 보는 바와 같이 16개 정점에서만 해저퇴적물 채취가 이루어져서 대조군으로서의 지질 자료의 양이 음향 자료에 비해 상대적으로 적기 때문에 음향 자료와의 정확한 일치가 쉽지 않다. 또한 표 1에서 보이지는 않으나 자갈질 모래의 특성 뿐만 아니라 다른 특성의 입자 성분을 포함할 수 있다는 가능성을 배제할 수 없다.

실제 해상에서 운용하는 경우에 음향학적 관점으로는 주파수, 펄스 길이 등에 의해서, 지질학적 관점으로는 해저퇴적물이 층을 이루는 양상이나 그 두께 등 여러 가지의 변수들이 포락선의 변화에 어느 정도는 영향을 미칠 것으로 여겨진다. 즉, 주파수는 해저퇴적층 두께에 따른 감쇠 계수나 산란 계수에 영향을 주고, 펄스 길이는 신호의 해상도와 연관성이 있다. 그리고 해저퇴적층의 두께나 다중 퇴적층 구조 등을 고려할 경우에는 수신 신호의 구간이나 포락선의 형태에 영향을 미치지 때문에 이에 대한 고찰이 필요하다. 본 해상 실험에서는 앞서 언급한 해저퇴적층의 두께나 다중 퇴적층 구조에 의한 영향은 배제할 수 있었던 반면, 천부지층탐사기에 의한 측정으로 인해 주파수나 펄스 길이 등에 의한 영향은 고려할 수 없었던 단점이 있다. 하지만 실내 수소 실험에서 주파수나 펄스 길이가 다른 다중 법 음향측심기를 사용하였을 때와 비슷한 양상의 결과를 얻을 수 있었기 때문에 이 부분에 대한 보완이 이루어졌다고 여겨진다.

V. 결론

본 연구는 해저면 지형 조사에 주로 이용되고 있는 음향 측심기를 이용하여 해저퇴적물에서 산란된 음향신호를 획득하고 해저퇴적물의 물리적 특성에 따라 산란신호

의 확률밀도함수가 어떻게 달라지는지를 연구하였다. 이를 위해 수조 실험을 통해 사전 예비조사를 실시하였고, 실 해양에서의 해상 실험을 통해 연구를 수행하였다.

해저퇴적물의 물리적 특성은 해양 조사 및 연구의 기초 자료로 이용되는데, 기존의 샘플 채취에 의한 지질학적 분석을 하는 고전적인 연구 방법은 시간적, 공간적 제약이 따르게 된다. 이에 각기 다른 물리적 특성을 갖는 해저 퇴적물을 샘플 채취한 지질학적 자료와 음향학적 실험을 통하여 얻어진 해저퇴적물의 음향산란신호의 나카가미 확률밀도함수의 관계를 비교함으로써 해저퇴적물 분류를 시행하였다. 그 결과, 해저퇴적물의 물성이 다를 경우 나카가미 확률밀도함수의 형태가 달라짐을 확인하였고, 또한 나카가미 확률밀도함수를 결정짓는 나카가미 변수의 값들이 다르다는 것을 알게 되었다. 이를 통해서 나카가미 변수 혹은 확률밀도함수의 분포를 통하여 해저퇴적물의 물리적 특성을 분류하는 가능성을 제시하였다. 이러한 연구는 비단 해저퇴적물의 물성에만 국한되지 않고, 현재 해저에 매몰되어 있는 기타 구조물 확인 작업에도 기여할 수 있다고 생각된다.

본 연구를 바탕으로 다중빔 음향측심기나 측변주사소나 등의 해저면 지형 탐사장비를 통해 해저퇴적층의 물리적 특성을 조사할 수 있는 보다 체계적이고 장기적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 지원 (R01-2005-000-10182-0)으로 수행되었습니다. 그리고 수조 실험을 도와준 한양대학교 해양음향연구실에 감사드립니다.

참고 문헌

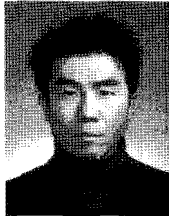
1. A. H. Bouma and N. F. Marshall, "A method for obtaining and analysing undisturbed oceanic sediment samples," *Marine Geology*, vol. 2, no. 1-2, pp. 81-99, 1964.
2. D. T. Smith and W.N. Li, "Echo-sounding and sea-floor sediments," *Marine Geology*, vol. 4, no. 5, pp. 353-364, 1966.
3. N. C. Smoot, "Guyots of the Mid-Emperor Chain mapped with multibeam sonar," *Marine Geology*, vol. 47, no. 1-2, pp. 153-163, 1982.
4. William L. Bandy, F. Michaud, J. Dymeni, C. A. Mortera-Gutiérrez, J. Bourgois, T. Calmus, M. Sosson, J. Ortega-Ramirez, J.-Y. Royer, B. Pontoise and B. Sichler, "Multi-beam bathymetry and sidescan imaging of the Rivera Transform-Moctezuma Spreading Segment junction, nor-

- thern East Pacific Rise: New constraints on Rivera-Pacific relative plate motion," *Tectonophysics*, vol. 454, no. 1-4, pp. 70-85, 2008.
5. R. Urgeles, J. Locat, T. Schmitt, and J. E. H. Clarke, "The July 1996 flood deposit in the Saguenay Fjord, Quebec, Canada: implications for sources of spatial and temporal backscatter variations," *International Journal of Marine Geology*, vol. 184, pp. 41-60, 2002.
6. V. E. Kostyler, "Stock evaluation of giant scallop (*Placopecten magellanicus*) using high-resolution acoustics for seabed mapping," *Fisheries Research*, vol. 60, pp. 479-492, 2003.
7. 석봉출, 3차원 해저 수치지형 모델에 관한 연구 - 1차년도 결과 보고서, 국방과학연구소, ATRC-408-93841, 1994.
8. 김길영, 김대철, 김양은, 이광훈, 박수철, 박종원, 서영교, "측심기의 음향반사 특성을 이용한 해저퇴적물의 원각분류: 부산 수영만의 예비결과," *한국수산학회지*, 35권, 3호, 273-264쪽, 2002.
9. 정태진, *황해중합조사(해저지질-자원조사) - 연구보고서*, 과학기술부, 2000-N-LO-01-A-03, 2001.
10. L. Hellequin and J. M. Boucher, "Processing of High-Frequency Multibeam Echo Sounder Data for Seafloor Characterization," *IEEE Oceanic Engineering*, vol. 28, no. 1, pp. 78-89, 2003.
11. C.-S. Maroni, A. Quinquis and E. Radoi, "A methodology for neural network based classification of marine sediments using a subbottom profiler," *OCEANS '97, MTS/IEEE Conference Proceedings*, vol. 2, pp. 1370-1375, 1997.
12. B. Langli and J.-C. Le Gac, "The first results with a new multibeam subbottom profiler," *OCEANS '04, MTS/IEEE TECHNO-OCEAN '04* vol. 2, pp. 1147-1153, 2004.
13. G. Theuillon, Y. Stéphan and A. Pacault, "High-Resolution Geoacoustic Characterization of the Seafloor Using a Subbottom Profiler in the Gulf of Lion," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 33, no. 3, pp. 240-254, 2008.
14. C. M. McKinny and C. D. Anderson, "Measurement of backscattering of sound from the ocean bottom," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 36, pp. 158-163, 1964.
15. C. S. Clay, "Coherent reflection of sound from the ocean bottom," *Journal of Geophysical Research*, vol. 71, pp. 2037-2044, 1966.
16. L. Hampton, *Physics of Sound in Marine Sediments*, Plenum, New York, pp.319-335, 1974.
17. A. D. Dunsiger, N. A. Cochrane and W. J. Veltor, "Seabed characterization from broad-band acoustic echosounding with scattering models," *IEEE Journal of Ocean Engineering*, vol. 6, pp. 94-107, 1981.
18. T. K. Stanton, "Sonar estimates of seafloor microroughness," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 75, pp. 809-818, 1984.
19. B. Chakraborty, "Effects of scattering due to seafloor microroughness on a multifrequency-sonar seabed profiler," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 85, pp. 1478-1481, 1989.
20. M. Nakagami, "The m-Distribution, a general formula of intensity of rapid fading," in *Statistical Methods in Radio Wave Propagation: Proceedings of a Symposium held June 18-20, 1958*, edited by W. C. Hoffman, pp. 3-36, Pergamon Press, New York, 1960.
21. J. McManus, "Grain size determination and interpretation," in *Techniques in Sedimentology*, edited by M. E. Tucker, pp.63-85, Blackwell, Oxford, 1988.

22. (주)UST21, **군장대교 건설공사 턴키 자반조사(2차 해양탄성파 반사법 탐사 조사) - 결과보고서**, UST21, 2006.

저자 약력

• **복 태 훈 (Tae-Hoon Bok)**



2004년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 이학사
 2006년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 이학석사 (수중음향)
 2006년 3월 ~ 현재: 제주대학교 해양시스템공학과 박사과정
 *주관심분야: 음파 산란, 음향신호처리

• **팽 동 국 (Dong-Guk Paeng)**

한국음향학회지 제24권 제5호 참조
 현재: 제주대학교 해양시스템공학과 조교수

• **박 요 섭 (Yosup Park)**



1994년 8월: 인하대학교 자동화공학과 공학사,
 1998년 8월: 인하대학교 대학원 자동화공학과 공학 석사,
 2004년 2월: 인하대학교 대학원 자동화공학과 공학 박사,
 2004년 ~ 2007년: (주)UST21 기술이사,
 2007년 ~ 2008년: Technical Advisor, South Pacific Applied geoscience Commission (SOPAC) in FIJI Island.
 2009년 ~ 현재: 한국해양연구원 해양위성관측기술 연구부 해양특성연구사업단.
 *주관심분야: 사이드스캔 소나 및 멀티빔 음향 음향 영상 개선, 사이드스캔 소나 및 멀티빔 음향 영상내 객체 자동 인지 및 형상복원, 사이드스캔 소나 및 멀티빔 음향 영상을 이용한 해저면 원격분류

• **공 기 수 (Gee-Soo Kong)**

1993년 2월: 인하대학교 해양과학 이학사
 1998년 2월: 인하대학교 해양과학 이학석사
 2004년 8월: 충남대학교 해양과학 이학박사 (지질해양)
 1996년 ~ 현재: 한국지질자원연구원 선임연구원
 *주관심 분야: 해양 지질

• **박 수 철 (Soo Chul Park)**



1974년: 서울대학교 해양학과 이학사
 1977년: 서울대학교 해양학과 이학석사 (해양지질학)
 1983년 독일 키엘대학교 대학원 지질/고생물 연구소 이학박사 (해양지질학)
 1977년 ~ 1978년: 한국자원연구소 해저 지질실 연구원
 1987년 ~ 1988년: 미 뉴욕주립대학 해양연구소 객원 연구원
 1991년 ~ 1993년: 한국 해양학회 학회지 편집위원
 1994년 ~ 1995년: 해양 과학 공동연구소 해양지질부장
 1994년 ~ 현재: 충청남도 지방건설기술심의회 의원
 1983년 ~ 현재: 충남대학교 자연과학대학 해양학과 조교수, 부교수, 교수
 *주관심분야: 해저탄성파 탐사학 및 대륙붕 지질학