

# 기반암 정보를 포함한 해저 지형 조사 연구 Seafloor Topographic Survey with Bedrock

김명배<sup>1)</sup> · 광강율<sup>2)</sup>

Kim, Myoung Bae · Kwak, Kang Yul

## Abstract

Seabed topography and marine site survey should be performed first in the design and construction of marine structures. We could successfully acquire the seafloor topography information can be obtained by bathymetric survey and side scan sonar and the sediment layer thickness and 3D bedrock depth by seismic reflection. It is necessary to apply carry out the integrated interpretation to each other in the ocean civil Eng. In this paper, we have obtained information on the sea bottom topography and water depth at the same time using interferometer technique and on the basement depth by seismic reflection. We have performed to assess the proposed method on the seafloor topographic survey with bedrock.

Keywords : Seafloor Topography, Seismic Survey, Bedrock

## 초 록

해양 구조물의 설계 및 시공을 위해서는 해저에 대한 지형 및 지층 조사가 우선적으로 선행되어야 한다. 해저 지형조사는 음파 탐사에 의한 수심 측량과 해저면 지형 영상의 획득을 통해 이루어지며, 해저 지층조사는 탄성과 탐사를 통한 해저 퇴적층 및 3차원 기반암 심도의 취득을 통해 이루어진다. 특히 해양 토목에서는 해저 지형과 기반암 정보에 대한 정밀한 데이터 확보가 요구되고 있으며, 이에 따라 초기 자료 취득 방법에 대한 관심이 증가하고 있다. 본 논문에서는 간섭계 방식의 음향영상탐사를 실시하여 해저 수심과 해저면 지형정보를 동시에 획득하였고, 저주파 방식의 반사법 탄성과 탐사를 통해 해저 기반암 정보를 취득하였다. 획득한 수심 데이터에 대한 비교 평가와 기반암 정보의 추출을 통해 해저 정보 획득에 대한 방법적 적합성을 검토하였으며, 해저 지형 및 기반암 데이터를 이용하여 3차원 해저 지형 모델링을 실시하였다.

핵심어 : 해저 지형, 탄성과 탐사, 기반암

## 1. 서 론

지구 환경 오염에 대한 관심이 높아지면서 대체 에너지의 일환으로 해양 자원 개발에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 1982년 유엔해양법협약(UNCLOS)이 채택된 이후 해양관리, 개발, 탐사, 자원 활용 등을 위해 다양한 해양구조물의 설치가 필요하게 되었으며, 이에 따라 해저 지형 및 기반암 등에 대한 해저 정보의 획득과 관리에 대한 요구가 증대하고 있다. 해저 지형 정보는 수심과 바닥면 정보로 구성할 수 있으며 음향 탐사를 이용하여 수심 측량과 해저 바닥면 영상탐사를 통해 정보를 획득하

는 방법이 일반적이다. 기반암과 퇴적물에 대한 정보는 탄성과 탐사와 시추 조사를 통해 얻을 수 있다. 해양에서의 시추 조사는 육지에서의 조사에 비해 기술적·경제적으로 매우 불리하기 때문에 해양 탄성과 탐사자료에 의한 해석을 주로 하고 이를 육안으로 확인하는 시추 지점을 제한적으로 선정하는 방식을 적용하고 있다. 이처럼 해저 정보는 육안으로 쉽게 확인 할 수 없기 때문에 간접적인 탐사 방법을 이용하고 있으며, 초기 탐사 자료의 취득은 해저 정보 해석의 첫 단계이다. 해저 지형 조사와 탄성과 탐사는 목적에 부합하는 장비와 방법을 적용해야 효율적인 해저 정보의 해석이 가능하다.

1) 정회원 · 명지전문대학 토목과 교수(E-mail : kimmb@chollian.net)  
2) 명지대학교 토목환경공학과 박사과정(E-mail : kwakky@empal.com)

본 논문에서는 최적의 해저 정보 해석을 위한 해저 지형 및 기반암 정보의 초기 자료 취득 방안을 제시하고자 한다. 이를 위해 해상에서 간섭계 방식의 음향영상탐사 방법을 이용하여 해저 수심과 바닥면 지형 영상을 동시에 획득 하였다. 또한 저주파 방식의 반사법 해양 탄성과 탐사를 통해 기반암 분포 및 심도 정보를 추출하였으며, 취득한 데이터를 이용하여 3차원 해저 지형 모델링을 실시하였다. 취득한 해저 수심에 대해서는 기존의 해도와 비교하였다. 이 때 기반암 정보에 대해서는 시추 조사에 의한 결과와 비교 평가하는 것이 가장 정확한 방법이지만 본 연구에서는 2008년 한국해양조사연구원서 연안해역 해저정보조사의 하나로 고주파 탐사 방식을 적용하여 실시한 천부 지층탐사 결과와 비교 평가하였다.

## 2. 해저 지형 및 기반암 정보 획득

### 2.1 개요

본 연구에서는 해저 지형 정보의 획득을 위해 간섭계 방식의 음향영상탐사와 해저 기반암 정보 취득을 위한 저주파 방식의 해양 반사법 탄성과 탐사를 실시하였다. 실험 대상 지역은 전라남도 신안군 부근의 약2km×6km의 해상으로서 수심은 약 4m~22m 정도로 분포하고 있는 영역이다. 이 지역은 해저 용기부가 있는 지형으로 해도를 참조하여 보다 정밀한 데이터를 얻을 수 있도록 비교적 평탄한 지형을 선정하였으며, 그림 1은 실험 대상 지역이다.

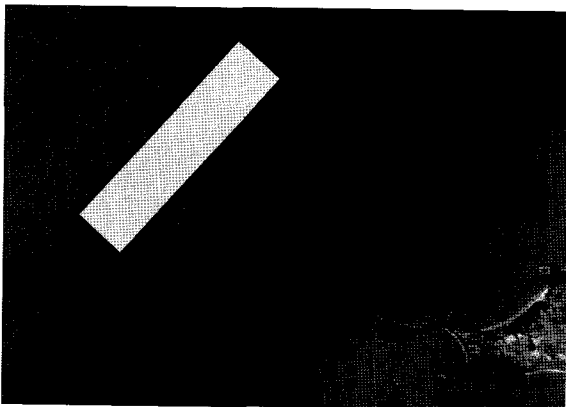


그림 1. 실험 대상 지역

실험에 사용한 탐사 장비 및 주요 보조 장비의 제원은

표 1과 같다.

표 1. 주요 탐사장비 제원

구 분	제 원
Neman ISSS 250	250kHz
SBP(Sparker)	500Hz
Motion Reference Sensor(MRU_z)	Roll/Pitch : 0.001°
Heading Sensor(Azimuth 1000)	±0.5°
SVP(SVP-15)	200m in 0.5m
DGPS(DSM 132)	1m 이하
Level(AT-G2)	±1.0mm

탐측은 주어진 계획경로를 따라 실시하게 된다. 일반적으로 탐측선의 간격은 수심의 3~4배로 설정하지만, 본 연구에서는 실험데이터의 정확도를 높이고 신뢰할 수 있는 데이터를 획득하기위해 그림 2의 탐측 경로와 같이 탐측선의 간격은 수심의 1.5배로 설정하여 66개의 경로를 탐측하였으며, 탐측선의 속도는 4knot~6knot를 유지

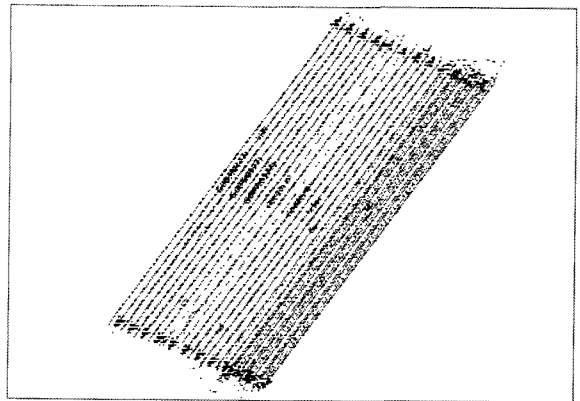


그림 2. 실험 대상 지역 탐측 경로

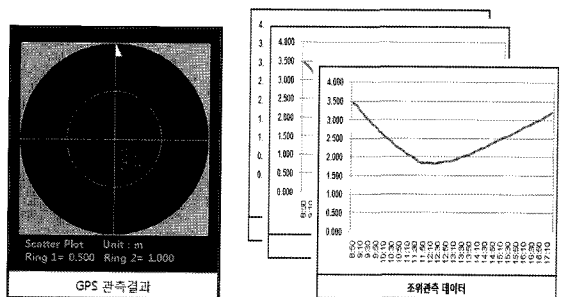


그림 3. GPS 및 조위 관측 데이터

하도록 하였다. 실험 대상지역의 DGPS 성과에 대한 오차량을 확인하기 위해 국가기준점 비급21에서 관측을 실시하고 기준점 성과와 비교하였으며, 이를 근거로 실험 대상 지역에서의 탐사를 위한 해상 위치를 결정 하였다. 측심위치의 조위 결정은 기본수준점성과(암태도 T.B.M No.2)를 이용하여 결정하였으며 그림 3은 GPS 관측 결과와 조위 관측 데이터를 표현한 것이다.

### 2.2 해저 지형 탐사

해양 지형 조사 및 탐사는 주로 음향학적 방법인 단빔 음향탐사기(Echo Sounder), 다중빔 음향탐사기(Multi-beam Echo Sounder) 및 음향영상탐사기(Side Scan Sonar)를 이용하여 왔다. 최근에는 해저 바닥에 대한 고품질 음향영상과 정밀한 기록데이터를 동시에 획득 할 수 있는 간섭계 방식의 음향영상탐사(Interferometer Side Scan Sonar ; ISSS) 기술이 개발되었다.

간섭계 방식의 탐사는 음파를 이용한 해저 수심과 바닥면 영상의 동시 확보가 가능한 탐사 방법으로서, 해저면 바닥의 기록 정보를 얻기 위하여 해저에서 반사되는 음파간의 위상차를 계산하는 간섭 기법을 적용한다. 이는 음향영상탐사기에 별도로 2개의 수신 채널을 추가하여 수중 바닥에 방사된 음향 에너지 중 반사되는 음파의 발원지 각도를 결정하기 위해 수신 음파간의 위상차를 계산하는 방식이다. 그림 4에서와 같이 동위상축에 있는 탐사 점은 위상차( $\beta$ )값이 0이며 동위상축을 벗어난 탐사 점에서는 위상차가 있음을 알 수 있다. 여기서  $\beta$ 값

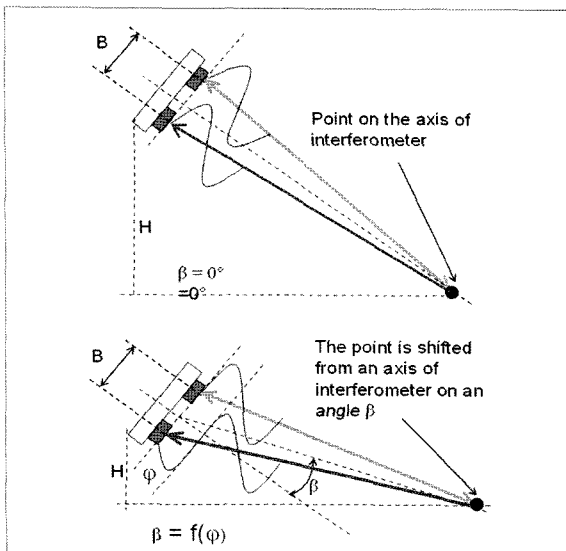


그림 4. 간섭계 음향영상탐사기법의 원리

을 구할 수 있기 때문에 각 탐사 점에 대한 수심을 알 수 있다.

실험에서 사용한 간섭계 방식의 음향영상 탐사기는 표 2와 같으며, 표 1의 DGPS 및 MRU 센서, Heading 센서 및 음속단면측정기 등의 추가적인 장비를 구성하여 탐사 위치를 결정 및 탐사선의 운동에 따른 보정 값을 취득하였다.

표 2. 간섭계 음향영상 탐사기 주요 제원

항 목	제 원
모 델	Neman ISSS 250
주파수	250kHz
음향발신각도	$0.5^\circ \times 45^\circ$
측정깊이	깊이 80m / 경사 340m
해상도	4cm

탐사는 계획 경로를 따라 실시하였으며, 취득 데이터의 정확도를 높이기 위해 안테의 탐측각을  $45^\circ$ 로 설정하였다. 탐사 데이터의 획득은 Hyscan 프로그램을 사용하여바닥의 상태에 따라 음파의 반사 신호의 강도가 결정되기 때문에 증폭조절을 통해 최적의 반사 신호를 수신할 수 있도록 하였고, 음향데이터의 획득과 동시에 추가 수신채널과의 위상차 데이터를 영상으로 취득하였으며 그림 5와 같이 표현된다.

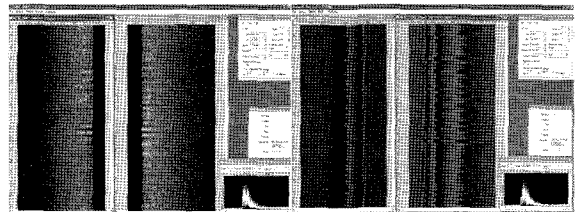
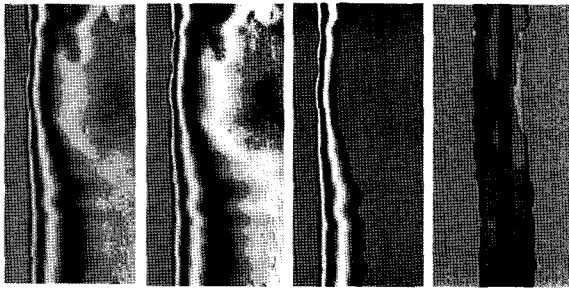


그림 5. 음향영상(좌) 및 위상영상(우)

탐사 데이터를 획득할 때 DGPS, MRU 및 Heading센서 등으로부터 실시간 데이터를 취득함으로써 음향데이터, 탐측 위치, 안테나의 탐측 각도 및 탐측 방향에 대한 항해 정보를 동시에 획득하고 동기화한다.

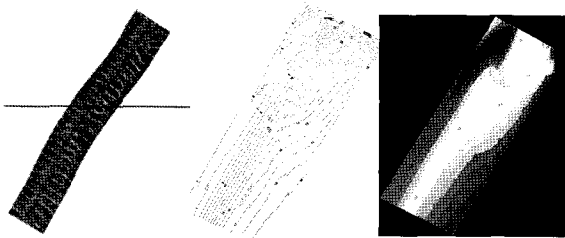
위상 영상을 처리하기 전에 항해 정보와 음속 정보 등의 데이터를 이용하여 취득 데이터에 대해 보정을 실시하였다. 음속 정보는 수중 평균 음속인 1,500m/s를 적용하였으며, 그림 6과 같이 위상 영상 처리, 바닥선의 처리 및 기록 정보 생성 등의 정밀한 수심데이터를 작성하

였고, 이때 수심의 3배 이내에 대해서만 처리함으로써 0.5%이내의 허용오차를 벗어나지 않도록 하였다.



(a) 위상영상 (b) 바닥선처리 (c) 위상처리 (d) 기복정보생성  
그림 6. 취득 데이터의 처리

탐사 경로별로 취득한 데이터에 대한 보정과 데이터 처리를 수행한 결과를 이용하여 그림 7과 같이 실험 영역 전체에 대한 모자이크 음향 영상과 수심 성과를 작성하였다.



모자이크영상      등고선도      수심분포도  
그림 7. 실험 영역에 대한 정밀 수심 데이터

### 2.3 해저 기반암 탐사

해양 탄성파탐사는 음향 측심기와 같은 원리인 음파 탐사로서 해저 퇴적층 내로 음파를 투과시켜 퇴적물 내에 있을 수 있는 물체의 존재 여부와 퇴적층 및 기반암의 지질 구조를 조사하는 방식이다. 탄성파 탐사는 반사법과 굴절법이 있으며, 대부분의 해양 탄성파 탐사는 반사법을 많이 이용한다. 사용하는 음파의 주파수 대역에 따라 고주파와 저주파로 분류할 수 있으며, 1kHz 이상의 고주파는 파장이 짧기 때문에 탐사 해상도가 높아 천부 지층 탐사에 주로 사용되고, 1kHz 미만의 저주파는 해상도가 낮은 대신 파장이 길어서 지층 투과력이 좋아 심부의 탐사 분야에 이용된다. 또한 수신기의 수에 따라 단일채널과 다중 채널 해양 탄성파탐사로 분류할 수 있다.

탄성파가 반사되기 위해서는 지하 경계면이 있어야 하고 이것을 기준으로 상부층과 하부층의 음향임피던스 값이 달라야 한다. 그림 8은 발파 점에서 발생한 탄성파 에너지가 지하 경계면에서 반사되어 발파 점의 양쪽에 깔려 있는 수신기에 수신되는 파선 경로를 보여준다.

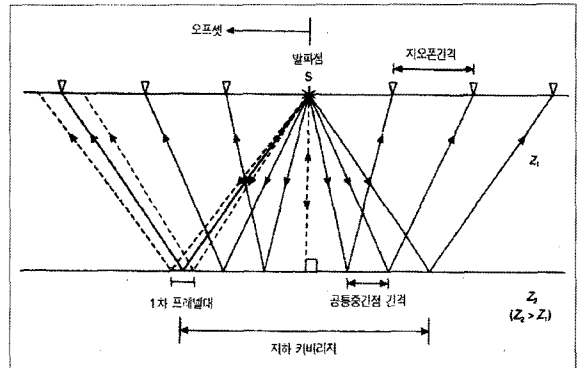


그림 8. 반사파 파선 경로

반사법 탐사는 에너지원, 지오폰 또는 하이드로폰과 같은 수신기, 탄성파기록계 등의 세 가지 요소가 필요하다. 에너지원은 음원을 발생시키는 역할을 하며, 지층의 경계면에서 반사되어 되돌아오는 음파는 하이드로폰을 통해 수신되어 증폭기에서 증폭되어 수신기로 들어온다.

일반적으로 에너지원은 전기적 에너지 방식과 물리적 에너지 방식으로 구분된다. 전기적 에너지 방식은 전기적 에너지를 음파 에너지로 변환하는 방식으로 규모가 작고 사용하기에 편리하며, 주로 고주파 음원에 많이 사용된다. 물리적 에너지 방식은 압축 공기와 같은 매질을 순간적으로 방출하여 음파를 발생시키는 방식으로서 에너지의 크기를 전기적 에너지 방식에 비해 수배에서 수십 배까지 크게 할 수 있는 장점이 있어 심부 탐사에 적합하다.

본 연구에서 사용한 지층탐사기는 반사법 방식의 단일채널 해양 탄성파 탐사기로서 전기적 에너지 음원 방식인 스파커를 이용하였으며 주파수는 500Hz를 사용하였고, 수직 해상도는 1m~3m이며 50m~80m 깊이를 투과하도록 하였다. 수신기는 PDS-22 type을 사용하였으며, 감도는 350MV/Pa이다. 주파수 범위는 5000Hz 이상이고, 10개의 하이드로폰을 호스 내부에 장착하였다. 수신기의 배치 길이는 약 2m로 구성하였다. 본 탐사에 앞서 최상의 탐사 조건을 구성하기 위해 먼저 부머와 스파커에 대해 수신기의 예인 깊이와 그 음원을 바꿔가면서

예비 실험 탐사를 실시하였다. 예비 탐사 결과와 기술적인 요건을 고려하여 음향 안테나는 30극 스피커를 사용하였고, 저장 에너지는 250J로 설정하였다. 음원과 수신기의 예인 깊이는 0.6m로 하였으며 음원의 간격은 1초로 설정 하였다.

취득한 데이터는 RadExPro S/W 를 이용하여 주파수 필터링과 증폭보정, 뮤팅 및 스웰 필터, 디콘볼루션 및 다중 반사제거 등의 처리 과정을 거쳤다. 데이터 등록은 10Hz~5kHz의 넓은 대역폭에서 수행되며, 잡음 수준은 그림 9에서와 같이 10Hz~100Hz 주파수 대역에서 나타나게 되므로 그림 10과 같은 band-pass 필터링을 실시하였다. 해상에 존재하는 너울은 음원과 수신기의 장착 깊이를 일정하게 유지하지 못하게 하는 문제를 발생하여 추가적인 잡음이 형성되므로 해양 탄성과 탐사에서 잡음으로 작용하고 수직 해상도를 저하하는 요인이 되기 때문에 그림 11과 같은 Swell filter 과정을 거쳐 데이터의 질을 개선하였다. 그림 12와 같은 다중 반사의 제거

는 해저면에 대한 실제 반사파를 반영함으로써 데이터 해석의 정확성을 향상 시킬 수 있었다. 그림 13은 각종 처리 과정을 거쳐 기반암 심도와 파쇄대 등이 표현되어 있는 해저 지층 탐사 결과 영상의 예를 든 것이다.

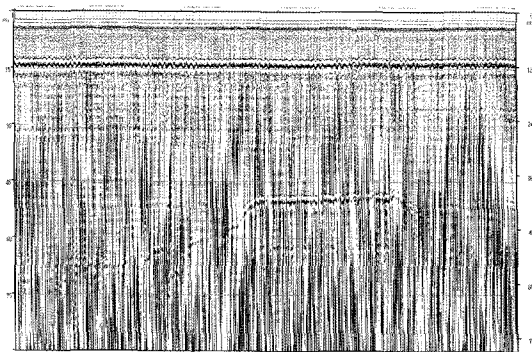


그림 9. Bandpass filter 전(trac33)

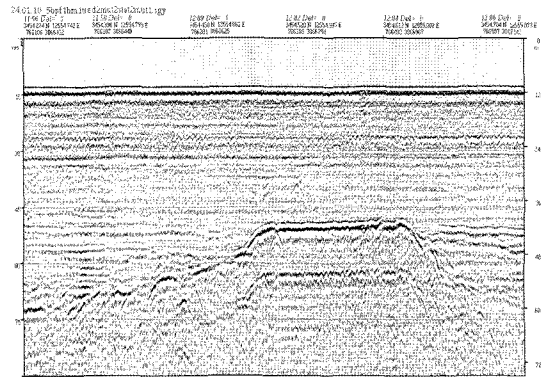


그림 11. Swell filter 후(trac33)

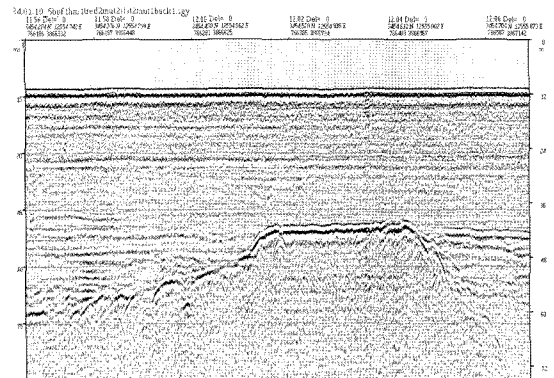


그림 12. 다중 반사 제거 후(trac33)

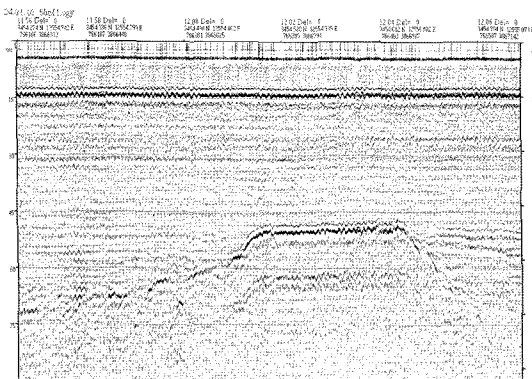


그림 10. Bandpass filter 후(trac33)

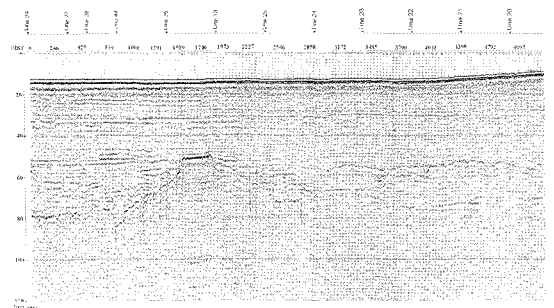


그림 13. 해저 지층 탐사 결과 영상(trac33)  
(아래 선형은 기반암 표면이며, 세로 점선은 파쇄대 경계선이다)

### 3. 결과 분석

#### 3.1 해저 지형 탐사 분석

실험 대상 영역의 수심은 그림 14와 같이 실험구역의 서북쪽은 수심이 낮고 남동쪽은 수심이 깊게 분포되어 있으며 기본수준면 아래 3.8m~21.6m로 분포하고 있었다. 실험 영역에서 취득한 수심 자료를 이용하여 등고선도를 작성하였으며, 그림 15와 같이 기존의 해도와 비교한 결과 일부 영역에서 약 1m~2m 정도의 차이가 발생하는 정도로 수심에서는 큰 차이가 없었다.

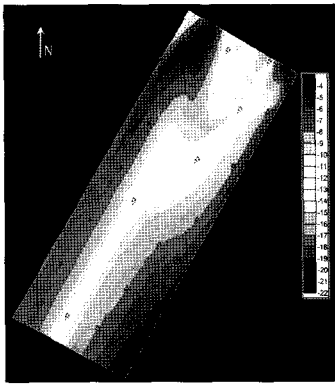


그림 14. 수심분포도

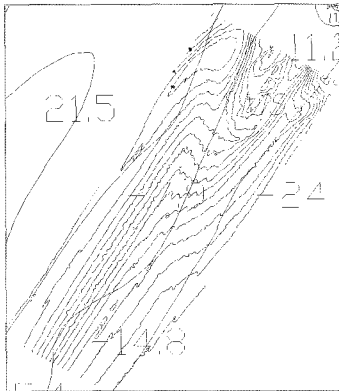


그림 15. 수심비교

#### 3.2 해저 기반암 탐사 분석

본 연구에서 취득한 해저 기반암에 대한 탐사 결과를 분석하기 위해, 2008년 한국해양조사연구원에서 주파수 2kHz-7kHz의 고주파 천부지층탐사장비를 사용하여 해저 탐사를 실시한 결과를 기본 자료로 활용하였으며 그림 16은 그 결과 영상 중 하나이다.

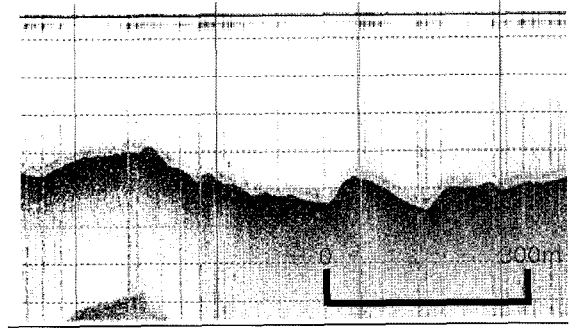


그림 16. 고주파 탄성과 탐사 영상(예)

또한 기반암 심도도는 해저 기반암 탐사 목적으로 실시한 해상 GPS 관측 성과와 조위 관측 데이터를 기준으로 설정된 기본수준면 이하의 심도로 작성하였으며, 지진파의 속도 값은 물층에 대해서는 수중 음파 속도인 1500m/s로 설정하고 퇴적층에 대해서는 1700m/s로 결정하여 해석하였다.

한국해양조사연구원에서 실시한 결과인 그림 16의 자료에 의하면 해저면에 대한 탐사 영상만 표현 될 뿐 기반암과 관련된 정보가 탐지되지 않았다. 이에 비해 본 연구에서 실험한 결과인 그림 17에서의 기반암 심도를 분석한 결과, 실험지역의 기반의 심도는 25m~65m로 분포하는 것을 알 수 있었다.

그림 17에서 기반암 심도가 올라와 있는 두 개의 지역을 볼 수 있다. 첫 번째 지역은 실험지역의 북동쪽에 위치하고 있고 약 1200m×500m의 면적이며, 평균기반암 심도는 35m이다. 두 번째 지역은 실험지역의 남서쪽에

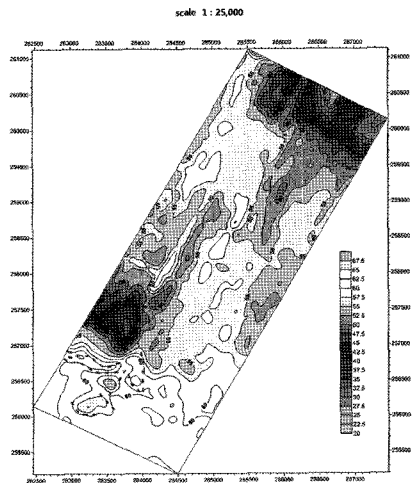


그림 17. 기반암 심도도 및 파쇄대

서 전체적으로 나타나고 있으며, 평균기반암 심도는 60m이다. 또한 평면상(600m×700m)에 등축모양의 분리되는 돌출을 볼 수 있으며 최소 기반암심도는 40~42m이다. 이 지역의 대부분의 기반암 심도는 55m에 가깝다.

퇴적층의 두께는 그림 18과 같이 해저면 아래에서 기반암 상단까지의 층으로서 퇴적층 층후도로 나타낼 수 있었다.

상기 간섭계 음향영상탐사에 의한 해저 지형 자료와 해양 탄성과 탐사를 통한 기반암 탐사 결과를 통합하여 그림 19와 같이 해저면에서 해저 기반암까지의 해저 3차원 모델링을 구성할 수 있었으며, 이 결과를 이용할 경우 해저 정보 해석의 기본 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

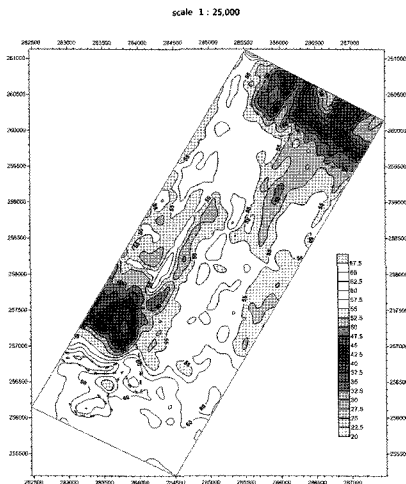


그림 18. 퇴적층 층후도

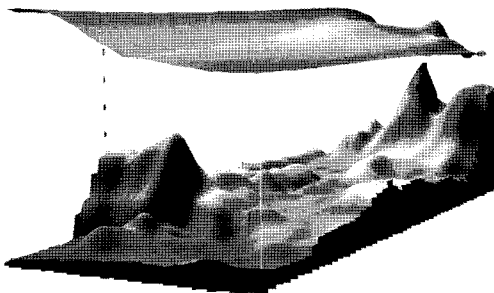


그림 19. 기반암이 포함된 해저 지형

## 4. 결 론

본 연구에서는 간섭계 방식의 음향영상탐사를 이용하여 해저 수심 및 바닥 지형 정보를 동시에 취득하고 저주파 방식의 반사법 해양 탄성과 탐사를 실시하여 해저 기반암 심도 및 분포 정보를 추출하였다. 취득한 데이터를 기존 해도 및 고주파 방식의 탐사 영상과 비교 평가하고, 기반암이 포함된 3차원 모델링을 실시 한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

첫째, 간섭계 방식의 음향영상탐사에 의한 수심 데이터를 기존 해도와 비교 분석한 결과 실험 영역에서의 수심 변화는 매우 작았으며, 이는 해저 지형 정보를 취득함에 있어서 간섭계 방식의 탐사 방법을 적용할 수 있음을 알 수 있었다.

둘째, 1kHz 미만의 저주파 방식의 탄성과 지층 탐사를 실시할 경우 해저 기반암을 포함하는 지층 정보가 세밀하게 반영이 되어 분석 자료로서의 활용가치가 보다 높을 수 있을 있다고 판단한다.

이상과 같이 기반암을 포함한 해저 지형 자료를 최적의 조건과 방법으로 취득하는 것이 정보 분석의 신뢰성을 확보할 수 있음을 알 수 있었으며, 향후 다양한 해상 환경에서의 실험을 통해 해저 유형별 탐사 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 판단한다.

## 참고문헌

- 김명배, 광강울 (2011), 간섭계방식을 이용한 수중지형 탐사방안 연구, 한국측량학회지, 제 29권, 제 3호, pp. 275-281.
- 김현도, 김진후 (2005), PC기반 8채널 탄성파탐사 시스템을 이용한 고해상 천해저 탐사, 한국물리탐사학회, 대한지구물리학회 공동학술대회논문집, 한국물리학회, pp. 187-194.
- 신성렬, 김찬수, 조철현 (2008), 탄성과 반사법 및 굴절법을 이용한 천해저 기반조사에 대한 연구, 물리탐사, Vol.11, No.2, pp. 109-115.
- 한현철, 박찬홍 (2006), 해양물리탐사 자료취득 기법, 자원환경지질, 제 39권, 제 4호, pp. 417-426.
- Robert Smith (2000), Multibeam and Seismic Mapping, SOPAC Preliminary Report.