

BSPE99531-11594-5

남서해 천해역 해저 퇴적층 지음향 특성 연구

Study on geoacoustic property of sediment layer at shallow water in the South Sea and Yellow Sea

2017. 12. 31

한국해양과학기술원

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “남서해 천해역 해저 퇴적층 지음향특성 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017. 12. 31.

총괄연구책임자 : 김병남

참여연구원 : 최복경, 김웅, 강돈혁,
 : 조성호, 신동혁, 이용국,
 : 정섬규, 금병철, 박요섭,
 : 김성렬, 최동림, 이정한,
 : 장남도, 장석, 박영길,
 : 김성현, 지호윤, 심민섭,
 : 유이선, 이승훈, 김미란,
 : 이철구, 권혁종, 고명권,
 : 이대혁

위탁연구기관명 : 한양대학교

위탁연구책임자 : 최지웅

보고서 초록

과제고유 번호		해당단계 연구기간	2015. 1. 1. ~ 2017. 12. 31.	단계 구분	
연구사업명	중사업명	해양영토 관리 및 국가 해양관리체계 구축을 위한 과학기술 개발 (우리 바다 지키기)			
	세부사업명	기관 주요사업			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	남서해 천해역 해저 퇴적층 지음향 특성 연구			
연구책임자	김 병 남	해당단계 참여연구원수	총 : 27 명 내부: 15 명 외부: 12 명	해당단계 연구비	정부 : 794,000 천원 기업 : 천원 계 : 794,000 천원
		총연구기간 참여연구원수	총 : 27 명 내부: 15 명 외부: 12 명	총 연구비	정부 : 794,000 천원 기업 : 천원 계 : 794,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 해양방위연구센터		참여기업명		
국제공동연구					
위탁연구	저주파 및 중주파수 음파의 천해 해저 퇴적층 전달특성 분석 및 지음향인자 역산				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	
<ul style="list-style-type: none"> ○ 목표: 남서해 천해역 해저 퇴적층 저주파 및 고주파 광대역 지음향 특성 파악과 지음향 모델 수립 ○ 연구해역 해저 퇴적층 음파전달 특성 파악 <ul style="list-style-type: none"> - 수직 및 수평 선배열 음향센서를 이용한 음향신호 전달특성 파악 ○ 지음향인자 관측 시스템 시제품 제작 <ul style="list-style-type: none"> - 실험실 내에서 운용 가능한 피스톤 코아용 시추 퇴적물 지음향인자 관측 시스템 시제품 제작 ○ 연구해역 해저 퇴적층 물리적 특성 파악 <ul style="list-style-type: none"> - 스파커 및 첨소나를 이용한 연구해역 해저 퇴적층 층서 구조 파악 - 피스톤 코아링 및 그램 샘플링과 박스코아 코아링을 통한 연구해역 해저 퇴적물 물성 파악 ○ 연구해역 시추 퇴적물 지음향인자 관측 및 분석 <ul style="list-style-type: none"> - 실험실용 지음향인자 관측 시스템 시제품을 이용하여 시추 퇴적물의 지음향인자 관측 및 분석 ○ 연구해역 해저 퇴적층 지음향인자 모델링 및 지음향 층서모델 수립 <ul style="list-style-type: none"> - 연구해역 시추 해저 퇴적물 지음향인자 관측자료 기반 비적용 주파수 대역 지음향인자 모델링 및 연구해역 지음향 층서 모델 수립 ○ 연구해역 해저면 음파전달 특성 관측자료 분석을 통한 지음향인자 역산 <ul style="list-style-type: none"> - 수중음파 해저면 전달특성 관측자료 분석 및 지음향인자 역산과 지음향 모델링 결과와의 비교분석을 통한 역산기법 실해역 적용 가능성 분석 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	지음향, 지음향인자, 지음향 역산, 지음향 모델, 피스톤 코아			
	영 어	Geoacoustic, Geoacoustic Parameter, Geoacoustic Inversion, Geoacoustic Model, Piston Core			

요 약 문

I. 제 목

남서해 천해역 해저 퇴적층 지음향 특성 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

수심이 낮은 천해역에서 음파는 수중에서의 굴절뿐만 아니라 해수면 및 해저면과의 복반사 및 산란, 해저 지층으로의 투과 및 반사에 의해 복잡한 다중경로를 통해 전파되어 진행된다. 이 가운데 해저면은 해수면에 비해 해저퇴적물이 성층적으로 연결되어 음향학적인 특성이 매우 복잡하게 나타남에 따라 음파의 전달에 강력한 영향을 미친다. 따라서, 해저 퇴적층의 지음향특성은 수중에서 음파전달 현상을 이해하는데 중요한 역할을 할 수 있다. 또한, 해저 퇴적층의 지음향특성은 퇴적물의 침식 및 퇴적 시 해양 및 기후조건, 고화작용과 같은 속성 작용 등에 의해 변화 될 수 있으므로 퇴적층의 퇴적과정을 이해하는 데 중요한 역할을 할 수 있을 뿐 아니라 해저자원 및 지층탐사와 해군의 대잠탐지 능력 향상에 있어서도 그 중요성이 날로 부각되고 있다. 그러나, 이러한 중요성에도 불구하고 우리나라 연안해역에서의 해저 퇴적층에 대한 지음향특성 연구는 거의 군사적 목적으로 국내 몇몇 연구기관과 대학을 중심으로 극히 제한적으로 수행되어 왔다. 특히, 우리나라 남서해역은 동해에 비해 수심이 낮기 때문에 음파전달에 있어서 해저 퇴적층의 영향이 강하게 나타남에도 불구하고 지음향특성 연구는 매우 부족한 실정이다. 또한, 이러한 지음향특성의 관측조차도 실험실에서 400 kHz ~ 1 MHz 대역의 초음파를 사용하여 수행된 관계로 실제 해양에서 사용하는 음파의 주파수 대역(수백 Hz ~ 수십 kHz)에서의 지음향특성과는 차이가 있다고 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 학술적으로 중요한 남서해 천해역의 한 구역을 연구해역으로 선정하여 실제 해양에서 사용되는 주파수 대역에 대한 해저 퇴적층 지음향인자 관측 시스템을 제작하여 시추 해저퇴적물에 대한 지음향인자를 실험실에서 측정하는 한편 지음향 모델링을 이용하여 비적용 저주파수 주파수대역에 대한 지음향인자를 예측하였다. 또한, 천해에서 수중음파 전달손실 실험을 실시함으로써 관측된 자료로부터 해저 퇴적층에 대한 지음향인자를 역산을 수행하여 지음향인자 관측결과와 비교분석을 수행하였다. 최종적으로는 연구해역의 해저 퇴적층에 대해서 얻어진 지음향인자 관측 및 역산 자료를 기반으로하여 지음향 층서 모델을 구축하였다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 시추 퇴적물 지음향인자 관측 시스템 시제품 제작
- 연구해역 해저 퇴적층 구조 및 물성과 퇴적환경파악
- 지음향인자 관측 시스템 시제품을 이용한 시추 퇴적물 지음향인자 관측 및 분석
- 연구해역 해저 퇴적층 지음향인자 모델링 및 지음향 층서모델 수립
- 연구해역 해저면 음파전달특성 관측 및 관측자료 분석을 통한 지음향인자 역산

IV. 연구개발 결과

- 해저 퇴적물 지음향인자 관측 시제품 제작
 - 해양에서 시추된 피스톤 코아를 절개하지 않고 코어 내 퇴적물의 지음향인자를 40 kHz ~ 1 MHz 주파수 대역에서 관측할 수 있도록 시스템을 설계하였다.
 - 피스톤 코아 퇴적물의 지음향인자를 수직방향으로 이동하면서 연속으로 측정 가능하도록 음향도파관을 설계하였다.
 - 피스톤 코아 퇴적물의 지음향인자 측정을 위해 사용되는 도파관 바닥과 벽면에 흡음재를 부착하여 도파관 바닥 및 벽면으로부터 반사된 음향신호의 간섭현상을 최소화하고 도파관에 삽입된 피스톤 코아가 360° 회전이 원활하게 작동하도록 써러스트 베어링(Thrust Bearings)을 설치하였다.
- 연구해역 해저 퇴적층 구조 및 물성과 퇴적환경 파악
 - 연구해역 해저 퇴적층 퇴적물의 물성을 파악하기 위하여 그랩 샘플러(Grab Sampler) 및 박스 코아러(Box Corer)와 피스톤 코아러(Piston Corer)를 이용하여 퇴적물을 샘플링하였다. 피스톤 코아를 이용한 퇴적물 채취 시 표층퇴적물에 해당하는 피스톤 코아의 상층부 퇴적물이 다량의 수분을 함유하고 있어 피스톤 코아 패킹 시 대부분 사라지는 관계로 표층 퇴적물에 대한 물성은 그랩 샘플링과 박스 코아링을 통해서 채취된 퇴적물을 이용하여 분석하였다.
 - 연구해역 해저 퇴적층의 구조는 그랩 샘플러(Grab Sampler)와 피스톤 코아러(Piston Corer)를 이용하여 채취된 퇴적물로부터 표층과 표층 하부 퇴적층을 구분하였으며 그 외의 하부 퇴적층은 탄성파 조사 자료와 문헌자료를 이용하여 층서 및 퇴적물 구성 을 추정하였다. 그 결과 표층 포함하여 총 5개의 층으로 연구해역의 층서를 구분함. 1층은 뱀(Mud)층, 2층은 모래(Sand)층, 3층은 뱀질모래(Muddy Sand)층, 4층은 단단한 뱀(Hard Mud)층, 5층은 뱀질모래(Muddy Sand)층으로 추정 할 수 있었다.
- 지음향인자 관측 시제품을 이용한 시추 퇴적물 지음향인자 관측 및 지음향 모델링과 지음향 층서모델 수립
 - 해저 퇴적층 1층은 연구해역에서 그랩 샘플링한 퇴적물을 이용하여 지음향인자를 측정하였으며, 해저퇴적층 2층, 3층, 5층에 대한 퇴적물은 피스톤 코아링으로 시추된 퇴적물 가운데 각층의 퇴적물 구성성분이 유사한 깊이의 퇴적물을 이용하여 지음향인자를 측정하였다. 4층 퇴적물은 본 연구팀이 타해역에서 시추한 퇴적물을 이용하여 측정된 지음향인자로 대체하였다.
 - 해저 퇴적층 각층에 대해서 관측된 지음향 인자는 BICSQS 지음향 모델을 이용한 모델링에 사용되었으며, 모델링 결과로부터 비관측 주파수 대역에 대한 각 층 퇴적물의 지음향 인자를 추정하였다. 표층 퇴적물의 지음향인자는 주파수 100 Hz ~ 1MHz 대역에 대해서 음속은 1465 ~ 1507 m/s의 분포로 나타났고 감쇠는 0.012 ~ 0.6 dB/m/kHz의 분포를 보였다. 2층 퇴적물에 대해서 주파수에 따른 음속은 1610 ~ 1743 m/s의 분포를 나타내었으며, 음감쇠는 0.3 ~ 1.9 dB/m/kHz의 분포를 나타냈

다. 3층과 5층 퇴적물에 대해서 주파수에 따른 음속은 1500 ~ 1570 m/s의 분포를 보였고, 음감쇠는 0.3 ~ 1.9 dB/m/kHz의 분포를 나타냈다. 4층 퇴적물에 대해서 주파수에 따른 음속은 1500 ~ 1540 m/s의 분포를 나타냈으며, 음감쇠는 0.005 ~ 0.5 dB/m/kHz의 분포를 보여주었다.

- 연구해역 탄성파 조사로부터 주파수 1 kHz에서 측정된 각 퇴적층별 음파 도달시간과 BICSQS 모델을 이용하여 추정된 각 층별 음속을 이용하여 해저 퇴적층의 두께를 결정하였다. 그리고 이를 기반으로 하여 연구해역별로 각 해저 퇴적층에 대한 지음향 층서모델을 수립하였다.
- 연구해역 해저면 음파전달특성 관측 및 관측자료 분석을 통한 지음향인자 역산
 - 연구해역에서 이어도호를 이용하여 예인되는 음원으로부터 방사된 저/중주파수 음파를 고정된 수직 선배열 수신음향센서에서 수신하여 수심과 거리에 따른 음파의 전달 손실 음장을 분석 및 모델링하였다.
 - 포물선 방정식을 기반으로 하는 음파 전달 모델(RAM)을 이용하여 특정 음파 전달 환경에서의 전달 손실 음장을 이용한 지음향 인자 역산 방법을 사용하여 특정 음파 전달 환경의 초기 지음향 인자 설정 값을 역으로 추정하여 지음향 인자 역산 가능성을 확인하였다.
 - 특정 거리의 여러 수신기에서 수신된 전달 손실 값을 이용한 상호스펙트럼 밀도 행렬을 이용한 지음향 인자 역산 방법을 사용하여 특정 음파 전달 환경의 초기 지음향 인자 설정 값을 역으로 추정함으로써 지음향 인자 역산 가능성을 확인하였다.
 - 각 지음향 인자 역산 방법에 대한 역산 가능성과 제한점을 비교하여 연구 해역에서 측정된 관측 자료로부터 획득한 거리에 따른 전달 손실 음장을 이용한 최적 지음향 인자 역산 방법을 수립하였다.
 - 연구해역에서 획득한 음향 자료로부터 획득한 전달 손실 음장을 이용하여 실험 해역의 지음향 인자를 역으로 추정하고, 연구 해역에서 실제 관측된 자료의 지음향 모델링 결과와 비교분석을 수행하였다. 그 결과 저주파 및 중주파수 음파 전달 손실 측정 자료를 이용한 지음향 인자 역산 결과에서는 연구해역의 대략적인 퇴적층 물성 정도만 파악이 가능한 것으로 나타났고, 구체적인 퇴적층 구조와 정확한 지음향 인자를 파악하려면 보다 높은 주파수의 근거리 음향 실험과 같은 추가 실험이 필요할 것으로 판단되었다.

V. 연구개발 결과의 활용계획

- 해군 대잠작전 수행 시 연구해역에 대한 소나 입력변수로서 지음향인자 자료 활용
- 수심이 얕은 천해에서 다중반사를 통한 수중 음파전달현상을 해저 퇴적층의 물성과 지음향특성을 유기적으로 연계하여 이해하는 데 활용.
- 타 해역에 대한 해저 퇴적층 지음향인자 관측 시 본 연구에서 개발된 지음향 관측 장비 활용
- 해저 골재자원 탐사 시 자원의 종류 및 퇴적층의 두께 추정에 활용

목 차

제출문	i
보고서초록	iii
요약문	v
제 1 장 서론	1
제 1 절 연구배경 및 필요성	1
제 2 절 연구목적 및 범위	2
제 2 장 국내외 기술개발 현황	5
제 1 절 국내 현황	5
제 2 절 국외 현황	5
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	9
제 1 절 실험실용 해저 퇴적물 지음향인자 관측 시제품 제작	9
1. 표층 퇴적물 지음향인자 관측 시스템 시제품 제작	9
2. 피스톤 코아 퇴적물 지음향인자 관측 시스템 시제품 제작	20
제 2 절 연구해역 해저 퇴적층의 물리적 특성 및 층서구조	27
1. 연구해역 표층 및 피스톤 코아 퇴적물의 물리적 특성	27
2. 연구해역 해저 퇴적층의 층서구조	36
제 3 절 연구해역 해저 퇴적층의 지음향 특성 및 지음향 층서모델	38
1. 연구해역 표층 퇴적물 및 피스톤 코아 퇴적물의 지음향 특성	38
2. 연구해역 해저 퇴적층의 지음향 모델링	46
3. 연구해역 해저 퇴적층의 지음향 층서 모델	58
제 4 절 연구해역 해저 퇴적층 음파 전달 특성 관측	61
1. 저주파수 및 중주파수 음파 전달손실 측정 실험	61
2. 저주파수 및 중주파수 음파 전달손실 측정 실험자료의 분석 방법 및 결과	67
제 5 절 연구해역 음파전달 관측자료 분석을 통한 지음향인자 역산	71

1. 퇴적층 지음향인자 역산 알고리즘.....	71
2. 최적화 기법 선정.....	72
3. 음파전달 모델 선정.....	74
4. 연구 해역 음향 자료의 최적 지음향인자 역산 기법 선정.....	77
5. 지음향 층서 모델 결과와 지음향 역산 결과의 비교분석.....	84
제 4장 연구개발 목표 달성도 및 대외기여도.....	89
제 1 절 연구개발목표 달성도.....	89
제 2 절 대외기여도.....	90
제 5 장 연구개발 결과의 활용계획.....	91
제 6 장 참고문헌.....	93

그 림 목 차

그림 2.2.1. Acoustic Sediment Classifier System의 블록다이어 그램.....	6
그림 3.1.1. 표층 퇴적물 지음향인자 관측 시스템 구성도.....	9
그림 3.1.2. 표층 퇴적물 패킹 모식도.....	9
그림 3.1.3. 표층 퇴적물 샘플박스.....	10
그림 3.1.4. 진공챔버 (Vacuum chamber).....	11
그림 3.1.5. 진동 교반기.....	12
그림 3.1.6. 표층 퇴적물에 대한 지음향인자 관측 시스템.....	13
그림 3.1.7. 음향 도파관 (Acoustic waveguide).....	14
그림 3.1.8. 펄스 송수신기(Pulser/Receiver).....	15
그림 3.1.9. 음향필터(Acoustic Filter).....	16
그림 3.1.10. 디지털 오실로스코프(Digital storage oscilloscope).....	17
그림 3.1.11. 중심 주파수가 60 kHz인 트랜스듀서와 송신 음향신호 파형 및 주파수 스펙트럼.....	18
그림 3.1.12. 중심 주파수가 90 kHz 트랜스듀서와 송신 음향신호의 파형 및 주파수 스펙트럼.....	18
그림 3.1.13. 500 kHz 트랜스듀서와 송신 음향신호의 파형 및 주파수 스펙트럼.....	19
그림 3.1.14. 표층 퇴적물 지음향인자 계산 프로그램 및 결과 예.....	20
그림 3.1.15. 피스톤 코아 지음향인자 관측 시스템 구성도.....	21
그림 3.1.16. LM 가이드 시스템.....	21
그림 3.1.17. 음향신호 수신용 하이드로폰과 수신감도 그래프.....	22
그림 3.1.18. 피스톤 코아 퇴적물 지음향인자 측정용 도파관.....	23
그림 3.1.19. 피스톤 코아 홀더.....	23
그림 3.1.20. 피스톤 코아를 회전이 가능하도록 잡아주는 고정치구.....	24
그림 3.1.21. 서보모터 수동 제어장치.....	25
그림 3.1.22. 피스톤 코아를 기계적으로 회전시키기 위한 서보모터 및 치구.....	25
그림 3.2.1. 연구해역 해저 퇴적층 퇴적물 채취를 위한 장비.....	27

그림 3.2.2. 연구해역도.....	27
그림 3.2.3. 해저 퇴적물의 표층 그랩 샘플링 및 피스톤 코아링 정점도.....	28
그림 3.2.4. 연구해역 표층 퇴적물의 퇴적상.....	29
그림 3.2.5. 연구해역 표층퇴적물의 뼈 함유율 및 물리적 특성 분포도.....	30
그림 3.2.6. 박스코아링을 통해서 채취된 표층 퇴적물.....	31
그림 3.2.7. 연구해역에서 시추된 피스톤 코아 퇴적물.....	31
그림 3.2.8. 연구해역에서 시추된 피스톤 코아 상부 퇴적물의 퇴적상.....	32
그림 3.2.9. 연구해역 시추 피스톤 코아 상부퇴적물의 모래함유율 및 물리적 특성 분포 도.....	33
그림 3.2.10. A03정점에서 시추된 피스톤 코아 퇴적물의 물리적 특성.....	34
그림 3.2.11. B05정점에서 시추된 피스톤 코아 퇴적물의 물리적 특성.....	34
그림 3.2.12. C02정점에서 시추된 피스톤 코아 퇴적물의 물리적 특성.....	35
그림 3.2.13. D06정점에서 시추된 피스톤 코아 퇴적물의 물리적 특성.....	35
그림 3.2.14. F02정점에서 시추된 피스톤 코아 퇴적물의 물리적 특성.....	35
그림 3.2.15. 연구해역 해저 퇴적층 층서구조 측정 모식도 및 관측라인.....	36
그림 3.2.16. 스파커를 이용하여 관측된 연구해역 해저 퇴적층 층서 구조.....	37
그림 3.3.1. 주파수 100, 500 kHz에서 연구해역 표층 퇴적물의 음속 및 음감쇠 분포 도.....	38
그림 3.3.2. 주파수 40, 100, 200, 500 kHz에서 피스톤 코아 상부 퇴적물의 음속 분 포도.....	40
그림 3.3.3. 주파수 100, 200, 500 kHz에서 피스톤 코아 상부 퇴적물의 음감쇠 분포 도.....	40
그림 3.3.4. A03 정점에서 시추된 피스톤 코아 퇴적물의 깊이별 지음향인자.....	41
그림 3.3.5. B05 정점에서 시추된 피스톤 코아 퇴적물의 깊이별 지음향인자.....	42
그림 3.3.6. C02 정점에서 시추된 피스톤 코아 퇴적물의 깊이별 지음향인자.....	43
그림 3.3.7. D06 정점에서 시추된 피스톤 코아 퇴적물의 깊이별 지음향인자.....	44
그림 3.3.8. F02 정점에서 시추된 피스톤 코아 퇴적물의 깊이별 지음향인자.....	45
그림 3.3.9. 연구해역 표층 퇴적물 채취 정점도 및 정점별로 관측된 표층 퇴적물의 지음 향인자 관측값을 기반으로 하여 수행된 지음향 모델결과.....	48

그림 3.3.10. 연구해역 전체정점에서 관측된 표층퇴적물의 지음향인자 평균값 기반 지음향 모델링 결과.....	48
그림 3.3.11. 연구해역 표층 퇴적물 모래함유량 분포도 및 주파수 100 Hz, 1 kHz, 5 kHz, 10 kHz에서 퇴적물 음속에 대한 지음향 모델링 결과.....	50
그림 3.3.12. 연구해역 표층 퇴적물 모래함유량 분포도 및 주파수 100 Hz, 1 kHz, 5 kHz, 10 kHz에서 퇴적물 음감쇠에 대한 지음향 모델링 결과.....	50
그림 3.3.13. 박스 코어링을 통해서 채취된 표층 퇴적물.....	51
그림 3.3.14. 연구해역에서 시추된 해저 퇴적층 2층의 피스톤 코아 퇴적물(Sand)에서 관측된 퇴적물의 지음향인자 평균값 기반 지음향 모델링 결과.....	52
그림 3.3.15. 연구해역에서 탄성파 도달시간 및 심도별 음속에 대한 지음향 모델결과를 이용하여 추정된 해저 퇴적층 2층(Sand)의 두께 분포도.....	52
그림 3.3.16. 연구해역에서 해저 퇴적층 3층 퇴적물(뻘질 모래)의 지음향인자 모델링 결과.....	54
그림 3.3.17. 연구해역에서 탄성파 도달시간 및 심도별 음속에 대한 지음향 모델결과를 이용하여 추정된 해저 퇴적층 3층(뻘질 모래)의 두께 분포도.....	54
그림 3.3.18. 연구해역에서 해저 퇴적층 4층 퇴적물(경질뻘)의 지음향인자 모델링 결과.....	56
그림 3.3.19. 연구해역에서 탄성파 도달시간 및 심도별 음속에 대한 지음향 모델 결과를 이용하여 추정된 해저 퇴적층 4층(경질뻘)의 두께 분포도.....	56
그림 3.3.20. 연구해역에서 탄성파 도달시간 및 심도별 음속에 대한 지음향 모델 결과를 이용하여 추정된 해저 퇴적층 5층(뻘질모래)의 두께 분포도.....	58
그림 3.3.21. 연구해역에서 D03 정점에서 주파수 100 Hz 음파에 대한 지음향 층서 모델 결과.....	59
그림 3.3.22. 연구해역에서 D03 정점에서 주파수 1 kHz 음파에 대한 지음향 층서 모델.....	59
그림 3.3.23. 연구해역에서 D03 정점에서 주파수 5 kHz 음파에 대한 지음향 층서 모델 결과.....	60
그림 3.3.24. 연구해역에서 D03 정점에서 주파수 10 kHz 음파에 대한 지음향 층서 모델 결과.....	60

그림 3.5.5. 특정 음파 전달 환경을 가정한 음파 전달 모델의 시뮬레이션 결과 (transmission loss field).....	78
그림 3.5.6. 기준 전달손실 곡선과 역산을 통해 추정된 전달손실 곡선(500 Hz).....	80
그림 3.5.7. 각 수심(1:5:100m)에서 추출한 상호스펙트럼 밀도 행렬 결과(좌 : 실수부, 우 : 허수부), (a) 기준 전달손실 음장에서 추출한 결과(simulated CSDM), (b) 최적 복제 전달손실 음장에서 추출한 결과(Estimated CSDM).....	83
그림 3.5.8. 연구해역의 지형 정보와 퇴적물 샘플링 수행 정점.....	84
그림 3.5.9. 실험 정선의 탄성파(Sparker) 측정 결과, (a) 탄성파 측정 정선, (b) S04 탄성파 측정 정선의 지층 구조 결과.....	85
그림 3.5.10. 실측 전달손실(검은색 실선), 지음향인자 역산을 통해 구현된 복제 전달손실(빨간색 실선).....	87
그림 3.5.11. 탄성파 측정 자료(Sparker)를 기반으로 지음향 모델링을 수행하여 획득한 연구해역의 지음향인자(검은색 실선)와 역산을 통해 획득한 지음향인자(파란색 실선).....	88

표 목 차

표 1.2.1. 연차별 연구목표 및 주요 연구내용.....	2
표 3.1.1. 표층 퇴적물 패킹 샘플박스 사양.....	10
표 3.1.2. 진공챔버 (Vacuum chamber) 사양.....	11
표 3.1.3. 진동교반기 사양.....	12
표 3.1.4. 음향 도파관 사양.....	14
표 3.1.5. 펄스 송수신기 사양.....	15
표 3.1.6. 음향필터 사양.....	16
표 3.1.7. 디지털 오실로스코프(Oscilloscope) 사양.....	17
표 3.1.8. LM가이드 사양.....	26
표 3.1.9. 서보모터 사양.....	26
표 3.2.1. 표층 퇴적물의 그랩 샘플링 정점.....	28
표 3.2.2. 해저 퇴적물의 피스톤 코아링 정점.....	29
표 3.2.3. 표층퇴적물 조성 및 조직변수.....	30
표 3.2.4. 표층퇴적물 조성 및 조직변수.....	32
표 3.3.1. 연구해역 표층 퇴적층 지음향 모델링 입력인자.....	49
표 3.3.2. 연구해역에서 해저 퇴적층 2층(모래)의 지음향 모델링 입력인자.....	53
표 3.3.3. 연구해역에서 해저 퇴적층 3층(뻘질 모래)의 지음향 모델링 입력인자.....	55
표 3.3.4. 연구해역에서 해저 퇴적층 4층(경질뻘)의 지음향 모델링 입력인자.....	57
표 3.5.1. 2층 구조 퇴적층에서 각 역산 인자들의 종류와 탐색 범위.....	79
표 3.5.2. 기준 전달손실을 이용한 지음향인자 역산 결과.....	80
표 3.5.3. 전달손실 음장의 정합장 처리 기법을 이용한 지음향인자 역산 결과.....	82
표 3.5.4. 연구해역에서 가정한 2층 구조 퇴적층의 각 역산 인자들의 종류와 탐색 범위.....	86
표 3.5.5. 실측 전달손실을 이용한 2층 구조 퇴적층에서의 역산 결과.....	87

제 1 장 서론

제 1 절 연구배경 및 필요성

1. 배경 및 필요성

수심이 낮은 천해역에서 음파는 수중에서의 굴절뿐만 아니라 해수면 및 해저면과의 반사 및 산란과 해저 지층으로의 투과 및 반사로 인해 복잡한 다중경로를 통해 전파되어 진행된다. 이 가운데 해저면은 해수면에 비해 해저 퇴적물이 층으로 연결되어 매우 복잡한 음향학적 특성을 보여서 음파의 전달에 강력한 영향을 미친다. 따라서, 해저 퇴적층의 지음향 특성에 대한 연구는 수중에서 음파전달 현상을 이해하는 데 중요한 역할을 할 수 있다. 또한, 해저 퇴적층의 지음향 특성은 퇴적물의 침식 및 퇴적 시 해양 및 기후조건, 고화작용과 같은 속성 작용 등에 의해 다양하게 변화 될 수 있어 퇴적층의 퇴적 과정을 이해하는 데도 중요한 역할을 할 수 있다. 또한 해저자원 및 지층탐사와 해군의 대잠탐지 능력향상에 있어서도 그 중요성이 날로 부각되고 있다. 그러나, 이러한 중요성에도 불구하고 우리나라 연안 해역에서의 해저 퇴적층의 지음향 특성에 대한 연구는 거의 군사적 목적으로만 국내 몇몇 연구기관과 대학을 중심으로 극히 제한적으로 수행되어 왔다. 특히, 우리나라 남서해역은 동해에 비해 수심이 낮기 때문에 음파전달에 있어서 해저 퇴적층의 영향이 강하게 나타남에도 불구하고 지음향 특성에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다. 또한, 이러한 지음향 특성의 관측조차도 대부분 실험실에서 400 kHz ~ 1 MHz 대역의 초음파를 사용하여 수행되고 있어 실제 해양에서 사용하는 음파의 주파수 대역(수백 Hz ~ 수십 kHz)에서의 지음향 특성과는 차이가 있다.

본 연구에서는 학술적으로 중요한 의미를 갖는 남서해 천해역의 한 구역을 연구해역으로 선정하여 해저 퇴적층의 층서구조를 파악하고 500 kHz 이하의 주파수 대역에서 퇴적물의 지음향 특성을 관측하고 BICSQS 지음향 모델(Biot-Stoll with squirt flow and shear model)을 이용하여 실제 해양에서 사용되는 주파수 대역에 대한 지음향 특성을 예측하고자 한다. 이와 더불어 이를 바탕으로 연구해역에 대한 지음향 층서 모델을 수립하고자 한다. 또한, 연구해역에서 수중음파 전달손실 실험을 실시하여 관측된 전달손실 자료로부터 해저 퇴적층에 대한 지음향인자를 역산하고 관측된 자료와 비교분석함으로써 해저 퇴적물의 지음향인자 예측을 위한 역산기법의 적용 가능성을 검토하고자 한다.

제 2 절 연구목적 및 범위

본 연구는 남서해 천해역에서 해저 퇴적층의 저주파 및 고주파 광대역 지음향 특성을 파악하고 지음향 층서 모델을 수립하기 위하여 수행되었다. 2015년 1월부터 2017년 12월 까지 총 3년에 걸쳐 수행되었으며, 연차별 연구 목표 및 내용은 아래 표와 같다.

표 1.2.1 연차별 연구목표 및 주요 연구내용

구분	연구목표	연구내용
1차년도	연구해역 해저 퇴적층 음파전달 특성 파악	<ul style="list-style-type: none">○ 연구해역 저주파수 및 중주파수 음파 관측을 통한 해저면 음파 전달 특성 파악
	지음향인자 관측 시스템 제작	<ul style="list-style-type: none">○ 실험실용 시추 퇴적물 지음향인자 관측 시스템 제작

구분	세부연구목표	연구내용
2차년도	연구해역 해저 퇴적층 물리적 특성 파악	<ul style="list-style-type: none">○ 연구해역 해저 퇴적층 구조 및 퇴적환경 파악○ 연구해역 해저 퇴적층 물성 측정
	시추 퇴적물 지음향인자 측정 및 역산기법 개발	<ul style="list-style-type: none">○ 실험실용 지음향인자 관측 시스템 시제품을 이용한 시추 퇴적물 지음향인자 관측 및 모델링<ul style="list-style-type: none">- 시추 퇴적물 음속 및 음감쇠 관측- 관측자료 기반 비적용 주파수 대역 지음향인자 모델링○ 실험실용 지음향인자 관측 시스템 고도화

구분	세부연구목표	연구내용
3차년도	연구해역 해저 퇴적층 지음향인자 역산 및 지음향 모델 수립	<ul style="list-style-type: none"> ○ 연구해역 해저면 음파전달특성 관측자료 분석을 통한 지음향인자 역산 <ul style="list-style-type: none"> - 저주파 및 중주파수 음파 해저면 전달특성 관측 자료 분석 및 지음향인자 역산 ○ 연구해역 해저 퇴적층 지음향인자 역산결과와 지음향 관측자료의 비교분석 <ul style="list-style-type: none"> - 피스톤 쿄아 퇴적물 지음향인자 관측 시스템 고도화 - 지음향 역산결과와 지음향 관측자료 기반 모델링 결과와 비교분석 ○ 연구해역 수중음향 및 지음향 관측자료 기반 해저 퇴적층 최적 지음향 모델 수립 <ul style="list-style-type: none"> - 연구해역 최적 지음향역산 기법 도출 - 지음향 관측자료 및 역산자료를 근거로 지음향 모델 수립

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 현황

해저 퇴적층의 지음향 특성에 대한 국내연구는 해외 선진국에 비해서 매우 미진한 수준으로 연구되고 있고, 또 국내 몇몇 연구기관과 대학을 중심으로 지극히 제한적으로 수행되어 왔다. 이 가운데 핵심 연구기관으로는 국방과학연구소가 주축이 되어 군사적 목적으로 중요한 해역에서의 해저 퇴적층에 대한 지음향 특성 연구를 활발히 수행하고 있다. 하지만, 관측자료 대부분을 공개하고 있지 않은 실정이다. 한국지질자원연구원은 해저지질도 작성 사업을 통해 해저지층의 지질 및 지구물리 특성과 음향특성을 조사하여, 국토에 존재하는 자원에 대한 기초적인 정보를 제공하고 학계, 산업계, 교육계 등에서 활용될 수 있도록 하고 있다. 연구에 참여한 대학으로는 서울대학교가 해저 퇴적층에 대한 지음향 특성을 예측할 수 있는 이론적인 연구를 수행하고 있고, 한양대는 수중음향 실험을 통해 해저 퇴적층의 지음향인자를 역산할 수 있는 연구를 수행하고 있다. 한편, 부경대와 전북대는 해저 퇴적층의 지음향인자를 관측하고 음향특성에 따라 층을 구성하는 층서모델에 대한 연구를 진행하고 있다.

제 2 절 국외 현황

미국은 2차 세계대전 때부터 군사적-목적으로 해저 퇴적물의 지음향 특성에 대한 연구를 수행하였다. 그 후 1995년부터는 미해군연구소(Office of Naval Research (ONR))의 체계적인 지원하에 다수의 대학(University of Washington, Texas A&M, University of Hawaii 등) 및 연구소(Scripps Institution of Oceanography 등)가 연합하여 SAX99 (Sediment Acoustics Experiment 99)와 SAX04 (Sediment Acoustics Experiment 04)등과 같은 연구사업을 수행하였다. 그리고 이와 같은 사업들을 통해 해저 퇴적물의 지음향 특성을 해석하기 위한 많은 이론적인 모델들이 개발된 바 있다. 또한, 미해군연구소(ONR)는 2001년부터 한반도 연안을 비롯하여 동중국해 및 남중국해 해저 퇴적층의 지음향인자를 해저면 음파전달손실로부터 역산하기 위한 다수의 연구사업(ASIAEX, WISE, NLIWI, IWISE, TAVEX)을 지원해오고 있다. 샌디에고의 스크립스 연구소(Scripps Institution of Oceanography) 산하의 해양물리 실험실(Marine physical laboratory)은 미

해군의 수중작전과 해양기술에 대한 문제의 해결책을 제시하기 위한 지음향에 대한 연구를 수행하고 있고, 특히 지음향 역산에 대한 다수의 논문을 발표한 바 있다. 미국 해군연구실(Naval Research Laboratory) 소속의 Stennis Space Center(SSC)는 해저퇴적물에 대한 분류와 도면화 작업, 해저퇴적물 분포특성과 퇴적물의 물성과 음향특성에 대한 연구를 수행하고 있다. 최근에는 장기적인 연구계획으로서 국내 항구 및 연안지역의 퇴적물에 대한 물성과 음향특성 대한 자료를 조사하고 분석한 후 수요자에게 효과적으로 제공하는 연구를 수행하는 한편 해저퇴적물을 물성과 음향특성에 따라 분류하기 위한 Acoustic Sediment Classifier System (ASCS)도 자체 개발하여 운용중이다(그림 2.2.1). 미 해군 연구소(ONR)은 해양음향 분야에 대해 매년 과제를 지원하고 있을 뿐만 아니라 지음향인자와 관련된 과제에 대해서도 현재까지 지속적인 연구수행을 지원하고 있다.

Acoustic Sediment Classifier System 블록다이어 그램

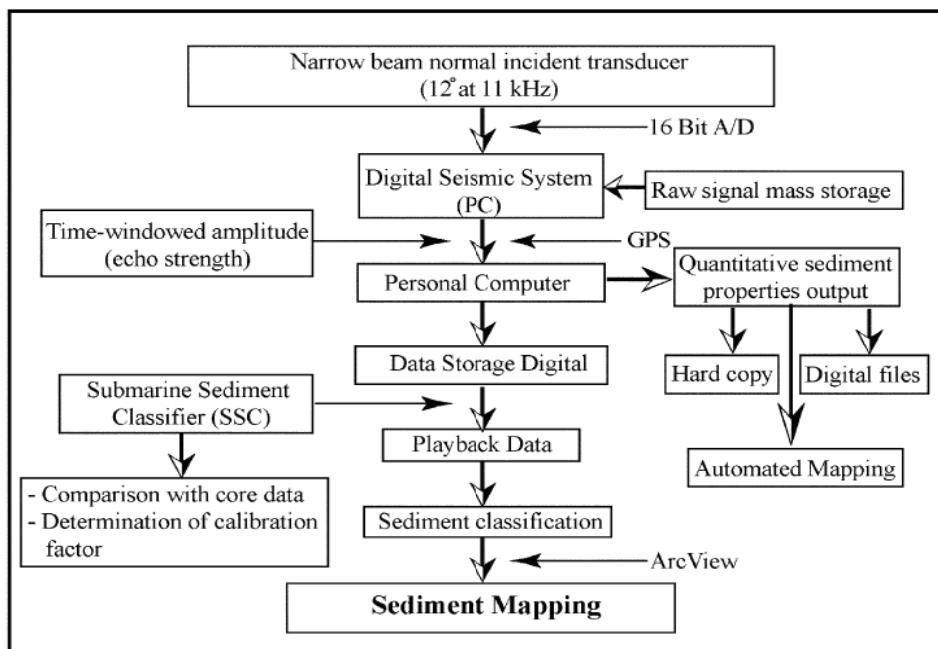


그림 2.2.1 Acoustic Sediment Calssifier System의 블록다이어 그램

일본의 해양과학기술센터(JAMSTEC: Japan Agency for Marine-earth Science and Technology)는 일본의 대표적인 해양연구 기관으로서 해저지질을 연구할 수 있는 다양한 장비 및 연구선을 보유하고 있다. 뿐만 아니라 해저 자원 조사 연구에 필요한 자료를 얻

기 위해 해저 지질 시료를 채취하여 그 특징을 조사하고 있다. 특히 이곳에서 보유하고 있는 심부 탐사선을 이용하여 보다 깊은 곳의 코어시료를 시추하여 음향특성에 대한 연구를 부분적으로 수행하고 있다. 또한, 산업기술종합연구소(AIST: Advanced Industrial Science and Technology) 산하의 지질조사종합센터(GSJ: Geological Survey of Japan)에서는 일본 근해의 해양 지질 구조에 대한 정보를 데이터베이스화하여 웹사이트에 공개하는 등의 방법으로 자국 영토에 대한 정보를 체계적으로 서비스하고 있다. 나아가 이런 방법으로 공개된 데이터들은 학계나 산업체에서 다양한 방면에서 활용되고 있는데 결과적으로 볼 때 일본은 해양지질에 대한 정보를 일본 사회생활 전반에 활용될 수 있도록 하고 있는 것이다. 단적인 예로 Tokai 대학교와 Poro-Acoustic Laboratory가 해저 퇴적물의 지음향 특성을 예측할 수 있는 이론모델 개발에 대한 연구를 진행하고 있다는 사실이 이를 증명한다.

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절 실험실용 해저 퇴적물 지음향인자 관측 시스템 시제품 제작

1. 표층 퇴적물 지음향인자 관측 시스템 시제품 제작

해양에서 그랩 샘플러를 통해 채취된 표층 퇴적물의 지음향인자를 관측하기 위하여 시스템을 설계 및 제작하였다. 시스템은 그림 3.1.1과 같이 퇴적물 샘플 패킹부와 수중음향 측정부로 크게 구분된다.

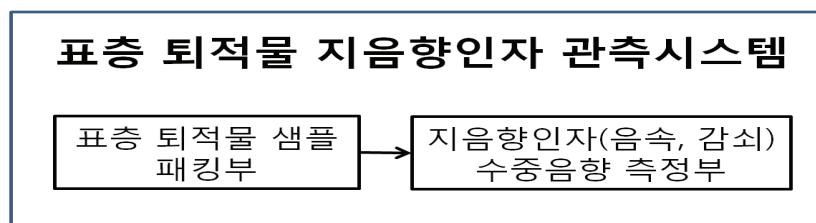


그림 3.1.1 표층 퇴적물 지음향인자 관측 시스템 구성도

가. 표층 퇴적물 샘플 패킹부

해양에서 그랩 샘플러를 이용하여 채취된 표층 퇴적물을 음향 측정용 샘플박스에 패킹할 때 퇴적물 내에 공기가 임의로 섞이지 않도록 방지하고 음파가 퇴적물 샘플박스 내에서 전파할 때 박스벽면을 투파하지 않도록 설계하였다. 또한, 샘플박스 내 퇴적물이 균질하게 분포하도록 제작하였다. 퇴적물의 패킹은 그림 3.1.2와 같은 과정을 통해서 수행되며 퇴적물 패킹에 사용되는 구성요소에 대한 설명은 다음과 같다.

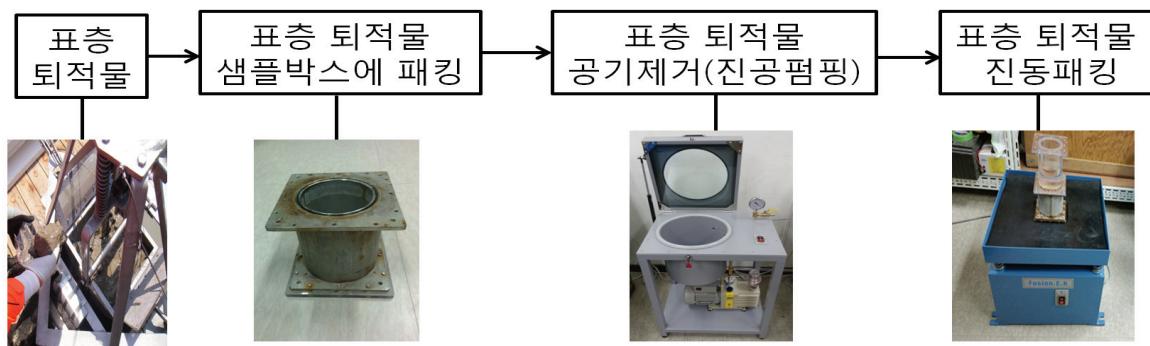


그림 3.1.2. 표층 퇴적물 패킹 모식도

1) 표층 퇴적물 패킹 샘플박스:

수중에서 지음향인자 측정 실험 시 송신센서로부터 송신된 음파가 샘플박스의 벽면을 투과하여 수신되는 효과를 최소화 하려는 차원에서 물보다 음향 임피던스(Acoustic Impedance)가 약 70배 높은 스텐레스(Stainless)재료를 이용하여 그림 3.1.3와 같이 샘플 패킹박스를 제작하고, 그 사양은 표 3.1.1과 같다.



그림 3.1.3. 표층 퇴적물 샘플박스

표 3.1.1. 표층 퇴적물 패킹 샘플박스 사양

구 분	사 양
재질	스텐레스
내경	76 mm
외경	102 mm
높이	110 mm

2) 진공챔버 (Vacuum chamber):

그림 3.1.4의 진공챔버는 샘플박스 내의 퇴적물 패킹 시 인위적으로 생성된 퇴적물 내부의 기포를 제거하기 위한 장치로서, 철재 챔버 안에 샘플박스를 위치시킨 후 밀폐된 상태에서 진공펌프를 가동시켜 샘플박스 내부의 기포를 제거하는 데 사용된다.



그림 3.1.4. 진공챔버 (Vacuum chamber)

표 3.1.2. 진공챔버 (Vacuum chamber) 사양

구 분	사 양
크기(외부)	800 × 600 × 700 mm
크기(내부)	Φ 356 × 300 (30ℓ)
진공펌프	100L/min
진공계이지	1 EA, -760mmHg
최대진공도	Max 1 Torr(-759 mmHg)
전원	220V 60Hz
시창구(상판유리)	10 mm 두께의 강화유리 (VDF144 Model: 12mmT)

3) 진동 교반기(Vibrator):

그림 3.1.5의 진동교반기는 기포가 제거된 샘플박스 내부 퇴적물에서 입자 사이의 간격을 고르게 유지시키는 데 사용된다.

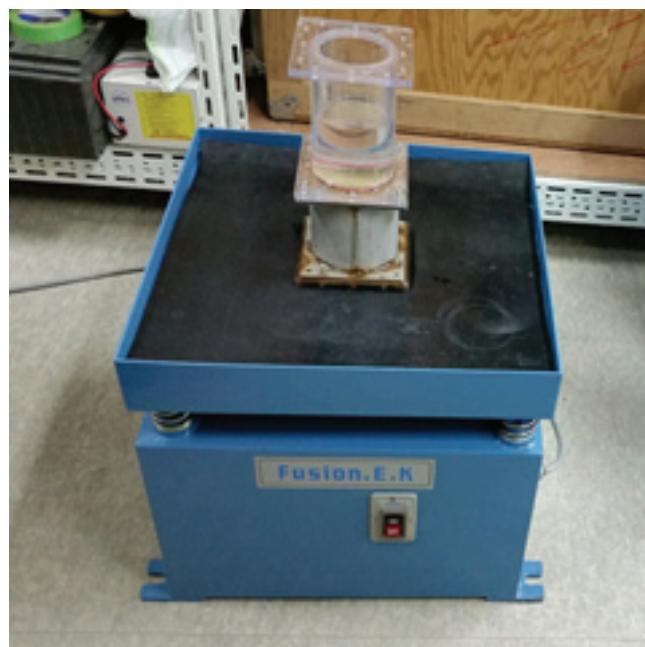


그림 3.1.5. 진동 교반기

표 3.1.3. 진동교반기 사양

구 분	사 양
형식	Mortor - driven
전원	220V, AC. 1/2 HP (50/60 Hz)
진동폭	1.5 mm
진동수	2850/3450 r.p.m
테이블크기	450×600 mm / 900×900 mm
재하용량	30 kg
무게	85 kg

나. 지음향인자(음속, 감쇠) 수중음향 측정부

지음향인자 수중음향 측정부는 20 kHz ~ 1 MHz의 주파수 대역에서 표층 퇴적물의 지음향인자를 관측할 수 있도록 설계되었다. 아래 그림 3.1.6은 퇴적물의 지음향인자를 측정하기 위한 실험 모식도를 나타내며, 각각의 구성요소에 대한 설명은 다음과 같다.

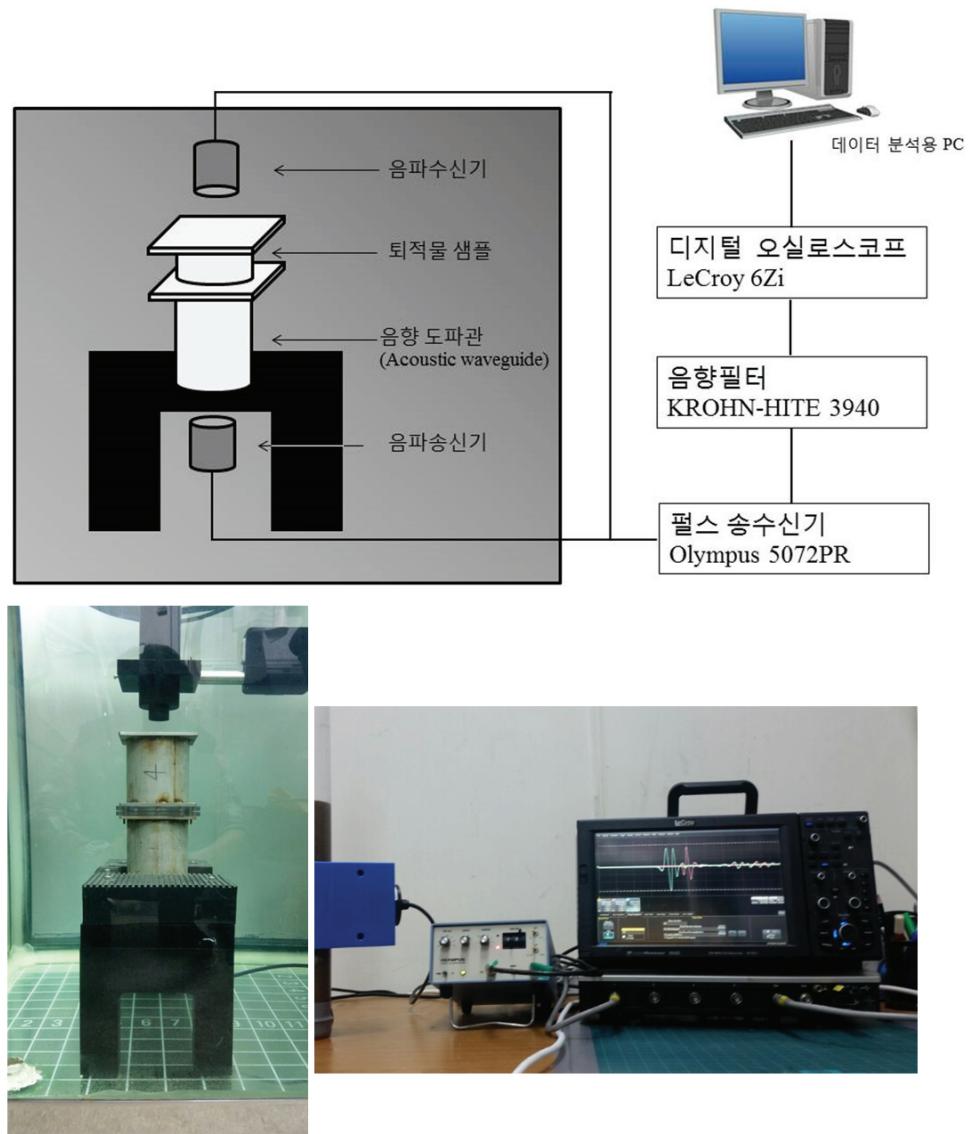


그림 3.1.6. 표층 퇴적물에 대한 지음향인자 관측 시스템

1) 음향 도파관(Acoustic waveguide):

표층 퇴적물 샘플 박스에 입사되는 음파가 평면파가 되도록 원거리 음장조건을 만족하는 길이로 그림 3.1.7과 같이 도파관(wave guide)을 제작하였다. 도파관 내로 음파 전파 시 도파관 벽면 바깥으로 음파가 투과되지 못하도록 외벽을 두껍게(26 mm) 설계하였다.



그림 3.1.7. 음향 도파관 (Acoustic waveguide)

표 3.1.4. 음향 도파관 사양

구 분	사 양
재질	스텐레스
내경	76 mm
외경	102 mm
높이	110 mm, 200 mm

2) 펄스 송수신기 (Pulser/Receiver):

그림 3.1.8의 펄스 송수신기는 음파 송신기(Transmitter)가 광대역 주파수의 음파를 송신할 수 있도록 한 장치로서, 이는 음파 수신기(Receiver)에 수신된 음향신호를 증폭하는데 사용된다.



그림 3.1.8. 펄스 송수신기(Pulser/Receiver)

표 3.1.5. 펄스 송수신기 사양

구 분	사 양
펄스 형태	Negative
허용 펄스 전압	-360 V
허용 펄스 에너지	13, 26, 52, or 104 μ J
댐핑(Damping)	15, 17, 20, 25, 36, 50, 100, 500 ohms
펄스 반복 주기	100, 200, 500, 1000, 2000 or 5000 Hz
주파수 대역폭	1kHz - 35MHz
Voltage gain	0-59, 1 dB steps (RL=50 ohms)
Attenuator range	0-59, 1 dB steps (RL=50 ohms)
최대입력 전력	400 mW

3) 음향필터 (Acoustic Filter):

그림 3.1.9의 음향필터는 음파 수신기(Receiver)가 임의의 주파수 대역의 음파만 수신할 때 사용되는 장치이다.



그림 3.1.9. 음향필터 (Acoustic Filter)

표 3.1.6. 음향필터 사양

구 분	사 양
감쇠비	24 dB/Octave
저항 채널 수	4
차단 주파수	3 Hz to 2 MHz
응답	Butterworth, Bessel
함수	Low-pass(LP), High-pass(HP), band-pass(BP), Band-reject(BR)
BP, BR 채널 수	1
Pre-filter gain	20 dB
Post-filter gain	20 dB

4) 디지털 오실로스코프 (Digital storage oscilloscope):

그림 3.1.10의 디지털 오실로스코프는 음파 수신기(Receiver)에 수신된 음향신호를 가시화 하여 분석 컴퓨터로 음향신호 데이터를 전송하는 데 사용되는 장치이다.

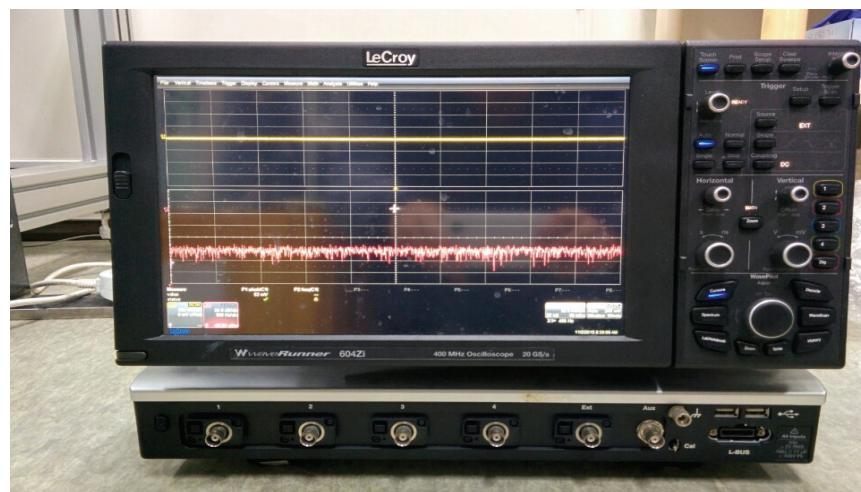


그림 3.1.10. 디지털 오실로스코프(Digital storage oscilloscope)

표 3.1.7. 디지털 오실로스코프(Oscilloscope) 사양

구 분	사 양
대역폭	400 MHz
입력 채널수	4
입력 저항	50 Ω+/-2% or 1 MΩ 17pF, 10 MΩ 9.5 pF with supplied Probe
댐핑(Damping)	15, 17, 20, 25, 36, 50, 100, 500 ohms
최대 입력 전압	50 Ω: 5V RMS ± 10V peak 1 MΩ: 400 V max.(DC+peak AC<10 kHz)
수직 해상도	8 bits; up to 11 bits with enhanced resolution (ERES)
Sampling rate	10 GS/s on 4Ch; 20 GS/s on 2 Ch

5) 음파 송신기(transmitter) 및 수신기(Receiver):

음파송신기와 수신기는 기본적으로 주파수특성이 동일한 1쌍의 트랜스듀서(transducer)를 사용하였으며, 그 파형과 주파수 스펙트럼은 각각 아래와 같다.

(가) 중심 주파수 60 kHz 트랜스듀서

- 사용 주파수 대역: 35 ~ 85 kHz; 직경: 25 mm

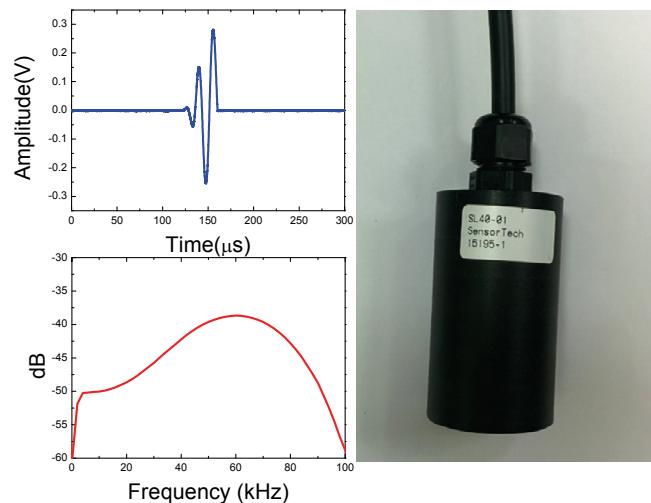


그림 3.1.11. 중심 주파수가 60 kHz인 트랜스듀서와 송신 음향신호 파형 및 주파수 스펙트럼

(나) 중심 주파수 90 kHz 트랜스듀서

- 사용 주파수 대역: 60 ~ 120 kHz; 직경: 64 mm

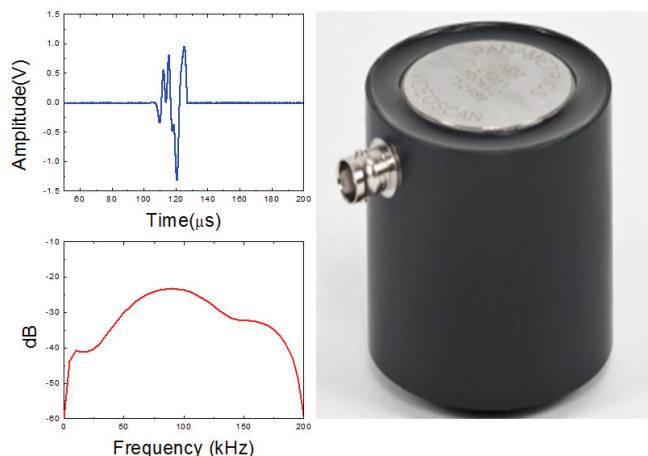


그림 3.1.12. 중심 주파수가 90 kHz 트랜스듀서와 송신 음향신호의 파형 및 주파수 스펙트럼

(다) 중심 주파수 500 kHz 트랜스듀서

- 사용 주파수 대역: 300 ~ 700 kHz; 직경: 25 mm

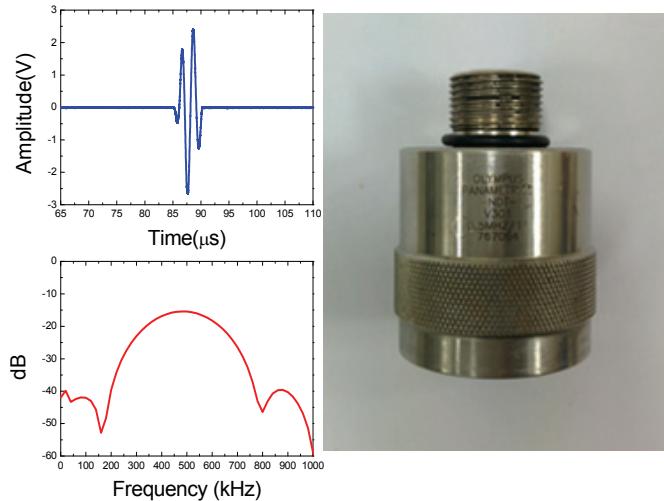


그림 3.1.13. 500 kHz 트랜스듀서와 송신 음향신호의 파형 및 주파수 스펙트럼

6) 데이터 분석 컴퓨터:

디지털 오실로스코프에 저장된 퇴적물 투과 음향신호를 처리하는 PC로서 표층 퇴적물의 음속과 감쇠 계산식이 코드화된 Matlab 프로그램을 실행하여 퇴적물의 지음향인자(음속, 감쇠)를 자동으로 계산한다.

(가) 퇴적물의 주파수별 음속 계산

식(3.1.1)은 퇴적물의 주파수별 음속을 계산하는 식으로서 c_{water} 는 물의 음속, f 는 주파수, d 는 퇴적물 샘플의 두께, $\Delta\phi$ 는 그림 3.1.6에서 보여주듯 퇴적물 샘플 유무에 따라 수중에서 수신된 음향신호의 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 통한 위상차를 나타낸다.

$$c_s(f) = \frac{c_{water}}{1 - \frac{c_{water}\Delta\phi(f)}{2\pi f d}} \quad (3.1.1)$$

(나) 퇴적물의 주파수별 감쇠 계산

식(3.1.2)는 퇴적물의 주파수별 감쇠를 계산하는 식으로서 $A_{water}(f)$ 와 $A_s(f)$ 는 각각 그림 3.1.6에서 퇴적물 샘플 유무에 따라 수신된 음향신호의 FFT 분석을 통한 주파수별 진폭을 나타낸다.

$$\alpha_s(f) = [20 \log \frac{A_{water}(f)}{A_s(f)}]/d \quad (3.1.2)$$

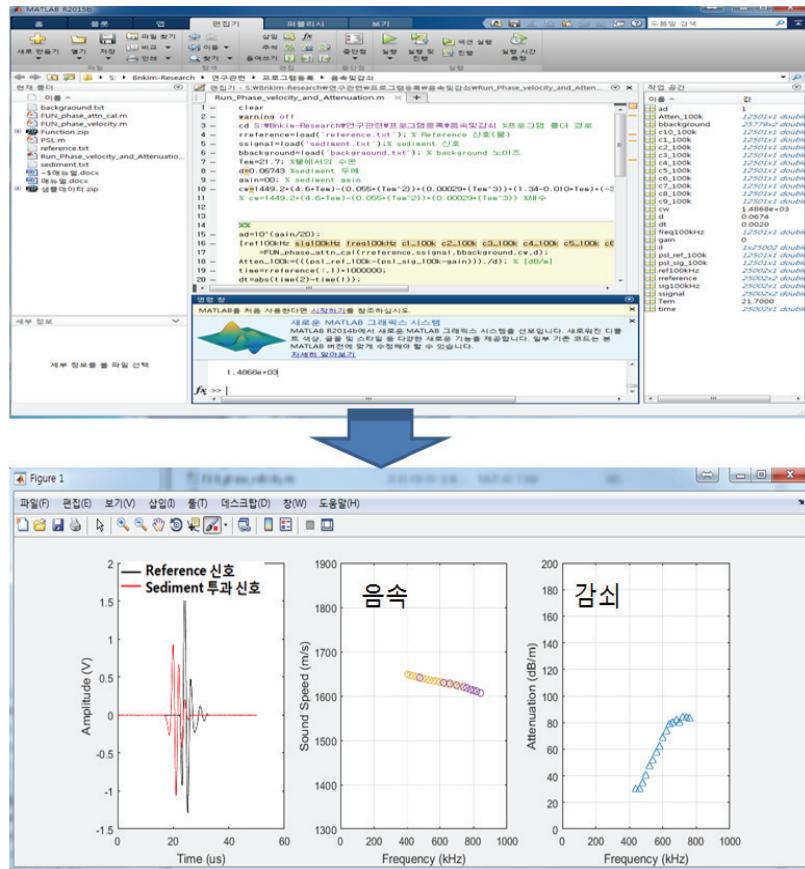


그림 3.1.14. 표층 퇴적물 지음향인자 계산 프로그램 및 결과 예

2. 피스톤 코아 퇴적물 지음향인자 관측 시스템 시제품 제작

해양에서 피스톤 코아러를 이용하여 시추된 표층 퇴적물의 지음향인자를 관측하기 위하여 시스템을 설계 및 제작하였다. 시스템은 40 kHz ~ 1 MHz의 주파수 대역에서 피스톤 코아내 퇴적물의 지음향인자를 수직으로 이동하면서 관측할 수 있도록 설계되었다.

그림 3.1.15와 그림 3.1.16는 피스톤 코아 퇴적물의 지음향인자 관측시스템의 구성도와 LM가이드 시스템을 나타낸다.

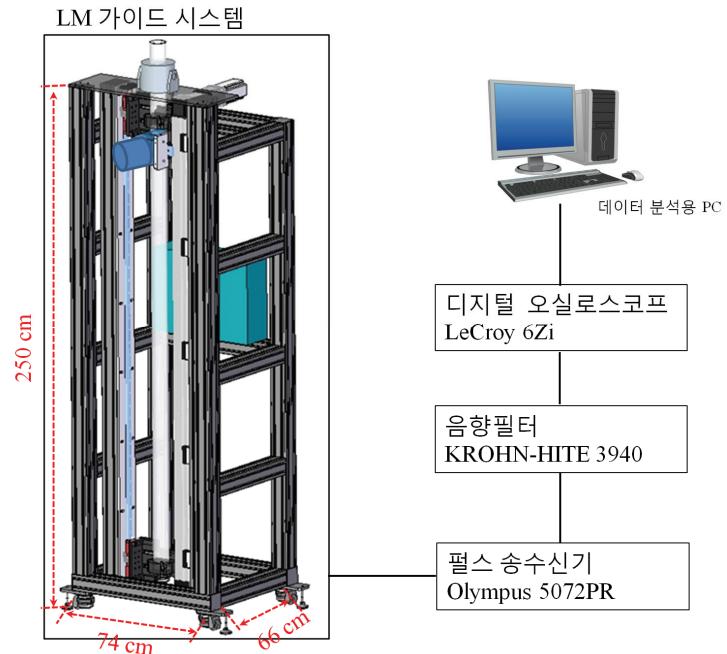


그림 3.1.15. 피스톤 코아 지음향인자 관측 시스템 구성도



그림 3.1.16. LM 가이드 시스템

가. 피스톤 코아 퇴적물 지음향인자 관측 시스템의 구성요소

1) 음향신호 송신 트랜스듀서 및 수신 하이드로폰:

“표층 퇴적물 지음향인자 관측 시스템”에서 사용된 중심주파수 60, 90, 500 kHz 트랜스듀서들을 음향신호 송신 트랜스듀서로 사용하였고, 수신 하이드로폰은 10 ~ 800 kHz 의 주파수 대역에서 수신감도가 -228 ± 3 dB re 1V/uPa을 나타내는 Reson사의 TC4038 모델을 사용하였다. 그림 3.1.17은 수신 하이드로폰과 수신 주파수 대역에 대한 수신감도 그래프를 각각 보여주고 있다.

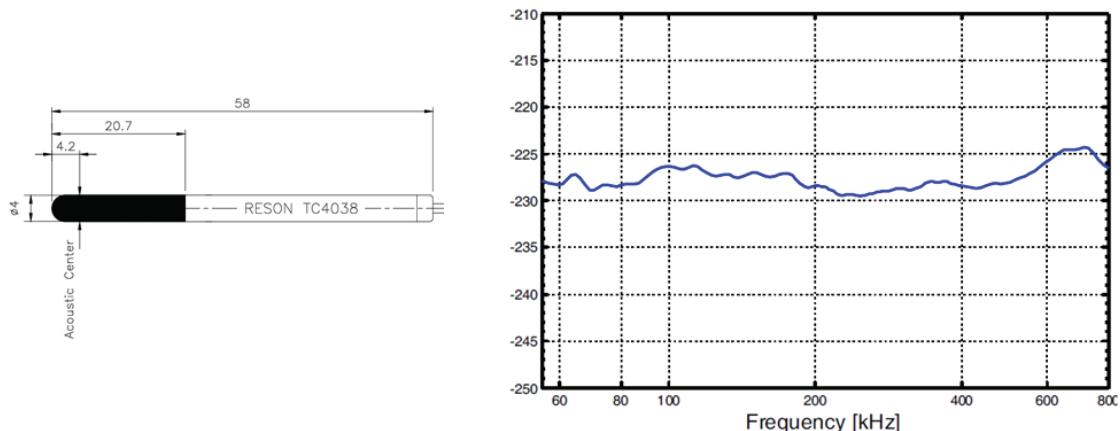


그림 3.1.17. 음향신호 수신용 하이드로폰과 수신감도 그래프

2) 피스톤 코아 퇴적물 지음향인자 측정용 도파관:

피스톤 코아에 장착되어 40 kHz ~ 1 MHz 주파수 대역의 지음향인자 측정이 가능하도록 피스톤 코아로부터 송신기 및 수신기 사이의 거리를 각각 원거리 음장 조건과 외부 반사효과를 최소화하는 차원에서 비대칭적으로 설계하여 MC 플라스틱을 이용하여 제작하였다. 또한, 도파관 벽면 및 바닥으로부터 반사된 음향신호의 간섭현상을 최소화하기 위하여 흡음재를 설치하였으며, 피스톤 코아가 360° 회전이 원활하게 작동하도록 쓰러스트 베어링(Thrust Bearings)을 바닥 아래쪽에 설치하였다. 음파가 피스톤코어 내부로 잘 투과되도록 하기 위해 음향임피던스 매질로서 물을 내부에 채웠으며 물이 도파관 바깥쪽으로 흘러내리지 않도록 하기 위하여 내부에 고무링을 위쪽에는 흡음재 뚜껑을 설치하였다. 그림 3.1.18은 피스톤 코아 퇴적물 지음향인자 측정용 도파관을 나타낸다.

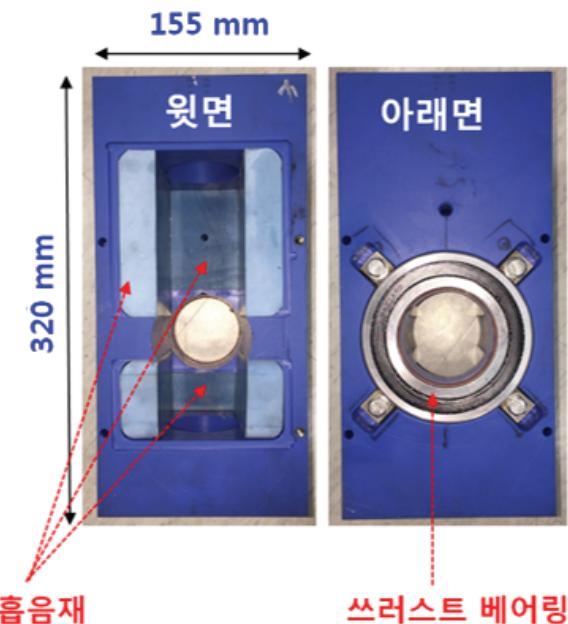


그림 3.1.18. 피스톤 코아 퇴적물 지음향인자 측정용 도파관

3) 피스톤 코아 홀더:

피스톤 코아 길이 방향으로 상부와 하부에 설치되어 코어를 단단히 고정시키는데 사용되는 장치로서, 지음향 측정용 도파관이 피스톤 코아의 수직방향으로 이동 시 코어가 좌우로 부드럽게 움직일 수 있도록 제작하였다. 그림 3.1.19는 피스톤 코아 홀더를 나타낸다.

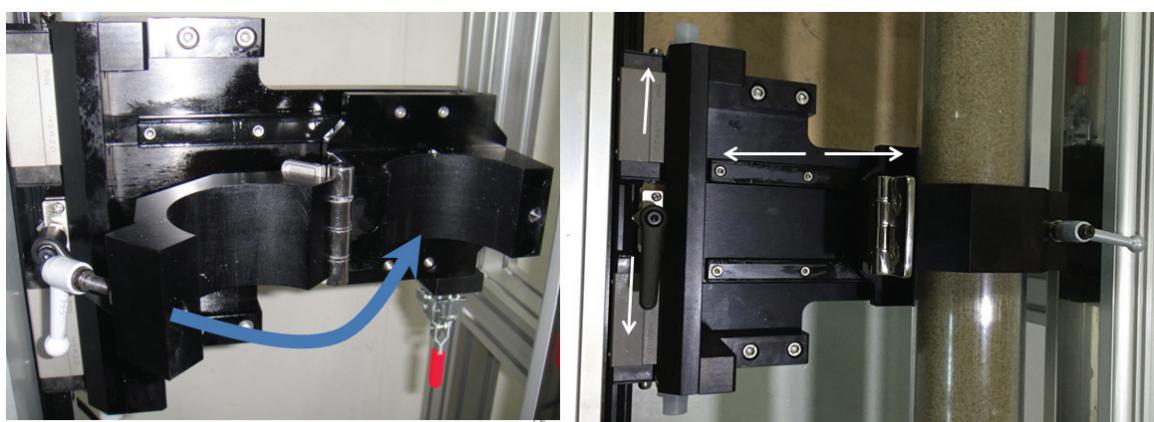


그림 3.1.19. 피스톤 코아 홀더

피스톤 코아를 회전시키면서 지음향인자를 여러 회전각도에서 측정하여 평균을 하는 경우는 피스톤 코아를 잡고 있는 코아 홀더의 조임쇠를 느슨히 할 필요가 있다. 이 경우 자칫 피스톤 코아가 바닥으로 떨어지는 상황이 발생하므로 코아를 떨어지지 않게 하기 위해서 코아 홀더의 위쪽과 아래쪽에 그림 3.1.20과 같이 볼 트랜스퍼가 장착된 고정 치구를 설치함으로써 코아가 떨어지는 것을 방지함과 동시에 원활히 회전할 수 있도록 하였다.



그림 3.1.20. 피스톤 코아를 회전이 가능하도록 잡아주는 고정치구

4) 서보모터 제어부:

그림 2.1.21은 피스톤 코아 퇴적물의 지음향인자 측정용 도파관을 상하 방향으로 움직일 때 사용하는 서보모터를 수동으로 제어하는 장치를 나타낸다.

5) LM가이드 및 서보모터:

그림 3.1.15에서 LM 가이드와 서보모터는 피스톤 코아 퇴적물의 지음향인자 측정용 도

파관을 상하로 이동시키는 데 사용된다. 또한, 그림 3.1.22과 같이 LM 가이드 시스템 상부에 추가적으로 설치된 서보모터는 로터리 테이블과 연결되어 피스톤 코아를 기계적으로 360° 회전시키는 데 사용되고, 이는 PC를 통해 제어된다. 표 3.1.8과 표 3.1.9는 LM가이드와 서보모터의 사양을 나타낸다.

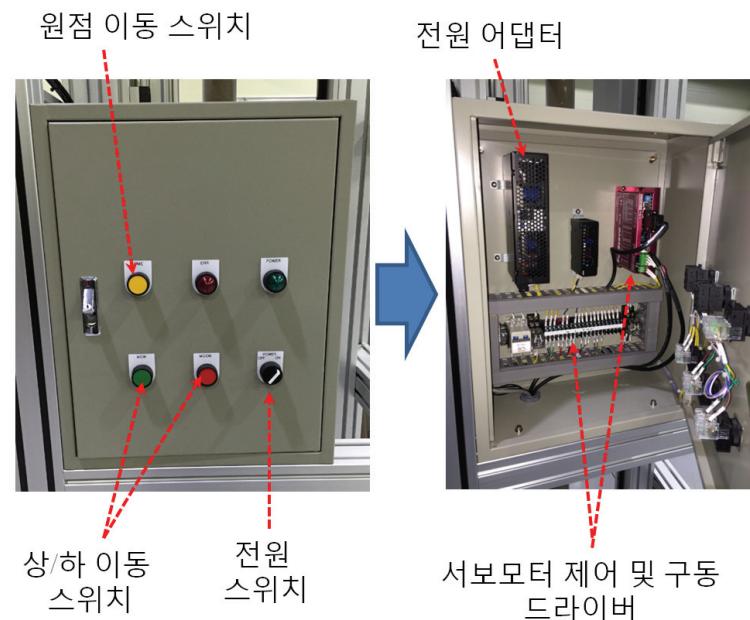


그림 3.1.21. 서보모터 수동 제어장치

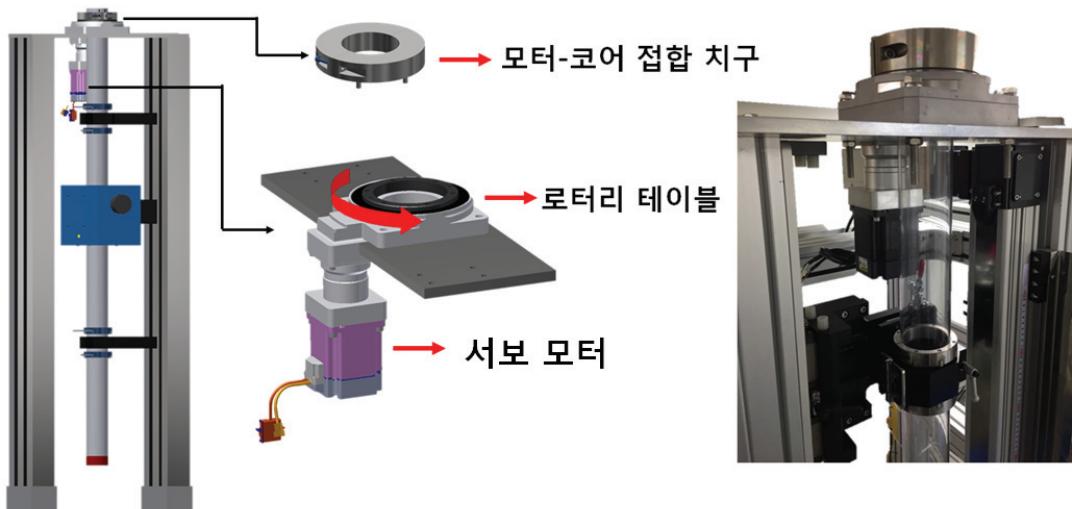


그림 3.1.22. 피스톤 코아를 기계적으로 회전시키기 위한 서보모터 및 치구

표 3.1.8. LM가이드 사양

구 분	사 양
스트로크	2000 mm
Base length	2380 mm
Total length	2565 mm
Liner motion rail	HSR20R2ss + 2100 [G20, 40]
센서	EE-SX674 , EE-SX674A
모터*	BM-86XL-ST Brake type
감속기	SPI(H)090 SERIES (1/10 SIMPO)
커플링	SJC-55C-RD-19K6X22K6

표 3.1.9. 서보모터 사양

구 분	사 양
드라이브 형식	BI-POLAR
위상 개수	2
전압	4.38 VDC
위상 당 전류	6 A
위상 당 저항	0.73 Ohm
위상 당 인덕턴스	8.68 mH
홀딩 토크(Holding torque)	9.0 N·m
로터 관성	4000 g·cm ²
무게	5.3 kg
길이	155 mm

6) 기타 구성요소:

필스 송수신기, 음향필터, 디지털 오실로스코프, 데이터 분석용 PC의 사양은 “표충퇴적물 지음향인자 관측 시스템”에서 사용된 장비와 동일하다. 데이터 분석용 PC는 서보모터를 제어할 때도 사용된다.

제 2 절 연구해역 해저 퇴적층의 물리적 특성 및 층서 구조

1. 연구해역 표층 및 피스톤 코아 퇴적물의 물리적 특성

연구해역 해저 퇴적층의 물성을 파악하기 위하여 그랩 샘플러(Grab Sampler) 및 박스코아러(Box Corer) 와 피스톤 코아러(Piston Corer)장비(그림 3.2.1)를 이용하여 퇴적물을 샘플링하였다. 피스톤 코아를 이용한 퇴적물 채취시 표층퇴적물에 해당하는 피스톤 코아의 상층부 퇴적물은 다량의 수분을 함유하고 있어 피스톤 코아 패킹 시 대부분 사라져 표층 퇴적물에 대한 물성은 그랩 샘플링과 박스 코아링을 통해 채취된 퇴적물을 이용하여 분석하였다.

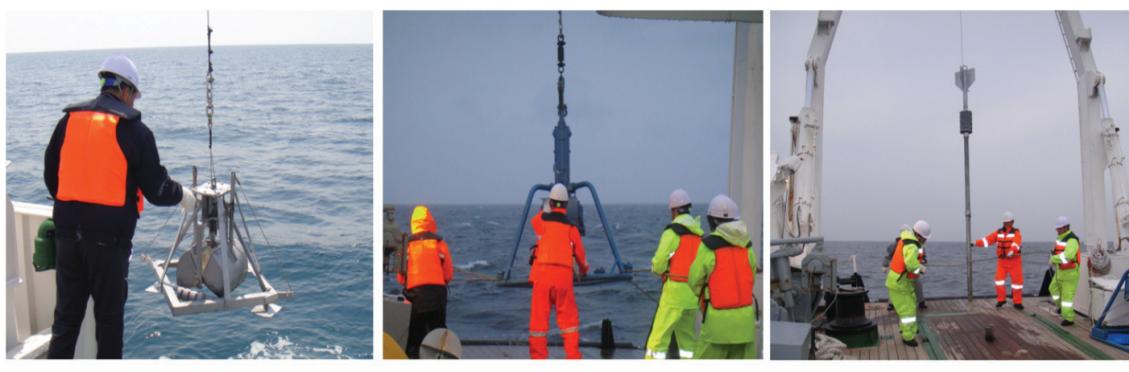


그림 3.2.1. 연구해역 해저 퇴적층 퇴적물 채취를 위한 장비

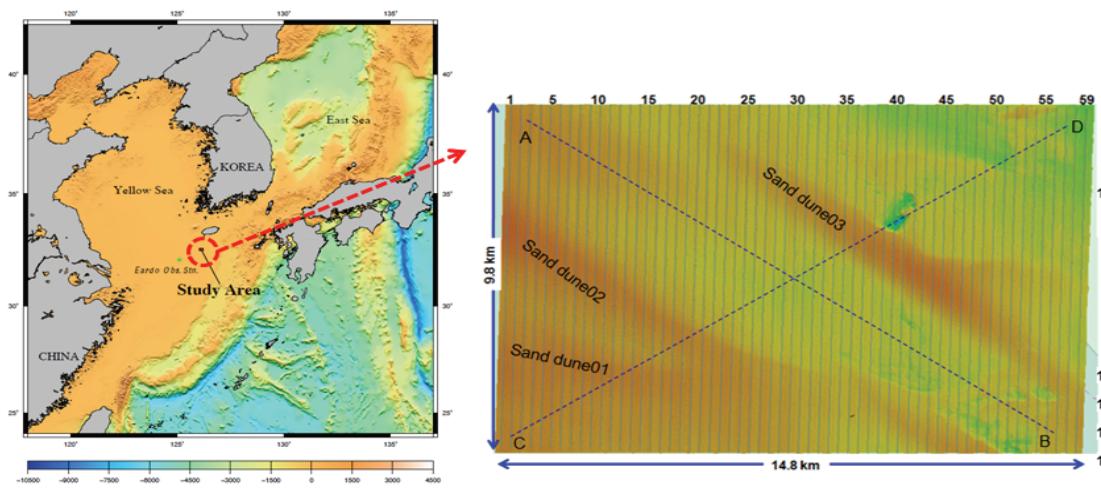


그림 3.2.2. 연구해역도

연구해역은 그림 3.2.2에서 보는 바와 같이 마라도 남서방 60 km의 거리에 수심 100 m 인데, 이곳은 모래언덕(sand dune)이 발달한 천해역이었다. 그림 3.2.3은 해저 퇴적층 퇴적물에 대한 그랩 샘플링과 피스톤 코아링 정점도를 나타내며, 표 3.2.1과 표 3.2.2은 각 정점에 대한 좌표를 나타낸다.

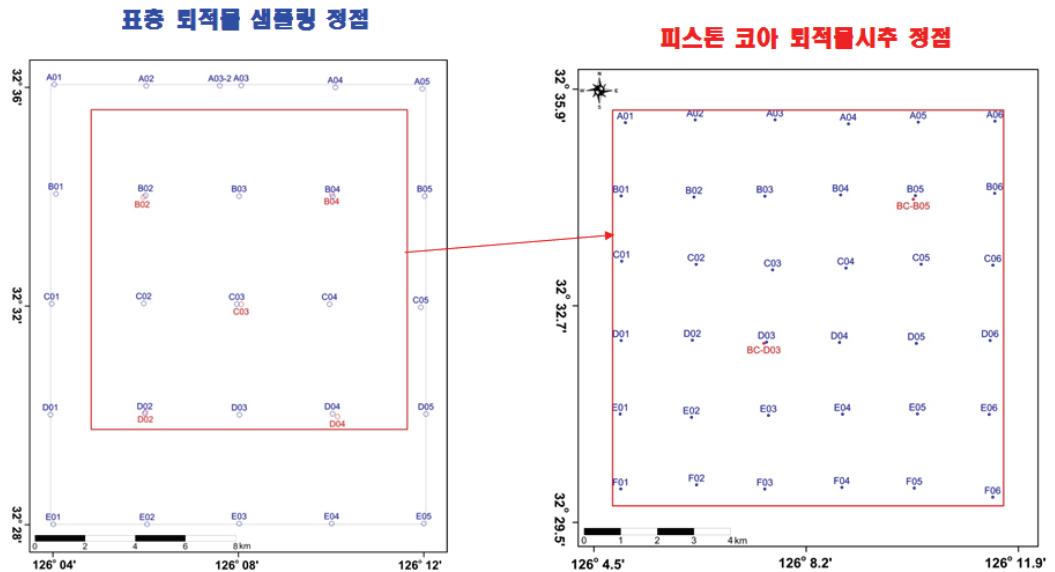


그림 3.2.3. 해저 퇴적물의 표층 그랩 샘플링 및 피스톤 코아링 정점도

표 3.2.1. 표층 퇴적물의 그랩 샘플링 정점

STATION NAME	LATITUDE	LONGITUDE	STATION NAME	LATITUDE	LONGITUDE
A01	32-36.05N	126-04.03E	C04	32-32.03N	126-09.97E
A02	32-36.03N	126-06.01E	C05	32-31.98N	126-11.93E
A03	32-36.04N	126-08.06E	D01	32-30.01N	126-03.95E
A04	32-36.00N	126-10.09E	D02	32-30.04N	126-05.98E
A05	32-35.98N	126-11.96E	D03	32-30.01N	126-08.02E
B01	32-34.05N	126-04.07E	D04	32-30.03N	126-10.03E
B02	32-34.02N	126-06.00E	D05	32-30.03N	126-12.05E
B03	32-34.01N	126-08.02E	E01	32-28.01N	126-04.01E
B04	32-34.00N	126-10.03E	E02	32-28.01N	126-06.03E
B05	32-34.01N	126-12.02E	E03	32-28.02N	126-08.02E
C01	32-32.04N	126-03.97E	E04	32-28.02N	126-10.01E
C02	32-32.05N	126-05.96E	E05	32-28.02N	126-12.00E
C03	32-32.04N	126-07.97E			

표 3.2.2. 해저 퇴적물의 피스톤 코아링 정점

STATION NAME	LATITUDE	LONGITUDE	STATION NAME	LATITUDE	LONGITUDE
A01	32-35.41N	126-05.05E	D01	32-32.19N	126-04.97E
A02	32-35.45N	126-06.26E	D02	32-32.19N	126-06.22E
A03	32-35.45N	126-07.66E	D03	32-32.16N	126-07.51E
A04	32-35.39N	126-08.94E	D04	32-32.16N	126-08.78E
A05	32-35.41N	126-10.15E	D05	32-32.15N	126-10.12E
A06	32-35.43N	126-11.49E	D06	32-32.19N	126-11.41E
B01	32-34.32N	126-04.97E	E01	32-31.10N	126-04.96E
B02	32-34.31N	126-06.24E	E02	32-31.05N	126-06.20E
B03	32-34.32N	126-07.48E	E03	32-31.08N	126-07.54E
B04	32-34.34N	126-08.80E	E04	32-31.10N	126-08.84E
B05	32-34.33N	126-10.11E	E05	32-31.10N	126-10.11E
B06	32-34.36N	126-11.49E	E06	32-31.10N	126-11.39E
C01	32-33.36N	126-04.98E	F01	32-29.99N	126-04.97E
C02	32-33.31N	126-06.28E	F02	32-30.06N	126-06.29E
C03	32-33.23N	126-07.62E	F03	32-29.99N	126-07.48E
C04	32-33.26N	126-08.89E	F04	32-30.02N	126-08.82E
C05	32-33.31N	126-10.21E	F05	32-30.01N	126-10.08E
C06	32-33.30N	126-11.46E	F06	32-29.87N	126-11.45E

연구해역에서 표층 퇴적물은 모래질 빨(sM)과 모래질 점토(sC)가 남북방향으로 발달된 퇴적상을 나타내며 낸다(그림 3.2.4). 이 지역은 빨 함량이 높아 평균 입도 및 공극율이 다소 높게 나타나는 양상(표 3.2.3, 그림 3.2.5)을 보여주었다.

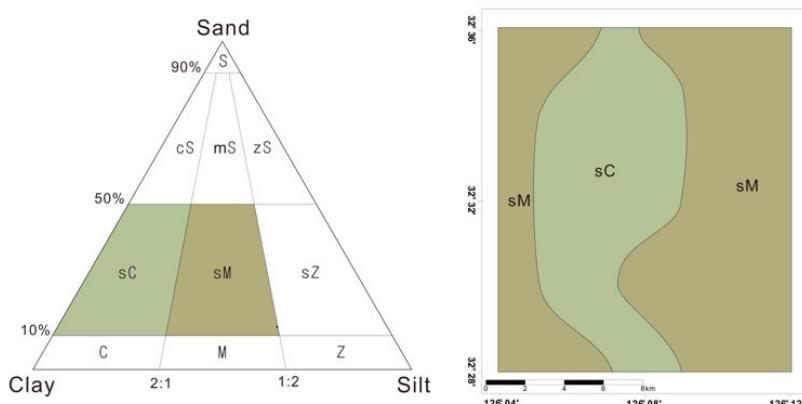


그림 3.2.4. 연구해역 표층 퇴적물의 퇴적상

표 3.2.3. 표층퇴적물 조성 및 조직변수

표층 퇴적물 조성 및 조직변수	범위
모래함량	16.9~47.8 %
빨 함량	52.2~83.2%
평균입도	5.9~7.9φ
분급도	3.0~3.6φ
입자밀도	2.5~2.9 g/cm ³
함수율	59.1~103.4%
전밀도	1.4~1.7 g/cm ³
공극율	61.0 ~ 72.3 %

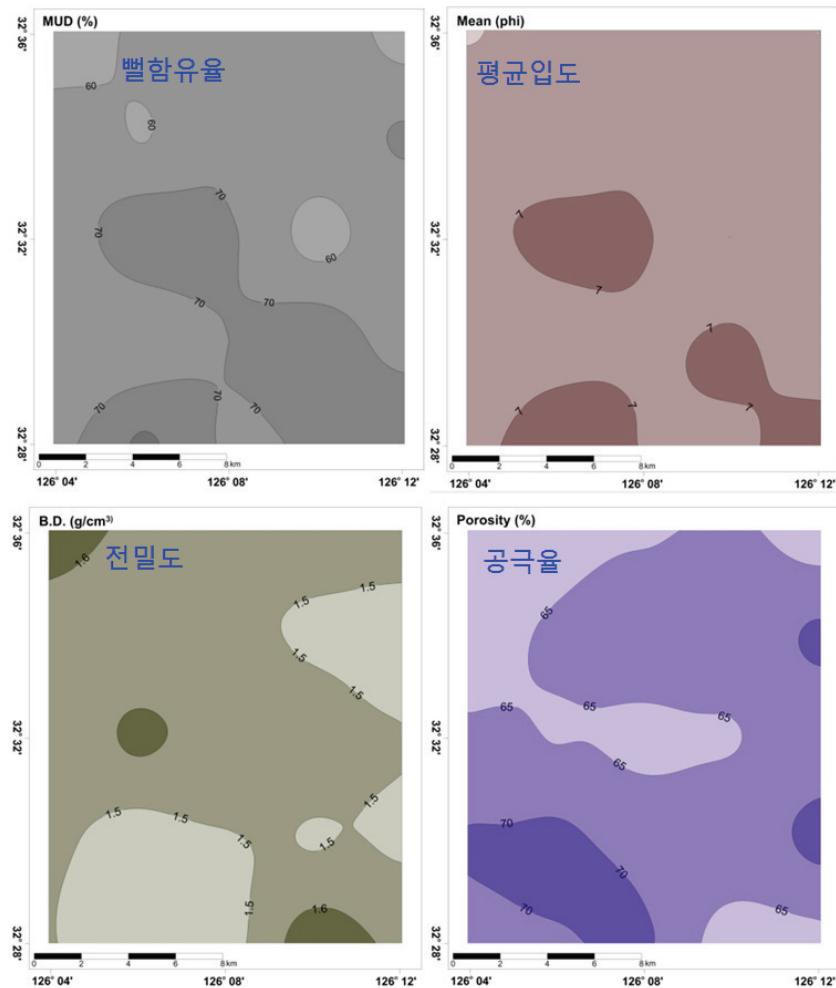


그림 3.2.5. 연구해역 표층퇴적물의 빨 함유율 및 물리적 특성 분포도

연구해역 표층퇴적물은 대부분 함수율이 높고 피스톤 코아링 과정에서 교란이 일어나며 코아를 패킹하는 과정에서 대부분 소실된다. 따라서, 표층 퇴적층의 두께를 확인하기 위하여 표 3.2.1에서 나타낸 연구해역 두 정점 (B04, C03)에서 박스코아링을 통해 두께를 측정한 결과 약 30~40 cm로 측정되었다. 그럼 3.2.6은 박스코아링을 통해 채취된 표층 퇴적물을 나타낸다. 이러한 표층 퇴적층의 두께는 첨소나 자료로는 관측이 되지않아 연구해역 퇴적층 층서구조 분류 시 얇은 표층을 별도로 추가할 필요가 있다.



그림 3.2.6. 박스코아링을 통해서 채취된 표층 퇴적물



그림 3.2.7. 연구해역에서 시추된 피스톤 코아 퇴적물

그림 3.2.7은 연구해역에서 피스톤 코아링을 통해서 시추된 피스톤 코아 퇴적물을 나타낸다. 그림 3.2.8에서 보는 바와 같이 피스톤 코아 퇴적물의 상부는 모래를 중심으로 하는 모래(S), 점토질 모래(cS), 약자갈뻘질모래((g)mS), 뻘질 모래(mS), 모래질 뻘(sM), 모래질 점토(sC)등이 다양하게 분포하는 퇴적상을 나타냈다. 피스톤 코아 상부 퇴적물은 표층과는 다르게 모래 함량이 높아서 평균 입도 및 공극율이 다소 낮게 나타났다.(표 3.2.4, 그림 3.2.9).

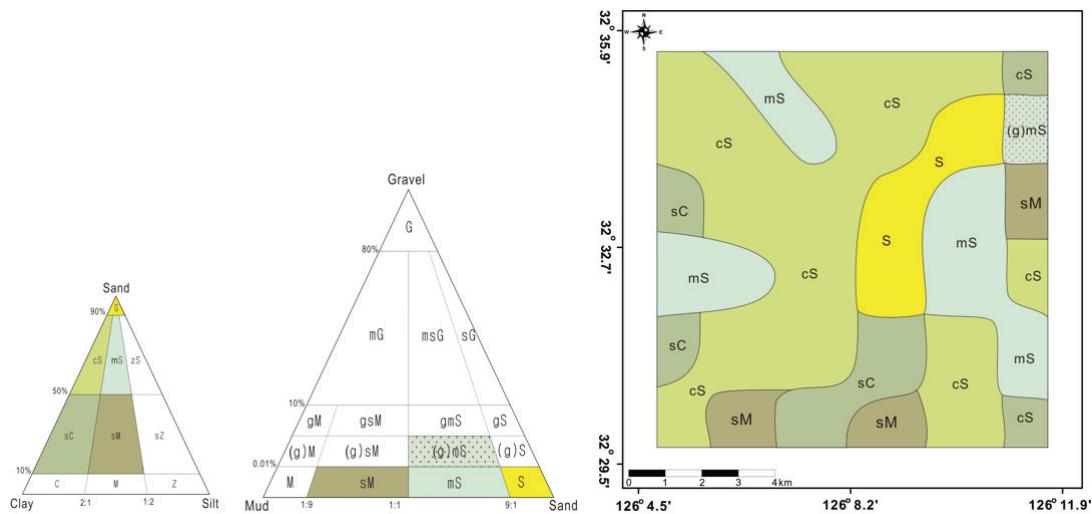


그림 3.2.8. 연구해역에서 시추된 피스톤 코아 상부 퇴적물의 퇴적상

표 3.2.4. 표층퇴적물 조성 및 조직변수

피스톤 코아 상부퇴적물 조성 및 조직변수	범위
모래함량	35.8~96.2 %
뻘함량	3.8~64.2%
평균입도	1.7~6.8φ
분급도	0.5~3.7φ
입자밀도	2.7~2.9 g/cm ³
함수율	19.3~65.7%
전밀도	1.6~2.2 g/cm ³
공극율	34.8 ~ 64.2 %

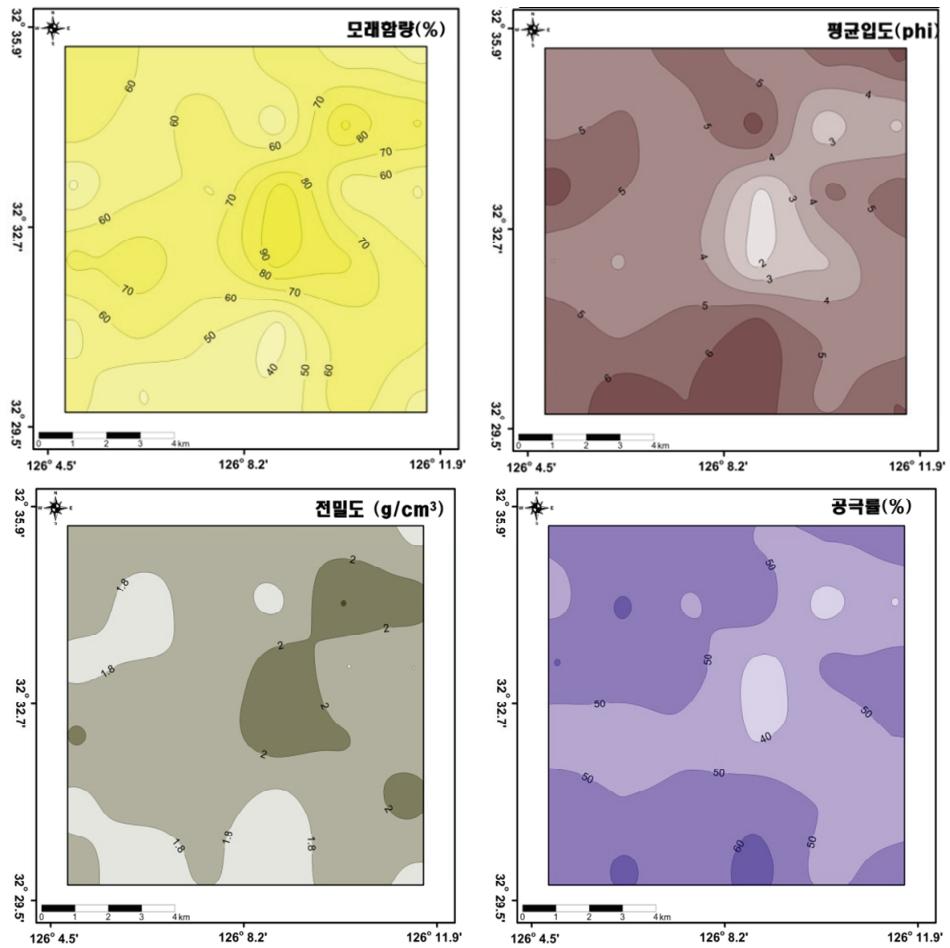


그림 3.2.9. 연구해역 시추 피스톤 코아 상부퇴적물의 모래함유율 및 물리적 특성 분포도

연구해역에서 시추된 36개 피스톤 코아 정점(표 3.2.2) 가운데 A03, B05, C02, D06, F02 정점에서 시추된 퇴적물의 깊이별 물성을 분석하였다. 전체적으로 피스톤 코아의 상부쪽 퇴적물은 모래함량이 매우 높은 빨질 모래 또는 모래함량과 빨 함량이 비슷한 모래질 빨로 구성되었다. 그러나, 하부로 내려갈수록 모래질 퇴적물이 우세하게 나타나는 특성을 나타냈다.

A03 정점의 퇴적물은 그림 3.2.10에서 보는 바와 같이 코아 퇴적물 상/중부에는 빨층 하부에는 모래층으로 구성되어 있었고, 하부로 갈수록 상대적으로 조립해지면서 양호한 분급을 나타냈다. 함수율과 공극율은 하부로 갈수록 감소하는 양상을 보였고, 전단응력은 하부로 갈수록 증가하는 양상을 나타냈다.

B05 정점은 그림 3.2.11에서 나타낸 바와 같이 코아 퇴적물 상/중/하부가 대부분 모래

층으로 구성되었으나 27~57 cm 사이에 뱉층이 존재하고 상대적으로는 세립하고 불량한 분급을 나타냈다. 그 이후부터는 하부로 갈수록 세립해지고 불량한 분급을 나타냈다.

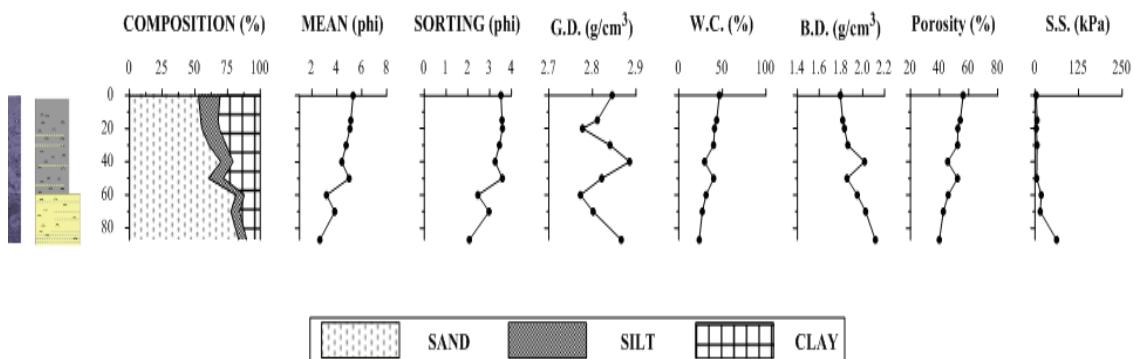


그림 3.2.10. A03정점에서 시추된 피스톤 코아 퇴적물의 물리적 특성

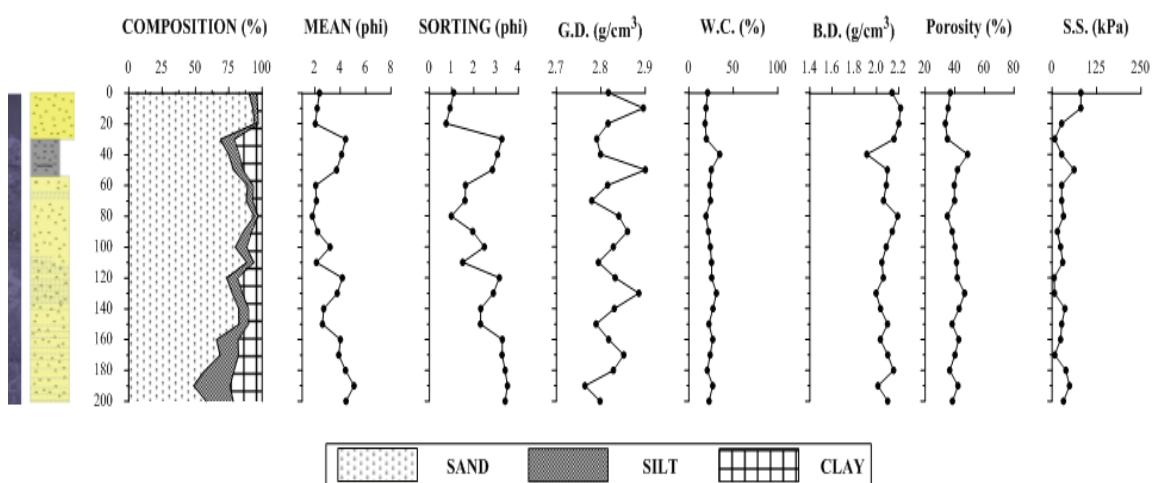


그림 3.2.11. B05정점에서 시추된 피스톤 코아 퇴적물의 물리적 특성

C02 정점은 그림 3.2.12에서 나타낸 바와 같이 코아 퇴적물 상부에 뱉층이 존재하고 55cm 이후부터는 모래층이 나타났다. 특히 함수율과 공극율은 하부로 갈수록 감소하고 전밀도 및 전단강도는 상반된 양상을 나타내었다.

D06 정점은 그림 3.2.13에서 나타낸 바와 같이 코아 퇴적물 상부에 뱉층이 존재하고 있었다. 34 cm 이후부터는 모래층이 나타나고, 전체적으로 C02 정점과 유사한 분포양상을 나타냈다.

F02 정점은 그림 3.2.14에서 나타낸 바와 같이 코아 상부에 뱉층이 존재하고 하부로 갈

수록 분급이 양호해지고 함수율과 공극율은 하부로 갈수록 감소하고 전밀도 및 전단강도는 증가했다.

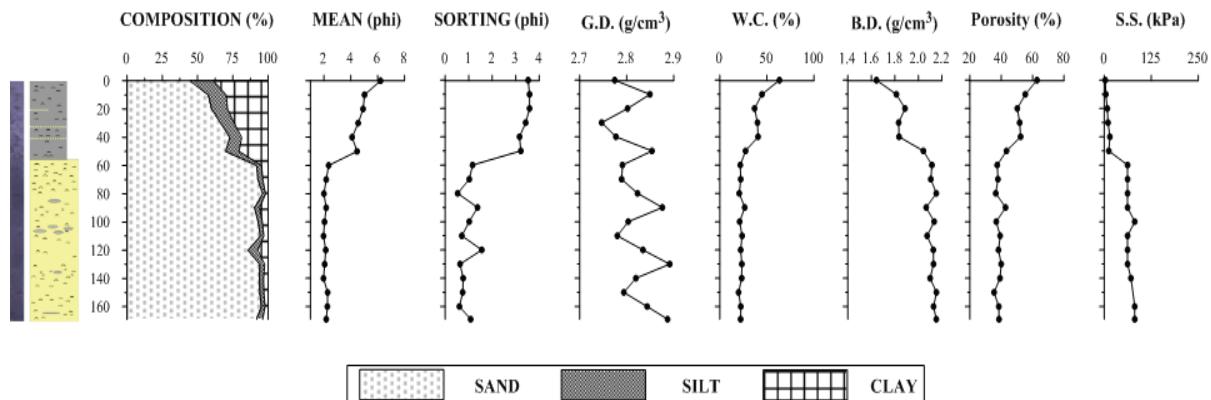


그림 3.2.12. C02정점에서 시추된 피스톤 쿠아 퇴적물의 물리적 특성

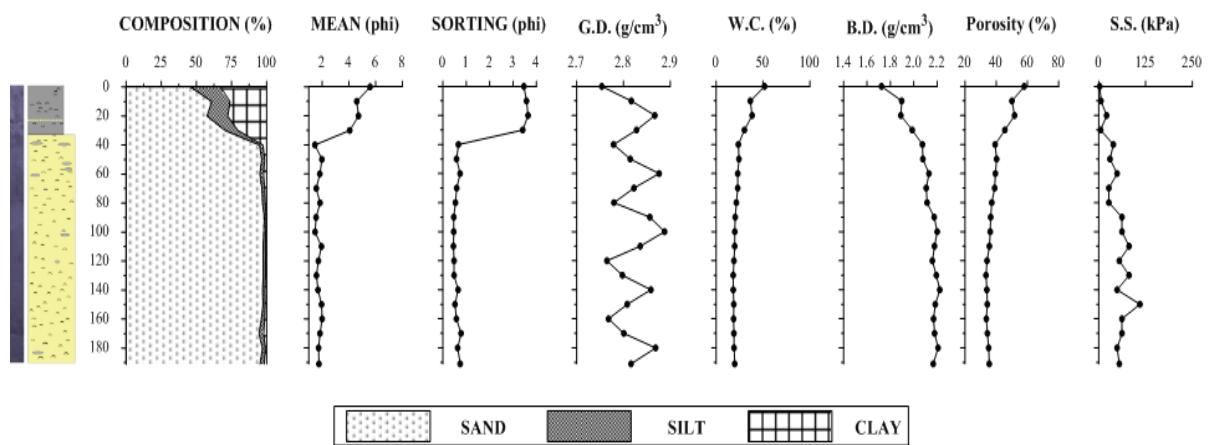


그림 3.2.13. D06정점에서 시추된 피스톤 쿠아 퇴적물의 물리적 특성

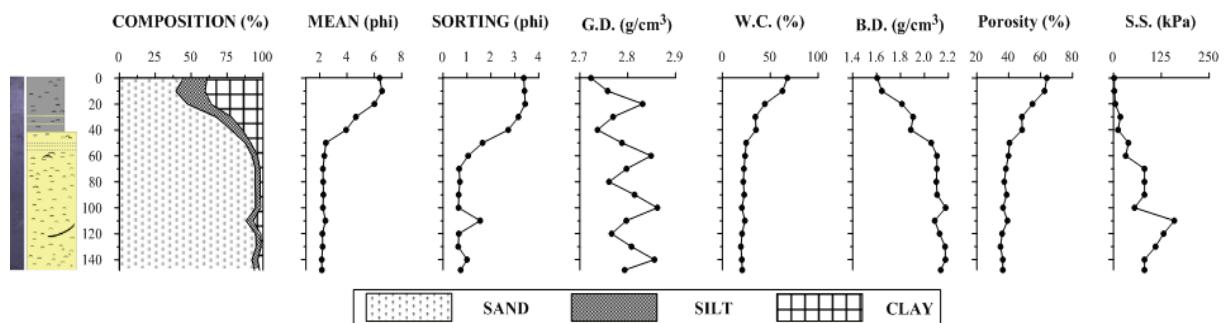


그림 3.2.14. F02정점에서 시추된 피스톤 쿠아 퇴적물의 물리적 특성

2. 연구해역 해저 퇴적층의 층서구조

연구해역에서의 해저 퇴적층의 층서구조는 이어도호에서 Sparker 음원을 해수중으로 삽입 후 음원을 예인(그림 3.2.15)하면서 주파수 1 kHz 이하의 광대역 음파를 송신하고 반사된 음파를 수신하면서 파악하였다. 연구해역 퇴적층의 층서 구조 파악은 그림 3.2.15의 관측라인을 따라 수행하였다.

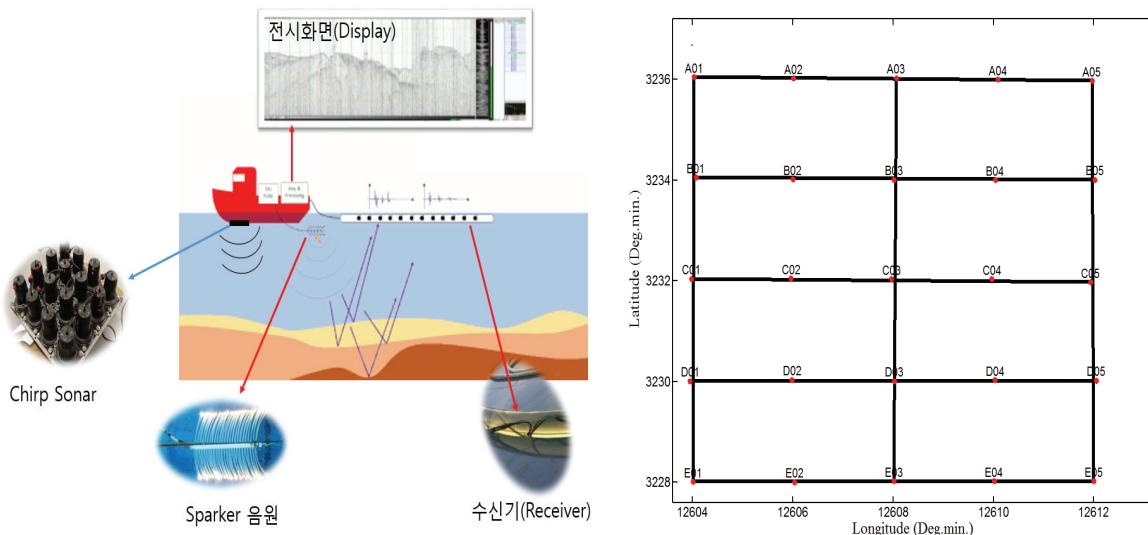


그림 3.2.15. 연구해역 해저 퇴적층 층서구조 측정 모식도 및 관측라인

그림 3.2.16은 연구해역의 각 관측라인(그림 3.2.15)에서 스파커 조사를 수행하여 획득된 해저 퇴적층의 층서 구조를 나타낸다. 그림에서 나타낸 바와 같이 연구해역의 해저 퇴적층은 대체적으로 4개의 층으로 구분 할 수 있다는 것을 확인하였다. 그러나, 그랩 샘플링 및 박스코아링을 통하여 채취된 표층의 뼈질 퇴적물은 두께가 40 cm 이내로 얕아서 스파커 관측 자료에는 나타나지 않는 관계로 연구해역의 층서구조는 그랩 샘플링 관측자료를 추가하여 총 5개의 층으로 고려하는 것이 타당하다. 연구해역 2번 째 해저 퇴적층을 구성하는 퇴적물은 피스톤 코아링 시추 퇴적물로부터 모래질 퇴적물임을 확인하였다. 3~5 층 퇴적물은 문헌자료(Bartek과 Wellner 1995, Berne 등. 2002, Ryang 등, 2013)를 이용하여 구성퇴적물을 확인하였다. 전체적으로 확인한 결과 3층은 뼈질모래, 4층은 단단한 뼈, 5층은 다시 뼈질모래로 구성됨을 파악하였다.

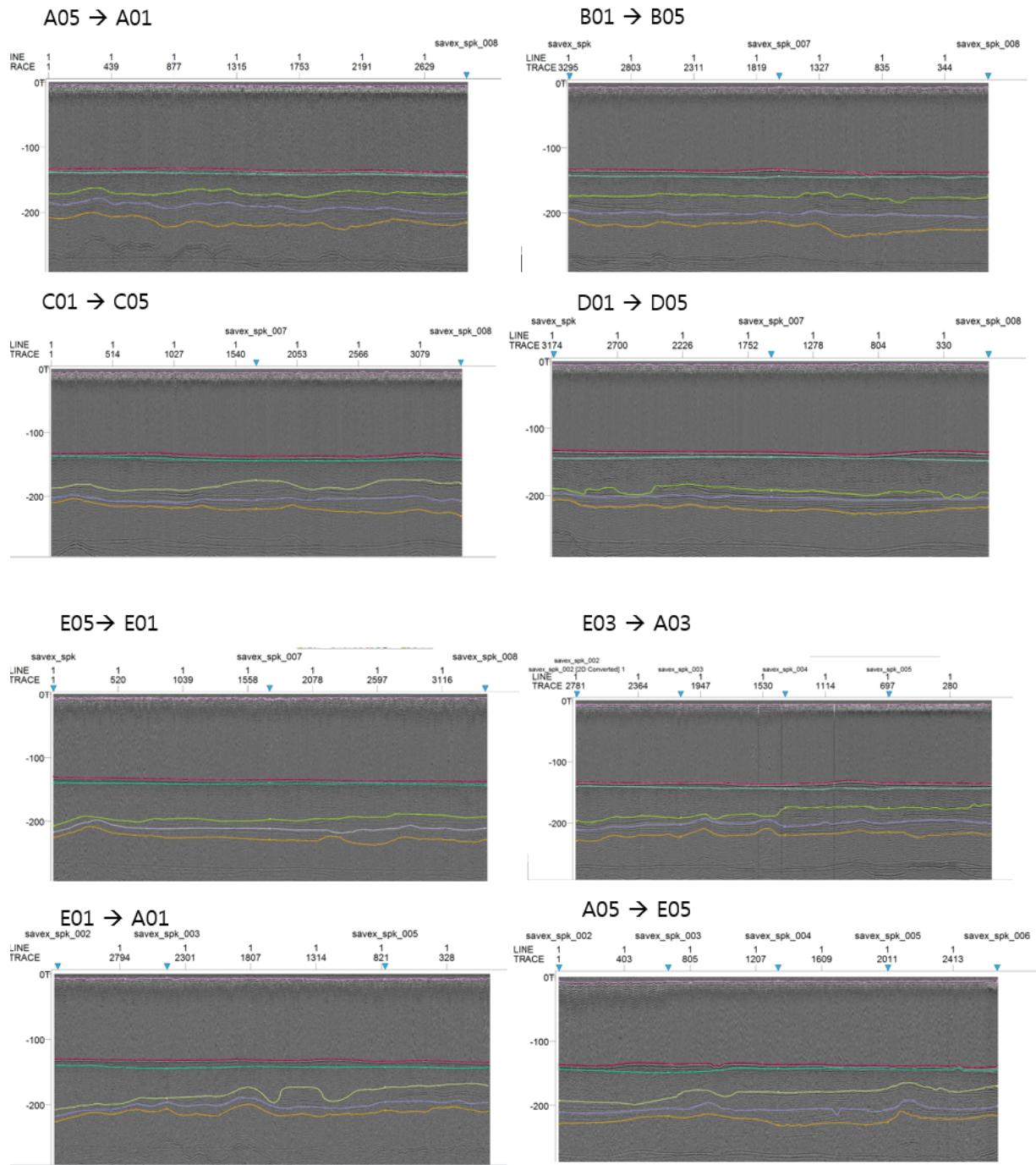


그림 3.2.16. 스파커를 이용하여 관측된 연구해역 해저 퇴적층 층서 구조

제 3 절 연구해역 해저 퇴적층의 지음향 특성 및 지음향 층서모델

1. 연구해역 표층 퇴적물 및 피스톤 쿄아 퇴적물의 지음향 특성

그림 3.3.1은 주파수 100 kHz와 500 kHz에서 연구해역 표층 퇴적물의 음속 및 음감쇠 분포도를 나타낸다. 실제 해양조사 당시 해저면 수온 14.5 °C에서 환산된 표층퇴적물의 음속 분포는 100 kHz와 500 kHz 음파 모두 유사하게 측정되었다. 또한, 음속분포는 그림 3.2.5에서 나타난 뼈함유율 분포도와 비교해 유사하게 나타났다. 즉, 뼈함유율이 높은 구역은 음속이 낮게 나타나고 낮은 구역은 높게 나타났다. 표층퇴적물의 음감쇠 분포는 D04 정점 주변을 제외하고는 두 주파수의 음파에 대해서도 유사하게 나타났다. 그림 3.2.5에서 나타난 뼈함유율 분포도와 정확히 매칭하기는 어렵지만 대체적으로 뼈함유율이 높은 구역에서 감쇠가 낮게 나타났다. 전체적으로 표층퇴적물에서 음속은 1470 ~ 1530 m/s 분포를 나타내며 음감쇠는 0.3 ~ 0.7 dB/m/kHz 분포를 나타냈다.

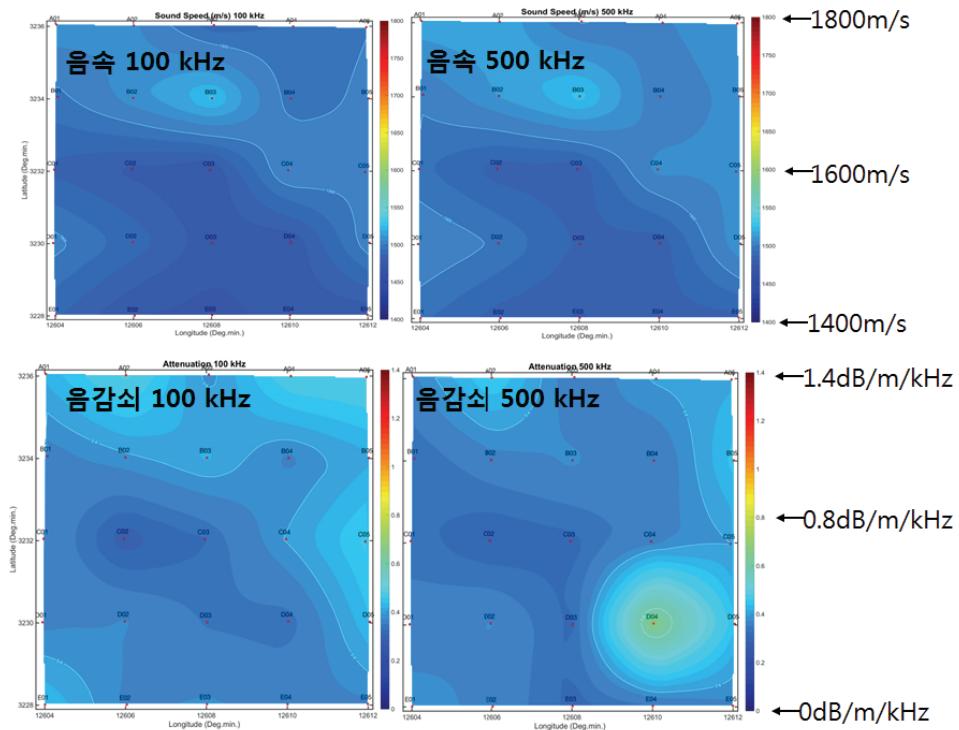


그림 3.3.1. 주파수 100, 500 kHz에서 연구해역 표층 퇴적물의 음속 및 음감쇠 분포도

그림 3.3.2와 3.3.3은 연구해역에서 시추한 피스톤 코아 퇴적물의 상부 퇴적물에 대한 것으로서 주파수 40, 100, 200, 500 kHz에서 측정된 음속 및 음감쇠 분포도를 나타낸다. 실제 해양조사 당시 해저면 수온 14.5 °C에서 환산된 피스톤 코아 상부 퇴적물에 대한 음속 분포는 4개 중심주파수 음파에 대해서 모두 유사하게 측정되었다. 또한, 음속 분포는 그림 3.2.9에서 나타난 모래함유율 분포도와 유사하게 나타났다. 즉, 모래함유율이 높은 구역은 음속이 높게 나타나고 낮은 구역은 낮게 나타났다. 피스톤코어 상부 퇴적물의 음감쇠는 뼈 함유량이 다소 높은 모래질 뼈과 대부분 모래로 구성되는 영역에서 낮게 나타나고 있으며, 뼈질 모래로 구성되는 영역에서는 음감쇠가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 전체적으로 피스톤코어 상부 퇴적물에서 음속은 1450 ~ 1800 m/s 분포를 나타내며, 음감쇠는 0.01 ~ 1.4 dB/m/kHz의 분포를 나타냈다.

그림 3.3.4 ~ 그림 3.3.8은 연구해역 피스톤 코아 시추 정점 A03, B05, C02, D06, F02(그림 3.2.3)에서 주파수 40, 100, 200, 500 kHz에 대한 코아 퇴적물의 깊이별 지음향인자(음속, 음감쇠)를 나타낸다. 실제 해양조사 당시 해저면 수온 14.5 °C에서 환산된 5개 정점 피스톤 코아 퇴적물의 깊이별 음속은 그림 3.2.10 ~ 그림 3.2.14가 제시하는 퇴적물의 수직분포 특성을 반영하여 뼈질 모래로 구성된 깊이에서는 음속이 낮고 모래로 구성된 깊이에서는 음속이 빠르게 나타났다. 또한 퇴적물의 깊이별 음속구조는 퇴적물 깊이별 전단강도의 변화와 유사한 경향을 나타냈다. 5개 정점에서 피스톤 코아 퇴적물의 깊이별 음감쇠는 음속구조와는 반대로 음속이 낮은 뼈질 모래 영역에서는 크고 음속이 높은 모래로 구성된 퇴적물 영역에서는 낮게 나타났다.

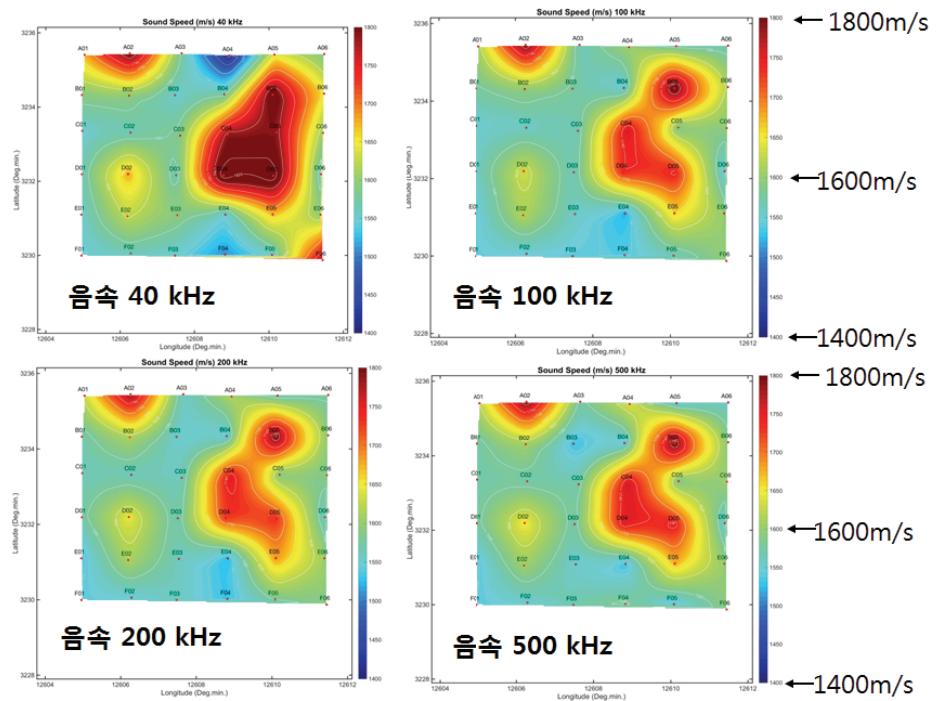


그림 3.3.2. 주파수 40, 100, 200, 500 kHz에서 피스톤 코아 상부 퇴적물의 음속 분포도

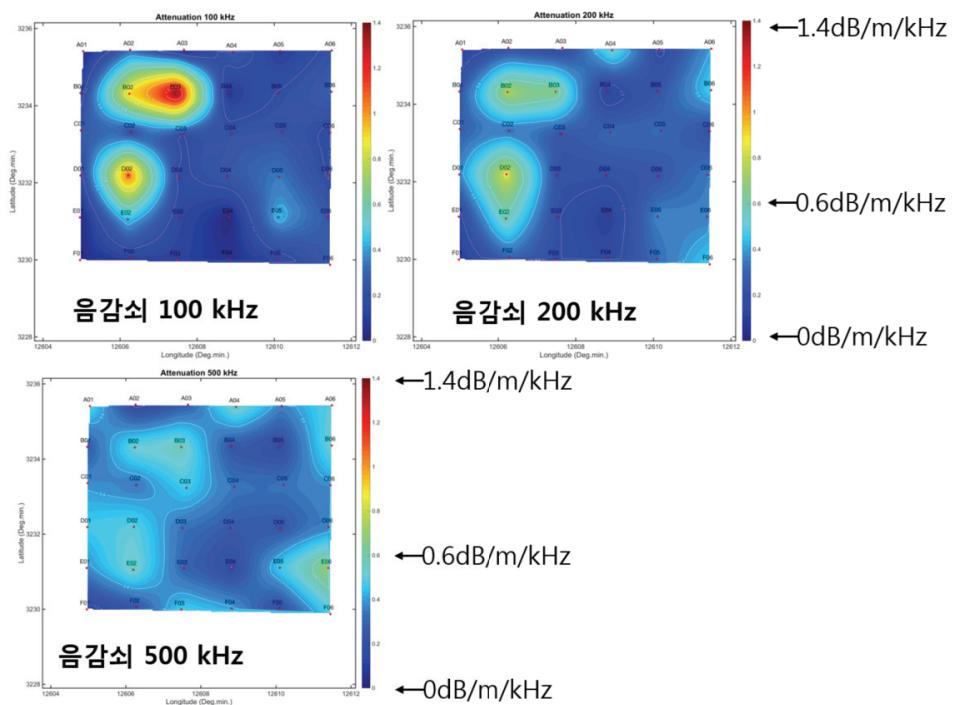


그림 3.3.3. 주파수 100, 200, 500 kHz에서 피스톤 코아 상부 퇴적물의 음감쇠 분포도

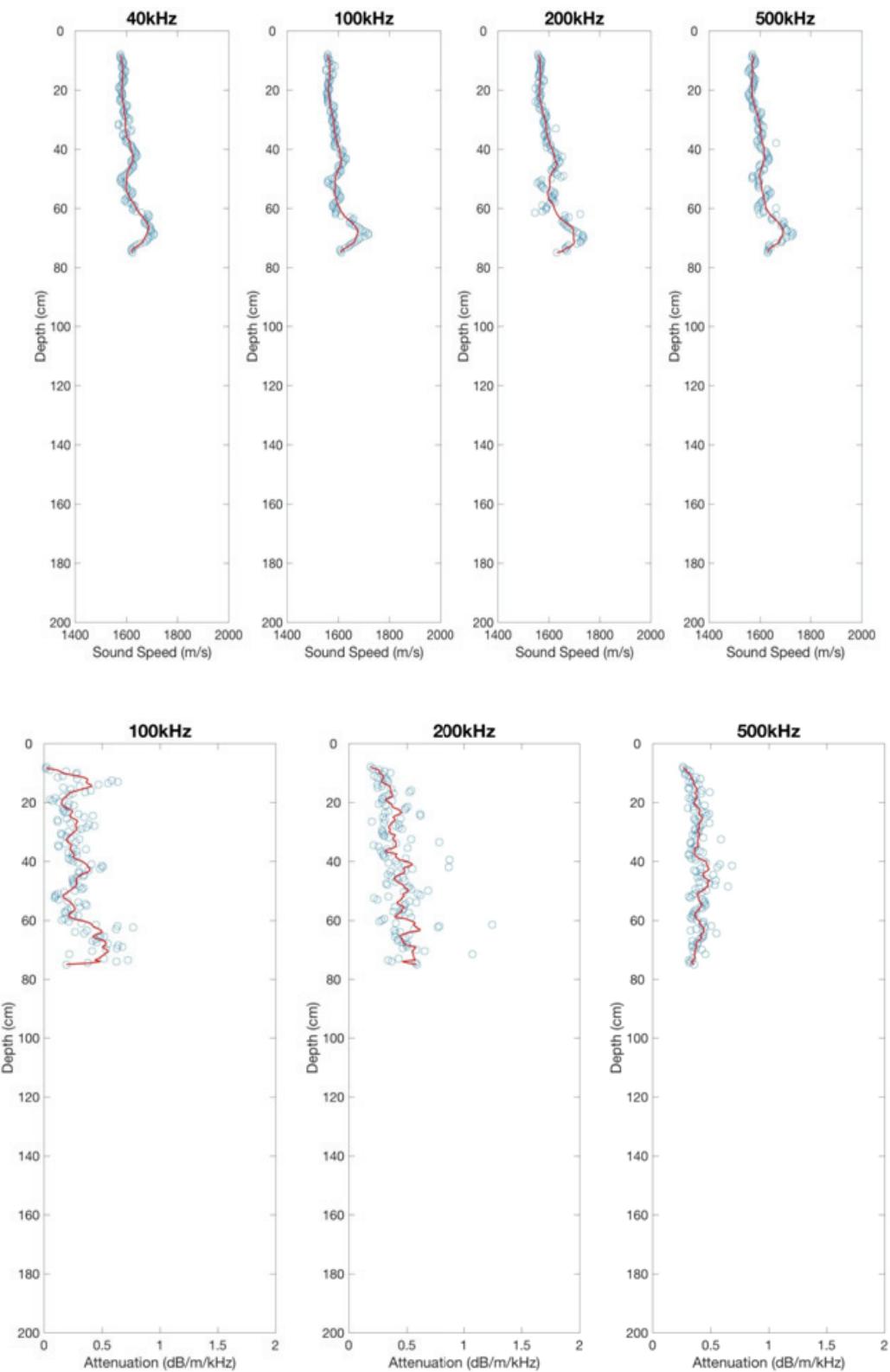


그림 3.3.4. A03 정점에서 시추된 피스톤 코아 퇴적물의 깊이별 지음향인자

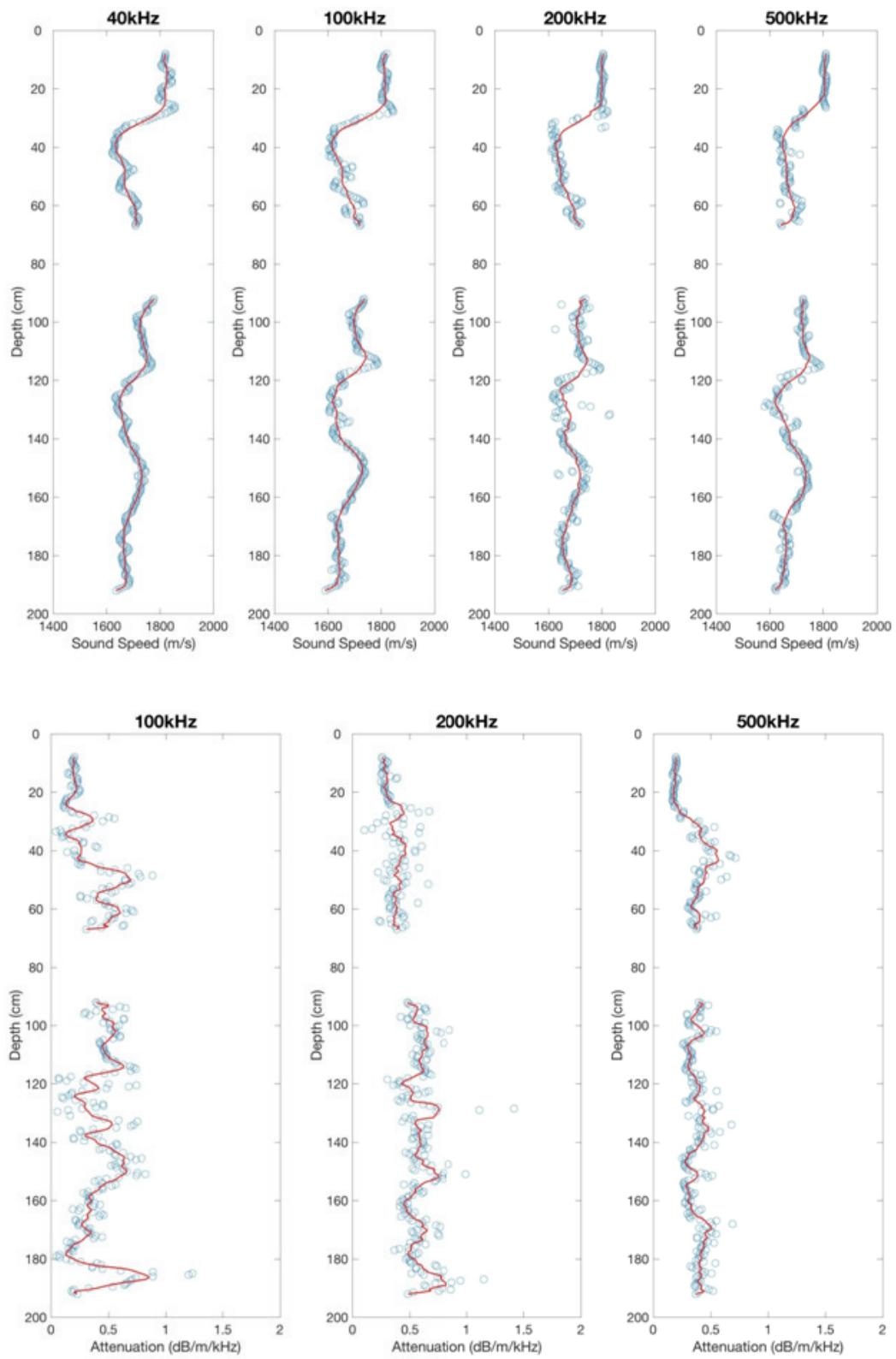


그림 3.3.5. B05 정점에서 시추된 피스톤 코아 퇴적물의 깊이별 지음향인자

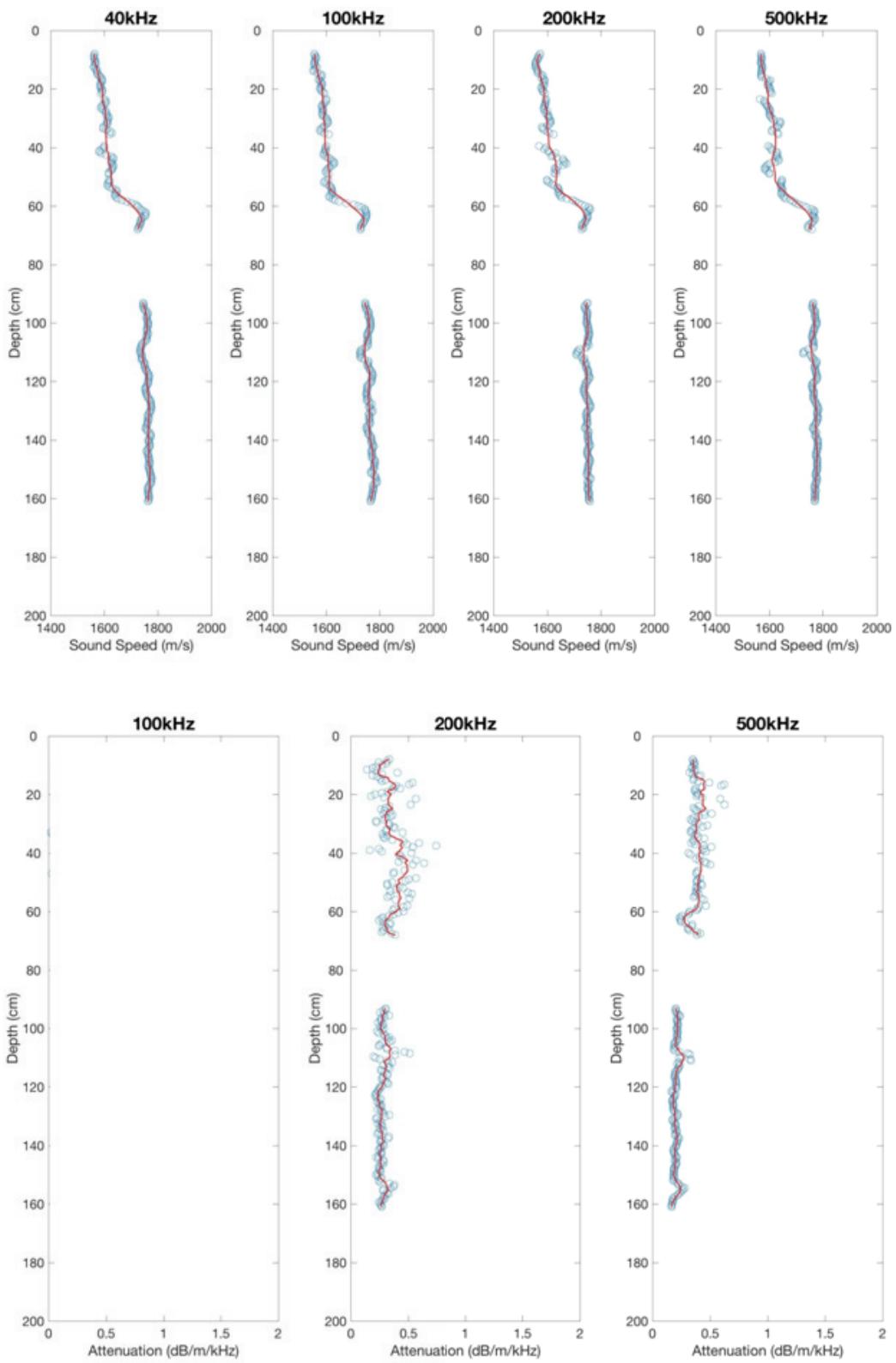


그림 3.3.6. C02 정점에서 시추된 피스톤 코아 퇴적물의 깊이별 지음향인자

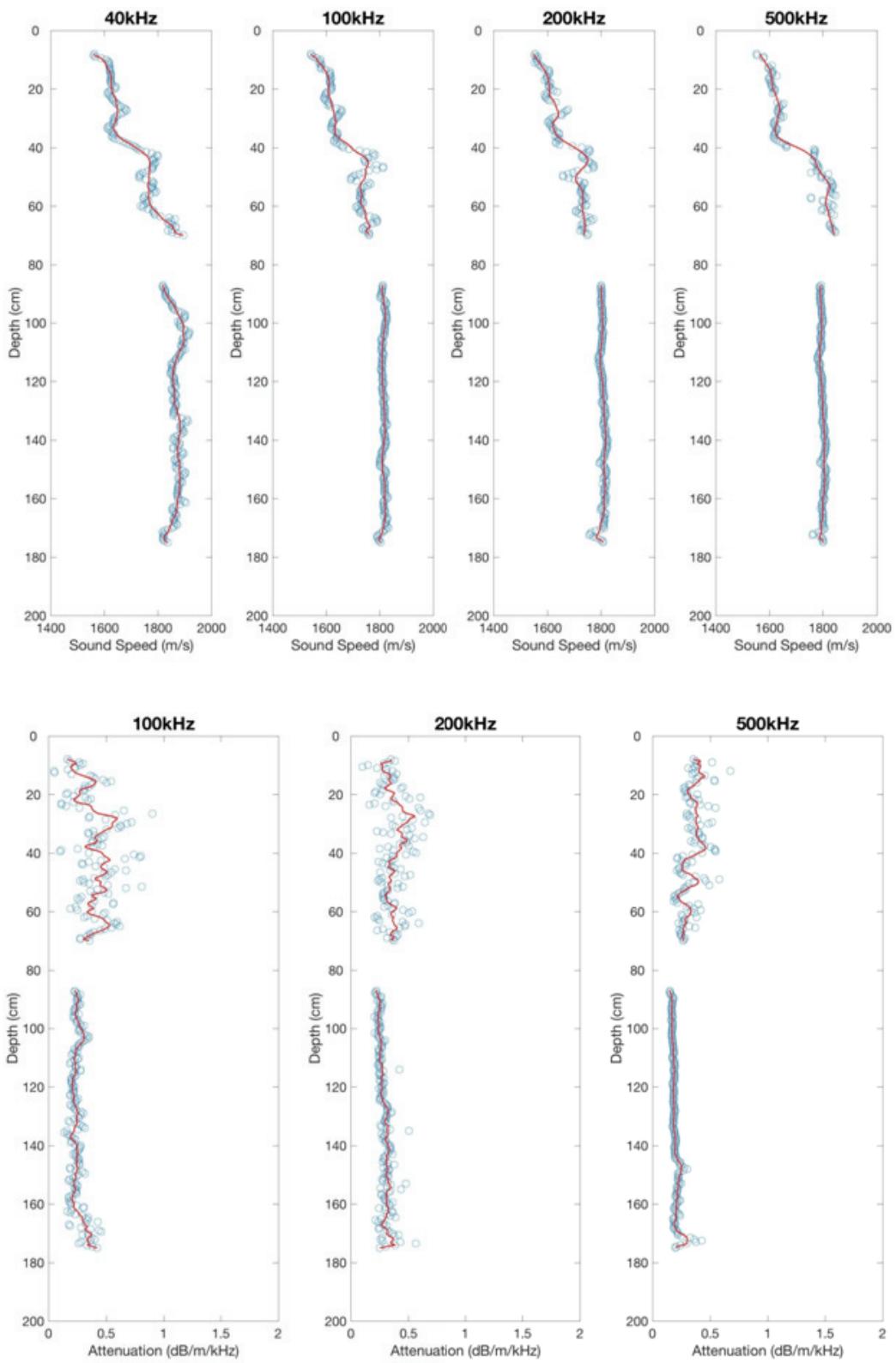


그림 3.3.7. D06 정점에서 시추된 피스톤 코아 퇴적물의 깊이별 지음향인자

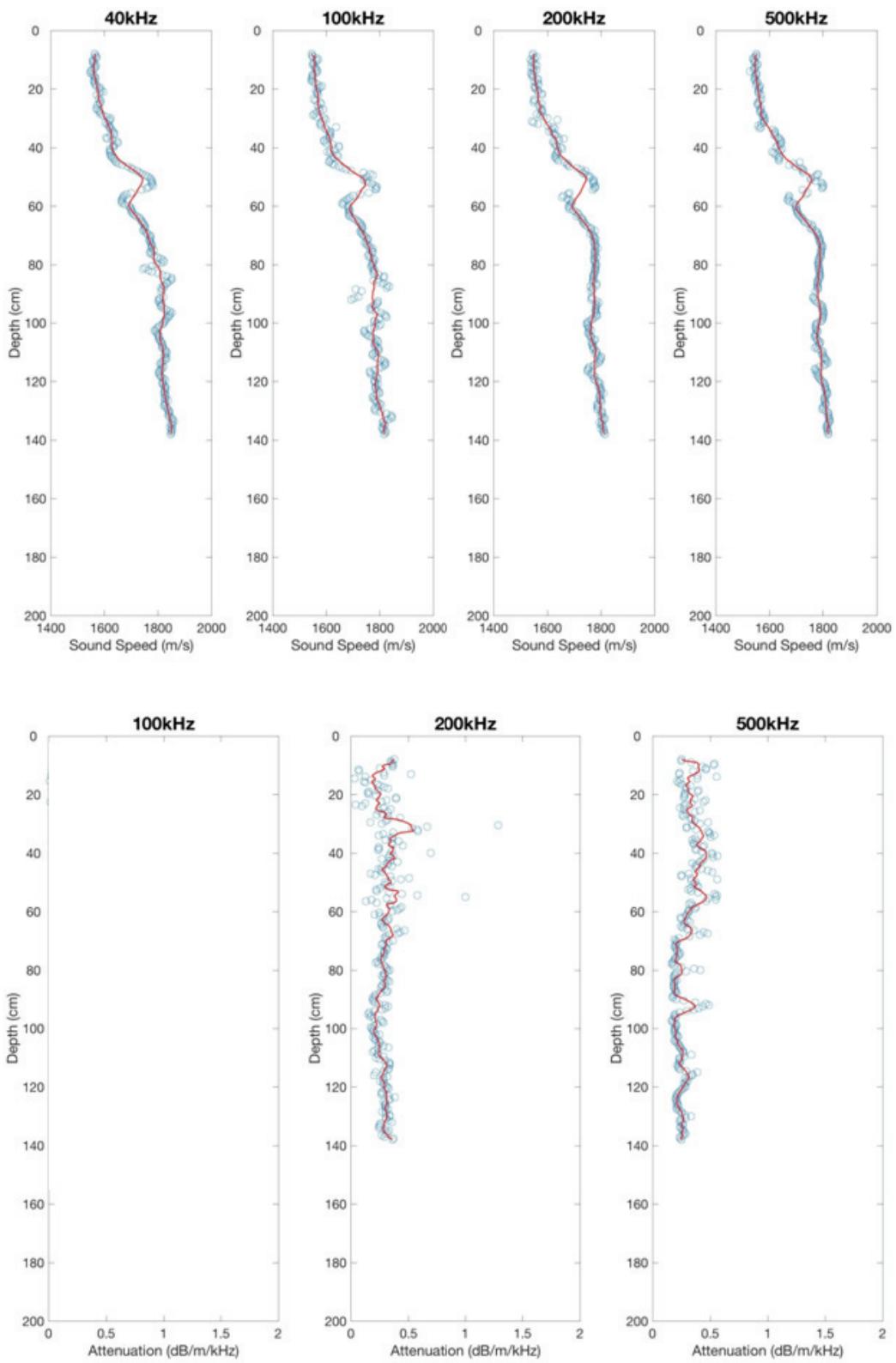


그림 3.3.8. F02 정점에서 시추된 피스톤 코아 퇴적물의 깊이별 지음향인자

2. 연구해역 해저 퇴적층의 지음향 모델링

연구해역에서 시추한 해저퇴적물의 지음향 관측자료를 기반으로 비관측 주파수대역에 대한 지음향인자를 예측하기 위한 BICSQS 지음향 모델(Biot model with grain contact squirt flow and shear drag)을 사용하였다(Chotiros 2004, Chotiros and Isakson 2008). BICSQS 지음향 모델은 Biot-Stoll 지음향 모델(Stoll 1989)을 기반으로 하여 퇴적물의 체적 탄성계수(K_b)와 횡탄성 계수(μ)를 주파수에 따른 퇴적물 알갱이 접촉면에서의 squirt flow 와 shear drag를 고려하여 수정하였다. 식 3.3.1 ~ 식 3.3.4는 BICSQS 지음향 모델에서 사용되는 4개의 방정식을 각각 나타낸다. 이 방정식들은 퇴적물 프레임(sediment frame)과 공극수(pore water)의 운동 변위에 대한 스칼라 및 벡터로 표시된다.

$$H\nabla^2\Phi_s - C\nabla^2\Phi_f = \rho\ddot{\Phi}_s - \rho_f\ddot{\Phi}_f \quad (3.3.1)$$

$$C\nabla^2\Phi_s - M\nabla^2\Phi_f = \rho_f\ddot{\Phi}_s - \frac{\alpha\rho_f}{\beta}\ddot{\Phi}_f - \frac{F\eta}{\kappa}\dot{\Phi}_f \quad (3.3.2)$$

$$\mu\nabla^2\Psi_s = \rho\ddot{\Psi}_s - \rho_f\ddot{\Psi}_f \quad (3.3.3)$$

$$\rho_f\ddot{\Psi}_s - \frac{\alpha\rho_f}{\beta}\ddot{\Psi}_f - \frac{F\eta}{\kappa}\dot{\Psi}_f = 0 \quad (3.3.4)$$

여기서

$$C = (1 - K_b / K_r)M \quad (3.3.5)$$

$$M = \frac{K_r}{[1 - K_b / K_r + \beta(K_r / K_f - 1)]} \quad (3.3.6)$$

$$H = (1 - K_b / K_r)C + K_b + \frac{4}{3}\mu \quad (3.3.7)$$

$$F(\xi) = \frac{1}{4} \frac{\xi T(\xi)}{\left[1 - \frac{2T(\xi)}{i\xi}\right]} \quad (3.3.8)$$

$$T(\xi) = \frac{ber'(\xi) + ibei'(\xi)}{ber(\xi) + ibei(\xi)} = \frac{-i\sqrt{i}J_1(i\sqrt{i}\xi)}{J_0(i\sqrt{i}\xi)} \quad (3.3.9)$$

$$\xi = a\left(\frac{\omega\rho_f}{\eta}\right)^{1/2} \quad (3.3.10)$$

$$K_b(\omega) = K_c + \frac{K_y}{1 + j(2\pi f_k / \omega)} \quad (3.3.11)$$

$$K_c = \frac{2}{3} G \frac{1+\sigma}{1-2\sigma} \quad (3.3.12)$$

$$\mu(\omega) = G(1 - j \frac{\omega}{2\pi f_\mu}) \quad (3.3.13)$$

이다.

식 3.3.1 ~ 식 3.3.13에서 주어지는 변수에 대한 이름은 각 퇴적층의 지음향 모델링 입력 변수 표에서 기술된다. 식 3.3.1 ~ 식 3.3.4의 해를 평면파 해를 가정하는 경우 종파성분의 음파에 대한 파수 해는 다음과 같이 주어진다.

$$k_f = -\frac{1}{2E1} \sqrt{-2E1(E2 - \sqrt{E2^2 - 4E1E3})} \quad (3.3.10)$$

여기서

$$E1 = -HM + C^2 \quad (3.3.11)$$

$$E2 = H \frac{\alpha \rho_f}{\beta} \omega^2 + \rho M \omega^2 - 2\rho_f \omega^2 C - \frac{i \omega F \eta}{\kappa} H \quad (3.3.12)$$

$$E3 = \rho_f^2 \omega^4 - \rho \frac{\alpha \rho_f}{\beta} \omega^4 + \frac{i \omega F \eta}{\kappa} \rho \omega^2 \quad (3.3.13)$$

이다. 이때 퇴적물의 음속과 음감쇠는 다음과 같이 표현된다.

$$c_f = \frac{\omega}{\text{Re}(k_f)} \quad (3.3.14)$$

$$\alpha_f = \text{Im}(k_f) \quad (3.3.15)$$

그림 3.3.9는 연구해역 전체 정점에서 관측된 표층 퇴적물의 지음향인자 관측값을 기반으로 하여 수행된 지음향 모델 결과를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이, 표층퇴적물의

지음향인자 모델링 결과는 다양한 차이로 나타난다는 것을 알 수 있다. 이것은 표층 퇴적물을 구성하고 있는 퇴적물의 물성(공극률, 입도 등) 차이에 의해 나타난다. 그림 3.3.10은 표층 퇴적물을 채취한 전체 정점에서 관측된 지음향인자의 평균값을 이용하여 지음향 모델링을 수행한 결과를 나타낸다. 표 3.3.1은 지음향 모델링 입력변수를 나타낸다. 주파수 100 Hz ~ 1MHz 대역에 대해서 음속은 1465 ~ 1507 m/s의 분포를 나타내며 감쇠는 0.012 ~ 0.6 dB/m/kHz의 분포를 나타냈다.

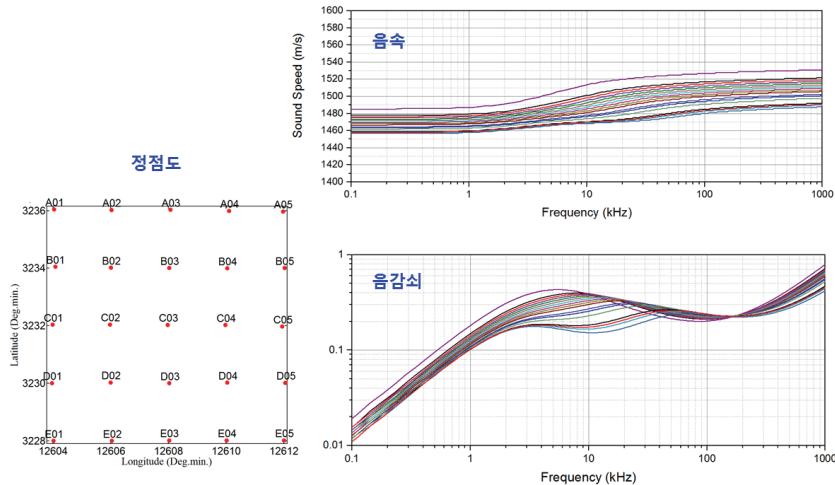


그림 3.3.9. 연구해역 표층 퇴적물 채취 정점도 및 정점별로 관측된 표층 퇴적물의 지음향인자 관측값을 기반으로 하여 수행된 지음향 모델 결과

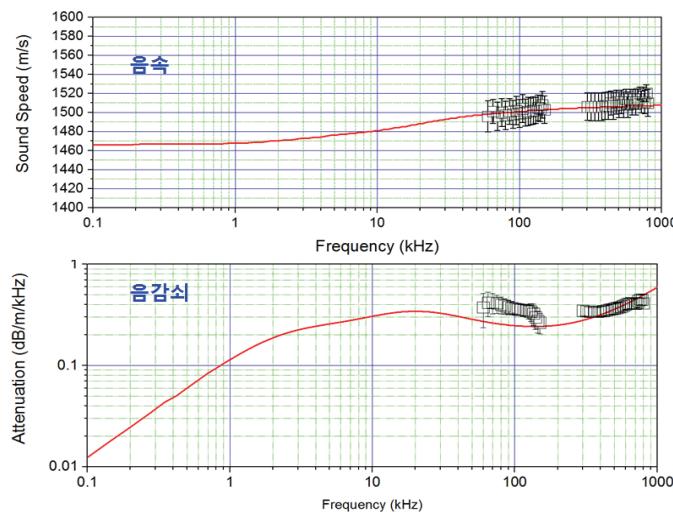


그림 3.3.10. 연구해역 전체정점에서 관측된 표층퇴적물의 지음향인자 평균값 기반 지음향 모델링 결과

표 3.3.1. 연구해역 표층 퇴적층 지음향 모델링 입력인자

Parameters	Value
Bulk properties	
β , Porosity	0.68
ρ_r , Grain density (kg/m^3)	2650
ρ_f , Fluid density (kg/m^3)	1026
K_r , Grain bulk modulus (Gpa)	36
K_f , Fluid bulk modulus (Gpa)	2.321
Fluid motion	
η , Fluid viscosity ($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)	1×10^{-3}
κ , Permeability (m^2)	1.524×10^{-12}
a, Pore size (μm)	6.824×10^{-6}
α , Tortuosity	3
Frame response	
σ , Poisson's ratio of sediment grain	0.15
G , Frame shear modulus (Pa)	1.425×10^6
K_y , Frame bulk modulus Difference (Pa)	60×10^6
f_k , Bulk relaxation frequency (kHz)	3
f_k , Shear relaxation frequency (kHz)	15
a_1 , Gap width	2.531×10^{-8}

그림 3.3.11과 3.3.12는 표층 퇴적물을 채취한 전체 정점에서 관측된 지음향인자 관측값을 기반으로 비적용 주파수 가운데 100 Hz, 1 kHz, 5kHz, 10 kHz에 대한 실제 해양조사 당시 해저면 수온 14.5 °C를 적용하여 수행된 지음향인자 모델링 결과를 나타낸다. 그림 3.3.11에서 보는 바와 같이, 모래 함유량이 상대적으로 적은 정점에서는 음속이 낮게 나타나고, 반면 많은 정점에서는 음속이 빠르게 나타남을 알 수 있다. 또한, 주파수가 증가할 수록 전체정점에 대해서 음속이 증가하는 양상을 나타낸다. 그림 3.3.12에서 나타난 음감쇠의 경우, 주파수 100 Hz와 1 kHz는 모래함유량에 따른 감쇠 증가 및 감소 양상이 약하게 보이나 주파수 5 kHz와 10 kHz에서는 모래의 함유량에 따른 그 양상은 비교적 뚜렷하게 나타났다.

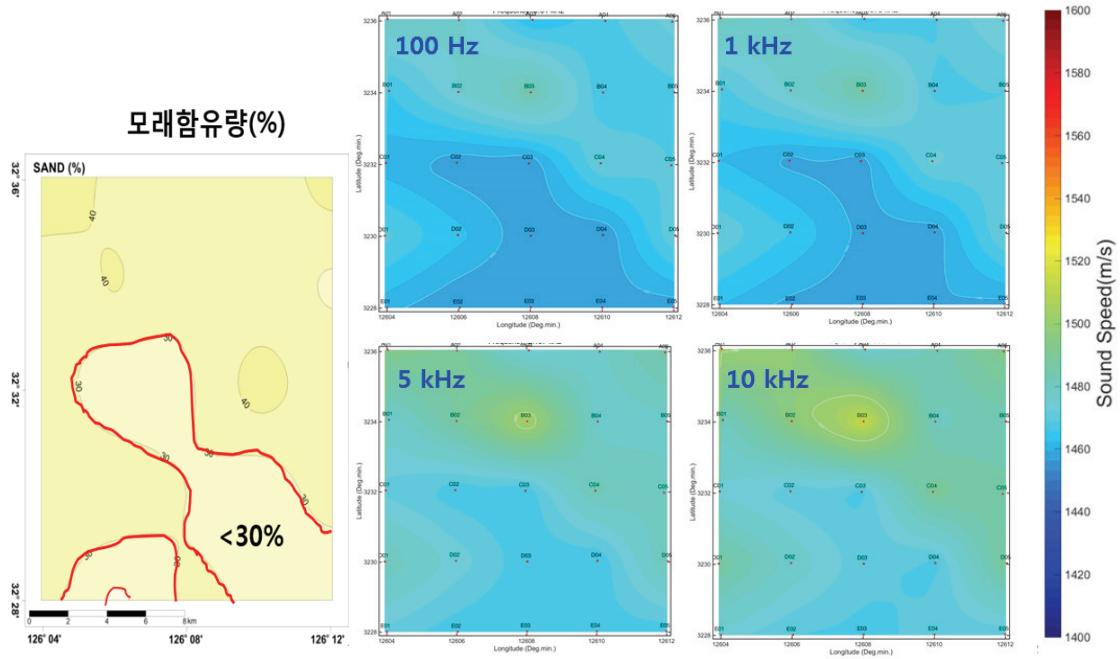


그림 3.3.11. 연구해역 표층 퇴적물 모래함유량 분포도 및 주파수 100 Hz, 1 kHz, 5 kHz, 10 kHz에서 퇴적물 음속에 대한 지음향 모델링 결과

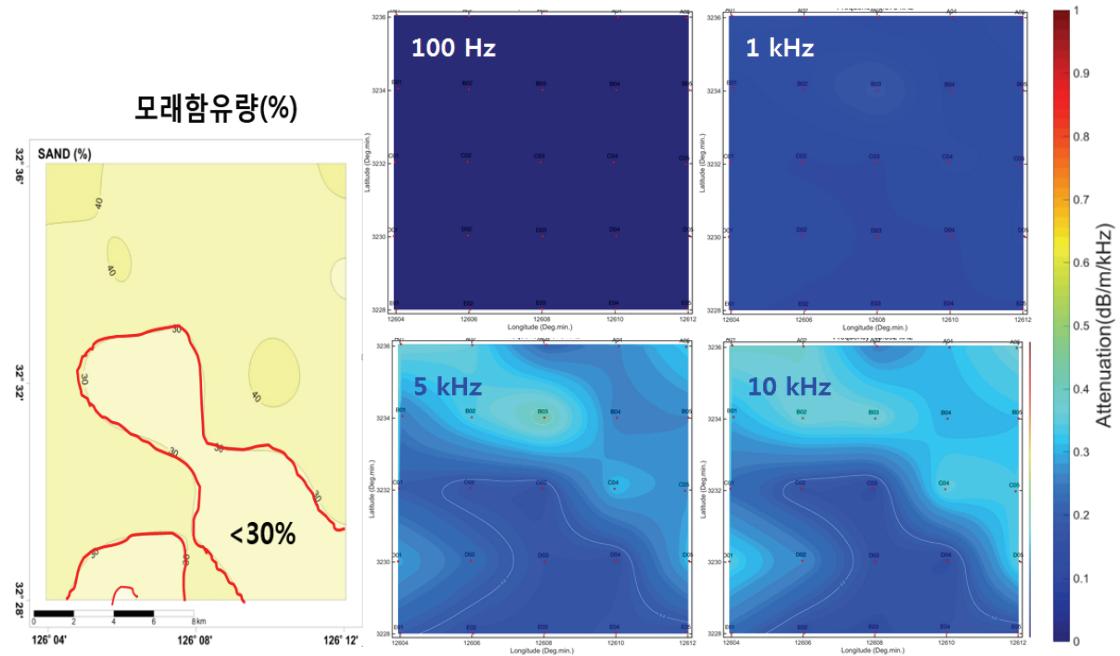


그림 3.3.12. 연구해역 표층 퇴적물 모래함유량 분포도 및 주파수 100 Hz, 1 kHz, 5 kHz, 10 kHz에서 퇴적물 음감쇠에 대한 지음향 모델링 결과

표층 퇴적물은 그랩 샘플링 및 박스코아 샘플링을 통해서만 확인이 되고 피스톤 코아 샘플링과 탄성파 및 첨 조사를 통해서도 퇴적층이 구분되지 않으므로 2개 정점에서 채취한 박스코아 샘플자료를 근거로 하여 1층 퇴적층의 두께는 0.4 m로 결정하였다(그림 3.3.13).

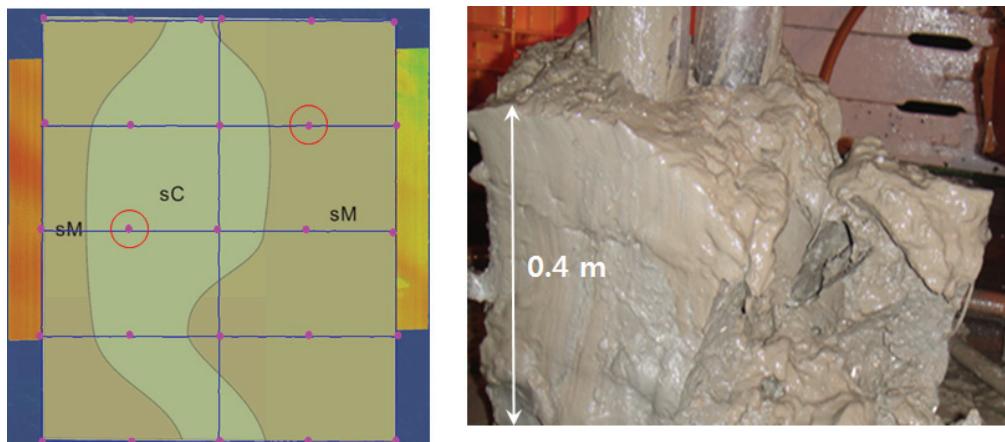


그림 3.3.13. 박스 코어링을 통해서 채취된 표층 퇴적물

연구해역에서 시추한 피스톤 코아 퇴적물은 상부에 표층 퇴적물(밸질 퇴적물)의 영향으로 인하여 다수의 관측 정점에서 밸질 모래의 존재가 확인되지만, 코아 깊이의 증가에 따라 대부분 모래로 구성된 것을 확인하였다. 따라서, 연구해역의 두 번째 퇴적층을 구성하는 퇴적물은 모래로 결정하고, 그것에 관해 관측된 평균 지음향인자 값을 기반으로 하여 BICSQS 모델을 이용하여 2층 퇴적물 모래에 대한 주파수별 지음향인자를 모델링 하였다.

그림 3.3.14는 해저 퇴적층 2층에서 시추된 피스톤 코아 퇴적물 가운데 모래로 구성된 퇴적물의 지음향인자 관측자료를 기반으로 계산된 주파수별 지음향인자 모델링 결과를 나타낸다. 표 3.3.2는 지음향 모델의 입력변수를 나타낸다. 그림에서 나타낸 바와 같이 주파수에 따른 음속은 1610 ~ 1743 m/s의 분포를 보여주었고 주파수 200 kHz 이상에서는 음속이 주파수 증가에 따라 감소하는 양상을 나타냈다. 이는 200 kHz 이상의 고주파수 음파가 Sand 내에서는 입자들과의 상호작용으로 인한 음향산란 효과에 의해 나타날 수 있다. 음감쇠는 0.3 ~ 1.9 dB/m/kHz의 분포를 나타냈다.

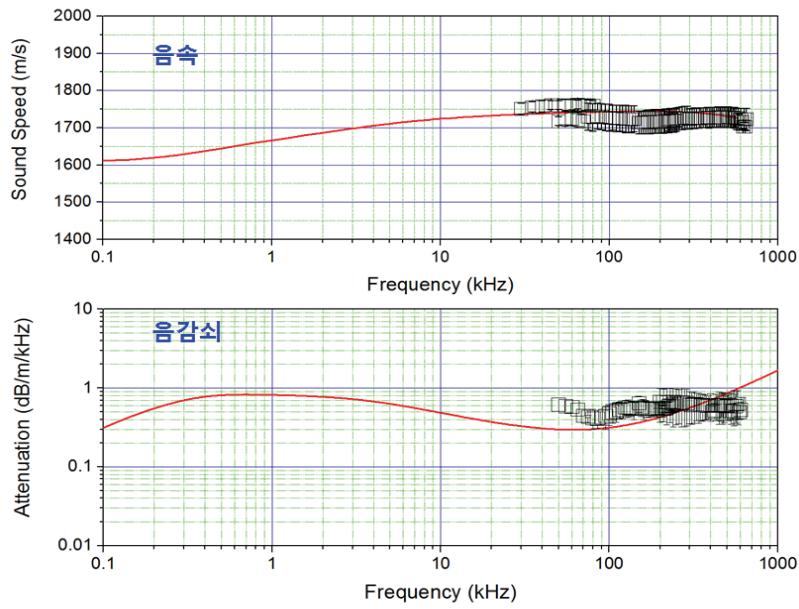


그림 3.3.14. 연구해역에서 시추된 해저 퇴적층 2층의 피스톤 코ア 퇴적물(Sand)에서 관측된 퇴적물의 지음향인자 평균값 기반 지음향 모델링 결과

해저 퇴적층 2층의 두께는 주파수 1 kHz의 탄성파 조사 자료에 나타난 음파도달 시간과 깊이에 따른 음속의 지음향 모델결과를 이용하여 결정하였다. 이때 그림 3.3.15는 해저 퇴적층 2층의 두께 분포도를 나타낸다. 전체적으로 2 ~ 13 m의 두께 분포도를 나타내며, 남동쪽 방향으로 상대적으로 높은 지형이 나타난다는 것을 알 수 있다.

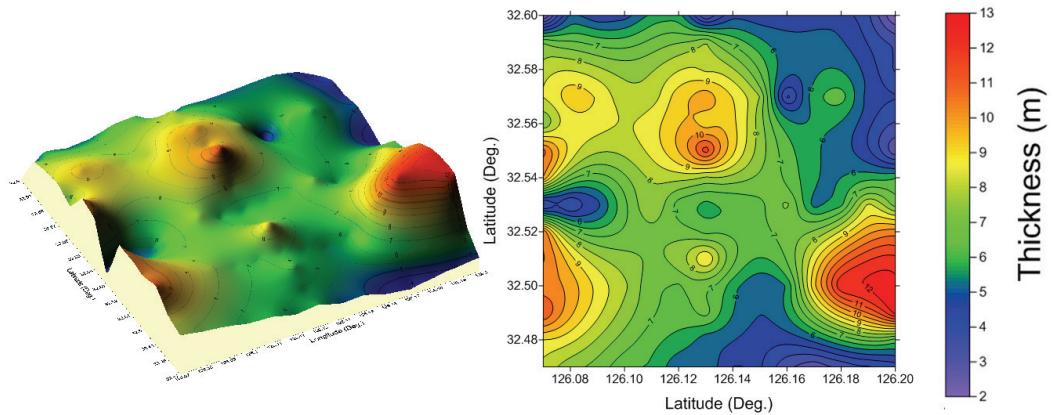


그림 3.3.15. 연구해역에서 탄성파 도달시간 및 심도별 음속에 대한 지음향 모델결과를 이용하여 추정된 해저 퇴적층 2층(Sand)의 두께 분포도

표 3.3.2. 연구해역에서 해저 퇴적층 2층(모래)의 지음향 모델링 입력인자

Parameters	Value
Bulk properties	
β , Porosity	0.54
ρ_r , Grain density (kg/m^3)	2650
ρ_f , Fluid density (kg/m^3)	1026
K_r , Grain bulk modulus (Gpa)	36
K_f , Fluid bulk modulus (Gpa)	2.321
Fluid motion	
η , Fluid viscosity ($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)	1×10^{-3}
κ , Permeability (m^2)	6.968×10^{-11}
a, Pore size (μ)	5.835×10^{-5}
α , Tortuosity	1.25
Frame response	
σ , Poisson's ratio of sediment grain	0.15
G , Frame shear modulus (Pa)	2.256×10^7
K_y , Frame bulk modulus Difference (Pa)	200×10^6
f_k , Bulk relaxation frequency (kHz)	4
f_μ , Shear relaxation frequency (kHz)	30
a ₁ , Gap width	6.224×10^{-7}

연구해역의 해저 퇴적층 3층은 피스톤 코아링을 통한 퇴적물 시추가 불가한 층인 관계로 2절에서 언급하였듯이, 문헌조사(Bartek and Wellner 1995, Berne 등. 2002, Ryang 등, 2013)와 탄성파 조사자료를 근거로 퇴적층을 뱉질 모래(Muddy Sand)로 결정하였다. 피스톤 코아링을 통해서 시추된 해저 퇴적층 2층의 퇴적물 가운데 뱉질 모래로 구성된 퇴적물을 해저 퇴적층 3층을 구성하는 퇴적물로 가정하고 관측된 평균 지음향인자를 기반으로 하여 BICSQS 모델을 이용하여 3층에 대한 지음향인자 모델링을 수행하였다. 그림 3.3.16과 표 3.3.3은 해저 퇴적층 3층을 구성하는 뱉질에 대한 주파수별 지음향인자 모델링 결과와 모델 입력 인자를 각각 나타낸다. 그림에서 나타낸 바와 같이 주파수에 따른 음속은 1500 ~ 1570 m/s의 분포를 나타냈고, 음감쇠는 0.3 ~ 1.9 dB/m/kHz의 분포를

나타냈다. 해저 퇴적층 3층의 두께는 2층과 마찬가지로 주파수 1 kHz의 탄성파 조사 자료에서 나타난 음파도달 시간과 깊이에 따른 음속의 지음향 모델결과를 이용하여 결정하였다. 이때, 그림 3.3.17은 해저 퇴적층 3층의 두께 분포도를 나타낸다. 전체적으로 19 ~ 49 m의 두께 분포도를 보여주며 남쪽 방향으로는 높은 지형 분포를 나타냈다.

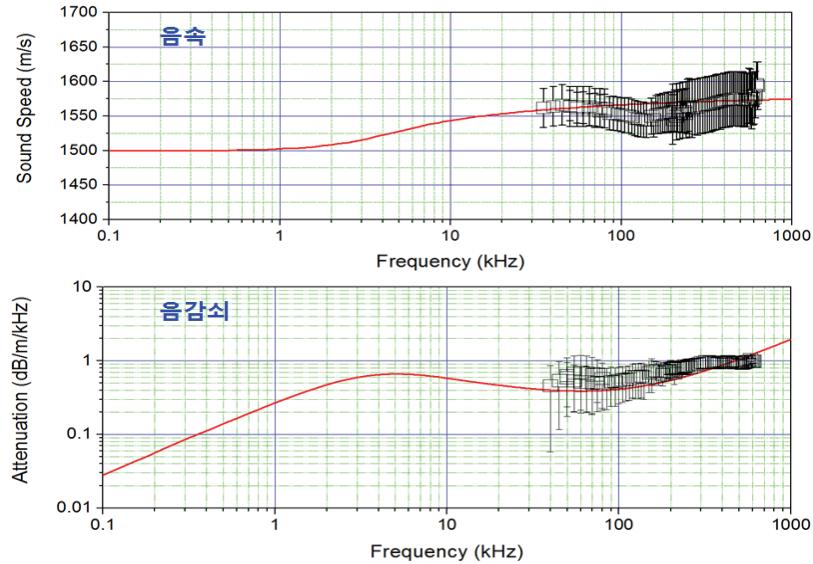


그림 3.3.16. 연구해역에서 해저 퇴적층 3층 퇴적물(밸질 모래)의 지음향인자 모델링 결과

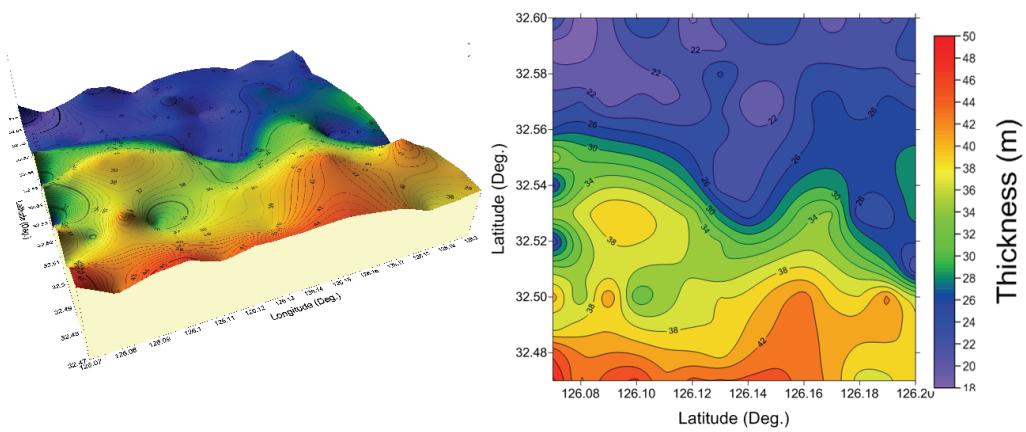


그림 3.3.17. 연구해역에서 탄성파 도달시간 및 심도별 음속에 대한 지음향 모델결과를 이용하여 추정된 해저 퇴적층 3층(밸질 모래)의 두께 분포도

표 3.3.3. 연구해역에서 해저 퇴적층 3층(뻘질 모래)의 지음향 모델링 입력인자

Parameters	Value
Bulk properties	
β , Porosity	0.581
ρ_r , Grain density (kg/m^3)	2650
ρ_f , Fluid density (kg/m^3)	1026
K_r , Grain bulk modulus (Gpa)	36
K_f , Fluid bulk modulus (Gpa)	2.321
Fluid motion	
η , Fluid viscosity ($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)	1×10^{-3}
κ , Permeability (m^2)	6.699×10^{-12}
a, Pore size (μ)	1.548×10^{-5}
α , Tortuosity	2
Frame response	
σ , Poisson's ratio of sediment grain	0.15
G , Frame shear modulus (Pa)	9.655×10^6
K_y , Frame bulk modulus Difference (Pa)	100×10^6
f_k , Bulk relaxation frequency (kHz)	5
f_μ , Shear relaxation frequency (kHz)	20
a_1 , Gap width	8.814×10^{-8}

연구해역 해저 퇴적층 4층은 3층과 마찬가지로 피스톤 쿄아링을 통한 퇴적물 시추가 불가한 층이어서 문헌조사(Bartek and Wellner 1995, Berne 등. 2002, Ryang 등, 2013)와 탄성파 조사자료를 근거로 퇴적층을 경질뻘(Hard Mud)로 결정하고 퇴적층의 두께를 추정하였다. 본 연구에서는 연구해역 해저 퇴적층 4층에 대한 퇴적물과 유사한 시추 퇴적물이 존재하지 않아 본 연구팀이 타 사업에서 수행한 서해 백령도해역 심부 시추 퇴적물인 경질뻘(Hard Mud)을 이용하여 해저 퇴적층 4층에 대한 지음향인자 모델링을 수행하고 퇴적층 두께를 결정하였다. 그림 3.3.18과 표 3.3.4는 해저 퇴적층 4층을 구성하는 경질뻘 대한 주파수별 지음향인자 모델링 결과와 모델 입력 인자를 나타낸다. 그림 3.3.19는 지음향 모델링 결과와 탄성파 조사자료에서 확인된 해저 퇴적층 4층의 음파도달 시간을 이용

하여 추정된 퇴적층의 두께 분포를 나타낸다. 그림에서 나타낸 바와 같이 해저 퇴적층 4층은 3 ~ 24 m의 두께분포를 나타내며, 북쪽 방향으로 높은 지형분포를 나타낸다.

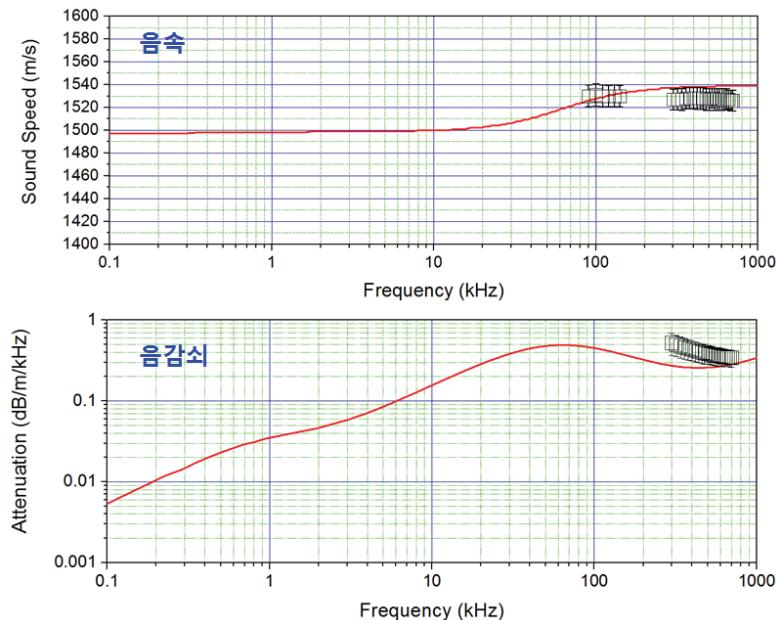


그림 3.3.18. 연구해역에서 해저 퇴적층 4층 퇴적물(경질빨)의 지음향인자 모델링 결과

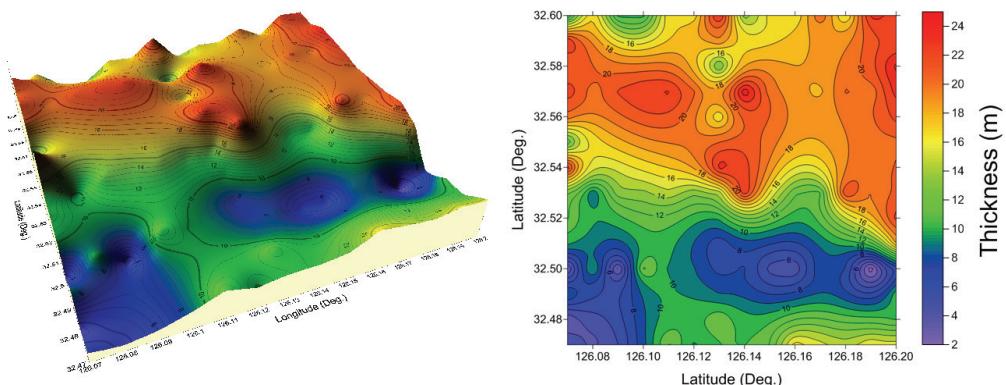


그림 3.3.19. 연구해역에서 탄성파 도달시간 및 심도별 음속에 대한 지음향 모델결과를 이용하여 추정된 해저 퇴적층 4층(경질빨)의 두께 분포도

표 3.3.4. 연구해역에서 해저 퇴적층 4층(경질黏)의 지음향 모델링 입력인자

Parameters	Value
Bulk properties	
β , Porosity	0.58
ρ_r , Grain density (kg/m^3)	2650
ρ_f , Fluid density (kg/m^3)	1026
K_r , Grain bulk modulus (Gpa)	36
K_f , Fluid bulk modulus (Gpa)	2.321
Fluid motion	
η , Fluid viscosity ($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)	1×10^{-3}
κ , Permeability (m^2)	50×10^{-14}
a, Pore size (μ)	1.798×10^{-6}
α , Tortuosity	3
Frame response	
σ , Poisson's ratio of sediment grain	0.15
G , Frame shear modulus (Pa)	2.854×10^6
K_y , Frame bulk modulus Difference (Pa)	10×10^6
f_k , Bulk relaxation frequency (kHz)	1
f_μ , Shear relaxation frequency (kHz)	50
a_1 , Gap width	1.028×10^{-8}

연구해역 해저 퇴적층 5층은 문헌조사(Bartek and Wellner 1995, Berne 등. 2002, Ryang 등, 2013)를 통해 해저 퇴적층 3층과 동일한 퇴적물로 구성된 뱉진모래층으로 결정하였다. 따라서, 해저 퇴적층 3층에서 사용된 지음향인자 모델링 결과와 5층에서의 탄성파 도달시간 자료를 이용하여 퇴적층의 두께를 추정하였다. 그림3.3.20은 해저 퇴적층 5층에 대한 퇴적층의 두께 분포를 나타낸다. 그림에서 나타낸 바와 같이 해저 퇴적층 5층은 4 ~ 30 m의 두께분포를 나타내며 북서쪽 방향으로는 높은 지형분포를 나타내고 있다.

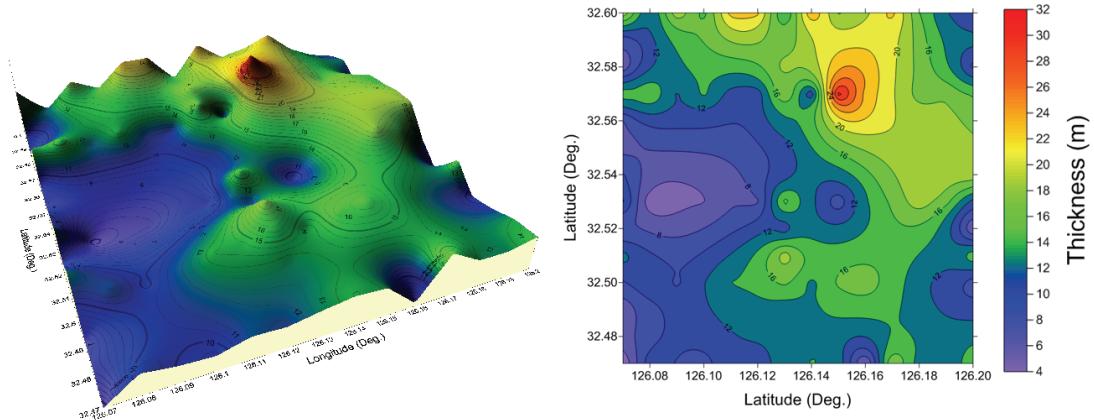


그림 3.3.20. 연구해역에서 탄성파 도달시간 및 심도별 음속에 대한 지음향 모델결과를 이용하여 추정된 해저 퇴적층 5층(밸질모래)의 두께 분포도

3. 연구해역 해저 퇴적층의 지음향 층서모델

연구해역 5개 층의 구성 퇴적물에 대한 지음향인자 모델링에 사용된 BICSQS 모델 입력 변수 가운데 퇴적층의 심도에 영향을 받는 횡탄성 계수(Shear Modulus)를 심도에 따른 퇴적물 하중 압력(Overburden Pressure)의 함수로 변환함으로써 각 퇴적층에 대한 지음향 층서 모델을 수립하였다. 아래 식은 퇴적물이 모래(Sand) 또는 점토(Clay)가 우세하게 구성될 때의 퇴적물 심도에 따른 횡탄성 계수에 대한 경험식을 나타낸다. 그림 3.3.21 ~ 3.3.24는 연구해역 피스톤코아 시추정점 D03에서 주파수 100 Hz, 1 kHz, 5 kHz, 10 kHz에 대한 지음향 층서 모델링 결과를 나타낸다.

$$G_s = 6.56 \cdot 10^5 \frac{(1-\phi)^{1.1}}{\phi^{1.1}} P^{0.5} \quad \text{for sand dominant sediment} \quad (3.3.16)$$

$$G_m = 2.05 \cdot 10^5 \frac{(1-\phi)^{1.29}}{\phi^{1.29}} P^{0.5} \quad \text{for clay dominant sediment} \quad (3.3.17)$$

$$P = 1.061 \cdot 10^4 (1-\phi) Z \quad (3.3.18)$$

* P: 퇴적물 하중 압력(Overburden Pressure)

Z: 퇴적층 심도(Sediment Depth)

ϕ : 퇴적물 다공율(Porosity)

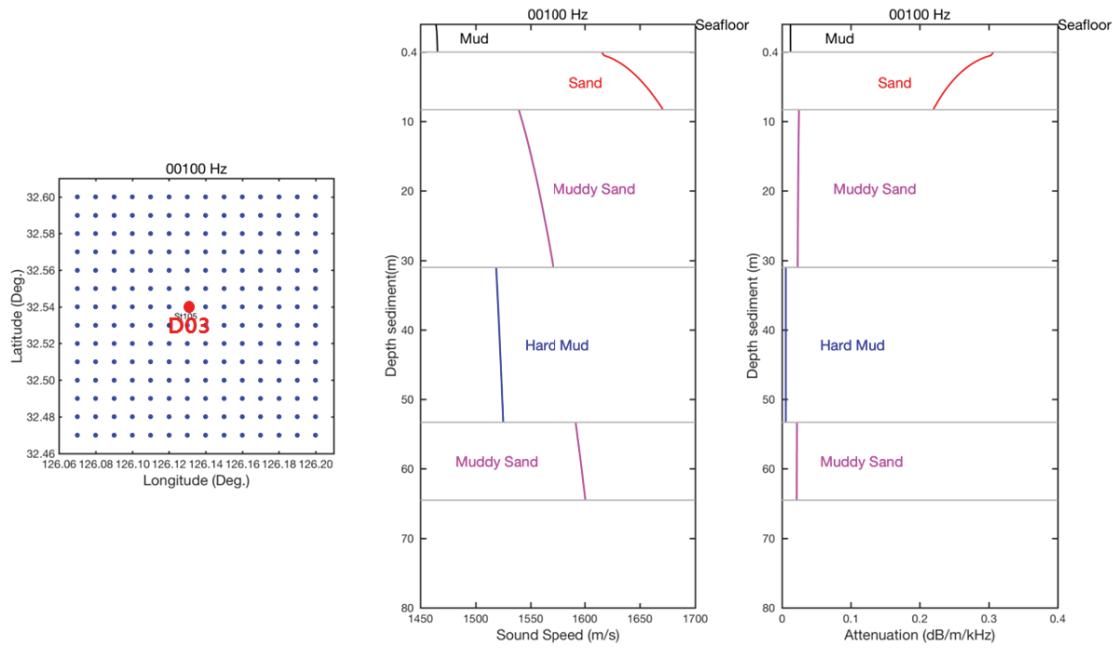


그림 3.3.21. 연구해역에서 D03 정점에서 주파수 100 Hz 음파에 대한 지음향 층서모델 결과

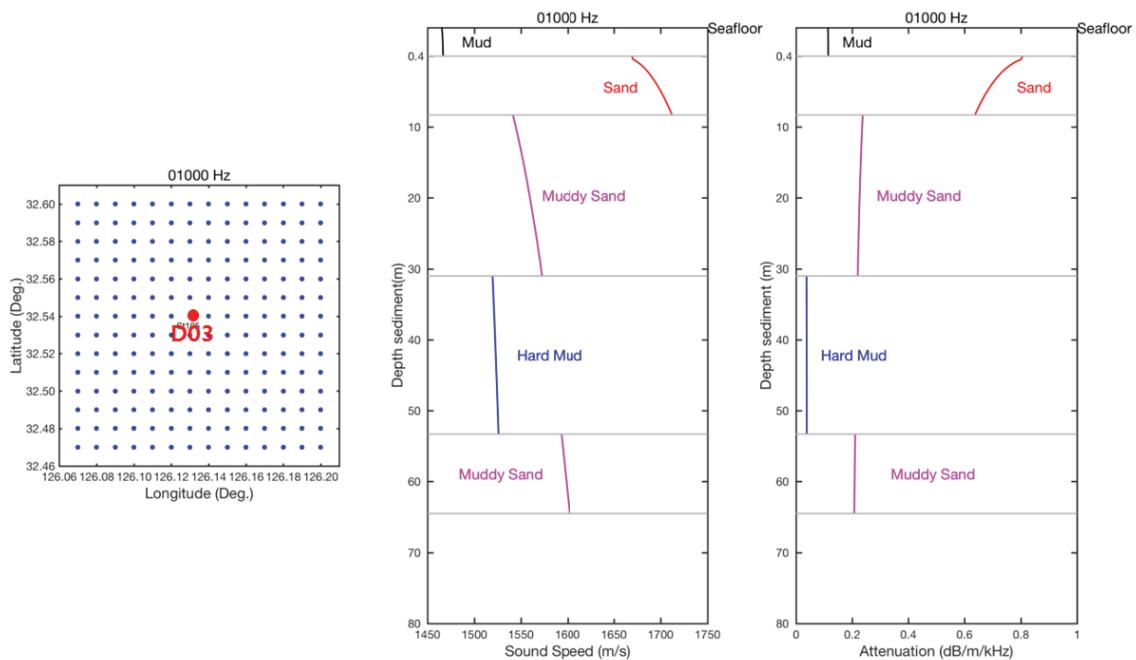


그림 3.3.22. 연구해역에서 D03 정점에서 주파수 1 kHz 음파에 대한 지음향 층서모델 결과

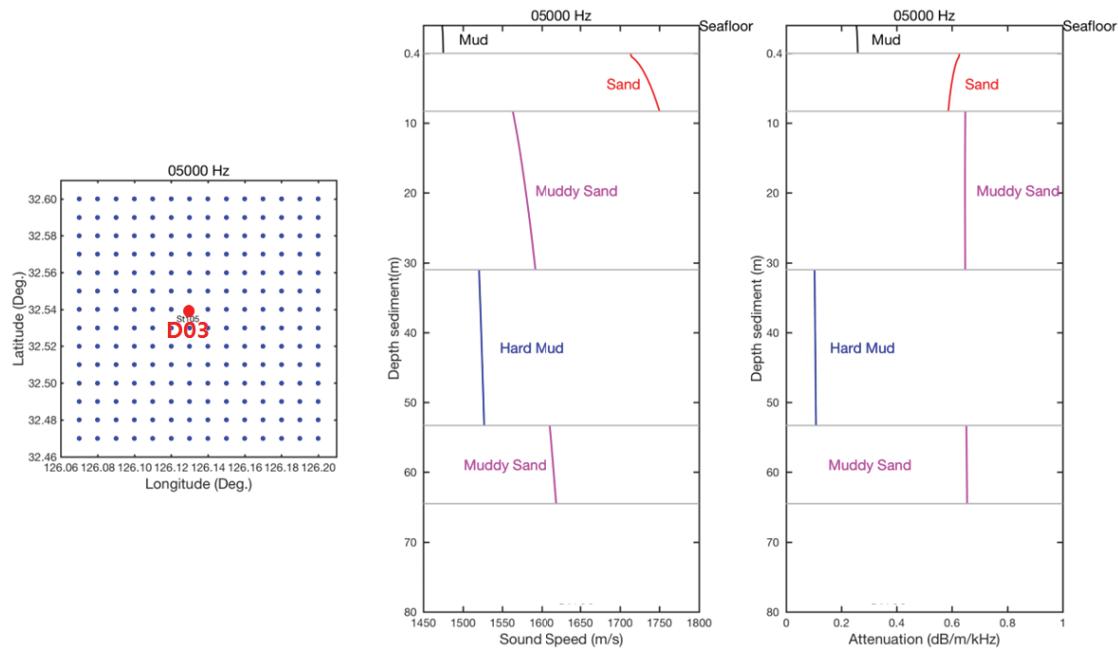


그림 3.3.23. 연구해역에서 D03 정점에서 주파수 5 kHz 음파에 대한 지음향 층서모델 결과

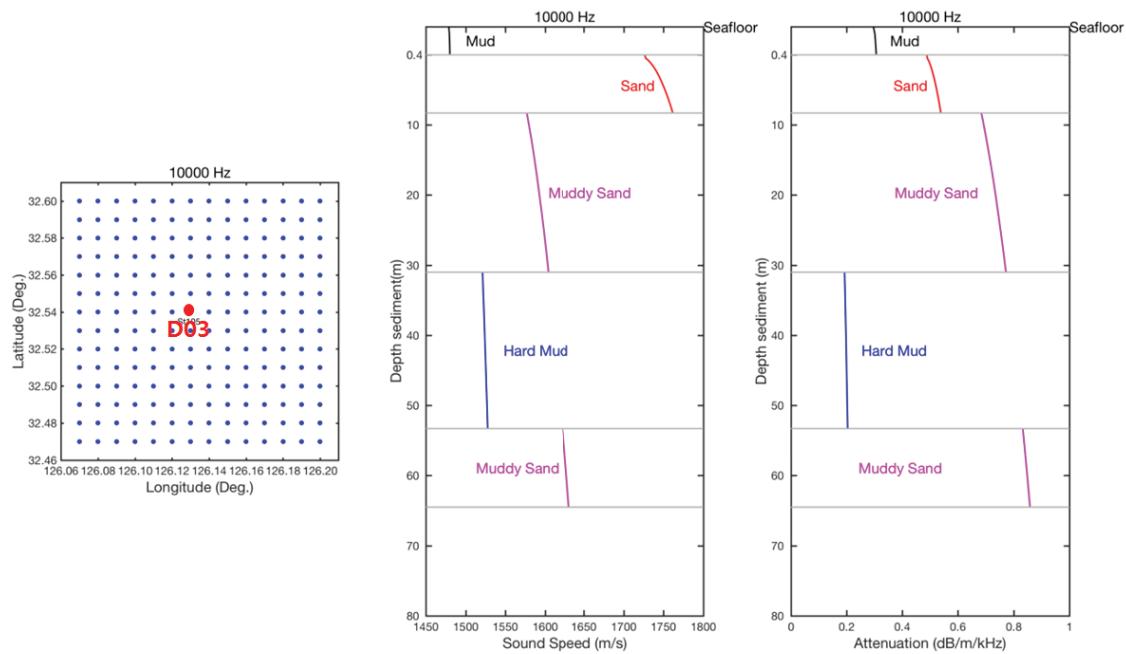


그림 3.3.24. 연구해역에서 D03 정점에서 주파수 10 kHz 음파에 대한 지음향 층서모델 결과

제 4 절 연구해역 해저 퇴적층 음파 전달 특성 관측

수심이 얕은 천해환경에서는 해저 경계면에 의한 음파 간섭 현상이 음파 전달에 큰 영향으로 작용한다. 따라서 천해 환경에서 음향학적 이론을 검증하고 해석하는 데에는 해저면 및 해저 퇴적층의 지질학적 물성을 파악하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 연구해역에서 저주파 및 중주파수 대역의 음향 신호를 이용하여 음파전달손실을 관측한 뒤, 이를 분석하여 퇴적층 영향에 의한 연구 해역의 지음향학적 특성을 확인하고자 하였다.

1. 저주파수 및 중주파수 음파 전달손실 측정 실험

2015년 5월 16일, 연구해역에서 저주파 및 중주파수 음파 전달 실험이 수행되었다(그림 3.4.1). 조사선인 온누리호에 예인되는 수중 음원으로부터 송신된 음파를 고정되어 있는 음향 수직 선배열 센서(DVLA, Drift Vertical Line Array)에서 수신하였다(그림 3.4.2). 고정되어 있는 음향 수직 선배열 센서를 기준으로 조사선이 음원을 각각 북-남, 동-서, 남-북, 서-동의 4방향으로 예인하였으며(그림 3.4.1(a)), 이 가운데 수중 음원의 예인 수심이 안정적인 구간이었던 동-서 방향(그림 3.4.1(b))의 실험 정선에 대한 음파 전달손실 분석을 수행하였다.

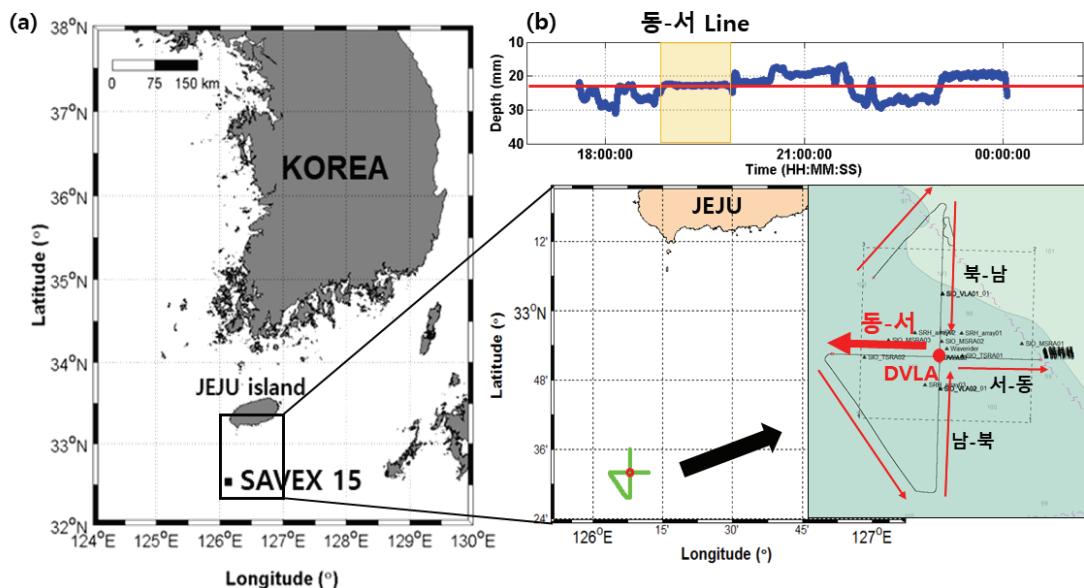


그림 3.4.1. (a) 저/중주파수 음파 전달손실 측정 실험 위치 및 조사선의 예인 경로, (b) 실험이 진행되는 동안의 음원 예인 수심

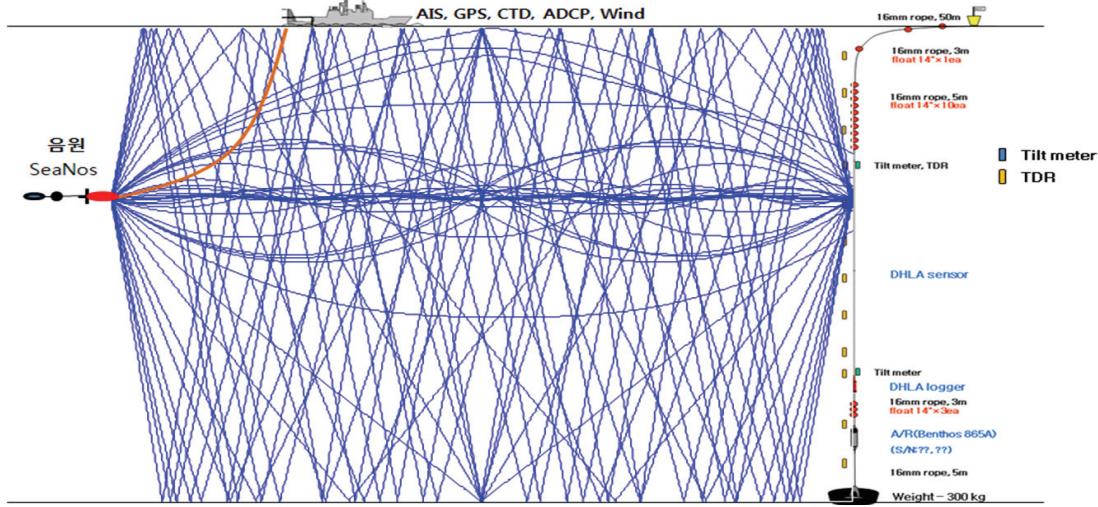


그림 3.4.2. 저/중주파수 음파전달 실험 구성도

수중 음원 발생 시스템은 신호 제어부, 파워앰프, 유압원치, 소나케이블, Towing body로 구성되었다(그림 3.4.3). 음원 신호는 저주파수 및 중주파수 대역 음파 발생 장치인 SeaNos(그림 3.4.4)에서 140, 240, 410, 605, 800, 930 Hz의 멀티톤 형태의 연속파(CW, Continuous Wave) 신호로 송신되었다(그림 3.4.5).



그림 3.4.3. 수중음원 발생 시스템 신호 제어부 및 파워앰프



그림 3.4.4. 수중음원 발생 시스템 Towing body 및 유압 원치

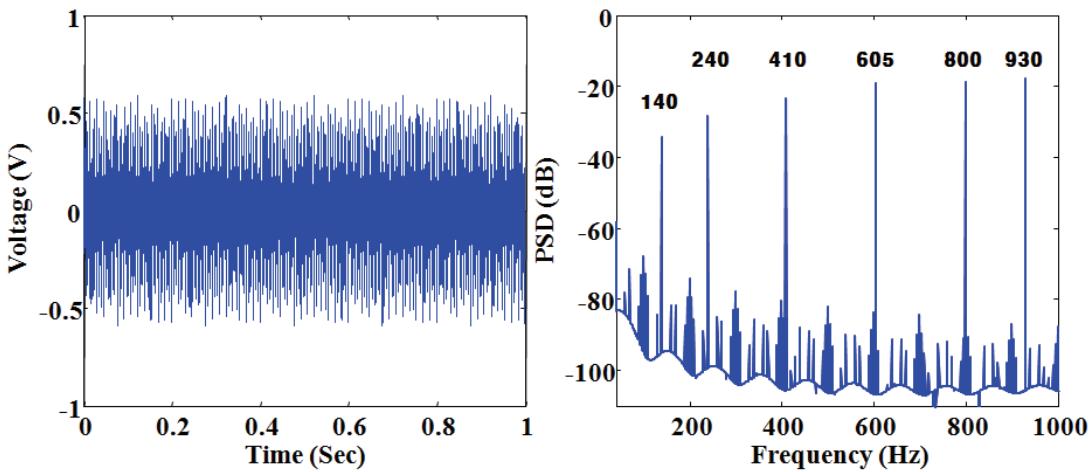


그림 3.4.5. 저/중주파수 대역 송신 음원 신호

수신 시스템은 음향 신호 로거, 수중청음기, 전치 증폭기, 유압원치로 구성되었다. 21개 채널의 네스티드 어레이(nested array) 형태로 구성된 음향 선 배열 센서(DHLA: Deployable Horizontal Line Array)는 약 60 m 길이로 연구해역에 수직으로 계류되었다 (그림 3.4.6 ~ 그림 3.4.8). 각 수중 청음기의 수신 감도는 -172.5 dB ref. $1\text{V}/\mu\text{Pa} \pm 1.5 \text{ dB}$ 로 동일하고, 샘플링 레이트(sampling rate)는 8192 Hz로 최대 24시간 연속 녹취가 가능하도록 설계하였다.

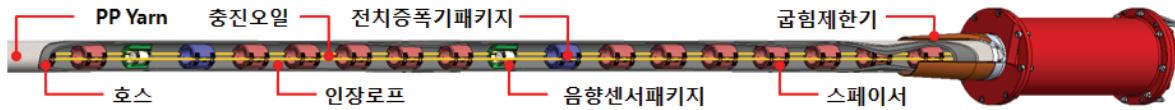


그림 3.4.6. 음향 선 배열 센서 구성

수중 음원은 고정되어 있는 수직 선 배열 센서를 기준으로 멀어지는 방향인 동쪽에서 서쪽으로 조사선으로 예인하였다. 예인 시 약 590 ~ 6300 m 거리를 평균 3.5 knot의 속도로 평균 수심 약 23 m에서 이루어졌다.

연구해역은 천해 환경임에도 음향 채널 축(sound channel axis)이 형성되어 있었으며 [그림 3.4.9(a)], 실험에서 송수신기 거리 2 km, 송신기 및 수신기 수심이 각각 23 m, 51 m에 해당하는 고유 음선 추적(Eigen-ray tracing) 결과는 그림 3.4.9(b)와 같다.

DVLA 센서 채널/간격

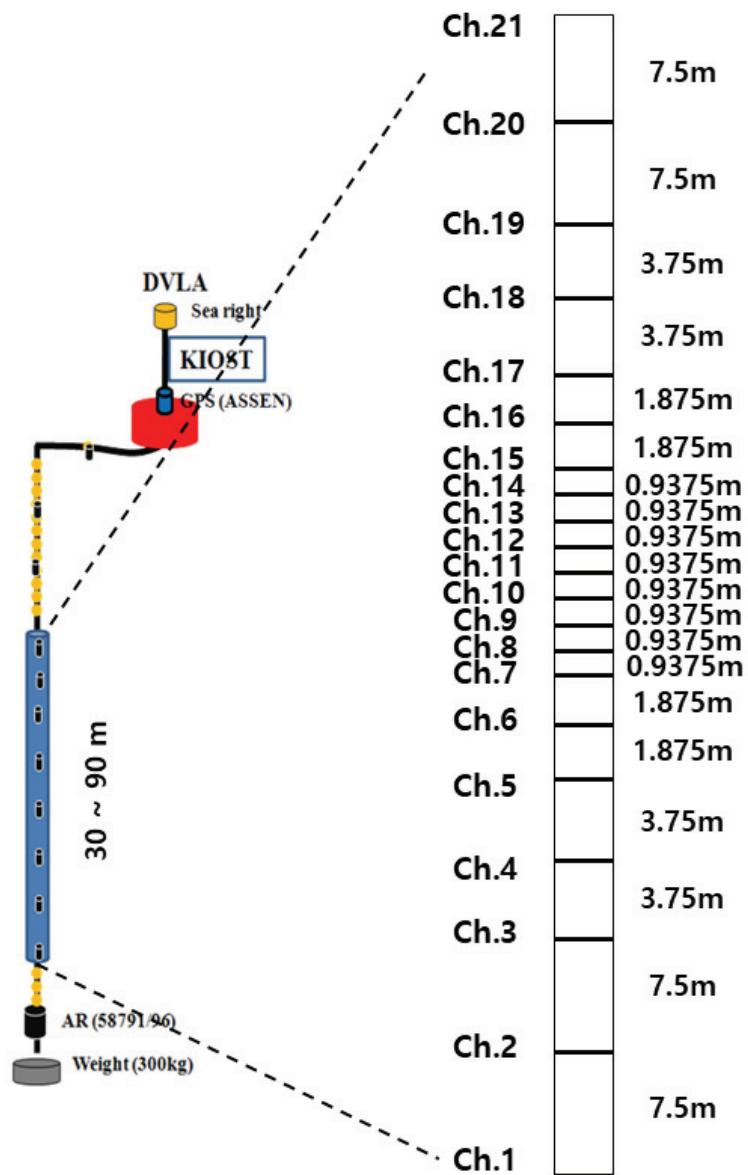


그림 3.4.7. 음향 선배열 센서 채널 구성 및 간격



그림 3.4.8. 음향 선배열 센서 및 유압 원치 현장 운용 예

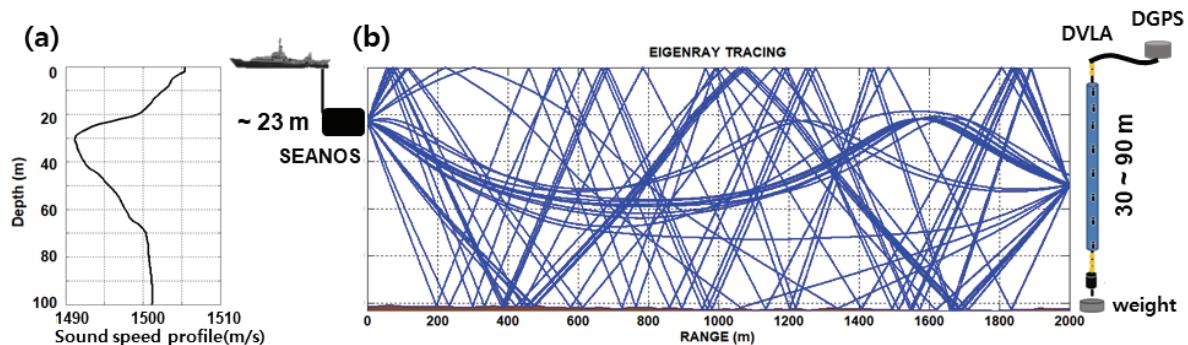


그림 3.4.9. 음파 전달손실 측정 실험 시 (a) 수직 음속 구조 및 (b) 고유음선 추적 결과

조사선과 수직선배열 상단에는 DGPS가 설치되어 있어 전달손실 측정 시 수평 거리를 확인할 수 있도록 하였고 각 송신기 및 수신기에는 수심 센서(depth recorder), Tilt 센서를 부착하여 수직 선배열 센서의 수심과 선형성을 확인하였다. 또한 연구해역 주변 선박 이동에 대한 정보 획득을 목적으로 조사선에 선박 자동 식별 장치(AIS, Automatic Identification System, CIS 100B)를 부착하였다(그림 3.4.10). 저주파 및 중주파수 음파 전달 실험이 수행되었던 약 7시간 동안 관측된 선박은 총 914 척으로 대부분의 선박은 상하

이, 일본 또는 대한 해협으로 향하는 화물선(Cargo ship)으로 판측되었다. 분석에 사용된 실험 정선(동-서 방향)에서 음파 전달 특성 측정 실험이 진행되는 동안, 고정된 수직선 배열 위치로부터 반경 50 km 이내에서 이동 중인 선박은 19 척으로 그림 3.4.11과 같은 경로로 이동 중이었다.

연구해역의 지형은 멀티빔 음향측심기(MBES, Multi-beam Echo Sounder)로 정밀 조사되었으며, 평균 102 m 수심의 비교적 평坦한 해저면에 약 4 ~ 5 m 높이의 사구(sand dune)가 부분적으로 존재하고 있었다(그림 3.4.12, Song et al., 2015). 전달손실 분석에 사용된 동-서 실험 정선은 6.5 km 길이의 Line 3(L3)에 해당되며 수직선 배열을 기준으로 약 2000 m 이내의 구간에서는 ± 1 m 이내로 비교적 평탄한 해저면을 나타내지만, 그보다 먼 거리에서는 약 5 m 정도의 수심 차이가 존재한다는 것을 확인할 수 있다(그림 3.4.13).



(a) 수심 센서 (b) Tilt 센서 (C) 선박자동 식별장치
 그림 3.4.10. 저주파 음파전달 측정을 위한 환경정보 획득 보조 장치

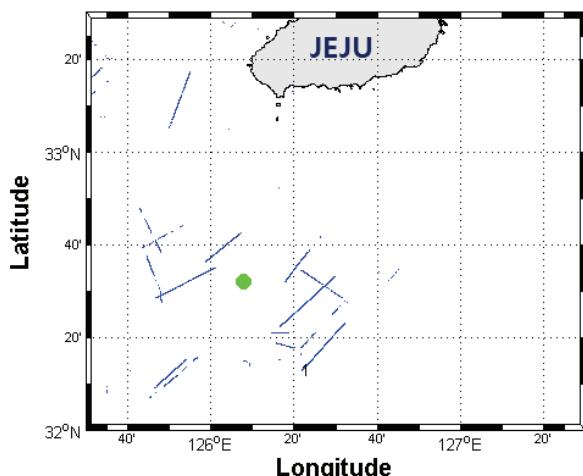


그림 3.4.11. 저주파 및 중주파수 음파 전달 특성 확인 실험(동-서 방향) 진행 중, 측정된 선박 이동 경로(● : 수직선 배열의 위치)

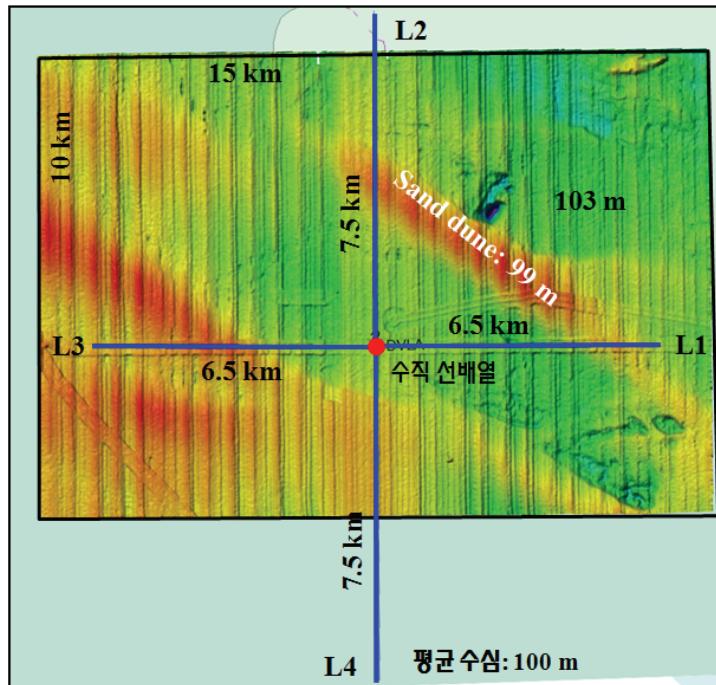


그림 3.4.12. 연구해역 정밀수심 측정 자료 및 음파전달손실 측정 계획 관측선

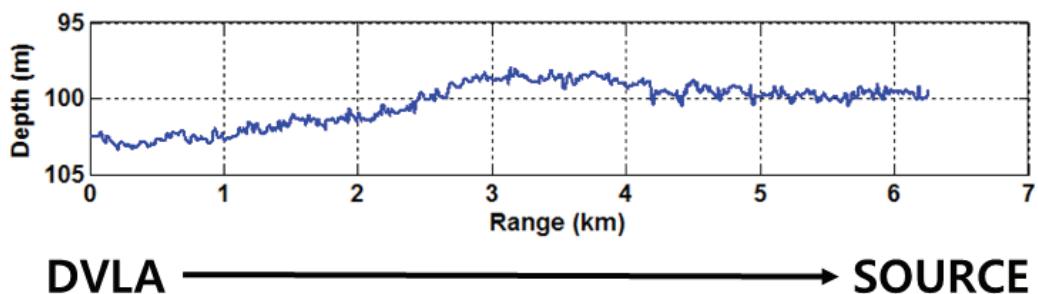


그림 3.4.13. 음파 전달손실 실험 정선(L3, 동-서 라인)의 지형도

2. 저주파수 및 중주파수 음파 전달손실 측정 실험 자료의 분석 방법 및 결과

실험 정선(동-서)을 따라 조사선에 예인되는 저주파 음원으로부터 방사된 음파는 실험이 진행되는 약 1시간 동안 고정된 음향 수직 선배열 센서에 의해 연속 녹취되었다. 이렇게 음향 수직 선배열의 21개 채널에서 각각 수집된 음향 자료는 5초 간격으로 주파수 분석을 수행하여 전달손실(Transmission loss)을 계산하였으며, 조사선과 수직선배열 상단에 부착된 DGPS 정보를 이용하여 이에 해당하는 송·수신기 간의 평균 수평 거리를 계산하였다. 이를 통해 수직선배열의 각각의 수신기에서 평균 수평 거리에 따른 전달손실을

도출할 수 있었다. 전달손실 측정이 진행된 실험 정선의 측정 거리는 약 590 ~ 6300 m, 인데 그림 3.4.14는 수직 선배열의 21개 수신기 중, 수층의 중층에 위치한 10번째 수신기에서 수신한 전달손실 곡선을 표시한다. 그림 3.4.14(a)는 저주파 음원과 수직선배열의 수평거리가 최단 거리에 위치하고 있는 경우인 약 590 m 지점의 전달손실 곡선이며, 그림 3.4.14(b)는 최장 거리에 해당하는 약 6300 m 지점에서의 전달손실 곡선을 나타낸다. 저주파 대역인 140, 240, 410 Hz에서 수신된 신호는 일반적으로 저주파수 대역에서 높은 수중 소음을 갖는 물리적 특성(조사선으로부터 방사되는 선박소음, 인근 해역에서 이동 중인 선박 소음, 주변 소음)으로 인해 마스킹된 것으로 판단되며, 605, 800, 930 Hz에서 수신된 신호가 비교적 신호대잡음비(signal to noise ratio)가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한, 상대적 측정 거리가 짧은 약 590 m의 경우가 각 주파수별 수신 준위가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 21개의 수중청음기에 수신된 신호의 전달손실은 평균적으로 $17\log_{10}(R) - 19\log_{10}(R)$ 의 값을 가지며, 수중청음기의 수중에 계류된 수심에 따라 측정된 전달손실의 차이가 발생하는 것을 확인하였다(그림 3.4.15).

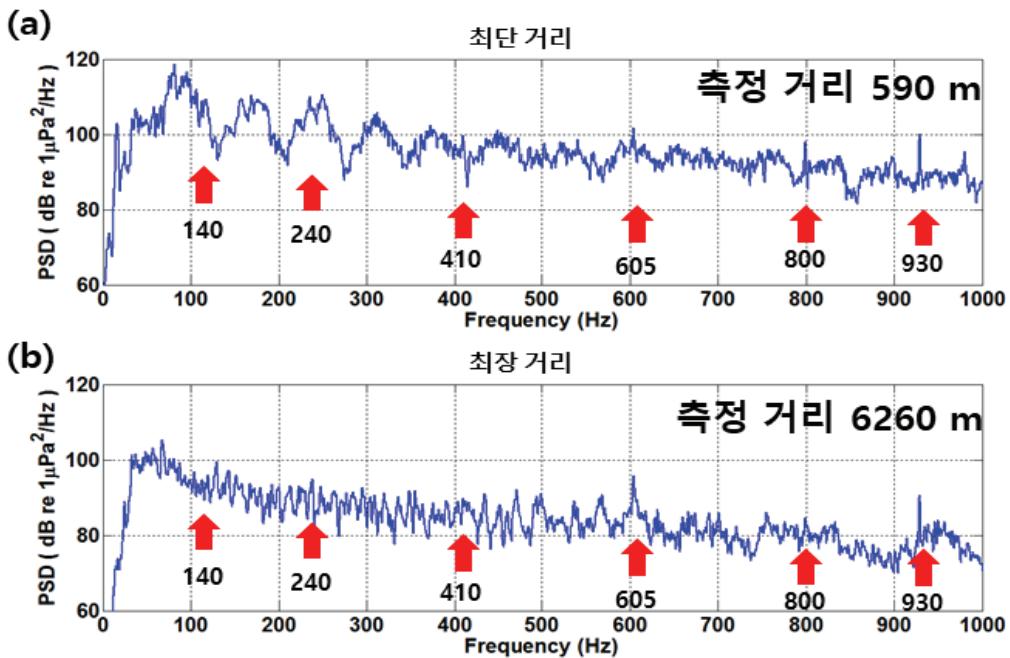


그림 3.4.14. 음파 전달 특성 음향 자료의 주파수 분석 결과, (a)송·수신기 거리가 최단거리인 경우(약 590 m), (b)송·수신기 거리가 최장거리인 경우(약 6260 m)

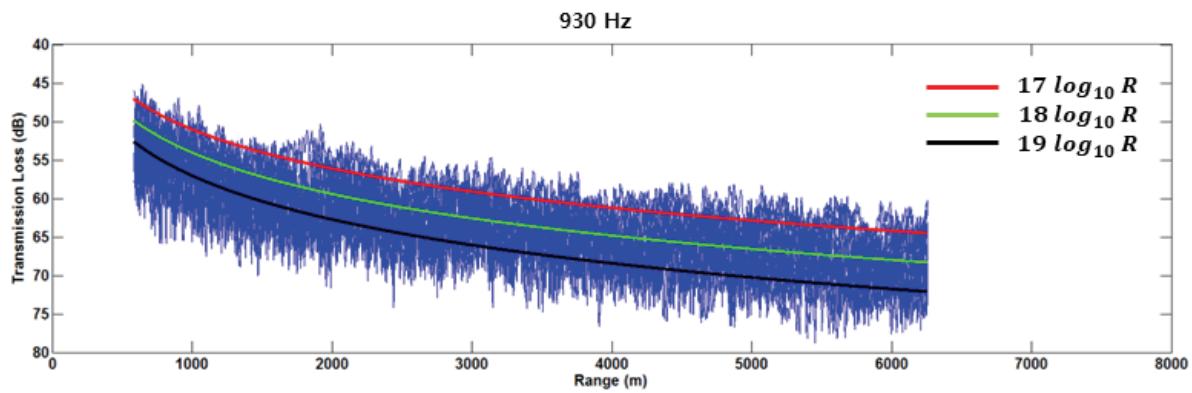


그림 3.4.15. 수직선배열의 21개 수중청음기에 수신된 음파전달 거리에 따른 음파전달 손실 (주파수: 930 Hz)

수직선 배열 내의 21개 수중 청음기는 전체 평균 수심 102 m 중에서 약 30 ~ 90 m에 위치하였으며, 부착된 5개의 수심 센서(depth recorder)를 이용하여 수직 선배열 센서의 수심과 선형성을 확인하였다(그림 3.4.16).

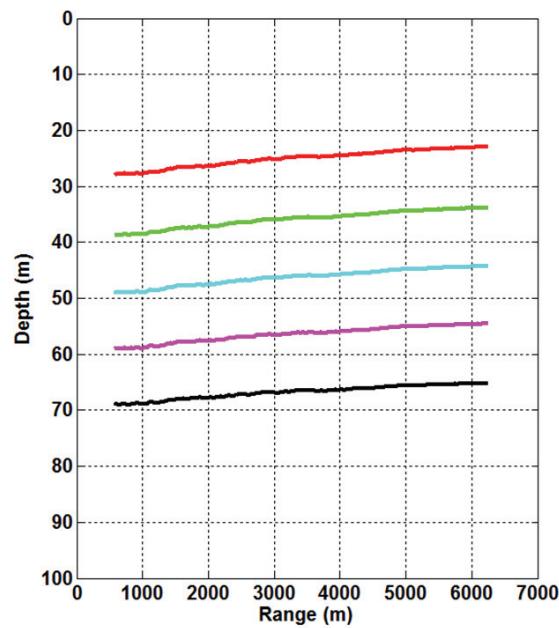


그림 3.4.16. 전달손실 측정 실험(동-서 방향)이 진행되는 동안 수직선배열의 수심 변화

수직선 배열은 동-서 방향의 전달손실 측정 실험이 진행되는 동안 조류에 의한 영향으로 약 5 m의 수심 변화가 발생한 것을 확인하였다. 이를 보정하기 위해 수직선 배열 센

서의 각 수신기에 수신된 신호로부터 거리에 따른 전달손실을 추정한 후 인접한 수신기에서 수신된 전달손실과 내삽법을 이용해서 수심 변동성을 보정한 거리 및 수심에 따른 전달손실 음장(transmission loss field)을 계산하였다(그림 3.4.17). 이렇게 획득한 연구해역의 전달손실 음장으로부터 해저면이 102 m의 평균 수심에서 ± 1 m 이내로 비교적 평坦한 해저면을 갖고 해저면파의 상호작용이 큰 구간인 2000 m 이내의 음장 중에 수직선 배열 센서의 중간 수심에 해당하는 60 m 수심에서의 전달손실을 추출하였다(그림 3.4.18). 이후 진행될 지음향인자 역산은 이 구간에서 추출한 전달손실 자료 가운데 SNR(signal to noise ratio)이 좋은 930 Hz 신호를 대표 주파수 신호로 선택하여 거리에 따른 전달손실을 사용한다.

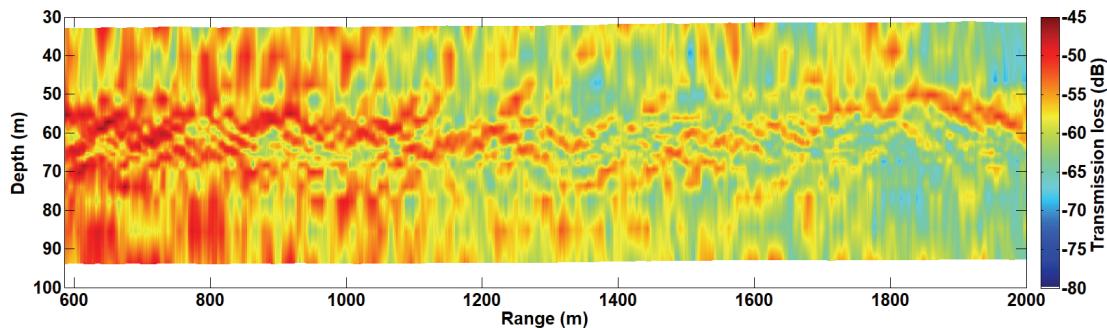


그림 3.4.17. 음파 전달 실험에서 측정된 수신 신호로 계산된 실측 전달손실 음장

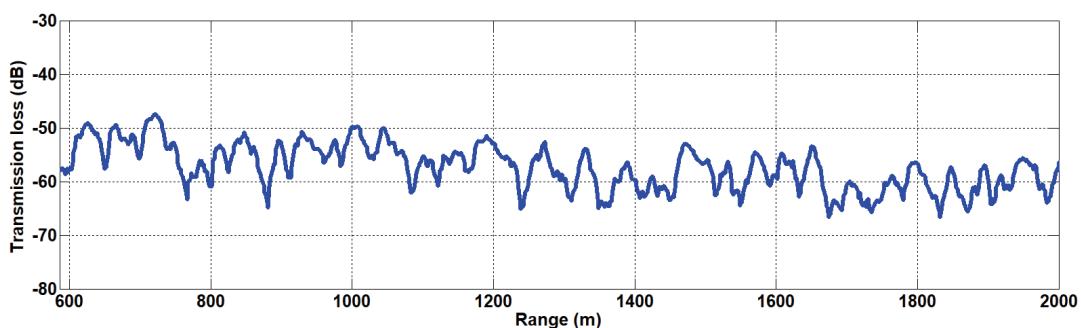


그림 3.4.18. 수심 60 m에서의 전달손실 곡선

제 5 절 연구해역 음파전달 관측자료 분석을 통한 지음향인자 역산

앞서 4절에서는 연구해역에서 측정된 음파 전달 관측 자료를 분석하여 해당 실험 정선에서의 거리에 따른 전달손실을 추출하였다. 연구해역과 같이 수심이 약 100 m인 천해 해양 환경에서의 음파 전달은 경계면의 간섭 영향이 크게 나타났다. 이러한 영향이 반영된 음향 자료를 이용하여 역으로 퇴적층 물성을 추정할 수 있다. 최근 해저 퇴적층의 지질학적 물성을 파악하는 방법으로 수중음향을 이용한 다양한 역산 기법이 제시되고 있으며, 본 연구에서도 연구해역에서 측정된 저주파 및 중주파수 음파 전달손실 자료를 이용하여 음파 전달 모델 결과와의 비교를 통해 해당 해역의 퇴적층 물성을 역으로 추정하는 연구를 수행하였다.

1. 퇴적층 지음향인자 역산 알고리즘

측정된 음향 자료를 이용한 퇴적층 지음향인자 역산은 크게 2가지 단계로 나눠진다. 먼저 실측 음향 자료에 적합한 순방향 모델(Forward model)을 선정하고 이 순방향 모델을 이용하여 실측 음향 자료와 비교될 복제 모델 자료를 구현한다. 복제 모델 자료는 역산하고자 하는 지음향인자를 반영할 수 있고, 이후 필요한 최적화 기법, 목적 함수 설정 등과 같은 역산 과정을 수행하게 된다(그림 3.5.1).

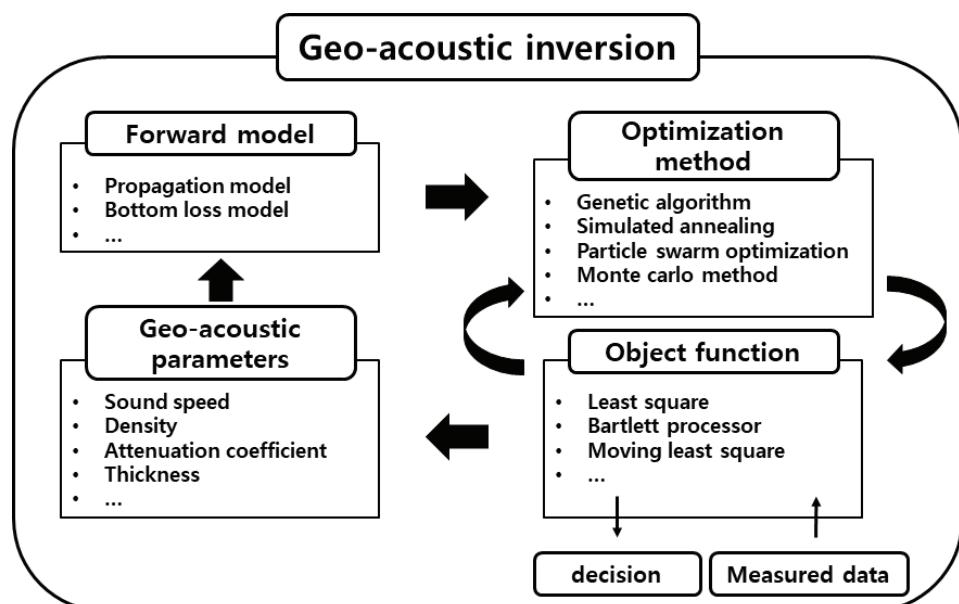


그림 3.5.1. 지음향인자 역산 과정의 흐름도

순방향 모델에는 수중에서의 음파 전달을 수치적으로 예측하기 위한 음향모델, 수층과 퇴적층의 음속, 밀도비와 주파수 차이에 따른 음파의 반사 및 투과 손실 모델 등이 있는데, 이 경우 측정된 음향 자료의 성격과 분석 목적에 따라 역산에 적합한 순방향 모델이 선정되어야 한다. 구현된 복제 모델 자료는 최소 제곱법(Least-square estimation), 바틀렛 프로세서(Bartlett processor) 등과 같은 목적 함수(Object function)에 따라 실측 음향 자료와 교차 상관성을 반복적으로 비교 평가하고 동시에 최적해인지 아닌지를 판별하게 된다. 이와 같이 목적함수를 통한 실측 음향 자료와 복제 모델 자료의 반복적인 비교가 진행되는 동안, 순방향 모델에 정의된 역산 인자의 다차원의 해 공간에서 효율적으로 최적해를 탐색하기 위해 유전자 알고리즘(Genetic algorithm), 입자 군집 최적화 알고리즘 (Particle swarm optimization), 시뮬레이티드 어닐링(Simulated annealing) 등과 같은 최적화 기법(Optimization method)이 적용된다. 최종적으로는 실측 음향 자료와 복제 모델 자료가 가장 잘 부합되는 최적해를 선정하게 되며, 역산된 해가 내포하는 불확실성에 대한 통계적인 특성을 평가하게 된다.

2. 최적화 기법 선정

다차원의 해를 찾는 역산에서 최적화(Optimization)란 어떤 목적 함수(Object function)의 함수 값을 최대화 또는 최소화시키는 최적 인자들의 조합을 찾는 과정이다. 일반적으로 최적해 탐색 방법은 지역 최적화(Local optimization)와 전역 최적화(Global optimization)로 구분된다. 지역 최적화는 탐색된 인자 주변에서 최적 인자를 찾기 위한 탐색이 수행되며, 전역 최적화는 탐색된 인자 주변 외에 탐색 범위 내의 전체 공간에서 탐색이 수행된다. 따라서 지역 최적화는 현재 탐색 지점 외의 다른 공간의 최적 인자를 탐색하지 못 할 수 있다. 반대로 전역 최적화는 현재 탐색 지점 주변의 최적 인자를 탐색하지 못할 가능성도 존재한다. 지역 최적화의 대표적인 알고리즘에는 경사법(Gradient method)이 있으며, 현재 점을 시작으로 새로운 점을 탐색하는 과정이 함수의 경사도를 사용하기 때문에 인접 탐색 점과의 경사에 따른 탐색 방향을 갖게 되는 기법이다. 반면 대표적인 전역 최적화의 알고리즘에는 무작위 탐색법(Random search method)이 있고, 무작위로 선택된 인자들에 따라서는 그 탐색 방향이 결정되는 비방향성의 탐색 기법이다.(Booker, 1987; Michalewicz, 1996; Gen and Cheng, 1997) 따라서 지역 최적화 탐색은 탐색 공간에 대한 전역 탐색의 부재로 지역 해에 빠질 가능성이 있으며, 전역 최적화 탐

색은 현재 탐색 점의 근처의 최적해를 찾지 못하고 탐색 인자가 많아짐에 따라 비능률적이라는 단점이 있다.

그러므로 다차원의 탐색 인자를 찾는 퇴적층 음향특성 역산 알고리즘에는 전역 탐색과 지역탐색이 적절하게 조화된 최적화 기법이 필요하다. 본 연구에서는 이와 같은 탐색 기법인 유전자 알고리즘을 사용하여 정의된 역산 인자의 다차원 해 공간에서 효율적으로 최적해를 탐색하는 연구를 수행하였다.

○ 유전자 알고리즘(GA, Genetic Algorithm)

유전자 알고리즘(Genetic Algorithms)은 1975년에 John Holland에 의해 개발된 전역 최적화 기법으로, 생물계의 진화를 설명하는 다원의 적자생존을 기본 개념으로 하는 계산 모델이다. 유전자 알고리즘은 염색체(chromosomes)들을 갖는 개체, 적합성에 따른 선택, 새로운 자손을 생산하기 위한 교차, 새로운 자손의 무작위 변이와 같은 과정을 겪으며, 염색체들을 갖는 모집단으로부터 교차(crossover), 변이(mutation)를 통해 새로운 개체로 진화하는 방법을 사용한다.(Mitchell, 1995)

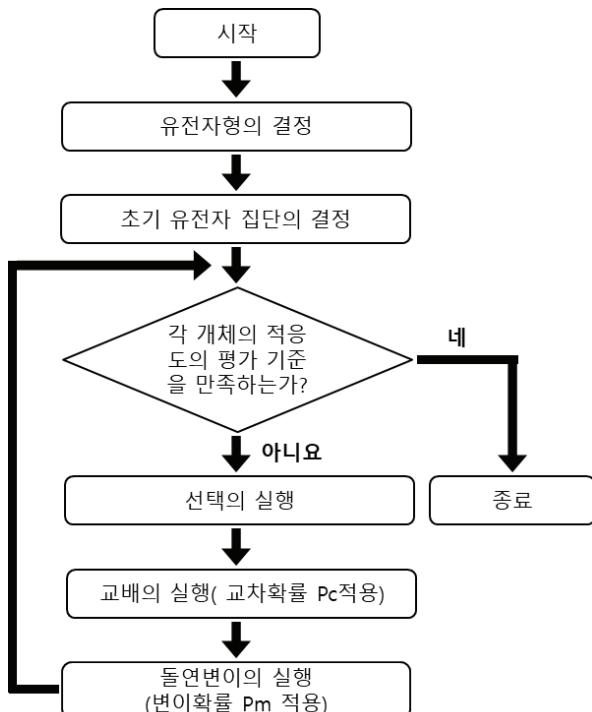


그림 3.5.2. 유전자 알고리즘 흐름도

유전자 알고리즘을 이용한 최적해 탐색 과정은 그림 3.5.2와 같이 나타낼 수 있다. 먼저 해결되기 위해 정의된 명확한 문제와 진화 현상이 발생할 초기 집단이 필요하고, 이 초기 집단은 해 공간 내에 무작위로 분포되도록 선택되거나 경험적인 방법으로 선택될 수 있다. 선택된 초기 집단은 제공된 목적함수를 이용하여 제시된 문제와의 적합도를 평가한다. 상대적으로 높은 적합도를 갖는 개체들을 선택하여 서로 교배를 통해 재결합하며, 사용자가 설정한 교차 확률(P_c)로 상호간의 유전정보가 공유되면서 집단에 새로운 개체가 생성된다. 그런데 새로운 개체가 생성될 때, 사용자가 설정한 돌연변이 확률(P_m)로 선택된 개체의 하나 이상의 유전 정보를 임의로 변경함으로써 폭 넓은 탐색 공간을 확보할 수 있게 된다(그림 3.5.3). 이와 같은 단계가 끝나면 현재의 모집단을 새로운 모집단으로 바꾼 다음 위의 과정을 반복하는 것이 유전자 알고리즘을 이용한 최적해 탐색 과정이다.(Mahfoud and Goldberg, 1995)

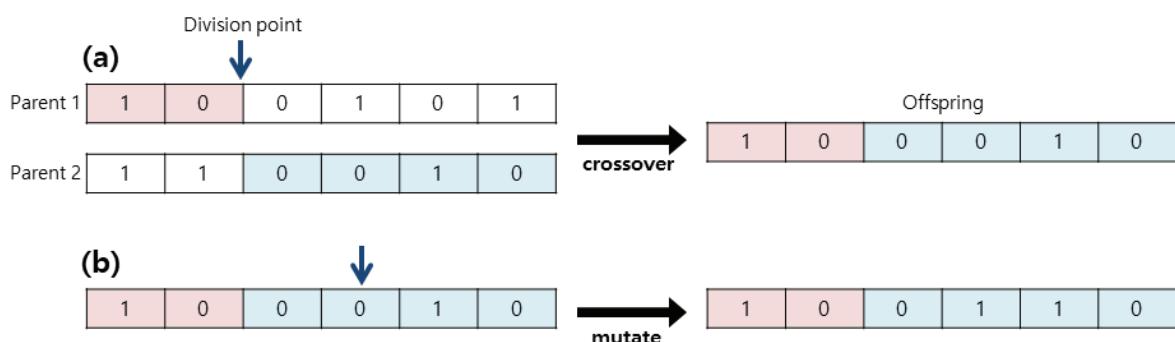


그림 3.5.3. 유전자 알고리즘의 연산자 예시 (a)교차 (b)변이

이러한 유전자 알고리즘은 모집단을 생성하는 탐색 공간 범위 이외의 범위에 존재하는 최적해를 생성할 수 없다. 또 집단 크기, 변이 확률, 교차율과 같은 알고리즘 설정 값들에 의한 탐색 성능도 달라질 가능성이 있는 등의 단점이 있다. 따라서 최적해 탐색 공간에 대한 적절한 범위를 설정하기 위한 사전 조사가 중요하며, 사용자의 각 알고리즘 설정 값들에 대한 적절한 조정 과정이 필요하다.

3. 음파 전달 모델 설정

퇴적층 음향특성은 퇴적층 음속, 밀도, 감쇠계수 등과 같은 지음향인자에 종속적이며,

해양에서 퇴적층 음향특성을 포함한 음파 전달은 음파 전달 모델을 이용하여 수치적으로 예측이 가능하다. 따라서 퇴적층 지음향인자를 역으로 추정하기 위해서는 퇴적층 음향특성을 포함하고 있는 실측 음향 자료와 비교될 복제 모델 자료가 필요하다. 이 복제 모델 자료는 역산하고자 하는 지음향인자를 반영할 수 있는 적합한 음파 전달 모델을 순방향 모델로 사용하여 구현할 수 있다. 일반적인 음파 전달 모델에는 RAM, BELLHOP, KRAKEN 등과 같은 모델이 있으나, 각 음파 전달 모델에 사용되는 이론으로는 포물선 방정식(parabolic equation), 음선이론(ray theory), 정상모드 이론(Normal mode theory) 등이 있다.

포물선 방정식을 사용하는 대표적인 모델인 RAM은 저주파 대역의 음파전달 예측에 주로 사용되며, 음파의 전파 거리에 대해 단계적으로 음장을 계산하므로 거리 독립 환경 뿐만 아니라 거리 종속 환경의 음파 전달 예측이 가능하다.

음선 이론을 사용하는 음파 전달 모델인 BELLHOP은 고주파 음파 전달 예측에 주로 사용되며, RAM과 마찬가지로 전파 거리에 대한 단계적 음장 계산을 통해 거리 종속 음파 전달 예측이 가능하다. 또한, 음선의 이동 방향과 도달 시간을 도출할 수 있기 때문에 음파 전달을 파악하고 이 과정에서 발생하는 여러 가지 물리적 현상을 이해하는 데 유용하게 사용된다. 하지만 반사와 투파가 동시에 발생하는 해저면의 경우, 하나의 음선이 다수의 음선으로 분리될 수 있음에도 불구하고 투파되는 성분을 무시하고 반사되는 음선에 대해서만 추적하기 때문에 하부 퇴적층에 대한 영향을 고려하지 못할 수 있다. 따라서 다중반사가 지배적인 천해에서 저주파 대역의 음파 전달을 예측하는 경우에는 적합하지 않다(Westwood, 1987).

정상 모드 모델을 사용하는 KRAKEN은 저주파 음파 전달 예측에 주로 사용되며, 거리 독립문제에 있어서 매우 정확한 해를 제공한다. 그러나 접근 방식이 복잡하여 사용 주파수가 높아지거나 거리 종속의 음파 전달을 예측하는 경우에는 계산 시간이 상당히 증가하게 되어 실용적이지 못하다는 단점을 갖는다(Jensen, 1994).

따라서 본 연구에서는 연구해역의 거리 종속 환경에서 저주파 및 중주파수 음파 전달에 대한 예측을 수행하기 위해, 포물선 방정식을 기반으로 하는 음파 전달 모델인 RAM을 역산 과정의 순방향 모델로 선정하여 연구해역의 퇴적층 지음향인자 역산을 수행하였다.

○ 포물선 방정식(Collins, 1995)

포물선 방정식은 식 (3.5.1)의 파동방정식으로부터 유도된다.

$$\nabla^2 P = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (3.5.1)$$

여기서 ∇^2 은 라플라시안(Laplacian) 연산자, P 는 음압, c 는 음속, t 는 시간을 나타낸다. 파동방정식의 해를 $P = p(x, y)e^{-jw t}$ 로 가정하여 식 (3.5.1)에 대입하면 헬름홀츠(Helmholtz) 방정식을 유도할 수 있다[식 (3.5.2)].

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (3.5.2)$$

여기서 k 는 파수(wave number)이다. 이를 원통형 좌표계로 변환하면, 다음을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \rho \frac{\partial p}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + k^2 p = 0 \quad (3.5.3)$$

여기에 음압으로부터 원통형 확산(\sqrt{r})을 제거하고, 거리 독립 원거리 음장을 가정하면 식 (3.5.4)를 얻을 수 있고

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \rho \frac{\partial p}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + k^2 p = 0 \quad (3.5.4)$$

이를 인수분해 하여 외향파(Outgoing wave)와 내향파(Incoming wave)로 성분을 분리하고[식 (3.5.5)] 외향파만을 취하면 식 (3.5.6)이 얻어진다.

$$\left(\frac{\partial}{\partial r} + ik_0 (1 - X)^{1/2} \right) \left(\frac{\partial}{\partial r} + ik_0 (1 + X)^{1/2} \right) p = 0 \quad (3.5.5)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial r} - ik_0(1+X)^{1/2} \right) p = 0 \quad (3.5.6)$$

여기서 $X = k_0^{-2} \left(\rho \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} + k^2 - k_0^2 \right)$ 이다.

식 (3.5.6)의 해는 다음과 같다.

$$p(r + \Delta r, z) = \exp(i k_0 \Delta r (1+X)^{1/2}) p(r, z) \quad (3.5.7)$$

$$p(r + \Delta r, z) = \exp(i k_0 \Delta r) \left(1 + \sum_{j=1}^n \frac{a_n X}{1 + b_n X} \right) p(r, z) \quad (3.5.8)$$

$$a_n = \frac{2}{2N+1} \sin^2 \frac{n\pi}{2N+1}, b_n = \cos^2 \frac{n\pi}{2N+1}$$

여기서 $(1+X)^{1/2}$ 을 유리수 근사법을 사용하여 식 (3.5.8)을 유도할 수 있다. 이를 이용하여 거리 단계별 음장을 계산함으로서(split step) 최종적으로 거리 종속 음장을 예측할 수 있다.

4. 연구 해역 음향 자료의 최적 지음향인자 역산 기법 선정

연구해역에서 측정된 저/중주파수 음파 전달손실 자료를 이용한 연구해역의 퇴적층 지음향인자 역산을 수행하기에 앞서 역산 방법에 대한 사전 검증을 위해 포물선 방정식 기반의 음파 전달 모델(RAM)을 이용함으로써 그림 3.5.4와 같은 2층 퇴적층 구조를 갖는 간단한 도파관에서 계산된 기준 전달손실을 이용한 지음향인자 역산을 수행하였다.

검증 방법은 특정 음파 전달 환경을 가정한 음파 전달 모델 결과(그림 3.5.5)를 기준 전달손실(measured data)로 설정한 후, 해당 음파 전달 환경에서 지음향인자 설정 값을 변경해가면서 반복 구현된 복제 음장을 기준 전달손실과 비교하는 방식으로 최적해 탐색이 수행되었다. 수층의 수심은 100 m, 송·수신기 수심은 각각 50 m이며 표층 퇴적층 두께는 20 m로 설정하였다. 수층은 1500 m/s의 등음속 구조이며, 표층 퇴적층 및 하부 퇴적층의 초기 지음향인자 설정 값은 각각 음속 1552 m/s, 1761 m/s, 밀도 1.56 g/cm^3 , 2.01 g/cm^3 , 감쇠계수 0.15 dB/m/kHz , 0.59 dB/m/kHz 로 구성하였다. 총 전파거리는 3000

m이다(그림 3.5.4). 이처럼 이미 알고 있는 수층 및 퇴적층 환경에서 계산된 기준 전달손실을 이용하여 역으로 퇴적층의 지음향인자를 추정하였고 이를 통해 전달손실을 이용한 퇴적층 구조 및 지음향인자 역산 방법의 타당성도 확인하고자 하였다.

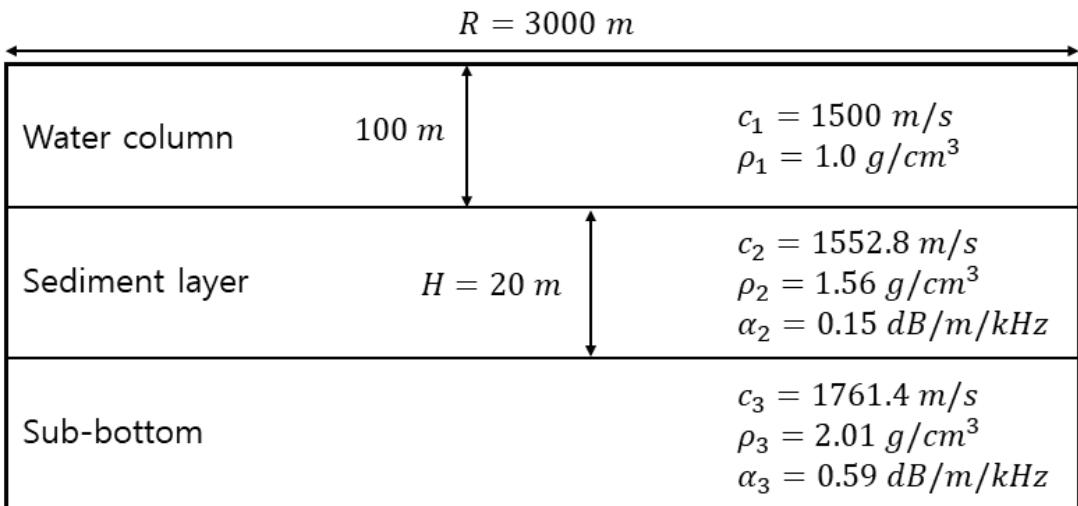


그림 3.5.4. 지음향인자 역산 방법을 검증하기 위한 음파 전달 환경 모식도

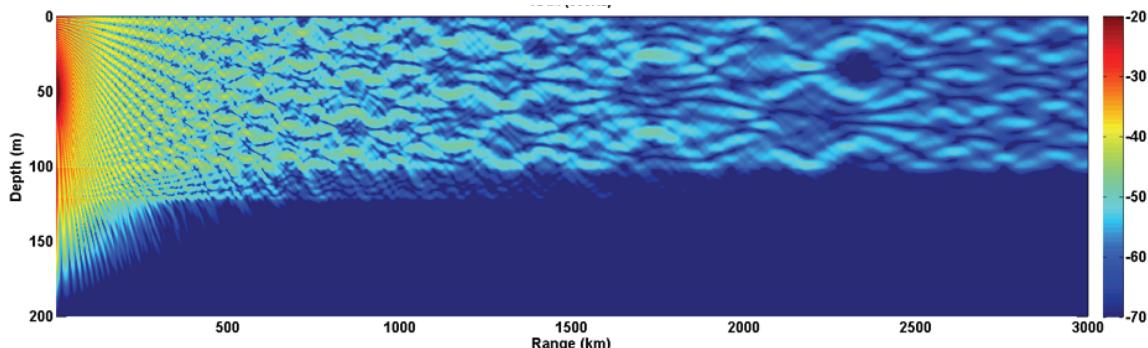


그림 3.5.5. 특정 음파 전달 환경을 가정한 음파 전달 모델의 시뮬레이션 결과 (transmission loss field)

- 특정 음파 전달 환경에서 모의된 전달손실 곡선을 이용한 지음향인자 역산 가능성 검증 전달손실 자료를 이용한 퇴적층 지음향인자 역산 방법 검증을 위한 첫 번째 역산 방법은 특정 수심에서의 거리에 따른 전달손실 곡선을 기준 전달손실 곡선과 비교하여 최적 지음향인자를 탐색하는 것이다. 특정 음파 전달 환경에서 수행된 음파 전달 모델 시뮬레이션 결과의 수층의 중층인 50 m에 대한 전달손실 곡선을 기준 전달손실 곡선으로 설정

하였다. 퇴적층의 지음향인자는 특정 탐색 범위 안에서 변동하며, 특정 지음향인자가 적용된 음파 전달 모델로 예측된 전달손실과 참값으로 설정된 전달손실 곡선을 반복적으로 비교하면서 최적해를 탐색하는 방식으로 해저면의 최적 지음향인자를 역추정하였다. 표 3.5.1은 해저면 지음향인자와 그 탐색 범위를 나타낸 표이다.

사용한 주파수는 연구해역에서 전달손실 측정에 사용된 주파수 대역인 500 Hz 신호를 사용하였다. 퇴적층 지음향인자 역산에 사용된 최적화 알고리즘은 유전자 알고리즘을 사용하였고, 최적화 과정에 사용된 목적함수는 최소 제곱법(Least-square estimation)을 사용하였다(식 3.5.9). X_i 는 기준 전달손실 곡선, M_i 는 복제 전달손실 곡선을 의미한다.

$$\phi(m) = (X_i - M_i)^2 \quad (3.5.9)$$

최적화 과정에 사용된 재생산 가중치, 교차율, 돌연변이 확률은 각각 지음향인자 역산에 일반적으로 사용되는 50 %, 80 %, 5 %로 설정하였다. 유전자 알고리즘에서 사용된 초기 집단은 32 개체로 구성되며 100 세대 반복을 통해 한 번의 최적화 과정에 3,200번의 음향 모델링을 수행하였다. 이와 같은 최적화 과정을 10회 반복 수행함으로써 전체 32,000번의 음향모델링을 통해 지음향인자를 역으로 추정하였다.

그림 3.5.6은 앞서 구성한 음파 전달 환경에서 RAM을 사용하여 얻은 기준 전달손실(빨간색 실선)과 이 기준 전달손실을 이용하여 역추정된 지음향인자로 모의한 복제 전달손실 결과(검은색 실선)이다.

표 3.5.1. 2층 구조 퇴적층에서 각 역산 인자들의 종류와 탐색 범위

Geo-acoustic parameters	Lower boundary	Upper boundary
1st P-wave sound speed(m/s)	1400	1800
1st Sediment density(g/cm^3)	1.0	2.5
1st P-wave attenuation($dB/m/kHz$)	0	1
1st Sediment thickness(m)	0	50
Sub-bottom P-wave speed(m/s)	1400	1800
Sub-bottom density(g/cm^3)	1.0	2.5
Sub-bottom P-wave attenuation ($dB/m/kHz$)	0	1
Source depth(m)	40	60

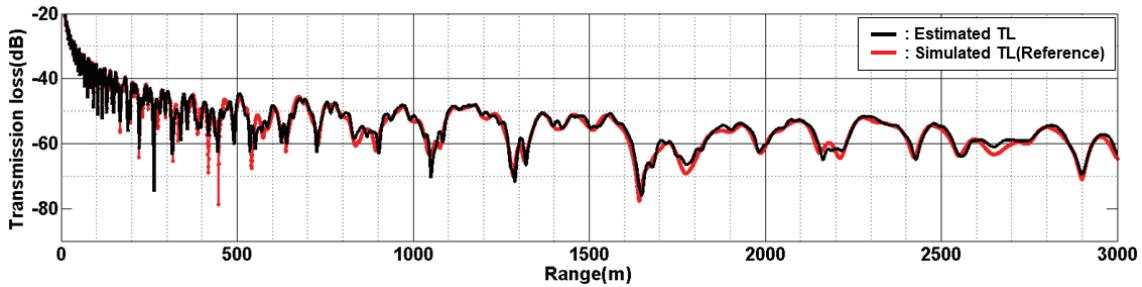


그림 3.5.6. 기준 전달손실 곡선과 역산을 통해 추정된 전달손실 곡선(500 Hz)

역산 결과 가운데서 시뮬레이션을 통한 기준 전달손실 곡선은 복제 전달손실 곡선과 거의 유사한 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있었으며(그림 3.5.6), 역으로 추정된 지음향인자는 표 3.5.2와 같다.

표 3.5.2. 기준 전달손실을 이용한 지음향인자 역산 결과

Geo-acoustic parameters	Inversion results	True values
1st P-wave sound speed(m/s)	1558.5 ± 2.6	151552.82.8
1st Sediment density(g/cm^3)	1.78 ± 0.08	1.56
1st P-wave attenuation($dB/m/kHz$)	0.28 ± 0.05	0.15
1st Sediment thickness(m)	27.1 ± 6.0	20
Sub-bottom P-wave speed(m/s)	1610.7 ± 64.6	1761.4
Sub-bottom density(g/cm^3)	1.78 ± 0.18	2.01
Sub-bottom P-wave attenuation($dB/m/kHz$)	0.36 ± 0.08	0.59
Source depth(m)	50.1 ± 0.02	50

표 3.5.2에서 시뮬레이션을 통해 얻은 천해 환경에서의 장거리 음파 전달손실 곡선을 이용한 지음향인자 역산 결과는 평균값(Mean value)와 그 표준 편차(Standard deviation)로 나타냈다. 이는 시뮬레이션을 통한 기준 전달손실 모의 과정에서 설정했던 초기 지음향인자와 비교한 것이다.

천해 환경에서 장거리 전파를 가정한 도파관이었기 때문에 표층에 비해 하부 퇴적층의 역산 민감도(Sensitivity)가 낮은 환경이었다. 이에 따라 표층의 역산 결과가 초기 설정값과 상당히 유사한 것에 비해 하부 퇴적층의 역산 결과는 초기 설정 값과는 다소 차이를 보였다. 따라서 전달손실을 이용하여 표층의 지음향인자 역산이 가능한 것을 확인하였고, 동일한 과정으로 연구해역 실험에서 획득한 전달손실 자료를 이용하여 연구해역의 지음향인자 역산을 수행한 후 그 결과를 연구해역에서 획득한 표층 지음향 층서 모델과 비교하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

○ 전달손실 음장의 정합장 처리 기법(Matched-Field Processing)을 이용한 지음향인자 역산 가능성 검증

앞서 모의한 음파 전달 환경과 동일한 환경에서 포물선 방정식 기반의 음파 전달 모델(RAM)로 기준 전달손실 음장을 모의하였으며, 복제 전달손실 음장과의 정합장 처리 과정을 통해 지음향인자 역산을 수행하였다. 수층에서 계산된 전달손실 음장의 전파거리 3000 m, 수신기 수심 1~100 m 사이에 5 m 간격의 수심에 대한 음압을 각각 추출하여 정합장 처리를 수행하였다. 각 수신기 위치에서의 음압으로 계산된 신호 세기(d , Intensity)를 기준 상호스펙트럼 밀도 행렬(\hat{R} , CSDM, Cross Spectral Density Matrix)로 구성하였으며(식 3.5.10), 이를 복제 음장의 상호스펙트럼 밀도 행렬과 반복적인 비교를 통해 지음향인자를 역산하는 방법의 타당성을 확인하고자 하였다(Huang and Hodgkiss, 2004).

$$\hat{R} = \frac{dd^\dagger}{Tr(dd^\dagger)}, \quad (3.5.10)$$

상호스펙트럼 밀도 행렬(\hat{R})은 최대값이 1인 데이터 벡터를 의미하며, d^\dagger 는 각 수신기 위치에서 음압으로 계산된 신호세기(d)의 전치행렬(Transpose matrix)을, Tr 은 행렬의 대각 합을 이용해서 정규화하는 함수를 의미한다. 최적화 과정에 사용된 목적함수는 바틀렛 기법(Bartlett processor)을 사용하여 기준 상호스펙트럼 밀도 행렬과 복제 상호스펙트럼 밀도 행렬(W)과의 상관성을 반복해서 비교하였다(식 3.5.11).

$$P = \frac{W^\dagger \hat{R} W}{W^\dagger W}, \quad (3.5.11)$$

해저면 지음향인자의 탐색 범위 및 사용한 주파수는 앞선 전달손실 곡선을 이용한 지음향인자 역산 방법 검증에서 사용한 값과 동일하게 설정하였다. 역산에 사용된 최적화 알고리즘은 유전자 알고리즘을 사용하였다. 최적화 과정에 사용된 재생산 가중치, 교차율, 돌연변이 확률은 각각 지음향인자 역산에 일반적으로 사용되는 50%, 80%, 5%로 설정하였다. 초기 집단은 16개체, 100세대 반복을 통해 한 번의 최적화 과정에 1,600번의 음향 모델링을 수행하였으며, 이와 같은 최적화 과정을 5회 반복 수행함으로써 총 8,000번의 음향 모델링을 통해 지음향인자를 역으로 추정하였다. 지음향인자 역산 결과는 최적해의 평균값(Mean value)과 그 표준 편차(Standard deviation)로 나타냈다(표3.5.3).

표 3.5.3. 전달손실 음장의 정합장 처리 기법을 이용한 지음향인자 역산 결과

Geo-acoustic parameters	Inversion results	True values
1st P-wave sound speed(m/s)	1560.4 ± 79.4	151552.82.8
1st Sediment density(g/cm^3)	2.12 ± 0.15	1.56
1st P-wave attenuation($dB/m/kHz$)	0.31 ± 0.16	0.15
1st Sediment thickness(m)	28.6 ± 11.2	20
Sub-bottom P-wave speed(m/s)	1591.0 ± 98.3	1761.4
Sub-bottom density(g/cm^3)	1.83 ± 0.22	2.01
Sub-bottom P-wave attenuation($dB/m/kHz$)	0.19 ± 0.11	0.59
Source depth(m)	49.8 ± 4.6	50

그림 3.5.7는 각각 앞서 구성한 음파 전달 환경에서 계산된 기준 상호스펙트럼 밀도 행렬(Simulated CSDM)과 이 상호스펙트럼 밀도 행렬을 이용하여 역추정된 지음향인자로 모의한 최적 복제 상호스펙트럼 밀도 행렬(Estimated CSDM)을 나타낸다. 또 음압의 실수부와 허수부로 구성된 상호스펙트럼 밀도 행렬이 이것과 서로 유사한 것을 확인할 수 있다.

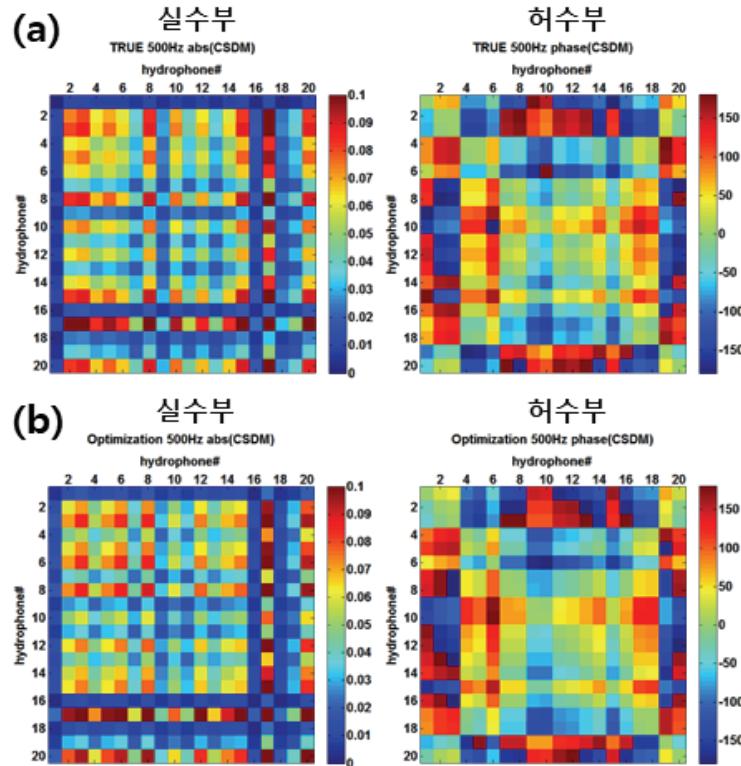


그림 3.5.7. 각 수심(1:5:100m)에서 추출한 상호스펙트럼밀도 행렬 결과(좌 : 실수부, 우 : 허수부), (a) 기준 전달손실 음장에서 추출한 결과(simulated CSDM), (b) 최적 복제 전달손실 음장에서 추출한 결과(Estimated CSDM).

○ 저주파 및 중주파수 음파 전달손실 측정 실험의 최적 지음향인자 역산 기법 선정
음파 전달손실 측정 실험의 최적 지음향인자 역산 기법을 선정하기 위해 앞서 특정 음파 전달 환경을 모의하여 전달손실 결과를 도출하였다. 그리고 이를 이용하여 전달손실 곡선을 이용한 지음향인자 역산 방법과 전달손실 음장의 정합장 처리 기법을 이용한 지음향인자 역산 방법에 대해 그 역산 가능성을 확인하였다. 두 역산 방법 모두 표층 퇴적층의 지음향인자 및 음원 수심에 대한 역산이 잘 수행될 수 있음을 확인하였다. 그러나 전달손실 음장의 정합장 처리 기법을 이용한 지음향인자 역산 방법은 전달손실 곡선을 이용한 지음향인자 역산 방법에 비해 한 번의 최적화 과정에 상당히 많은 연산 시간이 소요되며, 원거리 음파 전달 모의 과정에서 발생한 오차의 반복 누적 계산으로 인해 부정확한 역산 결과가 다수 발생하는 것을 확인하였다. 이는 정합장 처리 기법을 이용한 지음향인자 역산 방법이 소요되는 연산 시간에 비해 그 정확성이 상당히 떨어질 수 있음을 의미한다.

연구해역 음파 전달손실 자료를 이용한 연구해역의 지음향인자 역산은, 거리 종속 환경의 음파 전달 모델링이 수행되어야 하며, 보다 정확한 역산을 위해 최적화 과정의 많은 반복 수행이 필요하다. 따라서 저주파 및 중주파수 음파 전달손실 실험 자료를 이용한 해당 연구해역의 퇴적층 지음향인자 역산은 특정 수심에서 측정된 전달손실 곡선을 이용하여 복제 전달손실 곡선과의 반복적인 비교를 통한 역산 방법을 최적 역산 기법으로 선정하여 지음향인자 역산을 수행하였다.

5. 지음향 층서 모델 결과와 지음향 역산 결과의 비교분석

○ 연구해역에서 측정된 음파 전달손실 곡선을 이용한 지음향인자 역산

연구해역 음파 전달손실 자료를 이용하여 연구해역의 지음향인자 역산을 수행하기 위해서는 거리 종속 음파 전달 모델의 시뮬레이션이 반복적으로 수행되어야 한다. 따라서 연구해역의 환경적 특성을 보다 정확히 고려하는 것이 정확한 역산을 수행하는 데 필수적이다. 이를 위해 복제 음파 전달손실 곡선을 구현하기 위한 거리 종속 음파 전달 모델에는 멀티빔 음향 측심기(MBES, Multi-Beam Echo Sounder)로 조사된 지형 정보를 거리 종속 환경 인자로 사용하였다. 그림 3.5.8은 멀티빔 음향 측심기로 측정한 연구해역의 지형 정보와 퇴적물 샘플링이 수행되었던 정점을 함께 나타낸 그림인데, 이를 통해 앞서 측정 전달손실의 분석 구간으로 설정하였던 수직선 배열 센서로부터 2000 m 이내 구간에 해당되는 퇴적물 코어 샘플링 정점은 D03 정점(피스톤 코아 샘플링 정점)임을 알 수 있다.

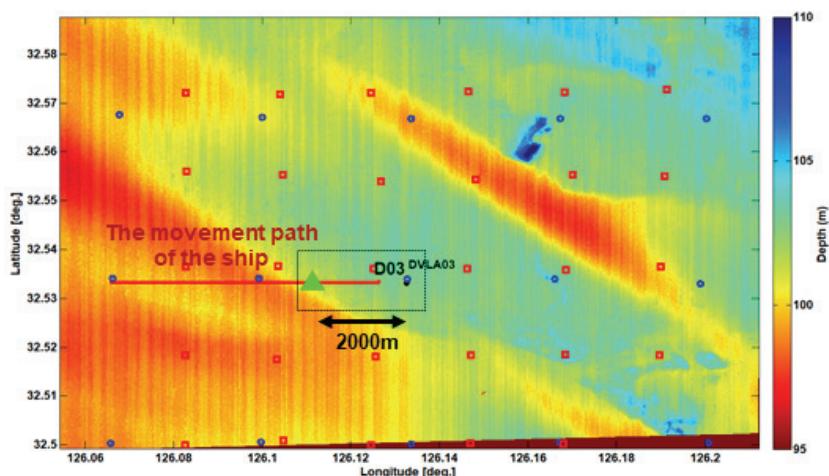


그림 3.5.8. 연구해역의 지형 정보와 퇴적물 샘플링 수행 정점

또한, 연구해역에서 퇴적층 지층 구조를 확인하기 위해 수행되었던 탄성파 측정 자료(Sparker)를 이용하여 D03 정점의 퇴적층 구조가 약 0.4 m의 뱃질 표층 퇴적층과 약 7.9 m의 모래질 1층 하부 퇴적층, 약 22.7 m의 모래질 뱃질 2층 하부 퇴적층으로 구성되어 있음을 확인하였다(그림 3.5.9). 따라서 역으로 추정하고자 하는 연구 해역의 퇴적층 환경은 역산 민감도가 낮은 약 0.4 m의 뱃질 표층 퇴적층을 층 분리에서 제외하고, 1층은 8.3 m, 2층은 22.7 m의 2층 퇴적층 구조를 가정하였다. 이외에도 실험을 진행하는 동안 UCTD(Underway Conductivity, Temperature, Density)로 측정된 수층의 수직 음속 구조를 음파 전달 모델의 환경 인자로 반영하여 복제 전달손실 계산을 수행하였다.

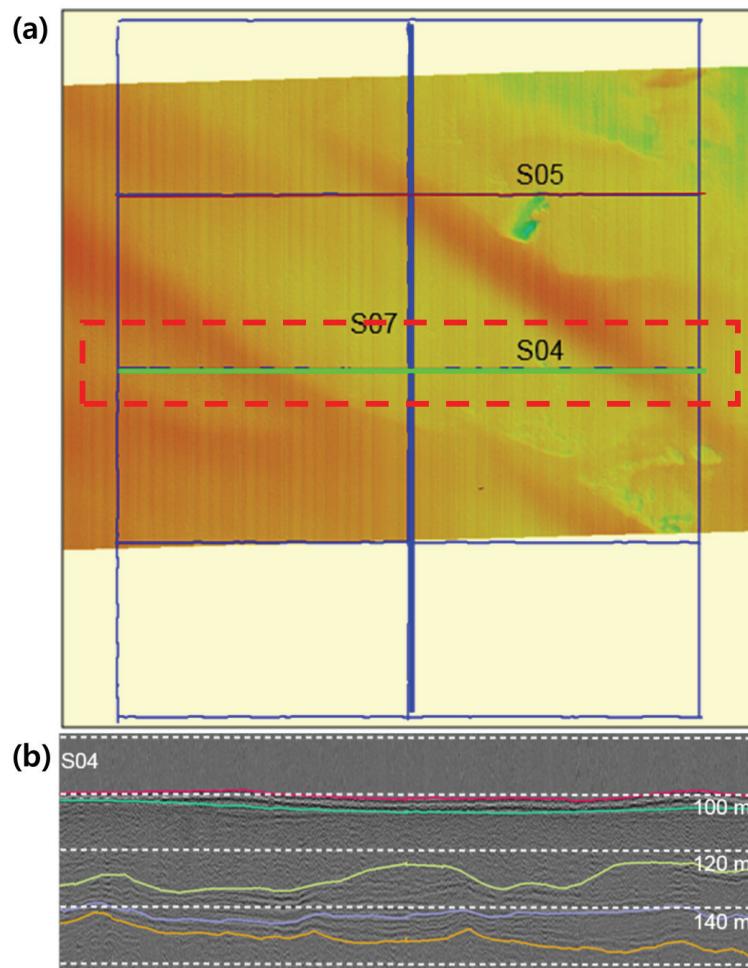


그림 3.5.9. 실험 정선의 탄성파(Sparker) 측정 결과, (a) 탄성파 측정 정선, (b) S04 탄성파 측정 정선의 지층 구조 결과

연구해역의 퇴적물 지음향인자 역산을 수행하기 위해, 앞선 4절에서 계산된 거리 및 수심에 따른 전달손실 음장(transmission loss field)에서 수심 60 m에 대한 전달손실 곡선을 추출하였으며(그림 3.4.18), 이를 통해 연구해역의 환경적 특성이 고려된 거리 종속 음파 전달 모델의 복제 전달손실 곡선과의 반복적인 비교를 수행하였다. 표 3.5.4는 지음향인자를 포함한 역산 인자들과 그 탐색 범위를 나타낸 것이다.

지음향인자 역산에 사용된 거리 종속 음파 전달 모델에는 포물선 방정식 기반의 음파 전달 모델인 RAM을 사용하였고, 최적화 알고리즘은 유전자 알고리즘(GA, Genetic Algorithm)을 사용하였다. 유전자 알고리즘은 한 세대 동안 재생산, 교차, 돌연변이를 거치면서 새로운 집단을 형성하며, 이 집단은 목적함수를 통해 재평가되고 반복적인 일련의 연산 과정으로 최적해에 수렴하거나 일정한 정지 조건을 만족하면 최적화 과정이 정지하게 된다(진, 2002). 따라서 재생산, 교차, 돌연변이가 각각 발생하는 확률 값에 따라 최적해 수렴도 및 역산 결과에 차이가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 지음향인자 역산에 일반적으로 사용하는 재생산 가중치(50 %), 교차율(80 %), 돌연변이 확률(5 %) 값을 사용하였다. 유전자 알고리즘에 사용된 초기 집단은 64개체로 구성되며, 각 집단이 100세대를 진화하는 과정으로 구성된다. 동일한 과정을 105회 병렬 반복 수행함으로써 총 672,000회의 음파 전달 모델이 수행되었다. 최적화 과정에 사용된 목적 함수는 최소 제곱법을 사용하였다.

표 3.5.4. 연구해역에서 가정한 2층 구조 퇴적층의 각 역산 인자들의 종류와 탐색 범위

Geo-acoustic parameters	Lower boundary	Upper boundary
1st P-wave sound speed(m/s)	1400	1800
1st Sediment density(g/cm^3)	1.0	2.5
1st P-wave attenuation($dB/m/kHz$)	0	1
Sub-bottom P-wave speed(m/s)	1400	1800
Sub-bottom density(g/cm^3)	1.0	2.5
Sub-bottom P-wave attenuation($dB/m/kHz$)	0	1
Source depth(m)	20	30
Source level offset(dB)	-5	5

역산 인자들의 역산 결과는 105회 반복 역산을 통해 획득한 최적해의 평균값(Mean value)과 그 표준 편차(Standard deviation)로 나타냈으며(표 3.5.5), 최적 지음향인자를 사용한 복제 전달손실과 실측 전달손실을 비교하였다(그림 3.5.10). 실측 전달손실 곡선(검은색 실선)과 이 실측 전달손실 곡선을 이용하여 역 추정된 지음향인자로 모의한 복제 전달손실 곡선(빨간색 실선)이 상당히 유사한 결과를 보인다는 것을 확인할 수 있었다.

표 3.5.5. 실측 전달손실을 이용한 2층 구조 퇴적층에서의 역산 결과

Geo-acoustic parameters	Inversion results
	$M_{mean} + std$
1st P-wave sound speed(m/s)	1631.7 ± 21.5
1st Sediment density(g/cm^3)	1.7 ± 0.13
1st P-wave attenuation($dB/m/kHz$)	0.38 ± 0.07
Sub-bottom P-wave speed(m/s)	1604.9 ± 36.4
Sub-bottom density(g/cm^3)	1.67 ± 0.13
Sub-bottom P-wave attenuation ($dB/m/kHz$)	0.32 ± 0.07
Source depth(m)	27.6 ± 0.2
Source level offset(dB)	-0.6 ± 0.5

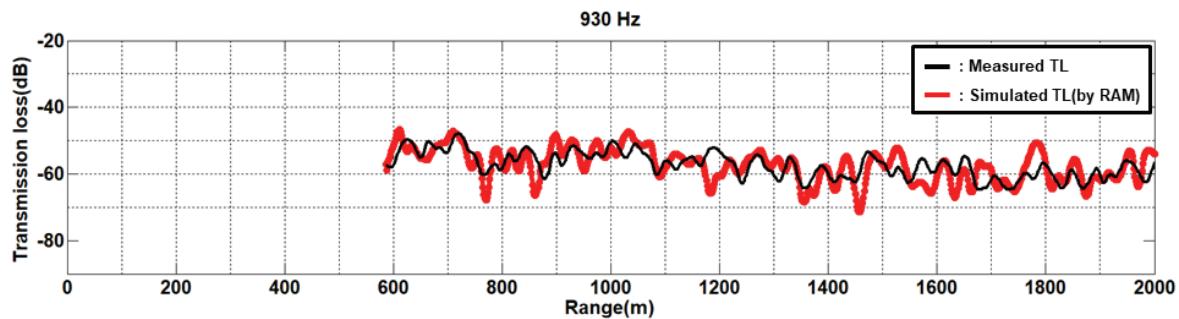


그림 3.5.10. 실측 전달손실(검은색 실선), 지음향인자 역산을 통해 구현된 복제 전달손실(빨간색 실선)

- 측정된 전달손실 자료를 이용한 지음향인자 역산 결과와 지음향 층서 모델 결과와의 비교 앞서 구성한 연구해역의 퇴적층 구조(1층 : 8.3 m, 2층 : 22.7 m)에 해당하는 지음향인자는 각각 음속 1631.7 m/s , 1604 m/s , 밀도 1.7 g/cm^3 , 1.67 g/cm^3 , 감쇠 계수 0.38 dB/m/kHz , 0.32 dB/m/kHz 로 역추정되었다. 이와 같은 역산 결과는 D03 퇴적물 샘플링

정점의 탄성파 측정 음향 자료와 코어 자료를 해석해서 획득한 지음향 층서 모델링 결과와 비교되었다(그림 3.5.11). 그림 3.5.11에서 검은색 실선은 D03 정점의 탄성파 측정 자료와 코어 자료를 해석해서 획득한 지음향 층서 모델링 결과를 나타내며, 파란색 실선은 측정된 전달손실 자료를 이용한 지음향인자 역산 결과를 나타낸다. 파란색 박스로 표시된 영역은 지음향인자 역산 결과의 표준 편차를 이용한 역산 오차 범위를 의미한다.

지음향인자 역산 결과는 음파 전달 모델에 사용된 퇴적층 구조가 2층 퇴적층 구조로 설정되었음에도 불구하고, 1층과 2층의 음속 및 감쇠계수가 거의 유사하게 추정되는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 역산 결과는 지음향인자 역산에 사용된 전달손실 측정 자료가 표층에 존재하는 뼈질 퇴적층(0.4 m), 모래질 퇴적층(약 7.9 m)이 하부의 모래질 뼈 퇴적층과 잘 구분되지 않는 음향학적 특성을 나타낸다는 것을 의미한다. 결과적으로 저주파 및 중주파수 음파 전달손실 측정 자료를 이용한 지음향인자 역산 결과에서는 연구해역의 대략적인 퇴적층 물성 정도만 파악이 가능할 것으로 판단되며, 구체적인 퇴적층 구조와 정확한 지음향인자 파악을 위해서는 보다 높은 주파수의 근거리 음향 실험과 같은 추가 실험이 필요할 것으로 판단된다.

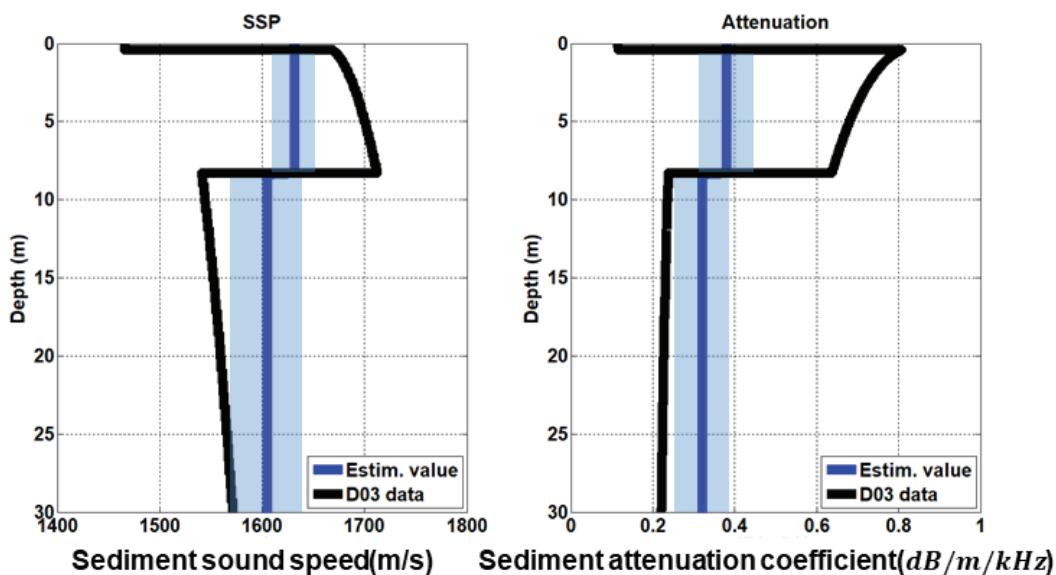


그림 3.5.11. 탄성파 측정 자료(Sparker)를 기반으로 지음향 모델링을 수행하여 획득한 연구해역의 지음향인자(검은색 실선)와 역산을 통해 획득한 지음향인자(파란색 실선)

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표 달성도

최종 연구개발 목표: 남서해 천해역 해저 퇴적층 저주파 및 고주파 광대역 지음향특성 파악과 지음향모델 수립			
구분	연구내용	달성도(%)	비고
1차년	<ul style="list-style-type: none">○ 연구해역 저주파수 및 중주파수 음파 관측을 통한 해저면 음파 전달 특성 파악○ 시추 퇴적물 지음향인자 관측 시스템 제작	100	
2차년	<ul style="list-style-type: none">○ 연구해역 해저 퇴적층 충서구조파악○ 연구해역 해저 퇴적층 퇴적물 물성 파악○ 실험실용 지음향인자 관측 시스템 시제품을 이용한 시추 퇴적물 지음향인자 관측 및 분석	100	
3차년	<ul style="list-style-type: none">○ 연구해역 시추 해저퇴적물 지음향인자 관측자 료 기반 지음향 모델링 및 지음향 충서 모델 수립○ 연구해역 해저면 음파전달특성 관측자료 분석 을 통한 지음향인자 역산○ 피스톤 코아 퇴적물 지음향인자 관측 시스템 고도화	100	

제 2 절 대외기여도

1. 학술적 측면

- 본 연구는 KIOST 및 미국 Scripps 해양연구소와 KRISO 그리고 국내 여러 대학(서울대, 한양대, 해양대, 광주과학기술원, 인하대 등)과 공동 해양조사를 목적으로 시작된 연구로서, 수중음향, 지음향, 해양물리에 대한 연구결과를 서로 공유함으로써 학술적으로 우수한 연구성과를 창출함.
- 본 연구가 수행된 연구해역(동중국해)은 미국, 중국, 일본 해군이 군사적으로 관심을 갖는 해역으로서 국내에서는 지음향 관측자료가 전무한 상황에서 본 연구 결과는 큰 의미를 갖고 있음. 특히, 좁은 해역에 대해서 집중적으로 지음향 조사를 수행한 것은 큰 의미를 갖음.

2. 기술적 측면

- 연구해역 해저 퇴적층에 대한 지음향 모델을 음파의 주파수별로 세분화함.
- 연구해역 해저 퇴적층에 대한 지음향 맵을 구성함으로써 해양영토 관리에 대한 연구기반을 구축함.
- 피스톤 코아 퇴적물의 지음향인자(음속, 음감쇠)를 측정하기 위하여 기존 코아 절개 후 샘플 채취를 통한 측정방식을 코아의 절개없이 측정할 수 있는 기술과 장비(PICAM)를 개발함. 기존에 해외에서 개발된 MSCL은 피스톤 코아 퇴적물의 음속을 측정할 수 있으나 코아의 절개없이 측정은 가능하나 음감쇠는 측정하지 못하는 단점이 있음.

3. 경제·산업적 측면

- 해양에서 적용가능한 주파수 대역에 대한 지음향인자 관측시스템을 개발하고 시제품 상용화에 대한 기반을 구축함.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 수심이 얕은 천해에서 수중음파는 해표면 및 해저면 등의 경계면에서 매우 복잡하게 상호작용을 하면서 전파하므로 해저 퇴적물은 음파전파에 지대한 영향을 미친다고 할 수 있음. 따라서, 이러한 현상을 정확히 예측하고 이해하는 데 본 연구 결과를 활용할 수 있음.
- 천해에서 해군의 대잠작전 수행시 소나의 예상 탐지거리 수온구조 뿐만 아니라 해저면 저질상태에 따른 지음향인자의 영향도 크게 받는 관계로 본 연구에서 얻어진 해저 퇴적물의 지음향인자는 소나의 탐지거리 모델링에 대한 입력자료로 활용이 가능함.
- 수십 kHz 이상의 고주파수 음파를 이용하여 퇴적물의 지음향인자 측정 시 저주파수 대역에 대한 지음향인자 예측에 활용 가능함.
- 연구해역인 동중국해역의 해저 퇴적층에 대한 주파수별 지음향 모델 수립시 활용가능.
- 해상에서 주파수 1 kHz이하의 저주파수 음파를 이용한 지음향인자 역산결과의 신뢰도 분석 시 연구결과를 활용할 수 있음.
- 해저 골재자원 탐사 시 자원의 종류 및 퇴적층의 두께 추정에 활용 가능함.
- 본 연구에서 개발된 시제품(PICAM)은 해양에서 시추된 피스톤 코아 퇴적물의 지음향인자를 현장에서 측정하는 데 활용이 가능함.

제 6 장 참고문헌

- 진강규, 2002, 유전 알고리즘과 그 응용, 교우사.
- C. -F. Huang, and W. S. Hodgkiss, “Matched-Field Geoacoustic Inversion of Low-Frequency Source Tow Data”, IEEE J. Oceanic Eng., vol. 29, p.952 - 963, (2004).
- E. K. Westwood, and C. T. Tindle, 1987, “Shallow water time simulation using ray theory”, J. Acoust. Soc. Am. 81, p. 1752–1761
- F. B. Jensen, W.A. Kuperman, M. B. Porter, and H. Schmidt, 1994, *Computational Ocean acoustics*, AIP, New York.
- H. C. Song, W. S. Hodgkiss, S. -M. Kim, B. -N. Kim, S. Cho, Y. Park, and S. Nam, 2015, *Shallow-water Acoustic Variability Experiment 2015 (SAVEX15) Trip Report*.
- L. B. Booker, 1987, *Improving search in Genetic Algorithm*, in: *Genetic Algorithms and Simulated Annealing*, ed. L. Davis, Pitman, London, and Morgan Kaufmann publishers, Los Altos, p. 64–73
- L. R. Bartek and R. W. Wellner, 1995, “Do equilibrium condition exist during sediment transport studies on continental margins? An example from the East China Sea”, Geo-Marine Letters 15, 23–29.
- M. D. Collins, 1995, *User’s Guide for RAM versions 1.0 and 1.0p*, Naval Research Laboratory, Washington, DC.
- M. Gen, and R. Cheng, 1997, *Genetic Algorithms & Engineering Design*, John Wiley & Sons, New York.
- M. Mitchell. 1995, *Genetic Algorithms : An Overview*, complexity, v.1 p. 31–39
- M. B. Porter, 2011, *The bellhop manual and user’s guide: Preliminary draft*, Jan, 31, [Online]. <http://oalib.hlsresearch.com/Rays/HLS-2010-1.pdf>.
- M. B. Porter, 1995, *The Kraken normal mode program. User’s manual*, SACLANT Undersea Research Centre, La Spezia, Italy.

- N. P. Chotiros, 2004, "A broadband model of sandy ocean sediment: Biot-Stoll with contact squirt flow and shear drag", *J. Acoust. Soc. Am.* 116, p. 2011–2021.
- N. P. Chotiros and M. J. Isakson 2008, "High-Frequency dispersion from viscous drag at the grain-grain contact in water-saturated sand", *J. Acoust. Soc. Am.* 124, p. EL296–300.
- R. D. Stoll, 1989, *Sediment Acoustics*, Springer-Verlag, New York.
- S. Berne, P. Vagner, F. Guichard, G. Lericolais, Z. Liuc, A. Trentesauxd, P. Yinc, and H. Yie, 2002, "Pleistocene forced regressions and tidal sand ridges in the East China Sea", *Marine Geology* 188, 293–315.
- W. H Ryang, S. P. Kim, S. Kim, and D. C. Kim, 2013, "Geoacoustic model of the transverse acoustic variability experiment area in the northern East China Sea", *Goscience Journal* 17, 267–278.
- Z. Michalewicz, 1996, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer, Berlin.