

극지방 해수층 관측을 위한 그린함수  
기반 역시간 구조보정 기술 개발

A Development of reverse time migration algorithm  
based on analytic green' s function for water column  
image in Arctic and Antarctic Oceans



한 국 해 양 연 구 원  
부 설 극 지 연 구 소

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “극지방 해수층 관측을 위한 그린함수 기반 역시간 구조보정 기술 개발”과제의 최종 보고서로 제출합니다.



연구책임자 : 강승구

참여연구원 : 장우근

참여연구원 : 박태욱

보고서 초록

과제관리번호	BSPE17480-005 -13	해당단계 연구기간	2017.11.01 ~ 2018.10.31	단계 구분	(1단계) / (총 1단계)
<b>연구사업명</b>	중 사업명	창의연구사업			
	세부사업명	신진연구원 지원사업			
연구과제명	중 과 제 명				
	세부(단위)과제명	극지방 해수층 관측을 위한 그린함수 기반 역시간 구조보정 기술 개발			
연구책임자	강 승 구	해당단계 참여연구원수	총 : 2명 내부 : 2명 외부 : 0명	해당단계 연구비	정부: 30,000 천원 기업: 천원 계: 30,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 부설 극지연구소 극지지구시스템연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :	상대국연구기관명 :			
위 탁 연 구	연구기관명 :	연구책임자 :			
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)					보고서 면수
<p><input type="checkbox"/> 그린함수 해석해를 이용한 역시간 구조보정 알고리즘 작성</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 그린함수 해석해 풀이 및 기존의 주파수 영역 역시간 구조보정 알고리즘에 적용</li> <li>- 프로그램 작성 및 가동 여부 확인</li> <li>- 주파수 대역을 높여가며, 해당 알고리즘에 대한 계산효율 점검</li> </ul> <p><input type="checkbox"/> 수층 이미징을 위한 탄성과 탐사자료 전처리 수행</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 2014년, 2017년 북극 보퍼트해에서 획득한 탄성과 탐사자료에 대한 전처리 수행</li> <li>- 주파수 필터링, 잡음제거 및 뮤팅, 디콘볼루션 및 버블효과 제거 기법활용을 통한 자료품질 향상</li> </ul> <p><input type="checkbox"/> 알고리즘 최적화 및 현장자료 적용 등 수치실험 수행</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 작성된 해석해를 이용한 주파수 영역 역시간 구조보정 알고리즘을 이용하여 전처리된 현장자료에 적용, 수층 이미지 구축</li> <li>- CTD자료와 비교분석 수행 및 최적화 구현</li> </ul> <p><input type="checkbox"/> 북극 보퍼트해 탐사자료에 대한 수층 이미지 구축 및 해석</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 완성된 알고리즘을 이용하여 2014년 그리고 2017년 북극 보퍼트해에서 획득한 현장자료 적용 및 이미지 계산</li> <li>- 전통적인 방법을 이용하여 구축한 수층 이미지 및 XCTD 프로파일과의 비교, 결과검증</li> <li>- 기존에 발표된 해당 연구지역에 대한 연구결과를 바탕으로 수층 이미지에 나타나는 이벤트 해석</li> </ul>					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	탄성해양학, 다채널 탄성과 탐사자료, 역시간 구조보정, 그린함수, 북극해			
	영 어	Seismic Oceanography, Multi-channel seismic data, Reverse time migration, Green's function, Antarctic Ocean, Arctic Ocean			

# 요 약 문

## I. 제 목

극지방 해수층 관측을 위한 그린함수 기반 역시간 구조보정 기술 개발

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

### 1. 목적

그린함수 해석해를 이용하여 기존의 주파수 영역 역시간 구조보정 알고리즘의 계산효율을 증가시키고, 이를 수층 이미지 구축에 활용함으로써 탄성과 탐사자료를 통해 극지방에 나타나는 수층 거동을 구현해 낼 수 있는 기술을 개발

### 2. 필요성

- 해양은 대기권보다 부피가 훨씬 작지만 열용량이 높아 지구 기후변화에 막대한 영향을 끼치며, 이에 따라 해양을 순환시키는 근본적인 요인들에 대한 많은 연구가 수행되고 있음
- 해양에서 서로 다른 물리적 성질을 가지는 바닷물들이 섞이면, 그 경계면에서 해양 물리적 성질의 차이에 의한 미세구조가 생겨나며, 이는 해당 지역에서의 대규모 열염순환을 이해할 수 있는 기초적인 자료로 활용이 가능
- 기존의 정점에서 수행되는 해양물리적 관측결과에서는 연속적으로 변하는 수괴와 같은 대규모의 해양층 순환을 관측하기에는 그 한계가 있음
- 탄성과 탐사자료의 경우 연속적인 자료측정이 가능하며, 자료처리 주파수 대역을 100Hz 이상으로 높이면, 고해상도의 수층 열염구조에 대한 이해가 가능
- 기존의 주파수영역 역시간 구조보정은 수평층을 가정한 전통적인 신호처리 기반 자료처리 기법을 이용하여 구축한 탄성과 이미지보다 향상된 지층구조의 구현이 가능한 것으로 알려져 있으나, 막대한 컴퓨팅자원을 요구함. 이를 그대로 고주파수 대역을 요구하는 수층 이미징에 적용할 경우 현재 일반적으로 시판되는 메모리 기준을 초과하는 현상이 발생
- 극지방에서 획득한 탄성과 탐사자료를 통해 해당 지역에서의 수층 열염순환을 정

확히 관측하고 이를 해석하기 위해서는 고주파수 신호를 처리할 수 있는 역시간 구조보정 알고리즘이 요구되며, 이를 위해서는 보다 효율적인 이미지 계산기술이 필요함.

### III. 연구개발의 내용 및 범위

- 해석해 풀이 및 포트란 언어를 이용한 그린함수 해석해를 기반으로 가동되는 역시간 구조보정 알고리즘 작성
- 수층 이미징 구축을 위한 현장자료 전처리 수행 (주파수 필터링, 뮤팅, 디콘볼루션 및 버블효과 제거 기술 적용)
- 작성한 구조보정 알고리즘 수치실험 및 최적화
- 현장자료 적용 및 수층 이미지 계산
- 계산된 수층 이미지 검증 및 해석

### IV. 연구개발결과

- 그린함수를 이용한 주파수 영역 역시간 구조보정 알고리즘 작성 완료
- 북극 보퍼트해에서 획득한 다채널 탄성과 탐사자료 전처리 수행
- 현장자료 적용을 위한 알고리즘 수치실험 및 최적화 수행
- 작성한 그린함수 해석해 기반 주파수 영역 역시간 구조보정 알고리즘에 적용 및 수층 이미지 구축 (2014년 획득자료 4개 라인, 2017년 획득자료 3개 라인)
- 수층 이미지 검증 (XCTD자료와 비교분석) 및 연구지역에 나타나는 열염구조 해석

### V. 연구개발결과의 활용계획

- 우리 연구소에서 보유하고 있는 북극 및 남극에서 획득한 다채널 탄성과 탐사자료에 적용하여 수층 이미지를 구축하고 이를 해석함으로써 기존의 방법에서 접근하지 못했던 해수층 내 연속적인 열염구조의 변화와 거동을 관찰

# 목 차

제출문.....	1
보고서 초록.....	2
요약문.....	3
목차.....	5
제 1 장 서론.....	6
제 1 절 연구개발의 목적.....	6
제 2 절 연구개발의 필요성.....	7
1. 기술적 측면.....	7
2. 경제·산업적 측면.....	8
3. 과학적 측면.....	8
4. 사회·문화적 측면.....	9
제 3 절 연구의 내용 및 범위.....	9
제 2 장 국내외 기술개발 현황.....	10
제 1 절 국외 수준.....	10
제 2 절 국내 수준.....	12
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과.....	13
제 1 절 역시간 구조보정 기술 소개.....	13
제 2 절 그린함수 해석해의 적용.....	14
1. 그린함수 해석해를 이용한 주파수영역 역시간 구조보정 개요.....	14
2. 가상음원을 이용한 이미징 조건.....	17
3. 해석적 그린함수의 응용.....	20
4. 송신원 디콘볼루션.....	22
제 3 절 결과.....	24
1. 북극 보퍼트해에서 획득한 현장자료를 이용한 수층 이미지 결과비교.....	25
2. 북극 보퍼트해에서 획득한 현장자료에 대한 구조보정 이미지 및 XCTD 자료와의 비교.....	30
3. 구조보정 이미지 해석.....	33
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도.....	37
제 1 절 목표달성도.....	37
제 2 절 관련분야에의 기여도.....	37
제 5 장 연구개발 결과 활용계획.....	39
제 6 장 참고문헌.....	40

# 제 1 장 서론

## 제 1 절 연구개발의 목적

해양은 열용량이 매우 높아 지구의 기후변화에 막대한 영향을 끼친다. 따라서 해양의 순환을 이해하는 것은 나아가 기후변화를 관측하고 예측할 수 있는 중요한 방법중 하나일 것이다. 해양의 순환을 이해하고 이에 대한 기본적인 요인들을 알아보기 위한 많은 연구가 있었지만, 기존의 물리적 관측방법으로는 수괴라 불리우는 서로 다른 성질의 바닷물이 만나 어떻게 섞이는지 그리고 순환은 어떻게 어느 정도까지 이루어지는지에 대한 연속적인 관찰이 불가능했다.

서로 다른 수괴가 섞일 때 그 경계면에서는 미세구조가 생겨나며, 이 미세구조는 지구의 기후를 변화시키는 중요한 요인으로 작용한다 (Thorpe, 2005). 이러한 현상의 관찰을 위해서는 광활한 해역에 대한 해수층의 온도와 염도를 측정하여야 하며, 이 경우 막대한 시간과 인력이 요구된다. 또한 일정한 간격으로 측정할 수 밖에 없어 수층 내 미세구조에 대한 수평적 범위와 연속성에 대한 정확한 정보를 획득해 내기 어렵다.

본래 해저 지질구조를 이해하기 위해 이용하는 해양 탄성과 탐사자료는 근래에 해양의 미세한 구조를 영상화하고 그 특성을 파악하는데 이용되고 있다. 이는 탐사지진학과 해양물리학을 융합한 새로운 분야로 해양 탄성학 (Seismic Oceanography)이라고 정의되어 현재 활발히 연구중에 있는 분야이다. 최초, 미국 와이오밍대학의 Holbrook et al. (2003)에 의해 제안된 이와 같은 수층 구조에 대한 관측방법은 수층 내에서 탄성파가 반사된 현상이 바닷물 내의 음향 임피던스가 변함에 따라 발생하는 것으로 밝혀졌으며, 이를 이용하여 수층구조의 영상화가 가능함을 증명하였다.

바닷물의 온도변화는 해수층 내에서의 음향임피던스를 변화시키고 탄성파 단면에서 영상화된 반사면은 바닷물의 열구조를 나타낸다. 이를 이용하면 해수층의 연속적인 열염구조에 대한 영상화가 가능하다. 하지만, 탄성파 탐사자료로부터 수층 이미지 구축을 위해서는 자료처리 주파수 대역을 100 Hz 이상으로 높여야 한다는 조건이 있다. 수층의 경우 지층과는 달리 층 구조가 수평적 구조가 아닌 다양한 형태의 수괴로 나타나는 경우가 많

기 때문에 대상구조를 수평층으로 가정한 일반적인 자료처리 기법을 이용할 경우 수층 이미지의 정확성과 품질에 그 한계가 존재한다. 반면, 지형적 가정이 없으며, 기존의 신호처리 방법보다 월등한 이미징 성능을 보장하는 파동방정식과 수치해석학적 기법을 이용한 역시간 구조보정 기법을 이용한다면 보다 정확한 수층 이미지 구축이 가능할 것으로 판단된다. 하지만 이와 같은 수치해석학적 기법에 기반한 역시간 구조보정 알고리즘의 경우 이를 수층 이미징에 적용 시, 상당한 고주파수 성분을 다뤄야 하며 이를 위해서는 상당량의 계산자원이 요구된다.

본 연구에서는 이와 같은 수치해석학적 기법에 기반한 역시간 구조보정 알고리즘의 효율을 높이고, 정확한 수층 이미지 구축을 위해 그린함수의 해석해를 이용한 역시간 구조보정 알고리즘을 개발하고 이를 극지방에서 획득한 현장자료에 적용함으로써 보다 정확한 수층 이미지를 구축하고자 한다.

## 제 2 절 연구개발의 필요성

### 1. 기술적 측면

- 수층의 온도 및 염분 변화는 음향임피던스를 변화시키므로, 탄성과 단면에서 영상화된 반사면은 해수층의 열염분구조를 반영 함.
- 수층에서의 탄성과 구조는 그 특성상 일반적인 지층구조와는 달리 100 Hz 이상의 고주파수 성분을 사용하여야 수층 거동을 관측할 수 있는 이미지 구축이 가능함.
- 탄성과 탐사단면 구축을 위해서는 신호처리 기반 그리고 수치해석학 기반의 다양한 방법의 활용이 가능하며 이는 가용할 수 있는 경제적 기술적 자원에 따라 선택적으로 적용.
- 수층의 경우 지층과 달리 층 구조가 수평적 구조가 아닌 다양한 형태의 수괴로 나타나는 경우가 많기때문에 대상구조를 수평구조로 가정한 신호처리 기반 자료처리 기법보다는 지형적 가정이 없는 수치해석학적 접근을 통해 이미지를 구축하는 방법이 유리할 것으로 판단.
- 하지만, 수치해석학적 기법을 수층에 적용할 경우 고주파수 성분을 다뤄야 하고 이

를 위해서는 상당량의 메모리와 cpu성능이 요구됨.

- 이에 따라 보다 효율적으로 수층 이미지 구축이 가능한 새로운 알고리즘이 요구됨.

## 2. 경제·산업적 측면

- 현재 석유산업분야에서는 파동전파 모델링, 역시간 구조보정 알고리즘, 파형역산 등 다양한 수치해석학적 기법을 이용하여 지하 석유 유망구조를 파악하는 산업이 활발히 진행 중이며, 컴퓨터 비용을 줄이고 효율적으로 계산이 가능한 알고리즘의 개발에 상당히 많은 투자와 연구가 진행 중임.
- 해수층의 물리적 특성을 활용하면, 역시간 구조보정에서의 파동전파 모델링 부분을 그린함수의 해석해로 대체할 수 있고, 이를 이용하면 기존의 역시간 구조보정 알고리즘의 계산 효율을 100배 이상 올릴 수 있음.
- 이에 따라 상당량의 컴퓨터 자원과 이에 수반되는 비용을 상당량 줄일 수 있는 효과를 볼 수 있음.

## 3. 과학적 측면

- 기존의 신호처리 기반 알고리즘을 이용한 수층 이미징의 경우 수평층을 가정한 방법이기에 때문에 급속도로 변하고 다양한 형태를 갖는 수괴 및 수층 구조를 이미징하는데에는 한계가 있다고 판단되며 특히, 천부 수층구조 (수심 100미터 이내)에 대한 이미징이 불가능하다는 단점이 존재 함
- 우리 연구소에서 보유한 북극해 다중채널 탄성과 탐사자료의 경우 수심 100m 인 근에서 상당히 중요한 수층 이벤트가 있음을 확인하였으며, 이는 역시간 구조보정 알고리즘을 통해 저심도 수층에서의 수층구조 및 수괴의 관측이 가능할 것으로 판단됨.
- 이는 향후, 해당 지역에서 북극의 급격한 기후변화와 관련된 수층의 거동을 밝혀낼 수 있는 소중한 근거가 될 수 있을 것으로 판단됨.

#### 4. 사회·문화적 측면

- 해당 알고리즘은 극지연구를 위해 세계 최초로 개발하고자하는 수층 탄성과 이미징 알고리즘으로 극지연구소가 향후 극지에서의 해양탄성학 분야를 선도해 나갈 수 있는 밑거름이 될 수 있을 것이라 판단됨.

### 제 3 절 연구의 내용 및 범위

#### 1. 해석해를 이용한 역시간 구조보정 알고리즘 개발

- 포트란을 기반으로 그린함수 해석해를 이용한 역시간 구조보정 알고리즘 개발
  - 그린함수 해석해 풀이 및 기존의 주파수 영역 역시간 구조보정 알고리즘에 적용, 프로그램 작성

#### 2. 수층 이미지를 위한 탄성과 탐사자료 전처리

- 현장자료 적용을 위해 기본적인 전처리 작업 수행
  - 2014년, 2017년 북극 보퍼트해에서 획득한 탐사자료에 대한 전처리 수행
  - 기본적인 전처리 작업 (필터링, 잡음제거등)의 디콘볼루션 및 버블효과 제거 수행

#### 3. 알고리즘 최적화 및 현장자료 적용실험

- 전처리된 현장자료를 개발한 구조보정 알고리즘에 적용하고 이에 대한 최적화 구현
  - 작성된 해석해를 이용한 역시간 구조보정 알고리즘을 이용하여 현장자료에 대한 수층 이미지 구축 및 XCTD자료와 비교 분석
  - 전통적인 방법을 이용한 수층 이미지 결과와 비교
  - 고해상도의 정확한 수층 이미징 구축을 위한 다양한 수치실험 수행 및 최적화

#### 4. 해석해를 이용한 역시간 구조보정 알고리즘을 활용한 수층 이미지 계산 및 해석

- 북극 보퍼트해 탐사를 통해 획득한 다중채널 탄성과 탐사라인에 대한 수층 이미지 구축 및 해석 수행
  - 최적화 단계를 통해 발전된 알고리즘을 통한 북극 보퍼트해 수층 이미지 구축
  - 기존의 전통적인 기법을 이용하여 구축한 수층 이미지 및 XCTD 자료에서 계산된 반사계수와 비교 및 결과 해석

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제 1 절 국외 수준

해양탄성학 분야를 주도하는 연구자들은 주로 북미와 유럽에서 활동 중인 과학자들이다. 주로 대서양과 지중해 그리고 북미 해역을 대상으로 많은 연구를 수행하고 있다. Holbrook 등이 해양탄성학 분야를 연구한 초기에는 탄성파자료의 처리분야에서 가장 기본적인 방법만 적용하여 바닷물의 구조를 파악하였으나(그림 1), 최근에는 탄성파자료의 디컨볼루션과 파동방정식을 이용하는 구조보정 등, 처리기술을 적용하여 바닷물의 구조를 더욱 자세하고 정확히 영상화하고 있다. 또한, 온도와 염도구조 그리고 저탁류 등을 파악함으로써 해양 모니터링 기술로 발전하고 있다.

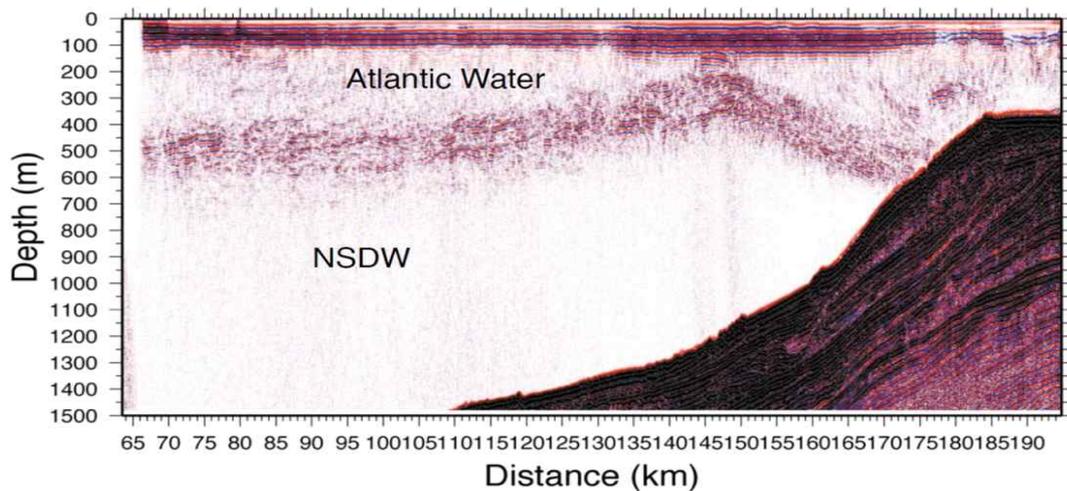


그림 2. 대서양에서 얻은 수층 이미지 단면 (Holbrook et al., 2003)

해양탄성학에서의 가장 인상적인 성과 중 하나는 지중해에서 만들어져 대서양으로 혼합된 바닷물을 영상화한 것이다. Pepenberg et al., 2009는 지중해에서 만들어진 따뜻한 고염수는 이베리아 반도의 남단을 따라 지브롤터 해협 밖으로 빠져나와 대서양에서 소용돌이를 만드는데, 상용 탄성파 자료처리 소프트웨어에서 제공하는 고도의 기술을 적용하여 이것을 영상화하였다. 탄성파 단면에서 지중해에서의 높은 염분도를 가지는 소용돌이는 렌즈모양으로 잘 나타나고 있으며(그림 2a), XBT 로 측정된 온도를 탄성파 단면에 겹쳐 그려보면 고온 이상대와 이 소용돌이가 정확히 일치함을 볼 수 있다(그림 2b).

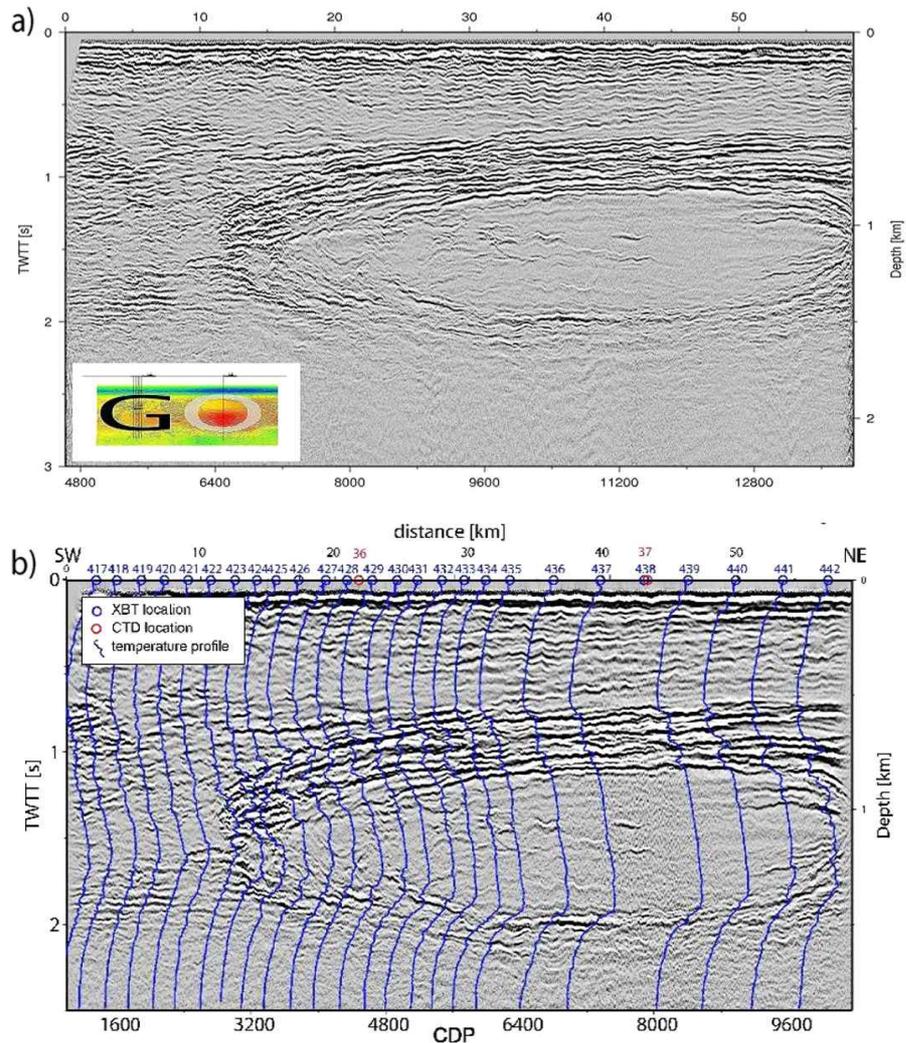


그림 3. (a) 대서양에서 얻은 수층 이미지 단면 (Pependerg et al., 2009), (b) 탄성과 자료 획득시 XBT로 관측한 수온을 탄성과 단면에 겹친 그림.

그 외, 아시아권에서는 중국과 일본에서 해양탄성학을 적용하는 사례가 증가하고 있다. 중국에서는 영토의 주변 바다 중 심해환경을 지닌 남중국해를 중심으로 해양탄성학관련 연구를 수행하여 남중국해 내에도 250 ~ 600m 깊이에 해류가 렌즈모양의 수괴를 이루고 있으며, 그 직경이 무려 60km 에 달한다는 것을 파악하였다(Tang et al., 2013). 일본에서는 일본 근해에서 따뜻한 쿠로시오 해류가 찬 바닷물과 만날 때 일어나는 움직임을 연구하고 있다 (Nakamura et al. , 2006).

## 제 2 절 국내 수준

국내에서는 해양과학기술원에서 우리나라 동해 및 서해안에서 나타나는 열염구조를 다중채널 탄성과 탐사자료를 이용하여 관측하는 다양한 연구 활동을 수행 중에 있다. 하지만 본 연구에서와 같이 수층 이미지 자체의 품질을 향상하고자 수층 이미지 구축을 위한 새로운 알고리즘 및 기법을 개발하고 이를 실측자료에 적용시키는 연구를 진행하는 활동은 현재까지 알려진 바 없다. 다만, 주파수 영역 역시간 구조보정 및 파형역산 알고리즘과 같은 수층이 아닌 지하 지층을 대상으로 하는 탄성과 탐사자료 처리 관련 알고리즘 개발 연구의 경우 서울대학교 공과대학에서 활발하게 진행 중이다.

아래 (그림 3)에서는 국내 연구진이 발표한 논문의 그림을 제시하였다. 해당 논문에서는 우리나라 서해안에서 획득한 탄성과 탐사자료를 이용하여 자료처리 및 분석 과정을 거쳐 아래의 그림과 같이 최종적인 수층 이미지를 구축하였고, 동시에 획득한 XBT자료를 바탕으로 반사계수를 계산하여 함께 도시하였으며, 이를 통해 서해안에 나타나고 있는 bottom winter water를 규명하였다.

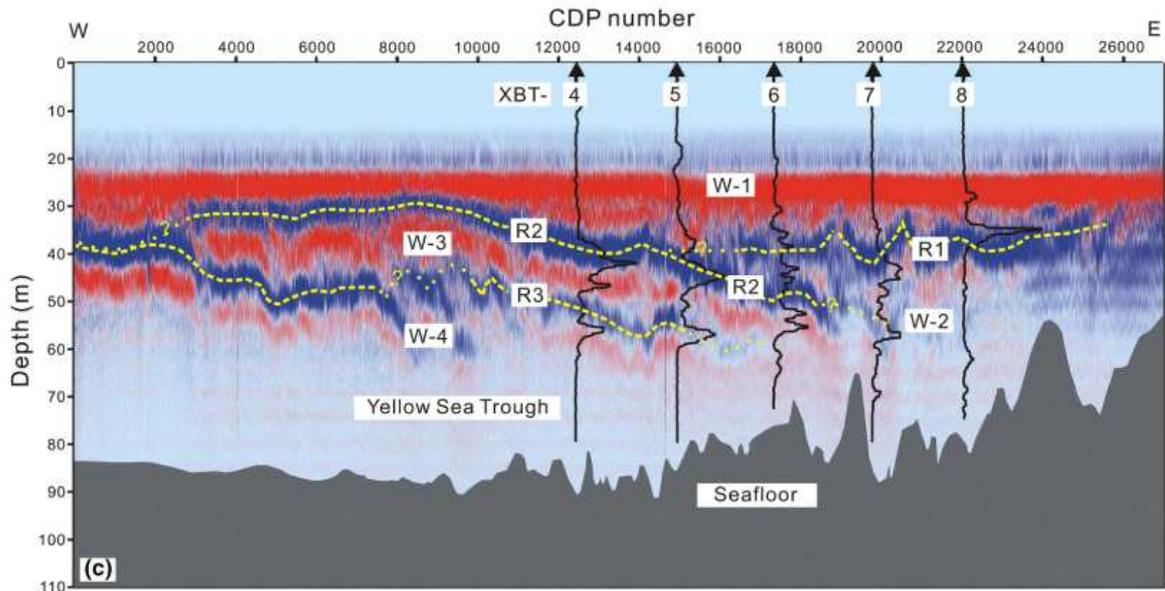


그림 4. 서해안에서 획득한 탄성과 탐사자료를 이용하여 국내 연구진(한국해양과학기술원)이 수행한 수층 이미지 (Moon et al., 2017)

## 제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

### 제 1 절 역시간 구조보정 기술 소개

양방향 파동방정식을 이용한 역시간 구조보정 (two-way wave-equation based reverse-time migration) 알고리즘은 단방향 구조보정 기법에 비해 훨씬 많은 계산 자원 (computational resources)을 요구한다. 하지만 반사파, 굴절파, 다중 반사파, 다중 굴절파 등을 처리할 수 있을 뿐 아니라 실질적으로 대상구조의 경사도에 따른 제한(dip limitation)없이 지하 구조의 영상화가 가능하고, 실제 진폭을 가장 잘 보존할 수 있는 기술이기 때문에 컴퓨팅 기술의 급속한 발전에 따라 현재 널리 이용되고 있다.

본래의 주파수-영역 역시간 구조보정 기술은 다채널 탄성과 탐사자료로부터 복잡한 지하 매질의 층서 및 지층구조에 대한 이미지 획득을 목적으로 개발되어 석유 및 가스와의 같은 자원탐사분야 혹은 지질학적 목적으로 널리 사용되었다. 일반적으로 파동방정식에 기반한 양방향 역시간 구조보정 알고리즘의 계산을 위해서는 불균질 매질(heterogeneous media)에 대한 복소 임피던스 행렬을 풀어야 하며, 이때 복소 임피던스 행렬의 특성과 탄성과 탐사에서 멀티샷 상황(multi-shot simulation)을 고려하여 멀티-프론탈 다이렉트 솔버(multi-frontal direct solver)를 이용해 왔다. 다이렉트 솔버를 이용해 한번의 복소 임피던스 행렬 인수분해(factorization)를 수행하면 역시간 구조보정 획득에 필요한 모델링 파동장의 계산과 관측된 데이터의 후방 전파를 각각 전방향/후방향 대체(forward/backward substitution)으로 효율적으로 계산할 수 있다. 하지만, 유한 요소법을 이용하여 복소 임피던스 행렬을 구성할 때, 파동 모델링은 파장당 격자수에 따른 계산상의 오류, 특히 오차의 확산(dispersion)이 발생한다. 예를 들어, 최대 주파수 128 Hz의 문제를 풀기 위해서는 격자 크기가 0.71 m 정도로 작아져야 하지만 이러한 격자 크기로 100 km (distance) x 2~3 km (depth) 크기의 문제를 계산해 내기에는 현재 cpu의 속도 및 메모리의 한계와 같은 컴퓨팅 환경의 문제가 나타난다.

본 연구에서는 이와 같은 기존의 양방향 역시간 구조보정의 한계점을 극복함과 동시에 이를 수층에 적용하고, 수층의 특성을 이용하여 효율적인 계산을 수행해 낼 수 있도록 그

린함수 해석해를 이용하는 주파수영역 역시간 구조보정 알고리즘을 개발하였다. 또한 현장자료에 적용하여 현재 연구소에서 보유 중인 탄성과 탐사자료에 나타나는 수층 열염구조에 대한 탄성과 이미지를 구축하였다. 구축된 결과는 탐사지역에서 획득한 XCTD 및 CTD 자료에서 계산한 음향임피던스 및 반사계수와 비교하여 결과를 검증하였다.

## 제 2 절 그린함수 해석해의 적용

이번 연구에서의 가장 큰 기술적 과제는 주파수-영역 역시간 구조보정을 수층 이미지 구축에 적용할 때, 상당량의 계산을 요구하는 파동방정식의 수치적 풀이를 해석적 그린함수의 풀이로 대체하여 계산을 효율적으로 수행하고, 고주파수 성분이 포함된 고해상도 수층 이미지를 획득하는 것이다.

### 1. 그린함수 해석해를 이용한 주파수 영역 역시간 구조보정 알고리즘의 개요

계산효율의 향상과 고주파수 성분(100 Hz 이상)의 고해상도 수층 탄성과 이미지 구축에 대한 기술적 과제를 달성하기 위한 해석적 그린함수와 주파수-영역 역시간 구조보정을 이용한 수층 이미징 기술은 다음과 같은 각각의 파트로 구성된다. 첫번째 관측 데이터(다채널 탄성과 탐사자료)로부터 해석적 그린함수를 이용해 송신 파형을 역산하여 송신원을 추정하는 송신원 추정부; 두번째 송신원 추정부에서 추정된 송신원을 이용해 관측 데이터를 디컨볼루션하는 송신원 디컨볼루션부; 그리고 마지막, 송신원 디컨볼루션부에서 디컨볼루션된 관측 데이터 정보를 입력받아 해석적 그린함수를 이용하여 주파수-영역 역시간 구조보정을 처리하는 구조보정부; 이렇게 세가지 단계로 구성되어 수행된다. (그림 4)에서는 이와 같은 그린함수 해석해를 이용한 역시간 구조보정 기술에 대한 개념을 도시한 그림을 수식과 함께 제시하였다.

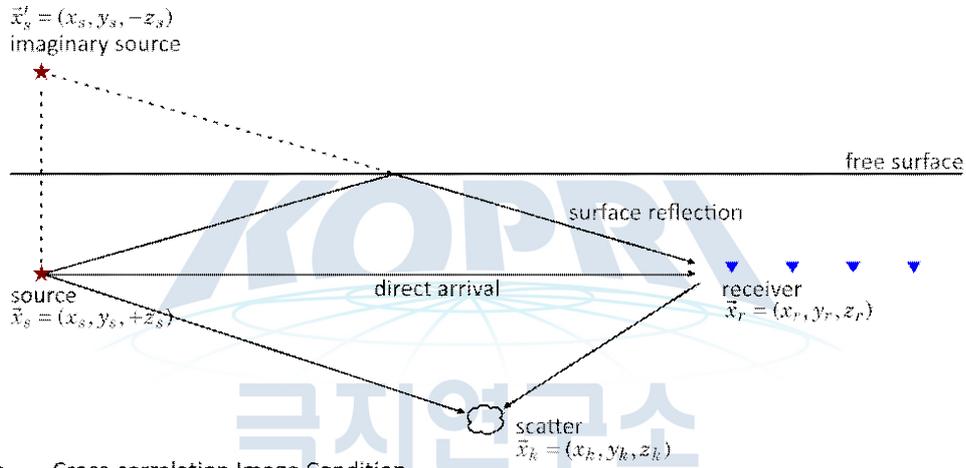
우선 첫 번째, 송신원 추정부는  $s'(\omega) = \frac{d(\vec{x}_r, \omega | \vec{x}_s) g^*(\vec{x}_r, \omega | \vec{x}_s)}{g(\vec{x}_r, \omega | \vec{x}_s) g^*(\vec{x}_r, \omega | \vec{x}_s)}$  과 같이 수신기들로부터 측정된 관측 데이터와 송신원 위치  $\vec{x}_s$ 에서 수신기 위치  $\vec{x}_r$ 으로 전파하는 해석

적 그린함수를 사용하여 송신원을 추정한다. 송신원 디컨볼루션부는

$$d'(\omega) = \frac{d(\vec{x}_r, \omega | \vec{x}_s)}{s'(\omega)}$$

과 같이 추정된 송신원을 이용해 수신기들로부터 측정된 관측 데이터

를 디컨볼루션한다. 구조보정부는 해석적 그린함수를 이용하여 가상음원을 추정하는 가상음원 추정부; 해석적 그린함수를 이용하여 디컨볼루션된 관측 데이터를 후방 전파하는 후방 전파부; 및 가상음원 추정부를 통해 추정된 가상음원과 후방 전파부를 통해 디컨볼루션한 관측 데이터를 후방 전파한 결과 등을 이용해 수층 이미지를 획득하는 후처리부; 단계를 거쳐 수행된다.



- Cross-correlation Image Condition

$$\phi_k = \int_0^{\omega_{\max}} \phi_k(\omega) d\omega = \int_0^{\omega_{\max}} \Re \left\{ \left[ \frac{\partial \mathbf{u}(\omega)}{\partial m_k} \right]^T \mathbf{d}^*(\omega) \right\} d\omega$$

- New Frequency-domain RTM

$$\phi_k(\omega) = \Re \left\{ \left[ -\frac{\partial \mathbf{S}^k(\omega)}{\partial m_k} \mathbf{g}_h(\vec{x}_k, \omega | \vec{x}_s) \right]^T \left[ \mathbf{d}'(\omega) \mathbf{g}_h(\vec{x}_k, \omega | \vec{x}_r) \right]^* \right\}, \quad \mathbf{d}'(\omega) = \frac{\mathbf{d}(\omega)}{s(\omega)}$$

- 3D Green's Function & Source Estimation

$$\mathbf{g}_h(\vec{x}_r, \omega; \vec{x}_s) = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{e^{i\kappa_0 |\vec{x}_r - \vec{x}_s|}}{|\vec{x}_r - \vec{x}_s|} - \frac{e^{i\kappa_0 |\vec{x}_r - \vec{x}'_s|}}{|\vec{x}_r - \vec{x}'_s|} \right), \quad s(\omega) = \frac{\sum_{ns} \mathbf{d}(\vec{x}_r, \omega) \cdot \mathbf{g}_h^*(\vec{x}_r, \omega; \vec{x}_s)}{\sum_{ns} \mathbf{g}_h(\vec{x}_r, \omega; \vec{x}_s) \cdot \mathbf{g}_h^*(\vec{x}_r, \omega; \vec{x}_s)}$$

그림 4. 그린함수 해석해를 이용한 역시간 구조보정 알고리즘 개념도 및 주요수식

가상음원 추정부는  $v_k(\omega) = -\frac{\partial S(\omega)}{\partial m_k} g(\vec{x}_k, \omega | \vec{x}_s)$  과 같이 송신원 위치  $\vec{x}_s$ 에서 산란

지점(scattering point)  $\vec{x}_k$ 으로 전파하는 해석적 그린함수를 사용하여 가상음원을 추정한다.

다. 또한, 후방 전파부는  $S^{-1}(\omega) [d'(\omega)]^* = [d'(\omega)]^* g(\vec{x}_k, \omega | \vec{x}_r)$ 와 같이 수신기 위치  $\vec{x}_r$ 에서 산란 지점  $\vec{x}_k$ 으로 전파하는 해석적 그린함수를 사용하여 상기 송신원 디컨볼루션된 관측 데이터를 후방 전파 처리한다. 후처리부는  $\Phi_k = \sum_{\omega} \Phi_k(\omega) = \sum_{\omega} R \left\{ \left[ -\frac{\partial S_k(\omega)}{\partial m_k} g(\vec{x}_k, \omega | \vec{x}_s) \right]^T [d'(\omega)]^* g(\vec{x}_k, \omega | \vec{x}_r) \right\}$ 와 같이 가상음원 추정부에서 추정된 가상음원과 후방 전파부에서 디컨볼루션된 관측 데이터를 후방 전파 처리한 결과를 이용하여 수층 이미지를 획득한다.

해석적 그린함수와 주파수-영역 역시간 구조보정을 이용한 수층 이미징 알고리즘은 관측 데이터로부터 해석적 그린함수를 이용해 송신 파형을 역산하여 송신원을 추정하는 단계; 추정된 송신원을 이용해 관측 데이터를 디컨볼루션하는 단계; 디컨볼루션된 관측 데이터 정보를 입력받아 해석적 그린함수를 이용하여 주파수-영역 역시간 구조보정을 처리하는 단계 등을 거쳐 수행된다.

우선, 송신원 추정 단계는  $s'(\omega) = \frac{d(\vec{x}_r, \omega | \vec{x}_s) g^*(\vec{x}_r, \omega | \vec{x}_s)}{g(\vec{x}_r, \omega | \vec{x}_s) g^*(\vec{x}_r, \omega | \vec{x}_s)}$ 과 같이 수신기들로부터 측정된 관측 데이터와 송신원 위치  $\vec{x}_s$ 에서 수신기 위치  $\vec{x}_r$ 으로 전파하는 해석적 그린함수를 사용하여 송신원을 추정하는 것으로 구성된다. 디컨볼루션 단계는  $d'(\omega) = \frac{d(\vec{x}_r, \omega | \vec{x}_s)}{s'(\omega)}$ 과 같이 추정된 송신원을 이용해 수신기들로부터 측정된 관측 데이터를 디컨볼루션하는 것으로 구성되며, 구조보정 단계는 해석적 그린함수를 이용하여 가상음원을 추정하는 단계; 해석적 그린함수를 이용하여 디컨볼루션된 관측 데이터를 후방 전파하는 단계; 및 추정된 가상음원과 디컨볼루션한 관측 데이터를 후방 전파한 결과를 이용해 수층 이미지를 획득하는 단계;를 포함한다. 가상음원 추정 단계는

$v_k(\omega) = -\frac{\partial S(\omega)}{\partial m_k} g(\vec{x}_k, \omega | \vec{x}_s)$ 과 같이 송신원 위치  $\vec{x}_s$ 에서 산란 지점(scattering point)  $\vec{x}_k$ 으로 전파하는 해석적 그린함수를 사용하여 가상음원을 추정하는 것으로 구성된다. 후방 전파 단계는  $S^{-1}(\omega) [d'(\omega)]^* = [d'(\omega)]^* g(\vec{x}_k, \omega | \vec{x}_r)$ 와 같이 수신기 위치

$\vec{x}_r$ 에서 산란 지점  $\vec{x}_s$ 으로 전파하는 해석적 그린함수를 사용하여 상기 송신원 디컨볼루션부에서 디컨볼루션된 관측 데이터를 후방 전파 처리할 수 있다. 수층 이미지 획득 단계는  $\Phi_k = \sum_{\omega} \Phi_k(\omega) = \sum_{\omega} R \left\{ \left[ -\frac{\partial S_k(\omega)}{\partial m_k} g(\vec{x}_k, \omega | \vec{x}_s) \right]^T [d'(\omega)]^* g(\vec{x}_k, \omega | \vec{x}_r) \right\}$  와 같이 추정된 가상음원과 디컨볼루션된 관측 데이터를 후방 전파 처리한 결과를 이용하여 수층 이미지를 획득하는 것으로 수행된다.

## 2. 가상음원을 이용한 이미징 조건 (Virtual source imaging condition)

탄성과 구조보정 이미지 계산 대상을 가상의 격자공간으로 가정했을 때, 임의의 k-번째 위치에서의 역시간 구조보정 이미지  $\Phi_k$ 은 수신기에서 기록된 파동장과 편미분 파동장의 상호상관(cross-correlation)에 의해 정의 된다. 이러한 이미징 컨디션(imaging condition)은 주파수 영역에서 아래의 [수식 1]과 같이 표현된다.

$$\Phi_k = \int_0^{\infty} \Phi_k(\omega) d\omega \approx \sum_{\omega} R \left\{ \left[ \frac{\partial u(\omega)}{\partial m_k} \right]^T d^*(\omega) \right\} \quad \text{[수식 1]}$$

여기서,  $\omega$ 는 각주파수(the angular frequency)이고,  $d(\omega)$ 는 푸리에 변환된 관측 데이터 (Fourier transformed data)이며,  $u(\omega)$ 는 주파수-영역 모델링 파동장(modeling wavefield in the frequency domain)이고,  $m_k$ 는 k-번째 모델 변수(k-th model parameter)이며,

$\frac{\partial u(\omega)}{\partial m_k}$ 는 편미분 파동장(partial derivative wavefield;  $m_k$ 의 변화에 따른  $u(\omega)$ 의 변화

량)이고,  $T$ 는 전치행렬 연산자(matrix transpose operator)이며,  $*$ 는 복소켈레 연산자(the conjugate operator)이고,  $R$ 은 복소수의 실수부를 나타낸다(Kim et. al, 2011). 여기서, 편미분 파동장을 직접 계산하는 것은 많은 계산을 요구하기 때문에 일반적으로 아래의 [수식 2] ~ [수식 9] 같이 가상음원(virtual source)를 이용하여 역시간 구조보정  $\Phi_k$ 을 계산한다.

주어진 음향 배경 매질(acoustic background model)을 이용해, 주파수-영역 모델링 파

동장  $u(\omega)$ 은 아래의 [수식 2]인 헬름홀츠 방정식(Helmholtz equation)을 푸는 것으로 계산할 수 있다.

$$\nabla \cdot \left( \frac{1}{\rho(x)} \nabla u(\omega) \right) + \frac{\omega^2}{\rho(x)c^2(x)} u(\omega) = -\frac{s(\omega)}{\rho(x)} \delta(x - x_s) \quad [\text{수식 2}]$$

여기서,  $c(x)$  및  $\rho(x)$ 는 각각 음향 매질의 음속과 밀도이고,  $s(\omega)$ 는 음원이며,  $\delta(\cdot)$ 는 다중 채널 탄성과 탐사를 위한 점 송신원(point source)을 구현하기 위한 크로네커 델타 함수(Kronecker delta function)이다. 유한 요소법(finite element method) 또는 유한 차분법(finite difference method)에 의해 [수식 2]는 아래의 [수식 3]과 같이 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$\mathcal{S}(\omega)u(\omega) = s(\omega)f \quad [\text{수식 3}]$$

여기서,  $\mathcal{S}(\omega)$ 는 복소 임피던스 행렬(complex impedance matrix)이고,  $f$ 는 송신원 벡터이다(Virieux et al., 2009). 유한 요소법(Jensen, F. B., 2011. Computational Ocean Acoustics, 2nd edn)을 이용하여 복소 임피던스 행렬  $\mathcal{S}(\omega)$ 은 아래의 [수식 4]와 같이 각 요소(element)의 강성 행렬(stiffness matrix)  $K_k$ , 감쇠 행렬(damping matrix)  $c_k$  및 질량 행렬(mass matrix)  $M_k$ 으로 구성된다.

$$\mathcal{S}(\omega) = \sum_{k=1}^{ne} \mathcal{S}_k(\omega) = \sum_{k=1}^{ne} K_k + i\omega c_k + \omega^2 M_k \quad [\text{수식 4}]$$

여기서,  $ne$ 는 전체 요소의 개수(total number of elements)이고,  $i = \sqrt{-1}$ 이다. 편미분 파동장  $\frac{\partial u(\omega)}{\partial m_k}$ 은 아래의 [수식 5]와 같이 모델 변수  $m_k$ 에 대하여 [수식 3]을 미분하는 것으로 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial \mathcal{S}(\omega)}{\partial m_k} u(\omega) + \mathcal{S}(\omega) \frac{\partial u(\omega)}{\partial m_k} = 0 \quad \text{[수식 5]}$$

위의 [수식 5]를 재배열하면 아래의 [수식 6]이 된다.

$$\frac{\partial u(\omega)}{\partial m_k} = \mathcal{S}^{-1}(\omega) v_k(\omega) \quad \text{[수식 6]}$$

여기서, 가상음원(virtual source)은 아래의 [수식 7]과 같이 정의된다.

$$v_k(\omega) = -\frac{\partial \mathcal{S}(\omega)}{\partial m_k} u(\omega) = -\frac{\partial \mathcal{S}_k(\omega)}{\partial m_k} u(\omega) \quad \text{[수식 7]}$$

여기서, 가상음원  $v_k(\omega)$ 은 산란 파동장의 지향성(radiation pattern of scattered wavefield)을 결정하는 복소 임피던스 행렬의 미분값  $\frac{\partial \mathcal{S}(\omega)}{\partial m_k}$ 과 모델링 파동장  $u(\omega)$ 의 곱으로 정의된다. 유한 요소법에서 각각의 모델 변수는 해당 고유 요소(unique element)에서만 정의되기 때문에([수식 [4] 및 Shin et al., 2001)), [수식 7]에서  $\frac{\partial \mathcal{S}(\omega)}{\partial m_k}$ 의 계산은

$\frac{\partial \mathcal{S}_k(\omega)}{\partial m_k}$ 으로 감소할 수 있다. 예컨대, k번째 요소의 음속에 대한 복소 임피던스 행렬의

편미분은 아래의 [수식 8]과 같이 k번째 질량 행렬  $M_k$ 에 대한 미분만으로 감소할 수 있다.

$$\frac{\partial \mathcal{S}(\omega)}{\partial c_k} = \frac{\partial \mathcal{S}_k(\omega)}{\partial c_k} = \omega^2 \frac{\partial M_k}{\partial c_k} \quad \text{[수식 8]}$$

[수식 6]을 [수식 1]에 대입하고, 등방성 음향 파동 전파 모델링(isotropic modelling)에서의 복소 임피던스 행렬  $\mathcal{S}(\omega)$ 에 대한 대칭 특성 (symmetricity)을 이용하면, 아래의 [수식 9]를 도출할 수 있다.

$$\Phi_k = \sum_{\omega} \Phi_k(\omega) = \sum_{\omega} R \left\{ \left[ -\frac{\partial S_k(\omega)}{\partial m_k} u(\omega) \right]^T [S^{-1}(\omega) d^*(\omega)] \right\} \quad \text{[수식 9]}$$

따라서 [수식 1]의 역시간 구조보정은 편미분 파동장의 직접적인 계산 없이 [수식 9]를 이용하여 가상음원(virtual source)와 후방 전파된 관측 데이터  $S^{-1}(\omega)d^*(\omega)$ 의 컨볼루션(convolution)으로 계산할 수 있다.

하지만, 멀티 프론탈 다이렉트 솔버를 이용해 모델링 파동장과 관측된 데이터의 후방 전파를 효율적으로 계산(Virieux et al., 2009) 할 수 있다고 하더라도 [수식 9]는 고해상도 수층 이미지 구축에 적용하기 어려움이 있다. 예를 들어, 최대 주파수 128 Hz에 해당하는 고해상도 이미지를 획득하기 위해서는 유한 요소법의 파장당 격자 수(Deraemaeker et al., 1999) 때문에 0.71 m 정도의 격자 크기를 사용해야 한다. 이러한 격자 크기로 100 km(distance) x 2~3 km(depth) 영역에 대해 구성된 복소 임피던스 행렬을 인수분해(factorization) 하는데 이는 현실적으로 불가능한 메모리 할당량을 필요로 한다(Gupta et al., 1997). 또한, [수식 9]는 송신원의 에너지,  $s^2(\omega)$ 이 포함되어 있기 때문에([수식 2] 및 [수식 15]) 송신기에서 상대적으로 거리가 가까운 위치에 이미징 대상이 존재하고 있는 수층 이미징 기법에는 적합하지 않다.

### 3. 해석적 그린함수의 응용 (Analytic Green's function application)

수층에서 일정한 음속과 밀도를 가정하면, 3차원 반무한 매질에서의 해석적 그린함수(3D analytic Green's function for half space)는 아래의 [수식 10]과 같이 표현할 수 있다.

$$g(\vec{x}_r, \omega | \vec{x}_s) = \frac{e^{i\frac{\omega}{c_0}|\vec{x}_r - \vec{x}_s|}}{4\pi|\vec{x}_r - \vec{x}_s|} - \frac{e^{i\frac{\omega}{c_0}|\vec{x}_r - \vec{x}'_s|}}{4\pi|\vec{x}_r - \vec{x}'_s|} \quad \text{[수식 10]}$$

여기서, 방정식의 오른쪽에 있는 첫번째 항은 실제 송신원 위치  $\vec{x}_s = (x_s, y_s, +z_s)$ 에서 수신기 위치  $\vec{x}_r = (x_r, y_r, +z_r)$ 로 전파하는 3차원 무한매질의 해석적 그린함수(3D

analytic Green's function for free space)이고, 두번째 항은 가상음원  $\vec{x}'_s = (x_s, y_s, -z_s)$ 에서 수신기 위치  $\vec{x}_r = (x_r, y_r, +z_r)$ 로 전파하는 3차원 무한매질의 해석적 그린함수(3D analytic Green's function for free space)이다. 이는  $z=0$ 에서 반사계수가 -1인 경우 송신기 위치  $\vec{x}_s$ 에서 수신기 위치  $\vec{x}_r$ 으로 전파하는 직접파(direct arrival)와 해수면 반사파(free-surface reflection)로 각각 해석되고, [수식 10]은 아래의 [수식 11]의 조건에서 [수식 2] 혹은 [수식 3]의 풀이가 된다(Duffy, 2001).

$$c(x) = c_0, \rho(x) = 1.0, \text{ and } s(\omega) = 1.0 \quad \text{[수식 11]}$$

여기서,  $c_0$ 는 수층의 음속이다. [수식 7]의 가상음원(virtual source)  $v_k(\omega)$ 은 아래의 [수식 12]와 같이 송신원 위치  $\vec{x}_s$ 에서 산란 지점(scattering point)  $\vec{x}_k$ 으로 전파하는 해석적 그린함수를 이용하여 계산할 수 있다. 즉, 가상음원 추정부(151)는 [수식 12]를 통해 가상음원을 추정할 수 있다.

$$v_k(\omega) = -\frac{\partial S(\omega)}{\partial m_k} g(\vec{x}_k, \omega | \vec{x}_s) \quad \text{[수식 12]}$$

측정된 데이터의 후방 전파(back-propagated wavefield)는 아래의 [수식 13]과 같이 수신기 위치  $\vec{x}_r$ 에서 산란 지점(scattering point)  $\vec{x}_k$ 으로 전파하는 해석적 그린함수를 사용하여 계산할 수 있다 (Sommerfeld, 1912).

$$S^{-1}(\omega) d^*(\omega) = d^*(\omega) g(\vec{x}_k, \omega | \vec{x}_r) \quad \text{[수식 13]}$$

[수식 12] 및 [수식 13]을 [수식 9]에 대입하면 아래의 [수식 14]와 같다.

$$\Phi_k = \sum_{\omega} \Phi_k(\omega) = \sum_{\omega} R \left\{ \left[ -\frac{\partial S_k(\omega)}{\partial m_k} g(\vec{x}_k, \omega | \vec{x}_s) \right]^T d^*(\omega) g(\vec{x}_k, \omega | \vec{x}_r) \right\} \quad \text{[수식 14]}$$

[수식 14]에서는 종래의 주파수-영역 역시간 구조보정 알고리즘에서 상당량의 계산을 요하는 파동 방정식의 수치적 풀이([수식 9]에 의한 파동전파 모델링 및 관측 데이터의 역전과 부분)을 해석적 그린함수의 풀이로 대체함으로써 종래의 주파수-영역 역시간 구조보정과는 다르게 복소 임피던스 행렬의 구성 및 풀이가 필요하지 않다. 하지만 [수식 14]는 수신기들로부터 측정된 관측 데이터에 포함된 송신원,  $\mathcal{S}(\omega)$ 이 포함되어 있기 때문에([수식 11]; [수식 15] (Jang, U. 2012) 송신기에서 상대적으로 거리가 가까운 해수 이미지 구축에는 여전히 적합하지 않다.

#### 4. 송신원 디컨볼루션 (Source deconvolution)

해양 탄성과 탐사에서 사용하는 에어건(airgun)은 버블 진동(bubble oscillation)을 발생시키고, 특히 수층 내에서 발생한 반사파의 크기보다 버블의 크기가 더 큰 경우(대부분 그러하다), [수식 14]를 단순히 이용하는 것만으로는 정확한 수층 이미지를 얻기 어렵다. 특히, 해수의 열염분 순환의 이해에 중요한 20 ~ 100 m 깊이의 천부 수층 부분의 이미지는 버블에 의해 가려지게 된다.

송신원 디컨볼루션은 이러한 버블의 영향을 최소화시킬 수 있고, 결과 이미지의 품질을 향상시키는데 큰 도움을 줄 수 있다. 주파수-영역에서 아래의 [수식 15]를 통해 수신기들로부터 측정된 데이터에서 송신원을 디컨볼루션할 수 있다.

$$d'(\vec{x}_r, \omega | \vec{x}_s) = \frac{d(\vec{x}_r, \omega | \vec{x}_s)}{s(\omega)} \approx \frac{d(\vec{x}_r, \omega | \vec{x}_s)}{s'(\omega)} \quad \text{[수식 15]}$$

여기서,  $\mathcal{S}(\omega)$ 는 송신 파형(source signature)이다. 즉 송신원 디컨볼루션부는 [수식 15]을 통해 송신원이 디컨볼루션된 관측 데이터를 처리할 수 있다. 송신 파형  $\mathcal{S}(\omega)$ 는 측정된 송신원(Ziolkowski, 1991)을 이용하거나 또는 [수식 16]과 같이 주파수-영역에서 최소 제곱을 이용한 최적화(least-square optimization)를 통해 추정된 송신원(estimated source)  $s'(\omega)$ 를 사용한다 (Kim et al., 2011).

$$s'(\omega) = \frac{d(\vec{x}_r, \omega | \vec{x}_s) g^*(\vec{x}_r, \omega | \vec{x}_s)}{g(\vec{x}_r, \omega | \vec{x}_s) g^*(\vec{x}_r, \omega | \vec{x}_s)} \quad \text{[수식 16]}$$

주파수-영역에서 송신원은 송신기 위치  $\vec{x}_s$ 에서 수신기 위치  $\vec{x}_r$ 으로 전파하는 해석적 그린함수와 수신기로부터 측정된 관측 데이터를 사용하여 추정할 수 있다. 이때, 수신기로부터 측정된 관측 데이터에 대한 시간 영역에서의 적절한 시간 윈도우(time windowing)의 수행은 [수식 16]을 이용한 송신원 추정의 안정성을 높일 수 있다(Koo, et al., 2011). 즉, 송신원 추정부는 [수식 16]을 통해 송신원을 계산된다. [수식 15]를 [수식 13]에 대입하면 아래의 [수식 17]과 같다.

$$S^{-1}(\omega) [d'(\omega)]^* = [d'(\omega)]^* g(\vec{x}_k, \omega | \vec{x}_r) \quad \text{[수식 17]}$$

즉, 후방 전파부는 [수식 17]을 통해 송신원이 디컨볼루션된 관측 데이터(source deconvoluted field data)를 후방 전파 처리할 수 있다.

[수식 12]와 [수식 17]을 [수식 9]에 대입하면 아래의 [수식 18]과 같다.

$$\Phi_k = \sum_{\omega} \Phi_k(\omega) = \sum_{\omega} R \left\{ \left[ -\frac{\partial S_k(\omega)}{\partial m_k} g(\vec{x}_k, \omega | \vec{x}_s) \right]^T [d'(\omega)]^* g(\vec{x}_k, \omega | \vec{x}_r) \right\} \quad \text{[수식 18]}$$

따라서 수층 이미지 구축을 위한 [수식 1]의 역시간 구조보정 식은 종래의 주파수-영역 구조보정과 형태적으로 유사하게 가상음원(virtual source)와 후방 전파된 관측 데이터의 컨볼루션(convolution)으로 계산할 수 있다. 그러나 가상음원 계산시 해석적 그린함수를 이용하고, 송신원이 디컨볼루션된 관측 데이터를 후방 전파하기 때문에 송신 파형과 무관한 수층 이미지를 계산할 수 있다 (Jang, U. (2012)). 즉 후처리부는 [수식 18]을 통해 가상음원과 송신원이 디컨볼루션된 관측 데이터(source deconvoluted field data)를 후방 전파된 결과를 이용해 수층 이미지를 처리할 수 있다.

본 연구에서 제시하는 역시간 구조보정은 파동방정식의 수치적인 풀이를 해석적 그린

함수의 사용으로 대체하였기 때문에 종래의 주파수-영역 역시간 구조보정과는 다르게 복소 임피던스 행렬의 구성 및 풀이가 필요하지 않다. 더욱이 본 연구에서 수정된 역시간 구조보정의 격자 크기는 최대 주파수(maximum frequency)에 따른 파장당 격자수가 아닌 공간 해상도(spatial resolution)만을 고려하는 것으로 결정할 수 있다 (Virieux, and Operto, (2009)). 예컨대, 128 Hz를 최대 주파수로 설정할 경우 2.0 m의 격자 크기로의 이미징 계산이 충분하다. 이는 종래의 유한 요소법을 사용하는 동일한 주파수에서 요구하는 격자 크기 0.71 m에 비해 약 3배이기 때문에 [수식 18]의 계산에는 아주 작은 메모리만이 필요하다. 따라서, 본 연구에 따른 역시간 구조보정 기법은 막대한 량의 메모리 요구 없이 고해상도 수층 이미지를 계산해 낼 수 있다. 더욱이 본 연구에서 역시간 구조보정의 계산 시 추정된 송신원(estimated source)이 디컨볼루션된 자료  $d'(\omega)$ 를 후방 전파하기 때문에 기존의 다른 알고리즘에서는 불가능했던 20 ~ 100 m 깊이의 천부 수층 구조에 대한 구조보정 이미지 계산이 가능하다.

본 연구에서는 정확한 수층 이미지의 계산을 위해 주파수영역 역시간 구조보정 기술을 도입하고자 하였고, 이로 인해 수반되는 상당량의 계산은 해석적 그린함수의 풀이로 대체하여 효율적으로 고주파수 성분이 포함된 고해상도 수층 이미지를 획득하고자 상기의 기술을 개발하고 알고리즘을 작성하였다. 본 연구에서 작성한 알고리즘을 활용한다면, 고주파수 성분이 포함된 고해상도의 수층 이미지를 해상에서 획득한 탄성과 탐사자료로부터 구축할 수 있고, 획득한 고해상도 탄성과 수층 이미지는 탐사 지역 내에서의 연속적인 수층의 물성(수온, 염분도 등)의 분포를 밝혀낼 수 있으며, 나아가 서로 다른 물성 해류가 어떻게 섞이는지, 대규모의 해류 순환이 어느 정도까지 발생하는 지를 확인하는 해양물리학적 연구의 수행을 가능하게 할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

### 제 3 절 결과

본 연구를 통해 개발된 그린함수 해석해를 기반으로하는 주파수영역 역시간 구조보정 알고리즘은 우리 연구소에서 보유하고 있는 극지방에서 획득한 다채널 탄성과 탐사자료에 적용하여 성능을 확인하였으며, 수층 이미지에 나타나는 반사 이벤트들은 탄성과 탐사시 함께 획득하였던 XCTD프로파일에 나타나는 음향임피던스 이벤트와 매칭시킴으로써

결과에 대한 타당성을 검증하였다.

**1. 북극 보퍼트해에서 획득한 현장자료(다채널 탄성과 탐사, 2014년 획득자료)를 이용한 수층 이미지 결과 비교 (전통적인 방법을 이용한 수층 이미지와 본 연구에서 개발한 역시간 구조보정을 이용하여 계산된 구조보정 이미지 결과 비교)**

2014년 북극 보퍼트해 대륙사면 지역에 나타나는 수층 열염구조를 대상으로 전통적인 자료처리 기법을 이용하여 구축한 수층 이미지와 본 연구를 통해 작성한 그린함수 해석해를 적용한 주파수 영역 역시간 구조보정 이미지를 비교하였다. (그림 5), (그림 6), (그림 7), (그림 8)에서는 2014년 획득한 총 4개의 탐사라인에 대해 전통적인 방법과 본 연구를 통해 작성한 구조보정 알고리즘을 이용하여 구축한 각각의 수층 이미지를 제시하였고 그 결과를 비교하였다. 그 결과, 각각의 탐사라인에서 공통적으로 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다. 전통적인 자료처리 방법을 이용하여 구축한 수층 이미지의 경우, 대체적인 수층거동을 설명할 수 있는 탄성과 이미지를 구해 낼 수는 있지만, 기후변화와 직접적인 연관이 있는 저수심 구간에 대한 수층 이벤트에 대한 이미징이 불가능하였다. 반면 그린함수 해석해를 기반으로 한 역시간 구조보정을 이용한 수층 이미지에서는 100m 이내의 수층 이벤트를 구축해 낼 수 있을 뿐만 아니라, 기존의 전통적인 방법을 이용한 결과보다 미세한 수층구조를 이미징 할 수 있었다.

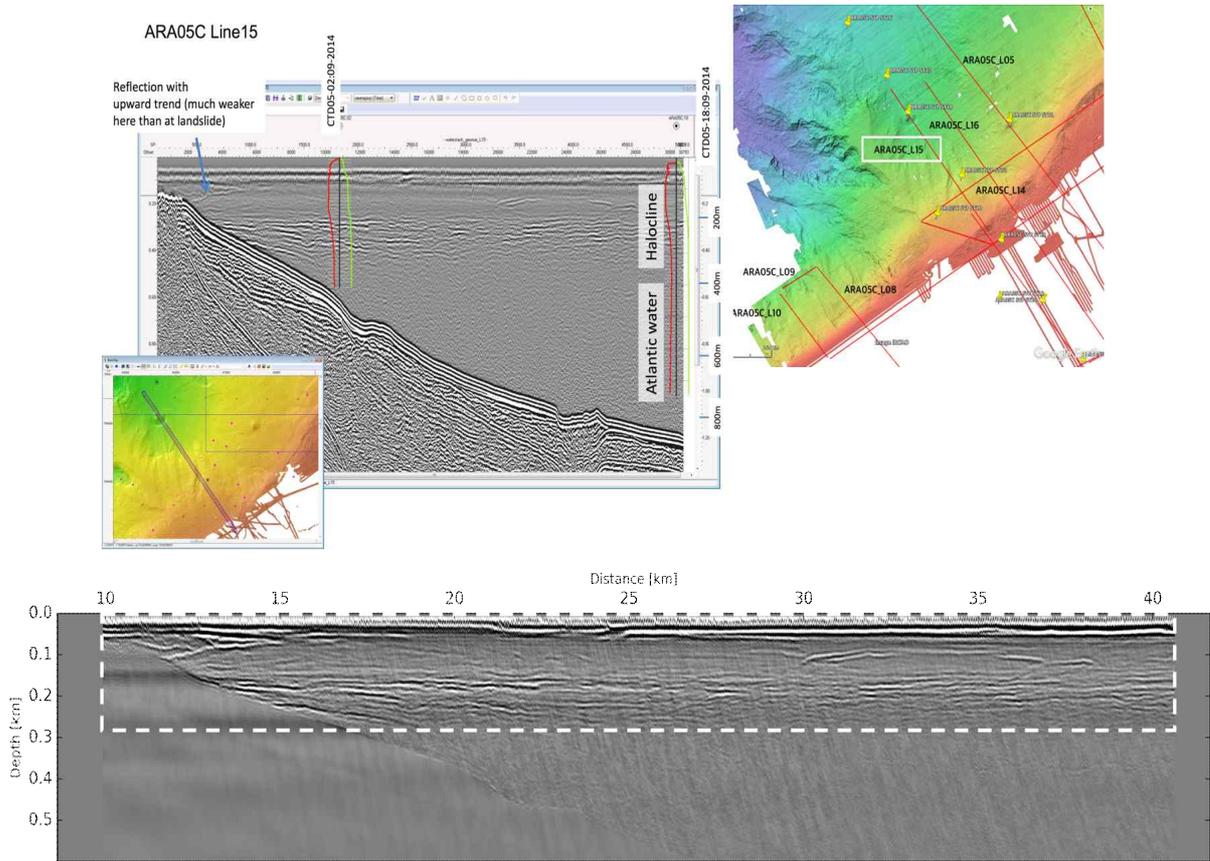


그림 5. ARA05C (2014년 북극 보퍼트해에서 획득한 탄성과 탐사자료) 15번 라인을 이용하여 구축한 해당 연구지역 수층 이미지, 상부 이미지(일반적인 자료처리 기법을 이용한 수층 이미지; 하부 이미지(그린함수 해석해를 이용한 주파수영역 역시간 구조보정 알고리즘을 이용하여 계산한 수층 구조보정 이미지)

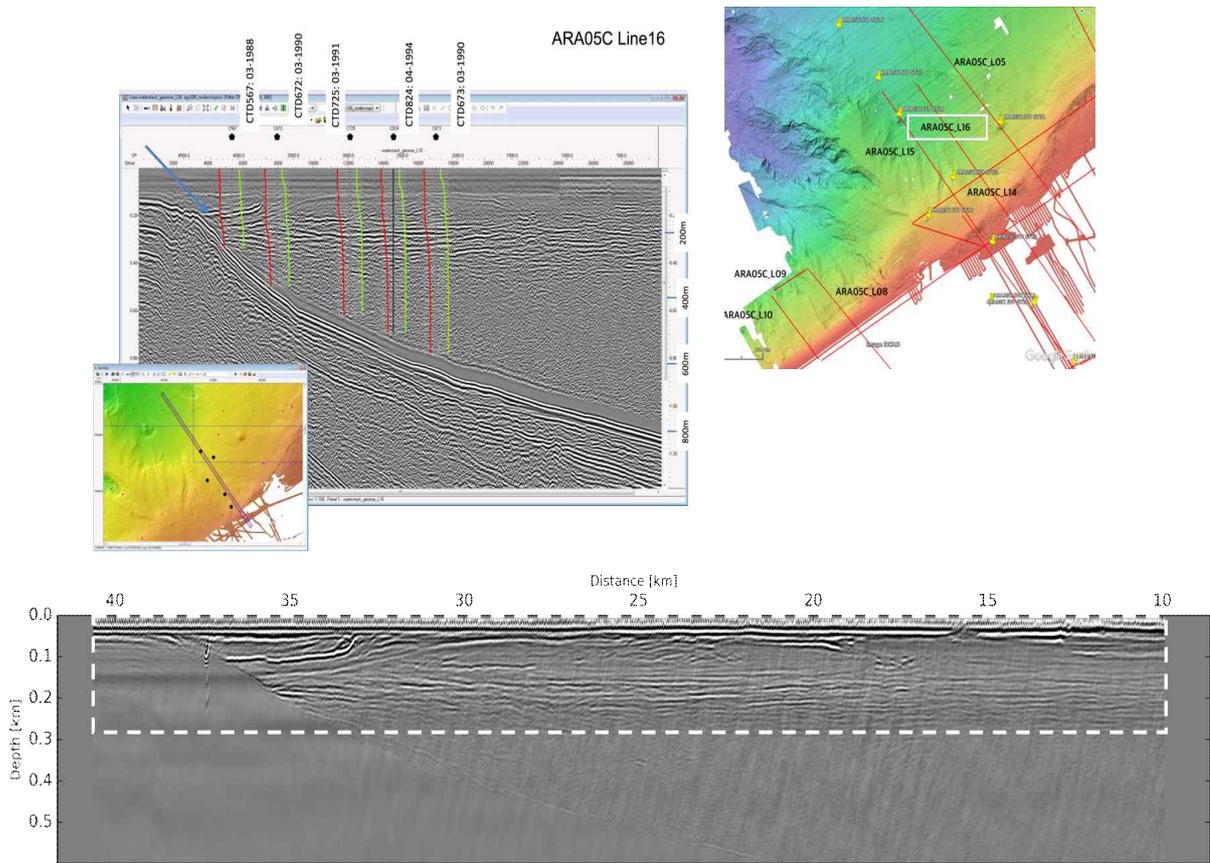


그림 6. ARA05C (2014년 북극 보퍼트해에서 획득한 탄성과 탐사자료) 16번 라인을 이용하여 구축한 해당 연구지역 수층 이미지, 상부 이미지(일반적인 자료처리 기법을 이용한 수층 이미지; 하부 이미지(그린함수 해석해를 이용한 주파수영역 역시간 구조보정 알고리즘을 이용하여 계산한 수층 구조보정 이미지)

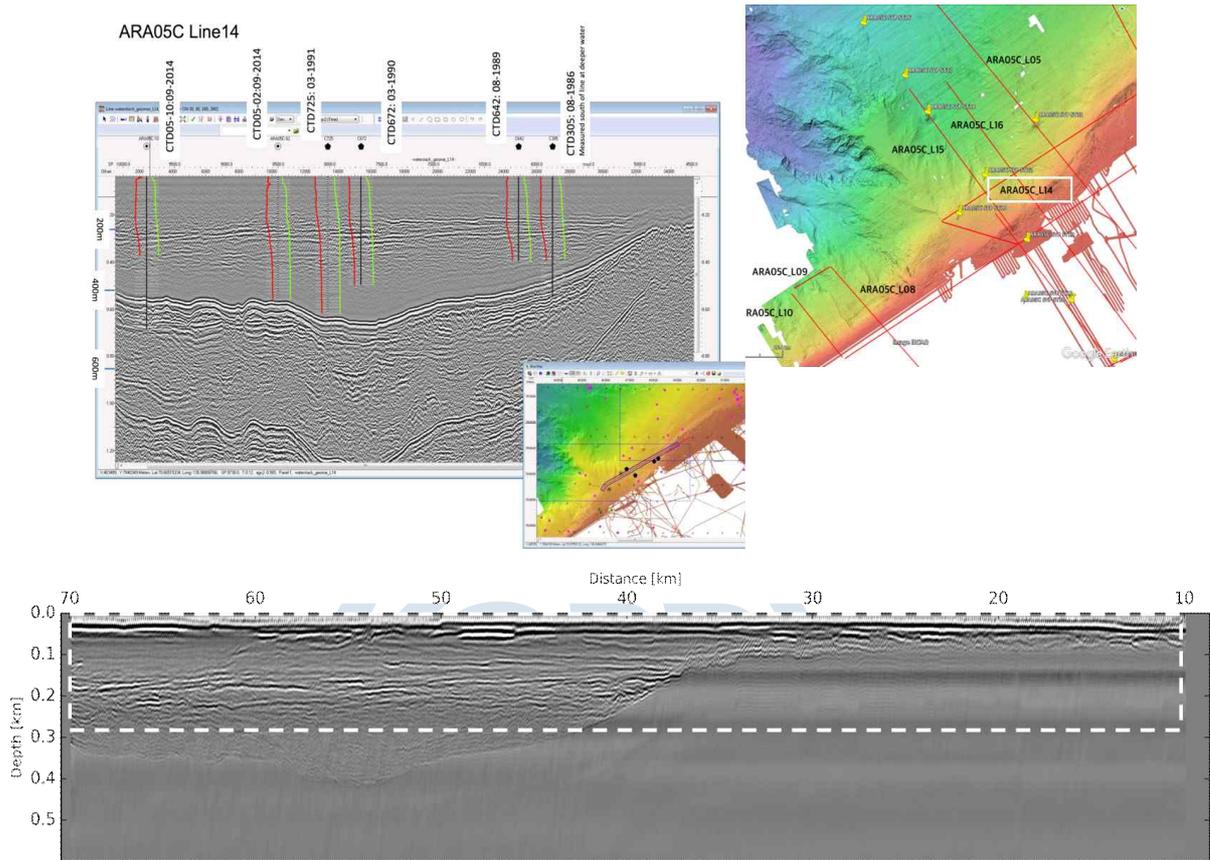


그림 7. ARA05C (2014년 북극 보퍼트해에서 획득한 탄성과 탐사자료) 14번 라인을 이용하여 구축한 해당 연구지역 수층 이미지, 상부 이미지(일반적인 자료처리 기법을 이용한 수층 이미지; 하부 이미지(그린함수 해석해를 이용한 주파수영역 역시간 구조보정 알고리즘을 이용하여 계산한 수층 구조보정 이미지)

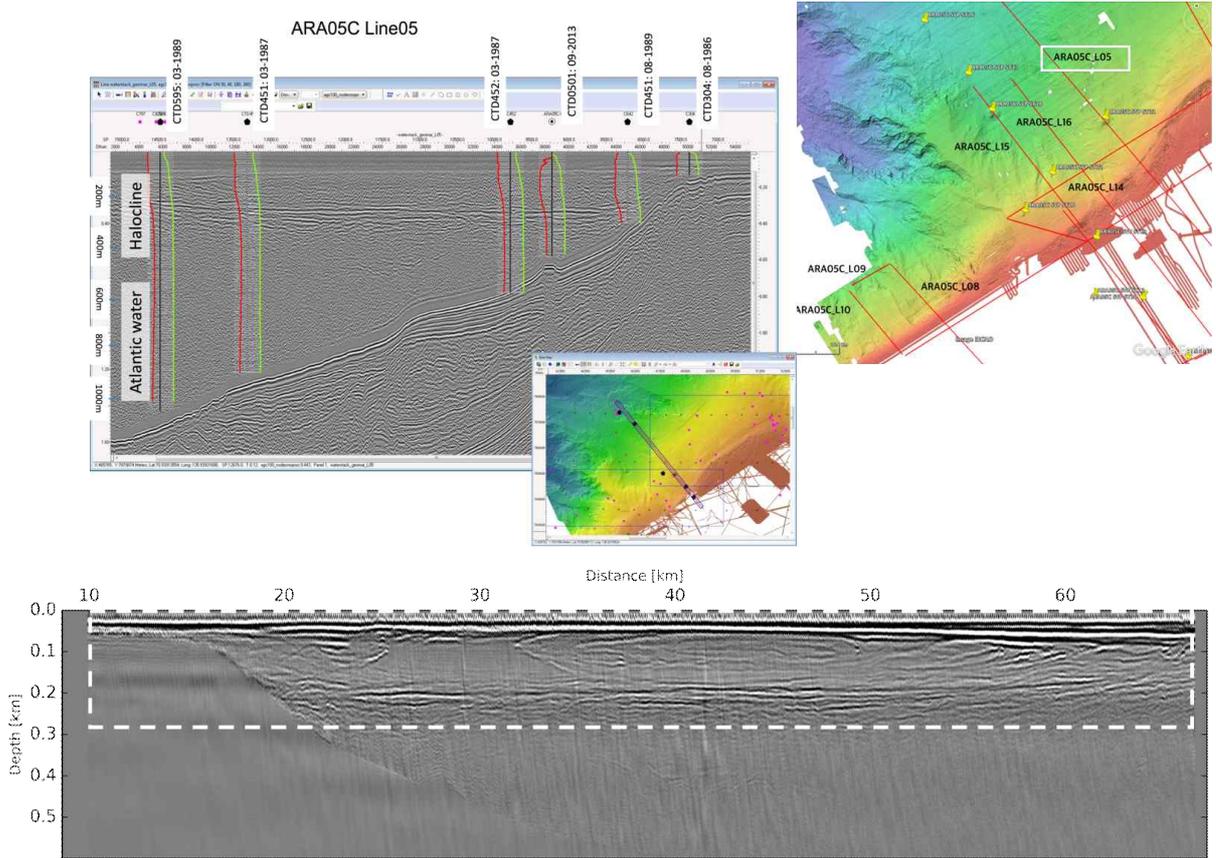


그림 8. ARA05C (2014년 북극 보퍼트해에서 획득한 탄성파 탐사자료) 5번 라인을 이용하여 구축한 해당 연구지역 수층 이미지, 상부 이미지(일반적인 자료처리 기법을 이용한 수층 이미지; 하부 이미지(그린함수 해석해를 이용한 주파수영역 역시간 구조보정 알고리즘을 이용하여 계산한 수층 구조보정 이미지)

2. 북극 보퍼트해에서 획득한 현장자료(다채널 탄성과 탐사, 2017년 획득자료)에 대한 구조보정 이미지 및 XCTD자료와의 비교 (결과증명 및 검증)

2017년 북극 보퍼트해(캐나다 EEZ 안쪽) 맥킨지 델타(Mackenzie Delta) 지역에서 대륙붕을 중심으로 다량의 탄성과 탐사자료를 획득하였고, 이 중 대륙사면지역을 중심으로 수층 해당 연구지역에 나타나는 수층의 거동과 열염순환의 관측을 위해 XCTD 자료를 획득하였다. 본 연구에서는 이를 활용하여 개발된 그린함수 해석해 기반 역시간 구조보정

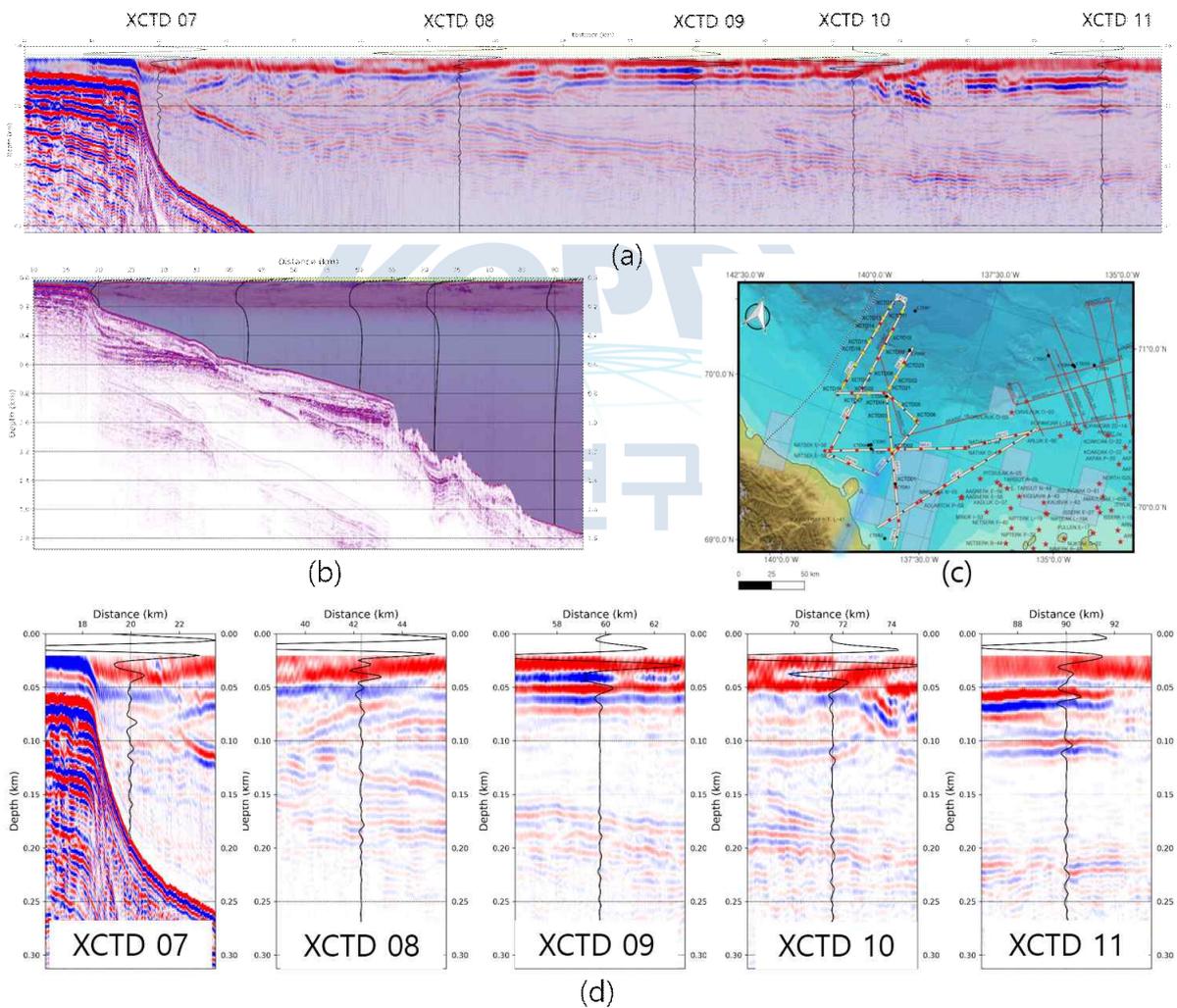


그림 9. ARA08C (2017년 북극 보퍼트해 맥킨지 델타(Mackenzie Delta) 인근의 대륙사면 지역에서 획득한 탄성과 탐사자료) 9번 라인에 대한 그린함수 해석해를 이용한 주파수영역 역시간 구조보정 알고리즘을 이용하여 계산한 수층 구조보정 이미지 및 결과검증. (a) 수층 이미지 결과 및 XCTD 프로파일 위치정보; (b) 구조보정 이미지 전체; (c) ARA08C 다채널 탄성과 탐사측선도; (d) 수층 이미지와 XCTD 자료로부터 계산된 반사계수 프로파일 비교

알고리즘을 적용하여 (그림 9) 에서 (그림 11)까지 총 3개 라인에 대한 수층 이미지를 구축하였다.

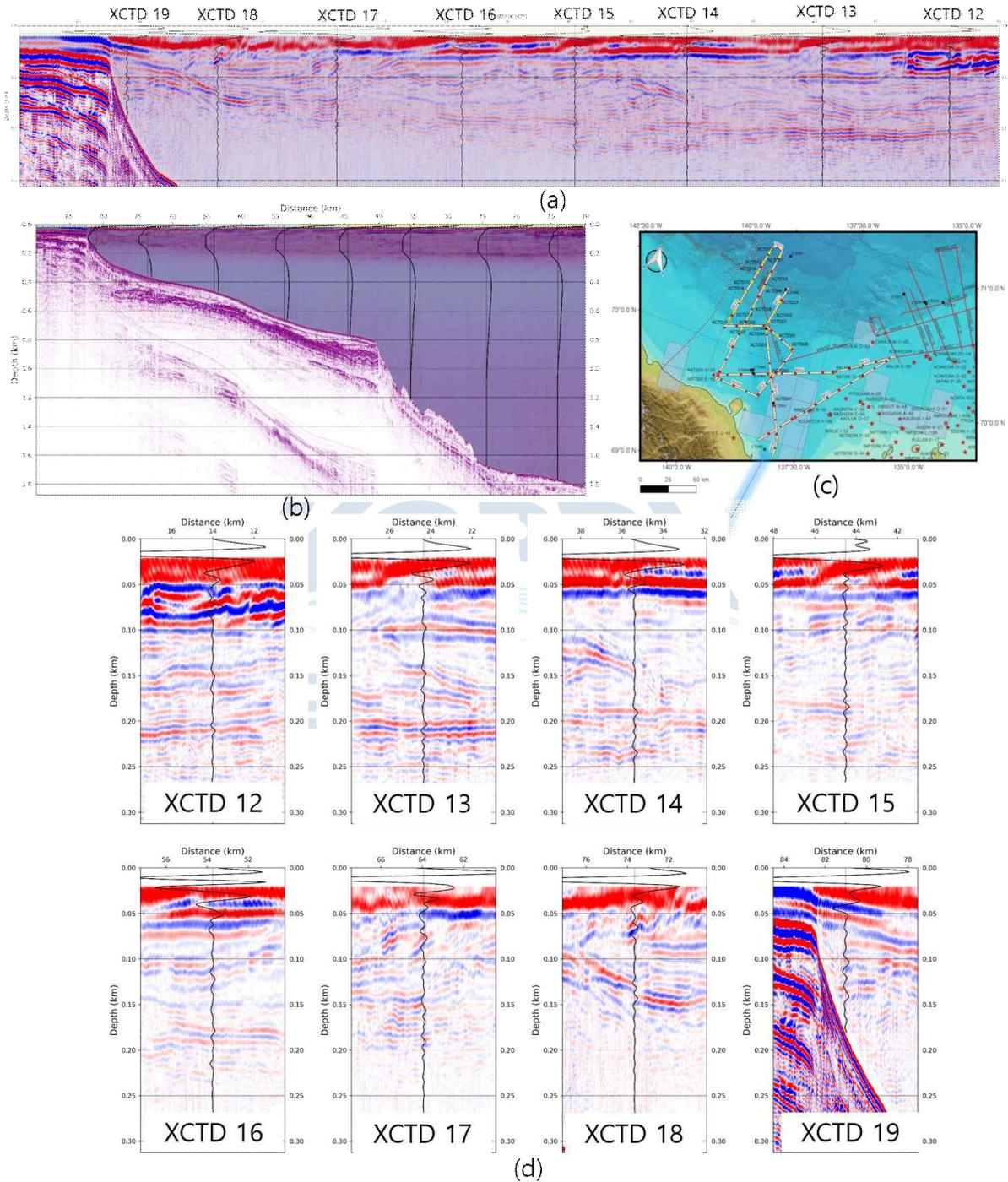
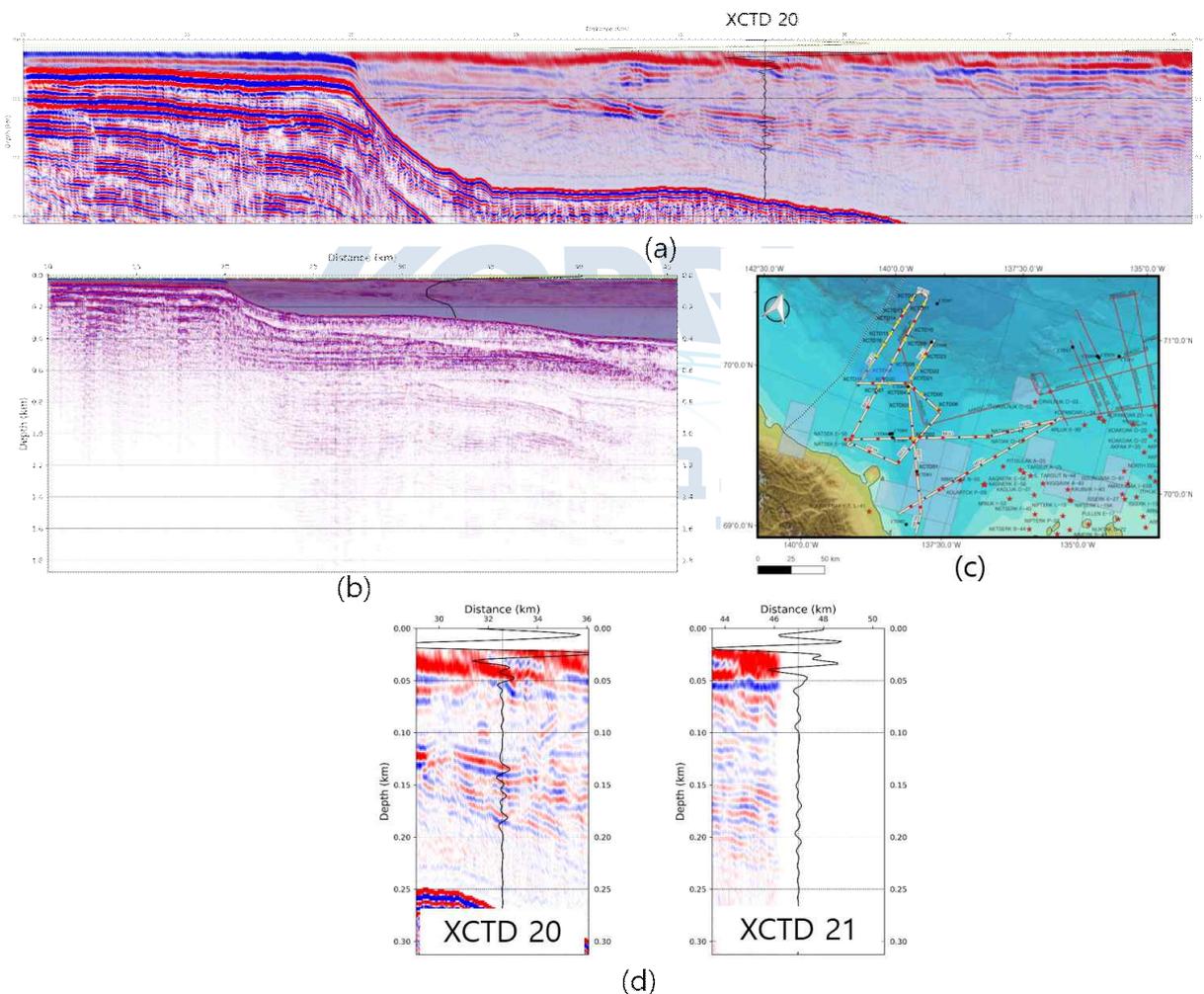


그림 10. ARA08C (2017년 북극 보퍼트해 맥킨지 델타(Mackenzie Delta) 인근의 대륙사면 지역에서 획득한 탄성과 탐사자료) 10번 라인에 대한 그린함수 해석해를 이용한 주파수영역 역시간 구조보정 알고리즘을 이용하여 계산한 수층 구조보정 이미지 및 결과검증, (a) 수층 이미지 결과 및 XCTD 프로파일 위치정보; (b) 구조보정 이미지 전체; (c) ARA08C 다채널 탄성과 탐사측선도; (d) 수층 이미지와 XCTD 자료로부터 계산된 반사계수 프로파일 비교

(그림 9) 에서 (그림 11)까지는 획득한 각 탐사라인 중 수심이 50 m 이상인 지역을 대상으로 계산된 수층 이미지와 XCTD자료로부터 반사계수를 계산하여 플롯한 반사계수 프로파일을 서로 비교하여, 수층 이미지에 대한 검증은 수행하였다. 그 결과 수층 이미지에 나타나고 있는 각각의 반사면과 이벤트는 XCTD로부터 계산된 반사계수 이벤트와 잘 매칭(matching)되고 있음을 확인할 수 있었다. 특히 본 연구에서 개발된 알고리즘의 장점인 저수심 구간 (~200 m)에서의 수층 이벤트가 잘 구축되고 있음을 확인할 수 있었으며, 이는 해당 연구지역에서 나타나는 기후변화를 이해하는데 소중한 자료로 쓰일 수 있을 것으로 기대하고 있다.



**그림 11.** ARA08C (2017년 북극 보퍼트해 맥킨지 델타(Mackenzie Delta) 인근의 대륙사면 지역에서 획득한 탄성과 탐사자료) 11번 라인에 대한 그린함수 해석해를 이용한 주파수영역 역시간 구조보정 알고리즘을 이용하여 계산한 수층 구조보정 이미지 및 결과검증, (a) 수층 이미지 결과 및 XCTD 프로파일 위치정보; (b) 구조보정 이미지 전체; (c) ARA08C 다채널 탄성과 탐사측선도; (d) 수층 이미지와 XCTD 자료로부터 계산된 반사계수 프로파일 비교

### 3. 구조보정 이미지 해석 : 북극 보퍼트해 맥킨지 델타 (Mackenzie Delta) 지역

본 연구에서 개발한 알고리즘을 이용하여 2014년 그리고 2017년 각각 북극 보퍼트해에서 획득한 다채널 탄성과 탐사자료로부터 수층 이미지를 획득하였다. 획득한 이미지는 기존의 전통적인 신호처리 방법을 이용한 결과와 비교하였고, 그 결과 저수심 구간에서 기존의 방법보다 월등한 영상구축의 성능을 보여주었다. 특히, 2017년 자료에서는 다채널 탄성과 탐사 수행 시 함께 획득한 XCTD 자료를 바탕으로 계산한 반사계수 프로파일과 비교하여 해당 알고리즘의 정확성을 검증하였다.

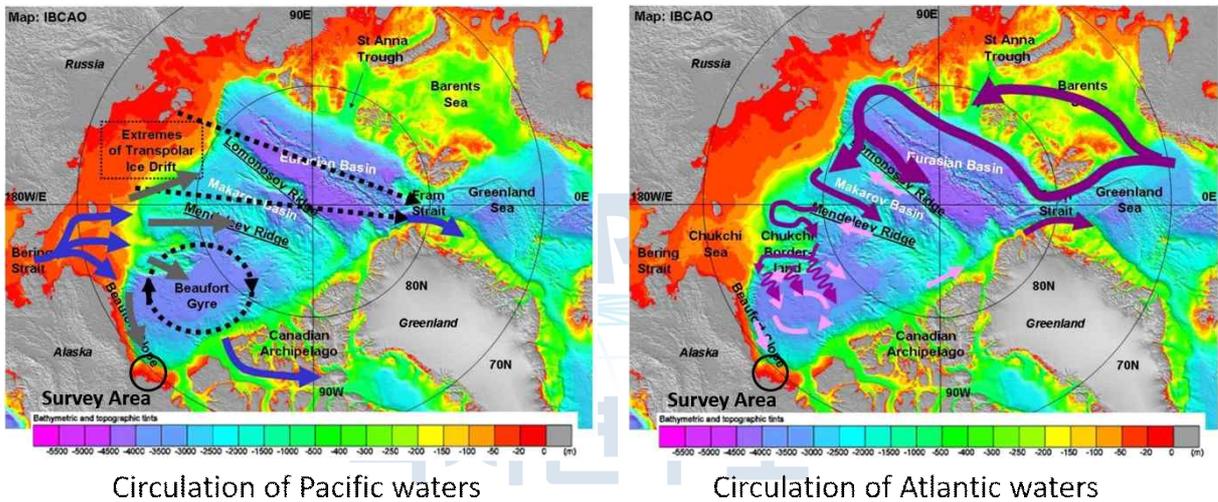
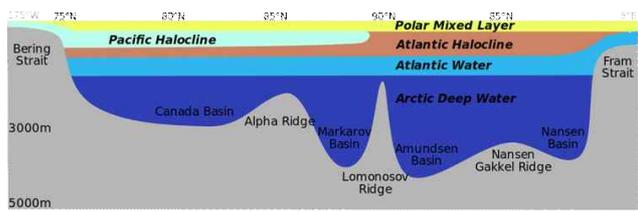
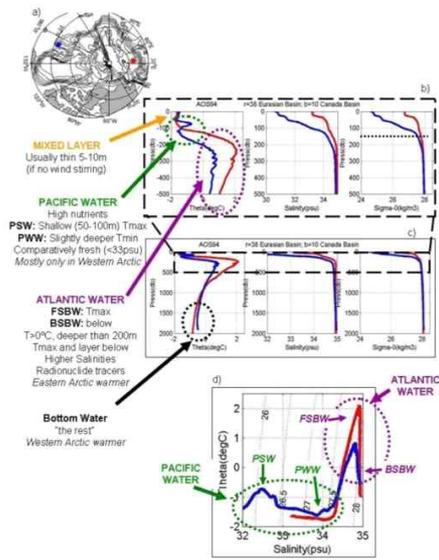


그림 12. 북극에서의 해류순환 (좌: 태평양 해수의 유입경로, 우: 북대서양 해수의 유입경로)

이번에는 기존에 연구된 북극해에 대한 일반적인 수층분포에 대한 연구결과를 본 연구에서 제시한 수층 이미지와 비교하여 분석한 결과를 제시하였다.

일반적으로 북극해는 유라시아, 북아메리카 그리고 그린란드로 둘러싸여 있으며, 베링해협을 통해 태평양과 연결되어 있고, 프람해협을 통해 대서양과 연결되어 있다. 북대서양의 해수는 그린란드와 스발바르 군도 사이의 프람해협과 바렌츠해 및 캐나다 군도를 통해 유입된다. 반면 북태평양의 해수는 폭이 좁고 수심이 얇은 베링해협을 통해서만 유입되고 있는 것으로 알려져 있다 (그림 12). 북극해 대부분을 차지하는 해수는 북대서양 해수로 이는 바다의 상층부에 일부 존재하고 나머지는 모두 중층과 저층으로 들어간다. 반면 태평양 해수는 주로 상층부에 존재하고 있는 것으로 알려져 있다 (그림 12 참고).



- ◆ Mixed Layer ( Around 5 m ~ 10 m)
- ◆ Pacific Waters, PW (Around 50 m ~ 150 m)
  - Pacific Summer Water (PSW)
  - Pacific Winter Water (PWW)
- ◆ Atlantic Waters, AW (Around 200 m ~ 400 m)
  - Fram Strait Branch Water (FSBW)
  - Barrents Sea Branch Water (BSBW)
- ◆ Arctic Deep water

그림 13. 북극해 해류분포

본 연구지역에서 관측되는 해류는 (그림 13)에 제시된 것과 같이 수심 5~10m에 존재하는 mixed layer 그리고 50~150m 수심구간에 존재하는 태평양 해수층 그리고 200m~400m 구간에 존재하는 대서양 해수층으로 구분할 수 있다. 태평양 해수층에서도 Pacific Summer Water (PSW)와 Pacific Winter Water (PWW)로 나뉜다. 대서양 수층은 Fram Strait Branch Water (FSBW)와 Barrents Sea Branch Water (BSBW)로 구분된다. 이와 같은 수층의 경계는 본 연구에서 제시하고 있는 수층 이미지에 강한 반사면으로 나타나게 된다.

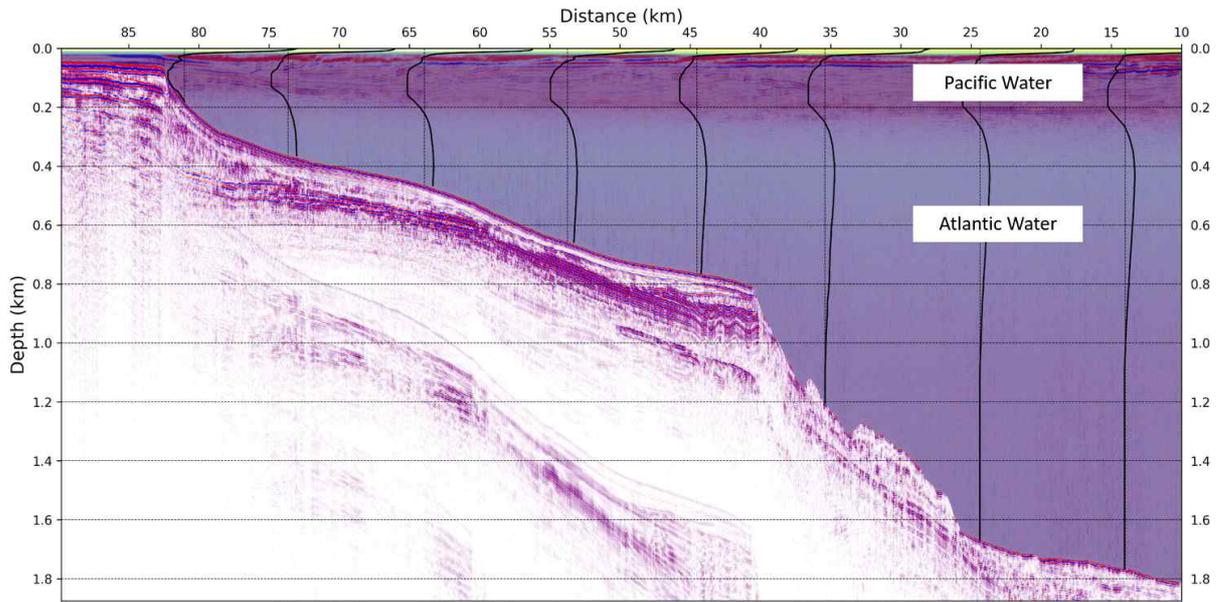


그림 14. 구조보정 알고리즘을 이용하여 구축한 수층에 대한 탄성과 이미지 (2017년 북극 보퍼트해에서 획득한 10번 탐사라인)

(그림 14)에서는 본 연구를 통해 개발된 구조보정 알고리즘을 이용하여 구축한 수층 이미지(2017년 북극보퍼트해에서 획득한 10번 탐사라인)를 XCTD 자료와 함께 도시하였다. 수층 이미지상에서 200m 인근에 수층의 경계가 나타나고 있으며, XCTD프로파일 상에서도 물성치가 다른 2종류의 층이 분류되어 나타나고 있음을 알 수 있었다.

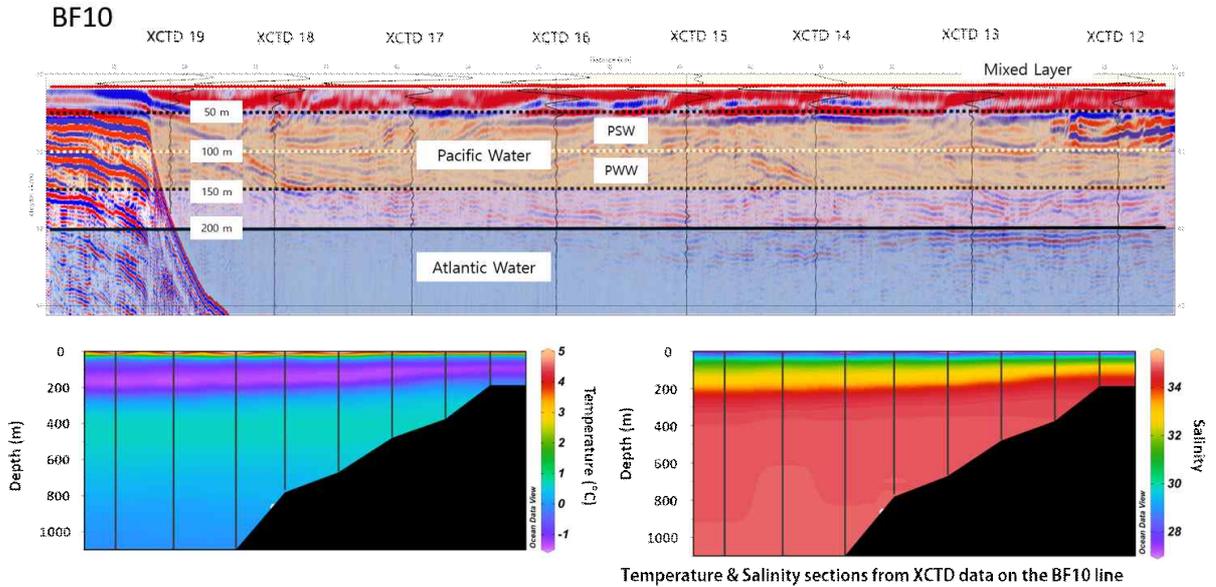


그림 15. 구조보정 알고리즘을 이용하여 구축한 수층에 대한 탄성과 이미지 및 XCTD 자료를 외삽하여 그린 온도 및 염분도 분포 (2017년 북극 보퍼트해에서 획득한 10번 탐사라인)

(그림 15)에서는 Woodgate, (2013)에서 제시하고 있는 북극에서의 수층분포와 본 연구를 통해 구축한 북극 보퍼트해 수층 이미지를 서로 비교하였다. 비교 결과 수층 이미지 상에서 나타나고 있는 반사 이벤트는 50m, 100m, 150m 그리고 200m인근에서 나타나고 있고, 가장 큰 반사이벤트는 50m상에 나타나고 있는 mixed layer와 태평양 수층의 경계로 판단된다. 반면, 태평양 수층과 북대서양 수층 내 존재하는 PSW, PWW 그리고 FSBW, BSBW의 경계는 아주 약한 이벤트로 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 200m 인근에서는 강하지는 않지만 북대서양 해류와 태평양 해류 간의 경계면이 나타나고 있음을 확인할 수 있었다.

## 제 4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

### 제 1 절 목표달성도

- 수층의 물리적 특성을 이용하여 계산효율을 극대화시킬 수 있는 그린함수 해석해를 이용한 주파수영역 역시간 구조보정 알고리즘 작성 완료
- 다양한 수치실험을 통해 해당 알고리즘의 최적화 수행 및 알고리즘 정상가동 확인
- 북극 보퍼트해에서 획득한 다채널 탄성과 탐사자료에 대한 적용을 위해 신호처리 기법을 이용한 전처리 수행
- 현장자료에 적용 및 북극 보퍼트해 대륙사면 지역에 대한 수층 이미지 구축 완료
- 전통적인 방법을 이용하여 구축한 수층 이미지와의 비교 분석 수행
- 2017년 획득한 탄성과 탐사자료와 XCTD 자료를 이용하여 수층 이미지를 비교하고, 이를 통해 현장자료에 대한 알고리즘의 적용 가능성과 결과의 타당성 증명 및 결과제시
- 구조보정 알고리즘을 통해 구축한 수층 이미지 분석을 통해 북극에 분포하고 있는 수층의 거동 관측 및 해석도 제시

### 제 2 절 관련분야에의 기여도

- 수평층을 가정하여 수행되는 일반적인 탄성과 자료처리 기법과의 차별성 및 기술적 한계점 극복 가능.

- 그린함수의 해석해를 이용함으로써 보다 향상된 효율을 지닌 수층에 대한 새로운 역 시간 구조보정 기술 개발.
- 저심도 수층에 대한 이미지 구현 및 북극에 나타나고 있는 각각의 수층의 경계를 명확히 규명해 낼 수 있는 연구자료를 제시.
- 급격한 기후변화가 진행 중인 극지에서 해류의 흐름을 관측할 수 있는 기술로 기존의 다중채널 탄성과 탐사자료를 활용하여 새로운 분야에서의 연구성과를 창출을 기대할 수 있음.
- 극지를 대상으로 새로운 연구분야에 대한 개척이 가능한 연구주제이기 때문에 향후, 해양탄성학(Seismic Oceanography)분야에서 극지연구소의 선도적인 역할 수행이 가능.



## 제 5 장 연구개발 결과 활용계획

- 극지연구소에서는 남극과 북극에서 쇄빙연구선 아라온을 이용하여 활발한 다중채널 탄성과 탐사활동을 진행하고 있으며 현재까지 상당량의 데이터가 축적되어 있음.
- 우리 연구소에서 보유한 북극 및 남극에서 획득한 다중채널 탄성과 탐사자료를 활용하여 고해상도 해양탄성학 이미지를 구축한다면 급격한 기후변화가 가속화됨에 따른 극지에서의 해류 순환에 대한 연속적인 관측과 이에 대한 해석이 가능.
- 향후, 북극 및 남극에서 획득한 다채널 탄성과 탐사자료와 CTD자료를 이용하여 극지방에서 나타나는 수층의 거동과 변화를 관측하는 연구 수행 예정.



## 제 6 장 참고문헌

- Deraemaeker, A., Babuska, I., & Bouillard, P., 1999, Dispersion and pollution of the FEM solution for the Helmholtz equation in one, two and three dimensions, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 46(4), 471-499
- Duffy, D. G. 2001, *Green's Functions with Applications* (Vol. 38). Chapman and Hall/CRC
- Gupta, A., Karypis, G., & Kumar, V., 1997, A Highly Scalable Parallel Algorithm for Sparse Matrix Factorization, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 8(5), 502-520
- Holbrook, W.S., Paramo, P., Pears, S., and Schmitt, R.W. 2003, Thermohaline fine structure in an oceanographic front from seismic reflection profiling. *Science* 301, 821-824.
- Jang, U. 2012, Comparison of scaling technique in steepest-descent method for the frequency-domain 2d acoustic waveform inversion. Seoul National University
- Kim, Y., Min, D.-J., & Shin, C., 2011, Frequency-domain reverse-time migration with source estimation, *GEOPHYSICS*, 76(2), S41-S49
- Koo, N.-H., Shin, C., Min, D.-J., Park, K.-P., & Lee, H.-Y., 2011, Source estimation and direct wave reconstruction in Laplace-domain waveform inversion for deep-sea seismic data, *Geophysical Journal International*, 187(2), 861-870

- Moon, Hye-Jin, Kim, Han-Joon, Kim, Chung-Ho, Moon, Seonghoon, Lee, Su-hwan, Kim, Jin Soo, Jeon, Chung-Kyun, Lee, Gwang Hoon, Lee, Sang Hoon, Baek, YoungSook and Jou, Hyeong-Tae, 2017, Imaging the Yellow Sea Bottom Cold Water from multichannel seismic data, *Journal of Oceanography*, 73(5), 701-709, DOI: 10.1007/s10872-017-0426-0
- Nakamura, Y., Noguchi, T., Tsuji, T., Itoh, S., Niino, H., and Matsuoka, T. 2006, Simultaneous seismic reflection and physical oceanographic observations of oceanic fine structure in the Kuroshio extension front. *Geophys. Res. Lett.* 33, L23605.
- Papenberg, C., Klaeschen, D., Krahnemann, G., and Hobbs, R.W. 2010, Ocean temperature and salinity inverted from combined hydrographic and seismic data. *JGR* 37, L04601, doi:10.1029/2009GL042115.
- Ruddick, B., Song, H., Dong, C., and Pinheiro, L. 2009, Water column seismic images as maps of temperature gradient. *Oceanography* 22, 192-205.
- Sommerfeld, A. 1912, Die Greensche Funktion der Schwingungsgleichung. *Jahresbericht Der Deutschen Mathematiker-Vereinigung*, 21. 309-352; Schot, S. H. (1992). Eighty years of Sommerfeld's radiation condition. *Historia Mathematica*, 19(4), 385-401
- Tang, Q.S., Wang, D.X., Li, J.B., Yan, P., and Li, J. 2013, Image of a subsurface current in the southern South China Sea. *Ocean Sci.* 9, 631-638.
- Thorpe, S.A. 2005, *The Turbulent Ocean*. 439pp., Cambridge Univ. Press.
- Virieux, J., & Operto, S. 2009, An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics. *GEOPHYSICS*, 74(6), WCCI-WCC26

Virieux, J., Operto, S., Ben-Hadj-Ali, H., Brossier, R., Etienne, V., Sourbier, F., Giraud, L., & Haidar, A., 2009, Seismic wave modeling for seismic imaging, *The Leading Edge*, 28(5), 538-544

Woodgate RA, Aagaard K, Swift JH et al. 2005. Pacific ventilation of the Arctic Ocean's lower halocline by upwelling and diapycnal mixing over the continental margin. *Geophysical Research Letters*, 32:L18609.

Woodgate RA, Weingartner T and Lindsay R. 2010. The 2007 Bering Strait oceanic heat flux and anomalous Arctic sea-ice Retreat. *Geophysical Research Letters*, 37:L01602.

Woodgate, R. (2013) Arctic Ocean Circulation: Going Around At the Top Of the World. *Nature Education Knowledge* 4(8):8

Ziolkowski, A., 1991, Why don' t we measure seismic signatures?, *GEOPHYSICS*, 56(2), 190-201

## 주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

극지연구소