

고해상도 속도 구조 영상화를 위한 해양
탄성파 자료 속도 역산 알고리즘 개발

Development of an velocity inversion algorithm for
imaging high-resolution velocity structure from marine
seismic data

2018. 12. 31

한 국 해 양 과 학 기 술 원

제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “고해상도 속도 구조 영상화를 위한 해양 탄성파 자료 속도 역산 알고리즘 개발”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2018. 12. 31

총괄연구책임자 : 전 형 구

참 여 연 구 원 : 김 한 준

“ : 주 형 태

“ : 이 상 훈

“ : 전 청 균

보고서 초록

과제고유 번호	PE99671	해당단계 연구기간	2018.4.1. - 2018.12.31	단계 구분	1/1
연구사업명	중사업명	신진연구자의 연구기반 구축 및 창의적 아이디어 지원			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	창의사업			
	세부과제명	고해상도 속도 구조 영상화를 위한 해양 탄성과 자료 속도 역산 알고리즘 개발			
연구책임자	전형구	해당단계 참여연구원 수	총 : 5 명 내부: 5 명 외부: 0 명	해당단 계 연구비	정부: 50,000 천원 기업: 50,000 천원 계 : 50,000 천원
		총연구기간 참여연구원 수	총 : 5 명 내부: 5 명 외부: 0 명	총 연구비	정부: 50,000 천원 기업: 50,000 천원 계 : 50,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 해저활성단층연구단		참여기업명		
국제공동연구					
위탁연구					
요약				보고서 면수	70
<p>○ 짧은 오프셋 탄성과 탐사 자료를 이용하여 정확한 지하 P파 속도 구조를 도출하기 위해 Markov Chain Monte Carlo (McMC) 역산 기법을 개발하였다.</p> <p>○ 알고리즘을 바탕으로 McMC 역산 프로그램을 제작하고 인공 합성 탄성과 자료에 적용하여 프로그램의 효용성을 확인하였다.</p> <p>○ 현장 지층 탄성과 탐사 자료와 현장 탄성과 해양학 탐사 자료에 개발된 프로그램을 적용하여 지층과 수층 속도 구조를 도출하고 예상되는 경계의 위치를 확률적으로 계산하였으며 역산 결과의 타당성을 분석하였다.</p> <p>○ 개발된 프로그램의 계산 효율을 높이기 위해 프로그램 병렬화를 수행하였고 GUI를 활용하여 프로그램 사용성을 높였다.</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	속도 역산, 탄성과 탐사, 짧은 오프셋, 탄성과 해양학, 마코프체인 몬테카를로			
	영 어	Velocity inversion, Seismic exploration, Short offset, Seismic Oceanography, Markov-chain Monte Carlo			

요 약 문

I. 제 목

고해상도 속도 구조 영상화를 위한 해양 탄성과 탐사 자료 속도 역산 알고리즘 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 필요성

- 최근 한반도 남동부 지역에서 규모 5.0의 울산 앞 바다 지진, 규모 5.8의 경주 지진, 규모 5.4의 포항 지진 등 과거에 비해 상당한 규모를 가진 지진들이 발생하여 해당 지역에 대한 단층 조사 필요성이 높아지고 있음
- 제 4기에 활동했다고 예상되는 양상단층과 일광단층 및 그 주변단층들은 한반도 남동부 천부까지 분포하므로 주로 1 km 이하의 짧은 오프셋을 가지는 스트리머를 이용하여 탐사를 수행하고 있음
- 획득한 탄성과 자료로부터 자료 처리를 통해 지하 구조를 영상화하기 위해서는 지하 매질의 정확한 속도 구조가 필수적이지만 짧은 오프셋 탄성과 탐사 자료에 적용할 수 있는 속도 구조 도출 알고리즘들을 현재 몇몇 단점 및 한계점을 가지고 있음
- 탄성과 해양학 신호는 직접파와 해저면 반사파의 진폭에 비해 매우 약하고 (1% 이하) 굴절파가 발생하기 힘든 환경이므로 기존에 개발된 지층 속도 역산 알고리즘으로는 정확한 속도 구조를 도출하기 어려움
- 본원이 보유한 탄성과 탐사 수신 장비는 대부분 1 km 이하의 짧은 오프셋을 가지고 있으므로 정확한 지하 속도 구조를 도출하는 것에 어려움이 있었음

2. 목적

- 본 연구 과제를 통해 짧은 오프셋에 적용 가능한 P파 속도 역산 알고리즘을 개발하고 짧은 오프셋의 지층 및 수층 탄성과 탐사 자료에 적용하여 정확한 속도 구조를 도출하고자 함

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. P파 속도 역산 알고리즘 개발

- 짧은 오프셋 탄성과 탐사 자료 특성 분석하고 기존 알고리즘의 한계점을 파악함
- 분석 결과를 바탕으로 기존의 문제점들을 극복할 수 있는 새로운 알고리즘을 개발하고 프로그래밍을 수행하여 프로그램을 제작함

2. 현장 자료를 이용한 알고리즘 검증

- 지층 및 수층 탄성과 탐사 자료에 알고리즘을 적용하여 지층 및 수층 P파속도 구조를 역산함
- 다양한 검증 방법으로 역산 결과를 검증하여 알고리즘의 효용성을 보임

3. 프로그램 개선

- 프로그램 병렬화를 통해 계산 효율을 향상시키고 GUI를 활용하여 프로그램 사용성을 높임

IV. 연구개발결과

1. P파 속도 역산 알고리즘 개발

- 짧은 오프셋 탄성과 탐사 자료에 기록된 신호 특성을 분석하고 Tomography, Velocity analysis, Full waveform inversion, Migration velocity analysis와 같은 기존 알고리즘이 한계점을 분석함
- Global optimization 기법을 이용한 P파 속도 통계적 역산 알고리즘을 개발하고 C언어를 이용하여 Markov chain Monte Carlo 역산 프로그램을 제작함
- Python 언어를 이용하여 역산 보조프로그램과 C/Fortran 언어를 이용하여 Depth migration 프로그램을 제작함

2. 현장 자료를 이용한 알고리즘 검증

- Tonga #04 지층 탄성과 탐사 자료와 황해 탄성과 해양학 탐사 자료에 개발

- 된 알고리즘을 적용하여 P과 속도 구조와 반사면 경계를 동시에 역산함
- Common image gather의 편평도, 해양 물리 관측 자료 등을 이용하여 역산 결과를 검증

3. 프로그램 개선

- MPI를 통해 프로그램을 트레이스 별로 병렬화하여 계산 효율을 향상시켰으며 GUI를 이용하여 역산 프로그램 실행 및 모니터링을 손쉽게 할 수 있도록 개선함

V. 연구개발결과의 활용계획

- 개발된 알고리즘을 통해 수층의 구조뿐만 아니라 물성 값에 대한 정보도 함께 도출할 수 있으므로 탄성과 해양학 관련 연구사업 및 국가 R&D에 활용할 계획임
- 지질 구조에 대해 더 정확한 영상화를 가능하게 하여 한반도 주변 지질 구조에 대한 이해도를 높이고 더 정확한 정보를 파악하는데 활용할 수 있으며 최근 지진이 발생한 남동해역 양산단층 활동 특성 규명에 활용하여 지진 피해 경감에 기여할 계획임
- 현재 본원이 보유한 탄성과 탐사 장비에 적합한 알고리즘이므로 본원이 보유한 탄성과 탐사 장비의 활용도를 높일 계획임

SUMMARY

I. Title:

Development of an velocity inversion algorithm for imaging high-resolution velocity structure from marine seismic data

II. Necessity and Objectives of the Study

1. Necessity

- Recently, there have been more significant earthquakes in the southeastern part of the Korean Peninsula, such as the 5.0-magnitude Ulsan earthquake, the 5.8-magnitude Gyeongju earthquake, and the 5.4-magnitude Pohang earthquake, which increase the necessity of fault investigation in the area.
- Since the Yangsan fault and Ilgwang fault are distributed to the shallow part of the southeast of the Korean Peninsula, the investigation has been conducted mainly using strippers with a short offset of less than 1 km.
- Although it is necessary to calculate the accurate subsurface velocity information to image the subsurface structure through the seismic data processing, the current velocity-model-building algorithms have several drawbacks and limitations.
- It is difficult to invert the accurate velocity structure of the water layer by using conventional velocity inversion algorithms because of the weak amplitude of water column reflections and absence of the refractions.
- The seismic exploration equipment in KIOST has short offset of about 1 km length, making it difficult to invert the accurate subsurface velocity structure.

2. Objectives

- The purpose of this research is to develop the P-wave velocity inversion algorithm for the short offset seismic data and to invert the accurate velocity structure through the short-offset subsurface and water column seismic data.

III. General Scope of the Study

1. Development of the P-wave velocity inversion algorithm

- Analyze the features of the short-offset seismic data and limitations of the conventional velocity-building algorithms
- Based on the analysis, develop the new algorithm which can overcome the limitations of the conventional velocity-building algorithms and make the new inversion program

2. Verify the algorithm using field seismic data

- Apply the developed algorithm to the field seismic data and invert the P-wave velocity
- Verify the inversion results by using well-known verification methods

3. Improve the program

- Improve the computation efficiency by parallelizing the program and make easier to use by using GUI

IV. Results of the Study

1. Development of the P-wave velocity inversion algorithm

- Analyzed the features of the seismic data recorded in the short-offset data and investigated the limitations of the Tomography, Velocity analysis, Full waveform inversion, and Migration velocity analysis algorithms
- Developed the stochastic inversion algorithm for the P-wave velocity by using global optimization method and made the Markov-chain Monte Carlo inversion program

2. Verify the algorithm using field seismic data

- Applied the algorithm to the Tonga #04 subsurface seismic data and Yellow Sea seismic oceanography data, and inverted the P-wave velocity and layer

boundaries simultaneously

3. Improve the program

- Improved the computation efficiency by parallelizing the traces using Message Passing Interface (MPI) and made the GUI program to execute and monitor the program easily

V. Suggestions for Applications

- Developed algorithm can invert the structure of the water layers as well as the values of the property, so it is planned to be used for the research projects and national R&D related to the seismic oceanography.
- Developed algorithm can contribute the investigation of the fault activities in southeast of the Korean peninsula because it is able to generate more accurate information of subsurface structures.
- Developed algorithm can contribute to enhance the utilization of the seismic equipment in KIOST because it is suitable algorithm for the short-offset seismic equipment.

CONTENTS

Summary	5
Contents	13
Chapter 1. Introduction	17
Chapter 2. Status of technological development domestic and overseas	19
2-1. Researches in Korea	
2-2. Researches in overseas	
Chapter 3. Content and results of the study	23
3-1. Development of P-wave velocity inversion algorithm	
3-1-1. Analysis of short-offset seismic data	
3-1-1-1. Analysis of the seismic data acquired by KIOST	
3-1-1-2. Analysis of the relationship between the offset and recoverable wavenumber through inversion	
3-1-2. Analysis of the limitations of conventional algorithms	
3-1-2-1. Velocity analysis	
3-1-2-2. Migration velocity analysis	
3-1-2-3. Refraction tomography	
3-1-2-4. Full waveform inversion	
3-1-3. Development of the inversion algorithm and program	
3-1-3-1. Development of P-wave velocity inversion algorithm using trans-dimensional Markov-chain Monte Carlo method	
3-1-3-2. Development of trans-dimenaional McMC inversion	

program

- 3-1-3-3. Development of Kirchhoff depth migration program
- 3-1-3-4. Development of sub-programs

3-2. Verification using field seismic data

- 3-2-1. Application of the algorithm to subsurface and seismic oceanography data
 - 3-2-1-1. Application to the synthetic seismic data
 - 3-2-1-2. Application to the subsurface seismic data
 - 3-2-1-3. Application to the seismic oceanography data
- 3-2-2. Verification of the algorithm
 - 3-2-2-1. Verification of the synthetic seismic data result
 - 3-2-2-2. Verification of the subsurface seismic data result
 - 3-2-2-3. Verification of the seismic oceanography data result

3-3. Improvement of the program

- 3-3-1. Improvement of the computational efficiency
- 3-3-2. Improvement of the usability

Chapter 4. Objective achievement and external contribution	67
Chapter 5. Plans for application	69
Chapter 6. References	71

목 차

요약문	5
목차	13
제 1 장 서 론	17
제 2 장 국내·외 기술개발 현황	19
2-1. 국내 연구 현황	
2-2. 국외 연구 현황	
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과	23
3-1. P파 속도 역산 알고리즘 개발	
3-1-1. 짧은 오프셋 탄성과 자료 특성 분석	
3-1-1-1. KIOST에서 취득한 탄성과 탐사 자료 분석	
3-1-1-2. 역산을 통해 얻을 수 있는 모델의 파수와 오프셋간의 관계 분석	
3-1-2. 기존 알고리즘 한계점 분석	
3-1-2-1. 속도 분석	
3-1-2-2. 구조보정 속도 분석	
3-1-2-3. 굴절과 토모그래피	
3-1-2-4. 완전 파형 역산	
3-1-3. 알고리즘 개발 및 프로그래밍 수행	
3-1-3-1. Trans-dimensional Markov-chain Monte Carlo 기법을 이용한 P파 속도 역산 알고리즘 개발	
3-1-3-2. Trans-dimensional McMC 역산 프로그램 개발	

3-1-3-3. Kirchhoff 구조보정 프로그램 개발

3-1-3-4. 보조 프로그램 개발

3-2. 현장자료를 이용한 알고리즘 검증

3-2-1. 지층 및 수층 탄성과 탐사 자료에 대한 알고리즘 적용

3-2-1-1. 인공 합성 자료에 알고리즘 적용

3-2-1-2. 지층 현장 탄성과 탐사 자료에 알고리즘 적용

3-2-1-3. 수층 현장 탄성과 탐사 자료에 알고리즘 적용

3-2-2. 알고리즘 검증 및 피드백

3-2-2-1. 인공 합성 자료 결과 검증

3-2-2-2. 지층 현장 탄성과 탐사 자료 결과 검증

3-2-2-3. 수층 현장 탄성과 탐사 자료 결과 검증

3-3. 프로그램 개선

3-3-1. 계산 효율 향상을 위한 알고리즘 개선

3-3-2. GUI를 이용하여 사용자 친화적 프로그램으로 개선

제 4 장 연구개발 목표달성도 및 대외 기여도	67
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	69
제 6 장 참고문헌	71

제 1 장 서 론

탄성과 탐사는 인공적으로 발생시킨 탄성과 신호를 지하로 전파시켜 지표면으로 돌아오는 신호를 수신기에 기록하고 분석하여 지하 지질 구조를 파악하는 물리 탐사 방법이다. 탄성과 탐사를 통해 얻은 신호를 분석하여 지하 지질 구조에 대한 정확한 정보를 얻기 위해서 많은 자료 처리 기법들이 개발되었고 현재까지도 새로운 자료 처리 기법들이 활발히 개발되는 중이다. 지하 구조를 정확히 영상화하기 위해서는 탄성과 탐사 자료뿐만 아니라 여러 다른 정보들도 필요로 하는데 그 중 가장 중요한 정보는 지하 매질의 속도 구조이다.

지하 매질의 속도 구조는 지하 구조 영상화에 직접적으로 영향을 주기 때문에 정확한 지하 매질의 속도 구조를 도출하기 위해서 여러 알고리즘들이 개발되었다. 대표적인 알고리즘으로 속도 분석(Velocity analysis) (Claerbout, 1978), 주시 토모그래피 (Travel time tomography) (Hampson and Russell, 1984; White, 1989; Luo and Schuster, 1990), 구조보정 속도 분석 (Migration velocity analysis) (Liu and Bleistein, 1995), 완전 파형 역산 (Full waveform inversion) (Lailly, 1983; Tarantola, 1984; Pratt et al., 1998; Shin and Cha, 2008) 등이 있다. 위 방법들 중 속도 분석 및 구조보정 속도 분석 방법의 경우 짧은 오프셋의 탄성과 탐사 자료에 적용할 수 있는 알고리즘이지만 도출된 속도 구조의 정확도가 낮거나 해상도가 낮은 문제점을 가지고 있다. 주시 토모그래피 중 대표적인 알고리즘인 굴절과 토모그래피는 굴절과가 거의 기록 되지 않는 짧은 오프셋 탄성과 탐사 자료에 적용하기 적합하지 않으며 완전 파형 역산의 경우는 심한 국소 최저치 (local minima) 문제로 인해 짧은 오프셋 탄성과 탐사 자료로부터 정확한 속도 구조를 도출하기 어렵다 (Brossier et al., 2015; Zhou et al., 2015; Jun et al., 2018). 따라서 정확한 지하 속도 구조를 도출하기 위해서는 긴 오프셋의 탄성과 탐사 자료나 충분히 낮은 주파수 성분이 포함된 탄성과 탐사 자료가 필수적이었다 (Virieux and Operto, 2009). 하지만 본원이 보유하고 있는 탄성과 탐사용 수신기의 최대 오프셋은 약 1 km 정도이며 실제 주로 사용하고 있는 수신기의 최대 오프셋은 약 150 m 정도에 불과하다. 또한 10 Hz 이하의 저주파수 정보를 취득하기에 적합하지 않은 장비이므로 기존의 속도 구조 도출 알고리즘을 통해서는 정확한 속도 구조 도출이 쉽지 않았다. 또한 최근 많은 관심을 받고 있는 탄성과 해양학 연구 (Holbrook et al., 2003)의 경우 지층 탄성과 탐사와는 다른 탐사 환경으로 인해 기존의 속도 도출 알고리즘을 적용하기 어려운 측면이 있었다.

따라서 본 연구 개발을 통해 짧은 오프셋 탄성과 탐사 자료에 적합한 P파 속도

도출 알고리즘을 개발하고 개발된 알고리즘을 지층 및 수층 탄성과 탐사 자료에 적용해 정확한 지층 및 수층의 속도 구조를 도출할 수 있는지 확인 하고자 하였다.

위와 같은 목적을 달성하기 위해 본 연구 개발에서는 우선, 짧은 오프셋의 탄성과 탐사 자료의 특징에 대해 분석하고 기존 속도 구조 도출 알고리즘들의 한계점이 대해 파악하였다. 이를 바탕으로 짧은 오프셋 탄성과 탐사 자료에 적합한 P파 속도 구조 도출 알고리즘을 개발하고 직접 프로그래밍을 수행하였다. 개발된 프로그램을 효율성을 보이기 위해 인공 합성 자료, 현장 지층 및 수층 탄성과 탐사 자료에 적용하고 역산 결과를 다양한 방법을 통해 검증 하였다. 그리고 프로그램의 계산 효율 및 사용성 향상을 위해 다중 코어 워크 스테이션을 이용한 프로그램 병렬 계산, Graphical User Interface (GUI) 작업을 수행하였다.

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

2-1. 국내 연구 현황

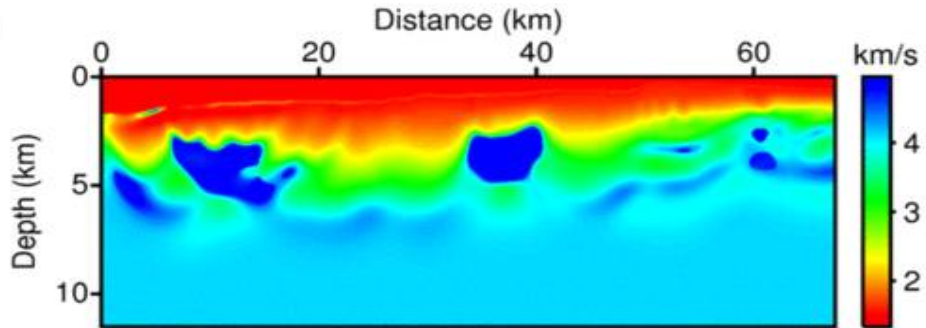
국내에서 취득하는 탄성과 탐사 자료는 일반적으로 최대 오프셋이 비교적 짧으며 (~3 km) 저 주파수 성분을 취득하는데 한계가 있었으므로 주로 셴블란스 (semblance) 패널에서 속도 분석을 진행하여 속도를 얻는 방법을 사용하여 지하 속도 구조를 도출하였다. 하지만 속도 분석을 통해 얻은 속도 구조는 공통 중합점 (Common Mid Point, CMP) 모음의 에너지 강도를 이용해 시간 축을 따라 몇몇 위치를 분석자 임의로 선택하므로 해상도가 비교적 낮으며 지하 구조를 평평하다고 가정하기 때문에 상대적으로 부정확하다는 단점을 가지고 있다.

이 후 국내 연구진들에 의해 굴절과 토모그래피 알고리즘 및 프로그램이 개발되어 (Pyun et al., 2005; Min and Shin, 2006) 인공 합성 자료 및 현장 자료에 적용되었으나 평활화된 (smoothed) 저 해상도의 속도 구조가 도출되었으나 (그림 2-1(a)) 굴절과 토모그래피를 위해서는 임계 굴절과가 반드시 필요하였다. 임계 굴절과는 반사파와는 달리 물성 차이가 존재하는 층 사이를 따라서 전파하다가 다시 지표면으로 되돌아 온 파로 임계 굴절과를 기록하기 위해서는 긴 오프셋의 탄성과 탐사 장비가 필수적이다.

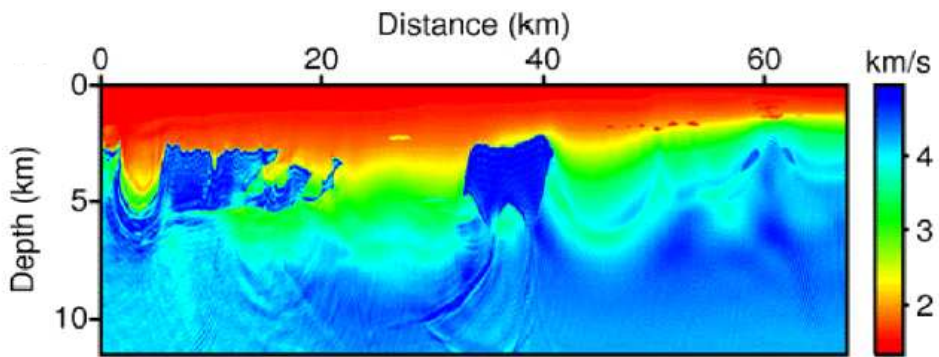
최근 몇 년 간 완전 파형 역산 (Full waveform inversion, FWI)을 이용하여 속도를 역산하려는 연구가 국내 대학을 중심으로 활발히 진행되었다 (Shin and Min 2006; Shin and Cha 2008; Shin et al., 2010; Ha et al., 2012). 완전 파형 역산은 모델 파동장과 관측 파동장간의 잔차를 줄여나가는 방향으로 속도 구조를 업데이트하는 알고리즘으로 경사 강하법, 가우스-뉴턴등과 같은 local optimization 방법을 사용한다. 완전 파형 역산은 고해상도의 비교적 정확한 속도 구조를 도출한다는 장점이 있지만 (그림 2-1(b)) 탄성과 탐사 자료와 주어진 조건에 따라 비선형성 (non-linearity), 해의 비유일성 (non-uniqueness) 문제가 심각하게 발생할 여지가 크다. 이는 저주파수 성분에 대한 의존도를 높이며 큰 산란 각 (scattering angle)을 가진 긴 오프셋 탄성과 탐사 자료에 대한 필요성을 증대시키는 문제를 가지고 있다.

현재 국내에서 사용하고 있는 탄성과 탐사 장비의 수신기 최대 오프셋이 짧음에도 불구하고 지금까지 국내에서 개발되었거나 사용되는 대부분의 속도 도출 방법은 짧은 오프셋 탄성과 탐사 자료에 적용하기 적합하지 않은 방법들이다. 따라서 짧은

오프셋 탄성과 탐사 자료에 적합한 지하 속도 도출 알고리즘이 반드시 필요한 상황이다.



(a)



(b)

그림 2-1. (a) 굴절과 토모그래피를 통해 도출된 평활화된 속도 구조와 (b) 완전 파형 역산을 통해 도출된 고해상도 속도 구조 (Kwon et al., 2017)

2-2. 국외 연구 현황

탄성과 탐사는 지질조사나 석유 및 가스 탐사와 같은 자원 개발에 널리 사용되고 있다. 국내의 경우는 석유 및 가스의 부존량이 극히 적기 때문에 탄성과 탐사를 주로 지질조사에 사용하고 있지만 석유 및 가스와 같은 자원 개발이 활발히 진행 중인 나라에서는 탄성과 탐사가 석유 및 가스 탐사에 많이 사용되고 있다. 따라서 해외 자원 개발 회사, 탐사 서비스 회사, 연구소 등에서 개발되는 지하 속도 구조 도출 알고리즘의 대부분은 자원 탐사를 목적으로 개발되고 있다. 지질 조사를 주된 목적으로 하며 2차원의 짧은 오프셋을 사용하는 국내 탄성과 탐사와는 달리 자원 탐사를 목적으로 하는 탄성과 탐사의 경우 대부분 긴 오프셋(10 km[~])의 수신기를 사용하며 많은 방위각에 대한 자료를 취득하기 위해 그림 2-2와 같이 Wide Azimuth (WAZ), Full Azimuth (FAZ) 등 3차원 탐사를 주로 수행하고 있다.

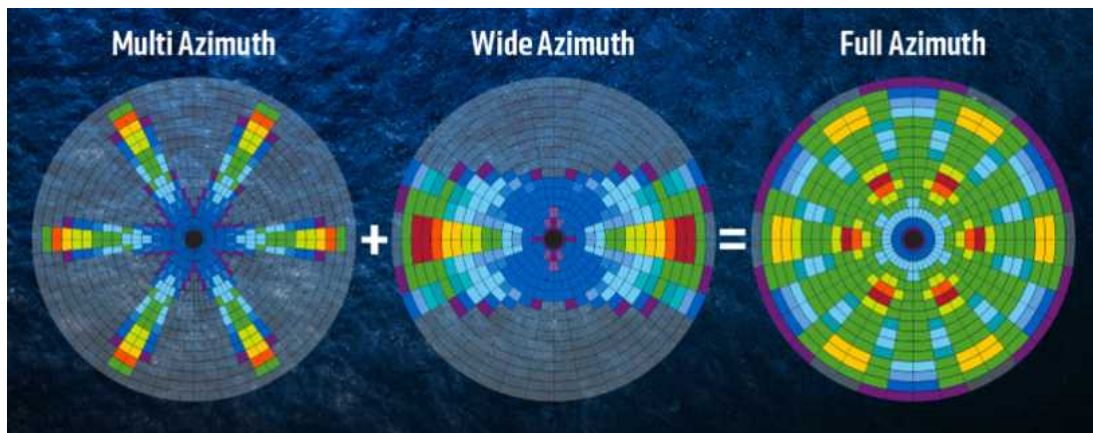


그림 2-2. 여러 방위각을 사용하는 3차원 탄성과 탐사

(<https://www.pgs.com/marine-acquisition/tools-and-techniques/acquisition-solutions/technology/multivessel-configurations/>)

이러한 탐사를 통해 얻은 탄성과 탐사 자료들을 사용할 경우 긴 오프셋 자료와 함께 충분한 저주파수 성분을 확보할 수 있으며 굴절과 토모그래피, 완전 파형 역산 등을 적용하여 속도 구조까지 도출하기 적합하다. 따라서 해외의 메이저 석유 회사들 및 서비스 회사들은 주로 굴절과 토모그래피를 반복적으로 수행하여 저해상도의 배경 속도 구조를 도출하고 완전 파형 역산을 적용하여 고해상도의 속도 구조를 도출한다. 하지만 석유 회사들은 심부의 석유 저류층이 주요 목표이므로 짧은 오프셋을 이용하는 천부 탐사는 관심의 대상이 아니다. 이 때문에 짧은 오프셋 탄성과 자료로부터 속도 구조를 도출하는 연구는 비교적 덜 수행되었으나 몇 가지 기술들이

개발되었다.

반사파 토모그래피 (Stork, 1992; Murphy and Gray, 1999) 가 그 중 하나로 반사파를 피킹하고 주시를 계산하여 속도 구조를 도출하는 방법이다. 이 방법은 반사파를 분석자가 직접 골라내야 하므로 시간과 비용이 상대적으로 큰 방법이다.

Xu et al. (2012)는 반사파가 지배적인 자료에 대하여 파형 역산을 적용하여 속도 구조를 도출할 수 있는 RFWI 알고리즘을 개발하였다. 이 방법은 파동장을 Primary wavefield와 Scattered wavefield로 분해하고 Scattered wavefield만 사용하여 역산을 수행하는 방법이다. 하지만 scattered wavefield를 추출하는 과정에서 추가적인 파동 전파 모델링이 필요하고 매 반복 계산마다 실제-진폭 역시간 구조보정 (True-amplitude reverse time migration)이 필요하기 때문에 기존의 완전 파형 역산에 비해 계산 량이 커진다는 단점이 있다. 또한 local optimization을 사용하는 방법이므로 저주파수 성분에 어느 정도 의존적일 수밖에 없으며 비선형성 문제 및 해의 비유일성 문제가 완전히 해결되지 않았다.

Bodin et al. (2009)는 local optimization을 이용하는 속도 역산 방법과는 다른 global optimization을 이용하는 통계적 역산 방법을 제안하였다. 이 방법은 탄성과 단면을 이용하여 속도 역산을 수행하는 방법이므로 짧은 오프셋 자료에도 적용할 수 있으며 계산 량이 비교적 작다는 장점이 있다.

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

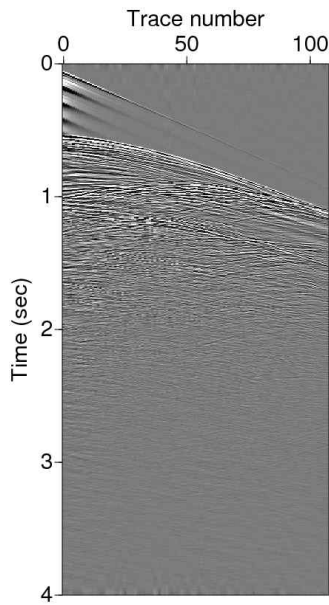
3-1. P파 속도 역산 알고리즘 개발

3-1-1. 짧은 오프셋 탄성과 자료 특성 분석

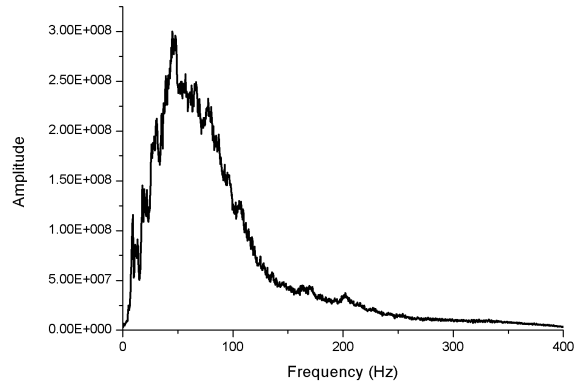
3-1-1-1. KIOST에서 취득한 탄성과 탐사 자료 분석

본원이 보유한 탄성과 탐사 수신기의 최대 채널 개수는 108개이며 최대 오프셋은 약 1.35 km 이다. 또한 최근 사용 빈도가 높은 장비는 24 개의 채널을 가지며 최대 오프셋은 약 150 m 정도이다. 송신원과 수신기의 최소 오프셋 간격을 조절하면 최대 오프셋 길이는 더 길어질 수 있지만 현실적인 연장 한계는 수십~수백 m 정도에 불과하다. 현재 보유하고 있는 탄성과 탐사 장비로 취득한 탄성과 탐사 자료는 아래와 같다 (그림 3-1 및 그림 3-2).

두 장비 모두 최대 오프셋이 짧아 굴절과 신호를 제대로 취득할 수 없으며 모든 수신기에서 직접파가 초동으로 기록된 것을 확인할 수 있다. 송신원 종류에 따라서 취득되는 주파수 성분이 서로 다르지만 Air gun을 송신원으로 사용한 경우 5 Hz 이하의 주파수 성분을 취득하는데 큰 어려움이 있으며 (그림 3-1(b)), Sparker를 송신원으로 사용한 경우 60 Hz 이하의 주파수 성분을 제대로 취득할 수 없는 등 (그림 3-2(b)) 정확한 속도 역산이 필수적인 저주파수 성분 취득이 어렵다는 것을 확인할 수 있다. 또한 Sparker 송신원의 경우 중심 주파수가 400~500 Hz로 매우 높기 때문에 파동 방정식 기반의 속도 도출 알고리즘을 적용할 경우 심한 분산 (dispersion)이 발생하며 이 현상 해결하기 위해서는 지나치게 작은 격자 간격을 사용해야한다는 문제를 가지고 있다.

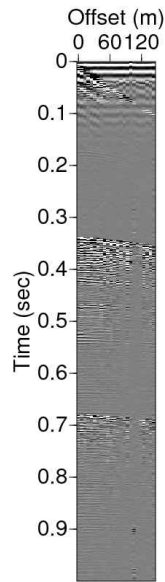


(a)

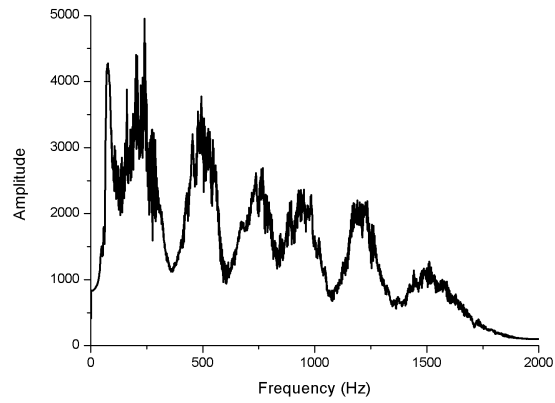


(b)

그림 3-1. (a) 108 채널 air gun 탄성과 탐사 자료 및 (b) 주파수 스펙트럼



(a)



(b)

그림 3-2. (a) 24 채널 sparker 탄성과 탐사 자료 및 (b) 주파수 스펙트럼

3-1-1-2. 역산을 통해 얻을 수 있는 모델의 파수와 오프셋간의 관계 분석

Sirgue and Pratt (2004)에 따르면 송신원에서 출발한 파동이 산란층 (scattering layer)에서 산란되어 수신기로 전파할 때 파수를 계산해보면 탄성과 탐사 자료를 취득한 환경과 탐사 자료로부터 역산 (토모그래피, 완전 파형 역산 등 local optimization을 사용하는 알고리즘) 가능한 속도 모델의 파수와의 관계를 분석할 수 있다.

우선

$$\cos\theta = \frac{z}{\sqrt{h^2 + z^2}} \quad (3-1)$$

$$\sin\theta = \frac{h}{\sqrt{h^2 + z^2}} \quad (3-2)$$

로 주어질 때 h 는 오프셋 길이의 절반이고 z 는 산란층의 깊이를 의미한다. 만약 단일 송신원과 단일 수신기를 가지며 1차원 탐사 환경을 가정할 경우 (그림 3-3) 이하의 모든 반사점 (reflection point)은 공통 중심점 (CMP)에 위치하게 된다. 따라서 중심점에서 생성된 산란파는 송신원과 수신기에서 발생한 동일한 평면파가 산란점에서 x 방향 (수평 방향)에 대해 서로 반대방향으로 전파한다고 여길 수 있으며 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$k_0 \mathbf{s} = (k_0 \sin\theta, k_0 \cos\theta) \quad (3-3)$$

$$k_0 \mathbf{r} = (-k_0 \sin\theta, k_0 \cos\theta) \quad (3-4)$$

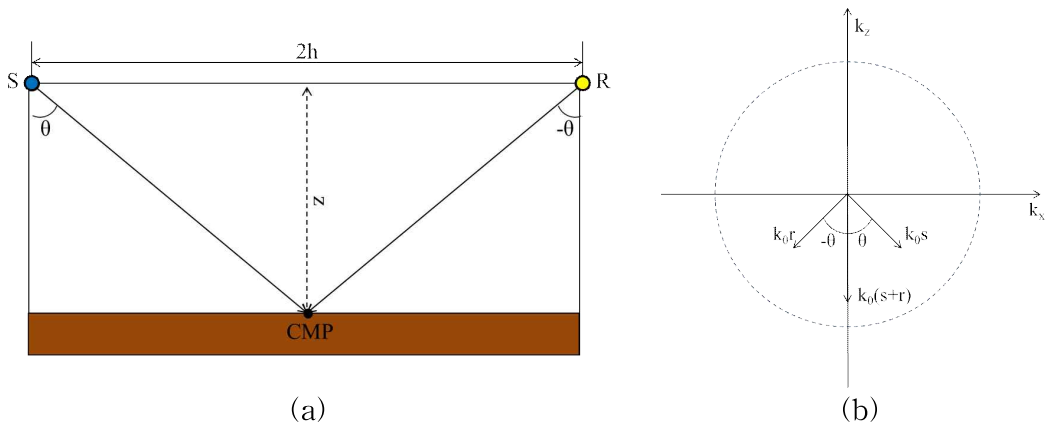


그림 3-3. 단일 송신원, 수신기일 때 (a) 탐사 모식도와 (b) 역산 그래디언트의 파수

즉, $k_x = 0$, $k_z = 2k_0\alpha$ 이고

$$\alpha = \cos\theta = \frac{z}{\sqrt{h^2 + z^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+R^2}} \cos\theta = \frac{z}{\sqrt{h^2 + z^2}} \quad (3-5)$$

로 표현할 수 있다. 여기서 R은 h/z로 오프셋 절반의 길이와 깊이간의 비율을 나타낸다. 파수는 속도와 주파수로 표현할 수 있으며 $k_0 = \omega/c_0$ 이다 (w: 주파수, c: 배경 p파 속도). 식 3-5를 이용하여 송신원과 수신기 사이의 오프셋과 탄성과 탐사의 목표 깊이에 따라 역산할 수 있는 모델의 파수 성분을 계산할 수 있다. 또한 $k_{zmin} = 2k_0\alpha_{min}$, $k_{zmax} = 2k_0$ 의 관계를 이용하여 모델의 최소 및 최대 파수를 구할 수 있다. 여기서 α 는 R이 커질수록 작아지고 R은 정해진 z에 대해 오프셋이 클수록 커진다는 성질을 가지고 있다. 따라서 모델의 가장 작은 파수 성분은 최대 오프셋일 때, 가장 큰 파수 성분은 수직입사 (또는 최소 오프셋)일 때 얻을 수 있다. k_0 는 정해진 배경 속도 값에 대해 취득되는 주파수 성분이 낮을수록 작은 값을 가진다. 이러한 성질을 종합해보면 오프셋이 클수록, 취득되는 주파수 성분이 낮을수록 작은 파수 성분을 역산 가능하다는 것을 알 수 있다. 하지만 실제 현장 탄성과 탐사를 통해 얻을 수 있는 최저 주파수 성분은 앞서 설명한대로 air gun 송신원의 경우 약 5 Hz, sparker 송신원의 경우 약 60 Hz 정도이다. 이러한 한계로 인해 오프셋이 짧을 경우 낮은 파수 성분을 회복할 수 없다는 문제가 발생한다. 그렇다면 본원이 보유한 탄성과 탐사 장비로 탐사를 했을 경우 역산을 통해 얻을 수 있는 파수 성분을 이론적으로 계산해볼 필요가 있다.

우선 타겟의 깊이가 각각 0.2 km와 2 km 이고 air gun을 이용하여 탐사를 수행하는 경우를 생각해보자. 이 경우 오프셋 길이에 따른 역산 가능한 최저 파수는 그림 3-4를 통해 확인할 수 있고 이에 해당하는 탐사 세부 사항은 표 3-1에 있다.

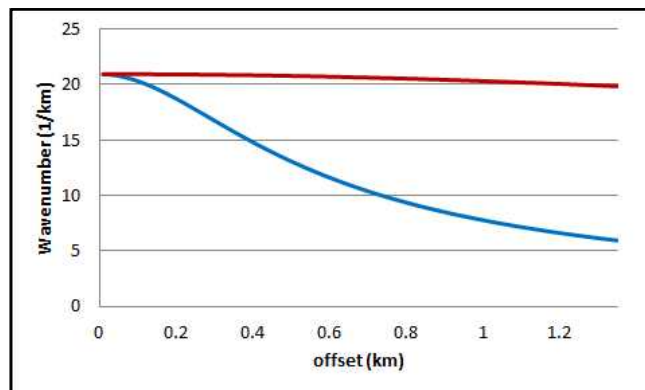


그림 3-4. Air gun 탐사 시 타겟의 깊이가 0.2 km (파란색), 2 km (빨간색) 일 때 오프셋에 따른 역산 가능한 최저 파수 성분

탐사 조건	변수 값
최저 주파수	5 Hz
배경 속도	3 km/s
타겟 깊이	0.2 km (파란색) / 2 km (빨간색)
최소 오프셋	0.01 km
최대 오프셋	1.35 km

표 3-1. Air gun 탐사 세부 사항

두 번째로 타겟의 깊이가 각각 0.2 km와 2 km 이고 sparker를 이용한 탐사를 가정해보자. 이 경우 오프셋 길이에 따른 역산 가능한 최저 파수는 그림 3-5를 통해 확인할 수 있고 이에 해당하는 탐사 세부 사항은 표 3-2에 있다.

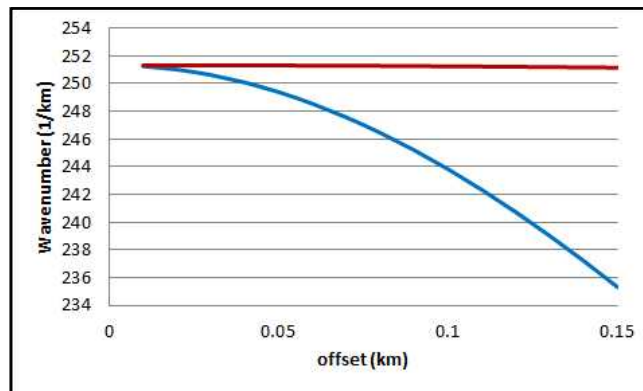


그림 3-5. Sparker 탐사 시 타겟의 깊이가 0.2 km (파란색), 2 km (빨간색) 일 때 오프셋에 따른 역산 가능한 최저 파수 성분

탐사 조건	변수 값
최저 주파수	60 Hz
배경 속도	3 km/s
타겟 깊이	0.2 km (파란색) / 2 km (빨간색)
최소 오프셋	0.01 km
최대 오프셋	0.15 km

표 3-2. Sparker 탐사 세부 사항

위 실험에서 0.2 km의 타겟 깊이는 평균 수심이 약 0.04 km인 황해 탄성과 탐사를 가정한 환경이고 2 km의 타겟 깊이는 평균 수심이 약 1.5 km인 동해 탄성과 탐사를 가정한 환경이다.

Air gun을 사용하고 1.35 km 최대 오프셋의 탐사를 수행할 때 타겟의 깊이가 0.2 km로 얇을 경우 역산을 통해 최소 5.94 (1/km)의 파수를 얻을 수 있지만 타겟의 깊이가 2 km로 비교적 깊을 때 얻을 수 있는 파수의 최소 값은 19.8 (1/km) 임을 알 수 있다. Sparker를 사용하고 0.15 km 최대 오프셋의 탐사를 수행할 때 타겟의 깊이가 0.2 km로 얇을 경우 역산을 통해 최소 235 (1/km)의 파수를 얻을 수 있고 타겟의 깊이가 2 km로 비교적 깊을 때는 251 (1/km)의 파수를 얻을 수 있다. 하지만 실제 속도 구조 도출에 중요한 장과장 속도 모델의 경우 경험 상 약 5 (1/km) 이하의 파수 정보가 필요하기 때문에 위 조건으로 얻는 모델의 파수 정보는 정확한 속도 구조 역산에 적합하지 않다는 것을 알 수 있다. 따라서 본원이 보유한 탄성과 탐사 장비를 이용해 정확한 속도 구조를 도출하기 위해서는 local optimization을 사용하지 않는 다른 역산 기법을 개발하고 적용할 필요성이 있다.

3-1-2. 기존 알고리즘 한계점 분석

3-1-2-1. 속도 분석 (Velocity analysis)

속도 분석은 가장 널리 사용되는 속도 도출 알고리즘으로 CMP 자료의 수직경로 시차 (Normal Move Out, NMO)를 계산하여 중합 속도를 계산한다. 수직 경로 시차는 특정 시간대에서 샘플링스 패널 상 가장 강한 에너지를 가지는 속도 값을 피킹 (picking) 하는 방법으로 계산되는데 적절한 속도가 피킹 될 경우 CMP 모음의 반사파가 평평하게 퍼지며 부정확한 속도 값이 피킹 될 경우 CMP 모음의 반사파가 오프셋이 커질수록 위 (피킹 속도가 낮음) 또는 아래 (피킹 속도가 높음)로 휘게 된다. 속도 분석을 통해 직접적으로 계산되는 속도는 평균 제곱 평균 제곱근 (Root Mean Square, RMS) 속도이며 이를 이용하여 CMP 중합을 수행한다. CMP 모음 상에서 샘플링스를 계산하여 중합 속도를 정하므로 fold 수 (각 CMP 모음에서 트레이스 개수)가 속도 분석의 질에 큰 영향을 미친다는 특성이 있다. Fold 수는 식 3-6과 같이 수신기의 개수가 많을수록, 송신원 발파 간격이 짧을수록 커지는 성질을 가지고 있으므로 만약 수신기의 개수가 적은 짧은 오프셋 스트리머를 사용한다 하더라도 송신원 발파 간격을 줄이는 방법을 통해 fold 수를 늘릴 수 있으므로 짧은 오프셋 탄성과 탐사 자료에 적용하기 용이한 알고리즘이며 현재도 다양한 종류의 탄성과 탐사 자료에 많이 사용되고 있다.

$$Fold = \frac{\text{수신기 간격} \times \text{수신기 개수}}{2 \times \text{송신원 간격}} \quad (3-6)$$

속도 분석 알고리즘은 기본적으로 지하 매질을 수평 층으로 가정하여 속도를 계산하기 때문에 경사가 있는 지형 또는 복잡한 형태의 지하 구조물이 있는 경우 정확한 속도 값을 도출 할 수 없으며 최종적으로 얻어지는 속도 값이 낮은 해상도를 가진다는 단점이 있다. 또한 모든 CMP에 대해 일정 간격마다 속도 분석을 수행해야 하며 간격이 좁을수록 정확한 속도 분석이 수행될 수 있으므로 많은 시간과 비용이 필요하다. 또한 샘플링스 패널 생성에 사용된 변수, 분석자의 주관 및 해석에 따라서 분석되는 속도 값에 차이가 발생할 수 있다. 그리고 다중 반사파 (Multiple)이 강한 자료의 경우 샘플링스 패널에서 실제 반사파의 에너지 크기보다 다중 반사파의 에너지 크기가 더 크게 계산되어 속도 분석이 어려워지는 경향이 나타나기도 한다. 그림 3-6은 상용 프로그램 (Geovation)을 이용하여 속도 분석을 수행하는 예시이며 왼쪽부터 차례로 샘플링스, 층간 속도, CMP 모음, 보정된 CMP 모음, 가상 중

합 결과 패널이다.

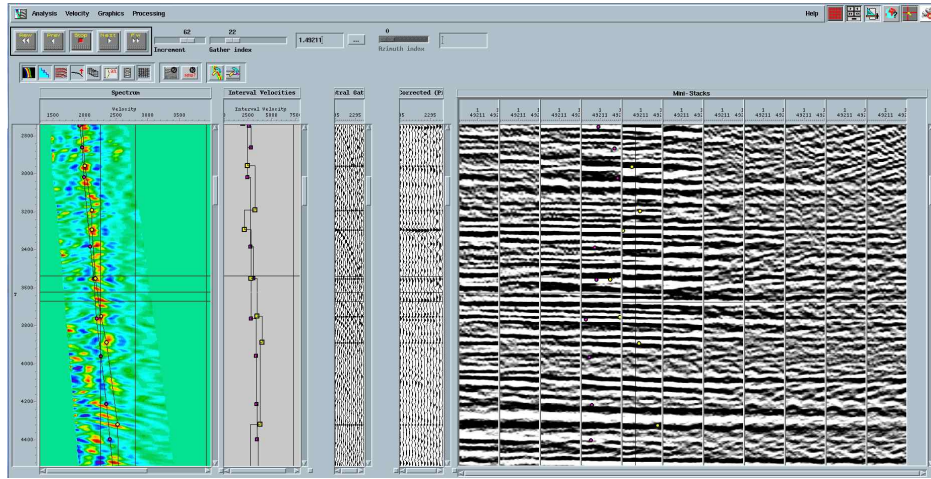


그림 3-6. 상용 프로그램을 이용한 속도 분석 예시

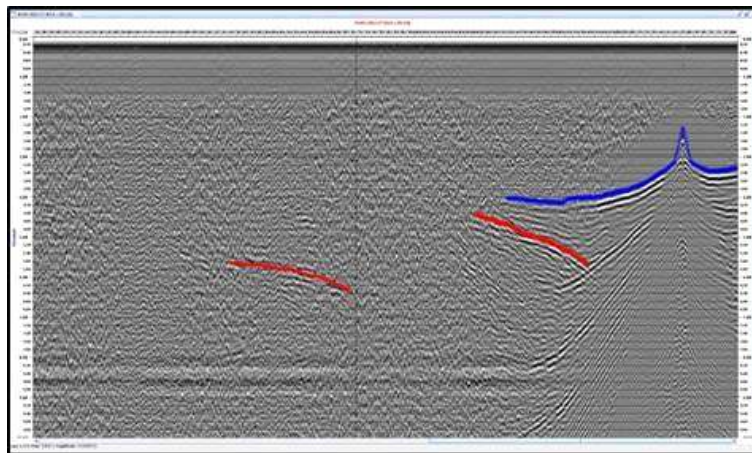
3-1-2-2. 구조보정 속도 분석 (Migration velocity analysis)

이미지 영역 (image domain)에서 반사와 생성 위치 차이 (kinematics error)를 이용하여 속도 구조를 역산하는 방법이다. 구체적인 방법을 보면 중합 전 깊이 보정 (prestack depth migration)을 이용하여 공통 이미지 모음 (Common Image Gather, CIG)를 계산하고 CIG를 분석하여 kinematics 에러를 계산한다. 계산된 kinematics 에러는 주시 계산을 이용하여 속도 에러로 변환되어 속도 구조를 반복적으로 업데이트 한다. 앞선 방법과의 차이점은 기존 속도 분석의 경우 중합 전 CMP 모음에서 각 RMS 속도에 따라 미리 계산된 샘플링스 에너지를 기반으로 속도를 분석자가 판단하여 결정하였지만 구조 보정 속도 분석의 경우 중합 전 구조 보정을 통해 도출된 CIG의 평평도 (flatness) 를 향상시키는 방향으로 속도가 자동 업데이트 된다는 점이다. 이 방법 또한 반사와 신호를 이용하여 속도를 계산하므로 반사파가 지배적인 짧은 오프셋 탄성과 탐사 자료에 적용 가능한 방법이지만 매 반복 계산마다 CIG들의 반사면에 대한 잔차 추출이 필요하며 상대적으로 낮은 해상도의 속도 값을 도출한다는 단점을 가지고 있다.

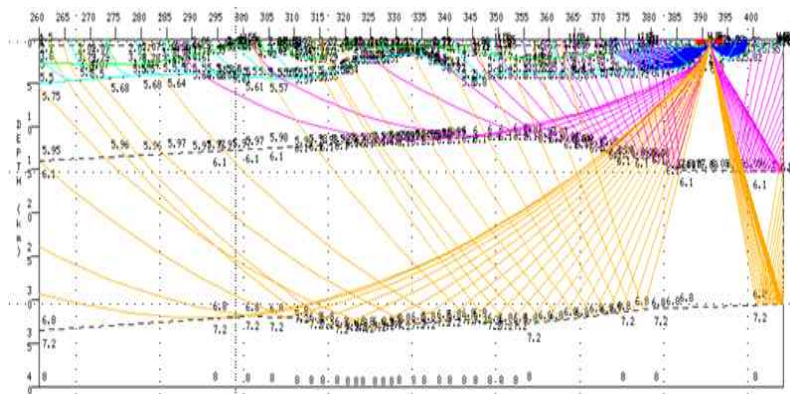
3-1-2-3. 굴절과 토모그래피 (Refraction tomography)

탄성과 탐사 자료의 초동과 주어진 속도 구조에서 주시 계산을 통해 얻은 초동간의 잔차를 최소화 시키는 방향으로 속도 구조를 업데이트하는 알고리즘이다. 주시 계산을 위해서는 파선을 직접 계산하거나 (ray tracing) 파동방정식에 기반 하여 초

동을 계산하는 방법이 있으며, 관측 자료의 초동을 직접 발췌해야하므로 공통 송신원 모음이 많은 경우 또는 공통 수신기 모음이 많은 경우 많은 시간이 필요하다. 굴절 주시만을 이용하므로 최종 속도 구조는 장파장 속도 구조이며 해상도가 낮다는 특징이 있다. 초동으로 기록되는 굴절과 정보를 이용하는 방법이기 때문에 OBS 탐사와 같이 매우 큰 오프셋을 가지는 탐사 방법에 널리 사용되는 알고리즘이며 굴절과가 제대로 기록되기 어려운 짧은 오프셋 탄성과 탐사 자료에는 적합하지 않은 방법이다. 또한 탄성과 해양학 자료의 경우 수층의 온도는 수심이 깊어질수록 하강하는 경향이 있고 마찬가지로 P와 전달 속도 또한 수심이 깊어질수록 하강하는 경향이 있다. 굴절과는 P와 전달 속도가 느린 층과 빠른 층사이의 경계를 주행하다가 속도가 느린 층으로 임계 굴절되어 돌아오는 파가 수신기에 기록된 것이므로 탄성과 해양학 자료에서 굴절과가 관찰되는 경우는 매우 드물기 때문에 굴절과 토모그래피를 탄성과 해양학 연구에 적용하기는 어렵다.



(a)



(b)

그림 3-7. (a) 관측 자료로부터 초동 발췌, (b) 주시 계산을 위한 Ray tracing

3-1-2-4. 완전 파형 역산 (Full waveform inversion)

주어진 속도 구조에서 도출된 모델링 파동장과 관측된 파동장간의 잔차를 최소화시키는 방향으로 속도 구조를 업데이트하는 방법으로 파동장의 일부 성분만 사용하는 토모그래피와는 달리 전체 파동장 성분 (굴절파, 반사파, 다중 반사파, 모드 변환 파 등)을 사용한다는 특징이 있다. 파동 방정식에 기반하여 가능한 모든 파형을 모델링하고 잔차를 계산하므로 최종적으로 도출된 속도 구조의 해상도가 높다는 것과 대부분의 과정이 자동화되어 수학적으로 계산되므로 사람의 주관이 개입될 여지가 적다는 점이 큰 장점이다. 모델링에 사용하는 지배방정식의 근사 정도에 따라 음향 파 (acoustic) 완전 파형 역산, 탄성파 (elastic) 완전 파형 역산, 이방성 (anisotropy) 완전 파형 역산 등으로 나뉘며 모델 파동장과 잔차를 계산하는 영역에 따라 시간 영역 (time domain), 주파수 영역 (frequency domain), 라플라스 영역 (laplace domain) 등으로 나뉜다. 최근에는 완전 파형 역산의 계산량 문제를 해결하기 위해 시간-주파수 또는 시간-라플라스-푸리에 복합 영역 (hybrid domain) 완전 파형 역산 방법이 소개되기도 하였다 (Kim et al., 2013; Jun et al., 2014; Jun et al., 2017).

완전 파형 역산은 최근 가장 많은 연구가 이루어지고 있는 알고리즘이며 알고리즘 개발 초기에 발생한 여러 문제를 해결하는 많은 알고리즘들이 개발되었지만 관측 자료에 저주파수 성분이 부족하거나 정확한 초기 속도 모델이 주어지지 않은 경우 사이클스킵핑 (cycle-skipping) 문제가 심해서 국소 최저치에 빠지는 문제는 아직 완전히 해결되지 않았다. 그림 3-8의 민감도 분석 결과를 보면 낮은 파수 (장파장) 이미지는 천부에만 역산이 되고 높은 파수 (단파장) 이미지가 심부에 역산되는 것을 확인할 수 있다. 만약 획득 가능한 저주파수 성분이 정해져 있을 때 오프셋의 길이가 충분히 길다면 낮은 파수 또한 심부에 역산될 수 있지만 비용 및 시간의 한계로 인해 충분히 긴 오프셋 자료를 확보하기는 어려우므로 심부의 장파장 속도 모델 역산은 아직까지 완전 파형 역산 알고리즘의 문제점으로 남아있다.



그림 3-8. 오프셋 길이와 역산 가능 파수의 깊이를 보여주는 민감도 분석 결과

최근에는 알고리즘 개발을 통한 문제점 해결뿐만 아니라 완전 파형 역산에 적합한 탐사 기술을 개발하고 적용하는 움직임도 있다. 세계인 자원 개발 회사들 또는 연구 기관에서 Broadband seismic (Kroode et al., 2013) 과 WAZ, FAZ 등의 탐사 기술을 통해 (Sirgue et al., 2009; Vigh et al., 2010; Vigh et al., 2013) 충분한 넓은 대역의 주파수를 취득하거나 많은 방위각의 긴 오프셋 탐사 자료를 취득 하는 노력을 하고 있다.

3-1-3. 알고리즘 개발 및 프로그래밍 수행

3-1-3-1. Trans-dimensional Markov chain Monte Carlo 기법을 이용한 P와 속도 역산 알고리즘 개발

Monte Carlo 법은 수식만 이용하여 답을 얻기 어려운 문제가 있을 때 데이터로부터 무작위 샘플을 추출한 다음 샘플을 통해서 답을 추정하는 방법이다. Monte Carlo 법을 이용하여 해답을 찾을 때 무작위 샘플을 추출하고 샘플을 이용하여 직접 목적함수를 평가하는 global optimization 방법을 채택하며 가장 낮은 목적함수를 가지는 모델이 최종 결과가 된다. 하지만 모든 차원에 대해서 목적함수를 평가하는 것은 현실적으로 어려움이 따른다. 이러한 한계를 극복하기 위해서 Markov chain 방법을 도입하는데 Markov chain이란 과거와 현재 상태가 주어졌을 때 미래 상태의 조건부 확률 분포가 과거 상태와는 독립적이며 현재 상태에 의해서만 결정되는 성질을 가진 이상 시간 확률 과정을 의미한다 (Everett, 2013).

Markov chain과 Monte Carlo 법을 연결하여 지구물리 분야에 적용하는 연구는 Malinverno(2002)에 의해 처음 제시되어서 전기 비저항 자료 역산에 적용되었다. 탄성과 탐사에는 Bodin and Sambridge (2009)가 최초로 적용하였으며 최근에는 Zhu et al. (2016), Ray et al. (2016) 에 의해 탄성과 역산 문제에 적용되었다. 탄성과 탐사 자료를 이용한 역산 문제에 Markov chain Monte Carlo (McMC) 법을 적용할 때 랜덤 추출된 샘플은 관측된 탄성과 탐사 자료로 가정하고 정답은 실제 지하 매질의 물성 값 (속도, 임피던스, 밀도 등)으로 가정하여 수행한다. 즉, McMC 법은 취득한 탄성과 탐사 자료를 통계적으로 분석하여 실제 지하 매질의 물성 값 중 가장 확률이 높은 값을 계산하는 방법이다.

본 연구에서는 Trans-dimensional McMC 법을 이용하였으며 trans-dimensional 은 지하 매질의 차원을 무작위로 높이거나 낮추면서 지하 매질의 물성 값을 취득하는 방법으로 모델의 차원이 불확실할 때 (unknown) 모델의 차원 또한 역산의 변수로 간주하고 역산하므로 고정된 차원을 이용하는 McMC 방법에 비해 더 정확한 결과를 도출한다는 특징이 있다. 따라서 모델의 차원을 의미하는 반사면의 위치가 역산의 변수이므로 실제 반사면이 존재할 확률이 높은 위치를 통계적으로 보여줄 수 있어 반사면의 정확한 위치와 지하 매질의 물성 값을 동시에 역산할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

P와 속도 역산을 위한 Trans-dimensioal McMC 알고리즘은 아래와 같다. McMC는 사전 확률 분포와 추가 정보를 통해 사후 확률 분포를 추정하는 방법인 베이즈 추론에 기반하며 이는 식 3-7로 표현될 수 있다.

$$p(m|d_{obs}) = \frac{p(d_{obs}|m)p(m)}{p(d_{obs})} \quad (3-7)$$

여기서 $p(m) = p(v, L|n)p(n)$ 는 사전 확률, v 는 P파 속도, L 은 층의 위치, 그리고 n 은 층의 개수를 의미한다. $p(d_{obs}|m) \propto \exp\left[-\frac{\phi(m)}{2N_d\sigma_d^2}\right]$ 의 성질을 가지고 있으며 이는 우도 함수 (likelihood function)을 의미하며, $\phi(m)$ 은 잔차, N 은 데이터 개수, σ 는 데이터 노이즈의 예측된 분산 (경험적으로 탄성과 자료 최대 값의 2~5%로 사용)을 가리킨다. Trans-dimensional McMC 방법에서는 Metropolis-Hastings 알고리즘 (Chib and Greenberg, 1995) 을 사용하며 주어진 조건에서의 수락 확률 (acceptance probability, $\alpha(m^*|m)$)은 식 3-8을 통해 계산된다.

$$\alpha(m^*|m) = \min\left[1, \frac{p(m^*)}{p(m)} \frac{p(d_{obs}|m^*)}{p(d_{obs}|m)} \frac{q(m|m^*)}{q(m^*|m)} \Big| \mathcal{J}\right] \quad (3-8)$$

m^* 는 새롭게 제안된 모델, m 은 현재 모델, $q(m^*|m)$ 는 현재 모델에서 새롭게 제안된 모델로 이동할 확률로 역산의 수렴을 조절하는 제안 분포이며 모델이 수렴할수록 $q(m^*|m)$ 과 $q(m|m^*)$ 의 차이가 줄어들어 수렴하게 된다.

Trans-dimensional McMC 역산을 위해서는 반복계산이 수행될 때 모델의 차원을 변경하면서 모델 층의 위치도 물성 값과 함께 역산 하는 것이 알고리즘의 핵심이며, 따라서 층의 위치, 개수를 역산하는 3가지 전략을 매 반복계산마다 무작위로 선택하여 수행하는 방법을 택한다 (Bodin and Sambridge, 2009). 3가지 전략은 층 생성(layer generation), 층 제거(layer decimation), 층 이동(layer relocation)이며 각각에 대한 수락 확률은 표 3-3에 표시되어 있다. 층 생성과 제거 과정은 모델의 차원을 변경시키는 전략이고 층 이동은 모델의 차원은 변경하지 않고 현재 차원에서 선택된 층을 재설정하는 과정이다. Trans-dimensional McMC는 제시된 세 가지 전략을 통해 목적함수를 평가할 때 무작위성을 높이고 local minima에 빠질 위험을 감소시킨다.

층 전략	수락 확률
층 생성	$\alpha(m^* m)_g = \min \left[1, \frac{\sigma_v \sqrt{2\pi}}{\Delta v} \exp \left(\frac{(v_k^* - v_i)^2}{2\sigma_v^2} - \frac{\phi(m^*) - \phi(m)}{2\sigma_d^2} \right) \right]$
층 제거	$\alpha(m^* m)_d = \min \left[1, \frac{\Delta v}{\sigma_v \sqrt{2\pi}} \exp \left(\frac{(v_k^* - v_i)^2}{2\sigma_v^2} - \frac{\phi(m^*) - \phi(m)}{2\sigma_d^2} \right) \right]$
층 이동	$\alpha(m^* m)_r = \min \left[1, \exp \left(- \frac{\phi(m^*) - \phi(m)}{2\sigma_d^2} \right) \right]$

표 3-3. 층 전략 (layer strategy) 에 따른 수락 확률 (acceptance probability).

층에 대한 전략 선택 및 수행이 완료되면 선택된 층에 연결된 물성 값을 무작위로 변경한다. 가우스 랜덤 함수를 따라 변경 값을 무작위로 추출하지만 물성 값의 급격한 변화를 막기 위해 정해진 범위 안에서 값을 무작위로 추출하며 최종적으로 0~1 사이의 실수 중 랜덤하게 선택된 β 와 수락 확률 α 를 비교하여 $\alpha > \beta$ 인 경우에만 제안된 모델을 수락하고 그렇지 않다면 제안된 모델을 버리고 다시 현재 모델을 이용하여 역산을 수행한다. 그리고 위 과정을 전체 트레이스에 대해 정해진 반복 계산 횟수로 수행하여 역산을 완료한다. 그림 3-9는 trans-dimensional MCMC 역산의 수행 절차 순서도이다.

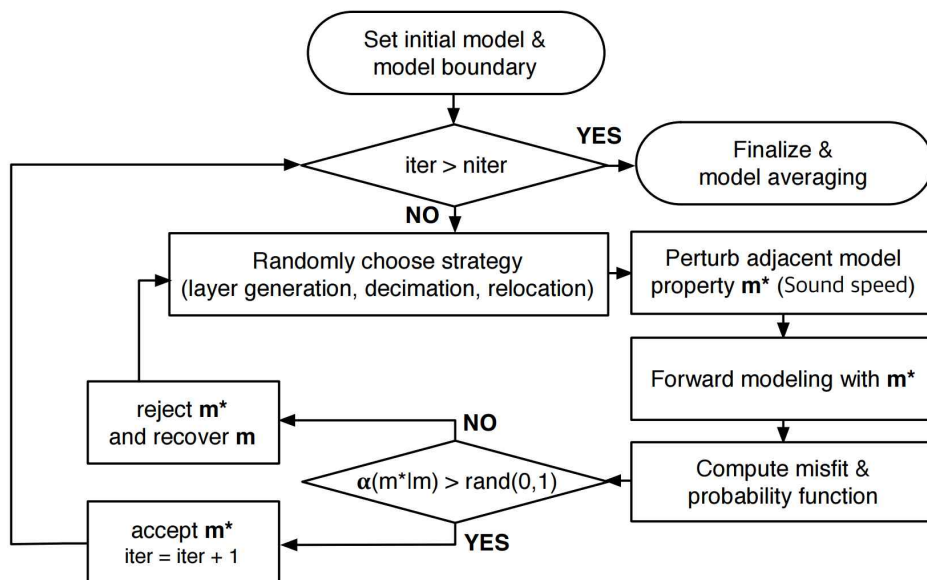


그림 3-9. Trans-dimensional MCMC 역산의 순서도

Trans-dimensional MCMC 역산은 입력 자료가 prestack 자료가 아닌 poststack 자료이므로 오프셋의 길이에 상관없이 일정 이상 품질을 가진 중합 단면 또는 구조보정 단면이 있으면 역산을 수행할 수 있기 때문에 본원이 가진 짧은 오프셋 탄성파 탐사 자료에 적합한 알고리즘이다. 또한 각 트레이스에 대해 병렬적으로 작용하는 알고리즘이므로 다중 코어를 이용한 프로그램 병렬화가 용이하고 파동 방정식 기반의 모델링이 아닌 콘볼루션 기반의 모델링을 수행하므로 계산량이 적다는 장점이 있다.

3-1-3-2. Trans-dimensional MCMC 역산 프로그램 개발

C언어를 이용하여 프로그램을 개발하였으며 Intel compiler 및 Makefile을 이용하여 실행 파일을 컴파일 하였다. 그림 3-10은 개발된 프로그램의 소스 코드 일부와 역산을 수행할 때 필요한 변수 입력 파일의 일부이다.

```

1 #include "mcmcsb.h"
2
3 void change_birth_death(int *layerlife,
4     int nlayer,
5     int minlayer,
6     int maxlayer,
7     int addseed1,
8     int addseed2)
9 {
10     float change, birth, death;
11     float randval;
12     int minlimit, maxlimit;
13
14     minlimit = minlayer + 5;
15     maxlimit = maxlayer - 5;
16
17     uniform_random(&randval, 0., 1., addseed1, addseed1 + addseed2);
18
19     if(nlayer > minlimit && nlayer < maxlimit)
20     {
21         change = 0.3;
22         birth = 0.3;
23         death = 0.4;
24     }
25     else if(nlayer > minlayer && nlayer <= minlimit)
26     {
27         change = 0.25;
28         birth = 0.5;
29         death = 0.25;
30     }
31     else if(nlayer >= maxlimit && nlayer < maxlayer)
32     {
33         change = 0.25;
34         birth = 0.25;
35         death = 0.5;
36     }
37     else if(nlayer <= minlayer)
38     {
39         change = 0.3;
40         birth = 0.7;
41         death = 0.0;
42     }
43     else if(nlayer >= maxlayer)
44     {
45         change = 0.3;
46         birth = 0;
47     }
48 }

```

```

1 Loading parameters for Markov-chain Monte Carlo inversion
2 #0. Domain group
3 nxi      : 384    #(node)
4 nzi      : 125    #(node)
5 dx       : 24.0   #(m)
6 dz       : 24.0   #(m)
7
8 ntrace   : 384   #(number)
9 nt       : 125   #(number)
10 dt      : 0.016  #(second)
11 fmax    : 15.    #(Hz)
12 jump    : 1     #(number)
13
14 #1. Inputfile group
15 #swdfile :
16 tmgfile  : /data5/home/jhg1026/INV2D/17.McMC/test/true_conv_result
17 wavefile : /data5/home/jhg1026/INV2D/17.McMC/test/source.dat
18
19 #vp group
20 vpstart  : 0     #0: 1d, 1: homo, 2: input
21 vpmin    : 1500  #(m/s)
22 vpmax    : 5500  #(m/s)
23 vphomo   : 3000  #(m/s)
24 vpwater  : 1500  #(m/s)
25 ivpfile  : /data5/home/jhg1026/INV2D/17.McMC/test/marm24m.384x125.
26
27 #ds group
28 dsstart  : 1     #0: 1d, 1: homo, 2: input
29 dsmin    : 900   #(g/cc)
30 dsmax    : 1100  #(g/cc)
31 dshomo   : 1000  #(g/cc)
32 dswater  : 1000  #(g/cc)
33 idsfile  : /data5/home/jhg1026/INV2D/17.McMC/test/marm24m.384x125.
34
35 #2. Inversion Group
36 norm     : 2     #1: L1-norm, 2: L2-norm
37 siter    : 0     #(number)
38 niter    : 20000 #(number)
39 minlayer : 5     #(node)
40 maxlayer : 50    #(node)
41 swindow  : 0     #(node)
42 ewindow  : 124   #(node)
43 vpstep   : 50    #steplength

```

그림 3-10. (a) Trans-dimensional MCMC 역산 코드 일부와 (b) 변수 입력 파일 일부

3-1-3-3. Kirchhoff 구조보정 프로그램 개발

Kirchhoff 구조보정 (depth migration) 은 중합 전 구조보정 알고리즘의 한 종류

로 주어진 속도 구조의 주시와 중합 전 관측 자료 (공통 송신원 모음) 를 이용하여 깊이 영역에서 구조보정을 수행하는 알고리즘이다. 본 연구에서는 실제 현장 자료를 이용해 역산을 수행할 때 관측 자료로 중합 후 탄성과 단면 (중합 단면 또는 구조보정 단면)을 사용하므로 정확한 탄성과 단면이 있을 때 더 정확한 속도 값을 도출해낼 수 있다. 지형의 수평 변화가 크기 않은 곳에서는 시간 영역 전처리를 통한 중합 단면을 이용하는 것이 가능하지만 수평적 변화가 크고 복잡한 지형에서는 중합 전 깊이 영역 구조보정을 수행할 경우 정확한 탄성과 단면을 도출할 수 있다. 따라서 정확한 탄성과 단면 생성을 위해서는 역시간 구조보정이나 Kirchhoff 구조보정이 합리적인 선택이다. 이 중 계산 속도가 빠르고 결과 검증이 쉬운 Kirchhoff 구조보정 알고리즘을 택하여 프로그램을 개발하였다.

C언어와 Fortran90 언어를 이용하여 프로그램 개발하였으며 깊이 영역에서 만들어진 구조보정 단면은 Madagascar의 “sfdepth2time” 모듈을 통해 시간 영역으로 변환되고 시간 영역 구조보정 단면을 역산의 관측 자료로 이용하여 McMC 역산을 수행한다. McMC 역산과 동일한 parsing system을 사용하여 구조보정에 필요한 변수들을 입력하였으며 그림 3-11은 Kirchhoff 구조 보정의 소스 코드 일부와 변수 입력 력 파일의 일부이다.

```

232 /*
233 *          S T A R T   K I R C H H O F F - M I G R A T I O N
234 *
235 //omega group
236 omega_t *omega;
237
238 //make gradient
239 double *sum_grad;
240 double *sum_hess;
241 double *total_grad;
242 double *total_hess;
243 double *grad_direction;
244
245 double **total_ciggrad;
246 double **total_cighess;
247 float *odcig;
248
249 nn = 1;
250
251 l2_terorb = 0.0;
252
253 omega = ealloc(nn*sizeof(omega_t));
254 omega[0].f = 2*3.1415926535897*0.01;
255 //
256 omega[0].l = 2*3.1415926535897*vpmin/(15*dx);
257
258 if(myrank == 0) msg("freq %f, damp %f", omega[0].f, omega[0].l);
259
260 //grad and hess
261 sum_grad = ealloc(nout*sizeof(double));
262 sum_hess = ealloc(nout*sizeof(double));
263 total_grad = ealloc(nout*sizeof(double));
264 total_hess = ealloc(nout*sizeof(double));
265 grad_direction = ealloc(nout*sizeof(double));
266 total_ciggrad = ealloc2(cignr*nz, ncig, sizeof(double));
267 total_cighess = ealloc2(cignr*nz, ncig, sizeof(double));
268 odcig = ealloc(cignr*nz*sizeof(float));
269
270 memset(vpd[0], 0, nn*nz*sizeof(double));
271 memset(vpf[0], 0, nn*nz*sizeof(float));
272 memset(vpdc, 0, nx*nz*sizeof(double));
273 memset(vpfc, 0, nx*nz*sizeof(float));
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000

```

그림 3-11. (a) Kirchhoff 구조보정 코드 일부와 (b) 변수 입력 파일 일부

3-1-3-4. 보조 프로그램 개발

현장 자료를 이용하여 역산과 구조보정을 수행하기 위해서는 자료의 크기 및 특징을 변화시키기 위한 다양한 전처리 과정들이 필요하다. 이러한 과정들은 많은 역산 및 구조보정 과정에서 반복적으로 수행되므로 자동화된 프로그램을 작성하여 필요할 때마다 사용하는 것이 연구의 효율을 높일 수 있는 방법이다. 따라서 본 연구에서 반복적 수행되는 절차들을 보조 프로그램 개발을 통해 쉽게 수행될 수 있도록 하였다. Python을 이용하여 보조 프로그램들을 개발하였고 그 목록은 표 3-4에 표기되어 있다.

프로그램 이름	내용
copAswdextract.py	- binary 파일로부터 해저면 지형에 대한 ascii 파일을 추출하는 프로그램
copBswdcut.py	- 수심 정보를 가진 ascii 파일을 이용하여 binary 파일의 수층 속도를 지정한 속도로 바꿔주는 프로그램
copBnorm.py	- 각 트레이스를 최대 값으로 정규화 시켜주는 프로그램
copBreverse.py	- CIG binary 파일의 방향을 전환시켜주는 프로그램
copBvelgen.py	- 초기 속도 모델을 만들어주는 프로그램
copAtracepick.py	- 역산 결과 검증을 위한 depth profile을 만들어주는 프로그램

표 3-4. 개발 된 보조 프로그램의 목록.

또한 프로그램 실행 시 변수들 설명 및 간단한 사용법 예제를 확인할 수 있도록 하여 프로그램의 사용 성을 높이기 위해 argparse를 이용하여 parsing을 수행하였다. 그림 3-12는 보조 프로그램 copAswdextract.py 코드의 일부와 프로그램 실행 시 출력되는 프로그램 사용 설명이다.

```

1 #!/data5/home/jhg1026/bin/anaconda3/bin/python3
2 print("="*50)
3 print("Library: jhglib")
4 print("program: sea water depth extraction")
5 print("date:      2018.08.24")
6 print("="*50)
7
8 import argparse
9 import os
10 import struct
11 import numpy as np
12
13 parser = argparse.ArgumentParser(description="Extract sea water depth from binary file")
14 parser.add_argument("-n1", action="store", nargs=1, type=int, metavar="int", help="number of samles in 1st dimension [man]")
15 parser.add_argument("-d1", action="store", nargs=1, type=float, metavar="float", help="sampling interval in 1st dimension, default:1 [opt]")
16 parser.add_argument("-val", action="store", nargs=1, type=float, metavar="float", help="value of the sea water, default:0 [opt]")
17 parser.add_argument("-input", action="store", type=str, metavar="str", help="input file name [man]")
18 parser.add_argument("-output", action="store", type=str, metavar="str", help="output file name [opt]")
19
20 args = parser.parse_args()
21
22 if args.n1:
23     n1=args.n1[0]
24
25 if args.d1:
26     d1=args.d1[0]
27 else:
28     d1=1.0
29
30 if args.val:
31     val=args.val[0]
32 else:
33     val=0.0
34
35 if args.input:
36     input=args.input
37     print("input file:          %s" %(input))
38     fsize=os.path.getsize(input)
39     n2=int(fsize/4/n1)
40     print("file size:             %d" %fsize)
41     print("n2:                    %d" %n2)
42
43     if args.output:

```

(a)

```

=====
Library:      jhglib
program:     sea water depth extraction
date:       2018.08.24
=====
usage: copAswdextract.py [-h] [-n1 int] [-d1 float] [-val float] [-input str]
                        [-output str]

Extract sea water depth from binary file

optional arguments:
  -h, --help      show this help message and exit
  -n1 int         number of samles in 1st dimension [man]
  -d1 float       sampling interval in 1st dimension, default:1 [opt]
  -val float      value of the sea water, default:0 [opt]
  -input str      input file name [man]
  -output str     output file name [opt]

Example: copAswdext.py -n1 100 [-d1 25.0] [-val 0.0] -input velocity.bin [-output swd.txt]

```

(b)

그림 3-12. (a) 보조 프로그램 (copAswdextract.py)의 일부와 (b) 프로그램 사용 설명

3-2. 현장자료를 이용한 알고리즘 검증

3-2-1. 지층 및 수층 탄성과 탐사 자료에 대한 알고리즘 적용

3-2-1-1. 인공 합성 자료에 알고리즘 적용

개발된 알고리즘이 이상적인 환경에서 성공적으로 지하 속도 구조를 도출할 수 있는지 확인하기 위해 인공 합성 자료를 이용하여 알고리즘 검증을 수행하였다. 실제 Marmousi 속도 모델을 이용하여 반사계수를 계산하고 콘볼루션을 이용하여 인공 합성 탄성과 단면을 계산하였으므로 탄성과 단면에 잡음이 없고 단면의 진폭은 실제 반사계수를 반영하고 있는 이상적인 환경이다. 그림 3-13은 실제 Marmousi 속도 모델과 인공 합성 탄성과 단면이다.

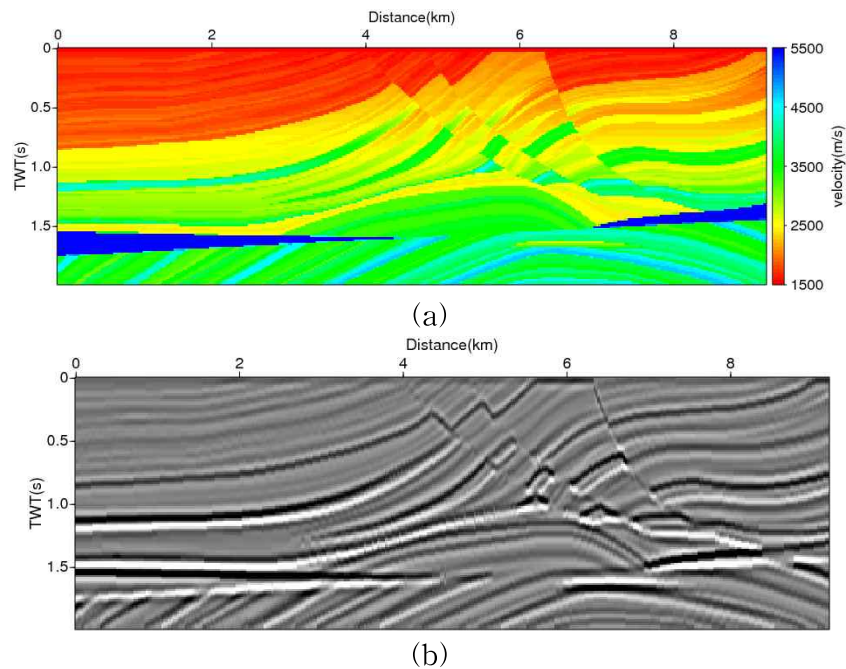


그림 3-13. (a) 실제 Marmousi 속도 모델과 (b) 인공 합성 탄성과 단면

50,000번의 반복 계산을 수행하였으며 Trans-dimensional MCMC 역산은 1차원 역산이므로 트레이스별 역산 결과의 일관성을 향상시키기 위해서 이동 평균을 적용하였다. 그림 3-14는 역산 결과이다.

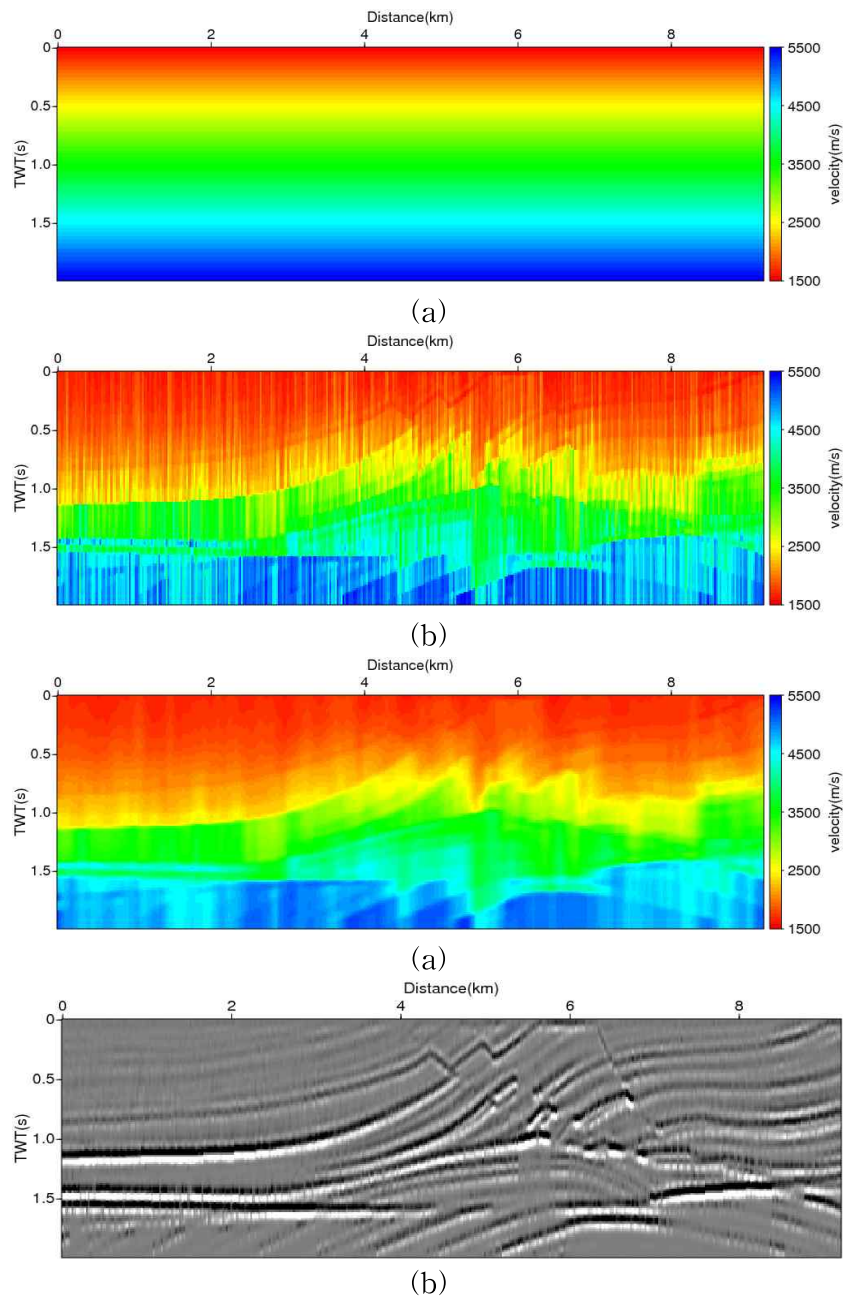
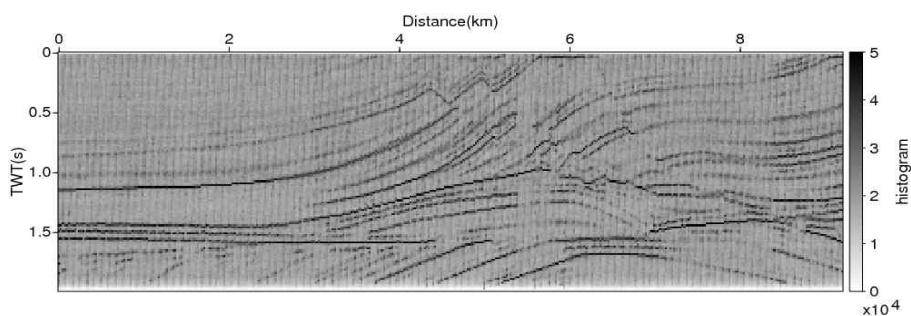


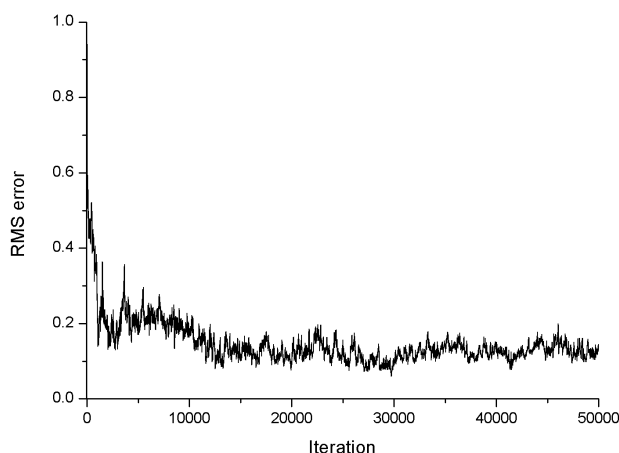
그림 3-14. (a) 초기 속도 모델, (b) Trans-dimensional MCMC 역산 결과, (c) 이동 평균 적용 결과, (d) 최종 모델링 탄성과 단면

최종적으로 역산된 속도 모델과 최종 모델링 탄성과 단면을 보면 실제 속도 모델 및 인공 합성 탄성과 단면과 상당히 근접하게 역산된 것을 확인할 수 있다. 이는 본 연구를 통해 개발된 알고리즘이 이상적인 환경에서 성공적으로 역산을 수행할 수 있음을 알려준다. Trans-dimensional MCMC는 층의 위치와 물성 값을 동시에 역산하므로 층이 있을 확률이 높은 위치를 나타내는 히스토그램을 통해 층의 경계

를 확률적으로 예측 할 수 있으며 그림 3-15(a)를 보면 실제 층이 존재 하는 곳에서 높은 히스토그램 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 3-15(b)의 RMS 오차를 보면 역산 초기 오차가 급격히 떨어지는 Burn-in period를 약 1000번의 반복 계산까지라고 볼 수 있으며 이후 무작위 행보 (random walk)를 통해 모델 업데이트가 진행되는 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 3-15. (a) 역산을 통해 얻은 히스토그램과 (b) 반복 계산에 따른 RMS 오차 변화

인공 합성 자료를 이용한 테스트를 통해 Trans-dimensional MCMC 역산 프로그램이 물성 값과 층의 위치를 정확히 찾아내는 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 위 실험은 이상적인 환경에서 프로그램이 성공적으로 역산을 수행하는지 확인하기 위한 단계였으므로 실제 환경과는 차이가 있다. 실제 탄성과 자료에 적용하기 위해서는 중합 전 탄성과 자료로부터 탄성과 단면을 만들어내고 역산을 수행해야 한다. 본 연구에서는 중합 전 탄성과 자료로부터 구조보정 단면을 얻기 위해 앞서 개발된 Kirchhoff 구조보정을 수행하고 Madagascar의 “sfdepth2time” 모듈을 이용해 시간

영역 구조보정 단면을 얻었다. 시간 영역에서 얻은 trans-dimensional McMC 역산 결과는 Madagascar의 “sftime2depth” 모듈을 이용해 다시 깊이 영역 속도 모델로 변환되었다. 또한 초기 속도 모델로 만들어진 구조보정 단면은 반사면의 위치 및 진폭이 실제 지하 구조와 차이가 있기 때문에 본 연구에서는 구조보정과 trans-dimensional McMC 역산을 반복수행하는 과정을 통해 속도 모델의 정확도를 향상시키는 절차를 새롭게 제안하였다 (그림 3-16).

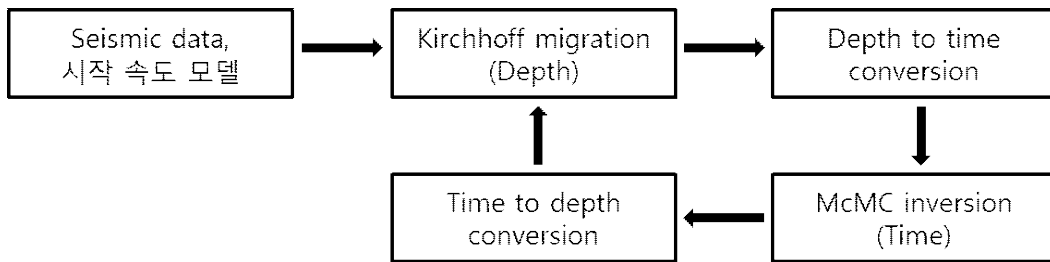


그림 3-16. 구조보정과 trans-dimensional McMC 역산 반복수행 절차도.

이 방법은 층의 위치 및 진폭과 주시를 번갈아가며 반복적으로 역산하는 방법으로 trans-dimensional McMC 역산은 진폭을 이용하여 주시를 업데이트하고 구조보정은 주시를 이용하여 진폭 및 층의 위치를 업데이트 하므로 진폭 및 층의 위치와 주시를 각각 분리하여 역산 하는 방법이다. 이와 같이 진폭 및 층의 위치와 주시를 분리하여 역산하는 방법은 반사파 기반의 완전 파형 역산 (Reflection-based Full waveform inversion) (Xu et al., 2012; Jun et al., 2018)에 사용된 파형역산-구조보정 반복 수행 방법 또는 두 단계 역산 방법 (two step approach) 과 유사하다.

실제 탐사 자료와 유사한 환경을 통해 알고리즘을 검증하기 위해 최대 오프셋이 3 km이고 모델의 최대 깊이가 3.5 km인 인공 합성 탄성과 공통 송신원 모음 자료를 만들고 테스트를 수행하였다. 그림 3-17은 세 번의 구조보정, 두 번의 trans-dimensional McMC 역산 과정에서 얻은 속도 모델과 구조보정 단면이다. 간단한 1차원 속도 모델로부터 역산을 시작하였지만 trans-dimensional McMC 역산과 구조보정을 반복하며 속도 구조가 실제랑 점차 유사해지는 것을 확인할 수 있다. 그림 3-18은 trans-dimensional McMC 역산 결과 (그림 3-17(e))를 초기 속도 모델로 이용하여 얻은 FWI 결과와 간단한 1차원 속도 모델 (그림 3-17(a))을 초기 속도 모델로 이용하여 얻은 FWI 결과이다. 짧은 오프셋 (~3 km)의 중합 전 탄성과 자료를 사용하여 FWI를 진행하였기 때문에 간단한 1차원 속도 모델을 이용한 FWI 결과는 심각한 cycle skipping으로 인해 구조보정과 유사한 (migration-like) 속도

업데이트만 진행되어 역산에 실패한 것을 볼 수 있다. 하지만 trans-dimensional MCMC 역산 결과를 이용한 FWI 결과는 실제 Marmousi 속도 구조와 유사한 결과를 역산하였다. 이는 짧은 오프셋 자료임에도 불구하고 trans-dimensional MCMC 역산이 정확한 주시를 계산할 수 있는 속도 구조를 역산했기 때문이다.

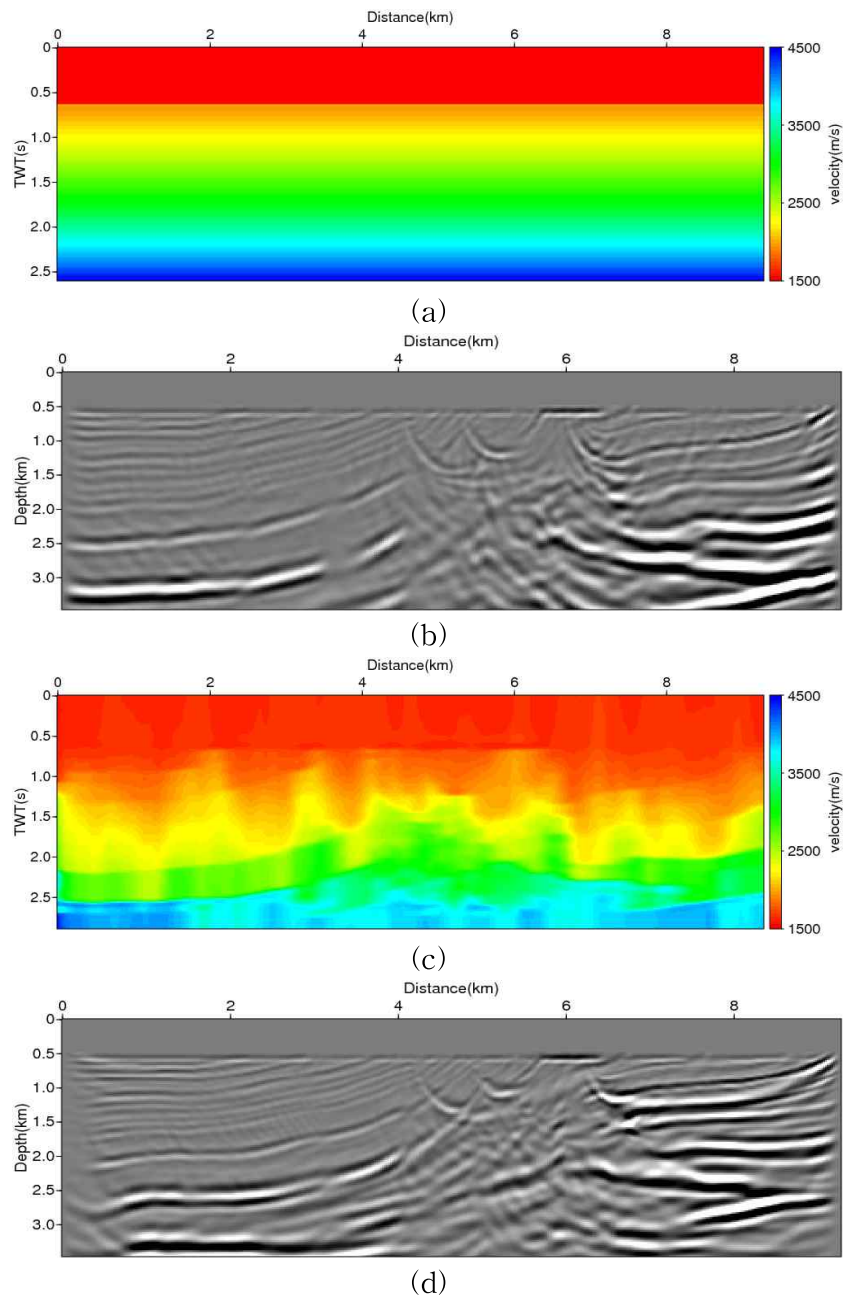
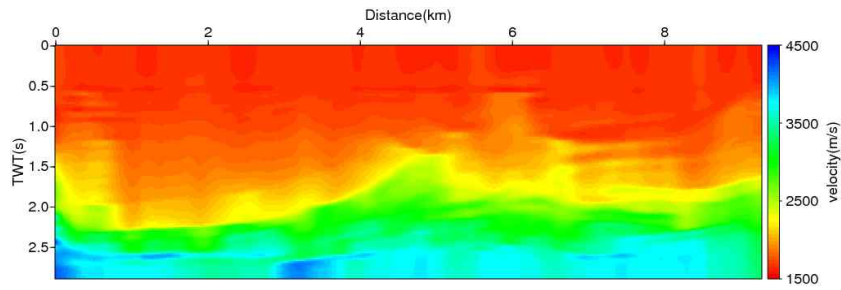
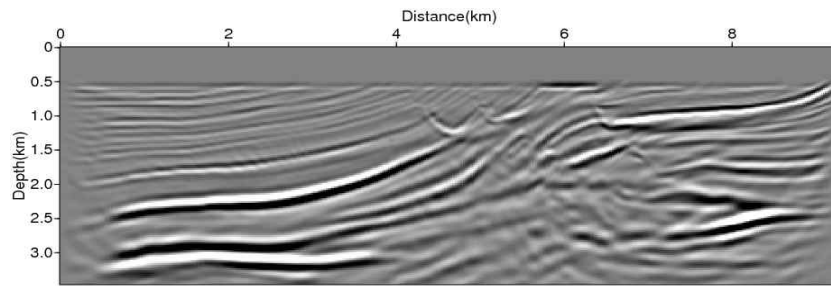


그림 3-17 (계속)

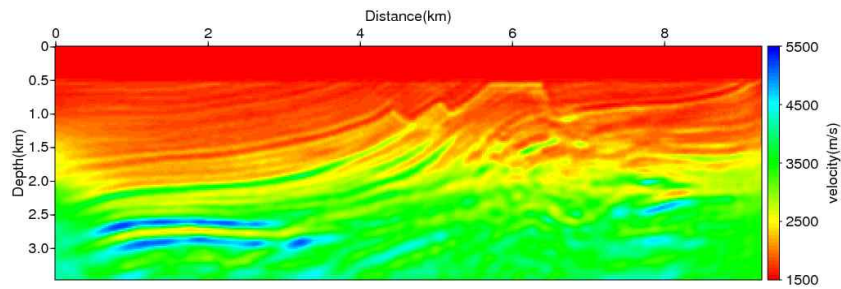


(e)

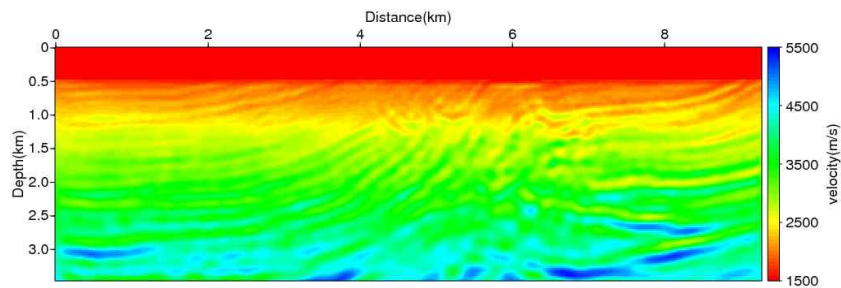


(f)

그림 3-17. (a) 초기 속도 모델, (b) 초기 속도 모델로 얻은 구조보정 단면, (c) 첫 번째 trans-dimensional MCMC 역산 결과, (d) 첫 번째 역산 결과로 얻은 구조보정 단면, (e) 두 번째 trans-dimensional MCMC 역산 결과, (f) 두 번째 역산 결과로 얻은 구조보정 단면



(a)



(b)

그림 3-18. (a) trans-dimensional MCMC 역산 결과를 이용하여 얻은 FWI 결과와 (b) 간단한 1차원 속도 모델을 이용하여 얻은 FWI 결과

3-2-1-2. 지층 현장 탄성과 탐사 자료에 알고리즘 적용

개발된 알고리즘이 인공 합성 자료로부터 지하 속도 구조를 성공적으로 역산할 수 있음을 보였기 때문에 이번에는 실제 현장 탄성과 탐사 자료에 적용 가능한지 확인하기 위해 Tonga #04 현장 탄성과 탐사 자료에 trans-dimensional MCMC 역산을 적용하였다. Tonga #04 현장 탄성과 탐사 자료의 세부 사항은 표 3-5에 설명되어 있다.

프로그램 이름	내용
송신원 종류 및 개수	Air gun 707개 (12.5 m 간격)
수신기 개수	108 / shot (12.5 m 간격)
기록 시간	4 s (1 ms 간격)
최대 오프셋	1.4 km

표 3-5. Tonga #04 현장 탄성과 탐사 자료 세부 사항

그림 3-19는 Tonga #04 현장 탄성과 탐사 자료의 공통 송신원 모음과 해당 공통 송신원 모음의 주파수 스펙트럼이다. 공통 송신원 모음의 최대 오프셋은 1.4 km이고 탐사를 통해 취득되는 최저 주파수 성분은 약 5 Hz인 것을 확인할 수 있다. 기존 연구 결과 (Kim et al., 2013)를 참고해보면 본 자료의 해저면 깊이는 약 300 m ~ 800 m 이고 탐사의 타겟인 해저화산지형은 약 700 m ~ 1500 m 깊이에 있다. 본 탐사 환경에서 기존의 역산 방법을 적용할 때 1 km 깊이의 위치에서 역산할 수 있는 최저 파수 값은 약 17.1 (1/km)이므로 기존의 역산 방법을 통해 정확한 속도 구조를 얻는 것은 어렵다. 따라서 본 자료에 trans-dimensional MCMC 역산을 적용하여 지하 속도 구조를 도출하고자 하였다. 역산 절차는 그림 3-16에서 제시한 방법을 사용하였으며 중합 전 자료로부터 Kirchhoff 구조 보정을 수행하여 구조보정 단면을 얻고 trans-dimensional MCMC 역산을 수행하였다. 총 3번의 Kirchhoff 구조보정과 2번의 Trans-dimensional MCMC 역산을 수행하여 지하 속도 구조와 반사면의 확률적인 위치를 역산 하였다.

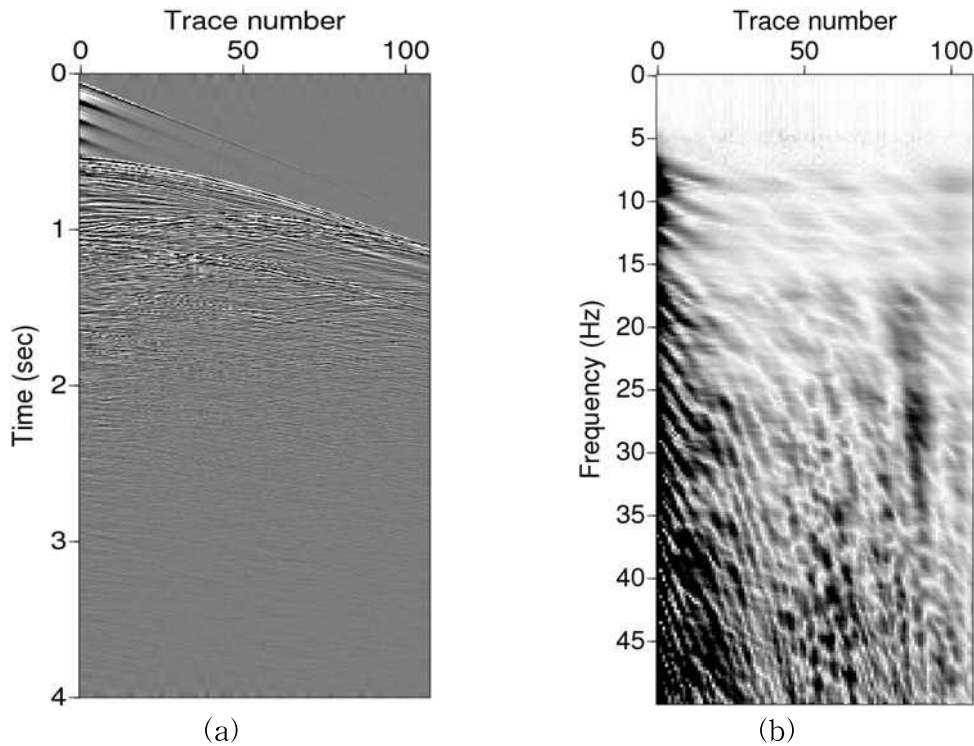


그림 3-19. Tonga #04 현장 탄성과 탐사 자료의 (a) 공통 송신원 모음과 (b) 해당 공통 송신원 모음의 주파수 스펙트럼

그림 3-20은 초기속도모델 및 각 단계에서의 McMC 역산 결과와 구조보정 단면이다. 간단한 1차원 초기 속도 모델로부터 시작하여 McMC 역산과 구조보정을 반복하면서 점점 속도 구조가 실제 구조보정에서 얻은 지하 구조와 유사한 형태로 업데이트되는 것을 확인할 수 있다.

그림 3-21은 두 번째 trans-dimensional McMC 역산 결과로 얻은 히스토그램과 모델링 결과이다. 종합 전 공통 송신원 모음에 기본적인 주파수 필터를 제외하고는 어떤 고급 자료처리도 수행하지 않았기 때문에 구조보정 단면에 다중 반사파 신호와 무작위 잡음들이 많이 남아있는 것을 볼 수 있다. 따라서 실제 반사면의 진폭이 잡음의 진폭에 비해 월등히 우세하지 않은 상황이며 다중 반사파 신호가 역산을 방해할 것으로 예상된다. 히스토그램은 실제 해저화산지형 반사면들의 위치가 잘 나타나있지만 trans-dimensional McMC 역산의 반복계산 횟수가 비교적 작고 (5000회) 강한 잡음들이 존재해 반사면의 히스토그램 값이 인공합성자료 예제에 비해 작은 것을 볼 수 있다. 이러한 문제는 적절한 자료 처리 (다중반사파, 무작위 잡음 제거 등) 를 수행하면 개선될 것으로 예상된다. 위와 같은 문제점에도 불구하고 모델링 결과는 실제 구조보정 결과와 상당히 일치하는 모습을 보여주며 구조 보정 단면과 역산된 속도 모델의 구조가 유사한 것을 볼 때 역산이 성공적으로 수행되었음을

알 수 있다.

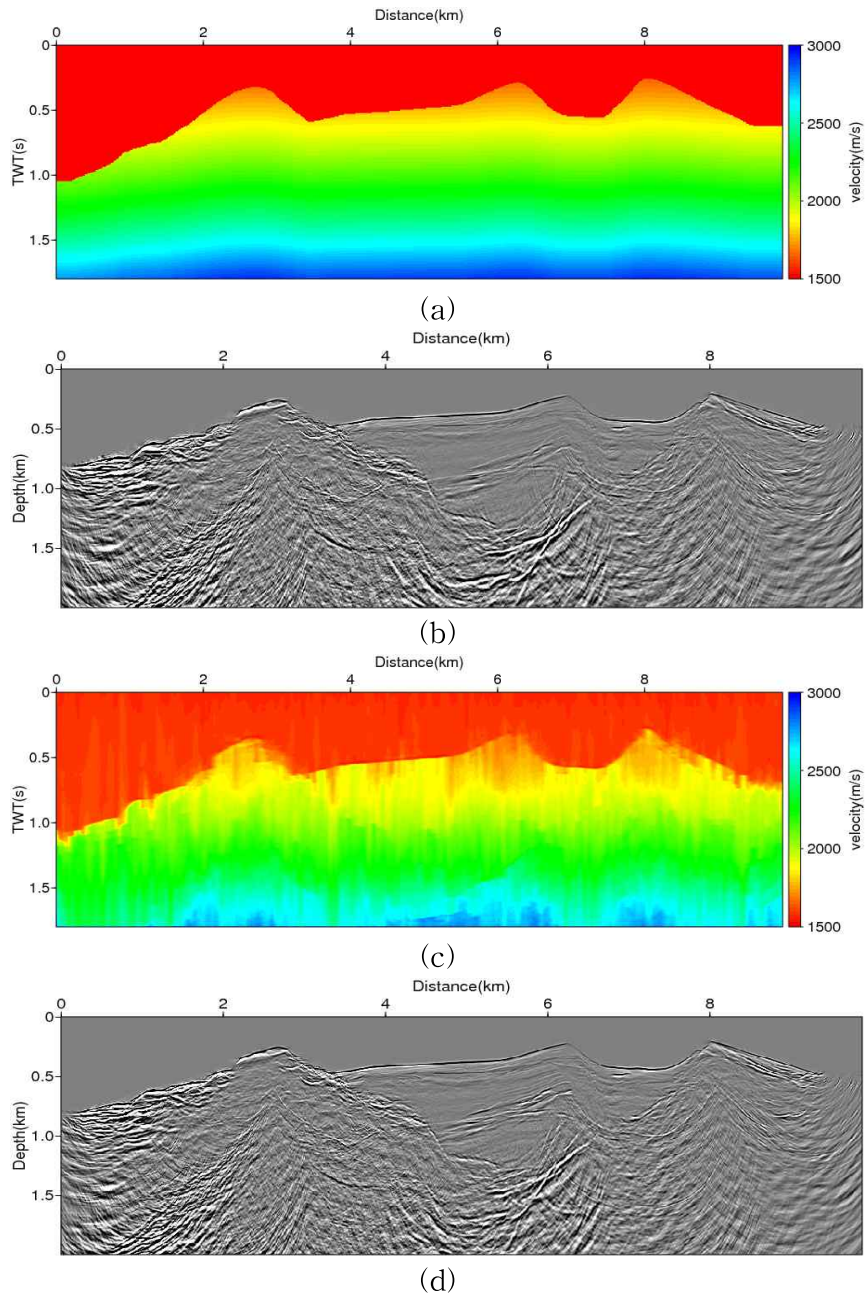
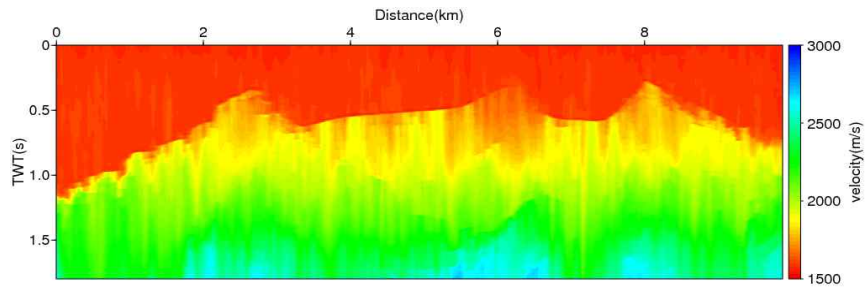
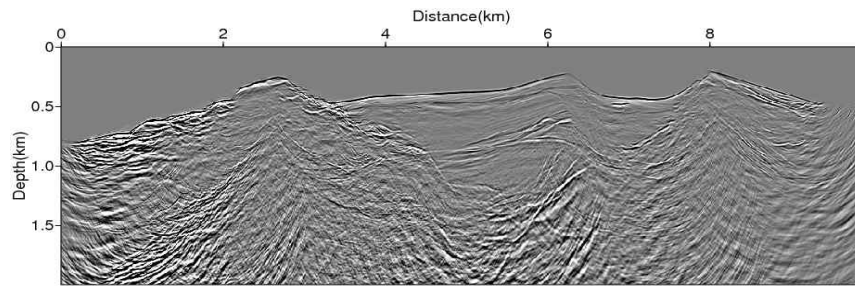


그림 3-20 (계속)

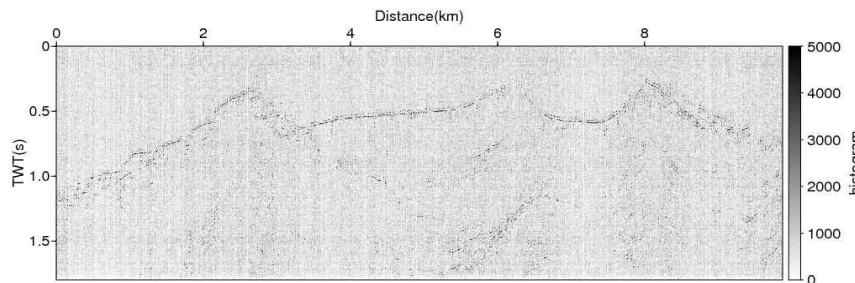


(e)

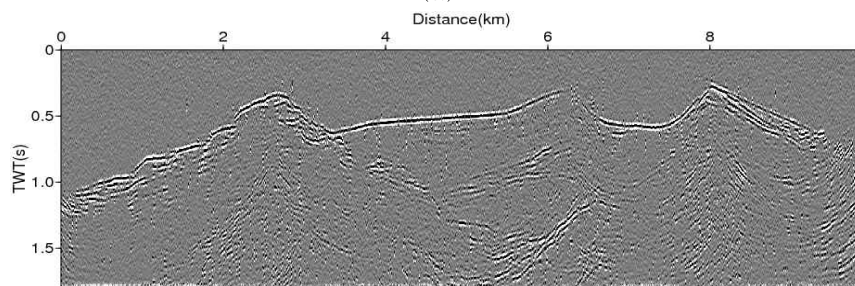


(f)

그림 3-20. (a) 초기 속도 모델, (b) 초기 속도 모델로 얻은 구조보정 단면, (c) 첫 번째 trans-dimensional MCMC 역산 결과, (d) 첫 번째 역산 결과로 얻은 구조보정 단면, (e) 두 번째 trans-dimensional MCMC 역산 결과, (f) 두 번째 역산 결과로 얻은 구조보정 단면



(a)



(b)

그림 3-21. (a) Trans-dimensional MCMC 역산을 통해 얻은 히스토그램과 (b) 최종 모델링 결과

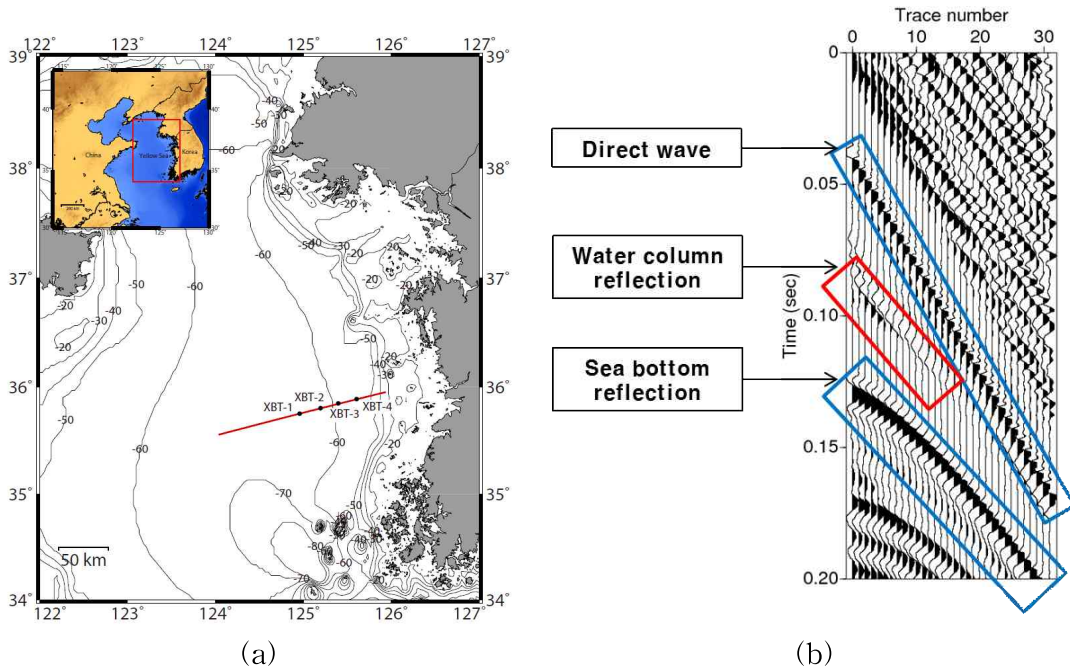
3-2-1-3. 수층 현장 탄성과 탐사 자료에 알고리즘 적용

개발된 프로그램이 탄성과 해양학 자료에 적용될 수 있는지를 검증하기 위해 황해 탄성과 해양학 자료를 이용하여 수층의 P파 전달 속도 및 구조를 역산하였다. 황해 탄성과 해양학 탐사 자료의 세부 사항은 표 3-6에 설명되어 있다.

프로그램 이름	내용
송신원 종류 및 개수	Air gun 12935개
수신기 개수	32 / shot (6.25 m 간격)
기록 시간	5 s (0.5 ms 간격)
최대 오프셋	250 m

표 3-6. 황해 탄성과 해양학 탐사 자료 세부 사항

그림 3-22는 황해에서 수행한 탄성과 탐사 위치와 수층 반사파가 기록된 공통 송신원 모음이다. AGC (Auto Gain Control)을 적용하여 작은 신호들을 적절히 증폭시킬 경우 공통 송신원 모음에서 직접파와 해저면 반사파 사이 약한 반사파가 관찰되는 것을 확인할 수 있으며 이는 서로 물성이 다른 수층 경계에서 임피던스차이가 발생하여 수층에 대한 반사파가 생성된 것이다. 본 탐사의 타겟인 수층 반사면은 약 50 m 내외에 존재하므로 기존 역산 방법을 통해 얻을 수 있는 최소 파수 값은 수층 반사파 신호가 가장 먼 수신기에 기록된다고 가정할 때 약 20.3 (1/km) 이지만 실제로는 수층 반사파의 진폭이 매우 작아 10~15 번째 수신기 위치보다 먼 수신기에서는 수층 반사파가 거의 기록되지 않으므로 실제 얻을 수 있는 최소 파수 값은 더 높을 것으로 예상된다. 따라서 기존의 역산 방법을 통해 속도 구조를 도출하기는 어려운 상황이므로 trans-dimensional McMC 역산을 적용하여 수층 P파 속도 구조 및 수층 경계를 역산할 수 있는지 확인 하였다. 본 자료의 수층 반사파는 직접파와 해저면 반사파에 비해 매우 작은 진폭을 가지며 수층의 구조는 수평적으로 매우 평탄하며 완만한 변화를 보인다는 특징을 가지고 있다. 따라서 Kirchhoff 구조 보정과 trans-dimensional McMC 역산을 반복 수행하는 방법 대신 시간 영역 자료 처리를 수행하여 탄성과 단면을 얻고 trans-dimensional McMC 역산을 1회 수행하였다.



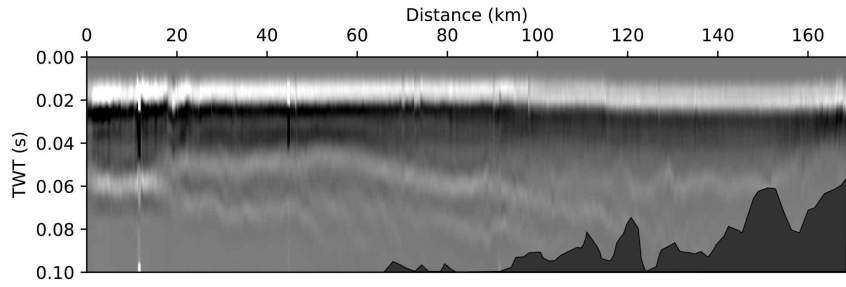
(a) 황해 탄성과 해양학 (Seismic Oceanography) 자료의 탐사 위치
 (b) 공통 송신원 모음에 기록된 수층 반사와 신호.

그림 3-22. (a) 황해 탄성과 해양학 (Seismic Oceanography) 자료의 탐사 위치와 (b) 공통 송신원 모음에 기록된 수층 반사와 신호.

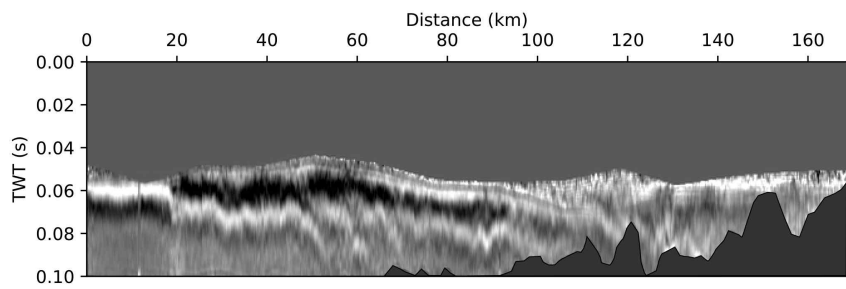
직접파와 해저면 반사파는 공통 송신원 모음에서 뮤팅 과정을 통해 제거하고 수층 반사파만 남은 CMP gather를 중합하여 탄성과 단면을 얻었으며 그림 3-23에 도시하였다. 하지만 공통 송신원 모음 자료에서 직접파를 제거하는 과정에서 직접파와 수층 반사파가 명확히 구별되지 않는 경우가 상당수 존재하여 완전한 분리가 쉽지 않았다.

그림 24는 간단한 1차원 초기 속도 모델과 trans-dimensional MCMC 역산 결과이다. 매우 간단한 초기 속도 모델로 시작했음에도 불구하고 황해 탄성과 해양학 자료의 타겟인 황해 저층 냉수의 분포를 왕복주시 (Two Way Traveltime) 0.06 초~0.08초 사이에 잘 역산하고 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 3-25는 역산으로 얻은 히스토그램과 역산 최종 모델링 결과이다. 가장 아래쪽 반사면이 황해 저층 냉수로 인해 생기는 반사면으로 간주되며 깊이로 환산할 경우 약 45m ~ 60 m 정도 깊이에서 경계면이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 역산 최종 모델링 결과는 실제 자료처리를 통해 얻은 탄성과 단면과 거의 일치하는 모습을 보여주며 이는 역산이 실제 자료와 모델링 자료의 간차를 적절히 줄이며 성공적으로 수행되었음을 나타낸다.

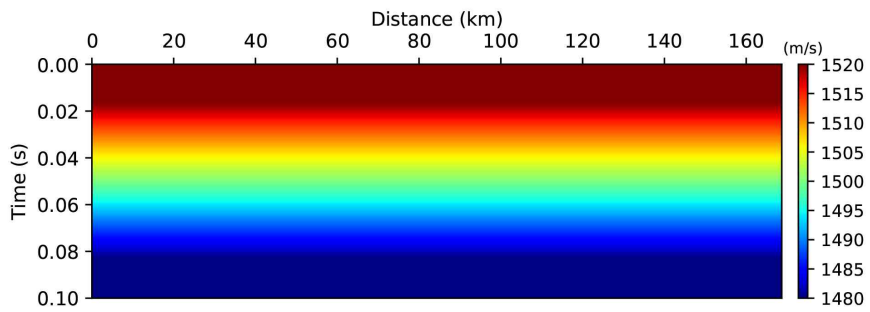


(a)

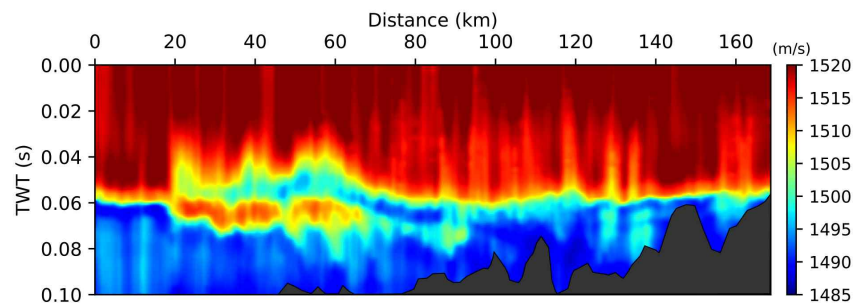


(b)

그림 3-23. (a) 전처리 전 탄성과 단면과 (b) 전처리 후 탄성과 단면



(a)



(b)

그림 3-24. (a) 간단한 1차원 초기 속도 모델과 (b) trans-dimensional MCMC 역산 결과

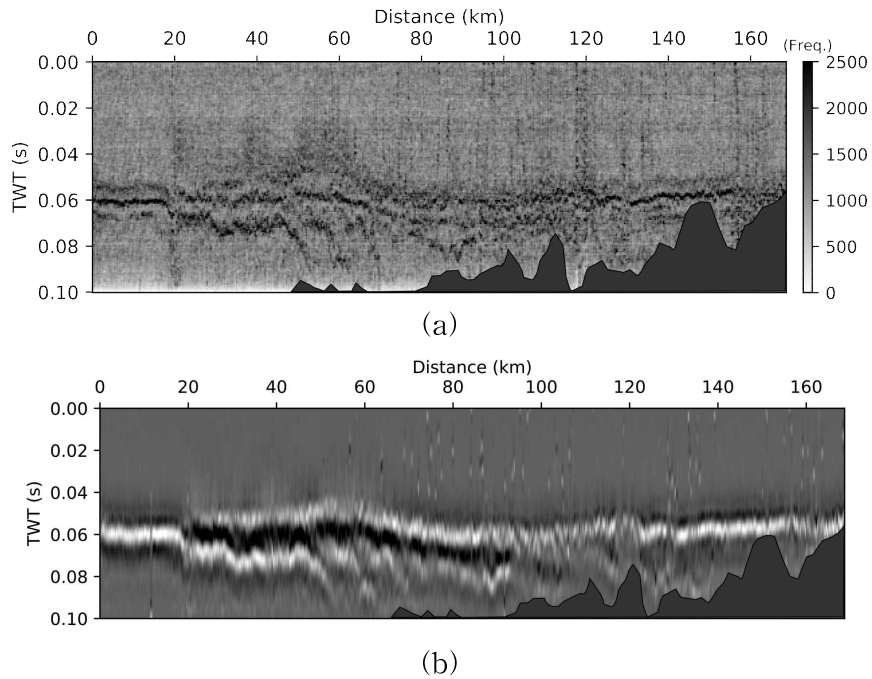


그림 3-25. (a) 히스토그램과 (b) 역산 최종 모델링 결과.

그림 3-26은 역산으로 얻은 속도 모델을 깊이 영역으로 변환한 후 온도 값으로 변환한 결과이다. 황해 저층 냉수는 황해 중심부에서 연안까지 약 50m 이상의 깊이 존재하는 10°C 이하의 냉수대를 의미하는데 그림 3-26의 온도 분포를 보면 황해 저층 냉수의 분포가 잘 나타나는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 trans-dimensional MCMC 역산이 탄성과 해양학 탐사 자료로부터 수층의 구조 및 P파 전달 속도를 성공적으로 역산할 수 있음을 검증하였다.

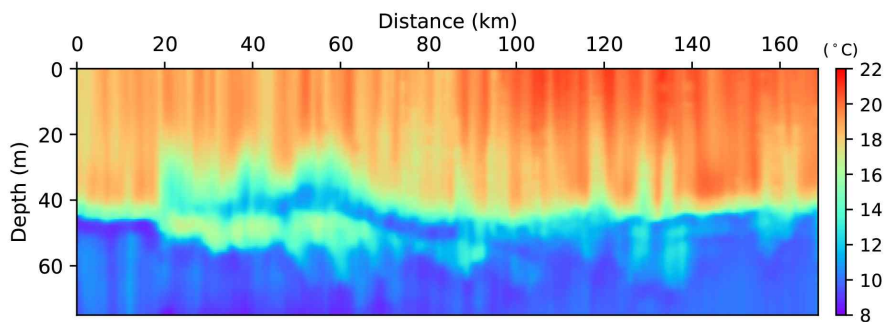


그림 3-26. 깊이 영역 및 온도 값으로 변환된 역산 결과

3-2-2. 알고리즘 검증 및 피드백

3-2-2-1. 인공 합성 자료 결과 검증

인공 합성 자료 결과는 Kirchhoff 구조보정의 오프셋 영역 공통 이미지 모음 (Offset Domain Common Image Gather, ODCIG) (Sava and Fomel, 2003) 를 비교하여 검증하였다. ODCIG는 같은 반사면에 대한 영상화 위치를 오프셋에 따라 계산한 것으로 Kirchhoff 구조보정의 ODCIG는 각 반사면까지의 주시를 이용하여 계산을 수행하며 반사면이 영상화된 형태에 따라 배경 속도 주시의 정확도를 확인할 수 있다. ODCIG는 표 3-7과 같은 특징을 가지므로 ODCIG의 반사면 위치를 보고 구조보정에 사용된 배경 속도 (역산을 통해 계산한 속도 모델) 의 정확도 및 상대적인 값을 유추할 수 있다.

ODCIG 반사면 위치	속도 관계
오프셋이 커질수록 반사면이 아래쪽으로 내려감	배경 속도 > 실제 속도
오프셋이 커질수록 반사면이 위쪽으로 올라감	배경 속도 < 실제 속도
모든 오프셋에서 동일한 깊이에 반사면이 등장함	배경 속도 = 실제 속도

표 3-7. ODCIG 반사면 위치와 배경 속도 정확도 사이의 관계

역산된 속도 구조의 정확도를 검증하기 위하여 Kirchhoff 구조보정을 수행할 때 ODCIG도 함께 계산하여 그림 3-27에 도시하였다. 초기 속도 모델을 사용할 경우 대부분의 반사면들이 오프셋이 커질수록 아래로 내려가며 이는 배경 속도가 실제 속도보다 빠르다는 것을 의미한다. 첫 번째 역산된 속도 모델을 사용할 경우 반사면들이 상당히 평평해지는 것을 확인할 수 있지만 여전히 일부 위치에서는 오프셋이 커질수록 반사면들이 아래로 내려간다. 반면, 두 번째 역산된 속도 모델을 사용할 경우 대부분의 반사면들이 평평하며 이는 배경 속도가 실제 속도와 거의 유사한 주시를 가지고 있음을 나타낸다. 이 결과는 Kirchhoff 구조보정과 trans-dimensional MCMC 역산을 이용하면 짧은 오프셋의 탄성과 탐사로부터 정확한 P파 속도 구조를 도출할 수 있음을 보여준다.

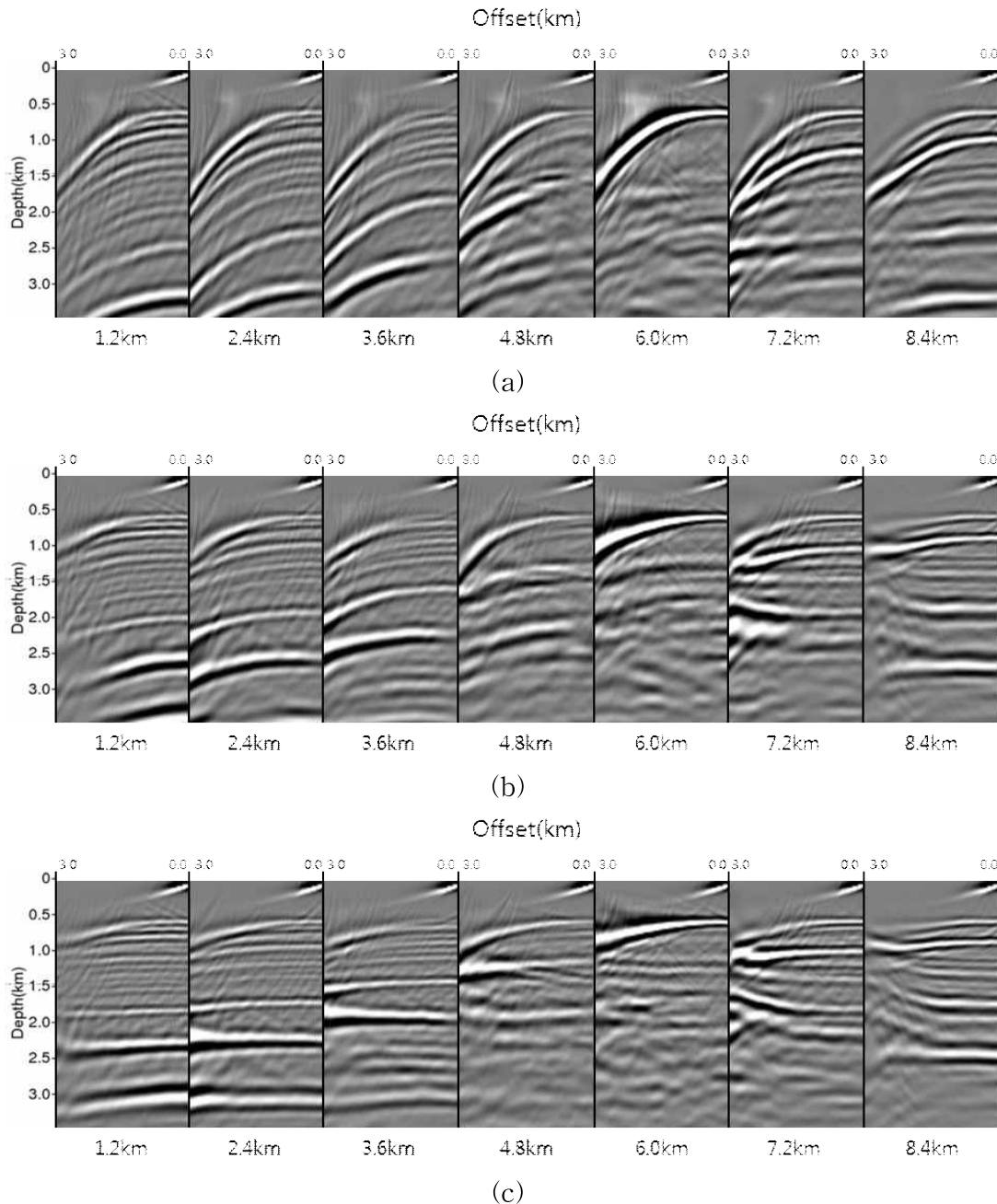


그림 3-27. 인공 합성 자료 역산에서 (a) 초기 속도 모델로 얻은 ODCIG, (b) 첫 번째 역산 결과로 얻은 ODCIG, (c) 두 번째 역산 결과로 얻은 ODCIG.

3-2-2-2. 지층 현장 탄성과 탐사 자료 결과 검증

지층 현장 탄성과 탐사 자료 결과는 Kirchhoff 구조보정의 ODCIG 비교와 기존 자료 처리 및 해석 결과 (Kim et al., 2013) 와의 비교를 통해 검증하였다. 그림 3-28은 각 역산 단계에서 얻은 ODCIG이며 앞선 인공 합성 자료 결과와 마찬가지로 역산이 반복될수록 ODCIG의 이벤트들이 평평해지는 것을 확인할 수 있다. 하지

만 앞선 인공 합성 자료의 결과와는 달리 각 단계마다 결과에 큰 차이를 보이지는 않는데 이는 필터링을 제외한 다른 자료 처리를 수행하지 않았기 때문에 다중 반사파와 잡음의 영향이 남아있어 속도 역산에 장애 요인으로 작용했기 때문이라고 간주된다. 이를 통해 볼 때 trans-dimensional MCMC 역산을 수행하기 전 적절한 잡음 제거 및 다중 반사파 신호 제거가 수행되어야 함을 알 수 있다.

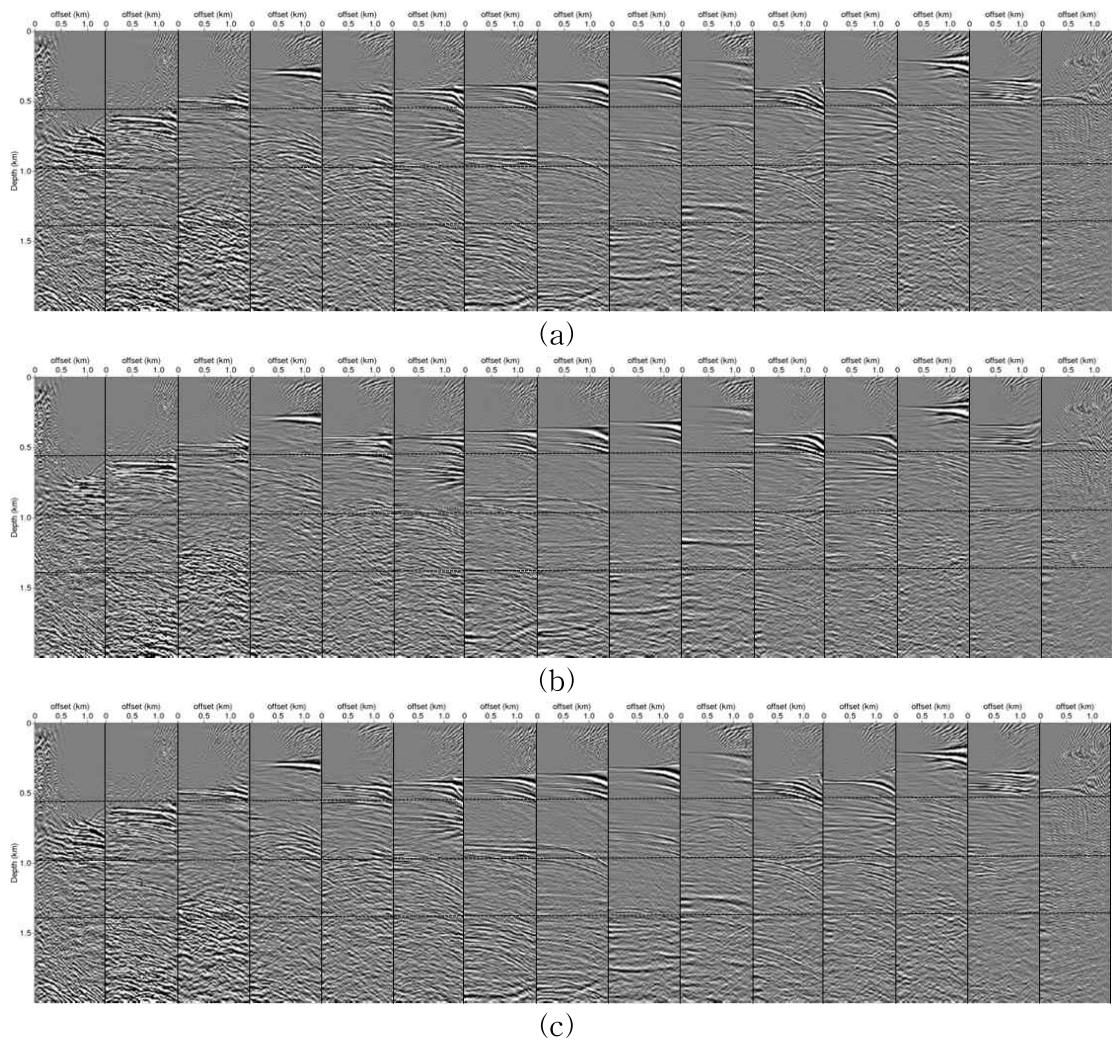


그림 3-28. Tonga #04 현장 탄성과 탐사 자료에서 (a) 초기 속도 모델로 얻은 ODCIG, (b) 첫 번째 역산 결과로 얻은 ODCIG, (c) 두 번째 역산 결과로 얻은 ODCIG.

역산 결과를 다른 방법으로 검증하기 위해서 기존 자료 처리 결과 (Kim et al. 2013)와 본 연구를 통해 역산된 결과를 비교해 보았다. Kim et al. (2013)의 자료 처리 및 해석 단면과 속도 역산 결과를 비교하여 그림 3-29에 도시하였다.

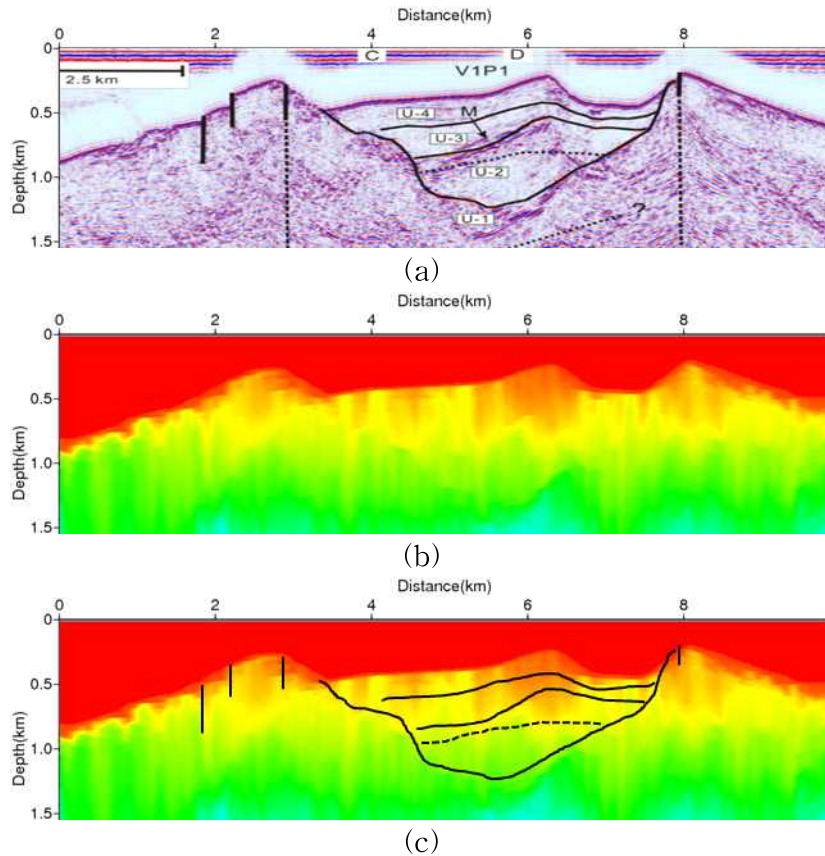


그림 3-29. (a) Kim et al. (2013)의 해석 단면, (b) trans-dimensional MCMC 역산 결과, (c) 해석된 층과 역산된 속도 모델.

Kim et al. (2013)은 전통적인 속도 분석을 통해 속도 구조를 도출하였고 시간 영역에서 중합 후 구조 보정 및 시간-깊이 변환을 수행하여 최종 깊이 영역 구조 보정 단면을 도출하였다. Trans-dimensional MCMC 역산을 통해 얻은 속도 모델과 해석 단면을 비교해보면 약 3 km 거리 이후 하강하는 U-1층의 위치가 해석 단면과 역산 속도 모델이 서로 잘 일치하며 약 1.3 km 깊이에 있는 U-1 층의 바닥 또한 서로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 또한 U-3 층의 반사면도 역산을 통해 일부 역산하였다. 하지만 MCMC 역산은 다중 반사와 또한 실제 구조인 것으로 간주하고 속도 구조를 업데이트 하기 때문에 1.5~4 km 거리 사이에 있는 해저면 다중 반사과도 역산 속도 모델에서 역산이 된 것을 볼 수 있다. ODCIG 비교 및 해석 단면 비교를 통해서 본 연구에서 개발된 trans-dimensional MCMC 역산 알고리즘이 지층 현장 탄성과 탐사 자료로부터 정확한 속도 구조를 도출할 수 있음을 검증하였다. 하지만 더 정확한 속도 구조 도출을 위해서는 적절한 자료 처리를 통해 잡음을 제

거하고 해저면 다중 반사파 제거 알고리즘 (Surface Related Multiple Elimination, SRME)과 같은 방법을 통해 다중 반사파를 제거할 필요가 있다.

3-2-2-3. 수층 현장 탄성과 탐사 자료 결과 검증

황해 탄성과 해양학 자료는 탐사 중 XBT를 이용하여 실제 수층의 온도와 P파 속도를 측정하였다. 따라서 실제 수층의 XBT 자료를 가지고 있으므로 수층 현장 탄성과 탐사 자료 결과는 XBT로 얻은 실제 수층 P파 속도 및 온도 자료를 역산을 통해 얻은 P파 속도 및 온도 값과 직접 비교하여 검증하였다. XBT는 서로 멀리 떨어진 5개의 정점에서 투하하였으나 마지막 XBT (XBT5) 투하 지점은 수심이 얕아 검증에 사용하지 않고 4개의 XBT를 이용하여 결과를 검증하였다. 그림 3-30은 XBT로 얻은 P파 속도 및 온도 값과 역산으로 얻은 P파 속도 및 온도 값을 도시한 그래프이다.

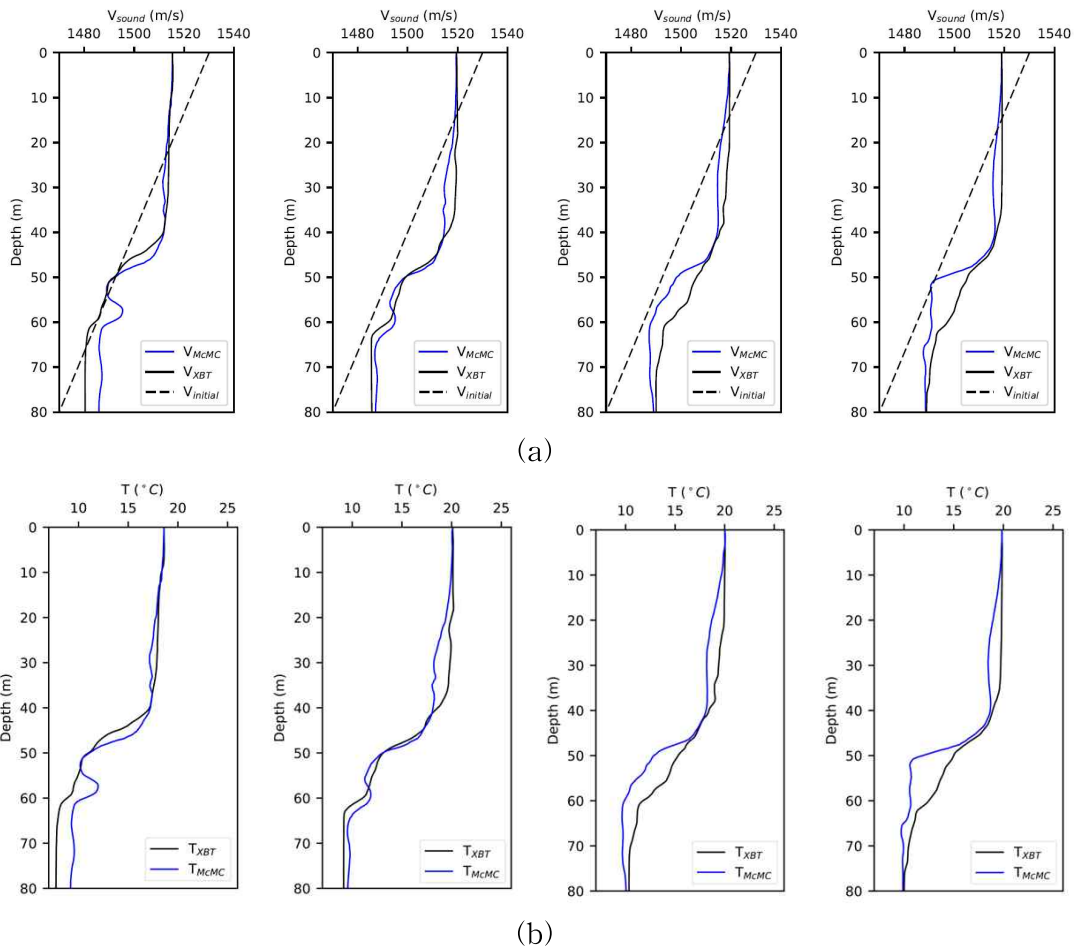


그림 3-30. (a) XBT P파 속도, McMC 역산 P파 속도, 초기 속도 비교와 (b) XBT 온도와 McMC 역산 온도 비교.

초기 속도 값 (V_{init}) 이 실제 속도 값 ($V_{x_{bt}}$) 과 큰 차이가 있음에도 불구하고 McMC 역산 결과 (V_{mcmc}) 는 실제 속도 값과 상당히 일치하는 결과를 보여주며 역산된 온도 (T_{mcmc}) 또한 실제 온도 ($T_{x_{bt}}$) 와 상당히 일치하는 값을 보여주는 것을 확인할 수 있다.

수층 탄성과 탐사 자료에 대한 결과 비교를 통해 본 연구에서 개발된 알고리즘이 수층의 속도 및 온도 값을 상당히 정확히 역산할 수 있음을 검증하였다. 하지만 탄성과 탐사의 자료 처리가 불완전했으며 탐사 자료의 주파수 밴드 제한 (band limited data) 특성 때문에 역산 결과에서 큰 값과 작은 값이 진동하는 현상이 발견되었다. 이러한 문제는 탄성과 탐사 단계서 모든 주파수 밴드를 취득하는 탐사 기법 (Broadband seismic exploration)을 도입하거나 Deghosting과 같은 주파수 밴드 회복 자료 처리를 적용하면 개선 될 것으로 예상된다.

3-3. 프로그램 개선

3-3-1. 계산 효율 향상을 위한 알고리즘 개선

그림 3-9의 trans-dimensional McMC 역산 순서도는 한 개의 트레이스에 대한 역산 순서도이며 이와 같은 역산을 모든 트레이스에 대해서 동일하게 수행해야 한다. 따라서 각 트레이스마다 동일한 계산 과정을 수행하므로 트레이스에 대해 병렬화를 수행하는 것이 프로그램 연산 속도를 높일 수 있는 가장 효율적인 방법일 것으로 간주되므로 MPI (Message Passing Interface) 를 이용하여 프로그램을 병렬화 하였다. 그림 3-31은 병렬화를 이용한 Trans-dimensional McMC 역산 프로그램 모식도이다.

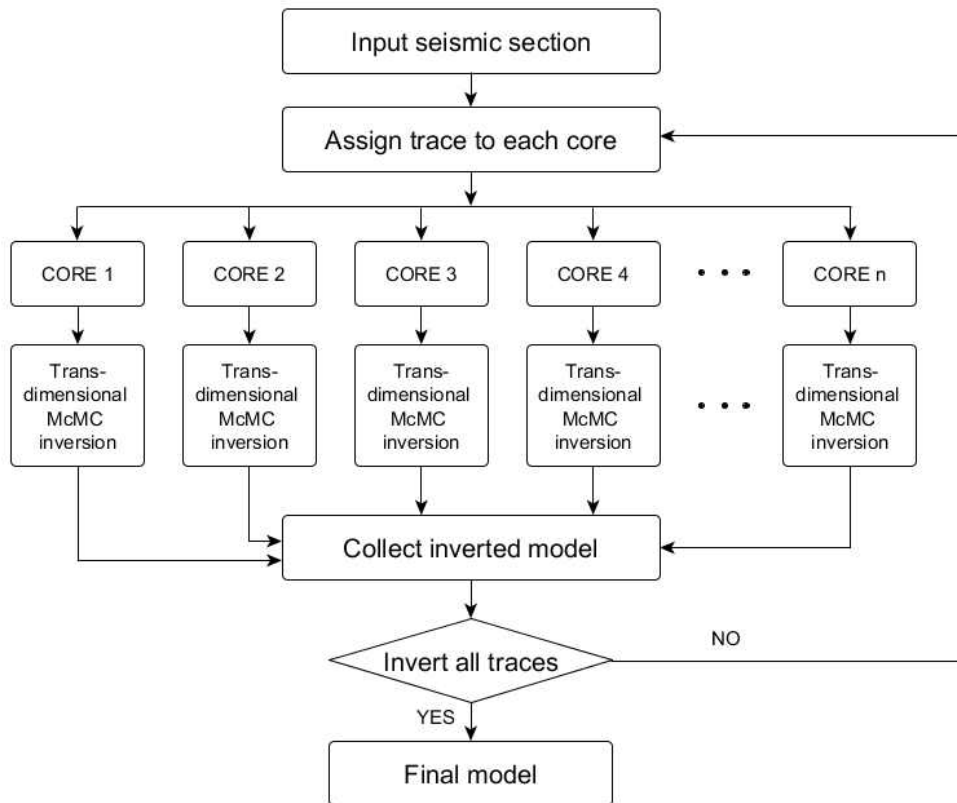


그림 3-31. 트레이스 병렬화를 수행한 trans-dimensional McMC 역산 프로그램 모식도.

일반적으로 총 트레이스의 개수가 계산 코어의 개수보다 많기 때문에 하나의 코어가 여러 개의 트레이스에 대해 역산을 수행해야 하며 병렬화된 코드의 일부는 그림 32에 있다.

<pre> 60 MPI_Init(&argc, &argv); 61 MPI_Comm_size(MPI_COMM_WORLD, &nrank); 62 MPI_Comm_rank(MPI_COMM_WORLD, &myrank); 63 64 while((i = getopt(argc, argv, "rw:")) != EOF) 65 switch (i) { 66 default: 67 case 'r': 68 recover = 1; 69 break; 70 case 'w': 71 wdir = optarg; 72 } 73 74 argc -= optind; 75 if(argc != 1) 76 { 77 printf("input anything man!! \n"); 78 } 79 config = argv[optind]; 80 81 umask(022); 82 setlogid(prog, myrank); 83 setlinebuf(stdout); 84 setlinebuf(stderr); 85 86 if(gethostname(cbuff, sizeof(cbuff)) < 0) 87 die("can't get host name, %m"); 88 msg("host %s pid %d rank %d", cbuff, getpid(), myrank); 89 90 h = &wd; 91 memset(h, 0, sizeof(inv_t)); 92 93 //set default 94 // h->media = MEDIA_ACOUSTIC; 95 96 mpi_load_config(h, config, myrank); 97 98 h->nrank = nrank; 99 h->myrank = myrank; 100 </pre>	<pre> 396 for(itrace = myrank; itrace < ntrace; itrace += nrank) 397 { 398 memset(poolvp[0], 0, niter*nz*sizeof(float)); 399 memset(vp1d, 0, nz*sizeof(float)); 400 memset(oldvplayer, 0, maxlayer*sizeof(float)); 401 memset(curvplayer, 0, maxlayer*sizeof(float)); 402 memset(newvplayer, 0, maxlayer*sizeof(float)); 403 404 memset(poolds[0], 0, niter*nz*sizeof(float)); 405 memset(ds1d, 0, nz*sizeof(float)); 406 memset(oldds1d, 0, maxlayer*sizeof(float)); 407 memset(curdslayer, 0, maxlayer*sizeof(float)); 408 memset(newdslayer, 0, maxlayer*sizeof(float)); 409 410 memset(rc1d, 0, nz*sizeof(float)); 411 memset(true1d, 0, nz*sizeof(float)); 412 413 memset(countlife, 0, 3*sizeof(int)); 414 415 nlayer = maxlayer / 2; 416 layerint[0] = 0; 417 for(ii = 1; ii < maxlayer; ii++) 418 { 419 layerint[ii] = (nz-1)*ii/(nlayer-1); 420 if(ii > nlayer-1) layerint[ii] = layerint[nlayer-1]; 421 } 422 layerint[maxlayer] = nz; 423 424 for(ii = 0; ii < maxlayer; ii++) 425 { 426 for(iz = layerint[ii]; iz < layerint[ii+1]; iz++) 427 { 428 vp1d[iz] = vp2d[iz][itrace]; 429 ds1d[iz] = ds2d[iz][itrace]; 430 } 431 } 432 433 for(iz = 0; iz < nz; iz++) 434 { 435 vp2d[iz][itrace] = vp1d[iz]; 436 ds2d[iz][itrace] = ds1d[iz]; 437 true1d[iz] = true2d[iz][itrace]; 438 } 439 </pre>
--	--

(a) MPI를 선언하는 부분과 (b) 각 트레이스를 계산 코어에 할당하는 부분.

계산에 사용한 코어의 개수에 따른 프로그램 병렬화의 효율을 비교하기 위해서 코어의 개수를 1, 2, 4, 8, 16 개로 증가시키며 역산에 걸리는 시간을 비교해보았다. 실험을 위한 모델은 384개의 트레이스 (384개의 CMP) 와 트레이스당 125개의 시간 샘플을 가진 매우 작은 탄성과 단면이고 총 10,000 번의 반복계산을 수행하였다. 그림 3-33은 계산 코어 개수에 따른 역산 시간을 비교한 그래프이다.

1개의 코어를 사용할 때는 총 417초의 시간이 필요하였지만 16개의 코어를 동시에 사용할 때는 총 28초의 시간이 걸려 계산 시간이 약 93%정도 감소하였다. 하지만 그래프를 통해 볼 때 코어의 개수가 늘어나도 계산 시간이 줄어드는 정도는 한계가 있는 것을 볼 수 있다. 이는 입력 자료 로딩, 결과 통합, 출력 등에 소모되는 시간은 줄어들지 않기 때문이다. 매우 작은 모델로 실험을 수행하여서 1개의 코어를 사용할 때도 비교적 짧은 시간 (417초) 안에 모든 역산이 완료되었지만 실제 탐사를 통해 얻는 자료는 수십~수백 km의 축선 길이와 수천~수십만의 CMP 개수를

가치므로 병렬 계산이 반드시 필요하다는 것을 알 수 있고 자료의 크기 및 보유한 코어 개수에 따라 적절한 수의 코어를 사용하는 것이 중요하다.

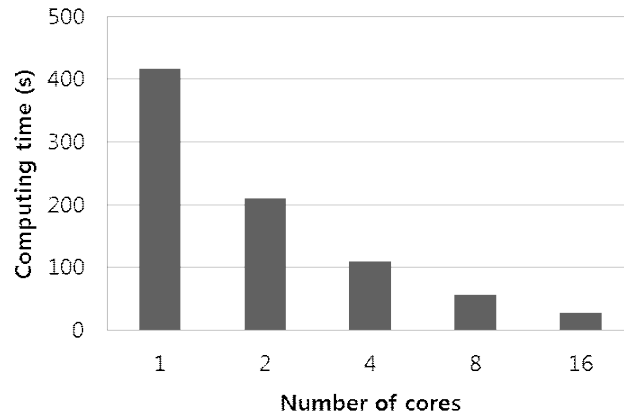


그림 3-33. 코어 개수에 따라 역산에 걸리는 시간 비교.

3-3-2. GUI를 이용하여 사용자 친화적 프로그램으로 개선

본 연구과제에서 개발된 모든 프로그램은 리눅스의 터미널 환경에서 vi 에디터를 통해 사용하도록 되어 있어 사용자가 리눅스 환경 및 vi 에디터에 익숙하지 않다면 프로그램을 사용하기 어렵다. 따라서 실제 탐사 현장에서 본 프로그램을 활용하기 위해서는 다양한 사용자가 손쉽게 활용할 수 있도록 프로그램 사용 환경을 개선할 필요가 있다. GUI는 Graphical User Interface의 약자로 vi와 같은 커맨드 라인에서 텍스트로 입력하는 환경이 아닌 윈도우처럼 그래픽을 이용하여 변수들을 손쉽게 입력하고 실행할 수 있도록 만들어 높은 환경이다. 본 연구과제에서는 GUI 프로그래밍을 위해 python의 PyQt를 활용하였으며 역산 프로그램 실행 (copGmcmc.py) 및 모니터링 (copGmcmcstat.py) GUI 프로그램을 개발하였다. 그림 3-34는 개발된 GUI 프로그램의 소스 코드 일부이다. 그림 3-35는 copGmcmc.py 프로그램의 변수 입력 화면 및 입력 변수 저장 화면이다. vi 에디터에 익숙하지 않아도 키보드 및 마우스를 이용하여 손쉽게 입력 변수들을 입력하고 저장할 수 있다. 팝업 창에 각 변수에 해당하는 값을 입력하고 “Save” 버튼을 누르면 입력된 변수 값들을 trans-dimensional MCMC 역산 프로그램의 입력 변수 파일 형식인 “.conf” 형태의 파일로 변환하여 저장하도록 되어 있다. 파일 저장 후 “Run” 버튼을 실행하면 정해진 코어 개수 (ncore) 를 사용하여 병렬계산을 수행하는 Trans-dimensional MCMC 프로그램이 실행되며 동시에 프로그램 모니터링을 위한 copGmcmcstat.py 프로그램이 실행된다.

```

1 #!/data5/home/jhg1026/bin/anaconda3/bin/python3
2
3 from PyQt5.QtWidgets import (QApplication, QComboBox, QDialog,
4     QDialogButtonBox, QFormLayout, QGridLayout, QGroupBox, QHBoxLayout,
5     QLabel, QLineEdit, QMenu, QMenuBar, QPushButton, QSpinBox, QTextEdit,
6     QVBoxLayout, QFileDialog, QApplication)
7
8 import os
9 import sys
10
11 class Dialog(QDialog):
12     def __init__(self):
13         super(Dialog, self).__init__()
14
15         #0. Domain group
16         self.nxi = QLineEdit()
17         self.nzi = QLineEdit()
18         self.ds = QLineEdit()
19         self.dz = QLineEdit()
20         self.ntrace = QLineEdit()
21         self.nt = QLineEdit()
22         self.dr = QLineEdit()
23         self.fmax = QLineEdit()
24         self.jump = QLineEdit()
25
26         #1. Image group
27         self.tmgfile = QLineEdit()
28         self.tmgbtn = QPushButton("Browser")
29
30         self.wavfile = QLineEdit()
31         self.wavbtn = QPushButton("Browser")
32
33         #2. Velocity group
34         self.vpstart = QLineEdit()
35         self.vpmin = QLineEdit()
36         self.vpmax = QLineEdit()
37         self.vphomo = QLineEdit()
38         self.vpwater = QLineEdit()
39         self.ivpfile = QLineEdit()
40         self.ivpbtn = QPushButton("Browser")
41
42         self.dsstart = QLineEdit()
43         self.damin = QLineEdit()

```

(a)

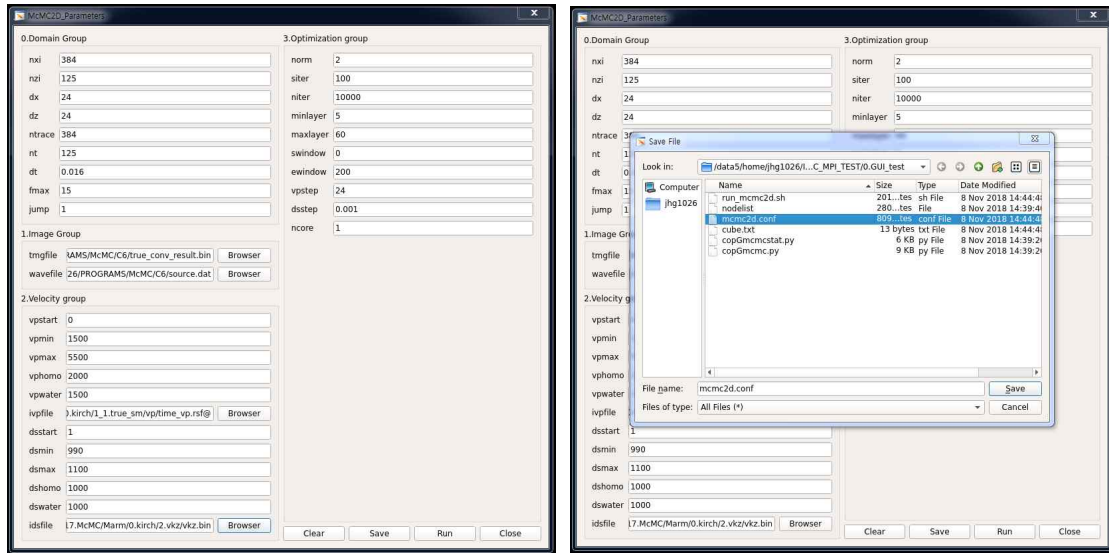
```

9 class Notepad(QWidget):
10
11     def __init__(self):
12         super(Notepad, self).__init__()
13
14         #Main boxes
15         self.txt = QTextEdit(self)
16         self.fig1 = QLabel(self)
17         self.fig2 = QLabel(self)
18
19         #Buttons
20         self.ref_btn = QPushButton("Refresh")
21         self.sav_btn = QPushButton("Save")
22         self.opn_btn = QPushButton("Open")
23
24         self.fig1_btn = QPushButton("Plot")
25         self.fig1_btn.setFixedSize(50)
26         self.fig2_btn = QPushButton("Plot")
27         self.fig2_btn.setFixedSize(50)
28
29         self.fig1_btn = QPushButton("Browser")
30         self.fig2_btn = QPushButton("Browser")
31
32         self.fig1file = QLineEdit()
33         self.fig2file = QLineEdit()
34
35         self.fig1col = QComboBox()
36         self.fig1col.addItem("black and white")
37         self.fig1col.addItem("red green blue")
38         self.fig1col.addItem("blue white red")
39
40         self.fig2col = QComboBox()
41         self.fig2col.addItem("black and white")
42         self.fig2col.addItem("red green blue")
43         self.fig2col.addItem("blue white red")
44
45         self.init_ui()
46
47     def init_ui(self):
48         mainLayout = QHBoxLayout()
49         v_layout = QVBoxLayout()
50         h_layout = QHBoxLayout()
51         v_layout2 = QVBoxLayout()
52
53         self.LogBox = QGroupBox("Log")
54         self.LogBox.setMinimumWidth(400)
55         logout = QVBoxLayout()

```

(b)

그림 3-34. (a) copGmcmc.py과 (b) copGmcmcstat.py 소스 코드의 일부.



(a) 역산 변수 입력 화면과 (b) 입력 변수 저장 화면.
그림 3-35.

그림 3-36은 copGmcmcstat.py를 이용한 프로그램 모니터링 화면이다. 왼쪽 “Log”창은 프로그램 실행 과정 중에 생성되는 로그 파일을 출력해주는 부분이며 5 초마다 자동으로 업데이트 되지만 “Refresh” 버튼을 통해 강제로 업데이트 해줄 수도 있다. 역산이 종료되면 “Log” 창의 “Open” 버튼을 이용하여 RMS 에러, 송신파 형 등의 텍스트 형식의 결과를 출력할 수 있다. 오른쪽 “Figure 1”, “Figure 2” 창은 속도 모델, 탄성과 단면, 히스토그램 등 바이너리파일을 그림 형태로 출력할 수 있는 부분이며 “red-green-blue”, “blue-white-red”, “black and white” 세 가지 색상 형식 중 하나를 선택할 수 있다.

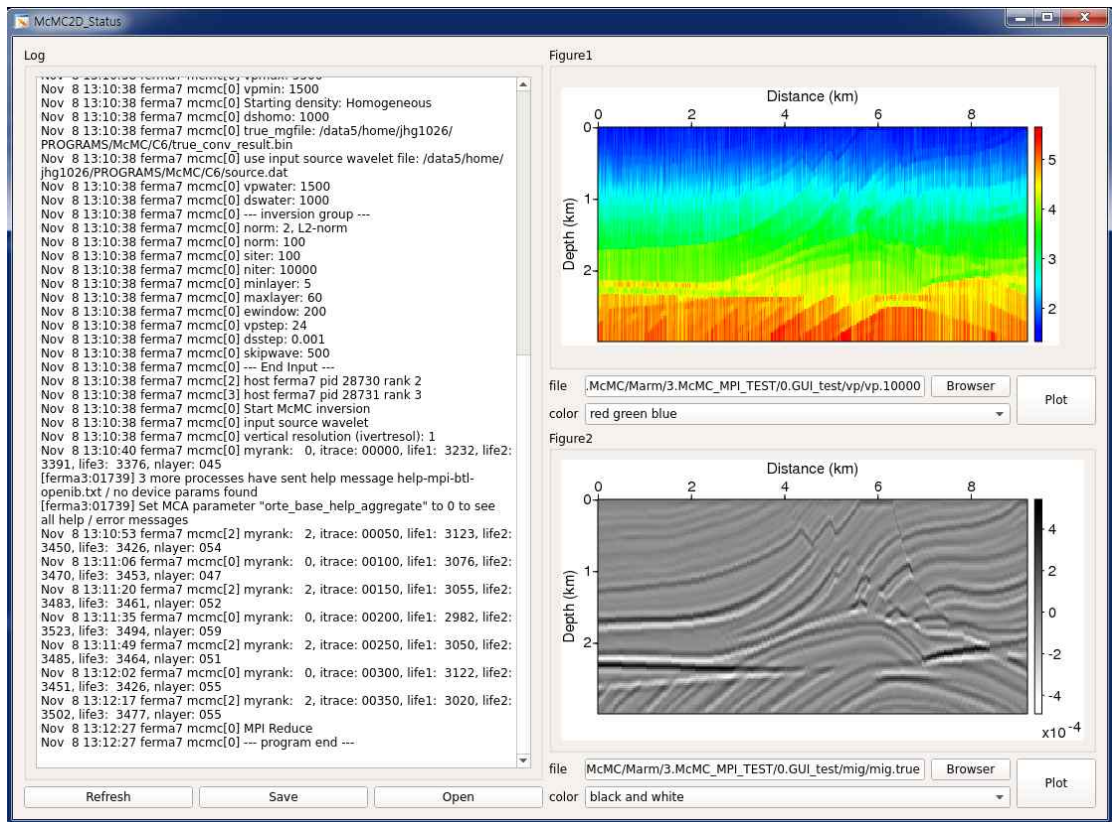


그림 3-36. 프로그램 모니터링 화면.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외 기여도

4-1. 목표 달성도

연구개발의 범위	연구개발 방법 및 내용	달성도 (%)
P파 속도 역산 알고리즘 개발	<ul style="list-style-type: none"> - 짧은 오프셋 탄성과 탐사 자료에 기록된 신호 특성 분석 - Tomography, Velocity analysis, Full waveform inversion, Migration velocity analysis와 같은 기존 - Global optimization을 이용한 P파 속도 통계적 역산 알고리즘 개발 - C 언어를 이용하여 McMC 역산 프로그램 제작 - Python 언어를 이용하여 보조 프로그램 제작 - C/Fortran 언어를 이용하여 Depth migration 프로그램 제작알고리즘의 한계점 분석 	100
현장 자료를 이 용한 알고리즘 검증	<ul style="list-style-type: none"> - 인공합성자료에 알고리즘 적용 - 지층 탄성과 탐사 자료에 개발된 알고리즘을 적용하여 지하 P파 속도 구조 도출 및 반사면 경계 파악 - 수층 탄성과 탐사 자료에 개발된 알고리즘을 적용하여 수층 P파 속도 구조, 온도 분포 및 수층 경계면 파악 - Common image gather의 편평도 비교, 기존 해석 결과와 비교를 통한 역산 결과 검증 - 해양 물리 관측 장비를 통해 직접 관측한 자료와 비교를 통한 역산 결과 검증 - 알고리즘 문제점 파악 및 개선 	100
프로그램 개선	<ul style="list-style-type: none"> - 프로그램 병렬화를 통한 계산 효율 향상 - GUI를 이용하여 프로그램 사용성 향상 	100

4-2. 대외 기여도

본 연구 개발에서는 짧은 오프셋에 적용 가능한 P파 속도 역산 알고리즘을 개발하였으며 연구 개발 결과는 관련 분야의 기술 발전에 기여하였다. 우선 짧은 오프셋 탄성과 탐사 자료의 특성을 분석하여서 오프셋의 길이 및 탐사 타겟의 깊이와 이미지 영역에서의 파수간의 관계를 분석하여향후 탄성과 탐사를 설계할 때 참고할 수 있는 가이드라인을 제시하였다. Trans-dimensional McMC 역산 프로그램을 개발하고 현장 자료에 대한 적용성을 검증하여 향후 관련 연구를 수행하기 위한 기반을 다졌다. 또한 GUI를 이용하여 사용자 편의성을 높였으며 프로그램 병렬화를 통해 계산 효율을 높였기 때문에 실제 탐사 현장에서 자료 취득과 동시에 손쉽게 역산 수행하여 타겟의 물성 값 및 반사면의 위치 정보를 획득할 수 있는 방법을 마련하였다. 그리고 황해 탄성과 해양학 자료에 적용하여 황해 저층 냉수대의 분포 및 경계를 규명하였고 황해 수층 구조에 대한 P파 속도 및 온도 값을 역산하는데 성공하여 탄성과 해양학 연구에 기여하였다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

본 연구개발을 통해 짧은 오프셋 탄성과 탐사 자료로부터 P파 속도를 도출할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 본 연구개발의 결과는 다양한 분야에 활용할 수 있을 것이라고 기대된다. 우선 탄성과 해양학 연구에 활용할 수 있을 것이다. 탄성과 해양학을 이용하여 수층의 구조뿐 아니라 물성 값에 대한 정보도 도출할 수 있으므로 관련 연구사업 및 국가 R&D에 개발에 활용할 계획이다. 또한 황해 저층 냉수대 연구와 같이 해양 생태계에 큰 영향을 줄 수 있는 수층 구조에 대해 기존 정보 외에 추가적인 정보를 제공할 수 있으므로 해양 물리 및 해양 생태 연구에 도움을 줄 수 있다. 그리고 본 연구 결과는 본원이 수행중인 지층 탄성과 탐사 연구과제의 자료 처리에 활용할 계획이다. Trans-dimensional MCMC 역산 프로그램은 대부분의 과정이 자동화 되어 있어 분석자의 주관을 최대한 배제할 수 있으므로 객관적인 결과를 도출할 수 있으며 중합 된 탄성과 단면 (또는 구조보정 된 탄성과 단면)을 사용하므로 계산 량이 크지 않아 기존의 방법들 보다 효율적으로 자료처리를 수행할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 현장 탄성과 탐사에 적용하여 실시간으로 지하 물성 정보를 취득하는데 활용할 수 있다. 또한 짧은 오프셋 탄성과 탐사 자료로부터 지하 속도 구조를 도출할 수 있기 때문에 기존에 사용하고 있는 탄성과 탐사 장비의 활용도를 높일 수 있어 경제적이다. 마지막으로 과거부터 현재까지 취득된 수많은 탄성과 탐사 자료를 재처리하는데 활용하여 더 개선된 결과를 도출할 수 있으며 최근 지진 발생이 잦은 남동해역의 지층 구조를 더 정확히 분석하는데 활용하여 지진 발생의 기작 규명 및 지진 피해 경감에 기여할 것이다.

제 6 장 참고문헌

- Bodin, T., & Sambridge, M. (2009). Seismic tomography with the reversible jump algorithm. *Geophysical Journal International*, 178(3), 1411-1436.
- Brossier, R., Operto, S., & Virieux, J. (2015). Velocity model building from seismic reflection data by full-waveform inversion. *Geophysical Prospecting*, 63(2), 354-367.
- Claerbout, J. F. (1978). How to derive interval velocities using a pencil and straight edge.
- Chib, S., & Greenberg, E. (1995). Understanding the metropolis-hastings algorithm. *The american statistician*, 49(4), 327-335.
- Everett, M. E. (2013). *Near-surface applied geophysics*. Cambridge University Press.
- Ha, W., Chung, W., Park, E., & Shin, C. (2012). 2-D acoustic Laplace-domain waveform inversion of marine field data. *Geophysical Journal International*, 190(1), 421-428.
- Hampson, D., & Russell, B. (1984). First-break interpretation using generalized linear inversion. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1984* (pp. 532-534). Society of Exploration Geophysicists.
- Holbrook, W. S., Páramo, P., Pearse, S., & Schmitt, R. W. (2003). Thermohaline fine structure in an oceanographic front from seismic reflection profiling. *Science*, 301(5634), 821-824.
- Jun, H. (2018). Efficient frequency-domain reflection-based full-waveform inversion using wavefield separation. In *SEG Technical Program Expanded*

Abstracts 2018 (pp. 1118–1122). Society of Exploration Geophysicists.

- Jun, H., Jin, H., & Shin, C. (2017). Application of efficient frequency-domain full waveform inversion using time-domain encoded simultaneous sources. *J. Seism. Explor*, 26, 141–69.
- Jun, H., Kim, Y., Shin, J., Shin, C., & Min, D. J. (2014). Laplace-Fourier-domain elastic full-waveform inversion using time-domain modeling Laplace-Fourier waveform inversion. *Geophysics*, 79(5), R195–R208.
- Kim, H. J., Jou, H. T., Lee, G. H., Na, J. H., Kim, H. S., Jang, U., ... & Jung, S. K. (2013). Caldera structure of submarine Volcano# 1 on the Tonga Arc at 21° 09' S, southwestern Pacific: Analysis of multichannel seismic profiling. *Earth, Planets and Space*, 65(8), 893–900.
- Kim, Y., Shin, C., Calandra, H., & Min, D. J. (2013). An algorithm for 3D acoustic time-Laplace-Fourier-domain hybrid full waveform inversion. *Geophysics*, 78(4), R151–R166.
- Kwon, J., Jun, H., Song, H., Jang, U. G., & Shin, C. (2017). Waveform inversion in the shifted Laplace domain. *Geophysical Journal International*, 210(1), 340–353.
- Lailly, P., & Bednar, J. B. (1983). The seismic inverse problem as a sequence of before stack migrations. In *Conference on inverse scattering: theory and application* (pp. 206–220). Philadelphia, PA: Siam.
- Liu, Z., & Bleistein, N. (1995). Migration velocity analysis: Theory and an iterative algorithm. *Geophysics*, 60(1), 142–153.
- Luo, Y., & Schuster, G. T. (1991). Wave-equation travelttime inversion. *Geophysics*, 56(5), 645–653.

- Malinverno, A. (2002). Parsimonious Bayesian Markov chain Monte Carlo inversion in a nonlinear geophysical problem. *Geophysical Journal International*, 151(3), 675-688.
- Min, D. J., & Shin, C. (2006). Refraction tomography using a waveform-inversion back-propagation technique. *Geophysics*, 71(3), R21-R30.
- Murphy, G. E., & Gray, S. H. (1999). Manual seismic reflection tomography. *Geophysics*, 64(5), 1546-1552.
- Pratt, R. G., Shin, C., & Hick, G. J. (1998). Gauss - Newton and full Newton methods in frequency - space seismic waveform inversion. *Geophysical Journal International*, 133(2), 341-362.
- Pyun, S., Shin, C., Min, D. J., & Ha, T. (2005). Refraction travelttime tomography using damped monochromatic wavefield. *Geophysics*, 70(2), U1-U7.
- Ray, A., Sekar, A., Hoversten, G. M., & Albertin, U. (2016). Frequency domain full waveform elastic inversion of marine seismic data from the Alba field using a Bayesian trans-dimensional algorithm. *Geophysical Journal International*, 205(2), 915-937.
- Sava, P. C., & Fomel, S. (2003). Angle-domain common-image gathers by wavefield continuation methods. *Geophysics*, 68(3), 1065-1074.
- Shin, C., & Cha, Y. H. (2008). Waveform inversion in the Laplace domain. *Geophysical Journal International*, 173(3), 922-931.
- Shin, C., Koo, N. H., Cha, Y. H., & Park, K. P. (2010). Sequentially ordered single-frequency 2-D acoustic waveform inversion in the Laplace - Fourier domain. *Geophysical Journal International*, 181(2), 935-950.

- Shin, C., & Min, D. J. (2006). Waveform inversion using a logarithmic wavefield. *Geophysics*, 71(3), R31–R42.
- Sirgue, L., Barkved, O. I., Van Gestel, J. P., Askim, O. J., & Kommedal, J. H. (2009, June). 3D waveform inversion on Valhall wide-azimuth OBC. In 71st EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2009.
- Sirgue, L., & Pratt, R. G. (2004). Efficient waveform inversion and imaging: A strategy for selecting temporal frequencies. *Geophysics*, 69(1), 231–248.
- Stork, C. (1992). Reflection tomography in the postmigrated domain. *Geophysics*, 57(5), 680–692.
- Tarantola, A. (1984). Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation. *Geophysics*, 49(8), 1259–1266.
- Ten Kroode, F., Bergler, S., Corsten, C., de Maag, J. W., Strijbos, F., & Tijhof, H. (2013). Broadband seismic data—The importance of low frequencies. *Geophysics*, 78(2), WA3–WA14.
- Vigh, D., Moldoveanu, N., Jiao, K., Huang, W., & Kapoor, J. (2013). Ultralong-offset data acquisition can complement full-waveform inversion and lead to improved subsalt imaging. *The Leading Edge*, 32(9), 1116–1122.
- Vigh, D., Starr, B., Kapoor, J., & Li, H. (2010). 3D full waveform inversion on a Gulf of Mexico WAZ data set. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2010* (pp. 957–961). Society of Exploration Geophysicists.
- Virieux, J., & Operto, S. (2009). An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics. *Geophysics*, 74(6), WCC1–WCC26.
- White, D. J. (1989). Two-dimensional seismic refraction tomography. *Geophysical Journal International*, 97(2), 223–245.

- Xu, S., Wang, D., Chen, F., Lambaré, G., & Zhang, Y. (2012). Inversion on reflected seismic wave. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012 (pp. 1-7). Society of Exploration Geophysicists.
- Zhou, W., Brossier, R., Operto, S., & Virieux, J. (2015). Full waveform inversion of diving & reflected waves for velocity model building with impedance inversion based on scale separation. *Geophysical Journal International*, 202(3), 1535-1554.
- Zhu, D., & Gibson, R. (2016). Seismic inversion and uncertainty analysis using a transdimensional Markov chain Monte Carlo method. In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2016 (pp. 3666-3671). Society of Exploration Geophysicists.

주 의

1. 이 보고서는 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.