



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

시간 영역 모델링을 이용한  
주파수 영역 송신 파형 독립  
음향파 완전 파형 역산

**Source-independent frequency-domain acoustic full  
waveform inversion using time-domain modeling**

2017 년 2 월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부

전 형 구

시간 영역 모델링을 이용한  
주파수 영역 송신 파형 독립  
음향파 완전 파형 역산

**Source-independent frequency-domain acoustic full  
waveform inversion using time-domain modeling**

지도 교수 신 창 수

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함  
2017 년 12 월

서울대학교 대학원  
에너지시스템공학부  
전 형 구

전형구의 공학박사 학위논문을 인준함  
2017 년 1 월

위 원 장 \_\_\_\_\_ (인)

부위원장 \_\_\_\_\_ (인)

위 원 \_\_\_\_\_ (인)

위 원 \_\_\_\_\_ (인)

위 원 \_\_\_\_\_ (인)

## 초 록

완전 과형 역산은 지하 매질의 물성 값을 계산하는 방법으로 관측 과동장과 수치 과동장 사이의 차이를 줄여나가는 방향으로 지하 매질의 물성 값을 업데이트 한다. 관측 과동장은 탄성과 탐사를 통해 얻은 탄성과 탐사자료로 지하 매질의 임피던스와 탐사에 사용한 송신 과형간의 콘볼루션을 통해 획득된다. 수치 과동장은 과동 방정식에 기반을 둔 과동 전과 모델링을 통해 계산되는데 이 때 실제 탐사에 사용한 송신 과형과 동일한 크기와 형태의 송신 과형이 있어야 정확한 수치 과동장을 구할 수 있다. 실제 탐사에 사용한 송신 과형을 얻기 위해서 송신 과형 역산 기법이 널리 사용되었으나 몇 가지 한계점이 존재한다. 본 연구에서는 송신 과형의 정보 없이도 완전 과형 역산을 수행 할 수 있는 송신 과형 독립 완전 과형 역산 기법을 제안한다. 송신 과형 독립 완전 과형 역산은 크게 디콘볼루션 기반과 콘볼루션 기반으로 나눌 수 있으며 본 연구에서는 각 송신 과형 독립 완전 과형 역산의 특성을 비교하였다. 송신 과형 독립 완전 과형 역산에서 가장 중요한 것은 참조 트레이스의 선택 방법이므로 참조 트레이스 선택 방법을 변경시켜가며 어떠한 참조 트레이스 선택 방법이 가장 적절한 방법인지 제안하였다. 또한 기존의 송신 과형 독립 완전 과형 역산을 현장 자료에 적용할 때 발생하였던 문제점을 극복하기 위해서 시간 창을 적용한 송신 과형 독립 완전 과형 역산을 제안하였다. 기존 주파수 영역 완전 과형 역산에는 시간 창을 적용하기가 쉽지 않기 때문에 시간 영역 모델링을 이용한 주파수

영역 완전 파형 역산에 시간 창을 적용하여 현장 자료에 대한 적용성을 높이고자 하였다. 제안된 알고리즘을 검증하기 위해서 Marmousi 인공 합성 자료에 대해 잡음이 없는 환경과 있는 환경에서 음향파 완전 파형 역산을 이용하여 수치 실험을 진행하였다. 디콘볼루션 기반과 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산에 대해 각각 실험을 진행하였고 참조 트레이스의 선택 방법과 시간 창의 길이를 변경하면서 결과를 비교하였다. 현장 자료에 대한 적용성을 검증하기 위해서 멕시코만(Gulf of Mexico) 현장 자료에 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 적용하였고 속도 모델을 성공적으로 도출하였다. 역산된 속도 모델은 구조보정, 공통 이미지 모음, 공통 송신원 모음의 비교를 통해 검증되었다. 수치 예제를 통해 송신원 주변 적은 수의 트레이스를 이용하여 참조 트레이스를 구성하고 직접파만 포함 하도록 시간 창을 적용한 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산이 실제 자료에 가장 적합한 방법임을 보였다.

**주요어** : 완전 파형 역산, 주파수 영역, 송신 파형, 시간 창, 현장 자료

**학 번** : 2014-30190

# 목 차

|   |    |
|---|----|
| 제 1 장 서 론.....                          | 1  |
| 1.1 연구의 배경 .....                        | 1  |
| 1.2 연구의 목적 .....                        | 7  |
| 1.3 연구의 구성 .....                        | 9  |
| <br>                                    |    |
| 제 2 장 주파수 영역 완전 파형 역산.....              | 10 |
| 2.1 주파수 영역 완전 파형 역산 알고리즘 .....          | 10 |
| 2.2 시간 영역 모델링을 이용한 주파수 영역 완전 파형 역산..... | 14 |
| 2.3 L-BFGS를 이용한 최적화.....                | 18 |
| 2.4 반복적 송신 파형 역산 .....                  | 23 |
| 2.4.1 반복적 송신 파형 역산 이론 .....             | 23 |
| 2.4.2 반복적 송신 파형 역산의 문제점.....            | 26 |
| <br>                                    |    |
| 제 3 장 송신 파형 독립 완전 파형 역산 .....           | 35 |
| 3.1 디콘볼루션 방법 .....                      | 35 |
| 3.1.1 디콘볼루션 방법을 이용한 파동장 .....           | 35 |
| 3.1.2 디콘볼루션 방법을 이용한 완전 파형 역산... 41      |    |
| 3.2 콘볼루션 방법.....                        | 44 |
| 3.2.1 콘볼루션 방법을 이용한 파동장 .....            | 44 |
| 3.2.2 콘볼루션 방법을 이용한 완전 파형 역산.....        | 50 |
| 3.3 참조 트레이스 선택 .....                    | 53 |
| 3.4 시간 창을 이용한 참조 트레이스 .....             | 67 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 제 4 장 | 인공 합성 자료 수치 예제 .....                       | 77  |
| 4.1   | 완전 파형 역산을 위한 준비 .....                      | 77  |
| 4.2   | Marmoursi 인공 합성 자료 .....                   | 80  |
| 4.3   | 잡음을 포함한 Marmoursi 인공 합성 자료 .....           | 95  |
| 4.3.1 | 가우스 무작위 잡음 .....                           | 97  |
| 4.3.2 | 가우스 무작위 잡음과 스파이크 잡음 .....                  | 108 |
| 4.4   | 해양 환경에서 스트리머를 이용한 Marmoursi 인공 합성 자료 ..... | 121 |
| 제 5 장 | 현장 자료 수치 예제 .....                          | 131 |
| 5.1   | 완전 파형 역산을 위한 준비 .....                      | 131 |
| 5.2   | 멕시코만 현장 자료 .....                           | 136 |
| 제 6 장 | 결론 .....                                   | 165 |
| 참고문헌  | .....                                      | 169 |

# 그림 목차

|  |    |
|--|----|
| 그림 2-1. 시간 영역 모델링을 이용한 주파수 영역 완전 파형 역산의 절차.....  | 17 |
| 그림 2-2. (a) 실제 Marmousi 속도 모델, (b) 균질한(homogeneous) 모델, (c) 1 차원(1D model) 모델, (d) 평활화 된(smoothed) 모델.....                                     | 28 |
| 그림 2-3. 실제 모델, 균질 모델, 1 차원 모델, 평활화 된 모델 일 때 송신 파형 역산으로 계산한 (a) 진폭 (b) 위상.....  | 29 |
| 그림 2-4. 완전 파형 역산에 사용한 인공 합성 자료 중 100번째 공통 송신원 모습.....  | 32 |
| 그림 2-5. 송신 파형 역산을 적용한 완전 파형 역산의 (a) 10번째 반복 계산, (b) 20번째 반복 계산, (c) 30번째 반복 계산, (d) 37번째 반복 계산 결과.....   | 33 |
| 그림 2-6. 송신 파형 역산을 적용한 완전 파형 역산의 RMS 오차..   | 34 |
| 그림 3-1. 최대 주파수가 (a) 15 Hz인 fdgaus wavelet, (b) 20 Hz인 fdgaus wavelet, (c) 20 Hz인 ricker wavelet.....   | 38 |
| 그림 3-2. 관측 파동장과 수치 파동장의 송신 파형이 각각 15 Hz fdgaus wavelet, 20 Hz fdgaus wavelet 일 때 디콘볼루션 방법으로 송신 파형 효과가 제거된 (a) 5 Hz, (b) 10 Hz의 주파수 영역 파동장..... | 39 |
| 그림 3-3. 관측 파동장과 수치 파동장의 송신 파형이 각각 15 Hz fdgaus wavelet, 20 Hz ricker wavelet 일 때 디콘볼루션 방법으로 송신 파형 효과가 제거된 (a) 5 Hz, (b) 10 Hz의 주파수 영역 파동장..... | 40 |
| 그림 3-4. 관측 파동장과 수치 파동장의 송신 파형이 각각 15 Hz fdgaus wavelet, 20 Hz fdgaus wavelet 일 때 콘볼루션 방법으로 송   |    |



|  |    |
|--|----|
| 신 파형 효과가 제거된 (a) 5 Hz, (b) 10 Hz의 주파수 영역 파동장.<br>.....   | 48 |
| 그림 3-5. 관측 파동장과 수치 파동장의 송신 파형이 각각 15 Hz<br>fdgaus wavelet, 20 Hz ricker wavelet 일 때 콘볼루션 방법으로 송신<br>파형 효과가 제거된 (a) 5 Hz, (b) 10 Hz의 주파수 영역 파동장... 49 |    |
| 그림 3-6. (a) 15 Hz fdgaus가 송신 파형 일 때 가우스 무작위 잡음이<br>추가된 관측 파동장의 100번째 트레이스, (b) 20 Hz ricker가 송신<br>파형일 때 계산된 수치 파동장의 100번째 트레이스. ....                | 63 |
| 그림 3-7. (a) OTR, (b) STR, (c) ATR을 이용하여 계산한 $r_{obs}$ 와 $r_{mod}$ .<br>.....   | 64 |
| 그림 3-8. 송신원에서 가장 가까운 트레이스가 배드 트레이스 일 때<br>(a) OTR, (b) STR, (c) ATR을 이용하여 계산한 $r_{obs}$ 와 $r_{mod}$ . ....   | 65 |
| 그림 3-9. (a) 15 Hz fdgaus가 송신 파형 일 때 일관성 잡음이 추가된<br>관측 파동장의 100번째 트레이스, (b) 20 Hz ricker가 송신 파형일<br>때 계산된 수치 파동장의 100번째 트레이스.....                     | 71 |
| 그림 3-10. 0.3 초의 시간 창이 적용 되지 않은 경우 (W/O) 와 적용<br>된 (W) 경우 (a) 관측 파동장의 참조 트레이스와 (b) 수치 파동<br>장의 참조 트레이스.....   | 72 |
| 그림 3-11. (a) 시간 창이 적용되지 않은 경우, (b) 0.3 초의 시간 창이<br>적용된 경우 $r_{obs}$ 와 $r_{mod}$ .....  | 73 |
| 그림 3-12. 2 초와 5 초의 시간 창을 적용한 경우 (a) 관측 파동장의<br>참조 트레이스와 (b) 수치 파동장의 참조 트레이스.....   | 74 |
| 그림 3-13. 시간 창의 길이가 (a) 2 초, (b) 5 초 일 때 $r_{obs}$ 와 $r_{mod}$ . 75   |    |
| 그림 4-1. (a) 송신 파형 역산을 이용한 완전 파형 역산 결과, (b) 완<br>전 파형 역산의 RMS 오차.....   | 82 |
| 그림 4-2. (a) 1.4 km 지점, (b) 7.9 km 지점의 실제 모델, 초기 모델, 역<br>산 결과의 깊이 프로파일. ....   | 83 |

|   |     |
|---|-----|
| 그림 4-3. (a) OTR, (b) STR, (c) ATR 방법을 사용한 디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과.....   | 86  |
| 그림 4-4. (a) 1.4 km, (b) 7.9 km 지점에서 추출한 깊이 프로파일.....  | 87  |
| 그림 4-5. (a) OTR, (b) STR, (c) ATR 방법을 사용한 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과.....  | 90  |
| 그림 4-6. (a) 1.4 km, (b) 7.9 km 지점에서 추출한 깊이 프로파일.....  | 91  |
| 그림 4-7. (a) 가우스 무작위 잡음이 추가된 Marmousi 인공 합성 자료와 (b) 가우스 무작위 잡음과 스파이크 잡음이 동시에 추가된 Marmousi 인공 합성 자료의 100번째 공통 송신원 모습.....   | 96  |
| 그림 4-8. 가우스 무작위 잡음이 추가된 Marmousi 인공 합성 자료에 대해 (a) OTR, (b) STR, (c) ATR 방법을 사용한 디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 적용한 결과.....  | 99  |
| 그림 4-9. (a) 1.4 km, (b) 7.9 km 지점에서 추출한 깊이 프로파일.....  | 100 |
| 그림 4-10. 가우스 무작위 잡음이 추가된 Marmousi 인공 합성 자료에 대해 (a) OTR, (b) STR, (c) ATR 방법을 사용한 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 적용한 결과.....  | 103 |
| 그림 4-11. (a) 1.4 km, (b) 7.9 km 지점에서 추출한 깊이 프로파일....  | 104 |
| 그림 4-12. 가우스 무작위 잡음과 스파이크 잡음이 추가된 Marmousi 인공 합성 자료에 대해 (a) 시간 창을 적용하지 않았을 때, (b) 2 초의 시간 창을 적용 했을 때, (c) 0.5 초의 시간 창을 적용 했을 때 디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과..   | 111 |
| 그림 4-13. (a) 1.4 km, (b) 7.9 km 지점에서 추출한 깊이 프로파일...   | 112 |
| 그림 4-14. 가우스 무작위 잡음과 스파이크 잡음이 추가된 Marmousi 인공 합성 자료에 대해 (a) 시간 창을 적용하지 않았을 때, (b) 2 초의 시간 창을 적용 했을 때, (c) 0.5 초의 시간 창을 적용 했을 때 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과..... | 115 |
| 그림 4-15. (a) 1.4 km, (b) 7.9 km 지점에서 추출한 깊이 프로파일....  | 116 |

|   |     |
|---|-----|
| 그림 4-16. (a) 해수 층이 존재하는 Marmousi 속도 모델, (b) 평활화<br>된 초기 속도 모델.....  | 124 |
| 그림 4-17. 해양 환경에서 스트리머를 이용하여 얻은 인공 합성 자<br>료 중 100번째 공통 송신원 모습.....  | 125 |
| 그림 4-18. 해양 환경에서 스트리머를 이용하여 얻은 Marmousi 인공<br>합성 자료에 대해 (a) OTR, (b) STR, (c) ATR 방법을 사용한 디콘<br>볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 적용한 결과.<br>..... | 126 |
| 그림 4-19. (a) 1.4 km, (b) 7.9 km 지점에서 추출한 깊이 프로파일....  | 127 |
| 그림 4-20. 해양 환경에서 스트리머를 이용하여 얻은 Marmousi 인공<br>합성 자료에 대해 (a) OTR, (b) STR, (c) ATR 방법을 사용한 콘볼<br>루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 적용한 결과. 128       | 128 |
| 그림 4-21. (a) 1.4 km, (b) 7.9 km 지점에서 추출한 깊이 프로파일....  | 129 |
| 그림 5-1. 멕시코만 현장 자료의 (a) 공통 송신원 모습과 (b) 공통 송<br>신원 모습의 주파수 스펙트럼.....   | 133 |
| 그림 5-2. 멕시코만 현장 자료 역산을 위한 초기 속도 모델.....   | 135 |
| 그림 5-3. 멕시코만 현장 자료에서 추출한 (a) OTR, (b) STR, (c)<br>ATR 방법의 참조 트레이스 ( $d_{ref}$ ).....  | 138 |
| 그림 5-4. 멕시코만 현장 자료에 대해 (a) OTR, (b) STR, (c) ATR 방법<br>을 사용한 디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을<br>적용한 결과.....                                    | 141 |
| 그림 5-5. 멕시코만 현장 자료에 대해 (a) OTR, (b) STR, (c) ATR 방법<br>을 사용한 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을<br>적용한 결과.....                                     | 142 |
| 그림 5-6. (a) 멕시코만 현장 자료에서 추출한 OTR과 STR 방법의 참<br>조 트레이스 ( $d_{ref}$ ) 중 0~1 초에 해당하는 부분을 확대한 그래<br>프, (b) 송신원에서 가장 가까운 트레이스들의 모습 (near trace   |     |

|   |     |
|---|-----|
| gather). .....  | 146 |
| 그림 5-7. 시간 창을 적용하지 않을 때와 적용 할 때 (a) OTR, (b) STR 방법의 주파수 영역 참조 트레이스 ( $d_{ref}$ ) 중 위상 성분. ....                                     | 147 |
| 그림 5-8. 멕시코만 현장 자료에 대해 0.5 초의 시간 창과 함께 (a) OTR, (b) STR 방법을 사용한 디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 적용한 결과.....                            | 150 |
| 그림 5-9. 멕시코만 현장 자료에 대해 0.5 초의 시간 창과 함께 (a) OTR, (b) STR 방법을 사용한 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 적용한 결과.....                             | 151 |
| 그림 5-10. 0.5 초의 시간 창과 (a) OTR, (b) STR 방법을 사용한 디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과가 배경 속도 모델인 키르히호프 구조보정 결과.....                         | 157 |
| 그림 5-11. 0.5 초의 시간 창과 (a) OTR, (b) STR 방법을 사용한 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과가 배경 속도 모델인 키르히호프 구조보정 결과.....                          | 158 |
| 그림 5-12. 0.5 초의 시간 창과 (a) OTR, (b) STR 방법을 사용한 디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과에 대한 오프셋 영역 공통 영상 모음 (3 km, 10 km, 15 km, 18 km). .... | 159 |
| 그림 5-13. 0.5 초의 시간 창과 (a) OTR, (b) STR 방법을 사용한 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과에 대한 오프셋 영역 공통 영상 모음 (3 km, 10 km, 15 km, 18 km). ....  | 160 |
| 그림 5-14. (a) 멕시코 현장 자료의 250 번째 공통 송신원 모음과 (b) 초기 속도 모델로부터 얻은 수치 파동장.....  | 161 |
| 그림 5-15. 0.5 초의 시간 창과 (a) OTR, (b) STR 방법을 사용한 디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과로부터 얻은 수치 파동장.....                                     | 162 |

|   |     |
|---|-----|
| 그림 5-16. 0.5초의 시간 창과 (a) OTR, (b) STR 방법을 사용한 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과로부터 얻은 수치 파동장..... | 163 |
| 그림 5-17. (a) 초기 속도 모델, (b) 디콘볼루션 기반의 역산 결과, (c) 콘볼루션 기반의 역산 결과로부터 얻은 수치 파동장의 300 번째 트레이스..... | 164 |

# 표 목차

|  |     |
|--|-----|
| <b>표 3-1.</b> 관측 파동장의 특성과 참조 트레이스 설정 방법에 따른 RMS 오차.....  | 66  |
| <b>표 3-2.</b> 참조 트레이스의 시간 창 길이에 따른 RMS 오차.....   | 76  |
| <b>표 4-1.</b> 완전 파형 역산에 사용한 복소 주파수.....  | 79  |
| <b>표 4-2.</b> 잡음이 포함되지 않은 자료를 이용한 경우 완전 파형 역산 방법에 따른 모델 오차와 반복 계산 횟수.....                      | 94  |
| <b>표 4-3.</b> 가우스 무작위 잡음이 포함된 자료를 이용한 경우 완전 파형 역산 방법에 따른 모델 오차와 반복 계산 횟수.....                  | 107 |
| <b>표 4-4.</b> 가우스 무작위 잡음과 스파이크 잡음이 포함된 자료를 이용한 경우 시간 창에 따른 모델 오차와 반복 계산 횟수.....                | 120 |
| <b>표 4-5.</b> 해양 환경에서 스트리머를 이용하여 얻은 Marmousi 인공 합성 자료의 경우 완전 파형 역산 방법에 따른 모델 오차와 반복 계산 횟수..... | 130 |
| <b>표 5-1.</b> 완전 파형 역산에 사용한 복소 주파수.....  | 134 |







# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구의 배경

지하 매질의 정확한 물성 값을 얻는 것은 지구물리학과 지질학에서 중요한 연구 분야 중 하나이다. 정확한 물성 값은 지하 매질의 구조를 영상화하는데 필수적이며 이는 지반 조사, 석유 및 가스의 부존 지역 예측, 저류층 특성화(reservoir characterization) 등의 분야에 활용된다. 지하 매질의 물성 중 P파 속도는 가장 중요하며 널리 사용되는 물성으로 역시간 구조보정, 키르히호프(Kirchhoff) 구조보정 등 영상화 알고리즘은 주로 P파 속도를 이용하여 지하 구조를 영상화 한다. 따라서 지하 매질의 속도 정보를 얻기 위해 속도 분석, 반사 및 굴절 토모그래피, 완전 파형 역산 등의 알고리즘이 사용되었다. 그 중 완전 파형 역산(full waveform inversion)은 최근 학계 및 산업계에서 가장 주목을 받고 있는 기술로 Lailly (1983)와 Tarantola (1984)가 adjoint state 법을 제안한 이후 시간 영역 (Gauthier *et al.* 1986; Mora 1987; Crase *et al.* 1990; Bunks *et al.* 1995)과 주파수 영역 (Pratt *et al.* 1998; Sirgue and Pratt 2004; Shin and Min 2006; Brossier *et al.* 2009)에서 많은 연구가 이루어졌다. 하지만 완전 파형 역산에는 아직 해결되지 않은 많은 문제들이 존재하고 이러한 문제들이 완전 파형 역산을 현장 자료에 적용하는데 장애 요인으로 작용한다.

해의 비유일성(non-uniqueness)은 가장 대표적인 문제 중 하나이다. 완전 파형 역산은 비선형 역문제(non-linear inverse problem)이고 불량조건(ill-posed)이기 때문에 데이터 상의 작은 오차가 역문제로 얻은 모델에 큰 변화를 만들어 낼 수 있으며 주어진 자료를 이용하여 얻을 수 있는 해는 유일하지 않다 (Backus and Gilbert 1967; Zhou *et al.* 2002). 국소 최저치(local minima)의 존재도 완전 파형 역산이 내재하고 있는 문제 중 하나이다. 국소 최저치는 완전 파형 역산이 최적화(optimization) 과정을 통해 전역 최저치(global minima)를 찾아가는데 장애 요인으로 작용하게 되는데 국소 최저치가 발생하는 원인으로서는 현장 자료에서 저 주파수 성분의 부재, 실제 지하 모델에 충분히 근접한 초기 모델의 부재 등이 있다. 목적 함수의 저 주파수 성분은 일반적으로 고 주파수 성분에 비해 더 선형적인 경향을 가지므로(Gupta 2011) 완전 파형 역산이 사이클 스킵핑(cycle skipping) 또는 위상 랩핑(phase wrapping) 현상을 피하고 올바른 해를 찾기 위해서는 저 주파수 성분이 필수적이다. 또한 실제 모델에 충분히 근접한 초기 모델을 이용한다면 국소 최저치의 영향이 줄어들기 때문에 올바른 해를 찾을 수 있다.

완전 파형 역산은 위와 같은 문제들 이전에 더 근본적인 문제를 가지고 있다. 완전 파형 역산은 정 전파 모델링(forward modeling)을 통해 얻은 수치 파동장(modeled wavefield)과 탄성과 탐사로 얻은 관측 파동장(recorded or observed wavefield) 간의 잔차(residual)를 최소화 시키는 방향으로 매질의 물성 값을 반복하여 업데이트하는 알고리즘이다. 수치 파동장은 정 전파 모델링에 사용한 송신 파형(source wavelet)과 그린 함수(green's function)의 콘볼루션 결과이고 관측 파동장은 실제 탐사에 사용한 송신 파형과

지하 매질 물성에서의 임펄스 반응(impulse response)과의 콘볼루션 결과이다. 따라서 정 전과 모델링을 수행할 때 실제 탐사에서 사용된 송신 파형과 동일한 송신 파형이 필수적으로 필요하다. 만약 정 전과 모델링에 사용한 송신 파형이 실제 탐사에 사용된 송신 파형과 다르다면 지하 매질의 물성을 정확히 반영하는 잔차가 계산되지 않기 때문에 그래디언트(gradient)가 잘못 계산되고 결국 지하 매질의 물성도 제대로 업데이트 되지 않는다. 따라서 정확한 송신 파형을 획득하는 것이 완전 파형 역산에서 가장 기본적이고 중요한 과정이다.

송신 파형을 획득하기 위한 방법으로는 근거리 오프셋 트레이스 (Vigh and Starr 2008)나 송신 파형 역산 (Song *et al.* 1995; Pratt 1999; Shin *et al.* 2007) 기법이 사용되었다. 특히 송신 파형 역산 기법은 최근 널리 사용되는 방법으로 완전 파형 역산을 수행하기 전 또는 수행하는 중에 송신 파형을 가우스-뉴턴 법으로 구한다. 이 방법은 현재 주어진 물성 값에 대한 파동 전과 모델링 결과와 탐사를 통해 얻은 관측 파동장 간의 오차가 최소가 되도록 송신 파형을 결정하는 방법이기 때문에 실제 송신 파형을 구하는 방법은 아니다. 따라서 송신 파형 역산은 몇몇 문제점을 가지고 있다.

첫 번째 문제점은 송신 파형 역산이 배경 물성 값에 의존적이라는 점이다 (Zhou and Greenhalgh 2003). 송신 파형 역산은 완전 파형 역산을 통해 정확한 지하 매질의 물성 값을 구하기 위해 수행하는 것이다. 하지만 송신 파형 역산이 배경 물성 값에 의존적이기 때문에 실제 송신 파형과 일치하는 송신 파형을 얻으려면 배경 물성 값이 실제 물성 값에 충분히 근접해야 한다는

모순점이 있다.

두 번째 문제점은 완전 과형 역산을 진행 할 때 RMS(Root mean square) 오차가 줄어드는 것이 배경 모델이 실제에 근접해서인지 단순히 오차가 줄어들도록 송신 과형이 계산 되었기 때문인지 알 수 없다는 점이다. 전자의 경우 완전 과형 역산이 올바른 방향으로 진행되고 있음을 의미하므로 역산을 계속 진행하면 된다. 후자의 경우 물성 값은 잘못 된 방향으로 업데이트 되지만 오차는 줄어드는 상황이기 때문에 역산을 중지 해야 한다. 하지만 역산을 중지하거나 계속 진행하는 것을 결정하는 것은 RMS 오차에 기반하고 있기 때문에 후자의 경우 과 역산(overestimated) 되었거나 강한 인공 잡음(artifact)을 포함한 물성 값이 역산 결과로 도출 된다.

위와 같은 문제를 해결하기 위해서 송신 과형에 독립적인 완전 과형 역산 방법이 제안되었다 (Zhou and Greenhalgh 2003; Lee and Kim 2003; Xu *et al.* 2006; Choi and Alkhalifah 2011; Choi and Min 2012; Zhang *et al.* 2016). 송신 과형에 독립적인 완전 과형 역산은 디콘볼루션 (Lee and Kim 2003) 방법과 콘볼루션 (Choi and Alkhalifah 2011) 방법으로 나눌 수 있고, 시간 영역과 주파수 영역에서 연구되었다.

Lee and Kim (2003)은 디콘볼루션에 기반한 송신 과형 독립 완전 과형 역산 방법을 제안하였다. 그들은 주파수 영역에서 참조 트레이스를 수치 파동장과 관측 파동장에 각각 나누는 방식으로 디콘볼루션을 진행하였다. 파동장은 송신 과형과 그린 함수의 콘볼루션 결과이므로 주파수 영역에서 파동장을 참조 트레이스로 나눌 경우 각각의 송신 과형은 제거되고 그린 함수만 남게 되어

송신 파형에 영향을 받지 않는 완전 파형 역산을 수행할 수 있다.

Xu *et al.* (2006) 은 디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산의 참조 트레이스를 선택하는 방법을 비교하였다. Lee and Kim (2003)은 하나의 참조 트레이스를 사용했지만 Xu *et al.* (2006)은 하나의 참조 트레이스를 사용하는 방법과 모든 트레이스를 평균하여 참조 트레이스로 사용하는 방법 두 가지를 비교하였고 모든 트레이스를 평균하여 참조 트레이스를 만드는 방법이 잡음에 더 강함을 보였다.

Choi and Alkhalifah (2011)는 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 기법을 제안하였고 부호화된 동시 송신원(encoded simultaneous source) 시간 영역 완전 파형 역산에 적용하였다. 그들은 수치 파동장과 관측 파동장에서 각각 참조 트레이스를 얻은 후 수치 파동장에서 얻은 참조 트레이스를 관측 파동장에 콘볼루션하고 관측 파동장에서 얻은 참조 트레이스를 수치 파동장에 콘볼루션하는 방법으로 각각의 파동장이 수치 모델링에 사용된 송신 파형과 실제 탐사에 사용된 송신 파형을 모두 가지도록 목적함수를 설계하였다. 이 방법은 디콘볼루션 과정 중에 발생할 수 있는 불안정성을 제거할 수 있으며 시간 영역과 주파수 영역 모두에 쉽게 적용할 수 있다는 장점이 있다.

Zhang *et al.* (2016) 은 시간 영역 탄성 매질 완전 파형 역산에 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 적용하였다. 그들은 송신원과 인접한 위치에 있는 소수의 트레이스들을 이용하여 참조 트레이스를 만들었고 시간 창을 적용하여 짧은

시간에 대해서만 정보를 가지는 참조 트레이스를 구성하였다. 이 방법은 후기 신호에 등장하는 복잡한 파형들의 영향을 받지 않는 참조 트레이스를 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다.

송신 파형 독립 완전 파형 역산 기법은 완전 파형 역산이 가지고 있는 송신 파형 획득 문제를 해결 할 수 있는 방법이지만 현장 자료에 대해 적용된 사례가 극히 적어 적용성을 충분히 검증 받지 않았으며 여전히 몇 가지 한계점을 가진 방법으로 아직 많은 연구가 필요한 분야이다.

## 1.2 연구의 목적

실제 탄성과 탐사를 통해서 관측 파동장을 만들어내는 송신 파형을 얻는 것은 쉽지 않다. 실제 탄성과 탐사에서 매질로 발사한 송신 파형은 송신원 주변의 매질과 결합 현상(coupling effect)이 일어나면서 전파되고 수신기 주변의 매질과 결합 현상을 거친 후 수신기에 기록되므로 (Lee and Kim 2003) 송신원에서 발사한 송신 파형과 실제 매질을 통과하는 송신 파형의 진폭 및 위상은 차이가 있을 수 밖에 없다. 이러한 결합 현상은 수치 모델링을 통해 묘사할 수 없기 때문에 완전 파형 역산은 송신 파형을 알지 못한 상태에서 진행 될 수 밖에 없다. 송신 파형 역산 기법이 널리 사용되는 방법이지만 앞서 언급한 한계점들이 존재하기 때문에 송신 파형에 독립적인 완전 파형 역산 방법을 연구할 필요가 있다.

송신 파형 독립 완전 파형 역산은 송신 파형의 영향을 받지 않고 완전 파형 역산을 더 안정적으로 수행 할 수 있다는 장점을 가지고 있지만 아직 해결되지 않은 몇 가지 문제점들을 가지고 있다. 우선 첫 번째는 참조 트레이스 선택 방법이다. 참조 트레이스는 특정 트레이스 하나만으로 구성 할 수도 있고 모든 트레이스를 평균 낼 수도 있으며 몇 개의 트레이스들만 추출하여 만들 수도 있다. 또한 참조 트레이스를 선택하는 위치도 중요하다. 송신원 근처에서 추출 할 수도 있겠지만 송신원에서 일정 거리 떨어진 수신기에서 추출 할 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 방법으로 참조 트레이스를 선택 한 후 어떠한 방법이 가장 합리적인 방법인지 연구를 진행한다.

두 번째는 디콘볼루션과 콘볼루션 방법 중 어떠한 방법을 선택해야 할지 여부이다. 시간 영역의 송신 파형 독립 완전 파형 역산의 경우 콘볼루션 방법을 적용하기는 간단하지만 디콘볼루션 방법을 적용하기는 쉽지 않다. 하지만 주파수 영역의 경우 두 방법 모두 쉽게 적용 가능하므로 어떠한 방법이 더 좋은 결과를 주는지, 또는 어떠한 방법이 어떠한 상황에서 더 적합한지를 제시할 필요가 있다. 본 연구에서는 주파수 영역 송신 파형 독립 완전 파형 역산에 디콘볼루션과 콘볼루션 방법을 모두 적용해보고 어떠한 방법이 어떠한 환경에서 더 나은 결과를 주는지 분석한다.

세 번째는 가장 중요한 문제로, 송신 파형 독립 완전 파형 역산 방법을 현장 자료에 어떻게 적용 할 것인가 이다. 인공 합성 자료와는 달리 현장 자료의 경우 다양한 종류의 파형들이 기록되어 있고 그 중 상당수는 음향파 또는 탄성과 파동 전파 모델링을 통해서서는 묘사할 수 없는 파들이다. 따라서 현장 자료에 적합한 송신 파형 독립 완전 파형 역산 방법을 제안 할 필요가 있다. 현장 자료에는 특히 후기신호에 모드 변환 파 등의 복잡한 파형들이 상당수 기록되어 있다. 따라서 Zhang *et al.* (2016) 이 제안한 시간 창 기법을 적용하여 참조 트레이스를 구성하는 것이 합리적인 방법일 것으로 간주된다. 하지만 주파수 영역 파동 전파 모델링에서 시간 창을 적용하는 것은 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 Sirgue *et al.* (2008)이 제안한 시간 영역 모델링을 이용한 주파수 영역 완전 파형 역산 기법을 이용하여 송신 파형 독립 주파수 영역 완전 파형 역산을 수행한다.



## 1.3 연구의 구성

제 2장에서는 우선 시간 영역 모델링을 이용한 주파수 영역 완전 파형 역산 이론을 소개하고 연구에 사용된 최적화 기법을 설명한다. 그리고 현재까지 널리 사용되고 있는 반복적 송신 파형 역산 기법의 이론에 대해 설명하고 수치 예제를 통해 그 문제점을 제시한다. 제 3장에서는 송신 파형 독립 완전 파형 역산 방법을 소개한다. 디콘볼루션 및 콘볼루션 방법을 이용한 송신 파형 독립 완전 파형 역산 이론에 대해 각각 설명한다. 그리고 각각의 특성 및 참조 트레이스 선택 방법과 시간 창 적용 방법에 대해서도 설명한다. 제 4장에서는 Marmousi 인공 합성 자료를 이용한 음향파 역산 수치 실험 결과를 제시한다. 수치 실험에서는 참조 트레이스의 수, 시간 창의 적용 유무, 인공 합성 자료의 잡음 유무로 나누어 디콘볼루션 및 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 적용하고 그 결과를 비교한다. 그리고 제 5장에서는 멕시코만(Gulf of Mexico) 현장 자료를 이용하여 음향파 역산 수치 실험을 진행한다. 현장 자료 수치 실험에서는 각기 다른 송신 파형 독립 완전 파형 역산 기법에 따른 역산 결과를 비교하고 어떠한 방법이 현장 자료에 대한 적용성이 가장 높은지 제안한다. 마지막으로 제 6장에서는 본 연구의 결론을 기술한다.

## 제 2 장 주파수 영역 완전 파형 역산

### 2.1 주파수 영역 완전 파형 역산 알고리즘

가우스-뉴턴법에 기반한 주파수 영역 음향파 완전 파형 역산은 주파수 영역에서 정 전파 모델링을 통해 계산된 수치 파동장과 탄성과 탐사를 통해 얻은 시간 영역 관측 파동장을 주파수 영역으로 변환한 파동장 간의 오차를 최소화 시키는 방향으로 P파 속도 모델을 업데이트 한다.  $l_2$ -norm을 사용하는 경우 단일 주파수와 단일 송신원에 대한 목적함수  $E(\mathbf{m})$  는 아래와 같이 주어진다.

$$E(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} (\tilde{\mathbf{u}} - \tilde{\mathbf{d}})^T (\tilde{\mathbf{u}} - \tilde{\mathbf{d}})^* \quad (2.1.1)$$

$\tilde{\mathbf{u}}$ 와  $\tilde{\mathbf{d}}$ 는 각각 주파수 영역 수치 파동장과 관측 파동장이고  $T$ 는 전치 행렬,  $*$ 는 켈레 복소수를 의미한다. 이 때  $k$  번째 모델 변수  $m_k$ 에 대한 목적함수의 그래디언트는 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial E(\mathbf{m})}{\partial m_k} = \text{Re}[\mathbf{J}_k^T \tilde{\mathbf{r}}^*], \quad (2.1.2)$$

$$\mathbf{J}_k = \frac{\partial \tilde{\mathbf{u}}}{\partial \mathbf{m}_k}, \quad (2.1.3)$$

$$\tilde{\mathbf{r}} = \tilde{\mathbf{u}} - \tilde{\mathbf{d}}. \quad (2.1.4)$$

$Re$  는 실수 부,  $\mathbf{J}$  는 편미분 파동장, 그리고  $\mathbf{r}$  은 잔차이다. 하지만 편미분 파동장을 직접 계산하는 것은 많은 계산량을 필요로 하기 때문에 현실적이지 않으므로 adjoint state 법 (Lailly 1983; Tarantola 1984; Plessix 2006)을 이용한다.

주파수 영역 파동 전파 모델링은 아래와 같은 수식으로 표현될 수 있다.

$$\mathbf{S}\tilde{\mathbf{u}} = \tilde{\mathbf{f}}. \quad (2.1.5)$$

$\mathbf{S}$  는 복소 임피던스 행렬,  $\tilde{\mathbf{f}}$  는 주파수 영역 송신 파형이다. 식 (2.1.5)를  $k$  번째 모델 변수  $\mathbf{m}_k$  에 대해 편미분 하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial \mathbf{m}_k} \tilde{\mathbf{u}} + \mathbf{S} \frac{\partial \tilde{\mathbf{u}}}{\partial \mathbf{m}_k} = 0 \quad (2.1.6)$$

이고

$$\frac{\partial \tilde{\mathbf{u}}}{\partial \mathbf{m}_k} = -\mathbf{S}^{-1} \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial \mathbf{m}_k} \tilde{\mathbf{u}} \quad (2.1.7)$$

이다. 식 (2.1.7)은 가상 송신원  $\mathbf{v}_k = -\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{m}_k} \tilde{\mathbf{u}}$  를 이용하여

$$\frac{\partial \tilde{\mathbf{u}}}{\partial \mathbf{m}_k} = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{v}_k \quad (2.1.8)$$

로 다시 쓸 수 있다. 따라서 식 (2.1.2)는 식 (2.1.8)을 이용하여 아래와 같이 표현 될 수 있다.

$$\frac{\partial E(\mathbf{m})}{\partial \mathbf{m}_k} = \text{Re}[\mathbf{v}_k^T (\mathbf{S}^{-1})^T \tilde{\mathbf{r}}^*] \quad (2.1.9)$$

이 때  $\mathbf{S}$ 가 자기 수반 행렬(self adjoint)인 경우  $(\mathbf{S}^{-1})^T = \mathbf{S}^{-1}$  이고,  $\mathbf{S}^{-1} \tilde{\mathbf{r}}^*$ 는 역 전파 파동장(back-probated wavefield)을 의미한다.

가우스-뉴턴 법을 이용할 경우 그래디언트( $\mathbf{g} = \frac{\partial E(\mathbf{m})}{\partial \mathbf{m}_k}$ )와 근사 헤시안( $\mathbf{H}_a$ , approximated Hessian)을 이용하여  $k$  번째 모델 업데이트  $\Delta \mathbf{m}_k$ 를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\Delta \mathbf{m}_k = -\mathbf{H}_a^{-1} \mathbf{g} \quad (2.1.10)$$

이 때 근사 헤시안은 목적 함수의 이차 미분인 헤시안의 잔차 항을 제거하여 얻는데 (Pratt et al. 1998) 직접 계산하는 것은 많은 계산량을 필요로 한다. 따라서 근사 헤시안을 직접 계산하는 대신 유사 헤시안 (pseudo-Hessian) (Shin et al. 2001), 개량된 유사 헤시안 (Choi et al. 2008; Jun et al. 2015), CGLS(Golub and van Loan 1996), 또는 Limited-memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno(L-BFGS)와 같은

quasi-Newton 법 등이 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 비교적 적은 계산 량으로 근사 헤시안의 비 대각(off diagonal) 성분까지 고려할 수 있는 L-BFGS 방법을 사용하였다.

계산된 모델 업데이트를 이용하여  $i$  번째 반복 계산(iteration)의 모델 변수  $m_k^i$ 를 아래와 같이 업데이트 할 수 있다.

$$m_k^i = m_k^{i-1} - \alpha \Delta m_k \quad (2.1.11)$$

$\alpha$ 는 도약 거리(step length)로 포물선 보간법(parabolic interpolation) (Vigh 2009)을 이용하여 계산한다.

## 2.2 시간 영역 모델링을 이용한 주파수 영역 완전 파형 역산

주파수 영역 파동장을 얻기 위한 주파수 영역 파동 전파 모델링은 행렬 해법(matrix solver)을 이용하는 것이 일반적이다. 복소 임피던스 행렬  $\mathbf{S}$  가 송신원 위치에 독립적이기 때문에 직접 해법(direct solver)을 이용할 경우 한번의 행렬 분해(Matrix factorization)로 여러 송신원을 계산 할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 3차원 영역과 같이 행렬의 크기가 매우 큰 경우 필요한 메모리의 양이 방대하기 때문에 직접 해법을 이용하는 것은 현실적으로 불가능한 경우가 많다. 이러한 문제를 극복하기 위해서 *Sirgue et al.* (2008)은 효율적인 3차원 완전 파형 역산을 위해 시간 영역 파동 전파 모델링을 이용하는 주파수 영역 완전 파형 역산 방법을 제안하였고 이 후 효율적인 완전 파형 역산을 위해 시간 영역 모델링을 이용한 여러 연구들이 진행되었다 (*Kim et al.* 2013; *Butzer et al.*; *Xu and McMechan* 2014; *Jun et al.* 2014). 시간 영역 모델링을 이용하는 주파수 영역 완전 파형 역산은 시간 영역 모델링과 이산 푸리에 변환을 이용하여 주파수 영역 정 전파 및 역 전파 파동장을 구하는 방법으로 시간 영역 모델링을 이용하여 시간 영역 수치 파동장을 계산하고 계산된 수치 파동장을 이산 푸리에 변환을 통해 주파수 영역으로 변환하여 주파수 영역 파동장을 구한다. 이 방법의 가장 큰 장점은 메모리 문제 없이 파동장을 구할 수 있다는 점이다. 시간 영역 모델링을 이용한 주파수 영역 완전 파형 역산은 다음과 같은 방법을 통해 수행된다.

우선 시간 영역 파동장  $u(t)$ 는 시간 영역 음향 파동 방정식 (식 (2.2.1))을 이용하여 계산된다.

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2} = \nabla^2 u(t) + f(t) \quad (2.2.1)$$

계산된 시간 영역 파동장  $u(t)$  는 이산 푸리에 변환 (식 (2.2.2))를 통하여 주파수 영역 파동장  $\tilde{u}(\omega)$ 로 변환된다.

$$\tilde{u}(\omega_n) = \sum_{k=0}^{nt} u(k\Delta t) e^{-\omega_n k\Delta t} \quad (2.2.2)$$

이 때 시간 영역 관측 파동장  $d(t)$ 도 식 (2.2.2)를 통해 주파수 영역 관측 파동장  $\tilde{d}(\omega)$ 로 변환된다.

식 (2.1.4)를 이용하여 주파수 영역 잔차  $\tilde{r}(\omega)$ 를 계산하고 식 (2.2.3)과 같이 이산 역 푸리에 변환을 통하여 시간 영역 잔차  $r(t)$ 를 얻는다.

$$r(k\Delta t) = \tilde{r}(\omega_n) e^{\omega_n k\Delta t} \quad (2.2.3)$$

$r(t)$ 와 adjoint 파동 방정식을 이용하여 adjoint 파동장을 얻는다. 음향 파동 전파 모델링 연산자는 자기 수반 행렬이므로 adjoint 파동 방정식은 식 (2.2.1)과 동일하고 adjoint 파동장은 역 전파 파동장과 동일하다. 계산된 시간 영역 역 전파 파동장은 식 (2.2.2)를 이용하여 다시 주파수 영역으로 변환되어 주파수 영역 역 전파 파동장  $\mathbf{S}^{-1} \tilde{\mathbf{r}}^*$  (식 (2.1.9))를 얻게 된다. 나머지 절차는 앞서 소개된 주파수 영역 완전 파형 역산과 동일하다. 본 알고리즘의 절차는 그림 2-1을 통해 확인 할 수 있다. 본 연구에서는 완전 파형 역산의

정 전파 및 역 전파 파동장을 구하기 위한 시간 영역 수치 모델링 방법으로 시간에 대한 2 차 및 공간에 대한 4 차 정확도를 가지는 유한 차분법(finite difference method)을 사용하였다. 또한 반 무한 매질에서의 파동 전파 양상을 시뮬레이션 하기 위해서 모델의 왼쪽, 오른쪽, 아래 경계면에 흡수 경계 조건인 higdon 경계 조건 (Higdon 1991)을 적용하였으며 상부 경계면은 자유면(free surface) 경계 조건을 적용하였다.



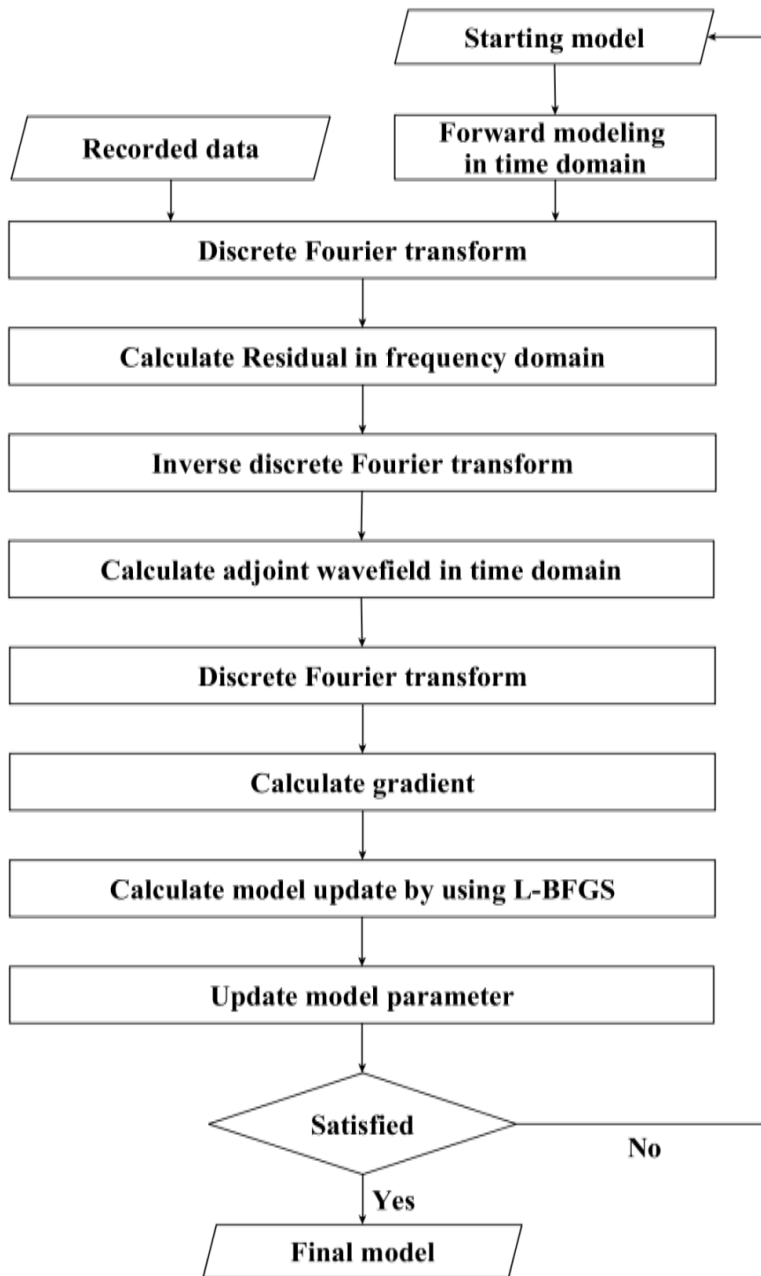


그림 2-1. 시간 영역 모델링을 이용한 주파수 영역 완전 파형 역산의 절차.

## 2.3 L-BFGS를 이용한 최적화

목적 함수  $f(x_k)$  에  $\Delta x$  만큼의 섭동이 있을 때  $f(x_k + \Delta x)$  는 테일러 전개를 통해 아래와 같은 2 차 함수로 표현 할 수 있다.

$$f(x_k + \Delta x) = f(x_k) + \Delta x^T \nabla f(x_k) + \frac{1}{2} \Delta x^T \nabla^2 f(x_k) \Delta x \quad (2.3.1)$$

위 함수를 최소화 하기 위해  $\Delta x$ 에 대해 편미분 하면

$$\nabla f(x_k + \Delta x) = \nabla f(x_k) + \nabla^2 f(x_k) \Delta x \quad (2.3.2)$$

가 되고

$$\Delta x = -H_k^{-1} \nabla f(x_k) \quad (2.3.3)$$

를 통해 탐색 방향(search direction)  $\Delta x$ 를 구할 수 있다. 이 때  $k$ 는 반복 계산의 횟수,  $H_k$ 는 목적 함수  $f(x_k)$ 의 헤시안이고  $\Delta x$ 를 이용하여 새로운 반복 계산의  $x_{k+1}$ 을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$x_{k+1} = x_k - \alpha_k \Delta x \quad (2.3.4)$$

헤시안 또는 근사 헤시안과 그의 역행렬을 직접 구하는 것은 많은 계산 량이 필요하므로 현실적으로 실용적이지 않다. 따라서 헤시안을 직접 구하지 않는 L-BFGS와 같은 quasi-Newton 법이 완전 파형 역산 분야에서 널리 사용되고 있다.

BFGS는 가장 효율적인 quasi-Newton 법이라고 알려져있으며 BFGS 라는 명칭은 개발자들인 Broyden, Fletcher, Goldfarb 와 Shanno 의 이름을 따서 지었다. BFGS는 근사 헤시안을 매 반복 계산 마다 새로 계산하는 것이 아니라 최근의 그래디언트 방향을 기반으로 업데이트 된 근사 헤시안 이용하는 방법 이다. 이 과정에서 BFGS는 근사 헤시안을 직접 계산하는 것이 아니라 근사 헤시안의 역행렬이 곱해진 탐색 방향을 바로 계산하기 때문에 근사 헤시안을 고려하면서도 계산 효율이 굉장히 높은 방법이다. 하지만 BFGS는 변수가 굉장히 많은 경우 적용이 힘들기 때문에 Limited-Memory BFGS(L-BFGS)가 변수가 큰 문제에 사용된다.

L-BFGS는 헤시안 행렬이 너무 크거나 밀집(dense) 하여 저장하기 힘들거나 조작하기 힘든 경우 사용된다 (Nocedal and Wright 1999). L-BFGS는  $n$  의 길이를 가지는 몇 개의 벡터만 저장하는 압축된 방식으로 근사 헤시안을 저장한다. 그리고 가장 최근  $m$  개 반복 계산의 업데이트들만을 이용하여 몇 번의 단순한 계산을 통해 탐색 방향을 계산하므로 근사 헤시안을 직접 구하는 방법이나 BFGS에 비해 굉장히 작은 계산 량과 저장 공간이 필요하다.

식 (2.3.4)는 근사 헤시안의 역행렬  $B_k$  를 이용하여 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$x_{k+1} = x_k - \alpha_k B_k \nabla f_k. \quad (2.3.5)$$

이 때  $B_k$  는 아래와 같은 형태로 매 반복 계산 마다 업데이트 된다.

$$B_{k+1} = V_k^T B_k V_k + \rho_k s_k s_k^T \quad (2.3.6)$$

이고

$$\rho_k = \frac{1}{y_k^T s_k}, \quad (2.3.7)$$

$$V_k = I - \rho_k y_k s_k^T, \quad (2.3.8)$$

$$s_k = x_{k+1} - x_k, \quad (2.3.9)$$

$$y_k = \nabla f_{k+1} - \nabla f_k. \quad (2.3.10)$$

탐색 방향  $B_k \nabla f_k$  는  $\nabla f_k$  와 벡터  $s_i, y_i$  를 이용하여 구할 수 있다. 새로운 반복 계산이 시작 될 때 가장 오래된 벡터  $s_i, y_i$  는 새로운 벡터  $s_k, y_k$  로 대체된다. 따라서 위 벡터들은 가장 최근  $m$  개 반복 계산의 업데이트 정보를 가지고 있고  $m$  은 주로 3에서 20 사이의 값을 사용한다 (Brossier *et al.* 2009). L-BFGS를 이용하여 탐색 방향을 결정하는 과정은 다음과 같다 (Nocedal and Wright 1999).

우선 헤시안의 초기 값( $B_k^0$ )을 선택한다. Brossier *et al.* (2009) 방법에 따르면 pseudo-Hessian (Shin *et al.* 2001)은 추가적인 계산량이 거의 필요하지 않으면서 실제 헤시안의 거동을 어느 정도 묘사 할 수 있으므로 L-BFGS 헤시안의 초기 값으로 적합하다. 따라서 본 연구에서도 pseudo-Hessian을 완전 과형 역산 첫 번째 반복 계산의 헤시안 초기 값으로 사용하였다. 두 번째 반복 계산부터는

$$B_k^0 = \frac{s_{k-1}^T y_{k-1}}{y_{k-1}^T y_{k-1}} \mathbf{I} \quad (2.3.11)$$

를 헤시안 초기 값으로 사용하였다. 식 (2.3.6)의 반복을 통해  $B_k$ 는 아래와 같은 관계를 만족한다.

$$\begin{aligned} B_k &= (V_{k-1}^T \cdots V_{k-m}^T) B_k^0 (V_{k-m} \cdots V_{k-1}) \\ &+ \rho_{k-m} (V_{k-1}^T \cdots V_{k-m+1}^T) s_{k-m} s_{k-m}^T (V_{k-m+1}^T \cdots V_{k-1}^T) \\ &+ \rho_{k-m+1} (V_{k-1}^T \cdots V_{k-m+2}^T) s_{k-m+1} s_{k-m+1}^T (V_{k-m+2}^T \cdots V_{k-1}^T) \quad (2.3.12) \\ &+ \cdots \\ &+ \rho_{k-1} s_{k-1} s_{k-1}^T. \end{aligned}$$

따라서 L-BFGS를 이용한 경우 아래와 같이 모델 변수  $x_{k+1}$ 을 업데이트 할 수 있다 (Nocedal and Wright 1999).

$$\begin{aligned} q &= \nabla f_k \\ \mathbf{for} \ i &= k-1, k-2, \dots, k-m \\ \alpha_i &= \rho_i s_i^T q \\ q &= q - \alpha_i y_i \\ \mathbf{end \ for} & \quad (2.3.13) \end{aligned}$$

$$r = B_k^0 q$$

$$\begin{aligned} \mathbf{for} \ i &= k-m, k-m+1, \dots, k-1 \\ \beta &= \rho_i y_i^T r \end{aligned}$$

$$r = r + s_i(\alpha_i - \beta)$$

**end for**

$$B_k \nabla f_k = r$$

$$x_{k+1} = x_k - \alpha_k B_k \nabla f_k.$$

## 2.4 반복적 송신 파형 역산

### 2.4.1 반복적 송신 파형 역산 이론

송신 파형은 완전 파형 역산이 진행되면서 동시에 업데이트 될 수 있다. 이러한 방법을 반복적 송신 파형 역산(iterative source estimation, ISE)이라고 하며 주로  $l_2$ -norm과 뉴턴 법이 사용된다 (Song *et al.* 1995; Pratt 1999; Shin *et al.* 2007). 송신 파형 역산은 다음과 같은 방법을 통해 수행된다 (Shin *et al.* 2007).

주파수 영역 관측 파동장 ( $v$ ), 수치 파동장( $u$ )의 그린 함수( $g$ ) 그리고 송신 파형 ( $s$ )은 아래와 같이 복소수 형태로 표현 될 수 있다.

$$v = a + ib, \quad (2.4.1)$$

$$g = c + id, \quad (2.4.2)$$

$$s = e + if. \quad (2.4.3)$$

$j$ 번째 수신기에 기록된 수치 파동장  $u_j$ 는

$$\begin{aligned} u_j &= g_j s = (c_j + id_j)(e + if) \\ &= c_j e - d_j f + i(d_j e + c_j f) \end{aligned} \quad (2.4.4)$$

이고  $j$ 번째 수신기에서의 잔차  $r_j$ 는

$$\begin{aligned} r_j &= u_j - v_j \\ &= c_j e - d_j f - a_j + i(d_j e + c_j f - b_j) \end{aligned} \quad (2.4.5)$$

이다. 따라서 송신 파형에 대한 목적 함수  $E_{src}(s)$  는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} E_{src}(s) &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{nr} r_j r_j^* \\ &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{nr} \left\{ (c_j e - d_j f - a_j)^2 + (d_j e + c_j f - b_j)^2 \right\}. \end{aligned} \quad (2.4.6)$$

뉴턴 법을 이용하여 최적화를 진행하면

$$E_{src}(s + \Delta s) = E_{src}(s) + \Delta s^T \nabla E_{src}(s) + \frac{1}{2} \Delta s^T \mathbf{H}_{src} \Delta s \quad (2.4.7)$$

로 2차 함수까지 근사할 수 있다. 이 때  $s = [e \ f]^T$  이고  $\Delta s = [\Delta e \ \Delta f]^T$  이다. 따라서 탐색방향  $\Delta s$  는

$$\Delta s = -\mathbf{H}_{src}^{-1} \nabla E_{src}(s) \quad (2.4.8)$$

이고, 그래디언트  $\nabla E_{src}(s)$  와 헤시안  $\mathbf{H}_{src}$  은 아래와 같이 표현된다.



$$\nabla E_{src} = \begin{bmatrix} \frac{\partial E_{src}}{\partial e} \\ \frac{\partial E_{src}}{\partial f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{nr} \{e(c_j^2 + d_j^2) - a_j c_j - b_j d_j\} \\ \sum_{j=1}^{nr} \{f(c_j^2 + d_j^2) + a_j d_j - b_j c_j\} \end{bmatrix}, \quad (2.4.9)$$

$$\mathbf{H}_{src} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 E_{src}}{\partial e^2} & \frac{\partial^2 E_{src}}{\partial e \partial f} \\ \frac{\partial^2 E_{src}}{\partial f \partial e} & \frac{\partial^2 E_{src}}{\partial f^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{nr} (c_j^2 + d_j^2) & 0 \\ 0 & \sum_{j=1}^{nr} (c_j^2 + d_j^2) \end{bmatrix} \quad (2.4.10)$$

따라서

$$\Delta s = \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta f \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 E_{src}}{\partial e^2} & \frac{\partial^2 E_{src}}{\partial e \partial f} \\ \frac{\partial^2 E_{src}}{\partial f \partial e} & \frac{\partial^2 E_{src}}{\partial f^2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial E_{src}}{\partial e} \\ \frac{\partial E_{src}}{\partial f} \end{bmatrix}, \quad (2.4.11)$$

이고

$$\begin{aligned} \Delta e &= -e + \frac{\sum_{j=1}^{nr} (a_j c_j + b_j d_j)}{\sum_{j=1}^{nr} (c_j^2 + d_j^2)} \\ \Delta f &= -f - \frac{\sum_{j=1}^{nr} (a_j d_j - b_j c_j)}{\sum_{j=1}^{nr} (c_j^2 + d_j^2)} \end{aligned} \quad (2.4.12)$$

이다.

### 2.4.2 반복적 송신 파형 역산의 문제점

반복적 송신 파형은 크게 두 가지의 문제점을 가지고 있다. 첫 번째 문제점은 송신 파형 역산이 배경 물성 값에 의존적이라는 점이다 (Zhou and Greenhalgh 2003). 본 연구에서는 송신 파형 역산이 배경 물성 값에 의존적임을 보이기 위해 실제 모델, 균질한 모델(homogeneous), 속도가 깊이에 따라 변하는 1 차원 모델 (simple 1D model), 평활화 된 모델(smoothed model)에 대해서 송신 파형 역산을 진행하여 진폭과 위상을 비교하였다. 그림 2-2는 송신 파형 역산에 사용한 속도 모델들이다. 그림 2-3은 배경 속도에 따라 달라지는 송신 파형 역산 결과이다. 주파수 영역에서 송신 파형 역산을 진행하였고 0.25 Hz 부터 7.5 Hz 까지 0.25 Hz 간격으로 총 30 개의 주파수에 대해 역산을 진행하고 그 결과를 도시하였다. 실제 모델은 음향파 Marmousi model을 사용하였다. 실제 모델에서 가장 멀리 떨어진 균질한 모델에서 역산된 송신 파형의 진폭은 실제 송신 파형의 진폭과 크게 다른 형태를 보여준다. 위상의 경우 저 주파수에서는 실제 송신 파형의 위상과 유사한 모습을 보여주지만 주파수가 올라갈수록 차이가 점점 커진다. 1 차원 모델에서 역산 한 송신 파형 역산 결과는 균질한 모델에서 역산 한 결과보다 실제 송신 파형에 더 가깝다. 하지만 실제 송신 파형과 차이가 있으며 특히 진폭의 경우 주파수가 높아질수록 실제 송신 파형에서 멀어진다. 평활화 된 모델에 송신 파형 역산을 적용한 결과는 이 전의 역산 결과들 보다 실제 송신 파형에 근접한 모습을 보여준다. 하지만 배경 속도 모델이 실제 모델에 충분히 가까움에도 불구하고 정확한 송신 파형이 역산 되지 않았다. 역산 된 송신 파형이 실제 송신 파형과 다르다면 수치 파동장과 관측 파동장의 잔차에 배경 속도 모델의 차이만 영향을 미치는 것이 아니라 송신

파형의 차이도 영향을 미치기 때문에 모델 업데이트가 올바른 방향으로 계산되지 않는다.

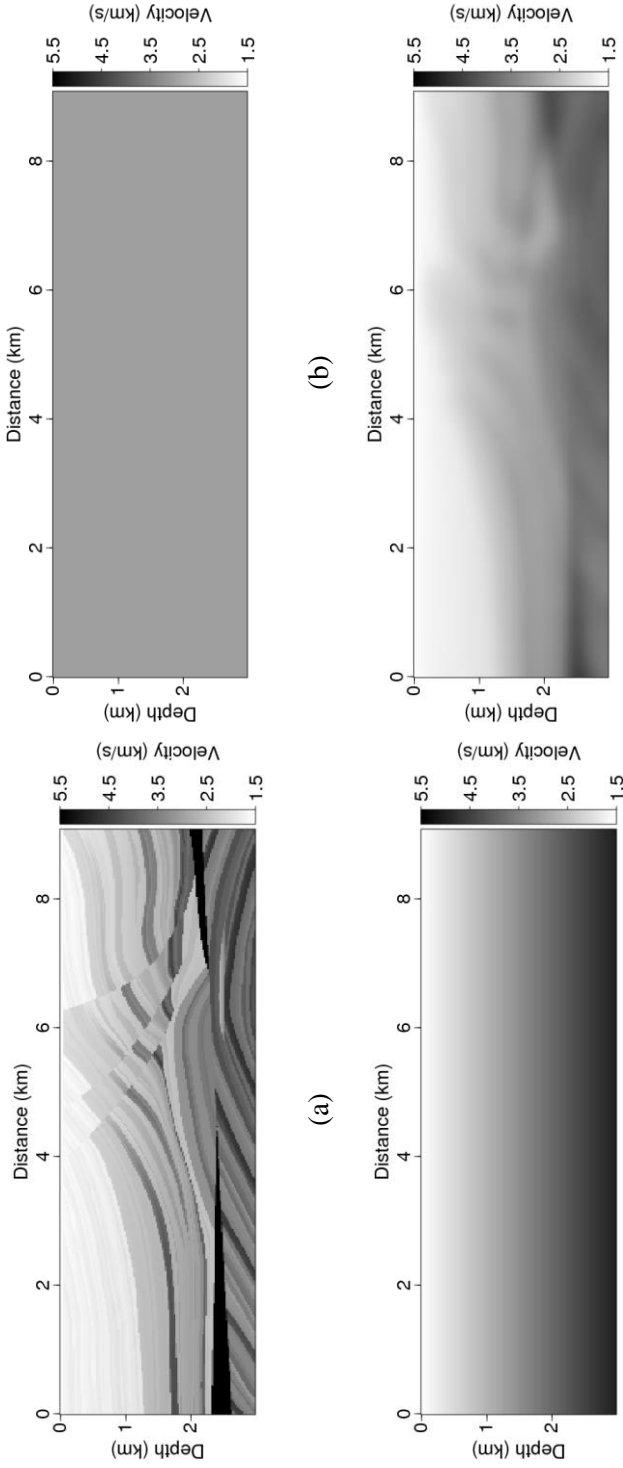
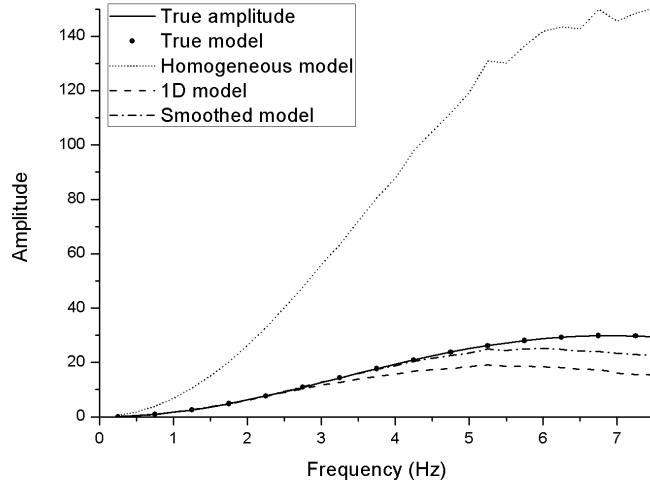
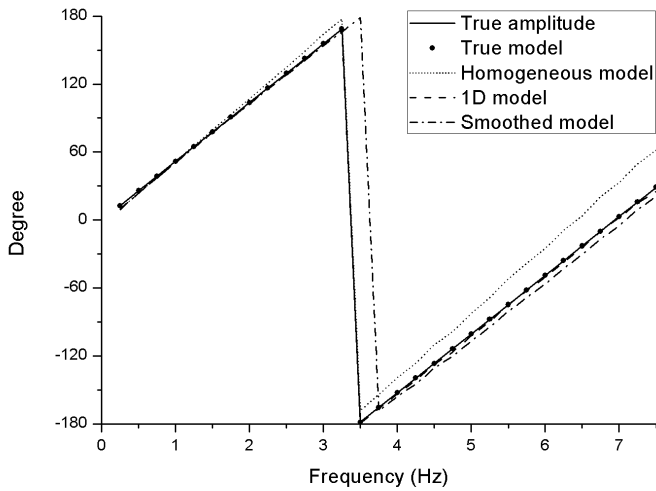


그림 2-2. (a) 실제 Marmousi 속도 모델, (b) 균질한(homogeneous) 모델, (c) 1 차원(1D model) 모델, (d) 평활화 된(smoothed) 모델.



(a)



(b)

그림 2-3. 실제 모델, 균질 모델, 1 차원 모델, 평활화 된 모델 일 때 송신 파형 역산으로 계산한 (a) 진폭 (b) 위상.

두 번째 문제점은 완전 파형 역산을 진행 할 때 RMS(Root mean square) 오차가 줄어드는 것이 배경 모델이 실제에 근접해서인지 단순히 오차가 줄어들도록 송신 파형이 계산 되었기 때문인지 알 수 없다는 점이다. 따라서 송신 파형 역산을 이용하여 완전 파형 역산을 수행하면 과 역산(overestimation)과 인공 잡음(artifact)이 빈번히 발생한다. 송신 파형 역산을 이용한 완전 파형 역산을 수행하기 위해서 평활화 된 모델 (그림 2-2(d))을 초기 속도 모델로 사용하고 4.0 Hz 부터 7.5 Hz 까지 0.25 Hz 간격으로 주파수를 사용하여 Marmousi 인공 합성 자료에 대해 완전 파형 역산을 수행하였다. 완전 파형 역산에 사용한 인공 합성 자료는 시간 영역 음향 파동 전파 모델링 기법을 이용하여 획득하였으며 그림 2-4는 역산에 사용한 자료의 100번째 공통 송신원 모습이다. 그림 2-5는 송신 파형 역산을 적용하여 얻은 완전 파형 역산 결과들이고 그림 2-6은 송신 파형 역산을 적용하여 완전 파형 역산을 수행 할 때의 RMS 오차이다. 완전 파형 역산 결과를 보면 반복 계산이 진행 됨에 따라 (10번째, 20번째, 30번째, 37번째 반복 계산) 하부 구조는 올바른 방향으로 역산이 되지만 상부에는 강한 인공 잡음이 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 인공 잡음이 발생 함에도 불구하고, 그림 2-6의 RMS 오차는 지속적으로 감소하다가 38번째 반복 계산에서 증가하기 시작한다. 완전 파형 역산은 수치 파동장과 관측 파동장 간의 오차를 이용하여 진행 상황을 확인 하고 완전 파형 역산의 반복 계산을 지속 할지 중지 할지를 결정한다. 따라서 그림 2-5에서 관찰 할 수 있는 인공 잡음은 송신 파형 역산 알고리즘을 이용한 완전 파형 역산에서 빈번히 발생하며, 큰 단점으로 작용한다. 본 예제와 같이 실제 모델에 근접한 속도 모델을 사용 한 경우에도 실제 송신 파형과 다른 송신 파형이 역산 되어 완전 파형 역산이

올바른 방향으로 진행되지 않으며 만약 실제 모델에서 더 멀리 떨어진 속도 모델을 사용 할 경우 송신 과형 역산의 문제점이 더 커지게 된다. 따라서 송신 과형 독립 완전 과형 역산과 같이 송신 과형에 영향을 받지 않는 완전 과형 역산 알고리즘을 사용하는 것이 불완전한 송신 과형으로 인해 나타나는 문제점을 해결 할 수 있는 방법이 될 것이다.

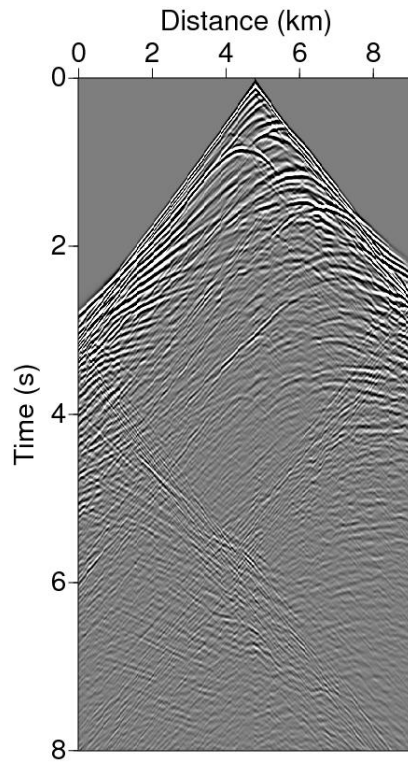


그림 2-4. 완전 파형 역산에 사용한 인공 합성 자료 중 100번째 공통 송신원 모습.



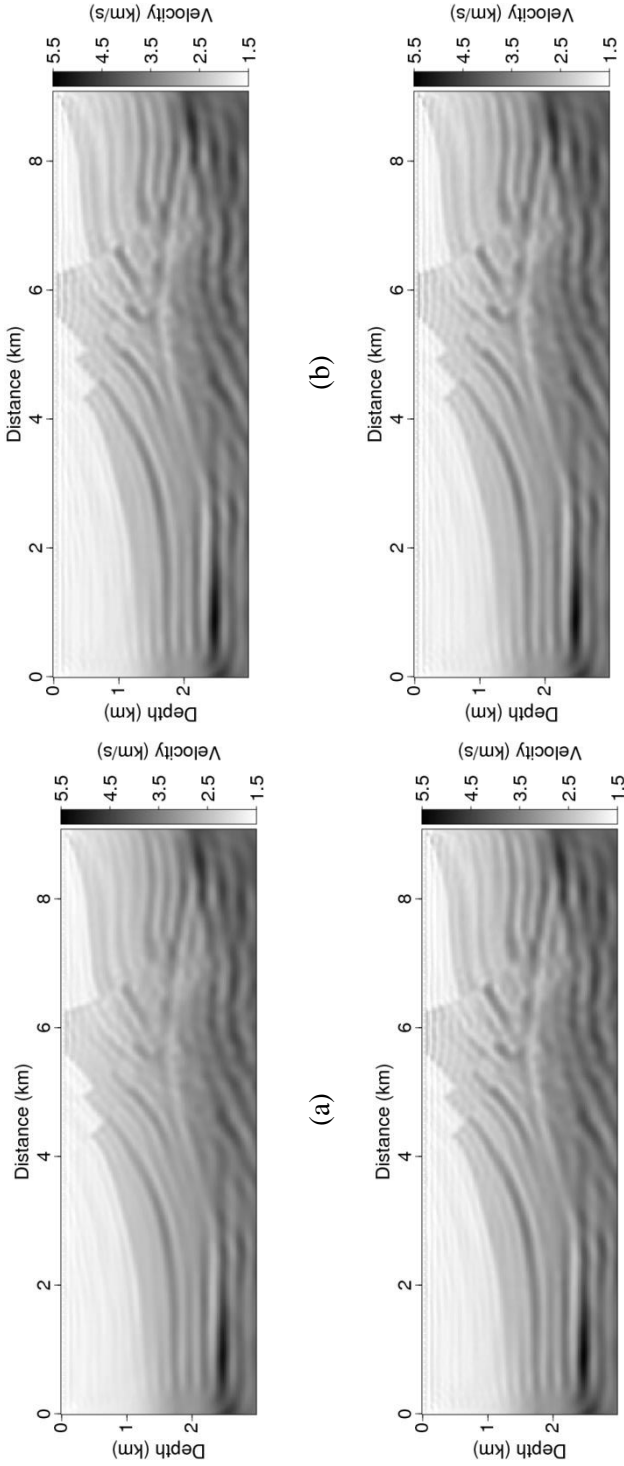


그림 2-5. 송신 파형 역산을 적용한 완전 파형 역산의 (a) 10번째 반복 계산, (b) 20번째 반복 계산, (c) 30번째 반복 계산, (d) 37번째 반복 계산 결과.

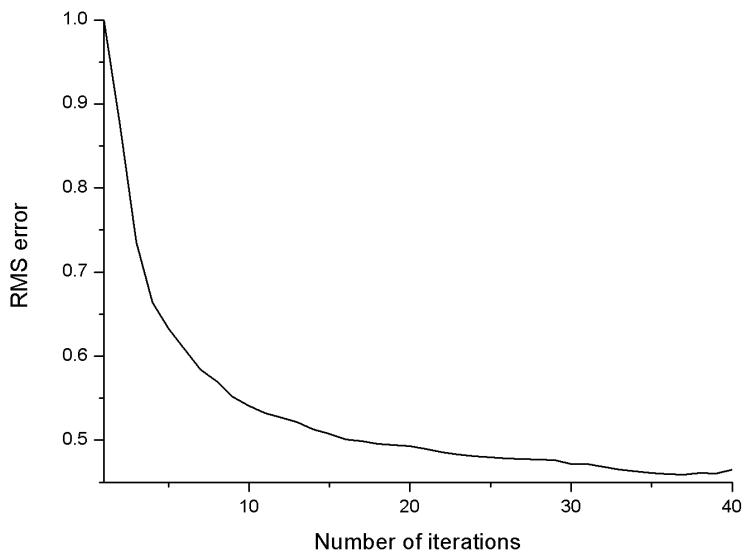


그림 2-6. 송신 파형 역산을 적용한 완전 파형 역산의 RMS 오차.

## 제 3 장 송신 파형 독립 완전 파형 역산

### 3.1 디콘볼루션 방법

#### 3.1.1 디콘볼루션 방법을 이용한 파동장

주파수 영역 파동장은 그린 함수와 송신 파형의 곱으로 표현될 수 있으므로  $j$  번째 수신기의 주파수 영역 수치 파동장 ( $\tilde{u}_j$ )과 관측 파동장 ( $\tilde{d}_j$ )는 각각 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\tilde{u}_j = \tilde{g}_j^u \tilde{s}^u, \quad (3.1.1)$$

$$\tilde{d}_j = \tilde{g}_j^d \tilde{s}^d. \quad (3.1.2)$$

$\tilde{g}_j^u$ 와  $\tilde{g}_j^d$ 는 각각  $j$  번째 수신기의 주파수 영역 수치 파동장과 관측 파동장의 그린 함수이고  $\tilde{s}^u$ 와  $\tilde{s}^d$ 는 각각 수치 파동장과 관측 파동장의 송신 파형이다. 이 때 송신 파형  $\tilde{s}$ 는 매질-송신원 간의 결합 효과도 포함하고 있으며, 매질-수신기 간의 결합 효과는 매질-송신원 간의 결합 효과에 비해 영향이 매우 작으므로 같은 공통 송신원 모음 자료에서 모든 트레이스에 대해 송신 파형  $\tilde{s}$ 는 동일하다고 가정한다 (Lee and Kim 2003).

수치 파동장과 관측 파동장에서 송신 파형의 효과를 제거하기 위해서 참조 트레이스  $\tilde{u}_{ref}$ 와  $\tilde{d}_{ref}$ 를 선택하고 각각의 파동장에 나눌 경우  $j$  번째 수신기에서 송신 파형이 제거된 수치 파동장 ( $\tilde{p}_j^u$ )과 관측 파동장 ( $\tilde{p}_j^d$ )을 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\tilde{p}_j^u = \frac{\tilde{u}_j}{\tilde{u}_{ref}} = \frac{\tilde{g}_j^u \tilde{s}^u}{\tilde{g}_{ref}^u \tilde{s}^u} = \frac{\tilde{g}_j^u}{\tilde{g}_{ref}^u}, \quad (3.1.3)$$

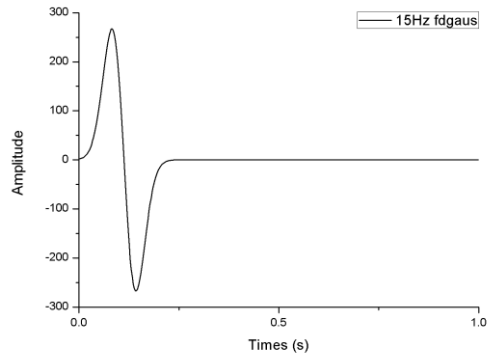
$$\tilde{p}_j^d = \frac{\tilde{d}_j}{\tilde{d}_{ref}} = \frac{\tilde{g}_j^d \tilde{s}^d}{\tilde{g}_{ref}^d \tilde{s}^d} = \frac{\tilde{g}_j^d}{\tilde{g}_{ref}^d}, \quad (3.1.4)$$

위와 같은 방법으로 얻은  $\tilde{p}_j^u$ 와  $\tilde{p}_j^d$ 는 송신 파형이 제거되었기 때문에 수치 파동장과 관측 파동장을 얻을 때 사용된 송신 파형이 서로 다르더라도 완전 파형 역산에 영향을 주지 않는다. 또한 이론적으로는 어떠한 참조 트레이스를 선택하더라도 전혀 문제가 되지 않는다. 하지만 실제로는 트레이스에 잡음, 복잡한 파동 현상 등이 포함되어 있어 어떠한 참조 트레이스를 선택 하느냐에 따라 파형 역산의 결과가 달라지게 되므로 적절한 참조 트레이스를 선택하는 것이 필수적이다 (Choi and Alkhalifah 2011).

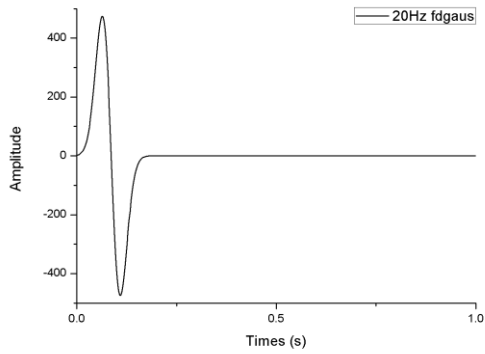
디콘볼루션을 이용한 송신 파형 효과 제거 방법이 실제로 송신 파형의 효과를 제거 할 수 있는지 확인하기 위해서 배경 속도가 같을 때 각각 다른 송신 파형을 사용한 경우  $\tilde{p}^u$ 와  $\tilde{p}^d$ 를 비교해보았다. 실제 탐사에서 얻은 자료에서는 송신 파형의 정확한 형태 및 최대 주파수를 알기 어렵기 때문에 본 실험에서도 관측 파동장과 수치 파동장의 송신 파형 형태뿐만 아니라 최대 주파수도 서로 다르

게 하여 비교를 진행하였다. 그림 3-1은 파동 전파 모델링에 사용한 송신 파형의 시간 영역 기록이다. 파동 전파 모델링 시 관측 파동장은 15 Hz를 최대 주파수로 가지는 fdgaus(first derivative of a Gaussian function) wavelet을 (그림 3-1(a)) 송신 파형으로 사용하였고 수치 파동장은 20 Hz를 최대 주파수로 가지는 fdgaus wavelet (그림 3-1(b))과 ricker (second derivative of a Gaussian function) wavelet (그림 3-1(c)) 두 가지 송신 파형을 사용하였다. 그림 3-1을 통해 각 송신 파형의 형태 및 크기가 다른 것을 확인 할 수 있다. 주파수 영역 파동장은 시간 영역 모델링을 이용한 주파수 영역 알고리즘에 기반해 시간 영역에서 계산된 파동장을 주파수 영역으로 변환하는 방법을 통해 계산하였다. 참조 트레이스는 송신원에서 가장 가까운 1개의 트레이스를 사용하였다.

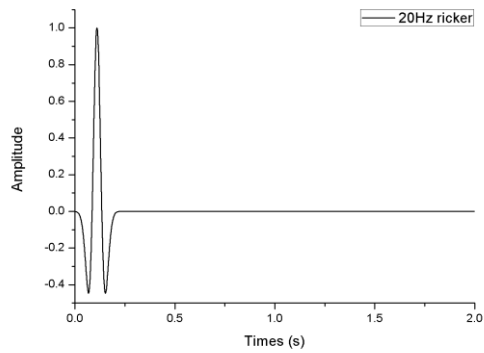
서로 다른 송신 파형을 사용하여 모델링을 수행하여 얻은 관측 파동장과 수치 파동장을 두 가지 주파수 (5 Hz, 10 Hz)에 대해 비교하였고 그 결과를 그림 3-2와 그림 3-3에 도시하였다. 관측 파동장을 얻을 때 사용한 송신 파형과 수치 파동장을 얻을 때 사용한 송신 파형이 서로 다름에도 불구하고 모든 그래프에서 송신 파형이 제거된 관측 파동장과 수치 파동장이 완전히 일치하는 것을 확인 할 수 있다. 이 결과를 통해 디콘볼루션을 이용한 송신 파형 제거 방법을 이용하면 송신 파형에 영향을 받지 않는 파동장을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한 그림 3-2의 결과와 그림 3-3의 결과도 파동장의 크기 및 형태가 서로 일치하는데 이는 각각의 파동장이 모두 송신 파형이 제거된 그린 함수의 비율 형태이므로 송신 파형의 형태 및 최대 주파수에 영향을 받지 않고 오직 배경 속도에만 영향을 받기 때문이다.



(a)

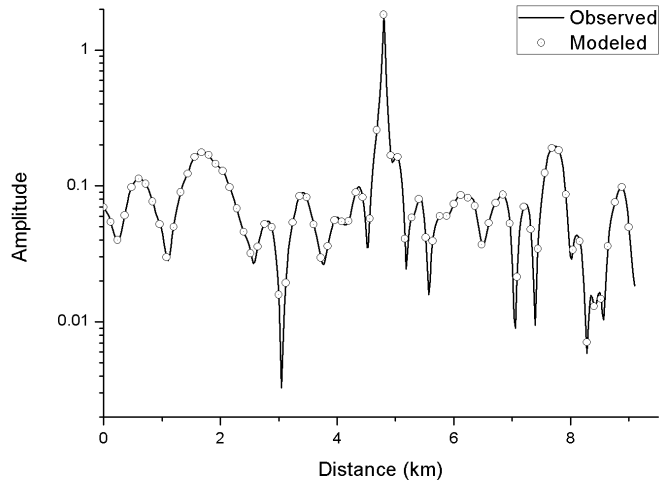


(b)

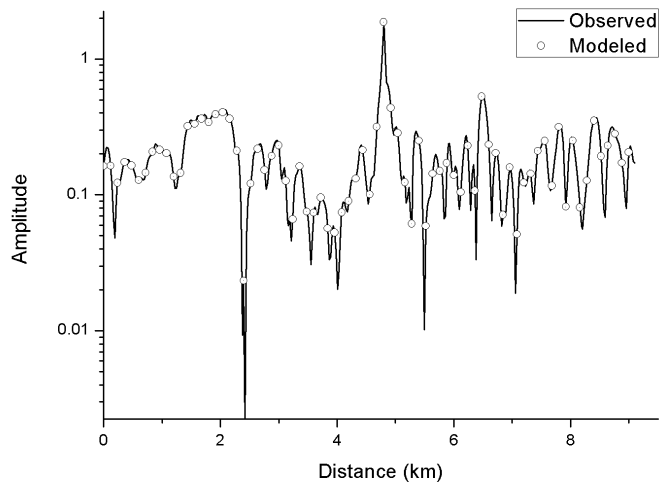


(c)

그림 3-1. 최대 주파수가 (a) 15 Hz인 fdgaus wavelet, (b) 20 Hz인 fdgaus wavelet, (c) 20 Hz인 ricker wavelet.

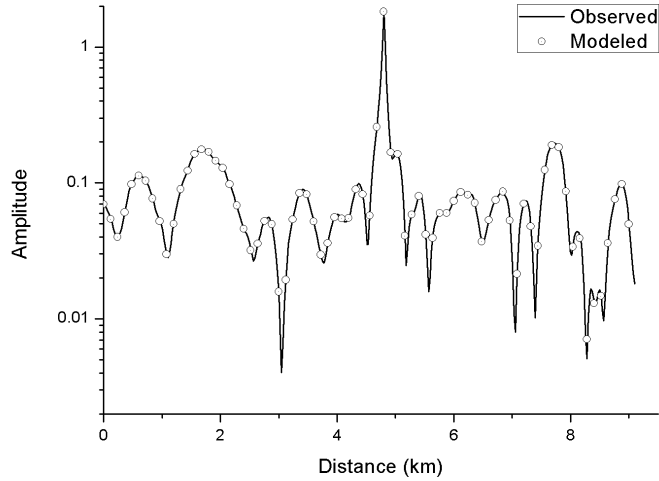


(a)

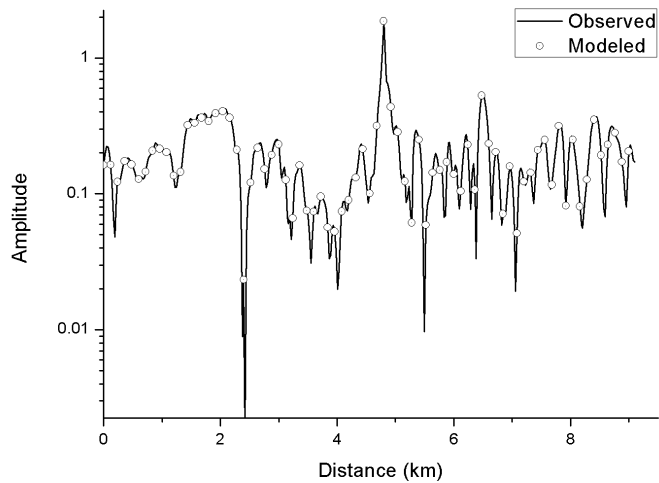


(b)

**그림 3-2.** 관측 파동장과 수치 파동장의 송신 파형이 각각 15 Hz fdgaus wavelet, 20 Hz fdgaus wavelet 일 때 디콘볼루션 방법으로 송신 파형 효과가 제거된 (a) 5 Hz, (b) 10 Hz의 주파수 영역 파동장.



(a)



(b)

그림 3-3. 관측 파동장과 수치 파동장의 송신 파형이 각각 15 Hz fdgaus wavelet, 20 Hz ricker wavelet 일 때 디콘볼루션 방법으로 송신 파형 효과가 제거된 (a) 5 Hz, (b) 10 Hz의 주파수 영역 파동장.



### 3.1.2 디콘볼루션 방법을 이용한 완전 파형 역산

기존의 완전 파형 역산의 목적 함수는 식 (2.1.1)과 같이 수치 파동장과 관측 파동장간의 잔차를 이용하여 구성된다. 기존의 완전 파형 역산은 잔차를 구하는 파동장이 송신 파형과 그린 함수의 콘볼루션 결과이므로 완전 파형 역산이 지하 매질의 속도 정보뿐만 아니라 송신 파형에도 영향을 받게 된다. 하지만 디콘볼루션을 이용하여 송신 파형의 효과가 제거된 파동장을 이용하여 잔차를 계산하면 목적 함수가 송신 파형에 영향을 받지 않고 오직 지하 매질의 속도 정보에만 영향을 받기 때문에 완전 파형 역산을 보다 안정적으로 수행할 수 있다. 식 (3.1.5)는 단일 주파수와 단일 송신원에 대해 디콘볼루션 방법을 적용한 완전 파형 역산의 목적 함수이다.

$$\begin{aligned}
 E(\mathbf{m}) &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{nr} (\tilde{p}_j^u - \tilde{p}_j^d)(\tilde{p}_j^u - \tilde{p}_j^d)^* \\
 &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{nr} \left( \frac{\tilde{u}_j}{\tilde{u}_{ref}} - \frac{\tilde{d}_j}{\tilde{d}_{ref}} \right) \left( \frac{\tilde{u}_j}{\tilde{u}_{ref}} - \frac{\tilde{d}_j}{\tilde{d}_{ref}} \right)^*
 \end{aligned} \tag{3.1.5}$$

이 때  $k$  번째 모델 변수  $\mathbf{m}_k$  에 대한 목적함수의 그래디언트는 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial E(\mathbf{m})}{\partial \mathbf{m}_k} &= Re \left[ \sum_{j=1}^{nr} \left( \frac{1}{\tilde{u}_{ref}} \frac{\partial u_j}{\partial \mathbf{m}_k} \left( \frac{\tilde{u}_j}{\tilde{u}_{ref}} - \frac{\tilde{d}_j}{\tilde{d}_{ref}} \right)^* \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{u_j}{(\tilde{u}_{ref})^2} \frac{\partial u_{ref}}{\partial \mathbf{m}_k} \left( \frac{\tilde{u}_j}{\tilde{u}_{ref}} - \frac{\tilde{d}_j}{\tilde{d}_{ref}} \right)^* \right) \right].
 \end{aligned} \tag{3.1.6}$$

$$\tilde{r}_j^* = \left[ \left( \frac{\tilde{u}_j}{\tilde{u}_{ref}} - \frac{\tilde{d}_j}{\tilde{d}_{ref}} \right)^* \right] \quad (3.1.7)$$

를 이용하여 식 (3.1.6)을 다시 쓰면

$$\begin{aligned} \frac{\partial E(\mathbf{m})}{\partial m_k} &= Re \left[ \sum_{j=1}^{nr} \left( \frac{\partial u_j}{\partial m_k} \frac{1}{\tilde{u}_{ref}} \tilde{r}_j^* - \frac{\partial u_{ref}}{\partial m_k} \frac{u_j}{(\tilde{u}_{ref})^2} \tilde{r}_j^* \right) \right] \\ &= Re \left[ \sum_{j=1}^{nr} \frac{\partial u_j}{\partial m_k} \frac{1}{\tilde{u}_{ref}} \tilde{r}_j^* - \frac{\partial u_{ref}}{\partial m_k} \sum_{j=1}^{nr} \frac{u_j}{(\tilde{u}_{ref})^2} \tilde{r}_j^* \right]. \end{aligned} \quad (3.1.8)$$

이다.

식 (2.1.8)을 이용하면 그래디언트는 아래와 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial E(\mathbf{m})}{\partial m_k} = Re[\mathbf{v}_k^T (\mathbf{S}^{-1})^T (\tilde{\mathbf{r}}_1^* - \tilde{\mathbf{r}}_2^*)], \quad (3.1.9)$$

$$\tilde{\mathbf{r}}_1^* = \begin{bmatrix} \frac{1}{\tilde{u}_{ref}} \left( \frac{\tilde{u}_1}{\tilde{u}_{ref}} - \frac{\tilde{d}_1}{\tilde{d}_{ref}} \right)^* \\ \frac{1}{\tilde{u}_{ref}} \left( \frac{\tilde{u}_2}{\tilde{u}_{ref}} - \frac{\tilde{d}_2}{\tilde{d}_{ref}} \right)^* \\ \vdots \\ \frac{1}{\tilde{u}_{ref}} \left( \frac{\tilde{u}_{nr}}{\tilde{u}_{ref}} - \frac{\tilde{d}_{nr}}{\tilde{d}_{ref}} \right)^* \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3.1.10)$$

$$\tilde{\mathbf{r}}_2^* = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \sum_{j=1}^{nr} \frac{\tilde{u}_j}{\tilde{u}_{ref}^2} \left( \frac{\tilde{u}_j}{\tilde{u}_{ref}} - \frac{\tilde{d}_j}{\tilde{d}_{ref}} \right)^* \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}.$$

## 3.2 콘볼루션 방법

### 3.2.1 콘볼루션 방법을 이용한 파동장

앞선 3.1절에서는 디콘볼루션을 이용하여 송신 파형의 효과를 제거하는 방법과 디콘볼루션으로 송신 파형이 제거된 파동장을 이용하여 완전 파형 역산을 수행하는 방법에 대해 설명하였다. 하지만 디콘볼루션 방법은 파동장에서 송신 파형을 분리해낼 때 주파수 영역에서 참조 트레이스를 나누는 방식을 택하므로 참조 트레이스에 따라 완전 파형 역산의 잔차가 불안정해질 수 있다는 점과 시간 영역 완전 파형 역산에서 디콘볼루션을 적용하기 쉽지 않다는 점이 한계로 작용한다. 이러한 문제를 극복하기 위해서 Choi *et al.* (2005)은 주파수 영역에서 Choi and Alkhalifah (2011)는 시간 영역에서 콘볼루션 방법을 이용하여 송신 파형의 효과를 제거하는 방법을 제안하였다.

주파수 영역 파동장은 식 (3.1.1)과 식 (3.1.2)와 같이 그린 함수와 송신 파형의 곱으로 표현될 수 있다. 콘볼루션 방법에서는 수치 파동장과 관측 파동장에서 송신 파형의 효과를 제거하기 위해서 참조 트레이스  $\tilde{u}_{ref}$ 와  $\tilde{d}_{ref}$ 를 선택하고 각각의 파동장에서 서로 교차하여 곱하는 방식으로  $j$  번째 수신기에서 송신 파형의 효과가 제거된 수치 파동장 ( $\tilde{p}_j^u$ )과 관측 파동장 ( $\tilde{p}_j^d$ )을 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\tilde{p}_j^u = \tilde{u}_j \tilde{d}_{ref} = \tilde{g}_j^u \tilde{g}_{ref}^d \tilde{s}^u \tilde{s}^d, \quad (3.2.1)$$

$$\tilde{p}_j^d = \tilde{d}_j \tilde{u}_{ref} = \tilde{g}_j^d \tilde{g}_{ref}^u \tilde{s}^d \tilde{s}^u. \quad (3.2.2)$$

$\tilde{p}_j^u$ 와  $\tilde{p}_j^d$  모두 기존의 송신 파형  $\tilde{s}^u$ 와  $\tilde{s}^d$ 가 합성된 형태인  $\tilde{s}^u \tilde{s}^d$ 를 송신 파형으로 가지므로 두 파동장의 송신 파형이 서로 같아져 송신 파형의 효과가 제거되었다고 볼 수 있다. 따라서 수치 파동장과 관측 파동장을 얻을 때 사용된 송신 파형이 서로 다르더라도 결국 같은 송신 파형이 사용된 것으로 간주되어 완전 파형 역산을 올바른 방향으로 수행할 수 있다.

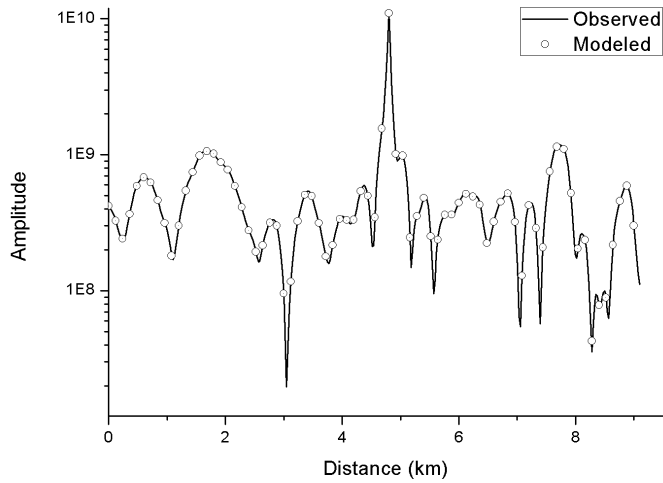
콘볼루션을 이용한 송신 파형 효과 제거 방법이 실제 송신 파형의 효과를 제거 할 수 있는지 확인하기 위해서 3.1.1절에서 디콘볼루션을 이용한 송신 파형 효과 제거를 검증했던 방법과 유사하게 배경 속도가 같을 때 각각 다른 송신 파형을 사용한 경우  $\tilde{p}^u$ 와  $\tilde{p}^d$ 를 비교해보았다. 송신 파형, 주파수 영역 파동장 계산 방법, 참조 트레이스 선택 방법들은 디콘볼루션 방법에 사용한 방법과 동일하다. 서로 다른 송신 파형을 사용하여 모델링을 수행하여 얻은 관측 파동장과 수치 파동장을 두 가지 주파수 (5 Hz, 10 Hz)에 대해 비교하였고 그 결과를 그림 3-4와 그림 3-5에 도시하였다. 관측 파동장과 수치 파동장을 얻을 때 사용한 송신 파형이 서로 다름에도 불구하고 모든 그래프에서 송신 파형의 효과가 제거된 관측 파동장과 수치 파동장이 완전히 일치하는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 콘볼루션을 이용하여 송신 파형의 효과를 제거 하면 관측 파동장과 수치 파동장이 송신 파형과는 상관 없이 동일한 파동장을 만들어냄을 알 수 있다.

디콘볼루션을 이용하여 송신 파형의 효과를 제거한 경우

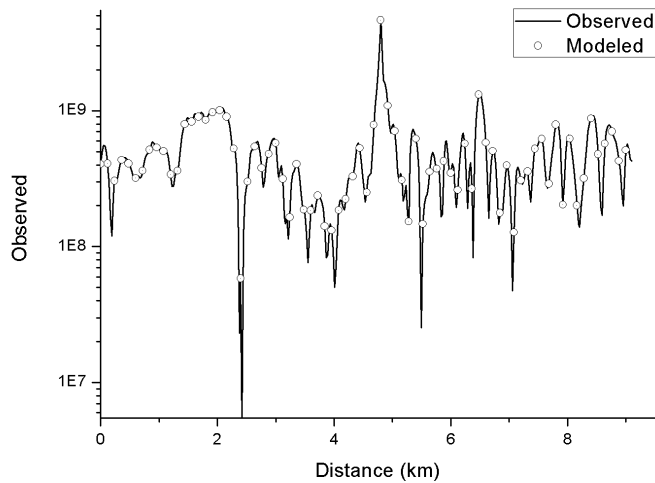
어떠한 송신 파형을 쓰더라도 같은 주파수에서는 서로 동일한 크기의 파동장을 만들어낸다. 그림 3-2(a)와 그림 3-3(a), 그리고 그림 3-2(b)와 그림 3-3(b)는 수치 파동장을 계산할 때 각각 서로 다른 송신 파형을 사용하였지만 송신 파형의 효과를 제거하고 난 후 동일한 크기의 파동장이 계산되었다. 또한 파동장의 주파수가 서로 다르더라도 파동장의 최대 크기는 서로 유사하다. 실제로 그림 3-2(a)와 그림 3-3(a)의 파동장의 최대 크기는 1.82, 그림 3-2(b)와 그림 3-3(b)의 파동장의 최대 크기는 1.87로 서로 거의 유사하다. 하지만 콘볼루션을 이용하여 송신 파형의 효과를 제거한 경우 송신 파형에 따라서 서로 다른 크기의 파동장이 계산된다. 그림 3-4(a)와 그림 3-5(a), 그리고 그림 3-4(b)와 그림 3-5(b)는 수치 파동장을 계산할 때 각각 서로 다른 송신 파형을 사용하였기 때문에 송신 파형 효과를 제거하고 난 후 형태는 동일하지만 크기가 서로 다른 파동장이 계산되었다. 또한 파동장의 주파수가 서로 다르면 파동장의 최대 크기가 서로 달라진다. 실제로 그림 3-4(a)와 그림 3-4(b)의 파동장의 최대 크기는 각각  $1.10 \times 10^{10}$ ,  $4.65 \times 10^9$ 로 주파수에 따라 서로 2배 이상 차이가 난다.

디콘볼루션을 이용하여 송신 파형의 효과를 제거할 경우 실제 송신 파형을 제거해서 그린 함수들의 비율로만 파동장을 구성하기 때문에 송신 파형에 전혀 영향을 받지 않는다. 따라서 어떠한 송신 파형을 쓰더라도 같은 주파수라면 같은 크기의 파동장이 계산되고 서로 다른 주파수라도 비슷한 크기의 파동장이 계산된다. 하지만 콘볼루션을 이용하여 송신 파형의 효과를 제거할 경우 수치 파동장과 관측 파동장을 계산 할 때 사용한 송신 파형이 서로 합성되어 만들어진 송신 파형이 사용된 것으로 간주할 수 있다.

따라서 송신 파형의 효과가 제거된 수치 파동장 ( $\hat{p}_j^u$ )과 관측 파동장 ( $\hat{p}_j^d$ )의 크기는 수치 모델링에 사용한 송신 파형과 실제 탐사에 사용된 송신 파형에 영향을 받는다. 또한 송신 파형의 진폭은 그림 2-3(a)에서 확인 할 수 있듯이 주파수에 따라 서로 다르다. 따라서 콘볼루션을 이용할 경우 송신 파형 효과가 제거된 파동장의 주파수당 진폭은 모델링에 사용한 송신 파형과 실제 탐사에 사용된 송신 파형의 주파수당 진폭에 의해 주파수 마다 서로 다른 크기를 가지게 된다.



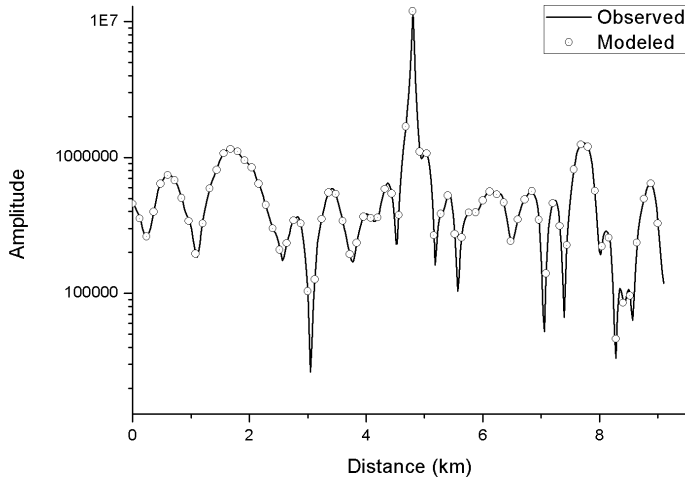
(a)



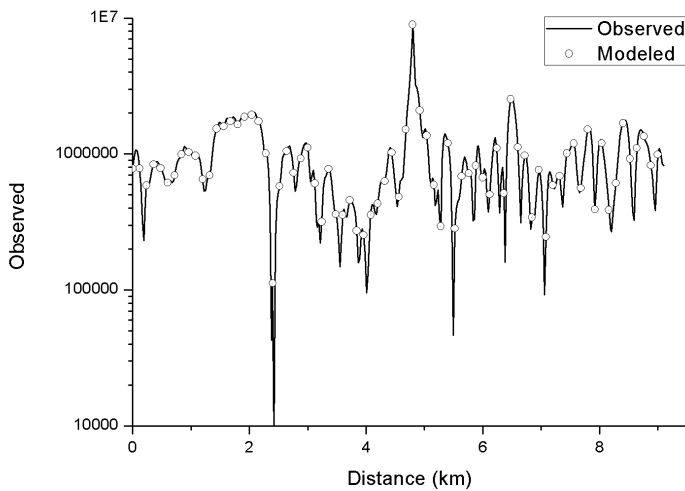
(b)

그림 3-4. 관측 파동장과 수치 파동장의 송신 파형이 각각 15 Hz fdgaus wavelet, 20 Hz fdgaus wavelet 일 때 콘볼루션 방법으로 송신 파형 효과가 제거된 (a) 5 Hz, (b) 10 Hz의 주파수 영역 파동장.





(a)



(b)

그림 3-5. 관측 파동장과 수치 파동장의 송신 파형이 각각 15 Hz fdgaus wavelet, 20 Hz ricker wavelet 일 때 콘볼루션 방법으로 송신 파형 효과가 제거된 (a) 5 Hz, (b) 10 Hz의 주파수 영역 파동장.

## 3.2.2 콘볼루션 방법을 이용한 완전 파형 역산

콘볼루션 방법을 통해 송신 파형의 효과가 제거된 파동장을 이용한 완전 파형 역산의 목적 함수는 식 (3.1.5)와 유사하게 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} E(\mathbf{m}) &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{nr} (\tilde{p}_j^u - \tilde{p}_j^d)(\tilde{p}_j^u - \tilde{p}_j^d)^* \\ &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{nr} (\tilde{u}_j \tilde{d}_{ref} - \tilde{d}_j \tilde{u}_{ref})(\tilde{u}_j \tilde{d}_{ref} - \tilde{d}_j \tilde{u}_{ref})^*. \end{aligned} \quad (3.2.3)$$

이 때  $k$  번째 모델 변수  $\mathbf{m}_k$  에 대한 목적함수의 그래디언트는 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial E(\mathbf{m})}{\partial \mathbf{m}_k} &= Re \left[ \sum_{j=1}^{nr} \left( \tilde{d}_{ref} \frac{\partial u_j}{\partial \mathbf{m}_k} (\tilde{u}_j \tilde{d}_{ref} - \tilde{d}_j \tilde{u}_{ref})^* \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \tilde{d}_j \frac{\partial u_{ref}}{\partial \mathbf{m}_k} (\tilde{u}_j \tilde{d}_{ref} - \tilde{d}_j \tilde{u}_{ref})^* \right) \right]. \end{aligned} \quad (3.2.4)$$

$$\tilde{r}_j^* = [(\tilde{u}_j \tilde{d}_{ref} - \tilde{d}_j \tilde{u}_{ref})^*] \quad (3.2.5)$$

를 이용해 식 (3.2.4)를 다시 쓰면

$$\frac{\partial E(\mathbf{m})}{\partial \mathbf{m}_k} = Re \left[ \sum_{j=1}^{nr} \left( \frac{\partial u_j}{\partial \mathbf{m}_k} \tilde{d}_{ref} \tilde{r}_j^* - \frac{\partial u_{ref}}{\partial \mathbf{m}_k} \tilde{d}_j \tilde{r}_j^* \right) \right] \quad (3.2.6)$$

$$= \operatorname{Re} \left[ \sum_{j=1}^{nr} \tilde{d}_{ref} \frac{\partial u_j}{\partial \mathbf{m}_k} \tilde{r}_j^* - \frac{\partial u_{ref}}{\partial \mathbf{m}_k} \sum_{j=1}^{nr} \tilde{d}_j \tilde{r}_j^* \right].$$

이다.

식 (2.1.8)을 이용하면 그래디언트는 아래와 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial E(\mathbf{m})}{\partial \mathbf{m}_k} = \operatorname{Re}[\mathbf{v}_k^T (\mathbf{S}^{-1})^T (\tilde{\mathbf{r}}_1^* - \tilde{\mathbf{r}}_2^*)], \quad (3.2.7)$$

$$\tilde{\mathbf{r}}_1^* = \begin{bmatrix} \tilde{d}_{ref}(\tilde{u}_1 \tilde{d}_{ref} - \tilde{d}_1 \tilde{u}_{ref})^* \\ \tilde{d}_{ref}(\tilde{u}_2 \tilde{d}_{ref} - \tilde{d}_2 \tilde{u}_{ref})^* \\ \vdots \\ \tilde{d}_{ref}(\tilde{u}_{nr} \tilde{d}_{ref} - \tilde{d}_{nr} \tilde{u}_{ref})^* \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3.2.8)$$

$$\tilde{\mathbf{r}}_2^* = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \sum_{j=1}^{nr} \tilde{d}_j(\tilde{u}_j \tilde{d}_{ref} - \tilde{d}_j \tilde{u}_{ref})^* \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}.$$

식 (3.1.8)과 식 (3.2.6)에서 오른쪽 수식의 두 번째 항은 참조 트레이스 위치에서의 편미분 파동장과 잔차의 영지연 콘볼루션이다.

탄성과 탐사의 수신기는 일반적으로 수백 개 이상이고 수 많은 송신원들을 이용한다. 또한 송신원 주변의 트레이스가 참조 트레이스에 포함 된다면  $\tilde{d}_{ref}$  나  $\tilde{u}_{ref}$  의 크기는 송신원에서 떨어진 위치에 있는  $\tilde{d}_j$  나  $\tilde{u}_j$  에 비해 매우 크다. 따라서 두 번째 항이 그래디언트 전체 영역에 미치는 영향은 극히 제한적이기 때문에 본 연구에서는 디콘볼루션 및 콘볼루션 방법을 이용하는 완전 파형 역산에서 Choi and Alkhalifah (2011) 과 Zhang *et al.* (2016)이 제안한 대로 그래디언트의 두 번째 항을 무시하고 첫 번째 항만 이용하여 완전 파형 역산을 진행하였다.

### 3.3 참조 트레이스 선택

송신 파형에 독립적인 완전 파형 역산을 위해 사용되는 디콘볼루션 방법과 콘볼루션 방법은 송신 파형의 효과를 제거하기 위해서 참조 트레이스를 사용한다. 이론적으로는 참조 트레이스를 선택하는 방법이나 위치는 크게 중요하지 않다(Choi and Alkhalifah, 2011). 하지만 실제 현장자료에는 잡음, 모드 변환파, 가이드파, 채널파와 같은 복잡한 파동 현상, 이방성 효과 등이 포함되어 있기 때문에 어떠한 참조 트레이스를 사용하는가에 따라서 완전 파형 역산이 달라질 수 있다. 따라서 적절한 참조 트레이스를 선택하는 것이 송신 파형 독립 완전 파형 역산에서 가장 중요한 부분이다.

참조 트레이스를 선택하는 방법은 크게 3가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 송신원에서 가장 가까운 하나의 트레이스를 참조 트레이스로 선택하는 방법 (Lee and Kim 2003), 두 번째는 모든 트레이스를 평균하여 사용하는 방법 (Zhou and Greenhalgh 2003), 세 번째는 송신원 주변의 몇몇 트레이스를 사용하는 방법 (Zhang et al. 2016)이다. 본 연구에서는 하나의 트레이스를 참조 트레이스로 선택하는 방법을 OTR(one trace for the reference trace), 모든 트레이스를 평균하여 사용하는 방법을 ATR (all traces for the reference trace), 송신원 주변의 몇몇 트레이스를 사용하는 방법을 STR(several traces for the reference trace) 이라고 명명한다.

탄성과 탐사 과정에서 잡음이 포함 된 경우 관측된 탄성과 파동장은 아래와 같다.

$$\tilde{d}_j = \tilde{g}_j^d \tilde{s}^d + n_j. \quad (3.3.1)$$

이 때  $n_j$ 은  $j$ 번째 트레이스에 기록된 잡음을 의미한다.

잡음이 포함된 관측 파동장을 이용해 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 수행하고자 하면  $j$ 번째 트레이스에 대한 잔차는 아래와 같다.

$$\tilde{r}_{dec,j} = \frac{\tilde{g}_j^u \tilde{s}^u}{\tilde{g}_{ref}^u \tilde{s}^u} - \frac{\tilde{g}_j^d \tilde{s}^d + n_j}{\tilde{g}_{ref}^d \tilde{s}^d + n_{ref}}, \quad (3.3.2)$$

$$\tilde{r}_{con,j} = \tilde{g}_j^u \tilde{s}^u (\tilde{g}_{ref}^d \tilde{s}^d + n_{ref}) - (\tilde{g}_j^d \tilde{s}^d + n_j) \tilde{g}_{ref}^u \tilde{s}^u. \quad (3.3.3)$$

$\tilde{r}_{dec,j}$  는 디콘볼루션,  $\tilde{r}_{con,j}$  는 콘볼루션을 이용했을 때의 잔차이다.

1개의 참조 트레이스를 사용한 경우(OTR) 참조 트레이스는 각각

$$\tilde{d}_{ref} = \tilde{g}_{ref}^d \tilde{s}^d + n_{ref}, \quad (3.3.4)$$

$$\tilde{u}_{ref} = \tilde{g}_{ref}^u \tilde{s}^u \quad (3.3.5)$$

이고 잔차는 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}\tilde{r}_{dec,j} &= \frac{\tilde{g}_j^u \tilde{s}^u}{\tilde{g}_{ref}^u \tilde{s}^u} - \frac{\tilde{g}_j^d \tilde{s}^d + n_j}{\tilde{g}_{ref}^d \tilde{s}^d + n_{ref}} \\ &= \frac{\tilde{g}_j^u}{\tilde{g}_{ref}^u} - \frac{\tilde{g}_j^d + \frac{n_j}{\tilde{s}^d}}{\tilde{g}_{ref}^d + \frac{n_{ref}}{\tilde{s}^d}}\end{aligned}\quad (3.3.6)$$

$$\begin{aligned}\tilde{r}_{con,j} &= \tilde{g}_j^u \tilde{s}^u (\tilde{g}_{ref}^d \tilde{s}^d + n_{ref}) - (\tilde{g}_j^d \tilde{s}^d + n_j) \tilde{g}_{ref}^u \tilde{s}^u \\ &= \tilde{g}_j^u \tilde{s}^u \tilde{g}_{ref}^d \tilde{s}^d - \tilde{g}_j^d \tilde{s}^d \tilde{g}_{ref}^u \tilde{s}^u + \tilde{g}_j^u \tilde{s}^u n_{ref} - \tilde{g}_{ref}^u \tilde{s}^u n_j.\end{aligned}\quad (3.3.7)$$

디콘볼루션과 콘볼루션을 이용했을 때  $j$  번째 트레이스에 대한 잔차는  $j$  번째 관측 파동장 트레이스에 포함된 잡음뿐만 아니라 참조 트레이스에 포함된 잡음( $n_{ref}$ )에도 함께 영향을 받게 된다. 참조 트레이스의 신호 대 잡음 비(Signal to noise ratio, SNR)가 높을수록 참조 트레이스에 포함된 잡음이 잔차 계산에 미치는 영향이 줄어든다. 일반적으로 송신원에서 가까운 트레이스 일수록 신호 대 잡음비가 높기 때문에 1개의 참조 트레이스를 사용하는 경우 송신원에서 가장 가까운 수신기에서 참조 트레이스를 선택하는 것이 가장 합리적인 방법이다 (Choi and Min 2012). 하지만 송신원에서 가장 가까운 수신기에서만 참조 트레이스를 선택하면 하나의 참조 트레이스가 전체 트레이스에 대한 송신 파형을 대표해야 하므로 만약 참조 트레이스가 몇몇 탐사 과정 상의 문제로 인해 전체 트레이스에 대한 송신 파형을 대표할 수 없다면 정확한 잔차가 계산되지 않는다는 위험성을 내포하고 있다. 또한 참조 트레이스에 포함된 잡음이 완전 파형 역산에 영향을 준다는 단점을 가지고 있다.

모든 트레이스에 대한 평균을 참조 트레이스로 사용한

경우(ATR) 참조 트레이스는 각각

$$\tilde{d}_{ref} = \frac{1}{nr} \sum_{j=1}^{nr} (\tilde{g}_j^d \tilde{s}^d + n_j), \quad (3.3.8)$$

$$\tilde{u}_{ref} = \frac{1}{nr} \sum_{j=1}^{nr} \tilde{g}_j^u \tilde{s}^u \quad (3.3.9)$$

이고 잔차는 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{r}_{dec,j} &= \frac{\tilde{g}_j^u \tilde{s}^u}{\frac{1}{nr} \sum_{j=1}^{nr} \tilde{g}_j^u \tilde{s}^u} - \frac{\tilde{g}_j^d \tilde{s}^d + n_j}{\frac{1}{nr} \sum_{j=1}^{nr} (\tilde{g}_j^d \tilde{s}^d + n_j)} \\ &= \frac{\tilde{g}_j^u}{\frac{1}{nr} \sum_{j=1}^{nr} \tilde{g}_j^u} - \frac{\tilde{g}_j^d + \frac{n_j}{\tilde{s}^d}}{\frac{1}{nr} \sum_{j=1}^{nr} (\tilde{g}_j^d + \frac{n_j}{\tilde{s}^d})} \end{aligned} \quad (3.3.10)$$

$$\begin{aligned} \tilde{r}_{con,j} &= \tilde{g}_j^u \tilde{s}^u \frac{1}{nr} \sum_{j=1}^{nr} (\tilde{g}_j^d \tilde{s}^d + n_j) \\ &\quad - (\tilde{g}_j^d \tilde{s}^d + n_j) \frac{1}{nr} \sum_{j=1}^{nr} \tilde{g}_j^u \tilde{s}^u \\ &= \tilde{g}_j^u \tilde{s}^u \frac{1}{nr} \sum_{j=1}^{nr} \tilde{g}_j^d \tilde{s}^d - \tilde{g}_j^d \tilde{s}^d \frac{1}{nr} \sum_{j=1}^{nr} \tilde{g}_j^u \tilde{s}^u \\ &\quad + \tilde{g}_j^u \tilde{s}^u \frac{1}{nr} \sum_{j=1}^{nr} n_j - n_j \frac{1}{nr} \sum_{j=1}^{nr} \tilde{g}_j^u \tilde{s}^u. \end{aligned} \quad (3.3.11)$$

이 때, 잡음이 무작위 잡음이라면 무작위 잡음은 많은



트레이스에 대해 합쳐지면서 크기가 줄어들게 되므로 각 잔차는 아래와 같이 근사될 수 있다 (Xu *et al.* 2006).

$$\tilde{r}_{dec,j} \approx \frac{\tilde{g}_j^u}{\frac{1}{nr} \sum_{j=1}^{nr} \tilde{g}_j^u} - \frac{\tilde{g}_j^d + \frac{n_j}{\tilde{s}^d}}{\frac{1}{nr} \sum_{j=1}^{nr} \tilde{g}_j^d}, \quad (3.3.12)$$

$$\begin{aligned} \tilde{r}_{con,j} \approx & \tilde{g}_j^u \tilde{s}^u \frac{1}{nr} \sum_{j=1}^{nr} \tilde{g}_j^d \tilde{s}^d - \tilde{g}_j^d \tilde{s}^d \frac{1}{nr} \sum_{j=1}^{nr} \tilde{g}_j^u \tilde{s}^u \\ & - n_j \frac{1}{nr} \sum_{j=1}^{nr} \tilde{g}_j^u \tilde{s}^u. \end{aligned} \quad (3.3.13)$$

ATR은 참조 트레이스에 포함된 무작위 잡음이 잔차 계산에 영향을 주지 않기 때문에 OTR에 비해 더 안정적으로 완전 파형 역산을 수행할 수 있다. 또한 특정 트레이스를 참조 트레이스로 사용하는 것이 아니기 때문에 선택된 참조 트레이스의 대표성으로 인한 위험성을 제거할 수 있다. 하지만 모든 트레이스에 대해 배경 잡음이 유사한 수준으로 존재할 때 수신기에 기록되는 신호의 크기는 파동이 전파함에 따라 구형발산(geometrical spreading), 고유 감쇠 등으로 인해 거리에 따라 감소하게 되므로 먼 오프셋(far-offset)에서의 신호 대 잡음 비는 가까운 오프셋(near-offset)에 비해 낮아진다. 그리고 실제 탐사를 통해 얻은 자료에는 무작위 잡음과 함께 일관성 잡음도 포함되어 있을 수 있을 뿐 아니라 신호의 위치도 트레이스 마다 변하기 때문에 트레이스의 합을 통해 잡음이 충분히 제거되지 않을 수 있다. 또한 가이드파와 같은 복잡한 파동 현상이나 이방성 효과는 먼 오프셋에서 상대적으로 더 크게 나타난다. 따라서 먼 오프셋의 트레이스를 참조 트레이스에

포함시키는 것이 적절하지 않을 수 있다.

송신원 주변의 몇몇 트레이스( $n_{ref}$ )를 선택하여 참조 트레이스를 구성 할 경우(STR) 참조 트레이스는

$$\tilde{d}_{ref} = \frac{1}{n_{ref}} \sum_{j=1}^{n_{ref}} (\tilde{g}_j^d \tilde{s}^d + n_j), \quad (3.3.14)$$

$$\tilde{u}_{ref} = \frac{1}{n_{ref}} \sum_{j=1}^{n_{ref}} \tilde{g}_j^u \tilde{s}^u \quad (3.3.15)$$

이고 잔차는 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{r}_{dec,j} &= \frac{\tilde{g}_j^u \tilde{s}^u}{\frac{1}{n_{ref}} \sum_{j=1}^{n_{ref}} \tilde{g}_j^u \tilde{s}^u} - \frac{\tilde{g}_j^d \tilde{s}^d + n_j}{\frac{1}{n_{ref}} \sum_{j=1}^{n_{ref}} (\tilde{g}_j^d \tilde{s}^d + n_j)} \\ &= \frac{\tilde{g}_j^u}{\frac{1}{n_{ref}} \sum_{j=1}^{n_{ref}} \tilde{g}_j^u} - \frac{\tilde{g}_j^d + \frac{n_j}{\tilde{s}^d}}{\frac{1}{n_{ref}} \sum_{j=1}^{n_{ref}} \left( \tilde{g}_j^d + \frac{n_j}{\tilde{s}^d} \right)}, \end{aligned} \quad (3.3.16)$$

$$\begin{aligned} \tilde{r}_{con,j} &= \tilde{g}_j^u \tilde{s}^u \frac{1}{n_{ref}} \sum_{j=1}^{n_{ref}} (\tilde{g}_j^d \tilde{s}^d + n_j) \\ &\quad - (\tilde{g}_j^d \tilde{s}^d + n_j) \frac{1}{n_{ref}} \sum_{j=1}^{n_{ref}} \tilde{g}_j^u \tilde{s}^u \end{aligned} \quad (3.3.17)$$

$$\begin{aligned}
&= \tilde{g}_j^u \tilde{s}^u \frac{1}{n_{ref}} \sum_{j=1}^{n_{ref}} \tilde{g}_j^d \tilde{s}^d - \tilde{g}_j^d \tilde{s}^d \frac{1}{n_{ref}} \sum_{j=1}^{n_{ref}} \tilde{g}_j^u \tilde{s}^u \\
&\quad + \tilde{g}_j^u \tilde{s}^u \frac{1}{n_{ref}} \sum_{j=1}^{n_{ref}} n_j - n_j \frac{1}{n_{ref}} \sum_{j=1}^{n_{ref}} \tilde{g}_j^u \tilde{s}^u.
\end{aligned}$$

일반적으로 가까운 오프셋의 트레이스들은 먼 오프셋의 트레이스에 비해 신호대 잡음비가 높고 복잡한 파동 현상이나 이방성 효과에 대한 영향이 더 작다. 따라서 가까운 오프셋의 몇몇 트레이스를 참조 트레이스로 선택 할 경우 오히려 모든 트레이스의 평균을 이용해 구성한 참조 트레이스에 비해서 잡음 및 기타 효과에 영향을 덜 받는 참조 트레이스를 구성 할 수 있을 것이다. 또한 여러 개의 트레이스를 참조 트레이스로 사용하기 때문에 OTR을 사용할 때 발생하는 대표성 문제도 해결 할 수 있을 것이다.

참조 트레이스를 구성하는 트레이스 개수가 잔차를 구성할 때 미치는 영향을 확인하기 위해서 본 연구에서는 트레이스 개수를 변경하면서 참조 트레이스를 구성한 후 콘볼루션 방법을 이용하여 송신 파형 효과가 제거된 관측 파동장과 수치 파동장을 비교해보았다. 이론적으로는 참조 트레이스를 어떻게 구성 하더라도 결과에는 영향이 없지만 실제 탄성과 탐사 자료에는 무작위 잡음 및 일관성 잡음과 같이 파동 전파 모델링을 이용해서는 구현 할 수 없는 신호들이 포함되어 있다. 따라서 본 실험에서는 신호 대 잡음비가 40인 가우스 무작위 잡음을 관측 파동장에 추가하여 실제 탄성과 탐사와 유사한 환경을 만들고자 하였다. 관측 파동장은 15 Hz의 최대 주파수를 가지는 `fdgaus wavelet`을 사용하였고 수치 파동장은 20 Hz의 최대 주파수를 가지는 `ricker wavelet`을

사용하였으며 배경 속도 모델은 Marmousi 속도 모델을 사용하였다. 본 연구에서는 주파수 영역 완전 파형 역산을 수행하였지만 참조 트레이스 구성 방법에 따른 효과를 좀 더 가시적으로 비교하기 위해서 시간 영역에서 콘볼루션을 진행하여 그림으로 도시하였다.

그림 3-6은 관측 파동장과 수치 파동장의 100번째 트레이스이다. 수치 파동장에는 잡음이 없이 신호만 기록되어 있고 관측 파동장에는 신호와 함께 비교적 큰 규모의 잡음들이 함께 기록되어 있다. 그림 3-7은 식 (3.2.8)  $\mathbf{r}_1$ 의 100번째 트레이스에 대한 잔차를 관측 파동장 부분 ( $r_{obs}$ ) 과 수치 파동장 부분 ( $r_{mod}$ ) 으로 나누어 각각 시간 영역에서 도시한 그림이다. 즉,

$$r_{obs} = \int_{-\infty}^{-\infty} \tilde{d}_{ref}(\tilde{d}_{100}\tilde{u}_{ref})e^{-i\omega t}d\omega, \quad (3.3.18)$$

$$r_{mod} = \int_{-\infty}^{-\infty} \tilde{d}_{ref}(\tilde{u}_{100}\tilde{d}_{ref})e^{-i\omega t}d\omega \quad (3.3.19)$$

이다.

OTR의 경우 (그림 3-7(a))와 11개의 트레이스를 사용한 STR의 경우 (그림 3-7(b))는 서로 비슷한 형태의 관측 파동장과 수치 파동장을 보여준다. 왜냐하면 두 방법 모두 송신원 주변의 1개 또는 11개의 트레이스만을 이용 했기 때문에 초기 시간대에만 강한 신호를 가지는 서로 비슷한 형태의 참조 트레이스가 구성 되었기 때문이다. 하지만 ATR의 경우 (그림 3-7(c)) 앞선 두 경우와는 다른 형태의 관측 파동장과 수치 파동장이 계산되었다. 왜냐하면 모든

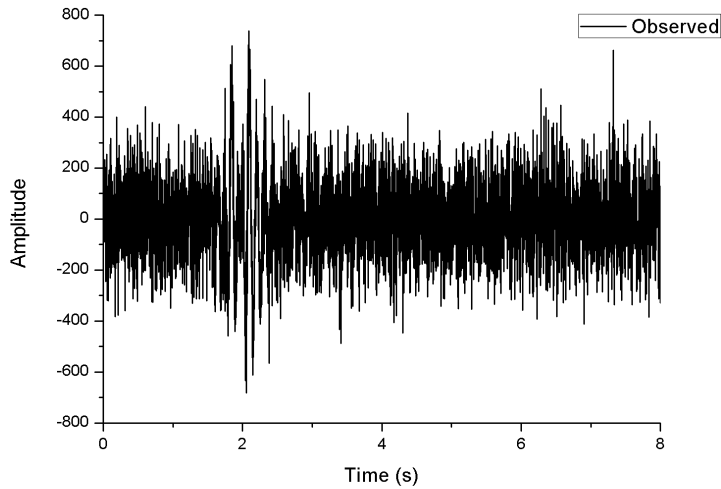
트레이스를 이용할 경우 먼 오프셋에는 후기 신호까지 비교적 강한 직접파와 반사파들이 기록되어 있어 초기 신호부터 후기 신호까지 강한 진폭을 가지는 참조 트레이스가 만들어지기 때문이다. 송신원 주변의 트레이스만 이용한 경우보다 모든 트레이스를 이용한 경우 이론적으로는 잡음에 더 강한 참조 트레이스가 구성된다. 하지만 실제로 모든 트레이스를 이용하여 참조 트레이스를 구성한 경우 참조 트레이스가 많은 트레이스의 정보를 모두 반영하기 때문에 송신원 주변의 트레이스들만 이용하여 참조 트레이스를 구성한 경우에 비해서 지하 매질의 속도 변화에 더 민감하게 반응하게 된다. 참조 트레이스가 지하 매질의 속도 변화에 더 민감하게 반응하게 되면 잔차 또한 지하 매질의 속도 변화에 민감하게 변하게 되고 완전 파형 역산의 비선형성이 증가하게 된다. 따라서 모든 트레이스를 이용하여 참조 트레이스를 구성하는 방법에 비해 송신원 주변의 하나 또는 몇 개의 트레이스를 이용하여 참조 트레이스를 구성 할 때 완전 파형 역산을 더 안정적으로 수행할 수 있다.

만약 송신원 주변의 트레이스에 배드 트레이스가 (bad trace)가 포함되어 있다면 OTR은 대표성 문제를 가지고 있다. 그림 3-8은 송신원에서 가장 가까운 트레이스가 배드 트레이스 일 때 계산된 잔차의 관측 파동장 부분( $r_{obs}$ )과 수치 파동장 부분( $r_{mod}$ )이다. 배드 트레이스를 구현하기 위해서 송신원에서 가장 가까운 한 개의 트레이스의 진폭에 0.5 를 곱해주었다. 그림 3-8(b)와 그림 3-8(c)의  $r_{mod}$ 는  $r_{obs}$ 와 거의 유사하다. 이는 STR이나 ATR 방법의 경우 배드 트레이스에 영향을 덜 받는다는 것을 보여주고 참조 트레이스가 전체 트레이스를 대표할 수 있다는 것을 의미한다. 하지만 OTR을

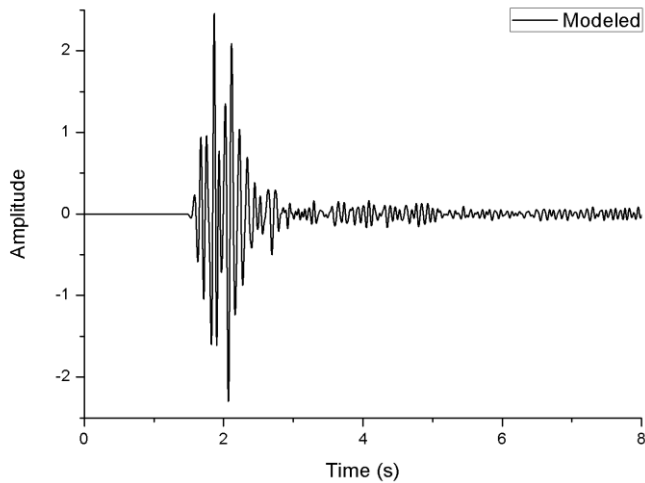
이용하여 얻은 그림 3-8(a)의  $r_{mod}$ 의 진폭은  $r_{obs}$ 와 상당한 차이가 있다. 이는 1개의 트레이스를 이용하여 참조 트레이스를 구성할 경우 만약 배드 트레이스가 선택 될 경우 대표성에 문제가 생겨 잔차가 올바르게 계산되지 않으며 완전 파형 역산이 잘못된 방향으로 진행 된다는 것을 의미한다.

관측 파동장의 탐사 환경과 참조 트레이스의 선택 방법에 따른  $r_{mod}$ 와  $r_{obs}$ 의 차이를 정량적으로 비교하기 위해서 RMS 오차를 표 3-1에 계산하였다. 참조 트레이스 선택 방법에 따라 잔차의 크기가 달라지는 문제를 해결하기 위해서 각 잔차의  $r_{mod}$ 와  $r_{obs}$  중 최대 값으로 정규화를 진행한 후 RMS 오차를 계산하였다. 가우스 무작위 잡음만 추가된 경우 OTR, STR, ATR 순으로 오차가 커졌고 배드 트레이스가 포함된 경우 STR, ATR, OTR 순으로 오차가 커졌으므로 앞서 설명한 결과와 일치한다.

위 두 실험을 통해 송신원 주변 몇 개의 트레이스를 이용하여 참조 트레이스를 구성하는 것이 1개의 트레이스나 전체 트레이스를 이용하여 참조 트레이스를 구성하는 것에 비해 완전 파형 역산에 더 적합한 방법이라고 결론 지을 수 있다.

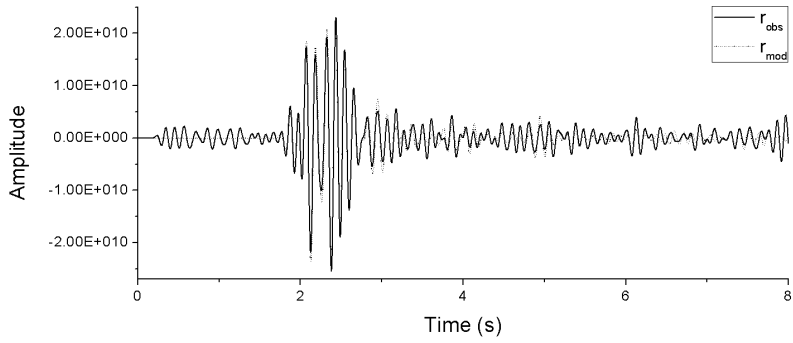


(a)

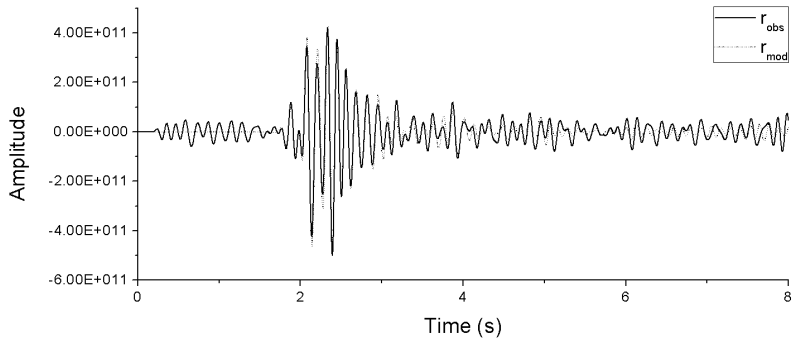


(b)

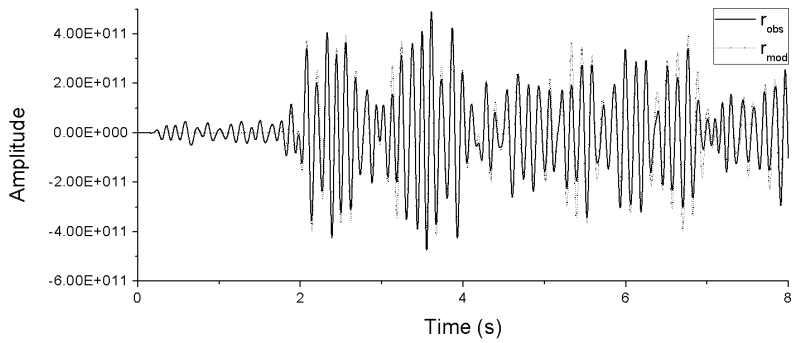
**그림 3-6.** (a) 15 Hz fdgaus가 송신 파형 일 때 가우스 무작위 잡음이 추가된 관측 파동장의 100번째 트레이스, (b) 20 Hz ricker가 송신 파형일 때 계산된 수치 파동장의 100번째 트레이스.



(a)



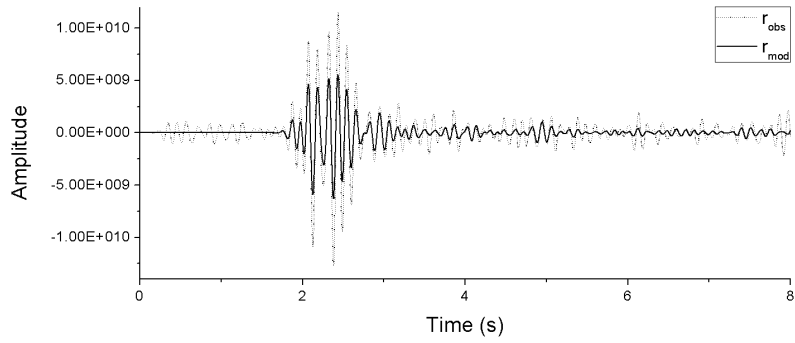
(b)



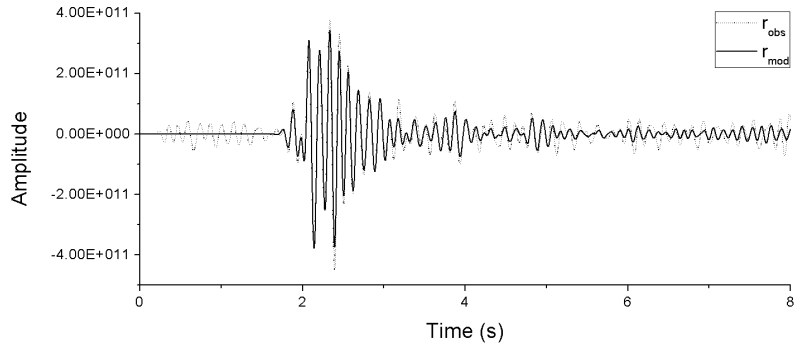
(c)

그림 3-7. (a) OTR, (b) STR, (c) ATR을 이용하여 계산한  $r_{obs}$  와  $r_{mod}$ .

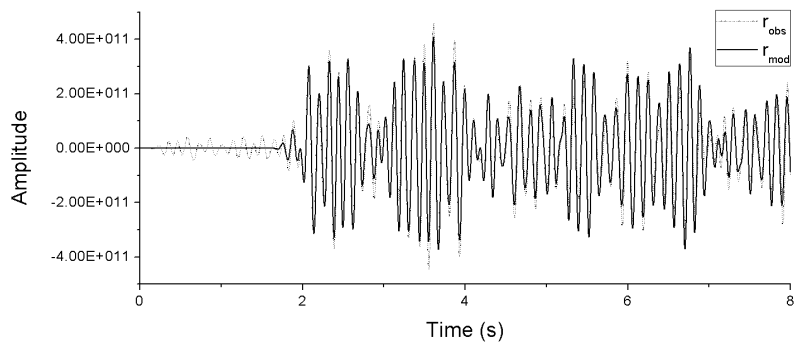




(a)



(b)



(c)

그림 3-8. 송신원에서 가장 가까운 트레이스가 배드 트레이스 일 때 (a) OTR, (b) STR, (c) ATR을 이용하여 계산한  $r_{obs}$  와  $r_{mod}$ .

| Figure | Reference trace | Noise  | Bad trace | Normalized RMS error |
|--------|-----------------|--------|-----------|----------------------|
| 3-7(a) | OTR             | SNR 40 | X         | $3.08 \times 10^0$   |
| 3-7(b) | STR             | SNR 40 | X         | $3.35 \times 10^0$   |
| 3-7(c) | ATR             | SNR 40 | X         | $5.55 \times 10^0$   |
| 3-8(a) | OTR             | SNR 40 | O         | $5.37 \times 10^0$   |
| 3-8(b) | STR             | SNR 40 | O         | $3.18 \times 10^0$   |
| 3-8(c) | ATR             | SNR 40 | O         | $5.19 \times 10^0$   |

표 3-1. 관측 파동장의 특성과 참조 트레이스 설정 방법에 따른 RMS 오차.

### 3.4 시간 창을 이용한 참조 트레이스

실제 탄성과 탐사를 통해 얻은 탄성과 자료에는 지하 매질의 정보를 담고 있는 의미 있는 신호뿐만 아니라 무작위 잡음, 모드 변환과나 가이드파와 같은 복잡한 파동 현상, 이방성 효과 등과 같은 원하지 않는 신호들도 포함되어 있다. 참조 트레이스에 위와 같은 효과들이 포함 되어 있지 않은 것이 가장 이상적이지만 어떠한 방법으로 참조 트레이스를 선택 하더라도 위와 같은 효과들은 참조 트레이스 안에 다소 포함될 수 밖에 없다. 하지만 참조 트레이스를 선택하고 구성하는 방법에 따라 참조 트레이스 안에 포함된 원하지 않는 신호들을 줄일 수 있다. 위와 같은 복잡한 파동 현상이나 이방성 효과 등은 파가 전파함에 따라 그 효과가 더 커지는 특성을 가지고 있기 때문에 탄성과 자료에서 후기 신호나 먼 오프셋에 주로 기록된다. 따라서 참조 트레이스를 선택 할 때 식 (3.3.14)와 식 (3.3.15)에서 제안한대로 가까운 오프셋의 트레이스만을 이용하는 것 뿐 아니라, Zhang *et al.* (2016)이 제안한 대로 시간 창을 적용하여 트레이스의 초기 시간만 사용하여 참조 트레이스를 구성하는 것이 가장 합리적인 참조 트레이스 구성 방법일 것이다.

하지만 기존의 주파수 영역 모델링에서는 특정 시간대에 윈도우를 적용하여 모델링을 수행하는 것이 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 2.2절에 설명한대로 시간 영역 모델링을 이용한 주파수 영역 완전 파형 역산 알고리즘을 선택하였다. 시간 영역 모델링을 이용한 주파수 영역 완전 파형 역산 알고리즘은 파동 전파 모델링을 시간 영역에서 수행하기 때문에 시간 영역에서 시간 창을 적용한 후 주파수 영역으로 푸리에 변환을 할 경우 시간 창이 적용된 주파수 영

역 파동장을 얻을 수 있다.

참조 트레이스에 시간 창을 적용하는 것이 시간 창을 적용하지 않는 방법에 비해 후기 신호에 등장하는 일관성 잡음에 덜 영향을 받음을 보이기 위해서 관측 파동장에 일관성 잡음을 추가한 후 식 (3.2.8)의 잔차  $\mathbf{r}_1$ 의 100번째 트레이스에 대한 관측 파동장 부분( $\mathbf{r}_{\text{obs}}$ )과 수치 파동장 부분( $\mathbf{r}_{\text{mod}}$ )을 계산하였다. 배경 속도 모델은 둘 다 실제 Marmousi 속도 모델을 사용하였다. 그림 3-9는 일관성 잡음이 추가된 관측 파동장과 100번째 트레이스에 대한 관측 파동장과 수치 파동장이다. 관측 파동장 100번째 트레이스의 3.8 초와 6.8 초 주변에서 일관성 잡음이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

그림 3-10은 0.3 초의 시간 창이 적용된 경우와 적용되지 않은 경우 관측 파동장의 참조 트레이스와 수치 파동장의 참조 트레이스이다. 참조 트레이스는 11개 트레이스를 이용한 STR 방법을 사용하여 구성하였다. 시간 창을 적용하지 않은 관측 파동장의 참조 트레이스에서 일관성 잡음이 3.8 초와 6.8 초 주변에서 나타난다. 100번째 트레이스보다 참조 트레이스를 구성하는 트레이스들이 송신원에 더 가깝기 때문에 직접파의 진폭이 더 크고 일관성 잡음의 진폭이 직접파 부분보다 상대적으로 작게 나타난다. 시간 창을 적용한 경우 직접파 부분만 참조 트레이스에서 보이고 일관성 잡음은 보이지 않는다. 수치 파동장에서도 시간 창을 적용하지 않은 경우 후기 시간대의 작고 복잡한 신호들이 참조 트레이스에서 보이지만 시간 창을 적용한 경우 참조 트레이스에는 직접파 부분만 보인다.

그림 3-11은 시간 창을 적용하지 않은 경우 (그림 3-11(a))와 적

용 한 경우 (그림 3-11(b)) 각각 계산 된  $r_{obs}$  와  $r_{mod}$  이다. 실제 배경 속도 모델이 같기 때문에 일관성 잡음이 없다면 두 파동장은 서로 같아야 한다. 하지만 일관성 잡음이 관측 파동장에만 존재하기 때문에 두 파동장은 서로 달라진다. 3.8 초 주변, 6.8 초 주변에서 두 파동장이 서로 다른 것은 일관성 잡음이 관측 파동장에만 포함되었기 때문이다. 그림 3-11(a)의 4.2 초에서 6.8 초까지 점선으로 표시된 사각형안의 차이는 관측 파동장의 참조 트레이스가 일관성 잡음을 포함 했기 때문에 나타나는 차이이다. 이 차이로 인해 완전 파형 역산에서 잔차가 제대로 계산되지 않는다. 그러나 그림 3-11(b)는 관측 파동장의 참조 트레이스가 일관성 잡음을 포함하지 않았기 때문에 점선으로 표시된 부분에서  $r_{obs}$  와  $r_{mod}$  가 완전히 일치하고, 그 결과 더 안정적으로 완전 파형 역산이 진행된다.

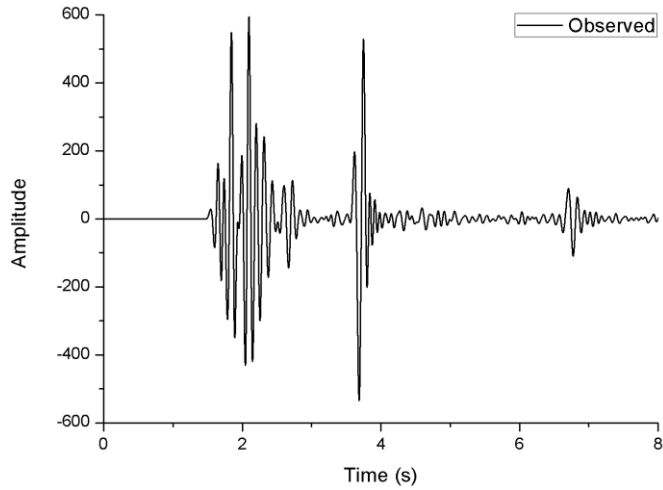
참조 트레이스에 시간 창을 적용하는 것이 적용하지 않는 것에 비해 일관성 잡음에 덜 영향을 받는다는 것을 위 실험을 통해 보였다. 그렇다면 시간 창의 길이를 어떻게 설정 할 것인가도 중요한 문제이다. 시간 창이 다를 때 어떻게 잔차의 각 성분 ( $r_{obs}$ ,  $r_{mod}$ ) 이 어떻게 변하는지 확인하기 위해서 시간 창의 길이를 2 초, 5 초로 변경하면서 실험을 진행하였다. 그림 3-12는 시간 창의 길이가 2 초, 5 초 일 때 관측 파동장의 참조 트레이스 (그림 3-12(a))와 수치 파동장의 참조 트레이스 (그림 3-12(b))이다. 참조 트레이스는 앞선 실험과 마찬가지로 11개 트레이스를 이용한 STR 방법을 사용하여 구성하였다. 2 초의 시간 창을 적용한 경우 관측 및 수치 파동장의 참조 트레이스에 반사파 이벤트가 일부 포함되었고 5 초의 시간 창을 적용한 경우 수치 파동장의 참조 트레이스에는 더 많은 반사파 이벤트가, 관측 파동장의 참조 트레이스에는 반사파 이벤트뿐 아니

라 일관성 잡음이 일부 포함 되었다.

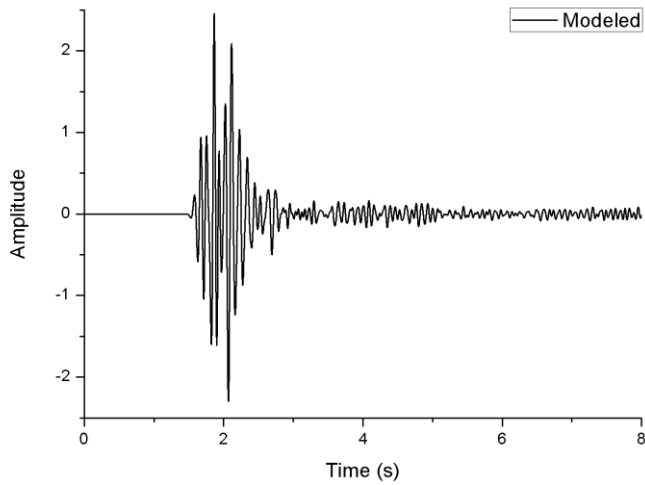
그림 3-13은 시간 창 의 길이가 2 초 (그림 3-13(a)), 5 초 (그림 3-13(b)) 일 때 각각 계산 된  $r_{obs}$  와  $r_{mod}$  이다. 시간 창 의 길이가 2 초일 때의  $r_{obs}$  와  $r_{mod}$  가 시간 창이 5 초일 때보다 서로 더 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 일관성 잡음이 5 초의 시간 창 일 때 일부 포함되었기 때문이다. 또한 시간 창이 2 초일 때의 차이가 시간 창이 0.3 초일 때에 비해 더 크다. 이는 시간 창이 2 초일 때 참조 트레이스에 포함 된 반사파 이벤트들이  $r_{obs}$  와  $r_{mod}$  계산에 불안정성을 높였기 때문이다. 따라서 참조 트레이스에 시간 창은 반사파 이벤트와 같은 복잡한 이벤트들을 제외하고 직접파 이벤트들만 포함 되도록 설정하는 것이 가장 이상적임을 알 수 있다. 직접파 이벤트만 포함되도록 참조 트레이스를 설정 할 경우 참조 트레이스가 완전 파형 역산의 반복 계산에 따라 거의 변하지 않아 완전 파형 역산의 안정성을 높일 수 있다는 장점도 있다.

참조 트레이스의 시간 창에 따른  $r_{mod}$  와  $r_{obs}$  의 차이를 정량적으로 비교하기 위해서 RMS 오차를 표 3-2에 계산하였다. 표 3-1과 동일하게 정규화를 적용하였고 그림 3-11, 그림 3-13의 점선 부분(4.5~6.4 초)에 대해 RMS 오차를 비교하였다. 시간 창이 길어질수록 RMS오차가 크며 이는 앞선 설명과 일치하는 결과이다.

3.3절과 3.4절의 실험을 종합해보면 송신원 주변의 일부 트레이스를 이용하여 참조 트레이스를 설정하고 직접파 이벤트들만 포함 되도록 시간 창을 적용하는 것이 가장 이상적인 참조 트레이스 구성 방법이라고 결론 내릴 수 있다.

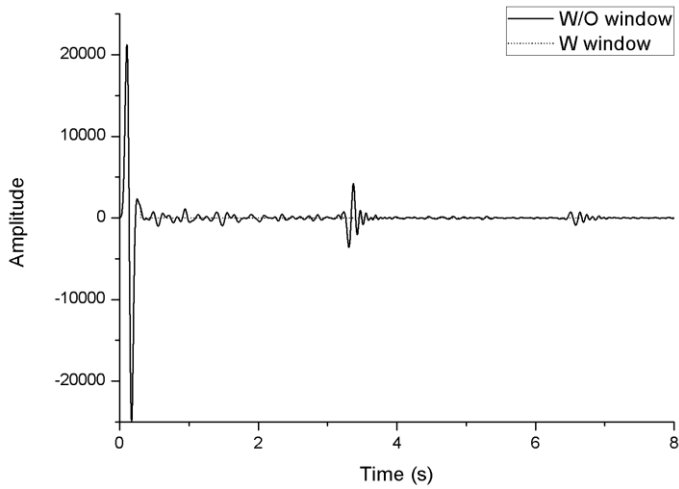


(a)

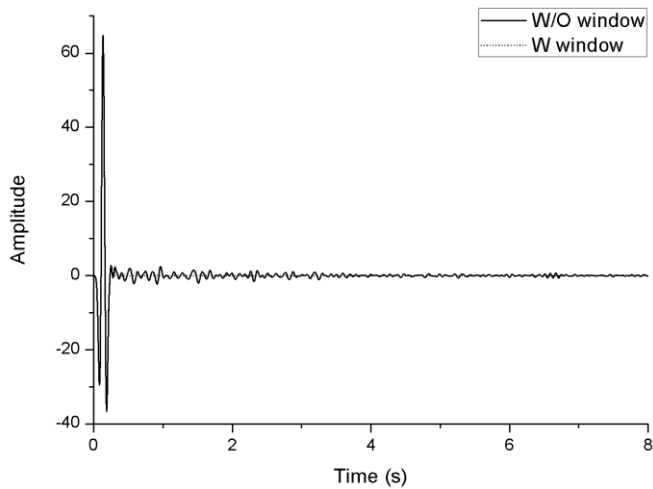


(b)

**그림 3-9.** (a) 15 Hz fdgaus가 송신 파형일 때 일관성 잡음이 추가된 관측 파동장의 100번째 트레이스, (b) 20 Hz ricker가 송신 파형일 때 계산된 수치 파동장의 100번째 트레이스.



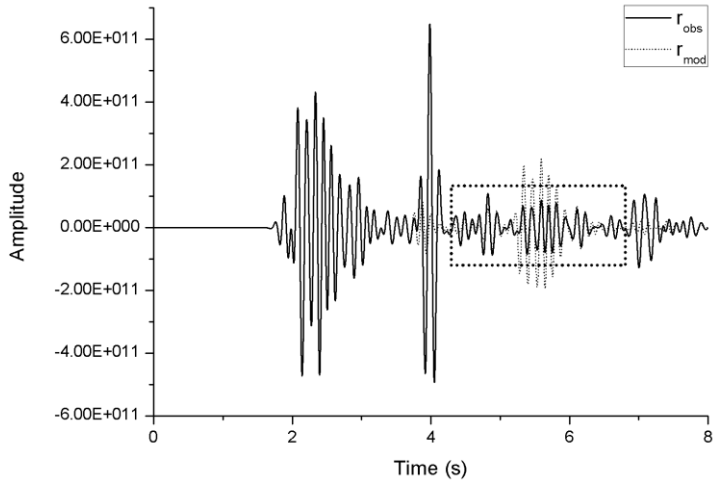
(a)



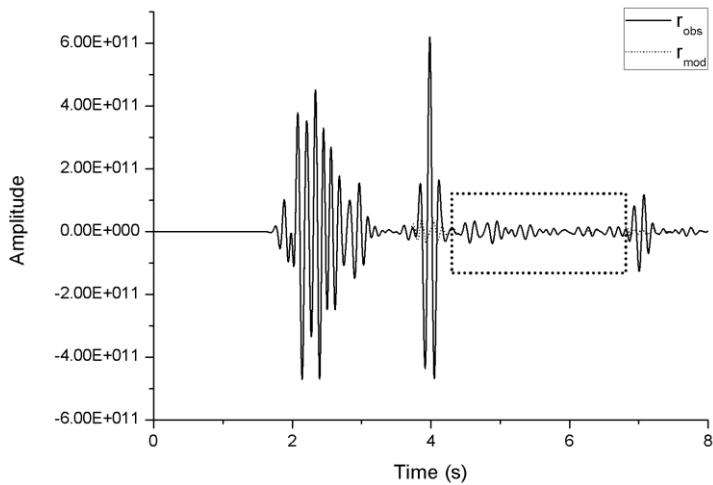
(b)

그림 3-10. 0.3 초의 시간 창이 적용 되지 않은 경우 (W/O) 와 적용 된 (W) 경우 (a) 관측 파동장의 참조 트레이스와 (b) 수치 파동장의 참조 트레이스.



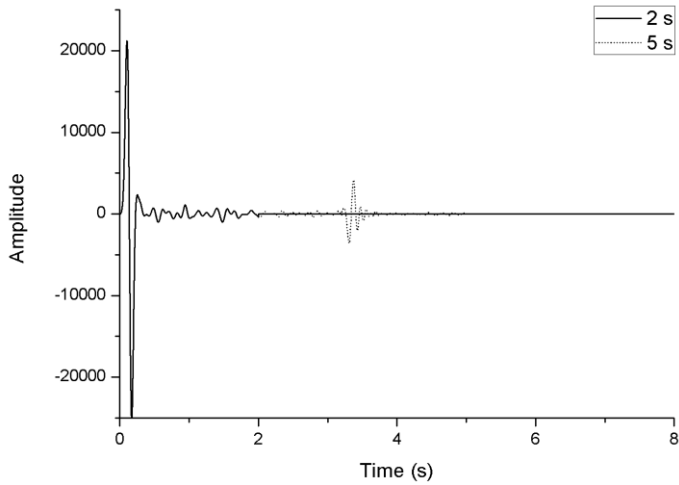


(a)

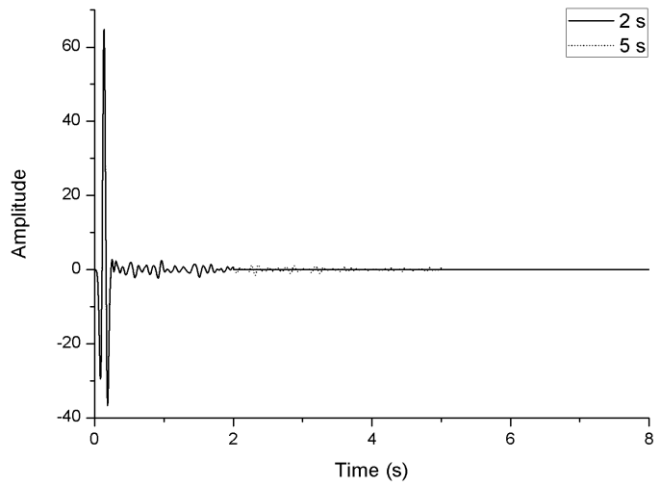


(b)

그림 3-11. (a) 시간 창이 적용되지 않은 경우, (b) 0.3 초의 시간 창이 적용된 경우  $r_{obs}$  와  $r_{mod}$ .

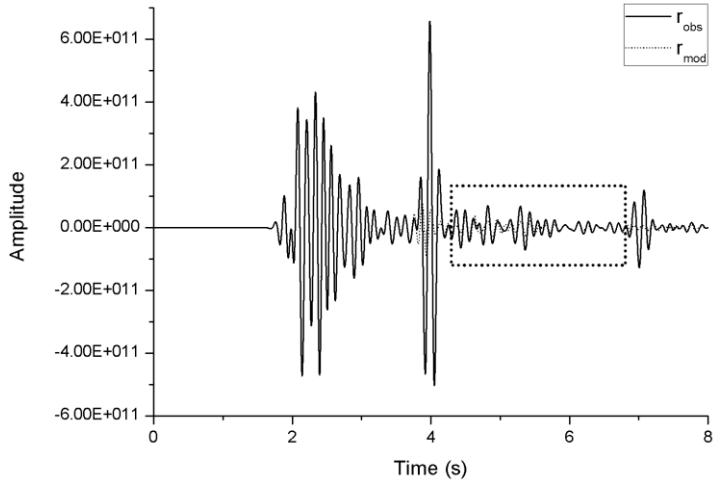


(a)

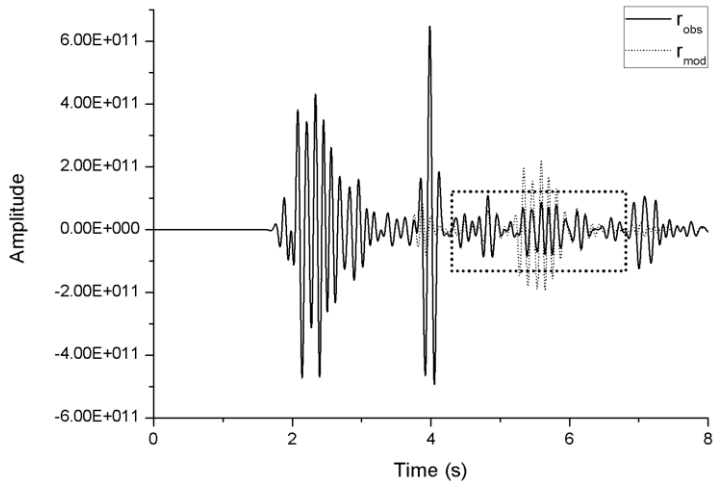


(b)

그림 3-12. 2 초와 5 초의 시간 창을 적용한 경우 (a) 관측 파동장의 참조 트레이스와 (b) 수치 파동장의 참조 트레이스.



(a)



(b)

그림 3-13. 시간 창의 길이가 (a) 2 초, (b) 5 초 일 때  $r_{obs}$  와  $r_{mod}$ .

| Figure  | Reference trace | Time window (s) | Normalized RMS error  |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------------|
| 3-11(a) | STR             | No              | $2.18 \times 10^0$    |
| 3-11(b) | STR             | 0.3             | $1.10 \times 10^{-1}$ |
| 3-13(a) | STR             | 2               | $7.08 \times 10^{-1}$ |
| 3-13(b) | STR             | 5               | $2.18 \times 10^0$    |

표 3-2. 참조 트레이스의 시간 창 길이에 따른 RMS 오차.

## 제 4 장 인공 합성 자료 수치 예제

### 4.1 완전 파형 역산을 위한 준비

본 연구에서는 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 위하여 디콘 볼루션과 콘볼루션 방법을 이용하여 송신 파형 효과를 제거하였다. 제안된 송신 파형 독립 완전 파형 역산 알고리즘의 효용성을 검증하기 위해 Marmousi 인공 합성 자료에 대해 완전 파형 역산을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 최대 주파수가 25 Hz인 fdgaus wavelet을 사용한 송신 파형을 이용하여 시간 영역에서 인공 합성자료를 생성하였고 그림 2-4에 100번째 공통 송신원 모습이 있다. 총 190 개의 송신원이 48 m 간격으로 배치되어있고 각 송신원 당 수신기는 384 개이며 24 m 간격으로 배치되어있다. 수신기의 위치는 고정되어 있다. 총 기록 시간은 8 초이고 샘플링 간격은 0.004 초 이다. 인공 합성 자료를 위한 배경 속도 모델은 그림 2-2(a)의 실제 Marmousi 속도 모델이고 역산을 위한 초기 속도 모델은 평활화 된 모델 (그림 2-2(d))을 사용하였다.

4 Hz 이하의 주파수는 일반적으로 현장 자료에서 사용 가능하지 않기 때문에 실험을 좀 더 실제에 가까운 상황에서 진행하기 위해 4 Hz 부터 13.5 Hz 까지의 주파수를 0.25 Hz 간격으로 사용하였고  $0.5 \text{ s}^{-1}$ 의 감쇠 상수를 사용하여 완전 파형 역산을 진행하였다. Pratt *et al.* (1999)와 Kim *et al.* (2011)의 제안대로 고 주파수 사이클 스

키프 (cycle skipping)을 피하기 위해 독립 그룹 방법(individual group method)을 개량한 부분 중첩 그룹 방법 (partial overlapping group method) (Anagaw and Sacchi 2014)을 사용하여 복소 주파수를 총 3 그룹으로 나누어 순차적으로 역산 하였다. 완전 파형 역산에 사용한 복소 주파수들은 표 4-1에 자세히 제시되어 있다.

본 연구에서는 2.3절에 제시된 L-BFGS를 이용하여 최적화를 진행하였고 도약 거리는 포물선 보간법 (Vigh 2009)을 이용하여 계산 하였다. 각 복소 주파수 그룹에서 RMS 오차가 수렴하면 해당 복소 주파수 그룹에서 완전 파형 역산을 종료하고 다음 복소 주파수 그룹으로 이동하여 완전 파형 역산을 진행하였다. 수치 모델링을 위한 송신 파형은 인공 합성 자료의 송신 파형과 다른 ricker wavelet을 이용하였고 최대 주파수는 각 복소 주파수 그룹의 최대 주파수에 따라 변하도록 설정하였다. 2.2절에서 설명 했듯이 시간에 대한 2 차 및 공간에 대한 4 차 정확도를 가지는 유한 차분법을 이용하여 시간 영역 정 전파 및 역 전파 모델링을 수행하였고 자유면 경계조건을 모델 상부에, higdon 경계 조건 (Higdon 1991)을 나머지 면에 적용 하였다.

| Complex frequency group | Frequency (Hz)  | Damping constant ( $s^{-1}$ ) |
|-------------------------|---|-------------------------------|
| 1                       | 4.0, 4.25, 4.5, 4.75, 5.0, 5.25, 5.5, 5.75, 6.0, 6.25, 6.5, 6.75, 7.0, 7.25, 7.5                | 0.5                           |
| 2                       | 7.0, 7.25, 7.5, 7.75, 8.0, 8.25, 8.5, 8.75, 9.0, 9.25, 9.5, 9.75, 10.0, 10.25, 10.5,            | 0.5                           |
| 3                       | 10.0, 10.25, 10.5, 10.75, 11.0, 11.25, 11.5, 11.75, 12.0, 12.25, 12.5, 12.75, 13.0, 13.25, 13.5 | 0.5                           |

표 4-1. 완전 파형 역산에 사용한 복소 주파수.

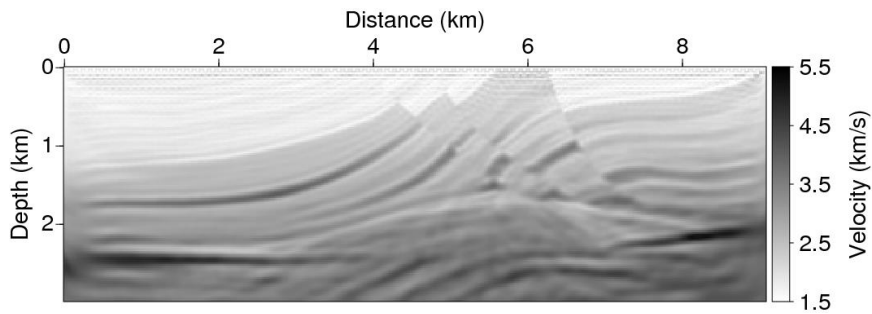
## 4.2 Marmoursi 인공 합성 자료

첫 번째 인공 합성 자료 실험으로 어떠한 잡음도 포함되어 있지 않은 Marmoursi 인공 합성 자료를 사용하여 완전 파형 역산을 수행하였다. 우선 참고로 반복적 송신 파형 역산(ISE)을 이용한 완전 파형 역산 결과를 그림 4-1에 도시하였다. RMS 오차가 증가하기 시작하면 다음 주파수 그룹으로 이동시켜 완전 파형 역산을 진행하였고 반복 계산 횟수와 RMS 오차에 대한 그래프를 그림 4-1(b)에 도시하였다. 총 반복 계산 횟수는 78 회로 각 그룹 당 반복 계산 횟수는 그룹 1이 37 회, 그룹 2가 13 회, 그룹 3이 28 회이다. 전체적으로 완전 파형 역산이 잘 수행된 것을 확인 할 수 있으며 대부분의 구조들이 명확히 역산이 되었다. 하지만 상부에 심한 인공 잡음이 나타나며 양쪽 하부의 관입 압입 구조의 속도 값도 실제 속도 값보다 낮은 것을 확인 할 수 있다. 완전 파형 역산의 결과를 더 정량적으로 확인 하기 위해서 속도의 깊이 프로파일(depth profile)을 추출하여 그림 4-2에 도시하였다. 그림 4-2(a)는 1.4 km 지점, 그림 4-2(b)는 7.9 km 지점의 실제 모델, 초기 모델, 역산 결과의 깊이 프로파일이다. 역산 결과의 깊이 프로파일에서 크게 두 가지의 문제점을 찾을 수 있다. 첫 번째 문제는 얇은 깊이에서 잡음들로 인해 속도 값이 진동한다는 점이다. 본 실험에서 나타난 인공 잡음의 원인은 크게 두 가지가 있다. 첫 번째 원인은 초기 속도 모델이 실제 모델에 충분히 근접하지 못하였기 때문에 실제와 다른 송신 파형이 역산 되었기 때문이다. 두 번째 원인은 송신 파형 역산이 RMS 오차를 계속 해서 줄어나가는 방향으로 송신 파형을 찾기 때문에 상부의 인공 잡음이 발생함에도 불구하고 RMS 오차가 줄어들어 완전 파형 역산이 계속 진행 되었기 때문이다.

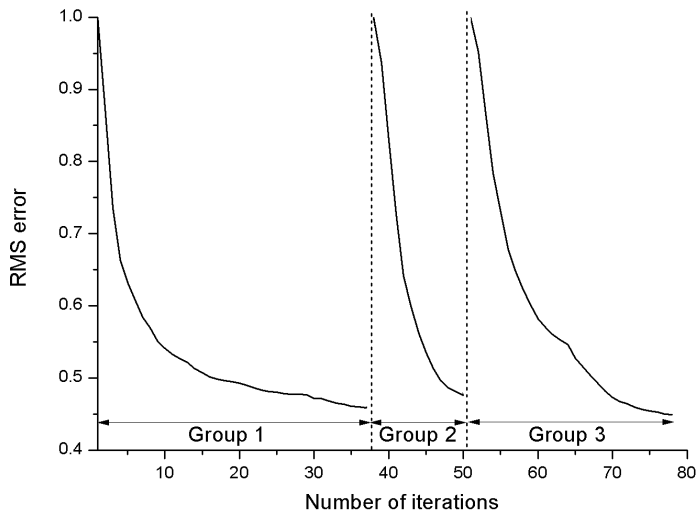


두 번째 문제는 5.5 km/s의 속도를 가지는 암염 구조의 속도 값을 제대로 역산하지 못한다는 점이다. 특히 7.9 km 지점의 깊이 프로파일에서 약 2.2 km 깊이에 있는 암염 구조는 실제로는 5.5 km/s의 속도를 가지고 있지만 역산을 통해서만 약 4.2 km/s의 속도로 역산이 되었다. 송신 파형 역산은 현재 속도 모델에서 가장 낮은 잔차를 가지는 송신 파형을 구하는 것이므로 진폭이 큰 가까운 오프셋 트레이스의 오차에 많은 영향을 받게 되고 먼 오프셋 트레이스의 오차를 덜 고려하게 된다. 하지만 깊은 곳에 위치한 구조에 대한 정보는 가까운 오프셋뿐만 아니라 먼 오프셋에도 많이 기록되어 있다. 이러한 송신 파형 역산의 특성으로 인해 하부의 고 속도 층의 속도 값이 정확히 역산 되지 않았다.

위와 같은 요인들이 송신 파형 역산을 이용하는 완전 파형 역산의 가장 큰 단점이다. 따라서 본 연구에서는 디콘볼루션 방법과 콘볼루션 방법을 이용하는 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 통해 위와 같은 문제점들을 극복하고자 하였다.

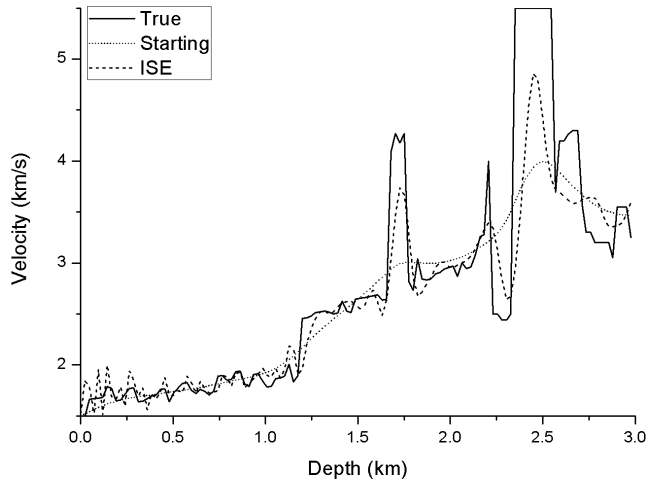


(a)

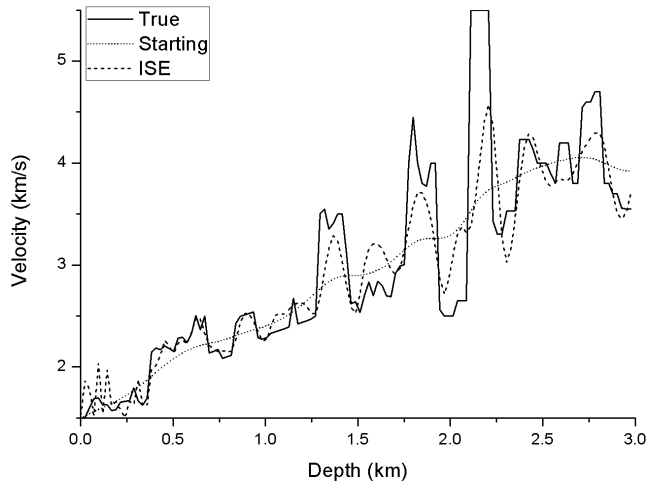


(b)

그림 4-1. (a) 송신 파형 역산을 이용한 완전 파형 역산 결과, (b) 완전 파형 역산의 RMS 오차.



(a)



(b)

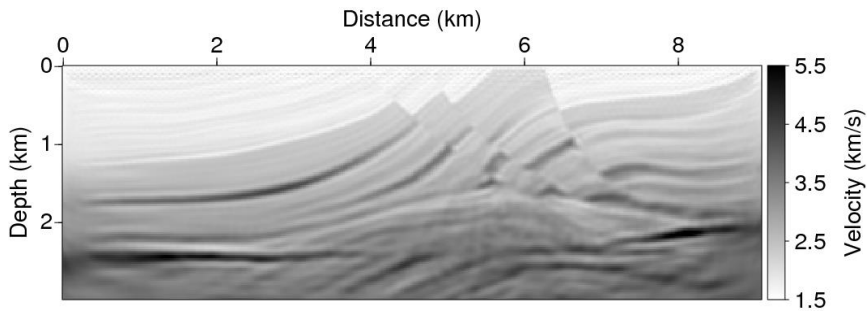
그림 4-2. (a) 1.4 km 지점, (b) 7.9 km 지점의 실제 모델, 초기 모델, 역산 결과의 깊이 프로파일.

송신 파형 독립 완전 파형 역산 알고리즘을 검증하기 위해서 4.1절에 제시된 조건으로 디콘볼루션 방법과 콘볼루션 방법을 각각 이용하여 실험을 진행하였으며, 참조 트레이스의 개수와 시간 창의 길이를 변화시키면서 실험을 진행하고 결과를 비교하였다.

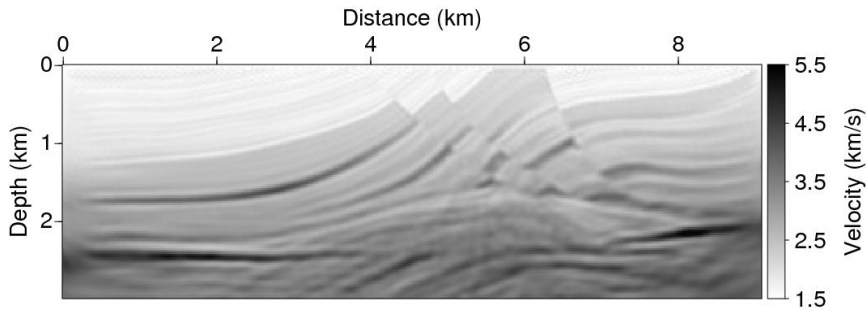
그림 4-3은 참조 트레이스를 구성하는 트레이스의 개수가 변할 때 디콘볼루션 방법을 이용한 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과이다. 각각 OTR (그림 4-3(a)), 11 개의 트레이스를 사용한 STR (그림 4-3(b)), ATR (그림 4-3(c)) 방법을 이용한 결과이고 시간 창은 적용하지 않았다. OTR 방법 결과와 STR 방법 결과는 서로 유사한 것을 확인 할 수 있다. 위 두 방법을 통해 역산한 결과는 송신 파형 역산을 이용하여 얻은 역산 결과와 거의 대부분의 구조가 유사하게 역산 되었지만 송신 파형 역산을 이용하여 얻은 역산 결과에서 나타나는 상부의 인공 잡음이 전혀 보이지 않는다. 또한 각각 총 57 회, 39 회의 반복 계산을 통해 얻었으므로 송신 파형 역산을 이용한 방법 (78회의 반복 계산) 보다 약 27 %, 50 % 낮은 계산량을 이용하였다. ATN 방법을 이용한 경우 총 36 회의 반복 계산이 수행 되었으며 역산 결과는 많은 인공 잡음을 포함하고 있다. ATN 방법에서 가장 낮은 반복 계산이 수행 된 이유는 인공 잡음의 발생으로 RMS 오차가 OTN 방법이나 STN 방법보다 높은 수준에서 수렴을 했기 때문이다. 인공 잡음의 발생은 ATN 방법의 경우 OTN과 STN 방법에 비해 참조 트레이스가 지하 매질의 속도 변화에 더 민감하게 반응하기 때문에 완전 파형 역산의 비선형성이 증가해서 나타난 현상이라고 볼 수 있다.

결과를 자세히 비교하기 위해서 1.4 km 지점과 7.9 km 지점에서

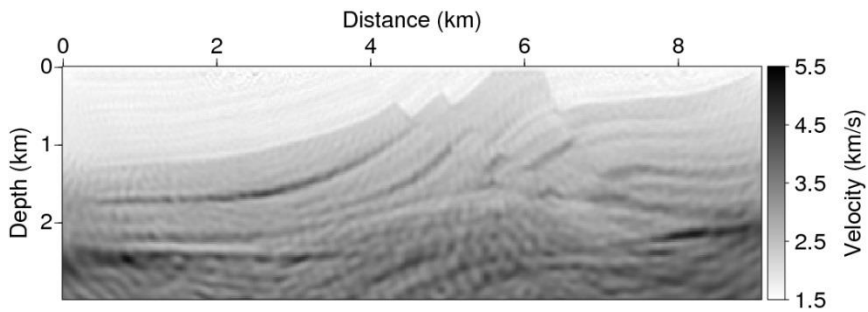
속도의 깊이 프로파일을 추출하여 그림 4-4에 도시하였다. 그림 4-4의 깊이 프로파일들은 그림 4-2의 깊이 프로파일들과는 달리 상부에 어떠한 인공 잡음도 관찰 되지 않고 실제 속도 값과 유사한 속도로 잘 역산이 되었다. 하지만 깊은 곳으로 갈수록 참조 트레이스 선택 방법에 따라서 깊이 프로파일이 다르게 나타난다. OTR 방법을 사용한 경우 대부분의 속도 값이 실제 속도 값과 유사하게 역산이 되었고 암염 층의 속도와 더 깊은 부분의 속도 구조 또한 잘 역산 된 것을 확인 할 수 있다. STR 방법을 사용한 경우 암염 층의 속도 값이 실제 속도 값 보다 낮게 역산이 되었지만 암염 층 속도를 제외하고는 거의 대부분의 속도 값들이 OTR 방법 유사한 수준으로 역산이 되었다. ATR 방법을 사용한 경우 깊은 부분으로 갈수록 역산 결과가 실제 속도 값과 멀어지는 것을 확인 할 수 있고 암염 층의 속도도 세 방법 중 가장 낮게 역산 되었다.



(a)

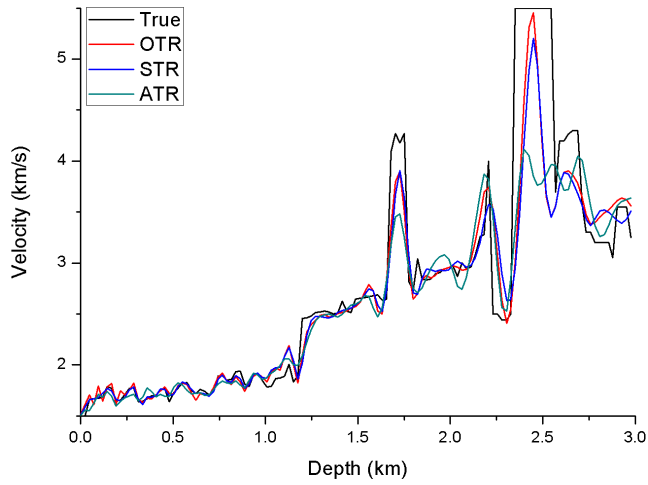


(b)

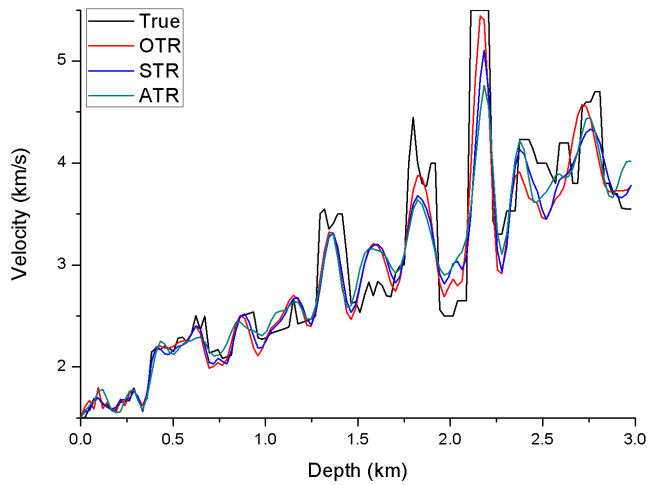


(c)

그림 4-3. (a) OTR, (b) STR, (c) ATR 방법을 사용한 디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과.



(a)



(b)

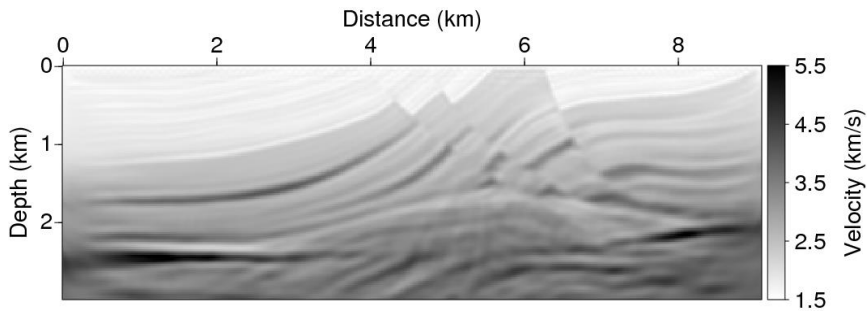
그림 4-4. (a) 1.4 km, (b) 7.9 km 지점에서 추출한 깊이 프로파일.

그림 4-5는 참조 트레이스를 구성하는 트레이스의 개수가 변할 때 콘볼루션 방법을 이용한 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과이다. 각각 OTR (그림 4-5(a)), 11 개의 트레이스를 사용한 STR (그림 4-5(b)), ATR (그림 4-5 (c)) 방법을 이용한 결과이고 시간 창은 적용하지 않았다. 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산은 참조 트레이스를 어떻게 선택 하더라도 서로 유사한 역산 결과를 도출 하였지만 ATR 방법을 사용한 경우 잡음의 수준이 약간 더 높은 것을 확인 할 수 있다. 그림 4-5의 모든 역산 결과는 상부에서 어떠한 잡음도 관찰 되지 않고 실제 속도 모델과 거의 유사한 속도 구조를 보인다. 속도 모델 하부에서도 실제 모델과 거의 유사한 수준으로 역산이 진행되었다.

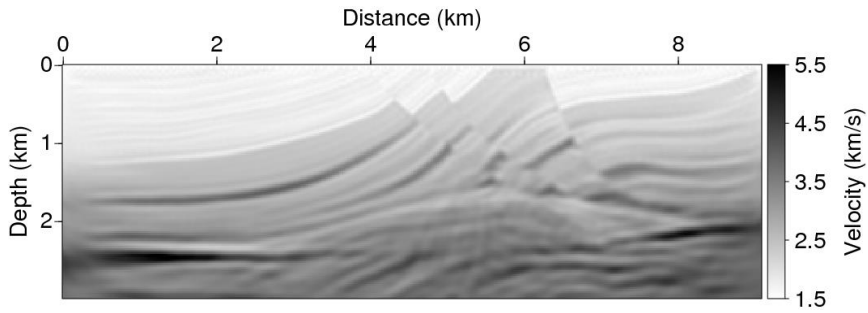
결과를 자세히 비교하기 위해서 1.4 km 지점과 7.9 km 지점에서 속도의 깊이 프로파일을 추출하여 그림 4-6에 도시하였다. 그림 4-4의 디콘볼루션 기반 송신 파형 독립 완전 파형 역산의 결과는 참조 트레이스를 선택하는 방법에 따라 깊이 프로파일의 차이가 큰 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 그림 4-6의 콘볼루션 기반 송신 파형 독립 완전 파형 역산의 결과는 깊이 프로파일이 참조 트레이스를 선택하는 방법에 크게 의존하지 않는 것을 확인 할 수 있다. OTR과 STR 방법을 사용한 경우 고속도 암염 층을 포함한 거의 대부분의 깊이에서 속도가 서로 유사하게 역산 된 것을 확인 할 수 있다. ATR 방법을 사용한 결과는 OTR이나 STR 방법을 사용한 결과와 약간의 차이가 있지만 몇몇 차이점을 제외하면 역산 결과가 서로 거의 일치 한다. 고속도 암염 층의 속도의 경우 OTR과 STR 방법을 사용한 경우 좀 더 정확한 역산 결과를 보였지만 암염 층 아래의 속도 구조의 경우 ATR 방법을 사용한 경우 실제 속도 구조에 더 근



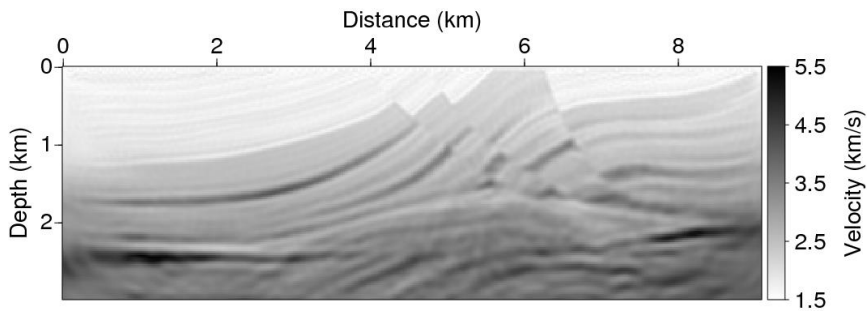
접하게 역산 되었다.



(a)

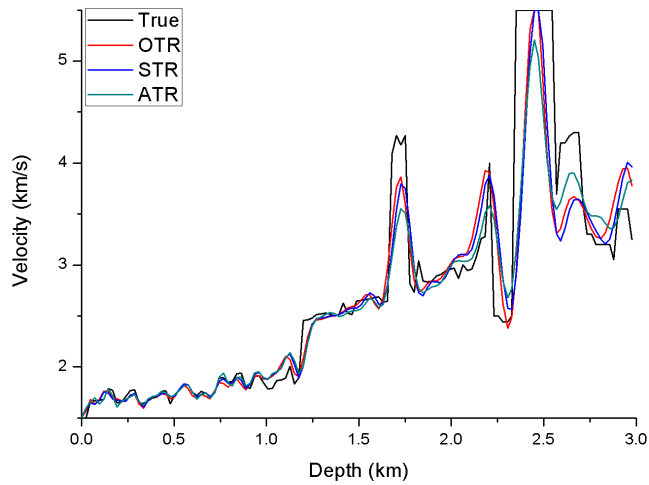


(b)

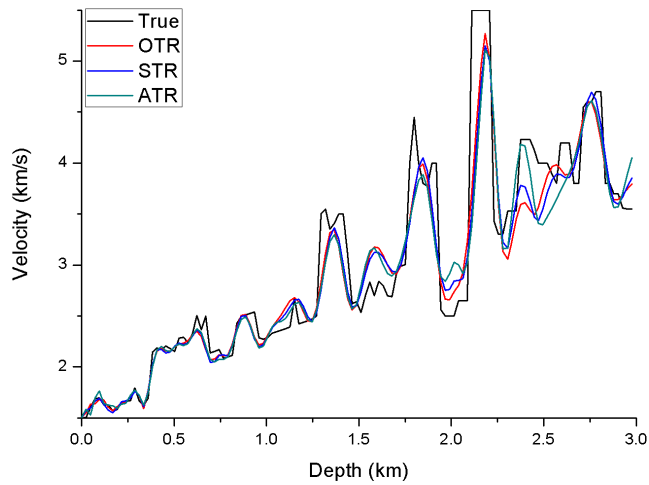


(c)

그림 4-5. (a) OTR, (b) STR, (c) ATR 방법을 사용한 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과.



(a)



(b)

그림 4-6. (a) 1.4 km, (b) 7.9 km 지점에서 추출한 깊이 프로파일.

모든 역산 결과를 정량적으로 비교하기 위해서 각 방법을 사용하여 얻은 역산 결과와 실제 속도 모델과의 모델 오차와 역산 결과를 얻기 위해 수행한 반복 계산의 횟수를 표 4-2에 기록하였다. 모델 오차는 *Brossier et al. (2009)*, *Jun et al. (2015)* 에서 사용한 방법과 같이 아래의 수식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{model misfit} = \frac{1}{nnode} \left\| \frac{\mathbf{m}_{inv} - \mathbf{m}_{true}}{\mathbf{m}_{true}} \right\|_2. \quad (4.2.1)$$

$nnode$ 는 계산 영역 안의 노드 개수,  $\mathbf{m}_{inv}$ 는 역산된 속도 모델,  $\mathbf{m}_{true}$ 는 실제 속도 모델이다.

표 4-2를 통해 송신 파형 역산(ISE)을 사용한 방법의 모델 오차가 가장 크고 콘볼루션과 OTR 방법을 사용한 완전 파형 역산 결과의 모델 오차가 가장 낮은 것을 확인 할 수 있다. 디콘볼루션과 OTR 방법을 사용한 완전 파형 역산 결과의 모델 오차도 콘볼루션과 OTR을 사용한 결과의 모델 오차와 유사하지만 약간 높다. 같은 송신 파형 효과 제거 방법을 사용하였다면 더 적은 숫자의 트레이스를 이용하여 참조 트레이스를 구성하는 것이 더 좋은 결과를 도출한다. 본 실험에서는 관측 자료에 어떠한 잡음도 포함되어 있지 않고 모든 트레이스가 이상적인 환경에서 기록되었다고 가정한 인공 합성 자료를 사용하였기 때문에 하나의 트레이스를 사용하여 참조 트레이스를 구성 하여도 참조 트레이스의 대표성 문제는 없으며 잡음의 효과도 받지 않는다. 많은 수의 트레이스를 사용할 경우 적은 트레이스를 사용하는 것에 비해 참조 트레이스는 속도 변화에 더 민감하게 되고 완전 파형 역산의 비선형성이 증가하게 된다. 따

라서 이상적인 환경일 때는 하나의 트레이스를 사용하여 참조 트레이스를 구성하는 것이 완전 파형 역산을 안정적으로 수행 할 수 있는 방법이다.

같은 참조 트레이스를 사용한 경우 콘볼루션 기반의 완전 파형 역산 결과의 모델 오차가 디콘볼루션 기반 완전 파형 역산 결과의 모델 오차보다 조금씩 낮지만 ATR 결과를 제외하면 역산 결과의 해상도는 디콘볼루션 기반 완전 파형 역산이 조금 더 높은 것을 확인할 수 있다. 콘볼루션 기반 완전 파형 역산의 잔차는 수치 파동장과 관측 파동장의 송신 파형이 서로 콘볼루션된 형태의 파형을 가지는 것으로 볼 수 있다. 디콘볼루션 기반 완전 파형 역산의 잔차는 송신 파형이 모두 제거된 형태 수치 파동장과 관측 파동장으로 구성되어 있으므로 각 파동장의 그린 함수만을 이용해 구성한 것과 동일하다. 따라서 송신 파형의 형태에 영향을 받는 콘볼루션 기반 완전 파형 역산의 결과가 송신 파형의 형태에 영향을 받지 않는 디콘볼루션 기반 완전 파형 역산의 결과보다 더 낮은 해상도를 보인다. 해상도가 낮아지면서 역산 결과가 평활화 되어 디콘볼루션 기반 완전 파형 역산에서 보이는 약간의 인공 잡음이 억제되어서 콘볼루션 기반 완전 파형 역산 결과의 모델 오차가 더 낮은 값을 가지게 되었다. 하지만 모델 오차의 차이가 미세하므로 두 방법 중 어떠한 방법이 더 우월한 방법이라는 것을 결론 내릴 만큼 유의미한 차이는 아니다.

| Figure | Source method | Reference trace | Model misfit          | Number of iteration |
|--------|---------------|-----------------|-----------------------|---------------------|
| 2-2(d) | -             | -               | $5.38 \times 10^{-4}$ | 0 (Starting)        |
| 4-1(a) | ISE           | -               | $4.68 \times 10^{-4}$ | 78                  |
| 4-3(a) | Deconvolution | OTR             | $4.18 \times 10^{-4}$ | 57                  |
| 4-3(b) | Deconvolution | STR             | $4.26 \times 10^{-4}$ | 39                  |
| 4-3(b) | Deconvolution | ATR             | $4.60 \times 10^{-4}$ | 36                  |
| 4-5(a) | Convolution   | OTR             | $4.11 \times 10^{-4}$ | 36                  |
| 4-5(b) | Convolution   | STR             | $4.21 \times 10^{-4}$ | 33                  |
| 4-5(c) | Convolution   | ATR             | $4.27 \times 10^{-4}$ | 42                  |

**표 4-2.** 잡음이 포함되지 않은 자료를 이용한 경우 완전 파형 역산 방법에 따른 모델 오차와 반복 계산 횟수.

### 4.3 잡음을 포함한 Marmoursi 인공 합성 자료

실제 탄성과 탐사를 통해 얻은 자료에는 다양한 잡음이 존재한다. 따라서 송신 파형 독립 완전 파형 역산 알고리즘도 잡음이 존재하는 환경에서 합리적인 역산 결과를 도출 하는지 검증하는 것이 필수적이다. 본 실험에서는 두 가지 잡음을 Marmousi 인공 합성 자료에 추가하여 실험을 진행하였다. 첫 번째 잡음은 가우스 무작위 잡음(Gaussian random noise)이다. 신호 대 잡음 비가 30인 잡음을 모든 트레이스에 추가하였으며 가우스 무작위 잡음이 추가된 탄성과 자료의 100번째 공통 송신원 모습은 그림 4-7(a)에 있다. 가우스 무작위 잡음은 배경 잡음으로 낮은 수준의 잡음이며 이러한 낮은 수준의 잡음이 송신 파형 독립 완전 파형에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 두 번째 잡음은 스파이크 잡음으로 탄성과 자료의 무작위 위치에 추가되었으며 그림 4-7(b)는 가우스 무작위 잡음과 스파이크 잡음이 함께 존재하는 탄성과 자료의 100번째 공통 송신원 모습이다. 스파이크 잡음은 가우스 무작위 잡음에 비해 더 가혹한 잡음 환경을 묘사한 것으로 강한 잡음이 존재할 때 송신 파형 독립 완전 파형이 어떻게 거동하는지 확인 하고자 하였다.

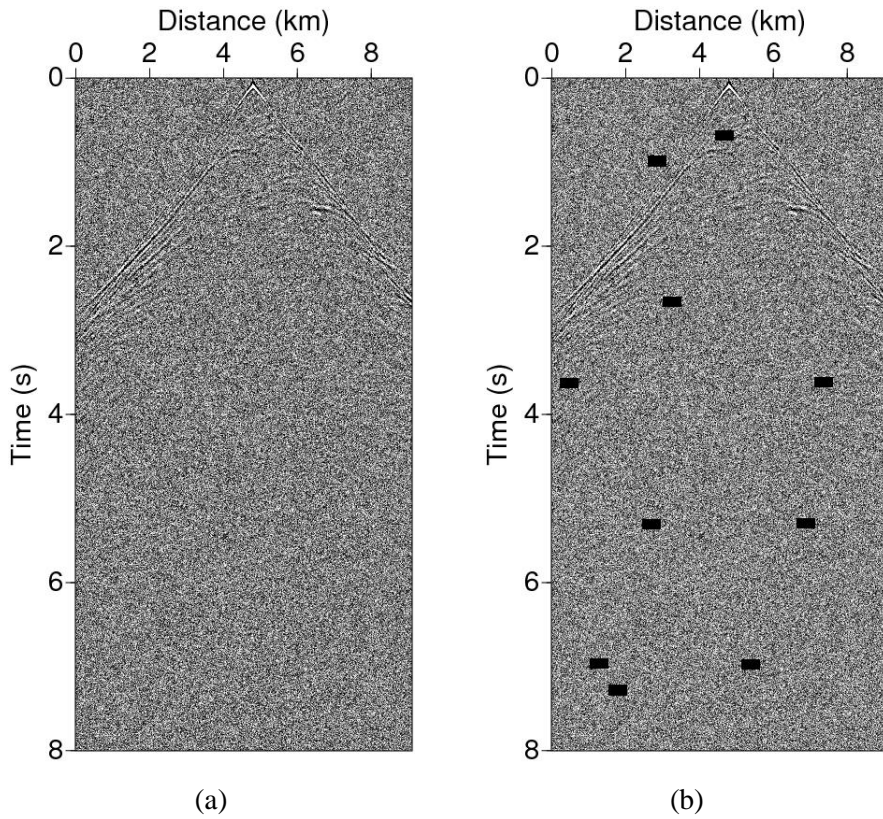


그림 4-7. (a) 가우스 무작위 잡음이 추가된 Marmousi 인공 합성 자료와 (b) 가우스 무작위 잡음과 스파이크 잡음이 동시에 추가된 Marmousi 인공 합성 자료의 100번째 공통 송신원 모습.



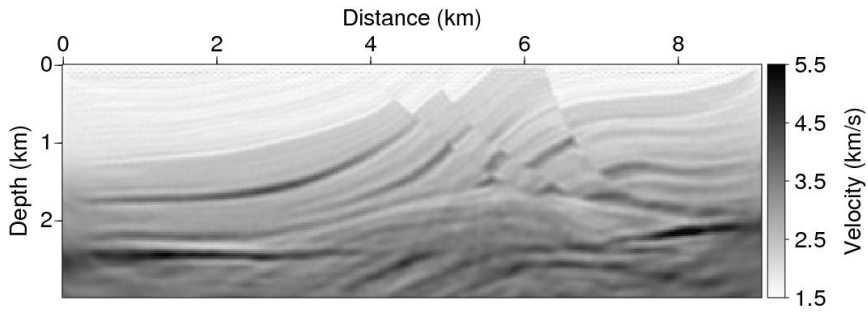
### 4.3.1 가우스 무작위 잡음

첫 번째 실험은 가우스 무작위 잡음만 추가된 인공 합성 자료를 이용하여 진행하였다. 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 위해 디콘볼루션 방법과 콘볼루션 방법을 각각 적용 하였고 OTR, 11 개 트레이스를 이용한 STR, ATR 방법을 이용하여 참조 트레이스를 구성하였다. 주파수 선택 방법, 최적화 방법 등과 같은 나머지 변수들은 4.1절에 제시된 방법과 동일하다.

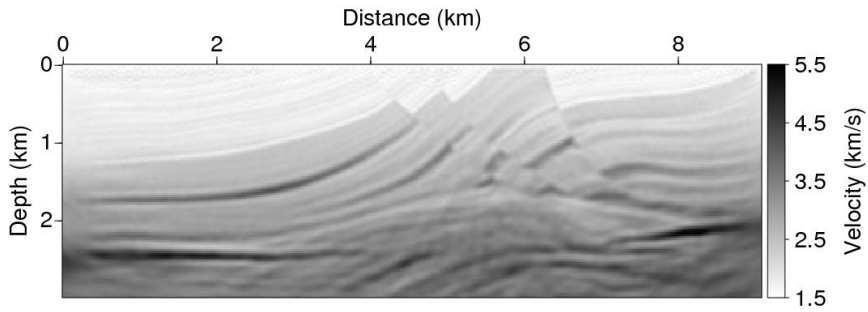
그림 4-8은 디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과이다. OTR (그림 4-8(a))과 STR (그림 4-8(b)) 방법을 사용한 결과는 그림 4-3의 잡음이 없는 자료의 결과와 거의 유사하다. 이는 가우스 무작위 잡음과 같은 낮은 수준의 잡음은 적은 트레이스를 이용하여 참조 트레이스를 구성 할 경우 디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과에 큰 영향을 주지 않는다는 것을 의미한다. 하지만 ATR (그림 4-8 (c)) 방법을 사용한 경우 완전 파형 역산 결과의 질이 크게 저하된 것을 확인 할 수 있다. 하부 속도 구조는 잡음으로 인해 거의 역산이 진행되지 않았으며 상부 구조는 하부의 강한 잡음들로 인해 크게 업데이트 되지 않았다. 그림 3-7에서 볼 수 있듯 잡음의 존재가 ATR 방법으로 구성된 수치 파동장과 관측 파동장을 더 복잡하게 만들고 목적 함수의 비선형성을 높이는 효과를 낳는다. 따라서 ATR 방법을 사용한 경우 완전 파형 역산이 올바른 방향으로 진행되지 않았다.

그림 4-9는 1.4 km 지점과 7.9 km 지점 속도의 깊이 프로파일이다. 그림 4-8의 역산 결과와 마찬가지로 깊이 프로파일도 ATN 방법을 사용한 경우 실제 모델과의 속도 차이가 가장 컸다. ATN 방법을

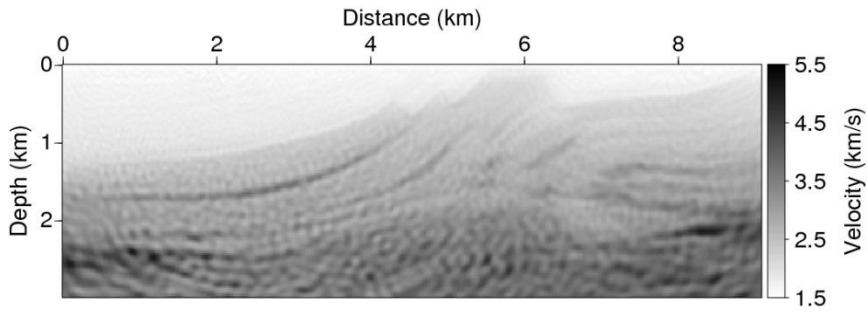
사용한 결과의 상부 속도 구조는 업데이트가 충분히 이루어지지 않아서 상대적으로 낮은 해상도를 보이며 5.5 km/s의 속도를 가지는 고속도 암염 층들도 거의 역산이 되지 않았다. 반면, OTR과 STR 방법을 사용하여 얻은 깊이 프로파일들은 결과의 해상도도 좋고 암염 층의 속도도 올바르게 역산을 하고 있다. OTR과 STR 방법의 결과는 서로 유사하지만 OTR 방법을 사용한 결과가 실제 모델에 조금 더 근접한 것을 볼 수 있다. 1.4 km 지점 2.3 km 깊이에 존재하는 저속도 층과 7.9 km 지점 2.0 km 깊이에 존재하는 저속도 층은 OTR 방법의 결과가 STR 방법의 결과 보다 더 정확히 역산 되었다. 그림 4-6의 깊이 프로파일들을 잡음이 포함되어 있지 않은 인공 합성 자료를 이용하여 얻은 깊이 프로파일들인 그림 4-4와 비교해보면 그림 4-4의 깊이 프로파일들이 실제 속도에 더 근접한 결과를 보인다. 잡음이 포함된 자료를 이용하여 얻은 결과들은 암염 층의 속도가 더 낮게 역산되었으며 암염 층 하부의 속도들의 정확도도 떨어지는 반면 잡음이 포함되지 않은 자료를 이용하여 얻은 결과들은 암염 층의 속도가 더 실제 속도에 가깝게 역산 되었고 깊은 부분의 복잡한 구조들도 상대적으로 정확히 역산되었다. 이 결과들은 낮은 수준의 가우스 무작위 잡음도 디콘블루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산의 결과에 영향을 주며 더 많은 트레이스 이용하여 참조 트레이스를 구성 할 경우 잡음에 더 많은 영향을 받는다는 것을 보여 준다.



(a)

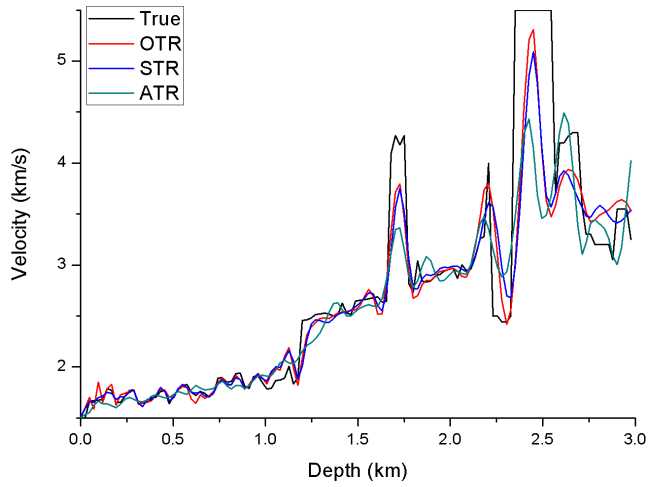


(b)

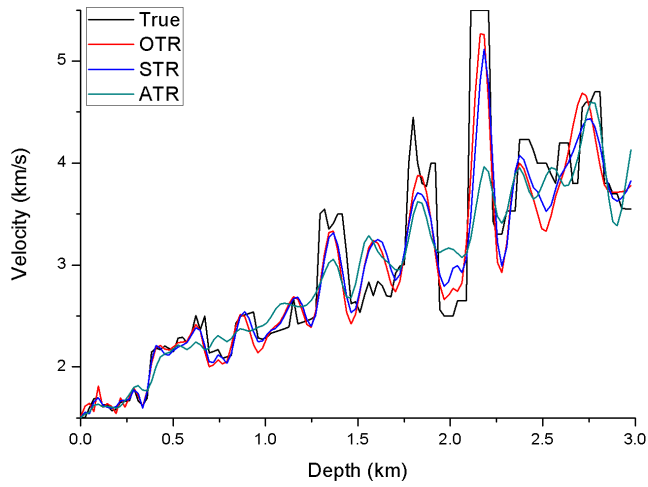


(c)

**그림 4-8.** 가우스 무작위 잡음이 추가된 Marmousi 인공 합성 자료에 대해 (a) OTR, (b) STR, (c) ATR 방법을 사용한 디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 적용한 결과.



(a)



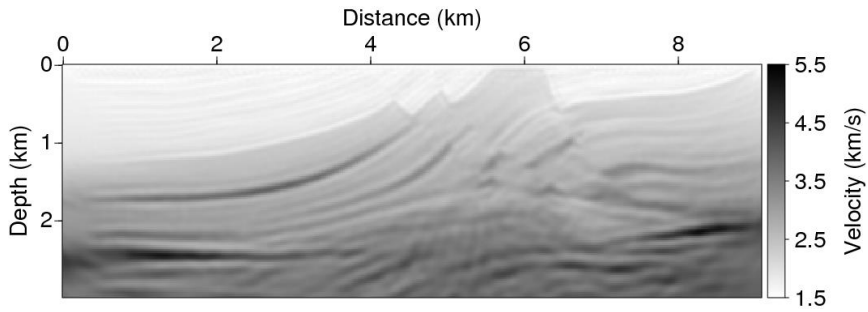
(b)

그림 4-9. (a) 1.4 km, (b) 7.9 km 지점에서 추출한 깊이 프로파일.

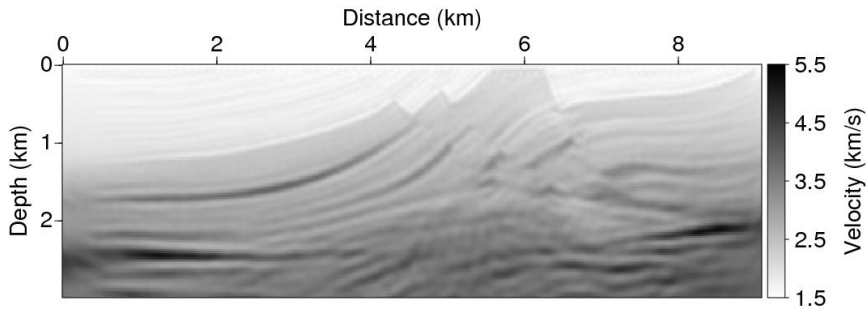
그림 4-10은 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과이다. OTR (그림 4-10(a))과 STR (그림 4-10(b)) 방법으로 얻은 결과는 서로 유사하고 속도 모델에서 인공 잡음을 거의 찾아볼 수 없지만 전체적인 속도가 충분히 업데이트 되지 않았다. 잡음이 포함되지 않은 자료로 얻은 결과인 그림 4-5(a), (b)와 비교해보면 속도 구조들이 충분히 선명하지 않으며 해상도가 상대적으로 낮은 것을 확인할 수 있다. ATR (그림 4-10(c)) 방법으로 얻은 결과는 다량의 인공 잡음이 포함되어 있어 OTR과 STR 방법으로 얻은 결과에 비해 더 부정확한 역산 결과를 보여준다. 잡음이 포함되지 않은 자료에 ATR 방법을 적용하여 얻은 결과인 그림 4-5(c)의 경우 모든 트레이스를 이용하여 참조 트레이스를 구성 하여 목적 함수의 비선형성이 높아졌음에도 불구하고 인공 잡음이 거의 포함되지 않은 상대적으로 안정적인 역산 결과를 보여주었으나, 자료에 무작위 잡음이 포함된 경우 비선형성이 크게 증가하여 역산 과정에서 속도 모델에 인공 잡음이 다수 발생하였다.

그림 4-11은 1.4 km 지점과 7.9 km 지점 속도의 깊이 프로파일이다. 1.4 km 지점 속도 깊이 프로파일인 그림 4-11(a)는 OTR과 STR 방법이 서로 비슷한 결과를 보인다. ATR 방법을 이용한 결과의 경우 대부분의 위치에서 OTR과 STR 방법을 이용한 결과와 비슷하지만, 인공 잡음으로 인해 상부 속도 값이 진동하며 암염 층 하부의 속도가 정확히 역산되지 않았다. 7.9 km 지점 속도의 깊이 프로파일 (그림 4-11 (b))에서는 OTR 방법이 STR 방법에 비해 실제 모델에 조금 더 근접한 모습을 보이며 STR 방법은 암염 층 하부의 속도가 과역산된 모습을 보인다. ATR 방법의 결과가 암염 층의 속도를 가장 근접하게 역산하였지만 암염 층 하부 속도가 심하게 과역산되었

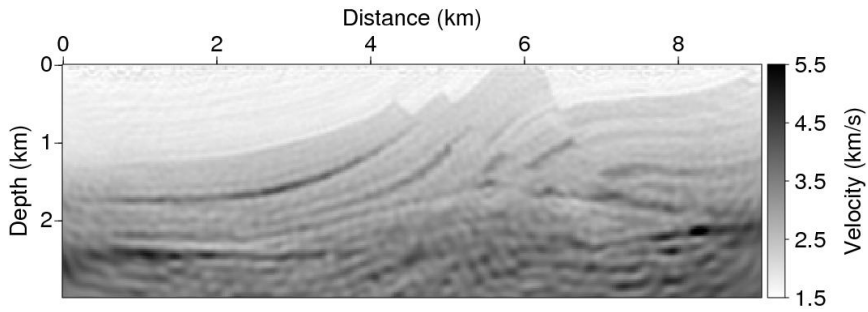
고 인공 잡음으로 인해 상부 속도 값이 진동한다. 잡음이 포함되지 않은 자료로부터 얻은 값이 프로파일인 그림 4-6과 비교해보면 그림 4-11은 질의 저하가 심하다. 암염 층의 속도가 실제와 상당히 떨어진 값으로 역산 되었고 몇몇 부분을 제외하면 대부분의 속도들이 실제 속도에 충분히 근접할 정도로 업데이트 되지 못하였다.



(a)

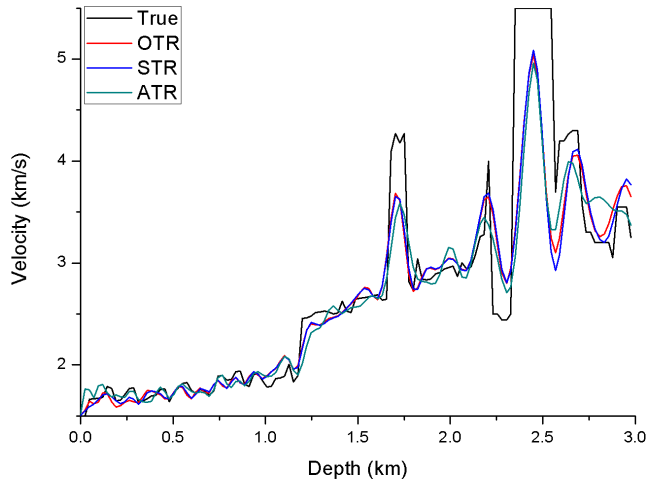


(b)

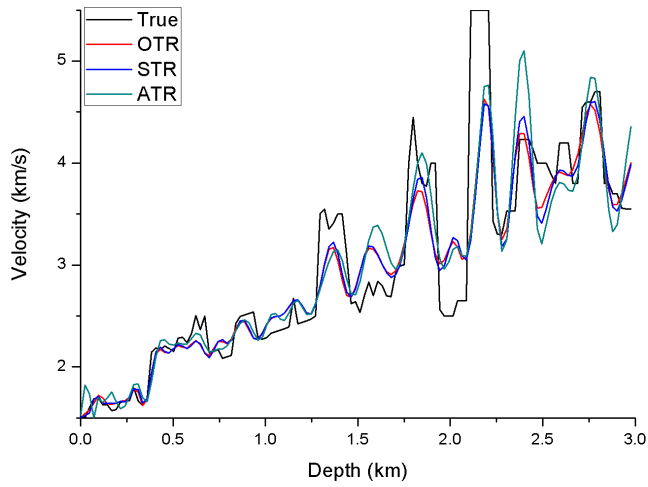


(c)

그림 4-10. 가우스 무작위 잡음이 추가된 Marmousi 인공 합성 자료에 대해 (a) OTR, (b) STR, (c) ATR 방법을 사용한 콘블루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 적용한 결과.



(a)



(b)

그림 4-11. (a) 1.4 km, (b) 7.9 km 지점에서 추출한 깊이 프로파일.



역산 결과들을 정량적으로 비교하기 위해서 실제 속도 모델과 역산 결과의 모델 오차와 역산 결과를 얻기 위해 수행한 반복 계산의 횟수를 표 4-3에 기록하였다. 모델 오차는 식 (4.2.1)을 사용하여 계산하였다.

표 4-3에서 ATR 방법을 제외하면 디콘볼루션 방법을 사용한 결과들이 콘볼루션 방법을 사용한 결과보다 더 낮은 모델 오차를 보인다. 잡음이 포함되어 있지 않은 자료를 이용해 얻은 결과 (표 4-2)와 비교해보면 모든 방법에서 잡음이 포함된 자료를 이용한 경우 모델 오차가 더 높게 나타났지만 모델 오차의 차이는 디콘볼루션 기반의 역산 결과가 콘볼루션 기반의 역산 결과보다 더 작다. 또한 디콘볼루션 기반 역산의 경우 잡음이 포함된 경우 역산 결과가 부정확해졌지만 해상도에는 큰 변화가 없었다. 하지만 콘볼루션 기반 역산 결과의 해상도는 큰 폭으로 낮아진 것을 확인할 수 있다. 잡음이 포함되지 않은 자료로 역산을 진행 한 경우 역산 결과의 해상도는 디콘볼루션 방법을 사용한 경우 더 높았으나 모델 오차는 콘볼루션 방법을 사용한 경우 더 낮았다. 하지만 잡음이 포함된 자료로 역산을 진행 한 경우 디콘볼루션 기반 역산 결과의 해상도가 더 높고 모델 오차는 더 낮았다. 또한 ATN 방법을 사용한 콘볼루션 기반의 역산 결과는 잡음이 없는 경우 OTN 이나 STN 방법을 사용한 결과와 거의 유사하였으나 잡음이 포함된 경우 결과의 질이 크게 떨어졌다.

반복 계산의 횟수를 비교해보면 가장 좋은 결과를 보인 OTR 방법을 사용한 디콘볼루션 기반의 역산은 총 67 회의 반복 계산이 수행되었지만 가장 좋지 않은 결과를 보인 ATR 방법을 사용한 디콘

볼루션 기반의 역산은 총 17 회의 반복 계산밖에 수행되지 못하였고 콘볼루션 기반의 역산 또한 19~25 회의 적은 수의 반복 계산이 수행되었다. RMS 오차를 기준으로 역산 종료 시점을 결정하였기 때문에 적은 반복 계산이 수행되었다는 것은 적은 반복 계산만으로도 RMS 오차가 충분히 감소 했거나 어떠한 요인으로 인해 RMS 오차가 충분히 감소하는데 한계가 존재한다는 것을 의미한다. 본 실험은 모델 오차가 크지만 RMS 오차는 더 이상 줄어들지 않는 상황이므로 잡음이 RMS 오차의 감소를 억제하는 요인으로 작용했다는 것을 확인할 수 있고 ATR 방법을 제외하면 콘볼루션 기반 역산의 반복 계산 횟수가 디콘볼루션 기반 역산의 반복 계산 횟수보다 작고 모델 오차는 더 크다.

위 결과를 통해 볼 때 콘볼루션 기반의 역산 방법이 디콘볼루션 기반의 역산 방법에 비해 무작위 잡음에 더 민감하다고 결론지을 수 있다. 하지만 ATR 방법의 경우 콘볼루션 기반의 역산 방법이 디콘볼루션 기반의 역산 방법에 비해 잡음이 있는 자료와 없는 자료 모두에서 더 좋은 결과를 준다. 이는 디콘볼루션 기반의 목적 함수가 콘볼루션 기반의 목적 함수보다 매 반복 계산마다 발생하는 참조 트레이스의 파동장 변화에 더 민감하게 반응한다는 것을 의미한다.

| Figure  | Source method | Reference trace | Model misfit          | Number of iteration |
|---------|---------------|-----------------|-----------------------|---------------------|
| 2-2(d)  | -             | -               | $5.38 \times 10^{-4}$ | 0 (Starting)        |
| 4-8(a)  | Deconvolution | OTR             | $4.22 \times 10^{-4}$ | 67                  |
| 4-8(b)  | Deconvolution | STR             | $4.30 \times 10^{-4}$ | 36                  |
| 4-8(b)  | Deconvolution | ATR             | $5.05 \times 10^{-4}$ | 17                  |
| 4-10(a) | Convolution   | OTR             | $4.47 \times 10^{-4}$ | 19                  |
| 4-10(b) | Convolution   | STR             | $4.53 \times 10^{-4}$ | 24                  |
| 4-10(c) | Convolution   | ATR             | $4.89 \times 10^{-4}$ | 25                  |

**표 4-3.** 가우스 무작위 잡음이 포함된 자료를 이용한 경우 완전 과형 역산 방법에 따른 모델 오차와 반복 계산 횟수.

### 4.3.2 가우스 무작위 잡음과 스파이크 잡음

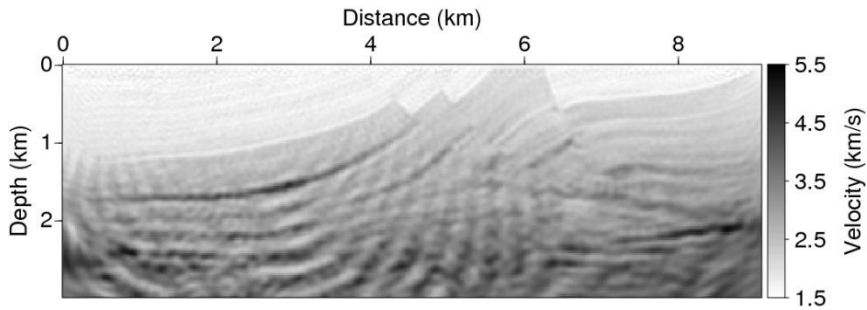
앞선 4.3.1에서는 가우스 무작위 잡음만 포함된 경우 송신 파형 독립 완전 파형 역산이 어떻게 거동하는지 확인하였다. 이번 절에서는 가우스 무작위 잡음과 스파이크 잡음이 함께 있을 때 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 실험을 위해서 11 개 트레이스를 이용한 STR에 0.5 초, 2 초의 시간 창을 적용하여 디콘볼루션, 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 수행하였고 시간 창을 적용하지 않은 결과와 비교하였다. 0.5 초의 시간 창을 적용할 경우 참조 트레이스에 반사파가 거의 포함되지 않고 직접파의 정보가 지배적이다. 2 초의 시간 창을 적용할 경우 참조 트레이스에 반사파와 직접파 정보가 함께 포함되어 있다. 시간 창을 적용하지 않을 경우 트레이스의 전체 시간에 대한 정보를 사용하게 된다. 0.5 초의 시간 창을 적용할 경우 참조 트레이스는 가장 적은 양의 잡음을 포함하게 될 것이고 시간 창을 적용하지 않을 경우 참조 트레이스는 가장 많은 양의 잡음을 포함하게 될 것이다. 주파수 선택 방법, 최적화 방법 등과 같은 나머지 변수들은 4.1 절에 제시된 방법과 동일하다.

그림 4-12는 가우스 무작위 잡음과 스파이크 잡음이 함께 있는 자료에 디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 적용한 결과이다. 시간 창을 적용하지 않았을 때의 결과 (그림 4-12(a))는 속도 모델 상부에서 하부까지 큰 인공 잡음이 발생하였다. 특히 모델의 왼쪽 모서리 부분 2.5 km 깊이에 있는 고속도 암염 층과 모델 4~6 km 지점 2.5 km 깊이 아래에 있는 배사구조는 인공 잡음으로 인해 거의 역산이 되지 않았다. 2 초의 시간 창을 적용했을 때의 결과 (그림 4-12(b))는 시간 창을 적용하지 않았을 때의 결과보다 향상된

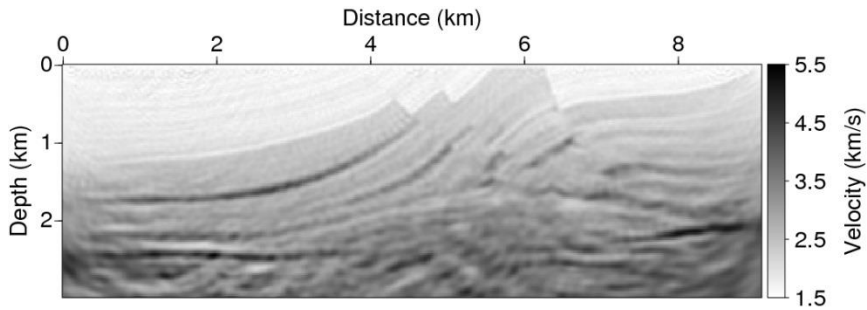
결과를 보인다. 모델 왼쪽에 있는 고속도 암염 층도 적절히 역산이 되었고 역산으로 인해 발생한 인공 잡음도 상당히 억제되었다. 하지만 여전히 상당한 수준의 인공 잡음으로 인해 모델 하부의 배사 구조는 적절히 역산되지 않았으며 몇몇 속도 구조들은 연결성이 좋지 않다. 0.5 초의 시간 창을 적용했을 때의 결과 (그림 4-12(c))는 앞선 두 결과보다 실제 모델에 더 근접한 역산 결과를 보인다. 인공 잡음은 2 초의 시간 창을 적용하여 얻은 결과보다 더 낮은 수준이고 고속도 암염 층과 하부 배사구조가 비교적 정확히 역산 되었다. 또한 대부분의 속도 구조들의 연결성이 좋다.

그림 4-13은 1.4 km 지점과 7.9 km 지점 속도의 깊이 프로파일이다. 그림 4-12의 속도 역산 결과에서 시간 창을 적용하지 않은 결과와 2 초의 시간 창을 적용한 결과는 다량의 인공 잡음으로 인해 속도 구조들이 정확히 역산되지 않았지만 깊이 프로파일에서는 실제 속도의 깊이 프로파일에 어느 정도 근접한 모습을 보인다. 1.4 km 지점 속도 깊이 프로파일인 그림 4-13(a)에서는 0.5 초의 시간 창을 적용한 결과의 깊이 프로파일이 실제 속도의 깊이 프로파일에 가장 근접한 결과를 보여주지만 시간 창을 적용하지 않은 결과와 2 초의 시간 창을 적용한 결과의 깊이 프로파일도 상부의 속도 구조나 고속도 암염 층을 0.5 초의 시간 창을 적용한 결과와 유사한 수준으로 역산하고 있다. 7.9 km 지점 속도 깊이 프로파일인 그림 4-13(b)에서는 상부의 구조들은 0.5 초의 시간 창을 적용한 것이 실제에 가장 근접하지만 암염 층의 경우 2 초의 시간 창을 적용한 결과가 실제 깊이 프로파일에 가장 근접한 모습을 보인다. 비록 깊이 프로파일은 시간 창을 적용하지 않은 방법, 2 초의 시간 창을 적용한 방법, 0.5 초의 시간 창을 적용한 방법 세 가지가 비교적 비슷하게 도출되었

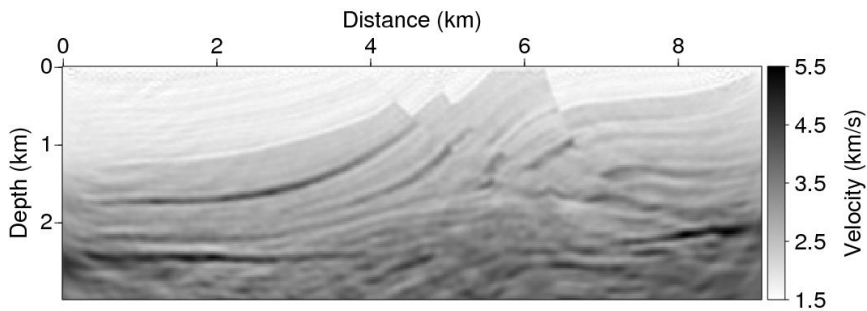
지만 역산된 속도 모델 전체를 보면 0.5 초의 시간 창을 적용한 방법이 인공 잡음이 가장 적으므로 디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산에 가장 적합한 방법임을 알 수 있다.



(a)

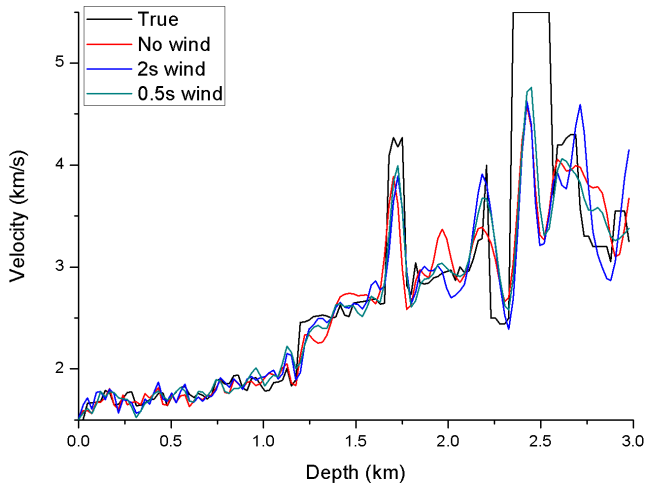


(b)

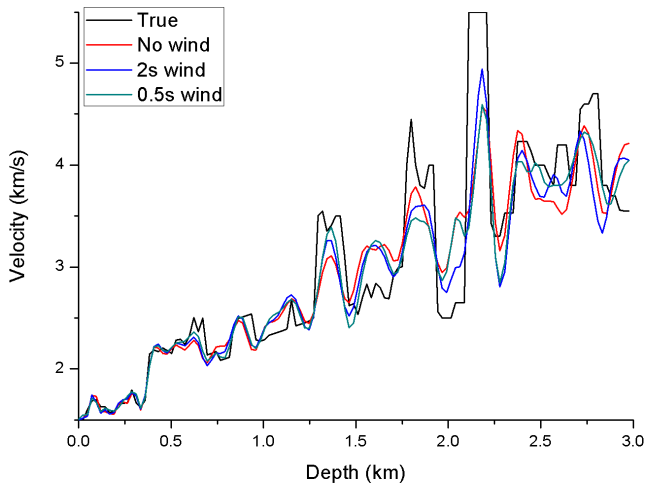


(c)

그림 4-12. 가우스 무작위 잡음과 스파이크 잡음이 추가된 Marmousi 인공 합성 자료에 대해 (a) 시간 창을 적용하지 않았을 때, (b) 2 초의 시간 창을 적용 했을 때, (c) 0.5 초의 시간 창을 적용 했을 때 디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과.



(a)



(b)

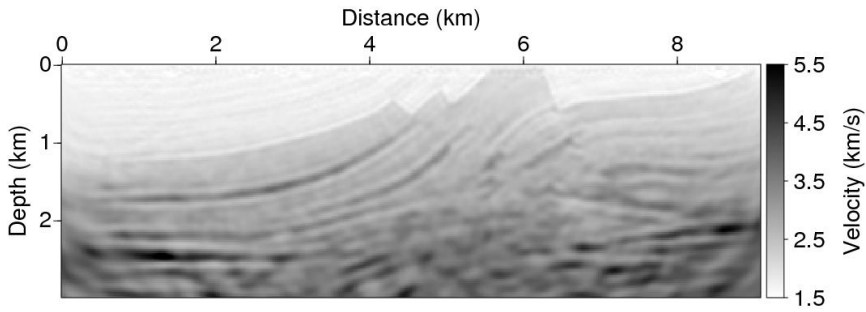
그림 4-13. (a) 1.4 km, (b) 7.9 km 지점에서 추출한 깊이 프로파일.



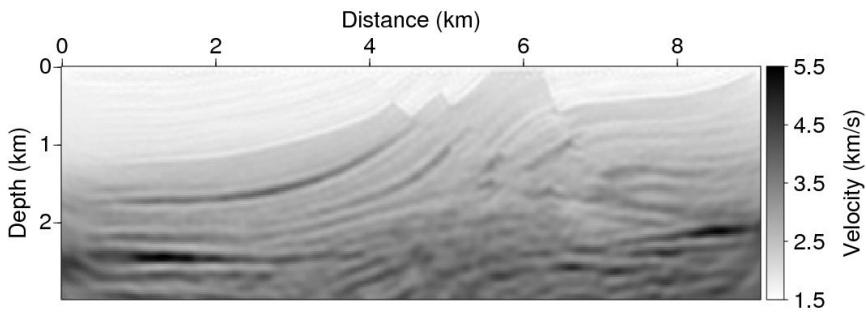
그림 4-14는 가우스 무작위 잡음과 스파이크 잡음이 함께 있는 자료에 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 적용한 결과이다. 시간 창을 적용하지 않았을 때의 결과 (그림 4-14(a))는 속도 모델 하부에 인공 잡음이 발생한 것을 확인 할 수 있다. 인공 잡음의 존재로 인해 모델 4~6 km 지점 2.5 km 깊이 아래에 있는 배사구조가 제대로 역산 되지 않았으며 오른쪽 모서리 2.3 km 깊이의 암염 층도 잡음으로 오염된 모습을 보인다. 2 초의 시간 창을 적용했을 때의 결과 (그림 4-14(b))는 시간 창을 적용하지 않았을 때의 결과와 큰 차이를 보인다. 대부분의 인공 잡음이 보이지 않으며 하부의 배사구조도 적절히 역산이 되었다. 0.5 초의 시간 창을 적용했을 때의 결과 (그림 4-14(c))는 시간 창을 적용하지 않은 결과보다 더 좋은 역산 결과를 보이지만 2 초의 시간 창을 적용한 결과와는 큰 차이를 보이지 않는다.

그림 4-15은 1.4 km 지점과 7.9 km 지점 속도의 깊이 프로파일이다. 속도 프로파일에서는 시간 창을 적용하지 않은 방법, 2 초의 시간 창을 적용한 방법, 0.5 초의 시간 창을 적용한 방법 모두 실제 속도 프로파일에 상당히 근접한 결과를 보여준다. 2초의 시간 창을 적용한 방법과 0.5 초의 시간 창을 적용한 방법의 결과는 거의 대부분의 위치에서 서로 속도 값이 유사하다. 시간 창을 적용하지 않은 역산 결과는 인공 잡음의 영향으로 인해 속도 모델 하부의 구조가 정확하게 역산 되지 않았고 모델 상부의 속도 프로파일도 실제 속도 값과 다른 값으로 역산 된 부분이 존재하지만 7.9 km 지점 깊이 프로파일의 암염 층 속도나 암염 층 바로 아래의 저속도 층과 같이 몇몇 부분은 오히려 시간 창을 적용한 방법들 보다 더 정확히 역산이 되었다. 비록 속도의 깊이 프로파일에서는 각 방법이 유사한 정

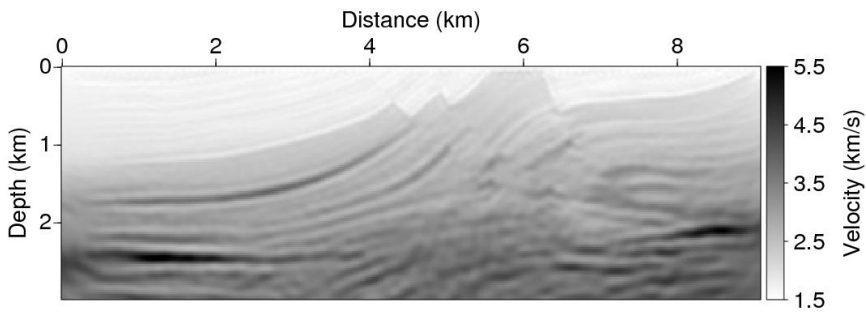
도의 정확도를 보였지만 역산된 속도 모델의 속도 구조와 인공 잡음을 고려하면 시간 창을 적용한 방법이 시간 창을 적용하지 않는 방법보다 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산에 더 적합하다고 결론지을 수 있다. 3.4절의 시간 창에 따른 파동장의 비교를 통해 이론적으로는 시간 창이 짧을 때 좋은 역산 결과를 주지만 본 실험에서는 시간 창이 충분히 짧다면 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산의 결과는 크게 달라지지 않음을 알 수 있다.



(a)

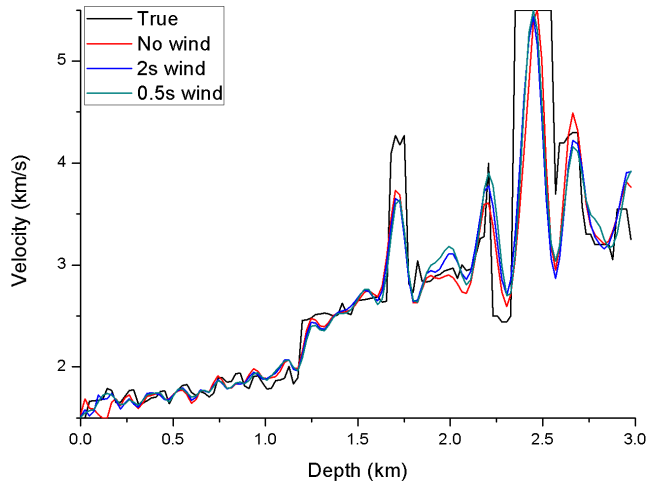


(b)

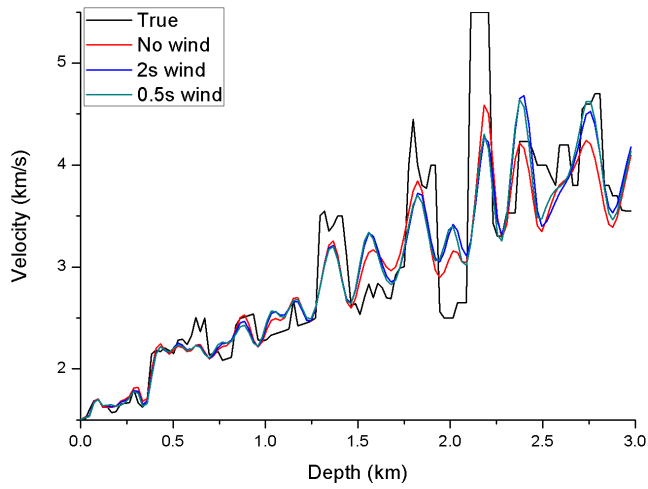


(c)

그림 4-14. 가우스 무작위 잡음과 스파이크 잡음이 추가된 Marmousi 인공 합성 자료에 대해 (a) 시간 창을 적용하지 않았을 때, (b) 2 초의 시간 창을 적용 했을 때, (c) 0.5 초의 시간 창을 적용 했을 때 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과.



(a)



(b)

그림 4-15. (a) 1.4 km, (b) 7.9 km 지점에서 추출한 깊이 프로파일.

역산 결과들을 정량적으로 비교하기 위해서 실제 속도 모델과 역산 결과의 모델 오차와 역산 결과를 얻기 위해 수행한 반복 계산의 횟수를 표 4-4에 기록하였다. 모델 오차는 식 (4.2.1)을 사용하여 계산하였다.

디콘볼루션 기반과 콘볼루션 기반의 완전 파형 역산 방법 모두 짧은 시간 창을 사용할수록 더 낮은 모델 오차를 보였다. 가우스 무작위 잡음은 공통 송신원 모음 전체에 균일하게 분포되어 있으므로 신호 대 잡음 비는 송신원 근처의 초기 시간대가 후기 시간대 보다 높다. 따라서 시간 창을 적용하여 초기 시간의 정보만 사용할 경우 신호 대 잡음 비가 높은 정보를 이용하여 참조 트레이스를 구성할 수 있다. 또한 스파이크 잡음은 공통 송신원 모음 초기 시간부터 후기 시간까지 골고루 분포되어 있으므로 적은 시간 정보를 사용할 경우 스파이크 잡음이 참조 트레이스에 포함될 확률이 줄어들게 된다. 따라서 시간 창의 길이가 짧아질수록 잡음이 역산에 미치는 영향이 줄어들어 모델 오차가 줄어드는 것이다. 또한 시간 창의 길이가 짧을 경우 직접파 성분이 참조 트레이스에 지배적으로 영향을 미친다. 직접파 성분은 지하 매질의 속도 변화에 거의 영향을 받지 않으므로 매 반복 계산마다 유사한 참조 트레이스가 구성된다. 따라서 시간 창이 짧을 경우 시간 창이 긴 경우에 비해 매 반복 계산마다 파동장의 변화가 더 작으므로 목적 함수의 비선형성이 줄어들게 되어 역산이 더 안정적으로 수행된다. 하지만 참조 트레이스는 송신 파형의 정보를 모두 포함하고 있어야 하므로 시간 창의 길이는 적어도 선택된 트레이스의 직접파를 모두 포함하는 시간 보다 크게 설정 되어야 한다.

디콘볼루션 기반의 완전 파형 역산 결과는 0.5 초의 시간 창을 적용한 방법을 제외하면 모두 콘볼루션 기반의 완전 파형 역산 결과보다 인공 잡음의 수준이 높으며 모델 오차가 크다. 0.5 초의 시간 창을 적용한 경우 두 방법의 모델 오차간 큰 차이는 없으며 디콘볼루션 기반의 역산 결과 (그림 4-12(c))와 콘볼루션 기반의 역산 결과 (그림 4-14(c))를 비교해보면 그림 4-12(c)는 상대적으로 높은 해상도를 보이지만 인공 잡음이 어느 정도 포함되어 있고 그림 4-14(c)는 상대적으로 낮은 해상도를 보이지만 인공 잡음이 거의 포함되어 있지 않다. 또한 2 초의 시간 창을 적용한 결과의 경우 디콘볼루션 기반의 역산 결과 (그림 4-12(b))는 0.5 초의 시간 창을 적용한 결과와 큰 차이를 보이지만 콘볼루션 기반의 역산 결과 (그림 4-14(b))는 0.5 초의 시간 창을 적용한 결과와 큰 차이가 없다. 위와 같은 결과를 통해 스파이크 잡음과 같이 강하고 복잡한 잡음이 포함되어 있을 때는 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산이 디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산보다 더 안정적인 결과를 준다고 결론지을 수 있다. 이는 4.3.1절의 가우스 무작위 잡음이 포함된 자료를 통해 얻은 결과와는 반대되는 결론이다.

관측 파동장에 잡음이 포함된 경우 식 (3.1.9)에 있는 디콘볼루션 기반 완전 파형 역산의 잔차에서 수치 파동장 부분 ( $\frac{\tilde{u}_j}{\tilde{u}_{ref}}$ )은 잡음을 전혀 포함하고 있지 않지만 관측 파동장 부분 ( $\frac{d_j}{d_{ref}}$ )은 잡음을 포함하고 있다. 만약 가우스 무작위 잡음과 같은 낮은 수준의 잡음이 관측 파동장에 포함되어 있다면 신호 대 잡음 비가 높은 참조 트레이스를 선택 할 경우 잡음은 잔차 계산에 큰 영향을 주지 못한다. 따라서 가우스 무작위 잡음만 포함된 경우 4.3.1절의 결과에서

볼 수 있듯이 디콘볼루션 기반의 완전 파형 역산은 안정적이고 높은 해상도의 역산 결과를 보여주었다. 하지만 스파이크 잡음과 같이 강하고 복잡한 잡음이 관측 파동장에 포함되어 있을 경우 관측 파동장으로 구성된 참조 트레이스에 포함된 잡음의 크기도 커지게 된다. 디콘볼루션 기반의 완전 파형 역산의 잔차에서 수치 파동장 부분은 잡음을 전혀 포함하고 있지 않기 때문에 관측 파동장의 큰 잡음은 잔차 계산에 큰 영향을 미치게 된다. 하지만 콘볼루션 방법의 경우 식 (3.2.5)에서 볼 수 있듯이 파동장과 참조 트레이스를 서로 교차하여 곱하므로 관측 파동장에 잡음이 포함되어 있으면 잔차의 수치 파동장 부분 ( $\tilde{u}_j \tilde{d}_{\text{ref}}$ )과 관측 파동장 부분 ( $\tilde{d}_j \tilde{u}_{\text{ref}}$ ) 모두 잡음을 포함하게 된다. 따라서 강하고 복잡한 잡음이 있을 때 콘볼루션 기반의 역산이 디콘볼루션 기반의 역산에 비해 비교적 안정적으로 역산을 수행하게 된다.

| Figure  | Source method | Time window | Model misfit          | Number of iteration |
|---------|---------------|-------------|-----------------------|---------------------|
| 2-2(d)  | -             | -           | $5.38 \times 10^{-4}$ | 0 (Starting)        |
| 4-12(a) | Deconvolution | No          | $5.42 \times 10^{-4}$ | 40                  |
| 4-12(b) | Deconvolution | 2 s         | $4.97 \times 10^{-4}$ | 39                  |
| 4-12(b) | Deconvolution | 0.5 s       | $4.65 \times 10^{-4}$ | 27                  |
| 4-14(a) | Convolution   | No          | $5.02 \times 10^{-4}$ | 27                  |
| 4-14(b) | Convolution   | 2 s         | $4.76 \times 10^{-4}$ | 21                  |
| 4-14(c) | Convolution   | 0.5 s       | $4.73 \times 10^{-4}$ | 20                  |

**표 4-4.** 가우스 무작위 잡음과 스파이크 잡음이 포함된 자료를 이용한 경우 시간 창에 따른 모델 오차와 반복 계산 횟수.



## 4.4 해양 환경에서 스트리머를 이용한 Marmousi 인공 합성 자료

앞선 인공 합성 자료 실험들은 고정된 수신기 배열을 가지는 탐사 환경에서 획득한 자료를 이용한 실험들이었다. 탄성과 탐사는 고정된 수신기를 사용하는 경우도 있지만 해양 탐사의 경우에는 주로 스트리머를 이용하여 탐사를 수행한다. 그러므로 스트리머를 이용한 해양 환경에서도 송신 파형 독립 완전 파형 역산이 성공적으로 적용될 수 있는지 확인 할 필요가 있다. 따라서 네 번째 인공 합성 자료 실험으로 그림 4-16(a)와 같이 480 m의 해수 층이 존재하는 해양 환경에서 스트리머(streamer)를 이용하여 취득한 인공 합성 자료에 대해 완전 파형 역산을 수행하였다. 총 190 개의 송신원이 사용되었으며 각각의 간격은 48 m 이다. 스트리머의 길이는 7.2 km로 24 m 간격으로 300 개의 수신기가 배치되어있다. 총 기록 시간은 8 초이고 샘플링 간격은 0.002 초 이다. 인공 합성 자료의 100번째 공통 송신원 모음은 그림 4-17에 있고 역산을 위한 초기 속도 모델은 평활화 된 모델 그림 4-16(b)을 사용하였다. 완전 파형 역산에 사용된 주파수, 최적화 방법, 도약 거리 계산 방법은 앞선 실험에서 사용한 방법과 동일하다. 본 자료에 대해 디콘볼루션 및 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 음향과 완전 파형 역산을 적용하였고 각각 OTR, 송신원 주변의 5개의 트레이스를 사용한 STR 그리고 ATR 방법을 사용하였을 때의 결과를 비교해보았다.

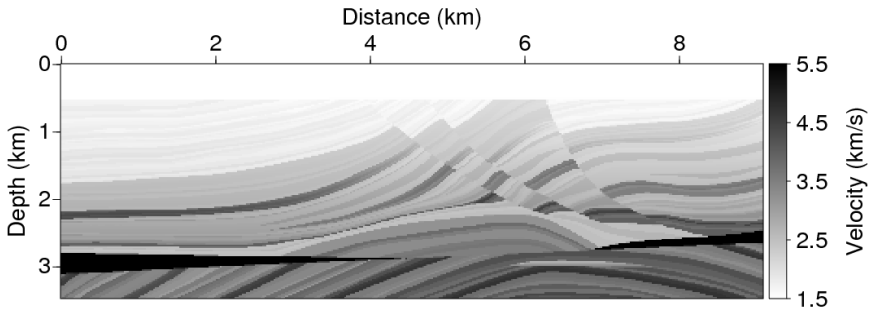
디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과는 그림 4-18에서 확인할 수 있다. OTR과 STR 방법을 사용한 경우 (그림 4-18 (a), (b)) 비교적 실제 모델에 잘 수렴하는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 ATR을 사용한 경우 모델이 거의 업데이트 되지 않아 실제

속도 모델과 상당히 멀리 떨어져 있으며 인공 잡음이 상당수 존재한다. 깊이 프로파일의 경우 1.4 km 지점의 깊이 프로파일 (그림 4-19(a))은 실제 속도의 깊이 프로파일의 속도 경향을 잘 반영하고 있다. 하지만 하부의 경우 정보가 부족하여 높은 해상도의 역산 결과를 보지는 않는다. 7.9 km 지점의 깊이 프로파일 (그림 4-19(b))은 상부의 결과는 비교적 실제 속도 구조에 근접하지만 하부의 경우 실제 속도 구조와 상당한 차이를 보인다. 스트리머 자료이고 모델 왼쪽에서 오른쪽으로 이동하면서 진행한 탐사를 묘사한 자료이기 때문에 모델의 오른쪽 부분으로 갈수록 왼쪽에 비해 정보가 부족하게 된다. 따라서 오른쪽 하부의 경우 역산에 필요한 충분한 정보가 자료에 기록되지 않아 역산이 올바른 방향으로 진행되지 않았다.

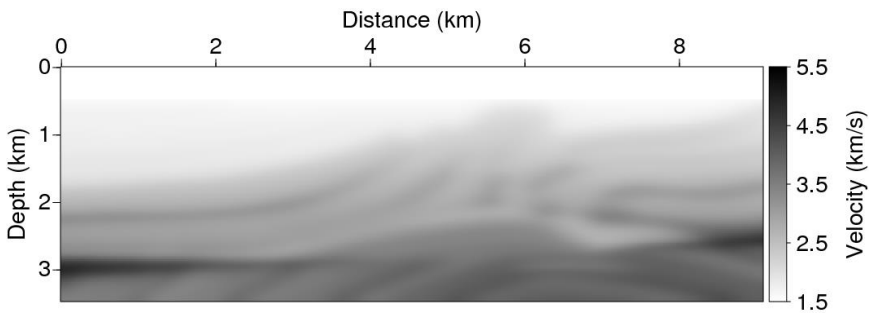
콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산의 결과는 그림 4-20에 도시되어있다. 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산의 결과도 앞선 실험들과 마찬가지로 OTR과 STR방법의 경우 실제 속도 구조에 잘 수렴하고 있는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 ATR 방법의 경우 역산이 거의 진행되지 않아서 속도 모델 왼쪽 일부만 역산이 진행되고 전체적인 속도 구조는 거의 변하지 않았다. 그림 4-21은 1.4 km 지점과 7.9 km 지점에서 추출한 깊이 프로파일 결과이다. 대부분의 위치에서 OTR과 STR 방법의 결과는 서로 유사한 깊이 프로파일을 보이며 ATR 방법의 결과에 비해서 실제 속도 구조에 더 근접하게 역산 되었다. 1.4 km 깊이에서의 결과가 7.9 km에서의 결과보다 실제 속도 구조에 더 근접하며 이는 1.4 km에서의 깊이 프로파일은 관측 파동장에 충분한 정보가 기록되었기 때문에 실제 속도와 상당히 유사하지만 7.9 km에서의 깊이 프로파일은 관측 파동장에 기록된 탄성과 정보가 부족하여 역산을 통해 정확한

속도 구조가 도출되지 않았기 때문이다.

디콘볼루션 기반의 결과와 콘볼루션 기반의 결과를 비교해보면 OTR과 STR의 경우 디콘볼루션 기반의 역산 결과가 콘볼루션 기반의 역산 결과에 비해 더 나은 해상도를 보여지만 인공 잡음의 수준도 더 높은 것을 확인 할 수 있다. ATR의 경우 콘볼루션 기반의 결과는 모델 왼쪽 부분만 조금 역산이 되었고 인공 잡음은 거의 보이지 않지만 디콘볼루션 기반의 결과는 인공 잡음이 역산 과정에서 상당수 발생하였다. 각각의 결과를 정량적으로 비교하기 위해서 모델 오차를 비교하고 표 4-5에 기록하였다. 디콘볼루션 기반과 콘볼루션 기반 모두 OTR과 STR은 서로 유사한 모델 오차를 가지며 ATR의 경우 상대적으로 더 높은 모델 오차를 보인다. 거의 유사한 모델 오차를 보여준다. 디콘볼루션 기반과 콘볼루션 기반의 결과를 서로 비교해 보면 OTR의 경우 콘볼루션 기반이 조금 더 낮은 모델 오차를 보여주고 STR의 경우 서로 거의 같은 모델 오차를 가지는데 반복 계산 횟수가 서로 다르기 때문에 나타나는 작은 차이일 뿐 유의미한 차이는 아니며 이는 앞선 4.2절의 결과와 일치한다.



(a)



(b)

그림 4-16. (a) 해수 층이 존재하는 Marmousi 속도 모델, (b) 평활화된 초기 속도 모델.

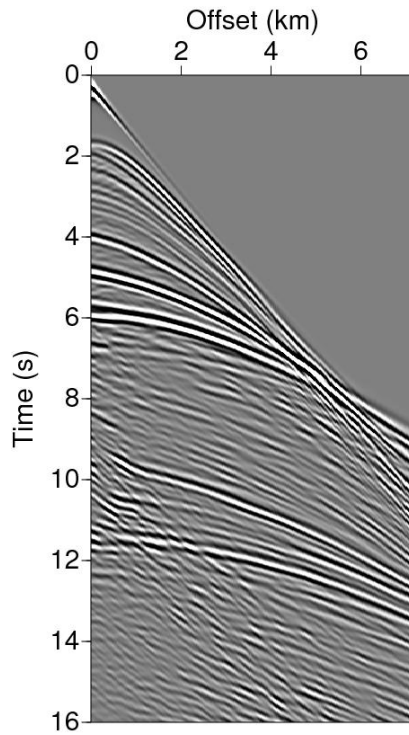
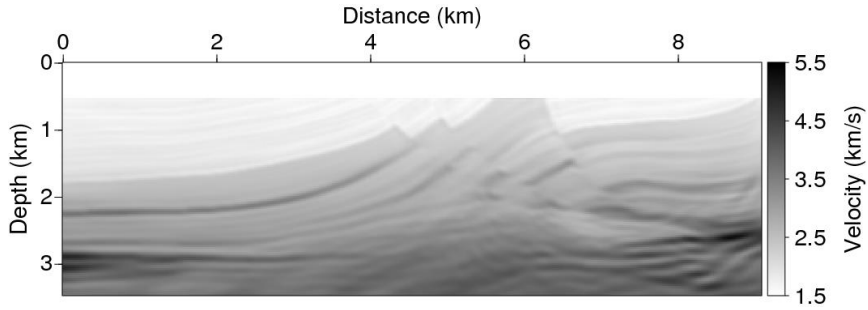
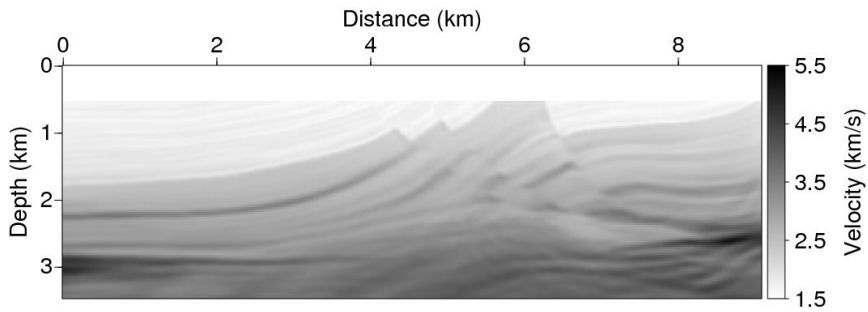


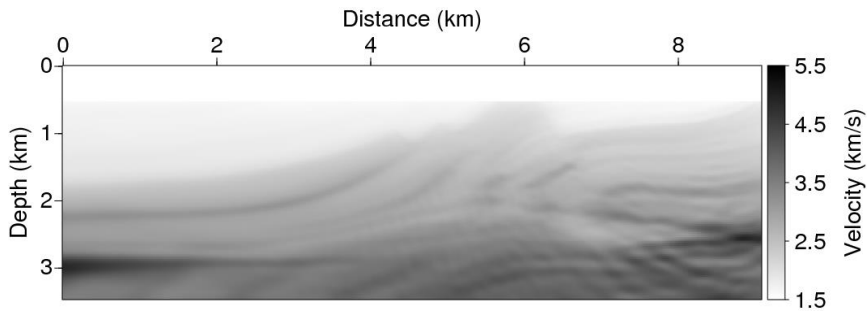
그림 4-17. 해양 환경에서 스트리머를 이용하여 얻은 인공 합성 자료 중 100번째 공통 송신원 모음.



(a)

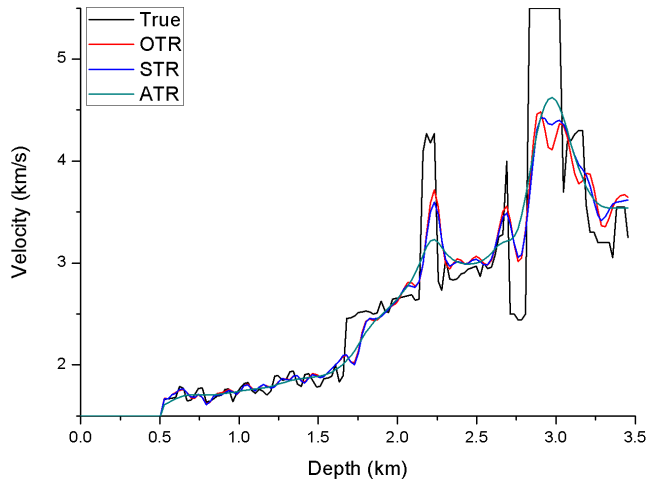


(b)

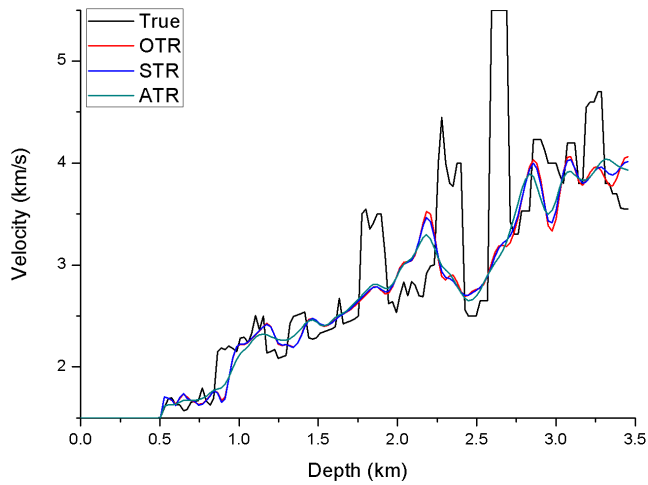


(c)

**그림 4-18.** 해양 환경에서 스트리머를 이용하여 얻은 Marmousi 인공 합성 자료에 대해 (a) OTR, (b) STR, (c) ATR 방법을 사용한 디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 적용한 결과.

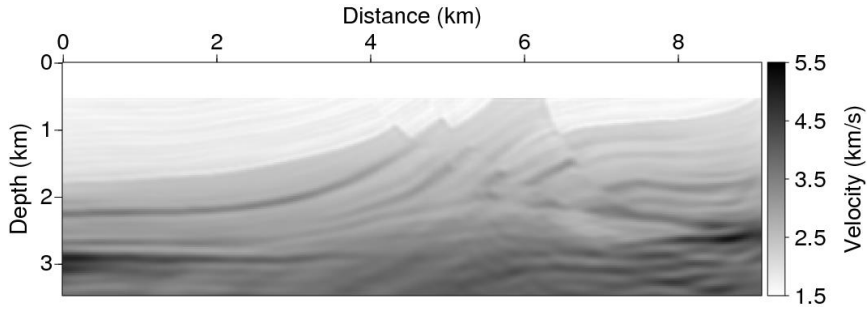


(a)

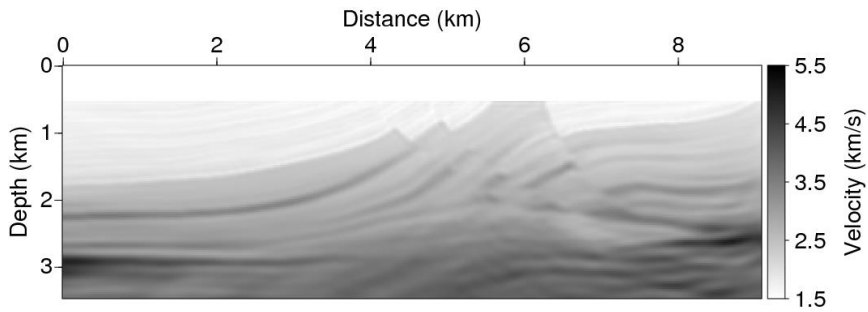


(b)

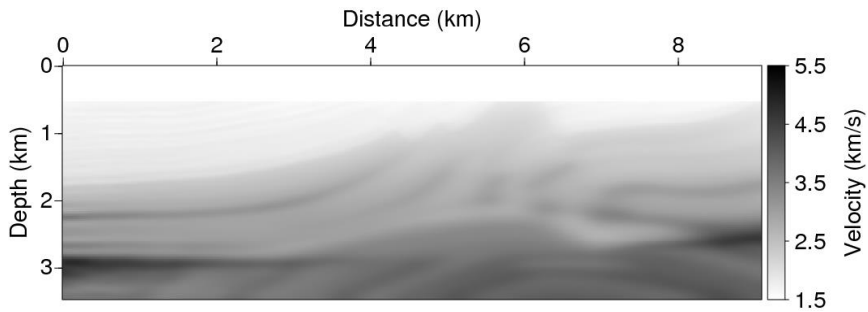
그림 4-19. (a) 1.4 km, (b) 7.9 km 지점에서 추출한 깊이 프로파일.



(a)



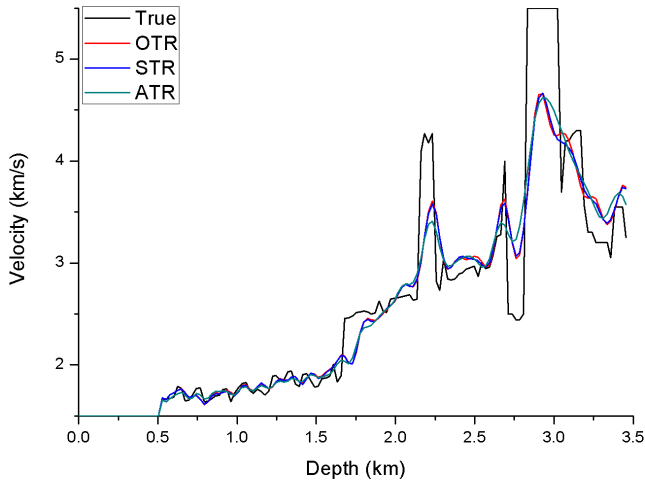
(b)



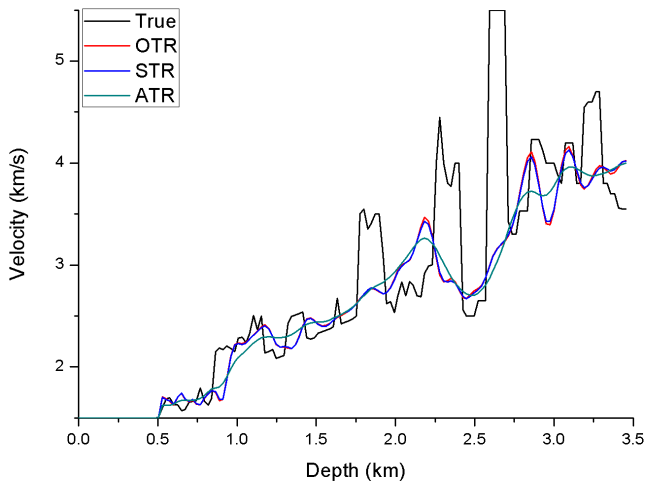
(c)

**그림 4-20.** 해양 환경에서 스트리머를 이용하여 얻은 Marmousi 인공 합성 자료에 대해 (a) OTR, (b) STR, (c) ATR 방법을 사용한 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 적용한 결과.





(a)



(b)

그림 4-21. (a) 1.4 km, (b) 7.9 km 지점에서 추출한 깊이 프로파일.

| Figure  | Source method | Reference trace | Model misfit          | Number of iteration |
|---------|---------------|-----------------|-----------------------|---------------------|
| 4-16(b) | -             | -               | $4.23 \times 10^{-4}$ | 0 (Starting)        |
| 4-18(a) | Deconvolution | OTR             | $3.81 \times 10^{-4}$ | 21                  |
| 4-18(b) | Deconvolution | STR             | $3.80 \times 10^{-4}$ | 27                  |
| 4-18(c) | Deconvolution | ATR             | $4.10 \times 10^{-4}$ | 15                  |
| 4-20(a) | Convolution   | OTR             | $3.78 \times 10^{-4}$ | 22                  |
| 4-20(b) | Convolution   | STR             | $3.80 \times 10^{-4}$ | 30                  |
| 4-20(c) | Convolution   | ATR             | $4.09 \times 10^{-4}$ | 17                  |

**표 4-5.** 해양 환경에서 스트리머를 이용하여 얻은 Marmousi 인공 합성 자료의 경우 완전 파형 역산 방법에 따른 모델 오차와 반복 계산 횟수.

## 제 5 장 현장 자료 수치 예제

### 5.1 완전 파형 역산을 위한 준비

본 연구에서는 송신 파형 독립 완전 파형 역산의 현장 자료 적용성을 검증하기 위해서 멕시코만 현장 자료에 디콘볼루션과 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 적용하였다. 멕시코만 현장 자료는 해양 스트리머(streamer) 탐사 자료로 총 399 개의 송신원이 50 m 간격으로 사용되었고 각 송신원 당 408 개의 수신기가 25 m 간격으로 배열되어 있다. 총 기록 시간은 12 초이고 0.004 초 간격으로 기록 되었다. 현장 자료에 완전 파형 역산을 적용하기 위해서는 전 처리가 필수적이다. 본 실험에서는 Ha *et al.* (2012)의 제안 대로 초동 이전의 잡음들을 제거하였고 강한 에너지를 가지는 배드 트레이스들도 제거하였다. 그림 5-1은 멕시코만 현장 자료의 공통 송신원 모습과 공통 송신원 모습의 주파수 스펙트럼이다. 주파수 스펙트럼을 통해 5 Hz 이하에는 의미 있는 정보가 포함되어 있지 않음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 6.5 Hz에서 16.25 Hz까지 0.25 Hz 간격으로 주파수를 사용하였으며 감쇠 상수는  $0.5 \text{ s}^{-1}$  를 사용하였다. 고 주파수의 사이클 스키핑을 피하기 위해 독립 그룹 방법(Pratt *et al.* 1999, Kim *et al.* 2011)을 적용하여 주파수를 4 그룹으로 나누어 순차적으로 역산 하였다. 완전 파형 역산에 사용한 복소 주파수들은 표 5-1에 자세히 제시되어있다.

본 연구에서는 인공 합성 자료 실험과 마찬가지로 L-BFGS를 이용하여 최적화를 진행하였고 도약 거리는 포물선 보간법 (Vigh 2009)를 이용하여 계산하였다. 또한 각 복소 주파수 그룹에서 RMS 오차가 수렴하면 해당 복소 주파수 그룹에서 완전 파형 역산을 종료하고 다음 복소 주파수 그룹으로 이동하여 완전 파형 역산을 진행하였다. 주파수 영역 완전 파형 역산은 초기 속도 모델이 실제 모델에서 멀리 떨어져있으면 국소 최저치에 큰 영향을 받아 역산이 제대로 된 방향으로 수행되지 않는다. 따라서 본 연구에서는 라플라스 (Shin and Cha 2008) 및 라플라스-푸리에 영역 파형 역산으로 (Shin and Cha 2009) 실제 속도 구조에 상당히 근접한 모델을 역산 한 후, 역산한 속도 모델을 평활화하여 초기 속도 모델로 설정하였으며 그림 5-2에 도시하였다. 수치 모델링을 위한 송신 ricker wavelet을 이용하였고 최대 주파수는 각 복소 주파수 그룹의 최대 주파수에 따라 변화도록 설정하였다. 또한 시간에 대한 2 차 및 공간에 대한 4 차 정확도를 가지는 유한 차분법을 이용하여 시간 영역 정 전파 및 역 전파 모델링을 수행하였고 자유면 경계조건을 모델 상부에, higdon 경계 조건 (Higdon 1991)을 나머지 면에 적용하였다.

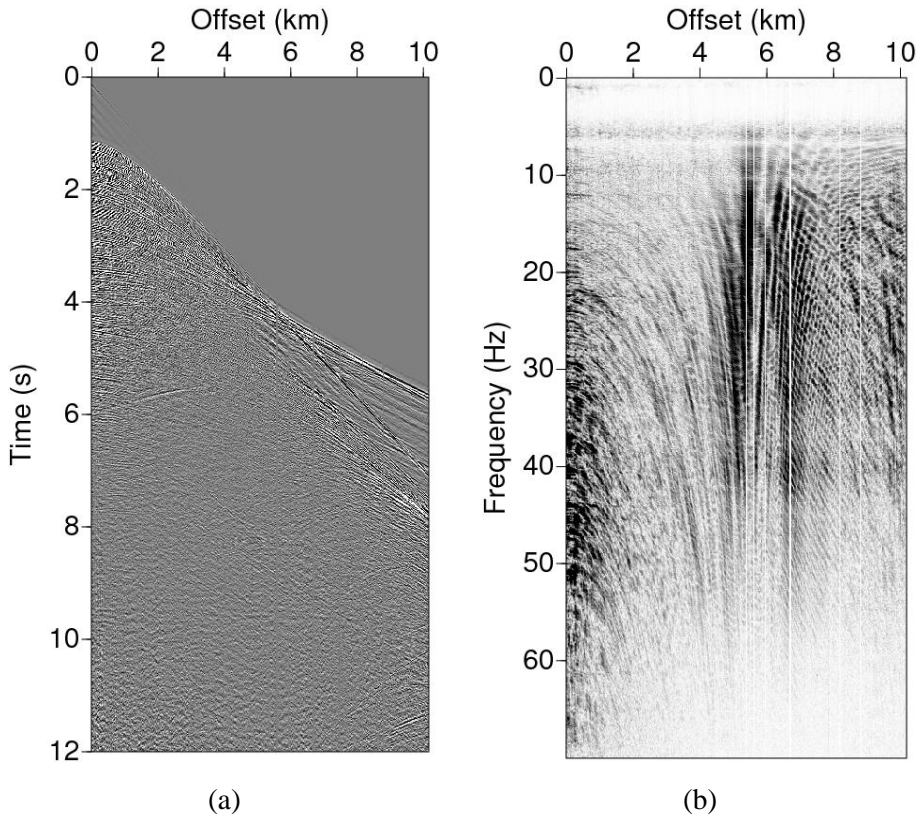


그림 5-1. 멕시코만 현장 자료의 (a) 공통 송신원 모음과 (b) 공통 송신원 모음의 주파수 스펙트럼.

| Complex frequency group | Frequency (Hz)  | Damping constant ( $s^{-1}$ ) |
|-------------------------|---|-------------------------------|
| 1                       | 6.5, 6.75, 7.0, 7.25, 7.5, 7.75, 8.0, 8.25, 8.5, 8.75           | 0.5                           |
| 2                       | 9.0, 9.25, 9.5, 9.75, 10.0, 10.25, 10.5, 10.75, 11.0, 11.25,    | 0.5                           |
| 3                       | 11.5, 11.75, 12.0, 12.25, 12.5, 12.75, 13.0, 13.25, 13.5, 13.75 | 0.5                           |
| 4                       | 14.0, 14.25, 14.5, 14.75, 15.0, 15.25, 15.5, 15.75, 16.0, 16.25 | 0.5                           |

표 5-1. 완전 파형 역산에 사용한 복소 주파수.

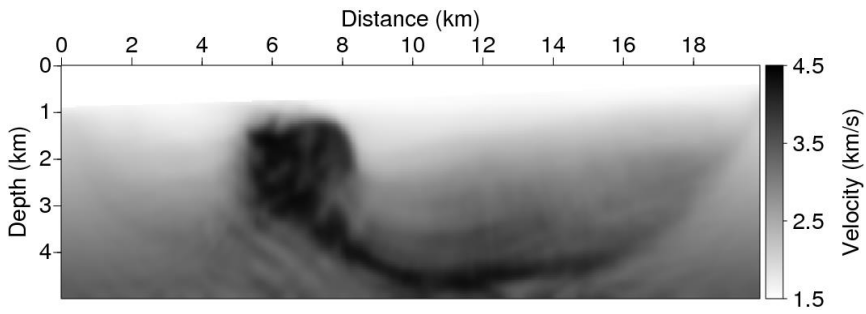


그림 5-2. 멕시코만 현장 자료 역산을 위한 초기 속도 모델.

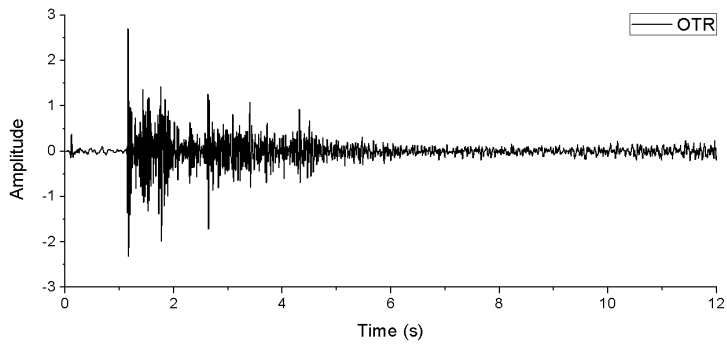
## 5.2 멕시코만 현장 자료

본 실험에서는 멕시코만 현장 자료에 디콘볼루션과 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 적용하였다. 멕시코만 현장 자료에는 무작위 잡음이 포함되어 있으며 본 연구에서는 음향파 완전 파형 역산을 현장 자료에 적용하므로 모드 변환파와 같은 탄성 파동 효과나 이방성 효과 또한 잡음으로 작용한다. 따라서 잡음들이 완전 파형 역산에 미치는 영향을 최소화 시키도록 참조 트레이스를 설정하는 것이 필수적이다. 본 실험에서는 참조 트레이스를 구성하는 트레이스의 개수와 시간 창의 길이를 변경시켜가며 실험을 진행하였고 그 결과를 비교하였다.

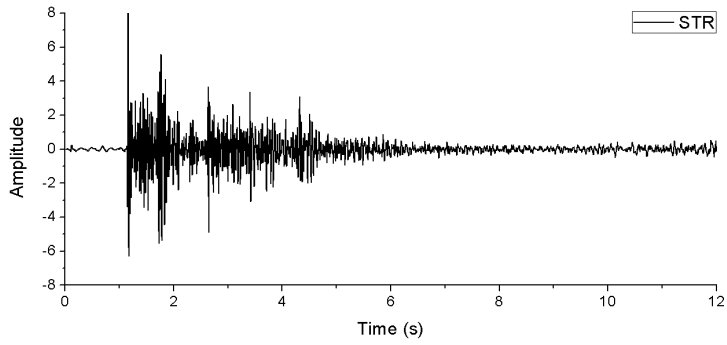
첫 번째 실험에서는 시간 창이 적용되지 않았을 때 참조 트레이스를 구성하는 트레이스 개수를 변화시키면서 완전 파형 역산을 수행하고 결과를 비교하였다. OTR, STR, ATR 방법을 각각 적용하여 디콘볼루션 기반 및 콘볼루션 기반 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 수행하였다. 4장의 인공 합성 자료 실험에 수신기가 고정된 위치에 배열되어 있는 경우는 송신원 양쪽으로 총 11 개의 트레이스를 선택하여 STR의 참조 트레이스를 구성하였다. 하지만 멕시코만 현장 자료는 해양 스트리머 탐사 자료이므로 수신기가 송신원으로부터 한쪽 방향으로만 배열되어 있기 때문에 송신원에서 가장 가까운 5 개의 트레이스를 이용하여 STR의 참조 트레이스를 구성하였다. 그림 5-3은 멕시코만 현장 자료의 33번째 공통 송신원 모습에서 추출한 참조 트레이스들이다. OTR 방법과 STR 방법의 참조 트레이스는 반사파 이벤트가 등장하는 1 초 근처에 강한 신호를 가지고 이후 점차 줄어드는 형태를 가진다. 하지만 ATR 방법의 참조 트레이스는



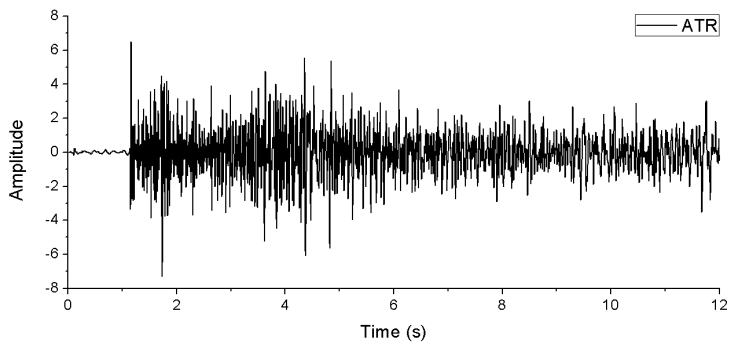
반사파 이벤트가 등장하는 1 초 근처부터 후기 신호까지 모두 비슷한 규모의 진폭을 가지는 신호들로 구성되어 있다. 세 참조 트레이스 모두 복잡한 파동 현상을 포함하고 있지만 ATR 방법의 참조 트레이스가 가장 복잡한 신호들을 가지고 있으며 OTR과 STR 방법의 참조 트레이스들은 서로 유사한 형태를 보인다. 참조 트레이스가 복잡하다는 것은 목적 함수의 비선형성이 증가한다는 것을 의미하기 때문에 인공 합성 자료를 통한 실험 결과와 마찬가지로 현장 자료를 이용한 실험에서도 ATR 방법보다 OTR과 STR 방법이 더 나은 결과를 줄 것을 예상할 수 있다.



(a)



(b)



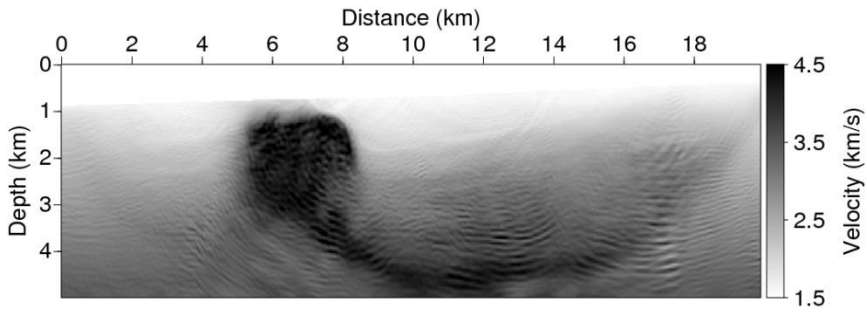
(c)

그림 5-3. 멕시코만 현장 자료에서 추출한 (a) OTR, (b) STR, (c) ATR 방법의 참조 트레이스 ( $d_{ref}$ ).

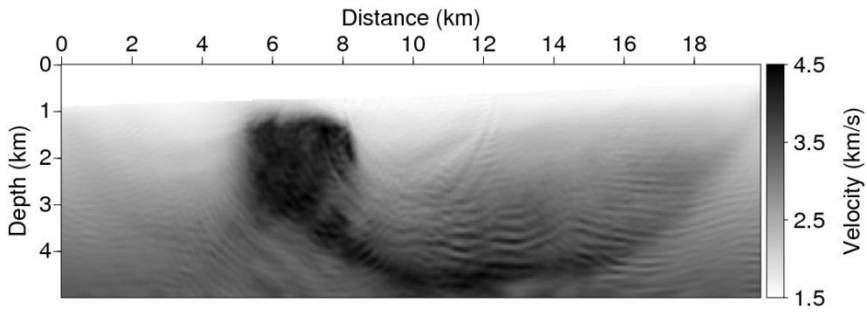
멕시코만 현장 자료는 앞서 실험한 인공 합성 자료와는 달리 탄성 파동 효과, 이방성 효과, 무작위 및 일관성 잡음 등이 포함되어 있는 자료이다. 따라서 시간 창을 적용하지 않을 경우 후기 신호의 잡음들과 복잡한 파동 현상들이 참조 트레이스 구성에 큰 영향을 주어 4.3.2절의 실험 결과처럼 완전 파형 역산이 올바른 해를 찾는 것을 방해한다. 그림 5-4는 멕시코만 현장 자료에 디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 적용하여 얻은 속도 모델이다. OTR 방법을 사용한 완전 파형 역산 결과인 그림 5-4(a)는 암염 돔의 경계가 비교적 선명하게 드러나지만 많은 잡음으로 인해 배경 퇴적층들의 속도 구조가 거의 드러나지 않는다. 그림 5-4(b)는 STR 방법을 사용한 완전 파형 역산 결과로 OTR 방법을 사용한 결과와 마찬가지로 강한 인공 잡음이 존재하고 여전히 배경 퇴적층들의 속도 구조가 역산되지 않았으며 암염 돔의 경계도 불분명하다. ATR 방법을 사용한 완전 파형 역산 결과인 그림 5-4 (c)는 역산이 거의 진행되지 않은 것을 확인 할 수 있다. 실제로 세 방법 중 가장 적은 횟수의 반복 계산이 수행되었으며 모델 업데이트 또한 의미 있는 속도 구조를 드러내지 못하고 인공 잡음만 역산 하였다. 이는 복잡한 참조 트레이스가 목적 함수의 비선형성을 크게 증대시켜 올바른 구조를 역산하는 것을 방해하고 RMS 오차가 줄어드는 것을 저해했기 때문에 나타나는 현상이다.

그림 5-5는 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 적용하여 얻은 속도 모델이다. OTR 및 STR 방법을 사용한 완전 파형 역산 결과인 그림 5-5(a)와 그림 5-5(b)는 인공 잡음의 수준은 전체적으로 디콘볼루션 기반의 역산 결과보다 낮으며 배경 퇴적층의 속도도 어느 정도 역산을 하였다. 하지만 여전히 인공

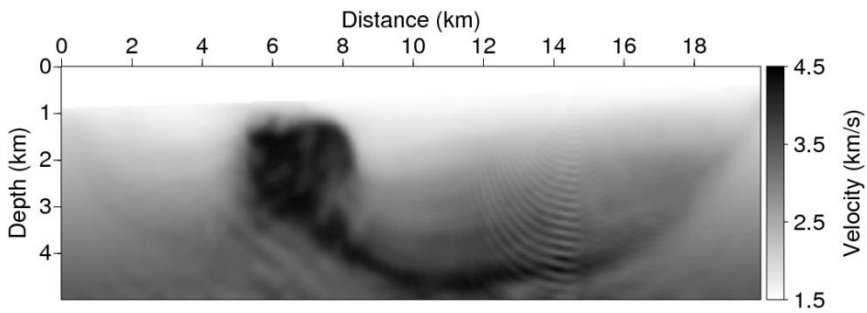
잡음이 나타나며 인공 잡음으로 인해 속도 모델이 충분히 업데이트 되지 않았다. ATR 방법을 사용한 완전 파형 역산 결과인 그림 5-5(c)는 디콘볼루션 기반의 역산 결과인 그림 5-4(c)와 마찬가지로 의미 있는 속도 구조는 거의 업데이트가 되지 않았으며 약간의 인공 잡음만 발생하였다.



(a)

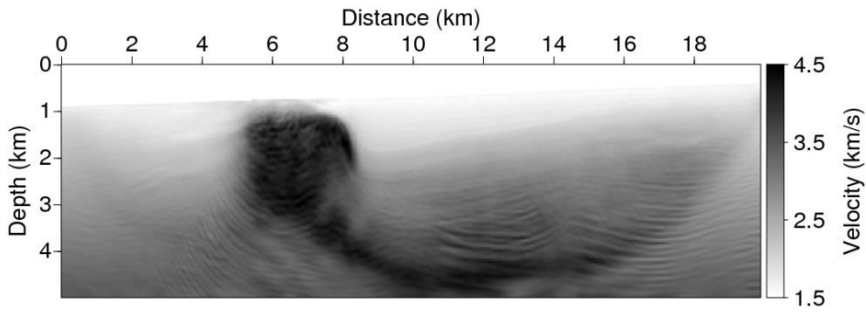


(b)

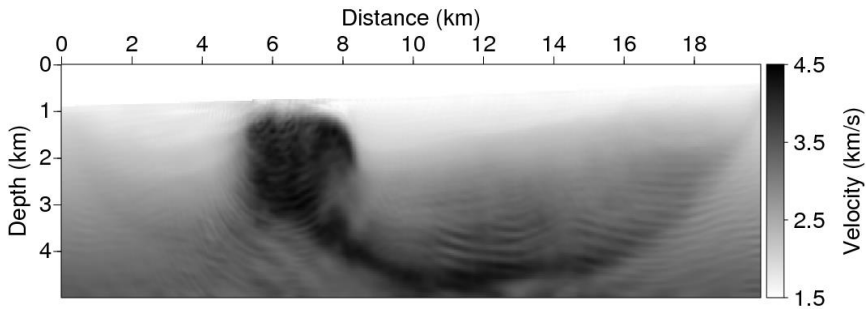


(c)

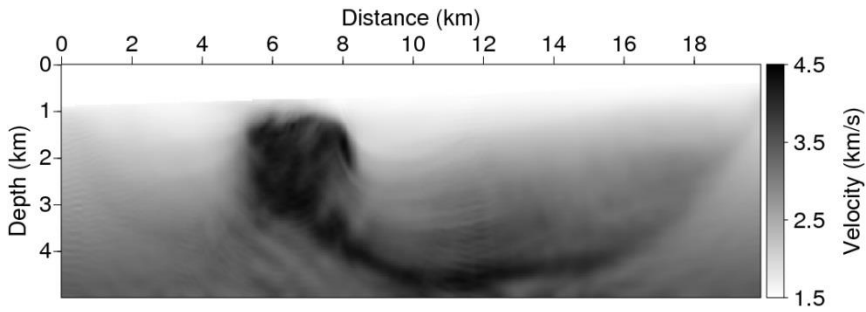
그림 5-4. 멕시코만 현장 자료에 대해 (a) OTR, (b) STR, (c) ATR 방법을 사용한 디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 적용한 결과.



(a)



(b)



(c)

그림 5-5. 멕시코만 현장 자료에 대해 (a) OTR, (b) STR, (c) ATR 방법을 사용한 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 적용한 결과.

앞선 실험을 통해 시간 창을 적용하지 않고 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 현장 자료에 적용 할 경우 참조 트레이스에 지나치게 복잡한 파동 현상들이 포함되어 완전 파형 역산이 올바른 방향으로 진행되지 않음을 알 수 있다. 따라서 이번 실험에서는 참조 트레이스에 시간 창을 적용하여 완전 파형 역산을 수행하였다. ATR 방법의 경우 시간 창을 적용하면 시간뿐만 아니라 오프셋에 대해서도 창이 적용되며 시간 창의 길에 따라서 참조 트레이스를 구성하는 트레이스의 개수가 달라지게 된다. 따라서 시간 창을 적용한 ATR 방법은 시간 창을 적용한 STR 방법과 유사하므로 ATR 방법에 대해서는 시간 창을 적용한 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 수행하지 않고 OTR과 STR 방법에 대해서만 시간 창을 적용하여 실험을 진행하였다. 본 자료의 송신원에서 인접한 트레이스들에는 눈에 띄는 배드 트레이스들이 포함되어 있지 않으므로 OTR 방법이 참조 트레이스의 대표성 문제에 크게 영향 받지 않을 것이라고 예상할 수 있다.

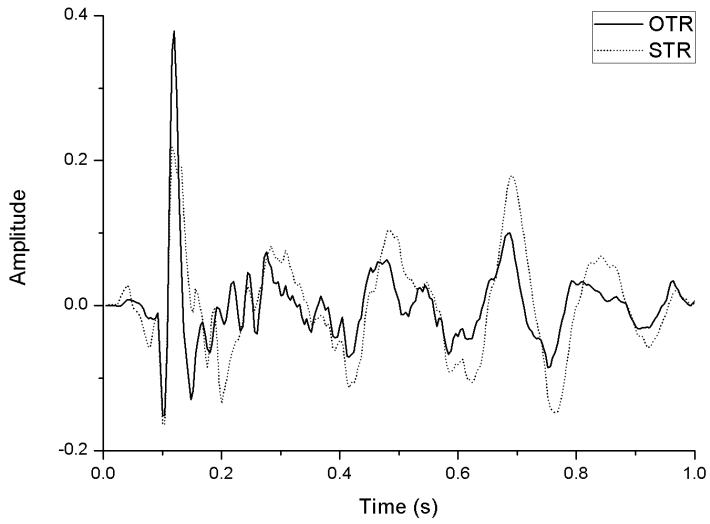
그림 5-6은 멕시코만 현장 자료에서 추출한 OTR과 STR 방법의 참조 트레이스 (그림 5-3(a), (b)) 중 0~1 초에 해당하는 부분만 확대한 그래프이다. 그림 5-3에서 사용한 참조 트레이스의 경우 시간 창을 적용하지 않았기 때문에 상당히 복잡한 탄성과 이벤트들이 참조 트레이스에 포함되어 있다. 하지만 1 초까지 확대한 그림 5-6(a)의 그래프는 직접과의 정보만 포함하고 있어 역산으로 인한 속도 모델의 변화에 민감하지 않다. 또한 상대적으로 단순한 형태를 가지고 있어 참조 트레이스가 목적 함수의 비선형성에 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 4.3.2절의 실험에서 제시된 대로 직접파 성분만 포함하는 참조 트레이스를

구성하는 것이 송신 파형 독립 완전 파형 역산의 안정성을 높일 수 있는 방법이기 때문에 1 초의 시간 창을 적용하는 것은 합리적인 선택일 수 있다. 하지만 본 트레이스는 33번째 공통 송신원 모음으로부터 얻은 참조 트레이스이며 33번째 공통 송신원 모음은 상대적으로 수심이 깊은 부분에서 획득한 자료이다. 그림 5-2를 통해 볼 때, 수심은 후기 공통 송신원 모음으로 갈수록 더 알아지는 경향이 있기 때문에 마지막 공통 송신원 모음의 해저면 반사파 이벤트가 기록된 시간을 확인할 필요가 있다. 마지막 공통 송신원 모음의 해저면 반사파 이벤트가 기록된 시간은 약 0.56 초 이다. 해저면 반사파 이벤트가 기록된 시간은 송신원에서 가장 가까운 트레이스들의 모음(near trace gather)을 통해 간단히 확인 할 수 있으며 (그림 5-6(b)) 이를 통해 참조 트레이스의 시간 창을 결정할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 0.5 초의 시간 창을 적용하여 참조 트레이스를 구성하였다.

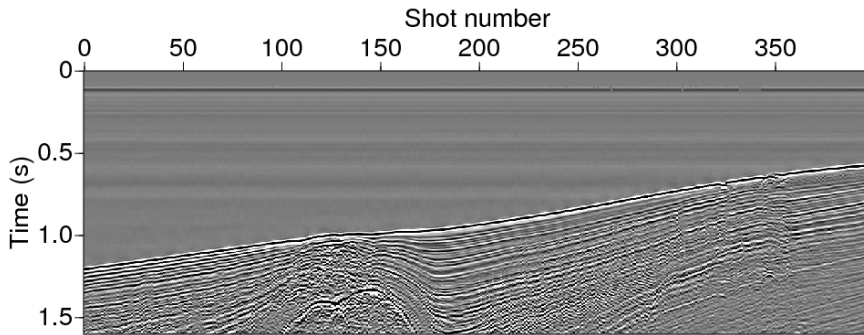
시간 창을 적용 할 때와 적용 하지 않을 때 주파수 영역에서 참조 트레이스들의 거동을 비교하기 위해 푸리에 변환을 통해 참조 트레이스들을 주파수 영역으로 변환하였다. 주파수 영역의 완전 파형 역산에서 국소 최저치 문제를 심화 시키는 가장 큰 원인 중 하나는 위상 랩핑(phase wrapping) 현상 이다 (Alkhalifah and Choi 2012; Alkhalifah 2014; Choi and Alkhalifah 2015; Jun *et al.* 2016). 또한 주파수 영역 완전 파형 역산에서 위상은 진폭 보다 더 중요한 영향을 미치기 때문에 (Bednar *et al.* 2007; Pyun *et al.* 2007) 참조 트레이스의 주파수 영역 위상 성분을 비교하였다. 그림 5-7은 시간 창을 적용 하지 않았을 때 (W/O window) 와 적용 했을 때 (W window) 주파수 영역 참조 트레이스 ( $\tilde{d}_{ref}$ ) 중 위상 성분을 도시한 것이다. OTR



방법과 STR 방법 모두 시간 창을 적용하지 않았을 때 위상이 주파수에 따라 심하게 진동하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 반사파 이벤트들과 다양한 파동 현상들이 참조 트레이스에 포함되어 위상 성분을 복잡하게 만들었기 때문이다. 복잡한 위상 성분을 가지는 참조 트레이스가 송신 파형 독립 완전 파형 역산에 사용될 경우 목적 함수의 비선형성이 더 증가하게 된다. 하지만 시간 창을 적용하였을 때 참조 트레이스에는 반사파 이벤트나 다양한 파동 현상들이 포함되어 있지 않고 주로 직접파만 포함되어 있기 때문에 위상 성분은 주파수에 따라 비교적 선형적으로 변한다. 따라서 시간 창을 적용한 참조 트레이스를 사용할 경우 송신 파형 독립 완전 파형 역산이 더 안정적으로 수행된다.

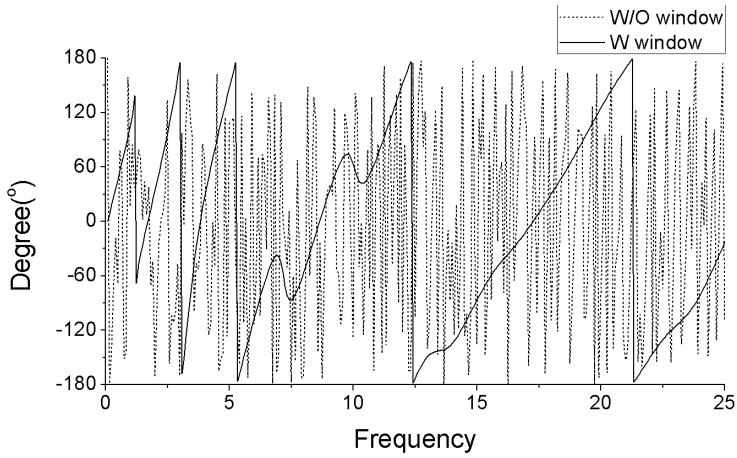


(a)

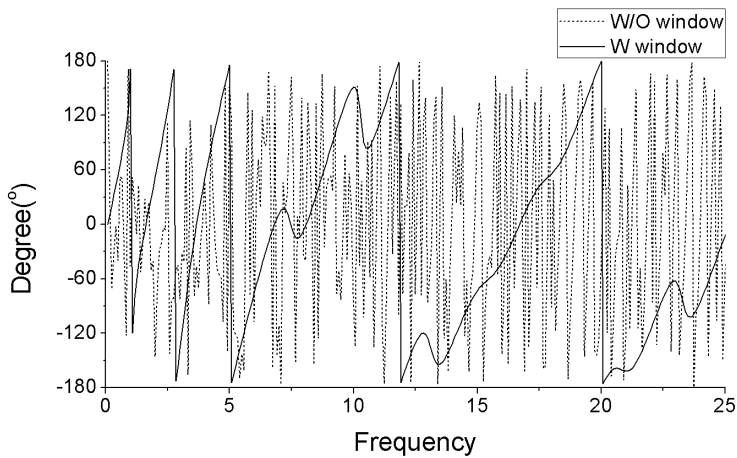


(b)

**그림 5-6.** (a)멕시코만 현장 자료에서 추출한 OTR과 STR 방법의 참조 트레이스 ( $d_{ref}$ ) 중 0~1 초에 해당하는 부분을 확대한 그래프, (b) 송신원에서 가장 가까운 트레이스들의 모음 (near trace gather).



(a)



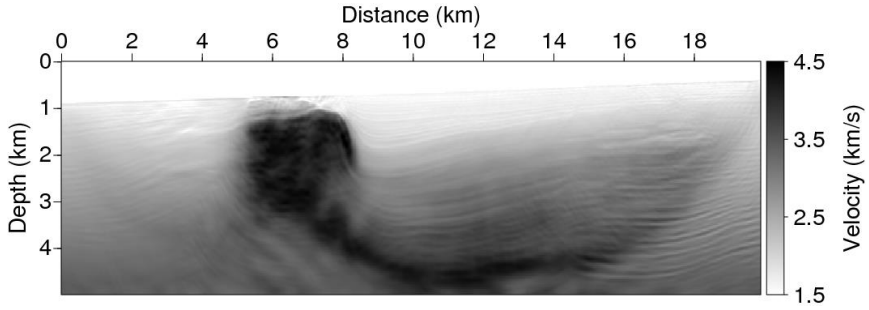
(b)

그림 5-7. 시간 창을 적용하지 않을 때와 적용 할 때 (a) OTR, (b) STR 방법의 주파수 영역 참조 트레이스 ( $\vec{d}_{ref}$ ) 중 위상 성분.

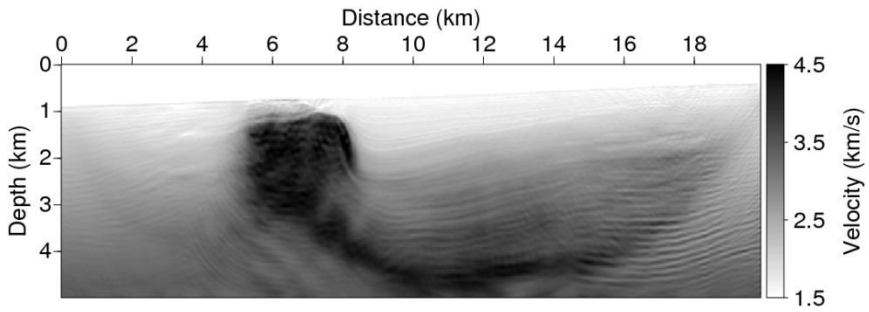
그림 5-8은 시간 창을 적용한 디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과이다. 시간 창을 적용하지 않은 결과(그림 5-5)에 비해 속도 모델의 해상도가 상당히 향상 되었으며 속도 구조들도 잘 업데이트 된 것을 확인 할 수 있다. 암염 돔 좌측 및 우측의 퇴적층 구조가 잘 역산이 되었으며 암염 돔의 상부 및 양쪽 경계도 명확히 역산이 되었다. 하지만 OTR 및 STR 방법을 사용한 역산 결과 모두 16~19 km 거리의 해저면 주변의 속도 모델에서 인공 잡음이 발생하였다. OTR과 STR 방법을 사용한 결과는 서로 큰 차이점이 보이지는 않지만 STR 방법을 사용한 결과의 16~19 km 거리 해저면 주변에서 더 심한 인공 잡음이 관찰되며 14~19 km 거리 3 km 깊이 아래에 존재하는 반사 면들이 과 역산 된 경향을 보인다.

그림 5-9는 시간 창을 적용한 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과이다. 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과도 시간 창을 적용한 참조 트레이스를 이용하였을 때 결과가 크게 향상되는 것을 확인 할 수 있다. 속도 모델의 해상도가 증가하였고 암염 돔의 상부 및 오른쪽 경계가 더 명확히 역산 되었으며 암염 돔 양쪽의 퇴적층도 적절히 역산 된 것을 확인 할 수 있다. 디콘볼루션 기반의 완전 파형 역산 결과와 콘볼루션 기반의 완전 파형 역산 결과는 서로 유사하다. 하지만 디콘볼루션 기반의 완전 파형 역산 결과에서 나타나는 잡음 문제와 과 역산 문제가 콘볼루션 기반의 완전 파형 역산 결과에서는 억제되었으며 디콘볼루션 기반의 완전 파형 역산 결과에 비해서 콘볼루션 기반의 완전 파형 역산 결과에서 암염 돔의 경계와 퇴적층들의 경계가 비교적 더 뚜렷하게 역산 되었다. 또한 OTR과 STR 방법을 사용한

결과를 서로 비교해보면 대부분의 속도 구조가 서로 유사하게 역산되어 서로 큰 차이를 보이지 않는 것을 확인 할 수 있다.

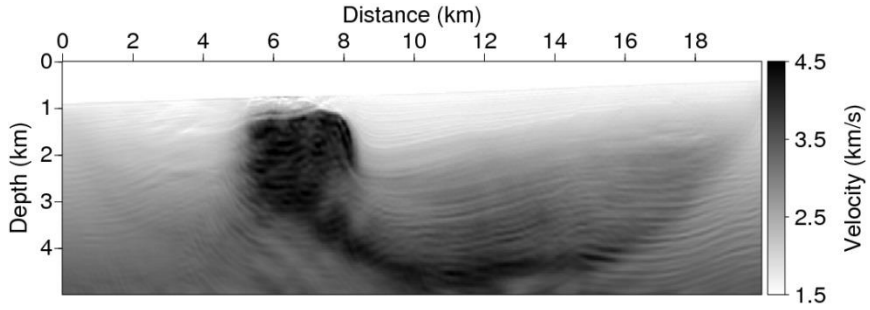


(a)

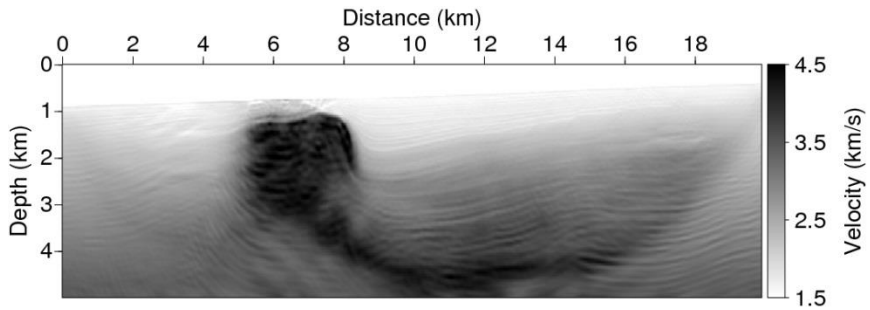


(b)

그림 5-8. 멕시코만 현장 자료에 대해 0.5 초의 시간 창과 함께 (a) OTR, (b) STR 방법을 사용한 디콘블루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 적용한 결과.



(a)



(b)

그림 5.9. 멕시코만 현장 자료에 대해 0.5 초의 시간 창과 함께 (a) OTR, (b) STR 방법을 사용한 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산을 적용한 결과.

역산 된 속도 모델만 비교한다면 시간 창을 적용한 참조 트레이스를 사용한 역산 결과가 시간 창을 적용하지 않은 참조 트레이스를 사용한 역산 결과보다 우월하다. 또한 시간 창을 적용한 참조 트레이스를 사용한 경우에도 콘볼루션 기반의 역산 결과가 디콘볼루션 기반의 역산 결과에 비해 암염 돔의 해상도가 더 높고 잡음의 수준이 더 낮다. 따라서 시간 창을 적용된 참조 트레이스를 사용한 콘볼루션 기반의 역산이 현장 자료에 더 적합한 방법이라고 결론 내릴 수 있다. 하지만 본 자료는 현장 자료이기 때문에 역산된 속도 모델이 실제 속도 구조에 충분히 근접한지 여부를 알 수 없다. 따라서 역산 된 속도 모델을 검증하기 위해서 시간 창이 적용된 참조 트레이스를 사용한 역산 결과에 대해 구조보정을 수행하고 오프셋 영역 공통 영상 모음을 비교하였다. 또한 속도 모델에 대해 파동 전파 모델링을 수행하고 관측 파동장과 수치 파동장의 이벤트들을 비교하였다.

그림 5-10과 그림 5-11은 각각 디콘볼루션 및 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과가 배경 속도 모델인 키르히호프 구조보정 결과이다. 0.5 초의 시간 창과 OTR 및 STR 방법을 적용하였다. 배경 속도 모델들이 (그림 5-8, 그림 5-9) 서로 상당부분 일치하기 때문에 구조보정 결과들도 서로 크게 다르지 않으며 암염 돔의 경계와 퇴적층의 구조가 잘 영상화 되었다. 특히 상부의 얇은 퇴적층들과 암염 돔 양쪽의 기울어진 퇴적층들이 명확하게 나타나는 것을 확인 할 수 있으며 14~18 km 거리 사이의 단층들도 잘 영상화 되었다. 특히 그림 5-10(a)와 (b)는 대부분의 구조가 일치하며 그림 5-11(a)와 (b) 또한 서로 거의 대부분의 구조가 일치한다. 디콘볼루션 및 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립



완전 파형 역산 결과를 비교하면 콘볼루션 기반의 역산 결과가 디콘볼루션 기반의 역산 결과에 비해 조금 더 나은 결과를 주었지만 구조보정에서는 서로 큰 차이를 보이지 않는다. 속도 모델 상에서 존재하는 약간의 잡음과 상대적으로 명확하지 않은 경계들이 키르히호프 구조보정을 위한 주시 계산에는 거의 영향을 주지 않았기 때문이다.

송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과를 좀 더 자세히 검증하게 위해 오프셋 영역 공통 영상 모음을 계산하여 도시하였다. 오프셋 영역 공통 영상 모음은 이벤트가 평평할 경우 배경 속도 모델이 실제 속도 구조에 근접함을 의미하고 이벤트가 경사져있을 경우 배경 속도 구조와 차이가 있음을 의미하므로 완전 파형 역산 결과를 검증하는데 널리 쓰인다. 그림 5-12와 그림 5-13은 3 km, 10 km, 15 km, 18 km 위치에서의 오프셋 영역 공통 영상 모음이다. 대부분의 위치에서 이벤트들이 평평한 모습을 보이고 이는 역산 된 속도 모델이 실제 모델에 상당히 근접함을 의미한다. 하지만 3 km 와 18 km 위치 하부에서 오프셋이 큰 경우 이벤트들은 충분히 평평하지 않다. 3 km 지점의 경우는 오프셋이 큰 경우 암염 돔 하부를 지나는 파들이 상당수 기록되어 있는데 암염 돔 하부의 경우 역산이 정확히 진행되기 어렵기 때문에 속도가 정확하지 않아서 이벤트들이 충분히 평평하지 않다. 18 km 지점의 경우는 역산 영역의 모서리 부분에 존재하기 때문에 탐사 과정에서 충분한 정보를 획득하지 못하여 역산이 올바르게 진행되지 못하였기 때문에 이벤트들이 평평하지 않다. 따라서 본 역산 결과에서 암염 돔 하부와 역산 영역 모서리 주변의 속도 정보는 신뢰하기 힘들다. 디콘볼루션 기반의 역산 결과와 콘볼루션 기반의 역산 결과가 서로

약간의 차이를 보임에도 불구하고 각각의 오프셋 영역 공통 영상 모음은 거의 유사한 것을 확인 할 수 있다. 이는 속도 모델의 잡음과 해상도에서 약간의 차이가 나더라도 파의 주시에는 큰 영향을 주지 않는다는 것을 의미한다.

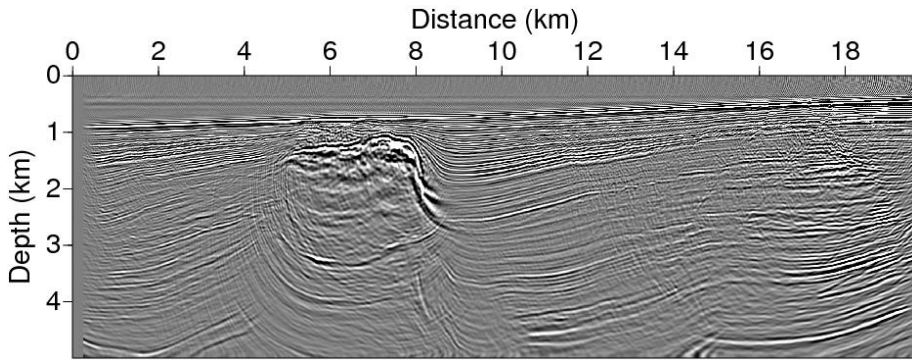
완전 파형 역산은 수치 파동장과 관측 파동장의 차이를 줄여나가는 방향으로 배경 매질을 업데이트한다. 따라서 역산된 속도 모델로부터 얻은 수치 파동장과 관측 파동장이 유사하다면 완전 파형 역산이 올바른 방향으로 수행되었다고 간주할 수 있다. 그림 5-14, 그림 5-15, 그림 5-16은 각각 멕시코만 현장 자료의 공통 송신원 모음, 초기 속도 모델 (그림 5-2)로부터 얻은 공통 송신원 모음, 디콘볼루션 기반의 역산 결과 (그림 5-8)로부터 공통 송신원 모음, 그리고 콘볼루션 기반의 역산 결과 (그림 5-9)로부터 얻은 공통 송신원 모음이다. 250 번째 공통 송신원 모음을 비교하였고 4~15 Hz 범위의 대역 필터가 적용되었다. 초기 속도 모델로부터 얻은 공통 송신원 모음의 (그림 5-14(b)) 초동은 현장 자료와 상당히 일치하는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 초기 속도 모델이 주파수 영역 완전 파형 역산의 초기 속도 모델로 적합함을 알 수 있다. 하지만 중요한 반사 이벤트들을 포함한 세부 이벤트들은 거의 모델링 되지 않았다. 디콘볼루션 기반의 역산 결과로부터 얻은 공통 송신원 모음은 (그림 5-15) 현장 자료에 상당히 근접함을 알 수 있다. 천부 퇴적층에서의 반사파들과 암염 돔에서 발생한 반사파들의 주시가 현장 자료에서의 주시와 거의 일치한다. 콘볼루션 기반의 역산 결과로부터 얻은 공통 송신원 모음은 (그림 5-16) 디콘볼루션 기반의 역산 결과로부터 얻은 공통 송신원 모음보다 현장 자료에 더 가깝다. 천부 퇴적층과 암염 돔에서의

반사파뿐만 아니라 2~3 초 사이에 존재하는 가까운 오프셋의 반사파들도 더 명확하게 기록되어있는 것을 확인 할 수 있다.

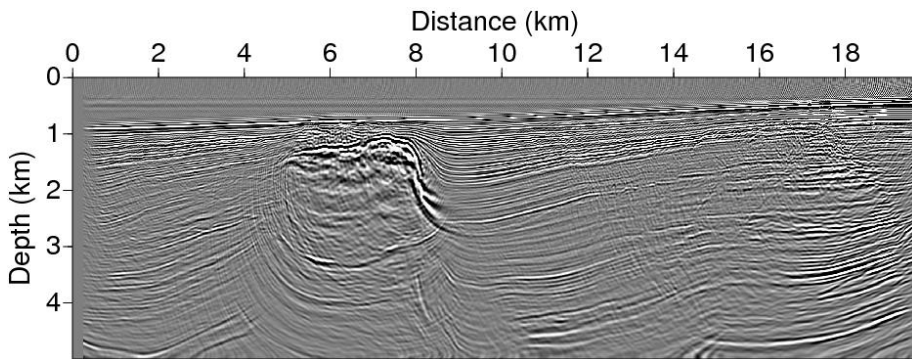
수치 모델링된 공통 송신원 모음과 현장 자료의 공통 송신원 모음을 더 정확히 비교하기 위해서 각 공통 송신원 모음의 300 번째 트레이스를 추출하여 그림 5-17에 도시하였다. 자세한 비교를 위하여 1~3.6 초 사이의 트레이스만 추출하여 정규화하였다. 그림 5-17(a)로부터 초기 속도 모델로부터 얻은 공통 송신원 모음의 트레이스는 현장 자료의 트레이스와 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 2 초 내외의 초동은 어느 정도 감지를 하고 있으나 이후의 반사파 신호들은 진폭 및 위상이 현장 자료의 트레이스와 상당한 차이가 있다. 디콘볼루션 기반의 역산 결과로부터 얻은 공통 송신원 모음의 트레이스는 (그림 5-17(b)) 초동부터 후기 신호까지 현장 자료의 트레이스와 상당히 일치함을 알 수 있다. 특히 OTR 방법 역산 결과의 트레이스는 STR 방법 역산 결과의 트레이스 보다 현장 자료의 트레이스에 더 근접한 모습을 보인다. 콘볼루션 기반의 역산 결과로부터 얻은 공통 송신원 모음의 트레이스도 (그림 5-17(c)) 현장 자료의 트레이스에 근접한 모습을 보이며 OTR 방법 역산 결과의 트레이스와 STR 방법 역산 결과의 트레이스가 서로 유사한 것을 확인 할 수 있다. 하지만 정규화를 적용 했음에도 수치 모델링된 트레이스들은 현장 자료의 트레이스들과 진폭에서 다소 차이를 보인다. 본 연구에서는 음향 매질 완전 파형 역산을 수행하여 P파 속도만 역산하였고, 수치 모델링을 위해서 음향파 파동 전파 모델링을 사용하였기 때문에 밀도 효과와 같은 탄성 매질의 영향을 모델링 하지 못하였기 때문이다. 진폭의 차이에도 불구하고 위상은 수치 모델링 결과들이 현장 자료와 상당히

일치함을 보이므로 완전 파형 역산이 실제 속도 구조와 근접한 속도 모델을 역산 하였음을 알 수 있다. 또한 그림 5-17(b)와 그림 5-17(c)는 서로 거의 유사한 결과를 보여주지만 후기 신호의 경우 그림 5-17(c)의 결과가 현장 자료 트레이스에 조금 더 근접한 모습을 보인다.

역산 결과를 다양한 방법을 통해 검증한 결과 적절한 시간 창을 적용한 경우 디콘볼루션 기반 및 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산이 현장 자료에 성공적으로 적용되어 실제 속도에 충분히 근접한 속도 구조를 역산 하였음을 알 수 있다. 디콘볼루션 기반과 콘볼루션 기반의 역산 결과를 서로 비교하면 구조보정과 오프셋 영역 공통 영상 모습에서는 속도 역산 결과의 주시 차이가 크지 않아서 서로의 결과가 유사하였지만 전체 파동장을 비교할 수 있는 공통 송신원 모습과 트레이스 비교에서는 콘볼루션 기반의 역산 결과가 실제 현장 자료에 더 유사하다. 또한 실제 역산 결과에서 발생한 인공 잡음과 과 역산 문제는 디콘볼루션 기반의 역산 결과가 콘볼루션 기반의 역산 결과보다 더 심하다. 따라서 콘볼루션 기반의 완전 파형 역산이 디콘볼루션 기반의 완전 파형 역산보다 현장 자료에 더 적합한 방법이며 본 자료와 같이 송신원 주변 트레이스에 배드 트레이스가 포함되어 있지 않다면 OTR 방법이 STR 방법보다 더 나은 결과를 준다고 결론 내릴 수 있다. 하지만 현장 자료의 경우 자료 취득 환경에 따라 자료의 특성이 변하므로 송신원 주변 트레이스에 배드 트레이스가 포함 되지 않을 것이라고 항상 확신 할 수는 없다. 따라서 완전 파형 역산의 신뢰도를 위해서는 OTR 방법보다 STR 방법을 사용하는 것이 더 적합하다.

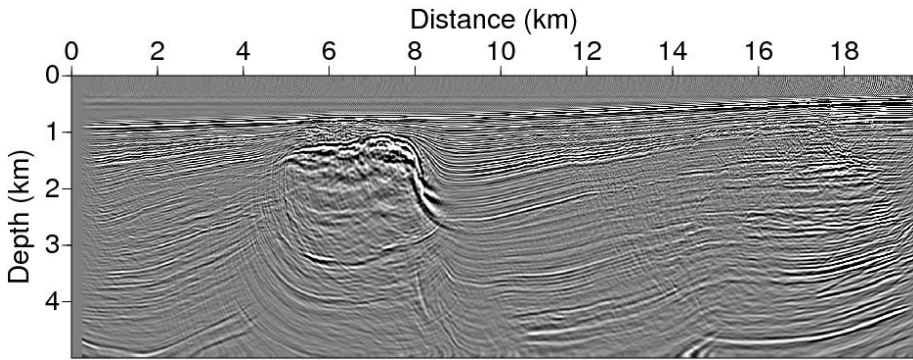


(a)

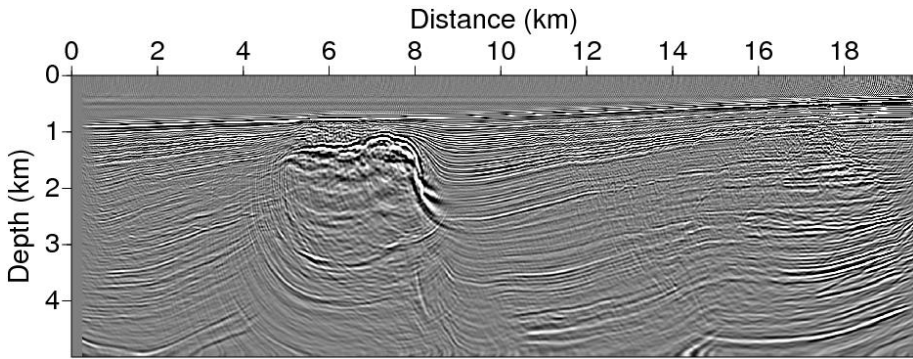


(b)

그림 5-10. 0.5 초의 시간 창과 (a) OTR, (b) STR 방법을 사용한 디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과가 배경 속도 모델인 키르히호프 구조보정 결과.

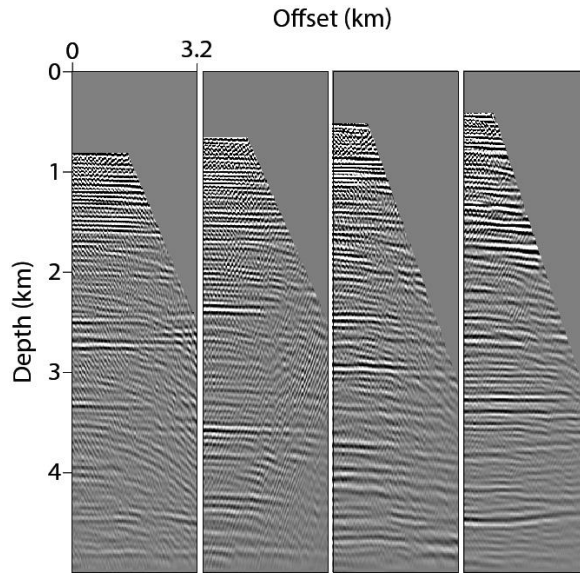


(a)

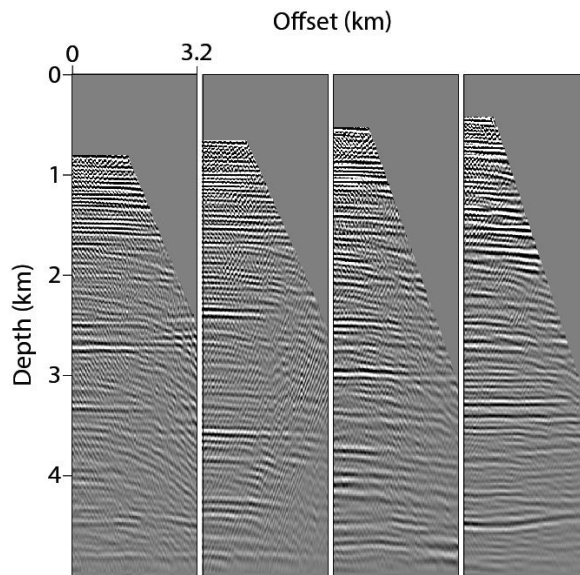


(b)

그림 5-11. 0.5 초의 시간 창과 (a) OTR, (b) STR 방법을 사용한 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과가 배경 속도 모델인 키르히호프 구조보정 결과.

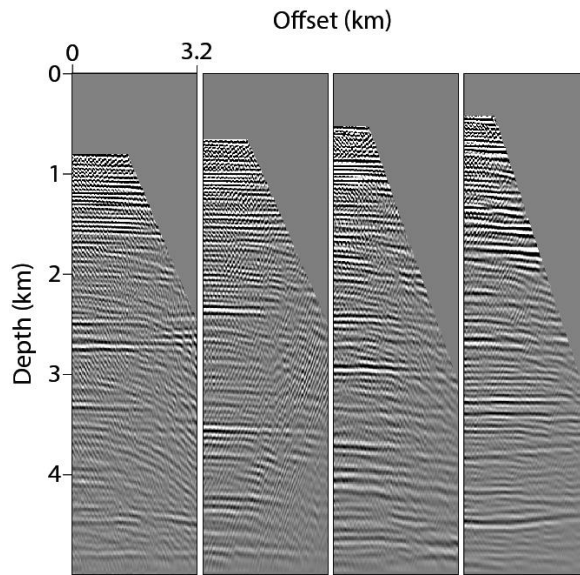


(a)

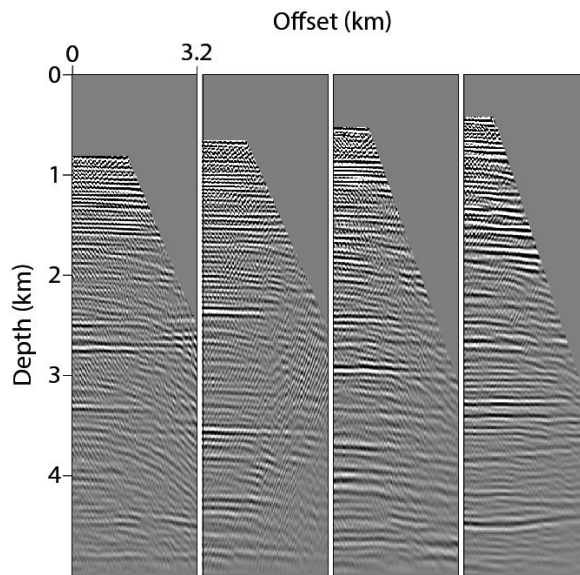


(b)

**그림 5-12.** 0.5 초의 시간 창과 (a) OTR, (b) STR 방법을 사용한 디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과에 대한 오프셋 영역 공통 영상 모음 (3 km, 10 km, 15 km, 18 km).



(a)



(b)

그림 5-13. 0.5 초의 시간 창과 (a) OTR, (b) STR 방법을 사용한 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과에 대한 오프셋 영역 공통 영상 모음 (3 km, 10 km, 15 km, 18 km).



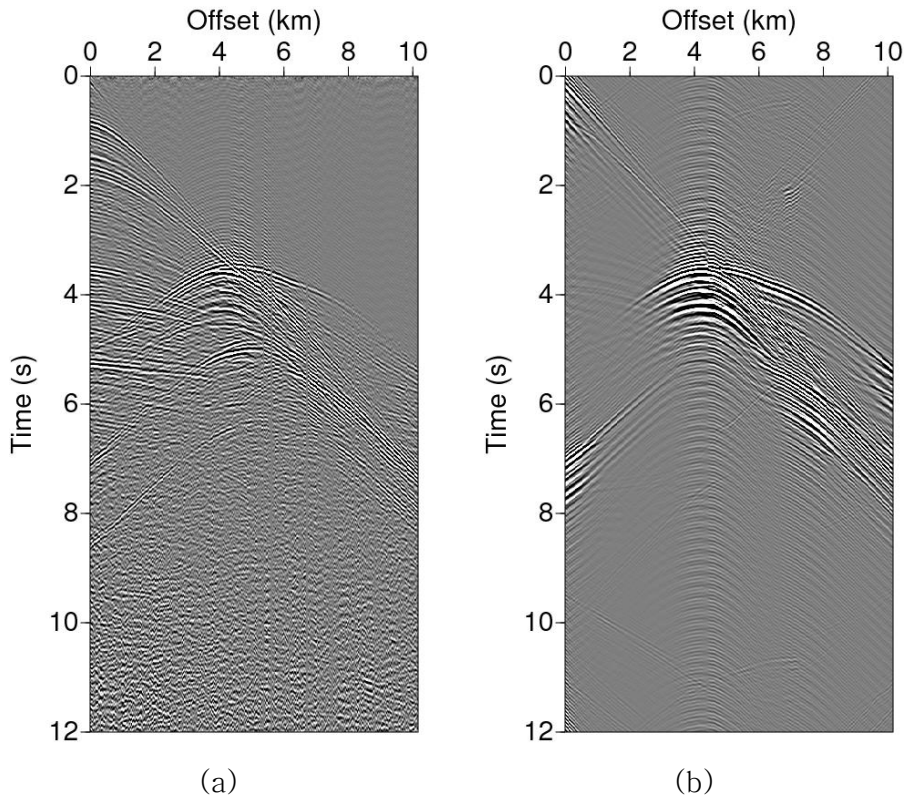


그림 5-14. (a) 멕시코 현장 자료의 250 번째 공통 송신원 모음과 (b) 초기 속도 모델로부터 얻은 수치 파동장.

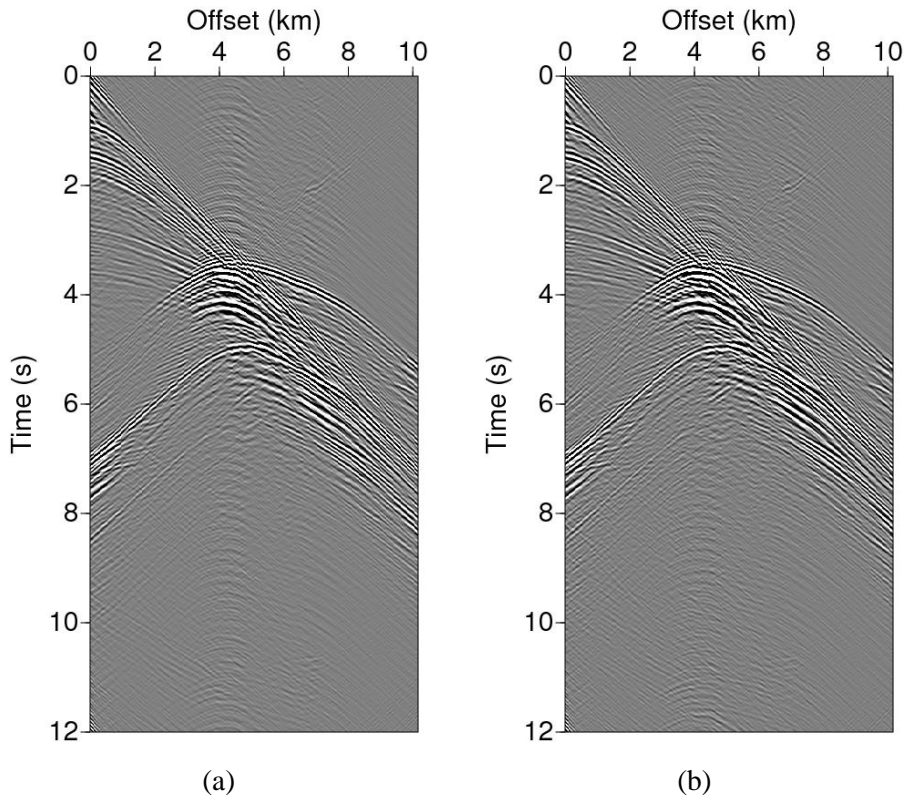


그림 5-15. 0.5 초의 시간 창과 (a) OTR, (b) STR 방법을 사용한 디콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과로부터 얻은 수치 파동장.

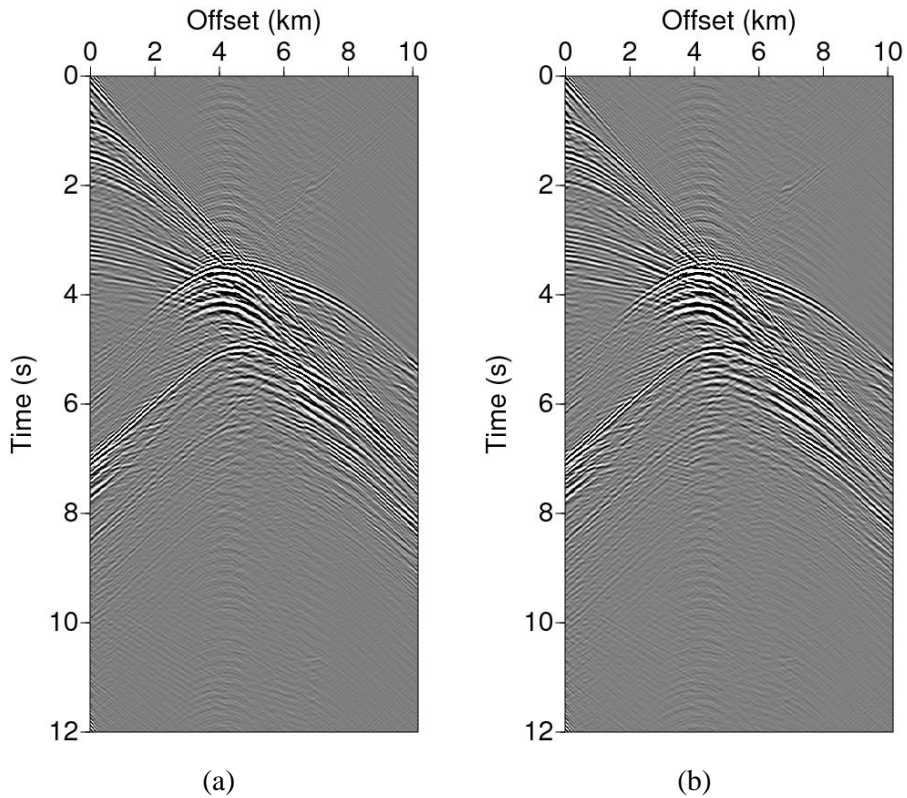
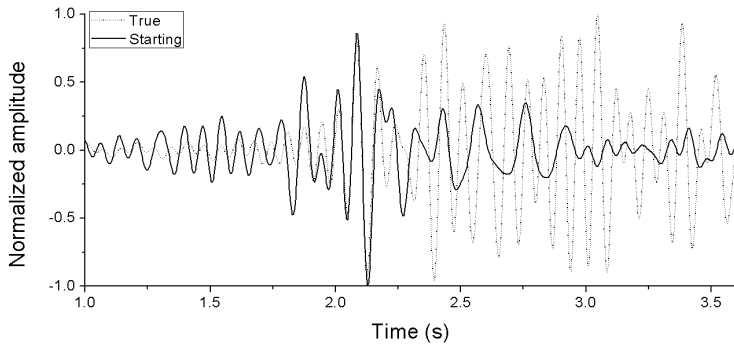
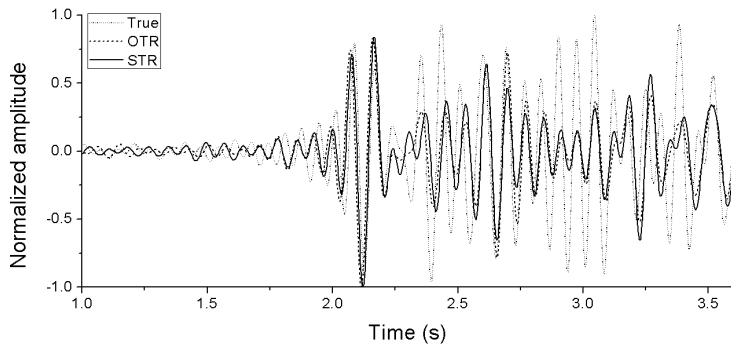


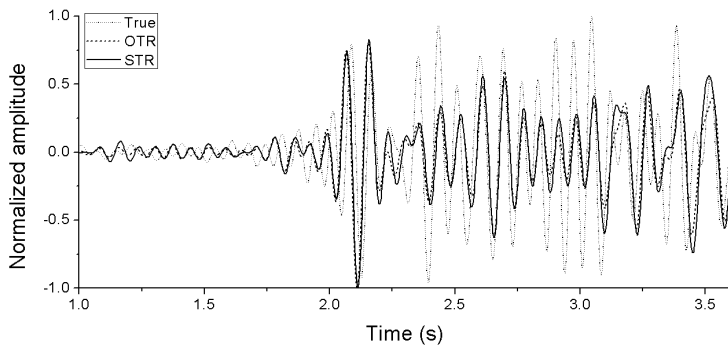
그림 5-16. 0.5초의 시간 창과 (a) OTR, (b) STR 방법을 사용한 콘볼루션 기반의 송신 파형 독립 완전 파형 역산 결과로부터 얻은 수치 파동장.



(a)



(b)



(c)

그림 5-17. (a) 초기 속도 모델, (b) 디콘볼루션 기반의 역산 결과, (c) 콘볼루션 기반의 역산 결과로부터 얻은 수치 파동장의 300 번째 트레이스.

## 제 6 장 결 론

완전 파형 역산은 고 해상도의 지하 매질 물성 값을 도출하는 것에 적합한 알고리즘으로 수치 모델링된 파동장과 관측 파동장 사이의 잔차를 줄여나가는 방법으로 지하 매질의 물성 값을 얻는다. 완전 파형 역산은 비선형 역문제이기 때문에 국소적 선형화(local optimization)를 이용하여 반복적으로 지하 물성 값을 찾아가며 이때 주로 뉴턴 기반의 방법을 이용한다. 따라서 국소 최저치의 존재는 완전 파형 역산이 올바른 해를 찾아가는 것을 방해하는 요소로 작용하며 국소 최저치로 인한 문제를 해결 하기 위해 많은 연구들이 이루어졌다. 특히 국소 최저치의 존재는 완전 파형 역산을 현장 자료에 적용하고자 할 때 큰 문제로 작용하게 된다. 왜냐하면 현장 자료는 인공 합성 자료와 달리 잡음, 모드 변환파, 가이드파, 채널파와 같은 복잡한 파동 현상, 이방성 효과 등이 포함되어 있어 수치 모델링을 통해서 실제 파동장과 동일한 파동장을 만들어내는 것이 불가능하기 때문이다.

완전 파형 역산의 현장 자료에 대한 적용성을 떨어뜨리는 또 다른 요인은 송신 파형 문제이다. 현장 탄성과 탐사에서 파동을 전파 시킬 때 사용하는 송신 파형은 송신원 주변의 매질과 결합 현상(coupling effect)이 일어나면서 전파되고 수신기 주변의 매질과 결합 현상을 거친 후 수신기에 기록된다. 따라서 송신원에서 발사한 송신 파형과 실제 매질을 통과하는 송신 파형과는 차이가 있으며

결합 현상은 수치 모델링을 통해 묘사할 수 없기 때문에 완전 과형 역산은 송신 과형을 알지 못한 상태에서 진행 될 수 밖에 없다. 따라서 본 연구에서는 실제 송신 과형을 알지 못한 상태에서 완전 과형 역산을 적용할 수 있는 송신 과형 독립 완전 과형 역산을 제안하였다.

송신 과형 독립 완전 과형 역산은 크게 디콘볼루션 방법과 콘볼루션 방법으로 구분할 수 있다. 디콘볼루션 방법은 주파수 영역에서 참조 트레이스를 수치 파동장과 관측 파동장에 각각 나누는 과정을 통해 송신 과형의 효과를 제거하는 방법이다. 콘볼루션 방법은 주파수 영역에서 참조 트레이스를 수치 파동장과 관측 파동장에 서로 교차하여 곱하는 과정을 통해 각 파동장이 서로 같은 형태의 송신 과형을 가지도록 만드는 방법이다. 두 방법 모두 수치 파동장과 관측 파동장의 송신 과형이 다르더라도 목적 함수에서의 수치 파동장 부분과 관측 파동장 부분은 원래의 송신 과형에 전혀 영향을 받지 않기 때문에 실제 송신 과형을 모르더라도 완전 과형 역산을 수행할 수 있게 해준다. 디콘볼루션은 송신 과형이 제거된 파동장을 이용하고 콘볼루션 방법은 수치 파동장과 관측 파동장의 송신 과형이 결합된 형태의 송신 과형을 이용하기 때문에 디콘볼루션 기반의 역산 결과가 콘볼루션 기반의 역산 결과에 비해 조금 더 높은 해상도를 보여주었다. 하지만 강하고 복잡한 잡음이 있을 때는 디콘볼루션 기반 목적 함수의 수치 파동장 부분은 잡음이 전혀 없지만 콘볼루션 기반 목적 함수의 수치 파동장 부분은 관측 파동장과 유사한 잡음이 포함되어 있으므로 콘볼루션 방법이 디콘볼루션 방법에 비해 더 안정적인 결과를 도출하였다. 또한 송신 과형 독립 완전 과형 역산은 고정된

수신기 배열을 사용하는 탐사 환경과 스트리머를 사용하는 탐사 환경 모두에 성공적으로 적용될 수 있음을 보였다.

송신 파형 독립 완전 파형 역산에서 가장 중요한 부분 중 하나는 참조 트레이스의 선택이다. 본 연구에서는 OTR, STR, ATR 방법의 참조 트레이스를 각각 이용하여 실험을 진행하고 그 효과를 비교하였다. 인공 합성 자료와 현장 자료 모두에서 OTR 방법이 가장 좋은 역산 결과를 도출하였고 ATR 방법이 가장 불안정한 결과를 도출하였다. ATR 방법은 모든 트레이스를 참조 트레이스로 사용하기 때문에 다른 방법들에 비해 지하 매질의 물성 값 변화에 참조 트레이스가 민감하게 변하게 된다. 따라서 ATR 방법은 완전 파형 역산의 비선형성을 높이고 좋지 않은 역산 결과를 도출한다. STR 방법은 송신원 주변의 몇몇 트레이스만을 이용하여 참조 트레이스를 구성하므로 OTR 방법과 거의 유사한 역산 결과를 도출하지만 OTR 방법이 가지고 있는 참조 트레이스의 대표성 문제는 완화된다. 인공 합성 자료와 현장 자료에서 OTR 방법을 이용한 완전 파형 역산 결과가 STR 방법을 이용한 완전 파형 역산 결과보다 조금 더 실제 속도 구조에 가깝지만 STR 방법이 배드 트레이스에 덜 민감하므로 더 안정적인 방법이라고 결론지을 수 있다.

잡음과 복잡한 파동 현상들이 관측 파동장에 포함된 경우 관측 파동장의 참조 트레이스가 영향을 받게 되고 완전 파형 역산이 정확한 속도 모델을 역산하지 못하게 된다. 따라서 잡음과 복잡한 파동 현상들이 참조 트레이스에 미치는 영향을 줄이기 위해 수치 파동장의 참조 트레이스와 관측 파동장의 참조 트레이스에 동일한

시간 창을 적용하여 완전 파형 역산을 수행하였다. 임의로 설정한 시간 창을 도입하는 것은 완전 파형 역산에 사람의 주관을 개입시키는 역할을 할 수 있다. 따라서 이러한 인위적인 개입을 최소화 시키기 위해서 최적의 시간 창 설정 방법 또한 제안하였다. 시간 창은 지하 매질의 물성 값 변화에 적은 영향을 받도록 하기 위해 직접파 성분만을 포함 하도록 설정하는 것이 가장 좋은 결과를 주었다.

본 연구에서 제안된 송신 파형 독립 완전 파형 역산은 음향 매질 완전 파형 역산에 대해 개발되었고 다양한 환경을 가지는 Marmousi 인공 합성 자료와 멕시코만 현장 자료를 통해 그 적용성이 검증 되었다. 특히 기존의 송신 파형 독립 완전 파형 역산의 한계점이었던 현장 자료에 대한 적용성이 향상 된 것이 이번 연구의 가장 큰 성과이다. 하지만 송신 파형 독립 완전 파형 역산은 여전히 몇 가지 개선할 부분들이 있다. 우선 본 연구에서 제안된 알고리즘을 탄성 매질 완전 파형 역산으로 확장하여 육상 탄성과 탐사에 적용해볼 필요가 있으며 이방성 매질에 대해서도 송신 파형 독립 완전 파형 역산이 적용 가능한지를 연구해볼 필요가 있다. 3차원 완전 파형 역산으로 본 알고리즘을 확장하여 현장 자료에 적용하는 것 또한 앞으로 수행되어야 할 연구 중 하나이다.



## 참고문헌

Alkhalifah, T., and Choi, Y., 2012. Taming waveform inversion non-linearity through phase unwrapping of the model and objective functions. *Geophysical Journal International* **191**, 1171-1178.

Alkhalifah, T., 2014. Research Note: Full-waveform inversion of the unwrapped phase of a model. *Geophysical Prospecting* **62**, 397-403.

Anagaw, A. Y., and Sacchi, M. D., 2014. Comparison of multifrequency selection strategies for simultaneous-source full-waveform inversion. *Geophysics* **79**, R165-181.

Backus, G., and Gilbert, F., 1967. Numerical applications of a formalism for geophysical inverse problems. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* **13**, 247-276.

Brossier R., Operto S. and Virieux J., 2009. Seismic imaging of complex onshore structures by 2D elastic frequency-domain full-waveform inversion. *Geophysics* **74**, WCC105–WCC118.

Bunks C., Saleck F., Zaleski S. and Chavent G., 1995. Multiscale seismic waveform inversion. *Geophysics* **60**, 1457–1473.

Butzer, S., Kurzmann, A., and Bohlen, T., 2013. 3D elastic full-waveform inversion of small-scale heterogeneities in transmission geometry. *Geophysical Prospecting* **61**, 1238-1251.

Choi, Y., Min, D.-J., and Shin, C., 2008. Frequency-domain elastic fullwaveform inversion using the new pseudo-Hessian matrix: experience of elastic Marmousi-2 synthetic data. *Bulletin of the Seismological Society of America* **98**, 2402–2415

Choi, Y., and Alkhalifah, T., 2011. Source-independent time-domain waveform inversion using convolved wavefields: Application to the encoded multisource waveform inversion. *Geophysics* **76**, R125-R134.

Choi, Y., and Min, D.-J., 2012. Source-independent elastic waveform inversion using a logarithmic wavefield. *Journal of Applied Geophysics* **76**, 13-22.

Choi, Y., and Alkhalifah, T., 2015. Unwrapped phase inversion with an exponential damping. *Geophysics* **80**, R251-R264.

Crase E., Pica A., Noble M., McDonald J. and Tarantola A. 1990. Robust elastic nonlinear waveform inversion: Application to real data. *Geophysics* **55**, 527-538.

Gauthier O., Virieux J. and Tarantola A., 1986. Two-dimensional nonlinear inversion of seismic waveforms: Numerical results. *Geophysics* **51**, 1387-1403.

Golub, G.H., and van Loan, C.F., 1996. *Matrix Computations*. 3rd edn. The Johns Hopkins University Press.

Gupta, H. K., 2011. *Encyclopedia of solid earth geophysics*. Springer.

Ha, W., Chung, W., Park, E., and Shin, C., 2012. 2-D acoustic Laplace-domain waveform inversion of marine field data. *Geophysical Journal International* **190**, 421-428.

Higdon, R. L., 1991. Absorbing boundary conditions for elastic waves. *Geophysics* **56**, 231-241.

Jun, H., Kim, Y., Shin, J., Shin, C., and Min, D.-J., 2014. Laplace-Fourier-domain elastic full-waveform inversion using time-domain modeling. *Geophysics* **79**, R195-R208.

Jun, H., Park, E., and Shin, C., 2015. Weighted pseudo-Hessian for frequency-domain elastic full waveform inversion. *Journal of Applied Geophysics* **123**, 1-17.

Jun, H., Kwon, J., Shin, C., Zhou, H., and Cogan, M., 2016. Regularized Laplace-Fourier-Domain full waveform inversion using a weighted  $l_2$  objective function. *Pure and Applied Geophysics*.

Kim, Y., Cho, H., Min, D.-J., and Shin, C., 2011. Comparison of frequency-selection strategies for 2D frequency-domain acoustic waveform inversion. *Pure and Applied Geophysics* **168**, 1715–1727.

Kim, Y., Shin, C., Calandra, H., and Min, D.-J., 2013. An algorithm for 3D acoustic time-Laplace-Fourier-domain hybrid full waveform inversion. *Geophysics* **78**, R151-R166.

Lailly P., 1983. The seismic inverse problem as a sequence of before-stack migration, in J. Bednar, ed., *Conference on Inverse Scattering: Theory and Application*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 206-220.

Lee, K. H., and Kim, H. J., 2003. Source-independent full-waveform inversion of seismic data. *Geophysics* **68**, 2010-2015.

Mora, P., 1987. Nonlinear two-dimensional elastic inversion of multioffset seismic data. *Geophysics* **52**, 1211-1228.

Nocedal J., Wright S. 1999. *Numerical Optimization*, Springer.

Plessix, R.-E., 2006. A review of the adjoint-state method for computing the gradient of a functional with geophysical applications. *Geophysical Journal International* **167**, 495-503.

Pratt, R. G., Shin C. and Hicks G. J., 1998. Gauss–Newton and full Newton methods in frequency–space seismic waveform inversion. *Geophysical Journal International* **133**, 341–362.

Pratt, R. G., 1999. Seismic waveform inversion in the frequency domain, Part I : Theory and verification in a physical scale model. *Geophysics* **64**, 888-901.

Shin, C., and Cha, Y., 2008. Waveform inversion in the Laplace domain. *Geophysical Journal International* **173**, 922-931.

Shin, C., and Cha, Y., 2009. Waveform inversion in the Laplace-Fourier domain. *Geophysical Journal International* **177**, 1067-1079.

Shin, C., Jang, S., and Min, D.-J., 2001. Improved amplitude preservation for prestack depth migration by inverse scattering theory. *Geophysical Prospecting* **49**, 592–606.

Shin C. and Min D.-J., 2006. Waveform inversion using a logarithmic wavefield. *Geophysics* **71**, R31–R42.

Shin, C., Pyun, S., and Bednar, J. B., 2007. Comparison of waveform inversion, part 1: Conventional wavefield vs. logarithmic wavefield. *Geophysical Prospecting* **55**, 449-464.

Bednar, J. B., Shin, C., and Pyun, S., 2007. Comparison of waveform inversion, part 2: phase approach. *Geophysical Prospecting* **55**, 465-475.

Pyun, S., Shin, C., and Bednar, J. B., 2007. Comparison of waveform inversion, part 3: amplitude approach. *Geophysical Prospecting* **55**, 477-485.

Song, Z. M. Williamson, P. R., and Pratt, R. G., 1995. Frequency-domain acoustic-wave modeling and inversion of crosshole data: Part II -Inversion method, synthetic experiments and real-data results. *Geophysics* **60**, 796-809.

Sirgue L. and Pratt R. G., 2004. Efficient waveform inversion and imaging: A strategy for selecting temporal frequencies. *Geophysics* **69**, 231–248.

Tarantola A. 1984. Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation. *Geophysics* **49**, 1259-1266.

Vigh, D., and Starr, E. W., 2008. 3D prestack plane-wave, full waveform inversion. *Geophysics* **73**, VE135-VE144.

Vigh, D., Starr, E. W., and Kapoor, J., 2009. Developing earth model with full waveform inversion. *TheLeading Edge* **28**, 432–435.

Xu, K., Greenhalgh, S. A., and Wang, M. Y., 2006. Comparison of source-independent methods of elastic waveform inversion. *Geophysics* **71**,

R91-R100.

Xu, K., and McMechan, G. A., 2014. 2D frequency-domain elastic full-waveform inversion using time-domain modeling and a multistep-length gradient approach. *Geophysics* **79**, R41-R53.

Zhang, Q., Zhou, H., Li, Q., Chen, H., and Wang, J., 2016. Robust source-independent elastic full-waveform inversion in the time domain. *Geophysics* **81**, R29-R44.

Zhou, B., and Greenhalgh, S. A., 2003. Crosshole seismic inversion with normalized full-waveform amplitude data. *Geophysics* **68**, 1320-1330.

Zhou, H., Zhang, Y., Gray, S.H., and Zhang, G. 2002. Regularization algorithm for seismic inverse problems. 72<sup>nd</sup> SEG Annual Meeting Expanded Abstract.

## **Abstract**

# **Source-independent frequency-domain acoustic full waveform inversion using time-domain modeling**

Hyunggu Jun

Department of Energy Systems Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Full waveform inversion is one of the methods to calculate the properties of subsurface material and it updates the properties by minimizing the differences between the observed wavefield and modeled wavefield. The observed wavefield is obtained from the field seismic exploration and it is the result of convolution between the impedance of subsurface and source wavelet used for the exploration. The modeled wavefield is calculated from the wave propagation modeling by using wave equation. For the accurate modeled wavefield, the numerical source wavelet which is the same as the source wavelet of the field seismic exploration is necessary. To obtain the source wavelet used for the field seismic exploration, the source estimation method is widely used, but it has several limitations. In this study, we propose the source independent full waveform inversion which does not need the true source wavelet. The source-independent full waveform inversion can be divided into two algorithms: deconvolution based method and convolution based method. We explained and compared each method theoretically and numerically. The most important part to apply the source-independent full waveform inversion is the method of constructing the reference trace. We performed tests by changing the methods of constructing the reference trace and suggested which method is the most appropriate method for the full waveform inversion. The conventional frequency domain source-independent full waveform inversion is not applicable to the field seismic data. To

apply the frequency domain source-independent full waveform inversion to the field seismic data, we introduced time-windowed frequency domain source-independent full waveform inversion. Because it is difficult to apply the time window to the conventional frequency domain wave propagation modeling, we performed frequency domain full waveform inversion using time domain modeling. To verify the suggested algorithm, we performed synthetic numerical tests by using Marmousi synthetic data with and without noise and compared the results. The numerical tests were performed by using each deconvolution and convolution based methods and by changing the method of constructing reference trace and length of time window. We also applied the proposed algorithm to the Gulf of Mexico field seismic data and successfully inverted the velocity model. The inverted velocity model was verified through migration, common image gathers and synthetic seismograms. Through numerical tests, we showed that the convolution based source-independent full waveform inversion using the reference trace which is constructed from a few number of short-offset traces and the time window which is applied to contain the direct wave information is the most appropriate and stable method for the full waveform inversion.

**Keywords:** Full waveform inversion, Frequency domain, Source wavelet, Time window, Field data

**Student Number:** 2014-30190