creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

공학박사 학위논문

신속한 구조보정 속도 모델 평가를 위한 주파수 배열 공통 영상 모음

Frequency-domain Common Image Gathers for Swift Migration Velocity Model Evaluation

2022년 1월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부

김 해 민

신속한 구조보정 속도 모델 평가를 위한 주파수 배열 공통 영상 모음

지도교수 신 창 수

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함
2021년 11월

서울대학교 대학원
에너지시스템공학부
김 해 민

김해민의 공학박사 학위논문을 인준함
2022년 1월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

국문초록

탄성파 탐사는 인위적으로 탄성파를 발생시킨 후 되돌아온 파동을 취득하여 지하 구조를 규명하는 기법이다. 먼저, 탐사를 통해 얻은 자료로 지하 구조의 물성값을 추정한다. 추정한 물성을 통해 지하 구조의 형태로 영상화하는 과정을 구조보정이라고 한다. 탐사 자료가 가진 정보의 한계로 인해 획득한 지하 구조 영상을 검증하는 과정이 필요하며, 검증 과정에서 오류가 발견되면 추정한 물성을 수정하는 과정을 거치게 된다. 수정과 검증 과정을 반복적으로 수행하여 최종적으로 얻은 구조보정 영상은 실제 지하 구조와 일치(또는 근접)한 것으로 볼 수 있다.

지하 구조를 규명하는 과정의 최종단계에 해당하는 구조보정 영상 검증을 정확하게 수행하는 것이 가장 중요하며, 검증의 대표적인 수단으로 공통 영상 모음을 사용한다. 공통 영상 모음이란 구조보정 영상에서 하나의 지점을 특정하여 그 위치에서 보고자 하는 매개변수를 축으로 하여 매개변수-심도 영역으로 트레이스를 나열한 영상이다. 본 논문에서는 새로운 공통 영상 모음 기법인 주파수 배열 공통 영상 모음을 제안한다. 주파수 배열 공통 영상 모음은 주파수-심도 영역의 영상이다. 주파수 영역 역시간 구조보정 알고리즘을 통해 지하 구조를 영상화하는 경우, 기존의 공통 영상 모음 기법과는 다르게 추가적인 계산 없이 바로 추출할 수 있는 것이 주파수 배열 공통 영상 모음의 가장 큰 장점이다.

본 논문에서는 주파수 배열 공통 영상 모음의 거동과 특성을 파악하고자 인공 합성 모델과 현장 자료에 적용하였고 2차원 모델에 한정하여 주파수 배열 공통 영상 모음 결과의 검증을 위해 오프셋 영역 공통 영상 모음과 각 영역 공통 영상 모음을 함께 도시하였다. 다층구조 모델을 통해서 구조보정 속도와 실제 속도의 차이에 따라 일정한 패턴의 거동이 나타나는 것을 확인하였고, Original marmousi 모델을 통해 실제 속도 모델과 역산을 통해 추정한 모델로부터 추출한 결과들을 비교하여 속도에 민감한 주파수 배열 공통 영상 모음의 정확도 및 실용성을 검증하였다. 3차원 모델인 SEG/EAGE 암염돔 모델을 통해 하이브리드 영역에서 주파수 배열 공통 영상 모음을 추출하였고 정확도를 검증하였다. 마지막으로, 현장 자료를 통해 주파수 배열 공통 영상 모음의 결과로 완전 파형 역산으로 추정한 속도 모델을 평가하였다.

주요어 : 역시간 구조보정, 음향파, 주파수 영역, 공통 영상 모음,
하이브리드 영역

학 번 : 2016-23242

목 차

1. 서 론 ····· 1

1.1. 연구의 배경 ····· 2

1.2. 연구의 목적 ····· 8

1.3. 논문의 구성 ····· 11

2. 모델링과 역산 ····· 12

2.1. 파동 전파 모델링 ····· 13

2.1.1 유한요소법을 이용한 2차원 주파수 영역 및 라플라스-푸리에 영역 음향파 파동방정식 기반 파동 전파 모델링 ·· 13

2.1.2 유한차분법을 이용한 3차원 시간 영역 음향파 파동방정식 기반 파동 전파 모델링 ····· 16

2.2. 라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산 ····· 24

3. 기존 공통 영상 모음 기법 ····· 34

3.1. 오프셋 영역 공통 영상 모음 ····· 34

3.2. 각 영역 공통 영상 모음 ····· 37

4. 주파수 배열 공통 영상 모음 ····· 41

5. 인공 합성 자료 적용 예제 ····· 52

5.1. 다층구조 모델 ····· 53

5.2. Original Marmousi 모델 ····· 70

5.3. SEG/EAGE 3차원 암염돔 모델 ····· 90

6. 현장 자료 적용 예제 ····· 101

6.1. 가봉 분지 현장 자료 ····· 102

7. 결　　론 ····· 121

참고문헌 ····· 123

Abstract ····· 138

그 림 목 차

[그림 4-1] '*'축에 해당하는 탄성파 트레이스를 푸리에 변환을 통해 주파수별로 도시한 영상(Yilmaz, 2001). ····· 47

[그림 4-2] 하이브리드 영역에서 주파수 영역 공통 영상 모음을 얻는 절차. ····· 51

[그림 5-1] 다층구조의 속도 모델. ····· 55

[그림 5-2] 평활화한 다층구조 속도 모델. ····· 56

[그림 5-3] 다층구조의 역시간 구조보정 영상(화살표는 반사면의 심도를 표시한 것). ····· 56

[그림 5-4] 다층구조 구조보정 영상의 3 km 지점을 기준으로 5 m 간격으로 주변의 10개의 공통 영상 모음을 이어붙인 영상(화살표는 검은 선은 반사면의 심도를 표시한 것): (a) 오프셋 영역 공통 영상 모음; (b) 각 영역 공통 영상 모음; (c) 주파수 배열 공통 영상 모음. ····· 58

[그림 5-5] (a) 두 번째 층과 네 번째 층의 속도를 200 m/s 씩 높인 평활화된 다층구조 속도 모델; (b) 두 번째 층과 네 번째 층의 속도를 200 m/s 씩 낮춘 다층구조 속도 모델. ····· 61

[그림 5-6] 그림 5-5의 속도 모델을 통해 획득한 역시간 구조보정 영상(화살표는 실제 반사면의 심도를 의미함): (a) 일부 층의 속도가 빠른 모델; (b) 일부 층의 속도가 느린 모델. ····· 63

[그림 5-7] 일부 층의 속도를 높인 다층구조 구조보정 영상에서 연속된 10개의 공통 영상 모음을 이어 붙인 영상(화살표와 검은 선은 실제 반사면의 심도를 의미함): (a) 오프셋 영역 공통 영상 모음; (b) 각 영역 공통 영상 모음; (c) 주파수 배열 공통 영상 모음. ····· 65

[그림 5-8] 일부 층의 속도를 낮춘 다층구조 구조보정 영상에서 연속된 10개의 공통 영상 모음을 이어 붙인 영상(화살표와 검은 선은 실제 반사면의 심도를 의미함): (a) 오프셋 영역 공통 영상 모음; (b) 각 영역 공통 영상 모음; (c) 주파수 배열 공통 영상 모음. ····· 67

[그림 5-9] (a) 실제 속도 모델; (b) 심도에 따라 선형적으로 속도가 증가하는 모델; (c) (b)를 초기 모델로 하여 라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산으로 속도를 추정한 모델. ····· 72

[그림 5-10] 그림 5-9의 속도 모델로부터 역시간 구조보정을 수행하여 얻은 지하 영상(빨간 선은 공통 영상 모음을 추출한 지점을 의미함): (a) 실제 속도 모델; (b) 심도에 따라 선형적으로 속도가 증가하는 모델; (c) (b)를 초기 모델로 하여 라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산으로 속도를 추정한 모델. ····· 73

[그림 5-11] 공통 영상 모음을 추출한 지점에서의 세 속도 모델의 속도분포: (a) 3.5 km; (b) 4 km; (c) 4.5 km; (d) 5 km; (e) 5.5 km; (f) 6 km; (g) 6.5 km; (h) 7 km; (i) 7.5 km; (j) 8 km. ····· 75

[그림 5-12] 그림 5-10의 모델에서 3.5 km에서 8 km 까지 0.5 km 간격으로 추출한 오프셋 영역 공통 영상 모음 10개를 이어 붙인 영상(화살표는 실제 반사면의 심도 일부를 의미함): (a) 실제 속도 모델; (b) 심도에 따라 선형적으로 증가하는 속도 모델; (c) (b)를 초기 모델로 하여 라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산으로 속도를 추정한 모델. ····· 78

[그림 5-13] 공통 영상 모음을 추출한 지점의 실제 속도 모델과 역산을 통해 추정한 모델의 속도 차이를 나타낸 그래프: (a) 3.5 km; (b) 4 km; (c) 4.5 km; (d) 5 km; (e) 5.5 km; (f) 6 km; (g) 6.5 km; (h) 7 km; (i) 7.5 km; (j) 8 km. ····· 80

[그림 5-14] 그림 5-10의 모델에서 3.5 km에서 8 km 까지 0.5 km 간격으로 추출한 각 영역 공통 영상 모음 10개를 이어 붙인 영상(화살표는 실제 반사면의 심도 일부를 의미함): (a) 실제 속도 모델; (b) 심도에 따라 선형적으로 증가하는 속도 모델; (c) (b)를 초기 모델로 하여 라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산으로 속도를 추정한 모델. ····· 84

[그림 5-15] 그림 5-10의 모델에서 3.5 km에서 8 km 까지 0.5 km 간격으로 추출한 주파수 배열 공통 영상 모음 10개를 이어 붙인 영상(화살표는 실제 반사면의 심도 일부를 의미함): (a) 실제 속도 모델; (b) 심도에 따라 선형적으로 증가하는 속도 모델; (c) (b)를 초기 모델로 하여 라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산으로 속도를 추정한 모델. ····· 87

[그림 5-16] (종방향: 1.8 km, 횡방향: 1.8 km, 심도: 0.5km)에서의 속도 모델: (a) SEG/EAGE 3차원 암염돔 속도 모델(빨간색 점선은 해당 지점을 의미함); (b) 심도에 따라 선형적으로 증가하는 속도 모델. ····· 92

[그림 5-17] SEG/EAGE 3차원 암염돔 모델에 사용한 송신원과 수진기 모식도(검은색 점은 송신원들을 의미하고 빨간색 점은 송신원을 의미하고, 음영 처리된 부분은 빨간색 점 위치의 송신원을 이용하였을 때 취득하는 수진기의 범위를 의미함). ····· 93

[그림 5-18] 각 속도 모델로부터 획득한 역시간 구조보정 영상: (a) 평활화한 실제 모델; (b) 심도에 따라 선형적으로 속도를 증가시킨 모델. ····· 94

[그림 5-19] 실제 속도 모델(True)과 심도에 따라 선형적으로 증가하는 속도 모델(Vkz)의 속도분포(횡방향: 1.81 km 지점): 종방향 (a) 1.11 km; (b) 1.31 km; (c) 1.51 km; (d) 1.71 km; (e) 1.91 km; (f) 2.11 km; (g) 2.31 km; (h) 2.51 km; (i) 2.71 km; (j) 2.91 km. ····· 95

[그림 5-20] 횡방향 1.81 km 지점에서 종방향 기준 200 m 간격으로 10개의 주파수 배열 공통 영상 모음을 이어붙인 영상(파란 화살표: 암염돔 상단의 실제 심도, 빨간 화살표: 암염돔 하단의 실제 심도): (a) 평활화한 실제 속도 모델; (b) 심도에 따라 선형적으로 속도를 증가시킨 모델. ····· 99

[그림 6-1] 현장 자료 구조보정에 적용한 속도 모델들: (a) 라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산을 통한 추정 속도 모델; (b) (a)에서 물 층을 제외한 나머지 영역의 속도를 20 % 낮춘 모델; (c) 균질 모델. ····· 104

[그림 6-2] 그림 6-1의 속도 모델을 이용하여 구한 역시간 구조보정 영상(빨간색 선은 공통 영상 모음을 추출한 지점을 의미함): (a) 라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산 알고리즘으로 추정한 속도 모델; (b) (a)에서 물 층을 제외한 나머지 영역의 속도를 20 % 낮춘 모델; (c) 균질 모델. ····· 106

[그림 6-3] 그림 6-1의 세 모델에서 공통 영상 모음을 추출한 지점의 속도분포: (a) 5 km; (b) 7 km; (c) 9 km; (d) 11 km; (e) 13 km; (f) 15 km; (g) 17 km; (h) 19 km; (i) 21 km; (j) 23 km. ····· 108

[그림 6-4] 그림 6-2의 모델에서 5 km에서 23 km 까지 2 km 간격으로 추출한 주파수 배열 공통 영상 모음 10개를 이어 붙인 영상(빨간색 화살표는 역산을 통해 추정한 속도 모델에서 추출한 주파수 배열 공통 영상 모음에서 수평하게 나타난 심도를 의미함): (a) 역산을 통해 추정한 속도 모델; (b) (a)에서 물 층을 제외한 나머지 영역의 속도를 20% 낮춘 모델; (c) 균질 모델. ····· 112

[그림 6-5] 그림 6-2의 모델에서 5 km에서 23 km 까지 2 km 간격으로 추출한 오프셋 영역 공통 영상 모음 10개를 이어 붙인 영상(빨간색 화살표는 역산을 통해 추정한 속도 모델에서 추출한 오프셋 영역 공통 영상 모음에서 수평하게 나타난 심도를 의미함): (a) 역산을 통해 추정한 속도 모델; (b) (a)에서 물 층을 제외한 나머지 영역의 속도를 20% 낮춘 모델; (c) 균질 모델. ····· 115

[그림 6-6] 그림 6-2의 모델에서 5 km에서 23 km 까지 2 km 간격으로 추출한 각 영역 공통 영상 모음 10개를 이어 붙인 영상(빨간색 화살표는 역산을 통해 추정한 속도 모델에서 추출한 각 영역 공통 영상 모음에서 수평하게 나타난 심도를 의미함): (a) 역산을 통해 추정한 속도 모델; (b) (a)에서 물 층을 제외한 나머지 영역의 속도를 20% 낮춘 모델; (c) 균질 모델. ··· 118

표 목 차

[표 1-1] 다양한 역시간 구조보정 알고리즘에서의 각 영역 공통 영상 모음을 획득하는데 걸리는 시간과 필요로 하는 기억공간 및 저장공간을 나타낸 표(Jin et al., 2013). ····· 10

[표 4-1] 세 가지 공통 영상 모음을 추출하는데 필요한 계산량을 도출하기 위한 모델 가정. ····· 48

[표 4-2] 각각의 공통 영상 모음을 추출하기 위해 역시간 구조보정 수행 외에 추가로 필요한 계산량과 저장공간. ····· 50

[표 5-1] 다층구조 모델의 속도분포. ····· 55

[표 5-2] 그림 5.1.6의 속도분포(밑줄 친 부분: 실제 속도보다 200 m/s 높인 층, 볼드체: 실제 속도보다 200m/s 낮춘 층을 의미함). ····· 60

[표 5-3] 구조보정에 사용한 속도 모델에 따른 주파수 영역 공통 영상 모음의 거동. ····· 69

1. 서 론

탐사를 통해 얻은 자료로부터 지하 구조 영상을 얻는 과정은 많은 절차로 이루어져 있다. 이 과정의 가장 큰 문제는 한 번에 신뢰할만한 지하 구조 영상을 얻을 수 없어, 지하 구조의 물성을 추정하는 작업과 영상화하는 작업, 그리고 그 결과물 검증하는 과정을 반복적으로 수행해야 한다는 것이다. 지하 구조 영상을 검증하는 대표적인 기법이 공통 영상 모음(Common Image Gather)이며, 기존 기법 중 대표적인 예로는 오프셋 영역 공통 영상 모음(Offset-domain Common Image Gather)과 각 영역 공통 영상 모음(Angle-domain Common Image Gather)이 있다.

이 장에서는 문헌조사를 통해 구조보정에 사용되는 대표적인 두 알고리즘인 키르히호프 구조보정과 역시간 구조보정을 소개하고 각각의 구조보정 알고리즘 수행 시 추출하는 공통 영상 모음 기법의 특징을 소개하고자 한다. 파악한 기존 공통 영상 모음 기법의 문제점을 해결하기 위해 제안하는 기법인 주파수 배열 공통 영상 모음 연구의 목적을 소개하고, 어떠한 방식으로 연구를 진행하였는지 소개하고자 한다.

1.1. 연구의 배경

구조보정(migration)이란 탐사를 통해 취득한 자료에서 산란(scattering)으로 인해 회절된 에너지를 모아 지하의 지층 구조를 영상화하는 것이다. 구조보정 기술은 Claerbout and Doherty (1972)에서 제시된 파동방정식 해를 유한차분법(Finite Difference Method)에 적용하면서 비약적인 발전이 이루어졌으며, 키르히호프 구조보정(Kirchhoff migration) (Schneider, 1978), F-K 구조보정(Frequency-Wavenumber migration) (Gazdag, 1978; Stolt, 1978), 심도 구조보정(Depth migration), 역시간 구조보정(Reverse Time Migration)(Baysal et al., 1983) 다양하게 발전하였다.

이 중, 현재까지 많이 사용되는 구조보정 기법은 키르히호프 구조보정과 역시간 구조보정이다. 먼저, 키르히호프 구조보정은 파선이론(ray theory)에 기반을 둔 파선 기반 구조보정(ray-based migration)으로 파동방정식을 키르히호프 방정식으로 근사하여 나타낸 것이다(Schneider, 1978). 트레이스에 기록된 값을 송신원과 수진기를 초점으로 하는 타원상의 모든 회절점으로부터 발생한 회절파의 합으로 보는 것으로, 가파른 경사를 가진 구조나 수평 방향 속도에 변화가 있는 구조에도 활용할 수 있으며, 계산량이 많지 않아 비교적 빠르게 영상화할 수 있어 현재까지도 많이 사용된다 (Bleistein, 1987; Audebert et al, 1997; Bleistein and Gray, 2001). 하지만 하나의 반사면에서 반사된 것이 아닌 여러번 반사

를 거쳐 돌아온 다중경로(multipath)를 고려할 수 없어, 복잡한 지하 구조를 가지는 경우 구조보정을 통해 획득한 영상을 신뢰하기 어려운 문제가 있다(Audebert et al., 1997).

이러한 문제를 해결한 구조보정 알고리즘이 역시간 구조보정이다(Baysal et al., 1983). 역시간 구조보정은 양방향 파동방정식을 사용하여 송신원으로부터 전파되는 순방향 파동장(forward wavefield)과 수진기에 기록된 파동장을 다시 수진기로부터 역전파 시키는 역방향 파동장(backward wavefield)의 조합으로 영상을 획득한다. 역시간 구조보정을 시간 영역에서 수행할 경우, 두 파동장의 콘볼루션(convolution)을 계산하고, 주파수 영역에서 수행할 경우, 두 파동장의 곱으로 구할 수 있다. 계산량이 많다는 단점은 있지만, 키르히호프 구조보정과는 다르게 다중경로를 가지는 파동장을 고려할 수 있어 지하 구조가 복잡한 경우에 키르히호프 구조보정보다 나은 영상화가 가능하여 현재도 많은 연구가 활발하게 이루어지고 있는 알고리즘이다.

구조보정을 통해 얻은 지하 영상을 검증하는 기법으로 공통 영상 모음 기법이 활용된다. 같은 지점(하나의 공간좌표)에서 공통 영상 모음이란, 중합된 한 지점에서의 영상을 관심 있는 매개변수로 나열한 것을 의미한다. 공통 영상 모음 기법에서 대표적으로 사용되는 것은 오프셋 영역 공통 영상 모음과 각 영역 공통 영상 모음이다.

오프셋 영역 공통 영상 모음은 구조보정 영상의 한 지점에서 송신원과

수진기의 거리를 의미하는 오프셋에 따라 영상을 나열한 것이다. 구조보정 속도를 검증하는 방법은 다음과 같다. 구조보정에 사용된 속도가 실제 지하 구조의 속도와 같다면, 모음 상에서 지하 구조 내에 존재하는 반사면의 심도와 같은 위치에서 에너지가 수평하게 나타난다. 구조보정에 사용된 속도가 실제 속도보다 빠르면 오프셋이 커질수록 얕은 심도방향으로 꺾이는 smiling 현상이 나타나고, 반대의 경우에는 frowning 현상이 나타난다. 키르히호프 구조보정 알고리즘으로 영상을 획득한 경우, 추가적인 계산 없이 오프셋 영역 공통 영상 모음을 추출할 수 있어 빠르게 구조보정 영상을 검증할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 오프셋 영역 공통 영상 모음은 표면에서의 전파 방향이 중간점(midpoint) 축을 따른 시간 경사(dip)만으로 명확하게 결정되지 않아 수평 방향의 속도 변화가 큰 경우에는 인공잡음에 의해 검증 수단으로서의 가치가 크게 떨어진다 (Prucha et al., 1999; Xu et al., 2001; Stolk and Symes, 2003). 또한, 구조보정에 이용한 속도가 실제 속도와 같아도 인공잡음으로 인하여 수평하게 나타나지 않는 문제 또한 발생한다.

위와 같은 문제를 해결하기 위해 키르히호프 구조보정 영상으로부터 각 영역 공통 영상 모음을 추출하는 연구가 이루어졌다(French, 1974; Gardner et al., 1974; Schneider, 1978). 각 영역 공통 영상 모음에서는 다중경로를 고려할 수 있어 오프셋 영역 공통 영상 모음에서보다 인공잡음이 덜하다는 장점이 있다(Xu et al., 2001; Brandsberg-Dahl et al., 2003). 하지만, 모음의 데이터가 기존 영상 데이터의 하위 집합(subset)이므로, 인공잡음이 여전히 존재하며, 반사면처럼 보이는 인공잡음의 반

사각까지 계산하게 되는 경우가 있어, 의미 없는 계산이 추가되는 문제가 있다(Sirgue et al., 2010). 이러한 문제를 해결하기 위해서 Brandsberg-Dahl et al. (2003)은 사전 지식에 기반한 가정을 추가하여 각 영역 공통 영상 모음을 추출하여 나은 결과를 보였지만, 탐사 이전의 과정에서 지하 구조에 대한 사전지식을 가지고 있는 경우가 적어 실제 현장 자료에 적용하는 것은 어렵다.

Giboli et al. (2012)는 역시간 구조보정을 통해 기존의 방식으로 오프셋 영역 공통 영상 모음을 추출한 결과가 직관적이지 않고, 이를 활용하는 것이 어렵다는 것에 착안하여 기존의 오프셋 영역 공통 영상 모음 형식의 공통 영상 모음을 추출하는 지표면 오프셋 모음(Surface offset gather)을 제안하였다. Lemaistre et al. (2012)는 넓은 방위각을 가지는 3차원 기니만(Gulf of Guinea) 현장 자료에 지표면 오프셋 모음을 적용하여 키르히호프 구조보정으로 획득한 오프셋 영역 공통 영상 모음보다 뛰어난 성능이 있음을 입증하였다. Yang et al. (2015)는 암염돔의 하부 구조를 규명하기 위해 기존에 활용되던 역시간 구조보정 알고리즘을 통해 획득한 각 영역 공통 영상 모음은 반사각의 범위가 30° 이하의 정보만 가지는 점과 오프셋이 커질수록 모음 상의 결과가 희미해지는 문제가 있어, 모든 방위각을 사용하는 지표면 오프셋 모음 기법을 제시하였다. 이 기법은 탐사 자료의 오프셋 범위가 넓을수록 유리하며, 각 영역 공통 영상 모음보다 나은 결과를 보이지만 역전파 파동장의 전파에 많은 연산을 추가적으로 수행해야 해서 비용이 크게 증가하는 문제가 있다.

Sava & Fomel (2003)에서는 역시간 구조보정과 같은 파동장 연속 구조보정(wavefield continuation migration)에서 먼저 오프셋 영역 공통 영상 모음을 획득하고 이를 주파수-파수 영역으로 변환하여 각 영역 공통 영상 모음을 획득하는 방법을 제안하였다. 이러한 방법은 2차원 문제에서는 어느 정도 효율적이지만 3차원 문제와 같은 상당한 연산을 요구하는 문제의 경우에서 비효율적이다. Xu et al. (2010)에서는 반사파와 방위각 정보를 담고 있는 각 영역 공통 영상 모음을 획득하기 위한 실제 진폭을 활용한 역시간 구조보정 알고리즘을 유도하였다. 지표면 오프셋 모음과의 비교를 통해 각 영역 공통 영상 모음의 결과가 암염돔의 상단과 하단에서 잡음 없이 깔끔하게 나타났다. 하지만, 모든 파동장을 저장해야 하고, 각각의 파동장에 4차원 푸리에 변환을 해주어야 하므로 구조보정 이외의 추가적인 계산량과 저장공간이 큰 폭으로 증가한다.

Yoon & Marfurt (2006)에서 제안한 포인팅 벡터를 Yan et al. (2013)에서는 역시간 구조보정 알고리즘에 적용하여 각 영역 공통 영상 모음을 획득하는 과정에서 필요로 하는 계산량을 줄이는 방법을 제안하였으며, Yan et al. (2016)에서는 지표면 오프셋 모음을 도시하여 비교하였을 때 포인팅 벡터를 이용한 각 영역 공통 영상 모음의 성능이 우위에 있지만, 기존의 각 영역 공통 영상 모음의 성능보다는 다소 떨어져 복잡한 지하구조에 적용하는 것은 무리가 있는 것을 밝혔다. Zhang & McMechan (2011)에서는 P파 분극으로부터 직접적으로 파수를 계산하여 얻은 입사각 영역으로 공통 영상 모음을 획득하는 방법을 제안하였다. 각 영역 공통 영상 모음에 방향 벡터 기반의 방법들을 적용하면 비교적 빠르게 획

득할 수 있는 장점이 있지만, 각 시간 단계에서 각 영상 지점에 대해 하나의 전파 방향만 계산이 가능하여 겹쳐서 반복적으로 나타나는 반사면(overlapping event)이 존재하는 복잡한 구조에서는 적합하지 않다(Vyas et al., 2011).

Tang et al. (2013)에서는 지연된 송신원 구조보정(delayed-shot migration)을 이용한 평면파(plane-wave) 역시간 구조보정을 수행하여 기존의 각 영역 공통 영상 모음보다 계산 비용을 줄이고 필요로 하는 저장공간을 대략 100배 줄인 3차원 각 영역 공통 영상 모음을 획득하는 방법을 제안하였지만, 기존의 각 영역 공통 영상 모음보다 성능이 떨어지는 문제가 있다. 이 외에도 Save & Fomel (2006)에서 제안한 국부적으로 이동된 영상화 조건 기법(local shift imaging condition method)이 있으며, 현재도 각 영역 공통 영상 모음을 획득하는 계산량을 줄이면서 성능도 만족시키기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.

목적에 따라 사용하는 구조보정 알고리즘, 알고리즘을 수행하는 영역, 공통 영상 모음이 다르다. 단순한 지하 구조를 빠르게 파악하고자 하는 경우, 키르히호프 구조보정을 수행하고 오프셋 영역 공통 영상 모음을 추출하는 것만으로도 충분하다. 복잡한 지하 구조의 경우, 역시간 구조보정 알고리즘을 수행하며, 이를 통해 오프셋 영역 공통 영상 모음 또는 각 영역 공통 영상 모음을 추출하여 지하 구조의 물성값을 분석한다. 하지만, 공통 영상 모음을 추출하기 위한 계산 및 저장공간이 추가로 요구되는 것을 알 수 있다.

1.2. 연구의 목적

탐사 자료로부터 영상을 얻기까지의 일련의 과정들은 주로 시간-공간 영역과 주파수-공간 영역에서 수행된다. 파동 전파 모델링의 경우, 주파수-공간 영역에서는 원하는 주파수 성분을 선택하여 모델링이 가능하며, 안정조건이 시간-공간 영역에 비해 자유롭고, 한 번 모델링 연산자 행렬이 계산되면, 다수의 송신원에 대한 파동장을 동시에 계산할 수 있어 병렬화가 간단하여 빠르게 모델링이 가능한 것이 장점이다. 하지만, 모델의 격자수와 송신원, 수진기의 개수에 따라 모델링 연산자 행렬의 크기가 결정되는데, 행렬의 크기가 커지면 요구되는 기억공간(memory) 시스템 구축 비용이 커지는 문제가 있다. 반면, 시간-공간 영역에서는 시스템 구축 측면의 제약은 없지만 높은 주파수를 포함하는 파동 전파 모델링을 하는 경우, 안정조건의 문제로 격자 간격과 시간 단계를 작게 사용하므로 계산량이 많아진다(Mulder et al., 2002). 완전 파형 역산과 역시간 구조보정의 경우, 순방향 파동장과 역전파 파동장(또는 관측 파동장)을 통해 물성값의 업데이트 값(gradient)을 구하는데, 주파수-공간 영역에서는 단순 곱으로 구하지만, 시간-공간 영역에서는 콘볼루션 값을 구해야 하므로 계산량이 많아진다. 공통 영상 모음은 역시간 구조보정이 수행되는 영역에 따라 달라지는데 대부분은 시간-공간 영역에서 추출되는 기법들이 주를 이룬다.

앞서 소개한 기존의 공통 영상 모음 기법인 오프셋 영역 공통 영상 모음은 시간 영역 모델링과 키르히호프 구조보정을 사용했을 시에 추가적인

계산 없이 빠르게 추출할 수 있는 것이 큰 장점이다. 하지만, 주파수 영역을 사용하는 경우나 역시간 구조보정과 같은 복잡한 구조에서 적합한 알고리즘을 적용할 때는 오프셋 영역 공통 영상 모음을 추출하기 위해 추가적인 계산이 요구된다. 각 영역 공통 영상 모음은 어떠한 구조보정 알고리즘을 사용하던, 어떠한 영역에서 수행하던 각 정보를 얻기 위한 추가적인 계산이 필요한데, 시간-공간 영역에서 수행하는 경우, 파동의 전파 방향을 계산하기 위해 시간 단계마다 파동장 스냅샷을 저장해야하므로 모델이 큰 경우에는 저장공간 확보의 문제가 있다. 표 1.2.1은 다양한 역시간 구조보정 알고리즘을 통해 각 영역 공통 영상 모음을 획득하는 계산 시간과 필요로 하는 기억공간과 저장공간을 나타낸 것이다.

복잡한 구조에 적합한 역시간 구조보정을 수행하였을 때 추출하는 기존의 공통 영상 모음 기법들은 요구되는 추가 계산량이 크다. 따라서, 본 논문에서는 역시간 구조보정 수행 시에 추가적인 계산 없이 빠르게 추출할 수 있는 공통 영상 모음 기법인 주파수 배열 공통 영상 모음을 제안한다. 본 연구의 목적은 새롭게 제안된 기법을 다양한 수치 예제에 적용하여 주파수 배열 공통 영상 모음의 거동을 파악하고, 기존 공통 영상 모음을 함께 도시하여 결과를 비교함으로써 적용성 및 실용성을 파악하고자 한다.

표 1-1. 다양한 역시간 구조보정 알고리즘에서의 각 영역 공통 영상 모음을 획득하는데 걸리는 시간과 필요로 하는 기억공간 및 저장공간을 나타낸 표(Jin et al., 2013).

	Computation time (for one shot)	Memory requirement (byte)	Disk space requirment (byte)
All, amplitude, S & R	15.0 min	115.2 M	$2 \times N_x N_z N_t / 8 = 2.4\,\mathrm{G}$
All, phase, S & R	115.0 min	115.2 M	$2 \times N_x N_z N_t / 8 = 2.4\,\mathrm{G}$
All, amplitude, S & D	7.0 min	105.6 M	$2 \times N_x N_z N_t / 8 = 2.4\,\mathrm{G}$
All, phase, S & D	56.0 min	105.6 M	$2 \times N_x N_z N_t / 8 = 2.4\,\mathrm{G}$
Two highest, amplitude, S & D	19.5 - 105.0 min	28.8 M	$2 \times N_x N_z N_t = 19.2\,\mathrm{G}$
Two highest, phase, S & D	21.5 - 106.5 min	28.8 M	$2 \times N_x N_z N_t = 19.2\,\mathrm{G}$
LPWD (window)	18.0 hours	3.5 G	$2 \times N_x N_z N_t / 8 = 2.4\,\mathrm{G}$
LPWD (whole)	55.7 min	4.3 G	$2 \times N_x N_z N_t / 8 = 2.4\,\mathrm{G}$
LSCI (window) + [FT]	2.8 min [+0.63 min /CIG]	250 M (time domain) 3.8 G (frequency domain)	$2 \times N_x N_z N_t / 8 = 2.4\,\mathrm{G}$
LSCI (whole) + [FT]	2.8 min [+0.63 min /CIG]	250 M (time domain) 3.8 G (frequency domain)	$2 \times N_x N_z N_t / 8 = 2.4\,\mathrm{G}$

1.3. 논문의 구성

본 논문의 2장에서는 공통 영상 모음을 추출하기 전에 선행되어야 하는 탄성파 자료처리(seismic data processing)에서 대표적인 파동 전파 모델링과 완전 파형 역산에 대한 이론을 설명한다. 3장에서는 기존 공통 영상 모음을 소개하고 대표적인 기법과 본 연구에서 사용한 기법을 소개한다. 4장에서는 먼저, 주파수 영역 역시간 구조보정 알고리즘을 수식을 통한 전개로 설명하고, 주파수 배열 공통 영상 모음 식을 정의한다. 또한 기존 공통 영상 모음 두 가지와 주파수 배열 공통 영상 모음을 추출하는데 필요한 계산량과 저장공간에 대해 비교하고, 하이브리드 영역에서 주파수 배열 공통 영상 모음을 추출하는 과정을 간략하게 소개한다. 5장에서는 세 가지의 인공 합성 모델(2차원 다층구조 모델, 2차원 Original Marmousi 모델, SEG/EAGE 3차원 암염돔 모델)에 주파수 배열 공통 영상 모음을 적용한 결과를 도시하였고, 6장에서는 가봉 분지 지역에서 취득한 현장 자료에 주파수 배열 공통 영상 모음을 적용한 결과를 도시하고 완전 파형 역산을 통해 추정한 속도 모델을 평가하였다. 마지막 7장에서는 본 연구의 결론을 기술하였다.

2. 모델링과 역산

2장에서는 탄성파 자료처리 과정 중 파동 전파 모델링과 완전 파형 역산을 소개하고자 한다. 2차원 모델 적용한 유한요소법(finite element method)을 이용한 주파수 영역 및 라플라스-푸리에 영역 음향파 파동방정식 기반 파동 전파 모델링과 3차원 모델인 SEG/EAGE 3차원 암염돔 모델에 적용한 공간 미분 항에 대해 고차 항(high-order)을 적용한 유한차분법(finite difference method)을 이용한 시간 영역 음향파 파동방정식 기반 파동 전파 모델링을 설명한다.

다음으로는 초기 물성 모델로부터 지하 구조의 물성값을 찾는 완전 파형 역산 기법 중 본 논문에서 사용한 라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산을 설명하고자 한다.

2.1. 파동 전파 모델링

2.1.1 유한요소법을 이용한 2차원 주파수 영역 및 라플라스-푸리에 영역 음향파 파동방정식 기반 파동 전파 모델링

본 논문에서는 2차원 인공 합성 수치 예제와 현장 자료의 모델링을 위해 유한요소법을 이용한 2차원 주파수 영역 음향파 파동방정식 기반 파동 전파 모델링을 적용하였다.

$$\frac{1}{c(\mathbf{x})^2}\frac{\partial^2 \mathrm{u}(\mathbf{x},\mathrm{t})}{\partial \mathrm{t}^2} = \frac{\partial^2 \mathrm{u}(\mathbf{x},\mathrm{t})}{\partial \mathrm{x}^2} + \frac{\partial^2 \mathrm{u}(\mathbf{x},\mathrm{t})}{\partial \mathrm{y}^2} + \mathrm{f}(\mathrm{t}) \qquad (2\text{-}1)$$

식(2-1)은 시간 영역 2차원 파동방정식이다. 유한요소법에서의 시간 영역에서의 2차원 파동방정식을 유한요소법으로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathrm{M}\ddot{\mathrm{u}} + \mathrm{C}\dot{\mathrm{u}} + \mathrm{K}\mathrm{u} = \mathrm{f}, \qquad (2\text{-}2)$$

식(2-2)에서 M은 질량 행렬(mass matrix), C는 감쇠 행렬(damping matrix), K는 강성 행렬(stiffness matrix)이며, $\ddot{\mathrm{u}}$는 u의 2차 미분 항, $\dot{\mathrm{u}}$는 u의 1차 미분 항, f는 시간 영역 송신행렬을 의미한다. 시간 영역 파동장 u에 푸리에 변환을 취하면 식(2-3)과 같다.

$$\tilde{u}(\omega) = \int_0^{\infty} u(t) e^{-\omega t} dt, \qquad (2\text{-}3)$$

여기서 $\tilde{u}$는 주파수 영역에서의 파동장, $\omega(=2\pi f)$는 각주파수(angular frequency) 이다. 식(2-3)을 식(2-2)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (\omega^2 M' + \omega C' + K')\tilde{u} &= \tilde{f}, \\ S'\tilde{u} &= \tilde{f}. \end{aligned} \qquad (2\text{-}4)$$

여기서 $S'(=\omega^2 M' + \omega C' + K')$는 모델링 연산자 행렬 또는 임피던스 행렬이라고 하며

$$\tilde{u} = S^{-1}\tilde{f}. \qquad (2\text{-}5)$$

식(2-5)와 같이 식을 변형하면, 주파수 영역의 파동장은 모델링 연산자 행렬의 역행렬과 송신원 행렬의 곱으로 구할 수 있는 것이다.

본 논문에서는 라플라스-푸리에 영역 파형 역산에 사용되는 모델링은 라플라스-푸리에 영역 모델링을 사용하였다. 먼저, 식(2-2)의 시간 영역 파동장에 라플라스-푸리에 변환을 취해주면 다음과 같다.

$$\bar{u}(s) = \int_0^{\infty} u(t) e^{-st} dt, \tag{2-6}$$

여기서 $\bar{u}$는 라플라스-푸리에 영역 파동장이며, s는 라플라스 감쇠 상수(Laplace attenuation constant) σ를 복소수 $s = \sigma + i\omega$로 확장한 것으로 복소 라플라스 감쇠 상수 또는 복소주파수(complex frequency)라고 한다. 식(2-6)을 다시 쓰면 다음과 같다(Shin and Cha, 2009).

$$\bar{u}(s) = \int_0^{\infty} u(t) e^{-st} dt = \int_0^{\infty} u(t) e^{-\sigma t} e^{-i\omega t} dt, \tag{2-7}$$

식(2-7)은 시간 영역 파동장에 라플라스 변환과 푸리에 변환을 한 번에 취해주는 것으로 볼 수 있다. 식(2-7)을 식(2-2)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (s^2 M'' + sC'' + K'')\bar{u} &= \bar{f}, \\ S''\bar{u} &= \bar{f}. \end{aligned} \tag{2-8}$$

여기서 $\bar{f}$는 라플라스-푸리에 영역 송신원 행렬, S''는 복소 임피던스 행렬이다. 식(2-5)과 같은 방법으로 라플라스-푸리에 영역 파동 모델링을 수행한다.

주파수 영역 모델링과 라플라스-푸리에 영역 모델링은 상당히 유사하다. 두 영역 간의 차이는 주파수 영역의 경우 실수주파수, 라플라스-푸리에 영역의 경우 복소주파수를 사용한다. 시간 영역 모델링과는 다르게 두 영역에서의 모델링은 주파수별로 독립적으로 모델링이 가능하므로 원하는 주파수 성분만을 선별하여 모델링을 할 수 있으며, 또한 병렬화를 쉽게 할 수 있어 계산환경에 제약이 없다면 빠르게 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다.

2.1.2. 유한차분법을 이용한 3차원 시간 영역 음향파 파동방정식 기반 파동 전파 모델링

본 논문의 3차원 수치 예제인 SEG/EAGE 암염돔 모델에 주파수 배열 공통 영상 모음 기법을 적용해보기 위해 먼저, 유한차분법을 이용한 3차원 시간 영역 음향파 파동방정식 모델링 기법으로 수치 파동장을 획득하였다. 시간 영역 모델링 기법을 사용한 이유는 (1) 시간 영역에서 파동 전파 모델링을 수행한 뒤에 주파수 영역 역시간 구조보정을 수행하여 지하 구조를 영상화하는 즉, 하이브리드 영역에서 주파수 배열 공통 영상 모음을 얻기 위한 과정을 보이고, (2) 3차원 모델의 경우 모델의 격자수가 $n_x \times n_y \times n_z$ 이므로, 주파수 영역에서 수행했을 시 모델링 연산자 행렬의 크기가 너무 커져 구축된 시스템의 기억공간의 크기를 넘어서는 문제가 있어서이다. 위의 두 가지 이유로 본 논문에서는 시간 영역에서 파동 전파 모델링을 하였으며, 3차원 음향파 파동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{c(\mathbf{x})^2}\frac{\partial^2 \mathrm{u}(\mathbf{x},\mathrm{t})}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \mathrm{u}(\mathbf{x},\mathrm{t})}{\partial \mathrm{x}^2} + \frac{\partial^2 \mathrm{u}(\mathbf{x},\mathrm{t})}{\partial \mathrm{y}^2} + \frac{\partial^2 \mathrm{u}(\mathbf{x},\mathrm{t})}{\partial z^2} + \mathrm{f}(\mathbf{x},\mathrm{t}). \qquad (2\text{-}9)$$

여기서 $c(\mathbf{x})$는 음향파의 속도인 p파 속도이며, $\mathbf{x}$는 공간 영역을 의미하며, $\mathbf{x}=(\mathrm{x},\mathrm{y},\mathrm{z})$이다. $\mathrm{u}(\mathbf{x},\mathrm{t})$는 시간 영역에서의 수치 파동장, $\mathrm{f}(\mathbf{x},\mathrm{t})$는 송신원을 의미하며, t는 시간, x, y, z는 공간을 나타낸다. 유한차분법은 미분식을 차분식으로 근사하여 근사치를 구하는 것으로 테일러 전개의 확장(Taylor series expansion)을 통해 얻을 수 있다.

$$f(x_o+h) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}h + \cdots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}h^n + R_n(x), \qquad (2\text{-}10)$$

식(2-10)은 임의의 함수 $f(x)$의 $x=x_0$에서 x축으로 임의의 간격인 h만큼 이동한 $x=x_0+h$의 지점에서의 함수값 $f(x_0+h)$를 $x=x_0$에서의 함수값과 미분한 함수의 값들로 표현한 것이다. 여기서 $f^{(n)}$은 n번 미분한 함수를 의미하며, $R_n(x)$는 나머지를 의미한다. 식(2-10)을 파동방정식 기반 모델링에 적용하기 위해 필요한 항은 2계 도함수인 $f''(x)$이며, 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f''(x_0) = \frac{2}{h^2}(-f(x_o+h) + f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}h + \cdots \\ + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}h^n + R_n(x)), \end{aligned} \qquad (2\text{-}11)$$

식(2-11)과 같은 방법으로 $f(x_0-h)$를 이용하여 $f''(x_0)$를 구하고, 2계 도함수에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$f''(x_0)=\frac{f(x_0+h)-2f(x_0)+f(x_0-h)}{h^2}+O(h^2) \qquad (2\text{-}12)$$

여기서, $O(h^2)$은 절단오차를 의미하며, 절단오차 항 중 가장 큰 차수가 2차이므로, 2계 정확도(second-order correct)를 가진 차분식이라고 한다. 식(2-12)를 이용하여 식(2-9)을 시간과 공간에 대해서 각각 2계 정확도를 가지는 차분식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\frac{1}{c_{i,j,k}^2}\frac{\partial^2 u_{i,j,k}^{l+1}-2u_{i,j,k}^{l}+u_{i,j,k}^{l-1}}{(\triangle t)^2} &= \frac{u_{i+1,j,k}^{l}-2u_{i,j,k}^{l}+u_{i-1,j,k}^{l}}{\triangle x^2} \\ &+\frac{u_{i,j+1,k}^{l}-2u_{i,j,k}^{l}+u_{i,j-1,k}^{l}}{\triangle y^2} \\ &+\frac{u_{i,j,k+1}^{l}-2u_{i,j,k}^{l}+u_{i,j,k-1}^{l}}{\triangle z^2}+f_{i,j,k}^{l}\end{aligned} \qquad (2\text{-}13)$$

식(2-13)에서 아래첨자의 i, j, k는 각각 x, y, z의 절점(node)을 나타내며, 위첨자 l은 시간 단계를 의미한다. 식(2-10)에서 l 단계와 $l-1$ 단계의 수치 파동장을 통해 구하고자 하는 $l+1$ 단계에서의 수치 파동장으로 식을 정리하면 다음과 같다. (각 축의 격자 간격을 의미하는 $\triangle x$, $\triangle y$, $\triangle z$의 값을 h로 통일하였다.)

$$u_{i,j,k}^{l+1} = 2u_{i,j,k}^{l} - u_{i,j,k}^{l-1} + c_{i,j,k}^{2}(\triangle t)^2$$

$$*(\frac{u_{i-1,j,k}^{l} + u_{i,j-1,k}^{l} + u_{i,j,k-1}^{l} - 6u_{i,j,k}^{l} + u_{i+1,j,k}^{l} + u_{i,j+1,k}^{l} + u_{i,j,k+1}^{l}}{h^2} \quad (2\text{-}14)$$

$$+ f_{i,j,k}^{l})$$

식(2-14)을 통해 x, y, z 축으로 각각 세 개의 절점, 즉 총 7개의 절점을 이용하여 다음 시간 단계에서의 파동장을 구하는 것이다. 본 논문에서는 절단오차를 줄여 모델링의 정확도를 높이기 위해 공간에 대해서 8계 정확도(eighth-order correct)를 갖는 차분식을 사용하였다. 각 공간 축마다 9개의 절점을 사용하여 총 25개의 절점을 이용하여 다음 시간 단계에서의 파동장을 구하는 것이며, 이를 식(2-14)의 형태로 정리하면 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
u_{i,j,k}^{l+1} &= 2u_{i,j,k}^{l} - u_{i,j,k}^{l-1} + c_{i,j,k}^{2}(\triangle t)^2 \\
&*[(-\frac{1}{560}*u_{i+4,j,k}^{l} + \frac{8}{350}*u_{i+3,j,k}^{l} - \frac{1}{5}*u_{i+2,j,k}^{l} + \frac{8}{5}u_{i+1,j,k}^{l} \\
&-\frac{205}{72}u_{i,j,k}^{l} + \frac{8}{5}*u_{i-1,j,k}^{l} - \frac{1}{5}*u_{i-2,j,k}^{l} + \frac{8}{350}*u_{i-3,j,k}^{l} \\
&-\frac{1}{560}u_{i-4,j,k}^{l} - \frac{1}{560}*u_{i,j+4,k}^{l} + \frac{8}{350}*u_{i,j+3,k}^{l} - \frac{1}{5}*u_{i,j+2,k}^{l} \\
&+\frac{8}{5}u_{i,j+1,k}^{l} - \frac{205}{72}u_{i,j,k}^{l} + \frac{8}{5}*u_{i,j-1,k}^{l} - \frac{1}{5}*u_{i,j-2,k}^{l} \\
&+\frac{8}{350}*u_{i,j-3,k}^{l} - \frac{1}{560}u_{i,j-4,k}^{l} - \frac{1}{560}*u_{i,j,k+4}^{l} + \frac{8}{350}*u_{i,j,k+3}^{l} \\
&-\frac{1}{5}*u_{i,j,k+2}^{l} + \frac{8}{5}u_{i,j,k+1}^{l} - \frac{205}{72}u_{i,j,k}^{l} + \frac{8}{5}*u_{i,j,k-1}^{l} \\
&-\frac{1}{5}*u_{i,j,k-2}^{l} + \frac{8}{350}*u_{i,j,k-3}^{l} - \frac{1}{560}u_{i,j,k-4}^{l})/h^2 + f_{i,j,k}^{l}]
\end{aligned}
\tag{2-15}
$$

시간 영역에서의 파동방정식 모델링은 오차가 시간에 따라 계속 퍼져가게 되므로, 시간 단계가 증가함에 따라 퍼져나가는 오차가 작아져야 모델링을 성공적으로 할 수 있어 오차가 퍼져나가는 비율을 1보다 작을 수 있도록 관련 변수들을 설정해야한다.

$$\left|\frac{\epsilon_{i,j,k}^{l+1}}{\epsilon_{i,j,k}^{l}}\right| = \left|\frac{e^{i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}-\omega(t_k+\triangle t))}}{e^{i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}-\omega t_k)}}\right| = \left|e^{-i\omega\triangle t}\right| = |\eta| \le 1,$$

$$\omega = c(x,y,z)\sqrt{k_x^2+k_y^2+k_z^2}, \tag{2-16}$$

$$\mathbf{k} = k_x\hat{\mathbf{x}} + k_y\hat{\mathbf{y}} + k_z\hat{\mathbf{z}},$$

$$\mathbf{r} = x\hat{\mathbf{x}} + y\hat{\mathbf{y}} + z\hat{\mathbf{z}}.$$

식(2-16)는 파(wave)를 평면파(plane wave)로 가정하여 안정조건을 계산하는 식이며, 여기서 k_x, k_y, k_z는 파수(wavenumber)를 의미하며, $\mathbf{r}$은 직교좌표계를 나타내는 벡터, ω는 각주파수, η은 시간 단계에 따라 생기는 오차의 비율을 의미한다. 식(2-15)에서 송신원 항을 제외하고, 식(2-16)을 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\frac{\epsilon_{i,j,k}^{l+1}-2\epsilon_{i,j,k}^{l}+\epsilon_{i,j,k}^{l-1}}{(\triangle t)^2} &= c^2(-\frac{1}{560}\epsilon_{i+4,j,k}^{l}+\frac{8}{315}\epsilon_{i+3,j,k}^{l}-\frac{1}{5}\epsilon_{i+2,j,k}^{l} \\
&+\frac{8}{5}\epsilon_{i+1,j,k}^{l}-\frac{205}{72}\epsilon_{i,j,k}^{l}-\frac{1}{560}\epsilon_{i-1,j,k}^{l}+\frac{8}{315}\epsilon_{i-2,j,k}^{l}-\frac{1}{5}\epsilon_{i-3,j,k}^{l} \\
&+\frac{8}{5}\epsilon_{i-4,j,k}^{l}-\frac{1}{560}*\epsilon_{i,j+4,k}^{l}+\frac{8}{315}\epsilon_{i,j+3,k}^{l}-\frac{1}{5}\epsilon_{i,j+2,k}^{l}+\frac{8}{5}\epsilon_{i,j+1,k}^{l} \\
&-\frac{205}{72}\epsilon_{i,j,k}^{l}-\frac{1}{560}\epsilon_{i,j-1,k}^{l}+\frac{8}{315}\epsilon_{i,j-2,k}^{l}-\frac{1}{5}\epsilon_{i,j-3,k}^{l}+\frac{8}{5}\epsilon_{i,j-4,k}^{l} \\
&-\frac{1}{560}\epsilon_{i,j,k+4}^{l}+\frac{8}{315}\epsilon_{i,j,k+3}^{l}-\frac{1}{5}\epsilon_{i,j,k+2}^{l}+\frac{8}{5}\epsilon_{i,j,k+1}^{l}-\frac{205}{72}\epsilon_{i,j,k}^{l} \\
&-\frac{1}{560}\epsilon_{i,j,k-1}^{l}+\frac{8}{315}\epsilon_{i,j,k-2}^{l}-\frac{1}{5}\epsilon_{i,j,k-3}^{l}+\frac{8}{5}\epsilon_{i,j,k-4}^{l})/h^2
\end{aligned} \tag{2-17}$$

다음, 식(2-17)의 양변 모두에 $\epsilon_{i,j,k}^{l}$을 나누어 주면 다음과 같다.

$$\frac{e^{i\omega\triangle t}-2+e^{-i\omega\triangle t}}{(\triangle t)^2} = \frac{3c^2}{h^2}(-\frac{1}{560}e^{i\omega 4h}+\frac{8}{315}e^{i\omega 3h}-\frac{1}{5}e^{i\omega 2h} + \frac{8}{5}e^{i\omega h}-\frac{205}{72}+\frac{8}{5}e^{-i\omega h}-\frac{1}{5}e^{-i\omega 2h}+\frac{8}{315}e^{-i\omega 3h}-\frac{1}{560}e^{-i\omega 4h}) \tag{2-18}$$

식(2-18)에서 $e^{-i\omega\triangle t}=\eta$이고, $e^{i\omega h}=\cos\omega h+i\sin\omega h$를 이용해 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{\eta}-2+\eta=\frac{3c^2}{h^2}(-\frac{2}{560}\cos(4\omega h)+\frac{16}{315}\cos(3\omega h)-\frac{2}{5}\cos(2\omega h) + \frac{16}{5}\cos(\omega h)-\frac{205}{72}) \tag{2-19}$$

식(2-19)을 정리하여 안정조건을 구할 수 있다. 하지만, 이러한 방법은 매우 복잡하며, Lines et al. (1999)에서 제안한 n계 정확도를 가지는 시간 영역 유한차분식의 안정조건을 구하는 식(2-20)을 사용하였다.

$$\frac{c\triangle t}{h} \le \frac{2}{\sqrt{\sum_{D=1}^{n}\left(\sum_{m=-M}^{M}\left|Coeff_m^D\right|\right)}} \tag{2-20}$$

식(2-20)에서 c는 p파 속도, $\triangle t$는 시간 단계, h는 격자 간격, $Coeff_m^D$는 D-차원에서의 유한차분법의 중앙차분법 계수를 의미하며, M 은 기준이 되는 절점에서 한 방향을 기준으로 하여 몇 개의 절점을 사용하였는지를 의미한다. 본 논문에서 사용한 방식은 M 은 4이며, 모든 공간 축에 같은 계수를 갖는 공간차분식을 사용하였으므로 $Coeff_m^1 = Coeff_m^2 = Coeff_m^3$ 이 된다. 식(2-20)을 이용하여, 공간에 대해 8계 정확도를 가지는 시간 영역 유한차분법에 적용한 모델링 안정조건을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\sum_{m=-M}^{M} \left| Coeff_m^D \right| &= \left| -\frac{1}{560} \right| + \left| \frac{8}{315} \right| + \left| -\frac{1}{5} \right| + \left| \frac{8}{5} \right| \\ &\quad + \left| -\frac{205}{72} \right| + \left| \frac{8}{5} \right| + \left| -\frac{1}{5} \right| + \left| \frac{8}{315} \right| + \left| -\frac{1}{560} \right| \\ &= 6.5 \end{aligned} \tag{2-21}$$

$$\frac{c \triangle t}{h} \le \frac{2}{\sqrt{(6.5)*3}} \simeq 0.453$$

식(2-21)에서 구한 안정조건은 0.453으로 본 논문에서 사용한 예제인 SEG/EAGE 3차원 암염돔 모델에서는 격자 간격인 h는 10 m, 시간 단계 $\triangle t$는 1 ms이므로 $c \le 4{,}530$ m/s를 만족하면 안정조건을 만족하는 것이다. 실제 SEG/EAGE 3차원 암염돔 모델에서의 최고 p파 속도는 5,500 m/s 이므로 안정조건을 만족하지 않는 영역이 존재하나 그 영역이 모델링에 영향을 줄 정도로 크진 않아 문제가 없다.

2.2 라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산

완전 파형 역산은 관측된 파동장(observed wavefield)을 기준으로 하여 초기 모델을 통해 얻은 수치 파동장(modelled wavefield)을 관측된 파동장에 맞도록 지하 구조의 물성값을 추정하는 알고리즘이다. 두 파동장이 얼마나 일치하는지를 수치화한 것을 목적함수로 설정하며, 관측된 파동장과 수치 파동장의 차이를 통해 정의되며, 이론적으로는 목적함수의 값이 0이 될 때 얻은 모델을 실제 지하 구조로 판단할 수 있다. 하지만 목적함수의 비선형 문제(nonlinear problem)으로 인하여 해가 유일하지 않은 비-유일성(non-uniqueness) 문제, 불량조건 문제(ill-posed problem), 큰 조건수를 갖는 문제(ill-conditioned problem)등의 이유로 역산 알고리즘을 통해 찾은 목적함수의 최솟값이 전역 최솟값(global minimum)인 것을 파악하기 어렵다(Virieux & Operto, 2009).

라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산은 Mallick & Frazer (1987)에서 파동방정식을 이용한 모델링에 복소주파수를 제안한 것을 시작으로, Sirgue & Pratt (2004)을 통해 모델링과 역산에 복소주파수를 적용하였다. 본 논문에서 사용한 라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산 알고리즘은 Shin & Cha (2009)에서 제안한 라플라스 상수를 복소화하여 역산에 적용한 것이다. 목적함수는 l_2-norm이며, 다음과 같다.

$$E(\mathbf{m}) = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n_s}\sum_{j=1}^{n_r} \| (u_{ij} - d_{ij}) \|^2, \qquad (2\text{-}22)$$

여기서 $\mathbf{m}$은 모델 매개변수(model parameter)이고 n_s, n_r은 각각 송신원의 개수, 수진기의 개수를 의미한다. u_{ij}와 d_{ij}는 각각 라플라스-푸리에 변환된 i번째 송신원과 j번째 수진기 쌍에서의 수치 파동장과 관측 파동장을 의미한다. 목적함수의 최솟값을 구하기 위해서 최대경사법(steepest gradient method)을 사용하였으며, 이 방식은 목적함수의 급경사 방향을 구한 뒤, 반대 방향으로 모델을 업데이트하는 것이다. 식(2-22)에서 k번째 모델 매개변수 m_k로 편미분을 취해주면 다음과 같다.

$$\frac{\partial E(\mathbf{m})}{\partial m_k} = \sum_{i=1}^{n_s}\sum_{j=1}^{n_r} \mathrm{Re}\left[\frac{\partial u_{ij}}{\partial m_k}(u_{ij} - d_{ij})^*\right]. \qquad (2\text{-}23)$$

여기서 Re는 실수부, $\frac{\partial u_{ij}}{\partial m_k}$는 편미분 파동장(partial derivative wavefield), *은 복소켤레를 의미한다. 편미분 파동장을 구하기 위해, 헬름홀츠 방정식의 형태인 식(2-8)을 이용해 k번째 모델 매개변수로 편미분을 해주면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \mathrm{S}}{\partial m_k}\mathbf{u} + \mathrm{S}\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial m_k} = 0, \qquad (2\text{-}24)$$

식(2-24)에서 좌변의 첫 번째 항을 우변으로 넘겨주고, 양변에 모델링 연산자 행렬의 역행렬 S^{-1}을 취해주면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial m_k} = -(\mathrm{S}^{-1})\frac{\partial \mathrm{S}}{\partial m_k}\mathbf{u}. \qquad (2\text{-}25)$$

식(2-25)의 식을 통해 편미분 파동장은 $-\frac{\partial \mathrm{S}}{\partial m_k}\mathbf{u} = \mathbf{f}_{\mathrm{k}}$의 송신원을 통해 얻어지는 것으로 볼 수 있다(Pratt et al. 1998). 여기서 $\boldsymbol{f}_k$를 가상송신원 벡터라고 하며, 식(2-23)에 식(2-25)를 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial E(\mathbf{m})}{\partial m_k} = \int_0^{\omega_{\max}} \sum_{i=1}^{n_s} Re\,[(\mathrm{S}^{-1}\mathbf{f}_{\mathrm{k}})^{\mathrm{T}}\,\mathbf{r}_{\mathrm{i}}^{*}(\omega)]\mathrm{d}\omega, \qquad (2\text{-}26)$$

식(2-26)에서 $\mathbf{r}_{\mathrm{i}}^{*}$은 수치 파동장과 관측 파동장의 차이인 잔차 파동장(residual wavefield)에 켤레를 취한 것이다. 모델링 연산자 S는 상반성의 원리(reciprocity principle)를 만족하고 대칭행렬이므로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{\partial E(\mathbf{m})}{\partial m_k} = \int_0^{\omega_{\max}} \sum_{i=1}^{n_s} Re\,[(\boldsymbol{f}_k)^{\mathrm{T}}\,\mathrm{S}^{-1}\mathbf{r}_i^{*}(\omega)]d\omega. \qquad (2.27)$$

식(2-27)을 통해서 k번째 모델 매개변수 m_k로 인한 모델의 변화량, 즉

급경사를 구하는 것이다. 이렇게 구한 기울기를 그대로 사용하면, 지하 구조의 심도가 깊은 곳에서의 해상도가 잘 나오지 않으므로, 값의 크기를 조정하는 스케일링(scaling) 과정을 거치게 된다. 최대경사법에서는 기울기를 스케일링하기 위해 헤시안 행렬(Hessian matrix)을 사용하며 식은 다음과 같다.

$$H_{ij} = \frac{\partial^2 E(\mathrm{m})}{\partial m_i \partial m_j}, \quad (\mathrm{i}, \mathrm{j} = 1, 2, \cdots, \mathrm{n}), \tag{2-28}$$

식(2-28)에서 H_{ij}는 헤시안 행렬의 원소, n은 모델 매개변수의 개수를 의미한다. 헤시안 행렬의 모든 원소를 이용하는 것이 full-Newton 방법이며 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\begin{aligned} H_{ij} &= \frac{\partial}{\partial m_i} \frac{\partial E(\mathrm{m})}{\partial m_j} \\ &= \frac{\partial}{\partial m_i} Re\left[\left(\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial m_i}\right)^{\mathrm{T}} \mathrm{r}^*\right] \\ &= Re\left[\left(\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial m_i}\right)^{\mathrm{T}} \left(\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{m_i}}\right)^* \frac{\partial^2 \mathrm{u}}{\partial \mathrm{m_i} \partial \mathrm{m_j}} \mathrm{r}^*\right], \end{aligned} \tag{2-29}$$

식(2-29)을 자코비안(Jacobian, J)으로 정리하면 다음과 같다.

$$H_{ij} = Re\{\mathrm{J}^{\mathrm{T}}\mathrm{J}^{*}\} + \mathrm{Re}\left\{\left[\frac{\partial \mathrm{J}^{\mathrm{T}}}{\partial \mathrm{m}_1}\mathrm{r}^{*} \ \frac{\partial \mathrm{J}^{\mathrm{T}}}{\partial \mathrm{m}_2}\mathrm{r}^{*} \cdots \frac{\partial \mathrm{J}^{\mathrm{T}}}{\partial \mathrm{m}_{\mathrm{n}}}\mathrm{r}^{*}\right]\right\}$$

$$= \mathrm{H}_{\mathrm{a}} + \mathrm{R},$$

$$\text{여기서, } \mathrm{J} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathrm{u}_1}{\partial \mathrm{m}_{\mathrm{i}}} \\ \frac{\partial \mathrm{u}_2}{\partial \mathrm{m}_{\mathrm{i}}} \\ \vdots \\ \frac{\partial \mathrm{u}_{\mathrm{n}}}{\partial \mathrm{m}_{\mathrm{i}}} \end{pmatrix} \tag{2-30}$$

식(2-30)에서 H_{a}는 근사 헤시안 행렬(approximated Hessian matrix)로 정의하며 R은 근사 헤시안 행렬의 값에 비해 매우 작은 나머지 값들이다(Pratt et al., 1998). 헤시안 행렬 전부를 쓰는 것이 아닌 근사 헤시안 행렬만을 이용하는 것을 Quasi-Newton method라고 한다.

$$\begin{aligned} H_{a(i,j)} &= Re\{\mathrm{J}^{\mathrm{T}}\mathrm{J}^{*}\} \\ &= Re\{[\boldsymbol{f}_1^{\mathrm{T}} \ \mathrm{f}_2^{\mathrm{T}} \ \cdots \ \mathrm{f}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{T}}](\mathrm{S}^{-1})^{\mathrm{T}}\mathrm{S}^{-1}[\mathrm{f}_1^{*} \ \mathrm{f}_2^{*} \ \cdots \ \mathrm{f}_{\mathrm{n}}^{*}]\}, \end{aligned} \tag{2-31}$$

비록 헤시안 행렬의 모든 원소를 사용하는 것이 아닌, 헤시안 행렬의 일부 성분만을 이용하는 Quasi-Newton method에서도 계산량이 크기 때문에, 매 단계에서 반복적으로 계산되어 업데이트하는 역산에 사용하기는

부담스럽다. 계산량을 줄이기 위해 Shin et al. (2001)에서는 근사 헤시안 행렬의 대각 성분만을 이용하는 유사 헤시안 행렬(pseudo-Hessian matrix), $\mathrm{H_p}$를 제안하였으며 다음과 같다.

$$\mathrm{H_p} = \mathrm{diag}(\mathrm{H_a}) = \left[\mathbf{f}_1^{\mathrm{T}}\mathbf{f}_1^{*}\ \mathbf{f}_2^{\mathrm{T}}\mathbf{f}_2^{*}\ \cdots\ \mathbf{f}_{\mathrm{n}}^{\mathrm{T}}\mathbf{f}_{\mathrm{n}}^{*}\right]. \tag{2-32}$$

유사 헤시안 행렬을 이용하면 기존 헤시안 행렬과 비교했을 때 계산량이 큰 폭으로 줄어드는 장점이 있다. 하지만, 근사를 통해 무시하고 넘어간 값들이 유사 헤시안 행렬의 대각 성분들에 비해 작긴 하지만, 그러한 요소에도 지하 구조에 대한 정보가 담겨 있으므로 계산량과 결과물 품질의 상충관계(trade-off)를 고려하여 적절하게 사용하면 된다. 본 논문에서는 유사 헤시안 행렬을 사용하였으며, 이를 통해 다음과 같이 k번째 모델 매개변수의 경사를 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial E(\mathbf{m})}{\partial m_k} = -\int_0^{\omega_{\max}} \frac{\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n_s}} \mathrm{Re}\left[(\mathbf{f}_{\mathrm{k}})^{\mathrm{T}}\,\mathrm{S}^{-1}\mathbf{r}_i^{*}(\omega)\right]}{\sum_{i=1}^{n_s} Re(\mathrm{H_p}) + \lambda} d\omega. \tag{2-33}$$

식(2-33)에서 λ는 유사 헤시안 행렬의 값이 0에 가깝거나 0인 경우를 위해 사용하는 감쇠 상수(damping factor)이다. 최종적으로, $k+1$번째 모델 매개변수 m_{k+1}을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\mathbf{m}_{k+1} = \mathbf{m}_k - \alpha \frac{\partial E(\mathbf{m})}{\partial m_k} \tag{2-34}$$

식(2-34)에서 α는 도약 길이(step length)라고 하며, 이 값을 적절하게 사용하는 것이 실제 모델을 찾아갈 수 있는 중요한 매개변수이다. 본 연구에서는 12.5 (m/s)를 사용하였다.

추가로 완전 파형 역산을 성공적으로 수행하기 위하여, 송신 파형(source wavelet)을 정확하게 추정하는 것이 중요하며, 이러한 과정을 송신 파형 역산(Song et al. 1995)이라고 한다. 먼저, 송신 파형을 복소수 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$u_j = (c_j + id_j)(e + if) = (c_j e - d_j f) + i(c_j f + d_j e), \quad j = 1, 2, \cdots, n_r \tag{2-35}$$

식(2-35)에서 u_j는 j번째 수진기에서의 복소 파동장을 의미하며, c, d, e, f는 임의의 수이고, j는 수진기의 개수를 의미한다. 관측된 데이터의 복소 송신 파동장을 $s_j = a_j + ib_j$라고 하면, 각 수진기의 위치에서의 두 복소 파동장의 잔차 δr_j는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \delta r_j &= u_j - s_j \\ &= c_j e - d_j f - a_j + i(c_j f + d_j e - b_j), \quad (j = 1, 2, \cdots, n_r) \end{aligned} \tag{2-36}$$

목적함수로 l_2-norm을 사용하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
E_{src} &= \frac{1}{2}\sum_j \delta r_j \delta r_j^* \\
&= \frac{1}{2}\sum_j \{(c_j e - d_j f - a_j)^2 + (c_j f + d_j e - b_j)^2\}.
\end{aligned}
\tag{2-37}
$$

송신 파형을 추정하는 식은 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
E_{src}^{l+1} &= E_{src}^{l} + \delta p \\
\delta p &= -\mathrm{H}^{-1} \nabla \mathrm{E}_{\mathrm{src}}^{\mathrm{l}}.
\end{aligned}
\tag{2-38}
$$

식(2-38)에서 δp는 송신 파형을 업데이트하기 위한 항을 의미하며, 헤시안 행렬의 역행렬과 목적함수의 모델 매개변수로 미분된 행렬의 곱으로 이루어져 있다. 모델 매개변수로 미분된 목적함수는 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
\nabla_e E_{src} &= \sum_j \{e(c_j^2 + d_j^2) - a_j c_j - b_j d_j\} \\
\nabla_f E_{src} &= \sum_j \{f(c_j^2 + d_j^2) + a_j d_j - b_j c_j\}.
\end{aligned}
\tag{2-39}
$$

헤시안 행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$H = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 E_{src}}{\partial e^2} & \frac{\partial^2 E_{src}}{\partial e \partial f} \\ \frac{\partial^2 E_{src}}{\partial f \partial e} & \frac{\partial^2 E_{src}}{\partial f^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_j (c_j^2 + d_j^2) & 0 \\ 0 & \sum_j (c_j^2 + d_j^2) \end{pmatrix}. \qquad (2\text{-}40)$$

식(2-40)에 식(2-38)의 δp에 대입하면 다음과 같다.

$$\delta p = -\begin{pmatrix} \frac{\partial^2 E_{src}}{\partial e^2} & \frac{\partial^2 E_{src}}{\partial e \partial f} \\ \frac{\partial^2 E_{src}}{\partial f \partial e} & \frac{\partial^2 E_{src}}{\partial f^2} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \nabla_e E_{src} \\ \nabla_f E_{src} \end{pmatrix}, \qquad (2\text{-}41)$$

식(2-39)과 식(2-40)을 식(2-41)에 대입하면 δp는 다음과 같이 정리된다.

$$\delta p = \begin{pmatrix} \delta e \\ \delta f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -e + \frac{\sum_j (a_j c_j + b_j d_j)}{\sum_j (c_j^2 + d_j^2)} \\ -f - \frac{\sum_j (a_j d_j - b_j c_j)}{\sum_j (c_j^2 + d_j^2)} \end{pmatrix}. \qquad (2\text{-}42)$$

식(2-42)을 식(2-18)에 대입하여 일정한 조건에 부합할 때까지 반복적으로 수행하여 얻는 결과를 송신 파형으로 사용한다.

2차원 인공 합성 모델인 Original Marmousi 모델에서는 초기 모델을 심도에 따라 선형적으로 속도가 증가하는 모델로 하고, 현장 자료는 균질

모델로 하여 라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산 알고리즘을 수행하여 속도 모델을 추정하였다.

3. 기존 공통 영상 모음 기법

3.1. 오프셋 영역 공통 영상 모음

오프셋 영역 공통 영상 모음은 주로 키르히호프 구조보정을 수행할 때 추출하는 공통 영상 모음으로 구조보정 영상의 특정 지점에서 오프셋 차원으로 확장하여 나열한 영상이다. Biondi (2006)에서 설명된 방식으로 키르히호프 구조보정 식을 나타내면 다음과 같다.

$$I(\xi) = \int_{\Omega_\xi} W(\xi,\mathbf{m},\mathbf{h})\mathrm{D}[\mathrm{t} = \mathrm{t_D}(\xi,\mathbf{m},\mathbf{h}),\mathbf{m},\mathbf{h}]\mathrm{d}\mathbf{m}\,\mathrm{d}\mathbf{h}. \qquad (3\text{-}1)$$

식(3-1)에서 $I(\xi)$는 키르히호프 구조보정 영상을 의미하며, ξ는 공간좌표로 3차원의 경우 $\xi = (z_\xi, x_\xi, y_\xi)$, $W(\xi,\mathbf{m},\mathbf{h})$는 적절한 가중치, $D(t = t_D(\xi,\mathbf{m},\mathbf{h}),\mathbf{m},\mathbf{h})$는 $t_D(\xi,\mathbf{m},\mathbf{h})$에서의 지표면에서 관측된 파동장을 의미한다. $\mathbf{m}$은 송신원과 수진기의 중간점을 의미하며, $\mathbf{h}$는 오프셋을 의미한다. 식(3-1)에서 한 지점에 대해서 오프셋에 따른 부분 영상을 구하는 식은 다음과 같다.

$$I(\xi,\mathbf{h}) = \int_{\Omega_{\xi,\mathbf{h}}} \mathrm{W}(\xi,\mathbf{m},\mathbf{h})D[t = t_D(\xi,\mathbf{m},\mathbf{h}),\mathbf{m},\mathbf{h}]d\mathbf{m}. \qquad (3\text{-}2)$$

식(3-2)의 ξ는 $\xi=(x_h,y_h)$으로 구조보정 영상에서의 특정 지점을 의미한다. 식(3-2)의 $I(\xi,\mathbf{h})$는 오프셋 영역 공통 영상 모음을 나타내는 값이며, 식(3-1)의 $I(\xi)$를 오프셋에 대해 중합 전 값을 의미한다. 이러한 관계를 통해 키르히호프 구조보정을 수행할 때 오프셋 영역 공통 영상 모음을 빠르게 추출할 수 있음을 확인하였다

하지만, 실제 지하 구조는 복잡하고 다양한 형태의 반사면을 포함하고 있어 키르히호프 구조보정으로는 정확한 영상화가 불가능하여 이를 해결하기 위해 더 많은 데이터를 함께 고려하여 영상화 성능을 높인 역시간 구조보정을 수행한다. 역시간 구조보정을 수행하는 경우에서 발생하는 문제는 오프셋 영역 공통 영상 모음을 직접적으로 추출하는 것이 어렵다는 것이다. 이러한 문제를 해결하고자 Giboli et al. (2012)는 지표면 오프셋 모음(surface offset gather)를 제안하였다. 먼저, 주파수 영역에서 영상화 조건을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$I(\mathbf{x},s)=\int_0^{\omega_{\max}} u_f(\mathbf{x},s,\omega)*u_b(\mathbf{x},s,\omega)\,d\omega. \qquad (3\text{-}3)$$

식(3-3)에서 $I(\mathbf{x},s)$는 송신원에 따른 영상화 조건, ω는 주파수, u_f는 순방향 파동장, u_b는 역전파 파동장을 의미한다. 식(3-3)은 모든 수진기를 중합하여 계산하는 것을 의미하며, 지표면 오프셋 모음은 중합하지 않은 역전파 파동장을 이용하는 것이다. 그 식은 다음과 같다.

$$I(\mathbf{x},s)=\int_0^{\omega_{\max}}\left(\sum_{j=1}^{n_r}\left(u_f(\mathbf{x},s,\omega)*u_b(\mathbf{x},s,r_j,\omega)\right)\right)d\omega. \qquad (3\text{-}4)$$

식(3-4)에서 n_r은 수진기의 개수이며, $u_b(\mathbf{x},s,r_j,\omega)$는 단일 수진기로부터 역으로 전파한 역전파 파동장을 의미한다.

본 논문에서는 식(3-4)와 같은 Giboli et al. (2012)의 지표면 오프셋 모음을 기반으로 하였으나, 오프셋별로 추출하게 되는 경우, 계산량이 너무 많아져 효율적으로 추출하기 위해 50 m 또는 100 m 간격으로 그 구간에 해당하는 수진기로부터 전파되는 역전파 파동장을 중합하여 오프셋 영역 공통 영상 모음을 추출하였다.

3.2. 각 영역 공통 영상 모음

각 영역 공통 영상 모음은 입사각, 반사각, 전파방향각 등 다양한 각을 기준으로 트레이스를 심도 영역으로 정렬한 것이다. 역시간 구조보정 수행 시에 각 영역 공통 영상을 추출하는 방법으로 많이 사용되는 포인팅 벡터를 이용한 각 영역 공통 영상 모음을 추출하는 방법을 소개하고자 한다(Li et al., 2021).

$$\frac{1}{v_0^2(\mathbf{x})}\frac{\partial^2 \mathbf{u}_f(\mathbf{x},t;\mathbf{x}_s)}{\partial t^2} - \nabla^2 \mathbf{u}_f(\mathbf{x},t;\mathbf{x}_s) = \mathbf{f}(t;\mathbf{x}_s) \tag{3-5}$$

식(3-5)는 순방향 파동장을 나타내는 식이며, 여기서 $v_0(\mathbf{x})$는 구조보정 속도이며, $\mathbf{u}_f(\mathbf{x},t;\mathbf{x}_s)$는 위치 $\mathbf{x}_s$에서의 송신원 $\mathbf{f}(t;\mathbf{x}_s)$로부터 나온 파동장을 의미한다. 식(3-6)에 포인팅 벡터$\mathbf{P}_s(\mathbf{x},t;\mathbf{x}_s)$로 송신원으로부터 나온 파동장의 전파 방향을 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{P}_s(\mathbf{x},t;\mathbf{x}_s) = -\nabla \mathbf{u}_f(\mathbf{x},t;\mathbf{x}_s)\frac{\partial \mathbf{u}_f(\mathbf{x},t;\mathbf{x}_s)}{\partial t} \tag{3-6}$$

관측된 탄성파 자료를 수진기로부터 역전파 시킨 파동장 식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{v_0^2(\mathbf{x})}\frac{\partial^2 \mathbf{u}_b(\mathbf{x},t;\mathbf{x}_s)}{\partial t^2} - \nabla^2 \mathbf{u}_b(\mathbf{x},t;\mathbf{x}_s) = \mathbf{d}(\mathbf{x}_r,t;\mathbf{x}_s) \qquad (3\text{-}7)$$

식(3-7)에서 $\mathbf{u}_b(\mathbf{x},t;\mathbf{x}_s)$는 수진기로부터 나온 파동장을 의미하며 $\mathbf{d}(\mathbf{x}_r,t;\mathbf{x}_s)$는 위치 $\mathbf{x}_r$에서 관측된 탄성파 자료를 의미한다. 식(3-7)에 포인팅 벡터 $\mathbf{P}_r(\mathbf{x},t;\mathbf{x}_s)$로 수진기로부터 나온 파동장의 전파 방향을 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{P}_r(\mathbf{x},t;\mathbf{x}_s) = -\nabla \mathbf{u}_b(\mathbf{x},t;\mathbf{x}_s)\frac{\partial \mathbf{u}_b(\mathbf{x},t;\mathbf{x}_s)}{\partial t} \qquad (3\text{-}8)$$

식(3-6)과 식(3-8)의 포인팅 벡터 사이의 각을 개방 각(opening angle)이라고 하며, 반사각 θ_r은 개방 각의 절반이므로 다음과 같다.

$$\theta_r = \frac{1}{2}\arccos\frac{\mathbf{P}_s(\mathbf{x},t;\mathbf{x}_s)\cdot\mathbf{P}_r(\mathbf{x},t;\mathbf{x}_s)}{|\mathbf{P}_s(\mathbf{x},t;\mathbf{x}_s)|\cdot|\mathbf{P}_r(\mathbf{x},t;\mathbf{x}_s)|} \qquad (3\text{-}9)$$

송신원으로부터 전파되는 파동장과 수진기로부터 전파되는 파동장에 영-지연 교차상관 영상화 조건을 적용하여 반사각에 따른 영상을 정렬하는 식은 다음과 같다.

$$m(\mathbf{x},\theta) = \int\int \mathbf{u}_{\mathrm{f}}(\mathbf{x},\mathrm{t};\mathbf{x}_{\mathrm{s}})\mathbf{u}_{\mathrm{b}}(\mathbf{x},\mathrm{t};\mathbf{x}_{\mathrm{s}})*\delta(\theta-\theta_{\mathrm{r}})\mathrm{dt}\,\mathrm{d}\mathbf{x}_{\mathrm{s}}$$

$$= \int\int m(\mathbf{x},\mathrm{t};,\mathbf{x}_{\mathrm{s}})*\delta(\theta-\theta_{\mathrm{r}})\mathrm{dt}\,\mathrm{d}\mathbf{x}_{\mathrm{s}} \qquad (3\text{-}10)$$

포인팅 벡터와 같은 방향 벡터를 활용하여 각 정보를 추출하는 기법은 시간 단위로 각 영상 지점에서의 파동장의 전파 방향을 계산해야 하므로 주로 시간-공간 영역 역시간 구조보정 수행 시에 이뤄진다.

본 논문에서는 주파수-공간 영역에서 역시간 구조보정을 수행하여 지하 구조를 영상화하여, 포인팅 벡터가 아닌 Sava and Fomel (2003)에서 소개한 국부적으로 이동된 영상화 조건의 방법으로 각 영역 공통 영상 모음을 추출하였으며, 이 방법에 대해 간략하게 설명하고자 한다.

$$I(x,z,h_x) = \int_0^{\omega_{\max}} \sum_{i=1}^{n_s} \mathbf{u}_f(x-h_x,z,\omega)*\mathbf{u}_b(x+h_x,z,\omega)d\omega. \qquad (3\text{-}11)$$

식(3-11)에서 h_x는 x축 방향으로의 거리를 의미하며 $\mathbf{u}_f(x-h_x,z,\omega)$는 (x,z)지점에서 h_x만큼 왼쪽으로 이동한 지점 $(x-h_x,z)$의 순방향 파동장이고, $\mathbf{u}_b(x+h_x,z,\omega)$는 (x,z)지점에서 h_x만큼 오른쪽으로 이동한 지점 $(x+h_x,z)$지점의 역전파 파동장이며, 모든 송신원과 수진기, 주파수에 대해서 중합하여 얻은 영상화 조건 값이 $I(x,z,h_x)$이다. 원하는 h_x값의 영상화 조건을 획득하여 도시하면 이것이 지표밑 오프셋 모음(subsurface

offset gather)이다. 이렇게 획득한 지표밑 오프셋 모음을 slant-stack 변환하여 오프셋 축을 각 축으로 변환하면 각 영역 공통 영상 모음을 얻을 수 있다.

4. 주파수 배열 공통 영상 모음

이 장에서는 주파수 영역 역시간 구조보정 수행 시 빠르게 추출할 수 있는 새로운 공통 영상 모음 기법인 주파수 배열 공통 영상 모음을 소개하기 위해 먼저 주파수 영역 역시간 구조보정 영상을 획득하는 과정을 수식을 통해 설명하고자 한다. 그 다음, 구조보정 영상 식으로부터 주파수 배열 공통 영상 모음 식을 도출하여 주파수 배열 공통 영상 모음 식을 정의하고 특징을 설명한다. 추가로, 주파수 영역 역시간 구조보정 수행 시에 세 가지의 공통 영상 모음을 추출하기 위한 계산량을 비교하여 주파수 배열 공통 영상 모음의 장점을 설명하고자 한다. 마지막으로, 시간 영역에서 파동 전파 모델링을 수행하였을 경우 즉, 하이브리드 영역에서 주파수 배열 공통 영상 모음을 추출하는 과정을 설명하고자 한다.

먼저, 시간 영역 역시간 구조보정 영상은 각 모델 변수로 편미분된 파동장과 관측 파동장 $\mathbf{d}_s$의 영-지연 상호상관(zero-lag cross-correlation)으로 (Shin et al., 2003) 표현할 수 있다. k번째 모델 매개변수 m_k에 해당하는 시간 영역 역시간 구조보정 영상식은 다음과 같다.

$$\Phi_k(\mathbf{x}) = \sum_{s=1}^{n_s} \int_0^{\mathrm{T}_{\max}} \left(\frac{\partial \mathbf{u}_s(t)}{\partial m_k} \right)^{\mathrm{T}} \mathbf{d}_s(t)\, dt. \tag{4-1}$$

$\mathbf{x}$는 차원에 따른 공간좌표, s는 송신원의 개수, $\mathrm{T}_{\max}$는 최대 관측 길이,

상부 첨자 T는 전치 행렬(transpose matrix)를 의미한다. $\mathbf{u}$와 $\mathbf{d}$는 각각 순방향 파동장과 관측 파동장을 의미한다. 주파수 영역에서는 Φ_k가 푸리에 변환을 통해 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi_k(\mathbf{x}) = \sum_{s=1}^{n_s} \int_0^{\omega_{\max}} Re\left[\left(\frac{\partial \tilde{\mathbf{u}}_s(\omega)}{\partial m_k}\right)^{\mathrm{T}}\right] \tilde{\mathbf{d}}_s^*(\omega)\, d\omega. \qquad (4\text{-}2)$$

식(4-2)에서 ω는 각주파수, 상부 첨자 *은 켤레 복소수, Re는 복소수 성분의 실수부, $\mathbf{u}$와 $\mathbf{d}$의 물결표(tilde)는 각각이 푸리에 변환된 것을 의미한다. 역시간 구조보정 영상을 구하는 식은 2장에서 설명한 완전 파형 역산의 모델 업데이트를 구하기 위한 식(2-23)와 유사하다. 식(4-2)의 관측 파동장 $\overline{\mathbf{d}}_s^*$에 순방향 파동장과 관측 파동장의 차이 $\tilde{\mathbf{r}}(=\tilde{\mathbf{u}}-\tilde{\mathbf{d}})$을 대입하면 완전 파형 역산이 되는 것이다. 즉, 편미분 파동장 행렬을 구축하는 것은 동일하므로 한번 구축하면 완전 파형 역산과 역시간 구조보정 모두에 사용할 수 있어 계산량이 크게 줄어든다.

라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산에서 설명한 것과 같이, 편미분 파동장을 직접 계산하는 것은 많은 계산량을 요구하는 과정이기 때문에, 가상송신원 개념을 이용하여 편미분 파동장 $\frac{\partial \tilde{\mathbf{u}}_s(\omega)}{\partial m_k}$를 구한다.

$$\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial m_k} = -\mathrm{S}^{-1}\widetilde{\boldsymbol{f}}_k$$

$$\begin{pmatrix} \dfrac{\partial \tilde{u}_1}{\partial m_k} \\ \dfrac{\partial \tilde{u}_2}{\partial m_k} \\ \dfrac{\partial \tilde{u}_3}{\partial m_k} \\ \vdots \\ \dfrac{\partial \tilde{u}_n}{\partial m_k} \end{pmatrix} = \mathrm{S}^{-1} \begin{pmatrix} \tilde{f}_k^{1*} \\ \tilde{f}_k^{2*} \\ \tilde{f}_k^{3*} \\ \vdots \\ \tilde{f}_k^{n*} \end{pmatrix}. \tag{4-3}$$

식(4-3)을 식(4-2)에 대입하면 k번째 모델 매개변수 m_k에 대한 구조보정 영상 Φ_k는 다음과 같다.

$$\Phi_k(\mathrm{x}) = \sum_{\mathrm{s}=1}^{\mathrm{n_s}} \int_0^{\omega_{\max}} Re\left[\tilde{\boldsymbol{f}}_k^{\mathrm{T}}\ (\mathrm{S}^{-1})^{\mathrm{T}}\ \tilde{\mathrm{d}}_{\mathrm{i}}^{*}(\omega)\right] \mathrm{d}\omega, \tag{4-4}$$

전체 구조보정 영상 Φ를 구하기 위해 가상송신원 벡터 $\tilde{\boldsymbol{f}}_k$를 전역 가상송신원 행렬로 바꿔주어야 한다. 방법은 아래와 같다. 먼저, 식(4-3)에 전치를 취해주면 다음과 같다.

$$\left(\frac{\partial \tilde{u}_1}{\partial m_k}\ \frac{\partial \tilde{u}_2}{\partial m_k}\ \frac{\partial \tilde{u}_3}{\partial m_k}\ \cdots\ \frac{\partial \tilde{u}_n}{\partial m_k}\right) = \left(\tilde{f}_k^{1*}\ \tilde{f}_k^{2*}\ \tilde{f}_k^{3*}\ \cdots\ \tilde{f}_k^{n*}\right)(\mathrm{S}^{-1})^{\mathrm{T}}. \tag{4-5}$$

식(4-5)를 확장하여 모든 모델 매개변수에 대해 나타내면 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
\left(\frac{\partial \tilde{u}_1}{\partial m_1}\ \frac{\partial \tilde{u}_2}{\partial m_1}\ \frac{\partial \tilde{u}_3}{\partial m_1}\ \cdots\ \frac{\partial \tilde{u}_n}{\partial m_1}\right) &= \left(\tilde{f}_1^{1*}\ \tilde{f}_1^{2*}\ \tilde{f}_1^{3*}\ \cdots\ \tilde{f}_1^{n*}\right)(\mathsf{S}^{-1})^{\mathrm{T}} \\
\left(\frac{\partial \tilde{u}_1}{\partial m_2}\ \frac{\partial \tilde{u}_2}{\partial m_2}\ \frac{\partial \tilde{u}_3}{\partial m_2}\ \cdots\ \frac{\partial \tilde{u}_n}{\partial m_2}\right) &= \left(\tilde{f}_2^{1*}\ \tilde{f}_2^{2*}\ \tilde{f}_2^{3*}\ \cdots\ \tilde{f}_2^{n*}\right)(\mathsf{S}^{-1})^{\mathrm{T}} \\
\left(\frac{\partial \tilde{u}_1}{\partial m_3}\ \frac{\partial \tilde{u}_2}{\partial m_3}\ \frac{\partial \tilde{u}_3}{\partial m_3}\ \cdots\ \frac{\partial \tilde{u}_n}{\partial m_3}\right) &= \left(\tilde{f}_3^{1*}\ \tilde{f}_3^{2*}\ \tilde{f}_3^{3*}\ \cdots\ \tilde{f}_3^{n*}\right)(\mathsf{S}^{-1})^{\mathrm{T}} \\
&\vdots \\
\left(\frac{\partial \tilde{u}_1}{\partial m_p}\ \frac{\partial \tilde{u}_2}{\partial m_p}\ \frac{\partial \tilde{u}_3}{\partial m_p}\ \cdots\ \frac{\partial \tilde{u}_n}{\partial m_p}\right) &= \left(\tilde{f}_p^{1*}\ \tilde{f}_p^{2*}\ \tilde{f}_p^{3*}\ \cdots\ \tilde{f}_p^{n*}\right)(\mathsf{S}^{-1})^{\mathrm{T}}.
\end{aligned}
\tag{4-6}
$$

식(4-6)에 전치를 취하면 전역 가상송신원 행렬을 얻을 수 있으며 다음과 같다. $(k = 1, 2, 3, \cdots, p)$

$$
\tilde{\mathbf{f}}_v^{\mathrm{T}} = \begin{pmatrix} \tilde{f}_1^{1*} & \tilde{f}_1^{2*} & \cdots & \tilde{f}_1^{n*} \\ \tilde{f}_2^{1*} & \tilde{f}_2^{2*} & \cdots & \tilde{f}_2^{n*} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{f}_p^{1*} & \tilde{f}_p^{2*} & \cdots & \tilde{f}_p^{n*} \end{pmatrix}
\tag{4-7}
$$

식(4-7)의 가상송신원 행렬 $\tilde{\mathbf{f}}_{\mathrm{v}}^{\mathrm{T}}$을 통해 전체 역시간 구조보정 영상을 나타내면 다음과 같다.

$$
\Phi(\mathbf{x}) = \sum_{\mathrm{s}=1}^{\mathrm{n_s}} \int_0^{\omega_{\max}} Re\left[\tilde{\mathbf{f}}_{\mathrm{v}}^{\mathrm{T}}\ (\mathsf{S}^{-1})^{\mathrm{T}}\ \tilde{\mathbf{d}}_{\mathrm{s}}^{*}(\omega)\right] \mathrm{d}\omega,
\tag{4-8}
$$

식(4-8)의 $\Phi(\mathbf{x})$가 모델 전체 영역에 대한 역시간 구조보정 영상을 의미하며, 역시간 구조보정 영상의 질을 높이기 위해 유사 헤시안 행렬과 감쇠 상수를 이용한 스케일링을 추가로 수행하였다.

$$\hat{\phi}(\omega,\mathbf{x}) = \sum_{s=1}^{n_s} \mathrm{Re}\left[\tilde{\mathbf{f}}_v^T\ (\mathbf{S}^{-1})^T\ \tilde{\mathbf{d}}_s^*(\omega)\right]. \tag{4-9}$$

식(4-8)의 모든 송신원과 주파수에 대해 중합된 역시간 구조보정 영상을 나타내는 $\Phi(\mathbf{x})$에서 주파수를 중합하지 않고 각각 나타낸 것이 식(4-9)의 $\hat{\phi}_k(\omega,\mathbf{x})$이며, 이것이 본 논문에서 제안하는 새로운 공통 영상 모음 기법인 주파수 배열 공통 영상 모음을 의미한다.

식(4-8)과 식(4-9)의 관계를 통해 주파수 배열 공통 영상 모음은 주파수 영역 역시간 구조보정 영상의 하위집합임을 알 수 있으며, 이러한 관계는 키르히호프 구조보정 영상을 나타내는 식(3-1)과 오프셋 영역 공통 영상 모음을 나타내는 식(3-2)과 같다. 즉, 주파수 영역 역시간 구조보정을 수행하는 경우에는 추가적인 계산 없이 주파수 배열 공통 영상 모음을 추출할 수 있다.

$$\Phi(x = x_i, z, \omega) = \sum_{s=1}^{n_s} Re\left[\left(\tilde{\mathbf{f}}_v\right)^T \left(\mathbf{S}^{-1}\right)^T \tilde{\mathbf{d}}_s^*\right]. \tag{4-10}$$

식(4-10)은 2차원 모델의 특정 지점 x_i에서 모든 심도에 대해 주파수 배열 공통 영상 모음을 추출하는 식을 의미한다.

탄성파 트레이스를 주파수별로 나타내면 그림 4-1과 같다(Yilmaz, 2001). 주파수가 낮을수록 진폭이 넓게 퍼져 나오게 된다. 탄성파 트레이스는 각 층의 임피던스 값의 차이가 작을수록 투과가 잘되며, 이 차이가 큰 경우에는 많은 에너지가 반사되는 것이다. 심도 영역에서도 각 층간의 임피던스 차이로 인해 트레이스에 큰 변화가 생기면 그림 4.1과 같이 주파수별로 반사면의 심도에서 집중되는 현상이 생기며, 주파수가 낮아질수록 집중되는 정도가 퍼져서 나타난다. 즉, 주파수 배열 공통 영상 모음상에서도 반사면이 존재하는 심도에서 일정 주파수 이상에서는 평평하게 보이나, 그보다 작은 주파수에서는 넓게 퍼져 나타나게 된다.

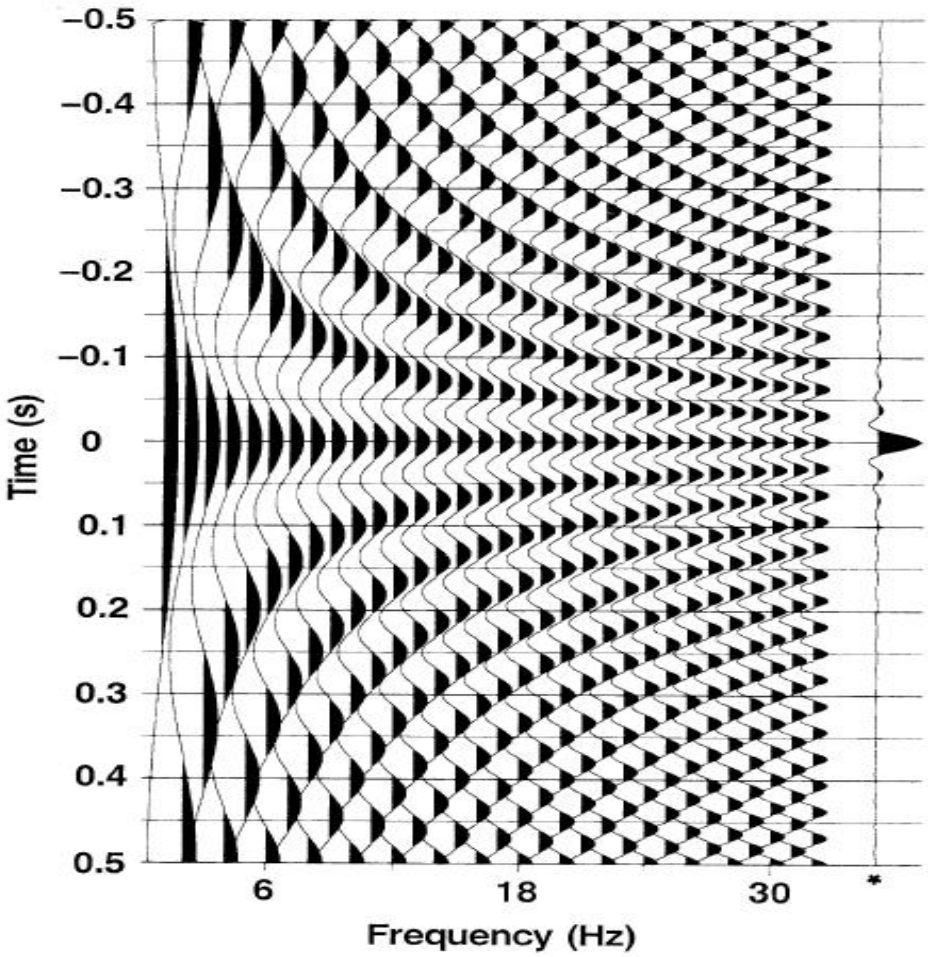


그림 4-1. '*'축에 해당하는 탄성파 트레이스를 푸리에 변환을 통해 주파수별로 도시한 영상(Yilmaz, 2001).

다음은 역시간 구조보정을 주파수 영역에서 수행 시 오프셋 영역 공통 영상 모음과 각 영역 공통 영상 모음을 추출하는데 필요한 계산량을 도출해냄으로써 주파수 배열 공통 영상 모음의 효율성을 파악해보고자 한다. 편의를 위해 공통 영상 모음은 지표면의 한 지점을 기준으로 전체 심도에 대해 도시하는 것으로 고정하며, 모든 지점에서 공통 영상 모음을 추출하는 것으로 하였다. 아래의 표는 2차원 모델을 기준으로 계산량을 파악하기 위해 가정한 값들을 나타낸 것이다.

표 4-1. 세 가지 공통 영상 모음을 추출하는데 필요한 계산량을 도출하기 위한 모델 가정.

x축 모델 격자수	n_x
z축 모델 격자수	n_z
총 송신원 개수	n_s
총 수진기 개수	n_r
총 주파수 개수	n_f
오프셋 수 (오프셋 영역 공통 영상 모음)	n_h
영상 지점 간격 수 (각 영역 공통 영상 모음)	n_p

속도 모델로부터 주파수 영역 역시간 구조보정 영상을 획득하기 위해서는 다음 과정의 계산이 필요하다.

1) 모델링 연산자 행렬 인수분해(matrix factorization)
2) 순방향 파동장 계산
3) 역전파 파동장 계산
4) 영상화 조건값 계산

모델의 격자수에 따라 차이는 있지만 1)번의 과정이 가장 많은 계산량을 필요로 한다(한 번의 역시간 구조보정을 수행하기 위해서는 $n_r \times n_x \times n_z$ 개의 요소를 가지는 행렬을 송신원의 개수인 n_s번과 주파수 별로 n_f번 인수분해(factorize)해야 한다). 인수분해된 모델링 연산자 행렬로부터 순방향 파동장과 역전파 파동장을 계산하고, 모델 영역의 영상 지점의 영상화 조건값을 계산하는 것이다. 오프셋 영역 공통 영상 모음을 추출하기 위해서는 각각의 송신원과 수진기에 해당하는 파동장을 계산해야 하는데, 역시간 구조보정을 수행하면서 인수분해한 모델링 연산자 행렬을 저장하였다면, 저장된 모델링 연산자 행렬로부터 빠르게 2)와 3)을 구할 수 있다. 각 영역 공통 영상 모음은 모델링 연산자 행렬을 저장할 필요는 없지만, 이동된 영상화 조건값을 구해야하므로 2)와 3)에서 계산한 값을 저장하여 이들로부터 n_p개의 지표밑 오프셋 모음을 추출하고 slant-stack 변환을 수행하게 된다. 주파수 배열 공통 영상 모음은 역시간 구조보정을 수행하면서 주파수별로 중합하기 전의 값들을 재정렬하여 추출하는 것이므로 추가적으로 필요한 계산이 전혀 없다. 표 4-2는 주파

수 영역 역시간 구조보정 수행 시에 필요한 계산량과 저장공간(기억공간 또는 디스크 공간)을 나타낸 표이다.

표 4-2. 각각의 공통 영상 모음을 추출하기 위해 역시간 구조보정 수행 외에 추가로 필요한 계산량과 저장공간.

	필요한 추가 계산량	필요한 추가 저장공간
오프셋 영역 공통 영상 모음	$n_s \times n_r$번의 파동장 계산	$n_r \times n_x \times n_z$ 크기의 모델링 연산자 행렬 n_s개
각 영역 공통 영상 모음	$n_p \times n_z \times n_x$ 개의 영상화 조건값 + slant-stack 변환	$n_p \times n_z \times n_x$개의 순방향 파동장 및 역방향 파동장
주파수 영역 공통 영상 모음	-	$n_f \times n_x \times n_z$개의 영상화 조건값

다음 그림 4-2는 하이브리드 영역(시간 영역 파동 전파 모델링 + 주파수 영역 역시간 구조보정)에서 주파수 배열 공통 영상 모음을 추출하는 과정이다. 파동 전파 모델링은 시간 영역에서 수행한 뒤에 송신원으로부터 전파되는 순방향 파동장 u_f와 수진기로부터 전파되는 역방향 파동장 u_b를 이산 푸리에 변환(discrete Fourier transform)하여 주파수 영역으로 변환한 뒤에 주파수 배열 공통 영상 모음을 얻는 것이다. 주파수 영역 역시간 구조보정을 수행하기 위해 필요한 과정과 동일하므로 하이브리드 영역에서 주파수 배열 공통 영상 모음을 추출하기 위해 필요한 추가적인 계산은 없다.

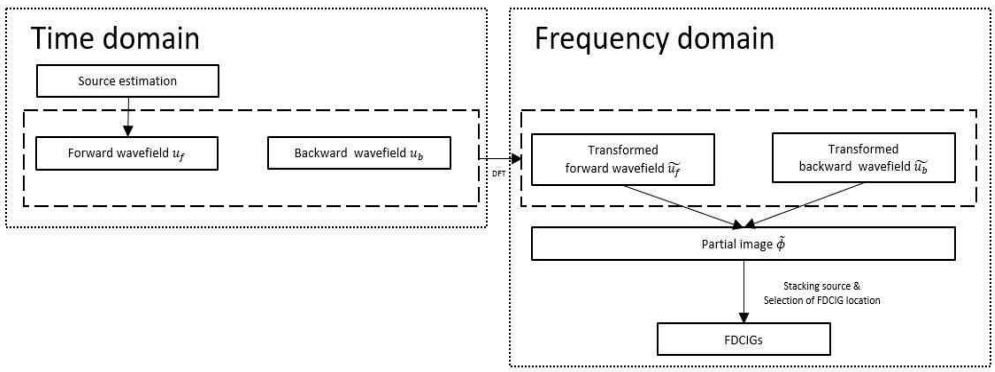


그림 4-2. 하이브리드 영역에서 주파수 배열 공통 영상 모음을 얻는 절차.

5. 인공 합성 자료 적용 예제

5장에서는 세 가지 인공 합성 모델에 주파수 배열 공통 영상 모음 기법을 적용하여 주파수 배열 공통 영상 모음의 거동과 특징을 파악하고자 한다. 각 예제에 사용된 속도 모델은 아래와 같다.

1. 다층구조 모델 - 단순한 구조를 가진 2차원 모델에 적용.

① 실제 속도와 일치하는 모델

② 일부 층의 속도가 실제 속도보다 높은 모델

③ 일부 층의 속도가 실제 속도보다 낮은 모델

2. Original Marmousi 모델 - 복잡한 구조를 가진 2차원 모델에 적용.

① 실제 속도와 일치하는 모델

② 심도에 따라 속도가 선형적으로 증가하는 모델

③ 역산을 통해 추정한 속도 모델

3. SEG/EAGE 3차원 암염돔 모델 - 하이브리드 영역에 적용.

① 실제 속도와 일치하는 모델

② 심도에 따라 속도가 선형적으로 증가하는 모델

5.1. 다층구조 모델

다층구조 모델은 5층 구조를 가진 인공 합성 모델이며 지표면에서 가장 가까운 층의 속도가 1,500 m/s이며 층의 속도가 깊어질수록 300 m/s 씩 증가하여 최하단 층의 속도는 2,700 m/s가 된다. 반사면의 심도는 각각 800 m, 1,600 m, 2,400 m, 3,200 m이다(그림 5-1). 모델의 크기는 6 km × 4 km로 설정하였으며, 격자의 간격을 5 m로 하여 모델의 격자수는 1200 × 800이다. 송신원과 수진기는 모델 상단에서 네 번째에 절점에 위치한 심도 20 m에 5 m 간격으로 각각 1200 개를 배치하였다. 경계조건은 지표면에는 디리클레 경계조건(dirichlet boundary condition)을 적용하였고(Officer, 1958), 나머지 세 면에 대해서는 PML(Perfectly Matched Layer)을 적용하였다(Komatitsch and Tromp, 2003). 파동 전파 모델링은 유한요소법을 이용한 주파수 영역 2차원 음향파 파동방정식을 기반으로 수행하였다. 파동 전파 모델링 및 주파수 영역 역시간 구조보정에 사용한 주파수는 2 Hz부터 20 Hz까지 0.1 Hz 간격으로 181개를 사용하였다. 역시간 구조보정 영상으로부터 추출한 오프셋 영역 공통 영상 모음은 오프셋 100 m부터 2,900 m까지 100 m 단위로 그룹화하여 28개의 그룹을 사용하였고, 각 영역 공통 영상 모음은 먼저 101개의 이동된 영상화 조건 값을 구하여 지표밑 오프셋 모음을 구축하고, slant-stack 변환을 통해 0도부터 60도까지 0.1도 간격으로 601개를 사용하여 도시하였다. 주파수 배열 공통 영상 모음에 사용한 주파수는 5 Hz부터 20 Hz까지 0.1 Hz 간격으로 151개를 사용하였다.

그림 5-2는 그림 5-1의 속도 모델에 평활화를 적용하였으며, 이를 구조보정의 속도 모델로 사용하였다. 평활화는 2차원 이진(binary) 모델에 대해 평활화를 적용하는 SU(seismic unix) 명령어인 smooth2를 이용하였다.

```
smooth2 n1=1200 n2=800 r1=5 r2=5 < velocity_model.binary_file > smoothed_velocity_model.binary_file
```

여기서 n1과 n2는 각각 x축과 z축의 모델 격자수를 의미하며, r1과 r2는 각각 x축과 z축에 평활화하는 정도를 결정하는 값이며, 높은 값을 줄 수록 평활화가 강하게 된다.

그림 5-3은 평활화된 다층구조 속도 모델을 이용하여 얻은 구조보정 영상에서 반사면을 강조하기 위해 수직 방향으로 2차 미분한 값을 적용하고 추가로 SU 명령어인 sugain의 자동 이득 제어(auto gain control, agc)를 적용한 것이다. sugain을 사용하기 위해서는 먼저 SU 명령어인 suaddhead를 통해 이진 파일을 su 파일로 변환해주어야 하며, 다시 이진 파일로 변환해주는 것은 SU 명령어 sustrip을 사용하였다.

```
suaddhead < migration_image.bin key=dt a=4000 | sugain dt=0.004 agc=1 | sustrip > processed_migration_image.bin
```

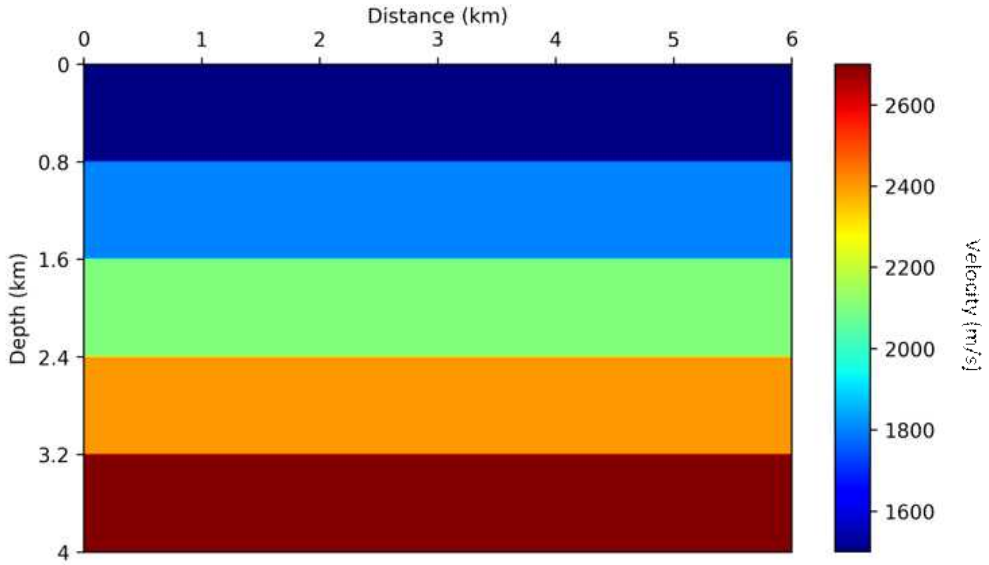


그림 5-1. 다층구조의 속도 모델.

표 5-1. 다층구조 모델의 속도분포.

층	심도(km)	속도(m/s)
1	0 ~ 0.8	1500
2	0.8 ~ 1.6	1800
3	1.6 ~ 2.4	2100
4	2.4 ~ 3.2	2400
5	3.2 ~ 4.0	2700

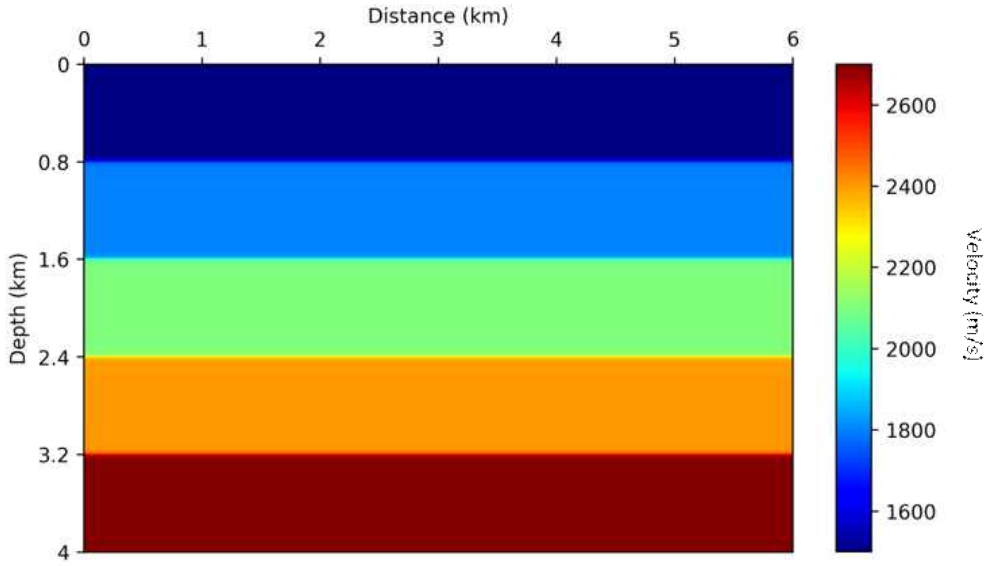


그림 5-2. 평활화한 다층구조 속도 모델.

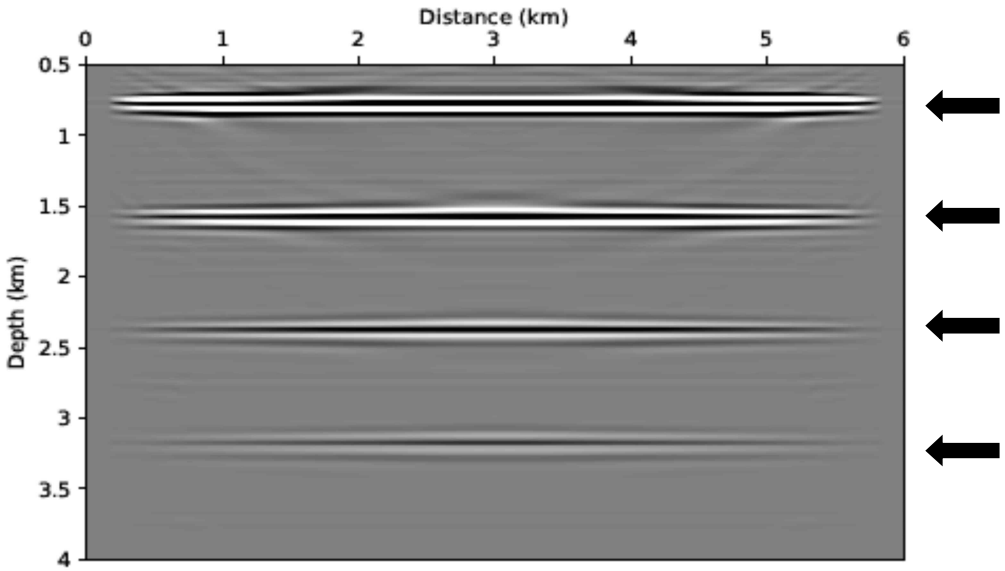
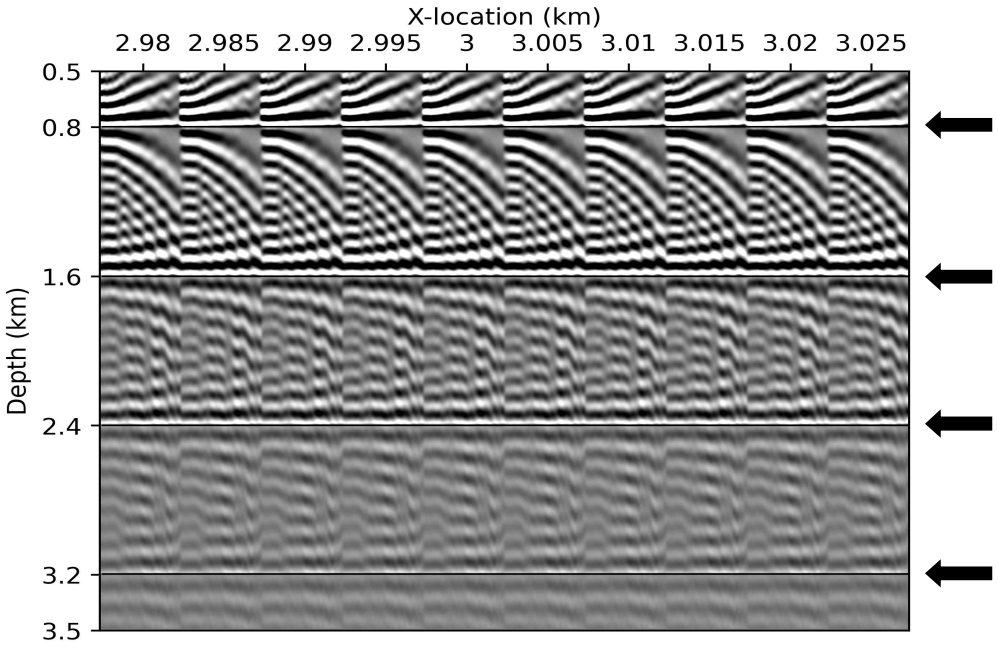


그림 5-3. 다층구조의 역시간 구조보정 영상(화살표는 반사면의 심도를 표시한 것).

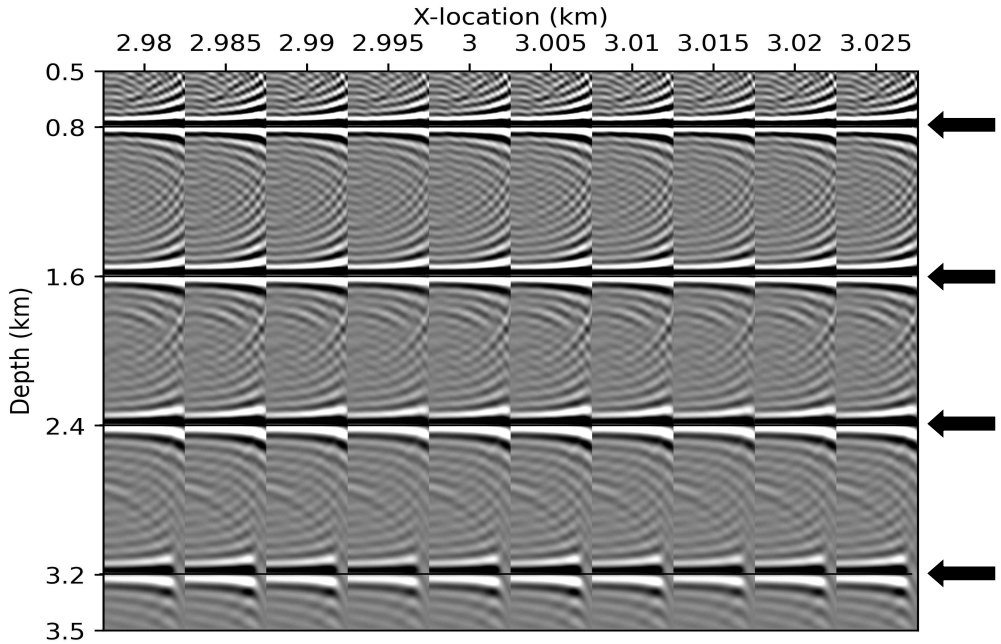
그림 5-4는 그림 5-2의 다층구조 구조보정 영상의 위치 2.98 km부터 3.025 km까지 5 m 간격으로 10개 지점에서의 오프셋 영역 공통 영상 모음, 각 영역 공통 영상 모음, 주파수 배열 공통 영상 모음을 추출하여 이어 붙인 것이다. 공통 영상 모음을 추출할 때, 모두 같은 스케일의 결과를 도시하기 위함과 동시에 통 영상 모음 상에서 횡방향 거동이 주요 관심 거동이므로 횡방향으로 스케일을 일정하게 만들어 횡적 연속성을 강조하기 위해 z축 방향 정규화(normalization)을 통해 영상 값의 범위를 -1 ~ 1로 만들었다. 반사면을 강조하기 위해 역시간 구조보정 영상에 적용한 것과 같이 z방향 2차 미분 값과 자동 이득 제어를 적용하였다.

그림 5-4의 세 공통 영상 모음 상에서 반사면의 심도인 0.8 km, 1.6 km, 2.4 km, 3.2 km에서 집중된 에너지가 평평하게 나타난다. 기존 오프셋 영역 공통 영상 모음과 각 영역 공통 영상 모음 모두 실제 속도와 구조보정에 사용된 속도가 일치할 때, 반사면의 심도에서 에너지가 평평하게 나타나는데, 주파수 배열 공통 영상 모음 상에서도 같은 결과가 나타난 것을 알 수 있다. 이를 통해 구조보정에 사용된 속도 모델이 실제 모델과 일치하는 경우, 반사면이 존재하는 심도에서 주파수 배열 공통 영상 모음 상에 평평하게 나타나는 것을 확인하였다.

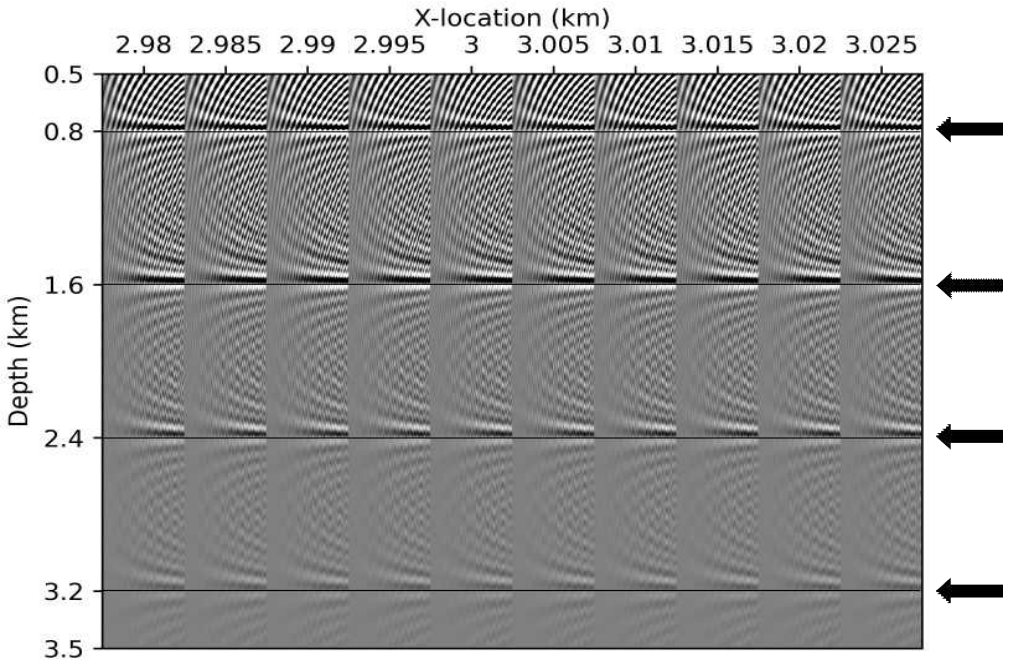


(a)

그림 5-4. 다층구조 구조보정 영상의 3 km 지점을 기준으로 5 m 간격으로 주변의 10개의 공통 영상 모음을 이어붙인 영상(화살표는 검은 선은 반사면의 심도를 표시한 것): (a) 오프셋 영역 공통 영상 모음; (b) 각 영역 공통 영상 모음; (c) 주파수 배열 공통 영상 모음.


X-location (km)
2.98 2.985 2.99 2.995 3 3.005 3.01 3.015 3.02 3.025
Depth (km)
0.5
0.8
1.6
2.4
3.2
3.5

(b)


X-location (km)
2.98 2.985 2.99 2.995 3 3.005 3.01 3.015 3.02 3.025
Depth (km)
0.5
0.8
1.6
2.4
3.2
3.5

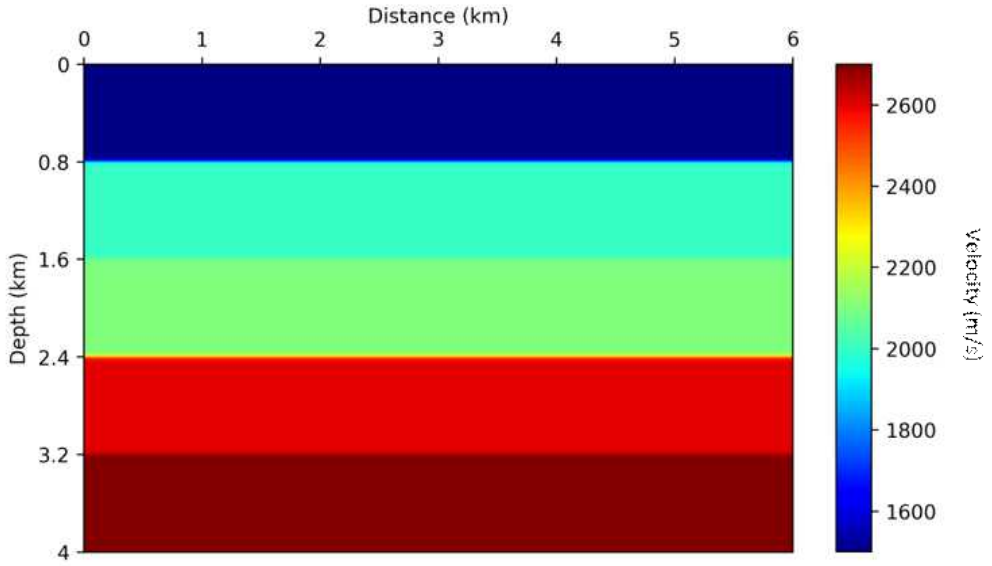
(c)

그림 5-4. (계속)

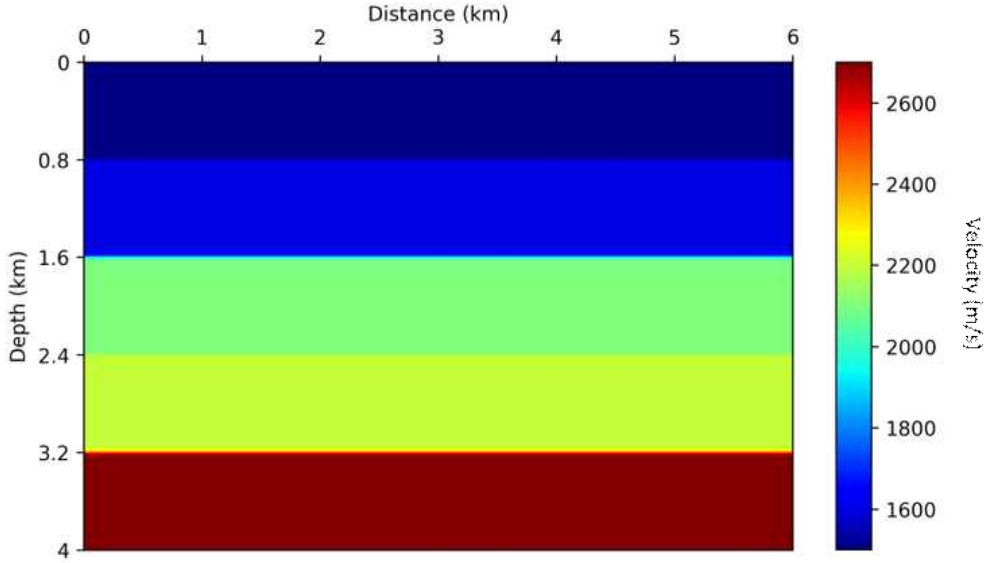
다음으로는 구조보정에 사용된 속도 모델이 실제 속도 모델과 맞지 않는 경우, 주파수 배열 공통 영상 모음 상에서 나타나는 거동의 변화를 살펴보고자 한다. 2층과 4층의 속도에 변화를 주어 구조보정에 사용된 속도가 1)실제 속도보다 높은 모델과 2)실제 속도보다 낮은 모델에 적용해보았다. 그림 5-5(a)와 그림 5-5(b)는 각각 1)과 2)에 해당하는 속도 모델이다. 1)의 모델은 2층과 4층의 속도를 원래의 속도보다 200 m/s씩 높였고, 2)의 모델은 2층과 4층의 속도를 원래보다 200 m/s씩 낮추었다. 표 5-2에 각 모델의 층별 속도를 나타내었다.

표 5-2. 그림 5.1.6의 속도분포(밑줄 친 부분: 실제 속도보다 200 m/s 높인 층, 볼드체: 실제 속도보다 200m/s 낮춘 층을 의미함).

		일부 층의 속도를 <u>높인</u> 다층구조 모델	일부 층의 속도를 **낮춘** 다층구조 모델
층	심도(km)	속도(m/s)	속도(m/s)
1	0 ~ 0.8	1500	1500
2	0.8 ~ 1.6	<u>2000</u>	**1600**
3	1.6 ~ 2.4	2100	2100
4	2.4 ~ 3.2	<u>2600</u>	**2200**
5	3.2 ~ 4.0	2700	2700



(a)

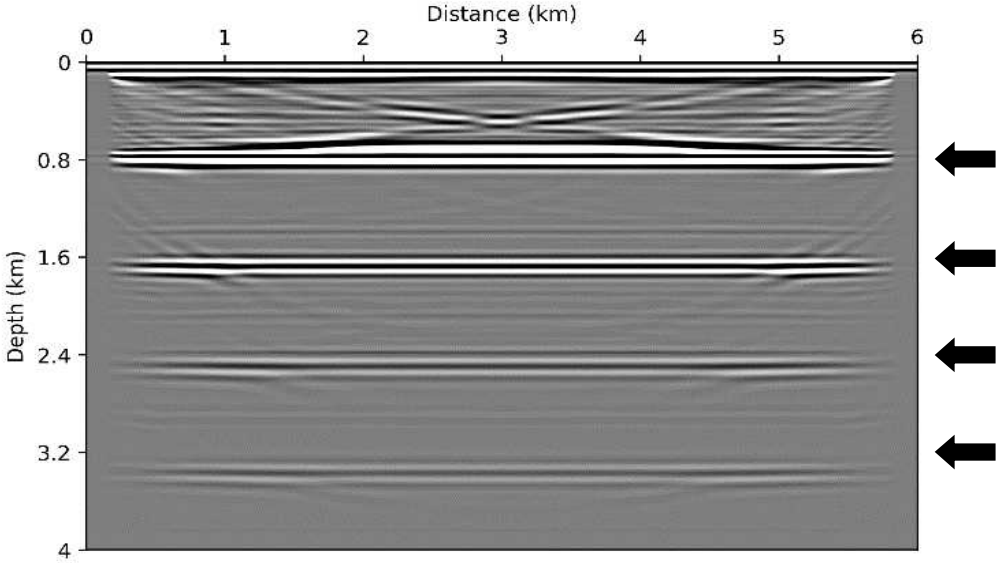


(b)

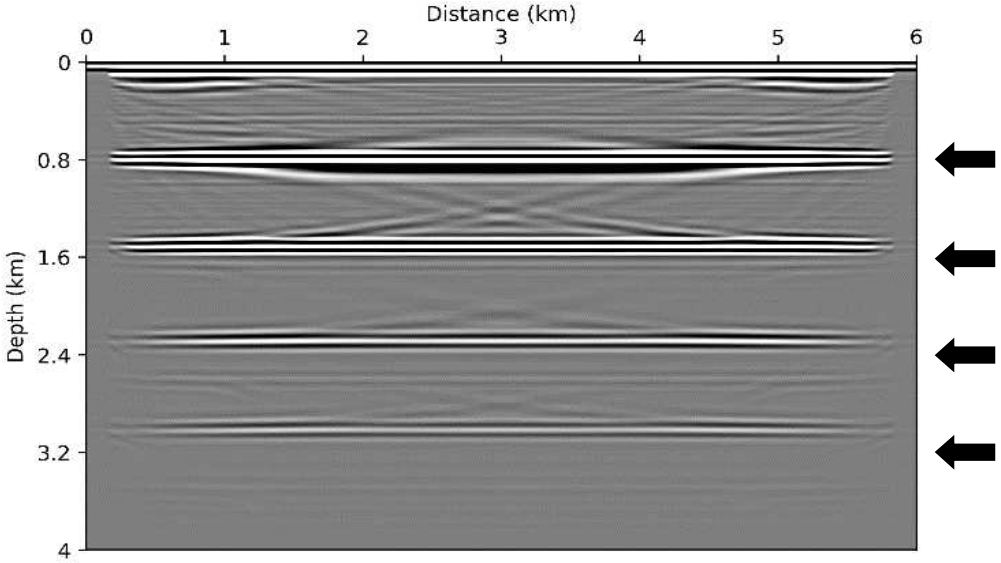
그림 5-5. (a) 두 번째 층과 네 번째 층의 속도를 200 m/s 씩 높인 평활화된 다층구조 속도 모델; (b) 두 번째 층과 네 번째 층의 속도를 200 m/s 씩 낮춘 다층구조 속도 모델.

그림 5-6은 그림 5-5의 속도 모델을 통해 획득한 역시간 구조보정 영상이다. 구조보정 영상 값에 z방향 2차 미분 값과 자동 이득 제어를 적용한 결과이다. 두 모델 모두에서 반사면의 심도가 0.8 km에 있는 반사면을 제외하고는 실제와 다르게 나타났다. 일부 층의 속도가 빠른 속도 모델로 역시간 구조보정을 수행하여 획득한 영상인 그림 5-6(a)에서는 심도가 깊어질수록 실제 속도보다 빨라 반사면의 심도가 실제보다 더 깊은 곳에 존재하는 것처럼 나타나고, 반대의 경우인 그림 5-6(b)에서는 심도가 깊어질수록 반사면의 심도가 실제보다 더 얕게 나타난다.

그림 5-7은 그림 5-6(a)로부터 모델의 중앙인 3 km 지점을 기준으로 주변 5 m 간격으로 10개의 지점에 대해 오프셋 영역 공통 영상 모음, 각 영역 공통 영상 모음, 주파수 배열 공통 영상 모음을 추출하고 z방향 2차 미분 값, 정규화, 자동 이득 제어를 적용한 결과다. 세 공통 영상 모음 모두 심도 0.8 km을 제외하면 그림 5-4와는 다른 양상을 나타낸다. 심도 1.6 km, 2.4 km, 3.2 km의 반사면에서는 기존의 두 공통 영상 모음과 주파수 배열 공통 영상 모음의 거동이 다르게 나타나는데, 그림 5-7(a)와 5-7(b)에서는 오프셋과 각이 커질수록 집중된 에너지의 심도가 깊어지는 frowning 현상이 나타나고 그림 5-7(c)에서는 주파수가 작을수록 집중된 에너지의 심도가 얕아지는 smiling 현상이 나타난다. 또한, 그림 5-7(b)와 5-7(c)에서는 심도 1.6 km, 2.4 km에 존재하는 반사면의 심도가 실제보다 깊게 나타나고 심도 3.2 km에 존재하는 반사면으로 인해 집중되는 에너지의 심도는 훨씬 깊게 나타난다. 이를 통해 주파수 영역



(a)

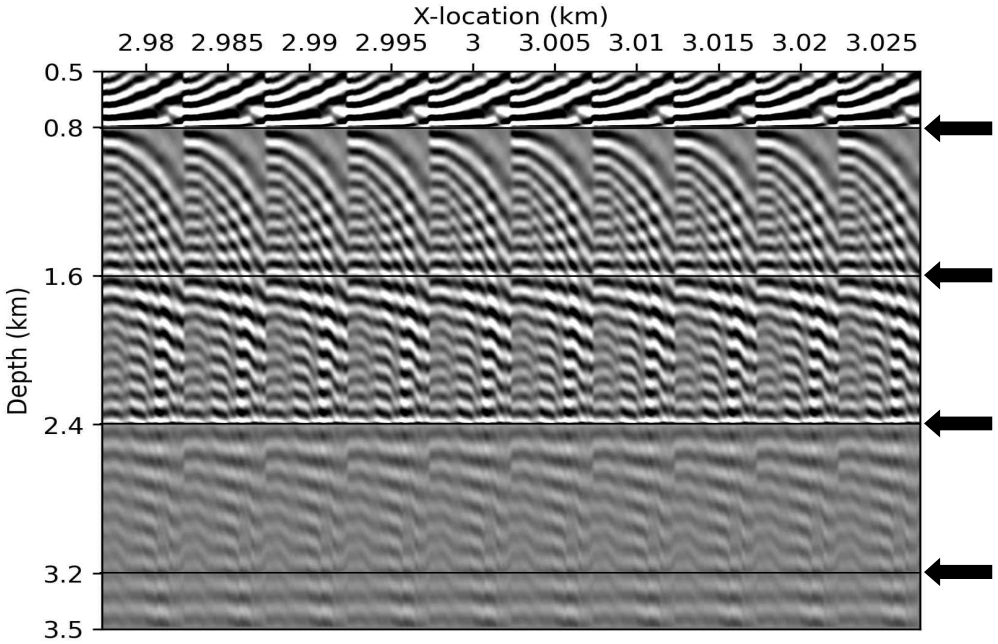


(b)

그림 5-6. 그림 5-5의 속도 모델을 통해 획득한 역시간 구조보정 영상(화살표는 실제 반사면의 심도를 의미함): (a) 일부 층의 속도가 빠른 모델; (b) 일부 층의 속도가 느린 모델.

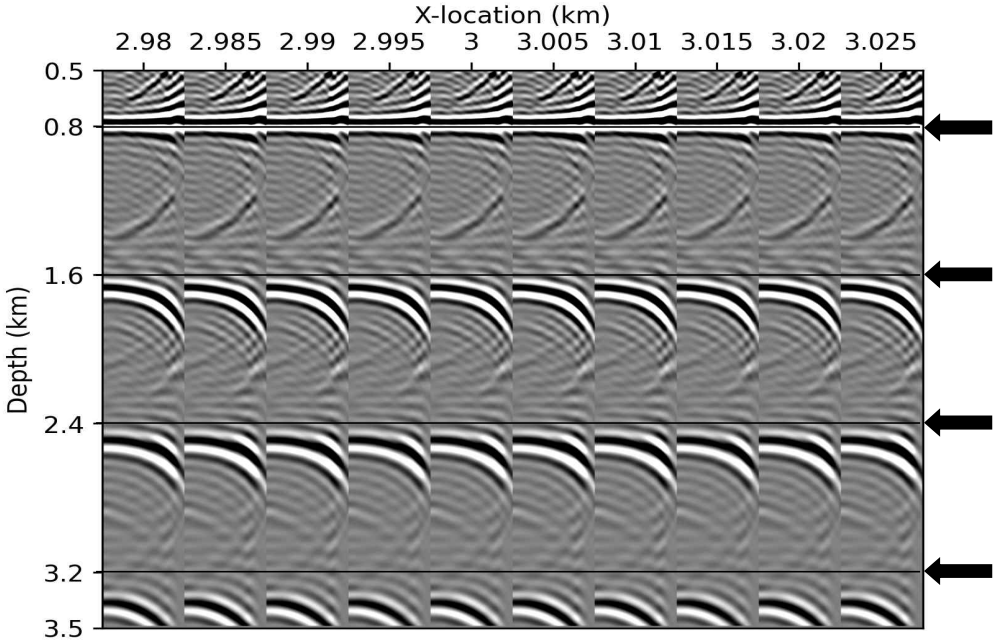
공통 영상 모음과 각 영역 공통 영상 모음이 오프셋 영역 공통 영상 모음보다 속도 섭동(perturbation)에 민감한 것으로 판단할 수 있다.

그림 5-8은 그림 5-6(b)로부터 위와 같은 방법으로 추출한 오프셋 영역 공통 영상 모음, 각 영역 공통 영상 모음, 주파수 배열 공통 영상 모음이다. 그림 5-7과는 반대로 그림 5-8(a)와 5-8(b)에서는 오프셋과 각이 커질수록 집중된 에너지의 심도가 얕아지는 smiling 현상이 나타나고 그림 5-8(c)에서는 주파수가 작아질수록 집중된 에너지의 심도가 깊어지는 frowning 현상이 나타난다. 또한 그림 5-7과 반대로 그림 5-8(b)과 5-8(c)에서는 반사면의 심도가 실제 심도보다 얕게 나타나는 것이 명확하게 나타나며, 심도 3.2 km에 존재하는 반사면에 의한 집중된 에너지의 심도가 심도 1.6 km, 2.4 km에 존재하는 반사면으로 인한 집중된 에너지의 심도보다 더 얕게 나타나는 것을 통해 각 영역 공통 영상 모음과 주파수 배열 공통 영상 모음이 오프셋 영역 공통 영상 모음보다 속도 섭동에 더 민감한 것을 알 수 있다.

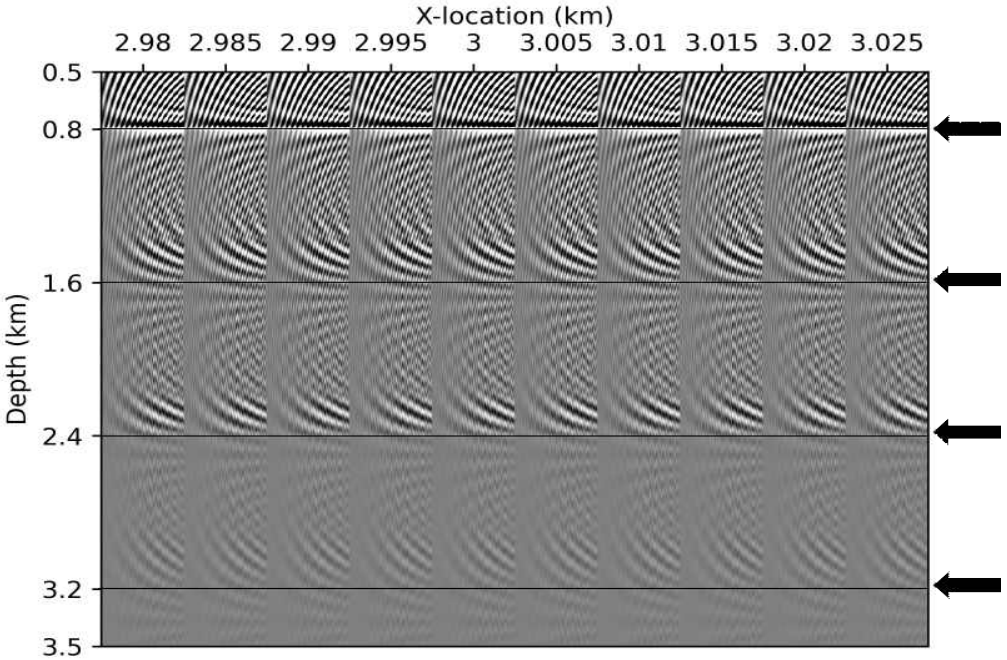


(a)

그림 5-7. 일부 층의 속도를 높인 다층구조 구조보정 영상에서 연속된 10개의 공통 영상 모음을 이어 붙인 영상(화살표와 검은 선은 실제 반사면의 심도를 의미함): (a) 오프셋 영역 공통 영상 모음; (b) 각 영역 공통 영상 모음; (c) 주파수 배열 공통 영상 모음.

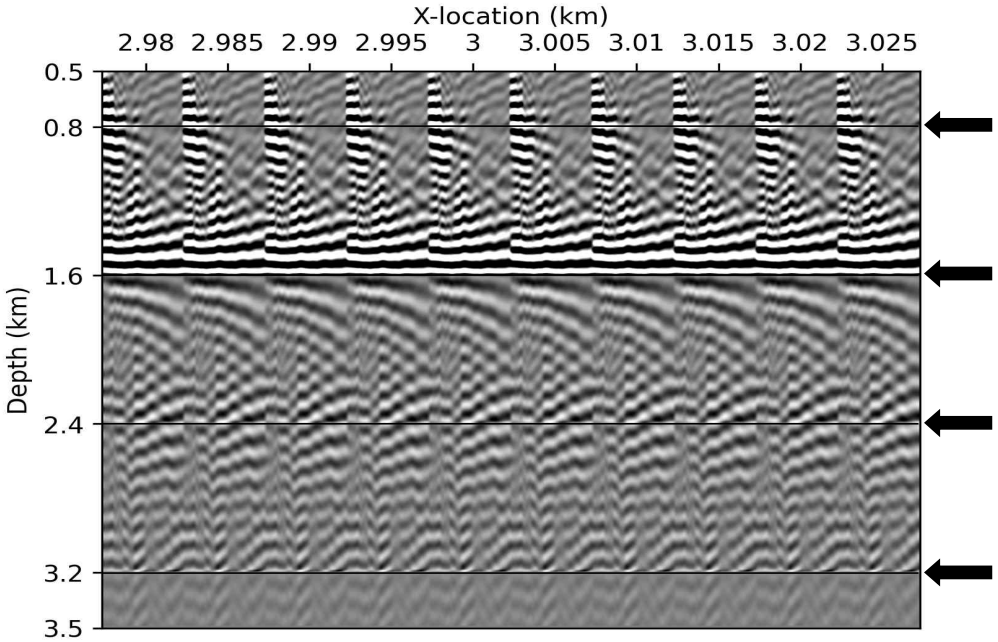

X-location (km)
2.98 2.985 2.99 2.995 3 3.005 3.01 3.015 3.02 3.025
0.5
0.8
1.6
2.4
3.2
3.5
Depth (km)

(b)


X-location (km)
2.98 2.985 2.99 2.995 3 3.005 3.01 3.015 3.02 3.025
0.5
0.8
1.6
2.4
3.2
3.5
Depth (km)

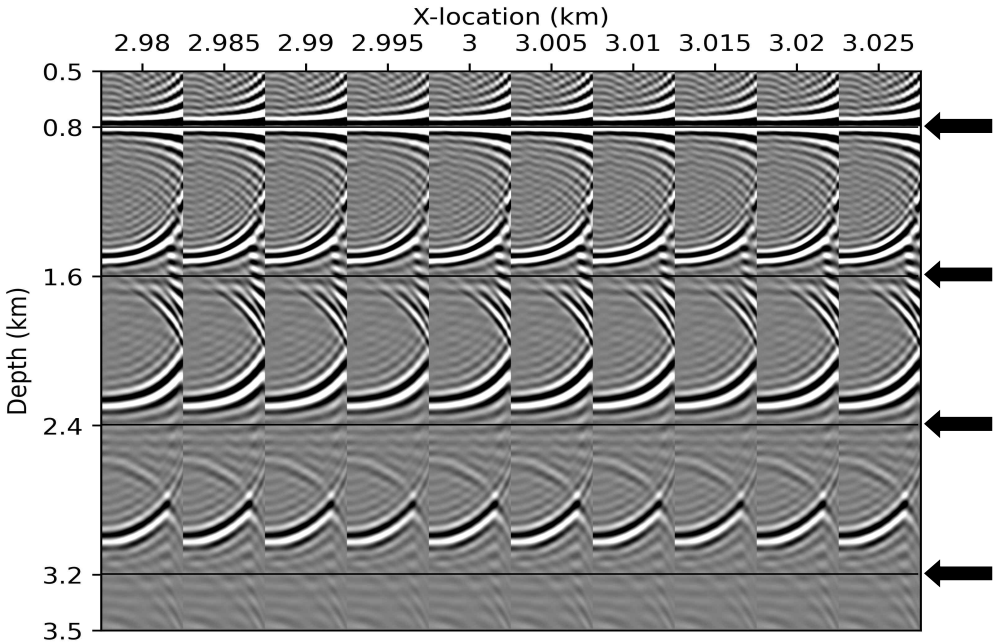
(c)

그림 5-7. (계속)

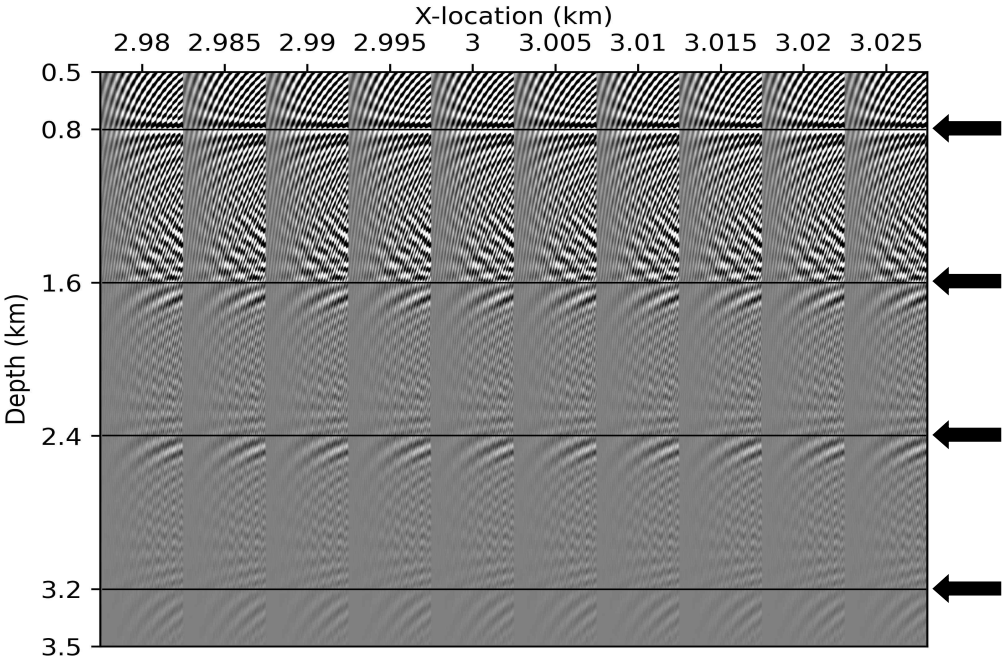


(a)

그림 5-8. 일부 층의 속도를 낮춘 다층구조 구조보정 영상에서 연속된 10개의 공통 영상 모음을 이어 붙인 영상(화살표와 검은 선은 실제 반사면의 심도를 의미함): (a) 오프셋 영역 공통 영상 모음; (b) 각 영역 공통 영상 모음; (c) 주파수 배열 공통 영상 모음.


X-location (km)
2.98 2.985 2.99 2.995 3 3.005 3.01 3.015 3.02 3.025
0.5
0.8
1.6
2.4
3.2
3.5
Depth (km)

(b)


X-location (km)
2.98 2.985 2.99 2.995 3 3.005 3.01 3.015 3.02 3.025
0.5
0.8
1.6
2.4
3.2
3.5
Depth (km)

(c)

그림 5-8. (계속)

이상으로 단순한 속도 구조를 가진 인공 합성 모델인 다층구조 모델을 통해서 주파수 배열 공통 영상 모음 상에서 나타나는 거동을 파악해보았고 그 결과는 아래의 표 5-3과 같다.

표 5-3. 구조보정에 사용한 속도 모델에 따른 주파수 배열 공통 영상 모음의 거동.

구조보정 속도 모델 (Migration velocity model)	주파수 배열 공통 영상 모음의 거동 (Behavior of FDCIG)
실제 속도와 **일치**하는 경우	Flat
실제 속도보다 **빠른** 경우	Smiling
실제 속도보다 **느린** 경우	Frowning

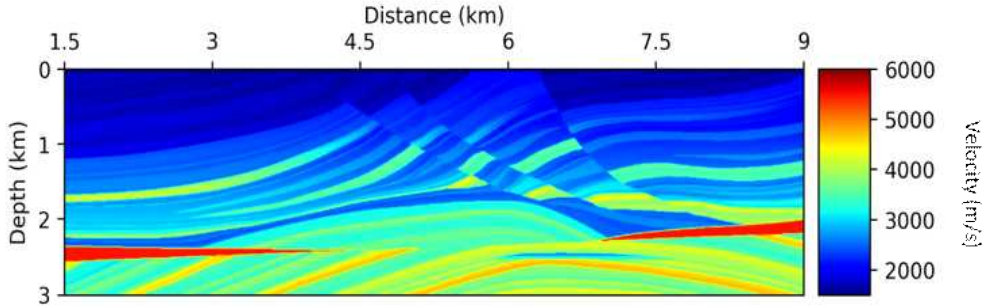
오프셋 영역 공통 영상 모음과 각 영역 공통 영상 모음을 함께 도시하여 주파수 배열 공통 영상 모음의 결과를 검증하였으며, 주파수 배열 공통 영상 모음의 속도에 대한 민감도(sensitivity)는 각 영역 공통 영상 모음과 비슷한 수준으로 나타나 구조보정 속도 모델을 판단하는데 유용할 것으로 보인다.

5.2. Original Marmousi 모델

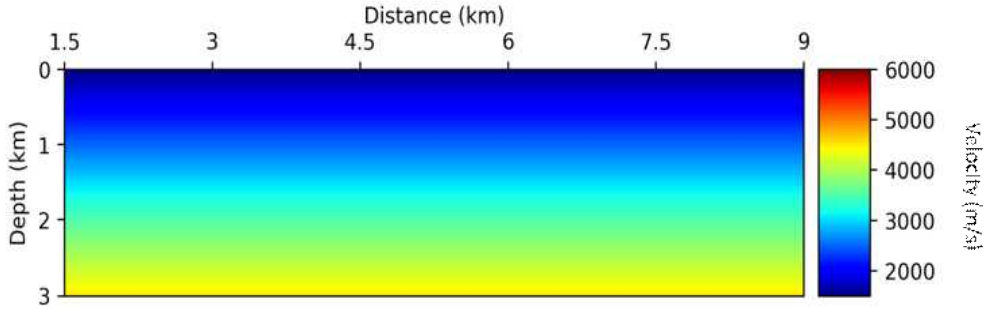
복잡한 구조를 가진 2차원 인공 합성 모델인 Original Marmousi 모델 (Bourgeouis et al., 1991)에 주파수 배열 공통 영상 모음을 적용해보고자 한다. 모델의 격자수는 (737 × 241) 이다. 격자의 간격은 각각 12.5 m로 모델 전체의 크기는 (9.2 km × 3 km)이다. 송신원은 3 km 지점에서 9.2 km 지점까지 25 m 간격으로 240개 간격으로 사용하였으며, 수진기는 각각의 송신원으로부터 200 m에서 2,575 m까지 96개를 사용하였다. 유한요소법을 이용하여 주파수 영역 2차원 음향파 파동방정식으로 파동전파 모델링을 하였으며, 지표면에는 디리클레 경계조건, 나머지 세 경계에는 PML을 적용하였다. 라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산에는 4 Hz 부터 19 Hz 까지 0.1 Hz 간격으로 151개를 사용하여 속도를 추정하였다. 주파수 영역 모델링과 역시간 구조보정 및 주파수 배열 공통 영상 모음에 사용한 주파수는 5 Hz 부터 30 Hz까지 0.1 Hz 간격으로 총 251개를 사용하였으며, 기존 공통 영상 모음과 같이 왼쪽에서 평평한 부분이 잘 보이도록 주파수를 오른쪽으로 갈수록 낮아지도록 영상을 추출하였다. 주파수 배열 공통 영상 모음의 검증을 위해 오프셋 영역 공통 영상 모음과 각 영역 공통 영상 모음을 같이 도시하였다. 오프셋 영역 공통 영상 모음은 오프셋 200 m 부터 50 m 단위로 2700 m 까지 50개를 사용하였고, 각 영역 공통 영상 모음은 먼저 101개의 이동된 영상화 조건값을 구한 뒤, slant-stack 변환을 통해 0°부터 60°까지 0.1° 간격으로 601개의 각 격자를 사용하였다.

그림 5-9는 Original Marmousi model과 비교를 위해 추가한 심도에 따라 속도가 선형적으로 증가하는 모델의 속도 모델(그림 5-9(b))과 그로부터 라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산을 수행하여 추정한 속도 모델(그림 5-9(c))이다. 그림 5-9(b)의 지표면의 속도는 1,500 m/s이고, 최하단부인 3 km 지점에서의 속도는 4,500 m/s이며, 그 사이의 속도는 선형적으로 증가한다. 그림 5-9(c)는 최대 속도가 6,000 m/s로 역산된 속도 모델이며, 깊은 심도(2 ~ 3 km)에서는 실제 속도 모델과 크게 다른 형태를 나타내며, 이는 깊은 심도에서는 역산이 제대로 되지 않은 것을 의미한다. 하지만, 이 모델을 통해 공통 영상 모음을 추출하여 실제 속도를 통해 추출한 것과 비교하여 주파수 배열 공통 영상 모음의 성능을 파악해보고자 하였다.

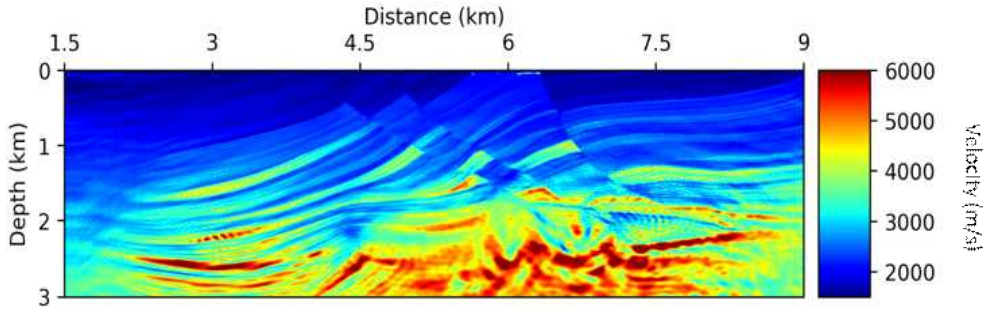
그림 5-10은 그림 5-9의 속도 모델로 역시간 구조보정을 수행하여 얻은 지하 단면 영상이다. 구조보정 영상의 보정을 위해 z방향 2차 미분 값, 자동 이득 제어를 적용하였으며, 1.5 ~ 9 km 구간으로 제한하여 영상을 도시하였다.



(a)

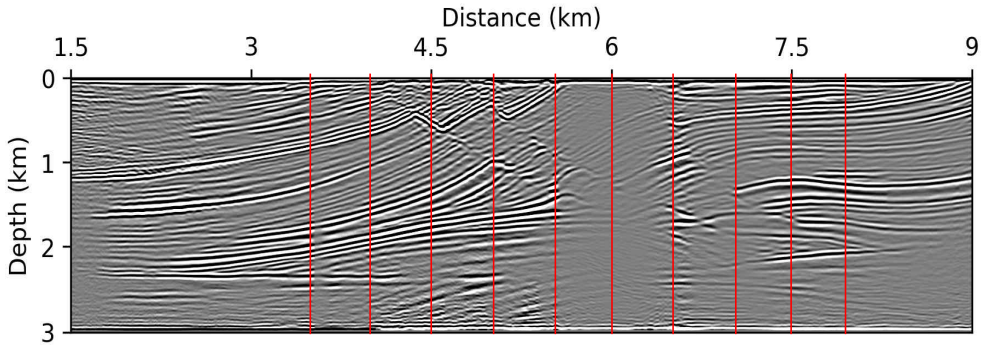


(b)

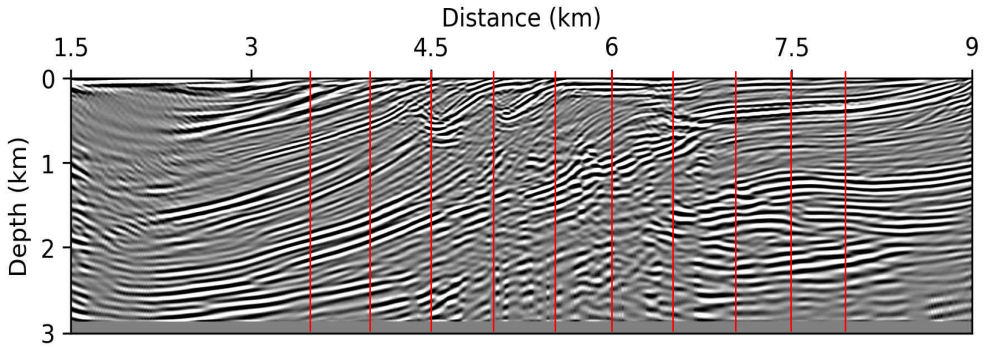


(c)

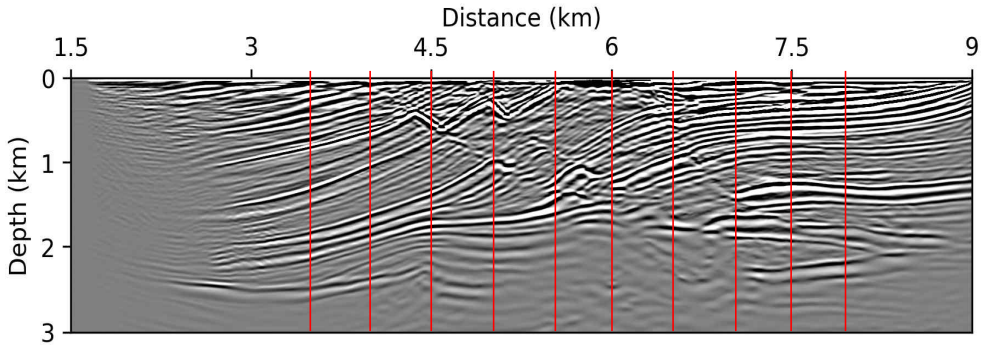
그림 5-9. (a) 실제 속도 모델; (b) 심도에 따라 선형적으로 속도가 증가하는 모델; (c) (b)를 초기 모델로 하여 라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산으로 속도를 추정한 모델.



(a)



(b)



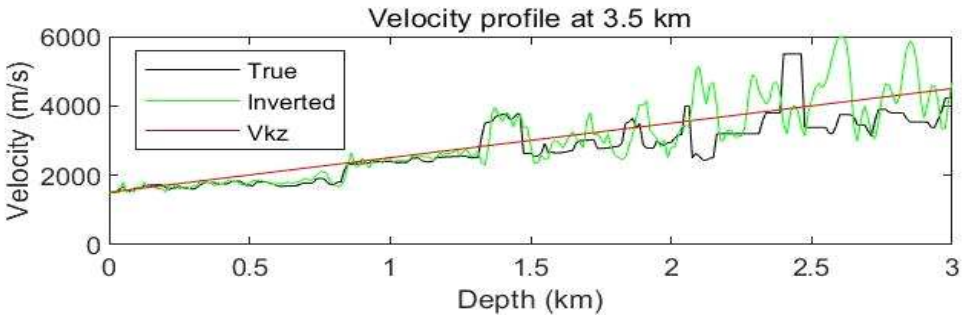
(c)

그림 5-10. 그림 5-9의 속도 모델로부터 역시간 구조보정을 수행하여 얻은 지하 영상(빨간 선은 공통 영상 모음을 추출한 지점을 의미함): (a) 실제 속도 모델; (b) 심도에 따라 선형적으로 속도가 증가하는 모델; (c) (b)를 초기 모델로 하여 라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산으로 속도를 추정한 모델.

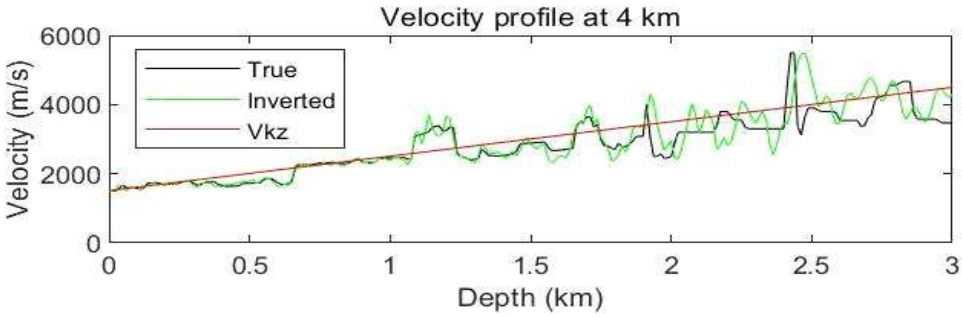
그림 5-11은 공통 영상 모음을 추출한 지점에서의 세 속도 모델의 속도 분포를 나타낸 것이다.

그림 5-14는 그림 5-10의 구조보정 영상에서 3.5 km 지점에서 0.5 km 간격으로 8 km 지점까지 총 10개의 오프셋 영역 공통 영상 모음을 추출하여 이어 붙인 영상이다. 그림 5-12(b)에 해당하는 심도에 따라 속도가 선형적으로 증가하는 모델로부터 추출한 오프셋 영역 공통 영상 모음에서는 평평하게 나타난 부분이 없다. 그림 5-12(a)와 그림 5-12(c)에 표시한 화살표는 실제 모델에 존재하는 반사면의 심도 일부를 나타낸 것이다. 그림 5-12(a)에서는 대부분의 화살표와 공통 영상 모음 상에 평평하게 나타난 부분의 심도가 일치한다.

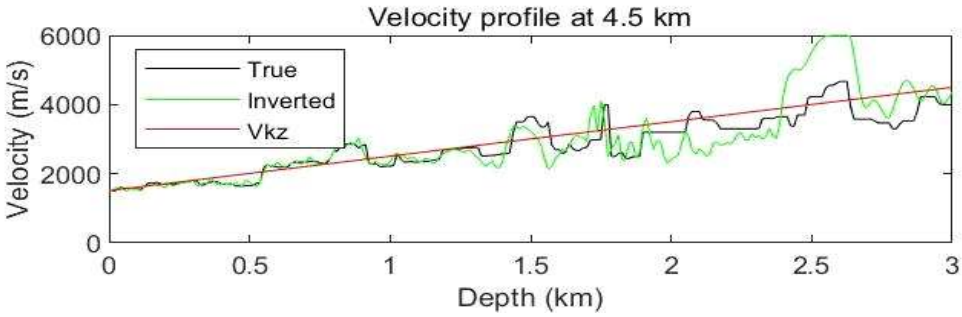
그림 5-13은 그림 5-12(a)와 그림 5-12(c)를 비교하기 위해 3.5 km 지점에서 8 km 지점까지 0.5 km 간격으로 실제 속도 모델과 역산을 통해 추정한 속도 모델의 속도의 차이를 나타낸 그래프이다. 그림 5-9(a)와 그림 5-9(c)의 속도 모델을 통해서는 심도 0 ~ 2 km 구간의 구조는 잘 일치하는 것으로 보이고, 그림 5-10(a)와 그림 5-10(c)의 구조보정 영상으로도 심도 0 ~ 2 km에서 유사하게 보인다. 하지만, 지점별로 속도분포를 파악한 결과, 거의 모든 지점이 0 ~ 1 km 구간의 속도가 일치하여 0에 가깝게 나타나지만, 그보다 깊은 심도에서는 대체로 일치하지 않는 것으로 나타난다.



(a)

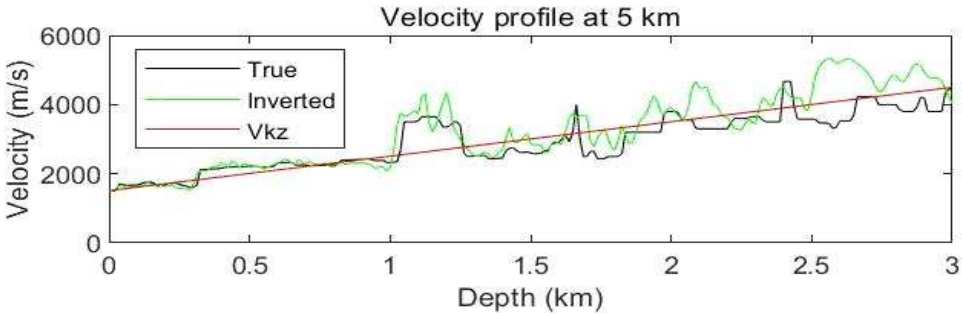


(b)

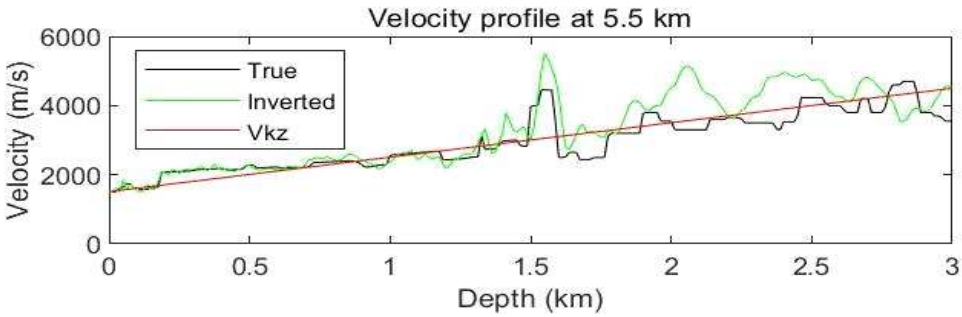


(c)

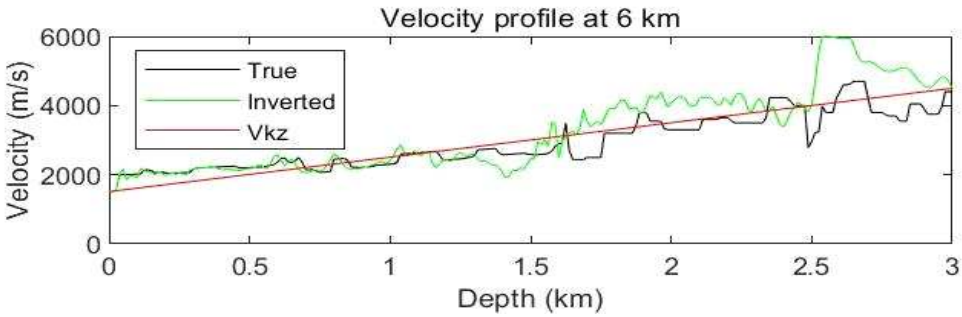
그림 5-11. 공통 영상 모음을 추출한 지점에서의 세 속도 모델의 속도분포: (a) 3.5 km; (b) 4 km; (c) 4.5 km; (d) 5 km; (e) 5.5 km; (f) 6 km; (g) 6.5 km; (h) 7 km; (i) 7.5 km; (j) 8 km.



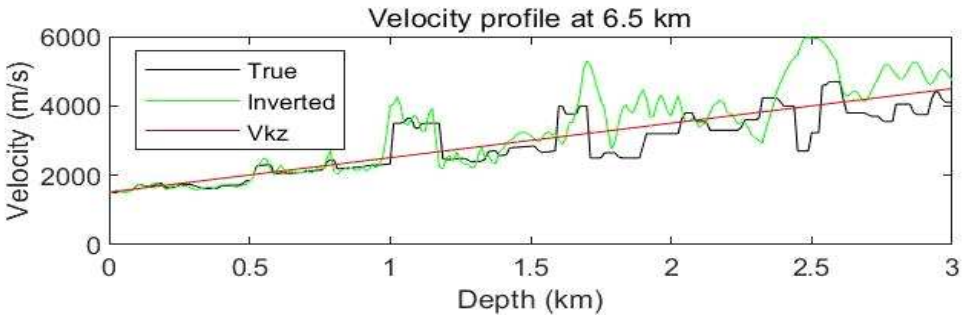
(d)



(e)

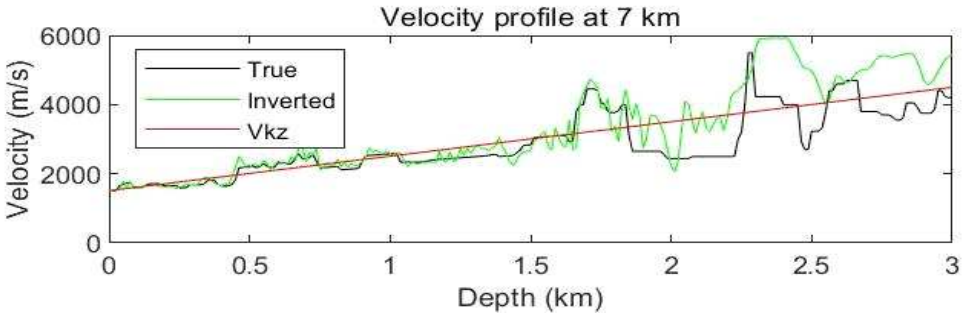


(f)

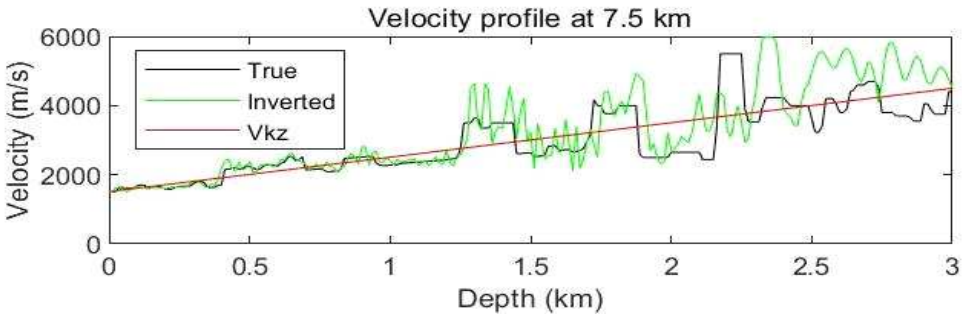


(g)

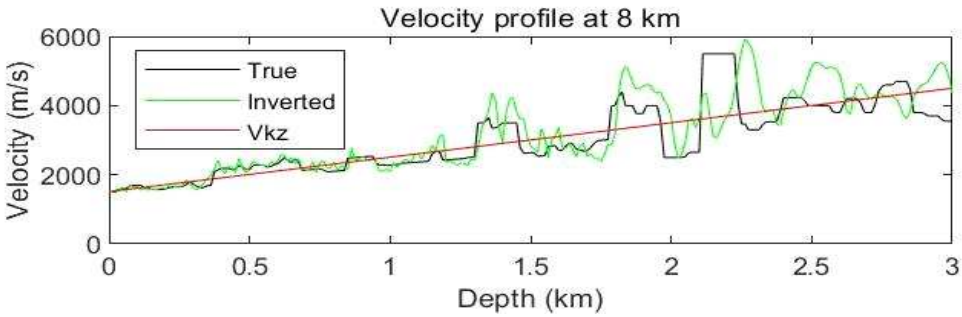
그림 5-11. (계속)


Velocity profile at 7 km
True
Inverted
Vkz
Velocity (m/s)
Depth (km)

(h)

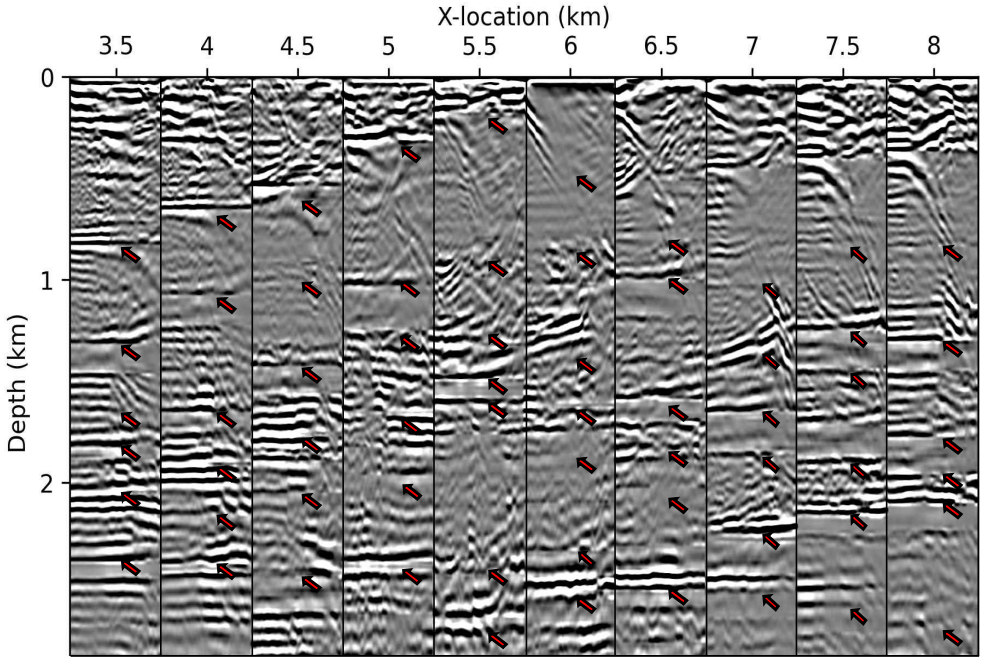

Velocity profile at 7.5 km
True
Inverted
Vkz
Velocity (m/s)
Depth (km)

(i)


Velocity profile at 8 km
True
Inverted
Vkz
Velocity (m/s)
Depth (km)

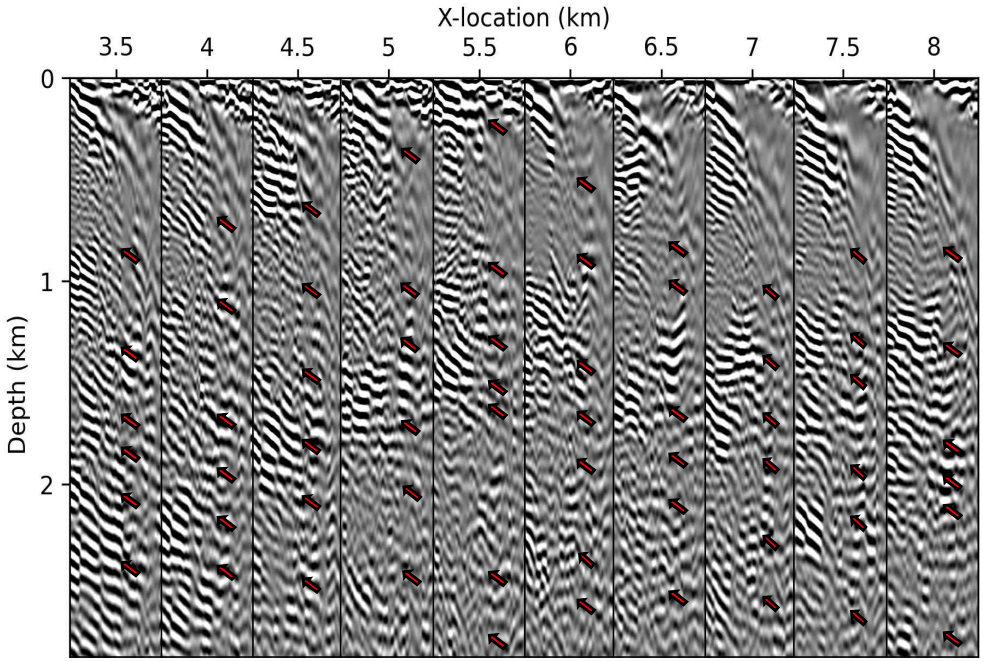
(j)

그림 5-11. (계속)

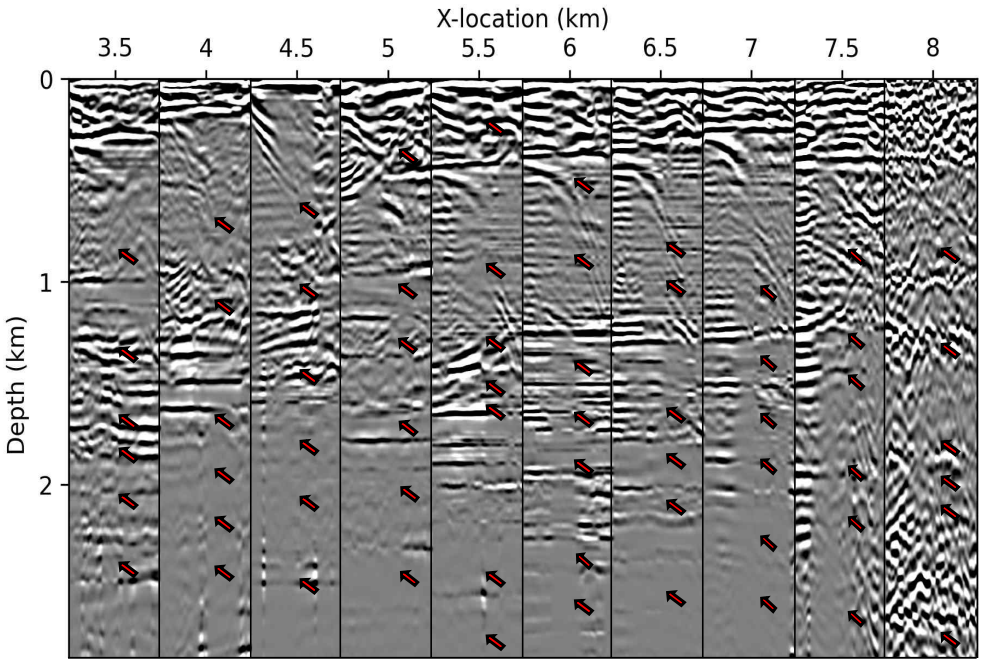


(a)

그림 5-12. 그림 5-10의 모델에서 3.5 km에서 8 km 까지 0.5 km 간격으로 추출한 오프셋 영역 공통 영상 모음 10개를 이어 붙인 영상(화살표는 실제 반사면의 심도 일부를 의미함): (a) 실제 속도 모델; (b) 심도에 따라 선형적으로 증가하는 속도 모델; (c) (b)를 초기 모델로 하여 라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산으로 속도를 추정한 모델.

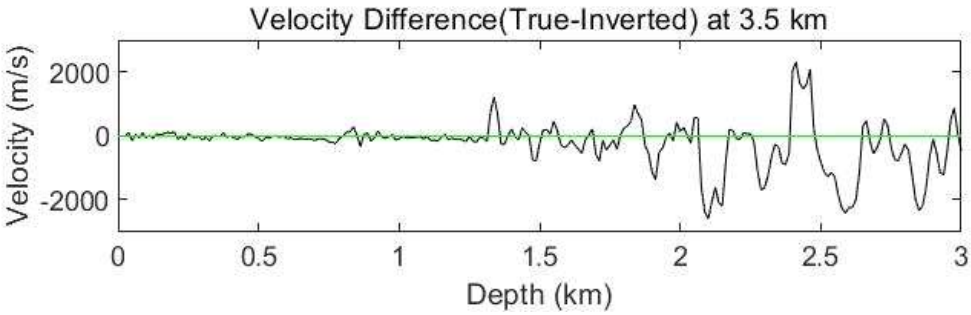

X-location (km)
3.5
4
4.5
5
5.5
6
6.5
7
7.5
8
0
1
2
Depth (km)

(b)

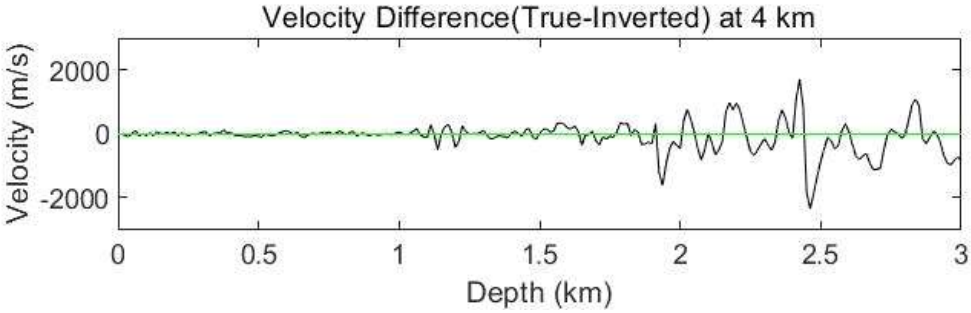

X-location (km)
3.5
4
4.5
5
5.5
6
6.5
7
7.5
8
0
1
2
Depth (km)

(c)

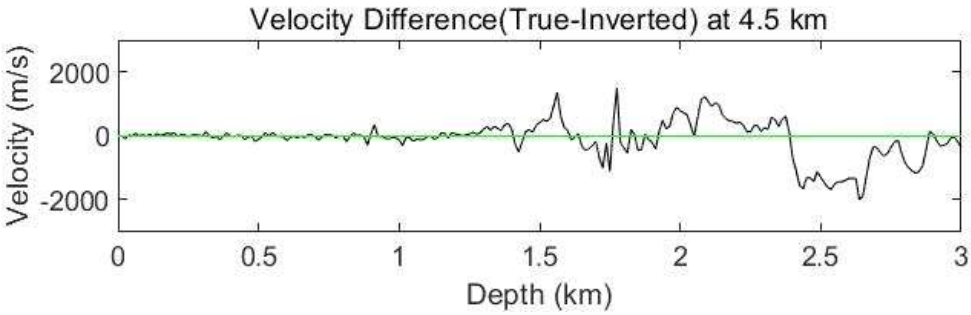
그림 5-12. (계속)



(a)

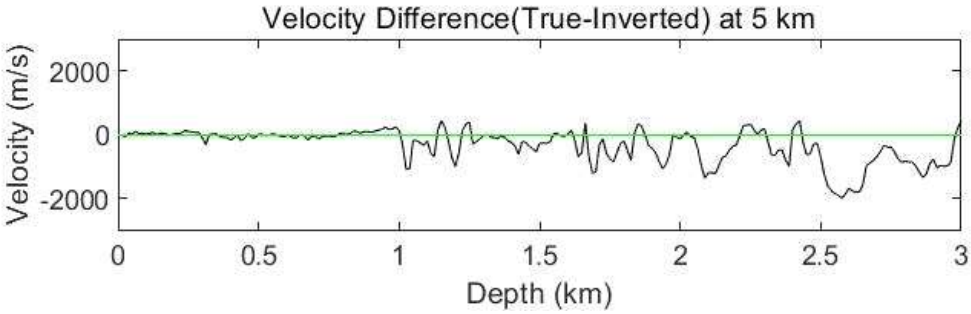


(b)

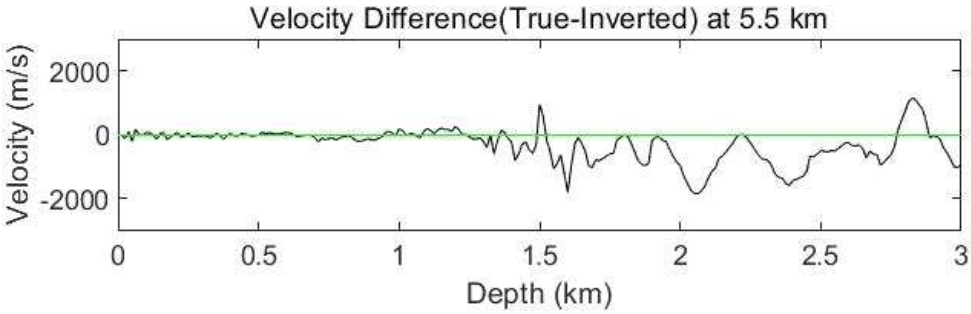


(c)

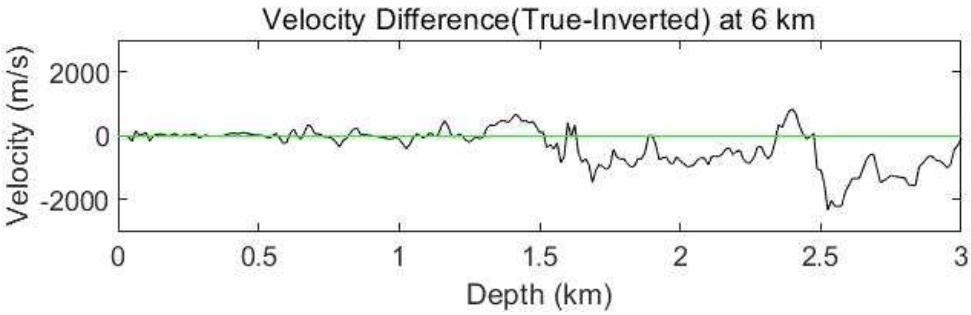
그림 5-13. 공통 영상 모음을 추출한 지점의 실제 속도 모델과 역산을 통해 추정한 모델의 속도 차이를 나타낸 그래프: (a) 3.5 km; (b) 4 km; (c) 4.5 km; (d) 5 km; (e) 5.5 km; (f) 6 km; (g) 6.5 km; (h) 7 km; (i) 7.5 km; (j) 8 km.



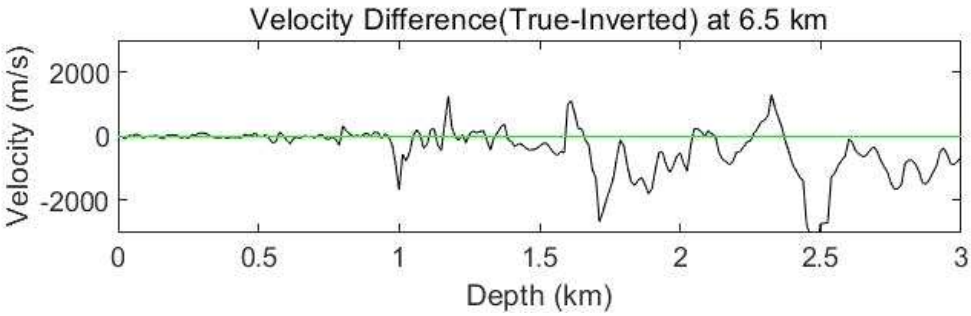
(d)



(e)

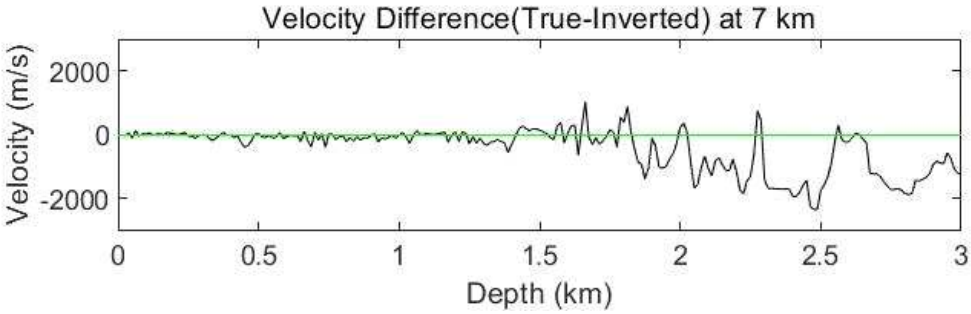


(f)

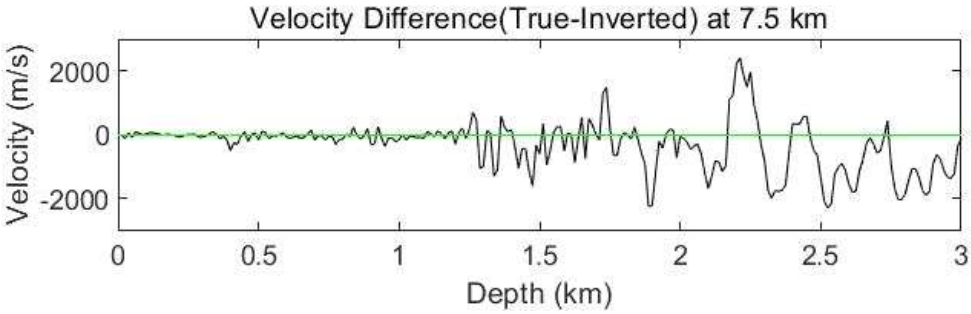


(g)

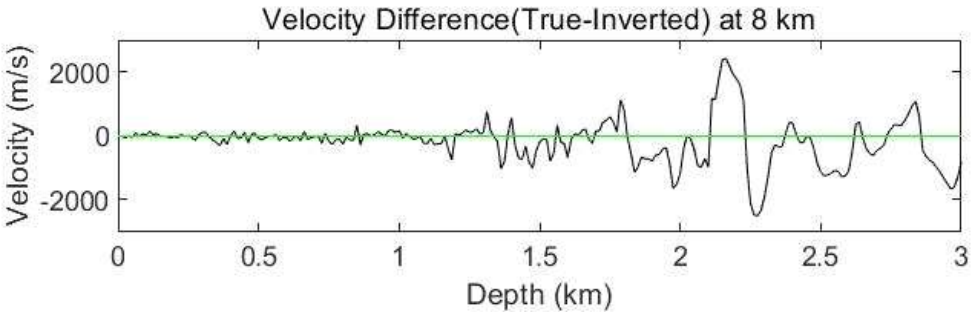
그림 5-13. (계속)


Velocity Difference(True-Inverted) at 7 km
Velocity (m/s)
2000
0
-2000
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
Depth (km)

(h)


Velocity Difference(True-Inverted) at 7.5 km
Velocity (m/s)
2000
0
-2000
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
Depth (km)

(i)

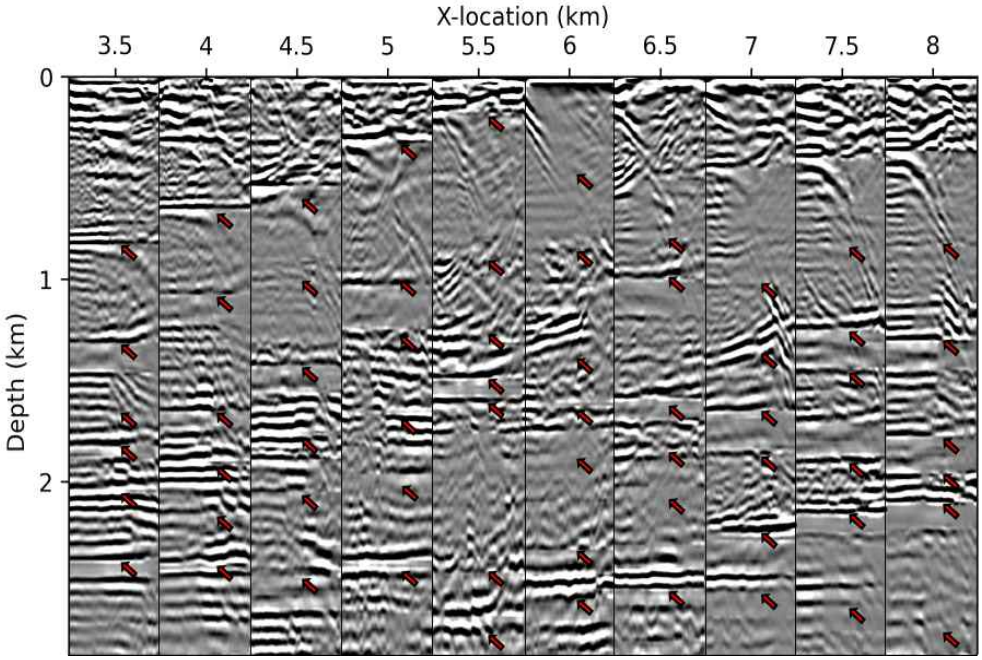

Velocity Difference(True-Inverted) at 8 km
Velocity (m/s)
2000
0
-2000
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
Depth (km)

(j)

그림 5-13. (계속)

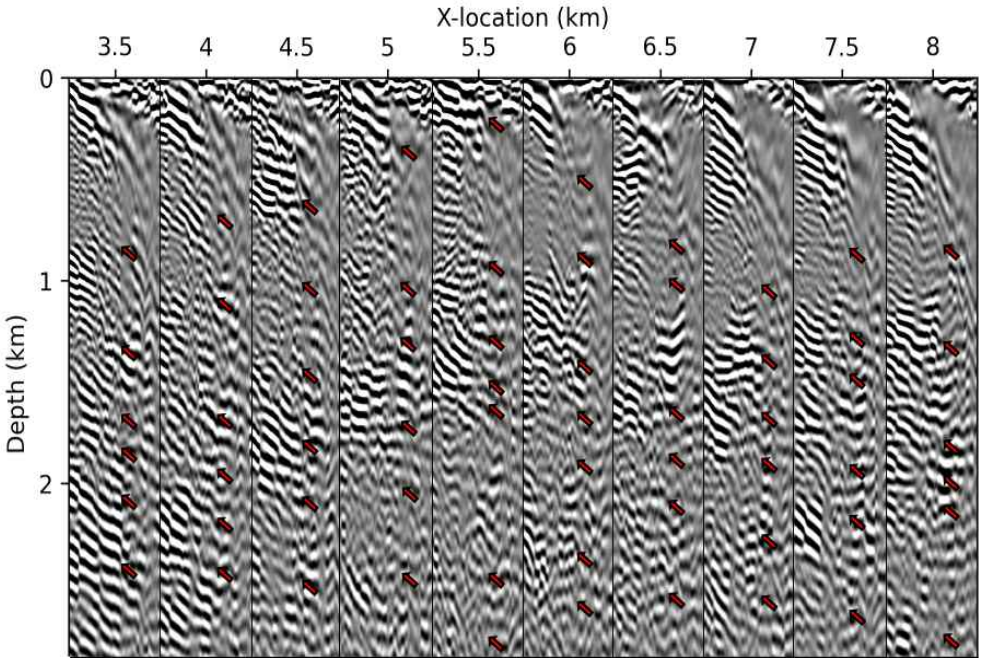
하지만, 그림 5-12(c)의 오프셋 영역 공통 영상 모음 상에서는 화살표와 일치하는 부분에서 수평선이 일부 나타나고(그림 5-12(c)의 4 km 지점의 심도 1.7 km, 5 km 지점의 심도 1.2 km, 6 km 지점의 심도 1.4 km), 대부분의 심도에서는 화살표와 일치하지 않는 심도에서 수평선이 나타난다(그림 5-12(c)의 3.5 km 지점의 심도 1 km, 5 km 지점의 심도 1.8 km, 5.5 km 지점의 심도 1.7 km, 6 km 지점의 심도 1.2, 1.5 km). 화살표와 일치하는 부분의 심도를 살펴보면 주로 얕은 심도(0 ~ 1.5 km 이내)인 것을 알 수 있다. 이것은 역산을 통해 추정한 속도 모델이 얕은 심도에서는 실제 속도와 일치하는 경향을 보이지만 깊은 심도에서는 그렇지 않은 것을 나타낸다.

그림 5-14는 그림 5-10의 구조보정 영상에서 3.5 km 지점에서 0.5 km 간격으로 8 km 지점까지 총 10개의 각 영역 공통 영상 모음을 추출하여 이어 붙인 영상이다. 그림 5-12(b)와 다르게 그림 5-14(b)는 수평하게 나타난 부분이 많다. 그림 5-11에서 알 수 있듯이, 심도에 따라 속도가 선형적으로 증가하는 모델과 실제 속도 모델의 속도가 일치하는 심도가 많다. 공통 영상 모음 상에서는 속도가 일치하는 부분이 나타나면, 수평하게 나타나야 하지만 그림 5-12(b)의 오프셋 영역 공통 영상 모음에서는 찾아볼 수 없었으며, 이러한 이유로 각 영역 공통 영상 모음이 오프셋 영역 공통 영상 모음보다 속도에 덜 민감한 것으로 볼 수 있다. 그림 5-14(a)에서는 여러 심도에서 수평선이 나타나며, 대부분이 실제 심도와 일치하게 나타난다. 그림 5-14(c)에서도 여러 심도에서 수평선이 나타나며, 화살표의 심도와는 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다.

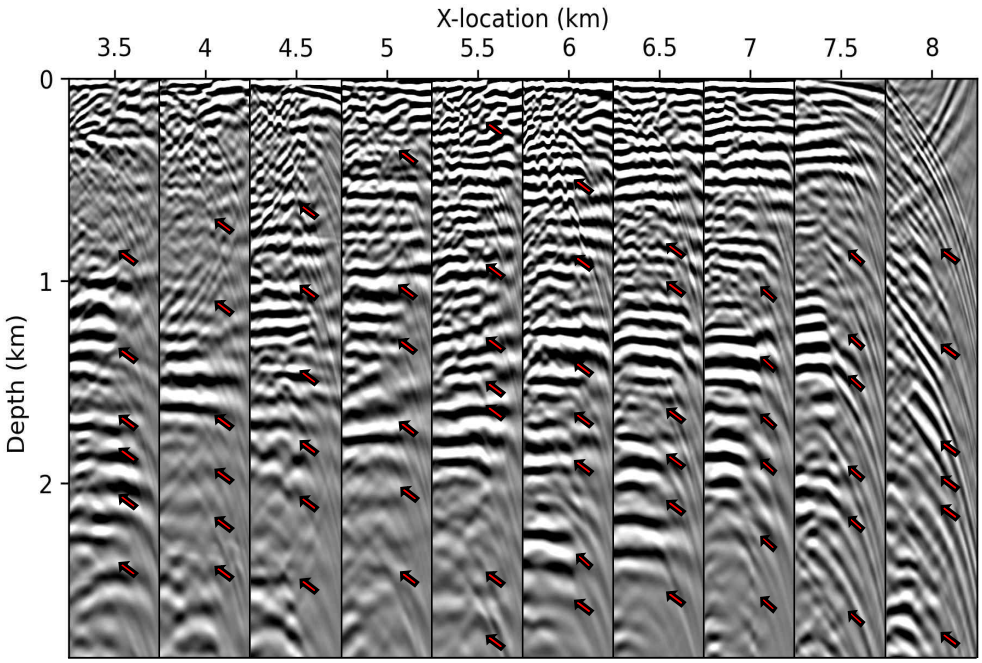


(a)

그림 5-14. 그림 5-10의 모델에서 3.5 km에서 8 km 까지 0.5 km 간격으로 추출한 각 영역 공통 영상 모음 10개를 이어 붙인 영상(화살표는 실제 반사면의 심도 일부를 의미함): (a) 실제 속도 모델; (b) 심도에 따라 선형적으로 증가하는 속도 모델; (c) (b)를 초기 모델로 하여 라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산으로 속도를 추정한 모델.


X-location (km)
3.5
4
4.5
5
5.5
6
6.5
7
7.5
8
0
1
2
Depth (km)

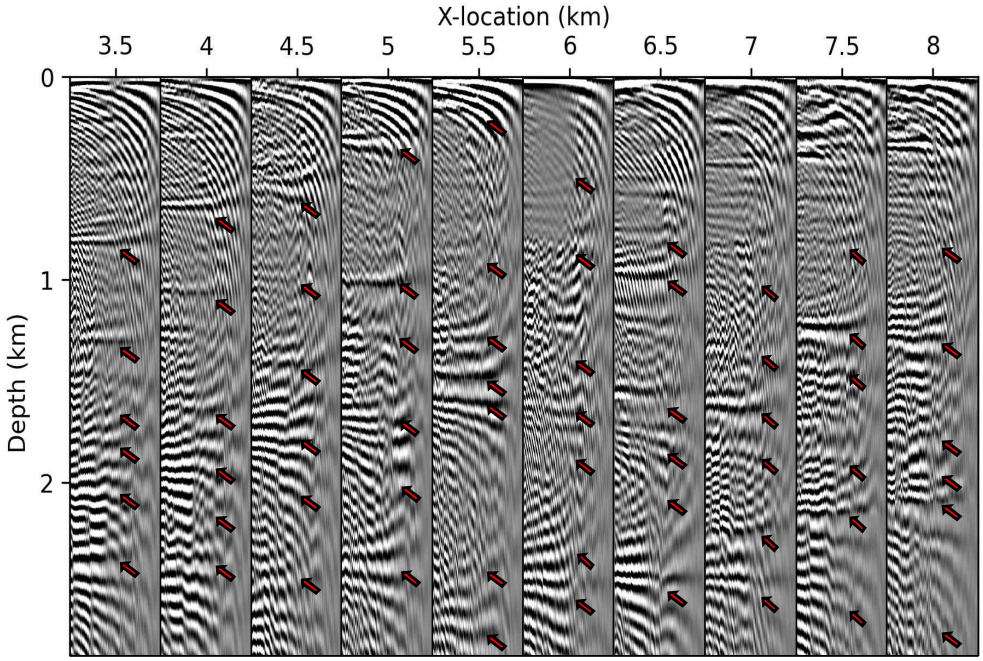
(b)


X-location (km)
3.5
4
4.5
5
5.5
6
6.5
7
7.5
8
0
1
2
Depth (km)

(c)

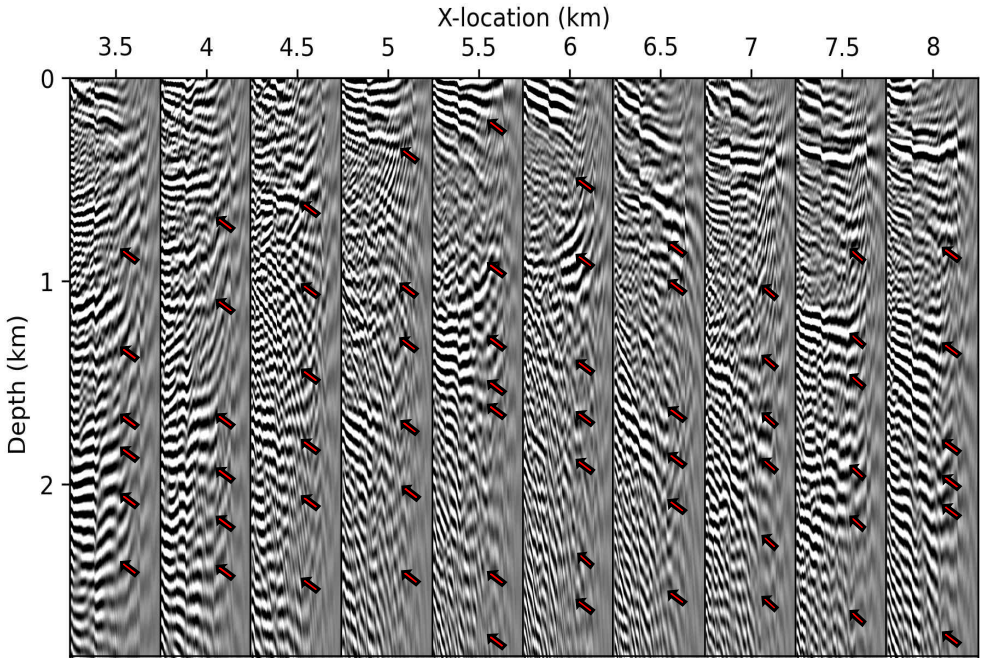
그림 5-14. (계속)

그림 5-15은 그림 5-10의 구조보정 영상에서 3.5 km 지점에서 0.5 km 간격으로 8 km 지점까지 총 10개의 주파수 배열 공통 영상 모음을 추출하여 이어 붙인 영상이다. 심도에 따라 속도가 증가하는 모델로부터 추출한 주파수 배열 공통 영상 모음(그림 5-15(b))에서는 오프셋 영역 공통 영상 모음(그림 5-12(b))와 같이 수평하게 나타난 심도가 없다. 이를 통해서, 오프셋 영역 공통 영상 모음과 주파수 배열 공통 영상 모음이 각 영역 공통 영상 모음보다 속도에 민감한 것을 추측할 수 있다. 그림 5-15(a)에서는 얕은 심도에서는 화살표와 일치하는 심도에서 수평하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 하지만 깊은 심도에서는 이러한 현상이 잘 나타나지 않는데, 그러한 이유로는 주파수 배열 공통 영상 모음에서 주파수가 낮아질수록 퍼지는 경향이 있으며, 깊은 심도에는 고주파수 성분이 도달하기 어려워 깊은 심도에 집중된 에너지의 평평한 정도가 점점 더 짧게 나타나는 것으로 보인다. 그림 5-15(c)에서는 모든 지점의 얕은 심도(0 ~ 1.5 km 이내)에서 보이는 수평선은 실제 반사면의 심도를 나타낸 화살표와 많은 부분 일치하여 나타난다. 깊은 심도에서 수평하게 나타나는 부분과 화살표가 일치하는 부분(3.5 km 지점의 심도 2 km, 4.5 km 지점의 심도 1.8 km, 7 km 지점의 심도 1.6 km)이 있는데, 에너지가 집중된 것은 임피던스 차이를 나타낸 것이고, 심도가 유사하게 나오는 것은 그 심도에 도달하기 까지의 실제 속도와의 차이의 음과 양의 값이 합쳐지면서 일치하게 나타나는 것으로 보인다. 하지만, 실제 심도와 일치하지 않으면서 수평하게 나타나는 경우와 수평하지 않게 나타나는 경우는 임피던스가 커서 에너지의 집중은 이루어졌지만, 속도가 맞지 않아 다르게 나타나는 것이다.

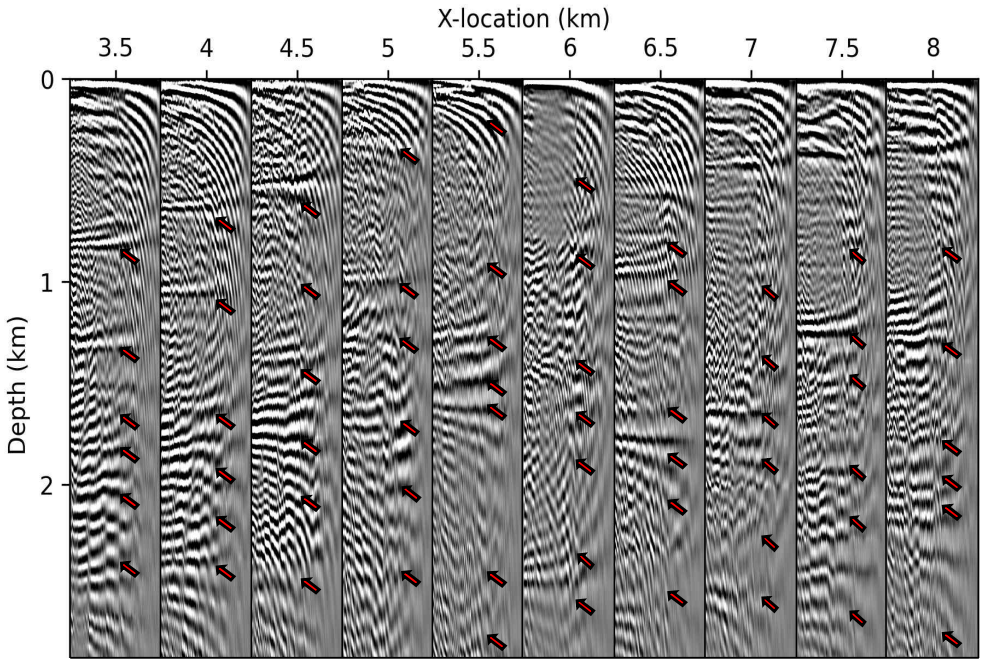


(a)

그림 5-15. 그림 5-10의 모델에서 3.5 km에서 8 km 까지 0.5 km 간격으로 추출한 주파수 배열 공통 영상 모음 10개를 이어 붙인 영상(화살표는 실제 반사면의 심도 일부를 의미함): (a) 실제 속도 모델; (b) 심도에 따라 선형적으로 증가하는 속도 모델; (c) (b)를 초기 모델로 하여 라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산으로 속도를 추정한 모델.


X-location (km)
3.5
4
4.5
5
5.5
6
6.5
7
7.5
8
0
1
2
Depth (km)

(b)


X-location (km)
3.5
4
4.5
5
5.5
6
6.5
7
7.5
8
0
1
2
Depth (km)

(c)

그림 5-15. (계속)

복잡한 2차원 인공 합성 모델인 Original Marmousi 모델에 세 가지 모델을 사용하여 공통 영상 모음을 추출해보았다. 실제 속도 모델에서 추출한 공통 영상 모음에서는 세 가지 공통 영상 모두 실제 반사면의 심도에서 수평하게 나타났으며, 이를 통해 속도 모델이 정확한 경우에 주파수 배열 공통 영상 모음을 통한 검증이 유의미한 것을 확인하였다. 심도에 따라 속도가 선형적으로 증가하는 모델에서 추출한 세 공통 영상 모음에서는 일부 다른 경향을 보였는데, 오프셋 영역 공통 영상 모음과 주파수 배열 공통 영상 모음에서는 수평하게 나타난 부분이 전혀 없었으나, 각 영역 공통 영상 모음에서는 많은 심도에서 수평에 가깝게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이를 통해서 오프셋 영역 공통 영상 모음과 주파수 배열 공통 영상 모음이 각 영역 공통 영상 모음보다 속도에 더 민감한 것을 알 수 있었다. 역산을 통해 추정한 속도 모델은 얕은 심도에서는 실제 속도와 대부분 일치하였지만, 깊은 심도에서는 실제 속도 모델과 크게 다른 모델이었으며, 이를 통해 추출한 세 공통 영상 모음 모두에서 실제 속도 모델에서 임피던스 차이가 큰 부분에서 집중된 에너지가 나타났지만 실제 반사면의 심도와는 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 세 공통 영상 모음의 결과에서 가장 큰 차이점은, 얕은 심도에서 속도가 일치하는 부분에 대해서는 주파수 배열 공통 영상 모음에서만 실제 반사면의 심도와 일치하는 부분에서 수평하게 나타났다.

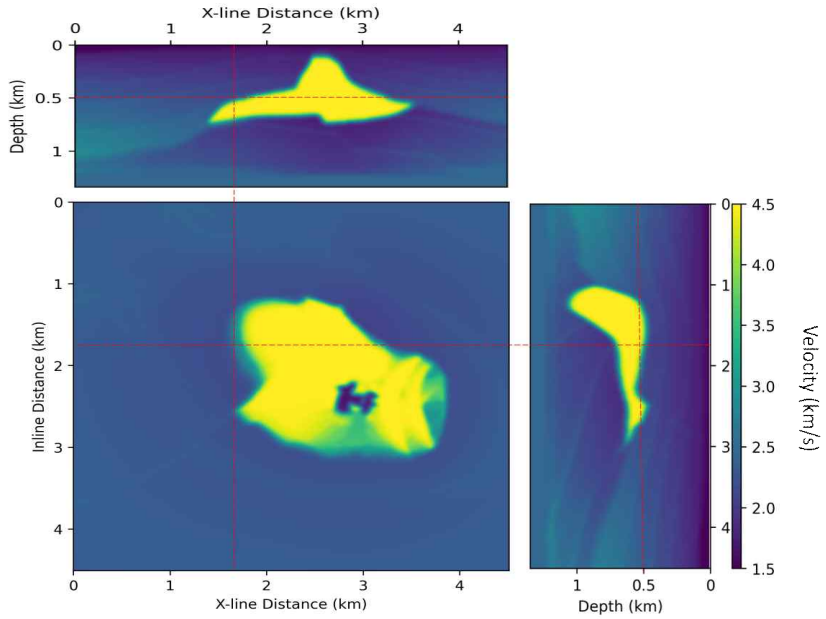
5.3. SEG/EAGE 3차원 암염돔 모델

이번 수치 예제는 하이브리드 영역에 주파수 배열 공통 영상 모음 기법을 적용해보고자 한다. 하이브리드 영역은 파동 전파를 모사하는 영역과 역시간 구조보정 영역이 다른 것을 의미하며, 본 논문에서는 파동 전파 모델링은 시간 영역에서 수행하였고 역시간 구조보정은 주파수 영역에서 수행하였다. 먼저, SEG/EAGE 3차원 암염돔 모델에서 파동 전파를 모사하기 위해 유한차분법을 이용한 시간 영역 음향파 파동방정식을 사용하였다. 파동 전파 모사의 정확도를 높이기 위해 공간에 대해서 8계 정확도, 시간에 대해서 2계 정확도를 가지는 유한차분법을 사용하였다. 또한, 공통 영상 모음 결과의 비교를 위해 심도에 따라 선형적으로 속도가 증가하는 모델(지표면에서의 속도는 1500 m/s, 최하단부에서의 속도는 3500 m/s)을 같이 사용하였다. 두 모델의 크기는 (4.51 km × 4.51 km × 1.34 km) (종방향(inline) × 횡방향(crossline) × 심도)이며, 격자의 간격은 각각 10 m로 하여 격자수는 (451 × 451 × 134)이다. 관측 최대 시간은 4초이며, 트레이스는 0.001 초 단위로 4,001 개의 정보를 가진다. 경계조건은 지표면에서는 디리클레 경계조건, 나머지 다섯 면에 대해서는 각 면으로부터 20개의 격자수를 할당하여 PML을 적용하였다. 주파수 영역 역시간 구조보정과 주파수 배열 공통 영상 모음에 사용한 주파수는 3 Hz부터 40 Hz까지 0.25 Hz 간격으로 총 149개를 사용하였다.

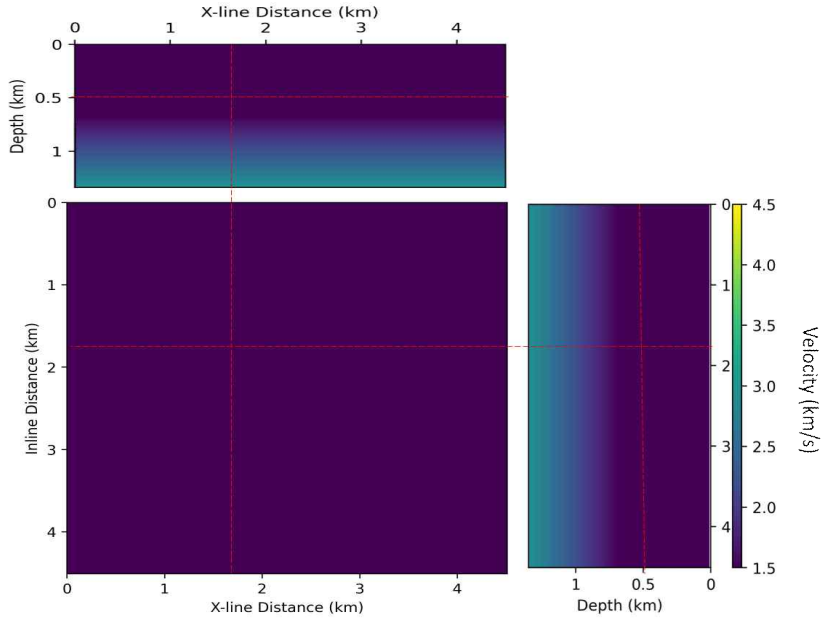
그림 5-16은 한 지점(종방향: 1.8 km, 횡방향: 1.8 km, 심도: 0.5 km)을 기준으로 3차원의 SEG/EAGE 암염돔의 속도 모델과 심도에 따라 속도가 선형적으로 증가하는 모델의 (종방향 - 횡방향), (종방향 - 심도), (횡방향 - 심도) 단면의 속도를 나타낸 것이다.

그림 5-17은 SEG/EAGE 3차원 암염돔 모델의 모델링을 위해 사용한 송신원-수진기 모식도이다. 사용한 송신원은 20 m 간격으로 총 400개를 사용하였으며, 송신원과 수진기 모두 모델의 경계면으로부터 400 m 지점부터 적용하였다. 한 송신원으로부터 전파된 파동장을 기록하는 수진기는 10 m 간격으로 각 방향으로 150개씩(1.5 km) 사용하였으며, 송신원의 위치에 따라 경계까지의 격자가 150개보다 적은 경우에는 경계까지만 해당하는 개수의 수진기를 사용하였다.

그림 5-18는 그림 5-16의 속도 모델에 평활화를 적용한 뒤 역시간 구조보정을 수행하여 얻은 영상이다. 구조보정 영상에서 암염돔 상단의 경우, 심도에 따라 선형적으로 속도가 증가하는 모델과 실제 속도를 평활화한 모델의 (종방향 - 심도), (횡방향 - 심도) 단면에서 반사면이 대체로 비슷한 수준으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 하지만, 암염돔 하단의 경우는 그림 5-18(b)에서는 전혀 나타나고 있지 않으며, 오직 그림 5-18(a)의 (종방향 - 심도), (횡방향 - 심도) 단면에서만 나타나는 것을 볼 수 있다.



(a)



(b)

그림 5-16. (종방향: 1.8 km, 횡방향: 1.8 km, 심도: 0.5km)에서의 속도 모델: (a) SEG/EAGE 3차원 암염돔 속도 모델(빨간색 점선은 해당 지점을 의미함); (b) 심도에 따라 선형적으로 증가하는 속도 모델.

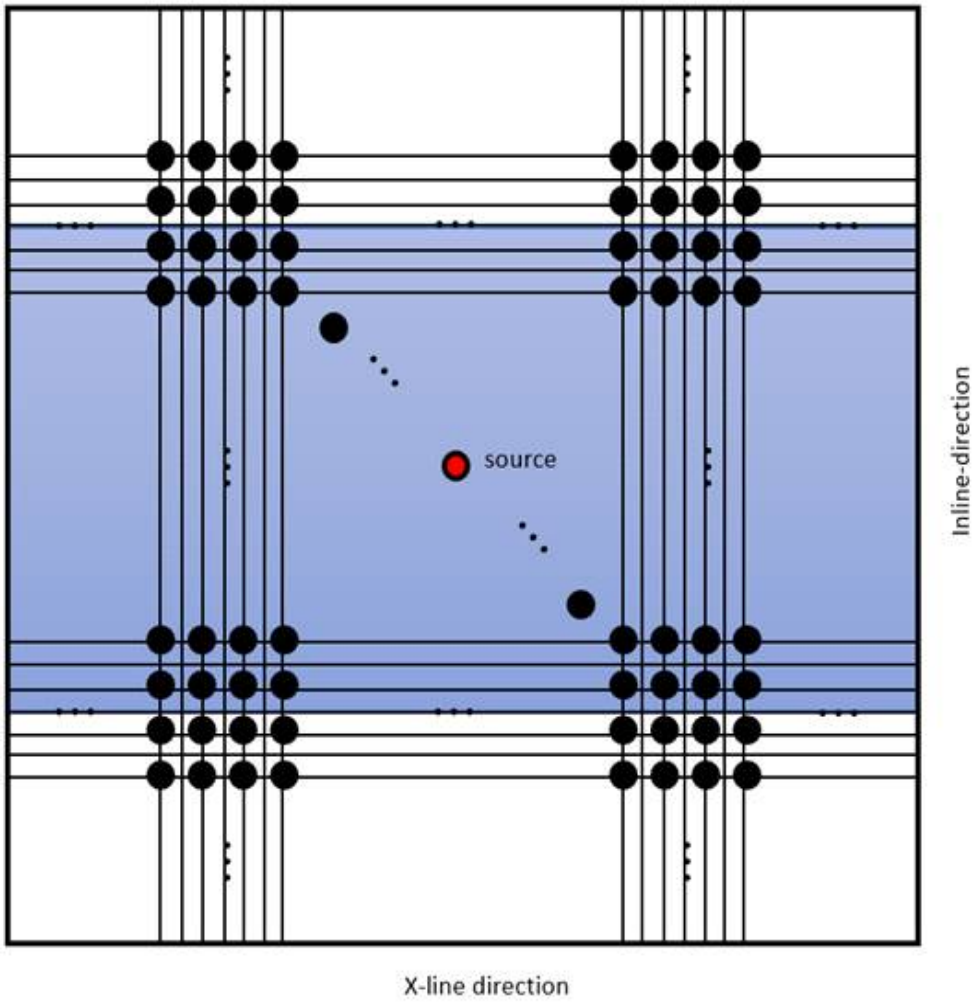
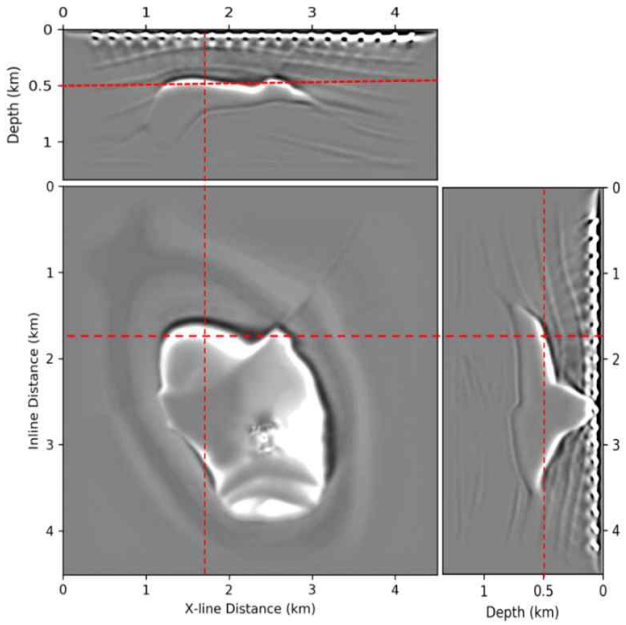
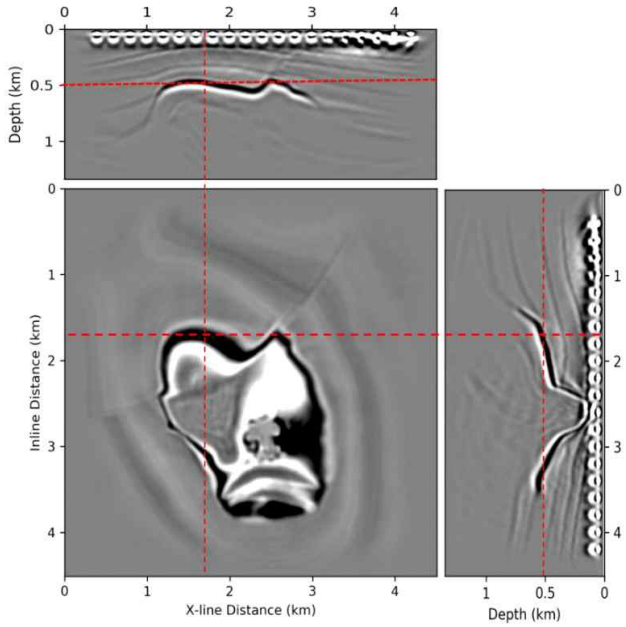


그림 5-17. SEG/EAGE 3차원 암염돔 모델에 사용한 송신원과 수진기 모식도(검은색 점은 송신원들을 의미하고 빨간색 점은 송신원을 의미하고, 음영 처리된 부분은 빨간색 점 위치의 송신원을 이용하였을 때 취득하는 수진기의 범위를 의미함).

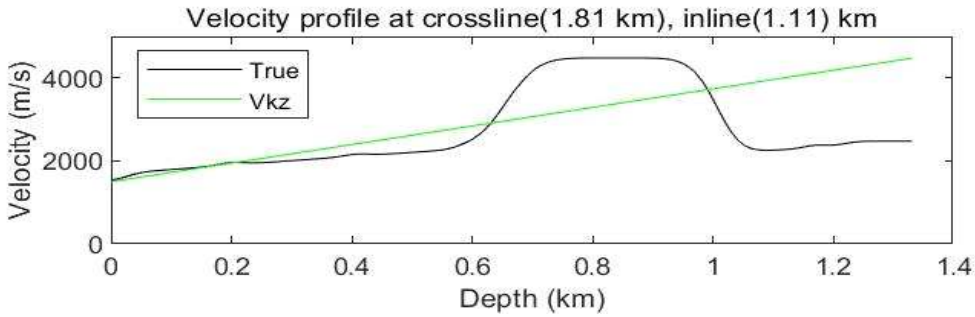


(a)

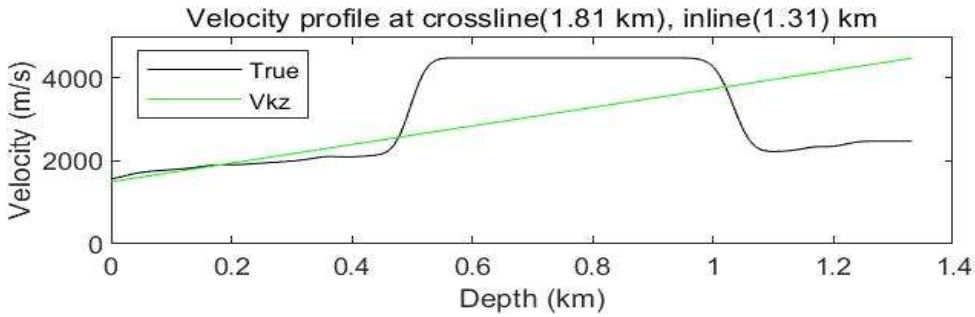


(b)

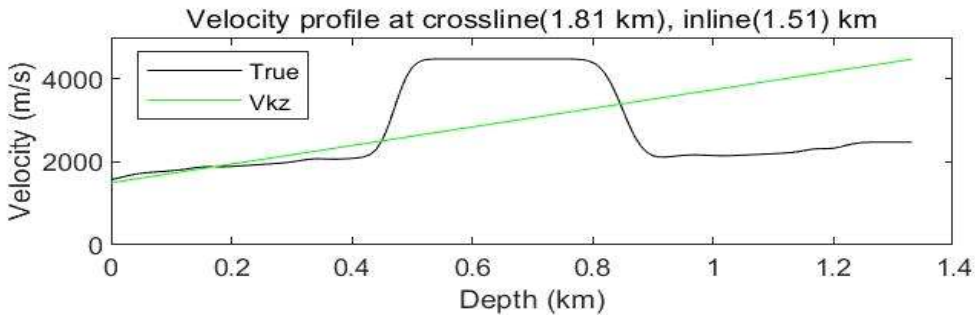
그림 5-18. 각 속도 모델로부터 획득한 역시간 구조보정 영상: (a) 평활화한 실제 모델; (b) 심도에 따라 선형적으로 속도를 증가시킨 모델.



(a)

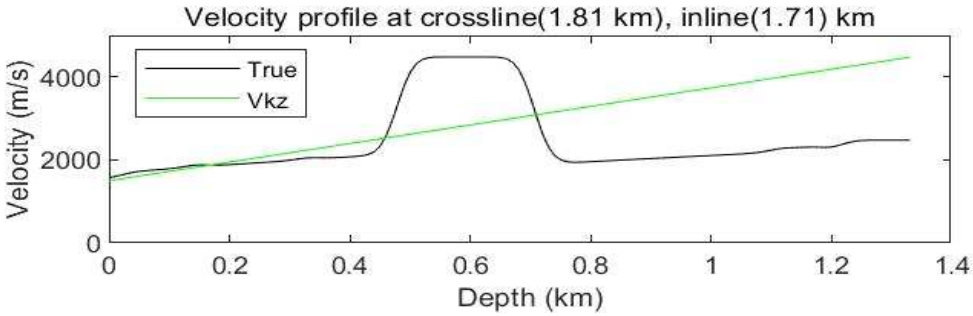


(b)

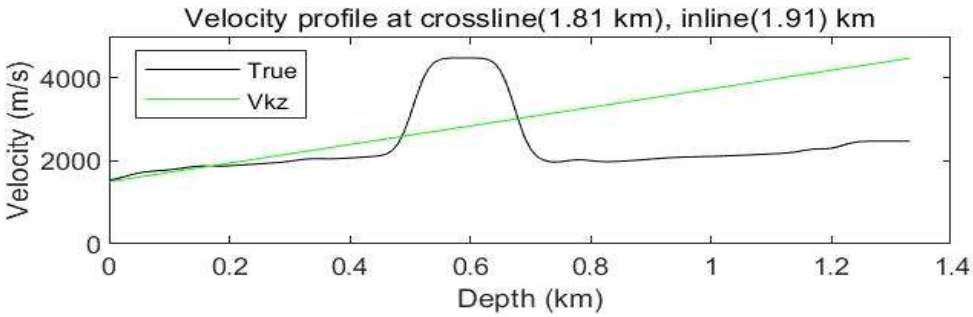


(c)

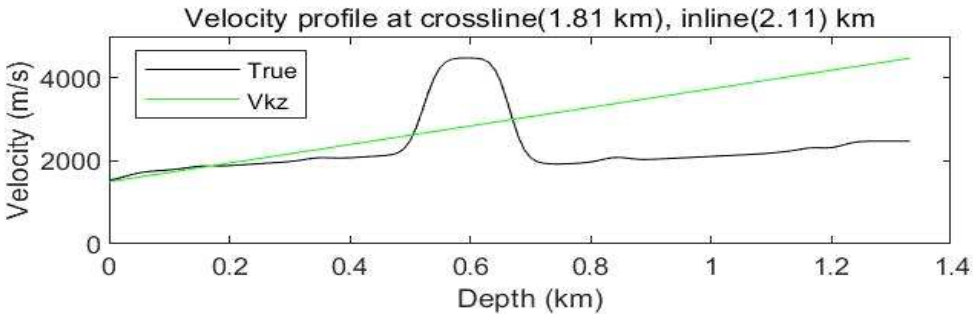
그림 5-19. 실제 속도 모델(True)과 심도에 따라 선형적으로 증가하는 속도 모델(Vkz)의 속도분포(횡방향: 1.81 km 지점): 종방향 (a) 1.11 km; (b) 1.31 km; (c) 1.51 km; (d) 1.71 km; (e) 1.91 km; (f) 2.11 km; (g) 2.31 km; (h) 2.51 km; (i) 2.71 km; (j) 2.91 km.



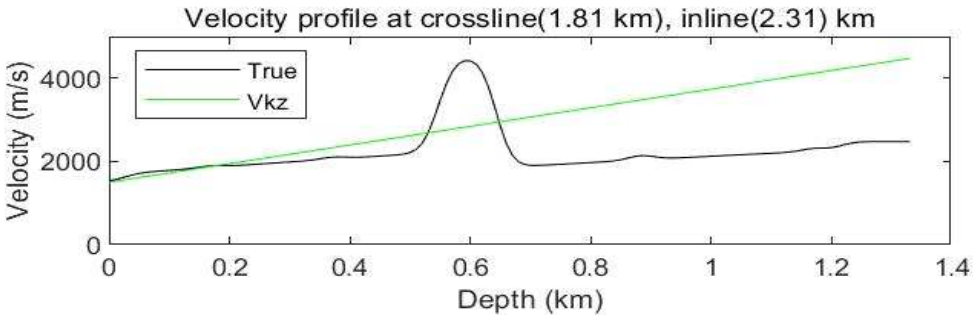
(d)



(e)

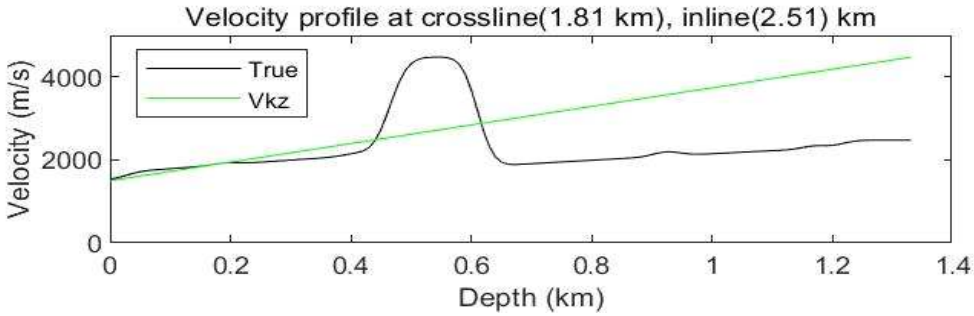


(f)

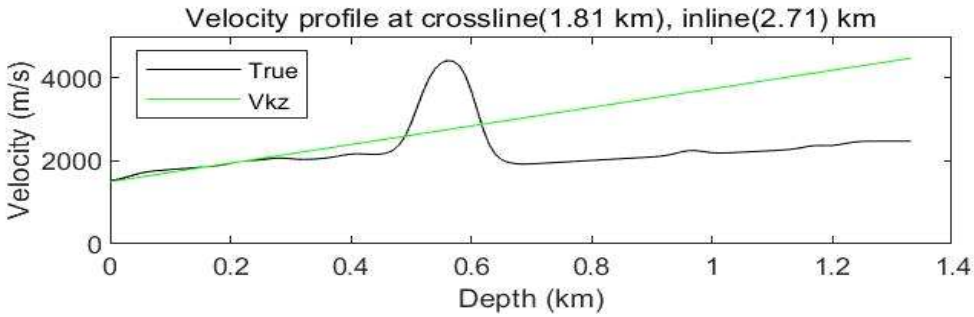


(g)

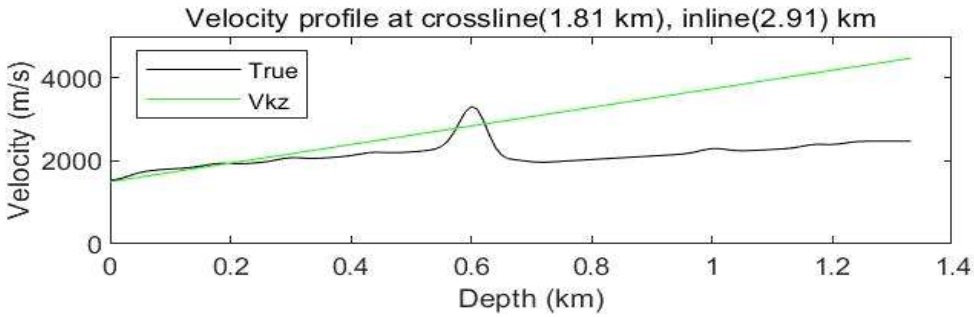
그림 5-19. (계속)


Velocity profile at crossline(1.81 km), inline(2.51) km
True
Vkz
Velocity (m/s)
Depth (km)

(h)


Velocity profile at crossline(1.81 km), inline(2.71) km
True
Vkz
Velocity (m/s)
Depth (km)

(i)

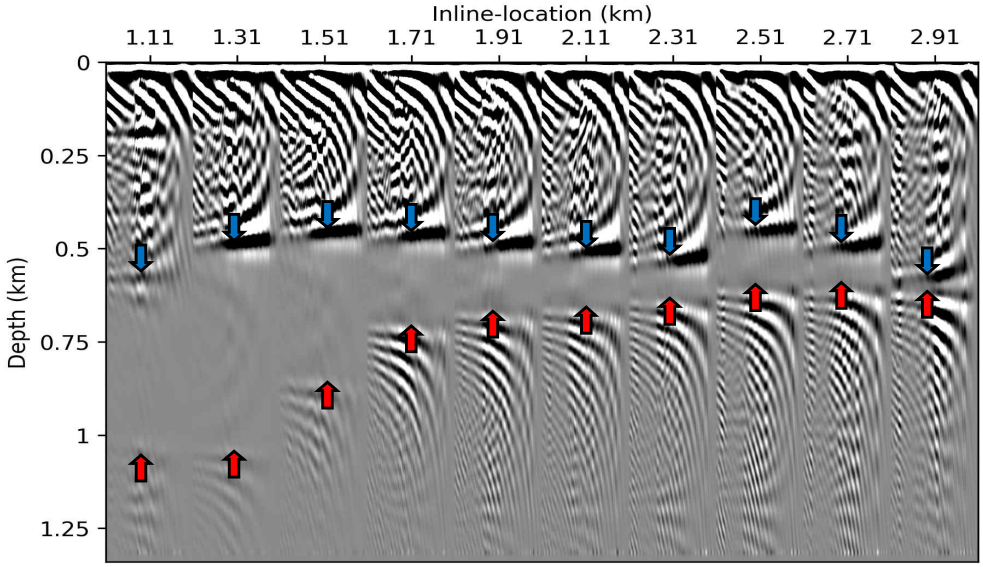

Velocity profile at crossline(1.81 km), inline(2.91) km
True
Vkz
Velocity (m/s)
Depth (km)

(j)

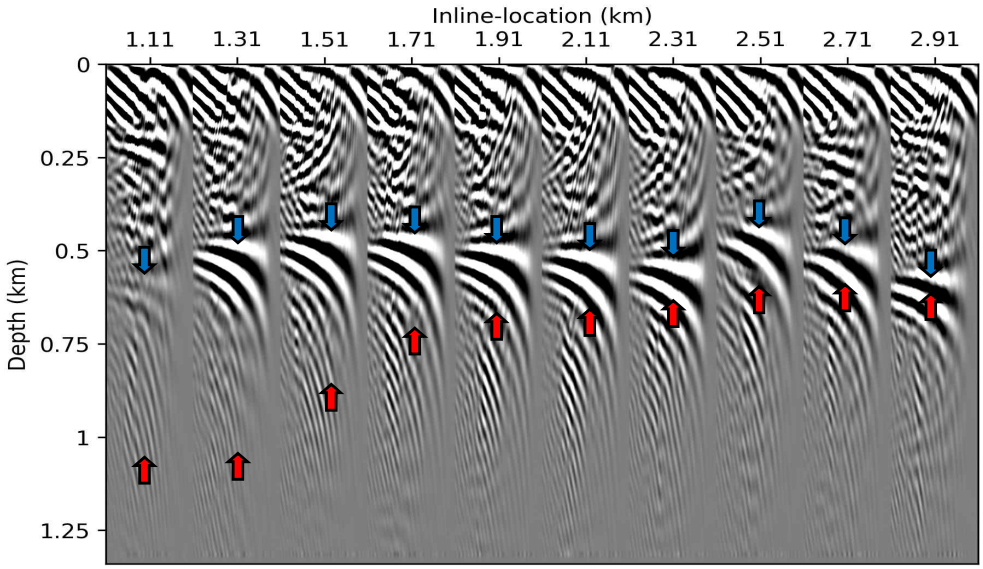
그림 5-19. (계속)

그림 5-19는 주파수 배열 공통 영상 모음을 추출한 한 지점에서의 속도 분포를 나타낸 것이다. 각각의 지점에서 속도가 높아졌다 낮아지는 구간이 존재하며, 이 구간이 암염돔을 의미한다.

그림 5-20은 그림 5-17의 구조보정 영상으로부터 획득한 횡방향은 1.81 km지점으로 고정하고, 종방향 기준 200 m 간격으로 10개의 주파수 배열 공통 영상 모음을 이어 붙인 것이다. 공통 영상 모음을 추출할 때, 반사면을 잘 나타내기 위해 z방향 2차 미분값을 적용하였다. 파란 화살표는 실제 암염돔의 상단 심도를 의미하고, 빨간 화살표는 실제 암염돔의 하단 심도를 의미한다. 그림 5-20(a)에서는 암염돔의 상단 부분과 하단 부분의 심도에 일치하게 집중된 에너지가 나타난다. 그림 5-20(b)에서는 암염돔의 상단 부분과 유사한 심도에서 집중된 에너지가 나타나는 것을 볼 수 있다. 그림 5-19를 통해 모든 지점에서 실제 암염돔이 존재하는 심도까지의 속도는 심도에 따라 속도가 선형적으로 증가하는 모델의 속도와 유사하기 때문에 이러한 결과가 나타난 것이며, 암염돔 내부에서의 속도 차이가 실제와 크기 때문에 암염돔의 하단 부분은 나타나지 않는다.



(a)



(b)

그림 5-20. 횡방향 1.81 km 지점에서 종방향 기준 200 m 간격으로 10개의 주파수 배열 공통 영상 모음을 이어붙인 영상(파란 화살표: 암염돔 상단의 실제 심도, 빨간 화살표: 암염돔 하단의 실제 심도): (a) 평활화한 실제 속도 모델; (b) 심도에 따라 선형적으로 속도를 증가시킨 모델.

3차원 모델인 SEG/EAGE 암염돔 모델을 통해 시간 영역 모델링한 자료로부터 주파수 배열 공통 영상 모음을 성공적으로 추출하였다. 또한, 속도 모델이 실제 속도 모델과 일치하는 경우에 규명하기 어려운 구조인 암염돔의 하단 심도에서도 주파수 배열 공통 영상 모음 상에서 수평하게 나타나는 결과를 보임으로써 신속하게 추출할 수 있는 주파수 배열 공통 영상 모음의 정확도와 실용성을 입증하였다.

6. 현장 자료 적용 예제

이 장에서는 가봉 분지에서 획득한 현장 자료에 주파수 배열 공통 영상 모음을 추출하고 그 결과를 오프셋 영역 공통 영상 모음과 각 영역 공통 영상 모음과 함께 도시하고 해석하였다. 현장 자료는 실제 지하 구조가 가지는 속도 모델을 알 수 없어 라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산을 통해 지하 구조 속도를 추정하였다. 공통 영상 모음을 추출하기 위해 세 가지의 속도 모델을 사용하였다.

① 역산을 통해 추정한 속도 모델
② 역산을 통해 추정한 모델에서 물 층을 제외한 나머지 영역의 속도를 20% 낮춘 모델
③ 모델 전체 영역에서 균질한 속도를 가지는 균질 모델

첫 번째 모델은 역산을 통해 추정한 모델의 정확도를 검증하는 목적으로 사용하였고, 두 번째 모델은 지하 구조의 실제 모델과 차이가 큰 속도 모델인 경우의 공통 영상 모음의 성능을 파악하고자 하였으며, 세 번째 모델은 구조는 역산을 통해 추정한 속도 모델의 분포와 비슷하지만, 속도가 다른 경우의 공통 영상 모음의 성능을 파악하고자 사용하였다.

6.1. 가봉 분지 현장 자료

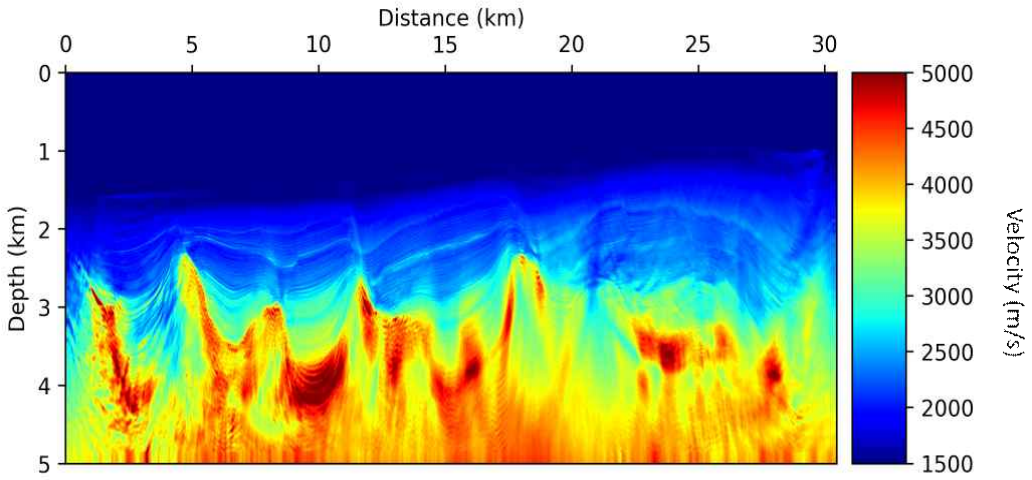
가봉 지역의 2차원 현장 자료에 주파수 배열 공통 영상 모음 기법을 적용하였다. 먼저 관측 파동장을 만들기 위해, 파동 전파 모델링은 다층구조 모델과 같은 유한요소법을 이용한 주파수 영역 2차원 음향파 파동방정식을 사용하였다. 모델의 크기는 (30.475 km × 5 km)이고, 간격은 12.5 m로 모델의 격자수는 (2438 × 400)이다. 파동 전파 모델링 및 주파수 영역 역시간 구조보정과 공통 영상 모음에 사용한 주파수는 5 Hz부터 30 Hz까지 0.25 Hz 간격으로 총 101개를 사용하였다. 송신원은 734개, 수진기는 804개이며, 간격은 각각 37.5 m, 12.5 m이다. 오프셋 영역 공통 영상 모음을 추출하기 위해 100 m 간격으로 100 m ~ 5,000 m까지 총 49개의 오프셋 그룹을 사용하였고, 각 영역 공통 영상 모음을 획득하기 위해서 101개의 이동된 영상화 조건 값을 구한 뒤, 0°부터 60°까지 0.1° 간격으로 601개의 각 격자를 사용하였다.

속도 모델은 세 가지를 사용하였다. 첫 번째 모델은 라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산을 통해 추정한 속도 모델이다. 인공 합성 모델과는 다르게 현장에서 취득한 자료는 지하 구조의 실제 속도를 알 수 없어 다양한 방법으로 어떠한 초기 모델로부터 탐사에서 취득한 자료의 정보를 이용하여 지하 구조의 속도 모델을 추정하게 되는데, 본 논문에서는 라플라스-푸리에 영역 파형 역산 알고리즘을 사용하였다. 이렇게 추정한 속도 모델이 실제 지하 구조가 가지는 속도 모델과 일치하는지는 알 수 없으므로 공통 영상 모음을 추출하여 이를 검증할 수 있다. 즉, 추정한

속도 모델의 검증 과정에 주파수 배열 공통 영상 모음 기법이 적합한지를 알아보기 위한 예제다. 두 번째 모델인 모델 전체 영역에서 속도가 1500 m/s로 균질한 모델과 세 번째 모델인 역산을 통해 추정한 속도 모델로부터 물 층을 제외하고 나머지 영역에 대해 속도를 20 % 낮춘 모델을 통해서는 공통 영상 모음의 민감도를 파악해보고자 한다.

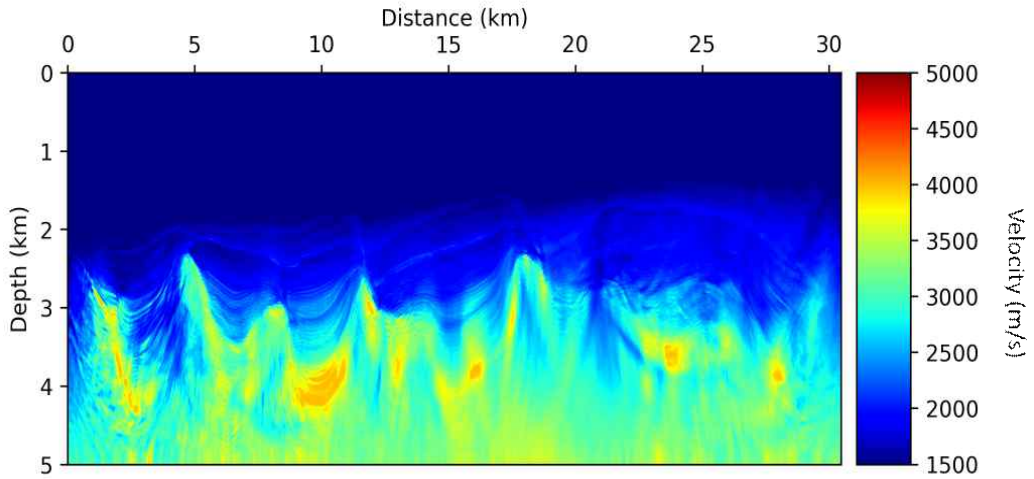
그림 6-1은 세 가지 속도 모델을 도시한 것이다. 그림 6-1(a)는 최저속도는 물 층에서의 속도인 1,500 m/s이고 최고속도는 5,000 m/s이다. 그림 6-1(b)에서는 최저속도는 물 층에서의 속도 1,500 m/s이고, 최고속도는 4,000 m/s이다.

그림 6-2는 그림 6-1의 속도 모델로부터 역시간 구조보정을 수행하여 획득한 영상이다. 역시간 구조보정 영상을 보정하기 위해 z방향 2차 미분 값, 자동 이득 제어를 적용하였다. 네 개의 빨간색 선은 특이한 구조가 있거나 반사면의 심도가 다른 네 지점을 의미하며, 이 지점에서 오프셋 영역 공통 영상 모음, 각 영역 공통 영상 모음, 주파수 배열 공통 영상 모음을 추출하였으며, 정규화, z방향 2차 미분 값, 자동 이득 제어를 적용하여 도시하였다. 그림 6-3은 세 모델의 공통 영상 모음을 추출한 지점의 속도분포를 나타낸 것이며, 5 km 에서 23 km 까지 2 km 간격으로 추출하였다.

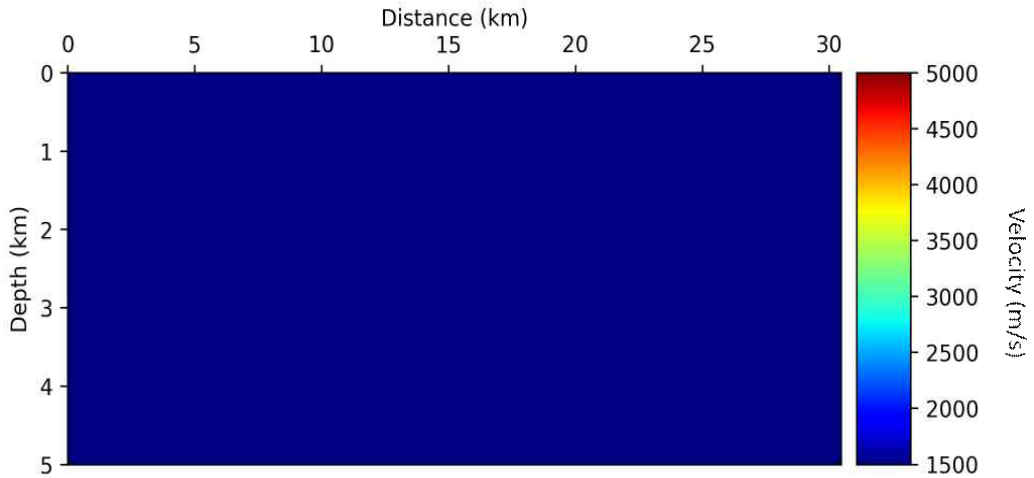


(a)

그림 6-1. 현장 자료 구조보정에 적용한 속도 모델들: (a) 라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산을 통한 추정 속도 모델; (b) (a)에서 물 층을 제외한 나머지 영역의 속도를 20 % 낮춘 모델; (c) 균질 모델.

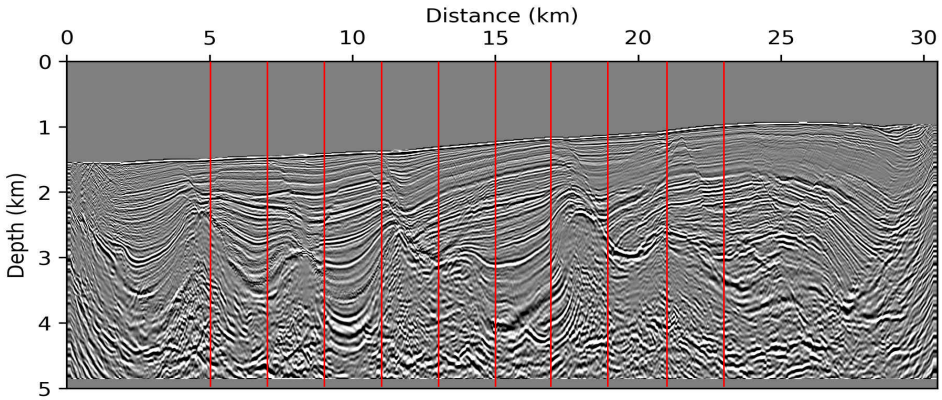

Distance (km)
0
5
10
15
20
25
30
Depth (km)
0
1
2
3
4
5
Velocity (m/s)
5000
4500
4000
3500
3000
2500
2000
1500

(b)


Distance (km)
0
5
10
15
20
25
30
Depth (km)
0
1
2
3
4
5
Velocity (m/s)
5000
4500
4000
3500
3000
2500
2000
1500

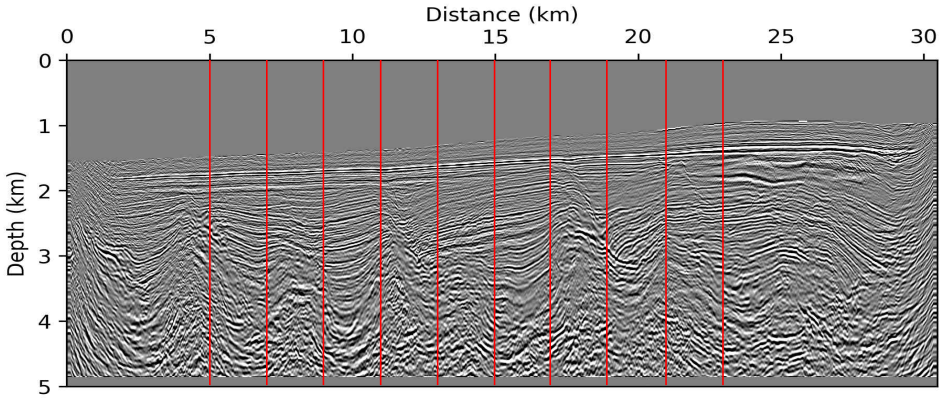
(c)

그림 6-1. (계속)

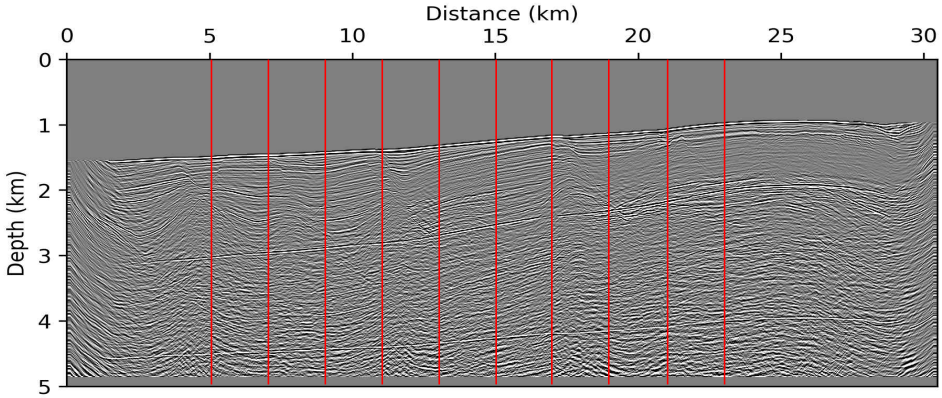


(a)

그림 6-2. 그림 6-1의 속도 모델을 이용하여 구한 역시간 구조보정 영상(빨간색 선은 공통 영상 모음을 추출한 지점을 의미함): (a) 라플라스-푸리에 영역 완전 파형 역산 알고리즘으로 추정한 속도 모델; (b) (a)에서 물 층을 제외한 나머지 영역의 속도를 20 % 낮춘 모델; (c) 균질 모델.

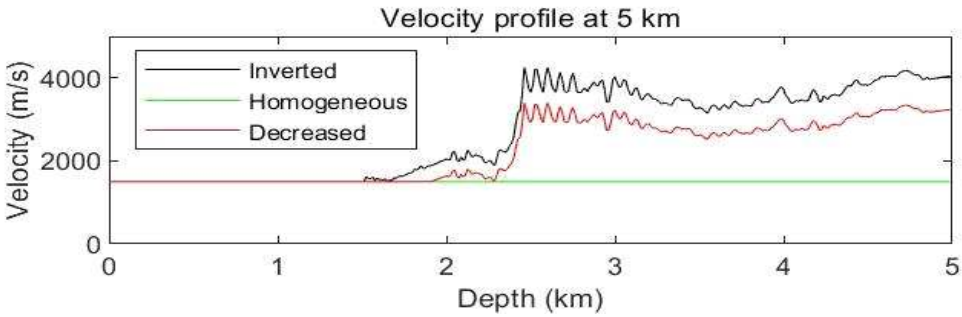

Distance (km)
0
5
10
15
20
25
30
Depth (km)
0
1
2
3
4
5

(b)

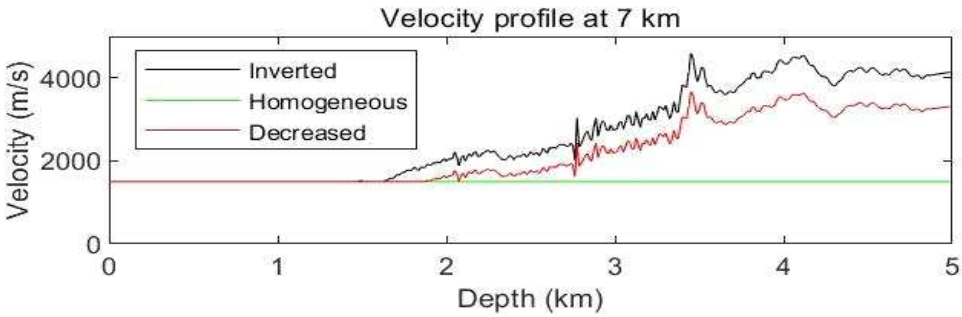

Distance (km)
0
5
10
15
20
25
30
Depth (km)
0
1
2
3
4
5

(c)

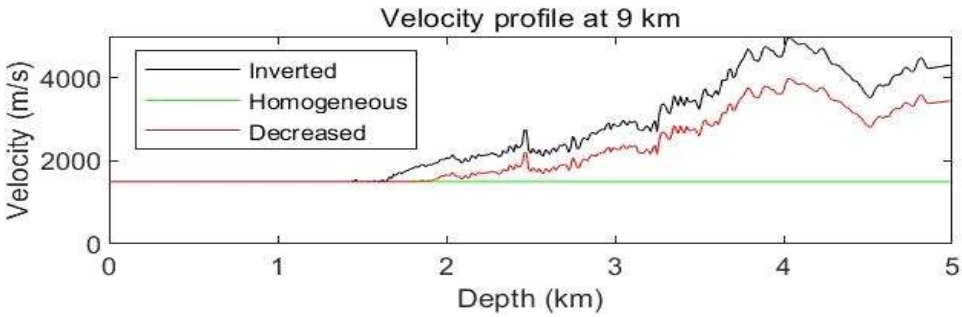
그림 6-2. (계속)



(a)

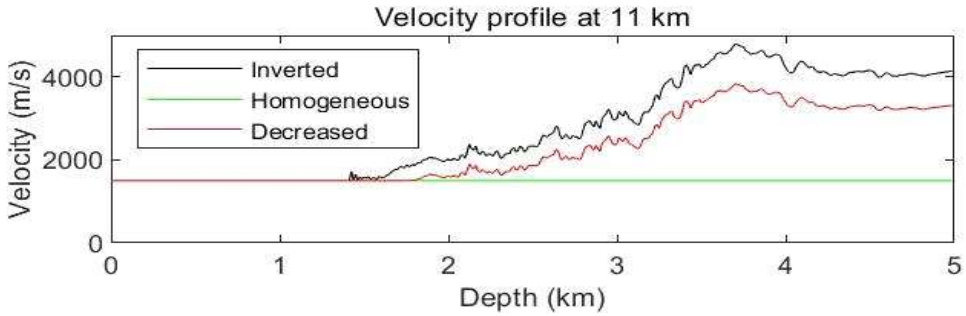


(b)

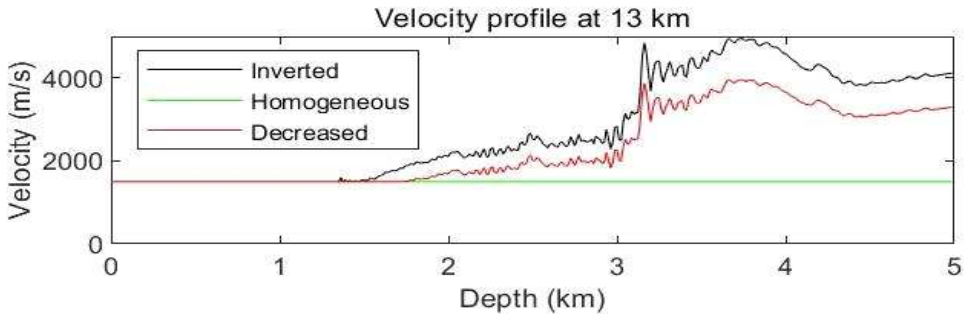


(c)

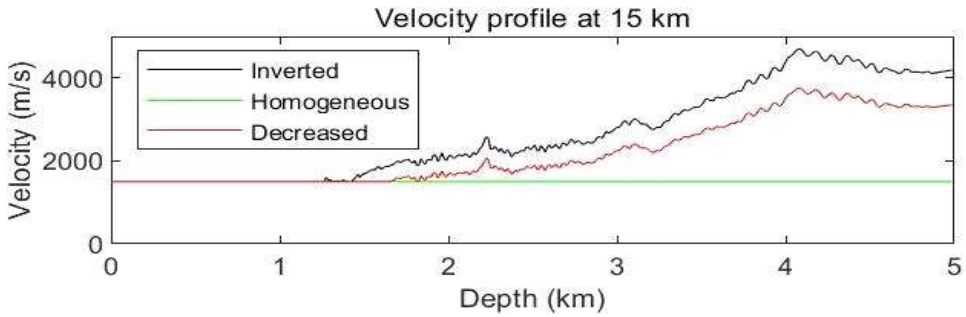
그림 6-3. 그림 6-1의 세 모델에서 공통 영상 모음을 추출한 지점의 속도분포: (a) 5 km; (b) 7 km; (c) 9 km; (d) 11 km; (e) 13 km; (f) 15 km; (g) 17 km; (h) 19 km; (i) 21 km; (j) 23 km.


Velocity profile at 11 km
Inverted
Homogeneous
Decreased
Velocity (m/s)
Depth (km)

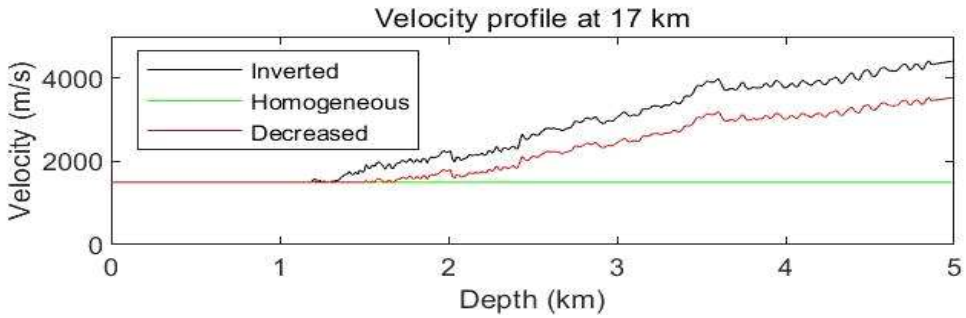
(d)


Velocity profile at 13 km
Inverted
Homogeneous
Decreased
Velocity (m/s)
Depth (km)

(e)

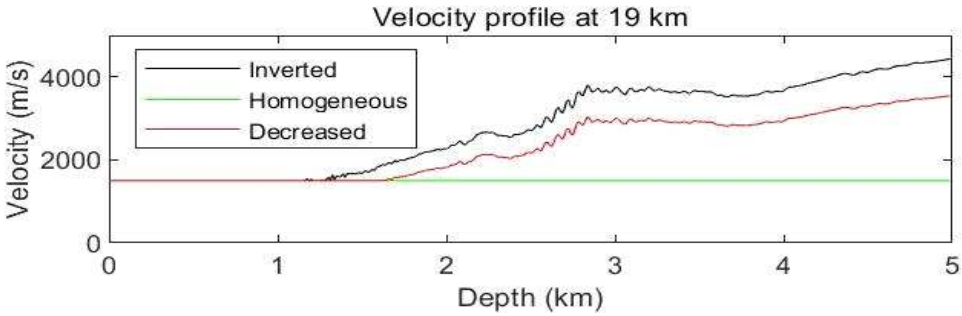

Velocity profile at 15 km
Inverted
Homogeneous
Decreased
Velocity (m/s)
Depth (km)

(f)

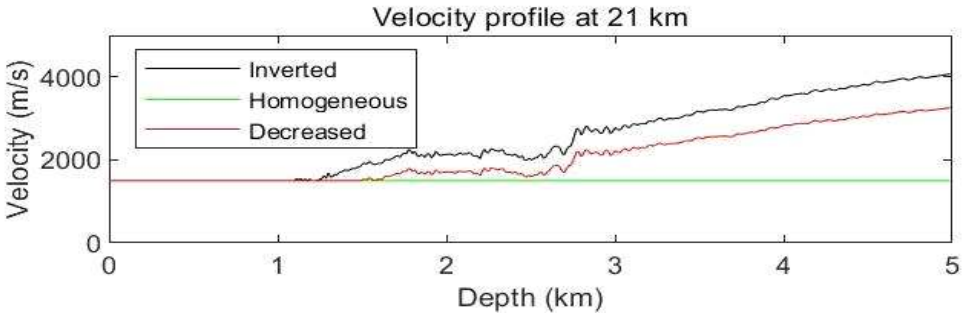

Velocity profile at 17 km
Inverted
Homogeneous
Decreased
Velocity (m/s)
Depth (km)

(g)

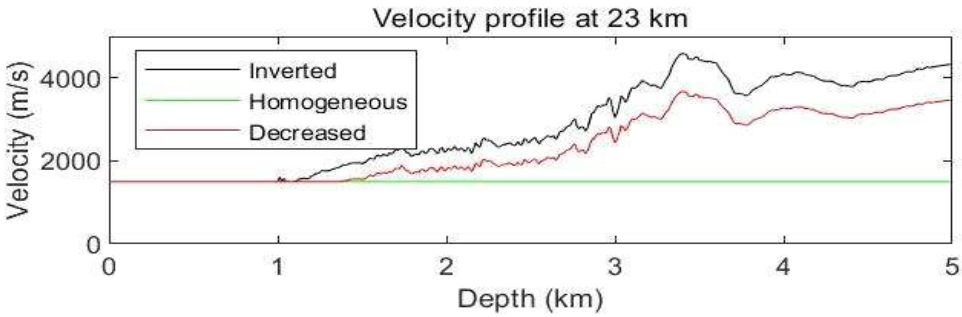
그림 6-3. (계속)


Velocity profile at 19 km
Inverted
Homogeneous
Decreased
Velocity (m/s)
Depth (km)

(h)


Velocity profile at 21 km
Inverted
Homogeneous
Decreased
Velocity (m/s)
Depth (km)

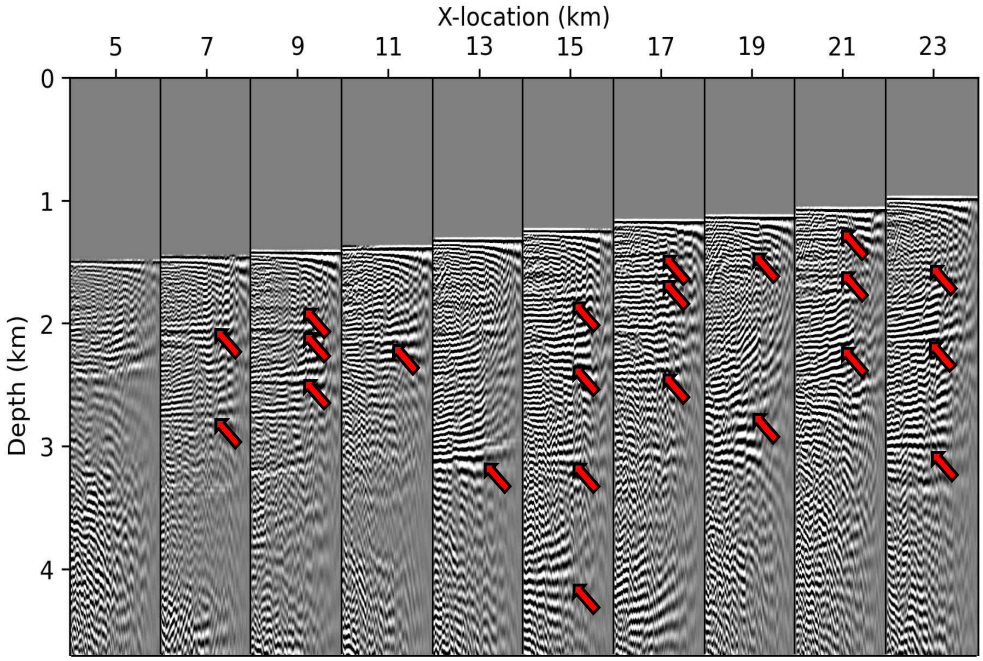
(i)


Velocity profile at 23 km
Inverted
Homogeneous
Decreased
Velocity (m/s)
Depth (km)

(j)

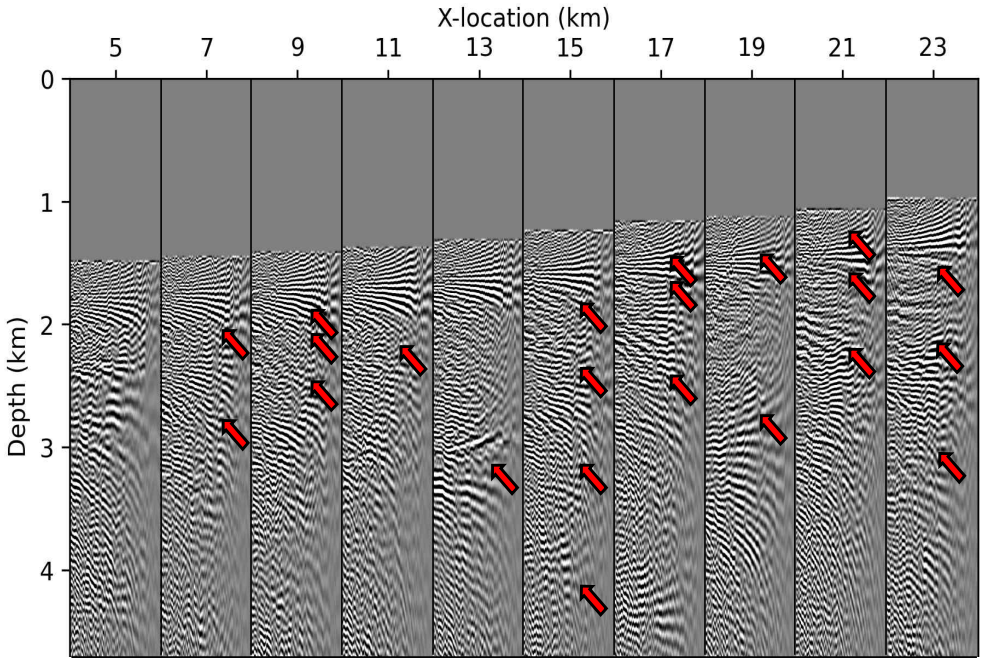
그림 6-3. (계속)

그림 6-4는 그림 6-2의 세 모델에서 2 km 간격으로 5 km 지점부터 23 km 지점까지 주파수 배열 공통 영상 모음을 추출한 것이다. 그림 6-4(a)에서는 여러 심도에서 집중된 에너지가 평평하게 나타난다. 자동 이득 제어를 적용하였기 때문에, 심도가 깊은 부분에서 에너지가 약한 것이 자동으로 보정되었지만, 주파수가 낮은 부분(각 지점의 오른쪽에 해당)은 해석이 어려워 일정 주파수 이상부터 평평하게 나타난 부분을 화살표로 표시하였다. 수평하게 나오는 심도는 대체로 0 ~ 3 km에 해당하는 심도이며, 깊은 심도에서는 수평하게 나오는 심도가 거의 없는 것으로 보아 역산을 통해 추정한 속도 모델이 대략 3 km 정도까지만 실제 속도와 유사한 것으로 평가된다. 실제 지하 구조의 속도를 알 수 없어 역산을 통해 추정한 속도 모델로부터 일부로 속도를 낮춘 모델을 생성하여 주파수 배열 공통 영상 모음을 추출하였으며 그 결과는 그림 6-4(b)와 같다. 그림 6-4(a)와 비교하였을 때, 모든 지점에서 해저면 기준 0.5 km 정도 깊은 부분에서 강한 에너지의 집중이 수평하게 나타난 것을 제외하면 그 외의 심도에서는 수평하게 나타난 부분이 없다. 그림 6-4(b)에서 수평하게 나타난 심도에서 그림 6-4(a)에서는 구조보정에 사용된 속도가 실제 속도보다 높을 때 나타나는 smiling 현상이 나타나는 것을 볼 수 있다. 즉, 해다 심도에서는 그림 6-4(b)에 해당하는 20 % 낮춘 속도가 실제 속도에 맞는 것으로 추측할 수 있다. 마지막 그림 6-4(c)는 역산에 사용된 초기 모델인 균질 모델에서 추출한 주파수 배열 공통 영상 모음이며, 실제 속도와 크게 다른 속도 모델을 구조보정에 사용하였기 때문에 해석이 가능한 부분이 전혀 없다.

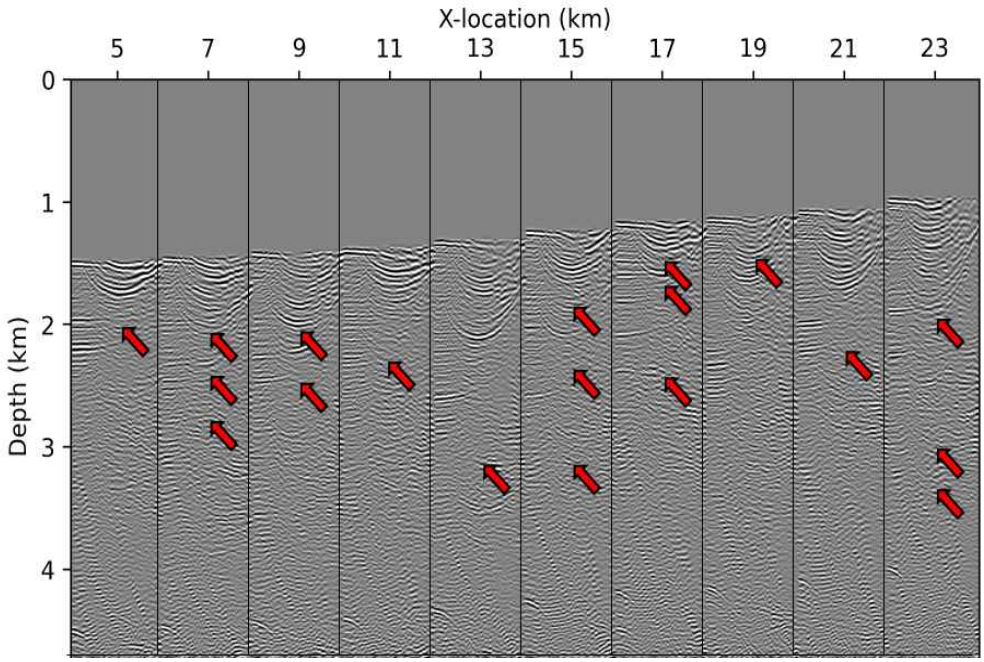


(a)

그림 6-4. 그림 6-2의 모델에서 5 km에서 23 km 까지 2 km 간격으로 추출한 주파수 배열 공통 영상 모음 10개를 이어 붙인 영상(빨간색 화살표는 역산을 통해 추정한 속도 모델에서 추출한 주파수 배열 공통 영상 모음에서 수평하게 나타난 심도를 의미함): (a) 역산을 통해 추정한 속도 모델; (b) (a)에서 물 층을 제외한 나머지 영역의 속도를 20% 낮춘 모델; (c) 균질 모델.


X-location (km)
5
7
9
11
13
15
17
19
21
23
0
1
2
3
4
Depth (km)

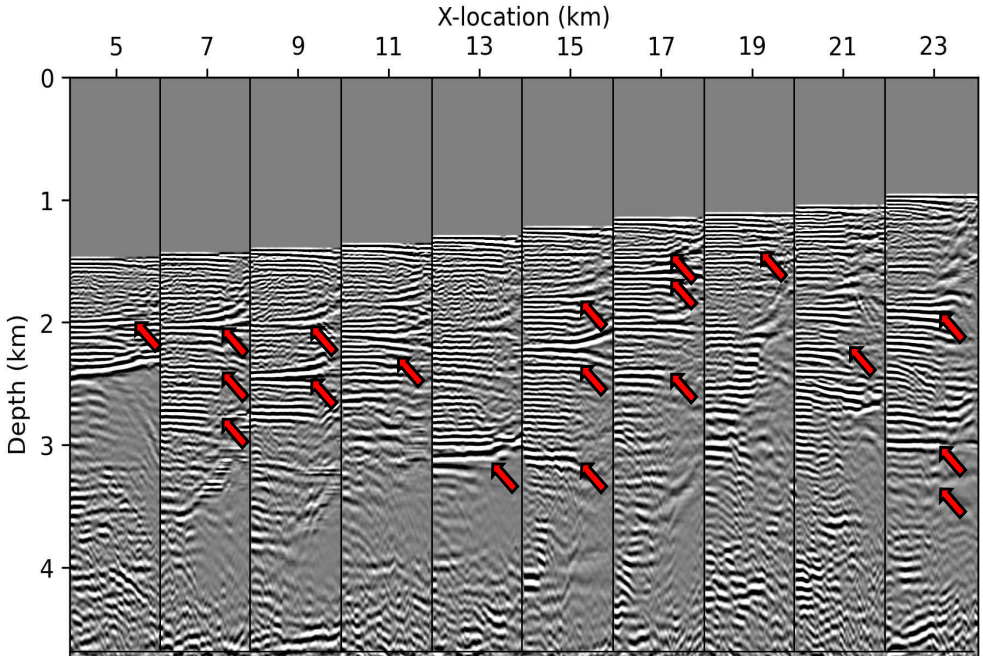
(b)


X-location (km)
5
7
9
11
13
15
17
19
21
23
0
1
2
3
4
Depth (km)

(c)

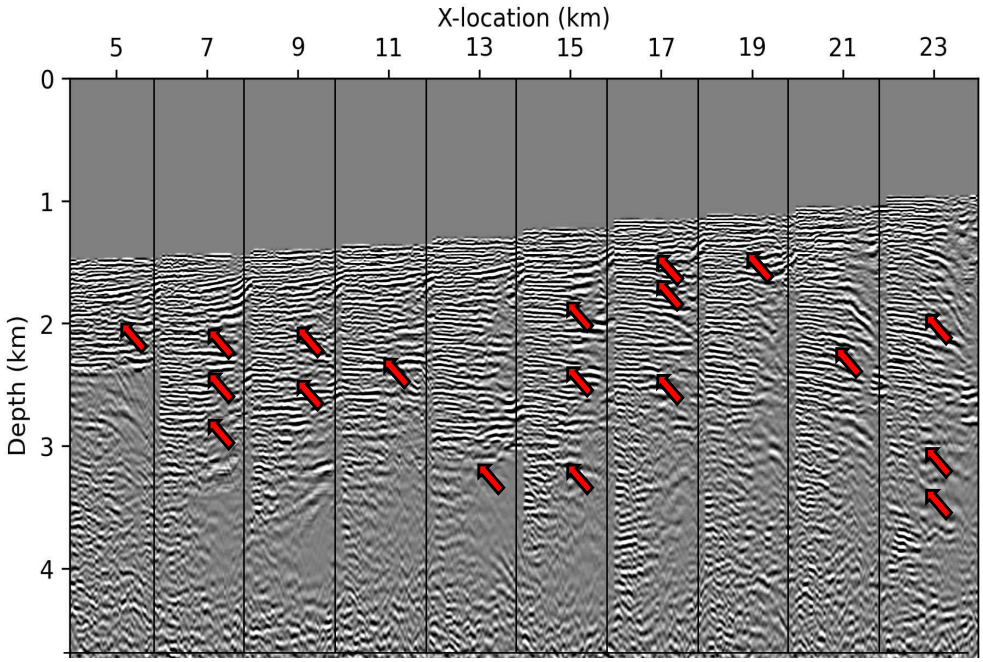
그림 6-4. (계속)

그림 6-5는 그림 6-4와 같은 방식으로 오프셋 영역 공통 영상 모음을 추출한 것이다. 그림 6-5(a)와 그림 6-4(a)에서 공통으로 수평하게 나타나는 심도(7 km 지점의 심도 2 km와 2.8 km, 9 km 지점의 심도 2.1 km와 2.5 km, 11 km 지점의 심도 2.3 km, 13 km 지점의 심도 3.2 km, 15 km 지점의 심도 1.9 km, 2.5 km, 3.2 km, 17 km 지점의 심도 1.8 km, 1.9 km, 2.6 km, 19 km 지점의 심도 1.8 km, 21 km 지점의 심도 2.4 km, 23 km 지점의 심도 2.2 km)가 많다. 차이점은 깊은 심도에서 수평한 부분이 없는 것이다. 그림 6-5(b)에서는 화살표와 일치하는 부분의 심도(11 km 지점의 심도 2.3 km, 17 km 지점의 심도 1.8 km)가 일부 있으나, 주파수 배열 공통 영상 모음의 결과와 같이 역산으로 추정한 속도 모델에 비해 에너지의 집중된 정도가 약하며 수평한 부분이 거의 나타나지 않는다. 이를 통해, 역산으로 추정한 속도 모델이 심도 3 km 이내에서는 실제 지하 구조와 유사한 속도 모델을 가지는 것을 알 수 있다. 그림 6-5(c)는 그림 6-4(c)와 같이 속도 모델이 실제 지하 구조가 가지는 속도 모델과 크게 달라 에너지의 집중이 이루어지지 않아 전반적으로 흐리게 나타나고 수평하게 나타난 부분이 없다.

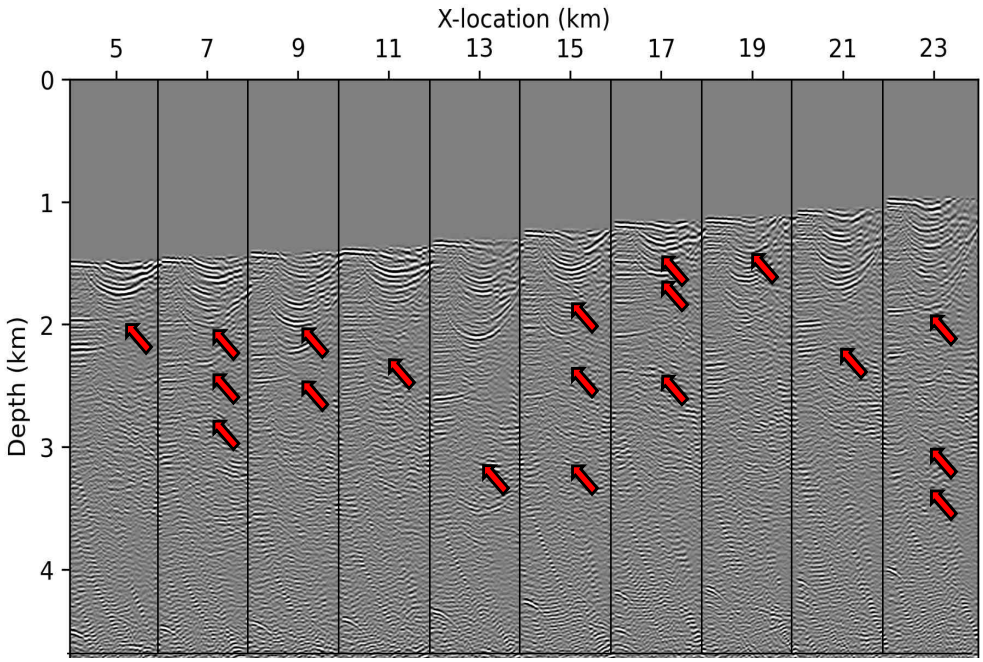


(a)

그림 6-5. 그림 6-2의 모델에서 5 km에서 23 km 까지 2 km 간격으로 추출한 오프셋 영역 공통 영상 모음 10개를 이어 붙인 영상(빨간색 화살표는 역산을 통해 추정한 속도 모델에서 추출한 오프셋 영역 공통 영상 모음에서 수평하게 나타난 심도를 의미함): (a) 역산을 통해 추정한 속도 모델; (b) (a)에서 물 층을 제외한 나머지 영역의 속도를 20% 낮춘 모델; (c) 균질 모델.


X-location (km)
5
7
9
11
13
15
17
19
21
23
0
1
2
3
4
Depth (km)

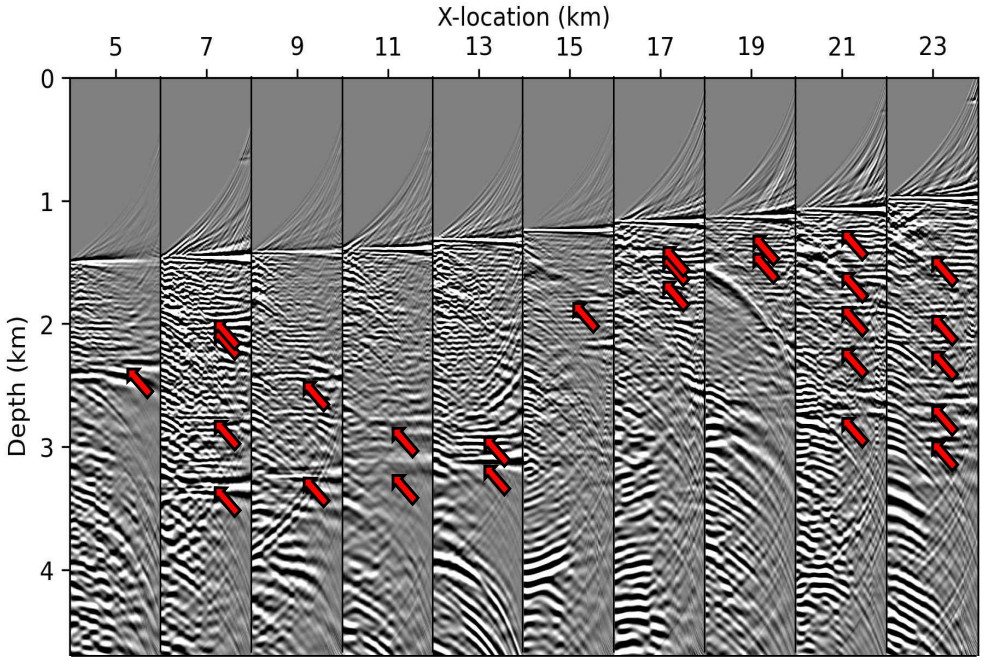
(b)


X-location (km)
5
7
9
11
13
15
17
19
21
23
0
1
2
3
4
Depth (km)

(c)

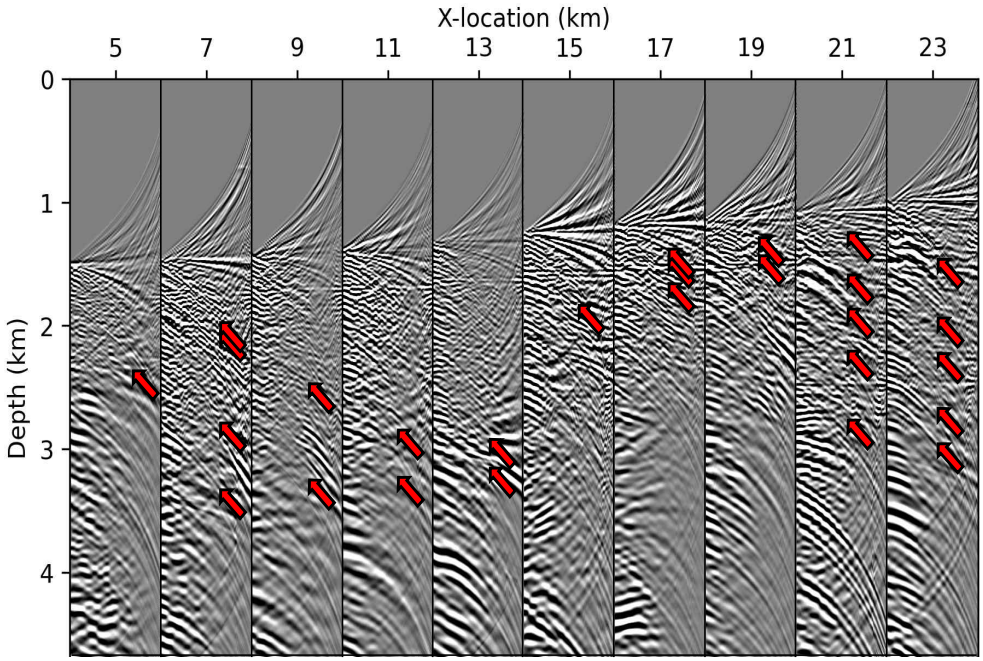
그림 6-5. (계속)

그림 6-6은 각 영역 공통 영상 모음을 추출한 결과이다. 빨간색 화살표로 표시된 것은 역산으로 추정한 속도 모델에서 추출한 각 영역 공통 영상 모음 상에 수평하게 나타난 부분의 심도를 의미한다. 그림 6-6에서 많은 심도에서 강하게 나타나는 frowning 현상과 해저면 위쪽의 smiling 현상을 보이는 것은 다중반사파로 인한 잡음이다. 그림 6-6(a)에 표시된 심도와 그림 6-4(a)에 표시된 심도가 일치하는 부분(7 km 지점의 심도 2.8 km, 9 km 지점의 심도 2.5 km, 13 km 지점의 심도 3.1 km, 15 km 지점의 심도 1.8 km, 3.1 km, 17 km 지점의 심도 1.5 km, 1.7 km, 19 km 지점의 심도 1.8 km, 21 km 지점의 심도 1.7 km, 1.9 km, 2.4 km, 23 km 지점의 심도 1.8 km, 2.3 km, 3.2 km)이 대부분이다. 그림 6-6(b)와 그림 6-6(a)를 비교하면, 화살표로 표시된 심도에서 수평하게 나타나는 곳이 없어 강제로 속도를 낮춘 모델이 전 심도에서 잘못된 것을 의미한다. 이러한 결과는 주파수 배열 공통 영상 모음과 오프셋 영역 공통 영상 모음의 결과와 차이가 있다. 그림 6-6(c)는 실제 지하 구조가 갖는 속도 모델이 구조보정에 사용한 단순하며 속도가 낮은 모델과 크게 다르기 때문에 에너지의 집중된 강도가 낮으며 수평하게 나타나는 부분 없이 잡음으로 인한 frowning 현상과 smiling 현상을 보이는 에너지만 보인다.

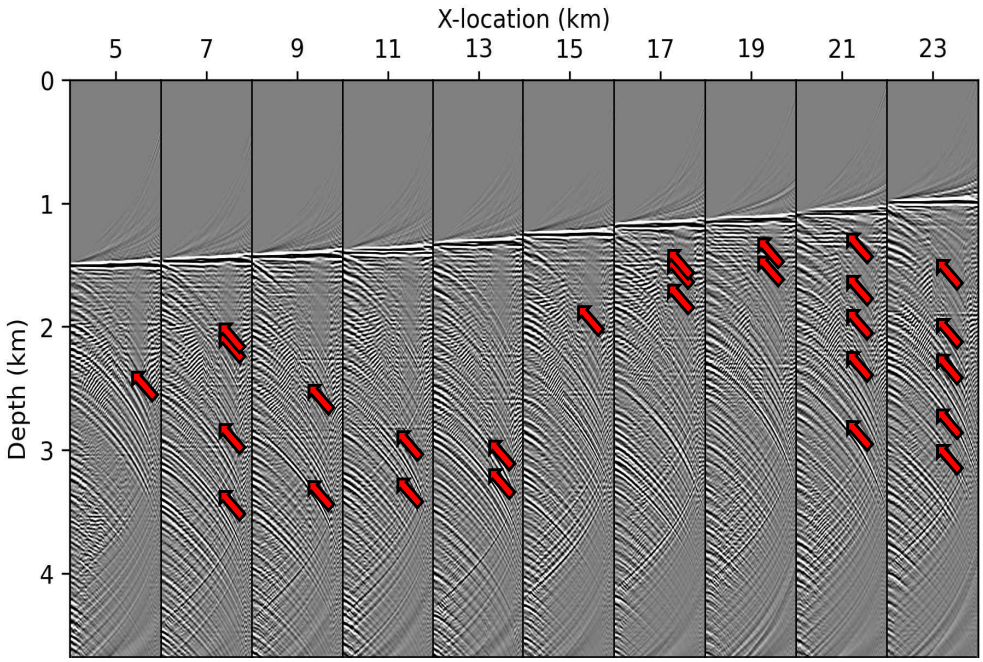


(a)

그림 6-6. 그림 6-2의 모델에서 5 km에서 23 km 까지 2 km 간격으로 추출한 각 영역 공통 영상 모음 10개를 이어 붙인 영상(빨간색 화살표는 역산을 통해 추정한 속도 모델에서 추출한 각 영역 공통 영상 모음에서 수평하게 나타난 심도를 의미함): (a) 역산을 통해 추정한 속도 모델; (b) (a)에서 물 층을 제외한 나머지 영역의 속도를 20% 낮춘 모델; (c) 균질 모델.


X-location (km)
5
7
9
11
13
15
17
19
21
23
Depth (km)
0
1
2
3
4

(b)


X-location (km)
5
7
9
11
13
15
17
19
21
23
Depth (km)
0
1
2
3
4

(c)

그림 6-6. (계속)

실제 지하 구조의 속도를 알 수 없는 현장 자료에 주파수 배열 공통 영상 모음을 추출한 결과 역산으로 추정한 모델이 얕은 구간의 심도(0 ~ 3 km)에 대해서는 실제 속도 모델과 유사한 것으로 평가되었다. 오프셋 영역 공통 영상 모음과 각 영역 공통 영상 모음을 추출하였으며, 역산으로 추정한 속도 모델로부터 추출한 세 공통 영상 모음의 같은 심도에서 반사면을 나타내는 결과를 보여 주파수 배열 공통 영상 모음의 결과를 검증할 수 있었다.

7. 결　론

구조보정에 사용된 속도 모델을 검증하는 수단으로 공통 영상 모음 기법을 사용한다. 주파수 영역에서 역시간 구조보정을 수행하였을 때 사용되는 공통 영상 모음 기법이 제한적이며, 이를 추출하는데 필요한 계산량과 저장공간이 크다는 문제점에 착안하여 본 논문에서는 새로운 공통 영상 모음 기법인 주파수 배열 공통 영상 모음을 제안하였다. 주파수 배열 공통 영상 모음은 구조보정 영상의 관심 지점에서 주파수로 나열한 영상이며, 주파수 영역 역시간 구조보정 수행 시, 빠르게 추출할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 새로운 기법을 다양한 모델에 적용하여 모델에 따른 거동을 파악하고, 실용성 및 적용성을 검증하였다.

2차원 인공 합성 모델을 통해 구조보정에 사용된 속도 모델이 실제 속도 모델과 일치 하는 경우에서는 주파수 배열 공통 영상 모음에서 평평하게 나타나며, 일치하지 않는 경우에서는 기존 공통 영상 모음과 상반되는 거동을 보이는 것을 확인하였다. 또한, 역산을 통해 추정한 모델과 실제 속도 모델로부터 추출한 공통 영상 모음을 비교하여, 주파수 배열 공통 영상 모음을 실질적으로 적용 가능한지에 대해 검증하였다. 3차원 모델을 통해서는 하이브리드 영역에서 주파수 배열 공통 영상 모음을 추출하는 방법을 소개하였으며, 마지막 2차원 현장 자료를 통해서는 실제 속도를 알 수 없는 경우에도 주파수 배열 공통 영상 모음이 속도 차이에 민감한 성질을 통해 역산으로 추정한 속도 모델이 일부 심도까지는 실제

속도 모델과 유사한 것으로 평가할 수 있음을 입증하였다.

다양한 수치 모델에 적용한 주파수 배열 공통 영상 모음의 결과와 이를 검증하기 위해 함께 도시한 기존의 공통 영상 모음 기법들을 통해 주파수 배열 공통 영상 모음 기법이 구조보정 속도 모델을 평가를 빠르게 할 수 있는 적합한 기법임을 검증하였다. 추후에는 주파수 배열 공통 영상 모음 상에 나타나는 move-out을 정량적으로 분석하여 구조보정 속도 분석에 주파수 배열 공통 영상 모음 기법을 적용하는 연구가 수행되어야 할 것이며, 기존에 공통 영상 모음 기법을 사용할 수 없었던 여러 송신원을 동시에 사용하는 경우에도 주파수 배열 공통 영상 모음을 추출하여 구조보정 영상에 사용된 속도 모델을 평가하는 연구를 시도해볼 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Audebert, F., Nichols, D., Rekdal, T., Biondi, B., Lumley, D. E., Urdaneta, H., 1997. Imaging complex geologic structure with single-arrival Kirchhoff prestack depth migration. Geophysics. 62, 1533-1543.

https://doi.org/10.1190/1.1444256

2. Baysal, E., Kosloff, D. D., Sherwood, J. W. C., 1983. Reverse time migration. Geophysics. 48, 1514-1524.

https://doi.org/10.1190/1.1441434

3. Biondi, B. L., Shan, G. 2002. Prestack imaging of overturned reflections by reverse time migration. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2002. Society of Exploration Geophysicists. 1284-1287.

https://doi.org/10.1190/1.1816889

4. Biondi, B. L., Symes, W. W., 2004. Angle-domain common-image gathers for migration velocity analysis by wavefield-continuation imaging. Geophysics. 69, 1283-1298.

https://doi.org/10.1190/1.1801945

5. Biondi, B. L., 2006. 3D seismic imaging. Society of Exploration Geophysicists. 125-152.

https://doi.org/10.1190/1.9781560801689

6. Bleistein, N., 1987. On the imaging of reflectors in the earth. Geohpysics. 52, 931-942.

https://doi.org/10.1190/1.1442363

7. Bleistein, N., Gray, S. H., 2001. From the Hagedoorn imaging technique to Kirchhoff migration and inversion. Geophysical Prospecting. 49, 629-643.

https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2001.00290.x

8. Brandsberg-Dahl, S., de Hoop, M. V., Ursin, B., 2003. Focusing in dip and AVA compensation on scattering-angle/azimuth common image gathers. Geophysics. 68, 232-254.

https://doi.org/10.1190/1.1543210

9. Claerbout, J. F., Doherty, S. M., 1972. Downward continuation of moveout-corrected seismograms. Geophysics. 37, 741-768.

https://doi.org/10.1190/1.1440298

10. Cho, Y., 2019. Efficient seismic depth imaging and full-waveform inversion via generalized multiscale finite element. Doctoral dissertation, Texas A&M University.

https://hdl.handle.net/1969.1/183841.

11. Cho, Y., Ha, W., Kim, Y., Shin, C., Singh, S., Park, E., 2016. Laplace-Fourier-domain full waveform inversion of deep-sea seismic data acquired with limited offsets. Pure and Applied Geophysics. 173, 749-773.

https://doi.org/10.1007/s00024-015-1125-7

12. Fomel, S., 2004. Theory of 3-d angle gathers in wave-equation imaging. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2004. Society of Exploration Geophysicists. 1053-1056.

https://doi.org/10.1190/1.1851067

13. French, W. S., 1974. Two-dimensional and three-dimensional migration of model-experiment reflection profiles. Geophysics. 39, 265-277.

https://doi.org/10.1190/1.1440426

14. Gardner, G. H. F., Gardner, L. W., Gregory, A. R., 1974. Formation velocity and density - The diagnostic basics for stratigrahpic traps. Geophysics. 39, 770-780.

https://doi.org/10.1190/1.1440465

15. Gazdag, J., 1978. Wave equation migration with the phase-shift method. Geophysics. 43, 1342-1351.

https://doi.org/10.1190/1.1440899

16. Giboli, M., Baina, R., Nicoletis, L., Duquet, B., 2012. Reverse time migration surface offset gathers part 1: a new method to produce 'classical' common image gathers. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012. Society of Exploration Geophysicists. 1-5.

https://doi.org/10.1190/segam2012-1007.1

17. Ha, T., Choi, Y., Shin, C., Min, D. J., 2009. Numerical modeling for 3d acoustic wave eqaution in the frequency domain. Journal of Seismic Exploration. 18, 57-79.

https://sciwatch.kiost.ac.kr/handle/2020.kiost/4347

18. Jin, H., McMechan, G. A., Nguyuen, B., 2015. Improving input/output performance in 2D and 3D angle-domain common-image gathers from reverse time migration. Geophysics. 80, S65-S77.

https://doi.org/10.1190/geo2014-0209.1

19. Jin, H., McMechan, G. A., Guan, H., 2014. Comparison of methods for extracting ADCIGs from RTM. Geophysics. 79, S89-S103.

https://doi.org/10.1190/geo2013-0336.1

20. Kalita, M., Alkhalifah, T., 2016. Common-image gathers using the excitation amplitude imaging condition. Geophysics. 81, S261-S269.

https://doi.org/10.1190/geo2015-0413.1

21. Kim, Y., Min, D. J., Shin, C., 2011. Frequency-domain reverse-time migration with source estimation. Geophysics. 76, S41-S49.

https://doi.org/10.1190/1.3534831

22. Komatitsch, D., Tromp, J., 2003. A perfectly matched layer absorbing boundary condition for the secone-order seismic wave equation. Geophysical Journal International. 154, 146-153.

https://doi.org/10.1046/j.1365_246X.2003.01950.x

23. Lemaistre, L., Lencrerot, R., Prat, P., 2012. Reverse time migration surface offset gathers part 2: using the full power of wide azimuth information. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012. Society of Exploration Geophysicists 2012. Society of Exploration Geophysicists. 1-5.

https://doi.org/10.1190/segam2012-0421.1

24. Li, C., Gao, Z., Li, F., Yang, T., 2021. Angle-domain common-image gathers from plane-wave least-squares reverse time migration. Geophysics. 86, 1-60.

https://doi.org/10.1190/geo2020-0511.1

25. Lines, L. R., Slawinski, R., Bording, R. P., 1999. A recipe for stability of finite-difference wave-equation computations. Geophysics. 64, 967-969.

https://doi.org/10.1190/1.144605

26. Mallick, S., Frazer, L. N., 1987. Practical aspects of reflectivity modeling. Geophysics. 52, 1355-1364.

https://doi.org/10.1190/1.1442248

27. Marfurt, K. J., 1984. Accuracy of finite-difference and finite element modeling of the scalar and elastic wave equations. Geophysics. 49, 533-549.

https://doi.org/10.1190/1.1441689

28. McMechan, G. A., 1983. Migration by extrapolation of time-dependent boundary values. Geophysical prospecting. 31, 413-420.

https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1983.tb01060.x

29. Mulder, W. A., Plessix, R. E., 2002. Time-versus frequency-domain modelling of seismic wave propagation. In 64th EAGE Conference & Exhibition. European Association of Geoscientists & Engineers. cp-5.

https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.5.E015

30. Nolan, C., Symes, W. W., 1996. Imaging in complex velocities with general acquisition geometry.

https://hdl.handle.net/1911/101874

31. Officer, C. B., Charles, B., 1958. Introduction to the theory of sound transmission: With application to the ocean. New York: McGraw-Hill.

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

https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1998.00498.x

33. Pratt, R. G., 1999. Seismic waveform inversion in the frequency domain, Part1: Theory and verification in a physical scale model. Geophysics. 64, 888-901.

https://doi.org/10.1190/1.1444597

34. Prucha, M. L., Biondi, B. L., Symes, W. W., 1999. Angle-domain common image gathers by wave-equation migration. SEG Technical Program Expanded Abstracts 1999. Society of Exploration Geophysicists. 824-827.

https://doi.org/10.1190/1.1821156

35. 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.

https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02978.x

36. Rickett, J., Sava, P., 2001. Offset and angle domain common-image gathers for shot-profile migration. 2001 SEG Annual Meeting. OnePetro.

37. Sava, P. C., Fomel, S., 2003. Angle-domain common image gathers by wavefield continuation methods. Geophysics. 68, 1065-1074.

https://doi.org/10.1190/1.1581078

38. Schneider, W. A., 1978. Integral formulation for migration in two and three dimensions. Geophysics. 43, 49-76.

https://doi.org/10.1190/1.1440828

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

https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2001.00279.x

40. Shin, C., Yoon, K., Marfurt, K. J., Park. K., Yang. D., Lim. Harry. Y., S. Chung., S. Shin., 2001. Efficient calculation of a partial-derivative wavefield using reciprocity for seismic imaging and inversion. Geophysics. 66, 1856-1863.

https://doi.org/10.1190/1.1487129

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

https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04102.x

42. Shin, C., Koo, N. H., Cha, Y. H., Park, K. P., 2010. Sequentially ordered single-frequency 2-d acoustic waveform inversion in the Laplace-Fourier domain. Geophysical Journal International. 181, 935-950.

https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04540.x

43. Shin, C., Ha, T., Ko, S., 2019. Simple, efficient hybrid domain common image gather. SEG International Exposition and Annual Meeting 2019. Society of Exploration Geophysicists. SEG-2019-3211998.

https://doi.org/10.1190/segam2019-3211998.1

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

https://doi.org/10.1190/1.1649391

45. Song, Z. M., Williamson, P. R., 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.

https://doi.org/10.1190/1.1443818

46. Stolk, C. C., Symes, W. W., 2004. Kinematic artifacts in prestack depth migration. Geophysics. 69, 562-575.

https://doi.org/10.1190/1.1707076

47. Stolt, R. H., 1978. Migration by Fourier transform. Geophysics. 43, 23-48.

https://doi.org/10.1190/1.1440826

48. Tang, B., Xu, S., Zhang, Yu., 2013. 3D angle gathers with plane-wave reverse-time migration. Geophysics. 78, S117-S123.

https://doi.org/10.1190/geo2012-0313.1

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

https://doi.org/10.1190/1.1441754

50. Virieux, J., Operto, S., 2009. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics. Geophysics. 74, WCC1-WCC26.

https://doi.org/10.1190/1.3238367

51. Vyas, M., Nichols, D., Mobley, E., 2011. Efficient RTM angle gathers using source directions. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011. Society of Exploration Geophysicists. 3104-3108.

https://doi.org/10.1190/1.3627840

52. Wang, X., Qian, J., Wang, H., 2016. Efficient angle-domain common-image gathers using Cauchy-condition-based polarization vectors. Geophysics. 81, 69-77.

https://doi.org/10.1190/geo2015-0327.1

53. Whitmore, N. D., 1983. Iterative depth migration by backward time propagation. SEG Technical Program Expanded Abstracts 1983. Society of Exploration Geophysicists. 382-385.

https://doi.org/10.1190/1.1893867

54. Wu, W. J., Lines, L. R., Lu, H. X., 1996. Analysis of higher order, finite-difference schemes in 3-D reverse-time migration. Geophysics. 61, 845-856.

https://doi.org/10.1190/1.1444009

55. Xu, S., Chauris, H., Lambare, G., Mark, Noble., 2001. Common angle migration: A strategy for imaging complex media. Geophysics. 66, 1877-1894.

https://doi.org/10.1190/1.1487131

56. Xu, S., Zhang, Y., Tang, B., 2010. 3D common image gathers from reverse time migration. SEG Technical Program Expandeed Abstracts 2010. Society of Exploration Geophysicists. 3257-3262.

https://doi.org/10.1190/segam1.351324

57. Yan, J., Dickens, T. A., 2016. Reverse time migration angle gathers using poynting vectors. Geophysics. 81, S511-S522.

https://doi.org/10.,1190/geo2015-0703.1

58. Yilmaz, Ö., 2001. Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data. Society of exploration geophysicists, 2001.

59. Yoon, K., Shin, C., Suh, S., Lines. Larry. R., Hong. S., 2003. 3d reverse-time migration using the acoustic wave equation: an experience with the SEG/EAGE data set. The Leading Edge. 22, 38-41.

https://doi.org/10.1190/1.1542754

60. Yoon, K., Marfurt, K. J., 2006. Reverse-time migration using the poynting vector. Exploration Geophysics. 37, 102-107.

https://doi.org/10.1071/EG06102

61. Zhan, G., Zhang, M., 2014. Common-image gathers in the offset domain from reverse-time migration. Journal of Applied Geophysics. 103, 99-103.

https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.01.005

62. Zhang, Q., McMechan, G. A., 2011. Direct vector-field method to obtain angle-domain common-image gathers from isotropic acoustic and elastic reverse time migration. Geophysics. 76, WB135-WB149.

https://doi.org/10.1190/geo2010-0314.1

63. Zhang, Y., Xu, S., Tang, B., Bai, B., Huang, Y., Huang, T., 2010. Angle gathers from reverse time migration. The Leading Edge. 29, 1364-1371.

https://doi.org/10.1190/1.3517308

Abstract

Frequency-domain Common Image Gathers for Swift Migration Velocity Model Evaluation

Haemin Kim

Department of Energy Systems Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Seismic exploration is a technique used to investigate the subsurface structure by acquiring the reflected wave after artificially generating seismic waves. First, the properties of the subsurface structure are estimated with data obtained through exploration. The process of imaging a subsurface structure through its estimated physical properties is called migration. Due to the limited exploration data, it is necessary to verify the validity of the acquired migration image. If errors are found during the verification process, the estimated physical properties are corrected. The final migration image obtained

by repeatedly performing the correction and verification process can be considered to be consistent with (or close to) the actual subsurface structure.

It is most important to accurately perform migration image evaluation, which is the final step in the process of identifying subsurface structures, where a common image gather is used as a representative means of evaluation. The common image gather is an image in which traces are arranged in the parameter-depth domain with the parameter to be viewed at a specific point in the restructuring image assigned as the axis. In this thesis, we propose a new common image gather called frequency-domain common image gather. Frequency-domain common image gather is a frequency-depth domain image. When imaging a subsurface structure through the frequency-domain reverse time migration, the biggest advantage of frequency-domain common image gather is that it can be directly extracted without additional computational cost, unlike the existing common image gather methods.

In this thesis, to understand the behavior and characteristics of frequency-domain common image gather, it is applied to synthetic models and field data. To verify the result of this method, offset-domain common image gather, and angle-domain common image gather are shown together in two-dimensional models. Through the multi-layer model, it is confirmed that a certain pattern

of behavior appears based on the difference between the migration velocity and actual velocity. Furthermore, the accuracy and practicality of the velocity-sensitive frequency-domain common image gather method is verified by comparing the results extracted from the actual velocity model and the model inverted calculation through the Original Marmousi model. Through the SEG/EAGE three-dimensional salt dome model, the frequency-domain common image gather method is applied to the hybrid-domain and the accuracy of the results are verified. Finally, we evaluated the velocity model inverted by Full Waveform Inversion (FWI) as a result of frequency-domain common image gather through field data.

keywords : Reverse time migration, acoustic, frequency-domain, common image gather, hybrid-domain

Student Number : 2016-23242