creative commons

COMMONS DEED

저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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

구배도 보정을 이용한 음향-탄성 결합매질에서의 완전파형역산

A Gradient Correction Method for Full Waveform Inversion in an Acoustic-Elastic Coupled Media

2013년 8월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부

강 승 구

구배도 보정을 이용한 음향-탄성 결합매질에서의 완전파형역산

A Gradient Correction Method for Full Waveform Inversion in an Acoustic-Elastic Coupled Media

지도교수 신 창 수

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함

2013년 7월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부

강 승 구

강승구의 박사 학위논문을 인준함

2013년 7월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

초 록

파형역산 알고리즘은 현장에서 획득한 탄성파 자료와 파동전파 모델링을 통해 구축한 인공합성자료와의 차이를 최소화시키는 방향으로 모델 매개변수를 갱신시킴으로써 이를 구축해 내는 알고리즘이다. 이와 같은 파형역산 알고리즘은 파동방정식의 풀이와 함께 수치해석학적 기법을 사용함에 따라 방대한 양의 컴퓨터 계산을 요구한다. 따라서 현대 컴퓨터 산업의 발달은 해당 알고리즘의 연구를 가속화시켰다. 또한 근래의 유가 폭등과 이에 따른 활발한 석유탐사 활동은 객관적인 결과를 구축해 낼 수 있는 파형역산 알고리즘에 대한 많은 지구물리학자들의 관심을 유발시키는데 충분했으며, 이에 따라 현재까지도 다방면에 걸친 파형역산에 대한 많은 연구가 수행 중에 있다.

파형역산 알고리즘은 비선형성의 파동방정식을 사용한다. 때문에 전체 최소값 이외에도 많은 국부 최소값을 나타내게 된다. 이러한 국부 최소값은 파형역산의 수행에 있어 초기해가 전체 최소값의 해에서 멀 경우 잘못된 값으로 수렴되는 치명적인 오류를 발생시킬 수 있다. 게다가 현재까지의 자료획득 기술력으로도 실제 탐사지역에 대한 저주파 성분이 포함된 탐사자료의 획득이 불가능하다. 저주파수 성분은 해당 탐사지역의 지하 매개변수 구축을 위한 배경구조가 되는 장파장 모델을 구축할 수 있는 정보를 포함한다. 따라서 저주파수 성분이 없이는 지하매질에 대한 배경구조 즉 장파장 구조의 획득이 불가능하고 궁극적으로는 정확한 역산결과의 구축에 커다란 문제점을 야기시킨다.

이번 연구에서는 이와 같은 국부 최소값 문제 그리고 저주파수 성분의 부재에 따른 문제점들을 해결함과 동시에 고해상도의 역산결과를 구축해 낼 수 있는 라플라스-푸리에 영역 파형역산 알고리즘을 도입하였다. 또한 음향매질에서의 파동방정식만을 사용하여 해저지형을 음향매질로 근사시켜 수행하는 기존의 파형역산 알고리즘을 확장하여 해저지층에 대한

탄성파 거동을 고려할 수 있는 음향-탄성 결합매질에서의 파형역산 알고리즘을 개발하였다. 음향-탄성 결합매질은 음향파 파동방정식과 탄성파 파동방정식을 결합하여 구축한다. 이와 같은 결합매질에 대한 파형역산 기술은 해저지층에 대한 파동의 거동을 탄성매질에서의 파동방정식을 통해 구현토록 함으로써 실제 해저지층에서의 탄성파 거동을 직접적으로 역산알고리즘에서 다룰 수 있다. 이에 따라 음향-탄성 결합매질에서의 파형역산 알고리즘은 해양탐사자료로부터 해당 지역에 대한 P-파속도 뿐 아니라 S-파속도 및 밀도에 대한 역산결과의 구축이 가능하다.

이번 연구에서는 다양한 수치해석학적 최적화 기법 중 구배법을 기반으로 하는 파형역산 알고리즘을 개발하였다. 이에 따라 해당 알고리즘에서의 구배도는 실질적으로 역산결과를 구축해 내는 기준이 된다. 해당 알고리즘에서는 역전파 알고리즘을 이용하여 효율적으로 구배도를 구축해 낸다. 하지만 감쇄파동장에 의한 음향-탄성 결합매질에서의 파형역산 수행에 있어 기존의 역전파 알고리즘에 의해 구축한 구배도에서는 해저지층 상부에 실제모델에 존재하지 않는 속도구조를 구축해 내는 수치적 결함과 현장자료에 포함된 잡음으로 인해 잘못된 방향으로 구배도가 구축되는 현상이 발생된다. 이는 결과적으로 정확한 역산결과의 구축에 큰 방해요소로 작용하게 된다. 본 논문에서는 이와 같은 문제점을 해결하고자 해당 구배도를 깊이 방향으로 누적하여 구축한 축적구배도를 이용하는 구배도 보정기법을 제안하였다. 이를 위해 몇 가지 가설을 설정하고 해당 가설에 대한 몇 가지 수치실험을 수행하였다. 그 결과 본래의 구배도에 대해 제곱을 취한 후 깊이 방향으로 그 값을 누적시키는 제곱 축적연산을 통해 구축한 축적구배도를 이용해 기존의 구배도를 보정하는 알고리즘이 앞에서 언급했던 수치적 결함과 현장자료에 포함된 잡음에 의한 효과를 제거해 내는데 가장 탁월한 기능을 수행함을 발견하였다. 제곱하여 누적시킴으로써 구축한 축적구배도를 사용하는 구배도 보정 기술은 그 성향에 따라 기존의 구배도 내 존재하는 비교적 큰 값의 이상대신호를 더욱더 강화시키는 역할을 함과 동시에 상대적으로 작은 값을 갖

는 수치적 결함 및 잘못된 방향으로 구축되었던 부분을 감쇄시키는 역할을 수행해 냄을 확인할 수 있었다.

수치예제에서는 인공합성자료 및 현장자료에 대한 기존의 구배도와 보정된 구배도를 각각 이용하여 구축한 역산결과를 비교 도시하고, 이를 분석하였다. 그 결과 구배도 보정은 감쇄파동장을 이용한 장파장 역산결과의 구축에 있어 현장자료에 포함되어 있는 잡음과, 해저지층 상부에서 발생하는 수치적 결함에 대한 문제를 효과적으로 해결해 낼 수 있음을 확인 할 수 있었다. 이와 더불어 보정된 구배도는 실제 이상대가 큰 부분에 대한 모델 변수 갱신을 극대화시키게 함으로써 실제 모델에 존재하는 암염구조와 같은 고속도층을 기존의 기술보다 정확히 규명해 내었음을 확인하였다. 인공합성자료의 경우와는 달리 현장자료에서는 역산결과를 직접적으로 평가하기 어렵다. 따라서 각각의 구배도에 의해 구축한 현장자료에 대한 역산결과는 역시간 구조보정과 역산결과에 대한 파동전파 모델링을 통해 구축한 공통송신원모음의 비교를 통해 구배도 보정기법을 적용한 역산 알고리즘이 보다 향상된 역산결과를 구축해 낼 수 있음을 증명하였다.

주요어 :완전파형역산, 결합매질, 탄성파 파동방정식, 음향파 파동방정식, 구배법, 라플라스-푸리에 영역, 구배도 보정

학 번 : 2011-30283

목 차

1. 서 론 ····· 1

1-1. 파형역산 소개 ····· 1

1-2. 라플라스-푸리에 영역 소개 ····· 3

1-3. 음향-탄성 결합매질의 소개 ····· 6

1-4. 구배도 보정기법 소개 ····· 9

1-5. 논문의 구성 ····· 11

2. 이 론 ····· 13

2-1. 라플라스-푸리에 영역 파동장 분석 ····· 13

2-2. 결합매질에서의 파동전파 모델링 ····· 21

2-2-1. 유한요소법을 이용한 파동전파 모델링 ····· 22

2-2-2. PML 경계조건의 적용 ····· 27

2-3. 파형역산 알고리즘 ····· 29

2-3-1. 목적함수 ····· 29

2-3-2. 역전파 알고리즘을 이용한 파형역산 ····· 31

2-3-3. 송신파형역산 ····· 36

2-4. 복소주파수 선택기법 ····· 38

2-5. 구배도 보정기법 ····· 43

2-5-1. 구배도 보정기법 ····· 44

2-5-2. 구배도 분석-인공합성자료 ····· 48

2-5-3. 구배도 분석-현장자료 ····· 67

3. 속도모델 구축 수치예제 ····· 73
3-1. 인공합성자료를 이용한 수치예제 ····· 75
3-1-1. Pluto1.5 모델 ····· 75
3-1-2. SEG/EAGE 암염돔 모델 ····· 89
3-1-3. Hess 모델 ····· 101
3-2. 현장자료를 이용한 수체예제 ····· 114

4. 결 론 ····· 129

5. 논 의 ····· 133

참고문헌 ····· 139

Abstract ····· 144

감사의 글

그 림 목 차

그림 1. 음향 매질에서의 감쇄상수 및 주파수 성분에 따른 압력장 ····· 17

그림 2. 탄성 매질에서의 라플라스 감쇄상수 및 주파수 성분에 따른 수평변위 파동장 ····· 18

그림 3. 탄성 매질에서의 라플라스 감쇄상수 및 주파수 성분에 따른 수직변위 파동장 ····· 19

그림 4. 음향-탄성 결합매질에서 추출한 라플라스 감쇄상수 및 주파수 성분에 따른 파동장 트레이스 비교 ····· 20

그림 5. 실제 해양 탐사환경 및 음향-탄성 결합매질에서의 파동전파양상 ····· 23

그림 6. 불규칙 해저 지형을 고려한 음향-탄성 결합매질 ····· 23

그림 7. 역전파 알고리즘을 이용한 완전파형역산 알고리즘 순서도 ····· 35

그림 8. 라플라스-푸리에 영역에서의 복소주파수 선택기법 ····· 41

그림 9. 구배도 보정기법을 적용한 파형역산 순서도 ····· 47

그림 10. 불규칙 해저지형을 설정한 음향-탄성 결합매질에서의 SEG/EAGE 암염돔 모델 ····· 53

그림 11. 라메상수 람다(λ)에 대한 구배도 분석 (선형증가모델) ····· 54

그림 12. 라메상수 뮤(μ)에 대한 구배도 분석 (선형증가모델) ····· 55

그림 13. 기존 구배도와 보정된 구배도로부터 깊이 1.2km 부근에서 추출한 가로방향 트레이스의 비교 (선형증가모델) ····· 56

그림 14. 라메상수 람다(λ)에 대한 구배도 분석 (제곱 축적 구배) ····· 57

그림 15. 라메상수 뮤(μ)에 대한 구배도 분석 (제곱 축적 구배) ····· 58

그림 16. 기존 구배도와 보정된 구배도로부터 깊이 1.2km 부근에서 추출한 가로방향 트레이스의 비교 (제곱 축적 구배) ····· 59

그림 17. 라메상수 람다(λ)에 대한 구배도 분석(세제곱 축적 구배) ····· 60

그림 18. 라메상수 뮤(μ)에 대한 구배도 분석 (세제곱 축적 구배) ····· 61

그림 19. 기존 구배도와 보정된 구배도로부터 깊이 1.2km 부근에서 추출한 가로방향 트레이스의 비교 (세제곱 축적구배도) ····· 62
그림 20. 라메상수 람다(λ)에 대한 구배도 분석(네제곱 축적 구배) ····· 63
그림 21. 라메상수 뮤(μ)에 대한 구배도 분석 (네제곱 축적 구배) ····· 64
그림 22. 기존 구배도와 보정된 구배도로부터 깊이 1.2km 부근에서 추출한 가로방향 트레이스의 비교 (네제곱 축적구배도) ····· 65
그림 23. 기존 구배도와 각각의 보정된 구배도로 부터 깊이 1.2km 부근에서 추출한 가로방향 트레이스의 비교 ····· 66
그림 24. 현장자료에서 추출한 임의의 송신원에서의 공통송신원 모음 ····· 69
그림 25. 현장자료에서 구축한 라메상수 람다(λ)에 대한 구배도 분석 ····· 70
그림 26. 현장자료에서 구축한 라메상수 뮤(μ)에 대한 구배도 분석 ····· 71
그림 27. 현장자료에서의 각각의 구배도로부터 추출한 깊이 2.5km 부근에서 추출한 가로방향 트레이스 ····· 72
그림 28. 불규칙 해저지형을 설정한 음향-탄성 결합매질에서의 Pluto모델 81
그림 29. 파형 역산에 사용되는 초기 모델 ····· 82
그림 30. 음향-탄성 결합매질에서의 주파수영역 완전파형역산결과 ····· 83
그림 31. 음향-탄성 결합매질에서의 라플라스영역 완전파형역산결과 ····· 84
그림 32. 음향-탄성 결합매질에서의 라플라스-푸리에영역에서의 단일 주파수를 이용한 순차파형역산결과 ····· 85
그림 33. 음향-탄성 결합매질에서의 2가지 복소주파수 대역을 이용한 라플라스-푸리에 영역 완전파형역산결과 ····· 86
그림 34. 음향-탄성 결합매질에서의 4가지 복소주파수 대역을 이용한 라플라스-푸리에 영역 완전파형역산결과 ····· 87
그림 35. 파형역산 결과에 대한 깊이 방향 트레이스 비교 ····· 88
그림 36. 암염돔 모델에 대한 파형 역산에 사용되는 초기모델 ····· 93
그림 37. 암염돔 모델에 대한 기존 알고리즘에 의해 구축한 음향-탄성 결합매질에서의 라플라스영역 파형역산결과 ····· 94

그림 38. 암염돔 모델에 대한 선형 증가 모델(vkz)을 이용하여 구배도를 보정하고 이를 이용하여 구축한 음향-탄성 결합 매질에서의 장파장 역산결과 ····· 95
그림 39. 암염돔 모델에 대한 깊이 방향에 따라 제곱하여 누적시켜 구축한 제곱 축적 구배도를 이용하여 해당 구배도를 보정하고 이를 이용하여 구축한 음향-탄성 결합 매질에서의 장파장 역산결과 ····· 96
그림 40. 암염돔 모델에 대한 깊이 방향에 따라 이를 세제곱하여 절대값을 취한 후 누적시켜 구축한 세제곱 축적 구배도를 이용하여 해당 구배도를 보정하고 이를 이용하여 구축한 음향-탄성 결합 매질에서의 장파장 역산결과 ····· 97
그림 41. 암염돔 모델에 대한 깊이 방향에 따라 네제곱하여 누적시켜 구축한 네제곱 축적 구배도를 이용하여 해당 구배도를 보정하고 이를 이용하여 구축한 음향-탄성 결합 매질에서의 장파장 역산결과 ····· 98
그림 42. 구배도 보정 법에 의해 획득한 라플라스-푸리에 영역에서의 최종 파형역산결과 ····· 99
그림 43. SEG/EAGE 암염돔 모델에 대한 파형역산 수행 시 측정한 반복 계산 횟수별 해당 RMS 에러 ····· 100
그림 44. 불규칙 해저지형을 설정한 음향-탄성 결합매질에서의 SEG-2D Hess VTI 모델 ····· 105
그림 45. SEG-2D Hess VTI 모델에 대한 파형 역산에 사용되는 초기 모델 ····· 106
그림 46. 라메상수 람다(λ)에 대한 각각의 구배도 (제곱 축적 구배도) ····· 107
그림 47. 라메상수 뮤(μ)에 대한 각각의 구배도 (제곱 축적 구배도) ····· 108
그림 48. SEG-2D Hess VTI 모델에 대해 기존 알고리즘에 의해 구축한 음향 탄성 결합 매질에서의 라플라스영역 파형역산결과 ····· 109
그림 49. SEG-2D Hess VTI 모델에 대해 구배도 보정법을 적용하여 구축한 음향-탄성 결합 매질에서의 장파장 역산결과 ····· 110

그림 50. SEG-2D Hess VTI 모델에 대해 실제 모델(검은점선), 기존 구배도에 의개 구축한 장파장 역산결과(붉은 점선) 및 구배도 보정기법을 적용하여 구축한 장파장 역산결과(푸른 점선)에서 각각 추출한 4.8km 지점에서의 깊이 방향 트레이스 ····· 111
그림 51. 구배도 보정법을 적용하여 구축한 최종 라플라스-푸리에 영역 파형역산결과 ····· 112
그림 52. SEG-2D Hess VTI 모델에 대한 파형역산 수행 시 측정한 반복계산 횟수별 해당 RMS 에러 ····· 113
그림 53. 현장자료에 대한 파형역산의 수행을 위해 설정한 초기모델 ····· 119
그림 54. 현장자료에 대해 기존 알고리즘에 의해 구축한 음향-탄성 결합 매질에서의 장파장 역산결과 ····· 120
그림 55. 현장자료에 대해 구배도 보정기법을 파형역산에 적용하여 이를 통해 구축한 장파장 역산결과 ····· 121
그림 56. 현장자료에 대해 기존의 구배도를 통해 구축된 장파장 역산결과를 바탕으로 하여 수행한 파형역산을 통해 구축한 최종 역산결과 ····· 122
그림 57. 현장자료에 대해 구배도 보정기법을 파형역산에 적용하고 이를 통해 구축된 장파장 역산결과를 바탕으로 하여 수행한 파형역산을 통해 구축한 최종 역산결과 ····· 123
그림 58. 현장자료에 대한 기존의 구배법과 구배도 보정기법을 적용하여 구축한 장파장 역산결과를 바탕으로 수행된 최종 파형역산에서 추출한 각각의 RMS에러 그래프 비교 ····· 124
그림 59. 각의 역산된 결과로부터 구축한 역시간 구조보정 결과 ····· 125
그림 60. 현구조보정으로부터 계산한 공통이미지모음 ····· 126
그림 61. 현장자료와 각각의 역산결과로부터 모델링을 통해 획득한 공통송신원모음 이미지 비교 ····· 127
그림 62. 공통송신원모음으로부터 추출한 트레이스의 비교 ····· 128
그림 63. 구배도 보정기법의 파형역산 적용-1 ····· 135
그림 64. 구배도 보정기법의 파형역산 적용-2 ····· 136

표 목 차

표 1. 복소주파수 선택기법에 대한 장, 단점 정리 ····· 42

표 2. Pluto모델에 대해 구축한 탄성파 탐사자료 정보 ····· 80

표 3. SEG/EAGE 암염돔 모델에 대해 구축한 탄성파 탐사자료 정보 ····· 92

표 4. SEG-2D Hess VTI 모델에 대해 구축한 탄성파 탐사자료 정보 ····· 104

표 5. 세 가지 오일트랩구조(암염돔구조, 배사구조, 충상단층구조)에 대한 구배도 보정 기술의 적용성 분석표 ····· 138

1. 서 론

1-1. 파형역산 소개

완전파형역산(full waveform inversion)은 현장에서 획득한 탄성파 자료(seismic data)와 파동방정식에 의해 획득한 모델링 자료와의 잔차(residual)를 최소화시키는 방향으로 반복 계산법에 의해 매개변수(parameters)를 갱신시켜 나가면서 이를 규명해 내는 최신 기술이다. 파형역산 알고리즘은 방대한 양의 데이터를 다루며, 파동방정식을 반복적으로 풀어내야 하기 때문에 상당한 양의 계산과 컴퓨터 자원이 요구되는 기술이다. 이 기술이 처음 개발될 당시에는 컴퓨터 기술과 알고리즘 구축 능력의 한계 때문에 활발한 연구의 진행이 어려웠지만, 현재 알고리즘 구축기술과 컴퓨터 산업의 발전으로 석유 및 가스탐사 산업에서 큰 기대를 걸고 있는 기술이다.

파형역산 알고리즘은 수학적 이미지 영상화 기법을 이용하는 방법과 가우스 뉴턴 (Gauss Newton), 풀-뉴턴(Full-Newton) 방법과 같은 수치적 최적화 기술을 이용하는 알고리즘으로 나뉜다. 본 논문에서는 구배법(gradient method)을 기반으로 하는 수치적 최적화 기술을 이용한 파형역산에 대한 연구를 수행하였다. 구배법을 기반으로 하는 수치적 최적화 기술은 상대적으로 수학적 이미지 영상화 기법보다 많은 양의 계산이 요구된다. 하지만 반복적인 계산에 의해 해당 매질의 지하 매개변수를 규명해 내는 방식으로 프로세스가 진행되기 때문에 지하 매질이 복잡할 경우라 할지라도 해당 매개변수의 규명이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

초창기 파형역산 알고리즘은 역전파 알고리즘을 기반으로 시간영역 (Lailly 1983; Tarantola 1984; Kolb, Collino and Lailly 1986; Gauthier, Virieux and Tarantola 1986; Mora 1987; Bunks et al. 1995; Shipp and Singh 2002)을 중심으로 해당 연구가 수행되었다. 시간영역에서의 파형역산기법은 그 당시의 전산환경에 비해 지나치게 방대한양의 계산과 시간이 요구된다는 문제점을 가지고 있었다. 이에 따라 많은 지구물리학자와 계산과학자들은 이와 같은 문제점을 해결하기 위한 많은 연구를 진행했다. 그리고 푸리에 변환을 이용한 주파수영역 파형역산 (Geller and1 Hara 1993; Pratt, Shin and Hicks 1998; Operto et al. 2004; Sirgue and Pratt 2004; Shin and Min 2006; Choi, Min and Shin 2008; Brossier, Operto and Virieux 2009) 알고리즘을 개발하였다. 주파수영역 파형역산 기술은 시간영역 자료에 대한 푸리에 변환을 통해 주파수영역으로 변환된 탐사자료를 사용한다. 이에 따라 해당 주파수에 대한 병렬화 계산이 가능하며 이는 기존의 시간영역에서의 파형역산 기술보다 효율적인 계산 프로세스를 수행해 낼 수 있게 하였다.

1-2. 라플라스-푸리에 영역 소개

앞장에서 소개한 주파수영역 파형역산의 경우 주파수별 병렬화를 통한 계산의 효율성은 증대 시켰지만 비선형 파동방정식으로부터 기인된 국부 최소값 문제와 현장자료에서의 저주파수 부재 등과 같은 문제점은 여전히 존재한다. 이와 같은 파형역산이 근본적으로 가지고 있는 문제점의 극복을 위해 현재까지 다방면에서 수많은 연구들이 진행되어오고 있다. 이에 대한 가장 근본적인 문제의 해결책은 탄성파 자료로부터 정확한 장파장모델을 구축하는 것이다. 만약 탄성파 탐사자료로부터 정확한 장파장 성분의 역산결과를 구축해 낼 수 있다면, 이를 배경모델로 활용함으로써, 앞에서 언급한 국부 최소값 문제 및 저주파수 부재에 따른 문제점들을 모두 해결할 수 있다.

이에 따라 Shin and Cha (2008)은 위에서 언급한 것과 같은 기존의 파형역산 알고리즘이 가지고 있는 문제점의 해결을 위한 라플라스영역 완전 파형역산 알고리즘을 제안하였다. 라플라스영역 파형역산은 탄성파 자료에 대한 영주파수성분(zero frequency components)의 감쇄파동장(damped wavefield)을 이용하는 기술로써 현장자료에 대한 장파장 속도모델의 구축이 가능하다 (Ha and Shin, 2012). 이는 앞에서 언급한 것과 같이 국부 최소값 문제와 저주파수 부제에 따른 기존 파형역산 기술이 가지고 있던 문제를 극복해 낼 수 있다. 해당 알고리즘에 대해 Chung et al. (2009)는 육상 탐사자료에서의 장파장 속도모델 구축을 위한 탄성매질에서의 라플라스영역 파형역산 기술로 확장하였고, Bea et al. (2010)은 음향-탄성 결합매질로 확장시키는 연구를 진행했다.

하지만, 라플라스영역 파형역산에 의해 획득한 역산결과는 감쇄파동장의 특성상 장파장 성향을 띄고 이에 따라 세부적인 그리고 자세한 지하

매개변수 모델의 구축이 어렵다. 또한 최대 오프셋과 사용한 라플라스 감쇄상수의 선택에 따라 민감하게 반응하기 때문에 보다 안정화된 그리고 보다 향상된 역산결과의 구축이 요구된다(Shin and Cha, 2009).

이에 따라 Shin and Cha (2009)는 기존의 라플라스영역 파형역산보다 향상된 고 해상도의 역산결과를 구축해 내기 위한 라플라스-푸리에 영역 파형역산 알고리즘을 제안하였다. 이는 위에서 언급한 라플라스영역 파형역산과 달리 라플라스 감쇄상수와 더불어 주파수 성분을 함께 사용하여 역산을 수행하는 기술이다. 이 기술은 결과적으로 장파장 속도모델만을 구축할 수 있는 기존의 라플라스영역 파형역산의 단점을 극복해 낼 수 있었다. 또한 동시에 기존 주파수영역에서 가지고 있었던 국부 최소값 문제와 실제 탐사자료에서의 저주파수 부재에 따른 문제점 또한 극복해 낼 수 있었다. 하지만 라플라스 감쇄상수와 주파수 성분을 모두 사용하는 만큼 기존의 기술보다 많은 양의 컴퓨터 자원과 계산 그리고 시간이 요구된다는 단점을 가지고 있다.

이번 연구에서는 이와 같은 라플라스-푸리에 영역 파형역산 알고리즘을 음향-탄성 결합매질로 확장함과 동시에 보다 효율적인 복소주파수(실주파수 성분과 라플라스 감쇄상수의 조합)에 대한 선택법을 제시하였다. 여기에서의 복소주파수의 선택법이란 기존의 라플라스영역 파형역산에서 사용하는 라플라스 감쇄상수와 주파수영역에서 사용하는 주파수 성분들의 구성에 대한 설계이다. 이는 각각의 파동장이 지니고 있는 특성에 대한 분석에 근거를 두고 설계한 역산 수행방법이며, 이는 곧 주파수영역에서의 단파장 성분의 파동장과 라플라스영역에서의 장파장 성분의 파동장에 대한 역산의 설계를 의미한다.

본 논문에서는 우선 기존의 연구에서 사용하였던 다양한 복소주파수 선택법에 대한 음향-탄성 결합매질에서의 역산결과를 도시하고 이를 분

석하였다. 이를 통해 라플라스-푸리에 영역 파형역산의 수행 시 불필요한 복소주파수 요소를 제거함으로써 라프라스-푸리에 영역 파형역산 알고리즘의 효율성을 증대시킬 수 있었다.

수치 예제에서는 음향-탄성 결합매질에 대한 다양한 복소주파수 선택법을 통해 구축한 인공합성자료에 대한 역산결과를 비교 도시하고, 이를 분석함으로써 음향-탄성 결합매질에서의 라플라스-푸리에 영역 파형역산을 위한 효율적인 복소주파수 선택법에 대한 타당성을 증명했다.

1-3. 음향-탄성 결합매질 소개

현재 연구되고 있는 대부분의 파형역산 알고리즘은 음향파 파동방정식을 이용한 파동전파 모델링 알고리즘을 사용한다. 음향파 파동방정식만을 이용한 기존의 완전파형역산 알고리즘은 압력 성분만을 사용하여 P-wave 속도에 대한 역산결과만을 획득해 내기 때문에 프로그래밍 시 혹은 프로그램의 구동 시 효율적일 수 있다. 하지만 실제 해양탐사가 수행되는 해저지형은 바닷물로 구성된 해수층과 그 아래 복합적인 지층으로 구성된 해저지층으로 나뉘어져 있다. 따라서 음향파 파동방정식에 기반을 둔 파형역산 알고리즘은 탄성매질인 해저지층에서 발생하는 탄성파 거동에 대한 정보를 다룰 수 없다.

해양탐사 자료는 탐사선에 설치된 에어건에서 발생하는 파동이 해수층을 거쳐 모드 변환되어 해저지층으로 전파되며, 이는 다시 해저지층을 따라 전파되고 일부는 지층을 거쳐 반사되어 해수면에 위치한 수신기에 기록되는 과정에 의해 획득된다. 이와 같은 과정을 통해 획득한 해양 탐사자료에서는 해수층을 통과하여 해저 지질층으로 파가 전파될 때 생성되는 전단파(shear wave) 및 모드전환(mode conversion)파와 함께 탄성매질에 대한 파동의 거동과 이에 따른 지하 매질의 정보 또한 동시에 해수면에 위치한 수신기에 기록된다. 또한 해저지층 또한 음향 매질이 아닌 탄성 매질이기 때문에 해양탐사 자료에서의 탄성효과는 잡음이 아닌 S-wave 속도 및 밀도와 같은 중요한 해당 매질의 물성 정보를 포함하고 있다 (Mora, 1987). 이와 같은 사실에서 볼 때, 기존의 음향 매질로 해저 지형을 가정하고 음향 파동방정식만을 이용한 파형역산 알고리즘에는 그 한계가 있다.

이와 같이 음향매질로 가정한 파형역산 알고리즘의 한계점을 극복하고

보다 물리학적으로 합당한 알고리즘의 구축을 위해 음향-탄성 결합매질에서의 파동전파 모델링 기술을 이용한 완전파형역산 기술이 개발되었다(Komatitsch, Barnes and Tromp 2000; Zhang 2004; Zienkiewicz, Taylor and Zhu 2005; Lee et al. 2009; Choi, Min and Shin 2008; Kim et al. 2009; Kang et al., 2012). 이와 같이 음향-탄성 결합매질에 대한 파형역산 알고리즘은 실제 해양탐사 환경에 대해 물리학적으로 보다 합당하게 파형역산의 대상매질을 설정할 수 있었고, 앞에서 언급한 것과 같이 해양 환경 내에 존재하는 탄성파의 거동과 이에 따른 효과를 파형역산에서 직접적으로 다룰 수 있게 되었다. 또한 P-wave 속도모델 뿐 아니라 S-wave 속도 및 밀도 까지도 구축해 낼 수 있었다.

음향-탄성 결합매질에서의 파동전파 모델링 기법은 실제 해양탐사 환경에서와 같이 음향매질의 상부에 설치된 송신원으로부터 음원파형이 생성된다. 생성된 파동은 음향매질을 전파하면서 결합매질의 경계면에 도달하게 된다. 이때 음향매질과 탄성매질의 경계면에서는 압력-변위 연속조건에 의해 음향 매질에서의 압력은 변위성분으로 바뀌어 탄성 매질로 전파되게 된다. 이렇게 전파된 파동은 탄성매질에서 투과 혹은 반사, 굴절이 일어나게 되고 다시 경계부에 설정된 연속조건에 따라 압력 성분으로 변환되어 음향매질의 상부에 위치한 수신기에 압력 성분으로 기록되게 된다.

Choi et al.(2008)에서는 실제의 해상환경의 탄성파 효과를 보다 정확히 고려하기 위해 음향-탄성 결합매질에서의 파형역산을 처음으로 제안하였다. 하지만 이 경우 실제 해저지형을 평지로 가정하였다. 따라서 실제 해저지형이 평평하지 않을 경우에 대한 한계점이 존재한다. 이에 대해 Kim et al. (2009)은 불규칙 해저면을 고려할 수 있는 음향-탄성 결합매질에서의 주파수영역 파형역산 연구를 수행하여 보다 정확하게 탐사

현장의 해저지형을 모사할 수 있도록 하였다. 또한 Bae et al (2009)은 음향 매질에서의 장파장 속도모델 구축 기법인 라플라스영역 파형역산 알고리즘(Shin and Cha, 2008)을 음향-탄성 결합매질에 적용하여 이에 대한 장파장 속도모델 구축을 위한 연구를 수행한 바 있다.

1-4. 구배도 보정기법 소개

본 연구에서는 구배법을 기반으로 가동되는 파형역산 알고리즘을 음향파 파동방정식과 탄성파 파동방정식을 결합하여 구성한 음향-탄성 결합매질로 확장하여 역산을 수행하는 연구를 진행하였다. 이와 같은 구배법을 기반으로 하는 파형역산은 역전파 알고리즘에 의해 구축한 구배도에 따라 해당 매질의 매개변수가 갱신되어 구축된다. 따라서 정확한 구배도를 구축하는 것은 파형역산의 수행에 있어 가장 중요한 과정이라 할 수 있다. 하지만 장파장 역산결과의 구축을 위한 감쇄파동장에 의한 라프라스 영역 파형역산 실험에서 기존의 역전파 알고리즘에 의해 구축한 구배도는 음향매질과 탄성매질의 경계 부분인 해저지층 상부에서 적절치 못한 방향으로 수렴하거나 혹은 이상대가 있어야 하는 부분에서는 그 값이 적정수준 이상으로 넓게 분포하여 수렴하는 현상이 목격되었다. 때문에 이와 같은 구배도에 의해 구축한 장파장 역산결과에서는 해저지층 상부에 잘못된 값을 구축해 내고, 광범위하게 분포된 이상대로 인해 지하 내부의 지질구조를 정확히 구축해 내지 못했다. 이와 같은 불안정한 구배도의 구축은 현장자료에 포함된 잡음과 음향매질과 탄성매질 사이에 존재하는 불안정한 수치적 결함으로 인해 생성된 현상으로 이에 대한 적절한 구배도 보정기법이 요구되었다.

이에 따라 구배도 보정은 해당 구배도에 대해 잡음 혹은 수치적 부산물에 의한 효과를 감쇄시키는 역할을 수행해야 하며 탄성파 탐사자료에 존재하는 주된 이상대에 대한 구배도를 집중시킴으로써 실제보다 광범위하게 나타나는 구배도를 보정할 수 있어야 한다. 이와 같은 목적의 달성을 위해 본 연구에서는 본래의 구배도를 이용하여 축적 구배도를 구축하고 이를 활용하는 알고리즘을 제안하였다. 구배도의 보정을 위해 사용하

는 축적 구배도는 역전파 알고리즘에 의해 구축한 구배도를 제곱하여 해당 구배도의 깊이 방향으로 누적하는 연산을 통해 구축된다. 본 알고리즘에서는 축적 구배도의 구축 시 구배도 값에 제곱을 취하여 누적시킴으로써 이를 구축한다. 그 이유는 구배도 값이 음수와 양수값으로 분포되기 때문에 이에 대한 누적을 위해 모두 양의 값으로 만들려는 것과 더불어 제곱을 취함으로써 축적연산의 효과를 보다 증대시키기 위함이다.

이와 같이 구축한 축적구배도는 본래의 역전파 알고리즘에 의해 구축한 구배도에 곱합으로써 궁극적인 구배도 보정 기술이 수행되게 된다. 이와 같은 구배도 보정기법은 인공합성자료 및 현장자료에 대한 구배도를 구축하고 이를 본 알고리즘에 의해 보정한 것과 비교함으로써 이에 대한 타당성을 증명할 수 있었다.

인공합성자료 및 현장자료에 대해 구축한 각각의 구배도를 살펴보면, 구배도 보정기법에 의해 구축된 구배도는 기존의 구배도와 비교해 볼 때 실제로 이상대가 존재하는 부분을 강조하는 효과가 탁월하였다. 때문에 축적구배도에 의해 보정된 새로운 구배도는 이상대가 강한 부분을 더욱 더 부각시킴으로써 상대적으로 그 값이 작은 기존의 파형역산에서 종종 마주쳐왔던 해저지층 상부에 생성되는 수치적 부산물에 의한 효과를 감쇄시킬 수 있었다.

수치예제에서는 인공합성자료 및 현장자료에 대한 각각의 구배도에 의해 구축한 장파장 역산모델과 이에 따른 최종 역산결과를 비교함으로써 구배도 보정법의 파형역산 적용성을 입증하였다. 현장자료의 경우에는 구조보정과 파동전파 모델링을 이용한 역산결과의 증명을 통해 본 연구에서 제안하는 구배도 보정기술의 타당성을 증명하였다.

1-5. 논문의 구성

본 논문의 1장 서론에서는 파형역산 알고리즘과 함께 라플라스-푸리에 영역 파형역산 기술 및 음향-탄성 결합매질 그리고 구배도 보정기법을 소개한다. 제 2장은 본론으로 주로 이번 연구에서 사용한 완전파형역산 알고리즘에 대한 이론을 다루었다. 제 2장의 1절에서는 라플라스 감쇄상수로부터 계산한 라플라스영역 파동장과 주파수영역 파동장 그리고 이 둘의 조합을 통해 구성한 라플라스-푸리에 영역 파동장에 대한 분석을 수행한다. 이어서 2절과 3절에서는 실제 해상탐사가 수행되는 해저 지질 환경을 정확히 모사해 낼 수 있는 음향-탄성 결합매질에 대한 유한요소법에 기반을 둔 파동 전파 모델링과 이를 이용하는 완전파형역산 알고리즘을 기술하였다. 이어서 제 2장 4절에서는 기존 파형역산 알고리즘이 가지고 있는 국부 최소값 문제 및 저주파수 부제에 따른 문제의 해결을 위해 라플라스 감쇄파동장과 실주파수 성분을 모두 사용하여 정확한 역산결과를 구축해 낼 수 있는 라플라스-푸리에 영역 파형역산 알고리즘을 제시하였다. 라플라스-푸리에 영역 파형역산 알고리즘은 기존의 라플라스영역 파형역산 알고리즘에 비해 방대한 량의 컴퓨터 자원을 요구한다. 이에 따라 효율적인 라플라스-푸리에 영역 파형역산 기법이 필요하다. 이에 따라 기존에 개발된 다양한 방법들을 음향-탄성 결합매질에 대한 파형역산에 적용해보고 동시에 효율적인 파형역산의 수행을 위한 복소주파수 선택법을 제시하였다. 제 2장의 마지막 5절에서는 본 연구에서 제안한 구배도 보정 기술을 제시하였다. 기존의 역전파 알고리즘에 의해 구축한 구배도는 라플라스 감쇄파동장을 이용하여 역산을 수행 할 경우 그 값이 음향 매질과 탄성매질이 만나는 해저 지층 상부에서 잘못된 값으로 수렴하고 이상대 부분에서의 구배도가 비정상적으로 넓게 분포함으

로써 불안정한 구배도를 구축한다. 이에 착안하여 이와 같은 문제를 해결해 낼 수 있는 축적 구배도를 이용한 구배도 보정법을 제시하였다. 그리고 인공합성자료 및 현장자료에 대한 보정된 구배도와 기존의 구배도를 비교 분석함으로써 구배도 보정 기술에 대한 타당성을 증명했다. 제 3장에서는 인공합성 모델과 현장자료를 이용해 구축한 역산결과를 제시하였다. 우선 첫 번째로 Pluto 1.5 모델를 이용하여 앞에서 언급한 음향-탄성 결합매질에서의 라플라스-푸리에 영역 파형역산 결과를 제시하였다. 두 번째로는 SEG/EAGE 암염돔 모델과 SEG Hess VTI 모델을 이용하여 구배도 보정기법에 의해 구축한 장파장 역산 결과을 기존의 구배도에 의한 역산결과와 비교 도시하였다. 이어서 현장자료에 대한 역산결과를 제시하였다. 현장자료에 대한 파형역산은 기존의 인공합성자료에 대한 실험과 같이 본래의 구배도를 이용한 라플라스-푸리에 영역 파형역산결과와 구배도 보정을 이용하여 구축한 역산결과를 각각 비교 도시하였다. 현장자료에 대해 구축한 각각의 역산 결과는 이에 대해 역시간 구조보정을 수행하고 이로써 구축한 구조보정 이미지와 공통 이미지 모음을 통해 간접적으로 해당 역산결과를 증명했다. 또한 역산결과를 바탕으로 모델링을 수행하고 이에 대한 인공합성 공통송신원 모음을 구축하고 이를 같은 위치에서의 현장자료와 비교함으로써 구배도 보정법에 의한 파형역산 결과의 타당성을 증명함으로써 본 논문의 결론을 도출하였다. 제 5장 논의에서는 해당 구배도 보정기법의 실질적인 사용을 위한 설명과 한계점을 제시함으로써 실질적인 파형역산으로의 적용에 대한 심층적인 내용을 다루었다.

2. 이 론

2-1. 라플라스-푸리에 영역 파동장 분석

이번 장에서는 음향-탄성 결합매질에 대한 주파수영역 및 라플라스영역 그리고 라플라스-푸리에 영역에 대한 각각의 파동장을 도시하고 이에 대한 분석을 통해 각각의 파동 전파의 특성을 확인하고 그 결과를 제시하였다. 그리고 이를 바탕으로 라플라스-푸리에 영역 파형역산에 대한 적절한 복소주파수 대역 및 선택기법을 설계하고자 한다. 이를 위해 균질한 음향-탄성 결합매질을 설정하고 해당 매질에서 1개의 송신원에서 생성한 음원에 대한 파동전파 모델링을 수행하였다.

첫 번째 주파수영역에서의 파동장 $u(w_r)$은 아래와 같이 시간영역에서의 파동장 $u(t)$에 대해 아래와 같은 푸리에 변환을 취함으로써 획득한다. 이와 같은 주파수영역에서의 파동장은 아래의 식(1)과 같은 수식으로 표현된다.

$$u(w_r)=\int_{-\infty}^{\infty} u(t)e^{-iw_r t}dt \tag{1}$$

여기서 $w_r(=2\pi f)$ 는 양의 각주파수, t는 시간을 각각 의미한다.

두 번째 라플라스영역에서의 파동장 $u(s)$은 아래의 식 (2)와 같이 시간영역에서의 파동장을 해당 라플라스 감쇄상수 s에 대한 라플라스 변환을 통해 계산해 낼 수 있다.

$$u(s)=\int_{0}^{\infty} u(t)e^{-st}dt \tag{2}$$

위 식에서 라플라스 파동장 $u(s)$는 시간영역에서의 파동장$u(t)$에 대해 주어진 라플라스 감쇄계수s에 의한 시간영역의 감쇄파동장의 영 주파수

성분과 같다. 이와 같은 감쇄파동장의 영 주파수 성분은 현장에서 획득한 탄성파 자료에 저주파수 성분 없더라도 이에 대한 파형역산을 가능하게 한다(Shin and Cha, 2008). 하지만 라플라스 감쇄파동장만을 이용하여 구축한 역산결과는 그 특성상 고해상도의 역산결과를 구축하기는 힘들다.

세 번째 라플라스-푸리에 영역에서의 파동장 $\tilde{u}(\omega)$은 아래에 제시된 식(3)과 같이 표현된다.

$$\tilde{u}(w) = u(w_r, s) = \int_0^\infty u(t) e^{-iw_r t} e^{-st} dt \tag{3}$$

여기서 라플라스-푸리에 영역 각주파수 $w(= w_r + is)$는 주파수영역에서의 각주파수 w_r과 라플라스 감쇄상수 s를 조합하여 구성된다. 만약 위의 식 (3)에서 만약 각 주파수 w_r이 0이면 시간영역 파동장은 앞의 식(2)에서 설명한 장파장 성분만을 같은 영주파수 성분의 감쇄파동장이 되며, 반대로 라플라스 감쇄상수 s가 0이면 식(1)에서 표현된 시간영역 파동장의 단파장 성분을 주로 포함하고 있는 주파수영역 파동장의 성향을 띄게 된다.

그림 1, 2, 3에서는 음향-탄성 결합매질에 대한 각각의 파동장을 도시하였다. 본 수치실험에 사용한 각주파수는 1Hz, 5Hz 그리고 10Hz이며 라플라스 감쇄상수의 경우 1, 5 그리고 10을 각각 사용하였다. 해당 모델은 가로 8 km, 수심 2km, 그리고 해저지층 4km로 구성하였고, 모델의 중앙에 1개의 싱글 임펄스 소스를 음원으로 설정하여 수치실험을 수행하였다.

그림 1에서는 결합매질에서 해수층에 해당되는 음향매질에서 획득한 압력장을 나타내고 있으며, 그림 2와 3에서는 해저지층을 대표하는 탄성매질에서의 탄성파 파동방정식을 통해 계산된 수평변위와 수직 변위에

대한 파동장을 각각 도시하였다. 그림을 자세히 살펴보면 각각의 파동장은 사용된 복소주파수의 성향에 따라 서로 상반된 경향성을 띄게 되며, 감쇄파동장과 주파수 성분이 서로 혼합된 경우에는 그 둘의 성향을 혼합한 형태의 경향성을 보였다. 또한 각각의 매질에 대한 파동장의 경향성은 매질에 상관없이 일정함을 보여준다.

정량적인 분석을 위해 그림 4에서는 주파수 5Hz에서의 주파수영역 파동장과 라플라스 감쇄상수 5를 사용하여 계산한 라플라스영역 파동장에서 추출한 가로 방향 트레이스를 그래프 형태로 비교하여 제시하였다. 그림에서 살펴보면 첫 번째 (a)에서는 음향매질에서 추출한 압력장에 대한 그래프를 도시하였고, (b)와 (c)에서는 탄성 매질에서의 수평 및 수직 변위에 대한 파동장 그래프를 도시하였다. 이 그래프를 통해 우리는 보다 정량적으로 각각의 대상매질에 대한 라플라스영역에서의 장파장 성향과 주파수영역에서의 단파장 성향에 대한 특징을 보다 자세히 분석해볼 수 있다.

분석결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다. 첫 번째 감쇄상수에 의해 계산된 라플라스영역 파동장의 경우에는 감쇄된 장파장 성분의 경향을 보이고 있으며, 반면 주파수영역 파동장의 경우 라플라스영역의 경우와 상반되는 단파장 파동장의 경향을 강하게 띄고 있음을 쉽게 알 수 있다. 이는 음향매질이건 혹은 탄성매질이건 상관없이 공통적으로 지니는 성향이며 이로 인해 어떠한 라플라스-푸리에 영역에서의 복소주파수 대역을 사용하는가에 따라서 해당 탄성파 자료에 대한 역산 결과가 장파장 경향을 띄게 되는지 단파장 경향을 띄게 되는지를 구별해 낼 수 있다. 또한 이를 바탕으로 적절한 라플라스 감쇄상수와 주파수 성분의 결합을 통해 시너지 효과를 창출해 낸다면, 보다 정확한 그리고 안정적인 파형역산의 수행이 가능하다. 하지만 라플라스-푸리에 영역에서의 복소주파수를 구

성할 시 기존의 알고리즘들에 비해 상당히 많은 주파수 성분이 구성되기 때문에 상당한 양의 계산과 컴퓨터 자원이 요구된다. 따라서 적절한 라플라스 감쇄상수와 주파수 성분의 선택기법이 요구된다.

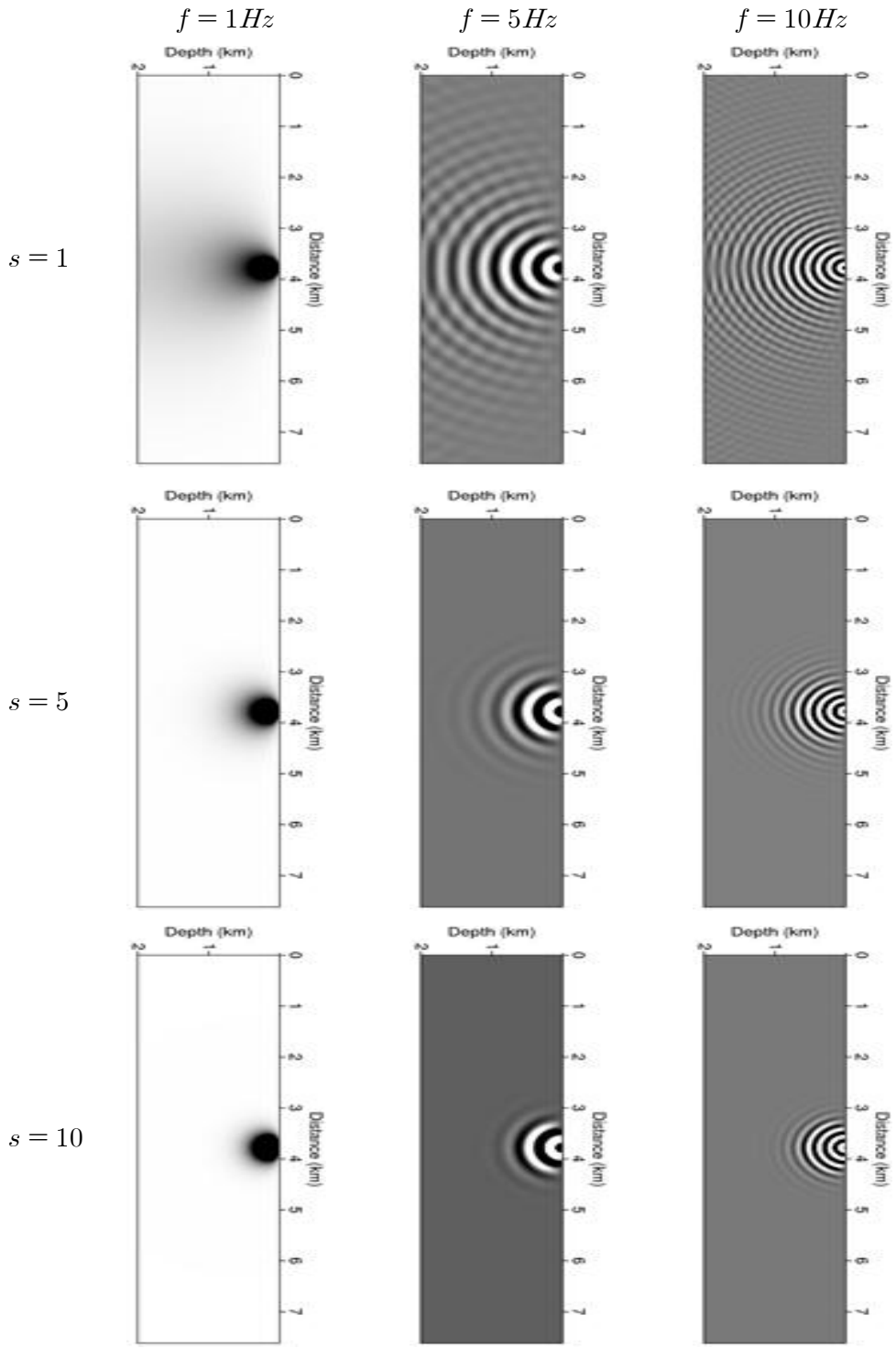


그림 1. 음향 매질에서의 라플라스 감쇄상수 및 주파수 성분에 따른 압력장(라플라스 감쇄상수 s :1, 5, 10; 주파수 f : 1Hz, 5Hz, 10Hz).

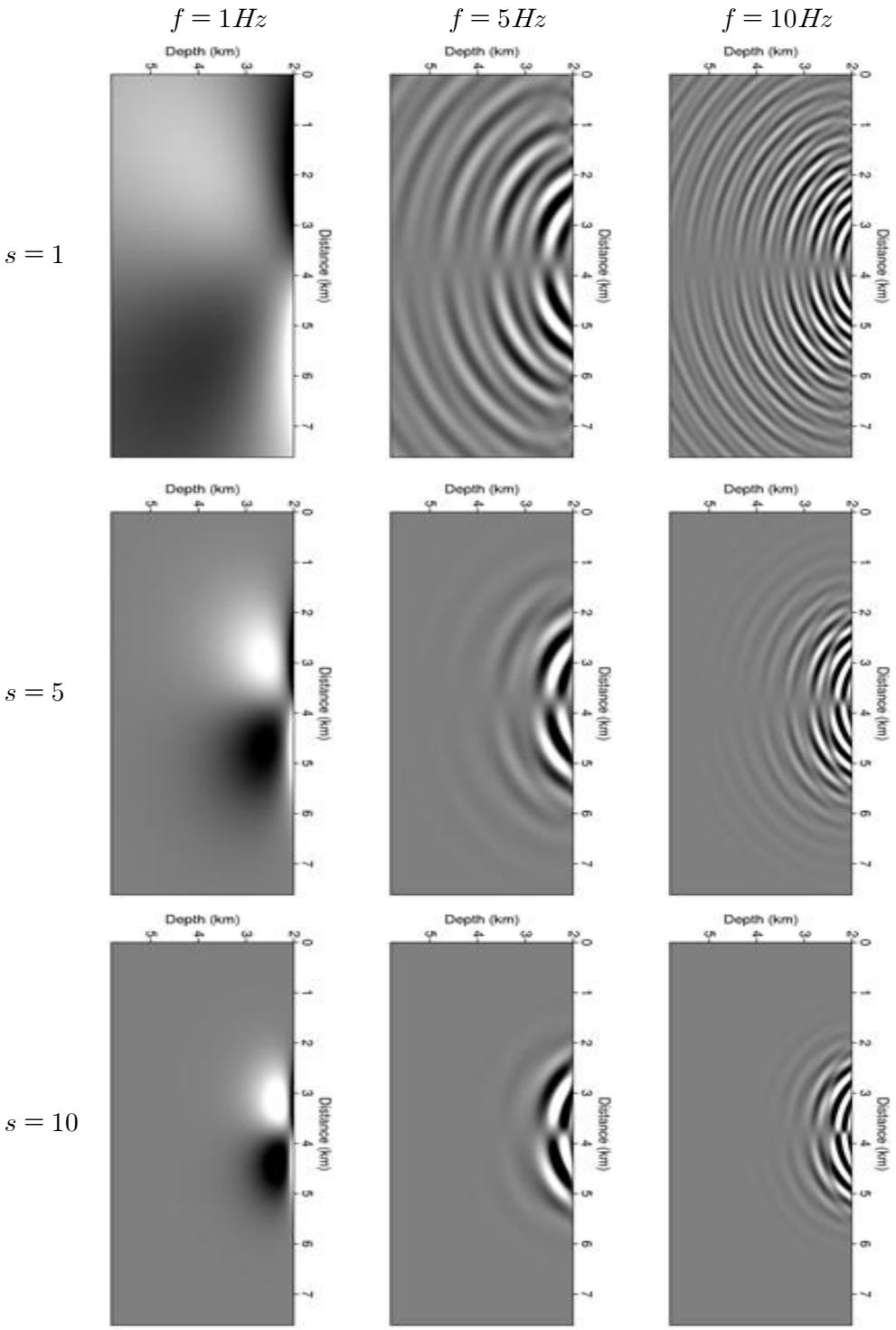


그림 2. 탄성 매질에서의 라플라스 감쇄상수 및 주파수 성분에 따른 수평변위 파동장 (라플라스 감쇄상수 s :1, 5, 10; 주파수 f : 1Hz, 5Hz, 10Hz).

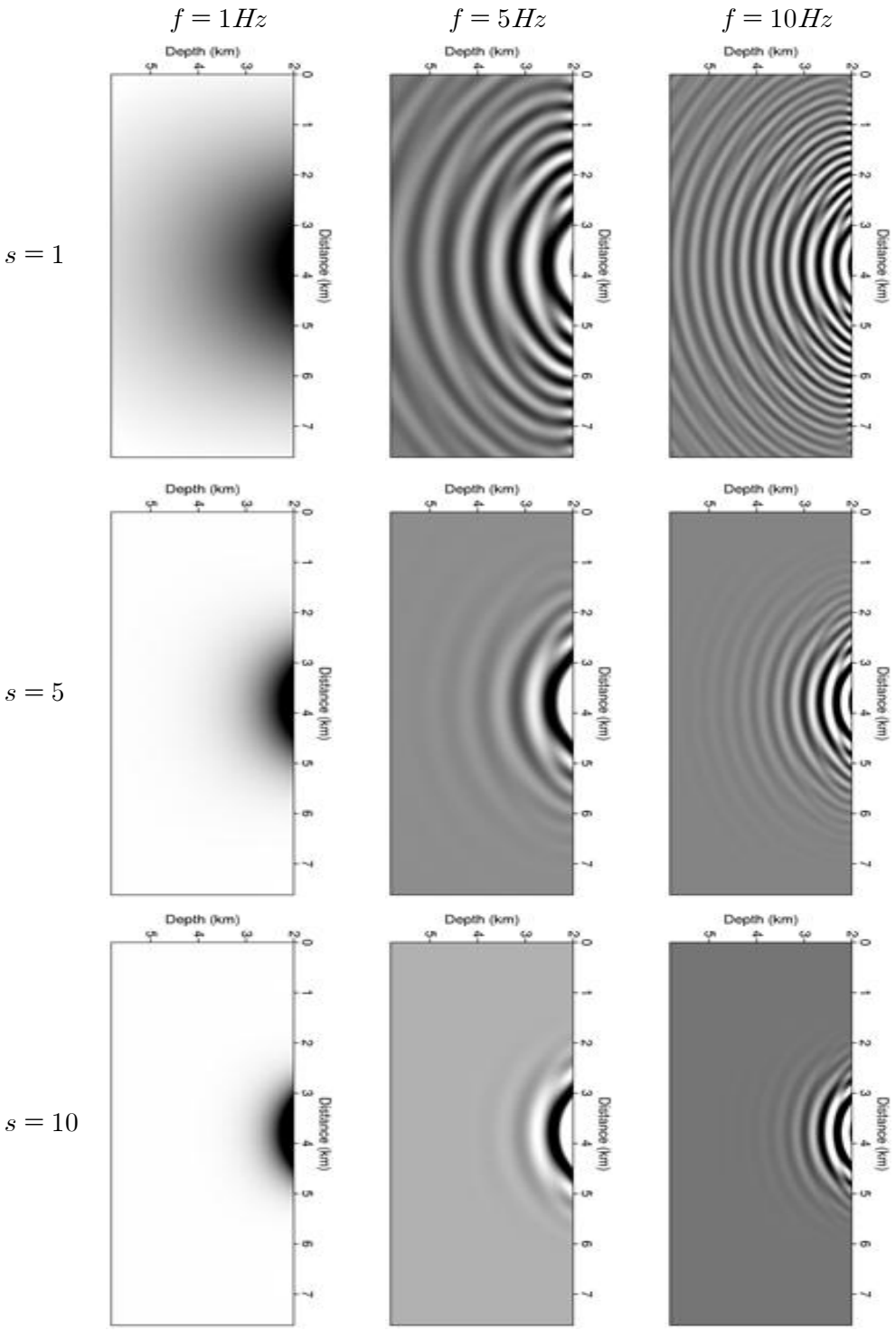
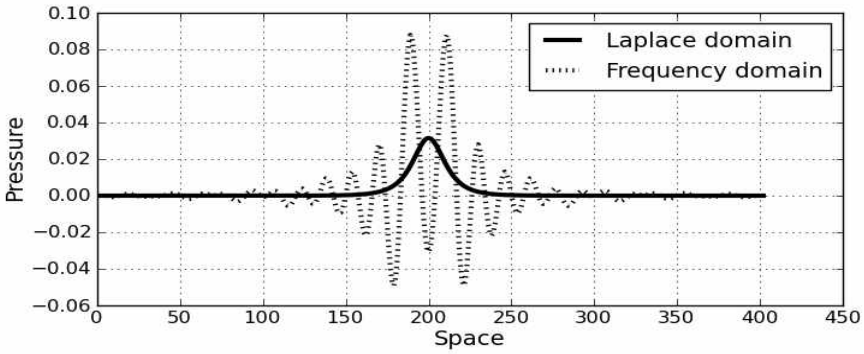
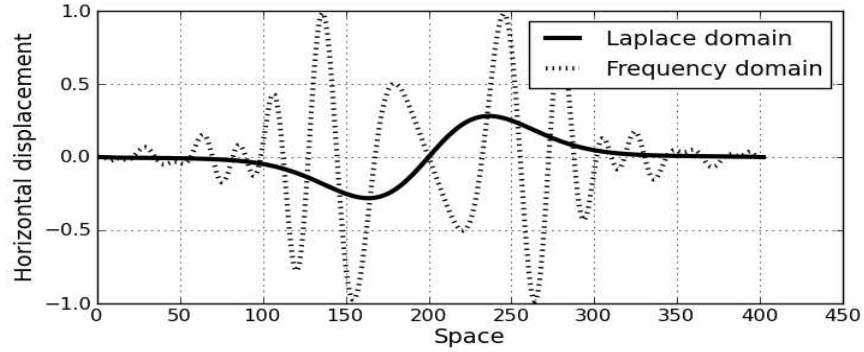


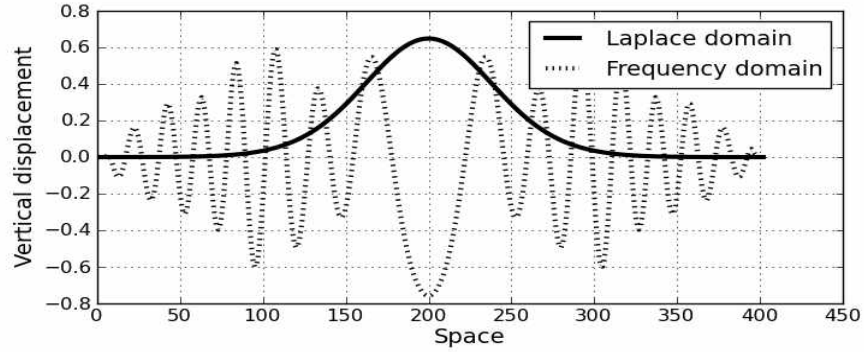
그림 3. 탄성 매질에서의 라플라스 감쇄상수 및 주파수 성분에 따른 수직변위 파동장 (라플라스 감쇄상수 s :1, 5, 10; 주파수 f : 1Hz, 5Hz, 10Hz).



(a)



(b)



(c)

그림 4. 음향-탄성 결합매질에서 추출한 라플라스 감쇄상수 및 주파수 성분에 따른 파동장 트레이스 비교; (a)음향 매질에서 추출한 압력 파동장 트레이스 (b)탄성 매질에서 추출한 수평변위 트레이스, (c) 탄성 매질에서 추출한 수직변위 트레이스.

2-2. 결합매질에서의 파동전파 모델링

이번 장에서는 음향 파동방정식과 탄성 파동방정식을 결합하여 구성한 음향-탄성 결합매질에 대한 파동전파 모델링 알고리즘의 이론을 기술한다. 사용한 모델링 기법은 유한 요소법이며, 라플라스-푸리에 변환에 의한 라플라스-푸리에 영역에서의 파동방정식에 대한 수식을 바탕으로 이론을 기술하였다.

우선 첫 번째로 음향매질에서의 파동방정식과 탄성 매질에서의 파동방정식을 제시하였다. 또한 음향매질에서의 압력 성분이 탄성 매질로 전파될 때 모드변환이 진행될 수 있도록 양쪽매질의 경계면에 대한 연속조건을 설명했다. 제시된 각각의 파동방정식과 해당 양쪽 매질사이의 경계면에 적용한 연속조건은 모두 유한 요소법을 이용하여 행렬식으로 표현하였다.

이어서 모델링을 수행하는 대상 매질에 대한 좌, 우 및 하부에 설정한 경계조건을 제시하였다. 실제 파동전파 환경에서는 무한한 크기의 반무한 매질에 대한 파동전파가 이루어진다. 하지만 수치적 기법을 통해 컴퓨터로 구현되는 파동전파 모델링의 경우 설정한 매질의 경계부에서는 인위적인 반사파가 발생한다. 이에 따라 이번 연구에서는 PML경계조건을 적용하여 이와 같은 경계면에서 발생하는 인위적인 반사파를 제거하였다. 그리고 이에 대한 내용은 이번 장의 2면에 제시하였다.

2-2-1. 유한요소법을 이용한 파동전파 모델링

실제 해상에서 수행되는 탄성파 탐사의 경우, 해수층 상부에 설치된 음원으로부터 생성된 파동은 해수층을 거쳐 해저지층으로 전파된다. 이때 압력장은 두 층의 경계면에서 수평 및 수직 변위로 모드변환되어 탄성매질로 전파되게 된다. 그리고 해저지층으로 투과된 파는 해저지층에 존재하는 반사면에 의해 다시 해수층으로 반사되고 이때 수직 및 수평변위는 다시 수층과 탄성매질의 경계면에서 압력장으로 변환되게 된다. 이런 물리적 현상은 실제 해양환경에서의 파동전파 양상을 반영한 것이며, 이를 모델링 알고리즘에 적용시키기 위해 Zienkiewicz et al. (2005)와 Komatitsch (2000)에 의해 개발된 음향매질과 탄성매질 사이의 경계면 연속 조건식을 사용하였다. 이와 같은 내용의 이해를 돕기 위해 그림 5에서는 해양 탐사 순서도와 이에 따른 실제 해저지형에서의 탐사환경과 이에 대한 파동 전파에 대한 그림을 제시하였다.

이번 연구에서는 실제의 해양 탐사환경을 정확히 묘사하기 위해서 불규칙한 해저면을 고려한 음향-탄성 결합매질을 구성하였다. 불규칙한 해저면을 표현하기 위하여 Kim et al. (2009)이 제안한 방법과 같이 삼각형 및 사각형 격자를 이용하여 불규칙한 해저면을 근사시켰다. 그림 6에서는 이번 연구에서 실제로 사용하는 불규칙한 해저 지형을 모사한 균질한 음향-탄성 결합매질에서의 P-wave 속도 모델을 도시하였다.

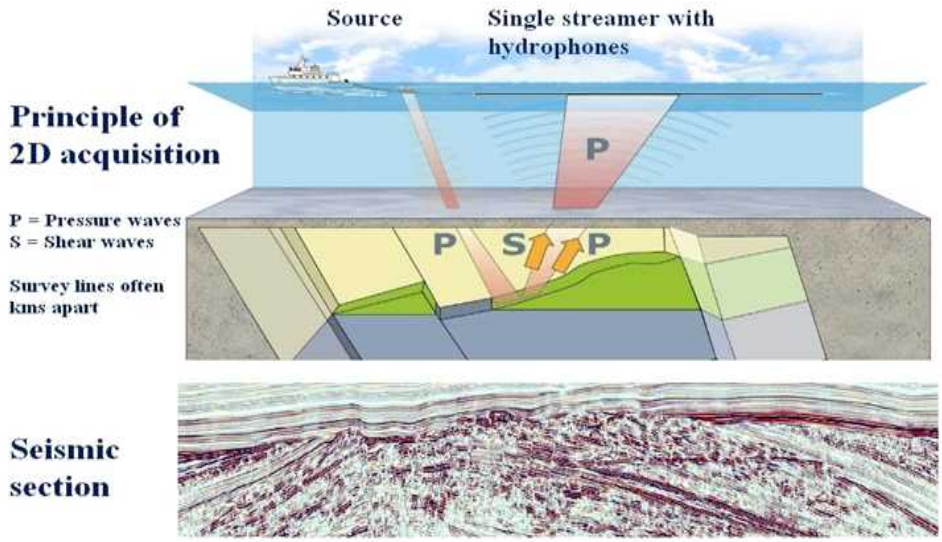


그림 5. 실제 해양 탐사환경 및 음향-탄성 결합매질에서의 파동전파양상 (Ikelle and Amundsen., Introduction to petroleum seismology, 2005).

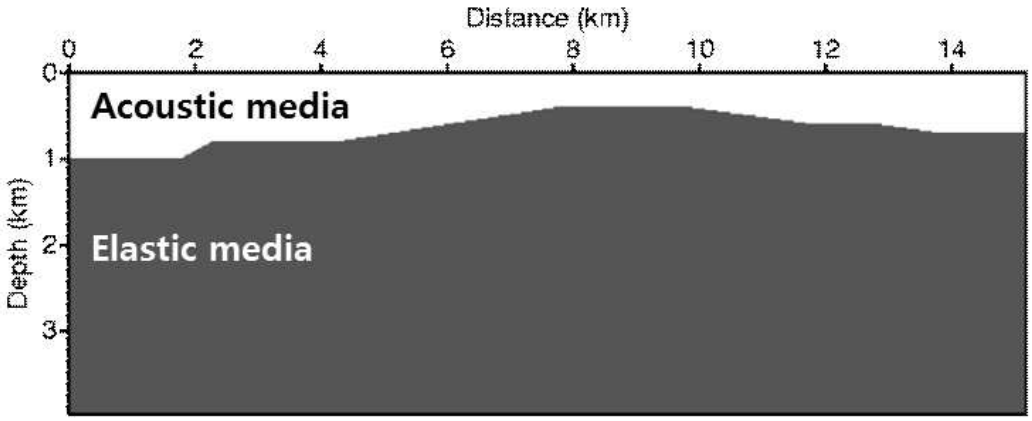


그림 6. 불규칙 해저 지형을 고려한 음향-탄성 결합매질.

라플라스-푸리에 영역에서의 음향 파동방정식은 시간영역에서의 파동방정식을 라플라스-푸리에 변환을 통해 아래의 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$-\frac{w^2}{c^2}\tilde{p}=\frac{\partial^2\tilde{p}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\tilde{p}}{\partial z^2}+\tilde{f} \tag{4}$$

여기서 w는 앞장에서 설명한 라플라스-푸리에 영역에서 사용하는 복소주파수, c는 음향매질에서의 P-wave 속도, x, z는 파동전파 대상 매질 전체에 대한 2차원 공간을 나타내며, $\tilde{p}$는 라플라스-푸리에 영역에서의 압력 파동장, $\tilde{f}$는 음원벡터를 나타낸다.

같은 맥락으로 결합매질 내에 해저지층에서의 파동전파를 구현하는 탄성파 파동방정식은 아래의 식(5) 와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
&\rho_E w^2\tilde{h}-\frac{\partial}{\partial x}\left\{(\lambda+2\mu)\frac{\partial\tilde{h}}{\partial x}+\lambda\frac{\partial\tilde{\nu}}{\partial z}\right\}-\frac{\partial}{\partial z}\left\{\mu\left(\frac{\partial\tilde{\nu}}{\partial x}+\frac{\partial\tilde{h}}{\partial z}\right)\right\}=0\\
&\rho_E w^2\tilde{\nu}-\frac{\partial}{\partial x}\left\{\mu\left(\frac{\partial\tilde{\nu}}{\partial x}+\frac{\partial\tilde{h}}{\partial z}\right)\right\}-\frac{\partial}{\partial z}\left\{\lambda\frac{\partial\tilde{h}}{\partial x}+(\lambda+2\mu)\frac{\partial\tilde{\nu}}{\partial z}\right\}=0
\end{aligned} \tag{5}$$

여기서 $\tilde{h}$와 $\tilde{\nu}$는 각각 라플라스영역에서 수평과 수직의 변위를 나타내며, ρ_E 는 탄성 매질의 밀도를, 람다(λ)와 뮤(μ)는 탄성 매질에 대한 라메상수(Lame´s constant)를 가리킨다.

위에서 제시한 음향 파동방정식 그리고 탄성 파동방정식을 결합하여 구성한 음향-탄성 결합매질에서는 음향매질에서 전파되는 압력성분의 파동장이 경계면에서 설정한 압력-변위 연속조건에 의해 탄성매질로 전파되면서 탄성매질에서의 변위로 바뀌게 된다. 또한 역으로 탄성매질로부터 반사되어 해수면으로 전파되는 경우, 탄성매질에서의 변위는 연속조건에 의해 다시 음향매질에서의 압

력으로 바뀌게 된다. 이는 아래의 식(6)와 (7)에서 제시하고 있는 음향매질과 탄성매질의 경계면에서 압력-변위 연속 조건(Zienkiewicz et al., 2005; Komatitsch et al., 2000)에 의해 계산된다.

$$\nabla p \cdot \mathrm{n} = -\rho_A \ddot{\mathrm{u}}_E \cdot \mathrm{n} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathrm{n} = -p\mathrm{n} \tag{7}$$

여기서ρ_A는 음향매질에 대한 밀도, $\ddot{\mathrm{u}}_E$ 는 시간에 대한 변위 벡터의 2차 미분값, n은 음향과 탄성 매질 사이 경계면에 대해 수직단위벡터, $\boldsymbol{\sigma}$는 대칭적인 2차 응력 텐서를 나타낸다.

유한 요소법을 사용하면 위에서 언급한 음향 파동방정식과 탄성 파동방정식 그리고 두 매질 사이 경계면에서의 연속조건은 각각의 행렬식으로 재구성할 수 있다. 우선 음향 매질에서의 파동방정식은 위에서 제시한 경계면에서의 연속조건과 함께 아래의 식 (8)과 같은 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$\left(\mathrm{K}^A + \mathrm{M}^A\right)\tilde{\mathrm{p}} + \mathrm{Q}^A \tilde{\mathrm{v}} = \tilde{\mathrm{f}} \tag{8}$$

여기서 K^A와 M^A는 음향매질에서의 강성행렬 및 질량행렬을 나타내고, Q^A는 음향 매질의 경계에서 정의된 경계 행렬이며, $\tilde{\mathrm{p}}$는 음향 매질에서의 라플라스-푸리에 영역 압력장벡터 그리고 $\tilde{\mathrm{v}}$는 탄성매질에서의 라플라스-푸리에 영역 수직변위벡터를 나타낸다.

탄성매질의 경우에는 아래의 식(9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\mathrm{K}^E + \mathrm{M}^E\right)\begin{pmatrix}\tilde{\mathrm{h}} \\ \tilde{\mathrm{v}}\end{pmatrix} + \mathrm{Q}^E \tilde{\mathrm{p}} = 0 \tag{9}$$

$$\mathrm{K}^{E}=\begin{bmatrix}\mathrm{K}^{11} & \mathrm{K}^{12}\\ \mathrm{K}^{21} & \mathrm{K}^{22}\end{bmatrix},\ \mathrm{M}^{E}=\begin{bmatrix}\mathrm{M}^{11} & 0\\ 0 & \mathrm{M}^{22}\end{bmatrix} \tag{10}$$

여기서, K^{E}와 M^{E}은 탄성매질에서의 강성행렬 및 질량행렬을 나타내고, $\tilde{\mathrm{h}}$는 탄성매질에서의 수평변위벡터, $\tilde{v}$는 수직 변위벡터, Q^{E}는 탄성 매질의 경계에서 정의된 경계 행렬, K^{ij}와 M^{ij}는 각각의 강성행렬과 질량행렬 성분들을 나타낸다.

위에서 제시했던 음향매질과 탄성매질에서의 유한요소법에 의해 정리한 행렬식들은 두 매질이 만나는 경계면에서의 경계조건을 만족시키는 음향-탄성 결합매질에서의 행렬식으로 아래와 같이 표현해 낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix}\mathrm{K}^{A}+\mathrm{M}^{A} & 0 & \mathrm{Q}^{A}\\ 0 & \mathrm{K}^{11}+\mathrm{M}^{11} & \mathrm{K}^{12}\\ [\mathrm{Q}^{E}]^{T} & \mathrm{K}^{21} & \mathrm{K}^{22}+\mathrm{M}^{22}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\tilde{\mathrm{p}}\\ \tilde{\mathrm{h}}\\ \tilde{\mathrm{v}}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\tilde{\mathrm{f}}\\ 0\\ 0\end{pmatrix} \tag{11}$$

위의 식(11)에서 제시한 행렬식은 기존 음향 혹은 탄성매질에서의 모델링과 같이 임피던스 행렬 S와 파동장 벡터 $\tilde{\mathrm{u}}=\tilde{\mathrm{u}}(\tilde{\mathrm{p}},\tilde{\mathrm{h}},\tilde{\mathrm{v}})$로 아래의 식(12)와 같이 축약하여 표현할 수 있다.

$$\mathrm{S}\tilde{\mathrm{u}}=\tilde{\mathrm{f}} \tag{12}$$

이번 연구에서는 앞에서 제시한 것과 같이 음향 파동방정식과 탄성 파동방정식을 결합한 음향-탄성 결합매질에서의 파동방정식을 유한 요소법을 사용하여 파동전파 모델링을 구현하였다. 계산을 위해 식 (12)에서 제시한 행렬식을 멀티 프론탈 매트릭스 솔버를 이용하여 풀어냄으로써 해당 매질에 대한 파동전파 모델링을 구현하였다.

2-2-2. PML 경계조건의 적용

파동전파 모델링 기법의 파형역산 적용에 있어 문제가 되는 것 중의 하나가 사용한 모델에 대한 좌, 우 그리고 하부에 대한 경계조건이다. 실제의 자연현상에서는 음원에서 발생되는 파동은 무한하다고 가정하는 지층을 따라 계속적으로 전파해 나간다. 하지만 컴퓨터를 이용하는 모델링 기법에서는 제한된 영역에 대한 경계조건이 문제가 된다. 현재까지 개발된 혹은 보유하고 있는 제한된 컴퓨터 환경에서는 실제와 같은 무한대의 공간을 수치적으로 정의할 수 없다. 따라서 유한차분법이나 유한요소법 등의 수치해석기법을 이용하는 파동 전파 모델링의 경우 유한하게 정의된 해당 모델링 영역의 경계에는 인위적인 경계면이 형성된다. 이러한 인위적인 경계면으로 인하여 실제로 존재하지 않는 인위적인 반사파가 나타나고, 이는 모델링 및 파형역산을 수행할 때 잡음으로 오인되는 문제를 야기한다. 따라서 이와 같이 인위적으로 영역의 경계부분에서 발생되는 인위적인 반사파를 제거하기 위해 본 논문에서는 Jean-Pierre Bérenger (1994)에 의해서 제안된 PML 경계조건(perfect matched layer)을 도입하였다.

기존의 유한요소법을 이용하는 파동 전파 모델링 기법에서는 대부분 흡수 경계조건(Clayton and Engquist, 1977)을 사용하였다. 하지만 흡수 경계조건은 일차원 모델링에서는 그 식이 간단하지만, 그 이상의 차원의 경우 수식이 매우 복잡해지며, 이에 따라 불안정한 거동을 보인다. 또한 완벽하게 해당 경계부에서의 반사파를 제거하지 못한다. 반면 PML경계조건의 경우 기존의 방법보다 그 알고리즘이 간단하고, 모델링 영역 주위를 둘러싸는 새로운 층을 만들고 그 층에 적용되는 감쇄 함수를 이용

하는 방식으로 구동되며 또한 음향매질 뿐 아니라 탄성매질의 경우에도 해당 반사파를 효과적으로 흡수한다. 따라서 기존의 흡수 경계조건 보다 안정적이면서도 간단한 알고리즘인 PML 경계조건을 음향-탄성 결합매질에서의 파동 전파 모델링에 적용하였다.

2-3. 파형역산 알고리즘

2-3-1. 목적함수

목적함수는 현장에서 관측된 자료와 파동전파 모델링에 의해 계산된 모델링된 자료와의 차이를 측정하는 함수이다. 완전 파형역산은 이와 같은 목적함수를 최소화하는 방향으로 해당 매질을 업데이트 시키는 연산을 반복적으로 수행하면서 해당 매개변수를 구축해 나가는 알고리즘이다. 기존의 파형역산 알고리즘은 주로 최소자승법에 의한 목적함수($l2$- norm)를 사용하였다. 하지만 최소자승법을 사용하여 구축한 파형역산결과는 때로 민감한 파동방정식의 비선형성 때문에 만족스럽지 못한 결과를 도출 시키는 경우가 있었고, 이에 대한 해결책으로, 최소절대값 목적함수 ($l1$-norm), 후버(Huber) 목적함수 및 로그(logarithmic) 목적함수 등과 같은 다양한 목적함수들이 연구 개발되었다 (Pratt et al., 1998; Shin and Min, 2006; Ha et al., 2009).

이번 연구에서는 라플라스-푸리에 영역에서의 파형역산을 다룬다. 이 경우 다양한 범위를 갖는 라플라스 감쇄계수가 사용되고, 이에 따라 감쇄파동장의 사용을 통한 파형역산이 수행된다. 이 경우 감쇄상수로 인해 파동장은 아주 작은 값을 갖는다. 이와 같은 이유로 라플라스-푸리에 파형역산에서는 기존에 쓰였던 최소자승법에 의한 목적함수($l2$- norm)를 사용할 수 없다. 따라서 이번 연구에서는 감쇄파동장과 같은 작은 값에 대한 잔차를 정의해 낼 수 있는 Shin and Min (2006)에 의해 제안된 로그 목적함수를 도입하였다.

로그 목적함수는 E 로 정의하며 아래의 식(13)과 같은 식으로 정의할 수 있다.

$$E = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n_s}\sum_{j=1}^{n_r}\left(\ln\frac{\widetilde{u_{ij}}}{\widetilde{d_{ij}}}\right)^2 \tag{13}$$

여기서 i와 j는 각각 송신원과 수신기를 나타내고, n_s와 n_r은 송신원과 수신기의 개수를 나타내며, $\widetilde{u_{ij}}$와 $\widetilde{d_{ij}}$는 각각 라플라스-푸리에 영역에서 모델링된 파동장과 관측된 파동장을 나타낸다.

2-3-2. 역전파 알고리즘을 이용한 파형역산

양방향 파동방정식을 이용한 완전 파형역산은 앞에서 정의한 목적함수를 최소화하는 방향으로 해당 매질을 반복적으로 갱신시켜 나감으로써 대상 매질의 매개변수를 규명해 내는 기술이다. 이와 같이 목적함수에 대한 최소화 과정을 통한 다양한 역산 기술들이 많이 소개되어 있지만(Virieux and Operto, 2009), 그중에서도 구배법에 기초를 둔 역산 기법들이 가장 많이 사용되고, 가장 효율적인 방법이라 알려져 있다.

구배법에서는 Full-Newton 방법과 Gauss-Newton 방법을 이용하는 파형역산 알고리즘이 있으며, 이와 같은 계산을 위해서는 대규모 메모리가 요구된다. 이에 따라 구배법의 사용에 있어 많은 컴퓨터자원과 계산을 감당하는 것을 피하기 위해 Newton-CG 방법(Pyun et al., 2011)과 같은 간접적으로 근사된 기법들이 소개되었다.

본 연구에서는 효율적인 계산을 위해 역전파 알고리즘(Pratt et al., 1998)을 도입하여 파형역산을 위한 모델변수 m_k 에 대한 목적함수의 구배도를 계산하였다. 이를 위해 앞의 2장 2절에서 기술한 파동전파 모델링 행렬식에 대한 편미분을 이용하였다. 모델링 행렬식을 사용하는 편미분 파동장에 대한 계산은 아래와 같이 기술할 수 있다.

앞의 모델링 부분에서 최종적으로 정의된 식(12)에 대해 양 변에 모델 변수에 m_k를 이용하여 이에 대한 편미분을 취하면 아래의 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathrm{S}\frac{\partial \tilde{\mathrm{u}}}{\partial m_k} = -\frac{\partial \mathrm{S}}{\partial m_k}\tilde{\mathrm{u}} \tag{14}$$

여기서 m_k는 해당 매질에 대한 k번째 성분의 매개변수를 나타내며, $\mathrm{v}_{m_k} = -\frac{\partial \mathrm{S}}{\partial m_k}\tilde{\mathrm{u}}$ 는 해당 매질에서의 가상 송신원(virtual source) 벡터를 나타낸다. 여기서 S^{-1}는 유한 요소법에 의해 음향-탄성 결합매질에서 수치 근사적으로 획득한 임피던스 행렬의 역행렬을 의미한다.

위의 식(14)는 가상송신원식을 대입하여 양 변을 정리하면 아래의 식(15)와 같이 편미분파동장을 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial \tilde{\mathrm{u}}}{\partial m_k} = \mathrm{S}^{-1}\mathrm{v}_{m_k} \tag{15}$$

본 연구에서 사용한 목적함수의 구배도 역시 앞의 모델링 행렬식과 같이 모델 변수에 m_k에 대한 편미분을 취하면 아래의 식 (16)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla_{m_k} E = \frac{\partial E}{\partial m_k} = \sum_{i=1}^{n_r}\left\{\frac{1}{\tilde{u}_i}\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial m_k}\ln\left[\frac{\tilde{u}_i}{\tilde{d}_i}\right]\right\} \tag{16}$$

이때, 앞에서 제시한 식(15)에서의 편미분파동장을 위의 식(16)에 대입하면 아래와 같은 간단한 행렬식을 얻는다.

$$\nabla_{m_k} E = \frac{\partial E}{\partial m_k} = \left(\mathrm{v}_{m_k}\right)^T \left(S^{-1}\right)^T \mathrm{r} \tag{17}$$

여기서 r은 아래와 같이 주어진다.

$$\mathrm{r} = \left[\frac{1}{\tilde{u}_1} \ln \frac{\tilde{u}_1}{\tilde{d}_1} \quad \frac{1}{\tilde{u}_2} \ln \frac{\tilde{u}_2}{\tilde{d}_2} \quad \cdots \quad \frac{1}{\tilde{u}_{n_r}} \ln \frac{\tilde{u}_{n_r}}{\tilde{d}_{n_r}} \quad 0 \quad \cdots \quad 0 \right]^T \tag{18}$$

파형역산 알고리즘에서 정의된 목적함수는 그 값이 최소가 되는 방향으로 아래의 식(19)과 같이 초기에 설정한 모델의 변수를 반복 계산을 통해 갱신해 나간다.

$$m_k^{(l+1)} = m_k^{(l)} - \alpha^{(l)} \nabla_{m_k} E^{(l)} \tag{19}$$

여기서 k는 반복 횟수이고 $\alpha^{(k)}$는 k번째 반복 횟수에서 목적함수의 구배도 $\nabla_{m_k} E^{(k)}$이 최소가 되는 방향으로 해당 매질 변수를 갱신시키기 위해 설정된 갱신길이(step length)이다.

파형역산의 수행에 있어 본 알고리즘은 위의 식 (19)를 이용하여 매개변수를 적절히 갱신해 나가야 한다. 이때 최대경사방향은 유사-헤시안 행렬의 대각성분에 의해 정규화를 수행한다(Shin et al., 2001b). 또한, 매개변수가 갱신되도록 라플라스 감쇄상수와 주파수 성분 그리고 매개변수벡터에 대해 정규화된 최대경사방향의 합계를 낸다. 그리하면 위에서 언급했었던 매개변수의 갱신에 대한 식은 아래의 식(20)과 같이 표현할 수 있다.

$$m_k^{(l+1)} = m_k^{(l)} - \alpha^{(l)} NRM \left[\sum_{w=1}^{m_f} NRM \left\{ \frac{\mathrm{Re}\left[\sum_{i=1}^{n_s} \left(\mathbf{v}_{m_k}\right)^T \left(S^{-1}\right)^T \mathbf{r} \right]_w}{\mathrm{Re}\left[\sum_{i=1}^{n_s} \left(\mathbf{v}_{m_k}\right)^T \left(\mathbf{v}_{m_k}\right) \right]_w + \Pi} \right\} \right] \quad (20)$$

여기서 l은 해당 반복계산 수를 의미하며, $\alpha^{(l)}$는 해당 반복 계산횟수에서의 갱신 길이를 나타낸다. 또한 n_s는 사용한 자료의 총 음원 개수를 의미하며, w은 라플라스 감쇄상수와 주파수를 표시하는 수이다. Π는 나눗셈을 안정화시키기 위한 감쇄 요소이며, NRM 은 주어진 벡터항에 대한 정규화 연산을 의미한다. 이와 같은 반복 계산법에 의해 갱신된 매개변수는 그 오차가 기준까지 내려갈 때까지 이 과정이 반복된다.

그림 7에서는 이와 같은 파형역산에 대한 순서도를 제시함으로써 전체적인 알고리즘을 정리하였다. 즉, 획득한 탐사자료와 음향-탄성 결합매질에서의 파동전파 모델링을 통해 구축한 모델링 자료와의 차이에 따른 로그 목적함수를 구성한다. 그리고 잔차를 역전파 시켜 해당 목적함수의 구배도를 산정하고, 유사-헤시안 행렬을 계산한다. 계산한 유사-헤시안은 역전파 알고리즘에 의해 구축한 구배도를 정규화 시키는데 사용한다. 이러한 절차를 걸쳐 계산된 최대 급경사 방향은 반복적인 수행을 통해 해당매질을 갱신하고 결국 적절한 수준의 RMS (Root mean square) 에러를 갖는 최종 역산 결과를 구축하게 된다.

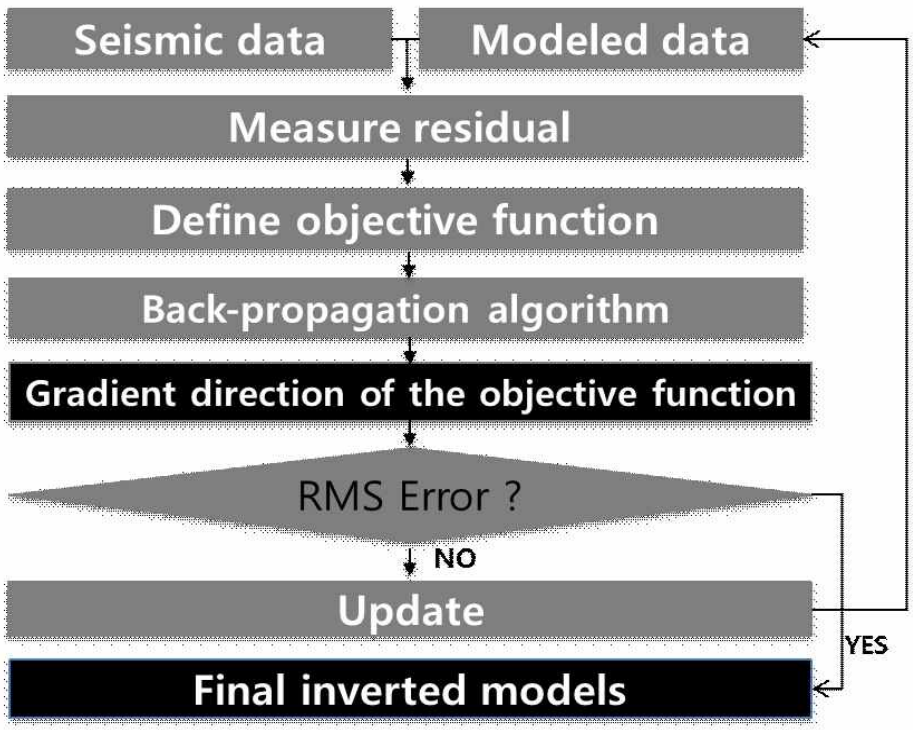


그림 7. 역전파 알고리즘을 이용한 완전파형역산 알고리즘 순서도

2-3-3. 송신파형역산

파형역산의 수행 시 모델 변수를 반복 계산법에 의해 갱신해 나가게 되는데 이때 송신파형 역산 알고리즘도 같이 계산하게 되면, 보다 정확한 역산결과의 구축이 가능하다. 파형역산 알고리즘에서의 송신원 함수는 진폭과 위상을 분리하여 추정될 수 있다 (Shin and Min, 2006). 송신파형역산에 대한 목적함수는 아래와 같이 쓰일 수 있다.

$$E_s = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n_s}\sum_{j=1}^{n_r}\left[\left(\ln\left(A^{src}A_{ij}^{G}/A_{ij}^{d}\right)\right)^2 + \left(\theta^{src} + \theta_{ij}^{G} - \theta_{ij}^{d}\right)\right] \tag{21}$$

여기서 A와 θ는 각각 진폭과 위상이고, 윗 첨자 src, G, d는 각각 송신원 함수, 그린함수, 관측 자료를 나타낸다. 그러므로 모델링되고 관측된 자료는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$u_{ij} = A^{src}A_{ij}^{G}e^{i(\theta^{src}+\theta_{ij}^{G})},\ d_{ij} = A_{ij}^{d}e^{i\theta_{ij}^{d}} \tag{22}$$

여기서 n_s와 n_r은 송신원과 수신기의 총 개수이다. 송신원 함수의 로그 진폭을 $z = \ln A^{src}$로 정의하면, 진폭을 추정하는 것에 대한 목적함수의 구배도와 그에 대한 헤시안 행렬은 각각 아래와 같다.

$$\frac{\partial E_s}{\partial z} = \sum_{i=1}^{n_s}\sum_{j=1}^{n_r}\mathrm{Re}\left[z + \ln\left(A_{ij}^{G}/A_{ij}^{d}\right)\right] \tag{23}$$

$$\frac{\partial^2 E_s}{\partial z^2} = \sum_{i=1}^{n_s}\sum_{j=1}^{n_r}1 \tag{24}$$

아래의 식을 이용하여 송신원 함수의 진폭을 갱신함으로써 진폭을 추정할

수 있다.

$$z^{(it+1)} = z^{(it)} - \frac{\sum_{i=1}^{n_s}\sum_{j=1}^{n_r}\left[z^{(it)} + \ln(A_{ij}^{G}/A_{ij}^{d})\right]}{\sum_{i=1}^{n_s}\sum_{j=1}^{n_r}1} = \frac{\sum_{i=1}^{n_s}\sum_{j=1}^{n_r}\ln(A_{ij}^{G}/A_{ij}^{d})}{\sum_{i=1}^{n_s}\sum_{j=1}^{n_r}1} \qquad (25)$$

여기서 윗 첨자 (it)는 반복 횟수를 나타낸다.

2-4. 복소주파수 선택기법

라플라스-푸리에 영역 파형역산 알고리즘은 기존에 개발되었던 라플라스영역 파형역산과 주파수영역 파형역산에서 사용하는 라플라스 감쇄상수와 주파수를 적절히 조합함으로써 보다 안정적으로 고해상도의 역산결과를 구축해 내는데 그 목적이 있다.

앞에서 기술한 대로 라플라스 감쇄상수를 이용하는 기존의 라플라스영역 파형역산 알고리즘은 현장자료에 포함되어 있는 장파장 성분만을 다루며, 이는 결국 실제 데이터에 대한 장파장 속도모델만을 구축해 낼 수 있음을 확인하였다. 반면 주파수영역 파동장의 경우 현장자료에 포함된 단파장 정보를 다루며 따라서 해당 탐사자료에 대한 파형역산의 수행 시 해당 매개변수에 대한 단파장 성분의 형태만을 구축해 낼 수 있다는 사실이 입증되었다. 이번 연구에서는 음향-탄성 결합매질에 대한 파형역산 알고리즘을 라플라스-푸리에 영역으로 확장하고 동시에 파형역산에서 사용될 주파수 성분과 라플라스 감쇄상수에 대한 선택기법을 제안함으로써 안정적이면서도 고해상도의 역산결과를 효율적으로 구축할 수 있도록 하였다.

아래 제시된 그림 8에서는 기존에 제안되었던 다양한 주파수 및 라플라스 감쇄상수에 대한 파형역산과 함께 이번 연구에서 사용하는 라플라스-푸리에 영역 복소주파수 선택기법을 제시하였다. 해당 그림에서 첫 번째 (a)에 제시된 그래프는 일반적으로 통용되었던 주파수영역 파형역산 알고리즘에서의 주파수 구성을 나타낸다. 이 경우 사용된 복소주파수는 설정한 전체 주파수 대역에 대해 한 가지 종류의 아주 작은 값의 감쇄상수로 그 주파수 대역이 구성된다. 기존의 일반적인 주파수영역 파형

역산에서 사용되는 감쇄상수는 일반적으로 0.1 내지는 0.5 정도의 값이 사용되었다. 이와 같은 복소주파수의 구성을 통해 파형역산을 수행하면 단파장 성향의 파동장에 의해 해당 지질구조에 대한 정확한 매개변수 값을 구축할 수 없으며, 단파장 성분의 구조만 나타나는 역산결과만을 구축해 낼 수 있다.

반면 두 번째 (b)에 제시된 그래프는 영 주파수 성분의 감쇄상수로 구성된 복소주파수 대역으로 Shin and Cha (2008)가 제안한 라플라스영역 파형역산 알고리즘에서 사용되는 복소주파수 대역이라 할 수 있다. 이 선택기법의 경우 모든 라플라스 감쇄상수는 영주파수성분에 대해 설정된 라플라스 감쇄상수에 따라 일괄적으로 파형역산이 진행됨을 알 수 있다. 이 경우에는 앞에서의 주파수영역 파형역산과는 상반되는 장파장 성분에 대한 파형역산의 수행을 통해 오직 장파장 역산결과의 구축이 가능하다.

세 번째 그래프 (c)에서는 앞에서 제시했던 주파수 성분과 라플라스 감쇄상수 성분을 혼합시킨 형태의 라플라스-푸리에 영역에서의 복소주파수 구성을 제시하고 있는데, 이는 2010년 Shin et al에 의해 제안된 단일 주파수에 대한 순차 파형역산 기법이다. 이 기법은 기존의 주파수영역과 라플라스영역에서의 주파수 선택을 혼합한 형태이다. 즉, 라플라스 감쇄상수와 주파수 대역을 그 순서와 크기에 따라 혼합하여 해당 라플라스-푸리에 복소주파수 루프를 구성한다. 여기서 가장 큰 차이점은 설정된 복소주파수 대역을 일괄적으로 계산해 내는 것이 아니라, 구성된 루프 내 각각의 1개의 복소주파수에 대해 순차적으로 그 값에 대한 역산이 수행되도록 설계되었다는 것이다. 이 경우에는 단순히 1개 복소주파수 성분만을 사용하기 때문에 단일코어 컴퓨팅 환경에서도 파형역산의 수행이 가능하다는 큰 장점을 가지고 있다. 하지만 역산의 수행에 있어 보다

많은 시간이 요구된다.

네 번째 그래프(d)에서는 2종류의 복소주파수 대역을 구성하고 각각의 복소주파수 대역에 대해 순차적으로 역산을 수행하는 기법이다. 해당 그래프에서 제시된 것과 같이 첫 번째 단계에서 사용된 복소주파수 대역은 오직 라플라스 감쇄상수로만 구성된다. 그리고 두 번째 단계에서는 실주파수 성분을 이용하여 구성한 복소주파수 대역을 사용하여 최종 역산결과를 구축한다. 이는 감쇄상수로만 구성된 첫번째 복소주파수 대역(라플라스 감쇄상수로 구성)에 의해 장파장 역산모델을 구축하고 이를 바탕으로 두 번째 복소주파수 대역(실 주파수 성분으로 구성)에 의한 파형역산을 통해 궁극적으로 고해상도의 최종 역산결과의 도출에 그 목적이 있다.

마지막에 제시된 그래프는 Kang et al. (2012)에 의해 제안된 복소주파수 선택적 기법으로 총 4가지의 복소주파수 대역을 사용한다. 이때 선택한 총 4가지의 복소주파수대역은 각각 단파장과 장파장 그리고 중파장 성분들을 고루 섞어 이를 구성하였다. 이 경우에는 선택한 총 4개의 주파수 대역에 대해 각각 순차적으로 장파장-단파장-중파장-단파장 성분의 복소주파수 대역을 순차적으로 이용하여 파형역산을 수행함으로써 고해상도의 최종 역산결과를 도출해 내는 알고리즘이다. 표 1에서는 앞에서 제시한 총 다섯 가지 복소주파수 선택기법에 대한 장, 단점을 정리하여 표로 제시하였다.

수치예제에서는 음향-탄성 결합매질에서의 라플라스-푸리에 영역 파형역산 알고리즘에 대한 타당성을 증명하기 위해 위에서 언급한 총 5가지의 복소주파수 대역에 대한 선택기법을 이용하여 이에 대한 역산결과들을 모두 수록하고 이를 비교 분석하였다.

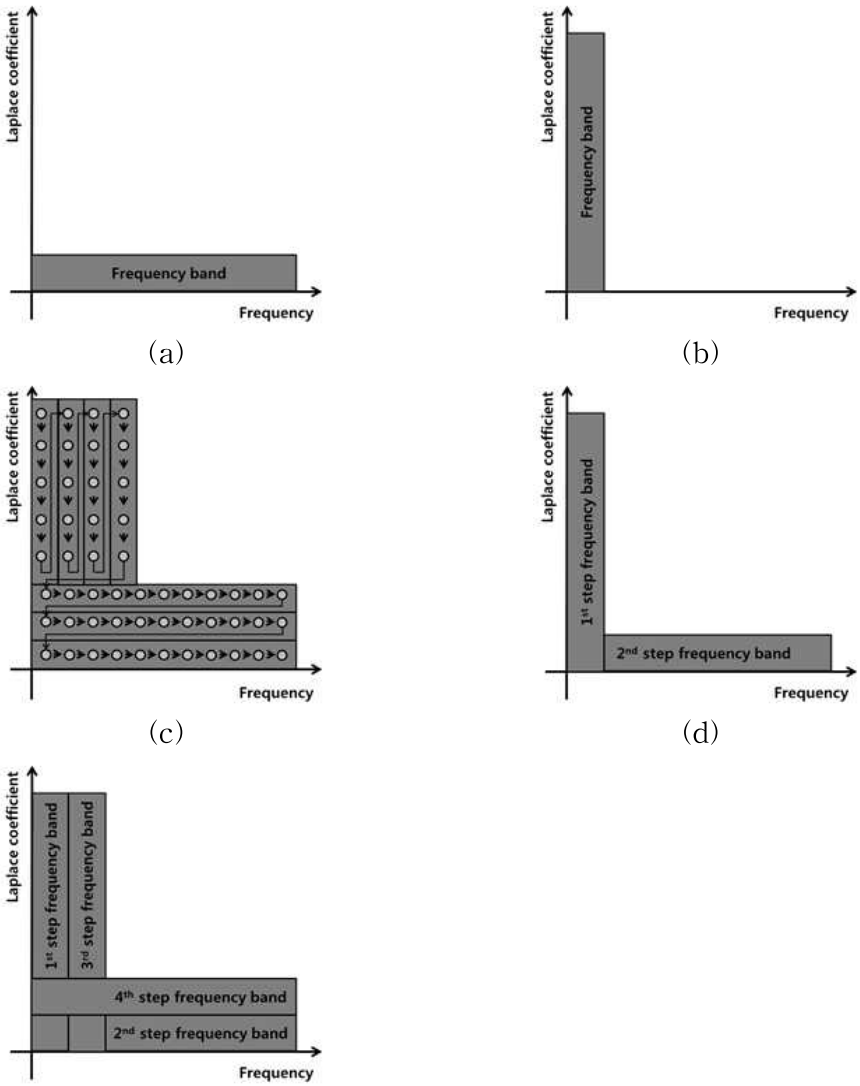


그림 8. 라플라스-푸리에 영역에서의 복소주파수 선택기법.

선택기법	설 명	
(a) 라플라스영역	장점	영주파수성분의 감쇄파동장에 의한 역산을 통한 장파장 속도모델 구축 가능
	단점	장파장 속도모델 구축은 가능하지만 고 해상도의 역산결과 구축 불가
(b) 주파수영역	장점	단파장 성분을 이용한 파형역산으로 인해 세부적인 지질 구조 규명
	단점	장파장 성분의 부재에 따른 정확한 매질의 매개 변수 규명 불가
(c) 단일 주파수에 의한 순차파형역산	장점	단일 주파수의 사용으로 단일 코어 환경에서의 라플라스-푸리에 영역 파형역산 가능
	단점	라플라스-푸리에 영역의 특성상 많은 복소주파수 성분에 대한 계산이 요구됨에 따라 많은 시간이 소요됨
(d) 2개 복소주파수 대역	장점	라플라스 감쇄상수와 주파수 성분에 대한 적절한 혼합을 통한 정확한 역산결과 구축
	단점	4개의 복소주파수 대역에 의한 파형역산과 비교 시 역산 결과의 해상도가 낮음
(e) 4개 복소주파수 대역	장점	가장 역산결과 구축
	단점	앞에서 제시한 2개 복소주파수 대역을 통한 파형역산보다 2배의 계산량과 시간이 소요됨.

표 1. 복소주파수 선택기법에 대한 장, 단점 정리.

2-5. 구배도 보정기법

본 연구에서 제시한 파형역산 알고리즘은 역전파 알고리즘을 이용하여 구배도를 구축하고 이를 바탕으로 매개변수를 갱신해 나가면서 최종 역산결과를 구축해 낸다. 본 알고리즘에서 구배도는 해당 매개변수를 갱신해 나가는 방향이며 이를 통해 직접적으로 설정한 초기모델로부터 역산결과가 구축된다. 하지만 라플라스 감쇄파동장에 대한 역전파 알고리즘에 의해 구축된 기존의 구배도는 음향매질과 탄성매질의 경계부분인 해저 지층 상부에서 잘못된 값으로 구배도가 구축되는 현상이 발생된다. 이는 최종적으로 실제모델에 존재하지 않는 고속도층이 해저지층 상부에 나타나도록 하는 원인이 된다. 또한 암염돔이 존재하는 모델에 대한 구배도에서는 본래 실제모델에 존재하는 암염돔이 분포한 구역 이상의 넓은 범위로 수렴되는 현상이 발생된다. 이는 실제 모델에 대한 암염돔 구조의 정확한 파형역산 결과 구축에 방해가 된다. 이에 따라 이번 논문에서는 기존의 역전파 알고리즘에 의해 구축한 구배도에서 나타나는 잘못된 구배도를 보정함으로써 정확한 장파장 역산결과를 구축해 낼 수 있는 구배도 보정기법을 제안하였다.

이번 장에서는 이와 같은 구배도 보정기법의 연구배경과 함께 해당 기술의 구축을 위해 수행했던 다양한 예제들을 제시하였다. 이어서 보정기술의 원리와 알고리즘의 구성을 자세히 설명하였다. 또한 인공합성자료 및 현장자료에 대한 보정된 구배도를 제시하고 이를 기존의 구배도와 비교 분석함으로써 제시한 알고리즘에 대한 타당성을 증명하였다.

2-5-1. 구배도 보정기법

음향-탄성 결합매질에 대한 장파장 역산결과의 구축에 있어 기존의 구배도가 가지는 가장 큰 문제점은 역산결과에서 실제로 존재하지 않는 부분에 고속도층이 구축된다는 점이다. 또한 암염돔 모델의 경우 실제 모델에 존재하는 암염돔 구조에 대한 그 규모 이상으로 해당 구배도가 구축됨으로써 실제 모델보다 큰 규모의 암염돔이 역산결과에 구축되는 문제가 발생된다. 이와 같은 문제의 해결을 위해 구배도 보정은 해당 구배도에 대해 큰 값을 가지고 있는 암염돔 부분의 구배값을 강조시키면서 상대적으로 작은 수렴값을 갖는 해저 지층상부에서의 구배값을 감쇄시킬 수 있는 역할을 수행할 수 있어야 한다.

이번 연구에서 제안하는 구배도 보정 기술은 본래의 구배도에 대해 깊이 방향으로 구배도 값을 제곱하여 누적시켜 구축한 축적 구배도를 사용한다. 이는 본래의 구배도 보정 기술의 목적대로 구배도에서 큰 값을 갖는 구간은 축적 연산에 의해 더욱더 커지고 상대적으로 작은 값을 갖는 구간은 상쇄되는 경향을 갖는다. 이렇게 구축한 축적 구배도는 보정을 위해 본래의 역전파 알고리즘에 의해 구축한 구배도에 곱하게 된다. 이렇게 되면 최종적으로 라플라스 감쇄파동장에 의한 파형역산 알고리즘에 사용될 보정된 구배도가 완성된다. 이는 많은 수치실험을 통해 습득한 경험을 바탕으로 수립한 알고리즘이다.

축적 구배도를 계산하는 식은 아래의 식 (26)과 (27)에 제시하였다. 깊이 방향에 대한 누적을 위해 우선 첫 번째 지층에 대한 기존의 구배도는 아래와 같이 그 값을 제곱하게 된다. 여기서 만약 제곱을 하지 않고 그대로 구배도를 누적시키면 음수와 양수로 구성된 본래의 구배도는 그 값

이 제대로 축적되지 못한다.

$$\nabla_{m_k} E_{acc}(ix,1) = \left[Re\left\{ \sum_{i=1}^{n_s} \left(\mathbf{v}_{m_k}\right)^T \left(S^{-1}\right)^T \mathbf{r} \right\} \right]^2 = \left[\nabla_{m_k} E(ix,1) \right]^2 \tag{26}$$

$ix = 1, ...nx$

식 (26)을 전체 구배도 모델로 확장하여 축적계산을 수행하면, 두 번째 층부터는 아래의 식 (27)과 같이 전체 구배도 영역에 대한 축적구배도를 계산해 낼 수 있다.

$$\begin{aligned} &\nabla_{m_k} E_{acc}(ix,iz) = \nabla_{m_k} E_{acc}(ix,iz-1) + [\nabla_{m_k} E(ix,iz)]^2, \\ &ix = 1,\cdots nx,\ iz = 2,\cdots,nz \end{aligned} \tag{27}$$

이렇게 획득한 축적된 구배는 아래의 식 (28)에서와 같이 기존의 구배에 대한 보정을 하는데 사용된다.

$$\begin{aligned} &\nabla_{m_k} E_{scal}(ix,iz) = \nabla_{m_k} E(ix,iz) \bullet \nabla_{m_k} E_{acc}(ix,iz) \\ &ix = 1,..,nx,\ iz = 1,...,nz \end{aligned} \tag{28}$$

위의 식(28)을 살펴보면, 전체 영역에 대한 기존의 구배도 $\nabla_{m_k} E(ix,iz)$에 대해 이를 위해 축적연산에 의해 구축한 구배도$\nabla_{m_k} E_{acc}(ix,iz)$를 곱함으로써 파형역산의 수행을 위한 보정된 구배도 $\nabla_{m_k} E_{scal}(ix,iz)$를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 이와 같이 구축한 보정된 목적함수의 구배를 기존에 사용하였던 모델 변수업데이트 식에 적용함으로써, 아래의 식(29)와 같이 음향-탄성 결합매질에 대한 장파장 속도모델 구축을 위한 파형역산 알고리즘에 적용할 수 있었다.

$$m_k^{(l+1)} = m_k^{(l)} - \alpha^{(l)} NRM\left[\sum_{w=1}^{m_f} NRM\left\{\frac{\mathrm{Re}\left[\nabla_{m_k} E_{scal}\right]_w}{\mathrm{Re}\left[\sum_{i=1}^{n_s}\left(\mathbf{v}_{m_k}\right)^T\left(\mathbf{v}_{m_k}\right)\right]_w + \Pi}\right\}\right] \qquad (29)$$

아래 제시된 그림 9에서는 이번 연구를 통해 제안한 구배도 축적 기법과 이를 이용한 구배도 보정기법을 활용한 파형역산에 대한 순서도를 제시하였다. 이 그림에서 살펴보면 붉은색 박스에 이번 장에서 기술하고 있는 축적구배도의 계산과 이를 이용한 구배도 보정 부분이 도시되어 있다.

앞에서 수식으로 설명하고, 그림 9를 통해 도시한 구배도 보정기법을 종합해 보면 다음과 같다. 우선 구배도 보정기법의 도입을 위해 기존의 구배도로부터 축적구배도를 계산해야 한다. 축적구배도는 기존 역전파 알고리즘에 의해 획득한 구배도를 깊이 방향으로 제곱하여 축적시킴으로써 계산한다. 이렇게 계산된 축적구배도는 기존의 구배도와 서로 곱하여 보정하게 되는데, 이렇게 구한 보정된 구배도를 파형역산에 적용한다. 하지만 구배도 보정기법은 앞에서 기술한 라플라스-푸리에 영역 파형역산에서 오직 영 주파수 성분의 감쇄상수만을 사용하는 복소주파수 대역에서만 사용이 가능하다. 그 이유는 축적구배도의 특성 상 주파수 성분이 작은 감쇄파동장에서만 그 값과 위치가 정확히 목적구조를 찾아가기 때문이다.

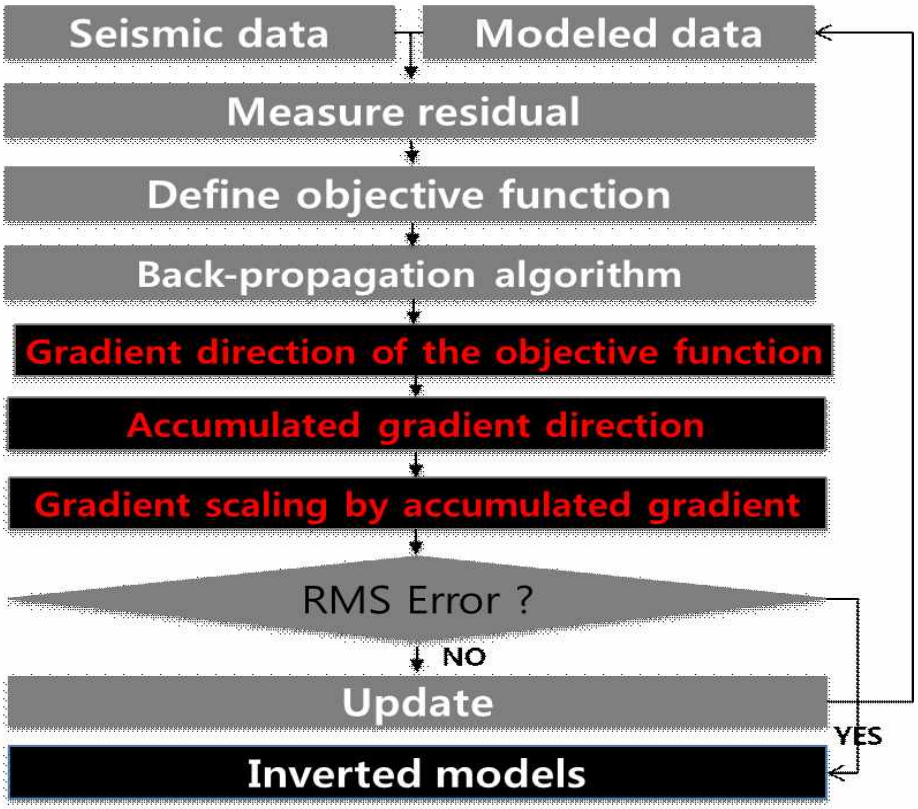


그림 9. 구배도 보정기법을 적용한 파형역산 순서도.

2-5-2. 구배도 분석-인공합성자료

이번 장에서는 앞에서 제안한 구배도 보정기법의 파형역산 적용에 관한 타당성 입증을 위해 인공합성자료에 대해 역전파 알고리즘에 의해 구축한 구배도와 제곱하여 구배도를 깊이 방향으로 누적시킴으로써 구축한 제곱 축적구배도 및 해당 알고리즘의 정립을 위해 수행한 기타 다양한 기법에 의해 보정한 보정된 구배도를 각각 비교 제시하고 이에 대한 분석을 수행하였다. 이로써 본 논문에서 제안한 경험적 이론에 바탕을 둔 제곱하여 축적한 구배도의 성능을 다른 구배도 보정 기술과 비교하고 이를 분석함으로 제곱 축적 연산을 통해 구축한 축적구배도에 의한 구배도 보정 기술에 대한 타당성을 증명하였다. 이번 수치실험에 사용된 인공합성모델은 음향-탄성 결합매질로 설정된 SEG/EAGE 암염돔 모델이다 (Aminzadeh et al., 1997). 이에 대한 구배도의 계산을 위해 우선 제시된 모델에 대한 음향-탄성 결합매질에서의 파동전파 모델링을 수행하였다. 이때 우리는 총 151개의 송신원을 설정하였으며, 송신원에 대해 각각 760개의 수신기를 설치하였다. 각각의 송신원 간격은 100 m이며, 사용된 수신기 간격은 20 m로 설정하였다. 사용된 라플라스 감쇄상수는 1부터 15까지 총 15개이다.

그림 10에서는 이번 수치실험에서 사용한 해수층과 불규칙한 해저면을 포함시킨 음향-탄성 결합매질로 구성된 SEG/EAGE 암염돔 모델 (P-wave, S-wave 및 밀도모델)을 제시하였다. 해당 실제 모델을 살펴보면 모델의 중앙부에 커다란 암염돔이 존재하며 불규칙한 해저지층을 가정하였고, 이에 따라 복잡한 모양으로 해수층과 해저 지질층의 경계 부분을 설정하였음을 확인할 수 있다.

이번 장에서 제시한 구배도 보정기법에 대한 수치실험은 다음과 같다. 우선 첫 번째 수치실험은 역전파 알고리즘에 의해 구축된 기존의 구배도를 임의로 설정한 선형증가 모델을 사용한 구배도 보정이다. 그림 11과 12에서는 람다(λ)와 뮤(μ)에 대해 역전파 알고리즘에 의해 구축한 구배도와 임의로 설정한 선형증가모델을 제시하고 이를 통해 보정한 보정된 구배도를 제시하였다. 이어서 그림 13에서는 본래의 구배도와 선형증가 모델을 이용하여 보정한 보정된 구배도에 대해 해당 모델의 1.2km 부근에서 추출한 트레이스를 비교 도시하였다. 제시된 그림에서 알 수 있듯이 축적구배도가 아닌 임의의 선형증가모델을 이용하여 구배도를 보정할 경우 구배도 보정의 목적인 해저 지층 상부에 위치한 잘못된 구배도의 수렴과 암염돔 부분에 대한 광범위한 구배도의 수렴성을 제대로 보정해 내지 못함을 알 수 있다. 이에 대한 최종 역산 결과는 다음 수치예제에 제시하였다.

두 번째 수치실험은 본 논문에서 제안한 제곱하여 깊이 방향으로 누적시켜 구한 제곱 축적 구배를 이용하는 구배도 보정법에 대해 수행하였다. 이에 대해 앞에서 제시한 순서와 같이 그림 14에서는 람다(λ) 그리고 그림 15에서는 뮤(μ)에 대한 역전파 알고리즘에 의해 구축한 구배도와 이를 제곱하여 깊이 방향으로 누적시킴으로써 구축한 제곱 축적 구배도를 제시함과 동시에 세 번째 그림에는 이를 통해 보정한 보정된 구배도를 제시하였다. 마찬가지로 그림 16에서는 깊이 1.2km 지점에서 추출한 각각의 구배도에 대한 트레이스 그래프를 제시하였다. 제시된 수평방향 트레이스를 살펴보면, 축적구배도에 의해 보정된 구배도(검은색 실선)는 보정 전 역전파 알고리즘에 의해 구축한 구배도(검은색 점선)와는 달리 실제 모델의 8.5km 부분에 존재하는 암염돔 구조에 정확히 수렴하고 있음을 알 수 있다. 또한 해저지층 상부에 구축된 잘못된 구배도 값은

감쇄됨을 확인할 수 있었다. 이는 구배도 보정기법에 의해 구축한 새로운 구배도가 고속도 구조인 암염돔 구조를 보다 정확히 찾아가고 있음을 알 수 있다. 이에 대한 역산결과 또한 다음 수치예제 부분에 제시하였다.

세 번째 및 네 번째 수치실험은 앞의 두 번째 실험에 대한 확장으로 세제곱하여 절대값을 취한 후 깊이 방향으로 그 값을 누적하는 세제곱 축적연산을 통해 구축한 세제곱 축적구배도와 네제곱을 취한 후 축적연산을 통해 구축한 네제곱 축적구배도를 각각 도시하였다. 그림 17과 18에서는 각각 람다(λ)와 뮤(μ)에 대한 세제곱 축적구배도와 이에 대한 보정된 구배도를 제시하였고, 19에서는 기존의 구배도와 세제곱 축적구배도에 의해 보정을 수행한 보정된 구배도의 정량적 비교를 위한 트레이스 그래프를 제시하였다. 같은 방법으로 네제곱 축적구배도에 대한 수치실험결과는 그림 20과 21 그리고 22에 각각 제시하였다. 세제곱 및 네제곱을 취한 후 축적연산을 통해 축적구배도를 구축할 경우, 그리고 이를 통해 구배도를 보정할 경우에는 큰 값으로 축적구배도가 구축되고 이로 인해 암염돔이 분포한 구역이 실제 모델보다 작은 범위로 농축되어 축소된 형태로 역산결과가 구축되는 현상을 발견할 수 있다. 이에 대한 역산결과는 다음 장 수치예제에 제시하였다.

이번 장에서는 총 4가지 구배도 보정기법을 SEG/EAGE 암염돔 모델에 대해 동일한 조건에서 해당 보정된 구배를 비교 분석해 보았다. 이에 대한 보다 정량적인 비교를 위해 그림 23에서는 람다(λ)와 뮤(μ)에 대한 각각의 구배도 보정기법에 의해 보정된 구배도에서 대해 깊이 1.2km 지점에서 추출한 트레이스를 비교 도시하였다. 이 그림에서 살펴보면 검은색 실선은 본래의 역전파 알고리즘에 의해 구축한 구배도를 나타내고, 녹색 점선은 선형증가모델을 이용해 보정한 구배도, 붉은색 실선은 제곱 축적연산에 의해 구축한 축적 구배를 이용하여 보정한 구배도, 파란색

점선은 세제곱 축적 구배도에 의한 보정된 구배도 그리고 마지막 노란색 실선은 네제곱 축적 구배도에서 추출한 트레이스를 나타낸다. 이 그림을 통해 각각의 구배도에 대한 성향을 비교 분석해 볼 수 있다. 우선 본래의 구배도는 해저면 상부에서 실제로 존재하지 않는 고속도층의 구축을 유발시키도록 하는 성향을 보이며 암염돔이 존재하는 구역에 대한 구배도의 수렴성 또한 미비함을 확인하였다. 이는 임의의 선형증가 모델을 이용할 경우에도 이와 유사한 경향을 보이고 있다. 하지만 축적연산을 이용할 경우, 해당 실제 모델에서의 암염돔 구조가 존재하는 부분에서 구배도 수렴이 집중되었음을 확인하였다. 또한 기존 구배도에 존재하는 해저지층 부분에서의 부적절한 구배도의 수렴은 축적연산을 이용한 축적 구배도에 의해 보정된 구배도에서는 이 같은 현상이 발견되지 않음을 알 수 있었다. 따라서 이번 분석을 통해서 해저지층 상부에 존재하는 원치 않는 고속도층의 구축을 사전에 방지하고 보다 효율적으로 실제 모델에 존재하는 암염구조를 구축해 낸다는 본래의 구배도 보정 목적을 달성하기 위해서는 축적연산에 의해 보정한 구배도를 사용해야 한다는 결론을 내릴 수 있다.

본래의 구배도는 그 특성상 정규화를 수행해야 하기 때문에 결국 그 값은 +1부터 -1까지의 범위에 해당되는 값을 가지고 있다. 때문에 이를 양수로 만들기 위해 제곱 취한 후 그 값을 가지고 깊이 방향으로 누적시키는 축적연산을 수행하였다. 또한 축적 구배도 값을 조금더 증폭시키기 위해 세제곱을 취해 절대값을 취한후 세제곱을 하여 같은 방식으로 축적 구배를 계산하고 이를 이용하여 구배도 보정을 수행하는 실험을 수행하였고, 추가적으로 네제곱을 취해서도 축적 구배도를 구축하고 각각의 축적 구배도에 대한 보정을 수행하였다. 그 결과 축적 구배도 값이 커질수록 보다 더 암염돔 구조가 존재하는 위치에서 구배도의 수렴이 집중됨을

알 수 있었다. 하지만 그 정도가 지나칠 경우에는 실제 모델에 존재하는 암염돔 구조보다 더 작은 범위에 대해 구배도가 수렴함으로써 결과적으로 실제 암염 구조보다 축소된 역산 결과를 구축하게 됨을 확인하였다.

이번 감쇄파동장에 대한 구배도 보정과 이에 대한 비교 분석결과는 다음과 같다. 장파장 역산결과의 구축을 위한 라플라스 감쇄파동장을 이용한 파형역산의 수행 시 기존의 구배도가 가지고 있는 문제점의 해결을 위해서는 반드시 본래의 구배도를 깊이 방향으로 누적하여 합한 축적연산에 의해 구축한 축적 구배도를 사용하여야 한다. 이때 경험적으로 해당 구배도를 제곱하여 누적시키는 것이 가장 정확한 장파장 역산결과를 구축해 낼 수 있다.

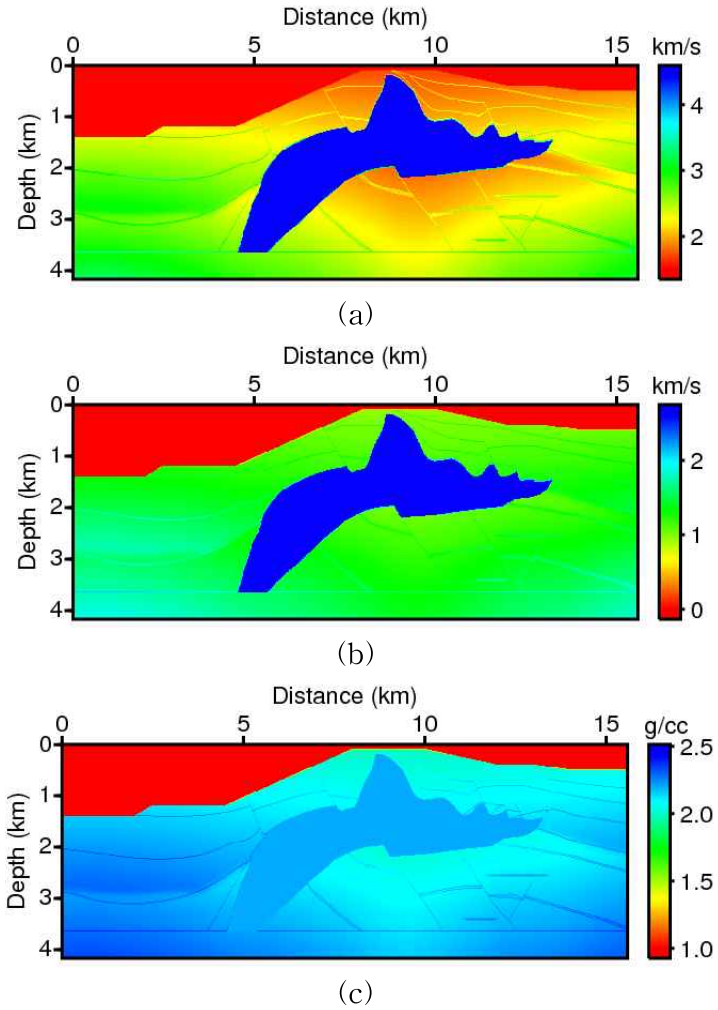


그림 10. 불규칙 해저지형을 설정한 음향-탄성 결합매질에서의 SEG/EAGE 암염돔 모델; (a) P-wave 속도, (b) S-wave 속도, (c) 밀도.

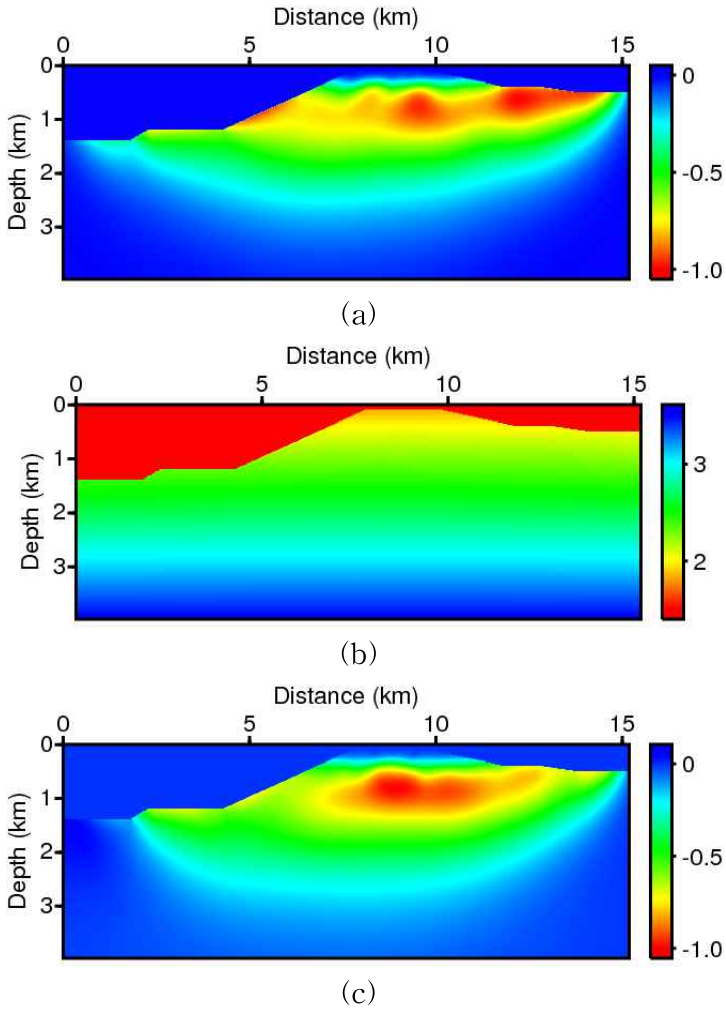


그림 11. 라메상수 람다(λ)에 대한 구배도 분석; (a) 기존의 구배도, (b) 임의의 선형증가모델, (c) 임의의 선형증가모델을 이용해 보정한 보정 구배도.

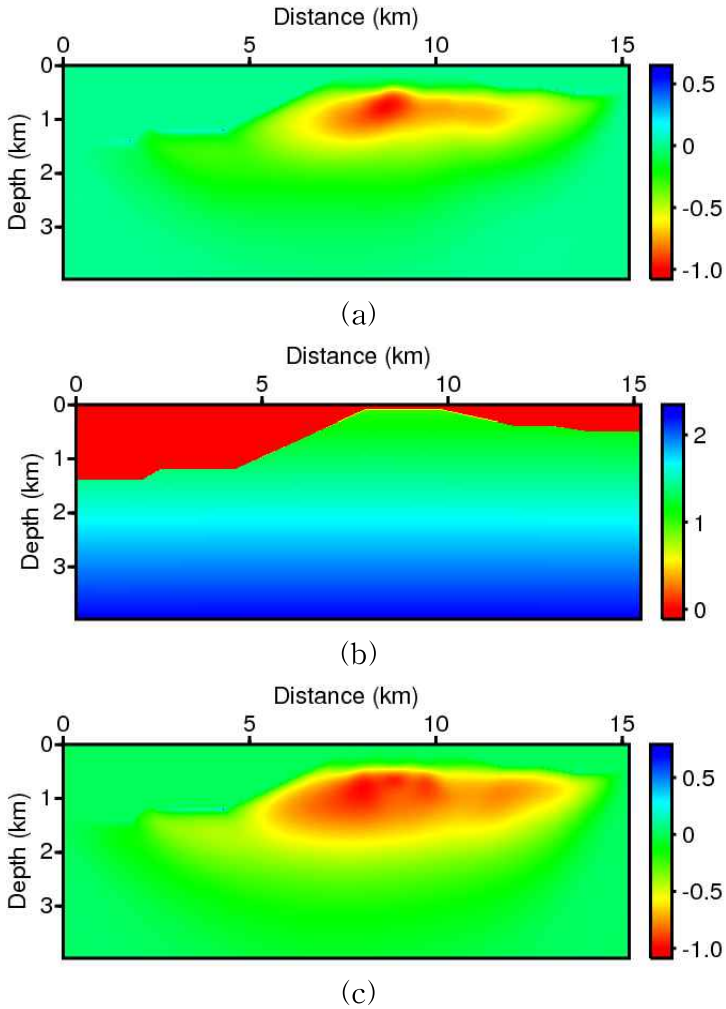
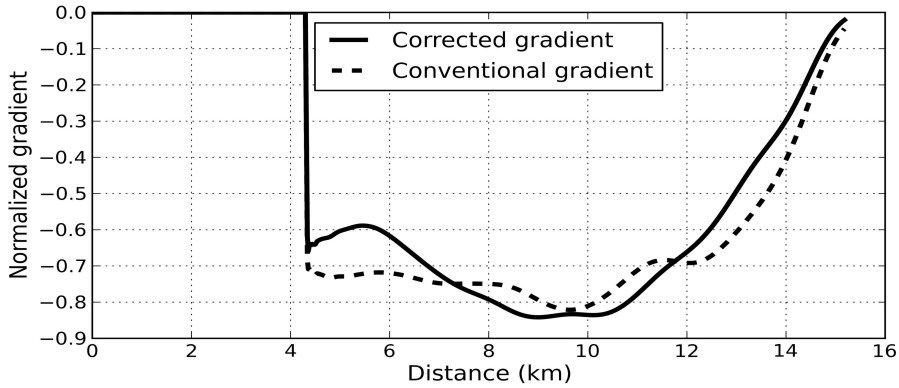
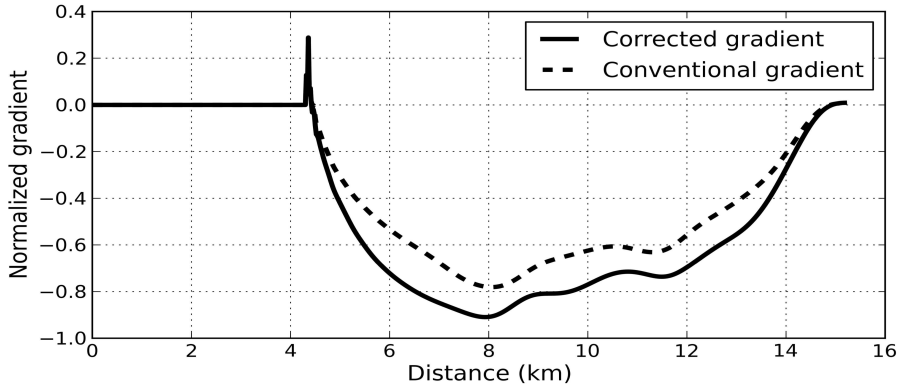


그림 12. 라메상수 뮤(μ)에 대한 구배도 분석; (a) 기존의 구배도, (b) 임의의 선형증가모델, (c) 임의의 선형증가모델을 이용해 보정한 보정 구배도.



(a)



(b)

그림 13. 기존 구배도와 보정된 구배도로부터 깊이 1.2km 부근에서 추출한 가로방향 트레이스의 비교; (a) 라메상수 람다(λ)에 대한 각각의 구배도 트레이스, (b) 라메상수 뮤(μ)에 대한 각각의 구배도 트레이스.

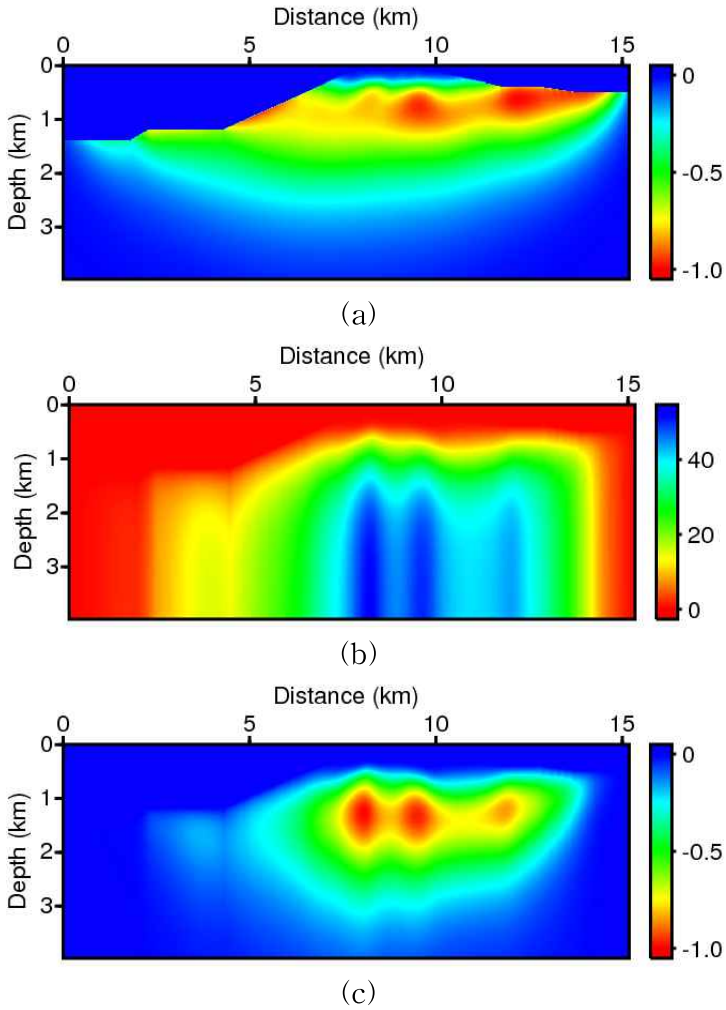


그림 14. 라메상수 람다(λ)에 대한 구배도 분석; (a) 기존의 구배도, (b) 제곱 축적 연산에 의해 구축한 축적구배도, (c) 축적구배도를 이용해 보정 한 구배도.

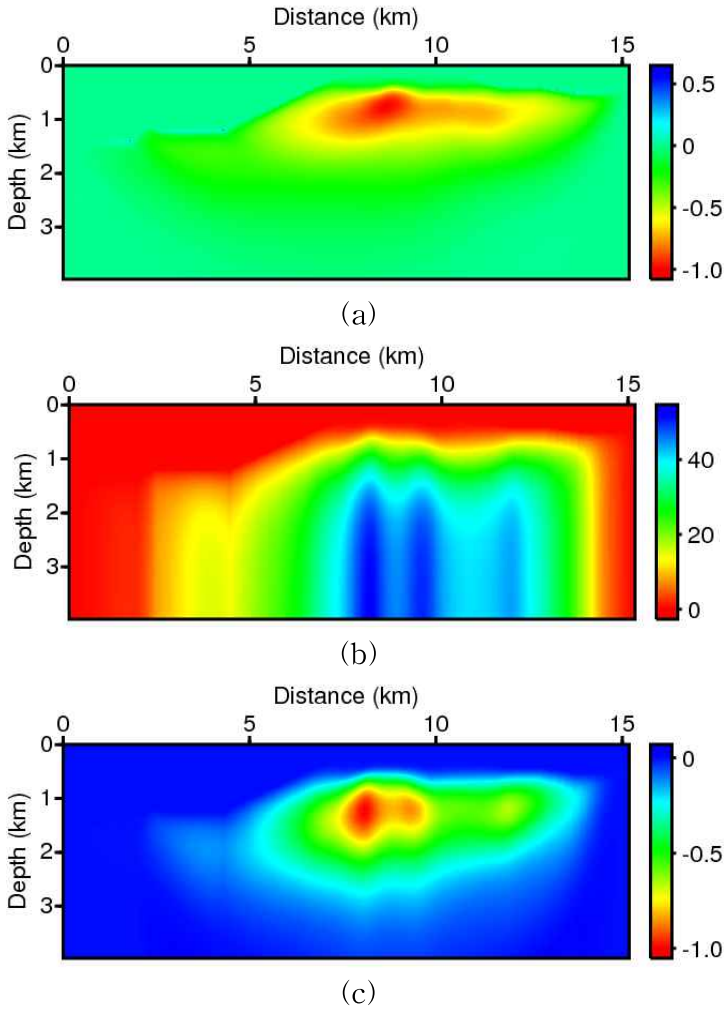
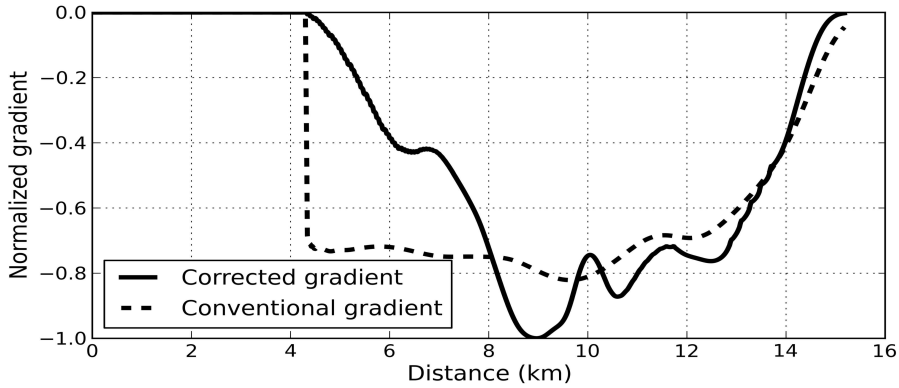
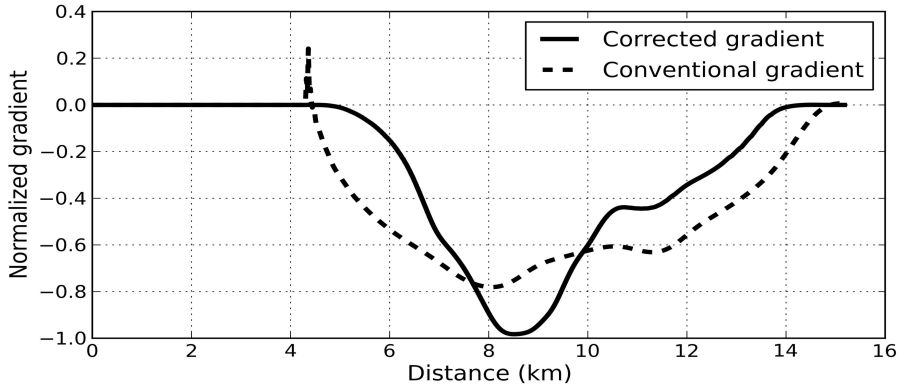


그림 15. 라메상수 뮤(μ)에 대한 구배도 분석; (a) 기존의 구배도, (b) 제곱 축적 연산에 의해 구축한 축적구배도, (c) 축적구배도를 이용해 보정한 구배도.



(a)



(b)

그림 16. 기존 구배도와 보정된 구배도로부터 깊이 1.2km 부근에서 추출한 가로방향 트레이스의 비교; (a) 라메상수 람다(λ)에 대한 각각의 구배도 트레이스, (b) 라메상수 뮤(μ)에 대한 각각의 구배도 트레이스.

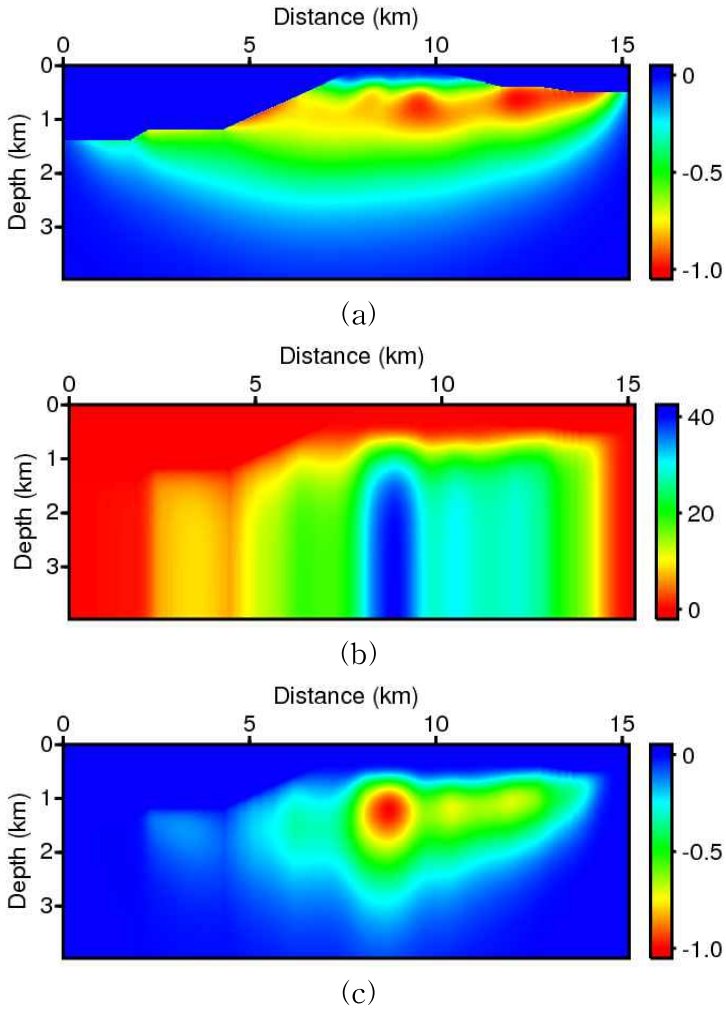


그림 17. 라메상수 람다(λ)에 대한 구배도 분석; (a) 기존의 구배도, (b) 세제곱의 절대값에 대한 축적연산에 의해 계산된 세제곱 축적구배도, (c) 축적구배도를 이용해 보정한 구배도.

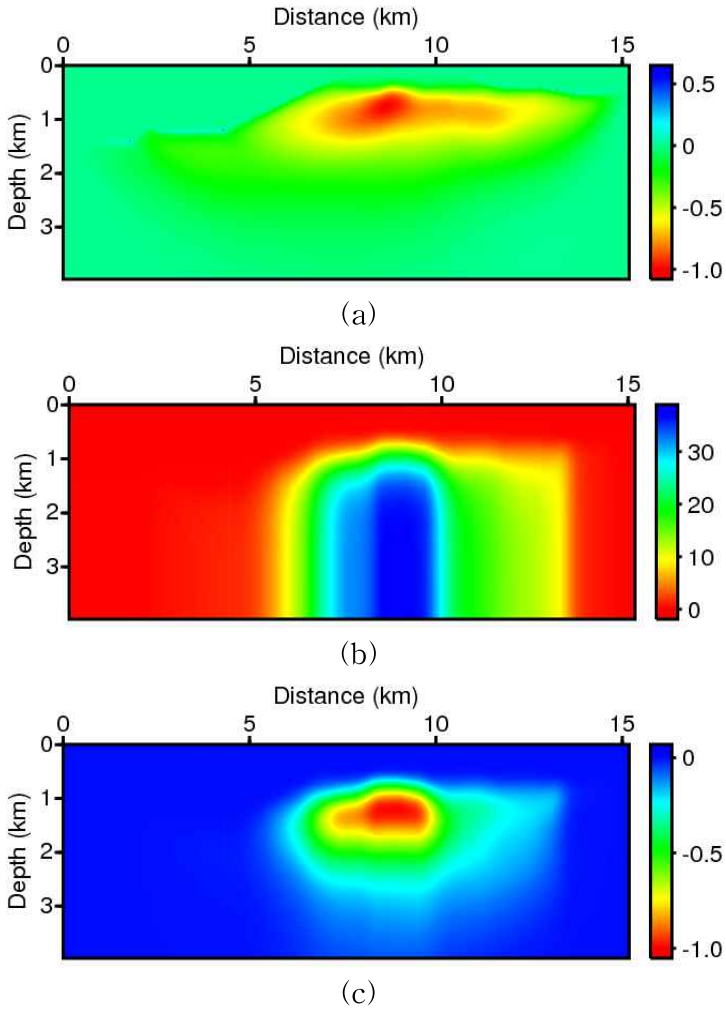
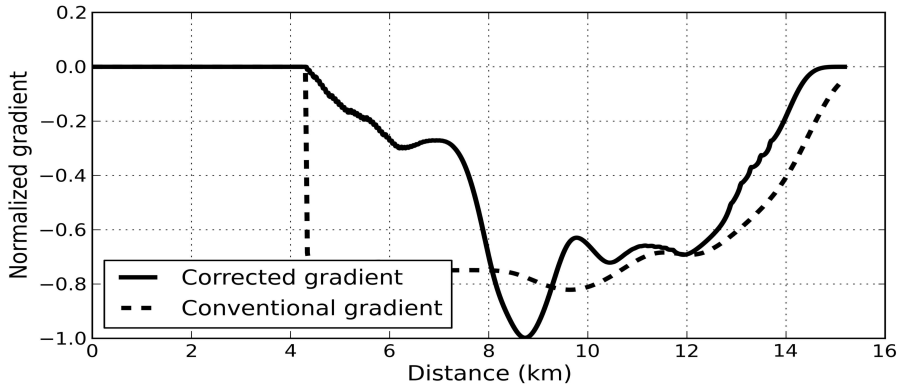
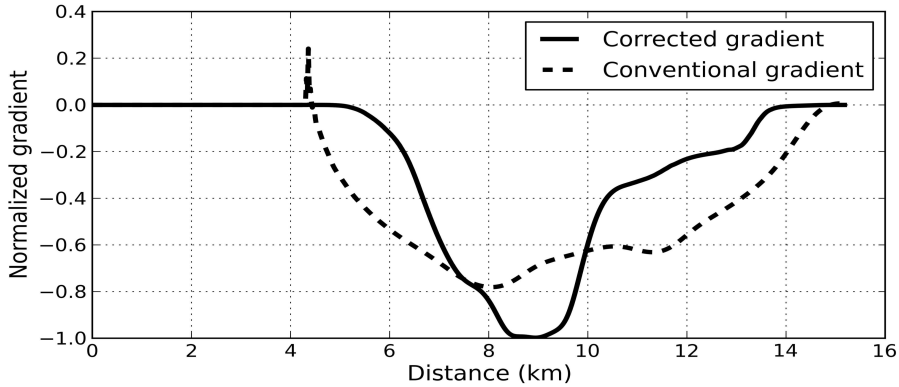


그림 18. 라메상수 뮤(μ)에 대한 구배도 분석; (a) 기존의 구배도, (b) 세제곱의 절대값에 대한 축적연산에 의해 계산된 세제곱 축적구배도, (c) 축적구배도를 이용해 보정한 구배도.



(a)



(b)

그림 19. 기존 구배도와 보정된 구배도로 부터 깊이 1.2km 부근에서 추출한 가로방향 트레이스의 비교; (a) 라메상수 람다(λ)에 대한 각각의 구배도 트레이스, (b) 라메상수 뮤(μ)에 대한 각각의 구배도 트레이스.

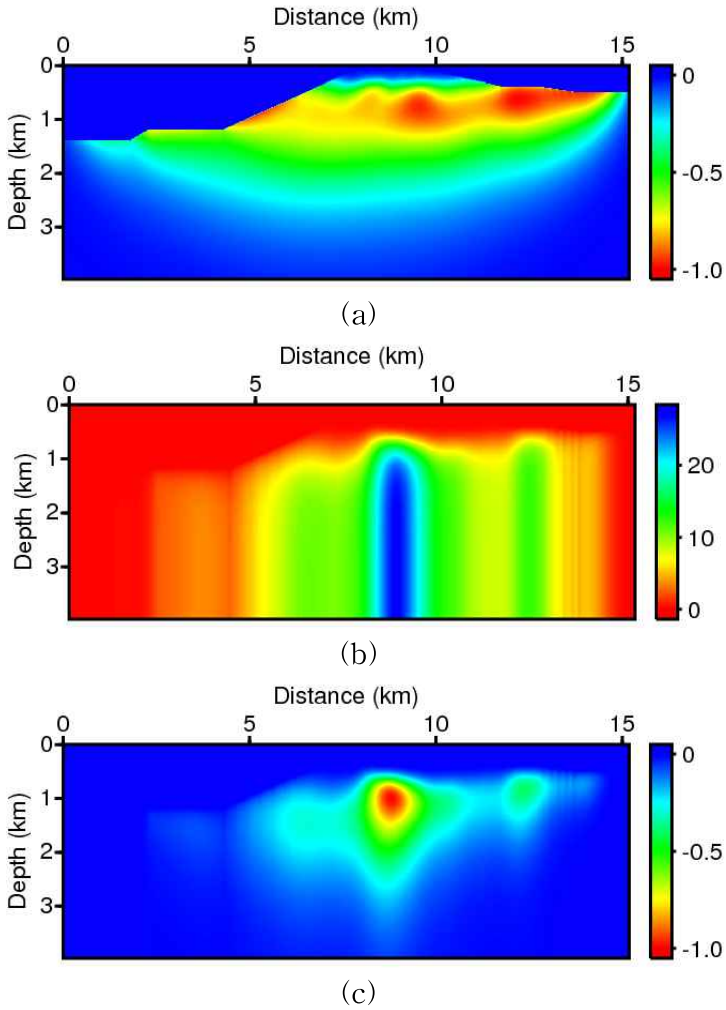


그림 20. 라메상수 람다(λ)에 대한 구배도 분석; (a) 기존의 구배도, (b) 네제곱 축적 연산에 의해 계산된 네제곱 축적구배도, (c) 축적구배도를 이용해 보정한 구배도.

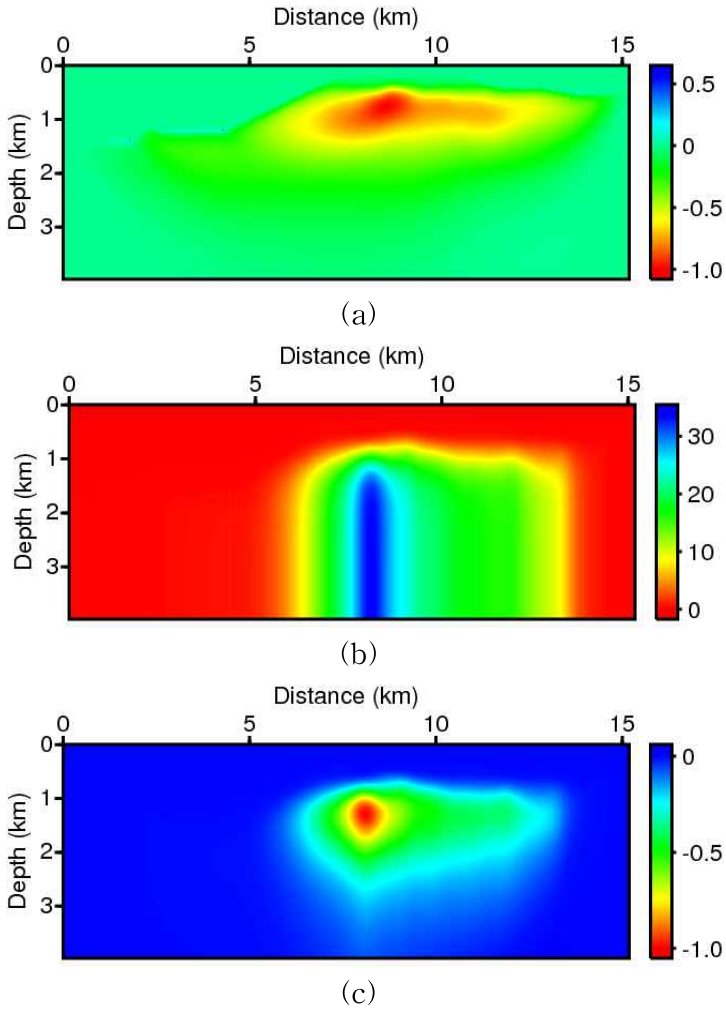
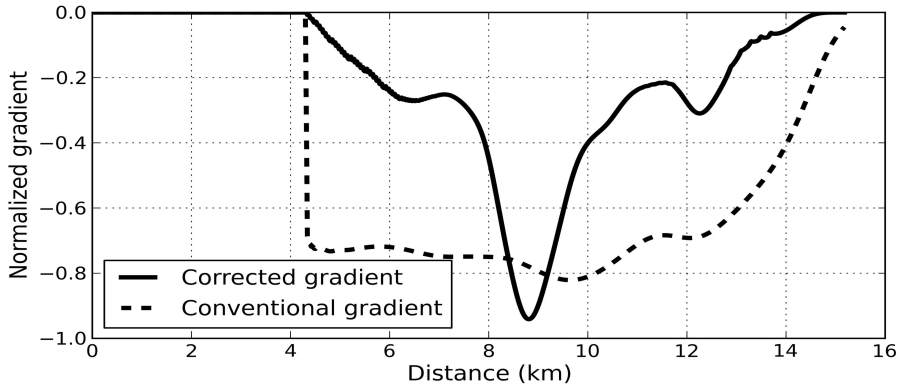
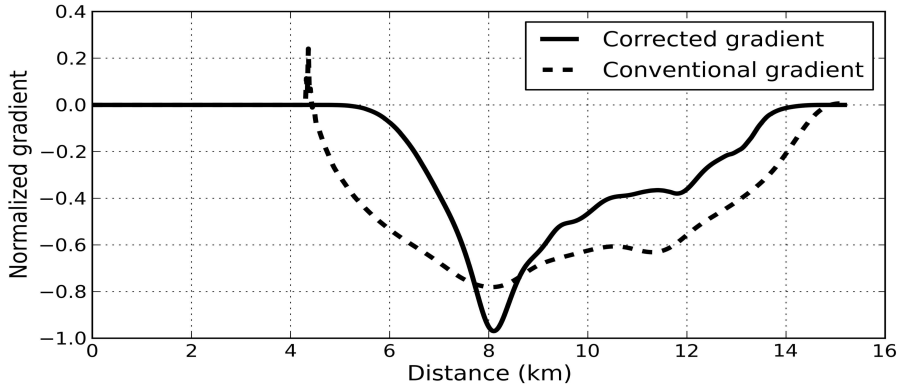


그림 21. 라메상수 뮤(μ)에 대한 구배도 분석; (a) 기존의 구배도, (b) 네제곱 축적 연산에 의해 계산된 네제곱 축적구배도, (c) 축적구배도를 이용해 보정 한 구배도.

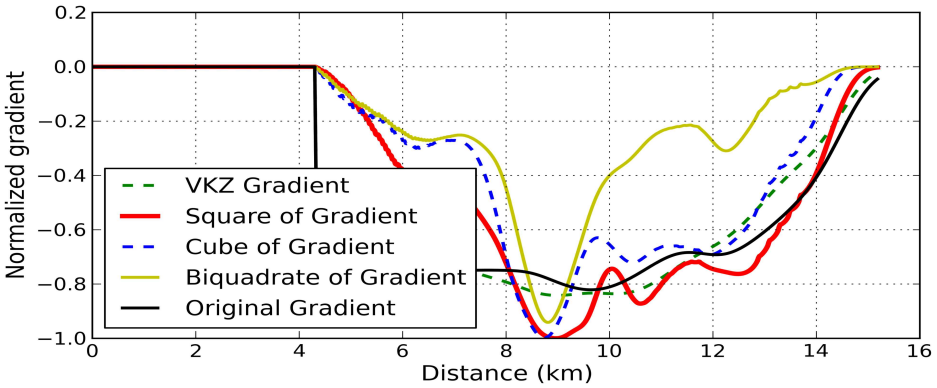


(a)

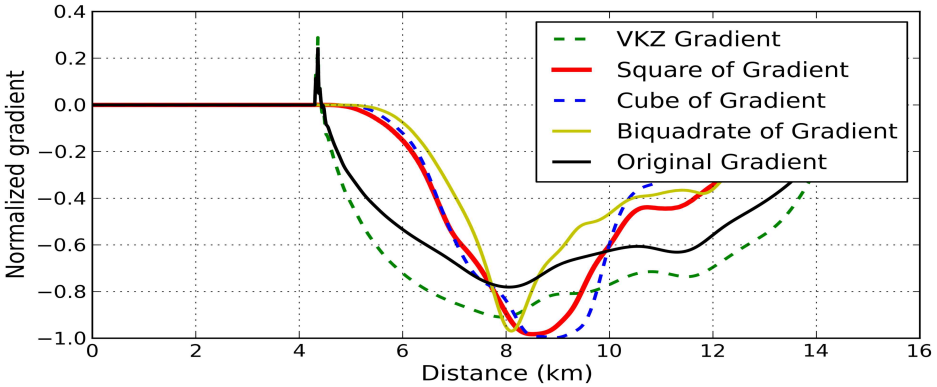


(b)

그림 22. 기존 구배도와 보정된 구배도로부터 깊이 1.2km 부근에서 추출한 가로방향 트레이스의 비교; (a) 라메상수 람다(λ)에 대한 각각의 구배도 트레이스, (b) 라메상수 뮤(μ)에 대한 각각의 구배도 트레이스.



(a)



(b)

그림 23. 기존 구배도와 각각의 보정된 구배도로 부터 깊이 1.2km 부근에서 추출한 가로방향 트레이스의 비교; (a) 라메상수 람다(λ)에 대한 각각의 구배도 트레이스, (b) 라메상수 뮤(μ)에 대한 각각의 구배도 트레이스.

2-5-3. 구배도 분석-현장자료

이번 연구에서 제안한 제곱 축적 구배도를 이용한 구배도 보정기법은 기존의 기술보다 효율적이면서 정확한 장파장 파형역산 결과의 구축에 도움을 준다. 하지만 앞에서의 구배도 분석은 파형역산 알고리즘의 궁극적인 목표인 현장자료가 아닌 파동전파 모델링을 통해 구축한 인공합성자료에 관한 수치실험을 통해 이루어졌다. 따라서 이번 장에서는 정확한 장파장 역산결과의 구축을 위한 구배도 보정기법을 많은 잡음을 포함하고 있는 현장에서 획득한 탐사자료에 적용하고 이에 대한 구배도의 분석을 수행하였다. 그리고 이에 대한 수치예제를 제시함으로써 본 알고리즘의 현장자료에 대한 적용성을 확인하고 이에 대한 분석을 수행하였다.

대상 탐사자료는 총 1156개의 송신원과 804개의 수신기를 사용하여 획득되었다. 송신원 간격과 수신기 간격은 각각 37.5 m, 12.5 m이며, 최대 오프셋 거리는 10.2 km, 총 기록 시간은 15초이다. 그림 24에서는 이번 수치실험에 사용된 탐사자료로부터 얻은 임의의 1개 송신원에 대한 공통송신원모음을 도시하였다.

현장자료에 대한 구배도 분석은 앞에서의 인공합성자료에 대한 구배도 분석과 같은 순서와 방향으로 수치 예제들을 제시하였다. 그림 25와 26에서는 각각 라메상수 람다(λ)와 뮤(μ)에 대한 감쇄파동장을 이용하여 역전파 알고리즘에 의해 구축한 구배도와 그 값을 제곱하여 깊이 방향으로 누적시킴으로써 구축한 제곱 축적 구배도 및 이를 이용하여 구배도 보정을 수행한 보정된 구배도를 모두 제시하였다. 각각의 그림에서 첫 번째로 도시된 그림은 해당 현장자료에 대한 기존 방법으로 계산된 구배도 모델이며, 두 번째 구배도모델은 첫 번째 구배도로부터 제곱의 합으로 누적시켜 계산된 제곱 축적구배도를 나타내고 있다. 세 번째 그림은

첫 번째 구배도와 두 번째 축적 구배도의 곱으로 획득한 보정 구배도를 제시하였다. 또한 정량적인 분석을 위해 깊이 2.5 km 지점에서 기존의 구배법의 구배와 보정된 구배법의 수평 구배도트레이스를 그림 27에 제시하였다. 그래프에서 실선은 구배도 보정 법에 의해 계산된 구배도의 트레이스를 나타내며, 점선은 역전파 알고리즘에 의해 획득한 본래의 구배도에 대한 트레이스를 나타낸다.

제시된 구배도들과 이에 대한 트레이스 그래프에서 보면 현장자료의 경우에도 앞에서 제시한 인공합성자료와 같은 맥락으로 구배도 보정기법을 이용할 때 암염돔과 같이 이상대 값이 큰 부분에서 더욱더 구배도가 부각됨을 확인할 수 있다. 또한 이는 이전의 인공합성자료에서의 경우보다도 그 차이가 확연히 드러남을 확인할 수 있다. 이를 통해 현장자료에서도 앞에서 제시했던 인공합성자료의 경우와 같은 결론을 내릴 수 있었으며, 그 효과는 이전의 인공합성자료 실험보다 극대화되었음을 알 수 있었다. 이에 대한 장파장 역산 결과는 다음 장 수치예제 부분에서 보다 자세히 다루었다.

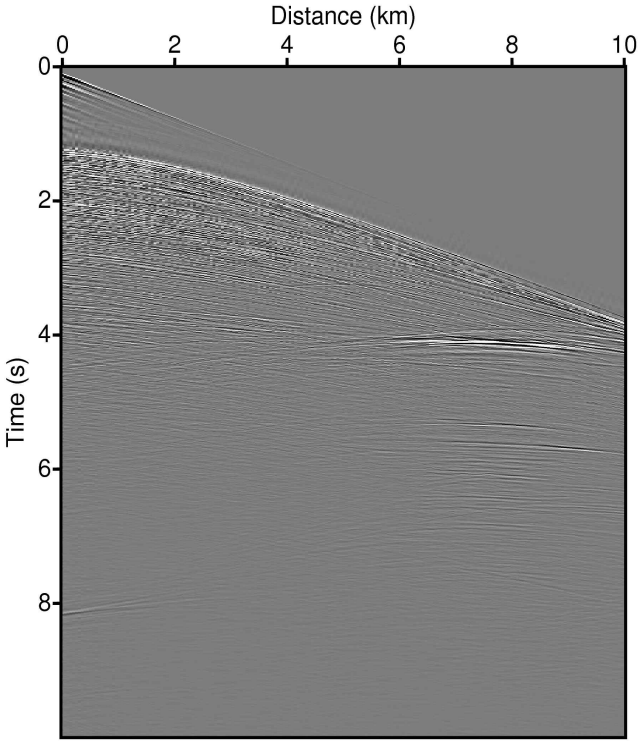


그림 24. 현장자료에서 추출한 임의의 송신원에 대한 공통송신원 모음.

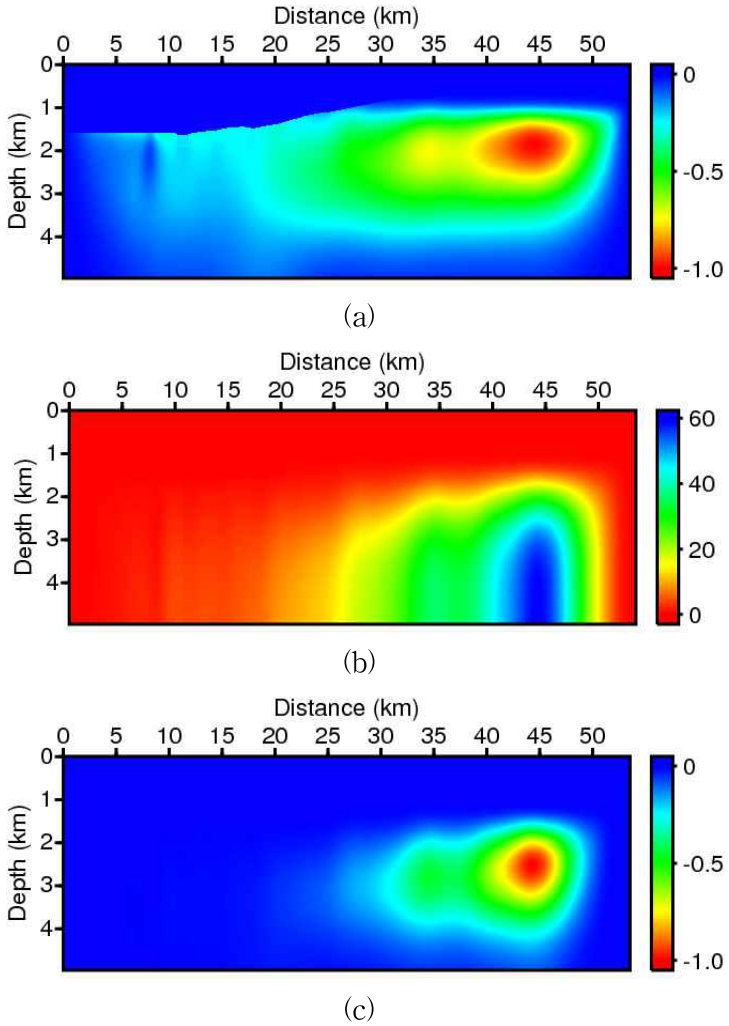
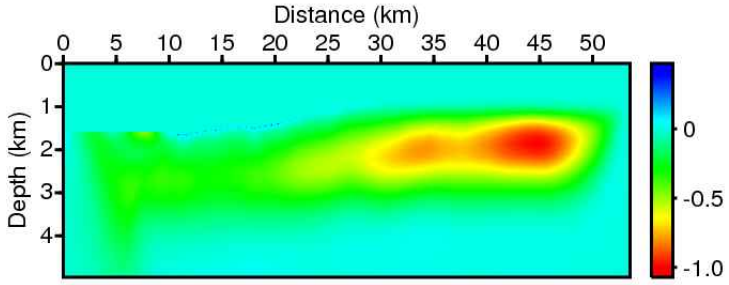
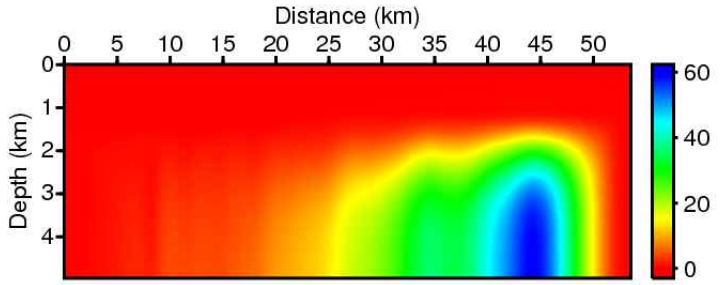


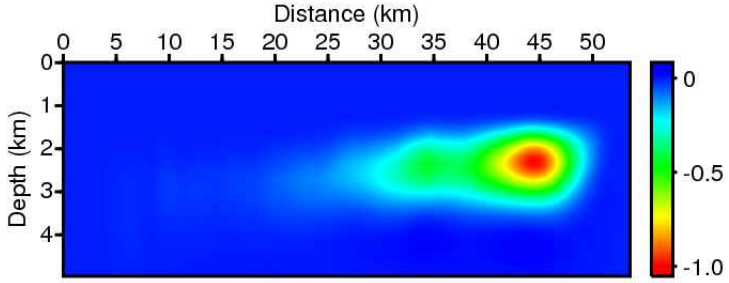
그림 25. 현장자료에서 구축한 라메상수 람다(λ)에 대한 구배도 분석; (a) 기존의 구배도, (b) 제곱하여 축적 연산에 의해 계산된 제곱 축적구배도, (c) 축적구배도를 이용해 보정한 구배도.



(a)

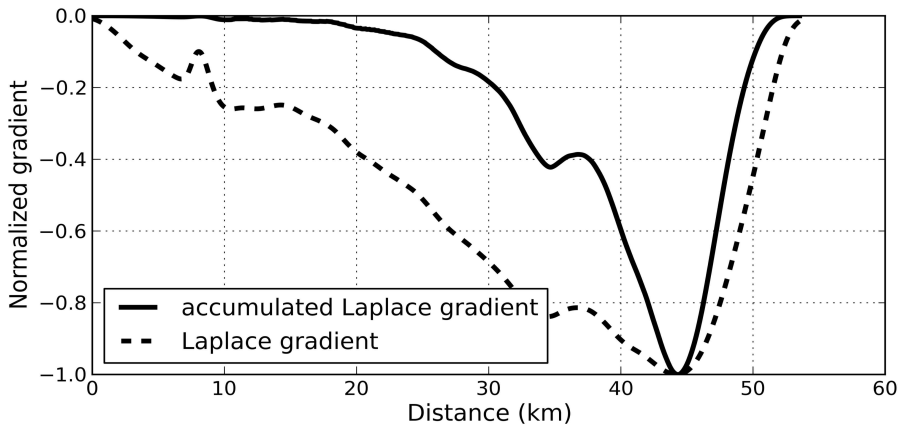


(b)

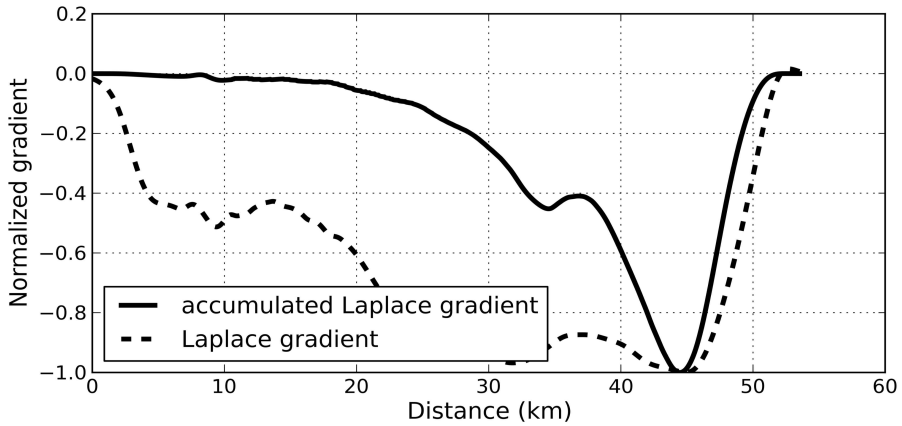


(c)

그림 26. 현장자료에서 구축한 라메상수 뮤(μ)에 대한 구배도 분석; (a) 기존의 구배도, (b) 제곱하여 축적 연산에 의해 계산된 제곱 축적구배도, (c) 축적구배도를 이용해 보정한 구배도.



(a)



(b)

그림 27. 현장자료에 대한 각각의 구배도로부터 추출한 깊이 2.5km에서 추출한 가로방향 트레이스; (a) 라메상수 람다(λ)에 대한 각각의 구배도 트레이스, (b) 라메상수 뮤(μ)에 대한 각각의 구배도 트레이스.

3. 수치예제

이번 장에서는 본 연구에서 제안한 음향-탄성 결합매질에 대한 완전 파형역산 결과를 제시하고 이에 대한 분석을 통해 본 연구에서 제안하는 역산 기술에 대한 타당성을 증명하였다. 수치실험은 Pluto 모델 (Stoughton, Stefani and Michell 2001)과 SEG/EAGE 암염돔 모델 (Aminzadeh, Brac and Kunz 1997) 그리고 SEG-2D Hess VTI 모델 등 총 3가지 종류의 인공합성모델에 의해 구축한 인공합성자료와 실제 해양 탐사를 통해 획득한 현장자료에 대해 수행하였다.

우선 첫 번째로 Pluto 모델에 대한 파형역산 수치실험을 수행하였다. 이 수치실험에서는 주파수영역, 라플라스영역 그리고 라플라스-푸리에 영역 파형역산에서 사용하였던 다양한 복소주파수 형태에 따른 파형역산을 음향-탄성 결합매질에 대해 수행하고 구축한 결과를 복소주파수 별로 정리하여 분석하였다. 그리고 결과에 대한 분석을 통해 구배도 보정법의 적용에 가장 효과적인 복소주파수의 구성을 결정하였다.

두 번째 SEG/EAGE 암염돔 모델과 SEG-2D Hess VTI모델에 대해서는 앞에서 선택한 복소주파수 기법에 따른 파형역산 기술에 본 논문을 통해 새로이 제안된 구배도 보정기법을 적용하고 이에 대한 파형역산을 수행하였다. 또한 기존의 역전파 알고리즘에 의해 구축한 구배도를 이용한 파형역산결과와 비교 도시함으로써 구배도 보정기법에 대한 파형역산 적용의 타당성을 증명하였다.

인공합성자료에 대한 각각의 파형역산과 그 결과에 따른 분석을 마친 후 현장자료에 대한 수치실험을 수행하였다. 수치실험에 사용한 현장자료는 수심의 변화가 매우 급격하며, 복잡한 지형적 특징을 가지고 있다. 이와 같은 복잡한 해저 지형은 음향-탄성 결합매질에서의 파동 전파 모

델링에 있어 심각한 수치적 잡음을 유발할 수 있다. 따라서 이는 이번 연구에서 제안한 구배도 보정기법의 적용에 따른 효과를 비교하는데 적절한 현장자료라 할 수 있다. 따라서 이에 대한 기존의 구배도에 대한 역산결과와 구배도 보정기법에 의해 보정된 구배도에 대한 역산결과를 비교 분석함으로써 본 연구에서 제안하는 구배도 보정기법의 현장자료에 대한 적용성을 시험하였다.

역산 대상에 대한 지형을 알고 있는 인공합성자료와는 달리 현장자료의 경우 그 결과에 대한 증명이 난해하다. 따라서 보다 확실한 현장자료에 대한 역산결과의 증명을 위해서 현장자료로부터 획득한 역산결과를 바탕으로 역시간 구조보정을 수행하고 이에 대한 공통 이미지 모음을 구축하여 이를 비교하였다. 또한 획득한 역산결과에 대한 파동전파 모델링을 통해 공통송신원모음을 구축하고 이를 현장자료와 비교함으로써 본 연구를 통해 제안한 파형역산 알고리즘의 타당성을 증명하였다.

3-1. 인공합성자료를 이용한 수치예제

3-1-1. Pluto1.5 모델

이번 장에서는 음향-탄성 결합매질에 대해 기존에 제안되었던 각각의 복소주파수 선택기법들을 비교해 봄으로써 라플라스-푸리에 영역 파형역산에 대한 가장 적절한 복소주파수 대역과 이에 대한 파형역산 수행 방법의 선택에 그 초점을 맞추었다. 이번 수치실험에 사용된 인공합성자료는 Pluto모델이다. Pluto 모델은 다중반사파의 발생을 극대화 시킬 목적으로 실제 존재하는 멕시코만 일대의 해저지형을 모티브로 하여 설계된 모델이다. 따라서 해당 모델로부터 생성된 인공합성자료는 모델의 구조상 다른 모델보다 상당히 많은 다중반사파를 포함하고 있는 것이 특징이다.

이번 장에서는 이와 같은 Pluto모델에 대해 기존에 제안되었던 각각의 파형역산 알고리즘에 대한 음향-탄성 결합매질에서의 파형역산을 수행하였다. 아래의 표2 에서는 이번 수치실험에 사용한 Pluto모델에 대한 파형역산의 수행에 관련된 정보와 구축한 탄성파 탐사자료에 대한 정보를 정리하여 제시하였으며, 그림 28에서는 실제 수치실험에서 사용한 음향-탄성 결합매질에 대한 Pluto모델 (P-wave 및 S-wave 속도 모델)을 제시하였다. 이번 수치실험은 파형역산 결과의 구축이 목적이 아닌 주파수 구성에 따른 경향성을 비교하는 것이 궁극적인 목적이기 때문에 밀도는 고정한 채 P-wave 속도 및 S-wave 속도에 대한 역산만을 수행하였다.

그림 29에서는 본 파형역산 수치실험을 위해 임의로 설정한 초기모델을 도시하였다. 초기모델은 깊이 방향에 따라 선형적으로 증가하는 모델

로 설정하였고, P-wave 속도 초기 모델의 경우 1.5km/s 에서 3.6km/s까지, S-wave 속도 초기 모델은 0.5km/s에서 2.0km/s까지의 범위로 설정하였다. 또한 음향-탄성 결합매질의 특성상 해수층의 경우 P-wave 속도, S-wave 속도, 밀도는 각각 1.5 km/s, 0 km/s, 1 g/cc로 설정하였다.

그림 30에서는 기존의 주파수영역 파형역산에 대한 음향-탄성 결합매질에서의 파형역산 결과를 도시하였다. 이때 사용된 주파수 대역은 2.1Hz부터 12Hz까지 사용하였다. 해당 그림에서 (a)는 주파수선택기법 그래프를 도시하였고, (b)와 (c)는 각각 P-wave 및 S-wave 속도에 대한 역산 결과를 제시하였다. 이 결과는 주파수 성분으로만 구성된 복소주파수를 사용하였기 때문에 역산 결과는 단파장 성분으로만 구성되었다. 따라서 실제 모델에서의 고속도층이나 저속도층이 정확히 규명되지 못했다. 또한 인공합성자료에 포함된 많은 다중반사파의 영향으로 암염돔의 구조 또한 정확히 규명해 내지 못했다.

그림 31에서는 앞의 경우와 상반되는 성향을 갖는 라플라스영역에서의 음향-탄성 결합매질에 대한 파형역산결과를 도시하였다. 앞의 주파수영역 파형역산의 경우와 마찬가지로 이 그림에서도 사용한 복소주파수를 나태내는 그림과 함께 P-wave 및 S-wave 속도구조에 대한 역산 결과를 도시하였다. 이번의 수치실험에서는 복소주파수 대역이 영 주파수에 상응하는 0.001Hz에 대 대해 2에서부터 14까지의 총 13개의 라플라스 감쇄상수로 구성이 되어있다. 이 경우에는 앞의 주파수영역 파형역산과는 달리, 해당 속도구조의 값을 찾아감을 알 수 있다. 하지만 특성상 세부적인 지질 구조 형상은 규명해 내지 못했다.

이와 같은 라플라스영역과 주파수영역이 가지고 있는 각각의 장단점을 보완하고자 2010년 Shin et al.은 라플라스-푸리에 영역에서의 단일 주파

수를 이용하는 순차 파형역산 알고리즘을 제안하였다. 그림 32에서는 Shin et al.(2010)에서 사용하는 라플라스 감쇄상수와 주파수 대역을 그대로 사용하여 이를 음향-탄성 결합매질에 적용시켜 보았다. 결과를 살펴보면, 기존의 라플라스 결과보다 향상된 결과를 구축할 수 있었지만, 정확한 역산 결과의 구축이라는 파형역산의 목표에는 못 미치는 결과를 보여준다. 또한 이 알고리즘의 경우 단일 코어를 사용하기 때문에 컴퓨터 자원을 절약 할 수는 있지만 보다 많은 시간이 소요된다는 단점을 가지고 있다.

네 번째 주파수 선택기법은 그림 33에 제시된 것처럼 2종류의 복소주파수 대역을 구성하고 이에 대한 순차적인 역산을 통해 최종 역산 결과를 구축해 내는 알고리즘이다. 첫 번째 대역은 설정된 라플라스 감쇄상수를 모두 사용하는 라플라스 감쇄상수로만 구성된 복소주파수 대역이다. 이 복소주파수 대역은 결국 기존의 라플라스영역 파형역산과 같은 장파장 속도모델을 구축해 낼 수 있다. 이에 순차적으로 실 주파수(2Hz 이상 5.9Hz이하)로 구성된 복소주파수대역에 따른 2차 파형역산이 수행된다. 이로써 장파장-단파장에 대한 파형역산을 순차적으로 수행하게 된다. 이렇게 구축한 역산결과는 그림 33에 각각 도시하였다. 또한 이와 같은 맥락에서 Kang et al. (2012)가 제안한 총 4개의 복소주파수로 구성된 라플라스-푸리에 영역 파형역산에 따른 결과를 그림 34에 제시하였다. 이 경우에는 앞의 2개 복소주파수 대역 기법에 추가적으로 2개의 복소주파수 대역을 추가한 것으로 장파장-단파장-중파장-단파장 성분을 순차적으로 이용하는 알고리즘이다.

그림 30부터 35에 이르기까지 총 5가지의 기존 알고리즘에 대해 Pluto 모델에서 구축한 음향-탄성 결합매질에 대한 역산결과를 분석하면 다음과 같은 결론을 도출해 낼 수 있다. 기존의 주파수영역 파형역

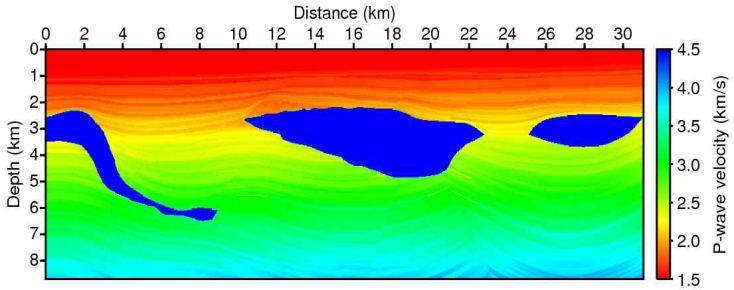
산은 저주파수 부재에 따른 문제로 인해 실제 모델이 갖는 배경속도를 구축해 낼 수 없다. 하지만 라플라스영역 파형역산은 실제 모델이 갖는 배경속도를 구축해 낼 수 있다. 하지만 감쇄파동장의 특성상 역산 결과는 장파장 성분의 저해상도 역산결과만의 구축이 가능하다. 하지만 이 둘의 성향을 결합시킨 형태의 라플라스-푸리에 영역 파형역산 알고리즘은 기존의 알고리즘 보다 향상된 역산결과의 구축이 가능하다. 하지만 많은 계산시간과 컴퓨팅 자원이 요구되는 바 적절한 라플라스-푸리에 영역 복소주파수 선택에 대한 기법의 구축이 요구된다. 따라서 다양한 라플라스-푸리에 영역에서의 복소주파수 선택법을 적용하고 해당 결과를 비교함으로써 복소주파수 선택법의 구축을 수행하여야 한다. 이를 위해 그림 35에서는 수행한 세가지 종류의 라플라스-푸리에 영역 파형역산 결과에 대한 정량적인 비교를 위해 사용한 Pluto 모델의 16km 부분에서 추출한 깊이에 따른 역산결과의 트레이스를 도시하였다. 이 그래프에서 검은 색 실선은 실제 모델을 나타내며 세가지 점선은 각각의 라플라스-푸리에 영역에서의 파형역산 알고리즘들에 의해 구축한 역산결과를 각각 나타낸다. 이 결과에서 살펴보면 2개 혹은 4개의 복소주파수 대역을 사용한 역산 알고리즘이 기존의 단일 주파수를 이용한 순차 파형역산 보다 좋은 역산결과를 구축해 냄을 알 수 있다. 2종류의 복소주파수 대역과 4종류의 복소주파수 대역에 의해 구축한 역산 결과를 비교하면 큰 차이를 보이지는 않는 것이 확인되었다. 이에 따라 본 연구에서는 구배도 보정기법의 적용을 위해 효율적으로 파형역산의 가동이 가능한 2 종류 복소주파수 대역을 사용하는 라플라스-푸리에 영역 파형역산 기법을 적용하였다.

다음 장에서는 총 2가지 인공합성 모델에 2 종류의 복소주파수 대역을 사용하는 라플라스-푸리에 영역 파형역산 알고리즘에 대해 구배도

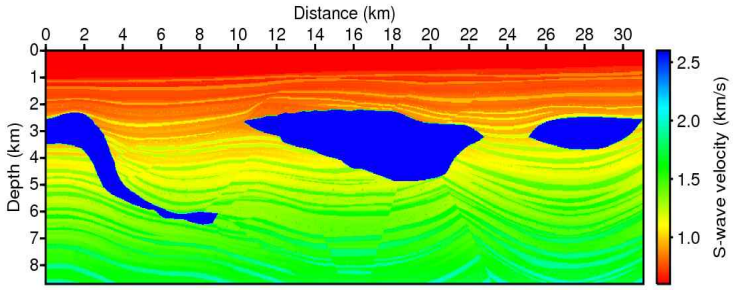
보정기법을 적용한 음향-탄성 결합매질에서의 파형역산 결과를 제시하고 이에 대해 분석하였다.

모델명	Pluto 모델
수심정보	0.6 km ~1.067 km
모델 크기	31.7 km × 9.0 km
송신파형 정보	1차 미분 가우스 함수
송신원 개수	101
송신원 간격	0.30480 km
송신원 깊이	0.03048 km
수신기 개수	1201
수신원 간격	0.03048 km
수신원 깊이	0.03048 km

표 2. Pluto모델에 대해 구축한 탄성파 탐사자료 정보.

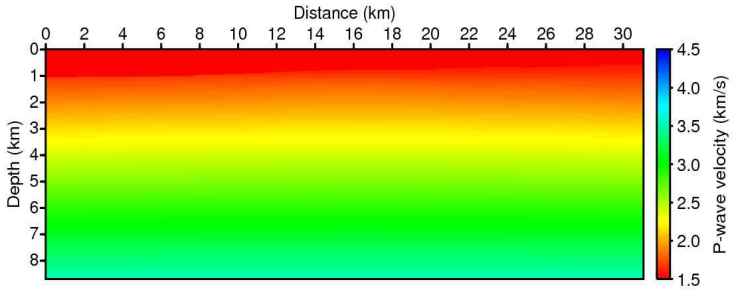


(a)

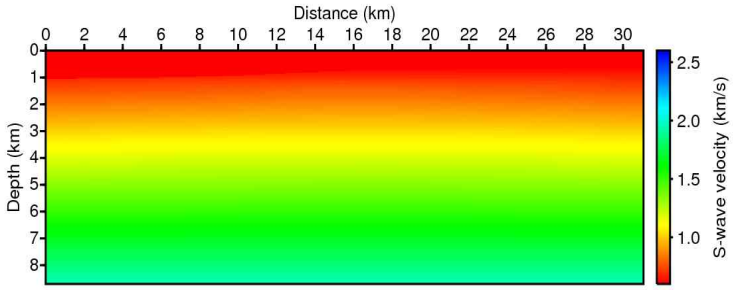


(b)

그림 28. 불규칙 해저지형을 설정한 음향-탄성 결합매질에서의 Pluto모델; (a) P-wave 속도 모델, (b) S-wave 속도 모델.

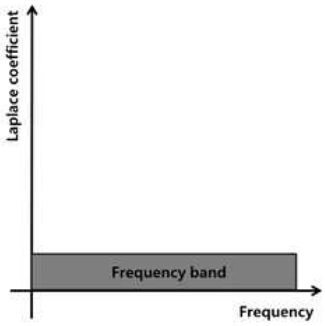


(a)

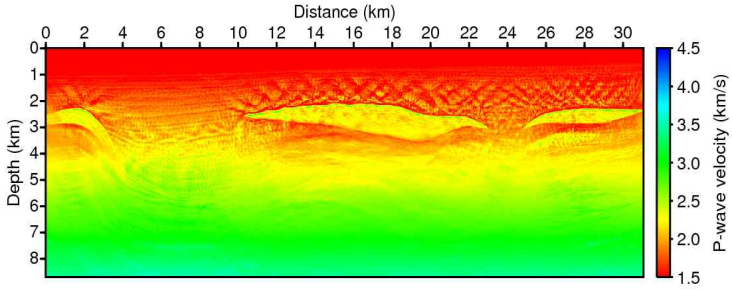


(b)

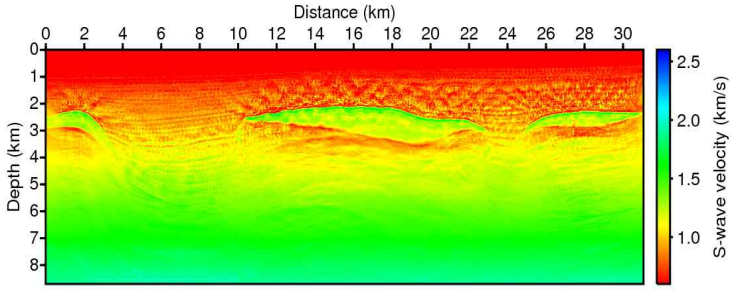
그림 29. 파형 역산에 사용되는 초기 모델; (a) P-wave 속도, (b) S-wave 속도.



(a)

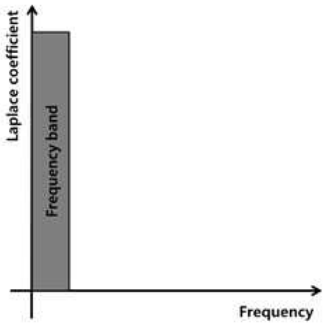


(b)

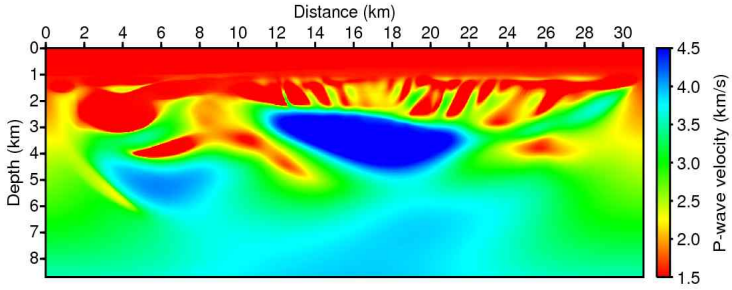


(c)

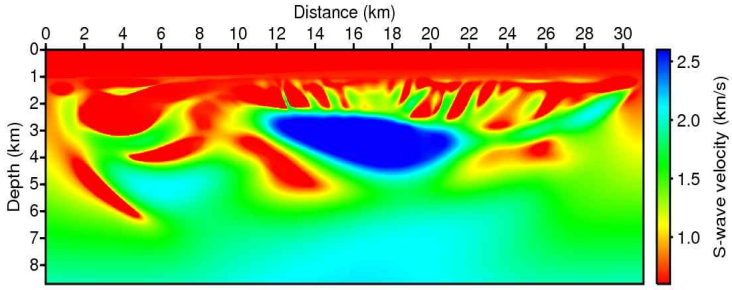
그림 30. 음향-탄성 결합매질에 대한 주파수영역 완전파형역산결과; (a) 주파수 선택기법 (주파수영역 파형역산) (b) P-wave 속도 모델, (c) S-wave 속도 모델.



(a)

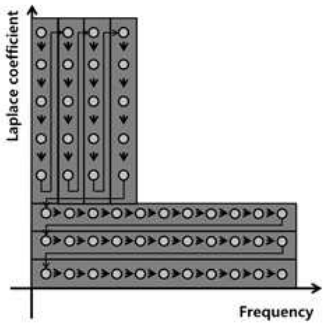


(b)

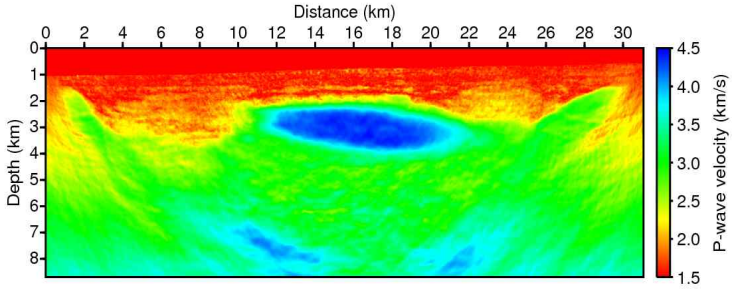


(c)

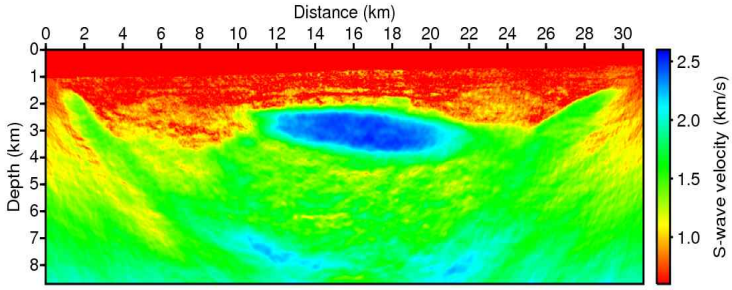
그림 31. 음향-탄성 결합매질에 대한 라플라스영역 완전파형역산결과; (a) 주파수 선택기법 (라플라스영역 파형역산) (b) P-wave 속도 모델, (c) S-wave 속도 모델.



(a)

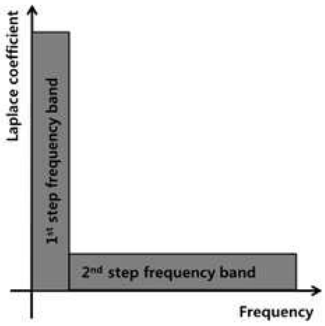


(b)

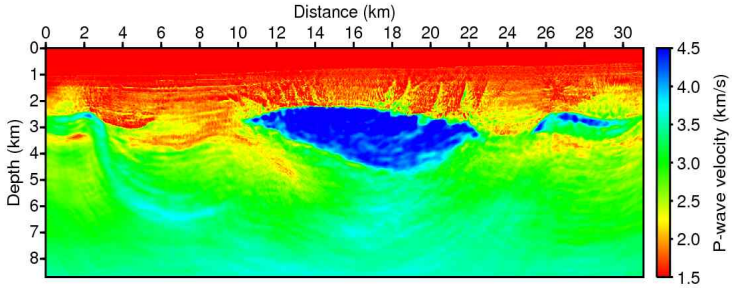


(c)

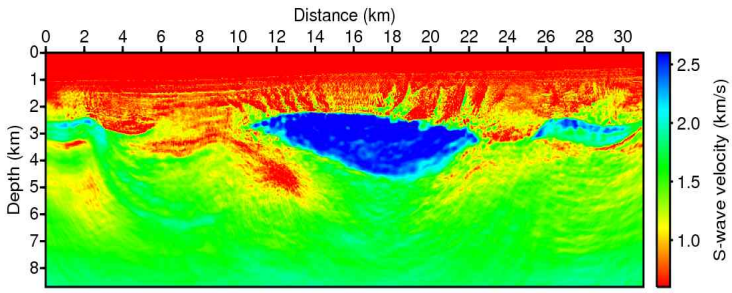
그림 32. 음향-탄성 결합매질에 대한 라플라스-푸리에영역에서의 단일 주파수를 이용한 순차파형역산결과; (a) 주파수 선택기법 (라플라스-푸리에 영역에서의 단일 주파수에 따른 파형역산) (b) P-wave 속도 모델, (c) S-wave 속도 모델.



(a)

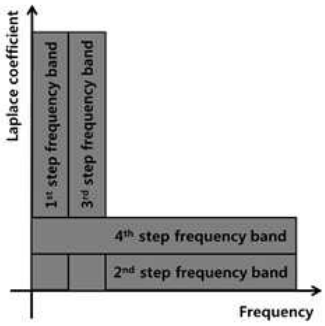


(b)

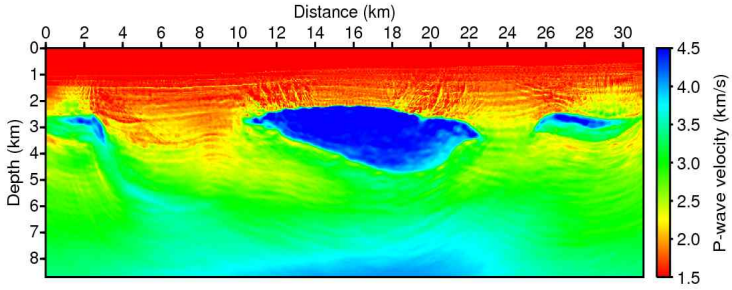


(c)

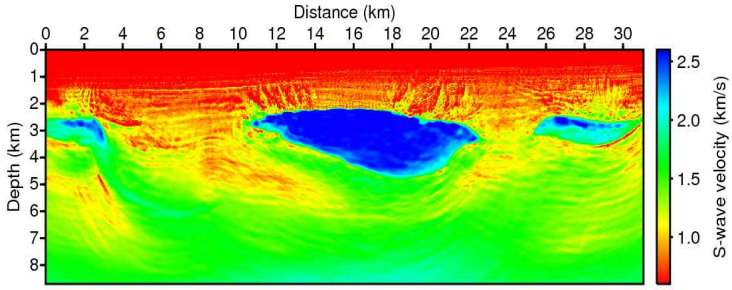
그림 33. 음향-탄성 결합매질에 대한 2가지 복소주파수 대역을 이용한 라플라스-푸리에 영역 완전파형역산결과; (a) 주파수 선택기법 (라플라스-푸리에 영역에서의 2개 복소주파수 대역을 이용한 파형역산) (b) P-wave 속도 모델, (c) S-wave 속도 모델.



(a)

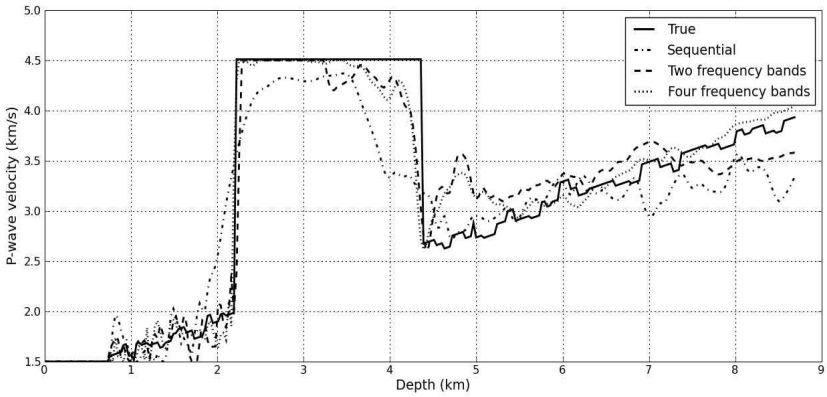


(b)

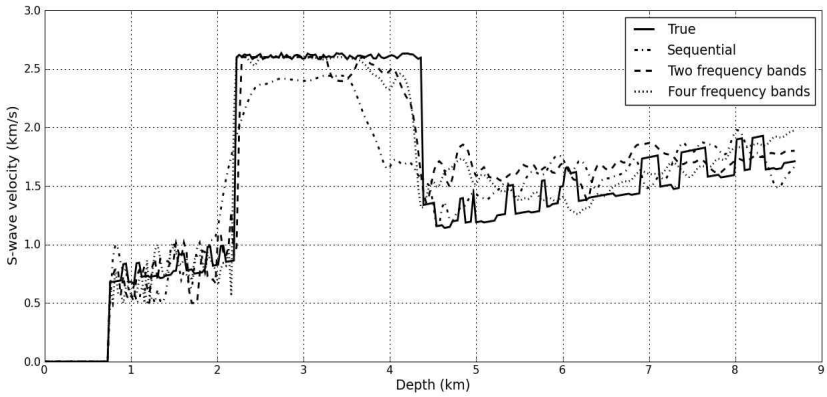


(b)

그림 34. 음향-탄성 결합매질에 대한 4가지 복소주파수 대역을 이용한 라플라스-푸리에 영역 완전파형역산결과; (a) 주파수 선택기법 (라플라스-푸리에 영역에서의 4개 복소주파수 대역을 이용한 파형역산) (b) P-wave 속도 모델, (c) S-wave 속도 모델.



(a)



(b)

그림 35. 파형역산 결과에 대한 깊이 방향 트레이스 비교; (a) P-wave 에 대한 역산결과에서 추출한 트레이스 비교 그래프, (b) S-wave 에 대한 역산결과에서 추출한 트레이스 비교 그래프.

3-1-2. SEG/EAGE 암염돔 모델

이번 파형역산 수치실험에서 사용하는 모델은 앞의 구배도 분석에 사용되었던 음향-탄성 결합매질에서의 SEG/EAGE 암염돔 모델이다. 이에 대해 기존의 구배법과 구배도 보정기법에 의해 획득한 각각의 장파장 속도모델을 비교함으로써 구배도 보정기법에 의한 장파장 속도모델 구축 알고리즘의 타당성을 입증하였다.

이번 파형역산에 대한 수치실험을 위해 설정한 초기속도모델은 깊이에 따라 그 값이 선형적으로 증가하는 모델로 설정하였으며 이는 그림 36에 제시하였다. 그림에서 살펴보면 P-wave 속도 모델은 1.5부터 3.6 km/s까지, S-wave 속도 모델은 1.0부터 2.3 km/s까지 그리고 밀도 모델의 경우 1.8부터 2.5 g/cc까지 선형적으로 증가하도록 설정되었다. 표 3에서는 본 수치실험에 사용한 SEG/EAGE 암염돔 모델과 이에 대한 파동전파 모델링을 통해 구축한 인공합성자료에 대한 정보를 정리하여 제시했다.

이번 수치실험은 앞의 라플라스-푸리에 영역에서의 복소주파수 선택에서 제시한 2종류의 복소주파수 밴드에 따라 순차적으로 수행한 라플라스-푸리에 영역 복소주파수 선택법(그림 8-d)을 이용하여 파형역산을 수행하였다. 이때 구배도 보정기법은 장파장 역산결과의 구축을 담당하는 첫 번째 복소주파수 밴드에 적용하였다. 이번 파형역산 수치실험은 앞에서 수행한 구배도 보정 기술 분석에 제시되었던 4 종류의 구배도 보정법(선형증가모델, 제곱 축적, 세제곱 축적 그리고 네제곱 축적 구배도)에 대해 모두 수행하고 이에 대한 각각의 결과를 제시하였다. 해당 역산결과는 그림 37, 38, 39, 40 및 41에 각각 도시하였다. 그림 37에서는 본래의 역전파 알고리즘에 의해 구축한 장파장 역산결과를 제시하였다. 그림

38에서는 선형증가 모델을 이용하여 기존 구배도를 보정하여 구축한 역산결과를 제시하였고, 그림 39에서는 본 연구에서 제안하는 제곱하여 깊이 방향으로 누적시켜 구축한 제곱 축적 구배도에 의해 보정된 구배도를 이용한 장파장 역산결과를 제시하였다. 또한 그림 40 그리고 41에서는 세제곱하여 절대값을 취해 축적시킴으로써 구축한 세제곱 축적구배도 및 네제곱을 취해 축적시킨 네제곱 축적구배도에 대한 장파장 역산결과를 각각 도시하였다.

각각의 결과를 살펴보면 기존의 구배도에 의해 구축한 결과에서는 해저 지층 상부에서 실제로 존재하지 않는 고속도층이 구축됨을 발견할 수 있었다. 이는 선형 증가 모델로 구배도를 보정하여 구축한 역산결과에서도 여전히 존재한다. 하지만 제곱 및 세제곱, 네제곱 축적 구배도를 이용하여 보정한 구배도를 이용한 역산결과에서는 이와 같은 현상을 발견할 수 없었다. 하지만 제곱하여 축적한 구배도를 이용하여 구축한 역산 결과를 제외한 나머지 축적 구배에 의해 보정한 구배도를 사용하여 구축한 역산결과에서는 실제 모델에 존재하는 암염돔 구조보다 축소된 형태의 역산결과가 구축되었다. 이는 세제곱 및 네제곱에 대해 누적된 큰 값의 축적 구배로 인해 파형역산 결과에 잘못된 값이 구축되었음을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 제곱하여 누적시킨 축적구배도를 이용한 구배도 보정기법을 권장한다.

그림 42에서는 구배도 보정법을 적용한 음향-탄성 결합매질에서의 SEG/EAGE 암염돔 모델에 대한 라플라스-푸리에 영역 최종 역산결과를 도시하였다. 이는 앞에서 언급한 그림 8-d에 제시된 복소주파수 선택기법에 제곱하여 누적시킴으로써 구축한 축적 구배도를 이용한 구배도 보정법을 적용시켜 구축한 최종 역산결과이다. 또한 그림 43에서는 이에 대한 RMS에러 그래프를 도시하였다. 그림 42에 제시된 최종 역산결과

와 그림 43에 제시된 RMS그래프에서 살펴보면 역산 결과는 실제 모델의 형태와 그 값을 정확히 찾아감을 확인 할 수 있었고, 15 퍼센트 이하의 값으로 RMS 에러가 줄어들었음을 확인할 수 있다. 이는 성공적으로 실제 모델에 대해 파형역산 결과가 구축되었음을 증명한다.

모델명	SEG/EAGE 암염돔 모델
수심정보	0.4 km ~1.5 km
모델 크기	15.6 km × 4.1 km
총 라플라스 범위	1 to 15
주파수 대역	3.1 Hz to 10 Hz
송신파형 정보	1차 미분 가우스 함수
송신원 개수	151
송신원 간격	0.1 km
송신원 깊이	0.02 km
수신기 개수	760
수신원 간격	0.02 km
수신원 깊이	0.02 km

표 3. SEG/EAGE 암염돔 모델에 대해 구축한 탄성파 탐사자료 정보.

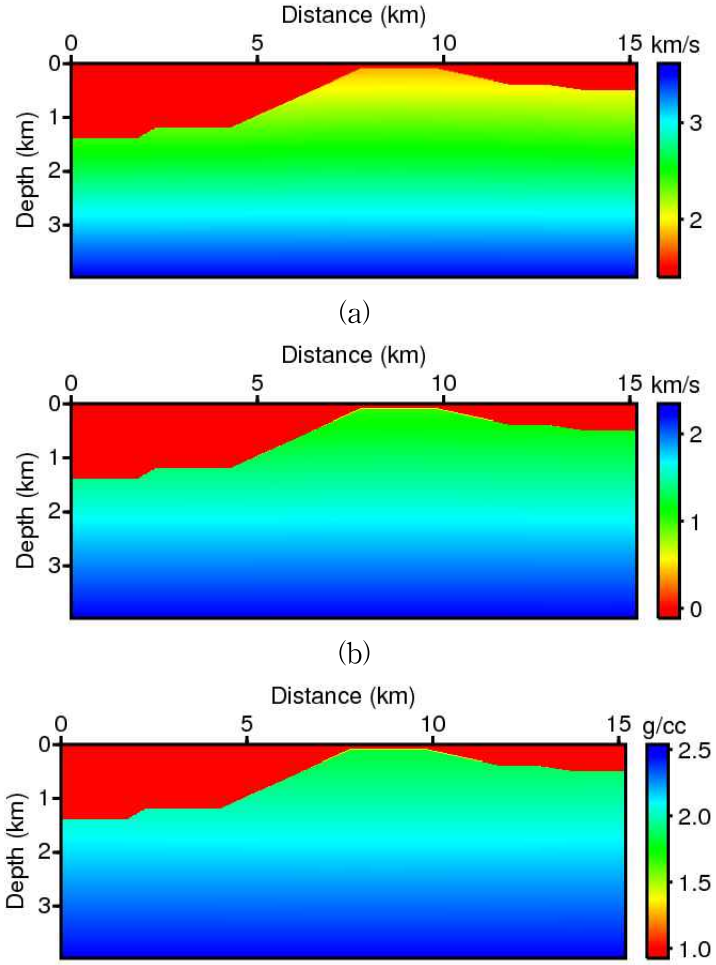


그림 36. 암염돔 모델에 대한 파형 역산에 사용되는 초기 모델; (a)는 P-wave 속도, (b)는 S-wave 속도, (c)는 밀도에 대한 초기속도 모델.

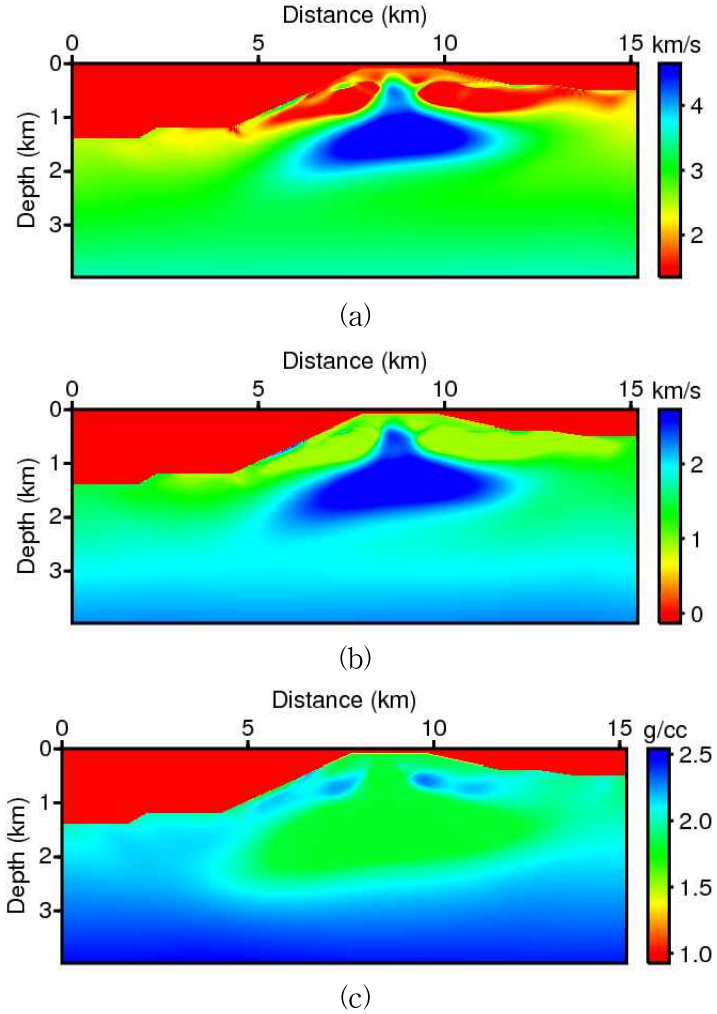
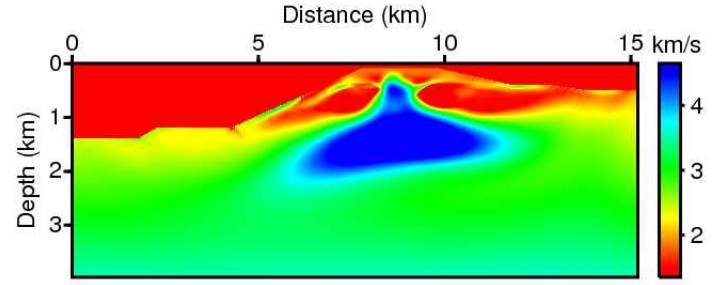
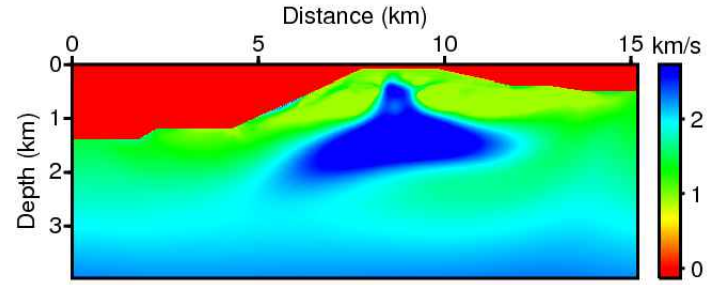


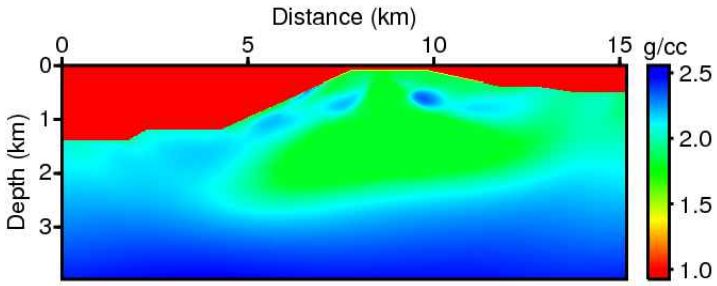
그림 37. 암염돔 모델에 대한 기존 알고리즘에 의해 구축한 음향-탄성 결합 매질에서의 라플라스영역 파형역산결과; (a)는 P-wave 속도, (b)는 S-wave 속도 (c)는 밀도에 대한 역산결과.



(a)

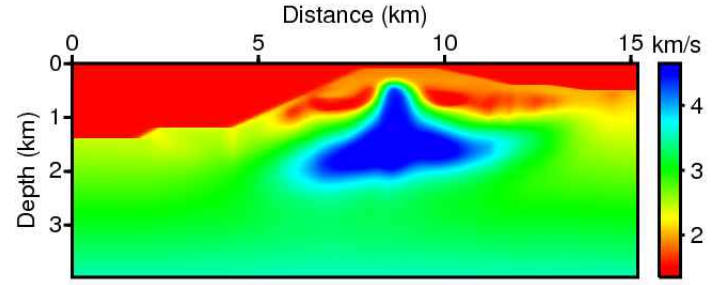


(b)

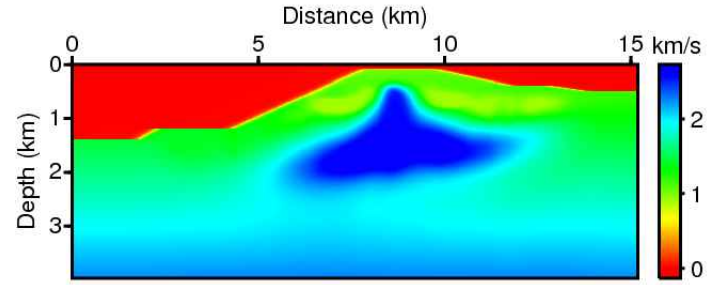


(c)

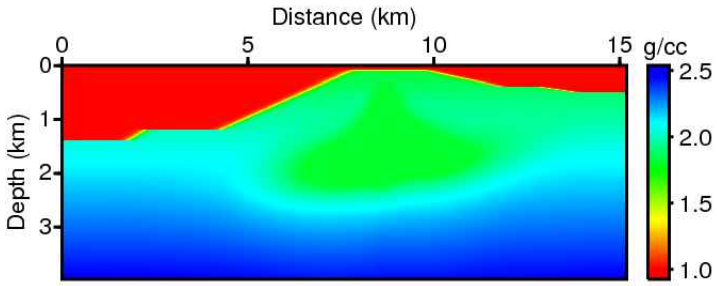
그림 38. 암염돔 모델에 대해 선형 증가 모델(vkz)을 이용하여 구배도를 보정하고 이를 이용하여 구축한 음향-탄성 결합 매질에서의 장파장 역산결과; (a)는 P-wave 속도, (b)는 S-wave 속도 (c)는 밀도에 대한 역산결과.



(a)

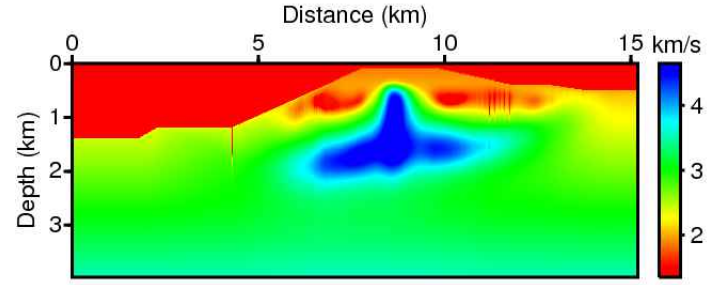


(b)

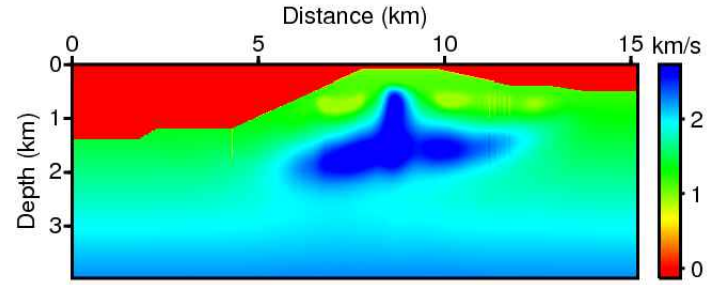


(c)

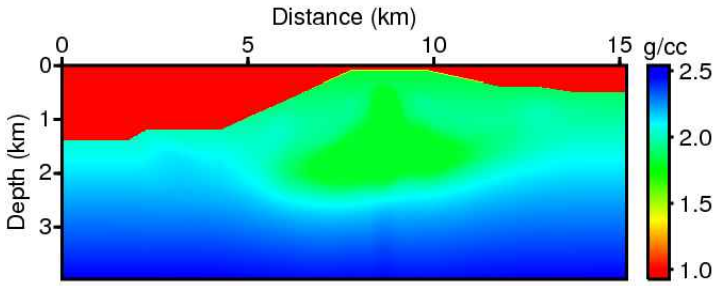
그림 39. 암염돔 모델에 대해 깊이 방향에 따라 제곱하여 누적시켜 구축한 제곱 축적 구배도를 이용하여 해당 구배도를 보정하고 이를 이용하여 구축한 음향-탄성 결합 매질에서의 장파장 역산결과; (a)는 P-wave 속도, (b)는 S-wave 속도 (c)는 밀도에 대한 역산결과.



(a)



(b)



(c)

그림 40. 암염돔 모델에 대해 깊이 방향에 따라 이를 세제곱하여 절대값을 취한 후 누적시켜 구축한 세제곱 축적 구배도를 이용하여 해당 구배도를 보정하고 이를 이용하여 구축한 음향-탄성 결합 매질에서의 장파장 역산결과; (a)는 P-wave 속도, (b)는 S-wave 속도 (c)는 밀도에 대한 역산결과.

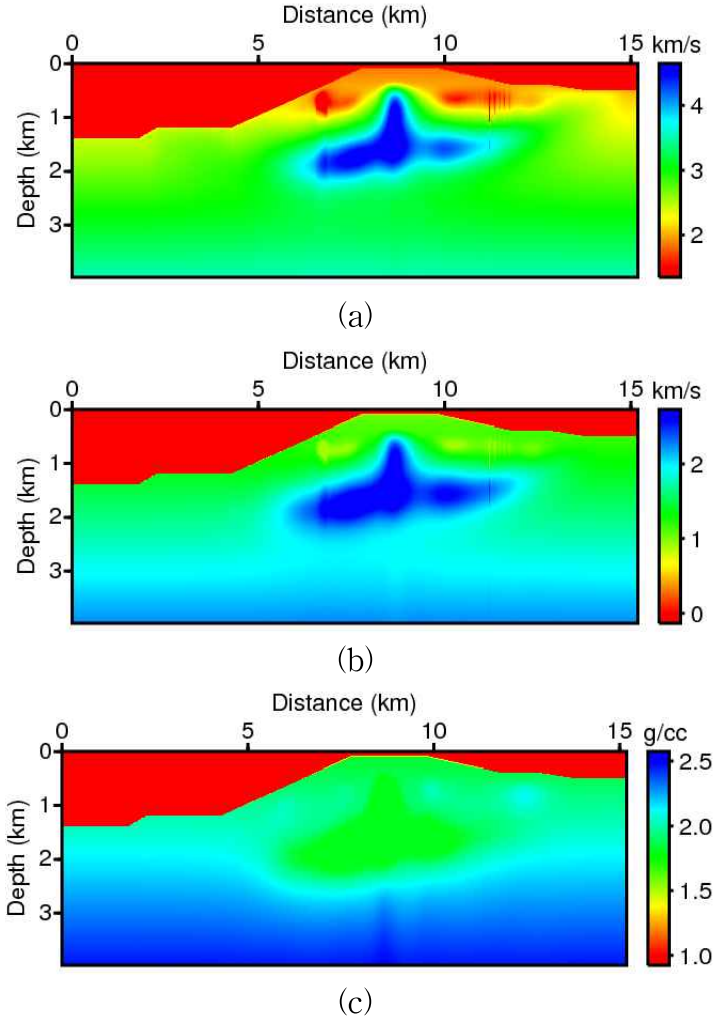
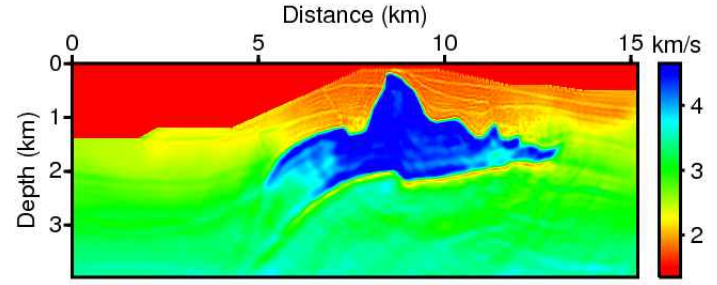
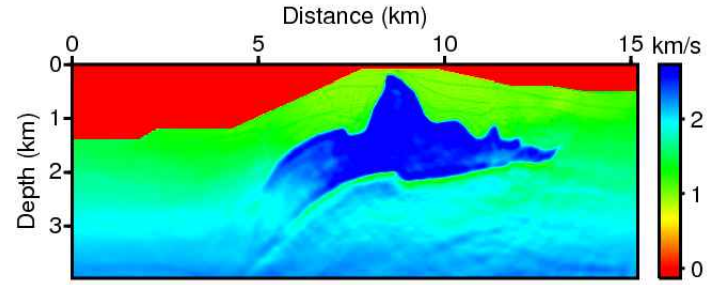


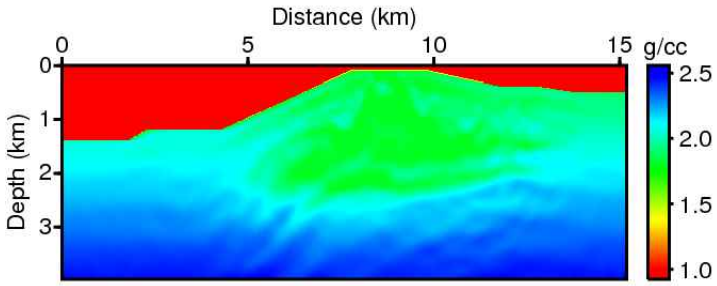
그림 41. 암염돔 모델에 대해 깊이 방향에 따라 네제곱하여 누적시켜 구축한 네제곱 축적 구배도를 이용하여 해당 구배도를 보정하고 이를 이용하여 구축한 음향-탄성 결합 매질에서의 장파장 역산결과; (a)는 P-wave 속도, (b)는 S-wave 속도 (c)는 밀도에 대한 역산결과.



(a)



(b)



(c)

그림 42. 구배도 보정 법에 의해 획득한 라플라스-푸리에 영역에서의 최종 파형역산결과; (a)는 P-wave 속도, (b)는 S-wave 속도 (c)는 밀도에 대한 역산결과.

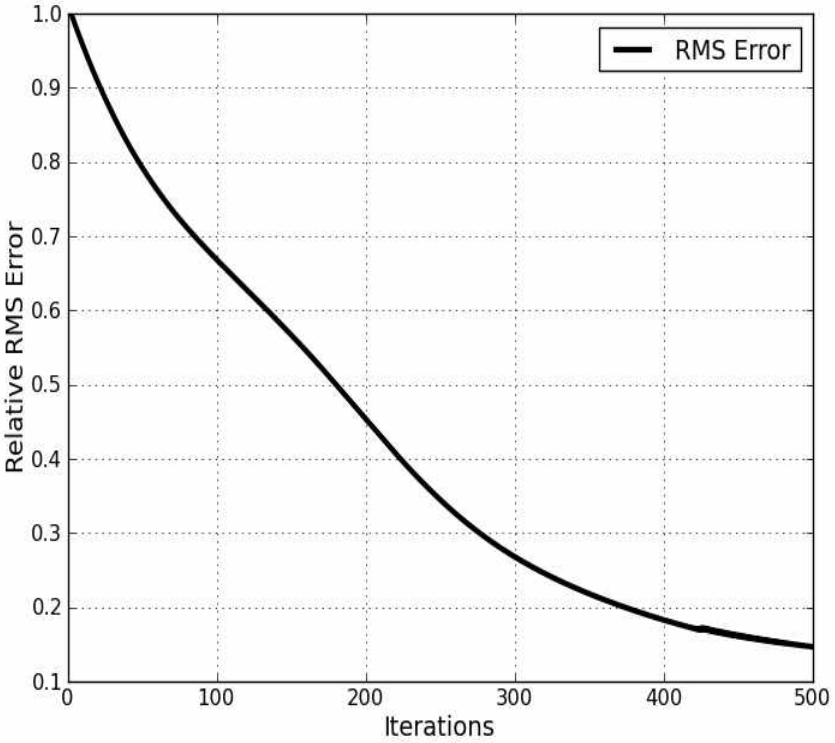


그림 43. SEG/EAGE 암염돔 모델에 대한 파형역산 수행 시 측정한 반복 계산 횟수별 해당 RMS 에러.

3-1-3. SEG-2D Hess VTI 모델

앞 장에서 수행한 수치 실험에 이어 이번에는 다른 대상 모델에 대한 기존의 구배도를 이용한 역산결과와 구배도 보정기법에 의해 구축한 새로운 구배도를 이용하여 구축한 역산결과를 제시하고 이를 서로 비교해 보았다. 이번 수치실험에서 사용하는 모델은 본래 이방성 매질에 대한 연구의 목적을 위해 개발된 Hess모델이다. 본 수치실험에서는 이방성과 관련된 매개변수를 배재한 채 등방성으로 가정하여 수치실험을 수행하였다. 이번에 사용한 Hess모델의 특징은 모델의 좌측 상부에 위치한 거대한 암염돔구조와 우측 상부에 위치한 단층구조이다. 본래의 자료에는 이방성 모델도 포함되어 있지만, 본 연구에 대한 적용을 위해 P-wave와 S-wave 속도모델 그리고 밀도로 해당 원본 모델을 재구성하여 음향-탄성 결합매질로 구성하고 이를 수치실험에 적용하였다. 이때 수심은 200m에서 500m까지 불규칙적으로 변하도록 설정하였다. 해당 모델은 그림 44에 도시하였다. 표 4에서는 해당 모델에 대한 모델링을 통해 탄성파 탐사자료의 구축을 수행할 때 적용한 모델링 정보를 제시하였다.

그림 45에서는 해당 역산 수치실험에 사용될 역산 초기모델을 제시하였다. 해당 그림에서 첫 번째 P-wave 초기속도 모델의 경우 2.1km/s에서 3.6km/s 까지 선형적으로 증가하는 모델로 설정하였고, 이와 같은 맥락으로 S-wave 초기속도모델의 경우에는 1.2km/s에서 2.2km/s까지 그리고 밀도의 경우 2.1g/cc에서 3.0g/cc까지로 초기속도모델의 범위를 지정하였다.

그림 46과 47에서는 각각 해당 모델에 대한 라메상수 람다(λ)와 뮤(μ)에 대해 역전파 알고리즘을 통해 계산된 구배도와 함께 이번 연구에서 제안한 기존의 구배도에 대해 깊이 방향으로 그 값을 제곱하여 누적시킴으로써 구축한 제곱 축적 구배도 그리고 이를 이용하여 보정한 구배도를 각각 도시하였다. 이를 통해 앞 장에서 기술한 것과 같이 각각의 구배도에 대한 비교 분석과 구배도 보정기법에 대한 효과를 분석할 수 있었다. 분석결과는 앞 장에서 제시한 SEG/EAGE 암염돔 모델과 같다.

제시도니 각각의 구배도를 이용한 파형역산 결과는 그림 48와 49에 제시하였다. 여기서 제시된 그림은 모두 첫 번째 복소주파수 대역(라플라스 감쇄상수)에 의해 구축된 장파장 속도모델이다. 구축한 장파장 역산결과에 대한 정량적인 비교를 위해 그림 50에서는 제시된 장파장 역산결과들과 실제 모델로 부터 4.8km 지점 즉 암염돔이 위치한 정 가운데 부근에서 추출한 트레이스를 제시하였다. 이를 분석해 보면 구배도 보정법에 의한 파형역산 알고리즘이 보다 향상된 역산결과를 구축할 수 있음을 증명하였다. 또한 역산결과 내 해저면 부근에서 관찰되는 불규칙 해저지형의 구현에 따른 잘못된 구배도로 인해 구축된 수치적 결함 또한 이와 같은 구배도 보정기법을 통해 해결할 수 있음을 증명할 수 있었다.

그림 51에서는 구배도 보정기법을 도입하여 구축한 최종 역산 결과를 도시하였다. 그리고 그림 52에서는 이에 대한 RMS에러 그래프를 도시하였다.

구배도 보정기법을 적용하여 구축한 장파장 역산결과 및 이에 대한 최종 역산결과는 기존의 구배도에 의해 구축한 역산결과와 실제 SEG-2D VTI HESS 모델과의 비교를 통해 정량적으로 P-파, S-파 및 밀도 모델에 대해 그 값이 기존의 기술보다 정확히 역산되었음을 확인할 수 있었다. 또한 RMS에러 그래프를 통해 본 논문에서 제안하는 음향-탄성 결

합매질에 대한 구배도 보정기법은 인공합성자료에 대해 해당 알고리즘의 목적을 달성하였음을 증명할 수 있었다.

모델명	SEG-2D Hess VTI 모델
수심정보	0.2 km ~ 0.5 km
모델 크기	17 km × 3.0 km
총 라플라스 범위	1 to 15
총 주파수 범위	3 Hz to 10 Hz
송신파형 정보	1차 미분 가우스 함수
송신원 개수	164
송신원 간격	1 km
송신원 깊이	0.2 km
수신기 개수	820
수신원 간격	0.02 km
수신원 깊이	0.02 km

표 4. SEG-2D Hess VTI 모델에 대해 구축한 탄성파 탐사자료 정보.

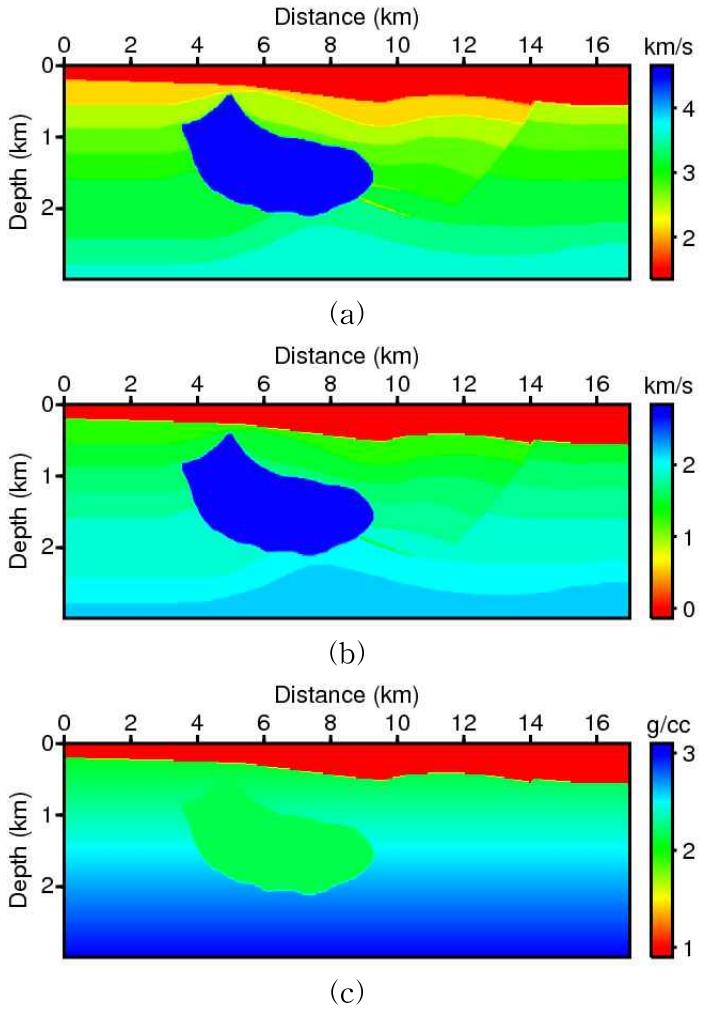
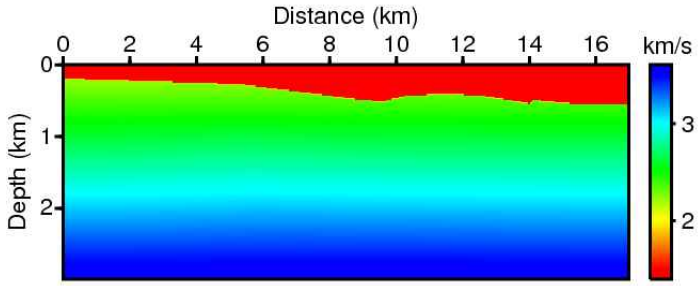
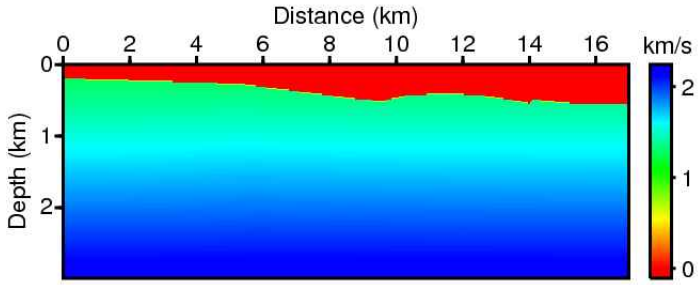


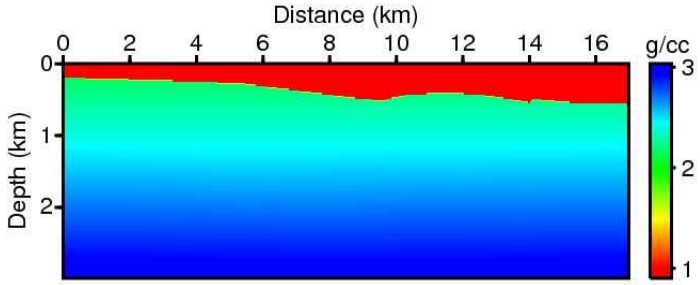
그림 44. 불규칙 해저지형을 설정한 음향-탄성 결합매질에서의 SEG-2D Hess VTI 모델; (a)는 P-wave 속도, (b)는 S-wave 속도 (c)는 밀도에 대한 역산결과.



(a)



(b)



(c)

그림 45. SEG-2D Hess VTI 모델에 대한 파형 역산에 사용되는 초기 모델; (a)는 P-wave 속도, (b)는 S-wave 속도 (c)는 밀도에 대한 역산결과.

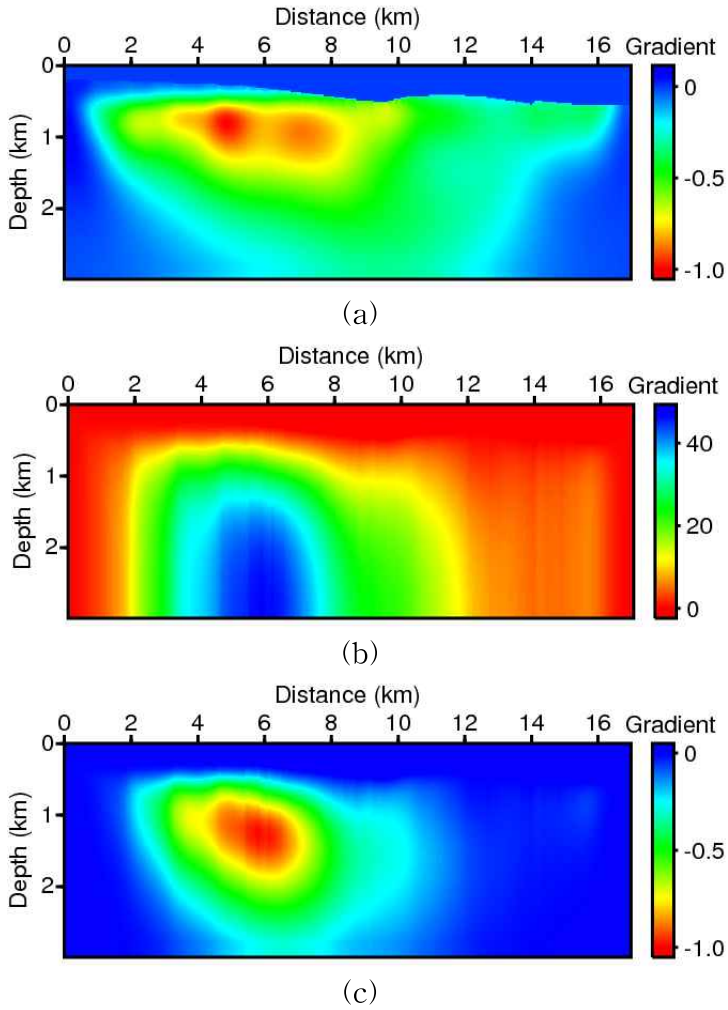


그림 46. 라메상수 람다(λ)에 대한 각각의 구배도; (a) 기존의 구배도, (b) 제곱하여 누적시킴으로써 구축한 축적구배도, (c) 축적 구배도를 이용해 보정한 구배도.

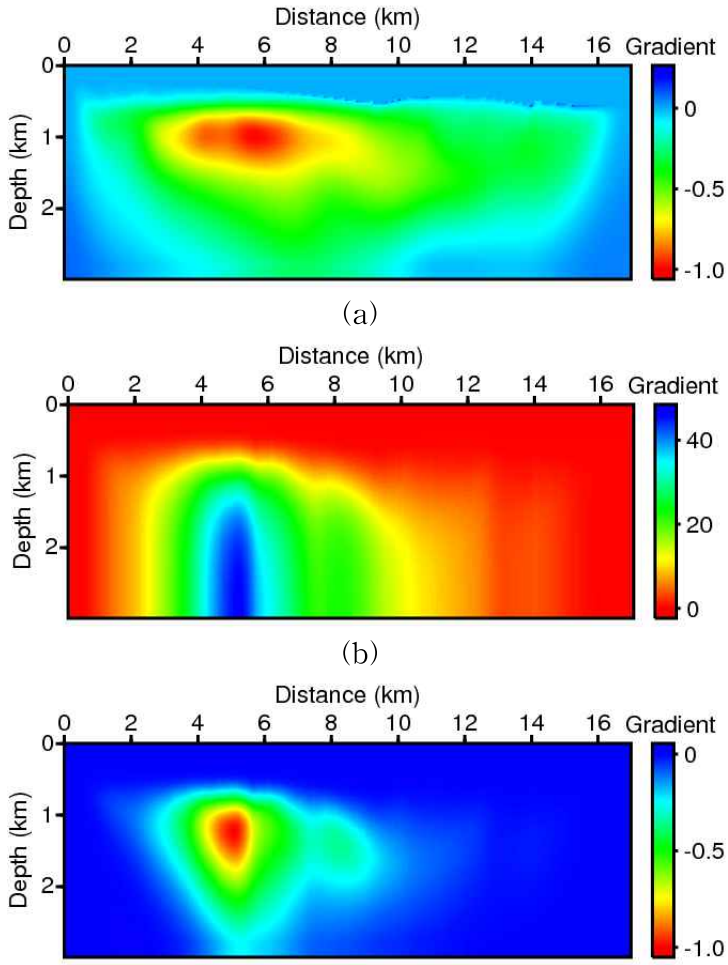


그림 47. 라메상수 뮤(μ)에 대한 각각의 구배도; (a) 기존의 구배도, (b) 제곱하여 누적시킴으로써 구축한 축적구배도, (c) 축적 구배도를 이용해 보정한 구배도.

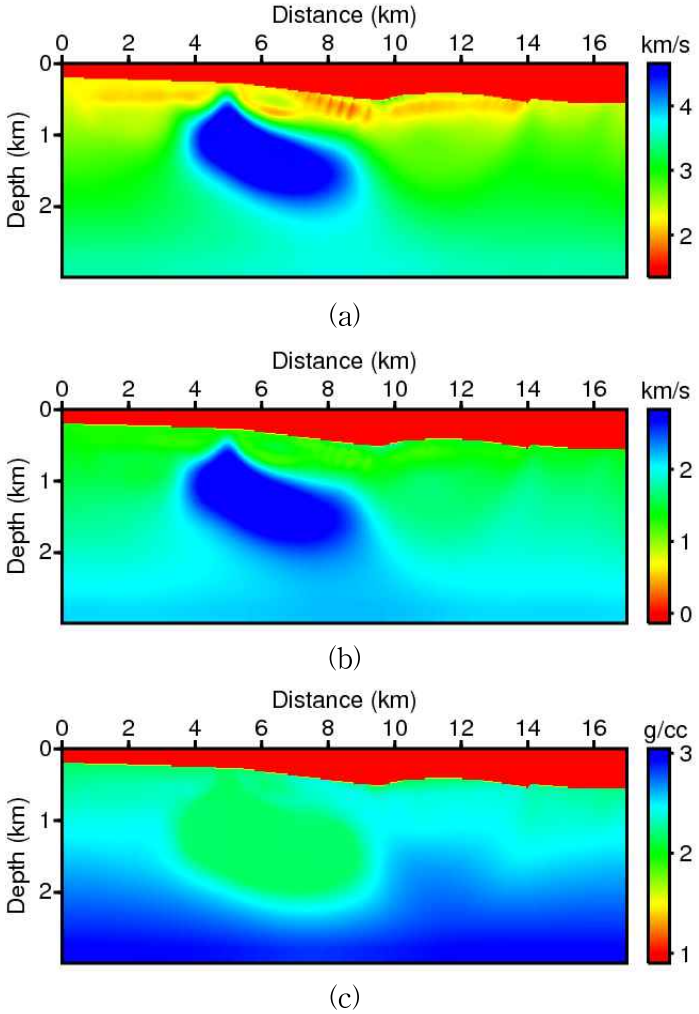
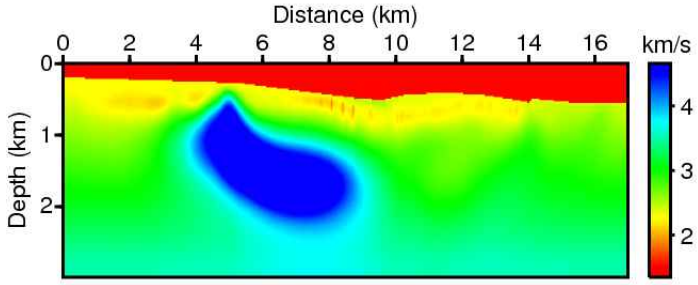
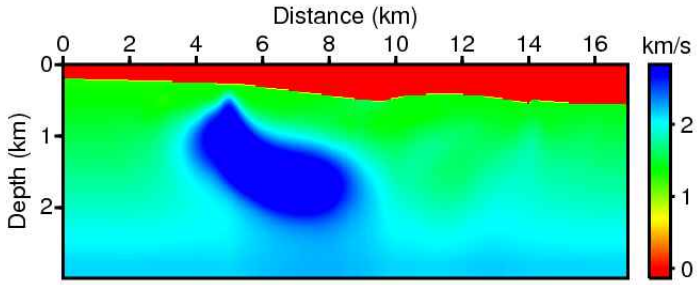


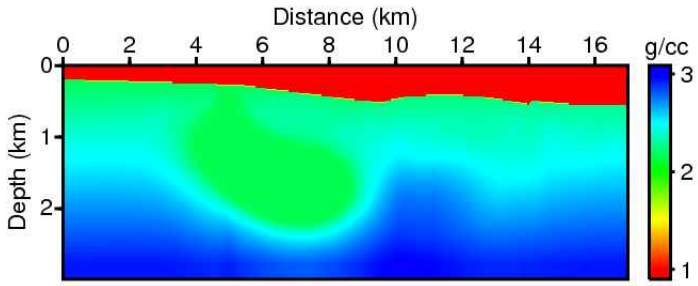
그림 48. SEG-2D Hess VTI 모델에 대해 기존 알고리즘에 의해 구축한 음향-탄성 결합 매질에서의 라플라스영역 파형역산결과; (a)는 P-wave 속도, (b)는 S-wave 속도 (c)는 밀도에 대한 역산결과.



(a)

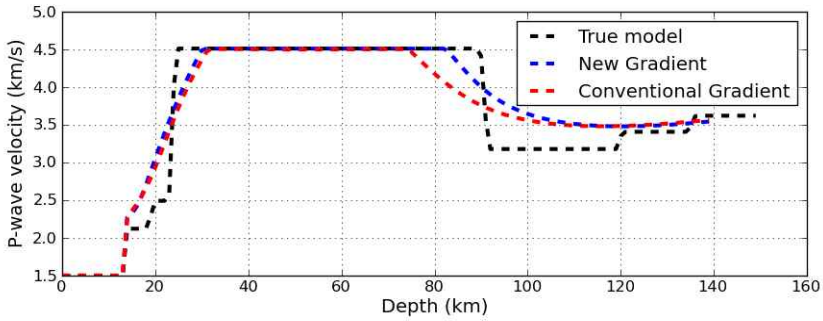


(b)

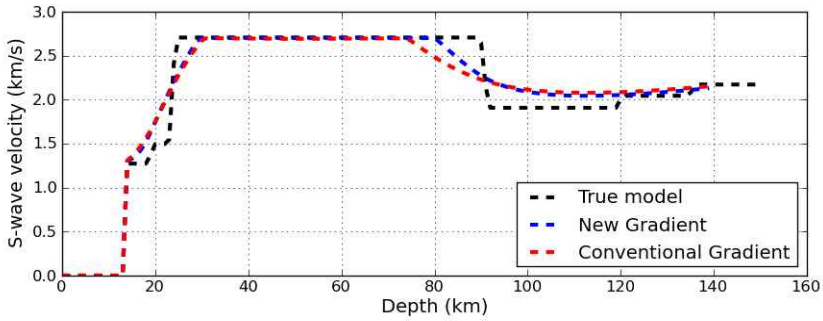


(c)

그림 49. SEG-2D Hess VTI 모델에 대해 구배도 보정법을 적용하여 구축한 음향-탄성 결합 매질에서의 장파장 역산결과; (a)는 P-wave 속도, (b)는 S-wave 속도 (c)는 밀도에 대한 역산결과.

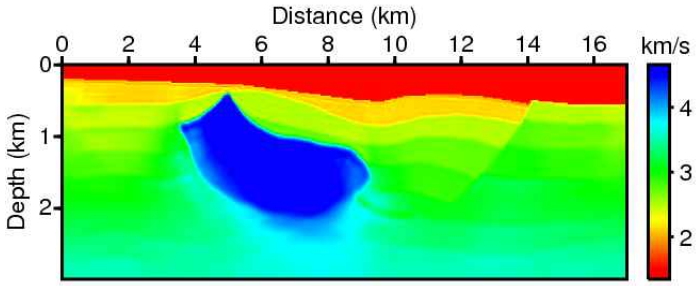


(a)

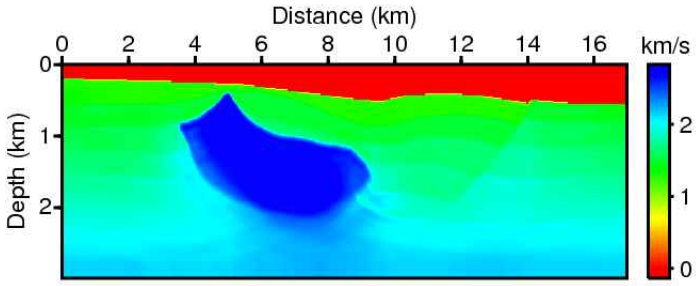


(b)

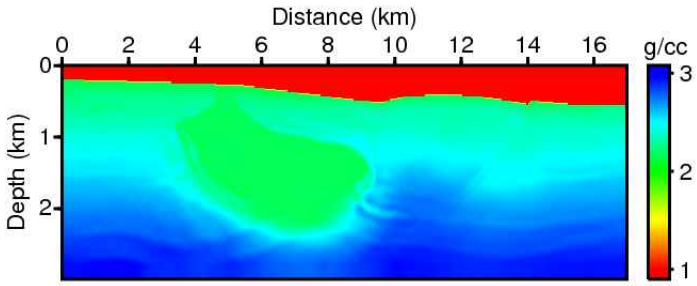
그림 50. SEG-2D Hess VTI 모델에 대해 실제 모델(검은점선), 기존 구배도에 의개 구축한 장파장 역산결과(붉은 점선) 및 구배도 보정기법을 적용하여 구축한 장파장 역산결과(푸른 점선)에서 각각 추출한 4.8km 지점에서의 깊이 방향 트레이스; (a)는 P-wave 속도에 대한 트레이스 비교 그래프, (b)는 S-wave 속도에 대한 트레이스 비교 그래프.



(a)



(b)



(c)

그림 51. 구배도 보정법을 적용하여 구축한 최종 라플라스-푸리에 영역 파형역산결과; (a)는 P-wave 속도, (b)는 S-wave 속도 (c)는 밀도에 대한 역산결과.

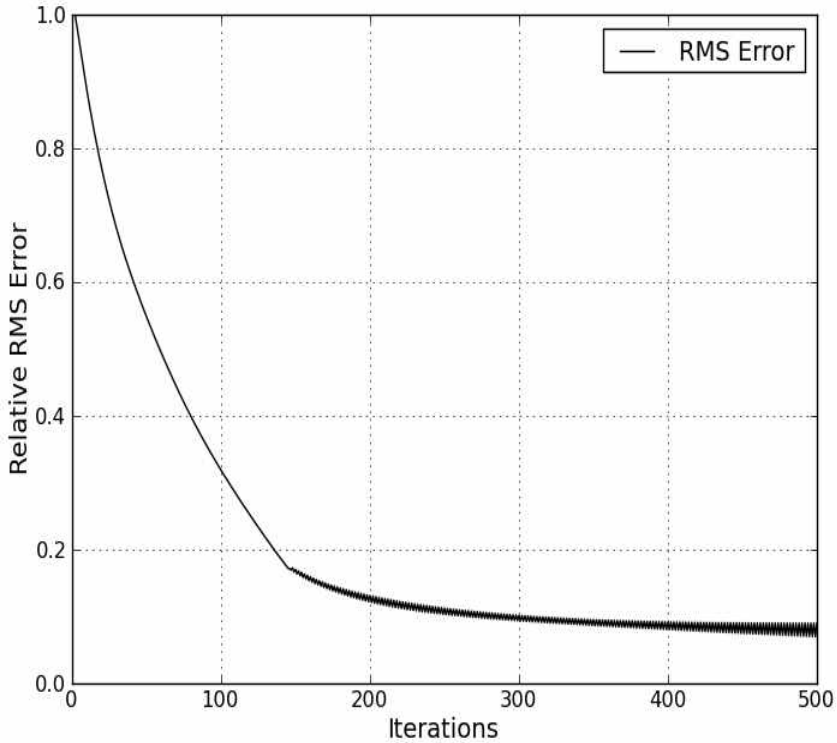


그림 52. SEG-2D Hess VTI 모델에 대한 파형역산 수행 시 측정한 반복 계산 횟수별 해당 RMS 에러.

3-2. 현장자료를 이용한 수치예제

앞에서 제시한 인공합성자료에 대한 파형역산 알고리즘의 수치실험에 이어 이번에는 실제 해상에서 수행한 해양 탄성파 탐사를 통해 획득한 현장자료에 대한 음향-탄성 결합매질에서의 구배도 보정기법을 적용한 파형역산을 수행하고 이를 기존의 알고리즘을 통해 구축한 역산결과와 비교해 보았다. 이와 더불어 획득한 역산 결과에 대해 구조보정을 이용한 간접적인 결과 확인과 역산 결과에 대한 파동 전파 모델링을 통해 인공합성 공통송신원모음을 구축하고 이를 현장자료와 비교토록 하는 직접적인 증명을 이용하여 해당 파형역산 알고리즘의 타당성을 증명하였다.

이번 수치실험에 사용한 현장자료는 앞의 구배도 분석에 사용되었던 자료이다. 해당 탐사자료는 총 1156개의 송신원과 804개의 수신기를 사용하여 해상에서 획득되었다. 송신원 간격과 수신기 간격은 각각 37.5 m, 12.5 m이며, 최대 오프셋 거리는 10.2 km, 총 기록 시간은 15초이다. 또한 수심의 경우 오프셋에 따라 급격히 변하는 특징을 가지고 있다.

그림 53에서는 현장자료에 대한 파형역산의 수행을 위해 설정한 P-wave 속도 및 S-wave 속도 그리고 밀도에 대한 초기모델을 각각 제시하였다. P-wave 속도의 초기 모델은 1.5에서 3.5 km/s까지 선형적으로 증가하도록 설정하였다. 마찬가지로 S-wave 속도 모델은 0.9에서 2.5 km/s까지 그리고 밀도 모델은 1.8부터 2.3 g/cc까지 선형적으로 증가하도록 설정하여 사용하였다. 또한 물 층의 경우 앞에서의 경우와 마찬가지로 P-wave 속도와 S-wave 속도, 밀도는 각각 1.5 km/s와 0 km/s, 1.0 g/cc로 고정하였다. 해당 자료의 특성상 급격히 변하는 해저 지층 구조는 Kim et al. (2009)에서 제안한 불규칙 해저지형 구축 알고리즘을 사용하였다.

이번 장에서 수행한 파형역산 알고리즘 역시 앞장의 인공합성 자료에 대한 라플라스-푸리에 영역 파형역산과 마찬가지로 2종류의 복소주파수

선택법을 사용하였다. 이에 대한 파형역산의 수행에서 첫 번째 복소주파수 대역은 라플라스 감쇄상수 1부터 10까지로 구성하였다. 또한 두 번째 복소주파수 대역은 라플라스 감쇄상수 1에 대해 3.1Hz부터 10Hz 까지 주파수 대역을 사용하여 구성하였다.

그림 54에서는 기존의 구배도에 대해 1번째 복소주파수 대역을 이용해 구축한 장파장 역산결과를 도시하였다. 다음의 그림 55은 구배도 보정기법을 적용하여 구축한 장파장 역산결과를 각각 제시하였다. 이 두 그림을 비교해서 살펴보면 역산된 장파장 결과는 기존의 인공합성 자료에 비해 많은 차이가 나고 있음을 확인 할 수 있다. 특히 역산 모델의 우측에 위치한 고속도 층의 유무와 함께 해저 지질 구조에 위치하고 있는 암염돔의 모양과 그 위치에 차이가 있다. 하지만 현장자료의 경우 어떠한 역산결과가 합당한지는 바로 확인이 불가능하다.

이어서, 그림 56 그리고 57에서는 최종적으로 구축한 역산결과를 도시하였다. 그림 58에서는 기존의 구배도에 의한 파형역산과 구배도 보정기법을 적용하여 수행한 파형역산을 통해 각각 측정한 RMS 에러를 함께 비교하여 도시하였다. 이 그림을 보면, 구배도 보정기법을 이용한 파형역산이 기존의 파형역산보다 작은 에러 값을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이는 간접적으로 이번 연구를 통해 제안한 구배도 보정기법이 정확한 장파장 역산결과를 구축하고 있음을 시사한다.

현장자료에 대한 최종 파형역산 결과(그림 56 그리고 57)에 대한 증명을 위해 시간영역 역시간 구조보정 알고리즘을 이용하여 지하구조 영상화를 구현하였다. 그림 59에서는 앞의 그림 56-a와 57-a에 제시한 각각의 P-파 속도에 대한 최종 파형역산 결과로부터 획득한 역시간 구조보정 영상을 제시하였다. 이 그림을 통해서 우리는 구배도 보정기법을 적용한 파형역산이 해당 탐사자료로부터 고속도층 부분의 깊이와 그 형태를 보다 잘 구현하고 있음을 확인 할 수 있었다. 또한 구배도 보정법의 적용을 통해 기존의 구배도에 의해 획득한 역산결과에서 존재하는 좌측

해저 지층 상부에 위치하는 고속도층 또한 정확히 제거되었음을 알 수 있었다. 이와 같은 구조보정 이미지를 통해서 현장자료에 대한 기존의 역산 알고리즘에 의해 획득한 장파장 역산결과 내 해저 지층 상부 좌측에 존재하는 고속도 층은 잘못된 구배도에 의해 구축된 비현실적인 역산 결과라는 결론을 내릴 수 있었다. 이번에 수행한 역시간 구조보정은 간접적으로 해당 역산결과의 타당성을 증명함과 동시에 기존의 구배도에 의해 해저지층 상부에 구축된 부적절한 고속도층의 경우 구배도 보정기법을 통해 이를 극복해 낼 수 있음을 증명했다.

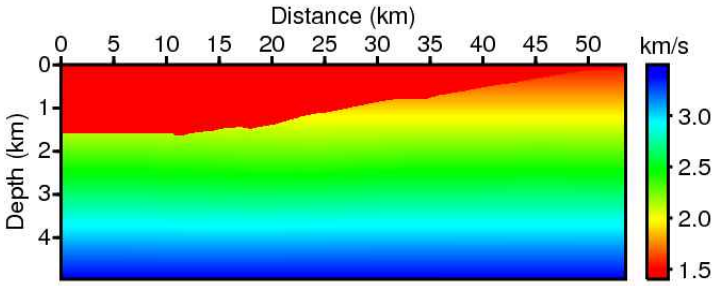
그림 60에서는 역시간 구조보정의 수행을 통해 구축한 10km 와 26 km 구간에서 추출된 구조보정의 공통이미지모음(Common image gather, CIG)을 제시하였다. 구조보정을 통해 구축한 공통이미지모음에서는 역산된 P파 속도에 대해 그 값이 정확하다면 해당 이미지 내에 존재하는 선이 직선이 된다. 우리는 이를 통해 간접적으로 역산결과에 대한 증빙을 할 수가 있다. 해당 결과를 살펴보면, 구배도 보정법을 적용하여 구축한 최종 역산 결과에 대한 공통이미지모음은 해당 이미지 내부에 존재하는 선의 평평한 정도와 평평한 선의 개수가 기존의 구배법에 의해 구축한 최종 역산 결과보다 많이 존재하고 있음을 알 수 있다. 이는 간접적으로 구배도 보정을 적용한 파형역산 알고리즘이 해당 현장자료에 대해 보다 정확한 역산 결과를 구축해 내었음을 시사한다.

현장자료에 대한 직접적인 역산결과의 증명을 위해 이번에는 각각의 알고리즘에 의해 구축한 역산결과에 대한 파동전파 모델링을 수행하여 인공합성 탄성파 기록을 생성하고 이를 송신원 별로 분류하여 공통송신원모음을 구축하였다. 이렇게 구축한 공통송신원모음은 해당 위치에서의 현장자료와 직접적으로 비교하였다. 이때 모델링 알고리즘은 최대 15 Hz 까지의 주파수를 이용하는 주파수영역 파동전파 모델링을 사용하였다.

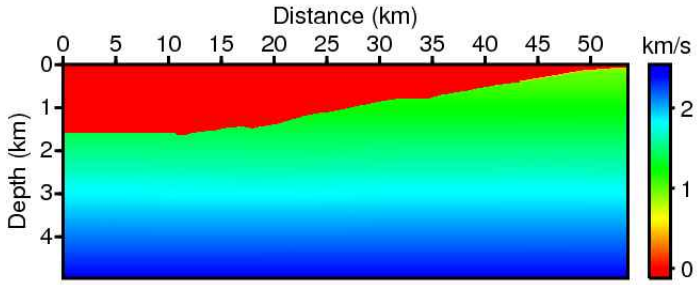
그림 61에서는 앞에서 설명한 각각의 최종 역산결과에 대한 파동 전파 모델링을 통해 구축한 공통송신원 모음과 밴드패스(Band-pass filter)를 적용하여 주파수 대역을 맞춘 현장에서 획득한 자료와 비교 도시하였다. 제시된 공통송신원 모음은 모델링자료와 현장자료 모두 751번째 송신원에서 추출한 이미지이다. 그림 61에서 (a)는 현장 자료에서 추출하여 얻은 751번째 송신원에서의 탄성파 기록이고, (b)는 기존의 구배도에 의해 구축한 최종 역산결과로부터 모델링을 통해 구축한 751번째 공통송신원 모음이며, (c)는 구배도 보정기법을 적용하여 구축한 최종 역산결과로부터 추출한 해당 위치에 대한 공통송신원 모음이다. 이와 같은 공통 송신원 모음을 분석해 보면 구배도 보정기법을 적용하여 구축한 역산결과가 기존의 구배법에 의해 구축한 역산결과보다 실제 현장자료에 가깝다는 것을 확인할 수 있다. 그림 62에서는 이와 같은 사실을 보다 정량적으로 확인해 보기 위해 그림 61에 제시된 세 종류의 탄성파 기록(현장자료, 기존의 구배법 그리고 구배도 보정기법에 의한 역산결과로부터 구축한 인공합성 자료)에 대해 각각 1.6 km 오프셋에서의 시간 트레이스들을 추출하여 이를 제시하였다. 그림 62에서 제시한 트레이스에서는 붉은색 실선은 현장자료에서 추출한 트레이스를, 녹색 점선은 기존의 구배도를 이용하여 구축한 파형역산 결과에서 모델링을 통해 계산한 트레이스 그리고 파란색 점선은 구배도 보정기법을 적용하여 구축한 역산결과로부터 모델링을 통해 구축한 트레이스를 나타낸다. 이 그림에서도 구배도 보정기법을 적용하여 획득한 최종 역산결과를 바탕으로 구축한 탄성파 기록이 현장 자료의 탄성파 트레이스와 더 유사함을 확인할 수 있었다.

이번 장에서는 현장자료에 대해 구배도 보정기법을 적용한 파형역산의 수치실험을 수행하고 이를 기존의 구배도에 의한 역산결과와 비교 도시함으로써 이번 논문에서 제안하는 구배도 보정기법에 대한 현장자료의

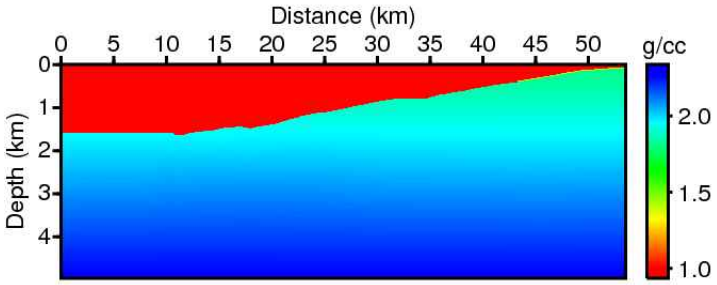
적용 가능성과 본 알고리즘의 타당성을 증명하였다.



(a)



(b)



(c)

그림 53. 현장자료에 대한 파형역산의 수행을 위해 설정한 초기모델; (a)는 P-wave 속도 모델, (b)는 S-wave 속도 모델, (c)는 밀도 모델.

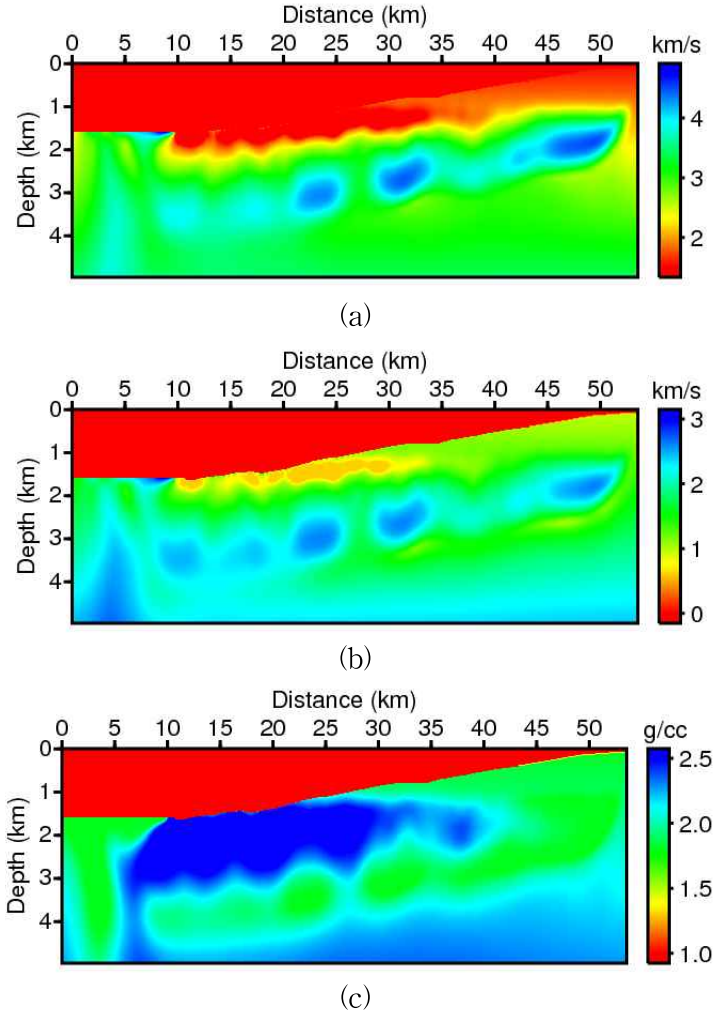


그림 54. 현장자료에 대해 기존 알고리즘에 의해 구축한 음향-탄성 결합 매질에서의 장파장 역산결과; (a)는 P-wave 속도 역산 모델, (b)는 S-wave 속도 역산 모델, (c)는 밀도 역산 모델.

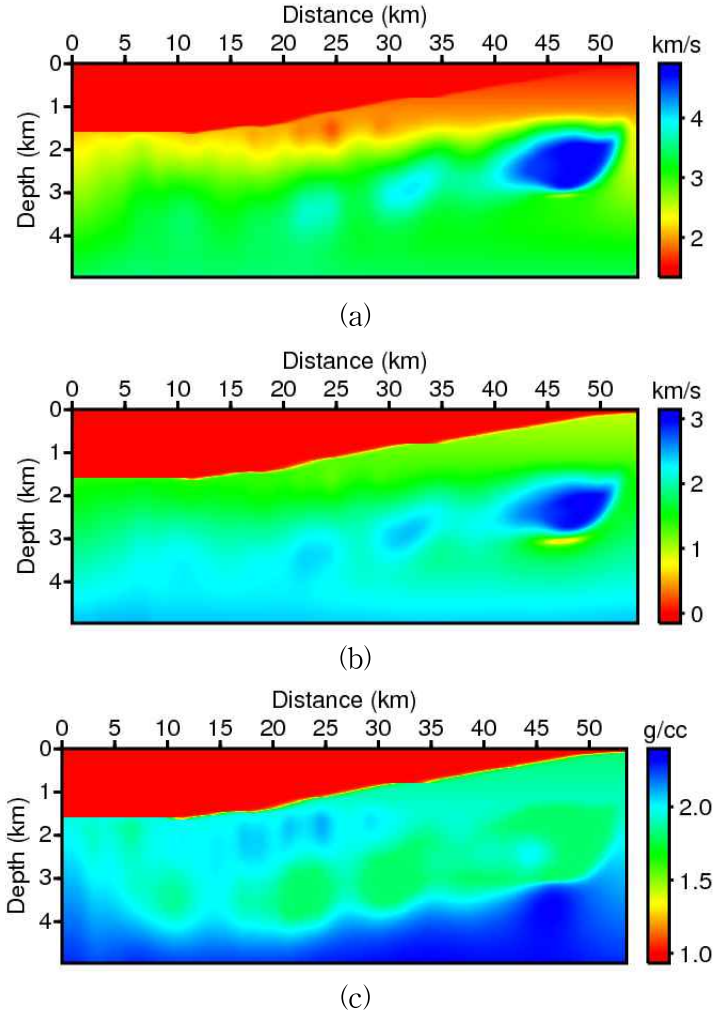


그림 55. 현장자료에 대해 구배도 보정기법을 파형역산에 적용하여 이를 통해 구축한 장파장 역산결과; (a)는 P-wave 속도 역산 모델, (b)는 S-wave 속도 역산 모델, (c)는 밀도 역산 모델.

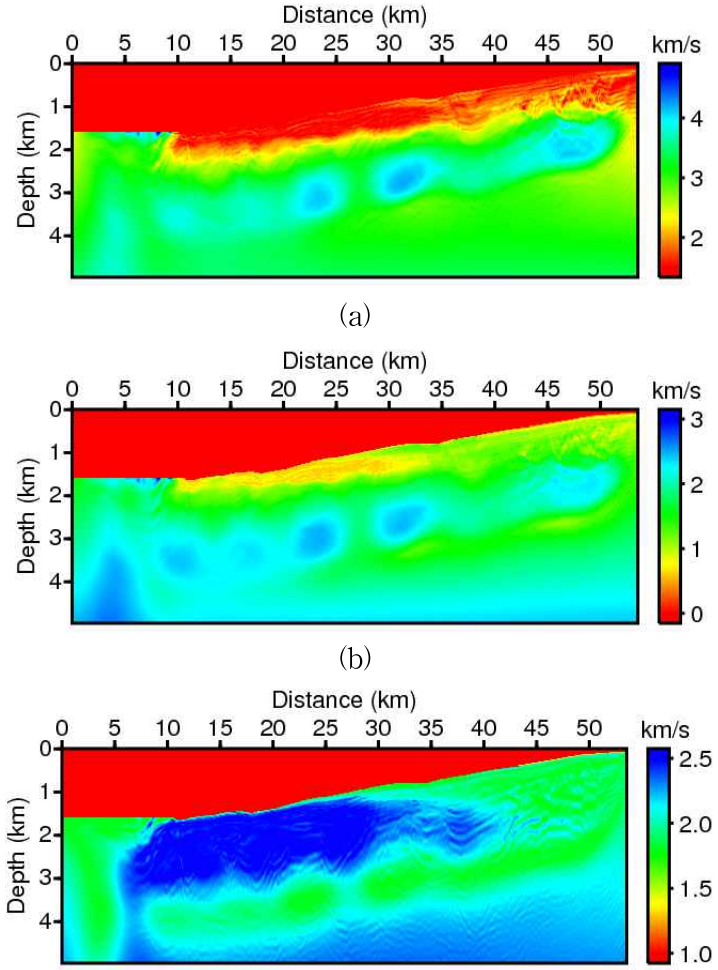


그림 56. 현장자료에 대해 기존의 구배도를 통해 구축된 장파장 역산결과를 바탕으로 하여 수행한 파형역산을 통해 구축한 최종 역산결과; (a)는 P-wave 속도 역산 모델, (b)는 S-wave 속도 역산 모델, (c)는 밀도 역산 모델.

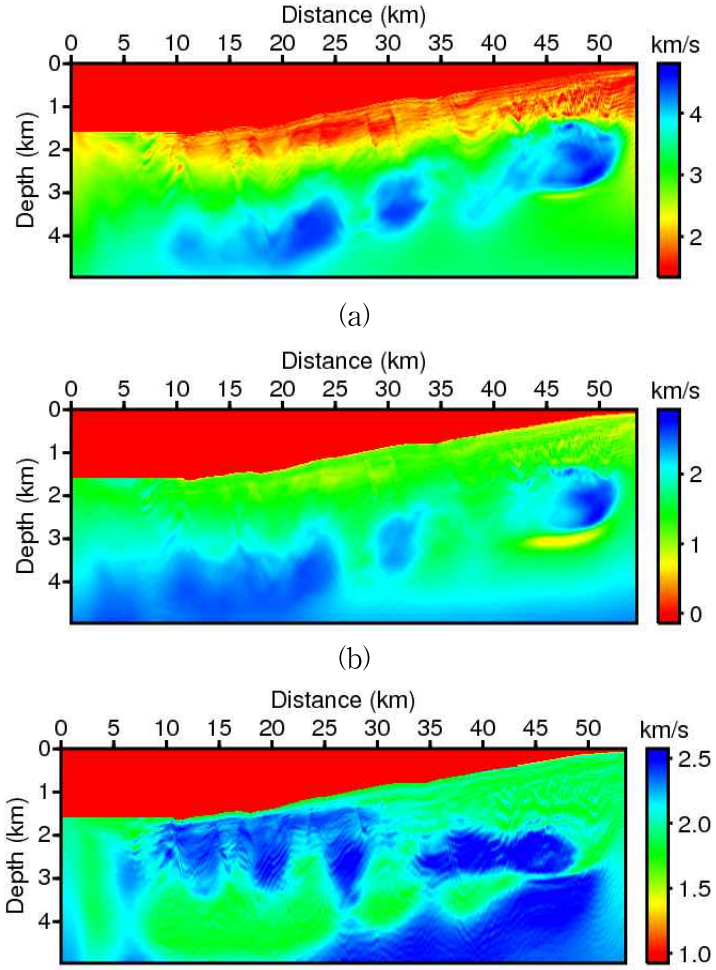


그림 57. 현장자료에 대해 구배도 보정기법을 파형역산에 적용하고 이를 통해 구축된 장파장 역산결과를 바탕으로 하여 수행한 파형역산을 통해 구축한 최종 역산결과; (a)는 P-wave 속도 역산 모델, (b)는 S-wave 속도 역산 모델, (c)는 밀도 역산 모델.

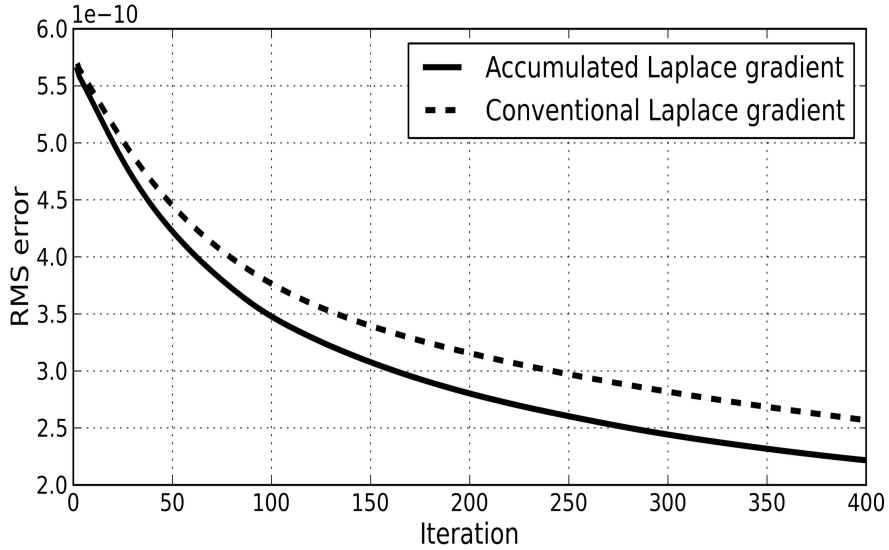
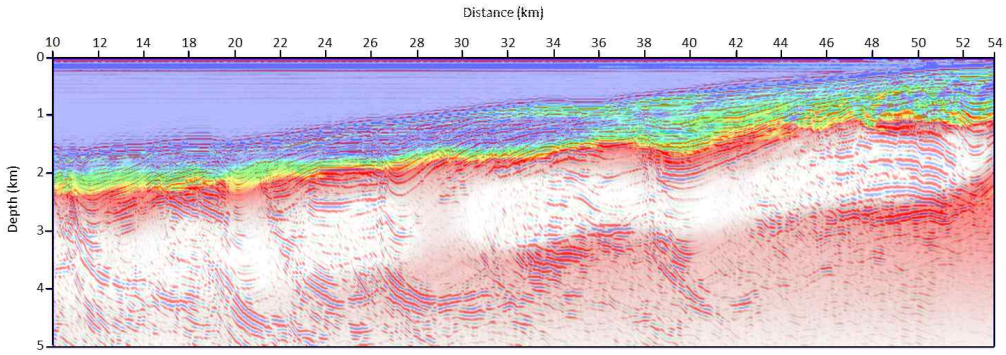
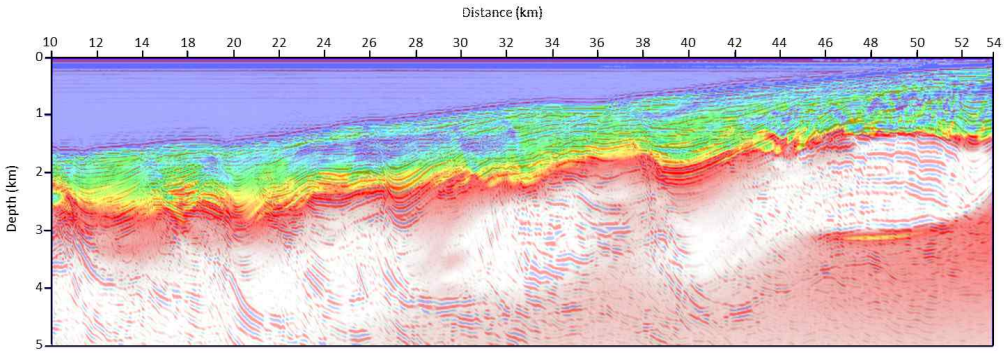


그림 58. 현장자료에 대한 기존의 구배법과 구배도 보정기법을 적용하여 구축한 장파장 역산결과를 바탕으로 수행된 최종 파형역산에서 추출한 각각의 RMS에러 그래프 비교.



(a)



(b)

그림 59. 각각의 역산된 결과로부터 구축한 역시간 구조보정 결과; (a)는 기존의 구배법을 이용하여 획득한 역산결과로부터 구축한 구조보정영상, (b) 구배도 보정기법을 적용하여 획득한 역산결과로부터 구축한 구조보정 영상.

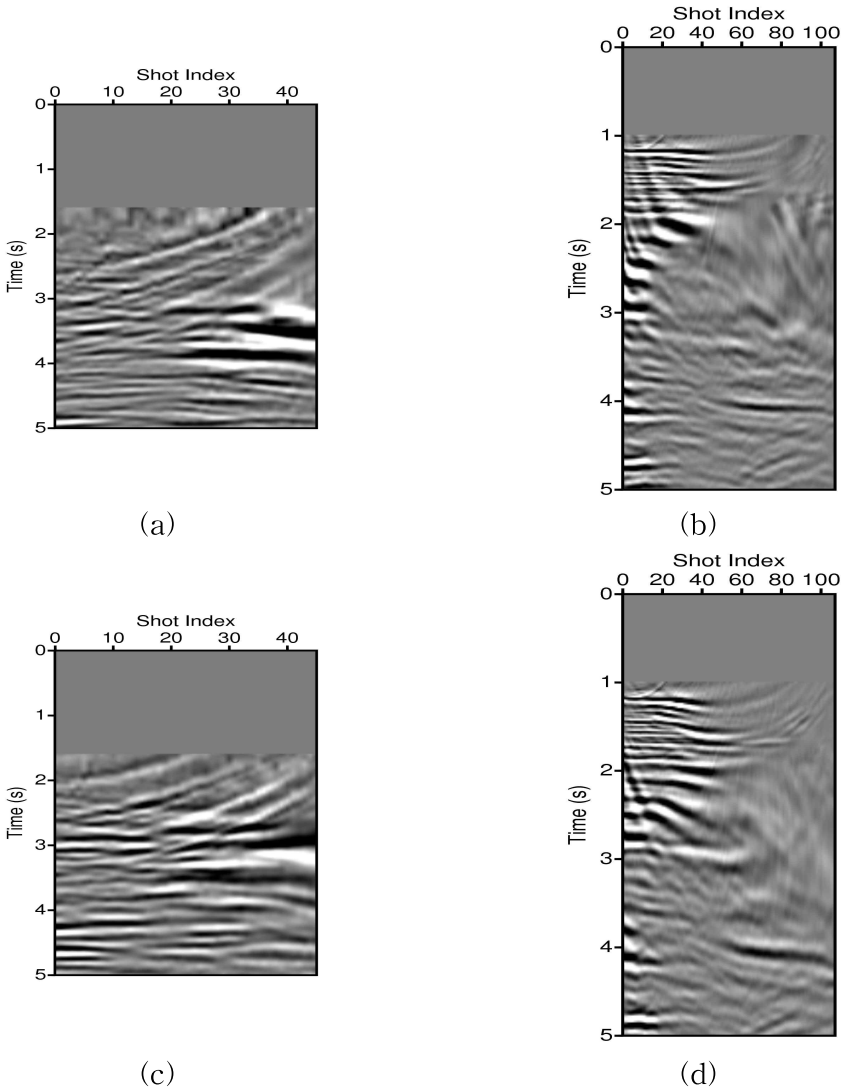
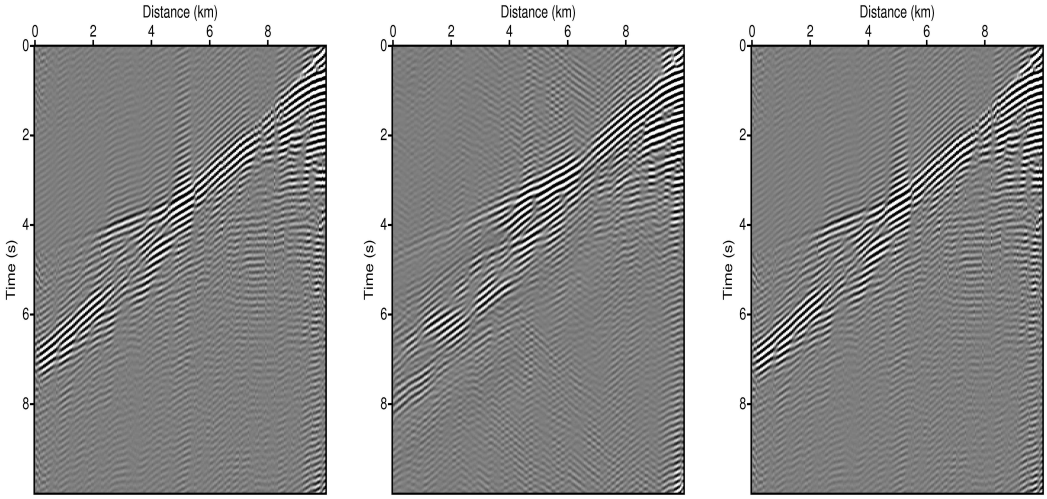


그림 60. 구조보정으로부터 계산한 공통이미지모음; (a)와 (b)는 기존의 역산 알고리즘을 이용하여 얻은 공통이미지모음. (c)와 (d)는 구배도 보정기법을 이용하여 획득한 역산결과로부터 얻은 공통이미지모음.

(a)와 (c)의 이미지는 모델의 왼쪽으로부터 10 km 떨어진 부분에서 추출해 낸 것이고, (b)와 (d)의 이미지는 모델의 왼쪽으로부터 26 km 떨어진 부분에서 추출함.



(a) (b) (c)

그림 61. 현장자료와 각각의 역산결과로부터 모델링을 통해 획득한 공통송신원모음 이미지 비교; (a)와 (b), (c)는 각각 현장 자료로부터 얻은 탄성파 기록, 기존의 구배법을 적용한 역산 모델로부터 얻은 탄성파 기록, 구배도 보정기법을 적용한 역산 모델로부터 얻은 탄성파 기록.

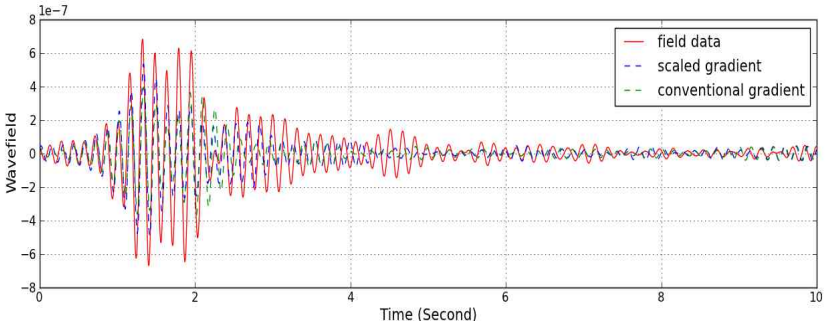


그림 62. 공통송신원모음으로부터 추출한 트레이스의 비교

4. 결 론

해양탐사가 수행되는 실제 해저환경은 물리적 특성에 따라 크게 음향매질인 해수층과 탄성매질인 해저지층으로 나눌 수 있다. 하지만 기존에 개발된 대부분의 파형역산 알고리즘은 음향 파동방정식만을 사용하여 해저환경을 모두 음향매질로 가정하였다. 본 논문에서는 보다 정확한 물리적 해양환경의 모사를 위해 음향파 파동방정식과 탄성파 파동방정식을 결합하여 해저환경을 구성하는 음향-탄성 결합매질에 대한 파형역산 알고리즘을 개발하였다. 이로써 실제 해저환경에서 발생되는 파동의 거동을 기존의 알고리즘보다 물리적으로 정확히 표현해 낼 수 있도록 했다. 이로써 기존의 기술에서는 다루지 못했던 해저지층에서의 탄성파 거동을 파형역산 알고리즘에서 직접적으로 다룰 수 있으며, 탄성파 파동방정식을 사용함에 따라 P-파속도 뿐 아니라 S-파속도 및 밀도구조까지도 파형역산에 의해 그 값의 규명이 가능토록 하였다.

일반적인 파형역산 알고리즘은 비 선형성의 파동방정식에 의한 국부 최소값 문제와 획득한 탄성파 자료에서의 저주파수 부재에 따른 문제점을 가지고 있다. 이와 같은 문제의 해결을 위해 본 연구에서는 기존에 개발된 음향매질에 대한 라플라스-푸리에 영역 파형역산 알고리즘을 음향-탄성 결합매질로 확장시키는 연구를 수행하였다. 이로써 음향-탄성 결합매질에 대한 파형역산 알고리즘을 통해서도 탐사자료로부터 고해상도의 역산결과 구축을 가능하게 하였다.

본 논문에서 제시한 음향-탄성 결합매질에서의 파형역산 알고리즘은 구배법을 기반으로 역산이 수행된다. 이와 같이 구배법을 기반으로 하는 역산 알고리즘에서는 구축한 구배도에 의해 해당 매개 변수가 갱신되며 이에 따라 파형역산 결과가 결정된다. 따라서 정확한 구배도를 구축하는

것은 파형역산의 성공과 실패를 좌우하는 중요한 요소로 작용한다. 음향-탄성 결합매질에 대한 라플라스-푸리에 영역 파형역산의 수행에 있어 첫 번째 과정은 라플라스 감쇄파동장을 이용한 장파장 역산결과의 구축이다. 이 과정에서는 감쇄파동장에 대한 역전파 알고리즘을 이용하여 장파장 역산결과 구축을 위한 구배도를 계산하고 이를 이용하여 초기모델을 갱신시킴으로써 해당 탄성파 자료에 대한 장파장 성분의 역산결과를 구축하였다. 하지만 역산결과에서 살펴보면 실제 고속도 지층이 존재하지 않는 해저지층 상부에 고속도 지층이 구축되는 사례가 발생한다. 이에 따라 기존의 역전파 알고리즘에 의해 구축한 구배도를 분석하는 다양한 실험을 수행하였다. 그 결과 라플라스 감쇄파동장에 대한 역전파 알고리즘에 의해 구축한 구배도에서 그 값이 음향매질과 탄성매질이 만나는 해저지층 상부에 잘못된 값으로 수렴하거나 혹은 이상대 부분에서의 구배도가 비정상적으로 넓게 분포되고 있음을 확인하였다. 이에 따라 실제 모델에 없는 해저 지층 상부의 고속도층이 파형역산 결과에 구축되게 되는 것이다. 이와 같은 잘못된 구배도를 보정하기 위해 본 논문에서는 축적 구배도를 이용한 구배도 보정법을 제안하였다. 본 논문에서 제시하는 구배도 보정법은 다음과 같은 절차에 거처 수행된다. 우선 기존의 역전파 알고리즘에 의해 구축한 구배도 값을 모두 제곱한 후 깊이 방향으로 누적시킨다. 이를 구배도에 대한 축적연산이라 정의하고 이렇게 구축한 축적구배도는 본래의 구배도와 곱함으로써 이를 통해 파형역산을 위한 구배도를 보정한다. 제곱축적을 하는 이유는 본래의 구배도가 갖는 성향을 감쇄시킬 수 있는 역할을 정확히 수행해 낼 수 있기 때문이다.

본래의 구배도에 대해 제곱을 취한 후 이를 깊이 방향으로 누적시킴으로써 구축한 축적구배도는 본래의 구배도에서 그 신호가 강한 부분을 더욱 더 강조하는 역할을 수행한다. 이는 상대적으로 해저지층 상부에서

고속도층의 역산결과를 유발하는 부분을 감쇄시키는 작용을 한다. 따라서 해당 구배도 보정기법의 본래의 목적을 달성할 수 있다.

이와 같은 구배도 보정기법은 인공합성자료 및 현장자료에 적용하여 구배도를 보정하고 이를 본래의 구배도와 비교하였다. 또한 이번 연구에서 제안하는 축적구배도 뿐 아니라 선형 증가 모델 및 기타 다양한 구배도에 대한 비교를 통해 제곱 축적구배도에 의한 구배도 보정기법의 타당성을 증명하였다.

구배도 보정기법에 대한 다양한 분석을 마친 후 수치예제 부분에서는 음향-탄성 결합매질에서의 구배도 보정기법을 이용해 구축한 역산결과를 제시하였다. 우선 첫 번째로 Pluto 1.5 모델을 이용하여 음향-탄성 결합매질에서의 라플라스-푸리에 영역 파형역산 결과를 제시하였다. 또한 이를 기존의 라플라스영역, 주파수영역 및 다양한 기존의 알고리즘으로부터 구축한 역산결과와 비교 분석하였다. 이와 같은 다양한 기존의 알고리즘을 결합매질에 적용하고 이에 대한 결과의 분석을 통해 음향-탄성 결합매질에서의 라플라스-푸리에 영역 파형역산을 위해 사용할 효율적인 복소주파수 선택법을 구축해 낼 수 있었다. 두 번째로는 SEG/EAGE 암염돔 모델과 SEG-2D Hess VTI 모델을 이용하여 본 연구에서 제안하는 구배도 보정기법에 대한 타당성을 증명하였다. 이를 위해 기존의 구배도에 의해 구축한 장파장 역산결과와 구배도 보정기법을 적용하여 구축한 장파장 역산결과를 비교 도시하고, 이에 대한 분석을 수행하였다. 그 결과 두 모델에 대한 장파장 역산 결과는 모두 공통적으로 실제 모델에 존재하지 않는 해저지층 상부에서의 고속도층 구축 문제가 구배도 보정법에 의해 제거됨을 확인할 수 있었다. 또한 기존의 구배도에 의해 구축된 장파장 역산결과보다 정확한 결과를 구축해 냄을 정량적으로 확인함으로써 해당 알고리즘의 타당성을 증명했다.

이어서 현장자료에 대한 수치실험 결과를 제시하였다. 현장자료에 대한 파형역산은 기존의 구배도를 이용한 파형역산결과와 구배도 보정을 이용한 역산 결과를 비교하였다. 이를 위해 RMS에러를 측정하여 비교하고 각각의 역산 결과에 대한 역시간 구조보정을 수행하고 이를 통해 간접적으로 구배도 보정기법에 의해 구축한 역산결과의 타당성을 증명했다. 이어서 직접적인 결과의 분석을 위해 해당 역산결과를 바탕으로 각각 파동전파 모델링을 수행하고 이에 대한 인공합성 공통송신원모음을 구축하였다. 각각의 역산 결과로부터 구축된 공통송신원모음은 같은 위치에서의 현장자료와 비교함으로써 구배도 보정법에 의한 파형역산 결과의 타당성을 증명하였다.

이번 논문에서는 인공합성자료 및 실제 현장자료에 대해 음향-탄성 결합매질에서의 라플라스-푸리에 영역 파형역산을 수행하였다. 또한 정확한 장파장 역산결과의 구축을 위해 제안한 구배도 보정기법을 적용하여 최종적으로는 고해상도의 역산결과를 구축하는데 성공하였다. 하지만 이번 연구의 한계점 또한 존재한다. 현재 수행되는 대부분의 석유탐사는 3차원 탐사이다. 하지만 본 논문에서 논하고 있는 알고리즘은 2차원에 국한되어 있다. 따라서 차후의 연구는 3차원 파동방정식을 이용하는 음향-탄성 결합매질에서의 파형역산 알고리즘에 대한 개발과 이에 대한 다양한 분석을 수행하여야 할 것이다.

5. 논 의

이번 장에서는 구배도 보정기법의 파형역산 적용에 대한 실질적인 방법과 한계점에 대해 자세히 논하였다.

구배도 보정 알고리즘은 기존의 역전파 알고리즘에 의해 구축한 구배도에서 발생하는 수치적 결함과 현장자료 내 포함된 잡음에서 기인하는 잘못된 수렴성을 보정해 줌으로써 궁극적으로 정확한 장파장 성분의 역산결과를 구축하는 것에 그 목적이 있다.

해당 기술을 파형역산에 적용하기 위해서는 우선 기존의 파형역산 알고리즘을 이용하여 역산을 수행하고, 이를 통해 구축한 구배도 및 역산결과를 우선적으로 확인해야 한다. 그리고 이들을 실제모델 혹은 현장자료에 대한 참고모델과 비교 분석해보고 해당 기술의 적용 여부를 결정해야 한다. 이때 실제모델 혹은 현장자료에서 속도 대비가 큰 암염구조와 같은 지형이 존재하거나 큰 이상대를 유발 시킬 수 있는 지질구조가 존재한다고 판단될 경우, 본 알고리즘의 적용이 가능하다. 하지만 충상단층 혹은 선형증가 형태의 지질구조와 같이 큰 이상대가 존재하지 않는 경우에는 해당 기술에 의한 역산결과의 향상을 기대하기 힘들다.

그림 63 그리고 64에서는 구배도 보정기법의 파형역산 적용과 과정별 수치예제들을 단계별로 정리하여 제시하였다. 이때 사용한 인공합성 모델은 SEG/EAGE 암염돔 모델이다. 이 모델 중앙에는 속도차가 큰 커다란 암염돔이 존재하기 때문에 구배도 구축 시 중앙에 커다란 이상대가 나타나는 특징을 가지고 있다. 그림 63에서는 수치실험에 사용된 암염돔 모델과 이에 대해 기존의 파형역산 알고리즘을 통해 구축한 본래의 구배도 그리고 이를 통해 구축한 최종 장파장 역산결과를 제시하였다. 하지만 이 그림에 제시된 구배도는 본래의 모델에 존재하는 암염구조의 위치

와 크기를 정확히 정의하지 못하고 있다. 또한 구축된 장파장 역산결과에서도 이로 인해 해저 지층상부에 잘못된 역산결과가 구축되었음을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상이 나타날 경우 그림 64에 제시된 것과 같이 구배도 보정 기술을 파형역산에 적용함으로써 보다 정확한 역산결과를 구축해 낼 수 있다. 해당 그림에서는 본래의 역전파 알고리즘에 의해 구축한 구배도와 이를 깊이방향으로 그 값을 제곱하여 누적시켜 구축한 축적구배도 그리고 축적 구배도에 의해 보정된 구배도를 제시하였다. 그리고 끝에는 보정된 구배도를 이용하여 구축한 최종 장파장 역산결과를 제시하였다. 보정된 구배도 그리고 이를 통해 구축한 역산결과는 앞의 그림 63에 제시된 역산결과와 비교하면, 해저지층 상부에 나타나는 수치적 결함을 해결함과 동시에 보다 정확한 역산결과를 구축해내고 있음을 확인할 수 있었다.

구배도 보정기법은 파형역산 알고리즘에 적용시키는데 있어 아래와 같은 몇 가지 제한사항이 있다. 첫째, 구배도 보정 기술은 오직 장파장 역산결과의 구축을 위한 라플라스 감쇄파동장을 이용하는 라플라스영역 파형역산 알고리즘에만 적용이 가능하다. 이에 대한 수치실험 결과 만약 주파수영역 파형역산에 해당 기술을 적용할 경우 주파수영역에서 구축한 구배도의 형상적 특성으로 인해 해당 알고리즘의 적용 전-후에 대한 역산결과의 차이를 보이지 않는 것을 확인했다. 둘째, 사용된 모델과 같이 실제 모델 혹은 탐사지역 내에 커다란 구배도 이상대를 구축해 낼 수 있는 암염구조와 같이 매개변수의 차이가 큰 지질구조를 포함하는 지역에서 탐사한 자료 혹은 이에 대한 인공합성 모델의 경우에만 해당 알고리즘의 적용이 가능하다. 이는 구배도 보정 알고리즘의 특성상 구축한 구배도 내에 커다란 이상대가 존재해야만 상대적으로 작은 값으로 나타나는 수치적 결함 및 잡음 효과를 감쇄시킬 수 있기 때문이다.

본 연구에서 새로이 제안한 구배도 보정 기술은 대상 지질 구조의 형상적 특징에 따라 본 기술의 성능이 좌우된다. 이에 따라 일반적인 세 종류의 오일트랩 지질구조(암염돔 구조, 배사구조, 충상단층 구조)를 벤치마킹한 인공합성 자료를 가지고 해당 기술을 적용하여 파형역산을 수행하고 그 결과를 분석하여 표 5에 제시하였다.

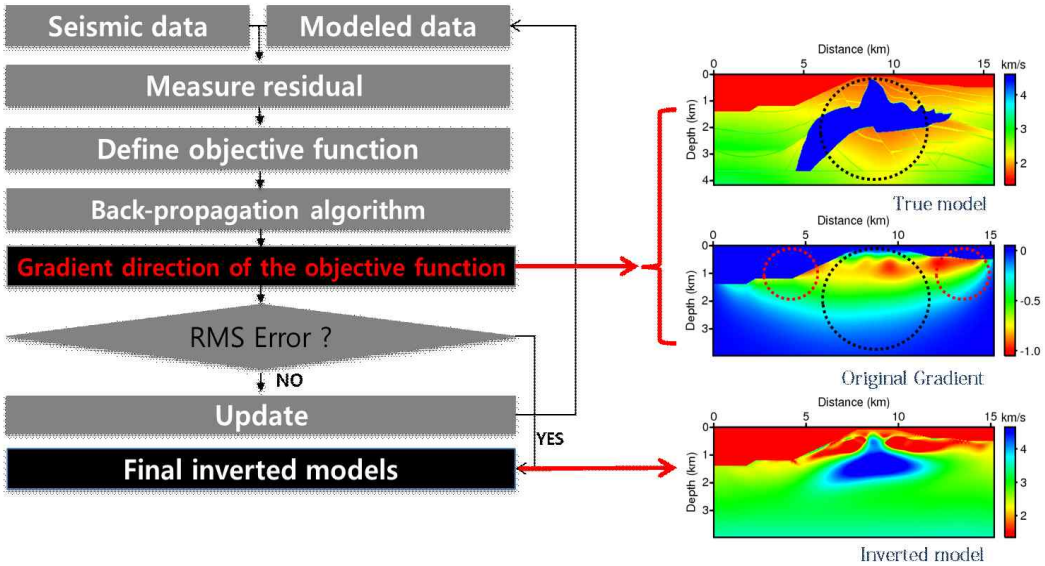


그림 63. 구배도 보정기법의 파형역산 적용 -1

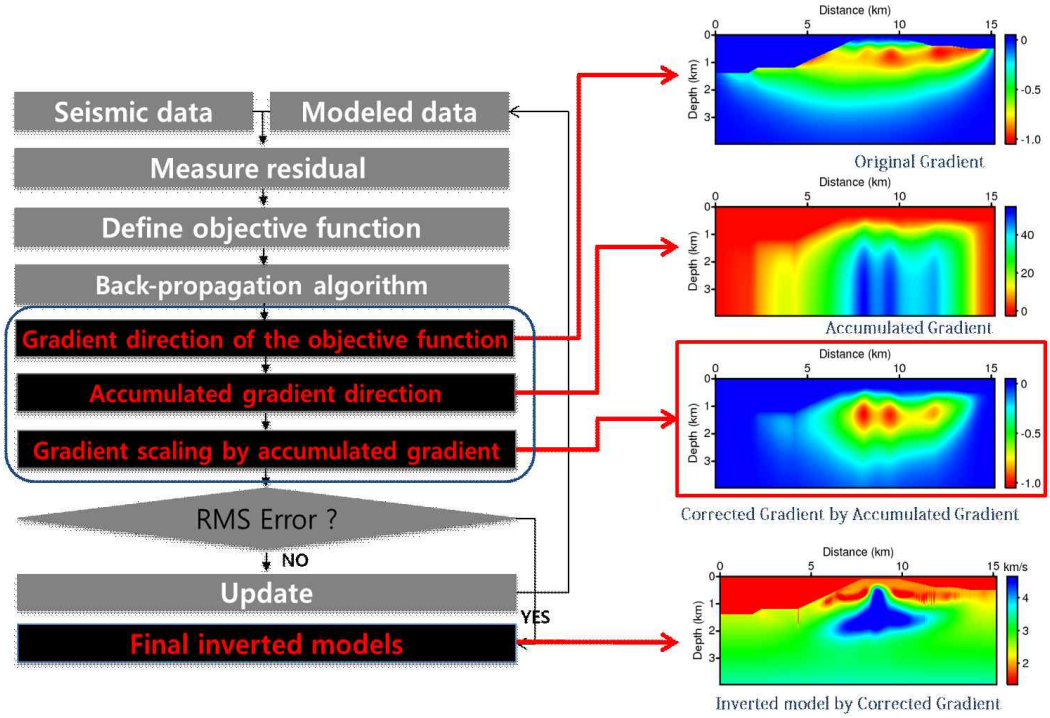


그림 64. 구배도 보정기법의 파형역산 적용 - 2

대상 지질구조	적용결과 분석 (●:좋음, ▲: 보통, ×: 나쁨)
암염돔구조	●
배사구조	▲
충상단층구조	×

표 5. 세 가지 오일트랩구조(암염돔구조, 배사구조, 충상단층구조)에 대한 구배도 보정 기술의 적용성 분석표

참 고 문 헌

Aminzadeh F., Brac J. and Kunz T. 1997. 3-D salt and overthrust models. The Society of Exploration Geophysicists. Tulsa.

Bae H.S., C. Shin, Y. H. Cha, Y. Choi, and D.J. Min, 2010. 2D acoustic-elastic coupled waveform inversion in the Laplace domain. Geophysical Prospecting, 58, 997-1010.

Bérenger J.B. 1994. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. Journal of Computational Physics 114, 185-200.

Brossier R., Operto S. and Virieux J. 2009. Seismic imaging of complex onshore structures by 2D elastic frequency-domain full-waveform inversion. Geophysics 74, WCC63-WCC76.

Bunks C., Saleck F.M., Zaleski S. and Chavent G. 1995. Multiscale seismicwaveform inversion. Geophysics 60, 1457-1473.

Choi Y., Min D.-J. and Shin C. 2008. Two-dimensional waveform inversion of multi-component data in acoustic-elastic coupled media. Geophysics 56, 863-881.

Chung W., C. Shin, and S. Pyun, 2010, 2D elastic full waveform inversion in the Laplace domain. Bulletin of the Seismological Society of America, 100, 3239-3249.

Clayton R. and Engquist B. 1977. Absorbing boundary conditions for acoustic and elastic wave equations. Bulletin of Seismological Society of America 67, 1529-1540.

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

Geller R.J. and Hara T. 1993. Two efficient algorithms for iterative linearized inversion of seismic waveform data. Geophysical Journal International 115, 699-710.

Ha, T., W. Chung, and C. Shin, 2009, Waveform inversion using a back-propagation algorithm and a Huber function. Geophysics, 74, R15-R24.

Ha, W., and C. Shin, 2012. Laplace-domain full-waveform inversion of seismic data lacking low frequency information. Geophysics, 77, 199-206.

Ikelle and Amundsen. 2005. Introduction to petroleum seismology. Society of exploration geophysics NO-12

Kang, S.-G., Bae, H. S. and Shin C., 2012, Laplace-Fourier-domain waveform inversion for fluid-solid media. Pure and Applied Geophysics, 169, 2165-2179.

Kim M.H., Choi Y., Cha Y.H. and Shin C. 2009. 2-D frequency-domain waveform inversion of coupled acoustic-elastic media with an irregular interface. Pure and Applied Geophysics 166, 1967-1985.

Kolb P., Collino F. and Lailly P. 1986. Pre-stack inversion of a 1-D medium. Proceedings of the IEEE 74, 498-508.

Komatitsch D., Barnes C. and Tromp J. 2000. Wave propagation near a fluid-solid interface. A spectral-element approach. Geophysics 65, 623-631.

Lee H.-Y., Lim S.-C., Min D.-J., Kwon B.-D. and Park M. 2009. 2D time-domain acoustic-elastic coupled modelling. A cell-based finite-difference method. Geosciences Journal 13, 407-414.

Lailly P. 1983. The seismic inverse problem as a sequence of before stack migration. In. Conference on inverse scattering. Theory and Application(eds J.B. Bednar, R. Redner, E. Robinson and A. Weglein), pp.206-220. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia.

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

Operto S., Ravaut C., Improta L., Virieux J., Herrero A. and DellAversana P. 2004. Quantitative imaging of complex structures from dense wide-aperture seismic data by multiscale traveltime and waveform inversions. a case study. Geophysical Prospecting 52, 625-651.

Pratt R.G., Shin C. and Hicks G.J. 1998. Gauss-Newton and full Newton method in frequency domain seismic waveform inversion. Geophysical Journal International 133, 341-362.

Pyun, S., W. Son, and C. Shin, 2011, 3D acoustic waveform inversion in the Laplace domain using an iterative solver. Geophysical Prospecting, 59, 386-399.

Shin C. 1988. Nonlinear elastic wave inversion by blocky parameterization. Ph.D. dissertation. The University of Tulsa.

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

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

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

Shin, C. and Cha, Y.H. 2009, Waveform inversion in the Laplace-Fourier domain, Geophys. J. Int. 177, 1067-1079.

Shin, C. and Cha, Y.H. 2010, Sequentially ordered single-frequency 2-D acoustic waveform inversion in the Laplace-Fourier-domain, Geophys. J. Int. 181, 935-950.

Shipp R.M. and Singh S.C. 2002. Two-dimensional full wavefield inversion of wide-aperture marine seismic streamer data. Geophysical Journal International 151, 325-344.

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

Stoughton, D., Stefani, J. and Michell, S. 2001, 2D elastic model for wavefield investigations of subsalt objectives, deep water Gulf of Mexic, 71st SEG meeting, Expanded Abstracts, San Antonio, Texas, USA, 1269-1272.

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

Zhang J. 2004. Wave propagation across fluid-solid interfaces. A grid method approach. Geophysical Journal International 159, 240-252.

Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. and Zhu J.Z. 2005. The Finite Element Method. Its Basis and Fundamentals. Butterworth-Heinemann.

Abstract

A Gradient Correction Method for Full Waveform Inversion in an Acoustic-Elastic Coupled Media

Seung-Goo Kang
Department of Energy System Engineering
The Graduate School
Seoul National University

Full waveform inversion algorithms are widely used in the construction of subsurface velocity models. In the following study, we propose a Laplace-Fourier-domain waveform inversion algorithm that uses both Laplace-domain and Fourier-domain wavefield to achieve the reconstruction of subsurface velocity models. Although research on the Laplace-Fourier-domain waveform inversion has been published recently that study is limited to fluid media. Because the

geophysical targets of marine seismic exploration are usually located within solid media, waveform inversion that is approximated to acoustic media is limited to the treatment of properly identified submarine geophysical features. In this study, we propose a full waveform inversion algorithm for isotropic acoustic-elastic coupled media with irregular submarine topography comparable to a real marine environment. From the acoustic-elastic coupled system, we obtained P- and S-wave velocity models from the pressure data alone. We also suggested strategies for choosing complex frequency bands constructed of frequencies and Laplace coefficients to improve the resolution of the restored velocity structures.

Also, we propose a new gradient correction method for the full waveform inversion in acoustic-elastic coupled media that can be used to study geological targets beneath the seafloor. This method scales the gradient direction using an accumulated gradient, which is generated by the accumulated sum of the square of the conventional gradient with respect to depth. This correction method is designed to enhance the recovery of large anomalies and the bottoms of high-velocity structures and to attenuate artifacts related to irregular seafloor surfaces.

We perform numerical tests using several synthetic models and field data. The numerical results demonstrate the validity of full waveform inversions for getting the long wavelength inverted model using the new correction method for acoustic-elastic coupled media. We also conduct frequency-domain waveform inversions using

previous inversion results as initial models. Reverse time migration images and synthetic seismograms obtained from the inversion show that this method can be successfully used for field data.

keywords : Full Waveform inversion, Elastic wave equation, Acoustic wave equation, Laplace-Fourier domain, Gradient correction method

Student Number : 2011-30283

감사의 글

박사학위 논문을 마무리하는 이 시점에서 이 기회를 통해 마음속에 항상 가지고 있었던 고마운 마음을 전합니다. 가장 먼저 많이 부족한 저에게 배움의 기회를 주신 신창수 교수님께 감사의 마음을 전해 드리고 싶습니다. 교수님께서 지도해 주신 덕분에 박사학위 과정을 무사히 잘 마칠 수 있었습니다. 2008년 석사과정 때부터 한결같은 모습으로 열정적으로 연구에 임하시는 교수님의 모습을 보면서 끈기와 노력의 중요성을 배울 수 있었습니다. 건강이 편치 않으신 중에도 저의 논문지도를 해 주신 은혜를 어찌 갚아야 할지 모르겠습니다. 바쁘신 중에도 논문심사위원을 맡아주신 조희찬 교수님 그리고 송재준 교수님께도 감사의 마음을 전해 드리고 싶습니다. 또한 논문 작성에 있어 많은 코멘트로 논문의 질 향상을 위해 도움을 주신 해양대학교 박근필 교수님과 정우근 교수님께도 감사의 마음을 전해드리고 싶습니다. 물리탐사 연구실에서 같이 생활하고 많은 도움을 주신 연구실 선후배님들께도 진심으로 감사의 마음을 전합니다. 연구실 선후배님들이 많은 도움을 주셨기 때문에 이렇게 무사히 박사과정을 마칠 수 있었습니다.

제가 박사학위를 취득하게 된 것은 어린 시절부터 저에게 공부할 수 있는 환경을 만들어 주시고, 따듯한 사랑과 관심을 주셨던 아버지, 어머니 덕분입니다. 또한 내 하나뿐인 여동생에게도 감사하는 마음을 전합니다. 칭찬과 격려를 아끼지 않으시고 사위를 자랑스럽게 생각해주시는 장인, 장모님께 감사의 마음을 전합니다. 저에게 예쁘고 귀한 딸을 주셔서 감사합니다. 서로 아껴주고, 사랑하며 살아가는 모습으로 그 은혜 보답하겠습니다.

끝으로 항상 옆에서 응원해주고 나를 믿어주는 아내 진실에게 이 기쁨을 바칩니다.

2013. 7. 22

강승구