creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학박사 학위논문

효율적 진원 결정을 위한 주파수 영역 자기 상관 영상화 조건의 적용성 연구

Study of the applicability of the frequency-domain autocorrelation imaging condition for an efficient source localization

2019 년 2 월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부

윤 병 준

효율적 진원 결정을 위한 주파수 영역 자기 상관 영상화 조건의 적용성 연구

Study of the applicability of the frequency-domain autocorrelation imaging condition for an efficient source localization

지도 교수 신 창 수

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함
2018 년 5 월

서울대학교 대학원
에너지시스템공학부
윤 병 준

윤병준의 공학박사 학위논문을 인준함
2018 년 12 월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

초 록

이 연구는 진원 위치 결정을 위한 역시간 영상화 방법으로 주파수 영역 자기 상관 조건을 이용한 방법을 제시하고 대규모 수진기에서 얻은 탄성파 기록을 자동 처리하는 기법으로써 적용성을 평가한다. 역시간 영상화를 이용한 진원 위치 결정 방식은 초동을 발췌하는 과정이 필요 없고 잡음에 강해 작은 규모의 진원에 대한 자동화된 처리에 적합하다. 기존의 영상화 방법은 시간 영역 파동 방정식을 반복적으로 계산하거나, 주파수 영역에서 역시간 파동장을 계산하고 영상화를 위한 시간 영역 추가 계산을 수행하여 필요한 계산 시간과 메모리가 증가하는 문제가 있었다. 그래서 가장 많은 계산 비용이 필요한 그린 함수를 미리 계산하여 저장하고 주파수 영역에서 탄성파 기록의 켤레 복소수를 그린 함수와 곱하여 역시간 파동장을 계산했다. 진원 위치는 주파수 영역 역시간 파동장 자기 상관도의 최대 진폭 지점으로 정했다. 이 과정에서 역 푸리에 변환과 시간 영역 연산을 배제하여 기존의 주파수 영역 역시간 영상화 방법에 비해 계산 비용을 절감하여 영상화 계산 효율을 증가시켰다. 제안된 방식의 적용성을 평가하기 위해 합성 자료 테스트 시 자동화된 P 파와 S 파 초동 발췌를 이용하는 위치 결정 방식과 비교했다. 제안된 방법은 잡음이 심하여 초동 발췌 자체가 실패하는 경우에도 정확하게 진원 위치를 제공했다. 특히 수진기의 개수가 충분히 많으면 단일 주파수를 이용한 결과로도 신뢰도 높게 진원 위치를 결정할 수 있었다. 수진기의 개수가 충분하지 않아도 역시간 파동장을 모든 주파수에 대해서 합산 후에 자기 상관을 계산하여 진원 위치를 결정했다. 포항 지진 현장 자료에 대한 테스트도 수행했다. 초동 발췌를 이용한 위치 결정 결과는 초동 발췌와 속도 모델의 불확실성 때문에 P 파 만을 이용한 결과와 S 파까지 이용한 결과가 상이했다. 대조적으로 제안된 방법은 진원 발생 시간을 추정하고 모든 주파수를 이용한 결과, 균질 매질을 가정하고 적은 수진기를 사용했음에도 진원 위치를 유일하게 결정했다. 합성/현장 자료에 대한 테스트를 통해 주파수 영역 자기 상관을 이용한 방식의 특징과 현장 적용성을 확인할 수 있었다. 앞으로 대규모의 수진기를 이용한 모니터링 네트워크 구축에 본 연구에서 제안하는 방법론이 널리 사용되길 기대해본다.

주요어 : 역시간 영상화, 자기 상관 조건, 주파수 영역, 진원 위치 결정
학　　번 : 2015-30291

목 차

제 1 장 서 론 1
1.1 연구의 배경 1
1.2 연구의 목적 3
1.3 연구의 구성 5
제 2 장 이 론 6
2.1 역시간 영상화와 역 필터의 개념 6
2.2 기존 역시간 영상화 조건과 주파수 영역 자기 상관 조건 8
2.3 본 연구의 기본 가정 11
제 3 장 합성 자료 수치 실험 및 영상화 조건 평가 13
3.1 계산량 비교 수치 실험 13
3.2 합성 자료 수치 실험에 사용된 변수 17
3.3 합성 자료 처리 작업 순서 20
3.4 10,000 개 수진기를 사용한 경우 22
3.5 100 개 수진기를 사용한 경우 32
3.6 10 개 수진기를 사용한 경우 55
3.7 진원 발생 시간 추정 66
제 4 장 현장 자료 수치 실험 및 영상화 조건 평가 71
4.1 현장 자료와 처리 변수 71
4.2 현장 자료 전처리 76
4.3 현장 자료 처리 결과 77
제 5 장 결 론 82
참고 문헌 86
부 록 88
A1. 수진기 배열의 형상 변경 수치 실험 88
A2. 가상 진원을 이용한 수치 실험 95
A3. 훑기파를 진원으로 이용한 수치 실험 100
A4. 100 개 수진기를 사용한 경우에 대한 보충 그림 103
A5. 시간 창 결정법 111
감사의 글 113

표 목차

표 1. 3 차원 합성 자료 생성/역시간 영상화에 사용한 변수들.....17
표 2. 합성 자료 처리를 위한 InSite 프로그램 변수들; 자동화된 P 파 S 파 초동 발췌 및 격자 탐색법에 사용된 변수들 19
표 3. 잡음 수준에 따른 100 개 수진기 자료에 대한 역시간 영상화 위치 결정 결과와 자동화된 초동 발췌를 이용한 위치 결정 결과 정리 표, 역시간 영상화의 경우 모든 주파수를 다 사용하였음. 53
표 4. 잡음 수준에 따른 무작위로 배치된 10 개 수진기 자료에 대한 역시간 영상화 위치 결정 결과와 자동화된 초동 발췌를 이용한 위치 결정 결과 정리 표, 역시간 영상화의 경우 모든 주파수를 다 사용하였음. 62
표 5. 현장 자료 역시간 영상화에 사용한 변수들.....74
표 6. 현장 자료 처리를 위한 InSite 프로그램 변수들; 자동화된 P 파 S 파 초동 발췌 및 격자 탐색법에 사용된 변수들 75
표 7. 현장 자료에 대한 역시간 영상화 위치 결정 결과와 자동화된 초동 발췌를 이용한 위치 결정 결과 정리 표, 역시간 영상화의 경우 모든 주파수를 다 사용하였음. 81
표 8. x 축 배치 100 개 수진기 자료에 대한 역시간 영상화 위치 결정 결과와 자동화된 초동 발췌를 이용한 위치 결정 결과 정리 표, 역시간 영상화의 경우 모든 주파수를 다 사용하였음.....92
표 9. 12 가상 진원 실험에 대한 자기 상관을 이용한 역시간 영상화 위치 결정 결과 정리 표, 역시간 영상화의 경우 모든 주파수를 다 사용하였음. 97

그림 목차

그림 1. 이론적인 계산량 비교: 역 푸리에 변환과 한 번의 시간 영역 연산을 수행 하는 기존 역시간 영상화 방법; $\mathbf{NT \times log(NT) \times N + N \times NT}$, 본 연구에서 제안하는 주파수 영역에서 두 번의 연산을 수행하는 경우; ; $\mathbf{2 \times NT2 \times N}$, **Nt** 는 시간 격자의 총 개수, **N**은 공간 격자의 개수 15
그림 2. 역시간 영상화 방법 간 계산 시간 비교, 산술 평균을 이용한 역시간 영상화(AmRTM), 기하 평균을 이용한 역시간 영상화(GmRTM), 본 연구에서 제안하는 주파수 영역 자기 상관을 이용하는 방법; 2 차원 자료에 대해서 수진기와 전체 공간 격자 수의 곱인 $\mathbf{NNx \times Ny \times Nz \times Nrcv}$ 증가시키면서 테스트를 수행함. 16
그림 3. 합성 자료 생성에 사용된 리커 요소파 18
그림 4. 리커 요소파(그림 3) 진폭 스펙트럼 18
그림 5. 본 연구에서 제안하는 주파수 영역 자기 상관 조건을 이용한 역시간 영상화 작업 순서 21
그림 6. 10,000 개 수진기를 이용한 수치 실험에 사용된 진원 (4,900, 4,900, 4,900)과 수진기 배치도 23
그림 7. 10,000 개 수진기를 사용한 경우 3 성분 탄성파 기록, (a) z 성분, (b) y 성분, (c) x 성분, 도시 목적으로 근거리 벌림 4,500~5,500 번째 트레이스만 도시함. 23
그림 8. 10,000 개 수진기 자료에 대한 주파수에 따른 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900) 26
그림 9. 10,000 개 수진기 자료에 대한 모든 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 4,900, 5,500)를 교차하고 있음. 27
그림 10. 리커 요소파를 이용한 곱풀기를 적용한 후의 10,000 개 수진기 자료에 대한 모든 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 4,900, 5,000)를 교차하고 있음 30
그림 11. 리커 요소파를 이용한 곱풀기 적용 후의 10,000 개 수진기 자료에 대한 주파수에 따른 단일 주파수 역시간 영상화를 이용

한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900)…31
그림 12. 100 개 수진기를 이용한 수치 실험에 사용된 진원 (4,900, 4,900, 4,900)와 수진기 배치도……33
그림 13. 100 개 수진기를 사용한 경우 3 성분 탄성파 기록, (a) z 성분, (b) y 성분, (c) x 성분, 도시 목적으로 근거리 벌림 49~59 번째 트레이스만 도시함. ……33
그림 14. 100 개 수진기 자료에 대한 모든 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 4,900, 5,000)를 교차하고 있음. ……36
그림 15. 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900) ……37
그림 16. (a) 100 개 수진기 자료에 대한 4 Hz 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, (b) 대조군인 10,000 개 수진기 자료에 대한 4 Hz 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 4,900, 5,000)를 교차하고 있음……38
그림 17. (a) 100 개 수진기 자료에 대한 11 Hz 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, (b) 대조군인 10,000 개 수진기 자료에 대한 11 Hz 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 4,900, 5,000)를 교차하고 있음……38
그림 18. (a) 100 개 수진기 자료에 대한 14 Hz 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, (b) (a) 그림을 확대한 결과, 점선은 이미지의 중앙 (5,000, 5,000, 5,000)를 교차하고 있음……39
그림 19. 신호 대 잡음비 수준에 따른 트레이스와 InSite를 이용한 초동 발췌 결과 예시……44
그림 20. 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900) (신호 대 잡음비가 2인 경우) ……45
그림 21. 100 개 수진기 자료에 대한 모든 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 4,900, 5,000)를 교차하고 있음. (신호 대 잡음비가 2인 경우)……46
그림 22. 100 개 수진기 자료에 대한 3 Hz 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 4,900, 5,100)를

교차하고 있음. (신호 대 잡음비가 2인 경우).....47
그림 23. 100 개 수진기 자료에 대한 7 Hz 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 4,900, 5,100)를 교차하고 있음. (신호 대 잡음비가 2인 경우).....48
그림 24. 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900) (신호 대 잡음비가 1인 경우) 49
그림 25. 100 개 수진기 자료에 대한 7 Hz 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 4,900, 5,000)를 교차하고 있음. (신호 대 잡음비가 1인 경우).....50
그림 26. (a) 100 개 수진기 자료에 대한 3 Hz 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (2,000, 6,600, 1,700)를 교차하고 있음. (b) (a) 그림에서 점선의 교차점이 이미지의 중점 (5,000, 5,000, 5,000)인 경우 (신호 대 잡음비가 1인 경우) 51
그림 27. (a) 100 개 수진기 자료에 대한 7 Hz 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (2,000, 6,600, 1,700)를 교차하고 있음. (b) (a) 그림에서 점선의 교차점이 이미지의 중점 (5,000, 5,000, 5,000)인 경우 (신호 대 잡음비가 1인 경우) 51
그림 28. 잡음 수준 별 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화 위치 결정 결과 정확도 비교 52
그림 29. 잡음 수준에 따른 100 개 수진기 자료에 대한 역시간 영상화 위치 결정 결과와 자동화된 초동 발췌를 이용한 위치 결정 결과 정리 그래프, 역시간 영상화의 경우 모든 주파수를 다 사용하였음. 54
그림 30. 무작위 배치된 10 개 수진기를 이용한 수치 실험에 사용된 진원 (4,900, 4,900, 4,900)와 수진기 배치도.....56
그림 31. 무작위로 배치된 10 개 수진기를 사용한 경우 3 성분 탄성파 기록, (a) z 성분, (b) y 성분, (c) x 성분.....56
그림 32. 무작위로 배치된 10 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900).....58
그림 33. 무작위 배치된 10 개 수진기 자료에 대한 (a) 3 Hz (b) 7 Hz

주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 이미지의 중점인 (5,000, 5,000, 5,000)를 교차하고 있음. 59
그림 34. 무작위로 배치된 10 개 수진기 자료에 대한 모든 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 4,900, 5,000)를 교차하고 있음.....60
그림 35. 잡음 수준에 따른 무작위로 배치된 10 개 수진기 자료에 대한 역시간 영상화 위치 결정 결과와 자동화된 초동 발췌를 이용한 위치 결정 결과 정리 그래프, 역시간 영상화의 경우 모든 주파수를 다 사용하였음. 63
그림 36. 무작위로 배치된 10 개 수진기 자료에 대한 모든 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 4,900, 5,000)를 교차하고 있음. (신호 대 잡음비가 2인 경우)64
그림 37. (a) 무작위로 배치된 10 개 수진기 자료에 대한 모든 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (2,300, 4,400, 7,500)를 교차하고 있음. (b) (a) 그림에서 점선의 교차점이 이미지의 중점 (5,000, 5,000, 5,000)인 경우 (신호 대 잡음비가 1인 경우).....65
그림 38. 2 s 지연이 적용된 100 개 수진기를 사용한 경우 3 성분 탄성파 기록, (a) z 성분, (b) y 성분, (c) x 성분, 도시 목적으로 근거리 벌림 49~59 번째 트레이스만 도시함. 69
그림 39. (a) 2 s 지연된 100 개 수진기 자료에 대한 모든 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (7,700, 4,900, 9,100)를 교차하고 있음. (b) (a) 그림에서 점선의 교차점이 이미지의 중점 (5,000, 5,000, 5,000)인 경우 69
그림 40. 잡음 수준 별 2 s 지연된 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화 위치 결정 결과 정확도 비교.....70
그림 41. 무작위로 배치된 10 개 수진기 자료에 대한 지연에 따른 역시간 영상화 결과의 정규화된 RMS 오차와 정규화된 표준편차 값.....70
그림 42. 포항 지역 8 개 지진계 배치도 72
그림 43. 현장 자료 탄성파 기록 (a) 2017.11.14 자료, (b) 2017.11.15 자료 (UTC), (c) (a)의 진폭 스펙트럼, (d) (b)의 진폭 스펙트럼.....73
그림 44. 2017.11.14 자료에 대한 InSite에서의 자동화된 P 파 S 파 초동 발췌 결과와 위치 결정 결과에 따른 이론적인 P 파 S 파 초동 예측값 78

그림 45. 2017.11.15 자료에 대한 InSite에서의 자동화된 P 파 S 파 초동 발췌 결과와 위치 결정 결과에 따른 이론적인 P 파 S 파 초동 예측값 78
그림 46. 2017.11.14 자료에 대한 지연에 따른 역시간 영상화 결과의 표준편차 값 79
그림 47. 2017.11.14 자료에 대한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭점 (1,245, 3,285, 4,200)을 교차하고 있음..... 79
그림 48. 2017.11.15 자료에 대한 지연에 따른 역시간 영상화 결과의 표준편차 값 80
그림 49. 2017.11.15 자료에 대한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭점 (1,560, 3,240, 2,775)을 교차하고 있음..... 80
그림 50. 무작위 배치/x 축 배치 100 개 수진기를 이용한 수치 실험에 사용된 진원 (4,900, 4,900, 4,900)와 수진기 배치도..... 90
그림 51. x 축 배치 된 100 개 수진기를 사용한 경우 3 성분 탄성파 기록, (a) z 성분, (b) y 성분, (c) x 성분, 도시 목적으로 근거리 벌림 49~59 번째 트레이스만 도시함. 90
그림 52. x 축 배치 100 개 수진기 자료에 대한 모든 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 3,700, 5,900)를 교차하고 있음. 91
그림 53. 무작위 100 개 수진기를 사용한 경우 3 성분 탄성파 기록, (a) z 성분, (b) y 성분, (c) x 성분, 도시 목적으로 근거리 벌림 49~59 번째 트레이스만 도시함 92
그림 54. 무작위 배치 100 개 수진기 자료에 대한 모든 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 4,900, 5,000)를 교차하고 있음..... 93
그림 55. x 축 배치, 규칙적 배치, 무작위 배치 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화 위치 결정 결과 정확도 비교 94
그림 56. 영상화 영역 12 분할 및 분할 영역별 가상 진원 수치 실험 개념도..... 96
그림 57. 12 가상 진원 실험에 대한 자기 상관을 이용한 역시간 영상화 위치 결정 결과의 정규화된 RMS 오차 그래프..... 98
그림 58. 2,500 m 심도에서의 각 사분면 가상 진원에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과의 정규화된 RMS 오차..... 98
그림 59. 5,000 m 심도에서의 각 사분면 가상 진원에 대한 단일 주파수 역시간 영상화 위치 결정 결과 정확도 비교..... 99

그림 60. 7,500 m 심도에서의 각 사분면 가상 진원에 대한 단일 주파수 역시간 영상화 위치 결정 결과 정확도 비교.....99
그림 61. 선형 훑기파 진원.....101
그림 62. 그림 61 훑기 신호의 진폭 스펙트럼 101
그림 63. 선형 훑기파를 이용하여 얻은 100 개 수진기를 사용한 경우 3 성분 탄성파 기록, (a) z 성분, (b) y 성분, (c) x 성분, 도시 목적으로 근거리 벌림 49~59 번째 트레이스만 도시함.....102
그림 64. 훑기파와 리커 요소파를 이용하여 합성한 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화 위치 결정 결과 정확도 비교.....102
그림 65. 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900) (잡음이 없는 경우) 103
그림 66. 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900) (신호 대 잡음비가 40인 경우).....104
그림 67. 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900) (신호 대 잡음비가 20인 경우).....105
그림 68. 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900) (신호 대 잡음비가 10인 경우).....106
그림 69. 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900) (신호 대 잡음비가 8인 경우) 107
그림 70. 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900) (신호 대 잡음비가 4인 경우) 108
그림 71. 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정

된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900)
(신호 대 잡음비가 2인 경우) 109
그림 72. 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이
용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정
된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900)
(신호 대 잡음비가 1인 경우) 110

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경

저자는 포항 미소 진동 자료 처리를 수행하면서 규모가 작은 많은 탄성파 자료를 처리해야 했다. 미소 진원(seismic center) 위치 결정 방법은 다음과 같다. 먼저 탄성파 기록에서 P 파 S 파 위상을 식별하고 초동(first arrival)을 발췌한다. 다음 단계로 격자 탐색법(grid-search method)을 이용하여 가상의 진원의 위치를 옮겨가며 이론적인 초동을 계산하고 발췌된 초동 값과 비교하여 가장 오차가 작은 지점을 진원으로 결정한다 (Maxwell, 2014).

기존의 초동 발췌를 이용한 방식은 신호 대 잡음비(signal to noise ratio)가 높은 큰 규모의 지진 처리에는 유리하나, 작은 규모의 미소 진원에서 온 탄성파 기록은 초동 발췌가 어렵고, 정확도가 떨어지며, 시간도 많이 소요됐다. 동료 연구자와 분업 시에는 초동 발췌에 대한 기준이 다르기 때문에 초동 발췌 차이에 의한 불확실성과 오차가 추가로 발생했다. 미소 진원 처리 결과는 수압 파쇄(hydraulic fracturing) 제어를 위한 신호등 시스템(TLS; Traffic Light System)을 위해 필수적인 정보이다 (Kim, et al., 2018). 따라서 신속한 의사결정을 위해 상대적으로 규모가 큰 진원에 대해 우선적으로 위치를 결정하고 규모가 작은 진원에서 온 탄성파 기록은 자동화된 초동 발췌를 이용한 진원 위치 결정 결과를 제공하기도 했다.

그런데 자동화된 초동 발췌를 이용한 방법은 신호 대 잡음비가 낮은 탄성파 기록, 즉 작은 진원의 탄성파 기록이나 잡음에 오염된 기록에 대해서 초동 발췌 자체를 실패하는 경우가 많았다. 자동화된 위치 결정 결과의 품질 관리 및 위치 결정 정밀도의 향상을 위해서 초동 발췌 및 격자 탐색법 자료처리 변수 최적화 작업이 지속적으로 필요했다. 이 최적화 과정에는 시간과 비용이 소모되며 작업자의 주관이 개입될 여지도 있었다. 이러한 특성은 작은 진원의 탄성파 기록을 처리하는데 기존의 초동 발췌를 이용한 진원 위치 결정 방식이 가지는 불리한 점이었다.

초동 발췌 없이 자동으로 진원 위치를 결정할 수 있는 방법으로 역시간 영상화(time reversal imaging)를 이용한 진원 위치 결정 방법이 있다. 이 방법은 수진기에서 기록된 탄성파 신호을 시간에 대해서 반전시켜 원래의 위치로 전파시켜 진원의 위치와 특성을 재현하는 기술이다. 역시간 영상화는 모든 파형을 이용하기 때문에 초동 발췌 과정이 필요 없다. 따라서 P 파와 S 파 초동 신호 만을 고려하고 나머지 신호는 잡음으로 간주하는 기존의 방법에 비해서, 초동 발췌에 소요되는 비용이나 그로 인해 생길 수 있는 잠재적인 오차가 발생하지 않는다. 또한 파동이 진원에서 수진기로 전파하면서 흩어진 에너지를 원래의 진원 위치로 모으는 방식이기 때문에, 잡음에 강하며 작은 진원에서 온 신호를 감지하고 처리할 수 있는 기술이다. 따라서 이 방법은 대규모의 수진기에서 얻어지는 작은 신호의 자동화된 처리에 유리하다 (Gajewski & Tessmer, 2005).

역시간 영상화의 개념은 음향학에서 압전 센서(transducer)를 이용한 초음파 음원 재현 실험실 실험과 컴퓨터를 이용한 수치 실험을 통해서 그 개념이 먼저 입증되었다 (Fink, et al., 1989). 이 기술은 시간 반전 음향학(time reversal acoustics)이라는 하나의 분야로 정립되었으며, 수중 잠수함 탐지, 의학에서의 담석 치료, 반도체에서의 불순물 제거를 포함하는 다양한 분야에 응용되고 있다 (Fink, 1999; Fink, 2000). 지진학과 물리 탐사 분야에서는 시간 영역 파동 방정식을 이용하여 음파 및 탄성파 합성 자료에 대한 진원 위치 결정을 수행한 연구를 시작으로 역시간 영상화가 활용되기 시작했다. (Gajewski & Tessmer, 2005). Larmat, et al.(2006)과 Larmat, et al.(2008)은 역시간 영상화를 수마트라 대지진 (Sumatra-Andaman earthquake; 2014.12.26) 위치 재결정, 대규모 빙하 침식 현상의 진원 위치 재분석에 활용하였다. O'Brien, et al., (2011)은 화산 지역에서 마그마의 움직임을 모니터링 하기 위한 미진동(tremor) 위치 결정 연구에 역시간 영상화를 적용했다. 최근에는 완벽하지 않은 송수진기 배열을 위한 영상화 조건 최적화 방법과 다양한 영상화 조건에 대한 연구가 진행되고 있다 (Bazargani & Snieder, 2016; Nakata, 2018). 또한 영상화 후 이미지 영역에서의 목적 함수 설정을 통한 동시 속도 물성 역산 연구도 진행되고 있다 (Fish, 2012; Chao, et al., 2018).

1.2 연구의 목적

역시간 영상화를 이용한 진원 위치 결정 연구는 대량의 작은 진원에 대한 자동화된 처리에 유리한 측면이 있지만, 지진학에서는 전 지구 스케일의 규모가 큰 지진 재처리에 적용되거나, 물리 탐사 분야에서는 주로 2 차원 합성 자료에 적용되고 있다 (Gajewski & Tessmer, 2005; Larmat, et al., 2006; Larmat, et al., 2008; Fish, 2012). 이것은 파동 방정식을 계산해서 수치 모델링을 해야하는 역시간 영상화가 실시간 모니터링 시스템에 적용하기에는 계산 비용이 비싸기 때문이다. 최근 GPU와 CPU를 이용한 병렬 처리 기법을 이용하여 역시간 영상화를 3 차원 탄성 매질에서 성공적으로 수행한 사례가 생기기 시작했다 (Xue, et al., 2016). 하지만 개인 컴퓨터에서 운용 가능한 초동 발췌 방식을 이용하는 상용/공용 위치 결정 소프트웨어와 비교할 때, 3 차원 탄성 매질에 대한 파동 방정식 풀이 계산 비용은 역시간 영상화 기술이 가지는 현장 적용에 불리한 점이다.

기존의 시간 영역 파동 방정식을 사용한 역시간 영상화 방법은 진원 위치 결정을 위해 각 진원을 결정할 때마다 역시간 모델링을 반복적으로 수행했다. 그리고 모델링한 모든 시간과 공간에서 가장 큰 진폭을 가지는 지점을 진원으로 결정했다. 이 방법은 시간 영역에서의 역시간 모델링을 수행하기 위해 모든 시간과 공간에 대한 진폭 정보를 컴퓨터 메모리에 할당하기 때문에 메모리 활용과 계산 시간의 측면에서 효율적이지 않다 (Gajewski & Tessmer, 2005; Larmat, et al., 2006; Larmat, et al., 2008). 그 이후의 연구는 시간 영역 파동 방정식을 계산하지 않고 주파수 영역에서 역시간 파동장을 먼저 계산했다. 그리고 모든 공간 격자 점에 대해 역 푸리 변환(inverse Fourier transform)을 수행하여 시간 영역으로 다시 돌아와 산술 평균을 이용한 역시간 영상화(AmRTM; Arithmetic Mean Reverse Time Migration) 방식으로 시간 축에 대해서 더하거나 기하 평균을 이용한 역시간 영상화(Geometric Mean Reverse Time Migration)의 방식으로 시간 축에 대해서 파동장을 곱하여 영상화 했다 (Nakata & Beroza, 2016; Nakata, 2018).

이 연구는 기존의 주파수 영역 역시간 영상화 방법이 수행하는 역 푸리에 변환과 시간 영역에서의 연산 과정을 배제하고, 주파수 영역에서 직접 계산된 역시간 파동장에 자기 상관(autocorrelation) 조건을 적용했다. 계산된 자기 상관 이미지에서 최대 진폭이 생기는 위치를 진원으로 결정했다. 이러한 역시간 영상화 조건의 개선을 통해 첫 번째로 기존의 주파수 영역 역시간 영상화 방법의 계산상의 효율을 증가시켜 현장 적용성을 높이고자 했다. 두 번째로 자동화된 초동 발췌 방식과의 비교를 통해서 제안된 방법의 대규모 수진기를 활용한 자동화된 진원 결정 시스템으로써 가능성을 타진해보고자 했다.

1.3 연구의 구성

이 연구는 이 자기 상관을 이용한 역시간 영상화 방식을 자동화된 P 파와 S 파의 초동 발췌를 이용한 진원 위치 결정법과 비교를 수행함으로써 이 방법의 효용성을 평가하고 대규모의 탄성파 자료를 처리하는 자동화된 위치 결정 방법으로써 적용성을 고찰한다. 특히 작은 신호도 처리가 가능한 역시간 영상화의 특성을 확인 하기 위해, 잡음이 있는 자료에 대한 테스트를 수행한다. 먼저 2 장에서 역시간 영상화의 개념과 제안되었던 영상화 조건들에 대한 리뷰를 한다. 3 장에서는 제안된 방법이 기존의 주파수 영역 역시간 영상화 조건 들에 비해서 계산량을 얼마나 줄일 수 있는지에 대해서 다룬 후, 3 차원 탄성 매질 가정 하에서 만들어진 합성 자료를 이용하여 역시간 영상화 및 위치 결정을 수행하여 동일한 조건 하에서 기존의 초동 발췌를 통한 진원 위치 결정 방법이 제공하는 결과와 비교한다. 4 장에서는 포항 지진 자료를 이용하여 제안된 방법의 현장 적용성을 테스트 한다. 마지막으로 5 장에서는 논의들을 정리하고 이 연구의 의의와 한계에 대해서 다룬다.

제 2 장 이　　론

2.1 역시간 영상화와 역 필터의 개념

이 절에서는 역시간 영상화의 개념을 명확하기 하기 위해서, 역시간 영상화와 역 필터(inverse filter)의 개념에 대해서 간단하게 살펴본다. 주파수 영역에서 음파와 탄성파 매질에 대한 파동 방정식을 행렬식 형태로 간단하게 나타내면, 식 1과 같다 (Nakata & Beroza, 2016). 여기서 $D(X,\omega)$는 각 주파수(angular frequency) ω일 때, 위치 X에서 측정된 파동장을 의미하며, $G(X,\omega)$ 는 주어진 속도 모델과 주파수에 대한 위치 X 에서 그린 함수, $f(X,\omega)$는 진원 함수이다.

$$D(X,\omega) = G(X,\omega)f(X,\omega) \tag{1}$$

측정된 파동장 $D(X, \omega)$가 주어졌을 때, 진원인 $f(X,\omega)$를 구하는 법은 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 그린 함수의 역함수 $G^{-1}(X,\omega)$를 구해서 측정된 파동장인 $D(X,\omega)$에 곱하는 방법 (역 필터를 이용한 방법), 두 번째는 역시간 연산자인 $G^{*}(X,\omega)$ ($*$ 는 켤레복소수를 의미)를 측정된 파동장인 $D(X,\omega)$ 에 곱하는 방법이다 (역시간 영상화를 이용한 방법).

파동 방정식이 시간 축을 반전시켜도 동일하게 성립하고 진원 수진기 간의 상반성 가정이 만족한다면, 주파수 영역에서 $G^{*}(X,\omega)$ 를 $D(X,\omega)$ 에 곱함으로써, 측정된 파동의 역시간 재 전파가 일어나며, 원리적으로는 초기 진원의 위치와 특성을 진원 발생 시간(event origin time)에서 복원할 수 있다. 만약에 모든 위치에 수진기가 위치하여 정보의 소실이 없다면, 역시간 영상화와 역 필터는 이론적으로 같다. 두 방식이 다른 점은, 실제로는 수진기가 모든 지점에 설치되어있지 않기 때문에 정보의 소실이 있고, 이로 인하여 역 필터를 구하는 과정이 불량조건문제(ill-posed problem)이기 쉽다는 점이다 (Tanter, et al., 2000; Tanter, et al., 2001).

이 연구는 수치적으로 불안정할 수 있는 역 필터 대신 역시간 영상화를 이용하여 진원의 위치를 결정한다. 식 1을 변형하여 주파수 영역에서 하나의 주파수 성분에 대해서 진원 $f(X,\omega)$를 구하기 위한 역시간 영상화를 식으로 나타내면 식 2 와 같다. 여기서 수진기 번호 ircv는 1~nrcv의 범위를 가진다. 이 식은 주어진 주파수에 대해서 각각의 수진기에 기록된 탄성파 신호를 역시간 모델링하여 모든 수진기에 대해서 합치면, 원래의 진원을 유사하게 재현할 수 있음을 의미한다.

$$\begin{aligned}\sum_{ircv}^{nrcv} G^{*}(X_{ircv},\ \omega)D(X_{ircv},\ \omega) \\ &= \sum_{ircv}^{nrcv} G^{*}(X_{ircv},\ \omega)\{G(X_{ircv},\ \omega)f(X_{isrc},\ \omega)\} \\ &\cong f(X,\omega)\end{aligned} \tag{2}$$

2.2 기존 역시간 영상화 조건과 주파수 영역 자기 상관 조건

시간 영역 파동 방정식을 사용하는 초기의 역시간 영상화 조건은 식 3과 같다 (Gajewski & Tessmer, 2005; Larmat, et al., 2006; Larmat, et al., 2008). 여기서 $f_i(X,t)$는 공간 X, 시간 t에서 구하는 i 번째 진원, $\delta(X-X_{ircv})$는 X_{ircv}에 설치된 $nrcv$개의 수진기 중 $ircv$ 번째 수진기 위치에 델타 함수(delta function)를 의미한다. 그리고 $D_i(X_{ircv}, T-t)$는 i번째 진원이 발생시킨 탄성파 기록, T는 수진기 최대 기록 시간의 의미한다. A_{ircv}는 수진기의 위치의 불규칙성과 재 전파에 의한 진폭 왜곡을 보정하기 위한 수진기 별 진폭보정계수이다 (Larmat, et al., 2006; Larmat, et al., 2008).

시간 영역 파동 방정식을 이용한 역시간 영상화는 진원의 위치를 결정하기 위해 탄성파 기록 마다 반복적으로 파동 방정식을 풀어 역시간 파동장을 구한다. 흩어졌던 파동 에너지가 집중이 되어 진폭이 최대가 되는 시간과 공간상 지점을 진원 발생 시간(event origin time)과 진원 발생 위치로 정한다.

$$f_i(X,t) = \sum_{ircv=1}^{nrcv} A_{ircv} D_i(X_{ircv}, T-t)\delta(X-X_{ircv}) \qquad (3)$$

반복적으로 시간 영역 파동 방정식을 계산하고 전체 시간과 공간 격자 중에서 최대값을 구하는 것은 메모리 및 계산 시간의 소모가 심하다. Nakata & Beroza (2016)는 주파수 영역에서 파동 방정식을 풀고 구한 역시간 파동장을 역 푸리에 변환을 통해 시간 영역 파동장으로 변환한 뒤 시간 축에 대해서 영상화 하는 방식을 제안했다. 시간 축에 대해서 이미지를 모두 더하는 방식이 산술 평균을 이용한 역시간 영상화이고 시간 축에 대해서 모두 곱하는 방식이 기하 평균을 이용한 역시간 영상화다 (식 4). 여기서 IFT는 모든 주파수 자료를 이용한 역 푸리에 변환을 의미하며, Π는 순열(permutation)을 의미한다. 시간 영역 파동 방정식을 푸는 경우와 마찬가지로 최종 결과 이미지 $I_{total}(X)$에서 가장 큰 진폭이 나타나는 지점을 진원 위치로 결정한다 (Nakata & Beroza, 2016).

$$I_{total}(X) = \sum_{t}\left\{\left(\sum_{ircv}^{nrcv} W_{ircv}(X,\ t)\right)\left(\sum_{ircv}^{nrcv} W_{ircv}(X, t)\right)\right\}$$

(산술 평균을 이용한 역시간 영상화)

$$I_{total}(X) = \sum_{t}\prod_{ircv} W_{ircv}(X,\ t) \tag{4}$$

(기하 평균을 이용한 역시간 영상화)

where $W_{ircv}(X,\ t) = IFT\left(G^{*}(X_{ircv},\ \omega)D(X_{ircv},\ \omega)\right)$

이 연구는 식 4에서 역 푸리에 변환과 시간 영역 연산을 배제하고 영상화 및 위치 결정을 수행했다. 주파수 영역에서 정의된 역시간 파동장을 모든 수진기에 대해 합한 후에 기존 탄성 매질 가정 하의 역시간 영상화 연구에서 제안된 방법처럼 3 성분 기록을 모두 활용해서 변위 벡터에 발산($\nabla\cdot$; divergence)을 취하여 P 포텐셜을 구했다 (Bazargani & Snieder, 2016). 계산된 P 포텐셜의 자기 상관을 계산하여 진폭의 최대값이 나타나는 지점을 진원 위치로 결정했다. 단일 주파수 별 영상화 및 위치 결정과 더불어 역시간 파동장을 모든 주파수에 대해 합한 후에, 자기 상관 값을 구하여 모든 주파수를 이용한 영상화도 수행했다. 이것을 정리하면, 식 5와 식 6과 같다. 여기서 ifreq는 개별 이산 주파수이고 범위는 1~nfreq이며, $R(X_{ircv},\ \omega)$는 수진기에서 기록된 자료의 재 전파 시의 진폭 감쇄를 보상 해주기 위한 보상 인자로 구면 발산에 의한 감쇄를 보상 해주기 위해 재 전파 시키는 수진기와 영상화 되는 지점의 거리로 정의했다.

$$I_{\text{proposed method individual frequency}}(X) = \left[\sum_{\mathbf{ircv}}^{\mathbf{nrcv}} \nabla \cdot \left(G^*(X_{\text{ircv}},\ \omega)D(X_{\text{ircv}},\ \omega)\right)R(X_{\text{ircv}},\omega) \times \left\{\sum_{\mathbf{ircv}}^{\mathbf{nrcv}} \nabla \cdot \left(G^*(X_{\text{ircv}},\ \omega)D(X_{\text{ircv}},\ \omega)\right)R(X_{\text{ircv}},\omega)\right\}^*\right] \quad (5)$$

$$I_{\text{prposed method total frequency}}(X) = \sum_{\text{ifreq}}^{\text{nfreq}} \sum_{\mathbf{ircv}}^{\mathbf{nrcv}} \nabla \cdot \left(\ G^*(X_{\text{ircv}},\ \omega)D(X_{\text{ircv}},\ \omega)\right)R(X_{\text{ircv}},\omega) \times \left\{\sum_{\text{ifreq}}^{\text{nfreq}} \sum_{\mathbf{ircv}}^{\mathbf{nrcv}} \nabla \cdot \left(G^*(X_{\text{ircv}},\ \omega)D(X_{\text{ircv}},\ \omega)\right)R(X_{\text{ircv}},\omega)\right\}^* \quad (6)$$

2.3 본 연구의 기본 가정

이 절에서는 이 연구에서 사용한 가정을 다룬다. 기존의 역시간 영상화 연구는 음향 매질을 가정하거나 탄성 매질 가정을 하더라도 계산량 문제상 2 차원 합성 자료에 대한 역시간 영상화를 수행하는 경우가 많았다 (Gajewski & Tessmer, 2005; Nakata & Beroza, 2016; Nakata, 2018). 그러나 암석이 지니는 고유 감쇄나 암석 내부의 공극 유체에 의한 효과를 무시하더라도 실제 땅은 3 차원 탄성 매질에 가깝다. 따라서 현장 자료에 적용성이 있으려면 최소한 3 차원 탄성 매질 가정 하의 파동 방정식을 이용하여 역시간 영상화를 수행해야 한다.

이 연구는 3 차원 무한 균질 탄성 매질 가정 하의 해석해를 이용했다 (Aki & Richards, 2002). 전체 매질에서의 탄성파 전파 속도가 동일하고 P 파와 S 파 직접파를 제외한 다른 파는 제외한다는 뜻이다. 이 가정은 수진기와 진원이 모두 동일한 암반에 위치해 있거나, 파장이 커서 비균질성을 무시 할 수 있는 경우를 제외하고 성립하기 어렵다. 일반적으로 매질은 균질 하지 않으며, 비균질성에 의한 파의 분산, 반사, 굴절, 회절 등의 현상이 일어나게 된다. 따라서 매질이 균질 하다는 가정 하의 해석해를 이용한 방식은 현장 적용 시 오차를 수반할 수 밖에 없다. 하지만 균질 매질 가정 하에 해석해를 이용하면, 비균질 매질에 대한 수치모델링을 이용한 역시간 영상화에 비해서 계산 시간이 단축되고 메모리가 절감이 되며, 경계조건을 적용시킬 필요가 없어, 경계에서의 인위적인 반사파에 의한 이미지의 왜곡 및 분석의 어려움을 주는 상황을 미리 방지할 수 있다.

이 외에도 논의를 간결하게 하기 위해서 수진기 배열은 일반적인 탄성파 탐사나 지진 모니터링에서 사용되고 있는 지표 수진기 배열에 대해서 분석을 하였고 시추공이 포함된 경우에 대해서는 고려하지 않았다. 현장 자료도 지표에 설치된 지진계에서 얻은 자료를 사용했다. 진원이 수진기 배열의 중앙에 있지 않는 경우도 테스트 하여 부록에 실었으나, 대부분의 분석에서는 수진기 배열의 중앙에 진원이 위치하는 것을 가정했다.

마지막으로, 기존의 P 파와 S파를 이용한 초동 발췌를 이용한 격자 탐색 방법과 정확도 비교를 위해서 위치에 대한 오차를 구할 때 아래의 방식을 사용했다. 기준 위치 $(x_{true}, y_{true}, z_{true})$ 와 계산된 위치 (x, y, z) 에 대한 임의의 원점에 대한 위치 벡터를 상정하고, 두 벡터 간의 오차 벡터 $(x - x_{true}, y - y_{true}, z - z_{true})$ 를 구하여 그 오차 벡터의 크기와 기준 위치에 대한 벡터의 크기를 정규화된 RMS(Root Mean Square) 오차를 이용하여 비교했다 (식 7). 앞으로의 모든 논의에서 3 차원 좌표를 나타내기 위해 데카르트 좌표계(Cartesian coordinate)를 사용할 것이며, 특별한 언급이 없는 이상 모든 좌표계 $(North, East, Depth) = (x, y, z)$의 기본 단위는 m 임을 밝힌다.

$$\text{Normalized RMS(Root Mean Square)Error (\%)} = \frac{\sqrt{(x - x_{trure})^2 + (y - y_{true})^2 + (z - z_{true})^2}}{\sqrt{x_{true}^2 + y_{true}^2 + z_{true}^2}} \times 100\ (\%) \tag{7}$$

제 3 장 합성 자료 수치 실험 및 영상화 조건 평가

3.1 계산량 비교 수치 실험

자기 상관을 이용한 역시간 영상화 방식은 기존의 주파수 영역 역시간 영상화 방법에서 역 푸리에 변환과 시간 영역 연산을 배제하기 때문에 계산량을 절약할 수 있다. 그림 1은 역 푸리에 변환과 시간 영역 연산을 배제함으로써 생기는 계산량의 차이를 이론적으로 비교해 본 그림이다. NT 개의 시간 격자에 대한 고속 푸리에 변환에 필요한 계산량은 $NT \times \log(NT)$으로 나타낼 수 있으며, 이 연산을 모든 N개의 공간 격자($N = Nx \times Ny \times Nz \times Nrcv$)에 대해서 모두 수행해야 하므로, 역 푸리에 변환에 필요한 계산량은 $NT \times \log(NT) \times N$이 된다. 여기서 Nx, Ny, Nz는 x, y, z 방향 격자 수, Nrcv는 사용하는 수진기 개수이다. 산술 평균을 이용한 역시간 영상화나 기하 평균을 이용한 역시간 영상화의 경우 시간 영역으로 변환 후에, 시간 축에 대한 덧셈 혹은 곱셈의 과정을 거치므로, 추가적으로 필요한 계산량은 $N \times NT$ 가 되어 총 계산량은 $NT \times \log(NT) \times N + N \times NT$ 이 된다. 이 연구에서 제안하는 주파수 영역에서 계산하는 방식은 주파수 별 역시간 파동장의 자기 상관 후에 모든 주파수에 대해서 더하는 과정을 거치므로 필요한 계산량을 $2 \times \left(\frac{NT}{2}\right) \times N$로 나타낼 수 있다 (주파수 샘플 개수가 시간 격자 개수의 절반이라고 가정).

그림 1에서 기존의 주파수 영역 역시간 영상화 방법과 비교가 무의미할 정도로 공간 격자와 시간 격자 개수가 많아질수록 두 방법의 차이가 기하급수적으로 커지는 것을 볼 수 있다. 영상화를 위한 최종 연산 과정은 공통적으로 포함하므로 이 차이는 대부분 공간 격자에 대한 역 푸리에 변환에서 기인 하는 것으로 볼 수 있다. 이 점을 확인하기 위해서 산술 평균 및 기하 평균을 이용한 역시간 영상화 방법과 주파수 영역 자기 상관도를 구하여 위치를 결정하는 본 연구에서 제안하는 방법을 2 차원 역시간 영상화 프로그램으로 구현하여 계산 시간을 비교했다 (그림 2). 프로그램 구현 상에서 기존 주파수 영역 영상화 방식과 본 연구에서 제안하는 방식의 코드 상의 가장 큰 차이는 역 푸리에 변환의 존재 여부다. 결과에서 확인할 수

있듯이, 공간 격자의 개수가 증가 할수록 역 푸리에 변환을 이용하는 역시간 영상화의 계산 시간의 증가량이 역 푸리에 변환을 하지 않는 본 연구에서 제안하는 방법보다 크게 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

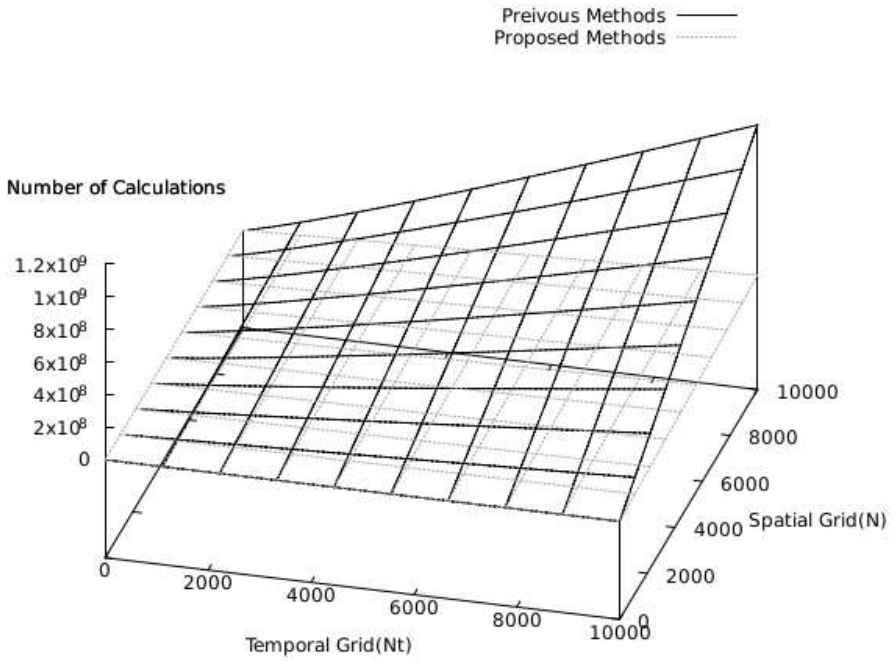


그림 1. 이론적인 계산량 비교: 역 푸리에 변환과 한 번의 시간 영역 연산을 수행 하는 기존 역시간 영상화 방법; $\mathbf{NT \times \log(NT) \times N + N \times NT}$, 본 연구에서 제안하는 주파수 영역에서 두 번의 연산을 수행하는 경우; ; $\mathbf{2 \times \left(\frac{NT}{2}\right) \times N}$, **Nt** 는 시간 격자의 총 개수, **N**은 공간 격자의 개수

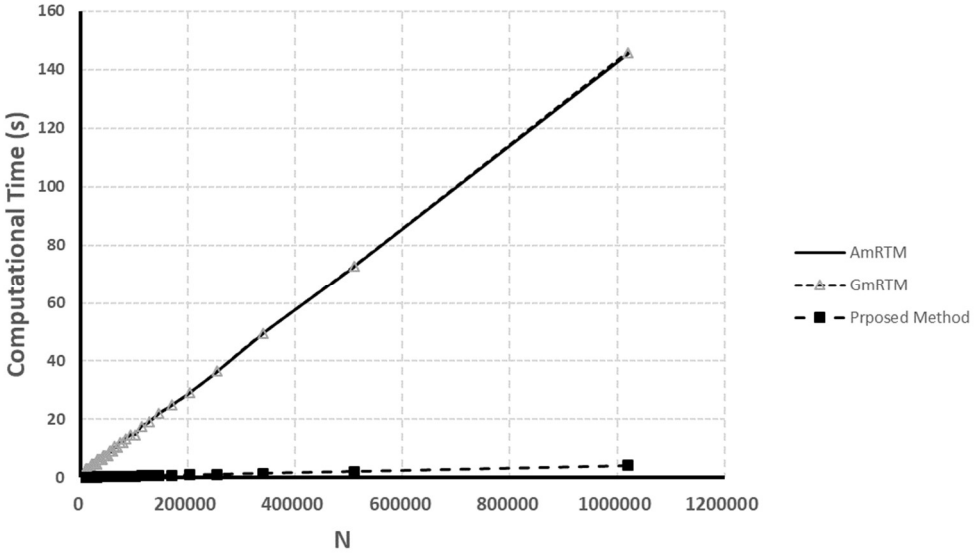


그림 2. 역시간 영상화 방법 간 계산 시간 비교, 산술 평균을 이용한 역시간 영상화(AmRTM), 기하 평균을 이용한 역시간 영상화(GmRTM), 본 연구에서 제안하는 주파수 영역 자기 상관을 이용하는 방법; 2 차원 자료에 대해서 수진기와 전체 공간 격자 수의 곱인 $\mathbf{N}(\mathbf{Nx} \times \mathbf{Ny} \times \mathbf{Nz} \times \mathbf{Nrcv})$ 증가시키면서 테스트를 수행함.

3.2 합성 자료 수치 실험에 사용된 변수

주파수 영역 자기 상관 영상화 조건을 합성 자료를 이용하여 테스트했다. 먼저 3 차원 탄성 매질 가정 하의 그린 함수를 이용하여 합성 자료를 생성했다. 합성 자료 생성과 역시간 영상화에 사용된 모델의 크기, 공간과 시간 격자 간격, 경계조건, 속도와 밀도 모델, 진원 타입과 같은 수치 변수는 표 1에 정리되어 있다. 그림 3과 그림 4는 합성 자료 생성 시 사용된 주요 주파수 대역이 5 Hz인 리커 요소파(Ricker wavelet)와 진폭 스펙트럼(amplitude spectrum)을 나타낸다. 전통적인 P 파와 S 파 초동 발췌를 이용한 위치 결정은 영국의 IMaGE사의 InSite라는 상용 소프트웨어를 사용했으며, 초동 발췌 및 격자 탐색에 사용한 변수는 표 2에 정리되어 있다.

표 1. 3 차원 합성 자료 생성/역시간 영상화에 사용한 변수들

Parameter	Description
The size of the domain	10,000 × 10,000 × 10,000 m
The number of grid	: 101 × 101 × 101
The grid interval	100 m
Boundary	Infinite media assumption
Velocity and density model	Homogenous model (2,500 m/s, 1,444 m/s, 2,300 g/cm^3)
Source wavelet	15 Hz Nyquist (5 Hz dominant) Ricker wavelet (for modeling)
	Vertical displacement source (for modeling)
	3-component trace of each receiver (for imaging)
Time parameters	5 sec recording time with 4 ms interval (1,250 samples)

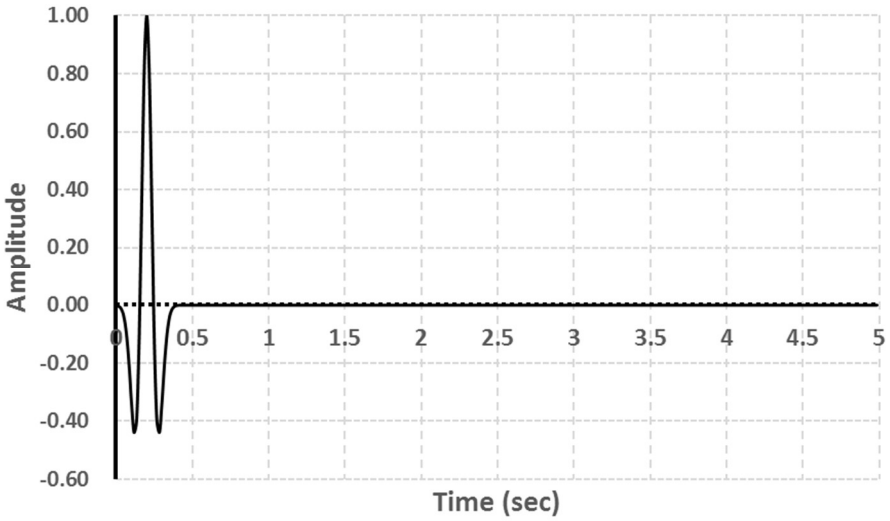


그림 3. 합성 자료 생성에 사용된 리커 요소파

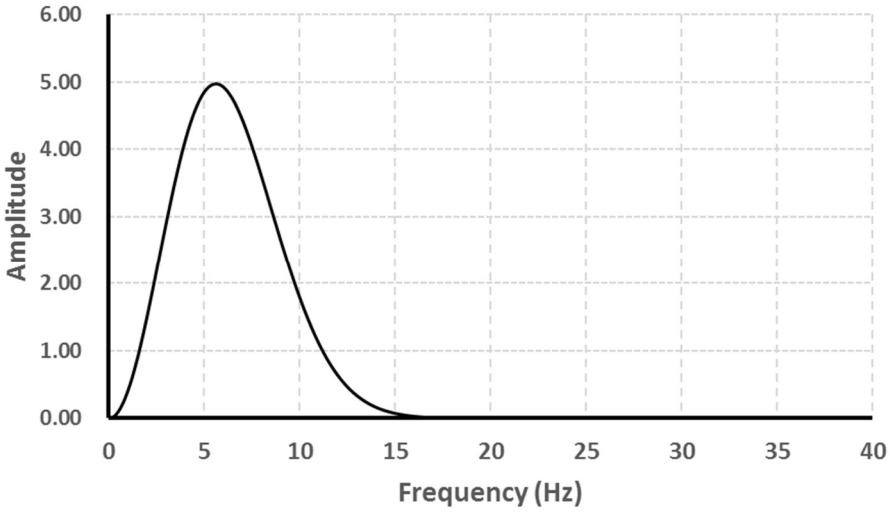


그림 4. 리커 요소파(그림 3) 진폭 스펙트럼

표 2. 합성 자료 처리를 위한 InSite 프로그램 변수들; 자동화된 P 파 S 파 초동 발췌 및 격자 탐색법에 사용된 변수들

Picking Parameters		
P wave picking parameter	Back window (s)	0.4
	Front window (s)	0.2
	Threshold	2
S wave picking parameter	Back window (s)	0.4
	Front window (s)	0.14
	Threshold	3
The first peak of RMS function is picked		
Grid Search Parameters (Location Parameters)		
Minimum number of P wave arrivals for location	4	
Minimum number of S wave arrivals for location	3	
Maximum residual	100 ms	
Grid Search Domain	10,000×10,000×10,000 m	
Initial cell size and desired resolution	500 m	100 m
Outlier identification is applied for arrivals		
Used Velocity Model and Q factor		
P wave velocity	2500 m/s	
S wave velocity	1444 m/s	
Q factor for P wave	200	
Q factor for S wave	100	

3.3 합성 자료 처리 작업 순서

이 절에서는 합성 자료를 이용한 역시간 영상화 처리 순서에 대해서 구체적으로 설명한다. 본 연구에서 제안하는 작업 순서는 다음과 같다.

1. 전처리 과정; 속도 모델(검층/탄성파 탐사 자료 등이 없는 경우 상속도 모델로 가정)과 탐사 영역을 정한다. 탐사 영역의 크기와 속도 모델에 따라 적절한 시간 창(time window)의 길이를 결정한다 (부록 A5 참조). 시간 창 결정을 통해 최대 기록 시간이 정해지면 필요한 최소 주파수 간격이 정해지게 되고, 체크 샷 혹은 기존의 자료나 컴퓨터의 성능에 맞추어 사용하고자 하는 최대 주파수 대역을 결정한다. 최대 주파수 대역과 속도 모델 정보를 이용하여 공간 격자의 크기와 시간 격자의 크기를 분산 조건(dispersion analysis)과 수렴 조건(stability analysis)을 만족하게 조절한다. 이에 따라 총 공간 격자 수가 결정된다. 정해진 변수를 이용하여 주파수 영역에서 그린 함수를 계산하여 주파수, 수진기 별로 저장한다.

2. 영상화 과정; 합성 자료(실시간 자료)가 생성되면 수진기에 기록된 자료를 푸리에 변환을 하고 켤레 복소수를 구한다. 저장되어 있는 주파수-수진기 별 그린 함수와 푸리에 변환된 자료의 켤레복소수를 곱한다. 주파수 마다 역시간 파동장을 모든 수진기에 대해서 더한 후, 재 전파에 대한 진폭의 감쇄를 보상하고 3 성분 변위 자료에 벡터에 대한 발산(divergence)을 취한다. 주파수 마다 구해진 값을 정규화 한 후 자기 상관을 취한다. 필요에 따라서는 먼저 정규화된 값을 모든 주파수에 대해 더한 후에 자기 상관을 계산한다. 마지막으로 최대 진폭 지점을 진원의 위치로 결정하고 다음 실시간 자료에 대해서 2 번 영상화 과정을 반복한다. 위의 내용을 정리하면 아래 그림 5와 같다.

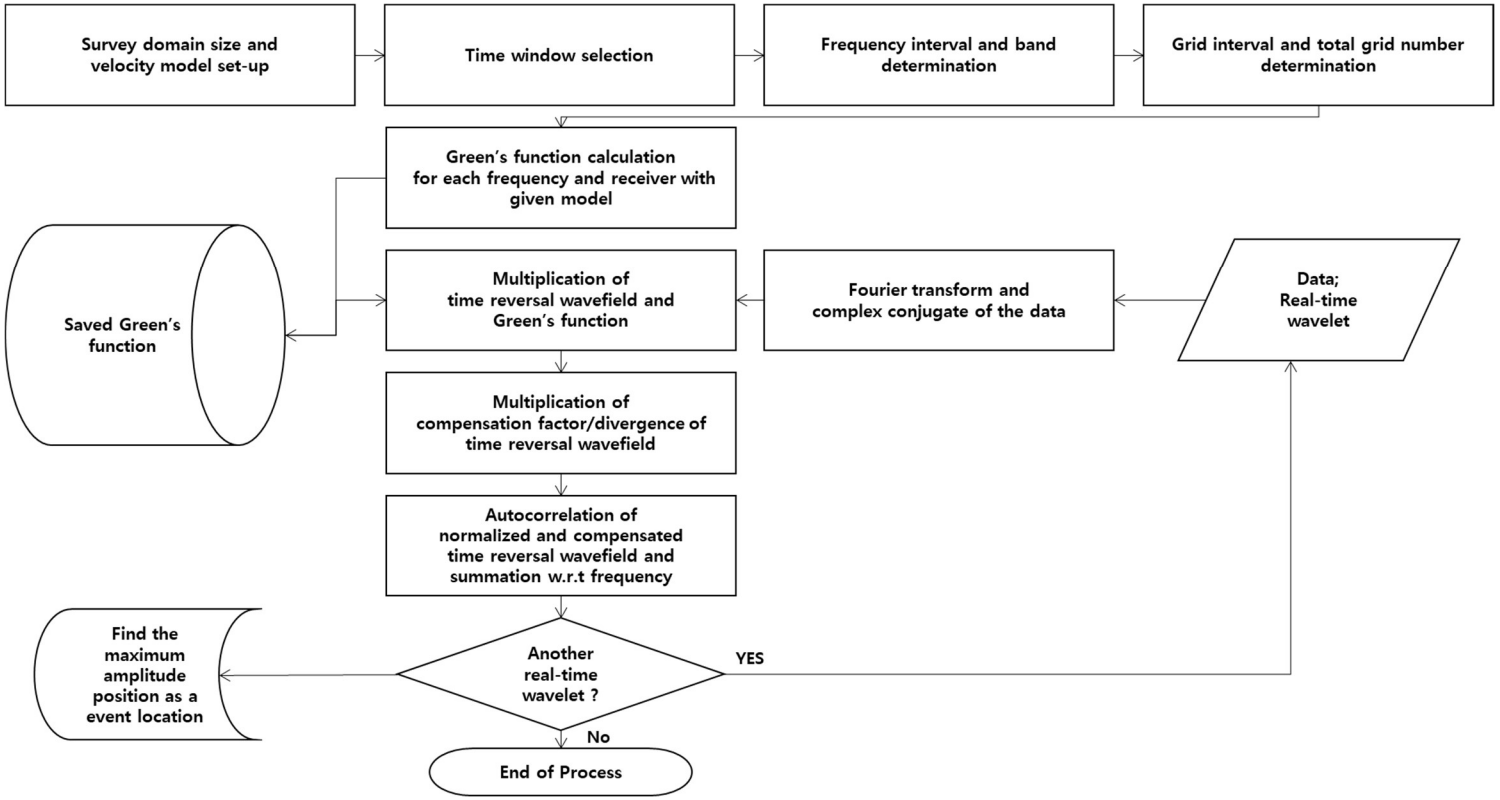


그림 5. 본 연구에서 제안하는 주파수 영역 자기 상관 조건을 이용한 역시간 영상화 작업 순서

3.4 10,000 개 수진기를 사용한 경우

이 절에서는 10,000 개 수진기를 사용하는 이상적인 경우에 대해서 영상화 및 위치 결정을 수행한 결과를 다룬다. 이 경우는 모든 격자에 모두 수진기가 위치하는 경우로, 다음의 테스트들에 대한 기준자료로써 의의가 있다.

그림 6은 10,000 개 수진기와 합성 자료 생성에 사용된 진원을 나타낸 그림이다. 하나 유의할 것은 진원과 수진기 배치도에서 수진기의 배치가 x, y 방향으로 완벽히 대칭은 아니라는 점이다. 이 때문에 영상화 결과에서 추정한 x 방향 위치 결정 결과의 양상과 y 방향 위치 결정 결과의 양상이 다르다. 그림 7은 탄성파 기록 중 근거리 벌림(near offset) 트레이스(trace)만 선별하여 도시한 것이다. P 파 초동은 2 s 부근에 보이고 있으며, S 파 초동은 3 s 부근에서 보이고 있다. 합성 3 성분 자료를 주파수 영역의 자료로 변환하여, 그림 5에 기술된 순서도의 방법으로 역시간 영상화 및 진원 위치 결정을 했다.

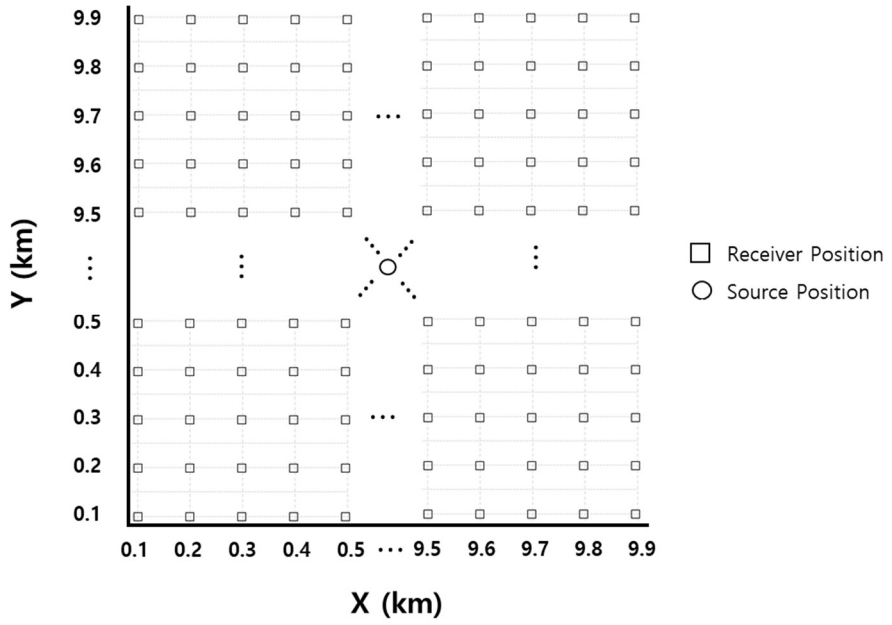
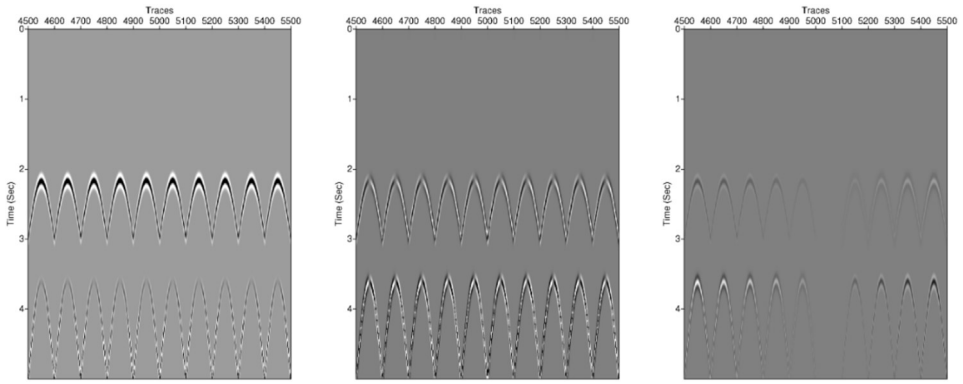


그림 6. 10,000 개 수진기를 이용한 수치 실험에 사용된 진원 (4,900, 4,900, 4,900)과 수진기 배치도



(a) (b) (c)

그림 7. 10,000 개 수진기를 사용한 경우 3 성분 탄성파 기록, (a) z 성분, (b) y 성분, (c) x 성분, 도시 목적으로 근거리 벌림 4,500~5,500 번째 트레이스만 도시함.

3.4.1 자기 상관 조건을 이용한 역시간 영상화 결과

그림 8은 10,000 개 수진기를 사용했을 때 주파수 별 영상화 결과다. 각각의 성분 별 최대 진폭 지점으로 결정된 좌표와 2.3절에서 정의한 오차의 정의에 의해 계산된 정규화된 RMS 오차를 나타낸다. 결과에서 볼 수 있듯이, x, y 성분은 1~14 Hz에서 원래의 진원 위치 x, y 좌표 값 (4,900 m)과 일치하고, z 방향 성분은 4~14 Hz 대역에서 원래의 진원의 심도 방향 z 좌표값 (4,900 m)과 일치한다. 결과적으로 정확한 위치 결정 결과를 제공하는 주파수 대역은 4~14 Hz 대역이다. 이 대역에서는 개별 주파수를 이용하여 정규화된 RMS 오차 1 %로 진원의 위치를 결정할 수 있다.

개별 주파수를 이용한 영상화 결과가 특정 주파수 대역에서 정확한 진원 위치 결정 결과를 제공하는 요인으로 여러 가지가 있을 수 있다. 가장 중요한 것은 진원의 주 주파수 대역이다. 이 수치 실험의 경우 5 Hz가 주 주파수인 0~15 Hz 대역의 리커 요소파를 주었기 때문에, 진폭 스펙트럼 양 끝 단의 주파수가 가지는 에너지가 0으로 수렴한다 (그림 4). 따라서 사용된 주파수 영역 양 끝 단에서는 합성된 파동장 자체가 매우 작기 때문에, 기록된 파동장을 재 전파시켜 계산하는 역시간 영상화의 결과가 0으로 수렴하여 영상화 결과와 위치 결정 결과를 신뢰할 수 없다. 이를 확인하기 위해, 부록 A3 에서 일정한 주파수 대역에 대해서 일정하게 에너지가 유지되 바이브로사이즈에서 흔히 사용되는 훑기 진원(sweep source)를 주어 역시간 영상화를 테스트했다. 이 실험에서 진원 주파수 대역에 따라 역시간 영상화 방법이 정확하게 위치를 결정하는 주파수 대역이 변화하는 것을 확인 할 수 있다. 즉, 진원이 더 넓은 주 주파수 대역을 가질수록, 역시간 영상화에서 단일 주파수 만으로 정확한 위치를 제공하는 범위가 더 넓어진다.

진원의 특성 외에도 수진기 간 간격 및 개수, 수진기 배열의 전체적인 형상과 커버리지, 진원 위치와 수진기 배열과의 상대적인 위치도 신뢰 가능한 위치 결정 결과를 제공하는 주파수 대역을 변화시킨다. 이 중 수진기 개수는 앞에서 언급한 에너지 문제와 결부되어 있다. 진원에서 발생한 에너지를 최대한 많은 수진기에서 받아서 원래의 위치로 재 전파 시켜야

원래 진원의 진폭을 재현할 수 있다. 다음 절에서 수진기의 개수를 줄여가며 테스트하여 이를 확인한다. 추가로 부록 A1에서 수진기 배열의 형상에 의한 효과를 실험했고, 부록 A2에서 수진기 배열과 진원과의 거리의 의한 효과에 대해서 테스트한 결과를 수록했다. 신뢰 가능 주파수 구간의 범위는 수진기 개수가 많아지고 수진기 간 간격이 좁아지고 진원과 수진기 배열의 상대적인 위치가 가까워지면 증가하는 경향을 보인다.

실제 현장 자료를 다루는 경우라면 앞에서 말한 변수들 외에도 P 파와 S 파 속도 구조 및 밀도, 매질의 고유감쇄계수(Q factor), 수진기의 고유 응답 함수와 수진기-땅의 결합 상태 등 수많은 효과가 중첩되어 신뢰도 있는 결과를 주파수 대역을 변화시킬 것이다. 따라서 개별 주파수를 이용한 영상화 및 위치 결정을 할 때 신뢰 가능한 주파수 대역을 결정하는 모든 변수를 고려하는 관계식을 세우려면 문제가 너무 복잡해진다. 대안으로 역시간 영상화의 처리 과정(그림 5)에서 그린 함수를 구하여 저장한 후, 부록 A2에서처럼 탐사 영역을 분할하여 인공적인 훑기 진원을 이용하여 신뢰할 수 있는 주파수 영역 범위를 테스트해보는 것을 고려해볼 수 있다. 또한 역발상으로, 현장 자료에 대한 주파수 별 자기 상관 역시간 영상화를 수행하여 각 성분 별로 결정되는 진원 위치 결과가 일관성이 있는 주파수 대역을 주 주파수 대역으로 추정하고, 다른 진원의 주파수 대역이 유사하다는 가정 하에 진원 위치 결정에 추정된 주파수 대역을 사용하는 것도 하나의 방법이 될 수 있을 것이다.

그림 9는 모든 가용 가능한 0~15 Hz 범위의 주파수에 대해서 역시간 파동장을 합한 후에 자기 상관을 수행한 결과다. 하나 특이사항은 모든 주파수에 대한 파동장을 더함으로써 사용할 수 있는 모든 정보를 사용한 영상화 결과가 심도에 대해서는 600 m 차이가 난다는 점이다. 이것은 정규화된 RMS 오차 7 % 수준으로, 단일 주파수를 이용한 위치 결정 결과(정규화된 RMS 오차 1%)보다 정확도가 떨어진다. 이 이유와 해결방안에 대해서는 다음 절에서 다룬다.

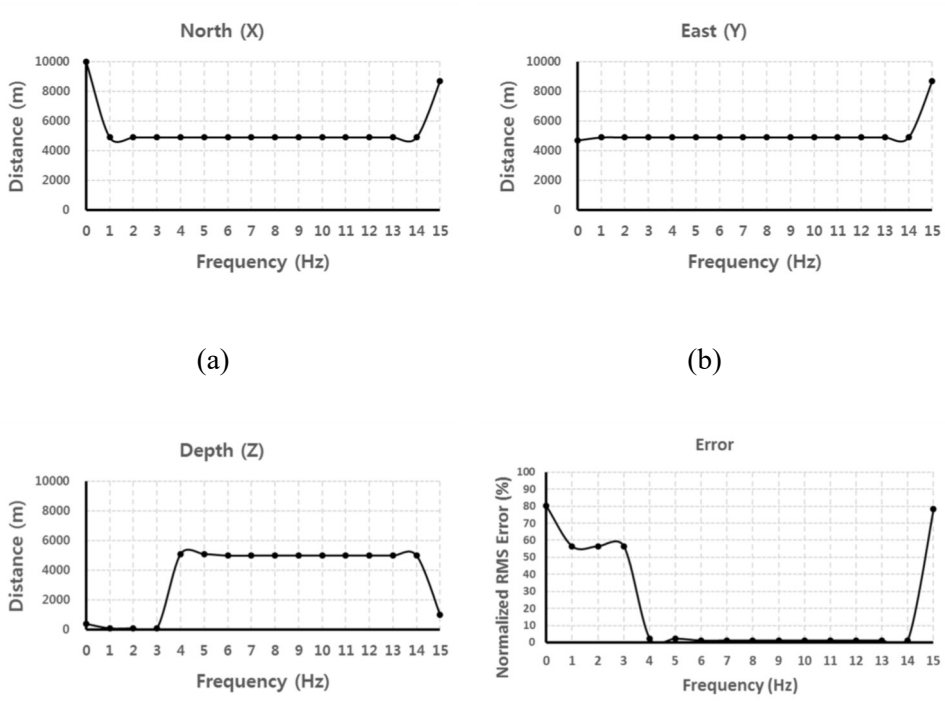


그림 8. 10,000 개 수진기 자료에 대한 주파수에 따른 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900)

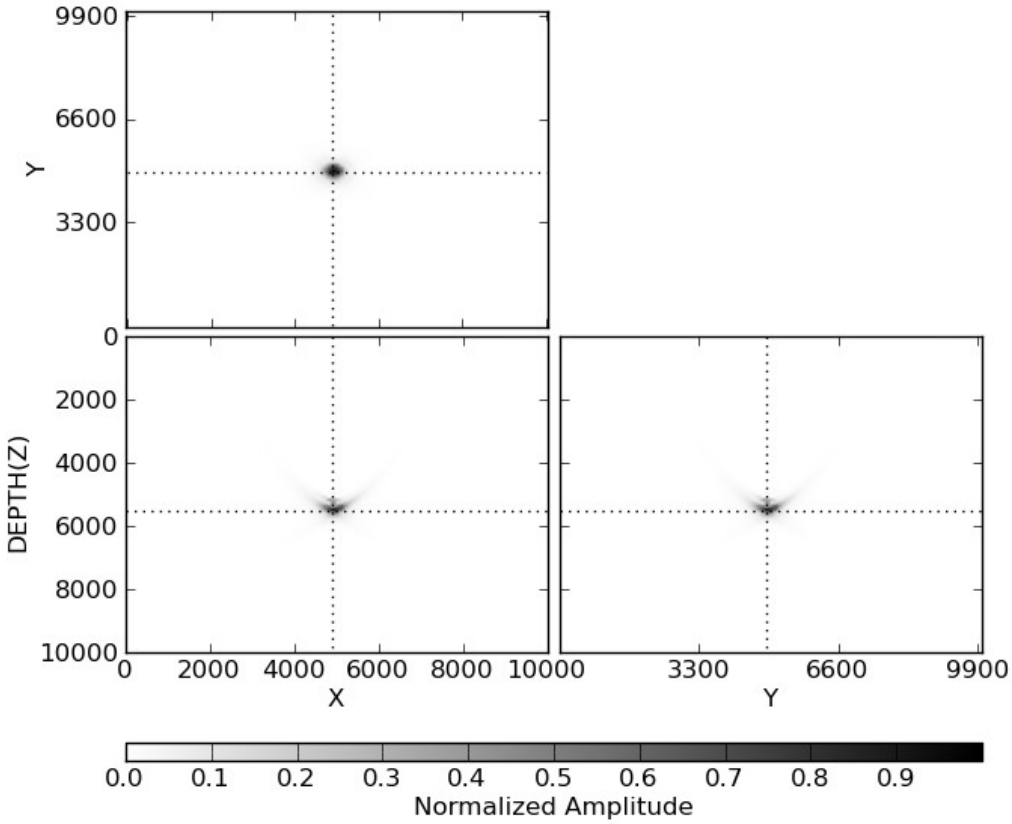


그림 9. 10,000 개 수진기 자료에 대한 모든 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 4,900, 5,500)를 교차하고 있음.

3.4.2 송신 요소파를 이용한 곱풀기

앞 절에서 단일 주파수를 이용한 영상화 결과 및 위치 결정 결과와 모든 주파수를 활용한 결과를 비교했고, 더 많은 정보를 사용한 결과가 오히려 심도 방향으로 600 m 오차가 발생하는 현상을 관찰했다.

이러한 현상이 생기는 이유는 진원 파형이 시작 시간(0 s)에서 진폭이 최대인 영위상 충격형 파형요소(zero-phase impulsive wavelet)가 아니기 때문이다. 그림 3에서 진원으로 사용된 리커 파형요소는 0.25 s 정도에서 최대 진폭을 가진다. 이로 인하여 탄성파 기록 상에서 에너지가 도달하고 최대 진폭이 되기까지 0.25 s 정도의 지연이 생기고, 수진기의 관점에서 진원의 심도는 매질의 P 파 속도인 2,500 m/s를 곱한 600 m 가량이 깊어 보이게 된다. 이러한 진원의 효과를 제거하는 방법의 하나로 진원의 역필터를 설계하여 주파수 영역에서 나누어 주는 곱풀기(deconvolution)가 있다. 이 방법을 적용하기 위해서 식 5을 계산할 때, 주파수 영역에서 각 주파수 별 리커 요소파의 진원 파형 $f_{isrc}(\omega)$을 나누어준다 (식 8).

$$
\begin{aligned}
&I_{\text{proposed method individual frequency}}(X) \\
&\sum_{ircv}^{nrcv} \nabla \cdot \left(G^{*}(X_{ircv}, \omega) D(X_{ircv}, \omega)\right) R(X_{ircv}, \omega) / f_{isrc}(\omega) \\
&\times \left\{ \sum_{ircv}^{nrcv} \nabla \cdot \left(G^{*}(X_{ircv}, \omega) D(X_{ircv}, \omega)\right) R(X_{ircv}, \omega) / f_{isrc}(\omega) \right\}^{*}
\end{aligned}
\tag{8}
$$

그림 10은 주파수 영역 곱풀기를 적용한 후의 10,000 개 수진기 배열에서 얻어진 자료를 이용하여 전체 주파수 영역을 다 활용한 역시간 영상화 결과다. 리커 요소파에 의한 효과가 사라져 심도 방향으로 오차가 단일 수치 격자 수준(100 m)으로 감소했다. 또한 진원 위치 주변의 에너지 밀집도가 그림 9와 비교하여 향상되었음을 알 수 있다.

그런데 곱풀기를 적용한 후에 개별 주파수 별로 영상화 결과를 도시한 그림 11을 보면, 곱풀기를 적용한 경우와 적용하지 않은 경우(그림 8)의 위치 결정 결과가 차이가 없다. 식 8에서 $f_{isrc}(\omega)$ 는 모든 공간과 모든 수진기에 대해서 하나의 복소수 상수로 정의가 되며 자기 상관을 수행하게 되면 개별 주파수 별 결과값에 대해서 하나의 실수로 나누어 주는 형태가 된다. 개별 주파수에 대한 자기 상관 영상화 결과를 최대 값으로 정규화 해서 도시하므로, 곱풀기는 개별 주파수를 이용한 영상화 결과에 영향을 주지 못 한다. 앞으로 자기 상관 영상화 조건 특성 분석에 집중하기 위해 기본적으로 곱풀기를 적용한 후에 결과를 분석한다. 이를 통하여 역시간 영상화 결과에서 리커 요소파 특성에 의해 특정한 오차가 영향을 끼치는 현상을 배제했다.

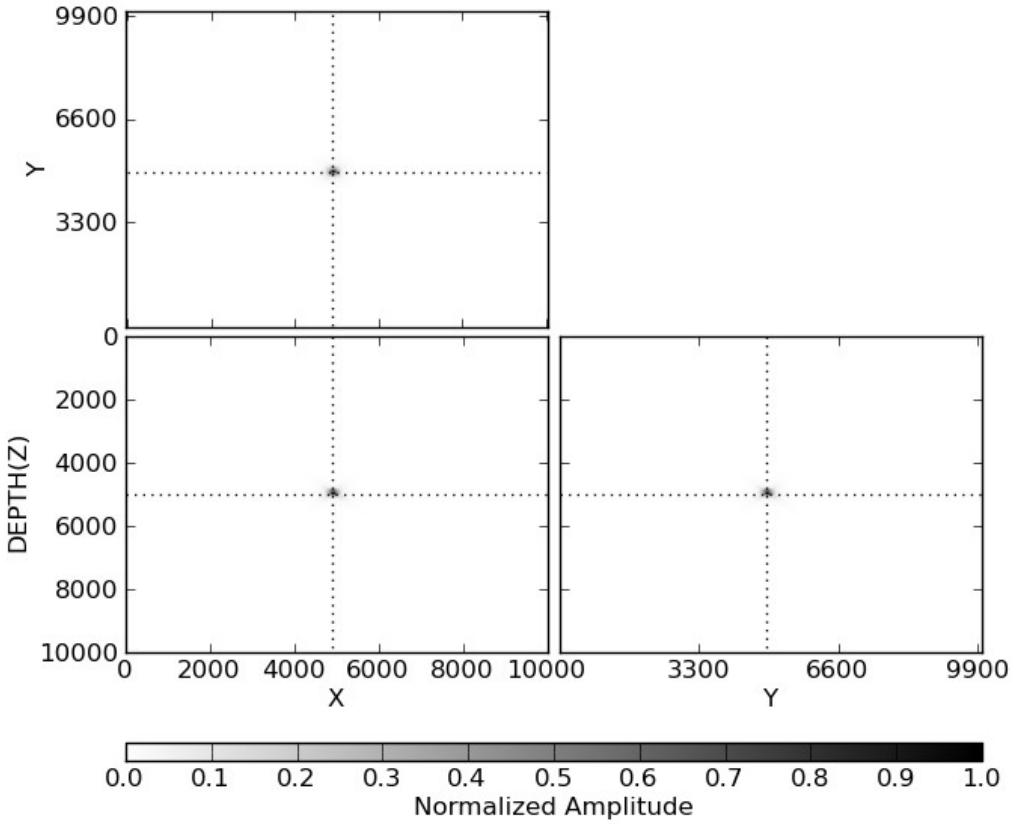


그림 10. 리커 요소파를 이용한 곱풀기를 적용한 후의 10,000 개 수진기 자료에 대한 모든 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 4,900, 5,000)를 교차하고 있음.

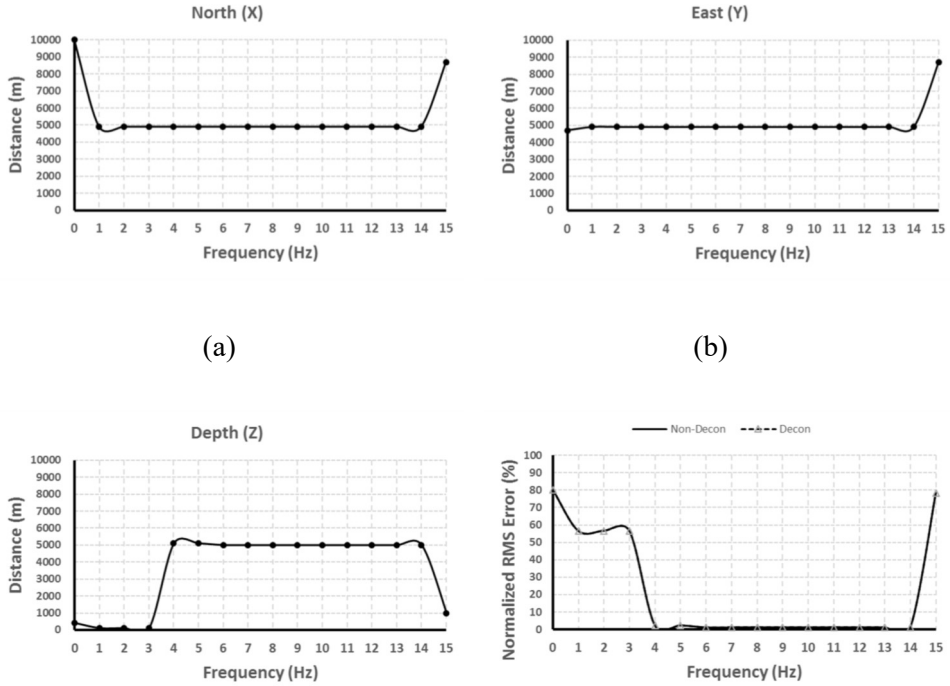


그림 11. 리커 요소파를 이용한 곱풀기 적용 후의 10,000 개 수진기 자료에 대한 주파수에 따른 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900)

3.5 100 개 수진기를 사용한 경우

3.4절에서 다룬 10,000 개 수진기를 이용하는 경우는 대규모의 3 차원 탐사를 가정한 것으로 일반적이지 않다. 따라서 이 절에서는 보다 현실적인 예제로 규칙적으로 배치된 100 개 수진기를 사용한 경우에 대해서 다룬다. 100 개 수진기를 사용하는 것은 일반적인 탐사현장에서 사용하는 수준이다. 지진 자료를 역시간 영상화로 처리한 연구에서도 100 여개 정도의 3 성분 지진계 자료를 사용했다 (Larmat, et al., 2006; Larmat, et al., 2008). 그림 12는 100 개 수진기의 배열과 진원의 위치를 나타낸 그림이다. 그림 13은 100 개 수진기에서 기록된 자료 중 근거리 벌림 트레이스를 도시한 탄성파 기록이다.

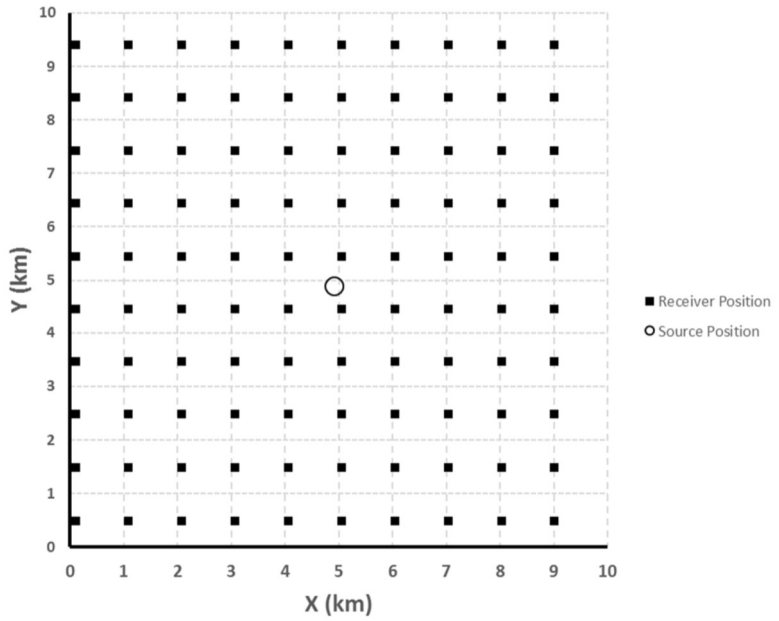
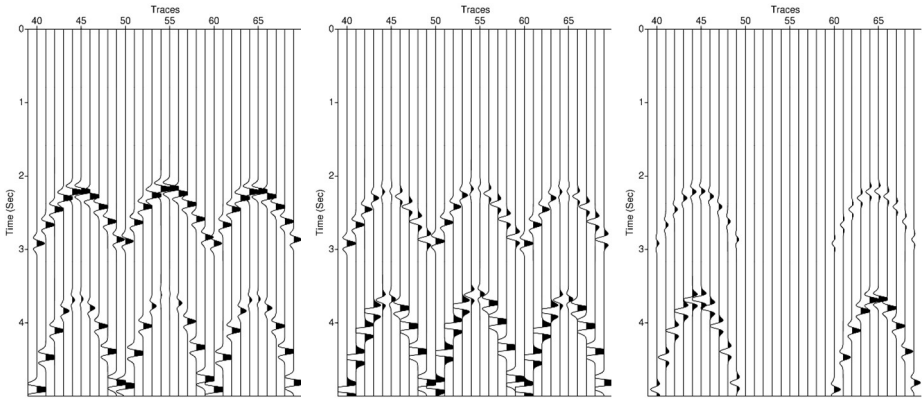


그림 12. 100 개 수진기를 이용한 수치 실험에 사용된 진원 (4,900, 4,900, 4,900)와 수진기 배치도



(a) (b) (c)

그림 13. 100 개 수진기를 사용한 경우 3 성분 탄성파 기록, (a) z 성분, (b) y 성분, (c) x 성분, 도시 목적으로 근거리 벌림 49~59 번째 트레이스만 도시함.

3.5.1 자기 상관 조건을 이용한 역시간 영상화 결과

그림 14는 규칙적으로 배열된 100 개 수진기에서 얻어진 합성 자료를 이용하여 모든 주파수 정보를 사용한 역시간 영상화 결과다. 3.4절에서 10,000 개 수진기를 활용했을 때와 차이가 없이 정규화된 RMS 오차 1 %로 진원의 위치를 맞춘다. 동일한 자료에 대해서 InSite를 이용하여 자동화된 P 파와 S 파 초동 발췌와 격자 탐색을 수행한 결과, P 파 초동 만을 이용한 위치 결정 결과는 14 % 오차를, P 파와 S 파를 이용한 결과는 22 % 오차 수준을 보였다. 자세한 결과는 표 3에 정리되어 있다.

그림 15는 단일 주파수에 대해서 역시간 영상화를 수행한 결과를 보여준다. 주 주파수 대역에서는 모든 주파수를 사용한 경우와 차이 없이 결정된 좌표 (x, y, z)가 정규화된 RMS 오차 1 %로 진원의 위치를 맞추고 있다. 10,000 개 수진기를 활용했을 때와의 차이점은 신뢰도 있는 위치 결정 결과를 제공하는 주파수 대역이 4~14 Hz에서 4~11 Hz로 감소했다는 점이다.

저주파수를 사용한 위치 결정 결과는 변동이 없고 고주파수를 사용한 위치 결정과 달라진 현상을 분석하기 위해서 단일 주파수를 사용한 4 Hz와 11 Hz 영상화 결과를 그려보았다 (그림 16, 그림 17). 비교를 위하여 대조군으로 10,000 개 수진기를 사용했을 때의 결과와 함께 도시했다.

우선 저주파수 쪽(4 Hz)을 사용한 역시간 영상화 결과(그림 16a)와 고주파수 쪽(11 Hz)을 사용한 역시간 영상화 결과(그림 17a)를 비교했다. 공간적으로 에너지가 집중되어 있는 양상이 주파수의 높고 낮음에 의존하여 변하는 것이 관찰된다. 그 다음으로 단일 주파수를 이용한 두 결과를 모든 주파수 대역을 사용한 그림 14의 영상화 결과와 비교해보면, 주파수 영역 신호 처리 시 원 파형 요소를 구현하는데 필요한 주파수 성분이 부족할 때 생기는 곁가지(side-lobe)가 보인다. 곁가지는 저주파수를 사용할 때는 동일한 속도일 때 고주파수 파형에 비해 공간적인 파장이 큰 저주파수 파형의 특성상 많이 나타나지 않는다. 하지만 똑 같은 이유로 고주파수를 사용한 결과에서는 천부에 곁가지가 상당히 많이 나타난다. 이 연구는

지표에 배치된 수진기에서 진원 에너지를 재 전파시키고 있다. 따라서 역시간 영상화 관점에서는 수진기는 새로운 진원이 되며, 새로운 진원 근처의 진폭이 전파에 대한 감쇄가 덜 되어 크다. 그래서 재 전파에 대한 보상을 했음에도 불구하고, 영상화 결과에서도 볼 수 있듯이 천부의 곁가지가 진폭이 크게 나타나게 된다. 이러한 천부 곁가지는 진원으로 오인될 수 있다.

그림 18은 역시간 영상화를 통한 위치 결정이 실패한 단일 주파수 14 Hz를 사용하는 결과다. 이 결과에서 전체의 영역에서 최대 진폭 값은 천부 (500, 4,800, 1,400) 지점이며, 점선은 원래 진원 에너지가 모여 있어야 하는 부근 (5,000, 5,000, 5,000)을 교차해서 지나고 있다. 그림 18a 그림에서 진원 부근의 에너지가 아예 존재하지 않는 것처럼 보이나, 확대한 그림 그림 18b에서 미약하지만 진원 부근의 에너지가 모여있다. 따라서 고주파수를 사용할 때 제대로 위치 결정이 안 되는 현상이 영상화 방법이나 진원 에너지 문제는 아니라는 것을 알 수 있다. 영상화 방법이나 진원 에너지 자체가 부족했다면, 진원 근처에 에너지가 아예 모이지 않았을 것이다. 따라서 이것은 수진기 쪽의 문제이다. 주파수 성분이 부족한 경우 곁가지가 역시간 영상화 방식과 지표 수진기 배열 특성상 천부에 강한 진폭을 가지고 나타나게 된다. 수진기 개수가 많아지면 곁가지가 상쇄되어 진원 부근의 진폭이 상대적으로 가장 크게 된다 (그림 16b, 그림 17b). 하지만 수진기의 개수가 적어지면 곁가지의 강한 이상 진폭이 상쇄되어 사라지지 않는다. 고주파수를 사용한 경우에는 저주파수를 사용한 경우보다 곁가지가 더 많이 생기기 때문에 위치 결정 정확도가 상대적으로 빠르게 감소하게 된다.

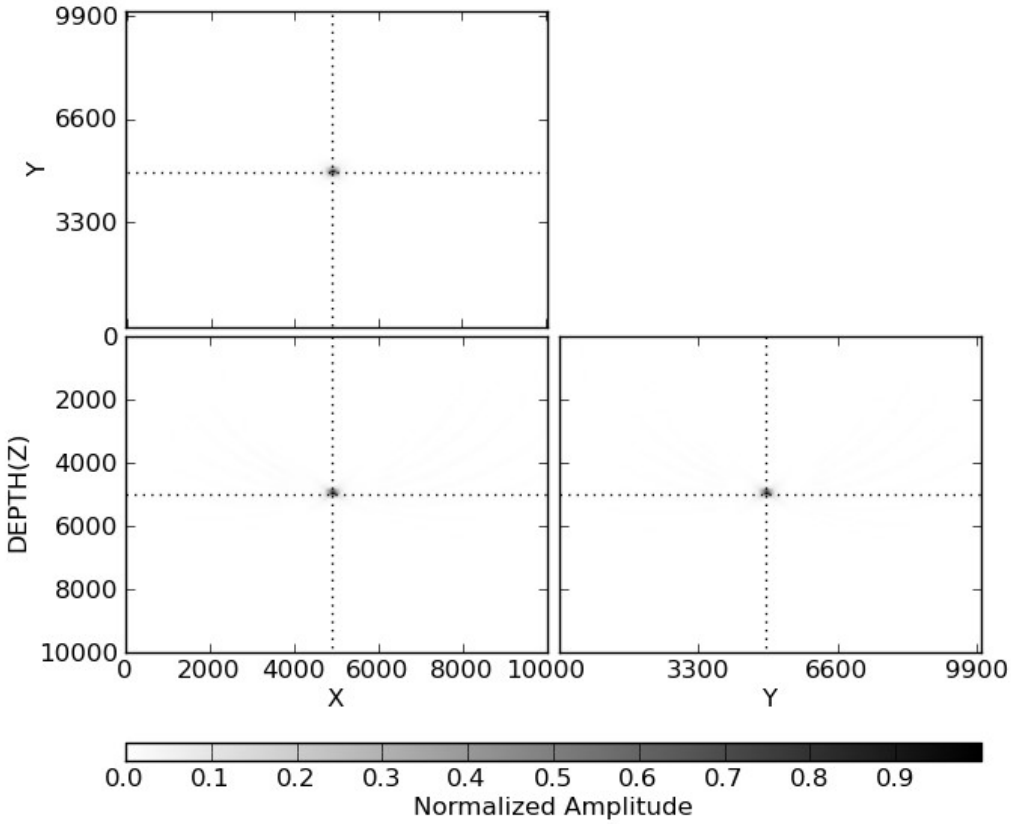


그림 14. 100 개 수진기 자료에 대한 모든 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 4,900, 5,000)를 교차하고 있음.

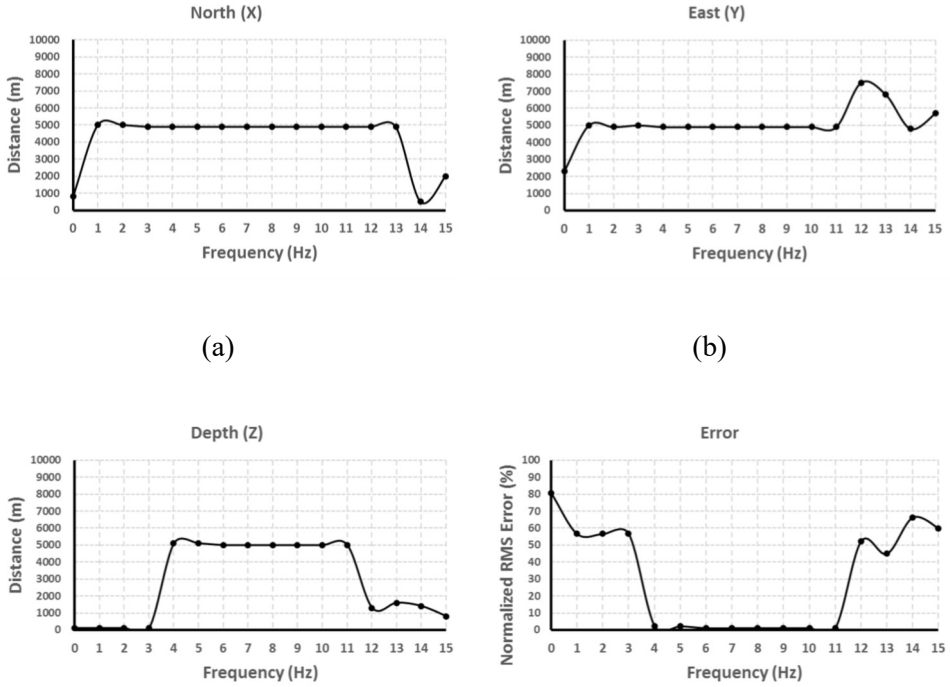
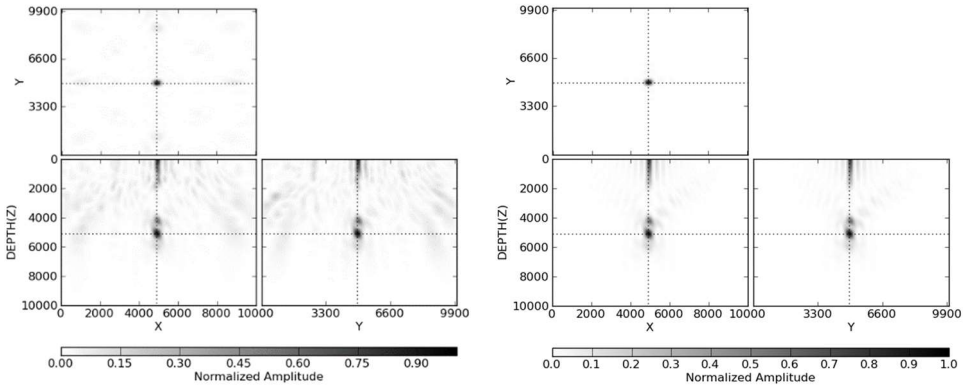
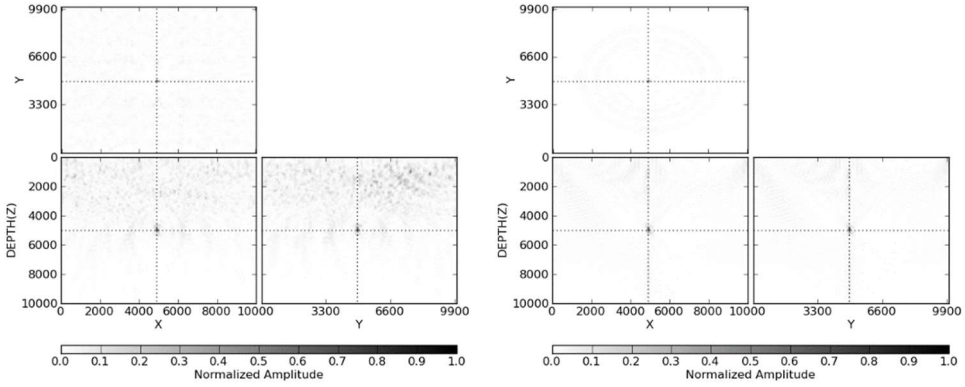


그림 15. 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900)



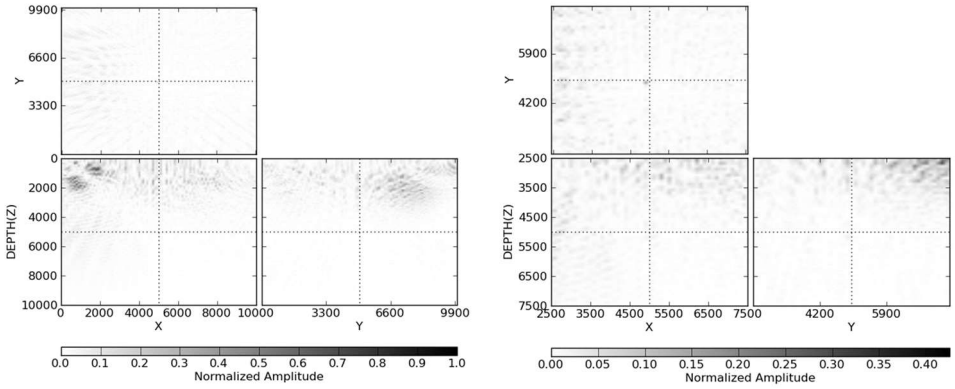
(a) (b)

그림 16. (a) 100 개 수진기 자료에 대한 4 Hz 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, (b) 대조군인 10,000 개 수진기 자료에 대한 4 Hz 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 4,900, 5,000)를 교차하고 있음.



(a) (b)

그림 17. (a) 100 개 수진기 자료에 대한 11 Hz 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, (b) 대조군인 10,000 개 수진기 자료에 대한 11 Hz 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 4,900, 5,000)를 교차하고 있음.



(a) (b)

그림 18. (a) 100 개 수진기 자료에 대한 14 Hz 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, (b) (a) 그림을 확대한 결과, 점선은 이미지의 중앙 (5,000, 5,000, 5,000)를 교차하고 있음.

3.5.2 제안된 방법의 잡음에 대한 견고성

역시간 영상화는 흩어진 진원의 에너지를 모으기 때문에 잡음에 강하다고 알려져 있다 (Gajewski & Tessmer, 2005). 이러한 특성은 기존의 P 파 S 파를 초동 발췌를 이용한 진원 위치 결정 방식이 전기 충격에 의한 잡음, 네트워크 끊김에 의한 자료 끊김 현상, 지진계 주변 펌프 운영 진동 등 여러 가지 종류의 잡음에 취약한 특징이 있는 것이 비해서 큰 장점이다. 여기서는 주파수 영역 자기 상관 조건을 이용한 역시간 영상화 방식이 기존의 역시간 영상화 방식들과 마찬가지로, 잡음이 심하거나 신호 자체가 작아서 배경 잡음과 유사한 수준의 신호여도 처리할 수 있는지 합성 자료 테스트를 통해 확인한다.

잡음이 있는 환경을 모사하기 위해 정규 분포(Gaussian distribution)를 따르는 무작위 잡음(random noise)을 생성하여 잡음이 없는 트레이스에 추가하여 사용했다. 잡음 생성을 위해 공개된 탄성파 자료처리 소프트웨어인 Seismic Unix의 sunoise 프로그램을 사용했다. sunoise에서 정의하는 신호 대 잡음비(S/N ratio; Signal to Noise ratio)별 무작위 잡음 수준을 계산하는 방식은 아래 식 9과 같다.

Signal to noise ratio :

$$\begin{aligned} \text{Output signal} &= \text{signal} + \text{scale} \times \text{noise} \\ \text{scale} &= \left(\frac{1}{\text{S/N}}\right) \times \left(\frac{\max|\text{amplitude of signal}|}{\sqrt{2}\sqrt{\text{energy per sample}}}\right) \end{aligned} \tag{9}$$

역시간 영상화 결과와 비교하기 위해 영국의 IMaGe사의 InSite를 이용하여 잡음이 섞여 있는 자료들을 읽어서 자동화된 초동 발췌 및 격자 탐색법을 활용하여 진원을 결정했다 (사용한 변수는 표 2 참조). 그림 19는 잡음 수준에 따른 동일한 트레이스의 변화를 도시한 것이다. 자동화된 초동 발췌를 수행한 결과도 도시되어 있다. 신호 대 잡음비가 4보다 낮아지면서 잡음 수준 때문에 초동 발췌 자체가 실패하는 것을 볼 수 있다. 충분한 초동 발췌 값이 확보 되야 신뢰도 있는 위치 결정이 가능한 격자 탐색법의 특성상 초동 발췌가 실패하면 위치 결정 자체를 수행할 수 없다.

초동 발췌를 이용하는 위치 결정 방식과 대조적으로 주파수 영역에서 자기 상관을 통한 역시간 영상 기법은 단일 주파수만 사용해도 신호 대 잡음비가 2인 경우까지도 진원의 위치를 정확하게 결정할 수 있다. 그림 20부터 그림 23까지는 신호 대 잡음비가 2인 자료를 이용하여 역시간 영상화를 수행한 결과다. 그림 20은 각 개별 주파수를 이용한 위치 결정 결과 정확도를 나타내고, 그림 21은 전체 주파수를 모두 사용한 영상화 및 위치 결정 결과다. 그림 22와 그림 23은 각각 그림 20에서 신뢰도 있는 위치 결정 결과를 주는 주파수 대역의 하한과 상한인 3, 7 Hz를 이용한 영상화 결과다. 잡음이 포함되면서 잡음이 없는 경우와 비교할 때 위치 결정 값을 신뢰할 수 있는 주파수 대역이 4~11 Hz에서 3~7 Hz로 줄어들었지만, 이 구간의 단일 주파수와 모든 주파수를 이용한 결과는 정규화된 RMS 오차 1~2 %로 진원 위치를 맞춘다.

그러나 신호 대 잡음비가 1로 신호와 잡음이 서로 분간이 안 되는 수준인 경우, 단일 주파수를 활용한 영상화 결과는 진원을 정확하게 맞추지 못 한다. 그림 24부터 그림 27까지는 신호 대 잡음비가 1인 경우의 자료를 이용하여 주파수 영역의 자기 상관 조건을 사용한 역시간 영상화 결과다. 그림 24에 도시된 주파수에 따른 위치 결정 결과에서 최대 진폭 위치가 주파수에 따라 불규칙하게 변해 위치 결정 결과를 신뢰할 수 없음을 알 수 있다. 하지만 이 경우에도 모든 주파수 정보를 다 활용한 결과는 진원의 위치를 정규화된 RMS 오차 1 %로 결정한다 (그림 25).

그림 26과 그림 27은 신호 대 잡음비가 2였던 경우 정규화된 RMS 오차 1 %로 위치를 결정하였으나, 잡음 수준이 높아지면서 위치 결정 값이 틀리게 된 경우인 단일 주파수 3 Hz와 7 Hz를 이용하여 영상화한 결과다. 두 경우 모두 상대적으로 주변보다 강한 진폭을 가지는 수많은 이상점(artifact)이 관찰된다. 이상점은 작은 공간적인 범위를 가지며 주파수의 높고 낮음에 상관없이 천부에 조밀하게 분포한다 (그림 26a, 그림 27a).

그런데 이 경우에도 진원 위치에서의 미약하게 에너지의 집중이 일어나고 있다 (그림 26b, 그림 27b). 무작위 잡음은 통계적으로 샘플의

개수가 많아지면 서로 상쇄되어 평균적으로 0으로 수렴하는 특성을 가지고 있다. 주파수에 대해서 더하는 과정이나 수진기에 대한 영상화 결과가 더해지는 과정에서 잡음은 상쇄되고 진원의 에너지는 상대적으로 커지게 된다. 따라서 역시간 영상화 자체는 되고 있지만 수진기의 개수의 부족으로 진원의 진폭이 천부의 잡음에 의한 이상점의 진폭보다 큰 값이 아니기 때문에 위치 결정이 실패하는 것으로 해석할 수 있다.

그림 28은 신호 대 잡음비 수준을 1~40으로 변화시키며 개별 주파수 별 위치 결정 결과의 정규화된 RMS 오차를 도시한 것이다. 잡음 수준 별 결정된 위치와 각 잡음 수준 별 정규화된 RMS 오차는 부록 A4를 참고하기 바란다. 지금까지 분석된 바와 같이 무작위 잡음의 수준이 증가할수록 신뢰도 있는 위치 결정 결과를 제공하는 구간이 줄어든다. 신뢰할 수 있는 주파수 대역이 노이즈가 없는 경우의 4~11 Hz에서 신호 대 잡음비가 2일 경우 3~7 Hz로 줄어든다. 특히 고주파수 상한이 잡음이 증가할수록 빠르게 줄어든다. 동일한 속도에서 상대적으로 큰 공간적인 파장을 가져, 곁가지나 이상점이 주는 영향이 적은 저주파수를 사용한 영상화 결과는 고주파수를 사용한 영상화의 결과에 비해서 정확도 변화가 심하지 않다.

표 3은 모든 주파수를 사용한 영상화 결과를 자동화된 P 파와 S 파를 이용해서 위치를 결정한 결과와 정규화된 RMS 오차를 비교한 표다. 그림 29는 표의 경향성을 보기 쉽게 그래프로 나타냈다. 자동화된 P 파와 S 파 초동 발췌를 이용한 진원 위치 결정 방법은 잡음 수준이 강해져 신호 대 잡음비가 1~2일 때 초동 발췌가 안 되고 위치 결정을 실패한다. 초동 발췌가 되는 경우에도 발췌값이 부정확하면 심도에 대해서 잘 못 된 결과를 도출했다 (신호 대 잡음비가 4일 때 P 파 초동 만을 이용한 위치 결정 결과의 경우).

이와 대조적으로 본 연구에서 제안한 방법이 도출하는 결과는 모든 주파수를 이용하여 역시간 영상화를 수행하고 진원 위치를 결정할 경우, 신호 대 잡음비가 1인 경우에도 정규화된 RMS 오차 1 %로 위치를 결정할 수 있었다. 지금까지의 결과는 수진기의 개수가 많은 경우 주파수 영역 자기

상관 조건을 사용한 역시간 영상화가 초동 발췌 및 격자 탐색법이 처리할 수 없는 상대적으로 작은 진원에 대해서 보다 정확하게 처리할 수 있음을 시사한다.

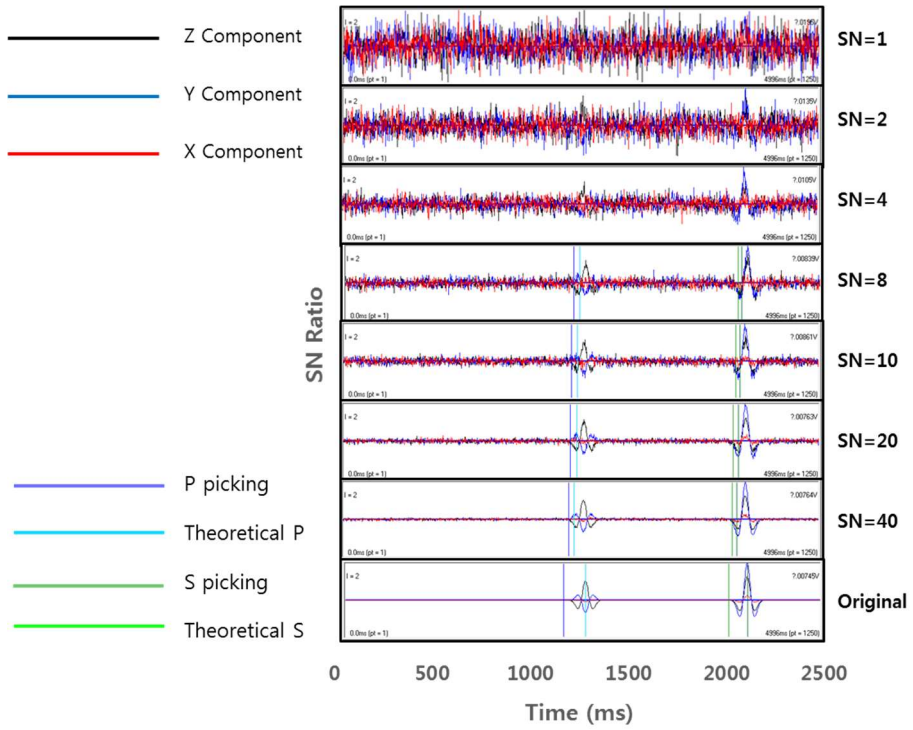


그림 19. 신호 대 잡음비 수준에 따른 트레이스와 InSite를 이용한 초동 발췌 결과 예시

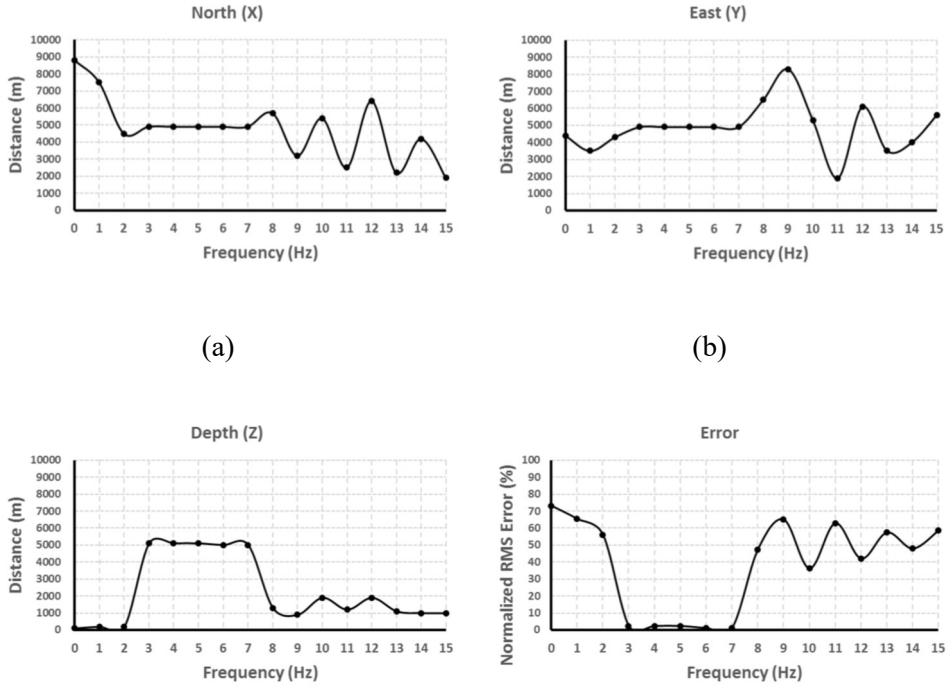


그림 20. 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900) (신호 대 잡음비가 2인 경우)

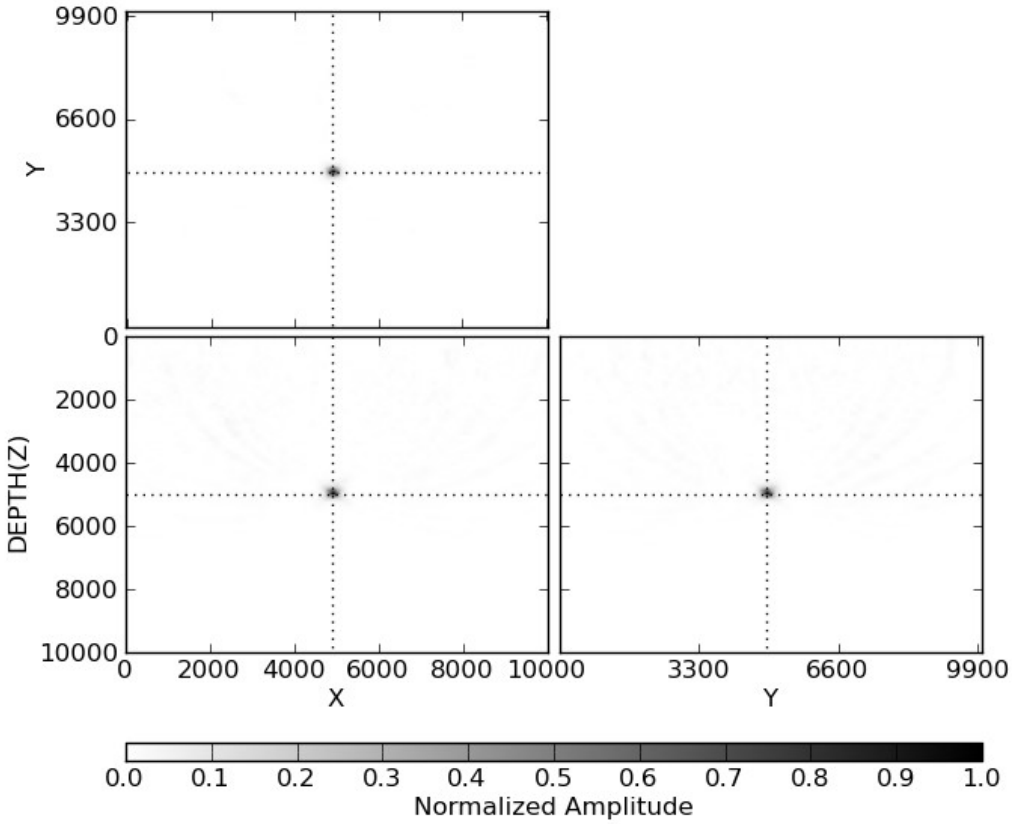


그림 21. 100 개 수진기 자료에 대한 모든 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 4,900, 5,000)를 교차하고 있음. (신호 대 잡음비가 2인 경우)

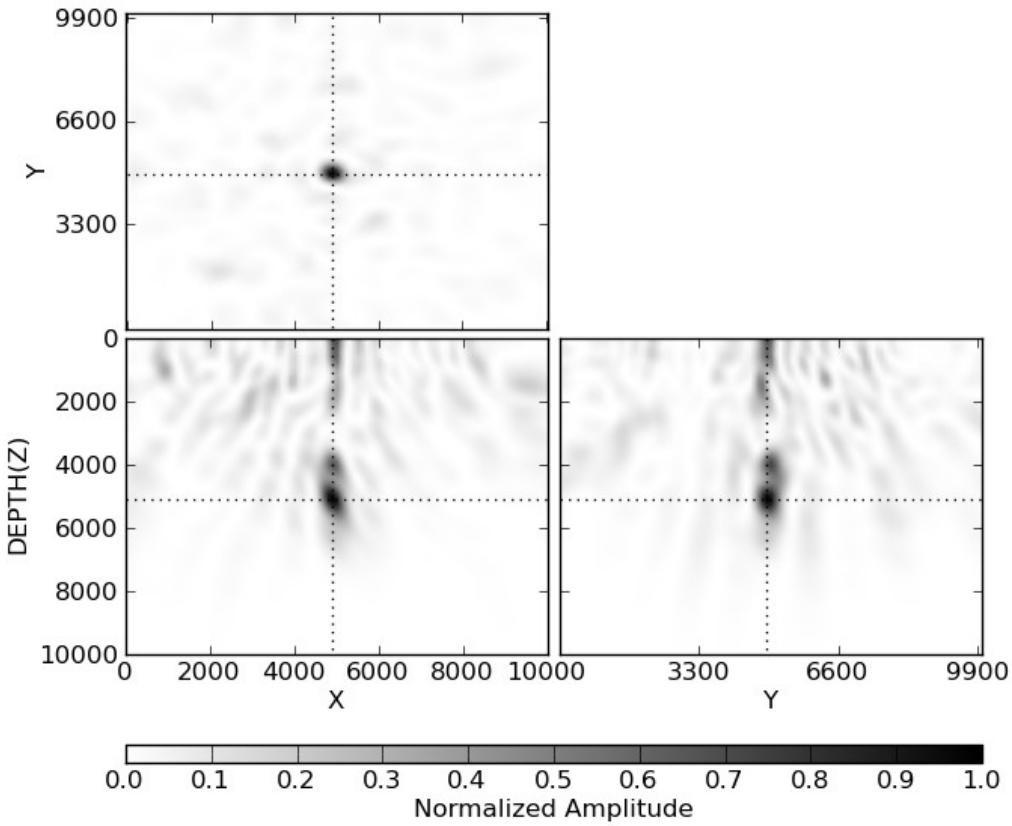


그림 22. 100 개 수진기 자료에 대한 3 Hz 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 4,900, 5,100)를 교차하고 있음. (신호 대 잡음비가 2인 경우)

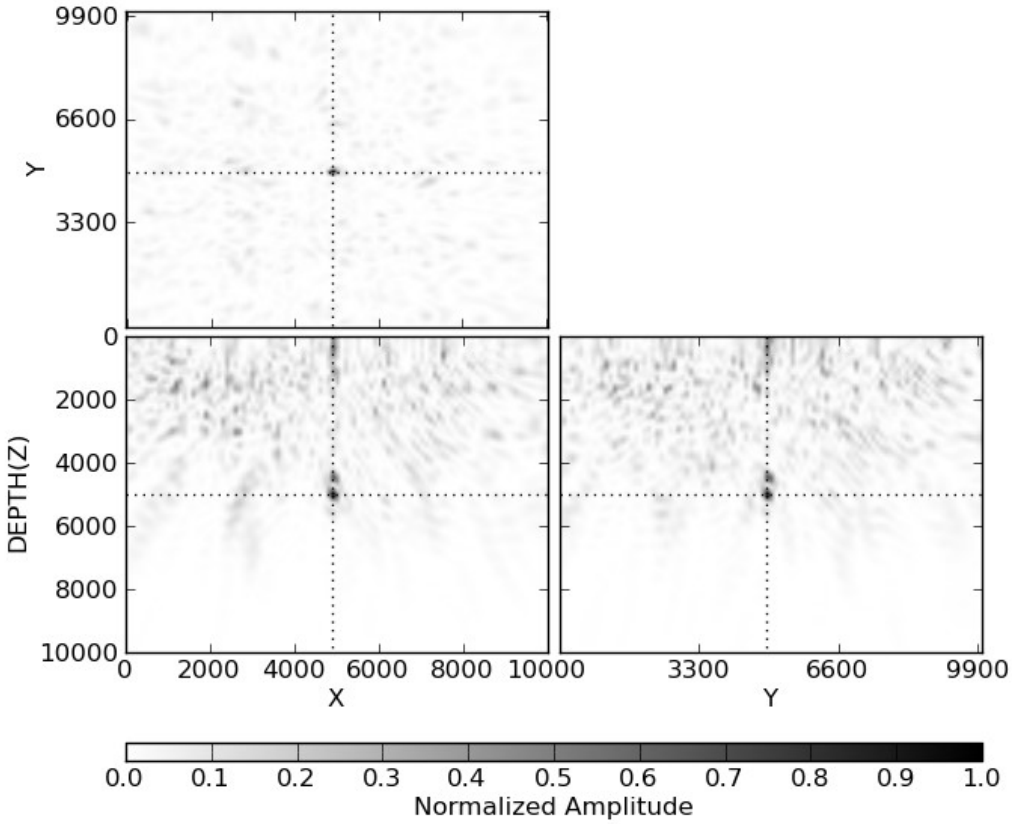


그림 23. 100 개 수진기 자료에 대한 7 Hz 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 4,900, 5,100)를 교차하고 있음. (신호 대 잡음비가 2인 경우)

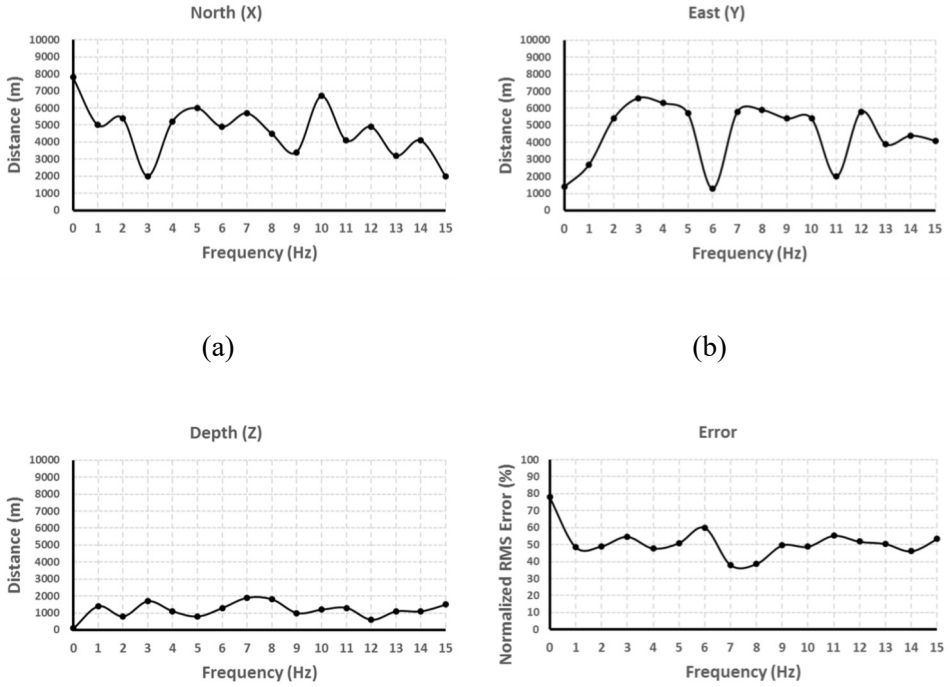


그림 24. 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900) (신호 대 잡음비가 1인 경우)

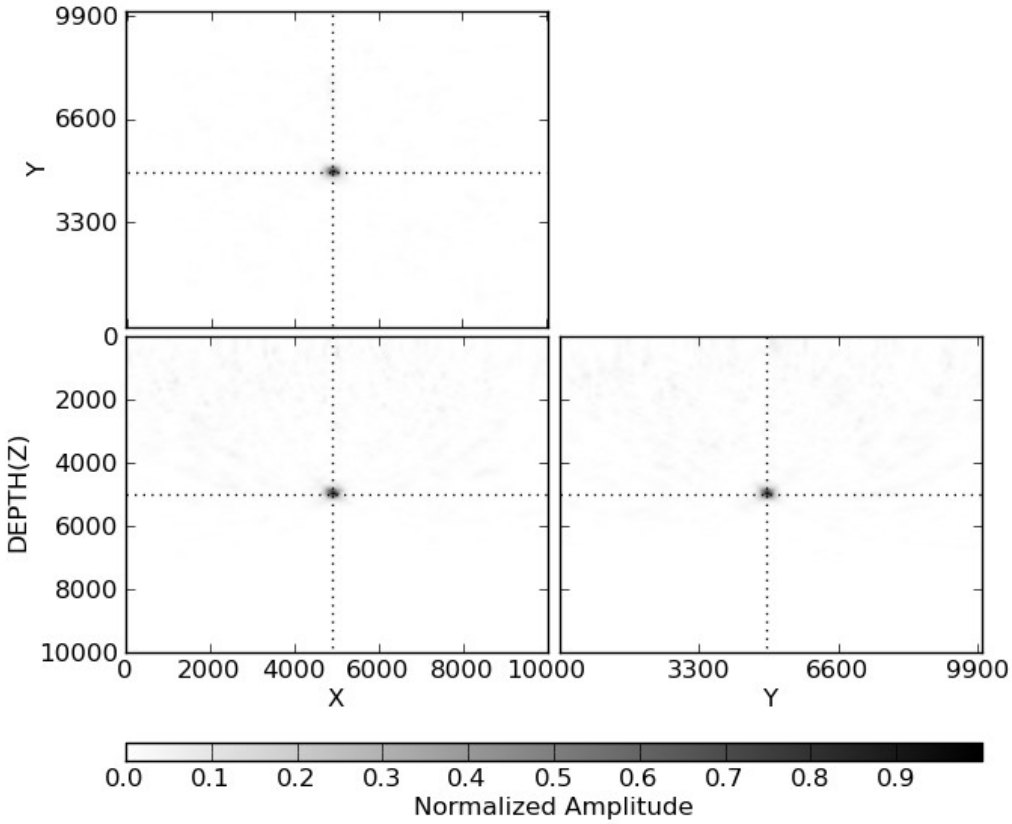
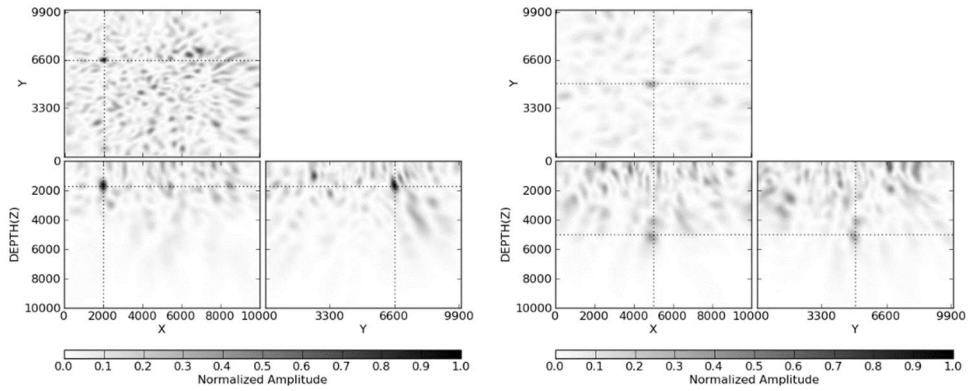
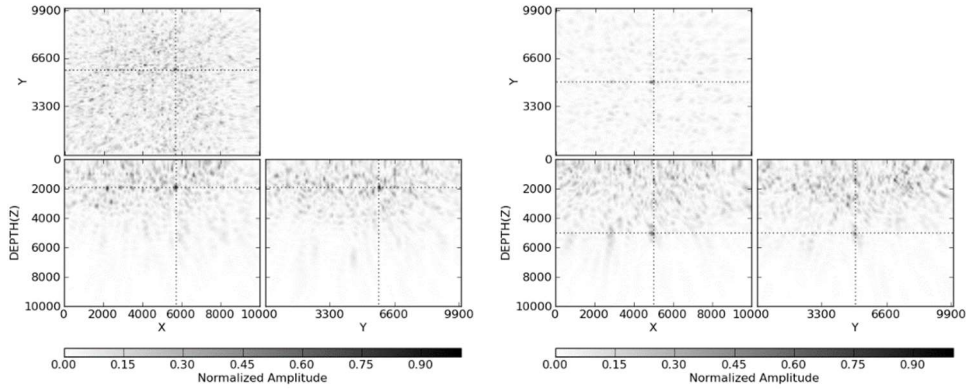


그림 25. 100 개 수진기 자료에 대한 7 Hz 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 4,900, 5,000)를 교차하고 있음. (신호 대 잡음비가 1인 경우)



(a) (b)

그림 26. (a) 100 개 수진기 자료에 대한 3 Hz 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (2,000, 6,600, 1,700)를 교차하고 있음. (b) (a) 그림에서 점선의 교차점이 이미지의 중점 (5,000, 5,000, 5,000)인 경우 (신호 대 잡음비가 1인 경우)



(a) (b)

그림 27. (a) 100 개 수진기 자료에 대한 7 Hz 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (2,000, 6,600, 1,700)를 교차하고 있음. (b) (a) 그림에서 점선의 교차점이 이미지의 중점 (5,000, 5,000, 5,000)인 경우 (신호 대 잡음비가 1인 경우)

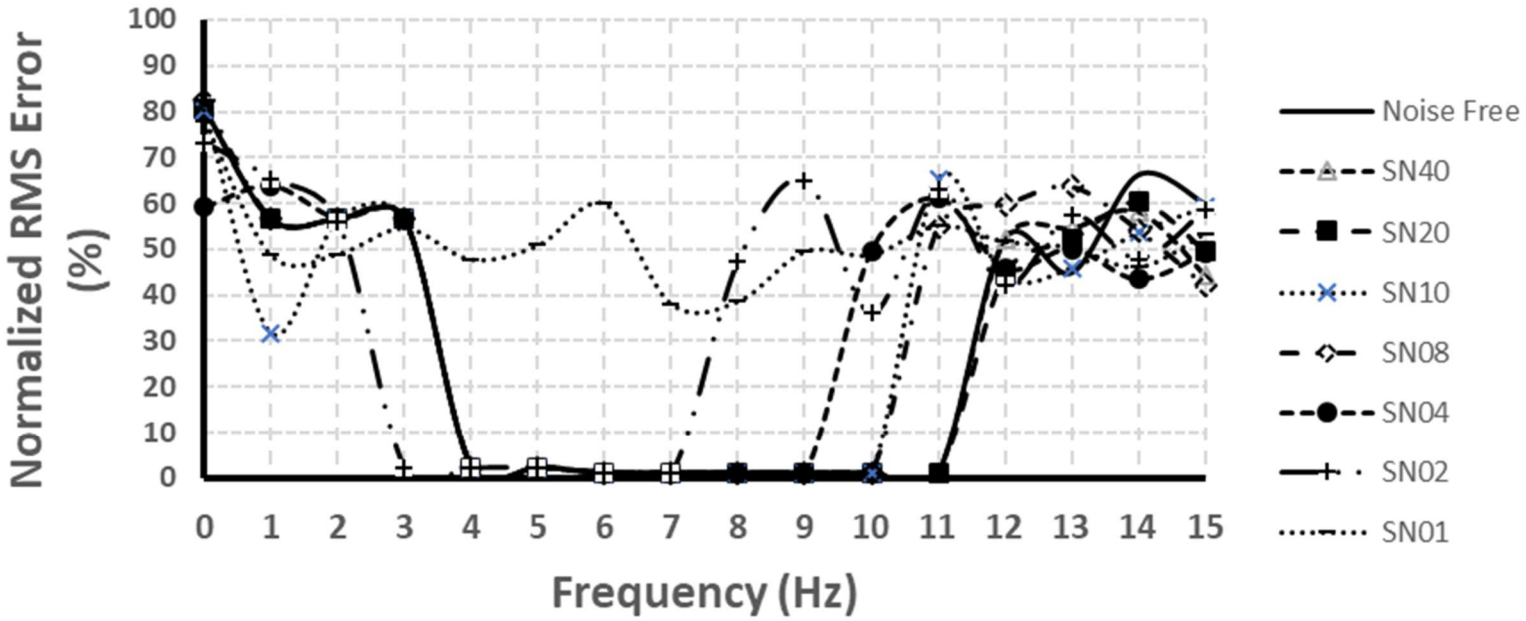


그림 28. 잡음 수준 별 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화 위치 결정 결과 정확도 비교

표 3. 잡음 수준에 따른 100 개 수진기 자료에 대한 역시간 영상화 위치 결정 결과와 자동화된 초동 발췌를 이용한 위치 결정 결과 정리 표, 역시간 영상화의 경우 모든 주파수를 다 사용하였음.

P wave	North (x) (m)	East (y) (m)	Depth (z) (m)	Error (%)
Noise Free	4,332	4,920	5,960	14
SN40	5,048	5,048	4,848	3
SN20	5,032	5,080	4,888	3
SN10	5,048	5,032	4,896	2
SN08	5,048	5,080	5,104	4
SN04	5,080	5,048	704	50
SN02				100
SN01				100

P and S arrivals	North (x) (m)	East (y) (m)	Depth (z) (m)	Error (%)
Noise Free	4,452	5,268	3,096	22
SN40	5,048	5,048	5,048	3
SN20	5,048	5,064	5,048	3
SN10	5,048	5,048	5,048	3
SN08	5,048	5,048	5,072	3
SN04				100
SN02				100
SN01				100

Proposed Method	North (x) (m)	East (y) (m)	Depth (z) (m)	Error (%)
Noise Free	4,900	4,900	5,000	1
SN40	4,900	4,900	5,000	1
SN20	4,900	4,900	5,000	1
SN10	4,900	4,900	5,000	1
SN08	4,900	4,900	5,000	1
SN04	4,900	4,900	5,000	1
SN02	4,900	4,900	5,000	1
SN01	4,900	4,900	5,000	1

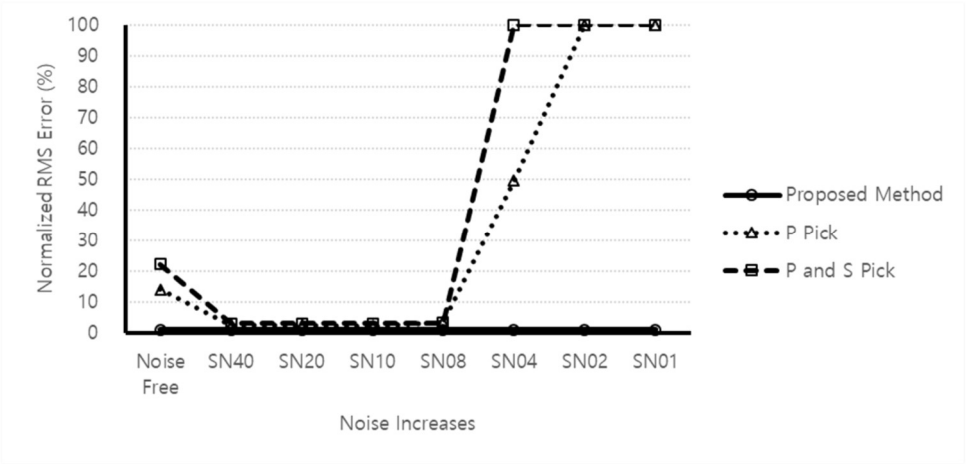


그림 29. 잡음 수준에 따른 100 개 수진기 자료에 대한 역시간 영상화 위치 결정 결과와 자동화된 초동 발췌를 이용한 위치 결정 결과 정리 그래프, 역시간 영상화의 경우 모든 주파수를 다 사용하였음.

3.6 10 개 수진기를 사용한 경우

실제 모니터링 망 구축 시 지형과 기반 시설의 여부, 문화사회적인 요인으로 많은 수의 수진기를 규칙적으로 배치하기 어려운 경우가 많다. 이런 경우 수진기 설치가 용이한 지역에 우선적으로 설치하게 되며 충분한 수진기 개수도 확보하기 어렵고 수진기 배치도 불규칙적이게 된다. 이번 절에서는 소규모의 국지 모니터링 망을 모사한 10 개 수진기를 무작위로 배치 시킨 경우에 대해 본 연구에서 제안하는 자기 상관을 이용한 영상화 방식을 테스트했다. 그림 30은 10 개 수진기와 진원 배치도를 보여주며, 그림 31 은 10 개 수진기에서 기록된 합성 탄성파 기록을 보여준다.

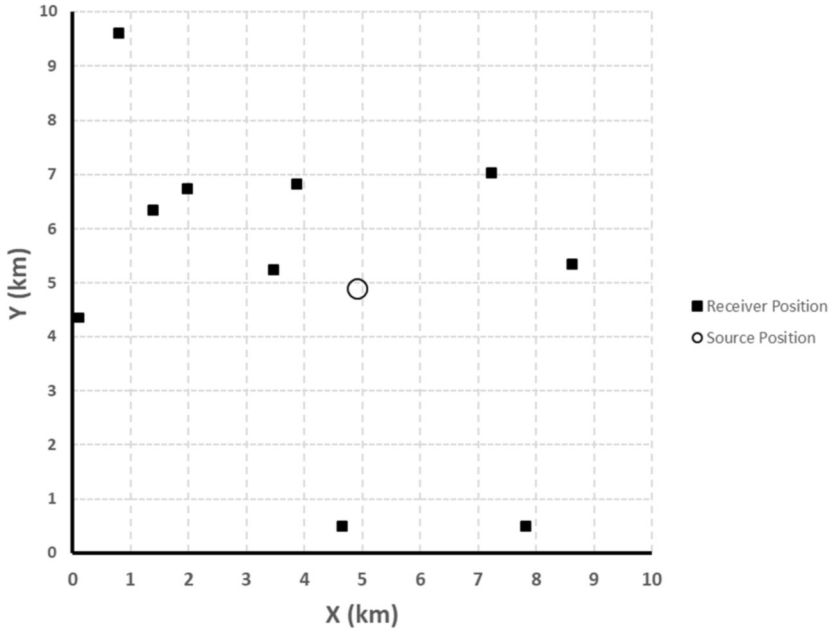
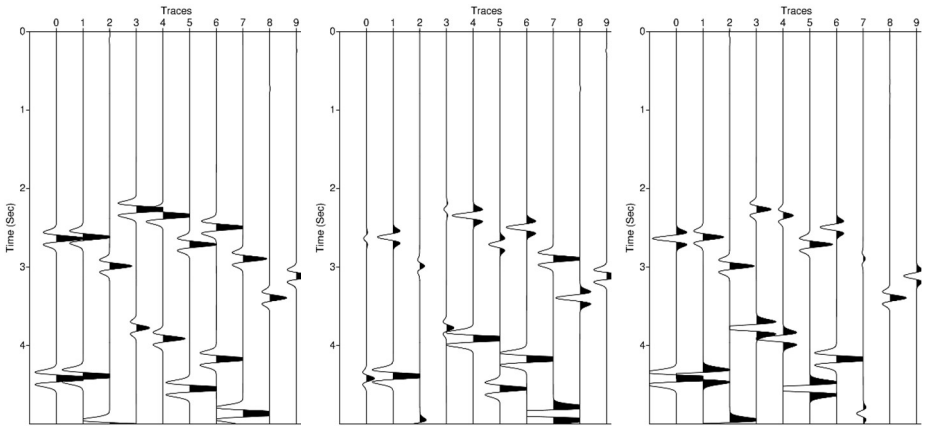


그림 30. 무작위 배치된 10 개 수진기를 이용한 수치 실험에 사용된 진원 (4,900, 4,900, 4,900)와 수진기 배치도



(a) (b) (c)

그림 31. 무작위로 배치된 10 개 수진기를 사용한 경우 3 성분 탄성파 기록, (a) z 성분, (b) y 성분, (c) x 성분

3.6.1 **자기 상관 조건을 이용한 역시간 영상화 결과**

역시간 영상화 결과 10 개 수진기를 사용한 경우 잡음이 없는 경우에도 각 주파수 별 영상화 결과로는 신뢰도 있는 위치 결정 결과를 얻지 못 했다 (그림 32). 단일 주파수 3 Hz와 7 Hz를 사용하여 영상화 한 결과에서 진원 근처에서 에너지는 모이고 있지만 수진기의 개수가 적어서 천부의 곁가지의 진폭을 넘어서지 못 하고 있음을 알 수 있다 (그림 33). 하지만 모든 주파수를 이용하면 그림 34 결과와 같이 10 개 수진기에서 얻은 자료에 대한 역시간 영상화를 통해 진원 위치를 정규화된 RMS 오차 1%로 결정할 수 있다. 따라서 수진기의 개수가 소수(10 개 이하이거나 단일 주파수 위치 결정 결과가 불규칙할 때)일 경우에는 모든 주파수 정보를 활용해서 역시간 영상화를 수행하여야 한다.

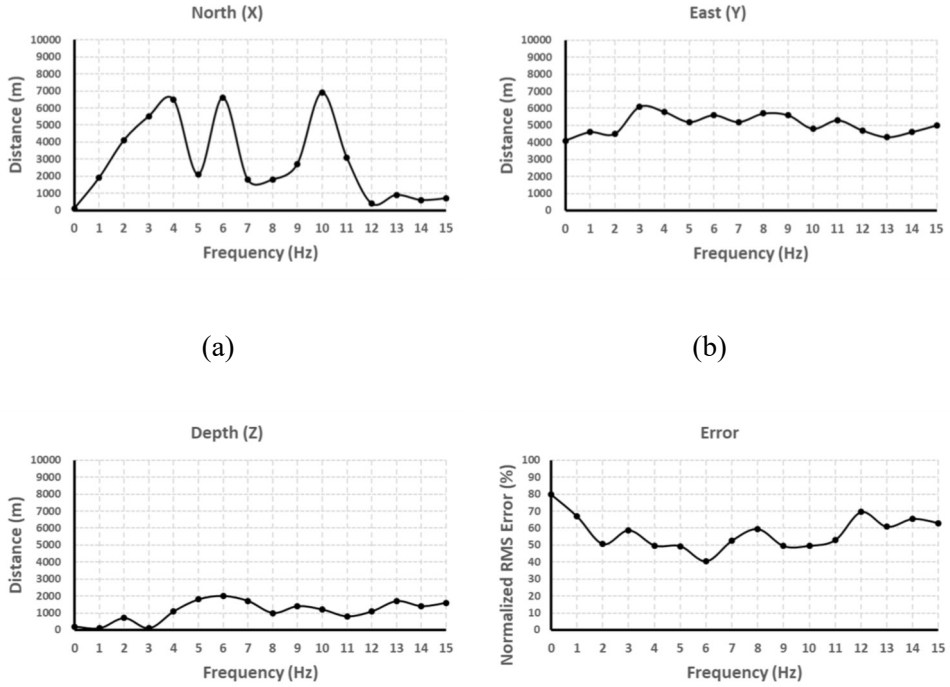
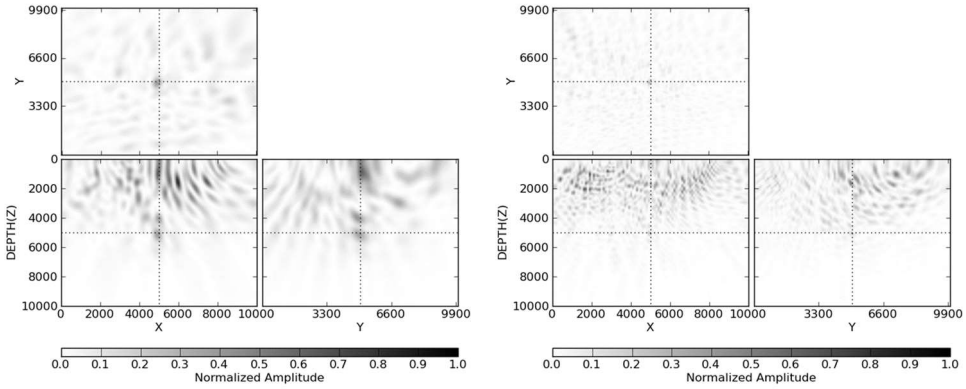


그림 32. 무작위로 배치된 10 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900)



(a) (b)

그림 33. 무작위 배치된 10 개 수진기 자료에 대한 (a) 3 Hz (b) 7 Hz 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 이미지의 중점인 (5,000, 5,000, 5,000)를 교차하고 있음.

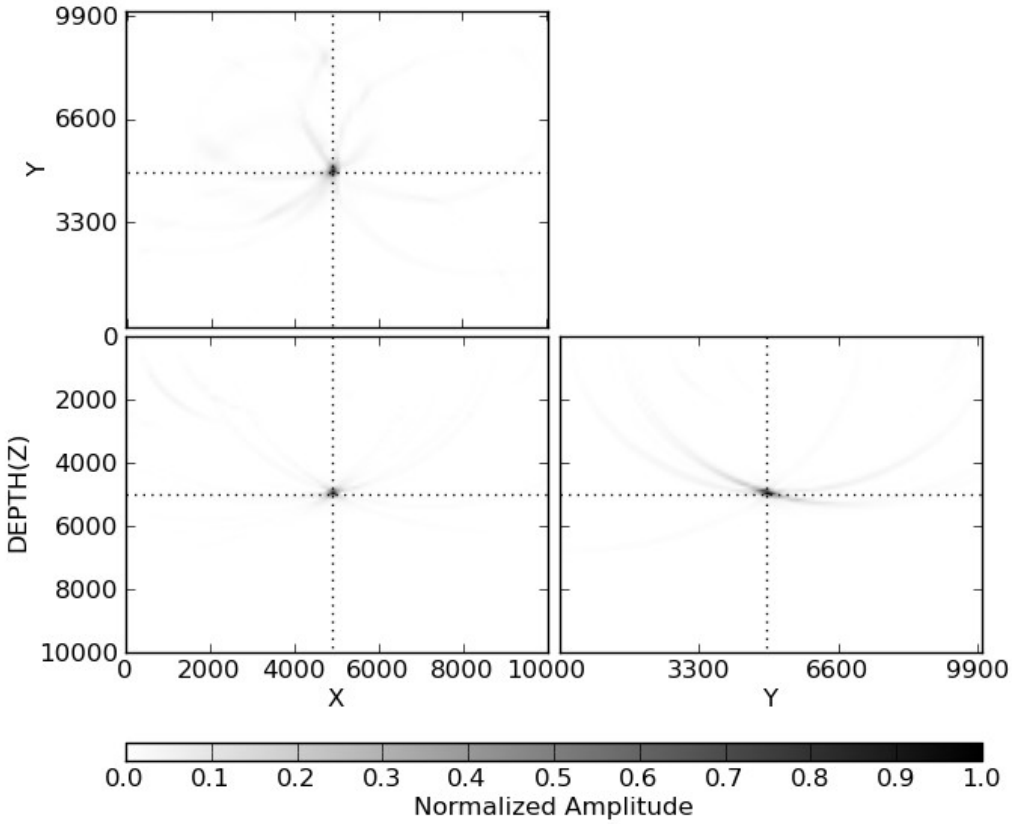


그림 34. 무작위로 배치된 10 개 수진기 자료에 대한 모든 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 4,900, 5,000)를 교차하고 있음.

3.6.2 제안된 방법의 위치 결정 결과 제공의 일관성

10 개 수진기를 활용한 경우도 현장 적용성을 확인하기 위해 무작위 잡음의 수준을 변화시켜 가면서 위치 결정 결과의 정확도를 확인했다. 표 4와 그림 35는 위치 결정 결과를 정리한 표와 경향성을 알기 쉽게 나타낸 그래프다. 그래프에서 신호 대 잡음비가 2 보다 큰 경우부터 본 연구에서 제안하는 방법이 정규화된 RMS 오차 1% 로 진원 위치를 맞추기 시작한다.

그림 36은 신호 대 잡음비가 2인 경우에 정규화된 RMS 오차 1%로 위치 결정 결과를 제공할 때 역시간 영상화 결과이고, 그림 37은 정확한 위치 결과를 주지 못 하는 신호 대 잡음비가 1인 경우다. 잡음의 수준이 증가할수록 천부의 진폭 이상점이 많아진다. 수진기의 개수가 적기 때문에 많은 수진기를 활용한 경우보다 상대적으로 이러한 잡음에 더 취약하게 되어 모든 주파수의 정보를 활용한다고 하더라도 정확한 위치 결과를 제공하지 못하게 된다. 하지만 그림 37b에서 진원 부근에서 에너지가 집중되고 있음을 확인할 수 있고 추후 특이값 분해나 공간에 대한 필터 등의 추가적인 처리를 통해 진원 위치를 결정할 수 있는 여지는 남아 있다 (Prada, et al., 1996).

그림 29와 그림 35에서 역시간 영상화 결과와 대조적으로 자동화된 초동 발췌와 격자 탐색법을 활용한 결과는 10 개 수진기를 활용한 경우와 100 개 수진기를 활용한 경우가 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 오히려 잘 못 된 초동 발췌값이 줄어들어 10 개 수진기를 이용한 경우가 100 개 수진기를 활용한 경우보다 더 정확한 경우도 있다. 이를 통해서 자동화된 초동 발췌를 활용한 진원 위치 결정 방식이 소수의 정확한 자료를 활용할 때에는 유리하지만, 다수의 수진기를 활용하는 상황에는 적합하지 않음을 알 수 있다. 주파수 영역 자기 상관 조건을 활용한 역시간 영상화 방식은 수진기 개수가 많아질 수록 흩어진 에너지를 모으는 장점이 극대화 되어 더 적은 주파수를 활용해도 정확한 위치 결정 결과를 제공할 수 있다. 또한 수진기의 개수가 적은 경우에도 모든 주파수 정보를 활용하여 진원을 일관성 있게 추정할 수 있다.

표 4. 잡음 수준에 따른 무작위로 배치된 10 개 수진기 자료에 대한 역시간 영상화 위치 결정 결과와 자동화된 초동 발췌를 이용한 위치 결정 결과 정리 표, 역시간 영상화의 경우 모든 주파수를 다 사용하였음.

P arrival	North (x) (m)	East (y) (m)	Depth (z) (m)	Error (%)
Noise Free	5,048	5,048	4,864	3
SN40	5,032	5,048	4,880	2
SN20	5,048	5,048	4,800	3
SN10	5,000	5,000	4,700	3
SN08	5,000	5,032	5,200	4
SN04	5,380	6,348	9,040	52
SN02				100
SN01				100

P and S arrivals	North (x) (m)	East (y) (m)	Depth (z) (m)	Error (%)
Noise Free	5,048	5,080	5,152	4
SN40	5,048	5,048	5,032	3
SN20	5,048	5,048	5,032	3
SN10	5,048	5,080	5,128	4
SN08	5,032	5,064	5,048	3
SN04				100
SN02				100
SN01				100

Proposed Method	North (x) (m)	East (y) (m)	Depth (z) (m)	Error (%)
Noise Free	4,900	4,900	5,000	1
SN40	4,900	4,900	5,000	1
SN20	4,900	4,900	5,000	1
SN10	4,900	4,900	5,000	1
SN08	4,900	4,900	5,000	1
SN04	4,900	4,900	5,000	1
SN02	4,900	4,900	5,000	1
SN01	2,300	4,400	1,500	51

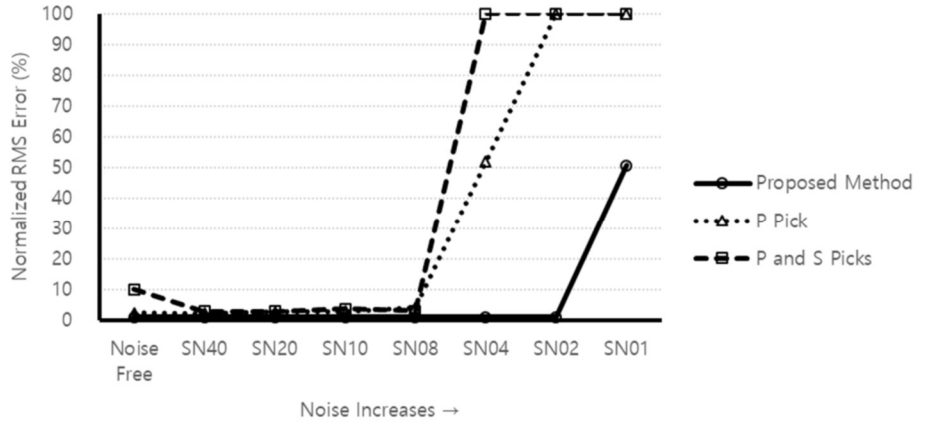


그림 35. 잡음 수준에 따른 무작위로 배치된 10 개 수진기 자료에 대한 역시간 영상화 위치 결정 결과와 자동화된 초동 발췌를 이용한 위치 결정 결과 정리 그래프, 역시간 영상화의 경우 모든 주파수를 다 사용하였음.

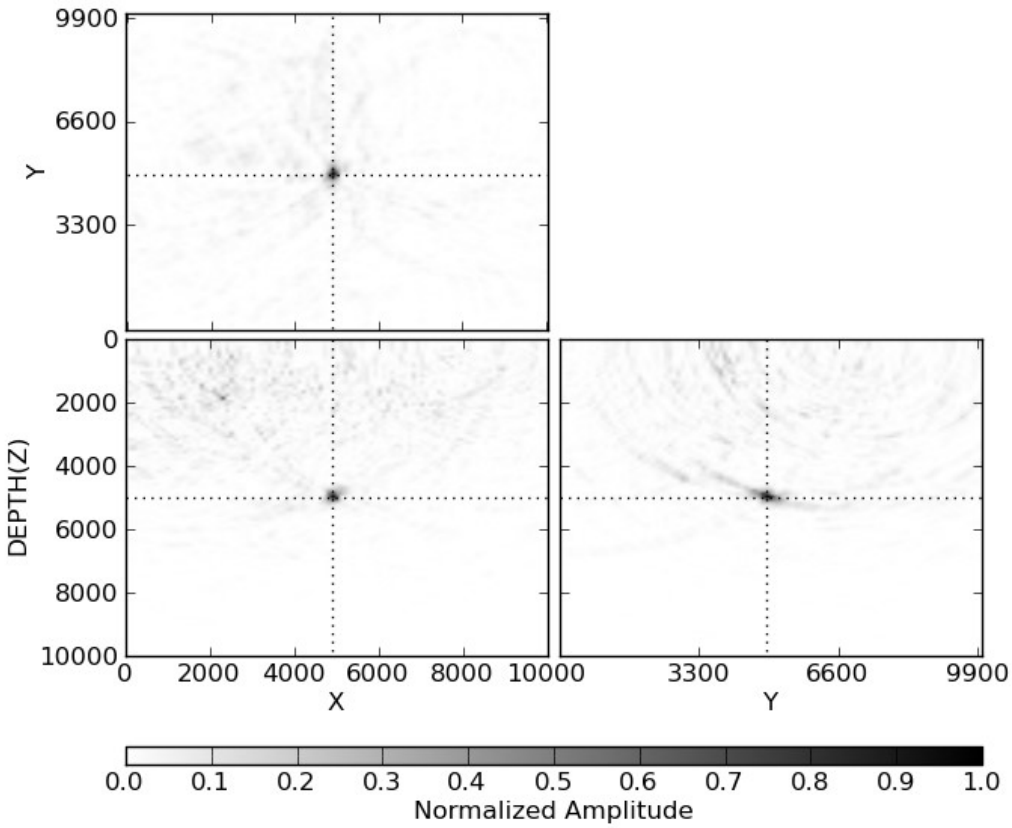
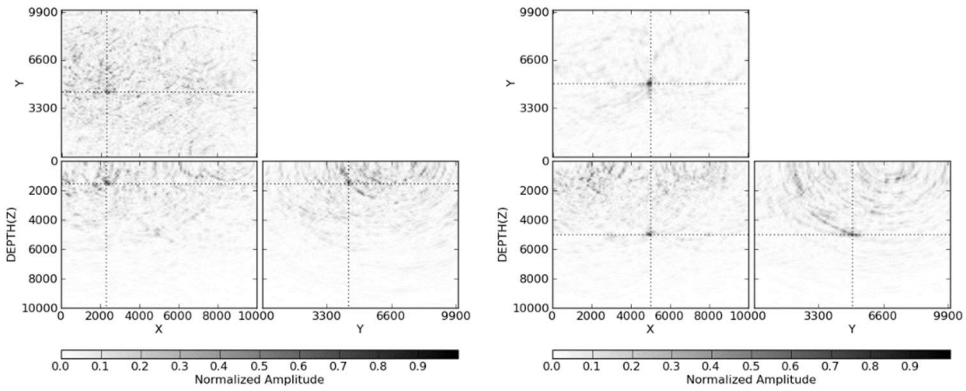


그림 36. 무작위로 배치된 10 개 수진기 자료에 대한 모든 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 4,900, 5,000)를 교차하고 있음. (신호 대 잡음비가 2인 경우)



(a) (b)

그림 37. (a) 무작위로 배치된 10 개 수진기 자료에 대한 모든 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (2,300, 4,400, 7,500)를 교차하고 있음. (b) (a) 그림에서 점선의 교차점이 이미지의 중점 (5,000, 5,000, 5,000)인 경우 (신호 대 잡음비가 1인 경우)

3.7 진원 발생 시간 추정

합성 자료에 대한 테스트에서 암묵적으로 가정하는 것은 진원 발생 시간을 알고 있다는 것이다. 합성 탄성파 기록의 시간 원점은 진원이 발생한 시점이다. 하지만 지진과 같은 현장에서 발생한 진원은 발생 시간을 알 수 없다.

기존의 시간 영역 파동 방정식을 이용하는 경우 시간과 공간에서 최대 진폭 지점을 찾는 문제이기 때문에, 에너지가 가장 집중 되는 시간을 진원 발생 시간으로 추정할 수 있었다 (Gajewski & Tessmer, 2005; Larmat, et al., 2006; Larmat, et al., 2008; Fish, 2012). 하지만 시간 영역 파동 방정식을 풀지 않고 주파수 영역에서 역시간 파동장을 구하고 영상화를 수행하는 경우에는 진원 발생 시간이 명시적이지 않다 (Nakata & Beroza, 2016; Nakata, 2018).

본 연구는 주파수 영역에서 자기 상관 조건을 이용하여 역시간 영상화를 수행하고 계산의 효율화를 위해서 역 푸리에 변환과 시간 영역 연산을 배제했다. 때문에 본 연구에서도 진원 발생 시간에 대해 명시적으로 고려하지 않는다.

본 연구의 영상화 결과가 탄성파 기록 시작 시간에 영향을 받는지 여부를 확인하기 위해서 그림 13의 탄성파 기록을 2 s 지연시켜 시작 시간을 바꾼 후에 주파수 영역 자료로 변환하여 역시간 영상화를 수행해보았다. 그림 38은 규칙적으로 배치된 100 개 수진기를 사용했을 때 얻은 탄성파 기록을 2 s 지연시킨 기록이다, 그림 39는 지연된 탄성파 기록을 모든 주파수를 활용하여 역시간 영상화를 한 결과를 보여준다. 그림 39a를 보면 최대 진폭 지점이 하부 (7,700, 4,900, 9100))에 있다. 그림 39b에서 진원 부근에도 에너지가 모이지 않고 있다. 전체적으로 주파수나 수진기가 충분하지 않아서 생기는 천부의 곁가지와 이상점이 발생하는 경우와 양상이 다르다.

한편, 단일 주파수를 이용한 결과는 모든 주파수를 활용한 경우와 다른 양상을 보인다 (그림 40). 인위적인 2 s 지연이 탄성파 기록에 적용되어 S 파 위상이 사라져서 자료 자체가 달라졌음에도, 주 주파수 구간을 중심으로 신뢰 가능한 위치 결정 결과를 주는 구간이 형성된다. 잡음 수준이 올라가는 경우 대역이 감소 패턴도 동일하다. 이 현상은 3.4절 단일 주파수 결과에 대한 곱풀기에 대한 해석과 유사하게 해석해 볼 수 있다. 식 10은 주파수 영역에서 임의의 시간에 대한 함수 g(t)에 대해서 시간 지연 α를 주는 것이 주파수 변환한 함수에 지수 상수 exp(±iωα)를 곱하는 것과 같음을 나타낸다. 따라서 식 8에 지수 상수를 추가하면 식 11처럼 나타낼 수 있다. 시간 지연은 주파수 영역에서 하나의 복소수 상수로 작용하기 때문에 단일 주파수를 이용한 영상화 결과에 영향을 주지 못 한다.

$$\mathrm{FT}\big(g(t \pm \alpha)\big) = \exp(\pm\ i\omega\alpha)\mathrm{FT}\big(g(t)\big) \qquad (10)$$

$$\mathrm{FT} : \text{Fourier transform}$$

$$\begin{aligned} & I_{\text{proposed method individual frequency}}(X) \\ &= \left[\sum_{ircv}^{nrcv} \nabla \cdot \frac{\big(G^*(X_{ircv},\ \omega)\exp(\pm\ i\omega\alpha)\,D(X_{ircv},\ \omega)\big)R(X_{ircv},\omega)}{f_{isrc}(\omega)}\right. \\ &\left.\times\left\{\sum_{ircv}^{nrcv} \nabla \cdot \frac{\big(G^*(X_{ircv},\ \omega)\exp(\pm\ i\omega\alpha)\,D(X_{ircv},\ \omega)\big)R(X_{ircv},\omega)}{f_{isrc}(\omega)}\right\}^*\right] \end{aligned} \qquad (11)$$

수진기 개수가 많으면 단일 주파수를 이용하여 위치 결정을 할 수 있지만, 단일 주파수 영상화 결과를 사용할 수 없는 수진기 개수가 적을 경우에 문제가 생긴다. 모든 주파수를 활용하는 역시간 영상화 결과는 진원 발생 시간에 영향을 받기 때문에 진원 발생 시간을 추정해야 한다. 본 연구는 탄성파 기록의 시작 시간이 진원 발생 시간과 일치할 때 역시간 영상화 이미지의 집중도가 가장 높아진다고 가정했다. 이미지의 집중도나 밀집도를 평가하기 위한 방법으로는 다양한 방법이 있으나 (Bahy, et al., 2011), 그 중 가장 간단한 이미지의 표준편차(σ; standard deviation)를 활용했다 (식 12).

테스트 결과 간단한 표준편차를 이용해서 진원 발생 시간을 추정할 수 있었다. 그림 41은 3.6절의 무작위로 배치된 10 개 수진기 자료에 대해서

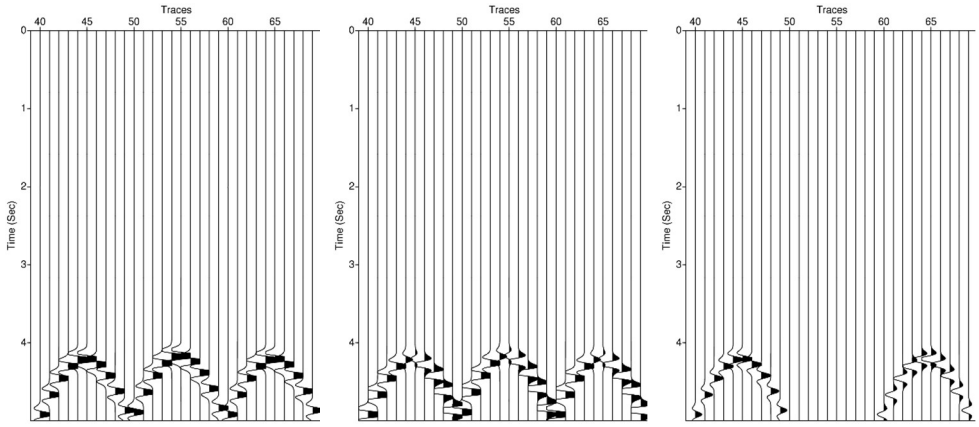
임의의 시간 지연을 주어가며 모든 주파수를 활용한 역시간 영상화를 수행하고 이미지의 정규화된 표준편차와 정규화된 RMS 오차를 계산한 그래프다. 그래프에서 볼 수 있듯이, 지연이 0 s 일 때 정규화된 표준편차 값이 제일 작고 이 때 정규화된 RMS 오차가 제일 작은 것을 볼 수 있다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{n}\left(I_i(X) - I_{average}\right)^2}{n-1}} \tag{12}$$

$I_i(X)$ = Ampliutude of the normalized time reversal image using all frequency

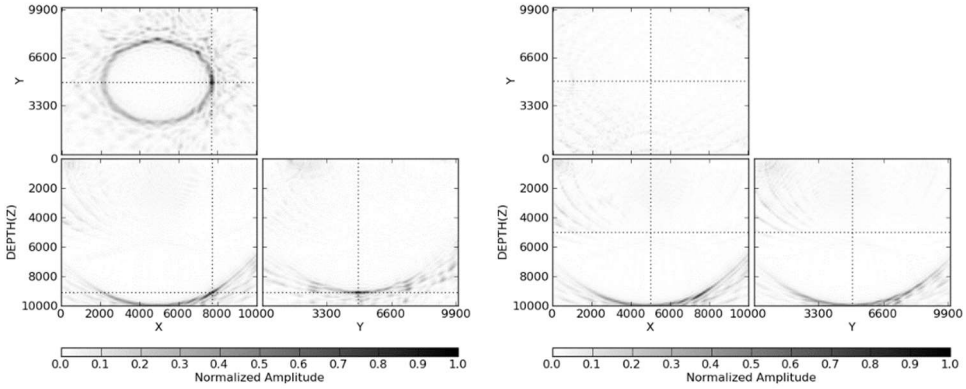
$I_{average}$ = the mean of the $I_i(X)$

n = The number of data points in the image



(a) (b) (c)

그림 38. 2 s 지연이 적용된 100 개 수진기를 사용한 경우 3 성분 탄성파 기록, (a) z 성분, (b) y 성분, (c) x 성분, 도시 목적으로 근거리 벌림 49~59 번째 트레이스만 도시함.



(a) (b)

그림 39. (a) 2 s 지연된 100 개 수진기 자료에 대한 모든 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (7,700, 4,900, 9,100)를 교차하고 있음. (b) (a) 그림에서 점선의 교차점이 이미지의 중점 (5,000, 5,000, 5,000)인 경우

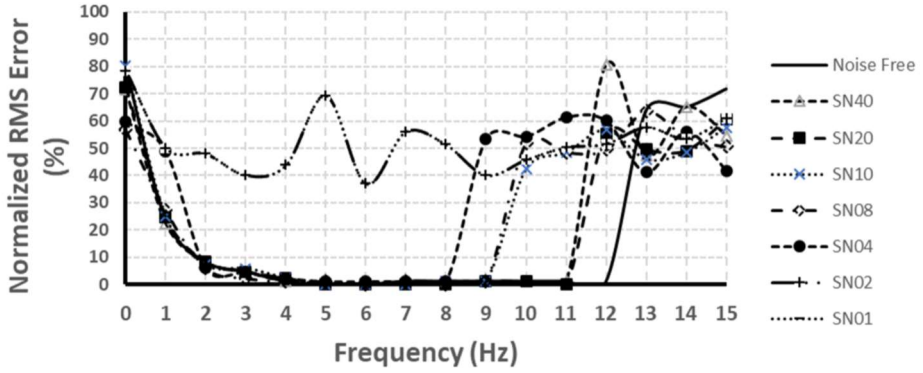


그림 40. 잡음 수준 별 2 s 지연된 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화 위치 결정 결과 정확도 비교

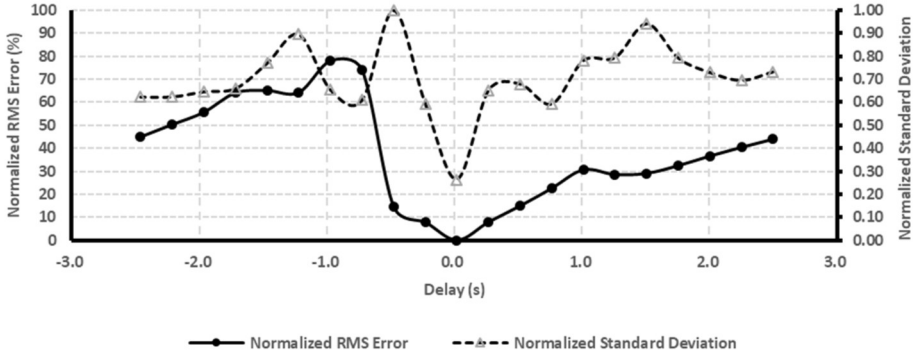


그림 41. 무작위로 배치된 10 개 수진기 자료에 대한 지연에 따른 역시간 영상화 결과의 정규화된 RMS 오차와 정규화된 표준편차 값

제 4 장 현장 자료 수치 실험 및 영상화 조건 평가

4.1 현장 자료와 처리 변수

이 장에서는 주파수 영역 자기 상관을 이용한 역시간 영상화 기법을 2017.11.14 국지 규모 1.9, 15일 국지 규모 3.2 포항 지진 자료에 적용하여 현장 적용 가능 여부를 확인한다. 본 연구에서 사용한 균질 탄성 매질을 가정한 3 차원 해석해는 비균질한 속도 구조를 가지는 현장 자료 처리 및 위치 결정에 오차를 수반할 수 밖에 없다. 하지만 수리 자극에 의한 미소 진동 계측이나 지진 모니터링의 경우, 정확한 위치 결정도 중요하지만 신속한 진원 위치의 결정과 보고도 중요하다. 자동화된 초동 발췌를 이용한 자료 처리 시에도 계산시간을 줄이기 위해서 균질 매질 가정을 바탕으로 결정한 위치 결과를 사용하기도 한다. 따라서 해석해를 이용하여 신속하고 낮은 계산비용으로 빠르게 위치를 결정한다는 점에 이 장의 의미가 있다.

현장 자료는 기 발표된 논문에서 공개한 속도계 자료를 사용하였다 (Kim, et al., 2018). 그림 42는 현장 자료 테스트에 사용한 총 8 개소의 3 성분 지진계의 배치를 나타낸다. 그림 43은 현장 자료 처리에 사용된 2017.11.14와 2017.11.15 원시 탄성파 기록과 진폭 스펙트럼을 보여준다. 두 자료의 진폭 스펙트럼의 양상이 조금 다르지만 대체로 ~40 Hz까지 신호가 존재한다고 보고 역시간 영상화를 수행했다. 시간 창의 길이는 부록 A5 를 참고하여 2.5 s로 정했다. 이외의 현장 자료 처리에 사용한 변수는 표 5(역시간 영상화 처리 변수)와 표 6(초동 발췌 및 격자 탐색법 처리 변수)에 정리되어 있다. 참고로 원시 탄성파 자료 및 지진계의 위치를 포함하는 메타 데이터는 아래의 URL에서 다운 받을 수 있다.

URL:
https://zenodo.org/record/1218738#.WyLp0O6FPIV

그림 42. 포항 지역 8 개 지진계 배치도

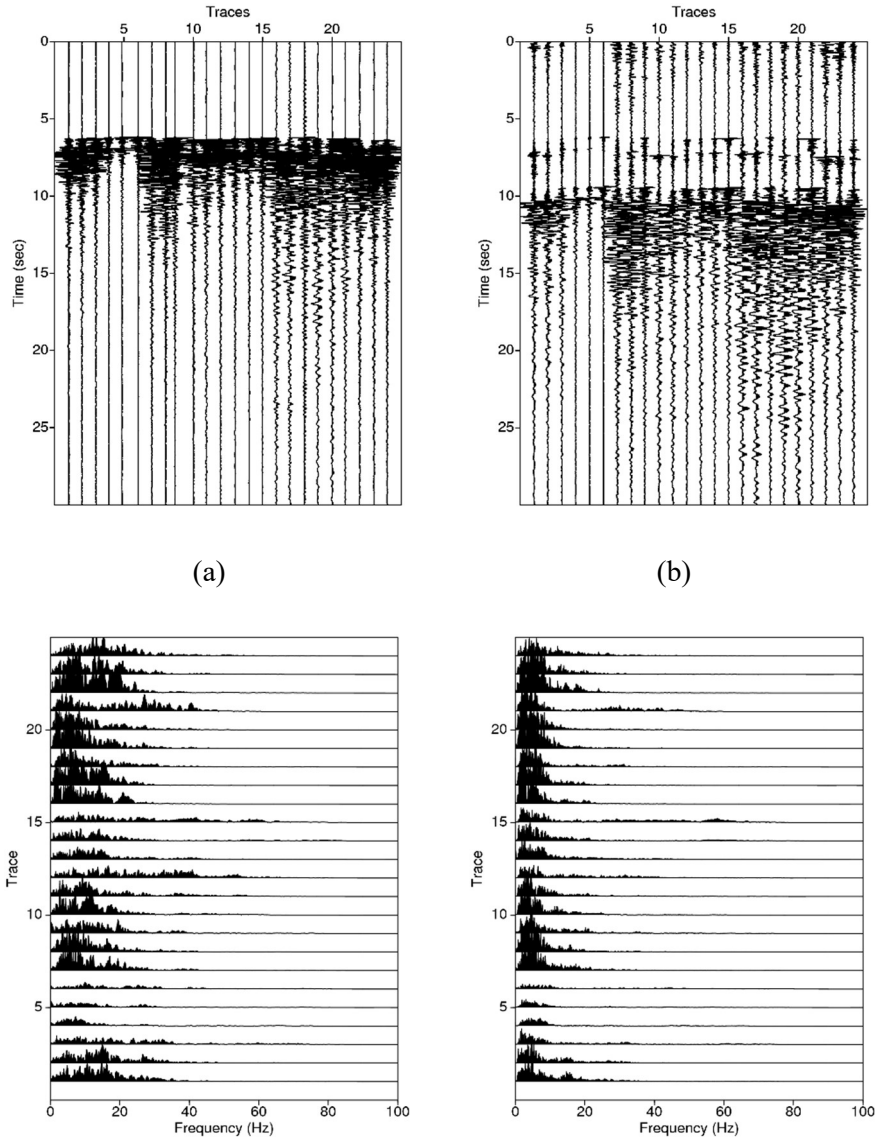


그림 43. 현장 자료 탄성파 기록 (a) 2017.11.14 자료, (b) 2017.11.15 자료 (UTC), (c) (a)의 진폭 스펙트럼, (d) (b)의 진폭 스펙트럼

표 5. 현장 자료 역시간 영상화에 사용한 변수들

Parameter	Description
The size of the domain	3,990 × 4,995 × 8,985 m
The number of grid	267 × 334 × 600
The grid interval	15 m
Boundary	No boundary (Analytic Green function in infinite medium)
Velocity and density model	Homogeneous (5,845 m/s, 3,305 m/s 2,500 g/cm^3) Determined by logging data
Source wavelet	3-component trace of each receiver station after velocity to displacement transformation
Frequency range used	~40 Hz
Time parameters	2.5 sec time windowing with 1 ms interval (2,500 samples)

표 6. 현장 자료 처리를 위한 InSite 프로그램 변수들; 자동화된 P 파 S 파 초동 발췌 및 격자 탐색법에 사용된 변수들

Picking Parameters		
P wave picking parameter	Back window (s)	0.1
	Front window (s)	0.05
	Threshold	2
S wave picking parameter	Back window (s)	0.1
	Front window (s)	0.035
	Threshold	3
The first peak of RMS function is picked		
Grid Search Parameters (Location Parameters)		
Minimum number of P wave arrivals for location	4	
Minimum number of S wave arrivals for location	3	
Maximum residual	100 ms	
Grid Search Domain	5,000 × 5,000 × 10,000 m	
Initial cell size and desired resolution	500 m	100 m
Outlier identification is applied for arrivals		
Used Velocity Model and Q factor		
P wave velocity	5,845 m/s	
S wave velocity	3,305 m/s	
Q factor for P wave	300	
Q factor for S wave	200	

4.2 현장 자료 전처리

아래는 수행한 현장 자료 전처리 과정을 정리한 것이다.

1. 원시 지진 자료는 보통 SEED혹은 miniSEED 파일 형식을 사용한다. 따라서 파이썬 기반의 지진자료처리 라이브러리인 Obpsy를 이용하여 miniSEED 파일을 탄성파 자료처리 라이브러리인 Seismic Unix에서 자료처리가 가능한 segy 포맷으로 바꿨다.

2. 지진계의 위경도 좌표를 국지 데카르트 좌표로 변환하기 위해서 GRS80 타원체를 사용하여 한국 동부를 원점으로 하는 TM(Transverse Mercator) 좌표로 먼저 변환했다. 그리고 임의의 원점을 정하고 수평 이동시켜 국지 좌표값으로 변환했다. 이 때 지진계의 표고 정보는 7~50 m 정도로 전체 8,994 m 심도 범위의 1 %가 보다 작아 무시했다.

3. miniSEED 자료를 segy 파일로 변환 후, Seismic Unix를 이용하여 국지 데카르트 좌표 정보를 파일의 헤더에 입혀 InSite를 활용한 초동 발췌를 이용한 진원 위치 결정에 사용했다. 또한 segy 파일을 헤더를 벗겨내고 바이너리 파일로 변환하여 포트란으로 작성된 역시간 영상화 프로그램에서 사용할 수 있게 했다.

4. 역시간 영상화 시에 지진계가 속도계이고 본 연구에서 사용하는 3차원 탄성 매질 해석해는 변위를 기반으로 식이 정리되어 있다. 식 13처럼 주파수 영역에서 임의의 함수 $g(t)$ 에 대한 미적분은 단순히 $-i\omega$ 의 곱과 나누기로 나타낼 수 있다. 따라서 현장 탄성파 기록을 주파수 영역 자료로 변환 시켜 주파수 영역 자료로 변환된 속도계 기록을 $i\omega$로 나누어주어 변위 기록으로 변환시켜 사용했다.

$$FT(g(t)^n) = (-i\omega)^n FT(g(t)) \quad (13)$$
$$FT : \text{Fourier transform}$$

4.3 현장 자료 처리 결과

그림 44와 그림 45는 각각 2017.11.14 현장 자료와 2017.11.15 현장 자료에 대한 초동 발췌 결과를 보여준다. 결정된 진원에 따른 이론적인 P 파와 S 파도 함께 도시했다. 진원 발생 시간 추정을 하기 위해 2017.11.14 자료의 경우 6 s 부근을 임의로 원점으로 잡았다. 그림 46은 진원 발생 시간을 추정하기 위해서 인위적인 시간 지연을 주어가며 분석한 결과다. 지연이 없을 때가 표준편차가 가장 최소였기 때문에 6 s를 원점으로 하여 모든 주파수를 활용하여 역시간 영상화를 수행했다 (그림 47). 2015.11.15 자료는 8.5 s 부근을 임의로 원점으로 잡았고 지연을 -0.3 s 주었을 때 가장 에너지가 집중 됨을 확인하고 영상화를 수행했다 (그림 48). 영상화 결과는 그림 49에 나와 있다. 역시간 영상화를 통한 위치 결정 결과는 자동화된 초동 발췌를 이용한 위치 결정 결과와 함께 표 7에 정리 되어 있다.

현장 자료에서 진원 위치에 대한 참값을 알 수는 없다. 하지만 참고용으로 한국지질자원연구원 지진센터에서 다층 속도 모델을 사용하여 결정한 위치와 차이를 계산해서 기재했다. 사용한 속도 모델과 처리 과정이 다르기 때문에 정당한 비교는 아니지만, 자동화된 초동 발췌법을 이용한 위치 결정 결과에서 P 파와 S 파 초동까지 쓴 경우, 가용 가능한 정보를 더 많이 사용하였음에도 불구하고 S 파 속도 모델의 불확실성 때문에 심도가 나머지 결과들과 크게 차이 나게 결정된다. P 파 만을 이용한 위치 결정 결과가 오히려 지진센터에서 제공한 기준 좌표와 더 가깝다. 이 경우 어느 값을 써야 하는지의 문제가 발생한다.

대조적으로 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 방식은 유일하게 위치를 결정하고 있다. 초동 발췌를 이용한 위치 결정 방식이 초동 발췌의 불확실성과 속도 모델의 불확실성에 모두 영향을 받는 것에 비해서 역시간 영상화 방식은 초동 발췌를 배제하기 때문에 오로지 속도 모델에 의한 불확실성만 가진다. 이는 추후 수치 영상화 프로그램을 이용하여 개선된 속도 모델을 사용할 경우에 위치 결과가 향상 될 수 있음을 의미한다.

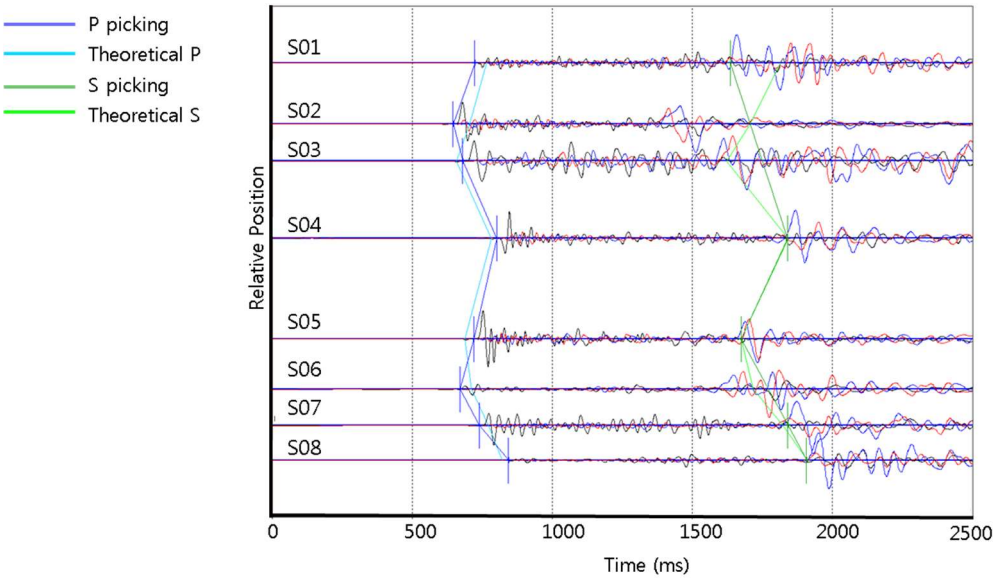


그림 44. 2017.11.14 자료에 대한 InSite에서의 자동화된 P 파 S 파 초동 발췌 결과와 위치 결정 결과에 따른 이론적인 P 파 S 파 초동 예측값

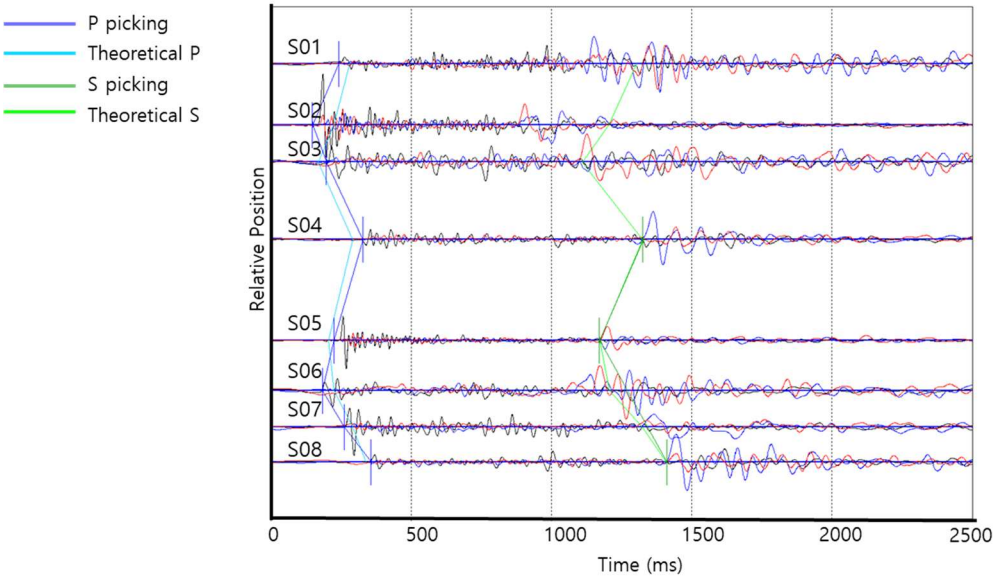


그림 45. 2017.11.15 자료에 대한 InSite에서의 자동화된 P 파 S 파 초동 발췌 결과와 위치 결정 결과에 따른 이론적인 P 파 S 파 초동 예측값

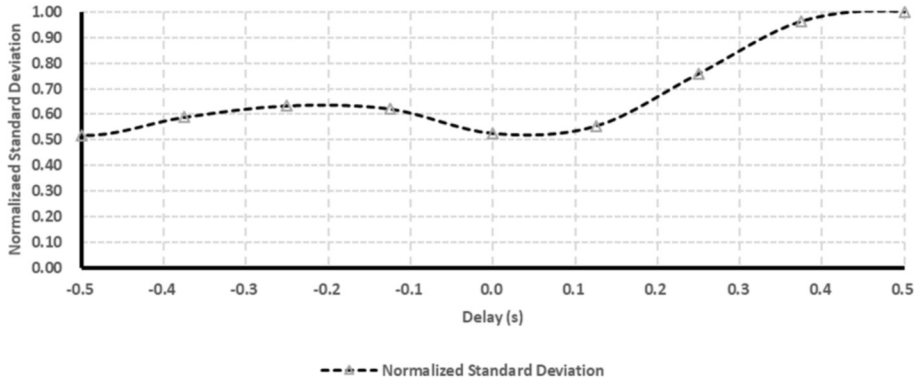


그림 46. 2017.11.14 자료에 대한 지연에 따른 역시간 영상화 결과의 표준편차 값

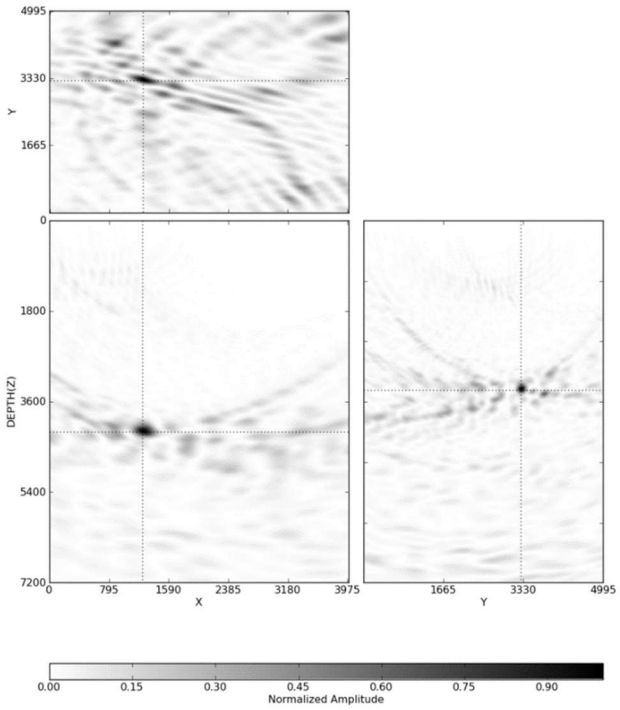


그림 47. 2017.11.14 자료에 대한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭점 (1,245, 3,285, 4,200)을 교차하고 있음.

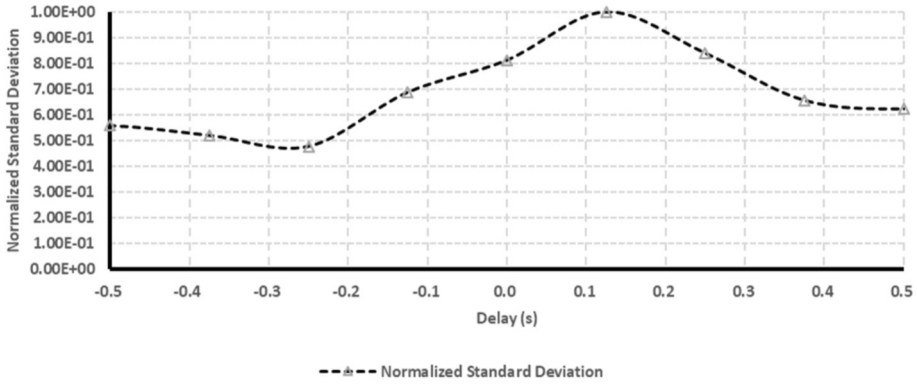


그림 48. 2017.11.15 자료에 대한 지연에 따른 역시간 영상화 결과의 표준편차 값

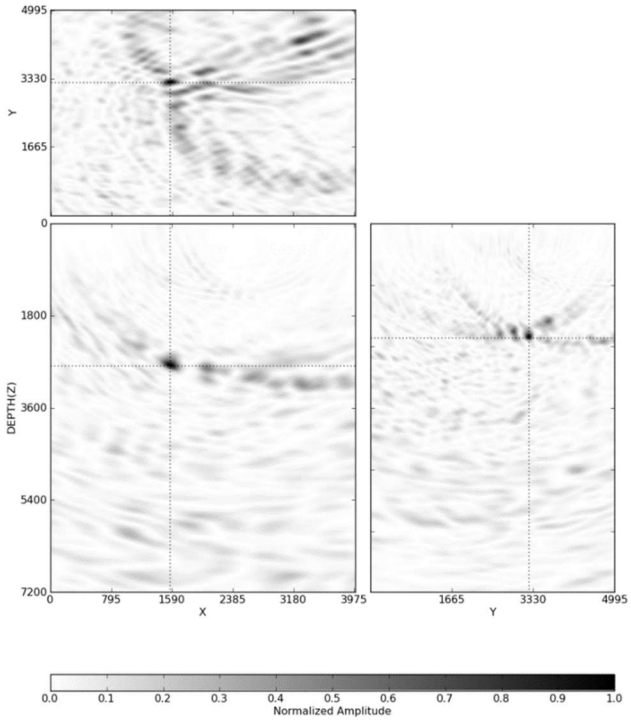


그림 49. 2017.11.15 자료에 대한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭점 (1,560, 3,240, 2,775)을 교차하고 있음.

표 7. 현장 자료에 대한 역시간 영상화 위치 결정 결과와 자동화된 초동 발췌를 이용한 위치 결정 결과 정리 표, 역시간 영상화의 경우 모든 주파수를 다 사용하였음.

Item	Local NS (x) (m)	Local EW (y) (m)	Depth (z)(m)	Normalized RMS Difference (%)
2017.11.14				
KIGAM	1,732	3,015	4,514	
Proposed Method	1,245	3,285	4,200	11
P Pick	1,696	2,904	3,040	26
P/S Pick	512	4,160	7,304	57
2017.11.15				
KIGAM	1,694	3,018	4,456	
Proposed Method	1,560	3,240	2,775	30
P Pick	1,632	3,032	2,824	29
P/S Pick	384	4096	7,104	56

제 5 장 결 론

기존의 초동 발췌와 격자 탐색법을 이용한 진원 위치 결정 방식은 규모가 큰 적은 수의 지진 자료 처리에는 유리하지만, 수압 파쇄 시 발생하는 미소 진동과 같은 규모가 작은 대량의 탄성파 진원 위치 결정에는 불리한 측면이 있었다. 이것은 잡음에 대한 신호의 상대적인 크기가 작아져 위치 결정에 필요한 정보인 초동 발췌 작업에 필요한 시간이 증가하고 초동 발췌 값 자체의 불확실성에 의한 오차가 커지는 문제에서 비롯되었다.

그래서 이 연구는 대규모 수진기에서 얻는 탄성파 자료에 대한 자동화된 위치 결정 방법으로 주파수 영역 역시간 파동장의 자기 상관을 이용한 진원의 위치 결정 방식을 제안했다. 초동 정보 만을 이용하는 기존 진원 위치 결정 방식과 다르게 모든 파형을 이용하는 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 방식은 초동의 발췌가 필요 없으며, 작은 규모의 진원 위치 결정에 유리하나, 현장에 적용하기에는 계산 비용이 비싸다는 문제가 있어 이 문제를 해결하고자 했다.

현장 적용성을 높이기 위해 계산 비용이 많이 필요한 주파수 영역 그린 함수를 미리 계산하여 저장하는 방식을 채택했다. 저장한 그린 함수를 이용하여 주파수 영역 역시간 파동장의 자기 상관도를 계산하고 진원 위치를 자기 상관도 상 최대 진폭 지점으로 정했다. 기존의 주파수 역시간 영상화 연구와 비교하면, 진원 위치 결정을 위한 역 푸리에 변환과 시간 영역 연산을 배제하고 주파수 영역에서 직접 진원 위치를 결정하여 계산 비용을 감소시켰다.

제안된 방법의 대규모의 수진기에서 얻을 수 있는 작은 규모의 탄성파 기록에 대한 적용성을 확인하기 위해 잡음 수준과 수진기 개수를 변화시키며 진원 위치를 알고 있는 합성 자료에 대한 자기 상관 조건을 이용한 영상화 및 위치 결정을 수행했다. 대조군으로 기존의 진원 위치 결정 방법인 P 파와 S 파 초동 발췌를 이용한 방법을 이용한 위치 결정도 동일한 속도 모델 조건하에서 수행했다. 분석 시에는 문제의 단순화를 위해서 가정한 진원이

수진기 배열의 중앙에 있는 경우에 대한 테스트 결과를 주로 사용했다. 참고로, 진원이 수진기 배열의 중앙에 있지 않고 한쪽에 치우쳐 있는 경우 한 가지를 부록에서 다루었다. 이 경우에는 제안된 방법도 자동화된 초동 발췌를 이용한 방법과 마찬가지로 정확한 위치 결정을 할 수 없었다. 하지만 진원의 위치로 가능한 모든 부분에 강한 진폭을 보여 역으로 수진기 배열의 불확실성을 확인할 수도 있을 것이다.

참고용으로 가장 이상적인 대규모의 수진기를 모사한 1,0000 개 수진기를 이용한 위치 결정 및 분석을 먼저 수행했다. 자기 상관도의 최대값을 이용한 진원 위치 결정 결과는 모든 주파수를 활용할 경우 정규화된 RMS 오차범위 1 %로 원래의 위치를 맞췄다. 단일 주파수를 이용한 영상화 결과도 송신 요소파의 주요 대역을 포함한 특정 주파수 대역에서 정규화된 RMS 오차범위 1 %로 진원 위치 결과를 맞췄다. 테스트 결과, 진원 자체의 주파수 대역과 수진기의 개수, 간격, 형상, 진원과의 거리 등에 의하여 신뢰 가능한 주파수 대역이 변화했다.

일반적인 규모의 탐사를 모사한 규칙적으로 설치된 100 개 수진기 자료를 이용한 역시간 영상화 결과 모든 주파수를 사용하면 잡음과 신호가 구분이 되지 않는 신호 대 잡음비가 1인 경우에도 정규화된 RMS 오차 1 %로 정확한 위치 결정 결과를 얻을 수 있었다. 반면 초동 발췌와 격자 탐색법을 활용한 위치 결정의 경우 신호 대 잡음비가 4 보다 작은 경우에는 초동 발췌 자체가 실패하여 위치 결정 자체를 수행하지 못 했다. 단일 주파수 성분을 이용한 위치 결정 결과도 신뢰도 있는 진원 위치 결정 결과를 도출했다. 이러한 경향성은 신호 대 잡음비가 2로 신호와 잡음이 분간이 되지 않는 경우에 대해서도 성립했다. 수진기의 개수가 줄수록, 잡음의 수준이 높아질수록 정확하게 진원을 결정할 수 있는 주파수 대역이 줄어들었고, 주파수 쪽 대역 상한이 하한보다 먼저 줄어들었다. 이 현상을 주파수 성분이 부족할 때 생기는 곁가지와 잡음에 의한 천부의 이상점 개념을 이용하여 해석했다.

소규모의 국지 모니터링 네트워크를 모사한 무작위로 설치된 10 개 수진기를 사용한 경우, 단일 주파수를 이용한 영상화 결과는 더 이상 정확한 위치 결정 결과를 제공하지 못 했다. 하지만 전체 주파수 대역을 모두 사용한 영상화 결과는 신호 대 잡음비가 2인 경우까지 정규화된 RMS 오차 1 %로 진원 위치를 결정 했다. 반면 초동 발췌를 이용한 위치 결정 방법은 신호 대 잡음비가 4 보다 작을 경우 100 개 수진기를 사용했을 때와 마찬가지로 초동 발췌를 실패했다.

현장 자료 처리 전 단계로 진원 발생 시간이 일반적으로 미지수인 현장 자료 처리를 위해 두 가지 해결 방안을 제시하였다. 우선 단일 주파수를 사용한 결과는 자료에 임의의 시간 지연이 주어지더라도 진원 위치를 일관성 있게 결정할 수 있었다. 따라서 수진기가 많을 경우에는 모든 주파수를 활용한 결과 대신, 단일 주파수를 이용한 결과를 사용할 수 있다. 또한 단일 주파수 결과를 사용할 수 없는 소규모 수진기에서 얻은 자료는 이미지 집중도를 계산하는 방식의 하나로 표준편차를 도입하여, 시간 지연을 임의로 주어가며 가장 낮은 표준편차를 나타낼 때를 진원 발생 시간으로 추정하여 위치 결정을 할 수 있다.

제안된 방법의 현장 적용성을 확인하기 위해 수진기의 개수가 8 개로 매우 소수인 포항 지진 자료를 이용하여 영상화 및 위치 결정을 수행했다. 초동 발췌를 이용한 위치 결정 결과는 초동 발췌와 속도 모델의 불확실성 때문에 P 파 만을 이용한 결과와 S 파까지 이용한 결과가 상이했다. 대조적으로 제안된 방법은 진원 발생 시간을 추정하고 모든 주파수를 이용한 결과, 균질 매질을 가정하고 적은 수진기를 사용했음에도 진원 위치를 유일하게 결정할 수 있었다.

이 연구의 한계점으로는 우선 매질을 균질 매질로 가정했다는 점이 있다. 따라서 속도 모델의 불확실성을 줄이기 위해서 추후 수치 영상화 프로그램의 개발을 통해 비균질 매질에서의 자기 상관 영상화 조건을 활용한 위치 결정 연구가 필요할 것이다. 그리고 단일 주파수를 이용할 때 신뢰할 수 있는 위치 결정 결과를 제공하는 주파수 범위에 영향을 주는 변수들을 제시하고

정성적으로 분석하였지만, 후속 연구에서 보다 엄밀하고 정량적인 분석이 필요할 것이다. 더불어 송수진기 배열에 관해서, 지표의 가상 진원이 커버리지 안에 위치하는 경우를 가정했기 때문에 다양한 송수진기 배열에 대한 추가적인 연구도 필요하다. 최종적으로는 진원 위치 결정과 그에 따른 자동화된 속도 모델 업데이트를 위한 연구도 필요할 것으로 생각된다.

최근 지진 및 화산 지진동 계측, CO_2 주입과 지열 발전, 원유회수증진법(enhanced oil recovery)을 위한 수압 파쇄 조절에 필요한 모니터링 시스템을 대규모의 센서를 이용하여 구축하는 것이 점점 일반화되가고 있다. (Hickman, et al., 2004; Okada, 2013; Maxwell, 2014). 본 연구에서 제안하는 주파수 영역 자기 상관 조건을 이용한 역시간 영상화 및 위치 결정 방법은 시간 영역 연산을 배제하고 수진기의 개수가 많은 경우에 단일 주파수를 이용한 결과를 사용할 수도 있기 때문에, 기존의 주파수 영역 역시간 영상화 방법에 비해 계산 효율성이 높으며 작은 규모의 탄성파 기록을 처리 가능한 역시간 영상화의 특성도 유지하고 있다. 앞으로 대규모의 수진기를 이용한 모니터링 네트워크 구축에 본 연구에서 제안하는 방법론이 널리 사용되길 기대해본다.

참고 문헌

Aki, K. & Richards, P., 2002. *Quantitative seismology.* 2nd ed. 편집자 Sansalito: University Science Books.

Bahy, R. M., Salama, G. I. & Mahmoud, T. A., 2011. *A no-reference blur metric guided fusion technique for multi-focus images.* Cairo, Egypt, NRSC.

Bazargani, F. & Snieder, R., 2016. Optimal source imaging in elastic media. *Geophysical Journal International,* 204(2), pp. 1134-1147.

Chao, S., Tariq, A. & Zedong, W., 2018. *velocity analysis and event estimation for passive seismic data using source focusing function.* Anaheim, SEG Technical Program Expanded Abstracts 2018.

Fink, M., 1999. Time-reversed acoustics. *Scientific American (International Edition),* 281(November 1999), pp. 91-113.

Fink, M., 2000. Time-reversed acoustics. *Rep. Prog. Phys,* Volume 63, p. 1933.

Fink, M., Prada, C., Wu, F. & Cassereau, D., 1989. *Self focusing in inhomogeneous media with time reversal acoustic mirrors.* Montreal, IEEE, pp. 681-6.

Fish, A. M., 2012. *Microseismic velocity inversion and event location using reverse time imaging.* Master Thesis: Colorado School of Mines.

Gajewski, D. & Tessmer, E., 2005. Reverse modelling for seismic event characterization. *Geophysical Journal International,* 163(1), pp. 276-284.

Hickman, S., Zoback, M. & Ellsworth, W., 2004. Introduction to special section: Preparing for the San Andreas Fault Observatory at Depth. *Geophysical Research Letters,* 31(12), pp. 10-13.

Kim, K. I. 외., 2018. Protocol for induced microseismicity in the first enhanced geothermal systems project in Pohang, Korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 제 91, pp. 1182-1191.

Kim, K.-H.외., 2018. Assessing whether the 2017 M w 5.4 Pohang earthquake in South Korea was an induced event. *Science,* 6081(January 2012), p. eaat6081.

Larmat, C. 외., 2006. Time-reversal imaging of seismic sources and

application to the great Sumatra earthquake. *Geophysical Research Letters,* 33(19), pp. 0-3.

Larmat, C., Tromp, J., Liu, Q. & Montagner, J. P., 2008. Time reversal location of glacial earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth,* 113(9), pp. 1-9.

Maxwell, S., 2014. Microseismic imaging of hydraulic fracturing. *Society of Exploration Geophysicists.*

Nakata, N., 2018. *Extended imaging conditions for passive seismic data with GmRTM.* Anaheim, SEG Technical Program Expanded Abstracts 2018.

Nakata, N. & Beroza, G. C., 2016. Reverse time migration for microseismic sources using the geometric mean as an imaging condition. *Geophysics,* 81(2), pp. KS51-KS60.

O'Brien, G. S. 외., 2011. Time reverse location of seismic long-period events recorded on Mt Etna. *Geophysical Journal International.*

Okada, Y., 2013. Recent progress of seismic observation networks in Japan. *Journal of Physics: Conference Series,* 433(1).

Prada, C., Manneville, S., Spoliansky, D. & Fink, M., 1996. Decomposition of the time reversal operator: Detection and selective focusing on two scatterers. *The Journal of the Acoustical Society of America,* 99(4), pp. 2067-2076.

Tanter, M. 외., 2001. Optimal focusing by spatio-temporal inverse filter. I. Basic principles. *The Journal of the Acoustical Society of America,* 110(1), pp. 37-47.

Tanter, M., Thomas, J.-L. & Fink, M., 2000. Time reversal and the inverse filter. *The Journal of the Acoustical Society of America,* 108(1), pp. 223-234.

Xue, Q., Wang, Y. & Chang, X., 2016. Fast 3D elastic micro-seismic source location using new GPU features. *Physics of the Earth and Planetary Interiors,* 제 261, pp. 24-35.

부 록

A1. 수진기 배열의 형상 변경 수치 실험

부록 A1에서는 규칙적으로 배치된 100 개 수진기를 이용한 역시간 영상화 테스트에서 수진기 개수를 동일하게 유지하면서 형상을 변화시켰을 때 역시간 영상화에 결과에 어떠한 영향을 미치는지 확인해보았다. 그림 50은 100 개 수진기를 무작위로 배치 시킨 경우와 x 축에만 설치한 경우의 송수신기 배치도를 나타낸다.

그림 51은 수진기가 모두 x 축에만 설치되어 있는 경우 탄성파 기록이다. 도시를 목적으로 근거리 벌림 수진기를 도시하였으며, P 파 초동이 3 s 부근에 관측되며, 5 s 부근에 S 파 초동을 확인할 수 있다.

그림 52는 수진기에서 기록된 탄성파 신호를 이용하여 모든 주파수를 활용하여 역시간 영상화를 수행한 결과다. 수진기가 모두 x 축에 설치되어 있기 때문에, x 방향의 위치 변화에 대한 민감도는 좋고, y 방향과 z 방향으로는 민감도가 낮다. 결과적으로 x 방향의 위치는 맞추나 y, z 방향 위치 결정 결과는 원래 진원의 좌표를 맞추지 못 한다.

하지만 이것은 영상화 방식의 한계가 아닌 수진기 배열의 근본적인 한계점이다. 표 8에서 자동화 초동 발췌를 이용한 방식도 진원을 결정하지 못 하며 오히려 역시간 영상화를 통한 위치 결정 결과의 정규화된 RMS 오차가 더 작다. 또한 역시간 영상화는 탄성파 파동을 원래 출발했던 위치로 재 전파 시키는 방식이기 때문에 그림 52에서의 강한 진폭을 나타내는 부분은 모두 현재의 송수진기 배열 하에서 추정 가능한 진원 위치라고 해석할 수도 있다. 이는 현재 송수진기 배열의 불확실성을 그대로 보여준다고 할 수 있으며, 이러한 특성을 송수진기 배열의 특성을 분석하는 방법으로 발전시켜 사용할 수도 있을 것이다.

그림 53은 100 개 수진기를 무작위로 배치했을 때 근거리 벌림 수진기에서의 탄성파 기록을 나타내며 그림 54는 모든 주파수를 이용하여 역시간 영화를 수행한 결과다. 수진기 배치가 진원을 중심으로 무작위적으로 배치되어 있지만, 수진기의 개수가 충분하여 전체 영역에 고르게 분산되어 있다. 무작위로 100 개의 수진기를 배치했을 경우의 위치 결정 결과는 100 개 수진기를 규칙적으로 사용한 경우와 차이가 없이 정규화된 RMS 1 %로 진원 위치로 수렴한다.

그림 55는 100 개 수진기가 x 축에만 설치되어 있는 경우와 불규칙적으로 설치되어 있는 경우의 단일 주파수를 이용한 위치 결정 결과다. 비교를 위해서 규칙적으로 배치된 100 개 수진기를 활용한 영상화 결과도 함께 도시했다. x 축에만 수진기가 설치되어 있는 경우는 모든 주파수를 다 이용한 결과와 마찬가지로 정확한 위치 결정 결과를 주지 못 한다. 반면에, 무작위 배치를 사용한 경우는 오히려 저주파수 대역에서는 규칙적인 수진기 배치에 의한 결과보다 높은 정확도로 위치 결과를 제공한다. 이것은 역시간 영상화의 신뢰할 수 있는 단일 주파수 범위를 결정할 때에 수진기 배열의 형상과 수진기의 간격이 영향을 주고 있음을 보여준다.

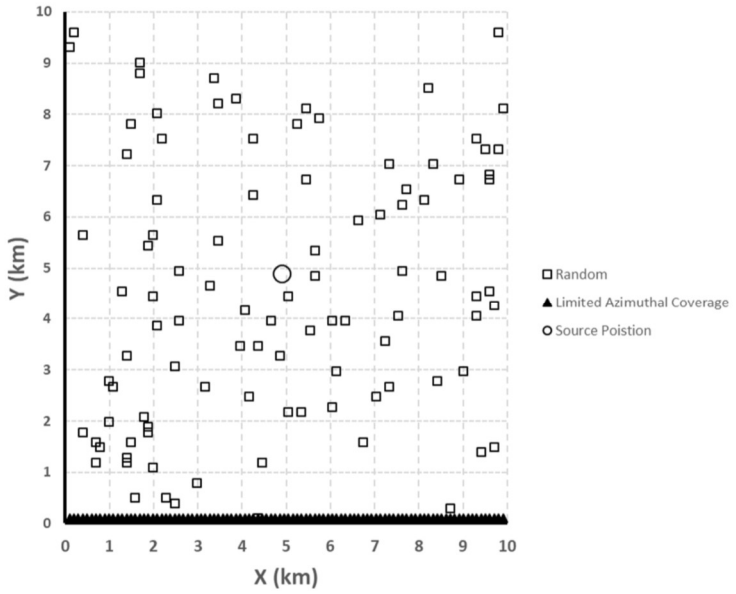
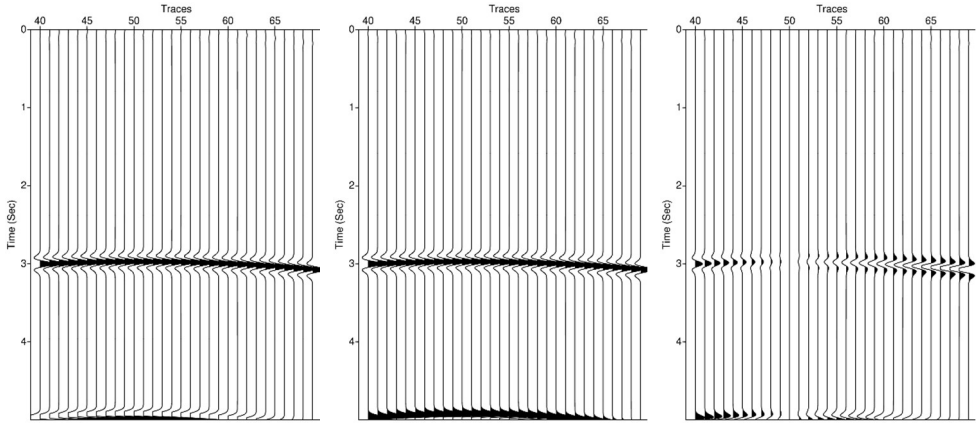


그림 50. 무작위 배치/x 축 배치 100 개 수진기를 이용한 수치 실험에 사용된 진원 (4,900, 4,900, 4,900)와 수진기 배치도



(a) (b) (c)

그림 51. x 축 배치 된 100 개 수진기를 사용한 경우 3 성분 탄성파 기록, (a) z 성분, (b) y 성분, (c) x 성분, 도시 목적으로 근거리 벌림 49~59 번째 트레이스만 도시함.

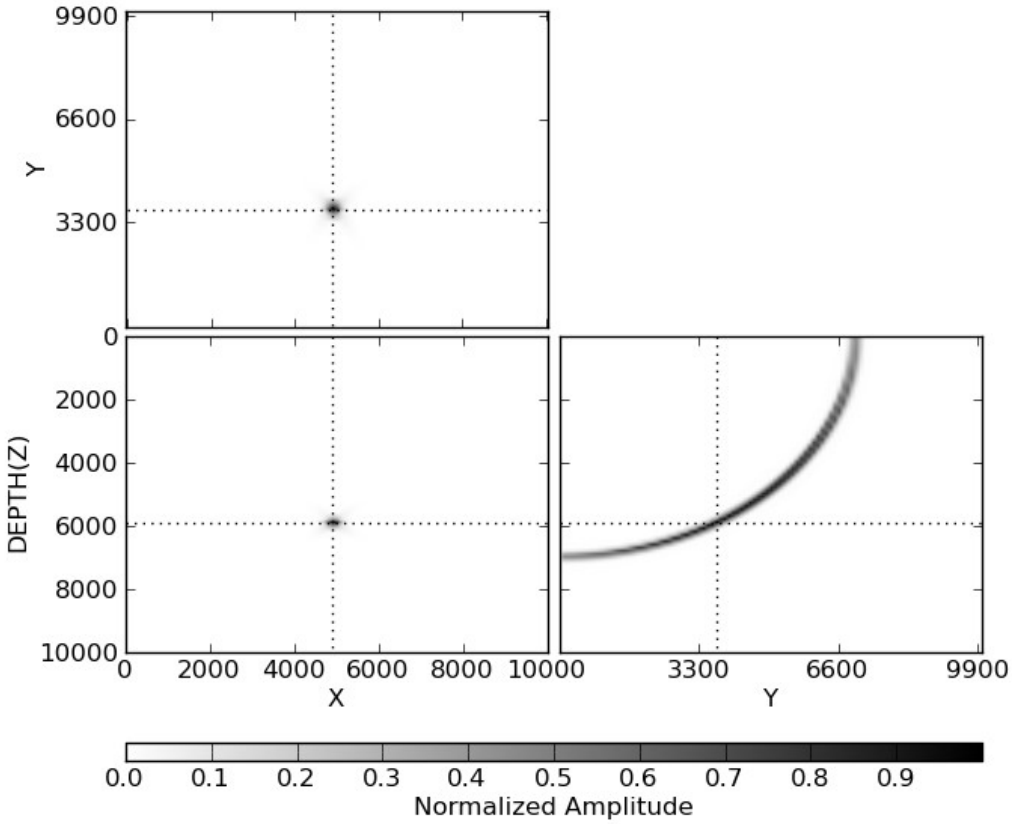
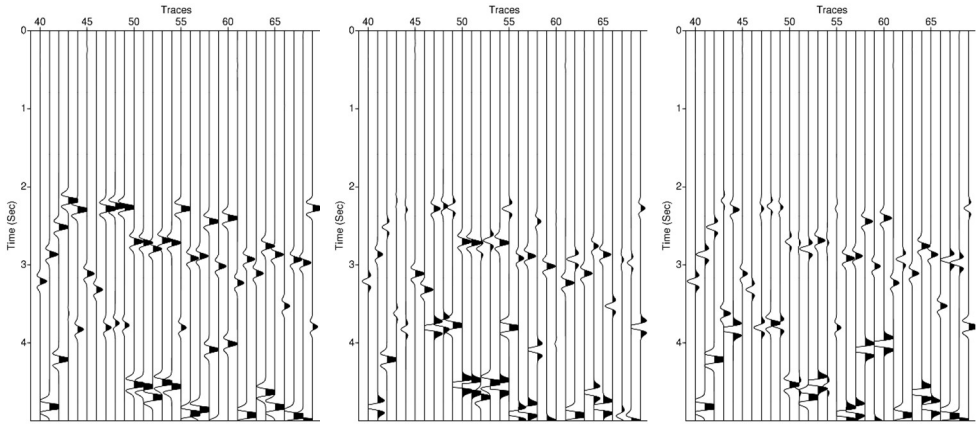


그림 52. x 축 배치 100 개 수진기 자료에 대한 모든 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 3,700, 5,900)를 교차하고 있음.

표 8. x 축 배치 100 개 수진기 자료에 대한 역시간 영상화 위치 결정 결과와 자동화된 초동 발췌를 이용한 위치 결정 결과 정리 표, 역시간 영상화의 경우 모든 주파수를 다 사용하였음

Item	North (x) (m)	East (y) (m)	Depth (z) (m)	Error (%)
P Arrival	2,104	512	416	81
P and S Arrivals	1,376	936	2,700	68
Proposed Method	4,900	3,700	5,900	18



(a) (b) (c)

그림 53. 무작위 100 개 수진기를 사용한 경우 3 성분 탄성파 기록, (a) z 성분, (b) y 성분, (c) x 성분, 도시 목적으로 근거리 벌림 49~59 번째 트레이스만 도시함

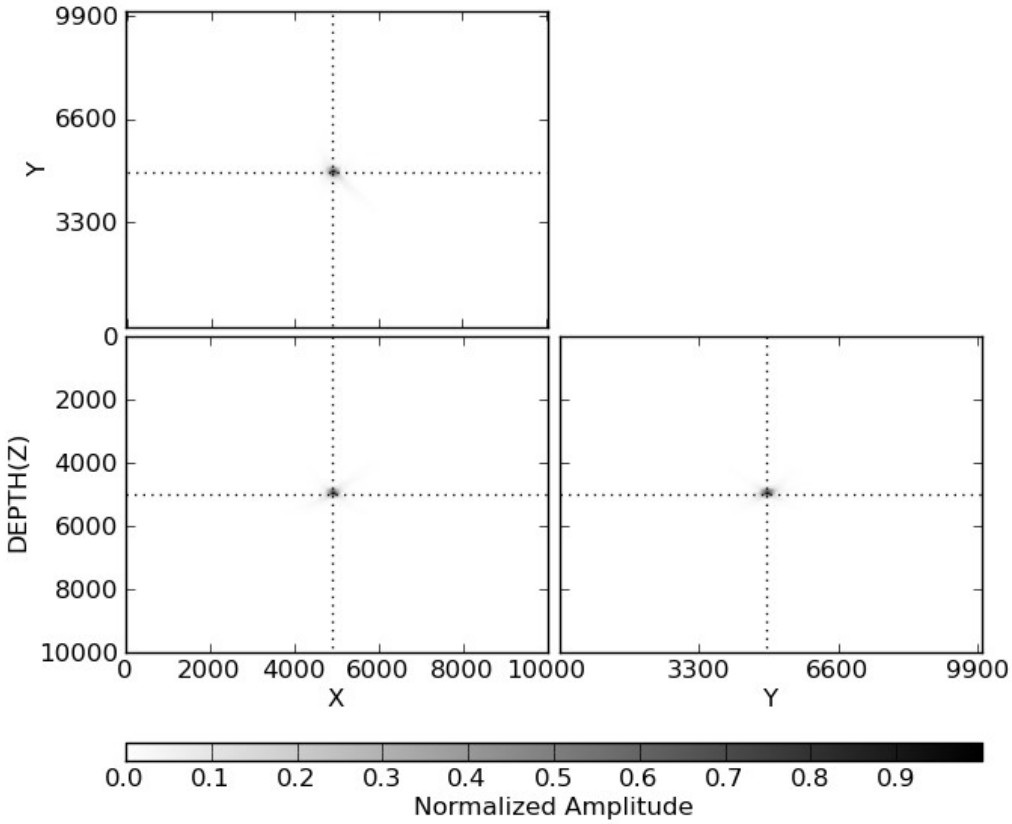


그림 54. 무작위 배치 100 개 수진기 자료에 대한 모든 주파수를 이용한 역시간 영상화 결과, 점선은 최대 진폭 지점인 (4,900, 4,900, 5,000)를 교차하고 있음.

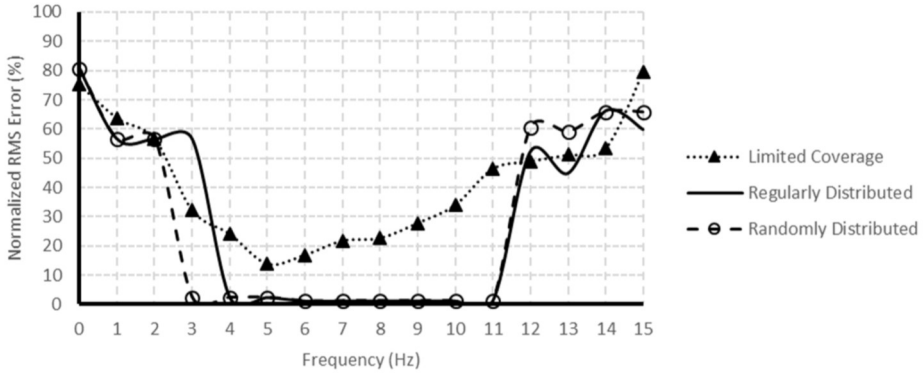


그림 55. x 축 배치, 규칙적 배치, 무작위 배치 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화 위치 결정 결과 정확도 비교

A2. 가상 진원을 이용한 수치 실험

본문에서 합성 자료 테스트 수행 시 진원이 지표 수진기 배열의 중앙에 위치한다는 가정 하에서 합성 자료 생성과 영상화를 수행했다. 하지만 실제의 진원이 수진기 배열의 중앙에만 존재하는 상황은 매우 드물며 영상화 영역의 어디에서나 발생할 수 있기 때문에, 다양한 위치에서 진원을 가정하고 역시간 영상화 테스트를 수행하는 것이 필요하다.

하지만 모든 영상화 영역의 모든 위치에서 합성 자료를 생성하고 분석하는 것은 양이 너무 많고 비효율적이다. 따라서 탐사 영역이 정해지고 합성 자료 생성과 영상화를 위한 변수가 정해지면 영상화 영역을 나누어 최소한 12 지점에 대해서 테스트를 하는 방식을 제안한다 (그림 56). 이러한 테스트를 통해서 어느 영상화 영역에 진원이 존재할 때 어떤 범위의 주파수까지 진원 위치를 결정할 수 있는지에 대한 기본적인 아이디어를 얻을 수 있다.

그림 56의 개념도에서 보여준 것과 같이 전체 영상화 영역을 심도 별로 3 등분 하고 각각 4 분면으로 나누어서 그 중앙 지점에 진원을 가정하여 합성 자료를 생성했다. 표 9에 이 자료에 대해 모든 주파수를 활용하여 역시간 영상화를 수행한 결과를 정리했다. 그림 57은 표의 경향성을 알기 쉽게 그래프로 도시한 것이다. 12 곳의 영상화 영역에 대해서 모든 주파수를 사용하여 위치 결정을 한다면, 정규화된 RMS 오차로 2 % 이내로 결정할 수 있다.

그림 58에서 그림 60까지는 각각 2,500 m, 5,000 m, 7,500 m 심도에서 각 사분면의 가정한 진원에 대한 단일 주파수를 이용한 위치 결정 결과의 오차를 보여준다. 진원의 심도가 깊어질수록 사용할 수 있는 주파수 대역이 줄어드는 경향을 보인다. 수진기 배열과 진원의 거리가 멀어질수록 진원 근처에 밀집되는 에너지 수준이 낮아지게 되고, 이 때문에 다른 천부의 곁가지가 최대 진폭 지점으로 인식이 되어 잘 못 된 위치 결정 결과를 도출하게 되는 것으로 해석된다.

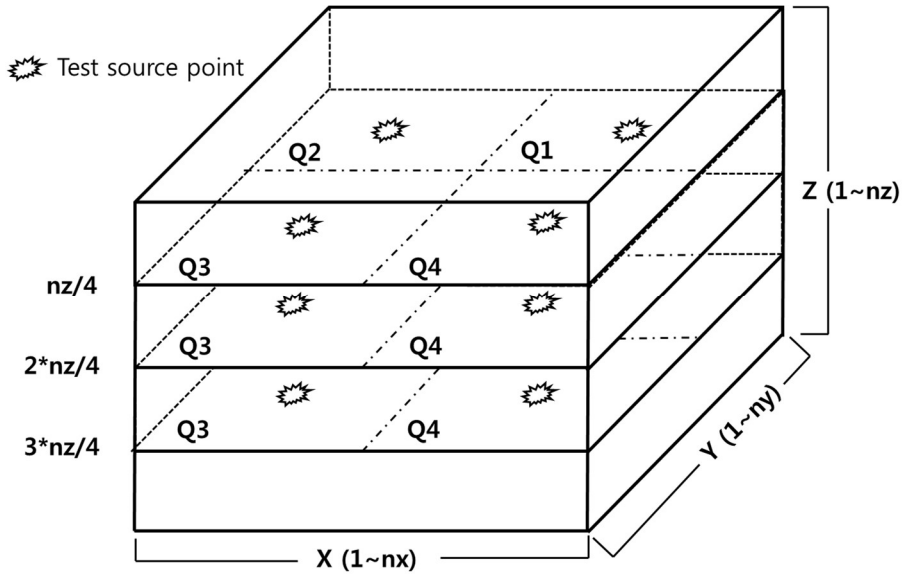


그림 56. 영상화 영역 12 분할 및 분할 영역별 가상 진원 수치 실험 개념도

표 9. 12 가상 진원 실험에 대한 자기 상관을 이용한 역시간 영상화 위치 결정 결과 정리 표, 역시간 영상화의 경우 모든 주파수를 다 사용하였음.

	North (x) (m)	East (y) (m)	Depth (z) (m)	True x (m)	True y (m)	True z (m)	Norm. RMS Error (%)
At 2500 m							
Q1	7,400	7,400	2,500	7,400	7,400	2,400	1
Q2	2,400	7,400	2,500	2,400	7,400	2,400	1
Q3	2,400	2,400	2,500	2,400	2,400	2,400	2
Q4	7,400	2,400	2,500	7,400	2,400	2,400	1
At 5,000 m							
Q1	7,400	7,400	5,000	7,400	7,400	4,900	1
Q2	2,400	7,400	5,000	2,400	7,400	4,900	1
Q3	2,400	2,400	5,000	2,400	2,400	4,900	2
Q4	7,400	2,400	5,000	7,400	2,400	4,900	1
At 7,500 m							
Q1	7,400	7,400	7,500	7,400	7,400	7,400	1
Q2	2,400	7,400	7,500	2,400	7,400	7,400	1
Q3	2,400	2,400	7,500	2,400	2,400	7,400	1
Q4	7,400	2,400	7,500	7,400	2,400	7,400	1

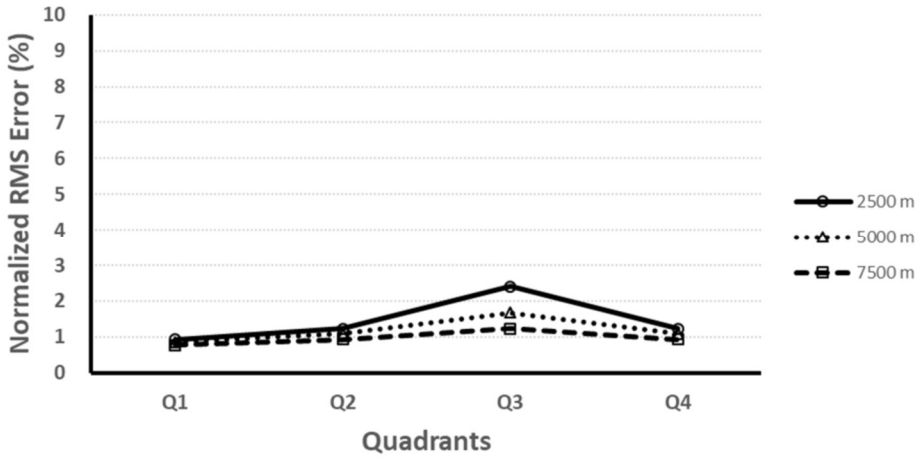


그림 57. 12 가상 진원 실험에 대한 자기 상관을 이용한 역시간 영상화 위치 결정 결과의 정규화된 RMS 오차 그래프

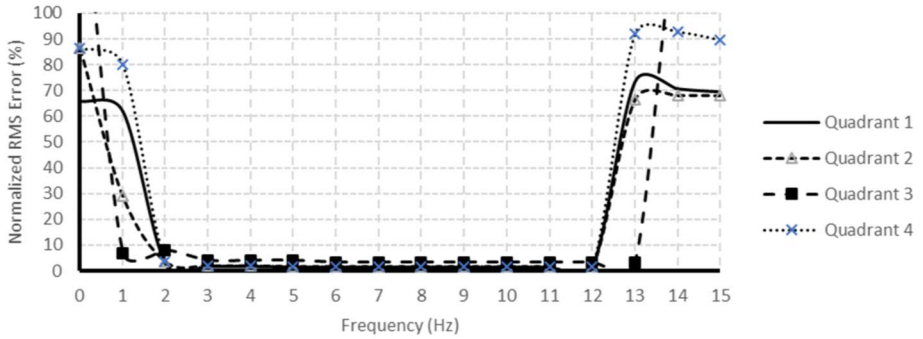


그림 58. 2,500 m 심도에서의 각 사분면 가상 진원에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과의 정규화된 RMS 오차

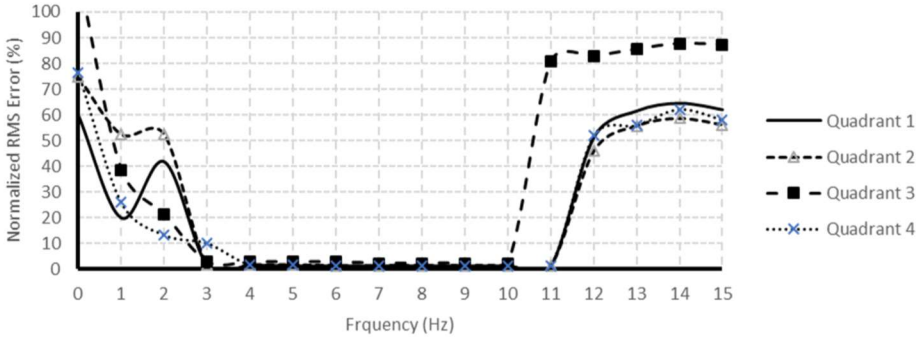


그림 59. 5,000 m 심도에서의 각 사분면 가상 진원에 대한 단일 주파수 역시간 영상화 위치 결정 결과 정확도 비교

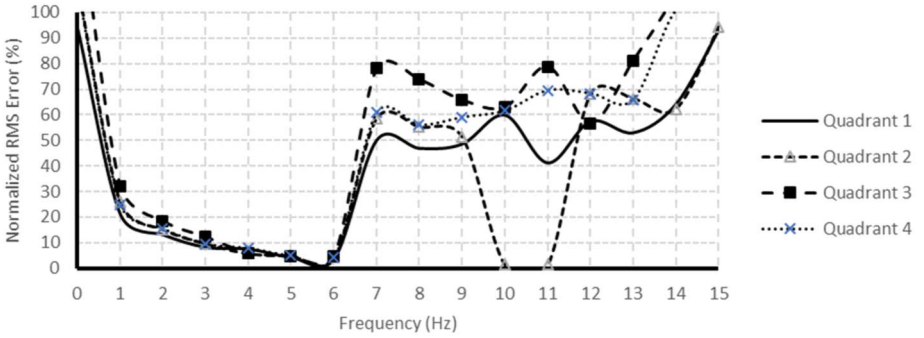


그림 60. 7,500 m 심도에서의 각 사분면 가상 진원에 대한 단일 주파수 역시간 영상화 위치 결정 결과 정확도 비교

A3. 훑기파를 진원으로 이용한 수치 실험

합성 자료에 대한 역시간 영상화를 수행한 3 장에서 단일 주파수를 이용한 위치 결정 결과는 양단에서 정확도가 감소한다. 이 현상이 합성 자료 생성 수행 시에 사용한 0~15 Hz 리커 요소파의 주파수 대역에 영향을 받기 때문인지 확인한다. 이를 위해 정해진 주파수 대역에서 비교적 일정한 진폭 스펙트럼을 가지는 바이브로사이즈에서 흔히 사용되는 훑기 신호를 진원으로 이용하여 역시간 영상화 결과에 어떤 영향을 끼치는지 확인해보았다.

먼저 그림 61은 시간 영역에서의 훑기 신호를 보여준다. 그림 62는 훑기 신호의 진폭 스펙트럼으로 0~25 Hz 대역을 사용했음을 보여주고 있다. 그림 63는 정의된 훑기 신호를 이용하여 합성 자료를 생성하여 100 개 규칙적으로 배열된 수진기에서 기록한 그림이다. 그림 64는 리커 요소파와 훑기 신호를 이용했을 때 단일 주파수 위치 결과를 비교하고 있다. 진원의 주파수 대역이 넓어지면서 신뢰도 있는 위치 결정 결과를 제공할 수 있는 주파수 대역도 증가하였음을 볼 수 있다.

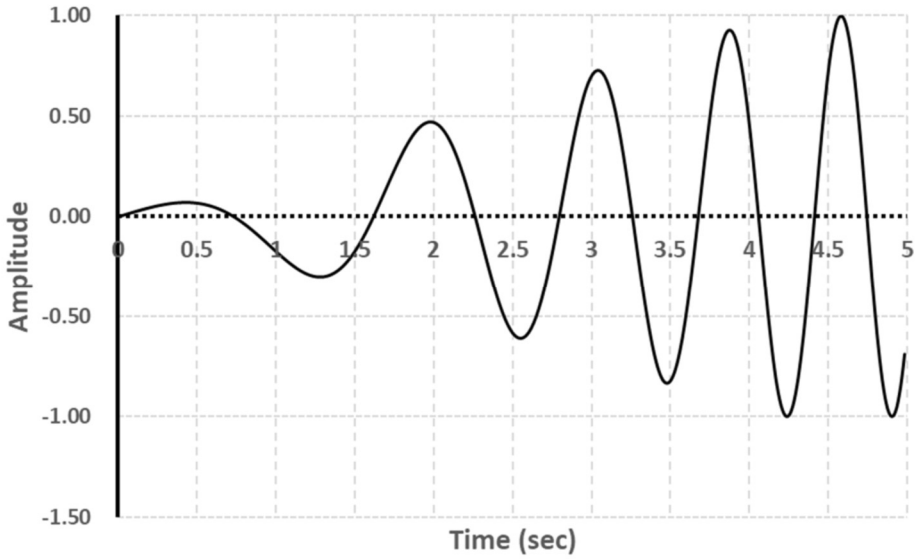


그림 61. 선형 훑기파 진원

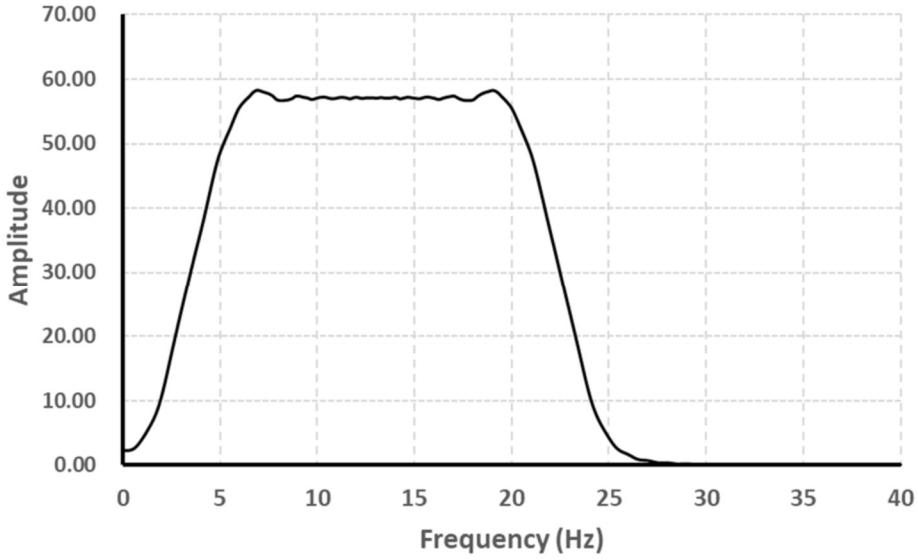
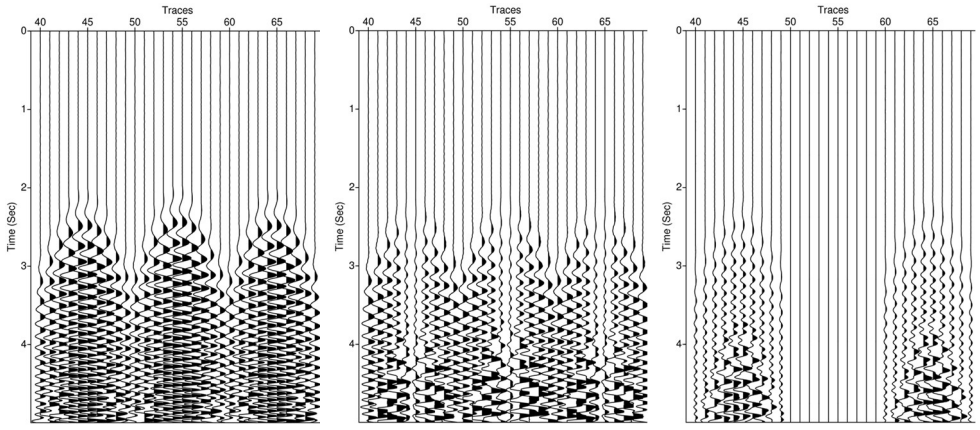


그림 62. 그림 61 훑기 신호의 진폭 스펙트럼



(a) (b) (c)

그림 63. 선형 훑기파를 이용하여 얻은 100 개 수진기를 사용한 경우 3 성분 탄성파 기록, (a) z 성분, (b) y 성분, (c) x 성분, 도시 목적으로 근거리 벌림 49~59 번째 트레이스만 도시함

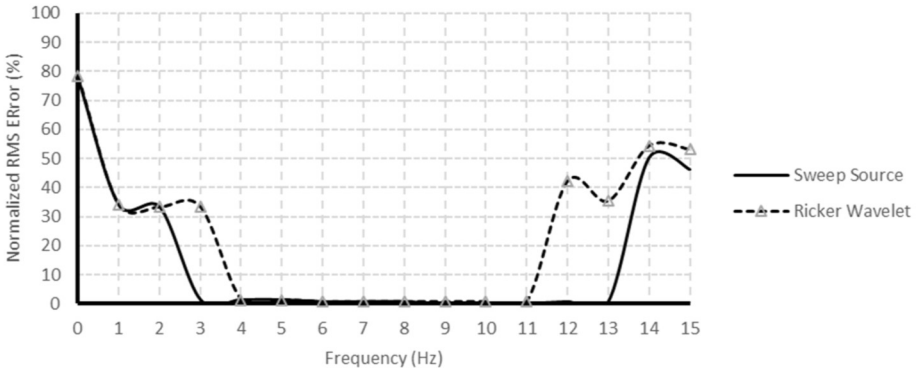


그림 64. 훑기파와 리커 요소파를 이용하여 합성한 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화 위치 결정 결과 정확도 비교

A4. 100 개 수진기를 사용한 경우에 대한 보충 그림

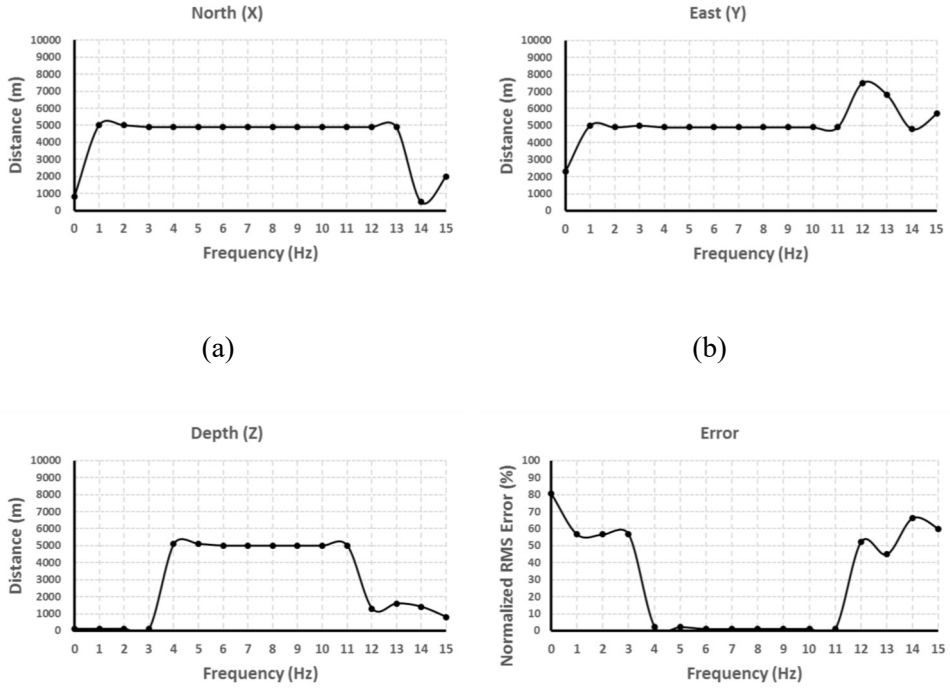


그림 65. 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900) (잡음이 없는 경우)

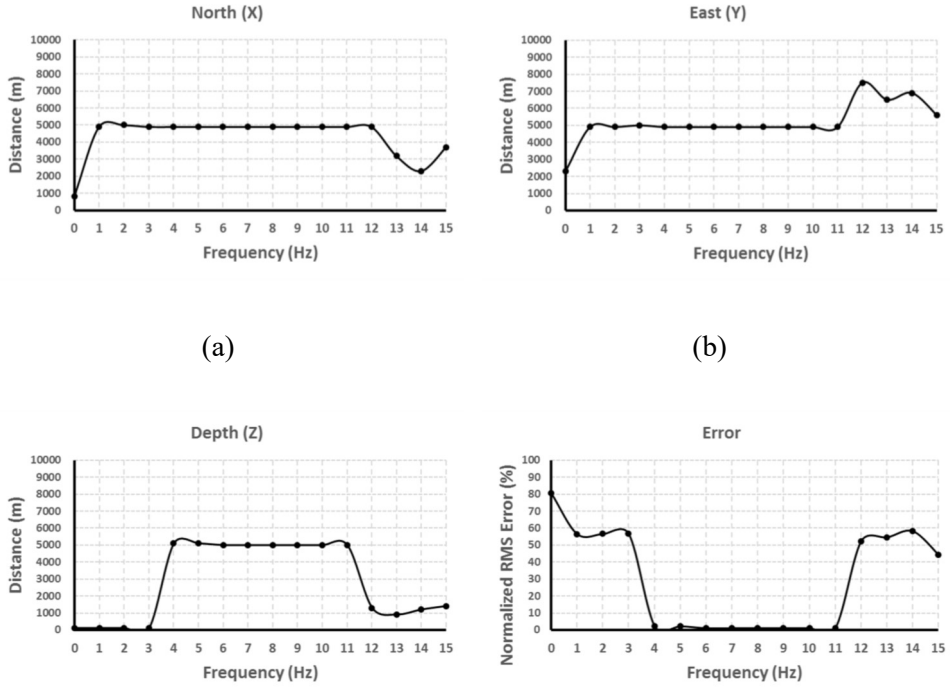


그림 66. 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900) (신호 대 잡음비가 40인 경우)

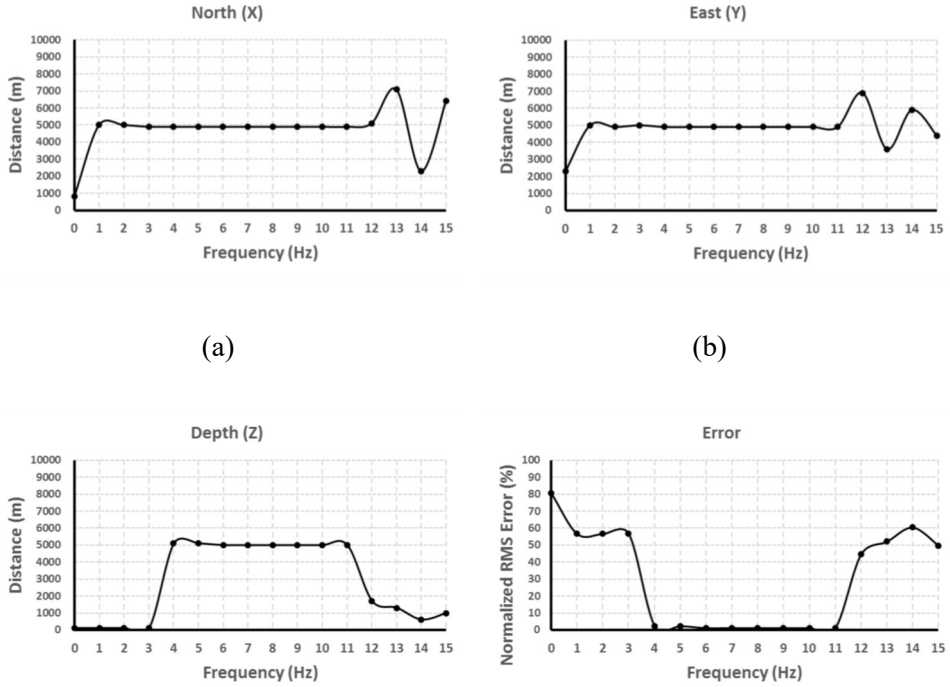


그림 67. 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900) (신호 대 잡음비가 20인 경우)

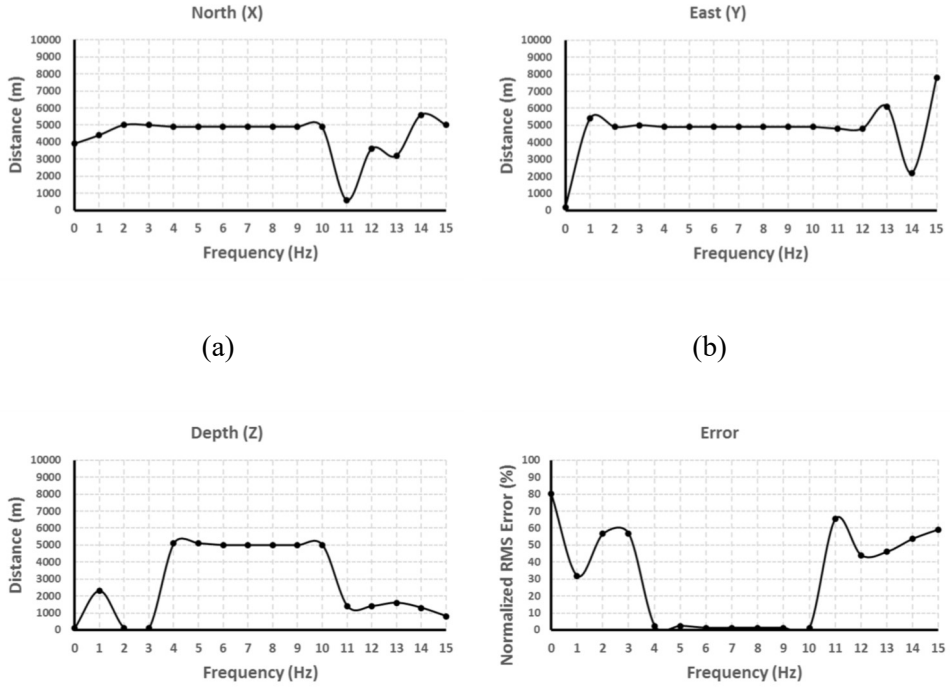


그림 68. 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900) (신호 대 잡음비가 10인 경우)

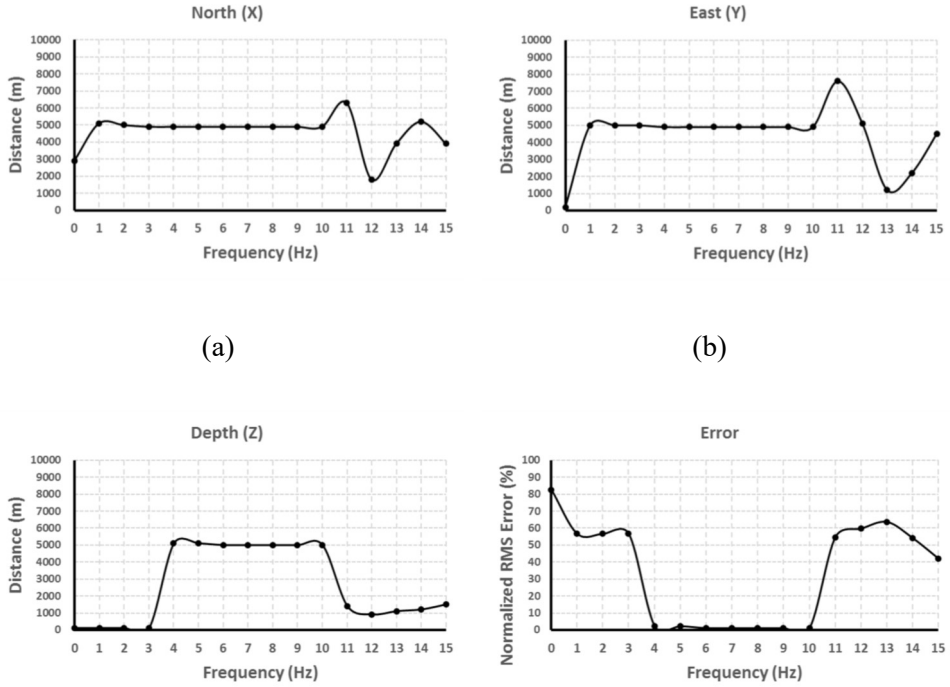


그림 69. 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900) (신호 대 잡음비가 8인 경우)

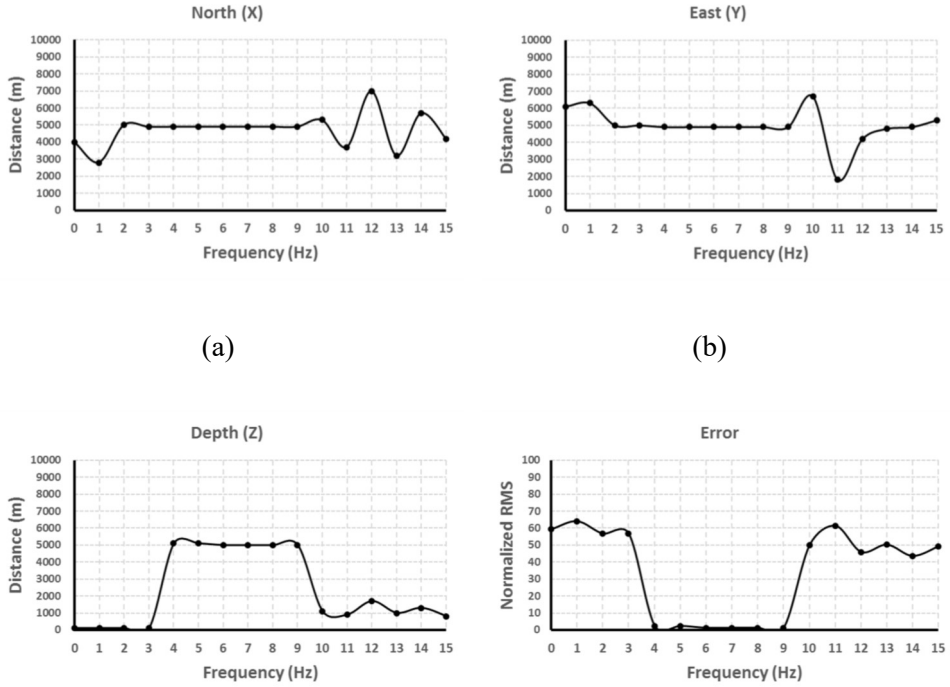


그림 70. 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900) (신호 대 잡음비가 4인 경우)

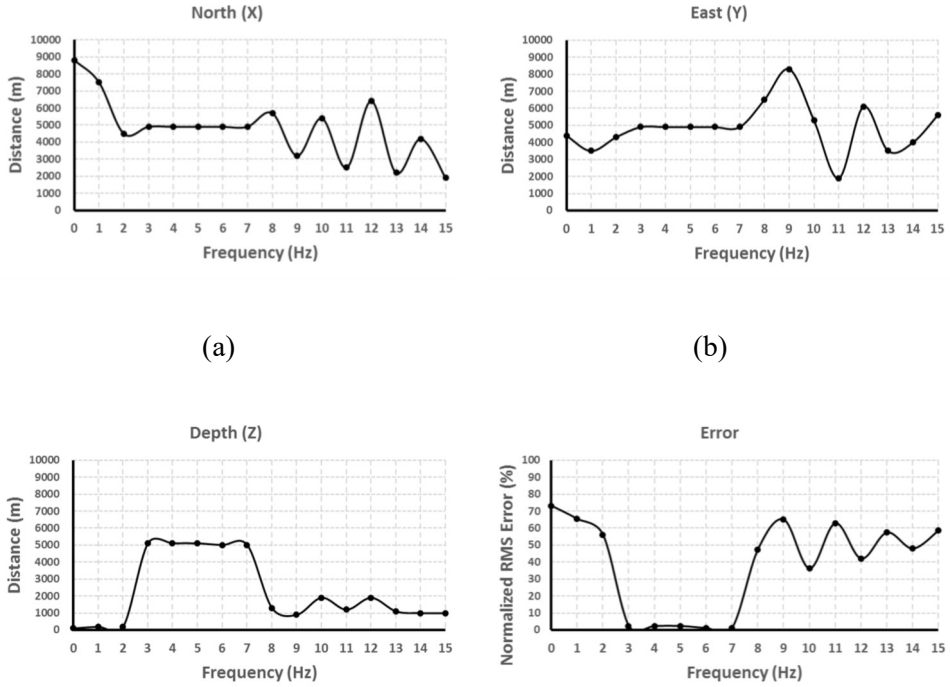


그림 71. 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900) (신호 대 잡음비가 2인 경우)

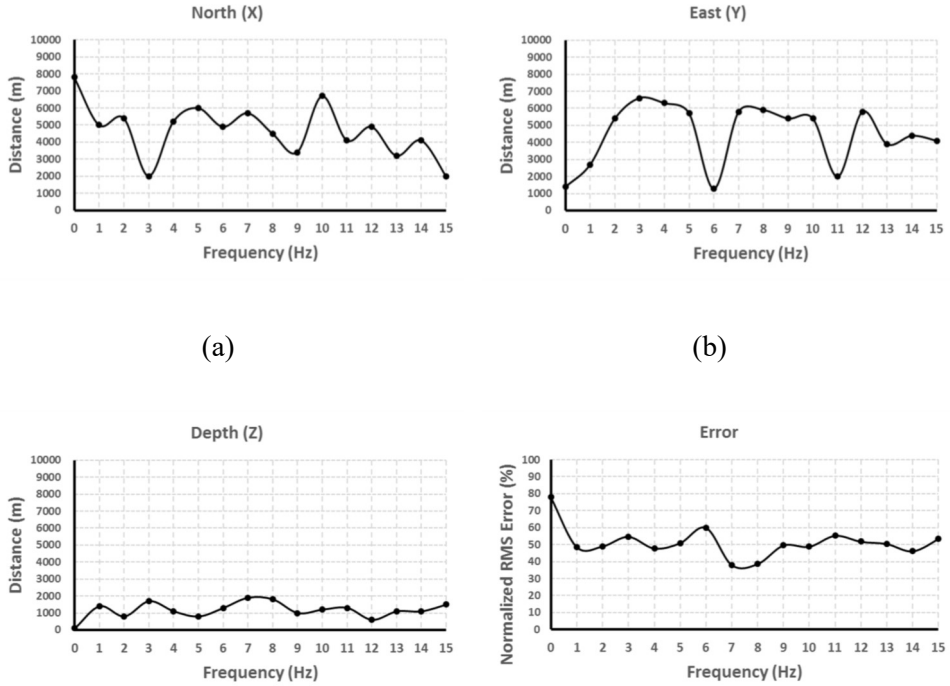


그림 72. 100 개 수진기 자료에 대한 단일 주파수 역시간 영상화를 이용한 위치 결정 결과 (a) x 성분, (b) y 성분, (c) z 성분, (d) 결정된 위치의 정규화된 RMS 오차, 진원은 (4,900, 4,900, 4,900) (신호 대 잡음비가 1인 경우)

A5. 시간 창 결정법

역시간 영상화 방법은 수진기에 기록된 모든 정보를 이용하여 진원을 재현하는 기술로, 원리상 사용하는 수진기 기록은 길수록 더 많은 정보를 활용하여 진원을 더 정확하게 재현할 수 있다 (Gajewski & Tessmer, 2005).

하지만 시간 창을 너무 길게 선택하게 되면 너무 많은 탄성파 기록이 섞여서 작은 규모의 진원이 상대적으로 작아서 구분하기 어려워진다. 중첩된 여러 진원을 구분하는 방법으로는 행렬의 특이 값 분해(SVD, Singular Value Decomposition)를 이용한 연구가 있으나 (Prada, et al., 1996), 특이 값 분해를 위한 추가적인 연산이 필요하기 때문에, 본 연구에서는 고려하지 않았다.

또한 CPU와 메모리, 하드 디스크와 같은 컴퓨터 자원에 한계가 있기 때문에, 한 번에 처리하는 자료의 길이가 길수록 자료 획득 소프트웨어에서 다루기 힘들어진다. 하나의 긴 자료에 대해서 역시간 영상화가 완결 되어야 위치가 결정이 되고 그 다음 자료에 대한 처리가 시작 되므로, 기록 시간이 너무 길면 영상화 및 위치 결정 결과의 갱신도 느려지게 된다.

따라서 탐사 지역이 정해졌다면, 탐사 지역의 알려진 평균적인 속도 모델 정보를 이용해서 다음과 같이 적절한 시간 창의 길이를 결정한다. 우선 평균적인 S 파의 속도를 V_S 라고 하고 예상되는 진원을 $(x_{test}, y_{test}, z_{test})$, 진원에서 가장 거리가 먼 수진기의 위치를 $(x_{far}, y_{far}, z_{far})$ 라고 정의하자. 최소한 가장 먼 수진기에서도 P 파와 S 파 직접파 위상을 확인할 수 있어야 하기 때문에, 시간 창 T_{window} 는 $\frac{\left(\sqrt{(x_{far}-x_{test})^2+(y_{far}-y_{test})^2+(z_{far}-z_{test})^2}\right)}{V_s}$ 로 정한다. 이것보다 크면, 하나 이상의 진원에 대한 탄성파 기록을 포함할 수 있는 확률이 높아지고, 이것보다 작으면 거리가 가까운 수진기에서 기록된 탄성파 신호를 거리가 먼 수진기에서는 기록되지 않을 확률이 높아진다.

Abstract

Study of the applicability of the frequency-domain autocorrelation imaging condition for and efficient source localization

Byoungjoon Yoon

Department of Energy Systems Engineering

The Graduate School

Seoul National University

In this study, we proposed frequency-domain autocorrelation as an imaging condition for time-reversal imaging. The previous imaging conditions in time-reversal imaging required time-domain calculations such as inverse Fourier transform. The computational burden to these calculations is critical; therefore, time-reversal imaging was not the proper method for real-time event localization. We exclude these time-domain calculations for efficiency. Instead, the maximum amplitude position of the frequency-domain autocorrelation of the time-reversal wavefield is determined as a source location. We conducted numerical tests to validate our imaging condition. The synthetic data test shows that our proposed algorithm provides a credible source localization result than the conventional grid-search method does in the noisy environment even using only one frequency component with many receivers. We also applied our algorithm to the two real datasets acquired from the small monitoring network in Pohang. The real-data test shows the comparable result with the result of grid-search method.

Keywords : time reversal imaging, autocorrelation, frequency domain, passive event localization

Student Number : 2015-30291

감사의 글

2005 년에 서울대에 입학을 하여 우여곡절 끝에 만 14 년 만에 박사 졸업을 하게 되었습니다. 먼저 부족한 저를 이끌어주시고 앞으로 연구할 기회를 주신 신창수 교수님과 박권규 박사님, 편석준 교수님, 민동주 교수님, 민기복 교수님께 감사의 말씀을 올립니다. 어깨를 짓누르는 중압감에 포기하고 싶은 시간도 있었지만, 많은 분들께서 매순간 도와주셔서 포기하지 않고 나아가 박사과정을 무사히 마칠 수 있었습니다. 도와주신 모든 분들께 이 자리를 빌어 감사드립니다.

선배님들께서 해주신 조언들 중 기억에 남는 한 가지만 꼽아보자면, “박사 학위는 마치 운전 면허처럼 딴 후에 어떻게 연구하는지가 더 중요하다”라는 말을 꼽을 수 있을 것 같습니다. 이 말은 과정 중에는 스스로에 대한 자괴감을 극복하고 앞으로 나가게 도와주었던 말이었습니다. 앞으로도 이 말씀을 가슴에 새기고 작은 성취에 취해 교만에 빠지지 않고 끈기 있게 공부하고 연구하여 그 결과를 공유하는 연구자가 되겠습니다.

무엇보다도 고비마다 쓰러지는 저를 붙잡고 일으켜 주시고 앞으로 갈 수 있게 해주신 제 영웅이자 멘토이신 아버지와 어머니, 그리고 철없는 사위지만 끝까지 믿고 물심양면으로 지원해주신 장모님 장인 어른께 감사의 말씀을 올립니다. 방문 할 때마다 맛있는 음식과 용기를 주신 스마트 하신 용우 형님 지은 누나 부부, 그리고 총명 소년 주원이에게도 감사드립니다. 힘들다고 투덜거릴 때마다 제작한 잼스터 동영상으로 잠시나마 웃게 해준 여동생 정민이도 고맙고 2019년 파이팅☺

끝으로 학부에서 석사, 연구원 생활, 박사 과정까지, 장장 10 년의 세월을 좋은 일 나쁜 일 할 것 없이 모든 과정을 함께 겪은 평생의 반려자인 별이에게도 표현할 길 없는 고마운 마음을 전합니다. 바쁘기만 한 아빠 밑에서도 구김살 없이 씩씩하고 건강하게 자라고 있는 이제는 내 삶을 지탱하는 가장 큰 이유가 된 재한이, 그리고 미래에 태어날 둘 째 사랑스런 달(태명)이에게 감사의 마음을 전하면서 글을 마칠까 합니다.