

한반도의 폭발자료에 대한 2-D 수치 모델링 연구

2-D Forward Modeling on an Explosion Data in Korea

강익범* · 조광현**

Kang, Ik Bum · Cho, Kwang Hyun

Abstract

To enhance capability on discerning local and regional seismic phases, such as, Pn, Pg, Sn, Rg, etc, within the crust, 2-D numerical forward modeling will be applied to the data obtained from local seismic stations by simulating almost all waves including not only body wave but also surface wave generated without having to explicitly include them under consideration of Q factor. In this study, after getting rid of instrumental response by deconvolution, pseudo-spectral method instead of relying on typical numerical methods, such as, FEM(Finite Element Method) and FDM(Finite Difference Method), will be implemented for 2-D numerical forward modeling by considering velocities of P-wave and S-wave, density, and Q factors. Ultimately, the power of reaching the enhanced capability on discerning local and regional seismic phases will make it easier for us to identify the seismic source, whether it is originated from man-made explosion or pure earthquake.

Key words : Forward modeling, Q factor, FEM, FDM, pseudo-spectral method

국문요약

한반도의 지각에 대한 지진파의 파형들을 피킹하기 위하여 한반도의 남동부지역에서 시행된 폭발로부터 각 관측소에서 관측된 지진자료를 2 차원 수치 순산모델링으로 계산된 이론적인 신호와 비교하였다. 실제 지진자료와 같은 완전한 파형을 얻기 위해서는 실제파뿐만 아니라 표면파를 포함한 모든 파형을 이론적으로 생성하여야 한다. 또한, 각 파형의 Q 값을 고려하여 그 감쇄 정도를 파악하여야 실제 파형과 똑 같은 이론적인 파형을 만들 수 있다. 본 연구에서는 FEM(Finite Element Method)과 FDM(Finite Difference Method) 같은 전형적인 수치 모델링 기법 대신에 수도스펙트럼기법(pseudo-spectral method)을 사용하여 이론적인 파형을 계산하였다. Q 값을 고려하지 않았기 때문에 완전한 파형을 얻기에는 어려움이 있었다. 그러나 각 관측소에 도달하는 실제파의 초기 파형들의 주기를 실제 파형과 맞추었다는 데에 그 성과가 있다고 할 수 있다. 본 연구의 궁극적인 목표는 수치 모델링을 통하여 지진원의 위치와 종류를 밝혀 내는데 그 정확성을 높이는 것이다.

주요어 : 순산모델링, Q 값, FEM, FDM, pseudo-spectral method

1. 서론

북한의 핵폭탄 실험과 관련된 정치적이고 군사적인 문제 때문에 인공 폭발에 의한 지진파 순수 자연지진파의 식별에 대한 연구는 그 어느 때보다도 중요한 연구 분야가 되었다. 실제로 한반도의 여러 관측소에서 2006년 10월 9일에 북한에서 실시된 핵실험에 의한 신호가 관측되었다. 지진원의 종류의 식별 뿐만 아니라

* 정회원·한국지질자원연구원 책임연구원

** 정회원·한국지질자원연구원 박사후연수생, E-mail : light123@snu.ac.kr

그 지진원의 위치를 구하기 위한 많은 노력이 더욱더 필요한 실정이다. 본 연구에서는 2003년 7월 15일의 실제 폭파자료를 이론적인 파형과 비교함으로써 한반도 지각에 의한 여러 파형들을 피킹하고자 한다. 결국, 수도스펙트럼 기법(pseudo-spectral method) (Carcione et al., 1988a; Carcione et al., 1988b; Carcione et al., 1988c Kang and McMechan 1990)을 사용한 2 차원 수치 모델링을 통하여 정확한 지진원의 위치를 찾는 것이 본 연구의 최종 목표가 될 것이다.

2. 2차원 수치 모델링 분석

이론적인 지진신호와 실제 지진자료와의 비교를 통해 여러 가지 초기 파동을 찾고자 하였다. 먼저, 3 개의 지각구조로부터의 탄성과 수치 모델링을 실행하였다(그림 1).

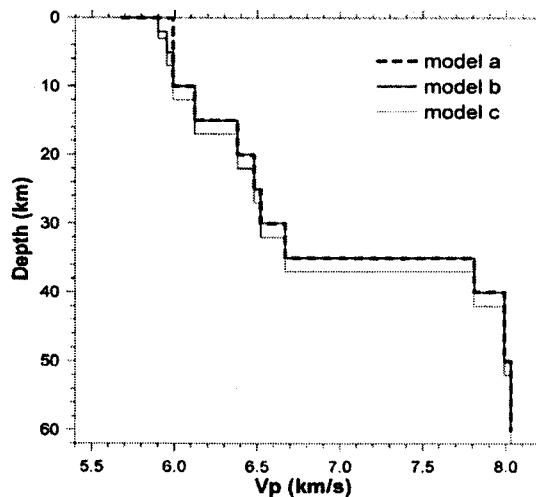


그림 1. 수치 모델링에 사용된 3 개의 지각구조

2 차원 모델에서 시간과 공간에 따라 변하는 입자 운동을 계산하기 위해 2-order 탄성과 파동방정식과 수도스펙트럼기법(pseudo-spectral method)을 사용하였다. 수치모델링에서 고주파 (~5 Hz) 의 지진파형을 얻기 위해 모델의 적당한 크기와 적당한 시간과 공간 단위를 정하여야 한다. 모델의 크기는 지표 204.8 km에서 깊이 102.4 km, 시간 단위는 0.002 초, 공간의 단위는 0.1 km 격자로 나누었다. 모델의 좌우 경계의 인위적인 경계면에서 발생하는 반사 작용을 억제하기 위해 30 노드가 사용되었다. 지표 경계면에서는 지표 경계 조건으로 10 노드의 밀도를 0으로 정하였다. 하부 경계면에서 반사작용을 억제하기 위해 60 노드가 사용되었고, 최심부 70 노드에서 반사효과(mirror source)를 방지하기 위해 밀도를 0으로 정하였다. 0.01 km 깊이에 지진원(point source)를 위치시키기 위해 우선적으로 20.48 km × 10.24 km 의 작은 모델에 대해 더 작은 시간과 공간 단위를 가지고 지진원의 에너지가 매우 약해질 때까지 사전 모델링 작업이 실행되어야 한다. 지진원의 에너지원은 10 Hz 의 고주파 리커 파형(Ricker wavelet)이다. 수도스펙트럼기법(pseudo-spectral method)의 순산 모델링 알고리즘에 의해 지각구조 모델에 대하여 수치 모델링을 하였다. 수치모델링 결과, 3 개의 지각구조 모델에 대한 이론적인 지진파형이 얻어진다. 모델링의 결과로부터 지각의 최상부의 속도구조에 따라 초기 주시와 파형에 큰 차이가 발생함을 알 수 있다. 그러므로 실제 지진자료의 여러 파형을 찾기 위하여서는 우선적으로 한반도 남동부지역의 세부적인 지각구조가 얻어져야 한다. 수치모델링의 최종 목표는 실제자료와 이론적인 지진파형과의 초기 주시와 파형을 비교함으로써 한반도 남동부 지역의 세부적인 지각구조를 구하는 것이다.

3. 분석결과 및 토의

모델 A의 수치 모델링 결과에서 초기 도달 파형은 첫번째 경계면에 대한 P파의 head wave인 Pn1이다. 하지만 Pn1의 에너지는 진원에서 매우 가까운 곳에 위치한 관측소를 제외하고는 상당히 작은 에너지를 보임을 알 수 있다. 모델 B의 수치 모델링의 결과에서 초기 도달 파형은 Pn1(offset < 60 km)과 Pn2(offset < 120 km), Pn3(offset > 120 km)이다. 초기 도달 파형들의 에너지를 모든 거리 범위에서 확인할 수 있다. 모델 C의 수치 모델링의 결과에서 초기 도달 파형은 Pn1(offset < 85 km)과 Pn2(offset > 85 km)이다. 초기 도달 파형들의 에너지는 거리에 따라 크게 감소한다. 특히, 30~50km, 100~120km의 거리범위에서 초기 도달 파형의 에너지가 매우 작다.

2004년 9월 15일에 한반도 남동부 지역에서 인공발파가 시행되었다. 15-150 km 사이의 15개의 지진관측소에서 이 신호가 관측되었다. 지진원과 관측소의 사이의 거리가 가깝기 때문에 거의 모든 파형들은 상부 지각 구조를 통하여 진행한다. 또한, 상부 지각구조에 따라 관측소로 지진파가 입사하는 각이 달라지므로 파형이 상당히 달라질 수 있다. 실제자료와 이론파형을 비교하기 위하여 상부 지각구조에 민감한 표면파 분산 분석으로 얻어진 대구(DAG)-울산(ULS) 관측소 경로의 군속도(Cho et al., 2007)를 역산하여 계산한 지각구조를 이용하여 수치 모델링을 수행하였다. 그림 2는 모델 A의 수치 모델링 결과와 Cho et al. (2007)의 지각구조의 수치 모델링 결과를 실제 폭파 자료(2004년 9월 15일)와 비교한 것이다. 실제 자료와 파형은 다르지만 초기 파동의 주기가 Cho et al. (2007)의 지각구조의 수치 모델링 결과와 유사함을 확인할 수 있다. 좀 더 정확한 파형 계산을 위하여 각 지진파 진행경로에 해당하는 지역적인 지각구조와 각 파형의 Q 값이 모델링에 적용되어야 할 것이다.

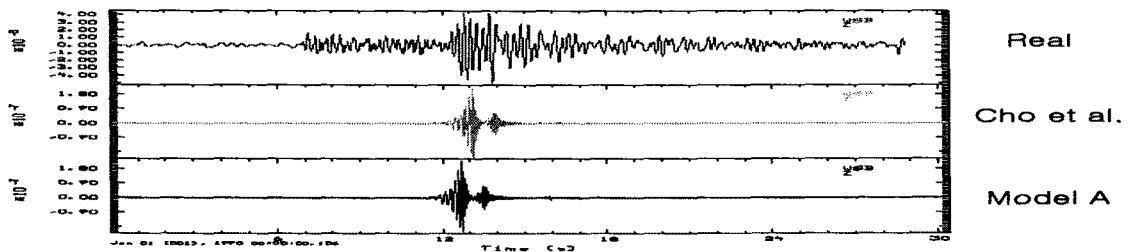


그림 2. 2004년 9월 15일에 한반도 남동부 지역의 인공발파로부터 WSB 관측소에서 관측된 실제 지진자료(붉은색)와 Cho et al. (2007)의 모델(연두색)과 모델 A (파란색)에서 얻어진 이론적인 파형의 비교.

참고문헌

- Carcione, J. M., D. Kosloff, and R. Kosloff, 1988a, Wave propagation in linear viscoacoustic medium, *Geophys. J.*, 93, 393-407.
- Carcione, J. M., D. Kosloff, and R. Kosloff, 1988b, Wave propagation in linear viscoacoustic medium, *Geophys. J.*, 95, 597-611.
- Carcione, J. M., D. Kosloff, and R. Kosloff, 1988c, Viscoacoustic wave propagation simulation in the Earth, *Geophysics*, 53, 769-777.
- Cho, K. H., R. B. Herrmann, C. J. Ammon, and K. Lee, 2007, Imaging the crust of the Korean Peninsula by surface-wave tomography, *Bull. Seism. Soc. Am.*, in press.
- Kang, I. B., and G. A. McMechan, 1990, Two-dimensional elastic pseudo-spectral modeling of wide-aperture seismic array data with application to the Wichita Uplift-Anadarko Basin region of Southwestern Oklahoma, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80, 1677-1695.