

3차원 토모그래피 방법으로 본
한반도 남부지역의 상부지각 속도 특성

The characteristics of upper crust below the southern Korean
Peninsula by using 3-D tomography

박정호*

강익범**

Park, Jung Ho

Kang, Ik Bum

ABSTRACT

At starting point, 1D velocity models were inverted by using 430 events with P-wave 5147, S-wave 3729 from KIGAM, KMA, KEPRI, and KINS's seismic networks. A minimum 1D model shows that P-wave velocities are around 6.0 ± 0.5 km/s slowly increasing with depth between surface and 15 km. The velocities are about 6.4 ± 0.2 km/s below 15km to 35km.

The earthquake data number for 3D tomography was 630 adding to previous 430 events with limitation of more than 6 station detection and relocation stability of location. The checkerboard test shows that only upper crust part from surface to 17 km have reliable resolution. The results of upper crust part present that the boundary of Gyeong-sang basin and Youngnam massif is mach well velocity variation pattern. The western part of the basin is shown as lower velocity and south-eastern part as higher. This is because that sedimentary rocks are widely located around western part of the basin and volcanic origin rocks are distributed around south-eastern part.

1. 서론

국내 지진관측망은 기상청의 관측망 현대화 사업과 함께 1998년부터 본격적으로 정비되기 시작하였으며 현재 전국적으로 기상청 가속도 관측소(41개)를 포함하여 약 120여개의 지진관측소가 실시간 자료 수집용으로 운영되고 있다(그림1).

이러한 관측망의 확충으로 진앙지 결정 정확도와 기록자료의 신뢰성이 매우 향상되었으며, 우리나라에서도 지진토모그래피를 수행 할 수 있는 어느 정도의 자료가 축적되었다. 따라서 본 연구에서는 국지지진자료의 실체파(P파와 S파)의 주시자료를 이용하여 한반도 남부지역에 대한 3차원 토모그래피를 수행하였으며, 그 결과 경상분지의 백악기 퇴적층의 발달특징과 백악기 불국사 화강

* 정회원 · 한국지질자원연구원 지진연구센터, 연구원

** 정회원 · 한국지질자원연구원 지진연구센터, 책임연구원

암의 분포 기원에 대하여 상부지각의 깊이 정도까지 대략적으로 그 발달 특징을 짐작할 수 있게 되었다.

2. 연구 방법

3차원 국지 지진토폴로그래피는 원거리 지진과 토폴로그래피에 비하여 연구지역의 속도 구조가 복잡하므로 초기 모델을 현실적으로 설정하는 것이 매우 중요하다. 이에 대하여 Thurber(1993)는 국지 지진의 지진목록과, 1차원 속도 구조를 함께 고려하는 'A minimum 1-D velocity model'을 제안하였다. 이는 RMS를 최소화할 수 있는 지진 목록과 속도구조 세트를 의미하며, 여러 세트가 존재할 수도 있는 것이다. 이런 최소 오차를 보이는 지진목록과 1차원속도구조는 3차원 토폴로그래피에 초기모델로 사용됨으로써,

3차원 토폴로그래피의 초기모델 의존성의 약점을 다소 보완 할 수 있도록 하였다. 본 연구에서도 이와 같은 절차를 따랐다. 그림2는 간단한 연구수행 절차를 보여주고 있다. 3차원 속도구조 모델을 사용하여 발파 이벤트의 위치를 재결정함을 통해 수립된 모델을 검증하여 보았다.

3. 지진자료

한국지질자원연구원과 기상청에서 1999년 1월부터 2004년 12월까지 관측된 지진목록을 취합하여 국내 가속도관측소를 포함한 107개 관측소에서 기록된 국지지진의 주시자료를 취합하였다. 한국지질자원연구원 데이터베이스에서 취한 지진목록과 기상청에서 제공된 목록을 취합하여 하나의 지진목록을 만들었으며, 위 관측기간 중에 취합된 지진은 최초 736개였고, 이 중에서 6개이상의 관측소에서 동시에 관측되고, 내륙지역과 근해에 위치하는 지진을 추출하여 430개의 지진을 1차원 모델 역산에 사용하였다. 이 때 사용된 P파는 5147개 S파는 3729개이고, 관측소와 진앙 거리에 따라 가중을 두어 직접 도착하는 초동파가 관측될 수 있는 거리인 150 km 이내에는 가중치 1로 하고 그 이상이 될 때에는 선형적으로 가중치가 감소되도록 하였다.

3차원 토폴로그래피를 수행하기 위해서는 430개의 지진의 분포지역이 내륙에 집중되어 있으므로 근해에서 발생한 지진 중 1차원 속도 모델에 대하여 진앙위치의 변화가 적은 것들을 추가로 선별하여 약 630개의 지진을 사용하였다. 이 때에도 1차원 모델 역산과 유사한 방법으로 거리에 따른

국내 지진관측소 분포도

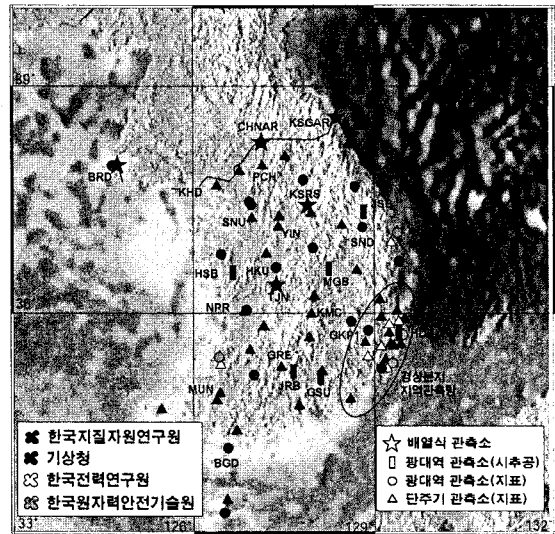


그림 1. 주요 지진관측기관의 관측소 분포도

Procedure

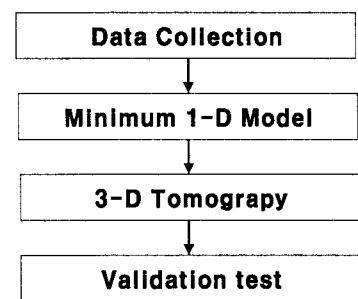


그림 2. 연구의 주요 절차

가중치 변화를 주었다.

4. Minimum 1-D Model

기존에 발표된 1차원 속도 모델 5개(Kim & Kim (1983), Kim S. K. (1995), Chung T. W. (1995), Kim W. H. (1998), Choi H. S. (2000))를 초기모델로 사용하여 1차원 minimum 모델을 역산하였다. 각 속도 층의 두께는 역산시 고정하였으며, 진원위치 와 속도 구조를 동시에 역산하는 방법을 사용하였다. 역산 단계별로 검토를 거쳐 비슷한 속도 층은 통합하면서 속도층의 두께를 조정하였다. 그림3은 역산된 P파와 S파 속도 구조를 (a)에 그리고 역산단계별 RMS 감소를 (b)에 서 보여주고 있다. 최종 1D Minimum Model이 가장 낮은 RMS를 나타내고 있으며, P파와 S파 간에 다소 차이는 있으나, P파의 속도를 기준으로 보면, 지표에서 약 15km 까지는 초기모델에 따

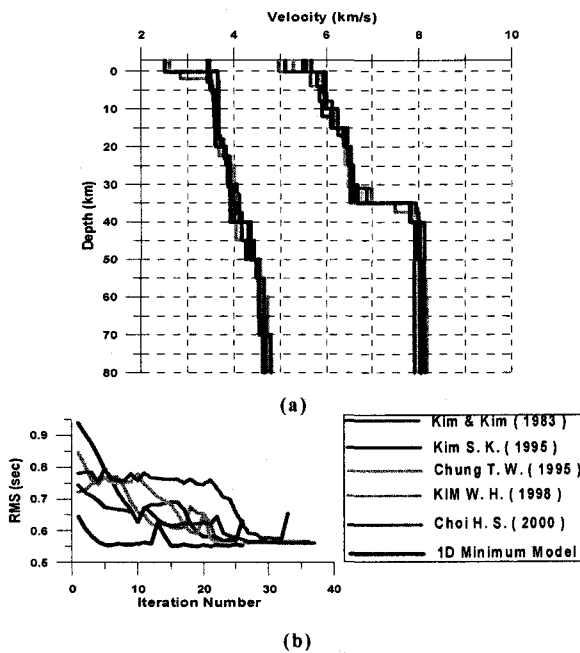


그림 3. (a) 1차원 모델 역산 결과, (b) RMS 변화

른 역산 결과의 분산이 약 $\pm 0.5\text{km/s}$ 정도로 나타나면서 점차 깊어짐에 따라 속도가 증가하고, 15km 이하에서는 약 $\pm 0.2\text{km/s}$ 정도로 나타나면서 속도 분산이 줄어들고 깊이에 따른 속도 증가 폭은 작게 나타난다. 35km 이하에서는 맨틀 상부의 속도에 해당하는 분포를 보이고 있다.

5. 3-D Tomography

3차원 지진파 토모그래피를 위해 내륙 및 해역의 비교적 안정적인 630개의 지진으로부터 P파 6,454개, S파 3,878개의 주시자료를 사용하였다. 수직 모델의 수평 격자는 약 30km 간격이며 수직 간격은 2km~20km 로 깊이에 따라 점차적으로 변화를 주었다. 단순격자 모델을 사용하여

수치 모델을 시험하여 보았다. 이는 연구지역에 대한 자료와 관측소의 기하학적 배치가 어느 정도의 해상도를 지원할 수 있는지를 시험해 볼 수 있는 가장 쉬운 방법이다. 단순격자시험에 의하면 약 17km 상부까지는 신뢰성이 있는 것으로 나타났다. 자료의 오차가 역산 해에 과도하게 전달되는 것을 막고, 해의 안정적 수렴을 위하여 damping 값을 10에서 100까지 변화 시키면서 1차 역산시 RMS 감소가 높고 자료 분산이 작은 값을 각각 계산하여 40으로 선정하였다.

역산결과 상부 지각에 해당하는 깊이의 속도 변화 양상을 주요 지체구조구의 경계선(점선)과 대비하여 그림 4에 나타내었다. 복잡한 지구조영향을 받은 연구지역에 대하여 소독도 변화와 양상과 단순 비교하기는 쉽지 않다. 따라서 비교적 단순한 지질구조를 나타내는 경상분지 지역을 위주로 속도해석을 실시하였다. 3, 7, 12 km 단면에서는 경상분지의 좌측경계를 따라 속도분포 경계가 나란하고, 경상분지내에서 서쪽으로 대체로 저속도가 동남쪽에는 고속도가 분포하지만, 깊이가 변함에 따라 분포 양상이 다소 복잡하다. 수직단면(그림 5)에서도 경상분지의 좌측경계가 뚜렷이 구별되고, 분지의 깊이가 좌측경계에서 분지 내부로 갈수록 깊어지고, 다시 해안쪽으로 가면서 낮아지는 전형적인 퇴적 구조가 잘 나타나고 있다. 이는 백악기 퇴적암이 경상분지 서쪽부에 넓게 분포하고 동남쪽으로는 화산성 쇄설물과 백악기 화강암들이 분포하는 지표지질과 잘 일치하는 결과로 볼 수 있다.

6. 결론

국내 지진관측 자료를 사용하여 국지 지진과 토모그래피를 수행하여 경상분지의 퇴적분지 형태에 대한 이해를 도울 수 있는 관측 결과를 도출 할 수 있었다. 지표 지질 조사 자료만을 가지고 경상분지의 하부 구조에 대하여 추론을 하기에는 그 광역적이고 깊이가 깊어 쉽지 않다. 지진과 토모그래피의 수직 단면에서 나타나는 저속도층의 분포 양상을 볼 때 경상분지와 영남육괴의 경계를 이루는 분지 서쪽에 넓게 분포하는 백악기 퇴적층(신동층군, 하양층군)의 위치와 저속도 분포가 잘 일치하고, 저속도층의 깊이도 깊어지는 결과를 볼 때 경상분지 서쪽과 대구지역의 하부에 백악기 퇴적층과 관련이 있는 저속도층이 분지 내 다른 지역에 비하여 두껍게 분포하고 있을 것으로 추정된다. 반면 화산기원의 유천층군과 불국사 조산운동과 관련이 있는 화성암의 분포 지역인 분지 동남부에는 속도가 주변에 비하여 빠른 특징을 보여주고 있으며 퇴적분지의 깊이도 알아질 것으로 추정된다.

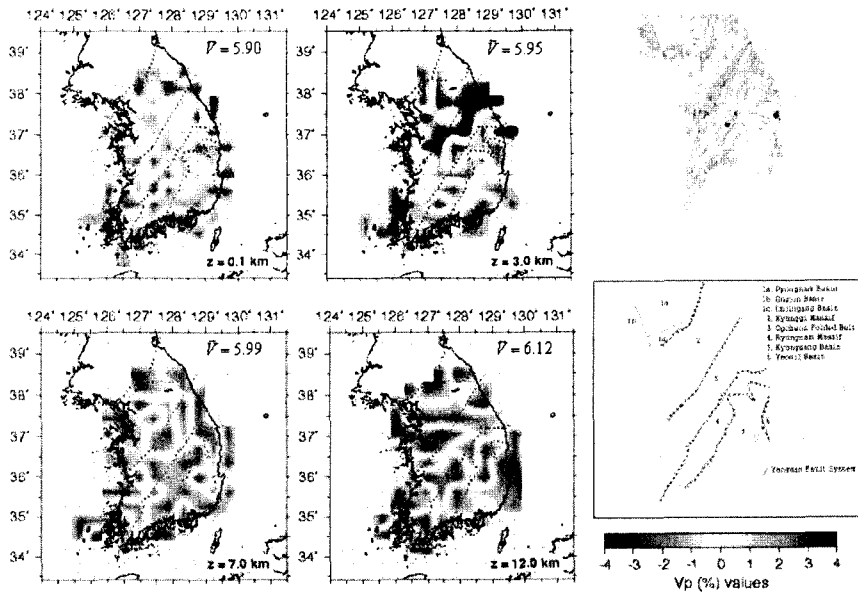


그림 4. 깊이별 수평단면상의 P파의 상대적 속도변화. 각 단면 우하단에는 깊이가, 우상단에는 기준 속도 값이 표시되어 있고, 우측상단에는 연구지역 화성암 분포도, 우하단에는 지체구조 분포를 나타내고 있다.

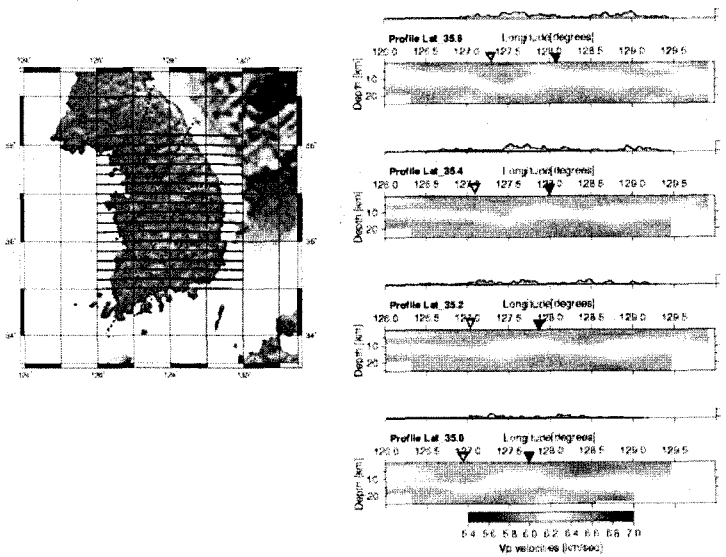


그림 5. 연구지역의 위도에 평행한 수직 단면도. 각 단면도 위에는 고도변화를 (깊이의 2배율), 좌상단에는 기준 위도를 표시를, 단면도 최하단에는 속도 컬러 막대그래프를 표시한 것이다.

참고문헌

1. Thurber, C. H., Local earthquake tomography: Velocities and V_p/V_s -theory, in H. M. Iyer and K. Hirahara (eds.), Seismic Tomography, Chapman and Hall, 1993, 563-583
2. Choi, H. S., Estimation of crustal velocity structure in southeastern Korea, M. S. Thesis, SNU, Seoul, Korea, 2000
3. Chung, T. W., A quantitative study on the crustal structure of the Korean peninsula based on the earthquakes from 1991 to 1994, Jour. Korean Earth Science Society, 1995, 16, 152-15
4. Kim, S. J., and Kim, S. G., A study on the crustal structure of South Korea by using seismic waves, Jour. Korean Inst. Mining Geol., 1983, 16, 51-61
5. Kim, S. K., A study on the crustal structure of the Korean peninsula, Jour. Geol. Soc. Korea, 1995, 31, 393-403
6. Kim, W. H., The P-wave velocity structure of upper crust around Yangsan fault, 2nd International Symposium on Seismic Hazards and Ground Motion in the Region of Moderate Seismicity, 1998, 166-177