

남한지역에서의 3차원 P파 속도구조

박재우¹⁾, 전정수²⁾, 민경덕¹⁾, 제일영²⁾

1. 서론

정확한 진앙위치를 결정하는 것은 지진 관측망의 중요한 목적 중 하나인데, 이를 위해 지각의 단순화된 속도 모델을 가정한 후, 그 모델을 통해서 전파하는 지진파의 진행시간을 계산하고, 진앙의 위치를 결정하게 된다. 하지만, 진앙 위치, 지각 속도모델, 관측소의 특성 등에 의해 계산된 시간과 관측된 실제 주행시간과의 차이가 발생하므로, 결국, 진앙위치의 정확도는 지각의 3차원적인 속도구조의 정확도와 밀접한 관련이 있다고 할 수 있다.

본 연구는 한국지질자원연구원에서 제공한 1999년 4월부터 2000년 9월까지 14개 관측소에서 관측된 1120개의 지진 데이터를 바탕으로, 남한지역에서의 3차원 지각 속도구조를 지진 토모그래피 방법을 적용하여 구해 보았다.

2. 이론과 연구방법

i 번째 지진에서 j 번째 관측소를 T 시간 동안에 진행하는 실체파의 주행시간은 함수로

$$T_{ij} = F(t_i, \sum_{k=1}^3 x_k, \sum_{l=1}^L m_l) + e \quad (1)$$

가 되며, 여기서 x_k 는 진앙 변수, m_l 은 속도모델 변수이고, t_i 는 지진 발생시간이다. 또한, 관측된 도착시간 t_{ij}^{obs} 과 계산된 도착시간 t_{ij}^{cal} 의 차이는 위 식을 선형화하여,

$$r_{ij} = \sum_{k=1}^3 \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_k} \Delta x_k + \Delta t_i + \sum_{l=1}^L \frac{\partial T_{ij}}{\partial m_l} \Delta m_l \quad (2)$$

가 되고, 연산 과정은 속도모델 변수와 진앙의 위치를 동시에 변화시키며 r_{ij} 가 최소가 되는 조건을 찾는 것이다.

3. 최소 1차원 속도모델

3차원 속도구조를 역산하기 위해서 정확한 초기 속도모델 값을 알아야 하는데, 우선, 1차원 초기 속도모델을 구하기 위해 1936년 이후부터 제시된 다양한 한반도의 속도구조를 근거로 하여, 각 층의 속도 범위를 한정된 후, 그 사이에 10개의 속도모델을 설정하였고, 각 모델을 지표로부터 19km까지 1~2km간격, 그 이하는 4~5km간격으로 나누었다. 데이터는 4개 이상의 관측소에서 관측되고, residual time이 4.0초 이하인 190개의 지진을 선택하였다.

역산 과정 중 속도, 진앙위치, 관측소 지연이 크게 변하지 않고, 총 RMS가 크게 떨어지며, 관측소 지연이 지질학적 의미를 지닐 때의 속도모델과 관측소 지연을 합쳐서 최소 일차원 모델이라고 하는데 (Kissling et al., 1994) 이와 같은 조건을 만족할 때에 속도의 수렴 범위를 구하고, 속도값이 비슷한 층을 합쳐서 단순화시켜 최소 일차원 속도모델을 구하였다(Fig. 1). 그 결과, 진앙의 RMS는 1.261초에서 0.953초로 감소하였고, Fig. 2에서 보는 바와 같이 대부분의 진앙의 깊이는 20km내로 분포하였다.

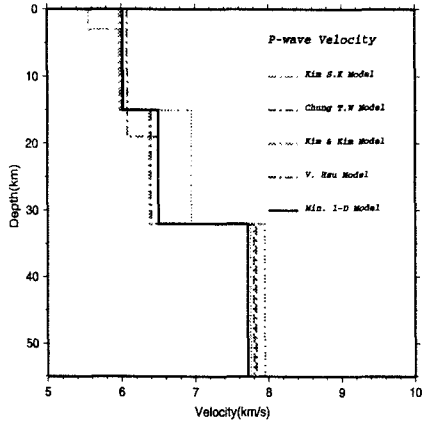


Fig. 1. The solid black line shows the Min. 1D P-velocity model. The dashed lines are the velocity models that are proposed for 1D P-velocity model.

특히, 38.3° N, 127.7° E와 36.7° N, 127.2° E지역은 대규모 발파장으로서, 같은 위치에서 발생한 지진이 관측소 특성, picking error등에 의해 관측망의 중심에서 길게 늘어진 형태로 관측되었으나, 재결정된 후에는 한 곳으로 집중되어 나타났다.

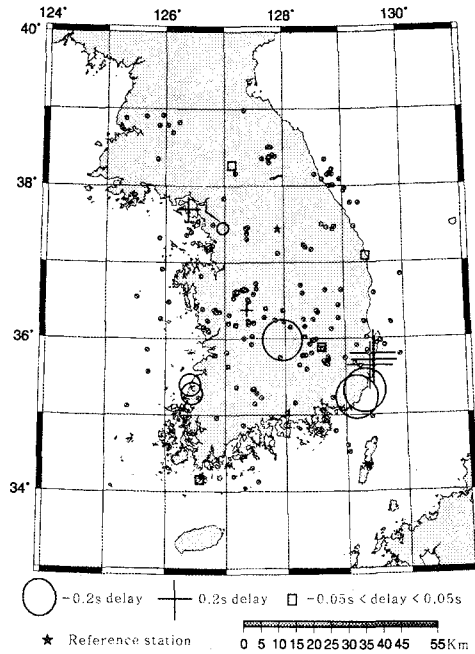


Fig. 2. Distribution of seismicity and station delays. Small full circles are the events inverted by the Min. 1D P-velocity model. Open circles show negative delays. Crosses show positive delays.

한편, 지진파의 속도는 두꺼운 퇴적층에서는 감소하는 반면, 변성암류 및 화강암류에서는 증가하는데, 퇴적층이 분포하는 연일분지 지역의 관측소에 양의 관측소 지연이 크게 나타나고, 주로 변성암이 분포하는 영남육괴와 육천대 남부지역에 음의 관측소 지연이 크게 나타남으로써, 지질학적 구조와도 잘 일

치하였다(Fig. 2).

일반적으로, JHD(Joint Hypocenter Determination) 방법은 3차원 속도구조가 복잡하며, 그 값이 잘 알려지지 않은 지역에서 진앙의 상대적 위치를 크게 향상시킬 수 있다(Engdahl et al., 1982 : Pujol, 1996 : Ratchkovsky et al., 1997b). 따라서, 41개의 지진을 선택해서 JHD 방법을 적용하여 위치를 재결정해 본 결과, 재결정된 진앙의 위치는 Calibration 지진을 중심으로 전체적으로 멀어지는 경향을 보였지만, 38.3° N, 127.7° E와 36.7° N, 127.2° E 지역의 지진들이 한 곳에 집중되어 나타남으로써, 3장의 결과와 일치함을 확인하였다.

4. 3차원 P파 속도구조

3장에서 결정된 지진 중 GAP이 270° 이하이고, 처음 위치에서 크게 벗어나지 않은(30km이하) 147개의 지진을 선택하고, 수평으로 약 30×30km, 수직으로 5~10km 간격의 격자를 나누고, 최소 1차원 속도모델 값을 할당한 후 지진 토모그래피 방법을 적용한 결과, 약 3회 정도의 연산 후 수렴하였고, 진앙의 RMS는 0.743초로 감소하였다.

Fig. 3의 Layer 2(0~5km)는 전체적으로 북동 방향의 속도 분포를 보이며, 지구조적 변화를 반영하지만, 관측소 주위의 속도 변화가 두드러지게 나타났고, 이는 지진의 파선 경로에 의한 영향을 받은 것으로 판단하였다.

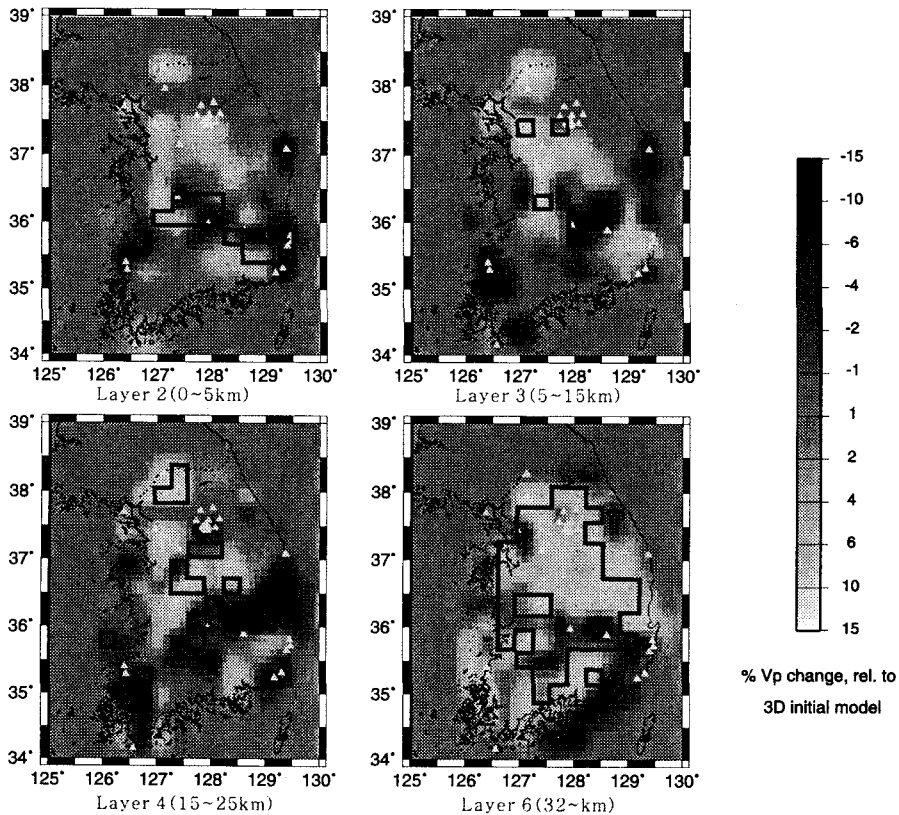


Fig. 3. Velocity change(%) relative to the initial velocity model. The thick black contour denotes the limit of reliable resolution(cells with RDE>0.1, DWS>50, and Khit>10)

Layer 3(5~15km)에서는 파의 공간 샘플링이 많지 않아 resolution 측정을 만족하는 영역은 거의 없었지만, 관측소의 영향이 비교적 적어지며, 지구조적 특징과 유사한 양상을 보였고, 경기육괴와 경상분지에 해당하는 지역은 속도값이 비교적 낮게, 그 사이에 해당하는 지역은 비교적 높지만 복잡한 속도 분포를 보였다. Layer 4(15~25km)에서는 남한의 남동부에서 북서부 방향으로 갈수록 속도 변화가 감소하는 양상을 보였다. Layer 6(35km 이하)에서는 전체적으로 해안선에서 내륙으로 갈수록 속도가 감소한 반면, 내륙 내에서는 Layer 4보다는 속도 변화가 크지 않았다. 또한, KSAR 관측소 부근의 속도값이 낮게 나타남으로써, 비교적 맨틀 경계부의 깊이가 깊을 것이라고 추정할 수 있었고, 이는 중력탐사에 의한 한반도의 모호면에 대한 결과와도 일치하였다.

5. 결론

남한에서의 3차원 P파 속도구조를 규명하기 위해, 우선 3차원 역산의 초기값으로 쓰일 1차원 속도 모델을 구하였다. 또한, 이를 JHD방법을 적용하여 그 결과를 검토하였고, 3차원 토모그래피 방법을 이용하여 지각의 속도 분포를 구하였다. 그 결과, 전체적으로 한반도의 지구조적 특성과 밀접한 관계가 있었고, 중력탐사의 결과와도 일치함을 확인하였다. 하지만, 데이터와 관측소의 개수가 충분치 못해, 한정된 부분에 대해서만 resolution 측정을 만족하는 해를 얻을 수 있었다. 따라서, 보다 많은 데이터와 초기 속도모델의 정확도를 높인다면, 3차원 속도구조에 대한 좋은 결과가 있을 것으로 기대된다.

6. 참고문헌

- E. Kissling, W.L. Ellsworth, D. Eberhart-Phillips, and U. Kradolfer, 1994, *JGR*, vol. 99, no. B10, Initial reference models in local earthquake tomography
Jose Pujol, 1988, *Bull. Seism. Soc. Am.* vol. 78. Comments on the Joint Determination of hypocenters and station corrections
김성균, 1995, *Jour. Geol. Soc. Korea* vol. 31, no. 4, 한반도의 지각구조에 관한 연구

주요어 : 지진 토모그래피, 속도모델

- 1) 연세대학교 지구시스템과학과
- 2) 한국지질자원연구원 탐사개발부