

## 한반도 남동부의 진원위치 재분석 Reanalysis of hypocenters around the southeastern area of the Korean Peninsula

박정호\*      지헌철\*      강익범\*      연관희\*\*  
Park, Jung-Ho   Chi, Heon-Chul   Kang, Ik-Bum   Yun, Kwan-Hee

---

### ABSTRACT

In this study we produced 1-dimensional p wave velocity structure of the crust using 449 P arrivals of 35 stations and we analysed hypocenters of the southeastern Korean peninsula area. A initial velocity model was selected from the priori studies and 30 different initial models were generated using random number generation from it. Using the velest program 30 different velocity structures were calculated and the result show that velocities are 5.8 - 6.4 km/sec within 6 - 16 km depth and  $7 \pm 0.2$  km/sec within 20 - 30 km with resonable resolution. Hypocenters were relocated by using resulted 1-dimensional velocity model as a initial model. Recalculated hypocenters' depth are shallower than initial data and epicenters show a little better lineality around study area but more much earthquake information are needed for the determination of relation between epicenter distribution and geological tectonic structures.

---

### 1. 서론

지진재해 분석 규모식결정 등과 같은 지진연구를 위해서는 보다 정확한 진원위치 결정이 요구된다. 진원위치 결정의 정확도에 영향을 미치는 요소로는 진앙지를 중심으로한 지진관측망의 구성, 정확한 관측시스템, 지각 및 맨틀의 속도구조 그리고 지진신호 처리자의 분석능력 등이 있다. 국내 디지털 지진관측망은 1994년 한국지질자원연구원에서 경상분지 양산단층일대의 지진활동 연구를 연구하기위하여 이동식으로 설치 운영된 것이 최초였으며, 1998년부터 지진관측망 현대화 시책의 일환으로 GPS 시각과 24bit A/D 디지털타이저를 채용한 디지털 지진계측 시스템이 설치되기 시작하여 현재 가속도전용 관측소를 제외하고 전국에 약 68개의 지진관측망이 운영 중에 있다(그림1). 진앙위치 결정 정확도 향상의 측면에서 지진관측망과 관측시스템은 하드웨어라고 한다면, 속도구조, 역산프로그램, 분석자의 정확도 등은 소프트웨어라고 할 수 있다. 지하 속도구조 산출은 진원위치와 상호 연계되어 있기 때문에 비선형문제가 내재되어 있다. 이를 극복하기 위하여 속도구조, 진원위치 그리고 관측소 보정치를 동시에 역산하는 JHD(Joint Hypocenter Determination)방법이 Douglas<sup>(1)</sup>에 의해 제시되었고 Crosson<sup>(2)</sup>, Ellsworth<sup>(3)</sup> 등에 의해 발전되었다. 이 방법은 진원위치가 속도구조에 대해 안정적인 장점이 있고, 관측소 보정치를 통하여 관측소 지하부의 지질특성을 반영함으로써 1차원 속도 구조 모델의 단점을 보완할 수 있다.

---

\* 한국지질자원연구원 지진연구센터, 정회원

\*\* 전력연구원 선임연구원, 정회원

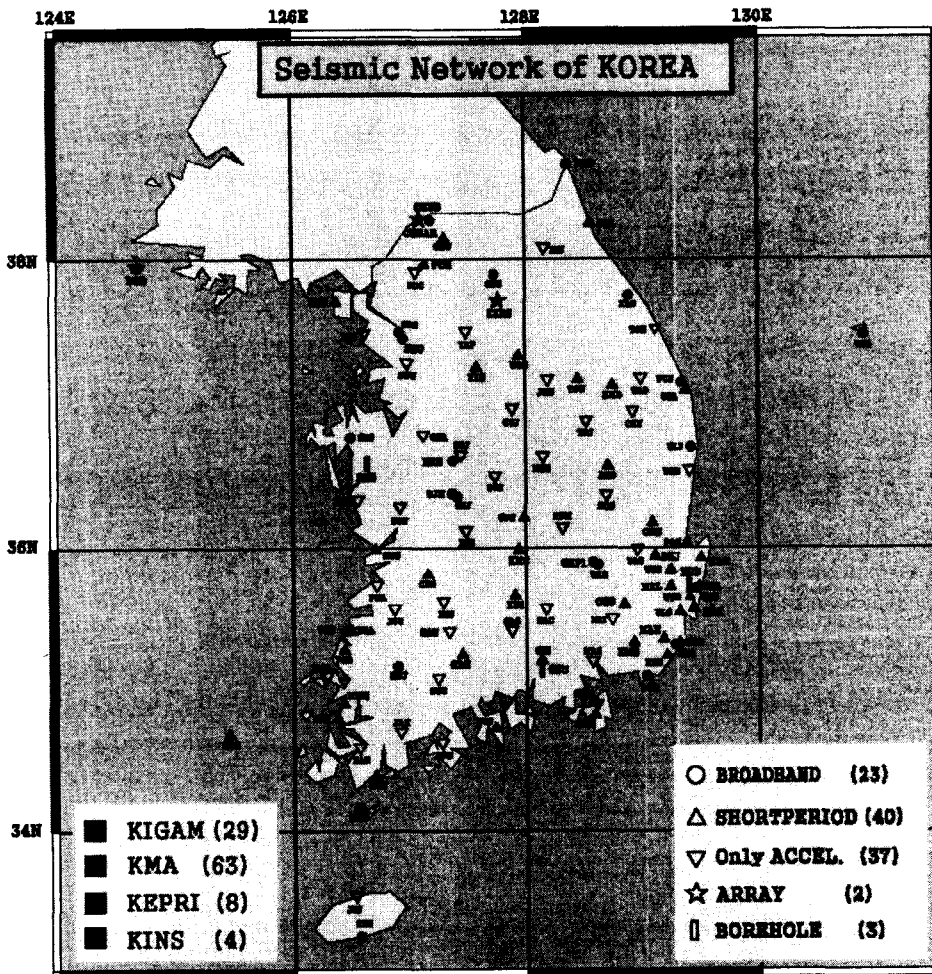


그림1. 국내 지진관측소 분포도

여기에서는 한국지질자원연구원에서 1994년 12월부터 2001년 12월까지 경상분지 관측망을 중심으로 1차적으로 결정된 지진목록을 JHD 알고리즘을 이용한 Velest program을 사용하여 상부 지각 속도 구조 역산 및 진원위치 재결정을 실시하였다.

## 2. 입력 자료

1994년 12월부터 2001년 12월까지 경상분지 디지털 관측망을 중심으로 HYP071으로 결정된 국지 지진(local earthquake)은 247개이다. 경상분지 지진관측망이 진원위치결정에 중심이 되었고, 한반도 남부의 동서 지역에서 지진파 전파특성이 상이한 것으로 보고되었으므로(지현철<sup>(4)</sup>), 연구 대상 지역을 한반도 동남부지역, 북위 34.5° - 37° , 동경 127° - 130° 으로 한정하였다.

이 지역에서 결정된 지진 중에서 4개 관측소 이상에서 P파의 초동을 양호하게 판별할 수 있었던 것은 총 155개 이벤트로서 그림 2와 같이 분포한다. 진원의 깊이는 주로 5 - 20km 이내에 분포되어 있으므로 지각구조 역산에서는 이 깊이 영역의 해상도가 가장 좋을 것으로 예측할 수 있다.

진원 깊이가 20km 이내의 국지지진(local earthquake)이고, 파형분석에서의 오차를 줄이기 위하여 본 연구에서는 4개이상의 관측소에서 동시에 기록되었고, 관측소 분포를 고려하여 Gap이 180° 이하의 지진 목록만을 다시 추출하여 총 53개의 이벤트를 선택하였다. Velest 프로그램 입력자료는 총 35개 관측소에서 기록된 449개의 P파 초동 자료가 사용되었다.

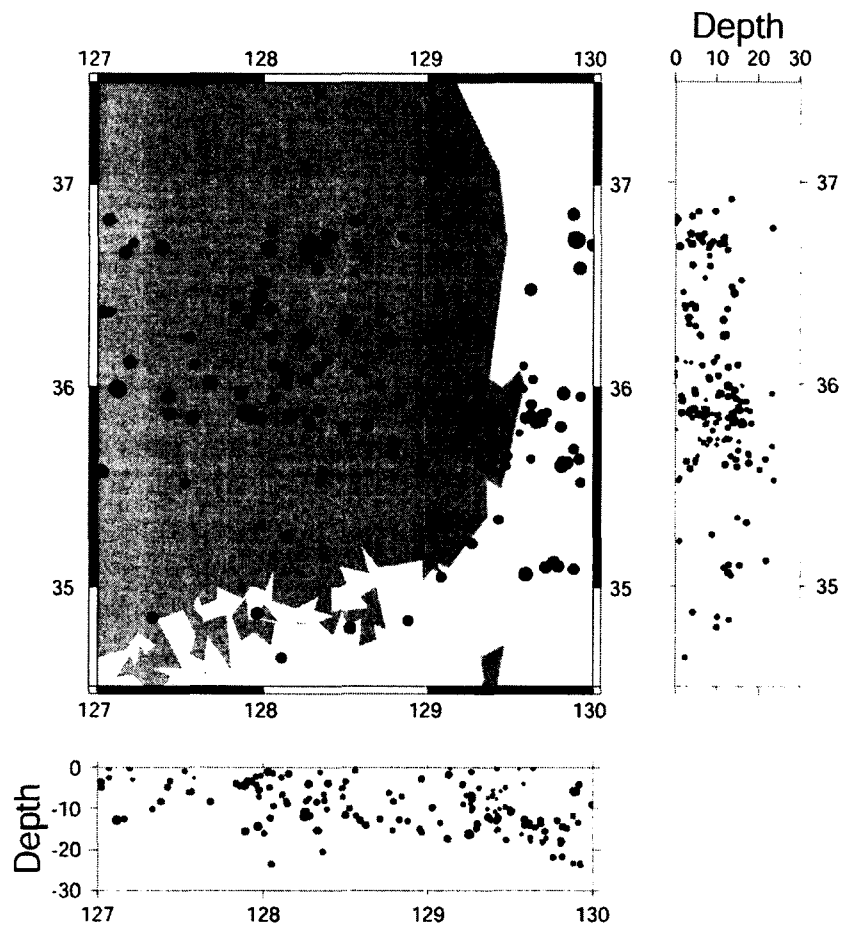


그림2. 연구지역에서 발생한 지진의 진앙분포 및 종, 횡 단면상의 진원 깊이 투영도(depth : km).

### 3. 분석 및 결과

대부분의 속도 구조 역산에서 초기모델이 결과에 미치는 비중은 매우 크다. Velest 프로그램에서는 역시 초기모델에 따라 다른 local minimum에 도달하는 경우가 발생한다. 이를 극복하기 가장 손쉬운 방법은 기존 연구자들에 의해 결정된 속도구조를 초기모델로 선정하는 것이다. 본 연구에서는 한반도 남부 또는 동남부 지역에 대한 1차원 속도구조 모델로 제시된 6가지 모델을 분석하여 공통적인 부분을 취하는 방법으로 초기 모델을 설정하였다. 그림3에서는 Lee<sup>(5)</sup>, Kim & Kim<sup>(6)</sup>, Kim<sup>(7)</sup>, Chung<sup>(8)</sup>, Kim<sup>(9)</sup> 그리고 Choi<sup>(10)</sup>에 의해 제시된 모델을 가는 실선으로 표시하였고, 굵은 실선은 본 연구에서 선정한 초기 속도 모델을 나타내고 있다. 기존 연구 결과로부터 도출된 초기 속도 모델을 기준으로  $\pm 0.5$  km/sec 범위 내에서 난수(random number) 생성을 통해 변형된 초기모델 30개(그림4)를 작성하였고 이에 대하여 각각 10회의 비선형 반복계산을 수행한 후 그 결과를 그림 5에 도시하였다. 서로 다른 30개의 초기 모델을 바탕으로 계산된 30개의 결과들을 종합하여 보면 약 6 km - 16 km 구간의 표준편차가 현저히 낮은 것을 발견할 수 있는데, 이는 입력 지진들의 진앙 깊이가 이 구간에 밀집되어 있기 때문에 다양한 초기 모델에 대해서 일정한 범위내의 값으로 잘 수렴하는 것으로 판단된다. 또한 20 km - 30 km 구간에서도 속도 변화 범위가 좁은 결과를 보였다. 이는 굴절파의 파선들이 이 구간을 지나기 때문에 결과적으로 좋은 수렴을 보인 것으로 판단된다. 그러나 지표에서 약 6 km 구간과 30 km 이상 구간에서는 파선이 많이 지나가지 않기 때문에 분해능이 낮은 결과를 보이며, 이런 점은 해석시 유의하여야 할 것이다.

다양한 초기모델로부터 계산된 속도구조 결과를 바탕으로 2차적인 속도구조를 선정할 수 있었다. 이 모델은 최종적인 것이라기 보다는 보다 좋은 결과를 도출하기 위한 새로운 초기 모델로 사용될 수 있다. 2차적으로 선정된 속도구조 모델을 초기 모델로 연구지역에서 관측된 155개의 이벤트에 대한 속도구조 및 진원위치 동시 역산을 수행하여 그 결과를 그림 6에 도시하였다. 진원의 깊이가 초기 진원 깊이 보다 낮아졌고, 수평적인 위치 변화로 진앙분포의 선형성이 다소 향상된 것으로 보이나, 구조선들과의 관계성 규명에는 보다 많은 지진자료의 축적이 요구된다.

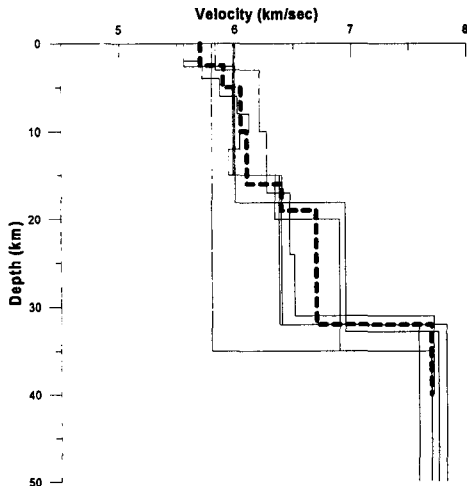


그림3. 선행 연구자들(본문참조)의 속도 구조모델(가는실선)들과 그로부터 선정된 초기모델(굵은 점선)

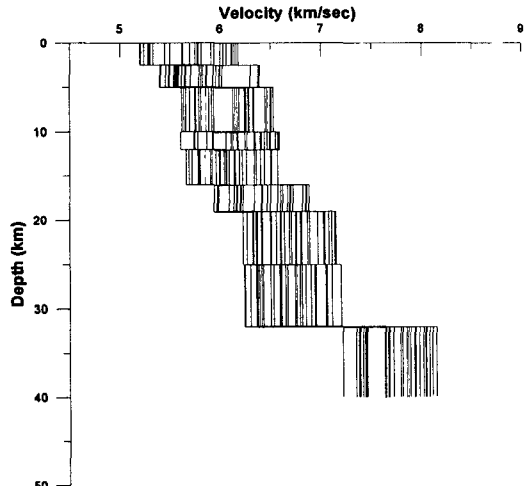


그림4. 그림3의 초기모델을 기준으로  $\pm 0.5$ km/sec 범위내에서 난수(random number) 생성에 의해 산출된 30개의 서로 다른 초기모델

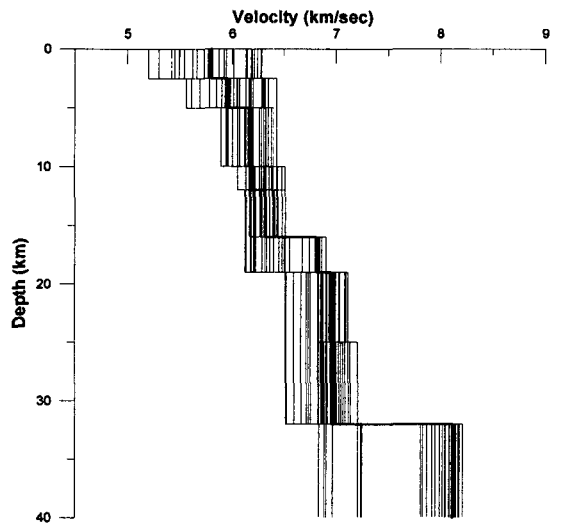


그림5. 다양한 초기모델로부터 계산된 30개의 1차원속도구조

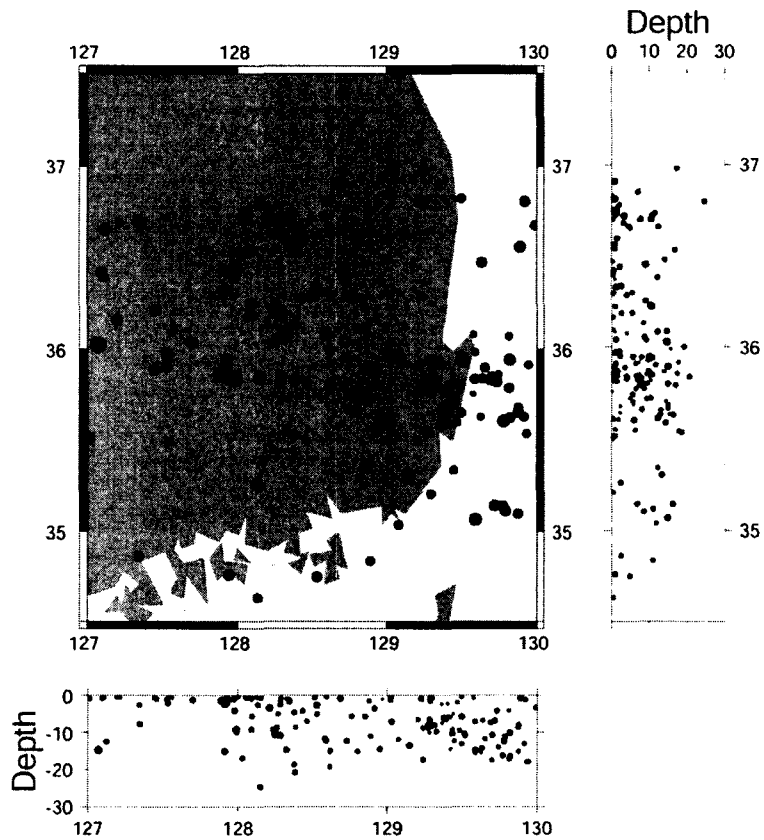


그림6. 역산결과 산출된 속도구조를 초기모델로 사용하여 계산된  
진앙위치 분포도 및 종, 횡단면 진원위치 투영도 (depth : km)

#### 4. 결론 및 토의

본 연구에서는 한국지질자원연구원의 디지털관측망에서 관측된 한반도 남동부지역에서 발생한 155개의 지진을 가지고 진원위치와 속도구조 그리고 관측소보정치 동시 역산을 통하여 1차원 속도구조 모델을 산출하였다. 산출된 1차원속도구조에서는 깊이 약 6 km - 16 km 까지에서 5.8 - 6.4 km/sec 속도분포를 나타내었고, 깊이 20 km - 30 km 구간에서는  $7 \pm 0.2$  km/sec 속도분포가 우세하기 나타났다. 연구지역의 발생 지진이 규모가 작고, 20 km 이내의 진앙분포를 하고 있기 때문에 상부 맨틀까지 속도구조를 규명하기에는 자료의 한계가 있었으므로, 속도구조 해석시에 30 km 이하에 대해서는 제외하였다. 다양한 초기모델을 바탕으로 산정된 2차적 속도구조를 초기모델로 다시 사용하여, 155개 이벤트의 진원위치를 재결정하였다. 전체적으로 진원 깊이가 초기 입력 값보다 얕아 졌으며, 진앙위치의 선형성이 다소 증가하였다. 경주지역 및 울산단층 지역에는 다른 지역에 비하여 진앙분포 밀도가 높으며 진앙의 선형배열들이 다소 발견되지만, 구조선과의 관계규명을 위해서는 보다 많은 자료 축적이 필요한 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. Douglas, A.(1967), "Joint epicentre determination", Nature, v. 215, pp.47-48.
2. Crosson, R. S.(1976), "Crustal structure modeling of earthquake data,1, Simultaneous least squares estimation of hypocenter and velocity parameters", J. Geophys. Res., v. 81, pp. 3036-3046.
3. Ellsworth, W. L.(1977), "Three-dimensional structismograms using automatic ray generation", M.Sc. thesis, Colorure of the crust and mantle beneath the island of Hawaii", Ph D thesis, MIT, Massachussets, USA.
4. 지현철 외 (1997), "경상분지에서의 지진연구(IV)", KR-97(C)-3, 연구보고서, 한국자원연구소
5. Lee, K. H.(1979), "On the crustal structure of the Korean peninsula", Jour. Geol. Soc. Korea, v.15, pp. 134-150.
6. Kim, S. J. and Kim, S. G.(1983), "A study on the crustal structure of south Korea by using seismic waves", Jour. Geol. Soc. Korea, v.16, pp. 51-61.
7. Kim, S. K.(1995), "A study on the crustal structure of the Korean pensular", Jour. Geol. Soc. Korea, v.31, pp. 393-403.
8. Chung, T. W.(1995), "A quantitative study on the crustal structure of the Korean peninsula based on the earthquakes from 1991 to 1994, Jour. Korean Earth Science Society, v.16, pp. 152-157.
9. Kim, W. H.(1998), "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, pp 166-177.
10. Choi, H. S.(2000), "Estimation of crustal velocity structure in southeastern Korea", M.S. Thesis, SNU, Seoul, Korea.