

**JHD를 이용한 경상분지 일원에서 발생한 지진의
진원위치 재결정 (I)**
**Relocation of Hypocenters, occurred in and around
Kyeongsang basin, using by
Joint Hypocenter Determination(JHD) method**

전정수* 전명순*
Jeon, Jeong-Soo Jun, Myung-Soon

ABSTRACT

Crustal velocity model is very important to determine the hypocenters of the local earthquakes, because the real crust is more complex and heterogeneous than simple homogeneous layered model. But the exact crust model in and around Kyeongsang basin area is not fixed till now. To solve this problem, Joint Hypocenter Determination(JHD) method is applied to the 133 local earthquakes, that is recorded at KIGAM local network from Dec. 14, 1994 to May. 14, 1998. According to the comparison of earthquake locations and depths for the conventional procedure and JHD relocation procedure, each locations is very similar, but depth distributions are different. An initial depth distribution derived from the conventional methods is irregular and does not show the general trends. JHD relocations reduce scatter and define a dipping plane, which is parallel to and apart 15km north from Ulsan fault.

1. 서론

관측된 자료로부터 정확한 지진발생 시간, 위치, 및 심도를 결정하기 위해서는 진원에서 관측소까지의 지진파 전파 경로에 대한 정확한 주시시간 정보가 있어야 한다. 이를 위하여 진원 및 속도구조에 대한 3차원 동시 역산을 통해 정확한 해를 구할 수 있지만, 적절한 관측소의 분포 및 양질의 지진자료가 필요하며, 또한 불균질한 3차원 매질에서의 정확한 파선추적 등 현실적으로는 제한이 따른다. 따라서 현재까지 근거리 지진의 진원을 결정하기 위하여 균질하고 평평한 다층의 속도구조를 갖는 1차원 속도구조모형을 이용중이나, 실제 지각의 구조는 매우 복잡하여 진원 결정시 모델과 실제 지각구조와의 차이에 의한 오차를 피할 수는 없다. 일반적으로 속도구조 모델의 입력 파라미터를 변화시킴에 따라 진원의 위치를 결정할 경우 진원 위치의 변화 범위는 작아 안정된 해를 구할 수 있지만, 지진발생 심도의 변화 양상은 매우 크게 나타나므로

* 한국자원연구소 자연재해방재연구단, 정회원

결정된 심도에 대한 신뢰도는 매우 낮다. 따라서 지진발생원인 및 지질구조와 관련성 규명 등을 위해서는 정확한 진원위치 규명이 우선적으로 수행되어야 한다.

각각의 지진에 대해 독립적으로 진원위치를 결정하는 지금까지 수행해온 기존의 방식으로 는 진원위치에 포함된 오차를 제거할 방법은 없다. 그러나 다수의 지진과 다수의 관측자료 에 대해 진원위치와 일관성(Coherence) 오차를 동시에 계산하므로써 진원위치의 정확도를 향상시키는 Joint Hypocenter Determination(JHD) 방법이 Douglas (1967)에 의해 최초로 제안 된 이후 많은 학자들에 의해 수정 및 보완되어 왔다(Pujol, 1996 ; Ratchkovsky et al., 1997 ; Viret et al., 1984). JHD 방법은 적용한 속도구조 모델과 실제 지각구조와의 차이에 의한 오 차뿐만 아니라 각 관측소별 직하부의 지질구조 차이 등 진원위치 결정에 영향을 줄 수 있는 모든 오차에 대한 관측소보정치(Station Correction)를 구하여 정확한 진원위치를 결정할 수 있게 해 준다. 따라서 지각구조가 복잡하고 명확하게 지질구조가 규명되어 있지 않은 경상 분지 일원에서 발생한 지진에 대해 JHD 방법을 적용하여 진원위치를 재결정하고, 이 지역에 서의 지진발생특성과 지구구조와의 관련성을 일차적으로 규명하였다.

2. JHD를 이용한 진원위치 재결정

2-1. JHD 방법을 이용한 진원위치 재결정

지역관측망(Local Network)에 관측된 근거리 지진자료로부터 진원을 결정하기 위해서는 평평하 고 일정한 속도구조를 갖는 1차원 속도구조모델을 이용하고 있다. 그러나 실제적으로 지각의 구조 는 매우 복잡하여 원거리 지진의 경우와는 달리 근거리 지진의 진원 결정시 모델과 실제 지각구 조와의 차이에 의한 오차를 피할 수는 없으며, 이들 오차는 크게 진원과 관측소 부근의 지질구조 와 진원-관측소간의 지진파 전파경로상의 3종류의 오차로 구분할 수 있다. 정확한 진원을 구하기 위해서는 이들 오차를 제거하여야 한다. 그러나 하나의 지진에 대한 진원을 독립적으로 구할 경 우에는 오차를 제거할 수 없으나, 다수의 지진에 대해 다수의 관측소의 자료를 이용하여 이들 오 차를 제거할 수 있다(Duglas, 1967). 원칙적으로는 진원 및 속도구조에 대한 3차원 동시 역산을 통해 정확한 해를 구할 수 있지만, 적절한 관측소의 분포 및 양질의 지진자료에 더욱 의존적이며, 또한 불균질한 3차원 매질에서의 정확한 파산추적 등 현실적으로는 제한이 따른다.

1차원 속도구조 모델에서 다수의 지진에 대해 다수의 관측소에서 기록된 경우에는 진원부근의 실제 지질구조와의 차이에 의한 오차는 모든 관측소에 동일하게 영향을 줄 것이며 진원결정시 무시할 수 있다. 관측소 부근의 지질구조와 전파경로에서의 모델과의 차이에 의한 오차를 하나의 관측소보정치(Station correction)로 할 경우, 정확한 진원을 결정하기 위해서는 지진발생 시간 및 관측소보정치를 동시에 결정하여야 하나, 이론적으로는 해가 무한하므로 직접 구할 수는 없다. 그러나 만약 정확한 진원의 위치 및 발생 시간을 아는 하나의 주된 지진(Master event)이 있을 경우, 역산과정에서 (n-1)번째 계산시 n번째 계산에 적용될 관측소보정치를 구할 수 있으므로 직 접적으로 해를 구할 수 있게 된다(Pujol, 1988).

실제적으로는 관측소보정치에는 지진파 경로 및 관측소 부근의 지질구조 차이에 의한 오차 뿐 만 아니라, 파형 판독오차 및 역산시 적용한 지각구조 모델과 실제 지각구조와 차이에 의한 오차 등 진원 위치 결정에 영향을 주는 모든 오차를 포함하고 있다. 따라서 JHD 방법을 이용할 경우 기존의 진원위치 결정 과정에 비해 속도구조 모델에 영향을 거의 받지 않는다. 실제적으로 J-B 주시시간과 미국 중동부 지각구조모델에 대한 주시시간을 이용하여 진원 위치를 재결정한 결과 관측망 밖에서도 위치 및 심도의 차이는 2km 이내로 적용한 속도구조 모델에 의한 영향을 거의 받지 않음을 확인할 수 있었다. 따라서 연구에서는 미 중동부 주시시간을 이용하였으며, 주지진 으로 진원이 가장 정확하게 결정된 1997년 6월 26일 경주지진을 이용하였으며, 156개 지진자료 중

5개 관측소 이상에서 기록된 지진에 대해 JHD 방법을 적용하여 진앙위치를 재결정 하였다.

2-2. 자료 해석

한반도 동남부는 울진, 월성 및 고리의 3개 원전부지에 현재 7기의 원자로가 가동중이고 9기가 건설 및 건설예정이다. 이들 원전의 지진안전성 문제는 인근 양산단층의 활동성 여부와 관련하여 국내외 학자들 간에 중대한 관심사로 대두되어 왔다. 이와 관련하여 한국자원연구소는 경상분지 내 덕정, 학계, 방방골, 명계, 매곡, 청송, 김해, 거제, 구례등 9개소와 무안, 포천, 보길도 3개소 등 총 12개 관측소에서 1년 365일 가동하는 3-성분 단주기 디지털 지진관측망을 구성하여 1994년 12월 14일부터 지진자료를 획득 중에 있다. 1994년 12월 14일부터 1998년 5월 14일까지 3년 6개월 동안 양산단층 주변의 관측망에 관측되어 결정된 156개 진앙의 분포(전명순외, 1995 ; 지현철외, 1996 ; 지현철외, 1997 ; 지현철외, 1998)는 그림 1에 표시되어 있다.

진앙의 분포는 대체로 북서-남동 방향으로 집중되고 있는 바, 이는 기상청에서 관측한 약 20년 간의 결과와 일치한다. 양산단층을 따라서 진앙이 집중되는 현상은 보이지 않고, 울산단층 중앙 동측부의 감포-울산 사이에 진앙이 집중되며 이는 북북서-남남동 방향으로 연장되어 있다. 또한 내륙에서는 문경-상주 일대에 다소 집중되어 나타난다. 또한 이들 지진의 심도별 분포 특성을 보기 위하여, 그림 1의 A-A', B-B', 및 C-C' 축선을 중심으로 폭이 50km인 지역 분포하는 지진의 심도를 표시한 것이 그림 2이다. 축선 A-A'은 울산단층과 거의 수직인 방향으로, A 지점에서 52km 및 63km 지점의 지표면에 양산단층 및 울산단층이 위치한다. 대부분의 지진은 심도 10-20km 부근에서 발생하였으며, 양산단층이나 울산단층 분포지역보다는 울산단층 동측에서 많은 지진이 발생하였으며, 동쪽 바다쪽으로 갈수록 심도는 깊어 진다. 축선 B-B'은 양산단층과 수직인 방향으로 B 지점에서 65km 및 78km 지점의 지표면에 양산단층 및 울산단층이 위치한다. 축선 A-A'의 경우와 마찬가지로 심도 10-20km 부근에서 많은 지진이 발생하고 있으며, 울산단층의 동측에서 많은 지진이 발생하는 양상을 보여주고 있다.

156개의 지진 중 5개소 이상의 관측소에서 기록된 133개 지진에 대해 2-1절에서 설명한 JHD 방법을 적용하여 진원의 위치를 재결정하였으며, 이들의 분포를 1:백만 지질도(한국자원연구소, 1995)에 나타난 지구조선과 함께 표시한 것이 그림 3이다. 전체적인 지진의 분포양상은 JHD 방법을 적용하기 이전의 분포와 거의 동일하나, 관측소에서 멀리 떨어진 북동부에서는 관측소방향으로, 동쪽 해양 지역과 서부 및 남서부 지역에서는 관측소 반대 방향으로, 북서부 지역에서는 거리는 변화가 없으나 북동쪽 방향으로 진원의 위치가 1-10km 정도 변한다.

그러나 진원의 심도는 JHD 이전에 비해 매우 연속성이 뚜렷하며, 그림 1에 표시한 것과 동일한 축선에서의 분포는 그림 4와 같다. 울산단층에 거의 수직인 A-A' 단면에서는 양산단층 및 울산단층 일대에는 거의 지진이 분포하지 않지만, 울산단층 동쪽 약 10-15km 지역에 진원이 집중되며 선상배열을 보여주고 있는 것이 매우 특징적이다. 양산단층에 수직인 B-B' 단면에서는 진원이 울산단층 동측의 동일한 지역에 집중하지만 A-A' 단면에서와 같이 뚜렷한 선상배열은 보이지 않고 있다. 그러나 C-C' 단면에는 C 지점으로부터 30km에서 60km 사이에 진원이 폭 넓게 분포하고 있다. 따라서 단면 A-A'에 진원이 선상배열한 이상대는 울산단층에서 북쪽으로 약 15km 떨어져서 울산단층과 거의 평행한 약 N70° W 방향으로, 경사는 70° SW 정도의 고각도로 발달하고 있으며, 좌우 수평적 연장은 약 30km 정도로 해석되며, 그림 3에 적색 굵은 선으로 표시하였다.

3. 결론 및 토의

한국자원연구소에서 1994년 12월 14일부터 1998년 5월 14일까지 3년 6개월 동안 기록된 156

개의 지진 중 5개소 이상의 관측소에서 기록된 133개 지진에 대해 JHD 방법을 적용하여 진원의 위치 및 심도를 재결정하였다. JHD 방법을 적용한 결과 진원의 수평적 위치는 관측망내에서는 1-2km 미만의 차이를 보이나, 진원의 심도는 큰 차이를 보인다. 그러나 JHD 방법을 적용하기 이전의 불규칙한 분포와는 달리 연속성이 좋으며, 인접한 지역에서는 유사한 분포경향을 보여주고 있다. 특히 단면 A-A'에 진원들이 선상배열한 이상대는 울산단층에서 북쪽으로 약 15km 떨어져서 울산단층과 거의 평행한 약 N70° W 방향으로, 경사는 70° SW 이상의 고각도로 발달하고 있으며, 좌우 수평적 연장은 약 30km 정도이다. 그러나 1:1,000,000 지질도상에서는 이 지역에는 주로 북동-남서방향의 단층이 우세하며, 이상대와 같은 북북동-남남서 방향의 단층은 다른 방향의 단층에 의해 절단되어 국지적으로 발달하고 있으므로, 이 지역에 대한 추가적인 지진자료 수집 및 지질조사가 수행되어 확인하여야 할 것이다.

그러나 본 연구에서는 미국 중부 및 동부의 지각모델에 대한 주시시간표를 사용하였으며, 외국에서 적용 사례에 비교할 때 상대적으로 적은 수의 지진자료만을 이용하였으므로, 해석 결과의 신뢰도를 높이기 위한 추가적인 자료수집 및 연구가 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 시행하는 중점국가연구개발사업의 하나인 자연재해방재기술개발사업으로 수행된 것이다.

참고문헌

1. 전명순, 지현철, 전정수, 신인철, 1995, 지진연구, 한국자원연구소 연구보고서 KR-94(C)1-16
2. 지현철, 류창하, 신인철, 1998, 경상분지에서의 지진연구(IV), 한국자원연구소 연구보고서 KR-97(C)-3.
3. 지현철, 전정수, 신인철, 1997, 경상분지에서의 지진연구(III), 한국자원연구소 연구보고서 KR-96(C)-4.
4. 지현철, 전명순, 전정수, 신인철, 1996, 경상분지에서의 지진연구(II), 한국자원연구소 연구보고서 KR-95(C)-5.
5. 한국자원연구소, 1995, 한국지질도 (1:1,000,000).
6. Douglas, A., 1967, Joint hypocenter determination, Nature, Vol. 215, p.47-48.
7. Pujol, Jose, 1996, An integrated 3D velocity inversion - Joint Hypocenter Determination relocation analysis of events in the Northridge area, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 86, No. 1B, p.138-s155.
8. Ratchkovsky, N. A., Pujol, J., and Biswas, N. N., 1997, Relocation of earthquakes in the Cook Inlet area, South Central Alaska, Using the Joint Hypocenter Determination method, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 87, No. 3, p.620-636.
9. Viret, M., Bollinger, G. A., Snoke, J. A., and Dewey, J. W., 1984, Joint hypocenter relocation studies with sparse data sets - a case history : Virginia earthquakes, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 74, No. 6, p.2297-2311.

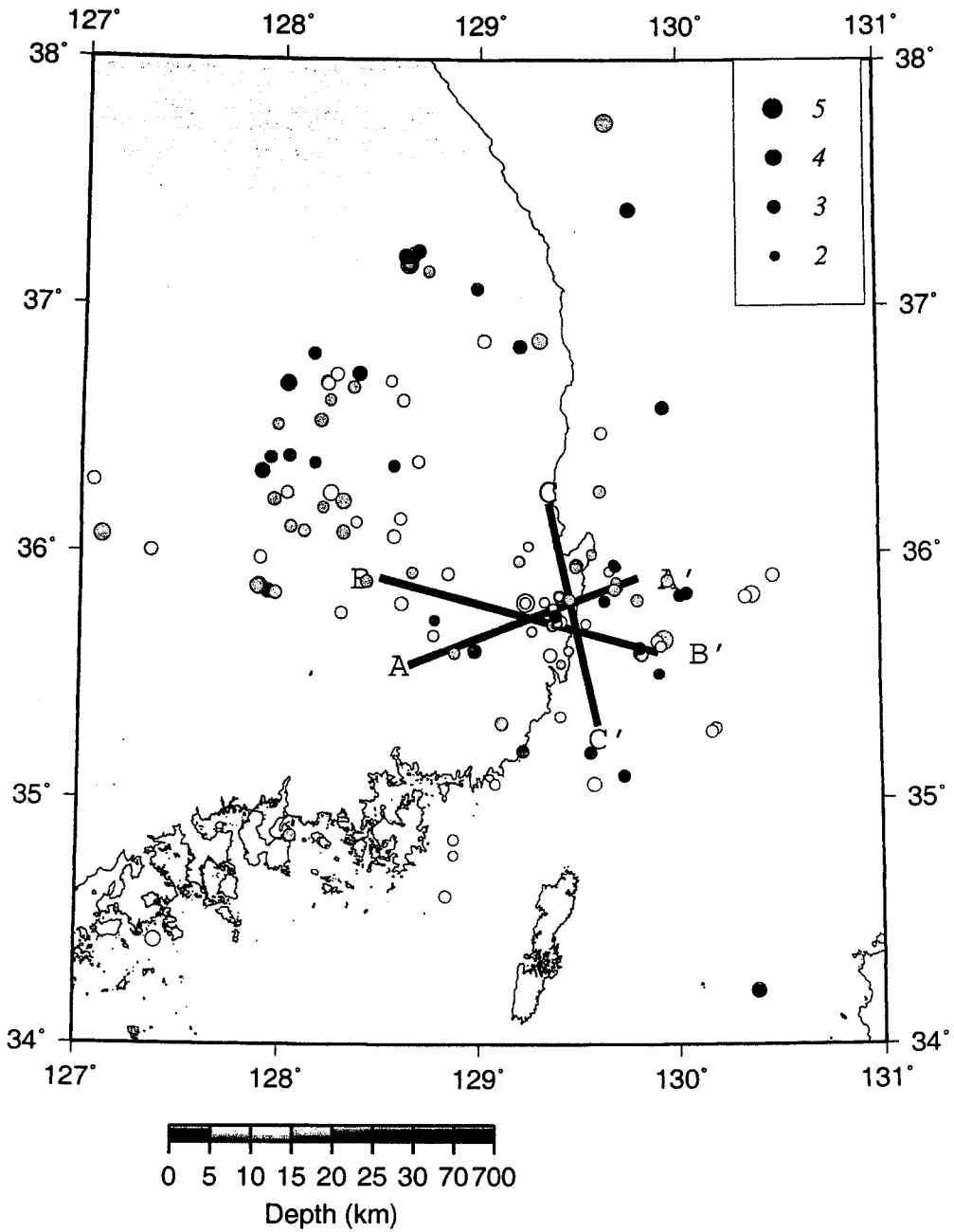


그림 1 1994년 12월부터 1998년 5월까지 경상분지 일원에서 발생한 156개 지진 분포도

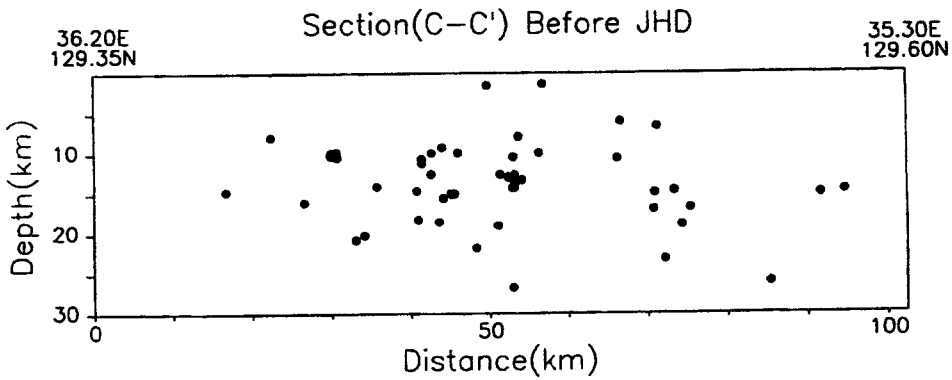
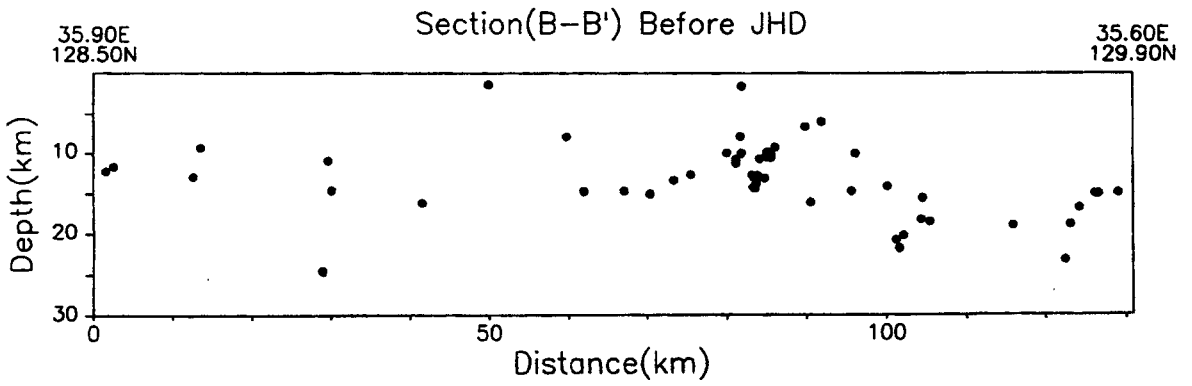
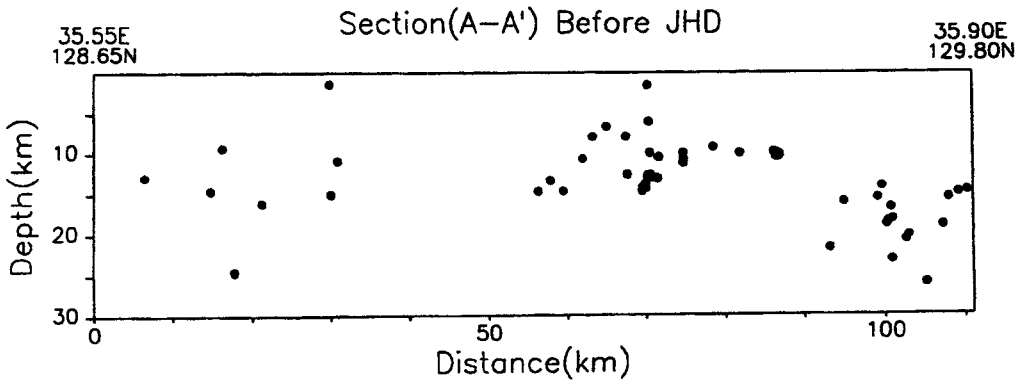


그림 2 그림 1의 A-A', B-B', 및 C-C'축선을 중심으로 폭이 50km 지역에서 발생한 축선별 지진의 심도 분포도

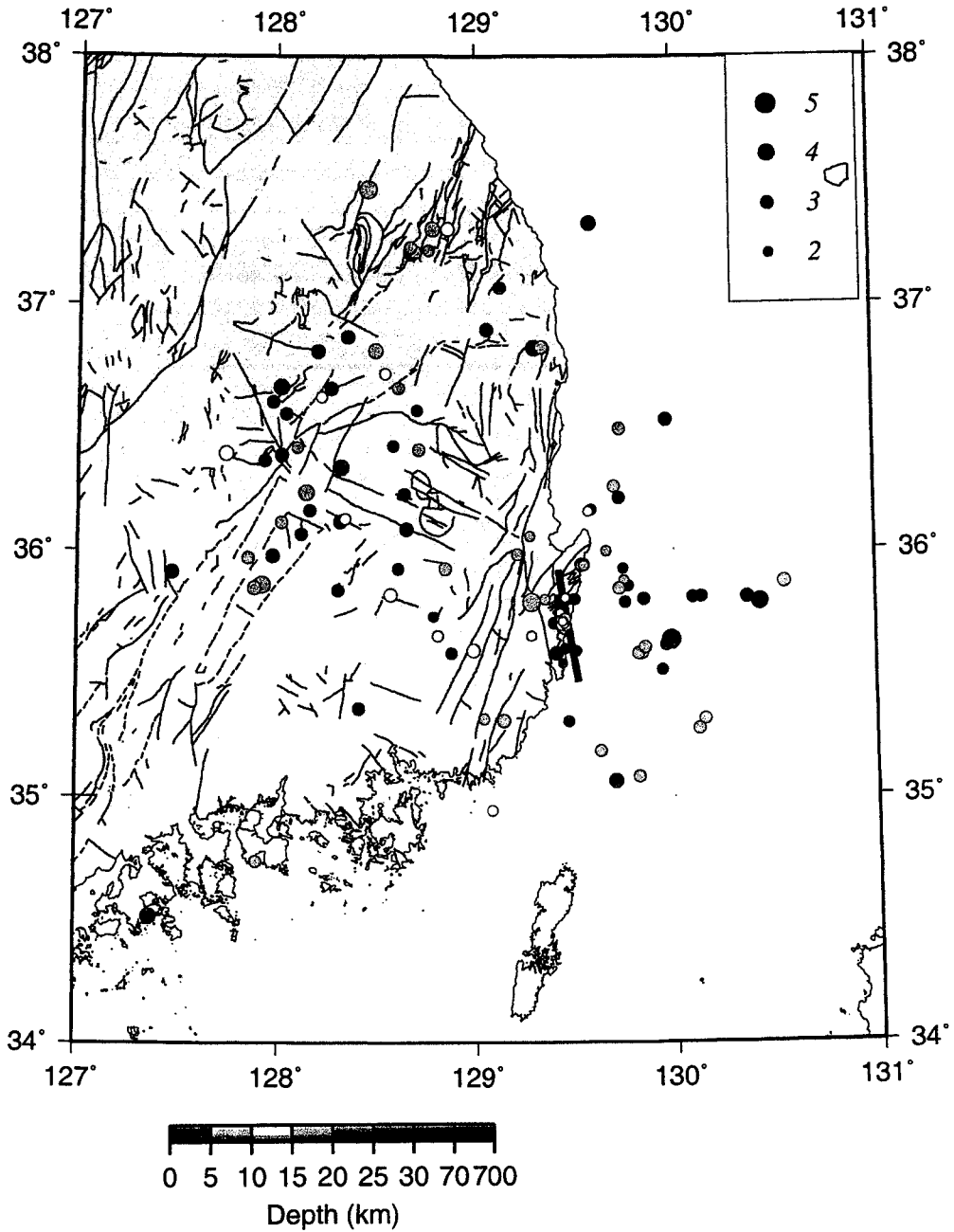


그림 3 1994년 12월부터 1998년 5월까지 경상분지 일원에서 발생한 156개 지진중 5개 관측소 이상에서 기록된 133개 지진에 대해 JHD 방법을 적용하여 재결정된 진원 분포도

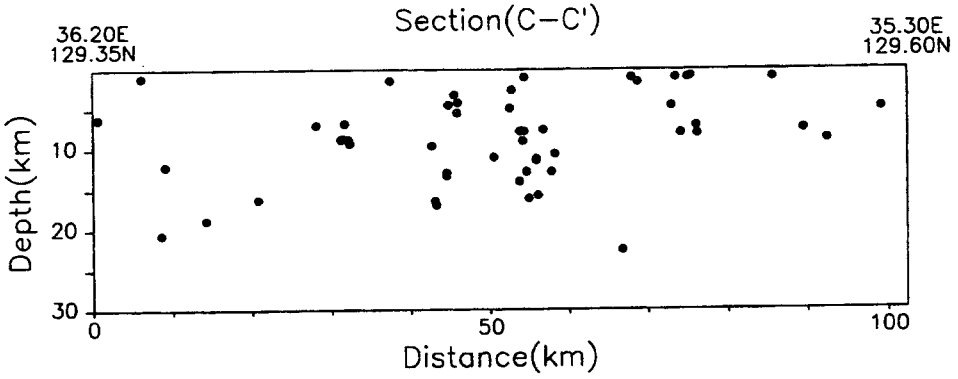
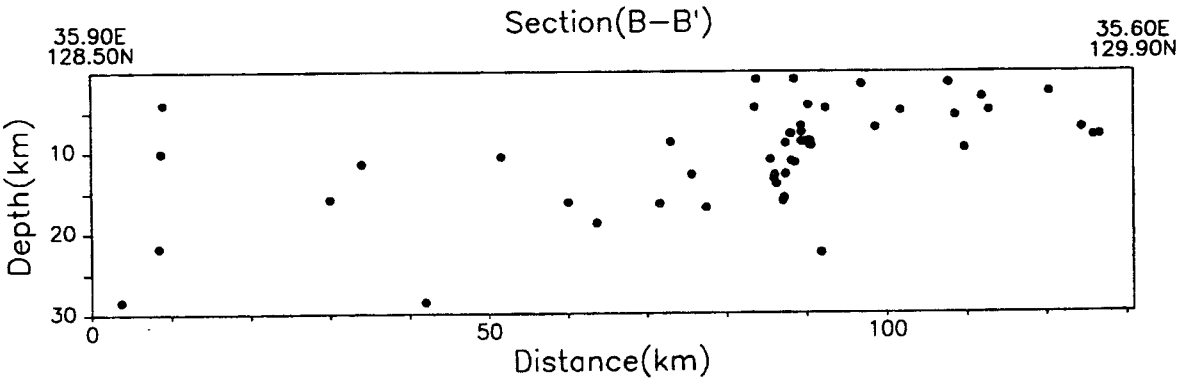
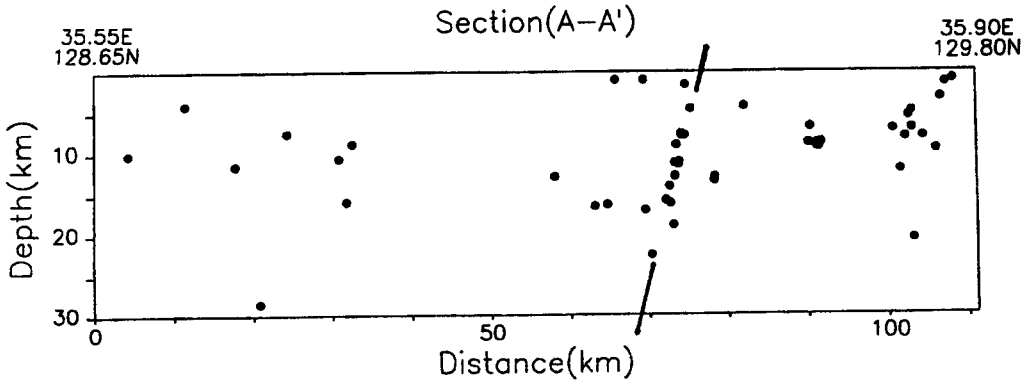


그림 4 JHD 방법을 적용하여 재결정된 진원에 대해 그림 1에 표시한 A-A', B-B', 및 C-C' 축선을 중심으로 폭이 50km 지역에서 발생한 지진의 심도 분포도