

## 한반도 남부의 지진파 토모그래피 연구

강익범 · 박정호\*

한국지질자원연구원

### Application of Seismic Tomography to the Region in and Near Southern Korean Peninsula

Ik Bum Kang and Jung-Ho Park\*

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

3-D seismic tomographic inversion is applied to investigation on velocity structure in and near Korean Peninsula. Firstly, it is applied to the region in southeastern Korean Peninsula. According to the results low-velocity zone seems to be clearly appeared in the so called Gyeongsang sedimentary basin and high-velocity zone is shown at the section of 7.5 km depth it implies the inclusion of plutonic rocks at the sedimentary basin. At the depth about 20~30 km existence of low-velocity zone seems to be related with the development of Yangsan fault system. Secondly it is applied to the region not only in Korean Peninsula but also East Sea using data from both Korean Peninsula and Japan Islands. According to the results, subduction zone starting from eastern part of Japan seems to be extended to the region beneath the East Sea.

**Key words :** tomographic inversion, low-velocity, high-velocity, subduction zone.

한반도 남부 및 인근 지역에 대하여 3차원 토모그래피 연구를 수행하였다. 먼저 1차 연구지역은 지진계의 분포가 비교적 조밀하게 설치되어 있는 한반도 남동부지역으로 연구결과에 의하면 경상분지 지역의 지표에서는 퇴적층 지역에서는 상대적으로 저속도가 나타나며 7.5 km 깊이에서는 상대적 고속도 분포가 넓게 나타났다. 이는 경상분지 내에서 화성기원의 암석들이 넓게 분포하는 것으로 보인다. 양산단층대 하부 약 20~30 km 깊이에서는 저속도 분포가 나타나는데 이는 양산단층대의 발달과 관계가 있을 것으로 여겨진다. 한반도 및 일본에서 관측된 자료를 이용하여 한반도 및 동해지역의 연구지역에서의 연구결과에 의하면 일본 동부에서 시작된 섭입대는 동해지역에까지 연장되는 것으로 분석되었다.

**주요어 :** 토모그래피 역산, 저속도, 고속도, 섭입대

## 1. 서 론

지구는 지각, 맨틀, 외핵, 내핵 등 평행한 층으로 구성되어 있는 것으로 간주되어 왔으며 많은 지진학자들은 지진이 발생하는 시간과 장소를 정확히 규명하기 위해서 이 지구를 대표할 만한 1차원적인 평행한 지구구조를 찾기 위해 노력해 왔다. 대표적인 예로는 PREM, IASPEI (International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior) 91 지하구조 모델

등이 있다. 그러나 지구의 불균질성 때문에 이러한 지구의 1차원 지하구조모델을 가지고 지진의 진앙지 및 발생시간을 결정하는 데는 실제의 위치와 시간과는 상당한 차이가 있으며 정확성이 많이 결여되어 있다. 또한 지역적인 지질구조 특성을 고려하여야만 정확한 진앙위치 및 지진발생시간을 결정할 수 있는데 일률적으로 1차원 모델을 적용하는 것은 많은 문제점을 내포하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 북미와 유럽지역에서는 특별한 연구 주로 3차원 지진파 토모그래피

\*Corresponding author: jhpark@kigam.re.kr

연구를 통해 그 지역에 맞는 3차원 지하속도구조를 찾는 데 주력하여 왔으며 연구를 통해 그 지역의 지질구조 특성에 맞게 선정된 모델을 진앙의 위치와 발생시각을 계산하는데 적용하여 정확도를 향상시켜 왔다. 한반도에서도 지하지구구조연구는 일부 지진학자들에 수행되어 간단한 1차원 지하지구구조를 해석하였다(Lee, 1979; Kim and Kim 1983; Kim, 1995; Chung, 1995; Kim, 1998; Choi, 2000). 그러나 극동지역 특히 한반도 및 주변 해역지역에서는 북미 및 유럽지역에 비해 상대적으로 지진발생빈도 및 지진연구가 활성화 하지 못하였기 때문에 대표적인 고유 지하지구구조 모델을 아직까지도 설정하지 못하였다. 한반도 및 한반도 주변지역에서는 연구에 필요한 충분한 관측자료를 보유하지 못하고 있으나 한정된 관측 지진자료를 이용 3차원적인 지진파 토모그래피 연구를 통해 지역에 맞는 고유모델을 개발할 필요가 있으며 이를 통해 한반도 및 주변지역에서 발생한 지진의 진앙위치 및 발생시각을 결정하는데 있어 정확도를 향상시켜야 할 것이다. 특히 한반도 남동부 지역은 한반도에서 지진 활동이 활발한 지역임에도 불구하고 원자력발전소를 비롯한 한국의 주요 기반 산업시설물들이 밀집한 지역이어서 지진활동성과 관련한 지하지질구조연구에 대한 관심이 집중되어 있는 지역이므로 이 지역에 대한 집중연구가 필요하다. 일본열도는 세계적으로 지진이 가장 활발한 환태평양 지진대로 대륙판과 해양판이 충돌하고 섭입하는 지역으로 지질학적으로 매우 중요한 지역으로 섭입대(subduction zone)에 대해서 실제로 많은 연구가 진행되었고 현재도 진행되고 있다. 동해지역은 일본열도와 한반도 사이에 위치하여 일본열도와 한반도 지체구조와 연관성을 가지고 있는 것으로 파악되어 동해생성원인에 대해 여러 가지 학설이 제시되고 있으며 동해지역이 섭입대가 존재하는 일본열도와 관련하여 섭입대가 동해지역까지 연장되어 있는지 여부에 대한 연구에 대해서는 지질학적으로 매우 관심이 높다.

## 2. 토모그래피

토모그래피(Tomography)라는 용어는 보이지 않는다는 의미의 희랍어 “Tomos”와 그림이라는 의미의 “Graph”의 합성어이며 의학방면에서 많이 사용되고 있다. 특히 병원의 X선 computer 단층촬영법으로 대표적으로 이용되고 있다. 토모그래피는 목적 대상체를 영상으로 구성하는 기술로서 필연적으로 컴퓨터의 도움을 받는 까닭에 CT(computed tomography)라고도 불

린다. 지진파 토모그래피는 파선 이론에 기초한 파선 토모그래피와 파동 이론을 바탕으로 파의 산란 현상을 이용하는 회절 토모그래피로 크게 구분된다. 파선 토모그래피는 투과 토모그래피라고도 불리며 파의 전달 시간과 파선의 경로 그리고 파선이 통과하는 매질의 속도와의 관계를 이용하여 속도분포를 구성하는 주시 토모그래피와, 진폭으로부터 흡수성 분포를 재구성하는 진폭 토모그래피로 나누어진다.

지진파 토모그래피는 1960년대 중반에 해양지각과 대륙지각을 전파해온 표면파를 이용 속도구조연구에 처음으로 도입되었는데 파의 전달시간의 차이를 이용하여 계산하였다. 처음에는 1차원적인 지진파 토모그래피 연구에서 점진적으로 2차원, 3차원 속도구조연구에 지진파 토모그래피 연구로 발전되었으며 현재에는 컴퓨터의 자료처리능력이 발달함에 따라서 파형역산(Waveform Inversion) 및 토모그래피와 같은 지하매질의 속도역산에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

지진파 토모그래피는 역산에 사용되는 주시 및 속도 모델을 매개변수화 하는 방식에 따라서 여러 형태로 분류될 수 있는데 역산에 사용되는 주시에 따라서는 투과, 굴절 그리고 반사주시 토모그래피로 분류할 수 있고 초기 속도 모델을 설정하는 것은 역산의 결과에 직접적인 영향을 미치는 중요한 요소이다. 한편 속도 모델을 매개 변수화하는 방식에 따라서는 블록(Block) 및 셀(Cell) 토모그래피로 나눌 수 있다. 블록 토모그래피는 해석한 단면을 토대로 균질한 속도 값을 가지는 큰 블록으로 속도 모델을 구성하기 때문에 역산시 미지수의 개수가 적어서 빠른 역산이 가능하므로 반복 변화시킬 때 편리하다. 반면 초기 모델이 실제 모델과 많이 벗어날 경우, 특히 매개 변수가 실제보다 작게 설정될 경우 문제가 발생할 수 있으므로 초기모델 설정에 유의하여야 한다. 셀 토모그래피는 작은 셀을 매개변수로 설정하기 때문에 계산시간이 많이 소요되긴 하지만 정교한 역산이 가능하며 매개변수가 실제보다 작게 설정될 확률을 줄일 수 있는 장점이 있다.

토모그래피를 이용하여 지구의 지하속도를 규명하기 위해 역산하는 방법은 효과적인 파선추적 알고리즘을 이용하여 적절한 지구지하 모형에 대해 주시곡선을 계산하고 파선의 전달경로에 대한 추적이 필요하다(Thurber, 1983). 파선(Ray)이란 실제로 존재하지 않는 물리적 현상이지만 파가 전파될 때 생성하는 파면(Wavefront)과 수직인 파의 궤적을 의미하는데 파선추적법(Raytracing)이란 지진파 에너지가 파선 추적 방식에 의해 결정되는 궤도를 따라 전파된다는 개념으로

지진파 에너지의 주성분이 지하 공간을 전파하는 현상을 이해하는데 매우 유익한 개념이다. 주어진 지구지하 모형의 파선경로에 대해 주시곡선을 계산하는 방법인 파선 추적법(Raytracing)에는 크게 굴곡법(Bending Method; Thurber and Ellsworth, 1980), 발사법(Shooting Method; Cerveny *et al.*, 1977) 그리고 Vidale(1988)에 의해 개발된 유한차분법(Eikonal Equation)등이 있으며 진원을 출발한 파는 최소경로를 따라 지진계에 기록된다는 Fermat의 원리에 그 기초를 두고 있다.

굴곡법은 Fermat의 원리를 바탕으로 하는 경계치 문제를 푸는 방법 중에 하나라고 생각할 수 있으며 파의 시발점인 진원과 파가 도달하는 장소인 지진계를 정점으로 하여 파선 경로를 가정한 후에 이를 변화시켜가며 최소한의 시간이 소요되는 경로를 구하기 때문에 주시 계산 시간이 적게 들고 모든 경우에도 계산이 가능하다는 장점이 있으나 실제 파가 최초로 전파되는 시간이 아닌 국부적 최소값(local minimum)을 계산하게 되는 경우가 있다.

발사법은 파선방정식에 대한 초기치 문제의 해를 구하는 방법의 일종으로 파의 발사지점인 진원에서 다양한 각도로 파를 발사하여 지진계에 일정한 거리 이내로 전달하는 파를 계산하는데 비교적 정확한 해를 구할 수 있으나 계산시간이 오래 걸리며 특히 암영대가 존재할 경우 도달하는 파를 계산하지 못하는 단점이 있다.

유한 차분법은 파선방정식(Eikonal Equation)에 대한 유한 차분해를 구하는 방법이다. 이는 한 개의 진원점에 대해 모든 점에서의 도달시간을 동시에 계산하기 때문에 계산시간이 적게 소요되며 비교적 정확한 해를 구할 수 있다는 장점이 있으나 파선추적을 실시하여 파선경로를 구하기 위해서는 도달시간의 공간적 편미분값을 구하여 진원으로부터 역산해야 하기 때문에 계산하는 시간이 많이 걸리며 단층같이 속도가 급격히 변하는 구조에서는 정확도가 현저히 낮아지는 단점을 가지고 있다.

이처럼 고전적인 파선추적 기법은 속도차이가 높은 지체구조에서는 계산이 제대로 이루어지지 않는 문제점을 발생시켜 왔고 또한 계산시간도 많이 걸린다는 단점이 있고 파선추적 기법에서 불균질의 매질에서 최소편곡점을 구하는 것이 최대의 어려운 속제로 남아 있으며 정확성 항상문제와 컴퓨터 용량문제는 항상 대치되어 왔다. 효과적인 Pseudo-Bending 방법을 포함한 빠른 속도의 ART (Approximate Ray Tracer) 방법인

ART-PB방법을 이용한 SIMULPS (Thurber, 1993; Eberhart-Phillips, 1993; Evans *et al.*, 1994) 알고리즘은 현재 지진파 토모그래피 연구에 유용하게 널리 사용되고 있다. ART-PB 방법은 퇴적층 및 단층 등 복잡한 지질구조에서도 용이하게 적용할 수 있으며 불규칙한 gridding이 가능하다. Husen(1999), Kissling *et al.*(2000) 연구에 의한 세 가지 파선추적 기법 RKP (Runge-Kutta Perturbance), ART-PB, FD (Finite Difference) 방법을 비교해본 결과 ART-PB 방법이 주시 계산을 하는데 있어 높은 정확성을 보여주었음을 확인해 주었다.

지진파 토모그래피는 지하매질의 속도와 구조 등 지하매질에 대한 정보를 얻기 위하여 실시하는데 이의 원리는 지진파자료에서 획득한 주시자료와 초기 가정 모델에서 계산한 주시의 오차를 최소화시킬 수 있도록 속도모델을 역산하는 Gauss-Newton 알고리즘으로 정의할 수 있다. 실제 지진파 자료에 적용시키기 위하여 초기 모델을 설정하여 주시곡선을 작성하고 오차(residual)를 구하여 역산을 수행한다. 역산 과정에서 나타나는 Jacobian 행렬의 편미분 값을 구하기 위하여 진원에서 지진계에 이르는 시간을 각 셀의 속도와 셀을 지나가는 파선의 길이를 이용하여 나타내고 이를 미분하여 값을 구한다. 이러한 미분값들은 모든 파선에 대하여 파선이 지나가는 셀마다 기록이 되므로 큰 Jacobian 행렬을 구성하게 된다. 그리고 각자의 셀과 실제 자료의 주시에 대하여 계산된 미분값들의 차이를 이용하여 속도를 계산한다.

### 3. 3차원 토모그래피 연구

많은 지진학자들은 지구속도모델구조를 연구하는데 전력해오고 있다. 일반적으로 1차원 속도구조모델로는 ISC (International Seismological Center)의 IASPEI91 모델이 범세계적으로 지진요소를 결정하는데 널리 사용되고 있다. 그러나 1차원 및 2차원 속도구조 모델은 복잡한 지구구조를 대표하기에는 적합하지 않기 때문에 광범위한 지역이나 소규모의 지역 불균질성을 연구하기에 적합한 3차원 토모그래피 연구가 많이 이용되며(Lay and Wallace, 1995) 현재 이와 관련하여 많은 연구가 진행되고 있다. 1996년도 50차 UN 총회에서 창설된 핵실험 금지조약기구인 CTBT (Comprehensive Nuclear-Test Ban Treaty)에서는 전 세계에 약 170개의 지진관측소를 설치하여 핵실험 실시 유무를 1,000 km 이내에서 관측하고자 하고 있으며 이를 위해 1차원

지구속도구조모델인 IASPEI 모델을 사용하고 있다. 그렇지만 1차원 속도구조모델을 이용하여 지진요소를 결정하였을 경우 지구의 불균질성 때문에 지진파의 도달 시간을 결정하는데 정확성을 현저히 저하시키며 실제 도달시간과 이론 도달시간과는 상당한 오차를 유발시킨다. 이러한 단점을 보완하기 위해 CTBT에서는 전 세계를 몇 개의 지역으로 분할하고 지역을 대표할 수 있는 3차원 지하지구 속도구조모델을 찾고자 연구에 집중하고 있다. 실제로 북미와 유럽지역에서는 현재 3차원 속도구조모델을 이용 핵실험 및 지진관측을 시도하고 있으며 발생위치 및 발생시간 결정의 정확도를 크게 향상시키고 있다.

지진학자들에 의해 토모그래피가 지진연구에 도입된 이후로 지구 속도구조 모델 연구에 많은 공헌을 하였으며 1차원 속도 구조모델을 설정하는데 많은 공헌을 하였다. 또한 광범위한 지역의 지구지하의 불균질성을 파악할 수 있을 뿐만 아니라 국부지역의 불균질성 파악이 용이한 3차원 속도 구조연구에도 상당한 도움을

주고 있다.

### 3.1. 경상분지

본 논문에서는 최근에 한반도 지역에서 수행된 경상분지 내에서의 3차원 토모그래피 연구를 소개하고자 한다. 한반도 동남부에 위치한 경상분지는 자동차 공장 및 제철소등 산업 시설물외에 원자력발전소 등 주요 국가기간시설물이 위치한 관계로 지진활동에 상당히 민감한 지역이며 현재까지도 경상분지 내에 존재한다고 해석되고 있는 양산단층의 활성유무는 한반도 지진연구의 주요과제중 하나이다.

한국지질자원연구원에서 양산단층계의 지진활동을 감시하기 위한 목적으로 1994년부터 디지털 지진관측망을 구성하기 시작하여 현재(2005년 12월)에는 전국에 약 30여개의 디지털 지진관측소를 운영하고 있으며 (Fig. 1), 한전전력연구원에서는 원자력 발전소 부지 내부와 주변지역에 단주기 디지털 지진관측소를 총 15개 운영하고 있다. 한편 한국원자력안전기술원에서도 원자

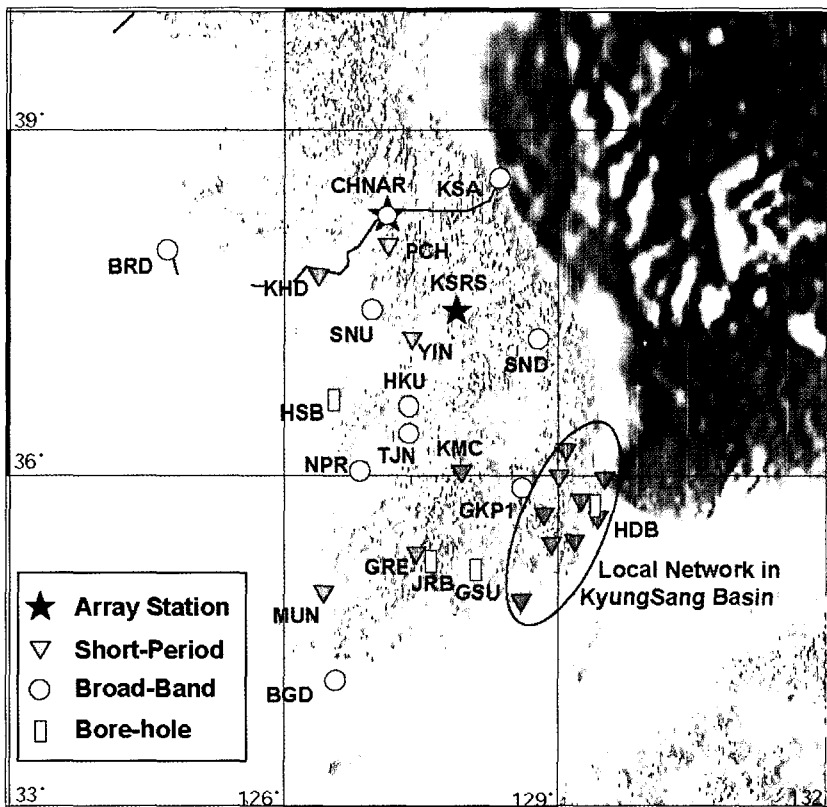


Fig. 1. Distributions of seismic stations operated by Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources (KIGAM). The shape of symbols denote the type of seismic instruments.

력 발전소 부지내에 각각 1개씩의 광대역 지진관측소를 운영하고 있다.

본 연구에서는 상기 기관 및 기상청의 일부 지진관측소에서 관측된 지진자료 중 한반도 남부 지역에서 발생한 지진동의 초동, P파의 도달시간을 사용하여 경상분지 일대의 P파 속도구조를 3차원적으로 역산하였다. 사용된 지진의 진앙지와 관측소간의 파선 분포를 Fig. 2에 도시하였다. 삼각형은 활용된 관측소의 위치를 나타내며, 십자선은 진앙지 위치를 의미한다. 진앙거리 150 km 까지는 가중치를 1로 하였고, 150 km부터 300 km 까지 가중치가 선형적으로 감소하도록 설정하였으며 RMS 잔차가 1.0 sec 까지는 가중치를 1로 하고 1.5 sec는 가중치를 0.02로, RMS 잔차 2.0 sec 이상은 사용하지 않도록 가중치를 0으로 설정하였다. 이런 조건하에서 4개이상 관측소에서 초동 P파의 도달시간이 기록된 지진을 선택하였으며 사용된 지진은 537개이며 P파는 2750개였다.

주시 토모그래피는 초기 모델에 의해서 계산된 주시자료와 관측된 지진자료와의 잔차 최소화를 만족하는 모델을 해로서 취하게 된다. 따라서 실제 지질환경과 유사한 초기 모델을 사용하여야 국지최소(local

minimum)에 빠지지 않고 지질환경에 부합하는 모델을 구할 수 있다. 적절한 초기 모델을 산정하기 위하여 기존의 연구결과들을 수집하여 분석 하였다. 남한지역 또는 경상분지 지역에 대하여 수행된 1차원 속도구조 모델들(Lee, 1979; Kim, 1983; Kim, 1995; Chung, 1995; Kim, 1998) 그리고 (Choi, 2000)의 6가지 연구결과를 Fig. 3에 색깔별로 표시하였다. 이들 6가지 모델들은 상부 지각의 심도가 15~22 km까지, 속도는 5.5~6.2 km/s로 분포하고 하부 지각 심도는 30~35 km 까지, 속도는 6.3~7.0 km/s의 범위를 나타내고 있다. 본 연구에서는 선정한 초기모델은 Fig. 3에 검은 점선으로 나타냈다. 이 모델은 지질자원연구원의 진앙지 결정시 사용되는 모델과 IASPEI91모델을 결합한 것으로서 층적층의 속도 분포를 고려하여 첫 층은 3.86 km/s의 저속도층을 100 m 심도까지 갖도록 한 것이다. 이 모델은 local 및 regional 지진에 대한 진앙지 오차율이 비교적 낮고 기존 모델들의 속도 범위 내에 있으며 굴절파 탐사 결과 P파의 지각 평균속도는 5.95 km/s, 맨틀 상부 속도는 8.1 km/s 로 발표되었는데 본 연구에 사용된 초기 모델은 이 발표 결과도 만족하고 있다(Lee, 2004). 본 연구에서 사용하고 있는

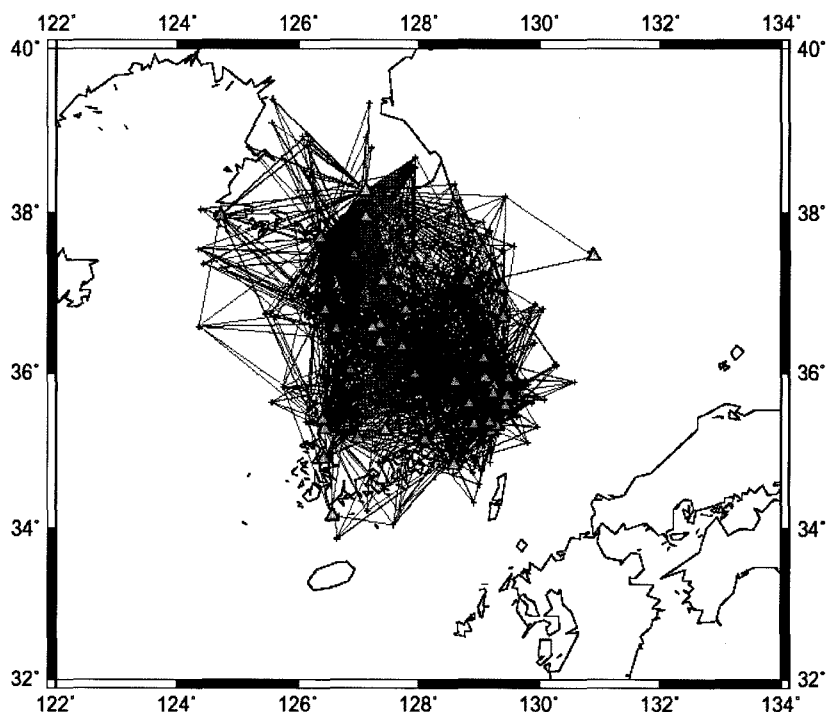


Fig. 2. The ray paths between epicenter and stations. Orange triangles represent seismic stations and small crosses show the location of epicenters.

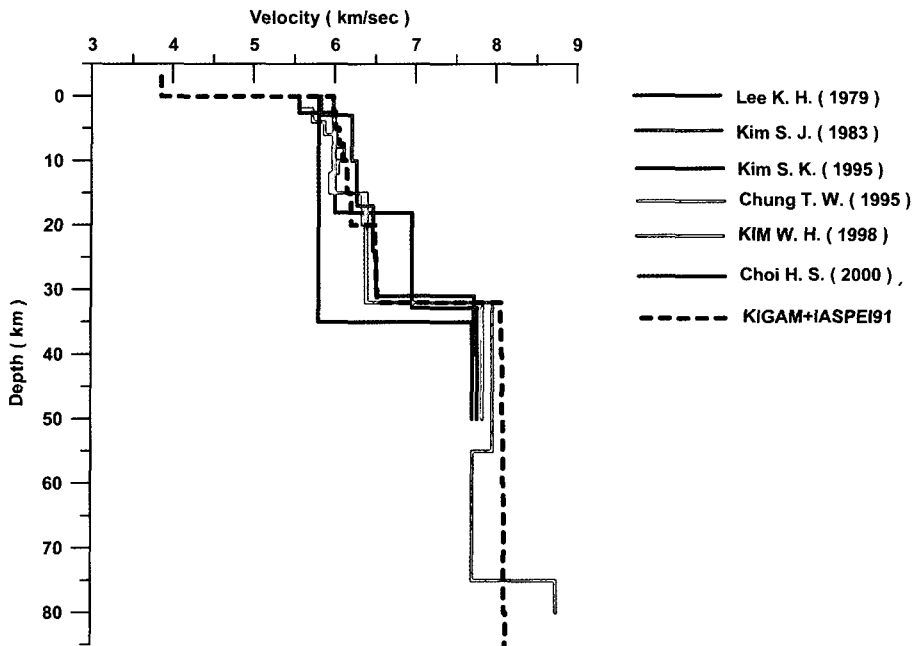


Fig. 3. The previous 1-D models and adapted initial model(KIGAM+IASPEI91).

pseudo-bending 파선 추적법은 파선경로상의 속도의 변화량에 의한 파선곡율을 결정하기 때문에 파선이 지표로 돌아오기 위해서는 같은 속도분포 층(예: 상부 지각내에서)이라도 깊이에 따른 약간의 속도 증가를 고려해 주어야 한다. 따라서 상부 지각내에서도 심부로 갈수록 속도가 점차 증가하도록 초기모형을 설정하였다.

3차원 속도 구조 모델 역산은 ART(Approximate Ray Tracing)와 Pseudo-Bending 방법을 혼합하여 Thurber(1983)가 개발하고 후속 연구진들에 의해 수정 발표된 SIMULPSq13이 사용되었다. 이 프로그램은 속도구조 모델과 진원위치 및 발생시간 정보를 동시에 역산할 수 있고 속도모델의 격자크기의 변화가 가능한 장점이 있다. 본 연구에서는 속도모델의 수평격자는 40 km의 일정한 격자를 사용하였으나 수직격자는 10 km 깊이까지는 2 km에서 5 km까지의 조밀한 격자를, 10 km 깊이 이상에서는 5 km에서 10 km까지의 넓은 간격의 격자를 적용하였다(Fig. 4). 토모그래피 역산이 진행된 횡수와 오차 값의 상관관계를 조사한 결과에 의하면 5차 역산에서 최소 오차 값을 보여준다. 또한 결과의 신뢰도 조사를 위해 격자내의 파형 전달한 파의 개수를 조사한 결과 2.5 km깊이에서 40 km까지 경상 분지 지역에서는 50개 이상의 파가 지나는 것으로 조사되어 신뢰성이 있다고 판단되었다.

연구지역에 대한 3차원 토모그래피 결과를 각 심도

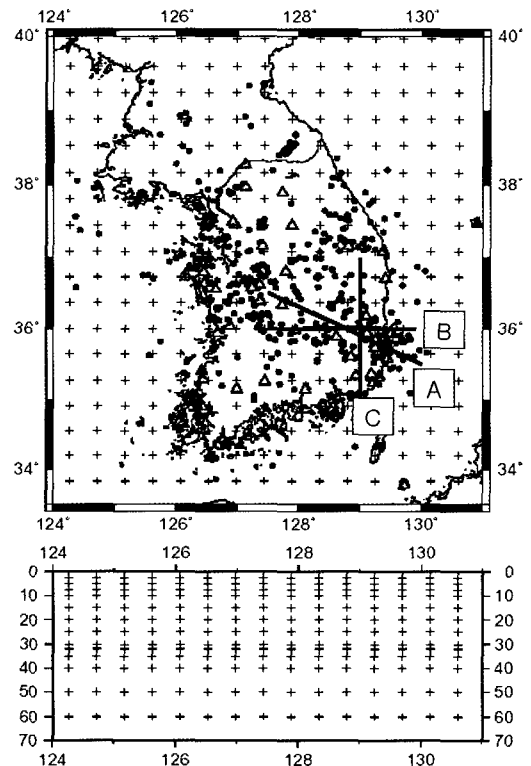


Fig. 4. The grid distribution in the study area. Triangles show the location of stations, and solid circles mean event locations. Three lines are the vertical cross section lines.

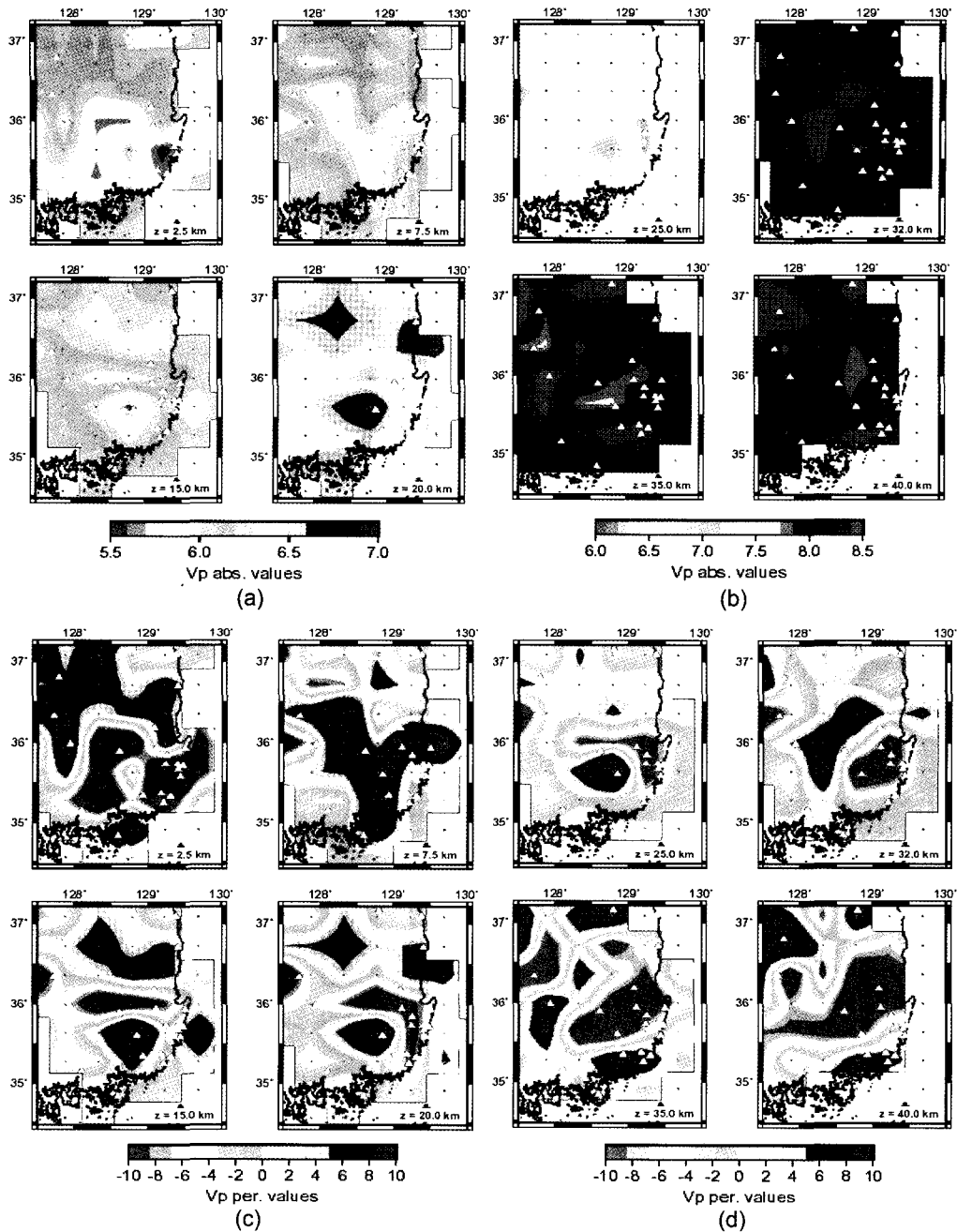


Fig. 5. The distribution of velocity on the depth slice sections (depth 2.5~40 km).

별 속도 분포로 Fig. 5에 도시 하였다. Fig. 5의 (a)와 (b)는 P파 속도 값으로써 심도별 분포를 나타낸 것이고, (c)와 (d)는 각 심도의 평균 속도 값에 대한 상대적 차이를 퍼센트(%) 값으로 나타낸 것이다. 심도 2.5 km에서의 P파 속도분포는 경상분지 퇴적층하부 지역

에서 분명한 저속도 분포를 나타내고 있으며 심도 7.5 km 상에서는 V자형태로 주위 보다 빠른 속도 분포가 나타났다가 15 km 깊이에서는 그 형태가 원형모양으로 바뀌고 지역도 두 지역으로 나뉘는 양상을 보여주고 있다. 이 두 지역은 지표에서 나타나는 경상분지의

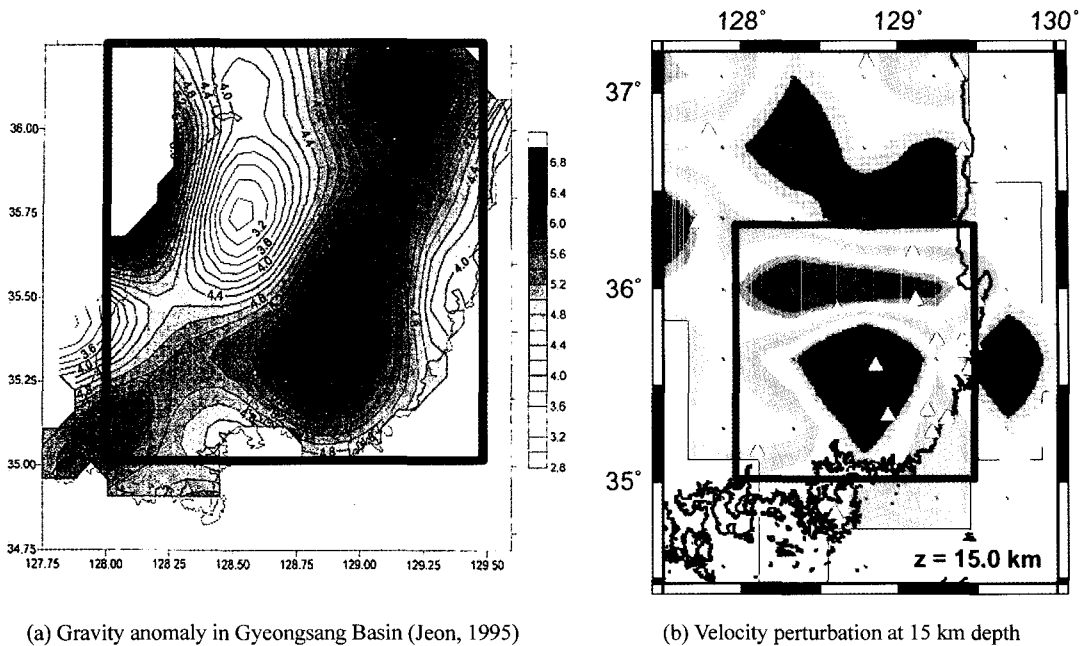


Fig. 6. The correlation between gravity anomalies and velocity perturbations on the 15km depth in Southeastern part of Korea. The rectangle shows the same area of two results.

화성기원의 암석분포 지역 하부에 발달되어 있는 것으로 보아 지각 하부 물질이 상부로 유입되는 중심부분으로 작용되었을 것으로 추정된다. 심도 15 km 상에는 영일만에서 김천을 잇는 저속도 지역이 좁은 띠 모양으로 나타난다. 이는 지표 퇴적암의 충후가 이 지역에서 가장 두껍게 분포하기 때문에 나타나는 현상일 것으로 판단된다. 심도가 깊어 감에 따라 양산 단층대 하부 지역을 따라 저속도가 나타나고 32 km 깊이에서는 저속도 지역이 양산 단층대 지역 전체를 덮으면서 넓게 자리 잡고 있다. 심도 20~30 km에 이르는 이러한 저속도 분포가 양산단층계의 발달과 어느 정도 관계가 있을 것으로 여겨지나 구체적인 관계를 밝히기에는 더 깊은 연구가 수행 되어야 할 것이다.

역산된 모델의 검증을 위하여 동일 지역에서 중력 이상도의 연구 결과와 비교하여 보았다. Fig. 6의 (a)는 경상분지일대에서 측정한 중력자료를 처리하여 결정된 중력이상도(Jeon, 1995)이며 (b)는 심도 15 km에서의 상대적 속도분포도이다. 사각형 구역이 동일 지역으로서 중앙 하부에 중력 고이상대와 고속도지역이 분포하고 있고 약간의 위치 오차가 있지만 대상 지역 좌상부는 중력 저이상대와 저속도 지역이 잘 일치하고 있다.

연구지역에서 3차원 토모그래피에 의한 속도구조결

과를 명확히 이해하기 위해 Fig. 4에서 보여준 바와 같이 예상되는 양산단층대를 수직으로 교차하는 방향(Line A)과 동서(Line B) 및 남북(Line C)방향등 세 가지 방향에서 단면도를 작성해 보았다(Fig. 7, 8 and 9). Fig. 7과 Fig. 8에서는 5 km와 10 km 깊이에서 뚜렷한 고속도 층이 나타나는데 이는 퇴적분지에 포함된 화성기원의 암석으로 여겨지며 남북방향의 단면도에서는 한국 지질도에 나타나는 유천계 화성암지역에서 고속도층이 분명하게 보여준다. Fig. 8에서는 남북방향의 수직 단면 분포로서 고속도층의 충후가 북위 35.5도 부근에서 가장 두껍게 나타남을 알 수 있다. Fig. 10에서는 한국지질도와 Line A와 Line B의 단면도 결과를 비교하였다. 3차원 토모그래피 속도구조연구결과에서 2.5 km 깊이에서 신동층(K1) 및 하양층(K2)이라고 불리는 퇴적층의 경상분지에서 저속도층이 분명하게 보이며 화성암 기원의 유천계의 고속도층도 뚜렷이 보인다. 상부층에서는 퇴적분지의 저속도층을 보여주는 반면 상부층하부에서는 K3로 표시된 바와 같이 상대적으로 고속도층을 보여준다. 동서방향의 단면도를 볼때 양산단층대를 중심으로 동쪽지역에서 저속도층이 서쪽보다 더 깊은 것으로 나타나며 양산단층대 하부 약 30 km 깊이까지 저속도층이 연장되어 있는 것으로 나타난다.



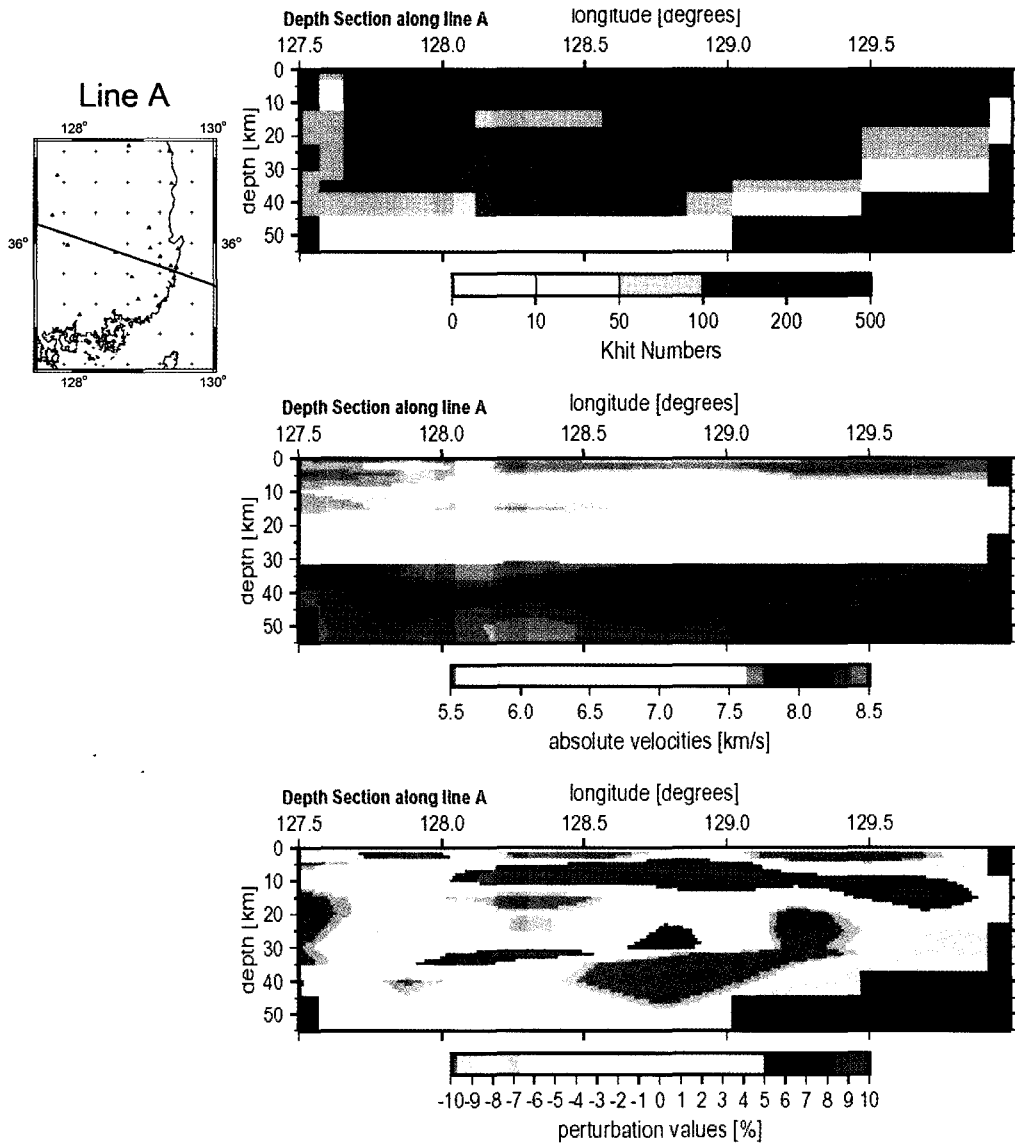


Fig. 7. The vertical cross section on the line A of Fig. 4.

### 3.2. 한반도 및 동해지역

연구지역을 일본열도, 동해, 한반도를 포함한 북위 25도에서 45도, 동경 120도에서 145도 사이지역으로 확대하였다. 이 지역은 섭입대(subduction zone)를 포함한 지질학적으로 매우 중요한 지역이다. 한반도 지역은 유라시아 판의 일부로 판과 판 경계 부분과 멀리 떨어져 있어 지진학 적으로 안정한 지역으로 여겨지며 실제로 역사지진 및 계기지진을 조사해 볼 때 중규모 이상의 지진이 상대적으로 적게 발생하는 것으로 관측되며 대

체로 진원의 깊이는 천부인 것으로 조사되었다. 지진 자료가 부족함에도 불구하고 앞서 지정한 바와 같이 한반도지역에서는 여러 가지의 1차원 속도구조 모델이 제시되었다(Lee, 1979; Kim and Kim 1983; Kim, 1995; Chung, 1995; Kim, 1998; Choi, 2000). 동해지역과 일본열도 지역은 대륙 판과 대륙판의 충돌 및 섭입 과정에서 생성된 것으로 지질학적으로 설명되어지며 여기에 관련된 대륙판은 유라시아판, 태평양판, 필리핀판, 북으로는 북미판 등이다. 일본 열도 지역은

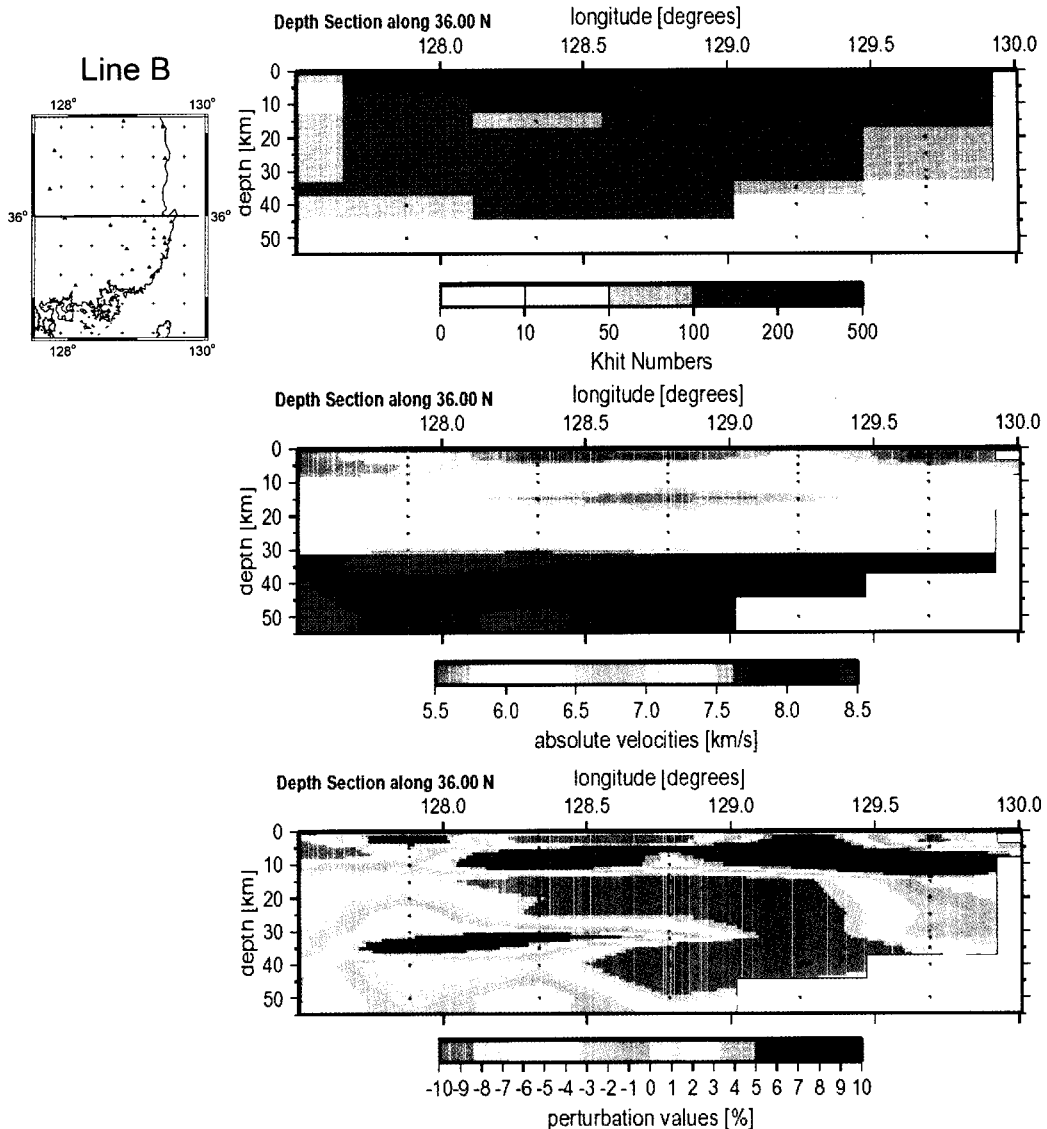


Fig. 8. The vertical cross section on the line B of Fig. 4.

북동 일본 · 남서 일본으로 크게 분류할 수 있는데 남쪽에서부터 필리핀 판이 남서 일본을 북서 방향으로 섭입대를 형성하고 있으며(Seno, 1977; Ranken *et al.*, 1984; Seno *et al.*, 1987, 1993) 동쪽에서부터는 북동 일본을 태평양판이 북서서 방향으로 섭입대를 형성하는 것으로 여겨진다(DeMets *et al.*, 1990). 동해 지역은 지형학적으로 4개의 해양분지(the Japan Basin, the Yamato Basin, the Ulleung Basin, and the Tartary Trough) 와 대륙성고지로 구성되어 있으며 Japan Arc System의 전형적인 back-arc (후배호) 분

지로 여겨진다. 동해의 생성에 대해서는 많은 연구가 진행되었고 대체로 3가지 모델이 제시되어 있다. 부채꼴 확장설(Otofuiji *et al.*, 1985a, 1985b; Celaya and MaCabe, 1987)은 서남일본과 동북일본이 각각 시계 및 반시계방향으로 회전하면서 동해가 열렸다는 설이고, pull-apart 확장설(Lallemand and Jolivet, 1986; Jolivet, 1985; Kimura and Tamaki, 1986)은 양산-쓰시마 단층과 Tartary-Hidaka shear zone의 우수향의 strike-slip의 힘에 의해 동해가 생성되었다는 설이고, 2 단계 확장설(Hayashida and Torii, 1986; Lee *et al.*,

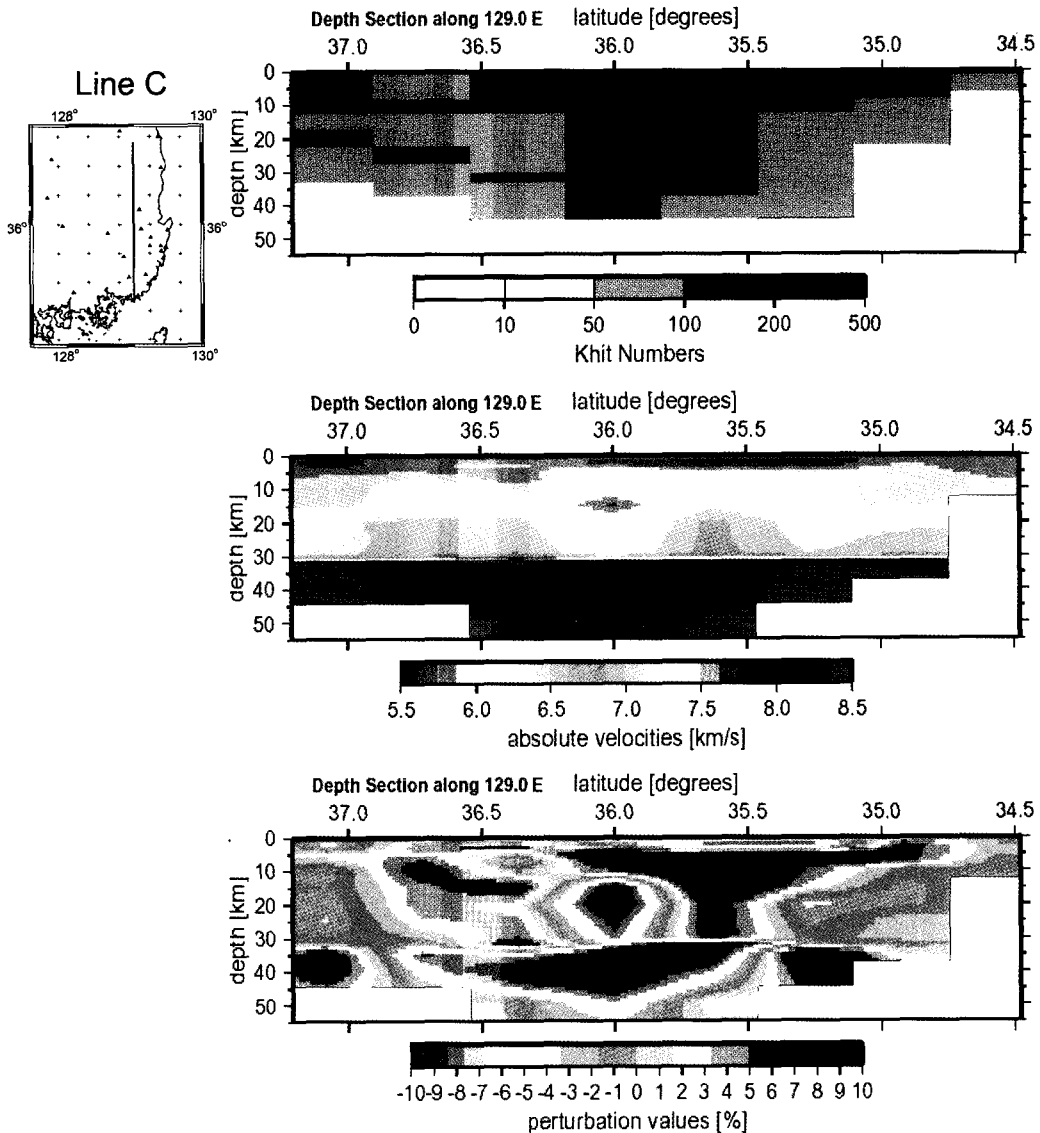
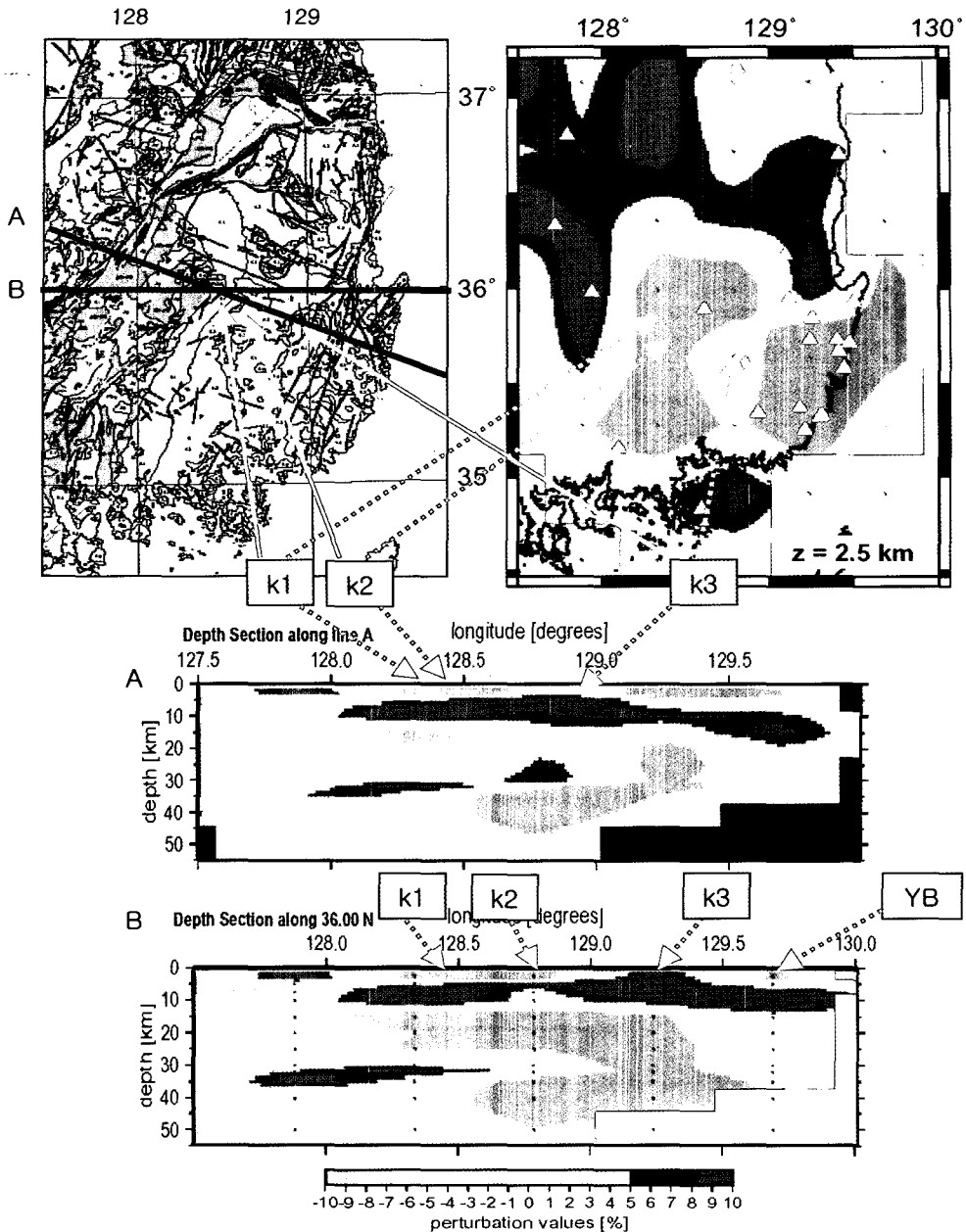


Fig. 9. The vertical cross section on the line C of Fig. 4.

1999)는 초기에는 일본열도가 남남서 방향으로 이동하다가 필리핀해판과의 충돌로 일본열도가 회전하여 동해가 오늘날과 같은 모습으로 되었다는 설이다. 한반도 지역과 달리 일본지역은 유라시아 판 밑으로 태평양판과 필리핀판이 섭입되는 것으로 여겨지는 지역으로 지진활동이 매우 활발한 지역으로 지진자료가 풍부하다.

이 지역에서 지진지체구조를 자세히 이해하기 위해 지진파 토모그래피 방법을 이용 지각 및 상부맨틀 속도구조연구를 실시하였다. 총 11,059 events의 349,532

개의 지진파 도달시간의 자료를 이용하였으며 자료는 한국지질자원연구원, 기상청, 일본기상청(JMA)자료를 이용하였다(Fig. 11). 한반도 지역의 경우 주로 천부에서 지진이 발생하며 중규모 이상의 지진의 발생이 희박하며 반면에 동해지역의 경우 지진을 관측할수 없는 단점과 일본열도의 경우 천부 및 심부 지진이 다양하게 발생하고 중규모이상의 지진자료가 풍부한 점을 감안하여 다양한 지진자료를 이용할 수 있도록 개발한 Zhao *et al.*(1996)의 software를 이용하였으며 이를 이용 약 270 km 깊이까지의 속도구조를 해석하였다. 깊



**Fig. 10.** The correlation between geological map and vertical cross section A and B, and the velocity perturbation on 2.5 km depth section.

이에서는 2 km, 10 km, 25 km, 40 km, 65 km, 90 km, 120 km와 150 km의 불규칙한 격자를 수평방향으로 남북, 동서방향 모두에서 40 km 격자를 이용하였다. 결과의 신뢰도 조사를 위한 분해능 결과에 의하면 대체로 천부에서는(2 km-40 km) 지진계가 전무한 동해지역에 비해 지진계가 위치한 일본열도와 한반도는 대체로

충분한 신뢰성을 반면에 희박한 지진자료에 기인하여 동해 지역에서는 결과에 대한 신뢰성이 매우 낮은 것으로 나타났다. 그러나 심부에서는 한반도지역을 동해 지역, 일본열도지역과 비교해 볼 때 결과에 대한 신뢰성이 매우 낮거나 거의 지하속도구조가 파악되지 않는 데 이는 한반도 지역에서 발생하는 지진의 대부분이

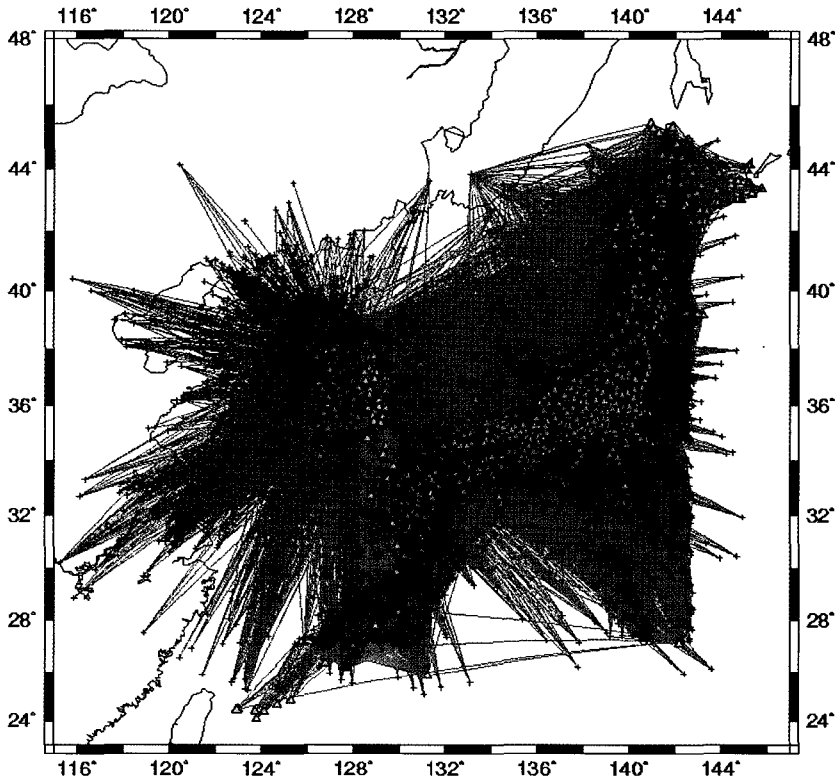


Fig. 11. Paths from epicenters(small black cross) to recording stations(orange triangles) of 11,059 data used in the study.

천부에서 발생하기 때문에 심부에 지진파가 전달되지 않아 분해능이 낮은 것으로 여겨진다(Fig. 12a, 12b).

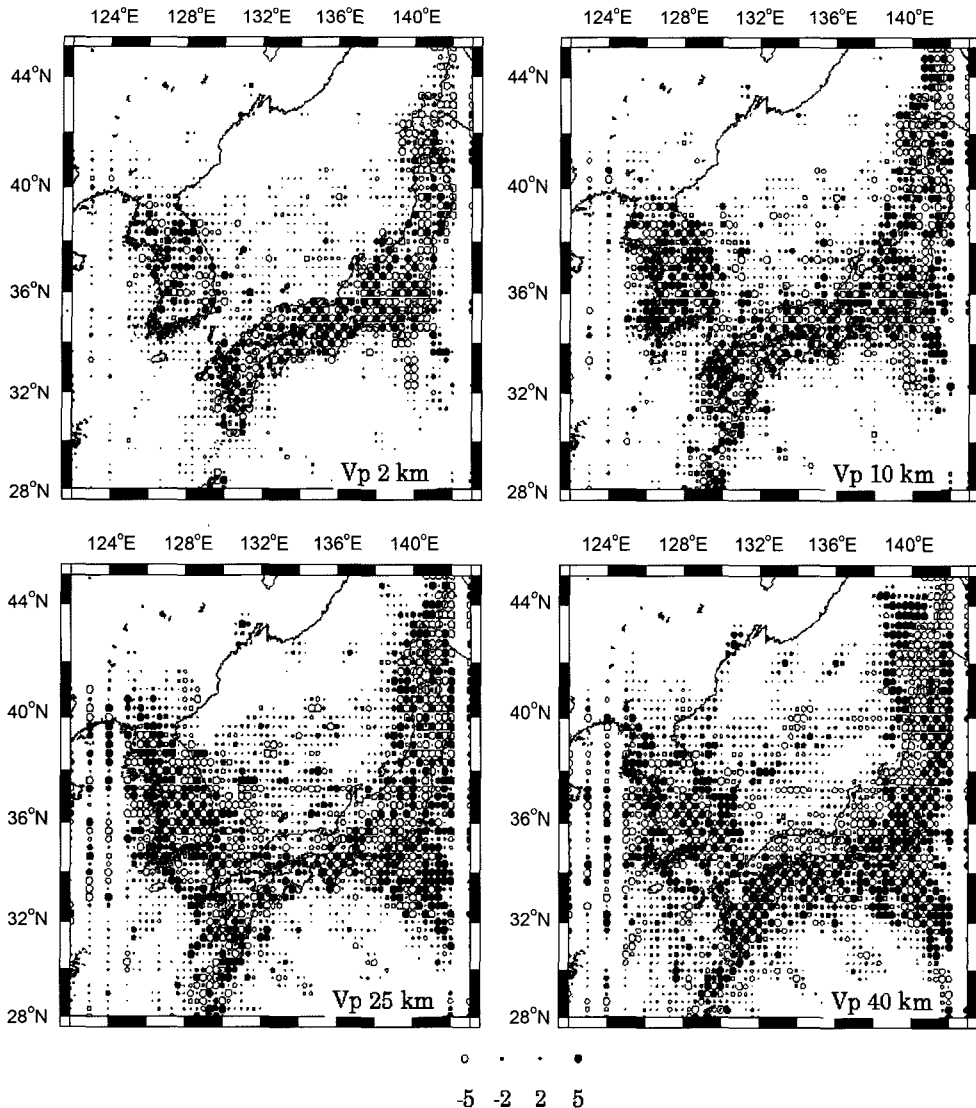
연구지역에서 3차원 지진파 토모그래피 연구결과(Fig. 13a, 13b)에 의하면 대체로 한반도 지역은 2 km에서 약 65 km 깊이까지 지각속도구조해석이 가능하나 깊이가 깊어질수록 분해능이 떨어져 지각속도구조해석이 가능하지 못하거나 전혀 지하속도구조가 파악되지 않는 반면 일본열도는 천부에서 심부까지 전체적으로 지각속도구조해석이 가능하다. 이는 한반도의 경우 천부지진이 대다수 발생하는 반면 일본열도의 경우 중규모 이상의 지진이 천부와 심부에서 모두 발생하는 것으로 여겨진다. 동해지역의 경우 지진계가 설치 되지 못하는 관계로 천부에서 분해능이 떨어져 제대로 지각속도구조가 파악되지 못하나 심부에서는 천부에서 보다 분해능이 높아져 대체적인 지하속도구조가 파악된다. 이는 동해지역에서 발생하는 심부지진의 영향인 것으로 여겨지며 서남부 일본 열도 지하에 필리핀판이 섭입되는 지역으로 여겨지는 곳에서 고속도층이 발견되는데 이는 섭입대 위의 고속도층의 존재를 암시하는 것으로 여겨지며 25 km 깊이에서는 동해지역에서 일본열도나

한반도지역에서 보다 높은 속도층이 발견되는데 이는 해양지각이 대륙지각보다 얇다는 것을 유추할 수 있다.

#### 4. 결론 및 토의

1차원 지하구조모델을 가지고 지진의 진앙지 및 발생시각을 결정하는 데는 실제의 위치와 시각과는 상당한 차이가 있으며 정확성이 많이 결여되어 있다. 또한 지역적인 특성을 고려하여야만 정확한 진앙위치 및 지진발생시각을 결정할 수 있는데 일률적으로 1차 모델을 적용하는 것은 많은 문제점을 내포하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 3차원 지진파 토모그래피 연구를 통해 그 지역에 맞는 모델을 설정하여 설정된 모델을 가지고 진앙의 위치와 발생시각을 계산하는데 적용하여 정확도를 향상시켜 왔다.

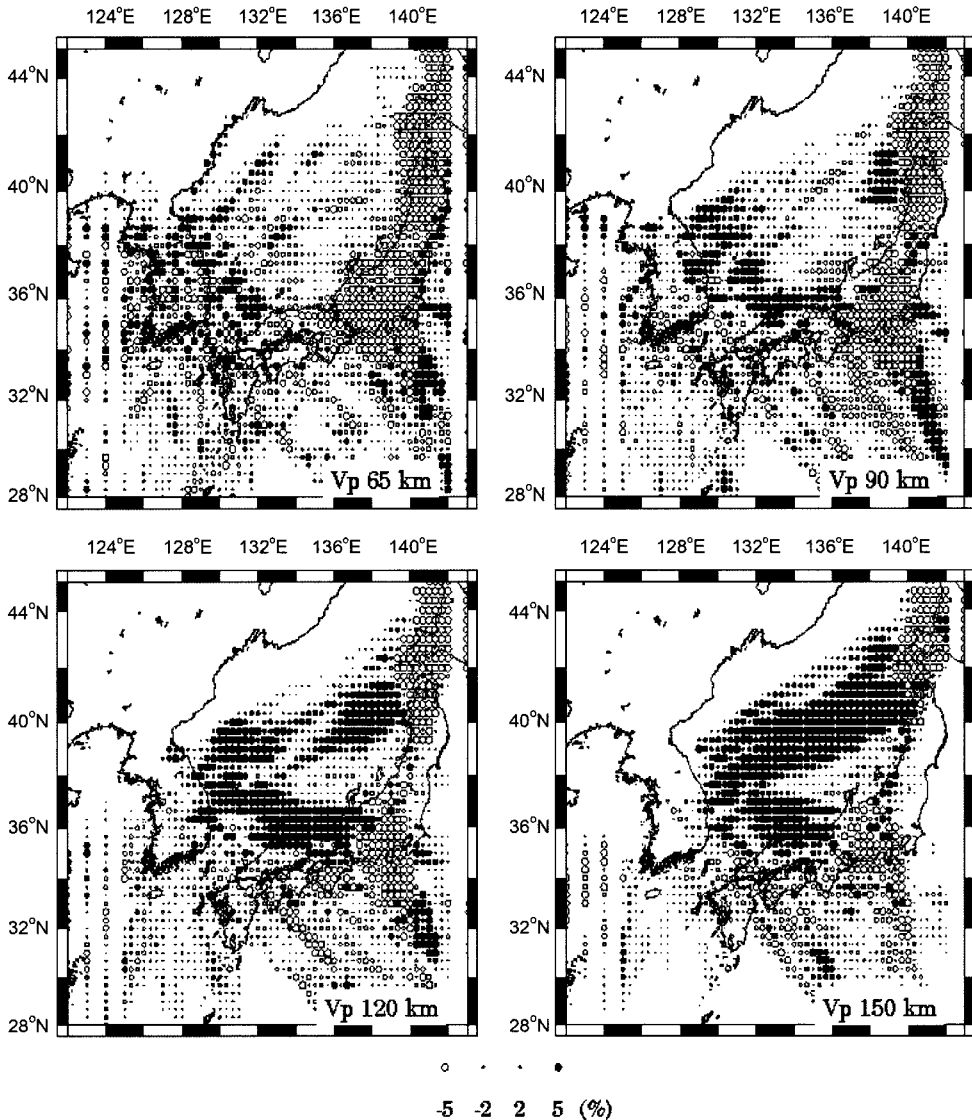
입력 자료 4개 이상의 지진파 관측소에서 잡힌 지진 537개에서 추출된 2750개 P파 도달시간 자료를 이용 경상분지를 포함한 남동부 한반도지역에서의 3차원 지진파 토모그래피 연구를 수행한 결과에 의하면 5차 역산에서 최소 오차값을 보여주며 2.5 km 깊이에서 40 km



**Fig. 12a.** Results of checker board test between 2 km and 40 km depth of the study area including the Korean Peninsula, Japan Islands, and East Sea.

깊이까지에서는 50개 이상의 파가 지나는 것으로 조사되어 충분한 신뢰성을 확보하였다. 또한 3차원 토모그래피 결과에 의하면 2.5 km 깊이에서의 P파 속도분포는 경상분지 퇴적암지역 하부에서 분명한 저속도분포를 보여주고 있으며 7.5 km 깊이에서는 V자형의 고속도 분포를 보여주고 있는데 이는 경상분지내의 화성암 기원 암석의 넓은 분포를 암시하는 것으로 보인다. 15 km 깊이에서 20-25 km 깊이까지는 고속도층 분포가 부분적으로 이어지며 32 km 깊이부터는 양산단층대하부 지역에서 저속도층을 보여주고 있는데 이는 양산단

층대 발달과 관계가 있을 것으로 판단된다. 경상분지 내 중력이상과 P파 속도구조와의 결과를 비교해본 결과 저속도층은 낮은 중력 분포 값 고속도 층은 높은 중력분포 값을 보여주고 있다. 정밀한 조사를 위해서 예상되는 양산단층대를 수직방향으로 단면도를 작성해본 결과 5 km와 10 km 깊이에서는 고속도 층이 나타나는데 이는 퇴적분지에 포함된 화성기원의 암석으로 여겨지며 남북방향의 단면도에서는 한국 지질도에 나타나는 음원계 화성암지역에서 고속도 층이 분명하게 보인다. 2.5 km에서는 신동층 및 하양층이라고 불리는



**Fig. 12b.** Results of checker board test between 65 km and 150 km depth of the study area including the Korean Peninsula, Japan Islands, and East Sea.

퇴적경상분지의 저속도층은 분명하게 보여준다. 동서방향의 단면도를 볼때 양산단층대를 중심으로 동쪽지역에서 저속도층이 서쪽보다 더 깊은 것으로 나타나며 양산단층대 하부 약 30 km 깊이까지 저속도층이 연장되어 있는 것으로 나타난다.

다른 연구지역은 일본열도, 동해, 한반도를 포함한 북위 25도에서 45도, 동경 120도에서 145도 사이지역으로 유라시아판 밑으로 태평양판과 필리핀판이 섭입되는 것으로 여겨지는 지역으로 지진활동이 매우 활발

한 지역이다. 이 지역에서 지진지체구조 활동의 특성을 자세히 이해하기 위해 한국지질자원연구원, 기상청 자료 외에 일본기상청(JMA)자료를 포함시킨 총 11,059 events의 349,532 지진과 도달시간의 자료를 사용하여 지진과 토모그래피 기법으로 지각 및 상부맨틀 속도구조 연구를 실시하였다. 결과에 의하면 일본 동부에서 시작된 섭입대는 동해지역에까지 연장되는 것으로 여겨진다.

일반적으로 토모그래피 연구를 포함하여 각종 지진

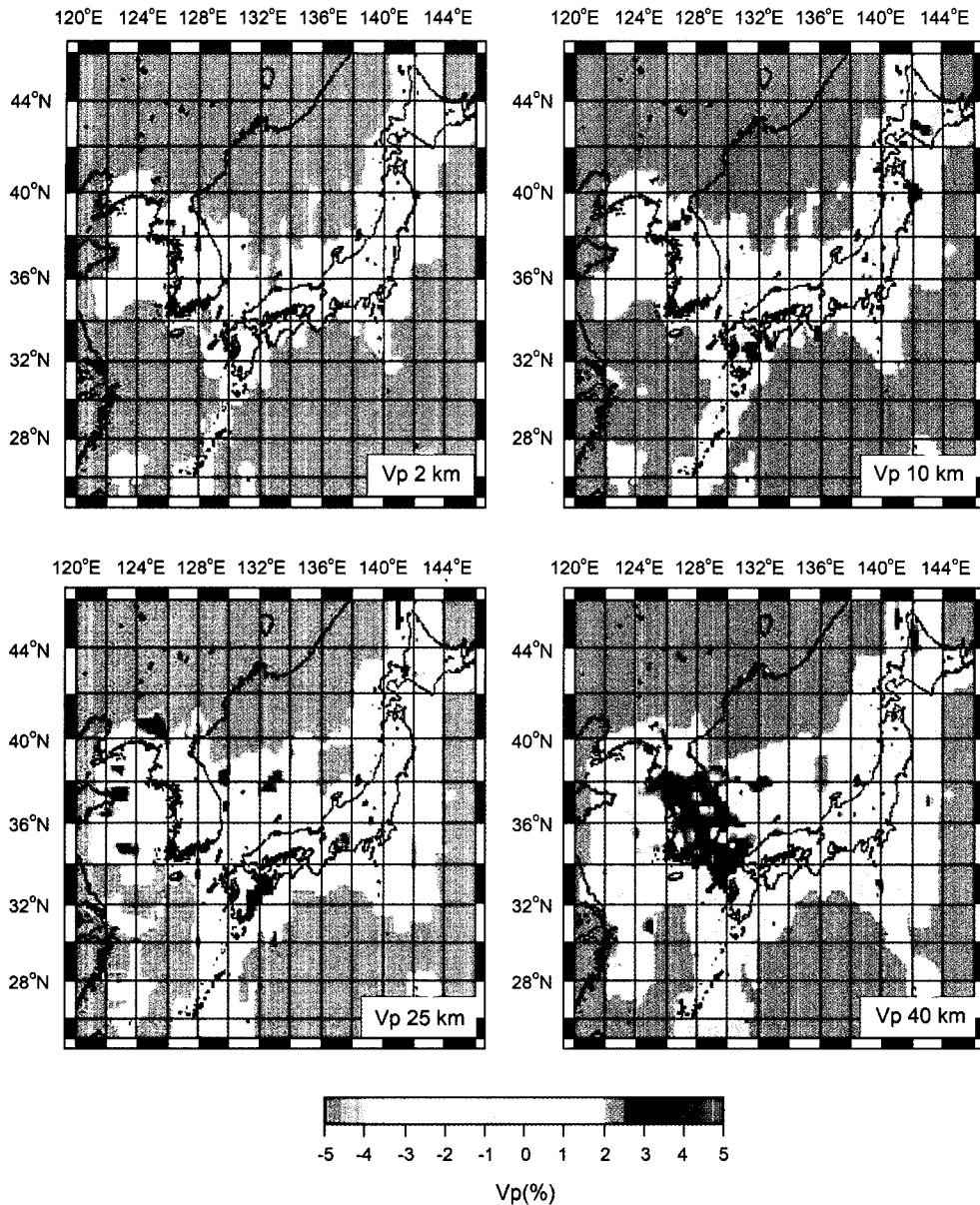


Fig. 13a. P-wave velocity variations of study area at 3, 10, 25, and 40 km depths.

연구를 수행하기 위해서는 최대한 근접한 지역에서 발생한 지진 자료가 있어야 가능하다. 이러한 측면에서 한반도 중에서 특히 북한 지역에서의 지진 자료 축척이 필요하며 특히 북한지역의 지하속도구조 규명연구는 물론이고 현재 정치적·군사적으로 민감한 사안인 미사일·핵실험 등 인공지진과 자연지진 식별 연구 등을 위해서 시급히 필요하다. 이러한 관점에서 북한지역을 동서남북방향에서 포위하는 형태로 지진관측소를

배치해야하고 최대한 북한과 근접하게 지진관측소를 배치시켜야 한다. 북한과 경계한 북동부 지역의 중국과 서쪽으로 일본에 지진계를 배치하고 북한과 최대한 근접한 휴전선부근의 지진관측소에서 관측된 지진자료를 이용하면 남한뿐만 아니라 북한을 포함한 한반도 전체에 대한 지하속도구조를 3차원 토모그래피 연구를 통해 소상하게 규명할 수 있을 것이다.



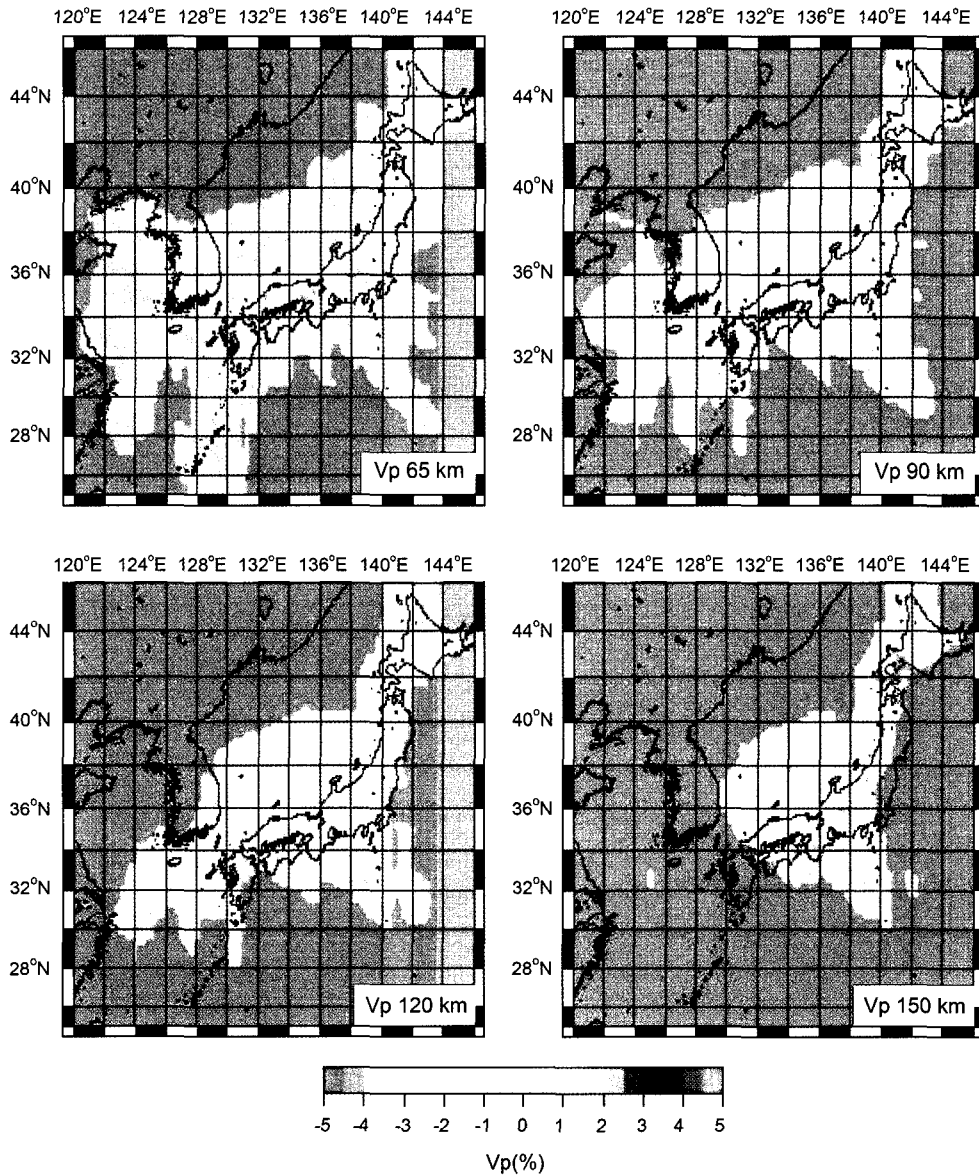


Fig. 13b. P-wave velocity variations of study area at 65, 90, 120, and 150 km depths.

### 감사의 글

본 연구는 기상지진기술개발사업단의 과제 번호 “CATER 2006-5202” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- Cerveny, V., Molotkov, I. A. and Psencik, I. (1977) Ray method in seismology. Praha: Universita Karlova.
- Choi, H. S. (2000) Estimation of crustal velocity structure in southeastern Korea, M. S. Thesis, SNU, Seoul, Korea.
- 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, p. 152-157.
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F. and Stein, S. (1990) Current plate motions. Geophys. J. Int., v. 101, p. 425-478.
- Eberhart-Phillips (1993) Local earthquake tomography: earthquake source regions, In H. M. Iyer and K. Hira-

- hara (ed.), *Seismic Tomography*, Chapman and Hall, p. 613-643.
- Evans, J. R. D. Eberhart-Phillips, and C. H. Thurber (1994) User's manual for SIMULPS12 for imaging Vp and explosion US Geol. Surv. Open File Rep OFR 94-431, 101.
- Hayashida, A. and Torii, M. (1986) Opening process of the southwestern part of the Japan Sea. *Mar. Sci. Mon.*, v. 120, p. 685-689(in Japanese).
- Husen, S. (1999) Local earthquake tomography of a convergent margin, North Chile, A combined on-and off-shore study Dissertation, Christian-Albrechts-Universität Kiel.
- Jeon, J. S. (1995), Geophysical study for the geologic structure in the southern part of Gyeongsang Basin, P101, Ph. D. Thesis, Yonsei University.
- Jolivet, L., and Miyashita, S. (1985) The Hidaka shear zone (Hokkaido, Japan): Genesis during a right-lateral strike-slip movement, *Tectonics*, v. 4, p. 289-302.
- Kim, S. J., and Kim, S. G. (1983) A study on the crustal structure of South Korea by using seismic waves, *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 16, p. 51-61.
- Kim, S. K. (1995) A study on the crustal structure of the Korean peninsula, *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 31, p. 393-403.
- 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, p. 166-177.
- Kimura, G., and Tamaki, K. (1986) Collision, rotation, and back-arc spreading in the region of the Okhotsk and Japan Seas, *Tectonics*, v. 5, p. 389-401.
- Kissling, E., F. Haslinger, and S. Husen, 2000, Model parametrization in seismic tomography: A choice of consequence for the solution quality, submitted to *Phys Earth Plan. Int.*
- Lallemand, S. and Jolivet, L. (1986) Japan Sea: A pull-apart basin?. *Earth planet. Sci. Letts.*, v. 76, p. 375-389.
- Lay, T. and Wallace, T. C. (1995) *Modern Global Seismology*, Academic Press
- Lee, J. M. (2004) The study of velocity structure beneath the Korea Peninsula, Symposium of the Korea Peninsula.
- Lee, K. H. (1979) On the crustal structure of the Korean Peninsula, *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 15, p. 134-150.
- Lee, Y.S., Ishikawa, N., and Kim, W.K. (1999) Paleomagnetism of Tertiary rocks on the Korean Peninsula: tectonic implications for the opening of the East Sea (Sea of Japan). *Tectonophysics*, v. 304, p. 131-149.
- Otofujii, Y., A. Hayashida, and Torii, M. (1985a) When was the Japan Sea opened?: Paleomagnetic evidence from southwest Japan, in *Formation of Active Ocean Margins*, N. Nasu, editor, p. 511-566.
- Otofujii, Y., Matsuda, T. and Nohda, S. (1985b) Opening mode of the Japan Sea inferred from the paleomagnetism of the Japan arc. *Nature*, v. 317, p. 603-604.
- Ranken, B., Cardwell, R. K. and Karig, D. E. (1984) Kinematics of the Philippine Sea plate, *Tectonics*, v. 3, p. 555-575.
- Seno, T. (1977) The instantaneous rotation vector of the Philippine Sea plate relative to the Eurasian plate, *Tectonophysics*, v. 42, p. 209-226.
- Seno, T., Moriyama, T., Stein, S., Woods, D. F., DeMets, C., Argus, D. and Gordon, R. (1987) Redetermination of the Philippine Sea plate motion (abstract), *EOS AGU Trans.*, v. 68, p. 1474.
- Seno, T., S. Stein, and Gripp, A. E. (1993) A model for the motion of the Philippine Sea plate consistent with NUVEL-1 and geological data, *J. Geophys. Res.*, v. 98, p. 17,941-17,948.
- Thurber, C. H. (1983) Earthquake locations and three-dimensional crustal structure in the Coyote Lake area, central California, *J. Geophys. Res.* v. 88, p. 8226-8236.
- Thurber, C. H. (1993) Local earthquake tomography: Velocities and Vp/Vs-theory, In H. M. Iyer and K. Hirahara (ed.), *Seismic Tomography*, Chapman and Hall, p. 563-583.
- Thurber, C. H. and Ellsworth, W. C. (1980) Rapid solution of ray tracing problems in heterogeneous media, *Bull. Seis. Soc. Am.*, v. 70, p. 1138-1148.
- Vidale, J. E. (1988) Finite-difference traveltimes calculation, *Bull. Seis. Soc. Am.* v. 78, p. 2602-2676.
- Zhao, D., Kanamori, H. and Humphreys, E. (1996) Simultaneous inversion of local and teleseismic data for the crust and mantle structure of southern California, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v. 93, p. 191-214.