

토론 “국내지진활동 및 지각구조 연구동향”에 관하여

이기화^{1*} · 유현재² · 송석구³ · 조광현⁴

¹서울대학교 지구환경과학부, ²한국해양연구원 극지연구소

³Stanford University, ⁴한국지질자원연구원 지진연구센터

Comment on “Recent Research for the Seismic Activities and Crustal Velocity Structure”

Kiehwa Lee^{1*}, Hyun Jae Yoo², Seokgoo Song³ and Kwang Hyun Cho⁴

¹School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, South Korea

²Korea Polar Research Institute, Incheon 406-840, South Korea

³Department of Geophysics, Stanford University, Stanford, CA 94305, USA

⁴Earthquake Research Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, South Korea

Kim *et al.*(2006)은 최근 한반도 및 그 주변에 대한 지진활동과 지각구조의 연구동향을 전반적으로 고찰하였다. 한반도의 지각구조는 반도의 지진활동 및 지진 위험도, 지질구조 및 지각진화 등의 연구에 필수적으로 연관되는 매우 중요한 문제이기 때문에 이에 대한 그들의 고찰에서 몇 가지 문제가 되는 점들을 다음과 같이 지적하고자 한다.

1. 대체로 지각구조는 모호면과 그 상부의 지각층으로 이루어져 있다. 모호면은 전 세계적으로 거의 모든 지역에서 발견되는 보편적 현상(universal phenomenon)임에 반하여, 그 상부지각층의 불연속면들(예: 콘라드면)은 지역에 따라 존재하기도 하고, 존재하지 않기도 하는 국지적 현상(local phenomenon)이다(Tanimoto, 1995). 이는 그러한 지진파 속도의 불연속면들에서 반사 또는 굴절되는 지진파(seismic phases)에 의하여 확인된다.

2. 지각속도구조의 결정은 주로 지진학적으로 주로 실체파(P파 및 S파) 주시곡선, 표면파(레이리파 및 러브파)의 분산, 수신함수(receiver function) 등을 분석하여 지각의 1-D 구조를 결정한다. 중력이나 자력자료 등 potential data는 이들 자료의 분석에 불가피하게 수반되는 해(solution)의 비유일성(non-uniqueness) 문

제 때문에 지각의 실제구조(real structure)의 결정에 단독으로 사용되지 않는다. 또 최근에는 실체파 및 표면파의 지진자료가 풍부해짐에 따라, 이들에 토모그래피 방법을 적용하여 2-D 내지는 3-D의 지각구조를 결정하기도 한다. 진앙결정, 진원기구 결정 등 통상적인 지진활동의 분석에서 1-D 지각구조의 모델이 적용됨으로 본 논의에서는 한반도의 1-D 지각구조 모델에 대한 토론에 국한 하고자 한다.

3. 지각구조의 가장 초보적인 결정방법은 지진파의 초동(first arrival)을 역산하는 방법으로, 초동 자료를 만족하는 주시곡선을 회귀적 방법으로 분석(regression analysis)하여 지층의 두께와 그 속도를 결정하는 방법이다. 여기서 초동 자료의 분포 양상에 따라 주시곡선은 임의의 수의 직선으로 나누어질 수 있으며, 그 수에 의해 지층들의 수가 결정된다. 예로서 Kim and Jung(1985)의 한반도 남부지역에 대한 그림 3의 주시곡선은 2개, 3개, 4개, 5개 등 임의의 수의 직선으로 분석될 수 있으며, 이에 따라 1층, 2층, 3층, 및 4층의 층상구조를 갖는 지각구조가 도출될 수 있다. 그러면 이 가능한 지각구조 모델 중 어느 것이 타당하다고 말할 수 있을까? 각 지층의 경계면에서 발생한 반사 또는 굴절 지진파를 제시하지 않은 한 어느 것도 옳다고 할 수 없다. 다시 말하면, 지각 내 속도의 불연속면에

*Corresponding author: kihwalee@snu.ac.kr

서 발생한 반사 또는 굴절파를 제시하지 않고, 단지 주시곡선을 만족하는 지각구조 모델은 지진학적으로 별 의미가 없다.

4. Lee(1979b)는 한반도의 지각구조를 최초로 지진학적 방법으로 결정하였다. 그는 1936년 7월 4일 쌍계사에서 발생한 지진에 대하여 일본 지진학자 Hayata가 수집한 지진자료를 분석하여 한반도의 지각구조를 결정하였다. 그 논문의 결론을 요약하면 다음과 같다. (1) Pn 속도가 대략 7.7 km/sec 인 잘 정의된 Moho 불연속면이 발견되었다. (2) 지각의 두께는 대략 35km 이다. (3) 지각이 단층 구조인지 다층 구조인지 명확하지 않으나 지각 상부의 P파 및 S파의 속도는 대략 5.8 km/sec 및 3.5 km/sec 이다. 그 논문에서 저자는 인천의 지진기록에서 Pn 위상(phase)을, 부산 및 대구 등지에서 지층 상층부를 통과한 Pg 위상을 확인하고, 이 지진의 주시곡선을 분석하여 한반도의 지각구조를 결정하였다. 이 지각구조는 후에 지진자료를 보충하여 하부지각에 대한 정보가 반영된 지각구조로 수정되었다(Song and Lee, 2001).

5. 그 후에 발표된 한반도의 지각구조에 관한 논문들은 Song and Lee(2001)의 논문을 제외하고는 한반도의 지각에 대한 다층 구조의 모델들을 제시하고 있다. 예로서 Kim and Kim(1983)는 2층 구조 그리고 Kim and Jung(1985), Kim(1995)은 3층 구조의 모델을 제시하였다. 이 논문들의 가장 중요한 문제점은 이들 논문들이 각 지층의 경계에서 발생한 반사 또는 굴절파를 제시하지 않고, 단지 주시곡선을 임의의 수의 직선으로 회귀분석하여 다층 구조로 해석하고 있는 점이다. 예로서 한반도 지각이 속도가 다른 2층으로 나누어진다면, 콘라드면에서 굴절되는 P* 위상이 확인되어야 하나, 이들의 어느 논문에서도 이 결정적인 P* 위상이 제시되지 않고 있다.

6. Kim *et al.*(2006)은 Kim(1995)의 표층과 상부 및 하부지각으로 나누어지는 지각구조 모델을 “중력, 지진파 주시 및 표면파 분산곡선을 만족시키는” 정확한 지각구조로 평가하였다. 그러나 이 모델에 대하여 다음과 같은 오류를 지적할 수 있다.

첫째, 중력자료는 앞에서 지적한 바와 같이 비유일해(non-uniqueness solution) 문제를 포함하고 있어 지진학적으로 결정된 지각구조의 적합성 평가에 절대

적 검증자료로 사용되어질 수 없다. 예로서 김성균은 한반도 중력자료를 분석하여 26 km의 두께의 지각균형이 유지되지 않은(isostatically under-compensated) 비합리적인 지각구조를 제시하였고(Kim, 1979), 또 33 km의 두께를 갖는 3층의 전혀 다른 모델도 제시하고 있다(Kim, 1995). 왜 이러한 모순이 발생하는가? 결과 해석과정에서 potential data 분석에 고려되어야 하는 비유일해(non-uniqueness solution) 문제를 간과하였기 때문이다. 그 반대로 오히려 중력 자료의 해석에서 적용되는 비유일해 문제를 해결하기 위하여, 지진자료의 분석결과를 사용하는 것이 옳다. 참고로 Lee(1979a)는 한반도의 중력자료를 이용하여, 한반도의 지각이 전체적으로 지각균형(isostatic equilibrium)이 유지되어있음을 보였다.

둘째, 주시곡선의 분석에서 그는 Pn 위상(phase)은 물론이고, 그 외 다층구조를 입증할만한 어떠한 지진파 위상도 제시하지 않았다.

셋째, 표면파의 분산자료 분석에는 다음의 문제점들이 있다.

1) 표면파는 그 파장에 따라 추출(sampling)할 수 있는 지구내부 물성의 깊이가 다르다. 대체로 표면파의 분산현상은 표면파 파장의 크기를 넘는 깊이의 물성의 변화에는 둔감하다. 따라서 지각의 상층 구조를 결정하기 위해서는 단 주기의 분산자료가 요구된다. 40 km 두께의 지각 구조를 표면파로 의미 있게 결정하려면 대략 20sec 이하의 신뢰할 만한 분산자료가 요구된다. 그러나 이러한 단주기의 표면파의 전파는 지각 내부의 수평적 이방성(lateral heterogeneity)에 의하여 크게 교란되어, 동일 지각에서도 경로에 따라 분산곡선에 큰 차이가 난다. Kim(1995)의 그림 8의 20sec 이하의 분산자료에서 단주기 분산곡선의 이러한 현상을 관찰할 수 있으며, 특히 3sec 이하에서 분산곡선은 사라진다. 이 점이 의미하는 바는 이 논문의 분산자료가 지각 상부의 구조를 결정하는 데 전혀 사용될 수 없음을 의미한다. 따라서 적합하지 않은 분산자료를 이용한 이 논문의 지각구조 모델(Table 3)에서 20 km 깊이 이내에 존재하는 제 1층 및 제 2층의 존재를 뒷받침 하는 것은 전혀 무의미하다.

2) 표면파 분산의 분석은 대체로 연구 대상의 지역이 수평적으로 균질하여 층상구조로서 근사할 수 있다

는 전제가 요구된다. Kim(1995)이 사용한 3개의 지진들(Fig. 6)은 각기 신의주 부근, 황해, 일본에서 발생했다. 이는 이 지진들과 관측소인 서울까지의 지각구조가 각기 다름을 의미한다. 신의주 부근에서 발생한 지진은 한반도 내부를 통과하여 관측소에 도달했으므로 수평적으로 거의 균질한 구조를 가정해도 무방하다. 그러나 황해는 해수와 그 하부의 퇴적층으로 이루어져 관측소인 서울까지의 지각구조를 총상으로 근사시키기 어려운 문제점이 있다. 일본지진의 경우는 한반도와 전혀 다른 지각구조를 가질지 모르는 일본 해협과 바다 등으로 서울까지의 지각구조를 총상으로 근사시키는 데, 황해지진보다 더 큰 문제가 있다. 따라서 신의주 부근에서 발생한 지진을 제외하고는 일본이나 황해에서 발생한 지진들은 표면파 분산 분석에 사용하기에 부적합하다. 특히 지각구조는 단주기의 신뢰할 만한 분산곡선에 의존하므로, 바닷물, 퇴적층의 존재가 이러한 단주기의 분산곡선을 신뢰할 수 없을 정도로 심하게 왜곡할 수 있다. 요컨대, Kim(1995)에는 지각구조의 결정에 사용하기에 전혀 부적합한 지진자료들을 사용되고 있다.

7. 아직까지 국내 지진학자들에 의하여 출판된 어떤 논문에서도, 콘라드면에서 굴절된 P* 위상을 제시하지 못하고 있다. 수신함수(Receiver function) 자료(예, Yoo and Lee, 2001; Chang and Baag, 2006; Yoo *et al.*, 2007)에도 Moho 면을 제외하고는 지각 내에서 한반도 전역에 걸치는 어떠한 뚜렷한 속도 불연속면이 나타나지 않는다. Fig. 1은 Lee(1979b)의 모델에서 지각 상층부의 속도가 Moho까지 연장된다고 가정한 모델, Kim(1995) 모델, Song and Lee(2001) 모델, 그리고 Yoo *et al.*(2007) 지각구조 모델을 보여준다. Yoo *et al.*(2007) 모델은 한반도 광대역 및 가속도 지진관측소에서 관측된 잡음(seismic noise)을 분석하여 얻은 0.5-20sec의 단주기 표면파 분산자료(Cho *et al.*, 2007)를 수신함수와 동시역산(joint inversion)하여 획득한 31개 지각구조 모델을 평균한 것이다. Fig. 2는 Fig. 1의 모델들에 대한 인공수신함수(synthetic receiver function)들을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 Kim(1995) 모델로부터 계산된 수신함수를 제외하면 수신함수에서 가장 뚜렷이 나타나는 위상은 모호면에서 전환되거나 다중반사된 위상들이다. 반면 Kim(1995) 모델로부터 계산된 수신함수에는 지각내 불연속면(Conrad)에서 전환되거나 다중반사된 위상들이 모호 위상보다 더 뚜렷이 관찰된다. 이는 그림의 제일 아래에

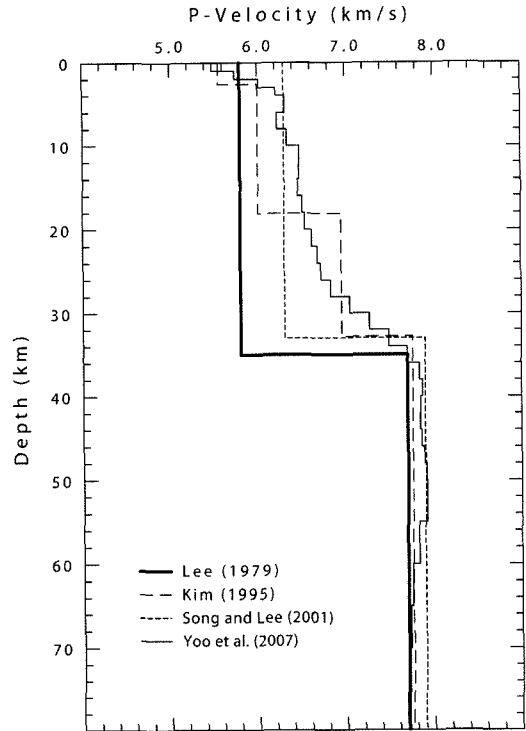


Fig. 1. Comparison of the four velocity models: Lee (1979), Kim (1995), Song and Lee (2001) and Yoo *et al.* (2007). The model of Yoo *et al.* (2007) is the average model of 31 velocity models beneath 31 broad-band seismic stations which are uniformly located in the Korean Peninsula.

위치한 실제 관측한 수신함수에는 관찰되지 않는 위상들이며, Kim(1995)의 모델에서 제시된 지각 내 불연속면의 존재가 실재하지 않음을 시사한다. 이로부터 한반도의 지각은 상부지각과 하부지각을 뚜렷하게 구분하는 경계면이 없는 거의 균질한 지각구조라 볼 수 있다.

8. 상기의 논의에서 고찰한 바대로 Lee(1979b)의 논문은, 국내 최초로 1) Pg 및 Pn phase를 분명히 보여 주었고, 2) Moho 면의 깊이를 합리적으로 대략 35km로 추정하였고, 3) 지각 상층부의 합리적인 P파 및 S파 속도와 Pn를 추정하였고, 4) 지각의 총상구조를 그 당시 자료로서는 분명히 결정할 수 없다는 점등을 지적함으로써, 현시점에서 객관적으로 평가를 하더라도 큰 오류가 없는 정직하고 정확한 논문으로 볼 수 있다. 반면에 Kim(1995)의 논문은, 1) 그의 총상구조를 확인할 수 있는 어떠한 지진파 위상들도 보여주지 않았고, 2) 중력자료의 비일일해성을 고려치 않고 중력자료를 비합리적으로 지진자료의 해석에 이용하였고,

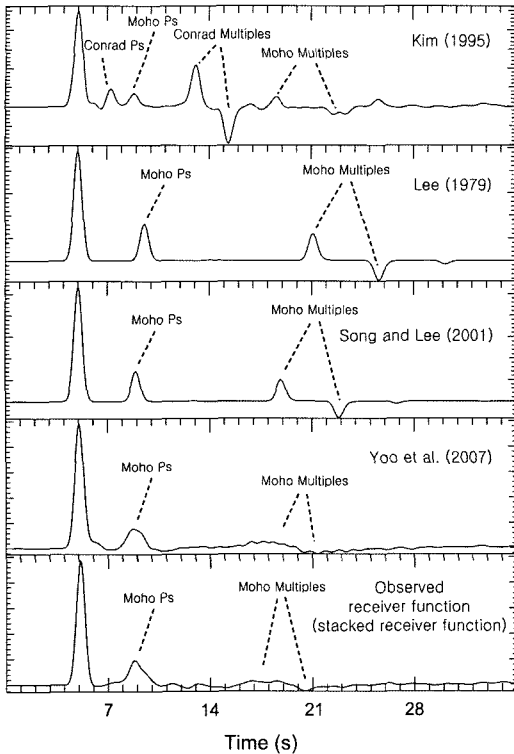


Fig. 2. Comparison of the observed receiver functions with the synthetic receiver functions calculated from four velocity models of Fig. 1. Note that there is no strong Conrad phases not only in the observed receiver function but also in the synthetic receiver functions from velocity models of Lee (1979), Song and Lee (2001), and Yoo *et al.* (2007), while the strong Conrad phases are found in the synthetic receiver function calculated from Kim (1995)'s model.

3) 표면과 분산현상에 대한 부정확한 지식으로 부적절한 자료를 지각구조 결정에 사용한 점에서 그 결과에 무관하게 방법론적인 면에서 많은 오류를 가진 논문으로 볼 수 있다. 또한 그 결과도 7항에서 볼 수 있는 바와 같이 비실재적이라 평가할 수 있다.

9. Kim *et al.* (2006)은 Lee(1979b)의 한반도 지각구조 모델이 연구에 사용한 “주시자료의 수가 적고, 시각에 대한 해상도가 낮아 현재로서는 그 이용가치를 상실했다”고 주장했다. 이러한 주장에 대하여 다음과 같은 반론을 제기할 수 있다. “Lee의 모델은 합리적인 방법으로 국내 최초로 한반도 지각구조에 관한 분명한 image를 제공하였고, 현재까지 어떠한 큰 오류도 발견할 수 없는 가치 있는 모델이다”. 이 모델은 후에 지

진자료를 보충하여 하부지각의 정보가 포함된 보다 합리적인 모델로 수정되었다(Song and Lee, 2001). 반면에 “Kim(1995)의 지각구조 모델은 층상구조에 대한 부정확한 지식 및 방법론에 비롯한 비실제적인 (unrealistic) 모델이다.” 특히 Lee(1979b)의 모델은 영어로 작성되어 국내는 물론이고 외국학자에게 한반도 지각구조를 최초로 제시한 점에서도 그 의의가 크다고 볼 수 있다.

참고문헌

- Chang, S.J. and Baag, C.E. (2005) Crustal structure in Southern Korea from joint analysis of teleseismic receiver function and surface-wave dispersion, *Bull. Seism. Soc. Am.* v. 95, p. 1516-1534.
- Cho, K.H., Herrmann, R.B., Ammons, C.J. and Lee, K. (2007) Imaging the upper crust of the Korean Peninsula by surface-wave tomography. *Bull. Seism. Soc. Am.* v. 97, p. 198-207.
- Kim, S.J. and Kim, S.G. (1983) A Study on the Crustal Structure of South Korea by using Seismic Waves, *Jour. Kore. Inst. Mining Geol.*, 16, p. 51-61 (in Korean).
- Kim, S.K. (1979) Geodetic and geophysical analyses of gravity data in Korea. *Jour. Kore. Inst. Mining Geol.*, 12, p. 17-28.
- Kim S.K. (1995) A Study on the Crustal Structure of the Korean Peninsular, *Jour. Geol. Soc. Korea*, 31, p. 393-403 (in Korean).
- Kim, S.K. and Bu Hung Jung (1985) Crustal Structure of the Southern Part of Korea, *Jour. Kore. Inst. Mining Geol.*, 18, p. 151-157 (in Korean).
- Kim, S.K., Jun, M. and Jeon, J. (2006) Recent Research for the Seismic Activities and Crustal Velocity Structure, *Econ. Environ. Geol.*, 39, p. 369-384 (in Korean).
- Lee, K. (1979a) On isostasy of the Korean Peninsula. *Jour. Geol. Soc. Korea*, 15, p. 134-140.
- Lee, K. (1979b) On crustal structure of the Korean Peninsula. *Jour. Geol. Soc. Korea*, 15, p.253-258.
- Song, S. and Lee, K. (2001) Crustal structure of the Korean Peninsula by travel time inversion of local earthquakes, *Jour. Geophy. Soc. Korea*, 4, p. 21-23.
- Tanimoto, T. (1995) Crustal Structure of the Earth, *Global Earth Physics, A Handbook of Physical Constants*, p. 214-224.
- Yoo, H.J. and Lee, K. (2001) Crustal structure under the Taejon (TJN) station by receiver function methods, *Jour. Geophy. Soc. Korea*, 4, p. 35-46.
- Yoo, H.J., Herrmann, R. B., Cho, K. H. and Lee, K. (2007) Imaging the Three-Dimensional Crust of the Korean Peninsula by Joint Inversion of Surface-Wave Dispersion and Teleseismic Receiver Functions, *Bull. Seism. Soc. Am.* v. 97, p. 1002-1011.