

Velest를 이용한 남한 지역의 P파 속도구조 분석 P-wave velocity structure in Southern Korea by using Velest program

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

ABSTRACT

Korea Institute of Geology, Mining, and Materials (KIGAM) has been operating Korea Earthquake Monitoring System (KEMS) to archive the real-time data stream and to determine event parameters (epicenter, origin time, and magnitude) by the automatic processing and analyst review. To do this, KEMS uses the Vindel Hue's velocity model which was derived from Wonju KSRS data. Because KIGAM now receives the real-time data from many stations including Wonju KSRS, Cholwon seismo-acoustic array, Uljin, Wolsung, Youngkwang, Taejon, Seoul, Kimcheon, Taegu, etc., the proper velocity model should be established around the Korean peninsula. In this study, P wave velocity structure was derived from VELEST program using 69 events among the 835 events determined by KEMS in 1999, which were recorded by at least 5 stations. General trend of velocity structure was similar to Sang Jo Kim's model, but velocity value was low in crust and high in upper mantle. Due to the sensitivity of inversion results to the initial input model, the artificial shot and blast data might be added.

1. 서언

정확한 진앙위치 및 심도 등을 결정하기 위해서는 정확한 속도구조에 대한 입력자료가 필수적으로 요구된다. 현재 한국자원연구소는 실시간 자료 획득/저장, 실시간 자동 자료분석 및 분석자에 의한 2차 재분석을 위한 KEMS(Korea Earthquake Monitoring System)을 운영중에 있다. KEMS에서 사용중인 속도구조는 Vindel Hsu에 의해 원주 KSRS 지진 관측망 자료를 이용하여 계산된 속도구조를 이용하고 있으나, 현재 원주 KSRS 관측망 자료뿐만 아니라 철원, 서울, 대전, 김천, 대구, 영광, 고리, 월성 및 고리 등 한반도 일원에 많은 관측소의 지진자료가 실시간으로 획득 및 분석이 가능하므로, 모든 관측자료를 이용하여 한반도 일원의 새로운 속도구조를 설정하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 1999년 1월 1일부터 12월 20일까지 관측된 지진자료를 이용하여 1차적으로 남한 일원에서의 속도구조를 분석하였다.

* 한국자원연구소 지진연구센터, 정회원

2. 입력자료

KEMS에서 1999년 1월 1일부터 12월 20일까지 진앙이 결정된 event는 총 835개이며, 5692개의 phase가 결정되었다. 이를 관측소와 진앙과의 거리에 따라 각 phase의 도달시간을 표시한 것이 그림 1이다. 그림에서 가로축은 진앙에서 관측소까지의 거리를 각도로 표시한 것이며, 세로축은 각 관측소에서의 지진파 도달시간이다. 그림에서 보는 바와 같이 거리에 따른 도달시간 분포를 보면 크게 먼저 도달하는 P파 계열과 이보다 늦게 도착하는 S파 계열로 구분되고 있다. 그림 1(a)에서 적색 실선은 진원의 심도가 10km 일 경우, IASPEI 91 모델에 대한 이론적인 도달시간을 나타낸 곡선으로 각거리가 1.5° 를 기준으로 근거리에서는 Pg 및 Sg 파가 먼저 도달하고, 원거리에서는 Pn 및 Sn 파가 먼저 도달하고 있음을 알 수 있다. 전체적으로 Pn파의 이론도달시간과는 어느 정도 일치하고 있으나 전체적으로 KEMS에서 관측된 각 Phase들의 도달시간은 세계적인 평균 지구 속도구조모델인 IASPEI 91 모델과는 잘 일치하지 않고 있음을 알 수 있다. 따라서 우리나라 지질학적인 조건에 맞는 상부 맨틀 및 지각의 속도구조를 구해야만 한다.

그림 1(b)는 현재 KEMS에서 사용중인 Vindel Hsu의 속도구조 모델에 대해 진원의 심도가 10km인 경우에 대한 이론 주시곡선을 표시한 것으로, 진앙거리가 3° 이상 되는 지역에서는 Pn 및 Sg 파의 경우 이론 주시곡선과 매우 잘 일치하고 있는 것이 특징적이다. 그러나 Pg 및 Sn의 경우 이론 주시곡선과 실제 관측결과와 잘 일치하지 못하고 있다. 이와 같은 오차가 발생할 수 있는 경우는 속도구조의 부정확성 혹은 각 Phase의 정확한 도달시간을 정확히 판독하지 못한 경우로 해석되어 진다. 특히 Sn Phase의 경우 상대적으로 진폭이 매우 작아 정확한 판독이 매우 어려우나, 이론적인 도달시간을 이용하므로써 좀 더 신뢰성 있는 Phase 판독도 가능할 것이다.

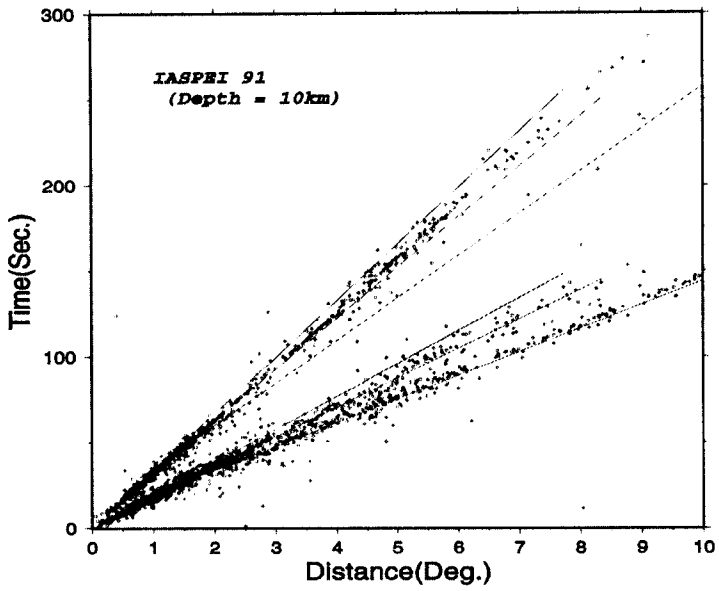
835개의 event는 자동분석결과에 대한 2차적인 분석자에 의해 재분석된 event로서 이 중에서 동일한 event에 대해 3개 이상의 관측소에서 P파가 관측된 경우는 167개 event이며, 이들의 분포는 그림 2와 같다. 그림에서 청색 사각형으로 표시된 지점은 실시간으로 지진자료를 수집하여 분석 가능한 관측소의 위치를 나타낸 것이다. 대부분의 인공발파는 규모가 상대적으로 작기 때문에 3개 이상의 관측소에서 동시에 기록되는 경우는 매우 드물다. 따라서 그림 2에 나타난 event의 대부분은 자연지진이거나 일부 대규모의 인공발파일 가능성이 매우 높다. 전체적으로 event의 분포는 남한 내륙에 집중적으로 분포하며, 동해, 남해, 및 서해 상에 일부 분포하며, 중국의 요동반도 일대에 집중적으로 분포하고 있다. 그러나 북한지역의 경우 평양근방 및 황해도 서쪽 해안가의 2개 event외에 발생하지 않고 있는 것이 특징적이다. 이는 일본근해 및 중국내륙에서 발생한 지진들의 관측결과와 비교할 때 북한지역에서 발생한 event만 감지할 수 없을 가능성은 매우 낮다. 그러나 기존 북한의 지진목록 등에 나타난 지진발생 빈도 등을 고려하여 볼 때 남한에 비해 적지 않은 지진이 매년 발생하는 것으로 나타나 있다. 따라서 북한지역에서 거의 event가 발생하지 않은 현상은 매우 특이한 것으로 이에 대한 정밀한 추가적인 조사가 수행되어야만 할 것이다.

이들 자료 중 남한 지역에서의 속도구조를 분석하기 동경 124° - 130.5° 및 북위 33.5° - 39° 사이에 진앙이 위치하며, 동시에 5개 이상의 관측소에서 P파가 기록된 event만을 선별하였으며, 이에 해당하는 event 수는 69개이다. 그림 3은 진앙과 관측소간의 P파 전달경로를 표시한 것으로 남한의 북서부 일부를 제외하고는 대부분의 지역에서는 지진파의 전파경로가 매우 잘 중첩되어 나타나고 있어 속도구조 분석에 매우 적당한 입력자료로 판단된다.

3. 속도구조 분석 결과 및 토의

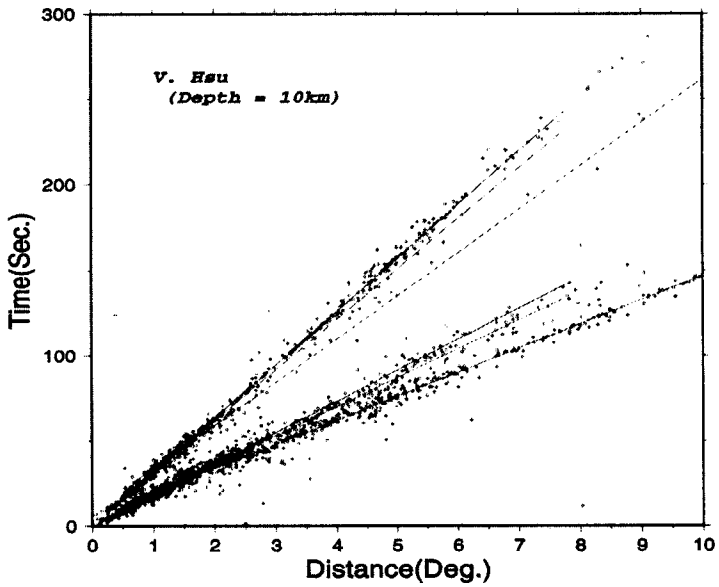
현재 KEMS 시스템에서 지진요소를 결정하기 위해 사용중인 속도구조 모델은 Vindel Hsu의 모델을 사용하고 있으나 서해안 지역의 대규모 발파장 위치와 KEMS 시스템에서 결정한 event의 위치가 차이를 보이고 있으며, 또한 Vindel Hsu의 모델은 원주 KSRS 지진자료만을 이용하여 구

KEMS



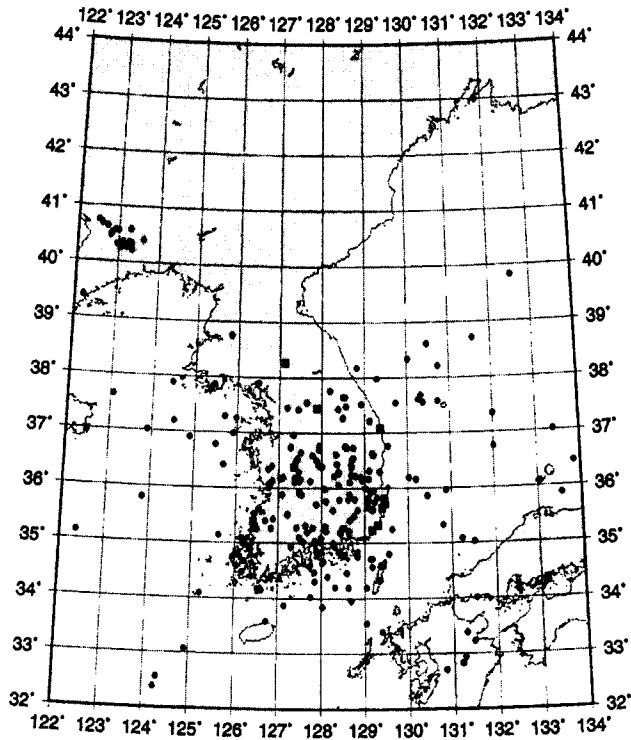
(a)

KEMS



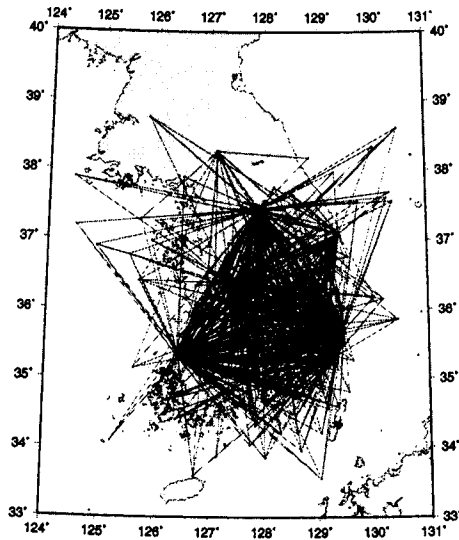
(b)

그림 1. 관측소와 진앙과의 거리에 따른 각 Phase의 도달시간 분포도
(실선은 (a) IASPEI 91 및 (b) Vindel Hsu의 속도구조 모델에 대한 주시곡선)



GMT Dec 14 16:03:41 1999 KSM90(1000)

그림 2. 3개 이상의 관측소에 P파가 기록된 진앙 분포도



GMT Dec 14 16:03:41 1999 KSM90(1000)

그림 3 5개 관측소 이상에서 P파가 전달된 event의 진앙-관측소간 P파 전파경로 분포도

한 속도구조 모델이나, 현재 KEMS 시스템에는 칠원, 울진, 영광, 월성, 고리 등의 지진관측소 자료를 실시간으로 전송받아 종합적으로 진앙위치를 결정하고 있다. 따라서 지진요소의 정확도를 향상하기 위해서는 현재 KEMS에서 사용중인 속도구조 모델에 대한 분석 및 보완이 이루어져야 할 것이다.

3-1. Velest Program 의 특징

지진자료를 이용하여 지하의 속도구조를 구하기 위해 기존에는 선형적인 속도구조 모델에 대해서만 역산을 이용하였으나, 실제적으로는 속도구조 모델뿐만 아니라 입력자료인 진원의 위치에도 좌우된다. 따라서 지진자료의 역산시 안정된 해를 구하기가 어렵게 된다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해 E. Kissling(1995)은 속도구조, 진원위치, 및 관측소 보정치(Station Correction)를 동시에 계산하는 수정된 Velest Program을 발표하였다. 최초의 Velest Program은 Ellsworth and Roecker(1976)에 의해 제안된 이래 많은 사람들에 의해 수정 보완되어 현재에 이른 것이다.

Velest Program의 특징은 크게 속도구조, 진원위치 및 관측소 보정치를 동시에 계산할 수 있으며, 초기모델에 의한 의존도를 낮추기 위해 위치는 알려져 있지만 발파시간을 알 수 없는 Blast와, 발파시간 및 위치를 알고 있는 Shot에 의해 제한을 가할 수 있어 매우 안정적인 결과를 얻을 수 있다. 따라서 현재 3차원 토모그래피의 초기모델로 Velest Program의 결과를 이용하고 있는 추세이다(Kissling,1994).

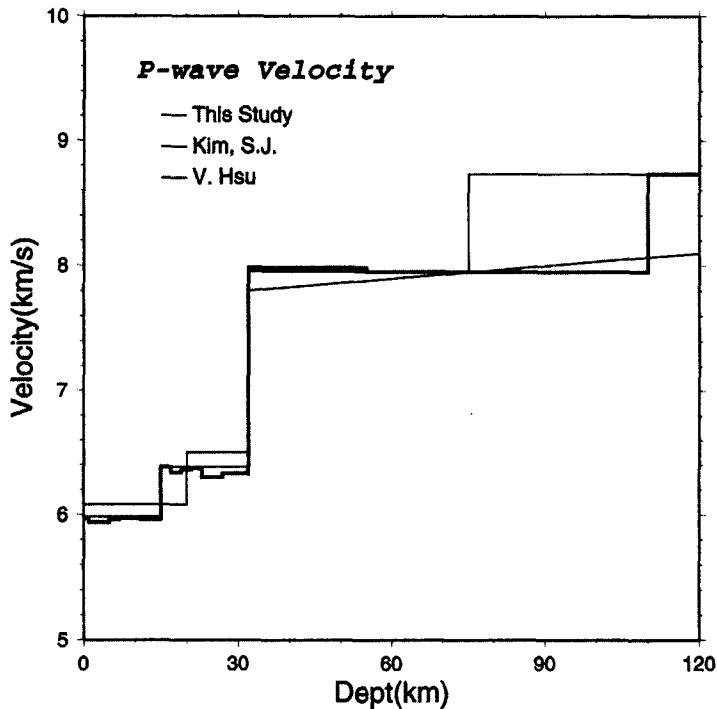


그림 5 상부맨틀 및 지각에서의 P파의 속도구조 분포

3-2. Velest Program 수행 결과 및 토의

초기 속도구조 모델로는 현재 KEMS에서 사용하고 있는 Vindel Hsu 속도구조 모델, 기상청에서 사용하고 있는 김상조의(1983)의 모델을 중심으로 다양하게 입력 패턴을 변화시키며 초기 모델에 의한 의존성을 시험하였다. 대부분의 경우 지각상부의 경우 초기 모델값에 매우 민감하게 반응하고 있으나, 지하 15km 하부에서는 어느 정도 안정된 값을 나타내는 특징을 보였다.

그림 4는 김상조의(1983)의 속도구조 모델을 초기 모델로 하여 Velest Program을 수행한 결과도이다. 초기 속도구조 모델은 김상조의의 원래 4층 구조를 18층으로 세분하여 속도변화 양상을 파악하고자 하였다. 역산 iteration을 계속적으로 수행하여도 전체적으로 초기 입력 모델인 김상조의 속도구조 모델과 매우 유사한 결과를 얻을 수 밖에 없었다. 그러나 Vindel Hus의 속도구조 모델이나, 변형된 최초 입력모델에 대해서도 유사한 속도구조를 얻을 수 있었으며, 특히 심도 15km 부근에서 속도가 급격히 증가하는 것으로 나타나고 있는 것이 특징적이다.

이와 같이 초기 입력 모델에 따라 속도구조가 차이가 나는 문제점을 해결하기 위해서는 Blast나 Shot을 이용하여 역산과정시 제한을 가하여야 안정된 해를 구할 수 있을 것이다. 이를 위하여 현재 KEMS에서 분석된 진앙분포도 중 많은 진앙이 집중되는 일부 지역에 대해 직접적인 발파장 확인 및 이동식 지진계를 이용한 정확하여 정확한 진원시를 측정하므로써 Blast와 Shot에 대한 자료를 보강하여야 할 것이다.

참고문헌

1. 김상조, 김소구, 1983, 지진파를 이용한 남한의 지각구조 연구, 광산지질, 16권 1호, p.51-61.
2. Ellsworth, W. L., 1977, Three-dimensional structure of the crust and mantle beneath the island of Hawaii, Ph D thesis, MIT, Massachusetts, USA.
3. Kissling, E., 1995, Program Velest user's guide, Second version, Institute of Geophysics and Swiss Seismological Service Report.
4. Kissling, E., Ellsworth, W.L., Eberhart-Phillips, D., and Kradolfer, U., 1994, Initial reference models in local earthquake tomography, JGR Vol.99, No.B10, p.19635-19646.