

파형분석에 의한 1996년 12월 13일 영월지진의 특성

Characteristics of the 13 December 1996 Yeongwol Earthquake Based on the Phase Analysis

김 우 한*
Kim, Woo Han

지 현 철**
Chi, Heon Chel

전 명 순**
Jun, Myung Soon

김 성 균***
Kim, Sung Kyun

국문요약

파형분석에 의한 영월지진의 본진과 두 여진에 대하여 연구하였다. 한국자원연구소(KIGAM)에서 제공된 지진기록의 파형분석을 위하여 12개의 가능한 파형에 대하여 주시곡선과 두 점을 잇는 파선추적이 사용되었다. 영월지진의 파형분석 결과는 다음과 같은 특성을 보여준다. 1) 본진(규모 4.5)에서는 Pn파형이 명확히 보이지만 두 여진(규모 3.8과 2.5)에서는 Pn파형이 보이지 않는다. 2) 두 여진에서는 Pg 혹은 PmP파형이 초동파로 도착한다. 3) 비록 콘라드 불연속면이 실제로 존재하더라도 지진기록에서 콘라드면과 관계되는 파형을 구분하기가 어렵다. 4) 경상분지밖에 위치하는 구례(GRE)관측소의 지진기록은 Pn파형의 도착시간, P-S파형의 도착시간차, 주파수 등에서 경상분지 내에 위치하는 관측소의 기록과 비교할 때 차이를 보인다.

주요어: 파형분석, 주시곡선, 두점을 잇는 파선추적

ABSTRACT

The seismic records of the main shock and two after shocks of the Yeongwol Earthquake are studied based on the phase analysis. The travel time curves and two point ray tracing with 12 different possible phases are used to analyze the phases of the records, which were provided by KIGAM seismic network. The results of phase analysis of the Yeongwol Earthquake show the characteristics as follows 1) The main shock ($M_s=4.5$) clearly shows Pn phase but two after shocks ($M_s=3.8$ and $M_s=2.5$) do not show Pn phase. 2) The Pg or PmP phases looks as first arrival phase in the after shock records whose epicentral distance is smaller or larger than 145 km. 3) It is very difficult to identify the phases in the seismic records, which are related to the Conrad discontinuity, even if the Conrad discontinuity exists. 4) The record of GRE station located outside of the Kyeongsan Basin shows different arrival time of Pn phase, P-S duration time and frequency compared with those of the other stations located within the Kyeongsan Basin.

Key words: phase analysis, travel time, two point ray tracing

1. 서 론

1996년 12월 13일 13시 10분 16.91초에 발생한 규모 4.5의 영월 지진은 한반도에서 1978년에 충남 홍성

에서 발생한 지진(규모 5.0)후 가장 규모가 큰 지진이다. 이 지진은 본진과 5개의 작은 여진을 수반하였다. 이 지진으로 인하여 작은 피해가 발생하였고, 한반도 전역에서 지진에 의한 지반진동을 느낄 수가 있었으며 지진감지범위는 약 450km 이었다. 본 연구에서는 영월지진의 특성을 연구하기 위하여 본진과 두 여진에 대하여 한국자원연구소 지진관측망 자료의 파형분석을 하였다.

본 연구를 위하여 한반도 지각 및 상부 맨틀의 속

* 정희원 · 경상대학교 지질학과 부교수.
** 정희원 · 한국자원연구소 방재연구센터 선임연구원.
** 정희원 · 한국자원연구소 방재연구센터 선임연구원.
*** 정희원 · 전남대학교 지질학과 정교수.

도구조를 이해하는 것이 필요하다. 지금까지 한반도의 지각 및 상부맨틀의 구조에 관한 연구는 미흡한 실정 이지만, 지각구조 연구는 주로 지진과 중력자료에 의 해 연구되어 왔다. 지진자료에 의한 연구결과로서, 쌍 계사지진의 주시자료를 이용하여 개략적인 지각구조 를 연구하였으며(Lee⁽¹⁾, 김상조⁽²⁾는 쌍계사지진과 홍 성지진 자료를 해석하여 지각구조를 포함한 상부맨틀 까지 좀더 세분된 지진과 속도구조를 연구했다. 또한 김성균, 정부홍⁽³⁾과 Kim and Lee⁽⁴⁾는 한반도 남부와 중부지역에서 인공발파에 의한 주시자료를 이용하여 지각의 속도구조를 연구하였고, 김성균⁽⁵⁾은 중력자료 를 이용하여 기본 모델을 만들어 자연 및 인공지진의 주시자료를 반복법 및 표면파 분산해석에 의하여 지 각의 속도를 결정하였다. 중력자료해석에 대한 연구결 과(Kim⁽⁶⁾, Kwon and Yang⁽⁷⁾, 최광선⁽⁸⁾)에서는 모호면 의 평균심도와 기복이 등치선 형태로 제시되어 왔다.

영월지진의 진원지는 도달범위와 동시성을 고려하여 기상청 지진관측망의 9 개 관측망 자료로 HYPO71(Lee and Lahr⁽⁹⁾) 프로그램을 이용하여 계산했다. 계산결과 진원지는 37° 15.11'N, 128° 42.68'E 이며 깊이는 7.68 km 이다. 경남 울산시 방방골에 위치한 BBK 관측소 의 파형분석을 하기 위하여 영월지진의 P파와 S파의 각 파형에 대하여 진원과 진앙거리 197.3km인 BBK 관측소를 잇는 파선추적을 김상조⁽²⁾의 지각모델을 사 용하여 계산하였다. 속도가 상수 혹은 선형인 수평층 에서 두점을 잇는 파선추적은 Kim and Chung⁽¹⁰⁾과 Kim et al⁽¹¹⁾의 연구에서 소개되었다. 파형분석을 위한 또 다른 방법으로 김상조⁽²⁾의 한반도 지각구조와 영월 지진 모델을 사용하여 12개의 가능한 파형에 대한 주 시곡선을 계산하였다. 한국자원연구소 지진관측망에서 제공한 본진과(규모 4.5) 두 여진(규모 3.8과 2.5) 자료 의 파형분석 결과 본진에서 Pn, PmP와 Pg 파형과 여 진에서 PmP와 Pg 파형은 비교적 구분이 가능하나 나 머지 파형들은 구분이 어려워 두점을 잇는 파선추적 및 주시곡선을 이용하여 구분하였다. 특히 Pn 파형의 경우 본진에서는 뚜렷이 기록되었지만 두 여진에서는 규모 3.8 여진의 거제관측소를(KJM) 제외하고는 기록 되지 않았다. 영월지진의 본진 및 두 여진의 구레 관 측소 기록과 나머지 관측소 기록을 비교할 때 초동 파형의 도달시간, P-S 파형의 도달 시간차, 주파수 등 에서 차이가 있다. 이는 본 연구에 사용한 자원연구소 지진관측망의 8개 관측소 중 전남 구례 관측소만 (GRE) 경상분지밖의 영남육괴에 위치하고 나머지 관

측소들은 경상분지내에 위치하는 것과 또 모호면의 깊이 변화에 관계가 있는 것으로 추측된다.

2. 파형의 분석

영월지진의 본진과 두 여진의 파형분석을 위하여 디지털 기록으로 상태가 양호한 한국자원연구소 지진 관측망 자료를 사용하였다. 본진의 진원지와 발생시간 을 계산하기 위하여 coverage가 양호하고 같은 시간 대를 사용하는 기상청 자료만 사용하였고 기상청 자 료와 시간대가 다를 수 있는 한국자원연구소 지진관 측망자료 및 그외 자료들은 배제하였다. 기상청 자료 중 비교적 초동 도착과의 판독이 가능한 서울, 서산, 대전, 광주, 춘천, 강릉, 울진, 부산, 그리고 대구 관측 소의 수직성분 자료로 HYPO71(Lee and Lahr⁽⁹⁾)을 이용하여 계산된 진원지는 37° 15.11'N, 128° 42.68'E 이며 깊이는 7.68km 이며, 발생시간은 1996년 12월 13일 13시 16.91초(한국표준시간)이다.

그림 1은 진원지 및 발생시간 계산에 사용된 관측 소의 위치 및 각 관측소에 기록된 영월지진의 수직성 분을 보여주며, 각 관측소 지진기록에서 화살표는 초 동파의 도착시간을 나타낸다. 두 여진은 초동 도착파 의 판독이 용이한 관측소가 적어서 진원지 결정에 많 은 오차가 발생할 우려가 있어서 본 연구에서는 두 여진의 진원지는 본진과 같은 진원지로 가정하였다.

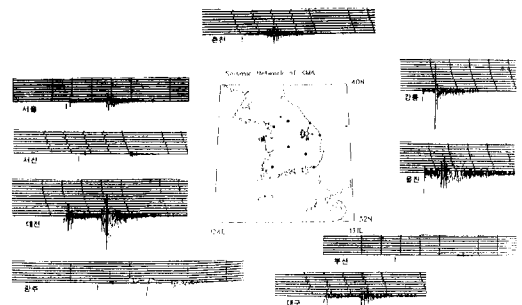


그림 1 Locations map for seismic stations of Korea Meterological Agency (KMA) and their seismic records (vertical component) to determine the hypocenter and the origin time of the Yeongwol earthquake. The symbol, arrow in the records represents the first arrival time.

그림 2는 영월지진의 진앙지(E)와 한국자원연구소 지진관측망의 각 관측소의 위치를 나타낸다. 그림 2

에서 강원도 원주시의 KSRS 관측소를 제외하고 검게 칠한 원 또는 사각형은 본 연구에 사용된 8개 관측소이며 구레관측소(GRE)와 나머지 7개 관측소 사이의 실선은 경상분지의 경계를 나타낸다. 영월지진의 P파의 각 파형에 대하여 진원과 진앙거리는 197.3km인 경남 울산시 방방골에 위치한 BBK 관측소를 잇는 파선추적(Kim and Chung⁽¹⁰⁾, Kim⁽¹¹⁾)을 김상조⁽²⁾의 지각모델을 사용하여 계산하였다 (그림 3). 김상조⁽²⁾의 지각모델은 콘라드면과 모호면의 불연속면을 가지고 있고 그 깊이는 각각 15km와 32km이며, 상부로부터 각 층의 P파의 속도는 5.95, 6.55, 그리고 7.95km/sec이다. S파가 P파로 변환되지 않는 순수 S파의 각 파형의 파선경로는 본 연구에서 P파와 S파의 속도비를 $V_p=1.715 \times V_s$ 로 일정하게 주었기 때문에 순수 P파의 파선경로와 같다.

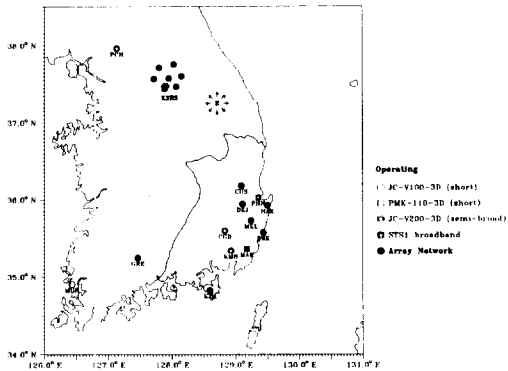


그림 2 Locations map for seismic stations of Korea Institute of Geology, Mining and Materials (KIGAM). The 8 stations denoted by solid circle or rectangular are used in this study. The solid line between GRE station and the other 7 stations represents the boundary of the Kyeongsang Basin.

그림 3에서 Pg는 P파의 직접파, PcrP는 콘라드면에서 반사한 P파, PcrS는 콘라드면에서 P파가 반사한 S파, P'는 콘라드면에서 굴절한 P파, PmP는 모호면에서 반사한 P파, PmS는 P파가 모호면에서 반사한 S파, Pn은 모호면에서 굴절한 P파이며 S파의 파형의 명칭도 P파와 동일하다. 영월지진의 진원과 BBK관측소 두 점을 잇는 파선 추적을 이용하여 각 파형들의 주시시간(travel time)을 계산했다(표 1). Pn파의 경우 주시시간은 30.2471초이며 예상 도달시간은 13시 10분 47.1574초이다.

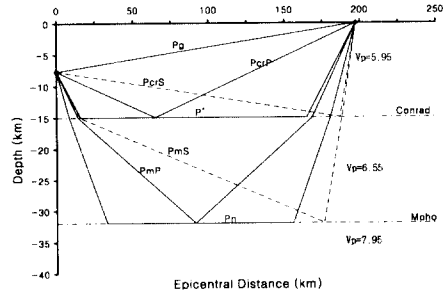


그림 3 Two point ray tracing between the hypocenter of the Yeongwol earthquake and BBK station whose epicentral distance is 197.3 km based on Kim's model (1983). Pg and Sg denote direct P-wave and S-wave. PcrP and ScrS, or, PmP and SmS represent reflected P and S-waves at the Conrad or Moho discontinuity. PcrS and PmS denote that P-wave converts to S-wave at the Conrad or Moho discontinuity. Pd and S' or Pn and Sn represent head P and S waves along the Conrad or Moho discontinuity.

Table 1 Expected Travel Times of the Phases at BBK Station based on two point ray tracing in Figure 5

Phase	Expected Travel Times (sec)	Phase	Expected Travel Times (sec)
Pg	33.1853	Sg	57.0393
PcrP	33.3726	ScrS	57.2334
PcrS	36.6972	ScrP	---
P'	31.6907	S'	54.3496
PmP	32.2705	SmS	55.3435
PmS	38.0860	SmP	---
Pn	30.2471	Sn	51.8737

그림 4에서 보듯이 Pn파는 예상 도달시간에 거의 정확하게 도달한다. 그림 4는 영월지진의 BBK관측소 지진기록의 수직성분을 표 1에 따라 각 파형들을 구분했다. Pn, PmP, Sg 등의 파형은 기록에서 구분이 가능하나 나머지 파형들은 표 1의 두 점을 잇는 파선추적의 예상 주시시간을 기초로 하지 않고는 각 파형의 구분이 불가능하다. Pg와 PcrP 파형의 경우 PmP 파와 거의 동시에 도달하므로 실제 지진기록에서 구분이 어렵다.

영월지진의 파형분석을 위하여 앞에서 계산된 진원

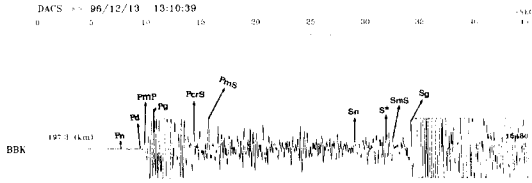


그림 4 The phase analysis of the Yeongwol earthquake at the BBK station based on the result of two point ray tracing in Figure 3 and in Table1.

지와 발생시간, 그리고 김상조⁽²⁾의 한반도 지각모델을 이용하여 12개의 가능한 파형에 관하여 주시곡선을 계산하였다.

주시곡선(그림 5)에서 보듯이 많은 파형들이 거의 같은 시간대에 도달하기 때문에 실제 지진기록에서 구분하기가 어려우며, 특히 콘라드면에 관계되는 파형들은 실제 콘라드면이 존재하더라도 진앙거리가 50 km 이내의 특정한 관측소를 제외하고는 지진기록에서 구분하기가 매우 어려울 것으로 판단된다.

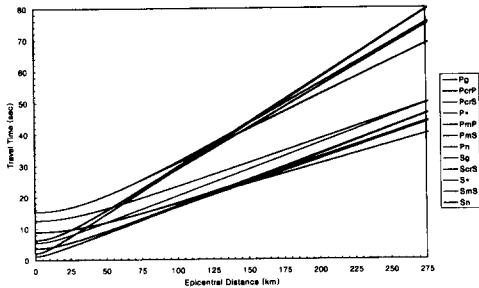


그림 5 Travel time curves for 12 possible phases using Kim's model (1983) and the hypocenter of the Yeongwol earthquake.

그림 6은 지진 규모가 4.5인 영월지진 본진이 한국 자원연구소 지진관측망에 기록된 8개 관측소의 수직 성분 기록을 가로축을 시간, 세로축을 진앙거리로 나타낸 것이다. 시간보정이 안된 경남 김해 관측소(KMH) 기록은 본 연구에서 제외했다. 본 연구에 사용된 8개 관측소중 전남 구례 관측소(GRE)만이 유일하게 경상분지밖의 영남육괴에 위치하며 나머지 관측소는 모두 경상분지 안에 위치한다.

그림 6에서 보듯이 Pn 파형은 진앙거리가 149.7 km 이상인 경북 영천군 덕정리 관측소(DKJ)부터 초동파로서 관측되며 직선의 기울기는 약 1/7.95 이며, 이는 모호면에 접한 상부 맨틀의 P파의 속도가 약

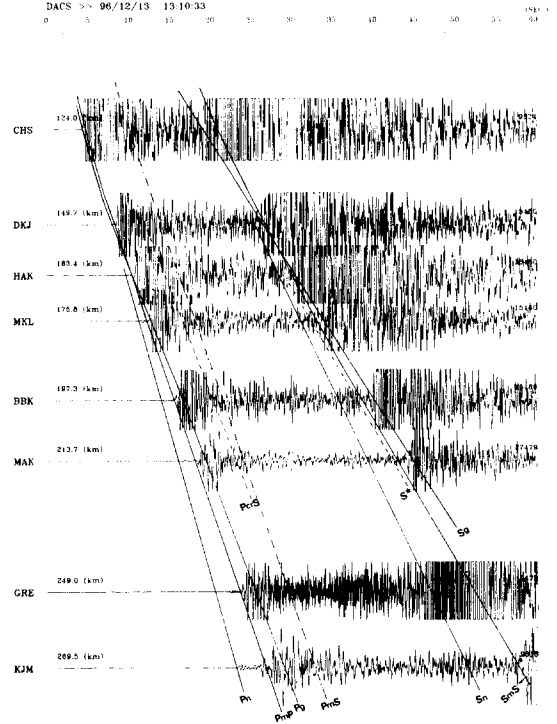


그림 6 The seismic records (vertical component) of the main shock of Yeongwol earthquake plotted on Epicentral distance and travel time axes. The magnitude of the main shock is 4.5.

7.95 km/sec 임을 의미한다.

이 결과는 본 연구에 사용한 김상조⁽²⁾ 모델의 P파의 속도와 일치한다. 진앙거리가 약 145 km 미만에서는 Pg 파형이 초동파로 도착하며 진폭은 크게 나타나며 진앙거리가 145 km 이상에서는 Pn파가 작은 진폭으로 초동파로 도착한다. 모호면에서 반사한 PmP는 진앙거리가 175.8 km인 경북 경주시 명계리 관측소(MKL) 이상의 진앙거리에서 Pn과 다음으로 비교적 뚜렷하게 관측되며 그림 6에서 보듯이 진앙거리가 증가함에 따라 진폭이 커진다. PcrS파, PmS파, Sn파, 그리고 S+파는 실제 지진기록에서 구분이 어려워 그림 5의 주시곡선을 기초로 도착 예정 시간을 점선 혹은 실선으로 나타내었다. Sg파와 SmS파의 경우, 그림 5의 주시곡선과 그림 6에서 파형 구분을 기초로 하여 표시했다. Sg파는 진앙거리가 149.7 km 미만에서는 SmS파보다 먼저 도착하며, 비교적 큰 진폭을 보여준다. 그러나 KJM 관측소 기록에서 보듯이 SmS 파형의 진폭도 진앙거리가 증가하며 따라 증가함을 볼 수 있다. 그림 6에서 S파에 관한 파형들이 P파에 관한

파형들과 같이 그림 5의 주시곡선과 일치하지 못하는 것은 P파와 S파의 속도비의 수평적 변화에 기인하는 것으로 보인다. 유일하게 경상분지밖에 위치한 구례 관측소에서는(GRE) 몇가지 특징을 보여준다. 구례 관측소에서는 첫째 Pn파가 그림 2에 의한 주시곡선의 도착 예정 시간보다 약 1초 늦게 도착하지만 PmP파의 도착 시간은 다른 관측소와 비슷하다. 둘째 Pn파와 PmP파의 도착시간차가 다른 관측소보다 짧고, 셋째 Pn파와 Sg 혹은 SmS파의 도착시간차가 다른 관측소보다 짧으며, 넷째 구례 관측소는 다른 관측소보다 고주파가 기록된다 (그림 6과 7). 그림 7은 MAK, GRE, KJM 관측소에서 band-pass filter board를 통과한 수직성분 지진기록을 시간영역(상)과 주파수영역(하)에서 비교한 것이다. 이 그림에서 보듯이 영남육괴에 위치하는 구례관측소(GRE)의 지진 기록이 경상분지내에 위치하는 MAK 및 KJM 관측소 지진 기록 보다 고주파임을 볼 수 있다. 이런 현상들에 대하여 여러가지 해석이 가능하지만, 그 중에 하나는 첫째와 둘째 특성은 모호권의 깊이가 서쪽으로 갈수록 깊어질 경우 GRE 관측소가 다른 관측소보다 서쪽에 위치한 관계로 이러한 특성을 보일 수 있을 것이다. 셋째 특성은 GRE 관측소가 위치한 영남육괴 매질의 P파에 대한 S파의 속도비가 경상분지 안보다 클 가능성이 있다. 넷째 특성은 경상분지의 퇴적암이 고주파에 대한 감쇄효과가 영남육괴에 비하여 클 가능성이 있다.

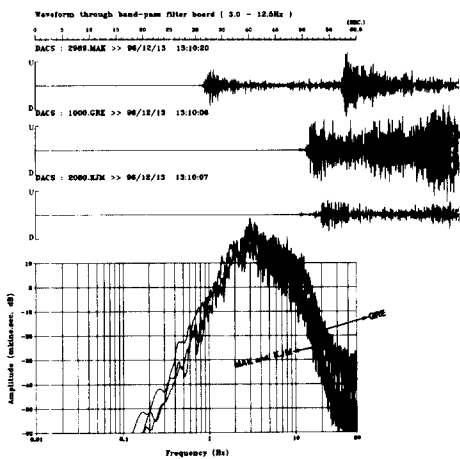


그림 7 The seismic records (vertical component) of the main shock of Yeongwol earthquake through Band-pass filter board in time and frequency domain.

그림 8과 9는 1996년 12월 13일 13시 27분 06.95초와 12월 14일 15시 17분 52.44초에 발생한 지진규모는 각각 3.8과 2.5의 여진을 그림 5의 본진과 같은 방법으로 나타낸 것이다. 두 그림에서 보듯이 Pn파형은 규모 3.8인 여진의 김해관측소(KJM)을 제외하고는 기록되지 않았다. 그림 8에서 Pg, PmP, Sg 및 SmS 파형들은 그림 3의 본진의 기록과 거의 일치하며, Sg파의 진폭은 다른 파형의 진폭에 비하여 크고, 또 진앙거리가 269.5 km인 김해 관측소에서는 SmS 파형의 진폭이 크게 나타난다. 그림 9에서 Pg와 PmP 파형들은 본진의 이 파형들과 약간의 차이가 나며, Sg와 SmS 파형들은 본진의 이 파형들과 차이가 더 커진 것으로 보인다. 이러한 현상은 이 여진의 진원지가 본진 및 그림 8의 여진의 진앙지가 약간의 차이가 나거나, 혹은 지진규모가 상대적으로 작기 때문에 나타나는 현상으로 추측된다. 그림 8와 9의 두 여진에서도 본진과 마찬가지로 구례 관측소(GRE)에서는 본진에서 언급한 셋째와 넷째 특성을 보여주며, 그 원인도 본진과 같은 것으로 추측된다.

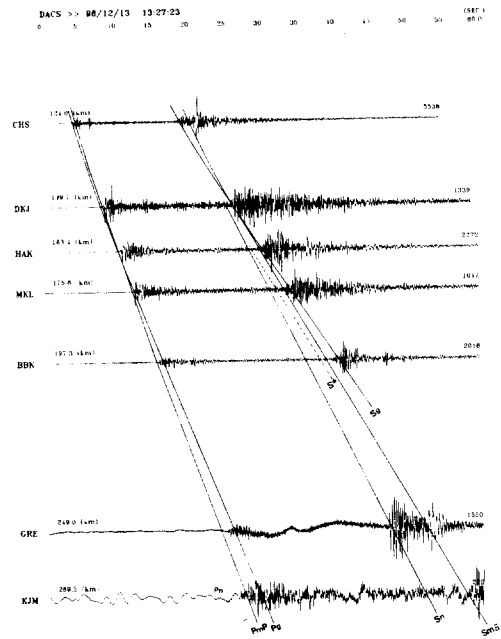


그림 8 The seismic records (vertical component) of the after shock of Yeongwol earthquake plotted on Epicentral distance and travel time axes. The magnitude of the after shock is 3.8.

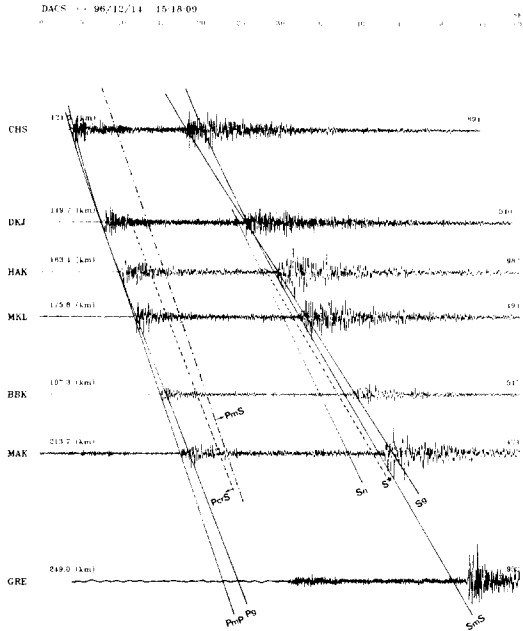


그림 9 The seismic records (vertical component) of the after shock of Yeongwol earthquake plotted on Epicentral distance and travel time axes. The magnitude of the after shock is 2.5.

3. 결 론

영월지진의 진앙지 재결정과 두점을 잇는 파선추적 및 주시곡선을 바탕으로 본진과 두 여진에 대한 파형 분석한 결과 아래와 같은 특성을 보인다.

1. 영월지진의 진원지는 $37^{\circ} 15.11'N$, $128^{\circ} 42.68'E$ 이며 깊이는 7.68km 이며, 발생시간은 1996년 12월 13일 13시 16.91초(한국표준시간)이다.
2. 본진의 Pn 파형을 분석한 결과 모호면에서 P파의 속도는 7.95 km/sec 이다.
3. 지진규모가 4.5인 본진에서는 진앙거리가 145km 미만에서는 Pg 파형이 초동파로 도착하고 진앙거리가 145km 이상에서는 Pn 파형이 초동파로 도착하나 지진규모가 3.8 이하인 두 여진에서는 Pn 파형이 기록되지 않고 PmP 파형이 초동파로 기록되기도 한다.
4. 구례관측소(GRE)에서 Pn파가 예상도달시간 보다 약 1초 늦게 도달하고 PmP파가 예상도달 시간에 도달하는 현상은 영남육괴의 지각의 두께는 서쪽으로 갈수록 증가할 가능성이 있다.
5. 구례관측소에서 Pn파와 Sg 혹은 SmS파의 도착시간 차가 다른 관측소보다 짧은 것은 경상분지 안과

밖의 지역에서 P와 속도에 대한 S파의 속도비가 다른것으로 추측된다.

6. 구례 관측소가 다른 관측소보다 고주파가 우세한 현상은 경상분지의 퇴적암은 고주파의 감쇄효과가 영남육괴에 비하여 큰 것으로 추측된다.

참 고 문 헌

1. Lee, K., "On the crustal structure of the Korean Peninsula," *Jour. Geol. Soc. Korea*, 15, 1979, pp. 134-150.
2. 김상조, "지진파를 이용한 남한의 지각구조 연구," 한양대학교 석사학위 논문, 1983.
3. 김성균, 정부홍, "한반도 남부지역의 지질구조," *광산지질*, 18, 1985, pp.151-157.
4. Kim, S.G., and Lee, S.K., "Seismic velocity structure in the central Korean Peninsula using the artificial explosions," *SAFE*, 2, 1996, pp.4-17.
5. 김성균, "한반도 지각구조에 관한 연구," *지질학회지*, 31, 1995, pp.393-403.
6. Kim, S.K., "Geodetic and geophysical analysis of gravity data in Korea," *Mining Geol.*, 12, 1979, pp.17-28.
7. Kwon, B.G., and Yang, S.Y., "A study on the crustal structure of the southern Korea Peninsula through gravity analysis," *Jour. Inst. Mining Geol.*, 18, 1985, pp. 309-320.
8. 최광선, "한반도 남부의 중력에 대한 연구," 서울대학교 박사학위 논문, 1986.
9. Lee, K., and Lahr, J.C., "HYPO 71: A Computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes," *Geol. Surv. Open-file Rep.*, 75-311, 1975, pp.1-116.
10. Kim, W., and Chung, I., "Rapid and accurate two point ray tracing in layered media with constant or linearly varying velocity function," *1996 Symposium on Seismology in East Asia, Proceedings*, 1996, pp.143-149.
11. Kim, W., Druzhinin, A., and Droujinina A., "Advanced iterative two-point ray tracing and travel-time inversion in stratified medium," *1996 Symposium on Seismology in East Asia, Proceedings*, 1996, pp.159-164.