

2002년 12월 10일 규모 3.6 철원지진의 진원요소 및 파상분석

A source and phase identification study of the M_L 3.6 Cheolwon, Korea, earthquake occurred on December 10, 2002

김우환* 박종찬* 김성균** 박창업****)
Kim, Woohan Park Cheongchan Kim SungKyun Baag, Chang-Eob

ABSTRACTS

We analysed phases recorded by the M_L 3.6 Cheolwon, Korea, earthquake occurred on the 10th of December, 2002 and computed source parameters such as hypocenter, origin time, earthquake magnitude and focal solutions. We used PmP and SmS phases to increase the accuracy in determinations of the hypocenter and origin time in addition to the phases such as Pg, Pn, Sg and Sn which are generally used in routine processes. The epicenter, depth, and origin time of the Cheolwon earthquake determined based on data of 11 stations within 200 km from the epicenter are 38.8108° N, 127.2214° E, 11.955 km, and on 7:42:51.436. The earthquake magnitude is calculated according to the definition of Richter's earthquake magnitude. The average magnitude obtained from all the stations is 3.6 M_L . The fault plane solution calculated based on data from 19 stations indicates slip process of a normal fault including strike-slip motion. The direction of compressional stress field has a large vertical component and a ESE-WNW direction of horizontal component, which is different from the mainly horizontal direction of main compressional stress field in the Korean Peninsula (ENE-WSW) obtained by previous studies.

1. 서론

2002년 12월 10일 강원도 철원 북쪽 약 60km에서 발생한 철원지진($M_L=3.6$)에 대한 지진기록자료의 처리 및 진원 위치, 발생시간, 지진규모, 단층면의 해 등의 진원요소 결정에서 기상청, 한국지질자원연구원, 대학 등 지진자료를 취급하는 각 기관들 사이에 규칙성과 통일성이 요구되고 있다. 이 지진은 휴전선 북쪽에서 발생한 관계로 남한에서는 지진관측소의 관측범위의 제한으로 이 자료를 이용하여 진원요소에 대한 정확한 값을 얻기 어렵다. 이러한 문제들을 해결하기 위하여 북한과 지진자료의 교환이 시급히 요구된다.

본 연구에서는 먼저 3성분 지진기록에서 공분산 행렬의 고유값과 고유벡터를 이용한 직선형도함수와 방향함수(Kim et al.⁽¹⁾)를 이용하여 파상을 분석하였다. 이 방법은 직접파는 물론 초동파로 도착하는 Pn 그리고 진앙거리가 교차거리 이상에서 상대적으로 진폭이 큰 PmP 및 SmS 파의 분석을 비교

* 경상대학교 지구환경과학과 (대표저자: wookim@gsnu.ac.kr)

** 전남대학교 지구환경과학과

*** 서울대학교 지구환경과학부

적 정확하고 안정되게 구할 수 있다(그림 2). 분석된 파상으로부터 가능한 모든 관측소에서 기록된 Pg, PmP, 및 Pn 그리고 Sg, SmS 파를 사용하여 주시곡선을 작성하였다 (그림 3). 여기에서 직접파는 대략 진앙거리 130km 이내에서 초동파로 관측되며, 진앙거리가 교차거리(약 120~130km)에 가까워지면 Pg, Pn 및 PmP가 거의 같은 시간대에 도착한다. 진앙거리가 S파의 교차거리 근처나 그 이상에서는 상대적으로 큰 진폭을 가지는 SmS가 관측되며, 이때 Sg 및 Sn은 진폭이 작아 구분이 어려우며, 교차거리 이상에서는 SmS 파형이 도착하기 전에 또 다른 S군의 파형(PmS ?)이 비교적 SmS 보다 작은 진폭을 가지고 도착하는 경우가 있으므로 SmS의 도착시간을 잘못 읽을 가능성이 있다(그림 2).

진원위치 및 발생시간을 결정하기 위하여 5개의 직접파(Pg 및 Sg)와 6개의 반사파(PmP 및 SmS)를 사용하였다. 남한에서 관측된 속도 및 가속도 자료는 총 40개 이상이지만 대부분 S/N의 비가 작으므로 파상구분이 용이한 진앙거리 200km 이내의 자료만 사용하였으며⁽²⁾. 계산상 오차를 줄이기 위해 진원과 관측소를 잇는 파선추적법(Kim and Baag⁽³⁾)을 진원 및 발생시간 결정프로그램에 적용하였다.

철원지진의 규모를 기상청은 3.8로, 한국지질자원연구원은 4.1로 발표하였다. 기상청과 한국지질자원연구원은 속도기록으로부터 직접 경험식을 이용하여 지진규모를 결정하고 있다. 기상청과 한국지질자원연구원의 규모 결정방법은 Richter⁽⁴⁾에 의하여 도입된 원래의 국지 지진규모(local magnitude)와 어긋난다. 이 연구에서는 Richter⁽⁴⁾의 정의에 맞도록 이 지진의 규모를 재결정하였다.

단층운동에 의해 발생한 지진파의 초동과 진폭은 단층의 종류에 따라 일정한 규칙성을 가지므로 P파의 초동 극성을 이용하여 단층면 해를 구하였다. 단층면 해를 구하기 위하여 5개의 직접파(Pg)와 14개의 반사파(PmP)를 사용하였으며 PmP 파형을 사용하여 계산한 단층 해는 기존 연구의 한반도 주 압축 응력장 방향(동북동-서남서)과 다른 국지적인 응력장 내에서 발생한 것으로 해석할 수 있다.

2. 방법

2. 1. 파상(phase) 분석

본 연구에 사용된 한반도 지각속도구조는 기존 연구의 결과(Kim⁽⁵⁾, Ham and Kim⁽⁶⁾)를 수정한 6개의 수평층 모델로서 각 층의 속도는 그림 1과 같다.

각 관측소에서 기록된 지진파의 파상(phase) 분석을 위하여 Kim et al.⁽¹⁾에 의하여 개발된 파상 분석법을 사용하였다. 이 방법은 3성분 지진기록에서 공분산 행렬의 고유값과 고유벡터를 이용하여 직선형도함수(R)와 방향함수(D)를 아래와 같이 정의한다.

$$R = 1 - \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^n \quad (1)$$

여기서 λ 는 공분산 행렬의 고유값이며 $|\lambda_1| \leq |\lambda_2| \leq |\lambda_3|$ 이다.

$$D(t) = 1 - |e_b(t_s) \cdot e_f(t)| \quad (2)$$

여기서 e_b 와 e_f 는 공분산 행렬의 기본 고유벡터와 각 점에서 고유벡터이며 본 연구에서는 기본 고유벡터는 파형 구분이 뚜렷한 Pg, Pn, 혹은 PmP의 고유벡터를 사용하였다. 그림 2는 BRD(백령도) 관측소에서 기록된 지진자료를 파형 분석법에 적용한 결과다. 이 관측소의 기록에서 보듯이 이 방법은 반사 및 굴절파인 Pn, PmP 및 SmS 파상의 구분이 가능하다. 특히 이 방법은 S군의 파형을 잘 구분하는

장점을 가지고 있다. 여기에서 SmS가 도착하기 바로 전에 어떤 S군의 파상이 도착하는 것을 알 수 있다. 만약 이러한 이유로 SmS 도착 시간을 잘못 읽을 수 있으므로 주시곡선(그림 3)에서 다른 관측소 자료와 비교하여 읽어야 오차를 줄일 수 있다.

그림 3은 각 파형의 주행시간과 진앙거리 300km 미만에 대한 주시곡선이다. 그림 3에서 사각형으로 표시되는 Pn파의 직선의 기울기의 역수는 모호면에서 P파의 속도를 나타내며 칠원지진의 경우 약 7.95 ± 0.05 km/sec 이다. Pn을 제외한 다른 파상의 경우, 각 파상 직선의 기울기의 역수는 그 파가 지나는 하부층의 속도가 많이 반영된 것으로 해석할 수 있다. 그림 3에서 진앙거리 130~200km에서 Pn의 경우 예상 도착 시간보다 늦게 도착하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 S/N의 비가 낮을 경우 Pn군 중 처음에 도착하는 신호는 잡음에 묻혀 보이지 않고 진폭이 상대적으로 큰 것이 초동파로 도착하는 것처럼 보일 수 있다⁽²⁾. 그림 2에서 Pn 파보다는 상대적으로 진폭이 큰 PmP 파가 안정적으로 도착하므로 지진규모가 약 4.0 또는 그 이하가 되는 작은 지진의 지진 요소를 결정할 때 Pn을 사용하는 것은 오차를 증가시킬 가능성이 있으므로 Pn 대신 PmP를 사용하는 것이 바람직하다. 지진규모 3.6인 칠원지진의 경우 진앙거리가 200km 이상인 지점에서도 Pn 파형이 구분되는 관측소도 있지만(예: BRD, 238km), 200km 미만인 관측소에서도 Pn 파형이 잡음에 묻혀 구분이 매우 어렵다(예, SEO, 151 km). 이러한 이유는 관측소의 고유 잡음 정도에 관계되는 것으로 판단되며 따라서 양질의 자료를 얻기 위하여 관측소의 위치 선정이 얼마나 중요한가를 인식케 한다.

2. 2. 진원 및 발생시간 결정

2002년 12월 10일에 발생한 칠원지진이 남한의 관측소에 기록된 총 개수는 속도계 및 가속도계 자료를 포함하여 40개 이상이다. 이 자료 중 특정 파상(예 Pg, Pn, PmP 등)의 구분이 가능한 자료는 진앙거리 300km 미만으로 20여개이며 본 연구에서는 5개의 직접파 자료를 포함하여 진앙거리 200km 미만의 자료(11개)와 300km 미만의 자료(22개)들을 사용하여 진원과 발생시간을 HYPO21 프로그램을 개선하여 결정하였다. 11개 관측소 자료를 사용하여 결정한 진원과 발생시간은 표 1과 같다. 표 1에서 P 도착 및 S-P 시간 다음의 A, B, 그리고 C는 지진요소 결정에서 가중치를 나타내며, S/N 비의 정도와 파상 구분의 신뢰도에 따라 A는 아주 명확, B는 보통, 그리고 C는 약간 불명확을 표시한다. 11개 관측자료를 사용하여 결정한 요소는 진앙: 북위 38.8108도, 동경 127.2214도, 진원깊이: 11.955km, 발생시간: 2002년 12월 10일 07시 42분 51.436초이며, P파의 rms 오차는 0.09초이다. 반면 22개 관측자료를 사용하여 결정한 요소는 진앙: 북위 38.8156도, 동경 127.2078도, 진원깊이: 10.843km, 발생시간: 2002년 12월 10일 07시 42분 51.472초이며, P파의 rms 오차는 0.21초이다. 진앙거리가 증가함에 따라 PmP의 주행 시간은 하부 지각의 속도 구조에 크게 영향을 받기 때문에 한반도의 하부 지각 속도구조가 확립되지 못한 실정을 감안하면 진앙거리 200km 이상의 자료를 진원요소 결정에 사용하면 신뢰도가 떨어질 가능성이 크므로 진앙거리 200km 미만의 자료로 결정한 진원요소가 신뢰도가 더 큰 것으로 추정한다. 기상청과 한국지질자원연구원에서 결정한 진원요소는 약간의 차이가 있는데, 이것은 두 기관 모두 각각의 지진 관측망에서 기록된 자료만 가지고 결정한 것이 가장 큰 원인으로 생각되며, 기상청은 적어도 소수점 2 혹은 3 자리까지 발표하는 것이 지진연구를 위하여 필요하다고 판단된다. 특히 두 기관의 관측망에서 소수의 관측소에서 기록되는 미소지진의 경우 두 기관의 자료를 합하면 충분히 진원요

소를 결정할 수 있으므로 두 기관의 지진자료를 통합 운영하는 것이 절실히 요구된다.

2. 3. 지진규모

이 연구에서는 김성균, 박민아⁽⁷⁾가 한반도의 지진파 감쇠특성을 고려하여, Richter⁽⁴⁾의 정의에 따라 유도한 경험식을 이용하여 지진규모를 결정하였다. 지진규모 M_L 을 결정하는 경험식은 다음과 같다.

$$M_L = \log A + 1.12 \log \Delta + 0.60 + S \quad (3)$$

여기서 A 는 Wood-Anderson 지진계의 수평성분에 기록된 최대진폭을, Δ 는 진원거리를, S 는 관측소 보정값을 나타낸다. 그러므로 이 식의 둘째 항은 거리에 따른 진폭의 감쇠효과를 나타내고 있다. Wood-Anderson 지진계는 고유주기 0.8초, 배율 2800배인 변위형 지진계이므로 최대진폭 A 를 구하는 것은 단순하지 않다. 먼저 속도 성분기록의 계기응답을 제거하여 다음으로 변위기록으로 변환시킨 후, 다시 Wood-Anderson 지진계의 계기응답을 곱함으로써 최대진폭을 얻을 수 있다. 이와 같은 방법으로 구한 지진기록은 실제의 Wood-Anderson 지진기록이라기보다는 일종의 모사기록이라 할 수 있다. 그림 4의 (A)는 이 지진을 관측소 PCH에서 기록한 것이며, (B)는 지진계의 응답을 제거한 지진기록이다. 또한 (C)는 이를 적분하여 변위기록으로 변환한 예이며, (D)는 Wood-Anderson 모사기록으로서 진폭의 단위가 mm로 되어 있다. 이러한 일련의 과정을 거쳐 구한 수평성분의 최대진폭을 식 (3)에 대입하여 Richter의 원래 정의에 따른 지진규모를 구하게 된다. 실제로는 2개의 수평성분이 있으므로, 각각의 수평성분으로부터 구한 규모를 평균하여 한 관측소의 지진규모가 결정된다. 그러나 김성균, 박민아⁽⁷⁾가 지적한 바와 같이 두 관측소의 규모평균을 취하는 것은 미리 두 수평성분의 최대진폭의 기하평균을 구하여 바로 하나의 규모를 결정하는 것과 동일하다. 또한 여러 관측소에서 하나의 지진에 대하여 구한 규모는 반드시 일치하지 않으며, 이것이 식 (3)의 관측소 보정값에 해당한다고 할 수 있다. 모든 관측소의 관측소 보정값의 합이 0이라는 가정아래에서, 여러 관측소에서 구한 규모들을 평균함으로써 한 지진에 대한 규모가 결정된다.

이 연구에서는 위와 같은 방법으로 지진규모를 재산정 하였다. 규모 산정에 이용한 지진기록은 진원 거리가 300km 이내이고 비교적 S/N비가 높은 관측소의 자료이다. 표 2에서 이용한 관측소의 Wood-Anderson 모사기록에서의 두 개의 수평성분에 대한 최대진폭의 기하평균(A)과 진원거리 결정된 규모를 나타낸다. 여러 관측소에서 구한 규모들의 평균을 취하여 결정된 지진규모는 3.6로서, 기상청에서 결정한 규모보다 0.2이 작으며, 지질자원연구원이 결정한 규모보다는 0.5만큼 작다.

2. 4. 단층면 해

5개의 직접파(Pg)와 14개의 반사파(PmP)를 사용하여 구한 칠원지진에 대한 단층면(P와 nodal plane)의 해는 그림 5와 같다. 제1단층면의 주향, 경사, 면선각은 각각 $315 \pm 10^\circ$, $15 \pm 3^\circ$, $220 \pm 10^\circ$ 이며 주향이동이 포함된 정단층을 이룬다. 그리고 보조단층면의 이들 방향각은 $186 \pm 2^\circ$, $80 \pm 2^\circ$, $-78 \pm 10^\circ$ 이며 주향이동이 미약하게 포함된 정단층이다.

압축 응력장 방향의 연직성분이 상당히 크게 나타나고, 수평성분은 동남동-서북서 방향이다. 이 결과는 기존 연구의 한반도 주 압축 응력장 방향과 다르다. 한반도 및 그 주변에서 발생한 지진에 대한

응력장 연구(Jun⁽⁸⁾, 박창업 외⁽⁹⁾, 이기화, 정태웅⁽¹⁰⁾, 전정수 외⁽¹¹⁾)에 의하면, 압축력의 방향은 거의 수평이며 대체로 동북동-서남서 가깝다. 한반도의 지각속도구조 특히 하부 지각속도구조가 밝혀져 있지 않는 점을 감안하고 제한된 직접파와 많은 반사파를 사용한 점을 감안하더라도 칠원 지진의 단층면 방향의 경향은 본 연구에서 구한 단층면 해와 크게 다르지 않을 것으로 판단된다. 따라서 이 지진은 한반도의 광역 응력장과는 다른 국지적인 응력장 내에서 발생한 것으로 해석할 수 있다.

3. 결론 및 토의

2002년 12월 10일 발생한 칠원지진은 휴전선 이북에서 발생한 관계로 남한에서는 지진관측소의 관측범위가 제한적이기 때문에 본 연구에서도 제한된 자료를 사용하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

1. 본 연구에 사용된 자료는 진앙거리 300km 미만의 자료로 5개의 직접파와 17개의 반사파 및 굴절파를 사용하였다.
2. Kim et al.⁽¹¹⁾에 의해 개발된 파형 분석법을 칠원 지진에 적용하여 결정한 P와 S파군의 직접파, 굴절파, 그리고 반사파를 주시곡선에 나타낸 결과 각 파형은 뚜렷한 경향을 보이며, 모호면에서 P-파의 속도는 7.95 ± 0.05 km/sec이다.
3. 5개의 직접파를 포함한 11개 지진자료로 결정한 진원요소는 진앙: 북위 38.8108도, 동경 127.2214도, 진원깊이: 11.955km, 발생시간: 2002년 12월 10일 07시 42분 51.436초, P파의 rms 오차는 0.09초이며, 22개 지진자료를 사용하여 결정한 진원요소는 진앙: 북위 38.8156도, 동경 127.2078도, 진원깊이: 10.843km, 발생시간: 2002년 12월 10일 07시 42분 51.472초, P파의 rms 오차는 0.21초이다.
3. Richter(1958)의 정의에 따라 유도한 경험식을 이용하여 결정한 칠원지진의 규모는 3.6이다.
4. 단층면 해석 결과 단층면과 보조단층면의 주향, 경사, 면선각은 각각 $315 \pm 10^\circ$, $15 \pm 3^\circ$, $220 \pm 10^\circ$, 그리고 $186 \pm 2^\circ$, $80 \pm 2^\circ$, $-78 \pm 10^\circ$ 이다. 이들은 주향이동 성분이 상당히(제1단층면) 또는 미약하게(보조단층면) 포함된 정단층이다. 칠원 지진의 압축 응력장 방향의 연직성분이 상당히 크게 나타나고, 수평성분은 동남동-서북서 방향으로서 기존 연구의 주로 수평성분인 한반도 주 압축 응력장 방향(ENE-WSW)과 다르게 나타난다. 따라서 이 지진은 한반도의 광역 응력장과는 다른 국지적인 응력장 내에서 발생한 것으로 해석할 수 있다.

참고문헌

1. Kim, W., Park, J., and Baag, C-E., 2003, Phase analysis using directionality and rectilinearity functions in three component seismograms, Submitted to Bull. Seismo. Soc. Am.
2. 박종찬, 김우한, 2001, 파형분석과 두점을 잇는 파선추적을 이용한 지진요소 결정, 한국지진공학회 논문집, 5, 57-61.
3. Kim, W. and Baag, C-E., 2002, Rappid and accurate two point ray tracing based on quadratic equation of take-off angle in a layered media with constant or linearly varying velocity functions, Bull. Seismo. Soc. Am., 92, 2251-2263.

4. Richter, C. F., 1958, Elementary Seismology. W. H. Freeman and Co., San Francisco, 758 p.
5. Kim, W., 1999, P-wave velocity structure in the vicinity of the Yangsan Fault region, *Geosciences J.*, 3, 17-22.
6. Ham, I. K., Kim, W., and Baag, C-E., 2003, Non-uniqueness problems in travel time inversion us earthquake data, will be submitted to *Pure and Applied Geophysics*
7. 김성균, 박민아, 2002, 한반도의 국지 지진규모. *지질학회지*, 38(2), 217-235.
8. Jun, 1990, Source parameters of shallow intraplate earthquakes in and around the Korean Peninsula and their tectonic implication. Doctor thesis, Uppsala Univ.
9. 박창업, 신진수, 지현철, 강익범, 류용구, 1998,, 1996년 12월, 13일 영월지진의 진원단층면 방향, *지구물리*, 1, 23-30.
10. 이기화, 정태웅, 1999, 1996년 양산단층 일대의 미소 지진을 이용한 복합단층면해, *지구물리*, 2, 235-240.
11. 전정수, 전명순, 강익범, 제일영, 신진수, 한국자원연구소, 2000, 지진원 및 지진파 전달특성 연구. 한국자원연구소, KR-00-(T)-05, 114 p.

Table 1. Hypocentral parameters and travel times of seismic phases determined using data of 11 stations recorded by the 10 December 2002 Cheolwon earthquake.

Hypocenter: 38.8108N, 127.2214E, depth=11.955km, Origin time: 07:42:51.436 with rms(P) error range of 0.09(sec)							
station	P-arrival Time	P-arrival time error	S-P time difference	S-P Time diff. Error	Epicentral Distance	P-Travel Time	Phase
CHNB	43:01.93A	0.026	7.69A	0.127	60.825	10.494	Pg, Sg
PCH	43:07.40A	-0.070	11.59A	-0.104	94.561	15.964	Pg, Sg
DDC	43:08.73B	-0.142	12.70C	-0.084	102.901	17.294	Pg, Sg
INJ	43:11.31A	-0.030	14.57B	0.111	117.834	19.874	Pg, Sg
CHC	43:12.82A	0.124	15.28A	-0.009	125.889	21.384	Pg, Sg
HOC	43:15.15A	0.137	17.06C	0.104	137.779	23.714	PmP, SmS
KHD	43:15.84A	0.017	17.60B	-0.063	143.391	24.404	PmP, SmS
SEO	43:16.75B	0.055	18.27B	0.013	149.227	25.314	PmP, SmS
YJD	43:18.84B	-0.104	20.13C	0.083	164.194	27.404	PmP, SmS
WON	43:20.75C	0.043	21.46C	0.281	175.691	29.314	PmP, SmS
DGY	43:21.13A	-0.058	21.58A	-0.48	177.873	29.694	PmP, SmS

* P indicates Pg or PmP phase, and S indicates Sg or SmS phase specified in the phase column of the table. The characters A, B, and C assigned to the arrival times and arrival time differences represent the levels of the data quality. The character A means a good quality, B a normal quality and C a bad quality.

Table 2. Maximum amplitude of the horizontal displacement component in the simulated Wood-Anderson seismogram and local magnitude determined at each seismic station.

Station	Sensor type	Epicentral Distance(km)	Maximum Amplitude(mm)	M_L
CHNB	Short Period	62.7	3.94	3.94
PCH	Short Period	95.4	3.35	3.35
CHJ	Short Period	226.5	0.92	3.20
HKU	Broad Band	245.8	2.95	3.75
TJN	Broad Band	271.5	1.20	3.41
SEO	Broad Band	150.4	3.28	3.55
KHD	Broad Band	144.2	2.78	3.46
SES	Broad Band	235.2	2.57	3.67
BRD	Broad Band	237.6	2.92	3.73

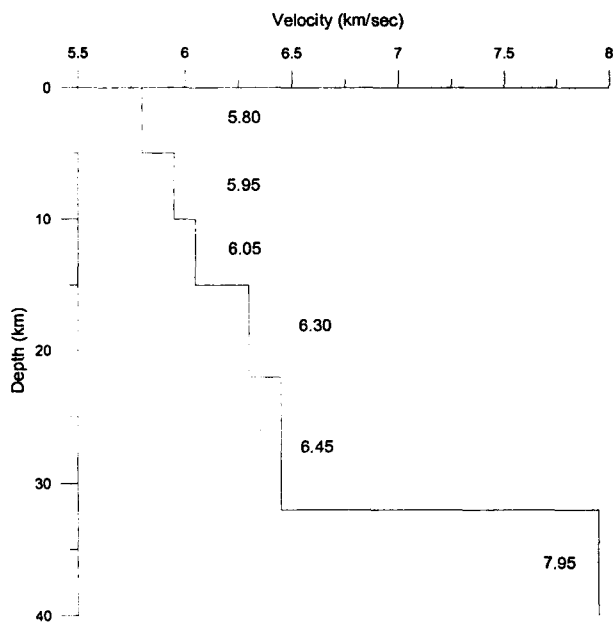


Fig. 1. Crustal P-wave velocity structure used in this study.

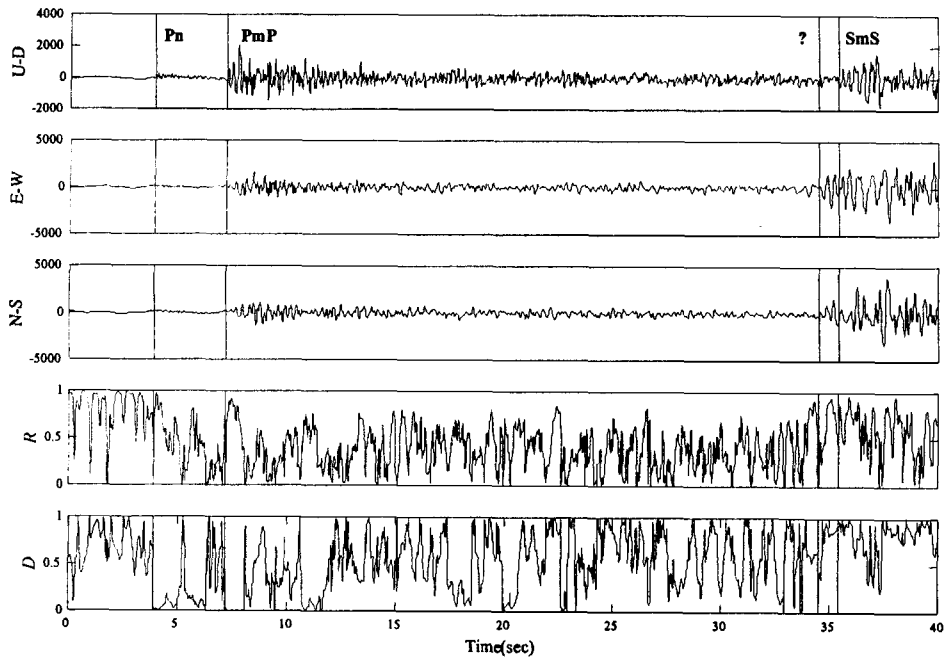


Fig. 2. Rectilinearity and directivity functions of seismograms recorded at the BRD station by the 10 December, 2002, M_w 3.6 Cheolwon earthquake,

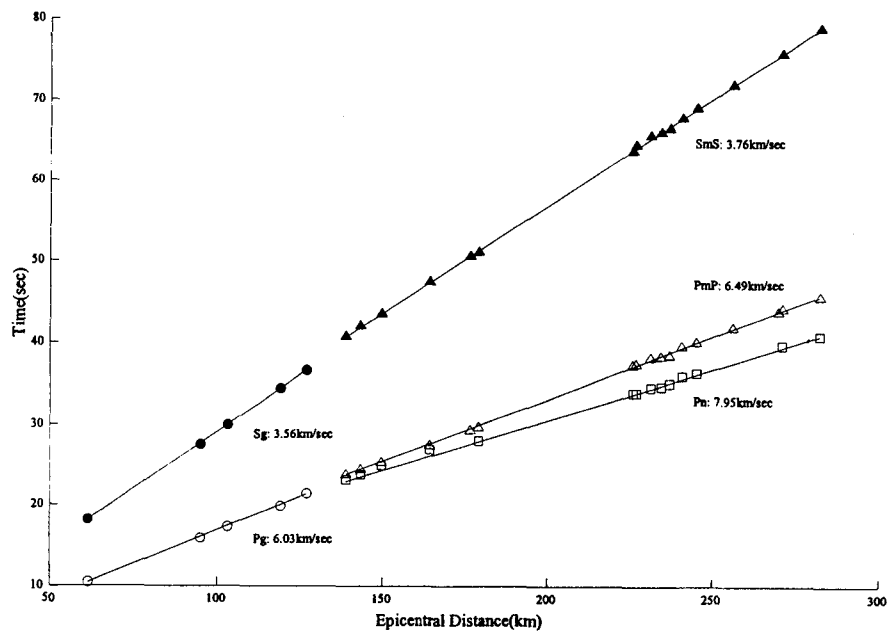


Fig. 3. Travel time curves of seismic phases recorded by Cheolwon earthquake. Symbols of open circle, open rectangle, and open triangle represent Pg, Pn, and PmP phases, respectively. The solid circle and solid triangle represent Sg and SmS phases, respectively.

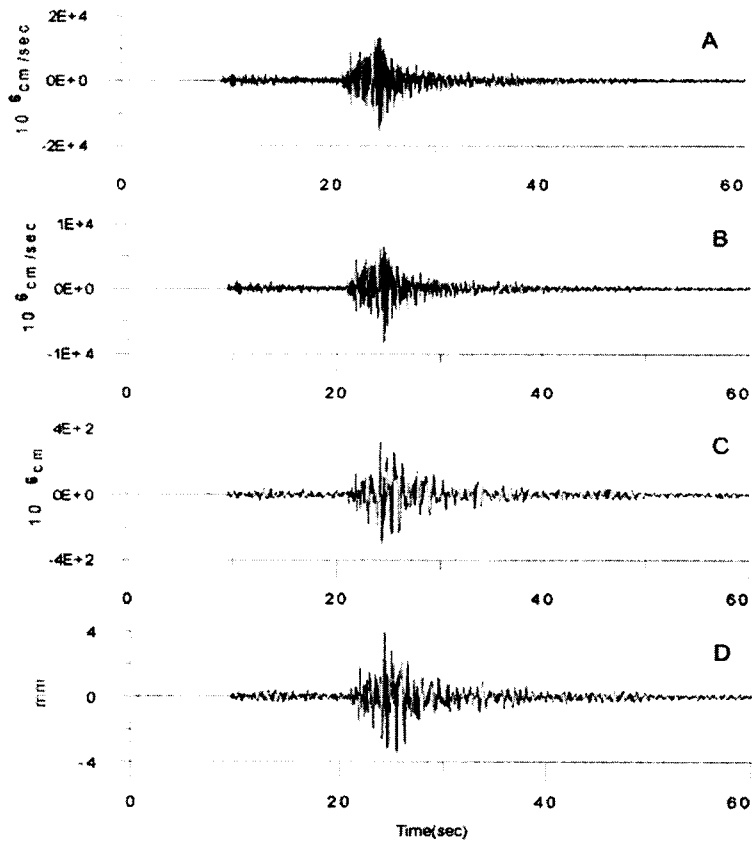


Fig. 4. An example of transformation process of a raw record into a simulated Wood-Anderson seismogram.

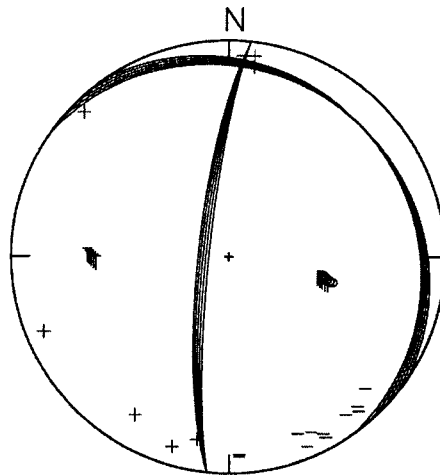


Fig. 5. Fault plane solutions for the 10 December 2002 Cheolwon earthquake. The characters P and T represent the orientation of compressional and dilatational stress axis.