

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

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

김우한*
Kim, Woohan

박종찬*
Park Cheongchan

함인경*
Ham, Inkyeong

김성균**
Kim, Sung Kyun

박창업***
Baag, Chang-Eob

국문요약

2002년 12월 10일 발생한 철원지진에 의해 기록된 지진파의 파상(phase)분석을 하고, 진원위치, 발생시간, 지진규모 등의 진원요소를 연구하였다. 이 연구에서는 기상청과 한국지질자원연구원의 지진관측망에 의해 기록된 속도 및 가속도 자료를 사용하였다. 이 지진은 휴전선 이북에서 발생한 관계로 휴전선 이남에서 직접파인 P가 기록된 관측소는 5곳에 불과하다. 또 굴절파의 초동파인 Pn은 대부분의 관측소에서 구분하기 어렵다. 이러한 이유로 진원 결정에서 기존의 방법으로는 오차의 가능성이 있다. 기록된 각 파의 구분을 위하여 Kim et al.⁽¹⁾이 개발한 파상 분석법과 주시곡선을 사용하여 P 및 S파의 직접파, 반사파 및 굴절파를 구분하였다. 진원위치 및 발생시간을 결정하기 위하여 기존의 방법에서 사용되는 Pg, Pn, Sg, Sn 파 외에 PmP 및 SmS 파를 추가로 사용하여 정확도를 증가시켰다. 진원거리 200km 미만의 11개 자료로 결정한 철원지진의 진앙은 북위 38.81도, 동경 127.22도, 그리고 진원 깊이는 12.0km이며, 발생시간은 7시 42분 51.4초(한국시간)이다. Richter의 지진규모 정의에 따라 계산된 각 관측소의 평균적 지진규모는 M_L 3.6이다. 이 규모는 기상청과 한국지질자원연구원에서 결정한 규모보다는 각각 0.2와 0.5만큼 작다.

주요어 : 2002년 12월 10일 철원지진, 파상 분석, 진원위치, 발생시간, 지진규모

ABSTRACT

We analysed seismic phases recorded by the 10 December 2002 Cheolwon, Korea, earthquake of M_L 3.6 and obtained source parameters such as hypocenter, origin time, earthquake magnitude. Velocity and acceleration records used in this study are from the KMA and KIGAM seismic networks. Due to the location of the epicenter in the north of the DMZ(Demilitarized Zone), direct Pg phases were recorded only at five stations in the area south of DMZ. Identification of refracted Pn phase as the first arrival is difficult in most stations. Therefore, the hypocenter determined by existing routine methods could be affected by a large error. In order to avoid the possibility of the problem, we employed a method of seismic phase analysis developed by Kim et al.⁽¹⁾. The direct, refracted, and reflected P and S phases were successfully identified using the method together with the travel time curve data. In order to improve the accuracy in determination of the hypocenter and origin time, we included PmP and SmS phases in the analysis in addition to the phases such as Pg, Pn, Sg and Sn. The epicenter, depth, and origin time of the Cheolwon earthquake determined based on data of 11 stations within 200km from the epicenter are 38.81°N, 127.22°E, 12.0km, and 7:42:51.4(local time), respectively. The average value of the local magnitude based on the Richter's definition from all the stations is 3.6 in M_L . This magnitude is smaller by 0.2 and 0.5 compared with magnitudes determined by KMA and KIGAM, respectively.

Key words : the 10 December 2002 Cheolwon, Korea, earthquake, phase analysis, hypocenter, origin time, local magnitude

1 서 론

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 결정 등어서 기상청, 한국지질자원연구원, 대학 등 지진자료를 취급하는 각 기관들 사이에 규칙성과 통일성이 요구된다. 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 요구되며, 이 연구에서는 남한의 지진자료만 사용하였다.

지진연구에서 파상(phase) 분석은 가장 중요한 부분 중

하나이다. 지진자료에서 많은 파상을 구분할수록 더 많은 정보를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 3성분 지진기록에서 공분산 행렬의 고유값과 고유벡터를 이용한 직선도함수와 방향함수(Kim et al.⁽¹⁾)를 이용하여 파상을 분석하였다. 이 방법은 직접파는 물론 초동파로 도착하는 Pn 그리고 진원거리가 교차거리 이상에는 상대적으로 진폭이 큰 PmP 및 SmS 파의 분석을 비교적 정확하고 안정되게 구할 수 있다.

주시곡선은 가능한 모든 관측소에서 기록된 Pg, PmP, 및 Pn 그리고 Sg, SmS 파를 사용하였다. 직접파는 대략 진원거리 130km 이내에서 관측되며, 초동파로 도착하여 이 파의 도착시간을 구분하는데 큰 어려움이 없다. 그러나 진원거리가 교차거리(약 120~130km)에 가까워지면 Pg, Pn 및 PmP가 거의 같은 시간대에 도착하므로 세심한 주의가 필요하다. 진원거리가 S파의 교차거리 근처나 그 이상에서는 상대적으로 큰 진폭을 가지는 SmS가 관측되며, 이때 Sg 및 Sn은 진폭이 작아 구분이 어렵다. 또 진원거리가 교차거리 이상에서는 SmS 파형이 도착하기 전에 또 다른 S군의 파형(PmS?)

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

** 전남대학교 지구환경과학과

*** 서울대학교 지구환경과학부

본 논문에 대한 토의를 2003년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2003. 5. 7 / 심사종료일 : 2003. 5. 27)

이 비교적 SmS 보다 적은 진폭을 가지고 도착하는 경우가 있으므로 SmS의 도착시간을 잘못 읽을 가능성이 있다.

진원위치 및 발생시간을 결정하기 위하여 5개의 직접파(Pg 및 Sg)와 6개의 반사파(PmP 및 SmS)를 사용하였다. Sn 파형은 진폭이 작아 다른 파형들과 간섭되어 기록되어 근거리 지진에서 구분이 매우 어렵다. 남한에서 관측된 속도 및 가속도 자료는 총 40개 이상이지만 대부분 S/N의 비가 작다. 또 어떤 파상군(group of phases) 중에서는 진폭이 큰 부분만 파상을 구분할 수 있어서 파상의 처음 도착 신호를 확인할 수 없는 것은 본 연구에서 제외하고 진앙거리 200km 이내의 자료만 본 연구에서 주로 사용하였다.⁽²⁾ 본 연구에서는 계산상 오차를 줄이기 위해 진원과 관측소를 잇는 파선 추적법(Kim and Baag⁽³⁾)을 진원 및 발생시간 결정프로그램에 사용하였다.

철원지진의 규모를 기상청은 3.8로, 한국지질자원연구원은 4.1로 발표하였다. 기상청과 한국지질자원연구원은 속도 기록으로부터 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.

II. 방법

2.1 파상(phase) 분석

본 연구에 사용된 한반도 지각속도구조는 기존 연구의 결과를 수정하여 사용하였다(Kim⁽⁵⁾). 지각모델은 6개의 층으로 나누었으며 속도구조는 Fig. 1과 같다.

기록된 지진파의 파상(phase) 분석을 위하여 Kim et al.⁽¹⁾에 의하여 개발된 파상 분석법을 사용하였다. 이 방법은 3성

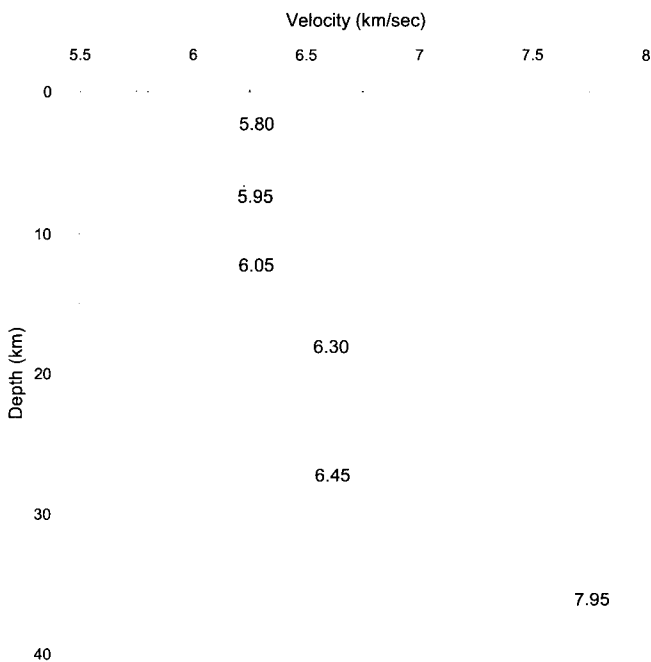


Fig. 1 Crustal P-wave velocity structure used in this study

분 지진기록에서 공분산 행렬의 고유값과 고유벡터를 이용한 직선도함수(R)와 방향함수(D)를 이용하여 파형을 분석하였으며, 두 함수는 아래와 같이 주어진다.

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

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

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

여기서 e_b 와 e_i 는 공분산 행렬의 기본 고유벡터와 각 점에서 고유벡터이며 본 연구에서는 기본 고유벡터는 파형 구분이 뚜렷한 Pg, Pn, 혹은 PmP를 고유 벡터로 사용하였다. 철원 지진에 의해 PCH(포천, 직접파) 및 BRD(백령도, 반사 및 굴절파) 관측소(Fig. 2)에서 기록된 자료를 파형 분석법을 적용하여 계산한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 두 관측소의 기록에서 보듯이 직접파의 경우(Fig. 3(a)) 이 파상 분석법은 Pg 및 Sg 파형이 뚜렷이 구분되며 반사 및 굴절파의 경우에도 이 방법은 Pn, PmP 및 SmS 파상의 구분이 가능하다(Fig. 3(b)). 이 방법은 S군의 파상을 잘 구분하는 장점을 가지고 있다. Fig. 3(b)에서 보듯이 SmS가 도착하기 바로 전에 어떤 S군의 파상이 도착하는 것을 알 수 있다. 만약 이러한 이유로 SmS 도착 시간을 잘못 읽을 수 있으므로 주시곡선에서 다른 관측소 자료와 비교하여 읽어야 오차를 줄일 수 있다.

Fig. 4는 각 파형의 주행시간과 진앙거리 300km 미만에 대한 주시곡선이다. 이 그림에서 보듯이 파상 분석법으로 분석한 결과, P군 파상으로 Pg, Pn, 및 PmP 파형이 구분되며 S군 파상으로는 Sg와 SmS 파형이 구분된다. 그러나 Sn 파는

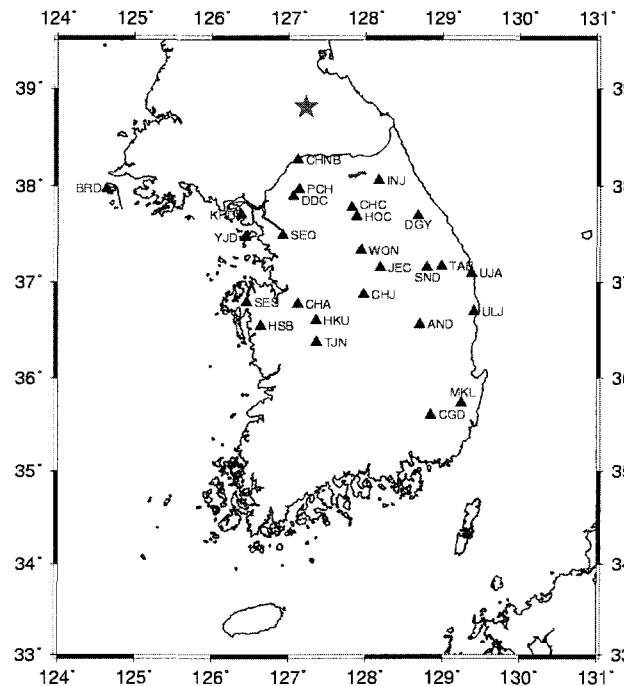


Fig. 2 Locations of seismic stations and the epicenter of the December 10, 2002, Cheolwon earthquake, Korea. Symbols star and triangle represent the epicenter and station, respectively

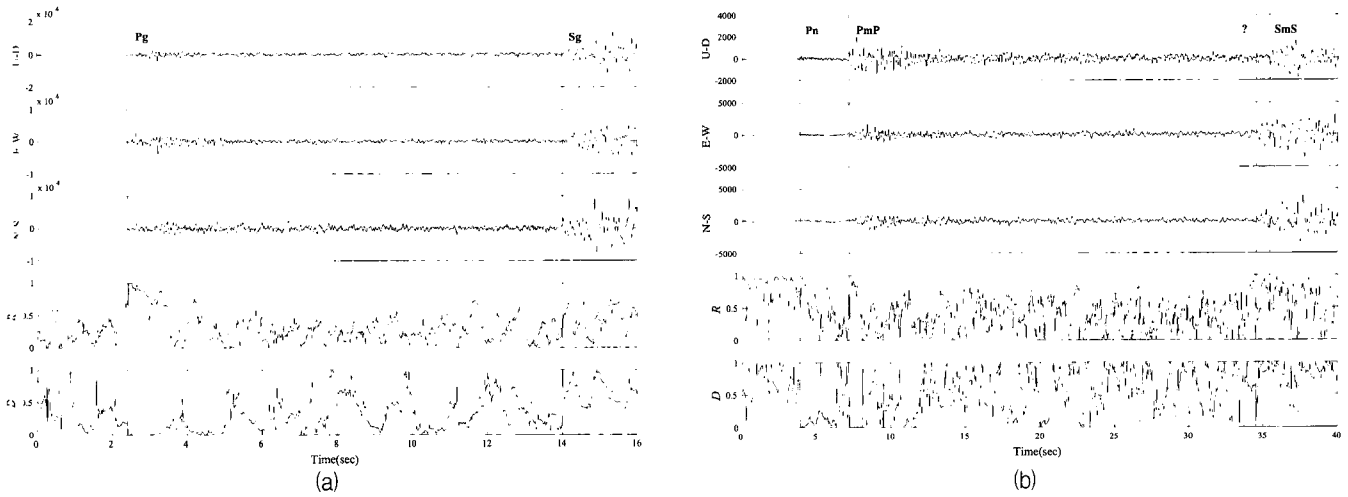


Fig. 3 Rectilinearity and directivity functions of seismograms recorded at the PCH station (a) and the BRD station (b) by the December 10, 2002, M_L 3.6 Cheolwon earthquake, Korea. From top to bottom, U-D, E-W, and N-S denote up-down, east-west, and north-south components, respectively, of velocity seismograms. Symbols R and D denote rectilinearity and directionarity functions, respectively. The vertical line represents the arrival time of a seismic phase.

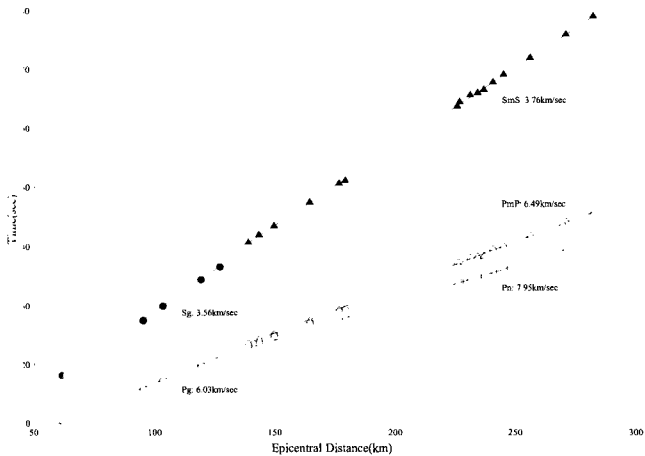


Fig. 4 Travel times of seismic phases recorded by the December 10, 2002, M_L 3.6 Cheolwon earthquake, Korea. Symbols of open circle, open rectangle, and open triangle represent Pg, Pn, and PmP phases, respectively. The solid circle and solid triangle represent Sg and SmS phases, respectively.

진폭이 작아 다른 파상의 파형과 간섭되어 나타나므로 구분이 어렵다. Fig. 4에서 Pn파(사각형 표시)에 의한 모호면 아래의 P파의 속도는 약 $7.95 \pm 0.05 \text{ km/sec}$ 이다. Pn을 제외한 다른 파상의 경우, 각 파상 직선의 기울기의 역수는 그 파가 지나가는 하부층의 속도가 많이 반영된 것으로 해석할 수 있다. Fig. 4에서 진앙거리 130~200km에서 보듯이 Pn의 경우 이상 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 동시다발로 도착하는 것처럼 보일 수 있다.⁽²⁾ Fig. 3에서 보듯이 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 철원지진의 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, 151km). 이러한 이유는 관측소의 고유 잡음에 관계되는 것으로 관측소의 위치 선정에 영향을 미친다.

2. 진원 및 발생시간 결정

2002년 12월 10일에 발생한 철원지진이 남한의 관측소(Fig. 2)에 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 약 20 개이며 이 연구에서는 5개의 직접파 자료를 포함하여 진앙거리 200km 미만의 자료(11개)와 300km 미만의 자료(22개)를 사용하여 진원과 발생시간을 HYPO71 프로그램(Lee and Lahr⁽⁶⁾)을 개선하여 결정하였다. 이 결정 프로그램에 계산상 오차를 줄이기 위해 진원과 관측소를 잇는 파선추적법을 적용하였다. 11개 관측소 자료와 22개 관측소 자료를 사용하여 결정한 진원과 발생시간은 각각 Table 1과 2와 같다. Table 1과 2에서 P파 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 관측소 자료를 사용하여 결정한 요소는 진앙 : 북위 38.81 ± 0.005 도, 동경 127.22 ± 0.005 도, 진원깊이 : $12.0 \pm 0.05 \text{ km}$, 발생시간 : 2002년 12월 10일 07시 42분 51.4 \pm 0.05초(한국시간)이며, P파의 rms 오차는 0.09초이다. 본 연구에서 구한 진원요소와 한국지질자원연구원과 기상청에서 구한 진원요소는 다소 차이가 난다. 그 예로 기상청은 진앙의 위치를 소수점 한자리 까지만 발표하는 관계로 정확한 비교가 어려우나 발표된 진앙위치(38.8N, 127.2E)는 본 연구와 5km 미만의 차이가 날 수 있고, 한국지질자원

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)							
Seismic station	P-arrival Time (sec)*	P-arrival time error(sec)†	S-P time difference(sec)†	S-P Time diff. Error(sec)†	Epicentral Distance(km)	P-Travel Time (sec)†	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 Hypocentral parameters and travel times of seismic phases determined using data of 22 stations recorded by the 10 December 2002 Cheolwon earthquake

Hypocenter : 38.8156N, 127.2078E, depth=10.830km Origin Time : 07:42:51.472 with rms(P) error range of 0.21 second							
Seismic station	P-arrival time (sec)†	P-arrival time error (sec)†	S-P time difference (sec)†	S-P time diff. error (sec)*	Epicentral distance (km)	P-travel time (sec)†	Phase
CHNB	43:01.93A	-0.065	7.69A	0.056	61.238	10.458	Pg, Sg
PCH	43:07.40A	-0.176	11.59A	-0.342	95.017	15.928	Pg, Sg
DDC	43:08.73B	-0.213	12.70C	-0.266	103.287	17.258	Pg, Sg
INJ	43:11.31A	-0.241	14.57B	-0.329	119.070	19.838	Pg, Sg
CHC	43:12.82A	-0.022	15.28A	-0.383	126.881	21.348	Pg, Sg
HOC	43:15.15A	-0.104	17.06C	-0.405	138.779	23.678	PmP, SmS
KHD	43:15.84A	-0.083	17.60B	-0.332	143.283	24.368	PmP, SmS
SEO	43:16.75B	-0.111	18.27B	-0.375	149.570	25.278	PmP, SmS
YJD	43:18.84B	-0.251	20.13C	-0.282	164.425	27.368	PmP, SmS
WON	43:20.75C	-0.186	21.46C	-0.235	176.638	29.278	PmP, SmS
DGY	43:21.13A	-0.184	21.58A	-0.388	179.132	29.658	PmP, SmS
CHJ	43:28.70B	0.244	26.55B	-0.205	225.956	37.228	PmP, SmS
CHA	43:28.90B	0.298	27.11B	0.303	226.907	37.428	PmP, SmS
SND	43:29.58B	0.298	27.51C	0.207	231.340	38.108	PmP, SmS
SES	43:29.70B	-0.076	27.86C	-0.178	234.562	38.228	PmP, SmS
BRD	43:29.82A	-0.328	28.22C	-0.341	236.986	38.348	PmP, SmS
TAB	43:31.04C	0.316	28.30C	-0.039	240.741	39.568	PmP, SmS
HKU	43:31.58B	0.115	29.06B	-0.024	245.172	40.048	PmP, SmS
HSB	43:33.38B	0.280	30.01B	-0.098	256.200	41.908	PmP, SmS
UJA	43:35.32B	0.137			269.734	43.848	PmP, SmS
TJN	43:35.68B	0.311	31.68B	-0.054	270.944	44.208	PmP, SmS
AND	43:37.15B	0.041	33.26B	-0.014	282.239	45.678	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.

연구원이 결정한 진앙(38.8640N, 127.2648E)은 본 연구 결과와 5km 이상의 차이가 난다. 본 연구에서 계산된 발생 시간은 기상청과는 0.5초 미만, 한국지질자원연구원과는 1초 이상의 차이가 나며, 진원 깊이는 두 기관 모두 발표하지 않고 있다. 22개 관측자료를 사용하여 결정한 요소는 진앙 북위 38.82도, 동경 127.21도, 진원깊이 : 10.8km, 발생 시간 : 2002년 12월 10일 07시 42분 51.5초이며, P와의 rms 오차는 0.21초이다. 진앙거리가 증가함에 따라 PmP의 주행 시간은 하부 지각의 속도 구조에 크게 영향을 받는다. 한반도의 하부 지각 속도구조가 확립되지 못한 실정을 감안하면 진앙거리 200km 이상의 자료를 진원요소 결정에 사용하면 신뢰도가 떨어질 가능성이 크므로, 본 연구에서는 진앙거리 200km 미만의 자료로 결정한 진원요소가 신뢰도가 더 큰 것으로 추정한다. 기상청과 한국지질자원연구원에서 결정한 진원요소 차이는 두 기관 모두 각각의 지진 관측망에서 기록된 자료만 가지고 결정한 것이 가장 큰 원인으로 생각되며, 두 기관에서 관측한 모든 자료를 사용하는 것이 신뢰도를 증가시키기 위해 필요하다. 특히 기상청 혹은 한국지질자원연구원에서 발표한 지진자료에 한국지질자원연구원 혹은 기상청 자료가 빠진 경우가 있는데, 각 기관의 관측망에서 소수의 관측소에서 기록된 자료라도 두 기관의 자료를 합하면 충분히 진원요소를 결정할 수 있으므로 두 기관의 지진자료를 통합 운영하는 것이 절실히 요구된다.

3 지진규모

이 연구에서는 김성균, 박민아⁽⁷⁾가 한반도의 지진과 감쇠 특성을 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 나타낸다. Wood-Anderson 지진계는 고유주기 0.8초, 배율 2800배인 변위형 지진계이므로 최대진폭 A 를 구하는 것은 간단하지 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. Fig. 5의 (A)는 이 지진을 관측소 PCH에서 기록된 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 최

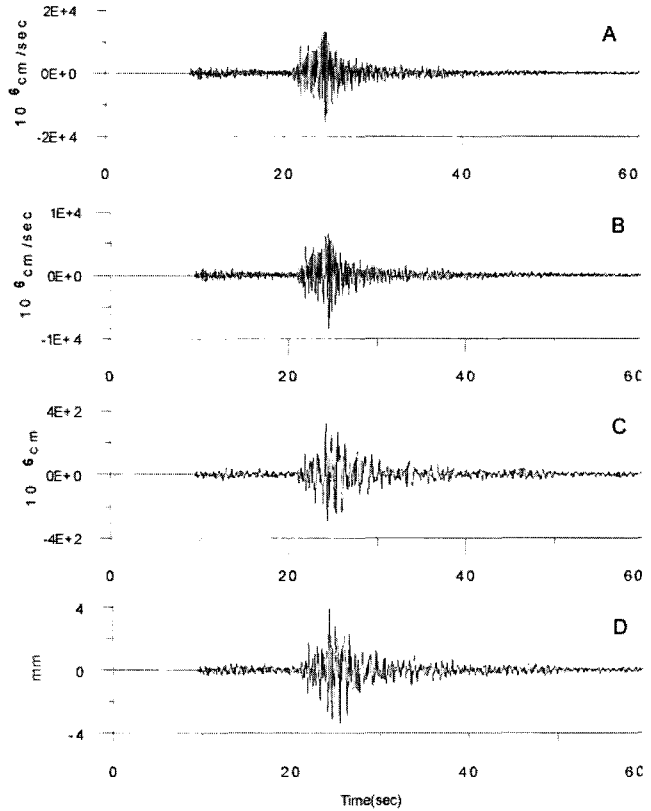


Fig. 5 An example of transformation process of a raw record into a simulated Wood-Anderson seismogram. The simulation is done from the step A to D : (A) Original velocity seismogram recorded by JC-V100 seismograph at PCH station, (B) seismogram after removing the instrument response of JC-V100 seismograph, (C) Displacement seismogram, (D) Simulated Wood-Anderson seismogram after being convolved with the instrument response of the Wood-Anderson seismograph

대진폭을 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 지정한 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.

위와 같은 방법으로 이 연구에서는 지진규모를 다시 산정하였다. 규모 산정에 이용한 지진기록은 진원거리가 300km 이내이고 비교적 S/N비가 높은 관측소의 자료이다. Table 3에 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 3.6으로서, 기상청에서 결정된 규모보다 0.2가 작으며, 지질자원연구원이 결정한 규모보다는 0.5만큼 작다.

Table 3 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	Broad Band	60.8	3.94	3.94
PCH	Short Period	94.5	3.35	3.35
CHJ	Broad Band	225.4	0.92	3.20
HKU	Short Period	245.0	2.95	3.75
TJN	Broad Band	270.8	1.20	3.41
SEO	Broad Band	149.2	3.28	3.55
KHD	Short Period	143.4	2.78	3.46
SES	Broad Band	234.7	2.57	3.67
BRD	Broad Band	244.5	2.92	3.73

average 3.56

III. 결론 및 토의

2002년 12월 10일 발생한 철원지진은 휴전선 이북에서 발생한 관계로 남한에서는 지진관측소의 관측범위가 제한적이다. 이 연구에는 진앙거리 300km 미만의 자료로 5개의 직접파와 17개의 반사파를 사용하였다. 이와 같이 제한된 자료를 사용하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

1. Kim et al.⁽¹⁾에 의해 개발된 파형 분석법을 철원 지진에 적용하여 결정한 P와 S파군의 직접파, 굴절파, 그리고 반사파를 주시곡선에 나타낸 결과 각 파형은 뚜렷한 경향을 보이며, 모호면에서 P-파의 속도는 $7.95 \pm 0.05 \text{ km/sec}$ 이다.
2. 다섯 개의 직접파를 포함한 11개 지진자료로 결정한 진원요소는 진앙 : 북위 38.81도, 동경 127.22도, 진원깊이 : 12.0km, 발생시간 : 2002년 12월 10일 07시 42분 51.4초, P파의 rms 오차는 0.09초이며, 22개 지진자료를 사용하여 결정한 진원요소는 진앙 : 북위 38.82도, 동경 127.21도, 진원깊이 : 10.8km, 발생시간 : 2002년 12월 10일 07시 42분 51.5초, P파의 rms 오차는 0.21초이다.
3. Richter(1958)의 정의에 따라 유도한 경험식을 이용하여 결정한 철원지진의 규모는 3.6이다.

철원지진의 경우에서 보듯이 한반도 중부 및 한반도 전체

의 지진연구를 위하여 이북과 이남의 지진자료 교환이 시급히 요구되고 있으며, 또 남한 내에서도 지진자료의 통합적인 운영과 이 자료를 취급하는 각 기관이 지진요소를 결정할 때 가능한 모든 자료를 사용하고 발표양식도 통일할 필요가 있다. 또한 한반도의 지각 속도구조가 밝혀져야만 신뢰성 있는 지진연구가 이루어 질 수 있으므로 이에 대한 대책이 시급히 요구된다.

감사의 글

이 연구는 과학재단 특정기초(R01-1999-0002-0005-0(2002))와 기상청 지진원 및 지진파 전달특성 과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다

참고 문헌

1. Kim, W., Park, J., and Baag, C.-E., "Phase analysis using directionality and rectilinearity functions in three component seismograms," *Submitted to Bull. Seismo. Soc. Am*, 2003.
2. 박종찬, 김우한, 파형분석과 두점을 잇는 파선추적을 이용한 지진요소 결정, 한국지진공학회논문집, 5, 2001, pp. 57-61.
3. Kim, W. and Baag, C.-E., "Rapid 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, 2002, pp. 2251-2263.
4. Richter, C. F., *Elementary Seismology*, W. H. Freeman and Co., San Francisco, 1958, 758 pp.
5. Kim, W., "P-wave velocity structure in the vicinity of the Yangsan Fault region," *Geosciences J.*, 3, 1999, pp. 17-22.
6. Lee, W. H. K. and Lahr, J. C., HYPO71PC(revised) : "A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes," *Geological Survey Open-File Rep.(U.S.)*, 9, 1-116, 1975, pp. 75-311.
7. 김성균, 박민아, "한반도의 국지 지진규모, 지질학회지", Vol. 38, No. 2, 2002, pp. 217-235.