

파형분석과 두 점을 잇는 파선추적을 이용한 지진요소 결정

Determination of Hypocentral Parameters Using Phase Identification and Two-Point Ray Tracing

박종찬 김우한
Park, Jong Chan Kim, Woo Han

국문요약

이 논문은 지진요소 결정의 정확성과 안정성을 향상시키기 위하여 파형분석과 두 점을 잇는 파선추적을 이용한 지진요소 결정 알고리즘을 소개한다. 지진의 규모가 상대적으로 작을 때(일반적으로 $m_b < 3.2$) Pn이 관찰되지 않고 PmP가 초동파로 기록된 것처럼 보인다. 이러한 경우, P파의 초동파와 S파를 이용하여 기존의 방법으로 계산된 지진요소들과 PmP와 SmS를 이용하여 이 연구에서 개발된 방법으로 계산된 지진요소들은 큰 차이를 보인다. 실제 지진에 대한 지진요소 결정의 계산결과가 이 방법이 기존의 방법보다 rms 오차가 크게 줄었음을 보여준다.

주요어 : 지진요소 결정, 직선형도 함수, 방향성 함수, 두 점을 잇는 파선추적

ABSTRACT

This study introduces an algorithm for determination of hypocentral parameters using phase analysis and two-point ray tracing to enhance accuracy and stability of computations. When the magnitude of earthquake is relatively small(usually $m_b < 3.2$), the PmP phase which looks like the first arrival phase may be observed without observing the Pn phase. In this case, the hypocentral parameters calculated by the existing method using the first arrival of P and S phases and by the method developed in this study using PmP and SmS phases show large differences. The computational results of determination of hypocentral parameters for actual earthquake events show that this method gives much smaller rms errors than the existing methods do.

Key words : determination of hypocentral parameters, rectilinearity function, directionality function, two-point ray tracing

1. 서론

지진요소 결정은 지진학 연구에 기초적인 자료로 사용된다. 따라서 지진분포도, 지진발생기구, 지구내부구조, 지진지체구조, 확률론적 지진위험도 및 지진공학 등을 연구하기 위하여 정확한 지진요소 결정은 필수적이다. 정확한 지진요소 결정을 위해서는 먼저 각각의 관측소에서 기록된 지진기록의 파형분석과 역산 알고리즘의 정확성이 요구된다.

기존의 지진요소 결정 프로그램은 비교적 파형구분이 용이한 초동파만 사용하였다. 그러나 규모가 작은 지진의 경우 Pn이 초동파로 도착하는 시간대에서, Pn 대 잡음의 비가 작아서 Pn은 지진기록에 보이지 않고 PmP가 초동파로 도착하는 것처럼 보이는 경우가 있다. 뿐만 아니라, Pn이 명확하게 구분되더라도 Sn의 구분이 쉽지 않으므로 초동파만을 이용하여 계산한 지진요소들은 정확하지 못한 결과를 산출할 수 있다. 이 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고 지진요소 결정의 정확성을 개선하기 위하여 직선형도 함수와 방향성 함수를 이용하는 파형분석 방법(Kim et. al.⁽¹⁾)과 초동파가 아니라도 분석된 각각의 파형에 대한 두 점을 잇는 파선추적법(Kim과 Baag⁽²⁾)을 기존의 지진요소 결정 알고리즘에 적용

하였다. 여기에서 Pn, Sn, PmP 및 SmS 파형은 각각의 주시 곡선에서 기울기(속도)를 이용하여 일차적으로 구분하였다.

이 연구에서 개발한 지진요소 결정 알고리즘을 한반도에서 발생한 지진에 적용한 결과, 기존의 지진요소 결정 알고리즘과 비교하여 정확성과 안정성이 크게 향상되었다. 특히, Pn이 초동파로 도착하는 시점에서 Pn이 보이지 않고 PmP가 초동파로 도착하는 것처럼 보이는 지진에서는 기존의 지진요소 결정 알고리즘을 이용한 계산 결과는 오차가 많이 발생하고 진원의 깊이가 불안정하였으나 이 연구의 방법을 이용한 계산 결과는 오차가 비교적 작게 나타났다.

2. 파형분석 및 두 점을 잇는 파선추적 적용

이 연구에서는 지진요소 결정의 신뢰성을 향상시키기 위하여 최근에 발생한 비교적 규모가 큰 지진 중 6개 이상의 관측소에서 기록된 자료들만 사용하였으며, 일차적으로 Kim et al.⁽¹⁾에서 소개한 직선형도 함수와 방향성 함수를 이용하여 파형을 분석하였다. 이 두 함수는 공분산행렬의 고유값과 가장 큰 고유값의 고유벡터를 이용하여 계산한다. P파군의 파형분석을 위해서 사용되는 직선형도 함수는 새로운 파형이 도달하는 시점에서 갑자기 증가하는 양상을 보인다. 반면 S파군의 파형분석을 위해서 사용되는 방향성 함수는 기준이 되는 벡터가 P파의 초동파가 우세한 부분의 고유벡터의 값이기 때문에 P파군의 파형이 도달할 때 급격히 감소

* 경상대학교 지구환경과학과, 박사과정(대표저자 : s_ccpark@gaechuk.gsnu.ac.kr)

** 정희원 · 경상대학교 지구환경과학과, 교수

본 논문에 대한 토의를 2001년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2001. 6. 12 / 심사종료일 : 2001. 9. 15)

하는 양상을 보이고 S파군의 파형이 도달하는 시점에서 급격히 증가하는 양상을 보인다. 이러한 특성은 S파의 파형구분에 유용하게 사용된다. 여기에서 공분산행렬을 계산하기 위해서 사용되는 점렬창은 시간 영역의 각각의 시점에서 정의되며, 각각의 공분산행렬에서 계산한 고유값과 고유벡터는 점렬창의 끝 부분에 정의한다. 이 때 점렬창의 크기는 서로 다른 두 종류의 파형이 하나의 창안에 들어가지 않는 최대의 크기가 적당하며, 특히 방향성 함수에서 기준이 되는 고유벡터를 정의하기 위해서 사용되는 점렬창은 초동파의 입자운동의 방향과 일치해야 하므로 비교적 작은 창을 사용하는 것이 바람직하다.

Fig. 1은 진앙거리가 171km인 1996년 12월 13일 영월지진을 MKL 관측소에서 기록한 3성분 지진기록과 직선형도 함수(R), 방향성 함수(D)를 계산한 결과이다. 이 기록의 표본추출간격은 0.01초이며 0.64초 크기의 점렬창을 사용하였다. 계산결과 직선형도 함수는 P_n , P_mP 파형의 도달시간을 비교적 정확하게 감지하였고, 방향성 함수는 S_n , S_mS 파형의 도달시간 측정에 유리하였다. 특히 이전에 도달한 파형의 진폭보다 상대적으로 작은 진폭을 갖는 S_n 파형의 도달시점에서 방향성 함수는 직선형도 함수보다 훨씬 더 민감하게 반응하였다.

Fig. 2는 진앙거리가 200km인 1996년 6월 21일 지진을 DKJ 관측소에서 기록한 3성분 지진기록과 두 함수를 계산한 결과이다. 이 지진기록의 표본추출간격은 0.02초이며, 1.28초 크기의 점렬창이 사용되었다. 이 지진은 DKJ 관측소에서 진앙거리가 200km이기 때문에 P파의 굴절파인 P_n 이 초동파로 도착해야하나 P_n 은 잡음과 구별이 어려우며 P_mP 가 초동파로 도착하는 것처럼 보인다. 이러한 현상은 한반도에서 발생하는 규모가 작은 대부분의 지진기록에서 나타나는 현상으로 정확한 파형구분은 주시곡선의 기울기를 이용하여 구할 수 있다. 이 기록에서도 P_mP 가 도달하는 시점에서는 직선형도 함수가 급격히 증가하는 양상을 보이며 S_mS 가 도달하는 시점에서는 방향성 함수가 증가하는 양상을 보인다.

이 연구에서는 Kim and Baag⁽²⁾에 의해 개발되었던 상수 속도분포를 갖는 수평층에 대한 두 점을 잇는 파선추적법을 지진요소 결정 단계에서 적용하였다. 이들은 각 층의 속도가 상수값을 가질 때, 고정된 두 점(진원, 관측지점) 사이의 수평거리를 스넬의 법칙을 이용하여 초기출발각에 대한 비선형 방정식으로 나타내었다. 초기출발각에 대한 비선형 방정식은 테일러 전개를 이용하여 초기출발각의 초기값에 관해 이차항까지 전개함으로써 실제 초기출발각과 계산한 초기출발각 사이의 차이값에 관한 이차방정식을 구할 수 있으며, 이 방정식에서 계산한 보정각을 초기출발각에 보정하여 반복계산에서 새로운 초기값으로 사용하였다.

Fig. 3은 영월지진의 여진에 대한 파형의 전파경로와 6개 관측소에서의 실제 진앙거리에 대한 계산된 수평거리와의 차이값을 나타낸 것이다. 여기에서 두 값의 오차는 파형의 종류에 관계없이 4번의 반복계산 내에 10^{10} km보다 작은 값을 가진다. 이러한 결과는 이 연구에서 사용한 두 점을 잇는

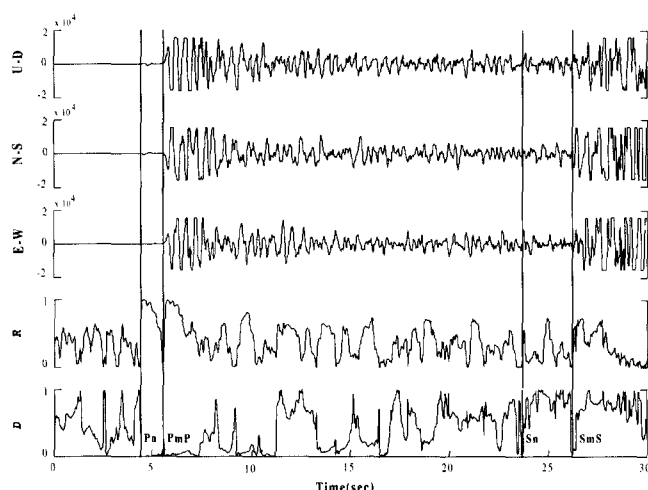


Fig. 1 Seismic phases identified by rectilinearity function (R) and directionality function (D) applied to three component seismograms of the Yeongweol earthquake(December 13, 1996) recorded by MKL station at epicentral distance 171km

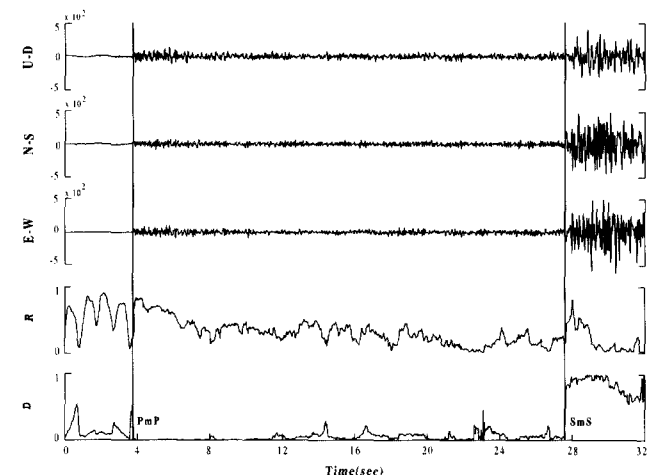
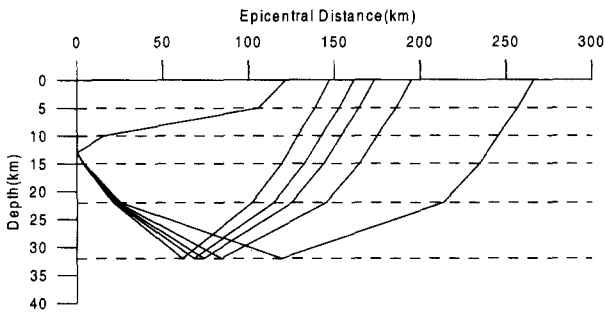


Fig. 2 Seismic phases identified by rectilinearity function (R) and directionality function (D) applied to three component seismograms of the earthquake(June 21, 1996) recorded by DKJ station at epicentral distance 200km

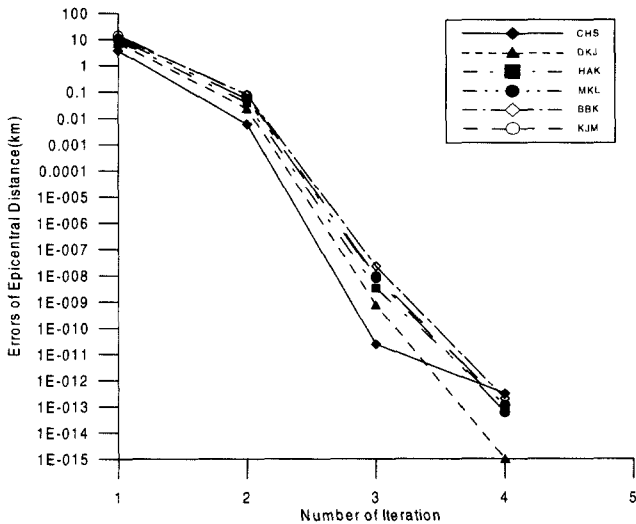
파선추적법이 실제 지진기록에 적용 가능함을 보여준다. 그러므로 빠르고 정확한 두 점을 잇는 파선추적법을 기존의 지진요소 결정 프로그램에 적용함으로써 지진요소 결정의 정확성을 향상시킬 수 있었다.

3. 지진요소 결정

기존의 지진요소 결정 프로그램은 주어진 진앙거리에서 최소 주행시간이 걸리는 초동파의 도달시간을 계산하여 지진요소를 결정하였다. 이론상으로 진앙거리가 130km 이상인 위치에서는 진원의 깊이와 관계없이 P_n 이 초동파로 도착하지만 한반도에서 발생하는 대부분의 지진과 같이 규모가 3.5 이하의 지진에서는 P_n 의 진폭이 잡음의 진폭보다 작아 보이지 않고 반사파인 P_mP 가 초동파인 것처럼 기록될 수도 있다. 이러한 경우 초동파로 도착하는 P_mP 를 P_n 으로 잘못 해석하여 지진요소 결정에 어려움을 겪을 수도 있다. Fig. 4는 이러한 현상을 나타낸 것으로 지진의 규모가 4.3인 영월



(a) Rays traced by the two-point ray-tracing method for transmitted and reflected waves in layered velocity model with a low-velocity layer



(b) Convergence rates of errors in epicentral distances between the true and calculated values in the two-point ray tracing

Fig. 3 Two-point ray tracing between the hypocenter and receivers for the aftershock of the Yeongweol Earthquake(December 13, 1996)

지진을 진앙거리가 192km인 BBK 관측소에서 기록한 연직 성분과 Gutenberg의 규모식($\log E = 5.8 + 2.5m_b$)을 이용하여 지진의 규모를 줄이면서 잡음과 P파의 초동파인 Pn의 변화양상을 나타낸 것이다(Richter⁽³⁾). 여기에서 잡음은 관측소에서 나타나는 기본 잡음이기 때문에 지진의 규모와 관계없이 동일하다고 가정하면, 지진의 규모가 감소할수록 Pn의 에너지는 급격히 감소하므로 규모가 작은 지진의 경우 Pn 파형의 에너지와 잡음의 에너지가 비슷하게 되어 두 파형의 구분이 어려워진다. 이러한 현상으로 인해 영월지진의 규모가 3.5 이하였다면 Fig. 4와 같이 BBK 관측소에서는 Pn이 보이지 않고 PmP가 초동파로 기록되며, 이 파형을 Pn으로 잘못 해석하여 바람직하지 못한 결과를 산출할 수도 있다. 뿐만 아니라 초동파로 Pn이 기록된 지진기록에서도 Sn의 구분은 매우 어려우며 대신 진폭이 큰 SmS가 명확하게 구분된다. 이 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 구분된 파형을 이용하여 주시곡선을 그리고 주시곡선의 기울기를 계산하여 파형의 종류를 정의하였다. 일반적으로 Pn의 속도는 $7.95 \pm 0.05 \text{ km/sec}$ 정도이므로 주시곡선상의 초동파의 속도가 $6.5 \pm 0.3 \text{ km/sec}$ 근처이면 이 파형은 Pn으로 보기 어렵고 PmP의 가능성이 크다. 이 연구에서는 초동파가 아니라도 구분이 용이한 특정 파형을 사용하여 지진요소를 결정함으

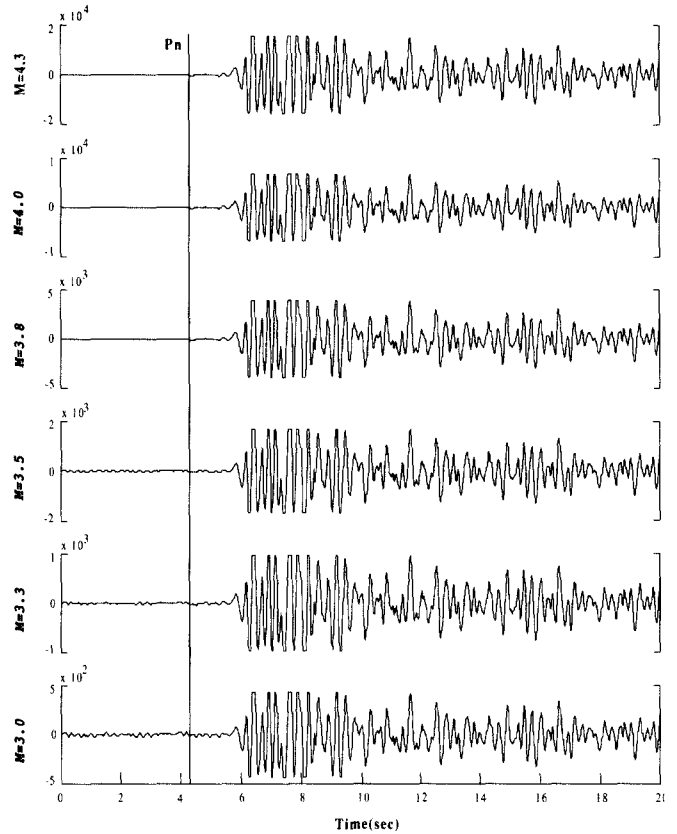


Fig. 4 Vertical component seismograms of the Yeongweol earthquake (December 13, 1996) recorded at BBK station with epicentral distance 192km. Based on real earthquake data(top), amplitudes of seismograms are scaled down depending on magnitude by keeping the noise level in the real earthquake data

로서 지진요소 결정의 정확성을 높였다.

Fig. 5는 이 연구에서 사용한 지각구조 모델로써, Kim⁽⁴⁾의 양산단층 일대의 지각속도 모델을 기초로 하여 지각을 32km 까지 5-10km의 두께를 가진 5개의 층으로 나눈 것이다. 각 층의 속도는 위에서부터 5.82, 6.10, 6.00, 6.30, 6.60km/sec이며, 상부맨틀의 속도는 7.95km/sec 이다.

Table 1은 앞서 언급한 알고리즘을 이용하여 계산한 파형 분석의 결과와 각 파형에 대한 두 점을 잇는 파선추적을 기존의 지진요소 결정 프로그램에 적용하여 얻은 5개 지진에 대한 지진요소와 한국지질자원연구원에서 계산한 결과를 비교한 것이다. 이 연구에서 사용된 5개의 지진 중 영월지진의 본진(1996년 12월 13일)만 Pn과 SmS 파형을 지진요소 결정에 사용하였고 나머지는 PmP와 SmS 파형을 지진요소 결정에 사용하였다. 이 연구의 계산결과는 한국지질자원연구원에서 기존의 지진요소 결정 알고리즘으로 구한 결과에 비해 rms 오차가 현저히 줄었고 진원의 깊이가 비교적 깊게 나타났다. 이러한 결과는 파형분석과 각각의 파형에 대한 파선추적을 지진요소 결정 프로그램에 첨가함으로써 비교적 정확한 파형의 전파 경로를 설정할 수 있었으며, 반사파와 굴절파를 이용함으로써 진원의 깊이 결정의 정확성을 향상시킬 수 있었기 때문이다.

Fig. 6은 1996년 12월 13일 영월지진의 본진(a)과 여진(b)의 주시곡선이다. 본진의 규모는 4.3이고 여진의 규모는 3.0이다. 이 두 지진의 기록에서 규모가 큰 본진은 7.93, 6.72 및

3.77km/sec의 속도를 갖는 Pn, PmP 및 SmS 파형이 명확하게 관찰되었으나 규모가 작은 여진은 6.7과 3.77km/sec의 속도

를 갖는 PmP와 SmS 파형만이 관찰되었다. 이러한 현상은 Pn 대 잡음의 진폭비가 낮아 이론상 초동파인 Pn은 지진기록에 나타나지 않고 PmP가 초동파인 것처럼 보이기 때문이다. 이 연구에서는 본진의 지진요소 결정을 위하여 초동파로 도착하는 Pn과 파형구분이 용이한 SmS를 이용하였고, 여진의 경우 PmP와 SmS를 이용함으로써 지진요소 결정에서 오차를 줄일 수 있었다. 또한 두 지진의 각각의 파형에 대한 주시곡선은 거의 직선에 가까우며 동일 파형의 속도는 거의 같은 값을 나타낸다.

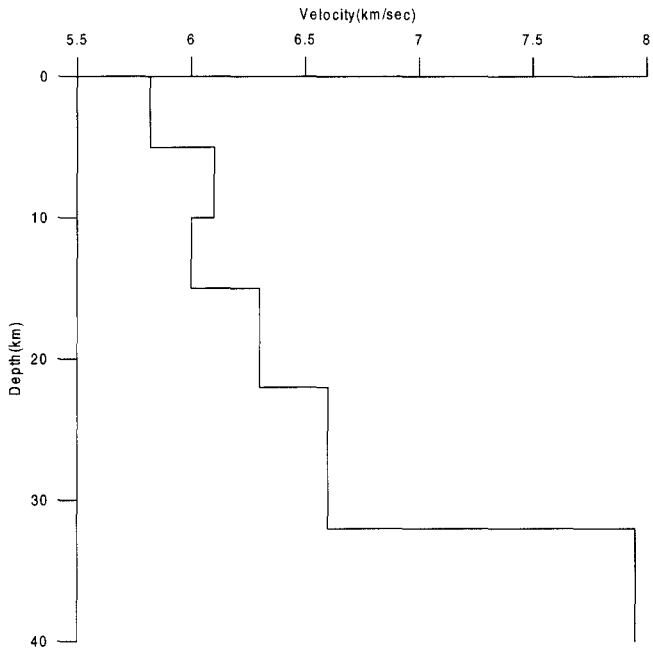


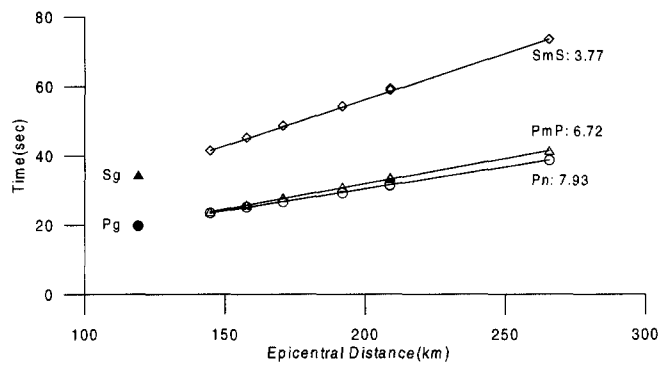
Fig. 5 P wave velocity structure of crust used this study. P-wave velocities of 6 layers are 5.82, 6.10, 6.00, 6.30, 6.60, and 7.95km/sec from top to bottom layer

4. 결 론

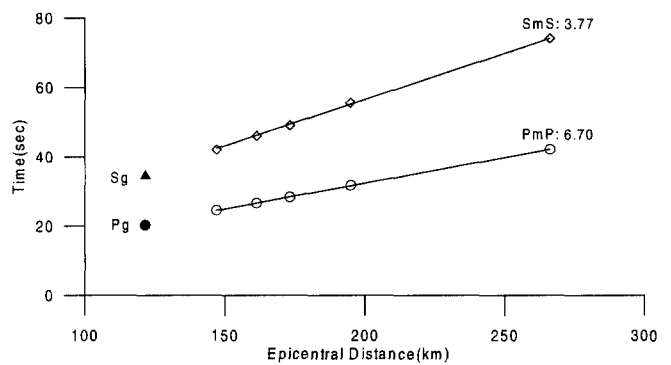
이 연구에서 개발한 파형분석과 두 점을 잇는 파선추적을 적용한 지진요소 결정방법은 기존의 방법보다 정확성과 신뢰도가 향상되었다. 지진규모가 작고 Pn이 초동파로 도착하는 경우, Pn의 진폭이 잡음보다 작아 보이지 않고 반사파인 PmP가 초동파인 것처럼 기록될 수도 있다. 뿐만 아니라 초동파로 Pn이 기록된 지진기록에서도 Sn의 구분은 매우 어려우며 대신 진폭이 큰 SmS가 명확하게 구분된다. 이러한 경우 초동파로 보이는 파형이 Pn 혹은 PmP 인지를 구분하는 것이 지진요소 결정에 중요한 요인이며, 구분이 비교적 용이한 파형에 대한 두 점을 잇는 파선추적법을 기존의 지

Table 1 Comparison between hypocentral parameters calculated by KIGAM(upper) using the existing method and by the technique in this study (lower) using the method developed in this study for 5 earthquakes

Origin time		Latitude (degree)	Longitude (degree)	Depth (Km)	Magnitude	RMS error
(Y/M/D)	(h:m:s)					
1996/ 6/21	01:04:07.77	36.0353N	126.9000E	2.30	3.2	0.56
	01:04:07.36	36.0376N	126.9017E	13.95		0.12
1996/12/13	13:10:18.16	37.1667N	128.6393E	7.73	4.3	0.58
	13:10:17.61	37.2191N	128.7697E	10.24		0.09
1996/12/13 (여진)	13:27				3.0	
	13:27:06.93	37.2262N	128.6951E	12.98		0.07
97/ 8/ 5	12:45:53.29	36.7242N	128.3907E	4.49	3.3	0.36
	12:45:53.83	36.7027N	128.3767E	18.25		0.08
97/10/18	19:35:31.31	37.2185N	128.6892E	1.51	3.0	0.63
	19:35:31.80	37.2170N	128.7073E	20.22		0.03



(a) Mainshock



(b) Aftershock

Fig. 6 Travel time curves for the mainshock of the Yeongweol Earthquake and its aftershock

진요소 결정 프로그램에 적용함으로써 비교적 정확한 지진 요소를 결정할 수 있었다. 이 연구에서 개발한 지진요소 결정 알고리즘을 한반도에서 발생한 지진에 적용한 결과 기존의 지진요소 결정 알고리즘보다 rms 오차가 크게 줄었고 진원깊이도 일반적으로 깊게 결정되었다.

감사의 글

이 연구는 한국과학기술평가원 자연재해방재 기술개발사업단과제(00-J-ND-01-B-19)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Kim, W., Park J., and Baag, C. E., "Phase analysis using directionality and rectilinearity functions in three component seismograms," *Bull. Seismo. Soc. Am.*(submitted)
2. Kim, W. and Baag, C. E., "Rapid and accurate two point ray tracing based on a quadratic equation of take-off angle in layered media with constant or linearly varying velocity function," *Bull. Seismo. Soc. Am.*, 2001.(Submitted)
3. Richter, C. F., *Elementary Seismology*, W. H. Freeman and Co., San Fransisco and London, 1958, pp. 365.
4. Kim, W., "P-wave velocity structure of upper crust in the vicinity of the Yangsan Fault region," *Geosciences*, Vol. 3, 1999, p. 17-22.