

파형 분석과 두 점을 잇는 파선추적을 이용한 진원요소 결정

Determination of Hypocentral Parameters using Phase Identification and Two Point Ray Tracing

박 종 찬¹⁾ 김 우 한²⁾
Park, Jongchan Kim, Woohan

요 약

파형분석과 두 점을 잇는 파선추적은 진원요소 결정의 정확성을 향상시키는 주요한 요인이다. 본 연구에서는 3성분 지진기록의 직선형도(rectilinearity) 함수와 방향성(directionality) 함수를 사용하여 파형분석한 결과와 두 점을 잇는 파선추적을 기존의 진원요소결정 프로그램에 적용하여 진원요소 결정의 정확성을 증가시켰다. 지진의 규모가 작을 때 Pn이 보이지 않고 PmP가 초동파로 기록된 것처럼 보인다. 이러한 지진에서는 주어진 진앙거리에서 최소 주행시간이 걸리는 P파와 S파의 초동파만 사용한 기존의 진원요소 결정 방법과 본 연구에서 PmP와 SmS를 사용한 결과는 매우 큰 차이를 보인다.

주요어: 진원요소결정, 직선형도와 방향성 함수, 두 점을 잇는 파선추적

ABSTRACTS

The phase analysis and the two point ray tracing are important factors to increase the accuracy of determination of hypocentral parameters. The accuracy of determination of hypocentral parameters is increased by applying the phase analysis using the rectilinearity and directionality functions of three component seismograms and the two point ray tracing. The Pn phase may not be observed, but the PmP phase which looks like the first arrival phase may be observed when the magnitude of earthquake is relatively small(usually $m_b < 3.2$). There is large difference in the results of hypocentral parameters, which are calculated from the existing method using P and S phase and from the method used in this study using PmP and SmS phases.

Key words: determination of hypocentral parameters, rectilinearity and directionality functions, two point ray tracing

1) 경상대학교 지구환경과학과 석사
2) 정회원 · 경상대학교 지구환경과학과 부교수

I. 서 론

정확한 진원요소 결정을 하기 위해서는 먼저 각 관측소에서 기록된 지진기록의 정확한 파형분석과 각 관측소 기록을 사용한 역산 알고리즘의 정확성에 기인한다. 본 연구에서는 진원요소 결정의 정확성을 개선하기 위하여 새로운 파형분석 방법과 초동파가 아니라도 분석된 각 파형을 두 점을 잇는 파선추적을 기존의 진원요소 결정 알고리즘에 적용하였다.

본 연구는 크게 두 부분으로 나눌 수 있다. 첫 번째 부분은 3성분 지진기록을 이용하여 각 점에서 공분산행렬을 정의하고 이 행렬의 고유값과 고유벡터를 계산하여 직선형도 함수와 방향성 함수를 동시에 계산하여 파형을 분석하는 것이다. 이 방법은 비선형 필터와 파소 변환에서 사용된 직선형도 함수를 사용하지만 그 특징은 다르다. 비선형 필터에서는 필터로 사용하기 위하여 직선형도 함수에 smoothing 인자를 곱했기 때문에 직선형도 함수만으로는 파형분석이 불가능하다(Flinn⁽¹⁾). 또한 파소 변환에서는 각 준위마다 직선형도함수를 구한 후, 각 준위의 직선형도 함수를 곱하여 합성 직선형도함수를 정의하였기 때문에 사용된 최대 준위에 따라 차이가 날 수 있으며 또 실제 지진기록을 각 준위별로 분해하는 과정에서 실제 기록이 변형될 수 있는 관계로 정확성에 문제가 발생할 수 있다. 특히 파소 변환에서는 S파군의 분석은 비효율적이다(김우한 외⁽²⁾). 두 함수의 계산결과 P파군의 파형은 직선형도 함수에 민감하게 반응하고 S파군의 파형은 방향성 함수에 민감하게 반응한다. 이 두 함수의 파형의 도달시간은 창 크기에 따라 약간의 차이를 보이므로 창 크기를 줄여가면서 안정된 값을 얻을 수 있다. 이 파형 분석법은 기존의 방법보다 매우 간단하며 정확성과 안정성이 뛰어나며, 특히 실체파의 파형분석에 효과적이다.

두 번째 부분은 파형분석의 결과를 이용하여 진원요소를 결정하는 것이다. 기존의 진원요소 결정 프로그램은 비교적 파형구분이 용이한 초동파만 사용하였다. 그러나 규모가 작은 지진의 경우 Pn이 초동파로 도착해야 하는 지점에서 Pn 대 잡음의 비가 작아서 Pn은 지진기록에 보이지 않고 PmP가 초동파로 도착하는 것처럼 보이는 경우가 있을 뿐만 아니라 Pn이 명확하게 구분되더라도 Sn의 구분이 쉽지 않으므로 초동파만을 이용하여 계산한 진원요소는 정확하지 못한 결과를 산출할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 초동파가 아니더라도 구분이 명확한 파형의 도달시간을 이용하여 진원요소를 결정하는 프로그램을 개발하고 이를 이용하여 진원요소를 결정한다. 이때 파의 경로로부터 발생하는 오차를 최소화하기 위하여 Kim과 Baag⁽³⁾에 의해 개발되었던 두 점을 잇는 파선 추적법이 적용된다. 여기에서 Pn, Sn, PmP 및 SmS 파형은 주시곡선에서 각 파형의 기울기(속도)를 이용하여 계산한 속도로 일차적으로 구분하였다.

II. 직선형도와 방향성 함수

일반적으로 P파 계열의 파형은 파의 진행방향과 평행하게 선형적으로 입자운동이 일어

나며, 반면 S파 계열의 파형은 파의 진행방향에 수직인 두 방향으로 입자운동이 일어난다. 본 연구에서는 3성분 지진기록에서 이러한 입자운동의 특성을 이용해서 새로운 파형이 도달할 때 그 값이 급격히 변화하는 함수를 소개하고, 이를 이용하여 파형의 도달시간을 계산하고자 한다.

i 번째 성분의 N 개의 관측값 X_{ij} ($i=1,2,3$ and $j=1,\dots,N$)의 평균값을 식(1)에서 μ_i 로 정의한다.

$$\mu_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ij} \quad (1)$$

식 (1)에서 구한 μ_i 를 이용하여 두 성분 X_1 과 X_2 의 사이의 공분산을 계산하면 식(2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Cov(X_1, X_2) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (X_{1j} - \mu_1)(X_{2j} - \mu_2) \quad (2)$$

식 (2)에서 구한 공분산을 이용하여 3성분 지진기록에 대한 공분산행렬을 정의하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M = \begin{bmatrix} Var(X_1) & Cov(X_1, X_2) & Cov(X_1, X_3) \\ Cov(X_1, X_2) & Var(X_2) & Cov(X_2, X_3) \\ Cov(X_1, X_3) & Cov(X_2, X_3) & Var(X_3) \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기에서 X_1, X_2, X_3 는 3성분 지진기록의 연직, 북-남, 동-서 성분을 나타내며, $Var(X_i)$ 는 $Cov(X_i, X_i)$ 을 의미한다.

공분산행렬이 대칭행렬이기 때문에 3개의 고유값은 실수이고, 모두 양수로 정의된다. 이렇게 구한 고유값들은 파형의 극성화 정도를 나타내기 때문에 상호간의 비를 이용함으로써 파형의 도달시간을 계산할 수 있다. 이러한 성질을 이용한 함수를 직선형도 함수라 하고, 다음과 같이 계산한다.

$$R = \left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^n \quad (4)$$

여기에서 고유값의 크기는 $\lambda_1 \gg \lambda_2 \gg \lambda_3$ 순이고, n 은 정수이며 신호 대 잡음(noise)의 비를 향상시키기 위해서 사용된다. 본 연구에서는 $n=2$ 를 사용한다. P파의 경우 한 방향으로 입자운동이 일어나므로 λ_1 값이 나머지 두 값에 비해 상대적으로 크게 나타나므로 직선형도 함수를 이용함으로써 도달시간을 계산할 수 있다. 그러나 S파는 두 방향으로 입자운동이 일어나므로 두 고유값의 크기가 비슷하다. 그러므로 직선형도 함수는 S파형의 구분에는 유용하지 못하다.

본 연구에서는 S파의 구분을 위해서 방향성 함수를 이용한다. 방향성 함수는 가장 큰 고유값의 고유벡터를 이용한 함수로서 다음과 같이 계산한다.

$$D = 1 - |e_b \cdot e_i| \quad (5)$$

여기에서 e_b 는 P파의 초동파가 우세한 특정지점에서의 공분산행렬의 가장 큰 고유값에 대

용하는 고유벡터이고, e_i 는 시간영역의 각 점에서 공분산행렬의 고유벡터들이다. e_6 는 P파가 우세한 지역에서의 고유벡터의 값이기 때문에 P파군의 파형이 도달할 때, 두 벡터의 방향이 거의 일치하므로 내적은 '1'에 접근한다. 그러므로 방향성 함수의 값은 '0'에 접근한다. 역으로 S파군의 파형이 도달할 때, 두 벡터의 내적의 값은 '0'에 접근하며 방향성 함수의 값은 '1'에 접근한다. 이러한 특성은 S파의 도달시간 계산에 유용하게 사용된다.

III. 파형구분의 방법 및 결과

본 연구에서 사용된 지진기록은 경상분지 내 한국자원연구소 지진관측망에 기록된 3성분 지진기록으로, 표본추출간격(sampling interval)이 0.01-0.02 초이다. 이상에서 소개한 알고리즘을 이용하여 파형분석을 실시하였다. 직선형도와 방향성 함수를 계산하기 위해서는 먼저 각 점에서 일정한 크기를 갖는 점렬창(T- point window)을 이용하여 공분산행렬 M 를 정의한다. 이 때 정의된 공분산행렬의 고유값과 가장 큰 고유값의 고유벡터를 이용하여 두 함수를 계산한다.

P파군의 파형구분을 위해서 사용되는 직선형도 함수는 파형이 도달하는 지점에서 갑자기 값이 증가하는 양상을 보인다. 그 이유는 새로운 파형이 도달할 때 기존의 입자운동의 양상이 파괴되면서 새로운 운동양상을 보이기 때문이다. 반면 S파군의 파형구분을 위해서 사용되는 방향성 함수의 경우 기준이 되는 벡터가 P파의 초동과가 우세한 부분의 고유벡터의 값이기 때문에 P파군의 파형이 도달할 때 급격히 감소하는 양상을 보이고 S파군의 파형이 도달하는 지점에서 갑자기 증가하는 양상을 보인다. 이 함수는 직선형도 함수에 비해 새로운 파형의 도달지점에서 민감하게 반응한다. 특히 S파군의 파형이 도달하는 지점에서의 고유벡터의 방향은 기준이 되는 P파의 고유벡터의 방향과 거의 수직을 이루므로 S파군의 파형분석에 유용하게 사용된다. 또한 창의 크기의 변화에 따른 고유벡터의 변화량은 고유값의 변화량보다 훨씬 크므로 최소 크기의 창을 선택하는 것이 유리하다. 특히 기준이 되는 고유벡터는 P파의 초동과 입자운동의 방향과 일치해야 하므로 작은 창을 사용하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 기준이 되는 고유벡터를 계산하기 위해서 각 점에서 정의되는 고유벡터를 계산하기 위해서 사용한 창의 크기에 절반에 해당하는 창을 사용하였다.

그림 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 도달지점에서 방향성 함수는 직선형도 함수보다 훨씬 더 민감하게 반응하였다. 이상의 두 함수는 파형의 전파 특성에 의한 입자운동의 변화양상과 밀접한 관계가 있으므로 두 함수를 동시에 사용함으로써 파형 분석의 정확성과 신뢰성을 높일 수 있었다.

IV. 진원요소의 결정

기존의 진원요소결정 프로그램은 주어진 진앙거리에서 최소 주행시간이 걸리는 초동파의 도달시간을 계산하여 진원요소를 결정하였다. 일반적으로 진앙거리가 130km 이상인 지점에서는 진원의 깊이와 관계없이 Pn이 초동파로 도착해야하나 한반도에서 발생하는 지진과 같이 규모가 3.0 이하의 지진에서는 Pn의 진폭이 잡음의 진폭보다 작아 보이지 않고 반사파인 PmP가 초동파인 것처럼 기록될 수도 있다. 이런 경우 초동파로 도착하는 PmP를 Pn으로 해석하여 진원요소 결정에 어려움을 겪을 수도 있다. 그림 2는 지진의 규모가 4.3이고 진앙거리가 192km인 영월지진을 BBK 관측소에서 기록한 연직성분과 쿠텐베르그의 규모식 ($\log E = 5.8 + 2.5m_b$)을 이용하여 지진의 규모를 줄이면서 잡음과 P파의 초동파인 Pn의 변화양상을 나타낸 것이다. 여기에서 잡음은 관측소에서 나타나는 기본 잡음이기 때문에 지진의 규모와 상관없이 동일하다고 가정한다. 이 그림에서 지진의 규모가 3.3일 때 잡음과 Pn의 구분이 모호해진다. 만약 영월지진의 규모가 3.3이었다면 이러한 현상으로 인해 BBK 관측소에서 초동파로 관측되는 PmP를 Pn으로 해석하여 바람직하지 못한 결과를 산출할 수도 있다. 뿐만 아니라 초동파로 Pn이 기록된 지진기록에서도 Sn의 구분은 매우 어려우며 대신 진폭이 큰 SmS가 명확하게 구분된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 연구에서는 구분된 파형을 이용하여 주시곡선을 그리고 주시곡선의 기울기를 계산하여 파형의 종류를 정의하였다. 일반적으로 Pn의 속도는 7.95km/sec 정도이므로 주시곡선상의 초동파의 속도가 6.5km/sec \pm 0.3 근처이면 이 파형은 Pn으로 보기 어렵고 PmP의 가능성이 크다. 이와 같이 같은 지진이라도 구분 가능한 파형의 종류가 다르므로 본 연구에서는 초동파가 아니라 더라도 구분이 용이한 특정 파형을 사용하여 진원요소를 결정함으로써 기존의 진원요소결정 프로그램의 문제점을 해결하고 진원요소 결정의 정확성을 높였다.

표 1은 앞서 언급한 분석 알고리즘을 이용하여 계산한 파형분석의 결과를 각 파형에 따라 두 점을 잇는 파선추적 알고리즘을 기존의 진원요소 결정 프로그램에 적용하여 얻은 4개 지진에 대한 진원요소와 한국자원연구소에서 계산한 결과를 비교한 것이다. 본 연구의 결과는 한국자원연구소에서 기존의 진원요소 결정 알고리즘으로 구한 결과에 비해 오차가 현저히 줄었고 진원의 깊이가 5-10km 깊게 나타났다.

그림 3는 1996년 12월 13일 영월지진의 본진(a)과 여진(b)의 파형분석 결과를 주시곡선을 나타낸 것이다. 본진의 규모는 4.3이고 여진의 규모는 3.0이다. 이 두 지진기록에서 규모가 큰 본진의 경우 주시곡선에서 보듯이 Pn, PmP 및 SmS의 속도가 7.93, 6.72 및 3.77 km/sec로 명확하게 관찰되었으나 규모가 작은 여진의 경우 주시곡선상에 6.7과 3.77km/sec인 두 종류의 파형만이 관찰되었다. 이는 Pn대 잡음의 진폭비가 낮아 이론상 초동파인 Pn은 지진기록에 나타나지 않고 본진의 주시곡선과 비교할 때, PmP가 초동파인 것처럼 보인다. 본 연구에서는 본진의 진원요소 결정을 위해서 초동파로 도착하는 Pn파 파형구분이 용이한 SmS를 이용하였고, 여진의 경우 PmP와 SmS를 이용함으로써 진원요소 결정에서 오차를 줄일 수 있었다. 또한 두 지진의 각 주시곡선은 거의 직선에 가까우며 동일 파형의 속

도는 거의 같은 값을 나타낸다.

V. 결 론

3성분 지진기록의 입자운동의 특성을 이용한 직선형도와 방향성 함수는 기존의 방법보다 간단하고 안정성과 정확성이 뛰어나므로 파형분석을 위한 유용한 방법이다. 이 두 함수는 파형의 전파 특성 및 파형의 종류에 따라 약간의 다른 양상을 보일 수 있으므로 정확한 파형분석을 위해서는 한가지 방법을 사용하는 것보다 두 가지 방법을 동시에 사용하는 것이 유리하다. 대체로 P파의 도달시간 측정에는 직선형도 함수가 유리하였고, S파는 방향성 함수가 유용하게 사용되었다. 또한 두 함수는 창의 크기에 따라 약간의 시간지연이 일어날 수 있으므로 적당한 크기의 창의 결정이 중요하였다.

한반도에서는 대체적으로 지진규모가 3.0 이하이고 진앙거리가 130km 이상인 경우 최초로 도착하는 Pn(모호면에서 굴절파)은 잡음보다 진폭이 작아 보이지 않고 반사파인 PmP가 초동파인 것처럼 기록될 수도 있다. 특히 초동파로 Pn이 기록된 지진기록에서도 Sn의 구분은 매우 어려우며 대신 진폭이 큰 SmS가 명확하게 구분된다. 특히 지진의 규모가 작을 경우 초동파와 잡음의 진폭비가 낮아 초동파를 구분할 수 없는 관계로 구분 가능한 PmP 및 SmS 파형에 대한 두 점을 잇는 파선추적을 적용하여 기존의 진원요소 결정 프로그램을 개선함으로써 비교적 정확한 진원요소를 구할 수 있었다. 그러나 진원요소는 주어진 지각의 속도구조에 따라 약간의 차이를 보이므로 진원요소 결정의 신뢰성을 높이기 위해서 한반도 지각구조에 대한 지속적인 연구가 수반되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Flinn, E. A., "Signal analysis using rectilinearity and direction of particle motion", Proceedings of the IEEE, 53, 1965, 1874-1876.
2. 김우한 · 박종찬 · 조한상, "3성분 지진기록의 파소변환을 기초로한 직선형도와 평면형도 함수를 이용한 파형구분", 대한지질학회지, 36권, 2000, 153-162.
3. 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", Submitted to Bull. Seismo. Soc. Am., 2000.

Table 1. A comparison between results of hypocentral parameters, which are calculated from the existing method in KIGAM(top) and from the method used in this study(bottom) for 4 earthquakes.

Origin time (Y/M/D)	Origin time (h:m:s)	Latitude (degree)	Longitude (degree)	Depth (Km)	Magnitude	RMS error
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 (aftershock)	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
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

Figure caption

1. Three component seismograms, rectilinearity function R and directionality function D for December 13, 1996 Yeongweol earthquake recorded at MKL station, whose epicentral distance is 171 km.
2. Vertical component of a three component seismograms for December 13, 1996 Yeongweol earthquake recorded at BBK station whose epicentral distance is 192km. Based on real earthquake data (top), the seismograms depending on magnitude are recalculated by keeping the noise level in the real earthquake data.
3. Travel time curves for December 13, 1996 Yeongweol earthquake(a) and aftershock(b).

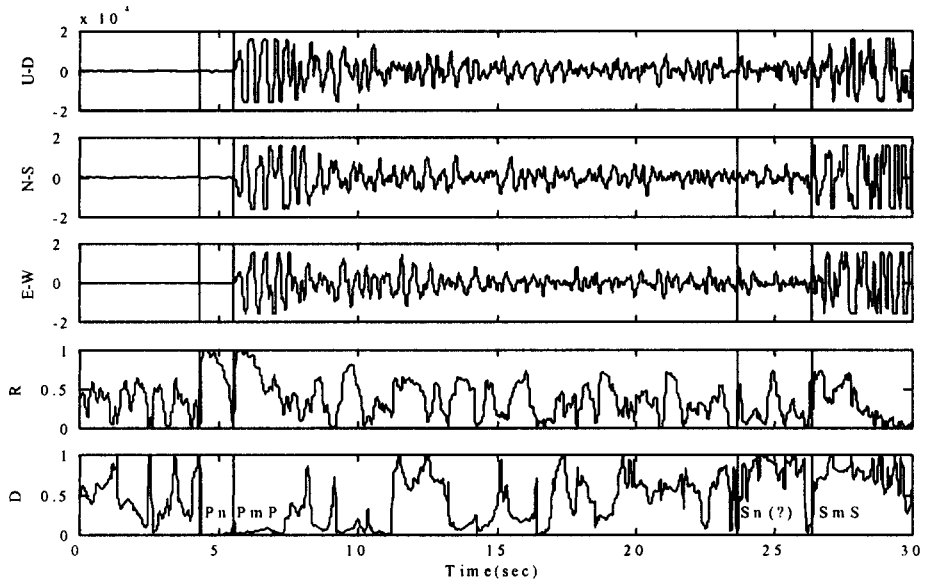


Figure 1

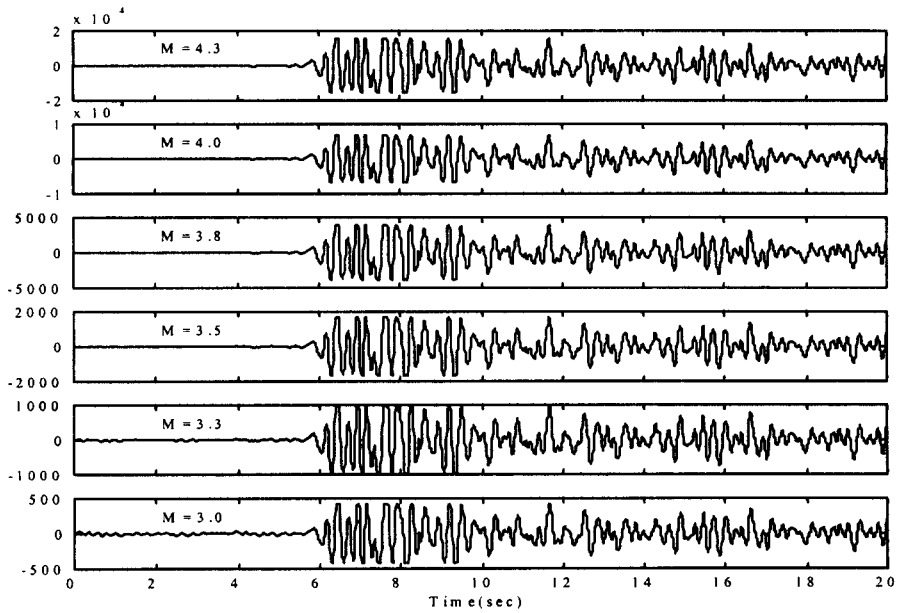


Figure 2

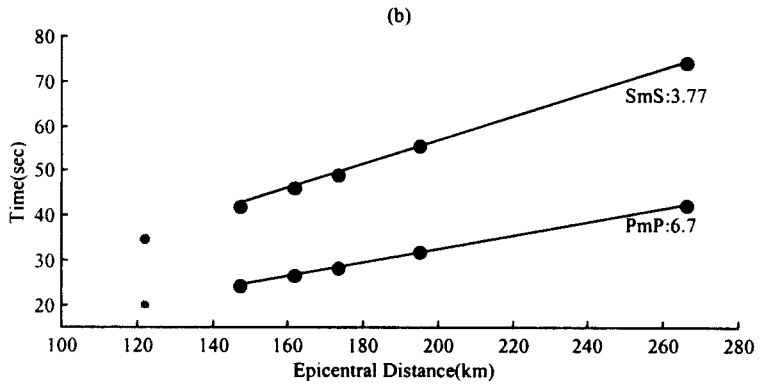
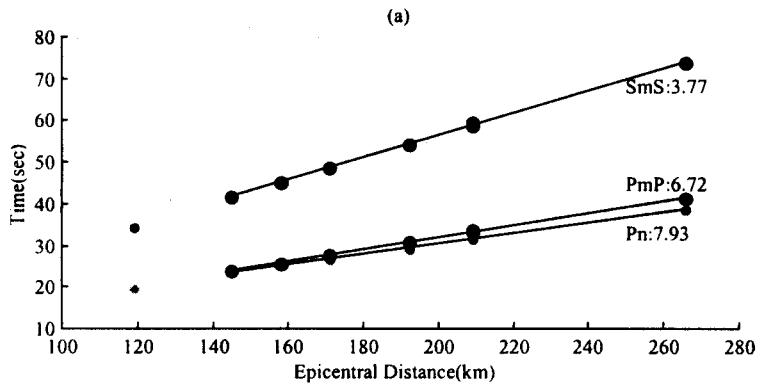


Figure 3