

## 초동 P파를 이용한 조기 규모추정에 관한 연구

### The study on rapid magnitude estimation using first arrival.

황의홍\* 조봉곤\*\* 류용규\* 신동훈\* 김수경\*\*\*\* 윤용훈\*\*\*  
Eui-Hong Hwang Bong-Gon Jo Yong-Gyu Ryou Dong-Hoon Sheen Su-kyoung Kim  
Yong-Hoon Youn

-----  
ABSTRACT

We have been conducting several studies on providing information to the public promptly as soon as earthquake occurs. Recently, JMA proposed a method for warning big earthquakes by observing the first 2 seconds after the first arrival. In this study, the envelope of the absolute value of the first 2 seconds after the first arrival is calculated, and then the relation of epicentral distance and slope of envelope, parameter B, is obtained. This result is applied to local magnitude equation of KMA, which then gives us a new magnitude equation from which can estimate the magnitude using maximum amplitude of P wave. We applied the method to two recent earthquakes; Ulsan and Daegu. The results using only the vertical components show that the magnitudes are lower than those calculated by the local magnitude equation of KMA. However, when we apply the method to the 3 components of maximum displacements, the results corresponds with those obtained from the local magnitude equation.

-----

#### 1. 서론

최근 지진경보시스템은 점차 좀더 정확한 정보보다는 좀더 빨리 지진정보를 전달할 수 있도록 발전하고 있다. 일반적으로 여러 관측소에서 기록된 지진관측 자료를 이용하여 지진정보 즉 발생시간, 위치, 크기등을 결정하는 방법은 약간의 차이는 있을 수 있으나 본질적인 원리는 유사하다고 할 수 있으며 이미 다수의 분석 시스템에서 사용되고 있고 또한 정확도 향상을 위한 개발도 이어지고 있다. 그러나 이러한 방법은 지진발생후 일정 시간 분석시간이 소요되므로 그만큼 지진정보를 빠르게 전달한다는 의미에서는 시간적인 지연소요가 될 수 있다. 최근의 비약적인 컴퓨터의 속도 향상과 다양한 방식의 매체 전달이 가능한 기술들이 실용화 되면서 지진발생시 이 사실을 전달하기 위해서 신속하게 지진정보를 추정하기 위한 기법들이 개발되어야 할 필요가 있다.

현재까지 단일 지진관측소에서 관측된 자료를 이용해 지진정보를 추정하고 강진동이 전달될 지역을 예측할 수 있는 방법들이 일부 개발되어 있다. 이와 같이 단일관측소의 정보만을 이용하여 지진정보를 추정한다는 것은 그 정확도에서는 다수의 관측소를 이용할 경우보다 낮을 수 있지만 그 정보를 전달한다는 의미에

\* 정회원 : 기상연구소 해양기상지진연구실 기상연구소

\*\* 정회원 : 전북대학교 지구환경과학부 교수

\*\*\* 기상연구소 해양기상지진연구실 기상연구관

\*\*\*\* 학생회원 : 기상연구소 해양기상지진연구실 연구원

서는 분명 빠르다는 절대적인 이점을 가질 수 있고 지진재해를 위한 유용성은 매우 크다고 할 수 있다. 현재 지진정보를 신속하게 추정하고 전달 가능한 시스템이 일본의 철도분야에서 실용화된 UrEDAS (Urgent Earthquake Detection and Alarm System)이다. 이 시스템은 P파를 감지한 후 3초간의 지진파를 이용하여 지진원을 추정하고, P파와 S파의 전파속도차를 이용하여 강진동이 전달될 수 있는 지역을 달리고 있는 열차에 대해 정보를 발송하는 시스템이다. 또한 일본 기상청은 단일 관측점에서 관측된 지진파형을 이용해 지진발생 위치의 방향을 추정하고, 또한 P파 도착후 2~3초간의 자료만을 이용하여 규모를 추정하는 방법으로 실제 지진발생 사실을 알리기 위한 목적으로 운영중에 있다(Kamigaichil,2005). 앞서 설명한 UrEDAS 시스템에서는 P파의 초기 도달자료로부터 우세주기를 계산하고 이를 이용하여 규모를 추정하고 있으며, Lockman & Allen(2005)은 P파의 우세주기와 규모와의 상관관계를 분석하므로써 규모를 조기에 추정할 수 있는 방법을 제안하였다.

본 연구에서는 일본 기상청에서 실제 운영중인 단일 관측소에 P파 도달이후 2~3초간의 자료를 사용하여 규모를 추정하는 과정 및 결과를 고찰하고 국내에서 발생한 지진을 대상으로 적용하므로써 이러한 기술이 국내에서도 적용가능한지에 대해 알아보았다.

## 2. 규모 추정 방법

Odaka 등(2003)은 P파 도달후 2~3초의 지진파로부터 규모를 추정하기 위하여 그림1에서와 같이 지진파의 진폭을 절대치화한 후 로그 스케일로 나타냈다. 그 결과 진앙거리가 큰 경우 또는 규모가 작은 경우에는 진폭의 평균치가 작고 반대로 진앙거리가 작고 규모가 큰 경우에는 진폭의 평균치가 크다는 것을 알았다(그림 2). 또한 규모가 큰 경우에는 P파 진폭이 증가방향으로 지속시간이 길고 반대의 경우에는 지속시간이 짧게 나타났다. 이러한 차이로부터 P파 진폭의 증가율과 포락선 파형의 기울기가 진앙거리 및 규모와 일정한 관계를 갖는다는 것을 발견하였다(Odaka et al, 2003).

실제의 지진파의 파형을 분석한 결과(그림 2) 규모가 다른 2개의 지진에 대해서 진앙거리가 가까운 경우와 먼 경우 모두 유사한 형태를 보여주었다. 이와 같이 P파의 도달 시간으로부터 2~3초동안의 지진파를 절대치화하고 이 파형의 포락선을 구하므로써 P파 초동부의 포락선 기울기와 진폭의 시간변화로부터 진앙거리에 따른 일정한 관계를 찾을 수 있다. Odaka 등은 그림 1의 P파 도달시각을 기준으로 일정 구간의 포락선 함수를 구하기 위하여 다음과 같은 회귀선을 제안하였다.

$$Y = Bt * \exp(-At) \quad (t \geq 0) \quad (1)$$

식 1에서 t는 P파 도달 후의 시간을 나타내며 최소자승법을 통해 A,B의 값을 구하므로써 절대치한 파형의 최고값들을 유지하는 회귀선을 구할 수 있다.

이러한 과정을 통해 지진발생 후 P파가 관측된 관측소의 지진파로부터 계수 B를 구하여 진앙거리와의 상관관계를 구할 수 있다. 그림 3은 일본의 지진자료를 이용하여 결정된 계수 B와 진앙거리의 상관관계를 예로 제시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 계수 B와 진앙거리를 로그축으로 나타내면 일정한 선형의 관계를 보여준다. 여기서 얻어진 선형관계식을 국지지진규모식의  $\log(\Delta)$

항에 적용하여 수정된 새로운 규모식을 작성하게 되므로써 P파의 최고진폭과 계수 B를 사용하여 규모를 추정할 수 있다.

### 3. 국내 지진파를 이용한 자료처리

P파 도달이후의 지진자료를 절대치화한 파형의 최대값들로부터 회귀선을 구하기 위하여 본 연구에서는 최소자승법을 이용하여 계수 A, B를 구하였다. 최소자승법의 정의에 의해서

$$S = \sum_i (y_i - Y_i)^2 \quad (2)$$

회귀선을 위한 커널함수  $Y_i = B t_i e^{-A t_i}$  를 식2에 삽입하고 계수 A, B에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} A \\ \ln B \end{pmatrix} = \frac{1}{D} \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서  $a_{11} = -n$ ,  $a_{12} = \sum_i t_i$ ,  $a_{21} = -\sum_i t_i$ ,  $a_{22} = \sum_i t_i^2$ ,  $b_{11} = \sum_i \ln t_i - \sum_i \ln y_i$

$b_{11} = \sum_i t_i \ln t_i - \sum_i t_i \ln y_i$ ,  $D = -\sum_i n t_i^2 + \sum_i t_i \sum_i t_i$  이고  $t_i$ 는 각 샘플의 도달시간이다.

따라서 식 3로부터 계수 A와 B는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A = \frac{1}{D} (a_{11} b_{11} + a_{12} b_{21}) \quad (4)$$

$$\ln B = \frac{1}{D} (a_{21} b_{11} + a_{22} b_{21}) \quad (5)$$

계수 A와 B를 구하기 위해서 P파 도달후 1.5초와 2초의 데이터를 이용하여 그 관계를 살펴보았다. 그림 4에서와 같이 2개의 시간창을 사용한 결과는 비교적 선형적인 관계를 보여주는 것으로 나타났다. Odaka et al(2003)는 시간창을 2초와 3초로 사용한 결과 거의 유사한 결과를 얻었다고 하였으며 특히 규모 4이하의 지진은 그 시간창을 2초 이하로 사용할 것을 제안하였다. 본 연구에서는 1.5초의 시간창을 적용한 결과보다 2초의 시간창을 적용했을때 그 회귀선이 잘 일치하였다. 그림 5는 2초의 시간창을 이용하여 2004년 5월 29일에 발생한 울진 지진을 대상으로 최소자승법에 의해 계수 A와 B를 구하고 P파와 회귀선을 나타낸 것이다. 4개의 관측소 자료 모두 P파의 도달 시간 이후 최대값을 유지하면서 회귀선이 잘 맞는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 2004~2005년 동안 기상청에서 지진발표를 한 규모 2.0 이상인 총 79개의 이벤

트에 대해서 각 관측소의 계수 A와 B 값을 계산하였다. 계산 결과 얻어진 계수 B와 진앙거리를 각각 로그축에서 보면 그림 6과 같이 일정한 선형 관계를 보여주는 것으로 나타났다. 이 결과로부터 얻어진 계수 B와 진앙거리 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$\log(\Delta) = -0.5568 * \log(B) + 1.5635 \quad (6)$$

식 6의 결과로부터 단일 관측점의 P파 도달후 2초 이내에 대략적인 진앙거리를 추정할 수 있다. 이와 같이 진앙거리가 추정 가능하다면 현재 일반적으로 사용하고 있는 국지규모식에 의해 대략적인 규모를 추정할 수 있다. 그러나 이와 같은 방법이 N초간의 최대진폭값을 이용해 추정한 규모이므로 원칙적인 규모의 정의에 비해서는 그 의미나 적용범위에 있어서 정확한 과학적 해석을 하기에는 무리가 있다. 다만 지진발생 후 단시간내에 추정 규모를 이용하여 일정거리 이상의 지점에 더 큰 진동이 올 수 있다는 정보를 알려줄 수는 있을 것이다.

본 연구에서는 현재 기상청에서 사용하는 국지규모식에 식 6의 관계식을 적용하여 추정 규모를 계산하였다. 현재 기상청은 Tsuboi의 지진규모식으로부터 얻어진 다음과 같은 국지규모식을 사용하고 있다(기상연구소,1999).

$$M_L = \log(A_{max}) + 1.73 \log(\Delta) - 0.83 \quad (7)$$

여기서  $\Delta$ 는 진앙거리(km)이며  $A_{max}$ 는 수평 성분의 최대진폭값이다. 본 연구에서는 식 6의 진앙거리와 계수 B의 관계식을 식 7에 삽입하여 다음과 같이 규모식을 수정하였다.

$$M_p = \log(A_{pmax}) - 0.96 \log(B) + 1.88 \quad (8)$$

식 8의 규모식에서 사용되는 최대진폭은 수직성분에서 P파 도달 후 2초 동안의 최대변위를 mm로 얻은 값이다. 표 1에서 이러한 기상청의 국지규모식을 수정한 규모식(식 8)로부터 올진 지진을 기록한 관측소의 규모를 정리하였다. 비교를 위해서  $M_p$ 를 계산하기 위해서 수직 성분의 최대진폭을 사용했으므로 지진과 전체 구간의 수직성분의 최대진폭을 이용하여 국지규모( $M_L$ )를 계산하여 보았다.

그림 7(a)는 표1의 계산 결과를 진앙거리에 대해서 도시한 것으로 계수 B를 이용하여 계산된 규모가 실제 규모보다 작게 얻어진 것을 알 수 있다. 그림 7(b)는 2004년 4월 26일 대구 인근 지역에서 발생한 규모 3.9의 지진에 대한 결과로 올진 지진의 결과에서처럼  $M_L$ 과  $M_p$  규모가 차이가 있는 것으로 나타났다. 최근 일본 기상청에서는 3성분의 벡터합으로 구한 최대진폭을 사용해서 규모를 결정한다고 하였다(Kamigaichi, 2005). 따라서 본 연구에서는 표1의 일부 관측소에 대해서 3성분의 최대변위 진폭을 구하고 이를 같은 방법으로 규모를 계산하여 보았다. 아울러 김성균과 박민아등(2002)이 결정한 규모식을 이용하여 그 결과를 비교하여 보았다(표2).

표2에서 보는 바와 같이 수직 성분의 최대진폭을 이용할 때 보다 다소 높은 결과를 보였으며 특히 박민아 등에 의해 결정된 규모식을 이용한 결과는 평균 규모가 4.55로 기상청에서 발표한 규모 5.2와 다소 유사한 결과를 보여주었다.

표 1. 울진 지진 규모 계산 결과

	진앙거리 (km)	B	최대변위진폭(mm)		Mp	M <sub>L</sub>
			P파	S파		
ULJ	71.52	0.5613	90.20	195.64	4.08	4.73
ULL	97.29	0.1187	7.25	89.53	3.63	4.63
POH	113.45	3.6062	165.71	422.32	3.56	5.42
AND	136	0.4997	32.36	160.80	3.68	5.14
ULS	159.28	0.0531	186.12	920.49	5.37	6.01
DAG	163.72	0.0389	16.02	135.23	4.44	5.20
DGY	167.6	0.0583	8.57	100.57	4.00	5.09
BUS	198.08	0.1404	2.09	34.38	3.02	4.75
CHJ	198.65	0.0515	1.27	80.48	3.22	5.12
SOC	215.55	0.1443	55.38	851.53	4.43	6.21
ICN	253.51	0.0235	0.93	69.62	3.41	5.25
CHI	258.02	0.0953	2.74	53.92	3.30	5.15
SWO	291.16	0.0844	0.57	73.76	2.67	5.38
CWO	295	0.0348	5.09	694.08	3.99	6.36
SEO	301.33	0.0248	0.55	63.42	3.16	5.34
KUS	314.19	0.0397	11.46	373.99	4.28	6.14
MUS	327.89	0.0173	37.82	37.76	5.15	5.18
JEU	328.05	0.0068	0.27	39.99	3.40	5.20
SES	334.39	0.0338	3.26	49.39	3.81	5.31
KWJ	341.84	0.0076	0.50	33.54	3.61	5.16
평 균					3.81	5.34

표 2. 3성분 벡터합의 최대진폭을 이용한 규모 결과

관측소명	B	최대진폭	M <sub>kma</sub>	M <sub>park</sub>
ULJ	0.1191	119.1301	4.20	4.58
AND	0.0499	49.9431	3.87	4.24
ULS	0.2113	211.2528	5.43	5.47
POH	0.2211	221.0529	3.69	4.35
DAG	0.0211	21.1300	4.56	4.56
ULL	0.0144	14.4362	3.93	4.09
평 균			4.28	4.55

### 3. 결론

본 연구에서는 P파 도달후 2초간의 지진자료를 이용하여 절대치의 포락선을 구하고 포락선의 기울기 즉 계수 B와 진앙거리의 상관관계를 구하였다.

$$\log(\Delta) = -0.5568 * \log(B) + 1.5635 \quad (9)$$

이 결과를 기상청에서 사용하는 규모식에 적용하여 P파의 최대 진폭만을 이용하여 규모를 추정할 수 있는 새로운 규모식을 구하였다. 기존의 규모식은 S파의 최대진폭을 이용하는 반면 본 연구에서 구한 규모식은 P파의 최대 진폭을 이용하여 규모를 결정할 수 있다.

$$M_p = \log A_{pmax} - 0.96 \log B + 1.88 \quad (10)$$

본 연구에서 구한 규모식을 이용하고 수직 성분의 최대변위 진폭으로부터 2004년에 발생한 울진 지진과 대구 지진의 규모를 추정하여 보았으며 실제 규모와의 차이를 비교하여 보았다. 그 결과 실제 규모에 비해 상대적으로 낮은 규모값이 얻어졌다. 그러나 지진파의 3성분의 벡터합으로 구한 최대변위 진폭을 사용해서 규모를 결정한 결과에서는 기상청에서 발표한 규모와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 본 연구 결과를 더 많은 지진자료를 대상으로 적용하여 추정 규모와 실제 규모의 상관관계를 비교하므로써 지진발생시 신속하게 규모를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 기상연구소 “한반도 지진재해 평가기반기술 개발” 과제의 일환으로 수행되었다.

#### 참고문헌

1. 기상청, 1999, 지진파 감쇠 및 지진해일 모델 연구, 기상청, 79-91
2. 김성균, 박민아, “한반도의 국지 지진규모”, 지질학회지, 제 38권 제 2호, 2002, pp 217-235
3. Andrew B. Lockman and Richard M. Allen, "Single-Station Earthquake Characterization for Early Warning", BSSA, Vol.95, No. 6, pp.2029-2039, 2005
4. Toshikazu Odaka, Hiromitsu Nakamura, and Kimitoshi Ashiya, "Difference in the initial slopes of the P-wave envelope waveforms of the main shock M7.4 and foreshock M7.1 of the 2004 off the Kii peninsula earthquakes", Earth Planets Space, 57, pp333-337, 2005
5. Toshikazu Odaka, Kimitoshi Ashiya, Shin'ya Tsukada, Shinji Sato, Kazuo Ohtake, and Daisuke Nozaka, "A New Method of Quickly Estimating Epicentral Distance and Magnitude from a Single Seismic Record", BSSA, Vol.93, No.1, pp.526-532, 2003
6. Osamu Kamigaichi, "Earthquake Early Warning System", International Workshop on the Fundamental Research for Mitigating Earthquake Hazards by KMA, Jeju, 2005.

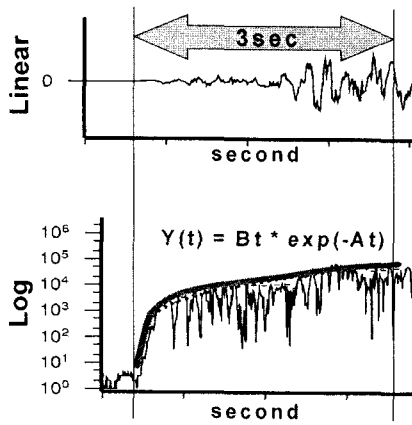


그림 1. P파의 Envelope 계산 모식도

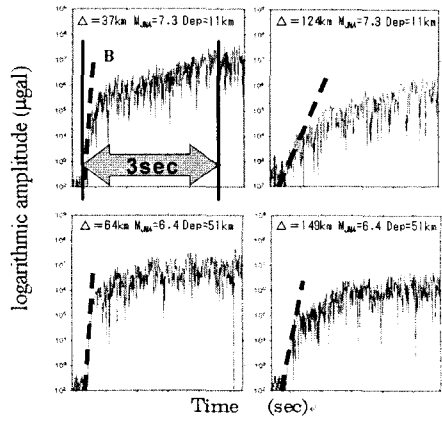


그림 2 규모와 진앙거리에 따른 진폭의 변화

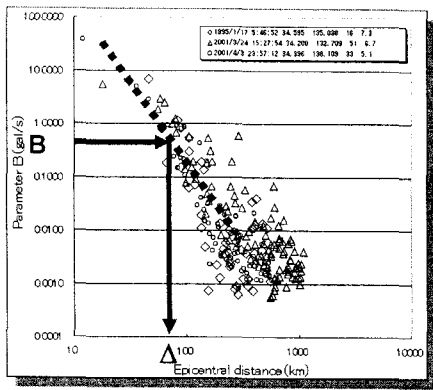


그림 3 계수 B와 진앙거리의 관계

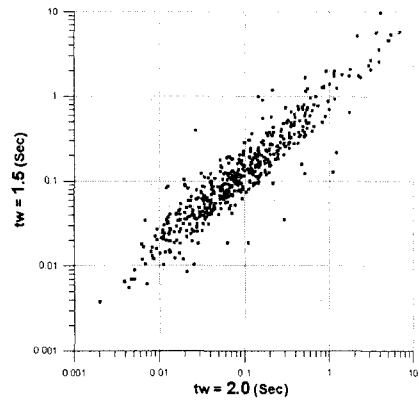


그림 4. 1.5초와 2초의 상관관계

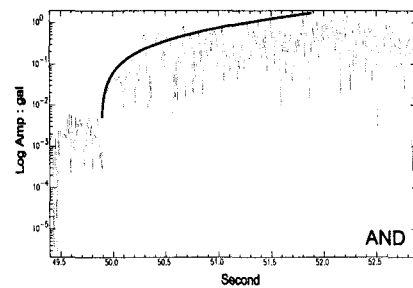
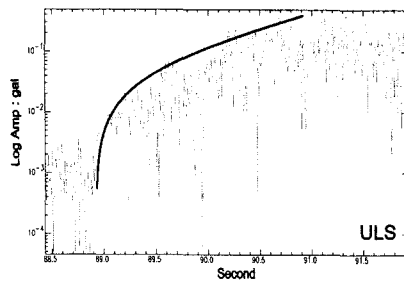
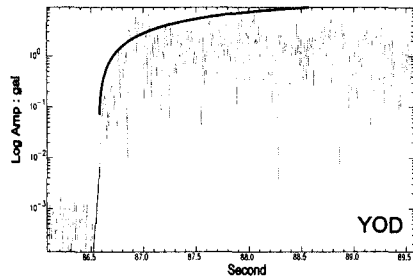
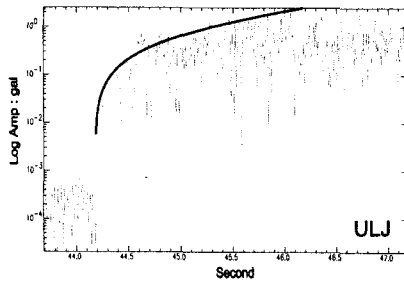


그림 5. 울진 지진의 P파와 회귀선

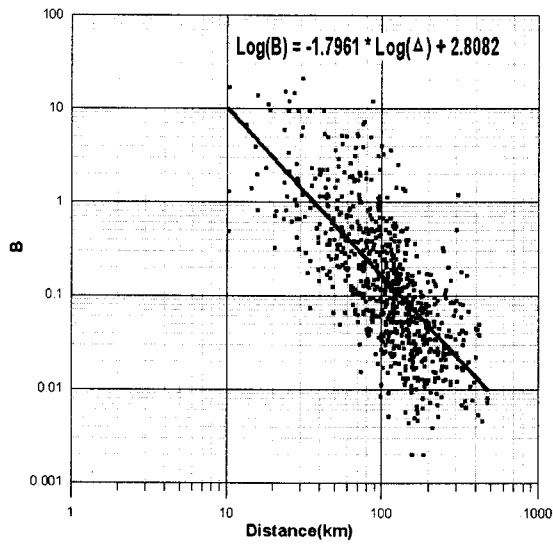


그림 6. 진앙거리와 계수 B의 상관관계

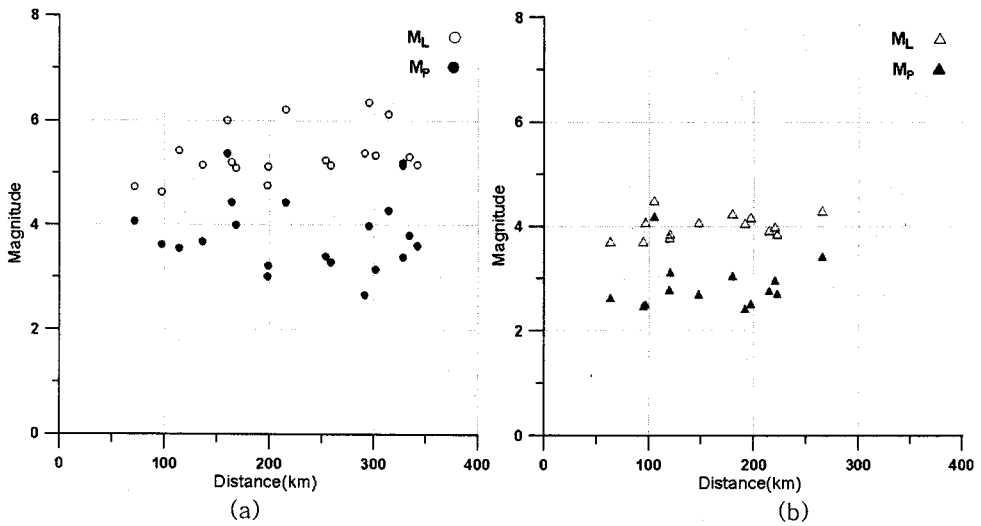


그림 7. ML과 Mp의 계산 결과 (a) 울진 지진( $M_L = 5.2$ ) (b) 대구 지진( $M_L = 3.9$ )