

# 한반도 남부의 지진파 감쇠특성 Seismic Wave Attenuation in the Southern Part of Korean Peninsula

신진수\*,  
Shin, Jin Soo

이종림\*\*,  
Lee, Jong-Rim

박창업\*\*\*  
Baag, Chang-Eob

---

## ABSTRACT

A seismic attenuation formula is derived from the intensity maps of medium sized four earthquakes that occurred in the southern part of Korean peninsula. In order to obtain the seismic attenuation formula, the the coefficients of four attenuation equations representing the intensity maps are integrated using the proper weighting factors depending on the credibility of the data are assigned to . The proposed formula shows the trend of attenuation similar to the ones for the Eastern North America for the region within the epicentral distance of 200 km, but produces higher attenuation at farther distances. Though the attenuation curve is not derived from the instrumental data, the result could be a useful tool for the analysis of seismic hazard in Korean peninsula.

---

## 1. 서론

한반도에서 미래에 발생가능한 대지진에 의한 피해를 완화시키기 위한 대책을 세우거나 또는 지각 내에서 지진파 전파 특성을 체계적으로 연구하기 위해서는 지진파 감쇠특성을 알아야 한다. 어느 한 지역에서의 지진파 감쇠모델은 보통 그 지역 주변부에서 발생한 큰 지진의 자료를 분석함으로써 구해진다. 15~17세기에는 한반도에서 피해가 심한 많은 지진들이 있었지만 강진동을 발생시키는 큰 지진은 근세기에는 매우 드물었다. 20세기에 들어서 한반도 남부지역에서는 규모 4.0 이상의 수십개 중간규모 지진들이 발생하였으나 한반도의 부족한 지진관측망으로 인하여 감쇠특성을 추정 할 수 있는 지진파형의 전국적인 기록이 없고, 다만 이들 지진 중에서 4개의 지진들만이 한반도 남부지역에서 진도 기록이 양호하게 남아 있을 뿐이다. 즉, 1936년 1월 4일에 발생한 규모 5.0의 쌍계사지진, 1978년 8월 7일에 발생한 규모 5.0의 홍성지진, 1981년 4월 15일에 발생한 규모 4.8의 포항지진, 1996년 12월 13일에 발생한 규모 4.5의 영월지진 등이다. 그러므로 실제 지진기록을 사용한 지진파 감쇠 정도의 추정은 주로 이들 지진의 진도분포도에 의존 할 수밖에 없다. 본 연구에서는 지진파 감쇠공식을 이 지진들의 진도분포도를 이용하여 도출하였다.

---

\* 한국전력공사 전력연구원 선임연구원, 정회원

\*\* 한국전력공사 전력연구원 수석연구원, 정회원

\*\*\* 서울대학교 교수, 정회원

## 2. 지진 자료

한반도에서 발생한 지진중 전국적으로 지진운동이 감지되어 등진도도가 만들어진 4 개의 지진의 진도 자료를 본 연구에 사용하였다. 이들 지진은 1936년 쌍계사지진, 1978년 홍성지진, 1981년 포항지진 그리고 1996년 영월지진 이다. 쌍계사지진은 규모가 약 5.0 정도로 이 지진 관련된 등진도도는 1940년 Hayata에 의해 작성되었다. 홍성지진은 쌍계사 지진 이후 한반도 남부에 발생한 가장 큰 지진으로 이 지진에 대한 진도 연구가 여러 사람에 의해 수행되었다 ( 박수희 1987; 서정희, 1979 ; Lee, 1984). 본 연구에서는 박수희(1987) 발표 자료를 기준으로 진앙거리에 대한 가속도 값을 추정하였다. 포항지진에 대한 가속도변화와 등진도도는 1987년 박수희의 발표자료를 근거로 작성하였다. 이 지진은 1981년 경북 포항시 동쪽 약 65 km 해역에서 발생한 것으로 지진동이 서울의 고층 건물에서도 감지되었지만 진앙지가 해상인 관계로 지진의 규모에 비해 홍성 지진과 같이 진앙지 부근에서 큰 피해를 주지는 못하였다. 단지 포항 시내 일부에서 건물의 일부가 지진에 의해 금이 간 정도로 보고되었다. 가장 최근인 1996년 12월 발생한 영월 지진에 대한 등진도도는 조봉곤 등(1997)과 경재복 등(1997)에 수행된 바 있다. 여기서는 조봉곤 등(1997)에 의해 작성된 등진도도의 일부를 수정하여 진앙거리에 따른 지반 가속도 값을 추정하는데 사용하였다. 진도자료를 이용하여 지진가속도 감쇠식을 얻기 위하여 우선 네 개의 등진도도(그림 1)로부터 진앙거리의 증가에 따른 진도의 감쇠 자료를 구하였다.

## 3. 최대 지반가속도 감쇠식

그림 2에서와 같이 진앙점을 중심으로 등각도 간격의 방사선을 형성시킨 뒤 이들 방사선이 등진선과 만나는 점을 진도자료 입력지점으로 정하였다. 동일한 방사선 상에 있는 두 입력지점의 중앙점을 주어진 진도의 대표점으로 정한다. 이렇게 하여 모든 방향이 방사선 상에서 여러 개의 진도값과 그에 해당하는 지점의 진앙거리를 측정한다. 예로써 진도 V의 평균 진앙거리를 구하려면 우선 i번째 방사선 상에서 진도 V의 상한과 하한계를 경계짓는 두 지점의 중앙점을 진도 V의 대표지점으로 하고 이 지점의 진앙거리를 다음과 같이 정한다. 여기서  $d_i^V$ 는 i번째 방사선 상에서 진도 V의 대표지점에 대한 진앙거리를 나타낸다.  $V+0.5$  및  $V-0.5$ 는 각각 진도 V의 상한과 하한을 뜻한다.

$$d_i^V = \frac{d_i^{V+0.5} + d_i^{V-0.5}}{2} \quad (1)$$

각 방향으로 진도에 대한 진앙거리가 정해진 후 평균 진앙거리  $d^V$ 는

$$d^V = \frac{\sum_i d_i^V}{N_i} \quad (2)$$

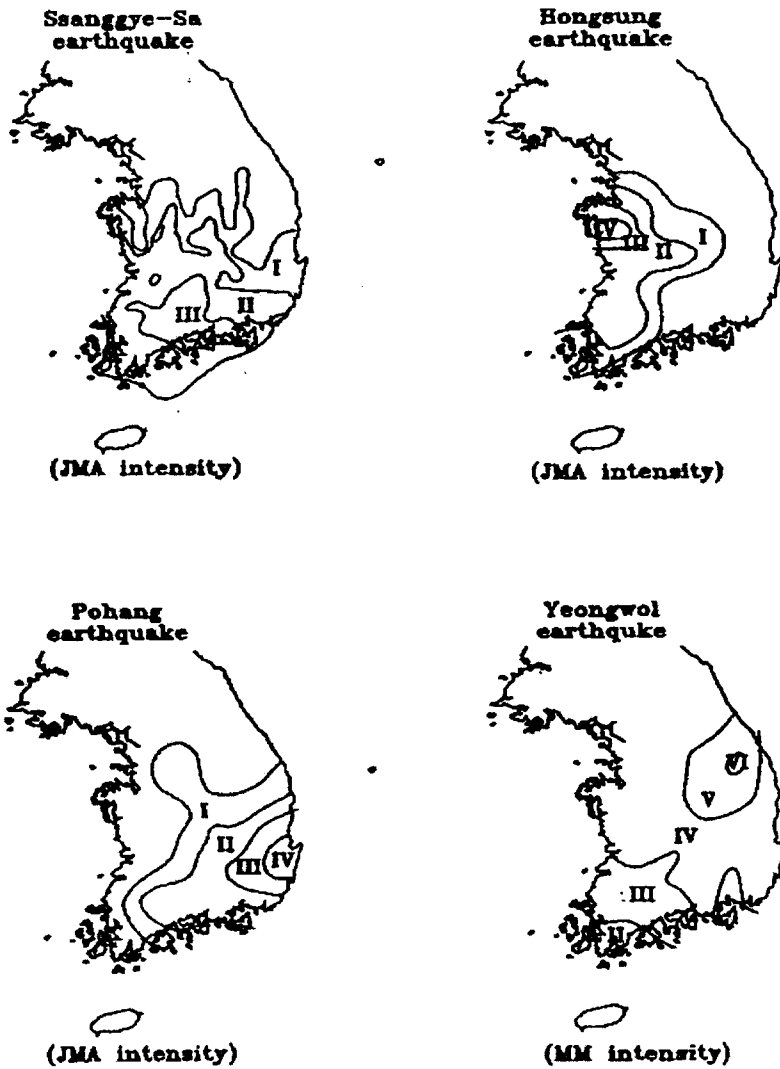


Figure 1. Isoseismal maps of the Ssanggye-Sa earthquake (after Hayata, 1940), Hongsung earthquake (after Park, 1987), Pohang earthquake (after Park, 1987) and Yeongwol earthquake (modified from the result of Jo, *et al* , 1997). Intensities for the Ssanggye-Sa, Hongsung and Pohang earthquakes are in JMA scale. And those for Yeongwol earthquake in MMI scale.

로 결정하였다. 여기서  $N_i$  는 등진도선상에서 등간격으로 구역화된 갯수이다. 진도 자료를 가속도자료로 변환하는 데는 일본 기상청의 JMA 진도 계급 대 가속도 대응표를 참조하였다. 4개의 진도 기록 중 쌍계사, 홍성, 포항지진에 대한 진도 평가는 는 JMA 기준으로 되어있는 반면 영월지진에 대한 것은 MMI 기준으로 등진도가 만들어져 이에 대한 보정은 Trifunac 과 Brady (1975)의 MMI 와 JMA 의 상호관계를 이용하였다.

진앙거리에 따른 지진 가속도 감쇠연구에서 가장 보편적으로 사용하는 공식인

$$\ln a = c_0 + c_1 M + c_2 \ln R + c_3 R \quad (3)$$

을 기본형으로 하여 한반도의 지진동 감쇠식을 결정하였다. 이 식에서  $a$ 는 지반운동의 최대 가속도이고,  $M$ 과  $R$ 은 각각 지진의 규모와 진원거리이다. 계수 중  $c_2$  와  $c_3$ 는 지진파가 전파하면서 겪는 감쇠정도를 나타내는 양이고  $c_0 + c_1 M$ 은 진앙지 부근에서의 최대 지반 가속도를 의미한다. 그런데 이번에 사용된 네개 지진의 규모가 모두 4.5 에서 5.0 사의 값으로 이런 규모 분포로는 확정된  $c_0$ 와  $c_1$ 를 구하기 어렵다. 따라서 계수 결정 시에는  $c_0 + c_1 M$ 를 하나의 계수  $c_1'$ 로 설정하여 감쇠공식을 결정하고  $c_0$ 와  $c_1$ 는 이 결과와 다른 연구자들에 의해서 수행된 결과를 비교하여 결정하였다.

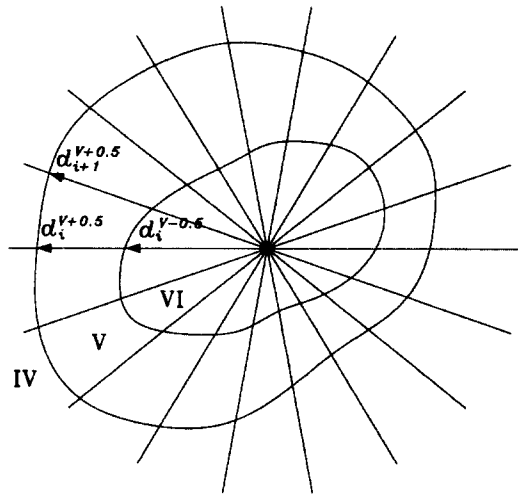


Figure 2. Schematic diagram for estimation of epicentral distance corresponding to specified intensity.  $d_i^V$  represents the epicentral distance of intensity  $V$  with  $i'$ th azimuth angle and is mean value of  $d_i^{V-0.5}$  and  $d_i^{V+0.5}$

계수 결정은 최소자승법에 의해 수행되었고 이 과정을 통해 얻어진 각 지진에 대한 계수 값은 표 1과 그림 3에 제시되어있다. 이 결과로부터 최종적인 결과를 얻기 위해서 본 연구에서는 각 지진에 대해 각기 다른 가중치를 부여하였다. 쌍계사지진의 경우 진도 기록이 작성된 연도가 오래 전이고 그림 2에서 같이 등진도도의 동서 경계가 불명확해 가중치를 1로 하였다. 포항지진은 비교적 최근에 발생한 지진이나 진앙의 위치가 육지에서 약 50 km 벗어난 해상 지역으로 진앙지 부근의 진도 자료가 없고 또한 진원 깊이에 대한 정확한 규명도 이루어지지 않아 가중치를 쌍계사지진보다는 크고 홍성지진보다는 작은 2로 하였다. 홍성지진은 한반도 남부에서 발생한 지진 중 가장 관심 있게 연구된 지진으로 진앙과 진원 위치가 비교적 잘 알려져 있으며 진도 기록도 전국적으로 조사되어있어 가중치를 4로 하였다. 영월지진은 가장 최근인 1996년 12월 발생한 것으로 지진발생 직후부터 이에 대한 여러 연구가 수행되었으며 진도 조사도 지진 발생 직후 바로 수행되어 이들 네 개의 지진 중 가장 조사가 잘되었으리 라고 판단되어 가중치를 8로 하였다. 이들 가중치와 각각 지진에서 얻어진 계수 값으로부터 다음과 같은 방법으로

$$c_i = \frac{\sum_{j=1}^4 c_j' w^j}{\sum_{j=1}^4 w^j} \quad (4)$$

계수  $c_i$ 의 값을 구하였다. 여기서  $c_j'$ 는 j번째 지진자료를 이용하여 구한 계수  $c_j$ 값을 말하고  $w^j$ 는 그 지진자료에 대한 가중치를 나타낸다. 이와 같이 하여 구해진 계수  $c_i$ 값으로 감쇠공식

$$\ln a(\text{cm}/\text{sec}^2) = 6.4854 - 0.8416 \ln R(\text{km}) - 0.0061 R(\text{km}) \quad (5)$$

을 얻게 된다. 여기서 가중치에 의해 구해진  $c_1'$ 값 6.4854는 별 의미가 없다.

이 과정을 통해 한반도에서 지진에 의한 지반 가속도가 거리에 따라 어떻게 감쇠 하는가는 구할 수 있으나 지진의 규모 변화에 따른 지반 가속도 변화는 알 수가 없다. 이와 같이 지진규모 변화에 따른 지반 가속도 변화를 알기 위해서는 감쇠공식의 계수  $c_0$  및  $c_1$ 이 정해져야 한다. 그런데 아직 까지 한반도에서 전국적으로 지반운동이 감지된 계기 지진기록이 거의 같은 규모인 약 5.0 내외이다. 이런 자료로부터 식(6) 과 같이 표현되는  $c_1$ 을 구하기에는 지진의 갯수 뿐만

$$c_1 = \frac{\Delta \ln a}{\Delta M} \quad (6)$$

아니라  $\Delta M$ 의 폭이 너무 좁아 어려움이 있다. 또한 진앙 부근에서 표 1을 이용하여 구한 지반 가속도의 값이 규모 변화에 따른 뚜렷한 변화를 보여주고 있지 않는 것도  $c_1$ 을 구하는데 큰 어려움이다.

본 연구에서는  $c_1$ 을 한반도의 지진 자료로부터 직접 구하지 않고 한반도와 지진활동 및 판구조적인 조건이 유사하다고 알려진 북미 대륙 중동부의 지진 가속도 감쇠식에서 그 값을 결정

하였다. Nuttli 와 Herrman(1981)은 북미 중동부에서 지진 가속도 감쇠식을 다음과 같이 결정하였다.

$$\ln a(cm/sec^2) = 1.265 + 1.15M - 0.833 \ln R - 0.0044 R \quad (7)$$

이 식에서 지진규모 증가에 대해 진앙 부근에서 지반 가속도 증가율은  $e^{1.15\Delta M}$  정도가 된다. 또한 Toro 등(1997)은 역시 북미대륙의 중동부에서  $L_g$  과 규모에 따른 지반 가속도 감쇠식을 유도하였다.

$$\ln a(cm/sec^2) = 1.76 + 1.2M_L - 1.28 \ln R - 0.0018R + 0.05 \max \left[ \ln \left( \frac{R}{100} \right), 0 \right] \quad (9)$$

이 결과에서도 지반 가속도 증가율은 규모에  $e^{1.2}$  정도 비례하는 것으로 계산되었다. Toro 등(1997)은 또한 북미 대륙의 남동부인 멕시코만 주변 지역에서 지반 가속도 감쇠식에서  $c_1$ 의 값을 1.31 정도로 평가하였다. 이 둘 결과를 종합하면 북미 대륙 중동부에서  $c_1$ 의 값은 1.2 내외로 평가되고 있다.

#### 4. 결론 및 토의

한반도 지진 가속도 감쇠공식은 앞절의 결과를 인용하여  $c_1$ 을 1.2 로 설정하였다. 각 지진에 의해 구해진  $c_1'$ 값(표 1)으로부터 4개의  $c_0$ 값을 식  $c_0 = c_1' - 1.2M$ 에 의해 구하였다. 이들  $c_0$ 값에 가중치를 가하여 계산된  $c_0$ 값 0.4854를 얻게 된다. 구해진 감쇠식은 다음과 같다.

$$\ln a = 0.49 + 1.2M - 0.84 \ln R - 0.0061 R \quad (9)$$

Table 1. Estimated coefficients of the seismic attenuation formula for the peak ground acceleration in the Korean peninsula

Earthquakes	Magnitude	Coefficients of attenuation formula			standard deviation	weighting factor
		$c_1'$	$c_2$	$c_3$		
Ssanggye-Sa	5.0	5.2003	-0.7997	-0.5810	0.4077	1
Pohang	4.8	6.0730	-0.4019	-0.016	0.1654	2
Hongsung	5.0	6.7017	-1.0715	-0.010	0.5716	4
Yeongwol	4.5	5.9810	-0.8662	-0.009	1.1286	8
Estimated value	-	6.4854	-0.8416	-0.0061	0.8036	

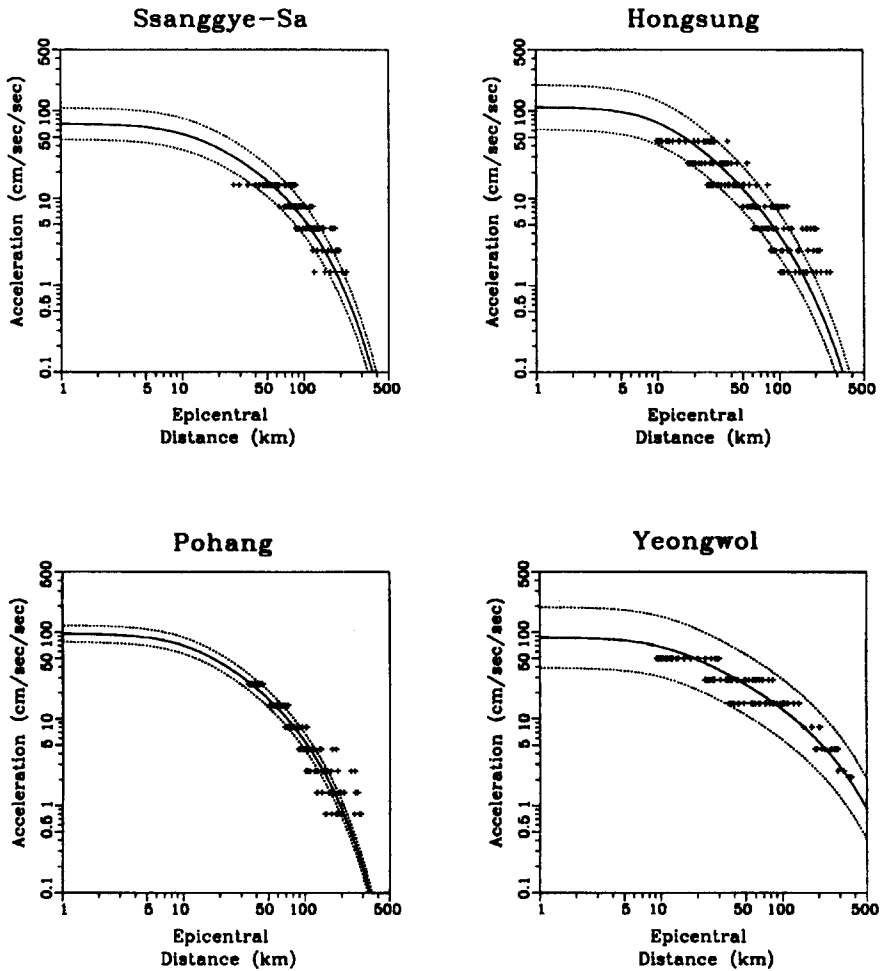


Figure 3. Acceleration attenuations with epicentral distance obtained from the four earthquakes in the Korean peninsula (see Text). Solid and dotted lines represent the acceleration with distance and the range standard deviation, respectively.

감쇠식 계산에 사용한 4개의 국내 지진의 진도자료에 대한 신뢰도가 표 1에서 가정한 가중치와 다른 경우에 감쇠공식도 달라질 수 있다. 그러므로 쌍계사지진, 포항지진, 홍성지진 및 영월지진에 대한 가중치를 각각 1, 3, 3, 3으로 하여 감쇠공식을 계산한 결과는 다음과 같다.

$$\ln a = 0.40 + 1.2M - 0.76 \ln R - 0.0094R \quad (10)$$

이 식은 진앙으로부터 약 200km 이상의 거리에서는 이전 식보다 감쇠효과가 더 크도록 되어 있다. 그러나 그 차이는 미미하다.

이들 식은 최근 한반도에서 발생한 중규모 지진들의 진도 자료로부터 얻어진 결과로 비록 정량적인 수치자료로부터 유도된 것은 아니지만 현재 사용할 수 있는 최선의 정성적인 자료로부

터 얻어진 것이라 할 수 있다.

지반 가속도의 감쇠 정도는 지진파가 전파해 나가는 매질의 성질, 지질에 따라 다르기 때문에 세계 각 지역마다 서로 다른 감쇠식을 사용한다. 따라서 이런 감쇠식은 각 지역의 지진 및 지질학적 특징을 반영한다고 볼 수 있다. 특히 지각 내의 파쇄대 발달 정도 및 암석의 고화 정도가 지진파 감쇠에 결정적인 영향을 미친다. 이번에 유도된 한반도에서의 지진 감쇠식을 타 지역 특히 북미 중동부에서 구해진 Toro 등(1997)의 결과와 비교해보면 가속도의 감쇠 정도가 진앙에서 200km 이내에서는 비슷하나 원거리에서는 더욱 급속히 변화하는 것을 볼 수 있다. 이런 현상은 감쇠식 계수 중  $c_3$  값의 효과에 의한 것이다. Nuttli 와 Herrman(1981)은  $c_3$ 를 -0.0044 정도로, 그리고 Toro 등(1997)은 -0.0018로 평가하고 있는데 이 값은 여기서 결정된 값, -0.0061 보다는 다소 작은 값이다. 따라서 한반도의 지진 가속도 감쇠식 중 -0.0061은 어느 정도 북미 대륙의 중동부와는 다른 한반도의 지체구조를 반영하고 있는 것이라 볼 수 있다.

이후 가속도 기록을 위한 관측망이 전국적으로 구축이 되면 본 연구에서 결정된 값은 수정되어야만 할 것이다. 그렇지만 그 이전까지 여기서 구해진 지반가속도 감쇠식은 한반도 지진재해도의 예비적인 분석에 매우 중요한 자료로 유용하게 사용될 것이다.

## 참 고 문 헌

- 경제복, 이기화, 한세섭, 1996, 20C 지진활동 특성과 영월지진(1996년 12월 13일)의 피해 및 진도 분석, 1997년 한국지진공학회 춘계 학술발표 논문집, 77-87.
- 박수희, 1987, 이것이 지진이다. 양동문화사
- 서정희, 1979, 홍성지진 조사 보고, 대한광상학회지, 제6권 158-165.
- 조봉곤, 김성균, 김우현, 김준경, 박창업, 1997, 1996년 12월 13일 영월지진의 진도 평가와 지진에너지 감쇠특성, 1997년 한국지진공학회 춘계 학술발표 논문집, 21-27.
- Lee, K. 1984. A study on the intensity in Korean Peninsula. Jour. Geol. Soc. Korea, V. 20. 140-146.
- Nuttli, O. W. and Herrman, R. B., 1981, Consequences of earthquakes in the Mississippi Valley, ASCE preprint 81-519.
- Rebollar, C. J., C. Traslosheros, and R. Alvarez, 1985, Estimates of seismic wave attenuation in northern Baja California, Bull. Seism. Soc. Am., 75, 1371-1382.
- Toro, G. R., Abrahamson, N. A. and Schneider, J. F., 1997. Model of strong ground motions from earthquakes in Central and Eastern North America : Best estimates and uncertainties. Seism. Res, Lett., V. 68, 58-73.
- Trifunac, M. D. and Brady, A. G. 1975. On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong motion. Bull. Seismol. Soc. Am. V. 65. 139-162.