

## 한반도 남동부 지진의 지각매질 특성 및 지진원 특성 변수 연구

Analysis of the Characteristics of the Seismic source and the Wave  
Propagation Parameters in the region of the  
Southeastern Korean Peninsula

김 준 경\* / 강 익 범\*\*

Kim, Jun Kyoung / Kang, Ik Bum

### Abstract

Both non-linear damping values of the deep and shallow crustal materials and seismic source parameters are found from the observed near-field seismic ground motions at the South-eastern Korean Peninsula. The non-linear numerical algorithm applied in this study is Levenberg -Marquadt method. All the 25 sets of horizontal ground motions (east-west and north-south components at each seismic station) from 3 events (micro to macro scale) were used for the analysis of damping values and source parameters. The non-linear damping values of the deep and shallow crustal materials were found to be more similar to those of the region of the Western United States. The seismic source parameters found from this study also showed that the resultant stress drop values are relatively low compared to those of the Western United States. Consequently, comparisons of the various seismic parameters from this study and those of the United States Seismo-tectonic data suggest that the seismo-tectonic characteristics of the South eastern Korean Peninsula is more similar to those of the Western U.S.

Keywords :

### 요 지

내진설계에 이용되는 지반진동과 관련된 주요 입력자료는 지진재해도 및 지반 응답스펙트럼 등이 있고 이러한 지진재해도 및 지반 응답스펙트럼을 평가하기 위하여 지역특성에 고유한 감쇠식이 필수적이다. 지역특성에 적합한 지반진동 감쇠식의 계수를 결정하기 위해 지진원 변수 및 지진파 전달특성 변수가 반드시 필요하고 본 논문에서는 지진원 변수 및 지진파 전달특성 변수를 평가하였다. 지진원 변수 및 지진파 전달특성 변수는 관측 지반 지진동에 대해 비선형적인 지배방정식을 이루고 있는 모델을 이용하였다. 이러한 비선형 지배방정식에 대한 수치해석 알고리즘을 통하여 지진원 변수 및 지진파 전달특성 변수 전체를 동시에 구하였다. 지반진동 자료는 주로 한반도 동남부 지역에서 발생하여 경상분지 주변 관측망에서 관측된 지반진동 자료를 이용하였다. 분석결과에 의하면 3개 지진원의 모멘트 지진규모( $M_w$ )는 각각 2.9, 3.1 및 3.2로 분석되었다. 또한 3개 지진원의 코너 주파수는 각각 8.2, 6.9 및 8.3 Hz로 분석되었다. 그리고 지각 심부의 비탄성 감쇠율(Qo) 및 주파수 지수값

\* 정희원, 세명대학교 자원환경공학과 교수

\*\* 정희원, 한국지질자원연구원 선임연구원

(η)은 약 211 및 0.63으로 평가되었다. 각각 천부의 비탄성 감쇠율( $\kappa$ )은 각각의 관측소에서 약 0.02에서 약 0.06의 범위의 값을 가지고 있는 것으로 평가되었다. 결론적으로 하부지각 및 상부 지각의 비탄성 감쇠율 값을 미국 중동부와 서부와 비교할 경우 미국의 서부지역과 유사한 값을 보여주었다. 또한 지진원의 특성도 응력강하값 만을 고려한다면 역시 미국의 서부지역과 유사한 값을 보여주었다.

**핵심용어** : 지진원, 응력강하, 코너주파수, 비탄성감쇠율( $Q_0, \kappa, \eta$ )

## 1. 서 론

각종 주요 구조물 및 건축물에 대해 내진설계가 점차 중요하게 인식되어 기준을 점점 강화하는 방향으로 법령화 되어있거나 추진되고 있고 지진재해 및 지반 응답스펙트럼 등이 내진설계를 위한 주요 입력변수로 이용된다. 지진재해도 및 지반 응답스펙트럼은 지반진동과 관련된 주요 입력자료이고 이를 효과적으로 평가하기 위하여 지역특성에 고유한 지반진동에 대한 감쇠식이 필수적이다.

이러한 지반진동에 대한 감쇠식의 계수를 결정하기 위하여 개략적으로 두 가지 방법이 있다. 우선 임의 지역에서 관측된 지진파가 다양한 규모 및 진앙거리에 대해 통계적으로 충분할 경우 관측된 지진파형을 통계적으로 처리하여 지역 고유의 특성에 적합한 지진파 감쇠식을 직접적으로 구할 수 있다. 하지만 분석대상이 되는 지역에서 관측된 지진파가 통계적으로 충분하지 못하여 관측된 지진파형을 이용하지 못할 경우 지진원 및 지반의 전달 특성 변수를 우선 평가한다. 이렇게 평가된 지진원 및 지반의 전달 특성 변수값을 이용하여 이론적인 지반진동을 만들고 이를 통계적으로 분석하여 지역 고유의 특성에 적합한 지진파 감쇠식을 간접적으로 구할 수 있다.

본 논문에서는 관측된 지진파가 규모, 진앙거리 분포 및 관측자료의 S/N비율을 종합적으로 고려할 때 분석대상이 되는 관측자료가 통계적으로 충분하지 못하다는 국내 현실을 감안하여 지역특성에 적합한 지진원 변수 및 지진파 전달특성 변수를 우선 평가하였다.

국내의 기존 연구를 살펴보면 주파수 영역에서의 각종 변수값 등을 평가한 Noh and Lee(1994)<sup>(1)</sup>, 지진원 및 지진파 감쇠 요소를 평가한 박동희 등(2000)<sup>(2)</sup> 등의 연구결과가 제시되어 있다. 또한 근거리 범위를 벗어나 regional distance(13도 30도 범위의 진앙거리)에서 관측된 지진파형을 이용하여

국내에서 발생한 지진에 대해 지진원 변수 가운데 하나인 응력강하값을 연구한 결과도 있다.

본 연구 결과와 기존의 연구결과를 비교하는 것도 대단히 중요하다. 하지만 특히 지각 심부 물질의 비탄성 감쇠율 값의 경우 본 연구는 주파수에 의존하는 함수로 모델링을 시도하였으나 국내의 타 연구는 다른 지배방정식을 이용하여 직접 비교하는 것이 불가능하였다. 각각 천부물질의 비탄성 감쇠율을 나타내는 값의 경우에도 본 연구의 경우 진앙거리와 독립된 각각의 관측소 고유의 값으로 제시되거나 타 연구의 경우 거리 의존성에 대한 함수로 표현되어 있어 직접 비교하는 것이 역시 불가능하였다. 따라서 동일한 지배방정식을 이용하여 분석된 결과와 비교를 시도하였다.

## 2. 가속도 지배 방정식

임의 지역에서 관측된 가속도 지반진동의 푸리에 스펙트럼은 주파수의 영역에서 지진원의 특성과 관련된 변수, 지진파가 전달하는 변수 및 관측소 지하부의 지반의 종폭 상태를 나타내는 변수로 이루어져 있다.

지진원의 특성을 나타내는 변수는 구체적으로 지진모멘트, 응력강하 또는 코너주파수 등으로 구성되어 있다. 또한 지진파가 전달하는 매체의 전달 특성을 나타내는 특성을 나타내는 변수는 심부 지각 구조의 감쇠특성을 나타내는 quality factor ( $Q_0$ ) 및 그 값의 주파수 관련 특성을 나타내는  $\eta$ , 천부 지각구조의 지진파 감쇠특성을 나타내는  $\kappa$ 가 있다. 또한 관측소 하부의 지반의 종폭 상태를 나타내는 주파수별 종폭계수 등으로 구성되어 있다. 따라서 위에서 제시된 가속도 지반진동의 푸리에 스펙트럼에 대한 지배방정식은 다음 식(3)으로 주어진다.

$$a(f) = C \cdot Mo \cdot f^2 / (1 + (f/f_c)^2) \cdot \exp(-\pi f R) / (\beta_0 \cdot Q(f)) / R \cdot A(f) \cdot \exp(-\pi \kappa f) \quad (1)$$

여기서 C는 가속도 지반진동의 결과 스펙트럼의 진폭을 결정하는 상수들의 모임으로 식으로 보다 자세하게 표현하면

$$C = 1/(\rho_0 \cdot \beta_0^3) \cdot 2 \cdot 0.63 \cdot 1/\sqrt{2} \quad (2)$$

이 된다. 위 식에서 2는 free surface 효과를, 0.63은 지진원으로부터 평균적인 radiation pattern을 나타내고,  $1/\sqrt{2}$ 는 수평성분 비율을 각각 나타낸다. 또한  $\beta_0$  및  $\rho_0$ 는 지진원 부근의 매질에 대한 전단파 속도와 지각물질의 밀도이고 각각의 값은 김성균(1995)<sup>(4)</sup>의 연구 결과를 이용하여 3.68 km/sec 및 2.7g/cm<sup>3</sup>로 가정하였다.

지진원의 스펙트럼 모델은 Brune의 지진원 대표 모델(1970)(5)을 이용하였고 가속도 지반진동의 결과 스펙트럼의 진폭을 결정하는 식 (1)의 지배방정식에서  $Mo \cdot f^2/(1+(f/fc)^2)$ 에 해당한다. 위 식에서 Mo는 지진모멘트, fc는 코너주파수를 각각 나타낸다. 위 식에 주어진 코너주파수를 보다 상세하게 표현하면 아래 식과 같다.

$$fc = \beta_0 (\Delta \sigma / (8.44 Mo))^{1/3} \quad (3)$$

위 식에서 임의 지진의 코너주파수는  $\Delta \sigma$ 와 Mo의 합수로 이루어져 있고  $\Delta \sigma$ 는 응력강하를 나타낸다. 또한 Q(f)는 지각심부를 이루고 있는 물질의 damping 효과를 나타내는 변수로서 주파수 함수로서 자세하게 표현하면 아래 식과 같다.

$$Q(f) = Q_0 (f/f_0)^{(7)} \quad (4)$$

여기서 R은 전원으로부터 관측소까지의 거리를 나타낸다. 따라서 지진파가 전달하는 지각심부의 전달매체 특성 및 전파거리에 따라 감쇠하는 특성은 주어진 가속도 지반진동의 푸리에 스펙트럼의 진폭을 결정하는 식(1)에서  $\exp(-\pi/R)/(\beta_0 \cdot Q(f))/R$ 에 해당한다.

또한 식 (1)의 지배방정식에서  $\kappa$ 는 지각 천부 매질의 damping 효과를 나타내는 변수이다. 지각 천부에서 지진파가 감쇠하는 특성을 나타내기 위하여 본 논문은 fmax 모델 대신에 카파 필터 모델을 이용하였고 식은  $\exp(-\pi \kappa f)$ 으로 표시된다.

마지막으로 식 (1)의 지배방정식에서 A(f)는 관측소 부지 부근의 천층을 구성하고 있는 물질의 탄성적 영향을 대표하는 변수로서 주파수별 진폭을 나타내는 변수이다.

### 3. 지반진동 자료

본 연구에서는 3개의 지진원으로부터 12개의 지진관측소에서 관측된 동서 및 남북방향 지진파형을 이용하였다. 특히 신호에 비하여 잡음비율이 비교적 적은 관측된 25개 세트의 동서 및 남북방향 지진파형을 이용하여 모두 50개의 관측파형에 대해 역산모델링을 수행하였다. 본 연구에서 이용한 지진의 규모는 2.9에서 3.1까지이고 이다. 3개의 지진에 대한 발생일시, 진앙위치, local 지진규모 등은 표 1에 주어져 있다.

본 연구에서 사용한 지반진동이 관측된 진앙거리 범위는 18.8 km부터 170.4 km까지이고 각각의 지진에 대한 관측소별 진앙거리, 분석에 이용된 지진파의 종류는 표 2에 주어져 있다. 또한 각각의 지진으로부터 관측한 관측소명, 설치된 장소의 지명, 각각의 관측소에 설치된 sensor 종류, 기반암 및 지진계의 natural frequency에 관한 내용은 표 3에 주어져 있다.

본 연구에 이용된 지진파형은 일률적으로 샘플 간격이 0.01초이고 anti-alias 필터가 25Hz부터 적용되어 있다. 따라서 관측된 지진파형의 푸리에 스펙트럼의 모양을 fitting할 경우 실제로 적용 가능한 주파수 대역은 20Hz 보다 약간 상회하는 구간이 실제 지진원 및 지하의 정보를 갖고 있는 주파수 대역이고 이러한 주파수 대역의 정보를 역산모델링에 이용하였다.

Table 1. Event Occurrence Parameters

Event No.	Date	Origin Time	Lat.	Long.	M
1	1997/06/16	22:51:13.96	35° 36.35	128° 58.64	2.9
2	1997/09/17	19:50:28.76	35° 35.44	129° 21.76	3.1
3	1997/10/11	19:50:28.76	35° 55.05	128° 50.69	2.7

Table 2. Occurrence Date, Station Name, Epicentral Distance (km)

Occurrence Date	Station Name & Motion	Epicentral Distance (km)
1997/06/16	0232.sbo	22.7
	1042.kpo	29.7
	1545.gre	32.2
	1550.chs	39.5
	2690.kmh	59.4
	3369.mak	64.4
	3413.hak	137.6
	3730.mkl	144.4
	4538.dkj	170.4
	1582.chs	18.8
1997/09/17	2195.kjm	29.9
	2759.kmh	39.4
	3448.mak	45.3
	3480.hak	38.2
	3988.mkj	69.7
	4598.dkj	109.7
	0355.cgd	24.2
	1834.gre	34.8
1997/10/11	2204..kjm	41.6
	2780.kmh	59.4
	3458.mak	64.3
	3501.hak	65.6
	4101.mkl	68.1
	4619.dkj	122.9
	5044.bbk	146.5

#### 4. 지반진동 분석방법

지진원 변수 및 지진파 전달특성 변수는 비선형적인 지배방정식을 이루고 있고 비선형방정식에 대한 수치해석 알고리즘을 통하여 지진원 변수 및 지진파 전달특성 변수를 동시에 구하였다. 비선형방정식의 해를 구하기 위한 수치해석 알고리즘은 Levenberg-Marquadt 알고리즘(6)을 이용하였다.

또한 남북 방향 성분과 동서방향 성분 각각에 대해 S파 성분 구간의 에너지 정보만을 역산에 이용하였다. 푸리에 분석에 이용된 지속시간은 각각의 지반진동 마다 다르게 설정하였다. 각각의 주파수에서 남북 방향 성분과 동서방향 성분의 푸리에 스펙트럼값을 각각 제곱하고 서로 더한 다음 제곱근을 구하여 분석을 위한 자료로 이용되었다.

본 연구의 분석을 위해 주어진 자료의 수는 모두 50개의 동서 및 남북성분 지반진동이다. 그리고 신호대 잡음비를 고려하여 분석을 위한 주파수 대역의 폭이 지진파형 각각에 대해 상이하다. 주어진 역산 자료에 대해 분석의 대상이 되는 변수는 Mo, fc (또는 응력강하), Qo,  $\eta$ , 그리고 12개 관측소 각각의  $\kappa$  값이다. 따라서 역산과정은 모두 20개의 미지수를 동시에 구하는 과정이다.

본 연구는 가장 적합한 해를 구하기 위해 residual의 값이 최소가 되는 기준도 물론 고려하였으나 12개 관측소의 각각의 kappa 값이 음의 값이 되지 않게 하는 조건을 동시에 만족시키는 해를 최적해로 선택하였다.

관측된 지진파형의 푸리에 스펙트럼과 역산결과 얻어진 지진변수들에 의해 계산된 푸리에 스펙트럼

**Table 3. The location, site condition, & sensor type of the seismic observation network**

station	geographical location	site condition	sensor type	natural frequency
DKJ	Dukjungri	shale-siltstone	JC-V100	1 Hz
HAK	Hakgeri	tuff	JC-V100	1 Hz
MKL	Myunggeri	Cretaceous-Tertiary granite	JC-V100	1 Hz
MAK	Maegokri	Cretaceous granite	JC-V100	1 Hz
BBK	Bangbanggol	basaltic tuff	JC-V100	1 Hz
CHS	Chongsong	granite	JC-V200	0.05 Hz
KMH	Kimhae	granite	JC-V100	1 Hz
KJM	Kuchemyun	granite	JC-V200	0.05 Hz
CGD	Chungdo	granite	JC-V100	1 Hz

을 비교할 경우 관측된 지진파형의 푸리에 스펙트럼과 계산된 푸리에 스펙트럼은 전체적으로 잘 부합하고 있음을 보여 주었다. 따라서 본 연구에서 분석된 각각의 해는 적어도 관측된 지진파형의 푸리에 스펙트럼과 잘 부합하고 있는 해이다.

## 5. 분석 결과

지진원의 특성을 대표하는 변수 가운데 하나인 Mo는 지진 모멘트값을 이용하여 계산된 모멘트지진 규모는 각각 2.9, 3.1 및 3.2로 분석되어서 로칼 지진규모값인 2.9, 3.1 및 2.7에 비하여 2개의 지진의 경우 유사하나 마지막 지진의 경우 로칼 지진규모값에 비하여 값이 약간 높게 나타났다.

본 논문의 결과와 타 지역 과의 비교를 위하여 kappa(sec), Qo,  $\eta$ ,  $\Delta\sigma$  등의 값에 대해 미국 중동부 및 서부지역에 대표되는 값들을 표 4<sup>(7)</sup>에 제시되어 있다.

**Table 4. Comparison of seismic source and attenuation parameters of the Western US and the Eastern US region**

parameters	Western US	Eastern US
kappa(sec)	0.040	0.006
Qo	291	500
$\eta$	0.60	0.65
$\Delta\sigma$	60	100

본 연구결과 얻어진 지진원 및 지각물질 특성을 나타내는 변수에 대한 결과값은 표 5에 제시되어

있다.

**Table 5. Seismic source and attenuation parameters from this study**

parameters	values
kappa(sec)	0.040463
	0.018324
	0.033864
	0.027111
	0.051668
	0.040419
	0.038812
	0.042817
	0.055320
	0.031438
	0.022735
	0.049300
Qo	211±27
$\eta$	0.629±0.080
$\Delta\sigma$ (bar)	31.7±6.7
	42.3±8.8
	81.9±17.9

지진원의 특성을 대표하는 변수 가운데 하나로 각각의 지진에 대한 응력강하 값은 앞 식에서 제시된 바와 같이 코너주파수 및 지진모멘트에 대한 함수로서 앞에서 코너주파수 값이 주어져 있다. 본 연구에서는 코너주파수, 지진모멘트 및 응력강하 등 3개의 변수 중에서 지진모멘트 및 코너주파수

변수를 역산의 대상 변수로 설정하고 응력강하값은 이미 값을 구한 지진모멘트 및 코너주파수 변수로부터 얻어질 수 있도록 분석을 하였다.

$f_c$ 는 각각의 지진의 코너주파수를 나타내며 지진모멘트 및 응력강하 값에 종속되는 함수로서 각각 8.2, 6.9 및 8.3 Hz로 분석되었다. 여기에 해당되는 응력강하값은 표 5에서 제시된 바와같이 약 32bar에서 약 82bar의 범위의 값을 가지고 있다.

$Q(f)$ 는 지진파가 전달하는 지각심부의 damping 효과를 나타내는 변수로서  $Q(f) = Q_0 \cdot (f)^{(\eta)}$ 로 표현된다. 본 연구에서는 표 5에서 제시된 바와같이  $Q_0$  값은 211이고 표준편차 값은 27로 분석되었다. 이 값은 Kim & Gao(1993)가 Lg coda를 이용하여 결정한  $Q$ 값인 145 보다 약간 높은 값이 나타났다. 표 4에 제시된 값과 비교하면 역시 미국 서부 지역의  $Q$ 값인 291 보다 아주 낮은 값이다.

지각심부의 damping 효과를 나타내는 지배식의 주파수의 지수에 해당하는  $\eta$ 값은 표 5에서 제시된 바와같이 0.63으로 분석되어 비교적 높은 값을 보여주었다. 앞서 제시한 바와 같이 국내의 기존 연구에서는 주파수의 함수가 아닌 지배방정식을 이용하였기 때문에 결과값을 직접 비교하는 것이 불가능하였고 북미 지역에서 동일한 지배방정식을 이용하여 분석된 값들과 비교하였다.

본 연구에서 분석된 지각 심부의 비탄성 감쇠율 값을 미국 중동부와 서부와 지역과 비교할 경우 상대적으로 미국의 서부지역과 보다 유사한 값을 보여주었다.

$\kappa$ 는 지진파가 지각 천부 매질을 통과할 때 지각 천부 매질의 damping 효과를 나타내는 변수이다. 지각천부에서 지진파가 감쇠하는 특성을 나타내기 위하여 본 논문은  $f_{max}$  모델 대신에 카파 필터 모델을 이용하였고 각 관측소에서 관측된 지진파의 경로가 다르므로 각 관측소마다 다른  $\kappa$ 值을 가지고 있다.  $\kappa$ 를 포함하고 있는 식에서 알 수 있듯이  $\kappa$ 값이 클수록 매질의 damping 효과가 크다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 3개의 지진원으로부터 12개의 지진관측소에서 관측된 지진파형을 이용하였다. 따라서 12개의  $\kappa$ 값이 구해지고 12개의 지진관측소에서 분석된  $\kappa$ 값은 표 5에서 제시된 바와같이 0.01에서 0.051의 범위의 값으로 분석되었다. 위에서 분석된 지각 천부의 비탄성 감쇠율 값을 미국 중동부 및

서부의 일반적인 값과 비교할 경우 미국의 서부지역과 보다 더 유사한 값을 보여주었다.

$A(f)$ 는 관측소 부지부근의 주파수별 증폭률을 나타내는 변수이다. 국내의 경우 이 분야에 대한 연구가 극히 미미한 편이다. 따라서 일률적으로 모든 주파수 대역에 대해 단위값 즉 1의 값을 적용하였다.

## 6. 결 론

응력강하 값은( $\Delta\sigma$ ) 지진원의 특성을 나타내는 하나의 변수로 본 연구에서 유도된 결과값을 국내 연구결과 및 미국 중동부 지역 및 서부 지역에서 분석된 값과 비교하였다. 표 4에서 제시된 바와 같이 일반적으로 미국 동부 지역은 약 100 bar이고 미국 서부 지역은 각각 약 50 bar로 알려져 있다. 본 연구로 부터 산정된  $\Delta\sigma$  값은 약 32 bar에서 약 82 bar의 분포를 보여주고 있다. 따라서 전체적으로 미국 동부지역 보다 낮은 값의 분포를 보여주고 있다.

또한  $Q(f)$ 는 지각심부의 damping 효과를 나타내는 변수로 본 연구에서 유도된 결과값을 미국 중동부 지역 및 서부 지역값과 비교하였다. 표 4에서 제시된 바와 같이 일반적으로  $Q_0$  값 및  $\eta$ 값은 미국 중동부 지역은 각각 약 500이고 및 약 0.65 미국 서부 지역은 각각 약 291 및 약 0.60으로 되어 있다. 본 연구로부터 산정된 결과값 및 미국 중동부와 서부 지역의  $Q_0$ 값의 경우 서부지역보다 낮은 값을 보여주었다.  $\eta$ 값을 비교하면 미국 중동부와 서부 지역의 중간정도의 값을 보여 주었다.

지재체구조적으로 경상분지 구조는 국내에 존재하는 타 지체구조에 비해 생성된 지질연대가 비교적 젊은 편에 속한다. 따라서 본 연구결과는 지질시대가 오래된 미국의 중동부 지역보다 미국 서부 지역의 지진원 및 지각물질의 감쇠값에 보다 유사한 값을 보여주고 있어 지질시대에 대한 일관성을 나타낸다.

## 참 고 문 헌

1. Noh and Lee, 1994, Estimation of peak ground motion in the southeastern part of the Korean Peninsula(I): estimation of spectral parameters, Jour. Geol. Soc. Korea, vol 30, 3, 297-364.
2. 박동희, 이정모, 김성균, 2000, 한반도 동남부

- 의 지진파 감쇠, 지진원 요소, 지진공학회지, vol 4, 99-106.
- 3. Atkinson and Silver, 1997, An Empirical Study of Earthquakes Source Spectra for California Earthquakes, BSSA, vol 87, No 1, pp 97-113.
  - 4. 김성균, 1995, 한반도의 지각구조에 관한 연구, 지질학회지, vol 31, 393-403.
  - 5. Brune, 1970, Tectonic stress and the spectra of seismic shear wave from earthquake, J. Geophys. Res., 75, vol 75, 4997-5009.
  - 6. Press, Teukolsky, and Vetterling, 1997. Numerical Recipes, Cambridge University press, USA..
  - 7. Kim, S. G. and F. Gao, 1997, Preliminary Crustal Studies of the Korean Peninsula using Lg-coda Q, BSAFE( Bull. Seis. Far East), vol 3, No 1, 121-139..