

## 후쿠오카지진의 지진원 및 감쇄특성 연구

김준경<sup>1)</sup>, 오태석<sup>2)</sup>, 유성화<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>세명대학교 자원환경공학과 교수 kimjk1@unitel.co.kr

<sup>2)</sup>세명대학교 자원환경공학과 석사

<sup>2)</sup>세명대학교 자원환경공학과 석사과정

### Analysis of Parameter Characteristics of the Seismic Source and Attenuation using the Fukuoka Earthquakes

JunKyoung Kim<sup>1)</sup>, TaeSeok Oh<sup>2)</sup>, SeongHwa yoo<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Res. & Envi. Geo. Eng., Semyung Univ.

<sup>2)</sup>Res. & Envi. Geo. Eng., Semyung Univ.

<sup>2)</sup>Res. & Envi. Geo. Eng., Semyung Univ.

**요약** : 우리나라는 강진으로부터 관측된 자료의 부족으로 중약지진을 이용한 강진의 감쇄특성 유추 및 지진원 및 전달특성 변수에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 최근 발생한 일본 후쿠오카지진 자료를 이용하여 LM 역산법으로 역산을 수행하였다. 지진원 특성, 지진파전달 특성 전체적으로 안정적인 값을 보여 주었다. 향후 보다 많은 지진자료를 수집하여 분석을 통한다면 보다 신뢰성 높은 결과값을 얻을 수 있다고 판단된다.

**주요어** : 후쿠오카지진, LM 역산법, 부지증폭효과

**Abstract**: The Korean peninsula has been considered as seismically intermediate region, since seismic activities have been not severe for long time and the active tectonic boundary is also located far away. However, the activities of earthquakes have been increased for last decade. significantly. Since currently important structures and facilities are increasing rapidly in the Korean Peninsula, the importance of seismic design are increasing exponentially too. This study used observed ground motion of Fukuoka event including 11 aftershocks and then estimated seismic parameters representing seismic source, propagation effect, and site effects. The results were comparable to those of other studies. The results could be used seismic design of the important structures and facilities in Korean peninsula.

**Keywords**:

## 1. 서론

우리나라는 조산대와 떨어져 있기 때문에 그동안 지진 안전지대처럼 여겨져 왔다. 하지만 지난 몇 해를 살펴보면 중소 규모의 지진이 다시 급증하고 있음을 알 수 있다. 급속한 경제성장을 통해 늘어난 여러 대규모 및 주요 구조물들에 대해 지진재해에 대한 내진설계 기준이 설정되어 있거나 개정중에 있으며 국내 지진을 대표하는 기준인지에 대해 아직 미흡한 실정이다. 또한 우리나라는 중·저 지진활동 지역으로서 공학적 특성상 중요한 강진으로부터 관측된 자료가 부족하다. 따라서 국내에서 발생한 중·저 지진을 이용하여 지진원 및 전달특성 변수에 대한 연구가 필요하며 이를 통해 내진설계 기준에 대응되는 강진에 대한 특성을 유추할 수 있다.

## 2. 연구 방법

관측된 다양한 규모의 관측지반지동 자료를 수집하고 LM(Levenberg Marquardt) 역산법을 적용하여 지진원상수( $f_c$ ,  $M_0$ ,  $\sigma$ ) 및 감쇠상수( $Q_0$ ,  $\eta$ ,  $k$ )를 계산하였다. 그 결과값을 기존의 국내·외 연구결과와 비교분석하였다.

### 2.1 연구방법

본 연구에서 적용된 지진원 모델은 단일 코너 주파수 및 일정한 응력강하(Stress Drop)의  $\omega^2$  지진원 모델을 이용하였다. 이러한 지진원 모델로부터 관측이 가능한 강지진동을 유추하기 위해 일반적으로 추계학적 모델을 적용하고 있으며 강지진동에 대한 추계학적 모델은 RVT(Random Vibration Theory) 방법을 적용하고 있다. RVT 방법을 적용한 가속도지반진동에 대한 Fourier Spectrum의 형태  $a(f)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$a(f) = C \frac{f^2}{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^\gamma} \frac{M_0}{R} P(f) A(f) e^{\frac{-\pi f R}{\beta_0 Q(f)}} \quad (1)$$

여기에서,

$$C = \left(\frac{1}{\rho_0 \beta_0^3}\right) \cdot (2) \cdot (0.55) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \cdot \pi, \quad f = \text{주파수}$$

$$M_0 = \text{지진모멘트(seismic),} \quad R = \text{진원거리(hypocentral)}$$

$$\beta_0 = \text{지진원에서의 S파속도,} \quad \rho_0 = \text{진원에서의 밀도}$$

$$Q(f) = Q_0 f^\eta \text{ (quality),} \quad A(f) = \text{지각증폭}$$

$$P(f) = \text{고주파제거 필터,} \quad f_0 = \text{지진원 코너주파수}$$

$$\gamma = 1, 2, 3 \text{ (} f_0 \text{ 이상에서의 지진원 변위스펙트럼 감쇠율)}$$

C는 상수로서 지진원 밀도( $\rho_0$ )와 S파 속도, 자유면 효과(2배수), 구면으로 방사하는 지진에너지의 평균값(0.55), 2개의 수평방향으로의 에너지 분리( $1/\sqrt{2}$ )와 관련된 파의 특성을 포함한다. 지진원 규모는 지진모멘트와 고주파 응력 파라미터 즉 응력강하( $\Delta\sigma$ )의 두 개의 독립적인 파라미터에 의해서 결정된다. 지진모멘트와 모멘트규모의 상관관계는 지진모멘트 규모의 정의(Kanamori)에 따라 다음과 같은 관계식이 있다.

$$\log M_0 = 1.5M_w + 16.05 \quad (2)$$

응력강하( $\Delta\sigma$ )는 지진원 코너주파수와 지진모멘트( $M_0$ ) 등과 관련되어 있으며 다음과 같은 관계식으로 표현된다.

$$f_0 = \beta_0 (\Delta\sigma / 8.44M_0)^{1/3} \quad (3)$$

응력강하는 고주파 응력강하(혹은 응력파라미터)라고도 불리며 그 이유는 지진원 코너주파수 이상의 고주파 대역에서 Fourier Spectrum이 응력강하에 비례하여 스케일링되기 때문이다.

위식에서 제시된 지각증폭을 나타내는  $A(f)$ 는 지진파가 지진원으로부터 지표 가까이 얽은 심도에 존재하는 저속도층(미국 서부의 경우 약 100m - 300m; 국내의 경우 15m - 30m)을 전파함에 따라 고주파수 대역에서 파의 진폭이 주파수에 의존하여 증가하는 현상을 설명한다. 지진파의 진폭 증폭률은 평균 지각속도와 지표 근처의 전단파 속도 및 밀도에 의해 결정된다. 본 논문에서는  $A(f)$ 에 대한 국내 연구결과가 충분하지 못하여 저주파수 대역에서 고주파수 대역까지 전체 주파수 대역에 걸쳐 증폭계수 1을 사용하였다.

$P(f)$  필터는 일정한 주파수값 이상에서 스펙트럼값이 급격히 감소하는 현상을 모델화하였다. 이러한 고주파영역에서의 스펙트럼값의 감쇠는 광역적인 현상, 관측소 부지부근 지표에서의 감쇠나 혹은 지진원 특성 자체 등에 의해 설명된다.

고주파 영역에서 급격한 감소를 모델화하는 이론은 f-max 및 kappa 모델과 같은 2가지 종류가 있으며 본 연구에서는 Anderson and Hough(1984)의 고주파 감쇠필터 모델인 kappa 모델을 적용하였으며 다음과 같은 형태로 제시된다.

$$P(f, r) = e^{-\pi x(r)f} \quad (4)$$

식(4)의 주된 구성요소인  $x(r)$ 은 지진파가 지진원으로부터 관측점까지 지각을 경유할 때 발생하는 Intrinsic 감쇠의 효과를 표시하며 크게 2가지 효과 즉 관측소 부지부근의 탄성적 감쇠특성 효과 및 진앙거리와 관련된 지각전체 구조에 의한 효과로 구성되어 있다. 따라서  $x(r)$ 는 진앙거리( $r$ ) 및 S파속도( $\beta$ ), 부지직하의 Soil층 두께  $H$  및 Soil층 두께  $H$ 에 걸친 평균적인 전단파 Q값에 영향을 받는다.

위에서 제시한 2가지 종류의 고주파 대역에서의 감쇠효과를 모두 고려한 식은 아래 식에 의해 모델화 된다.

$$x(r) = \frac{H}{\beta Q_s} + \frac{r}{\beta_0 Q(f)} \quad (5)$$

위 식 중에서 첫 번째 항은 진앙거리가 0인 경우에 해당하며  $x(0)$ 로 표시 되며 식(6)과 같이 표현된다.

$$x(0) = \frac{H}{\beta Q_s} \quad (6)$$

식(6)에서  $\bar{\beta}$ ,  $\overline{Q_s}$ 는 관측소 부지하부의 Soil층의 깊이 H 전체에 대한 이들 값들의 평균을 의미한다. 이 식에서 제시된 바와 같이 진앙거리가 영(0)인 경우  $x$ 값은 주파수와 무관하게 모델화 가능하며 관측소부지 부근 특성에 좌우되는 변수값으로 간주된다. 본 연구에서는 2가지 종류의 고주파대역에서의 감쇠특성 중에서 특히 진앙거리가 영(0)인 경우  $x(0)$ 를  $P(f, r)$ 과 달리  $P(f)$ 로 식(1)에서 표시하였고 이를 구해야 하는 변수로 간주하여 분석하였다.

다음으로 지진파가 지진원으로부터 관측점까지 지각을 경유할 때 발생하는 Intrinsic 감쇠의 2가지 종류의 효과 중에서 2번째 효과에 해당하는 진앙거리와 관련된 지각전체 구조의 의한 효과는 주파수의 함수인  $Q(f)$ 로 모델링 된다. 따라서 이러한 감쇠특성은 식(4)의  $x(r)$  중에서 2번째 항에 해당되며 진앙거리가 증가함에 따라 감쇠특성은  $Q(f)$  및 진앙거리 변수로 표현되며 식(1)에서 마지막 항에 해당한다. 따라서 감쇠에 관련항을 정리하면 아래식으로 주어진다.

$$K(r) = K(0) + \frac{r}{\beta_0 Q(f)} = P(f) + \frac{r}{\beta_0 Q(f)} \quad (7)$$

국내에 적합한 식(1)의 추계학적 지진모델 파라미터를 찾기 위해 본 연구에서는 반복적인 비선형역산방법을 채택하였다. 일반적으로 모델 파라미터 벡터  $a$ 를 갖는 변수  $x$ 의 비선형 함수는  $y = y(x; a)$ 와 같이 표현될 수 있으며 임의의 변수값  $x_i$ 에서의 측정값  $y_i$ 가 존재한다면 최적 모델파라미터  $a$ 는 다음과 같은 함수(X2)을 최소화하여 얻어질 수 있다.

$$X^2(a) = \sum_{i=1}^N [y_i - y(x_i; a)]^2 \quad (8)$$

## 2.2 연구자료

국내의 주요 지진관측망은 한국전력 전력연구원, 한국지질자원연구원, 한국 원자력안전기술원, 기상청 및 몇 개의 대학에서 공동으로 운영하고 있다. 본 연구에서 사용한 자료는 후쿠오카 본 지진 및 후지진을 선정하였다.

## 2.3 연구과정

LM 역산방법론을 이용하여 지진원 및 전달특성 변수를 비선형적으로 동시에 분석하는데 중점을 두었다.

### 2.3.1 자료수집 및 선정

최근 발생한 일본 후쿠오카 지진은 지진원의 진앙위치가 아주 좁은 지역에서 발생한 자료이기에 타 지진에 비해 거의 동일한 지역에서 발생하였다고 간주할 수 있으며 진앙지와 관측소 사이의 거리가 멀어 Event에 대한 각 관측소의 방위각이 일정하다고 판단되어진다. 따라서 2005년 3월 20일부터 2005년 5월 2일까지 발생한 일본 후쿠오카 지

진 기록 중 규모 3.9 이상의 가속도자료에서 E-W 및 N-S 방향의 수평성분만을 이용하여 연구를 실행하였다.

2.3.2 Calculation of Epicentral Distance

S파 길이를 결정하기 위해 각 event에 대해 관측소별 진앙거리를 계산하였다.

2.3.3 S-wave Windowing

S-wave Window간격은 Rayleigh 파를 최대한 배제하기 위해 window 시작점은 S파 시작점 2초전으로 하고 진앙거리에 따라 변화하는 S파 window 길이를 결정하였다.

2.3.4 Cosine Tapering

스펙트럼 양끝 5%에 대하여 Cosine Tapering을 수행하였다.

2.3.5 Fourier Spectrum의 벡터합 계산

Cosine Tapering까지 거친 자료를 Analyst 프로그램을 이용하여 각각 Fourier Spectrum을 구하였으며, Noise 성분을 제거한 후 각 주파수에 대한 E-W 및 N-S 성분의 Fourier Spectrum 값에 대해 벡터 합을 계산하였다.

2.3.6 Inverse Calculation

지진모델 파라미터를 추정하는 Silva의 프로그램(NFITM)을 사용하여 역산을 수행하였다.

2.4 연구결과

효과적인 역산수행으로 최적값을 얻기 위해 주파수 대역의 범위 조절, 규모값의 고정 및 변수화, 규모에 따른 분류 등 여러 가지 조건에 대해서 역산을 수행하였다.

Table 1. 본 연구 자료와 EUS, WUS & Domestic결과값 비교

Parameters	$Q_0$	$\eta$	$\Delta\sigma$	$\alpha$	$R_0$
WUS	220	0.60	65	0.040	-
EUS	351	0.84	120	0.006	-
노명현 외(1995)	1749		50	0.013	
연관희 외(2002)	348	0.52	33.7	0.019	50
조남대 외(2003)	1820	0.87	92	0.016	-
정태웅 외(2001)	250	0.70	-	-	-
정제원 (2005)	361.5	0.91	33.4	0.028	65
이번 연구	264.6	0.48	39.9	0.020	65

연구 수행결과 일반적으로 기반암조건 혹은 시추공에 설치한 관측소만으로 역산을 수행한 Case 17(MW변수)의 결과값을 제시하였다. 본 연구결과를 미국 동부 및 서부 지역과 개략적으로 비교할 경우 지각전체의 지진파의 감쇄특성 상수인  $Q_0$ 값은 미국서부 지역의 대표값보다 다소 높게 분석되었으며 미국동부 대표값, 연관희 외(2002) 및 정제원(2005)에서 제시한 값보다 낮게 분석되었으며 또한 지배방정식의 차이로 7배 이상의 차이가 존재하는 값이 나타났다.  $\alpha$ 값은 미국 동부지역과 서부지역 대표값의 중간값으로 연관희 외(2005)와 동일한 값을 보여주고 있다.  $\eta$ 값은 미국서부 대표값 및 연관희 외(2002)와 비슷한 결과값을 보이고 있다.  $\Delta\sigma$ 값은 다른 연구와 비슷한 값이 나타났으며 특히 연구 대상지진 중 2005/03/20(ML 6.5)에 대한  $\Delta\sigma$ 값은 185bar로 분석되었으며 동일한 지진을 사용한 연관희 외(2005)에 의해 발표된  $\Delta\sigma$ (170bar)값과 비슷한 값이나

타나고있다.

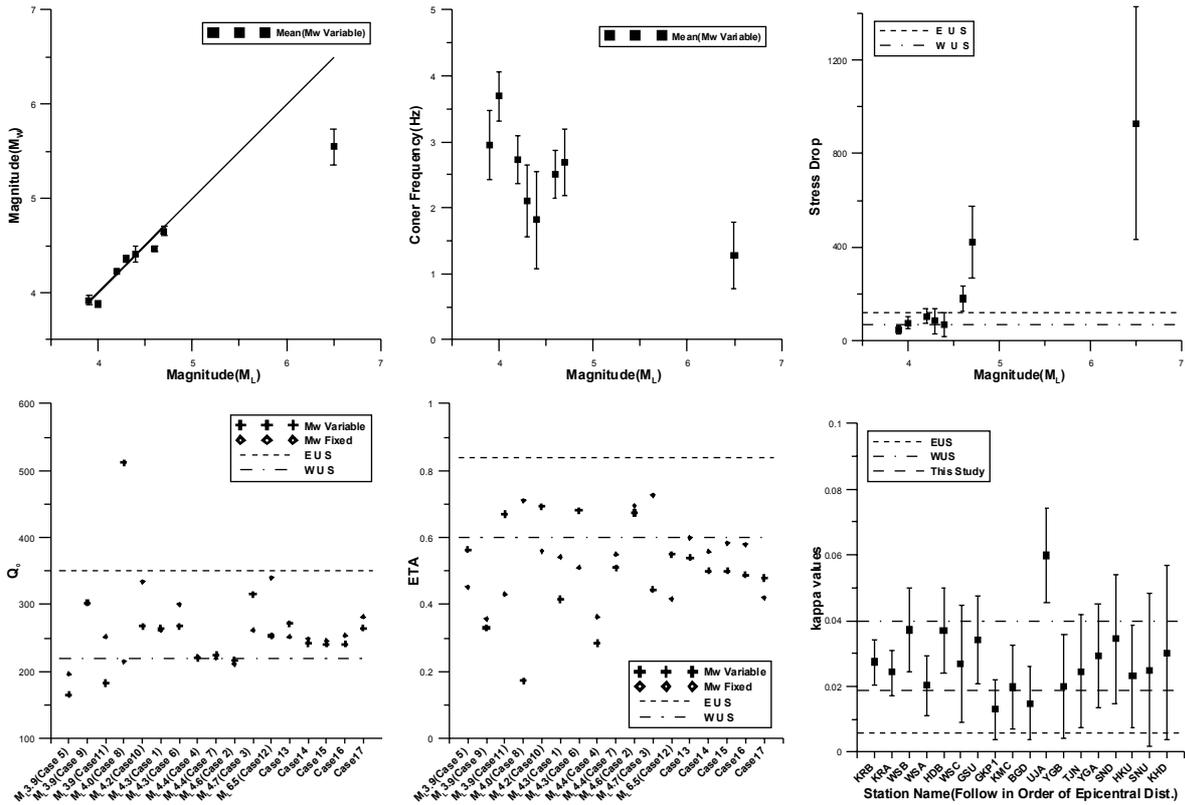


Fig. 1. 역산결과에 따른  $M_w$ ,  $f_c$ ,  $\Delta\sigma$ ,  $Q_0$ ,  $\eta$ ,  $\kappa$  값의 비교

### 3. 결론

기존의 연구결과 값들과 유사하게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 향후 관측소의 부지 특성을 고려한 연구 분석을 통하여 지진원의 계수 및 전달특성 계수를 분석하여 역산후 이번 연구 결과와 비교연구를 한다면 더욱 신뢰도가 높아질 것이다. 그리고 더욱 많은 지반진동 관측자료의 처리를 통해 지진규모계산 및 부지고유특성의 추정 등 내진설계에 중요 자료로 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

### 참고문헌

- 김성균, 박윤경, 전명순 2000, 한반도 남동부의 Q구조 Coda 파 연구 결과, 지질학회지 제 36권 제 4호, 529-544.
- 연관희, 장천중, 이종립 2001, 전력연구원 지진관측망 계측지진 분석을 위한 사전자료 처리. 한국지진공학회 춘계학술 발표회, 58-65.
- 연관희, 박동희, 김성주, 최원학, 장천중 2001, 지진관측자료의 효과적인 활용에 관한 고찰. 한국지진공학회 추계학술 발표회, 34-43.
- 연관희, 박동희, 장천중, 최원학, 이대수 2005, 후쿠오카 지진('05. 3. 20, MJMA=7.0)에 대한 일본 인근 지진관측소와 국내 지진관측소의 주파수응답특성 비교, 지구물리 제8권, 1호, 15-21