

관측소 부지증폭 특성을 고려한 후쿠오카 지진특성 연구

오태석¹⁾, 유성화²⁾, 김준경²⁾

¹⁾세명대학교 자원환경공학과, otae21@naver.com

²⁾세명대학교 자원환경공학과

Analysis of Fukuoka Earthquakes Characteristics considering site amplification

Taeseok Oh¹⁾, Seonghwa Yoo²⁾, Junkyoung Kim²⁾

¹⁾Res. & Envi. Geo. Eng., Semyung Univ.

²⁾Res. & Envi. Geo. Eng., Semyung Univ.

요약 : 우리나라는 강진으로부터 관측된 자료의 부족으로 중약지진을 이용한 강진의 감쇠특성 유추 및 지진원 및 전달특성 변수에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 최근 발생한 일본 후쿠오카지진 자료를 이용하여 LM 역산법으로 역산을 수행하였다. 이때 부지증폭효과, 관측소의 조건 및 규모의 변수화에 따라 각각 역산을 수행한 결과 부지증폭효과를 고려한 경우 Bed Rock으로 판단되는 관측소만의 역산 결과값과 유사한 값을 확인하였다. $\Delta\sigma$ 의 경우 부지증폭효과를 고려하지 않은 Case 1 및 Case 5에서 1108bar 및 185bar로 나타났으며 부지효과를 고려한 Case 3 및 Case 7에서는 147bar 및 146bar로 안정적인 값을 보이고 있다. 향후 보다 많은 연구 분석을 통한다면 보다 신뢰성 높은 결과값이 나타날 것으로 판단된다.

주요어 : 후쿠오카지진, LM 역산법, 부지증폭효과

Abstract : The Korean peninsula has been considered as seismically intermediate region, since seismic activities have not been severe for long time and the active tectonic boundary is also located far away. However, the activities of earthquakes have been increased significantly for last decade. 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, considering site amplification. The results were comparable to those of other studies in the same region. The results could be used as basic important parameters for seismic design of the important structures and facilities in Korean peninsula.

Keywords : Korean peninsula, Fukuoka event, site amplification

1. 서론

우리나라는 그동안 지진 안전지대처럼 여겨져 왔다. 지진이 발생하는 조산대와 떨어져 있기 때문에 안심해 온 것이다. 하지만 지난 몇 해를 살펴보면 지진이 다시 급증하고 있음을 알 수 있다. 급속한 경제성장을 통해 늘어난 여러 대규모 및 주요 구조물들은 지진 재해에 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 부족하여 중·저 지진을 이용한 강진의 감쇠특성을 유추하여야 할 필요성이 있으며 중·저 지진의 지진원 및 전달특성 변수에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 H/V 방법을 이용하여 우리나라 지역에 따른 주파수대의 적합한 부지증폭효과를 고려하여 중·저 지진의 지진원 및 전달특성 변수에 대한 연구를 하였다.

2. 연구목적 및 방법

중·소규모의 관측지반지동 자료를 H/V를 고려한 LM(Levenberg Marquardt) 역산법을 이용하여 지진원상수($f_c, M_0, \Delta\sigma$) 및 감쇠상수(Q_0, η, k)를 계산하였으며 그 결과 값을 기존의 국내·외 자료와 비교연구하고, 향후 더 많은 지반지동 관측자료의 처리를 통한 내진설계에 중요 자료로 사용하기 위함이다.

(1) 연구방법

지진기록을 이용한 부지효과의 평가는 배경잡음을 이용한 Nakamura(1989)의 연구에 의해 제안되었다. H/V비는 지진동의 푸리에 스펙트럼의 주파수 함수를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\log(H/V) = (\log H_1 + \log H_2)/2 - \log V \quad (1)$$

여기서, H_1, H_2 는 수평성분을 나타내고 V 는 수직성분을 나타낸다.

추계학적 지진모델은 단일 코너 주파수 및 일정한 응력강하(Stress Drop)의 ω^γ 지진원 모델을 이용한다. RVT(Random Vibration Theory) 방법은 파워스펙트럼으로부터 시간영역의 최대값을 추정하는 방법으로 가속도의 최대지반가속도와 RMS(Root-Mean-Square), 응답스펙트럼 값을 관련지을 수 있다. 가속도 Fourier Spectrum의 형태 $a(f)$ 는 다음과 같이 주어진다.

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

여기에서,

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

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

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

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

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

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

C는 상수로서 지진원 밀도(ρ_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.

$$\log M_0 = 1.5M_w + 16.05 \quad (3)$$

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

$$f_0 = \beta_0 (\Delta\sigma / 8.44M_0)^{1/3} \quad (4)$$

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

위식에서 제시된 지각증폭을 나타내는 $A(f)$ 는 지진파가 지진원으로부터 지표 가까이 얇은 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.

$P(f)$ 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.

(2) 연구자료

본 연구에서 사용한 자료는 최근 일본 후쿠오카 인근에서 일어난 2005년 3월 20일(규모 6.5)부터 2005년 5월 2일(규모 4.3)까지 발생한 지진 목록 중 규모 3.9 이상인 기록만을 선정하여 사용하였다. 이용된 자료는 한국지질자원연구원에서 기록된 가속도자료의 분석을 통하여 감쇠효과를 계산하였다.

(3) 연구과정

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 지진 기록 중 규모 3.9 이상의 가속도자료를 이용하였으며 EW, NS, UD 방향의 성분을 이용하여 연구를 실행하였다. <표 1>은 자료분석에 이용된 지진목록과 각 지진목록에 따른 관측소를 나타내고 있다.

2) Calculation of Epicentral Distance

S파 길이를 결정하기 위해 각 event에 대해 관측소별 진앙거리를 계산하였다.

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.

4) Cosine Tapering

스펙트럼 양끝 5%에 대하여 Cosine Tapering을 수행하였다.

5) Fourier Spectrum의 벡터합 계산

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

6) Calculation of H/V Ratio

벡터 합된 수평성분과 수직성분을 이용하여 H/V를 계산하였으며 결과값에 대하여 Hanning Windowing을 실시하였다.

7) Inverse Calculation

지진모델 파라미터를 추정하는 Silva의 프로그램(NFITM)에 6)의 결과값을 적용하여 역산을 수행하였다.

(4) 연구결과

효과적인 역산수행으로 최적값을 얻기 위해 관측소의 조건에 따른 분류, M_w 값의 고정 및 변수화, 부지증폭효과 고려에 따른 분류에 대해서 역산을 수행하였다. <표 2>는 역산 수행 시 각 Case에 대해 나타내고 있다.

표 1. 자료분석에 이용된 지진목록 및 관측소

No.	Event	Lat.	Log.	M_L	Station Name
1	2005/05/02	33.7713	130.2324	4.3	BGD, GKP1, GSU, HDB, HKU, KHD, KMC, KRA, KRB, SND, SNU, TJN, UJA, WSA, WSB, WSC, YGA, YGB
2	2005/04/20	33.7379	130.2116	4.6	BGD, GKP1, GSU, HDB, HKU, KHD, KMC, KRA, KRB, SND, SNU, TJN, UJA, WSA, WSB, WSC, YGA, YGB
3	2005/04/20	33.7116	130.2677	4.7	BGD, GKP1, GSU, HDB, HKU, KHD, KMC, KRA, KRB, SND, SNU, TJN, UJA, WSA, WSB, WSC, YGA, YGB
4	2005/04/10	33.5419	129.9002	4.4	BGD, GKP1, GSU, HDB, KHD, KMC, KRA, KRB, SND, TJN, WSA, WSB, WSC, YGA
5	2005/03/25	33.9128	130.1575	3.9	BGD, GKP1, GSU, HDB, HKU, KHD, KRA, KRB, SND, TJN, WSA, WSC
6	2005/03/22	33.8668	130.0855	4.3	BGD, GKP1, GSU, HDB, HKU, KHD, KMC, KRA, KRB, SND, SNU, TJN, WSA, WSB, WSC, YGB
7	2005/03/21	33.8175	130.0618	4.4	BGD, GKP1, GSU, HDB, HKU, KHD, KMC, KRA, KRB, SND, SNU, TJN, WSA, WSB, WSC, YGA
8	2005/03/21	33.8381	130.1983	4.0	GKP1, GSU, HDB, HKU, KHD, KMC, SND, TJN, WSA, WSB
9	2005/03/20	33.7734	130.0191	3.9	BGD, GKP1, GSU, HDB, HKU, KHD, KMC, SND, TJN
10	2005/03/20	33.7905	129.8901	4.2	BGD, GKP1, GSU, HDB, HKU, KHD, KMC, SND, SNU, TJN
11	2005/03/20	33.8183	130.0974	3.9	BGD, GKP1, GSU, HDB, KMC, SND, TJN
12	2005/03/20	33.7620	130.0954	6.5	BGD, GKP1, GSU, HDB, HKU, KHD, KMC, SND, SNU, TJN

표 2. 역산 수행 시 각 Case에 따른 Data 목록

Case	Data	Case	Data
1	All Station(M_w Vari. HV(X))	5	Bed Rock Station(M_w Vari. HV(X))
2	All Station(M_w Fix. HV(X))	6	Bed Rock Station(M_w Fix. HV(X))
3	All Station(M_w Vari. HV(O))	7	Bed Rock Station(M_w Vari. HV(O))
4	All Station(M_w Fix. HV(O))	8	Bed Rock Station(M_w Fix. HV(O))

표 3. 본 연구 자료와 EUS, WUS & Domestic 결과값 비교

Parameters	Q_0	η	$\Delta\sigma$	χ	비고
WUS	220	0.60	65	0.040	
EUS	351	0.84	120	0.006	
Case 1	241.7	0.500	207.3	0.020	
Case 2	248.1	0.558	90.6	0.031	
Case 3	204.3	0.543	68.9	0.020	
Case 4	189.2	0.625	54.5	0.030	
Case 5	264.6	0.479	59.9	0.020	
Case 6	281.7	0.420	47.5	0.016	
Case 7	215.3	0.494	59.5	0.021	
Case 8	209.9	0.489	56.1	0.019	

<표 3>에 각 Case에 대한 연구결과의 결과값을 제시하였다. 본 연구결과를 미국 동부 및 서부 지역과 개략적으로 비교할 경우 지각전체의 지진파의 감쇠특성 상수인 Q_0 값은 미국서부 지역의 대표값보다 다소 비슷하게 분석되었으며 미국동부 대표값보다 낮게 분석되었다. χ 값은 미국 동부지역과 서부지역 대표값의 중간값을 보여주고 있다. η 값은 미국 서부지역 대표값보다 낮은 결과값을 보이고 있다. $\Delta\sigma$ 값은 Case 1을 제외한 다른 경우의 결과값들은 미국 서부지역의 결과값과 비슷한 값이 나타났으며 특히 연구 대상지진 중 Case 3에서 2005/03/20(ML 6.5)에 대한 $\Delta\sigma$ 값은 147bar로 분석되었으며 동일한 지진을 사용한 연관희 외(2005)에 의해 발표된 $\Delta\sigma$ (170bar)값과 비슷한 값이 나타나고 있다.

<그림 1>은 각 역산 결과에 따른 M_w , f_c , $\Delta\sigma$, Q_0 , η , χ 값을 비교한 그림이다. 식 (4)에서 확인할 수 있는바와 같이 M_w 와 f_c 의 반비례 관계를 아래 그림에서 확인할 수 있으며 M_w , f_c 및 $\Delta\sigma$ 를 살펴보면 부지증폭효과를 고려하였을 경우 Case 1의 결과값에서 Case 5의 결과값에 가까워지거나 혹은 비슷한 값의 분포를 확인할 수 있다.

kappa값의 경우 부지증폭 효과를 고려한 결과 고려하지 않은 경우보다 대다수의 관측소에서 낮은 결과값을 보이는 것으로 확인되었다.

3. 결론

M_w , f_c 및 $\Delta\sigma$ 등에서 살펴본 결과 부지증폭효과를 고려한 경우 Case 5에서 Bed Rock에 위치하고 있다고 판단되는 관측소의 자료로 역산한 결과값과 비슷한 값의 분포를 확인하였다. 따라서 부지증폭 효과를 고려한 결과 증폭계수를 1로 하여 역산을 수행한 결과보다 상당히 안정적인 값을 얻은 것으로 판단된다. 향후 관측소의 부지 특성을 보다 많은 연구 분석을 통하여 지진원의 계수 및 전달특성 계수를 분석하여 역산 후 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.

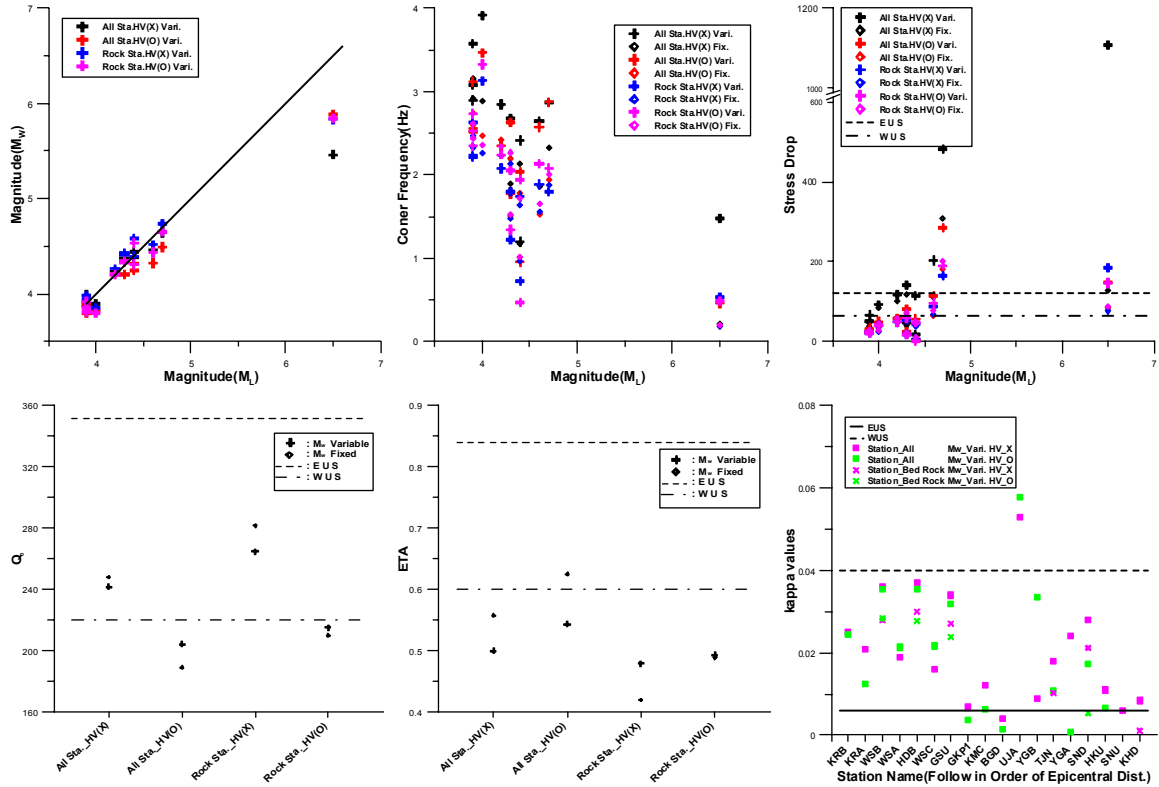


그림 1. 역산결과에 따른 M_w , f_c , $\Delta\sigma$, Q_0 , η , κ 값의 비교

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