

경주지역에서 발생한 3개 지진의 지진원 및 지진파전파 매질특성에 관한 연구

Optimal Design of Friction Dampers based on the Story Shear Force Distribution of a Building Structure

정 제 원*
Jung, Je-Won

김 준 경**
Kim, Jun-Kyoung

국문요약

본 연구는 경주부근에서 일어난 3개의 지진 (1999년 4월 24일, 규모 3.3, 6개 관측소; 1999년 6월 2일, 규모 4.0, 14개 관측소; 1999년 9월 12일, 규모 3.2, 7개 관측소) 으로부터 27개의 관측된 지반진동 자료를 이용하여 지진원 및 지진파감쇄특성 변수값을 분석하였다. 본 연구에서는 구하고자 하는 모든 값을 동시에 비선형적으로 분석하기 위해 LM (Levenberg-Marquardt) 역산방법을 적용하였고 전단파 에너지를 이용하였다. 3개지진의 평균 응력강하값은 약 48-bar이고 본 연구에 이용된 모든 관측소 부지부근 지진파감쇄 κ 값의 평균은 0.0312-sec로 분석되었다. 또한 광역 지진파감쇄값인 Q_0 과 η 값은 각각 417 및 0.83으로 분석되었다. 특히 지진파감쇄 κ 값은 미국 동부지역 대륙값 보다 훨씬 크고 미국 서부지역 대륙값 보다 약간 작은 값을 보여주고 있어 관측소 부지종류 특성에 대한 분석자료가 있으면 보다 의미있는 결과를 얻을 수 있다고 판단된다. 본 연구에서 분석된 지진원 및 지진파감쇄 특성 변수값들은 지배방정식의 차이 등으로 인해 기존의 연구결과와 일부 파라메타값에 있어서 다소 커다란 차이를 보여주고 있다.

주요어 : 응력강하, 카파값, 역산, 지진파감쇄변수, 코너주파수

ABSTRACT

Parameters including the seismic sources and the elastic wave propagation characteristics were analysed using the observed ground motions from 3 Kyoungju region earthquakes. The Levenberg-Marquardt algorithm was applied to invert all the variables non-linearly and simultaneously with S wave energy in frequency domain. Average stress drop of 3 events and local attenuation parameter κ were estimated to about 48-bar and 0.0312 respectively. Regional attenuation parameter, Q_0 and η , were also estimated to be about 417 and 0.83. κ values are much higher than that of EUS, even though smaller than that of WUS. All these values resultant from this study show that there are differences in some parameters of other studies due to differences in the governing equation. of acceleration motions

Key words : Levenberg-Marquardt algorithm, κ , Q_0 , η , stress drop

1. 서 론

우리나라는 한반도 주변에서 지진활동이 가장 활발한 일본지역과 거리가 멀기 때문에 그동안 지진 안전지대처럼 보여 온 것도 사실이다. 하지만 지난 몇 해 동안 홍도해역 지진(2003.3.23, 규모 4.9), 백령도지진(2003.3.30, 규모 5.0) 및 울진지진(2004.5.29, 규모 5.2) 등 중규모의 지진이 자주 발생하고 있다. 따라서 급속한 경제성장을 통해 늘어난 다양한 종류의 대규모 및 주요 구조물들의 지진재해에 대한 대비가 필요하다. 이를 위해 국내에서 토목 및 건축분야에서 내진설계 기준이 이미 설정되어 있거나 점진적으로 개정 중에 있다.

우리나라는 역사적으로 규모 7이상의 지진이 발생한 적도 있으나 장기간의 역사지진활동을 고려할 때 중약 정도의 지진활동 지역으로 평가되기도 한다. 따라서 내진공학설계를 효과적으로 수행하기 위해 설계지진규모에 상응하고 또한 실제 국내에서 관측된 필요한 강진자료가 특히

부족하다. 따라서 내진설계 기준설정을 위하여 중소 규모의 지진으로부터 관측된 지반진동을 이용하여 설계지진규모에 대응하는 강진자료를 유추할 필요가 있다. 따라서 중 규모 지진의 지진원 및 전달특성 변수에 대한 연구가 반드시 필요하다.

본 연구에서는 제한된 경주지역에서 발생한 3개의 3.0 이상의 중규모의 지진으로부터 관측된 지반진동 자료를 사용하였다. 또한 LM (Levenberg-Marquardt) 역산법을 적용하여 지진원 관련변수(f_0 , $\Delta\sigma$) 및 지진파의 비탄성 감쇠와 관련된 변수(Q_0 , η , κ)를 비선형적으로 동시에 구하였다. 수행한 결과값을 기존의 연구결과와 비교 및 분석하고 국내의 주요 구조물의 내진설계에 중요하게 이용되는 강진자료 합성에 필요한 기초자료로 제시하고자 한다. 이를 위해 본 연구 결과값을 노명현(1994)⁽¹⁾, 정태웅(2001)⁽²⁾, 연관희(2002)⁽³⁾, Junn et al(2003)⁽⁴⁾ 등에 의한 기존 연구결과와 비교하였다.

점진진원을 가정한 Brune(1970)⁽⁵⁾의 ω^2 지진원모델을 이용한 강진동의 추계학적 연구는 1980년대 초반부터 미국을 중심으로 활발히 연구되어왔다. 미국 서부와 동부를 대상으로 Boore(1983)⁽⁶⁾ 및 Atkinson(1984)⁽⁷⁾에 의하여 강지

* 세명대학교 자원환경공학과 대학원

** 세명대학교 자원환경공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 2006년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2005. 11. 11 / 심사종료일 : 2006. 2. 10)

진동의 추계학적 연구가 진행되어왔으며 그 이후 Atkinson and Boore(1997)⁽⁸⁾, Toro and McGuire(1987)⁽⁹⁾ 등으로 계속되어 왔다. 이들 연구는 일정한 주파수대역과 유한한 지속시간을 갖는 백색 가우스 잡음(gaussian white noise)에 지진원의 특성을 갖는 진원 모델 스펙트럼의 포락선을 이용하여 합성지진파를 계산할 수 있다는 Hanks and McGuire(1981)⁽¹⁰⁾의 연구결과에 기초를 두고 있다.

2. 가속도운동 지배방정식 이론

추계학적 지진모델은 단일 코너 주파수 및 일정한 응력강하(stress drop)의 ω^2 형태의 지진원 모델을 이용하였다. 가속도시간이력에 대한 푸리에스펙트럼은 $a(f)$ 로 나타내고 여러 가지 형태로 주어질 수 있으나 본 연구에서는 다음의 식을 이용하였다.

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

여기에서

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

- M_0 = 지진모멘트 (seismic), R = 진원거리 (hypocentral)
- β_0 = 지진원부근의 S파속도, ρ_0 = 지진원부근의 밀도
- $Q(f) = Q_0 f^n$ (quality), $A(f)$ = 지각증폭
- $P(f)$ = 고주파계거필터, f_0 = 지진원코너주파수
- $\gamma = 1, 2, 3$ (f_0 이상에서 지진원변위스펙트럼 감쇠율)

위에서 제시된 가속도의 푸리에스펙트럼 지배방정식에서 C는 변수로서 진원지역 부근의 지반의 밀도(ρ_0)와 S파속도, 자유면 효과(2배수), 구면으로 방사하는 지진에너지의 평균값(0.55), 2개의 수평방향으로의 에너지 분리($1/\sqrt{2}$)와 관련된 파의특성을 포함한다. 지진원 규모는 지진모멘트와 고주파영역에서의 응력강하 즉 응력강하($\Delta\sigma$)와 같이 두 개의 독립적인 값에 의해서 결정된다. 지진모멘트와 모멘트 지진규모의 상관관계는 Hanks and Kanamori (1979)⁽¹¹⁾에 의해 제시되었으며 이러한 정의에 따라 다음과 같이 제시 가능하다.

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

식 (2)에서 응력강하($\Delta\sigma$)는 지진원 코너주파수와 지진모멘트(M_0) 등과 상호 관련되어 있으며 다음과 같은 관계식으로 표현된다.

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

식 (3)에서 응력강하는 고주파 응력강하라고도 불리며

이에 대한 이유는 코너주파수 이상의 고주파 대역에서 푸리에 스펙트럼이 응력강하에 비례하여 스케일 때문이다.

식(1)에서 관측소 부지 천부의 증폭특성을 대표하는 $A(f)$ 필터는 지진파가 관측소 하부의 지표 가까이 얕은 심도에 존재하는 저속도층(미국 서부의 경우 약 100m에서 300m; 국내 경주지역의 경우 약 30m)을 전파함에 따라 고주파수 대역에서 파의 진폭이 주파수에 의존하여 증폭되는 현상을 설명한다. 지진파의 증폭률은 관측소 하부의 전단파 속도 및 밀도 등에 의해 결정된다. 본 연구에서는 $A(f)$ 에 대한 국내 연구결과가 충분하지 못하여 역산을 위한 관심 주파수 대역에 걸쳐서 증폭계수 1을 일률적으로 사용하였다.

또한 $P(f)$ 필터는 관측지반진동이 일정한 주파수값 이상에서 스펙트럼값이 급격히 감소하는 현상을 모델화하기 위해 이용된다. 고주파영역에서 스펙트럼값의 감소는 지진원 특성도 영향도 있지만 주로 지진원으로부터 관측소 부지부근 지표까지 통과하는 매질의 비탄성 감쇠특성 등에 의해 설명된다.

고주파 영역에서 관측 강진운동의 급격한 감소를 모델화하는 이론은 f-max 모델 및 kappa 모델과 같은 2가지 종류가 제시되어 있으며 본 연구에서는 Anderson and Hough(1984)⁽¹²⁾의 고주파 감쇠필터 모델인 kappa 모델을 적용하였고 다음과 같은 형태로 제시된다.

$$P(f) = e^{-\pi \cdot \kappa(R) \cdot f} \quad (4)$$

식 (4)의 지수부분의 주된 구성요소인 $\kappa(R)$ 은 지진파가 지진원으로부터 관측점까지 지각을 통과할 경우 발생하는 지진파의 고유의(intrinsic) 감쇠를 나타내며 크게 2가지 효과로 나타낸다. 즉 관측소 부지하부의 약 3-4km부근의 비탄성 감쇠특성 효과 및 거리와 관련된 지각구조 전체에 의한 효과로 구성되어 있다. 위에서 제시한 2가지 종류의 감쇠효과를 모두 고려한 식은 아래 식에 의해 모델화 된다.

$$\kappa(R) = \frac{H}{\beta_0 Q_s} + \frac{R}{\beta_0 Q(f)} \quad (5)$$

식 (5)에서 등호 오른쪽의 첫 번째 항은 거리가 0인 경우에 해당하며 $\kappa(0)$ 으로 표현할 경우 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\kappa(0) = \frac{H}{\beta_0 Q_s} \quad (6)$$

식 (6)에서 $\bar{\beta}$, \bar{Q}_s 는 관측소 부지하부의 전체 soil층의 깊이 H에 대한 전단파 속도 및 Q값들의 평균을 의미한다. 이 식에서 제시된 바와같이 거리가 0인 경우 κ 값은 주파수와 무관하게 모델화 가능하며 관측소 부지부근 특성에 좌우되는 변수값으로 간주된다. 본 연구에서는 2가지 종류의 고주파대역에서의 감쇠특성 중에서 특히 거리가 0

표 1 3개 경주지진에 대한 발생일자, 진앙위치, 진원깊이, 규모 및 관측소명, 진원거리

Event No.	Date	Lat.	Log.	Depth (km)	ML	Station (hypocentral distance: km)
1	1999/04/24	35.8492	129.2592	5.06	3.3	HAK(23.6), BBK(34.4), CGD(46.3), KJM(128.6), SNU(271.8), MUN(277.0)
2	1999/06/02	35.8373	129.3367	1.43	4.0	WSA(18.8), WSN(18.9), WSB(19.5), KRA(56.4), TAG(64.8), KRB(66.8), PUS(86.4), UJA(139.8), TEJ(187.0), TJN(215.7), YGA(267.8), YGB(269.0), SNU(277.9), BGD(314.6)
3	1999/09/12	35.8490	129.2487	5.9	3.2	MKL(13.3), HAK(24.5), BBK(34.8), CHS(39.3), CGD(45.5), KMH(63.5), KJM(128.1)

인 경우 $\kappa(o)$ 를 식 (1)에서 $P(f)$ 로 나타내었고 이를 역산으로부터 구해야 하는 변수로 간주하여 분석하였다.

다음은 지진파가 지진원으로부터 관측점까지 지각을 경유할 때 발생하는 고유감쇠의 2가지 종류중에서 2번째 효과에 해당하는 거리와 관련된 지각전체 구조에 의한 효과는 주파수의 함수인 $Q(f)$ 로 모델링이 가능하다. 이러한 감쇠특성은 식 (5)의 $\kappa(R)$ 중에서 2번째 항에 해당하며 진앙거리가 증가함에 따라 감쇠특성은 $Q(f)$ 및 진원거리의 변수로 표현되며 식(1)에서 마지막 항에 해당한다.

본 연구는 $\kappa(o)$ 및 $Q(f)$ 를 각각 독립변수로 간주하여 비선형적으로 동시에 역산으로부터 구하였다. 하지만 Junn et al(2002)⁽⁴⁾ 등과 같은 일부 다른 연구에서는 지진 관측자료를 이용하여 우선 $\kappa(R)$ 을 구하고 다시 관계식을 이용하여 $Q(f)$ 을 구하는 과정을 따르고 있다. 따라서 $\kappa(o)$, $\kappa(R)$ 및 $Q(f)$ 를 분석하는 방법론이 상이하고 각각의 값을 비교할 때 주의하여야 한다.

3. 연구자료

본 연구에서 사용한 자료는 경주부근에서 일어난 1999년 4월 24일 발생한 지진(규모 3.3)으로부터 6개 관측소, 1999년 6월 2일 발생한 지진(규모 4.0)으로부터 14개 관측소 및 1999년 9월 12일 발생한 지진 (규모 3.2)으로부터 7개 관측소 등 3개의 지진으로부터 27개의 관측된 지반진동 자료이다. 본 연구에서는 전단파 에너지를 이용하였다.

1999년 4월 24일과 1999년 9월 12일 발생한 지진으로부터 관측된 자료는 속도자료이기 때문에 주파수 영역에서 $2 \cdot \pi \cdot f$ 를 곱하여 가속도형태의 자료로 변환하였고 1999년 6월 2일 발생한 지진으로부터 관측된 가속도자료는 변환없이 그대로 이용하였다. 본 연구에서 사용된 관측자료는 표 1에 제시되어 있고 각각 지진발생일시, 진앙위치, 진원깊이, 지진규모 및 관측소 목록을 나타내고 있다. 진앙위치, 진원깊이, 지진규모는 한국지질자원연구원의 분석결과를 참조하였다. 수직성분은 본 논문에서 연구의 대상이 아니기 때문에 제외하였고 또한 수평성분의 S파 에너지 중에서 S/N비가 낮은(약 3.0이하)부분은 자료에서 제외하였다. 또한 표 2에서는 각각의 지진원에서 관측소까지 진원거리를 나타내주고 있다.

본 연구를 위해 한반도에서 발생한 많은 지진 가운데 특히 3개의 경주지진을 선택한 것은 3개의 지진원의 진앙 위치가 아주 좁은 지역내에 한정되어 있어 타 지진에 비

해 거의 동일한 지역에서 발생하였다. 만약 역산을 위해 이용하는 지반진동 관측소가 중복될 경우 지진파전달 경로에 대한 중복성이 증가된다. 따라서 지진파전달 경로에 대한 다양성이 감소하고 지진파전달 경로에 대한 중복성이 증가하여 적어도 해당되는 지진파전달 경로에 대한 역산결과는 분산이 감소된다. 비록 전체지역에 대한 비탄성감쇠 대표 값을 위하여 연구대상 지역내에서 여러가지 다양한 지진파 전파경로가 필요하나 위 경우를 고려하면 적어도 주어진 지진파전달 경로에 대한 역산 결과값 자체에 대해서는 분산이 감소한다고 할 수 있다.

그림 1은 본 연구에서 사용한 지반진동을 관측한 관측소의 진원거리별 분포를 나타내는 그림이다. 이 그림에 의하면 근거리에서 관측된 지반진동 자료가 다소 많고 진원거리가 최대 약 300km부근에서 관측된 자료도 있다. 국내의 일반적인 지각구조를 고려할 때 S파의 지각과 맨틀 경계에 대한 교차거리는 약 55km에서 60km 정도이고 이 범위에서 관측자료가 비교적 풍부하여 역산결과에 대한 신뢰성의 제고에 기여할 수 있다.

4. 연구방법

관측된 지반진동을 LM 역산방법론의 적용하여 지진원 및 지진파감쇠 파라메타와 같은 가속도 지배방정식의 변수 값을 비선형적으로 동시에 분석하였으며 표 2에서 제시된 순서도에 따라 순차적으로 수행하였다.

LM역산 방법을 적용하기 위해 입력자료는 관측된 지반진동을 푸리에 변환후 얻어지는 스펙트럼값 즉 식(1)에

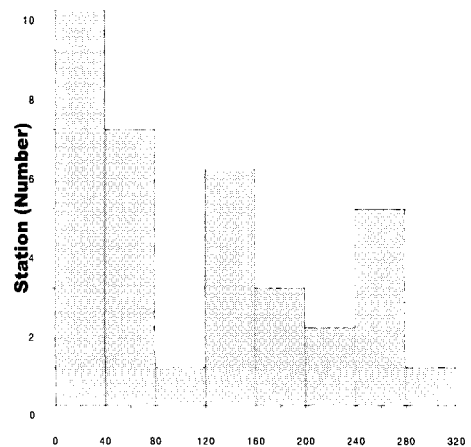


그림 1 거리별 관측소 분포도

표 2 분석방법 순서도

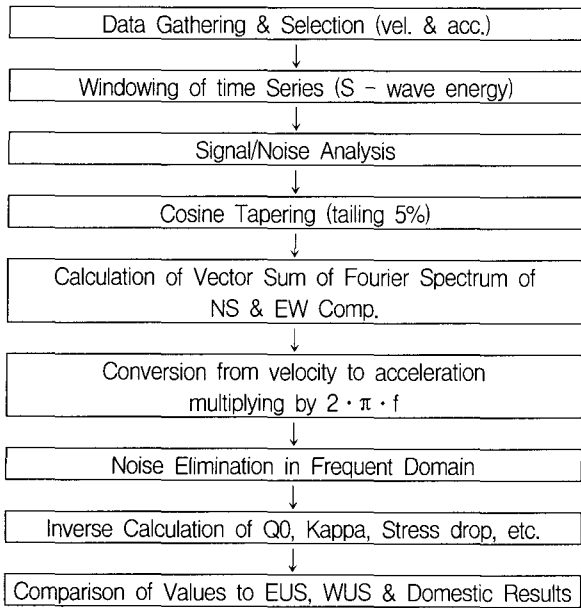


표 3 역산 주파수 범위의 변화에 따른 역산 분석결과

역산 주파수 범위	Q_0	η	$\Delta\sigma$	κ	비고
0.5Hz - 25Hz	412.1	1.06	31.2	0.0352	
0.5Hz - 30Hz	483.8	0.59	58.9	0.0210	
Free Hz - 25Hz	442.7	0.95	33.4	0.0345	
Free Hz - Free Hz	416.9	0.83	48.6	0.0312	고주파 최대영역 30Hz
Ave	438.9	0.86	43.0	0.0304	

서 $a(f)$ 에 해당하고, 역산으로부터 구하고자 하는 변수는 지진원 관련변수(M_w , f_0 , 및 $\Delta\sigma$) 및 지진파감쇄 관련변수($\kappa(o)$, $Q(f)$)이다. 만약 임의의 1개 관측소가 2개 또는 3개 이상의 지진으로부터 지반진동을 중복하여 관측하였을 경우 각각의 지진으로부터 독립적으로 역산하여 평균값을 취하지 않고, 해당 관측소 고유의 $\kappa(o)$ 값 하나가 얻어지도록 모델링하여 역산을 수행하였다.

표 2에서 제시된 S-wave의 시간창 길이는 Rayleigh 파를 최대한 제외하였고, 시간창 시작점은 S파 에너지 도달 전 2초전으로 하고 진원거리에 따라 S파 시간창의 길이를

제시된 공식을 이용하여 조절하였다. 잡음을 제거하기 위해 잡음의 시간창 길이를 S파 시간창의 길이와 동일하게 설정하여 주파수간격 차이 등에 대한 문제점 발생을 사전에 배제하였다.

그림 2는 S파 에너지를 시간창을 이용하여 자료를 선정하는 과정을 보여주는 있고, 1999년 4월 24일 경주지역에서 발생한 지진에 대해 대표적인 예로 CGD 및 KRA 관측소에서 EW 및 NS 성분에서 S파 에너지를 windowing하는 과정을 예시하였다.

5. 연구결과

1999년도에 일어난 경주지역에서 발생한 3개 지진의 관측자료를 동시에 역산한 결과가 표 3 및 그림 3, 4에 각각 제시되어 있다. 표 3에서 제시된 바와 같이 역산 대상의 주파수 대역을 변화시켜 역산을 시도하여 결과를 비교하였다.

우선 역산을 위한 주파수 범위는 본 연구에서 적용된 관측지반진동의 주파수 특성을 고려하여 4가지 경우를 설정하였으며 각각 0.5Hz - 25Hz, 0.5Hz - 30Hz, Free Hz

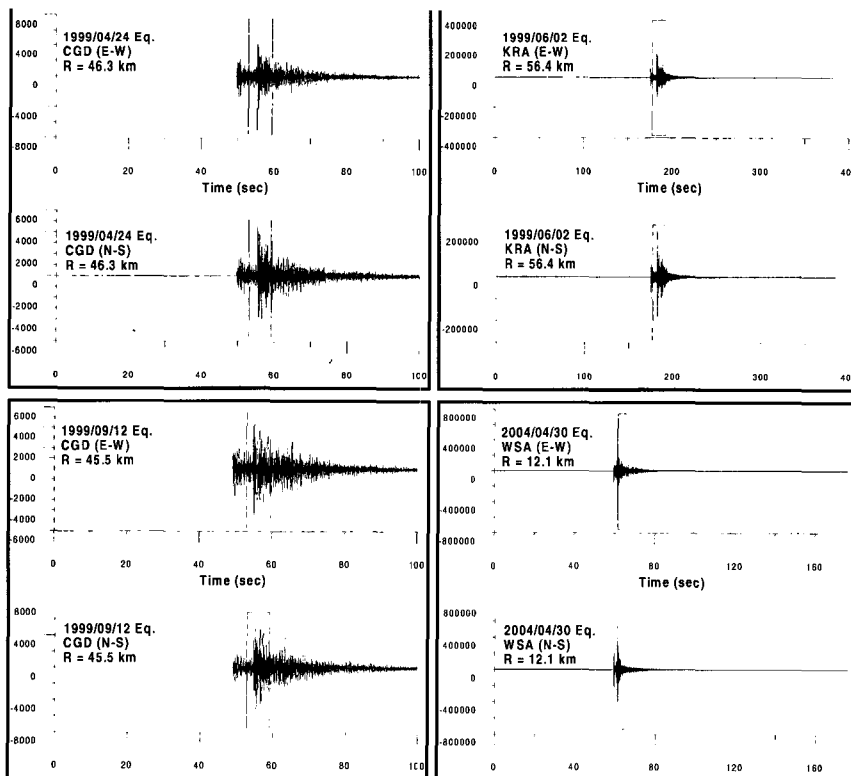


그림 2 CGD 및 KRA 관측소에서 관측된 EW 및 NS 성분에서 S파 에너지 성분을 windowing하는 과정

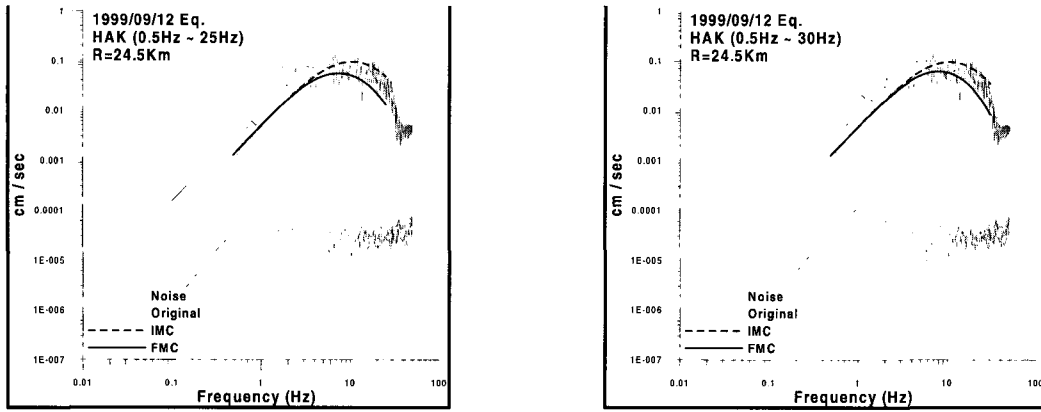


그림 3 0.5Hz-25Hz 및 0.5Hz-30Hz 범위에 대한 역산 결과비교(HAK)

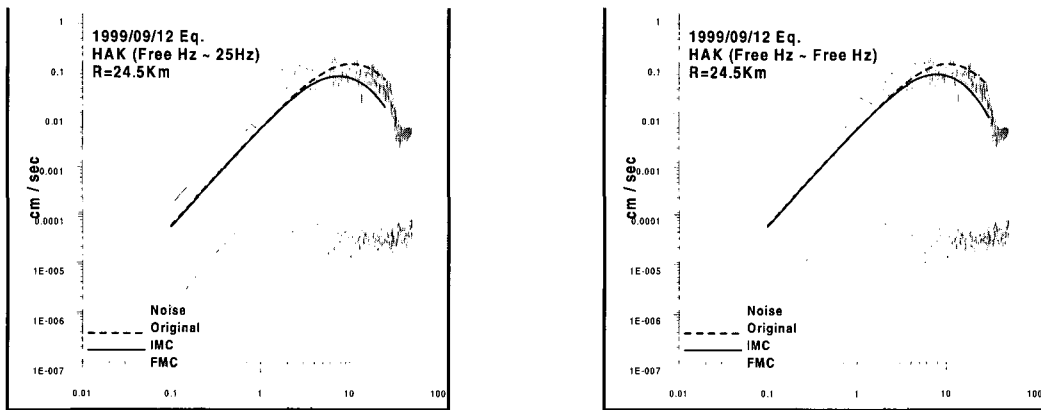


그림 4 Free Hz-25Hz 및 Free Hz-Free Hz 범위에 대한 역산 결과비교(HAK)

- 25Hz 및 Free Hz - Free Hz이다. 여기서 free는 역산을 위해상한 또는 하한 주파수 경계값을 잡음조건에 따라 달리하는 것을 의미한다. 앞의 2가지 경우는 역산을 위한 주파수범위를 고정시켜 역산을 수행하였다. 3번째 경우는 최소 주파수값을 또한 4번째 경우는 최소와 최대 주파수값을 각각의 지반진동의 잡음특성에 따라 달리하여 역산을 수행하였다. 특히 4번째 경우 역산을 위한 최대주파수는 Nyquist 주파수를 고려하여 30Hz로 제한하였다.

그림 3 및 4의 각각에서 1999년 9월 12일 발생한 지진으로부터 HAK 관측소(진원거리 24.5km)에서 관측된 지반진동에 대해 역산을 위한 주파수 범위를 달리하여 역산한 결과가 그림으로 제시되어 있다. 각각의 그림에서 실제 관측 지반진동의 스펙트럼(열은색 직선), 역산을 시작할 때 초기 추정값으로부터 얻어지는 스펙트럼(질은색 점선), 역산결과 얻어지는 합성스펙트럼(질은색 직선) 및 마지막으로 배경잡음의 스펙트럼(열은색 점선) 등 4개의 스펙트럼이 각각 제시되어 있다. 그림 3 및 4의 각각에서 알 수 있는 바와 같이 실제 관측지반진동의 스펙트럼과 역산결과 얻어지는 변수를 이용하여 계산된 합성스펙트럼이 4가지 경우 모두 주파수 전체범위에서 비교적 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

표 3에서 알 수 있는 바와 같이 4가지 경우의 주파수 범위에 대한 역산결과가 각각 제시되어 있고, 4번째 경우의 주파수범위를 적용하여 결과에 대한 값을 살펴보면 Q_0 값은 약 417, η 값은 0.83, $\Delta\sigma$ 값은 약 48 bar (99/04/24;

47bar, 99/06/02; 54bar, 99/09/12; 44bar) 그리고 κ 값은 0.0312이다. 위 표에서 4가지 경우 모두에 대한 평균값을 살펴보면 Q_0 값은 약 440, η 값은 0.86, $\Delta\sigma$ 값은 43bar, 그리고 κ 의 경우는 0.0304이다. 또한 4번째 경우 κ 값과 Q_0 및 η 와의 공분산 계수값은 각각 0.1 및 0.2의 값을 보여 주었으며 4가지 경우 가운데 최소값을 보여 주었다. 또한 4번째 주파수 경계를 이용하는 역산의 경우 잔차값이 역시 최소값을 보이고 있어 결과값에 대한 신뢰성을 확인할 수 있었다.

표 4 미국 동부, 미국 서부 및 국내 연구결과와 비교

Parameters	$\Delta\sigma$	Q_0	η	$\kappa(\text{sec})$	비고
WUA	65	220	0.60	0.040	
EUA	120	351	0.84	0.006	
노명현 외(1994)	50	1749	-	0.013	
연관희 외(2002)	33.7	348	0.52	0.019	
Junn et al(2002)	92	1820	0.87	0.016	$\kappa=K_S+K_QR$
정태웅 외(2001)	-	-	0.70	0.004	
본 연구	48	416.9	0.83	0.0312	

본 연구결과를 기존의 연구결과와 표 4에 제시된 바와 같이 비교를 시도하였으나 가속도운동 지배방정식의 차이, 연구방법론의 차이($\kappa(\rho)$ 및 Q_0), P파 혹은 S파 에너지 등 지진파에너지의 종류 및 역산을 위해 이용된 지진 및 관측소의 지리적인 분포도 많은 차이가 있기 때문에 본 연구결과와 단순한 비교는 힘들다. 특히 역산을 위해 적용

한 가속도지배방정식의 경우 본 연구는 연관희(2002)3)와 일치하나 표 4에서 제시된 타 연구자와 차이가 다소 존재하고 자세한 사항은 본 논문의 2절 마지막 부분에 제시되어 있다.

이러한 점을 고려하여 본 연구결과를 미국 동부(EPRI)⁽¹³⁾ 및 Boore et al⁽¹⁴⁾과 Anderson and Hough⁽¹²⁾에 의해 제시된 서부 지역과 개략적으로 비교하였다. 지각전체의 지진파의 감쇄특성을 나타내는 변수인 Q0값은 미국동부, 미국서부 지역의 대표값 및 연관희(2002)⁽³⁾ 등이 제시한 값보다 다소 높게 분석되었다. 표 4에서 알 수 있는 바와 같이 Q0값이 연관희(2002)3)를 제외한 다른 연구자의 결과와 4배 내지 5배 정도의 차이가 나는 것은 차이의 많은 부분이 가속도운동 지배방정식에서 계수값 및 역산을 위해 이용된 P파 혹은 S파 에너지 등의 차이로 해석된다.

본 연구에서 제시한 κ 값은 $\kappa(o)$ 에 해당하며 가속도운동 지배방정식에 있어서 차이가 있기 때문에 본 연구결과와 타 연구자의 연구결과와 단순한 비교는 힘들다. 하지만 미국 동부지역의 대표값보다 훨씬 크고 서부지역의 대표값에 보다 유사하다. 또한 가장 유사한 지배방정식을 적용한 연관희(2002)3) 등이 제시한 값보다 다소 높은 값을 보여주고 있다. 하지만 높은 $\kappa(o)$ 값은 역산에 이용된 전체 관측소의 평균값에 해당하고 각각의 연구는 각각 다른 조합의 지진원 및 관측소들을 이용하였기 때문에 단순히 비교한다는 것은 의미가 적다.

또한 본 연구에서 제시된 $\kappa(o)$ 값은 관측소부지 천부의 증폭특성도 포함되어 있는 값이다. 따라서 개개 관측소부지 천부의 증폭특성을 대표하는 A(f)를 이용하여 해당 특성을 제거할 경우 보다 신뢰성이 있는 $\kappa(o)$ 값을 얻을 수 있을 것으로 해석된다.

또한 지진규모에 의한 영향 및 안티알리아스(Anti-alias) 필터링 효과의 영향을 생각할 수 있다. 하지만 지진규모가 작아 감쇠가 시작되는 주파수값이 큰 지진에 비해 작고 따라서 25Hz에서 적용되는 안티알리아스 필터링 효과에 의한 왜곡현상은 상대적으로 작을 것으로 판단된다.

$\Delta\sigma$ 의 경우 북미의 각각의 지진지체구조적에 대해 대표값이 제시되어 있으나, 개개 지진에 따라 약간 다른 값을 보이는 것이 일반적이고 또한 값의 범위가 큰 것이 특징이다. 이러한 특징을 고려하여 표 4에서 제시된 타 연구결과와 굳이 비교하면 Junn et al(2002)⁽⁴⁾이 제시한 값보다 훨씬 작고, 노명현(1994)⁽¹⁾이 제시한 값과 가장 유사하고 연관희(2002)⁽³⁾가 제시한 값보다 크다. 물론 다른 연구자가 분석에 이용하였던 지진과 본 연구에서 분석을 위해 이용한 지진은 일치하지 않는다. 하지만 미국지역의 값과 비교하면 동부 지역의 대표값 보다 훨씬 낮은 값을 보여주고 있고 또한 미국 서부지역의 대표값 보다 역시 낮은 값을 보여주고 있다. 경주지역 지진의 경우 $\Delta\sigma$ 값만으로 단순히 분석할 경우 낮은 응력강하형 지진원 특성을 가지고 있다고 해석된다.

경주지역에서 발생한 지진 각각에 대해 Junn et al (2002)⁽⁴⁾의 연구결과와 비교하면 표 5에 제시된 바와 같다. Junn et al(2002)⁽⁴⁾은 3개 경주지역 지진을 포함하여 다수의 지진에 대해 분석하였고 이중에서 본 연구대상과 일치하는 경주지역지진 3개에 대해 각각 비교하였다.

표 5 3개 경주지역 지진에 대한 결과비교

Event 발생일시	ML (KIGAM)	$\Delta\sigma$		fo		Mw	
		Junn et al (2002)	본 연구	Junn et al (2002)	본 연구	Junn et al (2002)	본 연구
04/24/1999	3.3	89	47	8.7	9.5	3.2	2.9
06/02/1999	4.0	38	52	3.2	4.1	3.8	3.7
09/12/1999	3.2	39	44	5.4	6.9	3.4	3.2

한국지질자원연구원 자료에 의하면 04/24/1999 발생지진 및 09/12/1999 발생지진의 규모가 각각 3.3 및 3.2로 04/24/1999 발생지진의 규모가 상대적으로 큰 것으로 제시되고 있다. 하지만 Junn et al(2002)⁽⁴⁾ 및 본 연구결과에 의하면 공통적으로 09/12/1999 발생지진이 규모가 09/12/1999 발생지진보다 큰 것으로 제시되고 있다. 물론 분석방법의 차이가 있지만 지진규모와 직접적으로 관련되어 있는 변수인 코너주파수값 역시 이를 입증해주고 있다. 따라서 비록 작은 지진이지만 지진규모를 재분석할 필요가 있는 것으로 보인다.

$\Delta\sigma$ 값의 경우 본 연구는 3개의 경주지역 지진중에서 규모가 가장 큰 06/02/1999 발생지진이 52로서 가장 크다. 하지만 Junn et al(2002)⁽⁴⁾의 연구에 의하면 04/24/1999 발생지진이 가장 크고 값은 89로 제시하여 다소 차이가 존재한다. 하지만 이러한 차이는 표준편차값을 고려하여 분석할 필요가 있다. 지진규모 Mw의 경우 3개 지진에 대한 규모크기의 순서는 동일하나 본 연구의 결과값이 Junn et al (2002)⁽⁴⁾에 비해 규모값이 전체적으로 보다 작게 분석되었다. 마지막으로 코너주파수의 경우 본 연구결과 값이 Junn et al (2002)⁽⁴⁾에 비해 규모값이 일반적으로 크게 분석되었고 이러한 결과는 코너주파수 및 지진규모와의 일반적인 관계식과 부합되는 결과이다.

6. 결 론

본 연구에서는 3개의 경주지역에서 발생한 지진으로부터 관측된 자료를 이용하여 추계학적 지진모델 파라미터인 지진원 관련변수(Mw, f_0 , $\Delta\sigma$) 및 지진파감쇄 관련변수($\kappa(o)$, $Q(f)$)를 안정적으로 분석하기 위해 LM 역산방법을 적용하였다. 또한 경주지역에서 발생한 3개의 지진으로부터 관측된 지반진동 자료 중에서 지진파전달 경로에 대한 중복성의 증가를 이용하여 지진파전달 경로에 대한 분석을 최소화할 시도하였다.

역산을 수행한 결과 가속도운동 지배방정식의 차이, 연구방법론의 차이, P파 혹은 S파 에너지 등 지진파에너지

의 종류 및 역산을 위해 이용된 지진 및 관측소의 지리적 인 분포도 많은 차이가 있기 때문에 기존의 여러 연구결과와 직접적인 비교는 의미가 적다고 해석된다. 특히 가속도운동 지배방정식의 경우 본 연구는 연관희(2002)⁽³⁾와 일치하나 타 연구자와 많은 차이가 존재한다, 따라서 기존의 연구결과와 다소 커다란 차이가 있는 값들도 존재하는 것도 사실이나 연관희(2002)⁽³⁾에 의한 연구결과와 상대적으로 유사한 결과를 나타내었다.

향후 관측소의 부지천부의 증폭특성을 고려한 연구결과를 통하여 기존의 연구결과와 비교할 필요가 있다. 또한 더욱 많은 지반진동 관측자료를 포함시켜 지진규모분석 및 관측소 부지고유특성을 이용하여 평가한 결과는 내진설계에 중요 자료로 활용 가능할 것으로 예상된다. 또한 기존 연구결과들과 효과적으로 비교하기 위해 지진원 관련변수 (M_w , f_0 , $\Delta\sigma$) 및 지진파감쇄 관련변수($\kappa(o)$, $Q(f)$)와 같은 각각의 변수값들에 대해 표준편차값을 고려하여 보다 체계적으로 분석할 필요도 있다.

참 고 문 헌

1. 노명현, 한반도 남동부 지역에서의 최대지반운동치 추정(I); 스펙트럼 파라메타 추정, 1994.
2. 정태웅, 확장 coda 규격화 방법에 의한 한국 남동부 지역의 Qp-1, Qs-1 연구, 2001.
3. 연관희, 수정된 Levenberg-Marquardt 역산방법에 의한 한반도 남부의 추계학적 지진요소 평가, 2002.
4. Junn, J.G., Jo, N.D. and Baag, C.E., "Stochastic prediction of ground motions in southern Korea", *Geoscience J.*, Vol 6., No 3., Sept. 2002, pp. 203-214.
5. Brune, J., "Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes," *J. Geophys. Res.*, Vol .75, 1970, pp. 997-1006.
6. Boore, D.M, "Stochastic Simulation of High-Frequency Ground Motions Based on Seismological Models of the Radiated Spectra", *BSSA*,

- Vol. 73, 1983, pp. 1865-1894.
7. Atkinson, G., "Attenuation of strong ground motion in Canada from a random vibrations approach," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 74, 1984, pp. 2629-2653.
8. Atkinson, G., and Boore, D., "Stochastic point-source modeling of ground motions in the Cascadia region," *Seismological Research Letters*, Vol. 68, 1997, pp. 74-85.
9. Toro, G. and McGuire, R., "An investigation into earthquake ground motion characteristics in eastern North America," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 77, 1987, pp.468-489.
10. Hanks, T. and McGuire, R., "The character of high frequency strong ground motion," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 71, 1981, pp. 2071-2095.
11. Hanks and Kanamori, "A Moment Magnitude Scale," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84, 1979, pp. 2384-2350.
12. Anderson, J.G. and S.E., Hough, "A Model for the Shape of the Fourier Amplitude Spectrum of Acceleration at High Frequency," *BSSA*, Vol 74, 1984, pp. 1969-1993.
13. Electric Power Research Institute(EPRI), "Guidelines for determining design basis ground motions. Volume 1: Method and Guidelines for estimating earthquake ground motion in eastern North America," TR112293, Electric Power Research Institute, Palo Ato, California, November, 1993.
14. Boore, D., Joyner, W. and Wennerberg, L., "Fitting the stochastic source model to observed response spectrum western North America: Trade-off between $\Delta\sigma$ and κ ," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol 74, 1984, pp. 1969-1993.