

후쿠오카 지역에서 발생한 12개 지진의 지진원 및 지진파 감쇠값에 관한 연구

A Study on Seismic Source and Propagation Characteristics using a Series of 12 Fukuoka Earthquakes

김준경¹⁾

Kim, Jun-Kyoung

국문 요약 >> 본 연구는 2005년 3월부터 약 2개월에 걸쳐 후쿠오카 지역에서 짧은 기간에 발생한 12개의 지진으로부터 관측된 154개의 지반진동 자료를 이용하여 지진원 및 지진파 감쇠와 관련된 값들을 분석하였다. 본 연구에서는 구하고자 하는 모든 값을 동시에 비선형적으로 분석하기 위해 LM(Levenberg-Marquardt) 역산방법을 적용하였고 전단파 에너지를 이용하였다. 분석결과 12개 지진의 응력강하값의 평균은 약 79.2-bar이고 부지 하부 지진파 감쇠값 κ 의 평균값은 0.043으로 분석되었다. 또한 광역적인 지진파 감쇠를 나타내는 Q_0 와 η 값은 각각 248.1 및 0.558로 분석되었다. Q_0 과 η 값은 지진파의 경로중 일부가 동해를 거치기 한반도 남동부의 지진파 전파의 특성뿐만 아니라 일본과 한반도 사이의 지체구조의 차이로 인한 불균질 특성도 포함하고 있는 것으로 판단된다. 특히 관측소부지 하부의 지진파 감쇠값 κ 의 평균값은 미국 동부지역 대표값 보다 훨씬 크고 미국 서부지역 대표값보다 거의 유사한 값을 보여 주었으며 각각 관측소 부지 고유의 증폭에 대한 정확한 정보가 있으면 보다 의미있는 결과를 얻을 수 있다고 판단된다.

주요어 LM 역산, 응력강하, 코너주파수, 카파, 지진파감쇠값(Q_0 , η)

ABSTRACT >> Parameters including the seismic sources and the elastic wave propagation characteristics were analysed using the observed ground motions from 12 Fukuoka 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 12 events and local attenuation parameter κ under seismic stations were estimated to about 79.2-bar and 0.043 respectively. Regional attenuation parameter, Q_0 and η , were also estimated to be about 248.1 and 0.558 respectively. Low value of Q_0 seems to be caused by inhomogeneous tectonic characteristics between Japan island and southern Korean peninsula. κ values are much higher than that characterizing EUS (Eastern United States) region, and nearly similar to that of WUS (Western United States) region. If the informations on site specific amplification of all the seismic stations are known, κ values can be estimated more precisely. All the values including the seismic sources and the site and crustal scale propagation characteristics can be used as seismic design parameters.

Key words Levenberg-Marquardt inverse algorithm, stress drop, f_0 , κ , Q_0 , η

1. 서론

국내의 일반적인 시설물에 대한 내진 기준은 것은 과거 역사지진이나 최근의 계기지진 자료를 통계적 및 확률적으로 처리하고 또한 국가 경제 및 사회적 부담까지 종합적으로

로 고려하여 인명안전에 최종 목표를 두고 있다. 하지만 근래에 발생한 지진중에서 1995년 고베지진 및 1975년 당산지진 등과 같은 다수의 지진은 전통적으로 통계 및 확률적으로 지진위험도가 비교적 낮다고 평가되어 온 지역에서 예기치 않게 발생한 대형지진이기 때문에 그 지진의 피해는 막대하다. 특히 2005년 3월에 후쿠오카 지역에서 발생한 규모 6.5(한국지질자원연구원)의 지진은 부산 및 마산을 포함한 경남-남해안 지역에 위치하는 대도시 주민들이 지반의 흔들림을 감지할 정도로 우리나라에 영향을 크게 주어 외국 지진으로부터 국내 시설물의 피해가능성에 대한 우려가 증

¹⁾ 정회원·세명대학교 자원환경공학과 교수
(대표저자: kimjk1@unitel.co.kr)

본 논문에 대한 토의를 2007년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 10. 24 / 심사종료일 : 2006. 12. 20)

가하고 있다. 따라서 국가적인 차원에서 내재적으로 이변적인 성질을 많이 가지고 있는 지진재해에 대해 최소한의 대비가 필요하다.

임의지역에서 지진위험도를 평가할 때 그 지역에서 내진공학 설계에 필요한 정도의 크기를 가진 실제 강진자료를 수집할 기회는 대단히 낮다. 따라서 내진설계 기초자료를 평가하기 위해 중소 규모의 지진으로부터 관측된 지반진동을 이용하여 설계지진규모에 대응하는 강진자료를 유추할 필요가 있고 이를 위해 일반적으로 발생확률이 상대적으로 높은 중규모 지진의 지진원 및 지진파 전파 특성 값에 대한 연구가 반드시 필요하다.

최근 정태웅(2001)⁽¹⁾, Chung et. al.(2002)⁽²⁾, 연관희(2002)⁽³⁾, Junn et al(2003)⁽⁴⁾, 및 정제원(2006)⁽⁵⁾ 등에 의해 연구가 진행되고 있다. 점지진원을 가정한 Brune(1970)⁽⁶⁾의 ω^2 지진원모델을 이용한 강진동의 추계학적 연구는 1980년대 초반부터 미국을 중심으로 활발히 연구되어 왔다. 미국 서부 지역과 동부 지역을 대상으로 각각 Boore(1983)⁽⁷⁾ 및 Atkinson(1984)⁽⁸⁾에 의하여 강지진동의 추계학적 연구가 진행되어왔으며 그 이후 Atkinson and Boore(1997)⁽⁹⁾, Toro and McGuire(1987)⁽¹⁰⁾ 등으로 계속되어 왔다. 이들 연구는 일정한 주파수 대역과 유한한 지속시간을 갖는 백색 가우스 잡음(gaussian white noise)에 지진원의 성질을 갖는 진원 모델 스펙트럼을 포락하여 합성지진파를 계산할 수 있다는 Hanks and McGuire(1981)⁽¹¹⁾의 연구결과에 기초를 두고 있다. 기존 연구결과를 살펴보면 본 연구의 역산방법과 가장 유사한 역산 알고리즘을 이용한 연관희(2002)⁽³⁾는 한반도내 진앙을 가진 지진 및 국내 관측소 지진자료를 이용하여 Q_0 값은 348 및 η 값은 0.52의 결과를 제시하였다. 다수의 경주지진으로부터 측정된 국내 관측소 자료를 이용한 정제원(2006)⁽⁵⁾에 의하면 Q_0 값은 415.9 및 η 값은 0.83의 결과값을 제시하였다. 또한 EPRI⁽¹²⁾에 의해 제시된 미국 동부 지역 및 Boore et al⁽¹³⁾과 Anderson and Hough⁽¹⁴⁾에 의해 제시된 서부지역의 S파 에너지에 대한 대표값은 351 및 260로 제시되어 있다.

본 연구에서는 2005년 3월부터 약 2개월에 걸쳐서 후쿠오카라는 제한된 지역에서 발생한 12개의 규모 3.9이상 6.5 이하의 대규모 및 중규모의 지진으로부터 관측된 지반진동 자료를 사용하였다. 또한 LM (Levenberg -Marquardt) 역산법을 적용하여 지진원 관련값(f_0 , $\Delta\sigma$) 및 지진파의 비탄성 감쇠와 관련된 값(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.

2. 가속도함수

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 Boore (1983)⁽⁷⁾에 의해 제시된 다음의 식을 이용하였다.

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

여기에서

$$C = (\frac{1}{\rho_0 \beta_0^3}) \cdot (2) \cdot (0.55) \cdot (\frac{1}{\sqrt{2}}) \cdot \pi$$

f = 주파수

M_0 = 지진모멘트(seismic moment),

R = 진원거리(hypocentral distance),

β_0 = 지진원부근의 S파속도,

ρ_0 = 지진원부근의 밀도,

$Q(f) = Q_0 f^\eta$ (quality factor),

$A(f)$ = 부지증폭함수,

$P(f)$ = 고주파제거필터,

f_0 = 지진원코너주파수,

$\gamma = 1, 2, 3$ (f_0 이상에서 지진원변위스펙트럼 감쇠율)

위에서 제시된 가속도의 푸리에스펙트럼을 나타내는 식에서 C는 상수로서 지진원 지역 지반의 밀도(ρ_0)와 S파 속도, 자유면 효과(2배수), 구면으로 방사하는 지진에너지의 평균값(0.55), 2개의 수평방향으로의 에너지 분리($1/\sqrt{2}$)와 관련된 파의특성을 포함한다. 지진원 규모는 지진모멘트와 고주파 응력파라미터 즉 응력강하($\Delta\sigma$)의 두 개의 독립적인 파라미터에 의해서 결정된다. 지진모멘트(M_0)와 모멘트 지진규모(M_w)의 상관관계는 Hanks and Kanamori(1979)⁽¹⁵⁾에 의해 제시된 지진모멘트 규모의 정의에 따라 다음과 같이 제시 가능하다.

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

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

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

응력강하는 고주파 응력강하(혹은 응력파라미터)라고도 불리며 그 이유는 지진원특성을 나타내는 코너주파수 이상의 고주파 대역에서 푸리에 스펙트럼이 응력강하에 비례하여 스케일되기 때문이다. 식 (1)에서 γ 값은 2로 설정하였다.

식 (1)에서 부지하부의 증폭특성을 대표하는 $A(f)$ 필터는 지진파가 기반암과 같은 고속도층으로부터 관측소 하부의 지표 가까이 얇은 심도에 존재하는 지표부근 저속도 토양층(미국 서부의 경우 약 100m-300m; 국내 경주지역의 경우 약 30m)으로 전파함에 따라 고주파수 대역에서 파의 진폭이 주파수에 의존하여 증가하는 현상을 대표한다. 지진파의 증폭률은 관측소 하부의 전단파 속도 및 밀도 등에 의해 결정된다. 본 연구에서는 $A(f)$ 에 대한 국내 연구결과가 충분하지 못하여 저주파수 대역에서 고주파수 대역까지 역산 대상이 되는 관심 주파수 대역에 걸쳐서 증폭계수 1을 사용하였다.

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

고주파 영역에서 관측 강진운동의 급격하게 감소하는 현상을 대표하는 이론은 f-max 모델 및 kappa 모델 등 2가지 종류가 제시되어 있으며 본 연구에서는 Anderson and Hough(1984)⁽¹⁴⁾의 고주파 감쇠필터 모델인 kappa 모델을 적용하였다. kappa 모델론은 다음과 같은 형태로 제시된다.

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

식 (4)의 지수부분의 주된 구성요소인 $k(R)$ 은 지진파가 지진원으로부터 관측점까지 지각을 통과할 경우 발생하는 지진파의 감쇠를 모델링하고 있다. 위에서 제시한 감쇠효과를 고려한 식은 아래 식에 의해 모델화 된다.

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

위 식 중에서 등호 오른쪽의 첫 번째 항은 거리가 0인 경우에 해당하며 $\kappa(0)$ 으로 표시 되며 식 (6)과 같이 표현된다.

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

식 (6)에서 β , Q_s 는 관측소 부지하부의 전체 토양층의

깊이(H)에 대한 전단파 속도 및 질적요소(quality factor) 값들의 평균을 의미한다. 이 식에서 제시된 바와같이 거리가 0인 경우 κ 값은 주파수와 무관하게 모델화 가능하며 관측소 부지부근 특성에 좌우되는 값으로 간주된다. 본 연구에서는 2가지 종류의 고주파대역에서의 감쇠 성질중에서 특히 거리가 0인 경우 $\kappa(0)$ 를 $P(f)$ 로 식 (1)에서 표시하였고 이를 분석해야 할 대상 값으로 간주하여 분석하였다.

지진파가 지진원으로부터 관측점까지 지각을 경유할 때 발생하는 감쇠의 2가지 종류의 효과 중에서 2번째 효과에 해당하는 거리와 관련되며 지각전체 구조의 의한 효과가 있다. 이는 주파수의 함수인 $Q(f)$ 로 모델링이 되고 식 (5)의 $k(R)$ 중에서 2번째 항에 해당하며 가속도운동을 나타내는 식 (1)에서 마지막 항에 해당한다. 따라서 본 논문의 가속도운동을 나타내는 식 (1)에서 제시된 $P(f)$ 는 앞서 제시된 2개의 일반적인 감쇠 특성중에서 단지 관측소 부지하부의 비탄성 감쇠만을 대표하도록 모델화 하였다.

지진원 및 지진파 감쇠와 관련된 값들을 구하기 위해 본 연구에서는 반복적인 비선형 역산방법인 LM 방법을 이용하였다. 일반적으로 모델 파라메타를 벡터 \vec{a} 라고 하고 변수를 x 라고 할 때 비선형 모함수는 $y = y(x; \vec{a})$ 와 같이 표현 가능하며 임의의 변수값 x_i 에서 측정값이 y_i 이면 최적의 모델 파라메타 벡터 \vec{a} 는 다음과 같은 함수를 최소화하여 얻어질 수 있다.

$$X^2(\vec{a}) = \sum_{i=1}^n [y_i - y(x_i; \vec{a})]^2 \quad (7)$$

여기서 모델 파라메타 벡터 \vec{a} 는 다음과 같다.

$$\vec{a} = (M_1, M_2, \dots, M_{N_{eq}}, f_{o1}, f_{o2}, \dots, f_{oN_{eq}}, Q_0, \eta, \kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_{N_{eq}}) \quad (8)$$

(7) 식과 (8) 식에서 x_i 는 관측자료의 주파수, y_i 는 각각의 주파수에서 푸리에 스펙트럼값을 의미한다. 또한 $M_{N_{eq}}$ 는 N번째 지진의 규모, $f_{oN_{eq}}$ 는 N번째 지진의 코너주파수 및 $\kappa_{N_{eq}}$ 는 N번째 관측소의 부지 감쇠 값을 각각 의미한다.

3. 연구자료

본 연구에서 사용한 자료는 후쿠오카 지역에서 2005년 3월 20일 발생한 지진(규모 6.5)을 포함하여 12개 지진으로부터 관측된 154개 지반진동 자료를 이용하였다. 관측 지반진동 자료에 LM 역산법을 적용하여 지진원 관련값(f_0 , $\Delta\sigma$) 및 지진파의 비탄성 감쇠와 관련된 값(Q_0 , η , κ)를 비선형적으로 동시에 구하였다.

12개의 후쿠오카 지역에서 발생하여 국내의 관측소에서 관측된 속도자료는 식 (1)에서 제시된 가속도 운동을 나타내는 식을 적용하기 위해 모두 가속도형태의 자료로 변환하여 이용하였다. 본 연구에서 사용된 관측자료는 표 1에 제시되어 있고 각각 지진발생일시, 지진규모 및 관측소 목록을 나타내고 있다. 수직성분은 본 논문에서 연구의 대상이 아니기 때문에 제외하였고 또한 2개의 수평성분의 S파 에너지 중에서 S/N비가 낮은(약 3.0이하) 자료는 제외하였다.

본 연구를 위해 특히 12개의 후쿠오카 지진을 선택한 것은 앞서 제시한 바와같이 일본 지진에 의한 경남 및 남해안 지역에 대한 지진피해에 대한 잠재성을 평가할 때 대단히 중요하나 일본과 한반도사이의 동해의 지진파경로에 대한 비탄성 감쇠함수에 대한 연구가 아직 충분하게 연구가 되지 못하고 있는 실정이다.

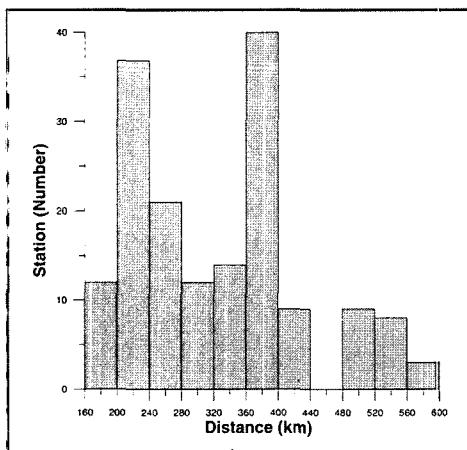
그림 1은 본 연구에서 사용한 지반진동을 관측한 관측소의 진원거리별 분포를 나타내는 그림이다. 가로축은 거리를 나타내고 세로축은 각각의 거리범주에서 관측된 지반진동

기록의 숫자를 나타내고 있다. 거리범주의 간격은 40km로 설정하였다. 이 그림에 의하면 약 170km에서 약 565km의 범위에서 관측된 지반진동을 이용하였다. 근거리에서 관측된 지반진동 자료가 다소 많고 진원거리가 최대 약 565km 부근에서 관측된 자료도 있다. 국내의 일반적인 지각구조를 고려할 때 S파의 지각과 맨틀경계에 대한 교차거리는 약 55km에서 60km 정도이고 모든 관측자료가 이 범위를 넘기 때문에 특히 지각 전체의 비탄성감쇠 특성값에 해당하는 Q_0 및 η 값의 역산결과에 대한 신뢰성의 제고에 기여할 수 있다.

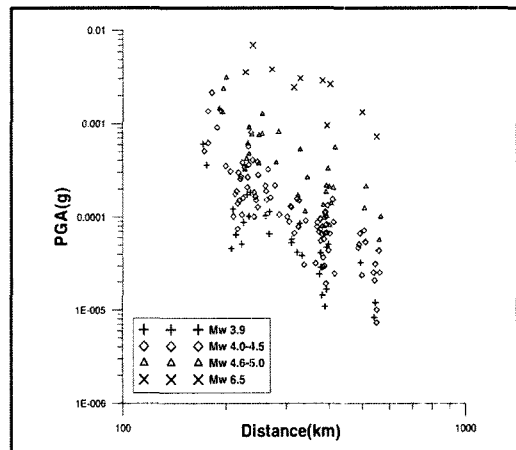
그림 2는 본 연구에서 사용한 지반진동의 진원거리에 따른 관측된 지반진동의 최대가속도값의 분포를 나타내는 그림이다. 가로축은 거리를 나타내고 세로축은 최대가속도값을 나타낸다. 이 그림에 의하면 12개의 지진을 지진규모에 따라 4가지 범위로 분류하였고 그림에 의하면 지진규모가 작을수록 또한 거리가 증가할수록 최대가속도값이 감소하고 있는 특징을 잘 보여주고 있다.

〈표 1〉 12개 후쿠오카지진에 대한 발생일자, 규모 및 관측소명

Event No.	Date	M_L	Seismic Stations
1	2005/05/02	4.3	KRA,KRB,WSB,WSA,HDB,WSC,GSU,GKPI,KMC,BGD,UJA,TJN,YGA,SND,HKU,SNU,KHD
2	2005/04/20	4.6	KRA,KRB,WSB,WSA,HDB,WSC,GSU,GKPI,KMC,BGD,UJA,TJN,YGA,SND,HKU,SNU,KHD
3	2005/04/20	4.7	KRA,KRB,WSB,WSA,HDB,WSC,GSU,GKPI,KMC,BGD,UJA,TJN,YGA,SND,HKU,SNU,KHD
4	2005/04/10	4.4	KRA,KRB,WSB,WSA,HDB,WSC,GSU,GKPI,KMC,BGD,TJN,YGA,SND,KHD
5	2005/03/25	3.9	KRA,KRB,WSA,HDB,WSC,GSU,GKPI,BGD,TJN,SND,HKU,KHD
6	2005/03/22	4.3	KRA,KRB,WSB,WSA,HDB,WSC,GSU,GKPI,KMC,BGD,TJN,SND,HKU,SNU,KHD
7	2005/03/21	4.4	KRA,KRB,WSB,WSA,HDB,WSC,GSU,GKPI,KMC,BGD,TJN,YGA,SND,HKU,SNU,KHD
8	2005/03/21	4.0	WSB,WSA,HDB,GSU,GKPI,KMC,TJN,SND,HKU,KHD
9	2005/03/20	3.9	HDB,GSU,GKPI,KMC,BGD,TJN,SND,HKU,KHD
10	2005/03/20	4.2	HDB,GSU,GKPI,KMC,BGD,TJN,SND,HKU,SNU,KHD
11	2005/03/20	3.9	HDB,GSU,GKPI,KMC,BGD,TJN,SND
12	2005/03/20	6.5	HDB,GSU,GKPI,KMC,BGD,TJN,SND,HKU,SNU,KHD



〈그림 1〉 12개 지진자료의 거리별 관측소 분포도



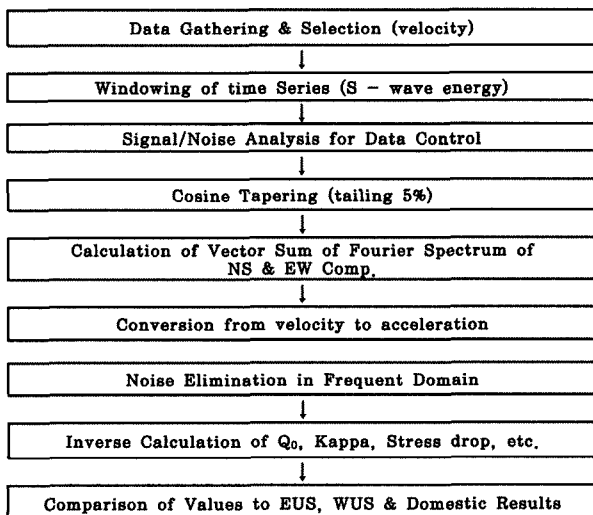
〈그림 2〉 12개 지진자료의 거리별 PGA 값 분포도

4. 연구방법

관측된 지반진동을 LM 역산방법을 적용하여 지진원 및 지진파 전파특성 값과 같은 가속도운동을 나타내는 식의 값을 비선형적으로 동시에 분석하였으며 그림 3에서 제시된 순서도에 따라 순차적으로 수행하였다. LM 방법은 비선형 역산문제를 풀기 위해 가장 자주 이용되는 일반적인 방법이다. 특히 S파 에너지의 시간창 길이를 설정할 때 레일리파 에너지를 최대한 제외하였고, 시간창 시작점은 S파 에너지 도달전 2초전으로 하고 진원거리에 따라 S파 시간창 길이를 연관회⁽³⁾에 의해 제시된 공식을 이용하여 조절하였다. 관측 파형속에 내재된 잡음의 효과를 완화시키기 위해 잡음의 시간창 길이를 S파 시간창 길이와 동일하게 설정하고 시간창의 종점이 P파 에너지가 도착하기 2초전까지 하여 주파수간격 차이 등에 대한 문제점 발생을 사전에 배제하였다.

그림 4에서 가로축은 주파수이고 세로축은 단위가 카운트(counts)로서 관측기기의 민감도 등을 고려하여 실제 물리량인 gal로 환산하기 전 초기 단계에 기록된 값의 단위이다. S파 에너지를 시간창을 통해 선택하는 과정을 보여주고 있고, 2005년 3월 20일 후쿠오카지역에서 발생한 규모 6.5의 지진에 대해 GSU 관측소에서 EW 및 NS 성분 각각에 대해 S파 에너지를 안착화(tapering)하는 과정을 예시하였다. 오른쪽 및 왼쪽의 그림에서 위 그림은 안착화 작업을 수행하기 전 아래 그림은 안착화작업을 수행한 후의 결과를 보여주고 있다.

역산수행을 위한 지반진동의 주파수 범위는 본 연구에서 적용된 관측지반진동의 주파수 특성을 고려하여 최소와 최대 주파수값을 각각의 지반진동의 잡음특성에 따라 주파수

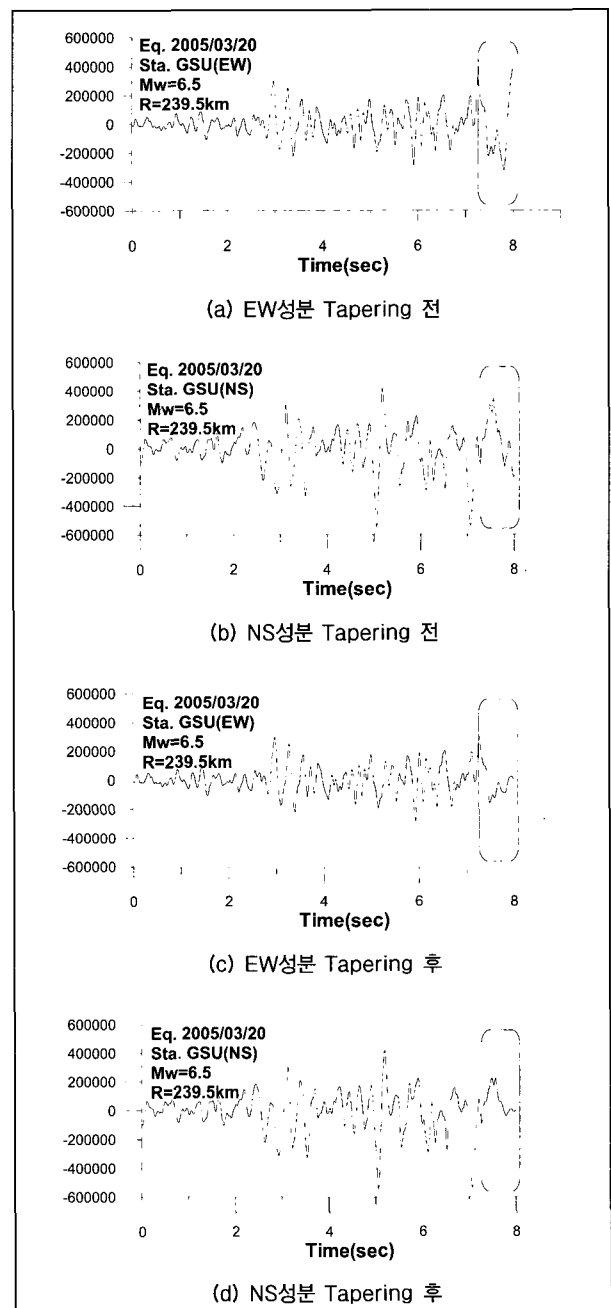


〈그림 3〉 자료 및 역산을 위한 분석절차 순서도

범위를 다르게 설정하여 역산을 수행하였다. 알리아스 효과를 피하기 위해 모든 지반진동에 대해 역산을 위한 최대주파수 범위를 30Hz이하로 제한하였다.

5. 연구결과

2005년 3월 20일 이후 약 2개월 동안에 걸쳐 후쿠오카지역에서 발생한 12개 지진의 관측자료를 이용하였고 지진자료를 몇가지 종류로 분류하여 역산을 각각 수행하였다. 우선 12개 지진 각각에 대해 독립적으로 역산을 하였고 또한



〈그림 4〉 2005년 3월 20일 규모 6.5의 GSU관측소에서 관측된 EW 및 NS 성분에서 S파 에너지 성분을 안착화하는 과정

12개 지진자료를 동시에 역산을 수행하였다. 또한 지진규모의 크기 등을 고려하여 관측자료를 다양하게 그룹화하여 역산을 수행하였다. 다양한 범주의 역산을 통해 분석의 신뢰성을 고려하였다. 그리고 각각에 대해 Mw 규모를 변수로 하였을 경우와 이미 결정된 값을 입력하여 변수를 고정화시켰을 경우로 나누어 수행하였다. 표 2에 12개 지진을 동시에 역산한 결과가 제시되어 있다.

지진파가 통과하는 지각전체 물질에 대한 지진파의 비탄성감쇠 정도를 나타내는 Q₀값은 지진모멘트 규모가 변수 및 고정일 경우 표 2에 제시된 바와같이 각각 241.7 및 248.1로 분석되었으며 상호 거의 유사한 결과값을 보여주고 있다. 비탄성감쇠의 지수값에 해당하는 η값은 Mw 규모가 변수 및 고정일 경우 각각 0.500 및 0.558을 보여주고 있어 다소 차이가 존재하고 있다.

본 연구결과를 기존의 연구결과와 비교를 시도하였으나 가속도 운동을 나타내는 식의 모델화 차이, 연구방법론의 차이, P파, S파 및 Lg파 에너지 등 지진파 에너지의 종류 및 역산을 위해 이용된 지진원의 지리적인 분포도 많은 차이가 있기 때문에 기존의 연구결과와 본 연구결과와 직접 대응이 되는 엄격한 비교는 어렵다. 따라서 역산 알고리즘이 본 연

구와 가장 유사한 연관희(2002)⁽³⁾ 및 정제원 (2006)⁽⁵⁾에 의한 연구결과와 주로 비교하였다.

기존 연구결과와 비교하면 본 연구의 역산방법과 가장 유사한 역산 알고리즘을 이용한 연관희(2002)⁽³⁾는 한반도내 진앙을 가진 지진 및 국내 관측소 지진자료를 이용하여 Q₀값은 348 및 η값은 0.52의 결과를 보여주어 본 연구결과 보다 대단히 큰 값을 보여주었다. 또한 다수의 경주지진으로부터 측정된 국내 관측소 자료를 이용한 정제원(2006)⁽⁵⁾에 의하면 Q₀값은 415.9 및 η값은 0.83의 결과값을 보여주어 본 연구결과를 포함하여 3개 연구 결과값 중에서 가장 높은 값을 보여 주었다.

또한 본 연구에 의한 결과를 EPRI⁽¹²⁾에 의해 제시된 미국 동부지역 및 Boore et al⁽¹³⁾과 Anderson and Hough⁽¹⁴⁾에 의해 제시된 서부지역의 S파 에너지에 대한 대표값인 351 및 260과 비교하였다. 본 연구에서 결과된 지각전체의 지진파의 감쇠특성 값인 Q₀값은 미국동부 지역 뿐만 아니라 미국 서부 지역의 대표값 보다 낮게 분석되었다. 따라서 본 연구로부터 분석된 Q₀값이 가장 낮은 값을 보여 주었다. 이에 대한 요인은 여러 가지가 고려될 수 있으나 앞서 제시한 다른 2 가지 연구에 비해 진앙인 후쿠오카 지역으로부터 한반도 관측소에 이르는 지진파 경로가 대륙 및 해양지각 등을 교차적으로 통과하므로 각각의 경계에서 지체구조적으로 불균질한 특성이 커다란 영향을 준 것으로 분석된다.

하부 물질의 지진파 감쇠특성을 대표하는 κ값은 표 2에서 제시한 바와같이 관측소마다 다소 커다란 차이를 보여주고 있다. 관측소마다 심한 차이를 보여주는 결과는 다수의 경주지진에 대해 국내 관측소 자료를 이용한 정제원(2006)⁽⁵⁾에 의해 제시된 바와 유사한 현상을 보여주었다. 또한 관측소 상호간의 κ값을 비교할 때 상대적으로 다소 높은 값을 보여주는 관측소는 WSB, HDB, GSU 및 UJA 등의 관측소가 있고 특히 UJA 관측소는 상대적으로 가장 높은 κ값을 보여주고 있다. 이러한 특징도 정제원(2006)⁽⁵⁾의 연구결과와 유사한 현상을 보여주었다.

12개 지진 각각에 대해 독립적으로 역산을 한 경우 음의 κ값을 나타내는 관측소가 다소 많이 나타났으나 동시에 역산을 한 경우는 관측소 전체가 모두 양의 κ값을 보여 주었고 따라서 12개 지진을 동시 역산할 경우 결과되는 κ값에 대해 신뢰성을 보다 크게 부여할 수 있었다. 이러한 특징적인 결과는 각각 지진에 대해 역산을 수행할 경우보다 12개 지진을 동시 역산의 경우가 상대적으로 각각의 관측소에 대한 자료의 중복도가 증가하였기 때문에 신뢰성에 기여할 한 것으로 판단된다. 또한 κ값은 관측소 부지의 지표부근 증폭

〈표 2〉 12개 후쿠오카지역 지진에 대한 지진원 및 감쇠값의 동시역산 분석결과

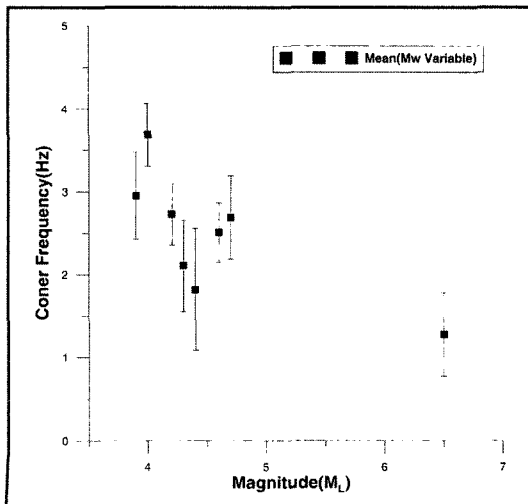
Variables for Inversion		Results	
Mw		Variable	Fixed
	Q ₀	241.7	248.1
	η	0.500	0.558
	Δσ	84.2(bar)	79.2(bar)
κ	KRB	0.0250	0.0290
	KRA	0.0210	0.0260
	WSB	0.0360	0.0420
	WSA	0.0190	0.0250
	HDB	0.0370	0.0440
	WSC	0.0160	0.0230
	GSU	0.0340	0.0410
	GKPI	0.0068	0.0150
	KMC	0.0120	0.0220
	BGD	0.0040	0.0140
	UJA	0.0530	0.0650
	YGB	0.0090	0.0210
	TJN	0.0180	0.0310
	YGA	0.0240	0.0360
	SND	0.0280	0.0420
	HKU	0.0110	0.0250
SNU	0.0059	0.0240	
KHD	0.0084	0.0280	

특성에 의해 영향을 종합적으로 고려할 필요가 있고 현재 국내 지진관측소 부지의 지표부근 증폭특성에 대한 정확한 연구가 거의 없어 관심주파수 범위에 대해 모두 1로 가정하였다.

그리고 본 연구의 결과 관측소 전체에 대한 평균값은 M_w 규모가 변수 및 고정일 경우 각각 0.036 및 0.043의 값을 보여 주었다. 또한 평균 κ 값을 외국의 값과 비교하면 미국 동부지역의 대푯값에 해당하는 0.006 보다 훨씬 크고 서부지역의 대표값에 해당하는 0.040과 거의 유사한 결과를 보여 주고 있다. 하지만 본 연구에서 분석된 κ 값은 관측소 부지 증폭 특성에 의한 영향도 부분적으로 작용하고 있는 것으로 분석되며 앞서 지적한 바와같이 정확한 관측소 고유의 부지 증폭 특성 정보를 이용할 경우 보다 신뢰성이 높은 값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

지진발생원인 지진원 값인 $\Delta\sigma$ 값 및 f_0 에 대한 결과를 살펴보면 우선 응력강하값을 대표하는 $\Delta\sigma$ 값을 분석한 결과 12개 지진의 평균값은 M_w 규모가 변수 및 고정일 경우 각각 84.2bar 및 79.2bar로서 거의 유사한 값을 보여주고 있다. 이러한 값은 일본 후쿠오카 지역의 지체구조적인 특성을 대표하는 값이다. 본 연구에 의한 결과를 EPRI⁽¹²⁾, Boore et al⁽¹³⁾과 Anderson and Hough⁽¹⁴⁾에 의해 각각 제시된 미국 지역과 비교하면 미국 동부 지역의 대표값에 해당하는 약 120bar 보다 낮은 값을 보여주고 있지만 미국 서부지역의 대표값인 65bar 보다 다소 높은 값의 특징을 보여주고 있다.

그림 5는 앞서 제시된 여러가지 역산 경우를 고려하여 지진원 값중 하나인 코너주파수의 평균값 및 분산이 지진규모의 변화에 따라 변화하는 특징을 보여주고 있다. 가속도 지



〈그림 5〉 지진규모의 증가에 따른 f_0 값 분포

반진동의 식에서 유추할 수 있는 바와같이 지진규모가 증가함에 따라 전체적으로 f_0 값이 감소하고 있음을 잘 보여주고 있다. 따라서 역산결과에 대한 신뢰성을 보여주고 있다.

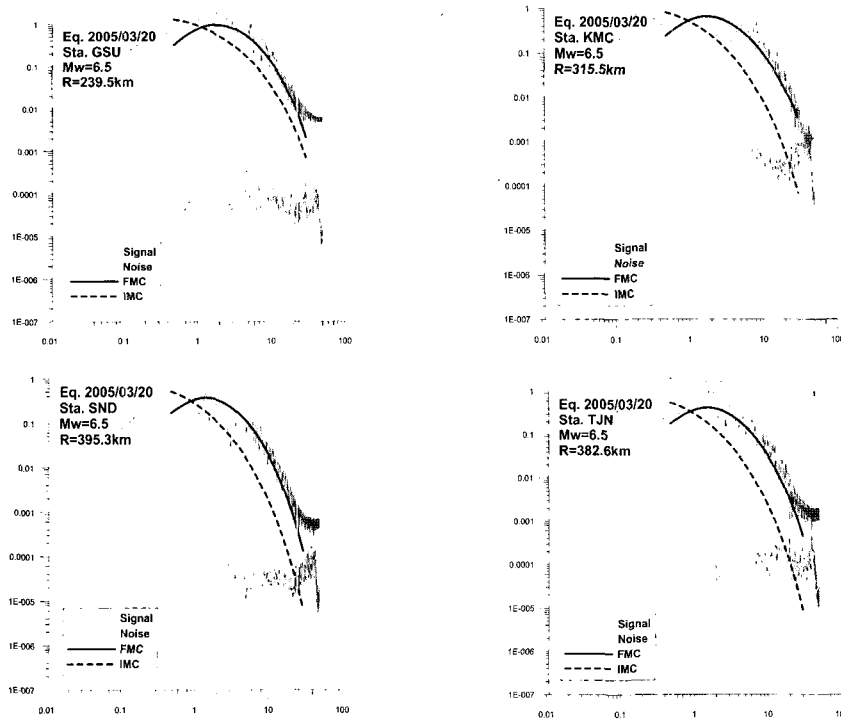
그림 6에서 2005년 3월 20일 규모 6.5의 지진으로부터 GSU, KMC, SND, 및 TJN 관측소 등 4개 관측소에서 관측된 지반진동을 이용하여 역산한 결과가 그림으로 제시되어 있다. 4개의 그림 각각에서 가로축은 주파수(1/sec)를 나타내고 세로축은 가속도 지반진동을 푸리에 변환한 결과값 ($\text{cm/sec}^2 \cdot \text{sec}$)을 나타낸다. 4개 그림 각각에서 실제 관측 지반진동의 스펙트럼(실선), 비선형 역산을 시작하기 위한 초기 추정값에 대한 스펙트럼(IMC, 굵은 점선), 역산결과 얻어지는 변수값들로부터 합성된 이론스펙트럼(FMC, 굵은 실선)이 각각 제시되어 있다. 또한 각각의 그림의 최하부에는 앞서 제시한 바와같이 배경잡음의 스펙트럼(점선)이 각각 제시되어 있다. 그림 6에서 알 수 있는 바와 같이 실제 관측지반진동의 스펙트럼과 역산결과 얻어지는 여러 가지 지진원 및 감쇠값을 이용하여 계산된 합성스펙트럼이 주파수 범위에 따라 상대적인 차이는 존재하지만 4개 관측소 모두 전체적으로 비교적 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

6. 결론

본 연구에서는 2005년 3월부터 약 2개월에 걸쳐서 후쿠오카라는 제한된 지역에서 발생한 12개의 규모 3.9이상 6.5 이하의 대규모 및 중규모의 지진으로부터 관측된 지반진동 자료를 사용하였다. 또한 LM(Levenberg-Marquardt) 역산법을 적용하여 지진원 관련값(f_0 , $\Delta\sigma$) 및 지진파의 비탄성 감쇠와 관련된 값(Q_0 , η , κ)를 비선형적으로 동시에 구하였다.

특히 후쿠오카 부근의 제한된 지역에서 발생하여 관측된 지반진동 자료를 이용하여 지진파전파 경로에 대한 중복성의 증가효과를 유도하고 이를 통해 지진파전파 경로에 대한 분산을 최소화시키도록 노력하였다. 본 연구에서 결과된 지각전체의 지진파의 감쇠특성 값인 Q_0 값은 미국 동부 지역 뿐만 아니라 미국 서부 지역의 대표값 보다 낮게 분석되었다. 또한 유사한 역산알고리즘을 이용한 기존의 2가지 연구 결과에 비해 Q_0 값이 대체로 가장 낮은 값을 보여 주었다. 이에 대한 요인은 여러 가지가 고려될 수 있으나 진앙인 후쿠오카 지역으로부터 한반도 관측소에 이르는 지진파 경로에서 지체구조적인 불균질과 같은 요인이 커다란 영향을 준 것으로 판단된다.

지진파전파 경로에 대한 중복성의 증가효과를 이용하여 κ 값에 대해 신뢰성이 있는 값을 얻을 수 있었고 관측소 상호간 다소 커다란 차이를 보여주고 있었다. 향후 정확하



〈그림 6〉 4개 관측소에서 관측 푸리에스펙트럼과 역산결과값의 비교(GSU, KMC, SND 및 TJN 관측소)

지중폭 특성 정보를 이용하여 분석할 경우 보다 신뢰성이 높은 값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

지진원관련 값인 $\Delta\sigma$ 값을 분석한 결과 12개 지진의 평균 값은 2가지 종류의 역산에 대해 각각 84.2bar 및 79.2bar로서 거의 유사한 값을 보여주고 있고 이 값은 미국 동부 지역의 대표값에 해당하는 약 120bar 보다 대단히 낮은 값을 보여주고 있지만 미국 서부지역의 대표값인 65bar 보다 다소 높은 값의 특징을 보여주었다. 향후 관측소의 부지증폭특성을 고려한 연구를 이용하여 기존의 연구결과와 비교할 필요가 있고 또한 더욱 많은 지진자료의 분석을 통해 한반도 및 동해지역 지각 전체 및 관측소 부지하부의 지역적인 감쇠특성 등 내진설계에 중요한 기초자료로 활용할 가능성이 높은 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 기상지진개발사업단의 “기상지진기술개발사업(CARTER 2006 -5107)”에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 정태웅, “확장 coda 규격화 방법에 의한 한국 남동부 지역의 Q_p^{-1} , Q_s^{-1} 연구”, 한국지구과학회지, 제22권 2호, 2001, pp.

112-119.
 2. Chung, T.W. and Lee, K., “Attenuation of high frequency Lg waves around the Yangsan Fault area,” the southeast Korea, *J. Korean Geophys., Soc.*, 5, 2002, pp. 1-8.
 3. 연관희, “수정된 Levenberg-Marquardt 역산방법에 의한 한반도 남부의 추계학적 지진요소 평가”, 한국지진공학회 2002년 춘계학술대회논문집, 2002, pp. 20-27.
 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, pp. 203-214, Sept. 2002.
 5. 정제원, 김준경, “경주지역에서 발생한 3개지진의 지진원 및 지진파전파 매질특성에 관한 연구”, 한국지진공학회 논문집, 제10권, 제1호, 2006, pp. 33-39.
 6. Brune, J., “Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes,” *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, 1970, pp. 997-1006.
 7. 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.
 8. Atkinson, G., “Attenuation of strong ground motion in Canada from a random vibrations approach,” *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 74, 1984, pp. 2629-2653.
 9. 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.
 10. 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.
 11. Hanks, T. and McGuire, R., “The character of high

- frequency strong ground motion," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 71, 1981, pp. 2071-2095.
12. 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 Alto, California, November, 1993.
13. 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.
14. Anderson, J.G. and Hough, S.E., "A Model for the Shape of the Fourier Amplitude Spectrum of Acceleration at High Frequency," *BSSA*, Vol 74, 1984, pp. 1969-1993.
15. Hanks and Kanamori, H., "A Moment Magnitude Scale," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84, 1979, pp. 2384-2350.