

추계학적 그린함수법으로 합성된 지반운동에 대한 단층 파라미터의 영향

Effects of Fault Parameters on the Ground Motion Synthesized by the Stochastic Green Function Method

김정한¹⁾ · 서정문²⁾ · 최인길³⁾

Kim, Jung Han · Seo, Jeong Moon · Choi, In Kil

국문 요약 >> 이 연구에서는 추계학적 그린함수법에 의한 단층 모델을 이용하여 지진파를 합성하고 단층 파라미터의 변화에 의한 지반 운동의 차이를 평가하였다. 모멘트 규모 6.5의 단층을 예제로 선정하였고 아스페리티 면적의 통계값을 이용하여 슬립의 분포를 모델링 하였다. 평가를 위해 고려된 단층 파라미터들은 진원의 위치, 전단파 속도 대비 파열 전파속도 비, 상승시간, 절점주파수 그리고 고주파 감쇠 필터 등 이었다. 요소지진원에 적용된 파라미터들은 구조권역별 특성이 다른 지역의 값을 사용하였고 다른 파라미터들은 발생 가능한 임의의 값을 사용하였다. 생성된 지반운동 시간이력으로부터 응답스펙트럼을 작성하였으며, 파라미터의 값을 달리하여 비교하였다. 이로부터 각각의 단층파라미터에 의해 영향을 받는 주파수 구간 및 스펙트럼 가속도의 차이를 평가하였다.

주요어 유한단층모델, 그린함수법, 추계학적 지진원모델, 아스페리티, 응답스펙트럼

ABSTRACT >> In this study, the ground motion was synthesized using the finite fault model by the stochastic green function method, and the difference in the ground motions was evaluated by using various values of the source parameters. An earthquake with a moment magnitude of 6.5 was assumed for the example fault model. The distribution of the slip in the fault plane was calculated using the statistical data of the asperity area. The source parameters considered in this study were the location of the hypocenter in the fault plane and the ratio of the rupture to the shear wave velocity, the rise time, the corner frequency of the source spectrum, and a high frequency filter. The values of the parameters related to the stochastic element source model were adjusted for different tectonic regions, and the others were selected for several possible cases. The response spectra were constructed from the synthesized ground motion time history and compared with the different parameter values. The frequency range affected by each parameter and the differences of the spectral accelerations were evaluated.

Key words Finite fault model, Green function method, Stochastic source model, Asperity, Response spectrum

1. 서론

원자력발전소와 같은 중요도가 높은 구조물은 발생 가능한 최대 지진에 대해서도 안전성을 확보해야 하므로 주변 단층대에서 발생할 수 있는 지진에 의한 입력지반운동에 대해 내진성능평가가 필요하다. 그러나 우리나라와 같이 강진

지역이 아닌 곳에서는 큰 규모의 지진이 관측된 사례가 거의 없기 때문에 예상되는 지진에 대해 지진원을 모델링하여 인공적으로 지반운동을 생성할 수밖에 없다. 단층으로부터 생성되어 전파되는 지진파는 구조권역(Tectonic Region) 특성, 진원 메카니즘, 전파특성, 지반증폭 등의 다양한 인자들에 의해 달라지며 큰 불확실성을 내포하고 있기 때문에 공학적 목적으로 사용될 지반운동을 합성하기 위해서는 이들 입력 값들의 변화에 따른 영향을 알아야 한다.

단층 근거리에 위치한 지역에서 발생하는 지반운동은 진원거리에 대한 단층의 상대적 크기를 무시할 수 없기 때문에 유한한 크기를 가지는 단층으로 모델링하여 지반운동을 생성하는 것이 합리적이다. 규모가 큰 지진을 모델링하는 방법으로는, 상사법칙에 근거한 작은 규모의 요소지진으로부터 발생하는 지진파가 파열 진행에 따른 지연시간을 고려

¹⁾ 한국원자력연구원 박사후 연구원

(교신저자: jhankim@kaeri.re.kr)

²⁾ 정회원·한국원자력연구원, 전문역

³⁾ 정회원·한국원자력연구원, 책임연구원

본 논문에 대한 토의를 2012년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2011. 10. 14 / 수정일 1차: 2011. 12. 7, 2차: 2011. 12. 20 / 게재확정일 : 2011. 12. 20)

© 2012EESK www.eesk.or.kr

하여 관측점에서 중첩되도록 하는 그린함수법(Green Function Method)이 널리 이용되며, 이는 Hartzell⁽¹⁾에 의해서 소규모 여진을 이용하여 본 지진의 지반운동을 합성하는 방법으로 시도되었다. 이와 같이, 대상으로 하는 단층에서 일어난 소규모 지진을 직접 요소지진으로 사용하여 지진원 및 전파, 증폭 특성을 보다 사실적으로 반영하도록 하는 경험적 그린함수법(Empirical Green Function Method)은 목표로 하는 대규모 지진 지반운동을 모든 주파수 대역에서 상당히 정확하게 모사한다.⁽²⁻⁵⁾ 그러나 해당 지역에서의 지진데이터를 얻기 힘들 경우에는 경험적 방법을 적용하기 어려우며, 이 경우 추계학적 점지진원 모델⁽⁶⁻⁸⁾로부터 광대역 주파수에 대하여 합리적으로 지반운동을 생성할 수 있다. 추계학적 모델에서는 지진원 특성에 의해 결정되는 입력 파라미터 값에 따라 주파수 성분이 달라지며, 특히 고주파수 성분의 차이가 크다. 그렇기 때문에 상대적으로 강성이 큰 단주기 구조물에 대한 입력 지반운동 목적으로 사용하기 위해서는 파라미터 값의 선택에 신중을 기해야 한다.

이 연구에서는 중규모 지진($5 < M < 6.5$)을 가정한 단층 예를 선정하여 유한단층 모델링을 하였다. 실제 관측된 지반운동을 모사하기 보다는 다양한 단층 파라미터들에 의한 영향 평가가 목적이므로 추계학적 그린함수법(Stochastic Green Function Method)을 이용하였다. 추계학적 지진원 모델 및 유한단층 모델에서 고려되어야 하는 파라미터들의 값을 달리하여 지반운동의 시간이력을 합성하였고 이에 대한 응답스펙트럼을 계산하여 비교 분석 하였다.

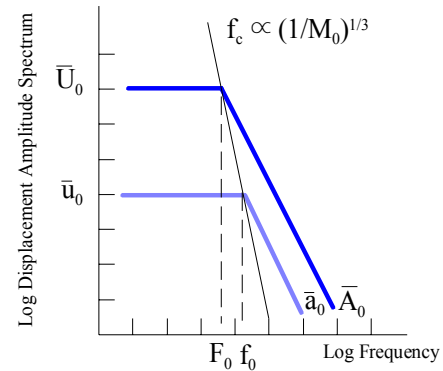
2. 추계학적 그린함수법을 이용한 강지진동 합성

2.1 그린함수법을 이용한 유한단층 모델링 방법

소규모 지진과 본 지진 사이에는 두 가지 상사법칙이 적용된다. 하나는 단층 면적, 슬립(Slip) 및 상승시간(Rise Time)과 같은 파라미터이며 또 다른 하나는 지진원 스펙트럼의 상사이다. 지진원 스펙트럼의 상사성은 Kanamori and Anderson⁽⁹⁾에 의해서 식 (1)과 같이 정의 된다.

$$L/l = W/w = T/\tau = (M_0/m_0)^{1/3} = N, \quad D/d = N \quad (1)$$

여기서 L 과 l 은 단층 길이, W 와 w 는 단층 너비, T 와 τ 는 상승시간, M_0 와 m_0 는 지진모멘트, D 와 d 는 슬립량이며 각각 본 지진과 요소지진에 대한 파라미터이다. 이 상사성은 응력강하량(Stress Drop, $\Delta\sigma$)이 단층 크기에 무관하다는 가정하에 요소지진을 $N \times N$ 으로 분할하는 경우 성립하게 된다.



〈그림 1〉 지진원 스펙트럼의 상사성⁽³⁾

또한, 지진원 스펙트럼에 대한 상사성은 ω -square 모델에서 성립된다. 이 모델은 지진원 스펙트럼을 규모에 상관없는 형태로 정의하며 저주파수 진폭 \tilde{U}_0 와 절점주파수 f_c 로부터 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\tilde{U}(f) = \tilde{U}_0 / [1 + (f/f_c)^2] \quad (2)$$

저주파수 진폭은 지진모멘트 M_0 에 비례하며 응력강하량은 지진모멘트와 절점주파수의 세제곱 (f_c^3)에 비례한다. 이때 응력강하량이 지진모멘트에 무관한 상수 값이면 절점 주파수는 지진모멘트의 세제곱근($M_0^{1/3}$)에 반비례하게 되며 고주파수성분의 진폭은 지진모멘트의 세제곱근에 비례하게 된다. 따라서 지진원 스펙트럼의 관계는 식 (3)과 같다.

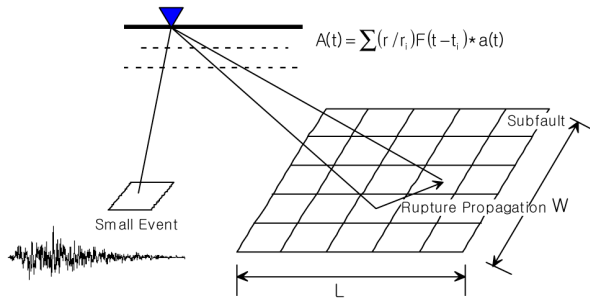
$$\tilde{U}_0/\tilde{u}_0 = M_0/m_0 = N^3, \quad \tilde{A}_0/\tilde{a}_0 = (M_0/m_0)^{1/3} = N \quad (3)$$

여기서, \tilde{U}_0 와 \tilde{u}_0 는 변위 스펙트럼에서의 평활 구간 진폭이며, \tilde{A}_0 와 \tilde{a}_0 는 가속도 스펙트럼에서의 평활 구간 진폭이다. 이러한 저주파 및 고주파 성분의 상사성을 고려하면 지진 규모에 따른 지진원 스펙트럼 형상은 그림 1과 같다.

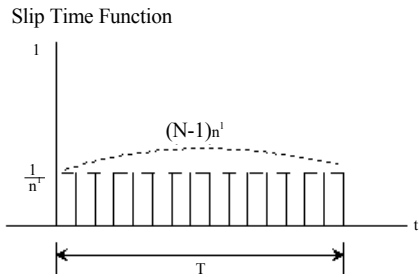
그린함수법을 이용하여 소규모 요소지진으로부터 본 지진의 지반운동을 합성하는 방법은 그림 2와 같다. 목표로 하는 지진모멘트의 크기가 소규모 요소지진의 N^3 배이고 요소지진원의 크기를 일정하다고 가정한다면 본 단층을 $N \times N$ 개의 요소지진원으로 분할 할 수 있다. 이때 본 지진의 지진파 $A(t)$ 는 요소지진의 지진파 $a(t)$ 에 대하여 식 (4)와 같이 표현 된다.

$$A(t) = \sum_{i=1}^{N^2} (r/r_i) F(t-t_i) * a(t) \quad (4)$$

여기서, r 은 소규모 지진의 진원거리이고 r_i 는 각 요소지진



〈그림 2〉 그린함수법을 이용한 지반운동 합성 방법⁽³⁾



〈그림 3〉 슬립 함수 차이에 따른 필터링 함수⁽³⁾

원의 진원거리이다. *기호는 컨볼루션(Convolution)연산을 나타낸다. t_i 는 파열 진행 및 지진파 전파에 따른 관측점까지의 도달거리에 대한 시간차이며 식 (5)와 같이 표현된다.

$$t_i = r_i / V_S + \xi_i / V_r \tag{5}$$

여기서, V_S 는 전단파 속도(Shear Wave Velocity)이고 V_r 은 파열전파 속도(Rupture Velocity)이며 ξ_i 는 파열 발생이 최초 시작되는 진원으로부터 해당 요소지진원까지의 거리이다.

요소지진원의 지진파는 단층파열로 인한 슬립 발생 시 소규모 지진파 본지진의 상승시간 차이를 보정해 주기 위해 필터링 함수 $F(t)$ 를 도입하여 변환된다. 여기서는 그림 3과 같이 델타 함수와 사각 함수 두 개의 조합으로 표현되는 필터링 함수⁽³⁾를 사용하였으며 이에 대한 계산은 식 (6)과 같이 표현될 수 있다.

$$F(t) = \delta(t) + \frac{1}{n'} \sum_{j=1}^{(N-1)n'} \delta[t - (j-1)T / (N-1)n'] \tag{6}$$

여기서 T 는 그림 3에서의 필터링 함수의 지속시간이며, n' 은 사각함수 평활부분 값의 역수이다. 이와 같이 식 (6)에 의해 필터링 된 요소지진원의 지진파를 식 (4)에 의해 중첩하면 목표로 하는 지진의 지반운동 시간이력이 만들어진다. 이때 저주파수 성분은 간섭(Coherent) 되도록 중첩되므로 N^3 에 비례하여 증폭된다. 고주파수 성분은 비간섭(Incoherent)

되도록 중첩되지만 식 (6)의 필터링 함수 $F(t)$ 가 고주파 영역에서 1의 값으로 접근하기 때문에 고주파 성분은 식 (4)에서 중첩되는 수 N^2 의 제곱근에 해당하는 N 배로만 증폭하게 된다. 이와 같은 과정을 거쳐 최종적으로 지진원 스펙트럼에서 고주파성분의 증폭량은 저주파성분 증폭량의 세제곱근에 해당하는 정도만 증폭하게 되어 상사성을 만족하게 된다.

2.2 추계학적 요소지진원 생성

대상 관측점에서 특화된 지반운동을 합성하기 위해서는 경험적 그린함수법이 유용하나 계측 데이터가 없을 경우에는 추계학적 방법으로 요소지진원을 모델링 할 수 있다. 여기서 요소지진원은 점지진원으로 가정될 수 있으며 지반운동 시간이력은 유한한 지속시간을 가지는 백색잡음(Gaussian White Noise)으로부터 이에 대한 스펙트럼을 진원 모델로부터 얻어진 목표 진폭 스펙트럼에 맞도록 변형하여 생성한다.

추계학적으로 시간이력을 생성하기 위한 지진원진폭스펙트럼은 주파수에 대한 진폭의 함수값으로 정의된다. 이는 식 (7)과 같이 지진원스펙트럼(Source Spectrum, E)과 경로 감쇠(Path Attenuation, P), 부지효과(Site Effect, G) 및 성분유형(Type of Motion, I)에 의한 함수로 이루어져있다.⁽¹⁰⁾

$$Y(M_0, R, f) = E(M_0, f) \cdot P(R, f) \cdot G(f) \cdot I(f) \tag{7}$$

여기서 지진모멘트 M_0 는 지진시 방출되는 에너지를 나타내며 $dyne\text{-cm}$ 단위를 가진다. 경로에 의한 감쇠 효과는 거리 R 및 주파수 성분에 따라 달라지며 부지효과는 거리에는 관계없는 주파수에 대한 함수이다. 따라서 특정 거리와 규모에 대한 지진원진폭스펙트럼은 최종적으로 주파수에 의한 함수 형태로 표현된다.

지진원스펙트럼 함수 E 는 식 (8)과 같이 상수 c 와 지진모멘트로부터 주파수에 대한 함수로 결정되는 지진원에 의한 항 S 의 곱으로 정해진다.

$$E(M_0, f) = c \cdot S(M_0, f) \tag{8}$$

여기서 S 는 가장 보편적이고 간단하게 ω -square 모델이 쓰인다. ω -square 모델의 변위진폭스펙트럼은 절점주파수(Corner Frequency, f_c)를 기준으로 저주파성분은 지진모멘트에 해당하는 상수값으로 일정하고 고주파성분은 주파수의 제곱에 대한 기울기로 감소하는 식 (9)와 같은 스펙트럼 형상을 가진다.

$$S(M_0, f) = \frac{M_0}{1 + (f/f_c)^2} \quad (9)$$

여기서 절점주파수는 상사성을 고려하여 $M_0 f_c^3$ 가 일정한 관계를 가지며 이 상수값은 응력강하량에 의하여 결정되어진다. Brune⁽¹¹⁾의 지진원스펙트럼 모델에 따르면 1개의 절점주파수를 가지는 ω -square 모델에서는 절점주파수와 응력강하량 사이의 관계식이 식 (10)과 같다.

$$f_c = 4.9 \times 10^6 \beta_s (\Delta\sigma/M_0)^{1/3} \quad (10)$$

여기서 f_c 는 Hz 단위이며 β_s 는 전단파속도로서 km/s 단위이고 응력강하량은 bar 단위이다. 지진원스펙트럼의 c 는 주파수에 무관한 상수이며 식 (11)과 같이 주어진다.

$$c = \frac{FR_{\phi\theta} V}{4\pi\rho\beta^3} \quad (11)$$

여기서 F 는 자유면증폭(Free Surface Amplification)을 나타내며 그 값은 2.0이고, $R_{\phi\theta}$ 는 방위각 θ 와 take-off angle ϕ 에 대한 방사패턴(Radiation Pattern)이며 수직인 두 방향의 평균적인 방사패턴은 전단파일 경우에는 0.55로 주어진다. V 는 두 개의 수평 성분에 대한 분할을 나타내며 그 값은 $1/\sqrt{2}$ 이고, ρ 와 β 는 지진원 부근의 밀도와 전단파 속도를 나타낸다.

경로감쇠 $P(R, f)$ 는 식 (12)와 같이 기하퍼짐(Geometric Spreading, D_g)과 고유·분산감쇠(Intrinsic and Scattering Attenuation, D_Q)로 표현된다.

$$P(R, f) = D_g(R) D_Q(f, R) \quad (12)$$

여기서, 기하퍼짐은 거리에 따른 함수로 표현되며 간단하게 진원거리의 역수인 $1/R$ 로 표현될 수 있다. 고유·분산감쇠는 주파수와 거리에 관한 함수이며 식 (13)과 같이 표현된다.

$$D_Q(f, R) = \exp\left(\frac{-\pi f R}{Q_f \beta}\right) \quad (13)$$

부지효과 $G(f)$ 는 진원으로부터 전파되어오는 거리에는 크게 상관없이 없기 때문에 경로감쇠와는 분리되어 여겨지며 증폭함수 $A(f)$ 와 감쇠함수 $D(f)$ 로 분리된다. 이중 고주파 감쇠를 나타내는 $D(f)$ 는 경로에 무관한 에너지 손실에 의해서 발생하며, 이 감쇠는 cut-off 주파수인 f_{max} 보다 고주파인 구

간에서 급격히 감소하는 필터(High-cut Filter)와, 지진파가 부지의 얇은 연약한 암반층을 통과하면서 이 암반층 댐핑의 증가에 의한 감쇠 영향을 표현하는 κ 필터(High Frequency κ Filter)의 두 가지로 표현되며, 각각 식 (14) 및 식 (15)와 같다. 또한 이 둘은 결합된 식으로 적용되기도 한다.

$$D(f, f_{max}) = [1 + (f/f_{max})^8]^{-1/2} \quad (14)$$

$$D(f, \kappa) = \exp(-\pi\kappa f) \quad (15)$$

지반 증폭 효과를 나타내는 함수인 $A(f)$ 는 해당 부지의 전단파속도에 따른 주파수에 대한 함수로 표현된다. 이 연구에서는 지반 증폭에 의한 것 보다는 지진원 자체의 영향을 보기 위함이므로 기반암 조건으로 가정하였다. 마지막으로 주파수에 대한 지진원진폭스펙트럼은 성분유형을 결정하는 필터를 통해 변위, 속도 및 가속도스펙트럼으로 변환될 수 있으며 가속도스펙트럼의 경우 $I(f) = (2\pi f)^2$ 이다.

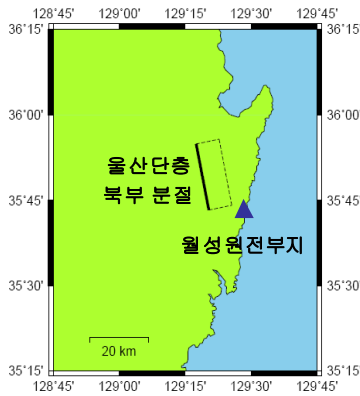
최종적으로 구해진 지진원진폭스펙트럼에 백색잡음을 맞추어 지반운동 시간이력을 생성한다. 백색잡음의 포락곡선은 Saragoni and Hart⁽¹²⁾가 제안한 기하급수 감소 곡선을 사용하였다.

지진원진폭스펙트럼에서 장주기 성분인 변위 민감 구간의 진폭은 규모와 거리에 의해서 정해지는 반면 고주파 성분인 가속도 민감 구간의 진폭은 다양한 조건에 의해 결정된다. 따라서 추계학적 유한단층 모델에서도 이들 파라미터 값 변화에 의해서는 고주파 성분에 주로 영향을 미칠 것이라 예상할 수 있다.

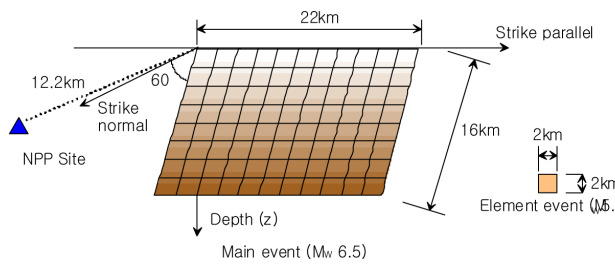
3. 대상 단층의 추계학적 그린함수법 모델링

3.1 대상 단층의 유한단층 모델링

추계학적 그린함수법을 이용한 지반운동 합성을 위하여 대상 단층 및 관측점을 선정하여 지반운동을 모사하였다. 예제 대상 모델은 울산단층으로 하였고, 주향이 349°이고 길이 22km에 해당하는 북부 분절(그림 4)에서 가상의 지진이 발생하는 것으로 가정하였다. 단층면의 너비는 파열이 발생할 수 있는 최대 깊이를 약 13km로 가정하고 경사각은 60°로 가정하여 16km로 정하였다. 따라서 가정된 단층 파열면의 단면적은 352km²이고, 이때 지진 모멘트는 식 (16)으로 정의되는 Sholz⁽¹³⁾의 L모델에 의해 6.89×10^{25} dyne-cm이며, 식 (17)에 의해 모멘트규모는 약 6.5로 결정되었다.



〈그림 4〉 가정된 울산단층 모델과 월성원전부지의 위치



〈그림 5〉 관측점과 단층의 상대적인 위치

$$S = 4.24 \times 10^{-11} M_0^{1/2} \quad (16)$$

$$M_W = (\log M_0 - 16.1) / 1.5 \quad (17)$$

관측점의 위치는 월성원전부지로 선정하였다. 단층면과 관측점 위치를 개략적으로 표현하면 그림 5와 같다. 지표면에서 단층 파열면과 관측점까지의 최단거리는 약 12km이다. 그린함수법에 적용되는 요소지진의 규모는 5.1로 가정하였으며 이는 가로 및 세로의 길이가 약 2km인 단면적 4km²의 지진원에 해당한다. 이에 따라 대상 단층을 주향 방향으로 11개, 경사 방향으로 8개로 분할하여 모델링 하였다.

3.2 아스페리티 모델링

단층의 파열면에서는 다른 주변부보다 슬립량이 더 큰 부분인 아스페리티(Asperity)영역이 존재한다. 단층 내의 아스페리티 개수 및 면적은 지진마다 상이하며 Somerville et al.⁽¹⁴⁾의 연구에서는 여러 지진에 대하여 아스페리티의 분포를 구하였다. 이들 값의 통계를 내면 지진 당 아스페리티의 수가 평균 2.6개 정도이며 전체 면적 대비 아스페리티 면적은 약 22% 이다. 가정된 대상 단층에서의 지진규모가 강진 지역과 같이 크지는 않기 때문에 아스페리티는 2개만 존재한다고 가정하고 모델링 하였다. Somerville et al.⁽¹⁴⁾의 연구에서 아스페리티가 2개인 지진들에 대하여 두 개의 아스

페리티의 면적비를 구하였으며 그 값은 약 8:3이었다. 이를 토대로 모델 단층의 아스페리티의 면적은 요소지진원의 크기를 고려하여 각각 8km×6km, 6km×4km로 결정하였다.

슬립량 D 와 지진모멘트 M_0 , 전단탄성계수 μ , 단층면적 S 의 관계는 식 (18)과 같다. 이로부터 단층 전체의 평균 슬립량이 구해진다. 아스페리티의 슬립량(D_{asp})이 평균 슬립량의 2배라고 가정하면 식 (18)로부터 거꾸로 아스페리티의 지진모멘트가 구해진다.

$$D = \frac{M_0}{\mu S} \quad (18)$$

구해진 아스페리티의 지진모멘트를 $M_{0,asp}$ 라 하면 아스페리티의 응력강하량(σ_{asp})은 식(19)와 같이 구해진다.

$$\sigma_{asp} = \frac{7}{16} \frac{M_0}{r^2 R} \quad (19)$$

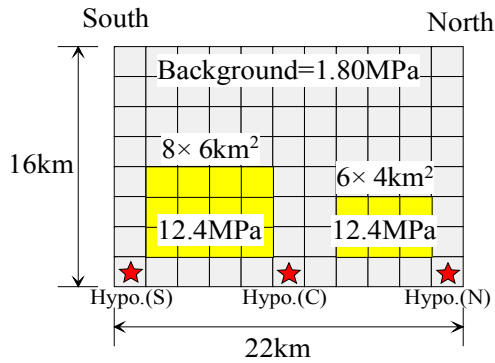
여기서 r 및 R 은 각각 아스페리티 및 전체 단층의 등가반지름이다. 배경영역의 지진모멘트는 전체 지진모멘트에서 아스페리티의 지진모멘트를 제외한 값으로 정해지며 이로부터 배경영역의 슬립량(D_{back})이 결정될 수 있다. 아스페리티와 배경영역의 너비를 각각 W_{asp} , W_{back} 이라 하면 배경영역의 응력강하량(σ_{back})은 단층의 기하학적 상사성과 응력강하량이 슬립속도에 비례한다는 관계로부터 식 (20)과 같이 결정될 수 있다.

$$\sigma_{back} = \frac{D_{back}}{W_{back}} / \frac{D_{asp}}{W_{asp}} \sigma_{asp} \quad (20)$$

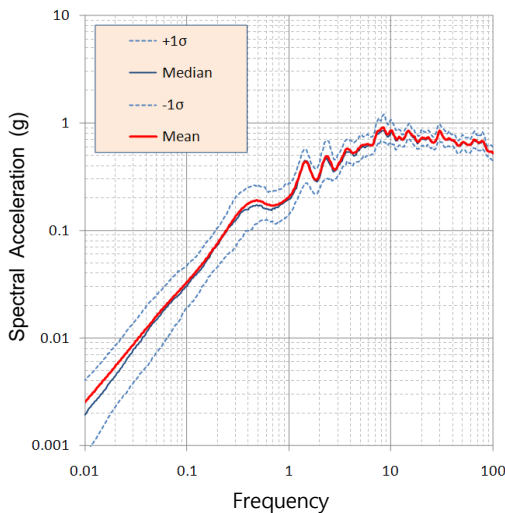
이에 따라 대상 단층 모델에서의 아스페리티의 응력강하량은 12.4MPa, 배경영역은 1.80MPa로 계산되었다. 이를 토대로 그림 6과 같이 단층 파열면의 아스페리티를 모델링 하였다. 가상의 지진을 모사하는 것이므로 실제 슬립의 공간적 분포를 알 수 없지만 우리나라와 같은 경우는 지표면 가까이에서는 큰 슬립이 발생하지 않을 것이라 예상되어 하단부 임의의 위치에 아스페리티를 배치하였다. 지진의 위치는 아스페리티 내부나 인접부일 확률이 높으며⁽¹⁵⁾, 전방지향성(Forward Directivity)에 의한 효과를 높이기 위해 최하단에 위치하는 것으로 가정하였다.

4. 단층파라미터에 따른 지진파 합성 결과

모델링된 단층에 대하여 단층 메카니즘에 관련된 파라미



〈그림 6〉 아스페리티와 배경영역으로 구분된 단층 모델링



〈그림 7〉 랜덤성에 의한 응답스펙트럼의 편차

터들의 값을 하나씩 변화시키며 지반운동을 합성하였다. 적용된 단층 파라미터로는 유한단층 모델에 의한 파라미터로 진원의 위치, 전파파속도에 따른 파열속도의 비(V_p/V_s), 슬립이 진행되는 지속 시간인 상승시간 등과 추계학적 지진원 모델로부터 기인하는 절점주파수와 전파에 의한 고주파 감쇠 등이 고려되었다.

동일한 파라미터로 지반운동을 합성하여도 추계학적 방법으로 시간이력을 생성 하는 과정에서 백색잡음에 의해 발생하는 랜덤성에 의해 합성된 지반운동의 시간이력이 달라진다. 따라서 고정된 파라미터에 대하여 랜덤성에 의한 응답스펙트럼의 편차를 먼저 평가하여야 한다. 이 예제에서 기준이 되는 파라미터 값은, 진원의 위치는 가운데, V_p/V_s 는 0.7, 상승시간은 1초, 124bar에 대한 절점주파수 및 일본과 같은 판경계(Inter-plate)지역에서 적용되는 고주파감쇠식 $Q_f = 114f^{0.92}$, $f_{max} = 15Hz$ 를 적용하였다. 이로부터 수차례 지반운동을 합성하여 응답스펙트럼을 얻었으며 그림 7은 이들에 대한 주파수별 스펙트럼가속도의 평균과 표준편차를 도시한 것이다. 편차는 저주파 영역으로 갈수록 커졌으며

1Hz를 기준으로 고주파 영역에서의 평균적인 로그표준편차는 약 0.16이었고 저주파 영역에서는 약 0.45로 계산되었다.

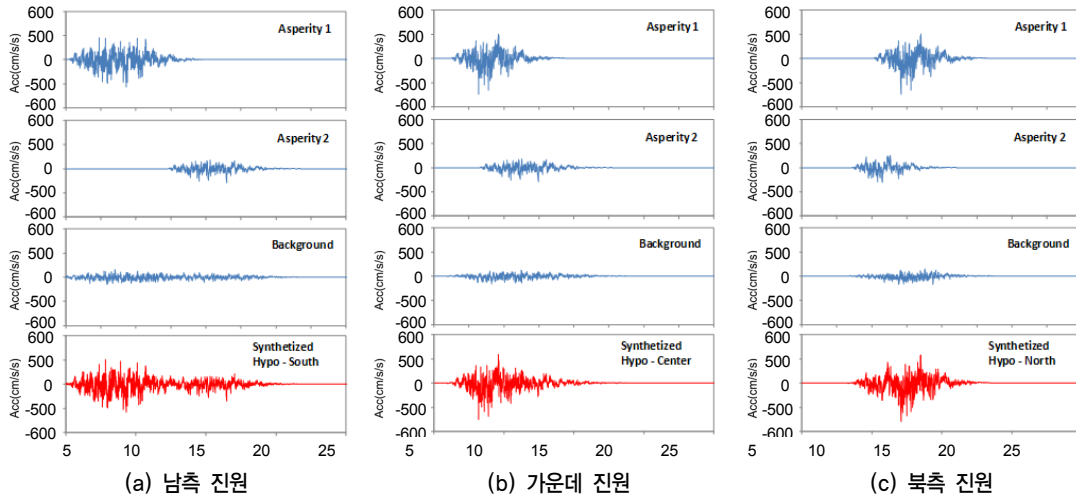
파라미터의 영향을 분석하기 위하여 이들 기준 파라미터 값에서 하나씩 파라미터를 변화시켜서 계산된 응답스펙트럼을 비교하였다. 이때 랜덤성에 의한 차이를 상쇄시키기 위해 같은 조건에 대하여 합성된 100개의 시간이력으로부터 구해진 응답스펙트럼의 평균을 비교하였다.

4.1 유한단층 모델의 파라미터에 의한 영향

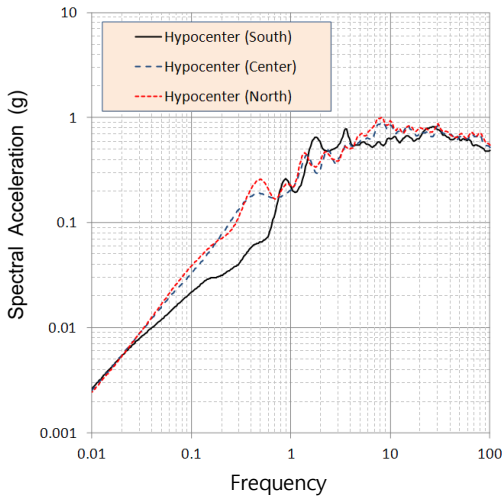
진원의 위치에 따른 파열 전파 방향에 의해서 달라지는 지반운동의 차이를 보기 위하여 그림 6과 같이 진원의 위치를 주향 방향으로 남측, 가운데, 북측 3곳에 위치하는 경우를 가정하여 각각의 경우에 대한 지반운동을 합성하였다. 그림 8은 두 개의 아스페리티 및 배경영역에서 관측점인 월성원전 부지로 전파되는 지반운동 가속도 시간이력 및 이를 시간축에서 중첩하여 최종적으로 합성된 지반운동 가속도 시간이력이다. 아스페리티 1이 $8km \times 6km$ 크기이고, 아스페리티 2가 $6km \times 4km$ 크기이다. 그림 8(a)의 남측 진원인 경우의 지반운동 시간이력에서는 각 아스페리티에서 전파되는 지진파가 큰 시간차를 가지고 도달하여 합성된 시간이력에서 분리되어 나타남을 알 수 있다. 그러나 그림 8(c)의 북측 진원의 경우는 각 아스페리티에서 도달하는 지진파가 동시에 합성되어 큰 지반운동이 합성된다. 이로부터 계산된 그림 9의 가속도 응답스펙트럼에서는 주파수 0.7Hz 이하인 상대적으로 장주기인 구간에서 그 차이를 보다 뚜렷이 확인 할 수 있다.

그림 10은 진원의 위치는 북측으로 고정하고 V_p/V_s 를 각각 0.7, 0.8, 0.9로 달리 하면서 지반운동을 합성한 것이다. 파열 전파속도가 커질수록 응답스펙트럼이 다소 고주파쪽으로 이동을 하지만 그 영향은 미미하였다.

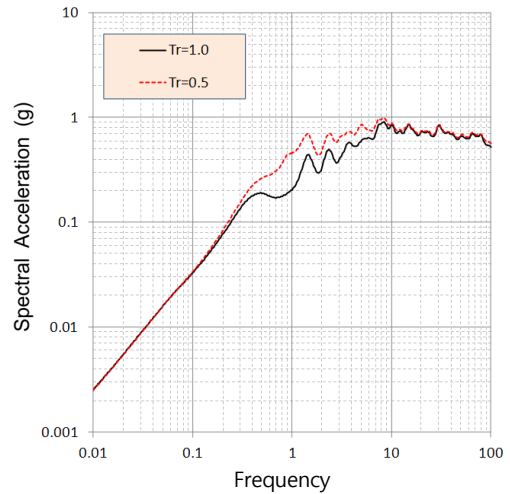
그림 11은 상승시간을 달리하였을 경우 응답스펙트럼에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 상승시간은 단층파열시 단층의 한 지점에서 슬립이 발생하기 시작해서 멈출 때까지의 시간을 나타낸다. 이는 유한단층모델에서 요소지진원의 필터링 함수의 지속시간에 해당한다. 상승시간은 지진 규모의 지수승에 비례하여 결정되지만, 동일 규모라도 일반적으로 판내부(Intra-plate)지역에서는 단층운동을 많이 겪지 않았기 때문에 깨지는 현상이 강하여 판경계지역보다 상승시간이 짧으며 그 정도는 중규모 지진의 경우 약 0.4~0.6배 정도이다.⁽¹⁶⁾ 예제 모델 규모에서 판경계지역에 해당하는 상승시간은 약 1초 정도이며⁽¹⁷⁾, 이에 따라 판내부지역 조건으로는 0.5초로 하여 비교하였다. 상승시간이 0.5초인 경우는 해당 상승시간의 역수인 2Hz 부근의 약 5배 차이 구간인 0.4~10Hz



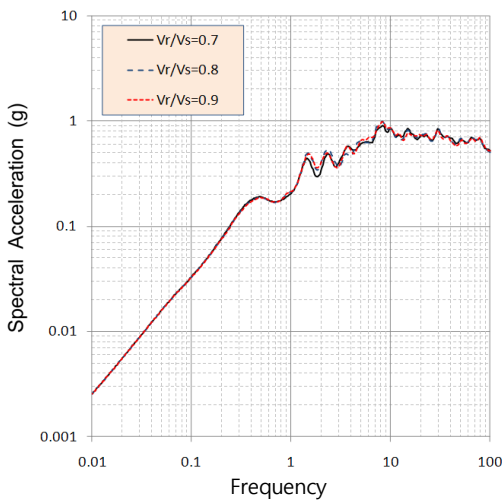
〈그림 8〉 아스페리티와 배경영역 및 최종 중첩 된 지반운동



〈그림 9〉 진원 위치에 따른 가속도 응답스펙트럼



〈그림 11〉 상승시간에 따른 가속도 응답스펙트럼



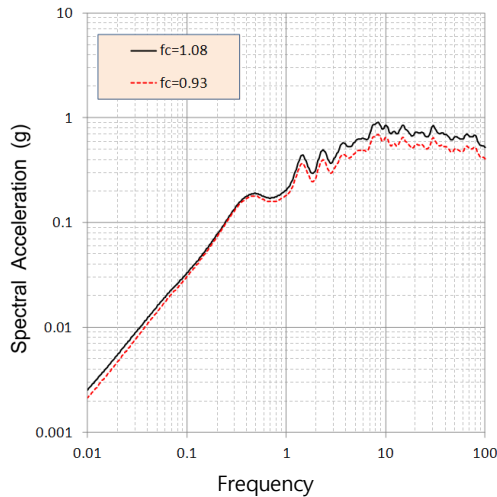
〈그림 10〉 V_r/V_s 에 따른 가속도 응답스펙트럼

에 걸쳐 응답스펙트럼의 변화가 있었다. 가장 차이가 많이 나는 주파수에서는 판내부지역 조건일 때 값이 약 120% 정

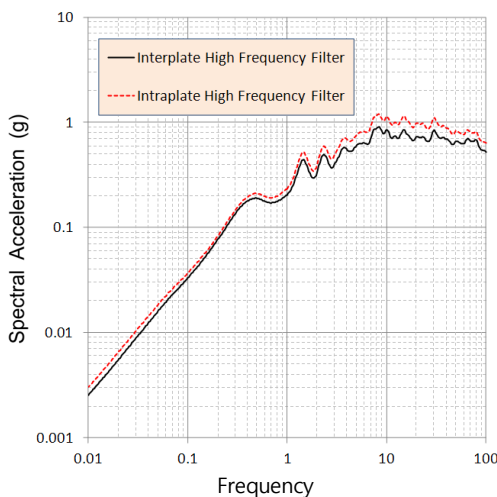
도 크게 평가되었다. 그러나 이 구간 이외의 주파성분에는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

4.2 추계학적 점지진원 모델의 파라미터에 의한 영향

추계학적 점지진원 모델은 다양한 파라미터에 의해 결정된다. 그중 가장 큰 영향을 미치는 절점주파수와 고주파 감쇠에 의한 영향을 평가하였다. 절점주파수는 식 (10)과 같이 응력강하량과의 관계식으로 주어지며 이는 지진에 따라서 편차가 심하지만 대체로 강진지역인 판경계지역에서는 우리나라와 같은 판내부지역보다 작은 값으로 평가된다. 여기서는 124bar에 해당하는 절점주파수 1.08Hz와 임의로 응력강하량 80bar에 해당하는 절점주파수 0.93Hz에 대하여 비교하였다. 그림 12는 각각의 절점주파수를 적용하여 구한 응답스펙트럼이다. 응력강하량이 크면 절점주파수가 커지고 이는 요소지진에서 고주파성분이 증가함을 의미한다. 유한



〈그림 12〉 절점주파수에 따른 가속도 응답스펙트럼



〈그림 13〉 고주파 필터에 따른 의한 가속도 응답스펙트럼

단층모델에서도 모든 주파수 영역에 대해서 응답스펙트럼 값이 커지지만 특히 절점 주파수 부근인 1Hz 이상의 주파수 성분의 세기에 더 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

그림 13은 고주파 필터의 차이에 의한 응답스펙트럼을 비교한 것이다. 판내부지역의 고주파 필터 식은 우리나라 동남부지역에서 구해진 $Q_f = 202(1 + (f/0.3)^{2.48})/(f/0.3)^{20}$ 및 $\kappa = 0.011$ 을 적용하였고⁽¹⁸⁾ 판경계지역의 식은 기준값으로 사용한 $Q_f = 114f^{0.92}$ 및 $f_{\max} = 15\text{Hz}$ 을 적용하였다. 판내부지역에서는 고주파 감쇠가 크게 일어나지 않으므로 고주파 필터에 의해서 전체적으로 응답스펙트럼이 다소 크며 특히 10Hz 부근에서는 약 30% 정도 크게 평가되었다.

5. 결론

이 연구에서는 그린함수법을 이용한 유한단층모델을 이

용하여 대상 단층으로부터 비교적 근거리에서 위치하는 관측점에서의 지반운동을 합성하였다. 그린함수법에 사용된 요소지진은 추계학적으로 생성된 소규모 지진을 사용하였다. 이를 통하여 지진원 및 단층 파열 전파, 지진파 전파 특성에 따른 합성된 지반운동의 변동성을 평가하였다. 진원의 위치, V_p/V_s 비, 상승시간, 절점주파수 그리고 고주파 감쇠 등의 파라미터 값을 달리하여 지반운동 시간이력을 생성하였고 이에 대한 응답스펙트럼의 변화를 비교하였다. 그 결과 각각의 파라미터들은 응답스펙트럼에 영향을 주는 주파수 영역대가 있음을 확인하였다. 저주파 영역에서는 요소 지진에서 발생하는 지진파의 시간차에 의한 간섭성이 특히 영향을 많이 주기 때문에 진원 위치에 의한 영향이 가장 컸다. 고주파 영역에서는 판내부지역과 판경계지역의 예로 적용한 절점주파수와 고주파 감쇠 파라미터에 의해서 각각 약 30%의 차이를 보였다. 상승시간에 의해서는 이에 해당하는 주파수 부근 영역에서만 차이를 보이고 아주 높거나 낮은 주파수에는 영향이 거의 없었다. 이와 같이 동일한 규모와 단층거리로부터 생성된 지진파라고 하더라도 다른 파라미터 값들에 의해 큰 변동성이 있다. 이러한 변동성은 해당 주파수 영역에서 랜덤성에 의한 표준편차 값 이상의 유의미한 차이를 나타내었다. 따라서 관심으로 하는 주파수 영역에 대해서는 지반운동 합성시 해당 파라미터들에 적절한 값을 사용하는 것이 중요하다. 또한 단층 내 진원의 위치와 같이 지역적 특성보다는 무작위성에 기인하는 인자나 단층의 형상과 같은 불확실성 인자들에 의한 영향도 향후 확률적으로 평가를 하여 입력지반운동에 대한 신뢰성을 확보할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2009-5208)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Hartzell, S.H., "Earthquake aftershocks as Green's functions," *Geophysical Research Letters*, Vol. 5, 1-4, 1978.
2. Irikura, K., "Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes," *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute*, Vol. 33, 63-104, 1983.
3. Irikura, K., and Kamae, K., "Estimation of strong ground motion in broad-frequency band based on a seismic source scaling model and an empirical Green's function technique; Earthquake source mechanics," *Annali Di Geofisica*, Vol. 37, 1721-1743, 1994.

4. Velasco, A.A., Ammon, C.J., and Lay, T., "Empirical Green function deconvolution of broadband surface waves: Rupture directivity of the 1992 Landers, California ($M_w=7.3$), earthquake," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 3, 735-750, 1994.
5. Bour, M., and Cara, M., "Test of a simple empirical Green's function method on moderate-sized earthquakes," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 87, 668-683, 1997.
6. Hanks, T.C., and Mcguire, R.K., "The character of high-frequency strong ground motion," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 71, 2071-2095, 1981.
7. Boore, D.M., "Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 73, 1865-1894, 1983.
8. Hwang, H., and Huo, J.R., "Generation of hazard-consistent ground motions," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 13, No. 6, 377-386, 1994.
9. Kanamori, H., and Anderson, D.L., "Theoretical basis of some empirical relations in seismology," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 65, No. 5, 1073-1095, 1975.
10. Boore, D.M., "Simulation of ground motion using the stochastic method," *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 160, 635-676, 2003.
11. Brune, J.N., "Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 75, 4997-5009, 1970.
12. Saragoni, G.R., and Hart, G.C., "Simulation of artificial earthquakes," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 2, 249-267, 1974.
13. Sholz, C.H., "Scaling laws for large earthquakes: consequences for physical models," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 72, No. 1, 1-14, 1982.
14. Somerville, P., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasakai, Y., Kagawa, T., Smith, N., and Kowada, A., "Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion," *Seismological Research Letters*, Vol. 70, No. 1, 59-80, 1999.
15. Mai, P.M., Spudich, P., and Boatwright, J., "Hypocenter locations in finite-source rupture models," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 95, No. 3, 965-980, 2005.
16. 김정환, 김재관, "안정대륙권역에서의 중규모지진에 의한 근 단층지반운동의 모델링," 한국지진공학회논문집, 제10권, 제3호, 101-111, 2006.
17. Miyake, H., Iwata, T., and Irikura, K., "Source characterization for broadband ground-motion simulation-kinematic heterogeneous source model and strong motion generation area," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, No. 6, 2531-2545, 2003.
18. 연관희, 서정희, "추계학적 지진동모델에 기반한 2D Q 토모그래피 수치모델 역산," 물리탐사, Vol. 10, No. 3, 191-202, 2007.