

경험적 그린함수를 이용한 강지진동 합성에 관한 연구

A Study on the Synthesis of Strong Ground Motion using Empirical Green Function

김 준 경*
Kim, Jun-Kyoung

이 상 훈*
Lee, Sang-Hoon,

국문요약

지진공학 분야에서는 내진설계를 위한 필요성으로 인해 근역의 강지진동이 관심의 대상이 되어왔으며, 최근 우리나라의 모든 구조물에 내진설계가 의무화되면서 그 필요성은 더욱 부각되고 있는 상황이다. 본 연구에서는 특정부지에서 발생한 강지진동 합성을 위하여 경험적 그린함수 방법을 이용한 합성방법을 적용하였다. 이 합성방법은 Haskell 타입의 운동학적 지진원 모델과 동일한 지역에서 발생한 지진의 유사성 이론을 기본으로 하고 있다. 합성에 이용되는 변수들은 단층길이, 폭 및 변위지속 시간과 같은 단층변수와 모멘트간의 일관된 관계로부터 결정된다. 본 연구에서 적용된 합성방법을 1997년 3월27일 일본의 동일지역에서 차례로 발생한 2개의 중규모(ML 4.7) 및 대규모 지진(ML 6.5)에 대하여 적용하여 강지진동을 합성하고 결과를 분석하였다. 본 연구방법을 적용한 결과 중규모(ML 4.7)로부터 관측된 강지진동을 이용하여 가속도, 속도 및 변위 성분에서 합성된 강지진동은 파형뿐만 아니라 전체 진동수 대역에서 대체적으로 실제 강지진동을 양호하게 예측하는 경향을 보였다. 또한, 전체적으로 합성운동의 침두값 역시 실제 계측된 침두값과 비교할 때 만족스러운 정도로 일치하는 결과를 보여주었다. 특히 가속도이력의 침두값은 단지 약 8.8%만의 차이를 보여주었다.

주요어 : 경험적 그린함수 방법, 강지진동 합성

ABSTRACT

The research on strong ground motions became important recently due to more severe requirement of seismic design for the domestic buildings and structures. The empirical Green's function method, which uses similarities between small and large earthquakes, was applied to make synthetic ground motions. That method was applied to the 2 earthquakes which occurred sequentially in time within narrow area in Japan. The strong ground motions for the virtual earthquake (magnitude 6.5) were synthesized using those observed from the magnitude 4.7 earthquake. Then, the synthesized ground motions (acceleration, velocity, and displacement) were compared to those observed from real earthquake (magnitude 6.5). The results showed that the general shapes of waveforms in time domain and the Fourier spectrum in frequency domain from synthesized ground motions (acceleration, velocity, and displacement) are similar to the observed strong ground motions within acceptable degree. The peak values of 3 kinds of synthesized strong ground motions in time domain are comparable between the synthesized and the real strong ground motions, especially only about 9 % difference in acceleration peak value.

Key words : empirical Green's function method, strong ground motion, synthetic ground motion

1. 서 론

지진공학 분야에서는 내진설계를 위한 필요성으로 인해 근역의 강지진동이 관심의 대상이 되어왔으며, 최근 우리나라의 모든 구조물에 내진설계가 의무화되면서 그 필요성은 더욱 부각되고 있는 상황이다. 실제 관측 지반진동이 풍부한 지역에서는 관측 지반진동을 통계적으로 처리하여 사용하고 있으나 일반적으로 관측 지반진동이 부족한 지역에서는 설계수준에 해당하는 강지진동이 없기 때문에 인공적으로 합성한 지진파형을 적용하고 있다.

국내의 경우 각종 구조물을 설계하기 위해 토목 및 건축 내진설계기준이 적용되어 오고 있다. 특히 건축물에 대한 내진설계는 최근 KBC가 발표되어 적용되고 있는 실정이다. 내진설계를 위한 여러가지 종류의 입력자료들은 설

계대상 구조물의 부지고유의 증폭특성이 필수적으로 고려되어야 하나, 국내의 경우 아직 충분하게 반영되지 못하고 있는 실정이다. 지금까지 내진해석에 사용되었던 합성가속도이력은 지진원특성, 지진파전달 매질의 특성 및 관측소 부근의 부지고유의 지반증폭특성 등 3가지 커다란 요소가 충분하게 고려되지 못하였다. 특히 위 3가지 요소중에서 특히 관측소부지의 직하부 수십 10m 깊이까지 부지고유의 지반증폭은 현상이 대단히 복잡하여 합성강지진동의 파형 및 진동수 특성에 가장 민감도가 큰 요소로 알려져 있으나, 아직 국내에 분포하고 있는 관측소하부의 부지고유의 지반증폭특성이 충분하게 연구되지 못하였다. 따라서 국내에서 내진설계에 적용되는 합성가속도이력은 많은 문제점을 갖고 있는 것으로 지적되어 왔다.

설계가속도이력은 내진설계에 반드시 필요하나 부지고유의 내진설계강도에 부합하는 정도의 실제 강지진동 기록을 얻는 것이 현실적으로 불가능하므로 대안으로 추계학적, 경험적 그린함수 및 합성 그린함수 방법 등 여러 가지 방법이 제시되어 왔다. 본 연구는 앞서 제시된 여러 가지 강

* 정회원 * 세명대학교 지환경공학과 부교수
(대표저자: kimjk1@unitel.co.kr)

** 정회원 * 한국전력기술(주), 책임연구원

본 논문에 대한 토의를 2006년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2005. 10. 26 / 심사종료일 : 2006. 1. 10)

지진동 합성방법들 가운데 이미 발생한 소규모 또는 중규모의 지진으로부터 실제 관측된 강지진동을 이용하여 내진 설계에서 요구되는 수준의 강지진동으로 합성하는 방법에 해당하는 경험적 그린함수를 이용하는 방법의 적용을 시도하였다.

본 연구에서 적용을 시도한 경험적 그린함수 방법은 대규모의 지진에 의해 특정 관측소에서 관측가능한 강지진동을 합성하기 위해 이미 발생한 중규모 또는 소규모 지진으로부터 특정 관측소에서 관측된 강지진동을 이용한다. 이 방법을 적용할 경우 중규모 또는 소규모 지진 발생에 의해 관측된 강지진동 자체가 특정 관측소하부의 부지증폭특성 정보를 이미 내재하고 있다는 장점이 있다. 따라서 내진설계강도 수준을 만족시킬 수 있는 강지진동을 합성하기 위해 복잡하고 민감도가 가장 큰 부지증폭특성을 별다른 노력없이 충분히 반영할 수 있는 것이 경험적 그린함수방법을 이용하는 최대의 장점이다. 위에서 제시한 바와 같이 경험적 그린함수방법은 관측소하부의 부지 증폭특성에 대한 국내의 연구환경을 고려할 경우 대단히 유용하고 의미있는 강지진동 합성방법으로 판단된다. 따라서 본 연구는 현재 주어진 국내 부지고유의 지반증폭 관련 연구환경을 고려하여 이러한 경험적 그린함수 방법 적용을 시도하게 되었다.

강지진동을 이론적으로 합성하는 연구는 무한 탄성체의 단층면에서 변위(dislocation)가 주어질 때 운동학적 지진원 모델을 이용한 Aki⁽¹⁾와 Haskell⁽²⁾의 연구를 최초로 볼 수 있다. 그들의 지진원 모델은 단층모델에 필수적인 5개 요소(단층길이, 단층폭, 파괴속도, 최종변위거리 및 변위지속시간)로 구분하여 변수화 하였다. Sato and Hirata⁽³⁾는 확산되는 표면파의 효과를 포함하는 층상체에 대한 지진운동을 계산하기 위해서 적분법을 사용하는 새로운 방법을 제시하였다. Bouchon⁽⁴⁾은 이산화 된 파동수(wave number) 방법을 기본으로 하여 층상체에서 진행되는 단층의 강지진동을 계산하는 방법을 개발하였다. 이러한 방법들에 따라 강지진동을 계산하는 합성법은 1Hz 미만의 저진동수 영역에서는 성공적이었지만, 고진동수 영역에서는 강지진동을 과소 예측한다는 평가를 받았다.

Hartzell⁽⁵⁾은 그린함수와 같이 소규모 지진의 지진기록을 이용하여 강지진동을 합성하는 또 다른 접근방법을 제시하였다. 그린함수는 아직 평가가 되지 않아 미지수로 남아 있는 지진원과 관측소 부지하부의 비균질한 지질구조뿐만 아니라 단층에서 진행되는 복잡한 동적 파괴과정을 포괄적으로 포함하고 있기 때문에 강지진동 합성을 위해 대단히 큰 장점을 지니고 있다. 이러한 이론을 기본으로 전진(foreshock) 및 여진(aftershock)과 같은 소규모 운동을 이용하여 주지진(mainshock)과 같은 강지진동을 합성한 연구결과들이 Irikura⁽⁶⁾ 등에 의해 발표되기 시작했다.

본 연구에서는 특정부지의 강지진동 합성을 위하여 Haskell 타입의 운동학적 지진원 모델과 지진의 유사성 이론을 기본으로 한 경험적 그린함수를 이용한 합성방법을 적용하였다. 본 연구에서 사용된 강지진동 관련 지배방정식

은 Irikura(1982)⁽⁶⁾의 연구결과를 주로 이용하였다. 1997년 3월27일 일본의 동일지역에서 발생한 2개의 중규모 및 대규모 지진에 대하여 적용하여 강지진동을 합성하고 그 결과를 분석하였다.

2. 강지진동 합성 이론

2.1 지진의 유사성 이론

강지진동과 소규모 지진 상호간에는 2종류의 유사성이 성립하는데, 첫 번째는 단층 주요 변수들간의 비례관계이며, 두 번째는 지진원 스펙트럼간의 비례관계이다. 단층 주요 변수들은 Kanamori와 Anderson(7)에 의해 식 (1)과 같은 관계를 제시하였다.

$$\frac{L}{L_e} = \frac{W}{W_e} = \frac{D}{D_e} = \frac{\tau}{\tau_e} = \left(\frac{M_o}{M_{o_e}} \right)^{1/3} \quad (1)$$

여기서 L은 강지진동의 단층의 길이, W는 단층 폭, T는 변위지속시간, Mo는 지진 모멘트, D는 최종 변위량을 나타내며, 첨자 e는 소규모 지진을 의미한다. 지진원의 기하학적 형상을 결정하는 단층변수들과 함께 강지진동 산정에 요구되는 중요한 단층변수로 단층의 파괴속도(v_p)와 변위지속시간(τ)이 있다. 단층의 파괴속도는 비록 지진의 규모가 다르더라도 그 값이 개략적으로 일정하지만, 변위지속시간은 단층 모델의 여러 가정을 내포하고 있어 그 값을 명확히 결정하기 어려운 문제가 있다.

2.2 지진원 시간함수

지진발생기구(earthquake source mechanism)가 동일한 대소규모의 지진이 동일지역에서 발생하였다고 가정할 때, 전술한 지진의 유사성 조건으로부터 소규모 지진과 강진 운동의 지진원 시간함수(source time function)사이의 관계를 알 수 있다. 그림 1의 Haskell의 지진원 모델은 단층의 파괴가 원활히 전파되며 변위가 일정하다고 할 때 이러한 관

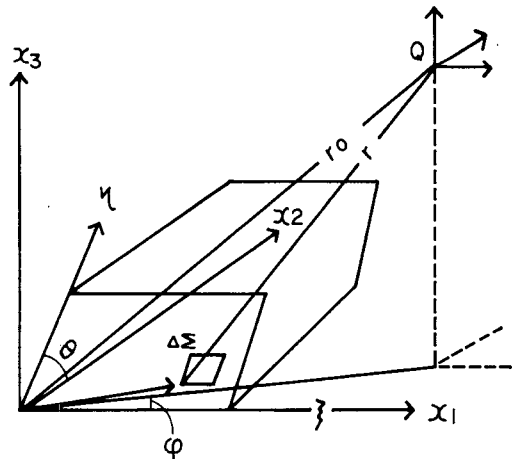


그림 1 Haskell이 제시한 사각형 단층모델의 좌표계

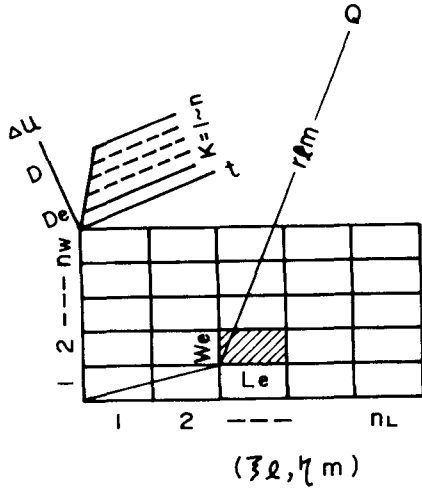


그림 2 대규모 지진원을 구성하는 분할된 단층면

계를 설명하고 있다. 그림 1과 그림 2와 같이 단층면을 따라 발생한 변위함수(dislocation function) $\Delta U(\xi, \eta, t)$ 에 의하여 무한균질탄성지반(infinite homogeneous elastic medium)에 있는 어떤 점 Q에서 발생하는 변위 $U_c(x, t)$ 는 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_c(x, t) = \frac{R_c(\theta, \phi)}{4\pi\rho v_c^3 r} \mu \int_0^L \int_0^W \Delta \dot{U}(\xi, \eta, t - t_c) d\xi d\eta \quad (2)$$

여기서, 단층의 파괴시발점으로부터 대상~부지까지의 지진파 도달시간

$$= \frac{r}{v_c} + \frac{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}}{v_r}$$

u = 지반강성

ρ = 지반밀도

v_c = 지반의 탄성과 속도

v_r = 파괴속도

r = 단층면 Σ 로부터 점 Q사이의 거리

R_c = 방사계수(Radiation Coefficient)

ϕ = 단층의 주향(Fault Strike)

θ = 단층의 경사각(Dip Angle)

식 (2)에서 오직 지진원의 변수들만으로 나타낼 수 있는 지진원 시간함수는 식 (3)과 같이 간단한 적분형태로 정의될 수 있다.

$$S(x, t) = \mu \int_0^L \int_0^W \Delta \dot{U}(\xi, \eta, t - tc) d\xi d\eta \quad (3)$$

주어진 단층면을 그림 2와 같이 $N_L \times N_W$ 개 요소로 분리하고 그 분리된 단층면을 소규모 지진의 단층면으로 간주할 때 각 요소의 단층면 Σ_e 의 길이와 폭은 각각 Le 및 We 가 되므로, 강지진동의 지진원 시간함수는 식 (4)와 같이 각 소규모 지진의 지진원 시간함수를 전체 단층면에 중첩하여 나타낼 수 있다.

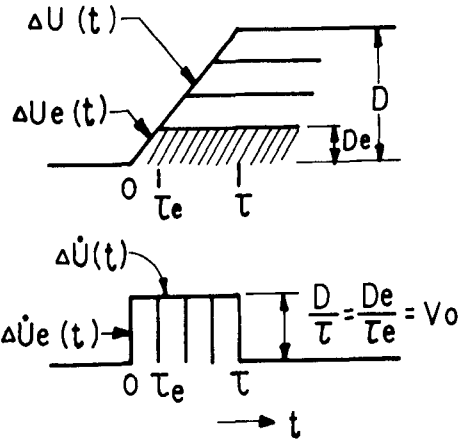


그림 3 대규모 지진 및 소규모 지진의 단층면 변위함수 및 slip velocity 관계

$$S(x, t) = \sum_{l=1}^{N_L} \sum_{m=1}^{N_W} \mu \int_{\xi_l}^{\xi_l + L_l} \int_{\eta_m}^{\eta_m + W_l} \Delta \dot{U}(\xi, \eta, t - t_{c_{lm}}) d\xi d\eta \quad (4)$$

한편, 강지진동의 단층면 좌표상의 임의점 (ξ, η) 에서의 변위함수 $\Delta U(\xi, \eta, t)$ 는 그림 3과 같이 변위지속시간 τ 와 최종변위량 D 로 표시되는 경사함수(ramp function)형태를 갖게 된다.

$$\Delta U(\xi, \eta, t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ = Dt/\tau & 0 < t < \tau \\ = D & \tau > t \end{cases} \quad (5)$$

또한 기본지진의 단층면 좌표상에 있는 임의점 (ξ, η) 에서의 변위함수 $\Delta U_e(\xi, \eta, t)$ 도 변위지속시간 τ_e 와 최종 변위거리 D_e 와 유사한 경사함수 형태를 갖는다. 식 (1)의 유사성 조건식은 동일 지역에서 발생한 다른 크기의 지진에 대하여 단층면의 미끌림속도 (slip velocity)는 일정하다고 가정할 수 있음을 보여준다. 즉, 미끌림속도 V_a 는 식 (6)과 같은 관계를 갖고 있으며, 식 (6)으로부터 (7)과 같은 관계가 성립된다.

$$V_a = \frac{D}{\tau} = \frac{D_e}{\tau_e} \quad (6)$$

$$\frac{D}{D_e} = \frac{\tau}{\tau_e} = Const \approx N_D \quad (7)$$

여기서 N_D 를 정수로 나타내면 다음과 같은 강지진동의 변위함수와 소규모 지진의 변위함수 사이의 관계식이 성립된다.

$$\Delta U(\xi, \eta, t) = \sum_{k=1}^{N_D} \Delta U_e[\xi, \eta, t - (k-1)\tau_e] \quad (8)$$

또한 식 (6)을 시간에 대해 미분할 경우 식 (7)과 같이 표현된다. 식 (6) 및 식 (7)을 그림으로 표시하면 그림 3에 제시되어 있다.

$$\Delta \dot{U}(\xi, \eta, t) = \sum_{k=1}^{N_D} \Delta \dot{U}_e[\xi, \eta, t - (k-1)\tau_e] \quad (9)$$

식 (9)를 식 (4)에 대입하면 아래와 같은 강지진동의 지진원 시간함수를 얻게 된다.

$$S(x, t) = \sum_{l=1}^{N_L} \sum_{m=1}^{N_M} \sum_{k=1}^{N_D} \mu \int_{\xi_l}^{\xi_l+L} \int_{\eta_m}^{\eta_m+W} \Delta \dot{U}_e[\xi, \eta, t - (k-1)\tau_e] \quad (10)$$

여기서 이중적분으로 표시된 항은 파괴시발점이 단층면 좌표상의 임의점(ξ, η_m)인 소규모 지진의 지진원 시간함수인 $S_{e_{lm}}(x, t)$ 으로 만들어진다. 따라서 주지진의 파괴시발점을 원점(0,0)으로 가정한다면 식 (10)은 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S(x, t) = \sum_{l=1}^{N_L} \sum_{m=1}^{N_M} \sum_{k=1}^{N_D} S_{e_{lm}}(x, t - t_{d_{klm}}) \quad (11)$$

$$\text{여기서, } t_{d_{klm}} = \frac{r_{lm}}{v_c} + \frac{\sqrt{\xi_l^2 + \eta_m^2}}{v_r} + (k-1)\tau_e \quad (12)$$

또한 원역에 위치한 각각의 기본 단층에서 발생한 기본 지진들이 동일한 지진원의 특성을 갖는다고 가정할 때, 각 기본지진의 지진원 시간함수는 동일하다고 간주될 수 있으며, 식 (11)는 식 (13)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$S(x, t) = \sum_{l=1}^{N_L} \sum_{m=1}^{N_M} \sum_{k=1}^{N_D} S_c(x, t - t_{d_{klm}}) \quad (13)$$

$$\text{여기서, } t_{d_{klm}} = \frac{r_{lm}}{v_c} + \frac{\sqrt{\xi_l^2 + \eta_m^2}}{v_r} + (k-1)\tau_e \quad (14)$$

즉, 강지진동의 지진원 시간함수는 소규모 지진의 지진원 시간함수 $S_c(x, t)$ 의 지연된 위상시간의 합으로 근사하게 나타낼 수 있음을 의미한다. 그리고 위의 식에서 NL, NW, ND 및 τ_e 값들은 앞서 설명한 지진의 유사성 조건으로부터 산정될 수 있다.

2.3 소규모 지진기록을 이용한 강지진동의 결정

먼저 합성하고자 하는 지진원의 규모 즉 예상되는 강지진동에 대한 활성 가능한 단층면을 파괴시키는 지진모멘트를 산정하고, 예측된 소규모 지진의 지진기록으로부터 소규모 지진의 지진모멘트를 계산한 후 합성하고자 하는 강지진동에 해당하는 대규모 지진과 소규모 지진의 모멘트비를 결정한다. 2개지진의 모멘트비가 N^3 일 때 강지진동의 단층면을 $N \times N$ 의 요소로 나눈다. 이때 분할된 미소 단층면은 소규모 지진의 단층면으로 간주한다. 무한균질 탄성 지반내의 미소단층면에 의한 근역에서의 지반운동 $U_e(x, t)$ 는 식 (15)와 같이 표현된다.

$$U_e(x, t) = \frac{R_c(\theta, \phi)\mu}{4\pi\rho v_c^3 r} \int_0^L \int_0^W \Delta \dot{U}_e(\xi, \eta, t - t_c) d\xi d\eta \quad (15)$$

$$\text{여기서, } t_c = \frac{r}{v_c} + \frac{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}}{v_r}$$

그런데, 무한균질탄성지반인 대상부지의 직하부의 기반암에 도달할 지반운동 등은 지표면 토층의 영향에 의하여 증폭되므로, 그 영향을 고려하여 지표면 지반운동을 결정한다. 관측지점의 직하부에서 관측지점 사이에 있는 지표면 토층의 영향을 전달함수 $T(x, t)$ 로 나타낼 때, 지표면 지반운동은 식 (16)을 이용하여 구할 수 있다.

$$G_e(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} T(x, t-t') * U_e(x, t') dt' \quad (16)$$

따라서 그림 2의 임의의 소규모 단층면에서 소규모 지진이 발생했을 때 단층면의 변위함수 $\Delta U_{e_{lm}}(\xi, \eta, t)$ 에 의한 지표면 지반운동 $G_{e_{lm}}$ 은 식 (17)과 같이 쓸 수 있다.

$$G_{e_{lm}}(x, t) = T_{lm}(x, t) * c_{lm} \mu \int_{\xi_l}^{\xi_l+L} \int_{\eta_m}^{\eta_m+W} \Delta \dot{U}_{e_{lm}}(\xi, \eta, t - t_{c_{lm}}) d\xi d\eta \quad (17)$$

$$\text{여기서, } t_{c_{lm}} = \frac{r_{lm}}{v_c} + \frac{\sqrt{(\xi - \xi_l)^2 + (\eta - \eta_m)^2}}{v_r}$$

$$c_{lm} = \frac{1}{4\pi\rho v_c^3} R_{c_{lm}}(\theta_{lm}, \psi_{lm}) / r_{lm}$$

한편 대규모 지진이 발생했을 때 대규모 지진에 의한 지표면 지반운동을 구하기 위해 식 (17)에서 이용되었던 소규모 단층면에서 소규모지진이 발생했을 때 단층면의 변위함수인 $\Delta U_{lm}(\xi, \eta, t)$ 를 이용하여 식 (18)과 같이 쓸 수 있다.

$$G_{lm}(x, t) = T_{lm}(x, t) * c_{lm} \mu \int_{\xi_l}^{\xi_l+L} \int_{\eta_m}^{\eta_m+W} \Delta \dot{U}_{lm}(\xi, \eta, t - t_{c_{lm}}) d\eta d\xi \quad (18)$$

대규모 지진의 변위함수 $\Delta \dot{U}_{lm}(\xi, \eta, t)$ 와 소규모 지진의 변위함수 $\Delta \dot{U}_{e_{lm}}(\xi, \eta, t)$ 의 상호관계는 식 (6)의 유사성 조건으로부터 구할 수 있다. 따라서 식 (17), (18) 및 (6)식으로부터 다음의 관계식을 유도할 수 있다.

$$G_{lm}(x, t) = \sum_{k=1}^{N_D} G_{e_{lm}}[x, t - (k-1)\tau_e] \quad (19)$$

따라서 소규모 지진의 지진이 발생했을 때 소규모 단층면의 변위에 의한 원역의 지표면 지반운동 $G_{e_{lm}}$ 을 위상시간에 대하여 적분하고, 적분된 지반운동 G_{lm} 을 다시 전체 단층면에 대하여 적분할 때, 식 (20)과 같이 강지진동이 발생했을 때 강지진동 단층면의 변위에 의한 원역의 지표면 지반운동 $G(x, t)$ 가 결정된다.

$$G(x, t) = \sum_{l=1}^{N_L} \sum_{m=1}^{N_M} G_{lm}(x, t - t_{c_{lm}}) = \sum_{l=1}^{N_L} \sum_{m=1}^{N_M} \sum_{k=1}^{N_D} G_{e_{lm}}(x, t - t_{d_{klm}}) \quad (20)$$

표 1 강지진동 분석에 사용된 2개 지진자료

구분(M)	관측소좌표	지진발생일	관측성분	진앙거리	진원깊이	방위각	최대가속도
4.7	위도:32.09°	1997. 3. 26	동서방향	13.2 Km	11.1 Km	357.1°	99 gal
6.5	경도:130.36°			12.1 Km	8.2 Km	349.7°	542 gal

$$\text{여기서, } t_{d_{i,m}} = \frac{r_{i,m}}{v_c} + \frac{\sqrt{\xi_i^2 + \eta_m^2}}{v_r} + (k-1)\tau_{e_{i,m}}$$

이상과 같이 소개된 강지진동 산정 방법은 주지진의 단층면내에서 일어난 오직 한 개의 지진기록을 사용한다. 따라서 그림4와 같이 또 다른 소규모 단층면으로부터 지진기록이 계속되었을 경우, 임의의 소규모 단층면의 변위에 의한 지반운동 $G_{e_{i,m}}$ 은 식 (21)과 같이 계속된 지반운동 $G_{e_{i,m}}$ 으로부터 산정될 수 있다. 단 전달경로의 영향 $T_{i,m}$ 은 $T_{i,m}$ 과 동일하다고 간주한다.

$$G_{e_{i,m}}(x,t) = \frac{R_c(\theta_{i,m}, \psi_{i,m})}{R_c(\theta_{i,m}, \psi_{i,m})} \frac{r_{i,m}}{r_{i,m}} G_{e_{i,m}}(x,t-t_{e_{i,m}}) \quad (21)$$

$$\text{여기서, } t_{e_{i,m}} = \frac{r_{i,m} - r_{i,m}}{v_c}$$

따라서 식 (21)을 식 (20)에 대입할 때 식 (22)과 같이 강지진동에 의한 지표면 지반운동 $G(x,t)$ 가 결정된다.

$$G(x,t) = \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^N \sum_{k=1}^N \frac{R_c(\theta_{i,m}, \psi_{i,m})}{R_c(\theta_{i,m}, \psi_{i,m})} \frac{r_{i,m}}{r_{i,m}} G_{e_{i,m}}(x,t-t_{e_{i,m}}-t_{d_{i,m}}) \quad (22)$$

지금까지 설명한 강지진동 계산식은 지진파 에너지 가운데 체적파(body wave)를 가정으로 했으며, 표면파의 경우도 본 유도과정을 거의 그대로 적용하여 강지진동을 합성할 수 있다. 그러나 체적파, 표면파 및 coda파 등과 같이 여러 가지 종류의 지진파가 복합적으로 존재하는 경우 본 계산식의 적용성은 다소 떨어진다. 따라서 이러한 경우 체적파와 표면파의 파속 및 방사형태에 대한 차이가 크지 않다는 가정이 선행되어야 한다.

Irikura(1982)⁽⁶⁾는 여러 번의 강지진동을 합성해 본 결과 고진동수 영역으로 갈수록 합성지진파의 속도값이 실측값보다 과대 예측된다는 사실을 발견했고, 그 원인이 해석에 사용된 소규모 지진의 가정된 변위지속시간과 실제 변위지속시간의 차이에서 기인함을 알았다. 따라서 강지진동 계산식 (22)에 적용된 변위함수의 형태를 완만한 형태로 변화시키기 위해 n' 이라는 새로운 변수를 도입하였고 다음과 같은 개선된 식 (23)을 제시하였다.

$$G(x,t) = \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^N \sum_{k=1}^{N \times n} \left(\frac{C_c}{C_m} \right) \frac{1}{n'} G_c \left[x, t-t_{r_{i,m}} - (k-1) \frac{\tau_c}{n'} \right] \quad (23)$$

$$\text{여기서, } t_{r_{i,m}} = \frac{r}{v_c} + \frac{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}}{v_r}$$

n' : 고주파 대역 보정계수, $n' \geq 1$

τ_c : apparent periodicity

한편, 합성된 지진파의 최대 가속도값과 고진동수의 스펙트럼값 뿐만 아니라 낮은 진동수 영역의 스펙트럼값이 실측지진의 값과 잘 일치될 수 있도록 식 (24)와 같은 강지진동 계산식을 다시 수정하여 제시함으로써 진동수간의 예측의 불일치 현상을 최대한 억제하였다.

$$G(x,t) = \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^N \sum_{k=1}^N \frac{R_{c_{i,m}}}{R_{c_{i,m}}} \frac{r_{i,m}}{r_{i,m}} G_c(x,t-t_{r_{i,m}}) + \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^N \sum_{k=1}^{(N-1)n} \frac{R_{c_{i,m}}}{R_{c_{i,m}}} \frac{r_{i,m}}{r_{i,m}} \frac{1}{n'} G_c \left(x, t-t_{r_{i,m}} - \frac{(k-1)\tau_c}{n'} \right) \quad (24)$$

3. 강지진동 합성결과 분석

앞서 제시된 강지진동 합성방법의 타당성을 확인하기 위해 소규모 지진과 대규모 지진이 거의 동일한 지역에서 발생하고 또한 관측자료가 다수인 조건을 만족시키는 후보 지진을 수집하였다. 하지만 위 조건을 만족시키는 지진은 국내에서는 찾기 어려웠고 일본 내에서 발생한 특정 지진을 선정하여 소규모의 지진으로부터 합성된 강지진동과 역시 동일한 지역에서 실제로 발생한 강지진동의 지진파 특성을 상호 비교하였다.

본 연구에서 사용한 지진자료는 1997년 3월26일 일본지역에서 발생한 규모 4.7과 6.5의 지진이 선정되었으며, 이들에 대한 규모별 관측지점, 관측일, 측정성분, 진앙거리, 깊이 등과 같이 구체적인 자료는 표 1에 제시되어 있다. 우선 규모 4.7의 지진자료를 이용하여 규모 6.5에 해당하는 강지진동을 합성하였다. 합성결과 얻어진 지반진동을 규모 6.5 지진으로부터 실제 관측된 지반운동 특성과 다시 상호 비교하였다. 규모 4.7의 지진으로부터 관측된 지반운동을 이용하여 규모 6.5에 해당하는 강지진동으로 합성하기 위해 필요한 지진원 관련 입력요소의 값은 표 2에 제시되어 있다.

경험적 그림함수를 이용한 강지진동의 형태 및 특성은 그림 4 와 그림 5에 제시되어 있다. 우선 그림 4는 3부분으로 이루어져 있고 가장 상부행의 3개의 그림은 규모 6.5의 지

표 2 강지진동 합성을 위한 지진원 입력요소 값

입력요소	입력값
단층 주향(fault strike)	278°
단층 경사각(dip angle)	89°
단층 길이(fault length)	7 km
단층 폭(fault width)	6 km
단층 요소수(subfault number)	5 × 5
파괴속도(rupture velocity)	2.5 km/s
전단파속도(shear wave velocity)	3.1 km/s
변위지속시간(rise time)	0.5 sec
파괴형태(style of rupture)	radial propagation
Stress Drop Ratio	1.06

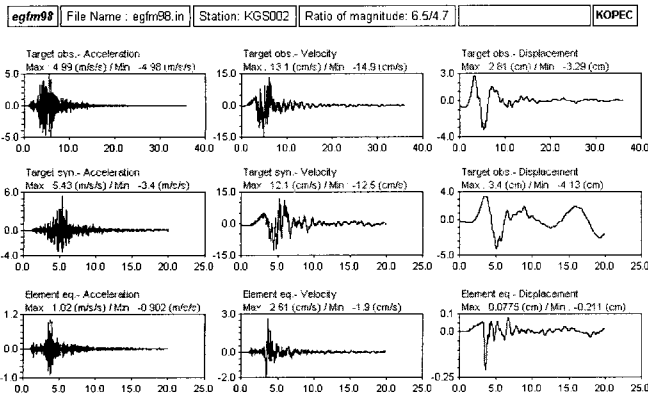


그림 4 관측강지진동, 합성강지진동 및 소규모지진 관측강지진동의 시간이력 비교 (가속도, 속도 및 변위이력)

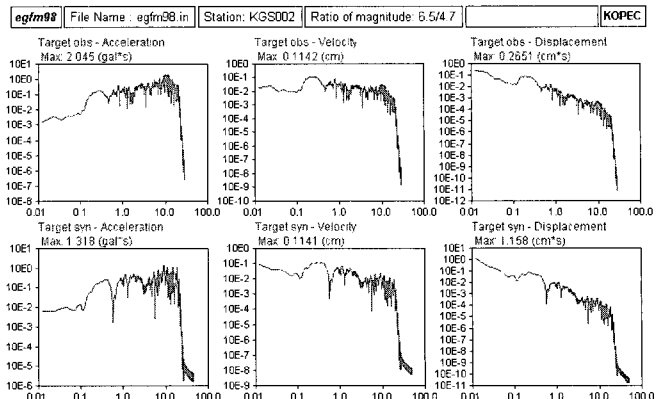


그림 5 관측강지진동 및 합성강지진동의 푸리에스펙트럼 특성 비교(가속도, 속도 및 변위이력)

진으로부터 실제 관측된 강지진동을 보여주고 있다. 왼쪽 열로부터 차례로 가속도, 속도 및 변위이력을 나타낸다. 아래 2개 행에 주어진 그림도 강지진동의 순서는 동일하다. 중간 행의 3개 그림은 규모 4.7의 지진자료를 이용하여 규모 6.5로 합성한 결과 얻어진 지진파형이고, 마지막행의 3개 그림은 규모 4.7의 지진으로부터 실제 관측된 강지진동을 나타낸다. 상부 2개 행의 강지진동 그림을 강지진동 종류에 따라 서로 비교할 경우, 전체적으로 파형 모양이 거의 일치하고 있음을 보여주고 있다. 또한 실제 관측된 지반진동의 최대값(가속도:4.99cm/s/s; 속도:13.1cm/s; 변위:2.81cm)과 합성으로부터 얻어진 지반진동의 최대값(가속도:5.43cm/s/s; 속도:12.1cm/s; 변위:3.4cm)이 거의 유사하다는 것을 보여주고 있다.

또한 마지막 행에 제시된 3개 종류의 강지진동의 최대값들은 규모 4.7지진으로부터 관측된 지반진동이기에 위와 행에 주어진 값들과 비교할 경우 아주 작은 값을 보여주고 있어 지진규모의 차이를 다시 확인할 수 있다. 물론 가속도파형은 다른 2가지 종류의 파형에 비해 일치정도가 상대적으로 다소 낮은 결과가 제시되었다. 가속도이력은 파형자체의 모양도 물론 중요하지만 특히 가속도이력을 내진공학의 목적으로 이용할 경우 푸리에스펙트럼 분석 결과인 진동수 영역에서의 분포특성에 대한 일치정도가 더욱 중요한 것으로 알려져 있다.

또한 가속도이력의 경우 다른 2가지 종류의 강지진동에 비해 일반적으로 고진동수영역의 처리문제로 인하여 시간영역에서의 최대가속도값을 예측은 대단히 어려운 일로 알려져 있다. 하지만 본 연구결과에 의하면 규모 6.5의 지진으로부터 관측된 가속도이력의 최대값과 합성가속도이력의 최대값과의 차이가 비교적 만족스러운 수준이었다. 보다 정량화하면 실제 관측된 최대가속도값을 기준으로 할 경우 차이는 약 8.8%로서 10% 이내에 해당하는 오차를 보여주어 합성가속도이력의 최대값을 아주 양호하게 예측하고 있다. 또한 속도이력의 경우는 약 7.6%이고 변위이력의 경우 약 21% 이내에 해당하는 오차를 보여주어 비교적 양호하게 예측하고 있다.

그림 5는 진동수영역에서 분석한 결과이고 가장 왼쪽 열

은 가속도를 푸리에스펙트럼 분석한 결과를 보여주고 있다. 해당 열의 상부 행의 그림은 규모 6.5의 지진으로부터 실제 관측된 강지진동을 푸리에스펙트럼 분석한 결과이고, 아래 행의 그림은 규모 4.7의 지진자료를 이용하여 규모 6.5로 합성한 결과 얻어진 강지진동을 푸리에스펙트럼 분석한 결과이다. 그리고 가운데 열 및 마지막 열은 속도이력 및 변위이력에 대한 푸리에 스펙트럼분석 결과를 각각 비교하여 보여주고 있다. 실제 관측된 강지진동의 푸리에 스펙트럼과 합성결과 얻어진 강지진동의 스펙트럼은 스펙트럼 모양뿐만 아니라 값에서 서로 유사한 특징을 보여주고 있다. 특히 최대값을 비교할 경우 속도이력에 대한 푸리에스펙트럼 최대값은 0.1141cm 및 0.1142cm로 차이가 1% 이내에 존재한다. 하지만 가속도 스펙트럼의 경우 2.045gal/s 및 1.318gal/s로서 약간의 차이가 존재하며 그 차이는 일반적으로 신뢰할 만한 수준이다.

4. 결 론

1개 특정 관측소에서 관측된 2개의 강지진동을 이용하여 경험적 그린함수 방법을 적용한 결과 가속도, 속도 및 변위 성분을 포함한 3 종류의 합성 강지진동은 전체 진동수대역에 걸쳐서 모양뿐만 아니라 값의 크기분포 등에서 대체적으로 규모 6.5지진으로부터 관측된 실제 강지진동을 양호하게 예측하는 경향을 보였다. 또한 시간영역에서도 3가지 종류의 합성 강지진동의 파형특성이 대체적으로 실제 강지진동을 양호하게 예측하는 경향을 보였다. 또한, 3가지 종류의 합성 강지진동의 첨두값 역시 실제 계측된 첨두값과 비교할 때 만족스러운 정도로 일치하는 결과를 보여주었다.

위 연구결과는 1개 관측소에서 중규모 지진(규모 4.7)으로부터 관측된 강지진동과 대규모 지진(규모 6.5)으로부터 관측된 2개의 강지진동을 이용하였기 때문에 자료가 부족한 것처럼 보이나 하나 다음에 제시된 다양한 결과를 고려할 필요가 있다. 우선 본 연구에서는 비록 1개 관측소에서 관측된 2개의 강지진동이지만 내진공학에서 중요자료로 사용되는 가속도이력 및 속도이력을 비롯하여 지진학과 같이 자

연과학에서 주로 중요자료로 사용되어지는 변위이력 및 속도이력을 포함하여 3가지 종류의 강지진동 모두에 대해 비교분석을 시도하여 비교적 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

다음으로 3가지 종류의 강지진동 모두에 대해 시간영역 분석 즉 파형의 특성 및 최대값의 유사한 정도를 비교분석하였다. 분석결과 3가지 종류의 강지진동 모두에 대해 규모 6.5의 지진으로부터 실제 관측된 강지진동과 규모 4.7의 지진을 이용하여 합성된 강지진동이 비교적 잘 일치하였다. 물론 가속도파형은 다른 2가지 종류의 파형에 비해 일치정도가 상대적으로 다소 낮은 결과가 제시되었다. 가속도이력의 파형 자체도 물론 대단히 중요하지만 특히 가속도이력을 내진공학의 목적으로 이용할 경우 푸리에스펙트럼 분석결과인 진동수 영역에서의 분포특성에 대한 일치정도가 더욱 강조되고 있다.

마지막으로 3가지 종류의 강지진동 모두에 대해 진동수 영역에서의 모양특성 및 최대값의 유사정도에 대한 비교분석을 수행하였고 비교분석한 결과에 의하면 가속도, 속도 및 변위이력을 포함한 3가지 종류의 강지진동 모두에 대해 규모 6.5의 지진으로부터 관측된 강지진동의 푸리에스펙트럼과 합성강지진동의 푸리에스펙트럼이 모양특성 및 최대값에 있어서 아주 양호하게 일치되는 결과가 제시되었다. 따라서 경험적 그린함수 방법을 이용한 강지진동 합성 방법을 국내에 시도한다는 점에서 의의가 있다.

경험적 그린함수 방법을 이용하여 강지진동을 효과적으로 합성하기 위해 지진파의 전파경로가 거의 동일하고 또한 규모가 아주 다른 2개의 지진이 동일지역에서 발생해야 하는 조건을 포함하여 여러 조건이 필요하나 이러한 여러 조건에 부합하는 지진자료를 국내에서는 아직 충분하게 수집하지 못하였다. 따라서 지진자료가 풍부한 것으로 알려진 일본지역에서 조건에 부합하는 지진자료를 수집하여 적용하였다. 하지만 향후 경험적 그린함수를 이용하여 강지진동 합성을 위한 여러 조건을 만족시키는 국내 지진

자료를 수집 및 분석하고 이를 통하여 본 방법의 국내 적용성을 계속적으로 시도할 예정이다.

참 고 문 헌

1. Aki, K, "Seismic Displacements near a Fault", *J. Geophys. Res.*, Vol.73, 1968, pp. 5359-5376.
2. Haskell, N. A., "Elastic Displacements in the Near-Field of a Propagating Fault," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 59, 1969, pp. 865-908.
3. Sato., R. and N., Hirata "One method to Compute Theoretical Seismogram in a Layered Medium", *J. Phys. Earth*, Vol. 28, 1980, pp. 145-168.
4. Bouchon, M., "Discrete Wave Number Representation of Elastic Wave Fields in Three-Space Dimensions," *J. Geophys. Res.*, Vol. 84, 1979, pp. 3609-3614.
5. Hartzell, S., "Earthquake After Shocks as Green Functions," *Geophys. Res., Letters*, Vol. 5, 1978, pp. 1-4
6. Irikura, K. and I., Muramatu, "Synthesis of Strong Ground Motions from Large Earthquakes Using Observed Seismograms of Small Events," *Proceedings Third International Earthquake Microzonation Conf.*, Seattle, Vol. 1, 1982, pp. 447-458.
7. Kanamori, H. and D.L., Anderson "Theoretical Basis of Some Empirical Relations in Seismology," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 65, 1975, pp.1073-1095.
8. 전력연구원, "한반도 지질 및 지진특성이 고려된 부지 고유 내진설계 응답스펙트럼 기술개발", 한국전력공사, 2000. 9.