

## 안정대륙권역의 중규모지진에 의한 근단층지반운동의 모델링

### Modeling of Near Fault Ground Motion due to Moderate Magnitude Earthquakes in Stable Continental Regions

김정한<sup>1)</sup> · 김재관<sup>2)</sup>

Kim, Jung-Han · Kim, Jae-Kwan

**국문 요약 >>** 이 논문에서는 안정대륙권역(Stable Continental Regions, SCRs)에서의 중규모 지진에 의한 근단층지반운동(Near Fault Ground Motion, NFGM) 모델을 처음으로 제시한다. 근단층지반운동은 큰 진폭의 장주기 속도 펄스를 갖는 특징을 가지고 있다. 이 속도 펄스를 모델링하기 위해서는 그 주기와 진폭을 지진의 규모와 단층거리의 함수로 표현할 수 있어야 한다. 그런데 안정대륙권역에서는 관측 자료가 빈약하여 지진데이터로부터 이 관계식을 직접 유도하는 것은 어렵기 때문에 이 연구에서는 간접적인 접근법을 채택하였다. 속도 펄스의 주기와 진폭은 단층파열의 상승시간과 파열속도의 함수임이 알려져 있고 활성구조권역(Active Tectonic Regions, ATRs)에 속하는 미국 서부지역에서는 실험적 공식이 확립되어 있다. 안정대륙권역에서의 상승시간과 단층파열속도의 지진규모에 대한 함수관계는 WUS와 CEUS에서의 자료를 비교하여 도출하였다. 이 관계식들로부터 안정대륙권역에서의 NFGM의 속도 펄스의 주기와 진폭을 지진규모 및 단층 거리에 대한 관계식으로 유도하였다. 안정대륙권역에서의 NFGM의 가속도 시간이력은 추계학적으로 생성된 원역지진지반가속도에 새로운 관계식에 의한 속도 펄스를 중첩하여 얻어진다. 적용 예제로서 탄소성 단자유도 시스템의 근단층지반운동에 대한 응답을 분석하였다.

**주요어** 근단층지반운동, 속도 펄스, 안정대륙권역, 지반운동 시간이력, 응답스펙트럼, 중규모 지진위험

**ABSTRACT >>** This paper proposes a method for modeling near fault ground motion due to moderate size earthquakes in Stable Continental Regions (SCRs) for the first time. The near fault ground motion is characterized by a single long period velocity pulse of large amplitude. In order to model the velocity pulse, its period and peak amplitude need be determined in terms of earthquake magnitude and distance from the causative fault. Because there have been observed very few near fault ground motions, it is difficult to derive the model directly from the recorded data in SCRs. Instead an indirect approach is adopted in this work. The two parameters, the period and peak amplitude of the velocity pulse, are known to be functions of the rise time and the slip velocity. For Western United States (WUS) that belongs active tectonic regions, there are empirical formulas for these functions. The relations of rise time and slip velocity on the magnitude in SCRs are derived by comparing related data between Western United States and Central-Eastern United States that belongs to SCRs. From these relations, the functions of these pulse parameters for NFGM in SCRs can be expressed in terms of earthquake magnitude and distance. A time history of near fault ground motion of moderate magnitude earthquake in stable continental regions is synthesized by superposing the velocity pulse on the far field ground motion that is generated by stochastic method. As an demonstrative application, the response of a single degree of freedom elasto-plastic system is studied.

**Key words** near fault ground motion, velocity pulse, stable continental regions, ground motion time history, response spectrum, moderate seismic risk

## 1. 서론

근단층지반운동(Near Fault Ground Motion, NFGM)은

일반적으로 진앙 거리가 약 10km 이내인 지역에서 관측되는 장주기 성분의 펄스 형태를 가지는 지진지반운동을 말한다. NFGM은 단층파열의 전파와 전단파의 전파가 서로 간섭을 일으켜 발생하며 주로 지진의 규모가 6.5 이상인 큰 지진에서 관측되었다.<sup>(1)</sup> 1994년 미국 Northridge 지진, 1995년 일본 고베지진, 1999년 터키 Izmit 지진 등과 같이 최근에 활성 구조권역(Active Tectonic Regions, ATRs)에서 발생한 지진에서 관측되었으며, 이 지진들은 진앙이 도시 주변에 위

<sup>1)</sup> 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정 (대표저자: geminic0@snu.ac.kr)

<sup>2)</sup> 정회원·서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

본 논문에 대한 토의를 2006년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 5. 9 / 심사종료일 : 2006. 5. 19)

치하여 큰 피해를 초래하였다. 이로 인하여 강진지역에서는 NFGM에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 국외의 몇몇 내진설계지침에서는 이를 반영하고 있다. 그러나 안정대륙 권역(Stable Continental Regions, SCRs)에 속하는 우리나라에서는 아직 이에 대한 문제의 심각성이 대두되고 있지 않아 거의 연구가 이루어지지 않고 있다.

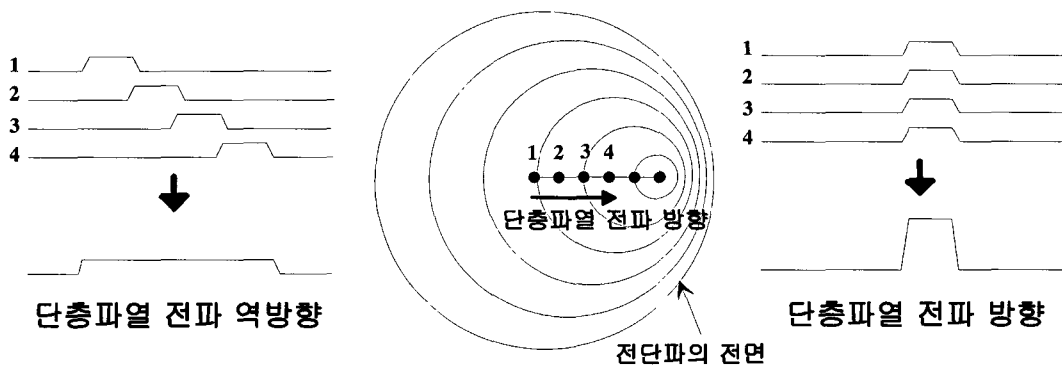
우리나라와 같은 중진지역의 경우 예상되는 지진의 규모가 크지 않기 때문에 진앙에서 반경 약 15km 이내에 주로 피해가 발생할 것으로 예상된다. 최근에 Mavroeidis and Papegeorgiou<sup>(2)</sup>가 수집한 NFGM의 자료들을 보면 규모 6 이하의 몇몇 중규모 지진에서도 NFGM이 발생한 경우가 있다. 그러므로 실제 중진지역에서 지진에 의한 피해가 발생한다고 하면 주로 진앙지역에서 피해가 집중될 것으로 예상되므로 NFGM의 발생 가능성을 배제할 수는 없으며 이에 대한 연구가 필요하다. 그러나 기존에 관측된 것들은 지진 활동이 활발한 ATRs에서의 상대적으로 규모가 큰 지진에서 발생한 것이고 실제로 우리나라와 같은 SCRs에서는 지진의 빈도수가 적기 때문에 아직까지 관측된 NFGM의 데이터가 거의 없는 실정이다. 따라서 이 연구에서는 간접적인 접근법을 채택하였다. 속도 펄스의 주기와 진폭은 단층파열의 상승시간과 파열속도의 함수임이 알려져 있고 ATRs에 속하는 미국 서부지역에서는 실험적 공식이 확립되어 있다. 안정대륙권역에서의 상승시간과 단층파열속도의 지진규모에 대한 함수관계는 미국 서부와 중·동부 지역에서의 자료를 비교하여 도출하였다. 이 관계식들로부터 안정대륙권역에서의 NFGM의 속도 펄스의 주기와 진폭을 지진규모 및 단층거리에 대한 관계식으로 유도하였다. 안정대륙권역에서의 NFGM의 가속도 시간이력은 추계학적으로 생성된 원역 지진지반가속도(Far Field Ground Motion, FFGM)에 새로운 관계식에 의한 속도 펄스를 중첩하여 얻어진다. 적용 예제로서 제안한 방법에 의해서 생성된 근단층지반운동에 대한 탄소성 단자유도 시스템의 응답을 분석하였다. 그 결과는

단주기 탄소성 구조물의 경우에는 응답에 있어서 매우 큰 차이를 발생시킬 수 있음을 보여주고 있다.

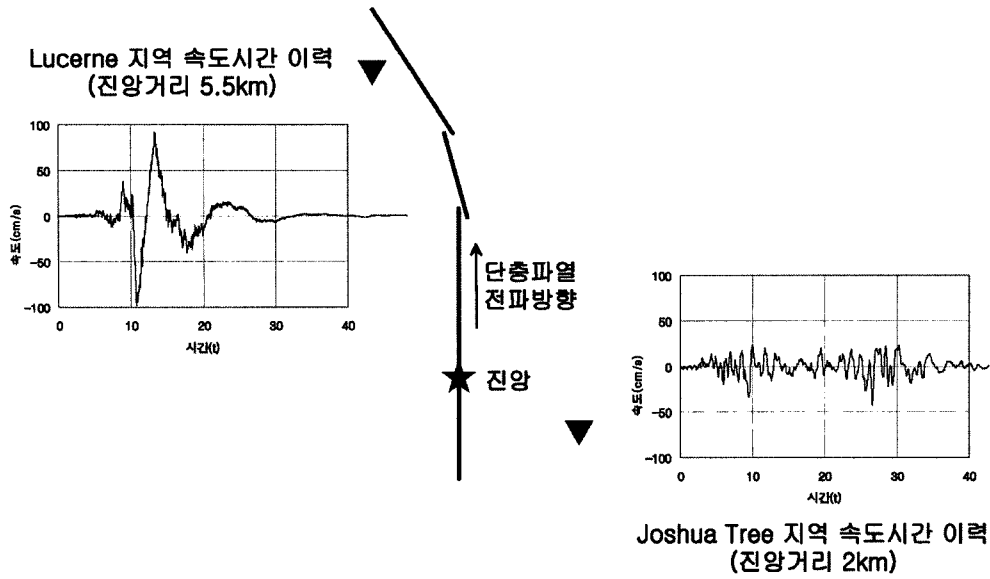
## 2. 근단층지반운동의 특성

### 2.1 전방지향성에 의한 장주기 성분 펄스

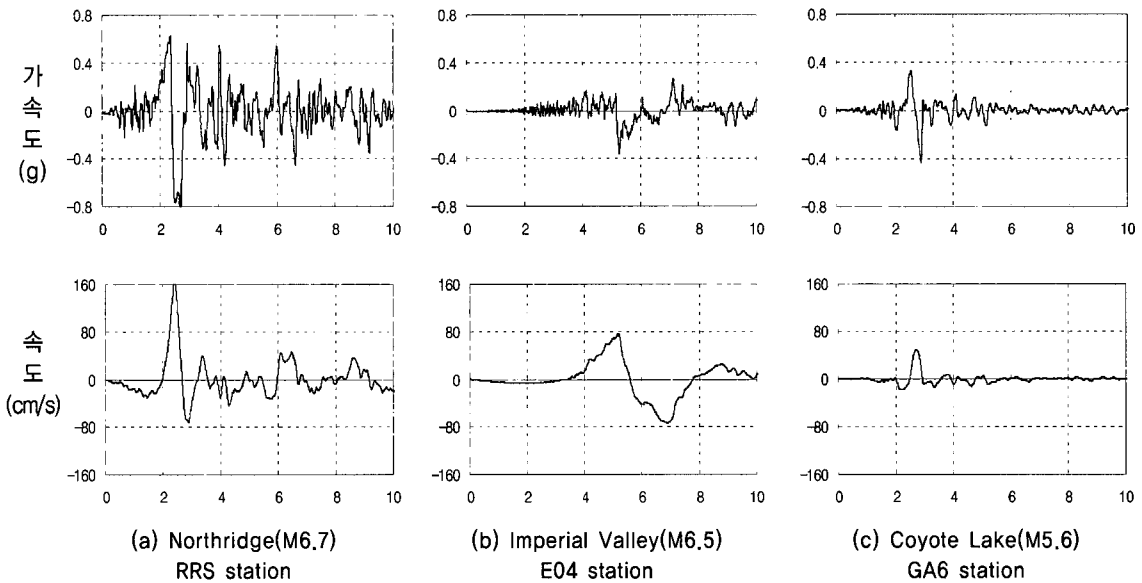
NFGM은 단층파열이 단층면을 따라서 전파하면서 일어나는 전방지향성에 의해서 발생한다. 단층파열이 단층면을 따라서 전파하는 현상은 점지진원이 이동하는 것으로 간주할 수 있으며 각 점지진원에서 발생하는 지진파가 중첩되어 지진 발생시 진앙에서 떨어진 지역에서 관측된다고 생각될 수 있다. 이 경우 그림 1과 같이 단층파열이 전파하는 전방에 위치한 곳에서 관측되는 지진파는 도플러 효과와 같이 높은 진동수를 갖게 되고 역방향으로는 낮은 진동수를 가지게 되며 이를 각각 전방 및 후방 지향성이라고 한다.<sup>(3)</sup> 단층파열의 전파 속도는 전단파 속도의 약 0.7~0.9배 정도인데 이 파열 전파 속도가 전단파의 전파 속도에 근접하면 지향성에 의해 단층의 각 점지진원에서 발생한 지진파가 거의 비슷한 시점에서 중첩되면서 진폭이 매우 큰 단일 펄스 형태를 가지게 된다. 이 펄스의 주기는 보통 0.6초 이상이며 지진 규모에 따라서 커진다.<sup>(1)</sup> 그림 2는 1993년 미국 Landers 지진에서 진앙에서 서로 반대방향에 위치한 두 지역에서 관측된 지진파의 속도 시간이력이다. 단층파열의 전파방향에 위치한 Lucerne 지역의 지진파의 속도 시간이력은 그 반대 방향에 위치한 Johsua Tree 지역에서 보다 진앙에서 더 멀지만 전방지향성에 의해 보다 더 큰 속도성분을 가지는 것을 알 수 있다.<sup>(1)</sup> 그러나 이 전방지향성에 의한 펄스는 지진파의 가속도 시간이력에서는 높은 진동수의 성분에 가려 잘 나타나지 않고, 주로 속도와 변위 시간이력에서 현저하다. 그림 3은 규모 6.7인 Northridge 지진과 규모 6.5인 Imperial Valley 지진, 그리고 규모 5.6의 Coyote Lake 지진의 가속도와 속도 시간이력이다. 속도 시간이력에서는 약 1초 이상의 장주기의



〈그림 1〉 지향성 효과



〈그림 2〉 전방지향성 발생 지역의 지반운동 속도 시간이력(Somerville et al., 1997)



〈그림 3〉 NFGM의 가속도 및 속도 시간이력

펄스 형태를 가지는 구간이 있음을 관찰할 수 있다.

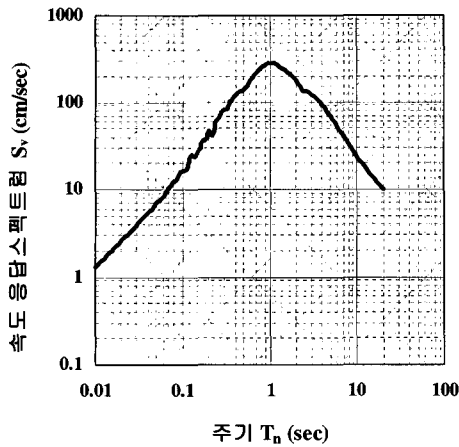
### 2.2 근단층지반운동에 의한 탄성응답스펙트럼

NFGM에 의한 단자유도 구조물의 탄성응답스펙트럼은 펄스의 주기에 해당하는 구간에서 뾰족한 형태의  $S_v$  값을 가진다. 그림 4(a)는 주기 약 1초의 펄스를 가지고 있는 Northridge 지진의 탄성응답스펙트럼을 네방향대수그래프에 도시한 것이다. 네방향대수그래프에서 일반적인 FFGM은 주기 약 0.2초에서 0.7초 사이에  $S_a$ 가 일정한 가속도 민감 구간이 있으며 0.7초에서 4초 사이에  $S_v$ 가 일정한 속도 민감 구간이 있다. 그러나 NFGM에서는 펄스에 의한 응답이 두드러지게

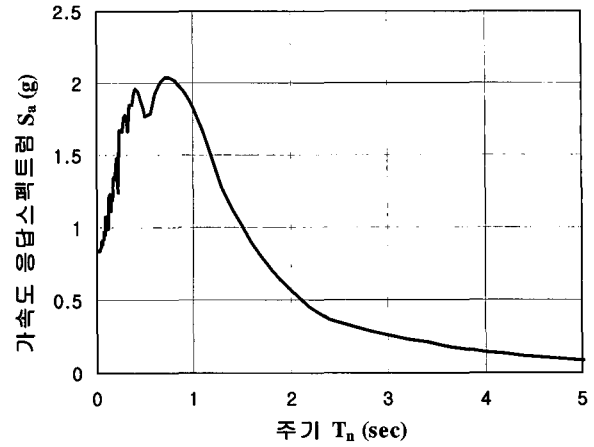
나타나기 때문에  $S_v$ 가 일정한 구간이 매우 뾰족하고 좁아지며  $S_a$ 가 일정한 구간이 늘어난다.<sup>(4)</sup> 이를 그림 4(b)와 같이 T- $S_a$  관계에서 놓고 보면  $S_a$ 의 최대값은 고주파 성분의 영향에 의해 펄스의 주기보다 조금 작은 값에서 생기긴 하지만 일반적으로 펄스의 주기에 해당하는 구간에서 최대값을 가진다.

### 2.3 근단층지반운동의 국외 설계규정

외국의 몇몇 설계규정에는 NFGM을 고려한 지반운동에 대한 규정들이 마련 되어있다. UBC<sup>(5)</sup> 및 ATC<sup>(6)</sup>에서는 단층에서 10km이내인 경우 지진규모가 6.5이상이면 NFGM에 의한 지반운동 증폭계수를 적용하도록 되어있으며 특히



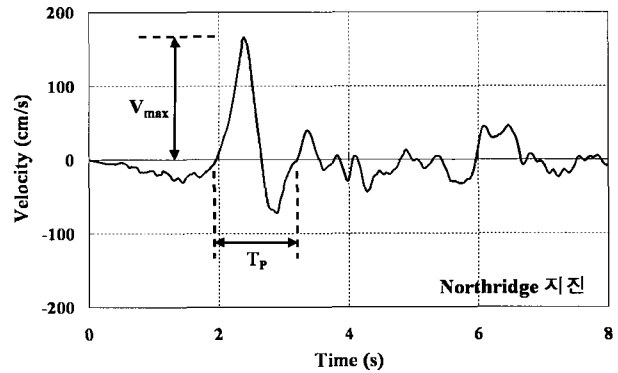
(a) 네방향대수그래프 응답스펙트럼



(b) 가속도 응답스펙트럼

〈그림 4〉 Northridge(1994년, RRS station) 지진기록의 응답스펙트럼

규모가 7.0이 넘는 지진에 대해서 단층까지의 최단거리가 2km이내인 경우 가속도 민감구간은 1.6배, 속도 민감구간은 2.0배 까지 증폭을 시킨다. 그러나 몇몇 지진들은 이 증폭계수를 적용한 값보다 50%를 넘는 지반운동을 보이기도 하며<sup>(6)</sup>, 규모 6.5 이하의 지진에서도 NFGM이 발생한 사례가 있기 때문에 다소 보완이 필요하다. FEMA<sup>(7)</sup>에서도 단층에서 10km 이내에서는 고유진동주기가 1초가 넘는 구조물에 대해서는 NFGM에 의한 펄스 효과에 의해 횡방향 설계지진력을 크게 정한다고 언급하고 있다.



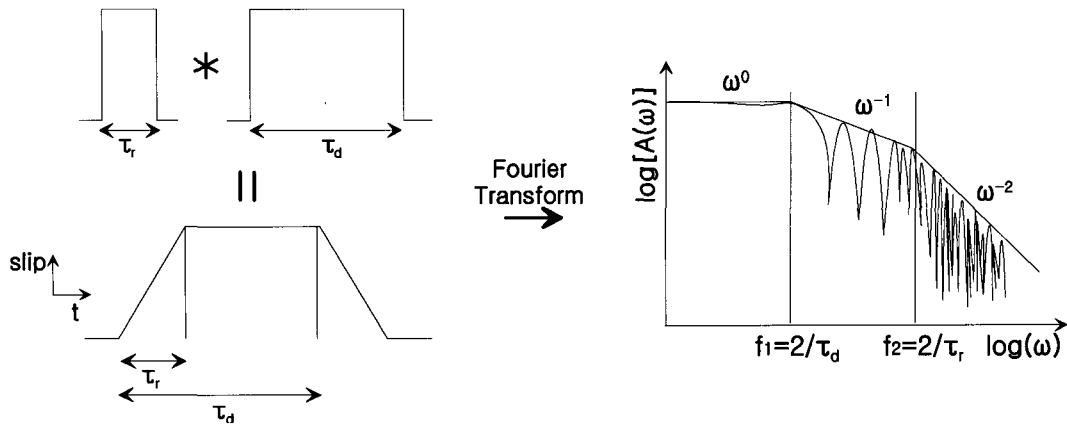
〈그림 5〉 속도 시간이력에서의 펄스 특성변수

2.4 펄스의 특성변수

NFGM에 의한 장주기 성분의 펄스는 속도 시간이력에서 나타나며, 이 주요한 펄스는 보통 하나에서 수 개의 사이클을 가지고 있다. 펄스의 특성을 정량적으로 구하기 위하여 여러 연구들이 수행되어 왔다. Alavi and Krawinkler<sup>(8)</sup>는 속도 펄스를 선형의 삼각형 모양으로 가정하였으며, 펄스의 주기와 최대진폭은 실제 관측된 NFGM과 이상화한 펄스에 대한 구조물 응답의 비교를 통해 결정하였다. Sasani and Bertero<sup>(9)</sup>는 개별적인 주기와 진폭을 갖는 반주기의 sine 곡선들을 연결하여 펄스의 시간이력을 표현하였으며 이와 실제 NFGM을 비교하였다. Mavroidis and Papageorgiou<sup>(2)</sup>는 속도 펄스의 수식적 모델을 한 주기의 elevated cosine 포락함수에 sine 파가 곱해져 있는 형태의 Gabor Wavelet으로 제안하였으며 실제 NFGM의 속도와 변위 시간이력에 거의 일치하도록 표현할 수 있었다. 이러한 연구들에서 보면 펄스의 주요 파라메타는 그림 5와 같이 크게 펄스의 주기( $T_p$ )와 최대진폭( $V_{max}$ )으로 주어진다. 위 연구들에서 펄스의 주기는 지진의 규모에 관련된 값이며 펄스의 최대진폭은 지진의 규모와 단층까지의 최단거리에 관계가 있다는 것이 밝혀졌다.<sup>(2,8,10)</sup>

3. 안정대륙권역에서의 근단층지반운동의 특성변수 추정

기존에 연구된 펄스 특성변수의 통계적 특성은 ATRs에서의 NFGM 데이터를 이용한 것이다. 일반적으로 ATRs에서는 잦은 지진활동에 의해서 약한 지각을 가지고 있기 때문에 같은 규모의 지진이라도 그 특성이 우리나라와 같은 SCRs에서와는 다르다. NFGM은 지진 발생시 단층파열의 전파와 전단파의 전파가 간섭을 일으켜 발생하는 것이므로 권역에 따라서 달라지는 지진의 단층운동 특성이 다르면 NFGM의 펄스 특성 또한 다를 것으로 예상된다. 그러나 SCRs 지역에서는 NFGM 지진 데이터의 부족으로 이를 직접 알아내기는 어렵고, FFGM에서 알 수 있는 구조권역에 따른 단층운동의 물리적 특성을 이용하여 ATRs에서의 NFGM 파라메타를 SCRs에 맞게 변형할 수 있다. ATRs와 SCRs 지역의 지진의 특성을 알기 위하여 상대적으로 지진 관측 및 연구가 많이 된 미국 서부(WUS) 및 중·동부(CEUS)에서 발생한 지반운동의 특성을 비교 분석하였다.

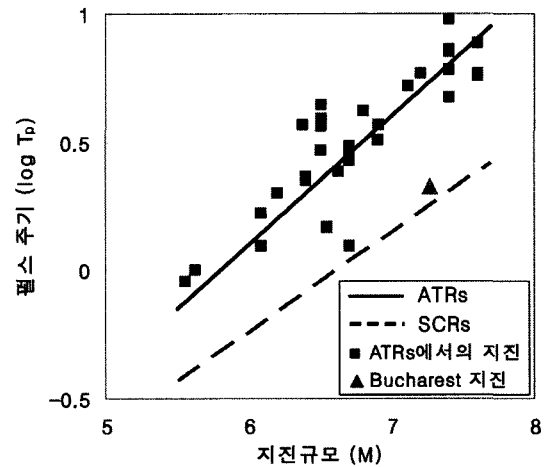


〈그림 6〉 Haskell의 선진원모델

### 3.1 안정대륙권역에서의 속도 펄스 주기의 표현식 유도

NFGM은 지진 발생시 단층파열의 전파와 전단파가 서로 간섭을 일으켜 발생하는 것으로, 단층 운동시 단층면의 한 지점이 파열에 의한 변위가 발생하기 시작하여 최종 변위에 도달하는 상승시간(rise time,  $\tau_r$ )에 따라서 펄스가 지속되는 시간, 즉 펄스의 주기에 영향을 준다. NFGM의 펄스의 주기  $T_p$ 는 통계적으로 구했을 때 상승시간에 비례하며 약 2.0배의 값을 갖는다.<sup>(11)</sup> 펄스는 점지진원의 중첩이라는 물리적 현상이기 때문에 구조권역에 관계없이 발진기구의 파라메타가 펄스의 형상을 결정할 것으로 생각된다. 그러므로 NFGM의 펄스의 주기는 상승시간에 비례한다고 가정하면 ATRs와 SCRs에서의 상승시간의 비를 구한다면 이를 기존 ATRs에서 구해진 펄스의 주기에 곱하여 SCRs에서의 펄스의 주기를 결정할 수 있다.

지진시 단층 운동을 선진원으로 가정한 Haskell의 단층 운동 모델에 따르면, 원역에서의 지반운동 변위 시간이력은 그림 6과 같이 사다리꼴 형태로 가정할 수 있으며, 여기서 변위가 증가하는 시간이 상승시간( $\tau_r$ )이고 변위가 증가하기 시작하여 감소하기 전까지가 파열지속시간( $\tau_d$ )이다. 이 사다리꼴 시간이력은  $\tau_r$ 과  $\tau_d$ 를 지속시간으로 하는 두 boxcar의 합성곱으로 표현될 수 있으며, 이 변위 시간이력의 푸리에 스펙트럼을 진동수에 대하여 나타내면 각각의 boxcar가 지속되는 시간의 역수에 해당하는 진동수에서 꺾이는 점인 절점주파수  $f_1, f_2$ 를 가지는 선형 점근선을 갖는다. 여기서 높은 주파수의 절점주파수인  $f_2$ 가 상승시간의 boxcar에 의해서 생기는 점이며  $2/\tau_r=f_2$ 인 관계를 가진다.  $f_2$ 는 지진규모 (M)가 커질수록 작은 값을 가지게 되며 구조권역에 따라서 그 관계식이 달라진다. ATRs인 미국의 서부에서는 이 관계가 식 (1)로 주어질 수 있고<sup>(12)</sup>, SCRs인 미국의 중·동부에서는 식 (2)로 주어진다.<sup>(13)</sup>



〈그림 7〉 SCRs 에서의 펄스 주기와 지진규모와의 관계

$$\log_{10} f_{2,ATRs} = 1.788 - 0.302M \tag{1}$$

$$\log_{10} f_{2,SCRs} = 1.43 - 0.188M \tag{2}$$

이 연구에서는 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 ATRs와 SCRs의 상승시간의 비를 도출하였으며 이는 식 (3)과 같이 지진 규모에 따른 값으로 표현된다.

$$\log_{10} \frac{\tau_{r,SCRs}}{\tau_{r,ATRs}} = 0.348 - 0.114M \tag{3}$$

강진지역에서 관측된 NFGM의 펄스의 주기와 지진규모를 도시하면 그림 7의 사각형 점들과 같으며 Mavroeidis and Papageorgiou<sup>(2)</sup>는 이에 대한 선형 회귀를 하여 그림 7에서 실선으로 나타낸 식 (4)를 구했다.

$$\log_{10} T_{P,ATRs} = -2.9 + 0.5M \tag{4}$$

이를 앞에서 구한 상승시간 비를 곱하여 식 (5)와 같이 SCRs에서의 펄스의 주기와 지진규모 관계식을 계산하였다.

$$\log_{10} T_{P,SCRs} = -2.552 + 0.386M \quad (5)$$

식 (5)는 그림 7에서 점선으로 나타내었다. 그림 7에서 삼각형 점으로 표시된 지진은 루마니아 Bucharest 지진으로 판내부인 SCRs에서 발생한 지진이다. 이 지진의 펄스의 주기와 지진규모 관계는 SCRs로 환산된 식 (5)와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

3.2 안정대륙권역에서의 속도 펄스 최대진폭의 표현식 유도

속도 펄스의 최대진폭( $V_{max}$ )은 지진규모 및 단층까지의 최단거리( $R$ )에 관계된 값이다. Alavi and Krawinkler<sup>(8)</sup>는 회귀 분석을 통해  $\log(V_{max})$ 가 규모에 비례하고 최단거리  $R$ 에는 반비례하는 관계식을 얻었다. 그러나 진앙에서 어느 정도 가까운 거리에서의  $V_{max}$ 는  $R$ 에 관계없이 지진 시 단층파열 속도(slip velocity,  $\dot{u}$ )에 거의 유사한 값을 가지며<sup>(11)</sup> 이를 표현하기 위해서는  $R$ 이 작은 거리에서는 규모에만 관련된 값을 가지고 일정 거리 이후에서는 거리에 따라 감소하는 Bray and Marek<sup>(10)</sup>이 제안한 식 (6)이 타당하다고 여겨진다.

$$\ln(V_{max,ATRs}) = 4.51 + 0.34M - 0.57\ln(7^2 + R^2) \quad (6)$$

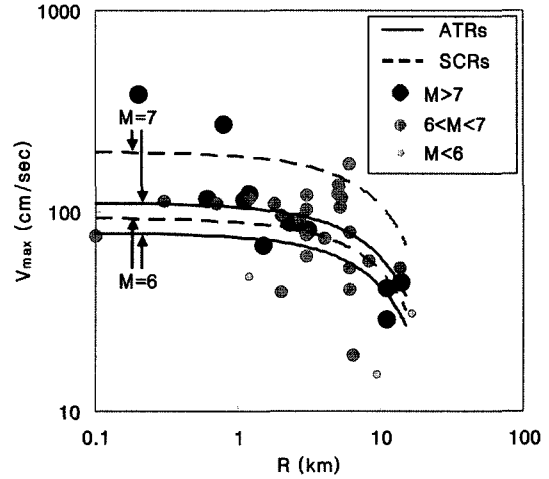
$R$ 이 작은 곳에서  $V_{max}$ 는 단층파열속도에 거의 유사한 값을 가지므로 두 값이 서로 비례한다고 가정하여 ATRs와 SCRs에서의 파열속도의 비를 구하여 SCRs에서의  $V_{max}$ 를 구하였다. 파열속도는 Brune<sup>(14)</sup>이 제안한 진원모델에서 제안된 slip 값을 시간으로 미분하여 구할 수 있으며, 이는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $\rho$ 는 밀도,  $\beta$ 는 전단파의 속도,  $\Delta\sigma$ 는 응력강하를 나타낸다.

$$\dot{u}(t) = \frac{\Delta\sigma}{\beta\rho} \quad (7)$$

$\Delta\sigma$ 는 일반적으로 지진의 규모와는 관련이 없고 구조권역에 따른 상수값을 가지는 것으로 여겨지지만 최근 연구에 따르면 이는 규모에 따라 달라지는 값으로 구해진다. Atkinson and Silva<sup>(12)</sup>는 규모 7.5, 6.5, 5.5의 미국 서부지역 조건에 맞는 지진을 시뮬레이션하여 각각에 대한  $\Delta\sigma$ 를 구했으며, 그 값은 규모 7.5에서는 50bar이고 규모 6.5에서는 90bar, 규모 5.5에서는 120bar이다. 이 규모에 따른  $\Delta\sigma$ 의 관계는 선형에 가깝게 변화하기 때문에 ATRs에서의  $\Delta\sigma$ 는 규모 5.5와 7.5의 값을 잇는 선형으로 가정하였다. 그러나 SCRs에서의  $\Delta\sigma$ 는 경우에 따라 편차가 크기는 하지만 지진규모에 무관하며 약 150bar로 구해진다.<sup>(13)</sup> 그 외의 ATRs와 SCRs에서의 단층파열속도를 결정하는 상수값들을 정리하

〈표 1〉 ATRs와 SCRs의 지진원 특성 변수

	ATRs	SCRs
응력강하, $\Delta\sigma$ (bars)	120(M5.5) 50(M7.5)	150
전단파 속도, $\beta$ (km/sec)	3.2	3.8
밀도, $\rho$ (g/cc)	2.70	2.80



〈그림 8〉  $V_{max}$ 와 지진규모 및  $R$ 과의 관계

면 표 1과 같다.

이 연구에서는 응력강하 값과 전단파 속도 및 밀도 값을 식 (7)에 대입하여 ATRs에 대한 SCRs의 단층파열속도의 비를 식 (8)과 같이 구하였다. 이를 식 (6)의 ATRs에서의  $V_{max}$ 에 곱하여 식 (9)와 같이 지진규모 및  $R$ 에 따라서 정해지는 SCRs에서의  $V_{max}$ 를 도출하였다.

$$\dot{u}_{SCRs} / \dot{u}_{ATRs} = \frac{121.8}{312.5 - 35M} \quad (8)$$

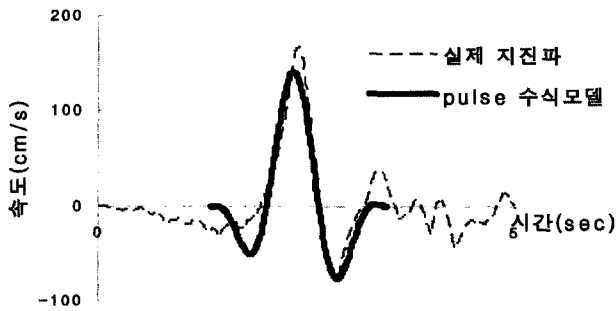
$$V_{max,SCRs} = \frac{121.8}{312.5 - 35M} \cdot \text{EXP}[4.51 + 0.34M - 0.57\ln(7^2 + R^2)] \quad (9)$$

그림 8의 점들은 ATRs에서 관측된 NFGM의 규모별  $V_{max}$ - $R$  관계를 나타낸 것이며 실선은 규모 6~7사이의 Bray 제안식을 표시한 것이다. 그리고 점선은 식 (9)에 따른 SCRs에서의  $V_{max}$ - $R$  관계를 나타낸 것이다. ATRs에서의 규모가 작은 지진에서는 응력강하 값이 SCRs에서와 거의 비슷하여  $V_{max}$  값에 큰 차이가 없지만 규모가 커질수록 SCRs에서의  $V_{max}$  값이 더 커질 것으로 예상된다.

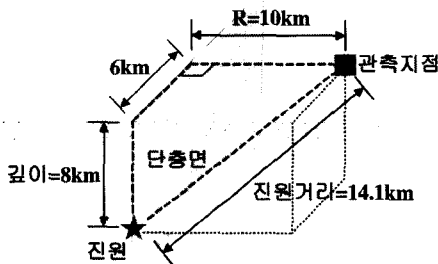
3.3 안정대륙권역에서 예상되는 근단층지반운동의 시간 이력 및 탄성응답특성

NFGM의 시간이력은 FFGM의 시간이력과 속도 펄스를

중첩하여 결정될 수 있다. FFGM의 시간이력은 진원거리와 지진규모로부터 추계학적으로 생성할 수 있으며 펄스의 두 파라메타인  $T_p$ 와  $V_{max}$ 는 R과 지진규모로부터 구할 수 있다. 펄스의 시간이력에 대한 수식모델은 그림 9와 같이 Mavroeidis and Papageorgiou<sup>(2)</sup>가 제안한 Gabor Wavelet 형태가 실제 NFGM을 가장 잘 표현하고 있어 이를 이용하였으며 이는 식 (10)과 같이 표현된다.



〈그림 9〉 지진파 속도 성분 펄스의 수식 모델



〈그림 10〉 진원거리 및 단층까지의 최단거리 R

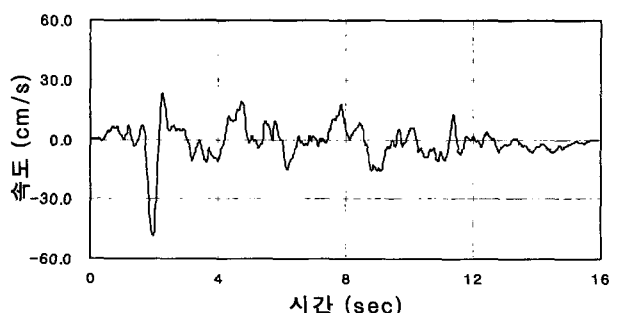
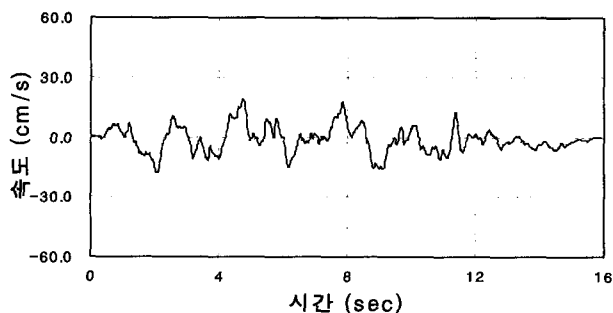
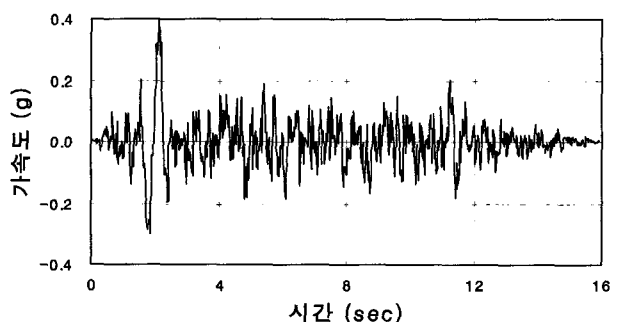
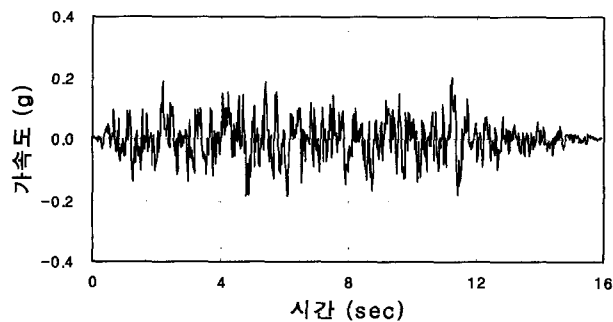
$$v(t) = A \frac{1}{2} [1 + \cos(2\pi \frac{f_p}{\gamma} t)] \cos(2\pi f_p t + \phi) \quad (10)$$

(단,  $-\frac{\gamma}{2f_p} \leq t \leq \frac{\gamma}{2f_p}$ )

식 (10)에서 펄스의 진동수  $f_p$ 는 식 (5)로부터 구해지는 주기  $T_p$ 의 역수로 구해지며 펄스의 진폭(A)은 중첩 후  $V_{max}$ 가 식 (9)에 의한 값에 맞도록 조절하였다. 부호변화점을 표현하는  $\gamma$ 는 1.0~3.0 사이, 위상각  $\phi$ 는  $0 \sim 2\pi$ 사이의 임의의 값을 가진다.

이를 이용하여 예로 SCRs에서의 지진규모가 6.2이고 그림 10과 같이 깊이 8km, 진원거리가 14.1km, 단층까지의 최단거리가 10km인 지역에서의 NFGM을 생성하면 다음과 같다.

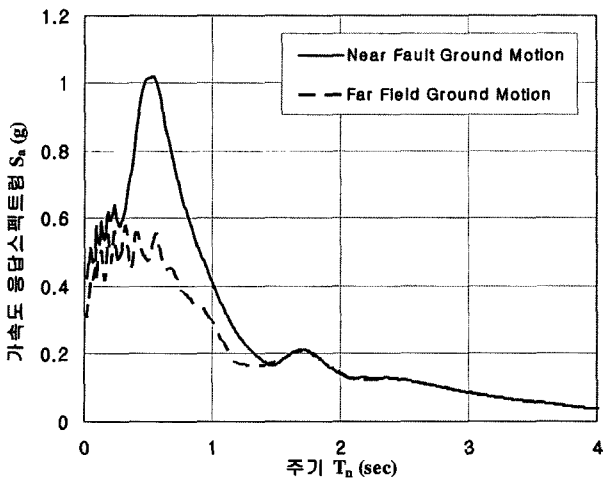
FFGM의 PGA값은 한반도 남동부의 부지효과를 고려한 감쇠공식<sup>(15)</sup>에 따라서 지진규모와 진원거리를 대입하여 0.2g로 계산되었고 SIMQKE를 이용하여 도로교 설계기준의 지반계수 1.0을 적용한 응답스펙트럼 형태에 맞춰 생성하였다(그림 11(a)). 시간이력의 포락함수는 사다리꼴로 하였고 포락함수의 매개변수는 ASCE<sup>(16)</sup>에서 제안한 규모 6.0~6.5 구간과 6.5~7.0 구간의 평균값으로 하여 상승시간은 1.25초, 강진동의 지속시간은 8.5초 감쇠시간은 6초로 결정하였다. 장주기 성분의 속도 펄스는 주기가 0.69초이고  $V_{max}$ 가 49.8cm/s로 계산되었다. NFGM의 펄스는 지반운동의 초기에 발생하기 때문에 상승시간 이후에 바로 펄스가 시작되도록 FFGM에 중첩하였으며 이렇게 구한 NFGM은 그림 11(b) 이고, 이 예에서는 약 2초에서 펄스에 의한 속도 시간이력의 최대진



(a) FFGM의 시간이력

(b) NFGM의 시간이력

〈그림 11〉 지진규모 6.2, R=10km의 FFGM과 NFGM의 시간이력



〈그림 12〉 FFGM과 NFGM의 응답스펙트럼

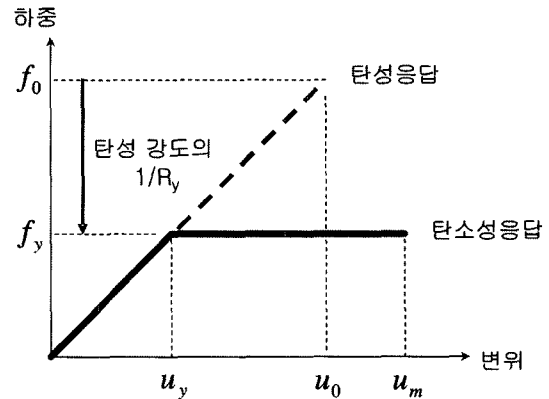
폭이 나타남을 볼 수 있다.

이러한 방법으로 지진규모 6.2, R=10km인 임의의 FFGM과 NFGM을 각각 5개씩 생성하였으며, 이에 대한 단자유도계의 탄성응답스펙트럼의 평균을 구하여 그림 12에 도시하였다. 주기 약 1.5초 즉, 펄스 주기의 약 2배 이내인 주기구간에서는 NFGM의 응답이 더 크게 나오며 그 최대값은 FFGM 보다 약 1.76배 정도 크다. 최대가 되는 주기는 약 0.54초로 펄스 주기의 약 0.78배에서 나타난다. 속도 펄스의 영향에 의해서 구조물의 주기가 펄스 주기보다 약간 작은 구간에서에서 매우 큰 응답이 나타남을 알 수 있으며 SCR에서의 중규모 지진에서는 이 구간이 가속도 민감구간에서부터 속도 민감구간의 일부에 걸쳐지는 단주기 및 중간주기 영역에 속한다.

**4. 안정대륙권역에서 예상되는 근단층지반운동이 탄소성응답 특성에 미치는 영향**

탄성적으로 거동하는 구조물에서는 주기가 동적 특성을 결정하지만 탄소성응답에서는 그 외에도 두 가지 특성 즉, 항복 강도와 연성도를 더 알아야 한다. 일반적으로 변위기반의 성능기초내진설계에서는 구조물의 연성 거동 능력을 고려하여 구조물의 항복 강도를 탄성응답시 요구되는 강도보다 작게 될 수 있도록 허용한다(그림 13). 이때 탄성응답에서 나누는 값을 항복강도 저감계수( $R_y$ ) 라고 한다. 항복강도 저감계수는 목표 변위를 허용연성도 이내로 제한할 수 있도록 결정하여야 한다.

그러나 NFGM의 경우 펄스가 작용하는 시점에서는 펄스의 주기적 특성의 영향이 강하기 때문에 지반운동의 지속시간 전체에 걸쳐서 비슷한 주기 성분을 가지고 있는 FFGM과는 다른 탄소성 거동을 보이게 된다. 그림 14는 단자유도계의



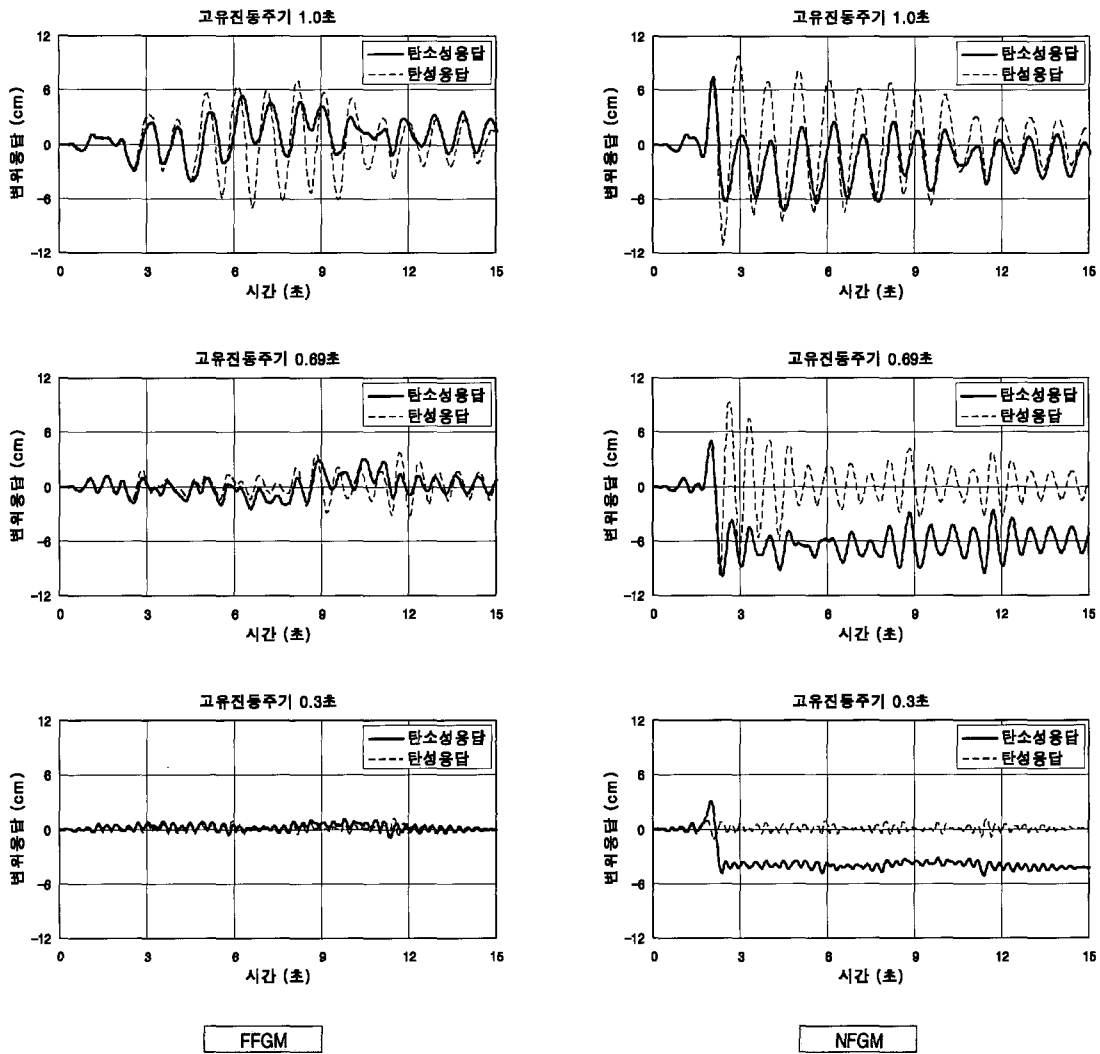
〈그림 13〉 탄소성 단자유도시스템의 거동

고유진동주기가 속도 펄스의 주기와 같은 0.69초와 이보다 큰 1.0초, 그리고 이보다 작은 0.3초인 세 가지 경우에 대하여 그림 11에서의 FFGM과 NFGM에 의한 변위응답 시간이력을 구한 것이다. 탄소성응답에서 적용한 항복강도 저감계수는 3을 적용하였다. 각각의 탄성응답( $u_0$ )과 탄소성응답( $u_m$ )을 정리하면 표 2와 같다. 탄소성응답에 의한 소요연성도는 식 (11)과 같이 계산되며 각각의 경우에 대해서 마찬가지로 표 2에 정리되었다. FFGM의 경우 탄성응답과 탄소성응답의 최대 변위가 큰 차이가 없으며 연성도가 허용연성도인 3에 근접하거나 이를 넘지 않는다. 또한 NFGM의 경우에도 구조물의 주기가 펄스의 주기보다 크거나 같은 1.0초, 0.69초인 경우에는 소요연성도가 3보다 작은 값을 가진다. 그러나 구조물의 고유진동주기가 지반운동의 펄스 주기보다 작은 0.3초인 경우에는 탄소성응답이 펄스 작용 시점에서 큰 소성변형을 보이며 소요연성도는 허용연성도를 훨씬 초과하게 된다. 이는 구조물의 주기가 지반운동의 펄스 형태의 가진 주기보다 작으면 상대적으로 펄스의 지속시간이 길어서 시스템이 탄성상태에 머무는데 소요되는 강도보다 작은 강도를 가지고 있는 경우 항복 후 힘이 한쪽방향으로 오래 지속되므로 과도한 소성 변형이 발생하기 때문이다.

$$\mu = \frac{R_y u_m}{u_0} \tag{11}$$

그림 15는 앞에서 구한 5개의 FFGM과 SCR에서의 NFGM에 대하여 위의 방법과 같이 항복강도 저감계수  $R_y=3$ 을 적용한 탄소성 단자유도계의 주기별 소요연성도의 평균을 나타낸 것이다. NFGM의 경우 속도 펄스 주기의 약 2/3배 보다 작은 약 0.4초 이하의 고유진동주기를 갖는 단자유도계인 경우 매우 큰 연성도를 필요로 하게 된다. 이 결과는 구조물의 연성거동을 고려한 설계 시 펄스 형태의 지반운동 시간이력을 동반하는 NFGM에 대해서는 FFGM과 같은 항





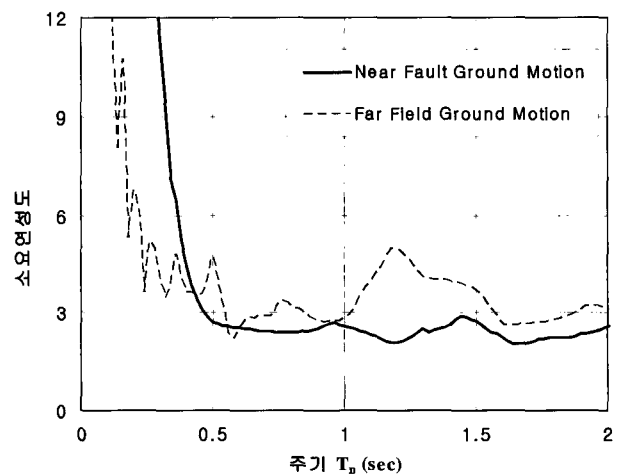
〈그림 14〉 FFGM과 NFGM에 대한 구조물의 주기별 변위응답 시간이력

〈표 2〉 FFGM과 NFGM에 대한 단자유도계의 주기별 변위응답

고유주기 (초)	지반운동	탄성응답, $u_0$ (cm)	탄소성응답, $u_m$ (cm)	소요연성도 ( $\mu$ )
T=1.0	FFGM	7.10	5.36	2.26
	NFGM	11.28	7.43	1.97
T=0.69 (=T <sub>p</sub> )	FFGM	3.68	3.08	2.51
	NFGM	9.87	9.91	3.01
T=0.3	FFGM	1.16	1.05	2.71
	NFGM	1.16	5.13	13.26

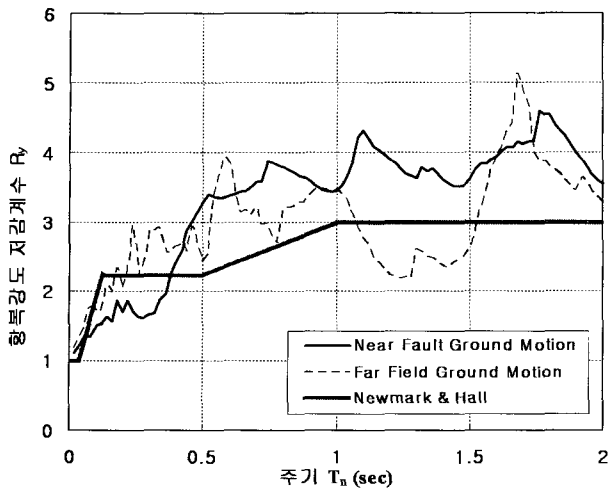
복강도 저감계수를 적용하려면 단주기 구조물의 경우에는 매우 큰 연성능력을 보유하도록 설계해야 한다는 것을 시사하고 있다.

그러나 구조물의 연성도를 증가시키는데는 한계가 있기 때문에 허용연성도 이내로 변위를 제한하도록 해야 하며 이에 따라 NFGM에 맞도록 주기별 항복강도 저감계수를 산정해야 한다. 그림 16은 앞에서 구한 5개의 FFGM과 SCRs



〈그림 15〉 R<sub>y</sub>=3인 경우 FFGM과 NFGM의 연성도

에서의 NFGM에 대하여 허용연성도가 3에 맞도록 구한 항복강도 저감계수의 평균값을 주기에 따른 값으로 나타낸 것이다. 일반적으로 지진에 의한 구조물의 비선형 거동 시 허



〈그림 16〉 연성도 3인 경우 FFGM과 NFGM의 향복강도 저감계수

용 가능한 향복강도 저감계수의 값은 구조물의 주기에 따라 다르며 단주기로 갈수록 거의 1에 가까운 값을 가져야 한다. 이에 Newmark and Hall<sup>(17)</sup>은 FFGM에 대하여 구조물의 주기에 따른 향복강도 저감계수를 제안하였으며 비교를 위해 이를 그림 16에 같이 도시하였다. 그림에서 보면 NFGM의 경우 펄스주기의 약 2/3배 보다 작은 주기인 0.4초 이하 구간에서는 향복강도 저감계수가 작게 평가되며 그만큼 탄소성거동에서도 탄성거동시 필요한 강도에 준하는 정도를 유지해야 함을 의미한다.

지진의 규모에 따라서 차이가 있겠지만 중규모 지진의 SCRs에서 발생 가능한 NFGM에서 속도 펄스의 주기는 1초 이내일 것으로 예상된다. 이에 따라 구조물의 탄성응답은 가속도 민감구간에서부터 속도 민감구간에 걸친 단주기 및 중간주기 구조물에서 매우 커지게 되며, 탄소성거동을 고려하여 설계하는 구조물에 대해서는 펄스의 주기보다 짧은 단주기 구조물의 경우 충분한 강도나 연성도를 확보해야 할 필요가 있다.

국내 도로교 설계기준의 설계응답스펙트럼은 NFGM에 의한 탄성지진력 증가에 대해 고려되어있지 않다. 또한 탄성지진력을 향복강도 저감계수에 해당하는 응답수정계수로 나누어 설계지진력을 산정하는데 단주기 구조물의 경우 응답수정계수를 1에 가깝게 해야 함에도 불구하고 구조물 주기에 따른 응답수정계수의 변화를 고려하지 않았으며, 특히 NFGM에 의해서는 응답수정계수를 작게 해야 하는 구간이 펄스의 주기에 따라서 보다 장주기 영역으로 이동할 수 있어 이에 대한 보완이 필요한 것으로 판단된다.

### 5. 결론

이 논문에서는 우리나라와 같은 SCRs 지역에서 발생 가

능한 NFGM의 지반운동 시간이력 모델링 방법을 처음으로 제시하였다. SCRs에서의 펄스의 형상을 구하기 위하여 일반적인 단층파열 메카니즘의 차이를 이용해서 ATRs에서의 NFGM 특성으로부터 환산하여 SCRs에서의 NFGM 펄스 특성 변수를 결정하였다. SCRs에서의 NFGM의 속도 펄스의 주기는 동일한 지진규모의 ATRs에서와 비교할 때 상승시간이 작아지므로 감소하며 그 값은 ATRs의 약 0.45~0.5배 정도이다. 또한 속도 펄스의 최대진폭은 지진 시 단층파열속도가 커지므로 ATRs보다 큰 값을 가진다. 지진규모와 단층까지의 최단거리로부터 SCRs에 적합한 속도 펄스를 만들었으며 이를 추계학적으로 구해진 FFGM에 중첩하는 방법으로 NFGM의 시간이력 모델링을 하였다.

이와 같이 생성된 NFGM에 대하여 탄성응답 및 탄소성응답 특성을 알아보았다. SCRs에서 규모 6.0~6.5의 NFGM을 고려하면 펄스의 주기는 0.6~0.9초 정도이며, 이 주기 구간은 FFGM에서는 응답스펙트럼이 최대값을 지나 감소하는 구간이지만 NFGM이 발생하면 펄스에 의해서 매우 큰 응답을 보일 수 있다. 구조물의 소성거동을 고려한 설계를 할 경우 단주기 구조물에 대해서는 충분한 강도나 연성도를 확보해야 함을 보였다. 그러나 이 연구에서는 지반 조건에 따른 NFGM의 특성 차이 및 강진동의 지속시간 등이 고려가 안 되었으며 향후 이에 대한 연구가 필요하다.

### 감사의 글

이 연구는 과학기술부 원자력중장기개발사업과 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의하여 수행되었습니다. 또한 이 연구는 또한 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었음을 알려드립니다. 관련 기관들의 연구비 지원에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. Somerville, P.G., Smith, N.F., and Graves, R.W., "Modification of Empirical Strong Ground Motion Attenuation Relations to Include the Amplitude and Duration Effects of Rupture Directivity," *Seismological Research Letters*, Vol. 68, No. 1, 1997, pp. 199-222.
2. Mavroeidis, G.P., and Papageorgiou, A.S., "A Mathematical Representation of Near-Fault Ground Motions," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, No. 3, 2003, pp. 1099-1131.
3. Douglas, A., Hudson, A., and Pearce, R.G., "Directivity

- and the Doppler Effect,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 78, No. 3, 1988, pp. 1367-1372.
4. Chopra, A.K., and Chintanapakdee, C., “Comparing Response of SDF Systems to Near-Fault and Far-Fault Earthquake Motions in the Context of Spectral Regions,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 30, 2001, pp. 1769-1789.
  5. UBC, *Uniform Building Code*, International Conference of Building Officials, Whittier, California, USA, 1997.
  6. ATC, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California, USA, 1996.
  7. FEMA, *NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA274, Federal Emergency Management Agency, Washington, D. C., USA, 1997.
  8. Alavi, B., and Krawinkler, H., “Behavior of Moment-Resisting Frame Structures Subjected to Near-Fault Ground Motions,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 33, 2004, pp. 687-706.
  9. Sasani, M., and Bertero, V.V., “Importance of Severe Pulse-Type Ground Motions in Performance-Based Engineering: Historical and Critical Review,” *12WCEE*, Auckland, New Zealand, 2000, paper no. 1302.
  10. Bray, J.D., and Marek, A.R., “Characterization of Forward-Directivity Ground Motions in the Near-Fault Region,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 24, 2004, pp. 815-828.
  11. Mavroeidis, G.P., and Papageorgiou, A.S., “Near-Fault Ground Motions, and the Response of Elastic and Inelastic Single-Degree-of-Freedom Systems,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 33, 2004, pp. 1023-1049.
  12. Atkinson, G.M., and Silva, W., “An Empirical Study of Earthquake Source Spectra for California Earthquakes,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 87, No. 1, 1997, pp. 97-113.
  13. Atkinson, G.M., “Earthquake Source Spectra in Eastern North America,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 83, No. 6, 1993, pp. 1778-1798.
  14. Brune, J.N., “Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes,” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 75, No. 26, 1970, pp. 4997-5002.
  15. 조남대, 박창엽, “한반도 남동부에서 부지효과를 고려한 스펙트럼 감쇠상수  $\gamma$  추정 및 강지진동의 추계학적 모사”, 한국지진공학회 논문집, 제7권, 제6호, 2003, pp. 59-70.
  16. ASCE, *Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary*, ASCE Standard 4-98, New York, USA, 1998.
  17. Newmark, N.M., and Hall, W.J., *Earthquake Spectra and Design*, EERI Monograph Series, EERI, Oakland, USA, 1982.