

스펙트럼 적합 입력지반운동에 의한 면진구조의 응답 특성

Response of Base Isolation System Subjected to Spectrum Matched Input Ground Motions

김정한^{1)*} · 김민규¹⁾ · 최인길¹⁾

Kim, Jung Han^{1)*} · Kim, Min Kyu¹⁾ · Choi, In-Kil¹⁾

¹⁾한국원자력연구원

¹⁾Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)

/ A B S T R A C T /

Structures in a nuclear power system are designed to be elastic even under an earthquake excitation. However a structural component such as an isolator shows inelastic behavior inherently. For the seismic assessment of nonlinear structures, response history analysis should be performed. In this study, the response of base isolation system was analyzed by response history analysis for the seismic performance assessment. Firstly, several seismic assessment criteria for a nuclear power plant structure were reviewed for the nonlinear response history analysis. Based on these criteria, the spectrum matched ground motion generation method modifying a seed earthquake ground motion time history was adjusted. Using these spectrum matched accelerograms, the distribution of displacement responses of the simplified base isolation system was evaluated. The resulting seismic responses excited by the modified ground motion time histories and the synthesized time history generated by stochastic approach were compared. And the response analysis of the base isolation system considering the different intensities in each orthogonal direction was performed.

Key words: Spectrum matched ground motion, Response history analysis, Design Response Spectrum, Seismic performance assessment, Base isolation, Nuclear power plant

1. 서론

원자력발전소와 같은 중요도가 높은 구조물은 다른 시설물들에 비해 지진에 대한 안전성 확보가 매우 중요하게 여겨진다. 결정론적인 방법으로 설계지진 하중에 대해 안전성을 만족해야 하는 것 뿐 만 아니라, 설계에서 고려하는 재현주기보다도 긴 강한 지진동에 대해서도 확률 이론에 근거하여 적절한 안전성을 만족시켜야한다. 대표적으로 ASCE 43-05[1]에서 제시하고 있는 원자력 구조물의 내진규정에서는 이를 고려한 성능기반 설계를 추구하고 있다. 이 기준에서는 설계지진(Design Basis Earthquake, DBE)에 대하여 두 단계의 성능기준으로, 100%DBE에 의한 지진하중에 대해서는 99%의 신뢰도로 성능을 만족하도록 해야하고, 150%DBE에 대해서는 90% 이상의 신뢰도로 성능을 만족시키도록 제시하고 있다. 이와 같은 확률 기반 성능기준에서는 지진에 대한 지진응답의 평균값뿐만 아니라 분포를 구해야 할 필요성이 있다. 특히 원전구조의 경우 구조물의 강성이 매우 크기

때문에 설계지진 내에서는 일반적으로 선형 해석법으로 지진응답을 평가하지만, 면진구조와 같이 비선형성이 큰 요소가 적용된 경우에는 성능평가를 위해 보다 주의 깊은 고찰이 필요하다. 이 연구에서는 비선형 해석을 위한 입력지반운동의 작성 방법과 이에 대한 지진응답을 면진구조의 예를 통하여 분석하였다.

2. 원전구조의 입력지반운동 시간이력 작성 방법

2.1 스펙트럼 적합 시간이력 생성방법

지진해석 및 내진설계를 위해 사용되는 입력지반운동은 실제 관측된 지진파를 직접, 혹은 단순 증폭하여 사용하기도 한다. 그러나 이는 응답스펙트럼으로 주어지는 설계지진을 모든 주파수 영역에서 포괄하기 어렵기 때문에 일반적으로 설계스펙트럼에 맞추어 생성된 인공지진 시간이력을 사용한다.

인공지진 시간이력을 생성하는 보편적인 방법은 추계학적 방법이다. 이 방법에서는 모든 주파수성분을 동일하게 가지는 백색잡음을 생성하고 이

*Corresponding author: Kim, Jung Han

E-mail: jhankim@kaeri.re.kr

(Received 18 December 2012; Accepted 21 February 2013)

로부터 각 주파수 성분의 진폭을 조절하여 목표로 하는 스펙트럼에 맞추도록 한다. 보다 더 실제 지진 특성을 반영하기 위해서 계측된 지진으로부터 위상각을 추출하여 사용하고 진폭만을 조절하는 방법이 쓰이기도 한다. 이와 같은 추계학적 방법은 몇 회의 반복계산으로 목표스펙트럼에 수렴시킬 수 있으며, 지진동의 지속시간을 자유롭게 조절할 수 있고, 주파수별 위상각을 랜덤하게 정함으로써 서로 상관성(cross correlation)이 없는 수많은 지진동을 생성할 수 있다.

그러나 이 방법은 주파수영역에서 수행되기 때문에 지진파의 주파수특성이 시간에 따라서 변하지 않는 정상(stationary)파의 특성을 가진다. 하지만 실제 관측된 지진동 시간이력은 시간에 따라 주파수 특성이 달라지는 비정상(non-stationary) 특성을 가지고 있으며, 이는 주파수영역에서의 지진동 생성 방법으로는 구현이 어렵다.

그래서 최근에는 비정상파 특성뿐만 아니라 실제 지진의 다양한 특성을 그대로 반영하기 위해 계측된 지진동 시간이력을 시간영역에서 직접 변형하는 방법이 개발되었다. 이들 방법은 주로 계측된 지진동에 적절한 형태의 wavelet 시간이력을 중첩하여 목표스펙트럼에 맞추는 방식이 사용되고 있다[2-7].

2.2 원전구조의 시간이력 해석 기준

원전의 지진해석 및 내진설계를 위한 시간이력 해석에 관하여 여러 기준들이 제시되어 있다. Reg. Guide 1.208[8]에서는 원전이 건설되는 지역의 등재해도스펙트럼(Uniform Hazard Response Spectrum, UHRS)에 대하여 기여도가 큰 지진규모-거리 특성이 반영된 입력지진을 사용하도록 하고 있다. 이를 위해 최대가속도(A), 최대속도(V), 최대변위(D)로 구성된 관계식인 V/A 값과, AD/V^2 값이 적합하도록 입력지진을 정해야 한다고 기술하고 있다. ASCE 4-98[9]에서는 장주기 성분에 대해서는 해당 지역에서 실제 계측된 지진동이나 혹은 계측 지진동을 구현할 수 있는 수치해석 모델을 통해서 작성할 것을 권하고 있으며, 3개 이상의 지진동을 해석에 사용하도록 하고 있다. 특히 랜덤성을 띠는 지진파의 고주파 성분과는 달리 장주기 성분은 지진원 메카니즘에 의해 영향을 받기 때문에 수평 양방향 성분이 상관성을 가질 수 있으며, 이에 장주기 영향이 큰 해석에서는 양방향 입력지진의 상관계수 값이 0.4 이상이 되도록 제시하고 있다. 즉, 먼진구조와 같은 경우는 입력지진동의 장주기 성분이 중요하기 때문에 실제 계측지진의 특성이 보다 잘 반영되어야 한다.

ASCE 43-05[1]에서는 선형해석의 경우 추계학적으로 생성된 합성지반운동을 사용할 수 있지만 비선형 해석의 경우 계측된 지진파나 또는 계측된 지진파를 목표스펙트럼에 맞게 변형(modified)시킨 지진파만을 사용하도록 규정하고 있다. 계측된 지반운동들은 목표로 하는 응답스펙트럼에 주로 기여하는 지진규모-거리를 고려하여 적합한 것들로 선택되어야 한다. 고려되어야 하는 특성은 단주기 및 고주파성분의 특성, 강진지속시간의 특성, 스펙트럼의 속도 및 가속도 민감구간 특성 등으로 기술하고 있다. 특히 단순히 지진응답의 평균값이 아니라 통계적 의미를 가지는 응답의 분포를 구하기 위해서는 30개의 입력지진동이 해석에 사용되어야 한다고 규정한다. SRP 3.7.1[10]에서도 비선형 해석을 위해서는 다수의 입력지반운동이 사용되어야 하며 장주기 및 고주파 성분 특성이 적절히 고려된 계측 지진이 사

용되어야 한다고 기술되어 있다.

위 기준들을 요약하면, 선형해석에서는 합성지진파를 사용할 수 있지만 비선형해석에서는 실제 계측지진이나 이를 스펙트럼에 적합하도록 변환시킨 지진동만이 사용 가능하다. 원전구조의 성능평가를 위해서는 응답의 확률분포를 구해야 하기 때문에 최소 30개의 입력지진이 필요하다. 특히 먼진장치는 비선형성이 크고 장주기 성분이 중요하므로 더욱 실 계측지진의 사용이 요구된다고 할 수 있다.

2.3 Seed 지진의 스펙트럼 적합 변형 방법

실제 계측된 지진은 목표응답스펙트럼을 모든 주파수 성분에 대하여 포괄하기 어렵기 때문에 지진해석 및 내진설계를 위해서는 계측된 지진을 스펙트럼에 맞도록 변형시킬 필요가 있다. 이때 실제 지진 기록의 비정상파 특성을 유지하기 위해서는 시간영역에서 변형시켜야 한다. 이를 위해, 계측지진의 시간이력에 특정 wavelet을 삽입하여 목표스펙트럼에 맞추는 방법이 주로 사용된다.

이 연구에서는 변형시키기 위해 선택된 지진(seed 지진)을 목표 스펙트럼에 맞도록 변환시키기 위해 Hancock et al.[2]에 의해 개발된 프로그램인 RspMatch를 사용하였다. 이 프로그램에서는 목표 스펙트럼에 부족한 주파수 성분을 보정하기 위해 식 (1)과 같은 wavelet 함수를 시간영역에서 중첩하도록 한다.

$$f_j(t) = \cos[\omega_j(t-t_j + \Delta t_j)] \exp\left[-\left(\frac{t-t_j + \Delta t_j}{\gamma_j}\right)^2\right] \quad (1)$$

여기서 ω_j 는 해당 주파수이고 Δt_j 는 최대응답발생시간 t_j 와 wavelet의 시간축 중심과의 위상차를 보정해주는 값이다. 따라서 wavelet의 중첩 위치가 원 지진파에 의한 최대응답발생시간에 맞추어지도록 하여 변형을 최소화 한다. 식 (1)의 우측 지수함수는 wavelet의 포락곡선이다. 이 포락곡선의 감쇠 정도를 정의하는 γ_j 는 가속도 시간이력으로 표현되는 wavelet의 최종 속도 및 변위 값이 0이 되도록 식 (2)와 같이 주파수(f)에 대한 식으로 주어진다. 이렇게 되면 중첩 후 별도의 기준선 보정이 필요하지 않다는 장점이 있다. 이를 적용하여 주파수 1 Hz에 대한 wavelet의 가속도, 속도 및 변위 시간이력을 형태를 그려보면 Fig. 1과 같다.

$$\gamma_f = 1.178f^{-0.93} \quad (2)$$

Fig. 2는 seed 지반운동 가속도 시간이력으로부터 시간영역에서 스펙트럼에 적합하도록 변형하는 과정을 보여준다. 목표스펙트럼은 ZPA(Zero Period Acceleration)가 0.5g인 Reg. Guide 1.60[11]의 수평방향 5% 감쇠 스펙트럼을 적용하였다. 지반운동 시간이력을 목표 스펙트럼에 맞추는 과정은 다음과 같다. 우선 특정 주파수에 대하여 목표스펙트럼에 맞도록 시간이력을 증폭시킨다. 여기서는 ZPA에 대해서 0.5g가 되도록 최초 시간이력을 증폭시켰다. 그 후 고주파수 영역부터 몇 개의 주파수 단계로 나누어 순차적으로 스펙트럼에 맞도록 wavelet을 시간이력에 중첩한다. 고주파수 성분부터 맞추는 것은, 고주파수 성분은 응답스펙트럼의 저주파수 성분에

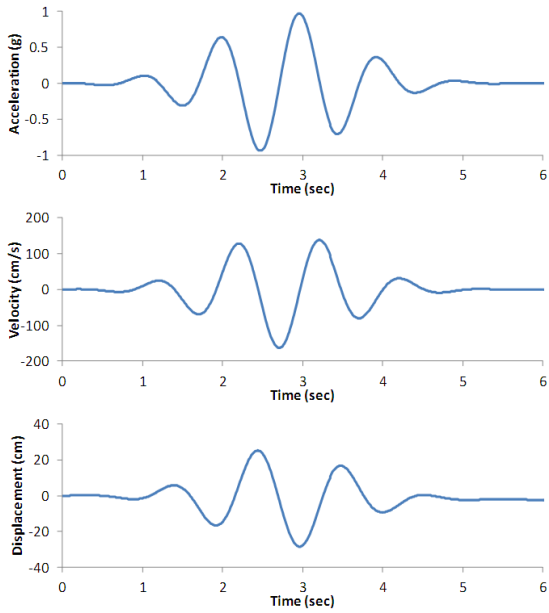


Fig. 1. Acceleration, velocity, and displacement wavelet[2]

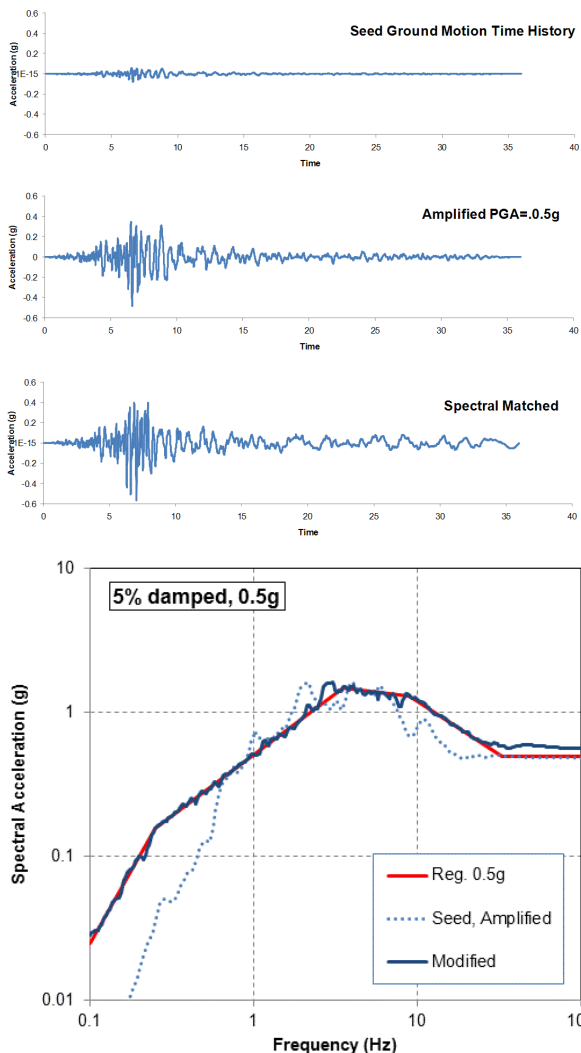


Fig. 2. Procedure to modify ground motion time history compatible with target spectrum

영향을 크게 미치지지만 반대로 저주파수 성분은 추가로 중첩이 되더라도 응답스펙트럼의 고주파수 성분에 미치는 영향이 미미하기 때문이다. 여기서는 50 Hz ~ 1.0 Hz, 1.0 Hz ~ 0.5 Hz, 0.5 Hz ~ 0.3 Hz, 0.3 Hz ~ 0.1 Hz의 네 단계로 나누어 순차적으로 목표스펙트럼에 맞추었다. Fig. 2와 같이 변형된 시간이력을 보면 seed 지진의 전체적인 포락 곡선 형상이나 시간에 따른 파형 자체의 변화는 거의 없도록 비정상파 특성이 유지된다. 단지 경우에 따라서, 저주파수 성분이 목표스펙트럼과 차이가 크면 저주파수 보정에 의해 고주파수 영역까지 영향을 미치는 경우가 발생 할 수 있다. Fig 2에서도 최종 ZPA 값은 0.5g 보다 다소 크다. 하지만 이러한 차이는 약 30 Hz 이상의 주파수 영역에서 발생하고, 구조물 해석 시, 특히 면진구조와 같은 장주기 구조물 해석시에는 응답에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

3. 시간이력 해석 모델

3.1 입력지반운동 시간이력 작성

시간이력 해석을 통하여 면진구조의 응답 분포를 구하기 위해 30개의 스펙트럼 적합 시간이력을 작성하였다. 대상 부지가 있는 경우 그 부지에서 발생 가능한 지진의 특성에 맞는 지반운동 시간이력을 seed 지진으로 선택해야 한다. 그러나 이 연구에서는 특정 부지를 대상으로 하지 않기 때문에 일반적인 설계스펙트럼을 대상으로 하였으며, 이에 seed 지진을 최대한 다양한 조건을 포함하는 지진들로 선택하였다. 이를 위해 미국 서부, 일본, 대만 등 강진지역에서 발생한 판경계지진(inter-plate earthquake)뿐만 아니라 캐나다, 미국 중동부에서 발생한 판내부지진(intra-plate earthquake)들도 포함하였다. 또한 펄스 형태의 근거리지진 특성을 가지는 지진이나 hanging wall, foot wall 지역에서 계측된 지진 등 다양한 조건이 포함되도록 하여 선택하였다. 이들 30개 seed 지진은 Fig. 3과 같이 다양한 지진규모-거리를 가지고 있다. 전체 지진기록의 목록은 Table 1에 제시하였다.

이들 seed 지진을 이용하여 목표로 하는 0.5g Reg. Guide 1.60 스펙트럼에 맞도록 30개를 변형하였다. Fig. 4는 목표응답스펙트럼과 변형된 지

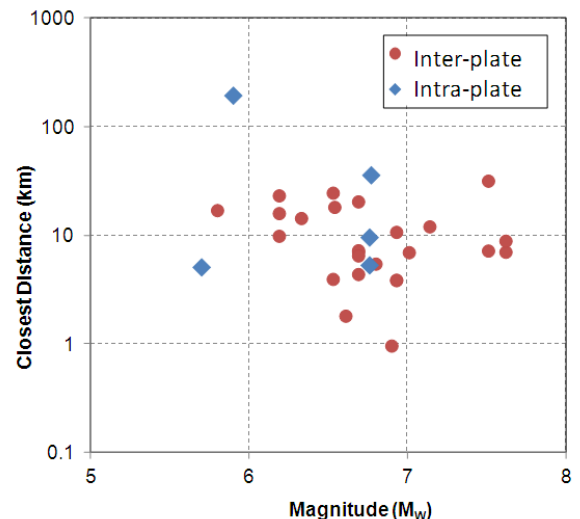


Fig. 3. Magnitudes and distances of seed motions

Table 1. List of selected seed motions

Earthquake	Station	Inter/Intra	M _w	Distance (km)
Miramich, Canada	IB2	Intra	5.7	5.10
Saguenay, Canada	DCKY	Intra	5.9	194.7
Parkfield	TMB	Inter	6.19	16.0
San Fernando	PUL	Inter	6.61	1.81
Gazli, USSR	GAZ	Inter	6.80	5.46
Imperial Valley	E05	Inter	6.53	3.95
Imperial Valley	SUP	Inter	6.53	24.6
Livermore-01	KOD	Inter	5.80	17.0
Victoria, Maxico	CPE	Inter	6.33	14.4
Morgan Hill	CLS	Inter	6.19	23.2
Morgan Hill	G06	Inter	6.19	9.86
Nahanni	S1	Intra	6.76	9.60
Nahanni	S3	Intra	6.76	5.32
Superstition Hills	ICC	Inter	6.54	18.2
Spitak, Armenia	GUK	Intra	6.77	36.0
Loma Prieta	BRN	Inter	6.93	10.7
Loma Prieta	CLS	Inter	6.93	3.85
Loma Prieta	LGPC	Inter	6.93	3.88
Erzican, Turkey	ERZ	Inter	6.69	4.38
Cape Mendocino	CPM	Inter	7.01	6.96
Northridge	CHL	Inter	6.69	20.5
Northridge	PAC	Inter	6.69	7.01
Northridge	PKC	Inter	6.69	7.26
Northridge	RRS	Inter	6.69	6.50
Kobe	KJMA	Inter	6.90	0.96
Kocaeli, Turkey	GYN	Inter	7.51	31.7
Kocaeli, Turkey	IZT	Inter	7.51	7.21
Chi-Chi, Taiwan	TCU072	Inter	7.62	7.03
ChiChi, Taiwan	TCU089	Inter	7.62	8.88
Duzce, Turkey	BOL	Inter	7.14	12.0

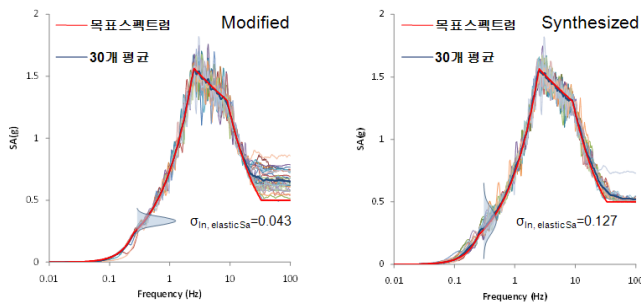


Fig. 4. 5% damped elastic response spectrum for the modified and synthesized time histories

반운동 시간이력 30개에 대한 응답스펙트럼 및 그 평균값을 도시한 것이다. 여기서 매끄러운 실선은 목표스펙트럼이고 굵은 실선은 30개 지진에 대한 스펙트럼의 평균이다. 또한 지반운동 작성 방법에 따른 차이를 보기 위해 추계학적 방법에 의한 합성(synthesized) 지진파도 30개를 작성하였다. 합성 지진파는 P-CARES[12] 프로그램을 이용하였다. 그림에서와 같이 두 방

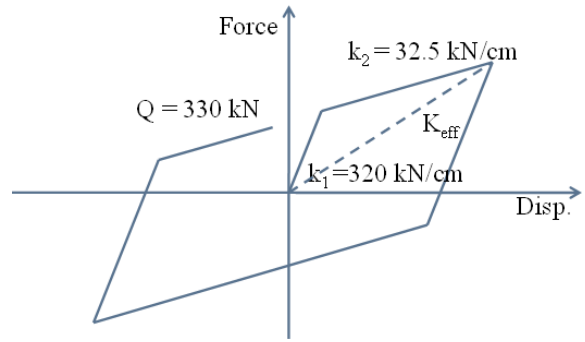


Fig. 5. Force-displacement hysteresis of base isolation system

법 모두, 개개의 스펙트럼은 변동성이 있지만 30개에 대한 평균은 목표스펙트럼과 거의 일치하고 있다.

3.2 면진구조 해석 모델

지진응답 해석을 위해 면진 시스템은 단순화 하여 모델링 하였다. 원자력발전소 구조물은 면진장치에 비해 상대적으로 고유진동수가 매우 크기 때문에 단자유도 강체 구조라 가정하고, 면진장치는 운동학적 경화(kinematic hardening) 이력 거동을 하는 이중선형(bilinear) 모델로 이상화 하였다. 여기서 면진장치는 10,000 kN 용량을 가지는 것으로 가정하였고, Fig. 5와 같이 하중-변위 이력곡선에서 초기강성 k_1 은 320 kN/cm, 2차 강성 k_2 는 32.5 kN/cm 이고 특성강도(characteristic strength) Q 는 330 kN 으로 하였다. 상부구조의 하중은 0.902 kN·sec²/cm로 하였다.

4. 입력지진에 따른 비탄성응답 분석

4.1 스펙트럼 적합 시간이력의 비탄성응답

0.5 g Reg. Guide 1.60 스펙트럼에 맞추어 변형된 30개의 입력 지진을 이용하여 이중선형 모델에 대해서 해석을 수행하였다. 해석에 의한 최대 변위는 평균 약 47 cm로 이 변위에 대한 유효주파수는 약 0.33 Hz 이다. 변형된 지반운동 시간이력으로부터 면진 시스템의 지진응답해석을 수행한 예를 Fig. 6에 도시하였다. 주어진 seed 지진은 Gazli 지진의 GAZ 관측소에서 계측된 지반운동과 ChiChi 지진에서 TCU089 관측소에서 계측된 지반운동이다. 이를 목표스펙트럼에 적합하게 변형한 시간이력은 Fig. 6의 왼쪽과 같고, 이에 대한 응답변위 시간이력 곡선은 Fig. 6의 오른쪽과 같다. ChiChi 지진의 지반운동 시간이력은 동일한 지진세기를 유지하며 지속시간이 긴 특징이 있고, Gazli 지진은 상대적으로 짧지만 강한 가속도 시간이력을 보인다. 따라서 Gazli 지진에 의한 응답의 경우 한 번의 강한 사이클만 가지지만 상대적으로 더 큰 비선형성을 보일 수 있다. 이는 동일한 탄성응답 스펙트럼에 맞추더라도 최대 비탄성응답 변위는 ChiChi 지진에 의한 변위보다 Gazli 지진에 의한 변위가 더 클 수 있음을 의미한다. Fig. 6의 맨 아래와 같이 일반적인 추계학적 방법으로 생성된 합성지반운동은 30개를 만들더라도 동일한 정상파 특성을 가지고 있다. 따라서 위에서 기술한 지진파고유의 서로 다른 특성이 반영되기 어렵다.

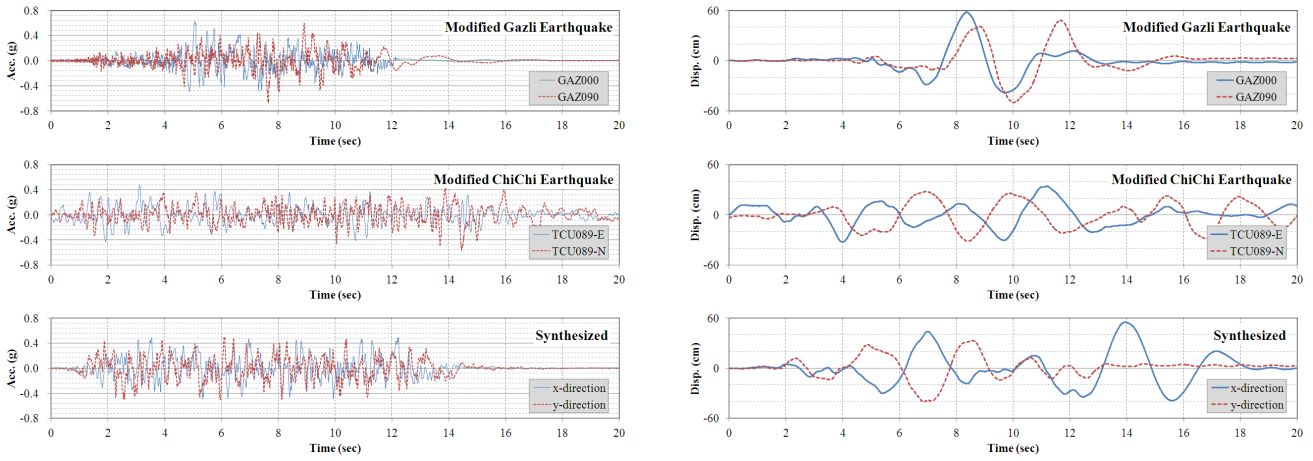


Fig. 6. Acceleration time histories of the modified and synthesized ground motions and its displacement response history

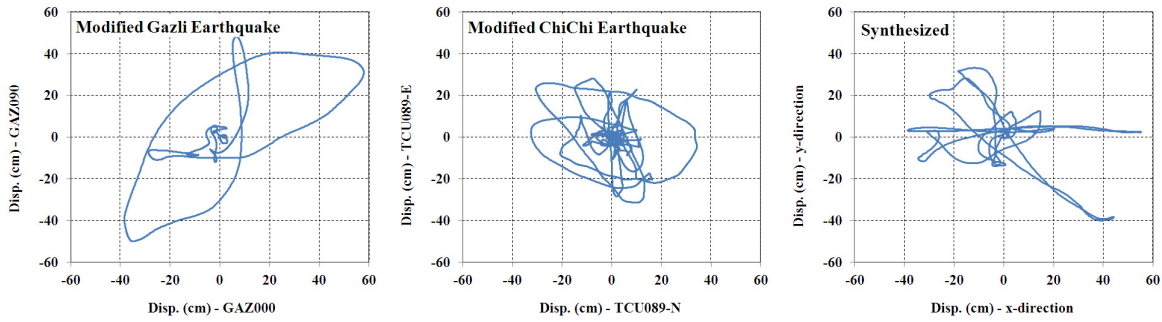


Fig. 7. Hodograms of horizontal displacement responses

Table 2. Distribution of displacement responses by 30 input ground motions

	Modified	Synthesized
Median Displacement (cm)	47.4	47.3
log-Stdev. (Displacement) ①	0.152	0.142
log-Stdev. (Sa at 0.33 Hz) ②	0.043	0.127
Ratio (① / ②)	3.52	1.11

각각에 대해서 응답의 변위를 평면상에 그리면 Fig. 7과 같다. 그림에서와 같이 변형된 지반운동에 대한 응답은 평면상에서 타원형 거동을 하지만 합성된 지반운동에 대한 응답은 양방향 지진이 완전 독립이기 때문에 일반적인 형태를 띄지 않는다.

Table 2는 30개 지진에 대한 변위 응답의 중간값(median)과 대수표준편차를 정리한 것이다. seed 지진으로부터 변형된 가속도시간이력을 입력 지진으로 한 것과 합성지진파를 입력지진으로 한 경우를 비교하였다. 각 방법에 따라서 응답 분포의 차이가 비선형 거동에 의해서 얼마나 달라지는지를 비교하기 위해서는 두 방법에 의한 탄성스펙트럼의 분포가 우선 일치되어야 한다. 그러나 목표 탄성스펙트럼으로의 수렴성이 각각 다르기 때문에 이를 일치시키기는 어렵다. 따라서 여기서는 탄성스펙트럼의 표준편차 대비 비탄성응답의 표준편차를 비교하는 방법을 택하였다. 탄성응답의 표준편차는 Fig. 4와 같이 면진구조의 유효주파수에 해당하는 0.33 Hz에서의 스펙트럴 가속도 값의 표준편차로 구하였다. 이에 대한 비탄성응답의 표준

편차 비는 Table 2에 정리되어 있다. 이를 보면, 두 방법 모두 변위 응답의 중간값은 유사하지만 탄성응답 편차 대비 비탄성응답의 편차가 변형된 시간이력을 사용한 경우 더 크다는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 기술한 바와 같이 변형된 시간이력의 경우 비정상과 특성과 같은 고유의 특성을 가지고 있기 때문에 입력지진에 따른 비선형 거동의 차이가 커지는 것으로 판단된다. 특히, 확률이 고려된 성능기반 평가 방법에서는 응답의 분포가 중요하기 때문에 합성지반운동을 이용하면 비선형 해석시 비보수적인 결과가 얻어질 가능성이 있다.

4.2 방향별 지진세기를 고려한 비탄성응답

4.2.1 양방향 입력지진 세기의 가정

일반적으로 수평 양방향 입력지진을 고려할 때는 두 방향의 지진 세기가 동일하다고 가정하고 설계한다. 그러나 실제 관측되는 지진동의 세기는 두 방향의 세기가 서로 다르다. 성능평가시 사용되는 UHR는 양방향의 지진 세기를 GeoMean 방법으로 하나의 대푯값으로 바꾸어 구한 것이다. GeoMean 방법에서는 Fig. 8과 같이 가장 센 방향을 최대축으로 하고 그에 수직하는 방향을 최소축이라고 했을 때 대푯값을 식 (2)와 같이 두 값을 곱해서 제곱근을 취한다. 따라서 해당부지의 UHR로부터 거꾸로 양방향 입력지진을 만든다면 각 방향의 지진 세기를 달리하는 것이 현실적이다.

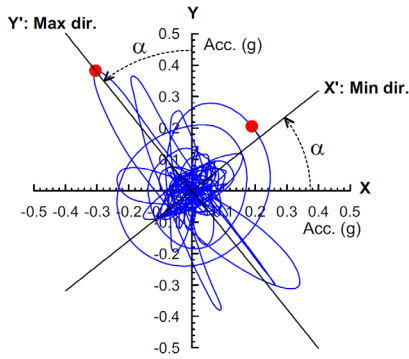


Fig. 8. Horizontal direction in GeoMean method[13]

$$Sa_{fi} = \sqrt{Sa_{fi,max} Sa_{fi,min}} \quad (2)$$

즉, GeoMean에 대하여 센 방향의 지진 세기 비(F_h)를 알면 최대축 방향의 지진세기는 F_h 배이고 최소축 방향의 지진세기는 $1/F_h$ 로 가정할 수 있다. Huang et al.[13]은 F_h 를 확률변수로 가정하였으며, 실제 계측지진의 통계를 구하여 그 값을 구하였다. 여기서 구해진 F_h 의 중간값(θ)은 1.3이고 표준편차(β)는 0.13이다. 이를 적용하여 30개의 양방향 지반운동 세기를 보정하기 위해 Latin Hypercube Sampling (LHS) 기법으로 30개의 F_h 를 샘플링 하고, 한 쌍에 대해서 한 쪽 방향으로는 F_h 로 증폭시키고 다른 수직한 방향으로는 $1/F_h$ 로 증폭시켜 GeoMean 값은 1배가 되도록 유지하면서 방향별 크기가 고려된 양방향 입력지반운동으로 변환하였다. 이들 변환된 가속도 시간이력에 대한 탄성응답스펙트럼은 Fig. 9와 같다.

이들로부터 양방향 지진입력에 의한 면진구조의 변위 응답을 계산하였다. 면진장치의 경우 최대변위는 시간축에서 동시에 발생한 양방향 변위의

Table 3. Medians and standard deviations of displacement responses excited by GeoMean ground motions and Max-Min ground motions

Displacement (cm)		x-dir	y-dir	SRSS
GeoMean Spectrum	Median	47.4	46.4	56.8
	log-Stdev.	0.152	0.160	0.156
Max-Min Spectrum	Median	71.7	30.3	74.5
	log-Stdev.	0.211	0.319	0.179
Ratio (Max-Min/GeoMean)	Median	1.51	0.65	1.31
	log-Stdev.	1.39	1.99	1.15

SRSS(Square Root of Sum of Square)에 대한 최대값으로 계산 될 수 있다. 이렇게 얻어진 최대변위의 중간값과 대수표준편차는 Table 3에 정리되어 있다. GeoMean 스펙트럼은 양방향 세기가 동일하다고 가정하고 구해진 값이고 Max-Min 스펙트럼은 양방향 세기의 차이를 앞서 기술한 방법으로 고려한 것이다. 그리고 이 두 개의 비를 표 하단에 기술하였다. SRSS로 계산되는 면진장치 응답의 최대값은 최대축에 대한 응답의 최대값에 근접한다. GeoMean 스펙트럼의 방향별 최대값은 차이가 없으므로 SRSS값을 지배하는 방향이 없지만 Max-Min 스펙트럼은 방향별 세기가 다르므로 SRSS 값이 최대축의 변위 응답 최대값에 영향을 받는다. 따라서 두 값을 비교하면 방향성을 고려한 경우가 약 30%의 변위 응답 증가가 있었다. 그리고 방향성을 고려한 경우 변위 응답의 분포에 대한 표준편차 또한 약 15% 증가하는 것을 알 수 있다. 즉 양방향 지진의 세기를 고려하거나 안한 경우 모두 동일한 GeoMean을 만족하지만 방향별 지진 세기의 차이가 고려된 스펙트럼에 의한 결과가 중간값뿐만 아니라 분포도 키치게 된다. 이는 성능 기반 평가시 큰 차이를 보일 수 있으므로 양방향 세기의 고려하는 것이 현실적인지에 대해 보다 깊은 고찰이 필요하다.

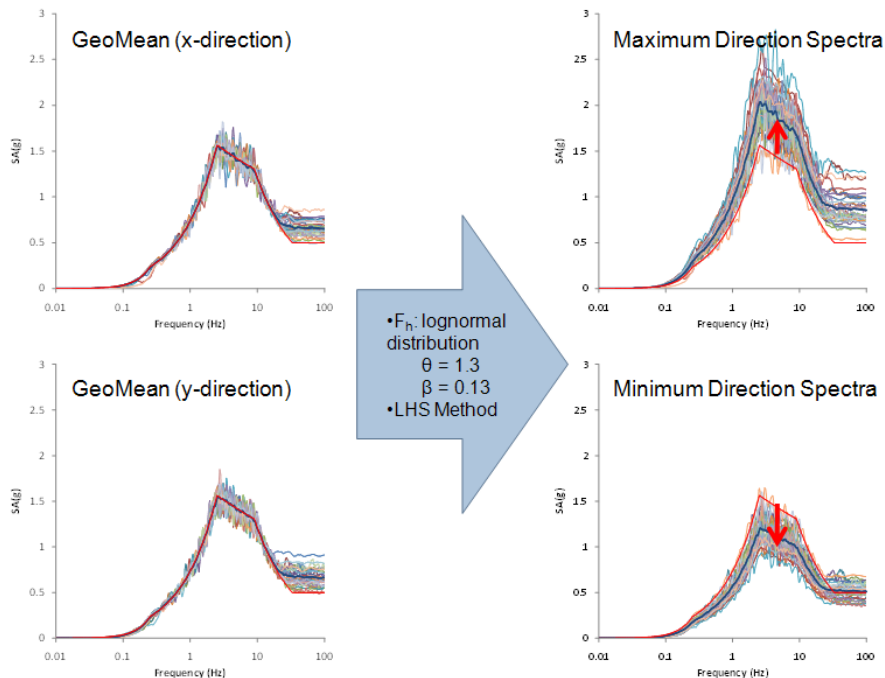


Fig. 9. Horizontal response spectra considering the ratio of maximum and minimum directions to the GeoMean

5. 결론

이 연구에서는 지진응답 시간이력 해석을 위해 계측지진을 목표 응답스펙트럼에 적합하도록 변형하는 방법으로 입력 지반운동 시간이력을 작성하였다. 이를 이용하여 면진장치와 같은 비선형 거동을 보이는 구조에 대해서 지진응답을 평가하였고 일반적으로 사용되는 추계학적 인공지진 시간이력에 의한 결과와도 비교하였다. 그 결과 비탄성 변위응답의 중간값은 시간이력 작성 방법에 따른 거의 차이가 없었으나, 탄성응답의 변동폭 대비 비탄성응답의 변동폭은 계측지진을 변형한 입력지진에 대해서 더 크게 나타났다. 이는 계측 지진을 변형시키는 방법이 비정상파 특성이나 지속시간 등 탄성응답스펙트럼에서는 잘 보여지지 않는 다양한 지진파 특성이 비탄성응답에는 반영되기 때문으로 추정된다. 특히 성능기반 평가법에서는 응답의 확률적인 분포 특성이 중요하기 때문에 이 방법을 적용하는 것이 보다 합리적이라 생각된다. 그러나 이 연구에서는 특정 예제에 대해서만 수행되었기 때문에 일반적인 현상을 말하기에는 한계가 있으며 다양한 비선형 파라미터를 가지는 구조물 및 여러 주파수 대역에 대해서 보다 세밀한 분석이 필요하다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2011T100200080)

/ REFERENCES /

1. ASCE 43-05, Seismic Design Criteria for Structures, Systems, and Components in Nuclear Facilities: American Society of Civil Engineers;c2005, 81 p.
2. Hancock J, Watson-Lamprey J, Abrahamson NA, Bommer JJ, Markatis A, McCoy E, Mendis R. An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets. *Journal of Earthquake Engineering*. 2006;10(S1): 67-89.

3. Spears RE, Unique Method for Generating Design Earthquake Time Histories, ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, INI/CON-08-13815;2008 Jul.
4. Mukherjee S, Gupta VK, Wavelet-based Generation of Spectrum-compatible Time-histories, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002 Oct;22(9-12):799-804.
5. Giaralisa A, Spanos PD, Wavelet-based Response Spectrum Compatible Synthesis of Accelerograms - Eurocode Application (EC8), *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009 Jan;29(1): 219-235.
6. Suárez LE, Montejo LA, Generation of Artificial Earthquakes via the Wavelet Transform, *International Journal of Solids and Structures*, 2005 Oct;42(21-22): 5905-5919.
7. Legrue J, Menu C, Simulation of Nonstationary Ground Motions Using Wavelets, 13th World Conference on Earthquake Engineering, 2004 Aug 1-6: Paper No. 296.
8. USNRC, A Performance-Based Approach to Define the Site-Specific Earthquake Ground Motion: Regulatory Guide, 1.208: U.S Nuclear Regulatory Commission; 2007 Mar. 24 p.
9. ASCE 4-98, Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary; American Society of Civil Engineers;c2000, 118 p.
10. USNRC, NUREG-0800, Standard Review Plan, Section 3.7.1 Seismic Design Parameters: U.S Nuclear Regulatory Commission, 2007 Mar.
11. USNRC, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants: Regulatory Guide, 1.60: U.S Nuclear Regulatory Commission; 1973 Dec. 6 p.
12. Nie J, Xu J, Costantino C, P-CARES: Probabilistic Computer Analysis for Rapid Evaluation of Structures: NUREG/CR-6922, Washington DC: U.S Nuclear Regulatory Commission; 2007 Jan, 158 p.
13. Huang Y, Whittaker AS, Kennedy RP, Mayes RL, Assessment of Base-Isolated Nuclear Structures for Design and Beyond-Design Basis Earthquake Shaking: Technical Report MCEER-09-0008: MCEER ;2009 Aug. 136 p.