

# 면진 원전구조물의 전도거동과 면진시스템 특성에 대한 샘플링 기법이 정지거리에 미치는 영향

## Effect of Rocking Behavior of Isolated Nuclear Structures and Sampling Technique for Isolation-System Properties on Clearance-to-stop

한민수<sup>1)</sup> · 홍기중<sup>1)\*</sup> · 조성국<sup>2)</sup>

Han, Min Soo<sup>1)</sup> · Hong, Kee Jeung<sup>1)\*</sup> · Cho, Sung Gook<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>국민대학교 건설시스템공학과, <sup>2)</sup>이노스기술(주)

<sup>1)</sup>Department of Civil Engineering, Kookmin University, <sup>2)</sup>R&D Center, Innose Tech Co. Ltd.

### / A B S T R A C T /

ASCE 4 requires that a hard stop be built around the seismic isolation system in nuclear power plants. In order to maintain the function of the isolation system, this hard stop is required to have clearance-to-stop, which should be no less than the 90th-percentile displacements for 150% Design Basis Earthquake (DBE) shaking. Huang et al. calculated clearance-to-stop by using a Latin Hypercube Sampling technique, without considering the rocking behavior of the isolated structure. This paper investigates the effects on estimation of clearance-to-stop due to 1) rocking behavior of the isolated structure and 2) sampling technique for considering the uncertainties of isolation system. This paper explains the simplified analysis model to consider the rocking behavior of the isolated structure, and the input earthquakes recorded at Diablo Canyon in the western United States. In order to more accurately approximate the distribution tail of the horizontal displacement in the isolated structure, a modified Latin Hypercube Sampling technique is proposed, and then this technique was applied to consider the uncertainty of the isolation system. Through the use of this technique, it was found that rocking behavior has no significant effect on horizontal displacement (and thus clearance-to-stop) of the isolated structure, and the modified Latin Hypercube Sampling technique more accurately approximates the distribution tail of the horizontal displacement than the existing Latin Hypercube Sampling technique.

**Key words:** Nuclear structure, Isolation, Clearance-to-stop, Rocking, Sampling technique

## 1. 서론

원자력발전소와 같은 중요도가 높은 구조물은 다른 구조물에 비해 지진에 대해 보다 높은 안전성 확보를 목표로 한다. 원전구조물의 안전성 확보를 위하여 원전시설물의 비허용성능 발생의 사건 시나리오를 가정하여, 지진 확률위험도평가(Seismic Probabilistic Risk Assessment, SPRA)와 같은 확률이론 기반의 설계를 통해 목표성능(performance goal)을 만족하도록 요구되어지고 있다. ASCE 4[1]에서는 지진확률위험도 성능목표를 제시하고 있으며, 또한 이를 대체할 수 있는 두 가지 성능 목표(performance objective)를 다음과 같이 제시하고 있다. 100% 설계기준지진(Design Basis

Earthquake, DBE)에 대해 99% 이상의 신뢰도로, 150% DBE (Beyond DBE, BDBE)에 대해 90% 이상의 신뢰도로 성능을 유지해야 한다.

미국 American Society of Civil Engineering (ASCE)에서는 면진장치를 원전 구조물에 적용하기 위한 기준을 개발하고 있다[1]. ASCE 4[1]에서는 면진시스템의 기능수행을 위해 면진시스템 주변에 충분한 정지거리를 갖는 정지체를 구축하도록 요구한다. 이 정지거리의 산정을 위해 ASCE 4[1]에서 제시하고 있는 두 가지 대체요건을 적용하여야 한다. 더불어 Huang et al.[2]의 연구에 따르면 150% DBE에 대한 90%-ile 변위가 100% DBE에 대한 99%-ile 변위보다 크게 나오는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 ASCE 4[1]에서는 150% DBE에 대한 90%-ile 변위를 정지거리로 요구한다.

지진 시 Fig. 1과 같은 면진 원전구조물에서, 큰 강성을 갖는 면진시스템 상부구조물은 기본적으로 선형거동을 하지만, 면진장치에서의 비선형거동에 의해 상당한 수평변위가 발생하게 된다. 그러므로 비선형 응답-이력해

\*Corresponding author: Hong, Kee Jeung

E-mail: kjhong@kookmin.ac.kr

(Received July 17, 2015; Revised October 2, 2015; Accepted October 5, 2015)

석을 통해 구조물의 비선형 거동을 충분히 고려해 줄 필요가 있다. 면진 원전구조물 변위의 불확실성을 고려하기 위해, 샘플링 된 면진구조물에 대한 비선형 응답이력해석을 수행한다. 이를 통해 면진 원전구조물의 수평변위에 대한 확률분포를 구하여, DBE에 대해 99%-ile, BDBE에 대해 90%-ile 변위를 구할 수 있다.

Huang et al.[2]에 의해 선행된 연구에서는 Fig. 2와 같이 면진시스템의 비선형 거동을 bilinear 모델로 고려하고, 면진시스템 상부구조물의 질량을 한 점에 집중시킨 3자유도의 단순화된 모델을 사용하여 두 수평 변위 및 수직 변위를 계산하고 있다. 면진장치를 구성하고 있는 고무패드의 영향으로 면진장치의 수직강성이 비면진 구조물에 비해 상당히 작게 되므로, Fig. 3과 같이 면진 원전구조물의 전도(rocking behavior) 현상이 발생할 수 있다. 또한 이 기존 연구는 면진 원전구조물 변위의 불확실성을 고려하기 위해 Latin Hypercube Sampling (LHS) 기법을 사용하고 있다. 이 기법은 Monte Carlo Simulation에 비해 해석 양을 줄여준다는 장점이 있는 반면, 표본(Sample)들이 대체로 평균 주변에 집중되어 있어 확률분포의 꼬리부

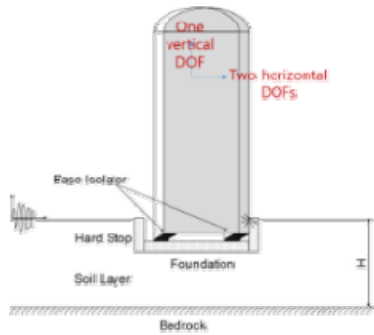


Fig. 1. Horizontal displacement of isolated structure

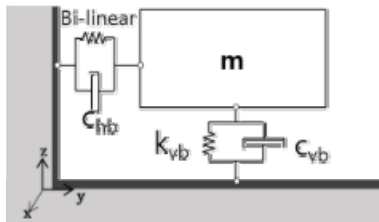


Fig. 2. System with a mass lumped at one point

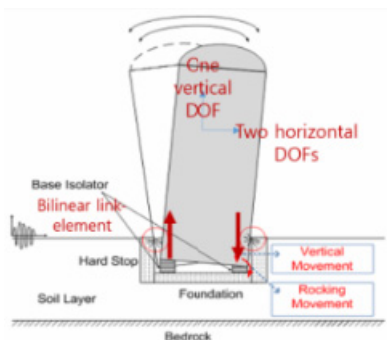


Fig. 3. Failure mode of isolated nuclear structure by rocking behavior

분을 추정하는 데 한계가 있다.

본 논문에서는 앞서 언급한 1) 면진 원전구조물의 전도거동이 정지거리 계산 결과에 미치는 영향을 검토하고자 한다. 확률론적 설계기법을 통한 원전 구조물의 설계를 요구하고 있으나, 원전구조물의 설계 성능목표에 대한 확률론적 만족 여부를 평가하는 기법은 정착되어 있지 않은 상황이다. 확률 분포를 정확히 추정하기 위한 표본 개수와 표본 추출 방법을 합리적으로 수립하기 위해 2) 면진시스템 특성의 불확실성을 고려하기 위한 샘플링기법이 이들 변위 계산 결과에 미치는 영향을 검토하고자 한다. 면진 원전구조물의 전도거동을 고려하기 위해서 사용한 단순 모델에 대해 2절에서 설명하고, 이 모델에 적용한 미국 서부지역 Diablo Canyon 원전 부지의 입력지진에 대해 3절에서 설명한다. 확률분포 꼬리부분의 영향을 더 정확하게 고려하기 위해 수정된 LHS 기법을 4절에서 제안한다. 이에 대한 해석 결과를 5절에 정리한다.

## 2. 면진 원전구조물의 단순화 모델

Fig. 3과 같이 구조물의 전도가 발생하는 경우 전도로 인해 원전 구조물의 정지체(Hard Stop) 충돌이 더 쉽게 발생할 수 있다. 전도를 고려하지 않는 경우 산정된 정지거리에 비해, 전도를 고려하는 경우 산정된 정지거리가 더 클 가능성이 있으므로 이에 대한 검토가 필요하다. 본 논문에서는 선행된 Huang et al.[2] 연구에서 사용한 Fig. 2와 같은 모델을 이용하여 해석하고, Fig. 4와 같이 구조물 전도를 고려한 모델을 이용하여 해석한다. 이 해석 결과들을 서로 비교하여 본 연구의 해석 절차를 검증한다. 또한 전도를 고려하였을 경우에도 기존 연구에서와 같이 150% DBE에 대한 90%-ile 변위가 100% DEB에 대한 99%-ile 변위보다 더 크게 나오는지 확인한다.

### 2.1 전도거동이 발생하는 단순화 모델

면진 원전구조물의 모델링은 SASSI software manual[3] 예제를 참고하고 있다. 여기서, 원전 격납건물의 내부 기계 설비는 제외한 구조물의 외벽만을 해석 대상으로 포함시킨다. Fig. 5는 원전 격납건물과 그 구조물을 12개의 lumped-mass로 단순화시킨 beam-stick model을 나타내고 있고, Table 1은 12개 절점에서의 beam-stick model의 정보를 나타내고 있다.

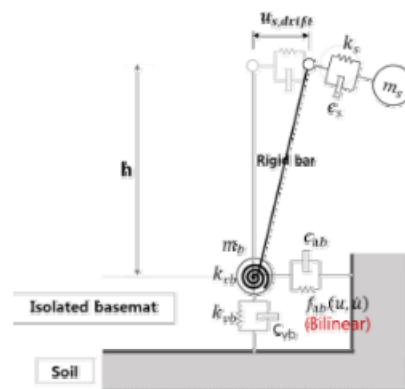


Fig. 4. Simplified model for considering rocking behavior

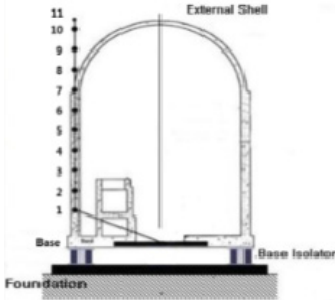


Fig. 5. Nuclear structure in SASSI example [3]

Table 1. Information of beam-stick model in SASSI example [3]

Mass No.	Mass (ton)	Area (m <sup>2</sup> )	Shear Area(m <sup>2</sup> )	Moment of Inertia(cm <sup>4</sup> )
base	9071	130	65.0	24.1
1	20865	130	65.0	24.1
2	1905	130	65.0	24.1
3	1905	130	65.0	24.1
4	1905	130	65.0	24.1
5	1905	130	65.0	24.1
6	1905	130	65.0	24.1
7	2091	130	65.0	24.1
8	1369	92	46.5	16.4
9	1120	92	46.5	12.9
10	961	92	46.5	6.9
11	86	92	46.5	1.7

본 논문에서 사용한 해석 모델은 SASSI software manual[3]의 12개의 lumped-mass로 단순화 시킨 beam-stick model에서 해석 시간의 단축을 위해 Fig. 4와 같이 2개의 lumped-mass로 더욱 단순화 시킨 모델을 사용한다. 이를 위해 기존 12개 lumped-mass를 갖는 beam-stick model의 하부 지점을 고정단으로 가정하여 모드해석을 수행한다. 모드 해석 결과 1차 모드의 고유진동수( $f_s$ ) 5.34Hz를 산출하였다. Chopra[4]를 참고한 식 (1)~(5) 과정을 거쳐 전도 모드의 모드질량과 모드높이를 산출한다. 계산 결과 구조물의 모드질량( $m_s$ )은  $3.6 \times 10^7$  kg, 바닥판의 질량( $m_b$ )  $9.07 \times 10^6$  kg, 모드높이( $h$ ) 19.36 m를 산출할 수 있다.

$$L_n^h = \sum_{j=1}^N m_j \theta_{jn} \quad (1)$$

$$M_n = \sum_{j=1}^N m_j \theta_{jn}^2 \quad (2)$$

$$L_n^\theta = \sum_{j=1}^N h_j m_j \theta_{jn} \quad (3)$$

$$m_s = \frac{(L_n^h)^2}{M_n} \quad (4)$$

$$h = \frac{L_n^\theta}{L_n^h} \quad (5)$$

여기서,  $m_j$ 는 j-th floor에서의 질량을,  $h_j$ 는 j-th floor의 높이를 나타낸다.  $\theta_{jn}$ 은 n번째 모드에서 j-th floor의 응답을 나타낸다. 또한 앞서 구한 1차 모드의 고유진동수로부터 식 (6), (7)을 이용하여 구조물의 강성( $k_s$ ) 및 감쇠계수( $c_s$ )를 산출한다.

$$k_s = m_s (2\pi f_s)^2 \quad (6)$$

$$c_s = 2m_s \zeta_s (2\pi f_s) \quad (7)$$

계산 결과 구조물의 강성( $k_s$ )  $4.38 \times 10^{10}$  N/m와 감쇠계수( $c_s$ )  $5.02 \times 10^7$ 를 산출할 수 있다. Fig. 4에서,  $u_{s,drift}$ 는 바닥판에 대한 구조물 모드질량의 상대변위,  $k_{rb}$  및  $k_{rb}$ 는 각각 면진시스템의 수직강성 및 전도강성,  $f_{hb}(u, \dot{u})$ 는 면진시스템의 비선형 복원력을 나타내고 있다.

## 2.2 면진시스템의 역학적 성질

면진장치는 elastomeric bearing 과 sliding bearing 두 종류가 있다. 이 논문에서는 elastomeric bearing의 한 종류인 납면진받침(Lead-Rubber isolation system, LR)만을 고려하고 있다. Huang et al.[2] 연구에서는 Fig. 5에서 정의한 면진시스템의 비선형 복원력( $f_{hb}(u, \dot{u})$ )을 Fig. 6과 같이 bilinear 모델로 나타내고 있고, 이 모델은 이차 수평강성( $K_d$ ), 항복강도( $f_y$ ), 항복변위( $u_y$ )로 정의된다. 항복강도는 비선형구간 직선의 y절편( $Q_d$ )으로 대체하여 표현할 수 있으므로, 이 연구에서는 이차 수평강성, 비선형구간 직선의 y절편, 항복변위로 Fig. 6의 bilinear 모델을 정의할 수 있다. 면진시스템은 수평변위가 25 mm에 도달할 때 언제나 항복하는 것으로 가정하고 있다. Huang et al.[2]는 3 가지의 서로 다른  $Q_d$ 와 3 가지의 서로 다른  $K_d$ 를 갖는 면진시스템을 조합하여 총 9가지의 면진시스템을 고려한다.

구조물의 전도거동을 표현하기 위해 Fig. 4에 보인 바와 같이 바닥판의 전도 스프링계수( $K_{rb}$ )를 사용한다. 전도 스프링계수는 바닥판에 설치되는 면진장치의 개수 및 배치 형상을 토대로 계산된다. 예를 들어, 면진시스템의 상부하중이 등분포라 가정하고 바닥판의 휨강성이 매우 커서 강체 회전 거동한다고 가정한다면, Fig. 7과 같이 동일한 수직강성을 갖는 면진장치 n 개가 동일한 면적을 부담하도록 배치하면 구조물의 전도가 발생하였을 때 Fig. 8과 같이 면진장치의 위치에 따라 발생하는 변위를 쉽게 계산할 수 있다. n개의 면진장치가 구조물의 전도에 의해 한 일은 하나의 등가 전도 스프링이 한 일과 같다는 에너지보존법칙을 이용하여, 등가 전도 스프링계수를

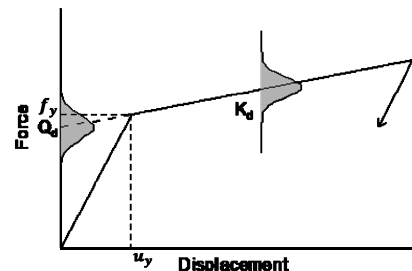


Fig. 6. Variations in properties of isolation system

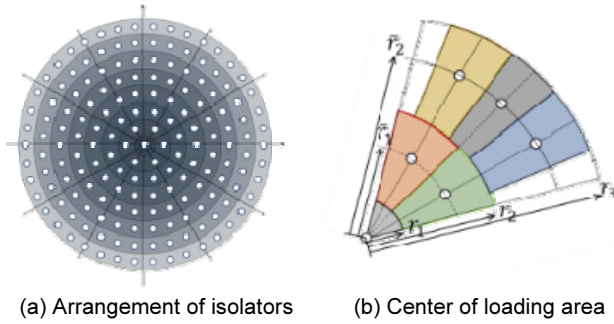


Fig. 7. Location and loading area of each isolator

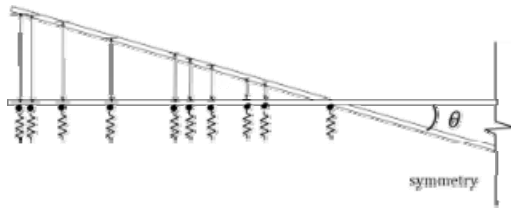


Fig. 8. Displacement of vertical spring for rocking behavior

아래 식 (8)과 (9)를 이용하여 구할 수 있다. 또한 식 (10), (11)을 통해 구조물 전체의 전도관성모멘트( $I_\theta$ )는 상부구조물의 전도관성모멘트( $I_s$ )와 바닥판의 전도관성모멘트( $I_b$ )의 합으로 구할 수 있다.

$$\frac{1}{2} k_{r,b} \theta^2 = \sum_{all} \frac{1}{2} k_{v,i} u_{v,i}^2 \quad (8)$$

$$k_{r,b} = \frac{\sum_{all} k_{v,i} u_{v,i}^2}{\theta^2} \quad (9)$$

$$I_s = m_s h^2 \quad (10)$$

$$I_b = \int r^2 dm = \frac{1}{4} \rho t r^4 \pi \quad (11)$$

$$T_r = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{k_{r,b}}{I_s + I_\theta}}} \quad (12)$$

여기서,  $k_{r,b}$ 는 면진시스템의 전도강성이다.  $k_{v,i}$ 는  $i$  번째 면진장치치의 수직 강성으로 본 논문에서는 모든 면진장치가 동일한 수직강성  $k_v$ 을 갖는 것으로 가정한다.  $u_{v,i}$ 는  $i$  번째 면진장치치의 수직변위,  $\theta$ 는 바닥판의 전도회전각,  $\rho$ 와  $r$ 은 각각 바닥판의 밀도와 반지름,  $T_r$ 은 면진구조물의 전도주기이다.

169개의 면진장치치를 설치한 것으로 가정할 경우( $n=169$ ), 식(9)를 이용하여 구조물의 전도강성( $k_{r,b}$ )  $9.525 \times 10^{13} Nm$ 를 구할 수 있다. 또한 식(10)과(11)로 상부구조물의 전도관성모멘트( $I_s$ )  $1.349 \times 10^{10} Nmsec^2$ , 바닥판의 전도관성모멘트( $I_b$ )  $8.900 \times 10^8 Nmsec^2$ , 바닥판을 포함한 구조물의 전도관성모멘트( $I_\theta$ )  $1.438 \times 10^{10} Nmsec^2$ 를 각각 산출할 수 있다. 그러므로 식(12)에 의해 면진구조물의 전도주기( $T_r$ )는 0.07초이다. 그러므로 본 논문에서는 0.05초, 0.07초, 0.09초의 전도주기를 갖는 세 가지의 면진시스템을 고려한다. Table 2는 전도주기 세 가지(0.05초, 0.07초, 0.09초), 상부

Table 2. Key parameters for the LR isolation systems with rotational period

No.	Model name	$Q_d/W$	$T_d$ (sec)	$T_v$ (sec)	$T_r$ (sec)	$u_y$ (mm)
1	LR_T2Q3R5	0.03	2	0.05	0.05	25
2	LR_T2Q6R5	0.06	2	0.05	0.05	25
3	LR_T2Q9R5	0.09	2	0.05	0.05	25
4	LR_T3Q3R5	0.03	3	0.05	0.05	25
5	LR_T3Q6R5	0.06	3	0.05	0.05	25
6	LR_T3Q9R5	0.09	3	0.05	0.05	25
7	LR_T4Q3R5	0.03	4	0.05	0.05	25
8	LR_T4Q6R5	0.06	4	0.05	0.05	25
9	LR_T4Q9R5	0.09	4	0.05	0.05	25
10	LR_T2Q3R7	0.03	2	0.05	0.07	25
11	LR_T2Q6R7	0.06	2	0.05	0.07	25
12	LR_T2Q9R7	0.09	2	0.05	0.07	25
13	LR_T3Q3R7	0.03	3	0.05	0.07	25
14	LR_T3Q6R7	0.06	3	0.05	0.07	25
15	LR_T3Q9R7	0.09	3	0.05	0.07	25
16	LR_T4Q3R7	0.03	4	0.05	0.07	25
17	LR_T4Q6R7	0.06	4	0.05	0.07	25
18	LR_T4Q9R7	0.09	4	0.05	0.07	25
19	LR_T2Q3R9	0.03	2	0.05	0.09	25
20	LR_T2Q6R9	0.06	2	0.05	0.09	25
21	LR_T2Q9R9	0.09	2	0.05	0.09	25
22	LR_T3Q3R9	0.03	3	0.05	0.09	25
23	LR_T3Q6R9	0.06	3	0.05	0.09	25
24	LR_T3Q9R9	0.09	3	0.05	0.09	25
25	LR_T4Q3R9	0.03	4	0.05	0.09	25
26	LR_T4Q6R9	0.06	4	0.05	0.09	25
27	LR_T4Q9R9	0.09	4	0.05	0.09	25

중량에 대한  $Q_d$ 의 비 세 가지(0.03, 0.06, 0.09), 수평주기 세 가지(2초, 3초, 4초)로 조합된 총 27 가지의 최적추정된(best-estimated) 면진시스템의 역학적 성질들을 보여준다. 여기서, 최적추정된 모델이라 함은 면진시스템 역학적 성질들의 불확실성을 고려하지 않은 모델을 말한다.

Table 2에 따라 수평, 수직, 전도강성을 결정할 수 있으며, 수평, 수직, 전도방향에 대한 감쇠비를 각각 2%로 가정한다. 여기서, 수직강성, 수평이차 강성 및 전도강성을 사용하여 수직, 수평 및 전도거동의 감쇠계수를 각각 계산한다.

### 3. 입력지진파

#### 3.1 설계기준지진

장주기 지진파에 대한 면진장치치의 응답을 확인하기 위해, Table 3과 같이 미국 서부지역 Diablo Canyon 원전 부지의 입력지진파 30세트를 사용한다[2]. 여기서, 한 세트는 수평방향 두 개, 수직방향 한 개를 포함하고 있다.

RSPmatch를 이용하여 이 입력지진파들을 미국 원자력규제위원회

(USNRC)에서 제공하는 스펙트럼에 매치시킨 설계기준지진을 만든다. Fig. 9는 각 방향 별 지진 스펙트럼에 매치된 지진파 30세트의 스펙트럼을 보여준다. 이때, 두 수평방향 지진은 동일한 크기를 갖는다.

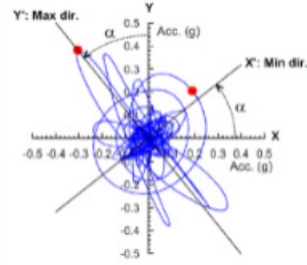


Fig. 10. Horizontal direction in GeoMean method

Table 3. Ground motions for the Diablo Canyon site

No.	Event	Station	Date
1	San Fernando	Lake Hughes #4	1971/02/09
2	San Fernando	Pacoima Dam (upper left)	1971/02/09
3	San Fernando	Pasadena	1971/02/09
4	Tabas, Iran	Tabas	1978/09/16
5	Irpinia, Italy	Auletta	1980/11/23
6	Irpinia, Italy	Bagnoli Irpinio	1980/11/23
7	Irpinia, Italy	Bisaccia	1980/11/23
8	Irpinia, Italy	Sturno	1980/11/23
9	Loma Prieta	Gilroy - Gavilan Coll.	1989/10/18
10	Loma Prieta	Gilroy Array #1	1989/10/18
11	Loma Prieta	UCSC	1989/10/18
12	Loma Prieta	UCSC Lick Observatory	1989/10/18
13	Cape Mendocino	Petrolia	1992/04/25
14	Northridge	Burbank - Howard Rd.	1994/01/17
15	Northridge	Chalon Rd	1994/01/17
16	Northridge	Griffith Park Observatory	1994/01/17
17	Northridge	Wonderland Ave	1994/01/17
18	Northridge	LA 00	1994/01/17
19	Northridge	Lake Hughes #4	1994/01/17
20	Northridge	Pacoima Dam (downstr)	1994/01/17
21	Northridge	Pcoima Dam (upper left)	1994/01/17
22	Northridge	Santa Susana Ground	1994/01/17
23	Northridge	Vasquez Rocks Park	1994/01/17
24	Kocaeli, Turkey	Gebze	1999/08/17
25	Kocaeli, Turkey	Izmit	1999/08/17
26	Chi-Chi, Taiwan	TCU045	1999/09/20
27	Chi-Chi, Taiwan	TCU102	1999/09/20
28	Duzce, Turkey	Lamont 1060	1999/11/12
29	Manjil, Iran	Abbar	1990/06/20
30	Loma Prieta	Los Gatos - Lexington Dam	1989/10/18

### 3.2 최대-최소 스펙트럼 적합 지진운동

일반적으로 수평 양방향 입력지진을 고려할 때는 두 방향의 지진 세기가 동일하다고 가정하고 설계한다. 그러나 실제 관측되는 지진동의 세기는 두 방향의 세기가 서로 다르다. 성능평가 시 사용되는 등재해 응답스펙트럼 (uniform hazard response spectrum, UHRS)은 양방향의 지진 세기를 기하평균(GeoMean) 방법으로 하나의 대푯값으로 바꾸어 구한 것이다. 기하평균 방법에서는 Fig. 10과 같이 가장 센 방향인 최대축의 가속도 값( $S_{a_{f,max}}$ ) 과 그에 수직하는 방향인 최소축의 가속도 값( $S_{a_{f,min}}$ )을 식(13)과 같이 곱해서 그 제곱근을 대푯값으로 취한다. 따라서 해당부지의 UHRS로부터 거꾸로 양방향 입력지진을 만든다면 각 방향의 지진 세기를 달리하는 것이 현실 적이다[5]. 즉, 기하평균에 대하여 센 방향의 지진 세기 비( $F_h$ )를 알면 최대 축 방향의 지진세기는 기하평균의  $F_h$  배이고, 최소축 방향의 지진세기는  $1/F_h$  배로 가정한다[6].

$$S_{a_{fi}} = \sqrt{S_{a_{f,max}} \cdot S_{a_{f,min}}} \tag{13}$$

### 4. Latin Hypercube 표본법

Hunag et al.[2]은 면진시스템의 역학적 성질에 대한 불확실성 및 지진 파에 대한 불확실성을 고려하기 위해 LHS 기법을 도입하고 있다. LHS는 평균이  $\mu$ 이고 표준편차가  $\sigma$ 인 정규확률 밀도함수의 총 면적을 각각  $n$ 개의 동일한 면적으로 나누고, 각 면적의 중간값(midpoint)  $n$ 개를 산출하여  $n$ 개의 표본을 구성하도록 사용한다.

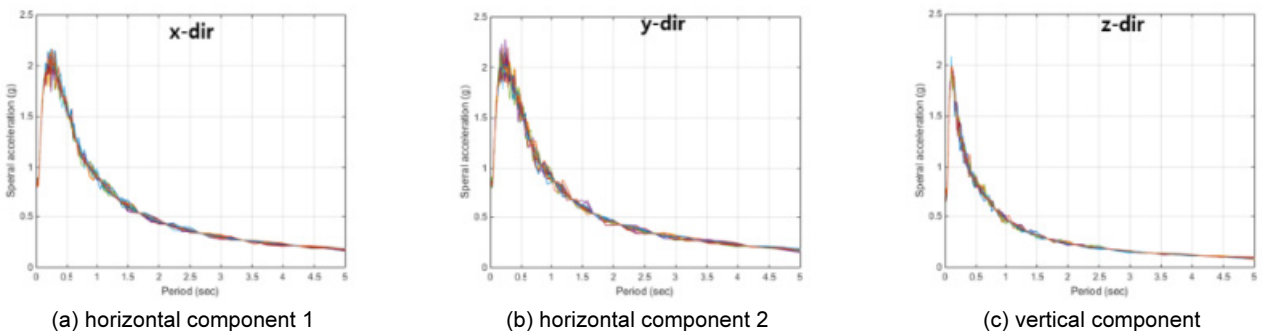


Fig.9. Five-percent damped response spectra of the 30sets of DBE spectrum-compatible ground motions for the Diablo Canyon site

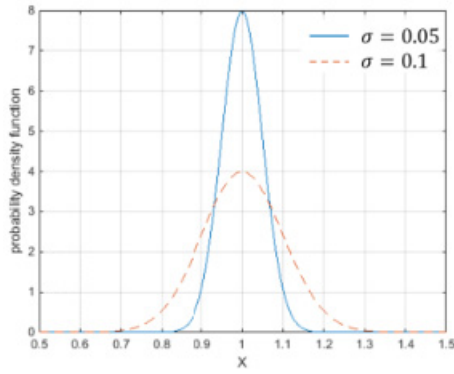


Fig. 11. Normal distributions with a mean of 1 and standard deviations of 0.05 and 0.1

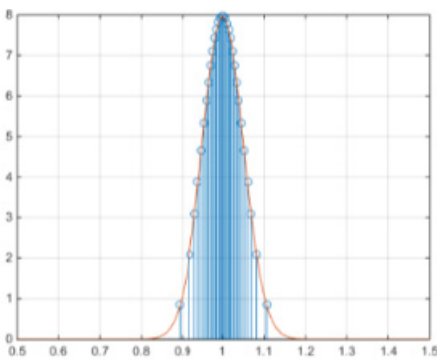


Fig. 12. Latin Hypbercube Sampling with a mean of 1 and standard deviations of 0.05 and 0.1

4.1 면진시스템의 불확실성

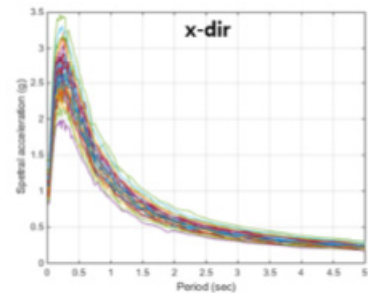
면진장치의 생산 과정에서 발생하는 불확실성에 의해 면진장치의 역학적 성질에 확률 분포가 나타난다. 이러한 불확실성을 고려하기 위해 다음과 같이 품질관리가 탁월한(Excellent) 경우와 좋음(Good) 두 경우를 고려한다. Fig. 11과 같이 평균이 1이고 표준편차가 ±10% 구간에 95% 신뢰도를 갖는 경우를 탁월한 품질 분포(표준편차 0.05), ±20% 구간에 95% 신뢰도를 갖는 경우를 좋은 품질 분포(표준편차 0.1)의 두 정규분포로 가정하고 있다. 이 두 분포를 2.2절에서 생성한 27개 최적모델의 역학적 성질 ( $Q_d, K_d, K_v, K_r$ )에 각각 적용하여, Fig. 12에 보인 바와 같이 LHS기법으로 30개의 표본 값을 갖는 면진시스템 해석모델을 만든다.

4.2 지진파의 불확실성

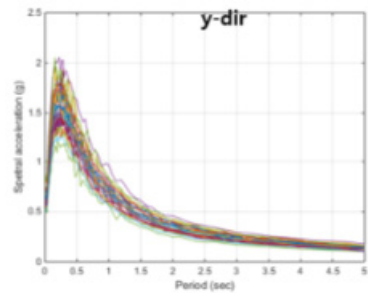
Huang et al.[6]은 기하평균에 대한 각 방향 지진입력 지진파의 비율  $F_h$  (수평방향)와  $F_v$  (수직방향)를 확률변수로 가정하고, 실제 계측지진의 통계를 구하여 그 값을 구할 수 있다. 여기서 구해진  $F_h$ 의 중앙값( $\theta$ )은 1.3이고 대수표준편차( $\beta$ )는 0.13이다. 이를 적용하여 30개의 양방향 지반운동 세기를 보정하기 위해 LHS 기법으로 30개의  $F_h$ 를 샘플링하고, 한쌍에 대해서 한 쪽방향으로는 기하평균의  $F_h$  배로 증폭시키고 다른 수직방향으

로는  $1/F_h$  배로 증폭시켜 기하평균 값은 그대로 유지하면서 방향별 크기가 고려된 양방향 입력지반운동으로 변환할 수 있다.  $F_v$ 의 중앙값은 1.0, 대수 표준편차 0.18로 적용하여 같은 방법으로 변환한다. Huang et al.[2]는 각 방향에 대해 해당 분포와 LHS 기법을 사용하여  $F_h, F_v$ 로 구성된 30개의 표본 세트를 Table 3의 30개 입력지진파에 무작위로 적용하여, 30세트의 최대-최소 스펙트럼 적합 지진운동(Maximum-Minimum spectra compatible ground motion)을 만든다. Fig. 13은 위와 같은 방법으로 설계 기준지진을 최대-최소 스펙트럼 적합 지진운동으로 변환한 결과를 나타내고 있다.

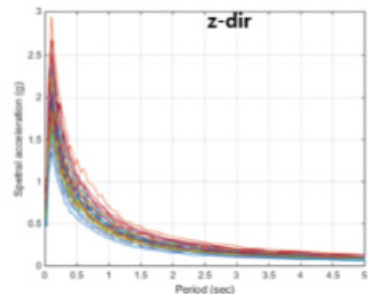
면진시스템과 입력지진의 불확실성이 지진 응답에 미치는 영향을 고려하기 위해 Table 4와 같이 총 네 세트로 나누어 그 해석 결과를 비교한다. 1) G0 - 최적 면진시스템 모델에 DBE(또는 BDBE) 스펙트럼 매칭된 지진(spectrum-compatible ground motions)을 적용, 2) M0 - 최적 면진시스템 모델에 DBE(또는 BDBE) 최대-최소 스펙트럼 적합 지진운동을 적용, 3) M1 - 매우 좋은 품질 관리된 면진시스템 모델에 DBE(또는 BDBE) 최대-최소 스펙트럼 적합 지진운동을 적용, 4) M2 - 좋은 품질 관리된 면진시스템 모델에 DBE(또는 BDBE) 최대-최소 스펙트럼 적합 지진운동을 적용



(a) horizontal component 1



(b) horizontal component 2

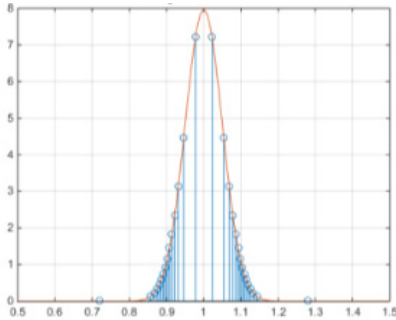


(c) vertical component

Fig. 13. Five-percent damped response spectra of the 30 sets of maximum-minimum DBE spectra-compatible ground motions for the Diablo Canyon site

**Table 4.** Analysis sets to consider uncertainty of isolators and ground motions

Set	Isolators		Ground motions		Total number of samplings
	Quality control	Number of samplings	Spectrum-compatibility	Number of samplings	
G0	Best-estimate	1	spectrum-compatible (Fig. 9)	30	30
M0	Best-estimate	1	maximum-minimum spectra-compatible (Fig. 11)	30	30
M1	Excellent control	30		30	900
M2	Good control	30		30	900



**Fig. 14.** Weighted Latin Hypercube Sampling with a mean of 1 and standard deviations of 0.05

[2]. 여기서 G0는 면진시스템의 불확실성이 고려되지 않고 스펙트럼 매치된 입력지진파만을 고려, M0는 면진시스템의 불확실성이 고려되지 않고 입력지진파의 방향성과 진폭의 불확실성을 고려, M1과 M2는 각각 매우 좋은 품질과 좋은 품질로 품질관리된 면진시스템의 불확실성이 고려되고 입력지진파의 방향성과 진폭의 불확실성을 고려한다.

### 4.3 기존 LHS 방법의 문제점 및 개선

정지거리는 100% DBE에 대한 99%-ile변위와 150% DBE에 대한 90%-ile변위로 계산한다. 변위확률분포의 꼬리부분을 더욱 정확히 추정할 수록 이들 변위를 더욱 정확히 계산할 수 있다. Huang et al.[2] 연구에서 사용된 LHS 기법은 표본이 평균에 집중되어 있어, 확률분포의 꼬리부분에 해당하는 99%(90%)-ile변위를 정확히 추정하는데 한계가 있다. 본 논문에서는 이와 같은 문제점을 보완하기 위해, 정규확률밀도함수의 총 면적을 가중치가 적용된 n개의 면적( $A_i$ )으로 나누어 평균과 멀어질수록 더 작은 면적으로 나누어지도록 하고 있다. 이를 통해 확률분포의 꼬리부분에 표본 개수가 더 많이 집중되도록 하고 있다. 이러한 샘플링(sampling) 기법을 가중치를 적용한 LHS(Weighted LHS, WLHS)라고 부르기로 한다. 이 논문에서 사용한 가중치는 식 (14)와 같다.

$$w_i = c/i^\alpha = A_i \tag{14}$$

여기서,  $\alpha$ 는 양의 실수이고,  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ 이 되도록 하기 위해  $c = \left[ \sum_{i=1}^n 1/i^\alpha \right]^{-1}$

로 정의한다. 가중치는 평균을 기준으로 양쪽으로 n/2개씩 대칭하게 적용한다. Fig. 14는  $\alpha=2$ 인 경우 WLHS 기법의 표본들을 나타내고 있다. 본 논문에서는 LHS 기법과 WLHS 기법을 적용하여 면진시스템 역학적 성질의 불확실성을 각각 고려하여 그 영향을 5.2절에 비교하고 있다.

## 5. 해석 결과

OpenSEES를 이용하여 비선형 응답이력해석을 수행하고 있다. 4.3절에서 언급한 각 해석 그룹의 표본 변위를 대수정규분포로 가정하여 다음과 같은 식 (15)와 (16)을 통해 중앙값( $\theta$ )과 대수표준편차( $\beta$ )를 추정한다.

$$\hat{\theta} = \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln y_i\right) \tag{15}$$

$$\hat{\beta} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln y_i - \ln \theta)^2} \tag{16}$$

여기서,  $\hat{\theta}$  와  $\hat{\beta}$ 는 각각 표본들의 중앙값과 대수표준편차를 나타내고, n은 표본들의 개수를 나타낸다.

### 5.1 전도 거동의 효과

앞서 언급한 것과 같이 구조물 전도거동의 영향을 확인하기 위해 Fig. 4와 같은 모델을 사용하고 있다. Table 5는 구조물의 전도를 고려하지 않을

**Table 5.** Result of Medians and logarithmic standard deviations of peak displacement for 100% DBE and 150% DBE

Model	100% DBE							
	median ( $\theta$ ) (mm)				logarithmic standard deviations ( $\beta$ )			
	G0	M0	M1	M2	G0	M0	M1	M2
LR_T2Q3	487	572	573	575	0.10	0.13	0.13	0.14
LR_T2Q6	401	473	472	472	0.14	0.21	0.20	0.21
LR_T2Q9	339	404	404	405	0.20	0.25	0.25	0.25
LR_T3Q3	643	775	775	776	0.15	0.18	0.18	0.18
LR_T3Q6	494	584	585	586	0.19	0.25	0.25	0.25
LR_T3Q9	403	472	473	473	0.20	0.28	0.28	0.28
LR_T4Q3	784	939	937	935	0.14	0.16	0.16	0.16
LR_T4Q6	526	641	641	642	0.20	0.24	0.24	0.25
LR_T4Q9	416	493	493	496	0.21	0.29	0.29	0.29
Model	150% DBE							
	median ( $\theta$ ) (mm)				logarithmic standard deviations ( $\beta$ )			
	G0	M0	M1	M2	G0	M0	M1	M2
LR_T2Q3	791	932	931	935	0.09	0.12	0.12	0.13
LR_T2Q6	678	796	796	798	0.12	0.16	0.16	0.17
LR_T2Q9	595	703	702	702	0.14	0.21	0.21	0.21
LR_T3Q3	1086	1300	1300	1303	0.12	0.16	0.16	0.16
LR_T3Q6	861	1039	1039	1041	0.18	0.22	0.22	0.22
LR_T3Q9	728	862	863	865	0.20	0.26	0.26	0.26
LR_T4Q3	1359	1620	1616	1616	0.13	0.14	0.14	0.14
LR_T4Q6	1011	1220	1219	1217	0.15	0.19	0.19	0.20
LR_T4Q9	779	952	951	951	0.19	0.24	0.24	0.25

**Table 6. Result of Medians Relative displacement ( $u_{s,drift}$ )**

Model		$\theta$ (mm) for 100% DBE				$\theta$ (mm) for 150% DBE			
		G0	M0	M1	M2	G0	M0	M1	M2
LR_T2Q3	R5	5.18	6.06	6.07	6.07	8.24	9.70	9.68	9.70
	R7	5.18	6.06	6.07	6.07	8.24	9.70	9.68	9.70
	R9	5.59	6.56	6.56	6.57	8.92	10.48	10.46	10.49
LR_T2Q6	R5	4.58	5.39	5.38	5.36	7.37	8.64	8.63	8.62
	R7	4.58	5.39	5.38	5.36	7.37	8.64	8.63	8.62
LR_T2Q9	R5	4.27	5.05	5.04	5.03	6.81	8.04	8.03	8.01
	R7	4.27	5.05	5.04	5.03	6.81	8.04	8.03	8.01
	R9	4.66	5.44	5.44	5.44	7.41	8.76	8.74	8.71
LR_T3Q3	R5	3.14	3.77	3.76	3.76	5.15	6.16	6.15	6.14
	R7	3.14	3.77	3.76	3.76	5.15	6.16	6.15	6.14
	R9	3.40	4.07	4.07	4.07	5.57	6.65	6.64	6.64
LR_T3Q6	R5	2.78	3.22	3.23	3.23	4.41	5.24	5.25	5.25
	R7	2.78	3.22	3.23	3.23	4.41	5.24	5.25	5.25
	R9	3.00	3.50	3.51	3.50	4.78	5.69	5.69	5.69
LR_T3Q9	R5	2.70	3.06	3.07	3.08	4.16	4.81	4.82	4.82
	R7	2.70	3.06	3.07	3.08	4.16	4.81	4.82	4.82
	R9	2.94	3.37	3.37	3.36	4.50	5.23	5.23	5.24
LR_T4Q3	R5	2.22	2.67	2.67	2.66	3.72	4.43	4.42	4.41
	R7	2.22	2.67	2.67	2.66	3.72	4.43	4.42	4.41
	R9	2.42	2.90	2.90	2.89	4.04	4.83	4.81	4.80
LR_T4Q6	R5	1.91	2.23	2.24	2.25	3.11	3.71	3.71	3.70
	R7	1.91	2.23	2.24	2.25	3.11	3.71	3.71	3.70
	R9	2.07	2.43	2.44	2.44	3.38	4.03	4.03	4.03
LR_T4Q9	R5	1.97	2.22	2.23	2.24	2.88	3.38	3.38	3.38
	R7	1.97	2.22	2.23	2.24	2.88	3.38	3.38	3.38
	R9	2.16	2.43	2.44	2.45	3.11	3.67	3.68	3.69

경우 바닥판 질량( $m_b$ ) 최외변위의 중앙값과 대수표준편차를 나타내고 있다. 이 결과는 Huang et al.[2]의 Fig. 2와 같은 모델의 응답과 완전히 일치하므로 본 해석이 적절히 수행되었음을 확인할 수 있다. 또한 Table 6에서 바닥판에 대한 구조물 모드질량( $m_s$ ) 최고상대변위( $u_{s,drift}$ )의 중앙값을 나타내고 있다. 이 결과를 통해 바닥판에 발생하는 변위에 비해 구조물의 모드질량에 발생하는 변위가 상당히 작은 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 동일한 질량 및 회전관성에 대해 전도주기(0.05~0.09초)가 수평주기(2~4초)에 비해 상당히 작기 때문에 수치해석을 통하지 않더라도 전도거동이 정지 거리에 미치는 영향이 작을 것임을 예상할 수 있다. 하지만 전도거동 발생에 의해 증가하는 수직하중이 면진장치의 파괴확률에 미치는 영향을 파악하는 기초자료가 될 수 있기 때문에 수치해석을 통해 전도거동을 정량화하여 평가할 필요가 있다.

**5.2 샘플링 방법의 효과**

Huang et al.[2]의 연구에서 사용한 Fig. 2와 같은 모델에 LHS와 WLHS 기법을 적용하여 그 결과를 비교하고 있다. Table 7은 LHS와 WLHS 기법으로 구한 M0/G0, M1/M0과 M2/M1의 최외변위 중앙값의 비를 각각 나타내고 있다. 여기서, M0와 G0는 모두 면진시스템 역학적 성질의 불확실성을 고려하지 않고, 반면 M0는 입력지진 불확실성의 영향을 고려하고 G0는 고려하지 않는다. 그러므로 두 해석 그룹의 비교를 통해 입력지진 불확실성의 영향을 확인할 수 있다. M1과 M0는 모두 입력지진 불확실성의 영향을 고려하고, 반면 M1은 면진시스템 역학적 성질의 불확실

성을 고려하고 M0는 고려하지 않는다. 그러므로 두 해석 그룹의 비교를 통해 면진시스템 역학적 성질 불확실성의 영향을 확인할 수 있다. 마지막으로 M2와 M1은 모두 입력지진 불확실성의 영향을 고려하고, 반면 M1은 탁월

**Table 7. Ratio of displacement of peak displacement for G0, M0, M1 and M2 of LHS & WLHS**

Model	median ( $\theta$ ) for 100% DBE (mm)					
	M0/G0		M1/M0		M2/M1	
	LHS	WLHS	LHS	WLHS	LHS	WLHS
LR_T2Q3	1.17	1.17	1.00	1.01	1.01	1.00
LR_T2Q6	1.18	1.18	1.00	1.00	1.00	1.00
LR_T2Q9	1.19	1.19	1.00	1.00	1.00	1.00
LR_T3Q3	1.20	1.20	1.00	1.00	1.00	1.00
LR_T3Q6	1.18	1.18	1.00	1.00	1.00	1.00
LR_T3Q9	1.17	1.17	1.00	1.01	1.00	0.99
LR_T4Q3	1.20	1.20	1.00	0.99	1.00	1.00
LR_T4Q6	1.22	1.22	1.00	1.00	1.00	1.00
LR_T4Q9	1.18	1.18	1.00	1.01	1.00	0.99
Model	median ( $\theta$ ) for 150% DBE (mm)					
	M0/G0		M1/M0		M2/M1	
	LHS	WLHS	LHS	WLHS	LHS	WLHS
LR_T2Q3	1.18	1.18	1.00	1.01	1.00	1.00
LR_T2Q6	1.17	1.17	1.00	1.00	1.00	1.00
LR_T2Q9	1.18	1.18	1.00	1.00	1.00	1.00
LR_T3Q3	1.20	1.20	1.00	1.00	1.00	1.00
LR_T3Q6	1.21	1.21	1.00	1.00	1.00	1.00
LR_T3Q9	1.18	1.18	1.00	1.00	1.00	1.00
LR_T4Q3	1.19	1.19	1.00	1.00	1.00	1.00
LR_T4Q6	1.21	1.21	1.00	1.00	1.00	1.00
LR_T4Q9	1.22	1.22	1.00	1.00	1.00	1.00

**Table 8. Result of 99%(90%)-ile displacement for M1 and M2 of LHS & WLHS**

Model	99%-ile displ. for 100% DBE (mm)					
	M1			M2		
	①LHS	②WLHS	(②-①)/①	①LHS	②WLHS	(②-①)/①
LR_T2Q3	781	808	<b>3.46%</b>	800	808	1.00%
LR_T2Q6	759	772	1.71%	768	772	0.52%
LR_T2Q9	724	729	0.69%	728	729	0.14%
LR_T3Q3	1174	1185	0.94%	1184	1185	0.08%
LR_T3Q6	1045	1057	1.15%	1054	1057	0.28%
LR_T3Q9	907	916	0.99%	913	916	0.33%
LR_T4Q3	1354	1379	1.85%	1370	1379	0.66%
LR_T4Q6	1125	1155	2.67%	1141	1155	1.23%
LR_T4Q9	966	983	1.76%	974	983	0.92%
Model	90%-ile displ. for 150% DBE (mm)					
	M1			M2		
	①LHS	②WLHS	(②-①)/①	①LHS	②WLHS	(②-①)/①
LR_T2Q3	1080	1109	2.69%	1099	1109	0.91%
LR_T2Q6	980	995	1.53%	991	995	0.40%
LR_T2Q9	917	925	0.87%	923	925	0.22%
LR_T3Q3	1589	1609	1.26%	1600	1609	0.56%
LR_T3Q6	1376	1378	0.15%	1378	1378	0.00%
LR_T3Q9	1200	1208	0.67%	1205	1208	0.25%
LR_T4Q3	1923	1935	0.62%	1934	1935	0.05%
LR_T4Q6	1558	1570	0.77%	1566	1570	0.26%
LR_T4Q9	1291	1315	1.86%	1303	1315	0.92%



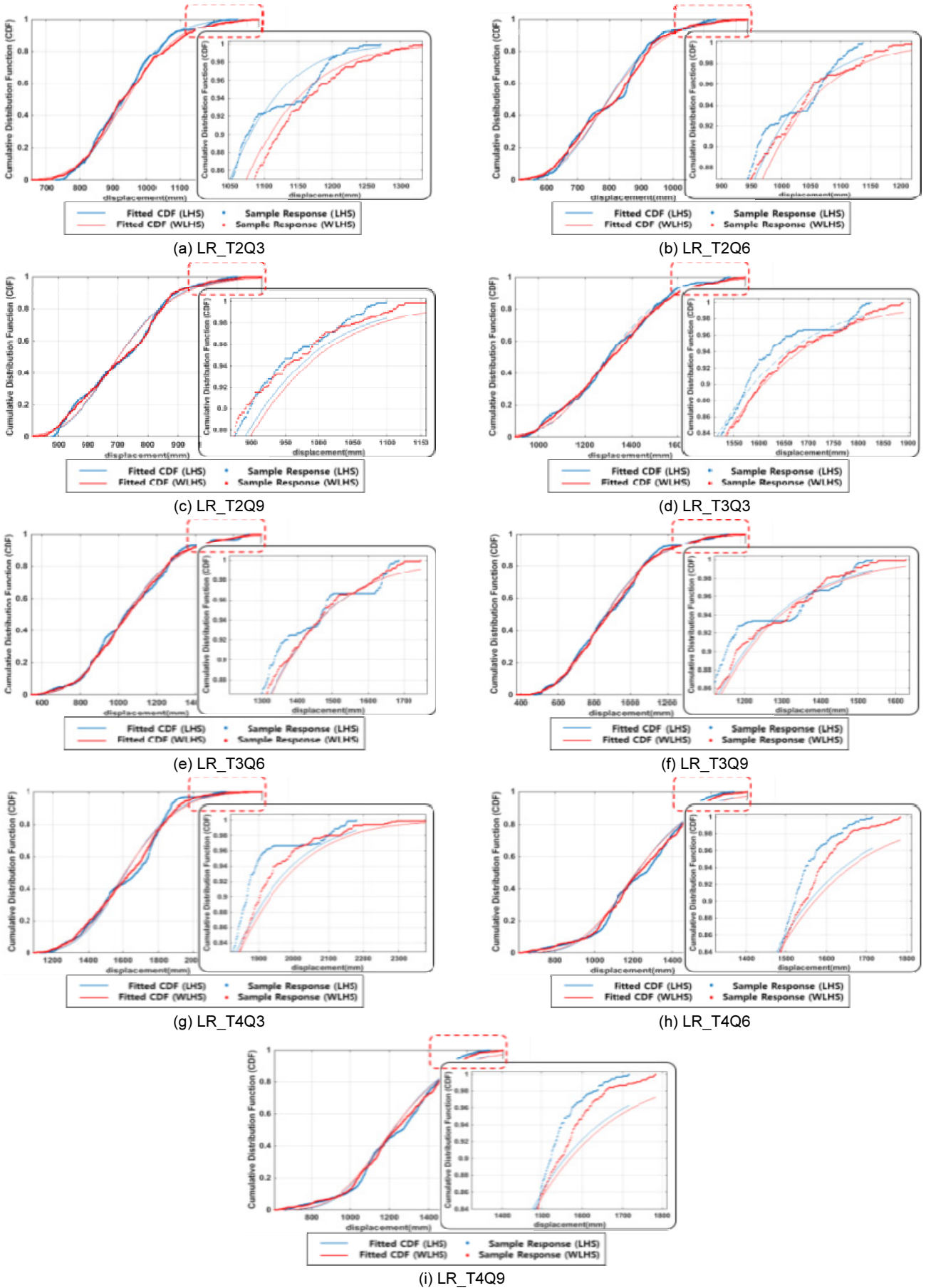


Fig. 15. Compare LHS with WLHS for 100% DBE

한 품질관리 된 면진시스템 역학적 성질의 불확실성을 고려하고 M2는 좋은 품질관리 된 면진시스템 역학적 성질의 불확실성을 고려한다. 그러므로 두 해석 그룹의 비교를 통해 품질관리 수준에 따라 달라지는 면진시스템 역학적 성질의 불확실성의 영향을 확인할 수 있다.

Table 7과 같이 두 샘플링 기법으로 구한 M1/M0와 M2/M1는 0.99~1.01 이고, M0/G0은 1.17~1.22이다. 이 결과를 통해 면진시스템 역학적 성질의 불확실성은 구조물의 변위 응답에 거의 영향을 미치지 않는 반면 입력지진파의 불확실성은 구조물의 변위 응답에 상당한 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 또한 Table 8에는 두 샘플링 기법을 통해 도출한 변위들 간의 차이를 나타내고 있으며 최대 3.46%까지 차이가 발생하므로, 면진시스템 역학적 성질의 불확실성 영향이 크지 않음을 보여준다. 결국, 입력지진파 불확실성의 영향이 면진시스템 역학적 성질의 불확실성에 비해 상당히 크게 평가되므로 입력지진파의 샘플링에 대한 추후 연구가 필요하다.

Table 8을 통해 150% DBE에 대한 상부구조물의 90%-ile 변위가 100% DBE에 대한 상부구조물의 99%-ile 변위에 약 1.27~1.40배 크게 나오는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 LHS 기법을 이용한 해석할 경우의 1.27~1.42배와 비슷한 경향을 나타내고 있다.

Fig. 15에서 파란선과 빨간선은 각각 LHS 기법과 WLHS 기법을 이용하여 구한 누적확률분포함수이고, 점선은 표본 변위의 누적확률분포함수이고, 실선은 최적추정된 누적확률분포함수이다.

표본의 개수가 모집단(population)의 개수와 같은 경우 정확한 확률분포를 구할 수 있다. 그러나 실제로는 모집단의 개수보다 훨씬 작은 표본 개수를 사용하게 되므로 확률분포를 근사하게 추정하게 된다. 확률분포의 꼬리 부분에 이러한 논리를 적용하면, 꼬리부분에 표본개수를 증가시킬수록 꼬리부분의 확률분포를 더욱 정확하게 추정할 수 있음을 알 수 있다.

## 6. 결론

본 논문에서는 면진 원전구조물의 전도거동 및 샘플링기법이 정지거리의 산정에 미치는 영향을 검토하였으며, 그 결과는 아래와 같다.

- 1) 본 논문에서 수행한 해석 결과를 기존 Huang et al.[2]의 결과와 비교하여 해석 절차를 검증하였다.
- 2) 전도거동을 고려한 경우, 고려하지 않는 경우에 비해 면진 원전구조물의(정지거리를 포함한) 수평변위들의 차이가 매우 작으므로, 구조물의 전도거동 영향이 거의 발생하지 않는 것을 확인하였다. 그러므로 면진 시스템의 정지거리 산정 시 면진 원전구조물의 전도를 고려하지 않아도 무방하다.
- 3) 변위확률분포의 꼬리부분에 있는 정지거리를 더욱 정확하게 추정하기 위해 수정된 Latin Hypercube Sampling 기법(Weighted Latin Hypercube Sampling)을 제안하였다. 확률분포의 꼬리부분에 대한 표본 개수를 늘림으로서 수정된 Latin Hypercube Sampling 기법에 의해 추정된 누적 확률분포함수가 기존의 Latin Hypercube Sampling 기법보다 더욱 근

사하게 샘플링 누적확률분포함수의 꼬리부분을 추정한다.

- 4) 기존 Huang et al.[2]의 결과와 일관되게, 면진시스템의 불확실성이 입력지진파의 불확실성 보다 상부구조물의 수평변위에 미치는 영향이 작음을 확인하였다. 그러므로 추후 입력지진파의 불확실성에 Weighted Latin Hypercube Sampling 기법을 적용하는 연구가 필요하다.
- 5) Latin Hypercube Sampling과 Weighted Latin Hypercube Sampling을 이용한 해석 결과 모두 150% DBE에 대한 상부구조물의 90%-ile 변위가 100% DBE에 대한 상부구조물의 99%-ile 변위보다 더 크게 발생함을 확인하였고, 이는 Huang et al.[2]의 결과와 일관된다.
- 6) ASCE 43에서는 확률론적 설계기법을 통한 원전 구조물의 설계를 요구하고 있으나, 원전구조물의 설계 성능목표에 대한 확률론적 만족 여부를 평가하는 기법은 정착되어 있지 않은 상황이다. 확률분포를 정확히 추정하기 위한 표본 개수와 표본 추출 방법을 합리적으로 수립하기 위해 본 연구를 수행하였고, 본 연구에서 제시한 바대로 Weighted Latin Hypercube Sampling은 Latin Hypercube Sampling보다는 좀더 합리적인 방법으로 여겨진다. 그러나 본 연구에서 제시한 방법은 여러 대안 중 하나이며 추후 더 다양한 예제들의 검토를 통해 일관된 방법론을 정립할 필요가 있다.

## / 감사의 글 /

이 연구는 한국에너지기술연구원 원자력융합 핵심기술개발사업 2014151010170B 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## / REFERENCES /

1. American Society of Civil Engineers (ASCE). Seismic analysis of safety-related nuclear structures and commentary. ASCE 4-\*\*, (forthcoming). Reston, VA.
2. Huang in, Whittaker AS, Kennedy RP, Mayes RL. Assessment of Base-Isolated Nuclear Structures for Design and Beyond-Design Basis Earthquake Shaking. Technical Report MCEER0-09-0008, c2009.
3. Computer Program SASSI, Theoretical Manual, Bechtel Corporation, San Francisco, CA; c1991.
4. Anil K, Chopra et al. Dynamics of Structures, Fourth edition, Pearson, California, 2012.
5. Kim JH, Kim MK, Choi IK, Response of Base Isolation System Subjected to Spectrum Matched Input Ground Motions, Conference Proceeding on Earthquake Engineering Society of Korea, EESK; c2013.
6. Huang YN, Whittaker AS, Luco N. Maximum and geometric-mean spectral demands in the near-fault region, Processing, 19th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology; Toronto, Canada; c2007.