

## 면진장치를 사용한 주거용 무량판구조의 내진성능 향상

Seismic Performance Enhancement of Residential Flat Plate  
Structure by Using Base Isolation Devices.

이 현 호\*

Lee, Hyun Ho

### Abstract

For the seismic performance enhancement of residential flat plate structure and for the selection of earthquake records, the possibility of base isolation is evaluated and the time history results are reviewed. By evaluating a base isolated stiffness, a target period, and an envelope curve analysis, seismic performance of structure, which has strong rotational mode, is evaluated. For the propriety evaluation of earthquake records usage and scaling method, time history analysis is done with variables such as DBE(design base earthquake) level, MCE(maximum considerable earthquake) level, and 1.4DBE level. From the analysis results, following conclusions can be made: the earthquake records, which are used in base isolation analysis, should be selected by similar soil type which the structure is considered, and should be intensity scaled in a range of mean  $\pm$  standard deviation of code based design response spectrum.

### 요 지

본 연구에서는 주거용 무량판구조의 내진성능을 개선하기 위한 면진적용 가능성을 평가하였으며, 시간이력 해석을 위한 지진기록 사용에 대한 문제점을 제시하였다. 면진층 강성 및 주기 평가 및 포락해석법을 적용하여 면진전 비틀림 모드가 강한 구조물을 면진시스템 적용으로 내진성능을 개선하였다. 지진기록 사용 및 크기 조절효과의 적정성을 평가하기 위하여 DBE, MCE, ASCE 7-05의 1.4DBE 의해 크기를 조정된 시간 이력 해석결과를 비교한 결과, 구조물의 지반조건과 유사한 조건에서 관측된 지진기록 및 지진기록의 응답이 설계기준 응답스펙트럼의 평균 $\pm$ 표준편차 범위 안에 있는 기록을 사용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

**Keywords** : Flat plate structure, Base isolation, Envelope curve analysis, Design base earthquake, Maximum considerable earthquake, Time history analysis

**핵심 용어** : 무량판구조, 면진, 포락해석, 설계지진, 최대지진, 시간이력 해석

\* 정희원, 동양대학교 건축학부 교수, 공학박사

E-mail : hhlee@dyu.ac.kr 054-630-1165

•본 논문에 대한 토의를 2007년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2007년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

국내에서도 적용사례가 증가하고 있는 면진기술은 새로운 내진설계 기술의 하나로서, 건물과 지반사이에 전단변형 장치를 설치하여 지반과 건물을 분리(base isolation)시키는 방법이다. 이러한 지반분리 기술은 지진지역에서 신축건물은 물론이고, 내진설계가 되지 않은 또는 내진능력이 부족한 기존 건물에 대해서도 효과적으로 적용시킬 수 있는 장점이 있다. 상부구조물의 평면비정형성이 커서 비틀림 특성이 강한 구조물의 대안으로 면진구조가 채용될 수도 있다. 지난 30여 년 동안 일본, 미국, 뉴질랜드 등을 중심으로 실험과 해석적인 연구를 통한 다양한 면진장치가 개발되었으며, 다양한 건물에의 실무적용을 위한 설계기준 및 지침의 제정 및 개정됨에 기인하여 면진기술이 급속하게 발전하고 있는 추세이다. 한국도 2001년 준공된 서초동 트라움하우스, 2006년 준공의 서산복지관 및 H건설에서 시공중인 아파트 등의 면진적용 사례가 있다. 2005년 4월 6일 개정된 “건축물하중기준(KBC 2005라 칭함)”에 의해 모든 건축구조물은 강화된 내진기준을 따라야 한다. 강화된 기준에 대한 대안으로 기존의 벽식 아파트에서 무량판구조로 변경된 아파트에 대한 시공사례가 증가되고 있다. 그러나 주거용 무량판건물은 지진력에 저항하기 위한 수평강성이 매우 적어, 독립적인 내진설계가 어려운 실정이다. 따라서 거주 공간을 제약하는 전단벽이나 브레이스 등을 설치하여야 할 필요성이 증가되고 있다. 거주성을 제한하는 추가적인 부재 설치에 대한 대안으로 지반과 건물을 분리시키는 면진장치를 사용한 지진력 저항 시스템을 구축한다면, 주거용 무량판구조는 중력하중과 약간의 수평하중만을 지지하는 독립적인 구조시스템으로 현행 기준의 제약성을 해결할 수 있는 것으로 판단된다.

본 연구의 목적은 주거용 무량판구조의 내진성능을 개선하기 위한 방법으로 면진시스템을 채용하는데 있다. 또한 면진해석을 위해 반드시 필요하지만, 아직 정립되지 않은 지진기록 사용에 대한 문제점을 제시하는데 있다. 주요한 연구내용은 아래와 같다.

- 지진저항 성능이 우수한 무량판구조의 면진설계
- 면진건물의 목표주기 또는 변위 예측

- 시간이력 해석을 위한 지진기록의 선정 방법 및 결과 비교

면진적용을 위한 기준은 일본건축학회의 면진구조설계지침(2001)<sup>(5)</sup> 및 미국 ASCE의 7-05(2005)<sup>(4)</sup>가 일반적으로 사용되고 있으며, 본 연구에서는 두 기준을 적절히 혼용하여 사용한다.

## 2. 대상건물 선정 및 문제점

대상건물의 개요는 아래와 같으며, 단면도는 Fig. 1에, 평면도는 Fig. 2에 나타내었다. 주거부분은 57평 1세대, 47평형 2세대로 구성되어 있다. 슬래브 두께는 200mm로 하였다.

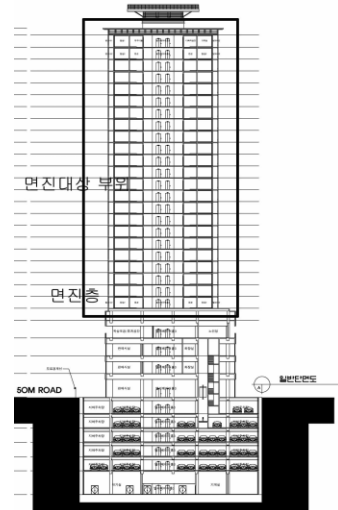


Fig. 1 대상 건물 단면도

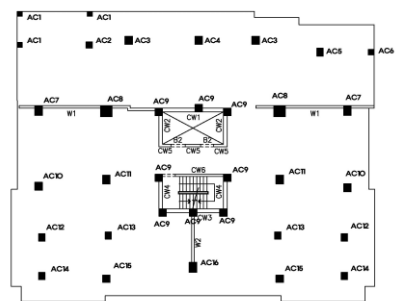


Fig. 2 대상 건물 평면도

- 용도 : 공동주택/판매시설
- 하부구조 : 1-4 층 판매시설, 골조구조
- 상부구조 : 5-27 층 아파트, 면진대상
- 기둥 및 벽체 콘크리트 강도 :
  - 9층이상  $f_{ck} = 24 \text{ MPa}$
  - 5~8층  $f_{ck} = 27 \text{ MPa}$
  - 1~4층  $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$
- 보, 슬래브 콘크리트 강도 :
  - 10층 이상  $f_{ck} = 24 \text{ MPa}$
  - 6~9층  $f_{ck} = 27 \text{ MPa}$
  - 2~5층  $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$
- 철근강도 : SD 400
- 풍하중 : 건물높이 91.8m,  $I_w$  1.1, 노풍도 B, 설계기본풍속 30m/sec
- 지진하중 : 지역계수 0.11, SC, IE 1.5, R 5.5(이중골조)

그림에서 면진대상은 5층을 전이층으로 한 6층 이상의 상부구조이다. 따라서 층수는 5층 밑면을 기초로 변경되기 때문에, 전체 23층 건물이 된다. Fig. 3에 대상건물의 면진설계전 고유치 해석결과를 나타내었는데, 이에 의하면 평면 비정형성에 의한 회전모드(고유주기 3.65초)가 지배하는 것으로 평가되었다. 이는 Fig. 2의 평면에서도 알 수 있듯이 3세대를 구성하기 위한 세대간벽의 영향으로 판단된다. 즉 본 건물의 평면비정형성이 커, 면진설계시 적용효과를 적절히 평가할 수 있는 것으로 판단된다. 물론 건물 외부에 강한 테두리 보를 설치하는 등의 보완책이 있을 수 있지만, 본 연구에서는 면진을 적용하기로 하였다.

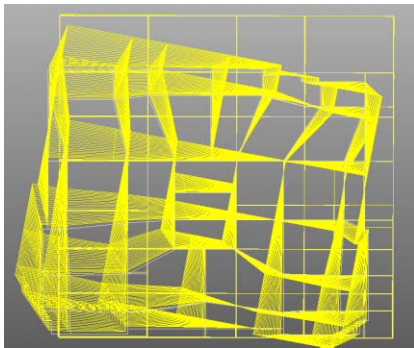


Fig. 3 상부구조물의 1차 회전 모드

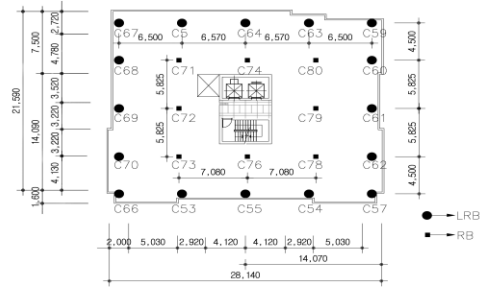


Fig. 4 면진장치 배치도

### 3. 면진장치 선정 및 포락해석법

#### 3.1 면진장치

면진설계에 있어 면진장치는 상부에서 내려오는 기둥하부에 설치하는 방법이 일반적이지만, 면진장치에 생기는 인발력을 없애기 위해 전이층 등을 설치하여 면진장치 간격을 넓히는 방법이 유리할 수도 있다. 본 연구에서는 일차적으로 면진층 상부 기둥하부에 일일이 면진장치를 설치하였으나, 평면 비정형성에 의한 비틀림 및 편심이 커서, 2m 두께의 전이층을 설치한

Table 1 면진장치 제원 상세

항 목		RB	LRB	
재료 특성	전단탄성계수	$\text{N/mm}^2$	0.39	0.39
	고무외경	mm	800	800
부재 치수	고무내경	mm	70	-
	납봉지름	mm	-	140
	고무두께	mm	5	5
	고무층수	mm	32	32
	고무층두께	mm	160	160
	1차형상계수		36.5	40.0
	2차형상계수		5.0	5.0
	내부강관두께	mm	3.9	3.9
수직 성능	플랜지외경	mm	1200	1200
	플랜지두께	mm	36	36
	제품높이	mm	366.9	366.9
	수직강성	$10^3 \text{ kN/m}$	3526	4104
수평 성능	기준면압	$\text{N/mm}^2$	15	15
	수평강성	$10^3 \text{ kN/m}$	1.206	-
	1차강성	$10^3 \text{ kN/m}$	-	16.04
	2차강성	$10^3 \text{ kN/m}$	-	1.234
	항복하중	kN	-	122.7
	등가강성	$10^3 \text{ kN/m}$		2.00
	등가감쇠정수			23.1

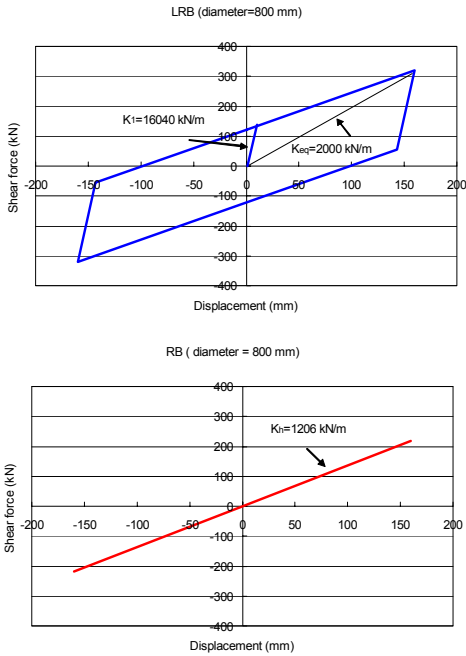


Fig. 5 선정된 면진장치의 이력 특성

뒤 면진장치를 배치하기로 하였다. 3.2절의 절차에 의한 면진장치는 국내여건을 고려하여, 천연고무계 면진장치(Rubber Bearing, RB) 9개 및 납붕삼입 적층고무(Lead Rubber Bearing, LRB) 16개를 사용하였다. 여기서 RB는 감쇠능력이 없으며, LRB는 복원력 특성 및 감쇠능력을 보유하고 있는 장치이다. 본 연구에서 대상으로 하는 면진장치에 대한 국산 제품이 부족하여 일본의 오일러스사 제품을 사용하였으며, 제품은 Table 1에 나타내었다. 상부에서 내려오는 축력에 대한 면압을 평가하여 면진장치의 지름은 800 mm로 하였다. Fig. 5에 RB 및 LRB의 이력특성을 나타내었다.

### 3.2 포락해석법에 의한 면진변위예측

면진설계에 있어 가장 중요한 것은 면진 후 대상 건물의 주기 선정이다. 즉 예비설계 단계에서 주기를 선정하여 필요한 면진장치의 수평강성을 결정하여야 되는 것이다. 본 연구의 대상 건물은 23층인 고층이고, 회전 모드가 지배적이어서 면진장치의 선정을 용이하

게 하기 위한 예비설계를 수행하였다. 먼저 면진층의 강성을 산정하여, 필요한 면진장치를 선정 한 뒤, 개발된 포락해석도표를 이용하여 면진변위를 산정하는 절차로 예비설계를 진행하였다. 이는 일본건축학회의 면진구조설계지침(2001)<sup>(4)</sup>을 참고로 한 것이며 자세한 내용은 아래와 같다.

#### ① 면진층 주기 산정

$$T_f = 2\pi\sqrt{\frac{W_E}{k_f g}} \quad (s)$$

$T_f$  : 면진층 주기

$W_E$  : 면진층 상부구조물 중량(kN)

$k_f$  : 분리장치(이소레이터)만의 수평강성 (kN/m)

$g$  : 중력가속도(m/s<sup>2</sup>)

#### ② 면진층 수평강성으로 변환

$$k_f = \frac{4\pi^2 W_E}{T_f^2 g}$$

#### ③ $T_f = 4$ 초로 가정, $W_E = 137,700$ kN

$$k_f = \frac{4\pi^2 \times 137,700}{4^2 \times 9.8} = 34,652 \text{ kN/m}$$

#### ④ 면진층 변위 선정

에너지 스펙트럼에 대한 선행연구결과<sup>(3)</sup> 및 KBC 2005<sup>(1)</sup>로 작성된 포락도표를 이용한 면진층 변위 선정

- 밑면 전단력 계수(밑면전단력/건물 총무게)

$$= 5950\text{kN}/137700\text{kN} = 0.0432$$

- 지반조건 Sc, VE=61.35 cm/sec,

$$T_s = 0.53 \text{ sec}$$

- 약 10cm의 면진층 변위 예상됨(Fig. 6참조)

Envelope curve for Sc and 0.11g

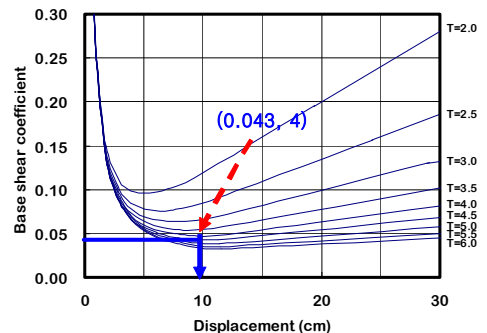


Fig. 6 포락해석법에 의한 면진층 변위 선정

여기서 적용된 포락해석법에 의한 면진변위 100 mm는 KBC 2005의 설계지진력(DBE)에 의한 것이고, 최대가능지진(MCE)에 대한 응답은 아니다. 그러나 본 연구에 적용된 면진장치는 최대 400mm(전단 변형률 250%)까지 수평변위를 허용할 수 있도록 선정하였다.

#### 4. 해석결과 비교 및 평가

##### 4.1 면진적용 효과

일반적으로 면진건물은 지진기록을 사용한 시간이력 해석으로 안정성을 평가한다. 이는 면진장치가 항복한 후 경험하는 비선형 거동을 적절히 평가하기 위해서이다. 지진기록은 설계기준의 응답스펙트럼과 형상이 유사한 지진기록을 사용하여야 한다. 또한 최소한 3개 이상의 지진응답중 최대값을, 또는 7개 지진기록의 평균응답을 사용하도록 각국 내진기준은 규정하고 있다.

본 연구에서는 기존연구<sup>(2)</sup>에 의거, 설계용 응답스펙트럼과 응답이 유사한 지진파를 사용하였다. 본 연구에

서 사용된 지진기록은 U.S.D.C.(1996)와 U.S.G.S (1992)<sup>(2)</sup>에서 수집하였으며, 지진기록은 BAP<sup>(2)</sup>이라는 프로그램을 이용하여 기록의 오차를 보정하였다. 또한 SMCAT<sup>(2)</sup>이라는 프로그램을 사용하여 Sc 지반과 유사한 S2, S3 지반의 기록을 선정하였다. 각각의 지진기록은 최대지진가속도 PGA를 0.11g로 조정하여 그 응답특성을 비교하였다. 그리고 지진기록의 응답이 기준 응답스펙트럼의 평균±표준편차 범위 안에 들어가는 것을 사용하였다. 최종적으로 선정된 지진기록의 응답을 Fig. 7에 나타내었으며, Table 2에 선정 목록을 정리하였다.

구조물의 경계비선형 해석이 가능한 프로그램을 사용한 면진해석 결과, 편심비는 X방향 0.0006, Y방향 0.0007로 평가되었다. 해석변수로는 면진해석전 응답스펙트럼 동특성, 응답스펙트럼을 적용한 면진해석시 동특성, 3개의 지진기록을 사용한 면진해석시 동특성 등 5가지 경우를 고려하였다. 시간이력해석에 의한 고유주기는 3.94초로 평가되었으며, Fig. 8에 대상건물의 층변위를 나타내었다. Fig. 8에서 Seismic Design은 면진전 응답스펙트럼을 사용한 응답을, Iso-lation

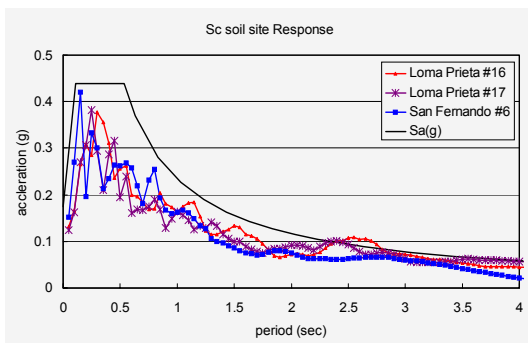


Fig. 7 선정된 지진기록의 응답특성

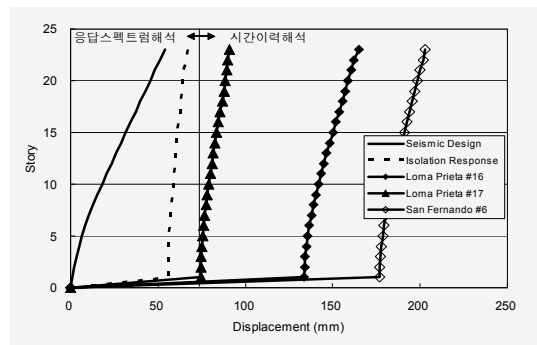


Fig. 8 비면진 및 면진건물의 층변위

Table 2 선정된 Sc 지반의 지진기록 목록

Event Name	Station Name	Date D/M/Y	M	Comp.	PGA cm/sec <sup>2</sup>	PGV cm/sec	PGD cm
Loma Prieta #16	Bear Valley	18/10/89	7.1	220	-68.0	-8.93	4.56
Loma Prieta #17	Bear Valley	18/10/89	7.1	310	-70.0	10.07	6.60
San Fernando #6	Fremont, Alhambra	09/02/71	6.5	S00W	112.3	-10.61	4.40

Table 3 ASCE 7-05에 의한 면진주기 및 변위

지진 레벨	DBE	MCE
주기(sec)	3.79	3.96
변위(mm)	141	221

Response는 응답스펙트럼을 사용한 면진응답을, 그 외는 시간이력해석에 의한 면진응답을 나타낸다. 이에 의하면, 면진후 거동은 면진전 거동에 비하여 층변위 양이 감소됨을 확인할 수 있었다. 특히 같은 응답스펙트럼을 변수로 한 응답을 비교해보면, 면진전·후 층변위량이 현저하게 줄어들음을 확인할 수 있었다. 3개의 지진기록을 사용한 시간이력 해석결과는 상당히 중요한 결과를 나타내었는데, 설계기준의 응답스펙트럼과 유사한 형상을 가진 지진기록을 사용하더라도, 그 응답은 상당한 차이를 나타낼 수 있다는 것이다. Fig. 7의 지진기록 응답에서 큰 차이가 없던 San Fernando 지진을 사용한 면진해석결과, X방향 면진층 변위는 177 mm, Y방향 면진층 변위는 164 mm로 평가되었다. 이는 다른 2개의 Loma Prieta 지진기록을 사용한 X방향 변위 134mm, 75mm 및 Y방향 변위 130mm, 65 mm와는 차이가 있는 것이다. Fig. 6에 의한 포락해석에 의한 예상 변위 100mm와는 많은 차이가 발생하였는데, 이는 포락해석용 도표는 예비 설계용으로 근사적인 면진거동을 예측하기 위해 사용되는 것이기 때문이다. 따라서 시스템 거동, 부재 설계 수준에서의 면진거동은 지진기록을 사용한 시간이력 해석 또는 진동대 등을 이용한 성능확인이 필요한 것으로 판단된다.

#### 4.2 지진하중의 크기조정 효과 평가

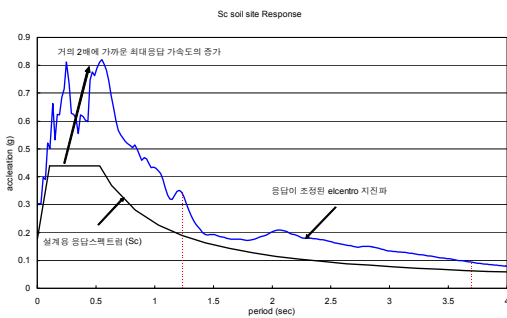


Fig. 9 ASCE 7-05에 의한 El centro 지진의 크기 조정

한국의 KBC 2005에서 채택하고 있는 내진설계의 근간은 미국의 UBC 97 및 IBC 2000 기준이다. IBC 기준은 2006년 판까지 출판되었으며, 주요 지진 하중에 대한 설명은 ASCE 7-05로 넘겨져 있는 상태이다. 이 기준들은 설계용 지진(DBE) 및 최대가능지진(MCE)을 규정하고 있는데, 한국의 KBC 2005는 MCE를 1.5배 낮은 설계용 지진만 규정하고 있다. 그러나 일반적인 면진설계에 있어 지진에 대한 극한 안정성 평가는 면진장치의 안정성 평가를 위하여 반드시 필요한 항목이다. 본 연구에서는 설계지진을 1.5배 증가시킨 경우에 대한 면진응답을 검토하였다. 그리고 ASCE 7-05의 면진해석시 사용되는 지진기록은 0.5TD(TD: DBE에 대한 면진주기)에서 1.25 TM(TM: MCE에 대한 면진주기)사이의 응답이 설계기준에 의한 응답보다 1.4배 이상 커야 한다는 규정이 있다. 이를 적용한 예를 Fig. 9에 나타내었는데, 예제로 사용한 El centro 지진기록의 응답이 너무 커져 많은 문제가 발생할 수 있는 것으로 평가되었다. 이는 현재미국에서도 많은 문제가 되고 있는 부분이며, DBE 및 MCE의 무리한 구분에 의한 것이다. 따라서 미국 기준을 그대로 한국에서 사용하는 것은 많은 문제를 유발할 수 있는 것으로 판단된다. 참고로 일본은 에너지에 근거한 VE 스펙트럼 및 이에 근거한 지진기록을 사용한다.

본 연구에서는 DBE수준의 지진응답을 1.5배 증가시킨 MCE 레벨의 시간이력 해석결과 및 DBE수준의 지진응답을 ASCE 7-05에 의해 크기를 조정한 시간이력 해석결과를 비교하여, 지진기록 선정 및 사용성의 가이드라인을 제시하고자 한다. 여기서 사용된

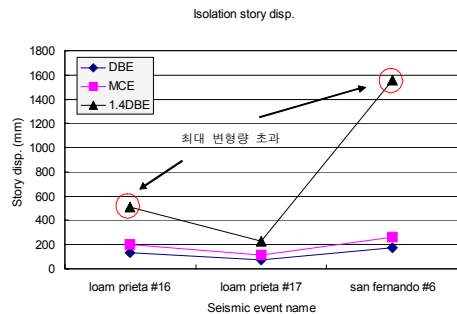


Fig. 10 지진기록의 크기조정 효과

지진기록은 Table 2에 있는 것으로 KBC 2005 SC 지반의 응답스펙트럼과 유사한 응답스펙을 사용한 것이다.

ASCE 7-05에 의해 선정된 DBE수준의 변위DD, 주기 TD 및 MCE 수준의 변위 DM, 주기 TM을 Table 3에 정리하였다.

Fig. 10에 시간이력 해석에 사용된 지진의 크기조정효과를 나타내었다. 그림에서 DBE는 KBC 2005에 의한 설계지진을 나타내며, MCE는 DBE를 1.5배 증가시킨 것이다. 또한 1.4DBE는 ASCE에 따라 특정구간의 DBE 응답을 1.4배 증가시킨 것이다. DBE 수준에 있어 최대변위는 San Fernando 지진의 경우 177mm이며, MCE 경우 265mm로 산정되었다. 그러나 1.4DBE 경우, 지진크기가 많이 증폭되어 San Fernando 지진의 경우 1561mm로 산정되었다. 또한 Loma Prieta #16의 경우 498 mm로 산정되었다. 이는 면진장치 허용 변형량 400 mm를 초과하는 것으로, ASCE 7-05에 의한 지진크기 조정방법에 대한 보완이 필요한 것으로 판단된다. 이상의 연구결과로부터, KBC 2005에는 면진해석시 사용될 지진기록에 대한 규정이 없지만, 아래와 같은 방법으로 지진기록을 선정하는 것이 적절한 것으로 판단되며, 향후 이에 대한 심도 깊은 연구가 필요한 것으로 판단된다.

- 지진기록은 지반조건과 유사한 조건에서 관측된 것을 사용하여야 된다.

- 지진기록의 응답이 설계기준의 응답스펙트럼의 평균±표준편차( $m \pm 1\sigma$ ) 범위 안에 들어야 된다.

또한 MCE 수준에 대한 명확한 정의 및 속도스펙트럼에 대한 개발이 필요한 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 주거용 무량판구조의 내진성능을 개선하기 위한 면진적용 가능성을 평가하였으며, 아직 정리되지 않은 지진기록 사용에 대한 문제점을 제시하였다.

- 1) 본 연구에서는 면진장치에 생기는 인발력을 없애기 위해 전이층을 사용하였으며, 면진장치 간격을 넓히는 방법으로 면진설계를 수행하였다. 그 결과 면진진 평면비정형성에 의한 비틀림 모드를 면진시스템 적용으로 개선할 수 있었다.
- 2) 시간이력해석을 위한 지진기록사용에 있어, 구조물의 지반조건과 유사한 조건에서 관측된 지진기록을 사용하여야 된다. 또한 지진기록의 응답이 설계기준 응답스펙트럼의 평균±표준편차( $m \pm 1\sigma$ ) 범위안에 들어가는 지진파를 사용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.
- 3) 설계주기 및 최대주기 범위에서 지진응답을 조정하는 ASCE 7-05는 지진응답을 매우 크게 증폭시킬 수 있으므로, 이에 대한 적절한 검토 및 지진기록 사용에 신중을 기하여야 될 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2005-D00839)의 일부분이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 대한건축학회, "건축구조설계기준 KBC 2005", 2005.
2. 이현호, "지반조건 및 이력특성을 고려한 비탄성 요구스펙트럼 산정", 대한건축학회논문집 구조계, 19권 7호, 2003. 7, pp.3-10.
3. 이현호, 천영수, "면진건물의 포락해석을 위한 설계용도표 산정", 구조물진단학회지, 10권 2호, 2006. 3, pp.56-66.
4. ASCE, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-05), 2005.
5. 日本建築學會, "免震構造設計指針", 日本建築學會, 2001.

급행 (접수일자 : 2007년 1월 20일)