

진동대 실험을 통한 전단벽 구조물의 층응답 특성 평가

In-structure Response Evaluation of Shear Wall Structure via Shaking Table Tests

정재욱^{1)*} · 하정곤²⁾ · 함대기³⁾ · 김민규⁴⁾Jung, Jae-Wook^{1)*} · Ha, Jeong-Gon²⁾ · Hahm, Daegi³⁾ · Kim, Min Kyu⁴⁾¹⁾한국원자력연구원 스마트안전진단연구부 선임연구원, ²⁾한국원자력연구원 스마트안전진단연구부 선임연구원, ³⁾한국원자력연구원 스마트안전진단연구부 책임연구원, ⁴⁾한국원자력연구원 스마트안전진단연구부 책임연구원¹⁾Senior Researcher, Smart Structural Safety and Prognosis Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, ²⁾Senior Researcher, Smart Structural Safety and Prognosis Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, ³⁾Principal Researcher, Smart Structural Safety and Prognosis Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, ⁴⁾Principal Researcher, Smart Structural Safety and Prognosis Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute

/ A B S T R A C T /

After the manual shutdown of the Wolsong nuclear power plant due to an earthquake in Gyeongju in 2016, anxiety about the earthquake safety of nuclear power plants has become a major social issue. The shear wall structure used as a major structural element in nuclear power plants is widely used as a major structural member because of its high resistance to horizontal loads such as earthquakes. However, due to the complexity of the structure, it is challenging to predict the dynamic characteristics of the structure. In this study, a three-story shear wall structure is fabricated, and the in-structure response characteristics of the shear wall structure are evaluated through shaking table tests. The test is performed using the Gyeongju earthquake that occurred in 2016, and the response characteristics due to the domestic earthquake are evaluated.

Key words: Shear wall structure, Shaking table test, Gyeongju earthquake, In-structure response spectrum

1. 서론

2011년 후쿠시마 원전사고 및 2016년 경주지진으로 인한 월성 원자력발전소의 수동정지 사건 이후 원자력발전소의 지진안전성에 대한 불안감은 사회적으로 큰 이슈가 되고 있다. 특히 2016년과 2017년에 발생한 경주지진과 포항지진의 경우 고주파 성분이 지배적인 특성이 관찰된 바 있다[1-3]. 그러나 국내 원자력발전소는 미 서부 강진지역을 기반으로 개발된 저주파 성분이 지배적인 Reg. Guide 1.60 설계응답스펙트럼 [4]을 기반으로 설계되어 국내에서 발생하는 고주파 성분이 주요한 지진동의 특성을 반영하지 못하고 있다[5]. 최근 개발된 미 중동부 지역(CEUS; Central and Eastern U.S.)의 지진동 모델은 미 서부지역과 달리 풍부한 고주파 성분을 포함하고 있으며[6], 국내 지진동 특성은 이 CEUS 지역의 지진동 특성과 유사한 것으로 알려져 있다[1], [7], [8]. 따라서 국내에서 발생하는 고주파 지진을 고려한 원자력발

전소 구조물의 응답특성을 분석하고 평가하는 것이 필수적이다.

원자력발전소의 보조건물과 같은 구조물에는 주로 지진과 같은 횡방향 하중에 대한 저항성이 큰 전단벽 구조가 널리 사용되고 있다[9]. 하지만 그 구조의 복잡성으로 인하여 구조물의 동적 거동을 예측하는 것은 매우 어려운 일이다. 특히 원자력발전소 구조물의 층응답은 해당층에 위치한 기기의 입력운동으로 사용되어 내진설계 및 검증 시 매우 중요한 사항이다. 또한 구조물의 층응답스펙트럼 (ISRS; In-structure response spectrum)은 각 층에 위치한 내부 기기의 최대 요구응답으로 [10] 일반적으로 내부 기기의 내진설계 시 사용된다[11, 12]. 따라서 본 연구에서는 원자력발전소의 주요 구조요소로 사용되는 전단벽 구조를 대상으로 2016년 발생한 경주지진에 대한 동적 거동을 분석하고자 한다. 전단벽 구조를 대표할 수 있는 가상의 전단벽 구조물을 선정 및 제작하고 진동대실험을 수행하였다. 특히 구조적 복잡성으로 인하여 수치해석적으로 예측하기 어려운 전단벽 구조물 내부의 위치 및 방향에 따른 층응답 특성을 도출한다.

*Corresponding author: Jung, Jae-Wook

E-mail: jaewook1987@kaeri.re.kr

(Received February 10, 2021; Revised April 1, 2021; Accepted April 7, 2021)

2. 전단벽 구조물 시험체 및 실험 개요

전단벽 구조의 동적응답 특성을 파악하기 위해 Fig. 1과 같이 전면부가 개방되고 3면이 ‘C’ 형태로 둘러싸인 3층 전단벽 구조 형태를 설계 및 제작하였다. 실제 원자력발전소를 대상으로 축척을 적용하여 실험 대상 구조물을 선정하는 것이 원자력발전소의 응답을 예측하기에 이상적인 방법이다. 하지만 진동대 장비의 사용 여건 및 제작상의 한계를 고려하여, 전단벽 구조를 대표할 수 있는 가상의 전단벽 구조를 대상으로 전단벽 구조 자체의 응답 특성을 분석하고자 하였다. 또한 전단벽 구조의 설계 시 전단벽 구조의 진동특성 뿐만 아니라 실험장비인 진동대 및 인양 크레인의 용량, 시험체 출입구의 크기도 고려하여 설계하였다. 전단벽 구조 시험체의 크기는 3,650×2,575×4,570 (길이×폭×높이, mm)이고, 각 층간높이는 1,350 mm, 벽체 두께는 150 mm, 슬래브 두께는 140 mm 이다. 전단벽 구조 시험체는 진동대에 설치하기 위하여 높이 400 mm의 정착판과 일체형으로 설계하였다. 철근의 배근은 콘크리트구조 철근상세 설계기준 (KDS 14 20 50)을 참고하여 철근의 배치와 피복 조건을 만족하도록 하였다. 시험체의 중량은 22.174톤이며, 정착부를 포함한 총 중량은 28.42톤 으로 설계하였다. 사용된 콘크리트의 강도는 콘크리트 타설시 제작한 공시체의 시험 결과 30.4 MPa로 분석되었으며, 보강철근은 SD400 철근 (항복강도: 400 MPa, 탄성계수: 200 GPa)을사용하였다.

진동대 시험 시 전단벽 구조 시험체의 층응답 특성을 분석할 수 있는 위치를 선정하여 가속도계를 배치하여 설치하였다. 시험체의 각 층에서 가속도 응답을 측정하도록 가속도계를 설치하였으며, 가속도계는 PCB사의 3축 가속도계인 356A16모델을 사용하였다. 실험체 하단 위치에서는 정착부 좌측 전면과 우측 후면, 정착부 중앙 부분과 진동대 중앙 부분에 가속도계를 설치하였고, 2층부터는 각 층 바닥의 좌측전면, 우측후면, 층 바닥 중앙에 각각 가속도계를 설치하였다 (Fig. 2-b). 설치한 층 및 각 층의 위치에 따라 F#P#로 가속도계의 명칭을 부여하였으며 (Fig. 2-a), 모든 가속도계는 시험에 앞서 교정기(calibrator)를 이용하여 정교보정을 수행한 뒤 시험에 사용하였다.

시험에 사용된 입력 지진은 2016년 9월 12일 대한민국 경상북도 경주시에 발생한 지진을 대상으로 하였다. 해당 지진은 리히터 규모 5.8로서, 대한

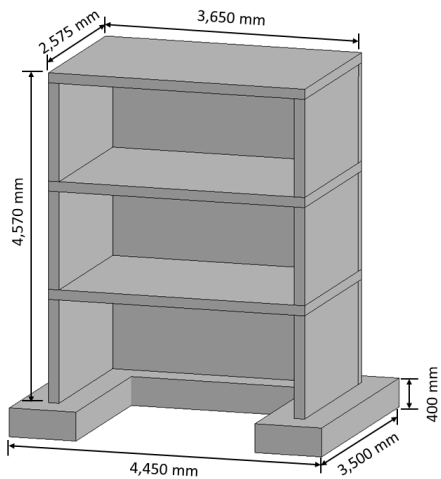
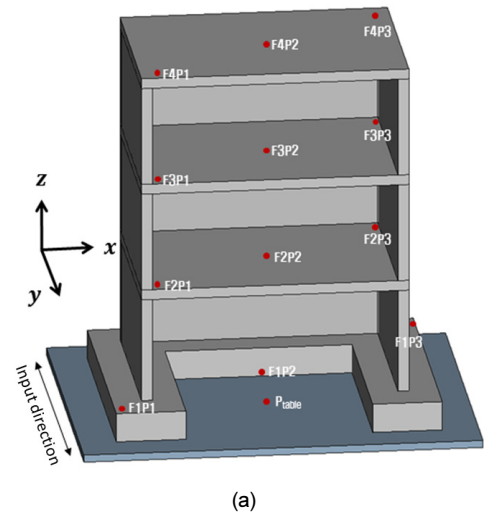


Fig. 1. Schematic of shear wall target structure

민국 지진 관측 이래 가장 강력한 지진이었다. 본 실험에서 사용된 지진파는 지진 발생 당시 진원에서 가장 근접한 명계리 지진관측소(MKL)에서 계측된 지진 (Fig. 3)을 사용하였다. 입력지진은 진동대 시스템의 가진진동수 범위 (0.1~60 Hz)를 고려하여 50 Hz로 필터된 지반운동을 사용하였다. 지진 입력으로 인한 손상이 발생될 경우 손상에 의한 영향을 고려하기 위하여 각 수준의 지진입력 이전에 시험체의 좌우방향 (x방향) 및 전후방향 (y방향)으로 진동수탐색시험을 수행함으로써 구조물을 동특성을 분석하였다.



(a)



(b)

Fig. 2. Locations of accelerometer

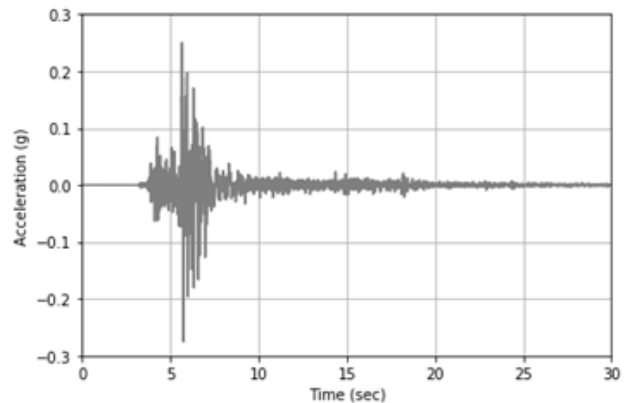


Fig. 3. Input earthquake (Gyeongju earthquake at MKL in 2016)

Table 1. Shaking table test procedure

Test no.	Input earthquake	Direction
1	Resonance search test	y-direction
	Resonance search test	x-direction
	MKL 0.28 g	y-direction
2	Resonance search test	y-direction
	Resonance search test	x-direction
	MKL 0.28 g	y-direction
3	Resonance search test	y-direction
	Resonance search test	x-direction
	MKL 0.50 g	y-direction
4	Resonance search test	y-direction
	Resonance search test	x-direction
	MKL 0.75 g	y-direction
5	Resonance search test	y-direction
	Resonance search test	x-direction
	MKL 1.00 g	y-direction
6	Resonance search test	y-direction
	Resonance search test	x-direction

‘ㄷ’ 형태 전단벽 구조의 비틀림 영향을 최소화하고 좌우에 위치한 전단벽 구조요소가 수평력에 저항할 수 있도록 최대지반가속도 수준에 따른 입력 지진은 전후방향(y방향)으로 1개 축 방향에 대하여 가진하였다.

입력지진의 최대지반가속도 (PGA; Peak Ground Acceleration) 수준은 실제 지진동 수준에 해당하는 0.28 g 입력지진 및 스케일을 조정된 입력 지진을 사용하였다. 실험 순서는 Table 1에 정리된 바와 같이 입력지진동 수준에 따라 5회의 실험을 수행하였다. 실제 측정된 지진동 수준의 0.28 g 입력지진을 가진한 후 손상이 발생될 경우 또는 손상이 발생되지 않더라도 첫 번째 실험의 검증 목적으로 0.28 g의 입력지진을 1회 더 가진하였으며, 이후 0.50 g, 0.75 g, 1.00 g의 최대지반가속도 수준의 입력지진을 사용하여 가진하였다.

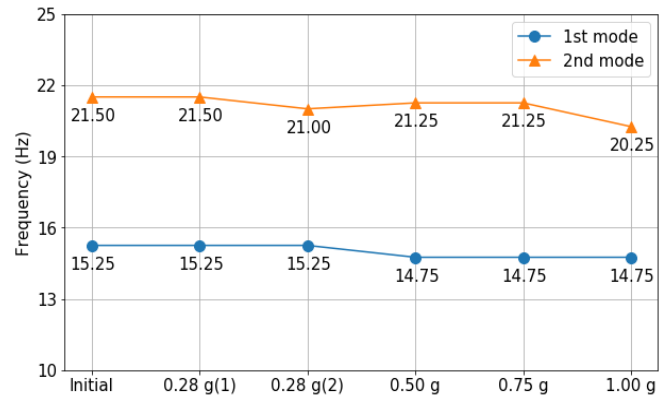
3. 진동수 탐색시험 결과 분석

지진하중을 입력하기에 앞서 진동수탐색시험을 수행하여 비교 기준이 되는 초기상태의 구조물 고유 진동수를 확인하고자 하였다. 이어서, 2번의 0.28 g 입력지진과, 0.5 g, 0.75 g, 1.00 g 순서로 점차 높은 수준의 지진 하중을 입력하였다. 각각의 지진 하중을 입력한 후에도 진동수탐색시험을 수행하여 구조물의 고유 진동수 변화를 관찰하였다. 즉, 일정 수준 이상의 지진 하중을 가한 후에 구조물의 고유 진동수를 탐색함으로써, 구조물의 손상 및 강성저하로 인한 동특성 변화를 통해 구조물의 손상 여부를 간접적으로 판단할 수 있다. Table 2에는 진동대 실험 진행에 따른 모드 진동수 변화가 정리되어 있다.

진동수 탐색시험에서 전단벽 구조물 상부에서 계측한 가속도 데이터를 진동대 입력운동에 대한 전달함수로 변환하고 이를 분석하여 전단벽 시험체의 모드별 고유진동수를 분석하였다. 진동수 탐색시험 결과 1차모드는 x 방향인 좌우방향 가진에서, 2차모드는 y방향 가진에서 관찰된다. 초기 시험체를 사용한 진동수 탐색시험 수행 결과 1차모드는 15.25 Hz, 2차모드

Table 2. Mode frequencies from random vibration tests

No.	Input earthquake	Frequency (Hz)		Frequency (Hz)	
		1 st mode	Variation	2 nd mode	Variation
1	Initial state	15.25	-	21.50	-
2	After 0.28 g	15.25	0	21.50	0
3	After 0.28 g	15.25	0	21.00	-2.3%
4	After 0.50 g	14.75	-3.3%	21.25	+1.2%
5	After 0.75 g	14.75	0	21.25	0
6	After 1.00 g	14.75	0	20.25	-4.7%

**Fig. 4.** Mode frequencies during shaking table tests

21.5 Hz로 나타났다. 첫 번째 시험인 0.28 g의 입력지진 가진 이후에는 동특성의 변화가 관찰되지 않았으며, 동일한 입력지진 수준인 0.28 g을 한번 더 가진한 이후 1차모드는 동일하며 2차모드의 진동수가 2.3% 감소하는 것으로 나타났다. 0.5 g 수준의 입력지진을 가진한 후에는 1차모드 진동수가 3.3% 감소 및 2차모드가 1.2% 증가하였다. 0.75 g의 가진 이후에는 고유진동수의 변화가 발생하지 않았으며, 1.00 g의 가진 이후 2차모드의 고유진동수가 4.7% 감소하는 결과가 확인된다.

두 번째 0.28 g 수준의 입력지진 가진 이후 2차모드가 감소하고 이후 0.50 g 수준의 가진 이후에는 오히려 약간의 고유진동수 증가가 발생하였다. 하지만 최종적으로는 2차모드의 고유진동수가 초기 시험체에 비하여 5.8% 감소하는 결과를 확인하였으며, 지진수준을 점차적으로 증가시키는 과정에서 약간의 오차는 발생할 수 있지만 전체적으로는 고유진동수가 감소하여 구조물에 손상에 의한 강성의 감소 및 고유진동수의 감소가 관찰되었다. 또한 1차모드인 좌우방향(x방향) 고유진동수는 최종적으로 3.3% 감소하는 결과를 확인하였으며, 입력지진을 가진하는 방향인 전후방향(y방향)의 강성이 비교적 더 큰 영향을 받는 것을 확인할 수 있다(Fig. 4).

결과적으로 1.00 g의 입력지진 가진 후에도 구조물의 유의미한 손상이 있다고 판단할 만큼의 고유진동수의 변화가 나타나지 않았으며, 실제 실험 진행 시 유의미한 외부 균열이나 파단 등은 관찰되지 않았다. 입력지진으로 사용된 경주지진은 고진동수 성분이 강하고 구조물 자체의 고유진동수 또한 고진동수 영역(>10 Hz)에 위치하지만, 강진 지속시간이 다소 짧은(2~3 초) 경주지진의 특성으로 인하여 실제 구조물에 누적되는 대미지 자체는 크지 않은 것으로 판단된다. 구조물의 손상 관점에서는 지진강도 뿐만 아니라 강진 지속시간에 의한 영향이 중요하기 때문에 판단되며, 본 실험과 같이 고진동수 성분이 강한 입력지진이 강성이 높은 구조물에 작용하였을 때는

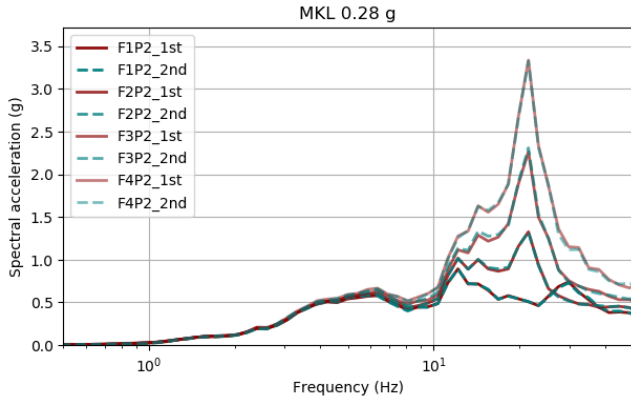


Fig. 5. In-structure response spectrum at 0.28 g PGA level

구조물의 손상보다는 구조물 내부에서 증폭되는 응답으로 인하여 내부 기기에 미치는 영향이 주요할 것으로 판단된다.

4. 입력지진에 따른 층응답스펙트럼 분석

입력지진동 수준 0.28 g~1.00 g에서 계측된 가속도 응답으로부터 입력 지진 수준, 위치, 응답 방향에 따른 특성을 분석하였다. 진동수 탐색시험 결과 초기 시험체에 0.28 g 수준의 입력지진을 가진하였을 때 진동수의 변화가 관찰되지 않았기 때문에 동일한 0.28 g의 입력지진을 가진한 첫 번째와 두 번째 실험 케이스의 응답 비교를 통해 실험 결과의 검증을 확인한 이후 지진수준 및 응답 방향에 따른 영향을 분석하였다. Fig. 5에서는 첫 번째와 두 번째 시험에서 계측된 0.28 g 수준 입력지진 가진 시 각 층의 가운데 지점에서의 층응답스펙트럼이다. 두 경우의 PGA 0.28 g 수준 입력지진 가진 결과 각 층의 층응답스펙트럼은 거의 동일한 값을 보여주며, 전후방향 모드의 고유진동수인 2.50 Hz 부근의 진동수 영역에서 층고가 증가함에 따라 동일하게 응답이 증폭되는 결과를 보여준다. 부분적으로 약간의 차이가 발생하는 부분은 확인되지만 전반적으로 잘 일치하는 결과를 확인할 수 있어 진동수 탐색 시험에서 동일한 모드 진동수를 가질 경우 동일한 응답을 나타내는 것으로 확인할 수 있다.

4.1 전단벽 구조물의 수평방향 층응답스펙트럼 분석

좌우방향(x방향) 응답의 경우 이상적으로 전후방향의 가진이 정확히 가해진다면 거의 발생하지 않겠지만 실질적으로는 시공, 실험 중 오차로 인하여 약간의 응답이 발생하는 것으로 확인된다. 그러나 전후방향 응답에 비해 좌우방향 응답은 현저히 낮은 값을 보이기 때문에 비교적 응답의 구분이 명확히 나타나는 최상단의 응답스펙트럼만 Fig. 6에 정리하여 응답 특성을 분석하였다. 좌우방향의 각 지진동 수준별 최대 응답은 약 0.5 g, 0.8 g, 1.2 g, 1.4 g로 나타나며, 전후방향 응답에 비해 약 10% 전후의 스펙트럴 가속도가 발생하는 것으로 확인된다. 또한 최대 응답이 좌우방향 진동수인 15 Hz 부근에서 발생하는 것이 아니라 전후방향 고유진동수인 21 Hz 부근에서 발생하는데, 이는 전후방향의 응답에 의해 좌우방향 응답이 간접적으로 발생하기 때문으로 판단된다. 특히 좌우방향 응답에서는 각 층의 위치에 따른

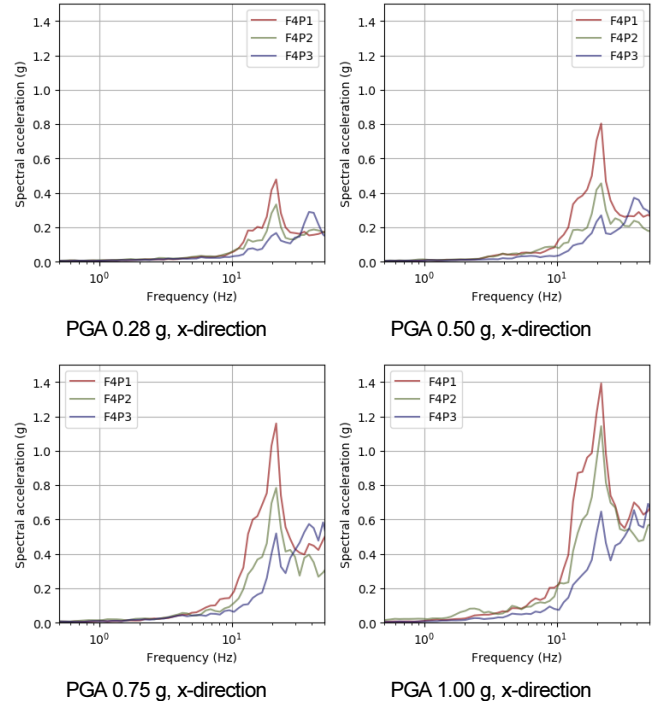


Fig. 6. Horizontal in-structure response spectrum in x-direction (F4P#)

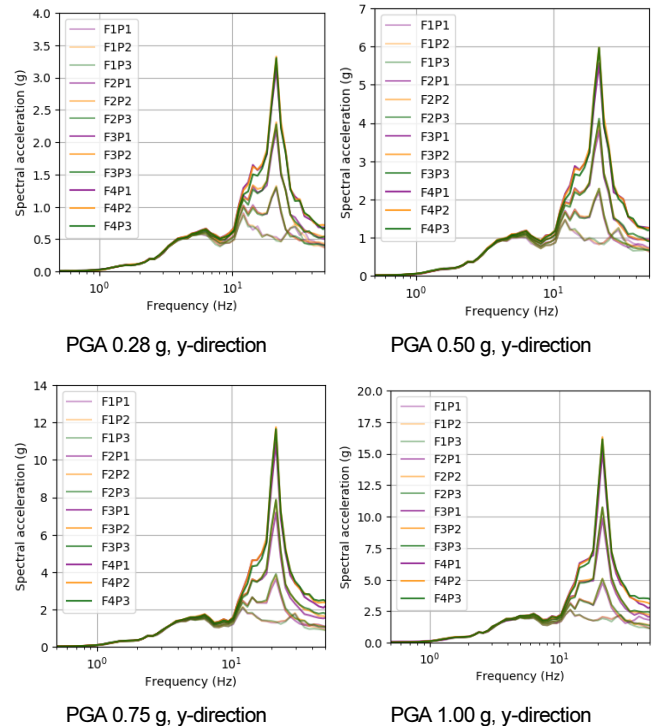


Fig. 7. Horizontal in-structure response spectrum in y-direction

응답 변화가 명확히 드러난다. 좌측 전면에 위치한 P1 위치에서 응답이 가장 크게 나타나고 우측 후면의 응답은 가장 낮은 값을 보여주며, 최대 응답이 발생하는 21 Hz 부근에서 약 2~3배의 차이가 발생한다. 이 차이는 전단벽 시험체의 강성중심이 무게중심과 정확히 일치하지 않거나, 정착부 볼트의 장력이 정확히 대칭이 되지 않는 등의 이유로 발생한 비틀림 거동에 기인

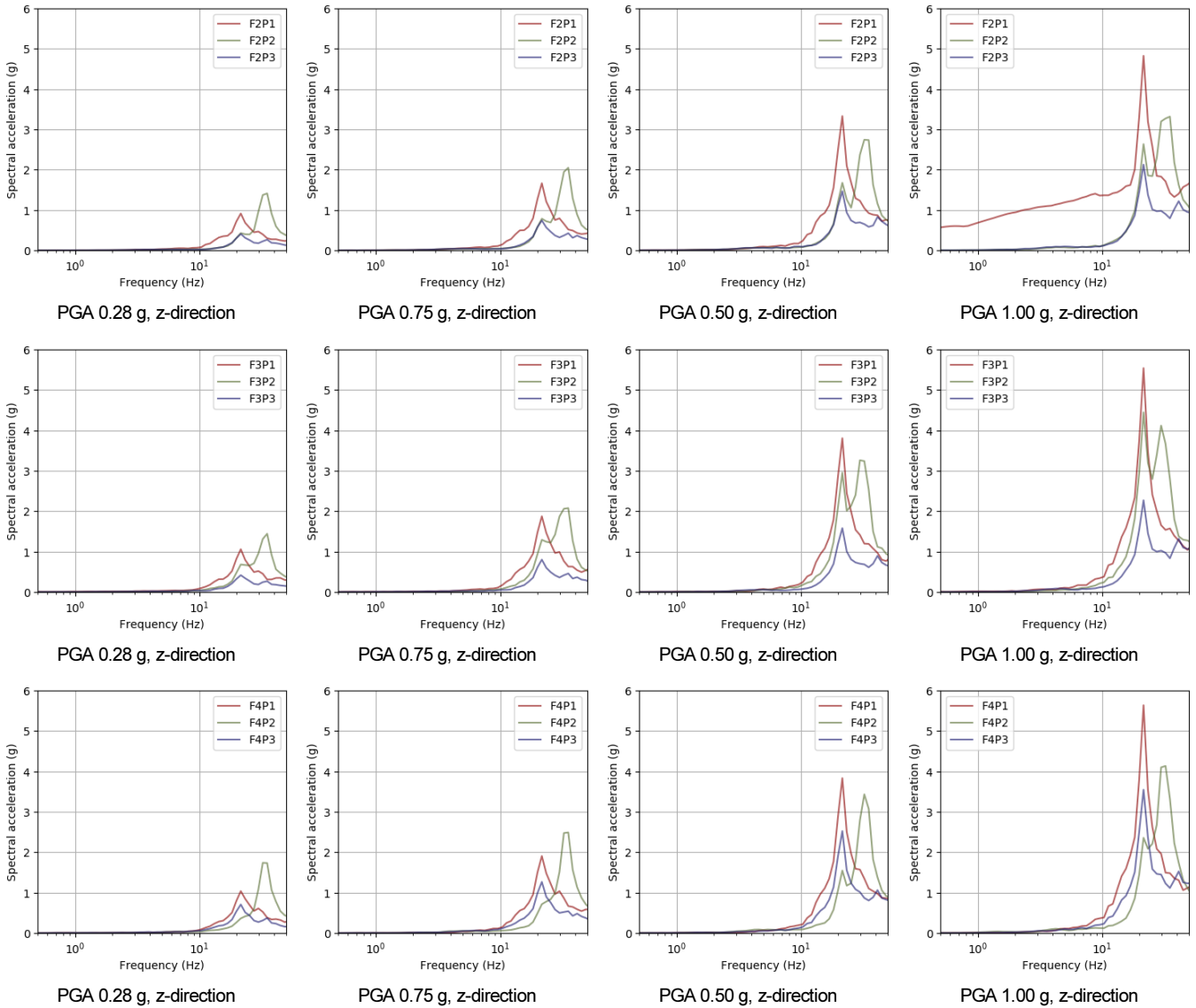


Fig. 8. Vertical in-structure response spectrum in z-direction

한 것으로 판단된다. 또한 전단벽 구조요소가 ‘C’ 형태인 전면부가 개방된 형태로 되어있어 전단벽 구조요소들의 강성중심이 위치할 것으로 예상되는 후면 벽체 부근에서 가장 멀리 떨어진 좌측 전면의 응답이 가장 큰 영향을 받아 최대 응답을 나타내는 것으로 판단된다.

전후방향(y방향)의 층응답스펙트럼에서는 2차모드 고유진동수 범위인 21 Hz 부근에서 응답의 증폭이 발생한다(Fig. 7). 층고가 증가함에 따라 현저한 응답의 증폭이 발생되며, 0.28 g에서 1.00 g까지 각각의 지진동 수준에 따라 최대 약 3.4 g, 5.7 g, 11.1 g, 16.0 g의 스펙트럴 가속도가 최상층에서 발생한다. 전후방향 응답의 경우 같은 층내에서의 위치에 따른 응답 변화에 비하여 입력 지진동 수준 및 층고에 따른 응답 차이가 지배적인 것으로 판단된다.

특히 좌측 전면인 P1의 전후방향 최대응답이 모든 층과 PGA 수준에서 P2 및 P3의 응답에 비하여 다소 낮은 결과를 보인다. 이러한 이유는 비틀림 거동에 기인한 것으로 판단된다. 좌우방향 응답의 경우 약간의 비틀림 거동으로 인하여 P1에서 가장 큰 값을 나타내는데, 비틀림 거동에 의하여 P1에서 좌우방향 응답이 증폭되는 만큼 전후방향의 응답이 다소 감소하게 된다.

결과적으로 수평방향 응답이 동일 층에서 응답의 차이를 보이는 이유는 구조물의 비틀림 거동으로 인하여 차이가 발생하게 되며, 구조물의 강성중심과의 거리가 멀어질수록 가진방향과 수직인 방향의 응답이 증가되고 가진방향의 응답이 감소하는 것으로 판단된다.

4.2 전단벽 구조물의 수직방향 층응답스펙트럼 분석

전후방향 가진에 따른 지진동 수준 및 위치에 따른 수직방향 응답스펙트럼 영향을 분석하고자 한다. 수직방향 응답에서는 수평방향 응답과는 현저한 차이를 보이는 경향성이 확인된다. 입력지진동 수준 증가에 따라 최상단의 응답이 증폭되는 경향성이 동일하게 나타나, 위치에 따른 응답의 현저한 차이를 보인다(Fig. 8). 특히 최대 응답이 발생하는 진동수 영역이 좌측 전면과 우측후면 위치에서는 전후방향 모드진동수인 21 Hz 부근에서 발생하나, 가운데 지점에서는 30 Hz 이상의 주파수 영역에서 최대응답이 발생한다. 이는 벽면에 가까이 위치한 P1, P3 계측 위치에서는 전단벽 구조물 자

체의 전후방향 모드 응답의 영향을 주요하게 받으나, 각 층 슬라브 가운데에서는 슬라브 자체의 상하 진동에 의한 영향을 훨씬 크게 받기 때문인 것으로 판단된다. 또한 21 Hz 부근의 최대응답을 기준으로 전후방향 응답의 약 30% 전후의 스펙트럴 가속도가 확인되며, 전후방향 가진 시 발생하는 좌우 방향의 응답보다 훨씬 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

또한 수평방향 응답과 대비되는 수직방향 응답의 차이는 위치에 따른 응답 변화에서 확인할 수 있다. 수평응답의 경우 층고가 올라감에 따라 전단벽 시험체의 주요 진동수 영역에서 응답이 증폭되는 경향을 명확하게 확인할 수 있다. 하지만 수직방향 응답에서는 층고가 올라감에 따라 응답이 거의 동일하거나, 증폭이 되더라도 수평방향에 비해 큰 변화를 확인하기가 어려운 것으로 나타난다. 결과적으로 수평방향 응답에 비해 수직방향 응답은 슬라브 바닥에서의 위치에 따른 변화가 명확하게 드러나며, 입력지진동 수준에 따른 응답의 증폭은 발생하지만, 층고에 따른 응답 증폭은 뚜렷하지 않은 것으로 확인된다.

4.3 수평방향 층응답스펙트럼의 비선형성

수평방향 중 지진입력 방향인 전후방향(y방향)의 층응답스펙트럼의 비선형성을 분석한다. 본 연구에서 고려한 0.28 g~1.00 g의 입력지진동 수준에서 전단벽 시험체가 구조적 선형 시스템 안에서 거동을 하게 될 경우 입력지진동 수준에 비례해서 응답의 크기가 결정될 수 있을 것이다. 따라서 입력지진동 수준에 따른 각 층별 슬라브 가운데의 전후방향 층응답스펙트럼을 입력지진동의 PGA 수준으로 정규화하여 응답 특성을 비교한다(Fig. 9). 1층과 2층의 응답스펙트럼에서는 모든 입력지진동 수준에서 거의 동일한 값을 보여주는 것을 확인할 수 있다. 그러나 층고가 3층 슬라브 이상인 위치에서는 정규화된 응답의 차이가 발생한다. 입력지진동 수준 0.50 g를 초과한

경우 전후방향 모드진동수 범위 부근(21 Hz)에서 추가적인 응답의 증폭을 확인할 수 있다. 결과적으로 0.50 g 이하인 입력지진동 수준에서는 전단벽 시험체가 선형 거동을 하는 구간으로 판단할 수 있으며, 0.50 g를 초과하는 구간에서는 저층부에서는 선형적으로 응답의 증폭이 발생하나 층고가 증가함에 따라 응답의 비선형성이 발생하는 것으로 판단할 수 있다. 일반적으로 전단력이 집중되는 저층부에서 손상으로 인한 비선형 거동이 먼저 나타날 것이나, 본 실험에서는 1~2층에서는 모든 PGA 수준에서 비슷한 응답을 보이고 3층 이상에서 비선형성을 갖는 응답이 확인된다. 특정 층을 기준으로 응답의 특성이 명확히 나뉘는 것으로 보이며, 이러한 이유는 각 층을 순차적으로 타설하는 과정에서 발생 가능한 콜드조인트 부분에서 먼저 손상이 발생하기 때문으로 판단된다. 본 실험 결과에서는 2층과 3층 사이에서 유의미한 손상이 발생한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 원자력발전소 구조물의 주요 구조형식인 전단벽 구조를 대상 구조물로 설정하여 동적 거동을 실험적으로 평가하였으며, 특히 2016년 월성 원자력발전소의 수동정지 사태를 유발시킨 경주지진을 사용하여 진동대 실험을 수행하였다. 대상 구조물로는 전면부가 개방된 ‘ㄷ’형상의 3층 규모의 전단벽 구조물을 제작하여 진동대 실험을 수행하였다. 경주지진 발생 시 진원에서 가장 근접한 명계리 지진관측소에서 계측된 지진파를 입력지진으로 선정하였고, 실제 국내에서 발생한 강진에 대하여 원자력발전소 구조물이 어떠한 응답 특성을 갖는지 파악하고자 하였다.

진동수 탐색시험 결과 실제 관측된 0.28 g 수준의 입력지진에서는 전단벽 구조물 시험체의 손상이 거의 발생하지 않는다. 1.00 g PGA 수준의 입력지진에 적용 시 동특성의 변화가(최대 5.8%의 모드진동수 감소) 확인되어 내부적으로 손상이 다소 발생한 것이 간접적으로 확인된다. 최종적으로 1.00 g 입력지진 가진 후 육안으로 확인 가능한 균열이나 정착부 파단 등은 관찰되지 않았으며, 구조물의 동특성 변화를 통해 미소한 손상을 간접적으로 유추할 수 있는 것으로 판단된다. 가진방향에서 계측한 층응답의 특성은 입력지진의 지진동 수준이나 층고에 따라 증폭되는 경향을 확인할 수 있다. 가진방향과 직교하는 좌우방향의 응답의 경우 시공 또는 실험 중 오차 등으로 인해 발생하는 것을 확인하였으며, 동일 층 내에서도 위치에 따라 응답의 경향이 상이한 것으로 나타났다. 수직방향 응답의 경우 슬라브 중앙에서 가장 큰 응답을 나타냈으며, 수평방향 응답과 비교하여 층고에 따른 응답 변화가 현저히 낮은 것으로 확인된다. 또한 입력지진의 지진동 수준에 따라 증폭되는 응답 특성이 비선형성을 가질 수 있는 것으로 확인된다. 결과적으로 본 연구에서 수행된 전단벽 구조물의 진동특성 분석 결과 실제 국내에서 발생한 지진이 구조적으로 어떠한 응답을 유발시키는 지 파악할 수 있었으며, 전단벽 구조물 내부에서 발생하는 층응답의 특성을 파악할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 구조적 복잡성으로 인하여 예측하기 어려운 전단벽 구조물의 거동 특성을 후속 연구를 통해 수치해석적으로 분석 및 활용할 수 있는 참고 데이터가 될 수 있을 것으로 사료된다.

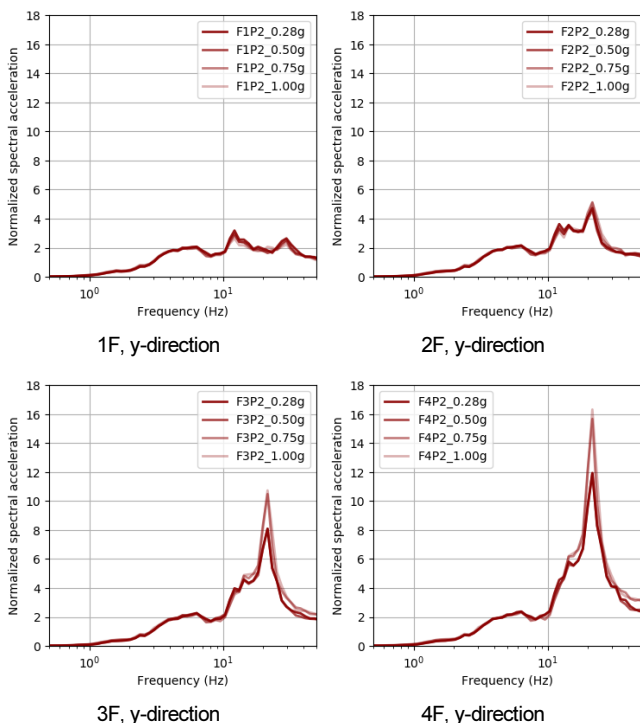


Fig. 9. Normalized horizontal in-response spectrum in y-direction

/ 감사의 글 /

본 논문은 “면진적용 원전의 확률론적 지진안전성 평가기술 개발” 연구의 일환으로 수행되었음 (NRF-2017M2A8A4014829).

/ REFERENCES /

1. Choi IK, Review and proposal for seismic safety assessment of nuclear power plants against beyond design basis earthquake, Transactions of the Korean Society of Pressure Vessels and Piping, 2017;13, 1:1-15.
2. Jeon J, Ju BS, Son H, Seismic fragility analysis of curved bridge under high frequency earthquakes, Journal of the Society of Disaster Information, 2020;16(4):806-812.
3. Son HY, Jung WY, Jeon BG, Ju BS, Seismic fragility analysis of electrical cabinet at anchor system, Korea Society for Advanced Composite Structures, 2019;10, 6:84-90.
4. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.60: Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Plants, c1973.
5. Park HG, Yang HK, Evaluation of seismic performance of nuclear power plant walls under beyond design basis earthquake with high-frequency contents, Korea Concrete Institute, 2020 May;32(3): 19-25.
6. Electric Power Research Institute, Advanced Nuclear Technology: High-Frequency Seismic Loading Evaluation for Standard Nuclear Power Plants (EPRI TR-3002009429), c2017.
7. Eem SH, Choi IK, Seismic response analysis of nuclear power plant structures and equipment due to the Pohang earthquake, EESK J, Earthquake Eng. 2018;22(3):113-119.
8. Choi IK, Kim JH, Park JH, Kim MK, Jeon JH, Seismic fragility reevaluation of SSCs in NPP with site-specific response spectrum, In Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, c2017.
9. Kim DY, Kwon TH, Nonlinear dynamic analysis of RC shear walls subject to in-plane shear, Korea Concrete Institute, 2019 Mar; 31(3):285-291.
10. Kanee ART, Kani IMZ, Noorzad A, Elastic floor response spectra of nonlinear frame structures subjected to forward-directivity pulses of near-fault records, Earthquakes and Structures, 2013;5(1):49-65.
11. Jung JW, Jang HW, Kim JH, Hong JW, Effect of second hardening on floor response spectrum of a base-isolated nuclear power plant, Nuclear Engineering and Design, 2017;322:138-147.
12. Suarez LE, Singh MP, Floor response spectra with structure-equipment interaction effects by a mode synthesis approach, Earthquake engineering & structural dynamics, 1987;15(2):141-158.