한국지진공학회 논문집 25권 3호 (통권 제141호)
2021년 5월

ISSN 1226-525X / eISSN 2234-1099
EESK J Earthquake Eng Vol. 25 No. 3, 137-144
https://doi.org/10.5000/EESK.2021.25.3.137

전단벽 구조물의 진동대 시험결과와 유한요소 내진해석 결과 비교

Comparison of Shaking Table Test Results and Finite Element Seismic Analysis Results of Shear Wall Structures

김기현[1)]* · 장영선[2)]
Kim, Ki Hyun[1)]* · Jang, Young Sun[2)]
[1)](주)코네스코퍼레이션 대리, [2)](주)코네스코퍼레이션 상무
[1)]Assistant Manager, KONES Corporation, [2)]Director, KONES Corporation

/ ABSTRACT /

In this study, the seismic safety of nuclear power plant structures is evaluated and verified by performing a vibration test on a relatively simple shear wall structure. The shear walls are the prominent members of nuclear power plants and resist the seismic load. The shear wall structure is designed and manufactured to perform shaking table tests and is used to increase the accuracy of the analytical method by comparing them with the numerical analysis results. Different results will be checked and more efficient application methods will be studied depending on the method of designing reinforced concrete structures.

Key words: Nuclear power plant, Shear wall, Vibration test, Seismic performance, Reinforced concrete structures

1. 서 론

원자력발전소는 일반적인 시설물보다 매우 엄격한 기준을 적용하여 높은 안전성을 확보하도록 설계한다. 보조건물(Auxiliary Building)과 같은 전단벽 구조물에 지진이 발생했을 경우 구조물의 거동 및 진동특성을 높은 정확도로 예측하는 것은 쉽지 않다. 발전소 내부에 설치된 기기의 구조건전성을 평가할 때는 해당 발전소의 최종안전성분석보고서(FSAR)의 특정건물, 특정 층의 응답스펙트럼곡선 자료를 이용하지만 상당히 보수적으로 산정되었기 때문에 실제 구조물의 거동과는 차이가 크다.

본 연구에서는 비교적 단순한 형태의 전단벽 구조물에 진동 시험을 수행함으로써 원전 구조물의 내진 안전성을 평가 및 입증하고자 한다[1]. 전단벽 시험체를 설계 및 제작하여 진동대 시험을 수행하고 수치해석결과와 비교하여 해석적 방법의 정확도를 높이는데 활용하고자 한다. 전단벽 구조물 진동시험에 대해서는 2장에서 기술하였고, 수치해석결과는 3장에 기술하였다. 4장에서는 전닥벽 구조물의 진동시험결과와 수치해석결과를 비교하였다.

*Corresponding author: Kim, Ki Hyun
E-mail: khkim@kones21.com
(Received February 18, 2021; Revised April 7, 2021; Accepted April 8, 2021)

2. 전단벽 구조물 진동시험

2.1 시험체 설계

전단벽 구조물 진동특성 공동연구를 통해 전단벽구조물의 진동특성을 연구하였다. 공동연구는 시험 전 제공받은 평면도와 철근상세 등의 정보로 해석을 수행하고, 부산대 지진방재연구센터에서 전단벽 시험체의 진동대 시험을 진행하여 동특성을 분석하고 가속도응답을 측정하였으며, 시험 후 해석을 개선하는 순서로 진행되었다. 진동대 시험은 센터 내에 설치된 3축 진동대를 이용하였다. 진동대 장비 사양은 Table 1과 같다.

시험체 모델은 전면부가 개방되고 3면이 '凹' 형태로 둘러싸인 3층 전단벽 구조 형태이며, 구조물의 크기 3,650 mm×2,575 mm×4,570 mm, 각 층

Table 1. Shaking Table Equipment Specification

Size	5.0 × 5.0 (m)
Degree of freedom	3 DOF
Maximum live load	600 kN
Excitation acceleration at maximum weight	1.25 g
Excitation frequency range	0.1 ~ 60 Hz

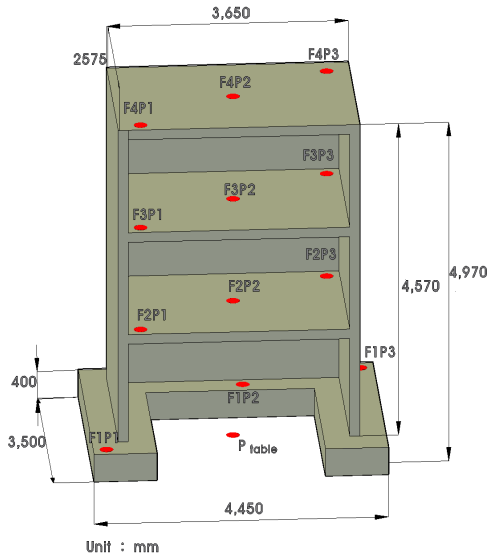


Fig. 1. Layout of Shear Wall Building and Installation Locations of Accelerometer

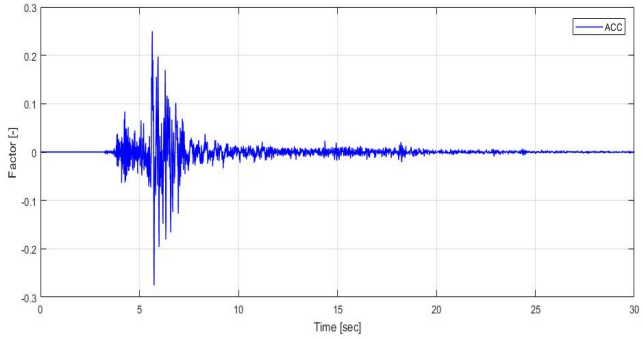


Fig. 2. 2016 Gyeongju Earthquake (MKL 0.28 g)

간 높이 1,350 mm, 벽체두께 150 mm, 슬래브 두께 140 mm이며 진동대에 설치하기 위하여 높이 400 mm의 정착판과 일체형으로 설계하였다(Fig. 1). 철근배근은 콘크리트구조 철근상세 설계기준(KDS 14 20 50)을 참고하여 철근의 배치와 피복조건을 만족하도록 하였으며 철근재료표는 Table 4와 같다. 시험체 중량 22.17톤, 정착부 포함 총 중량은 28.42톤으로 설계하였다. 구조물정착은 M35 고장력 볼트 38개를 이용하였다. 응답계측은 F#P#과 같으며 F는 층(Floor), P는 위치(Point)에 해당한다[2].

2.2 지진응답시험

시험에 사용된 입력지진은 2016년에 발생한 경주지진에 대하여 지진 발생 당시 진원에서 가장 근접한 명계리 지진관측소(MKL)에서 계측된 값을 이용하였다(Fig. 2). 지반가속도의 단위는 중력가속도 g이고, 측정시간간격은 0.01 sec, 가진시간은 30초이다. 전단벽 구조물에 실제 가속도 수준에 해당하는 0.28 g 외에 0.5 g, 0.75 g 그리고 1.0 g 수준까지 확대하여 다양한 크기의 지진하중을 입력하고 계측위치에서의 구조물응답을 확인하였다. 시험순서는 진동수 탐색(Random vibration)과 지진하중을 반복적으로 가하면서 진행되었으며, 진동수탐색으로 초기상태의 구조물 고유진동수를

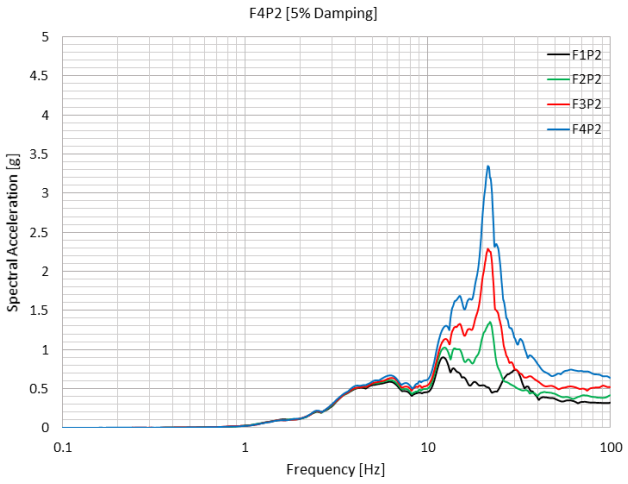


Fig. 3. F#P2 Response (Experiment)

확인하고 지진 하중을 입력하였다.

지진 하중 입력 후 진동수 탐색을 실시하여 구조물의 고유진동수 변화를 관찰하고 구조물에 발생한 결함 여부를 판단하였다. 지진하중을 입력하는 동안 실시간 가속도 값을 계측하였다. 시험 결과 중 각 층 슬래브 중앙(F#P2)에서 계측한 응답가속도에 대한 5%감쇠(Damping)곡선은 Fig. 3과 같다.

3. 수치해석

3.1 해석 개요

수치해석은 해석모델의 구현정도와 해석의 적용방법에 따라 결과의 차이가 있기 때문에 시험 전 해석과 시험 후 해석 두 차례의 해석에는 적용방법을 달리하여 진행하였다. 해석 프로그램으로는 ANSYS Mechanical (V.2020 R1)을 사용하였다[3].

수치해석에서 적용한 모델의 치수는 Fig. 1에 나타나있으며 사용한 철근과 콘크리트의 물성은 Table 2, Table 3과 같다. 입력지진에 따른 가속도 응답은 진동대 시험의 계측위치와 동일한 위치에서 구하였다.

Table 2. Material Properties of Rebar

Material	SD 400
Beam element	Structural Steel (Link180)
Density	Reflecting rebar material table
Young's modulus	205,000 MPa
Poisson's ratio	0.30

Table 3. Material Properties of Concrete

Material	Concrete
Beam element	Concrete (Solid65)
Density	2,300 kg/m^3
Young's modulus	27,644 MPa
Poisson's ratio	0.18

Table 4. Rebar Material Table (SD400)

Number	Diameter	Length (m)	Count	Total Length (m)	Unit weight (kg/m)	Total weight (ton)	Remark (ton)
D1	H10	3.038	26	78.988			3% Sur-charge
D2		2.475	130	321.750			
S1		0.528	150	79.200			
S2		0.568	136	77.248			
S3		0.668	75	50.100			
TD1		3.550	22	78.100			
TD2		3.550	22	78.100			
TD3		3.550	22	78.100			
TU2		3.550	22	78.100			
TU3		3.550	22	78.100			
sub total				997.786	0.560	0.559	0.576
ED1	H13	1.050	40	42.000			3% Sur-charge
ED2		1.100	21	23.100			
BU1		1.450	40	58.000			
BU2		1.500	21	31.500			
D3		2.475	112	277.200			
D4		3.550	56	198.800			
D5		3.400	32	108.800			
D6		4.350	16	69.600			
H1		0.369	92	33.948			
S4		1.856	36	66.816			
S5		1.856	15	27.840			
TU1		4.390	44	193.160			
W1		3.055	44	134.420			
W2		5.150	44	226.600			
W3		5.150	22	113.300			
W4		5.150	22	113.300			
sub total				1718.384	0.995	1.710	1.761
Sum						2.269	2.337

3.2 시험 전 해석

해석모델 작성 시 경계조건은 시험과 동일하게 38개의 앵커위치를 완전고정 하였으며 경계조건 평면도는 Fig. 4와 같다. 콘크리트의 경우 Fig. 6(a)과 같이 정착판, 하부슬래브, 상부슬래브, 벽체 등을 각각 모델링 후 하나로 붙여주었다. 철근은 철근재료표 중 직선형철근만 해석에 적용하였고, 도면에서 확인불가능하거나 곡선형 철근과 같이 모델에 반영되지 않은 철근은 중량만큼 주변철근에 할증 적용하였으며 배근형상은 Fig. 6(b)과 같다. 철근과 철근사이 곡선으로 연결되는 연결부는 모두 직선으로 대체하여 연결하였으며 철근이 설치되는 위치에서 콘크리트와 부착되도록 하였다. 구조물의 격자(Mesh)형상은 Fig. 6(c)과 같다. 벽체와 슬래브 부분은 육면체 격자(Hexahedrons Mesher)를 적용하였으며, 앵커가 설치되는 Hole 때문에 정착판은 사면체 격자(Tetrahedrons Mesher)를 적용하였다. Auto mesh를 적용하여 절점 128,531개, 요소 개수 46,974개이다.

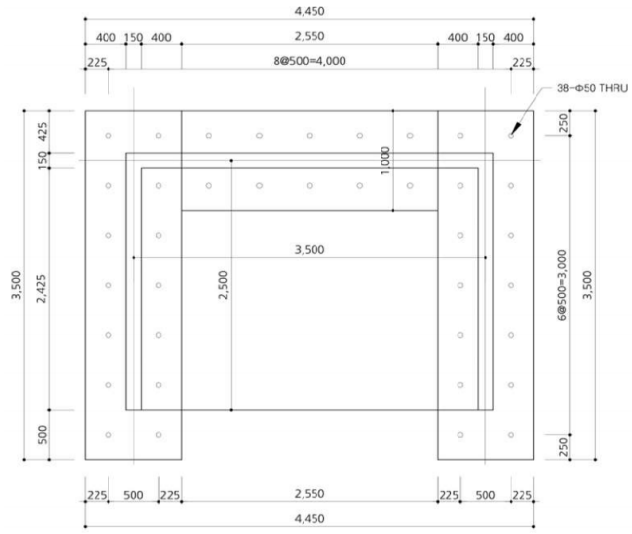


Fig. 4. Boundary Condition Plan

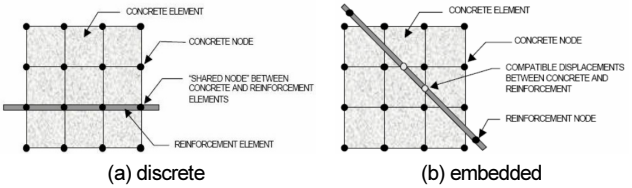


Fig. 5. Connection method (Reinforcement)

콘크리트와 철근이 함께 위치하는 절점(Node)과 요소(Element)는 해석에 오류가 많이 발생하는 위치이다. ANSYS 프로그램의 Auto Mesh를 이용하여 격자를 생성할 때 철근의 요소크기(element size)와 콘크리트의 요소크기가 다른 경우 콘크리트몸체에 위치한 철근의 격자가 콘크리트와 절점을 공유하지 못하여 실제 철근콘크리트거동을 표현하지 못할 수 있다. 철근과 콘크리트를 하나의 구조체로 적용해주기 위해서는 몇 가지 모델링 방법이 있으며, 시험 전 해석의 경우 직선형 철근만을 모델링 하였으므로 철근의 진행방향으로 콘크리트의 격자도 선형으로 생성하여 절점이 공유될 수 있도록 하는 분리(discrete)방법을 적용하였다 (Fig. 5(a)).

경계조건은 시험과 동일하게 38개의 앵커위치를 완전고정 하였으며, 모드해석(Modal Analysis)을 수행한 후 입력지진파에 대한 지진 가속도 시간이력해석을 수행하였다[4]. 경계조건 평면도는 Fig. 4와 같다. 모드 해석 결과 나타나는 첫 번째, 두 번째 모드형상은 Fig. 8과 같으며 해석결과에 영향을 주는 대부분의 모드가 고려될 수 있도록 질량참여율 95%이상으로 해석을 진행하였다. 모드해석의 1st, 2nd Mode 결과는 Table 5의 Analysis (Before Exp.)와 같다.

Table 5. Modal Analysis Results

Vibration test	1st Mode	15.25 Hz
	2nd Mode	21.50 Hz
Analysis (Before Exp.)	1st Mode	16.10 Hz
	2nd Mode	23.49 Hz
Analysis (After Exp.)	1st Mode	15.04 Hz
	2nd Mode	22.06 Hz

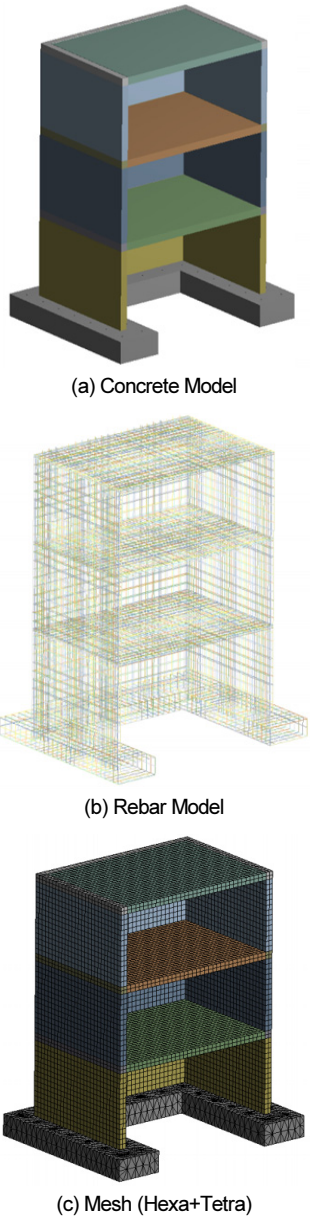


Fig. 6. Model (Analysis before Experiment)

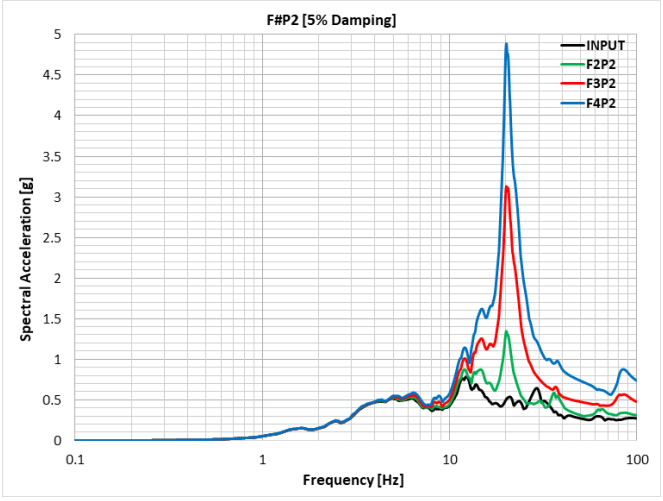


Fig. 7. F#P2 Response (Before Experiment)

지진하중의 입력방향은 구조물의 전면(Fig. 1 전후방향)이며, 시험 전 해석에서 가속도응답은 각 층 슬래브 중앙(F#P2)을 측정하여 응답스펙트럼을 작성하였다. 정착판의 응답(F1P#)은 입력(INPUT)과 큰 차이 없이 근사하게 나타났기 때문에 그래프작성 시 생략하였다. 응답스펙트럼은 5% 감쇠에 대하여 작성하였으며 해석결과는 Fig. 7과 같다.

3.3 시험 후 해석

진동대 시험의 결과를 확인한 후 적용방법을 달리하여 해석을 진행하였다. 콘크리트의 경우 전체를 하나의 솔리드로 거동할 수 있도록 캐드프로그램을 이용하여 한 몸체로 작성하였으며 Fig. 9(a)와 같다. 철근은 시험 전 해석에서 적용하지 못했던 벽체와 상부슬래브의 연결, 벽체와 정착판의 연결에 사용되는 곡선철근을 대부분 표현하고 모든 철근은 서로 연결되도록 하였다[5, 6]. 철근의 배근형상은 Fig 9(b)와 같으며, 구조물의 격자형상은 Fig. 9(c)와 같다. 정착판, 슬래브와 벽체부분을 구분하지 않고 하나의 구조물로 작성하였으므로 정착판, 슬래브 및 벽체에 대하여 모두 사면체 격자(Tetrahedrons Mesher)를 적용하였다. Auto mesh를 적용하여 절점 170,316개, 요소 99,603개인 격자모델을 형성하였으며 시험 전 해석과 비교하여 절점 개수는 약 30%, 요소 개수는 약 2배정도 증가되었다.

시험 후 해석의 경우 곡선형 철근이 많이 작성되었기 때문에 보강제의 모델이 복잡해진다. 직선형 철근만 설치할 때보다 철근이 지나가는 위치에 콘크리트의 절점이 위치하지 않는 경우가 많기 때문에 격자생성을 더 조밀하게 하여야 하며 철근과 콘크리트의 부착 시 공차(Tolerance)를 설정하는 값에 따라 철근콘크리트구조의 강성이 과하게 반영될 수 있다. 해석 시 격자생성을 더 조밀하게 진행하고 주변의 콘크리트 요소와 묶어 변위를 유지하는 방법으로 해석하는 내장형(Embedded)방법을 적용하였다(Fig. 5(b)).

시험 후 모델의 모드 해석결과는 Table 5의 Analysis(After Exp.)와 같다. 철근을 더 상세하게 모델링하고 콘크리트를 하나의 몸체로 만들고 내장형방법으로 연결한 시험 후 해석모델의 진동수가 더 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 공동 시험의 결과와 시험 후 해석의 결과가 상당히 유사한 것을 확인할 수 있다.

가속도응답측정위치(Fig. 1)는 시험 전 해석과 같이 정착판과 각 슬래브 중앙(F#P2)의 그래프를 작성하였으며 해석결과는 Fig. 10과 같다. 또한 전단효과를 확인할 수 있도록 각 슬래브의 벽면에 가까운 슬래브위치(F#P1,

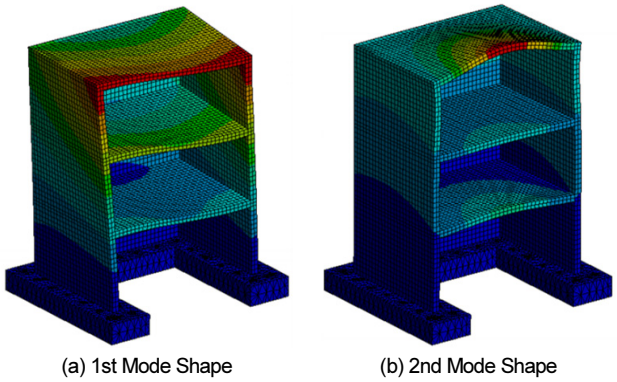
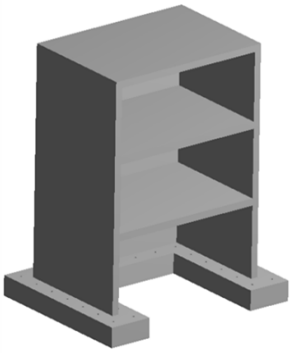
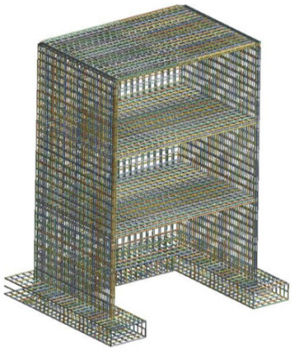


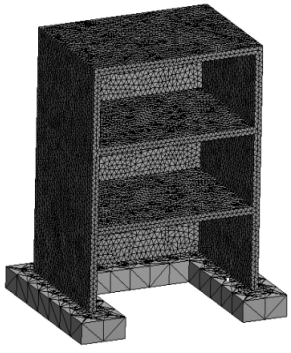
Fig. 8. Modal Shape of Analysis



(a) Concrete Model



(b) Rebar Model



(c) Mesh (Tetra)

Fig. 9. Model (Analysis after Experiment)

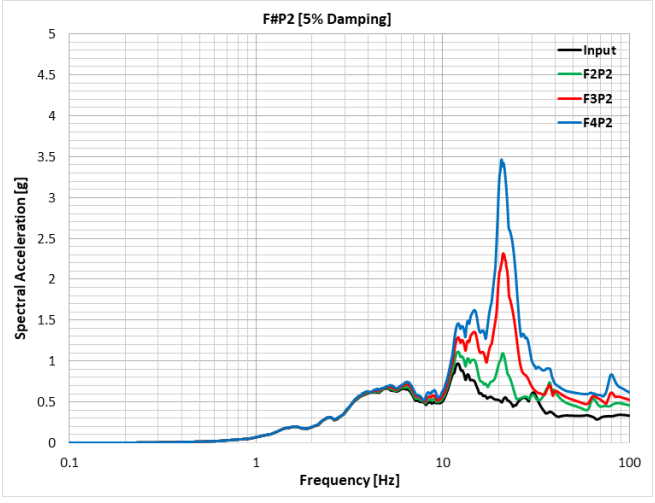


Fig. 10. F#P2 Response (After Experiment)

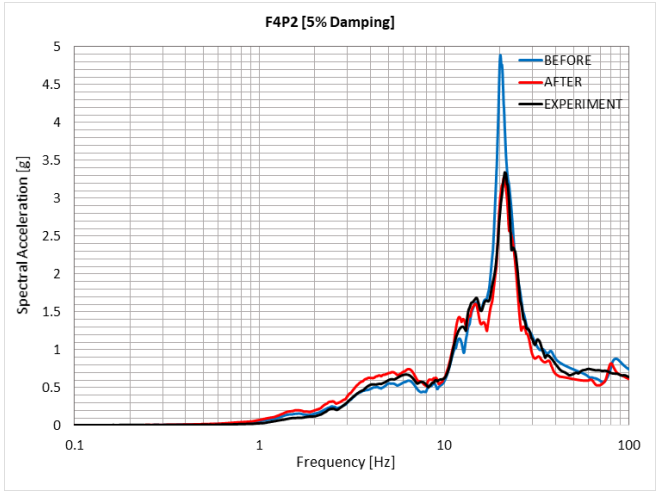


Fig. 11. Result Comparison at F4P2

F#P3)를 추가로 측정하여 응답스펙트럼을 작성하였다. 응답스펙트럼은 5% 감쇠에 대하여 작성하였으며 해석결과는 Figs. 12(a)~12(c)와 같다.

4. 결과비교

진동대 시험 결과 명계리 지진파 PGA 0.28 g~1.0 g에 대하여 모두 구조물에 균열 등의 구조적 변화는 감지되지 않았으며, 입력하중과 층별 응답의 크기가 어느 정도 비례관계에 있음을 확인 할 수 있었다. 유한요소해석에서도 응답스펙트럼이 동일한 형상으로 나타났으며 최대응답가속도의 크기에 비례하여 커짐을 확인하였고 본 논문에는 0.28 g의 응답을 비교하였다.

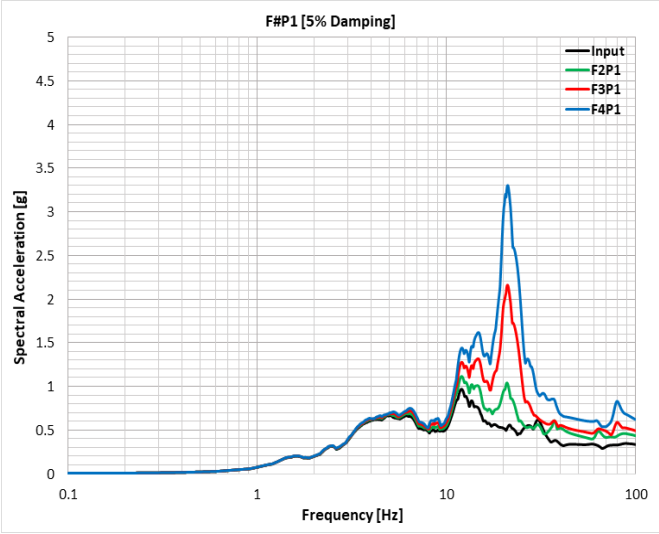
시험과 해석에서 구한 동일위치에서의 응답가속도로부터 작성한 스펙트럼을 비교한 그림은 Fig. 11과 같다. 대상위치는 상부슬래브 중앙에 해당하는 F4P2 위치이며 시험 전 해석결과는 진동대 시험에서 측정된 가속도응답보다는 큰 가속도응답을 보였으며, 시험 후 해석결과는 진동대 시험 결과와 상당히 유사한 응답이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

최대 응답이 발생하는 고유진동수는 약 21 Hz 부근으로 유사한 반면 최대응답은 시험 전 해석이 4.89 g, 시험 후 해석이 3.28 g로 차이가 있었다. 해석모델의 규격과 물성을 동일하게 적용하여도 철근과 콘크리트를 표현하고 연결하는 방법에 따라 발휘되는 강성의 차이가 있어 시험 후 해석의 결과가 시험 전 해석결과보다 최대가속도응답이 작아지는 결과를 얻었다.

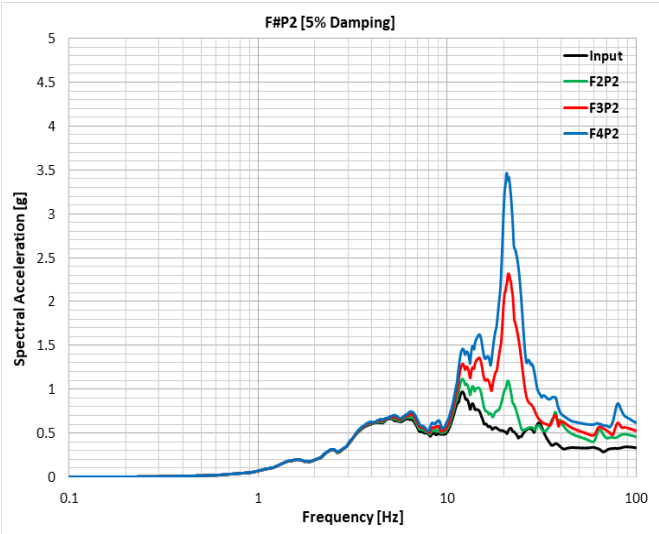
전면부로 작용하는 지진하중에 대하여 Fig. 12와 같이 동일한 층 내에서는 위치에 상관없이 유사한 응답을 보여주었다. Figs. 13~15와 같이 슬래브의 동일 위치의 응답이라도 전반적으로 높은 층으로 올라갈수록 최대응답이 증폭되는 결과를 확인할 수 있었다. 진동대 시험과 시험 후 해석에서 구한 응답가속도는 전반적으로 비슷한 가속도응답을 보여주었다.

5. 결 론

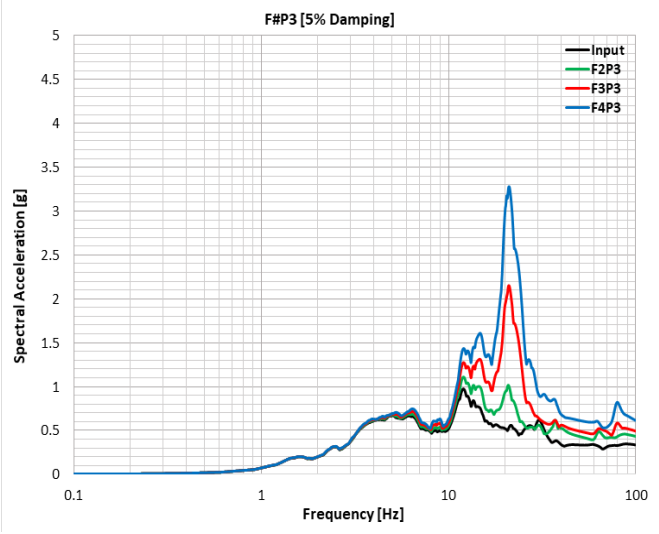
본 연구에서는 전단벽 구조물 시험체의 진동대 시험결과와 유한요소해석 프로그램을 이용한 해석결과를 비교하였다. 시험 전 해석결과는 시험체 도면과 철근재료표를 통해 도출하였고, 시험 후 해석결과는 현장에서 확인



(a) Response at F#P1

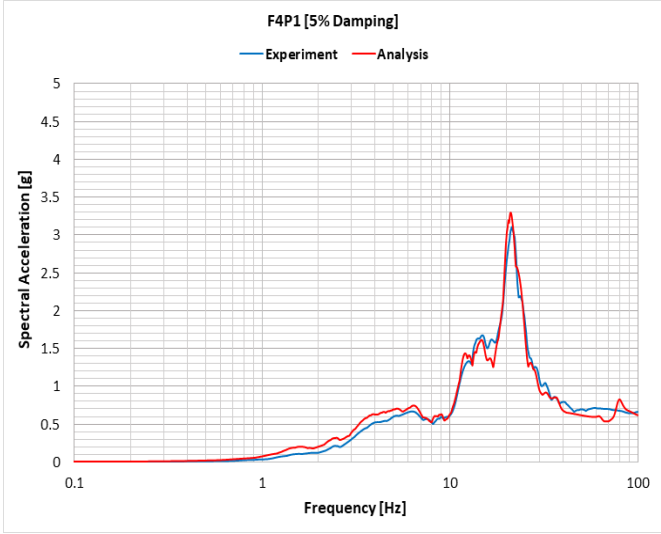


(b) Response at F#P2

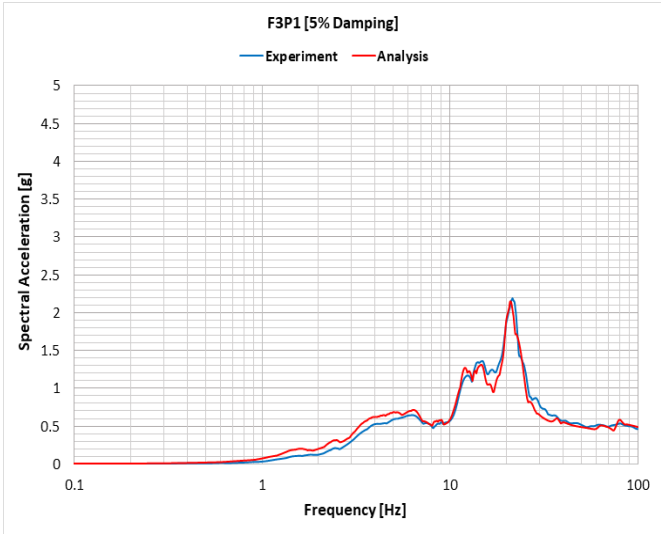


(c) Response at F#P3

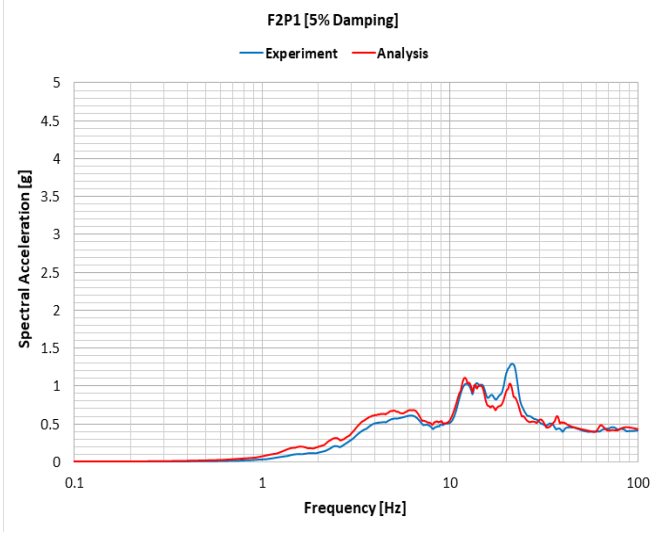
Fig. 12. Response acceleration at points of each floor



(a) Response at F4P1

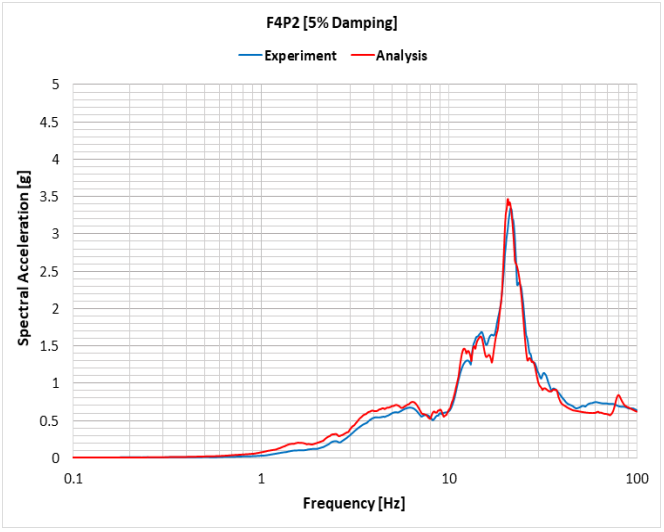


(b) Response at F3P1

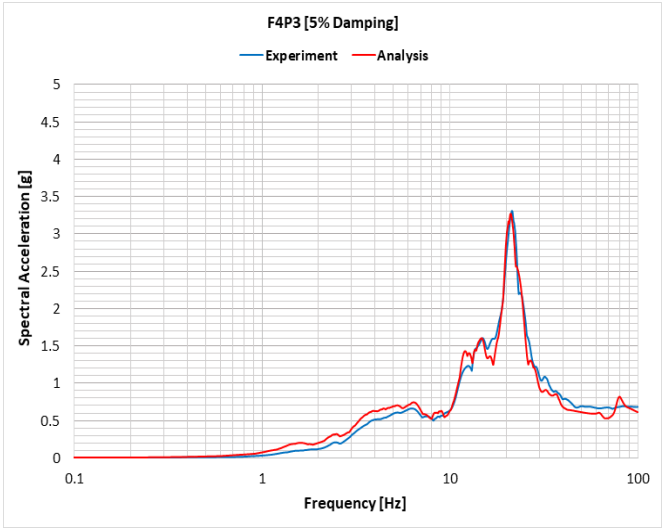


(c) Response at F2P1

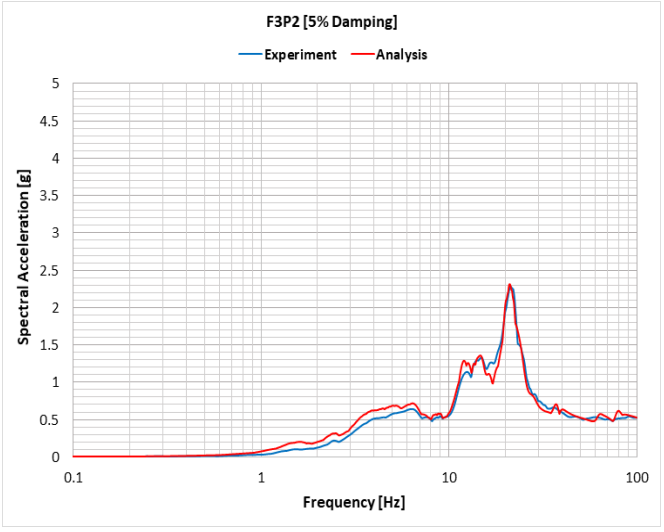
Fig. 13. Response Comparison (Experiment vs Analysis) - F#P1



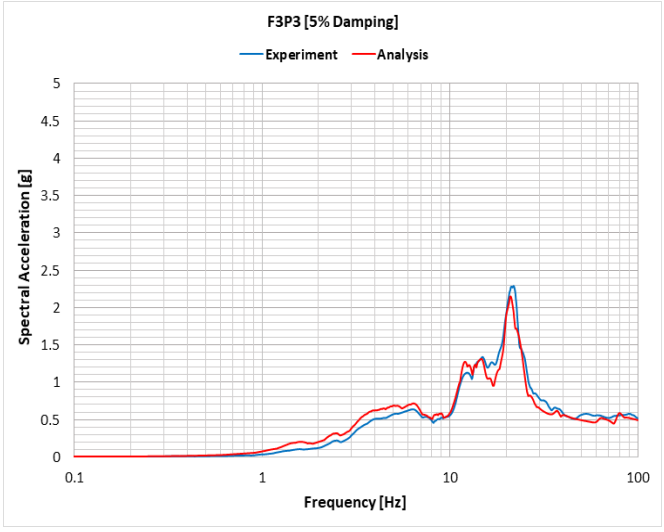
(a) Response acceleration at F4P2



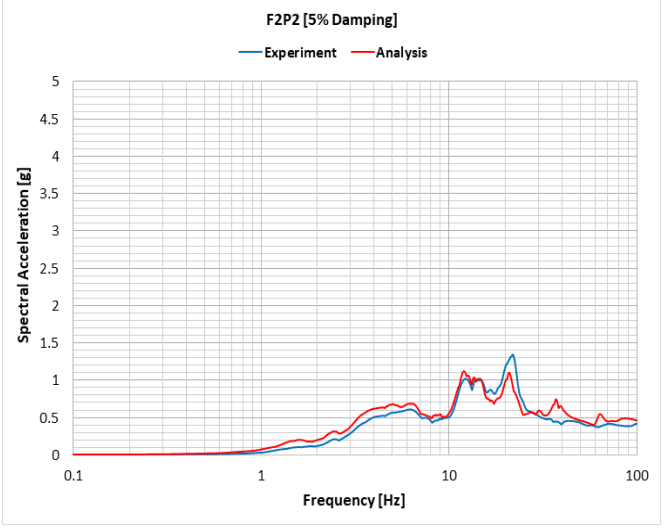
(a) Response acceleration at F4P3



(b) Response acceleration at F3P2

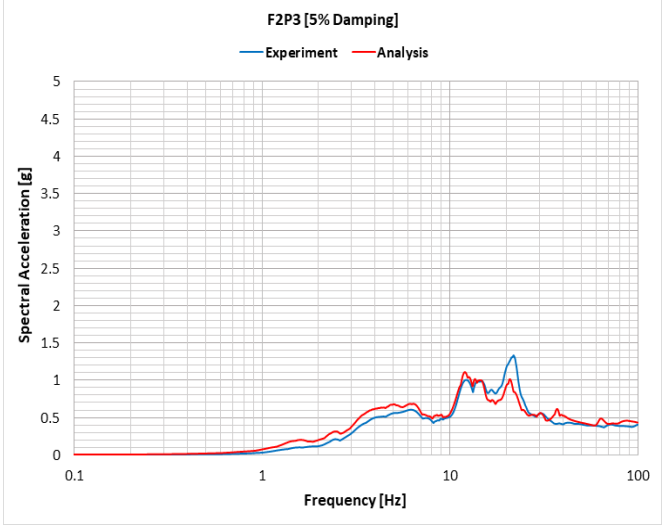


(b) Response acceleration at F3P3



(c) Response acceleration at F2P2

Fig. 14. Response Comparison (Experiment vs Analysis) - F#P2



(c) Response acceleration at F2P3

Fig. 15. Response Comparison (Experiment vs Analysis) - F#P3

한 시험체의 상세한 정보 및 개선사항을 설계에 반영하여 도출하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1) 전단벽 구조 시험체를 제작하여 진동시험을 수행하고 여러 위치에서의 가속도응답을 얻었다. 층별로 증폭되는 가속도응답결과를 확인하였고, 전면부로 작용하는 지진하중에 대하여 같은 층에서 비슷한 응답을 확인할 수 있었다.
2) 수치해석에서 철근콘크리트를 모델링할 때 사용하는 재료와 격자생성, 부착방법에 따라 응답결과가 상당히 달라질 수 있음을 확인하였다. 동일한 구조물이라도 격자생성방법에 따라 상당한 차이의 해석시간과 결과를 얻게 되는 것을 확인할 수 있었다. 철근콘크리트구조물의 거동을 표현할 때 철근과 콘크리트의 연결방법에 따라 구조물의 실제거동보다 강성이 과하게 표현되거나 부족하게 표현될 수 있음을 확인하였다.
3) 시험에서 사용한 입력지진파는 가진시간 30초 중 약 1초정도의 강진 구간을 제외하면 구조물에 큰 영향을 미칠 정도의 진동을 보여주지 않기 때문에 지진하중에 대한 전단벽 구조의 거동을 정립하기에는 정보가 부족하였다. 고진동수 성분이 많이 포함된 인공지진이나 RG 1.60스펙트럼에 부합하는 인공지진 등 다양한 입력지진해석 수행을 통한 해석데이터 구축이 필요하다.
4) 실험과 수치해석을 통해 검증된 모델을 통해 지진을 비롯한 다양한 하중에 대한 원전 구조물의 신뢰성과 안전성을 더 높일 수 있는 방안에 대한 추가 연구가 필요하다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 2020년도 한국원자력연구원에서 주관한 원전 구조물 내진 안정성 평가를 위한 전단벽 진동 실험 공동연구의 일환으로 수행되었습니다.

/ REFERENCES /

1. Korea Electric Power Industry Code (KEPIC). Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations. KEPIC END-2000. c2010.
2. Kim MG, Jung JW. The Vibration Test of Shear Wall for Seismic Performance Evaluation of Nuclear Power Plants. KAERI. 2021
3. Kim JY. ANSYS Workbench Training Manual. TSNE. c2017.
4. Chopra AK. Dynamics of Structures. 4th ed. Pearson. California. c2012.
5. Moehle JP. Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings. 1st ed: McGraw-Hill Education. c2014.
6. van de Vorstenbosch G, Charleson AW, Dowrick DJ. Reinforced concrete building performance in the Mw 7.8 1931 Hawke's bay, New Zealand, Earthquake. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering. 2002 Sep;35(3):149-164.