

2층 철골 구조물에 설치된 무정전전원장치의 실규모 진동대 실험연구

이지언¹, 박원일¹, 최경규^{2*}, 오상훈³, 박훈양⁴

Full-scale Shaking Table Test of Uninterruptible Power Supply Installed in 2-stories Steel Structure

Ji-Eon Lee¹, Won-Il Park¹, Kyoung-Kyu Choi^{2*}, Sang-Hoon Oh³, Hoon-Yang Park⁴

Abstract: In this study, the shaking table tests were carried out on six types of non-structural elements installed on a full-scale two-story steel structure. The shaking table tests were performed for non-structural elements with and without seismic isolators. In this study, the seismic performance of Uninterruptible Power Supply (UPS) specimens was tested and investigated. Non-seismic details were composed of conventional channel section steel beams, and the seismic isolators were composed of high damping rubber bearing (HDRB) and wire isolator. The input acceleration time histories were artificially generated to satisfy the requirements proposed by the ICC-ES AC156 code. Based on the test results, the damage and dynamic characteristics of the UPS with the seismic isolator were investigated in terms of the natural frequency, damping ratio, acceleration time history responses, dynamic amplification factors, and relative displacements. The results from the shaking table showed that the dynamic characteristics of the UPS including the acceleration response were significantly improved when using the seismic isolator.

Keywords: Full-scale structure, Uninterruptible power supply, Combined seismic isolator, High damping rubber bearing, Shaking table test, Dynamic characteristics

1. 서 론

국내 경주, 포항지진에서는 필로티, 아파트 등에서 구조물의 피해 뿐 아니라 광범위한 비구조요소의 피해가 다수 발생하였다(Lee et al., 2019; Kim et al., 2018). 특히 비구조요소의 자체 손상, 낙하 및 전도는 건축물의 기능 상실과 함께 전기 공급 단락 등 2, 3차 피해를 초래하는 등 심각한 손실을 유발하였다. 경주 및 포항지진 당시 비구조요소의 피해규모는 구조요소의 3배 이상으로 보고되었으며 이는 비구조요소의 내진 성능 확보가 내진설계에서 매우 중요한 요소로 인식되는 계기가 되었다(Korea Architectural Institute, 2018; Ministry of the Interior and Safety, 2018).

한편, 비구조요소는 제품 및 시공 상세가 복잡하고 다양한 부품으로 구성되므로 해석적 평가는 한계가 있다. 이에 내진 성능을 정확히 파악하기 위해서는 진동대를 이용하여 인공지

진파를 가력하여 취약부 및 한계상태를 분석하는 실험적 평가가 주로 수행된다(Jung et al., 2019). 이때, 비구조요소는 주요 구조부재와 연결되어 건축물의 거동으로부터 큰 영향을 받기 때문에 실규모 건축구조물 모형을 함께 사용하면 보다 정확한 분석이 가능하다.

최근 Chen et al. (2012)은 야외 진동대를 이용하여 5층 실험용 구조물에 6종의 비구조요소를 부착하여 진동대 실험을 수행하고 각 비구조요소의 성능목표의 달성여부를 분석하였다. Furukawa et al. (2013)은 면진시스템을 적용한 5층 규모의 구조물에 의료기기를 포함하여 총 102종의 비구조요소를 설치하고 진동대 실험을 수행하였으며 구조물의 면진설계에 따른 비구조요소의 거동을 확인하였다. 국외의 경우 여러 종류의 비구조요소가 부착된 실규모 대형 구조물에 대한 진동대 실험연구가 수행되고 있는 반면, 국내의 경우 실규모 건축물 모형을 활용한 선행 연구가 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 2층 규모의 철골 구조물에 7종의 비구조요소를 설치하여 각 비구조요소의 비내진상세와 내진상세를 적용한 2차레의 단축 진동대 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 7종의 비구조요소 중 전기비구조요소로 분류되는 무정전전원장치(Uninterruptible Power Supply, UPS)를 대상으로 현행 비내진상세와 면진상세를 적용하여 2차레 진동대 실험을 수행하였다. 연구대상인 무정전전원장치는 건축물의

¹정희원, 숭실대학교 건축학부, 석사과정

²정희원, 숭실대학교 건축학부 교수, 교신저자

³정희원, 부산대학교 건축공학과 교수

⁴정희원, (주)에너테크 기술연구소

*Corresponding author: kkchoi@ssu.ac.kr

Department of Architecture Engineering, Soongsil University, Seoul, 06978, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2022년 7월 31일까지 학회로 보내주시면 2022년 8월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

전력시스템을 관리 및 통제하는 케비넷형 전기비구조요소로 지진 등 재난 발생 시 건물의 성능 및 기능유지를 위해 필수적이다. 따라서 건축물의 기능 마비를 방지하고 비상전기를 공급하기 위하여 UPS의 설치 시 면진장치가 효과적이다.

케비넷형 전기 비구조요소에 주로 사용되는 면진장치로는 크게 볼베어링형, 레일형 등이 있으며, 국외의 경우 와이어면진장치가 많이 적용되고 있다. Balaji et al. (2015)은 와이어의 형태 및 로프의 개수에 따른 면진장치의 강성 및 감쇠비의 영향을 분석하였으며 Leblouba et al. (2019)은 와이어면진장치의 반복가력실험을 통해 동적 거동을 분석하였다. 한편, 국내에서 주로 사용되는 볼베어링 유형과 레일형의 면진장치의 경우 전도의 위험성과 수직 진동에 대한 취약성 등 많은 문제점이 제기되고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 국내에서는 대형구조물에도 많이 사용되는 적층고무 면진장치를 소형 설비에 적용하기 위한 연구들이 이루어지고 있다. Choun et al. (2003)은 천연고무 베어링 (Natural Rubber Bearing)과 고감쇠고무 베어링 (High Damping Rubber Bearing)을 저중량 소규모 기기에 적용하고 진동대 실험을 통해 면진효과를 분석하였으며 Nam et al. (2021)은 납-고무 베어링 (Lead-Rubber Bearing)을 변압기에 적용하고 수치해석을 통한 지진 저항성능 및 특성을 평가하였다.

본 연구에서는 무정전전원장치의 내진성능 개선을 위해 고감쇠고무와 와이어면진장치를 결합한 2층 구조의 복합면진장치를 개발하였으며, 실규모의 2층 철골 구조물 1층에 무정전전원장치를 설치한 후 2차레의 단축 진동대 실험을 수행하였다. 2차레의 실험 결과를 바탕으로 복합면진장치의 적용 전후에 대한 동적 거동을 예측하고 비교 및 분석하였다.

2. 진동대 기반 실험

2.1 2층 철골 구조물 및 실험계획

2.1.1 실험 셋업

실규모의 2층 철골 구조물에 건축 및 비건축 비구조요소의

Table 1 Geometric properties of structure members of 2-stories steel structure

Members	Dimensions (mm)			Sectional area (mm ²)	Unit weight (N/mm)	Moment of inertia (mm ⁴)	
	H×B	t ₁	t ₂			I _x	I _y
Columns (SS275)	400×200	8	13	8.41×10 ³	6.47×10 ⁻¹	2.37×10 ⁸	1.74×10 ⁷
Girders, Beams (SS275)	340×250	9	14	1.02×10 ⁴	7.81×10 ⁻¹	2.17×10 ⁸	3.65×10 ⁷

현행 비내진상세와 면진상세를 적용하여 두 차례의 진동대 실험을 수행하였다. 철골 구조물 내부에는 건축 비구조요소 (외장재, 내장재, 천장재, 이중바닥) 4종과 전기 및 기타 비구조요소 (무정전전원장치, 배관, 수조) 3종을 포함하여 총 7종의 비구조요소를 설치하였다. 전체적인 실험 셋업 모습은 Fig. 1에서 제시되어 있으며 본 연구대상인 UPS를 제외한 다른 비구조요소들은 그림에서 생략하였다.

UPS의 경우 일반적으로 구조물의 지하 또는 지상 1층에 설치되는 점을 고려하여 철골 구조물의 1층 왼쪽 측면에 설치하였다. UPS가 설치된 철골 구조물을 기준으로 좌우측에 기둥 프레임을 설치하고, 프레임에 와이어 LVDT를 부착하여 UPS와 구조물의 상대 변위를 계측하였다. 2층 철골 구조물은 크기 9.0 m × 4.5 m, 높이 7.2 m의 규모이며 주요 부재의 제원과 구조물의 치수는 Table 1과 Fig. 2에 제시되어 있다.

구조물의 각 층은 7개의 거더와 2개의 보로 이루어져 있으

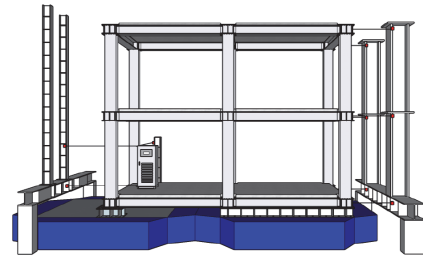


Fig. 1 Test set up

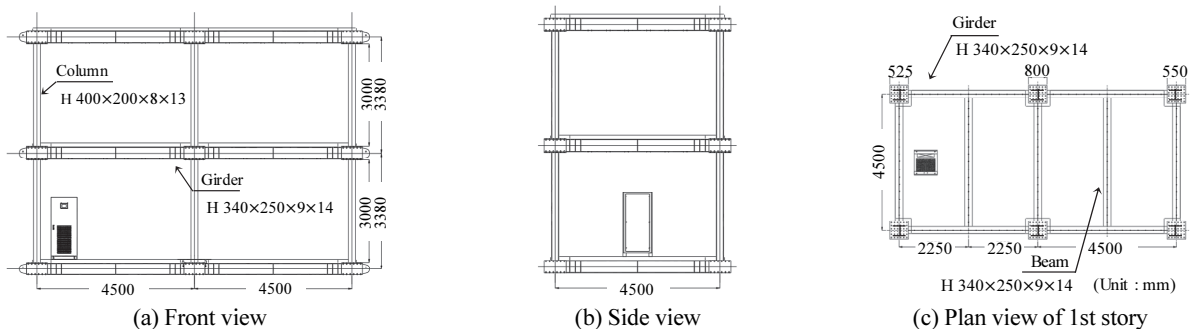


Fig. 2 Details of 2-stories steel structure

Table 2 Detailed specifications of shaking table

	Table size (m)	Degree of freedom	Full payload (tf)	Acceleration at full payload (g)		Acceleration at nominal payload (g)		Maximum stroke (mm)		Operation frequency range (Hz)
				X-axis	Y-axis	X-axis	Y-axis	X-axis	Y-axis	
Table A	5.0 × 5.0	3	30	0.85	0.85	1.00	1.00	± 300	± 200	0.1 ~ 60
Table B			60	1.00	1.00	1.25	1.25			

Table 3 Evaluation of required response spectrum

S_{DS} (g)	z/h	Horizontal acceleration	
		A_{FLX-H} (g)	A_{RIG-H} (g)
0.55	0	0.88	0.66

며, 그 위에 크기 9.2m × 4.7m, 두께 0.11m인 철근 콘크리트 슬래브를 설치하였다. 슬래브는 1, 2층과 옥상까지 총 3개로 각 층에 설치된 기둥 6개와 연결되며 기둥의 상단과 하단에는 각 12개의 M24 볼트를 통해 체결되었다. 슬래브의 개당 무게는 약 10t으로 3개의 슬래브가 설치된 구조물의 총 자중은 약 58tf이며 모든 비구조요소를 설치한 구조물의 총 중량은 대략 60tf로 측정되었다. 동특성해석을 통해 2층 철골 구조물의 고유주기 및 진동수를 산정하였으며 2차 모드까지 분석하였다. 1차 고유주기는 0.45 sec, 고유진동수는 2.22 Hz이며 2차 고유주기는 0.17 sec, 고유진동수는 5.88 Hz로 확인되었다.

2.1.2 진동대 실험방법 및 가진계획

7종의 비구조요소가 설치된 2층 규모 구조물의 총 중량과 크기를 고려한 두 개의 진동대는 가력 변위를 실시간으로 동기화하여 실험을 진행하였다. 두 진동대의 크기는 각각 5.0 m × 5.0 m로 가용 중량은 각각 30tf, 60tf으로 자세한 사양 및 성능은 Table 2에서 제시하고 있다. 구조물의 일체화된 거동을 위하여 각각의 진동대인 Table A, B에 각 2개씩 총 4개의 베이스 거더를 설치한 후 베이스 거더 위에 2층 철골 구조물을 연결하였다.

이때, 4개의 베이스 거더와 진동대는 총 32개의 M30 볼트로 체결되었다. 2층 철골 구조물의 기둥 6개를 통해 베이스 거더가 연결되었으며 기둥의 상단과 하단에는 각 12개의 M24 볼트를 통해 체결되었다.

진동대 실험은 ICC-ES AC156 (2010)을 따라 구조물의 장변방향에 대해 1축으로 가진하였으며, AC156에서 제시하고 있는 요구응답스펙트럼을 이용하여 생성된 인공지진파가 사용되었다. 설계스펙트럼가속도 S_{DS} 는 KDS 41 17 (2019)의 지진구역II, 지반은 S_D 로 가정하여 산정하였으며, 아래의 식 (1)과 (2)를 통해 수평 방향 요구응답스펙트럼 가속도 (A_{FLX-H} , A_{RIG-H})를 산정하였다.

Table 4 Test protocol

Test no.	Events	Test with non-seismic details	Test with seismic isolators
		PGA(g)	PGA(g)
1	Random test 1	-	-
2	AC156 30%	0.102	0.105
3	Random test 2	-	-
4	AC156 60%	0.193	0.206
5	Random test 3	-	-
6	AC156 100%	0.336	0.358
7	Random test 4	-	-
8	AC156 150%	0.537	0.529
9	Random test 5	-	-
10	AC156 200%	-	0.628

$$A_{FLX-H} = S_{DS} \left(1 + 2 \frac{z}{h} \right) \tag{1}$$

$$A_{RIG-H} = 0.4 S_{DS} \left(1 + 2 \frac{z}{h} \right) \leq S_{DS} \tag{2}$$

이때, 본 실험대상인 UPS가 1층에 설치되므로 높이 계수비 z/h 를 0으로 적용하였다 (Table 3).

진동대 실험을 위해 생성된 인공지진파의 응답스펙트럼 (Target Response Spectrum, TRS)이 AC 156에서 제시하고 있는 요구응답스펙트럼 (Required Response Spectrum, RRS)를 만족하고 있음을 확인하기 위하여 Fig. 3은 TRS와 RRS를 비교하고 있다. TRS가 AC 156 기준에서 제시하는 1.3 Hz 이상

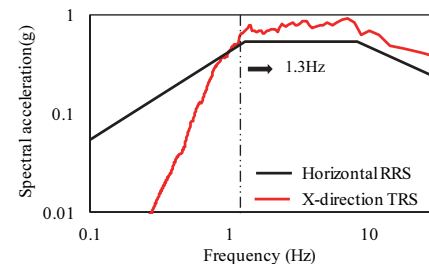


Fig. 3 Comparison between spectra of input acceleration and RRS target

주파수 영역을 포함하고 있음을 확인하였다.

요구응답스펙트럼의 가속도를 기준으로 지진하중 크기를 증가시켜 실험을 수행하였다. 비내진상세를 사용한 1차 진동대실험에서는 인공지진파 크기의 30%, 60%, 100%, 150%까지 각각 점증가진하였다. 2차 진동대실험에서는 면진상세를 적용하므로 인공지진파 크기의 180%까지 가진하였다. 가진 계획은 Table 4와 같으며 공진 주파수 탐색실험의 경우 1분 이내 동안 1~50Hz의 주파수 범위로 가진하였다.

2.1.3 계측 계획

2층 철골 구조물의 거동 분석을 위하여 가속도 및 변위를 계측하였으며 계측 계획은 Fig. 4와 같다. 가속도 계측을 위하여 각 층의 슬래브 중앙에 3축 가속도계를 총 3개 설치하였다. 철골 구조물 우측의 정면과 후면 방향에 대한 변위 계측을 위하여 구조물의 우측에 프레임을 추가적으로 설치하여 총 6개의 와이어 LVDT를 부착하였다.

2.2 무정전전원장치 실험계획

2.2.1 무정전전원장치 및 비내진정착상세

본 연구대상인 무정전전원장치는 전기가 중단되거나 전압 변동과 같은 장애 발생 시 안정적인 전기공급에 도움을 주는

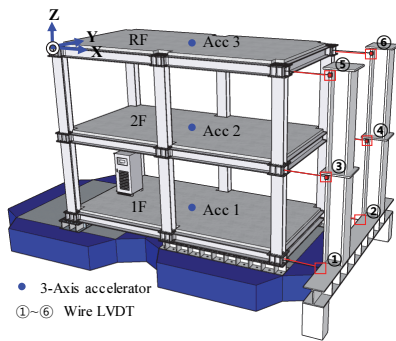


Fig. 4 Measurement location at 2-stories steel structure

전력설비이다. 1, 2차 진동대실험에 사용한 UPS는 IEC - 60950 (International Electrotechnical Commission 2019) 규격에 따른 100 kVA 용량이며, 크기는 750 mm × 800 mm, 높이는 1800 mm로 총 중량은 800 kg이다. UPS의 외관은 케비넷 형태로 구성되어 있으며 내부에는 변압기, 냉각기, 컨트롤 스위치와 같은 다양한 부품이 설치되어 있다. 특히 변압기의 경우 제조사의 규격에 따르면 총 질량 중 약 50%를 차지하고 있다. 이에 따른 UPS의 무게중심은 변압기가 설치된 수직 방향의 높이 1/3, 평면상 중심에 위치하고 있다(Fig. 5). 1차 실험에 사용된 내진보강 전UPS는 Fig. 5(a)와 같으며 하단부에 X 방향으로 2개의 C형강이 설치되고 C형강은 슬래브에 M16 웨지앵커 4개로 정착하는 상세를 가진다.

2.2.2 정착부 면진장치 상세

비내진정착상세를 가지는 UPS의 경우 지진 발생 시 가속도에 취약하며 특히 내부부품에서 큰 응답가속도를 보인다(Lee et al., 2019). 이는 내부부품의 손상을 유발하여 설비의 기능수행에 큰 장애를 초래할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 가속도에 민감성을 보이는 UPS의 내진보강을 위하여 고감쇠고무와 와이어 면진장치로 구성된 복합면진장치를 개발하였다

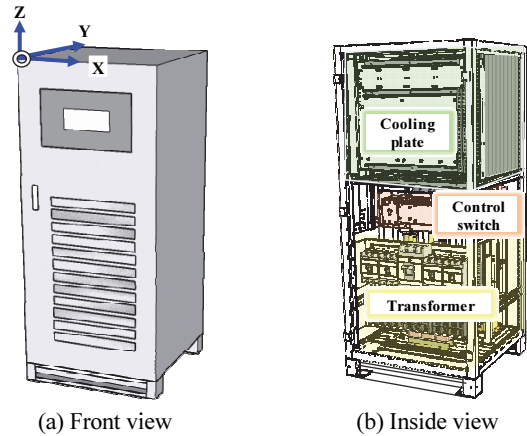


Fig. 5 Details of tested UPS

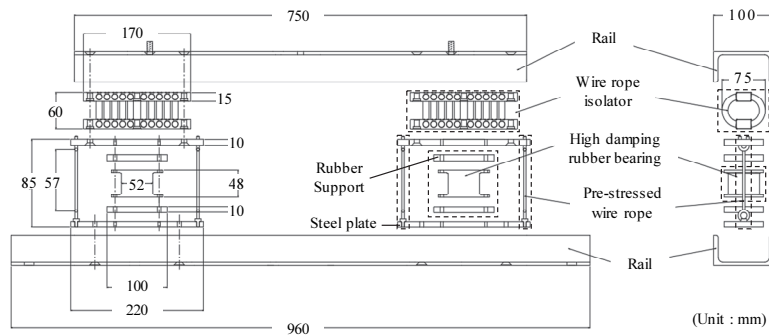


Fig. 6 Details of combined isolator system installed with rails

(Fig. 6). 일본 면진 협회에서는 효과적인 감쇠 성능을 위하여 고감쇠고무에 약 6 MPa의 압축응력이 재하되어야 한다고 규정하고 있다 (Japan Society of Seismic Isolation, 2002).

본 연구에서는 Fig. 7과 같이 고감쇠고무 위에 와이어 면진장치를 배치하여 2층 구조로 구성하였다. 또한, 고감쇠고무의 양 끝단에 프리스트레싱 와이어를 도입하여 고감쇠고무에 압축응력을 받을 수 있도록 개발하였다. 프리스트레싱 와이어에 볼트 조임을 통하여 6 MPa의 인장응력을 가력하였으며 이를 통해 고감쇠고무에 동일한 면압이 적용될 수 있도록 설계하였다. 볼트를 통해 인장응력을 가력한 후, 프리스트레싱 와이어를 연결하고 있는 볼트 풀림을 방지하기 위하여 용접으로 고정하였다. 프리스트레싱 와이어를 설치함에 따라 고감쇠고무가 받는 낮은 면압을 보완하고 소형기기에서도 사용이 가능하였다. 고감쇠고무의 최소 면압을 위하여 프리스트레싱 와이어의 도입뿐만 아니라 와이어면진장치를 직렬배치함에 따라 요구 면압을 확보하였다. 와이어 면진장치의 경우 강성 및 감쇠가 우수하여 국외에서 기계 및 전기 설비에 많이 적용되고 있는 면진장치로써 2층에 배치함에 따라 에너지 소산을 증대할 수 있도록 설계하였다. 복합면진장치의 각 구성요소에 대한 제원을 Table 5에서 나타내고 있다.

개발된 복합면진장치는 2차 진동대 실험에서 UPS에 적용하였다. 비내진정착상세인 ㄷ형강 다리부를 대신하여 UPS의

Table 5 Material properties of 2-stories combined isolator system

Stories (Components)	Mechanical properties
First story (High damping rubber bearing)	<ul style="list-style-type: none"> Shear modulus: 0.4 MPa Prestress surface pressure: 6.0 MPa Horizontal stiffness(k_h): 81.5 N/mm Vertical stiffness(k_v): 10426.2 N/mm
Second story (Wire isolator)	<ul style="list-style-type: none"> Wire rope yield strength: 205 MPa Wire rope ultimate tensile strength: 520 MPa Horizontal stiffness(k_h): 93.4 N/mm in X-direction, and 87.2 N/mm in Y-direction Vertical stiffness(k_h): 2329.8 N/mm

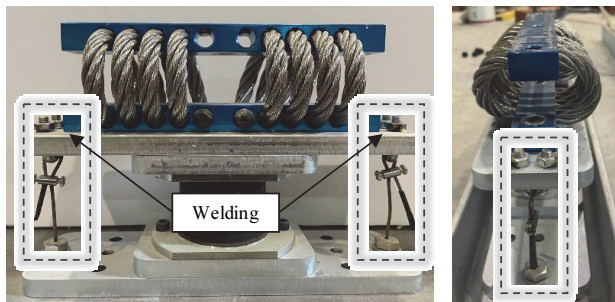


Fig. 7 Photo of combined isolator system

하단부에 복합면진장치를 설치하였다. 이때, 설치의 편이를 위하여 레일 내부에 2개의 복합면진장치를 설치되도록 레일 형으로 제작하여 설치하였다.

2.2.3 계측 계획

복합면진장치의 적용 여부에 따른 UPS의 동적 특성을 분석하기 위하여 가속도와 변위를 계측하였다. 이를 위해 3축 가속도계 5개 (Acc 1,2,3,4,5)와 와이어 변위계 (Wire LVDT ①, ②, ③, ④) 4개를 설치하였다. 1, 2차 진동대실험의 동적 응답을 비교하기 위하여 두 실험의 계측 계획 및 계측기의 위치는 동일하게 적용하였다 (Fig. 8). 3축 가속도계는 UPS의 상하부 (Acc 1, 2)와 내부부품 중 컨트롤 스위치 (Acc 3), 냉각기 프레임 (Acc 4), 변압기 (Acc 5)에 부착하였다. UPS의 상대변위를 계측하기 위하여 2층 구조물의 좌측에 Wire LVDT 부착할 수 있는 프레임을 설치하였으며, 이를 통해 UPS 상하부의 X, Y 방향에 대한 변위를 도출하였다.

3. 2층 철골 구조물 진동대 실험 결과

3.1 구조물의 동적 특성

2층 철골 구조물의 전체적인 거동을 파악하기 위하여 각 층의 슬래브 및 프레임 우측에서 가속도와 변위를 계측하였다. 공진 주파수 탐색실험 시, 계측된 가속도를 이용하여 고유진동수 및 주기를 확인하였다. 구조물의 고유진동수를 평가하기 위하여 진동대의 입력가속도에 대한 FFT(Fast Fourier

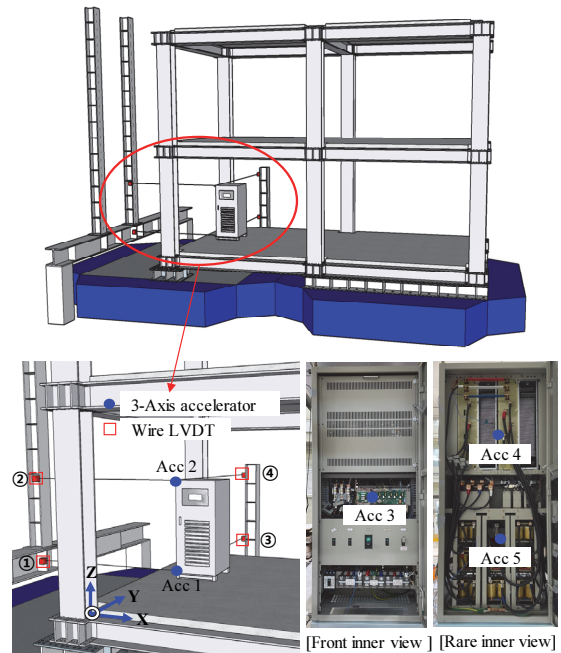


Fig. 8 Measurement location of UPS

Transform) 대비 구조물의 응답가속도에 대한 FFT로 유도되는 전달함수를 이용하였다. 해석결과를 통한 구조물의 고유진동수는 1차 모드에서 2.298 Hz (0.435 sec), 2차 모드에서 5.988 Hz (0.167 sec)로 확인되었으며 진동대 실험을 통한 고유진동수는 Table 6과 같다. 구조물의 분석 시 부재 접합특성을 고려하여 준 강접합을 가정하였다. 실제 실험 시, 구조물 내부의 7종의 비구조요소의 영향으로 편접합과 유사하게 거동함에 따라 해석결과와 실험결과에 다소 차이가 존재하며 실험결과에서 더 작은 고유진동수가 나타났다.

1, 2차 진동대실험을 통해 도출된 고유진동수의 분석 결과, 1차 진동대실험 대비 2차 진동대실험의 고유진동수가 더 낮은 값으로 나타났다(Fig 9). 이는 실험이 진행됨에 따라 구조물 일부가 비선형 상태로 접어들고 강성이 저하되었음을 의미한다.

Table 6 Natural frequencies at 2-stories steel structure

Test no.	Events	Test with non-seismic details (Hz)		Test with seismic isolators (Hz)	
		1st mode	2nd mode	1st mode	2nd mode
1	Random test 1	1.71	5.45	1.53	4.95
3	Random test 2	1.59	4.57	1.52	4.47
5	Random test 3	1.54	4.45	1.48	4.56
7	Random test 4	-	-	1.47	4.45
9	Random test 5	-	-	1.42	4.45

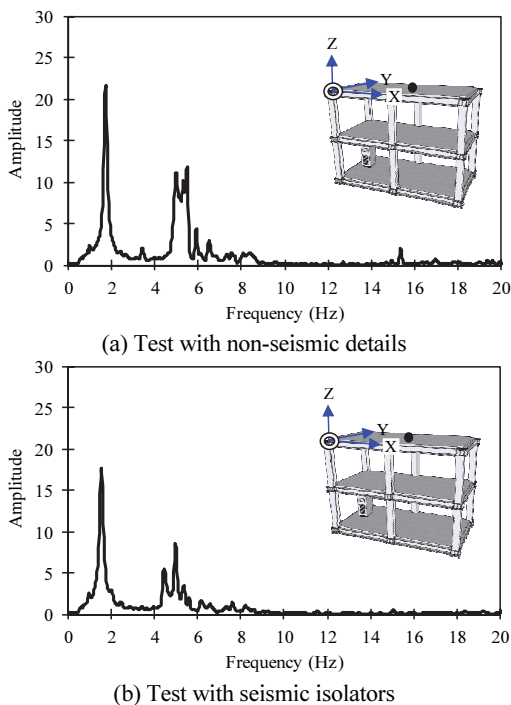


Fig. 9 Transfer function-frequency curves at 2-stories steel structure

비내진보강 상세의 비구조요소를 설치한 1차 진동대실험과 면진장치를 적용한 2차 진동대실험에 대해서 AC 156에 기반하여 생성된 인공지진파의 100% 크기로 가진 시 구조물 최상층에서 계측된 가속도의 시간이력곡선은 Fig. 10과 같다. 1, 2차 진동대실험에서 구조물의 최대응답가속도는 1.01g, 0.89g로 계측되었으며 입력 지진파의 최대응답가속도인 0.34g, 0.36g와 비교하였을 때, 진동대로부터 구조물의 최상층까지 약 2배 이상 가속도가 증폭되었음을 확인하였다.

4. UPS 진동대 실험 결과

4.1 응답가속도 분석

UPS의 상하부 및 내부부품에 부착한 3축 가속도계를 이용하여 비내진정착상세와 면진장치를 적용한 UPS의 응답가속도를 비교 및 분석하였다. 구조물의 장변 방향에 대하여 1차 진동대 실험이 수행되었으며 실험이 진행됨에 따라 응답가속도를 도출하였다. Fig. 11은 UPS의 내부부품 중 냉각기와 변압기에서 측정된 최대 응답가속도를 최대지반가속도와 대비하여 나타낸 것이다.

응답가속도 분석 결과, 모든 계측 부위에서 1차 진동대실험 결과 대비 2차 진동대실험에서 응답가속도가 감소되는 양상을 보였으며 이는 UPS에 면진장치를 적용함에 따른 결과로 판단된다. 특히 AC156 60% 가진 시, 1차 진동대실험에서 가장 큰 응답가속도가 계측되었던 냉각기의 경우 복합면진장치를 적용한 2차 진동대실험에서는 약 38% 저감된 응답가속도

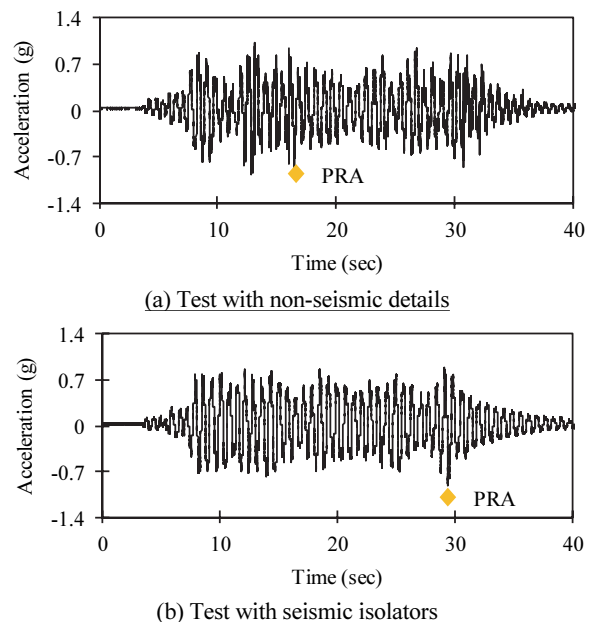
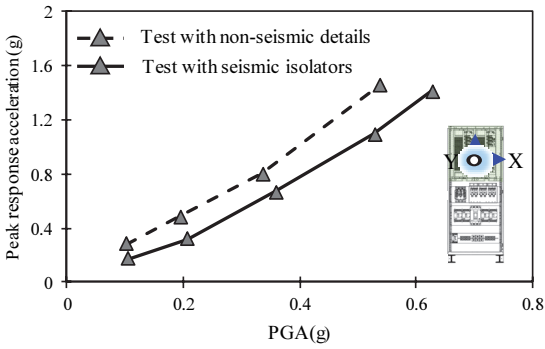
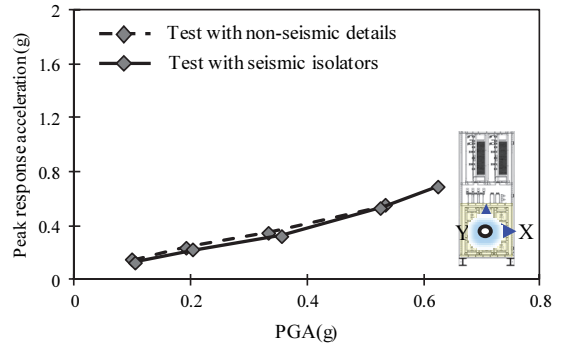


Fig. 10 Acceleration response time histories of the 2-stories steel structure of AC156 100% test



(a) At cooling plate of UPS



(b) At transformer of UPS

Fig. 11 Peak response acceleration versus PGA for test specimens

계측되었음을 확인하였다. 반면, 변압기의 경우 1, 2차 진동대 실험 결과 중 가장 작은 응답가속도가 계측되었으며 10% 이내의 감소율로 가장 낮은 변화율을 확인하였다. 이는 변압기가 UPS에서 가장 큰 질량을 차지하고 있으며 하단부에 다수의 볼트로 체결되어 있음에 따라 큰 움직임이 없었다고 분석된다.

Fig. 12는 가장 큰 감소율을 보인 냉각판 프레임의 응답가속도 시간이력을 나타내고 있다. PGA의 감소뿐만 아니라 복합면진장치를 적용함에 따라 UPS의 전체적인 흔들림이 감소하였음을 확인하였다.

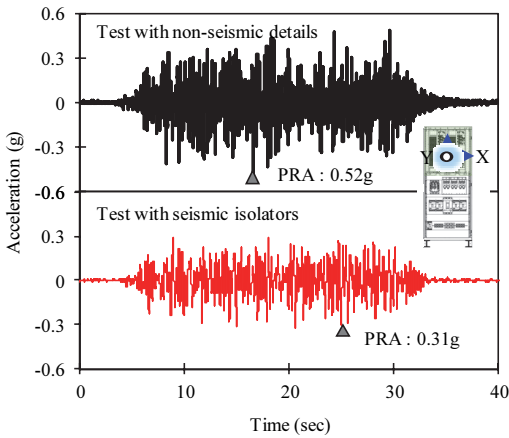
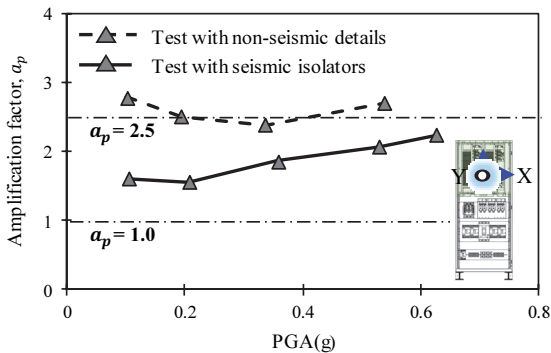


Fig. 12 Acceleration response time histories at cooling plate of AC156 60% test

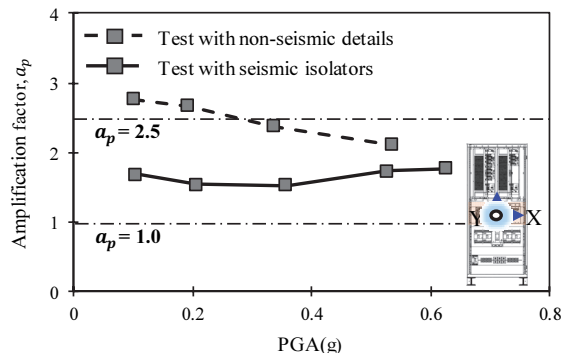
4.2 동증폭계수 분석

본 연구에서는 실험체의 상하부의 응답가속도와 진동대에서 계측된 응답가속도의 비를 사용하여 UPS의 가속도 증폭을 평가하였다. 실험을 통한 가속도 증폭 평가는 최대응답가속도 (PRA)와 최대지반가속도 (PGA)의 비율 a_p 로 유도된다. a_p 는 해당 요소의 강성과 부착성능을 고려한 계수로 현행 비구조요소의 내진설계에서 지진하중 산정에 사용된다. 국외기준 (FEMA E-74, ASCE 7-16)과 국내 기준 (KDS 41 17)에서 전기비구조요소의 a_p 는 1.0에서 2.5 사이로 규정하고 있다.

Fig. 13은 냉각기와 컨트롤 스위치에서 계측된 X 방향의 응답가속도를 이용하여 증폭계수를 나타낸 것이다. 1차 진동대 실험에서 큰 응답가속도가 계측된 냉각기와 컨트롤 스위치에서 증폭계수가 2.5를 초과함을 확인하였다. 그에 반해, 2차 진동대 실험의 경우 응답가속도를 계측한 5곳 모두 1.0에서 2.5 사이



(a) At cooling plate of UPS



(b) At control switch of UPS

Fig. 13 Amplification factor of UPS

Table 7 Natural frequencies at different locations of UPS test specimens

Test no.	Events	Natural frequency of UPS without seismic details (Hz)				Natural frequency of UPS with combined isolators (Hz)			
		Cooling plate	Control switch	Transformer	Upper frame	Cooling plate	Control switch	Transformer	Upper frame
1	Random test 1	6.14	6.16	6.21	6.38	4.12	4.10	4.14	4.12
3	Random test 2	6.08	6.15	6.17	6.35	4.09	4.07	4.01	3.98
5	Random test 3	6.01	6.09	6.12	6.29	4.05	4.01	3.98	3.92
7	Random test 4	-	-	-	-	3.95	3.98	3.88	3.88
9	Random test 5	-	-	-	-	3.92	3.92	3.75	3.79

값을 나타내며 위의 기준을 만족함을 보였다. 특히, 입력가속도 대비 응답가속도가 높게 계측되었던 내부부품에서 1차 진동대실험 당시 증폭계수가 3 가까이 계측되었으나 복합면진장치를 적용함에 따라 1.0~2.5 사이로 감소하였음을 확인하였다.

4.3 응답변위 분석

UPS의 보강 전후에 따른 응답변위를 확인하기 위하여 와이어 LVDT를 통해 상대 변위를 계측하였다. Fig. 14는 실험 진행 방향인 X 방향에 대하여 UPS 상부의 최대 상대변위를 나타낸 것이다. 분석결과, 복합면진장치를 통해 UPS를 보강한 2차 진동대실험에서 1차 진동대실험보다 더 큰 계측 값을 보이는 경향성을 확인하였다. 면진장치 적용 시 지진에 대한 응답가속도는 감소시킬 수 있지만, 지진에너지의 대부분은 변위를 발생시켜 소산하므로 응답변위가 크게 발생한다. 이를 고려하였을 때, 복합면진장치를 적용한 UPS의 응답 변위가 증가하는 것은 불가피하다고 볼 수 있으며 Jain SK et al. (2004), Mele E et al. (2018)에서도 면진장치 적용으로 인한 변위 증가가 확인되었다. 그럼에도 불구하고 1, 2차 진동대실험 모두 국내 국립전파연구소 기준에서 규정하는 내진 시험방법 (방송통신설비의 내진 시험방법, 2015)의 판정조건인 단방향 변위폭 75 mm를 만족하는 것을 확인하였다.

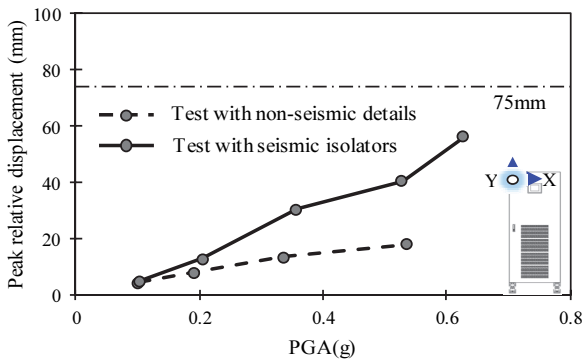


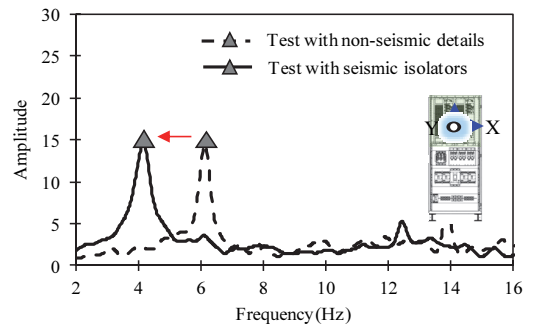
Fig. 14 Peak relative displacement response versus PGA of top of UPS

4.4 고유진동수 및 감쇠비 평가

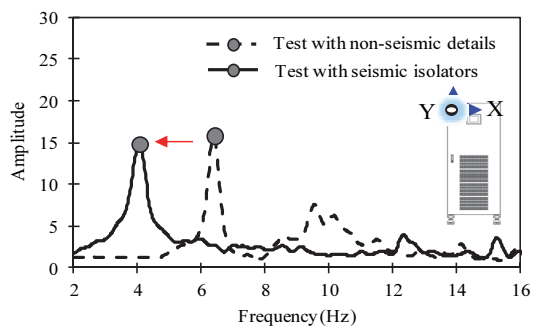
UPS의 고유진동수를 평가하기 위하여 진동대의 입력가속도에 대한 FFT 대비 UPS의 응답가속도에 대한 FFT로 유도되는 전달함수를 이용하였다. Table 7은 공진 주파수 탐색실험에 따른 1, 2차 진동대실험 시 UPS의 고유진동수를 나타내고 있다.

각 실험에 따른 UPS의 고유진동수 비교 결과, 계측 위치에 따른 고유진동수의 차이는 보이지 않았으며 1, 2차 진동대실험의 고유진동수 모두 구조물의 고유진동수 범위를 벗어나 공진을 일으키지 않음을 확인하였다.

Fig. 15는 전달함수를 통해 도출된 UPS 상부 프레임과 냉각기의 최초 고유진동수를 제시하고 있다. 공진 주파수 탐색



(a) At cooling plate of UPS



(b) At top of UPS

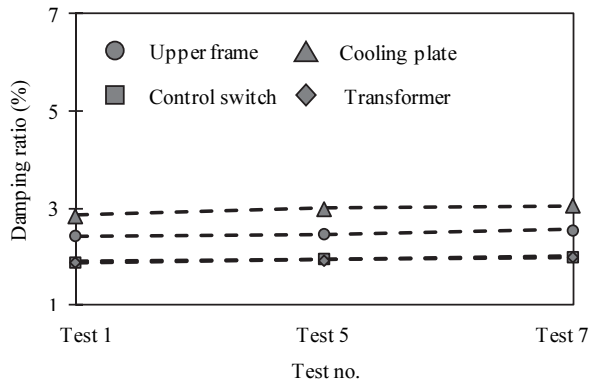
Fig. 15 Transfer function-frequency curves of UPS

실험의 범위인 1~50 Hz 내에서 1, 2차 진동대실험의 결과 모두 1차 모드가 지배적이었으나 1차 진동대실험 시 UPS의 상부 프레임에서는 9.59 Hz에서 2차 모드까지 관찰되었다. 비내진보강 상세를 가지는 1차 진동대실험에서 UPS 상부 프레임의 경우 6.38 Hz (0.156 sec), 냉각기에서 6.21 Hz (0.163 sec)의 값을 나타냈으며 복합면진장치를 적용한 2차 진동대실험에서 두 계층 부위 모두 4.12 Hz (0.243 sec)의 값을 보였다. 복합면진장치를 적용함에 따라 약 1.5배의 주기가 증가하였음을 확인하였다.

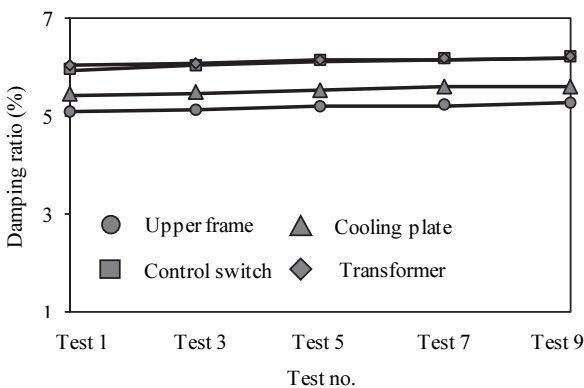
UPS의 감쇠비 평가를 위해 공진 주파수 탐색시험의 특성을 고려한 주파수 대역폭 방법을 이용하였다. 주파수 대역폭에서는 고유진동수를 이용하여 감쇠비를 식 (3)과 같이 정의한다 (Irvine et al, 2005).

$$\zeta = \frac{w_2 - w_1}{2w_n} \times 100\% \quad (3)$$

이때, w_n 은 고유진동수이며, 감쇠비(ζ)는 최대응답의 $1/\sqrt{2}$ 의 값을 갖는 두 점의 진동수 w_1, w_2 의 차이와 고유진동수의 비로 유도된다. Fig. 16은 실험이 진행됨에 따라 UPS



(a) Test with non-seismic details



(b) Test with seismic isolators

Fig. 16 Damping ratio of test specimens

의 가속도 계측 위치별 감쇠비 변화를 나타내었다. 최대입력 가속도가 증가할수록 UPS 및 복합면진장치의 피로도가 누적됨에 따라 두 가지 유형 모두 감쇠비가 증가하는 양상을 확인하였다. 복합면진장치를 적용한 UPS의 모든 계측 부위에서 5%~6%의 감쇠비를 나타내고 있으며 기존 상세를 가지는 UPS 감쇠비의 약 1.5배가 증가되었음을 확인하였다. 이는 복합면진장치를 적용함에 따라 UPS의 에너지 소산 능력이 향상되었음을 의미한다.

5. 결론

실규모의 2층 철골 구조물에 7종 비구조요소를 설치하여 단축 진동대 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 전기 비구조요소인 UPS에 적용하기 위한 복합면진장치를 개발하였으며 면진장치의 적용 유무에 따른 UPS의 동적 특성을 비교 및 분석하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 응답가속도 분석 결과, UPS의 정착부에 복합면진장치를 적용함에 따라 상부 프레임 및 내부부품의 응답가속도가 감소하는 경향성을 나타냈으며, 감소비율이 최대 38%로 확인되었다. 이는 UPS의 하단부에 설치된 복합면진장치가 입력지진과의 진동을 흡수하여 UPS로 전달되는 가속도를 최소화한 것으로 판단된다.
- (2) 동중폭계수 (a_p)의 경우 국내기준 KDS 41 17과 국외기준인 ASCE 7-16과 FEMA E-74에서 전기 비구조요소에 대하여 1.0~ 2.5 값을 제시하고 있다. 입력가속도대비 응답가속도가 크게 계측된 1차 실험의 경우 변압기를 제외한 나머지 계측 부위에서 이 기준을 만족하지 못하였다. 2차 진동대실험에서는 계측 부위 모두에서 a_p 가 2.5 이하인 것으로 나타났다. 복합면진장치를 적용함에 따라 UPS의 하부에서 상부까지 전달되는 응답가속도의 증폭을 억제시켰으며 응답가속도 저감에 대한 성능이 효과적임을 확인하였다.
- (3) 응답변위 분석 결과, 복합면진장치를 적용한 UPS의 응답변위가 기존 상세의 UPS보다 다소 증가하는 경향을 보였다. 이는 하단부에 면진장치를 적용함에 따라 강성 감소의 결과로 면진장치 적용시 변위의 증가는 선행연구에서도 확인되며 불가피한 것으로 판단된다.
- (4) 고유진동수 및 감쇠비의 분석 결과, 1차 진동대실험의 경우 UPS 상부프레임에서 최초 고유진동수가 6.38 Hz, 2차 진동대실험의 경우 4.12 Hz로 나타났다. 복합면진장치를 적용함에 따라 UPS의 주기가 1.5배 이상 증가하였으며 정착부의 강성이 감소하였음을 확인하였다. 1, 2차 실험이 진행됨에 따라 감쇠비가 증가하는 경향성을 보였으며 이는 점증가진으로 인한 UPS 및 복합면진

장치의 강성이 저하된 것으로 판단된다.

- (5) 복합면진장치 적용여부에 따른 UPS의 동적특성을 비교 및 분석한 결과, 개발 면진장치를 적용함에 따라 최대 38% 이상의 응답가속도가 감소되고 1.5배 이상의 주기가 증가되는 것으로 확인하였다. 즉 개발된 복합면진장치가 가속도에 민감한 UPS의 내진취약성을 개선하는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국연구재단 대학중점연구소지원사업의 연구비 지원 (NRF- 2022R1A6A1A03044977)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Lee, S. J., Kim, J. Y., & Choi, K-K. (2019). Investigation of Dynamic Characteristics Uninterruptible Power Supply System (UPS) Using Shaking Table Tests. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 35(11), 129-136.
2. Kim, T., Chu, Y., Kim, S. R., & Bhandari, D. (2018). Seismic behavior of domestic piloti-type buildings damaged by 2017 Pohang earthquake. *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 22(3), 161-168.
3. Korea Architectural Institute. (2018). Pohang Earthquake Damage Survey Report.
4. Ministry of the Interior and Safety. (2018). Guidelines for Earthquake-Resistant Measures of Electric Power Communication Equipment.
5. Chen, M., Pantoli, E., Wang, X., Espino, E., Mintz, S., Conte, J.& Hoehler, M. (2012). Design and construction of a full-scale 5-story base isolated building outfitted with nonstructural components for earthquake testing at the UCSD-NEES facility. In *Structures Congress 2012* (pp. 1349-1360).
6. Furukawa, S., Sato, E., Shi, Y., Becker, T., & Nakashima, M. (2013). Full-scale shaking table test of a base-isolated medical facility subjected to vertical motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(13), 1931-1949.
7. Balaji, P. S., Rahman, M. E., Moussa, L., & Lau, H. H. (2015, March). Wire rope isolators for vibration isolation of equipment and structures-A review. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 78, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.
8. Leblouba, M., Rahman, M. E., & Barakat, S. (2019). Behavior of polycal wire rope isolators subjected to large lateral deformations. *Engineering Structures*, 191, 117-128.
9. Leblouba, M., & Barakat, S. (2017). Performance of wire rope isolators in the seismic protection of equipment. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 120, p. 01009). EDP Sciences.
10. Choun, Y. S., Kim, M. K., Choi, I. K. (2003). A Shaking Table Test for the Effectiveness Evaluation of Seismic Isolation Systems for a Small Equipment. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 3146-3150.
11. Nam, G. S., Jeong, Y. S., Heo, S. H., Kwon, M. H. (2021). Analysis of Seismic Behavior of Transformers According to Types of Seismic Devices. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 22(9), 291-300.
12. ICC-ES. (2010). Acceptance Criteria For Seismic Certification by Shake-Table Testing of Nonstructural Components. ICC-ES AC156.
13. Architectural Institute of Korea. (2019). Korean Building Code, KDS 41 17 2019.
14. Japan Society of Seismic Isolation (J.S.S.I). (2002). Introduction to Seismic Isolation Structure.
15. Applied Technology Council. (2011). Reducing the Risks of Nonstructural Earthquake Damage-A Practical Guide. FEMA E-74.
16. Jain, S. K., & Thakkar, S. K. (2004). Application of base isolation for flexible buildings. In *13th World Conference on Earthquake Engineering* (pp. 1-6).
17. Mele, E., & Faiella, D. (2018). Inter-story isolation systems (IIS) for tall buildings: design considerations. *CTBUH Journal*, (2), 34-41.
18. Irvine, T. (2005). The half power bandwidth method for damping calculation.

Received : 02/15/2022

Revised : 04/06/2022

Accepted : 06/30/2022

요 지 : 본 연구에서는 실규모의 2층 철골 구조물에 7종의 건축 및 비건축 비구조요소를 설치하여 진동대 실험을 수행하였다. 진동대 실험은 현행 비내진상세와 면진장치를 적용한 실험으로 두 차례 수행되었으며 본 연구에서는 무정전전원장치(UPS)의 내진성능에 대하여 실험 및 분석하였다. 비내진정착상세로는 UPS 하단에 ㄷ형강 다리부가 설치되었고, 면진장치로는 고감쇠고무와 와이어로프로 구성된 개발 복합면진장치가 사용되었다. 지진하중모사를 위하여 ICC-ES AC156 (2010)에 따라 인공지진파를 생성 후, 동일 지진파의 크기를 점증하여 가진하였다. 진동대실험을 통해 복합면진장치의 적용여부에 따른 UPS의 거동 및 동적 특성(응답가속도, 응답변위, 동증폭계수, 고유진동수, 감쇠비)을 비교 및 분석하였다. 실험결과, 복합면진장치를 적용함에 따라 UPS의 고유진동수가 감소하여 응답가속도 및 증폭계수가 크게 감소하는 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 실규모 구조물, 무정전전원장치, 복합면진장치, 고감쇠고무, 진동대실험, 동적특성