KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research
Vol. 41, No. 1: 21-28/ February, 2021
DOI: https://doi.org/10.12652/Ksce.2021.41.1.0021

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Concrete Engineering 콘크리트공학

진동대 실험을 통한 발전기기용 콘크리트 앵커의 성능평가

이상문* · 전법규** · 정우영***
Lee, Sang-Moon*, Jeon, Bub-Gyu**, Jung, Woo-Young***

Seismic Performance Evaluation of Concrete Anchors used in Power Plant Equipment by Shaking Table Tests

ABSTRACT

The main purpose of this study is to assess the safety of the fixed anchorages subjected to the seismic motion for an operating facilities in the actual power plant. Thus, the experimental study was conducted to investigate the load response in the event of an actual seismic to the anchorages of a nonstructural components. Since there are economic and spatial constraints to study nonstructural components that actually have various forms, alternative test specimens of steel frames with mass were built and the shaking table test was carried out. In order to evaluate the dynamic characteristics and seismic performance, the natural frequency of the target structure was identified through the shaking table test and then the load response characteristics of the anchorage were evaluated by generating an artificial seismic effect like actual seismic. Finally, the structural stiffness was reinforced by fixing the steel frame to the test specimen using bolts, thereby reducing the load transmitted to the anchorage. It will be carried out on the reliability verification of the experiments and areas that have not been carried out due to the site conditions through the analytical approach in the future.

Key words : Nonstructural components, Structural stiffness, Shaking table test, Resonance frequency, Concrete anchor

초 록

본 연구는 실제 발전소 내 운영 설비의 고정부에 사용되는 앵커에 대하여 지진 발생 시 안전성을 평가하는 것이 주된 목적이다. 이에 따라 운영 설비와 같은 비 구조적 구성 요소의 고정부 앵커에 실제 지진이 발생하였을 경우 발생되는 하중에 대한 응답을 조사하기 위해 실험적 연구를 수행하였다. 실제 다양한 형태를 갖는 비구조요소를 연구하는 데는 경제적, 공간적 제약이 있기 때문에 프레임과 질량으로 구성된 대체 시험체를 제작하여 진동대 시험을 수행하였다. 고정부 콘크리트 앵커의 동적 특성과 내진성능을 평가하기 위해 진동대 시험을 통해 대상 구조물의 고유 진동수를 파악한 후 실제 지진과 같은 인공 지진 효과를 발생시켜 실험을 수행하였다. 결론적으로 시험체에 볼트를 이용하여 강철 프레임을 고정시켜 구조적 강성을 확보하였으며, 이에 따라 고정부 앵커에 전달되는 하중이 감소되는 것을 확인하였다. 향후 해석적 접근을 통하여 실험에 대한 신뢰성 검증 및 현장 여건 상 수행되지 못한 부분에 대하여 연구를 수행할 예정이다.

검색어 : 비구조요소, 구조물 강성, 진동대 실험, 고유진동수, 콘크리트용 앵커

* 강릉원주대학교 토목공학과 박사수료 (Gangneung-Wonju National University · sunnybob1@naver.com)
** 정회원 · 부산대학교 지진 방재 센터 연구교수 (Seismic Research and Test Center, Pusan National University · bkjeon79@pusan.ac.kr)
*** 종신회원 · 교신저자 · 강릉원주대학교 토목공학과 교수 (**Corresponding Author** · Gangneung-Wonju National University · woojung@gwnu.ac.kr)

Received September 22, 2020/ **revised** October 7, 2020/ **accepted** November 10, 2020

Copyright ⓒ 2021 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

최근 한반도의 지진발생 추이를 보면 2015년 이후 지진 발생 비율이 급격하게 증가하기 시작하였으며(MOIS, 2017) 2016년과 2017년에 각각 경주와 포항에서 규모 5.8과 규모 5.4의 지진이 발생하였다. 경주 지진은 지진관측 이후 최대지진으로서 가속도 응답스펙트럼의 일부 진동수 구간에서 내진설계 기준을 초과하였으며 포항 지진은 건축물과 설비에 큰 피해를 초래하였다(Ban, 2020; Ban and Hu, 2020). 특히 사회간접자본의 중요 시설물 중의 하나인 발전소의 경우, 지진피해사례를 살펴보면 구조요소보다 비구조요소의 손상 및 파괴에 의한 피해가 많이 발생하고 있으며 이러한 비구조요소의 피해복구비용은 전체 피해복구비용 중 상당한 비중을 차지하고 있는 것으로 보고된 바 있다(Oh et al., 2018). 비구조요소는 건축구조기준(KBC)에서 건축비구조요소와 기계 · 전기 비구조요소로 구분되며, 비구조요소 중 기계 · 전기 비구조요소 경우 건축물에 설치하는 기계 및 전기 시스템과 이를 지지하는 장비로서 전기회로의 유지 및 중앙제어, 통신 등과 같이 시설의 고유기능을 유지하기 위해 쓰이는 중요한 설비이다(MOLIT, 2016). 이와 같이 특수한 목적을 가진 중요 사회기반시설에 설치되는 비구조요소의 경우, 지진과 같은 자연재해로 인하여 고유기능에 장애가 발생한다면 운용 및 발전설비의 기능적 손실 및 오작동이 발생할 수 있으며 보다 심각한 사회적 혼란과 피해를 초래할 수 있는 2차 피해로 이어질 수 있다(Cosenza et al., 2015).

따라서 인명손실과 사회적, 경제적 피해를 최소화하기 위하여 비구조요소의 지진거동을 분석하여 내진성능을 확보하기 위한 노력이 필요하다. 지진에 의한 비구조요소 고정 앵커부 동적하중 특성을 분석하는 연구가 국내에서 진행된 바 있으며(Cho et al., 2010; Eem et al., 2019; Lee and Jung, 2020) 정확한 지진응답스펙트럼을 평가하기 위해 비구조요소의 구조적 강성을 수치적으로 계산하기 위한 연구 또한 진행되고 있다(Yang et al., 2003; Moon et al., 2018). 발전소 운용에 필요한 기계 · 전기설비는 대표적인 비구조요소로서 대부분 캐비닛 형태의 앵커볼트로 패널 바닥과 슬래브를 고정하는 자립식이다. 그러나 실제 기계 · 전기 캐비닛은 경제적, 공간적 제약으로 다양한 조건을 고려한 매개변수 시험을 수행하기에 어려움이 있어 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 강철 프레임과 질량으로 구성한 시험체로 대체하여 진동대 시험을 수행하였다. 지진 발생 시 취약부인 고정부 앵커에 대한 동적하중 특성을 분석하기에 앞서 대상 구조물의 고유 진동수를 먼저 파악하는 공진 탐색 실험을 수행하였으며, 가속도 배율을 조정한 인공지진파를 적용하여 다양한 지진 하중 조건하에서 고정부 앵커볼트에 전달되는 동적하중 특성을 조사하였다.

Fig. 1. Test Specimen to Replace Actual Structure

2. 시험대상품의 진동대 시험

본 연구에서는 지진 시 가장 많은 피해가 보고되는 비구조요소 고정부의 지진동에 따른 앵커에 전달되는 하중 특성을 분석하고자 진동대에 시험대상품을 앵커로 고정시켜 실험을 수행하였다. 실험 구성은 시험대상품(Case 1_무보강)에 대하여 M24 볼트를 이용하여 세로 및 가로로 강철 프레임을 본체에 체결하여 강성을 증가시키고 가속도 배율의 조정에 따른 지진하중의 세기 등을 달리하여 구조물 강성변화에 따른 고정 앵커부의 동적하중 특성을 조사하였다.

2.1 시험대상품 제원 및 설치

진동대 시험에 사용된 시험대상품은 일반구조용 강재 사각프레임(□ 100 mm × 100 mm × 9 mm)을 이용하여 Fig. 2 도면과 같이 설계하여 구성하였으며, 시험체 상부 중앙에 0.9 tonf (0.3 tonf × 3 ea)의 weight를 체결하여 하중을 재하 하였다. 진동대 바닥과 시험체 양 끝을 M30 고장력 볼트(4 ea)를 사용하여 고정하였으며, 볼트에 ring type 로드셀을 각각 설치하여 지진동으로

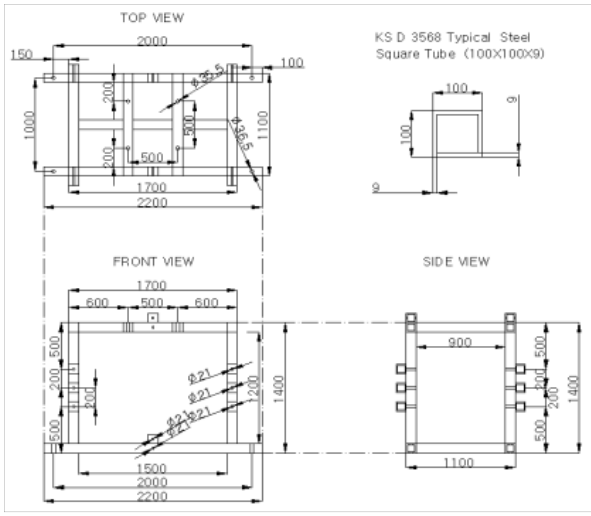
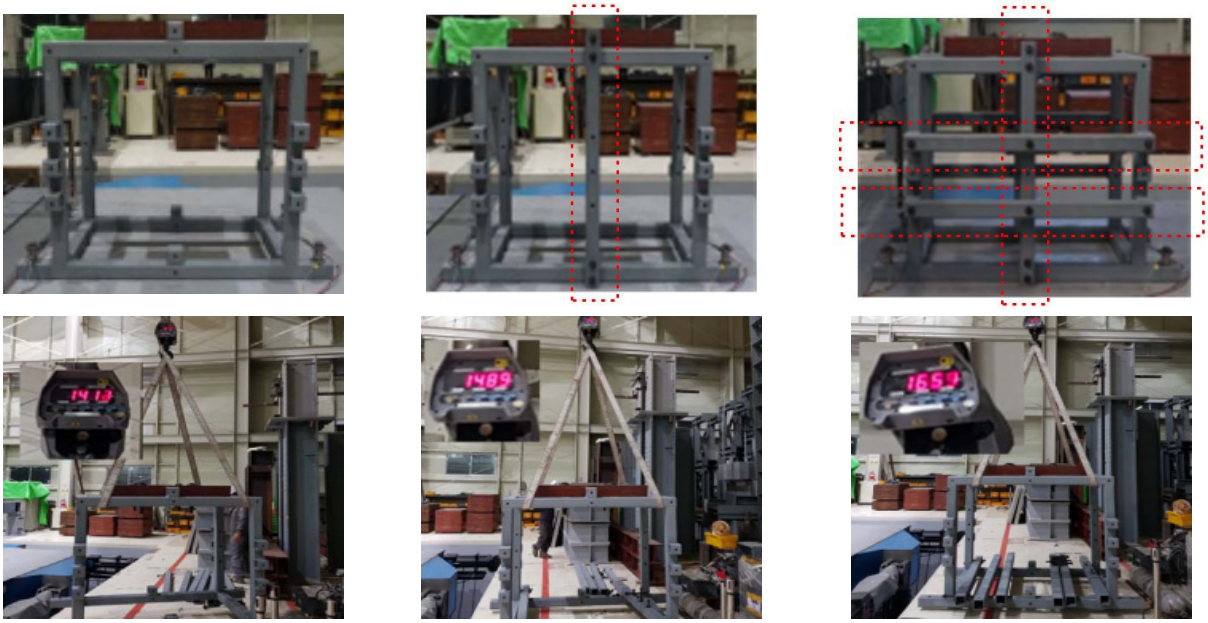


Fig. 2. Dimension of the Basically Specimen



(a) Case #1
No reinforcement

(b) Case #2
Add vertical frame (2 ea)

(c) Case #3
Add vertical frame (2 ea) and horizontal frame (4 ea)

Fig. 3. Shape and Weight of the Test Specimen for Each Case

Table 1. Tested Specimen Specifications

Case	Dimensions (mm)			Weight (tonf)	Boundary (Fixed)
	Length	Width	Height		
#1	2,200	1,100	1,400	1.413	M30 Anchor 4 ea
#2				1.489	
#3				1.659	

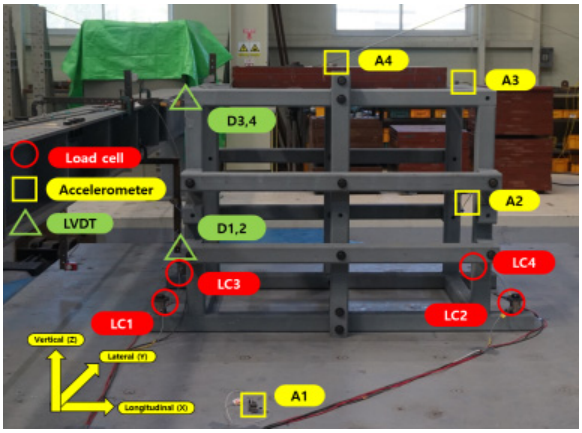


Fig. 4. Sensor Location

인하여 발생하는 전달 하중을 측정하였다. Fig. 3 및 Table 1과 같이 상부 재하하중은 0.9 tonf 으로 고정하고 프레임 추가로 인한 구조물 강성 변화를 매개 변수로 설정하여 입력지진에 따른 고정부 앵커에 전달되는 하중을 시험체 종류별로 비교 및 분석하였다.

시험대상품의 응답을 분석하기 위하여 시험체 좌측 상, 중단 프레임과 weight 중앙에 3축가속도계를 설치하였다. 진동대의 제어 결과를 확인하기 위하여 진동대 테이블에 3축 가속도계를 설치하였으며, 시험체의 상대 변위 측정을 위하여 좌측 상단과 하단에 좌우(X), 전후(Y)로 총 4개의 LVDT를 설치하였다. 각 계측 센서의 설치 위치 및 사진은 Fig. 4에 나타내었다.

2.2 입력지진

실험응답스펙트럼의 적합성을 평가하거나 실험 후 시스템의 변형 등을 분석하기 위하여 ICC-ES AC 156 : Section 6.4.5 (ICC-ES, 2016)에 따라 공진탐색실험을 수행하였다. 좌우(X), 전후(Y), 상하(Z) 방향으로 각각 sinusoidal sweep에 의한 탐색실험을 실시하며, 이 경우 sweep rate는 2 octave/min. 이고 가속도의 크기는 시료의 손상을 최소화하기 위하여 낮은 수준(0.49 m/s^2이상)으로 수행하였다. 가진 주파수의 범위는 선행연구(Jeon et al., 2019; Yun et al., 2019)를 참조하여 일반적인 캐비닛의 고유진동수인 5 Hz~20 Hz영역을 고려하여 전후방향으로 14 Hz~20 Hz, 좌우방향으로 8.15 Hz~10.5 Hz로 설정하였다. 진동대에 입력된 지진파형은 국내 내진설계기준을 고려하여 ICC-ES AC156의 요구응답스펙트럼을 만족하도록 건축물 내진설계기준

기반 인공지진(100 %), 내진설계기준 공통적용사항 기반 인공지진(150 %) 및 내진설계기준 초과 지진(200 %)을 가속도 조정을 통하여 적용하였다(IEC, 1991). 각 입력지진동의 수평 방향 영주기 가속도는 6.47 m/s^2와 9.71 m/s^2, 12.94 m/s^2이며, 수평 길이 1축 방향에 대한 가진 및 3축 방향 동시 가진하여 수행하였다. ICC-ES AC156의 RRS를 Fig. 5에 나타내었으며, 여기서 AFLEX-H와 AFLEX-V는 유연한 요소(flexible component)의 수평 · 수직방향 스펙트럼 가속도 값이며 ARIG-H, ARIG-V는 튼튼한 요소(rigid component)의 수평 · 수직방향 스펙트럼 가속도 값이다. ICC-ES AC156에 따라 계산된 요구응답스펙트럼의 주요계수 산정 결과를 Table 2에 나타내었다.

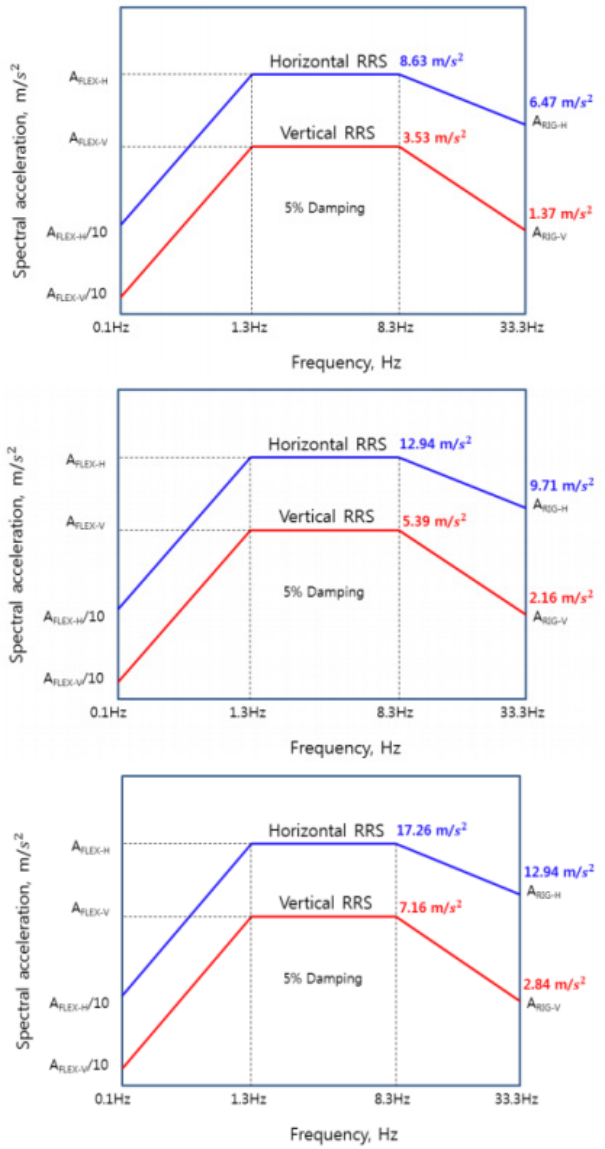


Fig. 5. ICC-ES AC156 RRS (PGA 100 %, 150 %, 200 %)

2.3 시험방법 및 순서

진동대 시험은 부산대학교 지진방재연구센터의 6자유도 진동대를 이용하여 수행하였다. 지진모사시험을 수행하기에 앞서 시험체의 고유진동수를 확인하고 동특성을 확인하기 위하여 공진탐색시험(resonance search test)을 우선적으로 수행하였다. 시험순서는 Table 3과 같으며 지진모사시험은 각 케이스별로 동일하게 1축과 3축에 대하여 100 %, 150 %, 200 % 가속도를 조정하여 가진 수행하였다.

Table 2. Parameter of Required Response Spectrum

Amp. (%)	SDS (m/s^2)	z/h*	AFLEX-H (m/s^2)	ARIG-H (m/s^2)	AFLEX-V (m/s^2)	ARIG-V (m/s^2)
100	5.39	1	8.63	6.47	3.53	1.37
150	8.09	1	12.94	9.71	5.39	2.16
200	10.79	1	17.26	12.94	7.16	2.84

* Height factor ratio

Table 3. Procedure of the Shaking Table Test

Procedure	Case	Classification	Test Method (AC 156)
1	#1	resonance test	Sinusoidal sweep, amp. = 0.05 g, (1.00~50.00) Hz, 2 octave/min., (X),(Y),(Z) independently
2		Seismic test	PGA 100 %, X-axis
3			PGA 150 %, X-axis
4			PGA 200 %, X-axis
5			PGA 100 %, 3-axis
6			PGA 150 %, 3-axis
7			PGA 200 %, 3-axis
8	#2	resonance test	Sinusoidal sweep, amp. = 0.05 g, (1.00~50.00) Hz, 2 octave/min., (X),(Y),(Z) independently
9		Seismic test	PGA 100 %, X-axis
10			PGA 150 %, X-axis
11			PGA 200 %, X-axis
12			PGA 100 %, 3-axis
13			PGA 150 %, 3-axis
14			PGA 200 %, 3-axis
15	#3	resonance test	Sinusoidal sweep, amp. = 0.05 g, (1.00~50.00) Hz, 2 octave/min., (X),(Y),(Z) independently
16		Seismic test	PGA 100 %, X-axis
17			PGA 150 %, X-axis
18			PGA 200 %, X-axis
19			PGA 100 %, 3-axis
20			PGA 150 %, 3-axis
21			PGA 200 %, 3-axis

3. 시험결과 및 분석

3.1 시험대상품 고유진동수

고유진동에 영향을 미치는 주요 인자 중 중량에 대해서는 동일하게 각 케이스별로 설정하였으며 프레임 증가에 따른 강성의 변화에 주안점을 두어 실험을 수행하였다. 시험대상품의 고유진동수는 공진탐색시험 중 진동대에서 입력된 가속도(base, a)에 대한 시험대상품 각 위치에서 응답가속도(Unit, b)의 전달함수를 산정함으로써 결정하였다. 전달함수(Tab)는 Eq. (1)과 같이 입력된 신호의 Power Spectral Density (Paa)에 대한 입, 출력 신호의 Cross Power Spectral Density (Pba)에 의해 계산된다. 공진 분석의 정밀도를 향상시키기 위하여 각 신호는 Symmetric Hamming Window가 적용되었다. 공진 탐색의 주파수 최소 간격은 0.25 Hz이다.

$$T_{ab}(f) = \frac{P_{ab}(f)}{P_{aa}(f)} \tag{1}$$

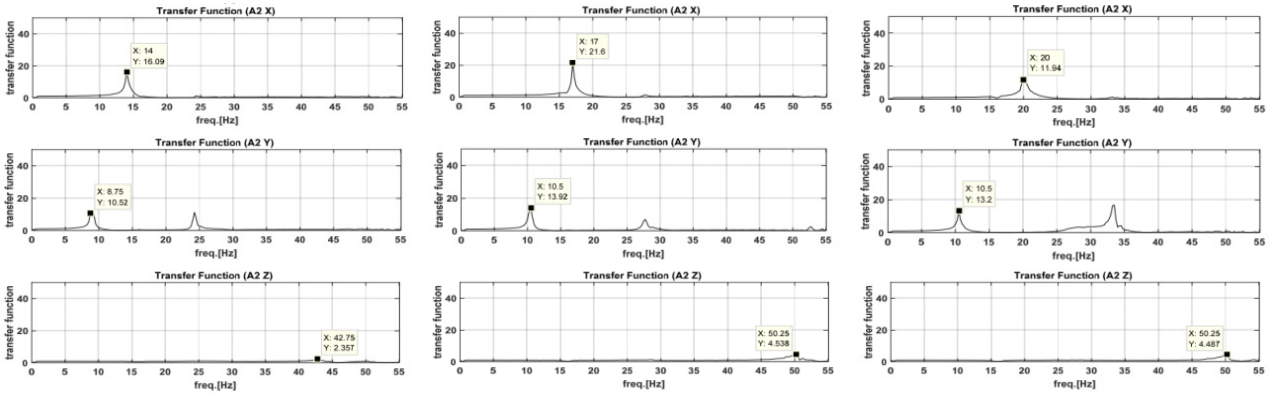
$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{2}$$

공진탐색 시험 결과, Table 4 및 Fig. 6과 같이 계측 위치 A2, A3, A4에서 각 케이스 별로 동일한 전달함수가 계측되었는데, 이는 시험대상품의 대칭적 구조물 특성으로 인한 것으로 판단된다. 공진탐색 시험 후 ABAQUS 유한요소 해석프로그램을 이용하여 시험에 대한 신뢰성을 검증하였다. 케이스 별 유한요소모델의 프레임 상부에 시험과 동일하게 무게를 적용하였으며, 단축(X축) 방향

Table 4. Results of the Resonance Search Test

Case	Sensor location*	Natural frequency (Hz)	
		Axis Direction	Results
#1	center of right frame (A2) top of right frame (A3) center of top weight (A4)	X	14.00
		Y	8.75
		Z	42.75
#2	center of right frame (A2) top of right frame (A3) center of top weight (A4)	X	17.00
		Y	10.50
		Z	50.25
#3	center of right frame (A2) top of right frame (A3) center of top weight (A4)	X	20.00
		Y	10.50
		Z	50.25

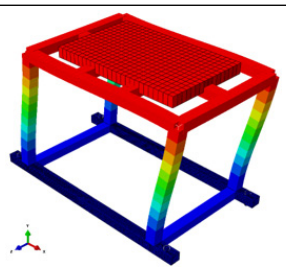
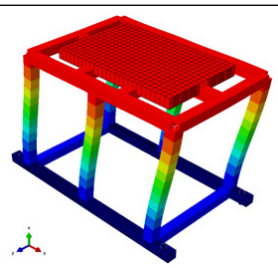
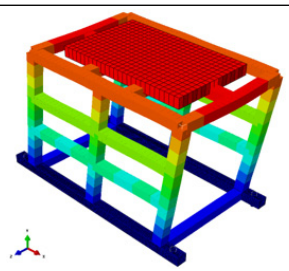
* Refer to Fig. 4 for sensor location.



(a) Case #1 (b) Case #2 (c) Case #3

Fig. 6. Resonance Search Test Results Each Case

Table 5. Comparison of the Results of Natural Frequency Through Stiffness Change

Case	#1	#2	#3
Specimen shape			
Test	14.00 Hz	17.00 Hz	20.00 Hz
Analysis	14.55 Hz	18.60 Hz	32.28 Hz
Stiffness of Testing	10933.48 kN/m	16988.39 kN/m	26197.88 kN/m

* Based on the change in the natural frequency for the X-axis direction.

에 대한 고유진동수의 변화를 기준으로 시험 결과와 비교하였다.

해석 결과, 시험 결과와 유사하게 프레임 추가에 따른 강성의 변화로 인하여 시험대상품의 고유진동수가 변화되는 것을 알 수 있었으며, 고유진동수 f와 Eq. (2)를 이용하여 Table 5와 같이 강성 k값을 역으로 계산하여 이론적으로 알려져 있는 구조물 강성의 변화에 따른 고유진동수 변화를 실험을 통하여 확인하였다.

3.2 고정부 앵커 동적 전달하중 분석

지진 시 구조 강성변화에 따른 비구조요소 고정부의 앵커에 전달되는 동적 하중 특성을 분석하기 위해 진동대 바닥과 시험체 양 끝단을 고정한 M30 고장력 볼트에 ring type 로드셀을 각각 설치(4 ea)하여 지진동으로 인하여 발생하는 전달 하중을 측정하였다. 입력지진은 2.2절에서 언급한 Fig. 5의 ICC-ES AC 156 RRS (PGA 100 %, 150 %, 200 %) 스펙트럼을 가진하여 1축 및 3축 방향으로 시험을 수행하였다. 1축 지진모사시험의 경우 지진하중 및 방향은 시험대상품의 좌우방향(Axis-X)을 기준으로 고려하였으며, Table 6은 각 케이스 별로 입력 지진파에 대한 앵커하중의 최대 절대값 및 평균을 로드셀 위치에 따라 나타낸 것이다.

Fig. 7과 같이 앵커에 전달되는 하중에서 LC-3 앵커가 다른 앵커보다 상대적으로 전달 하중이 크게 계측된 것을 확인하였는데, 시험대상품을 제작하는 과정에서 용접 및 접합 등으로 인하여 프레임에 변형이 발생되어 하중이 집중된 것으로 판단된다. 따라서 Fig. 8과 같이 LC-3를 이상점(outlier)으로 배제하고 나머지 앵커에 작용되는 하중을 Fig. 9와 같이 평균하여 결과를 분석 하였다.

3축 지진모사시험의 경우 Fig. 10과 같이 1축 시험과 달리 LC-1과 LC-2, LC-3과 LC-4의 앵커에서 합리적인 전달 하중이 계측되었다. 1축 시험이 선행되면서 입력된 지진 하중이 변형된 프레임과 앵커 간의 유격을 안정화 시키면서 다음 시험인 3축 지진모사시험의 입력 지진하중이 각 앵커에 고르게 분산된 것으로 판단된다.

Table 6. Maximum Anchorage Load Results for 1-way

Classification		Maximum anchorage load (kN)				
		LC1	LC2	LC3	LC4	AVG*
#1	PGA 100 %	0.713	0.933	5.016	0.811	0.819
	PGA 150 %	1.186	1.408	7.529	1.273	1.289
	PGA 200 %	1.828	2.105	10.82	2.008	1.980
#2	PGA 100 %	0.453	0.559	2.998	0.789	0.601
	PGA 150 %	0.626	0.777	4.122	1.090	0.831
	PGA 200 %	0.881	1.031	5.691	1.513	1.142
#3	PGA 100 %	0.359	0.765	3.463	0.865	0.663
	PGA 150 %	0.563	1.005	4.825	1.186	0.918
	PGA 200 %	0.936	1.311	6.665	1.573	1.273

* Average load calculated from LC1 to LC4 without LC3

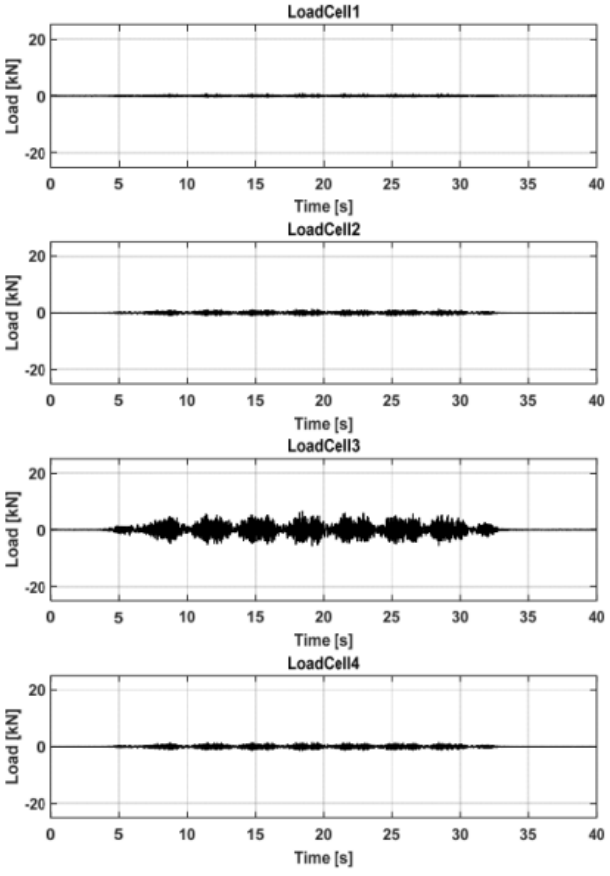


Fig. 7. Road Cell Response of the Seismic Simulation Test for 1-way

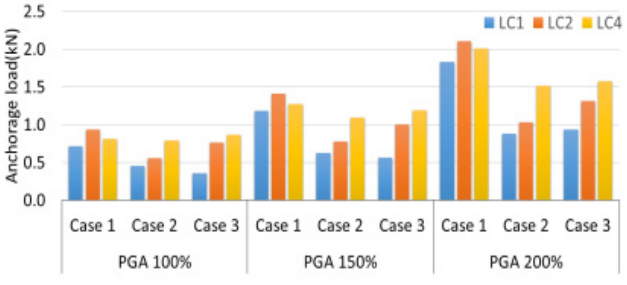


Fig. 8. Maximum Anchorage Load Results for 1-way without LC3

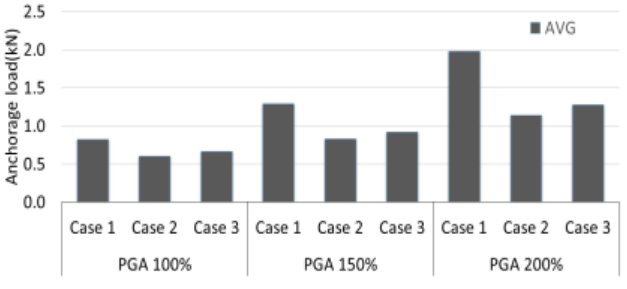


Fig. 9. Comparing Average Loads Each Case for 1-way

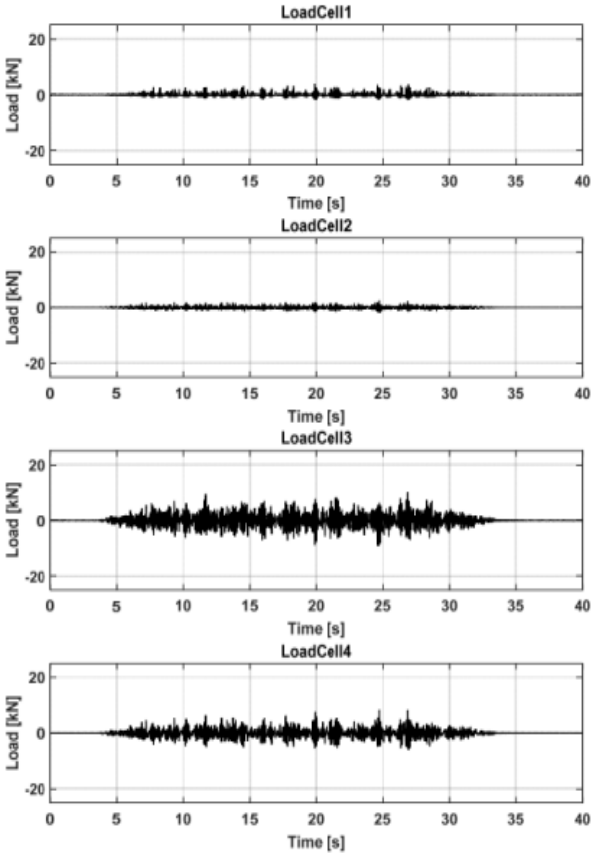


Fig. 10. Road Cell Response of the Seismic Simulation Test for 3-way

Table 7. Maximum Anchorage Load Results for 3-way

Classification		Maximum anchorage load (kN)				
		LC1	LC2	LC3	LC4	AVG
#1	PGA 100 %	5.236	4.425	11.532	12.837	8.507
	PGA 150 %	8.247	7.024	16.308	18.739	12.580
	PGA 200 %	11.969	9.680	21.366	24.399	16.854
#2	PGA 100 %	4.888	3.084	9.899	10.801	7.168
	PGA 150 %	7.548	5.039	13.779	15.624	10.498
	PGA 200 %	11.202	6.913	17.188	19.654	13.739
#3	PGA 100 %	3.826	2.539	10.063	8.365	6.199
	PGA 150 %	5.693	4.358	15.136	13.482	9.667
	PGA 200 %	8.615	7.912	19.269	18.150	13.487

Table 7은 각 케이스 별로 입력 지진파에 대한 앵커하중의 최대 절대값과 평균을 로드셀 위치에 따라 나타낸 것이며, 실험 결과에 대해서 각 케이스 별로 비교한 그래프를 Figs. 11 and 12에 나타내었다.

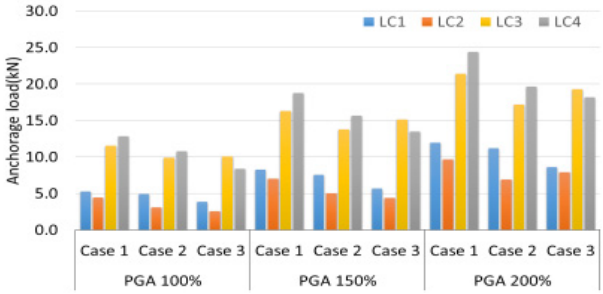


Fig. 11. Maximum Anchorage Load Results for 3-way

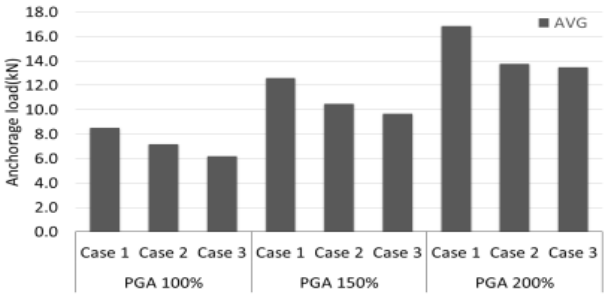


Fig. 12. Comparing Average Loads Each Case for 3-way

3.3 실험결과 요약

실험 결과 지진동으로 인한 시험체 고정부 앵커에 전달되는 하중은 1축 및 3축 모두 Figs. 9 and 12와 같이 구조물 강성의 증가에 따라 감소하는 경향이 나타났다. 이를 통하여 실제 구조물의 취약부 지점인 고정부 앵커에 전달되는 하중을 줄이기 위해 현장 설치 시 볼트 및 용접 등을 이용한 본체의 프레임 보강 등과 같은 시설물의 구조적 강성 확보가 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 실제 비구조요소의 경제적, 공간적 제약에 따른 다양한 조건을 고려한 매개변수 시험을 수행하기에 어려움이 있어 강철 프레임과 질량으로 구성된 시험체로 대체하여 진동대 시험을 수행하였다. 실제 지진 발생 시 비구조요소 시설물에서 가장 많은 피해가 발생되는 고정부 앵커에 대하여 본체의 강성이 변화함에 따른 지진동 하중 특성을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 고정부 콘크리트 앵커의 동적 특성과 내진성능을 평가하기 위해 진동대 시험을 통해 대상 구조물의 고유 진동수를 파악하였다. 실험 결과, 본체의 프레임 추가에 따른 강성의 변화로 인하여 시험대상품의 고유진동수가 변화되는 것을 알 수 있었

으며, 고유진동수 f와 시험대상품의 무게를 이용하여 강성 k값을 역으로 계산하여 이론적으로 알려져 있는 구조물 강성의 변화(증가)에 따른 고유진동수 변화(증가)를 실험을 통하여 확인하였다.

(2) 1축 및 3축 진동대 시험결과 앵커에 적용되는 하중은 고유진동수가 낮을수록 증가되는 경향이 나타났다. ICC-ES AC 156의 요구응답스펙트럼은 1.3 Hz~8.3 Hz 영역에서 최대 스펙트럼 가속도 값을 가지므로, 고유진동수가 RRS의 최대 스펙트럼가속도 영역에 가까워질수록 앵커에 전달되는 동적 하중이 증가되는 것을 확인하였다.

(3) LC1, LC2와 LC3, LC4의 하중 크기가 다른 것은 1) 진동대와 연결되는 시험체 하부면의 정밀도, 2) 로드셀 체결부의 정밀도, 3) 상부 하중의 무게중심이 LC3, LC4 쪽으로 편중됨 등의 원인에 의하여 발생한 것으로 판단된다.

(4) 지진특성을 고려하여 운용설비의 구조적 강성을 적절히 증가시킴으로써 고정부 앵커에 전달되는 하중을 효과적으로 감소시킬 수 있을 것으로 판단되며, 향후 해석적 접근을 통하여 실험에 대한 신뢰성 검증 및 현장 여건 상 수행되지 못한 부분에 대하여 추가적으로 연구를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 연구비지원(20IFIP-B128598-04)에 의해 수행되었습니다.

References

Ban, W. H. (2020). *Seismic performance evaluation of recentering braced frame structures using superelastic shape memory alloys*, M.Sc. Thesis, Incheon National University (in Korean).

Ban, W. H. and Hu, J. W. (2020). “Seismic performance evaluation of recentering braced frame structures using superelastic shape memory alloys: Nonlinear static analysis.” *Journal of Korean Society for Advanced Composite Structures*, KOSACS, Vol. 11, No. 2, pp. 7-14 (in Korean).

Cho, S. G., Kim, D. K. and Go, S. H. (2010). “Effects of the excitation level on the dynamic characteristics of electrical cabinets of nuclear power plants.” *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, EESK, Vol. 14, No. 3, pp. 23-30 (in Korean).

Cosenza, E., Di Sarno, L., Maddaloni, G., Magliulo, G., Petrone, C. and Prota, A. (2015). “Shake table tests for the seismic fragility evaluation of hospital rooms.” *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 44, No. 1, pp. 23-40, DOI: 10.1002/eqe.2456.

Eem, S. H., Jeon, B. G., Jang, S. J. and Choi, I. K. (2019). “Evaluate the characteristics of vibration caused by rocking modes of electric cabinet under seismic loading.” *Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, KSNVE, Vol. 29, No. 6, pp. 735-744 (in Korean).

International Code Council Evaluation Service (ICC-ES) (2016). *Acceptance criteria for seismic certification by shake table testing of nonstructural components*, AC 156.

International Electrotechnical Commission (IEC) (1991). *Environmental testing-Part 3-3: Guidance-Seismic test methods for equipments*, IEC 60068-3-3.

Jeon, B. G., Yun, D. W., Shin, Y. J. and Jung, W. Y. (2019). “Seismic performance evaluation for hydroelectric power plants RTU panel by shaking table tests.” *Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, KSNVE, Vol. 29, No. 6, pp. 770-779 (in Korean).

Lee, S. M. and Jung, W. Y. (2020). “Evaluation of anchorage performance of the switchboard cabinet under seismic loading condition.” *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 1-12.

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2016). *Korean building code-structural* (in Korean).

Ministry of the Interior and Safety (MOIS) (2017). *Pohang earthquake white paper* (in Korean).

Moon, J. Y., Kwon, M. H., Kim, J. S. and Lim, J. H. (2018). “Seismic fragility evaluation of cabinet panel by nonlinear time history analysis.” *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, KAIS, Vol. 19, No. 2, pp. 50-55 (in Korean).

Oh, S. H., Park, H. Y. and Choi, K. K. (2018). “Seismic damage status and characteristics of non-structural elements.” *Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, KSNVE, Vol. 28, No. 2, pp. 71-77 (in Korean).

Yang, J., Rustogi, S. K. and Gupta, A. (2003). “Rocking stiffness of mounting arrangements in electrical cabinets and control panels.” *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 219, No. 2, pp. 127-141.

Yun, D. W., Jeon, B. G., Jung, W. Y., Chang, S. J. and Shin, Y. J. (2019). “Analysis of anchorage behavior characteristics of the electrical cabinet using shaking table tests.” *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, KSNVE, Vol. 29, No. 1, pp. 43-50 (in Korean).