# 면진장치의 종류에 따른 변압기의 지진거동 분석

남광식, 정영석, 허소현, 권민호<sup>\*</sup> 경상국립대학교 토목공학과

# Analysis of Seismic Behavior of Transformers According to Types of Seismic Devices

Gwang-Sik Nam, Yeong-Seok Jeong, So-Hyeon Heo, Minho Kwon<sup>\*</sup> Department of Civil Engineering, ERI, Gyeongsang National University

**요 약** 본 연구에서는 변압기 내진성능을 확보하기 위해 면진장치에 따른 지진 저감성능과 특성을 평가하기 위한 수치해 석을 수행하였다. 해석에 적용한 면진장치는 마찰진자면진장치(FIP)와 납-고무면진장치(LRB)이며 각 면진장치를 유한요 소해석 프로그램을 사용하여 수치해석 모델화하였다. 또한, 변압기의 형상적 특성을 고려하기 위해 수치해석 모델링한 변압기의 형상과 하중이 실제 변압기와 유사하도록 모델링을 수행하였다. 변압기 해석모델에 마찰진자면진장치와 납-고 무면진장치를 적용하여 동적해석을 수행하기 위해 내진설계기준 공통적용사항과 ICC-ES AC156의 응답스펙트럼을 참 고하여 생성한 인공지진파를 해석에 적용하였다. 해석결과 면진장치가 적용되지 않은 해석과 비교하였을 때 마찰진자면 진장치를 적용한 변압기에서 발생한 가속도 감쇠율은 75%로 나타났으며 납-고무면진장치를 적용한 변압기의 응답가속 도 감쇠율은 최소 42%로 나타나 마찰진자면진장치가 납-고무면진장치에 비해 가속도 응답면에서 우수한 결과를 보였 다. 또한, 면진장치를 적용하였을 때 발생하는 변압기의 회전을 검토하기 위해 가속도가 작용할 때 변압기 좌우측의 상대 변위를 측정하였다. 이때 납-고무면진장치가 마찰진자면진장치에 비해 변압기의 회전이 큰 것으로 나타나 납-고무면진 장치의 설치를 고려할 때 면진 대상구조물의 회전에 대한 적절한 대응책의 마련이 필요할 것으로 보인다.

**Abstract** In this study, a numerical analysis was performed to evaluate the seismic reduction performance and characteristics of a seismic isolator used to ensure the performance of the transformer under seismic conditions. The seismic isolators used in this analysis were the Friction Isolation Pendulum (FIP) and the Lead-Rubber Bearing (LRB). Each seismic isolator was modeled using a numerical analysis program. To consider the characteristics of the transformer, the model in the simulation was made similar to the actual shape of the transformer. To perform dynamic analysis, artificial seismic waves were generated and targeted onto the transformer by referring to the response spectrums for common applications from the seismic design standards and the ICC-ES AC156. In the dynamic analysis of the analysis, the LRB showed bigger rotational deformation as compared to the FIP. Therefore, appropriate countermeasures against the rotational deformation of the structure are required while installing the LRB.

Keywords: Transformers, Seismic Isolator, Artificial Seismic Wave, Dynamic Analysis, Response Acceleration

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의	의 지원으로 수행되었음(과제번호 211FIP-B128598-05).
*Corresponding Author : Minho Kwon(Gy	eongsang Univ.)
email: kwonm@gnu.ac.kr	
Received July 5, 2021	Revised August 10, 2021
Accepted September 3, 2021	Published September 30, 2021

# 1. 서론

기상청(KMA: Korea Meteorological Administration)[1]에 따르면 1978년 이후 국내 지진 발생 횟수는 점진적으로 증가하는 추이를 보이고 있다 [1]. 2010년 이후 크고 작은 지진이 발생하고 있으며, 더 욱이 최근 2016년과 2017년에 경주와 포항에서 규모 5.8과 규모 5.4의 지진이 발생하였다. 일반적으로 대규 모의 지진은 주요 도시에 전기를 공급하는 전력설비에 큰 피해를 일으켰다. 일례로 일본 니가타 지진 당시 가시 와자키 가리와 원전 3호기와 인접해있는 변압기가 지진 에 의해 부싱이 손상되어 화재가 발생한 사례가 있으며[2]. 2017년 멕시코 시티 지진 당시 Yautepec과 Oaxaca 변전소의 변압기에 피해가 발생해 몇 일간 전기공급이 중단된 사례가 있다[3]. 이처럼 사회 전반에 전기를 공급 하는 전력설비들이 손상되게 되면 시민들의 생활이 불편 해지고 나아가 중요시설의 긴급작동에 영향을 미치므로 전력설비의 내진성능을 확보하기 위한 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구의 일환으로 전력설비의 내진성능을 향상시키기 위한 방법 중 전력설비에 면진장치를 도입하 고자 하는 연구가 상당수 진행되고 있다. 면진장치는 교 량이나 건축물 등의 구조물의 내진설계에 많이 사용되고 있으며, 최근 국내에서도 그 적용사례가 증가하는 실정 이다. 지진력을 저감시키기 위하여 면진장치를 이용하는 방법은 일반적으로 교량 등과 같은 대형 토목구조물에 적용되고 있다. 하지만 병원, 원자력발전소 등에서 사용 되는 비상디젤발전기의 내진성능을 확보하기 위해 면진 장치가 적용된 발전기의 내진성능 분석[4]과, 마찰진자시 스템을 적용한 LNG 탱크의 지진취약도 분석[5] 등과 같 이 면진장치를 구조면진 뿐만 아니라 기기면진에 적용하 기 위한 연구가 진행되고 있다. 면진장치의 특성에 관한 연구는 과거부터 진행되었으며 실제로 대형토목구조물 중 면진장치가 설치되는 사례가 많이 있다. 대규모 지진 이 자주 발생하는 미국, 일본, 뉴질랜드 등에서도 면진장 치에 대한 연구가 많이 진행되었으며 우리나라의 경우 면진장치를 생산하는 기업체에서 각 기업체가 생산하는 면진장치에 대한 자체연구가 수행되었다. 국내에서 진행 된 면진장치에 대한 연구 중 원점복귀형 마찰댐퍼를 이 용한 제진보강에 대한 연구[6]와 변압기의 축소모형에 마 찰진자면진장치를 적용하여 면진장치의 특성에 대한 연 구[7]가 진행되었다. 또한, 납-고무면진장치를 적용한 시 험체의 지진응답 해석 및 실험[8], 납-고무면진장치와 고 무면진장치의 전단특성과 온도의존성에 대한 연구[9] 등

이 수행되었다. 앞서 진행된 연구는 기기의 축소모형을 통해 면진장치 효과를 입증하기 위한 실험으로 진행되었 으며 대부분 기기의 모델을 간략화하여 나타내거나 하중 으로만 가정하여 연구를 수행하였다. 하지만 간략화된 기기모델은 기기의 비대칭과 같은 기기의 특성에서 발생 하는 하중중심 또는 운동중심 등을 표현하기 어려워 실 제 기기에 면진장치를 적용하였을 때의 거동특성을 예상 하기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 기기의 비대칭을 고 려한 변압기 수치해석모델을 기반으로 면진장치의 종류 에 따른 특성과 면진장치를 적용한 변압기의 거동특성을 해석적으로 분석하고자 한다.

#### 2. 해석모델

#### 2.1 면진장치

지진이 발생할 때 지반을 통해 전달되는 지진하중으로 부터 구조물의 안전을 위해 여러 종류의 면진장치가 개 발되어 사용되고 있다. 이와 같은 면진장치는 대부분 구 조물과 기초 사이에 설치가 되며 기초를 통해 전달되는 지진에너지를 고유한 방식으로 소산시켜 지진에너지가 상부의 구조물로 전달되는 것을 방지하는 역할을 한다. 해석에 사용한 면진장치는 주로 사용되는 면진장치 종류 인 마찰진자면진장치와 납-고무면진장치로 선택하였다. 마찰진자면진장치는 구조가 간단하며 자중에 의해 변형 후 복귀하는 특성을 지니고 있어 유지 보수가 용이하다 는 장점이 있다. 납-고무면진장치의 경우 고무의 탄성을 이용한 복귀와 납의 소성특성을 이용한 에너지소산으로 지진에너지를 감쇠시키는 방식이다. 납-고무면진장치의 경우 마찰진자면진장치와 달리 어느 정도의 수직변위를 제어할 수 있으며 Table 1과 같이 재결정온도가 다른 금 속보다 낮은 납의 특성에 의해 상온에서 변형 후 원래 분 자 형태로 재결정되는 특성을 가져 유지보수가 용이하다 는 장점이 있다.

Table	e 1.	Recrystall	ization	temperature	of	metal
-------	------	------------	---------	-------------	----	-------

Name	Recrystallization temperature		
Iron	450°C		
Copper	200°C		
Aluminum	150°C		
Lead	20°C		

#### 2.1.1 마찰진자면진장치

해석에 사용한 마찰진자면진장치는 기성 면진장치의 형상을 참고하여 모델링 하였으며 마찰면 사이의 마찰계 수는 0.035로 적용하였다. 면진장치 상하 플레이트의 내 부 직경은 252mm이며 지압면적은 88,668mm<sup>2</sup>이다. Fig. 1은 마찰진자면진장치의 해석모델이고 Fig. 2는 마 찰진자면진장치의 변위-하중 이력 곡선이다.



Fig. 1. Numerical model of FIP



Fig. 2. Displacement-Force curve of FIP

#### 2.1.2 납-고무면진장치

납-고무면진장치 해석모델에 적용된 적층고무의 재료 특성은 초탄성 재료의 변형률 에너지를 이용한 LRB받침 의 유한요소 해석에 대한 연구[10]의 재료 특성을 참고하 여 적용하였다. 참고한 납-고무면진장치의 설계수직면압 은 5MPa이며 설계하중은 236kN이다. 면진장치에 사용 된 적층고무와 보강철판의 직경은 249.4mm이며 납 코 어의 직경은 87mm로 적용하였다. 고무는 총 13층으로 적층되어 있으며 보강철판은 12층으로 적층되어 서로 강 체연결을 통해 구속되어있다. 납-고무면진장치에서 사용 한 납의 탄성계수는 16MPa, 포아송비는 0.44이며 고무 의 초탄성을 고려하기 위한 변형률 에너지함수를 도입하 였다. 변형률 에너지함수는 초탄성 재료의 변형률 에너 지를 이용한 LRB받침의 유한요소 해석에 대한 연구[10] 를 참고하여 Odgen함수를 사용하였으며 그 값은 Table 2와 같다. 납-고무면진장치의 해석모델은 Fig. 3과 같으 며 Fig. 4는 납-고무면진장치의 변위-하중 이력 곡선이다.

Table	2.	Strain	energy	function	parameter
rabic	4.	otram	chergy	runction	parameter

Strain Function	Material Parameters					
Odgen	i	μ	α	D		
	1	2.647	-0.098	0.00132		
	2	0.087	3.797	0.0000198		
	3	-2.326	0.2387	-0.0000006		



Fig. 3. Numerical model of LRB



Fig. 4. Displacement-Force curve of LRB

#### 2.3 변압기

해석에 사용할 변압기는 154kV급의 유입변압기의 형 상을 기반으로 하여 모델링 하였다. 변압기의 대략적인 치수는 L×W×H = 4.98m×5.95m×6.2m이며 변압기 의 외함에 부착된 방열판, 부싱 등의 부가장비 또한 모델 링 하였다. 실제 변압기의 상세구성과 중량은 Table 3과 같다. 변압기 내부 철심과 권선의 중량은 38 Ton이며 절 연유의 중량은 17.5 Ton이다. 그 외 변압기의 외함, 부 싱, 방열판 등의 중량은 20.1 Ton으로 총중량 75.6 Ton으로 표기되어있다. 본 연구에서는 해당 변압기의 형태를 기반으로 하여 변압기의 수치해석모델링을 수행 하였다. 변압기 본체를 구성하는 외함, 프레임 등은 Shell요소로 모델링 하였으며 방열판 및 부싱은 Beam요 소로 모델링 하였다. 완성된 변압기 모델의 총 중량은 63.18 Ton으로 나타났다. 변압기 내부에 위치하는 변압 용 철심과 권선은 서로 연결되어 일체 거동을 한다는 가 정하에 단일 Solid요소로 모델링하였으며 변압기 외함 바닥과 강체 연결되어있는 것으로 하여 외함과 일체거동 을 할 수 있도록 하였다. 완성된 변압기의 해석모델은 Fig. 5와 같다.

Table 3. Transformer details

Name		Weight		Quantity
CORE and COIL		38,000kg		1ea
OIL		17,500kg		-
TANK and FITTING	BUSHING 72.5kV		36kg	3ea
	BUSHING 170kV	20 100kg	207kg	3ea
	RADIATOR	20,100kg	-	10ea
	TANK		-	1ea
	ETC		-	-
Total		75,600	Okg	-



Fig. 5. Transformer numerical analysis model

#### 2.4 해석조건

변압기 지진해석의 경우 IEEE Std. 693[11]에서 69kV~230kV사이의 용량을 가진 변압기는 동적해석을

수행하도록 권고하고 있다. 따라서 본 연구에서는 IEEE Std. 693을 참고하여 동적해석을 통해 변압기의 해석을 수행하고자 한다. 변압기의 동적해석을 수행하기 위해 두 가지 지진파를 적용하였으며 적용된 지진파는 수직방 향을 제외한 수평 양방향으로 작용하도록 설정하였다. 면진장치는 4개씩 적용하였으며 변압기의 고정지점에 위 치하는 것으로 모델링하였다. 이후부터 편의를 위해 고 정단을 FIX, 마찰진자면진장치를 FIP, 납-고무면진장치 를 LRB로 나타내는 것으로 한다.

#### 2.5 면진장치를 적용한 변압기 해석

면진장치가 적용되지 않은 변압기 해석의 경계조건은 변압기 하단 프레임에 절점을 생성하여 해당 지점을 구 속하였으며, 절점에 지진파를 가진하였다. 면진장치가 적용된 변압기의 해석의 경우 두 면진장치 모두 하부 플 레이트의 하면을 구속하였으며, 해당 면에 지진파를 가 진하였다. 또한, 변압기의 중량을 고려하기 위해 수치해 석모텔에 중력이 작용하도록 설정하였다. 변압기의 해석 에서 면진장치는 면진장치가 적용되지 않은 변압기의 고 정단의 위치에 적용되었다. 마찰진자면진장치의 배치는 Fig. 6 (a)와 같으며 납-고무면진장치의 배치는 Fig. 6 (b)와 같다.



Fig. 6. Installation of Isolator (a) Transformer with FIP (b) Transformer with LRB

## 2.6 입력지진파

면진장치가 적용된 변압기의 지진거동분석을 위해 사 용할 인공지진파의 작성에 행정안전부의 내진설계기준 공통적용사항[12]의 응답스펙트럼과 ICC-ES AC156[13] 을 참고하여 작성한 설계응답스펙트럼을 이용하였다. 내 진설계기준 공통적용사항과 ICC-ES AC156의 응답스펙 트럼은 각각 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 내진설계기 준을 참고하여 생성한 지진파는 17sec 동안 지속되는 지 진파로 설계하였으며 AC156의 응답스펙트럼을 참고하 여 생성한 지진파의 경우 30sec 동안 지속되는 지진파로 설계하였다. 내진설계기준을 참고한 인공지진파의 경우 최대가속도를 0.255g로 생성하였으며 AC156의 지진파 의 경우 최대가속도를 0.44g로 생성하였다. 내진설계기 준 공통적용사항의 응답스펙트럼[12]으로 생성한 인공지 진파의 시간이력곡선은 Fig. 9와 같으며 ICC-ES AC156 의 응답스펙트럼[13]으로 생성한 인공지진파의 시간이력 곡선은 Fig. 10과 같다. 이후부터 편의를 위해 내진설계 기준의 응답스펙트럼을 통해 생성한 지진파를 KDS, ICC-ES AC156의 응답스펙트럼을 통해 생성한 지진파 를 AC156으로 나타내는 것으로 한다.



Fig. 7. Response spectrum of KDS



Fig. 8. Response spectrum of AC156

# 3. 해석결과 및 분석

해석의 결과로 KDS과 AC156지진파를 수평방향으로 가진하였을 때 수치해석 모델에 대해서 면진장치의 종류 에 따른 최대응답가속도와 각 면진장치의 상대변위를 도 출하였다. 변압기 모델의 최대응답가속도 및 상대변위는 Fig. 11의 변압기 외함 상단부와 하단부에서 각각 측정 하였다. 면진장치 상대변위의 경우 면진장치의 상부 플 레이트와 하부 플레이트의 중앙에서 각각 측정하였으며 두 플레이트 간의 상대변위를 측정하였다.



Fig. 9. Acceleration curve of KDS



Fig. 10. Acceleration curve of AC156



Fig. 11. Top(A) and Bottom(B) of Transformer case

#### 3.1 최대응답가속도

지진 시 변압기로 전달되는 지진가속도를 분석하기 위 해 변압기 외함 상단의 가속도와 하단의 가속도를 비교 하였다. KDS지진파를 입력하였을 때 변압기 상단의 최 대응답가속도는 면진장치가 적용되지 않았을 때 3.2g로 나타났으며 FIP, LRB를 적용하였을 때는 각각 0.6g, 1.5g로 나타났다. AC156지진파를 입력하였을 때 면진 장치가 적용되지 않은 변압기 상단의 최대응답가속도는 9.9g로 나타났으며 FIP, LRB를 적용하였을 때는 각각 0.9g, 2.4g로 나타났다. 각 해석에서 도출된 최대응답가 속도 결과를 바탕으로 지진파에 따른 면진장치별 최대가 속도와 면진장치를 사용한 변압기의 최대응답가속도 저 감율을 계산하여 Table 4에 나타내었다. Table 4에서 FIP가 적용된 변압기 해석모델은 변압기 상단의 가속도 에서 KDS, AC156지진파에 대해 80.83%, 90.36%의 저 감율을 보였다. 변압기 하단의 가속도에서는 KDS, AC156지진파에 대하여 75.73%, 84.33%의 저감율을 보였다. 해석결과 FIP는 두 인공지진파에 대하여 75%이 상의 최대응답가속도 저감율을 보이며 효과적으로 지진 가속도를 저감시키는 것으로 판단된다. LRB가 적용된 변압기 해석모델은 변압기 상단의 가속도에서 KDS. AC156지진파에 대해 53.18%, 82.11%의 저감율을 보 였다. 변압기 하단의 가속도에서는 KDS, AC156지진파 에 대하여 42.47%, 60.71%의 저감율을 보였다. 이때 해 석을 통해 도출된 면진장치의 최대가속도시간이력 곡선 을 지진파-면진장치로 구분하여 Fig. 12에 나타내었다. FIP를 적용한 변압기의 경우 입력지진파에 따른 최대응 답가속도 저감율 차이는 9~10%로 나타났으나 LRB의 경우 입력지진파에 의한 최대응답가속도 저감율 차이는 18~29%로 나타났다. 변압기 최대응답가속도 분석에서 LRB의 경우 FIP보다 상대적으로 큰 응답가속도가 발생 하는 것을 확인할 수 있었으며 LRB의 해석에서 서로 다 른 특성을 가진 두 지진파에 대해 저감율 차이가 큰 것을 보아 지진파에 따라 면진장치의 성능에 차이가 있을 것 으로 판단된다.

		Top-Acceleration(g)		Bottom-Acceleration(g)			
Isolator Device	Earthquake	Isolator Non applied	Isolator Applied	Reduction Rate	Isolator Non applied	Isolator Applied	Reduction Rate
FID	KDS	3.2024	0.6138	80.83%	2.4885	0.6040	75.73%
FIP	AC156	9.9729	0.9376	90.36%	6.0113	0.9419	84.33%
IDD	KDS	3.2024	1.4993	53.18%	2.4885	1.4317	42.47%
LKD	AC156	9.9729	1.7402	82.11%	6.0113	2.3620	60.71%
() understanding () understanding -1 -2 -3 -4 0 2 4 6 8 Trime (see KDS=FI	() () () () () () () () () ()	4 3 2 1 0 	() 12 14 16 10 12 14 16 10 BB	15 10 5 0 -5 -10 -15 0 5 10 AC	() () () () () () () () () ()	15 10 5 0 -10 -15 0 5 10 7 AC1	15 20 25 30
KDS-F	IP	KDS-	LKB	AC	150-FIP	ACI	50-LKB

Table 4. Max. Response acceleration of Transformer

Fig. 12. Max. Response acceleration curve of Transformer

#### 3.2 상대변위

지진에 의한 변압기 위치별 상대변위와 면진장치의 이 동거리를 비교하기 위해 Fig. 11의 변압기 상-하단의 상 대변위와 면진장치 상-하부 플레이트 중앙에서의 상대변 위를 측정하였다.

#### 3.2.1 변압기 상대변위

변압기 외함 상대변위의 최댓값과 면진장치를 적용하 였을 때의 상대변위 감소율을 정리하여 Table 5에 나타 내었다. 면진장치가 적용되지 않은 변압기의 외함에서 발생하는 상대변위는 KDS지진파에서 0.72mm, AC156 지진파에서 0.63mm로 나타났다. FIP가 적용된 변압기 외함의 상대변위는 KDS지진파일 때 0.14mm, AC156 지진파일때 0.19mm로 고정단일 때의 상대변위보다 각 각 80.05%, 70.50%가량 감소된 것을 확인하였다. 반면 LRB가 적용된 변압기의 경우 외함 상대변위는 KDS지진 파일 때 0.58mm, AC156지진파일 때 1.61mm로 나타 나 KDS지진파를 가진하였을 때 고정단일 때의 상대변위 보다 20.28% 가량 상대변위가 감소한 것을 확인할 수 있었으나 AC156지진파를 가진하였을 때는 오히려 상대 변위가 253.46%가량 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이때 해석을 통해 도출된 변압기 상-하단 상대변위의 시 간이력 곡선을 지진파-면진장치로 구분하여 Fig. 13에 나타내었다.

#### 3.2.2 면진장치 상대변위

면진장치 상-하부 플레이트의 상대변위 최댓값을 도

출하여 Table 5에 나타내었다. 면진장치 상-하부 플레 이트의 최대상대변위는 KDS지진파에서 FIP는 43.26mm, LRB는 23.08mm를 보이며 FIP의 상대변위가 LRB에 비해 더 큰 것으로 나타났다. AC156지진파에서는 FIP가 61.64mm, LRB가 67.22mm로 나타나 두 면진장치 간 상대변위 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 여기서 상 대적으로 최대가속도가 작은 KDS지진파에서 LRB의 상 대변위보다 FIP의 상대변위가 작은 것을 확인할 수 있다.

#### 3.3 변압기 회전변형

변압기의 동적해석결과에서 변압기의 회전변형을 확 인하였으며 이를 분석하기 위해 변압기 외함 하단부 좌-우측의 변위를 도출하여 두 값의 차이를 비교하여 Table 6에 정리하였다. 여기서 FIP를 적용한 변압기의 좌우 변 위차는 KDS지진파일 때 3.6mm이며, AC156지진파일 때 5.0mm로 나타났다. 반면 LRB를 적용한 변압기의 좌 우 변위차는 KDS지진파일 때 9.9mm로 나타났으며, AC156지진파일 때 56.7mm로 나타났다. 이때의 변위 를 이용하여 변위측정위치 사이의 거리(3650mm)를 사 용하여 계산한 회전각을 Table 6에 나타내었다. 변압기 의 회전각은 LRB를 적용한 변압기가 FIP를 적용한 변압 기보다 큰 것으로 나타났다. 이때 해석을 통해 도출된 변 압기 좌-우 변위차의 시간이력 곡선을 지진파-면진장치 로 구분하여 Fig. 14에 나타내었다. 이와 같은 회전변형 은 지진파의 작용방향과 변압기의 운동중심이 일치하지 않아 발생하는 현상으로 FIP의 경우 마찰력에 의해 회전 이 구속되지만 LRB의 경우 회전이 구속되지 않아 과도



Table 5. Max. Relative displacement of Transformer case and Isolator



		Transformer lateral displacement difference(mm)			
Isolator Device Earthqua		Isolator Non applied	Isolator Applied	Rotation Angle	
FIP	KDS	0.0535	3.6509	0.057°	
	AC156	0.1675	4.9954	0.078°	
LRB	KDS	0.0535	9.8682	0.155°	
	AC156	0.1675	56.9386	0.894°	

Table 6. Max. Transformer lateral displacement difference



Fig. 14. Max. Transformer lateral Displacement difference curve

한 변형이 발생한 것으로 보인다. 또한, 이러한 회전변형 은 Fig. 13 (AC156-LRB)와 같이 상대변위의 증가에 영 향을 준 것으로 판단된다.

### 4. 결론

본 연구에서는 중력가속도가 작용하는 상태에서 고정 단 변압기, 마찰진자면진장치와 납-고무면진장치를 적용 한 변압기에 2종류의 수평방향 지진파를 가진하여 동적 해석을 수행하였다. 이때 면진장치 적용 전후에 발생하 는 변압기의 거동을 분석하고 면진장치별 거동 특성을 파악하였으며 해석을 통해 도출된 결과는 다음과 같다.

- (1) 해석결과 면진장치를 적용한 변압기의 해석에서 수평방향 입력지진파에 의한 변압기의 최대응답 가속도는 마찰진자면진장치의 가속도 저감율이 납-고무면진장치에 비해 전반적으로 큰 것으로 나타났다.
- (2) 변압기 외함에서 발생하는 상대변위의 경우 마찰 진자면진장치를 적용하였을 때 70~80%가량 상대 변위가 감소하는 것을 확인할 수 있었던 반면 납-고무면진장치를 적용한 변압기 외함의 상대변위 는 감소율이 작거나 오히려 증가하는 경향을 보였다.
- (3) 변압기의 회전변형을 분석하기 위해 변압기 좌-우 측의 변위 차를 계산하였다. 이때 납-고무면진장 치의 좌-우측 변위 차가 마찰진자면진장치보다 큰

것으로 나타났으며 이는 두 면진장치의 복원력의 차이에서 나타나는 결과로 보인다. 상대적으로 납 -고무면진장치는 마찰진자면진장치보다 변형 후 복원력이 약해 회전변형이 발생한 뒤 회전변형의 복원이 적어 변형이 누적되어 결과적으로 더 큰 회전변형을 나타낸 것으로 판단된다.

- (4) (1), (2), (3)의 결과를 바탕으로 입력지진파에 대 해서 2 종류의 면진장치 중 마찰진자면진장치가 납-고무면진장치에 비해 더 우수한 거동특성을 가 진 것으로 나타났다.
- (5) 해석결과를 통해 도출된 면진장치의 지진 시 거동 특성은 실무에서 구조물에 면진장치의 도입을 고 려할 때 적절한 면진장치 선정에 도움이 될 것으 로 기대된다. 특히 납-고무면진장치의 도입을 고 려할 경우 지진 시 면진구조물이 회전하여 인접구 조물과 충돌할 우려가 있으므로 이에 대한 적절한 대응책 마련이 필요할 것으로 생각된다.

#### References

- [1] Korea Meteorological Administration (KMA), 2020 Annual Seismological Report. p.202, Korea Meteorological Administration, 2020, pp. 1-4
- [2] J. J. Ha, J. H. Park, M. G. Kim, "Japan's Niigata Earthquake and Nuclear Safety." Journal of The Electrical World, No. 369, pp. 4-18, 2007.
- [3] WRK Engineers, Mexico City Earthquake Reconnaissance -Day 3, Avalible From:

https://www.wrkengrs.com/mexico-city-earthquake-r econnaissance-day-4/ (Accessed Nov. 20, 2018)

- [4] M. K. Kim, Y. Ohtori, Y. S. Choun, I. K. Choi, "Analysis of Seismic Fragility Improvement Effect of an Isolated Rotational Equipment", *Jorunal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.11, No.6, pp. 69-78, 2007. DOI: https://doi.org/10.5000/EESK.2007.11.6.069
- [5] J. H. Moon, , J. S. Kim, , T. H. Lee, T. S. Han, "Seismic Fragility Analysis of a LNG Tank with Friction Pendulum System of Various Friction Coefficient." *Jorunal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol.30, No.2, pp. 95-102, 2017. DOI: https://doi.org/10.7734/COSEIK.2017.30.2.95
- [6] K. H. Moon, S. W. Han, H. C. Jo, K. S. Lee, "Seismic Retrofit Design Procedure Using a Friction Damper.", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.15, No.6, pp. 45-53, 2011. DOI: <u>https://doi.org/10.5000/EESK.2011.15.6.045</u>
- [7] J. B. Jang, J. K. Kim, K. M. Hwang, K. W. Ham, J. W. Park, C. W. Lee, "Experimental Study of Friction Pendulum System to Improve the Seismic Capacity of Transformer", *Jorunal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.12, No.2, pp. 1–8, 2008. DOI: https://doi.org/10.5000/EESK.2008.12.2.001
- [8] G. H. Koo, T. M. Shin, S. J. Ma, "Shaking Table Tests of Lead Inserted Small-Sized Laminated Rubber Bearing for Nuclear Component Seismic Isolation", *Applied Sciences*, 11(10), 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/app11104431
- [9] C. B. Cho, I. J. Kwahk, Y. J. Kim "An Experimental Study for the Shear Property and the Temperature Dependency of Seismic Isolation Bearings", *Jorunal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.12, No.1, pp. 67-77, 2008. DOI: https://doi.org/10.5000/EESK.2008.12.1.067
- [10] S. G. Cho, W. K. Park and S. M. Yun "Finite Element Analysis of Lead Rubber Bearing by Using Strain Energy Function of Hyper-Elastic Material", *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol.36, No.3, pp. 361-374, 2016. DOI: <u>https://doi.org/10.12652/Ksce.2016.36.3.0361</u>
- IEEE, IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substation, IEEE Power engineering society, IEEE std. 693-2018, 2018.
   DOI: <u>https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8686442</u>
- [12] Ministry of the Interior and Safety, Common application of seismic design standard, 2017.
- [13] ICC-ES, AC156-2010 Acceptance Criteria for Seismic Certification by Shake Table Testing of Nonstructural Components, 2015.





- 2020년 8월 : 경상국립대학교 토 목공학과 (공학사)
- 2020년 9월 ~ 현재 : 경상국립대 학교 토목공학과 (석사과정)

#### 〈관심분야〉 철근콘크리트 구조해석, 전산구조, 내진성능평가

#### 정 영 석(Yeong-Seok Jeong)

#### [정회원]



- 2015년 2월 : 경상국립대학교 토 목공학과 (공학석사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 경상국립대 학교 토목공학과 (박사과정)

〈관심분야〉 철근콘크리트 구조해석, 복합재료 보강재, 내진성능평가

허소 현 (So-Hyeon Heo)

#### [준회원]



2021년 2월 : 경상국립대학교 토 목공학과 (공학사)
2021년 3월 ~ 현재 : 경상국립대

학교 토목공학과 (석사과정)

〈관심분야〉 철근콘크리트 구조해석, 전산구조, 내진성능평가 권 민 호(Minho Kwon)

[정회원]



- 2000년 8월 : Univ.of Colorado Boulder (공학박사)
- 2000년 8월 ~ 2001년 12월 : Univ. of Colorado, Denver (Research Fellow)
- 2002년 3월 ~ 현재 : 경상국립대 학교 토목공학과 교수

〈관심분야〉 철근콘크리트 구조해석, 전산구조, 내진성능평가