



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

박사학위논문

임의방향 진동의 감쇠기능을
갖는 면진형 배전반에 관한 연구



한 성 대 학 교 대 학 원

스마트융합건설팅학과

스마트융합건설팅전공

이 태 호

박사학위논문
지도교수 홍정완

임의방향 진동의 감쇠기능을 갖는 면진형 배전반에 관한 연구

A Study on Seismic Isolators Switchboard with
Function Attenuation of Arbitrary Direction Vibration



HANSUNG
UNIVERSITY

2018년 6월 일

한 성 대 학 교 대 학 원

스마트융합건설팅학과

스마트융합건설팅전공

이 태 호

박사학위논문
지도교수 홍정완

임의방향 진동의 감쇠기능을 갖는 면진형 배전반에 관한 연구

A Study on Seismic Isolators Switchboard with
Function Attenuation of Arbitrary Direction Vibration

위 논문을 건설팅학 박사학위논문으로 제출함

2018년 6월 일

한 성 대 학 교 대 학 원

스마트융합건설팅학과

스마트융합건설팅전공

이 태 호

이태호의 컨설팅학 박사학위논문을 인준함

2018년 6월 일



심사위원장 _____(인)
심 사 위 원 _____(인)

심 사 위 원 _____(인)

심 사 위 원 _____(인)

심 사 위 원 _____(인)

국 문 초 록

임의방향 진동의 감쇠기능을 갖는 면진형 배전반에 관한 연구

한 성 대 학 교 대 학 원
스 마 트 융 합 컨 설 팅 학 과
스 마 트 융 합 컨 설 팅 전 공
이 태 호

우리나라는 환태평양 지진대에 위치하는 주변국보다 비교적 안전한 지역으로 인식되어지고 있어 지진에 대한 대비가 미흡했으나 지진은 규모의 차이가 있을 뿐 작거나 중간정도 규모를 가진 지진들이 과거부터 현재까지 지속적으로 발생하고 있다. 다만 지진에 대한 인식부족과 측정장비 미비 등으로 지진 발생 시 정보가 계측되고 알려지지 않은 것 뿐이라 할 수 있다.

우리나라는 건축물 및 비구조물에 대한 내진설계 적용이 1988년부터 의무화가 되었다. 내진설계가 의무화된 계기는 1978년 9월 규모 5.2 속리산 지진, 10월 규모 5.0 충남 홍성지진 및 1985년 멕시코 지진이라고 말할 수 있다.

건축물 내에 설치되는 비구조물에 대한 지진 대비책은 지금까지도 매우 취약한 현실이다. 특히, 재난방호 활동에 직접적인 영향을 주는 전기의 공급이 원활하지 않을 경우 위기대응 활동에도 큰 장애요소가 된다. 최근 법에서도 비구조물에 대한 내진건전성과 안전성 보장을 위한 제도가 정비되고 있다.

전기업계에서도 지진발생 시 건전성을 보장하고 원활한 전기 공급이 가능한

제품개발을 꾸준히 연구하고 있다.

본 연구에서는 수·배전반에 적용하는 내진장치를 개발하고 내진장치에 적용된 요소별 부품인 폴리우레탄, 스프링 등에 대한 하중 및 노화 특성실험을 수행하였고, 제품 결합 시의 완제품에 대한 개체 하중시험을 수행하였다. 개발된 내진장치를 직접 수·배전반에 적용하기 전 배전반에 대한 유한요소법을 이용한 해석적 방법을 적용하여 모드 및 스펙트럼 해석을 수행하였다. 또한, 수·배전반에 개발된 내진장치를 직접 설치하고 지진 발생지역의 특수한 상황을 고려한 내진시험 방법으로 3차원 진동대 실증시험을 수행하였다.

【주요어】 수·배전반, 지진, 면진장치, 폴리우레탄, 스펙트럼가속도



목 차

제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구의 배경 및 목적	1
제 2 절 연구의 필요성	6
제 3 절 연구범위 및 내용	9
제 2 장 이론적 배경 및 관련연구	10
제 1 절 구조물의 설계방법	10
제 2 절 지진관련 연구조사	13
제 3 절 수·배전반 내진 시험 방법	44
제 3 장 임의방향 진동 감쇠기능 면진장치 개발	52
제 1 절 면진장치 기존 연구	52
제 2 절 면진장치 종류별 설계방법과 특성	68
제 3 절 면진장치 개발 및 구조설계	84
제 4 장 면진장치 적용한 수배전반의 평가시험	103
제 1 절 유한요소법을 이용한 해석적 방법 소개	103
제 2 절 진동대 시험을 통한 실증적 방법	115
제 5 장 결 론	150
제 1 절 연구결과	150
참 고 문 헌	152
ABSTRACT	157

표 목 차

[표 2-1] 지진 규모 대응현상	24
[표 2-2] 진도 와 규모의 비교표	25
[표 2-3] 국내 건축물 내진성능 확보율 현황	28
[표 2-4] 지진구역 구분 및 지역계수	29
[표 2-5] 지반의 분류	31
[표 2-6] 단주기 지반증폭계수(F_a)	33
[표 2-7] 1초주기 지반증폭계수(F_v)	33
[표 2-8] 건축물의 내진등급 기준	34
[표 2-9] 중요도 및 중요도 계수	35
[표 2-10] 단주기설계스펙트럼가속도에 따른 내진설계범주	36
[표 2-11] 설계스펙트럼가속도에 따른 내진설계범주(주기 1초)	36
[표 2-12] 지진하중 산정을 위한 변수들	43
[표 2-13] 기준에 따른 설계 지진력 비교	43
[표 2-14] Required Response Spectra	47
[표 2-15] 시험대상설비의 종류 및 검증방법	48
[표 2-16] 내진시험 방법 및 판정조건	51
[표 3-1] 지진파의 구분 및 특성	53
[표 3-2] 규모별 지진에너지	55
[표 3-3] 정적해석과 동적해석 비교	56
[표 3-4] 적층고무의 직경분포	69
[표 3-5] 분리장치의 종류 및 요구성능	71
[표 3-6] 면진장치 성능비교표	90
[표 3-7] 폴리우레탄 시편 물성표	97
[표 3-8] 우레탄 시편 시험결과	98
[표 4-1] 모델 구성 요소	106
[표 4-2] 고유진동수 및 각 모드 별 참여도	108
[표 4-3] 최대응력 및 최대변위 결과	112

[표 4-4] 시험대상설비의 정보	115
[표 4-5] 장비사양	116
[표 4-6] 측정 분석 장비	117
[표 4-7] 점검항목 및 허용기준 요약	119
[표 4-8] 성능검증에 사용한 장비 목록	120
[표 4-9] 시험 순서도	120
[표 4-10] 공진탐색 시험조건	123
[표 4-11] 내진시험 결과 요약	125
[표 4-12] 공진탐색 시험결과 요약	126
[표 4-13] 최대가속도 및 상대변위 결과	129
[표 4-14] 시험대상 설비의 정보	134
[표 4-15] 장비사양	135
[표 4-16] 측정분석 장비	136
[표 4-17] 점검항목 및 허용기준 요약	138
[표 4-18] 성능검증에 사용한 장비 목록	139
[표 4-19] 시험 순서도	139
[표 4-20] 공진탐색 시험조건	141
[표 4-21] 내진시험 시험조건	142
[표 4-22] 내진시험 결과 요약	143
[표 4-23] 공진탐색 시험결과 요약	144
[표 4-24] 최대가속도 및 상대변위 결과	144

그 립 목 차

[그림 1-1] 불의 고리 환태평양 지진대	2
[그림 1-2] 지진 피해사례	3
[그림 1-3] 지진으로 전도된 배전반	4
[그림 1-4] 국내 지진 발생 추이	6
[그림 1-5] 기계장치에 사용되는 방진장치	7
[그림 2-1] 내진설계의 분류	11
[그림 2-2] 구조 원리	12
[그림 2-3] 설계원리	12
[그림 2-4] 지구의 내부 구조	13
[그림 2-5] 지구를 둘러싸고 있는 주요 판구조도	15
[그림 2-6] 진앙/진원거리 설명도	16
[그림 2-7] 규모와 진도 관계식	23
[그림 2-8] 최대지반가속도(PGA)와 진도의 관계	23
[그림 2-9] 내진설계 대상 변동 현황	26
[그림 2-10] KBC 2016의 지반의 분류	30
[그림 2-11] Telcordia Earthquake Zone Map	45
[그림 2-12] Earthquake Synthesized Waveform-VERTQII Zone 4 ..	46
[그림 2-13] Required Response Spectra	46
[그림 2-14] 층응답스펙트럼	49
[그림 3-1] 지진파의 입자운동 모형	52
[그림 3-2] 실측 지진파	52
[그림 3-3] 지진파의 사다리꼴 형태(포락모형)	54
[그림 3-4] 단자유도 구조물의 최대 동적 응답	63
[그림 3-5] 진동주기의 변화	65
[그림 3-6] 적층고무의 적용 현황	69
[그림 3-7] 천연고무계 적층고무의 직경 개수	70
[그림 3-8] 납봉삽입형 적층고무의 직경 개수	70

[그림 3-9]	적층고무 분리장치의 종류	74
[그림 3-10]	미끄럼 받침	75
[그림 3-11]	굴림받침	75
[그림 3-12]	강재댐퍼	76
[그림 3-13]	납댐퍼	76
[그림 3.14]	오일댐퍼	76
[그림 3-15]	마찰댐퍼	76
[그림 3-16]	적층고무의 단면	79
[그림 3-17]	적층고무의 수직방향 응력분포의 해석 예	80
[그림 3-18]	면진장치 구성도	87
[그림 3-19]	면진장치 신축기능	88
[그림 3-20]	면진장치 변형 모형	89
[그림 3-21]	면진장치 외형도	90
[그림 3-22]	압축스프링 상/하부 브라켓(하우징)	91
[그림 3-23]	탄성체 외형도	92
[그림 3-24]	어스테르게 폴리우레탄 탄성체	92
[그림 3-25]	대/소구경 금형 압축 스프링	93
[그림 3-26]	금형 압축스프링 특성표	93
[그림 3-27]	CL 60×60 물성표	94
[그림 3-28]	파란 금형 압축스프링 하중 시험	94
[그림 3-29]	만능재료시험기	96
[그림 3-30]	상온(23℃) 압축시험 그래프	98
[그림 3-31]	챔버(60℃) 압축시험 그래프	99
[그림 3-32]	챔버(60℃, 168h) 압축시험 그래프	100
[그림 3-33]	챔버(-20℃) 압축시험 그래프	101
[그림 3-34]	면진장치 시제품	101
[그림 3-35]	면진장치 시제품 하중 시험	102
[그림 4-1]	배전반 유한 요소 모델	106
[그림 4-2]	배전반 내부의 유한 요소 모델	107

[그림 4-3]	모드 별 형상	109
[그림 4-4]	설치위치에 따른 층응답스펙트럼	110
[그림 4-5]	요구응답스펙트럼	111
[그림 4-6]	응력분포 및 최대변위	112
[그림 4-7]	면진형 고압배전반	114
[그림 4-8]	면진형 고압배전반 구성도	115
[그림 4-9]	시험장비 구성도	118
[그림 4-10]	성능검증 구성도	119
[그림 4-11]	가속도계 설치	121
[그림 4-12]	내진시험 조건	124
[그림 4-13]	Telcordia zone 4 내진시험 전 공진탐색 X축(좌우) ...	127
[그림 4-14]	Telcordia zone 4 내진시험 전 공진탐색 Y축(좌우) ...	127
[그림 4-15]	Telcordia zone 4 내진시험 전 공진탐색 X축(좌우) ...	127
[그림 4-16]	Telcordia zone 4 내진시험 후 공진탐색 X축(좌우) ...	128
[그림 4-17]	Telcordia zone 4 내진시험 후 공진탐색 Y축(좌우) ...	128
[그림 4-18]	Telcordia zone 4 내진시험 후 공진탐색 Z축(좌우) ...	128
[그림 4-19]	Telcordia zone 4 내진시험 X축(좌우) 응답스펙트럼 ·	129
[그림 4-20]	Telcordia zone 4 내진시험 Y축(전후) 응답스펙트럼 ·	130
[그림 4-21]	Telcordia zone 4 내진시험 Z축(상하) 응답스펙트럼 ·	130
[그림 4-22]	Telcordia zone 4 X축 Time history	131
[그림 4-23]	Telcordia zone 4 Y축 Time history	131
[그림 4-24]	Telcordia zone 4 Z축 Time history	132
[그림 4-25]	Telcordia zone 4 내진시험 상대변위	132
[그림 4-26]	면진형 저압배전반	133
[그림 4-27]	면진형 저압배전반 구성도	134
[그림 4-28]	시험장비 구성도	137
[그림 4-29]	성능검증 구성도	138
[그림 4-30]	가속도계 설치	140
[그림 4-31]	내진시험 전 공진탐색 X축(좌우)	145

[그림 4-32]	내진시험 전 공진탐색 Y축(전후)	145
[그림 4-33]	내진시험 전 공진탐색 Z축(상하)	145
[그림 4-34]	내진시험 후 공진탐색 X축(좌우)	146
[그림 4-35]	내진시험 후 공진탐색 Y축(전후)	146
[그림 4-36]	내진시험 후 공진탐색 Z축(상하)	146
[그림 4-37]	내진시험 Table X축(좌우) 응답스펙트럼	147
[그림 4-38]	내진시험 Table Y축(전후) 응답스펙트럼	147
[그림 4-39]	내진시험 Table Z축(상하) 응답스펙트럼	147
[그림 4-40]	내진시험 간섭함수	148
[그림 4-41]	내진시험 Time history	149
[그림 4-42]	내진시험 상대변위	149



제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경 및 목적

1) 연구의 배경

지진은 자연에서 발생하는 재해 중 가장 예측하기 힘들고 지표면의 변화와 지반운동으로 막대한 경제적 손실 및 인명피해를 발생시키는 재해로서 국내 및 세계적으로 면진, 내진, 제진에 대한 이해와 구조적인 시스템 개발이 지속적으로 증가하는 추세이다. 2011년 일본 도후쿠 대지진(진도 9.0), 2016년 대만 타이난지진(진도7급), 2016년 일보 구마모토 지진(진도7.3)에서 알 수 있듯이 각 나라의 위기를 초래할 만큼 경제, 사회적 손실과 많은 인명피해를 가져왔다.

한반도는 불의고리인 환태평양 지진대에 위치하는 주변국보다 비교적 안전한 지역으로 인식되어져 지진에 대한 대비가 전무한 상태에서 2016년 09 경상북도 경주시 남남서쪽 8km에서 발생한 규모 5.8의 지진과 2017년 11월 포항에서 발생한 규모 5.4의 지진과 여진으로 우리나라가 더 이상 지진에 안전한 국가가 아님을 알 수 있다. 인접 국가들의 지진피해 사례들로 국민들에게 지진에 대한 경각심을 일깨워주고, 국가적인 지진 대비책을 수립하여야 한다. [그림 1-1]과 같이 지진에 의한 피해는 막대한 사회적, 산업적 피해를 동반하기 때문에 근본적인 예방대책이 필요하다.

지진활동으로 국가 주요 기간산업 시설인 송·변전 시설, 전력설비, 통신설비 등에 대해 지진 안전성을 확보할 수 없는 상황이다. 최근 발생한 지진으로 건물 붕괴, 도로 파손 등 자체만으로도 큰 피해를 주지만 화재, 정전, 폭발, 원전 사고 등 추가적인 대규모 2차 피해를 발생시킨다. 지진의 직·간접적인 2차 피해를 줄이기 위해서 비구조물에 대한 면진 및 내진설계가 최

우선으로 적용되어야 한다. 그러나 비구조물에 대한 면진, 내진설계로 지진피해에 대한 예방은 한계가 있다.



[그림 1-1] 불의고리 환태평양 지진대

우리나라는 구조물에 제한적으로 내진설계를 실시하였고 예로 1972년에 원자력발전소를 적용하였고, 1988년 건축물, 1992년에 교량 등에 적용하였다. 산업현장의 전문가와 학계 전문가들은 지진에 관한 인식 및 개념정립이 부족하였고 1997년 건설교통부에서 내진설계 상위개념인 ‘내진설계기준연구(Ⅱ)’를 제정한 후 본격적인 내진 설계가 시작되었다.



(a) 2015년 네팔지진



(b) 2016년 대만지진



(c) 2016년 일본지진



(d) 2011년 칠레지진

[그림 1-2] 지진 피해사례

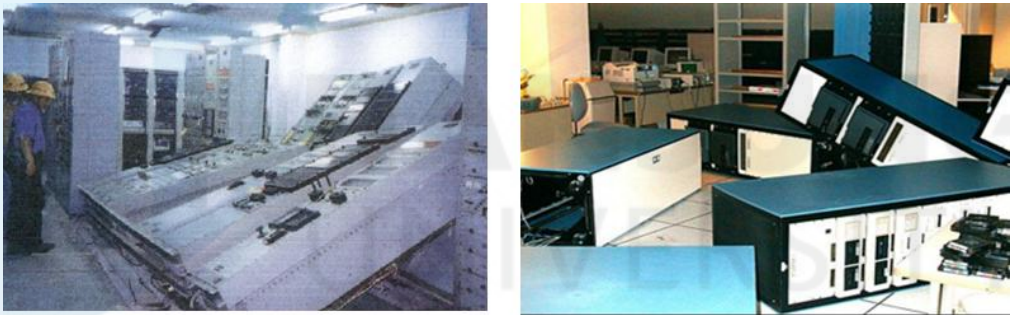
본 연구는 건물 구조체의 내진설계의 적용을 전제로 건물 내부에 설치되는 전기, 통신장비 등의 비구조재 설비에 대한 지진 안전성을 확보하기 위한 기술이라 할 수 있다.

2) 연구의 목적

지진은 지구 내부의 밀도의 불균형으로 지표면의 변동 및 지반운동으로 많은 인명 및 경제적 재해를 가져오는 무서운 자연재해이다. 지진은 예측하기 힘들다는 어려움이 있을 뿐만 아니라 지진이 발생하면 피해지역이 매우 광범위하게 된다.

지진이 발생했을 때 피해의 정도를 줄이기 위해 구조물의 안전성 확보는 대단히 중요하다. 그러나 불가피하게 피해가 발생하였을 경우 최대한 인명피해가 발생하지 않도록 대처할 수 있는 방법이 마련되어야 한다.

지진 피해의 핵심 원인으로는 [그림 1-3]에서와 같이 구조물 내 비구조재의 손상이 꼽히고 있다.



[그림 1-3] 지진으로 전도된 배전반

구조물 내 비구조물의 피해는 주요 재난구호의 즉각적 위기대응에 큰 장애가 된다. 특히, 재난 비상상태 발생 시 피해복구 대책은 안정적으로 전기 공급이 이루어진다는 전제하에 수립이 되기 때문에 수·배전반과 같은 전력공급을 위한 비구조물의 지진 안정성이 확보되어야 한다.

수·배전반이란 발전소에서 생산된 전기를 수전하여 공장, 학교, 건물 등 실제로 전기를 사용하는 곳에 전기를 분배해주는 장치로 금속 외함에 보호 계전기, 개폐기, 메타류 등을 취부 하여 조립한 기계설비 이다.

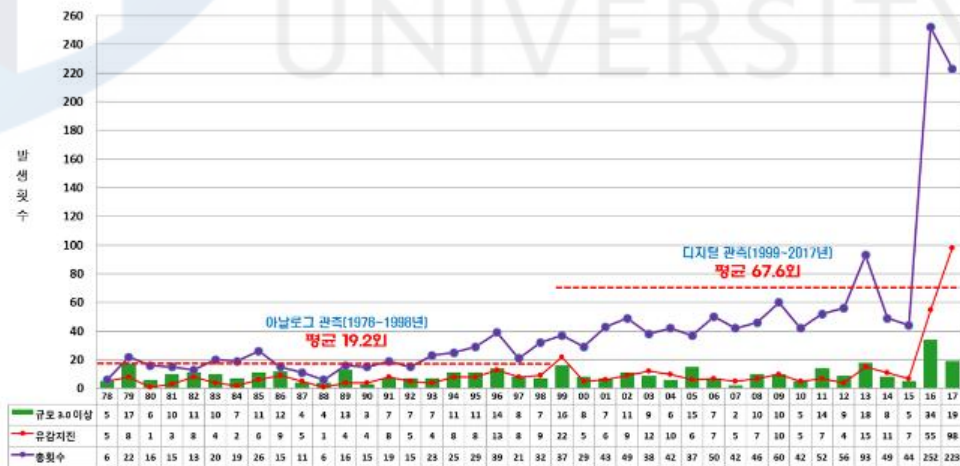
본 논문의 연구목적은 지진에 안전한 면진장치를 실제 제품에 부합하고 제품에 대한 해석 및 실증 시험을 통하여 지진에 대한 수·배전반의 안전성을 검증하는 것이다. 해석적 방법은 유한요소법을 수행하고 실증시험은 미국 Telcordia GR-03-CORE 와 국립전파연구원에서 제시하고 있는 층응답스펙트럼을 수행하여 요구조건과 적합여부를 평가한다.



제 2 절 연구의 필요성

최근 전 세계적으로 지진의 발생빈도와 강도가 증가하고 있어 건축물 뿐만 아니라 그 부속물들 또한 내진안전성을 확보해야 할 필요성이 대두되고 있다. 특히, 대형지진에 따른 대표적인 피해는 건물 또는 댐의 붕괴 등과 같은 대형 시설물 또는 건물의 파괴가 주로 언급되어 왔으나, 사회가 점차 발달함에 따라 통신, 가스, 수도, 전기 같은 사회 인프라 구조의 파괴로 인한 2차 피해의 규모 또한 점차 증가하고 있다.

한반도는 안정적인 지반구조로 지진에 대한 안정지대로 인식되어져 왔으나 최근 기상청 통계자료에 의하면 디지털 관측이 시작된 1999년부터 2017년 까지 국내 지진 발생 회수가 평균 67.6회로 보고 되고 있고, 최근 3년 이내에 지진 발생 건수가 급격히 증가됨을 알 수 있다. 2016년 09월 경주에 규모 5.8 지진, 2017년 11월 포항에 규모 5.4 지진 및 여진이 발생하는 등 더 이상 우리나라가 지진의 안전지대라고 볼 수 없는 상황이다.

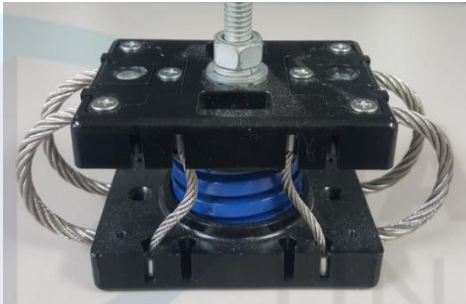


[그림 1-4] 국내 지진 발생 추이

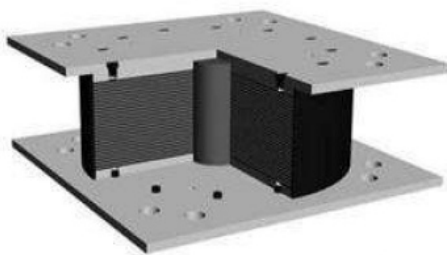
위 그림은 기상청 국가기상종합정보를 참조한 자료이며 지진규모 3.0이상의(건물 내 민감한 사람이 감지 할 수 있는 정도) 발생 횟수와 유감지진(사람이 지진동을 체감한 지진)을 나타낸 그래프이다. 총 횟수는 국내에서 발생한 지진규모 2.0이상으로 지진발생 횟수를 나타낸 것으로 지진 발생건수가 꾸준히 증가하는 추세를 알 수 있다.

[그림 1-4] 국내 지진 발생 추이에서 알 수 있듯이 최근 2~3년 내에 빈번히 발생하는 지진에 대한 피해를 줄이기 위하여 학계, 산업계 및 국가적 차원에서의 체계적인 지진재해 연구가 필요하다.

일반적으로 기계설비에 사용되어 지고 있는 내진장치는 두 가지로 금속 스프링구조 와 방진고무구조가 있다.



(a) 금속 스프링



(b) 방진고무

[그림 1-5] 기계장치에 사용되는 방진장치

[그림 1-5]의 (a)와 같은 금속 스프링은 일반적으로 수직진동이 발생하는 기계장치인 발전기, 공조기 등에 적용되고, 스프링의 특성상 수직진동만을 감쇠시키기 때문에 지진에서의 수평력을 감쇠시키기에는 적합하지 않다. (b)에서는 수직방향으로는 구조물에 고정시켜 지지하고 수평방향으로는 고무재질의 감쇠적 특성에 의해 수평 지진하중으로부터 구조물을 분리시키는 역할을 할 수 있어 구조물의 면진장치로 탄성고무재질의 방진장치가 적용되었다. 일반적인 적층고무형 면진장치는 교량, 건물등 구조물에 많이 쓰이고 지름이 1000~1500mm의 0.4~1.2MPa의 전단탄성계수를 갖는다.

그러나 수·배전반과 같은 비구조물에 적용되는 면진장치는 150~200mm 이내로 소형이고, 상부 구조물의 중량이 많이 나가지 않는다. 교량등에 설치되는 적층고무형 면진장치는 지진의 수평력을 감쇠시키는 원리로 적용되어져 있는 반면 수·배전반은 국가 및 기관에서 제시하는 특정 변위제한을 만족하여야 한다. 변위제한을 만족하기 위해서 수·배전반에 적합한 면진고무 및 장치를 개발하여 지진 시 발생하는 수평변위를 감쇠시킬 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 수·배전반 및 통신장비 등 구조물내 비구조물에 적용되는 소형 면진장치를 개발하여 면진장치에 대한 특성시험을 실시하고, 실제 진동대 시험을 수행하여 수·배전반에 적용된 면진장치가 변위제한을 만족하는지 여부를 판단하였다.

제 3 절 연구범위 및 내용

본 연구에서 제안하는 수·배전반의 소형 면진장치는 수·배전반의 기능적인 측면보다는 비구조물의 지진에 대한 내진성능 확보차원에서 접근하였다. 지진발생 시 진동이 수·배전반에 미치는 영향을 최소화 하여 수·배전반의 기능을 계속 유지하고 안전성을 확보하기 위함이다.

지진하중에 대한 수·배전반의 피해를 최소화 하고자 면진설계를 실시하였고, 면진설계에 대한 효과를 분석하기 위하여 실물크기의 제품을 제작하여 진동대를 이용한 시험을 수행하여 성능을 검증하였다.

연구의 범위와 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 2장에서는 선행연구조사를 통해 국내 내진구조의 현황과 적용사례 지진에 대한 구조물의 설계방법 및 시험방법을 조사하였다.
- 2) 3장에서는 제안하는 면진장치의 구성과 동작구조 및 종류별 설계방법 등을 서술 하였다.
- 3) 4장에서는 개발된 면진장치를 실제 수·배전반에 부착하여 내진검증 시험을 수행하고, 수행결과에기반하여 제품의 면진성능의 타당성을 검증하였다.
- 4) 5장에서는 내진검증 시험에 결과를 정리하였다.

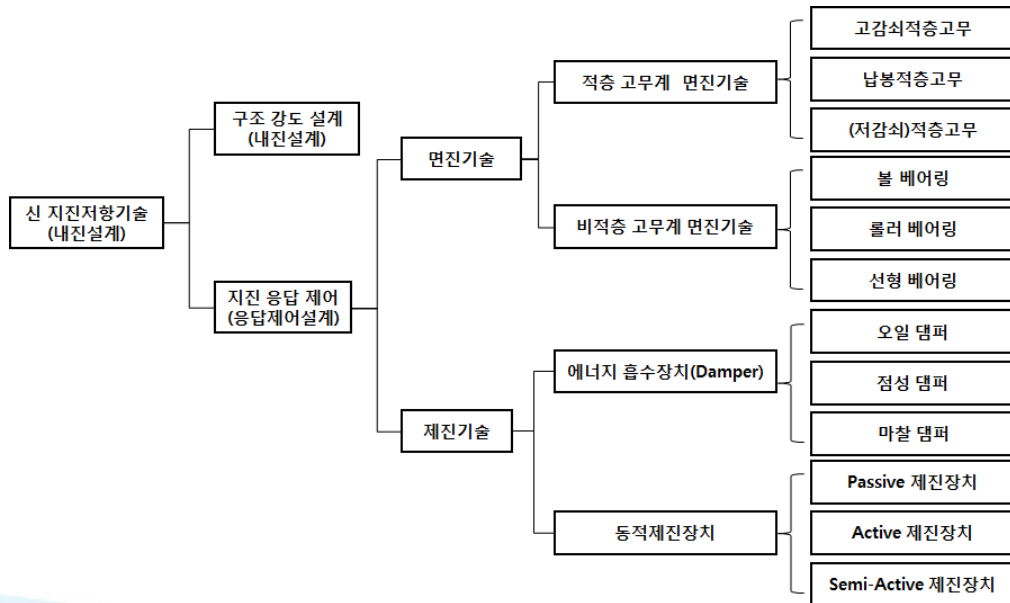
제 2 장 이론적 배경 및 관련연구

제 1 절 구조물의 설계방법

지진의 영향을 받을 때 마다 사람들은 그 피해를 줄이기 위해 여러 방법으로 노력해 왔다. 방법 중 상하방향으로의 영향은 매우 작으면서 동시에 좌우방향으로의 영향은 유연한 장치를 사용하여 지면과 건물을 분리시킴으로서 지진 힘의 영향이 구조물로 전달되는 것을 최소화하는 개념이 면진설계의 기본적인 개념이라고 할 수 있다.

1) 면진설계

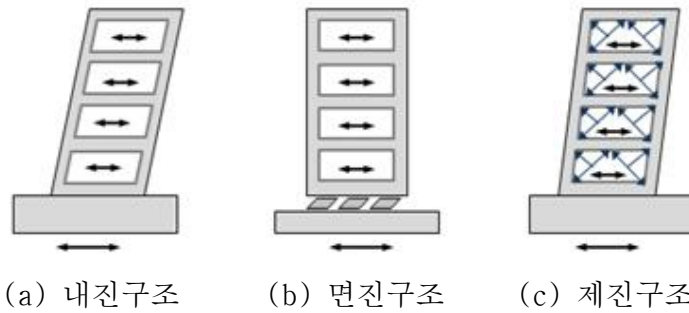
면진설계란 구조물과 지면 사이에 완충변형 장치를 설치하여 구조물과 지면을 분리(base isolation)시키는 방법으로 지진 발생하면 구조물이 한번 진동하는 시간을 사람의 힘으로 길게 하여 발생한 지진과 구조물의 공진(resonance)을 줄여 지진의 힘이 구조물에 상대적으로 감쇠하여 전달되도록 하는 시스템이다. 구조물과 지면과 분리시키는 것을 기본 개념으로 하지만 현실적으로는 불가능하다. 따라서 지진의 수직하중에는 충분히 견디고 수평하중의 영향에만 변위를 발생시키는 방법을 사용하고 있다.



[그림 2-1] 내진설계의 분류

2) 내진설계

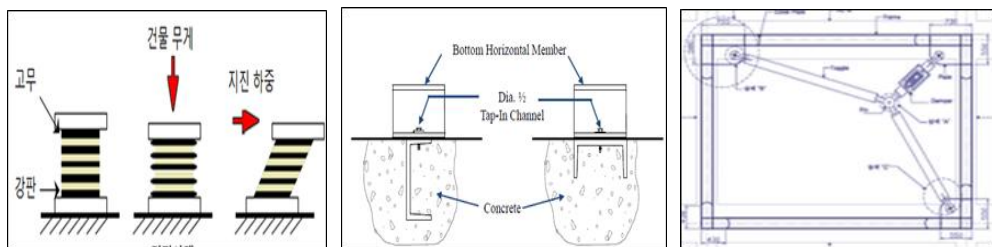
내진설계란 지진이 발생할 때 구조물이 붕괴되지 않는 것을 목표로 하는 설계법으로 구조물 자체의 강도 및 연성을 증가시켜 지진력에 저항하는 방법을 의미한다. 추가 장치 없이도 건물 자체의 강도 및 연성도를 증가시켜 지진에 저항하는 설계법으로 ‘구조강도설계’라고도 하며, 구조물의 상단 면으로 올라 갈수록 지진에 대한 응답변위와 가속도가 커지는 단점이 있다. 지진 후에도 구조물 자체의 균열과 변형 등이 심하므로 이상 현상이 발견된 부분에 대한 전면적인 보수와 보강이 필요하다.



[그림 2-2] 구조 원리

3) 제진설계

제진설계란 건물내부에 특수한 제진장치 (Damper; Energy dissipation device)를 설치하여 지진 발생 시 지반으로부터 입력된 지진에너지를 소산시키는 방법으로 건축물의 가속도 및 변위응답을 저감하여 구조물의 피해를 최소화하는 시스템으로서, 내진성능이 매우 향상되고 강진 발생 후 제진장치의 교체만으로 내진보강이 가능하여 경제성도 매우 우수하다고 할 수 있다.



(a) 면진설계

(b) 내진설계

(c) 제진설계

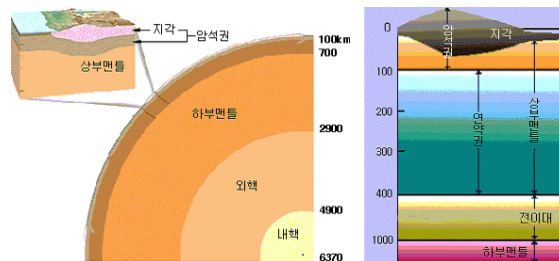
[그림 2-3] 설계원리

제 2 절 지진관련 연구조사

1) 지진 발생의 원인 및 요소

가) 지진의 발생원인

지진이란 지구내부의 에너지 활동으로 인해 지표면이 갈라지는 현상으로 특히, 대륙/해양지각에서 오랜 시간 누적된 힘이 순간적으로 표출되면서 그 힘의 일부가 지진파의 형태로 임의방향으로 전파되어 지표면까지 도달하여 지반이 흔들리는 자연현상을 말한다. 지진이 발생하는 직·간접적인 원인은 지구 내부에 있는 판(plate)의 이동이다. 이러한 판(plate)의 이동은 직접 지진을 발생시키기도 하고 다른 형태적 지진 에너지를 제공하기도 한다. 판을 이동시키는 힘은 다양한 형태로 발생하는데, 외부의 자연적인 힘으로 인해 판이 주변보다 낮아지는 지역에서 판이 암석권 밑의 상부맨틀에 반해 차고 무게가 많이 나가기 때문에 상부맨틀을 뚫고 들어가려는 힘, 상부맨틀 하부에서 판이 올라와 분리되거나 좌우로 퍼지려는 힘, 지구내부 열대류에 의해 상부맨틀이 판의 하부 부분과 같이 이동하는 힘 등이라고 생각할 수 있다. 판을 이동시키는 에너지는 어떠한 비율로 작용하는지는 아직 밝혀지지 않았다. (안종필, 유덕찬, 김영일, 2003) 암석권(lithosphere)은 지표면에서 맨틀 방향으로 약 100km 두께의 딱딱한 부분이며 그 하부에는 암석권에 비해 부드럽고 온도가 높아 쉽게 변형되는 부분이 존재하는데 이 부분이 지진이 발생할 수 있는 깊이의 한계이며 지표로부터 약 700km의 깊이이다.



[그림 2-4] 지구의 내부 구조

지진의 발생 원리를 설명하는데 적용되는 가장 일반적인 이론은 판구조론(Plate tectonics)과 탄성반발설(Elastic rebound theory)이다.

판구조론(Plate tectonics)은 1912년 독일 지구물리학자인 알프레드 베게너가 제시하였고 지구의 표면이 20여개의 판(plate)으로 형성되어 있고 이들 판은 지구 내부의 대류현상을 통해서 움직인다는 이론이며, 판(plate)은 암석으로 구성되어져 있고, 이론에 따르면 판이 이동하는 속도는 1년에 약 50mm 정도로 100년이면 5m, 1000년이면 50m를 이동한다는 것이다. 이들 판이 평행하게 일정한 속도로 동일 방향으로 움직인다면 아무 문제가 없을 것이지만 문제는 이들 판이 모두 동일한 방향으로 움직이지 않고 서로 결합되어있는 상태에서 각기 다른 방향으로 움직이려 한다는 것이다. 판의 끝부분은 칼로 자르고 기름칠을 하여 반듯하게 다듬어져 있지 않고 거칠은 돌덩어리로 이루어져 있다. 따라서 판들끼리의 경계면에서는 서로간의 마찰로 인해 움직임이 방해를 받게 되고 이러한 현상이 반복되다 보니 각각의 판의 경계면에서 힘이 작용하게 되는데 이 때 각 판 사이에 미끄러짐의 발생이나 갈라지는 등의 갑작스런 변화가 발생할 수 있고 이러한 현상이 지진을 발생시키게 된다.

탄성반발설(Elastic rebound theory)은 미국의 지진학자 리드가 1906년에 제시한 것으로 캘리포니아 산안드레아스 암층을 조사하여 샌프란시스코 지진의 원인을 밝힌 것이다. 이론은 지표면에 단층이 존재한다는 것을 가정하고 단층에 작용하고 있는 탄성력에 약한 부분이 탄성력에 견딜 수 없을 때 급격한 파괴가 일어나 지진이 발생한다는 이론으로 아래와 같이 정리될 수 있다.

- (1) 지진은 오랜 기간에 걸쳐 지각의 일부에 에너지가 축적되어 암석의 강도한계를 초과될 때 지각이 파괴되어 발생한다.
- (2) 지진발생시, 파쇄 전 암반의 양단은 에너지가 없는 곳으로 급속이동하고 이 운동은 파쇄부에서 멀리 떨어질수록 감소한다.
- (3) 지진을 통한 진동은 처음엔 파쇄면의 작은 넓이에서 시작되며 이

부분은 빠른 속도로 팽창해 나간다. (단, 속도는 실제파인 P파의 속도 보다는 늦다). 파쇄와 같이 발생하는 진동이 처음 시작되는 지점을 진원(Focus 또는 Seismic center)이라 부른다.

- (4) 지진발생시 방출된 힘은 파쇄 되기 바로 전에 변형된 암석의 탄성 에너지 이다.



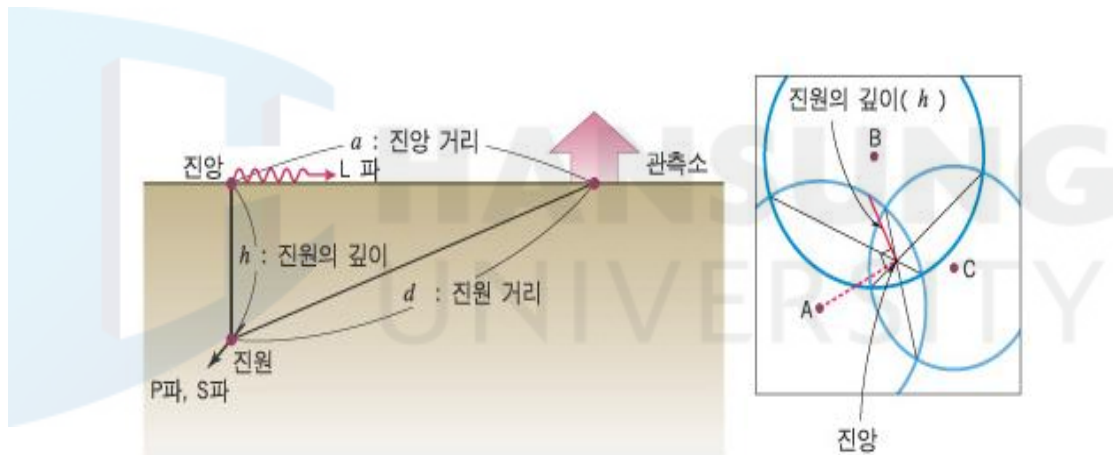
[그림 2-5] 지구를 둘러싸고 있는 주요 판구조도

나) 지진의 요소

지진요소는 지진계(Seismograph)의 지진파 기록 분석결과로 확인 할 수 있는데 임의의 지점에서 지진동을 확인 하였다면 이 지진동이 전파되기 시작한 시각이 있을 것이다. 즉, 지진파가 처음 발생한 시각이 진원 시(Origin time) 이다. 지진이 발생하면서 최초로 에너지가 방출된 곳을 진원(Seismic center)이라 하고, 진원 바로 위의 지점을 진앙(Epicenter)이라 한다.

진원(Seismic enter)은 지구 내에서 지진이 처음 발생한 곳을 말하며 깊이의 개념이 포함되어 있다. 실제로 암석의 변형이 일어난 범위는 수십 킬로미터 또는 수백 킬로미터에 이르므로 지진파의 전부가 한 지점에서 발생한 것이라고 볼 수 없다. 지진은 일정한 면적을 가진 영역에서 발생한 것이라고 생각할 수 있는데 그 영역을 진원역이라고 한다. 진원은 진원역 면적 중에서 최초로 지진파가 발생된 지점이고 지진이 시작된 점이라 하여 반드시 진원역의 중앙에 위치하는 것은 아니다.

진앙(Epicenter)은 [그림 2-6]처럼 진원의 바로 위 지표면 지점이며 진원지라고 하는 것은 진앙의 이름이다. 진원은 진앙의 위치와 진원의 깊이로 나타내고, 공간적 조건으로 진원거리(d) 및 진앙거리(a)가 있는데 이것은 임의의 관측소에서 측정한 진앙과 진원 거리를 말한다.



[그림 2-6] 진앙/진원거리 설명도

지진이 발생하면 그 발생장소를 정확히 알 수 있는데, 이것은 관측소에서 진원까지의 거리(d)를 측정할 수 있기 때문이다. P 파와 S 파는 진원에서 동시에 출발하지만 지표부근에서 P 파의 속도(v_p)는 약 8km/s, S 파의 속도(v_s)는 약 4km/s 이므로 관측소에는 P 파가 S 파보다 먼저 도착하게 된다. 이 두 파의 도착시간 차이를 ps 시 또는 초기미동시간이라 한다. 즉, ps 시 = S 파 도달시간 - P 파 도달시간 이다.

이것을 식으로 나타내면,

$$ps\lambda = \frac{d}{v_s} - \frac{d}{v_p} \quad (\text{식 2-1})$$

이므로 진원거리(d)는

$$d = \frac{v_p v_s}{v_p - v_s} \times ps\lambda \quad (\text{식 2-2})$$

따라서 $ps\lambda$ 를 측정하여 진원거리를 구할 수 있다.

2) 지진의 규모(Magnitude), 진도(Seismic intensity)

가) 규모(Magnitude)

규모란 발생한 지진의 크기를 정량적 수치로 나타낸 것으로 진동에너지에 속하고 이 개념을 처음 제시한 미국의 지질학자 리히터(C. F. Richter, 1935)의 이름을 사용하여 리히터스케일(Richter scale)이라고 한다. 이는 측장에 의하여 계산된 객관적 수치이며 지진기록계에 측정된 지진파형의 진폭과 발생점까지의 진원거리를 이용하여 산출한다. 예로 M 4.0에서 M은 규모(Magnitude)를 의미하고 뒤의 숫자는 통상 소수 1자리로 나타낸다. Gutenberg, Richter(1956)는 지진 발생 시 흔히 미디어 매체에서 말하는 리히터지진계라는 것은 없는 것으로 잘못된 표현이다. 지진파에너지 E_s 와 규모 M의 관계는 (식 2-3)과 같이 나타내는 것이 일반적이다.

$$\log E_s = 11.8 + 1.5M \quad (\text{식 2-3})$$

여기서, M 은 단위가 없고, E_s 는 Energy 단위를 갖는다. 지진규모(M)가 1.0올라가면 지진에너지(E)는 아래 계산과 같이 약32배 증가한다.

$$\log E_s = 11.8 + 1.5M \Rightarrow E = 10^{(11.8+1.5M)} \quad (\text{식 } 2-4)$$

$$E_{(M=1)} = 10^{(11.8+1.5 \times 1)} = 10^{13.3}$$

$$E_{(M=2)} = 10^{(11.8+1.5 \times 2)} = 10^{14.8}$$

$$\frac{E_{(M=2)}}{E_{(M=1)}} = \frac{10^{14.8}}{10^{13.3}} = 10^{1.5} = 31.623 \approx 32$$

2차 세계대전 당시 히로시마에 투하되었던 원자폭탄(Atomic bomb)은 8.4×10^2 erg의 힘을 가져 M6.1의 지진에 상당한 것이다. 지진규모의 개념을 처음으로 제시한 학자는 미국의 지질학자 C. F. Richter로 미국 남부 캘리포니아에서 일어난 국지지진(local earthquake)의 크기를 정량화된 수치로 표현하면서 규모의 개념을 제시하였다. 그 후로 제시한 사람의 이름을 따라 국지규모를 Richter scale이라 한다. 그는 (식 2-5)와 같이 국지 규모(M_L)를 정의하였다.

$$M_L = \log A - \log A_o(\Delta) \quad (\text{식 } 2-5)$$

여기서,

A = Wood-Anderson 지진계에 측정된 최대변위(mm)

Δ = 진앙거리(km)

$A_o(\Delta)$ = Δ 기준지진의 최대 변위

(식 2-5)의 $\log A_0(\Delta)$ 항은 진앙거리(Δ)에 따라 지진파의 진폭(amplitude)이 약해지는 것을 고려하는 변수로, 지진파의 파동을 전파하는 물질의 특성을 나타내며 지진이 측정되는 지역에 따라 변수값이 달라진다.

Bullen, Bolt(1985)는 우드-안드레슨 지진계에 측정된 기록자료를 이용하여 지진의 규모를 (식 2-6)으로 부터 결정하였다.

$$M = \log AH + 2.5 \log \Delta - 1.67 \quad (\text{식 2-6})$$

여기서,

M = 지진의 규모

AH = 수평성분의 최대변위(μm)

Δ = 진앙으로부터 관측점까지의 거리(km)

이 식에서 사용된 감쇠항, $2.5 \log \Delta$ 는 미국 남부 캘리포니아 지역에서 발생한 지진의 지진파가 각 지역으로 전파할 때 진앙거리에 따라 진동 폭이 줄어드는 크기를 설명하는 값이다. 따라서, 특정지역에 영향을 주는 지진의 규모 식을 추정하기 위해서 감쇠항을 정확하게 적용하는 것이 매우 중요하다. 최근에는 표면파규모(M_s)와 실체파규모(mb)를 더 보편적으로 사용하고 있다. 표면파와 실체파를 구분하는 이유는 에너지의 총 방출량이 비슷한 경우라도 지하 70km 이하에서 발생하는 지진과 지하 300km 이상에서 발생한 지진의 지진기록이 서로 다른 모양을 나타내기 때문에 천발지진의 규모는 표면파를 사용하고 심발지진의 규모는 실체파를 이용하여 구한다. Gutenberg, Richter(1936)는 국지규모의 개념을 진앙거리가 가까운 천발지진에 사용하여 20초 주기 동안 표면파의 최대 진폭으로부터 규모를 산출하였다. 그 후에도 표면파 규모와 관계하여 여러 식이 제시되었으며 이것은 모두 (식 2-7)과 같이 정의 된다.

$$M_s = \log(A/T) + af(\Delta, h) + b \quad (\text{식 2-7})$$

여기서,

A = 최대진폭

T = 주기

Δ = 진앙거리

h = 진원의 깊이

a 와 b 는 실험적으로 구해지는 상수이다. 지하 70km 이하에서 발생하는 천발지진에 대한 관계식 (식 2-8)로 주어진다.

$$M_s = \log(A/T) + 1.66f(\Delta, h) + 3.3 \quad (\text{식 2-8})$$

300km 이하에서 발생하는 심발지진의 경우 표면파를 발생 시키는 데는 효과적이지 않으므로 Gutenberg(1945)는 실체파의 가장 큰 진폭으로부터 규모를 산출하는 방식을 제안하였다. 실체파규모를 나타내는 관계식도 (식 2-8)과 동일한 형태로 제시하였다.

$$mb = \log(A/T) + af(\Delta, h) + b \quad (\text{식 2-9})$$

(식 2-9)에서 f 는 (식 2-8)과 동일하게 발생한 지진의 파동에너지 유지와 감쇠를 고려하여 진앙거리 및 진원의 깊이 관한 함수이다. 천발지진의 경우 M_s 와 mb 사이에는 다음과 같은 실험적 관계가 성립한다.

$$mb = 0.56M_s + 2.9 \quad (\text{식 2-10})$$

김상조 외(1998)는 우리나라에서 발생하는 지진의 규모를 산출할 때는, 지진기록의 유효 지속시간(signal duration)을 사용하거나 최대 수평성분을 사용한다. 현재 기상청(KMA)은 최대 수평성분을 사용하여 규모를 결정하는 방법으로 (식 2-11)을 이용한다.

$$M = 1.73 \log \Delta + \log A - 0.83 \quad (\text{식 2-11})$$

여기서,

Δ = 진앙거리(km)

A = 지진계에 기록된 진동폭(μm)으로 NS 와 EW 를 각각 남북방향 및 동서방향의 최대 속도요소라고 할 때, 그 두 요소의 벡터 합이다.

이는 일본의 Tsuboi(1954)가 제안한 진앙거리(Δ , km)와 지반운동의 최대 수평요소($A, \mu\text{m}$)을 이용한 규모 관계식으로 일본 기상청에서 이용하고 있는 대표적인 규모를 결정하는 공식 중의 하나이다

나) 진도(Seismic intensity)

어느 지역에 나타난 진도의 세기를 정량화한 수치로 나타낸 것으로 사람이 느끼는 느낌이나 구조물의 흔들림 정도를 사전에 정해놓은 기준에 계급화하여 정수단위로 나타내는 척도이다. 진도와 규모는 반드시 1대1 대응이 성립하는 것은 아니며, 발생한 지진에 대한 지역별 규모의 수치는 같을 수 있으나 진도의 계급은 서로 다를 수 있다. 진도는 서로 다른 계급값을 사용하기도 하지만 가속도 단위(cm/sec^2)를 사용하여, 중력가속도 $1g=980\text{cm}/\text{sec}^2$ 을 사용하기도 한다. 단위 cm/sec^2 는 gal로 표기하며 $1g=980\text{gal}$ 이라고도 사용한다. 표2.1 지진 규모에 따른 대응현상처럼 진도는 어떠한 지역에 발생한 지진동의 세기를 사람의 느낌이나 주변의 물체 또는 구조물의 흔들림 정도를 수치로 표현한 것으로 정해진 기준을 계급화한 척도이다.

진도는 발생한 지진의 규모, 진앙거리, 진원의 깊이에 큰 영향을 받으며 이와 함께 발생한 지역 토양구조와 구조물의 형태 및 인구 밀집도에 따라 다르게 평가될 수 있다. 따라서, 진도에 대한 계급은 세계적으로 통일된 기준이 없으며 각 국가별 환경에 부합하는 척도를 선정하고 있다. 표2.2에서 정리한 것처럼 우리나라 기상청은 일본 기상청 (JMA Scale : 1949) 8계급을 사용하

여 왔으나 2001년부터 미국에서 선정하여 여러 국가가 사용하는 MMI scale 12계급 (Modified Mercalli intensity scale)을 준용하고 있다. 지진에 대한 정보와 경험이 적은 우리나라는 지진발생 시 특성에 적합한 규모와 진도의 관계식의 정립이 미비하기 때문에 아래 5개의 식을 활용하고 있다.

$$M=1.0+\frac{2}{3}MMI \quad (\text{식 2-12})$$

(Gutenberg & Richter, 1956 - 미국서부)

$$M=1.75+\frac{1}{2}MMI \quad (\text{식 2-13})$$

(Nuttli & Hermann, 1979 - 미국중부)

$$M=0.44+\frac{2}{3}MMI \quad (\text{식 2-14})$$

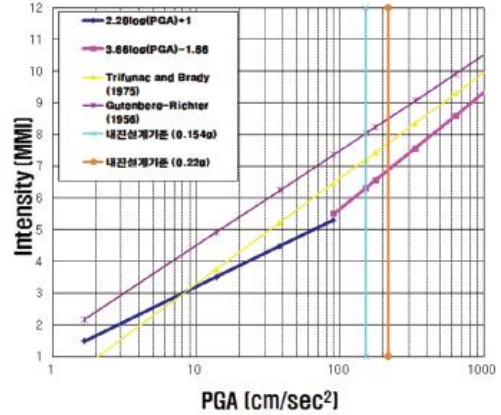
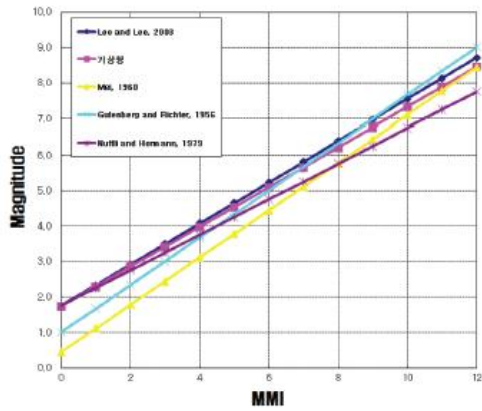
(Mei, 1960 - 중국)

$$M=1.75+0.58MMI \quad (\text{식 2-15})$$

(LEE & LEE, 2003)

$$M=1.73+0.56MMI \quad (\text{식 2-16})$$

(기상청, 2006)



[그림 2-7] 규모와 진도 관계식 [그림 2-8] 최대지반가속도(PGA)와 진도의 관계

이 식을 이용하면 여러 가지 분포의 규모와 진도를 계산할 수 있게 되고 진도 VI의 경우 규모 4.4~5.2로 계산된다.

HANSUNG
UNIVERSITY

[표 2-1] 지진 규모 대응 현상

규모	대응 현상	인체영향	진도
2.5 미만	사람의 몸으로 느낄 수 없으며 지진계로만 기록	감지불가	0(무감)
3.0 미만	소수의 사람들만 느낌. 매달린 물체 흔들림	일부감지	I (미진)
3.5 미만	거의 모든 사람이 지진을 감지함. 정차되어 있는 자동차가 약간 흔들림.	대부분 감지	II (경진)
4.0 미만	건물이 흔들리고 매달린 물체가 많이 흔들거리고 물이 출렁임.	약간놀람 자다 일어남	III(약진)
5.0 미만	집, 건물이 매우 많이 흔들리고 불안정하게 놓인 꽃병이 넘어지고 많은 사람이 밖으로 뛰어나옴	매우 놀람 자다 깨 밖으로 나옴	IV(중진)
6.0 미만	외벽에 Crack이 가고 비석이 넘어짐. 석축, 굴뚝, 돌담 등이 무너짐.	서있기 곤란	V(강진)
7.0 미만	견고한 건물의 피해가 심하거나 붕괴. 땅에 균열이 감	보행불가	VI(열진)
8.0 미만	대부분의 견고한 건물 붕괴. 산사태가 발생하고 지표 균열.	이성상실	VII(격진)
9.0 미만	견고한 건물 완전히 파손됨. 철도가 휘어지고 지면에 단층현상 발생	공포	

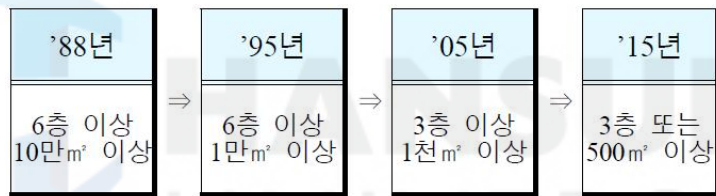
[표 2-2] 진도와 규모의 비교표

진 도	MMI(1931)	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
	JMA(1949)	I			II	III	IV	V		VI		VII	
	RF(1883, 이탈리아 드로시프오렐)	II	III	IV	V	VI	VII		VIII	IX	X		
	MSK(1964, Medvedev:러시아, Sponheuer : 독일)	II	III	IV			V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
규모		2	3	4			5		6		7	8	
가속도(<i>gal</i>)		0.8~2.5		2.5~ 8.0	8.0~25		25~ 80	80~250		250~400		400이상	

※ 대략 지진계수0.11g(I 구역): 규모 5.7, 지진계수 0.07g(II구역): 규모5.4

3) 전기설비 지진 대책 관련 법

내진설계란 지진 발생 시나 지진이 발생된 후에도 구조물이 안전성을 유지하고 그 기능을 발휘할 수 있도록 설계 과정에서 지진하중을 추가로 고려하여 설계를 수행하는 것을 의미한다. 우리나라는 구조물에 대한 내진설계 규정은 1988년에 처음 도입되어 의무화 되었고 당시 내진설계 의무 적용 대상은 층수로는 6층 이상, 연면적 10만 m^2 이상의 구조물이었으나, 순차적으로 내진설계가 강화되어 2015년 개정에는 3층 이상, 500 m^2 이상인 모든 구조물에 대해 내진설계를 의무화 하였다. 또한 건축법에 2017년부터 16층 이상, 연면적 5,000 m^2 이상의 구조물에 대해 내진성능 공개를 의무화한 내용이 포함되었다.



[그림 2-9] 내진설계 대상 변동 현황

국내 지진과 관련한 대책을 규정하고 있는 법으로는 자연재해대책법에서 규정하고 있으나 2008년에 자연재해대책법에서 지진관련 부분이 삭제되고 새롭게 지진재해대책법이 제정 되었다.

지진재해대책법(2014.2.7)에서는 지진과 지진해일로 인한 재해로부터 국민의 생명과 재산 및 주요 기간시설(基幹施設)을 보호하기 위하여 지진과 지진해일의 관측·예방·대비 및 대응, 내진대책(耐震對策)과 지진재해를 줄이기 위한 연구 및 기술개발 등에 필요한 사항을 규정함을 목적으로 한다. 동법 14조에는 지진 발생 시 피해를 입을 우려가 있는 주요 시설에 대한 내진설계기준을 정하고 그 이행에 필요한 조치를 취하여야 한다고 규정하고 있다. 전기

설비 관련 부분은 「전기사업법」에 따른 발전용 수력설비 및 화력설비, 송전 설비, 배전설비, 변전설비에 대해 내진기준을 마련하여 이행 할 수 있는 조치를 취하도록 규정하고 있다.

전기설비기술기준(2017.3.2.)의 제2절 전기공급설비의 시설 제21조 발전소 등의 시설 4~5항에는 고압 또는 특 고압의 전기기계기구·모선 등을 시설하는 발전소·변전소·개폐소 또는 이에 준하는 곳은 침수 우려가 없도록 방호장치를 갖추어야 하고, 시설하는 전기설비는 자중, 적재하중, 적설 또는 풍압 및 지진 그 밖의 진동과 충격에 대하여 안전한 구조이어야 한다고 되어 있으나 안전한 구조에 대한 부분이 관련 시행령 및 판단기준 등에 명확히 제시가 되지 않은 상황이다.

건축법(2018.2.9.)는 건축물의 대지·구조·설비 기준 및 용도 등을 정하여 건축물의 안전·기능·환경 및 미관을 향상시킴으로써 공공복리의 증진에 이바지하는 것을 목적으로 하고 있으며, 건축물에 비구조물인 전기설비에 관한 내진설계 부분으로는 제5장의 건축물의 구조와 재료등 48조에 건축물은 고정하중, 적재하중(積載荷重), 적설하중(積雪荷重), 풍압(風壓), 지진, 그 밖의 진동 및 충격 등에 대하여 안전한 구조를 가져야 한다고 규정하고 있고 건축물 및 공작물의 구조체에 대한 설계, 실험 및 검사, 설계하중, 재료강도, 제작 및 설치, 품질관리 등의 기술적 사항을 규정함으로써 건축물 및 공작물의 안전성, 사용성 및 내구성을 확보하기 위하여 건축구조설계기준(2005.4.6.)을 제시하였다.

4) 내진설계 현황

1988년 내진기준이 법제화 되었으므로 1988년 이전에 지어진 건물은 내진설계가 안되어 있다고 볼 수 있다. 1988년 제정 당시 내진설계의 적용으로 인한 경제적 과급효과를 고려하여 6층 이상의 건물만 내진설계를 하도록 하였다. 이는 2005년 개정 되면서 3층 이상 건물에 내진설계를 적용하게 하여 그 범위가 확대 되었다. 따라서 1988년부터 2005년 사이에 건축된 건물의 경우 6층 미만 건물은 내진설계가 안되어 있다 할 수 있다. 지진과 관련된 분석을 하는 기관별 통계는 다소 다르지만 내진설계가 적용된 건물은 전체건물의 10%내외라고 볼 수 있다. 따라서 이에 대한 대책 마련이 시급하다.

[표 2-3] 국내 건축물 내진성능 확보율 현황

구분		전체 건축물	내진대상 건축물	내진확보 건축물	내진율	
					내진대상 건축물 기준	전체 건축물 기준
총계		6,947,349	1,297,878	449,091	34.6%	6.5%
주택	소계	4,554,994	782,509	296,168	37.8%	6.5%
	단독주택	4,161,389	432,544	132,952	30.9%	3.2%
	공동주택	393,605	349,965	163,216	46.6%	41.5%
주택이외	소계	2,392,355	515,369	152,923	29.7%	6.4%
	학교	46,190	26,980	7,118	26.4%	15.4%
	의료시설	6,168	4,722	2,497	52.3%	40.5%
	공공업무시설	42,006	11,765	2,531	21.5%	6.0%
	기타	2,297,991	471,852	140,777	29.8%	6.1%

건축도시공간연구소 건축도시정책정보센터는 최근 발표한 ‘우리나라 건축물 내진설계 현황과 개선방향’ 보고서(2016)에서 이 같은 조사결과를 제시하고 건축물 내진설계 및 보강기준 강화가 시급하다고 주장했다.

개선방향으로는 대수선 시 내진보강을 의무화하고 필로티 건축물 기둥에 특별지진하중 적용을 의무화하도록 하는 등 법제도를 개선하는 한편 인센티

브를 통한 활성화 유도, 내진설계 및 인허가 실무자 전문성 향상, 절차 개선 및 연구 지원, 도시 차원에서의 지진 대응 대책 및 교육 프로그램 마련 등이 필요하다고 제안했다. 보고서에 따르면 2015년 12월 기준 국내 건축물 총 694만7349채 가운데 내진성능이 확보된 것은 44만9091채로 전체의 6.5%에 그치고 있다. 내진설계 대상 건축물 129만7878채 가운데서도 34.6%로 매우 낮은 수준이다. 즉 84만8787채가 지진에 취약한 실정이다. 또한 주택(46.6%), 의료시설(52.3%)의 내진성능이 비교적 우수한 상태로 나타났고 공공시설에 속하는 학교시설(26.4%)과 공공업무시설(21.5%)은 상대적으로 낮은 것으로 나타났다.

가) 지진구역 구분

우리나라 건축물의 내진설계기준은 각 지역에 따라 적용이 달라진다. 지진 발생 위험도에 따라 전국을 지진구역 I, II로 나누고, 지진 재현주기 2400년에서 건축물이 파괴되지 않도록 내진설계 하는 것을 목표로 하고 있다. 지역계수는 해당 지역에 발생을 예상할 수 있는 지진의 크기와 과거에 발생되었던 지진에 근거하고 지진층으로 부터의 거리등을 감안하여 기준을 설정한다. 우리나라는 유효최대가속도(EPA, Effective peak acceleration)를 사용한다.

[표 2-4] 지진구역 구분 및 지역계수

지진구역 (ZONE)		행정구역	지역 계수(Z)
I	시	서울, 대전, 인천, 부산, 세종, 대구, 울산, 광주,	0.22g
	도	경기, 경북, 경남, 충북, 충남, 전남, 전북, 강원 남부*	
II	도	제주, 강원 북부**	0.14g

* 강원 남부: 삼척, 영월, 태백, 정선, 원주, 강릉, 동해

** 강원 북부: 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천, 속초

나) 지반분류

건축구조기준(Korea Building Code, KBC)에서의 지반분류는 지층의 전단파속도가 760m/s 이상인 경우 보통암으로 판단하고, 지표면으로부터 보통암까지 평균지판특성(V_s)으로 분류된다. 따라서, 국내와 같이 암반까지의 깊이가 얕은 경우에 대하여 토사지반의 물성만으로 지반을 분류하게 된다. 다만, 보통암의 위치가 기준면으로부터 5m 이내이거나 30m 이상인 경우에는 평균전단파속도($V_{s,30}$)로 지반이 분류된다.



다) 지반의 종류

국지적인 지질조건과 지표 및 지하 지형이 지반 운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 지반을 [표 2-5] 지반의 분류 기준면으로부터 일반적인 보통암 지반은 $V_s=760\text{m/s} \sim 1500\text{m/s}$ 까지의 지반에 대한 평균지반특성 값으로 구분하며, 보통암의 위치가 기준면에서 5m 이하 또는 30m 이상인 경우에는 상부 30m 에 대한 평균지반특성으로 분류한다. 우리나라 지역의 지반을 구분하여 분류 할 수 있는 기록들이 부족하고, 지반의 종류가 연약한 토사지반(S_E)일 가능성이 없는 경우에는 단단 토사 지반(S_D)를 적용할 수 있다.

[표 2-5] 지반의 분류

지반종류	지반종류의 호칭	평균지반특성		
		전단파 속도 (V_s , m/s)	표준관입시험 $\bar{N}$ (타격횟수/30 0mm)	비배수전단 강도 $\bar{S}_u (\times 10^{-3}$ MPa)
S_A	경암 지반	1500초과	-	-
S_B	보통암 지반	760에서 1500		
S_C	매우 조밀한 토사지반 또는 연암 지반	360에서 760	>50	>100
S_D	단단한 토사 지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100
S_E	연약한 토사 지반	180미만	<15	<50

출처: 건축구조기준 내진설계(KBC 2016)

라) 지반증폭계수

지반증폭계수는 평균전단파속도($V_{s,30}$)으로부터 S_A , $S_B \sim S_E$ 까지 지반이 분류되고, 분류된 것에 대한 단주기지반증폭계수(F_a)를 적용하여 가속도 일정구간의 설계스펙트럼가속도를 정하고, 1초주기 지반증폭계수(F_v)를 적용하여 속도일정구간의 설계스펙트럼가속도를 구한다. 지반의 전단파속도(V_s)와 전단탄성계수(G)의 관계는 아래와 같다.

$$G = V_{s^2\rho} \quad (\text{식 2-17})$$

ρ 는 지반 밀도이다. 식2-17에서 지반의 전단파속도가 낮을수록 전단강성이 낮아짐을 의미한다. 지반의 종류가 $S_A \sim S_E$ 로 연약해질수록 단주기지반증폭계수(F_a)와 1초주기 지반증폭계수(F_v) 모두 증가하는 추세를 나타낸다.

보통암 지반까지의 깊이가 20m 미만인 단주기 지반조건에 대하여, 가속도일정구간의 설계스펙트럼가속도를 정의하는 단주기지반증폭계수(F_a)는 기존 S_C 또는 S_D 의 단주기 지반증폭계수 보다 크며, 속도일정구간의 설계스펙트럼가속도를 정의하는 1초주기 지반증폭계수(F_v)는 기존 S_C 또는 S_D 의 1초주기 지반증폭계수 보다 작다.

[표 2-6] 단주기 지반증폭계수(F_a)

지반종류	지진지역		
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$
S_A	0.8	0.8	0.8
S_B	1.0	1.0	1.0
S_C	1.2	1.2	1.1
S_D	1.6	1.4	1.2
S_E	2.5	1.9	1.3

$S_s = 2.5S$, S_s 의 중간값에 대해서는 직선보간 한다.

출처: 건축구조기준 내진설계(KBC 2016)

[표 2-7] 1초주기 지반증폭계수(F_v)

지반종류	지진지역		
	$S_s \leq 0.1$	$S_s = 0.2$	$S_s = 0.3$
S_A	0.8	0.8	0.8
S_B	1.0	1.0	1.0
S_C	1.7	1.6	1.5
S_D	2.4	2.0	1.8
S_E	3.5	3.2	2.8

S 의 중간값에 대해서는 직선보간 한다.

출처: 건축구조기준 내진설계(KBC 2016)

마) 내진설계 범주

건축물 구조기준의 내진기준에서는 건물의 중요도에 따라 기존 기준과 같이 지진력을 증가시키도록 하고 있다. (한상환, 이한선, 2008)은 건물의 중요도와 설계지진하중이 정해지면 내진설계등급(SDC)을 설정할 수 있고, 내진설계등급은 A, B, C, r 그리고 D로 총 네 가지로 분류하고 있다.

[표 2-8] 건축물의 내진등급 기준

건축물의 내진등급	건축물의 중요도	중요도계수 (I_E)
특	중요도 및 중요도계수에 따른 중요도 특	1.5
I	중요도 및 중요도계수에 따른 중요도 1	1.2
II	중요도 및 중요도계수에 따른 중요도 2 및 3	1.0

출처: 건축구조 기준 내진설계(KBC 2016)

[표 2-9] 중요도 및 중요도 계수

중요도	특	1	2	3
건축물 의 용도 및 규모	1. 연면적 1,000m ² 이상인 위험물 저장 및 처리 시설 · 국가 또는 지방자치단체의 청사 · 외국공관 · 소방서 · 발전소 · 방송국 · 전신전화국 2. 종합병원, 수술 시설이나 응급시설이 있는 병원	1. 연면적 1,000m ² 미만인 위험물 저장 및 처리시설 · 국가 또는 지방자치단체의 청사 · 외국공관 · 소방서 · 발전소 · 방송국 · 전신전화국 2. 연면적 5,000m ² 이상인 공연장 · 집회장 · 관람장 · 전시장 · 운동시설 · 판매시설 · 운수시설(화물터미널과 집배송시설은 제외함) 3. 아동관련시설 · 노인복지시설 · 사회복지시설 · 근로복지시설 4. 5층 이상인 숙박시설 · 오피스텔 · 기숙사 · 아파트 5. 학교 6. 수술시설과 응급시설 모두 없는 병원, 기타 연면적 1,000m ² 이상인 의료시설로서 중요도(특)에 해당하지 않는 건축물	1. 중요도(특), (1), (3)에 해당하지 않는 건축물	1. 농업시설물, 소규모 창고 2. 가설구조물

출처: 건축구조 기준 내진설계(KBC 2016)

[표 2-10] 단주기설계스펙트럼가속도에 따른 내진설계범주

S_{DS} 의 값	내진등급		
	특	I	II
$0.50 \leq S_{DS}$	D	D	D
$0.33 \leq S_{DS} < 0.50$	D	C	C
$0.17 \leq S_{DS} < 0.33$	C	B	B
$S_{DS} < 0.17$	A	A	A

출처: 건축구조 기준 내진설계(KBC 2016)

[표 2-11] 설계스펙트럼가속도에 따른 내진설계범주(주기 1초)

S_{D1} 의 값	내진등급		
	특	I	II
$0.20 \leq S_{D1}$	D	D	D
$0.14 \leq S_{D1} < 0.20$	D	C	C
$0.07 \leq S_{D1} < 0.14$	C	B	B
$S_{D1} < 0.07$	A	A	A

출처: 건축구조 기준 내진설계(KBC 2016)

지반의 분류방법이 상부 30m 평균전단파속도($V_{s,30}$)에서 보통암까지의 평균전단파속도(V_s)로 변경됨에 따라 발생하는 문제는 기존에 내진등급 C였던 구조물이 내진등급 D로 변경될 수 있다는 것이다. (박홍근, 김동관,

2016)은 평균전단파속도(V_s)로 지반을 분류할 경우 토사지반만으로 지반이 구분되어 S_D 지반조건이 될 것이라는 예상과 S_D 조건이면 기존의 S_{D1} 의 값이 크기 때문에 내진등급은 무조건 D로 결정되는 기존의 기준을 바탕으로 발생하는 오해라고 주장하였다.

5) 국·내외 비구조물의 내진설계 기준

각 나라의 내진설계 기준에서 비구조물의 설계를 위한 지진하중은 비구조물이 위치한 건물의 응답정도, 비구조물의 크기 및 중량, 설치위치(층수), 요소의 유연성 등에 의해 결정된다. 일반적인 설계기준은 등가하중법에 기반하고 있으며 비구조물의 중량을 설계하중을 결정하는데 반영하고 있다.

가) 미국 UBC 97(Uniform Building Code, 1997)

UBS에서는 비구조물의 접합 및 지지상태, 설치기간을 변수로 설계지진력 F_p 를 제안하였다. 건물의 지면이나 상부에 취부되는 비구조물의 무게가 180kg 이하 일 때는 내진기준에서 제외할 수 있으며, 결합 방법에는 앵커볼트 및 브레이싱이 포함되고 건물 지면과의 마찰에 의한 저항은 포함되지 않는다. F_p 의 식은 다음과 같다.

$$F_p = 4.0C_aI_PW_P \quad (\text{식 2-18})$$

또는,

$$F_P = \frac{\alpha_P C_a I_P}{R_P} \left(1 + 3 \times \frac{h_x}{h_r}\right) W_P \quad (\text{식 2-19})$$

$$0.7C_aI_PW_P \leq F_P \leq 4.0C_aI_PW_P \quad (\text{식 2-20})$$

여기서,

C_a = 수평지진계수

α_P = 1.0~2.5 사이의 증폭계수

I_P = 비구조물의 중요도계수

R_P = 1.0~4.0 비구조물의 반응수정계수

W_P = 비구조물 부재의 중량

나) 미국 IBC 2012(International Building Code)

IBC는 ASCE-7의 하중기준에 의해 비구조물의 설계를 수행하도록 정하고 있다. ASCE-7의 비구조물의 지진하중 구하는 방법은 아래와 같다.

$$F_P = \frac{0.4\alpha_P S_{DS} W_P}{\frac{R_P}{I_P}} \left(1 + 2\frac{z}{h}\right) \quad (\text{식 2-21})$$

$$0.35S_{DS}I_PW_P \leq F_P \leq 1.6S_{DS}I_PW_P \quad (\text{식 2-22})$$

여기서,

S_{DS} = 단주기에서의 설계스펙트럼가속도

R_P = 비구조물의 반응계수로서 1.0~ 5.0 사이의 값

I_P = 비구조물의 중요도계수

z = 구조물의 하단 면부터 비구조물의 높이

h = 구조물의 하단 면부터 지붕 층까지의 평균높이

W_p = 비구조물 부재의 가동중량

α_p = 1.0 ~ 2.5 사이의 값을 갖는 증폭계수

국내 건축구조기준(KBC)의 비구조요소에 대한 지진하중을 도출하는 계산식 미국의 ASCE-7의 기준과 같으며, 반응수정계수 등과 같은 계수는 일부 조정하여 적용하고 있다.

다) 일본의 건축기준법

일본의 건축기준법에서는 산업설비기기에 대한 수평 지진력을 구할 수 있으며 작용점은 기기의 중심점을 사용하는 것을 원칙으로 한다.

$$\begin{aligned} F_H &= K_H M G (N) \\ &= K_H W (kgf) \end{aligned} \quad (\text{식 2-23})$$

여기서,

F_H = 수평지진력

$K_H = Z K_s$ = 설계용수평진도

M = 기기의 질량(kg)

G = 중력가속도($9.80 m/s^2$)

W = 기기의 중량(kgf)

K_s = 설계용 표준지도

라) Eurocode 8(유럽)

유럽설계기준(Eurocode)은 지반운동, 증폭계수, 지반계수, 비구조물의 자중, 비구조물 부재의 중요도계수와 유연도를 적용하여 설계하중을 산출한다.

$$F_a = \frac{S_a \gamma_a}{q_a} W_a \quad (\text{식 } 2-24)$$

$$S_a = \frac{\alpha_g}{g} S \left[\frac{3 + (1 + \frac{z}{H})}{1 + (1 - \frac{T_\alpha}{T_1})} - 0.5 \right] \quad (\text{식 } 2-25)$$

여기서,

γ_a = 중요도계수, 중요하거나 위험한 요소 1.5, 그 외 요소 1.0

W_a = 부재의 무게

α_g = 설계지반가속도

g = 중력가속도

T_g = 비구조요소의 고유주기

T_1 = 건물의 고유주기

z = 지면에서 비구조요소의 높이

H = 건물높이

S = 지반계수

q_n = 비구조요소의 거동계수

S_a 는 비구조요소의 유연성과 관련된 수식이고 일반적으로 비구조요소는 건물구조체보다 매우 약하기 때문에

$$\frac{T_\alpha}{T_1} \approx 0$$

이 되며 다음과 같이 사용할 수 있다.

$$S_{\alpha} \approx \left(\frac{\alpha_g}{g} \right) s \left[1.5 \left(1 + \frac{z}{h} - 0.5 \right) \right] \quad (\text{식 2-26})$$

이 식에서 건물 하단지면(1층)에서의 가속도 값이 최대지반가속도 이다.

$$S_{\alpha} = \left(\frac{\alpha_g}{g} \right) s \quad (\text{식 2-27})$$

또한, 건물의 최상위에 설치된 비구조물의 부재에서의 가속도는 지반가속도의 2.5배가 되며, 유연한 비구조물의 부재인 경우 강건한 비구조물의 부재보다 가속도의 영향을 크게 받는다.

마) NZS 4203(New Zealand Standard)

뉴질랜드 기준 NZS 4203에는 건물에 취부 되는 기기 및 접합면 등을 포함한 모든 부분에 대한 지진력을 다음과 같이 산출한다.

$$F_{ph} = C_p(T_p) C_{ph} W_p R_p \leq 3.6 W_p \quad (\text{식 2-28})$$

$$F_{pv} = C_{pv} C_{pd} W_p R_p \leq 2.5 W_p \quad (\text{식 2-29})$$

여기서,

$C_p(T_p)$ = 비구조요소의 수평설계 계수

C_{ph} = 비구조요소의 수평응답계수

C_{pv} = 비구조요소의 수직응답계수

C_{vd} = 구조물의 주기에 따른 수직설계계수

R_p = 비구조요소의 위험도계수

W_p = 비구조요소의 중량

뉴질랜드 기준에서는 비구조요소의 소실로 인해 인명피해가 발생할 수 있는 경우에는 조립/용접부의 설계강도를 1.5배 증가시켜야 하며 변위연성계수는 2보다 작도록 하고 있다.

바) NBCC(National Building Code of Canada)

캐나다의 구조설계 기준에서는 기계, 전기, 건축 등에 적용되는 비구조요소들의 설계 하중기준을 다음과 같이 제안하고 있다.

$$V_p = 0.3F_\alpha S_\alpha(0.2)I_e S_p W_p \quad (\text{식 } 2-30)$$

여기서,

F_α = 지역계수

$S_\alpha(0.2)$ = 주기0.2초에서의스펙트럼응답가속도

I_e = 중요도계수

$S_p = \frac{C_p A_r A_x}{R_p}$ = 하중계수

C_p = 비구조요소의 계수

A_r = 비구조요소의 동적증폭계수

A_x = 높이계수

캐나다 구조설계기준은 타 국가 기준에 비해 비구조요소의 상부 및 지면 등의 부착방식 및 위치 그리고 높이에 따른 분류가 잘 되어 있고, 비구조요소의 주기에 따른 증폭계수를 포함하고 있다. 또한 NZS 4203과 같이 조립/용접부에 대한 설계지진하중도 고려하고 있다.

[표 2-12] 지진하중 산정을 위한 변수들

	지반종류	지진구역	지진력저항시스템
<i>UBC-97</i>	<i>Type SB(Rock)</i>		$R = 8.5$
<i>IBC-2012</i>	<i>Type B(암반)</i>	지진구역1	$R = 8.0$
<i>EUROCODE</i>	<i>Type A(Rock)</i>	$PGA = 0.22g$	$Behaviorfactor = 5.4$
<i>NZS1170-5</i>	<i>Type A(Rock)</i>	$Z = 1.2$	$\mu = 5$
<i>NBCC</i>	<i>Type A(Rock)</i>		$R = 8.0$
일본건축기준법	내진등급 S		

	건물의고유주기	비구조요소의주기	비구조요소의중요도계수
<i>UBC-97</i>	0.4	0.15	1
<i>IBC-2012</i>	0.4	0.15	1
<i>EUROCODE</i>	0.4	0.15	1
<i>NZS1170-5</i>	0.4	0.15	1
<i>NBCC</i>	0.4	0.15	1
일본건축기준법	내진등급 S		

[표 2-13] 기준에 따른 설계 지진력 비교

기준	비구조요소의 지진하중		건물의 설계전단력(V_s)	$\frac{F_{pg}}{V_s}$	$\frac{F_{pr}}{V_s}$
	1층(F_{pg})	지붕층(F_{pr})			
<i>UBC-97</i>	$0.50 W_p$	$2.00 W_p$	$0.18 W$	2.8	11.1
<i>IBC-2012</i>	$0.53 W_p$	$1.60 W_p$	$0.20 W$	2.6	8.0
<i>EUROCODE</i>	$0.46 W_p$	$1.10 W_p$	$0.14 W$	3.3	7.8
일본건축기준법	$1.00 W_p$	$2.00 W_p$	$0.20 W$	5.0	10.0

NZS1170-5	$0.26 W_p$	$0.77 W_p$	$0.08 W$	3.2	9.6
NBCC	$0.30 W_p$	$0.90 W_p$	$0.18 W$	1.7	5.0

W : 건물의 중량, W_p : 비구조요소의(기동)중량

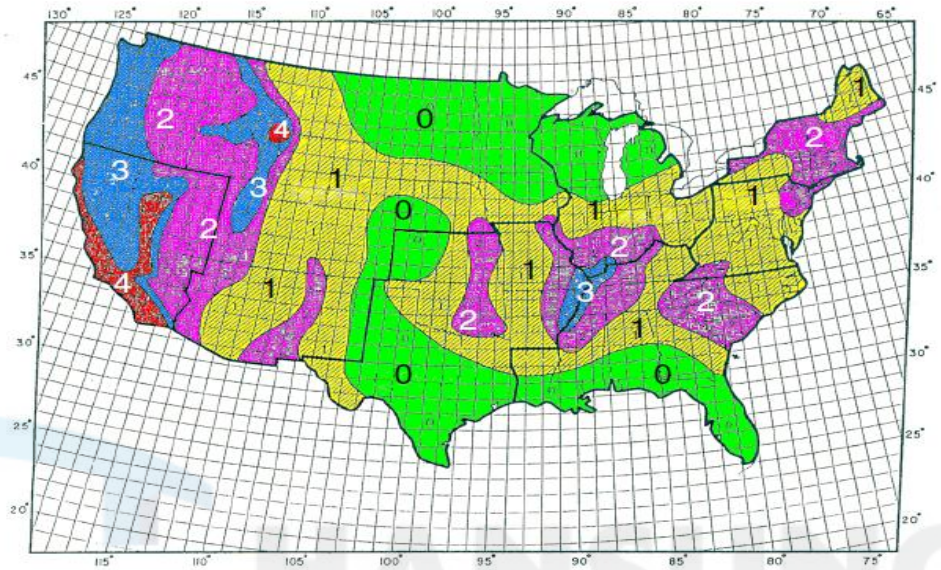
제 3 절 수·배전반 내진시험 방법

1) Telcordia GR-63-CORE

Telcordia Technologies, Inc.는 유무선 및 케이블을 생산 보급하는 기업을 상대로 네트워크(network)소프트웨어 와 서비스를 제공하는 세계 최대의 기업이다. 관련 산업이 끊임없이 진화하는 가운데, Telcordia는 전 세계의 통신사업자들이 네트워크(network)과 하드웨어 기기의 종류와 상관없이 혁신적인 신성장 동력 사업을 전개할 수 있도록 돕는 한편, 관련 사업자들로 하여금 적극적으로 원가를 절감하고 수익성을 향상시킬 수 있는 핵심적인 방법과 경험, 역량을 가지고 있다. Telcordia는 미국 동부 뉴저지주에 본사가 있고, 북미, 중남미등 전 세계에서 지사를 운영하고 있다.

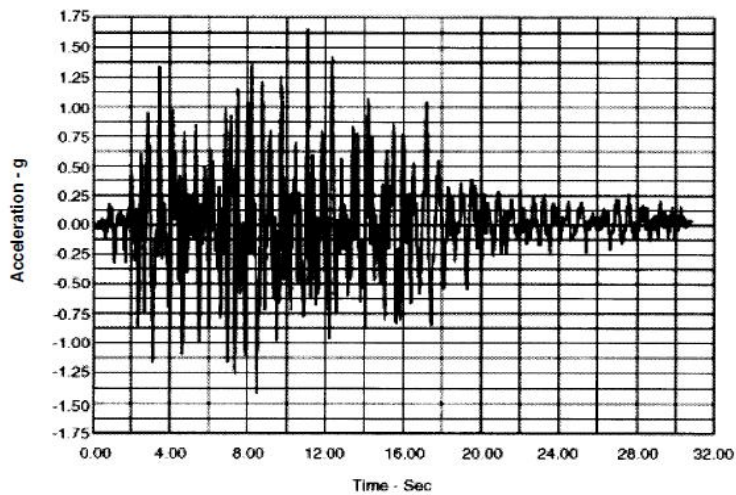
특히, Telcordia는 광통신 부품에 관한 성능시험 및 신뢰성 시험 기준을 자체 제정함으로써 세계 광통신 분야의 표준화 기구 역할을 자처 해왔고, 이에 따라 세계 각국의 광통신 부품 관련 기업들은 Telcordia의 시험기준으로 시험하고 통과한 인증서를 받아야만 국제기준의 적합성과 신뢰성을 검증 받았다고 말하고 있다.

(강동우, 2008)는 Telcordia에서 제정한 기술기준 중 본 논문에서 적용된 Telcordia 기술기준 GR-63-CORE은 지진 및 진동에 관한 기준으로 자국인 미국을 대상으로 만들어졌다. GR-63-CORE은 시간이 경과하더라도 받는 힘에 대해 변화가 없다는 것을 시험을 통해 구조적 건전성을 확인하는 Static test와 실내 공간에서 진동대 시험 규격을 확인하는 Office vibration test이 있다. 또한, 미국 전 지역에서 발생하는 지진의 발생빈도와 강도에 따라 0~5 Zone의 지역으로 나누어 [그림 2-11] Telcordia Earthquake Zone Map) 시험 기준을 정한 Zone 4 test, 운송에 관한 Transportation Vibration test등 4가지분야로 구성이 되어있다.



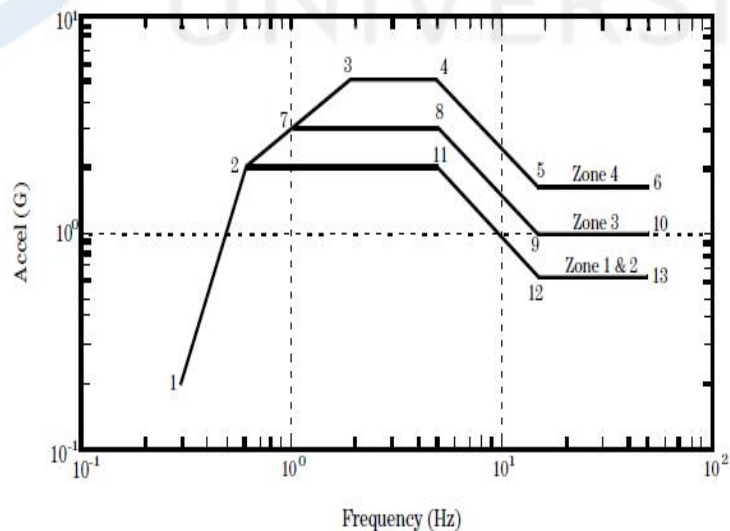
[그림 2-11] Telcordia Earthquake Zone Map
(the map of Zone 0 – Zone 4 in the USA)

본 논문에서 시험방법의 기준으로 사용될 Telcordia Zone 4는 [그림 2-11]의 빨간색 표기 부분이고, [그림 2-11]은 지진 위험이 거의 없는 지역 Zone 0 ~ 지진 위험이 아주 많은 캘리포니아 지역에 적용되는 Zone 4 까지 5 level 지역을 보여주고 있다. Telcordia 기준에서는 지진 위험 지역 Zone 4 level를 테스트하기 위한 파형 두 가지를 제시하고 있다.



[그림 2-12] Earthquake Synthesized Waveform - VERTQII Zone 4

[그림 2-12] Earthquake Synthesized Waveform에서 제시되는 지진파형은 Zone 4의 실제 지진의 강도를 시간영역에서의 지진파형으로 나타내었고,



[그림 2-13] Required Response Spectra

[그림 2-13] Required Response Spectra의 파형은 [그림 2-12] Earthquake Synthesized Waveform의 파형을 FFT(Fast Fourier Transform)을 통해 주파수 영역에서의 지진파형 형태로 나타낸 것이다.

[표 2-14] Required Response Spectra

Coordinate Point	Frequency (Hz)	Values for Upper Floor Acceleration (g)	Coordinate Point	Frequency (Hz)	Values for Upper Floor Acceleration (g)
Zones 1 and 2			Zone 4		
1	0.3	0.2	1	0.3	0.2
2	0.6	2.0	2	0.6	2.0
11	5.0	2.0	3	2.0	5.0
12	15.0	0.6	4	5.0	5.0
13	50.0	0.6	5	15.0	1.6
Zone 3			6	50.0	1.6
1	0.3	0.2			
2	0.6	2.0			
7	1.0	3.0			
8	5.0	3.0			
9	15.0	1.0			
10	50.0	1.0			

Telcordia Zone 4 기준에 적합하게 합격하기 위해서는 아래사항의 기준을 만족하여야 한다.

- (1) the 1st 고유주파수는 $2Hz$ 를 초과
- (2) 피 시험품 외함의 상단부와 바닥면과의 상대변위가 $76.2mm$ 이하
- (3) 사인파 등의 파형에도 영구적인 외함 결함이 없을 것
- (4) 지진 발생 중/후의 전기적 성능 유지할 것
- (5) the 1st 고유주파수는 $6Hz$ 이상 권장

2) 국립전파연구원 고시

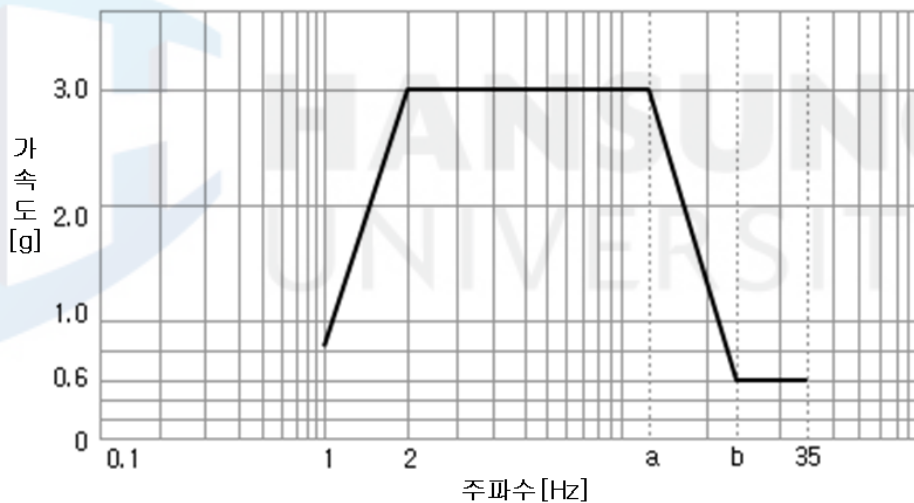
국립전파연구원 공고(제2015-14호)의 방송통신설비의 내진 시험방법은 지진 발생 시 통신설비 및 전원설비의 안정적인 기능을 유지하기 위해 방송통신설비 및 전원설비 등이 가진 내진성능을 검증하기 위한 시험방법과 기준을 설정하기 위하여 공표되었다. 공고의 내진성능 검증방법은 피 시험품을 직접 진동대 위에 장착하고 공고에서 제시한 지진가속도를 인가하여 성능이상 및 외형손상 여부 등을 판정조건과 비교 확인하는 시험검증 방법이 있고, 피 시험품의 구조적 시스템에 공고에서 제시한 지진가속도를 인가하여 모델링 방법으로 해석하여 외부손상 여부 및 변위 등이 판정조건에 부합하는지 확인하는 간접적인 방법이 있다. 전파연구원 공고에 적용 받는 피 시험품과 피 시험품의 세부품목과 검증방법을 [표 2-15]에 제시하였다.

[표 2-15] 시험대상설비의 종류 및 검증방법

피 시험품	세부품목	검증방법
통신장비	교환기, 전송단국장치, 중계장치, 다중화장치, 분배장치, 기지국 송수신장치, 고객정보 저장장치, 단문 메시지 저장장치	시험
전원설비	정류기	시험
	통신장비의 운용을 위하여 설치하는 수변전장치, 축전지, 비상용 발전기	시험 또는 해석
부대설비	통신장비를 놓기 위하여 추가로 설치하는 바닥시설 (이하 바닥시설이라 한다.)	시험 또는 해석
옥외설비	가. 철탑시설 : 강관 등으로 구성되어 대지 또는 옥상에 시설하는 철탑과 철주 및 건축법시행령 제 118조의 규정에 의거하여 신고하는 철주.	시험 또는 해석
	나. 선로구조물 : 통신구, 관로, 맨홀, 통신용 전주	시험 또는 해석

검증에 사용되는 요구응답스펙트럼은 지반과 동일한 높이 또는 지하에 설치되는 설비는 지반응답스펙트럼을 사용하며, 건물의 지반보다 높은 층에 설치되는 장치는 해당 층의 층응답스펙트럼을 사용한다. 지반응답스펙트럼은 기술기준에서 제시된 지진구역계수 및 지반분류, 건축물등급을 이용하여, 「건축법」 제48조, 제48조의2 및 「건축물의 구조 등에 관한 규칙 제3조제2항에 의한 「건축구조기준」에 따라 작성하여 사용한다.

층응답스펙트럼은 방송통신설비가 설치되는 해당 층에 대한 응답스펙트럼을 작성하여 사용하거나, [그림 2-14]에서 제시한 층응답스펙트럼을 사용한다. 바닥시설에 설치될 장비를 별도로 시험할 경우, 요구응답스펙트럼은 바닥시설 상단의 응답스펙트럼을 사용한다.



[그림 2-14] 층응답스펙트럼

[그림 2-14] 층응답스펙트럼에 적용되는 변수의 상세내용은 다음과 같다.

중력가속도(Gravitational acceleration, g)는 지구의 질량

$$M = 5.972 \times 10^{24} \text{ kg} \quad (\text{식2-31})$$

반지름 $r = 6,371 \text{ km}$ 는 지표면의 물체에 비해 매우 크고, 거의 구 대칭으로 간주할 수 있으므로 위 식을 사용하여 지구 표면에서의 중력가속도를 구할 수 있다. 일반적으로 아래에 주어진 지구 중력가속도 값이 사용되고 있다.

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

주파수(Hz) $a = \frac{35}{3} \text{ Hz}$, $b = 2a$ 이고 감쇠율(damping ratio) 2%를 적용한다. $1 \text{ Hz} \sim 2 \text{ Hz}$ 의 가속도 변화는 12 dB/octave 기울기를 가진다. a 에서 b 까지의 변화는 대수 단위에 의한 선형보간법을 사용하고 수직방향 힘에 대한 응답스펙트럼은 영주기가속도 $0.6g$ 를 최대 50%까지 줄여 사용할 수 있다.

본 연구에서 적용하는 제품은 방송통신설비 중 수·변전장치로 [표2-15]에서 제시하는 내진성능 판정조건을 모두 만족하여야 한다.

[표 2-16] 내진시험 방법 및 판정조건

번호	판정조건
1	통신장비는 내진 시험 중과 완료 후에 통신 신호 전송에 지장을 주지 않도록 하여야 한다.
2	피 시험품 외함의 상단부와 바닥면과의 단방향 변위 크기가 최대 75mm를 초과하면 안된다.
3	내진 시험 후 다음 각 호와 같은 손상이 없어야 한다. 1. 피 시험품의 전복 또는 전도 2. 피 시험품의 바닥 고정부 이탈 3. 설치된 구성품의 이탈 4. 피 시험품 외형의 변형 또는 파손 5. 바닥시설 자체의 결합부분이 이탈되거나 진동대 고정부분 이탈 6. 앵커링, 볼트 등의 고정장치 자체의 균열, 변형 및 절단 7. 기타 육안으로 확인이 가능한 변형이나 파손

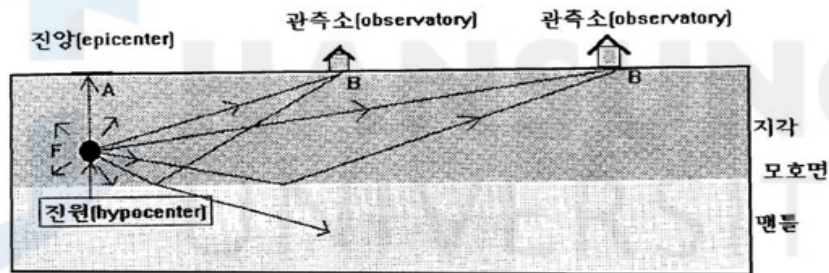
시험검증이 아닌 해석검증을 수행 할 경우 검증보고서에는 해석검증 방법 및 검증결과 및 입력 및 출력 데이터와 적용된 해석 모델, 지지구조물 연결부의 반발력 및 고정부(앵커링)와 기타 연결 부분들에 대한 경계조건 등이 기술되어야 한다.

제 3 장 임의방향 진동 감쇠기능 면진장치 개발

제1절 면진장치의 기존연구

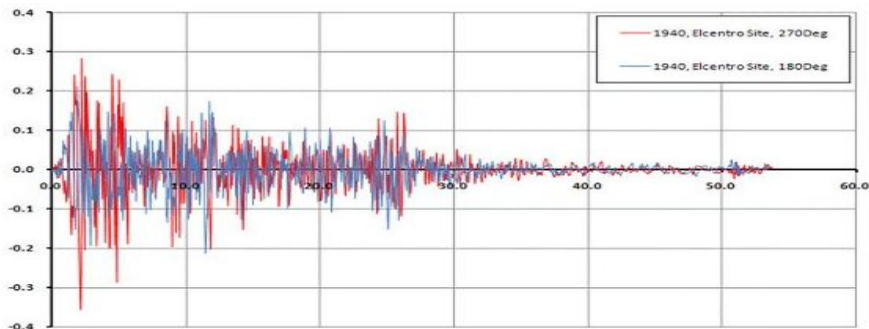
1) 지진파의 종류

지구 내부 암석의 급격한 파괴가 발생한 진원역으로 부터 지진에 대한 우레탄인 지구 내부 또는 지표면을 따라 움직이는 탄성파(Elastic wave)를 지진파(Seismic wave)라 한다. 지진계에 기록되는 파형은 지진파가 통과하면서 일으키는 매질의 변형에 의한 것이다.(재난대책안전본부, 2018)



[그림 3-1] 지진파의 입자운동 모형

실측지진파는 가속도측정기(Accelerograph)를 활용하여 다음과 같은 지반운동가속도 파형을 측정할 수 있다.



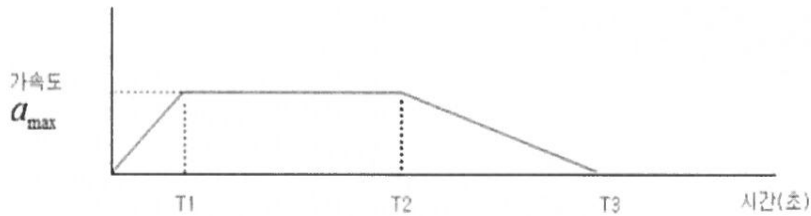
[그림 3-2] 실측 지진파

지진파는 전파특성에 따라 [표 3-1]과 같이 분류한다.

[표 3-1] 지진파의 구분 및 특성

지진파 구분		지진파 특성
실체파 Body wave	P파 : 종파 Longitudinal wave	- 밀도의 소·밀에 의한 <u>지각 변화파</u>. - 음파와 같은 소밀파로 모든 매질에 전파
	S파 : 횡파 Transverse wave	- 밀도의 변화는 없이 지각의 변형만 있음 - 진행방향에 수직인 횡 운동에 의하여 액체 내부(지구의 외핵과 내핵)는 통과 못함
표면파 Surface wave	LQ파 Love wave	- 하층은 파동이 없고 윗부분만 파가 전달 - 밀도의 변화는 일어나지 않음 - Love파는 S파의 수평운동 성분인 SH파로 수직운동 성분 지진계에는 거의 기록 <u>알림</u>.
	LR파 Rayleigh wave	- 밀도의 변화가 심하며 파동형식의 S파, P파의 복합적 성질을 보임 - P파와 S파의 수직운동 SV파가 조합된 성질을 가지며 수평운동성분 지진계에는 거의 기록되 <u>지 않음</u>
기타	자유진동 Free oscillation	- 큰 규모의 지진이 발생한 이후, 종이 울리는 것처럼 수일~ 수 주간에 걸쳐 나타나는 지구 전체의 진동 - 체적변화를 수반하는 구상진동(Spheroidal vibration)과 체적의 변화가 없는 뒤틀림 진동(Tortional vibration)으로 구분됨

지반운동가속도는 0.2g, 0.3g와 같이 지구중력가속도($1g = 980\text{cm/s}^2$)의 일정비율로 표현되고, 지진파는 가속도 값이 0인 x축을 밑변으로 하는 사다리꼴 형태로 표현할 수 있다.



[그림 3-3] 지진파의 사다리꼴 형태(포락모형)

여기서,

$\alpha_{\max}$ = 최대지반가속도,

T_1 = 상승시간

$T_2 - T_1$ = 강진지속시간

$T_3 - T_2$ = 감쇠시간

$\alpha_{\max}$ 는 지진의 세기와 밀접한 관계가 있으며 지진의 유지시간은 30초 미만으로 T_1 은 1-2초, $T_2 - T_1$ 은 15초미만, $T_3 - T_2$ 은 10초미만이다. 지진 발생 시 지각 내의 지진파는 실체파인 P파와 S파 2종류의 파동으로 전파되고 진원에서는 2종류의 파동이 동시에 발생하여 에너지가 방출된다. 동시에 발생한 지진파 중 전파 속도는 P파가 빠르기 때문에 지표면의 관측지점에 측정시간은 P파(종파)가 앞서게 된다. 강도가 큰 지진은 몇 번에 걸쳐 지진이 발생하는데 처음 가장 강하게 발생한 지진을 본진 이라고 하고 이후 연속적으로 발생하는 것을 여진이라 한다.

지진을 측정하는데 중요한 요소는 발생시간, 위치, 깊이와 지진파로 방출된 에너지가 중요한 측정 변수가 된다. 지진에너지(E)는 규모(M)과 아래와

같은 관계식으로 연관된다.

$$\log E = 11.8 + 1.5M \quad (\text{식 3-1})$$

(식 3-1)에서 E 의 단위는 erg 이며 [표 3-2]에서 규모가 1.0 증가할 때 에너지는 대략 32배 증가한다. 규모는 지표면의 관측지점 지진계에서 기록되어진 지진파의 진동 폭을 측정하고 진앙거리, 진원의 깊이 등을 고려하여 계산한다. 규모가 발생한 지진의 강도와 연관되어 있다면 진도는 어떤 특정한 곳에서 지진으로 인한 진동의 크기를 사람이 느끼는 정도, 주의의 물체, 건물 및 자연계에 대한 현상으로 구분한 것이다.

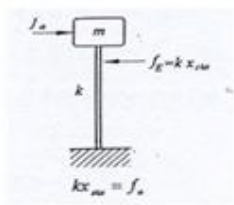
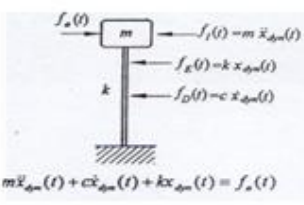
[표 3-2] 규모별 지진에너지

규모(M)	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
에너지(E) (erg)	2.0×10^{16}	6.3×10^{17}	2.0×10^{19}	6.3×10^{20}	2.0×10^{22}	6.3×10^{23}

2) 지진에 대한 구조해석

구조물의 움직임을 해석하는 방법에는 동적해석(Dynamic Analysis) 과 정적해석(Static Analysis)이 있다. 먼저 정적해석은 무게가 시간의 흐름에 따라 변하는 특성만을 반영하여 측정시점에서 무게에 의한 구조물의 움직임의 정도를 구하는 것이고 동적해석은 정적해석 방법에서 고려하는 구조물의 움직임에 따른 변위 량을 포함하여 운동하는 구조물이 가지는 특성인 관성력과 시간의 흐름에 따른 운동에너지의 감쇠력을 반영하여 구조물의 응답을 측정한다. 동적해석을 수행할 경우 정적해석 수행에 반하여 준비시간, 전산해석시간, 해석 장비의 성능, 결과 해석시간 등이 많이 소요되기 때문에 해당 구조물의 동적특성에 대한 근사값을 계산하는 것이 중요하다.

[표 3-3] 정적해석과 동적해석 비교

	정적해석	동적해석
외부하중	시간과 무관	크기, 방향, 위치 등의 시간의 함수
내부 저항력	탄성 복원력 (f_E)	탄성 복원력 (f_E) 관성력 (f_I) 감쇠력 (f_D)
특이사항		공진(resonance) 동적 증폭 많은 해석시간 소요
힘의 평형관계		
동적 증폭계수		$DAF = \frac{MAX \dot{x}_{dyn} }{MAX \dot{x}_{st} }$

가) 등정적해석법(Static Equivalent Force Analysis)

시험 진동모드의 영향을 정적 수평하중 값으로 환산하여 적용하는 방법으로 가장 수월하고 많이 쓰이는 일반식이라고 할 수 있다. 낮은 층의 일반 구조물의 경우 인접해 있는 구조물의 강성과 비슷하고, 질량에 현격한 차이가 없고, 평면이거나 좌우 대칭일 경우에 정적해석 방법이 신뢰성이 높다. 등가정적 해석법을 사용하기 위해 유도된 가정은 구조물이 정형이거나 정형에 가깝다는 것이다. (안태상, 2014)은 구조물의 움직임은 저차 진동 모드에서 영향을 많이 받고, 고차 진동모드의 영향은 크지 않으며 저차 진동 모드에서 받는 영향을 일부분 수정함으로써 고려될 수 있다 말하였다. 또한, 구조물의 거동은 탄성범위 안에서 일어난다고 독립적으로 거동하며 지반과의 상호작용은 무시한다.

등가정적해석법의 장점은 지진하중 산정이 간편하다는 것과 필산(筆算)이나 간단한 전산프로그램에 의한 해석이 가능하여 시간 절약과 계산에 들어가는 노력이 줄어든다는 것이다. 그러나, (이정균, 2015)은 첫 번째 진동모드 이외의 진동모드의 영향에 대한 고려가 어렵다는 것과 구조물의 동적특성을 제대로 고려하지 못하고 지반과 구조물의 상호작용을 고려하기가 힘들고 고층 건물이나 비정형 건물의 해석에 부적합하다는 단점도 있다고 말하였다. 등가정적해석법으로 해석을 하려면 아래와 같은 변수 값을 계산하고 층간변위와 건물의 분리 등을 포괄적으로 검토하여야 한다.

(1) 밀면 전단력

밀면 전단력이란 지진에 의해 구조물에 미치는 하중을 등가정적하중으로 변환하였을 때 건물의 밀면 상부에 미치는 지진 하중의 총합이다.

$$V = \left(\frac{A \cdot I \cdot C \cdot S}{R} \right) W \quad (\text{식 3-2})$$

여기서,

V = 밀면전단력

A = 지역계수, 건설 예정 지역의 지진위험도(0.08/0.12)

I = 중요도계수

C = 동적계수, $C = \frac{1}{1.2\sqrt{T}}$

여기서,

T = 건축물의 기본 진동주기(초)

$T = 0.085 h n^{3/4}$: 철골구조)

$T = 0.06 h n^{3/4}$: 철근 콘크리트구조

$T = \frac{0.09 hn}{\sqrt{B}}$: 그 외의 구조

S = 지반계수

R = 반응수정 계수

W = 구조물의 총 중량

(2) 층지진 하중

층의 지진하중은 각층의 하중에 비례하여 고층일수록 지진하중이 커지게 된다.

$$F_x = \left(\frac{W_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n W_i h_i^k} \right) V \quad (\text{식 3-3})$$

$T \leq 1.0\text{sec}$ 이면 $k=1.0$

$1.0 < T \leq 2.0\text{sec}$ 이면 $k=1.5$

$T > 2.0\text{sec}$ 이면 $k=2.0$

여기서,

F_x = x층의 층지진 하중

W_i, W_x = i, x층의 구조물 중량

h_i, h_x = 구조물 밑면으로부터 i, x층 까지의 높이

V = 밑면 전단력

(3) 층 전단력

$$V_x = \sum_{i=x}^n F_i \quad (\text{식 3-4})$$

여기서,

V_x = x층의 층 전단력

F_i = i층의 층지진하중

(4) 비틀림 모멘트

건축물의 중심과 강심간의 편심에 의한 비틀림 모멘트와 우발 비틀림 모멘트의 합으로 한다. 이 경우 비틀림 모멘트는 편심거리에 층전단력을 곱하여 산정하고, 우발 편심 모멘트는 해석하는 방향의 직각 방향으로 평면 치수의 5퍼센트에 해당하는 우발 편심에 그 층 전단력을 곱하여 산정한 모멘트로 한다.

(5) 전도 모멘트

구조물의 기초에 있어서의 구조물을 전도시키기 위한 외부 모멘트의 총합이다. 층전단력이 동시에 발생하지 않기 때문에 감소계수를 사용한다.

$$M_x = \rho \sum_{i=1}^n F_i (h_i - h_x) \quad (\text{식 3-5})$$

여기서,

M_x = x 층의 전도 모멘트

F_i = i 층에서의 층 지진하중

h = 건축물의 높이

(6) 층간 변위

층의 주도와 주각에서 생기는 수평 변위량의 차이로서 그 층의 층고의 0.015배를 초과할 수 없다.

$$\Delta_x = R \cdot (\delta_x - \delta_{x-1}) \quad (\text{식 3-6})$$

$$\phi_x = \frac{\Delta_x}{hsx} = \frac{R \cdot (\delta_x - \delta_{x-1})}{hsx} \quad (\text{식 3-7})$$

여기서,

R = 반응수정계수

δ_x, δ_{x-1} = x 층과 그 아래층의 층 변위

hsx = 층고, $\Delta_a = 0.015hsx \geq \Delta_x$

여기서,

Δ_a = 허용층간변위

0.015 : 허용층간 변위 각

hsx = x 층의 높이

Δ_x = x 층의 설계층간변위

나) 동적 해석법 (Dynamic Analysis)

현행법 상의 내진설계기준에는 지진발생 시 구조물에 대한 힘의 작용에 대하여 동적해석 방법 적용에 대한 언급은 없다. 그러나 건축물이 고층 또는 비대칭인 경우와 국가에서 중요하게 관리하고 있는 구조물일 경우 정적해석에 의한 해석 결과를 건축물의 내진설계에 적용하는 것은 바람직하지 못하다. 진동주기가 짧은 낮은 층의 건물일 경우 1차 진동모드의 영향을 많이 받지만, 기본적으로 진동주기가 긴 높은 층의 건물인 경우는 1차 진동모드의 영향이 상대적으로 약하고 2차 이상의 진동모드의 영향이 상대적으로 커진다는 것을 고려해야 보다 정확한 건축물의 움직임을 알 수 있다. 또한 구조물이 정방형이고 대칭일 경우에는 무시될 수 있는 변위나 비틀림 등이 구조물의 외형이 비대칭 이거나 비정형일 경우는 중요한 요소로 작용될 수 있다. 따라서 고층건물이거나 비대칭 건축물의 내진설계에서는 건축물의 동적거동 정도를 정확히 알아 낼 수 있는 해석방법이 필요하게 된다. 비대칭 구조물을 수평방향 지진과의 영향 $\ddot{x}_g(t)$ 만 고려할 때 운동방정식은 (식 3-8)과 같다.

$$[M]\ddot{X}(t) + [C]\dot{X}(t) + [K]X(t) = -[M]\{1\}\ddot{x}_g(t) \quad (\text{식 3-8})$$

여기서,

$[M]$ = 구조물의 질량행렬

$[K]$ = 구조물을 구성하는 각 요소의 강성행렬

$[C]$ = 감쇠 행렬

$\{1\}$ = 지진이 가해지는 수평방향의 자유도는 1, 그 이외에는 0인 상수 벡터

구조물의 수평영향 운동방정식에서 가장 크게 영향을 주는 것은 감쇠행렬 $[C]$ 이다. 질량행렬 $[M]$ 과 강성행렬 $[K]$ 은 구조물을 형성하는 각 부분의 재료와 형상적인 특징에서 직접 계산되지만, 감쇠행렬 $[C]$ 는 구조물을 형성

하고 있는 재료와 형상과는 상관없이 각 구성요소들 슬래브, 보등 간의 접합부 마찰, 구조물과 비구조물과의 마찰, 시간경과에 따른 사용 재료의 감쇠효과와 벽체 콘크리트에 발생한 미세 균열로 인한 에너지 소산에 직·간접 영향을 받는데 정확한 수치 값을 산출하기는 어려운 상황이다. 일반적인 경우 Rayleigh 감쇠 행렬 또는 비슷한 형상을 가진 구조물의 실험 결과를 참고하여 근사 값으로 모드별 감쇠비를 산정하게 된다.

동적해석은 원론적으로 (식 3-8)의 운동방정식의 해를 구하는 것으로 응답 스펙트럼 해석(RSM)과 시간이력해석법(Time History Analysis) 두 가지가 있고 시간이력해석법 중에 하나인 모드중첩법(Mode superposition)은 서로 독립적인 미분방정식으로 변환하고 저차 진동모드에 대한 결과를 중첩하는 방법이다. 또 하나의 방법인 직접적분법(Direct Integration)은 외부적인 진동 영향을 직접 수치적으로 적분하여 해를 구하는 방법이다.

(1) 응답 스펙트럼 해석법(Response Spectrum Analysis Method)

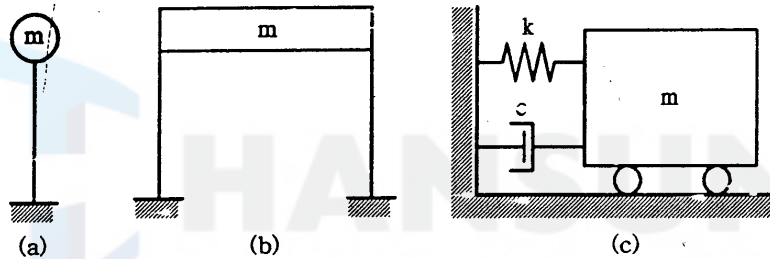
하나의 지역에서 발생하는 지진이라도 발생 환경에 따라 각기 다양한 형태로 발생하고 구조물에 미치는 영향 또한 다양하게 나타나므로 구조물의 움직임을 예측 할 때는 하나의 지진 기록만 사용하기 보다는 여러 개의 지진을 서로 비교 분석하여 얻어진 지진정보 내용을 이용하는 것이 바람직하다. 유사 지역에서 발생한 지진에 대한 자료는 통계적 방법으로 분석되어 내진설계 시 응답스펙트럼의 형태로 지진의 특성을 반영하게 되는데 이 스펙트럼은 분석되어진 지진기록에 대해 단자유도시스템의 진동주기에 따른 최대응답 즉, 변위, 속도 및 가속도를 나타낸다. 이 스펙트럼은 하나의 자유도를 가진 구조물을 사용하여 구한 것이지만 모드중첩법 원리에 의해 다자유도 구조물의 경우에도 근사적으로 적용될 수 있다.

(이성렬, 2009)는 지진하중에 대한 동적해석 방법을 실시하고 응답의 최대 값을 계산하기 위해서는 먼저 구조물의 진동주기와 모드형태를 알고 있어야 한다. 구조물의 진동주기 응답스펙트럼의 값을 입력하중으로 사용하고 모드별

하중의 크기인 모드참여계수로 맞추어 전체 모드에 대해 중첩한다고 하였다.

응답 스펙트럼 해석(Response Spectrum Method)의 장점은 설계용 스펙트럼의 형태로 구조물의 동적 특성을 고려하는 것과 계산이 복잡하지 않고 간편한 장점이다. 또한, 구조물 응답의 최대값을 계산 하고자 할 때 가장 효과적인 방법이며 실제 구조 설계에 가장 많이 쓰인다. 단점으로는 구조물 거동의 시간에 따른 거동의 양을 알 수 없고, 비선형 해석이나 피로 해석 등을 하고자 할 때는 사용할 수 없다.

(가) 응답 스펙트럼의 작성 원리



[그림 3-4] 단자유도 구조물의 최대 동적 응답

구조물의 일반적인 형태는 (a)와 같은 경우이다. 지표면이 횡 방향으로만 영향을 준다고 가정할 때 실제로 (b)와 같은 구조물이 가장 간단하게 거동하는 구조물이다. (b)는 평행한 두 개의 기둥에 한 개의 보가 연결되어 있는데 기둥의 무게는 영향을 주지 않고 모든 무게는 보에 영향을 준다고 가정한다.

보와 연결되어 있는 두 개의 기둥 간격에 의하여 보는 횡 방향으로만 진동하게 되고 연결되어 있는 두개의 기둥에 의하여 보의 회전 운동은 거의 발생하지 않는다. 그러므로 [그림 3-4]의 (c)와 같은 모델로 해석하는 것이 일반적이다.

① 구조물 거동의 방정식

지반에 연결되어 있는 구조물이 바닥면의 변위에 대한 상대적인 변위 x 가 구해짐으로써 확정된다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g \quad (\text{식 3-9})$$

$$\ddot{x} + \frac{c}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}x = -\ddot{x}_g \quad (\text{식 3-10})$$

이 식에 $2n = \frac{c}{m}$, $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 등의 기호를 사용하면

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + \omega^2 x = -\ddot{x}_g \quad (\text{식 3-11})$$

여기서,

$\omega = \text{진동수} = 2\pi f = \text{각진동수 (angular frequency)}$

$\xi = \frac{\omega}{n}$ (감쇠율)

그러므로,

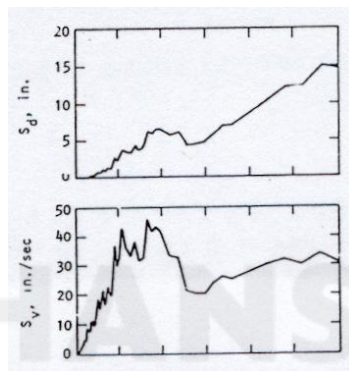
$$\ddot{x} + 2\xi\omega\dot{x} + \omega^2 x = -\ddot{x}_g \quad (\text{식 3-12})$$

구조물이 지진 발생 시 지표면 진동의 영향을 받을 때 (식 3-12)와 같이 미분방정식의 해를 통하여 구조물의 거동을 표현할 수 있다. 구조물의 동적거동 요소인 가속도, 변위 등을 계산하는 요인은 감쇠율(ξ), 진동수(ω), 지반

진동 가속도($x\ddot{g}$) 이다.

② 응답 스펙트럼

응답 스펙트럼은 특별히 정한 지진에 대하여 동일한 감쇠율(ξ)을 가지는 단자유도 구조물의 진동수(ω)를 상황에 맞게 변화하면서 동적해석을 실시하고 동적해석에서 발생하는 최대 응답값(가속도, 속도, 변위의 최대값, 스펙트럼 값) 등을 계산하는 것이다. [그림 3-5]는 진동주기의 변화를 나타낸 것이다.



[그림 3-5] 진동주기의 변화

나) 설계용 스펙트럼

지진이 발생하여 구조물에 영향을 미칠 때 구조물에 미치는 영향을 알아내기 위하여 비선형 동적해석을 실시한다. 그러나 비선형 동적해석방법은 발생할 지진에 대한 지반가속도, 구조물의 비선형 특성, 지반의 성질 등 자세한 정보가 있어야 가능하므로 실제 내진설계 적용 시 아래와 같은 방법으로 설계한다.

· 구조물의 단자유도화

건축되어져 있는 구조물은 실제로 자유도를 많이 가지고 있는 다자유도

시스템이다. 구조물의 동적거동은 처음 진동 모드에 의해 결정된다는 원리를 이용해 단자유도 시스템으로 단순화시켜서 가정한다.

- 탄성 스펙트럼의 설정

구조물의 복잡한 비선형 거동을 피하기 위하여 단자유도 구조물의 탄성 스펙트럼을 설정하여 사용한다.

- 지반 조건의 고려

지진이 발생하면 지진파는 지구 내부의 암반을 지나 구조물에 힘을 전달하게 된다. 전달된 지진에너지는 지반의 성질에 따라 진동수에 큰 차이가 생기기 때문에 고려하여 한다.

- 비선형 거동과 감쇠효과

내진설계에서는 응답수정계수 R 을 이용하여 비선형 거동과 감쇠효과 영향을 반영하고 있다.

- 진동 주기의 영향

구조물의 진동주기에 따라 가속도스펙트럼의 형상이 결정된다. 진동주기를 단순화 시켜 내진설계에 적용한다.

- 구조물의 중요도 : UBC에서 88년부터는 1.25배까지로 조정

(2) 시간 이력 해석(Time History Analysis)

지진 발생 시 지반에 미치는 영향을 시간의 변화에 따라 계산할 수 있을 때 구조물의 거동 범위를 해석할 수 있는 방법 중 하나이다.

(가) 직접 적분법에 의한 시간해석

구조물의 거동과 관련하여 운동방정식을 직접 적분하여 수치적인 거동 범위를 계산하는 방법으로 지반의 가속도 기록을 입력하중으로 사용한다. 입력 값으로 사용되어지는 가속도 기록은 과거 데이터를 활용하거나 모의 진동 파형을 이용하기도 한다. 직접 적분법에 의한 방법은 시간 간격을 짧게 나누고 각 시간간격에 운동방정식을 대입시켜 시간에 따른 거동을 단계적으로 구하

는 방법이다. 해법의 종류는 다음 두가지가 있다.

- 외연적(Explicit) 방법: 시간에 따라 작용하는 동적하중에 대한 구조물의 비선형거동을 파악하기 위한 해석방법이다. 시간간격은 임계 시간간격 보다 작은 값으로 선정되어야 한다.

- 내연적(Implicit) 방법: 시간 $t + \Delta t$ 에서의 평형식으로 해를 계산한다. 시간 간격은 크게 할 수 있으나 한 단계의 해를 구하는데 계산량이 많이 요구된다.

(나) 모드 중첩법에 의한 시간해석

직접 적분법을 이용하여 구조물 거동에 대한 변위를 운동방정식을 통하여 계산하려면 많은 시간과 자료가 필요하기 때문에 효율적으로 동적 거동을 계산하기 위하여 각 모드에 독립적인 미분 방정식으로 변환하여 시간해석을 하는 것을 말한다.

모드 중첩법은 각각의 모드에서 구조물의 거동을 합하여 전체 거동을 계산할 수 있다는 사실에 근거하고, 각 모드의 직교성을 이용하여 고유 진동 모드에서 발생하는 거동을 다른 모드와 독립적으로 구할 수 있다.

구조물 응답의 시각력을 계산하기 위해서는 각 모드의 응답 시각력을 단자유도 운동방정식을 통하여 계산하고 그 후 각 모드 값을 합하여 구조물의 전체 응답 시각력을 결정한다. 따라서 각각의 모드에서 얻어진 해를 모두 중첩시키면 정확한 구조물의 응답 시각력을 구할 수 있다.

제2절 먼진장치 종류별 설계방법과 특성

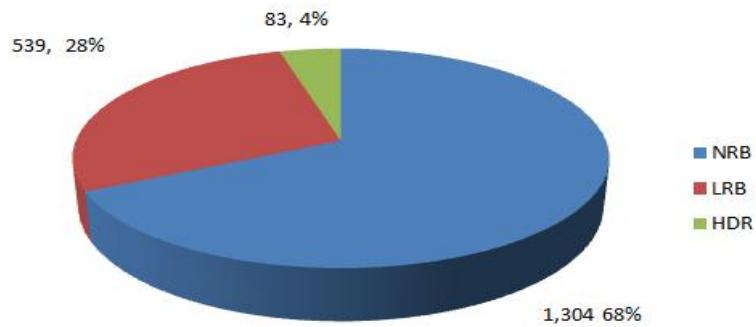
1) 먼진장치 적용 분석

일본 건축물에 적용된 적층고무에 대하여 일본건축센터에서 1998년까지 발행한 성능평가시트를 기준으로 직경 및 동일제품에 대한 적층고무 먼진장치가 30개 이상 설치된 19개 건물을 선정하여 조사하였다. 조사된 19개 건물 중 적용된 적층고무의 종류는 천연고무계 적층고무(이하, NRB)가 10개 건물에 적용되었고, NRB와 납붕삽입형 적층고무(이하, LRB)의 혼합 사용이 3개의 건물에, LRB가 5개 건물, 고감쇠고무계 적층고무(이하, HDR)가 1개의 건물에 적용되었다. 19개 건물에서 조사된 적층고무의 총 개수는 1926개이다. 조사된 적층고무 중 NRB가 1304개 조사되었고 전체의 68% 비중을 차지하였다. LRB는 539개로 전체 28%, HDR는 83개로 조사되어 전체 4% 비중을 차지하였다. 특히, HDR의 빈도가 가장 적은 원인은 면압과 편심의 처리를 위해 작은 크기의 적층고무를 30개 이상 사용한 건물이 많지 않았기 때문으로 판단된다. 실제 성능평가시트 조사에 의한 HDR의 결과에서도 83개의 적층고무에 중에서도 7종류의 크기가 사용되었다.

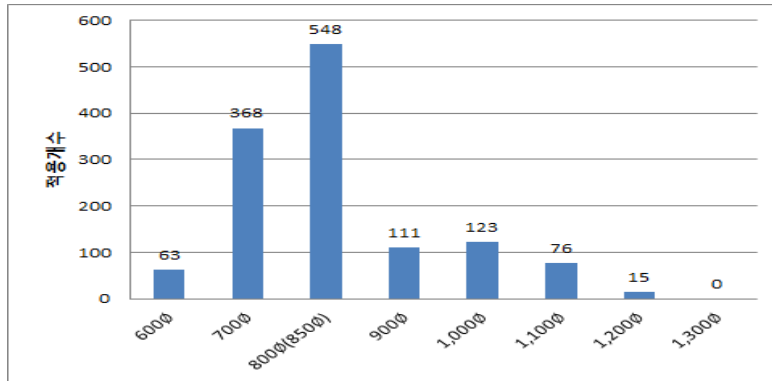
NRB와 LRB의 종류별 직경에 대한 분포를 [표 3-4]에 나타내었다. NRB에서는 직경 800 ϕ 가 가장 많았고, 700 ϕ 와 800 ϕ 크기의 적층고무가 전체 사용량의 70%를 차지하고 있다. 한편 LRB는 1,000 ϕ , 1,100 ϕ 의 적층고무 사용빈도가 NRB에 비해 많은데 이것은 적층고무 중앙 부분에 납붕을 삽입할 구멍이 있어 단면적을 증가시킬 필요성이 있었던 것으로 판단된다.

[표 3-4] 적층고무의 직경분포

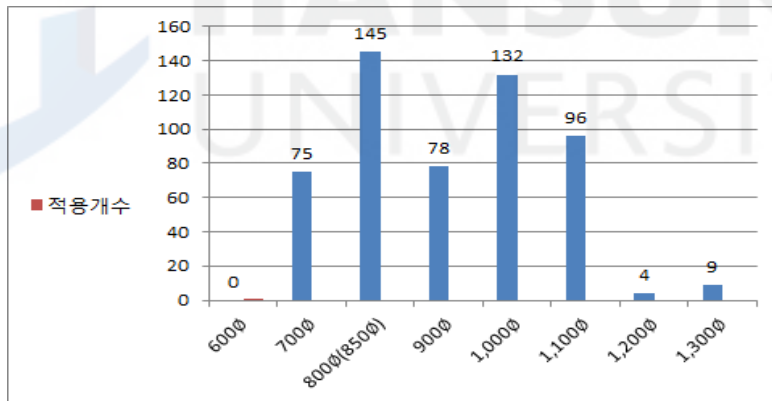
직경	NRB		LRB	
	개수	빈도(%)	개수	빈도(%)
600 $\varnothing$	63	4.8	0	0.0
700 $\varnothing$	368	28.2	75	13.9
800 $\varnothing$ (850 $\varnothing$)	548	42.0	145	26.9
900 $\varnothing$	111	8.5	78	14.5
1,000 $\varnothing$	123	9.4	132	24.5
1,100 $\varnothing$	76	5.8	96	17.8
1,200 $\varnothing$	15	1.2	4	0.7
1,300 $\varnothing$	0	0.0	9	1.7
합계	1,304	100.0	539	100.0



[그림 3-6] 적층고무의 적용 현황



[그림 3-7] 천연고무계 적층고무의 직경 개수



[그림 3-8] 납봉삽입형 적층고무의 직경 개수

2) 면진장치의 종류

면진장치는 격리기능을 하는 분리장치와 에너지흡수기능을 하는 댐퍼를 총칭하여 지칭할 경우에 사용하며, 분리장치라고 할 경우에는 적층고무계 격리장치와 미끄럼베어링(슬라이딩베어링), 구름베어링(롤베어링) 등의 분리장치를 지칭한다. 그리고 분리장치가 갖추어야 할 성능은 수직지지성능, 수평변형성능, 복원성능, 감쇠성능 4가지이다.

[표 3-5] 분리장치의 종류 및 요구성능

분리장치의 종류		수직지지 성능	수평변형 성능	복원성능	감쇠성능
적층 고무방식	천연고무 받침	○	○	○	×
	고감쇠고무 받침	○	○	○	○
	납봉삽입고무 받침	○	○	○	○
미끄러짐 방식	저 마찰형 받침	○	○	×	×
	PTFE	○	○	×	○
	탄성강체와 저마찰 형 지주의 직렬결 합방식	○	○	○	
	오목형 받침	○	○	○	×
롤러 방식	롤러형 받침	○	○	×	×
	볼베어링 받침	○	○	×	×
	오목형 받침	○	○	○	×

[○ : 있음, × : 거의 없음]

분리장치란 지반으로부터 건물을 분리·절연하는 장치 및 기구를 말한다. 지진이 일어났을 경우에 완전한 절연이랑 건물 전체를 공중에 뜨게 하는 것이지만 현재의 기술 수준으로는 불가능하다. 따라서 분리장치는 건물 전 중량을 지지할 수 있는 강도와 강성을 가지고 있으면서 수평방향으로는 충분히 유연한 특성을 지니고 있을 필요가 있다. 분리장치의 수평강성을 작게 하면 할수록 절연에 완전 가깝고, 건물에의 지진입력은 저감되어 응답가속도는 매우 작아진다. 한편, 지반과 건물과의 상대변위는 수평강성이 작을수록 증가하는 경향이 있다.

이와 같이 응답가속도와 면진층 변위의 관계는 서로 반대되는 성질을 나타낸다. 그러나 감쇄성능을 적절하게 부여함으로써 응답가속도를 가감하고 상대변위도 적당한 범위 내에 머물게 하는 것이 가능하다. 분리장치에는 하중지지능력, 대변형성능 및 지진 종료 시에 원위치로 복귀하는 복원성능 등이 요구된다. 또 경제성, 사공성, 내구성능 등도 중요한 요구 성능 이다.

분리장치의 요구 성능을 공학적 정량성을 가지고 경제적으로 실현한 것이 적층고무 분리장치이다. 적층고무 분리장치는 얇은 고무시트와 중간 강판을 교대로 쌓아 놓은 구조로 되어 있다. 고무 단독의 경우 연직방향으로 큰 하중을 작용시키면 변형되어 횡방향으로 부풀어 올라 안정되게 지지할 수 없다. 그에 비해 적층고무와 같이 견고한 강판을 고무사이에 삽입함으로써 연직방향의 변형이 크게 억제되고 수평방향으로의 유연성은 고무단독인 경우와 거의 비슷한 값을 유지하게 된다.

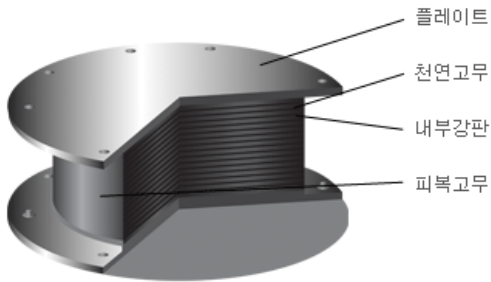
적층고무의 연직강성은 통상 기둥 하나와 비슷한 크기이다. 한 예로서 적층고무의 직경을 70cm, 전 고무의 두께를 1cm(0.7cm×20층)FH 하고, RC기둥으로서 단면은 70 X 70cm, 길이는 400cm인 기둥을 가정한다. 적층고무의 연직강성은 약 2,140t/cm이고 RC기둥의 강성은 2,500t/cm이 되어 적층고무의 압축강성이 RC기둥의 강성과 비슷함을 알 수 있다. 적층고무의 수평방향 성능은 고무의 특성이 충분히 발휘되어 매우 작은 수평강성

과 큰 변형능력을 가지고 있다. 이러한 적층고무의 수평강성과 수직강성의 비는 1:1,000 정도이다.

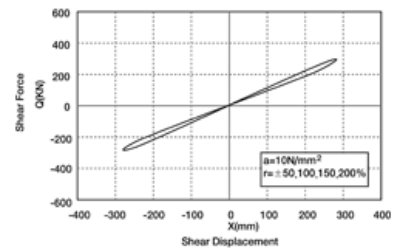
적층고무와 RC기둥의 수평변형능력을 위에 열거한 예로써 비교하면, 직경 70cm적층고무의 수평변형능력은 40cm 정도이고, RC기둥의 층간 변형각을 1/200으로 하면 수평 변형량은 약 2cm이다. 따라서 적층고무의 수평변형능력은 20층분 기둥의 수평변형량 총합에 상당한다.

분리장치에는 고무시트와 강판을 교대로 겹쳐 쌓은 적층고무 분리장치 [그림 3-9]]와 마찰저항을 작게 한 미끄럼 받침[그림 3-10], 굴림 받침 [그림 3-11] 등이 있다.



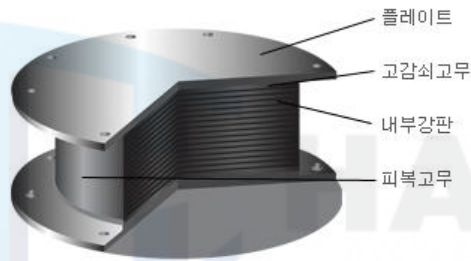


[구조]

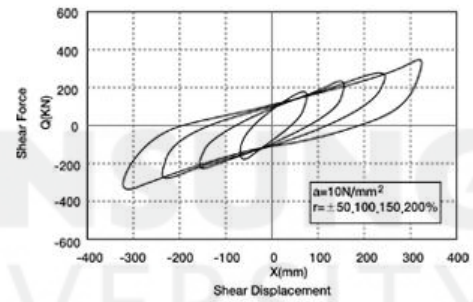


[이력곡선]

(a) 천연고무 받침

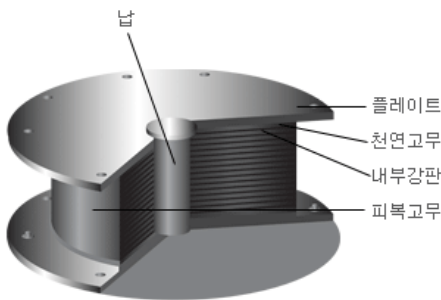


[구조]

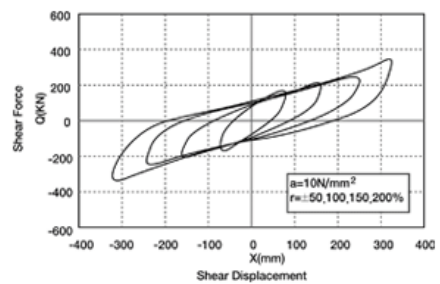


[이력곡선]

(b) 고감쇠고무 받침



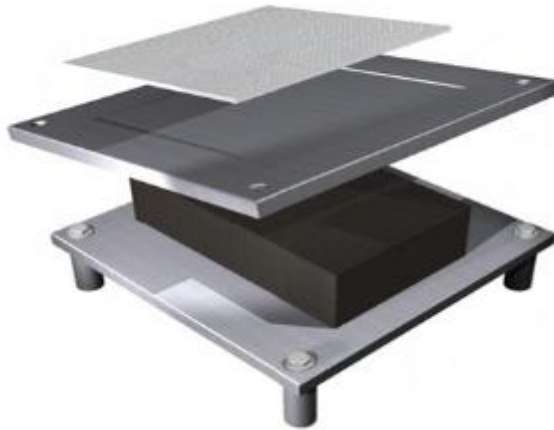
[구조]



[이력곡선]

(c) 납봉삽입고무 받침

[그림 3-9] 적층고무 분리장치의 종류



[그림 3-10] 미끄럼 받침



[그림 3-11] 굴림받침

분리장치의 기능만으로는 지진 시 건물과 지진면과의 진폭은 너무 크다. 이 진폭을 적절히 감소시키기 위해서는 감쇄기능이 필요하다. 감쇄장치는 지진 시 건물의 진폭과 속도에 따라 지진에너지를 흡수하고 진동을 제어하는 작용을 한다. 댐퍼의 주된 종류로는 강재와 납을 이용한 금속감쇄장치[그림 3-12], [그림 3-13], 오일과 같은 유연한 유체재료를 이용한 유체감

쇄장치[그림 3-14], 마찰감쇄장치[그림 3-15] 등이 있다.



[그림 3-12] 강재댐퍼



[그림 3-13] 납댐퍼



[그림 3-14] 오일댐퍼



[그림 3-15] 마찰댐퍼

3) 면진장치의 요구 성능

지반과 구조물과의 분리장치는 구조물의 상시하중에 대하여 오랜 기간 안정적인 지지능력이 요구되고 시간경과에 따른 경년변화에 의해 성능저하가 발생하지 않아야 하는 기준조건을 만족해야 한다. 분리장치의 요구되는 변형 성능은 분리장치에 요구되는 변형량 이상의 능력을 가져야 되고 고정하중을 지지할 수 있어야 한다. 이때 정상적으로 가해지는 부하는 상시하중의 2배 정도까지 반영하고 있다. 분리장치가 우수한 변형성능을 보유하고 있어도 건물을 원래의 위치로 복원시키는 강성이 필요하다. 복원 능력은 지진 후에 발생하는 잔류변형의 크기에 영향을 미치고, 수평 힘에 대한 면진성능도 높여야 함으로 수평강성을 가지도록 설계한다. 면진건물의 설계 신뢰성을 향상시키기 위해 복원력과 수평강성의 특성이 기둥이나 보의 변동에 따라 크게 영향을 받지 않아야 한다. 또한 조그마한 변형에서 끊어짐에 이르기까지의 특성이력, 면압 및 속도 등에 대한 검토와 정량적 평가가 중요하다. 특성이력과 내구성을 포함하여 면진부재의 품질 안전성은 매우 중요하다. 품질로서는 분리장치의 제작정밀로, 수평강성과 한계변형의 균일성이 요구된다.

분리장치의 설계는 면진건물에 요구되는 응답변형량과 목표성능을 만족하기 위하여 분리장치의 크기, 강성 및 변형능력 등을 결정하여야 한다. 이때 중요한 것은 축력의 변동에 대해 분리장치에 영향을 적게 받는 시스템으로 설계하여야 한다.

가) 적층고무의 특징과 구조

분리장치 적층고무의 모양은 얇은 강판과 고무 층을 겹쳐서 쌓은 구조이다. 압축 시 고무 층이 두꺼운 경우 수축이 심하게 되어 고무가 양 옆으로 빠져 나오게 되고 압축하중에 대한 견디는 능력이 떨어질 것이다. 고무 층의 두께를 얇게 하면 옆으로 빠져나오는 현상을 줄일 수 있고, 압축하중에 대한 수축량도 줄일 수 있다. 미끄러짐에 의한 변형 시에는 상/하부 판이 전단변형 영

향을 주지 않으므로 고무의 탄력에 수평강성이 좌우하게 된다.

적층고무의 단면을 [그림 3-16]에 나타내었다. 적층고무의 구성하고 있는 파라메타를 고무직경 D , 고무층 1개 두께 t_s 및 고무층수 n 이다. 이는 1차 형상계수 S_1 과 2차 형상계수 S_2 로 결정된다. 1차 형상계수 S_1 은 다음 식으로 정의된다.

$$S_1 = \frac{\text{고무의 유효면적(수압면적)}}{\text{고무 1층의 자유표면적(측면적)}} \quad (\text{식 3-13})$$

2차 형상계수 S_2 는 다음과 같이 정의된다.

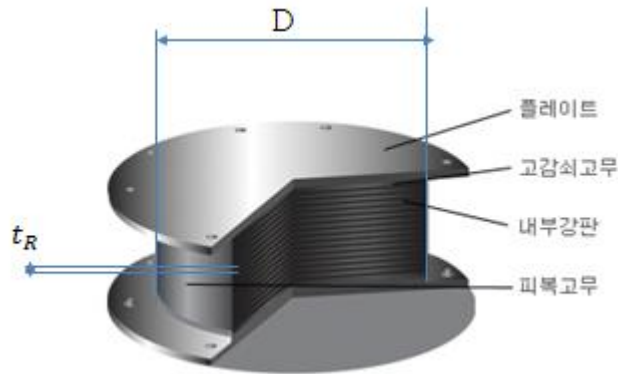
$$S_2 = \frac{\text{고무 직경}}{\text{전 고무층 두께}} \quad (\text{식 3-14})$$

S_1 은 주로 수직·휨 강성에, S_2 는 좌굴하중과 수평강성에 관계한다. 원형단면 적층고무의 경우 S_1 과 S_2 의 계산은 (식 3-15)를 따른다. 구속면적은 적층고무 중간에 있는 강판에 의해 고무층이 영향을 받는 면적이다. 중심에 홀이 있는 경우는 자유표면적과 구속면적 산출시 고려한다.

$$S_1 = \frac{\pi D^2/4}{\pi D t_R} = \frac{D}{4t_R}, S_2 = \frac{D}{nt_R} \quad (\text{식 3-15})$$

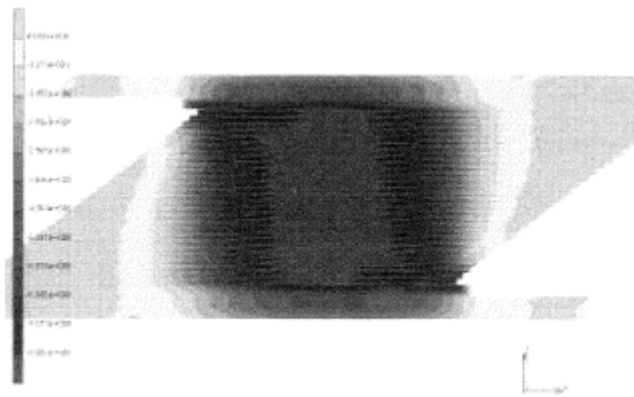
적층고무가 압축력을 받으면 고무는 바깥방향으로 밀려 변형되려 하지만 중간에 위치한 강판에 의해 구속되어 고무재질의 비압축성(포아송비 약 0.5)에 의해 고무 중심부에 3축 압축응력상태가 형성된다. 3축 압축응력상태는 고무층 안에 물이 고여 있는 것처럼 고무층에서 ‘새지 않는 물’과 같이 보이는 현상이다. 따라서 압축에 의한 변형량은 매우 작고 같은 단면적을 가진 철근콘크리트 기둥 1개와 같은 압축강성을 발휘할 수 있다. 또한 적층고무의 압축파괴시험에서 중간 강판의 인장파괴에 의해 고무의 구속이 약해지는 것으

로 보아 압축한계내력은 중간 강판의 강도에 지배되는 것으로 판단된다.



[그림 3-16] 적층고무의 단면

적층고무는 미끄러짐이 작용할 때 내부 강판은 고무층의 전단변형을 제한하지 않으므로 고무만의 탄력으로 수평강성을 발휘한다. 적층고무가 크게 변형된 경우도 하중지지능력은 보유하고 있다. 이는 [그림 3-17]과 같이 적층고무의 최상하면의 중복 부분에 대해 지속적으로 3축 압축응력상태가 유지되기 때문이다. 이 최상하면의 중복 부분에서 대부분의 압축하중이 지지되어 이 부분의 압축응력도는 상당히 커지는 반면 인장반력은 매우 작아진다. 또한 전단변형 시에는 고무에 의한 ‘물’의 구속효과가 작아지므로 압축강성은 거의 최상하면의 중복 부분의 단면적에 비례하여 작아진다. 수직 축소량에 미치는 영향은 미미한 수준이다. 이와 같이 적층고무는 큰 하중을 지지하면서 수평방향으로 크게 변형하는 것이 가능하다.



[그림 3-17] 적층고무의 수직방향 응력분포
($\sigma=300\text{kg/cm}^2$, $\gamma=300\%$)의 해석 예

나)면진장치의 성능

면진에 있어 분리장치는 기둥과 같이 오랜 시간에 걸쳐 건물의 하중을 받치는 연직성능과 지진 발생 시 일반 기둥에 비해 수평변형이 보다 안정된 성능이 요구된다. 수평변형에 안정된 성능은 제품 편차 고려 시에도 만족하여야 한다.

(1)연직성능

면진장치는 오랜 시간 하중을 받을 경우의 축력과 지진 발생 시 수평변형을 동반할 때의 축력에서도 건축물을 안전하게 지탱할 수 있는 것으로 하고 각 면진장치 간의 연직 변형량에 많은 차이가 발생하지 않도록 긴 기간 적용되는 면압을 적절히 설정한다.

적층고무의 압축강서 K_v 는 종탄성계수 E_c 를 이용하여 다음 식으로 계산한다.

$$K_v = \frac{E_c A}{T_R} \quad (\text{식 3-16})$$

여기서,

$$E_{ab} = \frac{E_c E_b}{E_c + E_b}$$

$$E_c = 3G(1 + 2_k S_1^2)$$

$T_{R=}$ 전고무층두께

A = 단면적

전단변형이 커지면 최상하면 중복지면의 면적이 감소하기 때문에 압축강성도 떨어진다. 전단변형이 커지면 고무재료의 변형경화에 의해 비례적으로 떨어지지 않는 경우도 있다. 따라서 (식 3-17)과 같이 전단변형 시의 압축강성 하한값 K_{ve} 를 정의한다.

$$K_{ve} = \frac{A_e}{A} K_V \quad (\text{식 3-17})$$

여기서,

A_e = 유효지지면적

전단변형이 δ 일 때 A_e 는 적층고무의 최상하면의 중복지면 면적에 의해 (식 3-18)에 의해 계산 된다.

$$A_e = \left[1 - \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{\delta}{D} \sqrt{1 - \left(\frac{\delta}{D} \right)^2} + \sin^{-1} \left(\frac{\delta}{D} \right) \right\} \right] A \quad (\text{식 3-18})$$

$$\cong \left[1 - 1.2 \frac{\delta}{D} \right] A \left(\frac{\delta}{D} \leq 0.6 \right)$$

적층고무의 중심에 홀이 있는 경우에는 홀을 고려한 1차 변형계수를 이용하여 구한다.

적층고무가 인장력을 받을 경우 내부의 압력은 부압상태가 되고 내부에 순

상이 발생한다. 따라서 인장강성에 대한 이론식은 없으며, 인장강성에 대해 인장시험 등의 결과로부터 압축강성에 비해 1/5~1/10 정도를 보유하는 것으로 나타났다. 인장강성은 전단변형의 크기에는 영향을 받지 않으나 큰 인장을 경험한 경우 인장변형에 대한 저항은 저하한다. 인장강성에 대해서는 적층고무의 부착방법과 접촉면의 치수 등에도 영향을 받기 때문에 실험 결과를 적절히 평가할 필요가 있다.

(2) 수평성능

면진장치는 지진 시 축력 하에서도 복원력을 상실하지 않고 수평한계변형까지 안정되게 변형할 수 있는 것으로 한다.

적층고무의 수평강성은 우레탄의 수평력과 압축력이 작용하는 경우 다음 식으로 구할 수 있다.

$$K_H = \frac{P^2}{2k_r q \tan\left(\frac{qH}{2}\right) - PH}, \quad q = \sqrt{\frac{P}{k_r} \left(1 + \frac{P}{k_s}\right)} \quad (\text{식 3-19})$$

여기서,

P = 압축하중

H = 고무층과 중간강판의 총두께 ($= T_R + T_S$)

T_s = 중간강판전두께

유효전단강성 k_s 와 유효휨강성 k_r 은 다음 식으로 구한다.

$$k_s = (G_A)_{eff} = G_A \frac{H}{T_R}, \quad k_r = (EI)_{eff} = E_{rb} I \frac{H}{T_R} \quad (\text{식 3-20})$$

여기서,

$$E_{rb} = \frac{E_r E_b}{E_r + E_b}$$

$$E_r = 3G \left(1 + \frac{2}{3} x S_1^2 \right)$$

$I =$ 단면 2차모멘트

(식 3-20)의 우변에서 $\frac{H}{T_R}$ 은 고무층과 중간 강판을 고려한 유효강성이다. 즉, 고무층만의 전단강성과 휨강성인 $\frac{G_A}{T_R}$, $\frac{E_{rb}I}{T_R}$ 과 적층고무 전체의 유효강성 $\frac{(G_A)_{eff}}{H}$, $\frac{(EI)_{eff}}{H}$ 를 등가시켜 구할 수 있다.

(식 3-19)는 압축하중 P 가 0에 근접할 때 $\tan\left(\frac{qH}{2}\right) \cong \frac{qH}{2}$ 가 되는 것을 고려하면 P 가 0일 때의 수평강성 K_{H0} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_{H0} = \frac{GA}{T_R} \quad (\text{식 3-21})$$

(식 3-21)은 적층고무의 수평강성을 평가하기 위해 매우 효과적인 식이다. 단, 식의 적용에 대해서는 적층고무의 전단변형이 탄성이고 휨변형 성분에 대해서는 무시 가능한 형상이어야 한다. 압축하중의 변동에 대해 수평강성의 변동이 작아지는 형상이어야 한다는 것이 (식 3-21)의 적용조건이며, 이는 적층고무의 설계에서도 중요하다.

제3절 면진장치 개발 및 구조설계

1) 면진장치 개발 배경

수·배전반은 전기의 분배와 배전계통 제어 및 보호에 필요한 전력기기인 진공차단기, 보호계전기, LBS 및 메타등과 같은 배전기기가 취부되어 있는 전기설비를 말하며, 고압배전반, 저압배전반, 전동기제어반, 분전반 등으로 분류된다. 수·배전반은 지진 시 발생하는 진동으로 인해 그 기능을 상실하거나 파손될 수 있다. 예로, 수·배전반 내부에 취부 되어져 있는 배전기기의 결속 부위가 풀리거나 연결되어 열반되어져 있는 수·배전반의 체결부위가 풀려 전도될 수 있다. 특히, 수·배전반이 전도되는 경우 기능상실 뿐만아니라 합선 등으로 인해 화재가 발생 할 수 있다. 지진에 의한 전도 등을 예방하기 위하여 최근 들어 면진형 수·배전반에 관한 개발이 활발하게 이루어지고 있으며 산업현장에 설치되어 사용되고 있다.

수·배전반은 지진과 같은 진동에 의해 수직 또는 수평 한쪽방향 으로만 거동하지 않으며 좌우상하 등으로 기울어지는 방향으로 거동하는 등 임의방향으로 거동하게 된다. 면진형 수·배전반에 적용된 종래의 기술들은 수직강성으로만 건디는 방진요소와 수평강성으로만 건디는 방진요소를 결합시켜 지진 진동을 감쇠시키고 있으나 그 외 방향의 진동에 대해서는 즉각적인 대응이 어려워 임의방향 진동에 대한 감쇠 효과가 떨어진다는 문제점이 있었다.

특히, 수·배전반이 기울어지는 방향의 거동에 의해 수·배전반이 전도될 수 있다. 면진형 수·배전반은 일반적으로 방진스프링, 방진고무 등을 이용하여 진동 감쇠를 실현하고 있다. 고무는 스프링에 비해 진동 폭이 크지 않고 진동에 대한 과도응답시간이 짧아 신속한 진동 감쇠효과 있는 반면 경화로 인해 진동 감쇠 성능이 저하 될 수 있다는 단점이 있다. 스프링은 고무에 비해 진동 감쇠 성능의 변화가 없다는 장점이 있으나 진동에 대한 과도응답시간이 길고 진동 폭이 크기 때문에 임의방향에 대한 진동 감쇠 효과가 떨어진다는 단점이 있다.

본 연구에서는 방진 스프링과 방진고무의 단점들을 상호 보완하여 지진 발생에 의한 임의방향 진동에 대한 감쇠 효과가 신속하게 이루어질 수 있을 뿐만 아니라 진동 감쇠 성능이 오랜 기간 유지될 수 있는 면진장치를 개발하여 실제 사용하는 수·배전반에 적용하여 면진형 수·배전반을 개발하는 데 있다.

가) 면진장치 구성

임의방향 진동의 감쇠 기능을 갖는 면진형 수·배전반은 사각형 모양의 형상을 가진 철 구조물로 구성되어 내부에 하나 이상의 배전기기가 취부 되고 배전반의 바닥면에 지진 발생 시 진동에 견디는 면진장치를 포함한다.

면진장치의 하부방진모듈은 평판 형태로 밑면의 가장자리 둘레에 원형의 홈이 있고 상면이 하우징의 하면에 고정 결합되는 금속소재의 상부 마운트로 구성되고 상부 마운트는 평판 형태로 상면의 가장자리 둘레에 원형의 홈이 형성된다. 하면이 바닥면에 고정 결합되는 금속소재의 하부마운트는 상하면으로부터 길이방향의 중간 부분으로 갈수록 직경이 점차적으로 작아지는 오목한 원기둥 형태로 중심에 상하면을 관통하는 일자형의 관통공이 형성되어 있으며 상면이 상부 마운트의 하면에 밀착되고 하면이 하부마운트의 상면에 밀착되는 고무소재의 우레탄으로 구성된다. 압축코일스프링 형태로 형성되어 상부 마운트의 하면과 하부마운트의 상면에 의해 양단이 차폐되어 있는 우레탄의 관통공의 내부에 압축된 상태로 삽입되는 소구경금형스프링과 압축코일스프링 형태로 구성되어 압축된 상태로 한 면이 상부마운트의 원형 홈에 끼워지고 타단이 하부마운트의 원형 홈에 끼워짐으로써 우레탄을 둘러싸는 대구경금형스프링을 포함한다.

우레탄은 중심축의 둥근 끝부분이 절단되어 원형평면의 말단 면을 갖는 두 개의 반구가 원형평면 형상의 말단 면끼리 접촉된 구조의 오목한 원기둥 형태로 형성되고, 우레탄의 관통공의 직경은 우레탄의 중간 단면에 해당하는 원형평면의 직경보다 작을 수 있다. 소구경금형스프링은 바닥면의 진동에 따라 우레탄이 변형될 때에 소구경금형스프링의 외주면이 우레탄의 관통공의 내주면에 슬라이딩되어 이동 가능한 직경을 가질 수 있다. 상부마운트의 하면 중

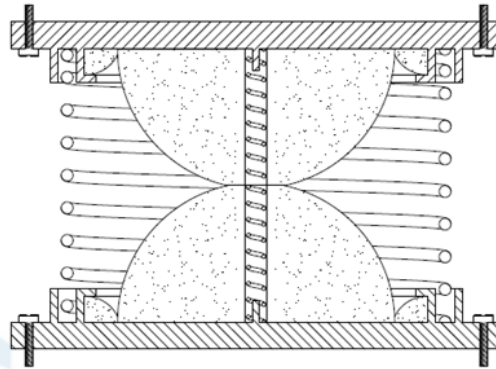
심과 하부마운트의 상면 중심에는 소구경금형스프링의 내경보다 작은 직경을 갖는 원기둥 형태의 중심돌기가 돌출되어 있고, 바닥면의 수평방향 진동에 따라 소구경금형스프링의 내경과 중심돌기의 직경 사이의 차이만큼 우레탄은 상부마운트의 하면과 하부마운트의 상면 사이에서 수평방향으로 슬라이딩되어 이동될 수 있다.

하부마운트의 원형의 홈은 하부마운트의 상면으로부터 동심원 형태로 돌출된 두 개의 원형돌기 사이의 틈 형태로 형성되고, 하부마운트의 상면의 두 개의 원형돌기 중 내측 원형돌기의 말단은 횡단면 “L” 형으로 꺾어져 연장되고, 면진형 수·배전반은 횡단면 부채꼴의 링 형태로 형성되어 만곡면이 노출되도록 하부마운트의 내측 원형돌기의 “L” 형 말단과 상면 사이의 홈에 끼어지는 하부고무링을 더 포함하고, 하부고무링의 만곡면의 하단 둘레와 우레탄의 하단 둘레는 서로 맞닿아 있어 바닥면의 수평방향 진동이 사라지면 우레탄의 하단은 우레탄과 하부고무링 각각의 탄성에 의해 하부마운트의 중심 측으로 복귀할 수 있다.

상부마운트의 원형의 홈은 상부마운트의 하면으로부터 동심원 형태로 돌출된 두 개의 원형돌기 사이의 틈 형태로 형성되고, 상부마운트의 하면의 두 개의 원형돌기 중 내측 원형돌기의 말단은 횡단면 “L” 형으로 꺾어져 연장되고, 면진형 수·배전반은 횡단면 부채꼴의 링 형태로 형성되어 만곡면이 노출되도록 상부마운트의 내측 원형돌기의 “L” 형 말단과 하면 사이의 홈에 끼어지는 상부고무링을 더 포함하고, 상부고무링의 만곡면의 상단 둘레와 우레탄의 상단 둘레는 서로 맞닿아 있어 바닥면의 수평방향 진동이 사라지면 우레탄과 상부고무링 각각의 탄성에 의해 우레탄의 상단은 상부마운트의 중심 측으로 복귀할 수 있다.

우레탄의 상단 표면과 하단 표면 각각은 오목부위와 볼록 부위가 교대로 반복되는 해바라기 형태로 형성되고, 하부고무링의 만곡면의 하단 둘레와 우레탄의 하단 둘레의 볼록 부위들과 서로 맞닿아 있고, 상부고무링의 만곡면의 상단 둘레와 상기 우레탄의 상단 둘레의 볼록 부위들과 서로 맞닿을 수 있다. 우레탄의 상단 표면과 하단 표면 각각은 오목부위와 볼록부위가 교대로 반복되는 해바라기 형태로 형성되고, 면진형 수·배전반은 각각이 압축코일스프링

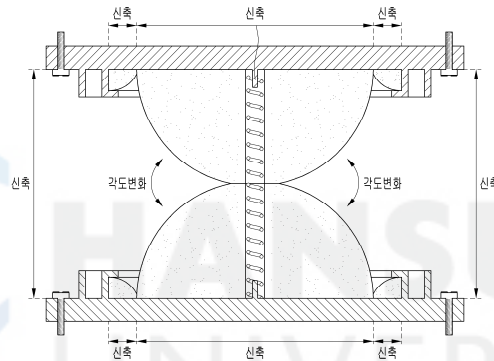
형태로 형성되어 하부고무링의 만곡면의 하단 둘레와 우레탄의 하단 둘레의 볼록 부위들 사이에 삽입되는 복수 개의 하부스프링을 포함한다. 각각이 압축 코일스프링 형태로 형성되어 상부고무링의 만곡면의 상단 둘레와 우레탄의 상단 둘레의 볼록 부위들 사이에 삽입되는 복수 개의 상부스프링을 더 포함할 수 있다.



[그림 3-18] 면진장치 구성도

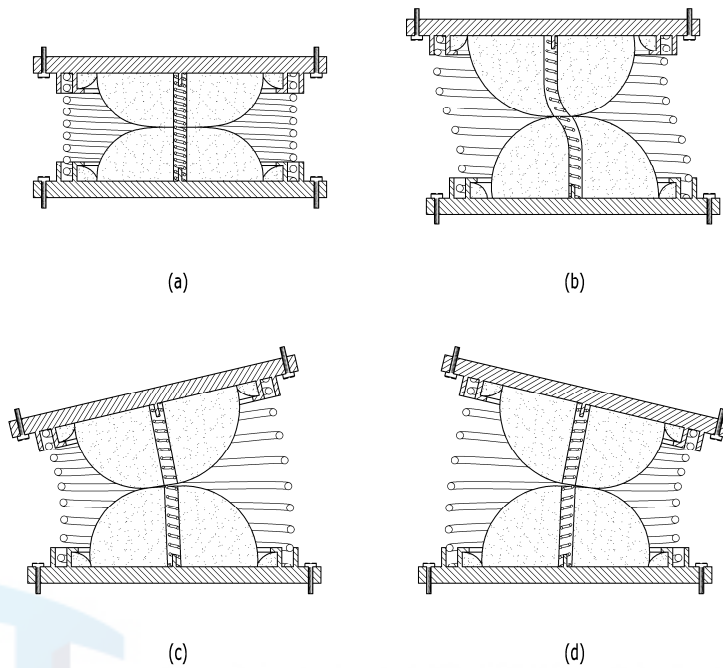
[그림 3-18]의 구성도에 도시된 바와 같이, 우레탄의 관통공 직경은 우레탄의 중간 단면에 해당하는 원형평면의 직경보다 작고 우레탄의 관통공에 소구경금형스프링이 삽입되어 있기 때문에 두 개의 반구는 수평방향의 진동에 따라 그 원형평면 형상의 평평한 말단 면끼리 서로 미끄러지게 된다. 이에 따라, 우레탄은 수평방향의 진동에 따라 두 개의 반구가 큰 저항 없이 서로 어긋나게 위치될 수 있어 수평방향의 탄성이 향상될 수 있다. 또한, 소구경금형스프링은 바닥면의 진동에 따라 우레탄이 변형될 때에 소구경금형스프링의 외주면이 우레탄의 관통공 내주면에 수직방향으로 슬라이딩되어 이동 가능한 직경을 갖기 때문에 두 개의 반구는 그 원형평면 형상의 말단면 범위에서만 슬라이딩 이동되어 서로 어긋나게 위치하게 된다. 이에 따라, 하부방진모듈에 매우 큰 강도의 수평방향 외력이 가해지더라도 상측 반구가 하측 반구의 아래에 위치하는 경우는 발생하지 않게 된다. 만약, 상측 반구가 하측 반구의 아래에 위치하게 된다면 원래의 형태로 원활하게 복원이 되지 않을 수 있다.

부마운트의 하면 중심과 하부마운트의 상면 중심에는 소구경금형스프링의 내경보다 작은 직경을 갖는 원기둥 형태의 중심돌기가 돌출되어 있기 때문에 바닥면의 수평방향 진동에 따라 소구경금형스프링의 내경과 중심돌기의 직경 사이의 차이만큼 우레탄은 상부마운트의 하면과 하부마운트의 상면 사이에서 수평방향으로 슬라이딩되어 이동될 수 있다. 이에 따라, 상부마운트의 하면과 하부마운트의 상면 사이에서 우레탄이 수평방향의 어느 한 방향으로 과도하게 이동됨이 방지될 수 있어 우레탄이 원래의 위치로 원활하게 복귀될 수 있다.



[그림 3-19] 면진장치 신축기능

상부고무링은 횡단면 부채꼴의 링 형태로 형성되어 만곡면이 노출되도록 상부마운트의 내측 원형돌기의 “L” 형 말단과 하면 사이의 홈에 끼어진다. 상부고무링의 만곡면의 상단 둘레와 우레탄의 상단 둘레는 서로 맞닿아 있어 바닥면의 수평방향 진동이 사라지면 우레탄과 상부고무링 각각의 탄성에 의해 우레탄의 상단은 상부마운트의 중심 측으로 복귀하게 된다.

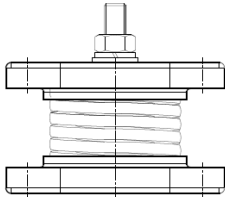
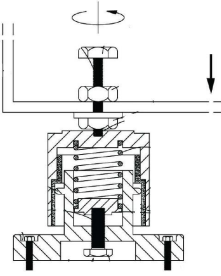
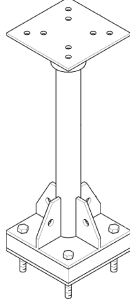
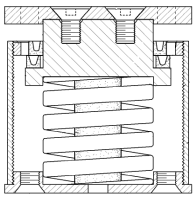


[그림 3-20] 면진장치 변형 모형

[그림 3-20]의 (b)에 도시된 바와 같이, 상부고무링과 우레탄은 수평방향의 진동에 의해 상부고무링의 만곡면의 상단 둘레와 우레탄의 상단 둘레가 서로 압착되어 눌리게 되면 그 각각의 복원력에 의해 서로 튕겨내게 되는 구조를 가짐에 따라 우레탄의 상단이 상부마운트의 중심 측으로 빠르게 복귀할 수 있어 수평방향의 탄성이 향상될 수 있다.

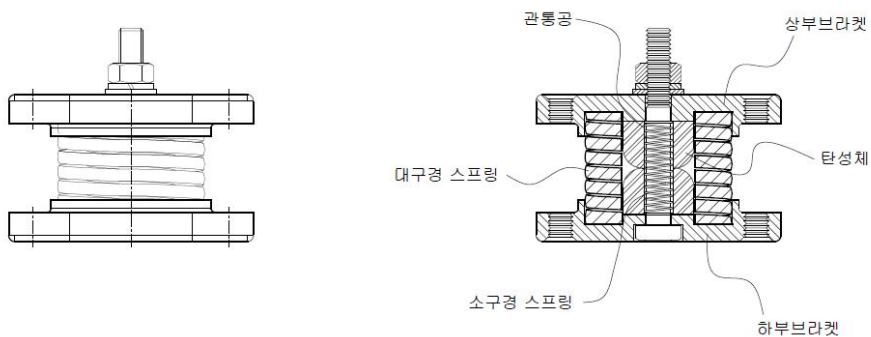
하부고무링은 횡단면 부채꼴의 링 형태로 형성되어 만곡면이 노출되도록 하부마운트의 내측 원형돌기의 “L” 형 말단과 상면 사이의 홈에 끼어진다. 하부고무링의 만곡면의 하단 둘레와 우레탄의 하단 둘레는 서로 맞닿아 있어 바닥면의 수평방향 진동이 사라지면 우레탄의 하단은 우레탄과 하부고무링 각각의 탄성에 의해 하부마운트의 중심 측으로 복귀한다. [표 3-6]은 기 개발된 면진장치의 성능과 재료 비교표이다.

[표 3-6] 면진장치 성능비교표

	개발 면진장치	A사	B사	C사
개발 모형				
성능	수직/수평/경사방향 진동감쇠	수직방향 진동감쇠	수직방향 진동감쇠	수직/수평방향 진동감쇠
재료	소/대구경 용수철 고감쇠 적층고무 (폴리우레탄)	대구경 용수철	고감쇠 적층고무	소구경 용수철 고감쇠 적층고무

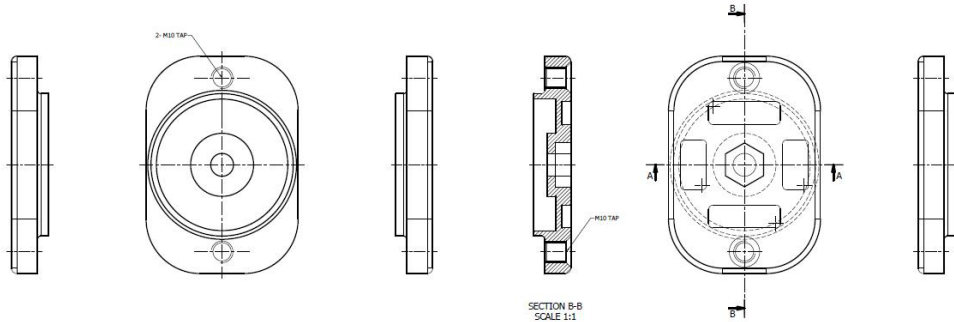
나) 면진장치의 설계

[그림 3-21]은 수·배전반에 적용 가능한 면진장치의 외형도를 나타낸 것이다. 외형 구성품 간의 배치 위치와 명칭을 기술하였다.



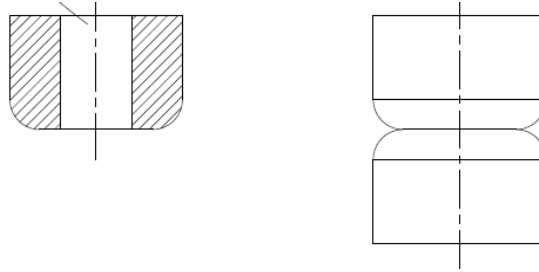
[그림 3-21] 면진장치 외형도

[그림 3-22]은 면진장치의 압축스프링 상/하부 하우징으로 알루미늄 (Al) 6061 계열의 소재를 사용하여 제작하였다. AL-6061계열의 소재는 경도가 높은 편은 아니지만 성형이 비교적 용이하고 부드러운 느낌으로 충격을 잘 흡수하는 특징으로 면진장치에 널리 사용되고 있다.



[그림 3-22] 압축스프링 상/하부 브라켓(하우징)

[그림 3-23]는 면진장치의 중요한 구성품 중에 하나인 탄성체로 쇼어경도 A95를 가지는 에스테르계 폴리우레탄(Polyurethane) 재질을 사용하였다. Z.Wirpsza(1993)는 1849년 독일의 Wurtz 등에 의해 우레탄이 소개된 후 1937년 독일의 I.G. Farben사와 O. Bayer교수 등의 연구진에 의해 세계 최초로 폴리우레탄이 합성되고 상용화되기 시작하였다. C. Hepburn(1992)는 폴리우레탄은 내구성, 내약품성, 내수성 및 건조성 등이 우수한 고분자로서 도료, 플라스틱, 고무, 접착제, 섬유 등의 여러 가지 형태로 합성될 수 있다는 장점으로 인해 공업적 뿐만 아니라 상업적으로도 관심이 집중된다고 하였다. 폴리우레탄 성질 중 HS(Hard segment)계는 화학성분 중 수소에 의해 성질이 강하게 합성되어 물리적으로 슬라이딩을 방지하는 특성을 가진다.

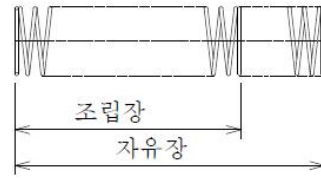
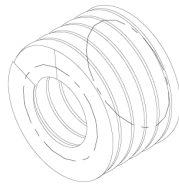
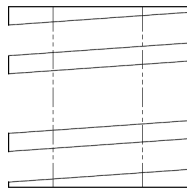


[그림 3-23] 탄성체 외형도



[그림 3-24] 에스테르계 폴리우레탄 탄성체

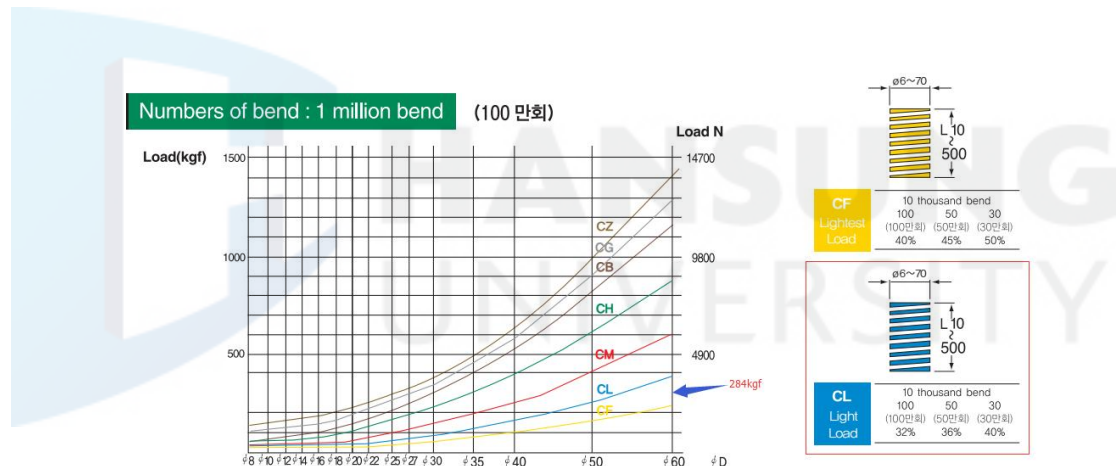
[그림 3-25]는 면진장치에 적용된 대구경 금형 압축스프링 CL 60×60과 소구경 압축스프링에 대한 외형도 이다. 대구경 금형스프링은 파란 금형스프링을 사용하고 파란 금형스프링은 경하중에 이용 가능하며, 면진장치에 적용된 파란 금형스프링은 284kgf의 하중에 14mm의 변위량을 가지는 스프링을 사용하였다. 소구경 압축스프링은 STS-WPB 재질을 사용하였고 선경 0.7mm, 중심경 11.1mm를 적용하였다. 소구경 금형 압축스프링의 자유장 52mm, 조립장은 38mm이다.



(a) 대구경 금형 압축 스프링

(b) 소구경 압축 스프링

[그림 3-25] 대/소구경 금형 압축 스프링



[그림 3-26] 금형 압축스프링 특성표

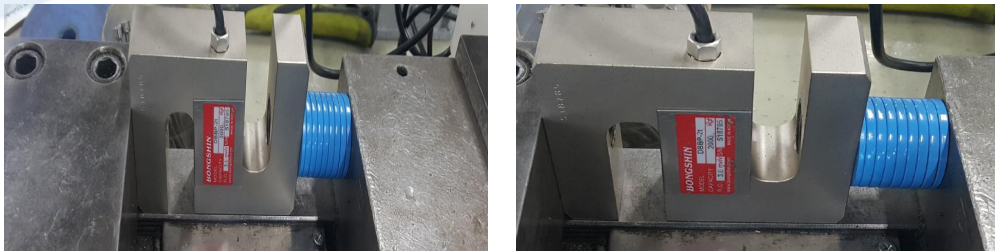
輕荷重
경하중
LIGHT LOAD

CL

하중 荷重 $\pm 10\%$
직각도 直角度 2° 以下
자유장 自由長 50m/m 以下 $\pm 0.5\text{m/m}$
55m/m 以上 $\pm 1\%$

呼稱 호칭 Model	外徑 외경(mm) Outer Dia.	內徑 내경(mm) Inner Dia.	自由長 자유장(mm) Free length	定數 정수(kg/mm) spring constant	30萬 (0.3million)		50萬 (0.5 million)		100萬 (1 million)	
					變形量 변형량(mm) Deflection	荷重 하중(kg) Load	變形量 변형량(mm) Deflection	荷重 하중(kg) Load	變形量 변형량(mm) Deflection	荷重 하중(kg) Load
CL 60×60			60	20.25	24.0		21.6		19.2	
70			70	17.35	28.0		25.2		22.4	
80			80	15.18	32.0		28.8		25.6	
90			90	13.50	36.0		32.4		28.8	
100			100	12.15	40.0		36.0		32.0	
125			125	9.72	50.0		45.0		40.0	
150			150	8.10	60.0		54.0		48.0	
175			175	6.94	70.0		63.0		56.0	
200	60	30	200	6.07	80.0	486	72.0	438	64.0	389
225			225	5.40	90.0		81.0		72.0	
250			250	4.86	100.0		90.0		80.0	
275			275	4.42	110.0		99.0		88.0	
300			300	4.05	120.0		108.0		96.0	
350			350	3.47	140.0		126.0		112.0	
400			400	3.04	160.0		144.0		128.0	
450			450	2.70	180.0		162.0		144.0	
500			500	2.43	200.0		180.0		160.0	

[그림 3-27] CL 60×60 물성표



[그림 3-28] 파란 금형 압축스프링 하중 시험

2) 면진장치 시험

가) 폴리우레탄 특성시험

수·배전반에 적용되는 면진장치에는 폴리우레탄, 대구경/소구경 금형스프링 등이 있는데 폴리우레탄에 대한 신뢰성을 확보하기 위한 방법으로 공인기관의 시험을 실시하였다. 시험을 실시하기 위한 장비로는 [그림 3-29] 만능재료시험기를 사용하였다.

본 만능재료시험기는 유압 Valve의 힘으로 재료의 물리적 특성시험을 하기 위한 시험기로 시험 종류에 따라 KS규격에 의한 시험이 될 수 있도록 시험기를 제작하였다. 시험의 진행 상태와 Data의 분석을 한눈에 관찰 할 수 있으며, 최대용량 1 MN 이상의 강성을 가지는 Frame 구조이다. 본 장비는 한국 산업규격 표시제품 KS B 5541 규격을 기준으로 시험을 진행 할 수 있는 시험기로, 시험 하중은 전자식 감응 장치인 압력 Cell로 감지 및 표시된다. 각종 Sensor와 교신은 RS232C or USB 통신방식에 의하여 처리 될 뿐만 아니라, Micro Process가 내장되어 각각의 과부하에 즉각 응답 할 수 있는 확실한 안전장치가 구축되어져 있다. 시험치수, 단면적, 평균값, 하중 등 각종 자료의 입력 및 계측장치는 D/B화 되어 Excel Program으로도 편집이 가능한 응용 Program에 의하여 운용 된다. Computer의 Graph Scale은 Auto Scale로 화면에 Graph 범위를 벗어날 경우 자동으로 바뀌어 사용자가 보기에 아주 편리하게 되어 있고, 시험의 종류로는 인장, 각종 압축 시험 등을 할 수 있어야 하며, 하중 : 변위, 하중 : 시간, 응력 : 변형률 등의 시험 그래프가 출력된다. 면진장치에 적용된 폴리우레탄의 온도의 변화에 따른 하중 : 변위 시험을 진행하여 관련사항을 직접 확인 하였다.



[그림 3-29] 만능재료시험기

[표 3-7]은 면진장치에 적용한 폴리우레탄의 물리적인 특성값을 나타낸 것이다. 미국재료시험협회(American society for testing materials, ASTM)에 따라 각 물성치에 대한 시험을 실시하였고, 기준에 만족하는 재료를 사용하여 시편을 제작하였다.

[표 3-7] 폴리우레탄 시편 물성표

물성	규격	단위	기준	검사치
경도	ASTM D 2240	<i>Shore A</i>	91-95	95
비중	ASTM D 792	g/cm^3	1.21-1.25	1.23
인장강도	ASTM D 412	<i>Mpa</i>	>25.0	35.0~36.1
신장률		%	>350	473~565
100% 탄성		<i>Mpa</i>	>12.0	15.5~16.5
찢힘강도	ASTM D 624	<i>KN/m</i>	>200	232~240
마찰손실	ASTM D 5963	mm^2	—	117.8~149.3
용해도지수	ASTM D 1238	$cm^2/10min$	9.0-16.0	9.0~11.0
YIE313(D65/10)	ASTM E 313	—	<8.0	3.2~3.6
(혼)탁도/4mm		%	<10.0	1.5~3.7
수분함량		<i>ppa</i>	<500	11~199
주기 : 인장/찢힘 검사 속도 : 500mm/min				

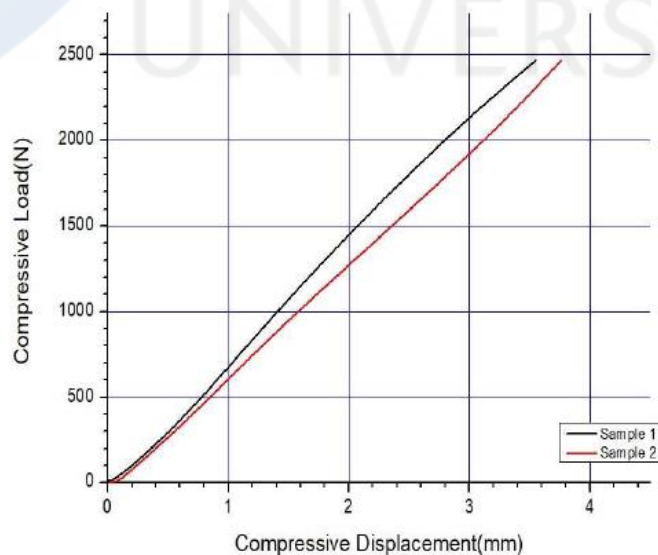
폴리우레탄 시료의 시험편은 [그림 3-22]처럼 지름 28.5mm, 높이 18.6mm 링 형태로 제작하였고 시험편에 대한 검사결과는 [표 3-8]과 같다.

[표 3-8] 우레탄 시편 시험결과

시험결과				
시험항목	단위	시료구분	결과치	시험방법
2 452 N 압축시 변위량[*1]	mm	-	1.7	KS B 5541 : 1985
2 452 N 압축시 변위량[*2]	mm	-	3.6	KS B 5541 : 1985
2 452 N 압축시 변위량[*3]	mm	-	4.1	KS B 5541 : 1985
2 452 N 압축시 변위량[*4]	mm	-	4.9	KS B 5541 : 1985

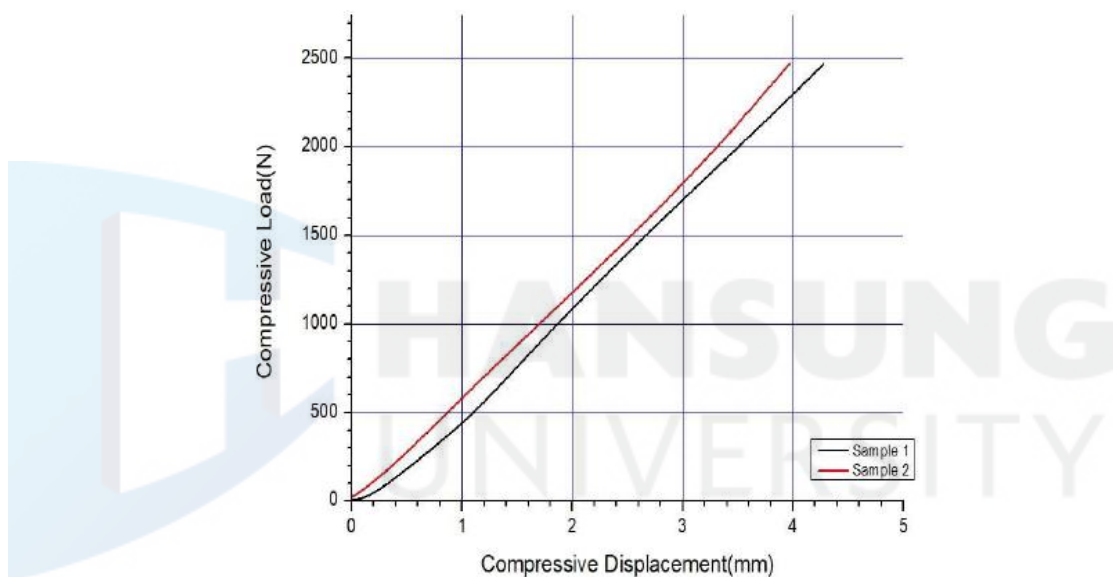
* 시험속도 : 3 mm/min, 시험편 크기 : 지름 28.5 mm × 높이 18.6 mm (링 형태)
 [*1] ((23 ± 2) °C) 에서 압축시험 진행
 [*2] ((-20 ± 2) °C) 에서 압축시험 진행
 [*3] ((60 ± 1) °C) 에서 압축시험 진행
 [*4] ((60 ± 1) °C, 168 h) 후 압축시험 진행

[그림 3-30] 압축시험 그래프는 폴리우레탄 시료의 시험편을 [그림 3-21] 만능재료시험기의 온도챔버(Temperature Chamber)의 온도 23°C ±2°C에서 3mm /min의 속도로 0~2500N 까지의 힘으로 KS B 5541:1995의 시험방법으로 수행한 압축시험 그래프이다. 최대 2500N 압축 시 폴리우레탄 시편 변위량은 3.6mm로 상온에서 변위량 변화는 없는 것으로 나타났다.



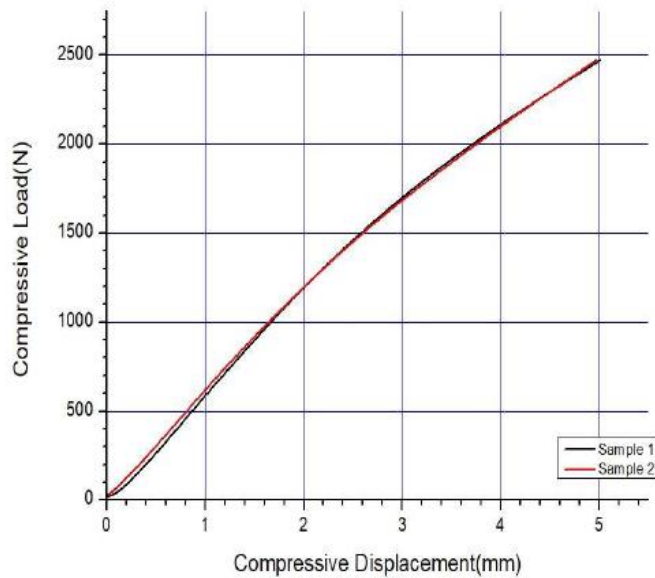
[그림 3-30] 상온(23°C) 압축시험 그래프

[그림 3-31] 압축시험 그래프는 폴리우레탄 시료의 시험편을 [그림 3-29] 만능재료시험기의 온도 챔버(Temperature Chamber)의 온도 $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 에서 3mm /min의 속도로 0~2500N까지의 힘으로 KS B 5541:1995의 시험방법으로 수행한 압축시험 그래프이다. 최대 2500N 압축 시 폴리우레탄 두 개의 시험편 모두 변위량은 4.1mm로 고온에서 일정량의 변위량 변화가 있는 것으로 나타나 폴리우레탄은 고(高)온도에 대한 연성의 성질이 있는 것으로 나타났다.



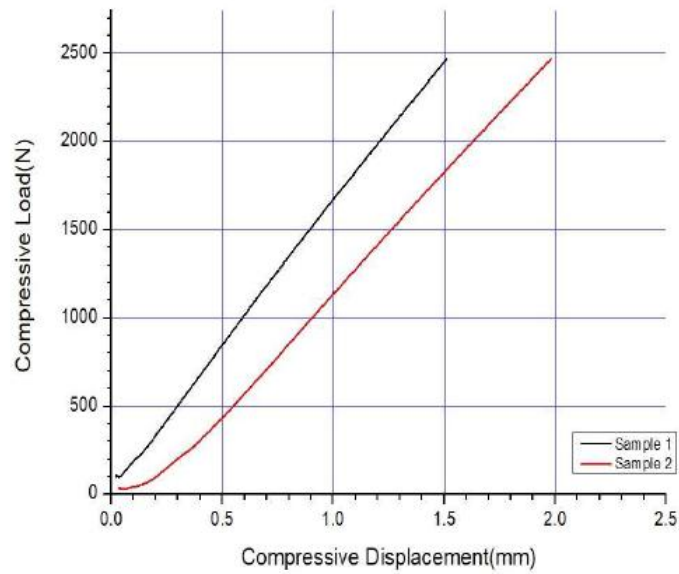
[그림 3-31] 챔버(60°C) 압축시험 그래프

[그림 3-32] 압축시험 그래프는 폴리우레탄 시료의 시험편을 [그림 3-29] 만능재료시험기의 온도 챔버(Temperature Chamber)의 온도 $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 에서 168시간의 노화를 진행하고 3mm /min의 속도로 0~2500N까지의 힘으로 KS B 5541:1995의 시험방법으로 수행한 압축시험 그래프이다. 최대 2500N 압축 시 폴리우레탄 두 개의 시험편 모두 변위량은 4.9mm로 고온에서 168시간 두 개의 변수와 고온 하나의 변수를 적용해 노화를 진행한 시료와의 변위량 변화는 없는 것으로 나타났다.



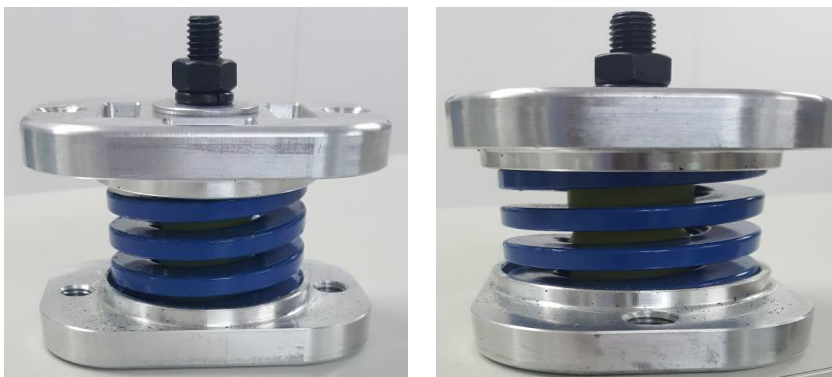
[그림 3-32] 챔버(60℃, 168h) 압축시험 그래프

[그림 3-33] 압축시험 그래프는 폴리우레탄 시료의 시험편을 [그림 3-29] 만능재료시험기의 온도 챔버(Temperature Chamber)의 온도 $-20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 에서 3mm /min의 속도로 0~2500N까지의 힘으로 KS B 5541:1995의 시험방법으로 수행한 압축시험 그래프이다. 최대 2500N 압축 시 폴리우레탄 두 개의 시험편 모두 변위량은 3.6mm로 저온에서 변위량 변화가 없는 것으로 나타나 폴리우레탄은 저(底)온도에 대한 강성의 성질이 있는 것으로 나타났다.



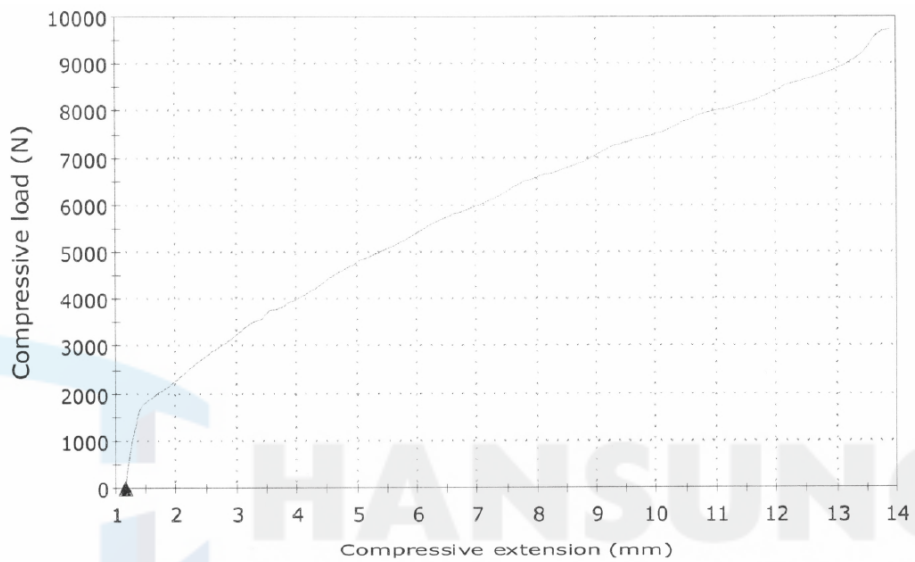
[그림 3-33] 챔버(-20℃) 압축시험 그래프

[그림 3-34]는 알루미늄 상/하부 브라켓, 금형 스프링, 폴리우레탄 등의 구성품을 조합한 면진장치 시제품을 제작하였다. 중심부에 지지볼트(M10×80)를 삽입하여 상하 조절을 가능하게 하였고, 면진장치와 연결되는 수·배전반에 고정할 수 있는 역할을 수행한다. [그림 3-35]은 시제품에 실제 힘을 가했을 때 견디는 하중시험을 실시하였다.



[그림 3-34] 면진장치 시제품

[그림 3-35]은 면진장치 시제품에 압축을 하면서 육안으로 대구경 금형 압축스프링(파란 금형스프링) 닿기 이전까지만 압축을 진행하였고, 14mm 정도 눌렀을 때 9,700 N(약 989 kg)정도 힘을 견디고 압축되었다.



[그림 3-35] 면진장치 시제품 하중 시험

제 4 장 면진장치 적용한 수·배전반의 평가시험

제1절 유한요소법을 이용한 해석적 방법 소개

1) 개요

보호배전반에 대하여 해당 설치위치의 요구응답스펙트럼(Required Response Spectrum)으로 표현되는 내진 환경 조건에서 기기가 구조적 건전성(Structural Integrity)을 유지할 수 있는지 여부를 유한요소해석을 이용하여 평가하는 방법이다. 내진해석은 해당 배전반이 위치하는 곳의 Floor Response Spectrum (FRS)을 포괄하는 Required Response Spectrum(PRS)에 대하여 해석대상이 구조적으로 안전한지의 여부를 검증하는 것이다.

2) 해석절차

내진해석의 목적은 보호배전반에 대한 내진 적합성을 해석적 방법으로 입증하기 위한 것이다. 내진해석은 지진사고가 발생하였을 때 배전반을 구성하는 구조물의 구조적 건전성(Structural Integrity)을 입증하기 위하여 실시한다.

허용기준은 적절한 해석방법의 선정에 의해 수행된 응답 결과는 기기가 그 구조적 건전성을 유지하기 위하여 허용기준을 만족하여야 한다. 여기서 구조적 건전성을 유지한다는 것은 2가지 조건 해석 결과인 최대 응력값이 허용응력 내에 있어야 하고 변위결과는 근접한 기기와 간섭을 일으키지 않도록 충분히 작은값이어야 한다.를 만족시키는 것을 의미하는 것이다. 보호배전반은 철 구조물로서 인장강도가 $420MPa$ 이고, 항복강도가 $350MPa$ 인 냉간압연강으로 구송되어 있으며 미국철강협회(AISC Sect. A5.2)의 지진 시 강구조물에 대한 허용응력 증가의 기준을 고려하여 허용응력은 항복강도의 90%인 $315MPa$ 로 한다. 해석 장비는 내진 해석을 수행하기 위하여 스펙트럼을 용이하게 수행할 수 있는 유한 요소 해석 프로그램이 필요하며 범

용 프로그램인 ANSYS ver 13.0을 사용하였다.

가) 단계1 : 동특성을 평가하기 위한 기기 검토

지진 조건하에서 어떤 방법이 기기의 성능을 가장 정확하게 나타낼 수 있는지 검토한다. 보호배전반 설치 위치의 OBE(Operating Basis Earthquake), SSE(Safe Shutdown Earthquake)에 대한 PRS, 지진계수, 시간이력 등에 의한 지진 입력 부하를 결정한다. 또한 설치위치가 결정되면 해석대상의 장착방법 및 방향을 결정한다. 장착(mounting)방법은 실제 사용되는 조건에 따라 해석 모델에 경계조건으로 부여된다.

나) 단계2 : 해석 대상 모델의 작성

기기 및 구조적 2차 지지물은 질량분포 및 강성도 특성을 적절하게 나타내도록 모델화하여 다음 단계의 공진진동수 계산과 응답 스펙트럼 해석 또는 시간이력해석을 위해 사용된다.

다) 단계3 : 응답결정

정적 계수 해석 방법은 수행이 용이하고 경제적이면서 보수적이기 때문에 기기 강도의 인지된 여유도를 갖고 선택한다. 동적해석은 기기가 강성이거나 가요성임을 나타낼 수 있으며 강성기기는 정적 해석 및 설치 위치와 관련된 지진 가속도를 이용하여 해석될 수 있다. 반면 가요성 기기는 응답 스펙트럼의 시간이력으로부터 계산된 동적 응답이나 다른 방법을 이용하여 해석된다. 다음과 같은 순서로 내진해석상의 응답을 결정한다.

- (1) 기기를 질량분포 및 강성도 특성을 적절하게 나타내는 모델을 이용하여 강성인지 가요성인지를 결정하기 위한 모드해석을 수행한다.
- (2) 동적 해석 방법 또는 정적 계수 방법 간의 해당여부를 정한다. 모델에서 요구응답스펙트럼의 차단진동수 이하에서 공진이 일어나지 않는 경우 기기는 강성으로 고려하며, 정적인 방법으로 해석할 수 있다. 가요성 기기의 경우, 응답 스펙트럼 해석 또는 시간 이력 해석을

이용하여 해석한다.

- (3) 강성기기의 경우 정적인 방법으로 해석할 수 있으며 각 기기부품에서의 지진력은 분포질량에 적절한 영주기 가속도(ZPA)를 곱하여 구한다. 가요성 기기의 경우에는 주어진 운전 기준 지진(OBE)과 안전 정지 지진(SSE)의 요구 응답스펙트럼(RRS)값을 입력하여 3차원의 개별적인 지진 성분을 사용하여 해석하며 두 가지의 수평성분과 하나의 수직성분에 기인한 응답을 자승합의 제곱근(SRSS)방법에 의해 마지막 단계에서 조합하여 구한다.

라) 단계4 : 응답에 기인한 응력해석

스펙트럼 해석에 의해 기기의 응력 및 변위 분포를 얻고 이를 허용기준과 비교하여 구조물의 적합성 여부를 결정한다.

마) 단계5 : 구조적 적합성 관점에서 기기 평가

시스템의 해석 데이터를 기록하고 기기 검증을 문서화 한다. 기기 검증 실패 시에는 재설계 또는 다른 기기를 선택한 시험을 고려한다.

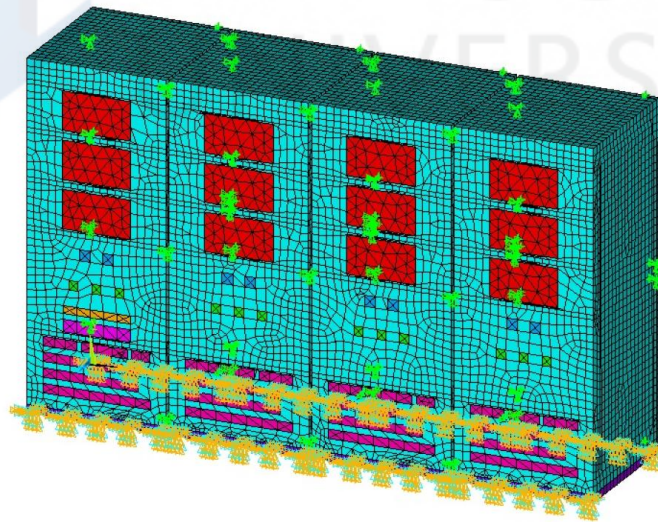
3) 해석 모델

해석 대상 구조물인 배전반에 대하여 [그림 4-1], [그림 4-2]와 같이 형상 및 경계조건을 고려한 유한요소해석 모델링을 하였다. 여기서 x 는 좌우방향이며, z 는 전후방향, y 는 수직방향을 나타낸다. 구조물은 Plate로 구성되어 있으며 다양한 형상의 내부 기기들이 부착되어 있다. IEEE 344의 설명에서와 같이 접속부의 흔들림 등에 의해 발생하는 비선형 응답 효과에 의한 파손을 정확히 예측하려면 시험이 수행되어야 하나 본 시험은 구조적 안전성여부를 해석하기 위한 것으로 실제 구조물의 거동을 최대한 적합하게 묘사할 수 있도록 모델링하였다. Door는 Panel 전체 강성에 영향을 미치지 않음으로 독립적인 모델링으로 힌지 부분과 Panel Frame에 Coupling을 이용하여 접합하였고, Panel내부의 Frame에 부착되어 있는 부

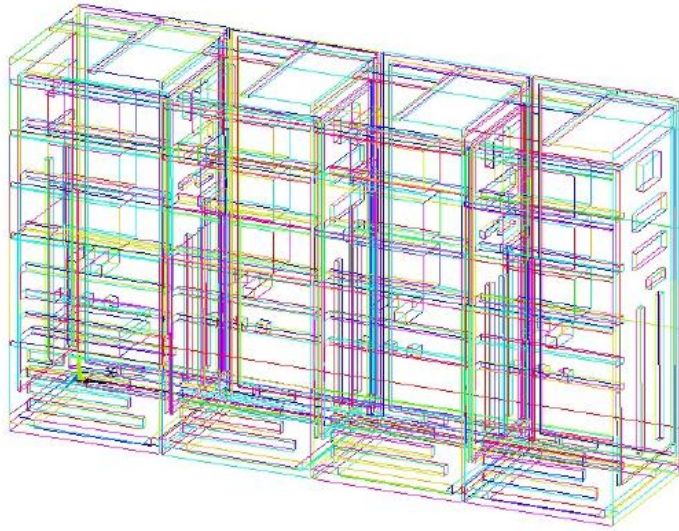
품은 각각 해당되는 무게를 갖고 있으며 동시에 Frame을 연결하는 강성체의 역할도 하고 있으므로 이를 동일한 무게를 갖는 요소로 생성하여 부작물에 의한 효과를 Simulation 할 수 있도록 하였다. 각 모델의 구성의 Plate는 Shell 요소, Frame은 Beam 요소, 질량은 Solid 요소를 사용하여 각 부품 무게에 맞는 밀도를 계산하여 적용하였으며 각 모델 구성 요소 및 절점의 수는 아래 [표 4-1]과 같다.

[표 4-1] 모델 구성 요소

종류	요소수	절점수
Relay Panels	42,276	53,704



[그림 4-1] 배전반 유한 요소 모델



[그림 4-2] 배전반 내부의 유한 요소 모델

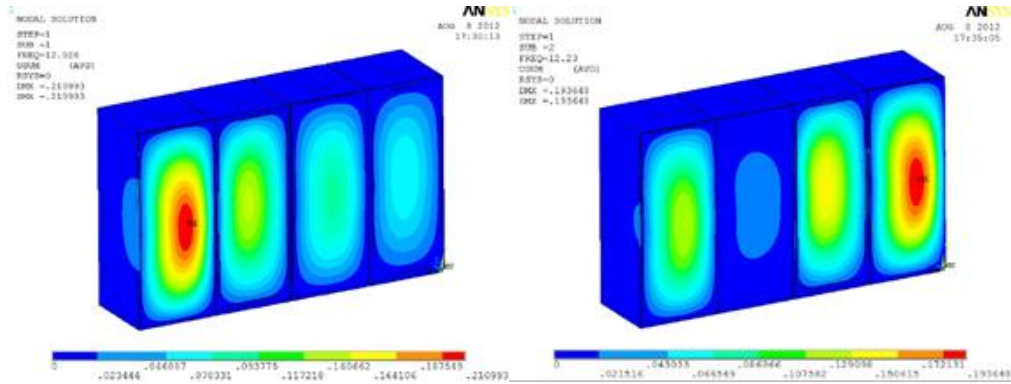
4) 해석 결과

가) 모드해석

대상 구조물이 가요성인지 강성구조인지의 여부를 판단하기 위해 스펙트럼 해석에 앞서 모드해석을 수행하였다. 모드해석에서는 고유진동수와 모드형을 나타내며, 해석결과 아래 [표 4-2]와 같이 1차 진동수는 12.0262Hz로 요구 응답스펙트럼의 차단진동수 33Hz보다 낮은 진동수에서 1차 고유진동수 값이 나타나고 있으므로 가요성기기의 해석절차를 따라야 한다. 아래 [표 4-2]는 각 모드별 작용하중을 나타낸 것이며, 1차~4차 모드까지의 모드 별 형상을 [그림 4-3]에 나타내었다.

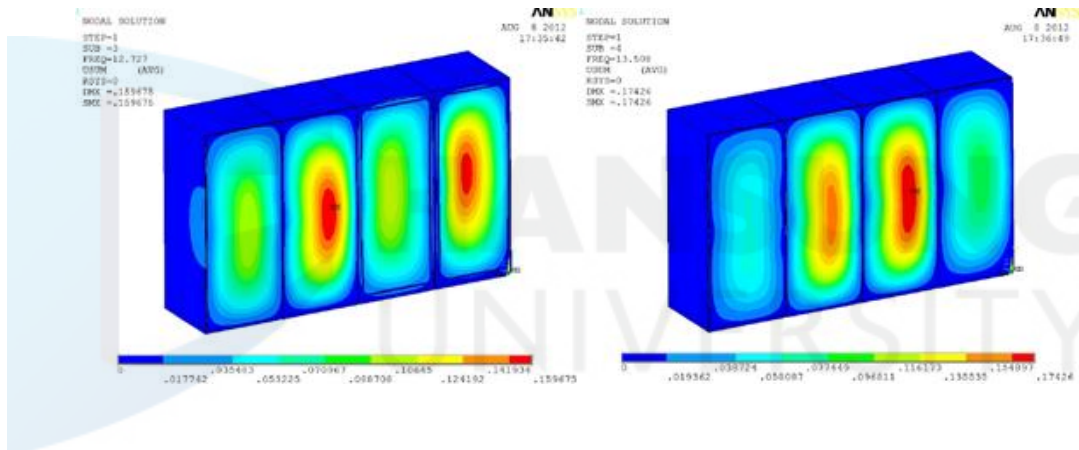
[표 4-2] 고유진동수 및 각 모드 별 참여도

	Freq.	x	y	z	Rot x	Rot y	Rot z
1	12.0262	0.035599	0.021775	0.210236	0.209602	0.525029	0.038634
2	12.2302	0.035289	0.024962	0.372418	0.372641	0.359859	0.033882
3	12.7273	0.01271	0.001779	0.004082	0.005317	0.547066	0.016219
4	13.5085	0.137263	0.012189	1.000000	1.000000	1.000000	0.123804
5	16.8534	0.08001	0.048289	0.003848	0.40496	0.002941	0.088926
6	16.9139	0.032115	0.04242	0.014906	0.328229	0.010573	0.041117
7	16.9234	0.000058	0.006005	0.002074	0.042524	0.00652	0.001322
8	16.9309	0.000364	0.000033	0.001086	0.016104	0.001199	0.000269
9	19.8145	0.63306	0.003423	0.018439	0.01561	0.138908	0.518833
10	20.1197	0.471611	0.010158	0.028742	0.029374	0.13677	0.341197



(a) 1차 모드

(b) 2차 모드



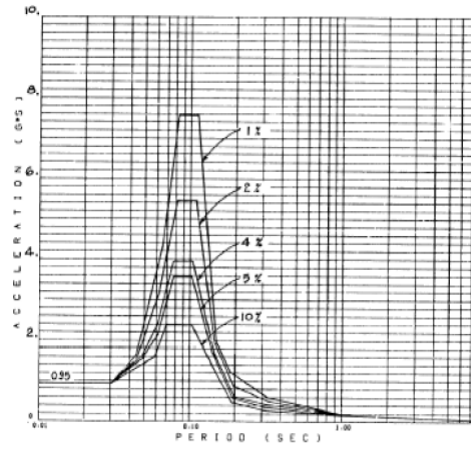
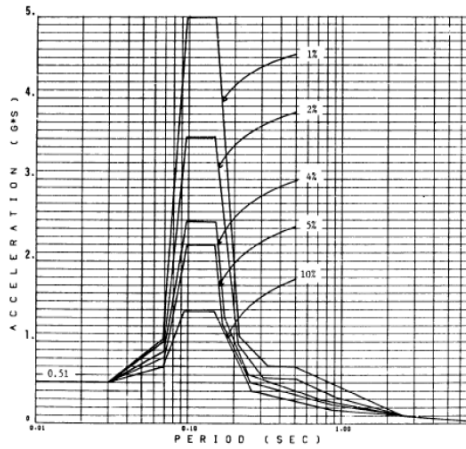
(c) 3차 모드

(d) 4차 모드

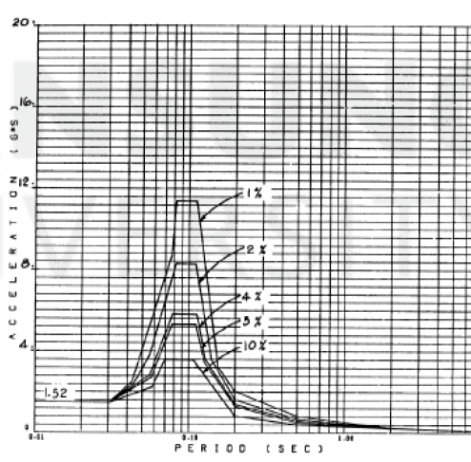
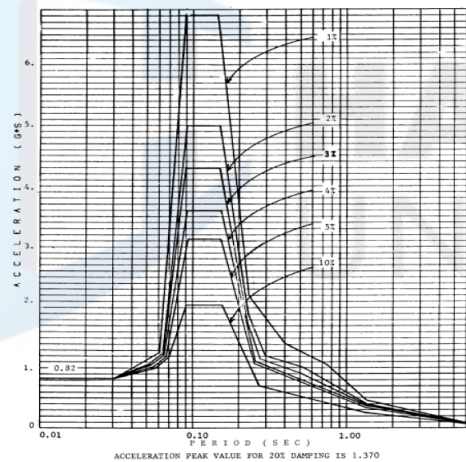
[그림 4-3] 모드 별 형상

나) 스펙트럼 해석

모드 해석에 이어 스펙트럼 해석을 수행하였다. 스펙트럼 해석은 시스템이 설치되는 위치의 [그림 4-4] 층응답스펙트럼(FRS)에 여유율 10%를 적용하여 보수적으로 작성한 [그림 4-5] 요구응답스펙트럼(RRS)를 하중조건으로 입력하였다. 여기서 운전기준지진(OBE)는 2% 감쇠곡선, 안전정지지진(SSE)는 5%의 감쇠곡선을 적용하였다.

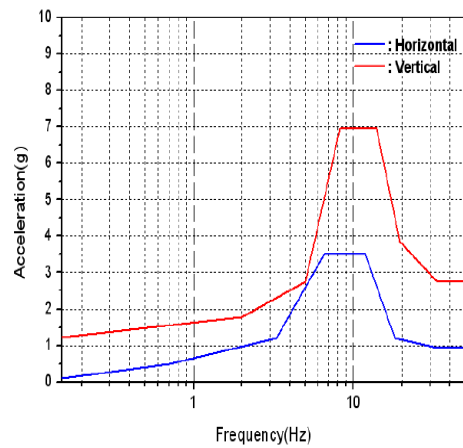
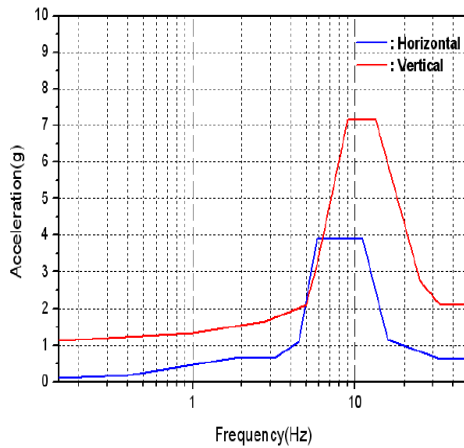


(a) OBE 수평방향 층응답스펙트럼 (b) OBE 수직방향 층응답스펙트럼



(c) SSE 수평방향 층응답스펙트럼 (b) SSE 수직방향 층응답스펙트럼

[그림 4-4] 설치위치에 따른 층응답스펙트럼



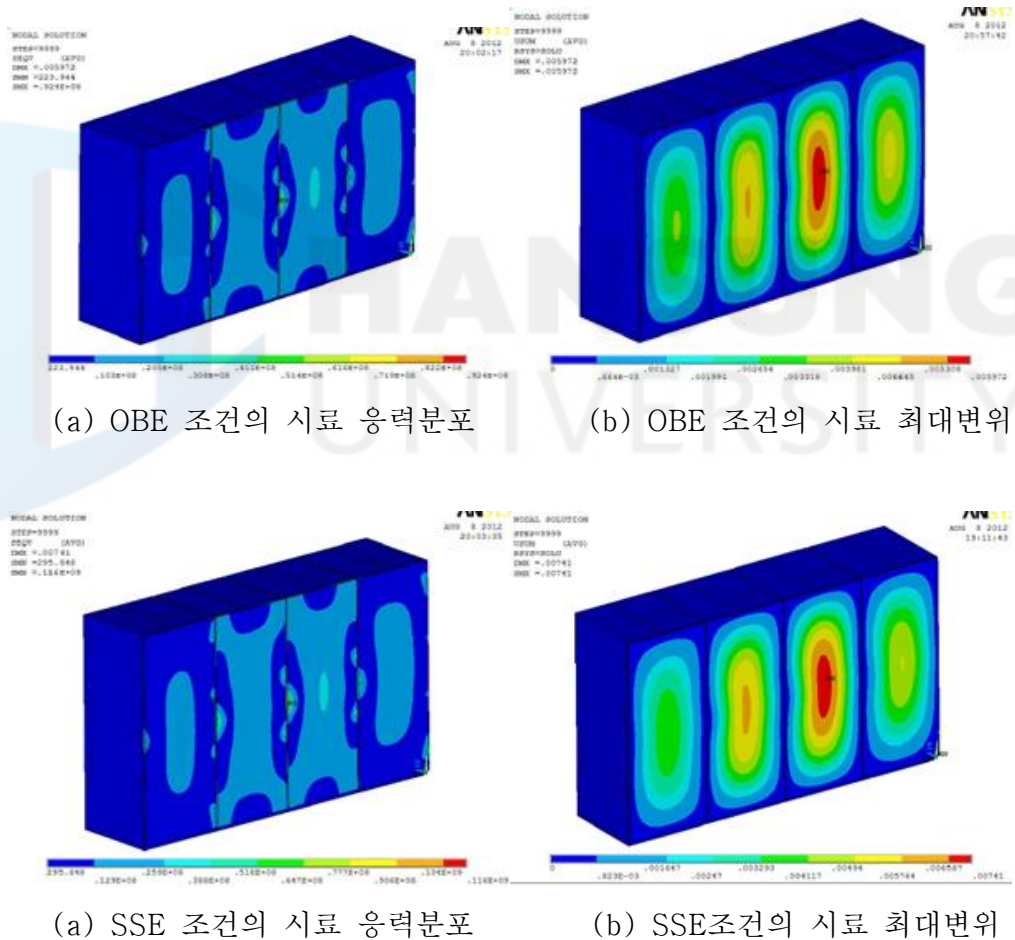
(a) OBE 요구응답스펙트럼(RRS) (b) SSE 요구응답스펙트럼(RRS)

[그림 4-5] 요구응답스펙트럼

스펙트럼해석에서의 모드 조합방법은 Regulatory Guide 1.92에 따른 Double-sum method를 이용하여 응력해석 결과를 비교하였다. 이와 같은 스펙트럼해석에서 두 수평방향(x, z)과 수직방향(y)의 가진에 대해 독립적으로 해석한 후, 각 방향별로 계산된 결과는 앞의 2) 해석절차에 따라 각 방향에서의 지진하중에 기인한 기기 상의 임의의 위치에서 결과를 얻기 위해 SRSS방법으로 합산하였다. 이와 함께 운전하중의 일종으로 볼 수 있는 구조물의 자중에 의한 응력분포를 고려하기 위해 중력가속도에 의한 정적해석을 수행하였으며, 이 값을 스펙트럼해석 결과에 더하였다. 해석방법에 따른 결과 중 [표 4-3]과 [그림 4-6]은 von Mises의 등가응력 및 최대변위 결과를 나타낸 것으로, 여기서 안전정지지진(SSE) 조건의 최대응력은 Door Lock 부위에서 $116MPa$ 의 값으로 나타났다. 결과적으로 해석결과 최대응력($116MPa$)이 냉간압연강(KS D 3512) 허용응력($315MPa$)보다 낮게 나타나므로 시험시료는 안정적인 구조임을 알 수 있다.

[표 4-3] 최대응력 및 최대변위 결과

해석대상 구조물	지진조건	최대응력 발생위치	최대응력 (MPa)	최대변위 (mm)
배전반	운전기준지진 (OBE)	Door Lock	92.4	5.972
	안전정지지진 (SSE)	Door Lock	116	7.41



[그림 4-6] 응력분포 및 최대변위

5) 결론

내진해석의 절차에 기초하여 내진해석을 수행한 결과는 다음과 같다.

가) 모드해석 결과 요구응답스펙트럼의 차단진동수(33Hz)이하에서 고유진동수가 나타났으므로 가요성기기로 스펙트럼해석을 수행하였다.

나) 주어진 요구 응답스펙트럼(RRS)에서 3축의 독립적인 가진에 의한 응답의 최종 결과 값은 공간상의 임의의 위치에서 결과를 얻기 위해 모드조합을 DSUM(Double-Sum)방법으로 계산하였으며, 운전하중의 일종인 구조물의 자중을 고려하기 위해 중력가속도에 의한 정적해석을 수행 하였고, 이를 스펙트럼해석 결과에 더하였다.

다) 스펙트럼해석 결과, Door Lock 부위에서 최대응력(116MPa)이 발생하였으며 냉간압연강 허용응력(315MPa)보다 낮게 나타나 있으므로 구조적으로 지진에 안전함을 입증할 수 있다.

라) 변위에 대한 결과는 근접한 기기와 간섭을 일으키지 않을 정도의 작은 값이 기록되었다.

제 2 절 진동대 시험을 통한 실증적 방법

1) Telcodia GR-63 CORE 기준의 내진시험

가) 면진형 고압배전반 실증시험

Telcodia “GR- 63- CORE 5.4.1 Earthquake Test (Issue 4, April 2012) Zone 4 level” 의 시험절차에 따라 요구되는 기능동작과 물리적인 손상 없이 정상상태를 유지하는지 시험검증 하였다.

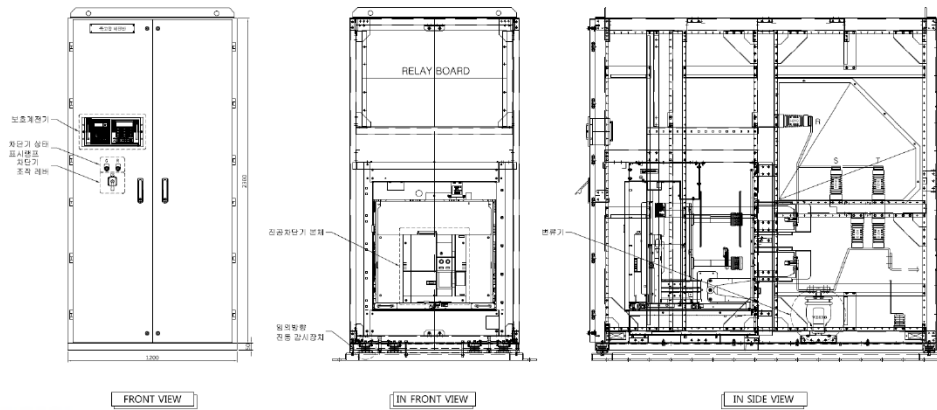
(1) 사양

면진형 고압배전반 설치형태는 바닥 고정형으로 고정볼트(M16 x 32 EA)로 Shaker table과 시험대상 설비를 체결하였다. 시료의 크기는(W)1200 mm x (D)2350 mm x (H)2300 mm이고 무게는 1530 kg이다. 제어전압은 110VDC 이다.



[그림 4-7] 면진형 고압배전반

[그림 4-8]은 먼진장치가 내장된 먼진형 고압배전반의 구성도를 나타낸 것이고 [표 4-4]는 먼진형 고압배전반에 부착되어 있는 설비들의 수량과 기능에 대하여 기술하였다.



[그림 4-8] 먼진형 고압배전반 구성도

[표 4-4] 시험대상설비의 정보

NO	구성품	수량	기능
1	보호계전기	1	진공차단기 제어 및 복합계측
2	차단기 상태 표시램프	2	진공차단기 Open/Close 상태표시 (ON-녹색 / Close-적색)
3	차단기 조작 레버	1	진공차단기 투입/개발 수동 조작 레버
4	임의방향 진동 감시장치	4	지진 및 진동으로부터 충격 감소
5	진공차단기	1	주전원 Open/Close
6	변류기	3	전류변환기

(2) 시험/측정 장비

[표 4-5]는 면진형 고압배전반을 시험하는 진동대의 제원을 나타낸 것이고, [표 4-6]은 진동대 시험 중 실제 변화량에 대한 변위값을 측정하는 센서를 나타낸 것이다.

[표 4-5] 장비사양

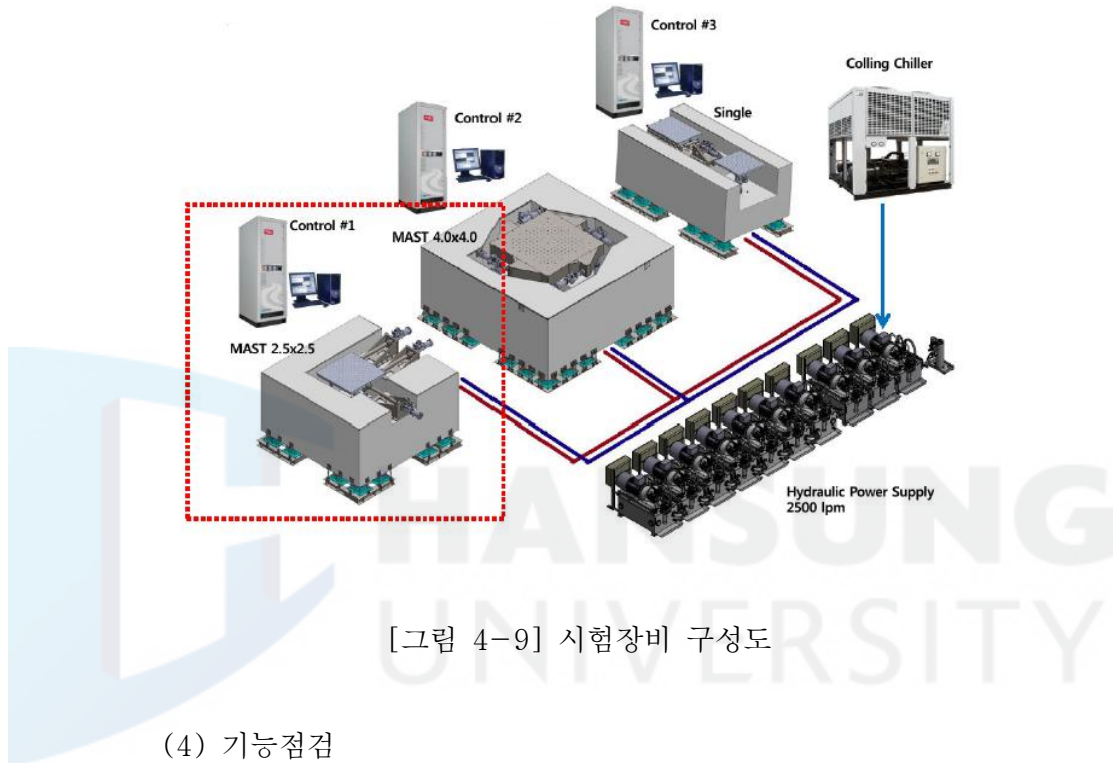
항 목	사 양
Test equipment	RIG2 MAST(Multi-Axial Shaking Test System) Seismic simulation test system
Manufacturer	IST (Germany)
Control method	Cyclic Wave Form (Sine, Tri-angle, Square) PSD Random Random (RRS waveform)
Table size	(2 500 x 2 500) mm
Frequency range	(1 ~ 100) Hz
Velocity	Z axis: 1.20 m/s X axis: 1.30 m/s Y axis: 1.30 m/s
Max. Acceleration (Payload)	Z axis: 8.0 g (2 ton) X axis: 6.0 g (2 ton) Y axis: 5.0 g (2 ton)
Max. Stroke	Z axis: 320 mm X axis: 320 mm Y axis: 320 mm

[표 4-6] 측정 분석 장비

기기명	형식	기기번호	차기교정 예정일자		교정기관
Controller	RIG 2	P03685.E01	1Hz~3Hz	2018.11.09.	SICT
			5Hz~100Hz	2018.09.21.	
Accelerometer	4623-025	C006740	1Hz~20Hz	2019.01.18.	KRISS / SICT
			20Hz~1250Hz	2018.12.25.	
		C006749	1Hz~20Hz	2018.10.22.	
			20Hz~1250Hz	2018.12.06.	
		C006754	1Hz~20Hz	2019.01.18.	
			20Hz~1250Hz	2018.12.25.	
		C006745	1Hz~20Hz	2019.01.18.	
			20Hz~1250Hz	2018.12.25.	
		C006746	1Hz~20Hz	2019.01.18.	
			20Hz~1250Hz	2018.12.25.	
		C006753	1Hz~20Hz	2018.10.22.	
			20Hz~1250Hz	2018.12.06.	
	4604-030	C002513 (ACC 01)	1Hz~20Hz	2018.09.17.	
			20Hz~1250Hz	2018.08.15.	
		C002516 (ACC 02)	1Hz~40Hz	2018.09.18.	
			20Hz~1250Hz	2018.08.15.	
		C005773 (ACC 03)	1Hz~40Hz	2018.09.18.	
			20Hz~1250Hz	2018.08.15.	
		C002514 (ACC 04)	1Hz~40Hz	2018.09.17.	
			20Hz~1250Hz	2018.08.15.	
		C002512 (ACC 05)	1Hz~40Hz	2018.09.17.	
			20Hz~1250Hz	2018.08.15.	
		C002515 (ACC 06)	1Hz~40Hz	2018.09.17.	
			20Hz~1250Hz	2018.08.15.	

(3) 시험장비 구성도

[그림 4-9]는 면진형 고압배전반을 시험하는 장비에 대한 전체 구성도 이다.



(4) 기능점검

(가) 점검항목 및 허용기준

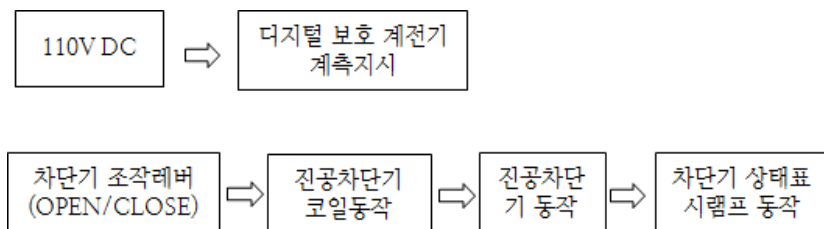
시험 전, 중, 후에 요구되는 물리적인 손상과 시험 전, 후로 요구되는 기능동작에 대한 허용기준이다.

[표 4-7] 점검항목 및 허용기준 요약

점검 항목	허용기준
VCB(진공차단기) OPEN/CLOSE 동작	CLOSE : 빨간색 램프 점등 OPEN: 초록색 램프 점등
변위 폭이 최대 75 mm를 초과하지 않을 것	75 mm 이하
시험대상기기의 전복 또는 전도	전복/전도 없을 것
시험대상기기의 바닥 고정부 이탈	이탈 없을 것
설치된 구성품의 이탈	이탈 없을 것
시험대상설비의 프레임 변형 또는 파손	변형/파손 없을 것
앵커링, 볼트 등의 고정 장치 자체의 균열, 변형 및 절단	변형/균열/절단 없을 것
기타 육안으로 확인이 가능한 변형이나 파손	변형/파손 없을 것

(나) 기능점검 구성도

전기적 성능확인 및 동작확인은 아래와 같이 구성된다.



[그림 4-10] 성능검증 구성도

(다) 성능검증에 사용한 장비

[표 4-8]은 면진형 고압배전반 내진시험 시 사용한 계측장비이다.

[표 4-8] 성능검증에 사용한 장비 목록

장비명	제조사	모델명	S/N	비고
C-SERIES DAQ MODULE	NI	NI- 9205	16737AB	전기적 신호 측정
PROGRAMMA BLE AC/DC POWER SOURCE	NF	KP3000 GS	9144426	110 V DC 전원공급

(5) 시험절차

(가) 시험순서

[표 4-9] 시험 순서도

시험 순서	시험구분
1	X축 시험 전 공진탐색 시험
2	X축 내진시험
3	X축 시험 후 공진탐색 시험
4	Y축 시험 전 공진탐색 시험
5	Y축 내진시험
6	Y축 시험 후 공진탐색 시험
7	Z축 시험 전 공진탐색 시험
8	Z축 내진시험
9	Z축 시험 후 공진탐색 시험
10	Complete the test

(나) 시험 방법

① 시험대상 설비 설치 및 가속도계 부착

시험대상설비는 Shaker table에 M16 볼트를 사용하여 32 곳에 2000 kgf cm로 고정되어 있다. 가속도계 부착은 시험대상설비의 상단과 중단의 상판 측면에 각각 3 방향(X, Y, Z 축)으로 부착하였고 아래 그림과 같이 시험방향과 동일하게 하였다.



[그림 4-11] 가속도계 설치

② 성능검증

시험대상설비의 시험하기 전, 중, 후로 물리적 손상 상태를 확인하였고, 전, 후로 기능의 정상작동을 확인하였다. 점검항목과 기준은 [표 4-7] 점검항목 및 허용기준 에서 제시한 기준으로 확인하고 판단하였다.

③ 공진탐색 시험

공진탐색 시험이란 시험응답스펙트럼의 적합성을 평가하거나 시험 후 시스템의 변형 등을 분석하기 위해, 시험대상설비의 고유진동수를 탐색하는 가진 시험을 말한다. 공진탐색시험은 일반적으로 내진 검증 요건의 부분은 아니지만(방송통신설비의 내진시험방법 한정) 검증을 위한 최상의 시험 방법 또는 기기의 동적 특성을 결정하는데 도움을 주기 위한 것이다.

모든 물체는 자체의 고유 진동수를 가지며 각각의 구성품이 결합된 형태에선 설치 형태, 위치, 무게 등에 영향을 받아 조립체의 공진 주파수가 결정된다. 내진시험에선 시험대상설비의 형상에 따른 무게중심과 하중, 재질에 따른 강성과 같은 요인에 의해 결정되며 시험 전, 후 데이터를 통해 제품의 구조적 변형을 수치적으로 판별할 수 있다.

또한 설치 장소의 특성에 맞춰 공진주파수 대역을 피해 설치환경을 조성할 수 있는 지표가 되며 공진주파수 탐색으로 얻어지는 상변화 시점 및 공진으로 인해 증폭되는 배율을 통해 제품의 취약점을 파악할 수 있다.

지진이 발생하게 되면 지상의 모든 구조물은 지진하중을 받게 되고, 이 지진하중의 주파수가 제품의 공진 주파수와 근접하게 되면 시험에서 얻을 수 있는 공진배율과 유사한 수준의 증폭이 일어나 제품 또는 구조물의 파괴가 발생될 확률이 높아진다. 기기의 설치환경 시 일반적인 건물의 공진주파수 대역이 1~3 Hz 환경이며, 지진 발생 시의 주 발생 대역폭이 1~33 Hz 사이인 것을 감안하고, 제품의 형상 및 하부 구조를 설계하여 공진에 영향을 주는 요소를 조절해하여 내진 성능을 강화할 수 있다.

본 시험에서는 공진을 탐색하기 위해 Shaker table 과 시험대상설비의 상단, 중단에 가속도계를 부착하였고 부착 위치와 방향은 [그림 4-11]과 같이 하였다. 공진탐색시험은 내진시험 전, 후로 진행하였다. 시험조건은 아래 [표 4-10] 과 같이 적용한 후 독립적으로 한 축씩 시험하여 3 축(X, Y, Z)을 수행하였다. 측정분석은 진동테이블에 대한 시험대상설비의 전달함수로 분석하였고, 증폭인자를 고려하여 시험대상설비의 공진주파수를 확인하였다.

[표 4-10] 공진탐색 시험조건

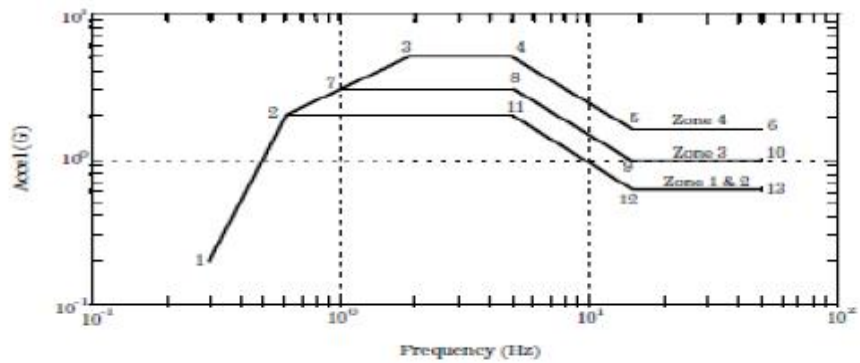
NO	구분	시험조건
1	Test type	Sweep sine
2	주파수	(1-50)Hz
3	가속도	0.2 g (1.96 m/s ²)
4	Sweep rate	1 oct/min
5	Sweep cycle	1 sweep
6	시험방향	X(좌우), Y(전후), Z(상하)

※ 1 g = 9.8 m/s²

④ 내진시험

내진시험을 하기 위해 적용된 요구응답스펙트럼(RRS)은“GR- 63- CORE 5.4.1 Earthquake Test (Issue 4, April 2012) Zone 4 level” 에서 제시한 응답스펙트럼을 사용하였고, 각축의 공진 테스트를 시험 전, 후에 각각 수행하였다. 요구응답스펙트럼(RRS)은 [그림 4-12] 시험레벨을 시험조건으로 적용한 후 각 축의 가진 시험 을 차례대로 수행하였고 시험응답스펙트럼(TRS)은 요구응답스펙트럼(RRS)을 포락하도록 시험하였다.

TRS는 감쇠계수 2%를 사용하여 1 Hz 부터 50 Hz까지의 주파수 범위를 1/6 옥타브 간격으로 분석하였다. 총 시험시간은 30초로 하였고, 강진동 부분은 25초 이상 유지하였다.



Coordinate Point	Frequency (Hz)	Values for Upper Floor Acceleration (g)	Coordinate Point	Frequency (Hz)	Values for Upper Floor Acceleration (g)
Zones 1 and 2			Zone 4		
1	0.3	0.2	1	0.3	0.2
2	0.6	2.0	2	0.6	2.0
11	5.0	2.0	3	2.0	5.0
12	15.0	0.6	4	5.0	5.0
13	50.0	0.6	5	15.0	1.6
Zone 3			6	50.0	1.6
1	0.3	0.2			
2	0.6	2.0			
7	1.0	3.0			
8	5.0	3.0			
9	15.0	1.0			
10	50.0	1.0			

[그림 4.12] 내진시험 조건

(6) 시험결과

(가) 내진시험 결과

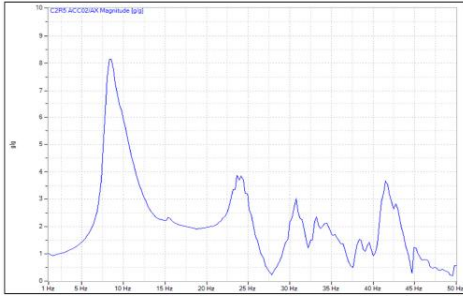
[표 4-11] 내진시험 결과 요약

점검 항목	허용기준	결과
VCB(진공차단기) OPEN/CLOSE 동작	CLOSE : 빨간색 램프 점등 OPEN: 초록색 램프 점등	이상없음
변위 폭이 최대 75 mm를 초과하지 않을 것	75 mm 이하	이상없음
시험대상기기의 전복 또는 전도	전복/전도 없을 것	이상없음
시험대상기기의 바닥 고정부 이탈	이탈 없을 것	이상없음
설치된 구성품의 이탈	이탈 없을 것	이상없음
시험대상설비의 프레임 변형 또는 파손	변형/파손 없을 것	이상없음
앵커링, 볼트 등의 고정 장치 자체의 균열, 변형 및 절단	변형/균열/절단 없을 것	이상없음
기타 육안으로 확인이 가능한 변형이나 파손	변형/파손 없을 것	이상없음

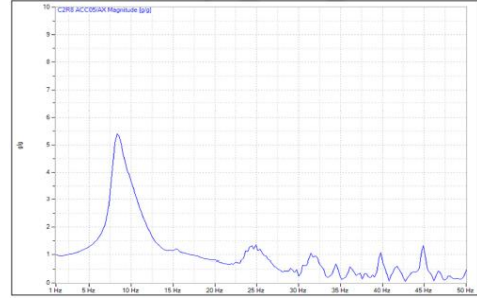
(나) 공진탐색시험 결과

[표 4-12] 공진탐색 시험결과 요약

구분		내진시험 전 공진탐색 시험		내진시험 후 공진탐색 시험	
		공진 주파수 (Hz)	가속도 배율 (g/g)	공진 주파수 (Hz)	가속도 배율 (g/g)
좌우 (X)	상단	8.30	8.14	7.57	3.08
	중단	8.30	5.41	7.32	3.67
전후 (Y)	상단	10.99	6.00	10.99	6.02
	중단	10.99	4.49	10.99	4.50
상하 (Z)	상단	24.9	2.54	24.90	2.55
	중단	24.9	2.54	24.90	2.55

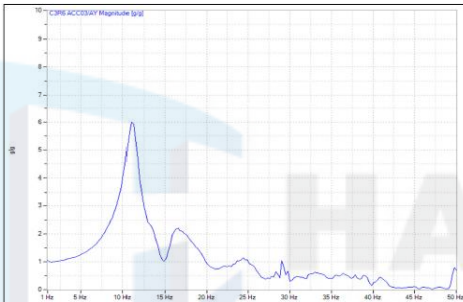


(a) 상단

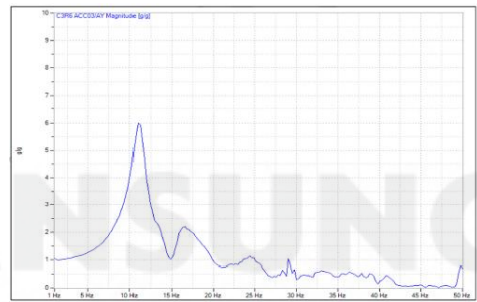


(b) 중단

[그림 4-13] Telcordia zone 4 내진시험 전 공진탐색 X축(좌우)

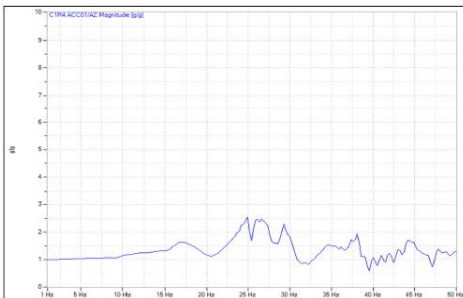


(a) 상단

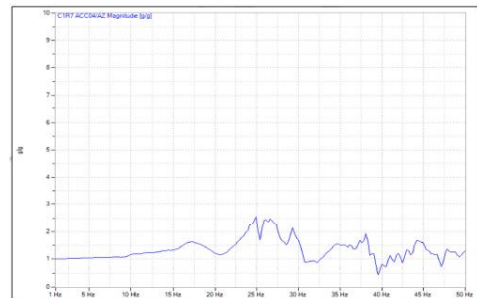


(b) 중단

[그림 4-14] Telcordia zone 4 내진시험 전 공진탐색 Y축(좌우)

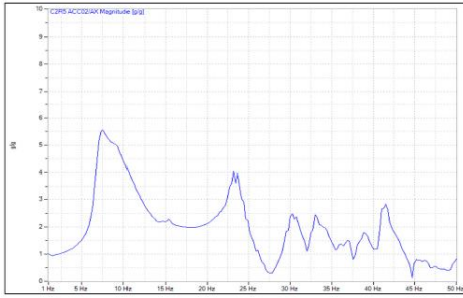


(a) 상단

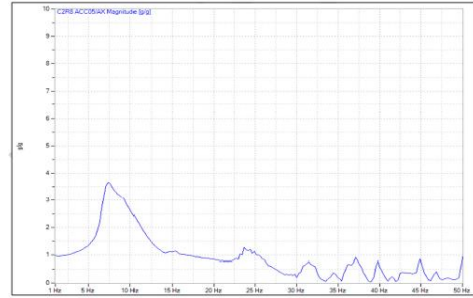


(b) 중단

[그림 4-15] Telcordia zone 4 내진시험 전 공진탐색 X축(좌우)



(a) 상단

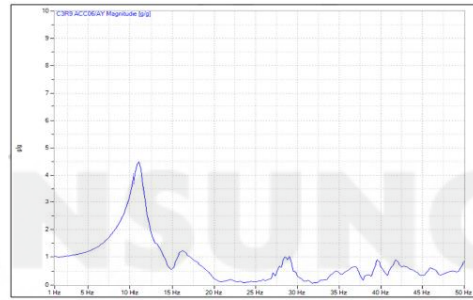


(b) 중단

[그림 4-16] Telcordia zone 4 내진시험 후 공진탐색 X축(좌우)

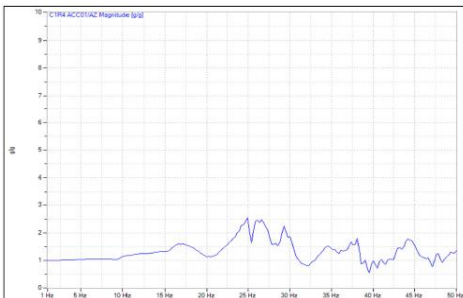


(a) 상단

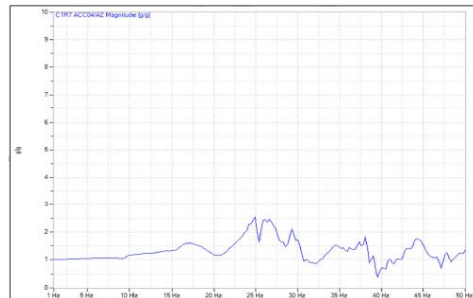


(b) 중단

[그림 4-17] Telcordia zone 4 내진시험 후 공진탐색 Y축(좌우)



(a) 상단



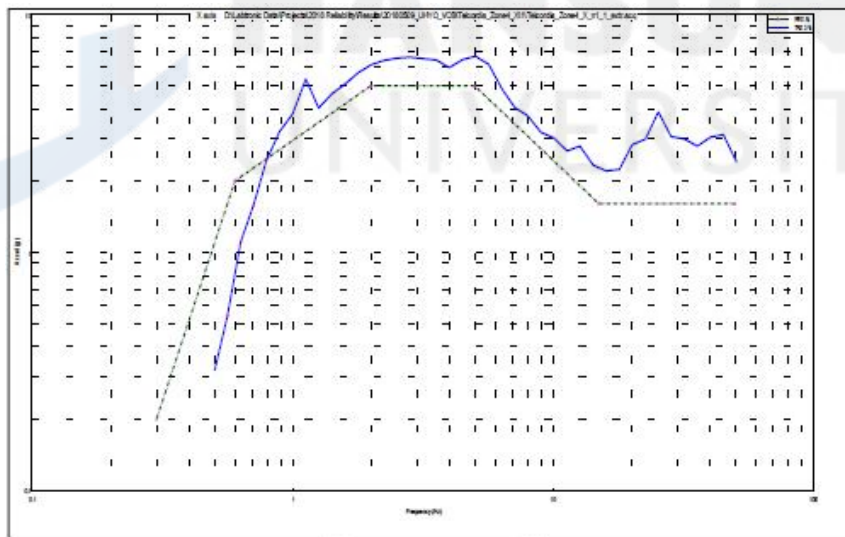
(b) 중단

[그림 4-18] Telcordia zone 4 내진시험 후 공진탐색 Z축(좌우)

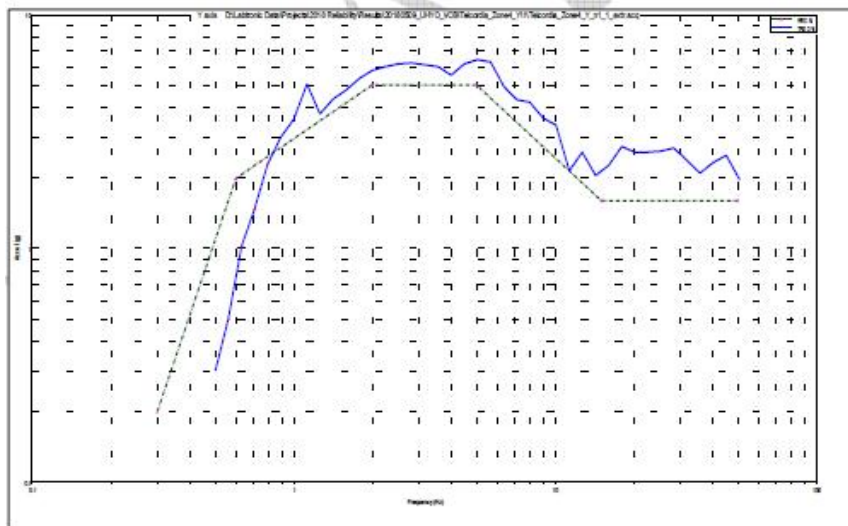
(다) 내진시험시의 최대 가속도 및 상대변위 결과

[표 4-13] 최대가속도 및 상대변위 결과

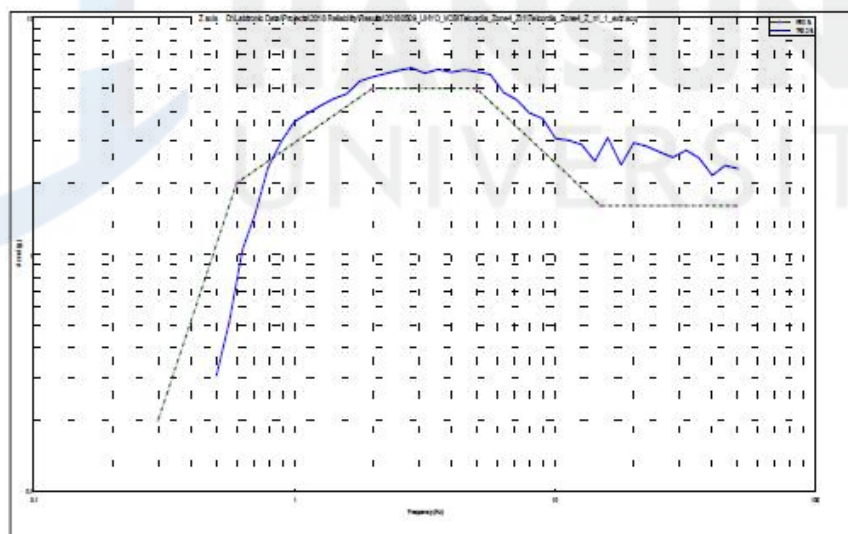
내진시험	시험방향	최대가속도(g)			상대변위 (mm)
		Shaker table	상단	중단	
Zone 4	X(좌우)	2.05	3.85	3.35	25.90
	Y(전후)	1.59	1.95	1.86	9.50
	Z(상하)	2.17	1.81	1.77	N/A



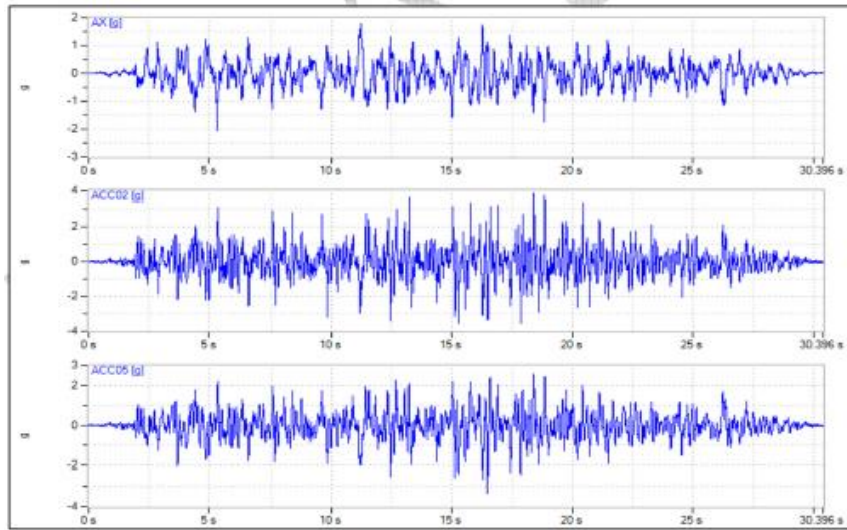
[그림 4-19] Telcordia zone 4 내진시험 X축(좌우) 응답스펙트럼



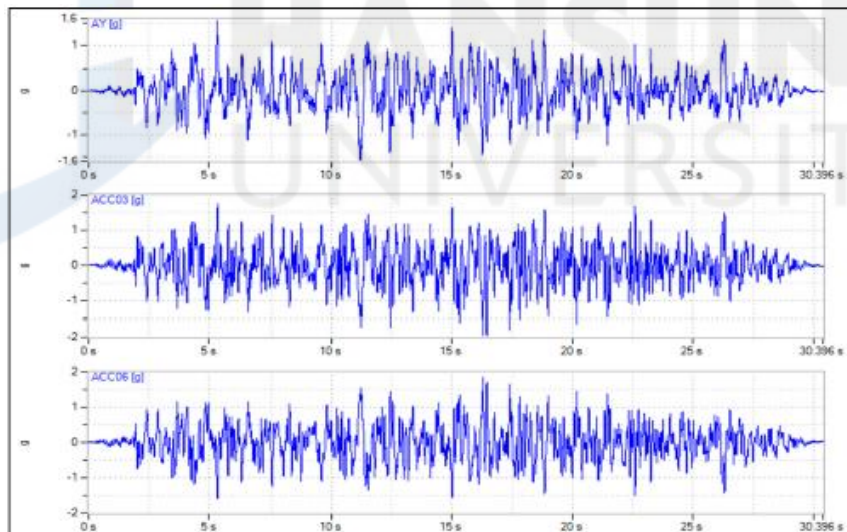
[그림 4-20] Telcordia zone 4 내진시험 Y축(전후) 응답스펙트럼



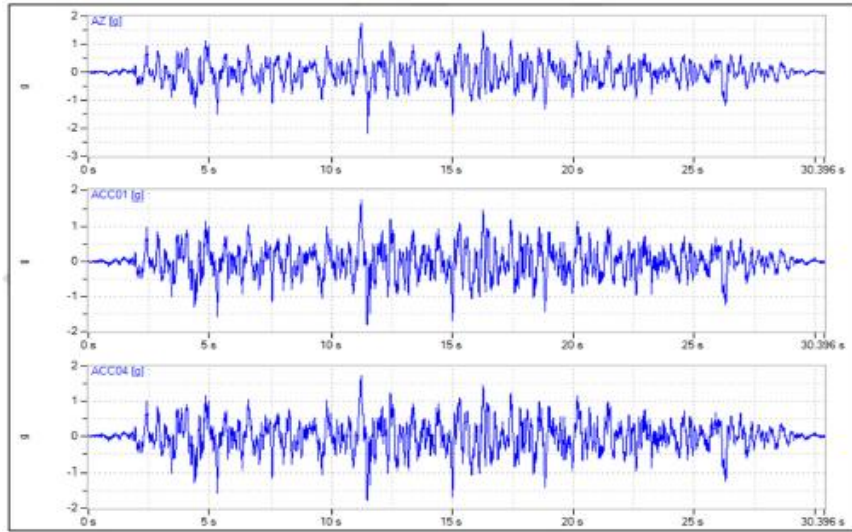
[그림 4-21] Telcordia zone 4 내진시험 Z축(상하) 응답스펙트럼



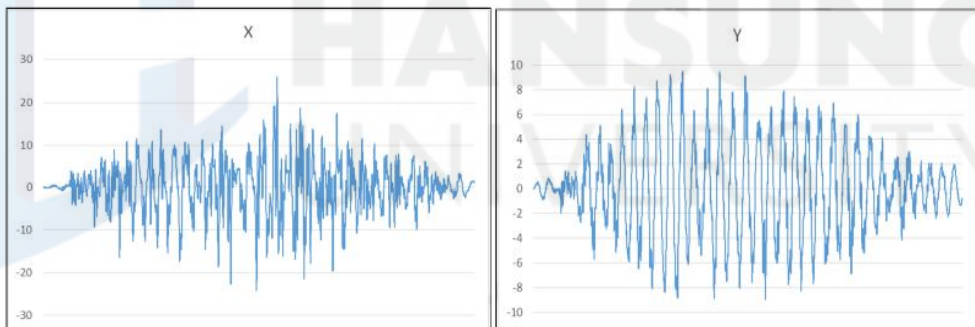
[그림 4-22] Telcordia zone 4 X축 Time history



[그림 4-23] Telcordia zone 4 Y축 Time history



[그림 4-24] Telcordia zone 4 Z축 Time history



(a) X축 변위

(b) Y축 변위

[그림 4-25] Telcordia zone 4 내진시험 상대변위

2) 전기통신설비 기준의 내진시험

Telcordia zone 4 내진시험 이후 동일 시료에 대하여 방송통신설비의 내진 시험방법(국립전파연구원 공고 제2015-14호)으로 시험하였다. 시료에 가혹한 조건으로 시험하였으나 국내에 산업현장에 설치된다는 점을 감안하여 국내 시험기준으로 재시험을 진행하였다. 시험방법은 전기통신설비의 내진시험방법 시험절차에 따라 요구되는 기능동작과 물리적인 손상 없이 정상상태를 유지 하는지 시험검증 하였다.

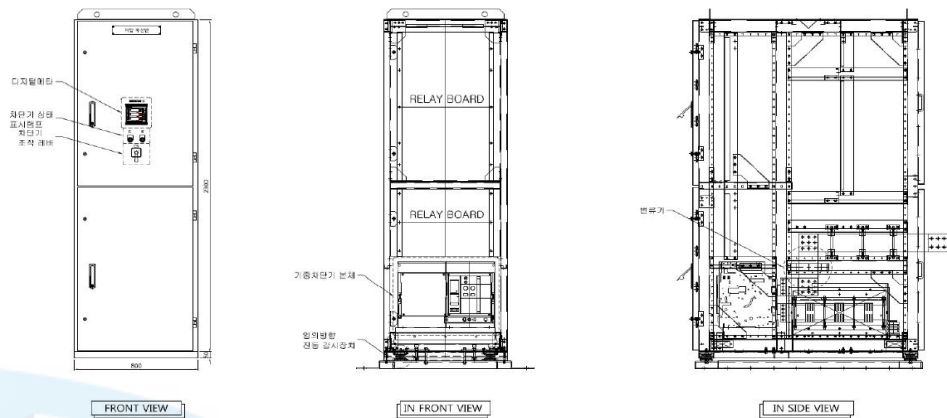
가) 사양

면진형 저압배전반 설치형태는 바닥 고정형으로 고정볼트(M16 x 20 EA)로 Shaker table과 시험대상 설비를 체결하였다. 시료의 크기는(W)800 mm x (D)1,500 mm x (H)2,350 mm이고 무게는 1,195 kg이다. 제어전압은 110V DC 이다.



[그림 4-26] 면진형 저압배전반

[그림 4-27]은 면진장치가 내장된 저압배전반의 구성도를 나타낸 것이고 [표 4-14]는 면진형 저압배전반에 부착되어 있는 설비들의 수량과 기능에 대하여 기술하였다.



[그림 4-27] 면진형 저압배전반 구성도

[표 4-14] 시험대상 설비의 정보

NO	구성품	수량	기능
1	보호계전기	1	진공차단기 제어 및 복합계측
2	차단기 상태 표시램프	2	진공차단기 Open/Close 상태표시 (ON-녹색 / Close-적색)
3	차단기 조작 레버	1	진공차단기 투입/개발 수동 조작 레버
4	임의방향 진동 감시장치	4	지진 및 진동으로부터 충격 감소
5	진공차단기	1	주전원 Open/Close
6	변류기	3	전류변환기

나) 시험/측정 장비

[표 4-15]는 면진형 저압배전반을 시험하는 진동대의 제원을 나타낸 것이고, [표 4-16]은 진동대 시험 중 실제 변화량에 대한 변위값을 측정하는 센서를 나타낸 것이다.

[표 4-15] 장비사양

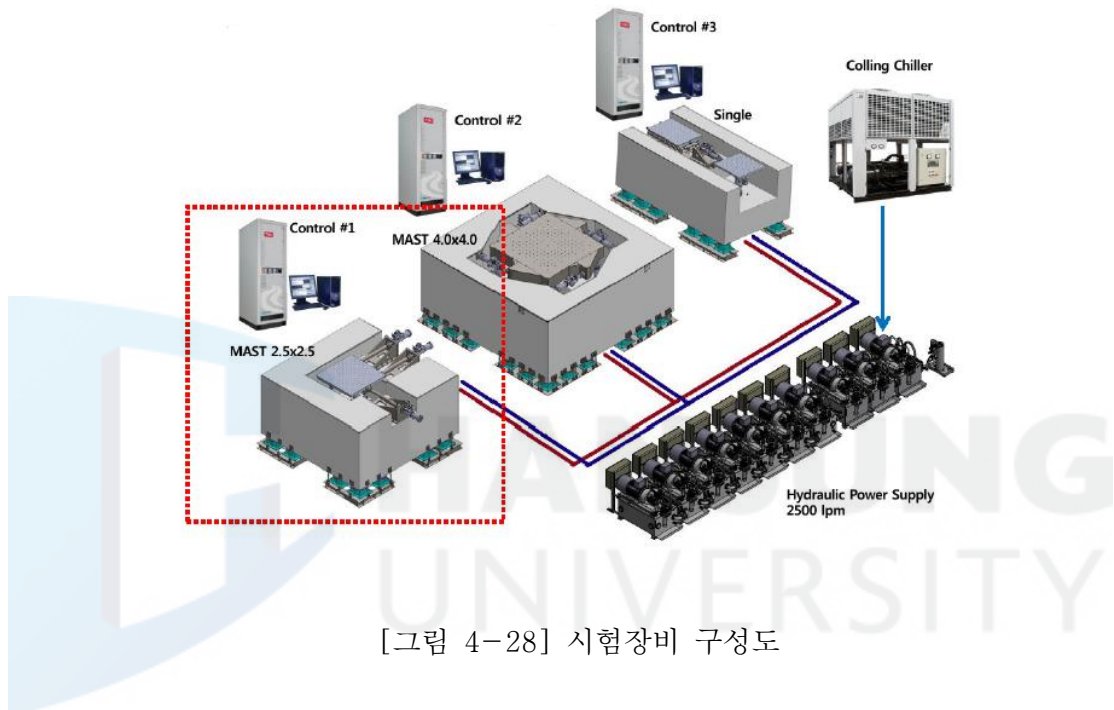
항 목	사 양
Test equipment	RIG2 MAST(Multi-Axial Shaking Test System) Seismic simulation test system
Manufacturer	IST (Germany)
Control method	Cyclic Wave Form(Sine, Tri-angle, Square) PSD Random Random (RRS waveform)
Table size	(2 500 x 2 500) mm
Frequency range	(1 ~ 100) Hz
Velocity	Z axis: 1.20 m/s X axis: 1.30 m/s Y axis: 1.30 m/s
Max. Acceleration (Payload)	Z axis: 8.0 g (2 ton) X axis: 6.0 g (2 ton) Y axis: 5.0 g (2 ton)
Max. Stroke	Z axis: 320 mm X axis: 320 mm Y axis: 320 mm

[표 4-16] 측정분석 장비

기기명	형식	기기번호	차기교정 예정일자		교정 기관
Controller	RIG 2	P03685.E01	1Hz~3Hz	2018.11.09.	SICT
			5Hz~100Hz	2018.09.21.	
Accelerometer	4623-025	C006740	1Hz~20Hz	2019.01.18.	KRISS / SICT
			20Hz~1250Hz	2018.12.25.	
		C006749	1Hz~20Hz	2018.10.22.	
			20Hz~1250Hz	2018.12.06.	
		C006754	1Hz~20Hz	2019.01.18.	
			20Hz~1250Hz	2018.12.25.	
		C006745	1Hz~20Hz	2019.01.18.	
			20Hz~1250Hz	2018.12.25.	
		C006746	1Hz~20Hz	2019.01.18.	
			20Hz~1250Hz	2018.12.25.	
		C006753	1Hz~20Hz	2018.10.22.	
			20Hz~1250Hz	2018.12.06.	
	4604-030	C002513 (ACC 01)	1Hz~20Hz	2018.09.17.	
			20Hz~1250Hz	2018.08.15.	
		C002516 (ACC 02)	1Hz~40Hz	2018.09.18.	
			20Hz~1250Hz	2018.08.15.	
		C005773 (ACC 03)	1Hz~40Hz	2018.09.18.	
			20Hz~1250Hz	2018.08.15.	
		C002514 (ACC 04)	1Hz~40Hz	2018.09.17.	
			20Hz~1250Hz	2018.08.15.	
		C002512 (ACC 05)	1Hz~40Hz	2018.09.17.	
			20Hz~1250Hz	2018.08.15.	
		C002515 (ACC 06)	1Hz~40Hz	2018.09.17.	
			20Hz~1250Hz	2018.08.15.	

다) 시험장비 구성도

[그림 4-28]는 면진형 저압배전반을 시험하는 장비에 대한 전체 구성도 이다.



[그림 4-28] 시험장비 구성도

라) 기능점검

(1) 점검항목 및 허용기준

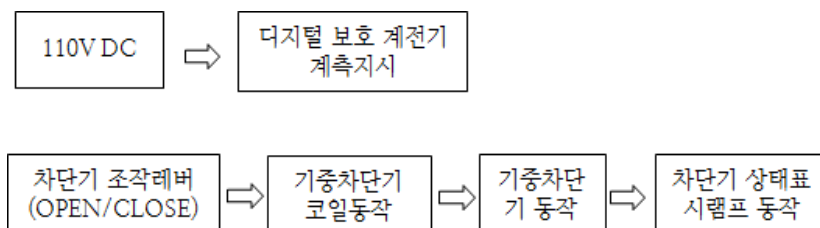
시험 전, 중, 후에 요구되는 물리적인 손상과 시험 전, 후로 요구되는 기능동작에 대한 허용기준이다.

[표 4-17] 점검항목 및 허용기준 요약

점검 항목	허용기준
ACB OPEN/CLOSE 동작	CLOSE : 빨간색 램프 점등 OPEN: 초록색 램프 점등
시험 전, 중, 후 ACB에 대한 Chattering 측정	Chattering 없을 것
변위 폭이 최대 75 mm를 초과하지 않을 것	75 mm 이하
시험대상기기의 전복 또는 전도	전복/전도 없을 것
시험대상기기의 바닥 고정부 이탈	이탈 없을 것
설치된 구성품의 이탈	이탈 없을 것
시험대상설비의 프레임 변형 또는 파손	변형/파손 없을 것
바닥시설 자체의 결함부분이 이탈되거나, 진동대 고정부분 이탈	이탈 없을 것
앵커링, 볼트 등의 고정 장치 자체의 균열, 변형 및 절단	변형/균열/절단 없을 것
기타 육안으로 확인이 가능한 변형이나 파손	변형/파손 없을 것

(2) 기능점검 구성도

전기적 성능확인 및 동작확인 은 아래와 같이 구성된다.



[그림 4-29] 성능검증 구성도

(3) 성능검증에 사용한 장비

【표 4-18】은 먼진형 저압배전반 내진시험 시 사용한 계측장비이다.

【표 4-18】 성능검증에 사용한 장비 목록

장비명	제조사	모델명	S/N	비고
C-SERIES DAQ MODULE	NI	NI- 9205	16737AB	전기적 신호 측정
PROGRAMMA BLE AC/DC POWER SOURCE	NF	KP3000 GS	9144426	110 V DC 전원공급

(4) 시험절차

(가) 시험순서

【표 4-19】 시험 순서도

시험 순서	시험구분
1	시험 대상설비 설치
2	공진 탐색 시험(내진 시험 전) (시험방향 순서: X축(좌우)→Y축(전후)→Z축(상하))
3	내진시험(2회)
4	공진 탐색 시험(내진 시험 후) (시험방향 순서: X축(좌우)→Y축(전후)→Z축(상하))
5	시험완료

(나) 시험 방법

① 시험대상 설비 설치 및 가속도계 부착

시험대상설비는 Shaker table에 M16 볼트를 사용하여 20 곳에 800 kgf cm로 고정되어 있다. 가속도계 부착은 시험대상설비의 상단과 중단의 상판 측면에 각각 3 방향(X, Y, Z 축)으로 부착하였고 아래 그림과 같이 시험방향과 동일하게 하였다.



[그림 4-30] 가속도계 설치

② 성능검증

시험대상설비의 시험하기 전, 중, 후로 물리적 손상 상태를 확인하였고, 전, 후로 기능의 정상작동을 확인하였다. 점검항목과 기준은 [표 4-17] 점검항목 및 허용기준 에서 제시한 기준으로 확인하고 판단하였다.

③ 공진탐색 시험

공진탐색 시험이란 시험응답스펙트럼의 적합성을 평가하거나 시험 후 시스템의 변형 등을 분석하기 위해, 시험대상설비의 고유진동수를 탐색하는 가진 시험을 말한다. 공진탐색시험은 일반적으로 내진 검증 요건의 부분은 아니지만(방송통신설비의 내진시험방법 한정) 검증을 위한 최상의 시험 방법 또는 기기의 동적 특성을 결정하는데 도움을 주기 위한 것이다.

본 시험에서는 공진을 탐색하기 위해 Shaker table 과 시험대상설비의 상단, 중단에 가속도계를 부착하였고 부착 위치와 방향은 [그림 4-30]과 같이 하였다. 공진탐색시험은 내진시험 전, 후로 진행하였고 시험조건은 아래 [표4-20] 과 같이 적용한 후 세 축을 동시에 시험하여 2번을 수행하였다. 측정분석은 진동테이블에 대한 시험대상설비의 전달함수로 분석하였고, 증폭인자를 고려하여 시험대상설비의 공진주파수를 확인하였다.

[표 4-20] 공진탐색 시험조건

NO	구분	시험조건
1	Test type	Sweep sine
2	주파수	(1-50)Hz
3	가속도	0.2 g (1.96 m/s ²)
4	Sweep rate	2 oct/min
5	Sweep cycle	1 sweep
6	시험방향	X(좌우), Y(전후), Z(상하)

※ 1 g = 9.8 m/s²

④ 내진시험

내진시험을 수행하기 위해 적용된 요구응답스펙트럼(RRS)은 “방송통신설비의 내진시험 방법”에서 제시한 층 응답스펙트럼을 사용하였고, 요구응답스펙트럼(RRS)은 아래 [표 4-21]을 적용한 후 3축 동시 가진 시험을 2회 반복 수행하였고, 시험응답스펙트럼(TRS)은 요구응답스펙트럼(RRS)을 포락하도록 시험하였다. 내진시험 후에 각각의 시험 축에 대한 독립성을 확인하기 위해 간섭함수가 0.5 이하임을 확인 하였다.

[표 4-21] 내진시험 시험조건

구분		시험조건			
시험방향		X(좌우)		Y(전후)	Z(상하)
주파수 범위		(1~35)Hz			
감쇠율		2%			
Total Duration		30 s			
Strong Motion Duration		25 s			
분석 대역폭		1/6 octave			
시험레벨					
X(좌우)		Y(전후)		Z(상하)	
주파수	가속도	주파수	가속도	주파수	가속도
1Hz	$7.36m/s^2$ (0.75g)	1Hz	$7.36m/s^2$ (0.75g)	1Hz	$3.68m/s^2$ (0.38g)
2Hz	29.43 m/s^2 (3g)	2Hz	29.43 m/s^2 (3g)	2Hz	14.72 m/s^2 (1.5g)
11.67Hz	29.43 m/s^2 (3g)	11.67Hz	29.43 m/s^2 (3g)	11.67Hz	14.72 m/s^2 (1.5g)
23.33Hz	$5.89m/s^2$ (0.6g)	23.33Hz	$5.89m/s^2$ (0.6g)	23.33Hz	$2.95m/s^2$ (0.3g)
35Hz	$5.89m/s^2$ (0.6g)	35Hz	$5.89m/s^2$ (0.6g)	35Hz	$2.95m/s^2$ (0.3g)

※ $1\text{ g} = 9.8\text{ m/s}^2$

(5) 시험결과

(가) 내진시험 결과

[표 4-22] 내진시험 결과 요약

점검 항목	허용기준	결과
ACB OPEN/CLOSE 동작	CLOSE : 빨간색 램프 점등 OPEN: 초록색 램프 점등	이상없음
시험 전, 중, 후 ACB에 대한 Chattering 측정	Chattering 없을 것	이상없음
변위 폭이 최대 75 mm를 초과하지 않을 것	75 mm 이하	이상없음
시험대상기기의 전복 또는 전도	전복/전도 없을 것	이상없음
시험대상기기의 바닥 고정부 이탈	이탈 없을 것	이상없음
설치된 구성품의 이탈	이탈 없을 것	이상없음
시험대상설비의 프레임 변형 또는 파손	변형/파손 없을 것	이상없음
바닥시설 자체의 결함부분이 이탈되거나, 진동대 고정부분 이탈	이탈 없을 것	이상없음
앵커링, 볼트 등의 고정 장치 자체의 균열, 변형 및 절단	변형/균열/절단 없을 것	이상없음
기타 육안으로 확인이 가능한 변형이나 파손	변형/파손 없을 것	이상없음

(나) 공진탐색시험 결과

[표 4-23] 공진탐색 시험결과 요약

구분		내진시험 전 공진탐색		내진시험 후 공진탐색	
		공진 주파수 (Hz)	가속도 배율(g/g)	공진 주파수 (Hz)	가속도 배율(g/g)
X (좌우)	상단	5.37	7.04	4.88	6.84
	중단	5.13	4.59	4.88	4.42
Y (전후)	상단	7.57	7.16	7.08	5.30
	중단	7.57	4.80	7.08	3.44
Z (상하)	상단	24.66	8.28	21.48	9.96
	중단	24.66	8.28	21.48	10.14

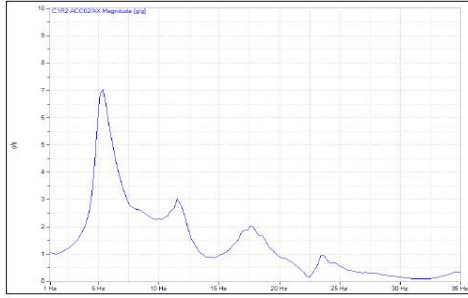
※ $1\text{ g} = 9.8\text{ m/s}^2$

(다) 내진시험 시의 최대 가속도 및 상대변위 결과

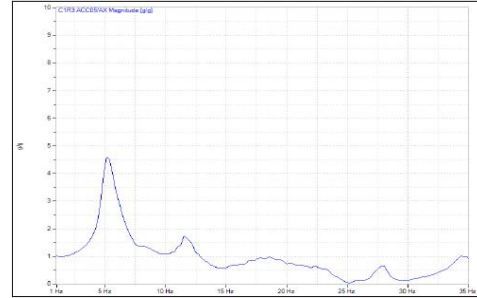
[표 4-24] 최대가속도 및 상대변위 결과

내진시험	시험방향	최대 가속도(g)			상대변위 (mm)
		Shaker table	상단	중단	
내진시험 1회	X(좌우)	0.75	3.38	2.04	24.93
	Y(전후)	0.82	2.26	1.63	11.70
	Z(상하)	0.41	1.17	1.13	N/A
내진시험 2회	X(좌우)	0.85	3.46	2.58	24.93
	Y(전후)	0.84	2.37	1.70	12.26
	Z(상하)	0.44	1.11	1.14	N/A

※ $1\text{ g} = 9.8\text{ m/s}^2$

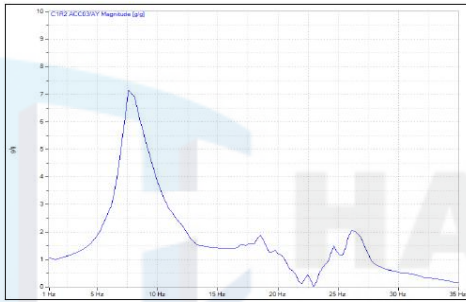


(a) 상단

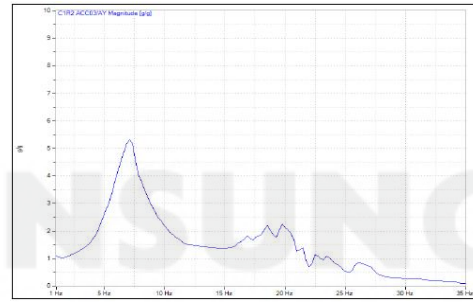


(b) 중단

[그림 4-31] 내진시험 전 공진탐색 X축(좌우)

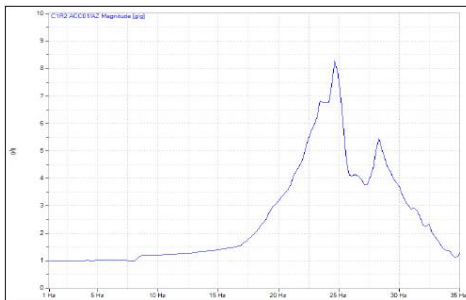


(a) 상단

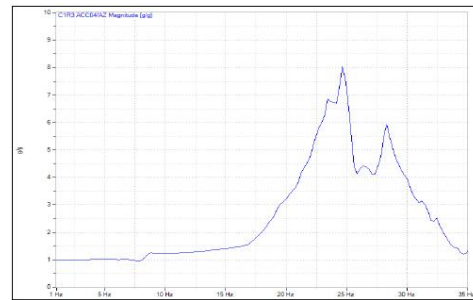


(b) 중단

[그림 4-32] 내진시험 전 공진탐색 Y축(전후)

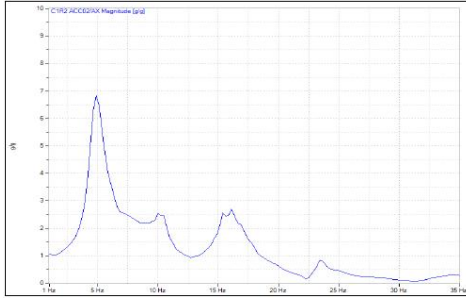


(a) 상단

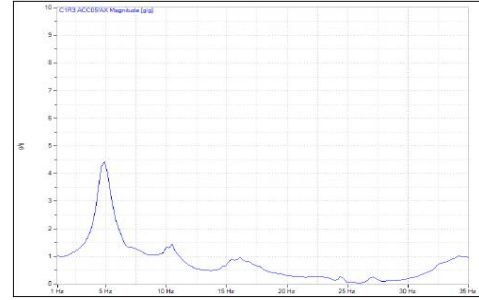


(b) 중단

[그림 4-33] 내진시험 전 공진탐색 Z축(상하)

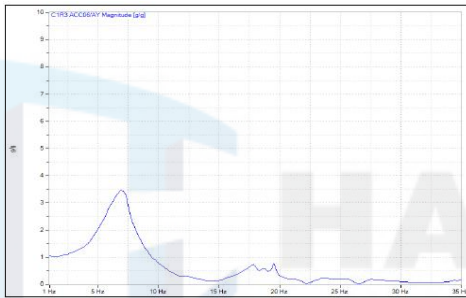


(a) 상단

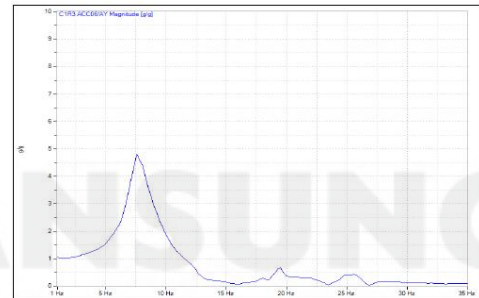


(b) 중단

[그림 4-34] 내진시험 후 공진탐색 X축(좌우)

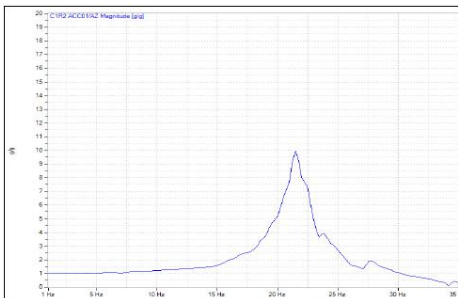


(a) 상단

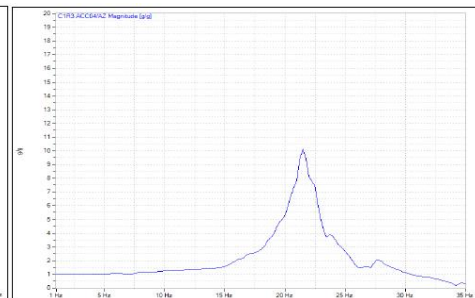


(b) 중단

[그림 4-35] 내진시험 후 공진탐색 Y축(전후)

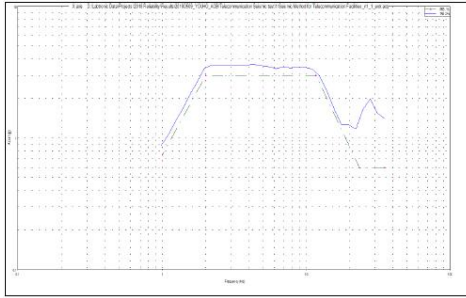


(a) 상단

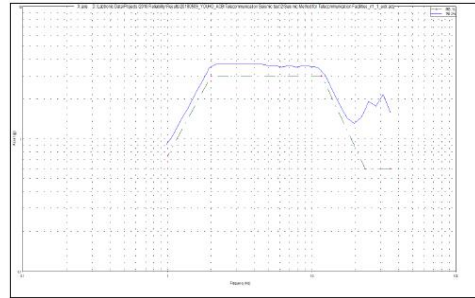


(b) 중단

[그림 4-36] 내진시험 후 공진탐색 Z축(상하)

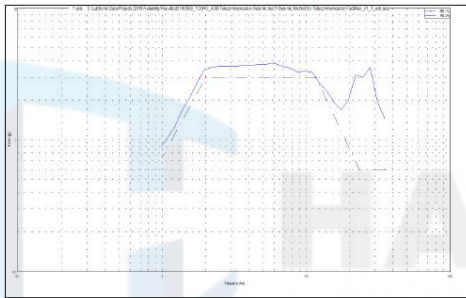


(a) 1회

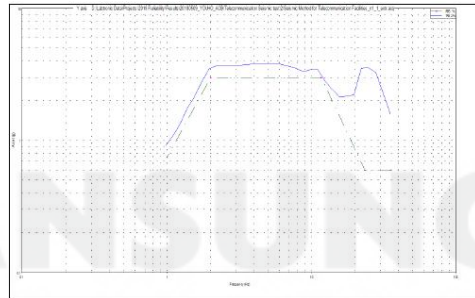


(b) 2회

[그림 4-37] 내진시험 Table X축(좌우) 응답스펙트럼

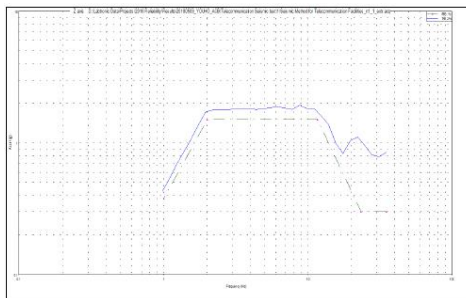


(a) 1회

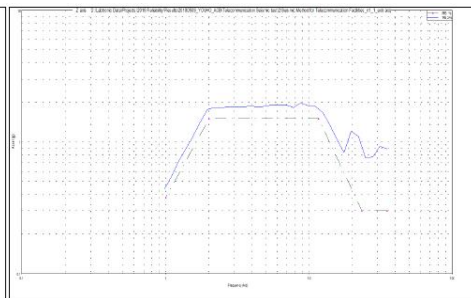


(b) 2회

[그림 4-38] 내진시험 Table Y축(전후) 응답스펙트럼

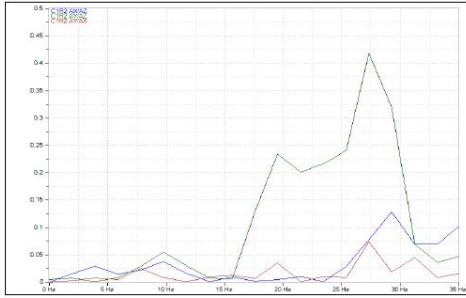


(a) 1회



(b) 2회

[그림 4-39] 내진시험 Table Z축(상하) 응답스펙트럼

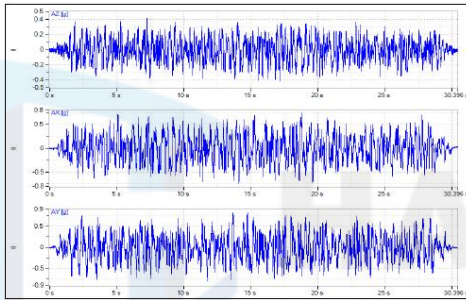


(a) 1회

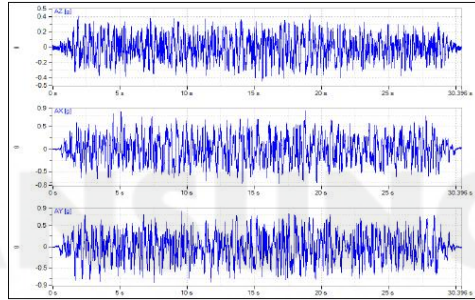


(b) 2회

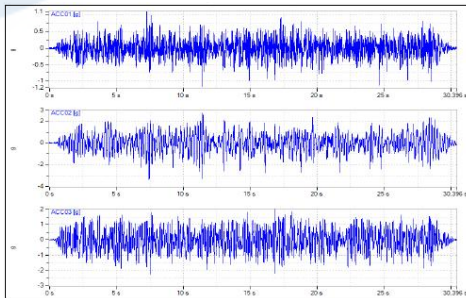
[그림 4-40] 내진시험 간섭함수



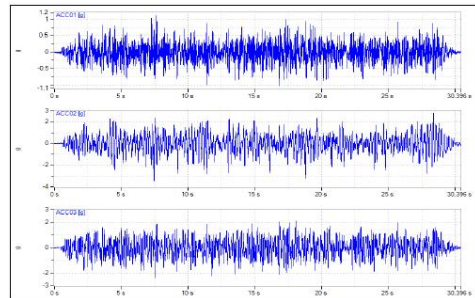
(a) 1회 Shaker table



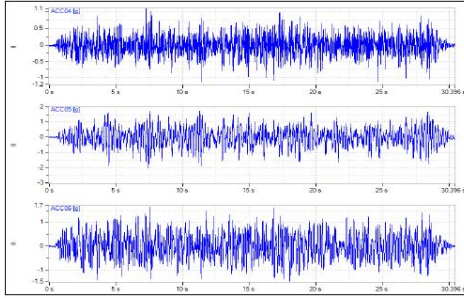
(b) 2회 Shaker table



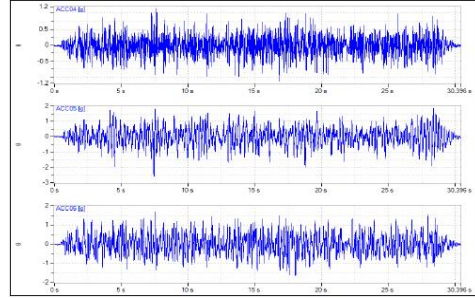
(c) 1회 상단



(d) 2회 상단

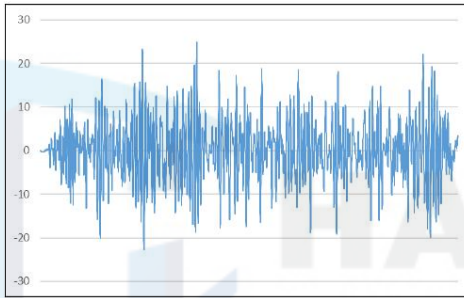


(a) 1회 중단

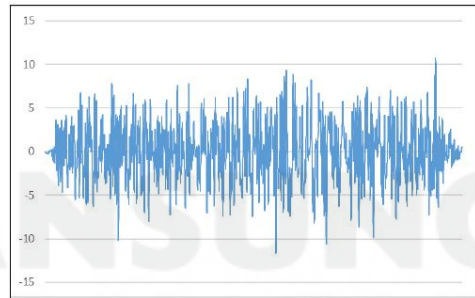


(b) 2회 중단

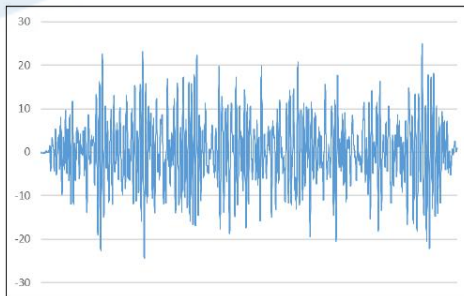
[그림 4-41] 내진시험 Time history



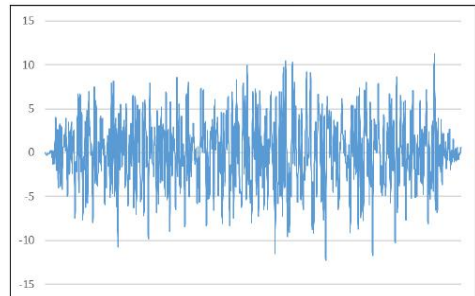
(a) X축 1회



(b) Y축 1회



(c) X축 2회



(d) Y축 2회

[그림 4-42] 내진시험 상대변위

제 5 장 결 론

제1절 연구결과

본 논문에서는 수·배전반에 대한 지진의 안전성을 확보하기 위하여 임의방향 진동의 감쇠기능을 가지는 면진장치를 개발 적용하여 해석적인 방법과 진동대 실증시험을 수행하였다. 본 연구의 절차는 수배전반에 적용하는 면진장치를 설계하고 시제품을 제작하여 적용된 부품에 대한 신뢰성 시험 및 확인 시험을 진행하였다. 면진장치에 적용한 폴리우레탄의 특성을 확인하기 위하여 온도조건을 조정하여 시험하였고, 그 결과 저온에서 우레탄이 강성의 성질을 보였고 고온에서는 연성의 성질을 나타내었다. 실제적인 상온에서의 변화율은 거의 없어 면진장치에 사용이 용이한 것으로 나타났다.

수배전반의 실물크기를 측정하여 3차원 모델을 구성하고 해석적 방법인 유한요소모델을 이용하여 정적해석을 수행하였다. 유한요소법을 통한 정적해석으로 수배전반의 응력분포 및 변위를 평가하고 설계 제한요건의 충족성을 확인하였다. 모드해석 결과 요구응답스펙트럼의 차단 진동수 이하에서 고유진동수가 나타났으므로 가요성기기로 스펙트럼을 수행하였다.

스펙트럼해석 결과 Door Lock부분에서 최대응력(116Mpa)이 발생하였으며 냉간압연강 허용응력(315Mpa)보다 낮게 나타나고 있으므로 구조적으로 안전함을 입증하였다. 도출한 결과를 바탕으로 수배전반에 대한 최종 설계안을 도출하였고 설계안을 기준으로 제품을 제작하여 내진성능시험을 수행함으로써 제품에 대한 신뢰성과 타당성을 확인하였다.

본 연구를 수행하여 도출된 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 폴리우레탄 시료의 시험편을 만능재료시험기의 온도챔버(Temperature Chamber)의 3mm /min의 속도로 0~2500N 까지의 힘으로 KS B 5541 :

1995의 시험방법으로 수행하였을 때 최대 2500N 압축 시 폴리우레탄 시편 변위량은 온도 $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 일 경우 3.6mm, 온도 $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 일 경우 4.1mm, 온도 $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 에서 168시간 노화 시켰을 경우 4.9mm로 상온에서 변위량 변화와 온도 $-20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 일 경우 3.6mm로 고온일 경우 폴리우레탄의 변위 값이 약간 높았지만 상온이나 저온에서의 변위량 변화는 없는 것으로 나타났다.

2) 모드해석에서는 고유진동수와 모드형을 나타내며, 해석결과 1차 진동수는 12.0262Hz로 요구응답스펙트럼의 차단진동수 33Hz보다 낮은 진동수에서 1차 고유진동수 값이 나타나고 있으므로 가요성기기의 해석절차를 따라야 한다. 스펙트럼해석 결과, Door Lock 부위에서 최대응력(116MPa)이 발생하였으며 냉간압연강 허용응력(315MPa)보다 낮게 나타나고 있으므로 구조적으로 지진에 안전함을 입증할 수 있다.

3) 수배전반에 대한 내진시험 결과 최대변위 75mm보다 이상인 제품이 없고, 시험 중 부착물의 이탈이나, 앵커링, 볼트 등의 고정장치 자체의 균열, 변형 및 절단 등이 일어나지 않고 시험 중 기능의 상실이 일어나지 않아 구조적 안전성과 신뢰성을 확보하였다.

환경의 변화에 따라 물성 값이 변화되는 우레탄의 성질을 고려하여 온도와 시간을 조정하여 시험을 하였으나 시간적 제한으로 충분히 시행하지 못하였다.

또한 우레탄의 수명기간 동안 물성 값을 고려한 규정은 포함되지 않았다. 따라서 향후 우레탄의 물성 값의 변화에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 국내문헌

- 강동우. (2008). “지진 및 진동을 고려한 통신용 전자장비의 구조최적설계”.
서울대학교 대학원 석사학위논문
- 건축도시공간연구소. (2015). “우리나라 건축물 내진설계 현황과 개선방향 보고서”. 4.
- 곽노석, 양윤구, 정부영, 황택성. (2005). 무용제 반응에 의한 폴리에스테르계
폴리우레탄의 합성 및 특성. 『Polymer』, 29(4), 344-349.
- 국립전파연구원. (2015). “방송통신설비의 내진시험방법”. 전파연구원 공고2015-14호.
- 국토교통부. (2016). “건축구조기준”. 국토교통부고시 제2016-317호.
- 기상청. www.kma.go.kr
- 김기현, 이상익, 배석명. (2008). “국내외 건축물에 시설되는 수변전설비 지진
대책에 관한 조사 분석”. 『전기설비학회논문지』, 22(12), 150-156.
- 김기현, 이상익, 배석명, 조성국. (2009). 건축물에 시설되는 수변전설비의 내
진설계 검토사항 및 설계 방안에 대한 고찰. 『조명·전기설비학회
논문지』, 23(8), 74-79.
- 김대곤. (2008). “非구조재 및 非건물재의 내진설계 필요성”. 『건축』, 52(10), 49-52.
- 김동관. (2013). “지진응답스펙트럼에 대한 낮은 심도의 토사지반과 하부구조
의 영향”. 서울대학교 대학원 박사학위논문
- 김상조, 박일민. (1998). “구조해석을 위한 상용 3D프로그램의 적용성에 관한
연구”. 『공업기술연구소논문집』, 12, 47-59.
- 김영중. (2010). “통신설비의 지진응답특성에 관한 동시 다축 시험 상관성”.
『한국소음진동학회 춘계논문집』, 564-565.
- 김예성, 배재현. (2016). “우리나라 건축물 내진설계 현황과 개선과제”.
『이슈와 논점』, 1216.
- 김정인, 고동우. (2016). “내진형수배전반의 개발현황과 과제”. 『대한건
축학회 학술발표대회 논문집』, 1407-1408.

- 대한전기협회. (2014). 전기설비기술기준, 산업통상자원부 고시 제 2014-245호.
- 문종윤, 권민호, 김진섭, 임정희. (2018). “비선형시간이력해석을 이용한 수배 전반의 지진취약도 도출”. 『한국산학기술학회 논문지』, 19(2), 50-55.
- 박성규. (2010). “진동대 실험을 통한 적층고무받침의 내진성능 평가”. 『한국철도학회 논문집』, 13(4), 440-446.
- 박영기. (2013). “롤리베어링을 이용한 면진 시스템의 최적 설계 : 실험적 연구”. 인하대학교 대학원 박사학위논문
- 박홍근, 김동관. (2016). “KBC 2016 지진하중의 지반계수 개정에 대한 소개”. 『건축구조』, 23(2), 13-26.
- 법제처. (2018). “지진·화산재해대책법”. 법률 제14532호.
- 손수원. (2018). “지반형 기초지진격리 장치의 면진성능 평가”. 부산대학교 대학원 박사학위논문
- 신은철, 신희수, 박경원, 박광석. (2017). “우레탄 수지계열의 화학물질 및 온도변화에 대한 강도특성 연구”. 『한국토목섬유학회 학술발표회』, 2017(10), 98-100.
- 안종필, 유덕찬, 김영일 (2003). “한국의 지진특성에 관한 고찰”. 『대한토목학회 학술대회』, 4144-4149.
- 안철진. (2017). “수배전반 면진 시스템의 해석모델 개발 및 해석적 검증”. 숭실대학교 대학원 석사학위논문
- 안철진, 최경규. (2016). “수배전반용 적층천연고무 면진장치에 대한 해석적 연구”. 『한국콘크리트학회 논문집』, 28(2), 81-82.
- 안태상. (2014). “캔틸레버형 강재댐퍼가 설치된 구조물의 내진성능”. 고려대학교 대학원 박사학위논문
- 이동근. (1993). “지진해석과 내진설계”. 『한국콘크리트학회지』, 5(2), 9-19.
- 이명규, 이상석, 박진영, 우성식. (2010). “내진성능향상을 위한 납고무제진장치의 개발”. 『대한건축학회 논문집』, 30(1), 13-14.
- 이성렬. (2009). “국내 학교건물의 내진성능평가 및 내진보강 위치선정 : 국내 및 일본규준을 중심으로”. 창원대학교 대학원 석사학위논문

- 이원호, 안태상, 김영주. (2015). 『면진구조 설계기법 및 국내 적용사례』, 서울 : 기문당.
- 이정균. (2015). “소방시설 내진성능평가를 위한 지진감시시스템의 설계 및 구현”. 인천대학교 대학원 박사학위논문
- 이준호. (2015). “복합 수동형 감쇠장치가 설치된 구조물의 내진성능”. 성균관대학교 일반대학원 박사학위논문
- 이춘택. (2017). “지진 센싱 장치의 신호조절 및 상보필터 설계에 의한 수배전반 설비의 내진 시스템 구현”.가천대학교 대학원 석사학위논문
- 장극관, 임영철, 서대원. (2013). 비구조요소의 내진설계기준 비교. 『대한건축학회 논문집』, 29(1), 23-30.
- 장정범, 이종립, 황경민, 함경원. (2009). 무정전-무이설 방식의 전기판넬 내진보강시스템 시험연구. 『한국지진공학회 논문집』, 13(3), 1-10.
- 진택성. (2014). “무정전 전원장치의 내진설계 및 해석에 관한 연구”. 건국대학교 대학원 석사학위논문
- 최영휴, 홍민기, 문성춘. (2015). “내진마운트 일체형 스마트 배전반의 내진검증 해석”. 『한국기계가공학회 춘추계학술대회 논문집』, 115.
- 최은수, 김진호, 유완동, 이승용. (2012). “기존 배전반 이중바닥 시스템의 내진보강 기술”. 『한국방재학회 논문집』, 12(2), 1407-1408.
- 하민국, 홍기증, 조성국. (2012) “국내 전기설비 내진설계기준 현황”. 『대한토목학회 정기학술대회』, 2299-2302.
- 한상환. (2011). 우리나라 내진설계 현황 및 문제점. 『건축』, 55(5), 22-26.
- 한상환, 이한선.(2008). 지진과 우리나라의 내진설계. 『건축』, 52(10), 23-27.
- 현기환. (2009). “내진성능 향상을 위한 고감쇠 고무받침의 개발연구”. 전남대학교 대학원 박사학위 논문

2. 국외문헌

- Benjamin David Kosbab. (2010). Seismic Performance Evaluation of Port Container Cranes Allowed to Uplift. Georgia Institute of Technology
- European Committee for Standardisation. (2003). Design of structures for structures for earthquake resistant – Part 1 : General rules, seismic actions and rules for buildings, Eurocode 8 (Pr EN 1998-1)
- Federal Emergency Management Agency. (1994). EHRP Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulations for New Buildings, Part 1 : Provision 222.
- International Code Council. (2012). International Building Code, IBC.
- Jieun Hur. (2012). Seismic Performance Evaluation of Switchboard Cabinets Using Nonlinear Numerical MODELS, Georgia Institute of Technology
- Jieun Hur, Eric Althoff, Halil Sezen, Richard Denning, Tunc Aldemir. (2017). Seismic Assessment and Performance of Nonstructural Components Affected by Structural Modeling, 『Nuclear Engineering and Technology』 , 49(2), 387-394.
- Masaomi TESHIGAWARA. (2000). New Seismic Design Provisions in Japan, ACI Special Publication Volume.
- Nathaniel Bryce Wagner. (2016). Seismic Earth Pressure on Basement Walls with Cohesionless Backfill. University of California Berkeley
- National Building Code of Canada(NBCC). (2005).
- Shunsuke OTANI, Hisahiro HIRAISHI, Mitsumasa MIDORIKAWA, Masaomi TESHIGAWARA. (2000). New Seismic Design Provisions in Japan, ACI Special Publication Volume.
- Standards Association of New Zealand. (1992). Code of Practice for General Structural Design and Design Loading for Buildings, Volume 1 Code of Practice, NZS 4203.
- Telcordia Technologies Inc. (2006). Network Infrastructure and

Operations GR-63-CORE Issue 2.

Uniform Building Code(UBC). (1997).

Yuji ISHIYAMA. (2011). Introduction to Earthquake Engineering and Seismic Code in the World.

櫛田 博恭. (2005). “電気使用設備の地震対策”. 『生産と低』, 1-13.

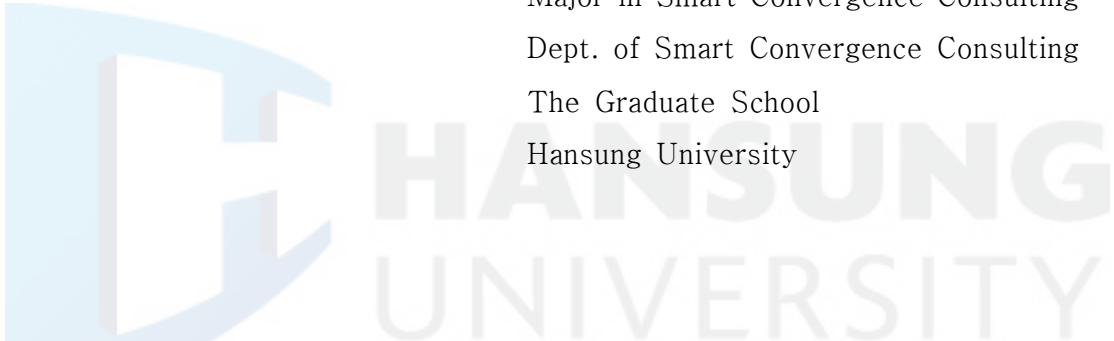


ABSTRACT

A Study on Seismic Isolators Switchboard with Function Attenuation of Arbitrary Direction Vibration

LEE, TAE HO

Major in Smart Convergence Consulting
Dept. of Smart Convergence Consulting
The Graduate School
Hansung University

The logo of Hansung University is located on the left side of the page. It features a stylized blue and white graphic. A large, faint watermark of the university's name, 'HANSUNG UNIVERSITY', is visible in the background across the middle of the page.

As South Korea is viewed as a relatively safer area than marginal states located at the Circum-Pacific earthquake belt, it does not prepare for earthquake. However, the earthquakes magnitude is only variable; small or medium-sized earthquakes have occurred since past. Due to lack of measuring apparatuses and awareness of earthquakes, when earthquakes incur, it is not noticed and measured.

In South Korea, since 1988, earthquake-proof of structure and non-structure has been obligated. The reason why earthquake-proof is obligated is that earthquakes occurred in Songnisan National Park(5.2, September 1978), Hongseong, Chung-nam province(magnitude 5.0, October 1978) and Mexico in 1985.

The preparation of non-structure that is built in the buildings is still vulnerable. Especially, if distribution of electricity that has directly effect on disaster operation does not run smoothly, there is no response of emergency situation. Recently, a system of integrity and safe guarantee of earthquake-proof on non-structure is maintained. The business of electricity also research and develop technology that distributes electricity smoothly during earthquakes.

In this research, we develop earthquake-proof applied to electrical panel and had load and aging experiment about components such as polyurethane and spring that are applied to earthquake-proof. Prior to directly applying developed earthquake-proof to electrical panel, we used analytical method about finite element method and carried out mode spectral analysis. Moreover, we set up earthquake-proof that are developed on electronic panel and carried out 3 dimensional verification test through the method of earthquake-proof in consideration of situation that occurs in the earthquake areas.