creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000266571

2018年 02月

博 士 學 位 論 文

구조시스템에 대한 부구조계 유사동적 실험 기법 개발

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

建 築 工 學 科 (建 築 工 學 專 攻)

張 正 鉉

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

구조시스템에 대한 부구조계 유사동적 실험 기법 개발

Development of Sub-Structure Pseudo Dynamic Test Technique for Structure System

2018年 2月 23日

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

建 築 工 學 科 (建 築 工 學 專 攻)

張 正 鉉

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

구조시스템에 대한 부구조계 유사동적 실험 기법 개발

指導敎授 최 재 혁

이 論文을 工學 博士學位申請 論文으로 提出함.

2017年 10月

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

建 築 工 學 科 (建 築 工 學 專 攻)

張 正 鉉

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

張正鉉의 博士學位論文을 認准함

委員長	朝鮮大學校 敎授	박 정 웅	印
委 員	韓國技術敎育大學校 敎授	이 승 재	印
委 員	全南大學校 敎授	이 강 석	印
委 員	朝鮮大學校 敎授	최 재 혁	印
委 員	朝鮮大學校 敎授	조 창 근	印

2017年 12月

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

차 례

제1장 서론

1.1 연구배경 및 목적 ····· 1
1.2 기존의 연구 ····· 5
1.3 연구내용 및 방법 ····· 7

제2장 유사동적 온라인 실험 방법 및 구성

2.1 유사동적 온라인 실험 방법 ····· 8
2.2 유사동적 온라인 실험 하드웨어의 구성 ····· 10
2.2.1 Actuator 제어 시스템 ····· 10
2.2.2 내부연결망 ····· 13
2.3 유사동적 온라인 실험 소프트웨어의 구성 ····· 15
2.3.1 구조물의 모델화 ····· 15
2.3.2 운동방정식 및 고유진동 ····· 18
2.3.2.1 단자유도 구조물 ····· 19
2.3.2.2 다자유도 구조물 ····· 20
2.3.3 감쇠비 ····· 22
2.3.4 수치적분법 ····· 26
2.3.4.1 Central Difference Method ····· 27
2.3.4.2 암시적 Newmark-β Method ····· 30

제3장 유사동적 온라인 실험 오차

3.1 개요 ····· 37
3.2 Actuator제어 및 변위제어 오차 ····· 37
3.3 에너지 기반 유사동적 온라인 실험의 오차 모니터링 ····· 42

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.4 유사동적 온라인 실험의 오차 보상법 ····· 44

제4장 선형 동적 실험을 통한 시스템 검증

4.1 개요 ····· 47
4.2 시험체 상세 ····· 49
4.3 단자유도 시스템 선형지진응답 실험 ····· 50
4.3.1 단자유도 시스템 선형 지진응답 실험 개요 ····· 50
4.3.2 복원력 보정에 따른 유사동적 온라인 실험 결과 ····· 54
4.3.3 순수 수치해석 결과 비교 ····· 60
4.4 MDOF 선형 지진응답 실험 ····· 64
4.4.1 다자유도 시스템 선형 지진응답 실험 개요 ····· 64
4.4.2 복원력 보정에 따른 유사동적 온라인 실험 결과 ····· 67
4.4.3 순수 수치해석 결과 비교 ····· 74

제5장 비선형 유사동적 온라인 실험

5.1 개요 ····· 82
5.2 강재 시험체 비선형 유사동적 온라인 실험 ····· 82
5.2.1 시험체 상세 ····· 82
5.2.2 준정적 재하실험 ····· 83
5.2.3 유사동적 온라인 실험 모델 ····· 86
5.2.4 비선형 온라인 실험 El Centro 140% 결과 ····· 88
5.2.5 비선형 온라인 실험 El Centro 200% 결과 ····· 99
5.3 전단패널댐퍼 비선형 유사동적 온라인 실험 ····· 110
5.3.1 시험체 상세 ····· 110
5.3.2 준정적 재하실험 ····· 110
5.3.3 유사동적 온라인 실험 모델 ····· 113
5.3.4 유사동적 온라인 실험 결과 ····· 116

제6장 결론

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참고문헌 ····· 132

부록

A. Skeleton Shift Model ····· 139

B. 실험 전경 ····· 143

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표 차 례

<표 2.1> 유압서보 Actuator의 성능 ····· 12
<표 2.2> DAQ 장비 성능 ····· 14
<표 2.3> 중앙차분법 흐름도 ····· 29
<표 2.4> 암시적 Newmark-β법 흐름도 ····· 33
<표 2.5> 수정 뉴튼-랩슨 반복법 흐름도 ····· 36

<표 3.1> 예측방정식의 상수 ····· 44

<표 4.1> 유사동적 온라인 실험 장비 및 프로그램 ····· 48
<표 4.2> 선형 유사동적 온라인 실험 시험체 제원 ····· 49
<표 4.3> 선형 SDOF 유사동적 온라인 실험 개요 ····· 50
<표 4.4> SDOF 지진응답실험 실험 및 수치해석 최대값 결과 비교 ····· 60
<표 4.5> 선형 MDOF 유사동적 온라인 실험 개요 ····· 65
<표 4.6> MDOF 지진응답실험 실험 및 수치해석 최대값 결과 비교 ····· 80

<표 5.1> 비선형 유사동적 실험 시험체 제원 ····· 83
<표 5.2> 준정적 재하 실험 및 SSM해석 에너지 흡수량 비교 ····· 85
<표 5.3> 비선형 MDOF 유사동적 온라인 실험 개요 ····· 86
<표 5.4> 비선형 온라인 실험 및 수치해석 최대값 결과 비교(EI 140) ····· 98
<표 5.5> 비선형 온라인 실험 및 수치해석 최대값 결과 비교(EI 200) ····· 109
<표 5.6> 전단패널댐퍼 준정적 재하 실험 및 SSM해석 에너지 흡수량 비교 ····· 112
<표 5.7> 구조물의 각층 규모 및 하중 ····· 114
<표 5.8> 구조물의 각층 제원(기둥-12ea) ····· 114
<표 5.9> 전단패널댐퍼 MDOF 비선형 유사동적 온라인 실험 개요 ····· 114
<표 5.10> 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 수치해석 1층 최대값 결과 비교 ····· 124
<표 5.11> 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 수치해석 2층 최대값 결과 비교 ····· 128

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

그 림 차 례

[그림 1.1] 규모 7.0이상 지진 발생 추이 ····· 1
[그림 1.2] 연도별 국내 지진발생 횟수 ····· 2
[그림 1.3] 준정적 재하실험 전경 ····· 3
[그림 1.4] 진동대 실험 전경 ····· 4

[그림 2.1] 유사동적 온라인 실험 개념도 ····· 8
[그림 2.2] 유사동적 온라인 실험 흐름도 ····· 9
[그림 2.3] PID제어 블록 다이어그램 ····· 11
[그림 2.4] 유압서보 밸브의 구조 ····· 12
[그림 2.5] (주)삼연기술의 유압서보 Actuator ····· 12
[그림 2.6] 유사동적 온라인 실험 정보전달 흐름도 ····· 13
[그림 2.7] 치환된 평면모델 ····· 15
[그림 2.8] 전단질점계모델 ····· 16
[그림 2.9] 라멘 구조 항복 메커니즘 ····· 17
[그림 2.10] 부재레벨 응답해석 골조 역학적 모델 ····· 18
[그림 2.11] 무감쇠 시스템의 자유진동 ····· 20
[그림 2.12] 다자유도 구조물의 감쇠 모델 ····· 23
[그림 2.13] 고우진동수에 따른 모드 감쇠비 변동 ····· 25
[그림 2.14] 수치 적분 ····· 26
[그림 2.15] 중앙차분법 ····· 27
[그림 2.16] Newmark -β법 ····· 30
[그림 2.17] 접선강성 사용에 따른 오차 ····· 34
[그림 2.18] 수정 뉴튼-랩슨 반복계산법 ····· 35

[그림 3.1] 실제 가력 실험시 변위제어 오차 ····· 38
[그림 3.2] 목표 변위점에서의 복원력 취득 오류 ····· 38
[그림 3.3] Actuator 제어 방법 ····· 39

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[그림 3.4] 오버슛에 의한 오차 ····· 40
[그림 3.5] 오버슛에 의한 구조물 응답(에너지 소산) ····· 40
[그림 3.6] 언더슛에 의한 오차 ····· 41
[그림 3.7] 언더슛에 의한 구조물 응답(에너지 부가) ····· 41
[그림 3.8] Hybrid Simulation Error Monitoring ····· 44
[그림 3.9] 다항식 보상 예측방법 ····· 45
[그림 3.10] 복원력 보정 방법 ····· 46

[그림 4.1] 유사동적 온라인 실험 시스템 ····· 47
[그림 4.2] 실험 전경 ····· 48
[그림 4.3] 선형 유사동적 실험 시험체 형상 ····· 49
[그림 4.4] 전단 1질점계 온라인 실험 모델 ····· 51
[그림 4.5] El Centro Ns(1940) 지진파 ····· 51
[그림 4.6] El Centro NS(1940) 가속도응답 스펙트럼(5%감쇠) ····· 52
[그림 4.7] 유사동적 온라인 지진응답실험 Flow Chart ····· 53
[그림 4.8] SDOF 온라인 실험 목표변위, 측정변위 응답 ····· 54
[그림 4.9] SDOF 온라인 실험 목표변위, 측정변위 응답(초기 5초) ····· 55
[그림 4.10] SDOF 온라인 실험 변위제어 오차 ····· 55
[그림 4.11] 복원력 보정여부에 따른 변위 응답 ····· 57
[그림 4.12] 복원력 보정여부에 따른 변위 응답(초기 5초) ····· 57
[그림 4.13] 복원력 보정에 따른 누적 에너지 오차 ····· 58
[그림 4.14] 복원력 무보정에 따른 누적 에너지 오차 ····· 58
[그림 4.15] 복원력 보정에 따른 HSEM ····· 59
[그림 4.16] 복원력 무보정에 따른 HSEM ····· 59
[그림 4.17] SDOF 온라인 실험 및 수치해석 변위 응답 ····· 61
[그림 4.18] SDOF 온라인 실험 및 수치해석 변위 응답(초기 5초) ····· 61
[그림 4.19] SDOF 온라인 실험 및 수치해석 하중 응답 ····· 62
[그림 4.20] SDOF 온라인 실험 및 수치해석 하중 응답(초기 5초) ····· 62
[그림 4.21] SDOF 온라인 실험 및 수치해석 변위-하중 이력응답 ····· 63

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[그림 4.22] 전단 2질점계 온라인 실험 모델 ····· 65
[그림 4.23] 부구조계 유사동적 온라인 지진응답실험 Flow Chart ····· 66
[그림 4.24] 전단2질점계 온라인 실험 변위 응답 ····· 67
[그림 4.25] 전단2질점계 온라인 실험 변위 응답(초기 5초) ····· 68
[그림 4.26] 전단2질점계 온라인 실험 변위제어 오차 ····· 68
[그림 4.27] 복원력 보정여부에 따른 1층 층간 변위 응답 ····· 70
[그림 4.28] 복원력 보정여부에 따른 1층 층간 변위 응답(초기 5초) ····· 70
[그림 4.29] 복원력 보정여부에 따른 2층 층간 변위 응답 ····· 71
[그림 4.30] 복원력 보정여부에 따른 2층 층간 변위 응답(초기 5초) ····· 71
[그림 4.31] 복원력 보정에 따른 누적 에너지 오차 ····· 72
[그림 4.32] 복원력 무보정에 따른 누적 에너지 오차 ····· 72
[그림 4.33] 복원력 보정에 따른 HSEM ····· 73
[그림 4.34] 복원력 무보정에 따른 HSEM ····· 73
[그림 4.35] 2질점계 온라인 실험 및 수치해석 1층 층간변위 응답 ····· 75
[그림 4.36] 2질점계 온라인 실험 및 수치해석 1층 층간변위 응답(초기 5초) ····· 75
[그림 4.37] 2질점계 온라인 실험 및 수치해석 2층 층간변위 응답 ····· 76
[그림 4.38] 2질점계 온라인 실험 및 수치해석 2층 층간변위 응답(초기 5초) ····· 76
[그림 4.39] 2질점계 온라인 실험 및 수치해석 1층 하중 응답 ····· 77
[그림 4.40] 2질점계 온라인 실험 및 수치해석 1층 하중 응답(초기 5초) ····· 77
[그림 4.41] 2질점계 온라인 실험 및 수치해석 2층 하중 응답 ····· 78
[그림 4.42] 2질점계 온라인 실험 및 수치해석 2층 하중 응답(초기 5초) ····· 78
[그림 4.43] 2질점계 온라인 실험 및 수치해석 1층 하중-변위 이력응답 ····· 79
[그림 4.44] 2질점계 온라인 실험 및 수치해석 2층 하중-변위 이력응답 ····· 79
[그림 4.45] 2질점계 온라인 실험 및 수치해석 1층 주파수 분석 ····· 81
[그림 4.46] 2질점계 온라인 실험 및 수치해석 2층 주파수 분석 ····· 81

[그림 5.1] 비선형 유사동적 실험 시험체 형상 ····· 83
[그림 5.2] 점증진폭 입력파형 ····· 84
[그림 5.3] 준정적 재하 실험 및 SSM해석 결과 ····· 85

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[그림 5.4] 비선형 온라인 실험 전단 2질점계 모델 ····· 87
[그림 5.5] 비선형 온라인 실험 EI140 변위 응답 ····· 88
[그림 5.6] 비선형 온라인 실험 EI140 변위응답 (초기 5초) ····· 89
[그림 5.7] 비선형 온라인 실험 EI140 변위제어 오차 ····· 89
[그림 5.8] 유사동적 온라인 실험 누적 에너지 오차 ····· 91
[그림 5.9] 유사동적 온라인 실험 HSEM 결과 ····· 91
[그림 5.10] 온라인 실험 및 수치해석 EI140 1층 층간변위 응답 ····· 92
[그림 5.11] 온라인 실험 및 수치해석 EI140 1층 층간변위 응답(초기 5초) ····· 92
[그림 5.12] 온라인 실험 및 수치해석 EI140 2층 층간변위 응답 ····· 93
[그림 5.13] 온라인 실험 및 수치해석 EI140 2층 층간변위 응답(초기 5초) ····· 93
[그림 5.14] 온라인 실험 및 수치해석 EI140 1층 하중 응답 ····· 94
[그림 5.15] 온라인 실험 및 수치해석 EI140 1층 하중 응답(초기 5초) ····· 94
[그림 5.16] 온라인 실험 및 수치해석 EI140 2층 하중 응답 ····· 95
[그림 5.17] 온라인 실험 및 수치해석 EI140 2층 하중 응답초기 5초) ····· 95
[그림 5.18] 온라인 실험 및 수치해석 EI140 1층 변위-하중 이력응답 ····· 96
[그림 5.19] 온라인 실험 및 수치해석 EI140 2층 변위-하중 이력응답 ····· 96
[그림 5.20] 온라인 실험 및 수치해석 EI140 1층 주파수 분석 ····· 97
[그림 5.21] 온라인 실험 및 수치해석 EI140 2층 주파수 분석 ····· 97
[그림 5.22] 비선형 온라인 실험 EI200 변위 응답 ····· 99
[그림 5.23] 비선형 온라인 실험 EI200 변위응답 (초기 5초) ····· 100
[그림 5.24] 비선형 온라인 실험 EI200 변위제어 오차 ····· 100
[그림 5.25] 유사동적 온라인 실험 누적 에너지 오차 ····· 102
[그림 5.26] 유사동적 온라인 실험 HSEM 결과 ····· 102
[그림 5.27] 온라인 실험 및 수치해석 EI200 1층 층간변위 응답 ····· 103
[그림 5.28] 온라인 실험 및 수치해석 EI200 1층 층간변위 응답(초기 5초) ····· 103
[그림 5.29] 온라인 실험 및 수치해석 EI200 2층 층간변위 응답 ····· 104
[그림 5.30] 온라인 실험 및 수치해석 EI200 2층 층간변위 응답(초기 5초) ····· 104
[그림 5.31] 온라인 실험 및 수치해석 EI200 1층 하중 응답 ····· 105
[그림 5.32] 온라인 실험 및 수치해석 EI200 1층 하중 응답(초기 5초) ····· 105

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[그림 5.33] 온라인 실험 및 수치해석 El200 2층 하중 응답 ····· 106
[그림 5.34] 온라인 실험 및 수치해석 El200 2층 하중 응답초기 5초) ····· 106
[그림 5.35] 온라인 실험 및 수치해석 El200 1층 변위-하중 이력응답 ····· 107
[그림 5.36] 온라인 실험 및 수치해석 El200 2층 변위-하중 이력응답 ····· 107
[그림 5.37] 온라인 실험 및 수치해석 El200 1층 주파수 분석 ····· 108
[그림 5.38] 온라인 실험 및 수치해석 El200 2층 주파수 분석 ····· 108
[그림 5.39] 전단패널댐퍼 시험체 형상 ····· 110
[그림 5.40] 전단패널댐퍼 준정적 재하 실험 결과 ····· 111
[그림 5.41] 전단패널댐퍼 준정적 재하 실험 결과 ····· 112
[그림 5.42] 대상구조물 평면 및 입면 ····· 113
[그림 5.43] 온라인 실험을 위한 구조물 전단질점계 치환 모델 ····· 115
[그림 5.44] 전단패널댐퍼 온라인 실험 변위응답 ····· 116
[그림 5.45] 전단패널댐퍼 온라인 실험 변위응답(초기5초) ····· 117
[그림 5.46] 전단패널댐퍼 온라인 실험 변위제어 오차 ····· 117
[그림 5.47] 유사동적 온라인 실험 누적 에너지 오차 ····· 118
[그림 5.48] 유사동적 온라인 실험 HSEM 결과 ····· 119
[그림 5.49] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 1층 층간변위 응답 ····· 120
[그림 5.50] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 1층 kd 하중 응답 ····· 121
[그림 5.51] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 kd 1층 변위-하중이력 응답 ····· 121
[그림 5.52] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 kc 1층 하중 응답 ····· 122
[그림 5.53] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 kc 1층 변위-하중이력 응답 ····· 122
[그림 5.54] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 1층 구조물 하중 응답 ····· 123
[그림 5.55] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 1층 구조물 변위-하중이력 응답 · 123
[그림 5.56] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 2층 층간변위 응답 ····· 125
[그림 5.57] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 2층 kd 하중 응답 ····· 125
[그림 5.58] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 kd 2층 변위-하중이력 응답 ····· 126
[그림 5.59] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 kc 2층 변위 응답 ····· 126
[그림 5.60] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 kc 2층 변위-하중이력 응답 ····· 127
[그림 5.61] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 2층 구조물 하중 응답 ····· 127

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[그림 5.62] 전단패널댐퍼 온라인 2층 실험 및 해석 구조물 변위-하중이력 응답 · 128
[그림 5.63] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 1층 주파수 분석 ····· 129
[그림 5.64] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 2층 주파수 분석 ····· 129

[그림 A.1] 스켈레톤 · 쉬프트 모델 ·····140
[그림 A.2] 목표점과 그 갱신 ·····141

[그림 B.1] 유사동적 온라인 실험 전경 ····· 144
[그림 B.2] 유사동적 온라인 실험 프로그램 전경 ····· 144
[그림 B.3] 유사동적 온라인 실험 제어기 전경 ····· 145
[그림 B.4] 전단패널댐퍼 파괴양상 ····· 145

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Abstract

Development of Sub-Structure Pseudo Dynamic Test Technique for Structure System

Jang, Jeong Hyun
Advisor : Prof. Choi, Jae Hyouk, Ph.D
Department of Architectural Engineering,
Graduate School of Chosun University

Recently, the frequency and magnitude of earthquakes are increasing worldwide. In case of Korea, this region had categorized as seismic safety zone. But small to medium magnitude earthquakes were steady occurred. And frequency of earthquake also shows steady increment. Especially, recent earthquake related 5.8 magnitude earthquake in Gyeongju has increased the interest of related researchers and the general public. As an evaluation method for the inelastic response of the structure, the analytical model is developed and calibrated by using experimental results. The developed analytical model is used to predict the inelastic response of the structure. Therefore, accurate and efficient testing methods are important to accurately evaluate the inelastic response of a structure to seismic loads.

The existing test methods for analysis inelastic behavior of structure are quasi-static, pseudo-dynamic and shaking table tests. Quasi-static test is easy to apply to test device and test. But this method cannot consider dynamic effect. On the other hand, shaking table test can satisfy dynamic effect and have high accuracy. But that is very expensive for applying the testing system.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

And test specimen is also takes high cost to make. Moreover when scale-downed specimen by capacity of testing system, that makes decrease reliability of test results by scale-effect. Therefore, shaking table test is so complex and hard to test. Using quasi-static test system has economical advantage. Pseudo-dynamic test is applying displacement to real structure that calculated from numerical analysis program through connected loading test device. And calculate displacement again for next step using numerical analysis program applying measured restoring force after load. But all of the pseudo-dynamic tests in Korea perfectly dependent on foreign technology and also there are no adequate researches.

Therefore, in this paper, the main purpose is to build a system for pseudo dynamic online test system and to evaluate its consistency. In order to verify the consistency of pseudo dynamic test, we tested the case of with and without compensation method for the steel specimen, it is confirmed that the system can be reconciled when the with compensation is applied to the test. Finally, similar dynamic tests were carried out using steel specimens and panel dampers. In the case of a steel damper, the structure is constructed as a physical part, and the rest is applied to a numerical analysis model to evaluate the response of a structure to a seismic load.

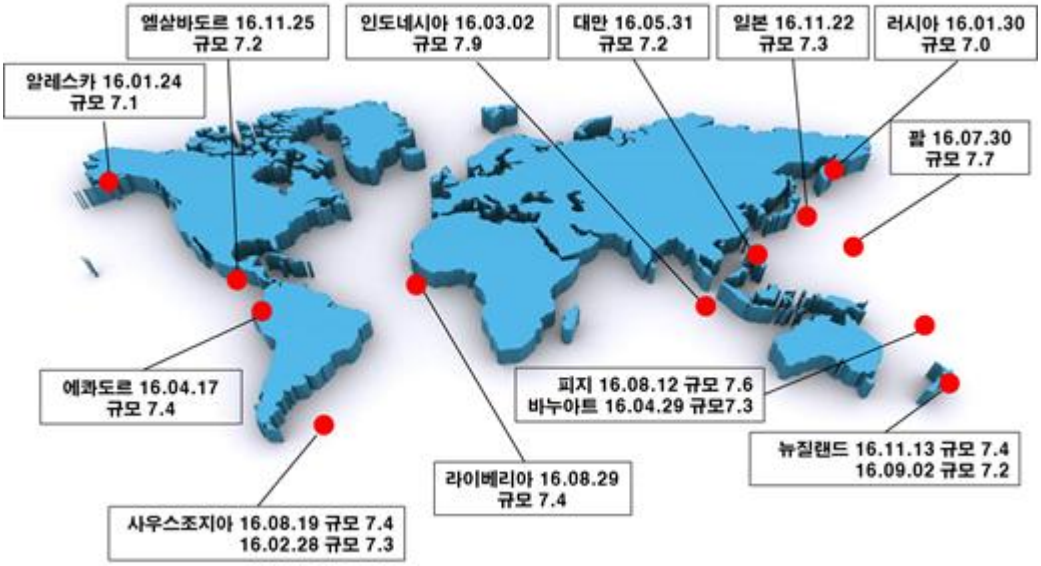
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제1장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

최근 전 세계적으로 규모 7.0 이상 31회, 규모 6.0이상 113회 등 지진의 발생 빈도 및 규모, 피해 규모가 증가 하고 있다. 또한 국내의 경우 유라시아판 내부에 위치하여 지금까지 지진 안전지대로 인식되어 왔으나, 최근 지진발생 빈도가 증가 및 특히 최근 경주지진 규모 5.8, 포항지진 5.4등의 지진 발생으로 인해 지진에 대한 관련 연구자 및 일반인들의 관심이 증가 하고 있다.

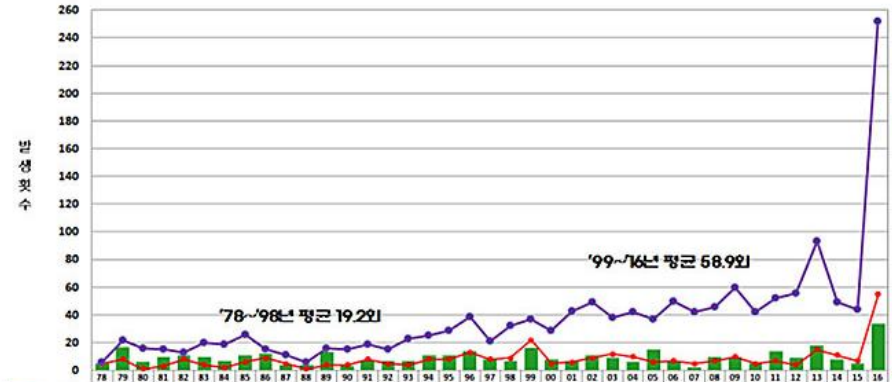


[그림 1.1] 규모 7.0이상 지진 발생 추이

구조물의 비탄성 응답에 대한 평가 방법으로는 실험적 방법을 이용한 결과를 활용하여 해석적 모델의 개발 및 보정을 하게 되며. 개발된 해석모델은 구조물의 비탄성 응답을 예측하는데 사용된다. 따라서 지진 하중에 대한 구조물의 비탄성 응답을 정확하게 평가하기 위해서는 정확하고, 효율적인 실험 방법이 중요하다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16
규모 3.0 이상	5	17	6	10	11	10	7	11	12	4	4	13	3	7	7	7	11	11	14	8	7	16	8	7	11	9	6	15	7	2	10	10	5	14	9	18	8	5	34
유감지진	5	8	1	3	8	4	2	6	9	5	1	4	4	8	5	4	8	8	13	8	9	22	5	6	9	12	10	6	7	5	7	10	5	7	4	15	11	7	55
총횟수	6	22	16	15	13	20	19	26	15	11	6	16	15	19	15	23	25	29	39	21	32	37	29	43	49	38	42	37	50	42	46	60	42	52	56	93	49	44	252

[그림 1.2] 연도별 국내 지진발생 횟수 (기상청 홈페이지 자료)

기존의 지진하중을 받는 구조시스템의 동적 응답을 파악하기 위해 수치 해석적 방법과 실험적 방법으로 발전 되어 왔다. 실험적 방법은 준정적 재하 실험, 유사동적 실험, 진동대 실험 등이 있다.

준정적 재하실험은 그림 1.3과 같이 유압식 액츄에이터를 이용하여 실험을 실시하게 되며, 현재 구조물의 성능 평가를 위해 일반적으로 가장 많이 실시되고, 구조물의 하중-이력 특성에 대한 분석, 에너지 소산능력과 파괴모드를 비교 평가하는 방법이다. 하지만, 준정적 재하실험에서는 정해진 하중이나 변위 이력에 의해 실험을 진행하기 때문에 동적 효과를 고려하지 못하는 단점이 존재하며, 특히 정해진 하중이나 변위 이력에 따라 다른 결과를 나타내는 단점이 존재한다. 많은 지침에서 입력 Loading Protocol을 제시 하고 있지만 아직 정확한 성능결과를 유추하기에는 부족한 면이 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[그림 1.3] 준정적 재하실험 전경

진동대 실험의 경우 실제에 가까운 빠른 지반운동을 모사할 수 있도록 진동대를 구축한 후 진동대위에 실험체를 설치하고 실제 측정된 또는 임의적으로 생성된 지반운동을 진동대에 가력 하여 진행하는 실험이다. 이 때문에 지진하중에 대한 실험체의 동적 특성을 파악할 수 있는 가장 신뢰성 있는 실험 방법이다.

진동대 실험은 실제 발생했던 지진 가속도로 실제 구조물과 동일한 규모 및 크기의 실험체를 이용하여 실험하는 것이 가장 이상적이다. 하지만 유압가력기의 용량 한계가 있기 때문에 실제구조물과 동일한 크기의 실험체를 설치할 만큼의 규모와 이 실험체에 지진파를 가력 할 수 있을 정도로 진동대의 성능을 증가시킬 경우 진동대 제작비용이 매우 많이 소요된다. 따라서 진동대 크기에 맞추어 축소된 모형을 제작하여 실험을 진행 하는 것이 일반적이다. 하지만 축소모형을 제작하게 되면 크기효과(Size effect)로 인해 실험결과에 대한 신뢰성이 떨어지게 되어 실험 결과를 신뢰하기에는 문제가 발생한다. 또한 진동대 실험을 진행하기 위해서는 진동대 실험 장비를 구축하기에는 너무 많은 비용이 발생하게 되며, 진동대 사용 비용 또한 준정적 재하 실험에 비해서 매우 고가 이며 실험 방법이 복잡하고 어렵다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[그림 1.4] 진동대 실험 전경

이러한 실험적 방법을 단점을 보완한 유사동적 실험의 경우 일본, 미국 등에서 활발히 연구되고 있으며, 수년에 걸친 실험적 오차, 적분 알고리즘, 부분구조에 대한 연구를 통해 많은 발전을 하였다. 최근 국내에서도 유사동적 실험과 관련된 연구가 많이 이루어지고 있으나, 해외의 장비 및 시스템을 이용하여 연구가 진행되고 있으며, 유사동적 실험 관련 시스템이나 알고리즘 개발이 미흡한 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 유사동적 온라인 실험을 위한 시스템을 구축하고, 그 정합성을 평가하는 것이 주 목적이다. 정합성을 확인하기 위하여 강재 실험체를 제작하여 자유진동 실험 및 탄성지진응답실험을 실시하여 수치해석 결과와 비교하여 그 정합성을 확인하였다. 또한 내력가변 마찰댐퍼에 대한 유사동적 온라인 실험과 진동대 실험결과를 비교하여 시스템의 정합성을 확인하였다. 마지막으로 강재시험체 및 패널댐퍼를 이용하여 전체 구조물의 경우 수치해석 모형으로, 강재댐퍼의 경우 물리부분으로 구축하여 지진하중에 대한 구조물의 응답을 평가 하고자 한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1.2 기존 연구 동향

유사동적 실험은 일본의 Hakuno 등(1969)은 진동대 실험 대신, 전동모터와 운동방정식의 계산을 맡는 아날로그 컴퓨터를 사용하여 지진하중에 대한 단자유도 시스템의 응답을 해석함으로써, 구조물의 동적 거동을 해석 할 수 있다는 기본 개념을 제안하였다[1]. 이후 Takanashi 등(1975)은 디지털 컴퓨터를 이용하여 지진하중에 의한 구조물의 비선형 동적거동 분석 방법으로, 유사동적 실험기법을 개발하였다[2]. 또한 Takanashi 등(1975)은 미분방정식을 풀기 위한 수치해석 방법으로 선형 가속도법을 사용한 것에서 시작되었다. 그러나 이 방법은 변위센서와 가력기의 정확도 때문에 실험 진행이 매우 어려워, 수치적분법으로 중앙차분법을 제안하였다. 중앙차분법은 명시적 방법이므로 강성 값은 필요치 않고, 실험에서 측정된 복원력은 다음 스텝의 변위를 구하기 위한 운동방정식에 바로 적용되었다. Dermitzakis 등(1985)은 분할 하이브리드 실험을 진행하기 위한 방법으로 부분구조 기법을 제안하여 구조물을 수치해석 모델 및 물리적 부분구조 모형으로 구분하였다. 또한 적분법 등의 안정성 문제를 해결하기 위하여 수치해석 알고리즘으로 혼합 알고리즘 방법을 제안하였다[3]. Thewalt 등(1987)은 최초로 암시적 적분방법을 하이브리드 실험에 적용하였고, 구조물로부터 측정된 복원력을 수치해석모델에 반환시키는 알고리즘을 제안하였다[4]. Shing 등(1991)은 HHT(Hilber-Hughes-Taylor)방법에 근거하여 초기 강성행렬을 통해 운동방정식의 해를 계산하는 수치해석 알고리즘을 제안하였다[5]. Thewalt 등(1994)은 실제 대상 실험체로부터 측정된 변위와 그 때의 측정 복원력으로, 물리적 부분구조 모형에 대한 접선강성행렬 계산 수식을 개발하였다[6]. Dorka 등(1991)[7], Dorka(2002)[8] 그리고 Bayer 등(2005)[9]은 암시적 적분방법으로서 수치해석을 위한 내부 연산 과정에서 Sub-stepping을 별도로 진행하는 방식인 Newmark 암시적 적분법을 제안하였다. 하이브리드 실험기법은 하드웨어가 발전을 거듭함에 따라, 2000년을 전후로 보급된 고성능 컴퓨터를 기반으로 활발한 연구가 진행되었다. Nakashima (2001)에 의해 실시간 하이브리드 실험에 대한 구성 방법이 제안되었으며[10] Jung 등(2007)에 의해 실시간 하이브리드 실험에 암시적 해석 방법의 긴 해석시간을 저감시키는 방법으로 고정된 반복수를 갖는 수치해석 방법이 제안되었다[11].

국내에서는 최인규 (2009)[35]와 조성민 등(2010, 2011)에 의하여 소형강재모형에

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

대한 소형 하이브리드 실험을 미니모스트 시스템을 기반으로 수행하였으며, 김세훈(2012)과 이재진 등(2012)은 1경간 2층을 갖는 강 뼈대 구조물에 대하여 물리적 부분 구조부재를 실물크기의 실험체로 제작하여, 단자유도 하이브리드 실험에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 OpenSees와 OpenFresco로 구성된 하이브리드 실험 시스템과의 정보 송수신을 이용한 실험은 실시간에 근사한 하이브리드 실험결과를 나타내었고, 정합성을 확인하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

1.3 연구 내용 및 방법

본 논문에서는 유사동적 온라인 실험을 위해 시스템을 구축하고, 유사동적 온라인 실험을 수행하여 진동대 실험 및 수치해석 결과와 비교검증을 통해 유사동적 온라인 실험의 정합성 및 유효성을 검토하고자 한다. 이를 위해 다음과 같이 총 6장으로 구성되어 있다.

제 1장은 서론으로 연구의 배경, 목적 및 논문의 전체적인 구성을 설명하였다.

제 2장은 유사동적 온라인 실험시스템에 필요한 구성요소와 구축한 유사동적 온라인 실험시스템에 대하여 기술 하였다.

제 3장은 유사동적 온라인 실험 시 중요한 변위제어 오차에 의해 발생하는 에너지 오차에 대해 분석하고 이를 보완할 수 있는 보상법을 서술 하였다. 또한 유사동적 온라인 실험의 성공 여부 및 정합성을 확인 할 수 있는 지표들에 대해 정리 하였다.

제 4장은 단자유도 및 다자유도 시스템에 대해 제안된 복원력 사전예측 보상법을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우에 대해 실험 결과를 비교 분석 하고, 보상법이 적용된 실험 결과와 수치해석 결과를 비교 분석 구축된 실험시스템의 정합성 및 유효성을 검토하고자 한다.

제 5장은 수치해석 모델로 비교적 표현이 쉬운 시험체와 내력저하 및 핀칭등의 효과로 인해 수치해석 모델로 표현이 어려운 시험체에 대해 유사동적 온라인 실험 및 수치해석을 통해 유사동적 온라인 실험 시스템의 필요성 및 수치해석 모델의 정밀도를 평가 하고자 한다.

제 6장은 결론부분은로 본 연구에서 도출된 결과를 요약 정리한다.

부록에는 수치해석에 사용한 수치모델 및 실험 전경이 수록되어 있다.

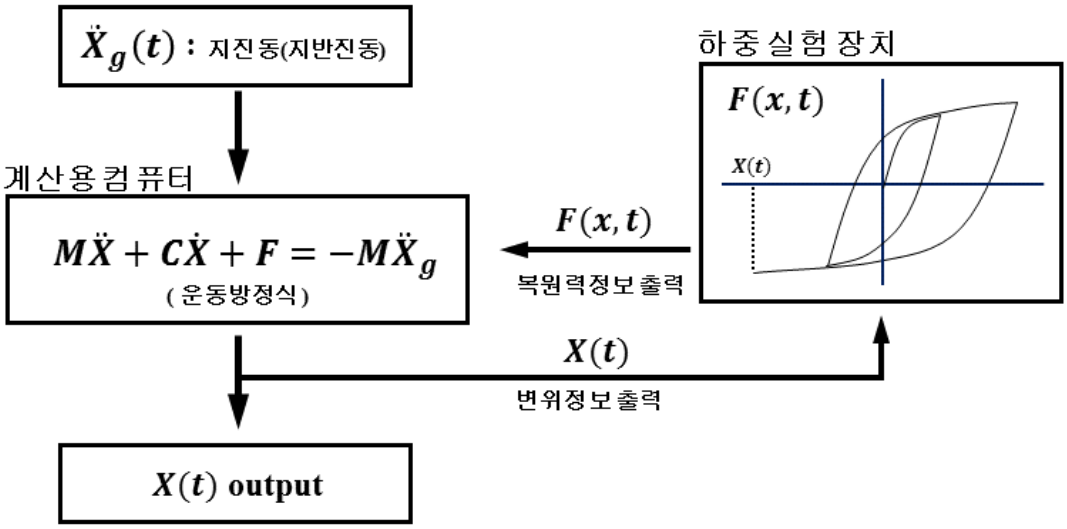
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제2장 유사동적 온라인 실험 방법 및 구성

2.1 유사동적 온라인 실험 방법

유사동적 온라인 실험은 구조 부재의 합리적으로 예측이 가능한 부분은 수치해석 모델을 이용하여 수치해석을 수행하면서 중요부재나 수치해석의 불확실성이 큰 부재의 경우 유압 액츄에이터 등을 사용하여 실험을 동시에 진행하는 방법이다. 유사동적 온라인 실험은 그림 2.1과 같이 전체 구조물에 대한 수치해석을 수행하고 실험부분에 대한 계산된 변위를 실험체에 적용하여 발생된 복원력을 이용하여 다음단계의 수치해석을 진행하여 지진하중에 대한 구조물의 전체 응답을 파악 할 수 있는 방법이다. 각 시간 단계별 실험체의 복원력이 포함된 수치해석이 이루어지므로 실험체의 동적 거동을 반영할 수 있어 준정적 재하실험 보다 유리하고, 진동대 실험에 비해 경제적인 장점이 있다.

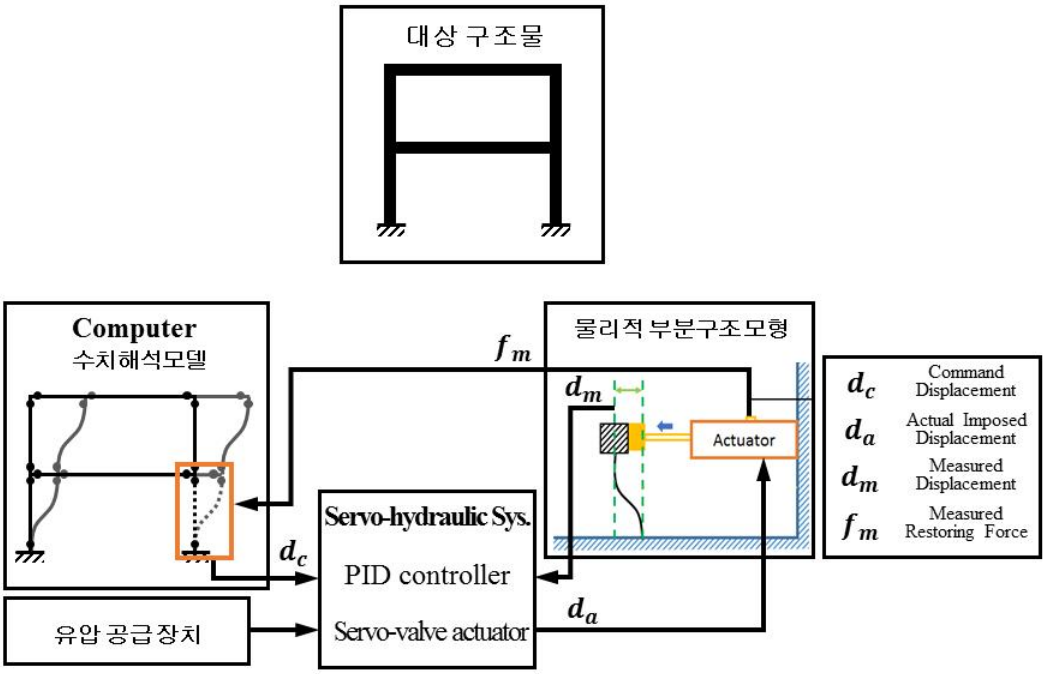


[그림 2.1] 유사동적 온라인 실험 개념도

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

유사동적 온라인 실험을 위한 기본적 절차와 상호 연결은 그림 2.2과 같다. 대상 구조물에 대한 수치해석 부분과 물리 부분을 분할 한 후 수치해석부분에서 계산된 변위는 물리 부분에 전달되어 유압 액츄에이터를 이용하여 제어 하게 되며, 물리적 부분의 측정 변위(dm)과 일치할 경우 액츄에이터 움직임을 멈춘 후 복원력(fm)을 측정하게 된다. 측정된 복원력이 수치해석 모델로 전달되어 수치해석에 통합되어 다음 스텝에 대한 구조물의 응답을 계산하게 된다. 이러한 방법을 반복하여 전체 지진하중에 대하여 반복하게 된다.



[그림 2.2] 유사동적 온라인 실험 흐름도

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.2 유사동적 온라인 실험 하드웨어의 구성

2.2.1 Actuator 제어 시스템

Actuator 제어 시스템은 입력 값과 출력 값을 최대한 똑같이 만드는 것이다. 일반적으로 유압 Actuator는 역학적 특성 때문에 시스템 입력 값과 출력 값을 똑같이 만드는 것은 어렵고 제어 오차가 발생하게 된다. 이러한 제어 오차를 줄이기 위한 가장 일반적인 방법은 피드백 제어이며 이 기술은 입력 값과 출력 값의 차이를 없애기 위해 출력값을 계측하고 컨트롤러로 되돌려 보내 입력 값과 출력 값의 제어오차를 없애는 기술이다.

유압 Actuator의 제어 정확성 및 제어 시간을 고려하였을 가장 많이 사용되는 제어 방법은 PID(Proportion, Integration, Derivation)제어방법이다. 그림 2.3에 PID 제어의 블록 다이어그램을 나타내었다. PID제어기는 식2.1과 같이 비례, 적분, 미분의 3부분의 항을 더하여 제어 값을 계산하도록 구성되어 있다. 비례항은 현재 상태에서의 오차 값의 크기에 비례한 제어작용을 하며, 적분한은 정상상태 오차를 없애는 작용을 하며, 미분 항은 출력 값의 급격한 변화를 추적함으로서 이상제어에 대한 제동을 걸어 오버슛(Overshoot)을 줄이고 안전성을 향상시킨다. PID제어의 경우 실험에 앞서 비례, 적분, 미분 Gain 값을 수정하여 Actuator가 입력 값을 잘 추적해 갈 수 있도록 튜닝이 필요하다. 각 Gain 값들의 조정에 따라 Actuator의 정확도 및 반응속도가 매우 민감하게 반응하므로 실험적/경험적 방법을 통해 튜닝이 이루어 져야 한다.

$$MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(r)dr + K_d \frac{de}{dt} \tag{2.1}$$

여기서, MV : 제어 값

e : 오차 값

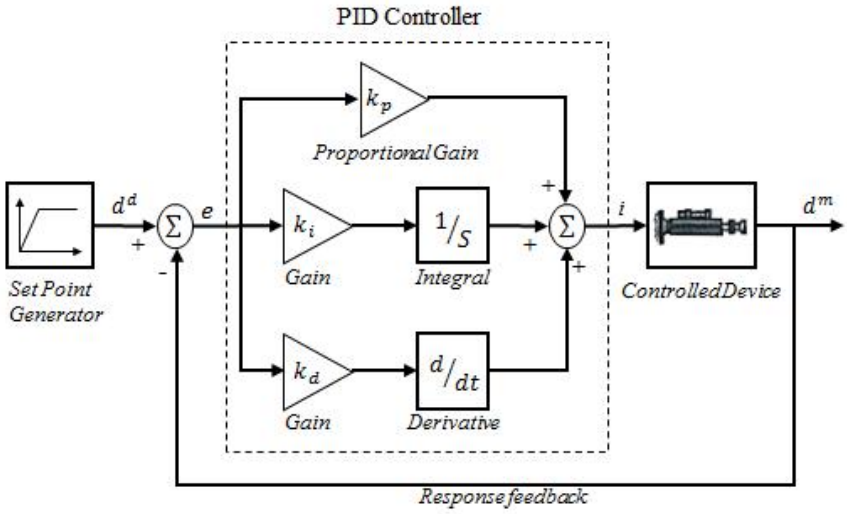
k_p : 비례 Gain 값

k_d : 적분 Gain 값

k_i : 미분 Gain 값

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

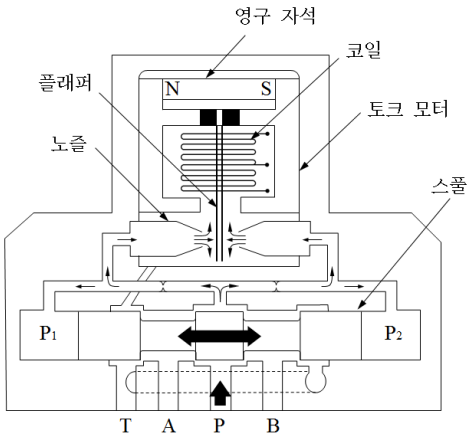


[그림 2.3] PID제어 블록 다이어그램

이러한 PID제어를 이용하여 Actuator를 제어하기 위해 Actuator에 서보밸브를 설치하였으며, 서보밸브는 유압서보 Actuator시스템의 핵심이다. 서보밸브는 밸브의 열림 정도를 제어하여 유압기름의 양을 제어함으로서 유압실린더의 스피드나 포지션을 제어하며, 제어 값과 피드백 량을 연산하여 유압밸브에 제어된 전류를 공급하여 밸브를 컨트롤 하는 시스템이다. 서보밸브의 구조는 그림 2.4에 나타내었다. 서보밸브 스풀의 기본적인 작동원리는 그림 2.4와 같이 P1, P2의 압력차에 의하여 스풀이 좌측 또는 우측으로 제어됨에 따라, 스풀이 좌측으로 움직이면 아래쪽 압력 P가 B로 연결된다. 반대로 스풀이 우측으로 움직이면 아래쪽 P압력은 A로 연결된다. 그러므로 이때 도입된 유압의 양은 스풀이 움직임에 따라 개폐된 정도에 비례한다. 서보밸브에 외부 전기신호를 주게 되면 플래퍼가 오른쪽 또는 왼쪽으로 움직이게 되며, 플래퍼의 움직임에 따라 플래퍼 측면의 노즐이 개폐된다. 그러면 그 노즐의 개폐에 의하여 P1,P2의 압력이 제어되게 되며 이에 따라 스풀이 움직여 유량을 실제적으로 조절하여 액추에이터를 컨트롤 하게 된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 2.4] 유압 서보 밸브의 구조

유사동적 온라인 실험과 같은 경우 실험에 사용되는 유압 Actuator의 성능에 따라 실험에 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 본 논문에서는 표2.1과 그림 2.5에 나타낸 (주)삼연기술의 유압서보 Actuator를 사용하여 유사동적 온라인 실험을 구축 하였다. 가력된 변위와 그 위치의 복원력을 확인하기 위한 전기신호를 얻기 위하여 유압 Actuator내부에 변위계(LVDT)와 하중 측정을 위한 로드셀을 장착 하였다.

[그림 2.5] (주)삼연기술의 유압서보 Actuator

<표 2.1> 유압서보 액추에이터의 성능

Capacity	500kN
Stroke	400mm(±200mm)
Servo Valve	Moog G761

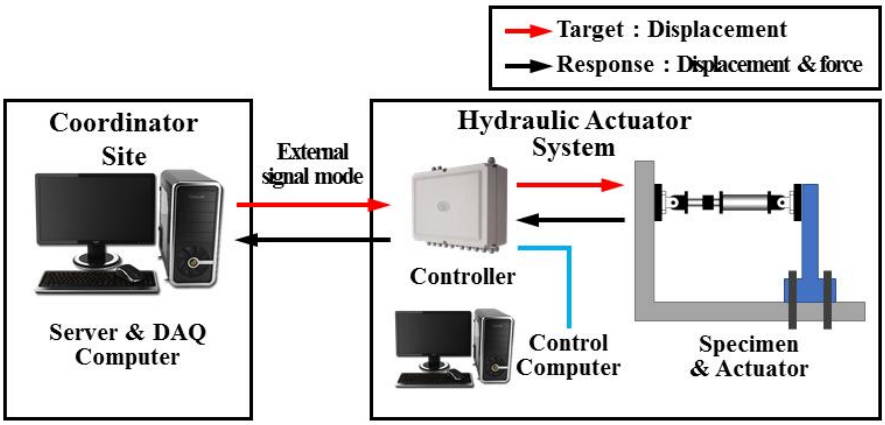
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.2.2 내부연결망

유사동적 온라인 실험의 경우 수치해석 부분과 실험 부분을 연결시켜 주는 시스템이 필수적이다. 본 논문에서는 실험실 내의 Actuator 제어 시스템과 수치해석 영역과의 연결을 그림 2.6과 같이 DAQ 시스템을 이용하여 직접 연결 하였다. 수치해석 영역 내에 Interface사의 PCI-3521 DAQ 보드를 이용하여 AD/DA 신호 변환이 가능하도록 구축하였으며, (주)삼연기술의 Actuator제어 시스템인 STC-500 제어기와 아날로그 신호(Volt신호)를 이용하여 정보 전달을 진행하였다.

수치해석 프로그램에서 x_{i+1} 스탭의 타겟 변위가 계산이 되면, 이 Target 변위는 PCI-3521 보드를 이용하여 아날로그 신호로 변화되어, Actuator 제어기로 전달된다. 입력된 아날로그 신호를 이용하여 Actuator 제어기는 목표변위까지 Actuator를 제어 가력하게 되며. 목표변위에 Actuator가 도달하면 그 위치에서의 복원력을 로드셀을 통해 입력 받게 된다. 입력받은 복원력은 Actuator 제어기를 통해 아날로그 신호로 PCI- 3251보드로 전달하게 되며, PCI-3521 보드를 통해 디지털 값으로 변환되어 다시 수치해석 프로그램에 전달되고, 수치해석 프로그램은 입력받은 복원력을 이용하여 다음 스텝에 대한 목표변위를 계산하게 된다.



[그림 2.6] 유사동적 온라인 실험 정보전달 흐름도

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

유사동적 온라인 실험 시 수치해석 부분과 Actuator 제어기와의 연결을 아날로그 신호를 이용하여 직접 연결을 진행하였기 때문에, Actuator의 최소 변위 제어 성능은 DAQ시스템의 분해 능력에 영향을 받게 된다.

본 논문에서 사용된 PCI-3521의 경우 12bit, ±5Volt의 입·출력 성능을 가지고 있으며, Actuator제어기의 경우 16bit, ±10Volt의 성능을 가지고 있다. 두 개의 DAQ시스템의 분해능이 다르기 때문에, Actuator의 용량의 절반밖에 사용하지 못하는 문제점이 발생하게 된다. 이러한 문제점을 해결하고자 아날로그 신호 연결 중간에 아날로그 신호 증폭/감소 장치를 설치하여 두 DAQ보드의 Range의 오차를 해소 하였다.

수치해석에 의해 계산된 변위에 따른 Actuator의 제어성능의 경우 DAQ시스템의 분해 능력의 영향을 받게 된다. PCI-3521 보드가 Actuator 제어기에 사용된 DAQ보드 보다 낮은 성능을 가지고 있어, 최소 분해능은 0.0024414Volt의 성능을 가지게 된다. 이 최소 분해능에 사용된 변위계에 따른 Gain값을 적용하면 최소 변위 분해능을 알 수 있다.

<표 2.2> DAQ 장비 성능

구분	장비 및 성능	
	수치해석 영역	Actuator제어기
DAQ Board	Interface PCI-3521	NI PCI-6221
Resolution	12bit	16bit
Range	±5Volt	±10Volt
Input Channel	8	16
Output Channel	4	2

Collection @ chosun

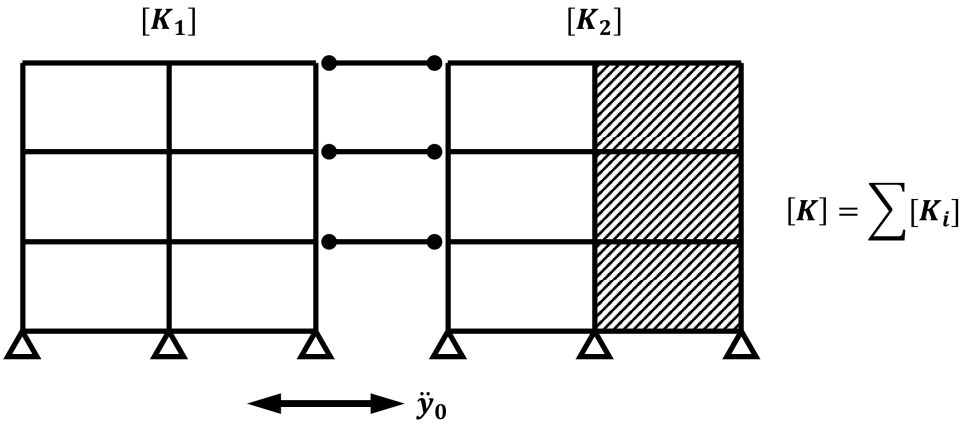
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.3 유사동적 온라인 실험 소프트웨어의 구성

2.3.1 구조물의 모델화

지진하중에 대한 구조물의 거동을 동역학에 기초해 해석·예측하는 것을 구조물의 지진응답해석(Earthquake Response Analysis)이라 한다. 지진응답을 해석 하는 경우에는 해석의 목적에 따라 구조물을 적절한 역학 모델(Mechanical Model)로 치환할 필요가 있다. 실제의 구조물은 지진 시에는 수평 2방향과 상항방향의 진동을 동시에 받아 상당히 복잡한 입체적 응답을 한다. 하지만 일반적인 구조물의 응답 해석에서는 수평 한방향의 진동에 대한 응답을 고려하기 위해 평면 진동 모델로 취급되는 경우가 많다. 평면 모델에서는 한방향의 지진을 받아 진동 방향의 각 골조가 모두 층 위치에서 동일한 변형을 한다고 생각 한다. 따라서, 이 경우의 전체 강성 매트릭스는 각 골조의 층 위치에서의 수평 강성 매트릭스를 가산함으로써 구할 수 있다(그림 2.7).

구조물의 지진응답해석에 종종 이용되어 온 모델화 방법은 건물의 동 특성을 각층마다의 강성과 내력이라는 형태로 평가해(층 레벨의 모델화) 건물의 질점을 스프링으로 직렬 연결한 전단질점계 모델로 치환해 응답을 평가한다. 이에 비해 건물의 기둥, 보, 벽 등 개개의 구성부재의 탄소성거동을 자세히 알 필요가 있는 경우에는 부재마다의 강성과 내력의 특성을 토대로 한 모델화(부재 레벨의 모델화)를 실시해, 골조모델로서의 응답해석을 진행하게 된다.

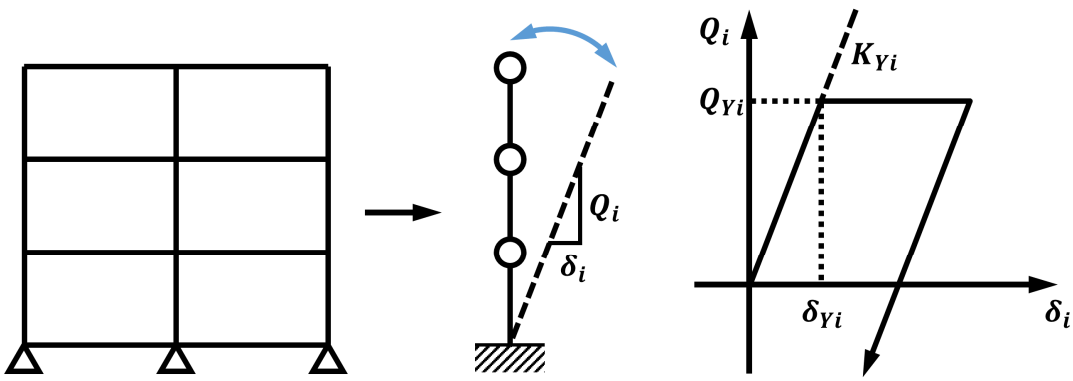


[그림 2.7] 치환된 평면모델

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

전단질점계 모델은 구조물의 복원력특성을 각층마다 전단스프링의 복원력 특성(층강성, 항복 층전단력)으로 치환해 표시한 것으로, 구조물 지진응답의 대체적인 성질을 조사하는 데에 널리 이용되는 모델이다(그림2.8). 건물의 층 강성의 경우 외력분포에 대해 구조물의 변형을 휨, 전단, 기초회전 및 경계보의 구속효과를 고려해서 결정하고, 각층의 층간 상대변위와 층 전단력과의 비에서 층강성을 계산해 전단계로 치환한다. 탄소성 역역에서의 응답을 고려하는 경우에는 골조의 항복시 강성을 평가할 필요가 있다(그림2.8). 항복시 강성과 항복 층 전단력으로 항복시 층변형(δ_y)이 결정되고, 이것이 손상의 지표가 되는 소성률을 결정할 때의 기초가 되므로, 항복시 강성은 가능한 실상에 근접한 값을 이용하도록 하여야 한다.



[그림 2.8] 전단질점계 모델

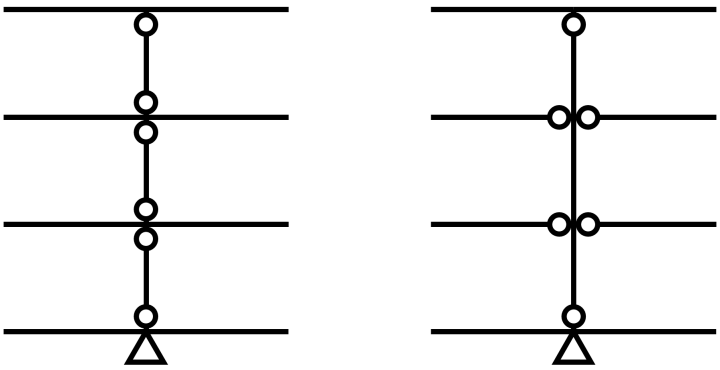
전단계 모델에서는 구조물이 항복해서 소성영역에 들어갈 때의 각층 전단력을 구해, 이것을 토대로 각층의 전단스프링의 항복력을 결정한다. 골조의 항복시 층전단력의 평가에 있어서는 골조를 구성하는 각 부재의 종국강도를 산정하고 다시 골조의 붕괴 메커니즘을 상정할 필요가 있다. 구조물 전체로서의 항복강도는 각 골조의 항복층전단력의 총합으로 평가된다. 이와 같은 건물의 종국강도의 평가를 건물의 수평보유내력의 산정이라 한다. 골조의 소성거동의 메커니즘은 매우 복잡하나, 극히 단순화시켜 생각하면 그림 2.9(a)과 같이 기둥붕괴형과, 보붕괴형으로 생각할 수 있다.

기둥붕괴형의 경우 각층 항복전단력은 기둥마다의 항복력($(M_{y상}+M_{y하})/h$)을 더한

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

합으로, 각층마다 독립적으로 구해지면 전단계로서의 모델화가 잘 맞게 된다. 보붕괴형의 경우 보와 최하층 주각이 항복해서 기둥 전체가 강체회전을 방생시키게 된다. 기둥붕괴형에서는 조기 항복하는 약한 층에 소성변형이 집중되나, 보붕괴형에서는 기둥에 의해 상하층의 상호작용 때문에 각층의 변형이 비교적 평준화된 경향이 있다. 이과 같은 경우 전단 질점계 모델화는 일반적으로 잘 맞지 않는 경향이 있다



(a)기둥 붕괴형 (b) 보 붕괴형

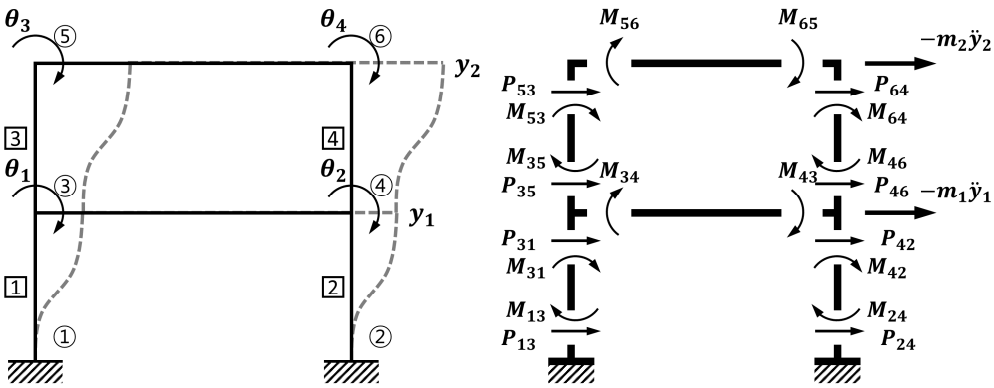
[그림 2.9] 라멘 구조 항복 메커니즘

골조모델의 경우 기둥, 보, 벽 등 개개의 부재를 하나의 역학적 요소로 생각하고, 이들의 탄성에서 소성영역에 이르는 거동을 고려하면서 구조물의 응답해석을 하는 방법이며, 구조물의 지진에 의한 손상의 과정을 정밀하게 파악하기 위해서 진행한다.

구조물을 구성하는 각 부재를 각각 하나의 역학모델로 치환하여 전체 부재를 구조물의 모델로 취급하면서 지진응답을 해석하는 것을 부재레벨의 응답해석이라한다. 층 레벨의 전단질점계 모델과 비교해 해석방법이 복잡하지만, 구조물의 지진시 탄소성 거동에 대해 훨씬 정밀한 응답을 얻을 수 있다. 골조모델의 경우 각 부재의 강성을 조합하여 강성 매트릭스를 작성하여 계산하게 되며, 탄소성을 고려하는 경우는 우선 부재의 다양한 탄소성거동을 표현할 수 있는 부재 모델을 설정할 필요가 있다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 2.10] 부재레벨 응답해석 골조 역학적 모델

2.3.2 운동방정식 및 고유진동

지진과 같은 불규칙한 외란을 받는 구조물의 동적응답을 해석하기 위해서는 미소한 시간간격마다 운동방정식을 수치적으로 적분해서 해를 정해가는 수치해석을 이용한다.

지진하중을 받는 구조시스템에 대한 동적 운동방정식은 식 2.2과 같다.

$$[M]\ddot{x}+[C]\dot{x}+[K]x=-[M]\ddot{x}_g \tag{2.2}$$

여기서, $[M]$: 질량 매트릭스

$[C]$: 감쇠 매트릭스

$[K]$: 강성 매트릭스

$\ddot{x}$: 가속도

$\dot{x}$: 속도

x : 변위

$\ddot{x}_g$: 지반가속도

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.3.2.1 단자유도 구조물

이상화된 단층골조나 질량-스프링-감쇠기 시스템으로 가시화 할 수 있는 선형 단자유도 시스템에 외력이 가해지면 그 운동은 식 2.2에 의해서 지배된다. 이 식에서 외력을 0으로 두면 자유진동에 대한 운동방정식이 구해지고 무감쇠 시스템에($C=0$) 대해서는 운동방정식이 식 2.3와 같이 표현된다.

$$m\ddot{x}+kx=0 \tag{2.3}$$

운동의 시작점이 시간 0에서의 변위 $x(0)$와 속도 $\dot{x}(0)$를 질량에 작용시켜서 구조 시스템을 정적평형 위치로부터 벗어나게 함으로써 자유진동은 시작된다.

$$x=x(0), \qquad \dot{x}=\dot{x}(0) \tag{2.4}$$

위의 초기조건하에서 동차미분방정식의 해는 식 2.5과 같다

$$x(t)=x(0)\cos\omega_n t+\frac{\dot{x}(0)}{\omega_n}sin\omega_n t \tag{2.5}$$

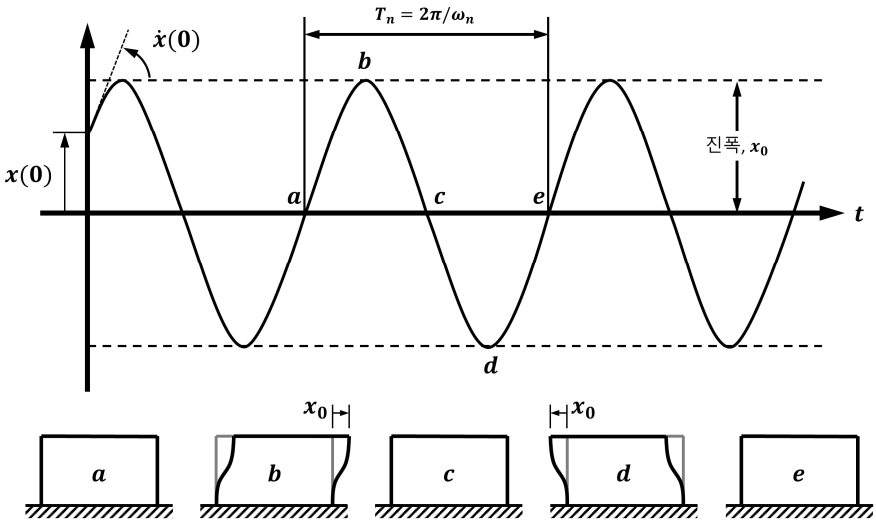
여기서,

$$\omega_n=\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{2.6}$$

그림 2.11은 시스템이 정적평형위치를 기준으로 진동하며, 이 진동은 $2\pi/\omega_n$ sec마다 반복되고 있음을 보여준다. a-b-c-d-e부분은 시스템의 자유진동의 한 사이클을 나타낸다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 2.11] 무감쇠 시스템의 자유진동

무감쇠 자유진동인 경우에는 일정한 진동을 무한히 지속한다. 하지만 실제 자유진동을 하는 구조물은 감쇠로 인하여 시간이 지남에 따라서 진폭이 점차 줄게 된다, 무감쇠 시스템이 한 사이클 자유진동 하는데 소요되는 시간을 시스템의 고유주기(T_n)라 한다. 고유주기와 고유진동수는 식 2.7과 같은 관계를 가진다.

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \tag{2.7}$$

2.3.2.2 다자유도 구조물

단자유도 구조물의 무감쇠 자유진동을 나타내는 식 2.3을 다자유도 구조물에 대한 무감쇠 자유진동으로 확장하면 동적 평형방정식을 식 2.8과 같이 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$[M]\ddot{x} + [K]x = 0 \tag{2.8}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

구조물이 변형하는 동안 변위가 일정한 형상(n차모드 형상;ϕ_n)을 유지한다고 가정할 때 다자유도 구조물의 자유진동은 구조물의 n차 모드의 진동을 의마하는데 식 2.9에서 보는바와 같이 구조물의 n차 모드의 지동을 나타내는 모드좌표(Modal Coordinate)인 q_n과 모드형상 ϕ_n의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$x_n = q_n \phi_n = (A_n \sin \omega_n t + B_n \cos \omega_n t)\phi_n \tag{2.9}$$

여기서 q_n은 시간에 따라서 변하는 진폭을 결정하고 ϕ_n은 진동형상을 나타내며 시간에 따라서 변하지 않는다. 이것을 식 2.8에 대입하고 고유치 방식의 형태로 변환하면 식 2.10을 얻을 수 있다.

$$\left\{[K] - \omega_n^2 [M]\right\}\phi_n = 0 \tag{2.10}$$

이것은 n개의 원소에 대한 n개의 동차대수방정식의 집합으로 해석될수 있다. 식 2.9.에서 ϕ_n이 0이 아닌 의미 있는 해를 가지기 위해서는 식 2.11을 만족해야 한다.

$$\left|[K] - \omega_n^2 [M]\right| = 0 \tag{2.11}$$

특성방정식으로 알려진 식 2.10을 풀면 자유도와 같은 수의 고유진동수 ω_n을 얻을 수 있다. 식 2.11을 풀어서 식 2.10에 대입하면 ϕ_n을 구할 수 있다. 그러나 식 2.10의 우변이 0이므로 ϕ_n를 구할 수 는 없지만 ϕ_n의 각 요소의 상대적인 비는 구할 수 있다. 이와 같이 구조물이 진동할 때 변형형상을 나타내는 ϕ_n를 모드형상(Mode Shape)이라고 한다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.3.3 감쇠비

자유진동을 하는 모든 구조물은 진폭이 점차 줄어들게 되는데 이것은 구조물에 감쇠력이 작용하기 때문이다. 감쇠가 존재하는 자유진동을 하는 단자유도 구조물의 운동방정식은 식 2.11과 같다.

$$m\ddot{x}+c\dot{x}+kx=0 \tag{2.11}$$

식 2.7을 m으로 나누면 식 2.8~2.9이 성립한다.

$$\ddot{x}+2\zeta\omega_n\dot{x}+\omega_n^2x=0 \tag{2.12}$$

$$\zeta=\frac{c}{2m\omega_n} \tag{2.13}$$

여기서 ζ : 감쇠비

감쇠상수 c는 자유진동 또는 강제조화진동의 한 사이클 동안 소산되는 에너지의 한 측도이다. 그렇지만 감쇠비는 감쇠를 나타내는 무차원량이며, 질량과 강성에만 의존하는 구조물의 특성 값이다.

감쇠가 적용된 다자유도 구조물의 운동방정식은 식 2.14와 같다.

$$[M]\ddot{x}+[C]\dot{x}+[K]x=0 \tag{2.14}$$

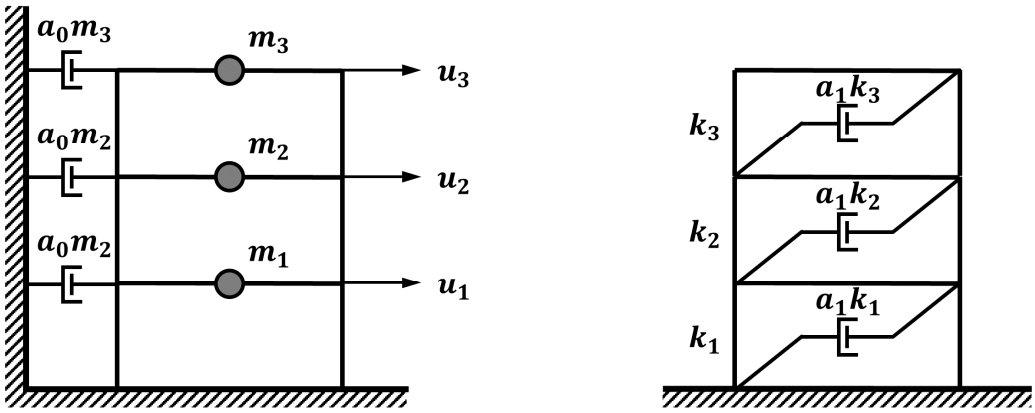
고전적 감쇠는 유사한 감쇠기구가 전체 구조물에 걸쳐서 분포외어 있을 경우에 타당한 이상화이다. 우선 질량-비례 감쇠와 강성-비례감쇠를 고려해보면 식 2.15와 같다.

$$C=a_0M \qquad C=a_1K \tag{2.15}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이 두가지 감쇠행렬모두에 대해 행렬 C는 모드 직교 특성 덕분에 대각행렬이고, 따라서 이들은 고전적 감쇠행렬이다. 이들은 그림 2.12에 나타낸 다층건물의 감쇠 모델을 나타낸다. 강성-비례행렬은 직관적으로 잘 이해가 되는데 이 감쇠행렬이 층간변형으로부터 기인하는 에너지 소산을 모델링 한다고 간주할 수 있기 때문이다. 반면에, 질량-비례행렬은 물리적으로 정당화하기 어려운데, 질량-비례행렬이 모델링한다고 간주할 수 있는 공기 감쇠는 대부분 구조물에서 무시할 정도로 작기 때문이다.



(a)질량-비례 감쇠 (b)강성-비례 감쇠

[그림 2.12] 다자유도 구조물의 감쇠 모델

질량-비례 감쇠를 가지는 구조물의 모드감쇠비와 계수 a_0의 관계는 다음과 같다. 제 n번째 모드의 일반화된 감쇠는 다음과 같다.

$$C_n = a_0 M_n \tag{2.16}$$

그리고 모드 감쇠비는 식 2.17과 같다.

$$\zeta_n = \frac{a_0}{2}\frac{1}{\omega_n} \tag{2.17}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이 감쇠는 고유진동수에 반비례한다(그림2.13(a)). 계수 a_0는 어느 한 모드에 대해 규정된 감쇠비 값을 얻을 수 있도록 결정된다. i번째의 모드의 감쇠비 ζ_i는 식 2.18을 이용하여 얻을 수 있다.

$$a_0 = 2\zeta_i\omega_i \tag{2.18}$$

a_0가 결정되면 감쇠행렬 C는 식 2.15에서 알 수 있고, 임의 모드의 n번째 모드의 감쇠비는 식 2.17에 의해서 계산된다.

이와 유사하게, 강성-비례 감쇠를가지는 구조물의 모드 감쇠비는 계수 a_1과 관련지을 수 있다. 이 경우,

$$C_n = a_1\omega_n^2 M_n \qquad \zeta_n = \frac{a_1}{2}\omega_n \tag{2.19}$$

강성-비례 감쇠비는 고유진동수에 선형적으로 비례하여 증가한다(그림 2.13(b)). 계수 a_1는 어느 한 모드에 대해 정해진 값을, j번째 모드의 감쇠비 ζ_j를 얻을 수 있도록 식 2.20를 이용하여 정해질 수 있다.

$$a_1 = \frac{2\zeta_i}{\omega_j} \tag{2.20}$$

계수 a_1이 결정되면 감쇠행렬 C는 식 2.15에서 구할 수 있고, 임의 모드의 감쇠비는 식 2.19에 의해서 구할 수 있다. 하지만 질량-비례 감쇠 및 강성-비례감쇠는 다자유도 구조물의 실제적인 해석을 위해서는 적합하지 않다. 다자유도 구조물의 해석에서는 Rayleigh감쇠가 가장 일반적으로 사용되는 감쇠 모델이다.

Rayleigh감쇠는 식 2.21과 같이 질량-비례 감쇠와 강성_비례 감쇠의 조합이다.

$$C = a_0 M + a_1 K \tag{2.21}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Rayleigh감쇠가 적용된 구조물의 n번째 모드의 대한 감쇠비는 식 2.22과 같다.

$$\zeta_n = \frac{a_0}{2}\frac{1}{\omega_n} + \frac{a_1}{2}\omega_n \tag{2.22}$$

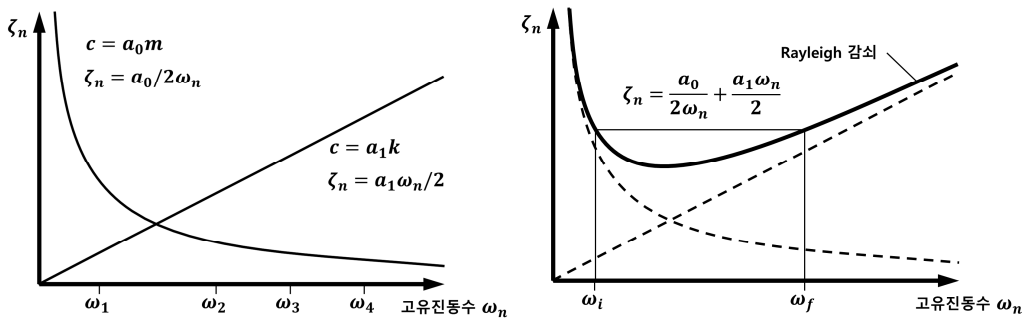
a_0, a_1은 제 i 및 j번째 모드에 대한 각각의 규정된 감쇠비 ζ_i, ζ_j로부터 결정될 수 있다. 식 2.22을 이 두 모드에 대하여 행렬 형식으로 표현하면 식 2.23과 같다.

$$\frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{bmatrix}\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta_i \\ \zeta_j \end{bmatrix} \tag{2.23}$$

이 두 대수방정식은 계수 a_0, a_1를 결정하기 위해서 풀 수 있으며, 두 모드가 같은 감쇠비를 갖는다고 가정할 수 있다. 따라서, 식 2.24이 구해진다.

$$a_0 = \zeta\frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \qquad a_1 = \zeta\frac{2}{\omega_i + \omega_j} \tag{2.24}$$

이제 감쇠행렬은 식 2.21을 이용하여 알 수 있고, 임의의 다른 모드에 대한 감쇠비는 식 2.22을 이용하여 계산할 수 있다. 그림 2.13과 같이 고유진동수에 따라서 변동한다.



(a)질량 및 강성 비례감쇠 (b)Rayleigh 감쇠

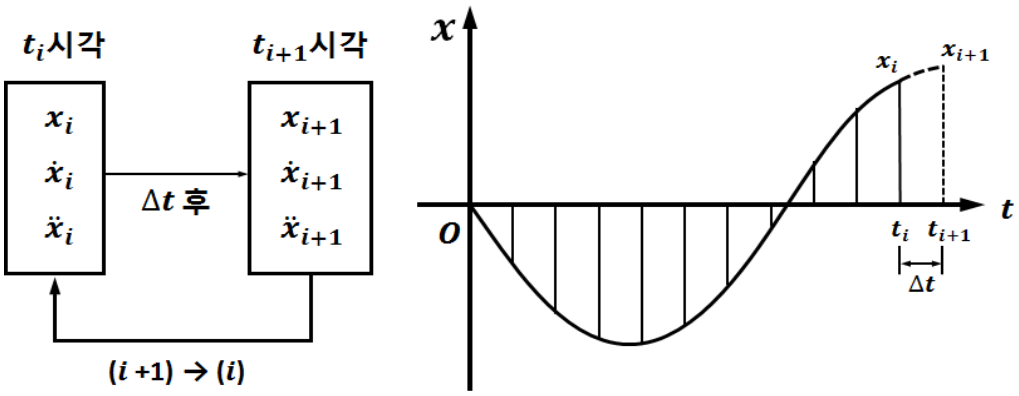
[그림 2.13] 고유진동수에 따른 모드 감쇠비 변동

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

2.3.4 수치적분법

수치적분법은 그림 2.14과 같이 시각 t_i까지의 응답상태 x_i, $\dot{x}_i$, $\ddot{x}_i$을 알고 있을 때, 미소한 $\triangle t$후 의 시간 t_{i+1}에서 상태 x_{i+1}, $\dot{x}_{i+1}$, $\ddot{x}_{i+1}$을 근사적으로 추정하고 이 계산을 순차반복해서 해를 구해가는 것이다.



[그림 2.14] 수치 적분

수치적분법은 명시적 방법(Explicit Method)과 암시적 방법(Implicit Method)으로 구별할 수 있다. 명시적 방법은 각 시간 단계 $\triangle t$에서의 변위를 바로 이전 단계에서의 거동들로부터 구할 수 있는 방법이며 그 해를 구하기 위해 반복과정(Integration)이 필요 없고 빠른 계산이 가능하다는 장점이 있으나, 매우 작은 하중단계에서 조건적 수렴을 하는 단점이 있다. 명시적 방법으로는 Central Difference Method, Explicit Newmark β Method, Explicit Hilbert-Hughes-Taylor Method, Explicit Generalized Time Integration등이 있다. 암시적 방법은 각 시간 단계 $\triangle t$에서의 변위를 위해 바로 이전 단계의 응답들뿐만 아니라 현 단계의 응답들도 필요한 방법이며 안전성과 정확성에서 명시적 방법보다 우수하지만 반복과정이 요구된다. 암시적 방법으로는 Implicit Newmark β Method, Implicit Hilbert-Hughes-Taylor Method, Fixed Iteration Implicit HHT Method, Operator-Splitting Method, Wilson Method 등이 있다.

Collection @ chosun

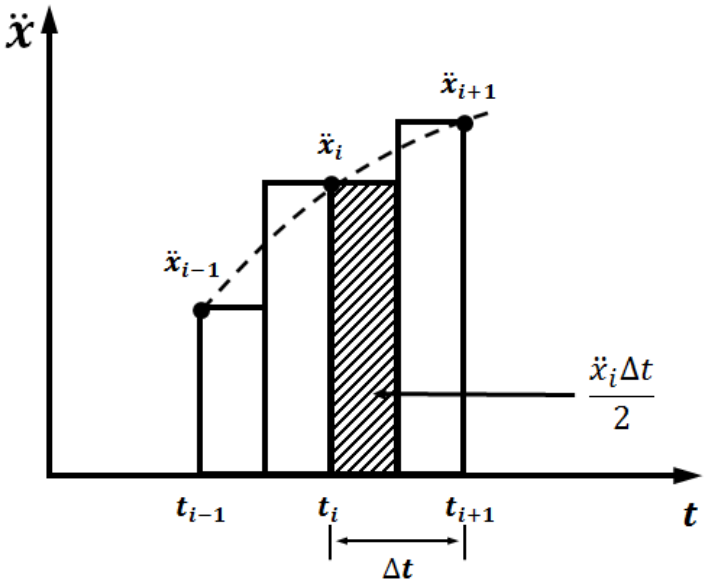
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

수치적분법을 선택 할 때 가장 중요한 사항은 해석결과의 안전성(Stability)과 정확도(Accuracy)이다. 명시적 방법이 암시적 방법에 비해 수치적으로 다루기 쉬운 알고리즘인 반면 해석결과가 안정적이면서도 정확하기 위해서는 수치해석을 매우 짧은 시간간격 $\triangle t$마다 수행해야 하기 때문에 다자유도 구조물의 해석 시 어려움이 따른다.

명시적 적분법 및 암시적 적분법 중 일반적으로 사용 되는 적분법인 Central Difference Method와 Newmark-β Method는 다음과 같다.

2.3.4.1 Central Difference Method(중앙차분법)

Central Difference Method는 변위의 시간에 대한 미분의 유한차분근사에 근거한 방법이다. 시간단계 i에서 속도와 가속도의 중심차분에 대한 표현 식은 식 2.25와 같다.



[그림 2.15] 중앙차분법

$$\dot{x}_i = \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2\triangle t} \qquad \ddot{x}_i = \frac{x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1}}{(\triangle t)^2} \tag{2.25}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

속도와 가속도에 대한 이 근사식들을 식2.1에 대입하면 식 2.26과 같아진다.

$$[M]\frac{x_{i+1}-2x_i+x_{i+1}}{(\triangle t)^2}+[C]\frac{x_{i+1}-x_{i-1}}{2\triangle t}+[K]x_i=-[M]\ddot{x}_{gi} \tag{2.26}$$

이 식에서 x_i와 x_{i-1}은(선행하는 시간단계에 대해서 이 절차를 적용함에 의해서 얻어지는) 기지의 양으로 가정된다. 기지량을 우변으로 옮겨 정리하고 식2.27과 같이 증분형식으로 정리하면 식 2.28~2.30이 도출된다.

$$\triangle x_{i+1}=x_{i+1}-x_i, \quad \triangle x_i=x_i-x_{i-1} \tag{2.27}$$

$$\hat{K}\triangle x_{i+1}=\hat{P}_i \tag{2.28}$$

$$\hat{K}=\frac{1}{(\triangle t)^2}[M]+\frac{1}{2\triangle t}[C] \tag{2.29}$$

$$\hat{P}_i=-M\ddot{x}_{gi}-\left[\frac{1}{(\triangle t)^2}[M]-\frac{1}{2\triangle t}[C]\right]\triangle x_i-[F_i] \tag{2.30}$$

따라서 미지량 x_{i+1}은 식 2.28에 대해 직접적분법(Direct Integration Method)을 이용하여 계산하면 알 수 있다.

$\ddot{x}_0$에 대한 초기 값이 주어지지 않았다면 식 2.31에 의하여 구한다.

$$[M]\ddot{x}_0=-[M]\ddot{x}_{g0}-[C]\dot{x}_0-[K]x_0 \tag{2.31}$$

중앙차분법은 시간단계가 충분히 작지 않으면 수치적반올림 오차로 인해 발산하게 되어 무의미한 결과를 얻게 된다. 수치안전성을 위한 구체적인 요구조건은 식 2.32과 같다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\frac{\triangle t}{T_n} < \frac{1}{\pi} \tag{2.32}$$

여기서, T_n : 구조물의 고유주기

중앙차분법에 대해 컴퓨터 구현을 위해 절차를 표 2.3에 나타내었다.

<표 2.3> 중앙차분법 흐름도

1.초기계산

1.1 $[M]\ddot{x}_0 = -[M]\ddot{x}_{g0} - [C]\dot{x}_0 - [K]x_0$를 계산

1.3 $\hat{K} = \frac{1}{(\triangle t)^2}[M] + \frac{1}{2\triangle t}[C]$

2. 시간단계에 대한 계산 $i = 1,2,3 \cdot \cdot \cdot$

2.1 $\hat{P}_i = -M\ddot{x}_{gi} - \left[\frac{1}{(\triangle t)^2}[M] - \frac{1}{2\triangle t}[C]\right]\triangle x_i - [F_i]$

2.2 $\hat{K}\triangle x_{i+1} = \hat{P}_i \Rightarrow \triangle x_{i+1}$를 계산

2.3 $\dot{x}_i = \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2\triangle t}$

2.4 $\ddot{x}_i = \frac{x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1}}{(\triangle t)^2}$

3. 다음 시간단계에 대해 계산

3.1 i를 $i+1$로 대체하고 2,1~2,4단계를 반복

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

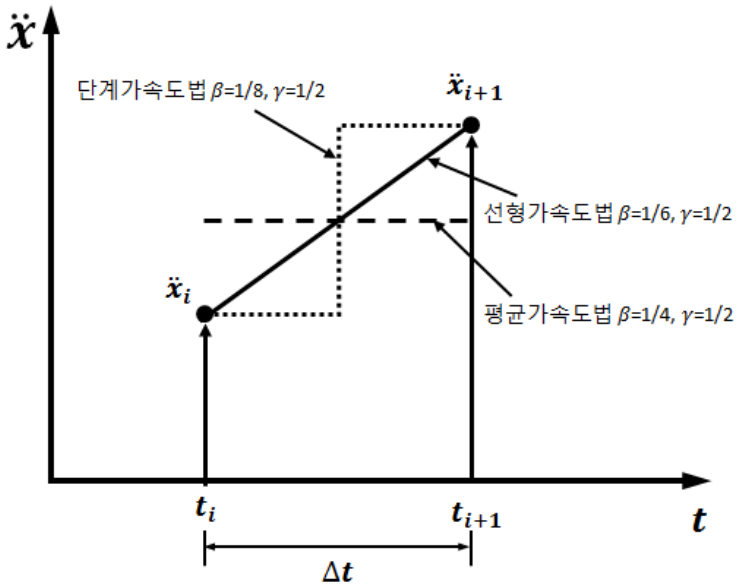
2.3.4.2 암시적 Newmark-β Method

1959년 뉴마크(Newmark)는 식 2.33, 식 2,34과 같이 변위, 속도 식에 근거하여 일련의 시간증분법을 발전시켰다.

$$\dot{x}_{i+1} = \dot{x}_i + [(1-\gamma)\Delta t]\ddot{x}_i + (\gamma\Delta t)\ddot{x}_{i+1} \tag{2.33}$$

$$x_{i+1} = x_i + (\Delta t)\dot{x}_i + [(0.5-\beta)(\Delta t)^2]\dot{x}_i + [\beta(\Delta t)^2]\ddot{x}_{i+1} \tag{2.34}$$

여기서 변수 β와 γ는 한 시간단계에 걸친 가속도의 변동을 정의하고, 수치적 안정성과 정확도를 결정한다. 만약 $\beta = 0$이면 명시적방법인 중앙차분법이 된다. $\beta \neq 0$이면 암식적 방법이 되며, $\beta = 1/2$의 경우 평균가속도법, $\beta = 1/6$의 경우 선형가속도법이된다. 대표적으로 $\gamma = 1/2$, $1/6 \leq \beta \leq 1/4$를 선택하면 정확도를 비롯한 모든 관점에서 만족스러운 결과를 얻을 수 있다.



[그림 2.16] Newmark -β 법

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

각 시간단계의 끝인 시간 $i+1$에서 위 두식은 동적 평형방정식 식 2.1과 결합하여, 시간 i에서의 기지의양 x_i, $\dot{x}_i$, $\ddot{x}_i$로부터 시간 $i+1$에서의 미지의양 x_{i+1}, $\dot{x}_{i+1}$, $\ddot{x}_{i+1}$을 계산 하는 근거를 제공한다. 식 2.33, 식 2.34의 우변에 미지의양 $\ddot{x}_{i+1}$이 있기 때문에 이 방법을 실현하기 위해서는 반복계산이 요구된다.

식 2.33과 2.34의 풀이 법은 다양한 표현이 가능하나, 본 논문에서는 증분변위에 의한 표현에 대해 정리하였다. 식 2.35과 같이 증분량을 이용하여 식 2.33과 2.34을 정리하면 식 2.36, 식2.37과 같이 된다.

$$\triangle x_i = x_{i+1} - x_i,\ \triangle \dot{x}_i = \dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i,\ \triangle \ddot{x}_{i+1} = \ddot{x}_{i+1} - \ddot{x}_i,\ \triangle \ddot{x}_{gi} = \ddot{x}_{gi+1} - \ddot{x}_{gi} \quad (2.35)$$

$$\triangle \dot{x}_i = (\triangle t)\ddot{x}_i + (\gamma \triangle t)\triangle \ddot{x}_i \quad (2.36)$$

$$\triangle x_i = (\triangle t)\dot{x}_i + \frac{(\triangle t)^2}{2}\ddot{x}_i + \beta(\triangle t)^2 \triangle \ddot{x}_i \quad (2.37)$$

식 2.36과, 식 2.37을 증분형식의 운동방정식에 대입하면 정리하면 식 2.38~2.40과 같이 정리된다.

$$\hat{k}\triangle x_i = \triangle \hat{p}_i \quad (2.38)$$

$$\hat{k}_i = [k_t] + \frac{\gamma}{\beta \triangle t}[C] + \frac{1}{\beta(\triangle t)^2}[M] \quad (2.39)$$

$$\triangle \hat{p}_i = -[M]\triangle \ddot{x}_{gi} + \left(\frac{1}{\beta \triangle t}[M] + \frac{\gamma}{\beta}[C]\right)\dot{x}_i + \left[\frac{1}{2\beta}[M] + \triangle t\left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)[C]\right]\ddot{x}_i \quad (2.40)$$

동적시스템의 특성인 M, C, K 수치알고리즘 변수 γ, β로부터 알수있는 $\hat{k}$와 $\triangle \hat{p}_i$와 각 시간단계의 시작점에서의 기지량 $\dot{x}_i$, $\ddot{x}_i$ 변위의 증분 $\triangle x_i$는 식 2.38에 대해 직접 적분법(Direct Integration Method)을 이용하여 계산하면 알 수 있다. $\dot{x}_{i+1}$의 경우

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

일단 $\triangle x_i$를 알게 되면 $\triangle \dot{x}_i$를 식 2.14으로 계산하여 얻을 수 있으며, $\ddot{x}_{i+1}$의 경우 식 2.41을 이용하여 얻을 수 있다.

$$[M]\ddot{x}_{i+1} = -[M]\ddot{x}_{gi+1} - [C]\dot{x}_{i+1} - [K]x_{i+1} \tag{2.41}$$

Newmark-β Method는 식 2.42을 이용하면 만족하면 수치적으로 안정한다.

$$\frac{\triangle t}{T_n} \leq \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{\gamma - 2\beta}} \tag{2.42}$$

만약 $\gamma = \frac{1}{2}$, $\beta = \frac{1}{4}$이면, 이 조건은 식 2.43과 같아진다. 이것은 평균 가속도법이 $\triangle t$에 무관하게 안정하다는 것을 의미하지만 $\triangle t$가 충분히 작아야만 그 해가 정확하다.

$$\frac{\triangle t}{T_n} = \infty \tag{2.43}$$

암시적 Newmark-β Method에 대해 컴퓨터 구현을 위해 절차를 표 2.3에 나타내었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

<표 2.4> 암시적 Newmark-β법 흐름도

1.초기 데이터

1.1 $x_{i+1}^{(0)} = x_i$, $f_s^{(0)} = (f_s)_i$, $\triangle R^{(0)} = \triangle \hat{p}_i$, $\hat{K}_t = \hat{K}_i$

1.2 $a = \frac{1}{\beta \triangle t}[M] + \frac{\gamma}{\beta}[C]$, $b = \frac{1}{2\beta}[M] + \triangle t\left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)[C]$

2. 시간단계에 대한 계산 j = 1,2,3, · · ·

2.1 $\triangle \hat{P}_i = -[M]\triangle \ddot{x}_{gi} + a\dot{x}_i + b\ddot{x}_i$

2.2 접선강성 K_i결정

2.3 $\hat{k}_i = [k_t] + \frac{\gamma}{\beta \triangle t}[C] + \frac{1}{\beta(\triangle t)^2}[M]$

2.4 반복절차를 이용하여 $\hat{k}_i$와 $\triangle \hat{p}_i$로부터 $\triangle x_i$ 계산

2.5 $\triangle \dot{x}_i = \frac{\gamma}{\beta \triangle t}\triangle x_i - \frac{\gamma}{\beta}\dot{x}_i + \triangle t\left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right)\ddot{x}_i$

2.6 $\triangle \ddot{x}_i = \frac{1}{\beta(\triangle t)^2}\triangle x_i - \frac{1}{\beta \triangle t}\dot{x}_i - \frac{1}{2\beta}\ddot{x}_i$

2.7 $x_{i+1} = x_i + \triangle x_i$, $\dot{x}_{i+1} = \dot{x}_i + \triangle \dot{x}_i$, $\ddot{x}_{i+1} = \ddot{x}_i + \triangle \ddot{x}_i$

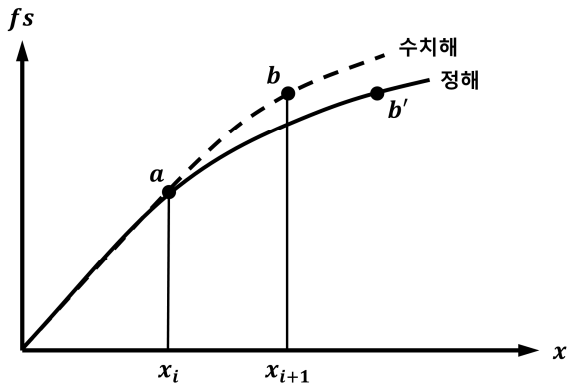
3. 다음 시간단계에 대해 계산

3.1 i를 $i+1$로 대체하고 다음 시간 단계에 대해 2,1~2,7단계를 반복

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

암시적 적분방법은 접선강성을 사용하고, 일정한 시간단계의 사용은 힘-변형 관계에서 전이점의 감지를 지연시키기 때문에 부정확한 결과를 가져올 수도 있다. 그림 2.17과 같이 힘-변형 관계에서 미지의 할선강성 대신 접선강성을 사용함과 관련한 오차에 대해서 고찰해보면, 시간 i에서의(시간단계의 시작점)변위는 a로 표기되어 있다. 점 a에서 접선강성을 사용하고 시간 i부터 $i+1$까지 적분을 수행하면 점 b로 식별되는 변위 x_{i+1}에 도달한다. 만약 곡선을 정확하게 추적하였다면 결과는 b'에서의 변위여야 한다. 일련의 시간단계에 걸쳐서 이러한 오차가 누적되면 상당한 오차가 발생하게 된다.



[그림 2.17] 접선강성 사용에 따른 오차

이러한 오차는 반복절차를 사용함에 의해서 최소화될 수 있다. 암시적 Newmark-β법의 각 시간단계에서 풀어야 할 가장 핵심 방정식은 식 2.38이다. 그림 2.18은 식 2.38의 개략도를 보여주고 있다. 접선강성 K_t는 변위 x에 의존하기 때문에 그 관계는 비선형 적이며, 따라서 기울기 $\hat{k}_t$도 일정하지 않다. 동적해석에서는, 질량과 감쇠 항의 존재가 $\hat{k}_t$의 비선형성을 감소시킨다. 그 이유는 $\triangle t$가 전형적인 값으로 주어질 경우에는 일정한 상수항인 $\frac{1}{\beta(\triangle t)^2}M$의 값이 K_t에 비해 훨씬 더 크기 때문이다.

반복계산 절차를 그림 2.18와 같이, 첫 단계는(그림 2.14의 b'점에 대응하는) 최종 $\triangle x$에 대한 제1차 근사인(그림 2.14의 b점에 대응하는) $\triangle x^{(1)}$를 결정하기 위해서 식 2.38을 앞서 설명한 절차에 적용하는 것이다.

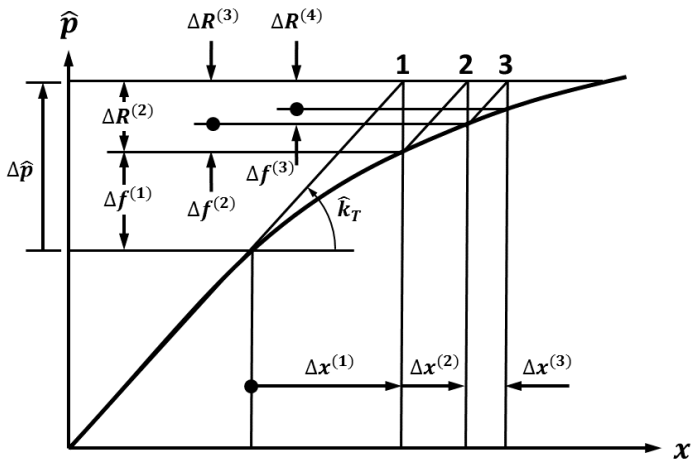
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$$\hat{k}\triangle x^{(1)} = \triangle\hat{p} \tag{2.44}$$

$\triangle x^{(1)}$와 연관된 것은 참값 $\triangle f^{(1)}$인데 이것은 $\triangle\hat{p}$보다 작다. 그리고 잔류하중 $\triangle R^{(2)} = \triangle\hat{p} - \triangle f^{(1)}$을 정의한다. 이 잔류하중 $R^{(2)}$에 의해 생기는 추가 변위 $\triangle x^{(2)}$는 식 2.45에 의해서 결정된다.

$$\hat{K}_t\triangle x^{(2)} = \triangle R^{(2)} = \triangle\hat{p} - \triangle f^{(1)} \tag{2.45}$$



[그림 2.18] 수정 뉴튼-랩슨 반복계산법

이 추가 변위를 새로운 잔류하중을 찾는데 사용하고, 이 과정을 수렴할 때까지 되풀이한다. 수정 뉴튼-랩슨 반복계산 절차를 표 2.5에 나타내었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

<표 2.5> 수정 뉴튼-랩슨 반복법 흐름도

1.초기계산
1.1 $M\ddot{x}_0 = -M\ddot{x}_{g0} - C\dot{x}_0 - Kx_0 \Rightarrow \ddot{x}_0$ 를 계산
1.2 $a = \frac{1}{\beta \triangle t}M + \frac{\gamma}{\beta}C,\ b = \frac{1}{2\beta}M + \triangle t\left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)C$
2. 시간단계에 대한 계산 $j = 1,2,3 \cdot \cdot \cdot$
2.1 추가변위 계산 : $\widehat{K}_t \triangle x^{(j)} = \triangle R^{(j)} \Rightarrow \triangle x^{(j)}$
2.2 $x_{i+1}^{(j)} = x_{i+1}^{(j-1)} + \triangle x^{(j)}$
2.3 $\triangle f^{(j)} = f_s^{(j)} - f_s^{(j-1)} + \left(\widehat{K}_t - K_t\right)\triangle x^{(j)}$
2.4 $\triangle R^{(j+1)} = \triangle R^{(j)} - \triangle f^{(j)}$
3. 다음 시간단계에 대해 계산
3.1 j를 $j+1$로 대체하고 2,1~2,4단계를 반복

본 논문에서는 전단질점계 및 암시적 Newmark-β 법, 수정 뉴튼-랩슨 반복법을 이용하여 수치해석 프로그램을 완성하였으며, 다자유도 구조물의 경우 2.3.3절에 설명한 Rayleigh감쇠를 적용하였다. 또한 수치해석 프로그램 내에 DAQ보드 관련 함수 및 Actuator 타겟 변위 및 허용오차 판별식 등의 기능을 추가 하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제3장 유사동적 온라인 실험 오차

3.1 개요

유사동적 온라인 실험이 실험 오차 전파를 성공적으로 완화 될 때 진동대 실험 결과아 필적하는 결과를 제공 할 수 있음을 많은 연구자들이 연구 하였다(Takanashi and Nakashima. 1987, Mahin et al. 1989, Magonette and Negro 1998). 이러한 실험적 오차에 대해 파악하고 평가 할 수 있는 방법에 대해 살펴보기로 한다.

3.2 Actuator제어 및 변위제어 오차

유사동적 온라인 실험의 일반적인 오차는 규칙적이고 예측가능한 오류입니다. Sing and Mahin. 1983는 몇 가지 체계적인 에러에 관하여 고찰 하였습니다. 이러한 오차가 유사동적 실험의 안전성에 큰 영향을 미친다는 것을 확인 하였으며, 이중에 변위제어 오차가 중요하다는 것을 확인 하였다.

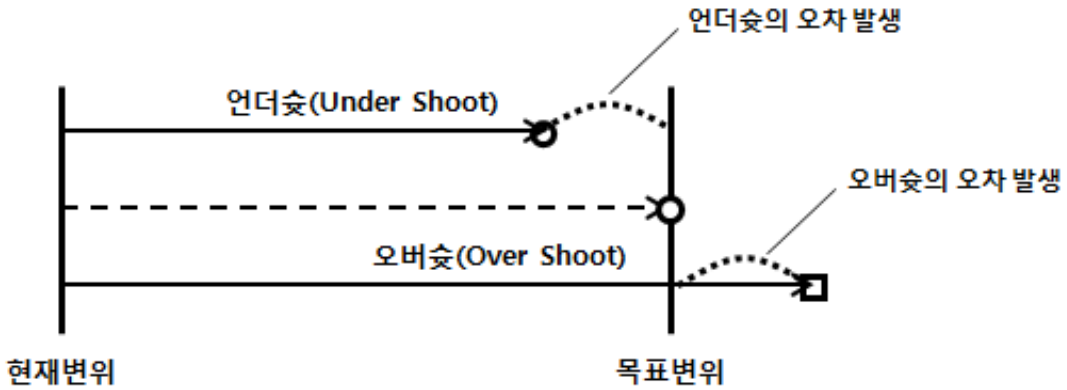
유압Actuator의 경우 목표 변위 점에 도달하기 위해 PID제어를 통해서 제어가 되게 된다. 하지만 유압 Actuator의 경우 그림 3.1과 같이 목표 변위 점을 정확히 제어 하지 못하고 목표 변위 점에 도달 하지 못하거나 목표 변위 점을 넘어서는 경우가 발생하게 된다.

오버슛이 발생할 경우 이는 실험체가 가지고 있는 고유의 성능을 영구히 지나치게 되어 실제 복원력 획득에 실패 하게 된다. 하지만 언더슛의 경우 실제 복원력보다 부족한 복원력의 양을 Actuator에 미소 변위량을 더욱 부과하여 오차량을 줄이거나, Actuator의 미소 변위량 이하의 경우 복원력 보정을 통하여 오차량을 줄일 수 있는 가능성이 남아 있다.

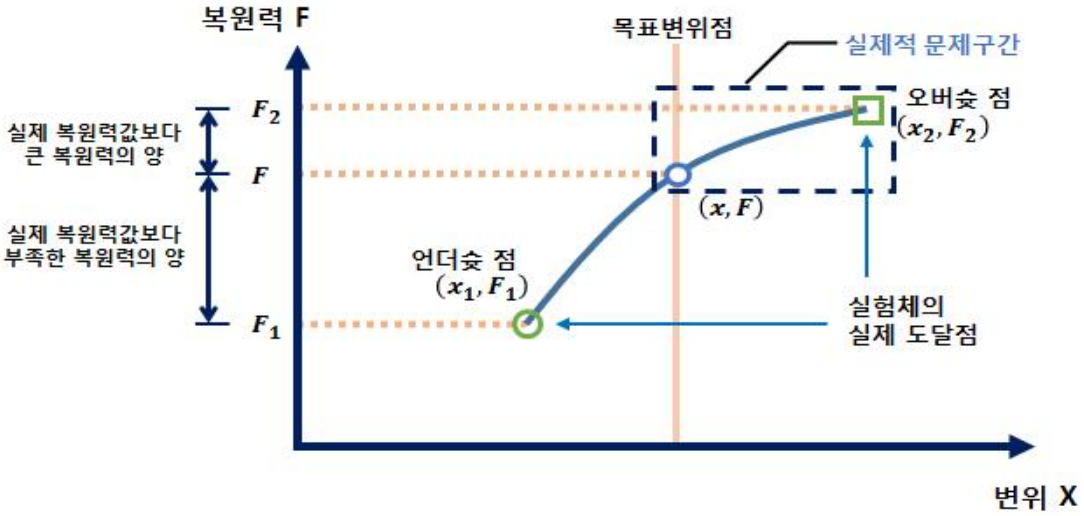
본 논문에서는 유압 Actuator 제어를 오버슛이 발생하지 않고 언더슛이 발생하도록 그림 3.3 과 같이 목표변위에 도달하기 위해 내부 Loop문을 두어 미소 변형량을 증가하여 목표 변위 점에 도달하도록 Actuator를 제어 하였으며, 목표 변위점에서 허용오차 범위를 두어 허용오차 범위내에 도달하면 Actuator를 멈추게 하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



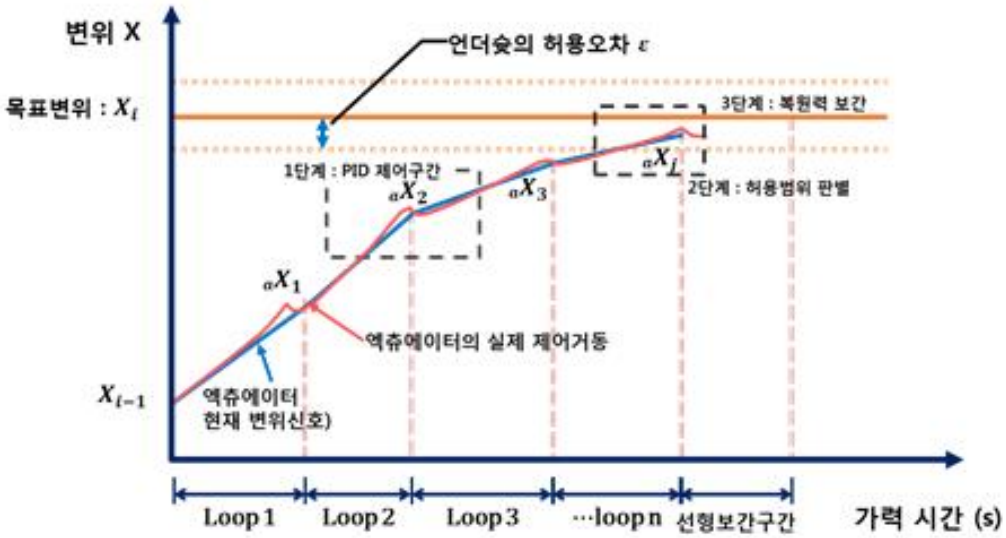
[그림 3.1] 실제 가력 실험시 변위제어 오차



[그림 3.2] 목표 변위점에서의 복원력 취득 오류

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

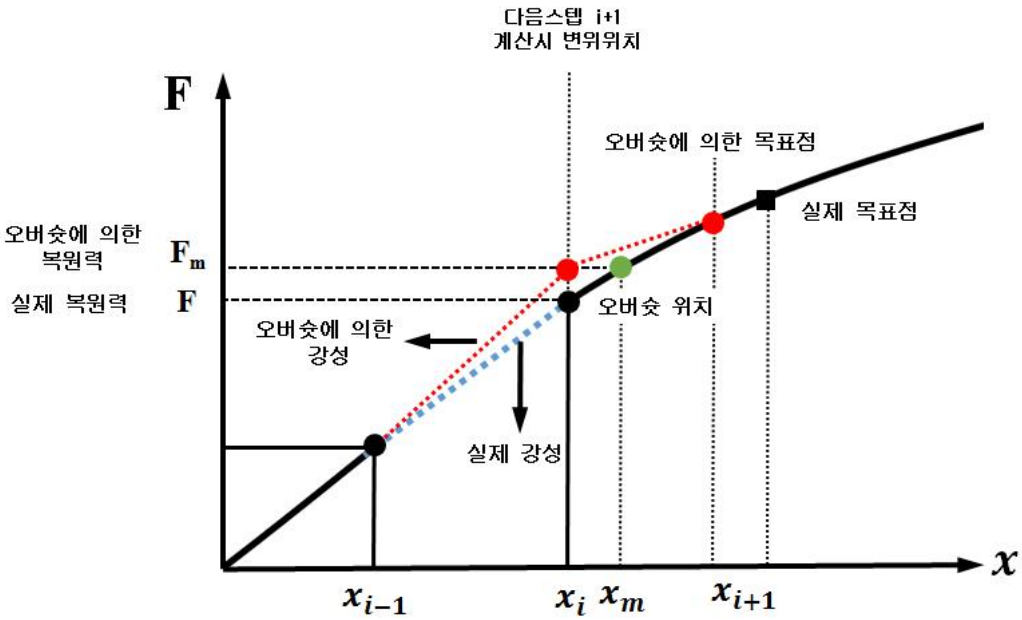


[그림 3.3] Actuator 제어 방법

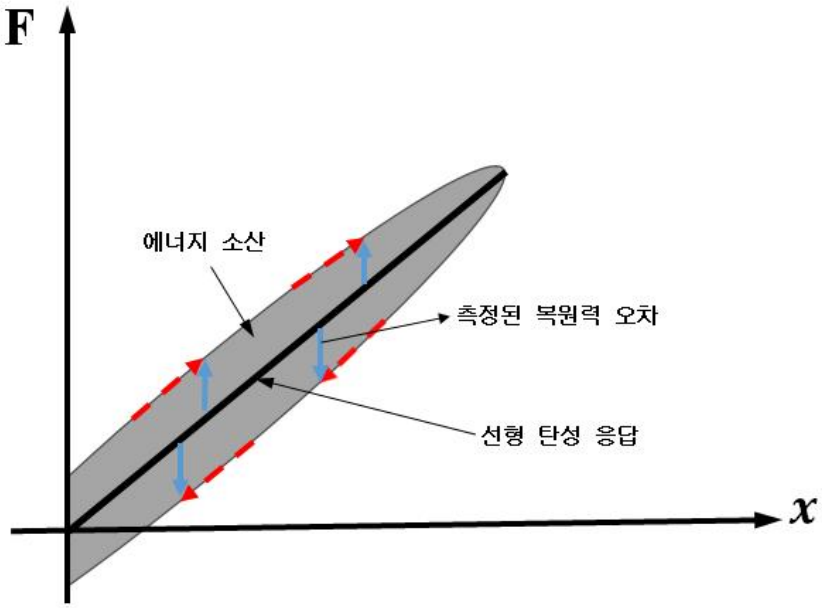
유사동적 온라인 실험 진행시 수치적분에 사용되는 x_i는 수치해석상의 안전성을 위해 목표변위를 사용하게 된다. 이러한 목표 변위와 시험체에서 취득된 복원력에서는 오버슛 or 언더슛 많큼의 오차가 그림 3.4, 3.6과 같이 오차가 발생하게 되며, 이는 매 스탭 적분이 될 때마다 누적되게 된다. 따라서, 목표 변위점을 넘어서는 오버슛이 발생할 경우 그림 3.5과 같이 구조물에 에너지 소산현상이 발생하게 되며, 목표 변위점에 도달하지 못한 언더슛이 발생할 경우 그림 3.7과같이 구조물의 에너지 부가현상이 발생하게 되어 에너지 불균형에 의해 유사동적 온라인 실험의 신뢰도를 확보하지 못하게 된다. 오버슛이 발생할 경우 이는 실험체가 가지고 있는 고유의 성능을 영구히 지나치게 되어 실제 복원력 획득에 실패 하게 된다. 하지만 언더슛의 경우 실제 복원력보다 부족한 복원력의 양을 Actuator에 미소 변위량을 더욱 부과하여 오차량을 줄이거나, Actuator의 미소 변위량 이하의 경우 복원력 보정을 통하여 오차량을 줄일 수 있는 가능성이 남아 있다. 본 논문에서는 Actuator의 오버슛을 방지하기 위해 목표 변위점에 도달하기 전에 허용오차를 두어 목표 변위 점에 도달하지 못하였어도 허용 오차범위 내에 Actuator가 도달하게 되면 Actuator의 변위제어를 제한하도록 하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



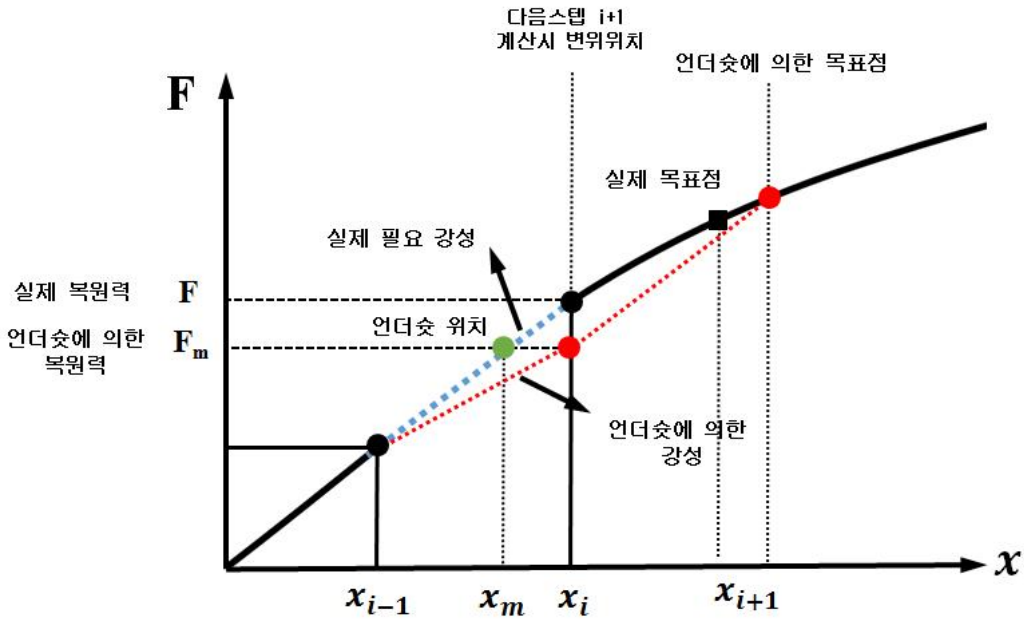
[그림 3.4] 오버슛에 의한 오차



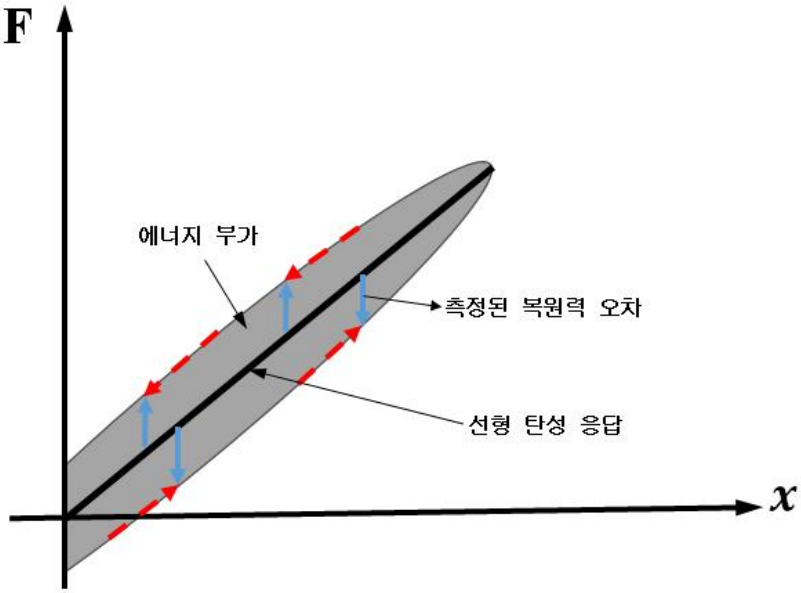
[그림 3.5] 오버슛에 의한 구조물 응답(에너지 소산)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 3.6] 언더슛에 의한 오차



[그림 3.7] 언더슛에 의한 구조물 응답(에너지 부가)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

3.3 에너지 기반 유사동적 온라인 실험의 오차 모니터링

유사동적 온라인 실험의 에너지 평형 방정식은 식 3.1과 같이 표현 할 수 있다. [55]

$$\int [M\ddot{x}]^T dx + \int [C\dot{x}]^T dx + \int [F]^T dx + \int [F^E]^T dx = \int -[M\ddot{x}_g]^T dx \tag{3.1}$$

여기서 제 1항은 질량의 움직임에 의한 Kinematic 에너지(E^K), 제 2항은 점성댐핑에 의해 소산되는 에너지(E^D), 제 3항은 해석에 의해 발생하는 Strain 에너지 및 Hysteretic 에너지(E^S), 제 4항은 실험에 의한 Strain 에너지 및 Hysteretic 에너지(E^E), 제 5항의 경우 외력에 의해 입력되는 총 에너지(E^{input}) 이다.

실험에 의해 발생하는 에너지 E_E의 경우 식 3.2 과 같이 실험에 의해 측정된 에너지와 변위 오차에 의해 발생하는 복원력 오차에 대한 에너지 이다.

$$E^E = \int [F^E]^T dx = \int [F^m + F^{error}]^T dx \tag{3.2}$$

유사동적 온라인 실험의 신뢰성을 확인하기 위해 실험에 의해 발생하는 에너지 오차를 계산하고 확인할 필요성이 있다. Thewalt and Roman. 1994[54]는 각 적분 시간 단계에서 에너지 오차를 다음과 같이 계산하도록 제안하였다.

$$E^{error} = \frac{1}{2}\left(K_i x_i^{error} + K_{i-1} x_{i-1}^{error}\right)\left(x_i^t - x_{i-1}^t\right) \tag{3.3}$$

또한 Mosqueda et al. 2007[56] 은 다음과 같이 수치적분에 적용된 에너지(E^E)와 실험체의 실제 이력현상에의 한 에너지(E^{BE})를 비교 하여 에너지 오차를 평가 할 수 있도록 제안하였다.

$$E_i^{error} = E_i^E - E_i^{BE} \tag{3.4}$$

$$E^{BE} = \int [F^m]^T dx^m \tag{3.5}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Ahmadizadeh and Mosqueda. 2009[59]는 에너지 평형 방정식으로부터 유사동적 온라인 실험의 실험 및 해석적 오차를 다음과 같이 계산 하였다.

$$E^{error} = E^{input} - (E^K + E^D + E^S + E^E) \tag{3.6}$$

이러한 에너지 오차를 계산하여 유사동적 온라인 실험의 신뢰도를 평가하기 위해 Thewalt and Roman 1994[54]는 유사동적 온라인 실험 모델의 복구 가능한 Strain 에너지와 관련시킴으로써 식 3.7과 같이 추정 할 수 있는 Hybrid Simulation Error Monitoring(이하 HSEM) 지표를 제안 하였다.

$$HSEM^S = \frac{E^{error}}{E^{strain}} \tag{3.7}$$

여기서, $E^{strain} = \frac{1}{2} x_y^T K x_y$

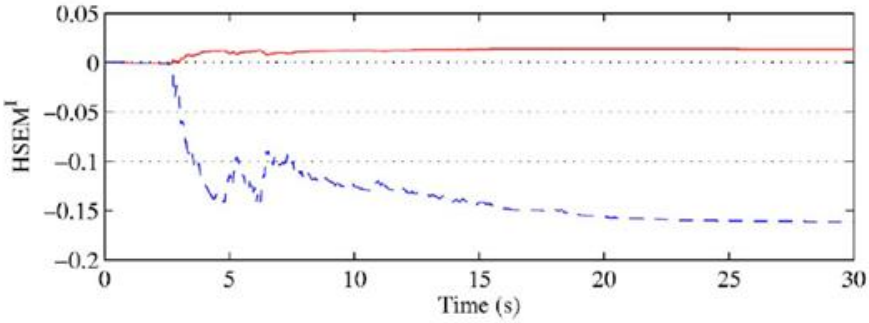
E^{strain}는 구조적 거동이 완전 탄소성이며 구조물의 항복을 가정하여 추정된다. 하지만 이는 주어진 구조에 대해 일정하며, $HSEM^S$는 진폭이나 지속시간을 고려하지 않고 있다. 에너지 오차는 시간이 지남에 따라 누적되기 때문에 긴 시뮬레이션에는 더 큰 에너지 오차가 발생할 것으로 예상된다.

이를 개선하기 위해 Mosqueda et al. 2007[56]는 입력에너지와 관련시킴으로써 식 3.8과 같이 제안 하였다.

$$HSEM^I = \frac{E^{error}}{E^{input} + E^{strain}} \tag{3.8}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 3.8] Hybrid Simulation Error Monitoring

이는 에너지 오차는 입력 에너지 및 Strain에너지에 의해 무차원화 되어 유사동적 온라인 실험의 신뢰성을 나타낸다.

3.4 유사동적 온라인 실험의 오차 보상법

3.3장에서 평가된 유사동적 온라인 실험의 실험적 오차를 보상해야 유사동적 온라인 실험의 신뢰도를 확보 할 수 있다. 이러한 실험적 오차를 보상하는 방법 가장 널리 사용되는 방법은 다항식 근사법이 있다(Horiuchi, Inoue et al.1999[60]). 이 방법은 제 n차 차수 다항식을 마지막 4개의 데이터 점에 맞추고 시뮬레이션 시간보다 먼저 명령 변위를 예측하는 방법이다.

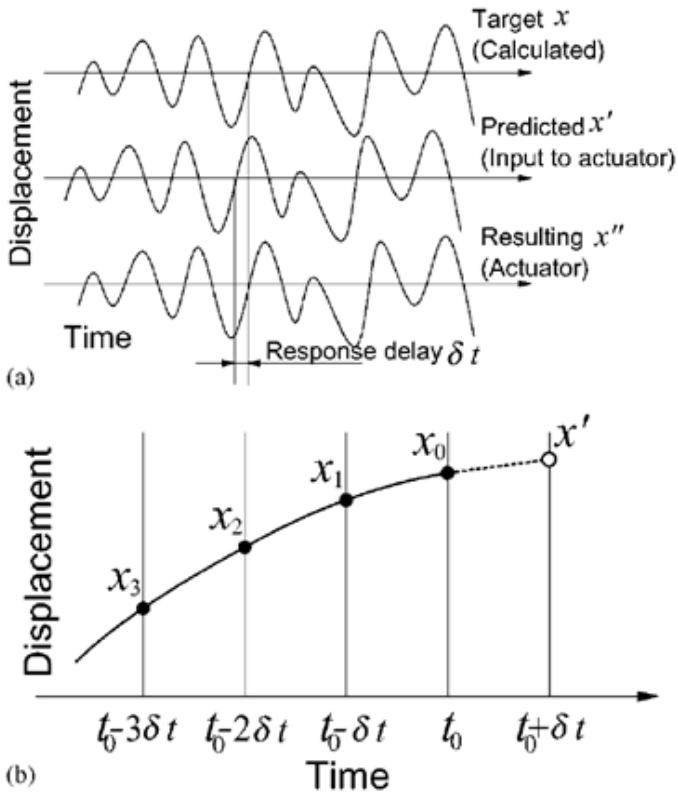
$$x' = \sum_{i=0}^{n} a_i x_i \tag{3.9}$$

<표 3.1> 예측방정식의 상수

Order n	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
0	1	-	-	-	-
1	2	-1	-	-	-
2	3	-3	1	-	-
3	4	-6	4	-1	-
4	5	-10	10	-5	1

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 3.9] 다항식 보상법 예측방법

또한 Gultom and Ma. 2014[58]는 실험적 오차에 의한 에너지를 계산하여 점성감쇠로 치환하여 추가 감쇠를 부여 하여 오차를 보상 하였다.

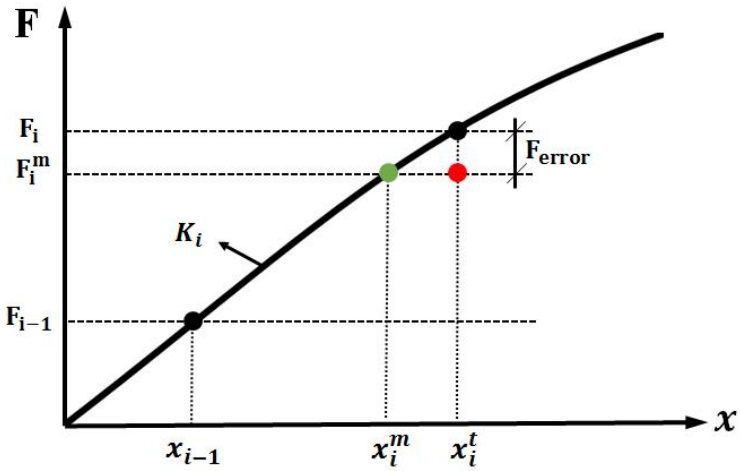
$$C_i^{cor} = \frac{-E_i^{er}}{\left(\dot{x}_{i-1} + \dot{x}_i\right)^T \left(x_i^t - x_{i-1}^t\right)} \tag{3.10}$$

$$\int [M\ddot{x}]^T dx + \int [C\dot{x}]^T dx + \int [F]^T dx + \int [C^{cor}\dot{x}]^T dx = \int -[M\ddot{x}_g]^T dx \tag{3.11}$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

본 논문에서는 명령변위 수정 및 추가 감쇠를 부여하는 것 대신에 Actuator의 변위 제어 오차에 대한 대응하는 복원력을 찾아내 실험적 오차를 최소화 하기 위한 복원력 사전예측 보상법을 적용하였다. 복원력 사전예측 보상법은 그림 3.10과 같이 측정된 복원력(F^m)에 변위 제어 오차에 의해 발생하는 부족한 복원력(F^{error})을 계산하여 추가하는 방법이다.



[그림 3.10] 복원력 사전예측 보상법

$$F_i = F_i^m + F_i^{error} = F_i^m + K_i(x_i^t - x_i^m) \tag{3.11}$$

여기서, F_i : 보정된 복원력

F_i^m : 측정된 복원력

K_i : 현재스텝의 실험체 강성

x_i^t : 목표 변위

x_i^m : 측정된 변위

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제4장 선형 동적 실험을 통한 시스템 검증

4.1 개요

2~3장에서 설명한 유사동적 온라인 실험 시스템을 그림 4.1 및 표 4.1과 같이 구축하였으며, 구축된 유사동적 온라인 실험 시스템의 정밀도를 검증하기 위하여 전단 질점계 구조물을 모델링하여 자유진동실험 및 지진응답 실험을 진행하였다. 선형 지진응답실험을 통해 수치해석 결과와 비교·검토 및 HSEM 평가를 이용하여 전체적인 유사동적 실험 시스템의 유효성을 검증 하였다.

(a) 수치해석 컴퓨터

(b) Actuator 제어기

(C) 유압 Actuator

(d) 유압펌프

[그림 4.1] 유사동적 온라인 실험 시스템

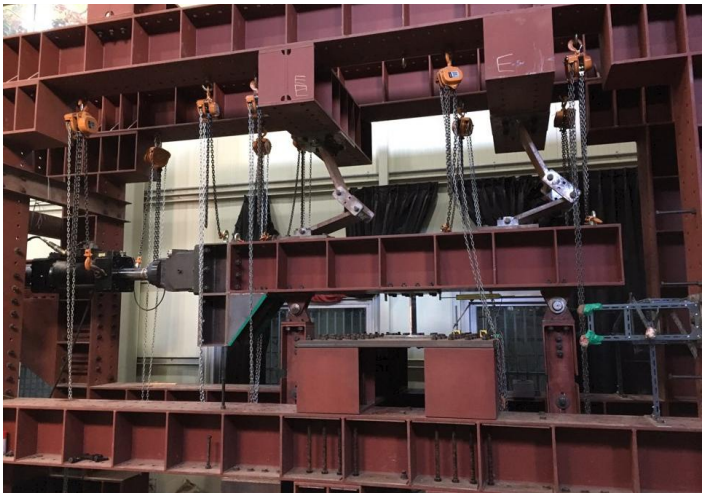
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

<표 4.1> 유사동적 온라인 실험 장비 및 프로그램

구분	장비 및 성능
가력기	유압서보 Actuator - ㈜삼연기술
Controller	(주)삼연기술 - STC500 - 16bit, ±10V
수치적분법	Implicit Newmark - β Method
DAQ Board	Interface PCI-3521 DAQ Board - 12bit, ±5V
계측 센서	Load Cell = ±500kN LVDT = ±100mm
프로그램 언어	Visual Basic 6.0
내부연결망	직접 연결(아날로그 신호)
시스템 제어 분해능	하중 - 0.24kN 변위 - 0.0488mm

실험은 조선대학교 건설 공용 구조실험동에서 수행되었으며, 실험체 설치 및 가력 시스템은 그림 4.2과 같다. 시험체에 가해지는 하중은 강체거동을 하도록 제작된 Loading Beam에 의해 시험체로 전달된다. 시험체는 휨변형을 억제하고 전단거동을 할 수 있도록 실험체 좌우에 양단 힌지로 구성된 기둥을 설치하였으며, 시험체의 면외방향 변형을 구속하기 위해 면외방향 변형 구속 기구를 설치하였다. 모든 실험에 대해 Actuator의 변위제어 속도 $1mm/\sec$로 실험을 진행하였다.



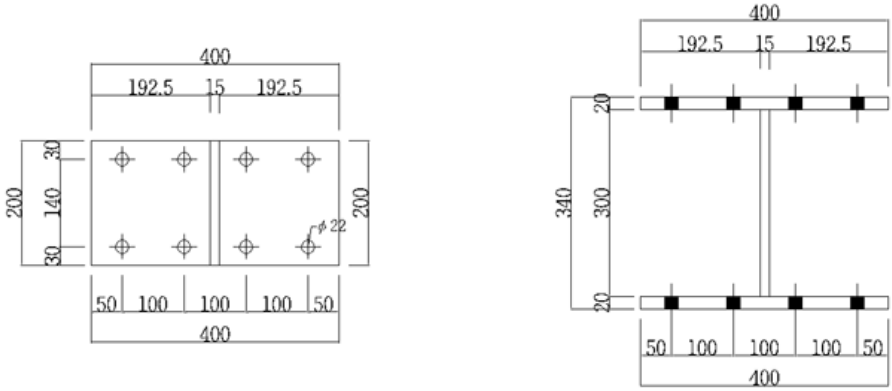
[그림 4.2] 실험 전경

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4.2 시험체 상세

실험에 이용한 시험체는 그림 4.3에 나타내었으며 시험체의 제원은 표 4.2과 같다 ($\sigma_y = 235MPa$). 사용된 강재는 SS400강재를 이용하였으며, 두께 15mm, 길이 200mm, 높이 300mm(용접부 제외 280mm)의 강판을 사용하였다. 강판을 약축으로 배치하였으며, 유사동적 온라인 실험 구조모델이 전단질점계 모델이기 때문에, 시험체 상하부에 두께 20mm의 앤드플레이를 용접하여 강판 양단부에서 소성힌지가 발생하도록 하였다. 앤드플레이와 가력프레임과 M20 고력볼트를 이용하여 재하보와 실험 프레임에 고정하여 가력방향 수평변위를 제외하고 면외방향 변위 및 회전자유도를 구속하였다.



[그림 4.3] 선형 유사동적 실험 시험체 형상

<표 4.2> 선형 유사동적 온라인 실험 시험체 제원

Z_P (mm^3)	M_P $(N \cdot mm)$	Q_y (kN)	K (kN/mm)	D_y (mm)	h_0 (mm)
11,250	2,643.75	18.88	6.3	3	280

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4.3 단자유도 시스템 선형 지진응답 실험

4.3.1 단자유도 시스템 선형 지진응답 실험 개요

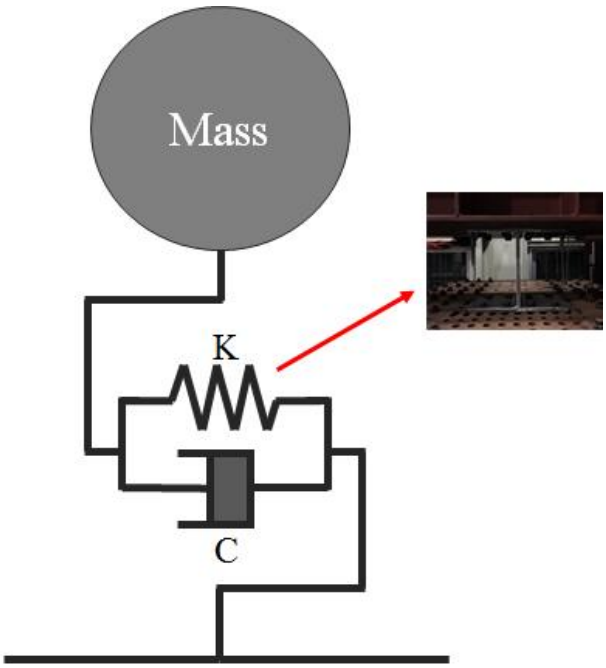
단자유도 시스템 유사동적 온라인 지진응답 실험을 진행하기 위해 그림 4.4과 같은 전단 1질점계 모델에 대하여 질량 0.00204$kN \cdot s^2/mm$을 사용하였으며, 5%의 감쇠를 적용하여 실험을 진행하였다. 3.4절에 제안된 복원력 보정 및 복원력 무보정에 따른 결과를 비교 분석 하기 위해 각각의 실험을 진행하였으며, 복원력 보정에 대한 결과와 순수 수치해석 결과와 비교 분석 하였다. 유사동적 온라인 지진응답 실험에 사용된 지진파는 El Centro NS(1940), 시간간격은 0.005sec를 이용하였며, 그림 4.5에 나타내었다. 사용된 지진파의 PGA는 0.348g이며, El Centro 지진파의 가속도 응답스펙트럼을 그림 4.6에 나타내었다. 수치적분법으로는 Newmark - β법을 사용하였으며,$\beta = 1/6$, $r = 1/2$를 사용하였다.

<표 4.3> 선형 SDOF 유사동적 온라인 실험 개요

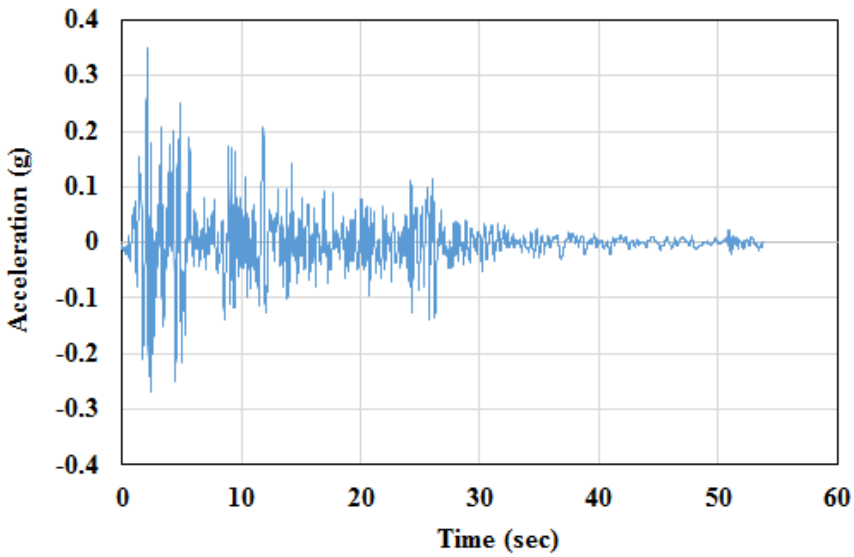
질량	0.00204$kN \cdot s^2/mm$
감쇠계수	5%
초기강성	6.3kN/mm
주기	0.113sec
시험체 재료	SS400
입력 지진파	El Centro Ns
시간간격	0.005sec
수치적분법	Newmark - β법 $\beta = 1/6$, $r = 1/2$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



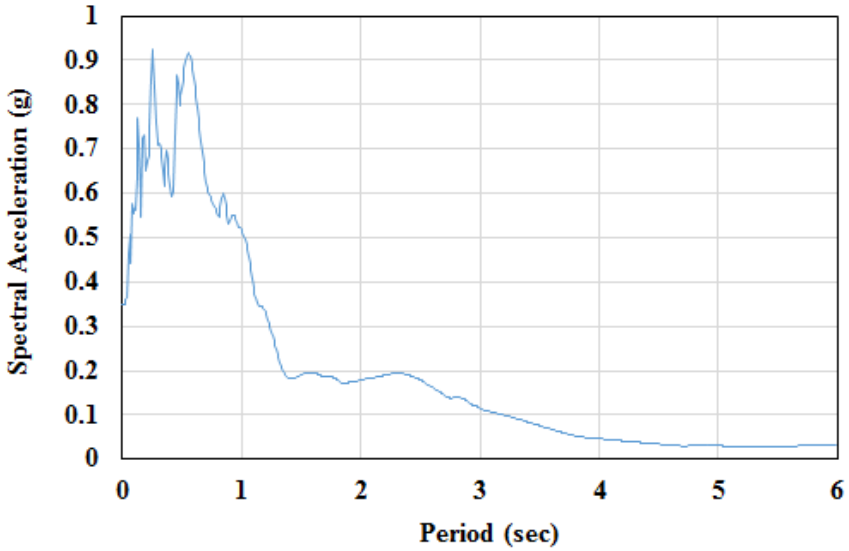
[그림 4.4] 전단 1질점계 온라인 실험 모델



[그림 4.5] El Centro Ns(1940) 지진파

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

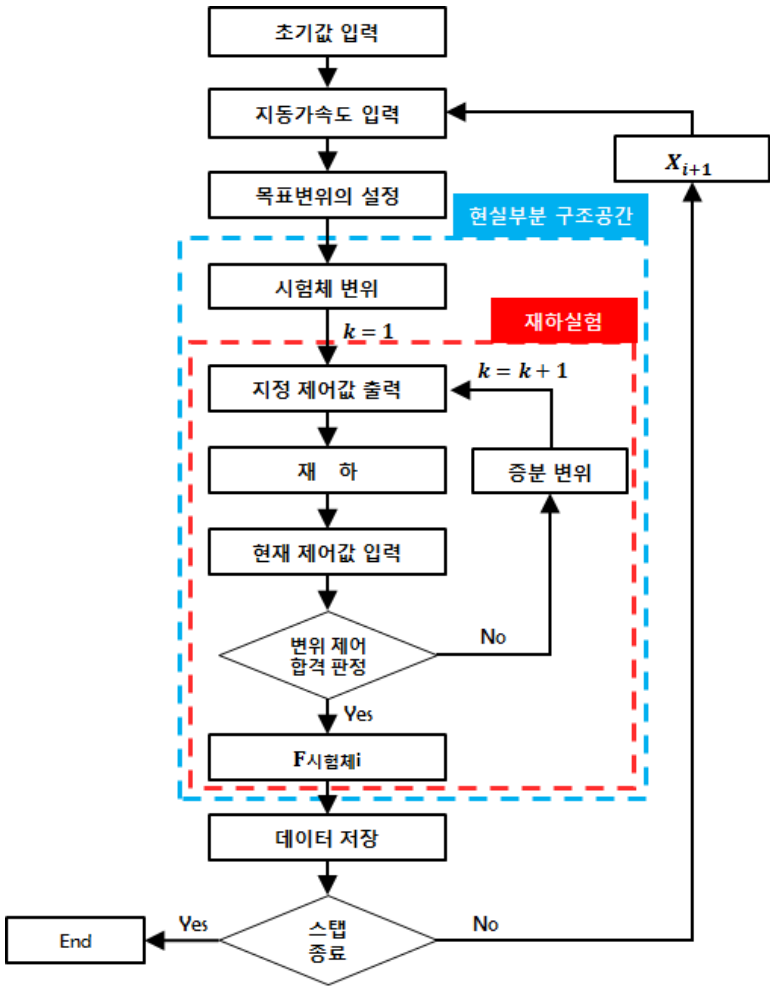


[그림 4.6] El Centro Ns(1940) 가속도 응답스펙트럼(5%감쇠)

그림 4.4과 같은 1개의 강성을 가지는 1질점계 유사동적 온라인 지진응답 실험의 경우 수치해석에 필요한 질량, 감쇠비, 시간간격등의 초기 변수에 대한 설정을 진행한 후 입력된 지진파에 따른 구조물의 변위를 계산하게 된다. 이어 계산된 구조물의 변위를 이용하여 실험체의 목표 변위가 산정 되며, 목표 변위의 허용범위 안에 도달하기 위해 Actuator를 제어 하여 허용범위 도달하게 되면 Actuator의 제어를 멈추게 되고 그 위치에서의 실험체의 복원력을 받아들여 다음 스텝에 대하여 진행하게 된다. 그림 4.7에 유사동적 온라인 지진응답 실험의 Flow Chat를 나타내었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



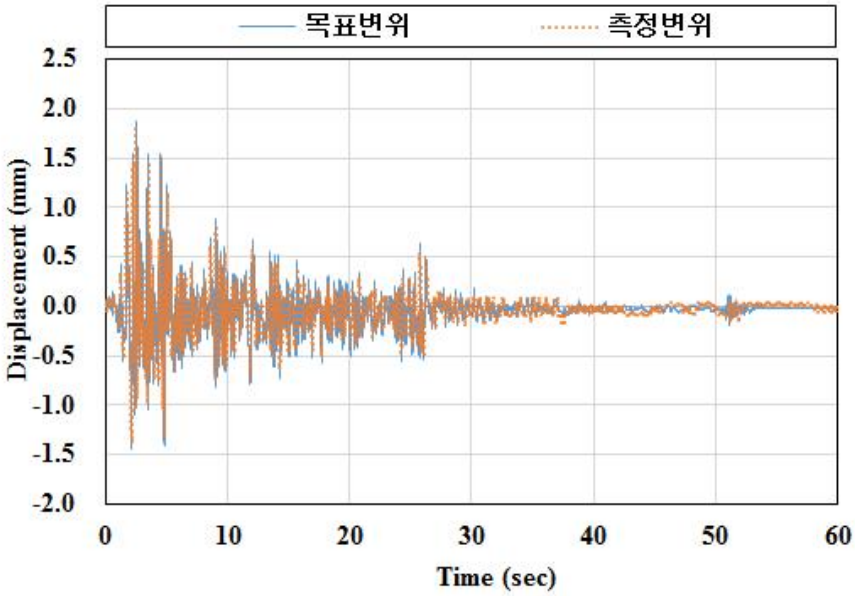
[그림 4.7] 유사동적 온라인 지진응답실험 Flow Chart

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4.3.2 복원력 보정에 따른 유사동적 온라인 실험 결과

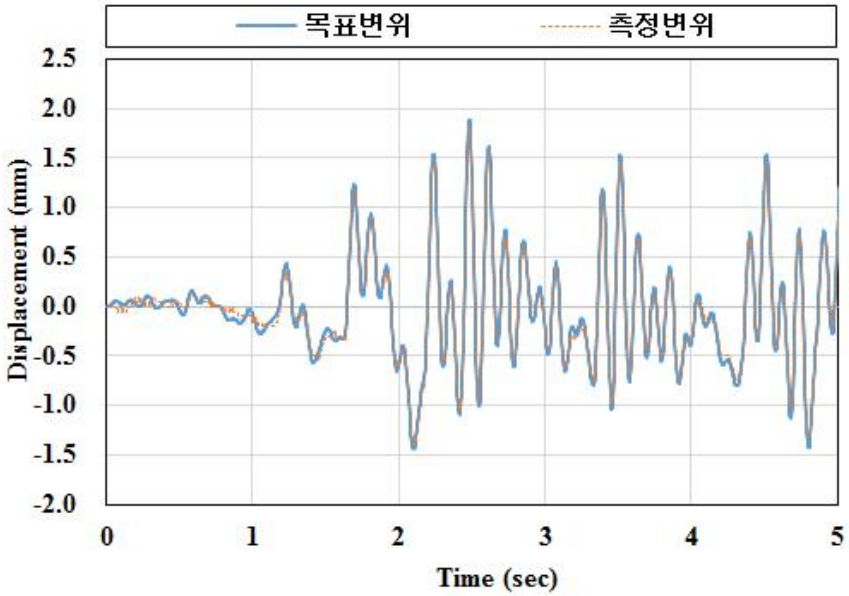
복원력을 보정한 유사동적 온라인 실험에 대해 Actuator의 변위제어 시간$1mm/\sec$를 이용한 결과 총 실험 시간은 약 1510초의 시간이 소요되었으며, 목표변위와 측정된 변위에 대한 결과를 그림 4.8 ~ 4.10에 나타내었다. 그림 4.8에 목표변위와 측정변위 결과를 나타내었으며, 그림 4.9에 초기 5초 구간에 대한 결과를 나타내었다. Actuator의 제어가 목표변위에 따라 정밀하게 제어됨을 확인 할 수 있었으며, 전 구간에 대해 오버슛이 발생하지 않고 시스템 구축 시 목표로 하였던 언더슛이 발생하는 것을 확인하였다. 목표변위와 측정변위의 오차는 그림 4.10과 같이 -0.15mm~0.15mm의 오차가 발생하였으며, 최대변위에서 목표변위 1.876mm 측정변위 1.8mm, 최소변위에서 목표변위 -1.438mm, 측정변위 -1.38mm로 각각 0.076mm, 0.058mm로 Actuator제어 허용범위 0.1mm 이내의 정밀한 제어가 되었음을 확인 하였다.



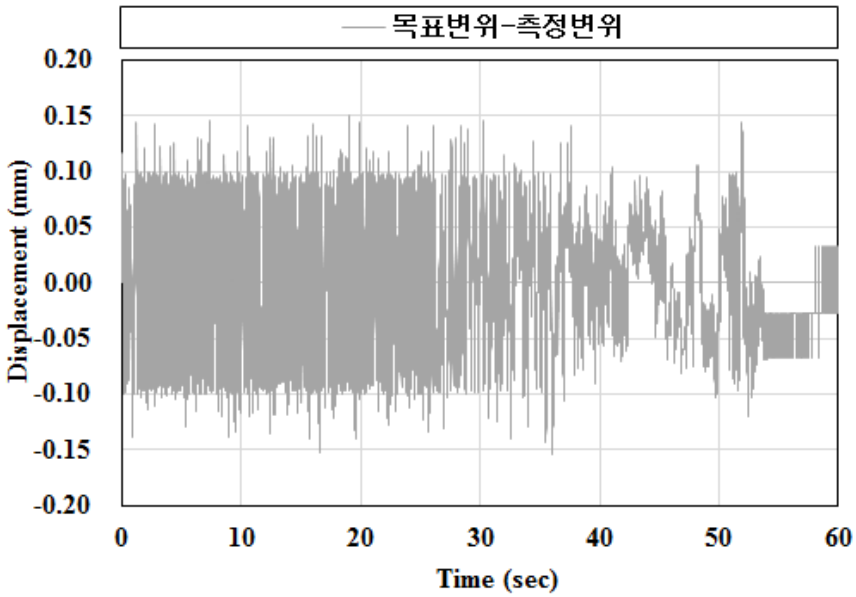
[그림 4.8] SDOF 온라인 실험 목표변위, 측정변위 응답

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 4.9] SDOF 온라인 실험 목표변위, 측정변위 응답(초기 5초)



[그림 4.10] SDOF 온라인 실험 변위제어 오차

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

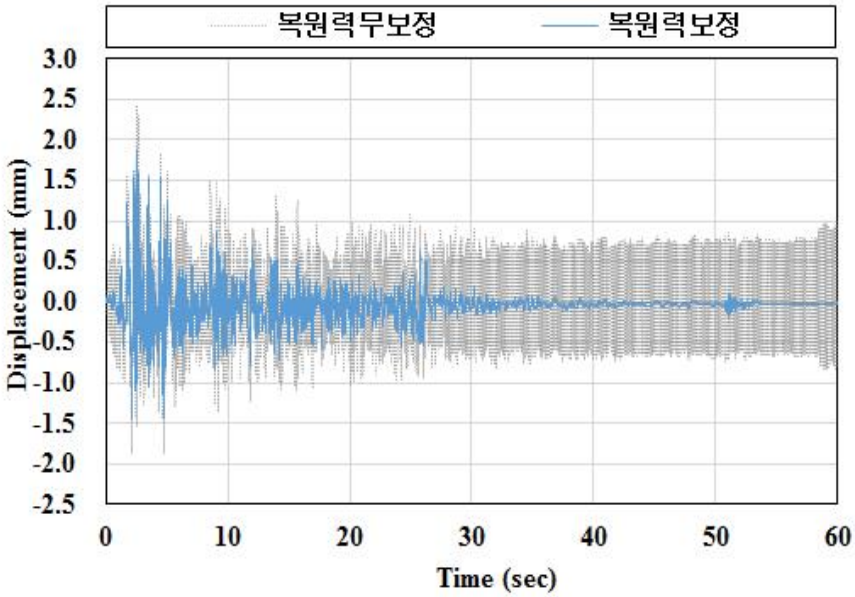
언더슛을 이용한 유사동적 온라인 지진응답 실험 시 복원력 보정의 필요성은 3장에 나타낸 것과 같이 에너지 부가현상을 해소하기 위해 필수적이다. 복원력 보정에 따른 효과를 확인하기 위해 복원력이 보정된 유사동적 온라인 지진응답실험과 복원력이 보정되지 않은 유사동적 온라인 지진응답 실험을 비교 분석하였다. 복원력 보정 여부에 따른 차이만을 확인하기 위해 복원력 보정 부분을 제외하고 동일한 실험 조건하에 실험을 진행하였다.

복원력 보정 여부에 따른 변위 응답 결과를 그림 4.11 ~ 4.12에 나타내었다. 응답 변위의 경우 최대 변위 및 전체적인 변위응답이 복원력을 보정하지 않은 경우 크게 나타났다. 복원력 보정한 경우 최대변위 +1.876mm, -1.38mm로 나타났으며, 복원력을 보정하지 않은 경우 최대변위 +2.442mm, -1.873mm로 나타났다. 이러한 응답의 증가는 초기에서부터 다음 스텝을 계산하는 목표변위와 측정된 하중에 따라 미소 하중의 누적으로 인해 에너지부가 현상이 발생하여 변위 응답의 차이가 크게 발생한 것으로 판단된다.

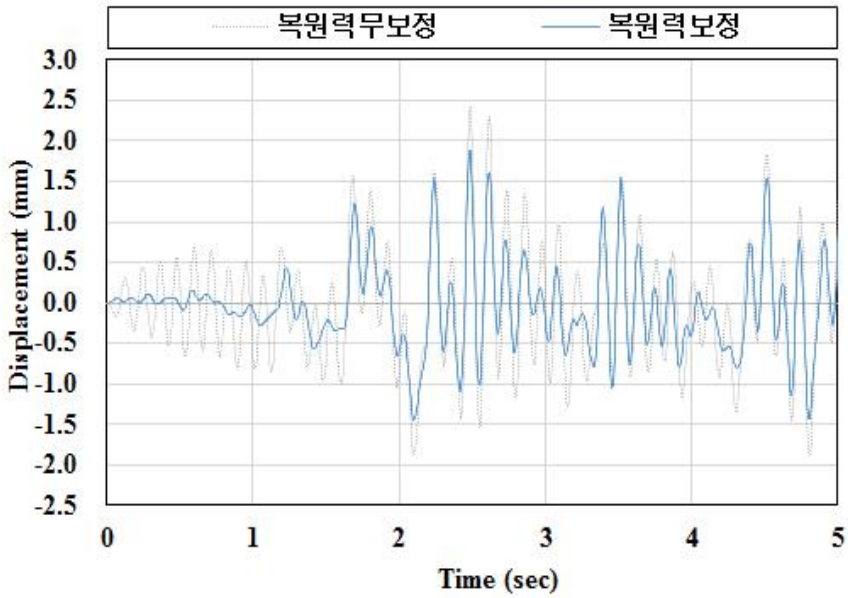
복원력 보정여부에 따른 에너지 오차를 [Mosqueda et al]제안한 평가 방법으로 평가한 결과를 그림4.13 ~ 4.16에 나타내었다. 복원력을 보정한 결과 실제 실험체에 의해 소산된 에너지와 수치적분에 적용된 에너지가 큰 오차가 발생하지 않는 것을 확인 할 수 있었으며, 복원력을 보정하지 않은 경우 최종 약 570kN·mm의 에너지 오차가 발생하는 것을 확인 하였다. 복원력 보상법을 적용한 경우 실험 종료 후 HSEM지표는 약 0.034로 나타났으며 이는 유사동적 온라인 실험의 에너지 오차가 입력되는 외부에너지와 복원 가능한 Strain에너지 대비 약 3.4%의 오차로써 정밀한 실험이 진행 된 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 복원력 보상법을 적용하지 않은 경우 HSEM지표는 약 6.5로 매우 큰 오차가 발생하는 것을 확인 할 수 있었으며, 이에 따라 복원력 보상법을 적용하지 않은 경우 유사동적 온라인 실험의 신뢰도를 확보하지 못하는 것이 확인 되었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



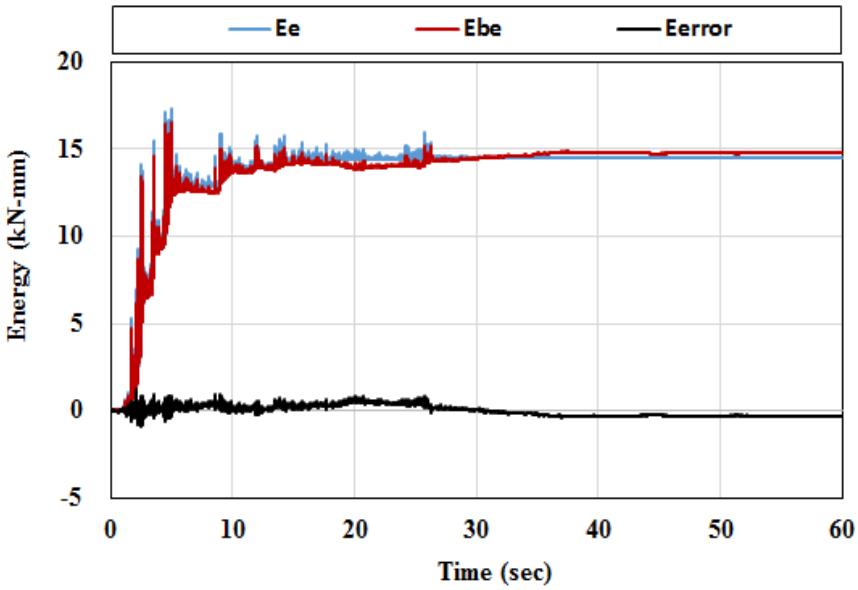
[그림 4.11] 복원력 보정여부에 따른 변위 응답



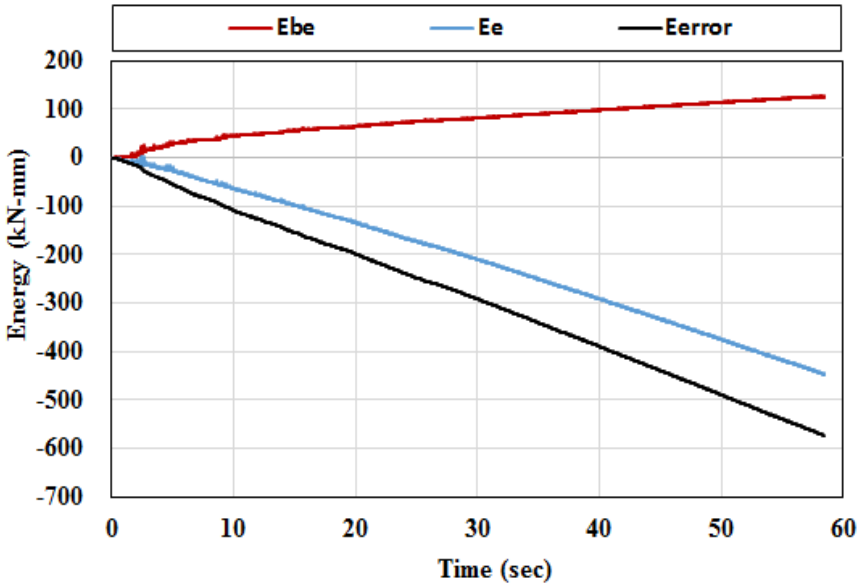
[그림 4.12] 복원력 보정여부에 따른 변위 응답(초기 5초)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



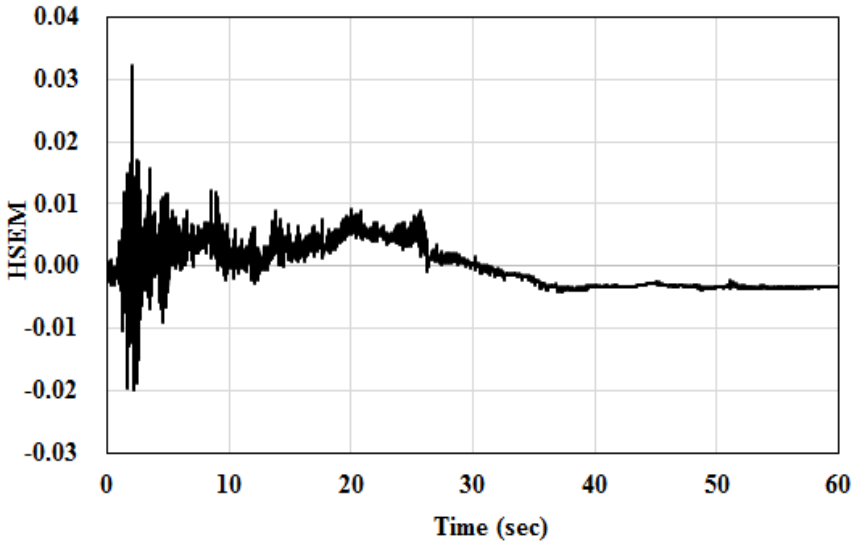
[그림 4.13] 복원력 보정에 따른 누적 에너지 오차



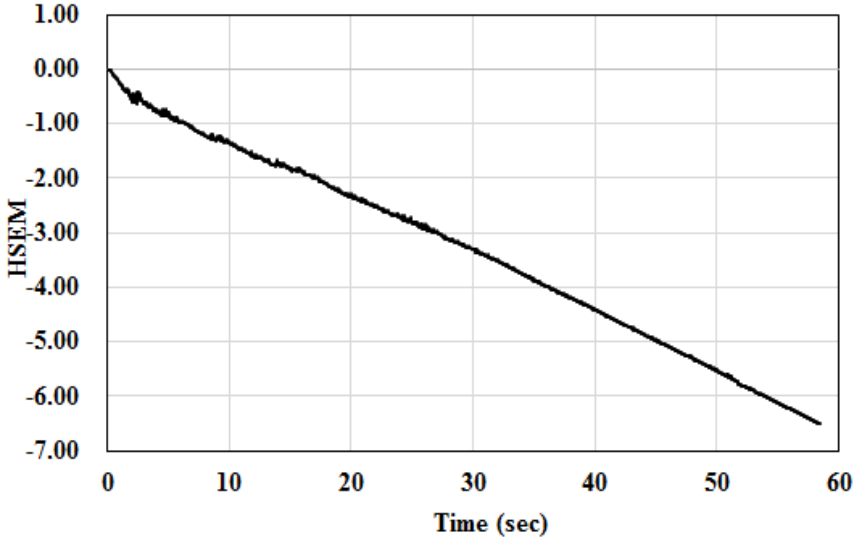
[그림 4.14] 복원력 무보정에 따른 누적 에너지 오차

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 4.15] 복원력 보정에 따른 HSEM



[그림 4.16] 복원력 무보정에 따른 HSEM

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4.3.3 순수 수치해석 결과 비교

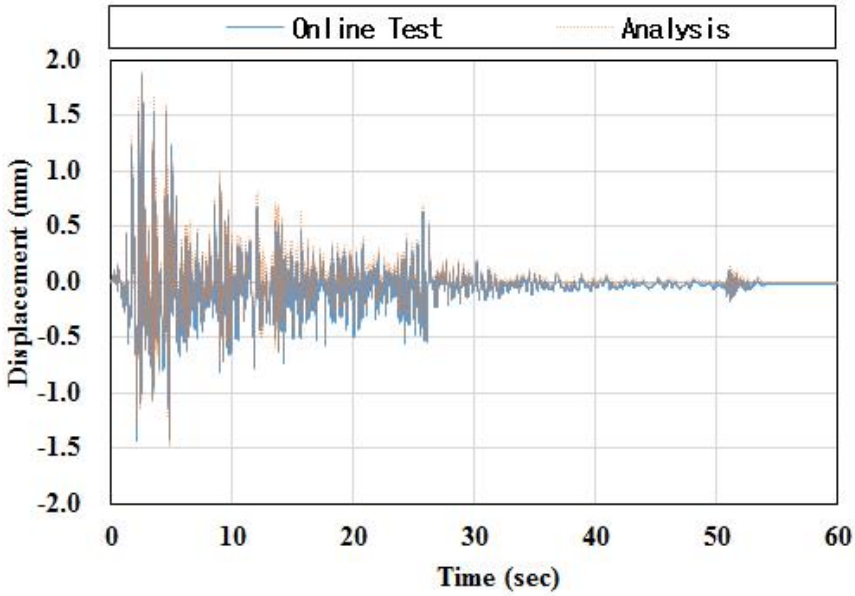
구축된 유사동적 온라인 실험에 대하여 유효성 및 적합성을 검증하기 위하여 표 4.2의 초기강성 6.3kN/mm를 이용하여 순수 수치해석을 진행하였으며, 복원력 보상법이 적용된 유사동적 온라인 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하여 그림 4.17 ~ 4.21에 나타내었다. 변위응답에 대한 결과 그림 4.17~4.18과 같이 전체적으로 유사동적 온라인 실험이 응답 변위가 적게 나타남을 확인 되었으며, 유사동적 온라인 실험 결과 최대 변위 +1.876mm, -1.438mm로 나타났으며, 수치해석 결과 최대 변위 +1.901mm, -1.487mm로 나타났다. 복원력의 경우 그림 4.19~4.20에 나타내었으며, 유사동적 온라인 실험의 경우 최대 11.08N, 최소 -8.59kN으로 나타났으며, 수치해석 결과 최대 11.97kN, 최소 -9.37kN으로 나타났다. 전체적으로 실험 결과와 수치해석 결과가 8%이내의 오차로 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 유사동적 온라인 실험결과가 전체적으로 순수수치해석 결과에 비해 적게 나타났으며, 이는 유사동적 온라인 실험의 경우 실험체 셋팅 실험 시스템에 의하여 Hysteretic Energy가 소산됨에 따른 것으로 판단된다.

<표 4.4> SDOF 온라인 실험 및 수치해석 최대값 결과 비교

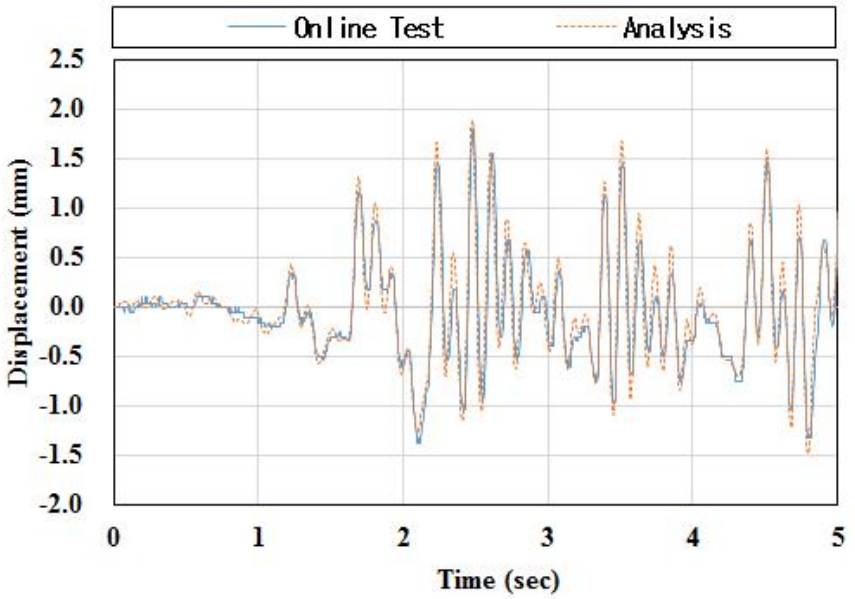
		온라인실험	수치해석	오차
변위(mm)	Max	1.876	1.901	0.025
	Min	-1.438	-1.487	0.048
하중(kN)	Max	11.088	11.978	0.89
	Min	-8.599	-9.37	-0.77

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



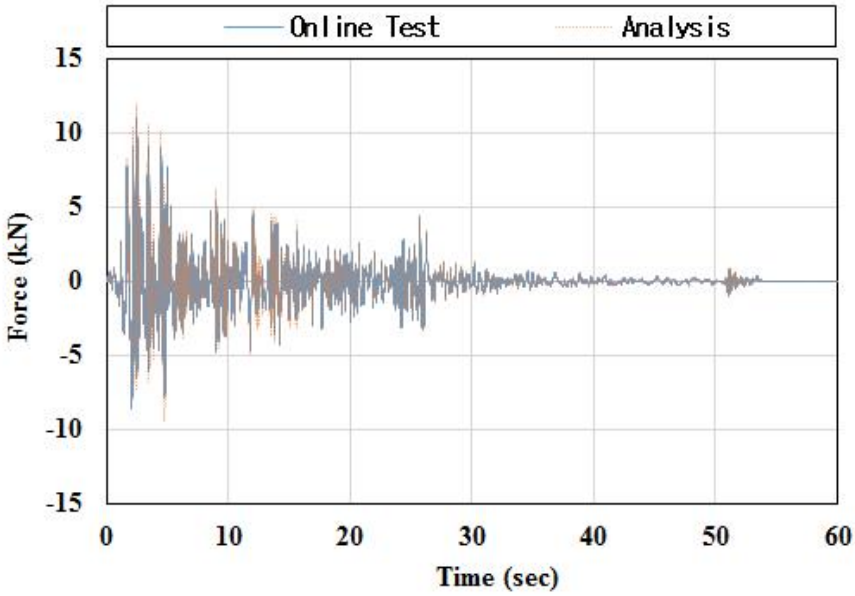
[그림 4.17] SDOF 온라인 실험 및 수치해석 변위 응답



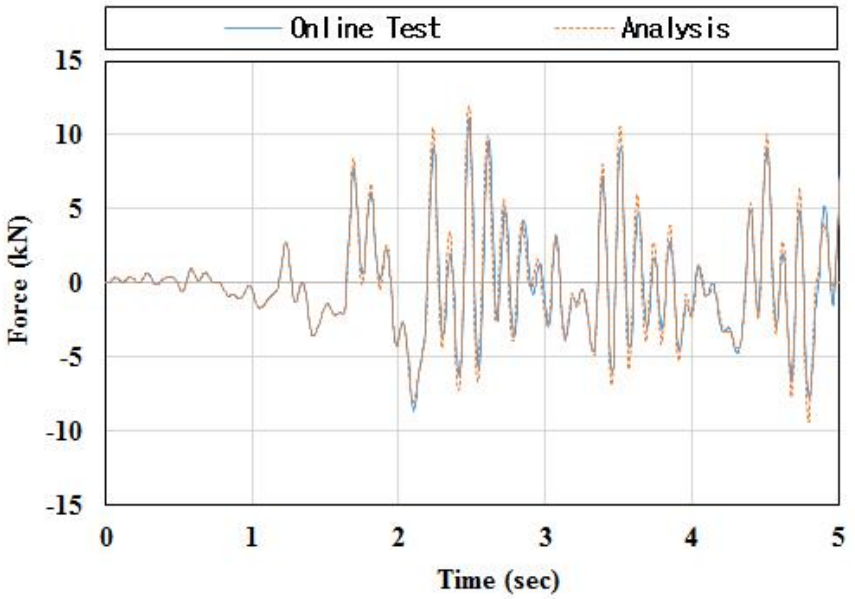
[그림 4.18] SDOF 온라인 실험 및 수치해석 변위 응답(초기 5초)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



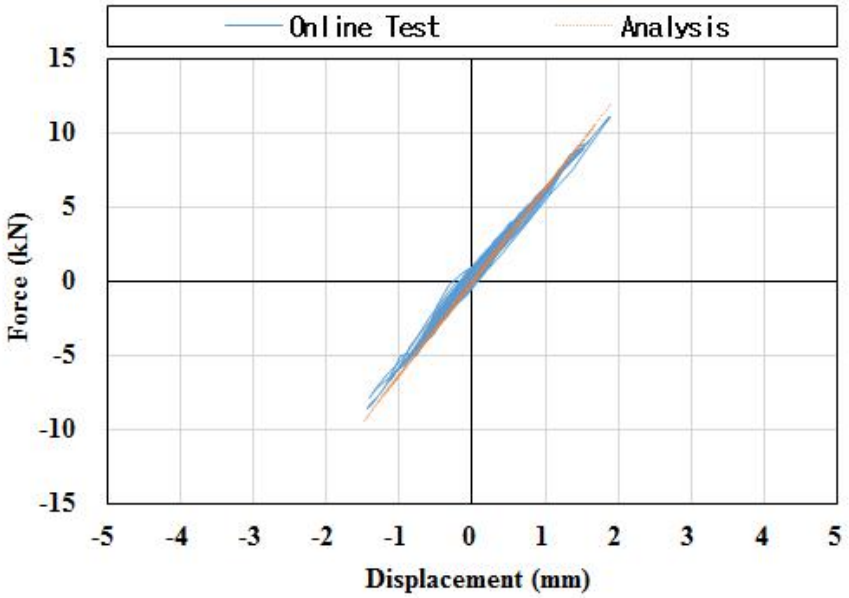
[그림 4.19] SDOF 온라인 실험 및 수치해석 하중 응답



[그림 4.20] SDOF 온라인 실험 및 수치해석 하중 응답(초기 5초)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 4.21] SDOF 온라인 실험 및 수치해석 변위-하중 이력응답

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4.4 다자유도 시스템 선형 지진응답 실험

4.4.1 다자유도 시스템 선형 지진응답 실험 개요

3.4절에 제안된 복원력 보정 및 복원력 무보정에 따른 결과를 비교 분석 하기 위해 각각의 실험을 진행하였으며, 복원력 보정에 대한 결과와 순수 수치해석 결과와 비교 분석 하였다. 2질점계 다자유도 시스템 유사동적 온라인 지진응답 실험에 대해 3.4절에 제안된 복원력 보정 및 복원력 무보정에 따른 결과를 비교 분석 하기 위해 각각의 실험을 진행하였으며, 복원력 보정에 대한 결과와 순수 수치해석 결과와 비교 분석 하였다.

다자유도 시스템의 경우 그림 4.22과 같은 전단 2질점계 해석 모델을 적용하였다. 각 층 질량 0.00102$kN \cdot s^2/mm$을 사용하였으며, 1차 및 2차 모드 5%감쇠를 적용, Rayleigh감쇠를 이용하여 감쇠 매트릭스를 구성 하였다. 대상실험체의 경우 4.2절에 나타낸 실험체에 대해 실험을 진행하였으며, 1층 부분에 대해 실험부분을 2층부분에 해석부분을 적용 하였다. 2질점계 다자유도 시스템 유사동적 온라인 지진응답 실험에 사용된 지진파는 El Centro NS(1940), 시간간격은 0.005sec를 이용하였다. 수치적분법으로는 Newmark-β법을 사용하였으며, $\beta = 1/6$, $r = 1/2$를 사용하였다.

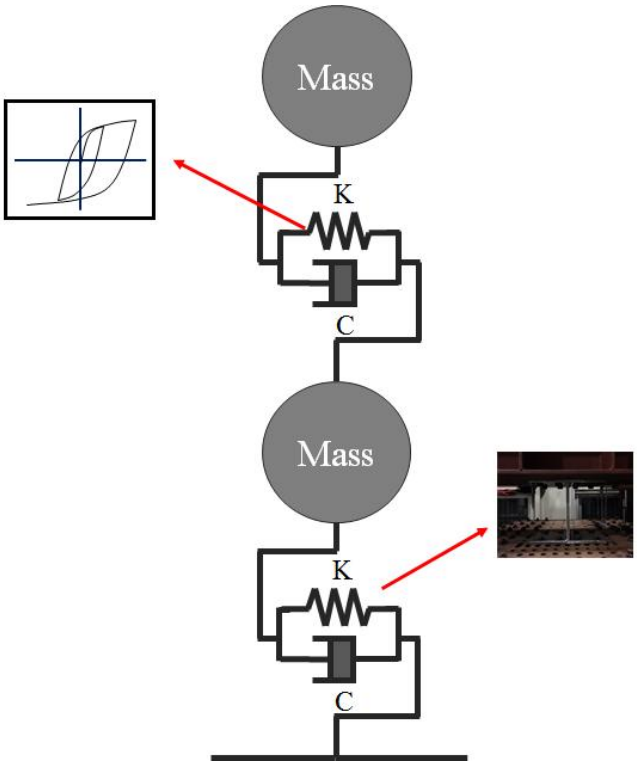
부구조계 유사동적 온라인 지진응답 실험의 경우 수치해석에 필요한 질량, 감쇠비, 시간간격등의 초기 변수에 대한 설정을 진행한 후 입력된 지진파에 따른 구조물의 변위를 계산하게 된다. 이어 계산된 구조물의 변위를 이용하여 실험체의 목표 변위 및 가상부분(해석모델)의 변위가 산정 되며, 가상부분에 대하여 해석 모델을 이용한 계산을 진행함과 동시에 실험체의 목표 변위의 허용범위 안에 도달하기 위해 Actuator를 제어 하여 허용범위 도달하게 되면 Actuator의 제어를 멈추게 되고 그 위치에서의 실험체의 복원력을 받아들여 다음 스텝에 대하여 진행하게 된다. 그림 4.23에 유사동적 온라인 지진응답 실험의 Flow Chat를 나타내었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

<표 4.5> 선형 MDOF 유사동적 온라인 실험 개요

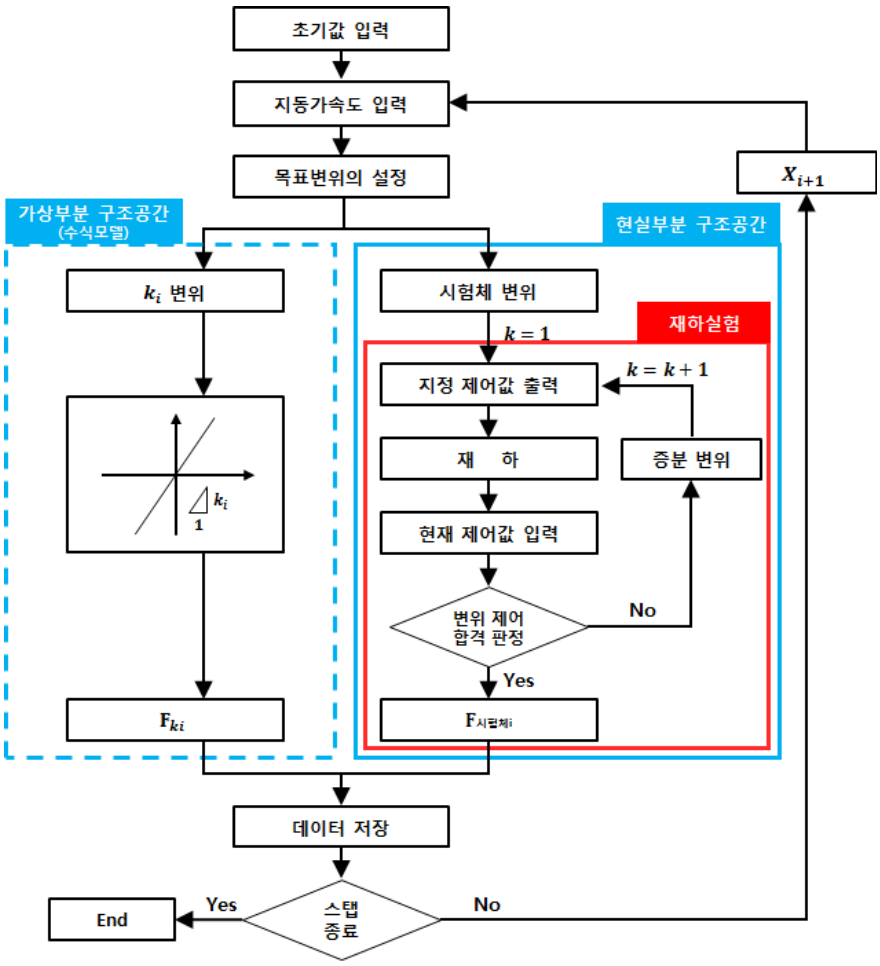
질량	1층 : $0.00102kN \cdot s^2/mm$, 2층 : $0.00102kN \cdot s^2/mm$
감쇠계수	1차모드 5%, 2차모드 5%
초기강성	1층 : 6.3kN/mm, 2층 : 6.3kN/mm
주기	1차모드 0.129sec, 2차모드 0.049sec
시험체 재료	SS400
입력 지진파	El Centro Ns
시간간격	0.005sec
수치적분법	Newmark - β법 $\beta = 1/6$, $r = 1/2$



[그림 4.22] 전단 2질점계 온라인 실험 모델

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 4.23] 부구조계 유사동적 온라인 지진응답실험 Flow Chart

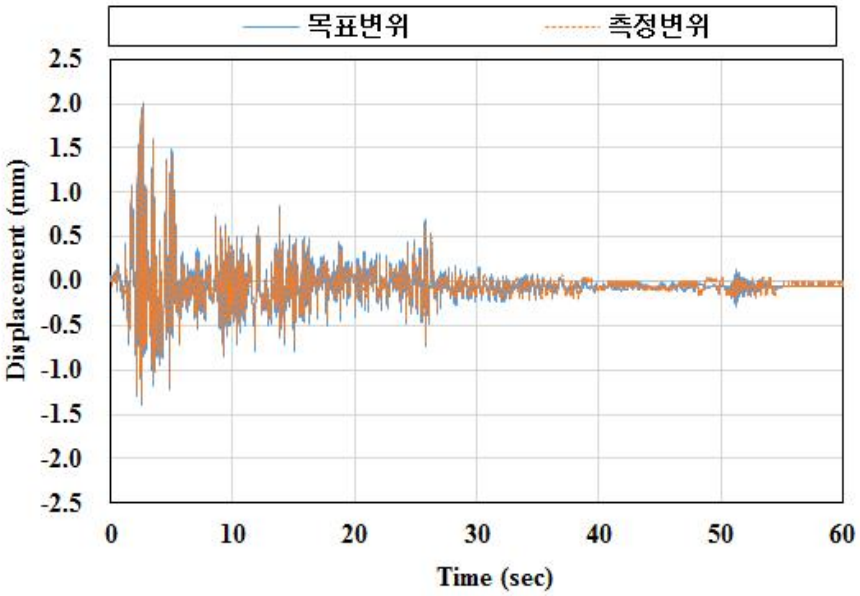
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4.4.2 복원력 보정에 따른 유사동적 온라인 실험 결과

2질점계 선형 유사동적 온라인 실험의 1층 부분 물리부분 으로 구성하여 직접 실험 하였으며, 2층 부분의 경우 수치해석 탄성 모델을 이용하여 유사동적 온라인 실험을 진행 하였다.

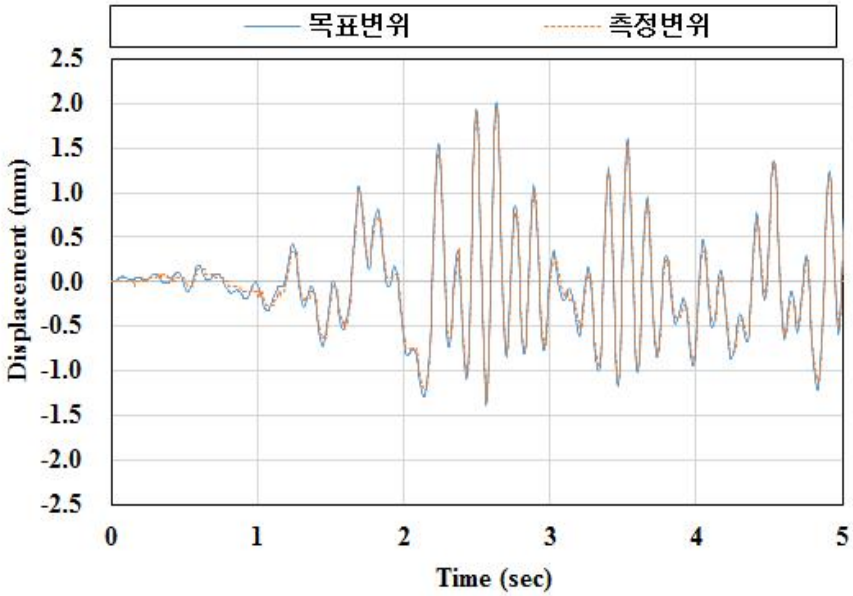
복원력을 보정한 2질점계선형 유사동적 온라인 실험에 대한 총 실험 시간은 약 1095초의 시간이 소요되었으며, 목표변위와 측정된 변위에 대한 결과를 그림 4.24 ~ 4.26에 나타내었다. 그림 4.24에 목표변위와 측정변위 결과를 나타내었으며, 그림 4.25에 초기 5초 구간에 대한 결과를 나타내었다. Actuator의 제어가 목표변위에 따라 정밀하게 제어됨을 확인 할 수 있었으며, 전 구간에 대해 오버슛이 발생하지 않고 시스템 구축 시 목표로 하였던 언더슛이 발생하는 것을 확인하였다. 목표변위와 측정변위의 오차는 그림 4.26과 같이 -0.15㎜ ~ 0.15㎜의 오차가 발생하였으며, 최대변위에서 목표변위 2.02㎜ 측정변위 1.94㎜, 최소변위에서 목표변위 -1.38㎜, 측정변위 -1.32㎜로 각각 0.079㎜, 0.063㎜로 Actuator제어 허용범위 0.1㎜이내의 정밀한 제어가 되었음을 확인 하였다.



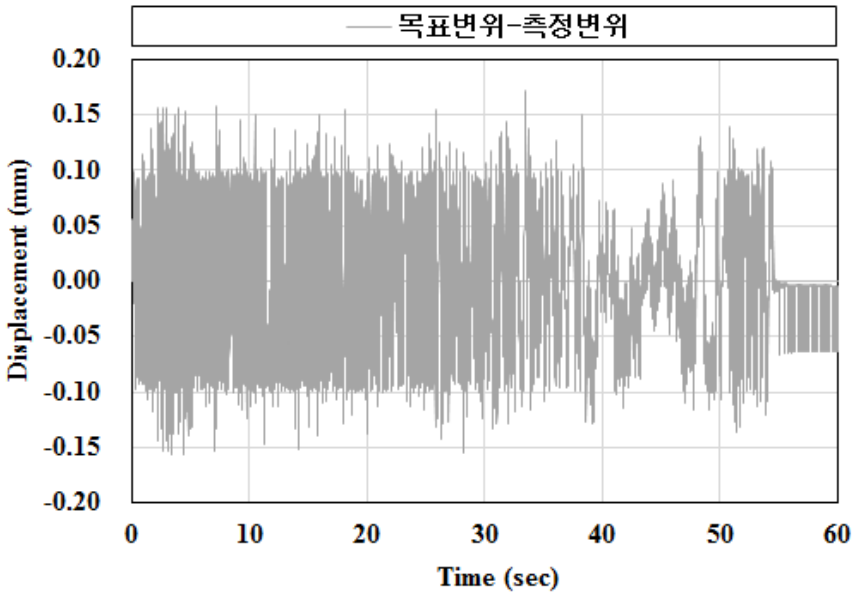
[그림 4.24] 전단2질점계 온라인 실험 변위 응답

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 4.25] 전단2질점계 온라인 실험 변위 응답(초기 5초)



[그림 4.26] 전단2질점계 온라인 실험 변위제어 오차

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다자유도 시스템에 대한 유사동적 온라인 실험의 복원력 보정에 따른 효과를 확인하기 위해 4.3.2절과 동일한 방법으로 복원력이 보정된 유사동적 온라인 지진응답실험과 복원력이 보정되지 않은 유사동적 온라인 지진응답 실험을 비교 분석하였다. 복원력 보정 여부에 따른 차이만을 확인하기 위해 복원력 보정 부분을 제외하고 동일한 실험 조건하에 실험을 진행하였다.

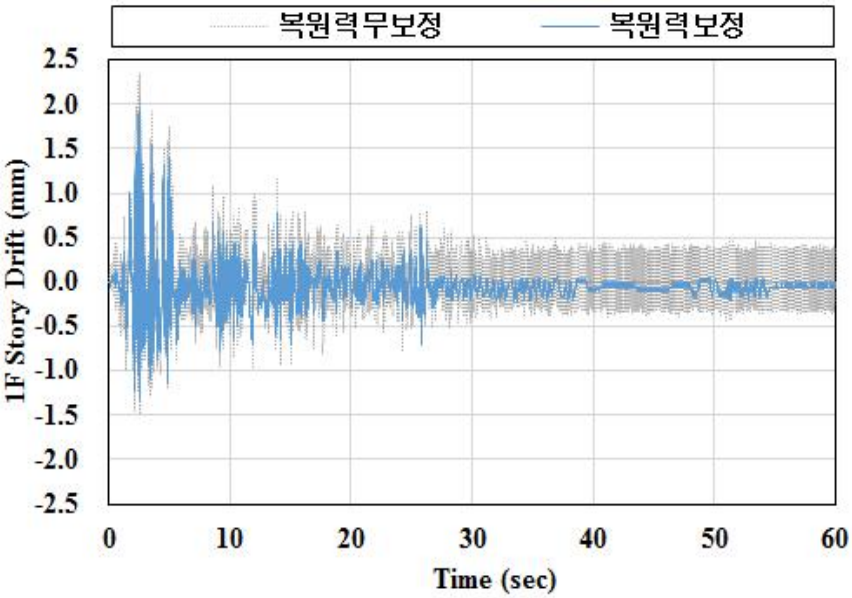
복원력 보정 여부에 따른 변위 응답 결과를 그림 4.27 ~ 4.30에 나타내었다. 응답 변위의 경우 1층 및 2층 모두 최대 층간 변위 및 전체적인 층간 변위응답이 복원력을 보정하지 않은 경우 크게 나타났다. 복원력 보정한 경우 1층 층간 최대변위 +2.019mm, -1.383mm로 나타났으며, 복원력을 보정하지 않은 경우 최대변위 +2.367mm, -1.495mm로 나타났다.

이러한 응답의 증가는 단자유도 시스템에 대한 유사동적 온라인 실험과 동일하게 초기에서부터 다음 스텝을 계산하는 목표변위와 측정된 하중에 따라 미소 하중의 누적으로 인해 에너지부가 현상이 발생하여 변위 응답의 차이가 크게 발생한 것으로 판단된다.

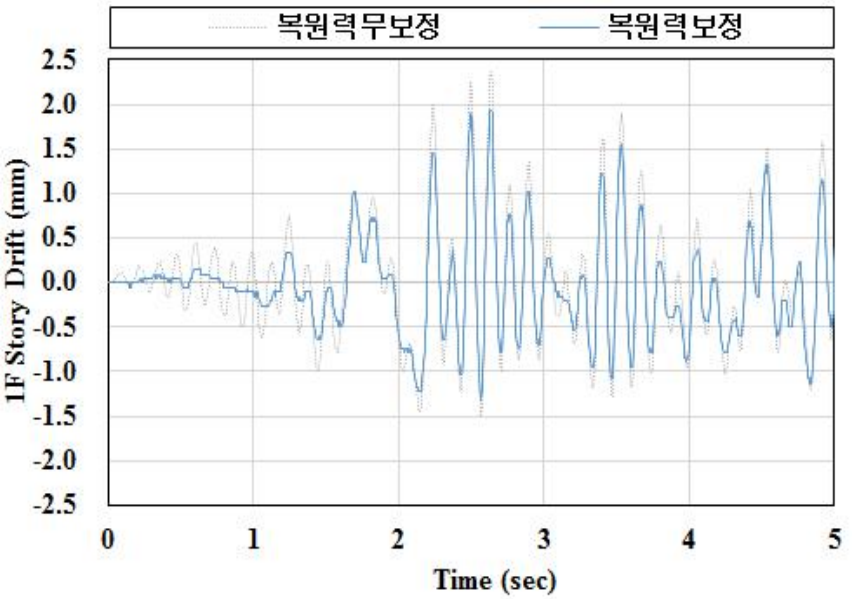
다자유도 시스템에 대한 복원력 보정여부에 따른 에너지 오차에 대해 평가한 결과를 그림4.31 ~ 4.34에 나타내었다. 복원력을 보정한 결과 실제 실험체에 의해 소산된 에너지와 수치적분에 적용된 에너지가 큰 오차가 발생하지 않는 것을 확인 할 수 있었으며, 복원력을 보정하지 않은 경우 최종 약 800kN·mm의 에너지 오차가 발생 하였다. 복원력 보상법을 적용한 경우 실험 종료 후 HSEM 지표는 약0.004로 나타났으며, 이는 유사동적 온라인 실험의 에너지 오차가 입력되는 외부에너지와 복원 가능한 Strain에너지 대비 약 0.4%의 오차로써 정밀한 실험이 진행 된 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 복원력 보상법을 적용하지 않은 경우 HSEM 지표는 약4.8로 나타나 오차가 크게 발생하는 것을 확인 할 수 있었으며, 이에 따라 단자유도 및 다자유도 시스템에 대해 본 논문에서 제안한 복원력 사전예측 보상법을 적용함으로써 유사동적 온라인 실험의 정밀도를 확보할 수 있음을 확인 하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



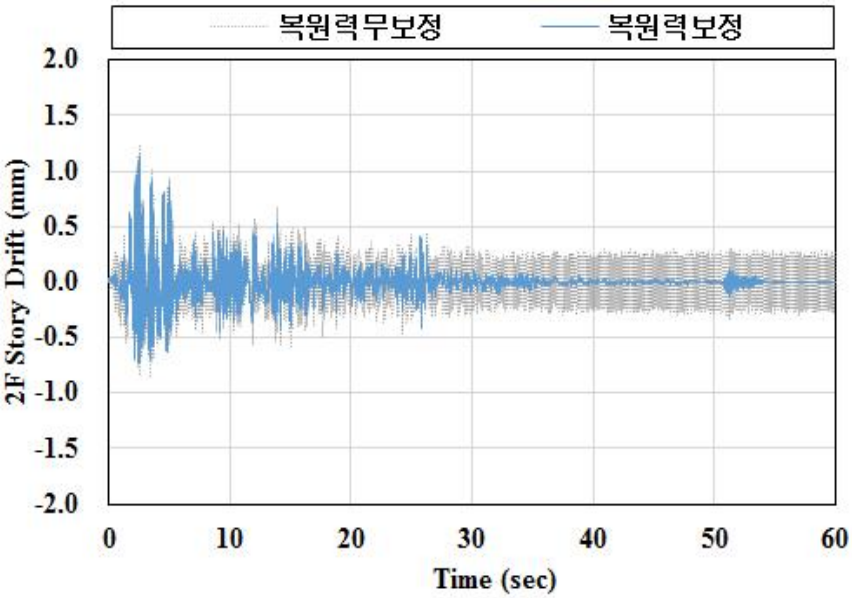
[그림 4.27] 복원력 보정여부에 따른 1층 층간 변위 응답



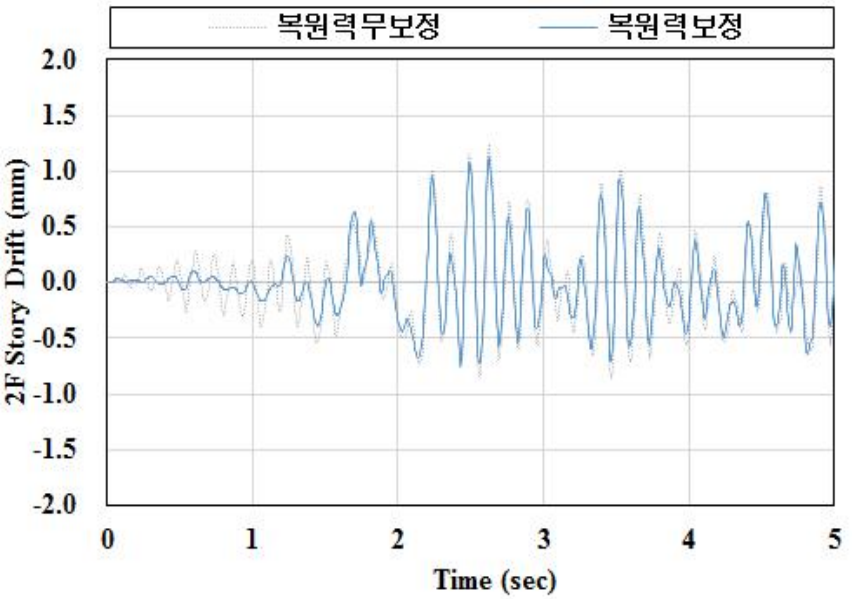
[그림 4.28] 복원력 보정여부에 따른 1층 층간 변위 응답(초기 5초)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



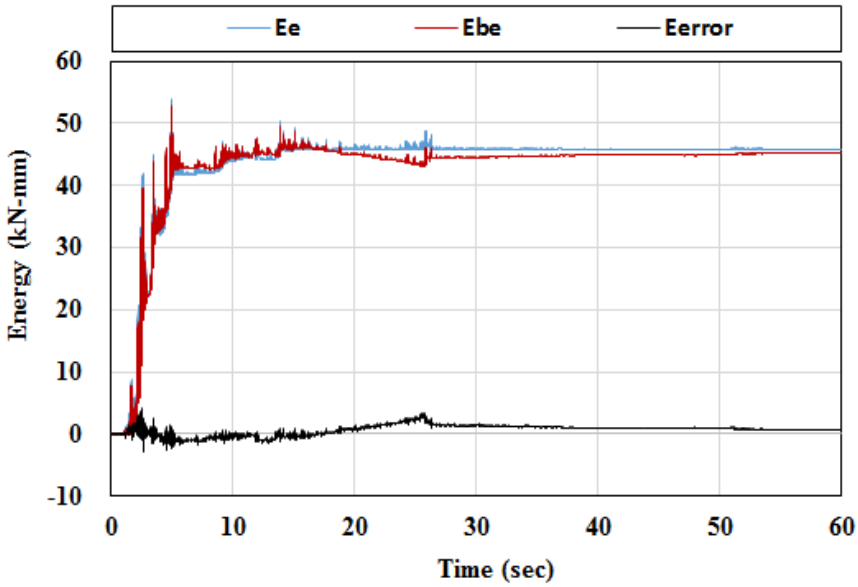
[그림 4.29] 복원력 보정여부에 따른 2층 층간 변위 응답



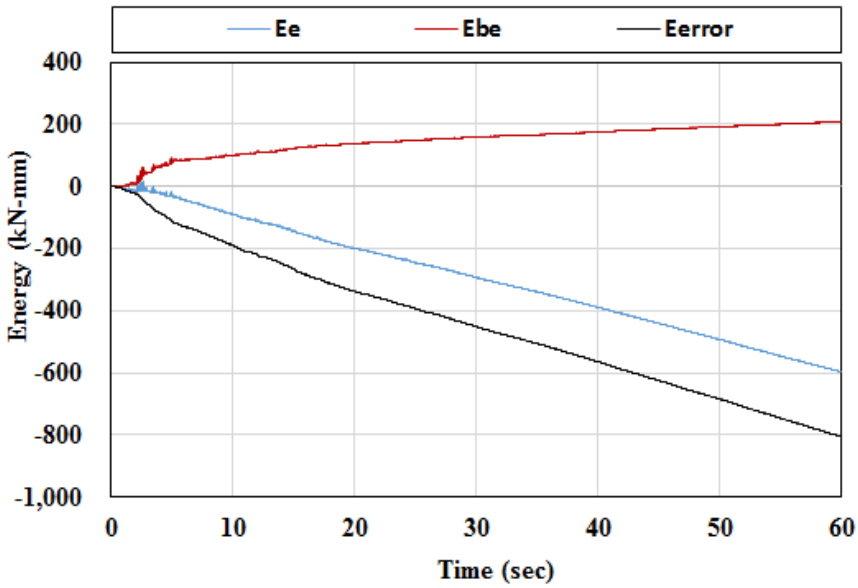
[그림 4.30] 복원력 보정여부에 따른 2층 층간 변위 응답(초기 5초)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



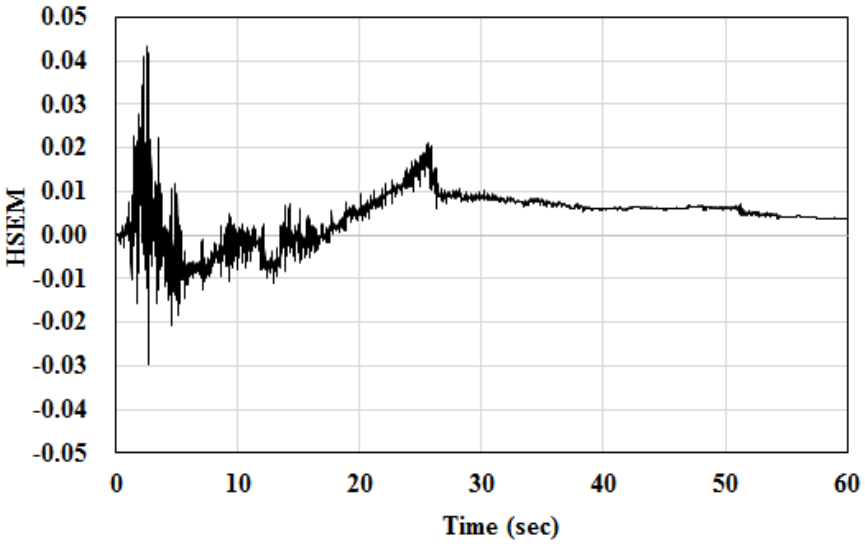
[그림 4.31] 복원력 보정에 따른 누적 에너지 오차



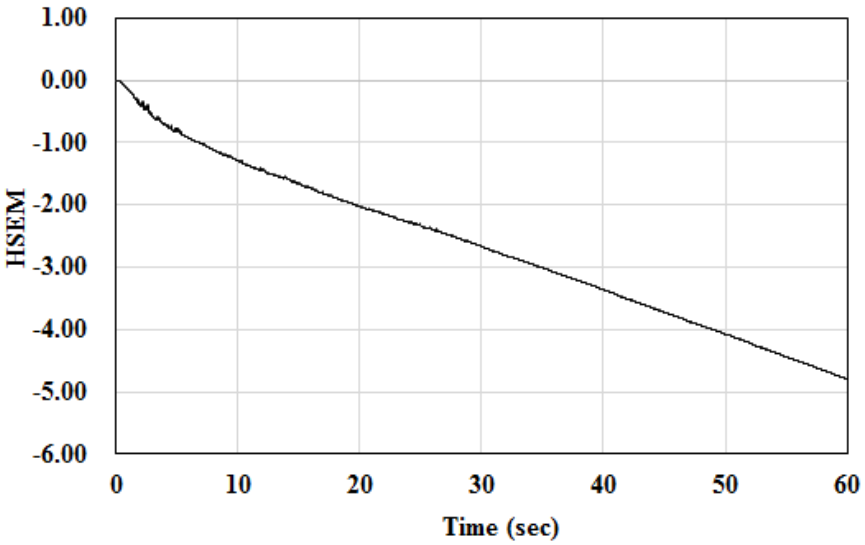
[그림 4.32] 복원력 무보정에 따른 누적 에너지 오차

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 4.33] 복원력 보정에 따른 HSEM



[그림 4.34] 복원력 무보정에 따른 HSEM

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

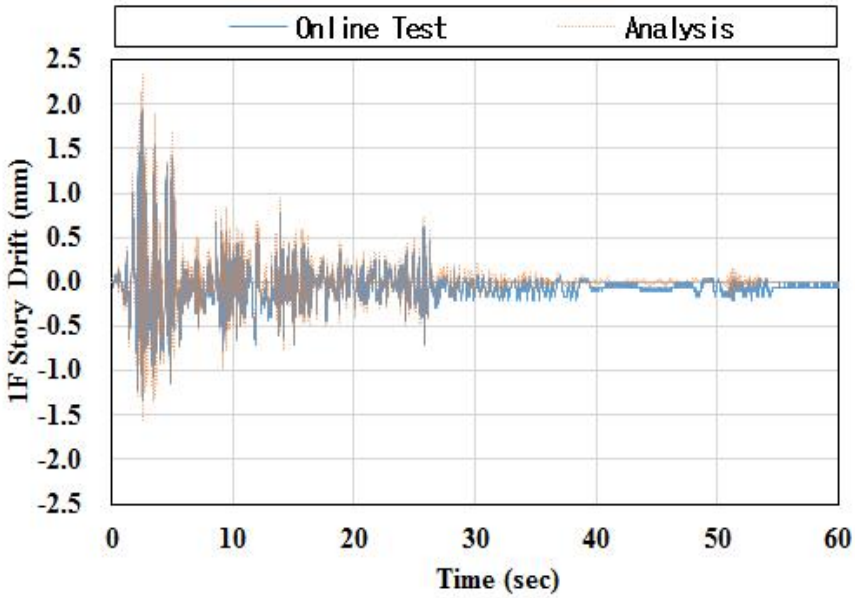
4.4.3 수치해석 결과 비교

구축된 다자유도 시스템 유사동적 온라인 실험에 대하여 유효성 및 적합성을 검증하기 위하여 표 4.2의 초기강성 6.3kN/mm를 이용하여 1층 및 2층 모두 수치해석 모델을 이용하여 해석을 진행하였으며, 다자유도 유사동적 온라인 1층 가력 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하여 그림 4.35 ~ 4.44에 나타내었다. 각층 변위응답에 대한 결과 그림 4.35 ~ 4.38과 같이 전체적으로 유사동적 온라인 실험이 응답 변위가 적게 나타남을 확인 되었으며, 유사동적 온라인 실험 결과 1층 최대 층간변위 +2.019m, -1.383mm로 나타났으나, 수치해석 결과 1층 최대 층간변위 +2.327mm, -1.556mm로 나타났다. 유사동적 온라인 실험에 의한 2층 최대 층간변위 +1.134mm, -0.738mm, 수치해석의 2층 최대 층간 변위는 +1.414mm, -1.01mm으로 나타났다. 다자유도 시스템 유사동적 온라인 실험의 경우도 단자유도 시스템과 동일하게 수치해석 결과 보다 실험 결과가 전체적인 응답이 적게 나타났으며, 이는 앞서 4.3.3절에서 고찰한 결과와 같이 실험 시스템 및 시험체 셋팅 상황에 의한 이력소산에너지 발생으로 인한 것으로 확인 되었다.

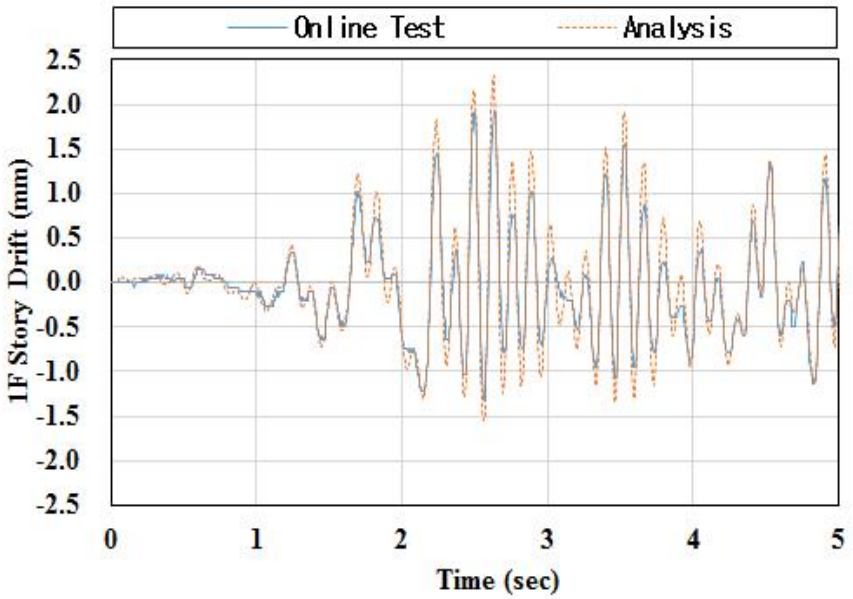
복원력의 경우 그림 4.39 ~ 4.44에 나타내었으며, 다자유도 시스템 유사동적 온라인 실험 1층의 경우 최대 12.49kN, 최소 -8.12kN으로 나타났으며, 수치해석 1층 결과 최대 14.66kN, 최소 -9.8kN으로 나타났다. 2층의 경우 실험 최대 복원력 7.14kN, 최소 -4.64kN, 수치해석 결과 최대 8.91kN, 최소 -6.36kN 으로 나타났다. 전체적으로 정방향 부방향 모두 실험 결과와 수치해석결과가 잘 일치함을 확인함으로써 구축된 유사동적 온라인 실험 시스템의 유효성 및 적합성을 확인 할 수 있었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



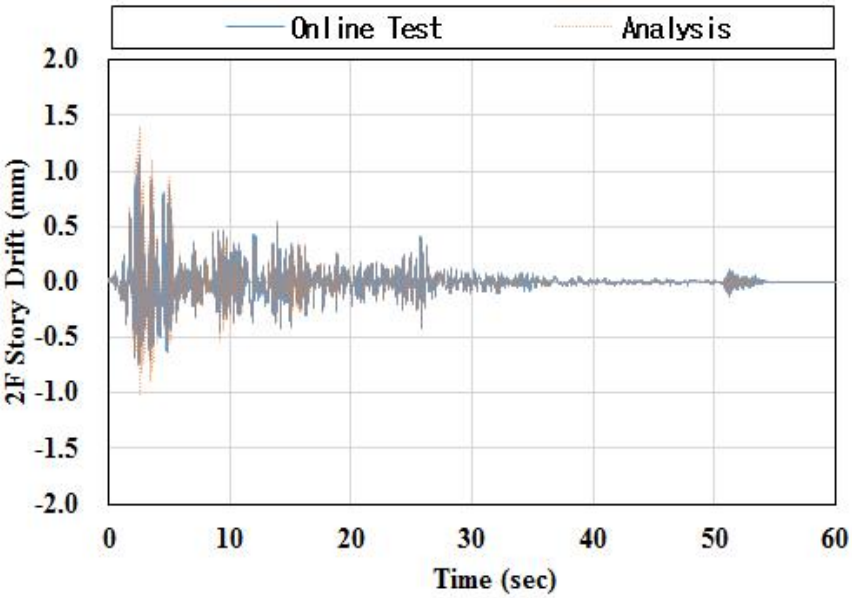
[그림 4.35] 2질점계 온라인 실험 및 수치해석 1층 층간변위 응답



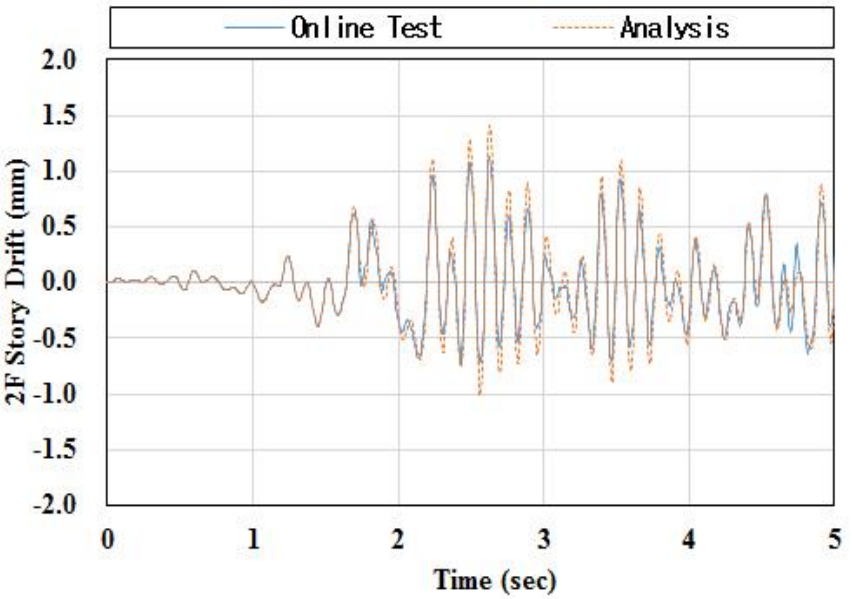
[그림 4.36] 2질점계 온라인 실험 및 수치해석 1층 층간변위 응답(초기 5초)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



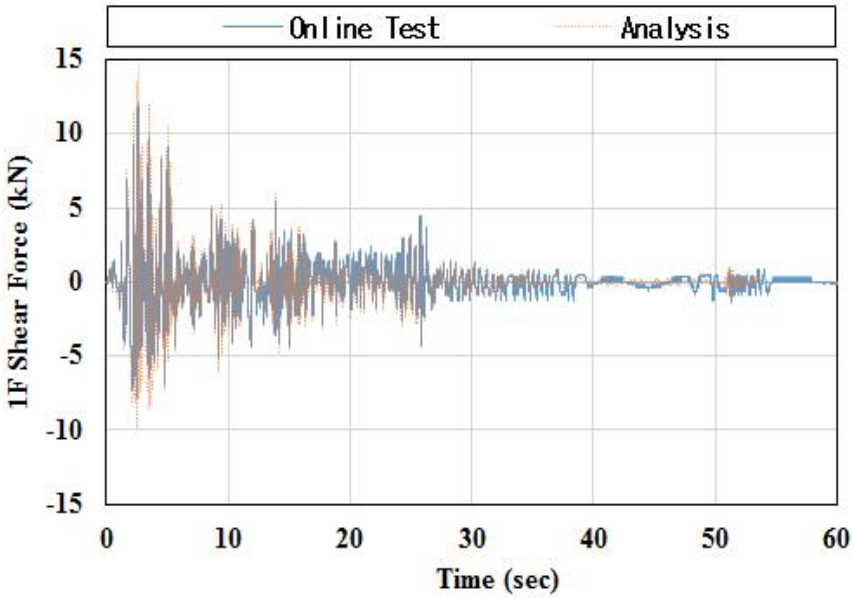
[그림 4.37] 2질점계 온라인 실험 및 수치해석 2층 층간변위 응답



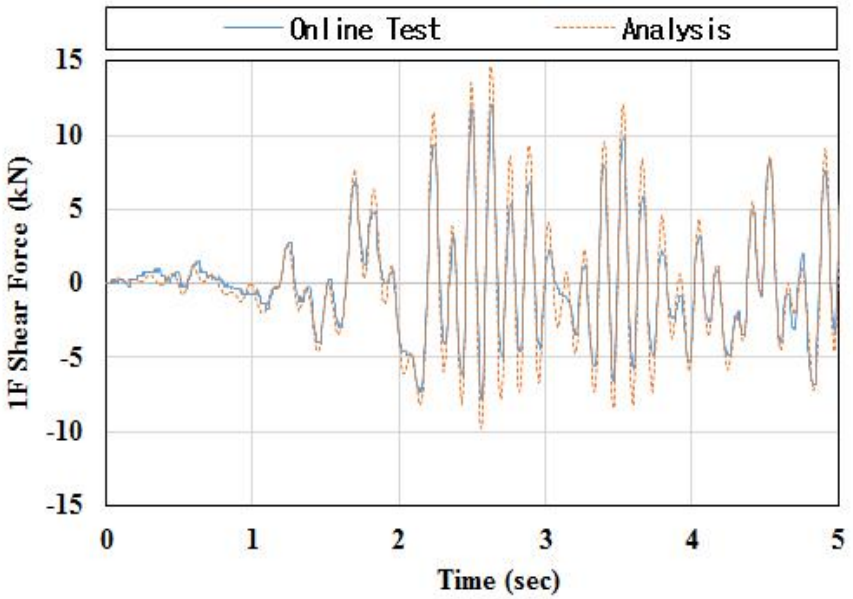
[그림 4.38] 2질점계 온라인 실험 및 수치해석 2층 층간변위 응답(초기 5초)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



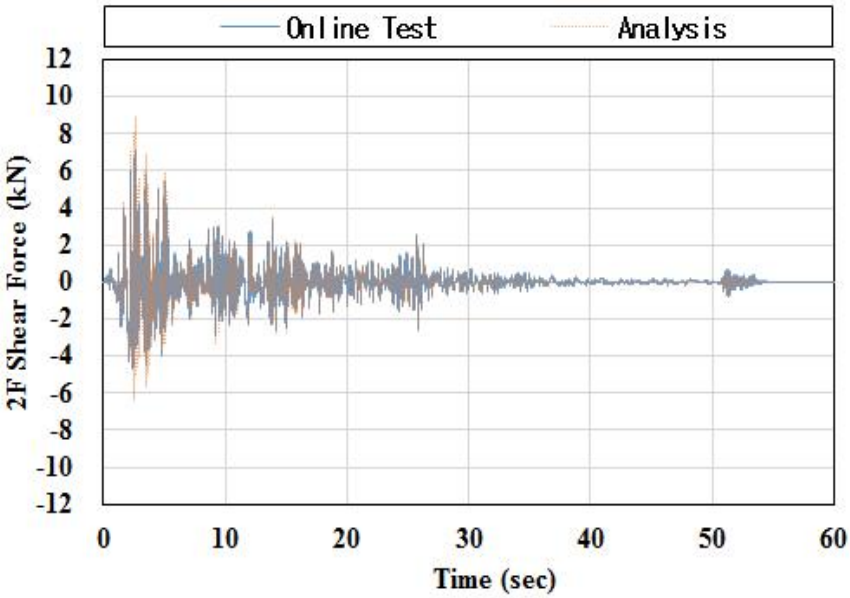
[그림 4.39] 2질점계 온라인 실험 및 수치해석 1층 하중 응답



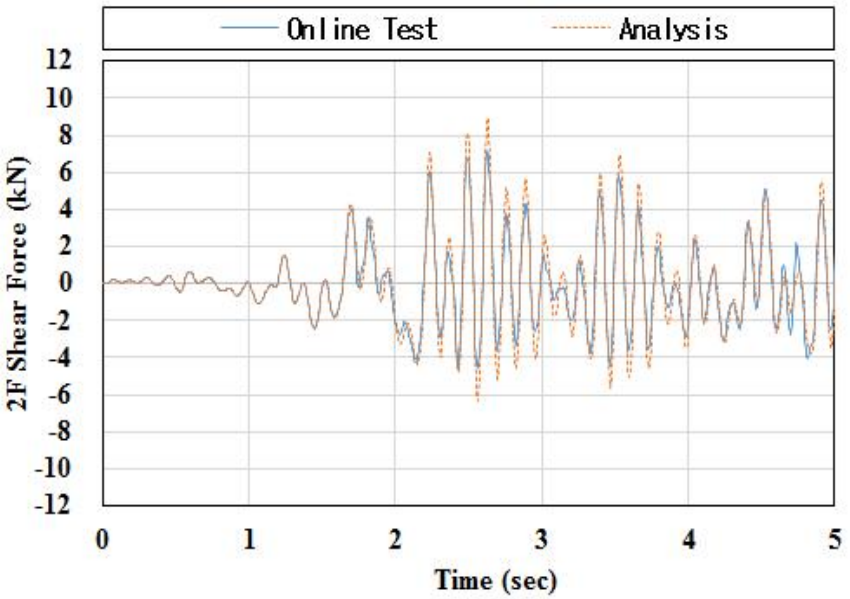
[그림 4.40] 2질점계 온라인 실험 및 수치해석 1층 하중 응답(초기 5초)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



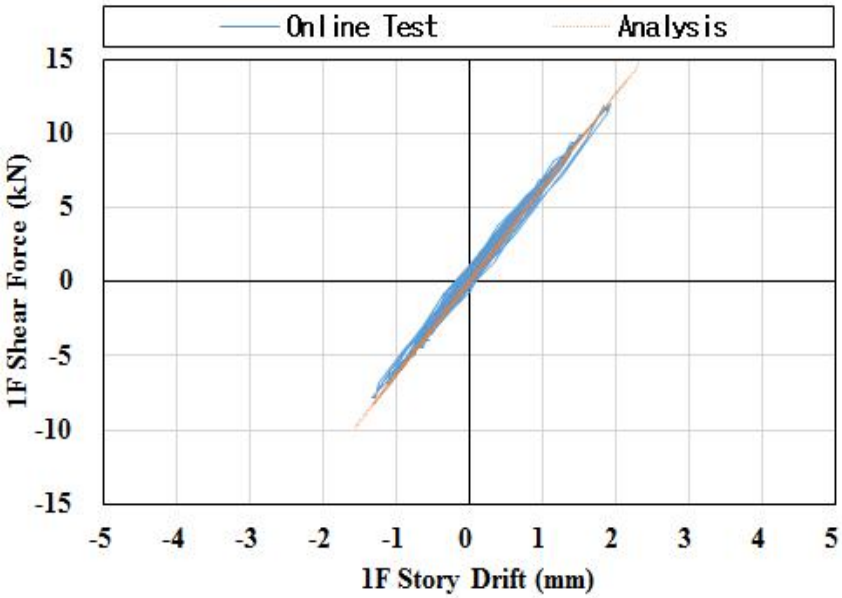
[그림 4.41] 2질점계 온라인 실험 및 수치해석 2층 하중 응답



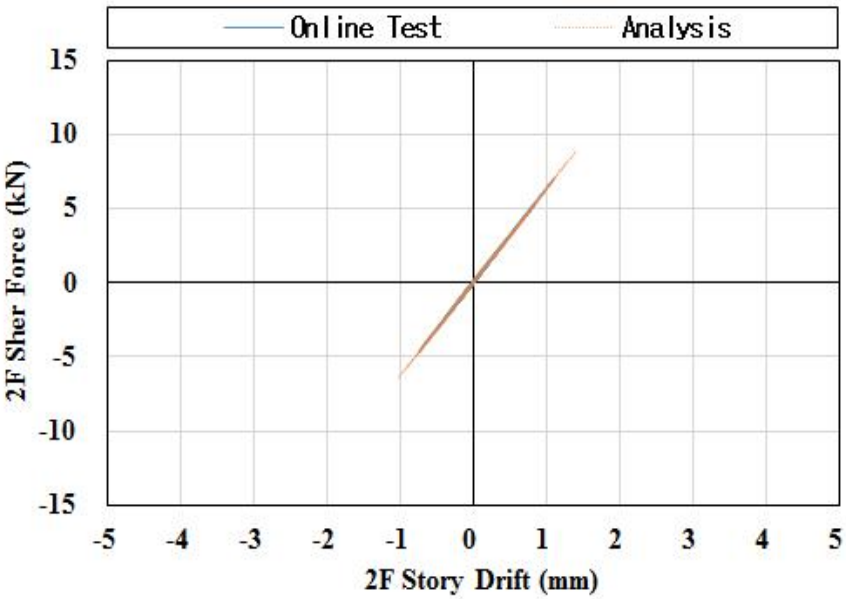
[그림 4.42] 2질점계 온라인 실험 및 수치해석 2층 하중 응답(초기 5초)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 4.43] 2질점계 온라인 실험 및 수치해석 1층 하중-변위 이력응답



[그림 4.44] 2질점계 온라인 실험 및 수치해석 2층 하중-변위 이력응답

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

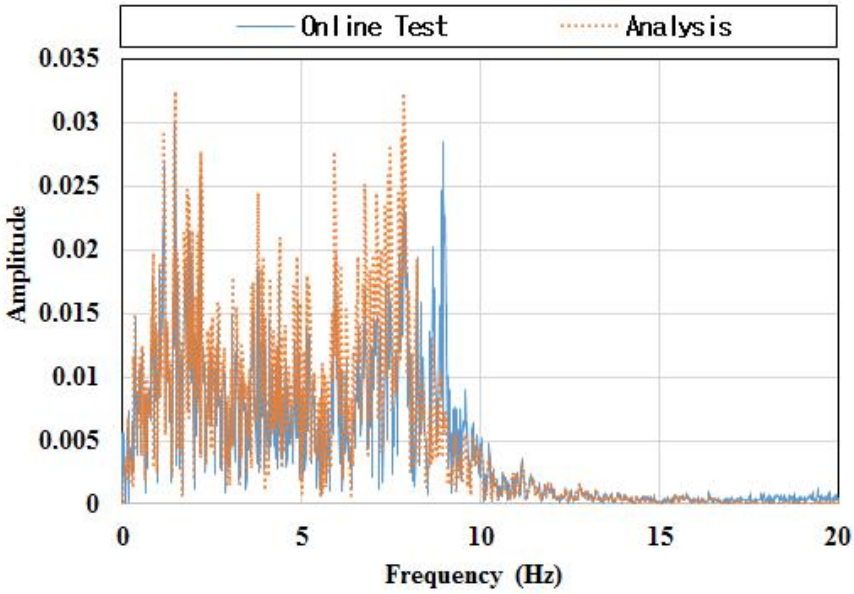
<표 4.6> MDOF시스템 온라인 실험 및 수치해석 최대값 결과 비교

			온라인실험	수치해석	오차
1F	변위(mm)	Max	2.019	2.327	0.308
		Min	-1.383	-1.556	-0.172
	하중(kN)	Max	12.493	14.665	2.171
		Min	-8.123	-9.807	-1.684
2F	변위(mm)	Max	1.134	1.414	0.28
		Min	-0.738	-1.01	-0.27
	하중(kN)	Max	7.149	8.914	1.764
		Min	-4.649	-6.368	-1.719

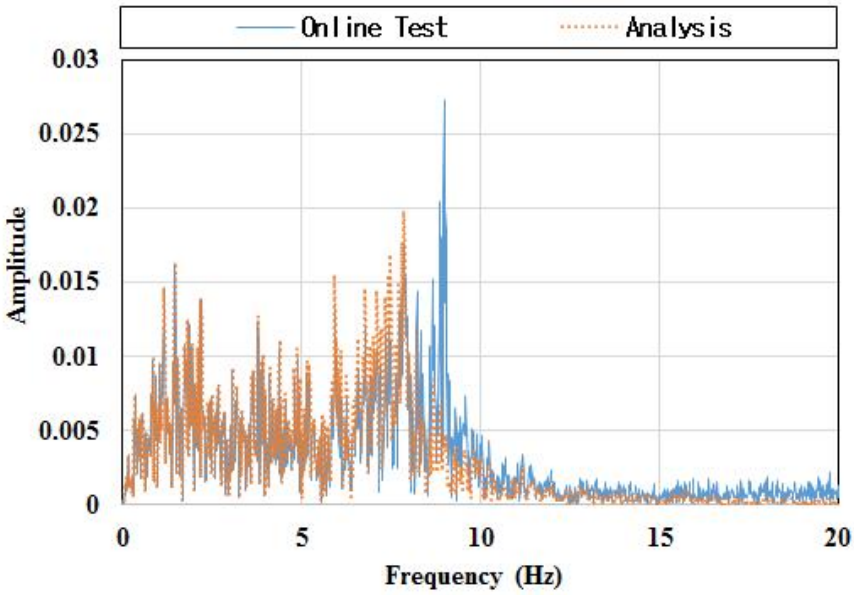
유사동적 온라인 실험 과 수치해석 변위응답에 대한 주파수 분석 결과를 그림 4.45 ~ 4.46에 나타내었다. 1층의 경우 실험 결과 최대응답크기 주파수는 1.46Hz로 나타났으며, 수치해석 결과 고유진동수는 1.46Hz로 나타났으며, 5Hz 이하의 주파수 응답의 경우 매우 잘 일치하고 있으나 5Hz이상의 주파수 응답에서 약간의 오차가 발생 하였다. 2층의 경우 실험 결과 고유진동수는 8.98Hz로 나타났으며, 수치해석 결과 고유진동수는 7.86Hz로 나타났으며, 1층과 마찬가지로 5Hz 이상의 영역에서 약간의 오차가 발생하였으나, 1,2층 모두 주파수 응답의 양상이 비슷하게 나타남을 확인 할 수 있었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 4.45] 2질점계 온라인 실험 및 수치해석 1층 주파수 분석



[그림 4.46] 2질점계 온라인 실험 및 수치해석 2층 주파수 분석

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제5장 비선형 유사동적 온라인 실험

5.1 개요

본 장에서는 앞서 구축 및 유효성이 검증된 유사동적 온라인 시스템을 이용하여 비교적 해석 모델로 표현이 쉬운 강재 시험체와 해석 모델로 표현이 어려운 강재패널 댐퍼에 대하여 비선형 유사동적 온라인 실험을 수행한다. 또한 이를 수치해석 모델을 적용한 수치해석 결과와 비교 분석함으로써 수치해석 모델과 실제 실험과의 차이를 확인하고자 한다. 이를 통해 수치해석 모델로 표현이 어려운 구조 부재의 경우 유사동적 온라인 실험의 필요성을 확인 하고자 한다.

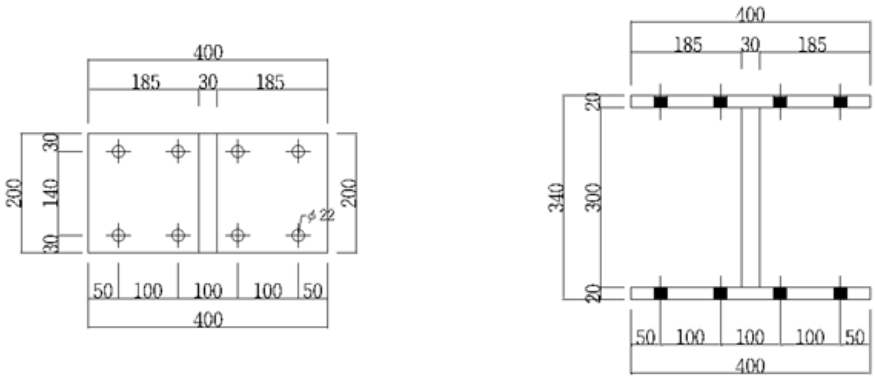
5.2 강재 시험체 비선형 유사동적 온라인 실험

5.2.1 시험체 상세

수치해석 모델로 표현이 비교적 쉬운 강재 시험체에 대한 유사동적 온라인 실험에 이용한 시험체는 그림 5.1에 나타내었으며 시험체의 제원은 표 5.1과 같다 ($\sigma_y = 235MPa$). 사용된 강재는 SS400강재를 이용하였으며, 두께 30㎜, 길이 200㎜, 높이 300㎜(용접부 제외 280㎜)의 강판을 사용하였다. 강판을 약축으로 배치하였으며, 시험체 상하부에 두께 20㎜의 앤드플레이를 용접하여 강판 양단부에서 소성힌지가 발생하도록 하였다. 앤드플레이와 가력프레임과 M20 고력볼트를 이용하여 재하보와 실험프레임에 고정하여 가력방향 수평변위를 제외하고 면외 방향 변위 및 회전자유도를 구속하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 5.1] 비선형 유사동적 실험 시험체 형상

<표 5.1> 비선형 유사동적 실험 시험체 제원

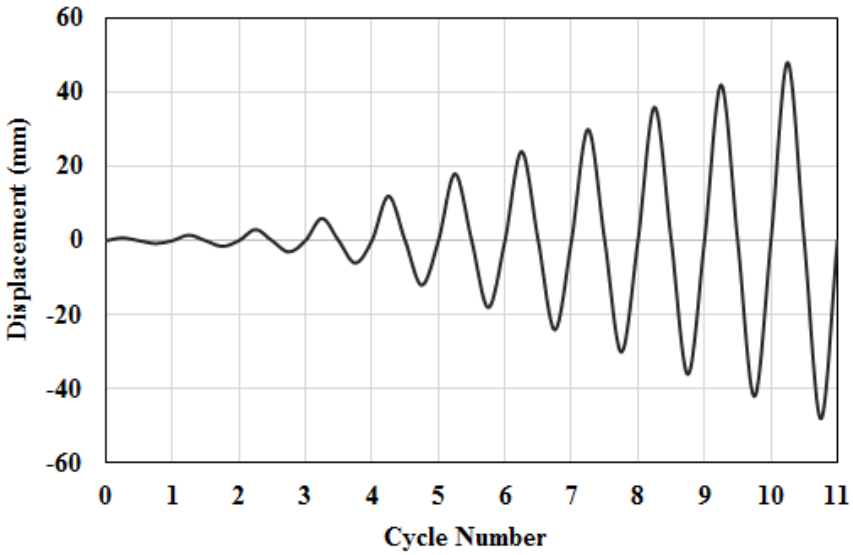
Z_P (mm)	M_P $(kN \cdot mm)$	Q_y (kN)	K (kN/mm)	D_y (mm)	h_0 (mm)
45,000	10,575	75.53	50.42	1.5	280

5.2.2 준정적 재하실험

그림 5.1에 나타낸 시험체의 구조성능을 파악하기 위해 준정적 재하 실험을 수행하였다. 시험체의 준정적 재하실험을 위한 가력시스템은 3.1절과 동일한 가력 시스템을 사용하였다. 대상시험체의 구조성능을 파악하기 위해 변위제어를 하였으며, 입력파형은 그림 5.2와 같이 초기강성 및 항복하중등 시험체의 구조성능을 정밀하게 파악하기 위해 초기 0.75㎜, 1.5㎜, 3㎜, 6㎜ 이후 에는 6㎜씩 증가하는 점증진폭을 갖는 반복하중을 적용하였으며 각 사이클별 1회 가력 하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



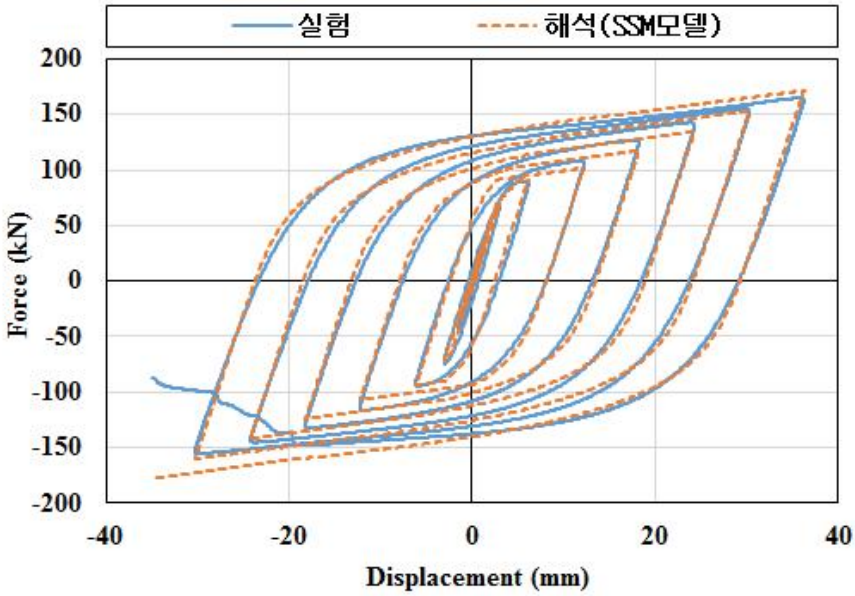
[그림 5.2] 점증진폭 입력파형

대상 시험체의 준정적 재하실험 결과를 그림 5.3에 나타내었다. 일반적인 강재 실험에서 나타나는 내력저하 및 핀칭현상이 없는 안정적인 방추형의 이력형상을 나타내었으며, 초기강성 25kN/mm, 항복강도 64.5kN, 항복변위 2.58mm 및 최대하중 164.73kN으로 나타났다. 실험체의 파괴는 상부 용접부에서 파괴가 발생하였으며, 8사이클(변위 36mm) 정 방향 변형이 발생한 후 부 방향으로 변형이 발생하면서 파괴가 발생되었다.

이러한 대상 시험체의 준정적 재하실험 결과를 토대로 수치해석 모델을 적용한 결과를 함께 나타내었다. 대상 시험체를 표현하기 위한 Skeleton Shift Model(이하 SSM)[부록1]을 적용하였으며, 이 모델의 특성은 반복 하중을 받는 강구조의 탄소성 거동에 크게 영향을 미치는 재료의 변형도 경화에 따라, 내력상승 및 국소 불안정 현상에 의한 강도 저하 및 강성의 연화 현상 등을 고려할 수 있는 모델이다. 대상 시험체를 표현하기 위해 SSM의 Shift 계수 및 Round 계수는 각각 0.65, 9를 사용하였다. 적용된 SSM이 대상 시험체의 이력특성을 매우 잘 나타냄을 확인 하였고, 파괴 이전까지의 누적 에너지 흡수량을 비교한 결과 표5.2과 같이 실험결과 34.800$kN \cdot mm$, 해석결과 34,027 $kN \cdot mm$로 약 2.2%의 오차로 나타났다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 5.3] 준정적 재하 실험 및 SSM해석 결과

<표 5.2> 준정적 재하 실험 및 SSM해석 에너지 흡수량 비교

	실험	SSM해석	오차
누적 에너지 흡수량	34,800	34,027	2.2%

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5.2.3 유사동적 온라인 실험 모델

대상실험체의 비선형 유사동적 온라인 실험을 진행하기 위해 그림 5.4과 같은 2질점계 다자유도 전단모델을 설정 하였다. 2층 구조물의 경우 준정적 재하 실험에서 정의한 SSM을 적용하였으며, 1층의 경우 직접 시험체를 설치하였다. 또한 1층 및 2층 모두 SSM을 적용한 수치해석 결과와 비교 분석하였다.

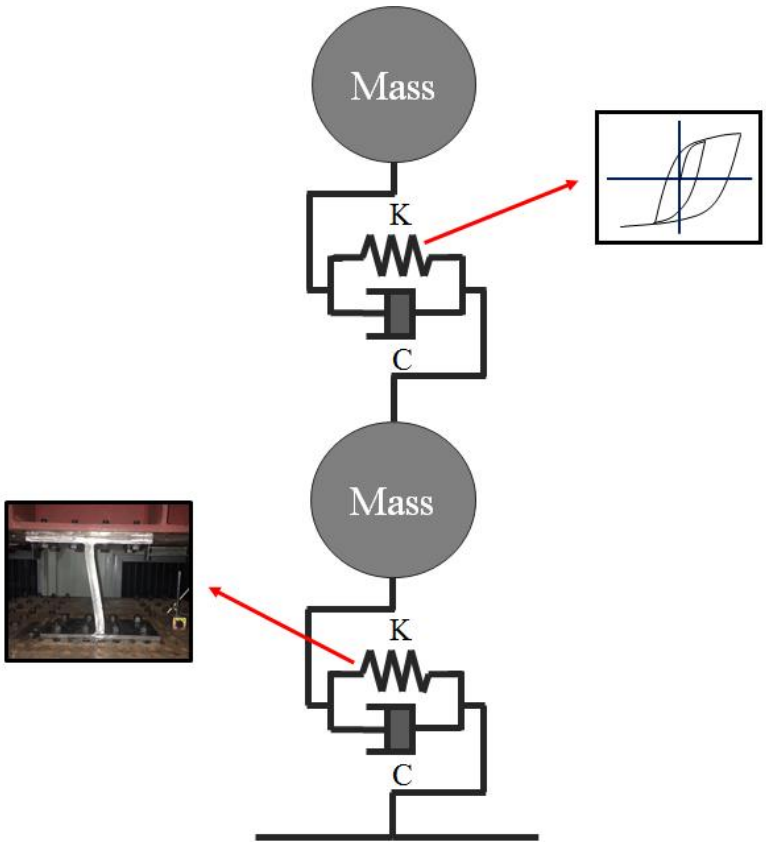
구조모델의 각 층 질량 $0.018kN \cdot s^2/mm$을 설정하였으며, 1차 및 2차 모드 5% 감쇠를 적용, Rayleigh감쇠를 이용하여 C매트릭스를 구성 하였다. 실험에 사용된 지진파는 그림 3.8과 같이 El Centro NS(1940), 시간간격은 0.005sec를 이용하였다. 수치적분법으로는 Newmark-β법을 사용하였으며, $\beta = 1/6$, $r = 1/2$를 사용하였다.

<표 5.3> 비선형 MDOF 유사동적 온라인 실험 개요

질량	1층	$0.018kN \cdot s^2/mm$
	2층	$0.018kN \cdot s^2/mm$
감쇠계수		Rayleigh감쇠 (1차모드 5%, 2차모드 5%)
초기강성	1층	25kN/mm
	2층	25kN/mm
주기	1차모드	0.272sec
	2차모드	0.104sec
시험체 재료		SS400
입력 지진파		El Centro Ns
시간간격		0.005sec
수치적분법		Newmark - β법 $\beta = 1/6$, $r = 1/2$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 5.4] 비선형 온라인 실험 전단 2질점계 모델

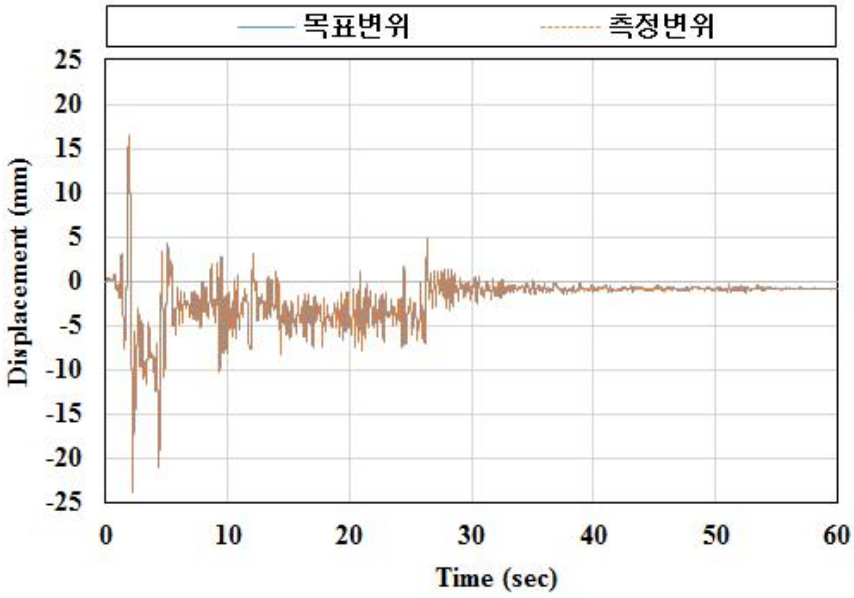
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5.2.4 비선형 온라인 실험 El Centro 140% 결과

대상 시험체의 비선형 유사동적 온라인 실험에 대해 입력 지진파의 스케일 140%를 적용하여 시험체에 충분한 소성변형이 발생하도록 실험을 진행 하였다. 총 실험 시간은 약 3160초의 시간이 소요되었다.

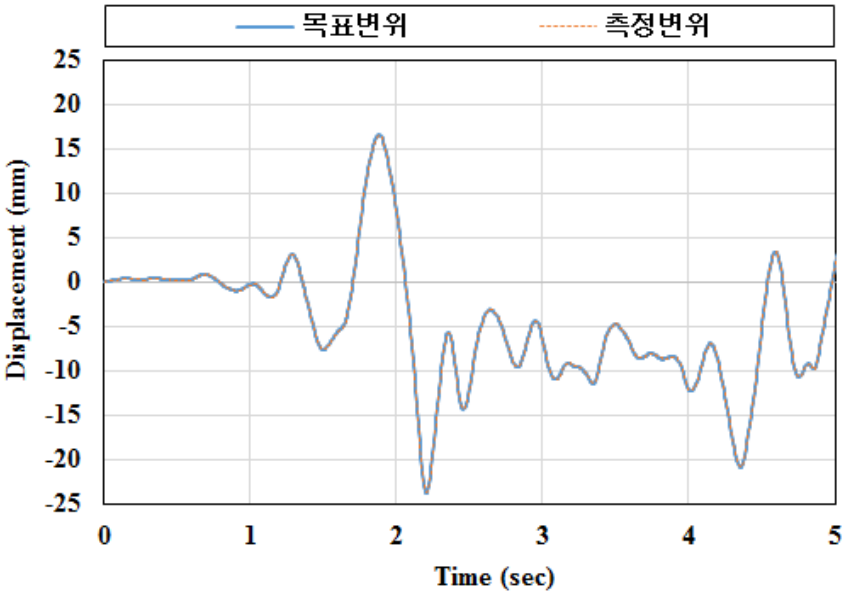
목표변위와 측정된 변위에 대한 결과를 그림 5.5 ~ 5.7에 나타내었다. 그림 5.5에 목표변위와 측정변위 결과를 나타내었으며, 그림 5.6에 초기 5초 구간에 대한 결과를 나타내었다. Actuator의 제어가 목표변위에 따라 정밀하게 제어됨을 확인 할 수 있었으며, 전 구간에 대해 오버슛이 발생하지 않고 시스템 구축 시 목표로 하였던 언더슛이 발생하는 것을 확인하였다. 목표변위와 측정변위의 오차는 그림 5.7과 같이 -0.10mm ~ 0.15mm의 오차가 발생하였으며, 최대변위에서 목표변위 16.59mm 측정변위 16.5mm, 최소변위에서 목표변위 -23.77mm, 측정변위 -23.7mm로 각각 0.09mm, 0.07mm로 Actuator제어 허용범위 0.1mm이내의 정밀한 제어가 되었음을 확인 하였다.



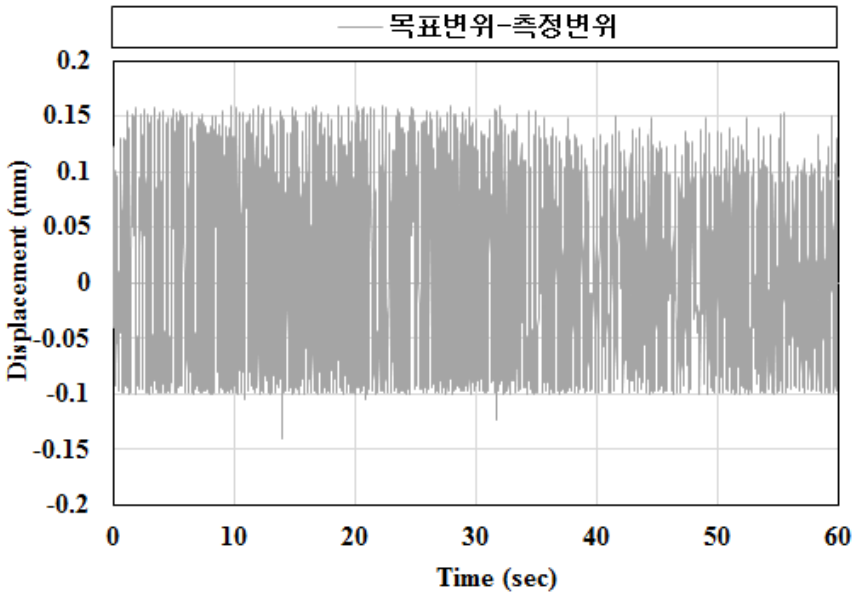
[그림 5.5] 비선형 온라인 실험 El140 변위 응답

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 5.6] 비선형 온라인 실험 EI140 변위응답 (초기 5초)



[그림 5.7] 비선형 온라인 실험 EI140 변위제어 오차

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

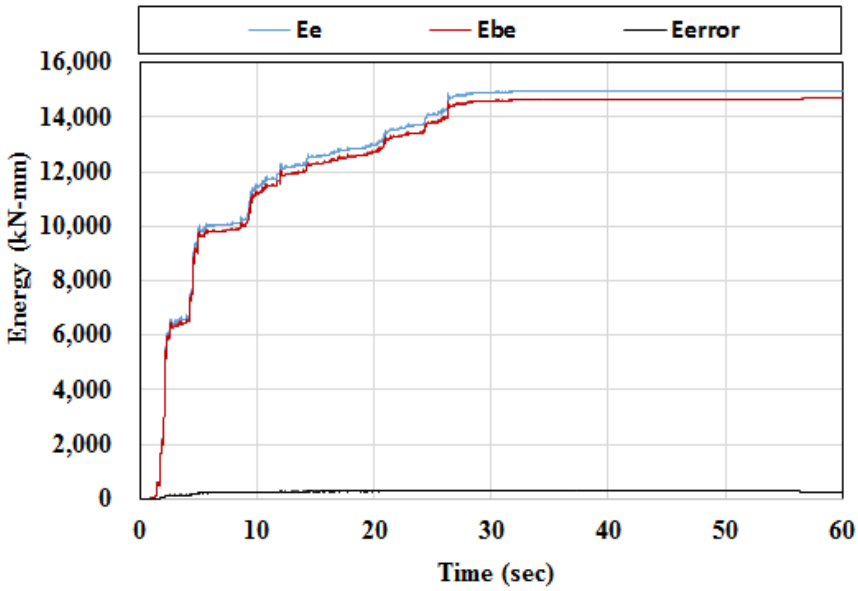
비선형 유사동적 온라인 실험에 대해 앞서 평가한 방법으로 에너지 기반을 이용하여 평가한 결과 그림 5.8 ~ 5.9에 나타내었다. 그림 5.8에 나타낸 에너지 오차의 경우 약 262kN·m로 나타났으며, 실제 실험체의 소산에너지보다 더 큰 에너지를 소산 시킨 것으로 나타났다. HSEM지표의 경우 그림 5.9와 같이 실험 종료 후 약 0.01로 나타났으며, 실험 진행 중에도 안정적인 지표 값이 나타나 유사동적 온라인 실험이 정밀도를 가지고 실험이 진행 된 것을 확인 하였다.

비선형 유사동적 온라인 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하여 그림 5.10 ~ 5.21에 나타내었다. 각층 변위응답에 대한 결과 그림 5.10 ~ 5.13과 같이 전체적으로 유사동적 온라인 실험과 수치해석 결과가 유사하게 나타났으나 1층 잔류변형의 경우 약간의 오차가 발생하였다. 유사동적 온라인 실험 결과 1층 최대 층간변위 +16.59m, -23.77mm로 나타났으나, 수치해석 결과 1층 최대 층간변위 +14.57mm, -25.7mm로 나타났다. 유사동적 온라인 실험에 의한 2층 최대 층간변위 +3.09mm, -2.71mm, 수치해석의 2층 최대 층간 변위는 +3.21mm, -2.95mm로 나타났다.

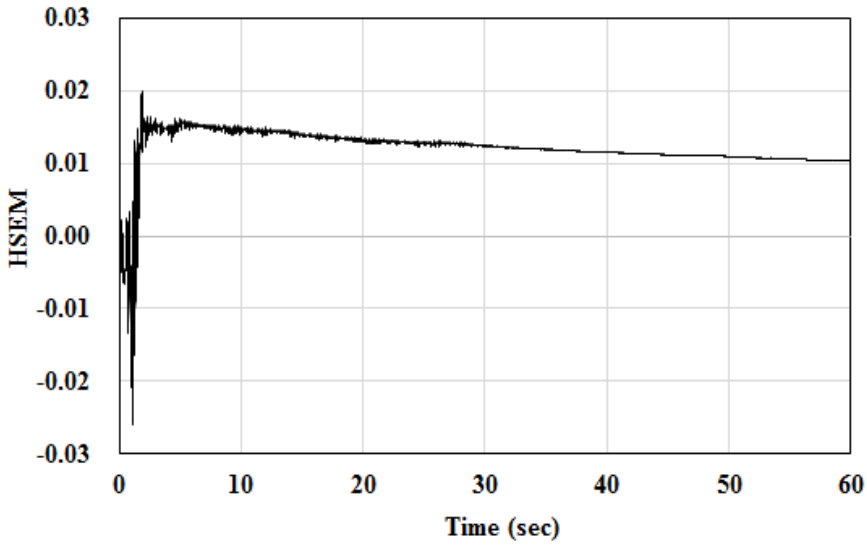
복원력의 경우 그림 5.14 ~ 5.17에 나타내었으며, 전체적으로 하중이력이 일치함을 확인하였다. 1층의 경우 최대 117.02kN, 최소 -129.82kN으로 나타났으며, 수치해석 1층 결과 최대 110.77N, 최소 -123.37kN으로 나타났다. 2층의 경우 실험 최대 복원력 69.75kN, 최소 -68.09kN, 수치해석 결과 최대 70.25kN, 최소 -71.53kN 으로 나타났다. 하중-변위 이력을 보면 수치해석 모델이 강성 및 바우싱거부의 오차로 인해 변위이력 및 잔류변위에서 약간의 오차가 발생하였지만, 그림5.20 ~ 5.21에 나타난 주파수 응답에서 최대응답크기에만 약간의 오차가 발생하였고 주파수 분포는 매우 잘 일치 하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



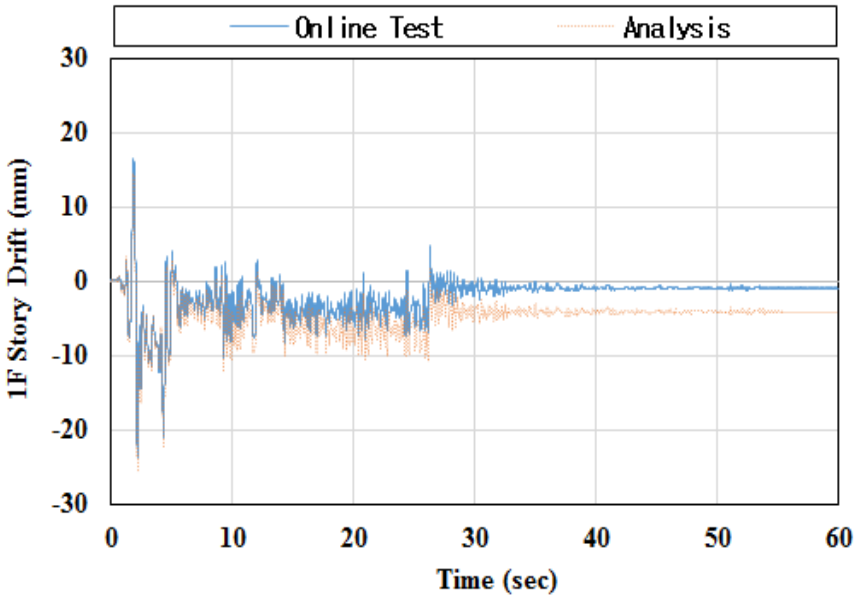
[그림 5.8] 유사동적 온라인 실험 누적 에너지 오차



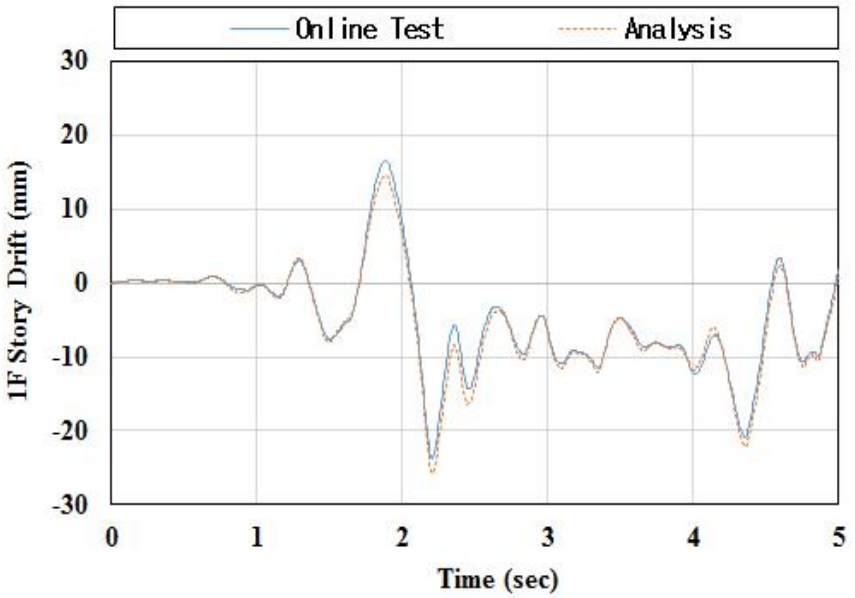
[그림 5.9] 유사동적 온라인 실험 HSEM 결과

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



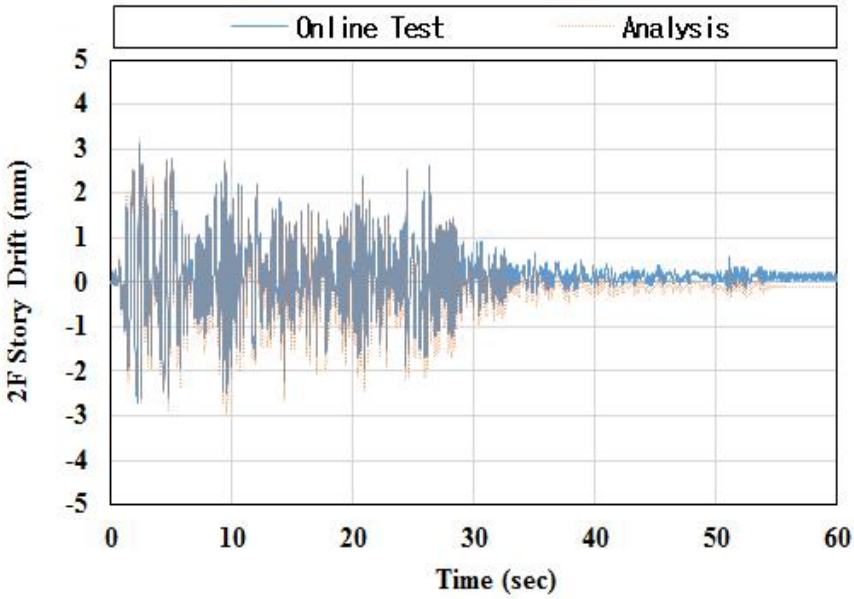
[그림 5.10] 온라인 실험 및 수치해석 EI140 1층 층간변위 응답



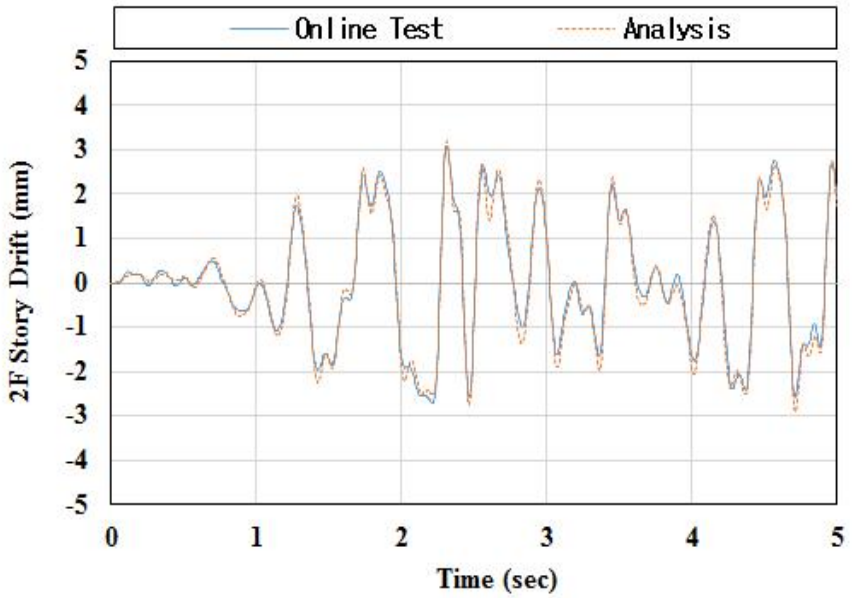
[그림 5.11] 온라인 실험 및 수치해석 EI140 1층 층간변위 응답(초기 5초)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



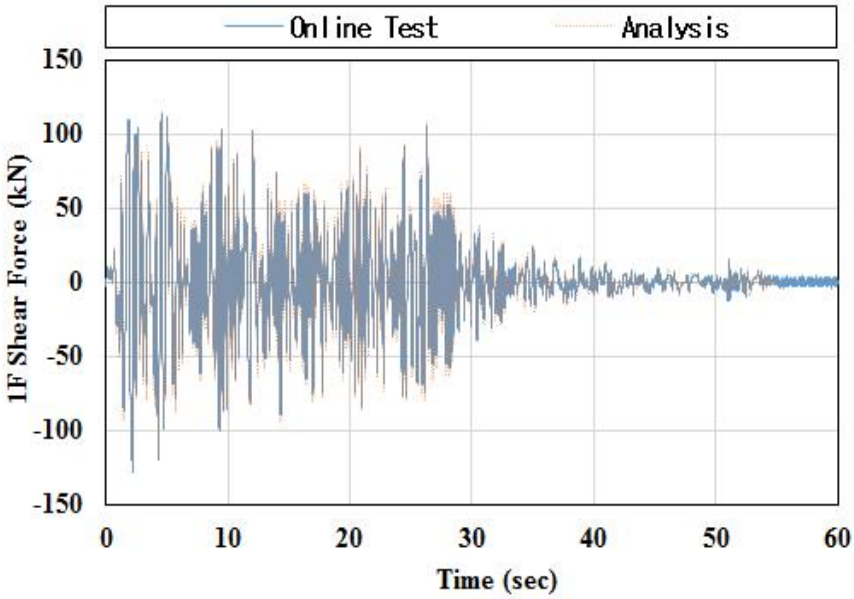
[그림 5.12] 온라인 실험 및 수치해석 EI140 2층 층간변위 응답



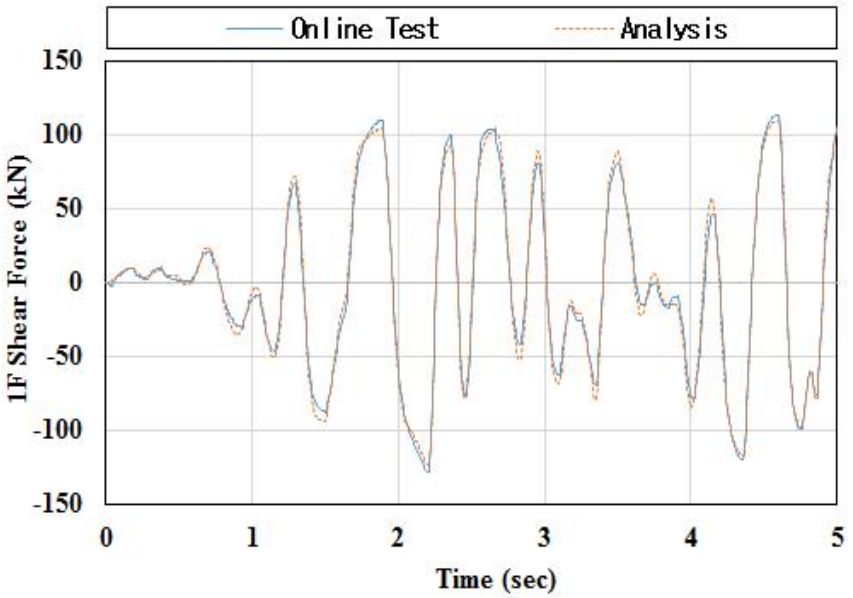
[그림 5.13] 온라인 실험 및 수치해석 EI140 2층 층간변위 응답(초기 5초)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



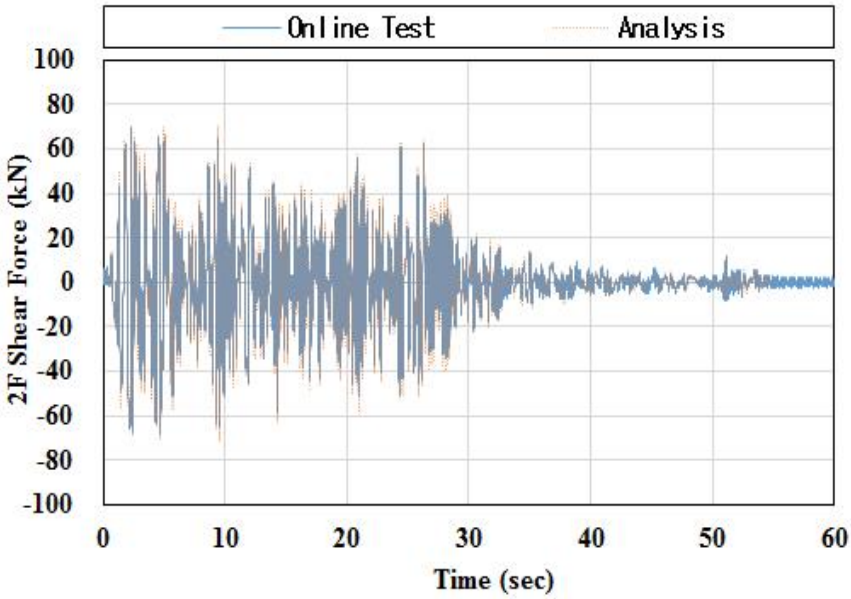
[그림 5.14] 온라인 실험 및 수치해석 EI140 1층 하중 응답



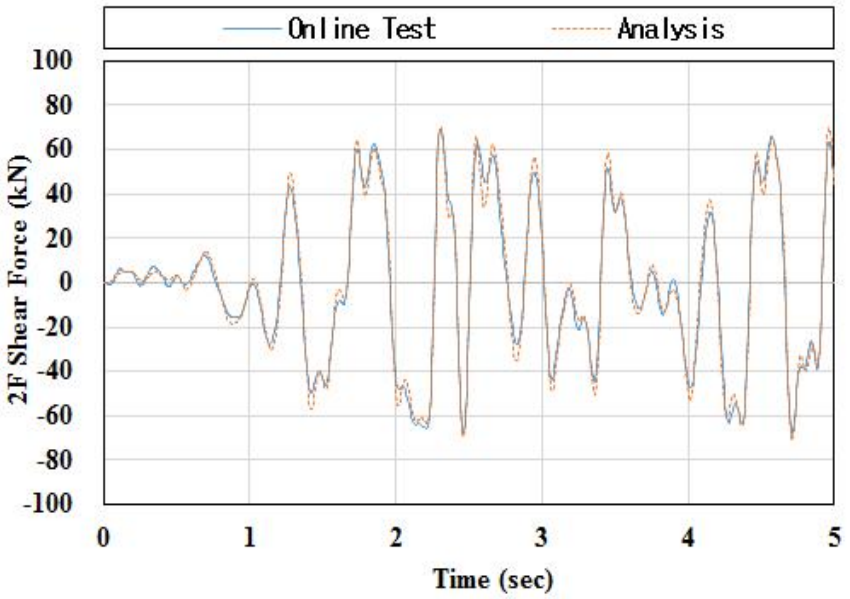
[그림 5.15] 온라인 실험 및 수치해석 EI140 1층 하중 응답(초기 5초)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



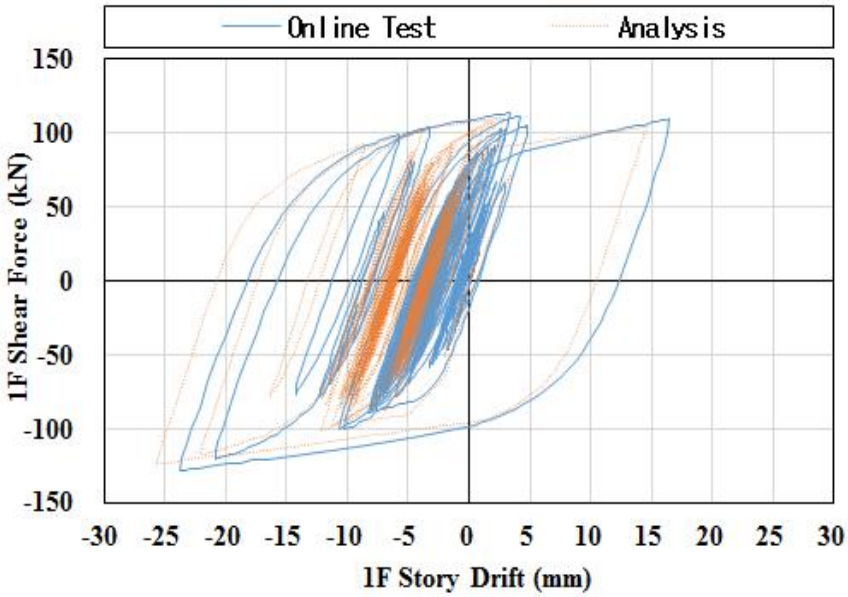
[그림 5.16] 온라인 실험 및 수치해석 EI140 2층 하중 응답



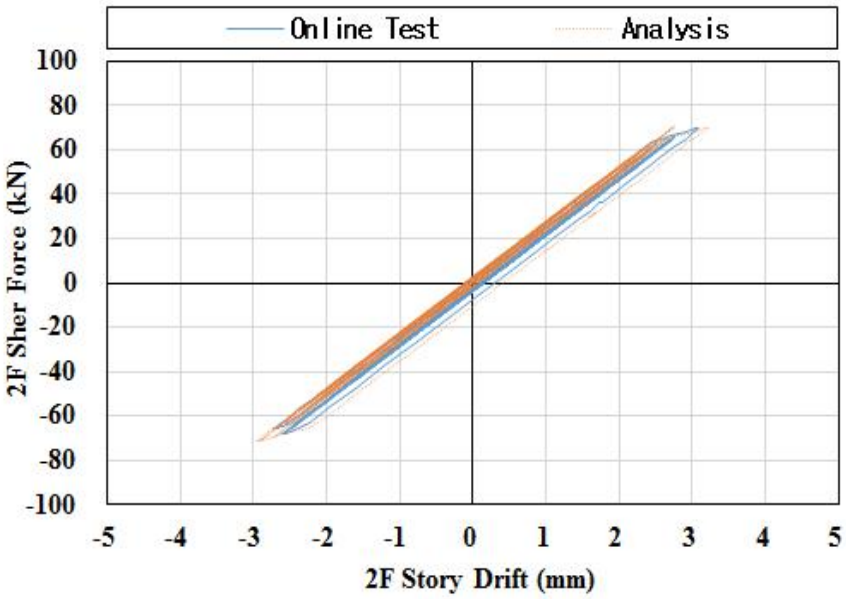
[그림 5.17] 온라인 실험 및 수치해석 EI140 2층 하중 응답초기 5초)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



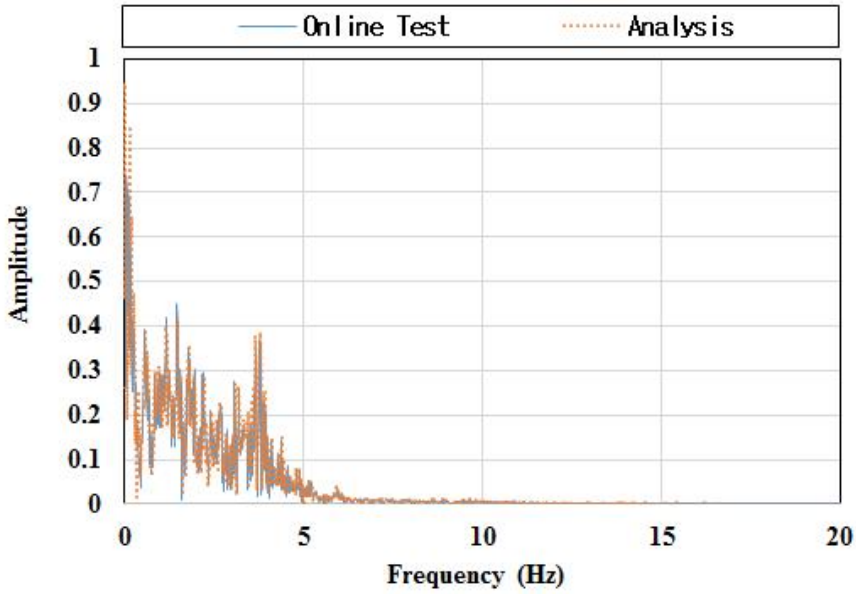
[그림 5.18] 온라인 실험 및 수치해석 EI140 1층 변위-하중 이력응답



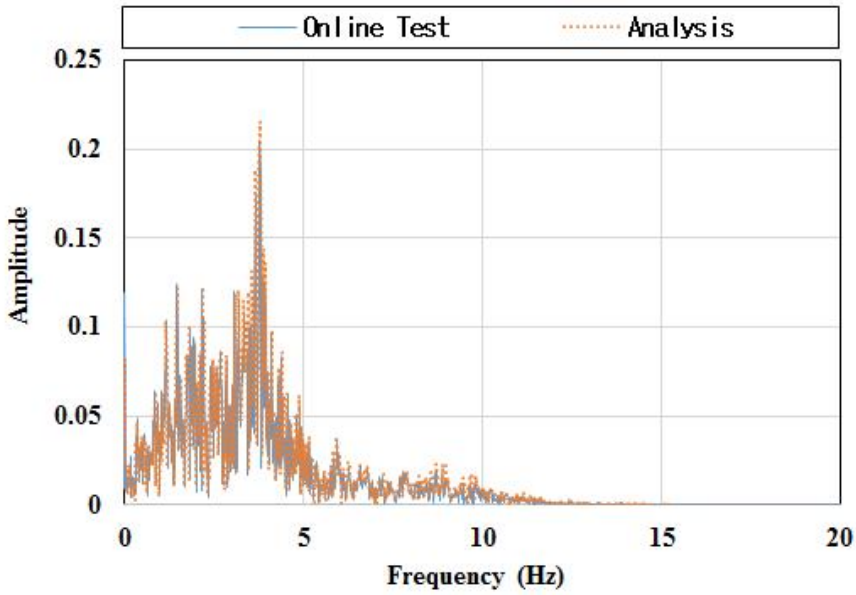
[그림 5.19] 온라인 실험 및 수치해석 EI140 2층 변위-하중 이력응답

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 5.20] 온라인 실험 및 수치해석 EI140 1층 주파수 분석



[그림 5.21] 온라인 실험 및 수치해석 EI140 2층 주파수 분석

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

<표 5.4> 비선형 온라인 실험 및 수치해석 최대값 결과 비교(EI 140)

			온라인실험	수치해석	오차
1F	변위(mm)	Max	16.59	14.57	2.01
		Min	-23.77	-25.7	1.93
	하중(kN)	Max	117.02	110.77	6.24
		Min	-129.82	-123.37	-6.45
2F	변위(mm)	Max	3.09	3.21	0.12
		Min	-2.71	-2.95	0.23
	하중(kN)	Max	69.75	70.25	-0.5
		Min	-68.09	-71.53	3.44

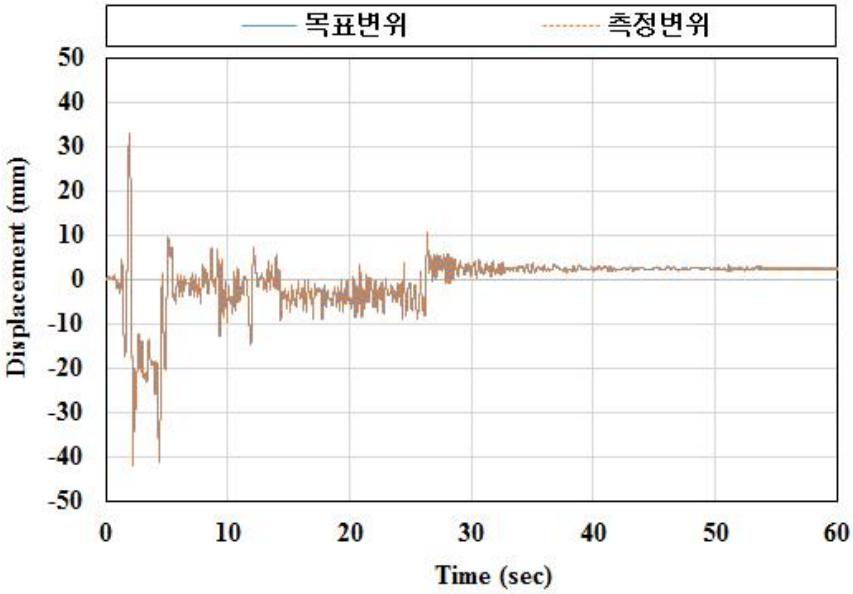
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5.2.5 비선형 온라인 실험 El Centro 200% 결과

유사동적 온라인 실험을 활용할 시 지진 발생 후 여진 및 추가 지진하중에 대한 시험체의 거동특성을 파악할 수 있다. 이에 따라 지진 발생 후 여진 및 추가 지진하중을 가정하여 앞서 El Centro 140%에 대해 실험 했던 시험체를 교체하지 않고 El Centro 200%에 대해 실험을 진행하였다.

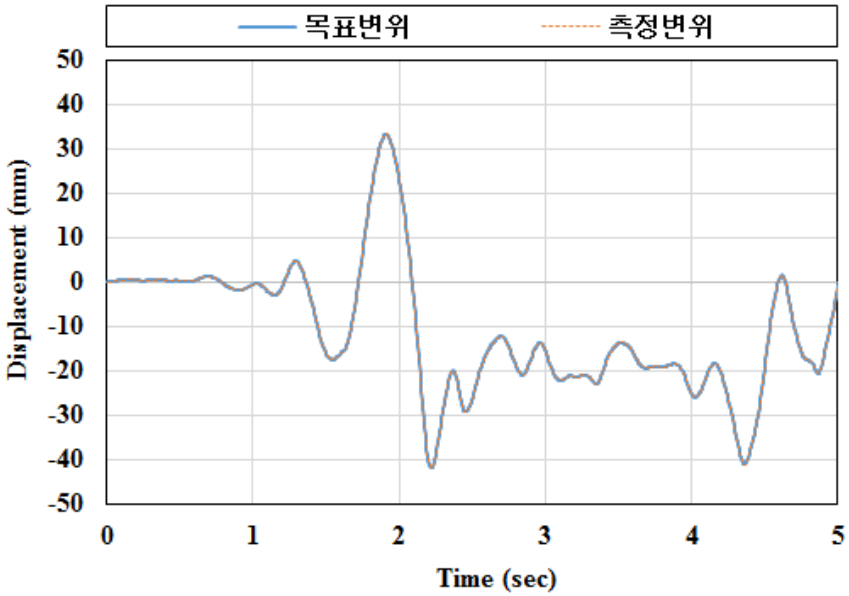
목표변위와 측정된 변위에 대한 결과를 그림 5.22 ~ 5.24에 나타내었다. 그림 5.22에 목표변위와 측정변위 결과를 나타내었으며, 그림 5.23에 초기 5초 구간에 대한 결과를 나타내었다. Actuator의 제어가 목표변위에 따라 정밀하게 제어됨을 확인 할 수 있었다. 목표변위와 측정변위의 오차는 그림 5.24과 같이 -0.10mm ~ 0.15mm의 오차가 발생하였으며, 최대변위에서 목표변위 33.21mm 측정변위 33.16mm, 최소변위에서 목표변위 -41.87mm, 측정변위 -41.82mm로 각각 0.05mm, 0.05mm로 Actuator제어 허용범위 0.1mm이내의 정밀한 제어가 되었음을 확인 하였다.



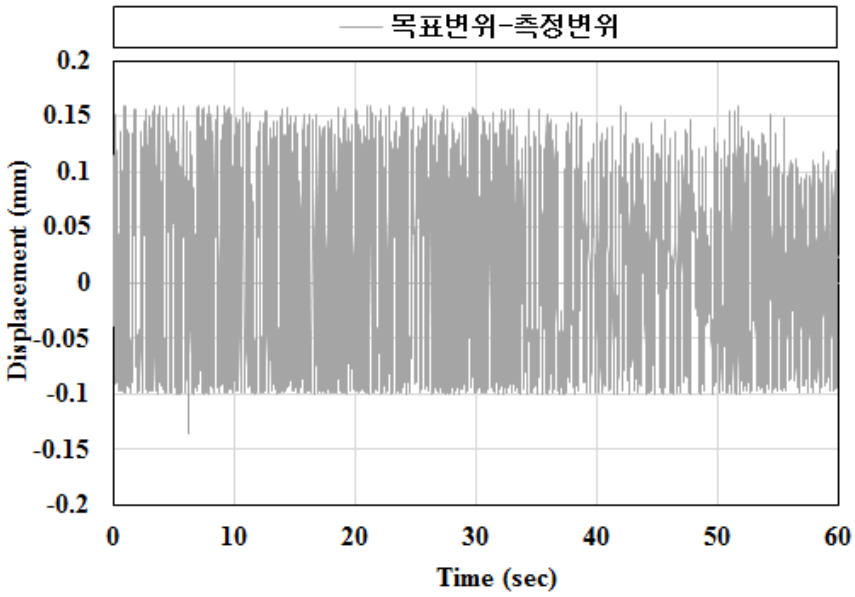
[그림 5.22] 비선형 온라인 실험 El200 변위 응답

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 5.23] 비선형 온라인 실험 EI200 변위응답 (초기 5초)



[그림 5.24] 비선형 온라인 실험 EI200 변위제어 오차

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

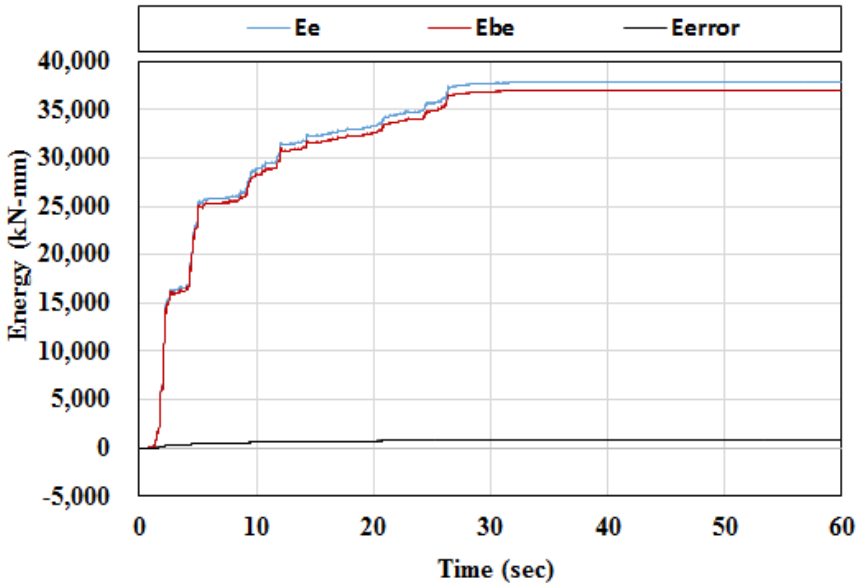
비선형 유사동적 온라인 실험에 대해 앞서 평가한 방법으로 에너지 기반을 이용하여 평가한 결과 그림 5.25 ~ 5.26에 나타내었다. 그림 5.25에 나타낸 에너지 오차의 경우 약 832kN·m로 나타났으며, 실제 실험체의 소산에너지보다 더 큰 에너지를 소산 시킨 것으로 나타났다. HSEM지표의 경우 그림 5.26와 같이 실험 종료 후 약 0.016로 나타났으며, 실험 진행 중에도 안정적인 지표 값이 나타나 유사동적 온라인 실험이 정밀도를 가지고 실험이 진행 된 것을 확인 하였다.

비선형 유사동적 온라인 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하여 그림 5.27 ~ 5.38에 나타내었다. 각층 변위응답에 대한 결과 그림 5.27 ~ 5.30과 같이 전체적으로 유사동적 온라인 실험과 수치해석 결과가 유사하게 나타났으나 1층 및 2층 잔류변형 및 최대 변위에서 오차가 발생하였다. 이는 최대 변형 이전 변형에서 해석 모델과 시험체와의 내력의 차이가 발생하여 최대 변형에서의 오차 발생 및 이후 잔류변형의 오차가 발생한 것으로 판단된다. 유사동적 온라인 실험 결과 1층 최대 층간변위 +33.21m, -41.87mm로 나타났으나, 수치해석 결과 1층 최대 층간변위 +31.44mm, -37.22mm로 나타났다. 유사동적 온라인 실험에 의한 2층 최대 층간변위 +4.09mm, -4.5mm, 수치해석의 2층 최대 층간 변위는 +3.38mm, -4mm로 나타났다. 대상 시험체에 대해 준정적 재하 실험의 경우 최대 변위 36mm에서 파괴가 발생 하였지만, 유사동적 온라인 실험 시 최대 41.87mm까지 변형이 발생 하였지만 시험체의 파괴는 나타나지 않았다.

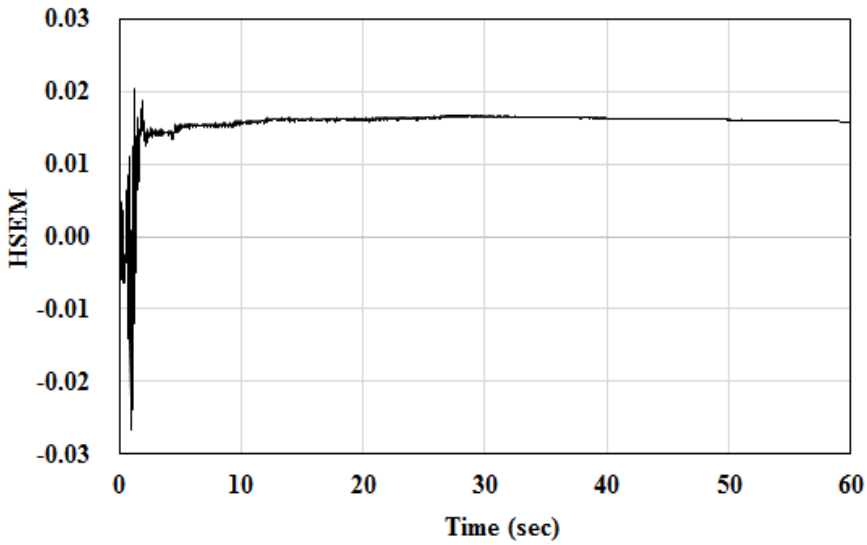
복원력의 경우 그림 5.31 ~ 5.34에 나타내었으며, 전체적으로 하중이력이 일치함을 확인하으나 최대 내력에서 오차가 발생하였다. 1층의 경우 최대 149.89kN, 최소 -165.67kN으로 나타났으며, 수치해석 1층 결과 최대 136.65N, 최소 -150.42kN으로 나타났다. 2층의 경우 실험 최대 복원력 80.98kN, 최소 -90.02kN, 수치해석 결과 최대 83.82kN, 최소 -83.59kN 으로 나타났다. 하중-변위 이력을 보면 수치해석 모델이 강성 및 바우싱거부의 약간의 오차로 인해 변위이력 및 잔류변위에서 약간의 오차가 발생하였지만, 그림5.37 ~ 5.38에 나타난 주파수 응답에서 최대응답크기에만 약간의 오차가 발생하였고 주파수 분포는 매우 잘 일치 하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



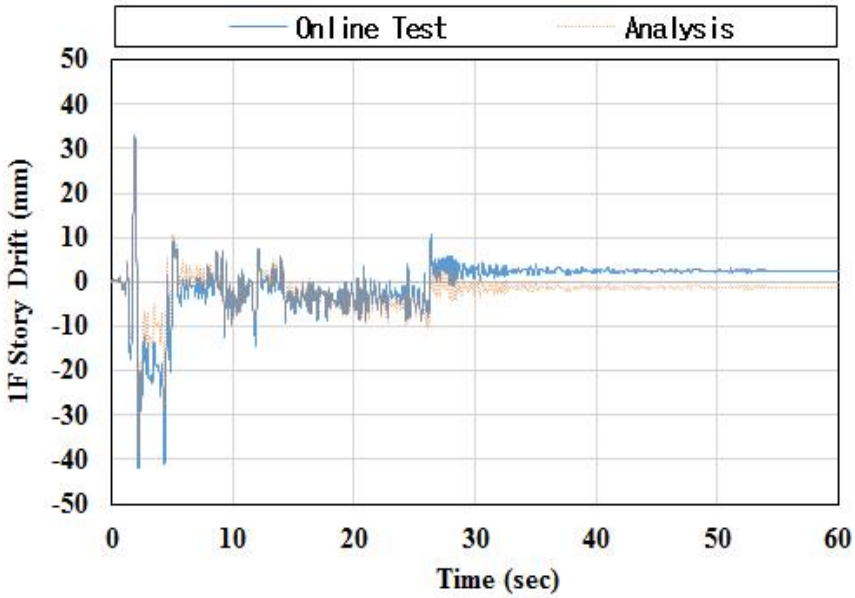
[그림 5.25] 유사동적 온라인 실험 누적 에너지 오차



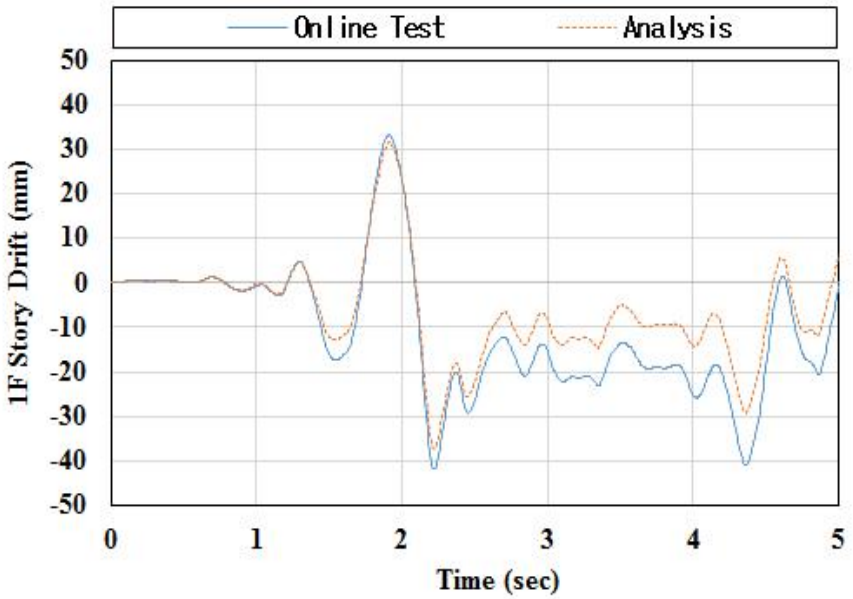
[그림 5.26] 유사동적 온라인 실험 HSEM 결과

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



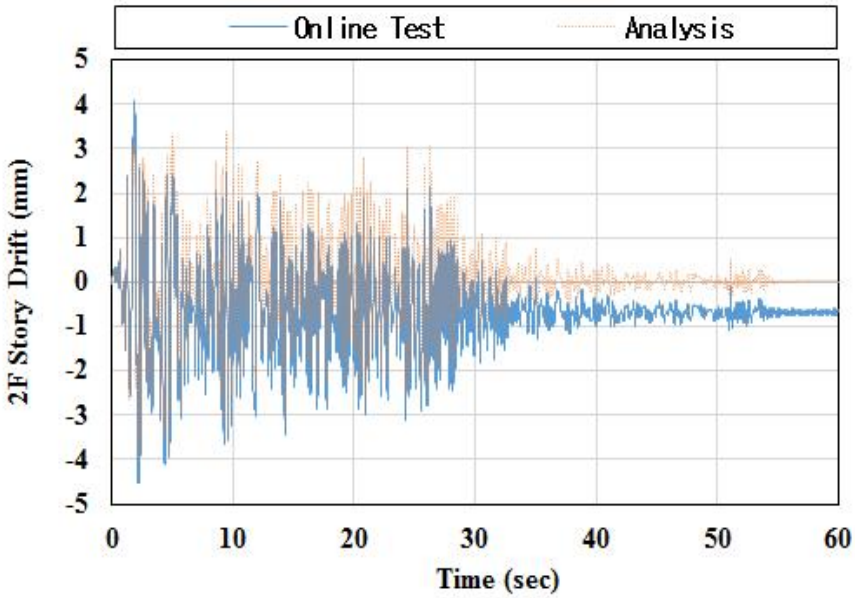
[그림 5.27] 온라인 실험 및 수치해석 EI200 1층 층간변위 응답



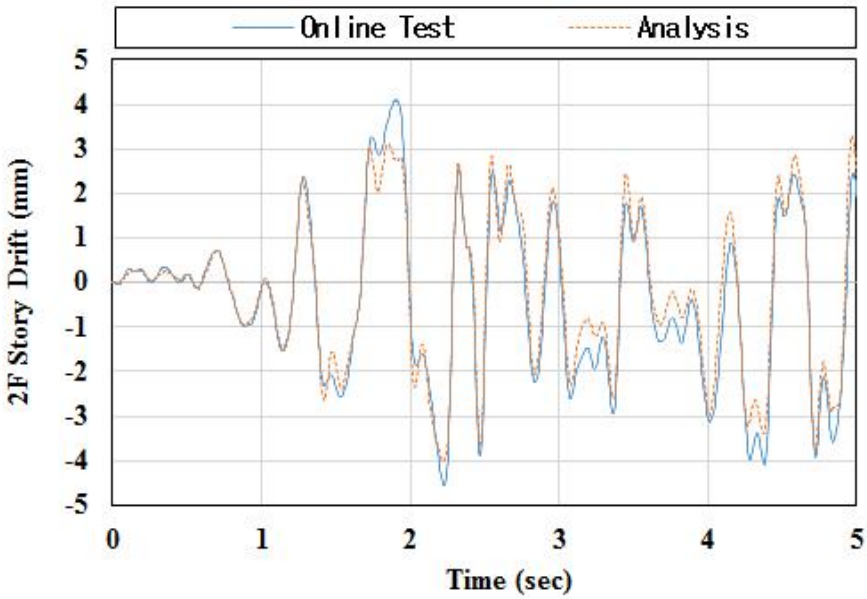
[그림 5.28] 온라인 실험 및 수치해석 EI200 1층 층간변위 응답(초기 5초)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



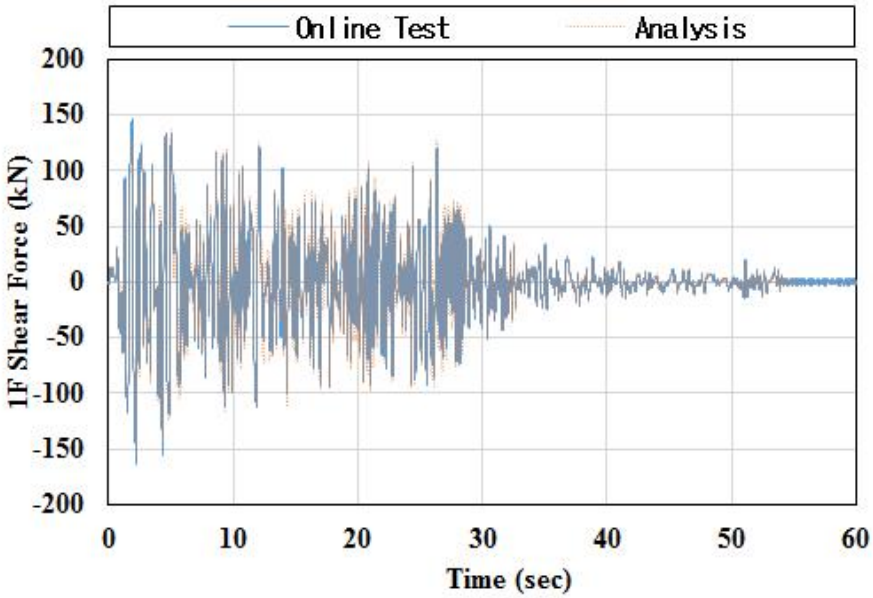
[그림 5.29] 온라인 실험 및 수치해석 EI200 2층 층간변위 응답



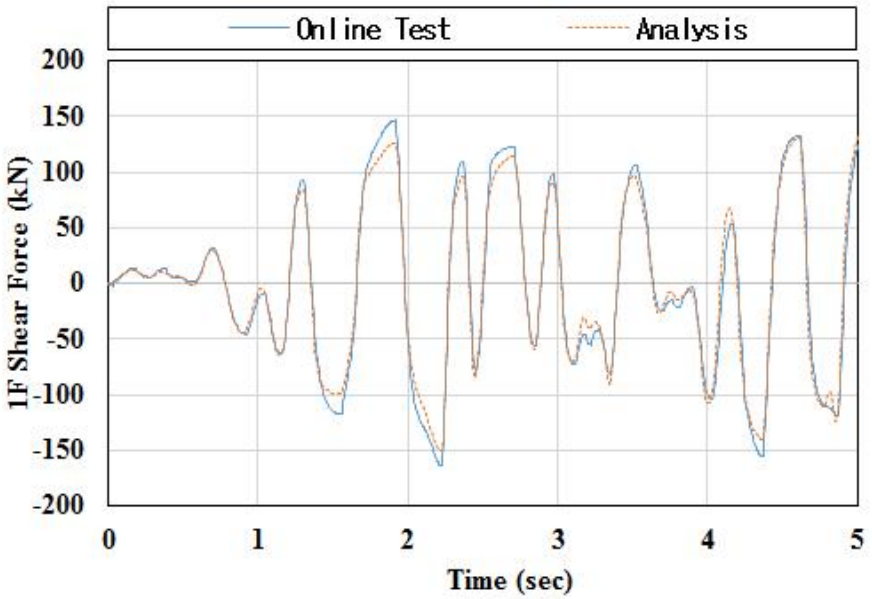
[그림 5.30] 온라인 실험 및 수치해석 EI200 2층 층간변위 응답(초기 5초)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



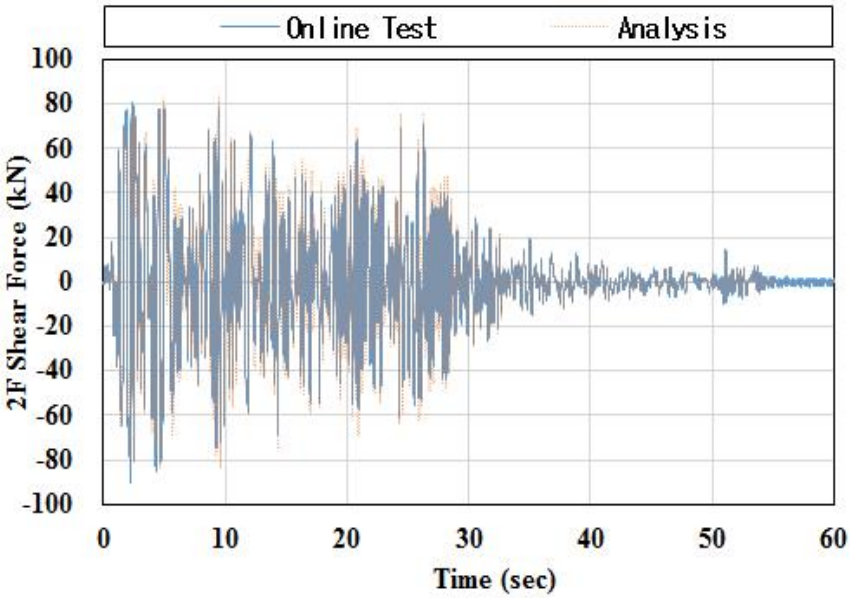
[그림 5.31] 온라인 실험 및 수치해석 EI200 1층 하중 응답



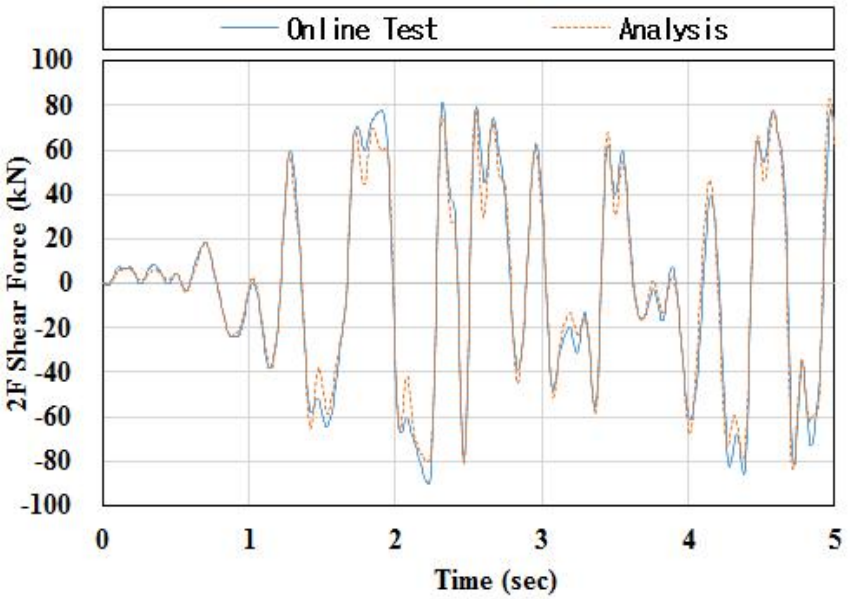
[그림 5.32] 온라인 실험 및 수치해석 EI200 1층 하중 응답(초기 5초)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



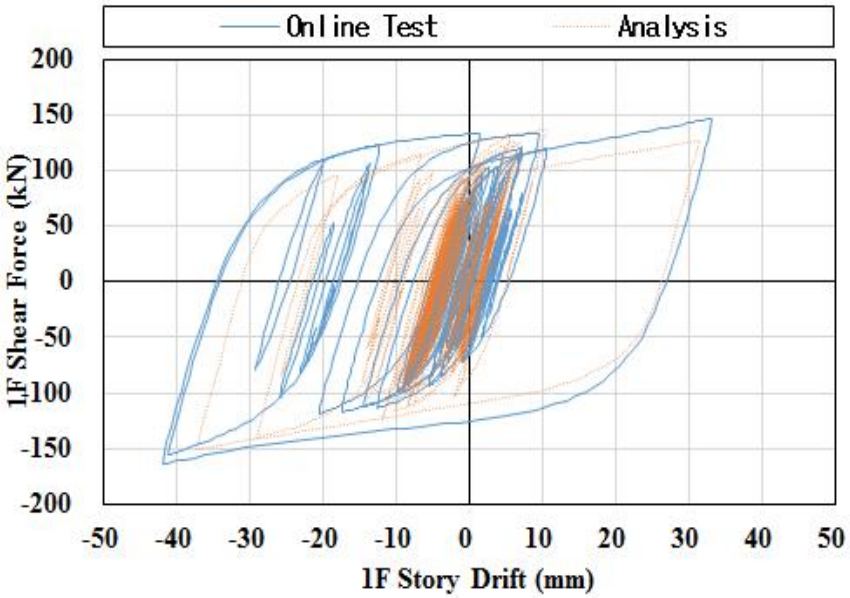
[그림 5.33] 온라인 실험 및 수치해석 EI200 2층 하중 응답



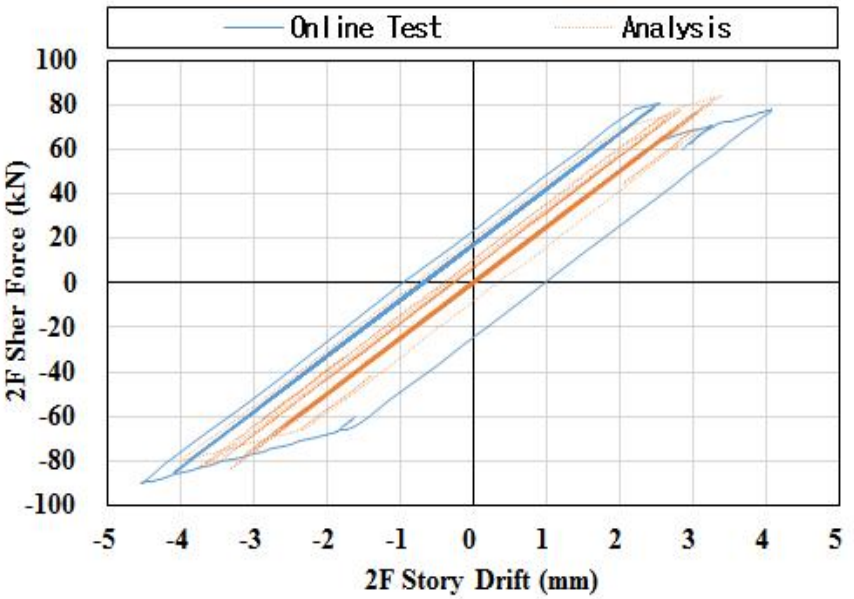
[그림 5.34] 온라인 실험 및 수치해석 EI200 2층 하중 응답초기 5초)

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



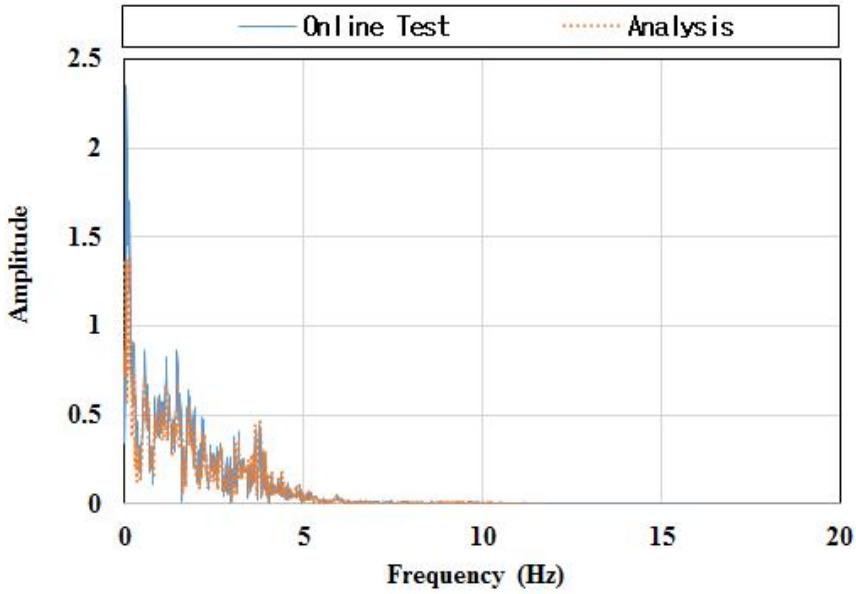
[그림 5.35] 온라인 실험 및 수치해석 EI200 1층 변위-하중 이력응답



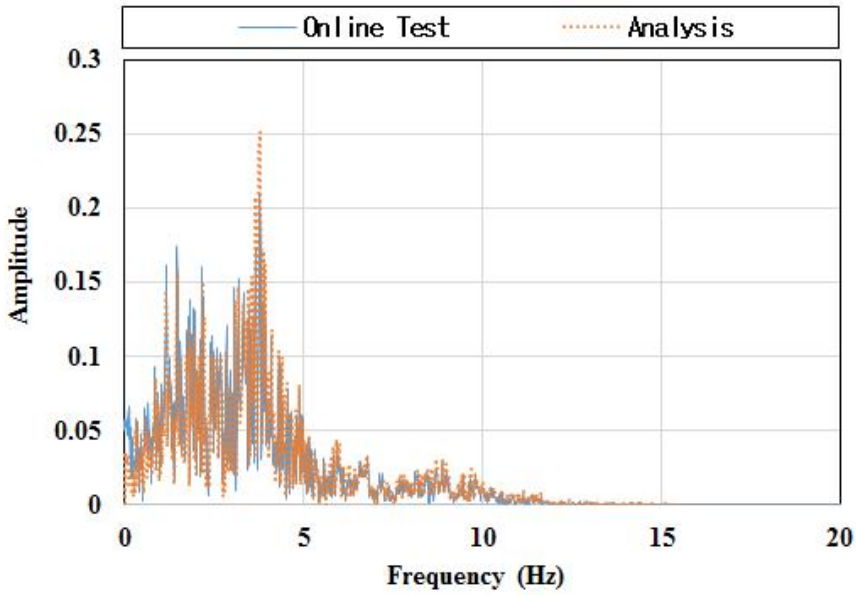
[그림 5.36] 온라인 실험 및 수치해석 EI200 2층 변위-하중 이력응답

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 5.37] 온라인 실험 및 수치해석 EI200 1층 주파수 분석



[그림 5.38] 온라인 실험 및 수치해석 EI200 2층 주파수 분석

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

<표 5.5> 비선형 온라인 실험 및 수치해석 최대값 결과 비교(EI 200)

			온라인실험	수치해석	오차
1F	변위(mm)	Max	33.21	31.44	1.76
		Min	-41.87	-37.22	-4.65
	하중(kN)	Max	149.89	136.65	13.23
		Min	-165.67	-150.42	-15.25
2F	변위(mm)	Max	4.09	3.38	0.7
		Min	-4.5	-4	-0.53
	하중(kN)	Max	80.98	83.82	-2.87
		Min	-90.02	-83.59	6.42

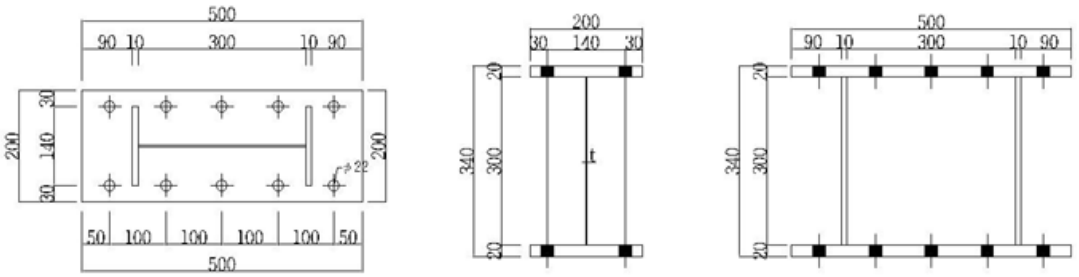
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5.3 전단패널댐퍼 비선형 유사동적 온라인 실험

5.3.1 시험체 상세

전단패널댐퍼의 경우 패널부 좌굴에 의한 내력 저하 현상 및 핀칭 현상이 나타남에 따라 수치해석 모델로 표현이 어려운 문제점이 존재한다. 전단패널댐퍼 시험체는 그림 5.00에 나타내었으며, SS400강재를 이용하여 패널부의 사이즈는 폭, 높이를 300이며, 두께는 4mm로 제작하였다. 패널부 상하에 20mm 두께를 갖는 앤드플레이트와 패널부 양옆으로 10mm 두께를 갖는 플랜지로 구성하였다.



[그림 5.39] 전단패널댐퍼 시험체 형상

5.3.2 준정적 재하실험

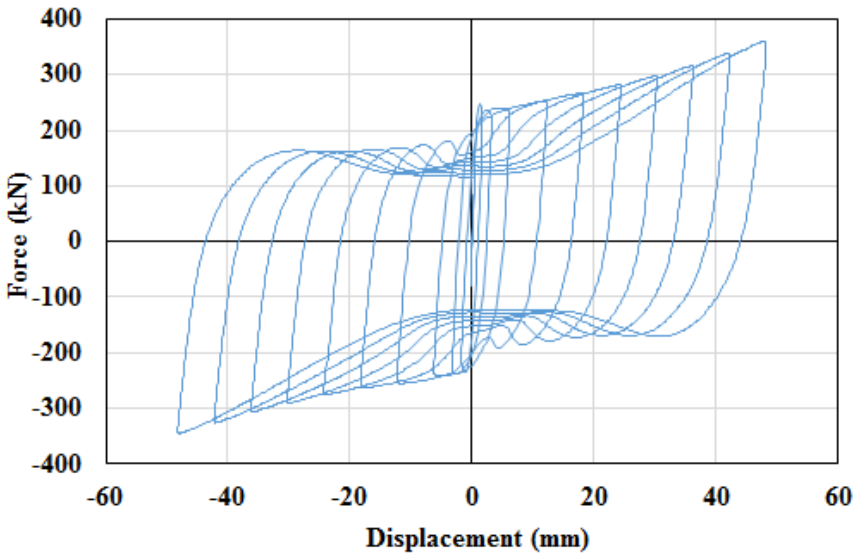
그림 5.39에 나타낸 전단패널댐퍼 시험체의 구조성능을 파악하기 위해 준정적 재하실험을 수행하였다. 시험체의 준정적 재하실험을 위한 가력시스템은 3.1절과 동일한 가력 시스템을 사용하였다. 전단패널댐퍼의 구조성능을 파악하기 위해 변위제어를 하였으며, 입력파형은 그림 5.2와 같이 초기강성 및 항복하중등 시험체의 구조성능을 정밀하게 파악하기 위해 초기 0.75mm, 1.5mm, 3mm, 6mm 이후 에는 6mm씩 증가하는 점증진폭을 갖는 반복하중을 적용하였으며 각 사이클별 1회 가력 하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

전단패널댐퍼의 준정적 재하실험 결과를 그림 5.40에 나타내었다. 전체적인 이력거동은 전단변형이 지배하는 초기구간에서의 패널은 안정된 방추형의 이력거동을 보이지만, 면외좌굴이 시작하면서 내력저하가 발생하고, 이후 인장역 장용에 의해 내력상승효과가 나타났다. 초기강성 275kN/mm, 항복강도 165kN, 항복변위 0.6mm 및 최대하중 360.04kN으로 나타났다. 시험체는 실험 최대 반복 가력 48mm까지 파괴가 발생하지 않았다.

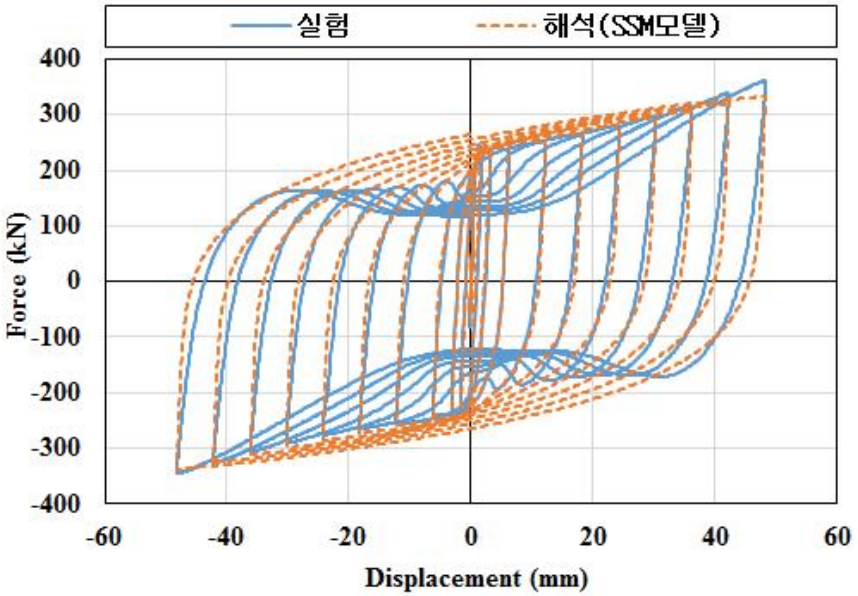
대상 시험체를 표현하기 위한 SSM모델을 적용하였으며, 대상 시험체를 표현하기 위해 SSM의 Shift 계수 및 Round 계수는 각각 0.5, 6를 사용하였다. 적용된 SSM이 대상 시험체의 이력특성 중 내력저하 및 핀칭현상을 표현하지는 못하였다. 전단패널댐퍼의 준정적 실험 결과와 수치해석의 누적 에너지 흡수량을 비교한 결과 표5.6과 같이 실험결과 146,330$kN \cdot mm$, 해석결과 190,771$kN \cdot mm$로 약 30%의 오차로 나타났다. 이는 내력저하 현상을 표현하지 못함에따라 매우 큰 오차를 발생하였으며, 이는 전단패널댐퍼의 수치해석 모델 적용이 어려워 기존 해석모델을 이용하여 수치해석에 적용하였을 때 매우 큰 오차가 발생할 수 있을 것으로 판단된다.



[그림 5.40] 전단패널댐퍼 준정적 재하 실험 결과

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 5.41] 전단패널댐퍼 준정적 재하 실험 결과

<표 5.6> 전단패널댐퍼 준정적 재하 실험 및 SSM해석 에너지 흡수량 비교

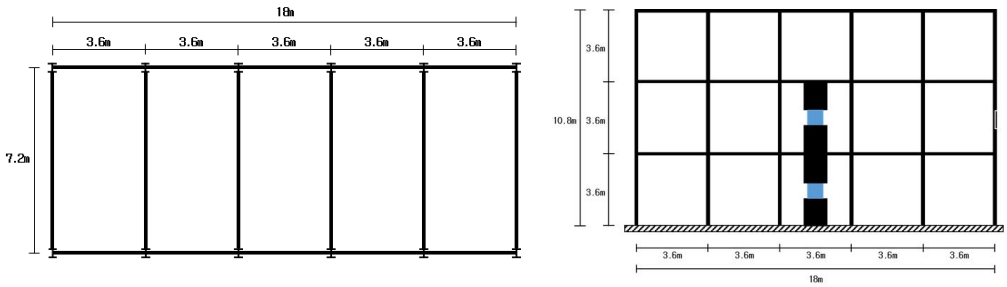
	실험	SSM해석	오차
누적 에너지 흡수량	146,330	190,771	30.3%

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5.3.3 유사동적 온라인 실험 모델

본 장에서는 전단패널 댐퍼를 시험체로 유사동적 온라인 실험을 진행하기 위해 그림 5.42과 같은 3층 철골구조물을 설계한 후 1층 부분에 전단패널댐퍼를 적용하여 구조물의 응답을 확인하였다. 3층 철골구조물의 용도는 사무실 용도이며, SS400강재를 이용하였다. 보의 경우 무한강성을 가지는 것으로 가정하고 기둥의 설계만 진행하였다. 구조물의 중력방향 설계하중은 고정하중 4.8kN/㎡, 적재하중 3kN/㎡을 사용하였으며, 구조물의 각층 중량 10,108.88kN, 질량 0.10315$kN \cdot s^2/mm$로 나타났다. 하중에 따른 각층 기둥을 설계한 결과 기둥의 사이즈는 H 300×300×10×15로 설계 되었으며 각층 강성 및 항복강도, 항복변위는 표 5.7과 같다. 이러한 구조물의 유사동적 온라인 실험을 위한 전단질점계 모델로 표현하면 그림 5.43과 같다. 1층 댐퍼부의 경우 실제 전단패널댐퍼부를 구성하였으며, 나머지 부분에 대해서는 수치해석모델을 적용하였다. 유사동적 온라인 실험을 위해 입력지진파는 그림 4.5과 같은 El Centro, 시간간격 0.005sec를 적용하였으며, 1차 및 2차 모드 5% 감쇠를 적용, Rayleigh감쇠를 이용하여 C매트릭스를 구성 하였다. 수치적분법으로는 Newmark-β법을 사용하였으며, $\beta = 1/6$, $r = 1/2$를 사용하였다.



(a) 평면도 (b) 입면도

[그림 5.42] 대상구조물 평면 및 입면

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

<표 5.7> 구조물의 각층 규모 및 하중

하중 (kN/m^2)	면적 (m^2)	중량 (kN)	질량 $(kN \cdot s^2/mm)$
7.8	1296	10,108.88	0.10315

<표 5.8> 구조물의 각층 제원(기둥-12ea)

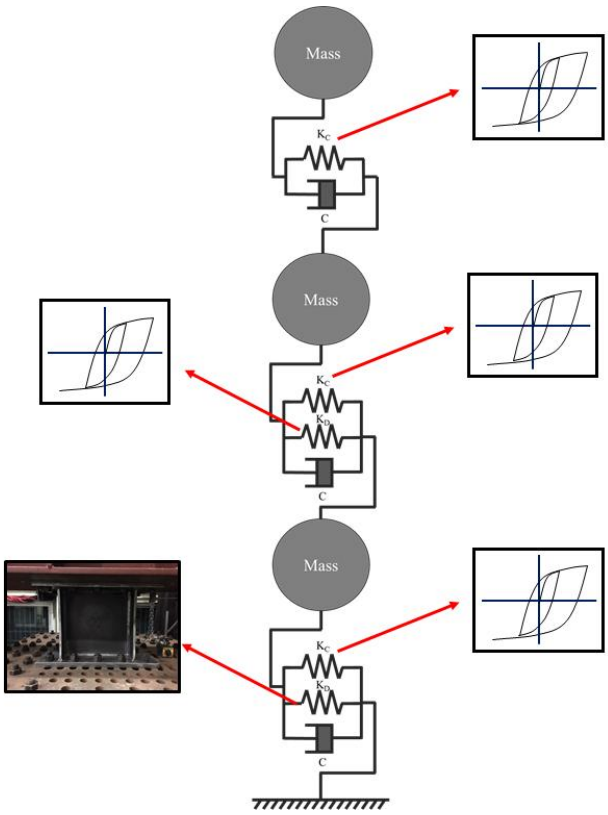
Z_P (mm)	M_P $(kN \cdot mm)$	Q_y (kN)	K (kN/mm)	D_y (mm)	h_0 (mm)
5,400,000	1,269,000	705	42.7	16.5	3600

<표 5.9> 전단패널댐퍼 MDOF 비선형 유사동적 온라인 실험 개요

질량	1층	$0.10315kN \cdot s^2/mm$		
	2층	$0.10315kN \cdot s^2/mm$		
	3층	$0.10315kN \cdot s^2/mm$		
감쇠계수		Rayleigh감쇠 (1차모드 5%, 2차모드 5%)		
초기강성		기둥부	댐퍼부	구조물(기둥+댐퍼)
	1층	42.7kN/mm	275kN/mm	317.7kN/mm
	2층	42.7kN/mm	25kN/mm	67.7kN/mm
	3층	42.7kN/mm	·	42.7kN
주기	1차모드	0.832sec		
	2차모드	0.282sec		
	3차모드	0.094sec		
시험체 재료		SS400		
입력 지진파		El Centro Ns		
시간간격		0.005sec		
수치적분법		Newmark - β법 $\beta = 1/6$, $r = 1/2$		

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 5.43] 온라인 실험을 위한 구조물 전단질점계 치환 모델

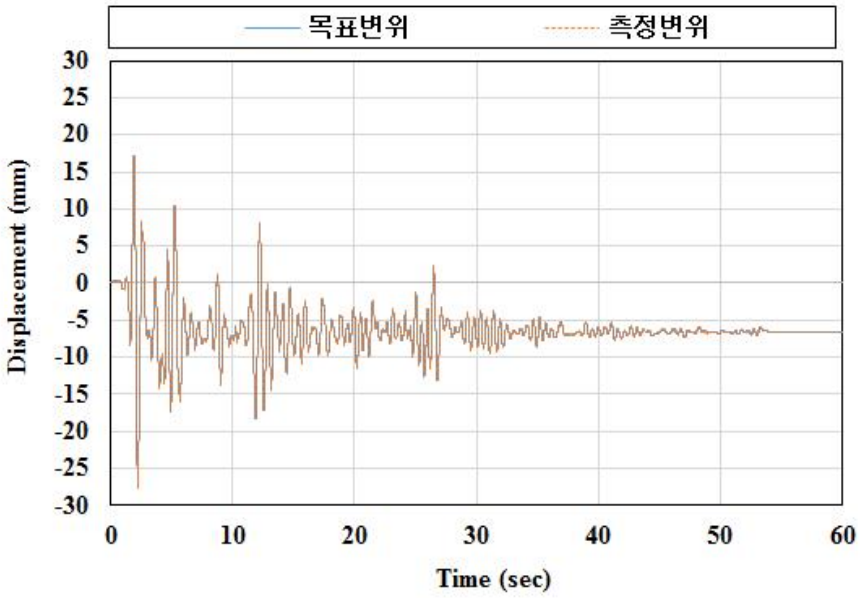
Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

5.3.4 유사동적 온라인 실험 결과

전단패널댐퍼를 실제 물리부분으로 구성하여 유사동적 온라인 실험을 진행한 결과 총 실험시간은 약 2874초의시간이 소요되었다.

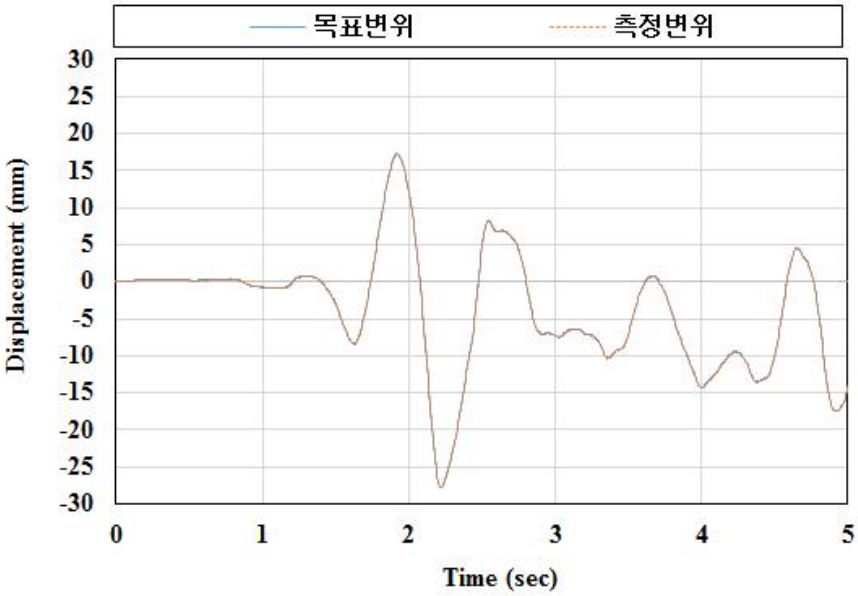
그림 5.44에 목표변위와 측정변위 결과를 나타내었으며, 그림 5.45에 초기 5초 구간에 대한 결과를 나타내었다. Actuator의 제어가 목표변위에 따라 정밀하게 제어됨을 확인 할 수 있었으며, 전 구간에 대해 오버슛이 발생하지 않고 시스템 구축 시 목표로 하였던 언더슛이 발생하는 것을 확인하였다. 최대변위에서 목표변위 17.22㎜ 측정변위 17.14㎜, 최소변위에서 목표변위 -27.78㎜, 측정변위 -27.74㎜로 각각 0.09㎜, 0.04㎜로 Actuator제어 허용범위 0.1㎜이내의 정밀한 제어가 되었음을 확인 하였다. 목표변위와 측정변위의 오차는 그림 5.46과 같이 -0.10㎜ ~ 0.15㎜의 오차가 발생하였다.



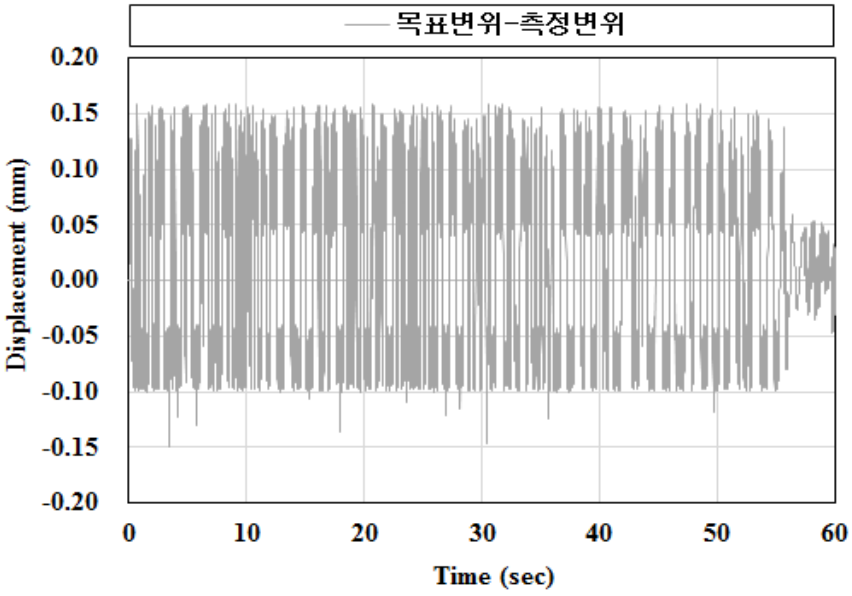
[그림 5.44] 전단패널댐퍼 온라인 실험 변위응답

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 5.45] 전단패널댐퍼 온라인 실험 변위응답(초기5초)



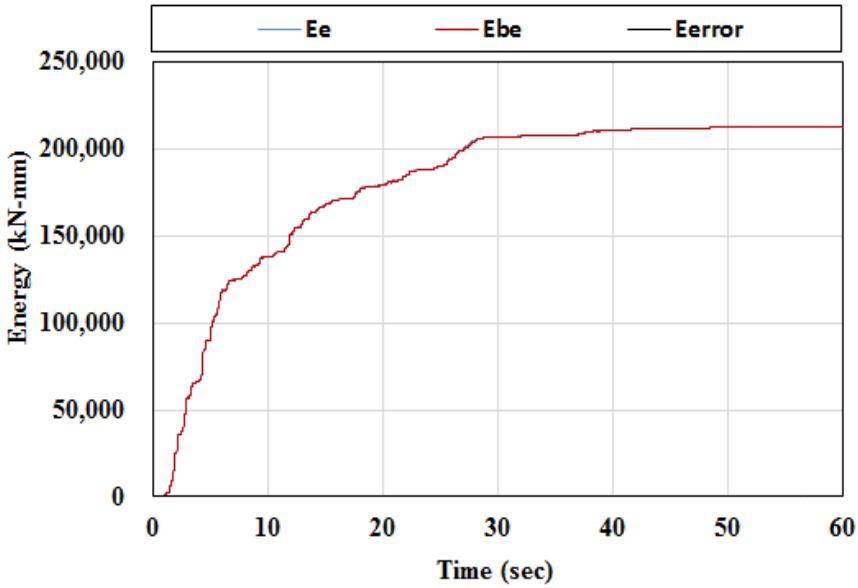
[그림 5.46] 전단패널댐퍼 온라인 실험 변위제어 오차

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

비선형 유사동적 온라인 실험에 대해 앞서 평가한 방법으로 에너지 기반을 이용하여 평가한 결과 그림 5.47 ~ 5.48에 나타내었다. 그림 5.47에 나타낸 에너지 오차의 경우 약 151kN·m로 나타났으며, 이는 실험체의 누적 에너지 소산량 보다 미소한 에너지 오차가 발생하였다. HSEM지표의 경우 그림 5.48과 같이 실험 종료 후 약 0.0014로 나타났으며, 실험 진행 중에도 안정적인 지표 값이 나타나 유사동적 온라인 실험이 정밀도를 가지고 실험이 진행 된 것을 확인 하였다.

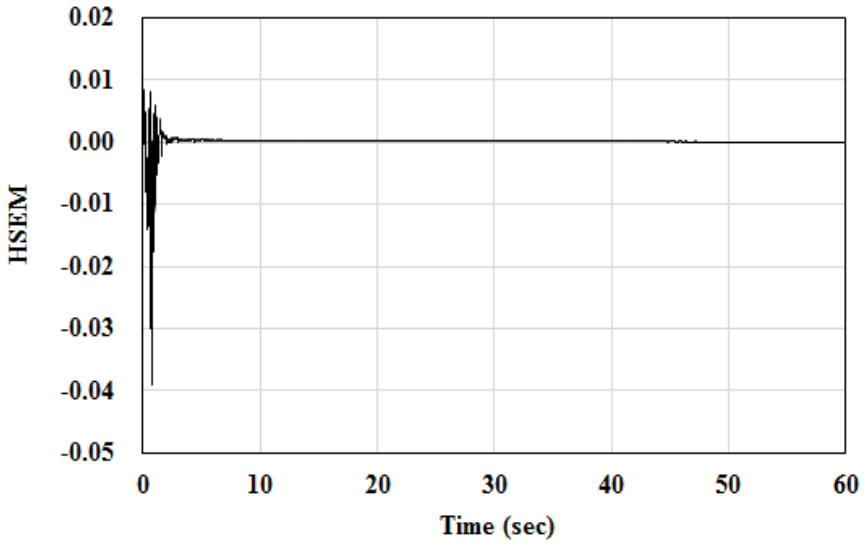
전단패널댐퍼를 실제 물리부분으로 구성하여 유사동적 온라인 실험을 진행한 결과 약 8.8초의 응답에서 패널부의 크랙이 시작 되었다. 준정적 재하 실험의 경우 최대 변위 48mm까지 점진증폭파형에 대해 파괴가 발생하지 않았으나, 유사동적 온라인 실험을 진행하였을시 그 이하의 변위 응답에서 파괴가 발생함을 확인하였으며, 준정적 재하실험의 경우 동적효과를 고려하지 못하나 유사동적 온라인 실험의 경우 동적 효과가 고려됨에 따른 차이로 판단된다.



[그림 5.47] 유사동적 온라인 실험 누적 에너지 오차

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 5.48] 유사동적 온라인 실험 HSEM 결과

구조물의 1층응답에 대해 그림 5.49 ~ 5.55에 나타내었다. 그림 5.49과 같이 변위 응답의 경우 초기의 변형 및 최대 변위 응답은 잘 일치 하나 패널댐퍼의 좌굴에 의한 내력저하 현상 및 핀칭 현상이 나타난 이후에는 온라인 실험의 변위 응답이 더 크게 발생하였으며, 시험체의 파괴가 발생하기 시작하면서 변위 오차가 발생하였다. 최대 변위응답의 경우 온라인 실험 결과 +17.22mm, -27.78mm, 수치해석 결과 17.72mm, -27.18mm로 미소한 오차만 발생하였으며 이는 최대 변위 응답이 패널부의 내력저하 현상 등이 발생하기 전에 나타남에 따라 미소한 오차가 발생 하였다.

그림 5.50 ~ 51과 같이 실제 물리부분으로 구성된 K_d의 응답의 경우 수치해석 모델이 파괴 및 내력저하 현상 등을 표현하지 못해 최대 응답의 이후의 응답에서 오차가 크게 발생 하였다.

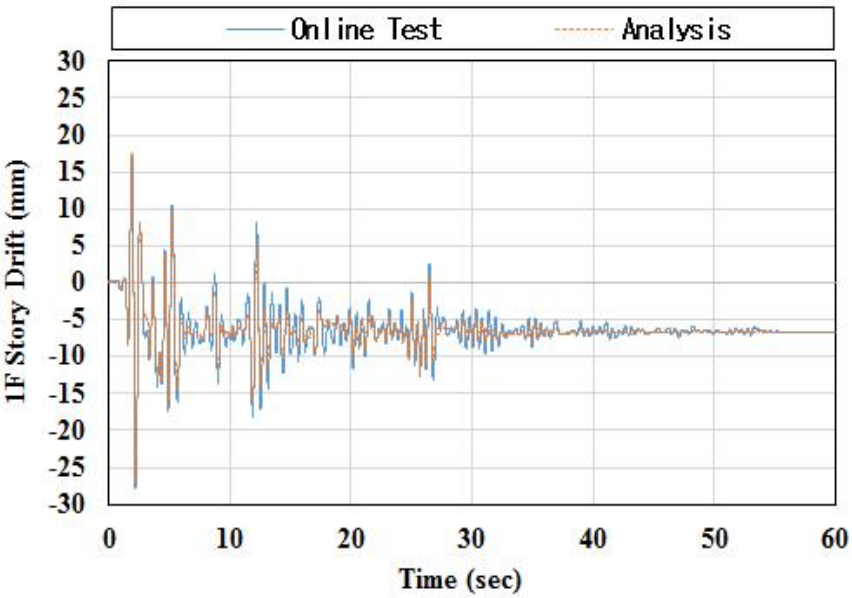
그림 5.52 ~ 5.53에 Kc(기둥)의 응답을 나타내었으며, 전체적인 이력형상을 잘 일치함을 확인 하였으며, 하중이력의 경우 최대 응답 이후의 응답에서 오차가 발생하였지만, 탄성 범위 내에서 응답이 나타남을 확인하였다.

그림 5.54 ~ 5.55에 1층 구조물 전체에 대한 응답을 나타내었다. 실험 결과와 해석

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

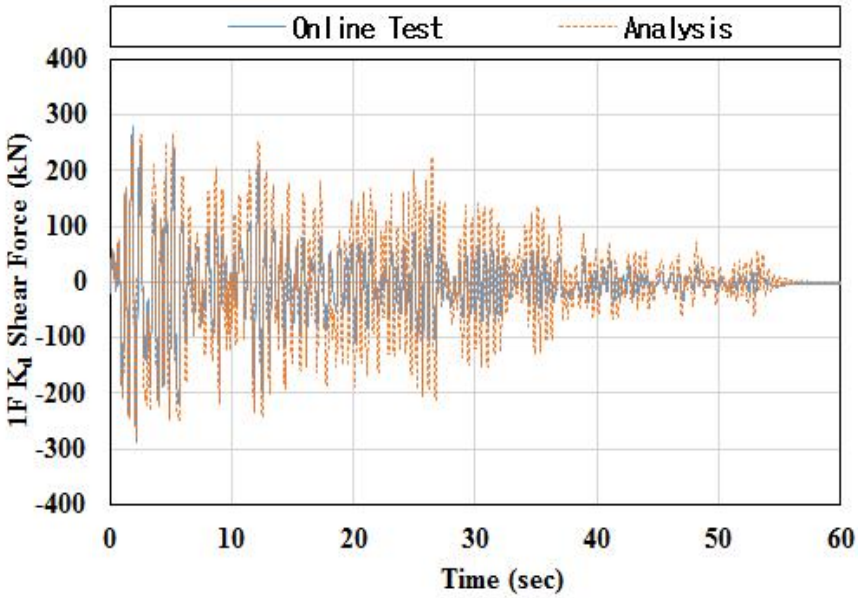
결과 이력형상 및 하중이력이 잘 일치함을 확인 하였다. 이는 전단패널댐퍼의 파괴가 발생함에 따라 온라인 실험의 경우 변위 응답의 양이 더 크게 나타났지만, 기둥부분의 응답이 탄성 범위내에 존재함으로써 수치해석 결과와 온라인 실험결과의 응답의 오차가 크게 발생하지 않은 것으로 확인되었다. 하지만 시험체의 파괴 및 내력저하 현상 등이 발생할 때 기둥부의응답이 항복이후의 응답에 위치한다면 구조물의 전체적인 응답의 오차는 크게 나타날 것으로 판단된다.



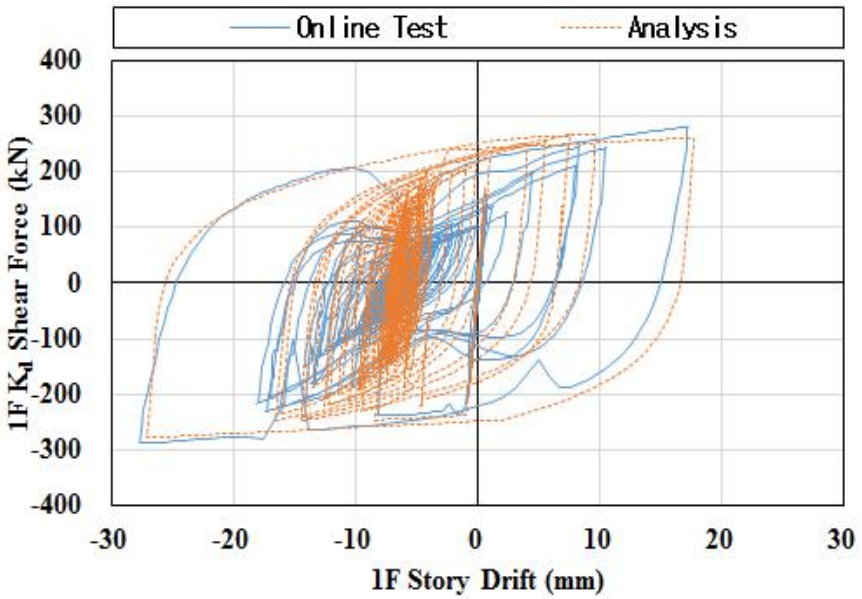
[그림 5.49] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 1층 층간변위 응답

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



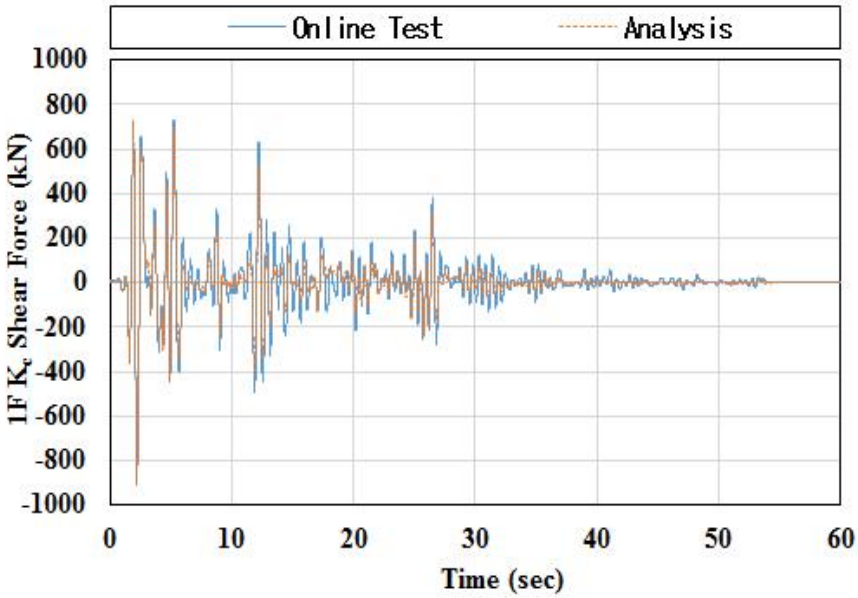
[그림 5.50] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 1층 k_d 하중 응답



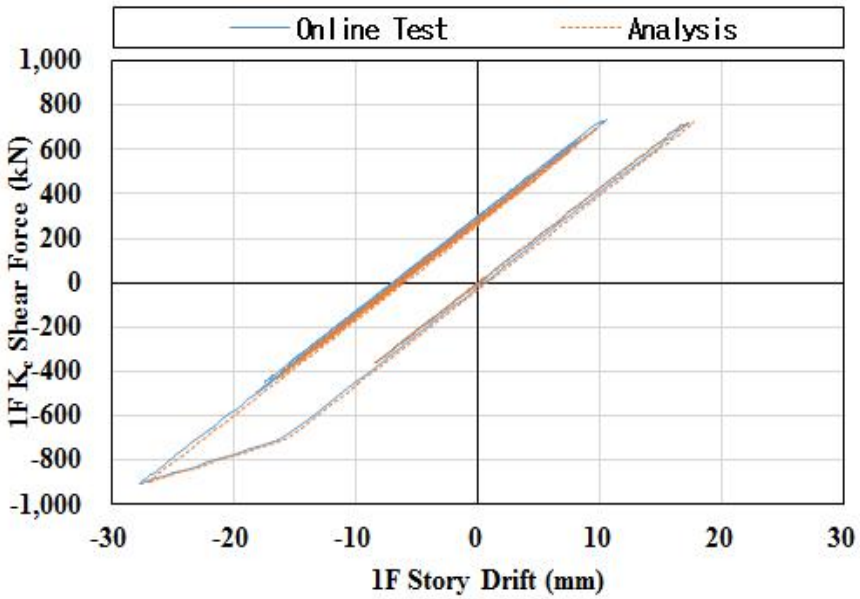
[그림 5.51] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 k_d 1층 변위-하중이력 응답

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



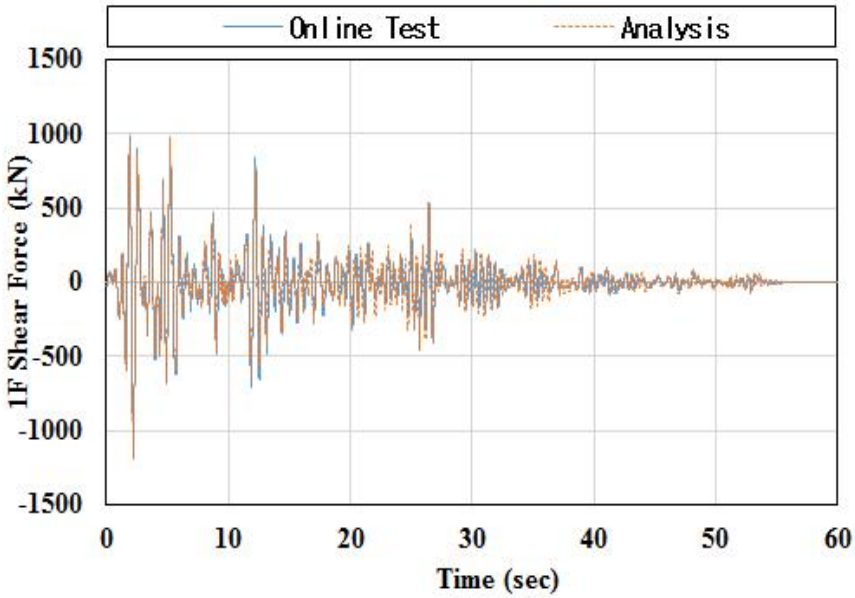
[그림 5.52] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 k_c 1층 하중 응답



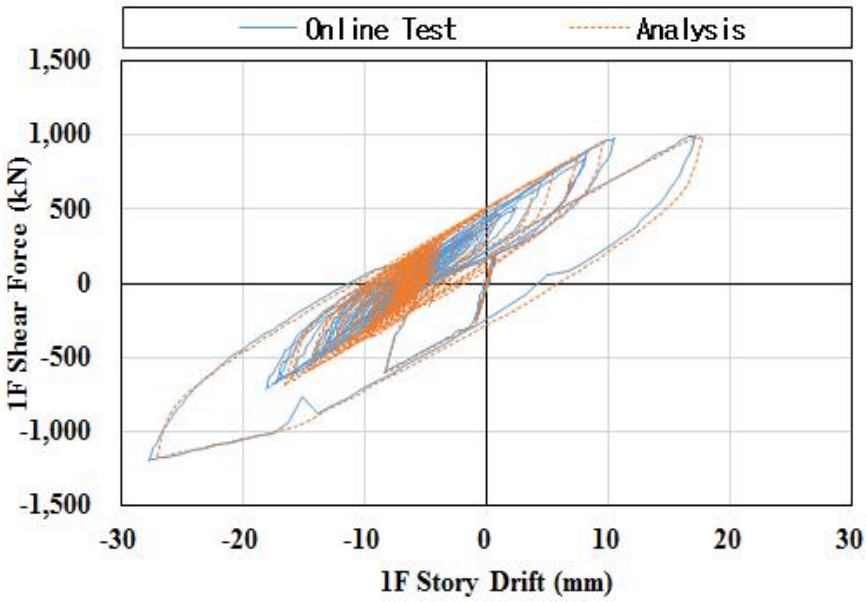
[그림 5.53] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 k_c 1층 변위-하중이력 응답

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 5.54] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 1층 구조물 하중 응답



[그림 5.55] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 1층 구조물
변위-하중이력 응답

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

<표 5.10> 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 수치해석 1층 최대값 결과 비교

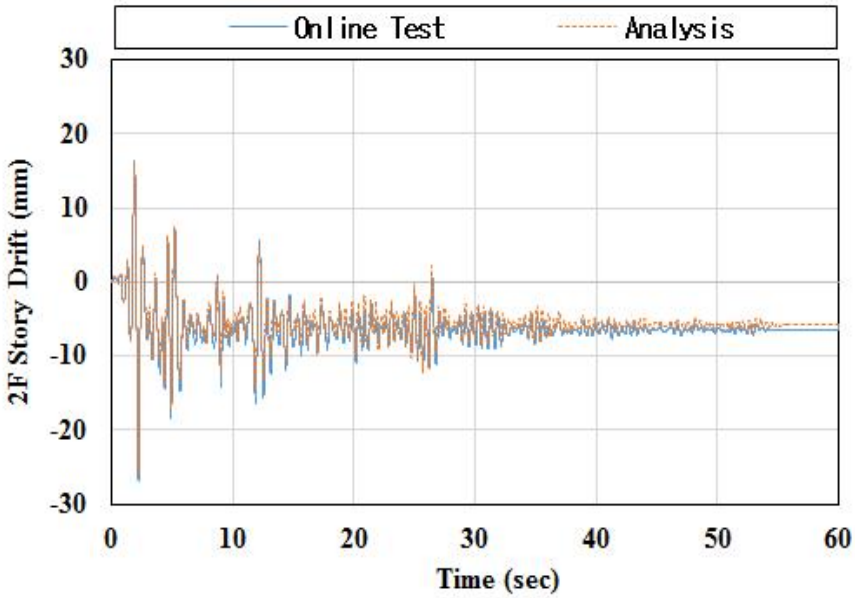
			온라인실험	수치해석	오차
변위(mm)		Max	17.22	17.72	-0.49
		Min	-27.78	-27.18	-0.6
하중(kN)	구조물	Max	997.03	986.36	10.66
		Min	-1193.83	-1178.98	-14.85
	기둥부 (K_c)	Max	732.62	725.67	6.94
		Min	-905.52	-900.72	-4.79
	댐퍼부 (K_d)	Max	280.26	267.84	12.41
		Min	-288.38	278.25	-10.12

구조물의 2층응답에 대해 그림 5.56 ~ 5.62에 나타내었다. 그림 5.56과 같이 변위응답의 경우 1층의 응답이 온라인 실험과 수치해석 결과가 큰 오차가 발생하지 않아 2층의 변위응답이 온라인 실험과 수치해석 결과가 잘 일치하는 것으로 나타났다. 최대변위응답의 경우 온라인 실험 결과 +16.48m, -26.77mm, 수치해석 결과 16.11mm, -25.83mm로 미소한 오차만 발생하였다.

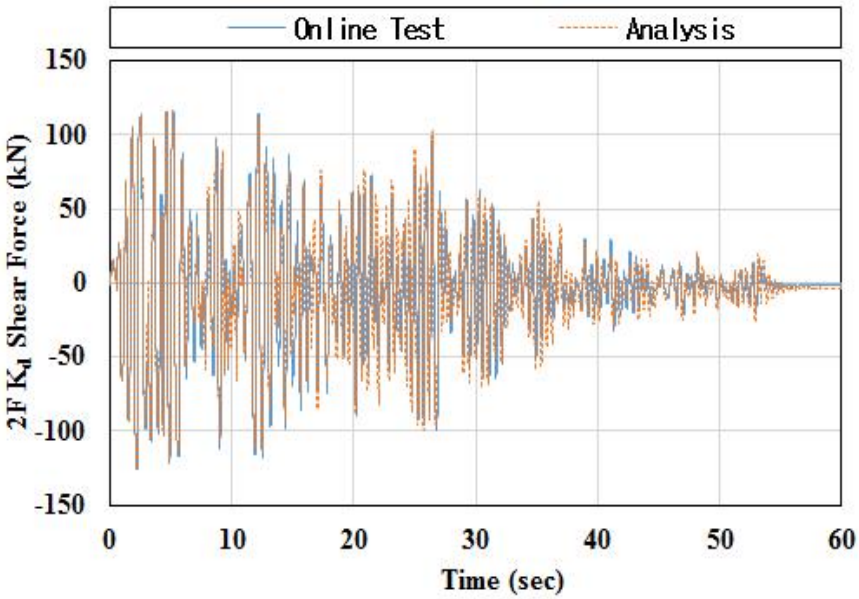
2층 구조물 전체 및 기둥부, 댐퍼부 모두 온라인 실험결과와 수치해석 결과가 잘 일치 함을 확인 하였으며, 이는 변위응답과 같이 2층 구조물의 경우 모두 수치해석 모델이기 때문에 1층에서 구조물의 응답이 온라인 실험결과와 수치해석 결과가 비슷하게 나타났기 때문이다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



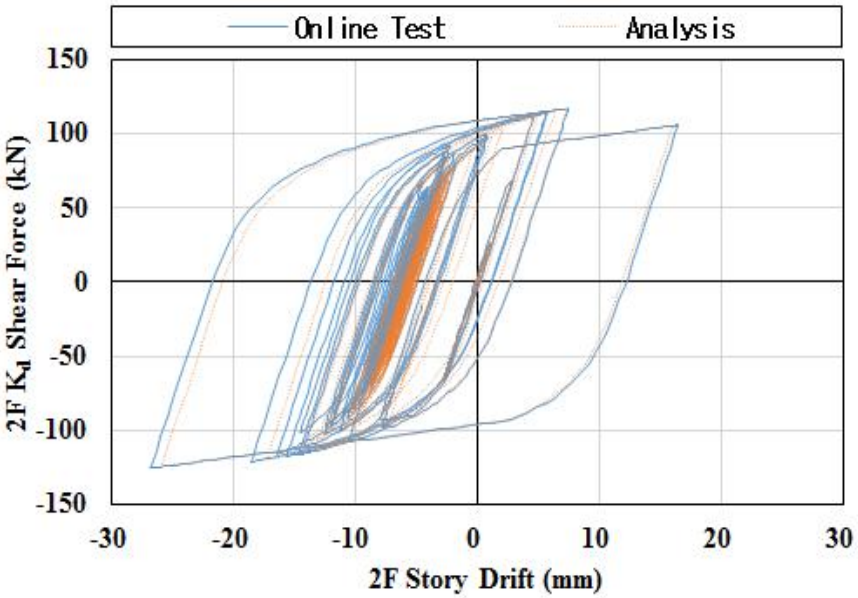
[그림 5.56] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 2층 층간변위 응답



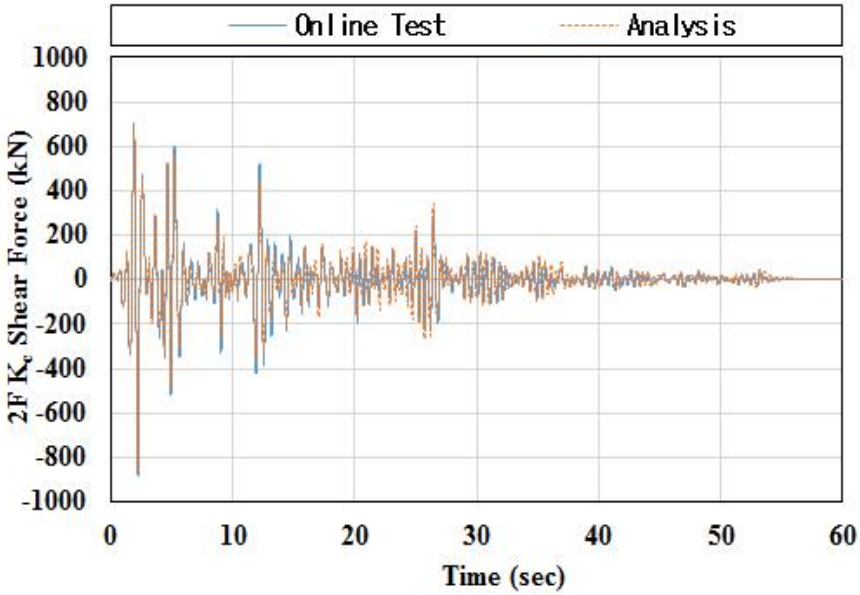
[그림 5.57] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 2층 k_d 하중 응답

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



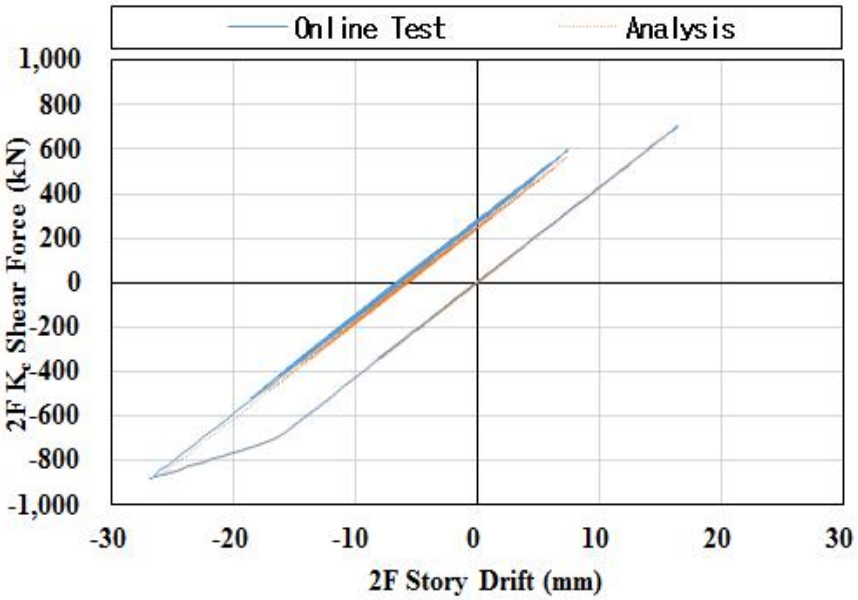
[그림 5.58] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 k_d 2층 변위-하중이력 응답



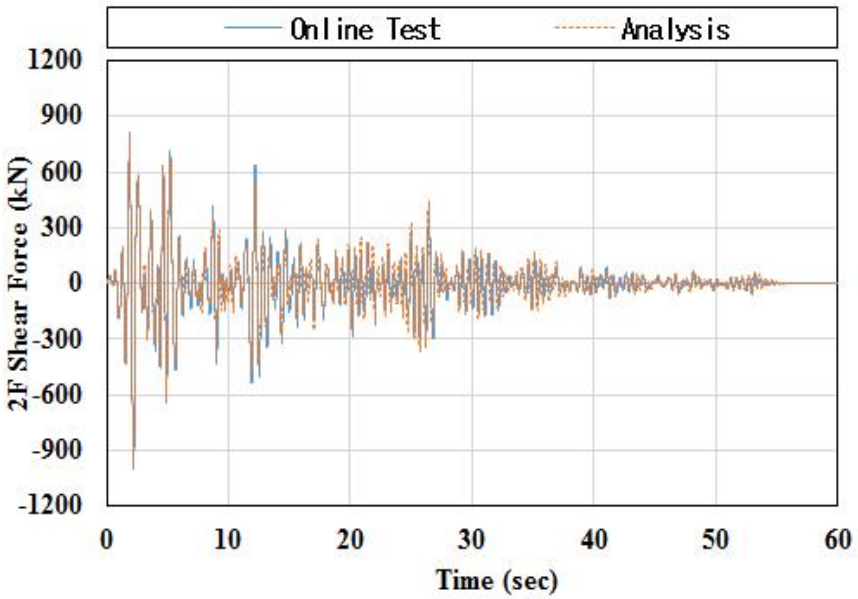
[그림 5.59] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 k_c 2층 변위 응답

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



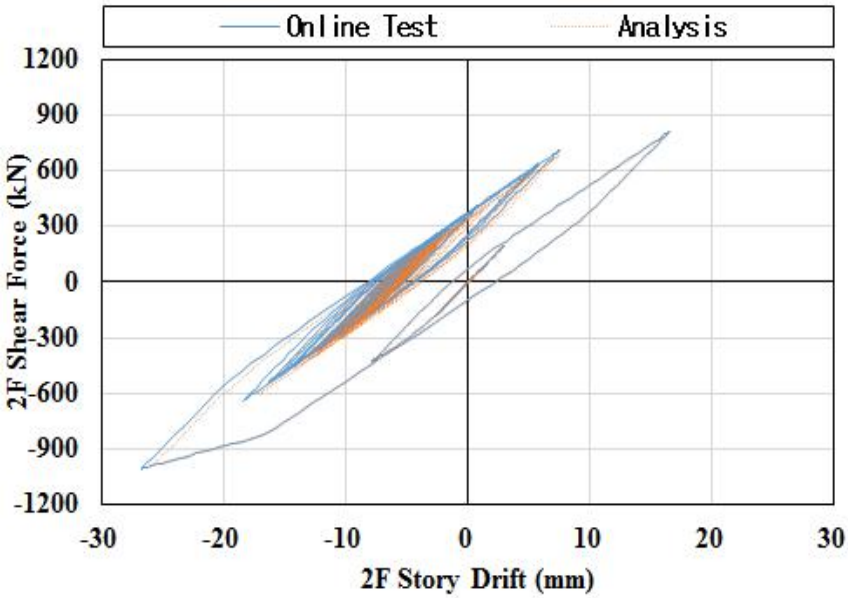
[그림 5.60] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 k_c 2층 변위-하중이력 응답



[그림 5.61] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 2층 구조물 하중 응답

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 5.62] 전단패널댐퍼 온라인 2층 실험 및 해석 구조물 변위-하중이력 응답

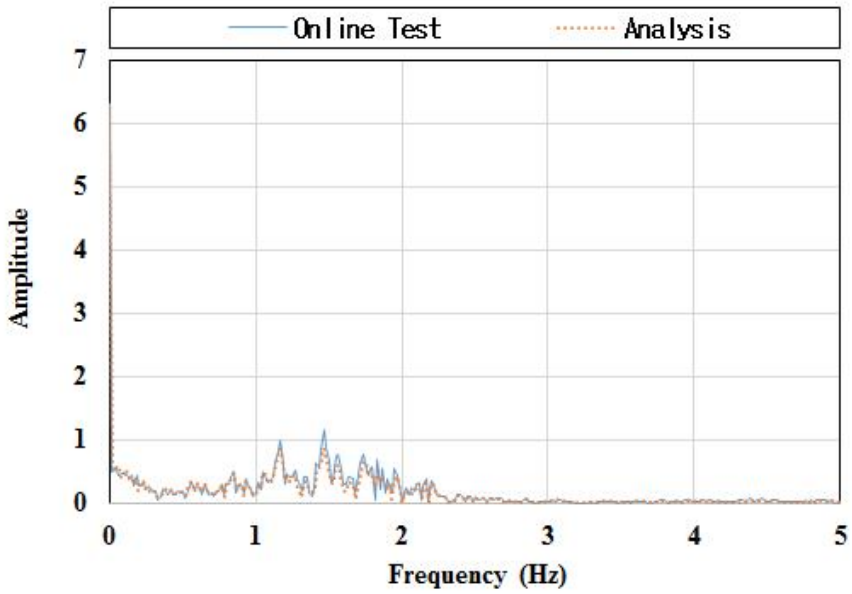
<표 5.11> 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 수치해석 2층 최대값 결과 비교

			온라인실험	수치해석	오차
변위(mm)		Max	16.48	16.11	0.37
		Min	-26.77	-25.83	-0.94
하중(kN)	구조물	Max	809.77	793.73	16.04
		Min	-1005.83	-988.64	-17.18
	기둥부 (K_c)	Max	708.86	688.09	15.76
		Min	-880.31	-864.28	-16.03
	댐퍼부 (K_d)	Max	117.12	116.48	0.63
		Min	-125.51	-124.36	1.15

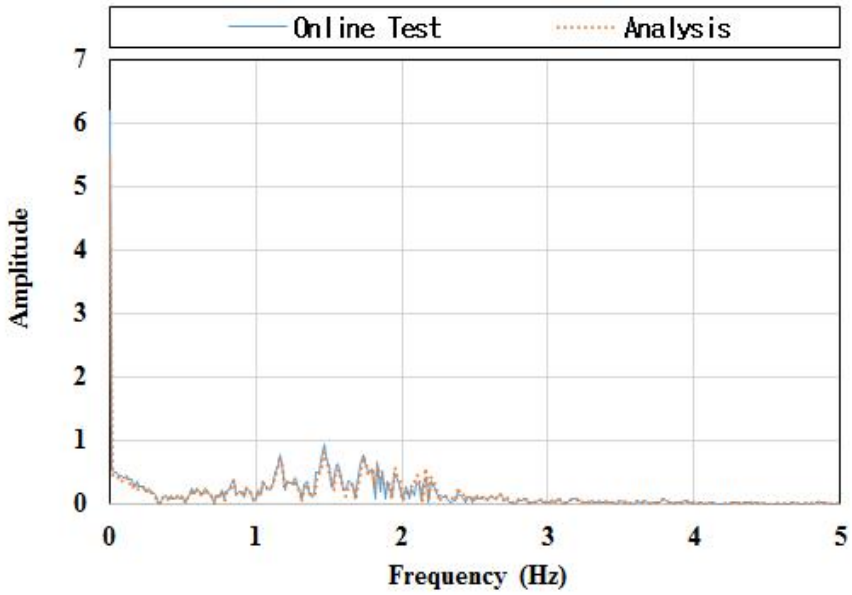
구조물의 1층 및 2층 변위응답에 대한 주파수 분석을 한 결과 그림 5.63 ~ 5.64에 나타내었다. 1층 및 2층 모두 응답크기에 약간의 오차가 발생하였으며, 진동수의 경우 잘 일치함을 확인 할 수 있었다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 5.63] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 1층 주파수 분석



[그림 5.64] 전단패널댐퍼 온라인 실험 및 해석 2층 주파수 분석

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

제6장 결론

본 논문에서는 유사동적 온라인 실험을 위해 시스템을 구축하고, 유사동적 온라인 실험을 수행하여 진동대 실험 및 수치해석 결과와 비교검증을 통해 유사동적 온라인 실험의 정합성 및 유효성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 유사동적 온라인 실험 시스템 구축을 위해 하드웨어의 구성으로 유압 Actuator를 사용하였고, Actuator 제어시스템과 수치해석 프로그램과의 연결을 위해 아날로그 신호(Volt)를 이용하여 데이터전송을 구축하였다. 수치해석 프로그램의 경우 Visual Basic 6.0을 이용하였으며, 수치적분법으로는 Implicit Newmark-β법, 반복법으로는 수정 뉴튼-랩슨법을 이용하여 수치해석 프로그램을 구성하였다. 또한 수치해석 프로그램 내에 AD/DA보드 관련 함수 및 변수, Actuator의 목표 변위 생성 및 판별에 관한 모듈을 포함하여 구축하였다. Actuator의 제어시 발생하는 오버슛과 언더슛의 경우 시험체 고유의 성능을 지나치지 않게 언더슛으로 Actuator가 제어되도록 하였으며, 이에 따라 발생하는 에너지 부가현상의 경우 복원력 보정을 이용하여 해소하였다.

2) 선형 및 비선형 유사동적 온라인 실험 결과 Actuator의 제어를 확인 한 결과 전 실험에 대해 오버슛이 발생하지 않고 시스템 구성시 목표로 하였던 언더슛이 발생함을 확인하였으며, 목표변위에 대한 Actuator 변위가 0.15mm 이내의 정밀한 제어가 됨을 확인 할 수 있었다.

3) 유사동적 온라인 실험의 정밀도의 큰 영향을 미치는 변위제어 오차를 보정하기 위해 본 논문에서는 미소 변위 제어 오차에 따라 발생하는 에너지 부가 현상을 해소하기 위해 복원력 사전예측 보상법을 제안 하였다. 제안된 복원력 사전예측 보상법을 이용하여 유사동적 온라인 실험을 진행 및 Mosqueda et al. 2007이 제안한 HSEM지표를 통해 오차 모니터링을 진행한 결과 약 0.05이하로 나타나 구축된 유사동적 온라인 실험의 정밀도를 확보함을 확인 하였다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

4) 단자유도 시스템과 다자유도 시스템에 대해 복원력 사전예측 보상법을 적용한 선형 유사동적 온라인 실험 결과와 수치해석 결과를 비교 한 결과 전체적인 이력응답이 잘 일치함을 확인 하였다. 또한 유사동적 온라인 실험 결과가 수치해석 결과보다 적은 응답의 결과가 나타났으며, 이는 실험의 경우 실험 셋팅 및 제어오차 등으로 인하여 실험체의 소산 에너지가 발생하여 수치해석 결과보다 적게 나타나는 것으로 판단된다.

5) 일반적인 이력형상을 가지는 시험체에 대해 비선형 유사동적 온라인 실험을 진행한 결과와 Skelton Shift 모델을 이용한 수치해석 결과를 비교 분석 한 결과, 일반적인 이력형상을 가지는 시험체에 대해서는 Skelton Shift 모델을 이용하여 충분히 시험체의 이력특성을 나타낼 수 있음을 확인 하였다. 하지만 내력 저하 및 핀칭현상등의 이력형상을 가지는 시험체에 대해서는 Skelton Shift 모델로 시험체의 특성을 나타낼 수 없으며, 이에 따라 구조물의 응답의 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 특수한 이력형상 등을 가지는 시험체에 대해서는 유사동적 온라인 실험을 진행하여 수치해석 모델과 실험 결과의 차이에 대하여 검토가 필요할 것으로 판단된다.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

참고문헌

[1] Hakuno, M., Shidawara, M. & hara, T. (1969), "Dynamic destructive test of a cantilever beam, controlled by ananalog-computer", Transactions of the Japan Society of Civil Engineers, Vol 171, pp 1-9,(in Japanese).

[2] Takanashi (1975) Non-linear earthquake response analysis of structures by a computer actuator on-line system - Part1 details of system, Transactions of the Architectural Intitute of Japan, 229, pp. 77-83.

[3] Dermitzakis, S.N. & Mahin, S.A.(1985), "Development of substructuring techniques for on-line computer controlled seismic perfomance testing," UBC/EERC-85/04, Earthquake Engineering Research Institute, Univercity of California, Berkeley, California

[4] Thewalt, C.R. & Mahin, S.A.(1987), "Hybrid solution techniques for generalized pseudodynamic testing," UBC/EERC-87/09, Earthquake Engineering Research Institute, Univercity of California, Berkeley, California.

[5] Shing, P.B. & Vannan, M.T. (1991), "Implicit algorithm for pseudodynamic tests: convergence and energy dissipation, "Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol20, pp 809-819.

[6] C.R. Thewalt, M. Roman (1994) Performance parameters for pseudodynamic tests, Journal of Structural Engineering, 120(9), pp. 2768-2781.

[7] U.E. Dorka, D. Heiland (1991) Fast online earthquake utilizing a novel PC supported measurement and control concept, 4th Conference on

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Structural Dynamics, Southampton, UK, 1991.

[8] U.E. Dorka (2002) Hybrid experimental-numerical simulation of vibrating structures, International Conference WAVE2002, Okayama, Japan.

[9] V.Bayer, U.E. Dorka, U.Fullekrug, J.Gschwilm (2005) On real-time pseudodynamic substructure testing: algorithm, numerical and experimental results, Aerospace Science and Technology, 9(3), pp. 223-232.

[10] Nakashima, M. (2001), "Development, potential, and limitations of real-time online (pseudo-dynamic) testing, "Philosophical Transactions of the Royal Society of London A, Vol 359, pp 1851-1867.

[11] Jung,R.Y., et al. (2007), "Performance of a real-time pseudodynamic test system considering nonlinear structural response," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 36, pp 1785-1809.

[12] 한국건설기술연구원(1999), "대형 구조물 모형실험 정착을 위한 연구".

[13] 한국건설기술연구원(2001), "교각 내진성능 평가 및 교량 비선형 내진해석 프로그램 개발".

[14] 대한주택공사 주택연구소(1999), "Pseudo-Dynamic(유사-동적)실험기법 연구".

[15] 김남식(1994), "기초분리된 액체저장탱크의 지진거동분석을 위한 유사동적실험", 한국과학기술원, 박사학위논문.

[16] 정영수 등(2000), "섬유보강 원형 RC 교각의 내진성능 평가를 위한 유사동적실험,"한국지진공학회 논문집,제5권,제2호,통권 제18호,pp49-57

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[17] 김재관 등(2004), "인터넷을 통한 원격 유사동적실험기술 개발,"한국지진공학회 춘계학술대회 논문집,pp385-392

[18] Park,D.U.등(2006), "인터넷 기반 온라인 네트워크 유사동적 실험기법,"한국지진공학회 학술대회 논문집,pp553-562

[19] TakanashiK., & Nakashima.(1989), "Japanese activities on on-line testing," Journal of Engineering Mechanics, Vol 113, No 7, pp 1014-1032.

[20] Mahin, S., et al. (1987),“Pseudodynamic test method-current status and future directions, "Journal of Structural Engineering, Vol 115, No 8, pp 2113-2128.

[21] Shing, P.B., Nakashima, M. & Bursi, O.S. (1996), "Application of pseudodynamic test method to structural research", Earthquake Spectra, Vol 12, No 1, pp 29-56.

[22] Tanaka, H. (1975), "A computer-actuator on-line system for non-linear earthquake response analysis of structures, "Journal of the Industrial Science, Vol 27, pp 15-19, (inJapanese).

[23] Nakashima, M., et al. (1995), "Pseudo-dynamic testing using conventional testing devices, "Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 24, No 10, pp 1409-1422.

[24] Nakashima, M., et al. (1990), "Integration techniques for substructure pseudodynamic test, "Proc. of the 4th U.S. National Conference on Earthquake Engineering. Palm Springs, California, pp 515-524.

[25] Shing, P.B., et al. (1991), "Implicit time integration for pseudodynamic tests," Earthquake Engineering and Structural

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

Dynamics, Vol 20, pp 551-576.

[26] Nakashima, M. & Takai, H. (1985), "Computer-actuator online testing substructure and mixed integration techniques", Proc. of the 7th Symposium on the Use of Computers in Building Structures, Archtectural Institute of Japan Tokyo, Japan, pp 205-210, (in Japanese).

[27] Shing, P.B., et al. (1994), "Pseudodynamic tests of concentrically braced frame using substructuring techniques", Journal of Constructional Steel Research, Vol 29, pp 121-148.

[28] Tsai, K., et al. (2003), "Network platform for structural experiment and analysis(I)", NCREE-03-021, National Center for research on Earthquake Engineering, Taiwan.

[29] Pan, P., et al. (2006), "Development of peer-to-peer(P2P) Internet onlone hybrid testsystems", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 35, pp 267-291.

[30] Wang, T., et al. (2008), "Numerical characteristics of peer-to-peer(P2P) Internet online hybrid test system and its applications to seismic simulation of SRC Stucture", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 37, pp 265-282.

[31] Jung, R.Y. & Shing, P.B. (2006), "Performance evaluation of a real-time pseudodynamic test system", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 35, pp 789-810.

[32] Ahmadizadeh, M., et al. (2008), "Compensation of actuator delay and dynamics for real-time hybrid structural simulation", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 37, pp

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

21-42.

[33] Molina, F.J., et al. (2002), "Pseudodynamic tests on rubber base isolators with numerical substructuring of the superstructure and strain-rate effect compensation", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 31, pp 1563-1582.

[34] Bousias, S.N., et al. (2007), "Pseudodynamic response of torsionally unbalanced two-storey test structure", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 36, pp 1065-1087.

[35] Chang, S.Y., (2009), "Extensions of nonlinear error propagation analysis for explicit psudodynamic testing", Eqrtuake Enginnering and Structural dynamics, Vol8, pp 77-86.

[36] Gultom, R.J. & Ma, Q.T. "Real-time error correction in fast pseudodynamic testing: a numerical study", 4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Method in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Greece.

[37] 최인규, 정대성, 김철영, 박영석 (2007), "KOCED 미니모스트 시스템을 이용한 온라인 하이브리드실험," 대한토목학회 학술대회 논문집, pp 2430-2433.

[38] 최인규, 정대성, 김철영, 박영석 (2008), "소형뼈대모형을 이용한 하이브리드 실험과 진동대실험의 비교 연구," 대한토목학회 학술대회 논문집, pp 2536-2539.

[39] 박희상 (2001), "유사동적실험에 의한 철근콘크리트 교각의 내진성능 보강에 관한 연구", 석사학위논문, 중앙대학교.

[40] 지현우 (1999), "직접 적분법의 분석과 비교", 석사학위논문, 한국과학기술원.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[41] 정래영 (2006), "실시간 하이브리드 실험 시스템을 위한 Implicit 시간 적분법", 한국지진공학회 논문집, 제10권, 제5호, 통권 제51호, pp 99-106.

[42] 이태형 (2005), "오픈시스 구조해석 플랫폼, OpenSees", 한국강구조학회지, 제17권, 제3호, 통권 제64호, pp 56-60.

[43] 이재진 (2012) “하이브리드 실험에 대한 적용성 및 신뢰도 평가”, 석사학위논문, 인하대학교.

[44] 강대흥, 김성일 (2011) “고정반복법에 의한 암시적 HHT 시간적분법을 이용한 철근콘크리트 골조구조물의 실시간 하이브리드 실험”, 한국지진공학회 논문집, 제 15권, 제 5호, 통권 제81호, pp 11-24.

[45] 조성민, 최인규, 정대성, 김철영 (2010) “소형선형 평면뼈대모형의 진동대 실험을 통한 하이브리드실험 기법의 검증”. 한국지진공학회 논문집, 제 14권, 제 6호, 통권 76호, pp 33-43.

[46] 김세훈 (2013) “실시간 하이브리드 실험법을 적용한 강 뼈대 구조물의 동적거동 평가”, 석사학위논문, 경희대학교.

[47] 양원직 (2008) “뉴랄-네트워크의 실시간 이력특성 동정기법에 의한 부분구조 유사동적 실험” 대한건축학회 논문집, 구조계, 제 24권, 제3호, 통권 233호 pp 53-60.

[48] 강동섭 (2007) “철근콘크리트 단주실험을 통한 유사동적실험기법에 관한 연구”, 석사학위논문, 한양대학교.

[49] 허무원, 천영수, 황재승, 이강석 (2015) “유사동적실험에 의한 외부접합형 카고메 트러스 제진장치가 설치된 RC 라멘조 공동주택의 내진성능 평가”, 한국구조물진단유지관리공학회, 제 19권, 제1호, pp 23-34.

[50] 최인규 (2008) “하이브리드실험 기법을 이용한 소형강재기둥의 지진거동모사”, 석사학위논문, 명지대학교.

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[51] 대한건축학회, 건축구조설계기준, 기문당, 2009.

[52] 대한건축학회, 제진구조설계지침 및 예제집, 기문당, 2010.

[53] Chopra. A.k., Dynamics of Structures, PEARSONEDUCATIONKOREA, 2004.

[54] Thewalt, C. R., & Roman, M. (1994), "Performance Parameters for pseudodynamic tests." J. Struct. Eng., 120(9), pp 2768-2781.

[55] Uang. C. H. & Bertero, V. V. (1990). "Evaluation of seismic energy in structures." Earthquake Eng. Struct. Dyn., 19(1), pp 77-90.

[56] Mosqueda. G., et al., (2007), "Real-Time Error Monitoring for Hybrid Simulation. Part I: Methodology and Experimental Verification." Journal of structural engineering, 133(8), pp 1100-1108.

[57] Horiuchi. T., et al., (1999) " Real-time hybrid experimental system with actuator delay compensation and its application to a piping system with energy absorber.", Earthquake Engineering and structural dynamics, 28, PP 1121-1141

[58] Gultom. R. J., & Ma. Q. T., (2014), " Intuitive real-time compensation algorithm for actuator control errors in fast psd test." Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, July 21-25.

[59] Ahmadizadeh. M., & Mosqueda. G., (2009), "Online energy-based error indicator for the assessment of numerical and experimental errors in a hybrid simulation." Engineering Structures. 31(9), PP 1987-1996

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

부록 A

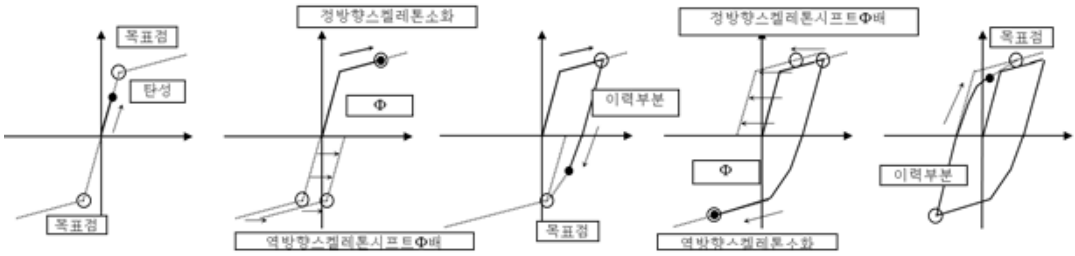
- Skelton Shift Model -

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

A. Skeleton Shift Model

스켈레톤·시프트 모델은 반복 하중을 받는 강구조의 탄소성 거동에 큰 영향을 미치는 재료의 변형 경화에 의한 내력상승, 국소 불안정 현상에 의한 내력저하 및 강성의 연화현상 등을 고려한 모델이다. 일반적으로 철골부재와 골조이력곡선을 스켈레톤 부분과 이력 부분으로 분할하여, 각 방향의 스켈레톤 부분만을 연결하면, 단조재하곡선과 양호하게 대응하는 것으로 알려져 있다. 이 점에 유의하여, 스켈레톤·시프트 모델은 미리 설정된 정방향, 역방향의 스켈레톤 곡선에 각각 목표점을 마련해 임의의 변위 이력에 대해 다음의 그림 A.1과 같은 컨트롤에 의해 복원력을 모의한다.



[그림 A.1] 스켈레톤·쉬프트 모델

재하점이 탄성 한계를 지나서 스켈레톤 위를 추적할 때, 그 스켈레톤의 목표점은 재하점과 동시에 이동하고 갱신한다. 이 때, 반대쪽의 스켈레톤을 반대쪽의 목표점과 함께 재하점의 경험 소성변형량의 Φ배만큼 변형 축을 따라 이동시킨다. 스켈레톤의 재하에 따라 이력부분이 시작되면, 진행방향(재하 방향)의 스켈레톤 위의 목표점을 목표로 이력부분의 곡선이 결정된다.

그림 A.1과 같이 Φ는 이력의 비정상성을 나타내는 매개 변수로Φ = 1일 경우 비선형 이력 부분을 무시하고 선형 탄성거동을 나타낸다. 또한, Φ= 0이라고 하면 통상의 Ramberg - Osgood 모델처럼 일정진폭 하에서는 2 사이클부터 정상적인 이력 루프에 도달하는 모델이 된다.

연강 재료의 단축 반복의 σ-ε 관계에 적용시킨 예제에서는 Φ값이 0.8 전후로 실용상 충분한 결과를 준 사례가 보고되고 있다. 또한, 반강접 접합부의 이력곡선에 적

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

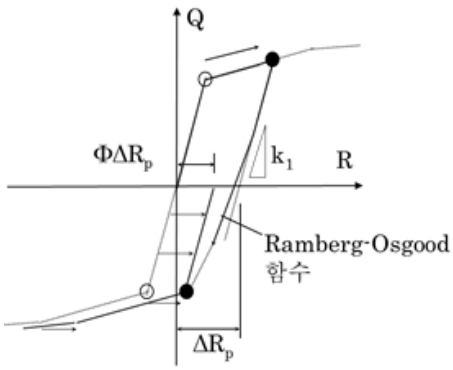
용시킨 예제에서 Φ=0~0.3 정도의 비교적 작은 값이 사용되고 있다.

1) 골조의 스켈레톤 곡선

반복재하실험 결과에서 얻은 이력곡선을 스켈레톤부 · 재하부 · 연화부로 분할한다. 여기서는 간편하게서 스켈레톤 곡선을 트리리니어 스켈레톤으로 평가한다.

2) 스켈레톤 곡선의 목표점과 그 갱신 (A.2)

스켈레톤 · 시프트 모델을 이용할 때, 인장측과 압축측에서 이력곡선이 목표로 하는 점, 즉 목표 지점을 정할 필요가 있다. 본 해석에서 초기 목표점은 모델화 된 트리리니어 모델의 첫 번째 접점으로 한다. 또한 목표점의 갱신은 단조재하실험결과에 따른다.



[그림 A.2] 목표점과 그 갱신

3) 이력곡선 함수와 구하는 방법

재하시 마다 재하점과 앞으로의 지향 방향에 있는 목표점을 이용하여 이력곡선을 정할 필요가 있다. 본 해석에서는 Ramberg-Osgood 함수식을 이용하여 이력곡선을 결정하였다. 다음은 Ramberg-Osgood 함수식에 대해 설명하였다.

Ramberg-Osgood 함수식은 다음 식과 같은 증분 형식으로 표현할 수 있다.

$$\triangle Q_i = \frac{\triangle R_i}{a + b\gamma \left| Q - Q_H \right|^{\gamma - 1}} \qquad (A.1)$$

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

여기서,

$\triangle Q_i$: i단계에서 복원력 증분

$\triangle R_i$: I단계에서 변형각 증분

Q: 임의점으로의 복원력

Q_H: 현재 재하점에서의 복원력

γ: 곡선 계수

계수 a, b에 대해서는 다음 두 조건을 사용하여 식 (3.2)에서 결정된다.

- 현재의 재하점에서의 접선 강성은 스켈레톤 곡선의 초기 탄성 기울기와 같다.
- 기준점(목표 지점)을 통과한다.

$$a = \frac{1}{k_1} \tag{A.2}$$

$$b = \frac{1}{|Q_s - Q_H|^{\gamma-1}}\left(\frac{1}{k_{HS}} - \frac{1}{k_1}\right)$$

$$k_{HS} = \frac{Q_s - Q_H}{R_s - R_H}$$

여기서,

k_1: 스켈레톤 위의 제 1 기울기

Q_s: 목표점에서의 복원력

R_s: 목표점에서의 변형각

R_H: 현재 재하점에서의 변형각

Collection @ chosun

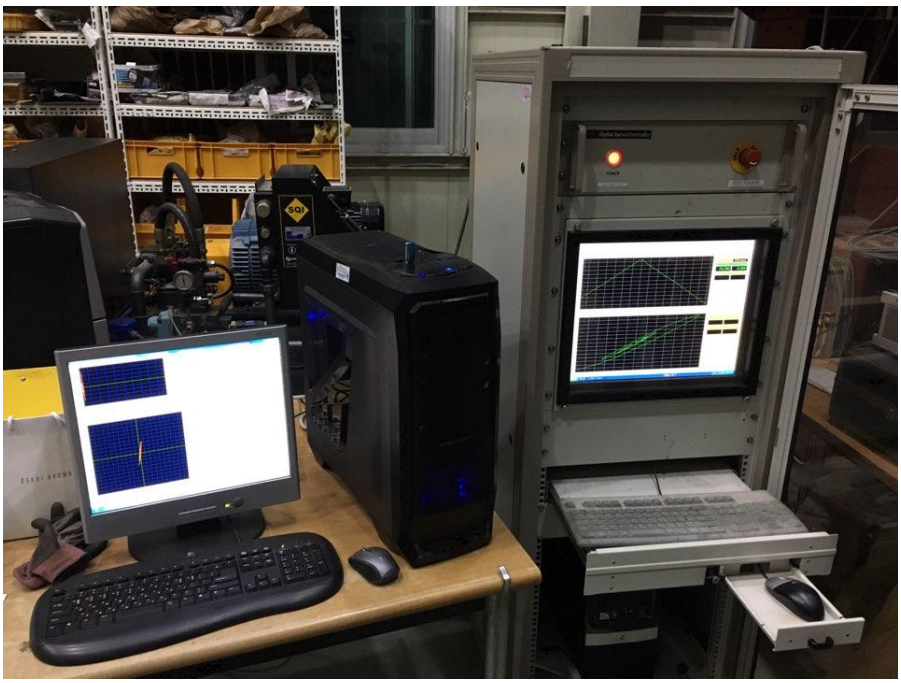
조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

부록 B

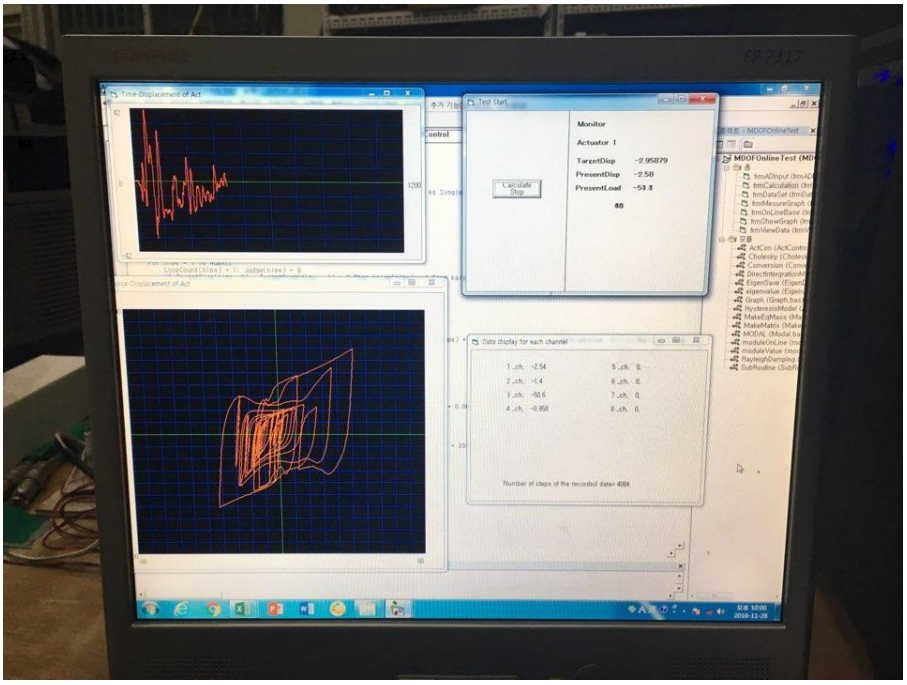
- 실험 전경 -

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



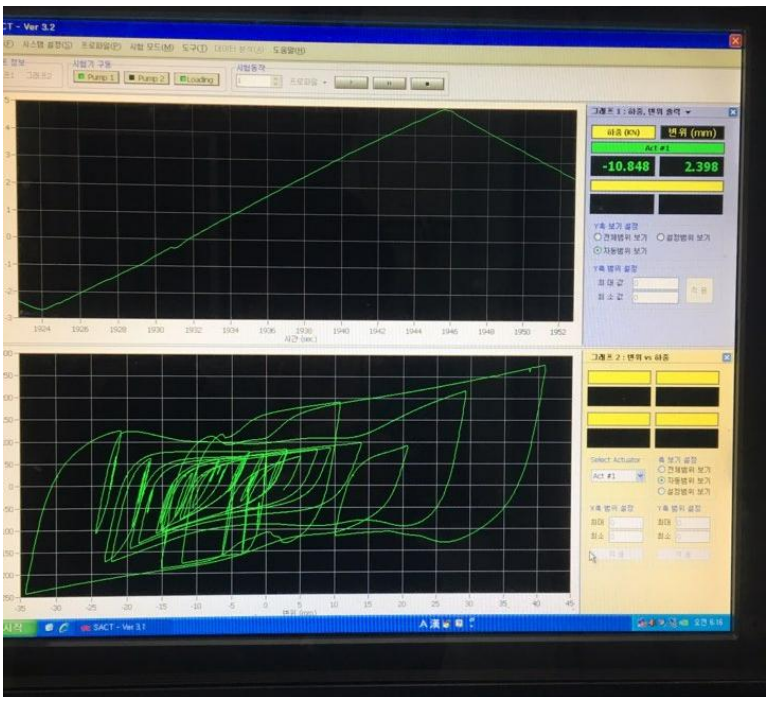
[그림 B.1] 유사동적 온라인 실험 전경



[그림 B.2] 유사동적 온라인 실험 프로그램 전경

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY



[그림 B.3] 유사동적 온라인 실험 제어기 전경

[그림 B.4] 전단패널댐퍼 파괴 양상

Collection @ chosun