

20CTAP  
-C15192  
9-02

보안 과제( ), 일반 과제( ☒ ) / 공개( ☒ ), 비공개( )발  
간등록번호() 국토교통기술촉진 연구 사업 제2차연도 최종 보  
고서

R&D / 20CTAP-C151929-02

# 국토교통기술촉진 연구사업 최종보고서

2021.03.05.

주관연구기관 / 연세대학교 산학협력단

국  
토  
교  
통  
기  
술  
촉  
진  
연  
구  
사  
업

최  
종  
보  
고  
서

2021

국토교통부  
국토교통과학기술진흥원

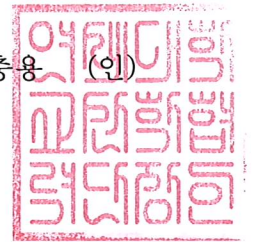
## 제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘사용중인 조적조 학교선물의 내진 보수·보강을 위한 저비용 분사형 PU재료 및 시공기술 개발’ (연구개발 기간 : 2019.04.15 ~ 2020.12.31) 과제의 최종보고서(보완본) 1부를 제출합니다.

2020.03.05.

주관연구기관명 : 연세대학교 산학협력단 (대표자) 이충용 (인)



주관연구기관책임자: 김장호

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에  
동의합니다.

## 보고서 요약서

|                   |                       |                                                        |                            |             |                                                             |
|-------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------|-------------|-------------------------------------------------------------|
| 과제 고유 번호          | 20CTAP-C15<br>1929-02 | 해당 단계<br>연구 기간                                         | 2019.04.15.~<br>2020.12.31 | 단계구분        | 2차연도/<br>2차연도                                               |
| 연구사업명             | 중사업명                  | 국토교통기술촉진연구사업                                           |                            |             |                                                             |
|                   | 세부사업명                 |                                                        |                            |             |                                                             |
| 연구과제명             | 대과제명                  | 사용중인 조적조 학교건물의 내진 보수·보강을 위한 저비용<br>분사형 PU 재료 및 시공기술 개발 |                            |             |                                                             |
|                   | 세부과제명                 |                                                        |                            |             |                                                             |
| 연구책임자             | 김장호                   | 해당단계<br>참여연구원 수                                        | 총: 6명<br>내부: 6명<br>외부: 명   | 해당단계<br>연구비 | 정부:206,000천원<br>민간: 천원<br>정부외: 천원<br>상대국: 천원<br>계:206,000천원 |
|                   |                       | 총 연구기간<br>참여연구원 수                                      | 총: 10명<br>내부: 9명<br>외부: 1명 | 총 연구비       | 정부:370,000천원<br>민간: 천원<br>정부외: 천원<br>상대국: 천원<br>계:370,000천원 |
| 연구기관명 및<br>소속 부서명 | 연세대학교 산학협력단           |                                                        |                            | 참여기업명       |                                                             |
| 국제공동연구            | 상대국명:                 |                                                        |                            | 상대국 연구기관명:  |                                                             |
| 위탁연구              | 연구기관명:                |                                                        |                            | 연구책임자:      |                                                             |

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

|                         |                                                                                                                |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 연구개발성과의<br>보안등급 및<br>사유 | 본 연구의 성과는 폴리우레아 재료 및 공법을 개발하는 기술로 기초원천 연구<br>단계이므로, 특허나 신기술과 관련하여 정보가 공개되어도 무방한 과제임으로 보<br>안조치가 필요하지 않다고 판단된다. |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### 9대 성과 등록·기탁번호

| 구분           | 논문 | 특허 | 보고서<br>원문 | 연구시설<br>· 장비 | 기술요약<br>정보 | 소프트<br>웨어 | 화합물 | 생명자원     |          | 신품종 |    |
|--------------|----|----|-----------|--------------|------------|-----------|-----|----------|----------|-----|----|
|              |    |    |           |              |            |           |     | 생명<br>정보 | 생물<br>자원 | 정보  | 실물 |
| 등록·기<br>탁 번호 | 2  | 1  | 2         |              |            |           |     |          |          |     |    |

### 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

| 구입기관 | 연구시설<br>· 장비명 | 규격<br>(모델명) | 수량 | 구입연월일 | 구입가격<br>(천원) | 구입처<br>(전화) | 비고<br>(설치장소) | NTIS<br>등록번호 |
|------|---------------|-------------|----|-------|--------------|-------------|--------------|--------------|
|      |               |             |    |       |              |             |              |              |
|      |               |             |    |       |              |             |              |              |

요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)

보고서 면수: 198

## 요약문

| 연구의<br>목적 및 내용            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 조적식 구조물(토목, 건축)에 적용 가능한 내진 보수·보강용 폴리우레아 재료개발 및 스프레이식 폴리우레아 보수·보강공법 시스템 개발을 통해 조적식 구조물의 저비용 급속 내진보강기술 개발</li> <li>• 조적식 구조물에 적용가능한 보수·보강용 폴리우레아의 최적 배합비 도출</li> <li>• 폴리우레아 분사형 스프레이 노즐 시스템 개선</li> <li>• 보수·보강용 폴리우레아 재료성능 평가를 통한 물성 검증</li> <li>• 조적식 구조물 벽체 축소부재의 휨강도 및 진동대 실험을 통한 내진성능 검증</li> <li>• 실제 조적식 구조물의 테스트 베드(Test-bed) 구축을 통한 현장 적용성 평가</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                  |           |               |                  |           |     |          |          |     |    |    |    |    |           |             |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------|---------------|------------------|-----------|-----|----------|----------|-----|----|----|----|----|-----------|-------------|------------|-----------|-----|------|--|-----|--|----------|----------|----|----|---------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 연구개발성과                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 조적식 구조물에 적용 가능한 보수·보강용 폴리우레아 최적 배합비율 개발</li> <li>• 보수·보강용 폴리우레아 도포를 위한 스프레이 분사성능 정량화</li> <li>• 조적식 구조물 벽체 축소모형 내진성능평가 및 관련 데이터 확보</li> <li>• 노후 조적식 구조물의 폴리우레아 보수·보강기법 현장적용 가능성 검증</li> <li>• 저비용, 고효율의 내진보강성능기법 개발</li> </ul> <p>&lt;예상되는 연구개발성과 유형&gt;</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">구분</th><th rowspan="2">논문</th><th rowspan="2">특허</th><th rowspan="2">보고서<br/>원문</th><th rowspan="2">연구시설·<br/>장비</th><th rowspan="2">기술요약<br/>정보</th><th rowspan="2">소프트웨<br/>어</th><th rowspan="2">화합물</th><th colspan="2">생명자원</th><th colspan="2">신품종</th></tr> <tr> <th>생명<br/>정보</th><th>생물<br/>자원</th><th>정보</th><th>실물</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>예상성과<br/>(N/Y)</td><td>Y</td><td>Y</td><td>Y</td><td>N</td><td>Y</td><td>N</td><td>Y</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td></tr> </tbody> </table> |                  |           |               |                  |           |     |          |          |     |    | 구분 | 논문 | 특허 | 보고서<br>원문 | 연구시설·<br>장비 | 기술요약<br>정보 | 소프트웨<br>어 | 화합물 | 생명자원 |  | 신품종 |  | 생명<br>정보 | 생물<br>자원 | 정보 | 실물 | 예상성과<br>(N/Y) | Y | Y | Y | N | Y | N | Y | N | N | N | N |
| 구분                        | 논문                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 특허               | 보고서<br>원문 | 연구시설·<br>장비   | 기술요약<br>정보       | 소프트웨<br>어 | 화합물 | 생명자원     |          | 신품종 |    |    |    |    |           |             |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                  |           |               |                  |           |     | 생명<br>정보 | 생물<br>자원 | 정보  | 실물 |    |    |    |           |             |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 예상성과<br>(N/Y)             | Y                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Y                | Y         | N             | Y                | N         | Y   | N        | N        | N   | N  |    |    |    |           |             |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 연구개발성과의<br>활용계획<br>(기대효과) | <p><input type="checkbox"/> <b>기술적 측면</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 조적식 구조물에 적용·가능한 보수·보강용 폴리우레아 내진 보강재 국내 최초 개발</li> <li>• 신재료 및 보수·보강 시스템 개발로 인한 내진성능 향상</li> <li>• 지진에 의한 구조물 안전성 확보와 저비용의 유지·보수 효과 기대</li> </ul> <p><input type="checkbox"/> <b>경제적 측면</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 노후화된 조적식 구조물에 적용 가능한 고부가가치 보강재료 핵심 기술 확보</li> <li>• 조적식 구조물 적용을 통한 고분자 폴리머계 보강재료의 응용분야 다양화</li> <li>• 급속시공이 가능하여 약 20% 이상의 공기단축 효과</li> <li>• 구조내진성능 보강효과로 인한 연간 약 10억 이상의 보수비용 절약 가능</li> </ul> <p><input type="checkbox"/> <b>정책·산업적 측면</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 지진 발생 시 국민의 생명보호와 재산, 사회적 혼란 방지</li> <li>• 기존 비내진구조물의 구조안전성 확보를 통한 사회적 안전성 증대</li> <li>• 내진보강분야 전문인력 양성 및 후속 연구의 기초자료로 활용 가능</li> <li>• 보수·보강용 폴리우레아는 내진안전성 및 기본적인 방수성능도 포함되어 있으므로, 타 산업의 적용을 통한 동반성장을 기대</li> </ul>                                    |                  |           |               |                  |           |     |          |          |     |    |    |    |    |           |             |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 국문핵심어<br>(5개 이내)          | 조적식 구조물                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 내진보강             | 폴리우레아     | 노즐시스템         | 보수보강             |           |     |          |          |     |    |    |    |    |           |             |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 영문핵심어<br>(5개 이내)          | Brick structures                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Polymer material | Poly Urea | Nozzle System | Seismic retrofit |           |     |          |          |     |    |    |    |    |           |             |            |           |     |      |  |     |  |          |          |    |    |               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |

## < 목 차 >

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 1. 연구개발과제의 개요 .....         | 1   |
| 1-1 연구개발의 개요 .....          | 1   |
| 1-2 연구 개발 대상의 국내·외 현황 ..... | 8   |
| 2. 연구수행내용 및 성과 .....        | 14  |
| 2-1 1차년도 연구수행 내용 및 결과 ..... | 14  |
| 2-2 2차년도 연구수행 내용 및 결과 ..... | 62  |
| 3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ..... | 153 |
| 3-1 목표 달성도 평가 .....         | 153 |
| 3-2 관련 분야의 기여도 .....        | 155 |
| 3-3 기존 기술 대비 차별성 .....      | 156 |
| 3-4 연구성과 활용 방안 .....        | 162 |
| 3-5 최종성과물 일람 .....          | 163 |
| 3-6 연구개발 핵심성과 요약 .....      | 164 |
| 4. 연구개발성과의 활용 계획 등 .....    | 169 |
| 4-1 최종연구성과 활용계획 .....       | 169 |
| 붙임. 참고 문헌 및 발표자료 .....      | 180 |

## 〈 표 목 차 〉

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| 표 1.1 조적식 구조물에 적용되는 다양한 내진보강기법 .....                              | 7  |
| 표 1.2 국내 시설물별 내진실태 현황 (단위 : 개소) .....                             | 10 |
| 표 1.3 기존에 수행되었던 주요 연구주제와의 차별성 .....                               | 11 |
| 표 2.1 저장도 콘크리트 압축강도 시험결과 (단위: MPa) .....                          | 23 |
| 표 2.2 고강도 콘크리트 압축강도 시험결과 (단위: MPa) .....                          | 23 |
| 표 2.3 무도포 프리즘 압축강도 시험결과 .....                                     | 25 |
| 표 2.4 MONOMERIC MDI 프리즘 압축강도 시험결과 .....                           | 25 |
| 표 2.5 MODIFIED MDI 프리즘 압축강도 시험결과 .....                            | 25 |
| 표 2.6 POLYMERIC MDI 프리즘 압축강도 시험결과 .....                           | 25 |
| 표 2.7 무도포 사인장 강도 시험결과 .....                                       | 30 |
| 표 2.8 MONOMERIC MDI 사인장 강도 시험결과 .....                             | 30 |
| 표 2.9 MODIFIED MDI 사인장 강도 시험결과 .....                              | 30 |
| 표 2.10 POLYMERIC MDI 사인장 강도 시험결과 .....                            | 30 |
| 표 2.11 무도포 휨강도 시험결과 .....                                         | 37 |
| 표 2.12 MONOMERIC MDI 휨강도 시험결과 .....                               | 37 |
| 표 2.13 MODIFIED MDI 휨강도 시험결과 .....                                | 37 |
| 표 2.14 POLYMERIC MDI 휨강도 시험결과 .....                               | 37 |
| 표 2.15 무도포 휨강도 시험결과 .....                                         | 41 |
| 표 2.16 MONOMERIC MDI 휨강도 시험결과 .....                               | 41 |
| 표 2.17 NSM1 휨강도 시험결과 .....                                        | 42 |
| 표 2.18 NSM2 휨강도 시험결과 .....                                        | 42 |
| 표 2.19 3차 MONOMERIC MDI 휨강도 시험결과 .....                            | 45 |
| 표 2.20 폴리우레아 산환경 노출 전·후 인장강도 및 신장률 .....                          | 47 |
| 표 2.21 제논 아크 광원에 의한 노출 시험방법의 시험조건 (KS M ISO 4892-2) .....         | 49 |
| 표 2.22 KS F 2274:2018 (자외선 노출), KS F 4922:2007 (인장강도 및 신장률) ..... | 50 |
| 표 2.23 탄산화 노출시험 결과 .....                                          | 52 |
| 표 2.24 동결융해 시험 결과 .....                                           | 56 |

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| 표 2.25 Reactor E-10HP 장비 사양 .....           | 57  |
| 표 2.26 무도포 휨강도 시험결과 .....                   | 64  |
| 표 2.27 BFP 휨강도 시험결과 .....                   | 65  |
| 표 2.28 BFPS 휨강도 시험결과 .....                  | 65  |
| 표 2.29 BFPP 휨강도 시험결과 .....                  | 65  |
| 표 2.30 NSM 휨강도 시험결과 .....                   | 65  |
| 표 2.31 조적벽체 제원 .....                        | 69  |
| 표 2.32 상하부 Con' c 제원 .....                  | 71  |
| 표 2.33 고정 Bracket 제원 .....                  | 73  |
| 표 2.34 El - Centro 지진 ※ .....               | 76  |
| 표 2.35 시험체 보강방법 .....                       | 81  |
| 표 2.36 Sensor 구분 (종류) .....                 | 83  |
| 표 2.37 시험체 위치 .....                         | 84  |
| 표 2.38 Sensor 위치 .....                      | 85  |
| 표 2.39 가속도계 제조사명 .....                      | 85  |
| 표 2.40 조적벽체 내진안정성 시험순서 .....                | 86  |
| 표 2.41 시험체별 최대 변위 및 상대 변위 .....             | 122 |
| 표 2.42 시험체별 최대 변위 및 비교(무보강, PU) .....       | 123 |
| 표 2.43 시험체별 최대 변위 및 비교(GFRP, GFRP+PU) ..... | 123 |
| 표 2.44 시험체별 최대 변위 및 상대 변위 .....             | 124 |
| 표 2.45 실험비디오 목록 .....                       | 137 |
| 표 2.46 실험비디오 목록 (계속) .....                  | 138 |
| 표 2.47 실험비디오 목록 (계속) .....                  | 139 |
| 표 2.48 실험비디오 목록 (계속) .....                  | 140 |
| 표 2.49 실험비디오 목록 (계속) .....                  | 141 |
| 표 2.50 데이터 비교 .....                         | 144 |

## 〈    그림    목    차    〉

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| 그림 1.1 연도별 지진발생추이(기상청, 2017) .....                | 5  |
| 그림 1.2 대한민국 지진 분포 및 단층 추정도(기상청, 2017) .....       | 5  |
| 그림 1.3 조적식 구조물의 지진에 의한 피해 .....                   | 6  |
| 그림 1.4 조적식 구조물 적용가능한 보수·보강용 폴리우레아 개발 .....        | 8  |
| 그림 2.1 폴리우레아 합성 과정 .....                          | 18 |
| 그림 2.2 폴리우레아 하중-변위 실험결과 .....                     | 20 |
| 그림 2.3 폴리우레아 물성실험 .....                           | 20 |
| 그림 2.4 PU보강부재 압축실험 .....                          | 21 |
| 그림 2.5 저장도 콘크리트 압축강도 .....                        | 22 |
| 그림 2.6 고강도 콘크리트 압축강도 .....                        | 22 |
| 그림 2.7 프리즘 압축강도 시험체 제원 .....                      | 24 |
| 그림 2.8 프리즘 압축강도 시험 .....                          | 24 |
| 그림 2.9 NON PU 프리즘 압축강도 시험 하중-변위 그래프 .....         | 26 |
| 그림 2.10 MONOMERIC MDI 프리즘 압축강도 시험 하중-변위 그래프 ..... | 26 |
| 그림 2.11 MODIFIED MDI 프리즘 압축강도 시험 하중-변위 그래프 .....  | 27 |
| 그림 2.12 POLYMERIC MDI 프리즘 압축강도 시험 하중-변위 그래프 ..... | 27 |
| 그림 2.13 배합별 프리즘 압축강도 시험 하중-변위 그래프 .....           | 28 |
| 그림 2.14 사인장강도 시험 개념도 .....                        | 29 |
| 그림 2.15 사인장강도 시험 .....                            | 29 |
| 그림 2.16 NON PU 사인장강도 시험 하중-변위 그래프 .....           | 31 |
| 그림 2.17 MONOMERIC MDI 사인장강도 시험 하중-변위 그래프 .....    | 31 |
| 그림 2.18 MODIFIED MDI 사인장강도 시험 하중-변위 그래프 .....     | 32 |
| 그림 2.19 POLYMERIC MDI 사인장강도 시험 하중-변위 그래프 .....    | 33 |
| 그림 2.20 배합별 사인장 강도 시험 하중-변위 그래프 .....             | 33 |
| 그림 2.21 PU 보강 부재 휨 실험 .....                       | 34 |
| 그림 2.22 휨강도 시험 준비과정 .....                         | 35 |
| 그림 2.23 휨강도 시험 .....                              | 36 |
| 그림 2.24 NON PU 휨강도 시험 하중-변위 그래프 .....             | 38 |

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| 그림 2.25 MONOMERIC MDI 휨강도 시험 하중-변위 그래프 .....                | 38 |
| 그림 2.26 MODIFIED MDI 휨강도 시험 하중-변위 그래프 .....                 | 39 |
| 그림 2.27 POLYMERIC MDI 휨강도 시험 하중-변위 그래프 .....                | 39 |
| 그림 2.28 NSM 공법의 개념도 .....                                   | 40 |
| 그림 2.29 콘크리트 휨 강도 시험 .....                                  | 41 |
| 그림 2.30 NON PU 휨강도 시험 하중-변위 그래프 .....                       | 42 |
| 그림 2.31 MONOMERIC MDI 휨강도 시험 하중-변위 그래프 .....                | 43 |
| 그림 2.32 NSM1 휨강도 시험 하중-변위 그래프 .....                         | 43 |
| 그림 2.33 NSM2 휨강도 시험 하중-변위 그래프 .....                         | 44 |
| 그림 2.34 MONOMERIC MDI 휨강도 공인성적서 .....                       | 45 |
| 그림 2.35 산(acid) 환경 노출 시험 .....                              | 46 |
| 그림 2.36 산(acid) 환경 노출시험 공인성적서 .....                         | 48 |
| 그림 2.37 자외선 노출 시험 .....                                     | 49 |
| 그림 2.38 자외선 노출시험 공인성적서 .....                                | 50 |
| 그림 2.39 탄산화 노출 시험 .....                                     | 51 |
| 그림 2.40 탄산화 노출 시험 결과 .....                                  | 52 |
| 그림 2.41 산(acid) 환경 노출시험 공인성적서 .....                         | 53 |
| 그림 2.42 동결융해 시험 .....                                       | 54 |
| 그림 2.43 동결융해 시험 결과 .....                                    | 55 |
| 그림 2.44 Reactor E-10HP .....                                | 56 |
| 그림 2.45 에어퍼지 스프레이 건 .....                                   | 57 |
| 그림 2.46 에어퍼지 스프레이건 분사성능 .....                               | 57 |
| 그림 2.47 액상퍼지 스프레이 건 .....                                   | 58 |
| 그림 2.48 액상퍼지 스프레이건 분사성능 .....                               | 60 |
| 그림 2.49 메커니컬 퍼지 스프레이 건 .....                                | 60 |
| 그림 2.50 메커니컬 퍼지 스프레이건 분사성능 .....                            | 61 |
| 그림 2.51 조적식 부재 휨 실험 .....                                   | 62 |
| 그림 2.52 (a) BFN, (b) BFP, (c) BFPS, (d) BFPP, (e) NSM ..... | 63 |
| 그림 2.53 조적식 휨 부재 강도 시험 .....                                | 64 |
| 그림 2.54 무보강 휨강도 시험 하중-변위 그래프 .....                          | 66 |
| 그림 2.55 BFP 휨강도 시험 하중-변위 그래프 .....                          | 66 |

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 그림 2.56 BFPS 휨강도 시험 하중-변위 그래프 ..... | 67 |
| 그림 2.57 BFPF 휨강도 시험 하중-변위 그래프 ..... | 67 |
| 그림 2.58 NSM 휨강도 시험 하중-변위 그래프 .....  | 68 |
| 그림 2.59 조적 벽체 치수 .....              | 69 |
| 그림 2.60 벽체 및 하부 Slab Con' c .....   | 70 |
| 그림 2.61 벽체 측면 및 상부 사진 .....         | 70 |
| 그림 2.62 상부 Mass Con' c .....        | 71 |
| 그림 2.63 하부 Slab Con' c 도면 .....     | 72 |
| 그림 2.64 상부 고정 Bracket 도면 .....      | 72 |
| 그림 2.65 하부 고정 Bracket 도면 (상단) ..... | 74 |
| 그림 2.66 하부 고정 Bracket 도면 (하단) ..... | 74 |
| 그림 2.67 조적벽체 정면 및 측면 도면 .....       | 75 |
| 그림 2.68 피시험체 구성품 .....              | 75 |
| 그림 2.69 El - Centro 지진파형 .....      | 76 |
| 그림 2.70 보호 Bracket 체결 도면 .....      | 77 |
| 그림 2.71 보호 Bracket 체결 후 운반 모습 ..... | 78 |
| 그림 2.72 KRRI 진동대 .....              | 79 |
| 그림 2.73 측정장비 (eDAQ) .....           | 80 |
| 그림 2.74 시험체 명명법 .....               | 81 |
| 그림 2.75 시험체 Type .....              | 82 |
| 그림 2.76 센서 명칭 표기법 .....             | 83 |
| 그림 2.77 2개 시험체 동시 설치 .....          | 84 |
| 그림 2.78 단독 시험체 설치 .....             | 85 |
| 그림 2.79 Dummy Mass Setting .....    | 87 |
| 그림 2.80 Reference Frame 설치 .....    | 87 |
| 그림 2.81 시험체 설치 평면도 .....            | 88 |
| 그림 2.82 MWN-1 .....                 | 89 |
| 그림 2.83 MWN-2 .....                 | 89 |
| 그림 2.84 MWN-3 .....                 | 89 |
| 그림 2.85 MWP2-1 .....                | 90 |
| 그림 2.86 MWP2-2 .....                | 90 |

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 그림 2.87 MWP4-1 .....                    | 90  |
| 그림 2.88 MWP4-2 .....                    | 90  |
| 그림 2.89 MWF5-2 .....                    | 91  |
| 그림 2.90 MWF5-1 .....                    | 91  |
| 그림 2.91 MWPF10-1 .....                  | 91  |
| 그림 2.92 MWPF5-1 .....                   | 91  |
| 그림 2.93 MWPF5-2 .....                   | 92  |
| 그림 2.94 하부고정 Bracket (좌/우 센서배치) .....   | 93  |
| 그림 2.95 MWN-1@0.3g 파괴 시 주요 측정치 .....    | 94  |
| 그림 2.96 MWN-1@0.4g 파괴 시 주요 측정치 .....    | 94  |
| 그림 2.97 MWN-2@0.4g 파괴 시 주요 측정치 .....    | 95  |
| 그림 2.98 MWN-2@0.5g 파괴 시 주요 측정치 .....    | 95  |
| 그림 2.99 MWN-3@0.3g 파괴 시 주요 측정치 .....    | 96  |
| 그림 2.100 MWN-3@0.4g 파괴 시 주요 측정치 .....   | 97  |
| 그림 2.101 MWP2-1@0.6g 파괴 시 주요 측정치 .....  | 99  |
| 그림 2.102 MWP2-1@0.7g 파괴 시 주요 측정치 .....  | 99  |
| 그림 2.103 MWP2-1@0.8g 파괴 시 주요 측정치 .....  | 100 |
| 그림 2.104 MWP2-2@0.7g 파괴 시 주요 측정치 .....  | 101 |
| 그림 2.105 MWP2-2@0.8g 파괴 시 주요 측정치 .....  | 102 |
| 그림 2.106 MWF4-1@0.5g 파괴 시 주요 측정치 .....  | 104 |
| 그림 2.107 MWF4-1@0.6g 파괴 시 주요 측정치 .....  | 104 |
| 그림 2.108 MWF4-2@0.6g 파괴 시 주요 측정치 .....  | 105 |
| 그림 2.109 MWF4-2@0.7g 파괴 시 주요 측정치 .....  | 106 |
| 그림 2.110 Mortra 충전홀 .....               | 108 |
| 그림 2.111 MWF5 균열발생 패턴 비교 .....          | 108 |
| 그림 2.112 MWF5-1@0.5g 파괴 시 주요 측정치 .....  | 109 |
| 그림 2.113 MWF5-1@0.6g 파괴 시 주요 측정치 .....  | 110 |
| 그림 2.114 MWF5-2@0.4g 파괴 시 주요 측정치 .....  | 111 |
| 그림 2.115 MWF5-2@0.5g 파괴 시 주요 측정치 .....  | 112 |
| 그림 2.116 MWPF5-1@0.9g 파괴 시 주요 측정치 ..... | 114 |
| 그림 2.117 MWPF5-1@1.0g 파괴 시 주요 측정치 ..... | 115 |

|                                               |     |
|-----------------------------------------------|-----|
| 그림 2.118 MWPF5-2@0.8g 파괴 시 주요 측정치 .....       | 116 |
| 그림 2.119 MWPF5-2@0.9g 파괴 시 주요 측정치 .....       | 117 |
| 그림 2.120 MWPF10-1@0.9g 파괴 시 주요 측정치 .....      | 119 |
| 그림 2.121 MWPF10-1@1.0g 파괴 시 주요 측정치 .....      | 120 |
| 그림 2.122 MWN-1 시험체 파괴 후 사진 및 균열도 .....        | 125 |
| 그림 2.123 MWP4-1 시험체 파괴 후 사진 및 균열도 .....       | 126 |
| 그림 2.124 MWP2-1 시험체 파괴 후 사진 및 균열도 .....       | 127 |
| 그림 2.125 MWN-2 시험체 파괴 후 사진 및 균열도 .....        | 128 |
| 그림 2.126 MWPF5-1 시험체 파괴 후 사진 및 균열도 .....      | 129 |
| 그림 2.127 MWN-3 시험체 파괴 후 사진 및 균열도 .....        | 130 |
| 그림 2.128 MWP4-2 시험체 파괴 후 사진 및 균열도 .....       | 131 |
| 그림 2.129 MWPF10-1 시험체 파괴 후 사진 및 균열도 .....     | 132 |
| 그림 2.130 MWF5-1 시험체 파괴 후 사진 및 균열도 .....       | 133 |
| 그림 2.131 MWPF5-2 시험체 파괴 후 사진 및 균열도 .....      | 134 |
| 그림 2.132 MWF5-2 시험체 파괴 후 사진 및 균열도 .....       | 135 |
| 그림 2.133 MWP2-2 시험체 파괴 후 사진 및 균열도 .....       | 136 |
| 그림 2.134 Boundary Condition of modeling ..... | 143 |
| 그림 2.135 출력 가속도 비교 그래프 .....                  | 144 |
| 그림 2.136 중앙부 변위 비교 그래프 .....                  | 144 |
| 그림 2.137 응력 발생 모식도 .....                      | 144 |

# 1. 연구 개발과제의 개요

## 1-1. 연구 개발의 개요

□ 지진 발생빈도 및 인명·재산피해 증가

○ 최근 전 세계적으로 큰 지진이 발생함과 동시에 수많은 인명 및 재산피해가 발생하였으며, 토목 및 건축구조물, 사회기반시설물 등에 심각한 피해가 발생하고 있음. 또한, ‘불의 고리’라고 불리는 환태평양 지진대에 속한 나라의 경우 거의 모든 메가 지진과 지진해일이 주기적으로 발생하고 있음.

○ 불의 고리에 속한 아이티와 칠레의 경우, 규모 7.0 이상의 지진이 발생한 아이티와 규모 8.8의 지진이 발생한 칠레의 지진 규모는 불과 1.8밖에 차이가 발생하지 않지만, 에너지 강도는 그 차이가 500배가 넘는 강한 위력의 지진이 발생하였음. 하지만, 인명 및 재산 피해는 칠레가 약 700명, 아이티는 약 30만명에 달함.

○ 칠레 지진의 피해가 적었던 이유는 규모 8 이상의 강진이 연 1회 이상 발생하고 무감지진을 포함해 연간 200만번의 지진이 발생하는 것에 대비하여 국가적으로 구조물의 내진설계를 강화하고 지진대비체계 시스템이 정확하게 구축되었기 때문임.

○ 우리나라도 2016년 경북 경주에서 규모 5.8의 강진이 발생하여 사상자 48명, 약 107억원의 재산피해가 발생하였으며, 같은 해 10월 말까지 503회의 여진이 발생하였음. 또한, 2017년에는 경북 포항에서 규모 5.4의 강진이 발생하여 사상자 135명, 약 3323억원의 재산피해가 발생하였음.

○ 2017년 기상청 자료에 따르면 그림 1.1에서 보는 바와 같이 2016년 지진(규모 2.0 이상) 발생횟수는 총 252회로 계기관측을 시작한 1978년 이후 가장 많이 발생하였으며, 디지털 방식의 지진관측을 시작한 1999년부터 2017년까지의 지진발생 연평균 횟수인 67.6회보다 약 4배 더 많이 발생한 것으로 나타남.

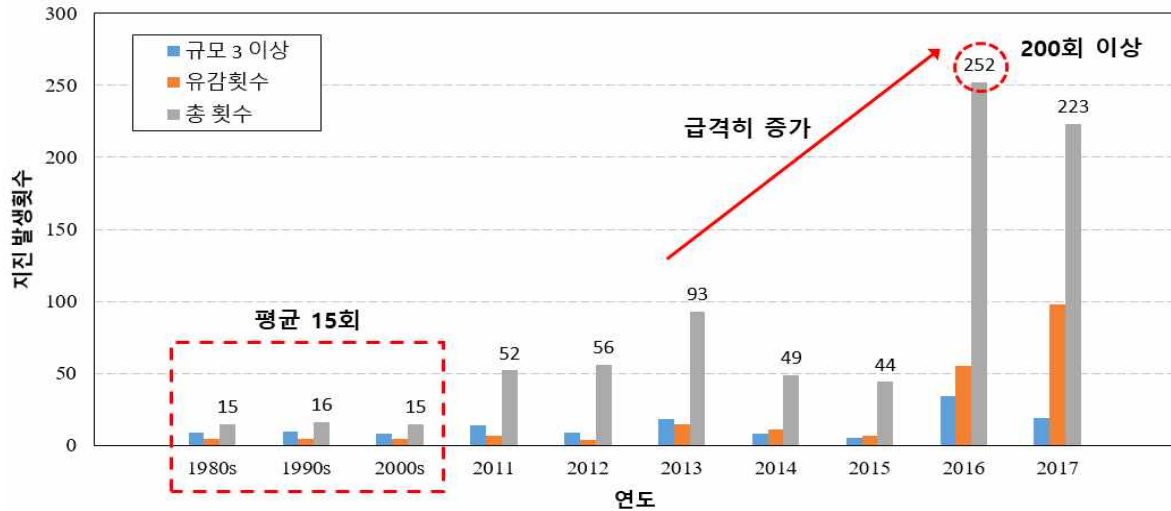
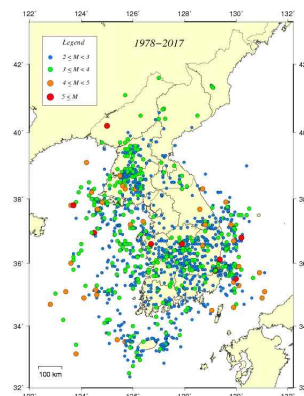


그림 1.1 연도별 지진발생추이(기상청, 2017)

○ 지금까지 한반도는 활동성 판 경계로부터 멀리 떨어져 있어 지진 안전지대로 간주 되어 왔으나, 조사된 지진 통계를 살펴보면 우리나라는 이제 결코 지진의 안전지대가 아님을 확인할 수 있음. 또한, 그림 1.2에서 보는 바와 같이 국내 주요 지역을 통과하는 활성단층이 존재할 가능성이 제기됨에 따라 부지특성에 따른 지표단층 전단에 대한 대비가 있어야 할 것으로 판단됨.



(a) 진앙분포도(1978~2017)



(b) 활성단층 가능성 존재

그림 1.2 대한민국 지진 분포 및 단층 추정도(기상청, 2017)

○ 특히, 우리나라는 1990년 이전까지 기간시설에 대한 내진성능 향상이라는 개념과 내진설계에 관한 개념도 정립되지 않았으며, 기존 기간시설물의 내진성능향상에 관한 연구는 아직도 미미한 실정임. 또한, 내진설계기준이 처음 도입된 1988년 이전에 건설된 대부분의 구조물은 현 내진설계 기준에 부합하지 않으며, 노후화로 인해 지진이 발생할 경우 큰 인명 및 재산피해가 발생할 것으로 판단됨.

□ 조적식 구조물의 내진성능 재검토 필요

○ 지금까지 내진성능에 초점이 맞추어졌던 고층 구조물이나 빌딩, 교량 등과 달리, 그림 1.3에서 보는 바와 같이 일상생활에서 가장 많이 사람이 거주하고 생활하는 학교, 개인주택, 상업건물 등의 공공시설은 비보강 조적조 벽체와 철근 콘크리트 슬래브로 구성되어 있는 조적식 구조물이 대부분임. 이러한 조적식 구조물은 건설이 용이하면서도 충분한 강성을 가지고 있기 때문에 세계적으로 저층 구조물에 많이 사용되어 왔으나, 내진성능에 매우 취약하다는 단점이 있음.

○ 또한, 조적식 구조물은 전 세계적으로 중·저층 주거 및 상업시설, 종교용 건축물, 학교, 관공서 등의 용도로 폭넓게 사용되고 있으나, 지진과 같은 횡력 발생 시 접착력을 잃거나 미끄러지면서 파괴될 수 있어 수많은 인명피해가 예상됨.

○ 이러한 조적식 구조는 조적개체와 모르타르의 이질재료를 접착하여 쌓는 방식의 구조벽체로 역할에 따라 크게 두 가지로 나눌 수 있음. 우선, 내력벽은 건물의 모든 하중을 벽체가 받는 것으로, 지붕이나 상부에는 콘크리트 슬래브 또는 목조로 구성되어진 것을 의미함. 두 번째로 장막벽(비 내력벽)은 구조체의 하중은 벽돌의 벽체가 아닌 다른 구조방식이 받고 벽체는 단지 칸막이와 내·외부의 치장성의 의미만을 가지고 있는 구조체를 의미함.

○ 지진이 발생할 경우, 비보강 조적조의 위험성이 매우 높음에도 불구하고 국내 비보강 조적조 건물, 특히 건설된 지 20년 이상의 노후화된 구조물의 경우, 내진 보강이 전혀 이루어지지 않아 지진 발생 시 많은 재산 및 인명피해가 예상됨. 또한, 국내 내진규정에는 조적식 구조물에 대한 내진규정이 마련되어 있지 않아 지진 발생 이후의 보수·보강을 통한 피해 복구 대책이 마련되어 있지 않음.

○ 앞서 언급한 바와 같이 노후화된 조적조 구조물은 내진설계반영이 부족하여 강도저하와 환경문제로 인한 내구성능 저하로 인해 구조적으로 보수·보강 뿐 아니라 안전성과 사용성을 동시에 확보할 수 있는 획기적인 구조물 보수·보강 및 내진보강공법이 반드시 필요한 실정임.



(a) 학교 외벽 파손



(b) 공동주택 외벽 파손

그림 1.3 조적식 구조물의 지진에 의한 피해

□ 기존 조적식 구조물의 내진보강현황

○ 기존 조적식 구조물의 내진보강방법을 살펴보면 표 1.1에서 보는 바와 같이 다양한 보강 기법이 적용되고 있음. 하지만 이러한 방법은 구조물의 자중이 증가하고 보강 효과가 미비하거나, 공사비용이 상당히 많이 발생하기 때문에 비경제적임.

표 1.1 조적식 구조물에 적용되는 다양한 내진보강기법

| 보강기법           | 장점                                                                                                                | 단점                                                                                                           |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 강재 스크류 앵커      | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 해외 시공실적 많음</li> <li>· 내진성능 향상이 뛰어나</li> <li>· 다양한 구조물에 적용 가능함</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 공사비용 과다</li> <li>· 고도의 정밀 시공 요구</li> <li>· 국내 보강공사 실적 미비</li> </ul> |
| Steel tie      | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 공사가 간편함</li> <li>· 공사비가 적음</li> <li>· 구조물 연성향상이 뛰어나</li> </ul>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 인방보가 없는 경우 보강효과 미비</li> <li>· 조적벽체의 국부파괴 유도</li> </ul>              |
| 벽체 전면 보강       | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 시공기술이 보편화</li> <li>· 화재에 강함</li> <li>· 내진성능 효과가 큼</li> </ul>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 공사비용 과다</li> <li>· 개구부 처리가 어려움</li> <li>· 자중이 증가</li> </ul>         |
| 외부 버팀벽 보강      | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 거주자가 이주할 필요 없음</li> </ul>                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 공사비용 과다</li> <li>· 넓은 대지 필요</li> </ul>                              |
| 철 골 골조 설치      | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 시공기술이 보편화</li> <li>· 역학적 분석이 용이</li> </ul>                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 자중이 증가</li> <li>· 공사비용 과다</li> </ul>                                |
| 벽체 슬래브 연결부 위보강 | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 공사가 손쉬움</li> </ul>                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 보강 효율성이 낮음</li> </ul>                                               |
| 섬유 보강재         | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 공사가 손쉬움</li> <li>· 벽체 강성증가 효과</li> <li>· 다양한 부위 보강 적용</li> </ul>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 화재에 취약</li> <li>· 기존 벽체와의 일체화 어려움</li> </ul>                        |

○ 기존 조적식 구조물의 내진성능 향상과 지진이 발생할 경우에 대비하여 신속한 보수·보강을 위해 본 연구에서는 다음과 같이 스프레이식 분사형 폴리우레아를 적용한 내진성능 보강 시스템을 제안하고 개발하고자 함.

□ 조적식 구조물의 내진성능 보강 시스템 개발

○ 본 연구에서는 기존 노후화된 조적식 구조물의 내진성능 향상과 신속한 보수·보강을 위해 폴리머계 재료를 활용한 분사형 폴리우레아 내진성능 보강 시스템을 개발하고자 함.

○ 제안하고자 하는 폴리우레아를 이용한 조적식 구조물의 내진성능 보강공법의 경우, 건물에 사람이 주거하는 동안에도 신속한 보수·보강시공이 가능하기 때문에, 기존 건물을 폐쇄하지 않아도 되는 점이 가장 큰 장점이라 할 수 있으며, 이를 통해 시간적, 경제적으로 효율

적 시공이 가능하고, 무엇보다도 공사비 절감효과를 가져올 수 있음.

○ 기존 폴리머계, FRP, 에폭시 등에 의한 보수·보강공법은 그림 1.4에서 보는 바와 같이 교량 하부나 터널, 구조물 기둥 등 활용범위가 한정되어 폴리우레아의 물성을 변화하는 연구가 진행·적용되어왔음. 하지만 본 연구에서는 도심 또는 외곽지역의 일구밀도가 가장 높은 학교, 주거, 상업시설, 관공서 등 조적식 구조물에 즉시 활용이 가능한 폴리머계 재료를 개발하고 적용할 예정임.

○ 개발하고자 하는 폴리머계 보강재료는 비구조용 보수재료로서 적용되는 구조물의 특성에 따라 폴리머 재료배합비가 서로 다르기 때문에, 기존에 적용되고 있는 재료배합비로는 조적식 구조물에 바로 적용이 불가능함. 또한, 보강재료를 구조물에 적용할 시 보강재료의 두께에 따른 효율성을 정확하게 검토하여야 함. 따라서 강성과 연성을 동시에 만족할 수 있는 최적의 재료배합비를 개발하고 안전성과 사용성을 모두 고려할 수 있는 보수·보강시스템을 개발하고자 함.

○ 분사형 폴리우레아를 이용한 구조물 보수·보강공법은 내진의 핵심인 내력 및 연성능력을 증진하여 에너지 소산능력을 갖게 하는 기술임. 또한, 기존 강판보강공법과 달리 보강 부위의 하중 증가량이 적어 구조물에 큰 영향을 끼치지 않으며 부식에 대한 안정성을 가지고 있음.

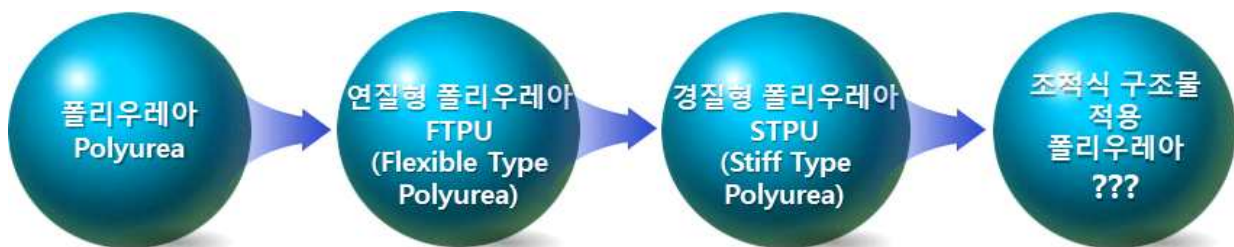


그림 1.4 조적식 구조물 적용가능한 보수·보강용 폴리우레아 개발

## 1-2. 연구 개발 대상의 국내·외 현황

### □ 기술현황

○ 국내의 경우, 일반적으로 지진안전지대로 인식되어 지진활동에 대한 연구나 구조물의 내진성능을 확보하기 위한 연구가 미비하였음. 하지만 최근 동일본 대지진과 더불어 경주, 포항에서 발생한 지진 이후 내진보강에 대한 중요성을 인식하였으며, 정부에서는 ‘기존 공공시설물 내진보강 기본계획안’을 작성하고 각 부처와 연계하여 협의중에 있음.

○ 또한, 구조물의 보강은 1990년대 초부터 대학기관 및 기업을 중심으로 섬유를 이용한 보강공법 연구가 활발히 진행되었으며, 1994년 탄소섬유시트에 의한 보강공법을 지하주차장에 적용한 이후, 국내 유지관리 부분의 중요성이 강조되고 있음.

- 정병주 등(1998)은 조적식 구조물의 수평전단균열을 전제로 벽체 균열패턴에 관한 검토 및 보수재료의 종류에 따른 성능 비교와 시공방법에 따른 내력변화에 관한 실험적 연구를 수행하였으며, 김희철 등(1998)은 저층 비보강 조적식 건물에 대한 최대 진동가속도의 지진 하중이 작용하였을 경우의 구조물 거동을 파악하고 안전성 여부를 평가하였음.
- 김홍범(2001), 이한선 등(2001)은 조적식 구조물의 내진성능에 관한 국위 기준과 국내 기준으로의 적용성 검토를 위하여 미국 및 호주 기준 등에 대해 비교분석을 수행하였으며, 조적식 구조물에 대한 유한요소 해석을 수행함.
- 일본의 경우, 1995년 고베 지진 이후 ‘신기술에 의한 기존 건축물의 내진성 향상기술 개발’의 연구가 시작되었음. 기존 구조물의 내진성능 향상을 위해 복합섬유 부착공법을 중심으로 AF 공법, SR-CF 공법, CRS-CL 공법, WARS 공법 등의 독자적인 보강공법이 개발되었으며, 현장에 활발히 적용되고 있음.
- 미국은 1995년부터 20억 달러를 투자하여 CONMAT(Construction Materials and System Program) 사업을 통해 복합섬유의 건설분야 활용방안에 대해 연구하였으며, 다양한 형태의 보강기술이 개발되고 있음.
- 유럽의 경우, 1950년대 이후 대량으로 건설된 콘크리트 교량 및 건축물의 노후화가 진행됨에 따라 다양한 보강공법에 대한 연구가 진행되었으며, 주로 정적하중에 의한 보강형태로 이루어진 경우가 많음.
- 캐나다는 1995년 설립된 ISIS Canada 협의체를 통해 FRP 보강기술에 대한 다양한 기술개발을 진행 중에 있으며, 노후 구조물의 수명 연장 및 성능 향상을 위해 적극적인 연구를 수행하고 있음.

#### □ 시장현황

- 2011년 소방방재청이 발표한 ‘시설물별 내진실태 현황자료’에 따르면 현재 내진설계가 의무화된 전국의 시설물 107만 8천 72곳 중 81.6%에 달하는 87만 9천 771곳이 내진설계가 이루어지지 않은 것으로 나타남 (표 1.2).
- 또한, 우리나라 전체 내진설계 대상 시설물 31종 123,201개소 중 45,905개소(37%)는 내진성능이 확보되었으나, 77,296개소(63%)는 내진보강이 되어있지 않아 위험에 노출되어 있는 상태임. 특히 본 연구에서 수행할 조적식 구조물이 포함된 공공건축물, 학교시설, 병원은 총 59,733개소로 내진보강이 전혀 이루어지지 않은 상태로 나타남.
- 학교시설물의 경우 내진설계 대상인 3층 이상 건물은 총 17,734동으로 이 중 13.7%인 2,429동만 내진설계가 적용되어 있으며, 나머지 86.3%에 대한 내진보강대책이 시급한 상황임.

표 1.2 국내 시설물별 내진실태 현황 (단위 : 개소)

| 시설물   | 내진설계 대상 | 내진적용   | 내진 미적용 |        |         |         |    | 기준 제정연도 |
|-------|---------|--------|--------|--------|---------|---------|----|---------|
|       |         |        | 소계     | 내진양호   | 내진보강 완료 | 내진보강 필요 | %  |         |
| 총계    | 123,201 | 29,104 | 94,097 | 15,385 | 1,416   | 77,296  | 63 |         |
| 공공건축물 | 51,903  | 8,466  | 43,437 | -      | -       | 43,437  | 84 | 1988    |
| 도시철도  | 1,421   | 47     | 1,374  | 1,065  | -       | 309     | 22 | 1999    |
| 공항시설  | 145     | 95     | 50     | 36     | 6       | 8       | 6  | 1974    |
| 도로시설물 | 33,042  | 10,893 | 22,149 | 7,615  | 1,181   | 13,353  | 40 | 1999    |
| 학교시설  | 18,329  | 2,417  | 15,912 | -      | 61      | 15,851  | 86 | 2009    |
| 병원    | 2,334   | 1,215  | 1,119  | 655    | 19      | 445     | 44 | -       |
| ⋮     | ⋮       | ⋮      | ⋮      | ⋮      | ⋮       | ⋮       | ⋮  | ⋮       |
| ⋮     | ⋮       | ⋮      | ⋮      | ⋮      | ⋮       | ⋮       | ⋮  | ⋮       |

○ 내진보강을 위한 재정투자실적은 해마다 증가하고 있으며, 내진성능 확보를 위해 각 부처별 국토교통부 350억원, 문화체육관광부 330억원, 교육과학기술부 280억원 등 9개 중앙행정기관에서 1천 5백억원을 투자하고, 지자체별로 서울특별시 100억원, 경기도 900억원, 제주도 60억원 등 13개 시·도에서 350억원을 투자하였음.

○ 최근 전 세계적으로 발생한 자연재해로 인한 재산피해는 약 3천 500억 달러에 달하며, 이중 지진에 의한 피해액은 약 2300억 달러에 달해, 전체 피해액 중 약 65% 이상이 지진에 의한 것으로 조사되었음.

○ 일본은 노후 구조물 및 국가 시설에 대한 내진 보강을 위해 약 45조원을 투입하고 있으며, 이는 전 세계 내진 시장의 대부분을 차지하고 있는 것으로 나타남. 또한, 중국, 미국, 뉴질랜드 등에서도 지진발생 빈도가 증가하고 있고 진도도 강진으로 바뀌는 경향을 보이고 있어 추후 세계시장은 내진성능 보강과 관련하여 지속적으로 증가할 것으로 예상됨.

#### □ 정책 현황

○ 국토교통부는 중전 2층 이하 소규모 구조물에 대해서 내진보강 매뉴얼 등을 마련하여 자발적인 내진 보강을 유도하고, 표준설계 시공을 의무화하도록 장려하고 있음. 또한, 구조기술사 등 전문가의 내진설계 참여 대상을 현행 6층 이상에서 3층 이상으로 확대하고, 1~2층 저층 건축물에 대해서도 별도의 표준 설계도면을 만들어 이 기준에 따라 신축을 의무화하도록 계획을 수립중에 있음.

○ 또한, 현재는 3층 이상 건축물과 연면적 1천m<sup>2</sup> 이상, 높이 13m 이상 등 지진에 취약한 구조물에 대해서만 내진설계가 의무화 되어 왔지만, 2층 이하 소규모 건축물에 대한 내진성능을 강화하기로 하고 법 개정을 추진중에 있음.

#### □ 지식재산권 현황

○ 국내·외 지진에 의한 내진성능 향상을 위한 주요 연구 및 논문, 특허현황을 아래와 같이 조사하였으며, 내진성능 확보 및 폴리우레아 재료에 관한 주요 연구주제와 본 연구의 차별성을 표 1.3를 통해 제시하였음. 조사된 바와 같이 본 연구에서 적용하고자 하는 폴리우레

아 재료에 관한 보수·보강기법 연구는 본 연구진이 참여한 과제가 유일하며, 특히, 노후화된 조적식 구조물에 대한 내진성능 향상에 관한 연구는 전무한 실정임.

표 1.3 기존에 수행되었던 주요 연구주제와의 차별성

| 구 분                                    | 기존 연구의 취약성                                               | 본 연구개발의 차별성                                                                               |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 카본복합재료를 이용한 노후벽식 공동주택 리모델링을 위한 내진성능 확보 | 탄소섬유 복합재료를 이용하여 노후 구조물의 리모델링을 통한 내진성능 확보로 FRP의 단점 극복 불가능 | 폴리우레아 내진재료를 개발하여 연성 보강공법을 통한 보강 메커니즘 구현, FRP공법에서 발생하는 불연속면의 탈락 현상 발생하지 않음                 |
| 폴리우레아 방수방식 재료개발                        | 폴리우레아 방수방식용의 고연성 재료 개발로 내진적용 불가능                         | 폴리우레아 개발의 유사성은 있으나, 구조물 보수·보강용이 아닌 방수용 재료를 개발한 것으로써, 본 연구에서는 내진보강용 강성 증가효과가 있는 폴리우레아 재료개발 |
| 도심지 내 중·저층 주요시설물 응급복구 내진보강기술 개발        | 탄소섬유 복합재료에 대한 외부환경 영향에 대한 검증으로 FRP의 보강 시 계면 탈락의 단점이 있음   | 폴리머계 고연성 내진재료로써 보강메커니즘이 확연히 구분되며 취성파괴가 발생하지 않음                                            |

· 주요 연구현황

| 연구제목                                                         | 수행기관            | 년도   | 내용 요약                                                                  |
|--------------------------------------------------------------|-----------------|------|------------------------------------------------------------------------|
| FRP를 사용한 콘크리트 외부보강                                           | Philip et al.   | 1991 | 섬유보강판을 이용한 외부 보강효과 연구 및 보강재 단부 부착파괴 방지기법 연구                            |
| CFRP 판으로 보강된 RC 부재의 신뢰성                                      | Nikolaso et al. | 1995 | CFRP 보강비에 따른 파괴변형도, 부재의 강도에 미치는 영향 연구                                  |
| 탄소섬유시트로 보수·보강된 RC 구조물의 결함 검지                                 | 동경대학교           | 1996 | 탄소섬유시트의 결함크기변화를 적외선 카메라로 열적외선 영상을 사용하여 검토                              |
| 교량구조물의 보수·보강                                                 | 건설교통부           | 1995 | 구조물 보수·보강공법 및 특성                                                       |
| 탄소섬유시트의 접착 피로 성향                                             | 森脇涉             | 2000 | 에폭시 수지를 접착한 탄소섬유시트의 피로하중, 접착거동에 따른 인장력 영향 연구                           |
| 중진지역 콘크리트 교량의 내진보강기술 개발                                      | 중앙대학교           | 2005 | 기존 비내진 설계 및 주철근 겹침이음으로 시공되어 공용중인 다주교각의 비선형 거동 특성 및 내진성능 평가 연구          |
| 에폭시 접착 보수·보강재의 박리현상 분석                                       | 청주대학교           | 2005 | 에폭시 수지 접착제를 이용한 탄소섬유보강공법의 구조체 박리현상에 대한 원인 규명 및 구조체, 접착제, 보강재 간 재료물성 분석 |
| 온도환경변화에 따른 에폭시 접착 보강공법의 부착거동 분석                              | 청주대학교           | 2006 | 자연환경변화에 따른 에폭시 접착 보강공법의 박리인 규명을 위한 온도환경 변화에 따른 각 재료별 거동 분석             |
| 일반 콘크리트 구조물 및 충격 폭발 하중을 받는 구조물의 보수 보강을 위한 고인성, 고연성 폴리우레아의 개발 | 연세대학교           | 2008 | 충돌, 폭발하중 등의 극한하중을 받는 구조물의 긴급보수보강을 위한 폴리우레아 재료개발                        |
| 기동부재의 내진성능 및 내구성 극대화를 위한 PU Spray 보수보강공법의 실용화                | (주)홍지연세대학교      | 2014 | 기동부재의 내진성능 향상을 위한 보수보강재료인 폴리우레아 도포공법에 관한 연구                            |

• 주요 논문현황

| 논문제목                                                                                                                                    | 저자                          | 년도   | 발행기관                                                       | 내용 요약                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 유리섬유 보강 원형<br>철근콘크리트 교각의<br>내진성능에 관한 준정적<br>실험연구                                                                                        | 정영수, 임강균<br>한기훈, 이대형        | 1999 | 콘크리트학회<br>논문집                                              | 내진설계 유무에 따른 콘크리트<br>교각의 유리섬유 보강방법을 통한<br>내진 성능 증진 효과 연구             |
| 강판보강에 의한 원형 RC<br>교각의 내진성능 향상                                                                                                           | 김재관, 김익현임<br>현우, 이재호        | 2003 | 콘크리트학회<br>논문집                                              | 강판으로 내진보강된<br>중실우너형단면 RC 교각의<br>지진거동 특성 및 강판보강 효과<br>연구             |
| 비내진설계 내력벽식 구조물의<br>슬래브 내진성능 향상방안 연구                                                                                                     | 황지현<br>박태원                  | 2013 | 한국방재학회<br>논문집                                              | 비내진상세를 갖는<br>노후공동주택을 모델로 한<br>벽-슬래브 접합부 성능 및 슬래브<br>보강 연구           |
| 긴급시공이 가능한 FRP<br>내진보강재로 보강된 기둥의<br>내진성능평가 실험                                                                                            | 김진섭, 권민호<br>서현수             | 2013 | 한국구조물진단유<br>지관리공학회<br>논문집                                  | 긴급시공이 가능한 체결식 FRP<br>내진보강재를 적용한 구조물의<br>내진성능 보강효과 연구                |
| 긴급시공이 가능한 FRP<br>내진보강재 개발 및 최적보강량<br>산정을 위한 해석적 연구                                                                                      | 김진섭, 권민호<br>서현수, 임정희<br>김동영 | 2013 | 한국구조물진단유<br>지관리공학회<br>논문집                                  | 여진에 의한 2차 피해예방을 위한<br>FRP 내진보강재 연구                                  |
| Diagonal Shear and<br>Out-of-Plane Flexural Strength<br>of Fabric-Reinforced<br>Cementitious<br>Matrix-Strengthened Masonry<br>Wall     | S.L.S<br>V.S<br>D.C.RP.G    | 2017 | Journal of<br>Composites for<br>Construction               | Fabric으로 보강된 조적식<br>구조물의 전단 연구                                      |
| Monte Carlo Simulation of Shear<br>Capacity of URM Walls<br>Retrofitted by Polyurea<br>Reinforced GFRP Grids                            | P.F.S<br>P.Y<br>A.N         | 2008 | Journal of<br>Composites for<br>Construction               | 폴리우레아 및 GFRP 보강을 통해<br>제작된 조적식 구조물의<br>Monte Carlo Simulation 전단 연구 |
| Resistance of Membrane<br>Retrofit Concrete Masonry<br>Walls to Lateral Pressure                                                        | L.G.M<br>J.S.D<br>R.J.D     | 2008 | Journal of<br>Performance of<br>Construction<br>Facilities | 멤브레인이 도포된 조적식<br>구조물의 수평하중 저항성능 연구                                  |
| Structural performance of<br>confined masonry walls<br>retrofitted using ferrocement<br>and GFRP under in-plane cyclic<br>loading       | M.E.D<br>H.O<br>O.K<br>M.S  | 2015 | Engineering<br>Structures                                  | Ferro 시멘트와 GFRP로 보강된<br>조적식 구조물의 Cyclic loading<br>거동 연구            |
| Masonry Walls Strengthened<br>with Fabric-Reinforced<br>Cementitious Matrix Composite<br>Subjected to In-Plane and<br>Out-of-Plane Load | S.B                         | 2013 | University of<br>Miami /<br>Doctoral<br>Dissertation       | 면내 및 면외 하중을 받는 Fabric<br>보강 시멘트 매트릭스의 거동                            |

· 주요 특허현황

| 특허명칭                                                                 | 특허권자      | 특허번호            | 내용 요약                                                                                                                                                             |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 섬유시트와 푸쉬판을 이용한 콘크리트 구조물 보수공법                                         | (주) 안풍건설  | 10-2009-0034334 | 콘크리트 구조물에서 열화된 콘크리트 부분을 제거 후 타공섬유시트를 배치, 모르타르를 충전함으로써 열화된 콘크리트를 보수                                                                                                |
| 콘크리트 구조물의 방수 및 보수, 보강을 위한 속경 고밀도 모르타르 조성물 및 이를 적용한 방수 및 보수, 보강 내진 공법 | 설재숙       | 10-2014-0042894 | 중성화, 염해, 동해, 화학적 침식 등에 의하여 강성 및 내구성이 저하된 콘크리트 구조물의 본래 성능을 회복시키는 방수, 보수보강 및 지진환경에 무방비로 방치되어 있는 비내진 콘크리트 구조물의 염해방지 방수 몰탈에 적용될 수 있는 모르타르 조성물 및 이를 적용한 방수 및 보수, 보강 공법 |
| 속경성 모르타르를 이용한 콘크리트 구조물 단면의 보수 보강공법                                   | (주)우성안전   | 10-2015-0176851 | 속경성 모르타르를 이용하여 콘크리트 구조물의 단면을 보수 보강하는 공법                                                                                                                           |
| 섬유보강 리바를 이용한 콘크리트 구조물의 보수보강 및 내진보강 공법                                | (주)우암건설   | 10-2015-0100814 | 섬유계열의 섬유보강 리바와 모르타르에 마이크로 화이버를 혼합하여 물리적, 전기적, 화학적 특성 향상 및 내열성을 향상시켜 화재시에도 안정적으로 콘크리트 구조물의 보수보강 및 내진보강이 될 수 있는 공법                                                  |
| 습식시공이 가능한 내진보수보강용 콘크리트 구조물 모르타르 및 이를 이용한 콘크리트 구조물 보수보강 내진공법          | (주)평강산업개발 | 10-2016-0150195 | 콘크리트 구조물 보수보강시, 건식시공뿐만 아니라, 습식시공도 가능한 콘크리트 구조물 보수보강 모르타르 및 이를 이용한 콘크리트 구조물 보수보강 내진공법                                                                              |
| 구조물 보수보강용 내진강화형 섬유직물 및 그 시공방법                                        | (주)케이지에프  | 10-2017-0031778 | 경사와 위사로 직조한 강화섬유직물의 외표면에 아크릴수지와, 폴리우레탄과, 저수축제를 포함하여 제조된 망직물체를 가압하여 일체화시킨 것을 특징으로 하는 구조물 보수 보강용 내진강화형 섬유직물 및 시공방법                                                  |
| FRP를 이용한 조적벽체 건축물의 내진 보강의 시공방법                                       | 김윤기       | 10-2017-0101818 | 기존 조적 건축물의 외벽에 FRP를 이용한 조적식 벽체 건축물의 내진 보강의 시공방법                                                                                                                   |

## 2. 연구수행내용 및 성과

### 2-1 1차년도 연구수행 내용 및 결과

#### 1) 폴리우레아 최적배합도출

##### 가. 주제의 원재료 검토

○ 폴리우레아의 주제로 사용되는 이소시아네이트(isocyanate)는 Aromatic계열과 Aliphatic 계열로 분류할 수 있음. 이 중에서도 반응성이 빠른 초속경화의 특성을 나타낼 수 있는 주제의 원료를 선택하며 가능성 있는 재료들을 아래와 같이 선정하였음.

○ 이소시아네이트(isocyanate)는 포름알데히드와 아닐린이 축합 반응하여 생성된 디페닐메탄디아민(Diphenyl methane Diamine)을 포스젠( $\text{COCl}_2$ )과 반응시켜 얻어지는 생성물을 정제한 물질임. 이소시아네이트는 상온에서 액상 형태이고 제품의 점도와 반응성, NCO(%) 함량에 의해 특성화됨. 이소시아네이트 화합물의 관능기수(functionality)는 물성과 반응성, 반응중의 경화 속도에 많은 영향을 미침. 일반적으로 관능지수가 높으면 경화 속도가 빠르고 경도가 높아지지만 부서지기 쉬운 고분자가 형성될 수 있으므로 주의가 필요함.

○ 본연구에서 주제에 사용되는 이소시아네이트는 빠른 반응성으로 저온 경화가 가능하고 역학적 특성이 확보되어야 함. 이에 방향족 이소시아네이트 중에서 분자량이 200 이상이고 관능기는 2~3으로 아미이드 결합을 하며 취급 및 사용이 쉬운 제품 3가지를 선정하여 비교 실험을 진행하였음.

○ Modified MDI는 상온에서 결정성 고체인 Monomeric MDI의 일부를 카르보디이미드화(Carbodiimide)하여 상온에서 점도가 낮은 액체 상태를 유지하도록 함으로써 취급 및 사용이 용이하도록 개발한 투명하면서 연한 노란색의 색상을 띠는 MDI임.

○ Polymeric MDI는 경질 및 반경질분야 제조에 폭넓게 사용되고 있는 특수 제품으로써 상온에서 액상인 제품으로 동절기에 저장( $-20^\circ\text{C}$ ) 및 취급이 용이하며, 무용매(Solvent Free) 형태로 4,4-diphenylmethane diisocyanate(MDI)의 단량체 MDI와 이들의 이량체, 삼량체, 사량체 이상의 Oligomer가 혼합되어 있으며 최대 250cps ( $25^\circ\text{C}$ )의 점도와 평균 2.7의 평균 관능기를 갖는 제품임.

○ Monomeric MDI는 고순도로 정제된 순수한 MDI로써, 상온에서 결정성백색 고체이나, 액상으로 존재할 때는 물처럼 맑고 투명한 특징을 갖고 있으며, 4,4' -, 2,4' -, 2,2' -Diphenylmethane diisocyanate 의 단량체 MDI 이며 관능기가 2 인 선형구조를 갖고 있으며, 고유특성인 변색에 대한 저항력이 강해 고온 및 자외선에 대한 내변색 안정성이 매우 뛰어나.

○ 주제 원료(Isocyanate)의 종류

| 제품군           |                |         |     |      |         |           |
|---------------|----------------|---------|-----|------|---------|-----------|
| Modified MDI  | Cosmonate LL   | 296     | 2   | 1.12 | 20~60   | 28.5~29.5 |
| Polymeric MDI | Cosmonate M200 | 350~400 | 2.6 | 1.23 | 150~220 | 30~32     |
| Monomeric MDI | Cosmonate PI   | 250     | 2   | 1.07 | 80~100  | 33.6      |
| TDI           | 80%-TDI        | 174.16  | 2   | 1.22 | 30~60   | 48        |
| IPDI          | IPDI           | 222     | 2   | 1.06 | 10      | 37.5      |
| H12MDI        | Desmodur W     | 232     | 2   | 1.07 | 30      | 31.8      |
| HDI           | Desmodur W     | 232     | 2   | 1.07 | 30      | 31.8      |
| TPA-100       | TPA-100        | 364     | 2   | 1.16 | 1400    | 23.1      |
|               | 24A-100        | 360     | 2   | 1.13 | 1800    | 23.3      |
|               | E402-100       | 934     | 2   | 1.12 | 6000    | 10.2      |
|               | E420-100       | 930     | 2   | 1.11 | 5800    | 10.0      |
|               | D-101          | 426     | 2   | 1.10 | 500     | 19.7      |
|               | A-201H         | 490     | 2   | 1.12 | 110     | 17.2      |
|               | AE700-100      | 706     | 2   | 1.00 | 800     | 13.5      |
|               | TSA-100        | 408     | 2   | 1.12 | 550     | 23.5      |
|               | TSS-100        | 478     | 2   | 1.08 | 420     | 20        |
|               | TSE-100        | 694     | 2   | 1.07 | 1600    | 12.1      |

나. 경화제의 원재료 검토

○ 경화제의 원료들은 제품의 부가적인 성질을 부여하는 역할을 하며 경화제 제조 시 사용되는 가능성 있는 재료들을 아래와 같이 선정하였음.

○ 경화제 원료인 아민은 중합 및 분자 간 결합을 강하게 하기 위해 아민을 사슬 연장제로 사용함. 아민은 이소시아네이트와 격렬하게 반응하여 짧은 시간에 사슬과 사슬 간의 연결이 진행되어 분자량이 큰 중합체가 됨.

○ 경화제에 사용되는 아민의 분자량에 따라 POLYUREA의 물성이 좌우됨. 분자량이 1000 이상인 아민은 이소시아네이트와 반응할 때 유연한 성질로 탄성이 있고 인장강도가 낮은 재질이 됨. 따라서, 주제와 경화제의 완벽한 가교 역할을 하면서 경화시간 조절이 가능하기 위해서는 분자량이 낮고 관능기가 높은 아민을 사용해야 함.

○ 아민은 이소시아네이트와의 반응성이 상당히 높으므로 한 가지 제품으로 경화시간을 조절하는 데 어려움이 많음. 또한 당량이 낮을수록 반응성이 빠르고, 당량이 높을수록 반응성이 느린 특성이 있으므로 평균 분자량이 100~400인 제품을 반응성과 작업성을 고려하여 적절히 혼합하여 사용하는 것이 바람직함.

○ 경화제의 사용되는 재료들은 주로 기타 특성을 나타내주기 위해 사용되는데 Polyeter Amine은 Flexible한 성질이나 도막표면을 단단하게 해주고 겔화현상을 나타나게 해주는 기본적인 요소로써 사용되고 있음.

○ Fuctionally Amine은 가교(Crosslink)역할로서 주제와 경화제의 연결고리 역할을 해주며 경화시간을 단축시키거나 증가시키는 용도로 많이 사용되고 Curing하는데 가장 중요한 역할로 사용되고 있음.

○ Polyol은 보통 우레탄에 가장 많이 사용되고 있지만 특히 하이브리드타입의 제품에 폴리올과 아민을 혼합하여 많이 사용되고 있으며 화학적으로 말단에 -OH(Hydroxyl)기를 가지고 있어 소지면과의 높은 부착특성을 나타내줌. 또한 Polyol의 반응성은 Polyol의 Hydroxyl기에 따라 영향을 미침.

○ Additive는 기타 부가적인 반응을 위해 사용하는 것으로 부착력증가, 가교역할, 수분방지, 자외선차단제, 침전방지제 등의 목적으로 사용됨.

○ 경화제 원료의 종류

| 경화제 원료               |                 |        |     |      |           |                    |
|----------------------|-----------------|--------|-----|------|-----------|--------------------|
| 제품군                  | 원료명             | 분자량    | 관능기 | 비중   | 점도        | OH No<br>(mgKOH/g) |
| Polyether<br>Amine   | D-2000          | 2000   | 2   | 1.0  | 430       | -                  |
|                      | T-5000          | 5000   | 3   | 1.0  | 1045      |                    |
|                      | D-400           | 400    | 2   | 0.97 | 26.5      |                    |
| Functionaly<br>Amine | Ethacure 100    | 178.28 | 2   | 1.02 | 280       |                    |
|                      | Ethacure 420    | 310    | 2   | 1    | 110       |                    |
|                      | NH-1420         | 552    | 2   | 1.06 | 1000~2500 |                    |
|                      | NH-1520         | 580    | 2   | 1.06 | 800~2000  |                    |
|                      | Moca            | 267.17 | 2   | 1.44 | -         |                    |
| Polyol               | DF-400          | 400    | 2   | 1.03 | 50~90     | 265~295            |
|                      | DF-1000         | 1000   | 2   | 1.00 | 120~180   | 108~116            |
|                      | DF-2000         | 2000   | 2   | 1.00 | 280~370   | 55~58              |
|                      | DF-3000         | 3000   | 2   | 1.00 | 520~560   | 33~37              |
|                      | NP-300          | 292    | 4   | 1.01 | 1400~1800 | 735~755            |
|                      | Sovermol-750    | 540    | 3   | 1.02 | 700~1400  | 300~330            |
|                      | KE-510          | 6000   | 3   | 1.02 | 700~1100  | 26~30              |
|                      | FA-703          | 4800   | 3   | 1.02 | 860~980   | 33~37              |
| Additive             | DEG             | 106    | 2   | 1.12 | 43        | -                  |
|                      | 1,4 ButhaneDiol | 90.1   | 4   | 1.01 | -         | -                  |
|                      | Zikasolb-BS     | 1000   | -   | -    | -         |                    |
|                      | SA-1720         | -      | -   | -    | -         |                    |
|                      | ASA NP-50       | 1000   | -   | -    | -         |                    |
|                      | LD-5701         | 236    | -   | 1.07 | 29        |                    |

다. POLYUREA의 합성

- 주제의 합성 1단계로 원재료 투입 전 반응기 내부 온도를 60℃ 로 20분간 예열하여 내부의 수분을 증발시킴.
- 2단계로 이소시아네이트 원료들을 투입 후 반응온도(70℃)까지 온도를 올린 후 원료들이 균일하게 혼합이 이루어지도록 200rpm의 교반속도로 1시간동안 합성을 진행함.
- 프리폴리머 반응이 완료된 후 30℃ 까지 서서히 냉각시킴.
- 교반을 진행하면서 반응기 내부의 대기중의 수분 유입을 막기 위하여 질소를 지속해서 투입하였음.
- 반응 중에 발생할 수 있는 발열 반응으로 인한 급격한 내부온도 상승을 막기 위하여 지속적으로 온도를 관찰하며 조절하였음.

2) 폴리우레아 재료성능평가

- 주제의 주원료인 이소시아네이트(Modified, Polymeric, Monomeric)의 종류에 따라 NCO

(%) 함량을 변화시키면서 합성한 프리폴리머가 이론값에 맞게 합성이 되었는지를 확인하기 위하여 NCO(%) 적정 시험을 진행하였으며, 이론값과 실험값의 차이가 없는 것으로 나타나 정상적으로 합성이 이루어진 것을 확인할 수 있었음.



그림 2.1 폴리우레아 합성 과정

○ 이소시아네이트 종류와 상관없이 합성된 POLYUREA는 NCO(%) 함량이 높아질수록 경화 시간이 빨라지는 경향을 나타냈음.

○ 인장강도와 신장률 결과 Monomeric > Polymeric > Modified 순으로 인장강도가 높아지는 경향을 확인할 수 있었음. Monomeric MDI의 경우 NCO(%) 13, 15.5, 18%의 인장강도가 21, 25, 28로 가장 높은 인장강도를 나타내었으며, Modified MDI는 NCO(%) 함량 증가에 따라 15, 18, 21MPa로 가장 낮은 인장강도를 나타내었음. 이소시아네이트 종류에 따라서는 분자량이 높은 제품일수록 인장강도가 높아지는 것을 확인할 수 있었음.

○ 신장률 시험결과로 부터 인장강도와 반비례하여 NCO(%)가 높아질수록 신장률이 감소하는 경향을 확인할 수 있었음. Polymeric MDI는 취성적인 성질로 신장률이 급격히 감소하며, Monomeric MDI가 높은 인장과 함께 신장률 또한 높게 나타나면서 연성적인 성질을 유지하였음.

○ 이소시아네이트 종류와 NCO(%) 변화에 따른 경도시험 결과를 살펴보면, 경화시간과 인장강도 시험의 결과와 같은 경향으로 Monomeric > Polymeric > Modified 순으로 경도가 상승하는 것으로 나타났으며, 이소시아네이트 종류에 따라 같은 NCO(%) 함량에서 분자량이 높은 제품 순으로 경도가 높아지는 것을 확인할 수 있었음.

○ 경도시험 결과도 인장강도와 같은 경향을 나타내고 있으며, Monomeric MDI를 사용하였을 때 가장 높은 경도 값을 나타냈음.

○ 30MPa의 압축강도를 가지는 모르타르로 제작된 모체에 합성한 POLYUREA를 도포한 후 부착강도를 측정하였음. 부착강도 시편제작 시 부착력 증가를 위해 프라이머를 도포 한 것과 안 한 것을 비교하여 진행하였음.

○ 프라이머 도포한 부착강도 값은 모든 조건에서 2.5~3.0 MPa로 나타났지만, 기반층 파괴가 발생하였음. 모체와 피착재의 경계면에서의 파괴가 이루어지는 부착층 파괴는 이루어지지 않아 측정값을 부착강도로 표현하기에는 의미가 없을 것으로 판단됨.

○ 프라이머 도포하지 않은 부착강도 값은 모든 조건에서 1.5~2.5 MPa로 나타나. 폴리우레아 품질 기준에는 만족을 하지만 프라이머 도포한 후 폴리우레아를 도포하는 것이 더 좋은 부착성능이 나타나는 것을 확인할 수 있었음.

| MODIFIED<br>MDI.  | NCO%   | mole<br>fraction | Gel time | Tack Free<br>Time | 인장강도<br>(Mpa) | 경도<br>(Shore D) | 신장율(%) |
|-------------------|--------|------------------|----------|-------------------|---------------|-----------------|--------|
|                   | 13%    | 1                | 40       | 200               | 15            | 52              | 300    |
|                   | 15.50% | 1                | 25       | 90                | 18            | 60              | 250    |
|                   | 18.00% | 1                | 10       | 25                | 21            | 65              | 170    |
| POLYMERIC<br>MDI. | NCO%   | mole<br>fraction | Gel time | Tack Free<br>Time | 인장강도<br>(Mpa) | 경도<br>(Shore D) | 신장율(%) |
|                   | 13%    | 1                | 50       | 330               | 18            | 60              | 150    |
|                   | 15.50% | 1                | 46       | 220               | 22            | 63              | 120    |
|                   | 18.00% | 1                | 35       | 150               | 25            | 66              | 100    |
| Monomeric<br>MDI  | NCO%   | mole<br>fraction | Gel time | Tack Free<br>Time | 인장강도<br>(Mpa) | 경도<br>(Shore D) | 신장율(%) |
|                   | 13%    | 1                | 22       | 50                | 21            | 63              | 320    |
|                   | 15.50% | 1                | 20       | 45                | 25            | 66              | 280    |
|                   | 18.00% | 1                | 20       | 45                | 28            | 69              | 250    |

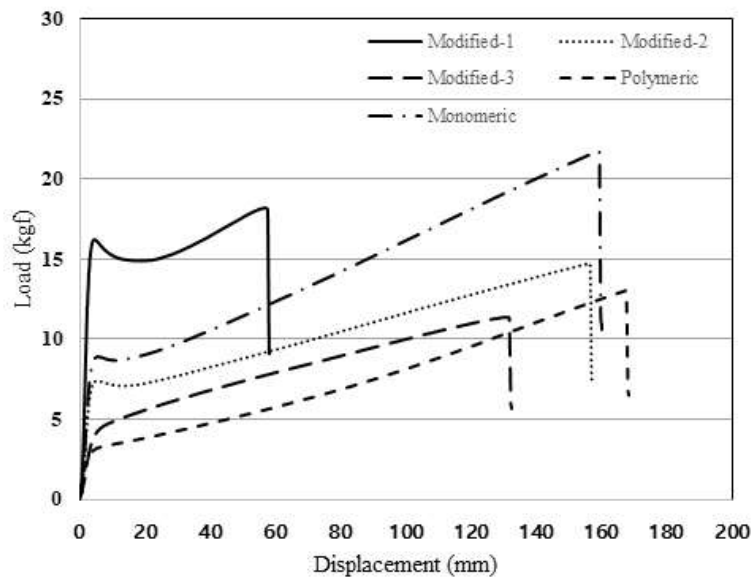
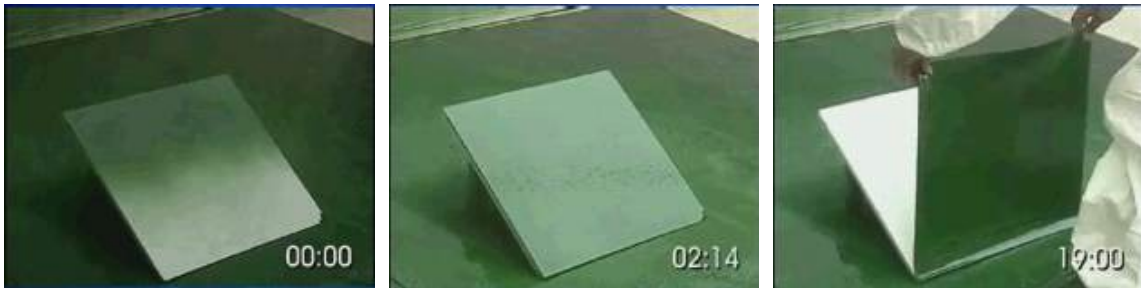


그림 2.2 폴리우레아 하중-변위 실험결과



폴리우레아 스프레이



폴리우레아 시편



인장실험



부착강도 실험



경도 실험

그림 2.3 폴리우레아 물성실험

### 3) 폴리우레아 보수 · 보강효과 검증

#### - 폴리우레아 보강 실험체 압축실험

○ 3개의 최적배합 도출 후, 보강성능을 검증하기 위해 압축실험을 수행하였음. 조적벽돌의 무보강/PU보강 프리즘 압축실험과 콘크리트의 무보강/PU보강 일축압축실험을 수행하였으며, 이를 통해 폴리우레아의 보강효과를 확인할 수 있었음.

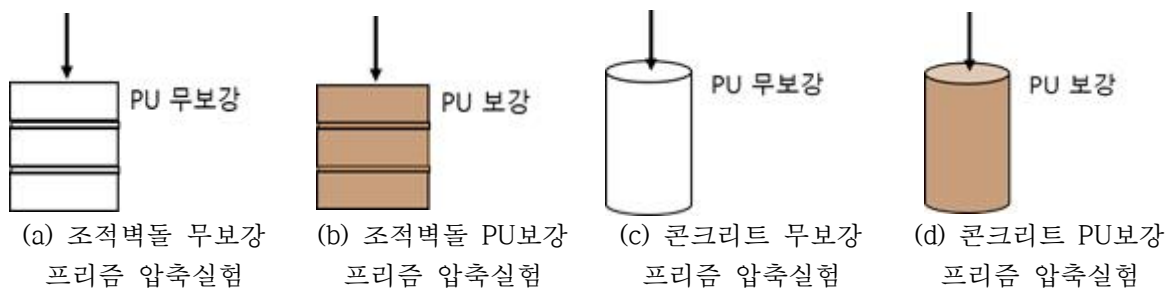


그림 2.4 PU보강부재 압축실험

#### - 콘크리트 압축강도 시험

##### 시험방법

본 연구에서는 개발된 폴리우레아의 보강성능을 간접적으로 시험하기 위해 지름 10cm, 높이 20cm 크기의 원형공시체 시편을 제작하였음. 성능평가를 위해 콘크리트 원형공시체에 Monomeric MDI, MODIFIED MDI, POLYMERIC MDI, 3가지 배합을 약 3mm의 두께로 폴리우레아를 도포하였음. 다양한 강도에서의 성능을 비교하기 위해서 저강도 콘크리트와 상대적으로 고강도인 콘크리트의 경우로 나눠서 시험을 진행하였음. 압축강도 시험은 KS F 2405 규격을 참고하여 그림 2.5, 2.6과 같이 수행하였음. 공시체에 충격을 주지 않도록 일정한 속도로 하중을 가했으며 하중을 가하는 속도는 압축 응력도의 증가율이 매초 0.6 MPa가 되도록 시험을 진행하였음. 공시체가 파괴될 때 나타내는 최대하중을 기록하였으며, 폴리우레아의 고연성을 관찰하기 위해 공시체 파괴이후 폴리우레아가 파단 될 때까지 하중을 가하였음. 압축강도는 다음 식에 따라 산출할 수 있음. 그림 2.5과 그림 2.6은 압축강도 시험과정을 나타내었음.

$$f_c = \frac{P}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

$f_c$  : 압축강도 (MPa),  $P$  : 시험기가 나타내는 최대하중(N)



(a) Monomeric MDI

(b) MODIFIED MDI

(c) POLYMERIC MDI

그림 2.5 저강도 콘크리트 압축강도



(a) Monomeric MDI

(b) MODIFIED MDI

(c) POLYMERIC MDI

그림 2.6 고강도 콘크리트 압축강도

## 시험결과

내진보강용 폴리우레아의 압축강도 보강성능을 평가했을 때 저강도 콘크리트의 경우 Non PU < MODIFIED MDI < POLYMERIC MDI = Monomeric MDI 순으로 나타났음. 이를 통해 저강도 콘크리트에서의 경우 폴리우레아 도포로 인한 구속력이 작용하여 강도 증진 효과가 있는 것으로 판단됨. 또한, 고강도 콘크리트의 경우 Non PU < MODIFIED MDI = Monomeric MDI < POLYMERIC MDI 순으로 나타났으나 전체적으로 압축강도의 보강효과가 미미한 것으로 판단됨. 하지만 고연성의 폴리우레아의 도포를 통해 내력의 향상보다는 연성 및 인성 증진에 효율적임. 공시체의 파괴 양상은 그림 2.6과 같이 하중이 증가하면서 폴리우레아를 도포한 원형 공시체의 부정형으로 붕괴 팽창을 일으키게 되고 편심에 의해 내부의 콘크리트가 파괴되는 형상을 보였음. 폴리우레아의 파단이 크게 일어나지 않고 시편을 구속하고 있는 것으로 보아 내력보강보다는 급격한 조적식 구조물의 붕괴를 막아 지진 시에도 구조물의 완전한 붕괴를 막아 인명대피 시간을 확보할 수 있으리라 판단됨.

표 2.1 저강도 콘크리트 압축강도 시험결과 (단위: MPa)

| 시험편           | 1    | 2    | 3    | 평균   |
|---------------|------|------|------|------|
| Non PU        | 9.6  | 10.2 | 10.7 | 10.2 |
| Monomeric MDI | 15.0 | 12.9 | 14.0 | 14.0 |
| MODIFIED MDI  | 11.8 | 15.0 | 12.7 | 13.2 |
| POLYMERIC MDI | 13.8 | 13.7 | 14.4 | 14.0 |

표 2.2 고강도 콘크리트 압축강도 시험결과 (단위: MPa)

| 시험편           | 1    | 2    | 3    | 평균   |
|---------------|------|------|------|------|
| Non PU        | 31.2 | 33.1 | 31.5 | 32.0 |
| Monomeric MDI | 33.7 | 33.1 | 30.6 | 32.5 |
| MODIFIED MDI  | 33.8 | 30.4 | 33.4 | 32.5 |
| POLYMERIC MDI | 34.5 | 31.3 | 34.7 | 33.5 |

#### - 프리즘 압축강도 시험

##### 시험방법

본 연구에서는 개발된 폴리우레아의 보강성능을 간접적으로 시험하기 위해 길이 190mm, 폭 90mm, 높이 57mm 크기의 벽돌 3개 사이를 10mm 모르타르로 충전하여 3단으로 쌓은(190mm×90mm×191mm) 시험체 3개를 각 배합별로 그림 2.7과 같이 준비하였음. 조적용 모르타르의 시멘트·모래의 배합비는 1:4 레미탈을 사용하였으며, 제작한 시험체에 Monomeric MDI, MODIFIED MDI, POLYMERIC MDI, 3가지 배합을 약 3mm 두께로 도포하였음. 압축강도 시험은 한국건축표준기준(안) 및 ASTM E 447을 참고하여 진행하였으며, 프리즘의 28일 압축강도를 기준으로 측정하였음. 폴리우레아의 보강성능을 확인하기 위해 압축강도 뿐만 아니라, 최대변위를 측정하여 내진성능 증진을 간접적으로 평가하였음. 그림 2.8은 프리즘 압축강도 시험을 진행하는 과정을 나타내었음.

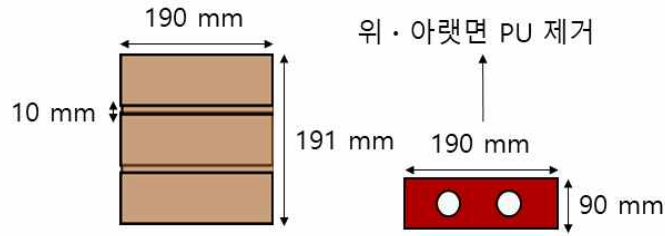


그림 2.7 프리즘 압축강도 시험체 제원

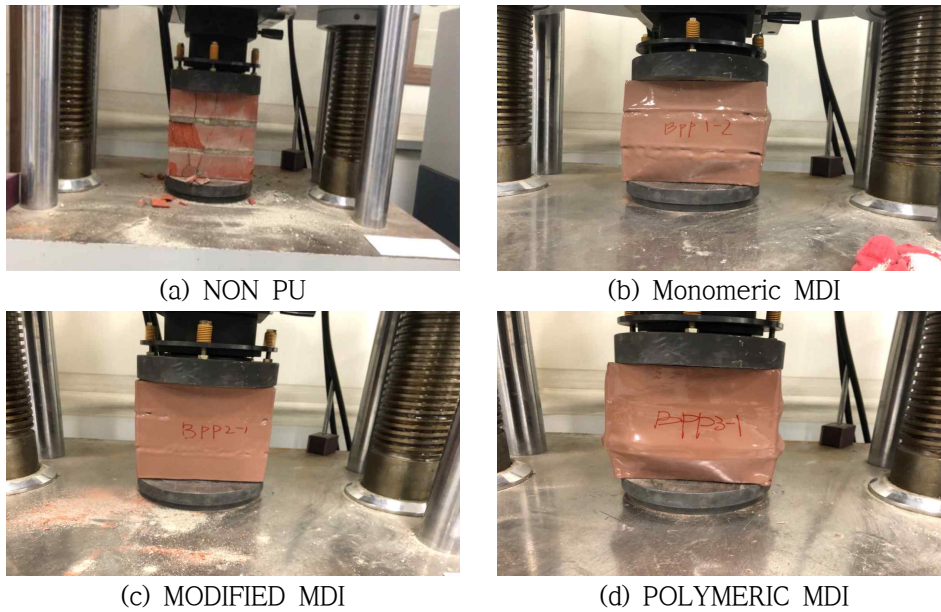


그림 2.8 프리즘 압축강도 시험

## 시험결과

내진보강용 폴리우레아의 프리즘 부재 압축강도 보강성능을 평가했을 때 강도의 경우 Non PU < MODIFIED MDI < Monomeric MDI < POLYMERIC MDI 순으로 나타났음. 상대적으로 폴리우레아 표면 보강 시 도포로 인한 구속력이 작용하여 MONOMERIC MDI, POLYMERIC MDI 배합 도포 시 각각 9%, 29.3%의 강도 증진 효과를 확인하였으나 시험체별 압축강도의 편차를 고려하였을 때 보강효과가 미미한 것으로 판단됨. 조적조 프리즘의 파괴 양상은 그림 2.9과 같이 폴리우레아를 도포하지 않은 시험체는 모르타르와 벽돌이 일체로 작용하여 이상적인 콘형의 파괴 형태가 나타났으며, 이는 모르타르와 벽돌의 충진이 양호하고 부착력이 계면에서 균일하게 작용한 것으로 판단됨. 폴리우레아를 도포한 시험체는 콘크리트 압축강도와 동일하게 부정형으로 파괴 팽창을 일으키게 되고 편심에 의해 내부의 벽돌과 모르타르가 파괴되는 형상을 보였음. 하중 작용 시 취성 파괴가 발생하는 조적식 구조물의 단점을 폴리우레아 보수보강으로 보완이 충분히 가능함을 확인하였음.

표 2.3 무도포 프리즘 압축강도 시험결과

| 시험편 번호 | 최대하중<br>(kN) | 최대변위<br>(mm) | 강도<br>(MPa) |
|--------|--------------|--------------|-------------|
| 1      | 318.4        | 2.94         | 18.62       |
| 2      | 383.4        | 3.2          | 22.42       |
| 3      | 277.8        | 3.18         | 16.25       |
| 평균     | 326.5        | 3.11         | 19.1        |

표 2.4 MONOMERIC MDI 프리즘 압축강도 시험결과

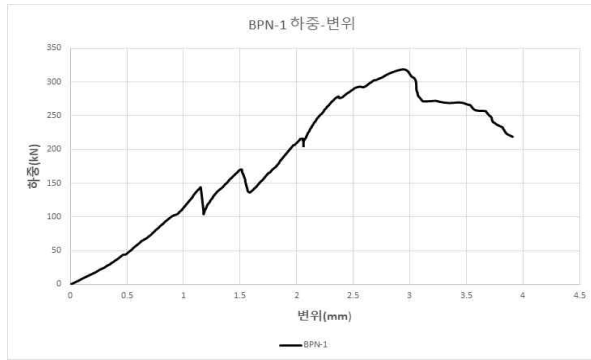
| 시험편 번호 | 최대하중<br>(kN) | 최대변위<br>(mm) | 강도<br>(MPa) |
|--------|--------------|--------------|-------------|
| 1      | 374.6        | 2.58         | 21.91       |
| 2      | 262.4        | 2.69         | 15.35       |
| 3      | 430.8        | 2.45         | 25.19       |
| 평균     | 355.9        | 2.57         | 20.81       |

표 2.5 MODIFIED MDI 프리즘 압축강도 시험결과

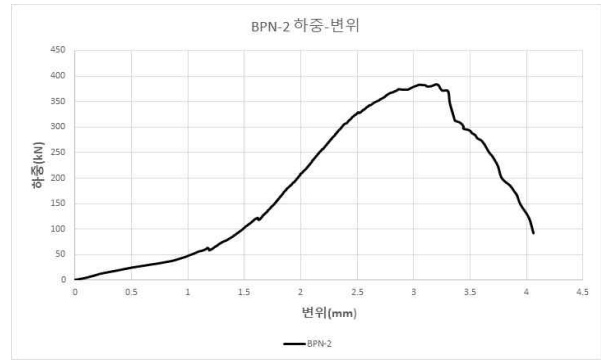
| 시험편 번호 | 최대하중<br>(kN) | 최대변위<br>(mm) | 강도<br>(MPa) |
|--------|--------------|--------------|-------------|
| 1      | 238.2        | 3.44         | 13.93       |
| 2      | 333.2        | 2.71         | 19.49       |
| 3      | 198.0        | 2.67         | 11.58       |
| 평균     | 256.5        | 2.94         | 15.0        |

표 2.6 POLYMERIC MDI 프리즘 압축강도 시험결과

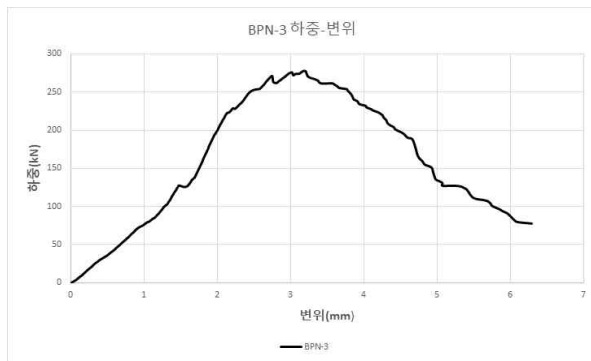
| 시험편 번호 | 최대하중<br>(kN) | 최대변위<br>(mm) | 강도<br>(MPa) |
|--------|--------------|--------------|-------------|
| 1      | 349.6        | 3.57         | 20.44       |
| 2      | 443.0        | 3.14         | 25.91       |
| 3      | 474.4        | 3.05         | 27.71       |
| 평균     | 422.3        | 3.25         | 24.70       |



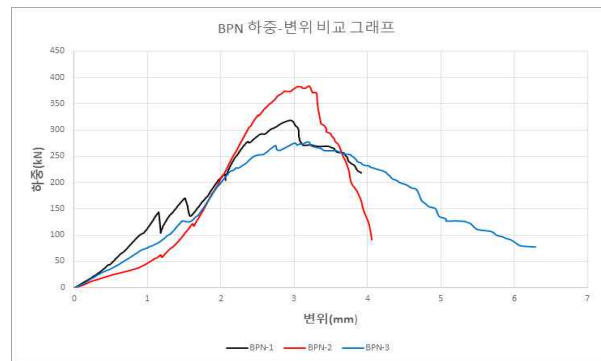
(a) 1번 시편



(b) 2번 시편

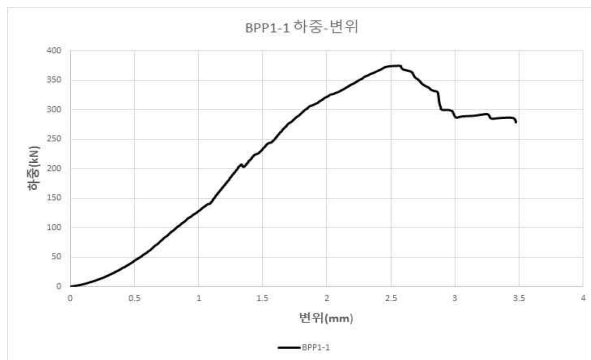


(c) 3번 시편

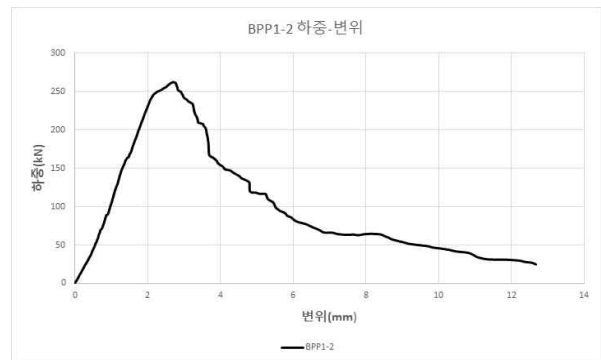


(d) 1-3번 시편

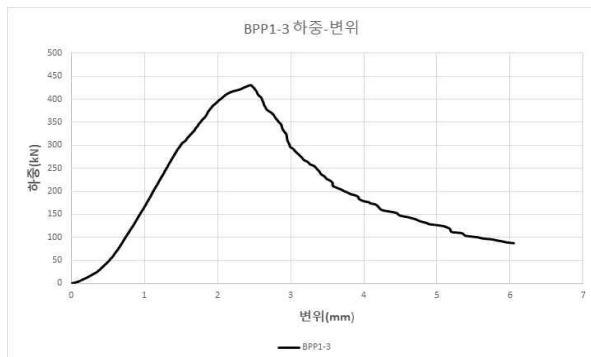
그림 2.9 NON PU 프리즘 압축강도 시험 하중-변위 그래프



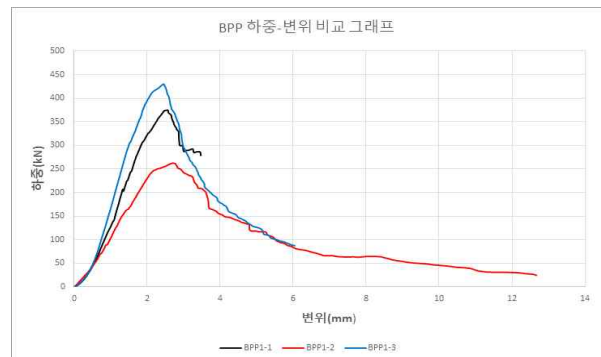
(a) 1번 시편



(b) 2번 시편

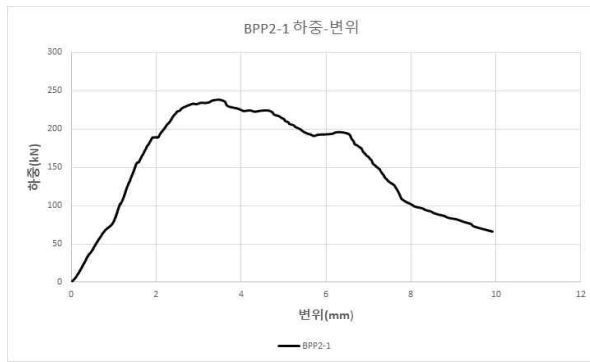


(c) 3번 시편

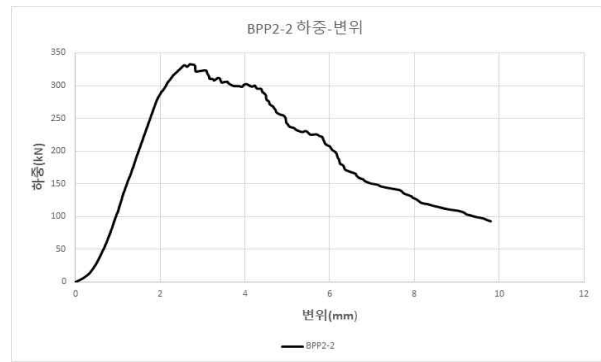


(d) 1-3번 시편

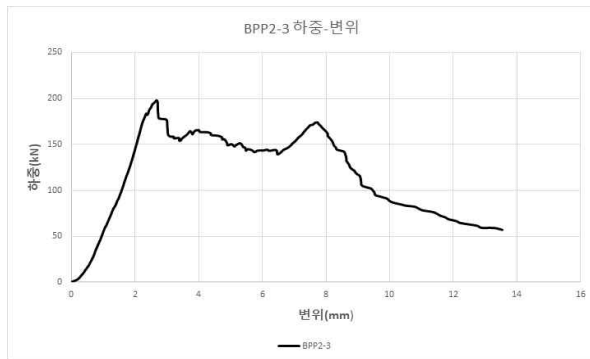
그림 2.10 MONOMERIC MDI 프리즘 압축강도 시험 하중-변위 그래프



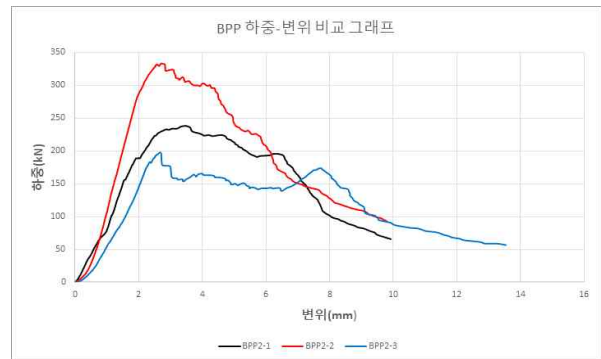
(a) 1번 시편



(b) 2번 시편

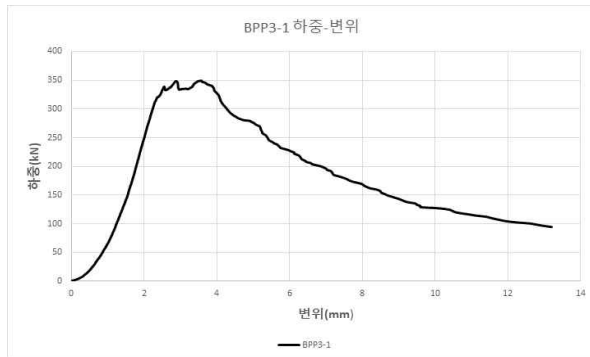


(c) 3번 시편

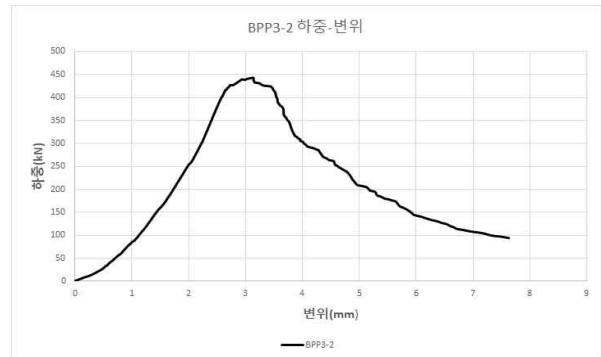


(d) 1-3번 시편

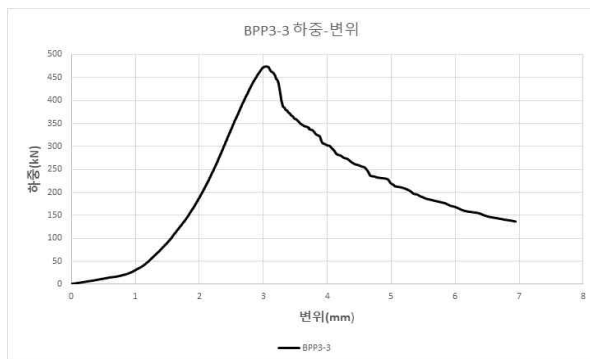
그림 2.11 MODIFIED MDI 프리즘 압축강도 시험 하중-변위 그래프



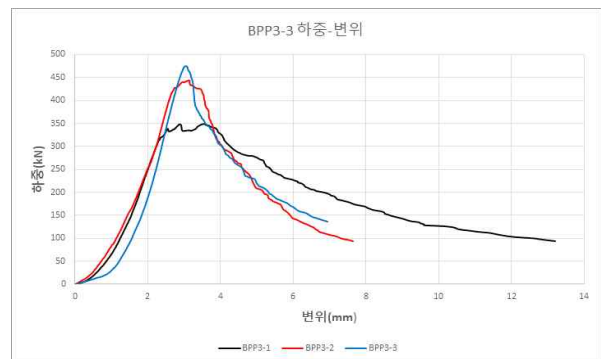
(a) 1번 시편



(b) 2번 시편



(c) 3번 시편



(d) 1-3번 시편

그림 2.12 POLYMERIC MDI 프리즘 압축강도 시험 하중-변위 그래프

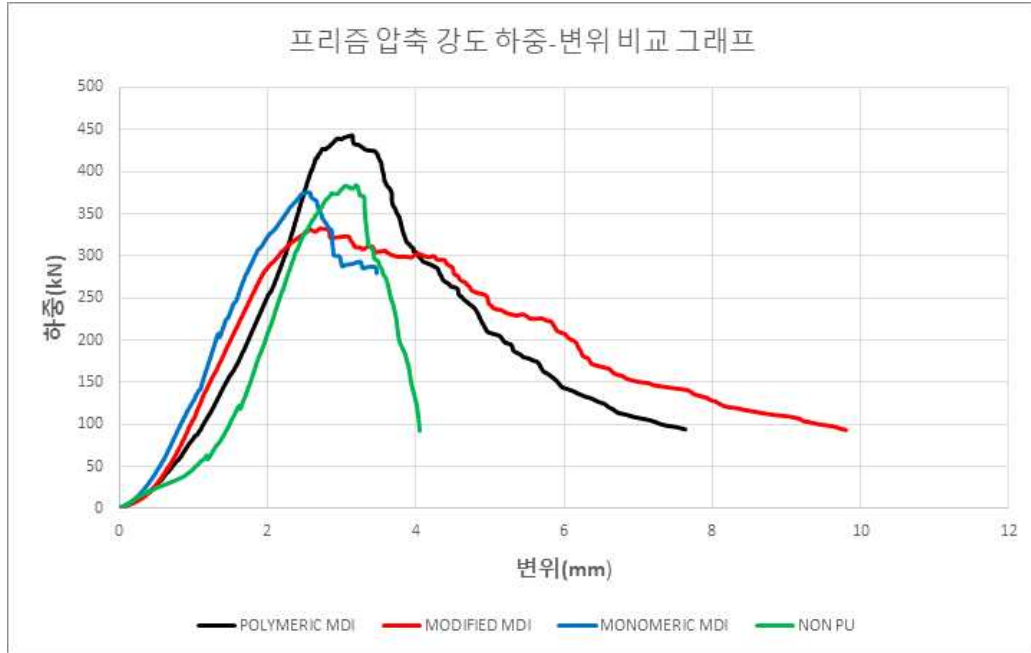


그림 2.13 배합별 프리즘 압축강도 시험 하중-변위 그래프

#### - 사인장강도 시험

##### 시험방법

본 연구에서는 개발된 폴리우레아의 보강성능을 간접적으로 시험하기 위해 앞선 프리즘 압축강도 시험용 시험체와 같은 크기와(190mm×90mm×191mm) 같은 배합의 시험체 3개를 준비하였음. 제작한 시험체에 Monomeric MDI, MODIFIED MDI, POLYMERIC MDI, 3가지 배합을 약 3mm 두께로 도포하였다. 사인장강도 시험의 국내 시험 평가 기준은 마련되어 있지 않음. 따라서 ASTM E 519-10(ASTM 2010)에서 제시하는 시험 방법을 참고하여 진행하였으며 폴리우레아의 파단이 일어날 때까지 수직하중을 가력하였음. 폴리우레아의 보강성능을 확인하기 위해 조적체 파괴 시의 강도와 변위뿐만 아니라 폴리우레아 보강을 통해 보강된 극한하중과 최대변위를 측정하여 내진성능 증진을 간접적으로 평가하였음. 그림 2.14은 사인장강도 시험의 개념도를 나타내었으며, 그림 2.15은 진행과정을 나타내었음. 조적요소에서의 사인장강도는 실험 결과를 바탕으로 다음 식과 같이 산정하였음.

$$\tau_{ps} = \frac{0.707P}{A_n} \text{ (MPa)}$$

$P$  : 작용하중,  $A_n$  : 조적요소의 단면적

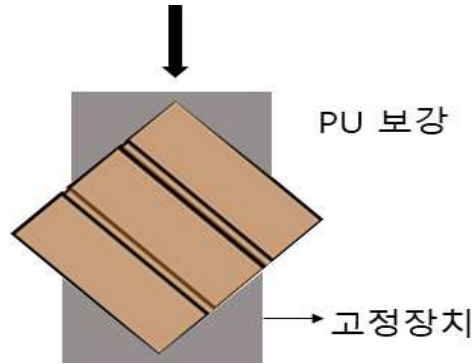


그림 2.14 사인장강도 시험 개념도

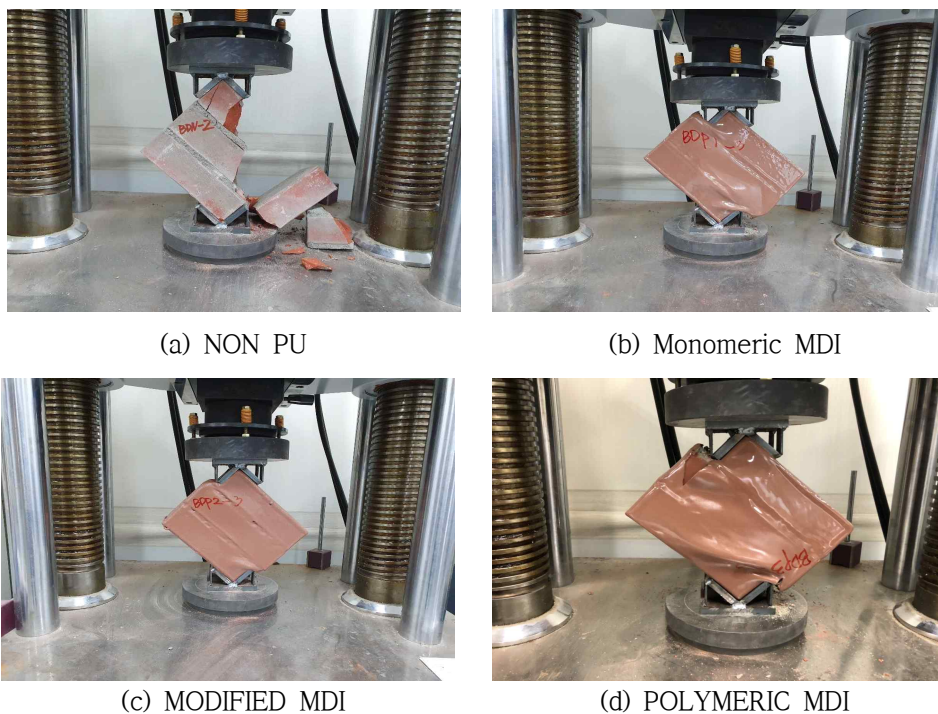


그림 2.15 사인장강도 시험

## 시험결과

표 2.7-2.10은 무도포 시편, MONOMERIC MDI, MODIFIED MDI, POLYMERIC MDI의 각 시편 별로 사인장강도 시험을 진행하였을 때의 결과를 나타냄. 그림 2.16~2.20은 조적요소에 작용하는 하중과 변위에 따른 관계를 나타내었으며, 최대하중에 도달과 동시에 급격한 응력저하를 나타내었음. 무도포 시편의 경우 최대하중에 도달함과 동시에 시험체의 파괴가 일어났으나, 폴리우레아를 도포한 시험체의 경우 급격한 파괴가 일어나지 않고 오히려 변위가 증가함에 따라 작용 하중이 증가하는 경향을 나타냈음. 내진보강용 폴리우레아의 사인장강도 보강성능을 평가했을 때 Non PU < MODIFIED MDI < Monomeric MDI < POLYMERIC MDI 순으로 나타났음.

표 2.7 무도포 사인장 강도 시험결과

| 시험편 번호 | 최대하중<br>(kN) | 강도<br>(MPa) | 변위<br>(mm) | 최대변위<br>(mm) | 극한하중<br>(kN) |
|--------|--------------|-------------|------------|--------------|--------------|
| 1      | 52.2         | 1.02        | 1.05       | 1.10         | 52.2         |
| 2      | 52.4         | 1.03        | 1.55       | 1.60         | 52.4         |
| 3      | 62.8         | 1.23        | 0.94       | 1.0          | 62.8         |
| 평균     | 55.8         | 1.09        | 1.18       | 1.23         | 55.8         |

표 2.8 MONOMERIC MDI 사인장 강도 시험결과

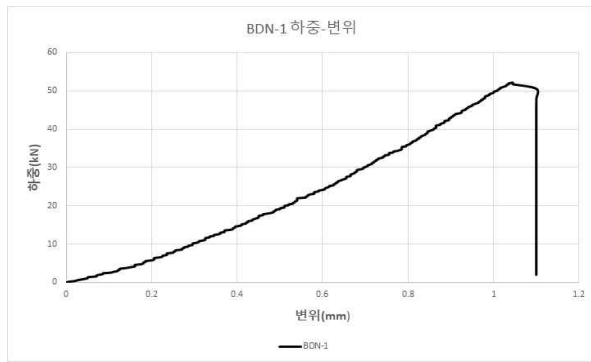
| 시험편 번호 | 최대하중<br>(kN) | 강도<br>(MPa) | 변위<br>(mm) | 최대변위<br>(mm) | 극한하중<br>(kN) |
|--------|--------------|-------------|------------|--------------|--------------|
| 1      | 33.8         | 0.66        | 1.80       | 26.22        | 82.8         |
| 2      | 68.0         | 1.33        | 1.91       | 39.64        | 68.0         |
| 3      | 92.0         | 1.80        | 2.29       | 47.18        | 92.0         |
| 평균     | 64.6         | 1.27        | 2.0        | 37.68        | 80.93        |

표 2.9 MODIFIED MDI 사인장 강도 시험결과

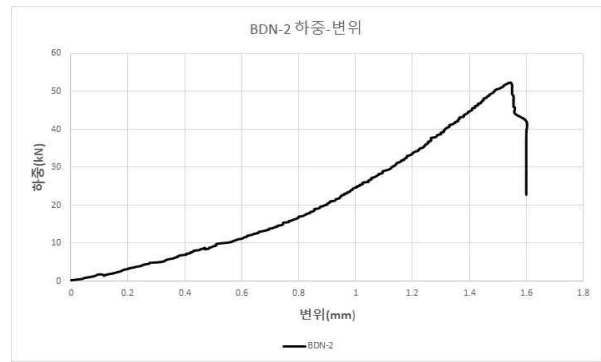
| 시험편 번호 | 최대하중<br>(kN) | 강도<br>(MPa) | 변위<br>(mm) | 최대변위<br>(mm) | 극한하중<br>(kN) |
|--------|--------------|-------------|------------|--------------|--------------|
| 1      | 67.2         | 1.32        | 2.69       | 45.78        | 74.8         |
| 2      | 81.2         | 1.59        | 3.01       | 47.65        | 81.2         |
| 3      | 50.8         | 0.99        | 2.84       | 45.23        | 50.80        |
| 평균     | 66.4         | 1.3         | 2.85       | 46.22        | 68.93        |

표 2.10 POLYMERIC MDI 사인장 강도 시험결과

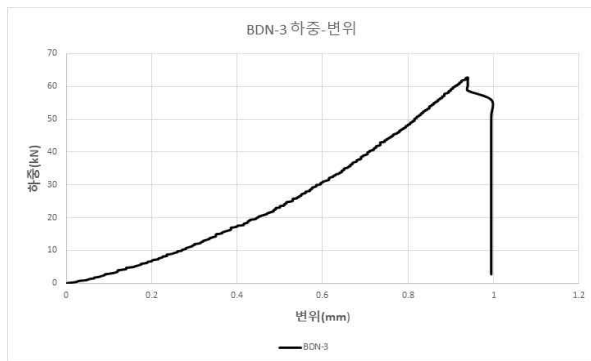
| 시험편 번호 | 최대하중<br>(kN) | 강도<br>(MPa) | 변위<br>(mm) | 최대변위<br>(mm) | 극한하중<br>(kN) |
|--------|--------------|-------------|------------|--------------|--------------|
| 1      | 90.8         | 1.78        | 2.63       | 46.91        | 90.8         |
| 2      | 73.2         | 1.43        | 2.68       | 46.55        | 78.8         |
| 3      | 61.2         | 1.2         | 2.75       | 46.65        | 83.2         |
| 평균     | 75.07        | 1.47        | 2.69       | 46.7         | 84.27        |



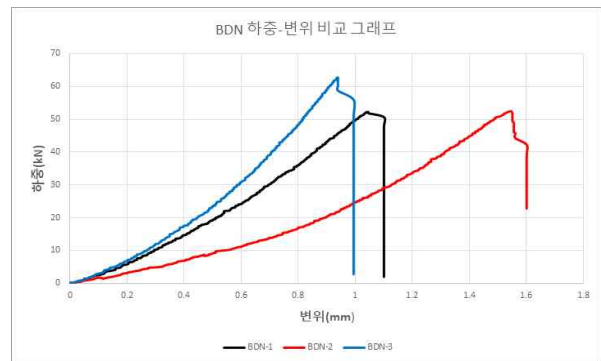
(a) 1번 시편



(b) 2번 시편

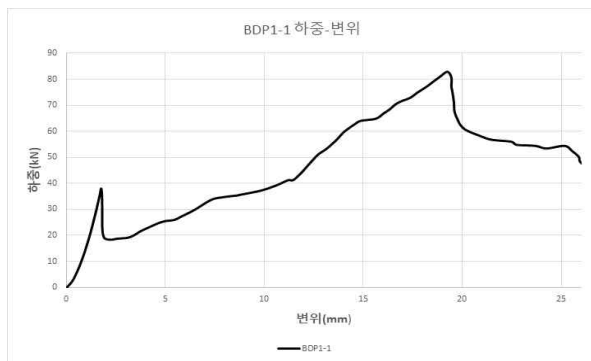


(c) 3번 시편

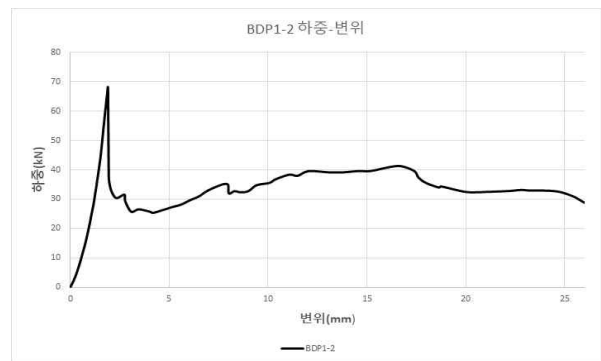


(d) 1-3번 시편

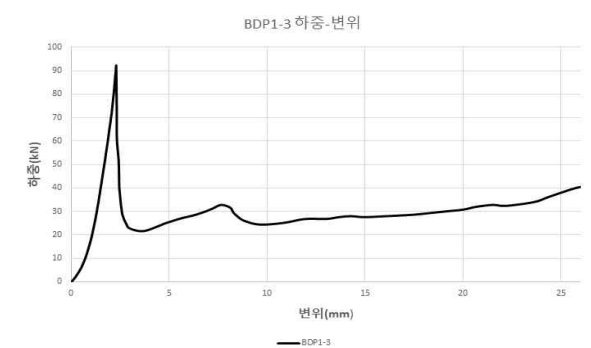
그림 2.16 NON PU 사인장강도 시험 하중-변위 그래프



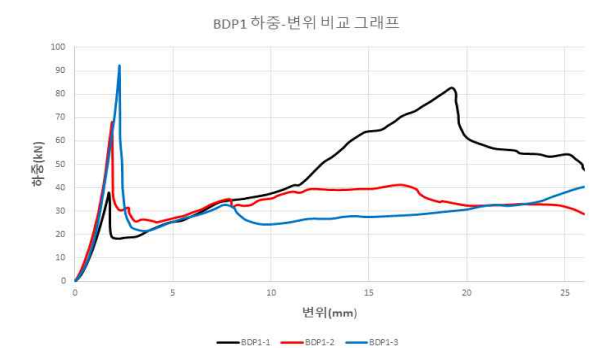
(a) 1번 시편



(b) 2번 시편

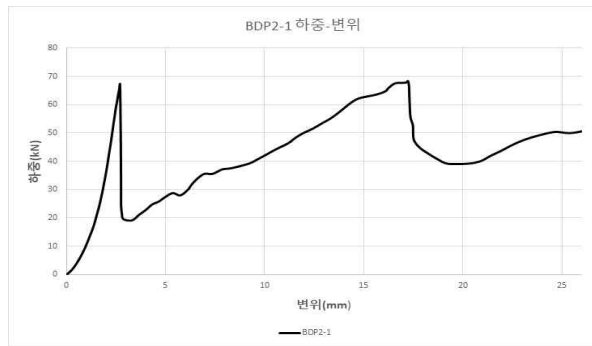


(c) 3번 시편

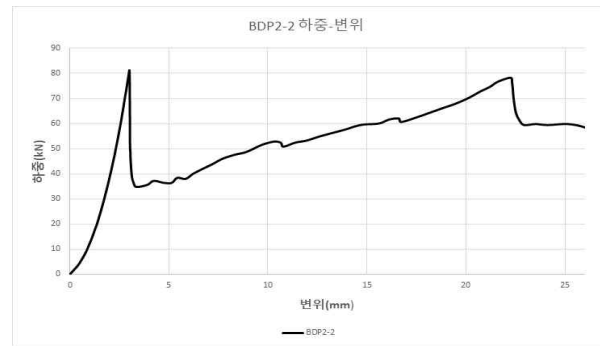


(d) 1-3번 시편

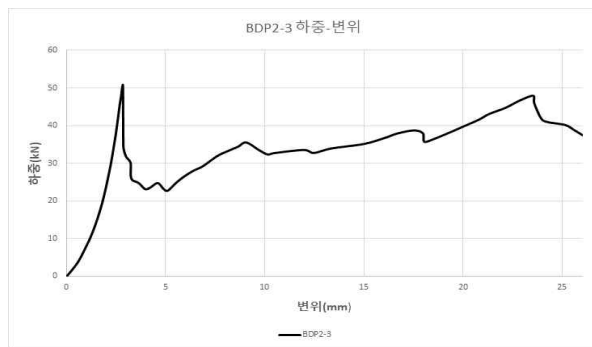
그림 2.17 MONOMERIC MDI 사인장강도 시험 하중-변위 그래프



(a) 1번 시편



(b) 2번 시편

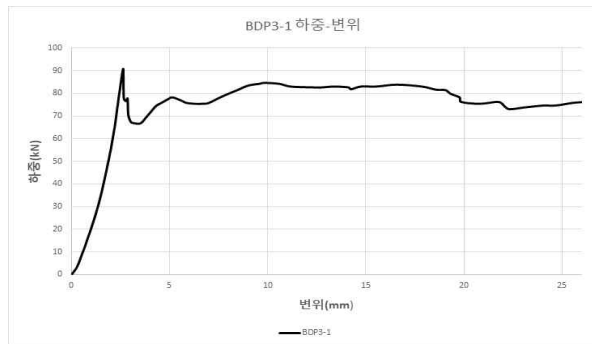


(c) 3번 시편

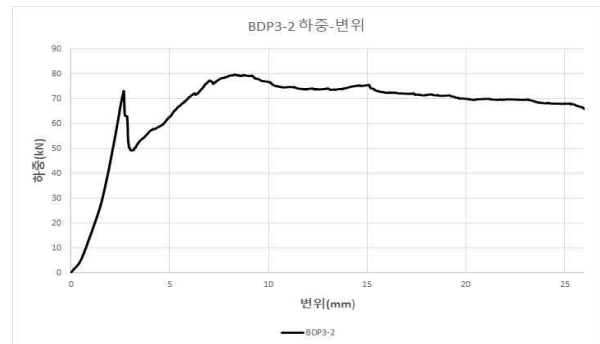


(d) 1-3번 시편

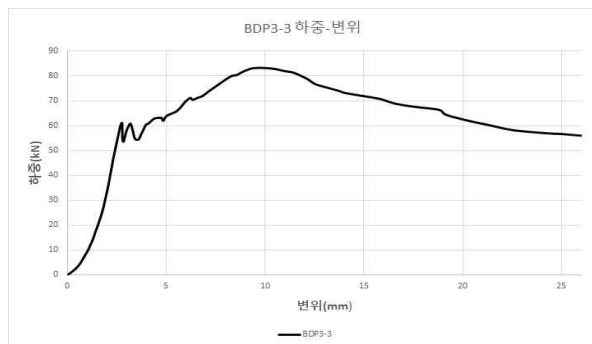
그림 2.18 MODIFIED MDI 사인장강도 시험 하중-변위 그래프



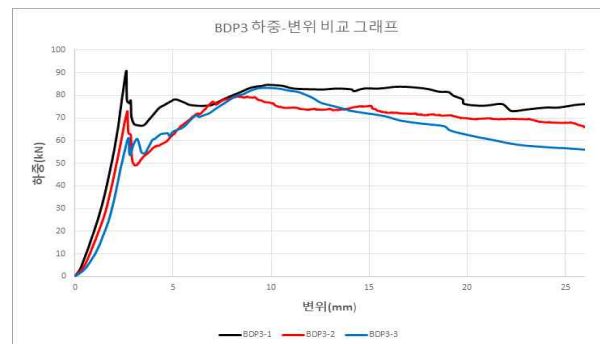
(a) 1번 시편



(b) 2번 시편



(c) 3번 시편



(d) 1-3번 시편

그림 2.19 POLYMERIC MDI 사인장강도 시험 하중-변위 그래프



그림 2.20 배합별 사인장 강도 시험 하중-변위 그래프

- 폴리우레아 보강 실험체 휨 실험

○ 3개의 최적배합 도출 후, 보강성능을 검증하기 위해 그림 2.21와 같이 휨 실험을 수행하였음. 100\*100\*400 크기의 보를 제작해 무보강/PU보강 휨 실험을 수행하였으며, 단순보강뿐 아니라 표면보강공법(Near Surface Mounted)를 응용한 보강공법의 개발 및 검증을 수행함. 이를 통해 고강도, 고인성 폴리우레아의 보강효과를 확인하였음.

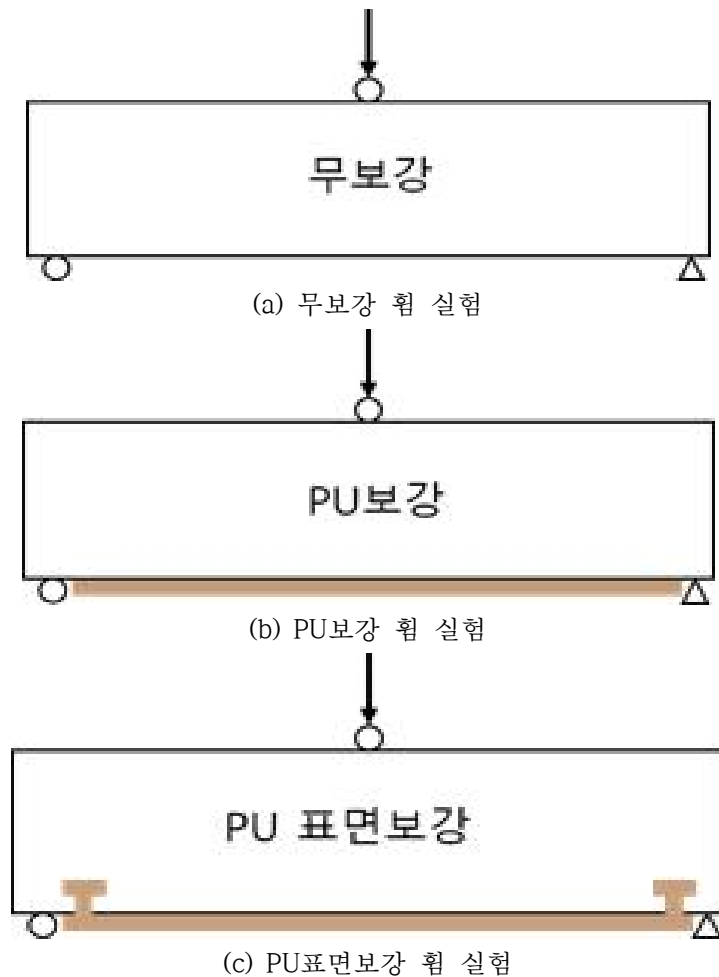


그림 2.21 PU 보강 부재 휨 실험

시험방법

본 연구에서는 개발된 폴리우레아의 보강성능을 간접적으로 시험하기 위해 100\*100\*400mm, 경간 300mm 크기의 보 시편을 제작하였음. 휨 강도 성능평가를 위해 콘크리트 보에 MODIFIED MDI, POLYMERIC MDI, Monomeric MDI 3가지 배합을 그림 2.22과 같이 약 3.5mm의 두께로 폴리우레아를 도포하였음. 휨 보강성능 시험은 KS F 2408 규격에 따라 그림 2.23와 같이 수행하였으며, 공시체에 충격을 가하지 않도록 일정한 속도로 하중을 가했음. 하중은

4점 하중법에 따라 2개의 지지롤러와 2개의 재하롤러로 이루어진 장치에 하중을 연직으로, 또한 중심이 치우치지 않게 가했음. 변위제어 방식으로 시험을 진행할 경우 폴리우레아의 고연성 효과를 파악하기 어렵기 때문에 하중을 가하는 속도를 가장자리 응력도의 증가율이 매초 0.06MPa가 되도록 조정하고, 최대하중 이후 폴리우레아가 파단될 때까지 그 증가율을 유지하였음. 또한 중앙부에 변위 측정자기센서(LVDT)를 설치하여 변위를 측정하였음. 위와 같은 방법으로 시험을 진행 후 공시체의 인장쪽 표면 지간 방향 중심선의 4점 사이에서 파괴되었을 때 휨강도를 다음식과 같이 산출할 수 있음.

$$f_b = pl/bh^2$$

$f_b$  : 휨강도(MPa),  $p$  : 시험기가 나타내는 최대하중(N),  $l$  : 지간(mm),  $b$  : 파괴 단면의 너비(mm),  $h$  : 파괴 단면의 높이(mm)

또한 공시체가 인장 쪽 표면의 지간 방향 중심선의 4점의 바깥쪽에서 파괴된 경우는 편심을 받은 것이기 때문에 그 시험결과를 무효로 함.



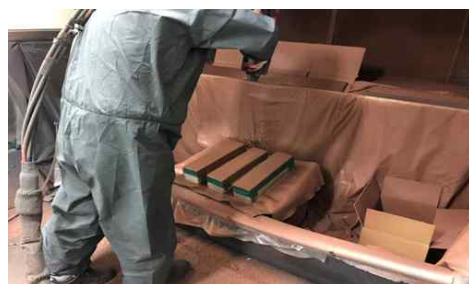
(a) 도포 전 시험체



(b) 프라이머 도포



(c) 폴리우레아 배합



(d) 폴리우레아 도포

그림 2.22 휨강도 시험 준비과정

## 시험결과 (1차)

내진보강용 폴리우레아의 수평 휨강도 보강성능을 평가했을 때 Non PU < POLYMERIC MDI < MODIFIED MDI < Monomeric MDI 순으로 폴리우레아 보강된 시험체는 평균적으로 강도가

증진되는 효과를 표 2.11-2.14과 같이 확인할 수 있었음. 이 실험에서 균열이 인장 쪽 표면의 지간 방향 중심선의 4점의 바깥쪽에서 파괴된 경우는 편심을 받은 것이기 때문에 그 시험결과는 무효로 하였음. 폴리우레아를 도포하지 않은 콘크리트 보의 경우 수평 휨강도에 도달하였을 때 급격한 파괴 양상을 나타냈음. 폴리우레아를 도포한 콘크리트 보는 Monomeric MDI 배합의 경우 휨 강도의 보강성능이 있으며, 콘크리트의 파괴 이후에도 그림 2.23과 같이 폴리우레아는 파단되지 않고 일정 수준 이상의 강도로 보가 파괴되는 것을 막아주는 양상을 보였음. MODIFIED MDI 배합의 경우 고연성의 폴리우레아가 콘크리트 보의 갑작스러운 파괴를 막아주는 양상을 보이나 Monomeric MDI 배합에 비해 휨강도와 극한하중이 낮았음. POLYMERIC MDI 배합의 경우에는 휨강도 보강성능도 다른 배합에 비해 약하고 연성도 낮아 콘크리트 보가 갑작스럽게 파괴되는 양상을 보임. 고연성·고인성의 폴리우레아를 도포 하였을 경우에는 콘크리트의 균열 이후에도 휨강도가 급격하게 감소하거나 파괴되는 양상을 보이지 않았으며, 이에 따른 각 배합별 하중-변위 그래프를 그림 2.24-2.27 까지 나타내었음.

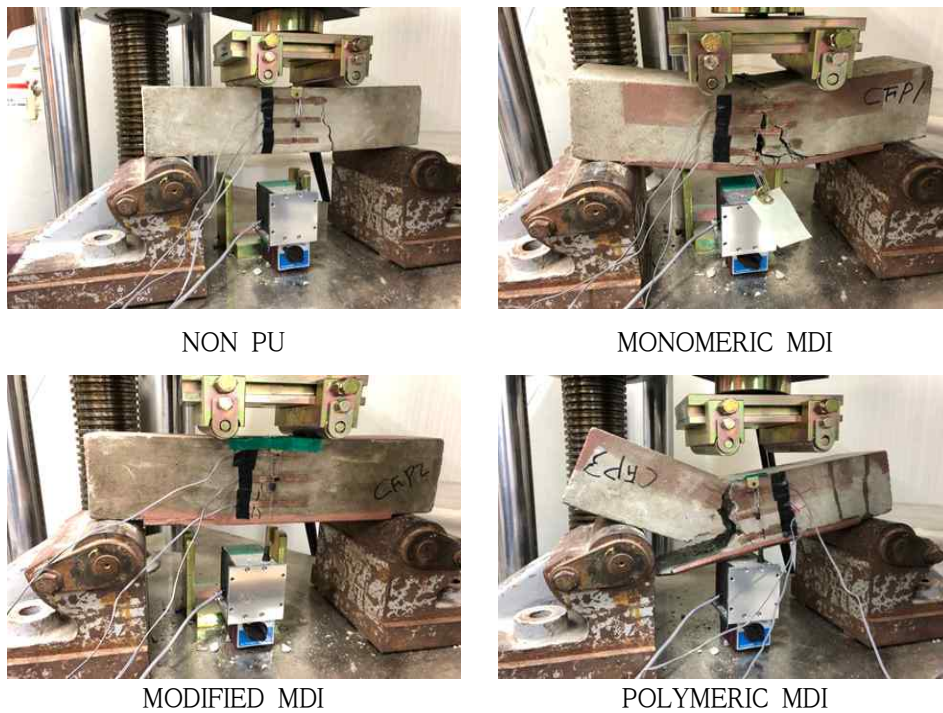


그림 2.23 휨강도 시험

표 2.11 무도포 휨강도 시험결과

| 시험편 번호 | 최대하중<br>(kN) | 강도<br>(MPa) | 변위<br>(mm) | 최대변위<br>(mm) | 극한하중<br>(kN) |
|--------|--------------|-------------|------------|--------------|--------------|
| 1      | 9.2          | 2.76        | 1.17       | 1.17         | 9.2          |
| 2      | 10.4         | 3.12        | 2.00       | 2.00         | 10.4         |
| 3      | -            | -           | -          | -            | -            |
| 평균     | 9.8          | 2.94        | 1.58       | 1.58         | 9.8          |

표 2.12 MONOMERIC MDI 휨강도 시험결과

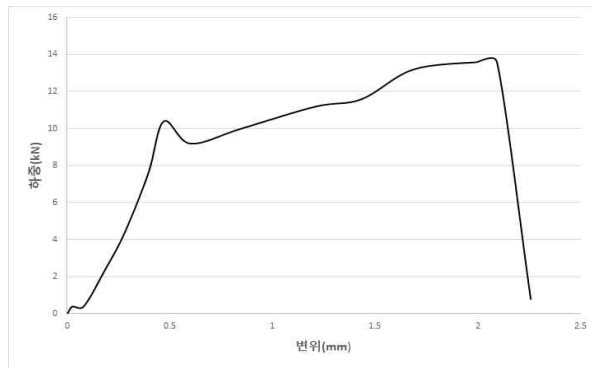
| 시험편 번호 | 최대하중<br>(kN) | 강도<br>(MPa) | 변위<br>(mm) | 최대변위<br>(mm) | 극한하중<br>(kN) |
|--------|--------------|-------------|------------|--------------|--------------|
| 1      | 14.4         | 4.32        | 1.16       | 22.83        | 16.4         |
| 2      | 14.8         | 4.44        | 1.43       | 20.79        | 14.8         |
| 3      | 11.4         | 3.84        | 1.30       | 25.96        | 12.8         |
| 평균     | 13.53        | 4.2         | 1.30       | 23.19        | 14.67        |

표 2.13 MODIFIED MDI 휨강도 시험결과

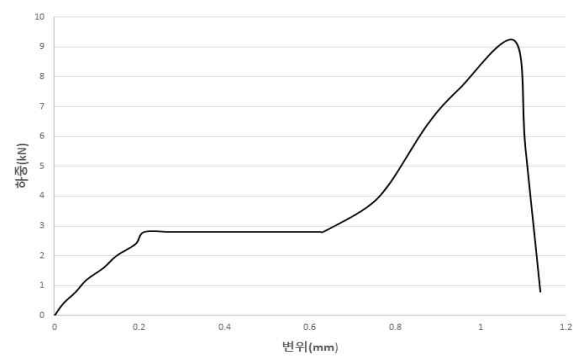
| 시험편 번호 | 최대하중<br>(kN) | 강도<br>(MPa) | 변위<br>(mm) | 최대변위<br>(mm) | 극한하중<br>(kN) |
|--------|--------------|-------------|------------|--------------|--------------|
| 1      | -            | -           | -          | -            | -            |
| 2      | 12.4         | 3.72        | 1.42       | 17.37        | 12.4         |
| 3      | 11.6         | 3.48        | 1.45       | 15.62        | 11.6         |
| 평균     | 2.0          | 3.6         | 1.43       | 16.49        | 12.0         |

표 2.14 POLYMERIC MDI 휨강도 시험결과

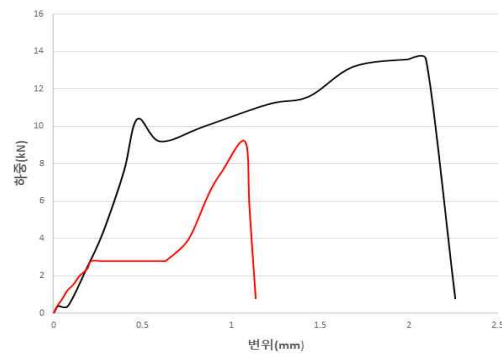
| 시험편 번호 | 최대하중<br>(kN) | 강도<br>(MPa) | 변위<br>(mm) | 최대변위<br>(mm) | 극한하중<br>(kN) |
|--------|--------------|-------------|------------|--------------|--------------|
| 1      | -            | -           | -          | -            | -            |
| 2      | 13           | 4.02        | 2.01       | 3.14         | 14.2         |
| 3      | 12.4         | 3.72        | 1.15       | 3.15         | 15.6         |
| 평균     | 12.7         | 3.87        | 1.58       | 3.14         | 14.9         |



(a) 1번 시편

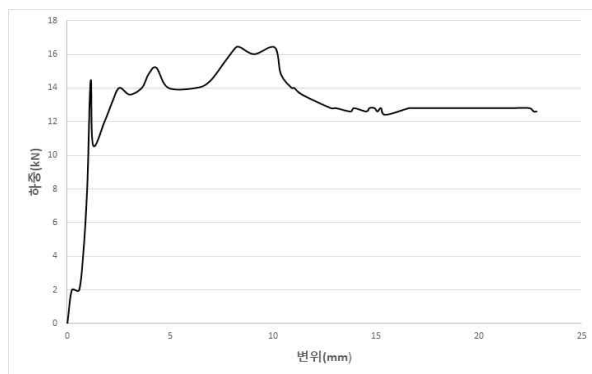


(b) 2번 시편

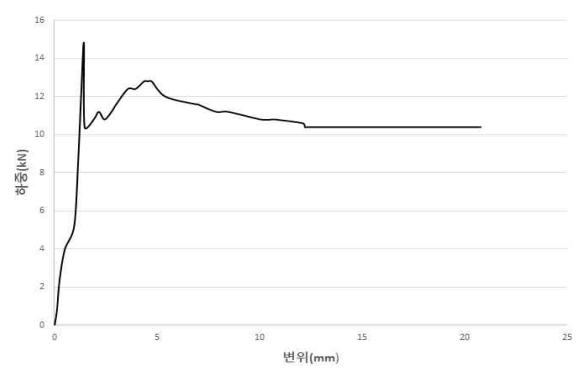


(c) 1-2번 시편

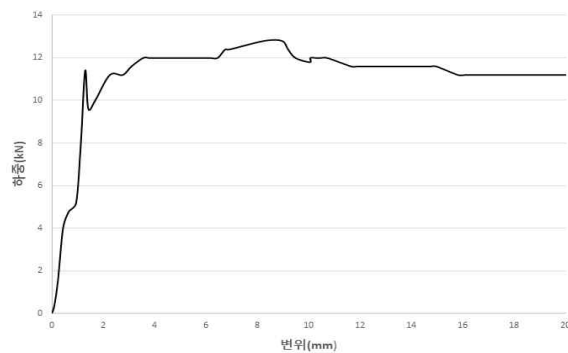
그림 2.24 NON PU 휨강도 시험 하중-변위 그래프



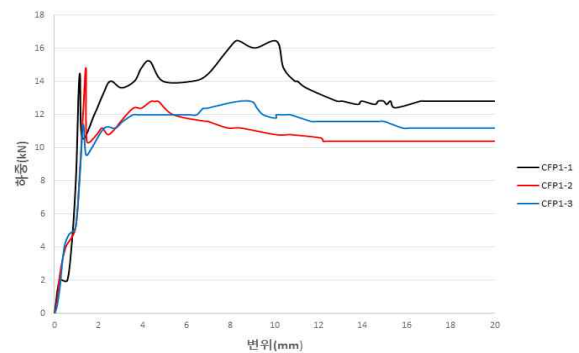
(a) 1번 시편



(b) 2번 시편

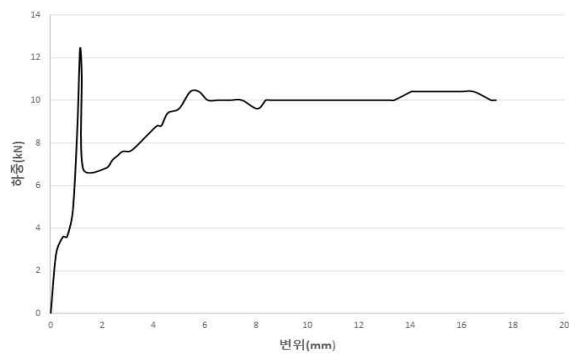


(c) 3번 시편

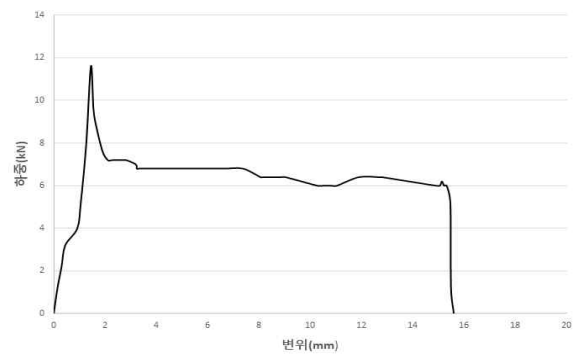


(d) 1-3번 시편

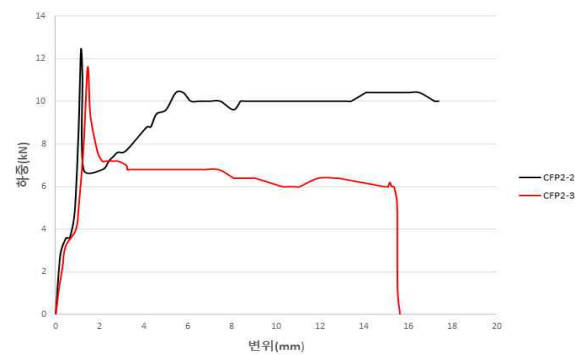
그림 2.25 MONOMERIC MDI 휨강도 시험 하중-변위 그래프



(a) 2번 시편

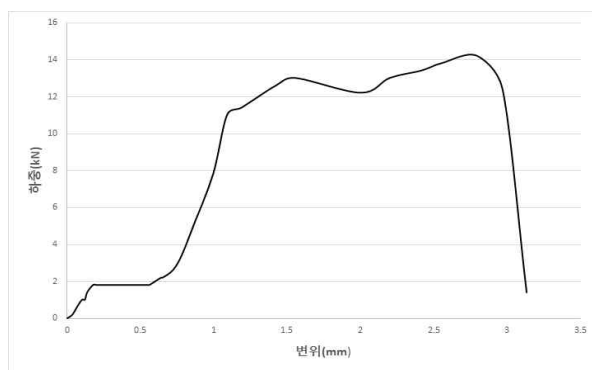


(b) 3번 시편

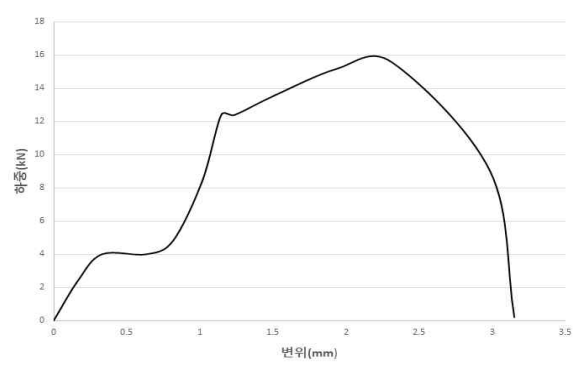


(c) 2-3번 시편

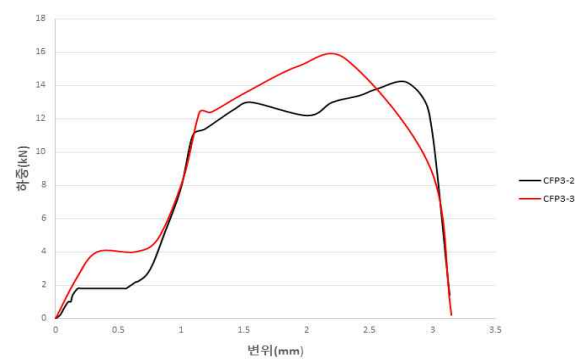
그림 2.26 MODIFIED MDI 휨강도 시험 하중-변위 그래프



(a) 2번 시편



(b) 3번 시편



(c) 2-3번 시편

그림 2.27 POLYMERIC MDI 휨강도 시험 하중-변위 그래프

## 시험결과 (2차)

앞선 1차 내진보강용 폴리우레아의 수평 휨강도 보강성능을 평가했을 때 Non PU < POLYMERIC MDI < MODIFIED MDI < MONOMERIC MDI 폴리우레아 배합 순으로 휨강도가 증진되는 효과를 1차 시험결과와 같이 확인할 수 있었음. 1차시험 결과를 바탕으로 MONOMERIC MDI 배합의 강도증진 효과가 가장 좋다고 판단하였음. 따라서 콘크리트 표면에 MONOMERIC MDI 배합의 폴리우레아를 매립하는 형태의 표면매립(NSM)공법을 적용하여 구조물의 보강성능을 평가하였음. 그림 2.28과 같이 두 가지 형태의 NSM 공법을 적용하여 휨강도 시험을 진행하였음.



그림 2.28 NSM 공법의 개념도

Non PU < MONOMERIC MDI < NSM1 < NSM2 순으로 강도가 증진되는 효과를 표 2.15 - 표 2.18와 같이 확인할 수 있었음. NSM1번 공법을 적용했을 경우 MONOMERIC MDI 배합으로만 보강했을 경우에 비해 휨강도가 약4.3%가 증가하였고, NSM2번 공법의 경우 21.7%가 증가하여 표면매립공법을 적용하였음. 콘크리트 파괴 후의 거동 및 최대변위는 표 2.15 - 표 2.18과 같이 나타내었음. 이에 대한 하중-변위 그래프를 그림 2.30 - 2.33과 같이 비슷한 수준으로 판단되지만 NSM공법을 적용하한 부재의 경우 NSM공법을 적용하지 않은 부재보다 폴리우레아와 콘크리트 보 사이에 부착강도가 증가하여 초기 강성 및 휨강도가 증가하는 것으로 사료됨. 그림 2.29은 실험과정을 나타냈으며, 그림 2.31은 MONOMERIC MDI 배합으로만 보강하여 변위 20mm에 도달했을 때의 휨강도에 대한 공인성적서를 나타냈음.



NON PU



MONOMERIC MDI



NSM 1



NSM 2

그림 2.29 콘크리트 휨 강도 시험

표 2.15 무도포 휨강도 시험결과

| 시험편 번호 | 최대하중<br>(kN) | 강도<br>(MPa) | 변위<br>(mm) | 최대변위<br>(mm) | 극한하중<br>(kN) |
|--------|--------------|-------------|------------|--------------|--------------|
| 1      | 7.2          | 2.16        | 1.12       | 1.12         | 7.2          |
| 2      | 6.4          | 1.92        | 1.54       | 1.54         | 6.4          |
| 3      | 9.4          | 2.82        | 1.46       | 1.46         | 9.4          |
| 평균     | 7.67         | 2.30        | 1.37       | 1.37         | 7.67         |

표 2.16 MONOMERIC MDI 휨강도 시험결과

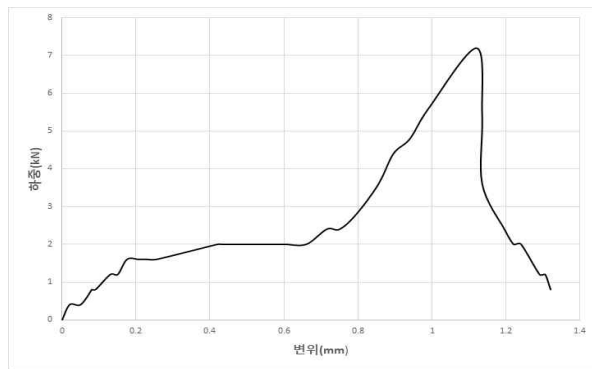
| 시험편 번호 | 최대하중<br>(kN) | 강도<br>(MPa) | 변위<br>(mm) | 최대변위<br>(mm) | 극한하중<br>(kN) |
|--------|--------------|-------------|------------|--------------|--------------|
| 1      | 8.4          | 2.52        | 1.18       | 17.57        | 41.2         |
| 2      | 9.6          | 2.88        | 1.34       | 17.89        | 38.4         |
| 3      | 9.6          | 2.88        | 1.45       | 19.54        | 34.0         |
| 평균     | 9.2          | 2.76        | 1.32       | 18.33        | 37.87        |

표 2.17 NSM1 휨강도 시험결과

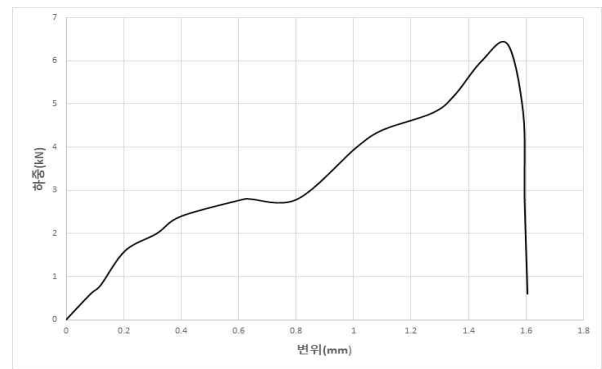
| 시험편 번호 | 최대하중<br>(kN) | 강도<br>(MPa) | 변위<br>(mm) | 최대변위<br>(mm) | 극한하중<br>(kN) |
|--------|--------------|-------------|------------|--------------|--------------|
| 1      | 9.6          | 2.88        | 1.87       | 13.67        | 52.0         |
| 2      | 7.8          | 2.34        | 1.35       | 19.24        | 43.0         |
| 3      | 11.4         | 3.42        | 2.71       | 14.36        | 43.4         |
| 평균     | 9.6          | 2.88        | 1.97       | 15.76        | 46.13        |

표 2.18 NSM2 휨강도 시험결과

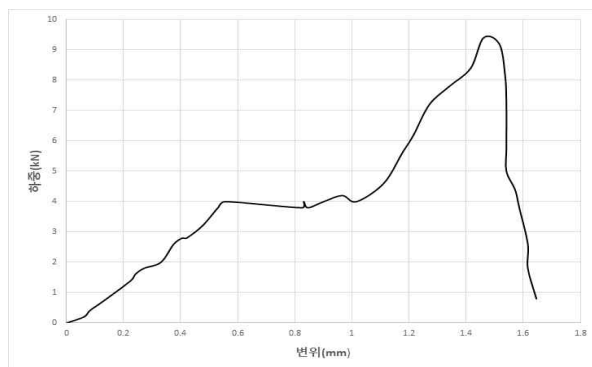
| 시험편 번호 | 최대하중<br>(kN) | 강도<br>(MPa) | 변위<br>(mm) | 최대변위<br>(mm) | 극한하중<br>(kN) |
|--------|--------------|-------------|------------|--------------|--------------|
| 1      | 11.2         | 3.36        | 1.5        | 18.51        | 42.2         |
| 2      | 10.4         | 3.12        | 1.44       | 19.24        | 48.0         |
| 3      | 12.0         | 3.60        | 2.59       | 18.33        | 50.4         |
| 평균     | 11.2         | 3.36        | 1.84       | 18.69        | 46.87        |



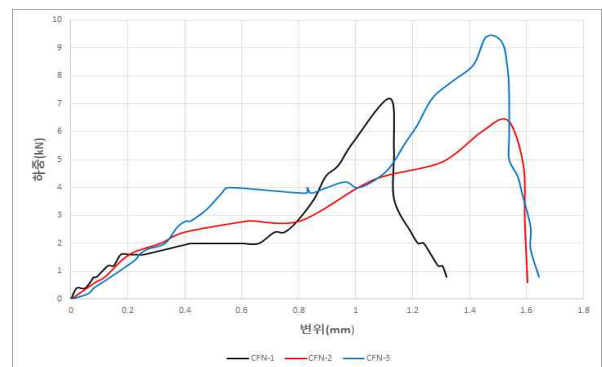
(a) 1번 시편



(b) 2번 시편

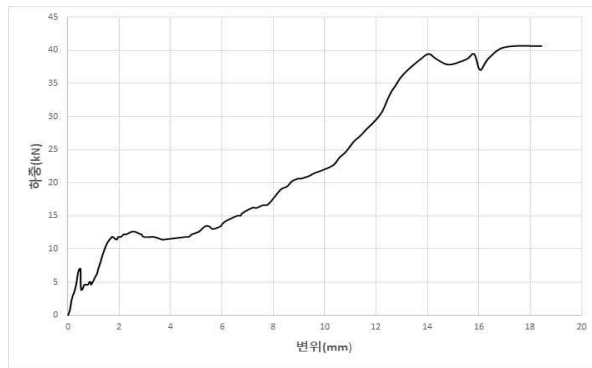


(c) 3번 시편

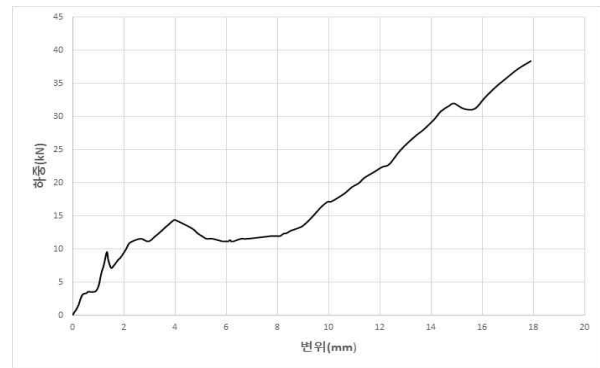


(d) 1-3번 시편

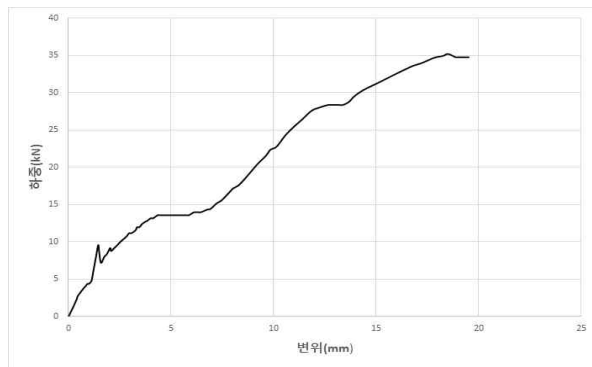
그림 2.30 NON PU 휨강도 시험 하중-변위 그래프



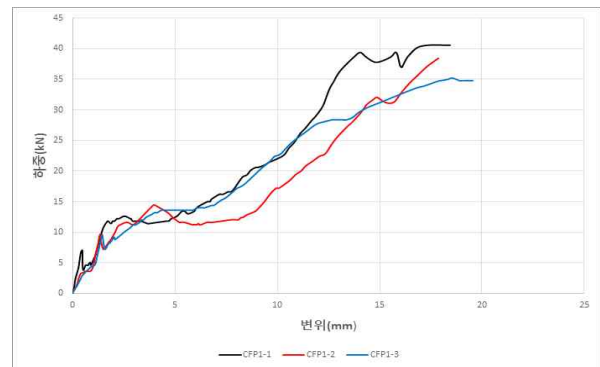
(a) 1번 시편



(b) 2번 시편

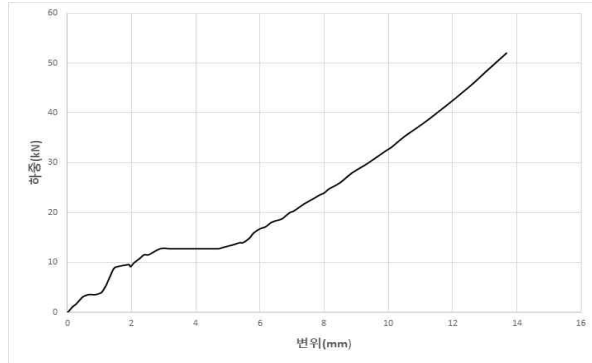


(c) 3번 시편

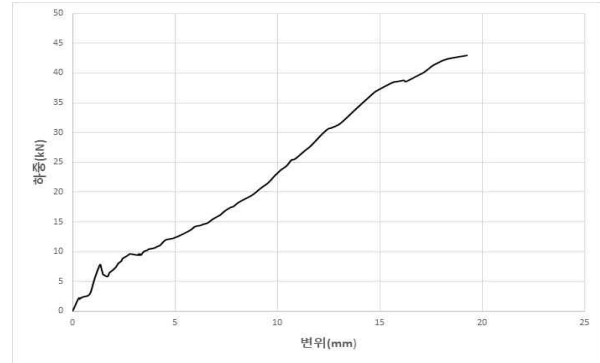


(d) 1-3번 시편

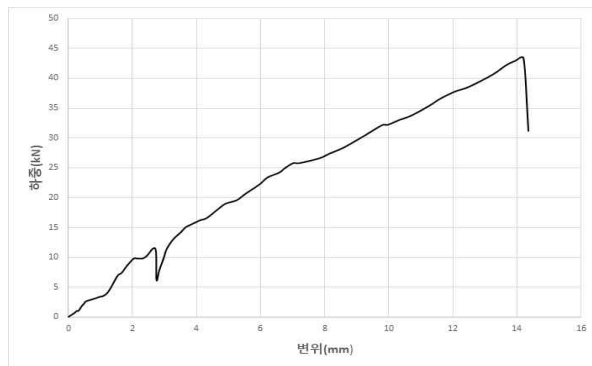
그림 2.31 MONOMERIC MDI 휨강도 시험 하중-변위 그래프



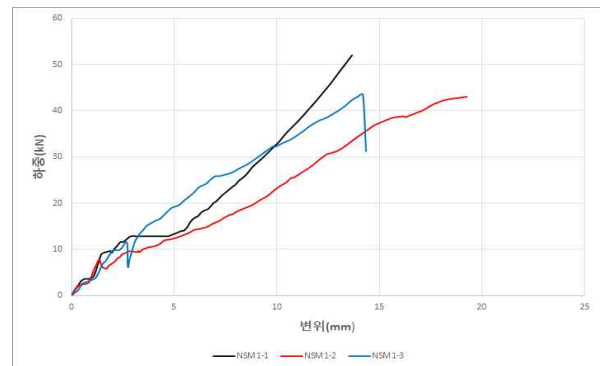
(a) 1번 시편



(b) 2번 시편

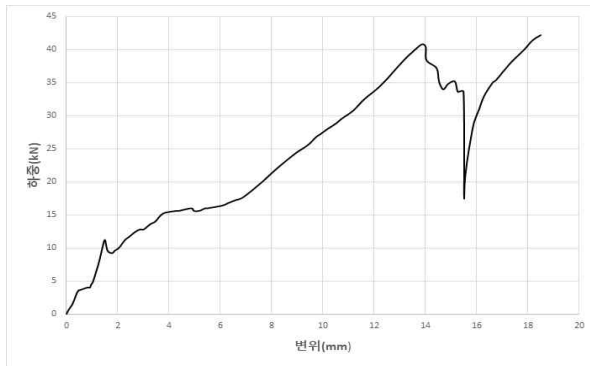


(c) 3번 시편

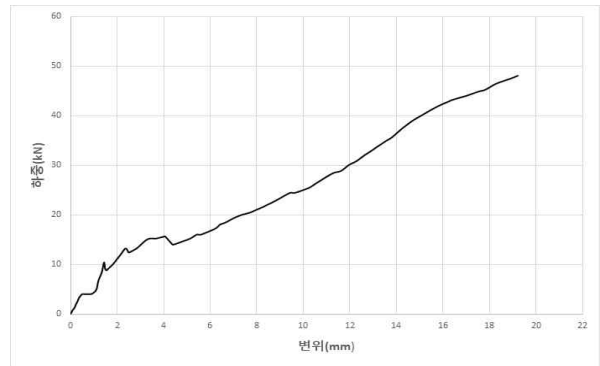


(d) 1-3번 시편

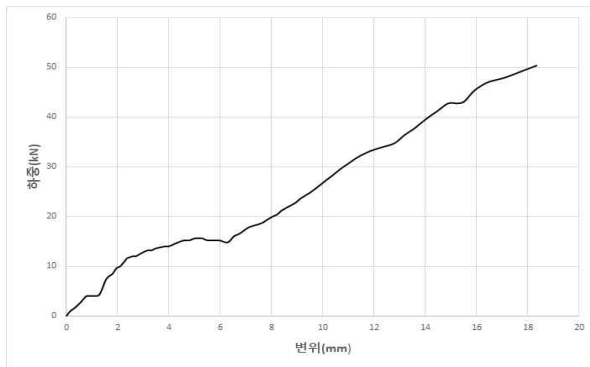
그림 2.32 NSM1 휨강도 시험 하중-변위 그래프



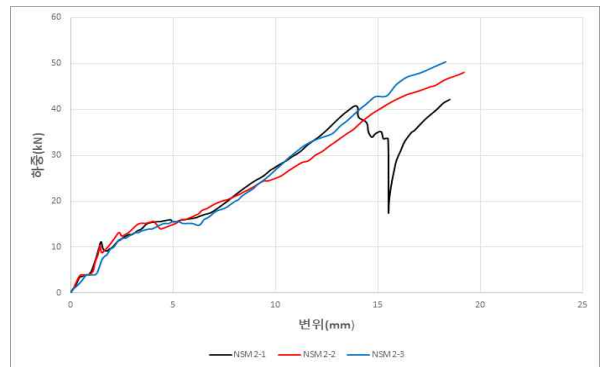
(a) 1번 시편



(b) 2번 시편



(c) 3번 시편



(d) 1-3번 시편

그림 2.33 NSM2 휨강도 시험 하중-변위 그래프

내진보강용 폴리우레아의 수평 휨강도 보강성능을 2차례에 걸친 시험결과 폴리우레아의 휨강도 보강성능을 확인하여 한국콘크리트 시험원에 공인성적서를 의뢰하였음. 공인시험을 의뢰한 시편은 3차로 제작한 콘크리트 보에 Monomeric MDI 배합을 도포하여 의뢰하였음. 의뢰 시 무보강 시편과 비교하여 확연한 결과차이를 확인하기 위하여 콘크리트 파단 시 휨강도가 아닌 시험체의 변위가 20mm에 도달하였을 때의 강도를 측정된 결과임. 또한 콘크리트의 파단 시 휨강도를 확인하기 위하여 자체 시험을 진행한 결과는 다음 표 2.19, 발급받은 성적서는 그림 2.34과 같이 나타내었음. 공인시험 결과 극한하중이 파단 시 하중의 2배 이상으로 버틸 수 있는 것을 확인하였으므로 폴리우레아를 도포한 구조물의 경우 급격한 파괴를 막아 지진피해를 최소화 하는데 효과적일 것으로 예상됨.

표 2.19 3차 MONOMERIC MDI 휨강도 시험결과

| 시험편 번호 | 최대하중<br>(kN) | 강도<br>(MPa) | 파괴변위<br>(mm) | 최대변위<br>(mm) | 극한하중<br>(kN) |
|--------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| 1      | 16.2         | 4.86        | 0.65         | 16.99        | 40.6         |
| 2      | 11           | 3.3         | 1.66         | 11.9         | 41.6         |
| 3      | 11.8         | 3.54        | 1.35         | 16.275       | 39           |
| 평균     | 13           | 3.9         | 1.22         | 15.055       | 40.4         |


**시험성적서**


주소: 경기도 오산시 동부대로 372 | 상주서번호: KCTL-06-20-02752  
 전화: 031-385-1882 | 팩스: 031-373-1883 | 레이저 (1/1) (중 1)  
 홈페이지: http://www.kctl.or.kr

---

1. 의뢰자  
 ○ 기관명: 연세대학교 산학협력단  
 ○ 주소: 서울 서대문구 연세로 50 제1공학관 A404호  
 ○ 의뢰일자: 2020. 06. 11.

2. 시험성적서의 용도: 품질관리용

3. 시료명: CFPI

4. 시험기간: 2020. 06. 11 ~ 2020. 06. 12

5. 시험방법: KS F 2408 : 2016

6. 시험장소: ☒ 고정시험실 ☐ 현장시험  
 (주소: 경기도 오산시 동부대로 372 )

---

7. 시험결과

| 시험항목   | 단위  | 결과 | 비고  |
|--------|-----|----|-----|
| 휨강도 시험 | MPa | 1  | 8.5 |
|        |     | 2  | 7.7 |
|        |     | 3  | 9.9 |
|        |     | 평균 | 8.7 |

붙.

※ 본 성적서는 KS Q ISO/IEC 17025 및 KOLAS 인정범위에 해당하는 공인성적서입니다.

---

|          |         |
|----------|---------|
| 작성일자     | 기술책임자   |
| 인성명: 이재호 | 성명: 이윤수 |

본 성적서의 시험결과는 고객이 제시한 시료에 대한 결과임.

2020 . 06 . 12 .

**한국인정기구 인정 한국 콘크리트 시험원**

위 성적서는 국제시험기관인정협력체(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협정(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인받은 분야에 대한 시험결과입니다.

KCTL-TP-22-01(07)
Korea Concrete Testing Laboratory
\*첨가제부는 상단 홈페이지 및 QR코드로 확인가능

그림 2.34 MONOMERIC MDI 휨강도 공인성적서

#### 4) 폴리우레아 도포 실험체 내구성 실험

##### - 산(acid) 환경 노출시험

##### 시험방법

내진보강용 폴리우레아의 산(acid) 환경 노출 시험은 KS F 4922(폴리우레아 수지도막 방수재)에 준하여 실시하며, 그림 2.35에서 보는 바와 같이 산 처리온도  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  인 KS W ISO 6353-2(R37)에 규정된 황산 규정품 2% 용액 400mL 속에 시험편 3개를 168시간(7일) 담가 둔다. 침지 후 시험편을 물로 씻고 마른 형질로 닦은 후, 표준 상태에서 4시간 이상 가만히 놓아둔 뒤 인장강도와 파단 시 신장률을 측정함.

1) 인장강도 : 인장강도는 자동 기록된 차트지에서 최대하중을 읽고, 다음 식에 따라 계산하여 시험편 3개의 평균값으로 나타냄.

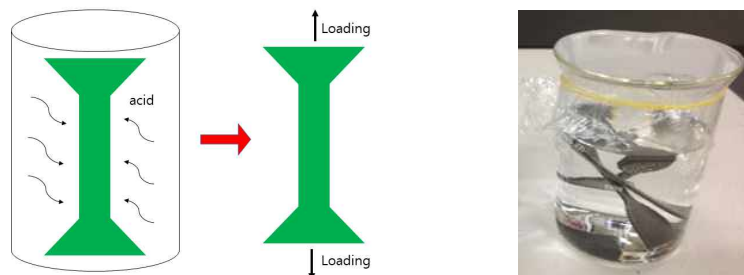
$$T_B = \frac{P_B}{A}$$

$T_B$  : 인장강도( $\text{N}/\text{mm}^2$ ),  $P_B$  : 최대하중(N),  $A$  : 시험편의 단면적( $\text{mm}^2$ )

2) 파단 시의 신장률 : 파단 시의 신장률은 파단 시의 눈금 간 거리를 측정하여, 다음 식에 따라 계산하여 시험편 3개의 평균값으로 나타냄.

$$E_B(\%) = \frac{(L_B - L_O)}{L_O} \times 100$$

$E_B$  : 파단시의 신장률(%),  $L_B$  : 파단시의 눈금 사이 거리(mm),  $L_O$  : 눈금 사이 거리(20mm)



산(acid)환경 노출시험 개념도

(b) 황산 2% 용액 400ml

그림 2.35 산(acid) 환경 노출 시험

## 시험결과

내진보강용 폴리우레아의 산환경 노출 시험 수행 후 산환경 노출 전·후의 인장강도 및 신장률을 측정한 결과는 표 2.20와 같음. 이전의 시험결과 중 성능이 가장 우수한 배합인 Monomeric MDI 시험편을 한국건설생활환경시험연구원에 의뢰해 공인 성적서를 발급받음. KS F 4922(폴리우레아 수지 도막 방수재)의 ‘방수재의 품질에서 산처리 이후 품질 기준’은 인장강도 비의 경우 80% 이상 150% 이하, 파단 시의 신장률의 경우 250% 이상으로 규정하고 있음. 산환경노출시험 결과 황산 2% 침지 후 인장강도 비 83%로 KS F 4922의 기준을 만족하였으며, 파단 시의 신장률 역시 457%로 KS 규격을 만족하였음. 시험결과 본 연구에서 개발하는 폴리우레아가 산환경 노출 시 내구성이 우수한 것으로 판단됨.

표 2.20 폴리우레아 산환경 노출 전·후 인장강도 및 신장률

|           | Monomeric MDI | 황산 2% 침지 | 비          |
|-----------|---------------|----------|------------|
| 인장강도(MPa) | 28            | 23       | 1.0 : 0.83 |
| 신장률(%)    | 460           | 457      | 1.0 : 1.0  |



## 시험성적서

000-990-987-4794

1. 성적서 번호 : CT19-11443IK
2. 의뢰자
  - 업체명 : 연세대학교산학협력단
  - 주소 : 서울특별시 서대문구 연세로 50, 제1공학관 A404
3. 시험기간 : 2019년 10월 18일 ~ 2019년 10월 29일
4. 시험성적서의 용도 : 일반 연구용
5. 시료명 : 폴리우레아 도막 아령형 3호
6. 시험방법
  - (1) KS F 4922-2007

### 7. 시험결과

(1) 폴리우레아 도막 아령형 3호

| 시험항목                   | 단위 | 시험방법 | 시험결과 | 비고                          | 시험장소 |
|------------------------|----|------|------|-----------------------------|------|
| 열화처리후의 인장성능(신장률)-인장강도비 | %  | (1)  | 83   | (20 ± 2) °C, (65 ± 20) % RH | A    |

\* 시험장소

A : 서울특별시 금천구 가산디지털1로 199 (가산동)



## 시험성적서

000-990-987-4794

1. 성적서 번호 : CT19-11443IK
2. 의뢰자
  - 업체명 : 연세대학교산학협력단
  - 주소 : 서울특별시 서대문구 연세로 50, 제1공학관 A404
3. 시험기간 : 2019년 10월 18일 ~ 2019년 10월 29일
4. 시험성적서의 용도 : 일반 연구용
5. 시료명 : 폴리우레아 도막 아령형 3호
6. 시험방법
  - (1) KS F 4922-2007

### 7. 시험결과

(1) 폴리우레아 도막 아령형 3호

| 시험항목                   | 단위 | 시험방법 | 시험결과 | 비고                          | 시험장소 |
|------------------------|----|------|------|-----------------------------|------|
| 열화처리후의 인장성능(신장률)-인장강도비 | %  | (1)  | 457  | (20 ± 2) °C, (65 ± 20) % RH | A    |

\* 시험장소

A : 서울특별시 금천구 가산디지털1로 199 (가산동)

| 확인  | 작성자<br>성명                                                                                              | 고급종 | 기술책임자<br>성명 | 영재원 |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------------|-----|
| 비고: | 1. 이 성적서는 KS Q ISO/IEC 17025 및 KOLAS 인정과 관련이 없으며, 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명에 한정된 결과로서 전체제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다. |     |             |     |
|     | 2. 이 성적서는 온도, 시간, 광도 및 소용량으로 사용될 수 있으며, 온도 이외의 사용을 금합니다.                                               |     |             |     |
|     | 3. 이 성적서가 일부를 발해하여 사용한 결과는 보증할 수 없습니다.                                                                 |     |             |     |
|     | 4. 이 성적서의 잔여부분은 홈페이지(www.kdrc.co.kr)에서 확인 가능합니다.                                                       |     |             |     |

2019년 10월 29일

한국건설생활환경시험연구원



| 확인  | 작성자<br>성명                                                                                              | 고급종 | 기술책임자<br>성명 | 영재원 |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------------|-----|
| 비고: | 1. 이 성적서는 KS Q ISO/IEC 17025 및 KOLAS 인정과 관련이 없으며, 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명에 한정된 결과로서 전체제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다. |     |             |     |
|     | 2. 이 성적서는 온도, 시간, 광도 및 소용량으로 사용될 수 있으며, 온도 이외의 사용을 금합니다.                                               |     |             |     |
|     | 3. 이 성적서가 일부를 발해하여 사용한 결과는 보증할 수 없습니다.                                                                 |     |             |     |
|     | 4. 이 성적서의 잔여부분은 홈페이지(www.kdrc.co.kr)에서 확인 가능합니다.                                                       |     |             |     |

2019년 10월 29일

한국건설생활환경시험연구원



결과문의 : 06503 서울특별시 금천구 가산디지털1로 199 (가산동) ☎ (02) 2102-2667

전자문서본은 시험결과에 대한 참고용입니다.

출력일자 : 2019.10.29

전자문서본(Electronic Copy)

양식(KP-12-01-02(1))

결과문의 : 06503 서울특별시 금천구 가산디지털1로 199 (가산동) ☎ (02) 2102-2667

전자문서본은 시험결과에 대한 참고용입니다.

출력일자 : 2019.10.29

전자문서본(Electronic Copy)

양식(KP-12-01-02(1))

그림 2.36 산(acid) 환경 노출시험 공인성적서

### - 자외선 노출시험

### 시험방법

자외선 노출시험은 KS F 2274(건축용 합성 수지재의 촉진 노출 시험방법)에 준하여 실시하며, 자외선 형광램프보다 더 강한 자외선을 방출하는 제논-아크 시험기를 사용하였음. 그림 0은 시험에 사용되는 제논-아크 시험기를 나타내었으며, 챔버에 아령형 3호 시험편을 각각 1,000시간, 2,000시간 노출시켜 재료성능을 평가함. 재료성능 평가는 자외선 노출 전·후의 인장강도 및 신장률을 측정하였음. 또한 제논-아크 광원에 의한 노출 시험방법의 주요한 시험조건을 표2.21에 나타내며, 시험조건 상세는 KS M ISO 4892-2에 의함.

표 2.21 제논 아크 광원에 의한 노출 시험방법의 시험조건 (KS M ISO 4892-2)

| 항목              | 노출 시험방법                                                    |         |
|-----------------|------------------------------------------------------------|---------|
| 램프의 상대 분광 조사도   | WX-A                                                       | WX-B    |
| 필터              | 석영 유리, 자외선 차단에 이용되는 유리체 필터, 자외선 차단용 유리체 필터, 물 필터 등을 조합시킨다. |         |
| 시험편 표면의 방사 조도   | $550W/m^2$ (파장역 290 nm~ 800nm)                             |         |
| 블랙 패널 온도        | $(63\pm3)^{\circ}C$<br>다만 당사자 간의 협의에 의하여 변경할 수 있다.         |         |
| 상대 습도           | $(50\pm5)\%$                                               |         |
| 시험편으로의 물 분무 사이클 | 102분 조사 후 18분 조사 및 물 분무, 또는 당사자 간의 협의에 의한다.                | 물 분무 없음 |
| 조사방법            | 연속조사                                                       |         |



(a) 시험조 내부



(b) 제논-아크 시험기 챔버

그림 2.37 자외선 노출 시험

## 시험결과

이전의 재료성능 평가 결과 중 성능이 가장 우수한 배합인 Monomeric MDI 시험편으로 내진 보강용 폴리우레아의 자외선 노출 시험 수행 후 자외선 노출 전·후의 인장강도 및 신장률을 측정한 결과는 표 2.22와 같음. 인장강도의 경우 Xenon Arc 광원에 1,000시간 및 2,000시간 노출 시킨 폴리우레아 시편은 각각 40, 36% 강도저하가 발생 되었으며 신장률의 경우 제논-아크 광원에 1,000시간 및 2,000시간 노출 시킨 폴리우레아 시편은 각각 31, 32%이상 감소하였음. KS F 4922(폴리우레아 수지 도막 방수재)의 ‘방수재의 품질에서 산처리 이후 품질 기준’은 열화시험 이후 인장강도 16Mpa 이상의 성능과 파단시의 신장률 250% 이상으로 규정하고 있음. 자외선 노출 시험결과 인장강도는 만족시켰으며, 신장률 또한 KS 규격을

표 2.22 KS F 2274:2018 (자외선 노출), KS F 4922:2007 (인장강도 및 신장률)

| 시험항목                           | 단위  | 시험방법 | 시험결과 | 비고                    |
|--------------------------------|-----|------|------|-----------------------|
| 내후성(Xenon, 1000h) 후 인장강도       | MPa | (1)  | 17   | (23±2)℃, (50±5)% R.H. |
| 내후성(Xenon, 1000h) 후 파단시<br>신장률 | %   | (1)  | 321  | (23±2)℃, (50±5)% R.H. |
| 내후성(Xenon, 2000h) 후 인장강도       | MPa | (1)  | 18   | (23±2)℃, (50±5)% R.H. |
| 내후성(Xenon, 2000h) 후 파단시<br>신장률 | %   | (1)  | 316  | (23±2)℃, (50±5)% R.H. |



## 7338-7079-0222-353

1. 성 격 서 보 호 : CT19-14284K
2. 의 의 자  
○ 업 제 명 : 연세대학교산학협력단  
○ 주 소 : 서울특별시 서대문로 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)
3. 시험기간 : 2019년 12월 19일 ~ 2020년 05월 08일
4. 시험성적서의 용도 : 일반 연구용
5. 시 료 명 : 풀리우레아 도막
6. 시험방법  
(1) KS : 2274:2018, KS F 4922:2007

## 7. 실험결과

( ) 물리우레아 도막

| 시험항목                           | 단위    | 시험횟수 | 시험결과 | 비 고                            |
|--------------------------------|-------|------|------|--------------------------------|
| 내수성(Nelson, 1 000 N) 후 인장강도    | ㎍     | (1)  | 07   | (0.2 ± 0.1), (50 ± 5) %<br>상 하 |
| 내수성(Nelson, 1 000 N) 후 인산치 산성용 | % (1) | (32) |      | (0.2 ± 0.1), (50 ± 5) %<br>상 하 |
| 내수성(Nelson, 2 000 N) 후 인장강도    | ㎍     | (1)  | 18   | (0.2 ± 0.1), (50 ± 5) %<br>상 하 |
| 내수성(Nelson, 2 000 N) 후 인산치 산성용 | % (1) | (36) |      | (0.2 ± 0.1), (50 ± 5) %<br>상 하 |

|    |          |     |        |             |     |                                                                                       |
|----|----------|-----|--------|-------------|-----|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 확인 | 작성<br>성명 | 고영준 | Y.J.K. | 기술책임자<br>성명 | 엄재원 |  |
|----|----------|-----|--------|-------------|-----|---------------------------------------------------------------------------------------|

참고: 1. 이 설계서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명에 대한 원형과 결과로서 제작제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.  
 2. 이 설계서는 초본, 선본, 양도 및 소송권한을 한층도 없이 있으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.  
 3. 이 설계서의 일부만을 발명하여 사용한 결과는 보증할 수 없습니다.  
 4. 이 설계서의 지위정보는 특허청 (www.kipo.go.kr) 에서도 검색할 수 있습니다.

2020년 05월 08일  
한국건설생활환경시험연구원



결과문의 : 21594 인천광역시 남동구 소래로 628 ☎ (032)460-5164

전자문서본은 시험결과에 대한 참고용입니다.

重 1100G 長 116CM

전자문서본(Electronic Copy)

- 58 -

## - 탄산화 노출시험

### 시험방법

내진보강용 폴리우레아의 탄산화 노출 시험은 KS F 2584 (콘크리트의 촉진 탄산화 시험 방법)에 준하여 실시하였으며, 그림 2.39과 같은 직경 100mm, 높이 200mm크기의 원형공시체에 폴리우레아를 도포한 후, 온도 20℃ 상대습도 60% 이산화탄소 5%의 조건을 만족할 수 있는 탄산화 노출 챔버에서 시험을 수행하였음. 탄산화 깊이 측정 시 페놀프탈레인 용액을 분사하여 적자색으로 변색된 구간까지의 깊이를 표면으로부터 측정하며, 각 공시체의 측면부를 10 등분 하고 총 스무 군데의 탄산화 깊이를 측정하여 그 평균값을 계산하였음. 탄산화 깊이 측정을 통해서 탄산화 속도 계수를 추정하였으며 다음 식에 따라 계산하였음.

$$\alpha = \frac{d}{\sqrt{t}}$$

$\alpha$  : 탄산화 속도 계수,  $d$  : 탄산화 깊이  $t$  : 탄산화 기간(week)

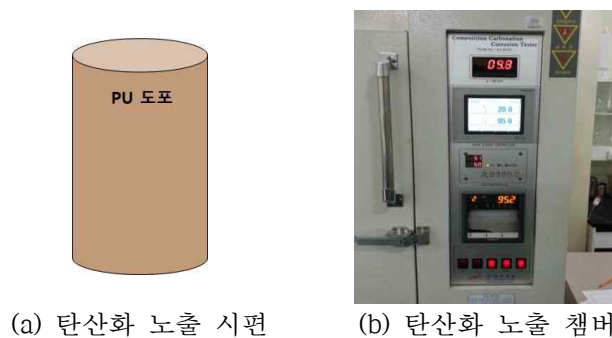


그림 2.39 탄산화 노출 시험

### 시험결과

내진보강용 폴리우레아를 도포한 콘크리트의 탄산화 노출 시험 수행 후 탄산화 노출 전·후의 탄산화 깊이 및 탄산화 속도계수를 도출한 결과는 표 2.23과 같음. 4주 동안의 탄산화 노출 시험결과, 폴리우레아를 도포하지 않은 시험편의 탄산화 깊이는 16.5mm로 측정되었음. 폴리우레아를 도포한 시험편은 11.0mm, 9.5mm, 12.0mm로 측정되었으며, MODIFIED MDI < Monomeric MDI < POLYMERIC MDI 순으로 나타났음. 이는 무도포 시편 대비 약 33, 42, 27% 감소한 효과 나타냈으며, 폴리우레아를 도포한 시편의 경우 탄산화 침투에 대한

저항능력을 가지고 있는 것으로 판단됨. 그림 2.40는 탄산화 노출깊이를 측정하기 위해 페놀프탈레인 용액을 뿌린 시편임.

표 2.23 탄산화 노출시험 결과

| 제품군           | 탄산화깊이<br>(mm) | 탄산화 기간<br>(week) | 탄산화 속도 계수 |
|---------------|---------------|------------------|-----------|
| NON PU        | 16.5          | 4                | 8.25      |
| Monomeric MDI | 11.0          | 4                | 5.5       |
| MODIFIED MDI  | 9.5           | 4                | 4.75      |
| POLYMERIC MDI | 12.0          | 4                | 6.0       |



NON PU



Monomeric MDI



MODIFIED MDI



POLYMERIC MDI

그림 2.40 탄산화 노출 시험 결과

**시험성적서**

1. 성적서번호 : CT20-030152K

2. 의뢰자  
 ○ 업체명 : 연세대학교산학협력단  
 ○ 주소 : 서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)

3. 시험기간 : 2020년 03월 05일 ~ 2020년 04월 07일

4. 시험성적서의 유효도 : -

5. 시료명 : CTN 외 3건

6. 시험방법  
 (1) KS F 2584:2010

**시험성적서**

성적서번호 : CT20-030152K

7. 시험결과

1) CNT

| 시험항목                   | 단위 | 시험방법 | 시험결과 | 비고                       | 시험장소 |
|------------------------|----|------|------|--------------------------|------|
| 탄산화 깊이(축전 탄산화 기간: 28일) | mm | (1)  | 18.5 | (20±2) °C, (RH±5) % R.H. | A    |

2) CTP1

| 시험항목                   | 단위 | 시험방법 | 시험결과 | 비고                       | 시험장소 |
|------------------------|----|------|------|--------------------------|------|
| 탄산화 깊이(축전 탄산화 기간: 28일) | mm | (1)  | 11.0 | (20±2) °C, (RH±5) % R.H. | A    |

3) CTP2

| 시험항목                   | 단위 | 시험방법 | 시험결과 | 비고                       | 시험장소 |
|------------------------|----|------|------|--------------------------|------|
| 탄산화 깊이(축전 탄산화 기간: 28일) | mm | (1)  | 9.5  | (20±2) °C, (RH±5) % R.H. | A    |

4) CTP3

| 시험항목                   | 단위 | 시험방법 | 시험결과 | 비고                       | 시험장소 |
|------------------------|----|------|------|--------------------------|------|
| 탄산화 깊이(축전 탄산화 기간: 28일) | mm | (1)  | 12.0 | (20±2) °C, (RH±5) % R.H. | A    |

\* 시험시료: 재래지 폐지(탄산화 시험 전 평상원료)

※ 시험장소  
 A : 서울특별시 금천구 가산디지털1로 199 (가산동)

확인자명 : 임귀환  
 성직명 : 김기환  
 기술책임자명 : 김태상

비고 : 1. 이 성적서는 KS Q ISO/IEC 17025 및 KOLAS 인증과 관련이 없으며, 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명에 한정된 결과로서 전체제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.  
 2. 이 성적서는 불포, 선진, 광고 및 소송판으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.  
 3. 이 성적서의 유효기간을 결정하여 사용한 결과는 보증할 수 없습니다.  
 4. 이 성적서의 진위여부는 홈페이지(www.kcl.net.kr)에서 확인 가능합니다.

2020년 04월 07일

한국건설생활환경시험연구원

결과문의 : 06503 서울특별시 금천구 가산디지털1로 199 (가산동) ☎ (02)2102-2768

중 4800자 중 1800자

양식DP-12-01-02(1)

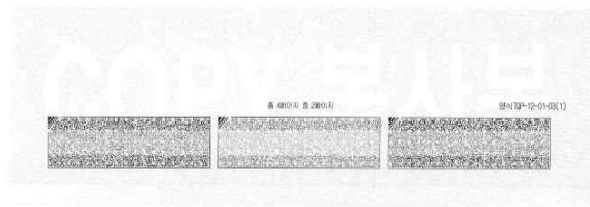


그림 2.41 산(acid) 환경 노출시험 공인성적서

- 동결융해 시험

시험방법

내진보강용 폴리우레아 도포 콘크리트의 동결융해 시험은 KS F 2456(급속동결 융해에 대한 콘크리트 저항 시험방법)에 준하여 실시하였음. 콘크리트 공시체의 중심온도가 동결 시  $-18^{\circ}\text{C}$ , 융해 시  $+4^{\circ}\text{C}$ 가 되도록 동결융해 챔버에서 시험을 진행하였음. 이때 사용한 시편은 그림0과 같이 직경 100mm, 높이 200mm 크기의 원형공시체에 폴리우레아를 전면 도포하였음. 챔버 내 기중에서 동결융해의 작용을 1사이클에 4시간 정도로 반복하였으며, 총 300사이클 이후 시험 전·후의 동탄성계수를 측정하여 상대 동탄성계수를 도출하였고, 다음 식에 따라서 계산하였음.

$$P_c = \left( \frac{n_c^2}{n_o^2} \right) \times 100$$

$P_c$  : 동결융해 C 사이클 후의 상대 동탄성계수(%),  $n_c^2$  : 동결융해 0사이클에서의 변형 진동의 1차 공명 진동수(Hz),  $n_o^2$  : 동결융해 C 사이클에서의 변형 진동의 1차 공명 진동수(Hz)

내구성 지수 측정은 다음 식에 따라 계산하였음.

$$DF = \frac{PN}{M}$$

$DF$  : 시험용 공시체의 내구성 지수,  $P$  : N사이클에서 상대 동탄성 계수(%),  $N$  : 상대 동탄성계수가 60%가 되는 사이클 수 또는 동결융해의 노출이 끝나게 되는 순간의 사이클 수,  $M$  : 동결 융해 노출이 끝날 때의 사이클 수



(a) 동결융해 챔버



(b) 동탄성계수 측정 장비

그림 2.42 동결융해 시험

## 시험결과

내진보강용 폴리우레아를 도포한 콘크리트의 동결융해 시험 수행 후 배합별 동탄성계수 및 상대동탄성 계수를 도출한 결과는 표 2.24과 같음. 300사이클 동안의 동결융해 노출 결과, 폴리우레아를 도포하지 않은 시험편의 상대 동탄성계수의 평균은 74.4%이었으며, 폴리우레아를 도포한 시험편의 경우 Monomeric MDI, MODIFIED MDI, POLYMERIC MDI 순으로 89.6, 90.8, 90.4%의 결과를 얻었음. 이는 무도포 시편 대비 약 20.4, 22.0, 21.5%의 동결융해에 대한 저항 능력이 증가하는 효과 나타냈음. 그림 2.43은 무도포 시험편과 폴리우레아를 도포한 시험편의 상대동탄성계수를 측정하는 과정을 나타냈음.

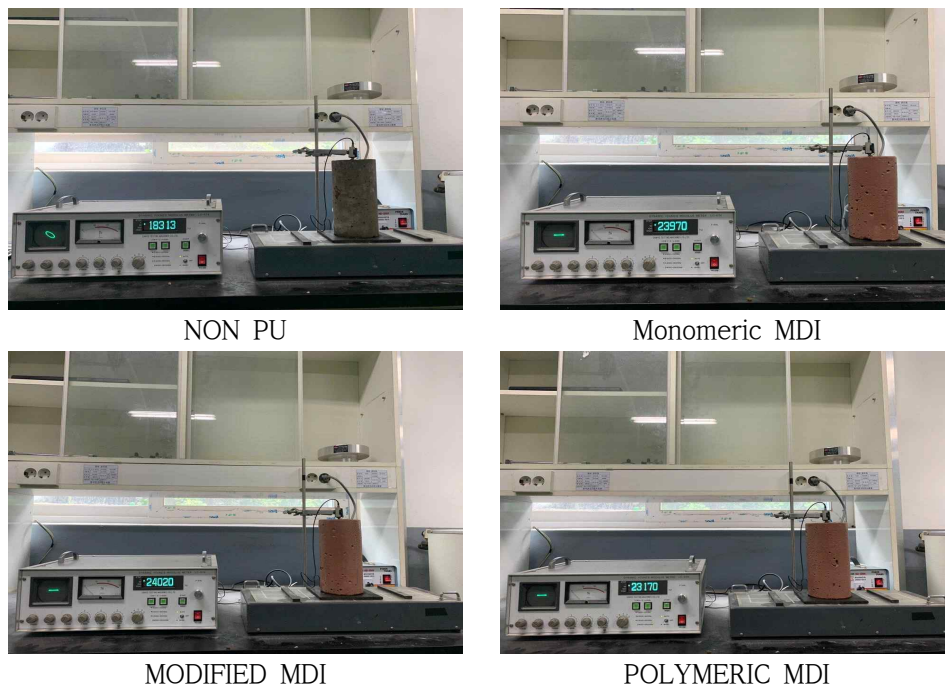


그림 2.43 동결융해 시험 결과

| Non PU |       |       |       | MONOMERIC MDI |       |       |       |
|--------|-------|-------|-------|---------------|-------|-------|-------|
| c=100  | 1     | 2     | 3     | c=100         | 1     | 2     | 3     |
| n0     | 22105 | 24689 | 22625 | n0            | 20232 | 21418 | 21470 |
| nc     | 21290 | 23687 | 21595 | nc            | 20068 | 21145 | 20987 |
| Pc (%) | 92.8  | 92.0  | 91.1  | Pc (%)        | 98.4  | 97.5  | 95.6  |

| c=200  | 1     | 2     | 3     | 200    | 1     | 2     | 3     |
|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| n0     | 22105 | 24689 | 22625 | n0     | 20232 | 21418 | 21470 |
| nc     | 19860 | 22815 | 20060 | nc     | 19664 | 20798 | 20684 |
| Pc (%) | 80.7  | 85.4  | 78.6  | Pc (%) | 94.5  | 94.3  | 92.8  |

| c=300  | 1     | 2     | 3     | c=300  | 1     | 2     | 3     |
|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| n0     | 22105 | 24689 | 22625 | n0     | 20232 | 21418 | 21470 |
| nc     | 18313 | 21845 | 19778 | nc     | 19199 | 20255 | 20316 |
| Pc (%) | 68.6  | 78.3  | 76.4  | Pc (%) | 90.0  | 89.4  | 89.5  |

| MODIFIED MDI |       |       |       | POLYMERIC MDI |       |       |       |
|--------------|-------|-------|-------|---------------|-------|-------|-------|
| c=100        | 1     | 2     | 3     | c=100         | 1     | 2     | 3     |
| n0           | 23150 | 21570 | 21212 | n0            | 20489 | 22280 | 21150 |
| nc           | 22780 | 21134 | 20840 | nc            | 20201 | 21881 | 20843 |
| Pc (%)       | 96.8  | 96.0  | 96.5  | Pc (%)        | 97.2  | 96.5  | 97.1  |

| 200    | 1     | 2     | 3     | 200    | 1     | 2     | 3     |
|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| n0     | 23150 | 21570 | 21212 | n0     | 20489 | 22280 | 21150 |
| nc     | 22603 | 20880 | 20533 | nc     | 19884 | 21567 | 20444 |
| Pc (%) | 95.3  | 93.7  | 93.7  | Pc (%) | 94.2  | 93.7  | 93.4  |

| c=300  | 1     | 2     | 3     | c=300  | 1     | 2     | 3     |
|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| n0     | 23150 | 21570 | 21212 | n0     | 20489 | 22280 | 21150 |
| nc     | 22308 | 20508 | 20036 | nc     | 19520 | 21218 | 20020 |
| Pc (%) | 92.9  | 90.4  | 89.2  | Pc (%) | 90.8  | 90.7  | 89.6  |

표 2.24 동결융해 시험 결과

## 5) 보수·보강용 폴리우레아 도포를 위한 스프레이 분사성능

### 분사 장치별 성능

#### 5.1 리액터

본 연구에서 개발된 폴리우레아를 도포하는데 사용한 장비는 모두 미국 그레이코社의 장비를 사용하였음. 본 연구에서 개발한 폴리우레아를 믹싱하는데 필요한 리액터는 Reactor E-10HP장비를 사용하였음. 위 장비는 소형 이동형 장비로 무게 100kg, 최대호스 길이 32m로 현장에서 빠르게 작업하는데 적합하여 국내에서 많이 사용되는 장비임. 표 2.25 Reactor E-10HP의 성능을 나타냄. 또한 그림 2.44 는 위 장비의 사진을 나타내었음.

표 2.25 Reactor E-10HP 장비 사양

|         |                          |
|---------|--------------------------|
| 최대 작업압력 | 2500PSI(172bar, 17.2MPa) |
| 최대 호스길이 | 32 m                     |
| 최대 유체온도 | 77 ℃                     |
| 토출량     | 3.8L/min                 |
| 무게      | 108kg                    |
| Heater  | 4kw                      |



(a) Reactor



(b) Reactor 가열 호스

그림 2.44 Reactor E-10HP

#### 5.2 스프레이건

현재 그레이코社에서 개발된 스프레이는 기존의 방수용 폴리우레아 시공과정에서 제기되었던 문제점들이 대부분 개선된 상황임. 따라서 현재 개발되고 보편적으로 사용되고 있는 장비를 이격패턴, 유량, 리액터의 압력 등을 분석하여 노후화된 조적식 구조물의 보수·보강 뿐만 아니라 현장상황에 따라 적합한 장비를 제시하고자 함.

### 5.2.1 에어퍼지 스프레이건

에어퍼지 스프레이건은 공기분사식 팁 세정으로 원료의 점착 및 막힘 현상이 감소하였음. 또한 강화 스테인레스로 제작된 챔버와 사이드셀은 내구성을 높였고 믹스 모듈, 팁 디자인의 개선으로 원료의 혼합이 개선되었음. 사용성이 편리하고 유지보수가 신속한 간편함 때문에 기존 방수용 폴리우레아의 도포 시 자주 사용됨. 그림 2.45 에어퍼지 스프레이건 및 부가장비를 나타냄. 또한, 그림 2.46 라운드팁과 플랫팁에 따른 분사성능을 나타내었음. 현재 사용한 리액터의 최대압력이 2500PSI이기 때문에 그래프에 나타내었음.



(a) 에어퍼지 건

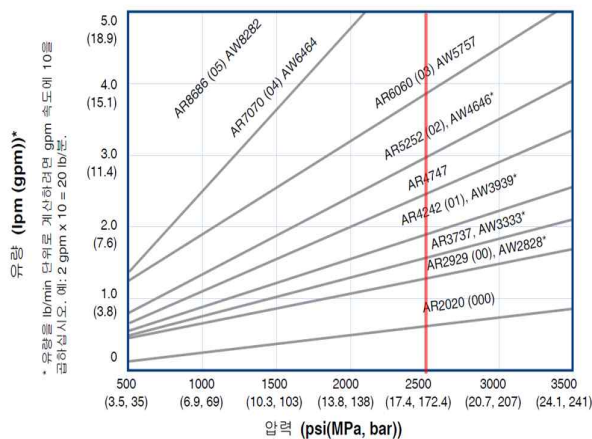


(b) AP Gun 플랫 팁

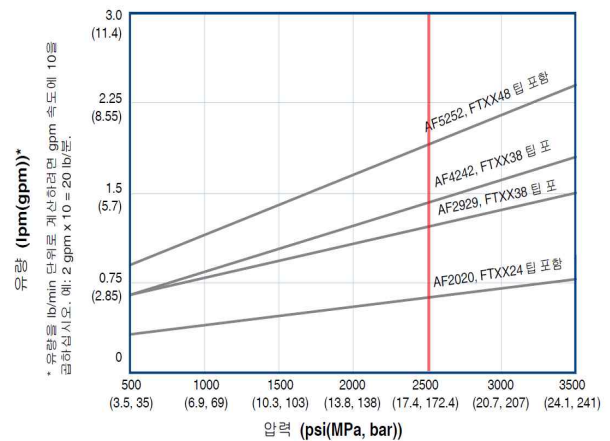


(c) AP Gun 플랫 챔버

그림 2.45 에어퍼지 스프레이 건



(a) 원형 팁 분사성능



(b) 플랫형 팁 분사성능

그림 2.46 에어퍼지 스프레이건 분사성능

### 5.2.2 액상퍼지 스프레이건

액상퍼지 스프레이건과 에어퍼지 스프레이건의 가장 큰 차이는 클리어 샷 액체가 스프레이건의 손잡이 안으로 주입된 후, 스프레이건의 방아쇠를 당길 때마다 클리어 샷 액체가 믹스 챔버로 주입되어 그 안에 있는 화학적 잔존물들을 제거하는 데 도움을 주게 되어 믹스 챔버를 항상 청결한 상태로 유지하게 해줌. 이는 믹스 챔버를 청소할 필요가 거의 없게 되면서 일일 스프레이 작업시간과 연간 생산성을 최대화 할 수 있음. 또한 믹스 챔버가 청결하기 때문에 스프레이 패턴을 균일하게 유지할 수 있고 키트를 최대한 오래 사용할 수 있어 시간과 비용 절감에 효율적임. 그림 2.47 액상퍼지 스프레이건의 사진을 나타내었음. 또한, 그림 2.48 장비의 라운드팁과 플랫팁에 따른 분사성능을 나타내었음.

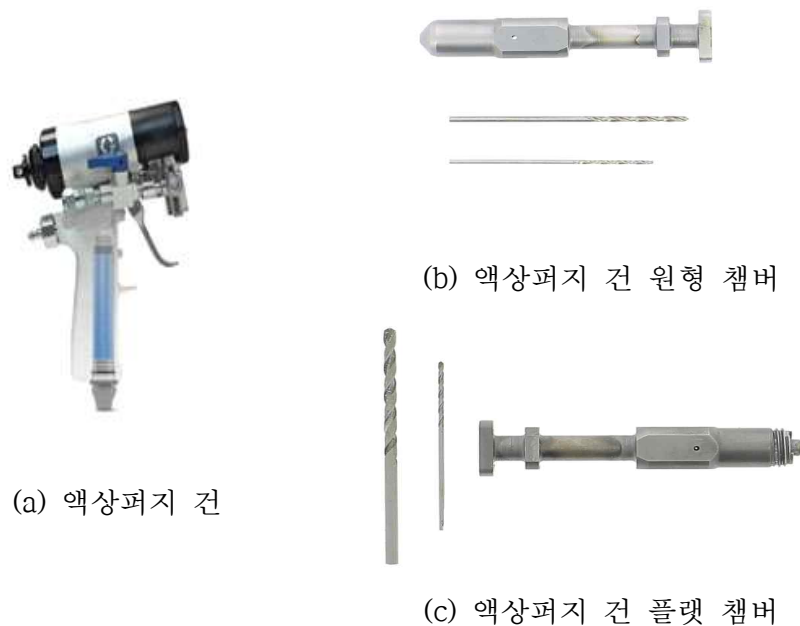
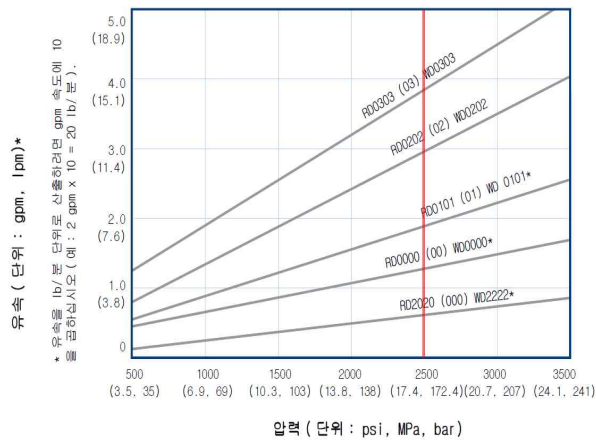
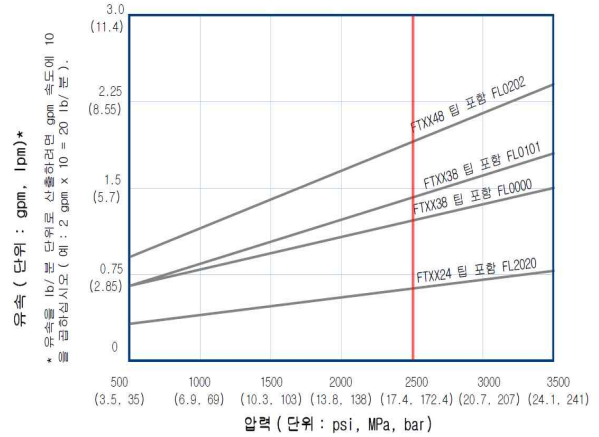


그림 2.47 액상퍼지 스프레이 건



(a) 원형 팁 분사성능



(b) 플랫폼 팁 분사성능

그림 2.48 액상퍼지 스프레이건 분사성능

### 5.2.3 메커니컬 퍼지 스프레이건

메커니컬 퍼지 스프레이건은 믹스 모듈과 팁을 교환함으로써 초 저출력의 얇은 도막의 작업방식부터 대규모의 고출력 고토출의 작업방식에도 사용이 가능함. 부드러운 마무리 작업과 우수한 미립화 성능을 가지며 긴 작동수명의 믹스 모듈을 사용하였음. 또한 수리 및 유지보수 비용이 매우 저렴한 장점이 있음. 본 연구에서는 메커니컬 퍼지 스프레이건과 라운드형 팁을 사용하여 비산분진발생을 최소화하고 섬세한 도포를 진행하였음. 그림 2.49(a)는 메커니컬 퍼지 스프레이건 사진을 나타내고 (b)는 도포과정에서 사용한 라운드팁 및 라운드 모듈을 나타내었음. 또한 그림 2.50은 메커니컬 퍼지 스프레이건의 분사성능을 나타내었음.

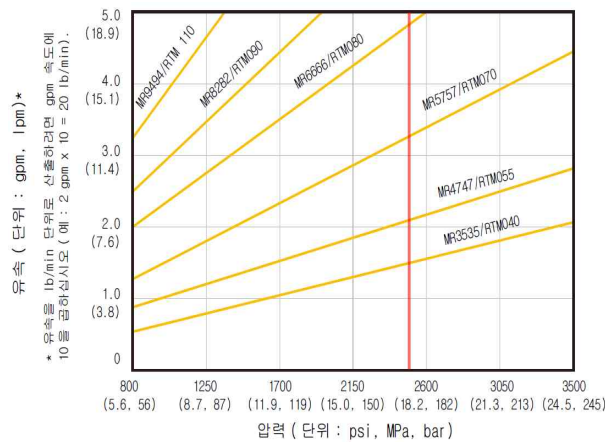


(a) 메커니컬 퍼지 스프레이 건

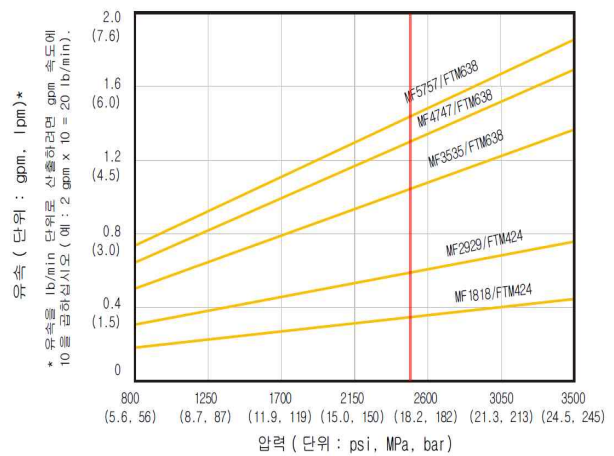


(b) MP Gun 라운드팁 및 라운드 모듈

그림 2.49 메커니컬 퍼지 스프레이 건



(a) 원형 팁 분사성능



(a) 플랫형 팁 분사성능

그림 2.50 메커니컬 퍼지 스프레이건 분사성능

플랫형 팁은 라운드형 팁에 비해 스프레이 패턴의 단면적이 넓어 대규모 시공에는 양호하지만, 선경화된 수지입자의 양이 많아지는 문제로 비산분진의 발생이 증가한다는 문제점을 가지고 있음. 라운드형 팁은 주제(A제)와 경화제(B제)가 원형노즐을 통과하는 폴리우레아 수지의 양이 많아 경화가 늦어지기 때문에 폴리우레아 유체의 유동성이 유지되어 비산분진 발생이 감소함. 하지만 라운드형 팁의 단점은 도포 면적이 좁아져서 대면적 시공에 불리함.

본 연구에서 개발한 폴리우레아는 내진 보강 성능이 있는 폴리우레아이기 때문에 기존 단수 방수용 폴리우레아와 사용목적이 다름. 따라서 넓고 얇게 도포하는 방수용 목적이 아닌 보수가 필요한 지점에 두껍고 부드러운 마무리 작업이 요구됨으로 메커니컬 퍼지 스프레이건의 라운드형 팁 사용이 가장 적합한 것으로 판단된다.

## 2. 연구수행내용 및 성과

### 2-2 2차년도 연구수행 내용 및 결과

#### 1) 폴리우레아 보강 조적식 부재 휨 실험

1차년도 연구 수행 시 개발된 최적배합 폴리우레아(MONOMERIC MDI)의 조적조에 대한 보강성능을 직접적으로 검증하기 위해 그림 2.51과 같이 폴리우레아 표면 보강 조적식 부재 휨 실험을 진행하였음. 치수가 190\*90\*57인 적벽돌 사용하였으며, 모르타르의 두께는 10mm로 조적하였음. 추가로 콘크리트 휨강도 평가 시 개발된 표면보강공법(Near Surface Mounted)을 조적식 부재에 적용하여 휨강도 실험을 진행하였음. 이를 통해 횡방향 축력에 취약한 조적식 구조물에 보수보강용 폴리우레아의 효용성을 검증함.

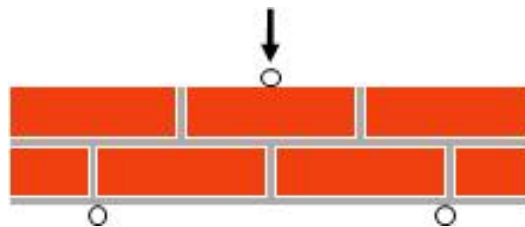


그림 2.51 조적식 부재 휨 실험

#### 시험방법

국내 조적식 구조물에 대한 균열 형태 분석, 구조성능 열화 분석등의 연구는 다양하게 진행되고 있으나 설계 또는 시공 관련 세부 기준이나 지침이 미약한 상태임. 따라서 본 실험에서는 폴리우레아의 고연성 효과를 파악하기 위해 KS F 2408 규격에 따라 그림 2.51과 같이 중앙점 재하 휨강도 시험을 수행하였으며, 하중 장치는 중앙점의 연직 방향으로 중심이 치우치지 않도록 가할 수 있게 2개의 지지 롤러와 1개의 재하 롤러로 이루어짐. 하중은 변위 제어 방식으로 1mm/min으로 일정하게 가하였으며, 최대변위가 8mm 도달 시까지 시험을 진행하였음. 휨부재의 인장쪽 표면 지간 방향 중심점에서 파괴 발생 시 휨강도 산정식은 다음과 같음.

$$f_b = 3Pl/2bh^2$$

$f_b$  : 휨 강도(MPa),  $P$  : 최대 하중(N),  $l$  : 지간(mm),  $b$  : 파괴 단면의 너비(mm),  
 $h$  : 파괴 단면의 높이(mm)

조적식 휨부재 시편의 제원은 124\*90\*570mm, 지간 390mm로 제작하였으며, 다음 그림 2.52은 표면 보강 방식을 변수로 제작한 시험체의 모식도임.

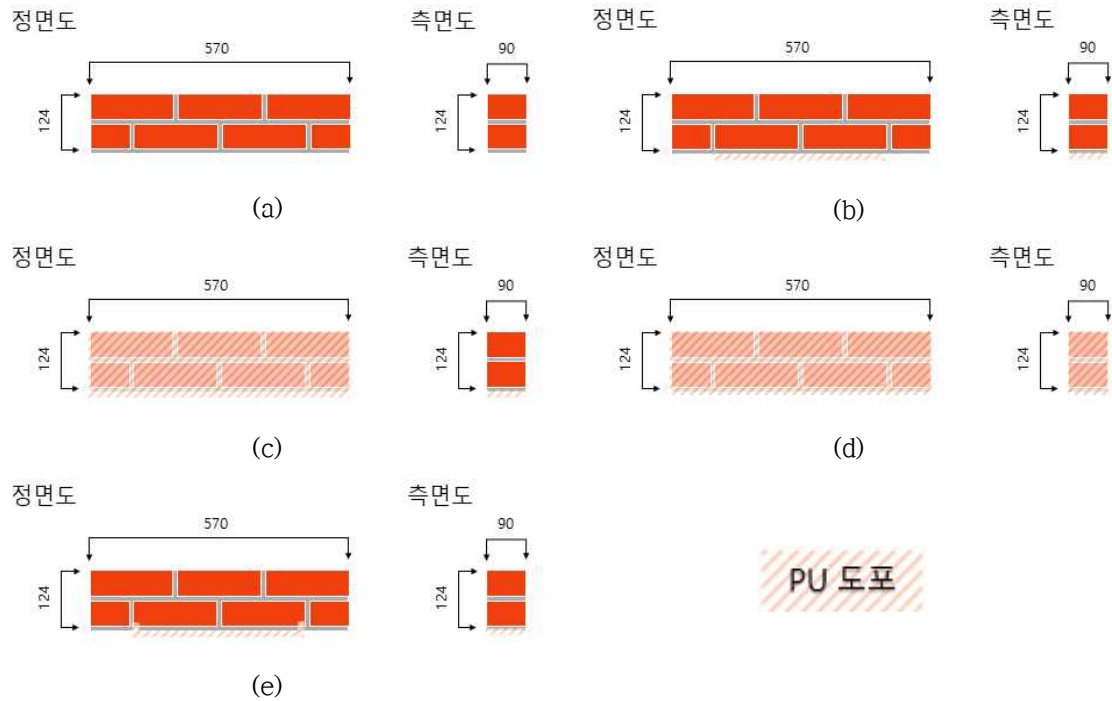


그림 2.52 (a) BFN, (b) BFP, (c) BFPS, (d) BFPPF, (e) NSM

## 시험 결과

내진보강용 폴리우레아의 수평 휨강도 보강성능을 평가 결과 무보강 < NSM < BFP < BFPS < BFPPF 순으로 최대하중 증진효과를 표 2.26-2.30과 같이 확인하였음. 고연성·고인성의 폴리우레아를 도포 하였을 경우에는 모르타르 부분의 균열 이후에도 휨강도가 급격하게 감소하거나 파괴되는 양상을 보이지 않았으며, 이에 따른 각 배합 별 하중-변위 그래프를 그림 2.54-2.58까지 나타내었다.



BFN



BFP



BFPS



BFPS



NSM

그림 2.53 조적식 휨 부재 강도 시험

표 2.26 무도포 휨강도 시험결과

| 시험편 번호 | 극한하중<br>(kN) | 최대변위<br>(mm) | 강도<br>(MPa) |
|--------|--------------|--------------|-------------|
| 1      | 4.54         | 1.12         | 1.92        |
| 2      | 3.75         | 1.02         | 1.59        |
| 3      | -            | -            | -           |
| 평균     | 4.15         | 1.07         | 1.75        |

표 2.27 BFP 휨강도 시험결과

| 시험편 번호 | 극한하중<br>(kN) | 최대변위<br>(mm) | 강도<br>(MPa) |
|--------|--------------|--------------|-------------|
| 1      | 5.70         | 9.23         | 2.41        |
| 2      | 6.94         | 8.87         | 2.93        |
| 3      | 5.74         | 8.36         | 2.43        |
| 평균     | 6.13         | 8.82         | 2.59        |

표 2.28 BFPS 휨강도 시험결과

| 시험편 번호 | 극한하중<br>(kN) | 최대변위<br>(mm) | 강도<br>(MPa) |
|--------|--------------|--------------|-------------|
| 1      | 4.88         | 12.70        | 2.06        |
| 2      | 7.61         | 8.16         | 3.22        |
| 3      | 8.24         | 11.74        | 3.48        |
| 평균     | 6.91         | 10.87        | 2.92        |

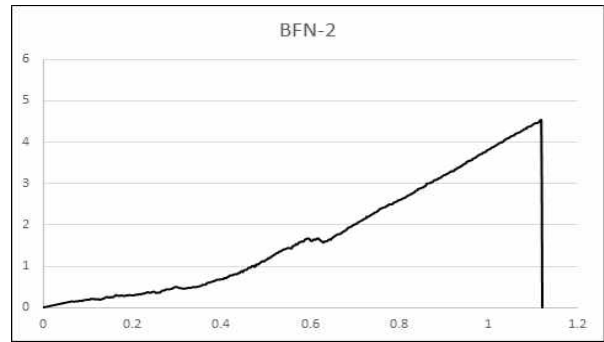
표 2.29 BFPF 휨강도 시험결과

| 시험편 번호 | 극한하중<br>(kN) | 최대변위<br>(mm) | 강도<br>(MPa) |
|--------|--------------|--------------|-------------|
| 1      | 10.03        | 8.68         | 4.24        |
| 2      | 6.93         | 9.29         | 2.93        |
| 3      | 8.24         | 10.26        | 3.48        |
| 평균     | 8.40         | 9.41         | 3.55        |

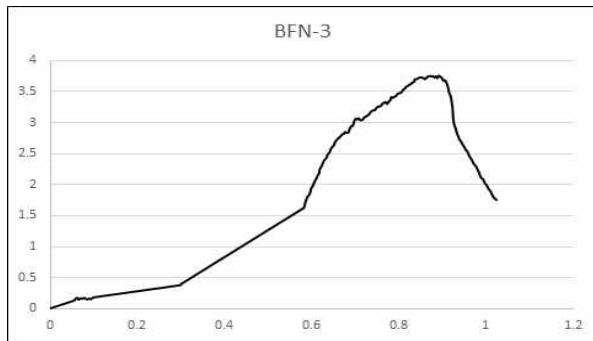
표 2.30 NSM 휨강도 시험결과

| 시험편 번호 | 극한하중<br>(kN) | 최대변위<br>(mm) | 강도<br>(MPa) |
|--------|--------------|--------------|-------------|
| 1      | 5.56         | 9.29         | 2.35        |
| 2      | 6.42         | 9.38         | 2.71        |
| 3      | 5.35         | 10.07        | 2.26        |
| 평균     | 5.78         | 9.58         | 2.44        |

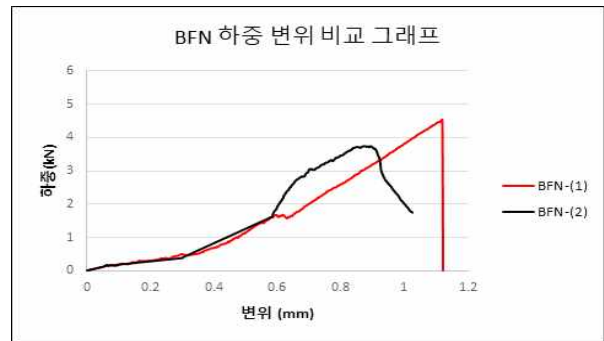
(a) 1번 시편



(b) 2번 시편

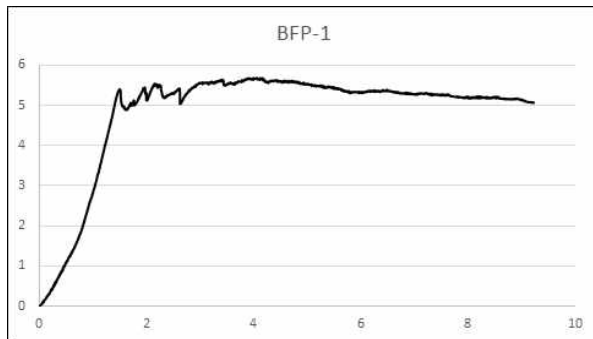


(c) 3번 시편

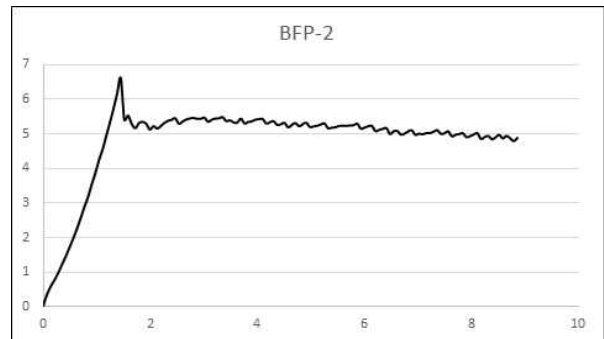


(d) 1-3번 시편

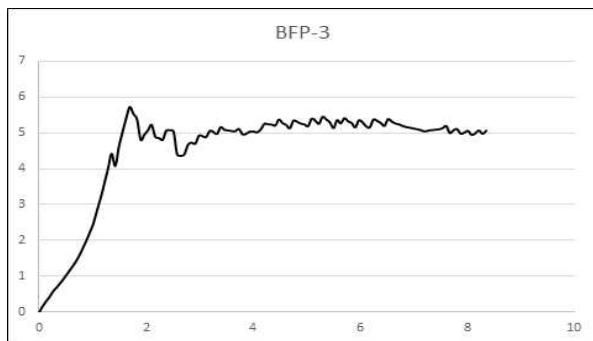
그림 2.54 무보강 휨강도 시험 하중-변위 그래프



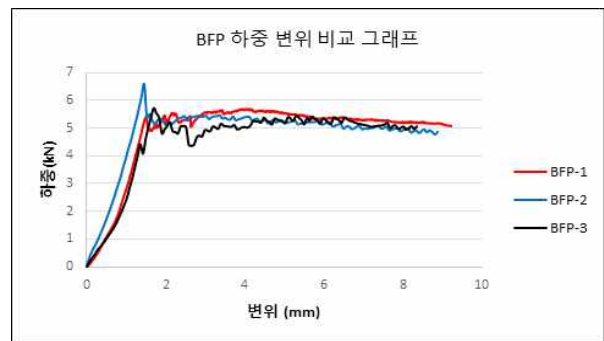
(a) 1번 시편



(b) 2번 시편

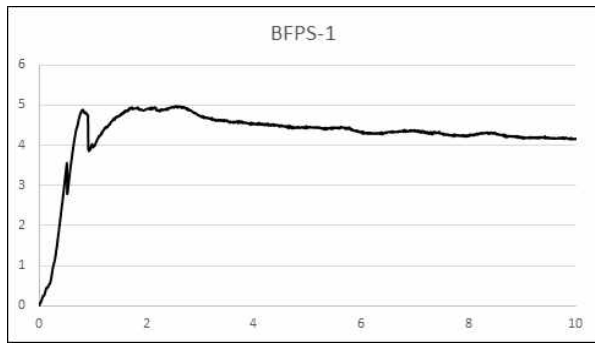


(c) 3번 시편

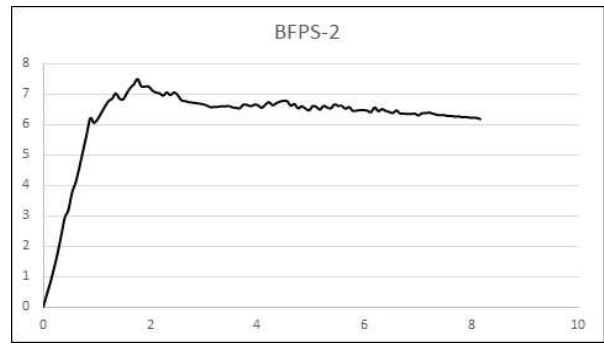


(d) 1-3번 시편

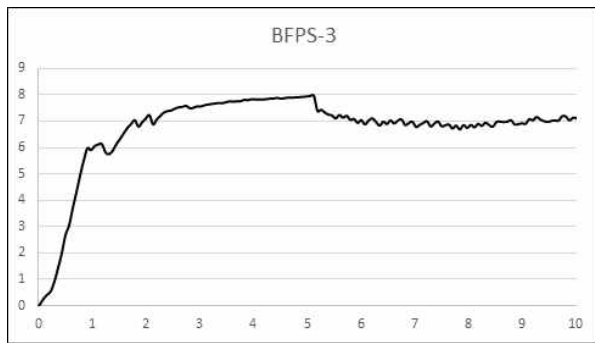
그림 2.55 BFP 휨강도 시험 하중-변위 그래프



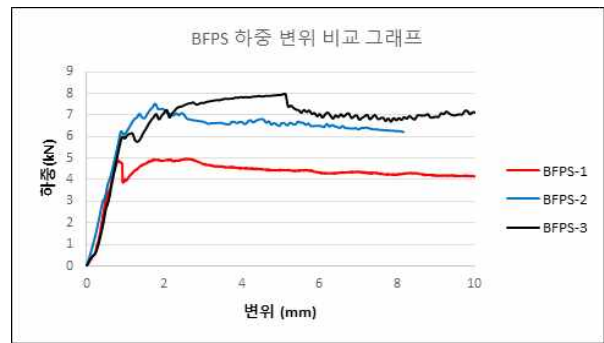
(a) 1번 시편



(b) 2번 시편

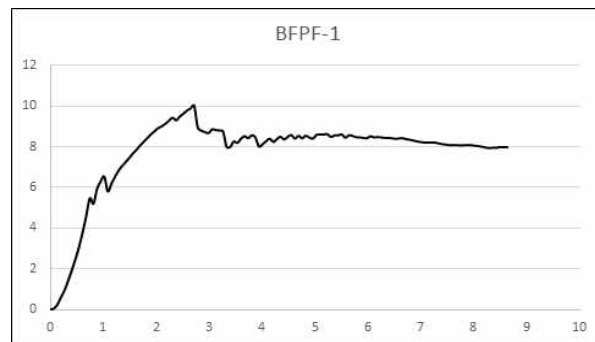


(c) 3번 시편

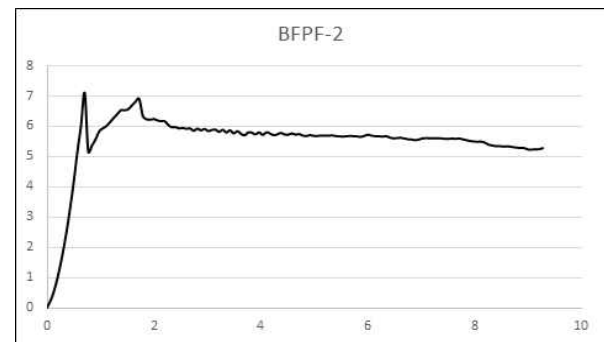


(d) 1-3번 시편

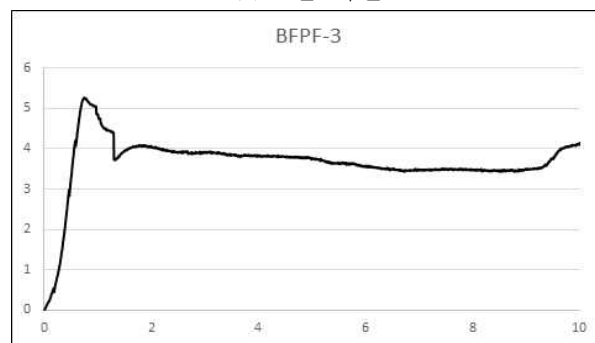
그림 2.56 BFPS 휨강도 시험 하중-변위 그래프



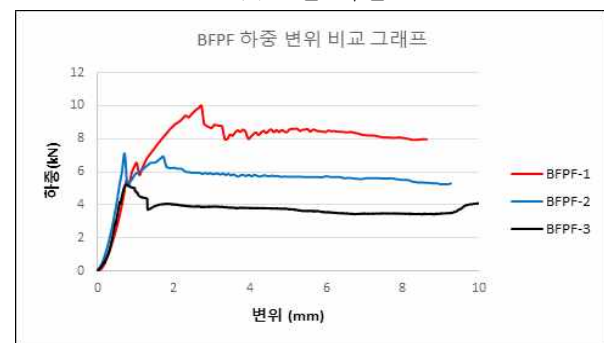
(a) 1번 시편



(b) 2번 시편

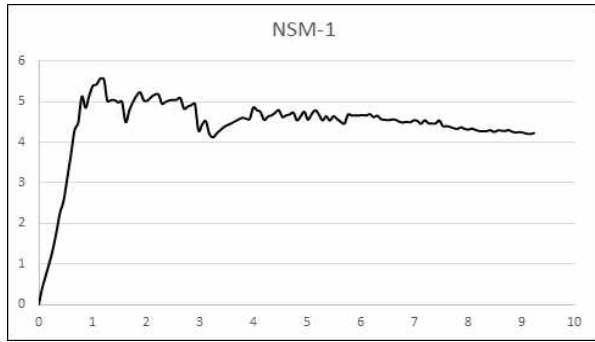


(c) 3번 시편

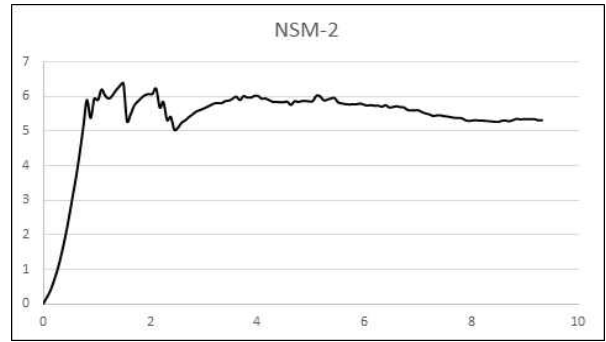


(d) 1-3번 시편

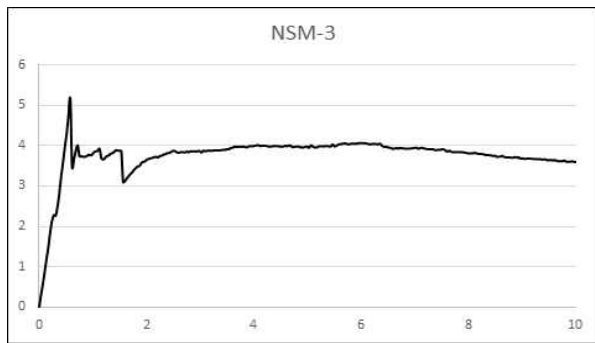
그림 2.57 BFPP 휨강도 시험 하중-변위 그래프



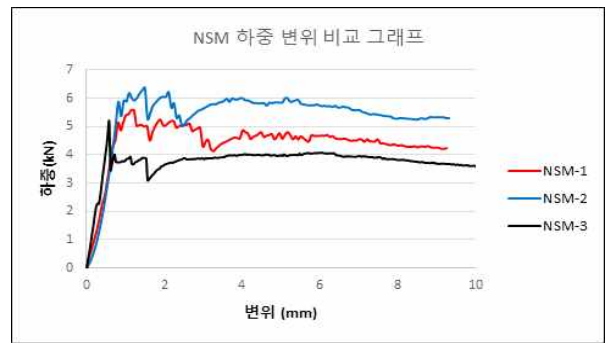
(a) 1번 시편



(b) 2번 시편



(c) 3번 시편



(d) 1-3번 시편

그림 2.58 NSM 휨강도 시험 하중-변위 그래프

## 2) 조적식 벽체의 내진 성능평가

### 2.1 시험개요 (Key information and results)

#### 2.1.1 시험체 제원

| 조적벽                    |                    |                                                                                                         | Remarks |
|------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 사 양<br>(Specification) | 제 원 (mm)           | 1,390(L) × 190 (W) × 1,551 (H)                                                                          |         |
|                        | 중 량 (kg)           | 700                                                                                                     |         |
|                        | 벽돌 제원 (mm)<br>및 갯수 | <ul style="list-style-type: none"> <li>190 (H) × 90(W) × 57 (H)</li> <li>322 EA (23단)</li> </ul>        |         |
|                        | Mortar 및 줄눈        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Mortar 배합비 : (1 : 3, 시멘트 : 모래)</li> <li>줄눈 크기 : 10 mm</li> </ul> |         |

표 2.31 조적벽체 제원

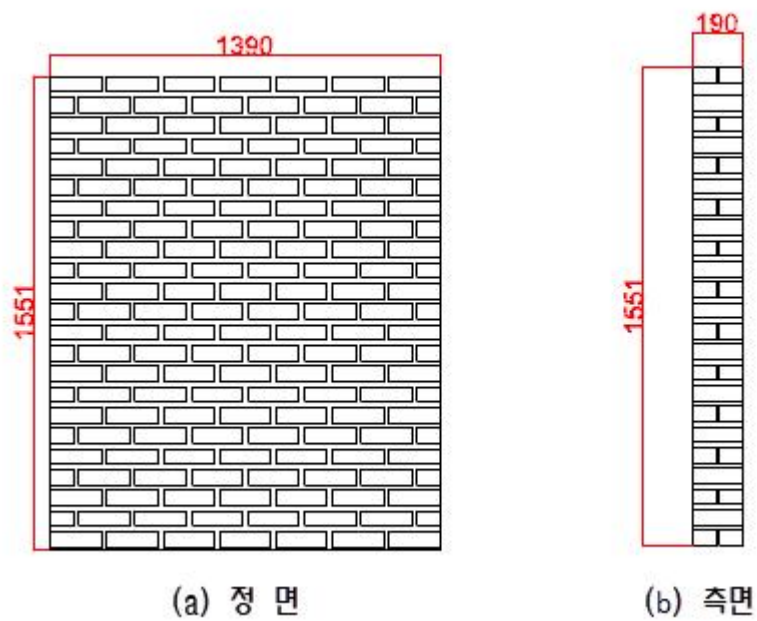


그림 2.59 조적 벽체 치수

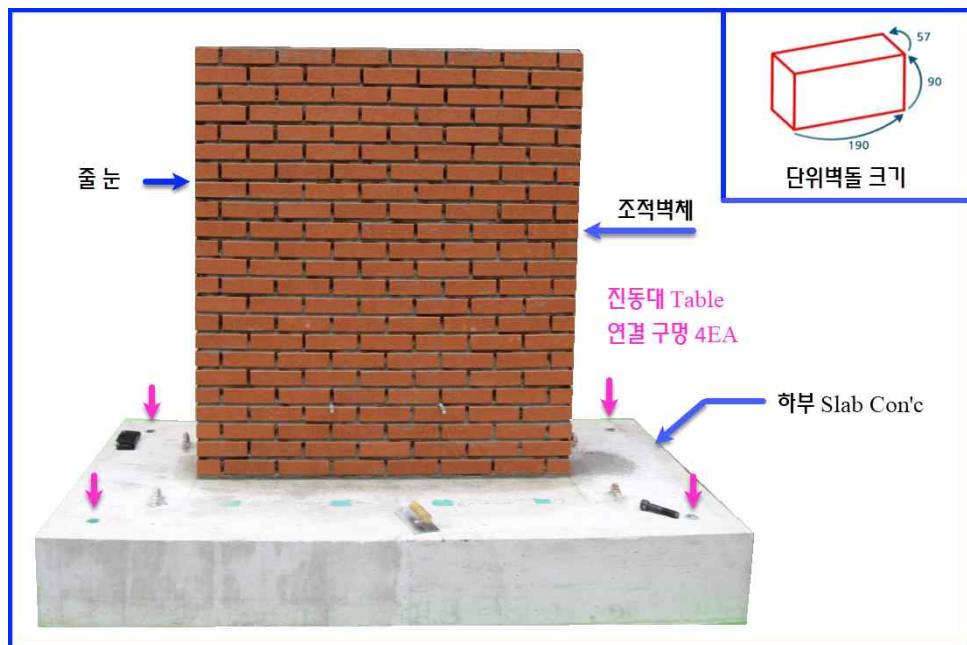


그림 2.60 벽체 및 하부 Slab Con' c

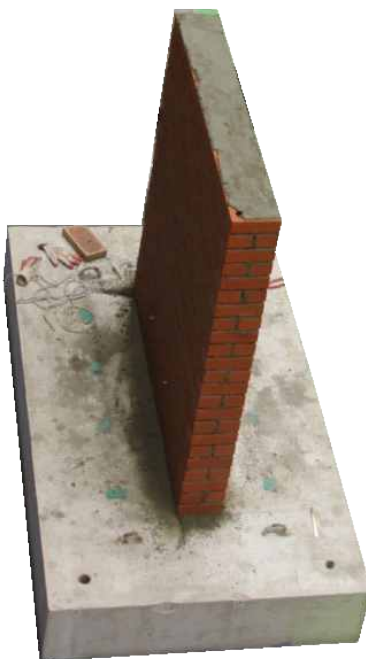


그림 2.61 벽체 측면 및 상부 사진

| 상부 Mass Con' c         |               |                                                                                                                          |  |
|------------------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| 사 양<br>(Specification) | 제 원 (mm)      | 1,750(L) × 540 (W) × 370 (H)                                                                                             |  |
|                        | 중 량 (kg)      | 1,000                                                                                                                    |  |
|                        | 조적벽체와<br>연결방법 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Con' c에 H Beam (Flang t=12, Web h=220) 절반 매입 합성</li> <li>상부 고정 Bracket</li> </ul> |  |
| 하부 Slab Con' c         |               |                                                                                                                          |  |
| 사 양<br>(Specification) | 제 원 (mm)      | 2,300(L) × 1,300 (W) × 300 (H)                                                                                           |  |
|                        | 중 량 (kg)      | 3,200                                                                                                                    |  |
|                        | 조적벽체와<br>연결방법 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Mortar 줄눈 10 mm</li> <li>하부 고정 Bracket</li> </ul>                                 |  |

표 2.32 상하부 Con' c 제원

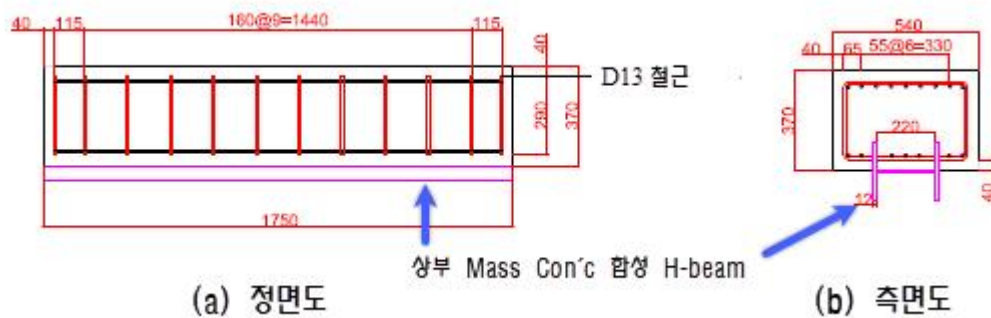
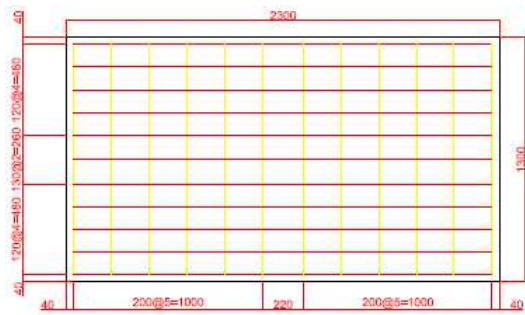


그림 2.62 상부 Mass Con' c

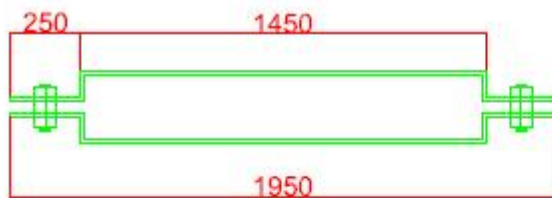


(a) 평면도



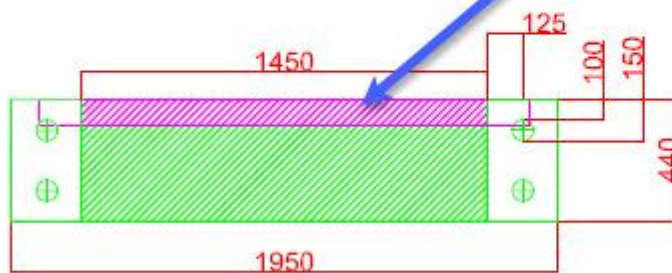
(b) 측면도

그림 2.63 하부 Slab Con' c 도면

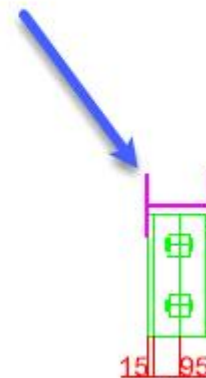


(a) 평면도

상부 Mass Con'c 합성 H-beam



(b) 평면도

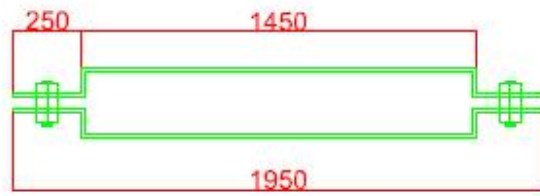


(c) 측면도

그림 2.64 상부 고정 Bracket 도면

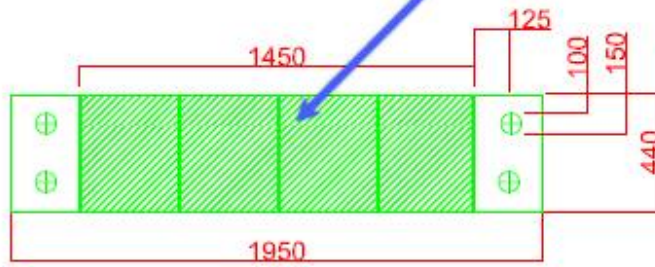
|                        |                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  |
|------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| 상부 고정 Bracket          |                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  |
| 사 양<br>(Specification) | 제 원 (mm)                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1,450(L) × 190 (W) × 440 (H) × 15(t)</li> <li>• 맞대기 Flange 길이 : 250</li> <li>• □ 형 Bracket 2EA</li> </ul>                                                                                                                                                          |  |
|                        | 상부 Mass<br>Con' c 와<br>연결 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 전산 Bolt Link 사용 6EA</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                     |  |
|                        | 조 적<br>벽체와 연결             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bolt &amp; Nut 체결 4EA</li> <li>• Rubber Pad 삽입</li> </ul>                                                                                                                                                                                                          |  |
| 하부 고정 Bracket          |                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  |
| 사 양<br>(Specification) | 개별제원 (mm)                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Web : 1,450(L) × 190 (W) × 440 (H) × 15(t)</li> <li>• Flange : 1,950(L) × 440 (W) × 15(t)</li> <li>• 맞대기 Flange 길이 : 250</li> <li>• L형 Bracket 2EA</li> <li>• Web는 2단으로 설치</li> <li>• 상부 1단은 5EA 사각 수직 보강대 설치</li> <li>• 하부 1단은 5EA 삼각보강대 설치, Flang와 접합</li> </ul> |  |
|                        | 하부 Slab<br>Con' c 와<br>연결 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• I Bolt 8EA</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                              |  |
|                        | 조적<br>벽체와 연결              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bolt &amp; Nut 체결 4EA</li> <li>• Rubber Pad 삽입</li> </ul>                                                                                                                                                                                                          |  |

표 2.33 고정 Bracket 제원

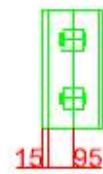


(a) 평면도

수직 보강대 설치 (5EA)

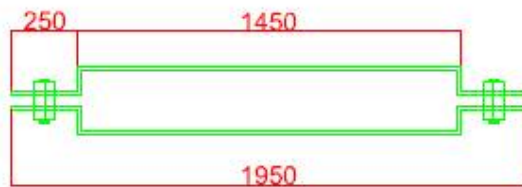


(b) 평면도



(c) 측면도

그림 2.65 하부 고정 Bracket 도면 (상단)

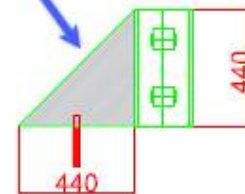


(a) 평면도

삼각 수직 보강대 설치 (5EA)



(b) 평면도



(c) 측면도

그림 2.66 하부 고정 Bracket 도면 (하단)

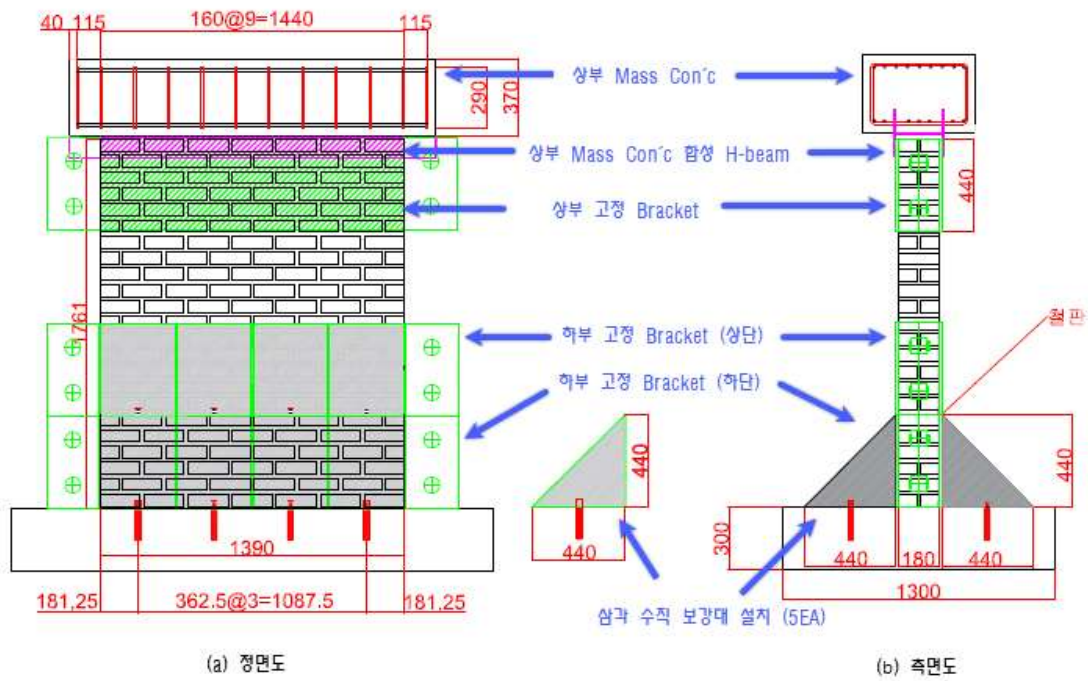


그림 2.67 조적벽체 정면 및 측면 도면

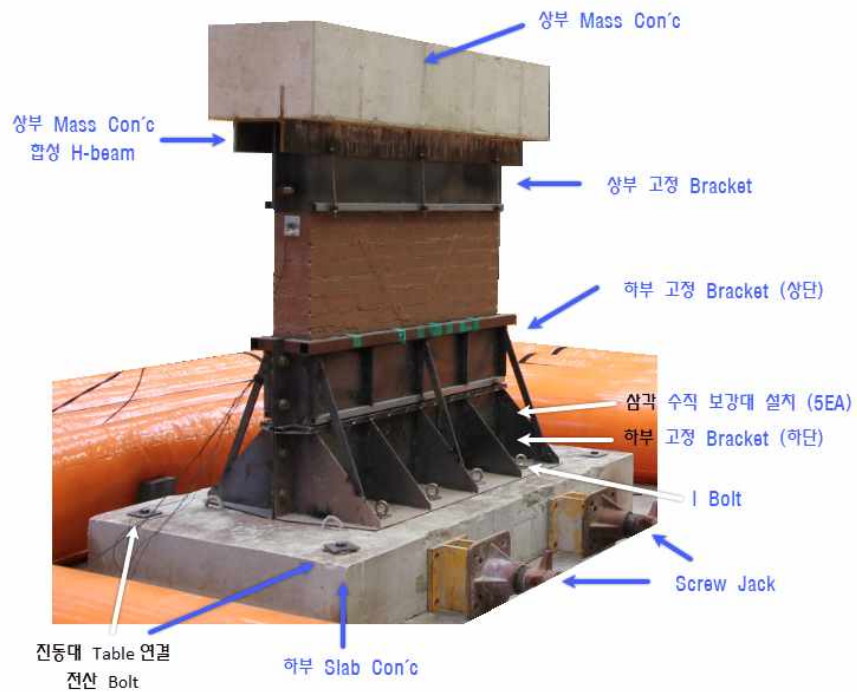


그림 2.68 피시험체 구성품

## 2.1.2 가진파형

El-Centro 지진파

가진파형은 1940년에 미국 캘리포니아 남동쪽 멕시코와 국경지역의 Imperial Valley에서 발생한 El-Centro 지진파를 이용하였음.

표 2.34 El - Centro 지진 ※

| 구 분            | 내 용                       | 발 생 위 치                                                                             |
|----------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| UTC time       | 1940-05-19, 04:36:47, UTC |  |
| Depth          | 16 km (9.9 mi)            |                                                                                     |
| Epicenter      | 32.733°N 115.5°W          |                                                                                     |
| Magnitude      | 6.9 Mw                    |                                                                                     |
| Type           | Strike-slip               |                                                                                     |
| Areas affected | United States, Mexico     |                                                                                     |
| Total damage   | \$6 million               |                                                                                     |
| Casualties     | 9 dead, 20 injured        |                                                                                     |

※ 참조 Wikipedia, ‘1940 El Centro earthquake’

아래 지진파를 기준으로 최대 지반 가속도 (Peak ground acceleration, PGA)를 0.1g부터 1.0g까지 Scale을 조정하여 시험체가 파손될 때까지 시험을 진행함.

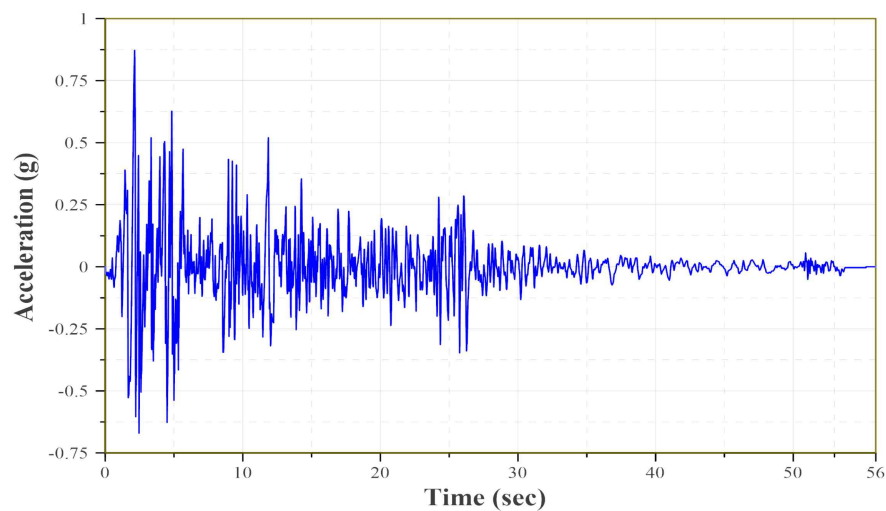


그림 2.69 El - Centro 지진파형

### 2.1.3 피시험체 설치

피시험체인 조적벽체는 운반과 제작과정에서 발생할 수 있는 파손을 최소화하기 위해 실험을 실시하는 ‘한국 철도기술 연구원 6-DOF 진동대 실험실’에서 제작되었음. 2,300 mm (L) × 1,300 mm (W) × 300 mm (H) 의 Con’ c 바닥 Slab 위에 폭 190 mm (단위 일반 벽돌 폭너비 × 2EA)로 23단의 벽돌을 쌓아서 벽체를 제작하였음. 최상단과 하단 그리고 벽돌 사이에 mortar를 사용하여 10 mm 의 줄눈을 주었음. 조적벽체 상부에는 중량 1,000kg, 크기 1,750 mm (L) × 540 mm (W) × 370 mm (H) 의 Con’ c Bloc을 얹혀 가진 시 관성 하중으로 작용하도록 하였음. Crane으로 시험체를 이동 시 그림 2.70, 2.71와 같이 중심이동 및 전도발생으로 파손을 방지하기 위해 강재로 만든 보호 Bracket를 장착 후 이동하였음. 하부 바닥 Con’ c Slab는 가진 시 움직이지 않도록 그림 2.68에서 보이는 바와 같이 네모통이에 Bolt를 삽입할 수 있는 구멍을 내어 전산 Bolt와 Nut를 사용하여 진동대 Table과 체결하였으며 미끄러짐을 방지하기 위해 Screw Jack을 4EA 설치하였음. 상부와 하부 Con’ c 는 H-beam과 강재 Bracket으로 조적벽체와 결합하여 연결하였으며 파괴가 벽체의 중앙에서 발생할 수 있도록 Bracket에 일정한 높이를 주었음. 무보강 시험체의 경우 벽체 제작한 후 2주간 양생 후 실험을 실시하였음. 벽체에 보강을 하는 경우에는 벽체를 쌓은 후 2주, 보강을 위한 Polyurea 도포 또는 GFRP 부착 후 역시 2주간 양생을 실시한 후 실험을 실시하였음.

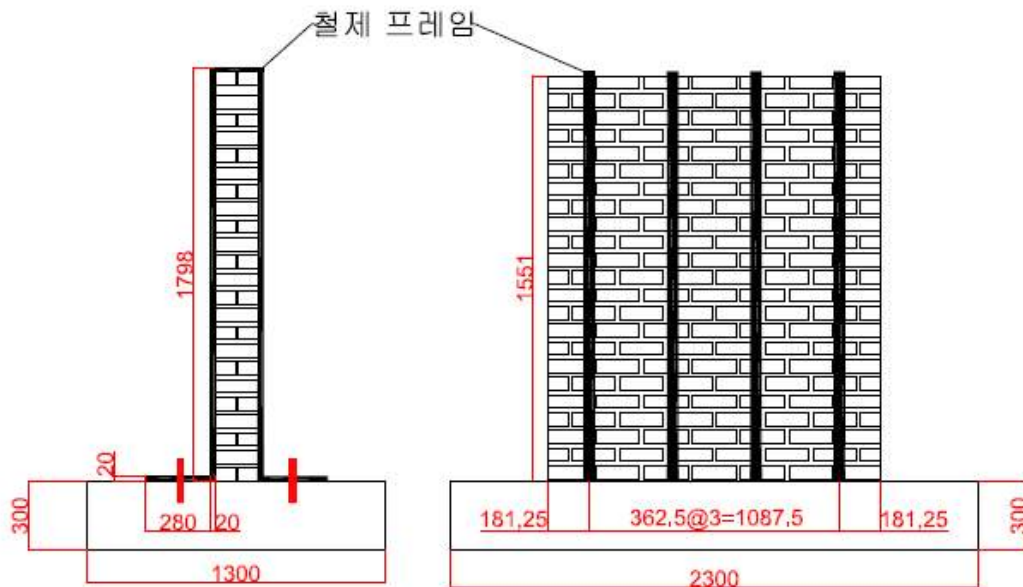


그림 2.70 보호 Bracket 체결 도면



그림 2.71 보호 Bracket 체결 후 운반 모습

## 2.1.4 시험설비 및 장비

- 시험장소 : 한국철도기술연구원 6-DOF 진동대 시험실
- 주 소 : 경기도 의왕시 철도박물관로 176
- 진동대 사양
- 제작사 : (주)케이앤알시스템
- 제어프로그램 : Sabio Series (C, D, M,K)
- 주요사양

|                                                                                |                |         |          |
|--------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------|----------|
| 1. Table size : 4.1 x 4.1 meters                                               |                |         |          |
| 2. Degrees of freedom : 6DOFs (3 translations, 3 rotations & DOFs combination) |                |         |          |
| 3. Full payload : 300kN                                                        |                |         |          |
| 4. Frequency of operation : 0.1 ~ 60Hz                                         |                |         |          |
| 5. Overturning moment : 1200kN-meters for lateral(or longitudinal) direction.  |                |         |          |
| 6. Center of gravity on the table : 2.5 meters                                 |                |         |          |
|                                                                                | Longitudinal   | Lateral | Vertical |
| 7. Actuator stroke                                                             | ±300mm         | ±300mm  | ±200mm   |
| 8. Velocity at 1Hz with full payload                                           | 1.3m/s         | 1.3m/s  | 1.2m/s   |
| 9. Acceleration at 1Hz with full payload                                       | 0.8g           | 0.8g    | 0.8g     |
| 10. Velocity at 2Hz with full payload                                          | 1.0m/s         | 1.0m/s  | 1.3m/s   |
| 11. Acceleration at 2Hz with full payload                                      | 1.3g           | 1.3g    | 1.7g     |
| 12. Maximum flow rate                                                          | 4080LPM, 21MPa |         |          |

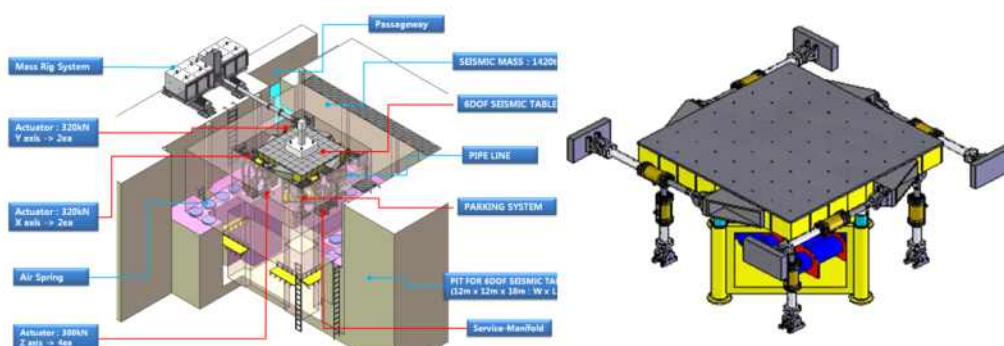


그림 2.72 KRRR 진동대

## 2.1.5 측정장비

- 제작사 및 장치명 : HBM, Somat eDAQ
- 제어프로그램 : Somat Test Control Environment (TCE)
- 주요사양

|                                              |                                                                  |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Layer                                        | Somat eDAQ Bridge Layer(EBRG)                                    |
|                                              | Somat eDAQ Simultaneous High Level Layer (EHLS)                  |
| Temperature                                  | -20 to 65°C                                                      |
| Resolution                                   | 16-bit ADC, across specified full-scale range                    |
| Sample Rates                                 | Independently set                                                |
|                                              | 100 kHz Master Clock= 0.1 Hz to 100 kHz                          |
|                                              | 98.3 kHz Master Clock= 0.1 Hz to 98,304 Hz                       |
| Strain Gage Conditioning                     | Supports: 1/4, 1/2, and Full Bridge Devices                      |
| Excitation                                   | 5V (Bipolar $\pm 2.5$ ) or 10V (Bipolar $\pm 5$ )                |
| Bridge Resistance                            | 1/4 Bridge: Completion Resistor; specified 350 $\Omega$          |
| Four shunt calibration resistors per channel | 50 k $\Omega$ , 100 k $\Omega$ , 200 k $\Omega$ , 500 k $\Omega$ |



그림 2.73 측정장비 (eDAQ)

## 2.2 시험체 설치 (Main test results and test configuration)

### 2.2.1 설치 센서 및 부착위치

시험체 명칭 (보강 종류별 명명법)

- 시험체의 보강종류 및 명칭의 표기법은 그림2.74과 같음.
- 그림 2.74 에서 X는 보강방법을 의미하고 세부적인 사항은 표 2.35에 나타냈음.
- 그림 2.74 에서 N은 각각의 시험체 Type의 일련번호임.
- 그림 2.75 에 시험체명의 종류를 나타내었음.



그림 2.74 시험체 명명법

표 2.35 시험체 보강방법

| X    | 보 강 방 법                                         | 비 고 |
|------|-------------------------------------------------|-----|
| N    | 무보강                                             |     |
| P2   | Polyurea 2mm 보강                                 |     |
| P4   | Polyurea 4mm 보강                                 |     |
| PF5  | GFRP (폭 50mm)에폭시 함침 및 벽체 부착 후, Polyurea 2mm 보강  |     |
| PF10 | GFRP (폭 100mm)에폭시 함침 및 벽체 부착 후, Polyurea 2mm 보강 |     |
| F5   | GFRP(폭 50mm) 에폭시 함침 및 벽체 부착                     |     |



(a) MWN Type



(b) MWP Type



(c) MWPF Type



(d) MWF Type

그림 2.75 시험체 Type

## Sensor 명칭 (명명법)

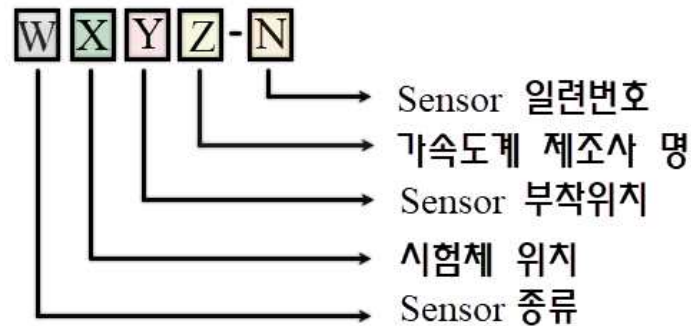


그림 2.76 센서 명칭 표기법

Sensor의 표기법은 Sensor의 종류, 2개의 시험체를 동시에 가졌을 때는 설치위치, 가속도의 경우 제조사명 그리고 일련번호 등에 따라 그림 2.76과 같이 표기했음. 그림 2.76에서 W는 Sensor의 구분(종류)을 의미하고 세부적인 사항은 표 2.36에 나타냈음. Sensor의 사양 및 종류에 대해서는 1.6 절에 기술하였음.

표 2.36 Sensor 구분 (종류)

| W | Sensor 종류 | 비 고 |
|---|-----------|-----|
| A | 가속도계      |     |
| L | Laser 변위계 |     |

그림 2.76에서 X는 진동대 Table 위에 2개의 시험체를 동시에 올려놓고 시험했을 경우에 이를 구분하기 위한 것으로써 표 2.37과 같이 제어실을 기준으로 앞에 위치한 것을 F, 뒤에 위치한 것을 B로 표기하였음. Table 상에 한 개의 시험체만을 올려서 가진한 경우 이에 대한 표기는 생략하였음.

표 2.37 시험체 위치

| W | Sensor 종류     | 비 고    |
|---|---------------|--------|
| F | 전방 (Forward)  | 제어실 기준 |
| B | 후방 (Backward) | 〃      |



그림 2.77 2개 시험체 동시 설치

그림 2.76에서 Y는 Sensor의 부착위치를 의미함. 벽체의 정면에 가속도계 또는 Laser 변위계를 횡방향으로 배치한 경우 창측(W), 중앙(C), 통로(P)로 표기하였고 측면은 ‘S’로 표기하였음. 가속도계, Laser 변위계를 상하 방향으로 배치한 경우 상부(U), 중앙(M), 하부(D)로 표기하였고 진동대 바닥에 설치한 것은 ‘B’로 표기하였음. 세부적인 사항은 표 2.38와 같이 표기하였음.

표 2.38 Sensor 위치

| Y   | Sensor 부착위치         | 비 고         |
|-----|---------------------|-------------|
| B   | 진동대 Table (Base)    |             |
| U   | 상부 (Upward)         |             |
| M/C | 중앙 (Middle, Center) | U,M,D/W,C,P |
| D   | 하부 (Downward)       |             |
| S   | 측면 (Side)           |             |
| W   | 창문쪽 (Window Side)   |             |
| P   | 통로쪽 (Passage Side)  |             |



그림 2.78 단독 시험체 설치

표 2.39 가속도계 제조사명

| W | Sensor 종류           | 비 고     |
|---|---------------------|---------|
| D | Dytran (ICPE Type)  | 가속계만 적용 |
| K | Koywa (Bridge Type) | 〃       |

## 2.2.2 시험 방법

정확한 가진파형을 작성하기 위해 그림 2.79과 같이 피시험체의 무게와 같은 Dummy Mass를 올려놓고 Tuning을 실시하였음. Sensor 설치를 위해 그림 2.80과 같이 Reference Frame과 Aluminum Profile을 조립하여 설치하였음. 무보강, 보강 조적벽체에 대한 내진안정성 시험은 아래 표 2.40과 같은 순서로 진행하였음.

표 2.40 조적벽체 내진안정성 시험순서

| 번호 | 시험체명     | 보 강 방 법               | 시 험 방 법                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 비 고 |
|----|----------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1  | MWN-1    | 무보강                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Wave <ul style="list-style-type: none"> <li>• El-Centro earthquake</li> </ul> </li> <li>■ Max Amp. <ul style="list-style-type: none"> <li>• 0.1g ~ 1.0g</li> </ul> </li> <li>■ Direction <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 axes, in-plane</li> </ul> </li> </ul> |     |
| 2  | MWP4-1   | Polyurea 4mm 도포       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
| 3  | MWP2-1   | Polyurea 2mm 도포       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
| 4  | MWN-2    | 무보강                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
| 5  | MWPF5-1  | GFRP 50mm부착 PU 2mm 도포 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
| 6  | MWN-3    | 무보강                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
| 7  | MWP4-2   | Polyurea 4mm 도포       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
| 8  | MWPF10-1 | GFRP 50mm부착 PU 2mm 도포 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
| 9  | MWF5-1   | GFRP 50mm부착           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
| 10 | MWPF5-2  | GFRP 50mm부착 PU 2mm 도포 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
| 11 | MWF5-2   | GFRP 50mm부착           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
| 12 | MWP2-2   | Polyurea 2mm 도포       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |     |

El-Centro 지진파형을 Scale을 조정하여 최초 0.1g부터 0.1g 간격으로 1.0g까지 점진적으로 가진하여 시험을 실시하여 시험체의 파괴가 발생하면 종료하였음. 가진 시간은 56sec이고 각 단계 마다 시험체의 가속도와 변위를 계측하였으며 제어실 방향을 양(‘+’)로 기록하였음.



그림 2.79 Dummy Mass Setting



그림 2.80 Reference Frame 설치

### 2.2.3 시험체 설치

바닥 Slab Con' c에 Mortar 10mm 타설하고 23 단의 벽돌을 쌓아 벽체를 제작하였음. 조적 후 2 주 동안의 양생기간을 두었음. Polyurea 도포, GRRP 부착 또는 그 이후 Polyurea 도포 후 다시 2주간의 양생기간을 두었음. 실험체를 진동대 Table에 거치하기 위해 20ton 용량의 주행 Crane을 사용하였으며 운반과정에서 발생할 수 있는 파손을 방지하기 위해 4개의 보호 Bracket를 체결하였음. 바닥 Slab Con' c의 4 구석에 관통구멍을 뚫어 전산볼트로 Table에 설치된 Bolt 구멍에 체결하여 고정하였음. 또한, 가진 시 미끄럼 발생을 방지하기 위해 진동대 바닥에 Bracket과 Screw Jack을 설치하였음.

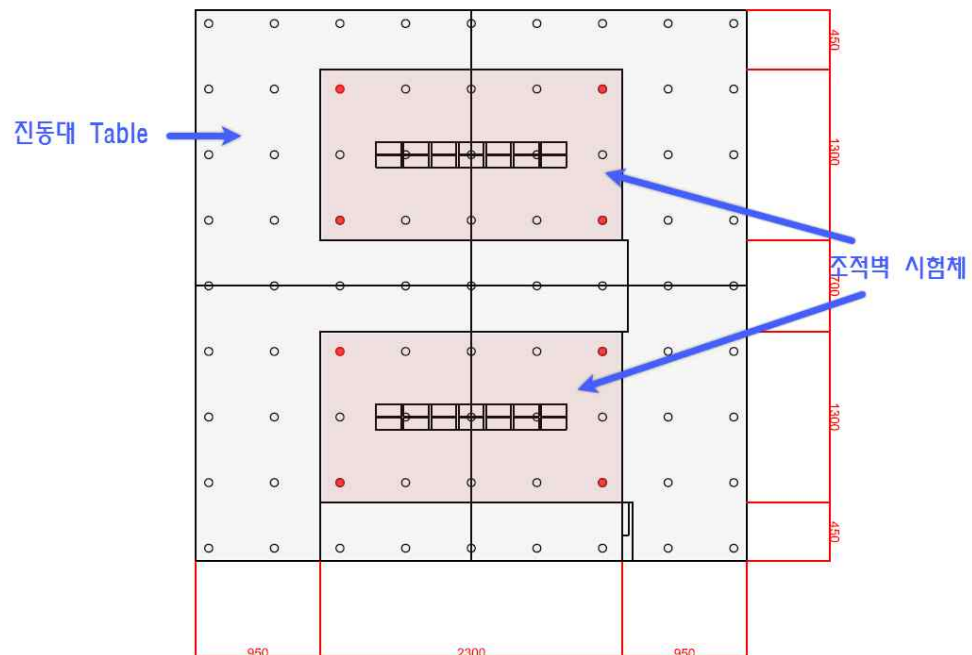
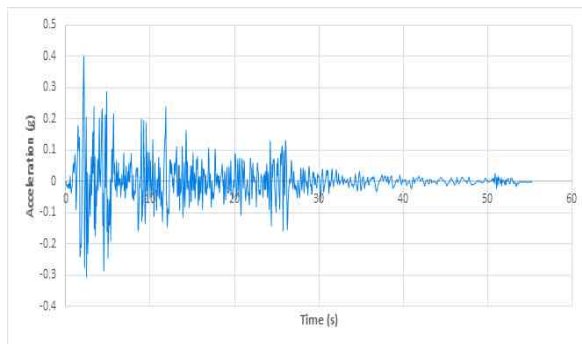


그림 2.81 시험체 설치 평면도

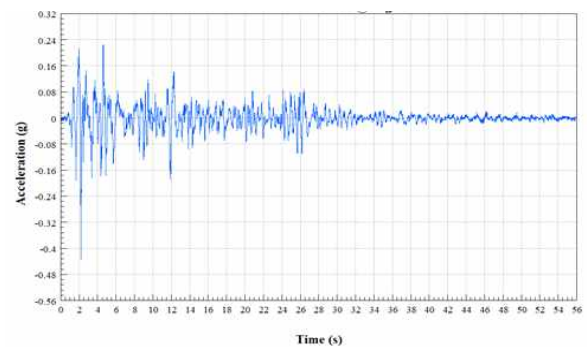
## 2.3 시험 결과 (Detailed test results and supporting data (shake-table test))

### 2.3.1 입력지진가속도와 출력지진가속도 비교

입력지진파(El Centro)의 최대중력가속(PGA)를 scaling하여 0.1g부터 0.1g씩 증가하는 방식으로 벽체 파단 시까지 가진하였음. 출력지진가속도로는 진동대 Actuator 바닥판에 부착된 가속도계를 사용하여 Data를 수집하였으며, 다음 그림 2.82-2.93는 시험체 별 벽체 파단 시 입력 및 출력 가속도를 보여주고 있음.

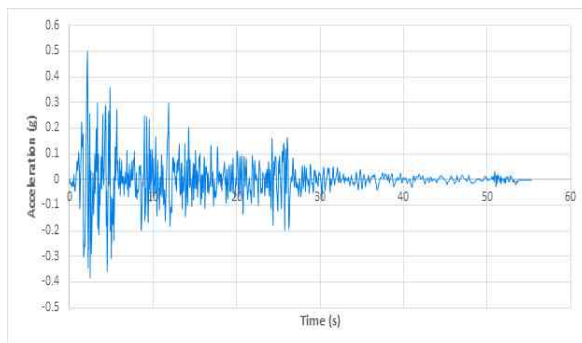


입력지진가속도

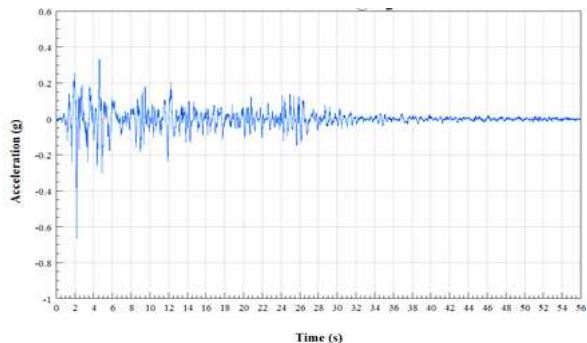


출력지진가속도

그림 2.82 MWN-1

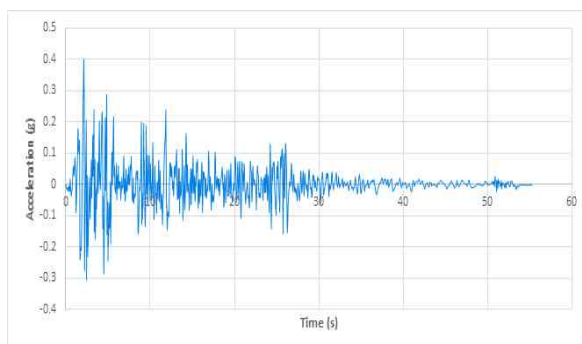


입력지진가속도

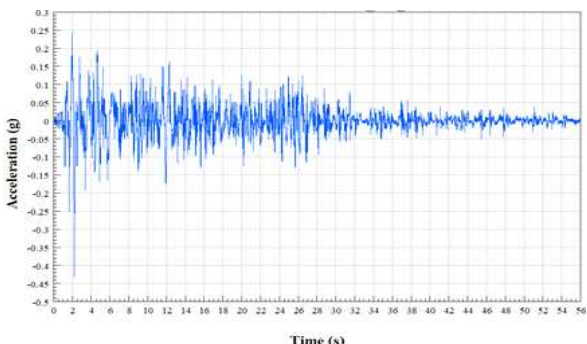


출력지진가속도

그림 2.83 MWN-2

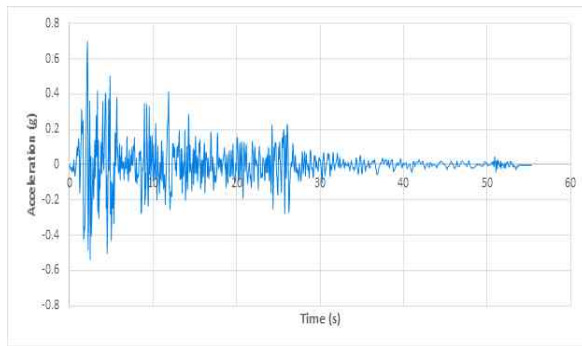


입력지진가속도

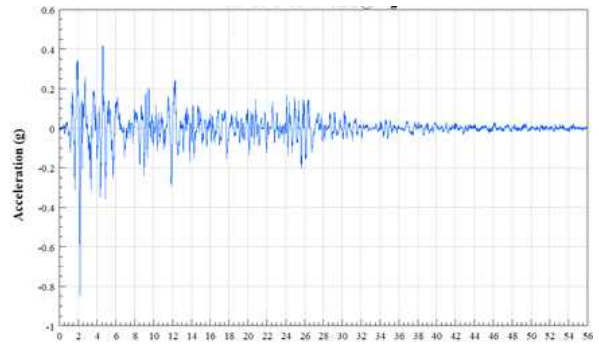


출력지진가속도

그림 2.84 MWN-3

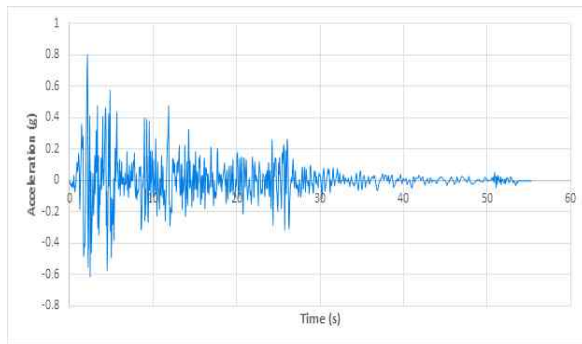


입력지진가속도

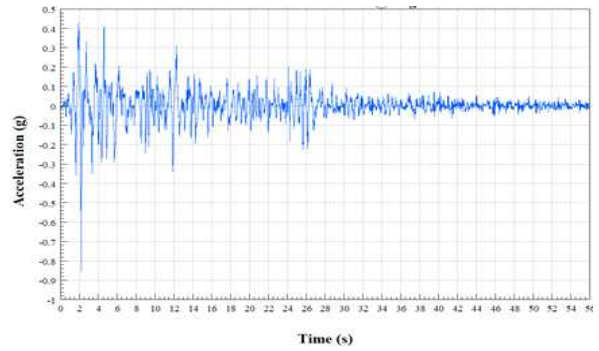


출력지진가속도

그림 2.85 MWP2-1

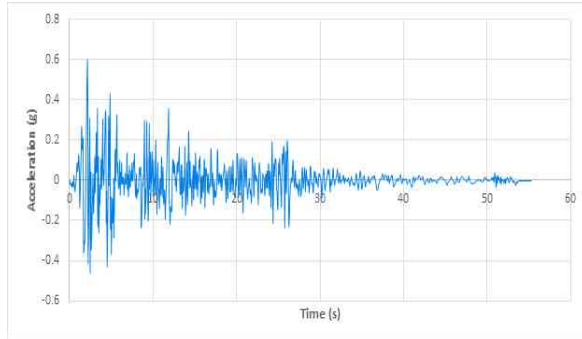


입력지진가속도

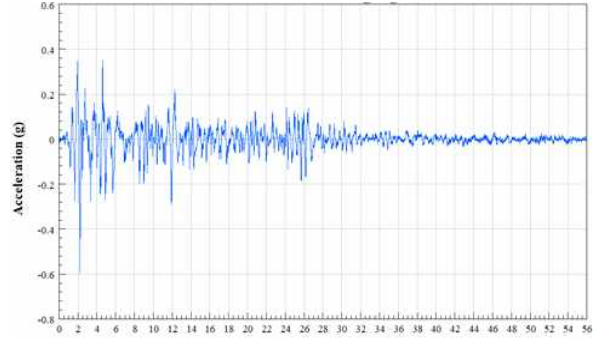


출력지진가속도

그림 2.86 MWP2-2

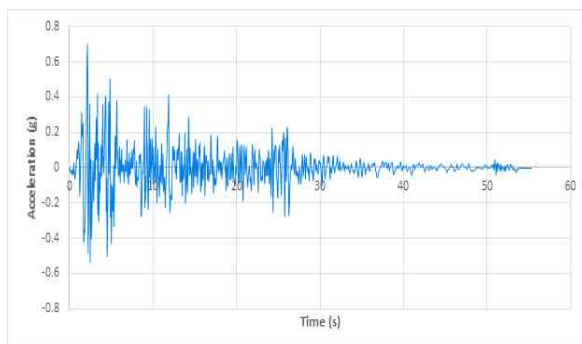


입력지진가속도

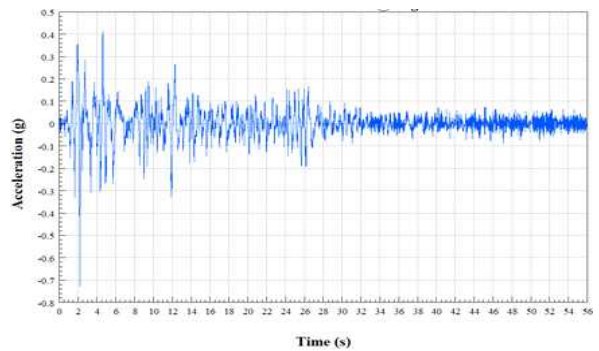


출력지진가속도

그림 2.87 MWP4-1

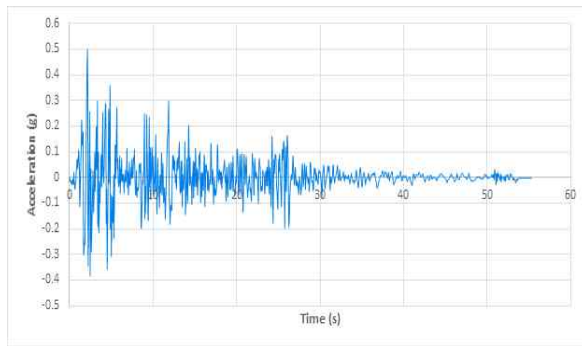


입력지진가속도

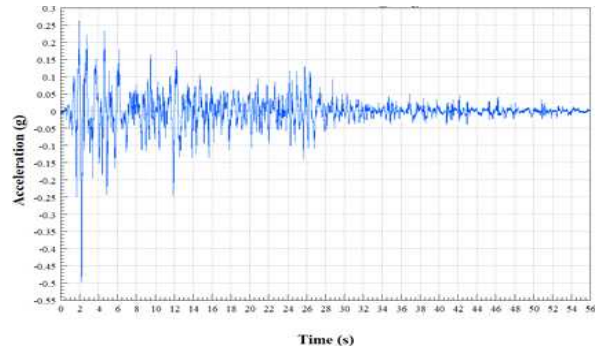


출력지진가속도

그림 2.88 MWP4-2

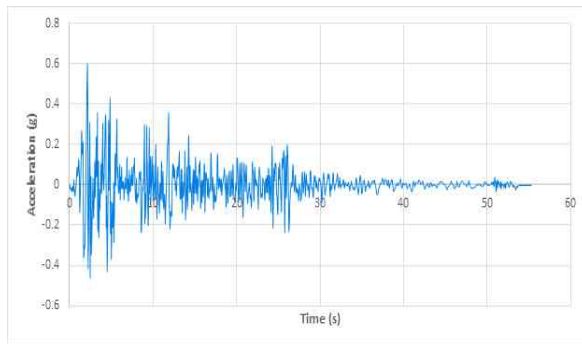


입력지진가속도

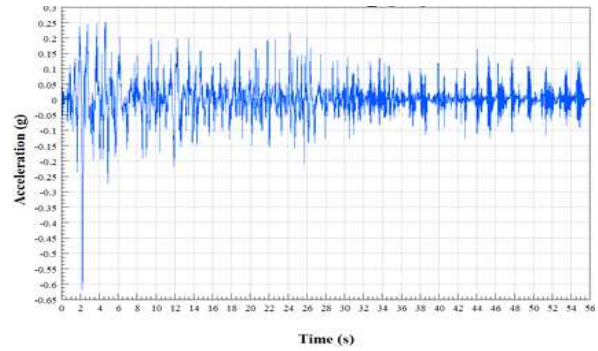


출력지진가속도

그림 2.89 MWF5-2

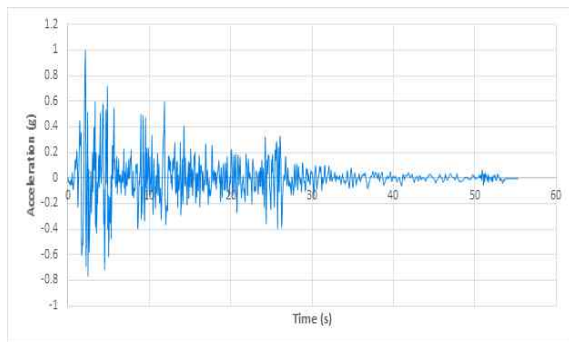


입력지진가속도

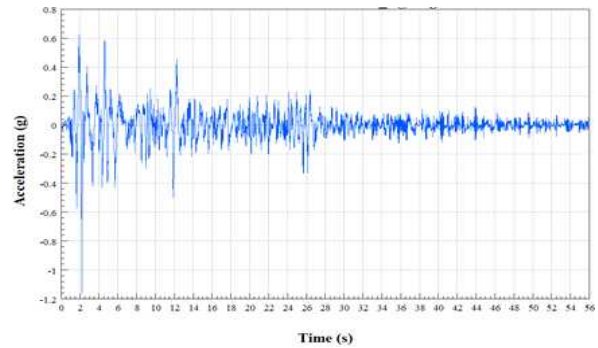


출력지진가속도

그림 2.90 MWF5-1

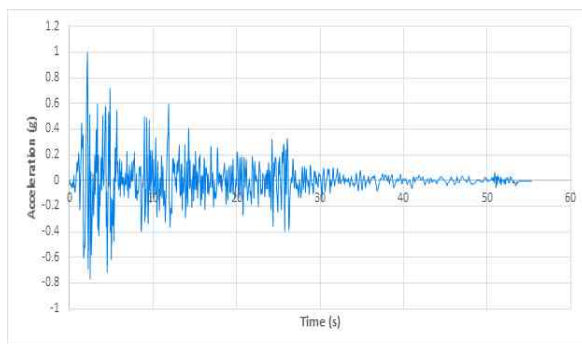


입력지진가속도

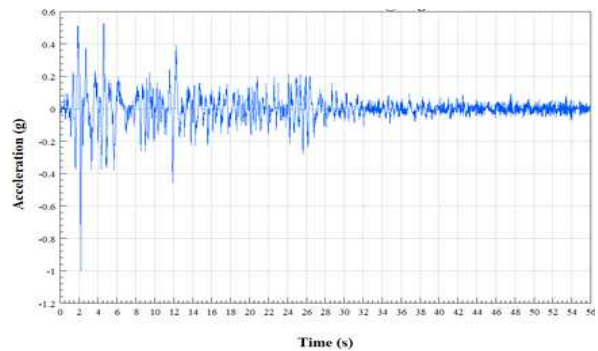


출력지진가속도

그림 2.91 MWPF10-1

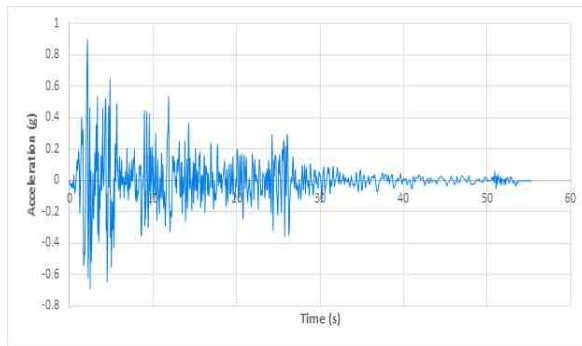


입력지진가속도

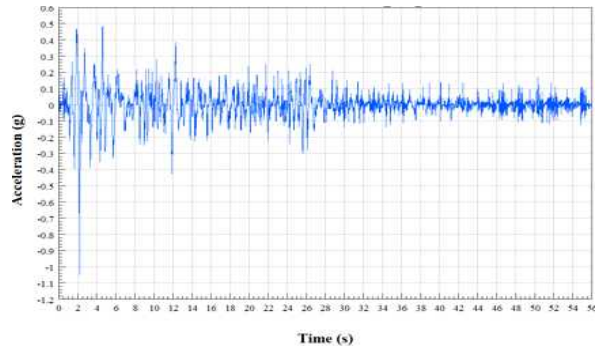


출력지진가속도

그림 2.92 MWPF5-1



입력지진가속도



출력지진가속도

그림 2.93 MWPF5-2

### 2.3.2 시험체별 파괴 시 주요 측정치

#### ◦ MWN (무보강 조적조)

| Spcm.<br>Acc. | MWN-1 |       | MWN-2 |       |        | MWN-3 |       |       |        |       |
|---------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|
|               | ABK   | ACK   | ABK   | ABCK  | LBC    | ABK   | ABUD  | ABMD  | LBU    | LBM   |
| 0.1g          | -0.09 | -0.08 | -0.10 | -0.08 | -7.46  | -0.14 | -0.18 | -0.13 | 8.19   | 8.12  |
| 0.2g          | -0.22 | 0.29  | -0.23 | -0.18 | -15.77 | -0.26 | -0.38 | -0.28 | -15.39 | 15.14 |
| 0.3g          | -0.31 | 0.47  | -0.32 | -0.26 | 23.89  | -0.32 | -0.53 | -0.32 | 24.88  | 24.53 |
| 0.4g          | -0.43 | -0.31 | -0.46 | 0.31  | -33.45 | -0.43 | 0.62  | -0.57 | 53.36  | 34.97 |
| 0.5g          |       |       | -0.67 | -0.94 | 44.91  |       |       |       |        |       |

무보강 시험체 MWN-1는 예비시험의 성격으로 가장 먼저 시행하였음. 하부 고정 Bracket은 그림 2.94과 같이 하부 1단만 설치하였으며 변위의 측정도 벽체 중앙과 좌/우측에 설치하였으나 DAQ과정에서 문제가 발생하여 데이터를 얻지 못하였음. MWN-2와 MWN-3은 하부 고정 Bracket를 2단으로 설치하였으며, MWN-2의 경우 다른 시험체보다 높은 가속도까지 완전한 파괴는 발생하지 않았으나 전 단계인 0.46g에서 균열이 발생하기 시작했음. 무보강의 경우 0.43g ~ 0.46g에서 파괴가 발생하였으며 이때 중앙부에서의 변위는 33.5 mm ~ 35 mm 가 발생하였음.

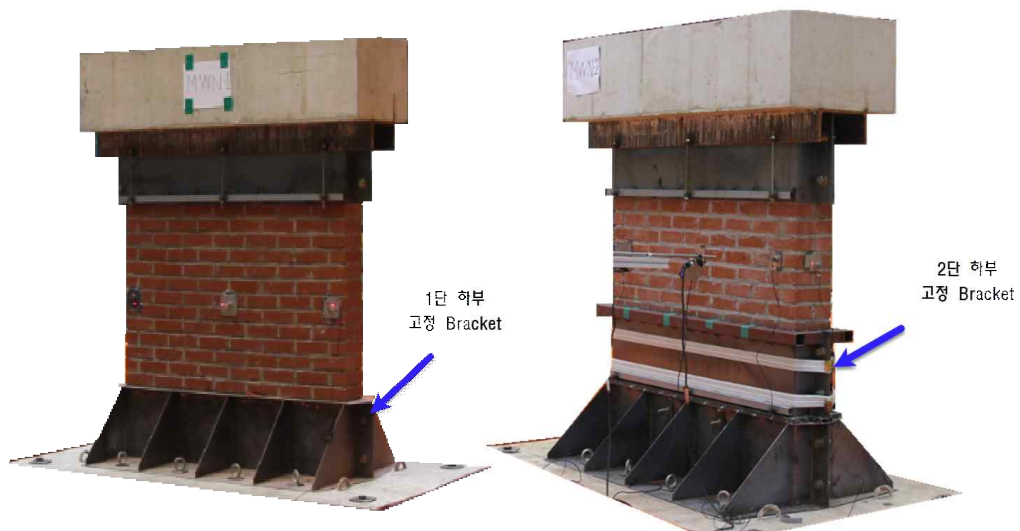


그림 2.94 하부고정 Bracket (좌/우 센서배치)

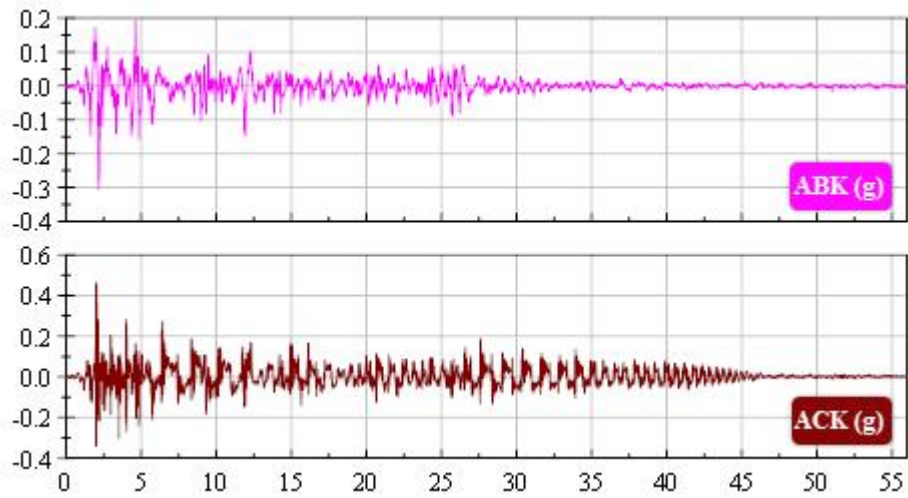


그림 2.95 MWN-1@0.3g 파괴 시 주요 측정치

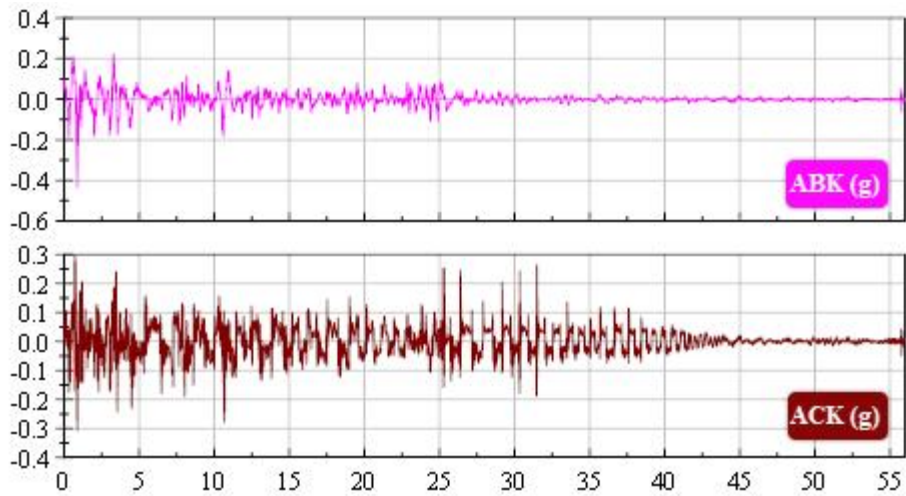


그림 2.96 MWN-1@0.4g 파괴 시 주요 측정치

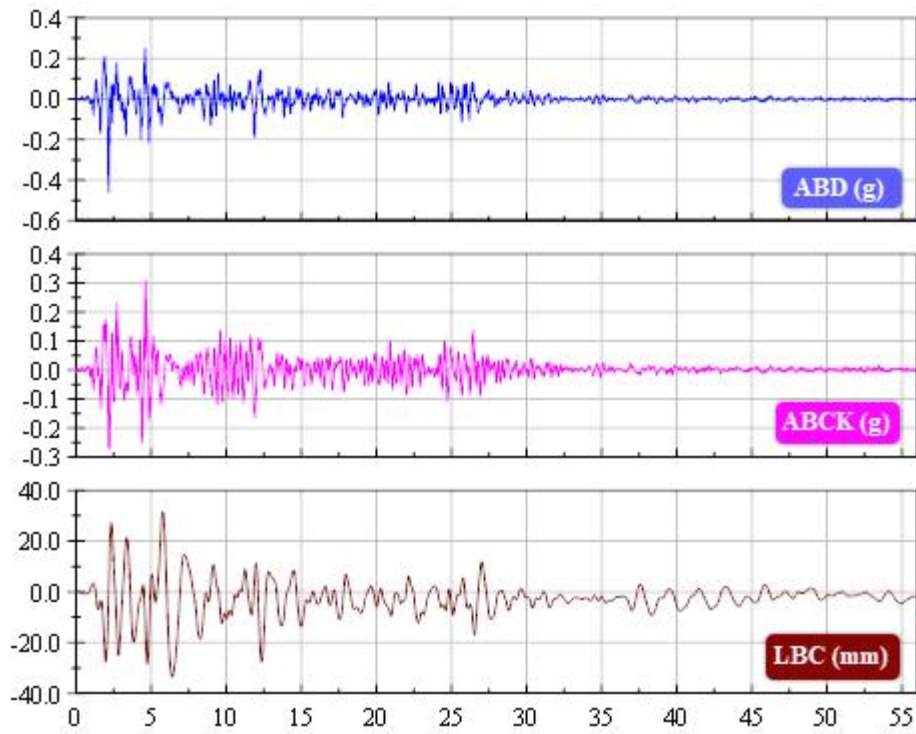


그림 2.97 MWN-2@0.4g 파괴 시 주요 측정치

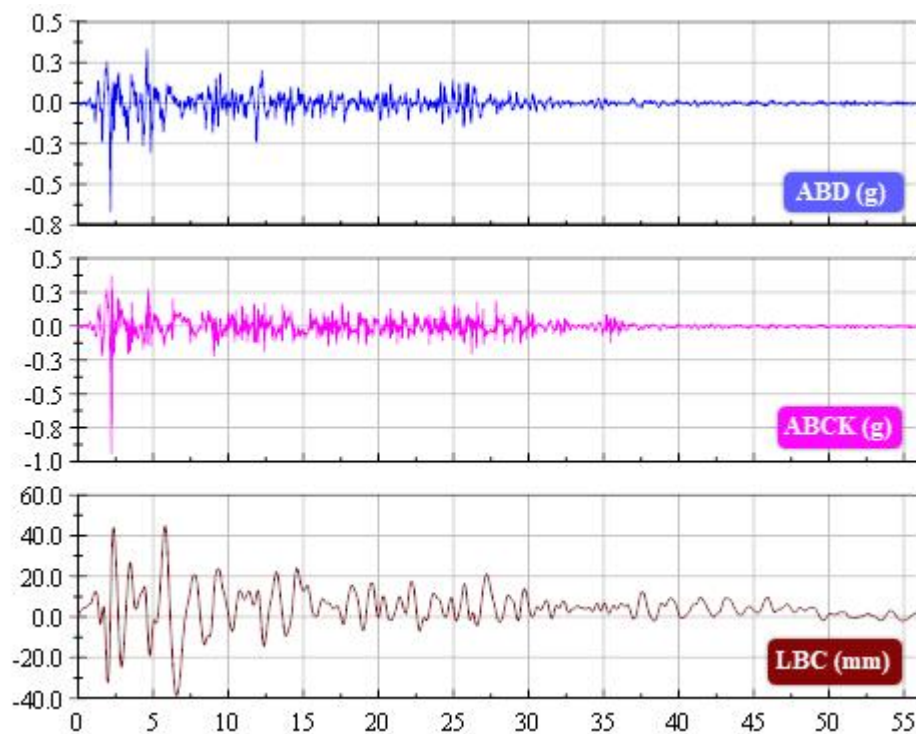


그림 2.98 MWN-2@0.5g 파괴 시 주요 측정치

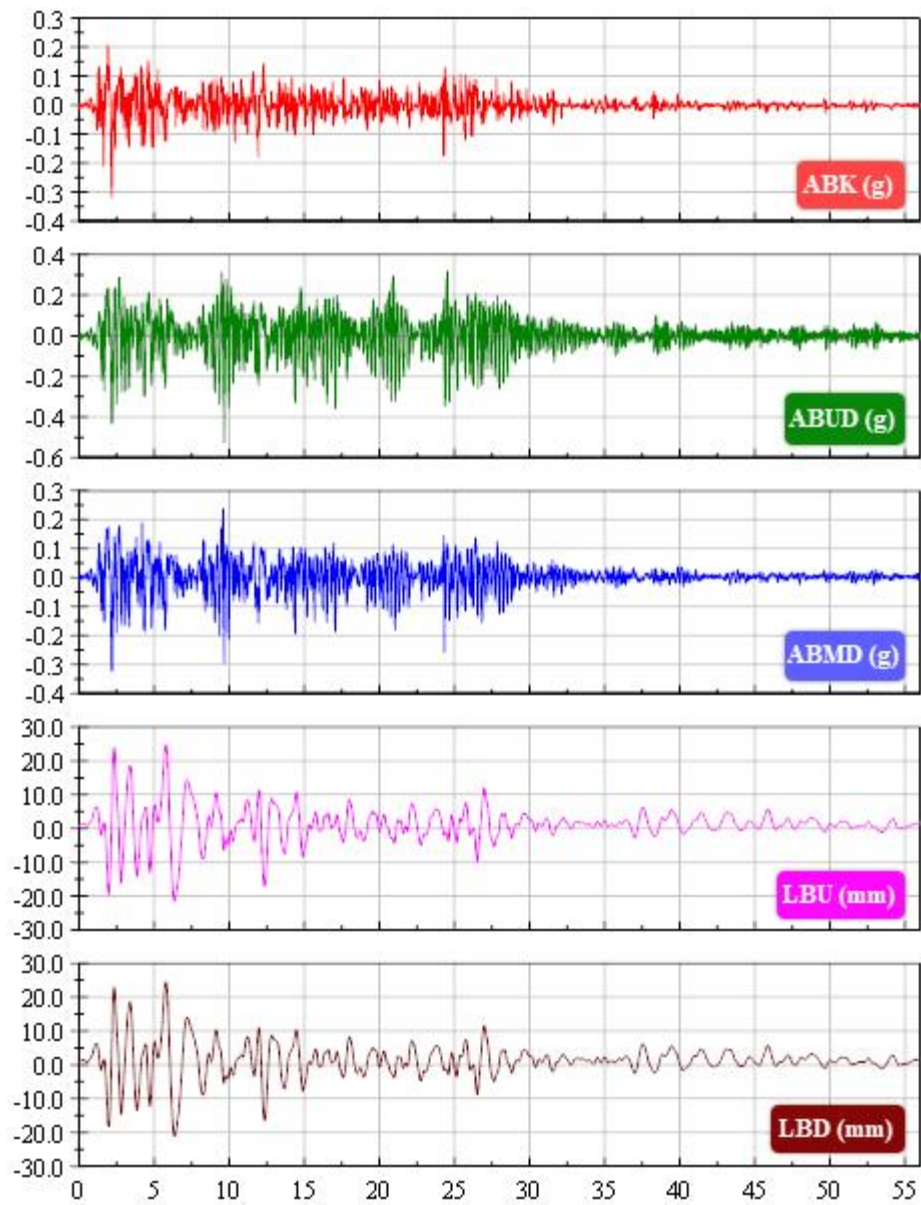


그림 2.99 MWN-3@0.3g 파괴 시 주요 측정치

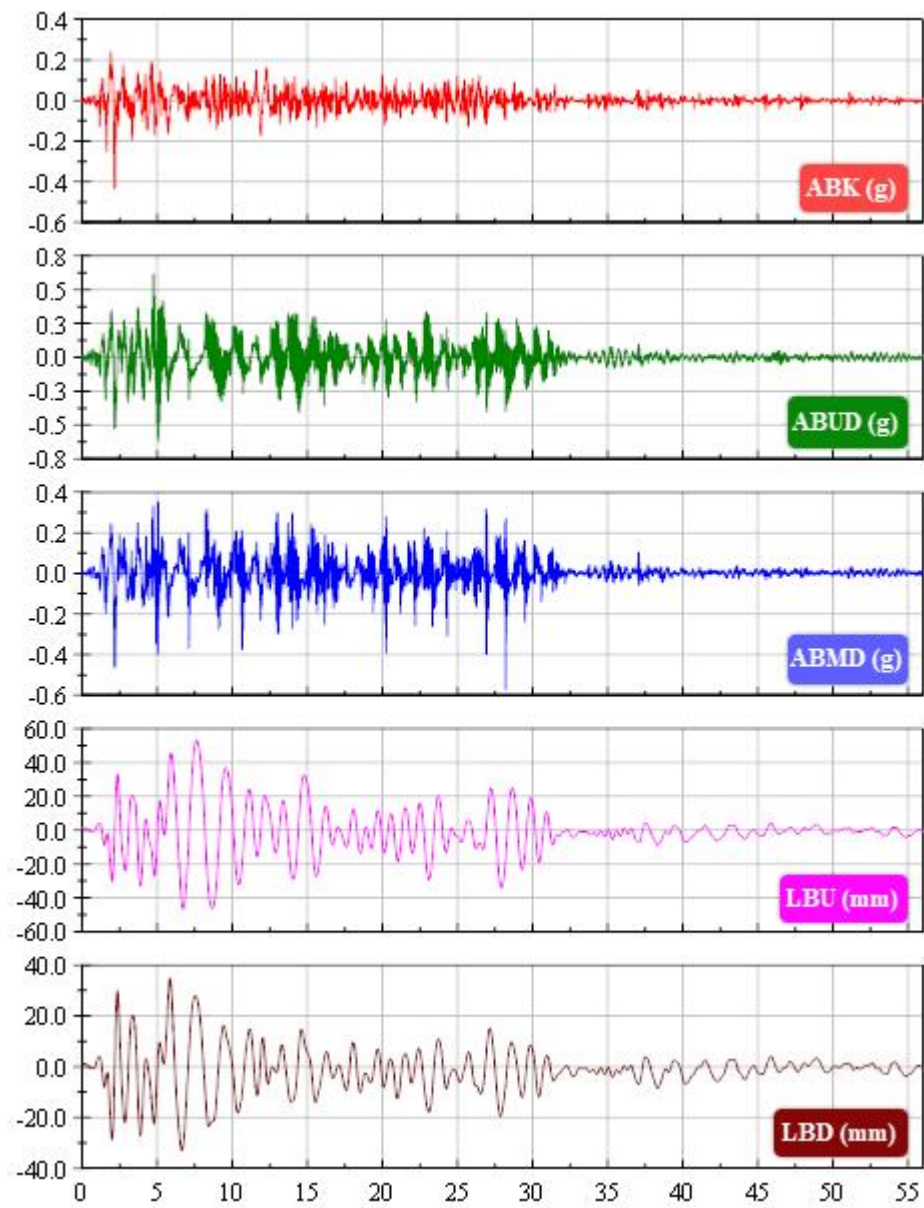


그림 2.100 MWN-3@0.4g 파괴 시 주요 측정치

◦ MWP2 (Polyurea 2mm 보강)

| Spcm.<br>Acc. | MWP2-1 |       |        | MWP2-2 |       |       |        |        |
|---------------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|
|               | ABK    | AFCK  | LFC    | ABK    | ABUD  | ABMD  | LBU    | LBM    |
| 0.1g          | -0.09  | -0.08 | -7.50  | -0.13  | -0.20 | -0.13 | 8.28   | 7.84   |
| 0.2g          | -0.22  | -0.14 | -15.29 | -0.25  | -0.38 | -0.28 | 15.48  | 14.97  |
| 0.3g          | -0.30  | -0.18 | 25.25  | -0.34  | -0.46 | -0.31 | 25.21  | 24.46  |
| 0.4g          | -0.43  | -0.26 | 32.15  | -0.44  | -0.72 | -0.51 | -32.40 | -31.60 |
| 0.5g          | -0.63  | 0.58  | 47.69  | -0.50  | -2.28 | 0.71  | -42.51 | -40.02 |
| 0.6g          | -0.72  | 0.73  | 49.95  | -0.65  | -1.47 | -0.94 | 49.29  | 47.68  |
| 0.7g          | -0.81  | 0.88  | 58.78  | -0.71  | -1.90 | -1.11 | 59.89  | 57.26  |
| 0.8g          | -0.95  | -1.60 | 140.20 | -0.86  | 2.52  | -1.07 | 80.20  | 65.49  |

MWP2 시험체는 Polyurea를 무보강 시험체에 2mm 도포하여 보강한 것으로써 MWP2-1은 0.8g 까지 측정값을 기록하였으나 그림 2.103의 변위값에 나타난 바와 같이 가진 초반부터 큰 변위가 발생하는 것으로 보아 0.7g에 이미 파괴가 발생한 것으로 판단됨. MWP2-2는 0.86g에서 파괴가 발생하였음. Polyurea 2mm 보강한 경우 0.81g ~ 0.86g에서 파괴가 발생하였으며 이때 중앙부에서의 변위는 58.78 mm ~ 57.56 mm 가 발생되었음.

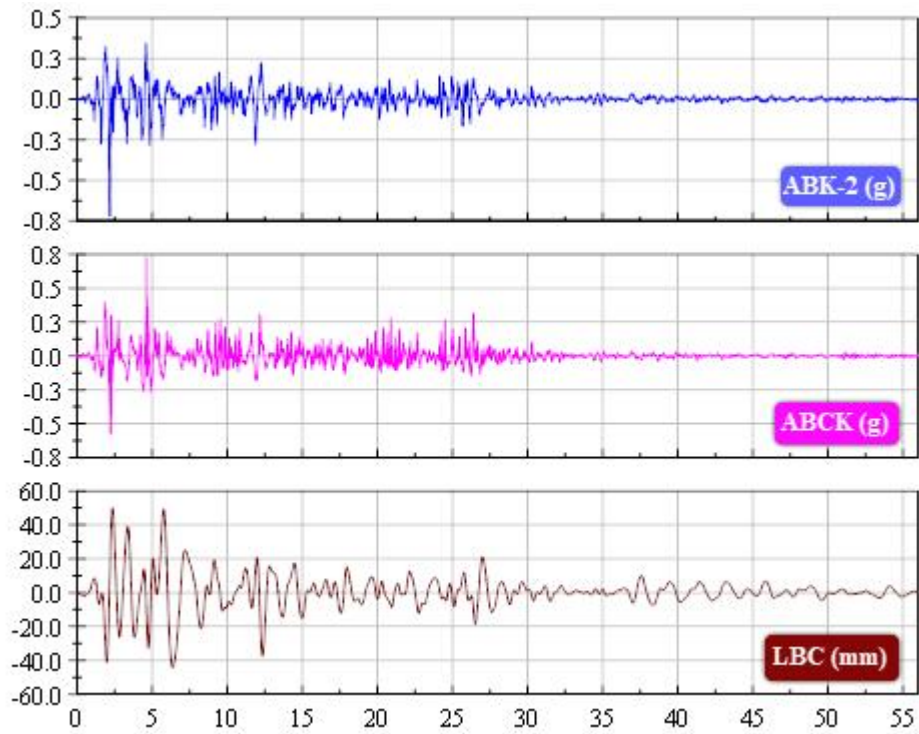


그림 2.101 MWP2-1@0.6g 파괴 시 주요 측정치

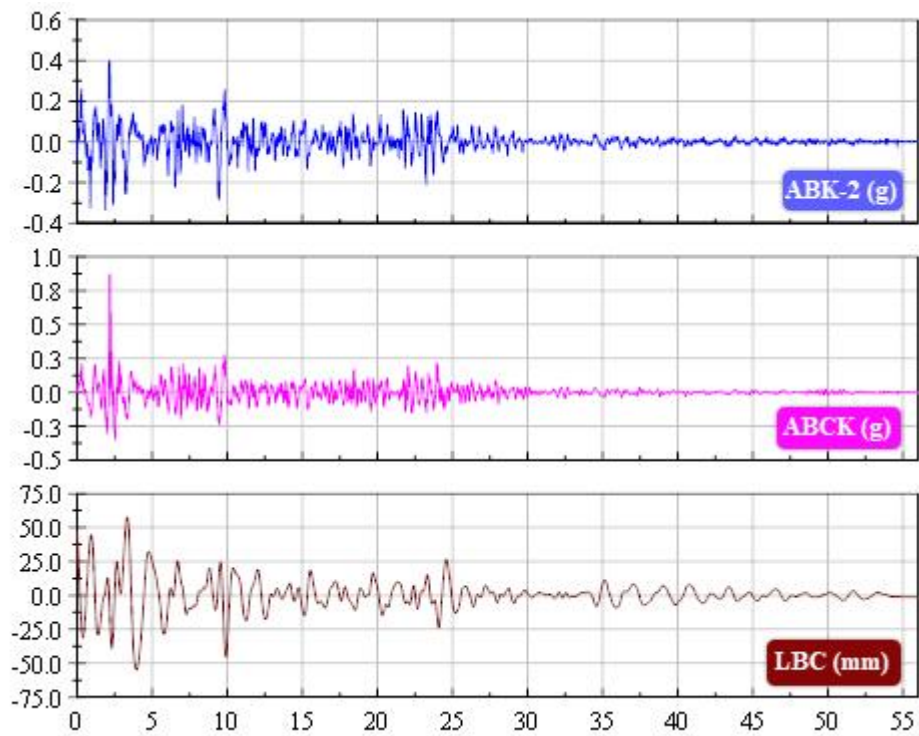


그림 2.102 MWP2-1@0.7g 파괴 시 주요 측정치

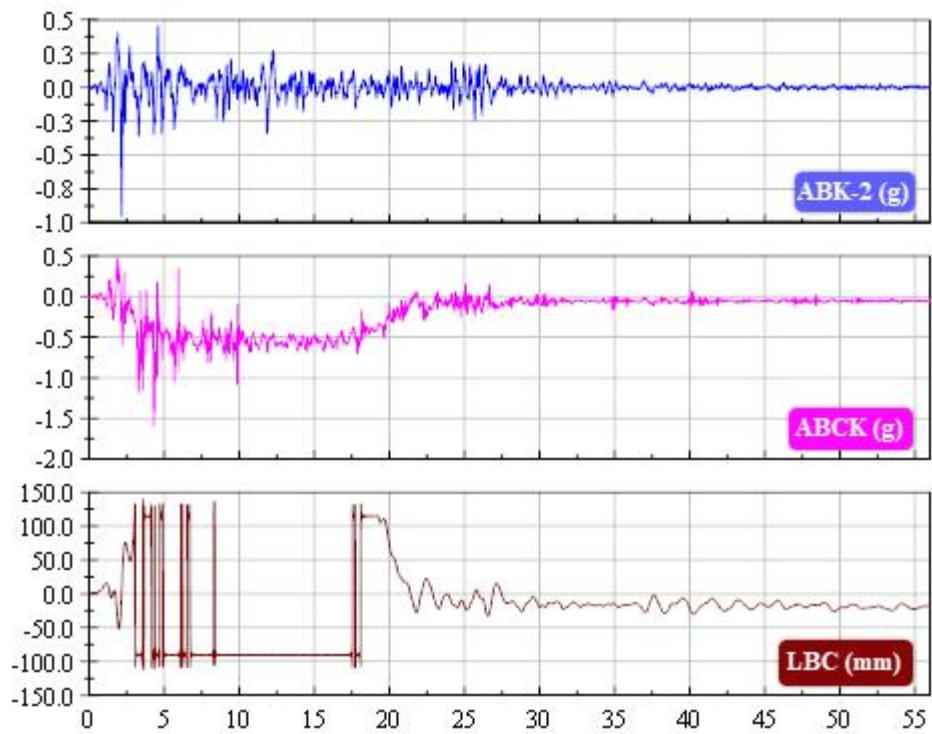


그림 2.103 MWP2-1@0.8g 파괴 시 주요 측정치

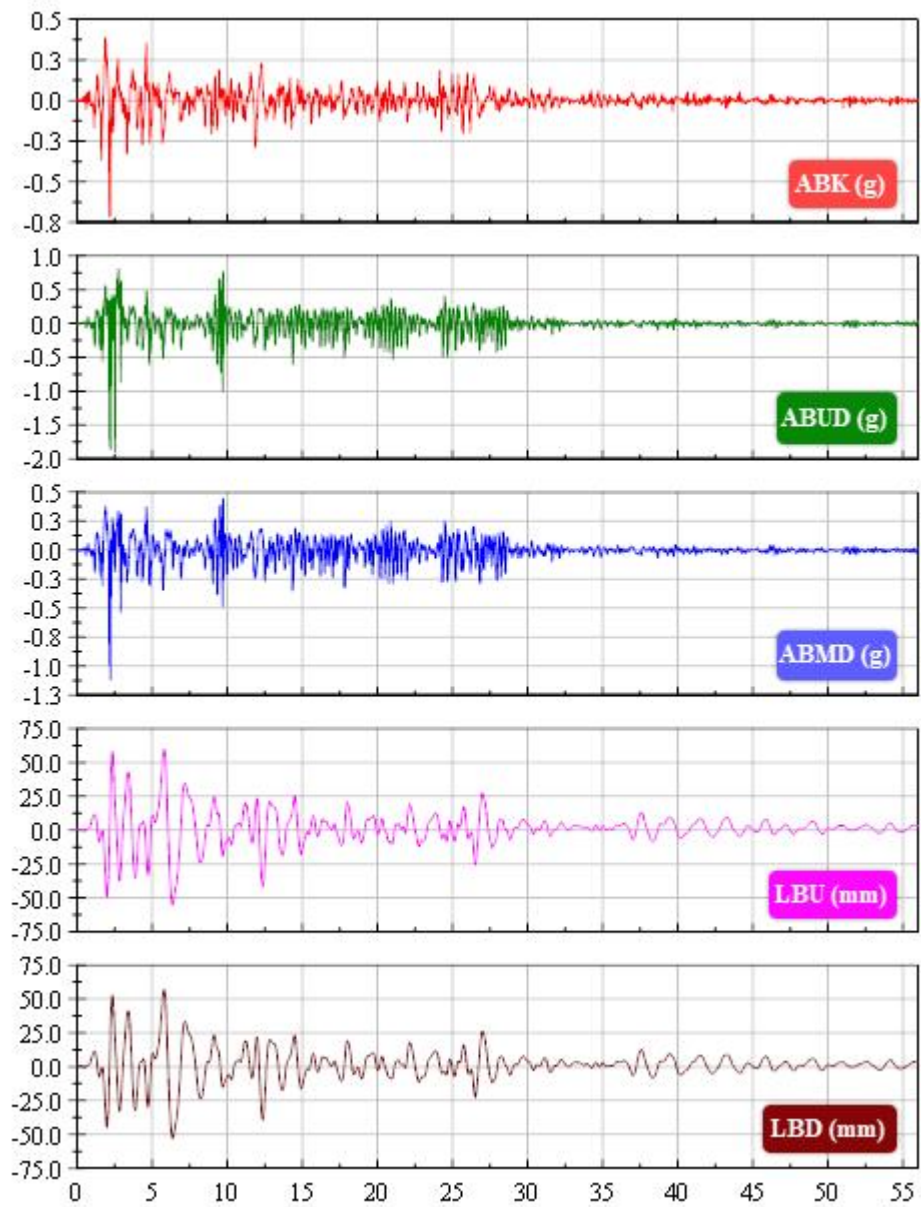


그림 2.104 MWP2-2@0.7g 파괴 시 주요 측정치

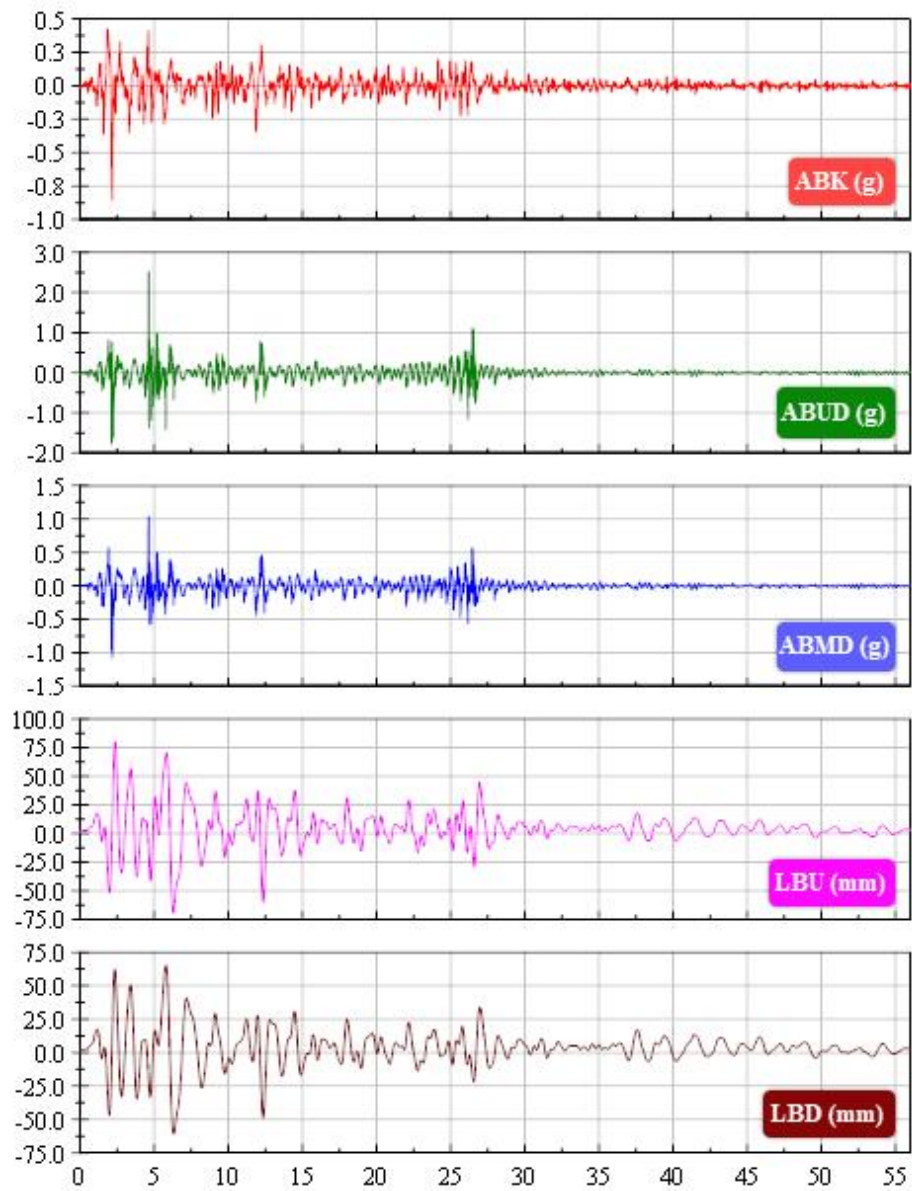


그림 2.105 MWP2-2@0.8g 파괴 시 주요 측정치

◦ MWP4 (Polyurea 4mm 보강)

| Spcm.<br>Acc. | MWP4-1 |       |         | MWP4-2 |       |       |        |        |
|---------------|--------|-------|---------|--------|-------|-------|--------|--------|
|               | ABK    | ACK   | LP      | ABK    | AFUD  | AFMD  | LFU    | LFM    |
| 0.1g          | -0.10  | -0.20 | -7.668  | -0.13  | -0.19 | -0.12 | -7.43  | 7.58   |
| 0.2g          | -0.20  | -0.35 | -16.374 | -0.24  | 0.34  | 0.23  | -15.68 | -16.06 |
| 0.3g          | -0.28  | -0.40 | 24.886  | -0.29  | 0.42  | 0.27  | 27.37  | 25.67  |
| 0.4g          | -0.44  | -0.63 | 43.319  | -0.42  | 0.61  | 0.42  | -34.36 | -34.47 |
| 0.5g          | -0.61  | 0.88  | 52.213  | -0.55  | 1.02  | 0.62  | 49.10  | 45.72  |
| 0.6g          | -0.60  | 0.87  | 61.147  | -0.62  | 0.96  | -0.81 | 75.61  | 61.13  |
| 0.7g          |        |       |         | -0.73  | 2.15  | 1.14  | 126.96 | 95.30  |

MWNP4 시험체는 Polyure를 무보강 시험체에 4mm 도포하여 보강한 것으로써 MWP4-1은 0.6g에서 파괴가 발생하였고 중심부에서 변위는 61.15mm가 발생하였음. MWP4-2은 0.7g까지 측정값을 기록하였으나 그림 2.109의 변위값에 나타난 바와 같이 가진 초반부터 큰 변위가 발생하는 것으로 보아 0.6g에 이미 파괴가 발생한 것으로 판단됨. Polyurea 4mm 보강한 경우 0.6g ~ 0.62g에서 파괴가 발생하였으며 이때 중앙부에서의 변위는 61 mm가 발생하였음. Polyurea를 더 얇게 도포한 2mm의 경우보다 파괴 시 변위는 약 3 mm 가량 더 발생하였으나 가속도의 경우 0.2g ~ 0.25g 낮은 PGA에서 파괴가 일어난 것은 일반적이지 않아 이에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단됨.

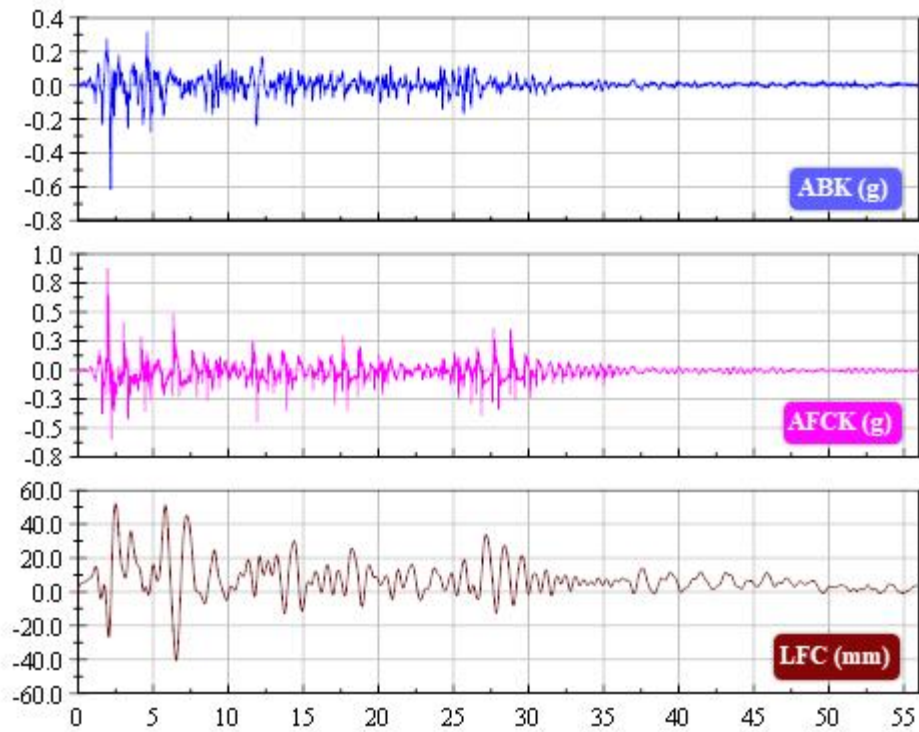


그림 2.106 MWF4-1@0.5g 파괴 시 주요 측정치

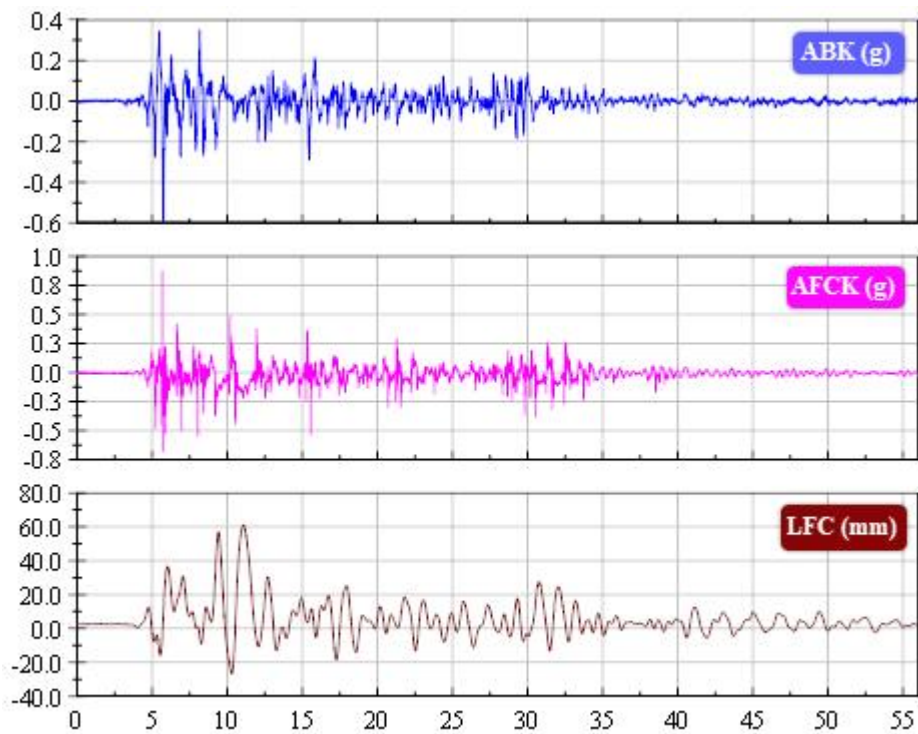


그림 2.107 MWF4-1@0.6g 파괴 시 주요 측정치

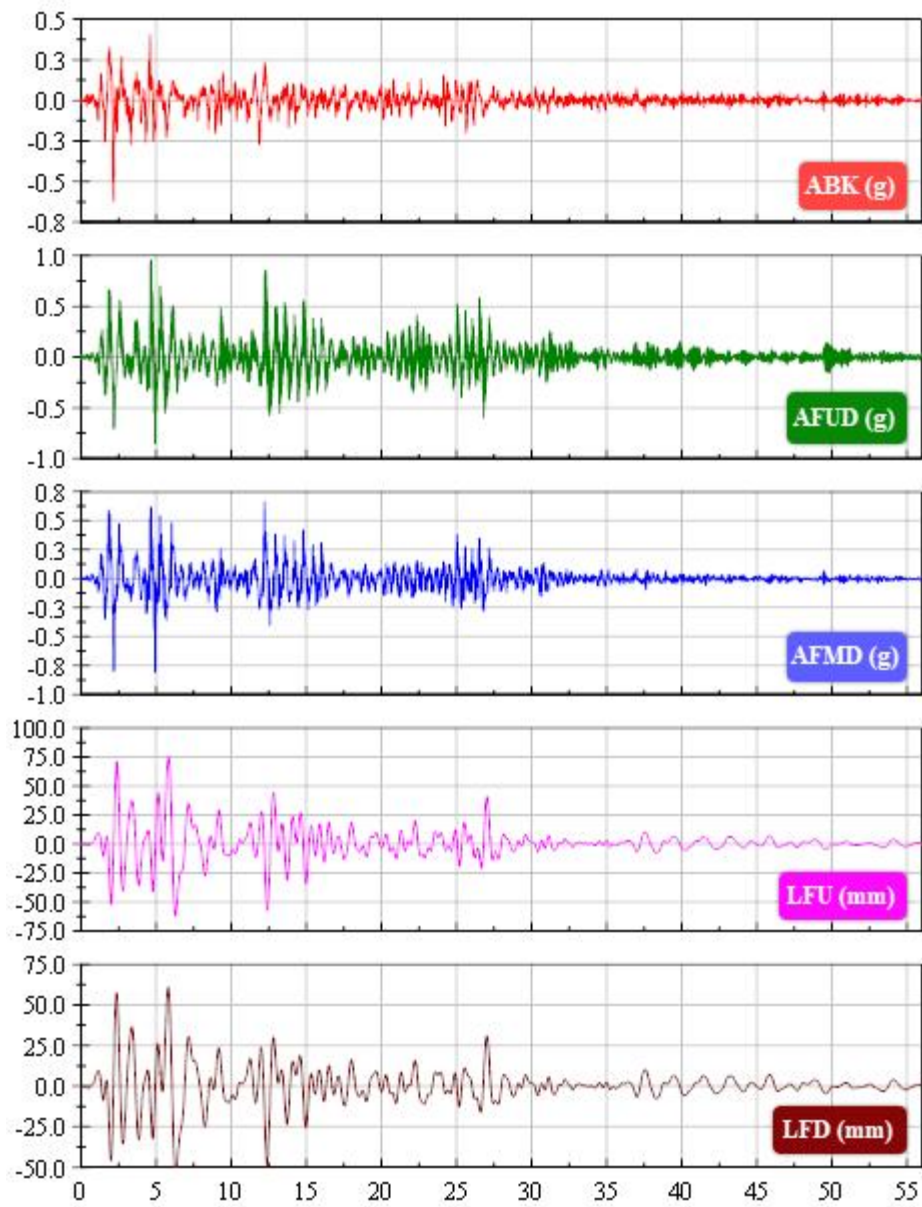


그림 2.108 MWF4-2@0.6g 파괴 시 주요 측정치

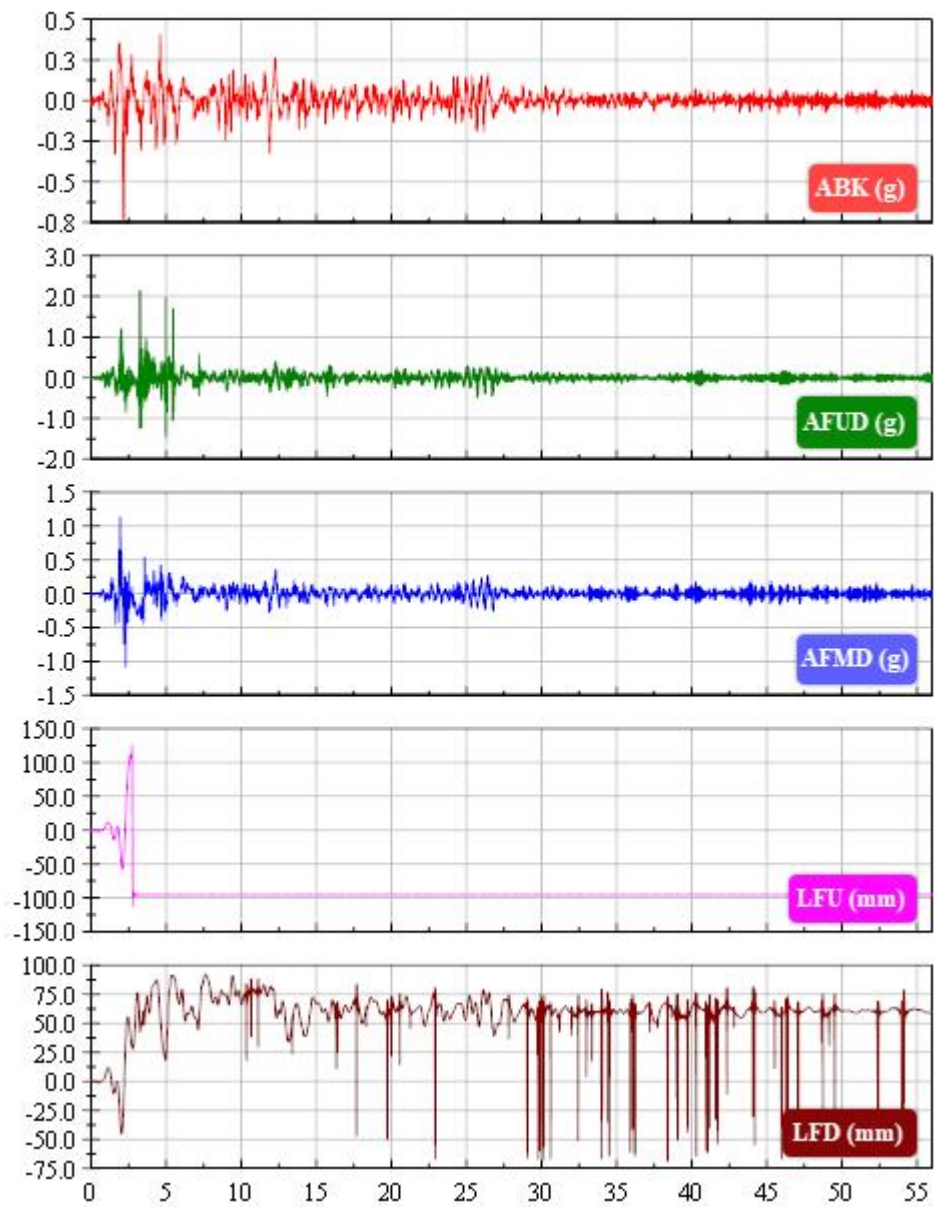


그림 2.109 MWF4-2@0.7g 파괴 시 주요 측정치

◦ MWF5 (GFRP 5mm 보강)

| Spcm.<br>Acc. | MWF5-1 |        |       |       |       | MWF5-2 |       |       |         |         |
|---------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|---------|---------|
|               | ABK    | AFUD   | AFMD  | LFU   | LFM   | ABK    | AFUD  | AFMD  | LFU     | LFM     |
| 0.1g          | -0.14  | -0.14  | -0.14 | -7.68 | -7.76 | -0.13  | -0.20 | -0.16 | 8.08    | 8.11    |
| 0.2g          | -0.23  | 0.26   | 0.20  | 17.53 | 16.35 | -0.25  | -1.97 | -0.34 | -16.18  | 18.54   |
| 0.3g          | -0.34  | -1.51* | 0.29  | 31.01 | 27.99 | -0.34  | -1.42 | -0.70 | 27.27   | 28.92   |
| 0.4g          | -0.43  | 0.46   | 0.35  | 40.36 | 36.46 | -0.44  | -2.50 | -1.27 | 33.88   | 35.47   |
| 0.5g          | -0.57  | -2.86* | -0.52 | 55.56 | 49.88 | -0.50  | 98.75 | -2.57 | -136.05 | -117.22 |
| 0.6g          | -0.75  | 41.96* | -0.89 | 66.96 | 59.29 |        |       |       |         |         |

※ 가속도계 Magnet Base 미끄러짐 발생

MWF5 시험체는 GFRP를 5mm 두께로 절단하고 Epoxy 함침(Immersion) 후에 무보강 조적조에 부착하였음. MWP5-1 시험체는 0.75g에서 파괴되었으며 변위는 상단 66.96mm 중앙에서 59.29mm가 발생하였음. 같은 종류의 시험체인 MWP5-2는 그림 2.113에서 다른 Type의 시험체 파괴 시 변위와 달리 가진파의 Peak치를 지나서 파괴된 것으로 보아 공칭가속도 0.5g에서 파괴된 것으로 분류하였음. 변위는 전단계 가속도인 0.44g에서 상단 33.88 mm 중단 33.88 mm가 발생하였음. 아래 그림 2.111 MWP5의 균열도를 보면 MWP5-1의 균열은 GFRP가 보강된 부분에서 발생하였고 MPWP5-2는 조적보의 가운데보다 취약한 외측부터 시작된 것으로 관찰할 수 있음. 조적벽체의 구조상 가운데보다 측면에서 균열이 시작할 가능성이 높음. 동일 보강 Type인 MWF5의 파괴 양상이 다른 것은 균열 발생 패턴으로 미루어 볼 때 MWP5-2는 조적 시 그림 2.110의 충전홀에 조적 시 Mortar의 충전이 가운데 벽돌보다 상대적으로 양호하지 못할 가능성이 많을 것으로 예측할 수 있고, MWP5-1의 경우는 이와 반대로 외측이 가운데보다 상대적으로 양호하게 되었을 것으로 예상할 수 있음.

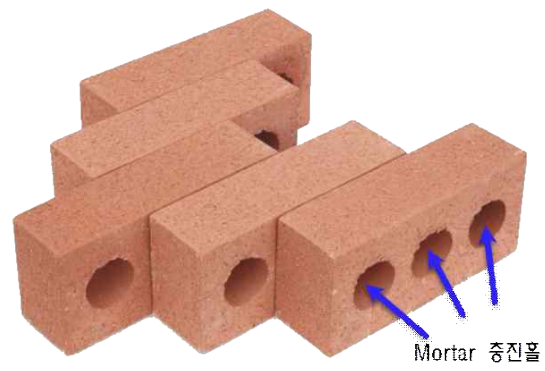


그림 2.110 Mortar 충전홀

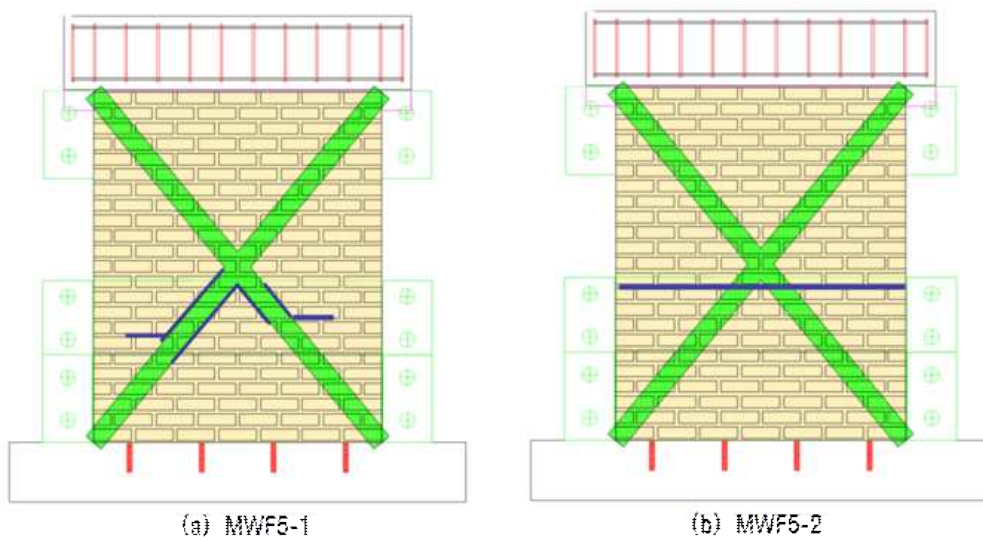


그림 2.111 MWF5 균열발생 패턴 비교

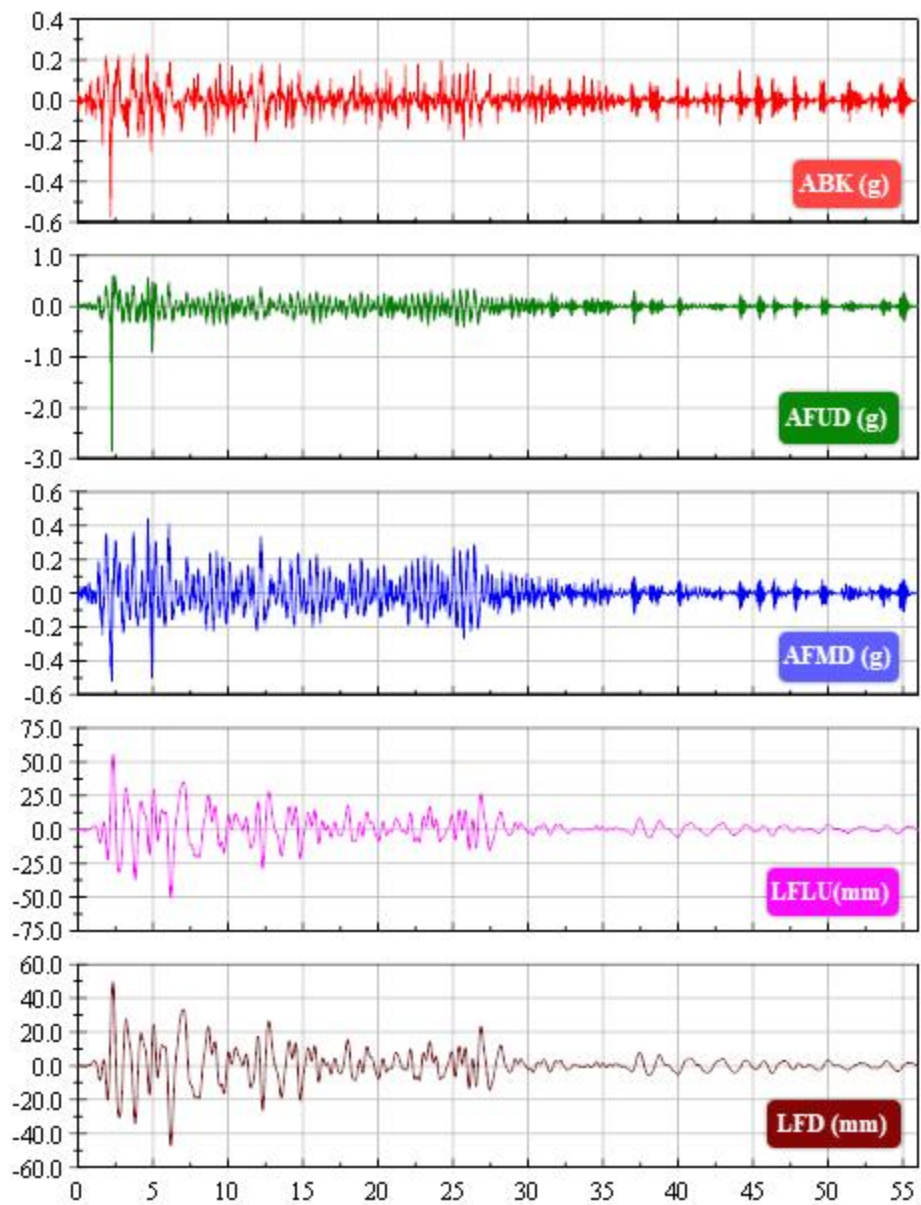


그림 2.112 MWF5-1@0.5g 파괴 시 주요 측정치

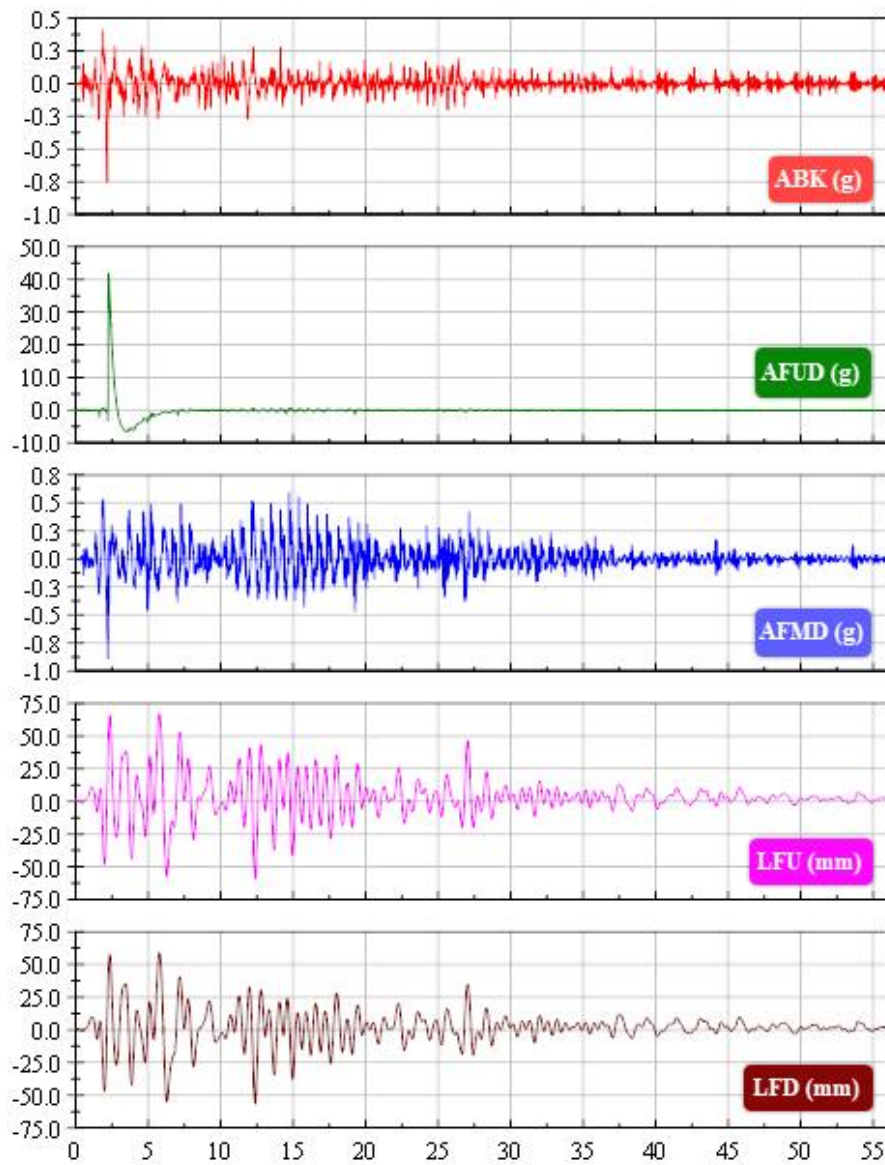


그림 2.113 MWF5-1@0.6g 파괴 시 주요 측정치

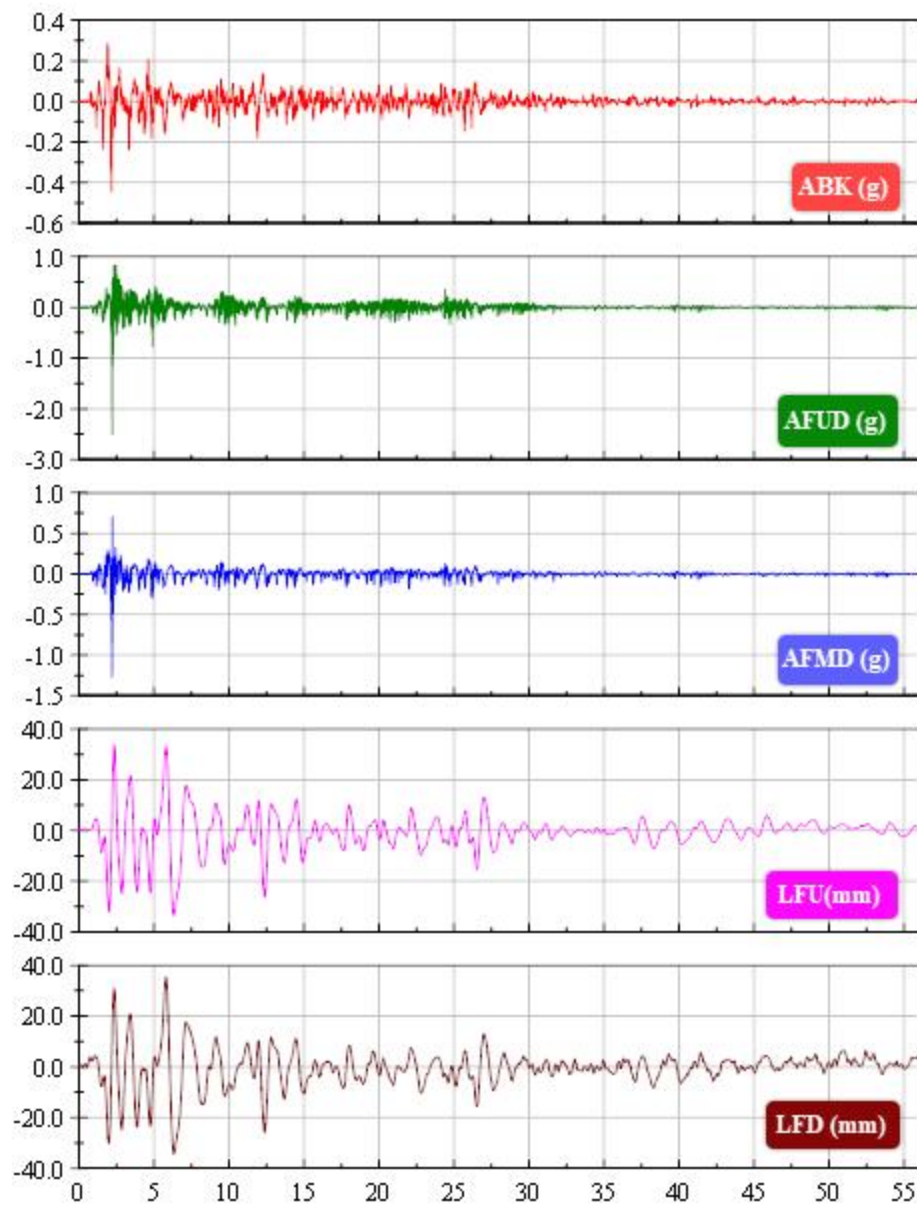


그림 2.114 MWF5-2@0.4g 파괴 시 주요 측정치

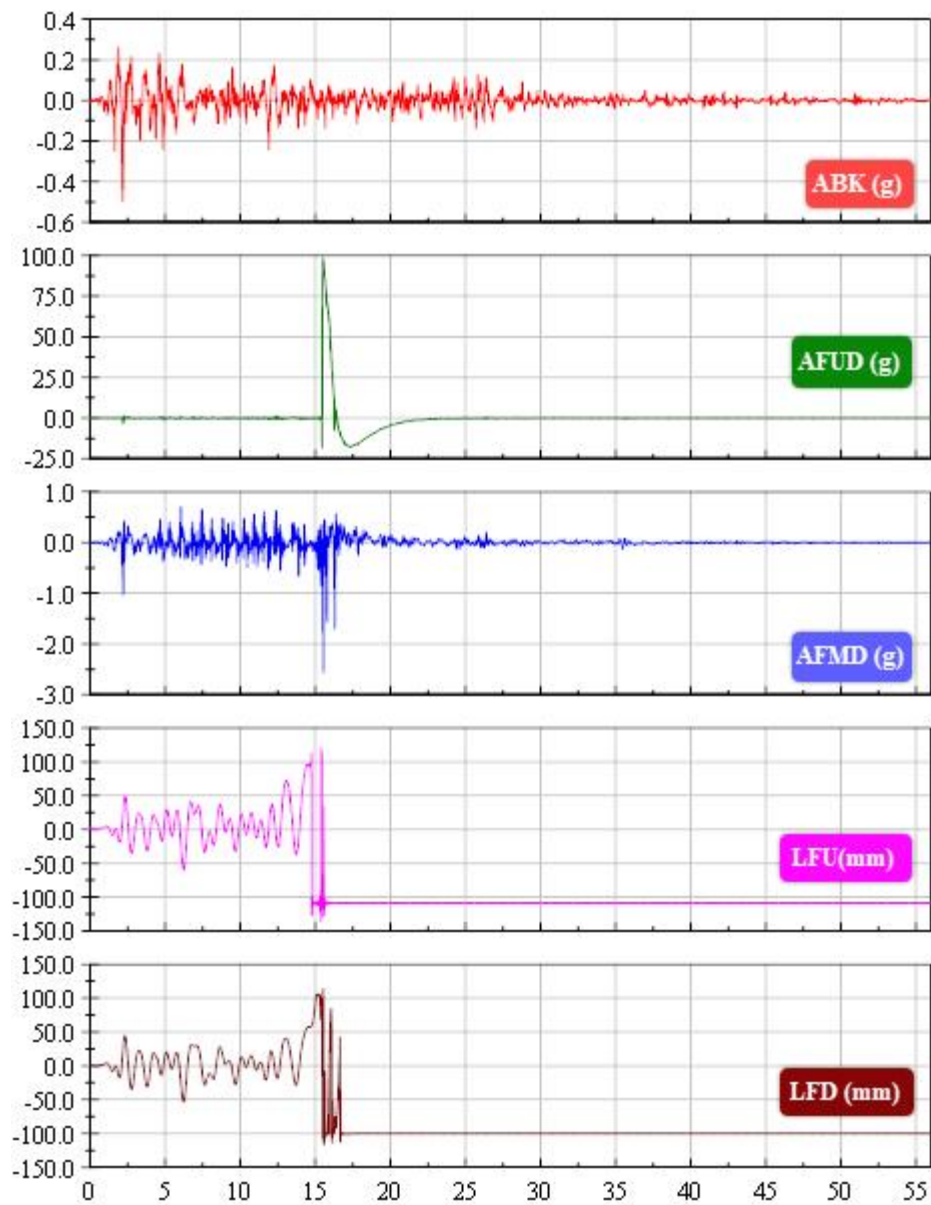


그림 2.115 MWF5-2@0.5g 파괴 시 주요 측정치

◦ MWPF5 (GFRP 5mm 보강 후 Polyurea 2mm 도포)

| Spcm.<br>Acc. | MWPF5-1 |       |       |         |        | MWPF5-2 |         |        |         |        |
|---------------|---------|-------|-------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|--------|
|               | ABK     | AFUD  | AFMD  | LFU     | LFM    | ABK     | ABUD    | ABMD   | LBU     | LBM    |
| 0.1g          | -0.14   | -0.14 | -0.13 | -7.75   | 7.51   | -0.14   | -0.20   | -0.13  | -8.01   | -7.73  |
| 0.2g          | -0.26   | -0.57 | -0.44 | -17.02  | -16.44 | -0.23   | -0.52   | -0.29  | -17.02  | -20.08 |
| 0.3g          | -0.32   | -0.47 | -0.43 | -24.12  | 23.49  | -0.34   | -0.69   | -0.31  | 24.44   | -26.28 |
| 0.4g          | -0.43   | -0.73 | -0.62 | -36.12  | -34.95 | -0.43   | -0.87   | -0.53  | -36.13  | -35.28 |
| 0.5g          | -0.52   | -0.98 | -0.63 | -41.93  | 40.81  | -0.57   | -1.27   | -0.68  | -48.24  | -43.69 |
| 0.6g          | -0.68   | -1.38 | -1.09 | 51.65   | 48.62  | -0.75   | 15.78*  | -1.13  | -52.83  | -48.68 |
| 0.7g          | -0.76   | -1.19 | -0.84 | 63.48   | 56.47  | -0.80   | -60.71* | 0.94   | 63.66   | 59.42  |
| 0.8g          | -0.84   | -1.88 | -1.27 | 83.85   | 72.39  | -0.92   | 12.08*  | 1.05   | 74.07   | 64.63  |
| 0.9g          | -1.00   | -2.56 | -2.09 | -103.53 | 85.37  | -1.05   | -3.08   | -9.60* | -106.67 | -90.43 |
| 1.0g          | -1.01   | 2.55  | 1.97  | -133.04 | 84.97  |         |         |        |         |        |

※ 가속도계 Magnet Base 미끄러짐 발생

MWPF5 시험체는 GFRP를 5mm 두께로 절단하고 Epoxy 함침(Immersion) 후에 무보강 조적조에 부착 후 다시 Polyurea를 2mm 도포하여 보강하였음. MWPF5-1 시험체는 1.0g에서 파괴되었으며 변위는 상단 133.04mm 중앙에서 84.97mm가 발생하였음. 그러나 공칭가속도 0.9g인 전 단계에서 1.0g의 PGA로 가진 되었으며 이때 발생한 변위는 상단/중앙에서 103.53/85.37mm가 발생한 것으로 보아 마지막 단계에서의 변위는 전 단계의 손상이 반영된 것으로 사료됨. 같은 종류의 시험체인 MWPF5-2는 1.0g 상단 106.67mm 중단 90.43mm 가 발생하였음.

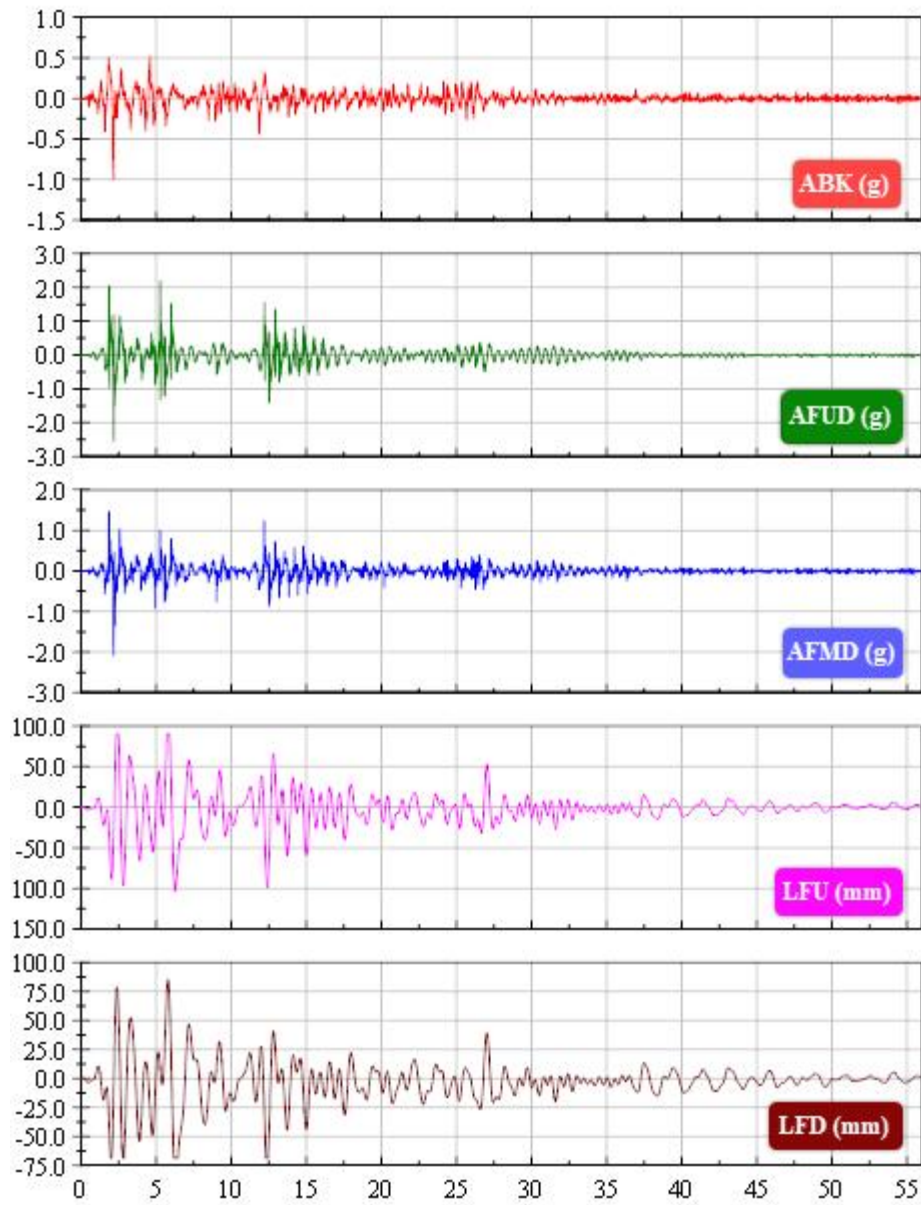


그림 2.116 MWPF5-1@0.9g 파괴 시 주요 측정치

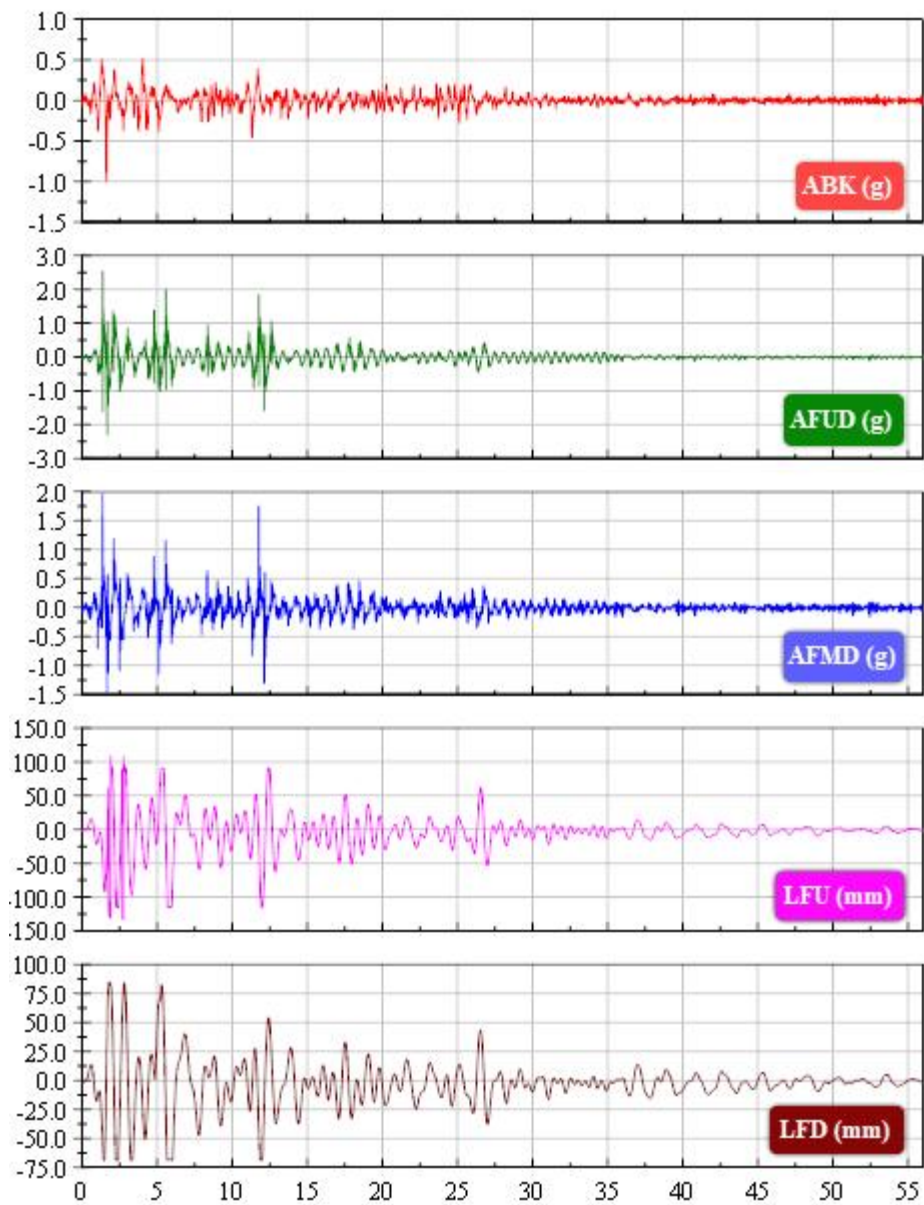


그림 2.117 MWPF5-1@1.0g 파괴 시 주요 측정치

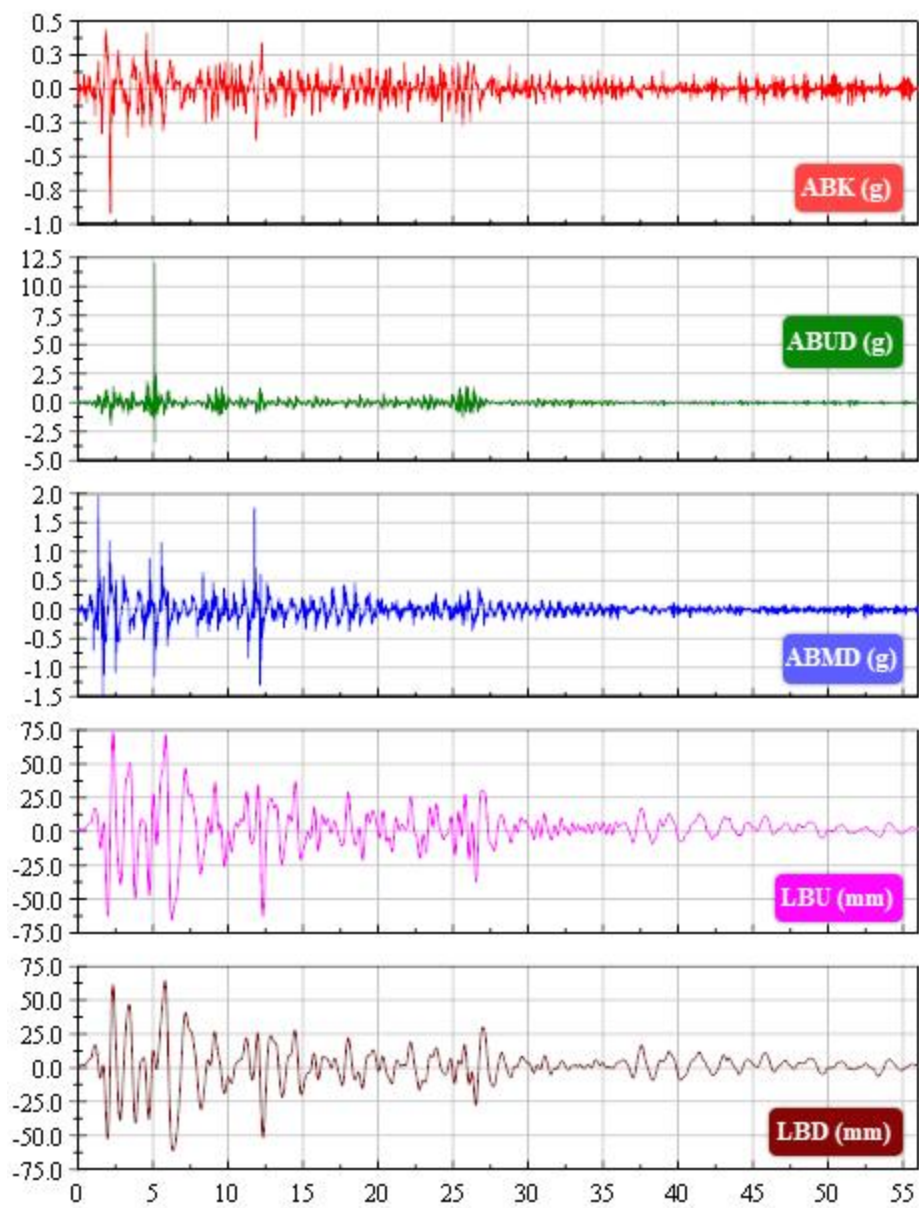


그림 2.118 MWPF5-2@0.8g 파괴 시 주요 측정치

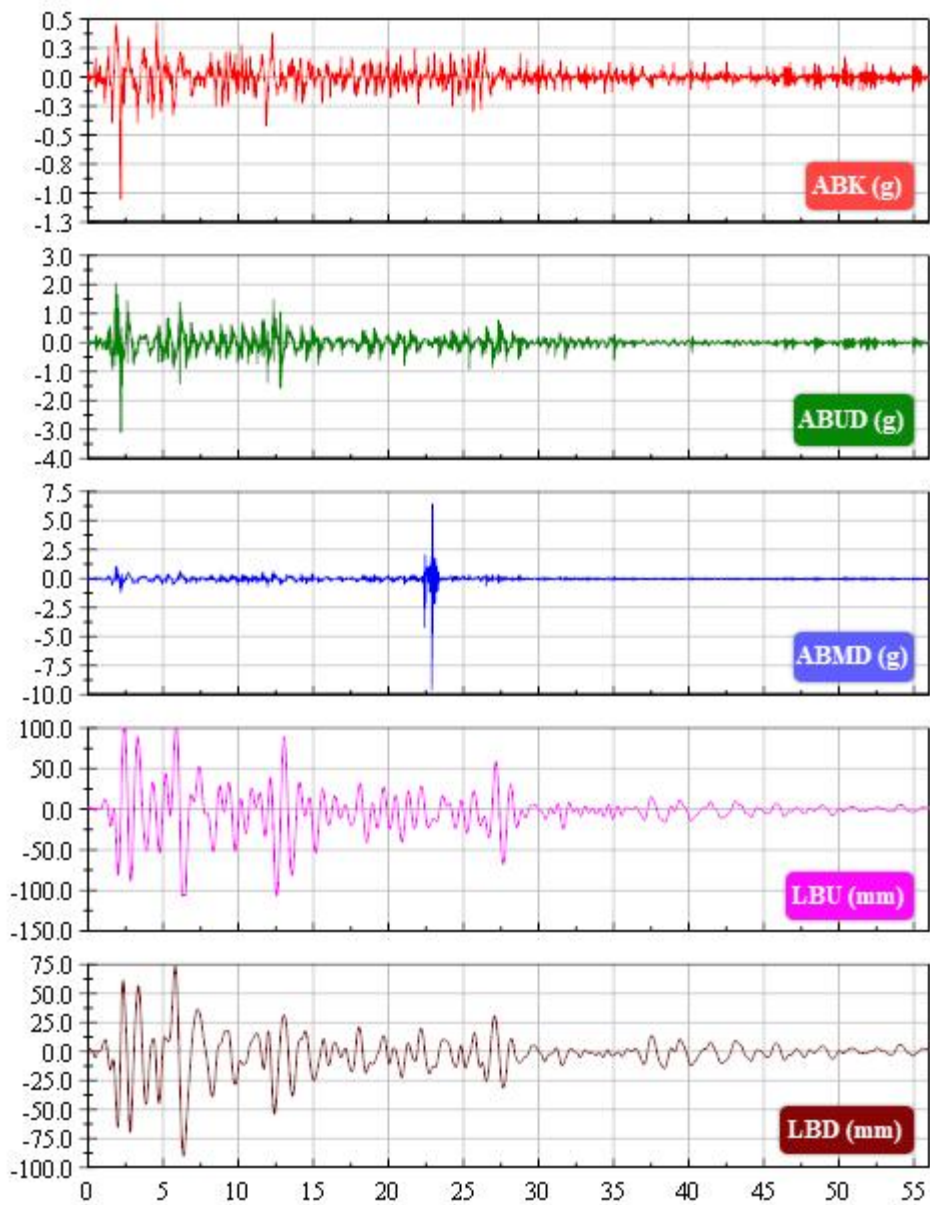


그림 2.119 MWPF5-2@0.9g 파괴 시 주요 측정치

◦ MWPF10 (GFRP 5mm 보강 후 Polyurea 2mm 도포)

| Spcm.<br>Acc. | MWPF10-1 |       |       |        |        |
|---------------|----------|-------|-------|--------|--------|
|               | ABK      | ABUD  | ABMD  | LBU    | LBM    |
| 0.1g          | -0.13    | 0.28  | -0.14 | -7.05  | 7.39   |
| 0.2g          | -0.24    | 0.40  | 0.28  | 15.77  | -15.56 |
| 0.3g          | -0.29    | 0.53  | 0.34  | 26.08  | 24.53  |
| 0.4g          | -0.42    | 0.76  | 0.41  | 34.62  | -32.21 |
| 0.5g          | -0.55    | 0.91  | 0.51  | 48.51  | 44.51  |
| 0.6g          | -0.62    | 1.70  | 0.83  | 57.61  | 51.96  |
| 0.7g          | -0.73    | 1.83  | 0.84  | 68.12  | 60.47  |
| 0.8g          | -0.79    | -1.94 | -0.99 | 75.61  | 68.19  |
| 0.9g          | -0.93    | -2.34 | -1.07 | 87.70  | 77.42  |
| 1.0g          | -1.07    | -3.91 | -1.42 | -97.43 | 95.15  |

MWPF10 시험체는 GFRP를 10mm 두께로 절단하고 Epoxy 함침(Immersion)후에 무보강 조적조에 부착 후 다시 Polyurea로 2mm 도포하여 보강하였음. MWPF10-1 시험체는 1.07g에서 파괴되었으며 변위는 상단 97.43mm 중앙에서 95.14mm가 발생하였음.

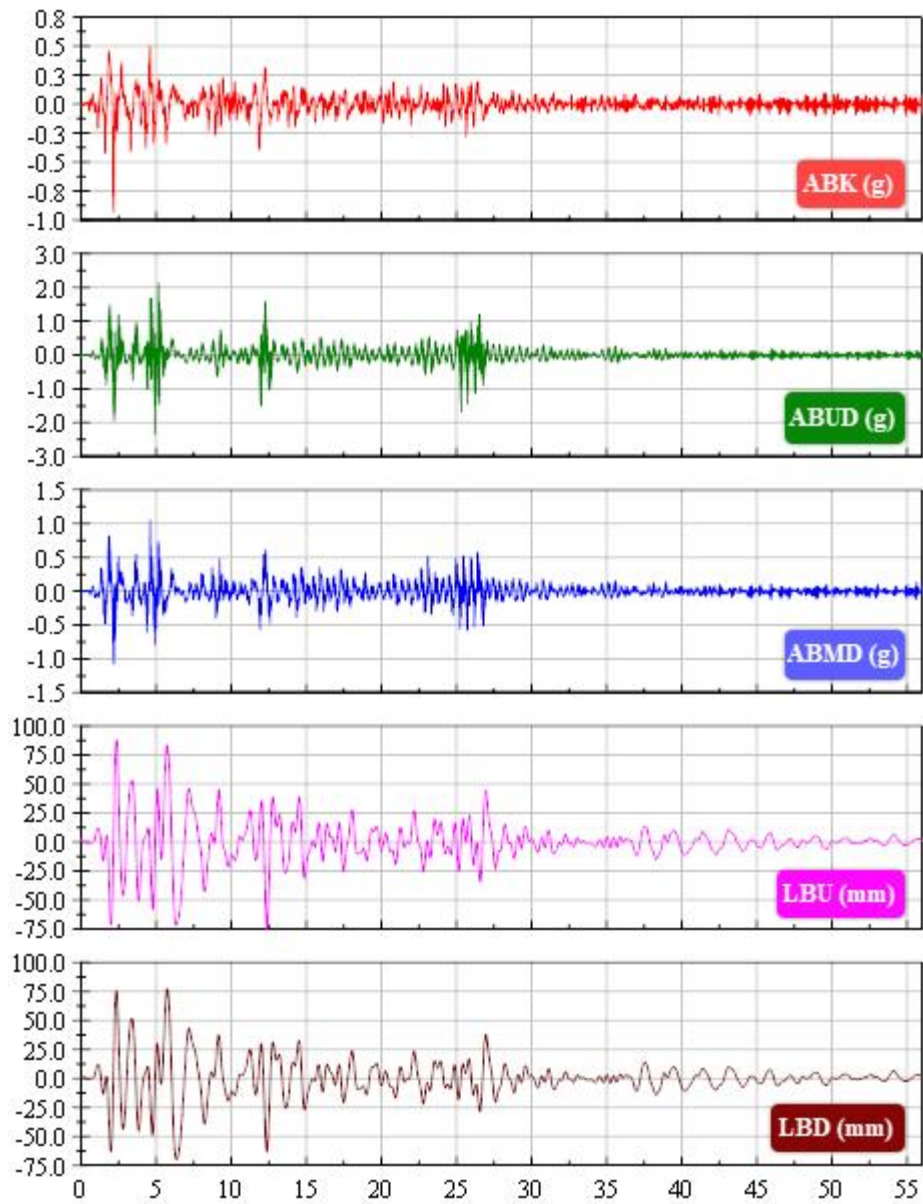


그림 2.120 MWPF10-1@0.9g 파괴 시 주요 측정치

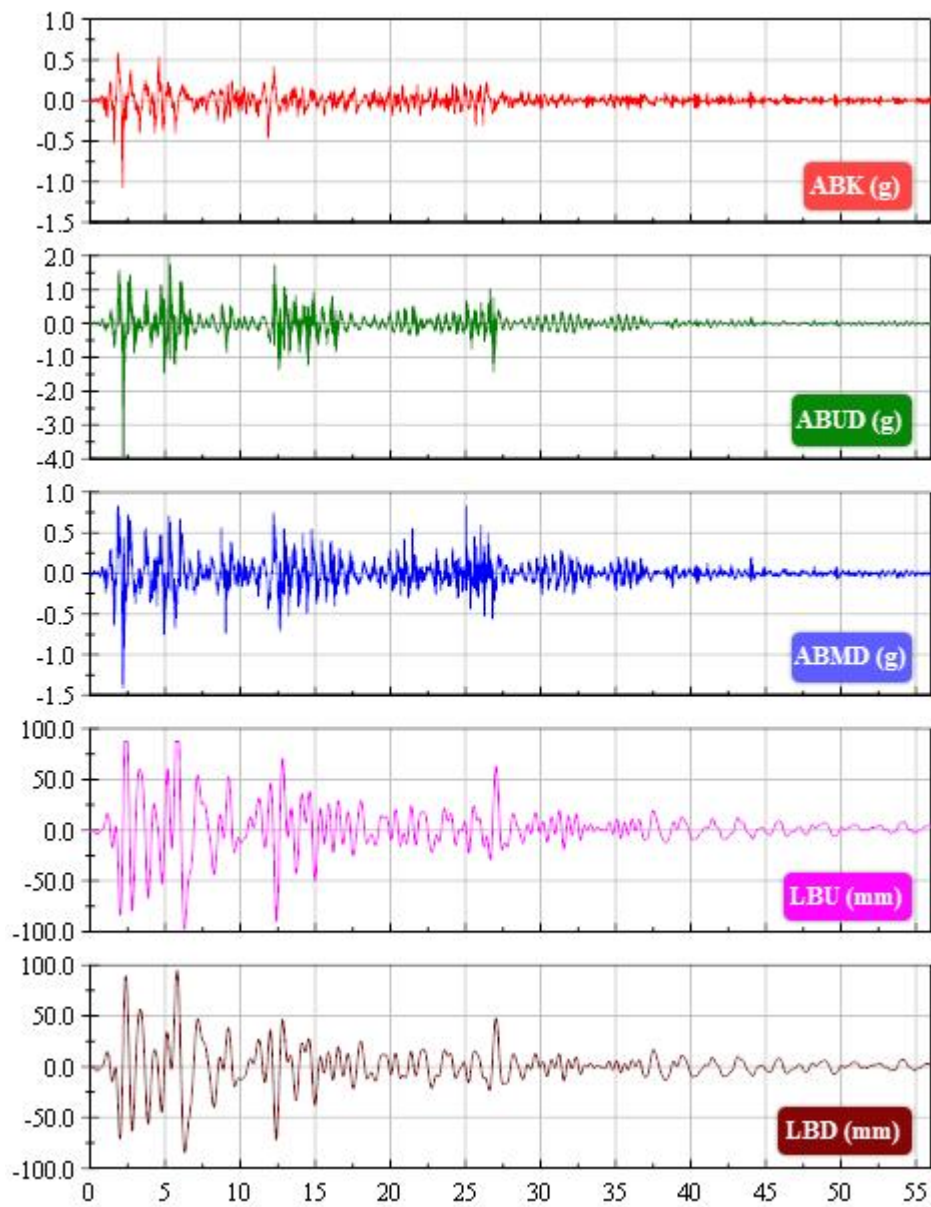


그림 2.121 MWPF10-1@1.0g 파괴 시 주요 측정치

### 2.3.3 시험체별 변위

다음 표 3.0은 조적식 벽체 파괴 공칭 가속도 시험 시 진동대의 변위와 벽체 상부 레이지 변위계에서 계측된 변위 값을 나타내고 있음. 시험체 별 변위는 MWP4-1 시편의 경우 0.6g(PGA)의 지진파 가진 시 Shaking table의 변위는 42.82mm (push), -36.55mm (pull)이며 벽체의 변위는 52.21mm(push), -40.58mm (pull)로 측정되었음. MWP2-1 시편의 경우 0.7g(PGA)의 지진파 가진 시 Shaking table의 변위는 58.62mm (push), -55.26mm (pull)이며 벽체의 변위는 76.15mm(push), -50.89mm (pull)로 측정되었음. MWN-2 시편의 경우 0.5g(PGA)의 지진파 가진 시 Shaking table의 변위는 42.88mm (push), -36.50mm (pull)이며 벽체의 변위는 44.91mm (push), -38.76mm (pull)로 측정되었음. MWPF5-1 시편의 경우 1.0g(PGA)의 지진파 가진 시 Shaking table의 변위는 79.88mm (push), -79.59mm (pull)이며 벽체의 변위는 109.29mm(push), -133.04mm (pull)로 측정되었음. MWN-3 시편의 경우 0.4g(PGA)의 지진파 가진 시 Shaking table의 변위는 30.30mm (push), -32.23mm (pull)이며 벽체의 변위는 53.36mm(push), -46.63mm (pull)로 측정되었음. MWP4-2 시편의 경우 0.7g(PGA)의 지진파 가진 시 Shaking table의 변위는 50.37mm (push), -43.43mm (pull)이며 벽체의 변위는 75.61mm(push), -62.29mm (pull)로 측정되었음. MWPF10-1 시편의 경우 1.0g(PGA)의 지진파 가진 시 Shaking table의 변위는 73.76mm (push), -69.51mm (pull)이며 벽체의 변위는 87.03mm(push), -75.04mm (pull)로 측정되었음. MWF5-1 시편의 경우 0.6g(PGA)의 지진파 가진 시 Shaking table의 변위는 50.37mm (push), -43.43mm (pull)이며 벽체의 변위는 66.96mm(push), -59.24mm (pull)로 측정되었음. MWPF5-2 시편의 경우 0.9g(PGA)의 지진파 가진 시 Shaking table의 변위는 74.76mm (push), -69.51mm (pull)이며 벽체의 변위는 99.58mm (push), -106.68mm (pull)로 측정되었음. MWF5-2 시편의 경우 0.5g(PGA)의 지진파 가진 시 Shaking table의 변위는 42.82mm (push), -36.56mm (pull)이며 벽체의 변위는 50.15mm(push), -58.59mm (pull)로 측정되었음. MWP2-2 시편의 경우 0.8g(PGA)의 지진파 가진 시 Shaking table의 변위는 67.23mm (push), -57.44mm (pull)이며 벽체의 변위는 70.41mm(push), -69.32mm (pull)로 측정되었음.

표 2.41 시험체별 최대 변위 및 상대 변위

| 번호 | 시험체명     | 파괴 공칭<br>가속도<br>(g, PGA) | Shaking<br>Table<br>(mm) | Masonry<br>Wall<br>(mm) | Relative<br>Displ.<br>(mm) | Range of<br>Relative<br>Displ.<br>(mm) |
|----|----------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------------------|
| 1  | MWN-2    | 0.5                      | 42.82                    | 44.91                   | 2.09                       | 4.33                                   |
|    |          |                          | -36.45                   | -38.69                  | -2.24                      |                                        |
| 2  | MWN-3    | 0.4                      | 30.30                    | 34.97                   | 4.67                       | 5.45                                   |
|    |          |                          | -32.23                   | -33.01                  | -0.78                      |                                        |
| 3  | MWP2-1   | 0.7                      | 58.62                    | 58.78                   | 0.16                       | 2.68                                   |
|    |          |                          | -55.26                   | -57.78                  | -2.52                      |                                        |
| 4  | MWP2-2   | 0.8                      | 67.23                    | 80.20                   | 12.97                      | 24.86                                  |
|    |          |                          | -57.44                   | -69.33                  | -11.89                     |                                        |
| 5  | MWP4-1   | 0.6                      | 50.37                    | 61.15                   | 10.78                      | 24.27                                  |
|    |          |                          | -43.43                   | -29.94                  | -13.49                     |                                        |
| 6  | MWP4-2   | 0.7                      | 57.84                    | 55.18                   | 2.66                       | 13.04                                  |
|    |          |                          | -55.88                   | -45.50                  | -10.38                     |                                        |
| 7  | MWF5-1   | 0.6                      | 52.77                    | 66.96                   | 14.19                      | 27.85                                  |
|    |          |                          | -45.58                   | -59.24                  | -13.66                     |                                        |
| 8  | MWF5-2   | 0.5                      | 44.78                    | 49.84                   | 5.06                       | 26.87                                  |
|    |          |                          | -37.66                   | -59.47                  | -21.81                     |                                        |
| 9  | MWPF5-1  | 1.0                      | 79.88                    | 109.29                  | 29.41                      | 82.86                                  |
|    |          |                          | -79.59                   | -133.04                 | -53.45                     |                                        |
| 10 | MWPF5-2  | 0.9                      | 74.63                    | 99.58                   | 24.95                      | 61.99                                  |
|    |          |                          | -69.63                   | -106.67                 | -37.04                     |                                        |
| 11 | MWPF10-1 | 1.0                      | 79.84                    | 87.85                   | 8.01                       | 24.75                                  |
|    |          |                          | -80.69                   | -97.43                  | -16.74                     |                                        |

폴리우레아 내진보수보강 시 재료의 고연성 및 고인성 특성을 검증하기 위해 시험체별 파괴 공칭 가속도 가진 시 진동대와 시험체 상단의 Lazer LVDT에서 측정된 변위를 비교하였음. 상대 변위 비교 결과 무보강 < PU 보강 < GFRP 보강 < GFRP+PU 보강 순으로 상대변위의 범위가 증가하였으며, 이는 붕괴 시 취성 파괴 형상을 보이는 조적식 벽체의 내진 보수보강 용 재료로 폴리우레아의 적합성을 확인함.

또한, 폴리우레아의 보강 효과를 정량적으로 검증하기 위해 무보강 시험체의 파괴 공칭 가속도 가진 시 발생한 최대 변위 대비 PU 보강 시험체의 동일 가속도 가진 시 발생한 최대 변위값을 비교하였으며, 표 2.42은 이를 나타내고 있음. 이와 동일하게 MWPF 시험체와 MWF 시험체의 최대 발생 변위값을 비교하여 표 2.43에 나타냈음. 시험체의 발생 상대변위를 PU 표면 보강 유무를 기준으로 비교하였으며, 다음 표 2.44는 이를 나타내고 있음. PU 무보강 시험체의 대조군으로 더 높은 공칭 가속도에서 파괴가 발생한 시험체의 상대변위를 채택하였음.

$$\begin{aligned}\text{PU 보강 효과}(\%) &= \frac{RD_{MWP_{\max}} - RD_{MWN_{\max}}}{RD_{MWN_{\max}}} \times 100(\%) \\ &= \frac{RD_{MWP_{\max}} - RD_{MWF_{\max}}}{RD_{MWF_{\max}}} \times 100(\%)\end{aligned}$$

표 2.42 시험체별 최대 변위 및 비교(무보강, PU)

| 시험체명   | 공칭<br>가속도<br>(g, PGA) | 최대 변위<br>(mm) | 최대 변위 비<br>(mm/mm) |
|--------|-----------------------|---------------|--------------------|
| MWN-2  | 0.5                   | 44.91         | 1.0                |
| MWP2-1 |                       | 42.99         | 0.95               |
| MWP2-2 |                       | 39.43         | 0.88               |
| MWP4-1 |                       | 40.58         | 0.90               |
| MWP4-2 |                       | 41.58         | 0.92               |

표 2.43 시험체별 최대 변위 및 비교(GFRP, GFRP+PU)

| 시험체명     | 공칭<br>가속도<br>(g, PGA) | 최대 변위<br>(mm) | 최대 변위 비<br>(mm/mm) |
|----------|-----------------------|---------------|--------------------|
| MWF5-1   | 0.6                   | 66.96         | 1.0                |
| MWPF5-1  |                       | 48.62         | 0.73               |
| MWPF5-2  |                       | 48.48         | 0.72               |
| MWPF10-1 |                       | 43.39         | 0.65               |

표 2.44 시험체별 최대 변위 및 상대 변위

| 시험체명     | 파괴 공칭<br>가속도<br>(g, PGA) | Relative Displ.<br>(mm) | PU 보강 효과<br>(%) |
|----------|--------------------------|-------------------------|-----------------|
| MWN-2    | 0.5                      | 2.24                    | -               |
| MWP2-1   | 0.7                      | 2.52                    | 12.5            |
| MWP2-2   | 0.8                      | 11.89                   | 430.80          |
| MWP4-1   | 0.6                      | 13.49                   | 502.23          |
| MWP4-2   | 0.7                      | 10.38                   | 363.39          |
| MWF5-1   | 0.6                      | 13.66                   | -               |
| MWPF5-1  | 1.0                      | 53.45                   | 291.29          |
| MWPF5-2  | 0.9                      | 37.04                   | 171.16          |
| MWPF10-1 | 1.0                      | 16.74                   | 22.55           |

2.3.4 균열도

각 시험체 마다 파손이 일어난 후 최종 균열도를 아래와 같이 나타내었음.

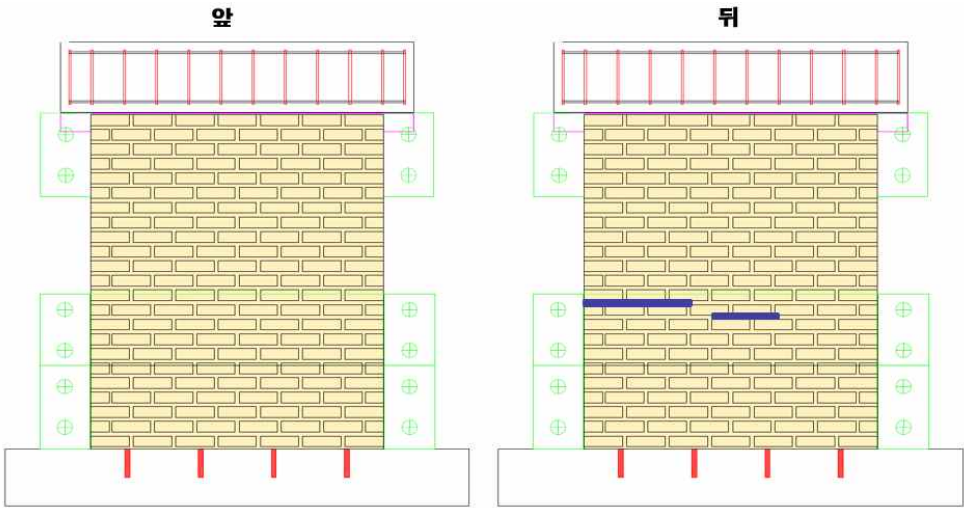
|             |                                                                                      |  |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--|
| 구 분         | MWN-1                                                                                |  |
| 사<br>진      |   |  |
| 균<br>열<br>도 |  |  |

그림 2.122 MWN-1 시험체 파괴 후 사진 및 균열도

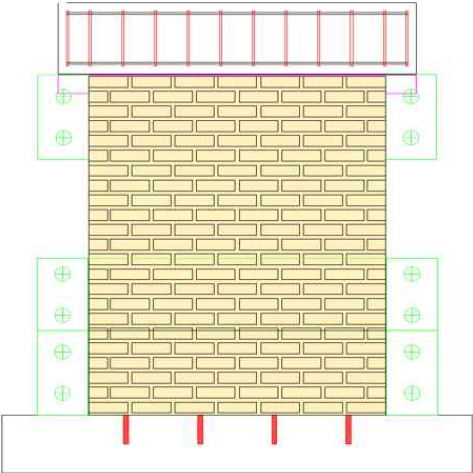
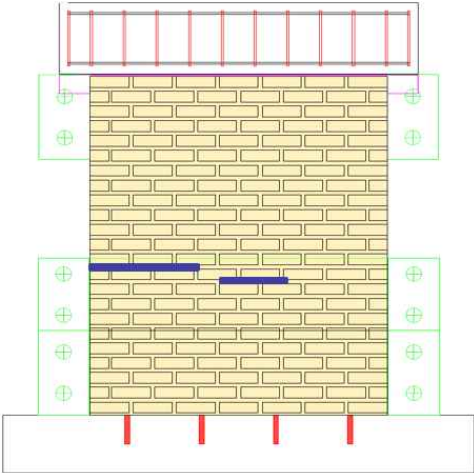
|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 구분  | MWP4-1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 사진  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 균열도 | <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;"> <p><b>앞</b></p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p><b>뒤</b></p>  </div> </div> |

그림 2.123 MWP4-1 시험체 파괴 후 사진 및 균열도

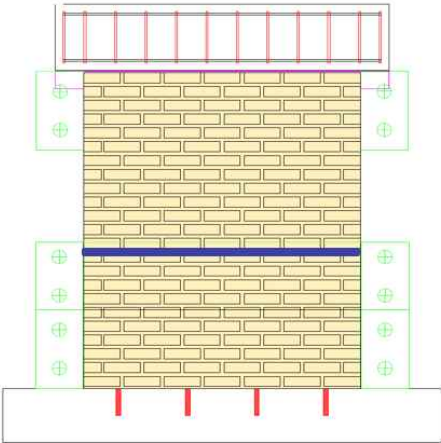
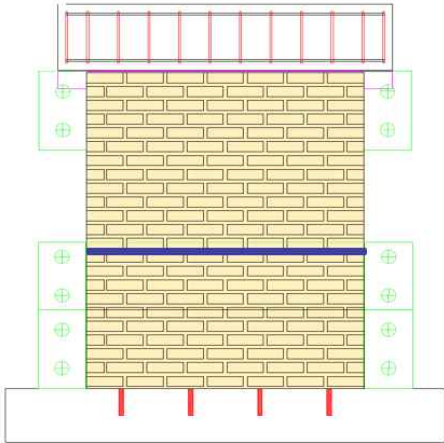
|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 구분  | MWP2-1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 사진  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 균열도 | <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;"> <p><b>앞</b></p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p><b>뒤</b></p>  </div> </div> |

그림 2.124 MWP2-1 시험체 파괴 후 사진 및 균열도

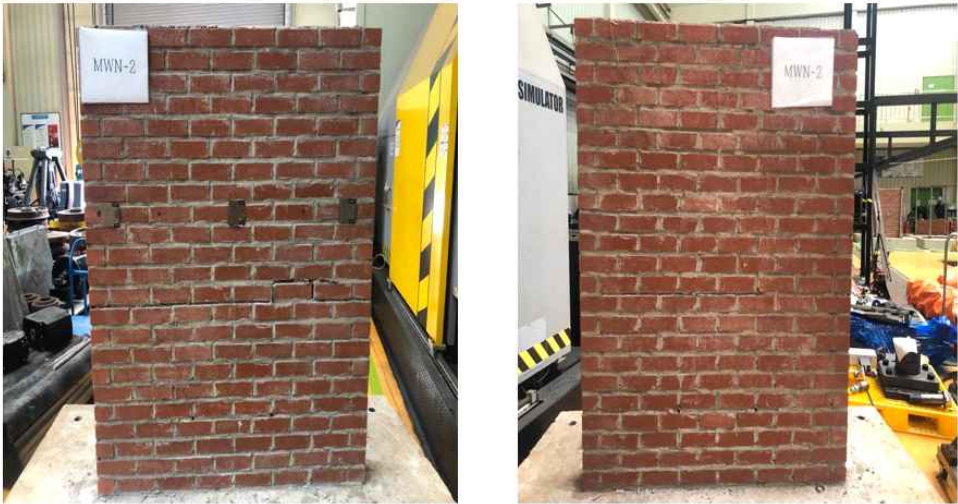
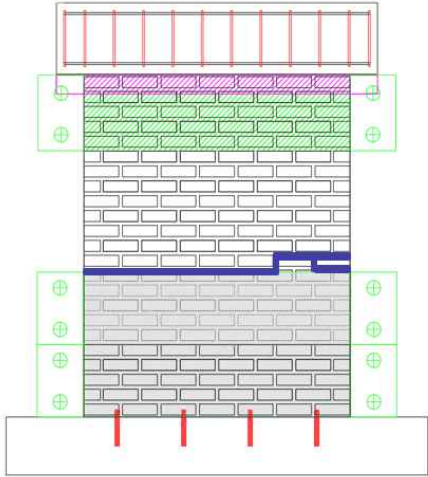
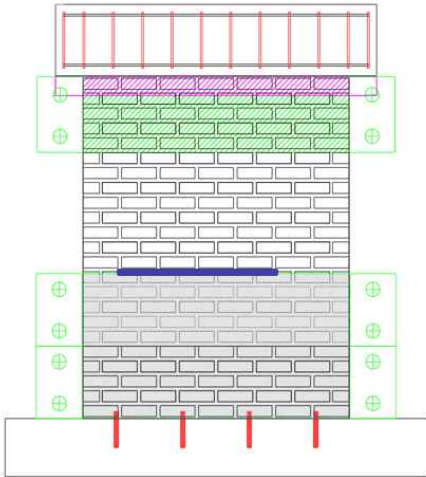
|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 구분  | MWN-2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 사진  |                                                                                                                                                                                                                                                              |
| 균열도 | <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>앞</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>뒤</p>  </div> </div> |

그림 2.125 MWN-2 시험체 파괴 후 사진 및 균열도

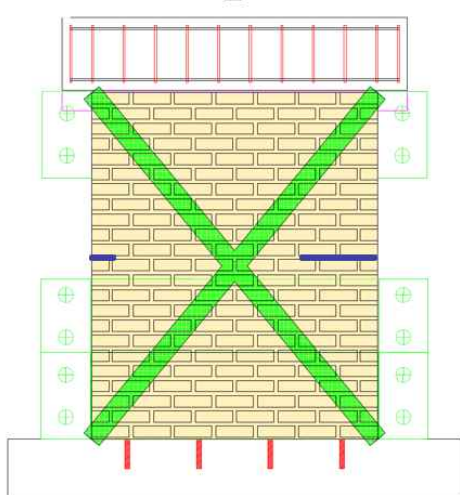
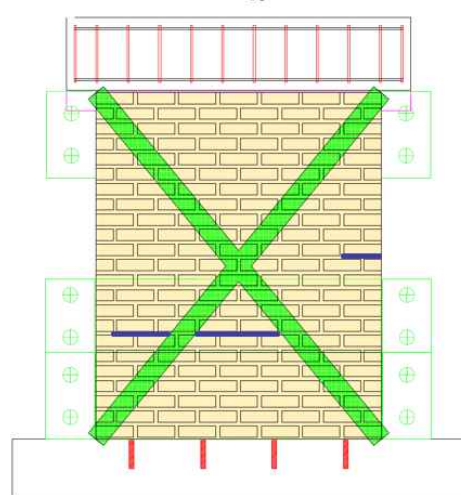
|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 구분  | MWPF5-1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 사진  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 균열도 | <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;"> <p><b>앞</b></p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p><b>뒤</b></p>  </div> </div> |

그림 2.126 MWPF5-1 시험체 파괴 후 사진 및 균열도

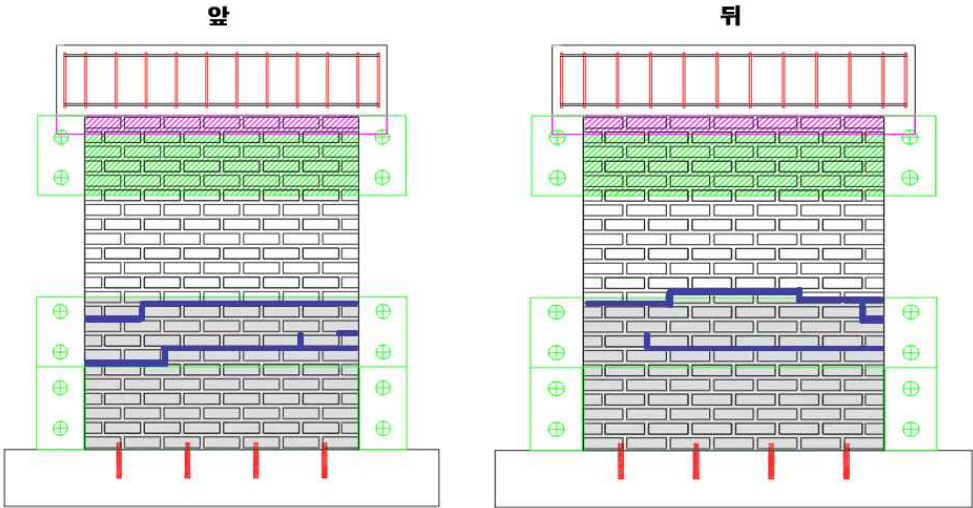
|     |                                                                                      |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 구분  | MWN-3                                                                                |
| 사진  |    |
| 균열도 |  |

그림 2.127 MWN-3 시험체 파괴 후 사진 및 균열도

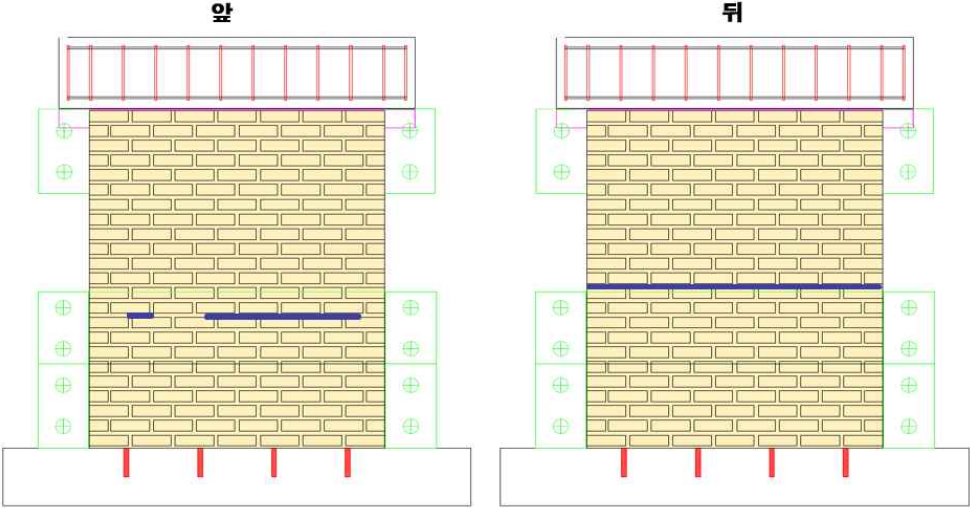
|     |                                                                                      |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 구분  | MWP4-2                                                                               |
| 사진  |   |
| 균열도 |  |

그림 2.128 MWP4-2 시험체 파괴 후 사진 및 균열도

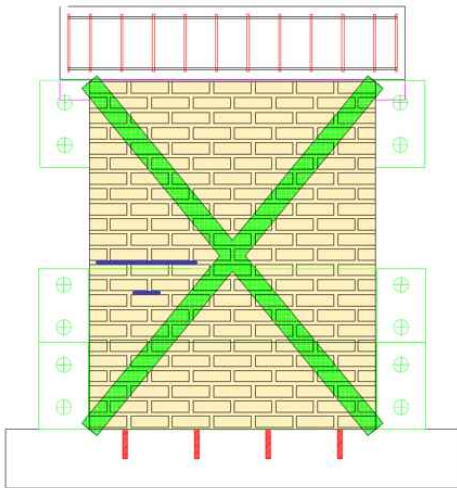
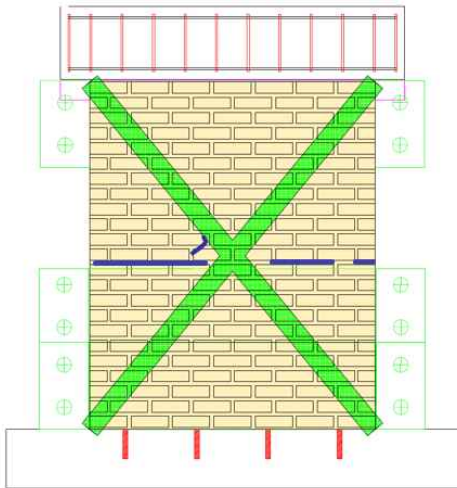
|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 구분  | MWPF10-1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 사진  | <div data-bbox="363 488 829 1003">  </div> <div data-bbox="949 488 1324 1003">  </div>                                                                               |
| 균열도 | <div data-bbox="351 1115 810 1639"> <p style="text-align: center;">앞</p>  </div> <div data-bbox="865 1115 1324 1639"> <p style="text-align: center;">뒤</p>  </div> |

그림 2.129 MWPF10-1 시험체 파괴 후 사진 및 균열도

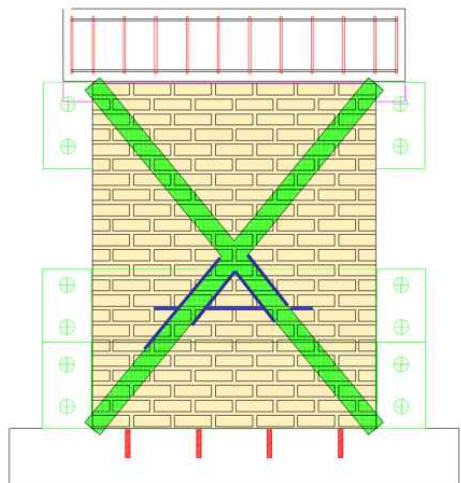
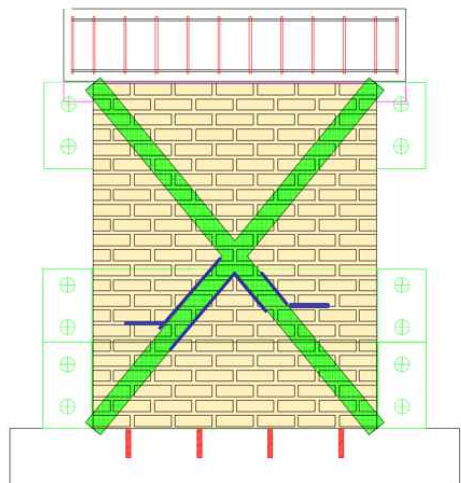
|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 구분          | MWF5-1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 사<br>진      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 균<br>열<br>도 | <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p><b>앞</b></p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p><b>뒤</b></p>  </div> </div> |

그림 2.130 MWF5-1 시험체 파괴 후 사진 및 균열도

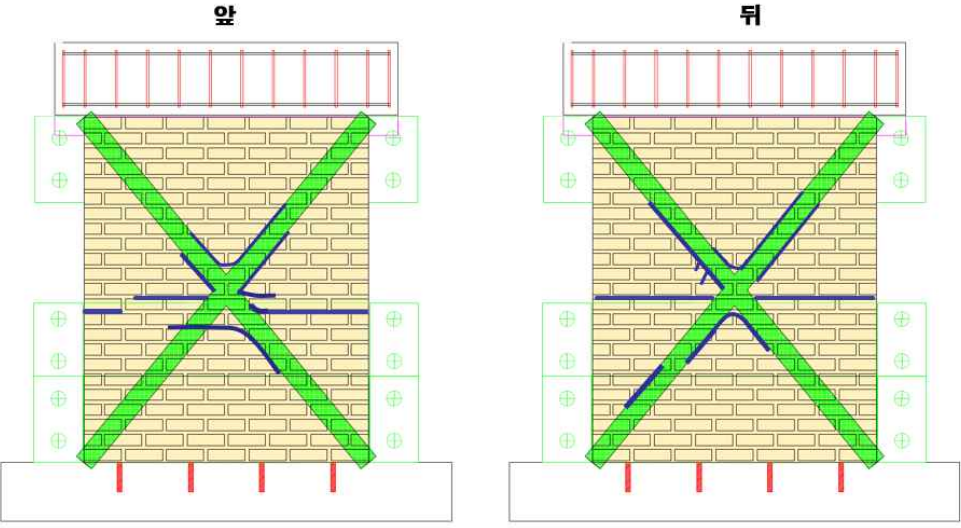
|     |                                                                                      |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 구분  | MWPF5-2                                                                              |
| 사진  |    |
| 균열도 |  |

그림 2.131 MWPF5-2 시험체 파괴 후 사진 및 균열도

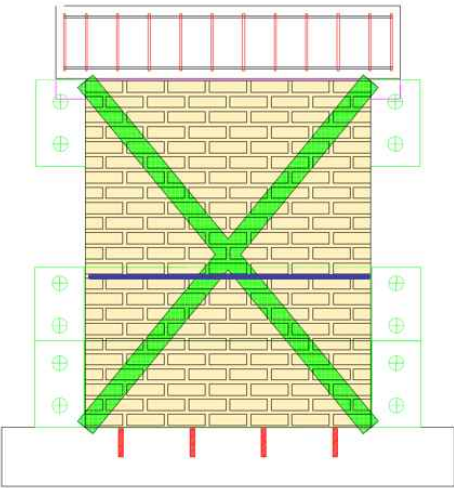
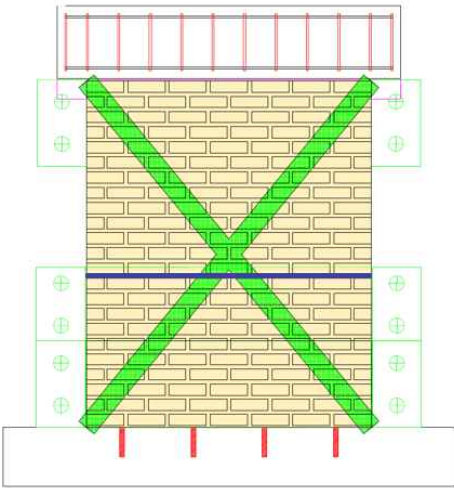
|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 구분  | MWF5-2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 사진  |                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 균열도 | <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>앞</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>뒤</p>  </div> </div> |

그림 2.132 MWF5-2 시험체 파괴 후 사진 및 균열도

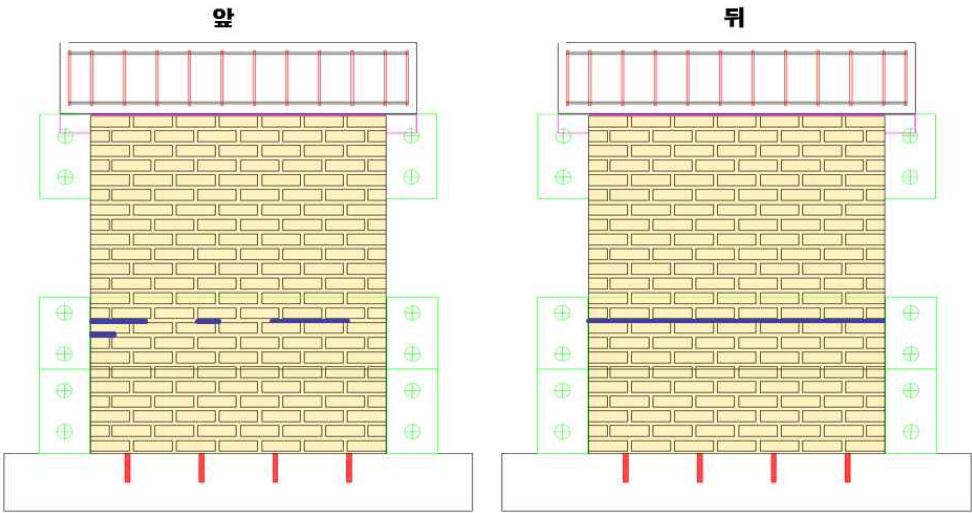
|     |                                                                                      |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 구분  | MWP2-2                                                                               |
| 사진  |   |
| 균열도 |  |

그림 2.133 MWP2-2 시험체 파괴 후 사진 및 균열도

### 2.3.5 비디오 촬영 목록

표 2.45 실험비디오 목록

| 과 일 명                  | 가진파형 (PGA) | 촬 영 시 간 | 비 고 |
|------------------------|------------|---------|-----|
| MWF5-1(정면)             | 0.1g       | 1:15    |     |
|                        | 0.2g       | 1:13    |     |
|                        | 0.3g       | 1:17    |     |
|                        | 0.4g       | 1:11    |     |
|                        | 0.5g       | 1:11    |     |
|                        | 0.6g       | 1:10    |     |
| MWF5-1<br>MWPF 5-2 (위) | 0.1g       | 0:21    |     |
|                        | 0.2g       | 1:14    |     |
|                        | 0.3g       | 1:47    |     |
|                        | 0.4g       | 1:03    |     |
|                        | 0.5g       | 1:05    |     |
|                        | 0.6g       | 0:54    |     |
| MWF5-2(정면)             | 0.1g       | 1:10    |     |
|                        | 0.2g       | 1:12    |     |
|                        | 0.3g       | 1:09    |     |
|                        | 0.4g       | 1:09    |     |
|                        | 0.5g       | 1:14    |     |
| MWN-1(정면)              | 0.2g       | 2:34    |     |
|                        | 0.3g       | 0:50    |     |
|                        | 0.4g       | 0:49    |     |
| MWP2-1(정면)             | 0.1g       | 1:34    |     |
|                        | 0.2g       | 1:24    |     |
|                        | 0.3g       | 1:22    |     |
|                        | 0.4g       | 1:22    |     |
|                        | 0.5g       | 2:12    |     |
|                        | 0.6g       | 1:42    |     |
|                        | 0.7g       | 0:22    |     |

표 2.46 실험비디오 목록 (계속)

| 과 일 명       | 가진파형 (PGA) | 촬 영 시 간 | 비 고 |
|-------------|------------|---------|-----|
| MWP4-1 (위)  | 0.1g-1     | 1:42    |     |
|             | 0.1g-2     | 1:18    |     |
|             | 0.2g-1     | 1:45    |     |
|             | 0.2g-2     | 1:22    |     |
|             | 0.3g       | 1:32    |     |
|             | 0.4g       | 2:18    |     |
|             | 0.5g       | 2:04    |     |
|             | 0.6g       | 1:05    |     |
| MWP4-1(정면)  | 0.1g-1     | 1:16    |     |
|             | 0.1g-2     | 1:17    |     |
|             | 0.2g-1     | 1:16    |     |
|             | 0.2g-2     | 0:56    |     |
|             | 0.3g       | 0:56    |     |
|             | 0.4g       | 1:19    |     |
|             | 0.5g       | 1:04    |     |
|             | 0.6g       | 1:20    |     |
| MWP4-2(정면)  | 0.1g       | 1:10    |     |
|             | 0.2g       | 1:09    |     |
|             | 0.3g       | 1:05    |     |
|             | 0.4g       | 1:16    |     |
|             | 0.5g       | 1:04    |     |
|             | 0.6g       | 4:05    |     |
|             | 0.7g       | 1:00    |     |
| MWPF5-1(정면) | 0.1g       | 1:42    |     |
|             | 0.2g       | 1:11    |     |
|             | 0.3g       | 1:19    |     |
|             | 0.4g       | 1:10    |     |
|             | 0.5g       | 1:07    |     |
|             | 0.6g       | 1:12    |     |
|             | 0.7g       | 1:09    |     |
|             | 0.8g       | 1:10    |     |
|             | 0.9g       | 1:25    |     |
|             | 1.0g       | 1:17    |     |

표 2.47 실험비디오 목록 (계속)

| 과 일 명                  | 가진파형 (PGA) | 촬 영 시 간 | 비 고 |
|------------------------|------------|---------|-----|
| MWP10-1<br>MWP4-2 (위)  | 0.1g       | 1:16    |     |
|                        | 0.2g       | 0:58    |     |
|                        | 0.3g       | 1:19    |     |
|                        | 0.4g       | 1:14    |     |
|                        | 0.5g       | 1:06    |     |
|                        | 0.6g       | 0:58    |     |
|                        | 0.8g       | 1:03    |     |
|                        | 0.9g       | 1:12    |     |
|                        | 1.0g       | 1:05    |     |
| MWF5-1<br>MWP5 5-2(측면) | 0.1g       | 1:12    |     |
|                        | 0.2g       | 1:13    |     |
|                        | 0.3g       | 1:15    |     |
|                        | 0.4g       | 1:07    |     |
|                        | 0.5g       | 1:06    |     |
|                        | 0.6g       | 1:03    |     |
|                        | 0.7g       | 1:13    |     |
|                        | 0.8g       | 1:11    |     |
|                        | 0.9g       | 1:11    |     |
| MWF5-2<br>MWP2-2(측면)   | 0.3g       | 0:58    |     |
|                        | 0.4g       | 1:08    |     |
|                        | 0.5g       | 0:31    |     |
|                        | 0.6g       | 1:05    |     |
|                        | 0.7g       | 1:09    |     |
|                        | 0.8g       | 0:56    |     |
| MWN-1(측면)              | 0.1g       | 1:04    |     |
|                        | 0.2g       | 0:55    |     |
|                        | 0.3g       | 1:26    |     |
|                        | 0.4g       | 0:48    |     |
| MWP2-1<br>MWN-2(측면)    | 0.1g       | 1:37    |     |
|                        | 0.2g       | 1:26    |     |
|                        | 0.3g       | 1:14    |     |
|                        | 0.4g       | 1:13    |     |
|                        | 0.5g       | 1:54    |     |
|                        | 0.6g       | 1:19    |     |
|                        | 0.7g       | 1:51    |     |

표 2.48 실험비디오 목록 (계속)

| 과 일 명                  | 가진파형 (PGA) | 촬 영 시 간 | 비 고 |
|------------------------|------------|---------|-----|
| MWP4-1(측면)             | 0.1g-1     | 1:30    |     |
|                        | 0.1g-2     | 1:30    |     |
|                        | 0.2g-1     | 1:18    |     |
|                        | 0.2g-2     | 1:20    |     |
|                        | 0.3g       | 1:12    |     |
|                        | 0.4g       | 1:19    |     |
|                        | 0.5g       | 1:17    |     |
|                        | 0.6g       | 1:19    |     |
| MWP4-2<br>MWPF10-1(측면) | 0.1g       | 1:11    |     |
|                        | 0.2g       | 1:14    |     |
|                        | 0.3g       | 1:23    |     |
|                        | 0.4g       | 1:02    |     |
|                        | 0.5g       | 0:49    |     |
|                        | 0.6g       | 0:56    |     |
|                        | 0.7g       | 0:50    |     |
|                        | 0.8g       | 0:55    |     |
|                        | 0.9g       | 0:49    |     |
|                        | 1.0g       | 0:47    |     |
| MWPF5-1<br>MWN-3(측면)   | 0.1g       | 1:39    |     |
|                        | 0.2g       | 1:10    |     |
|                        | 0.3g       | 1:18    |     |
|                        | 0.4g       | 1:12    |     |
|                        | 0.5g       | 1:11    |     |
|                        | 0.6g       | 1:11    |     |
|                        | 0.7g       | 1:09    |     |
|                        | 0.8g       | 1:09    |     |
|                        | 0.9g       | 1:41    |     |
|                        | 1.0g       | 0:59    |     |
| MWN-2(후면)              | 0.1g       | 1:30    |     |
|                        | 0.2g       | 1:13    |     |
|                        | 0.3g       | 1:12    |     |
|                        | 0.4g       | 1:21    |     |
|                        | 0.5g       | 1:57    |     |
| MWN-3(후면)              | 0.1g       | 1:44    |     |
|                        | 0.2g       | 1:09    |     |
|                        | 0.3g       | 1:19    |     |
|                        | 0.4g       | 1:11    |     |

표 2.49 실험비디오 목록 (계속)

| 파 일 명        | 가진파형 (PGA) | 촬 영 시 간 | 비 고 |
|--------------|------------|---------|-----|
| MWP2-2(후면)   | 0.1g       | 1:09    |     |
|              | 0.2g       | 1:09    |     |
|              | 0.3g       | 1:08    |     |
|              | 0.4g       | 1:02    |     |
|              | 0.5g       | 1:15    |     |
|              | 0.6g       | 1:07    |     |
|              | 0.7g       | 1:04    |     |
|              | 0.8g       | 1:23    |     |
| MWPF5-2(후면)  | 0.1g       | 1:15    |     |
|              | 0.2g       | 1:12    |     |
|              | 0.3g       | 1:15    |     |
|              | 0.4g       | 1:07    |     |
|              | 0.5g       | 1:07    |     |
|              | 0.6g       | 1:11    |     |
|              | 0.7g-1     | 1:15    |     |
|              | 0.7g-2     | 1:25    |     |
|              | 0.8g       | 1:12    |     |
|              | 0.9g       | 1:11    |     |
| MWPF10-1(후면) | 0.1g       | 1:13    |     |
|              | 0.2g       | 1:12    |     |
|              | 0.3g       | 1:21    |     |
|              | 0.4g       | 1:12    |     |
|              | 0.5g       | 1:08    |     |
|              | 0.6g       | 1:02    |     |
|              | 0.7g       | 27:19   |     |
|              | 0.8g       | 1:14    |     |
|              | 0.9g       | 1:04    |     |
|              | 1.0g       | 1:10    |     |

### 3) Abaqus/Explicit을 이용한 수치해석

조적식 벽체에서 발생 가능한 여러 가지 변수들이 벽체에 어떻게 작용하는지 알아보기 위해 상용 유한 요소 해석 프로그램인 ABAQUS(2020)를 사용하여 해석하였음. 해석은 조적식 벽체 진동대 시험에 사용된 시험체 규모와 동일하게 요소망을 작성하여 실시하였음. 조적식 벽체의 경우 블록과 모르타르 간의 경계면을 고려하여야 하며, 따라서 접촉 모델링에서 뛰어난 성능을 보이는 ABAQUS/Explicit 모듈을 사용하였음. ABAQUS/Explicit은 외연적 시간 적분법(explicit time integration)을 이용하여 충분히 작은 시간 간격에 대해 높은 비선형성을 가진 문제를 빠른 시간에 풀 수 있음. 따라서 0.001 sec 단위의 El Centro 지진파를 적용한 조적식 벽체 해석에 유리하게 작용함.

#### 3.1 시험체 모델링

조적 블록 요소에 적용시킨 구성 모델은 ABAQUS 내 제공하고 있는 콘크리트 손상 소성 모델(Concrete Damaged Plasticity Model)을 사용하였음. 해당 모델은 주로 cyclic 및 동적 하중 하에서 콘크리트 구조물을 분석하기 위한 것이었지만, 조적식 벽체 거동 해석에도 활용 가능성이 높음. CDP 모델은 주요 파괴 메커니즘이 인장 균열 및 압축 균열인 연속 소성 기반 손상 모델이며, 이 모델은 인장력과 압축 모두에서 다양한 강도, 강성 저하 및 강도 회복 효과를 적용할 수 있음.

해석을 위해 사용된 블록 개체의 압축강도는 19Mpa이며, 응력-변형률 관계는 다음 식과 같이 포물선 형태로 증가하고 최대 압축강도 이후 선형으로 감소하는 Modified Hognestad 응력-변형률 곡선을 사용하였음. 개체의 탄성계수는 20659Mpa로 최대 압축강도 발현 시 변형률( $\epsilon_0$ )은 0.0025, 최대 변형률( $\epsilon_{cu}$ )을 0.0033으로 설정하였음. 인장강도는 압축강도의 10%로 설정하였으며 포아송 비는 0.15로 설정하였음.

$$f_c = f_c' \left[ \frac{2\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad 0 < \epsilon_c < \epsilon_0$$
$$f_c = f_c' \left[ 1 - 0.15 \left( \frac{\epsilon_c - \epsilon_0}{\epsilon_{cu} - \epsilon_0} \right) \right] \quad \epsilon_0 < \epsilon_c < \epsilon_{cu}$$

$f_c$  : 콘크리트 일축 압축응력(Mpa),  $\epsilon_c$  : 콘크리트 일축 압축변형률,

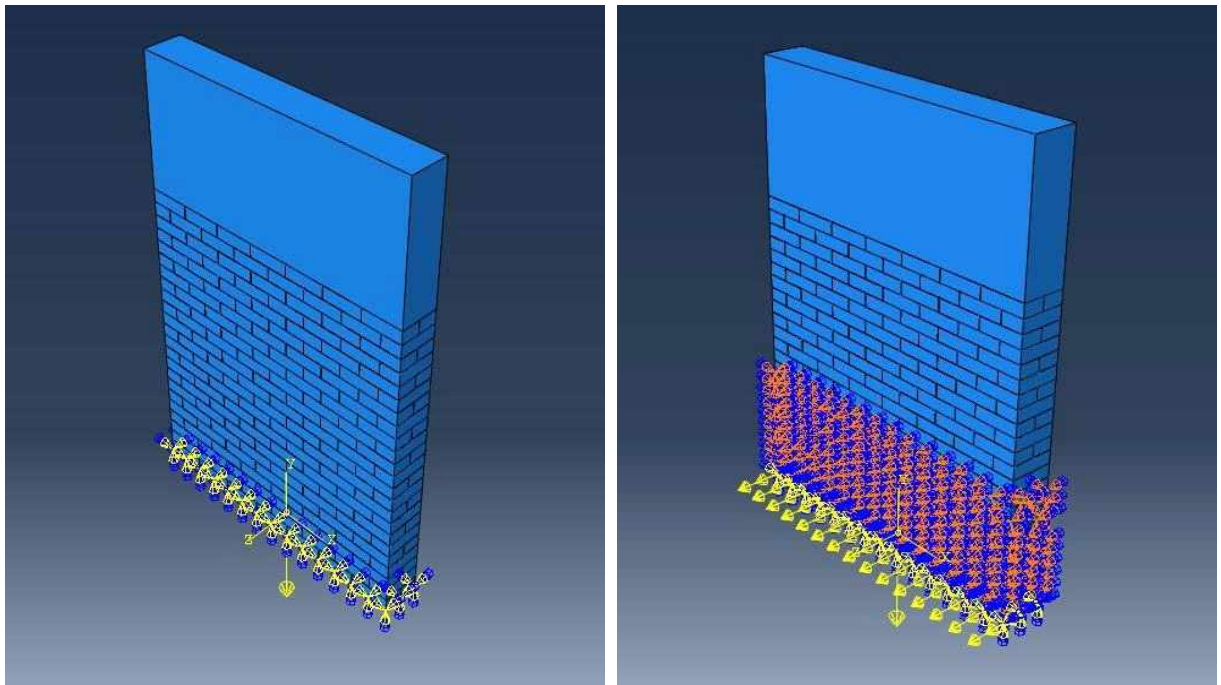
$f_c'$  : 일축 압축 강도(Mpa),  $\epsilon_0$  :  $f_c'$ 에서의 압축변형률,  $\epsilon_{cu}$  : 콘크리트 최대 압축변형률

표 2.0 CDP 모델에 적용되는 입력 변수

| Dilation angle | Eccentricity | $\sigma_{bo}/\sigma_{co}$ | $K_c$ | Viscosity |
|----------------|--------------|---------------------------|-------|-----------|
| 10             | 0.1          | 1.16                      | 0.67  | 0.001     |

조적식 벽체의 블록과 모르타르 계면의 거동을 구현하기 위해 interaction으로 cohesive behavior을 적용하였으며, 1개의 적분점을 가지는 8절점 Solid 요소(C3D8R)를 Mesh로 적용하였음.

벽체를 상재하중을 구현하기 위해 Earthquake Step(Explicit) 이전에 Gravity Step을 추가하여 모델에 가속도로 인한 하중이 가해지기 전에 축응력을 발생시켰으며, 실제 실험에서 Slab와 벽체 사이에 sliding이 발생하는 것을 방지하기 위해 설치한 bracket을 경계 조건을 통해 bracket이 끝나는 위치까지 상대변위가 발생하지 않도록 하였음.



Gravity Step

Earthquake Step

그림 2.134 Boundary Condition of modeling

### 3.2 해석 결과

실험 데이터 검증 및 추가적인 매개 변수해석 수행을 위한 동적 해석을 진행하였음. 해석 결과 응력 발생 위치 및 가속도와 변위 발생량은 실험 데이터와 유사하나, 실험 데이터와의 비교를 위한 추가 해석 데이터 구축이 요구되는 실정임. 추후 지진파의 스케일링 및 실구조물 규모의 해석을 진행할 예정임.

표 2.50 데이터 비교

|                  | Shaking Table Test | Numerical Analysis | Ratio   |
|------------------|--------------------|--------------------|---------|
| Acceleration(g)  | 0.093              | 0.065              | 70.0%   |
|                  | -0.10              | -0.08              | 80.0%   |
| Displacement(mm) | 8.12               | 7.20               | 88.67%  |
|                  | -6.62              | -7.46              | 112.70% |

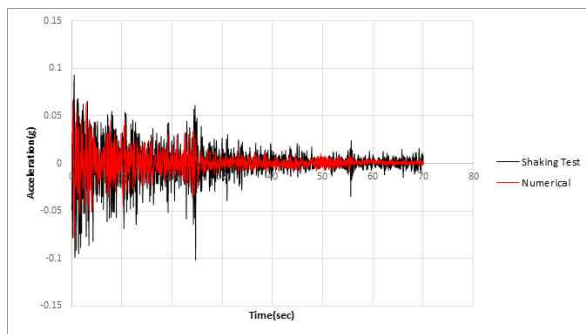


그림 2.135 출력 가속도 비교 그래프

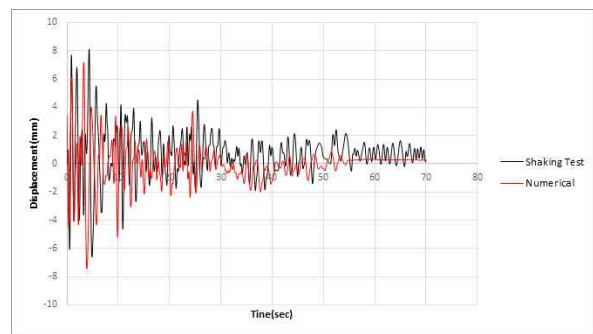
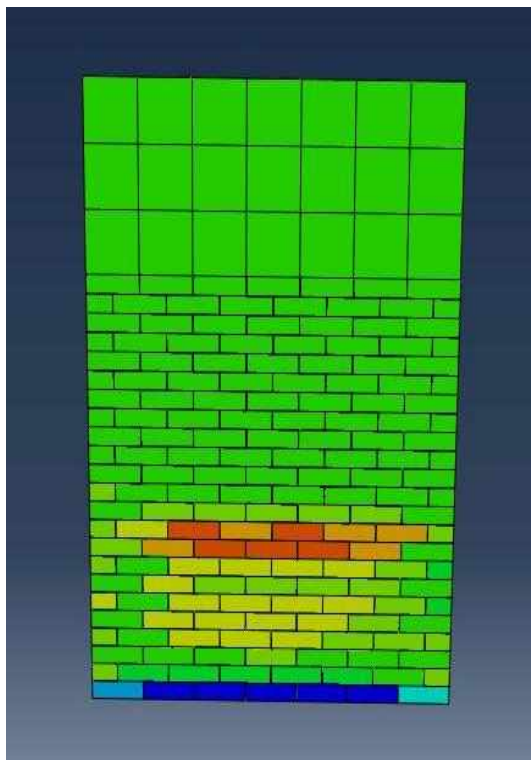
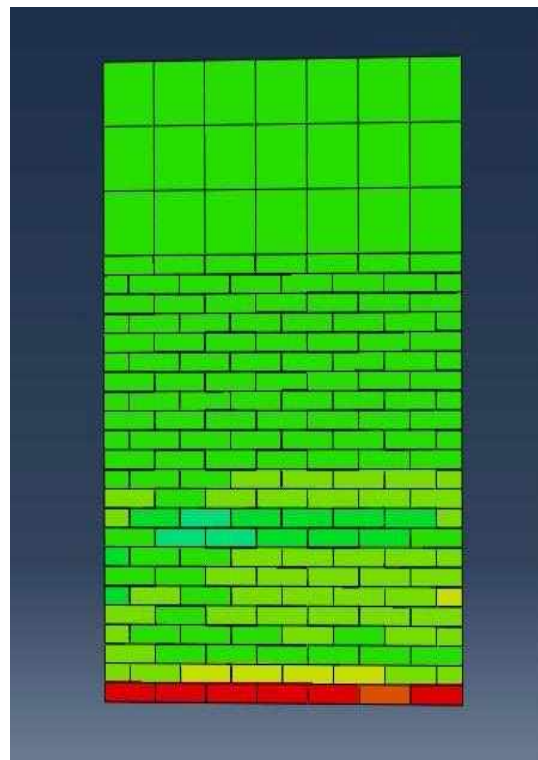


그림 2.136 중앙부 변위 비교 그래프



정면



후면

그림 2.137 응력 발생 모식도

### 3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

#### 3-1. 목표 달성도 평가

##### 1. 최종 성과별 점검기준(당초계획)

| 구분 | 핵심 성과물<br>(CTE) |                                     | 단위 성과물 |                                | 성과점검기준  |           |         |     |           |          |     | 양적성과 현황     |                                                                                                                     |                                                                                                                     |     |     |
|----|-----------------|-------------------------------------|--------|--------------------------------|---------|-----------|---------|-----|-----------|----------|-----|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|
|    |                 |                                     |        |                                | 질적 성과지표 |           | 목표치     | 달성치 | 측정<br>방법  | 검증<br>방법 | 가중치 | 해당<br>기관    | 예산<br>(백만원)                                                                                                         | 목표치                                                                                                                 | 달성치 | 가중치 |
| 주관 | A               | 조적식 구조물의 내진 보수·보강을 위한 폴리우레아 재료기술 개발 | A-1    | 조적식 구조물에 적용 가능한 폴리우레아 최적배합비 도출 | ①       | 인장강도      | 20 MPa  |     | KS M 6518 | 공인성적서    | 1   | 연세대학교 산학협력단 | 9                                                                                                                   | 특허: 출원 <u>1건</u><br>논문(비 SQ) : <u>1건</u>                                                                            |     | 15  |
|    |                 |                                     |        |                                | ②       | 연신율       | 150% 이하 |     | KS F 2241 | 공인성적서    | 1   |             |                                                                                                                     |                                                                                                                     |     |     |
|    |                 |                                     |        |                                | ③       | 내화화성      | 5%      |     | KS M 3007 | 공인성적서    | 1   |             |                                                                                                                     |                                                                                                                     |     |     |
|    |                 |                                     | A-2    | 재료물성실험 및 물성 최적화                | ①       | 인장강도      | 20 MPa  |     | KS M 6518 | 공인성적서    | 1   |             | 6                                                                                                                   | 논문(비 SQ) : <u>1건</u>                                                                                                |     | 10  |
|    |                 |                                     |        |                                | ②       | 연신율       | 150% 이하 |     | KS F 2241 | 공인성적서    | 1   |             |                                                                                                                     |                                                                                                                     |     |     |
|    |                 |                                     | A-3    | 조적식 벽체용 공시체 일축압축실험             | ①       | 강도증가      | 30% 이상  |     |           | 공인성적서    | 2   |             | 30                                                                                                                  | 논문(SQ) : <u>1건</u><br>보고서 : <u>1건</u>                                                                               |     | 10  |
|    | B               | 시공 공법 및 장비시스템 스프레이건 노즐 개선           | B-1    | 노즐시스템 개선                       | ①       | 실험용 노즐 제작 | 1       |     |           | 노즐 도면    | 2   | 4           | 시제품 : <u>1건</u><br>논문 : <u>1건</u>                                                                                   |                                                                                                                     | 15  |     |
|    |                 |                                     |        |                                | ②       | 분사성능 실험   |         |     |           | 스프레이건 노즐 | 1   |             |                                                                                                                     |                                                                                                                     |     |     |
|    |                 |                                     | B-2    | 내진성능실험                         | ③       | 내진저항성     | 20% 이상  |     |           | 논문게재     | 7   |             |                                                                                                                     |                                                                                                                     |     | 40  |
|    | C               | 현장적용성                               | C-1    | 노후 조적식구조물 테스트베드 구축             | ①       | 시공기간      | 1일 이내   |     | 현장        | 현장       | 3   | 20          | 보고서 : <u>1건</u><br>특허: 등록 <u>1건</u>                                                                                 |                                                                                                                     | 15  |     |
| 계  |                 |                                     |        |                                |         |           |         |     |           | 20       |     | 109         | 특허: 출원 <u>1건</u><br>등록 <u>1건</u><br>논문(SQ) : <u>3건</u><br>논문(비 SQ) : <u>4건</u><br>시제품 : <u>1건</u><br>SW : <u>1건</u> | 특허: 출원 <u>1건</u><br>등록 <u>1건</u><br>논문(SQ) : <u>1건</u><br>논문(비 SQ) : <u>1건</u><br>시제품 : <u>1건</u><br>SW : <u>1건</u> | 100 |     |

## 2. 최종 성과별 점검기준(최종연구실적)

| 구분 | 핵심 성과물<br>(CTE) |                                     | 단위 성과물 |                                | 성과점검기준  |           |         |         |            |          |     | 양적성과 현황             |                        |                                                                                   |                                                                                  |     |
|----|-----------------|-------------------------------------|--------|--------------------------------|---------|-----------|---------|---------|------------|----------|-----|---------------------|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
|    |                 |                                     |        |                                | 질적 성과지표 |           | 목표치     | 달성치     | 측정<br>방법   | 검증<br>방법 | 가중치 | 해당<br>기관            | 예산<br>(백만<br>원)        | 목표치                                                                               | 달성치                                                                              | 가중치 |
| 주관 | A               | 조적식 구조물의 내진 보수·보강을 위한 폴리우레아 재료기술 개발 | A-1    | 조적식 구조물에 적용 가능한 폴리우레아 최적배합비 도출 | ①       | 인장강도      | 20 MPa  | 28 M Pa | KS F 492 2 | 공인성적서    | 1   | 연세대학교 산학협력단         | 9                      | 특허: 출원 1건<br>논문(비 SQ) : 1건                                                        | 특허: 출원 1건<br>논문(비 SQ) : 1건                                                       | 15  |
|    |                 |                                     |        |                                | ②       | 신장률       | 150% 이상 | 460%    | KS F 492 2 | 공인성적서    | 1   |                     |                        |                                                                                   |                                                                                  |     |
|    |                 |                                     |        |                                | ③       | 내 화확성     | 5%      | 36%     | KS F 492 2 | 공인성적서    | 3   |                     |                        |                                                                                   |                                                                                  |     |
|    |                 |                                     | A-2    | 재료물성실험 및 물성 최적화                | ①       | 인장강도      | 20 MPa  | 28 M Pa | KS F 492 2 | 공인성적서    | 1   |                     | 6                      | 논문(비 SQ) : 1건                                                                     | 논문(비 SQ) : 1건                                                                    | 10  |
|    |                 |                                     |        |                                | ②       | 신장률       | 150% 이상 | 460%    | KS F 492 2 | 공인성적서    | 1   |                     |                        |                                                                                   |                                                                                  |     |
|    |                 |                                     | A-3    | 조적식 벽체용 공시체 일축압축실험             | ①       | 강도증가      | 30% 이상  | 76%     | KS F 240 8 | 공인성적서    | 3   |                     | 30                     | 논문(SQ) : 1건<br>보고서 : 1건                                                           | 보고서 : 1건<br>인력양성 : 1건                                                            | 10  |
|    | B               | 시공 공법 및 장비시스템 스프레이건 노즐 개선           | B-1    | 시공공법 개선                        | ①       | 시공공법 제시   | 1       | 특허출원    | 특허         | 2        | 4   | 시제품 : 1건<br>논문 : 1건 | 보고서 : 1건               | 15                                                                                |                                                                                  |     |
|    |                 |                                     |        |                                | ②       | 시공성 평가    | 1일 이내   | 1일 이내   | 현장검증       | 현장검증[사진] |     |                     |                        |                                                                                   | 3                                                                                |     |
|    |                 |                                     | B-2    | 내진성능실험                         | ③       | 변형률(상대변위) | 40% 이상  | 진행중     | 보고서        | 논문게재     |     | 3                   | 40                     | 논문 (SQ) : 2건<br>논문(비 SQ) : 2건                                                     | 인력양성 : 2 건                                                                       | 35  |
|    |                 |                                     |        |                                | ④       | 연성도(강도증진) | 30% 이상  |         |            |          |     |                     |                        |                                                                                   |                                                                                  |     |
|    | C               | 현장적용성                               | C-1    | 노후 조적식구조물 테스트베드 구축             | ①       | 시공기간      | 1일 이내   | 1일 이내   | 현장         | 현장       | 2   | 20                  | 보고서 : 1건<br>특허 : 등록 1건 |                                                                                   | 15                                                                               |     |
|    | 계               |                                     |        |                                |         |           |         |         |            |          |     | 20                  | 89                     | 특허: 출원 1 건<br>등록 1 건<br>논문(SQ) : 3 건<br>논문(비 SQ) : 4 건<br>시제품 : 1 건<br>인력양성 : 2 건 | 특허: 출원 1 건<br>등록 0 건<br>논문(SQ) : 0 건<br>논문(비 SQ) : 2 건<br>시제품 : 1건<br>인력양성 : 3 건 | 100 |

### 3-2. 관련 분야의 기여도

본 연구에서는 조적식 구조물을 대상으로는 국내 최초로 폴리우레아를 통해 보수·보강을 진행하여 80년대 이전에 지어진 대부분의 조적식 건물의 내진 보강에 적용 가능할 것으로 예상됨. 또한 국내 조적식 구조로 지어진 공공건축물, 학교시설, 병원 등의 85% 이상은 내진 보강이 이루어지지 않고 있으며, 학교시설물의 경우 내진설계 대상인 3층 이상 건물은 총 17,734동 중 86.3%가 내진보강대책이 시급한 상황으로, 본 연구를 통해 개발된 보수·보강재료를 내진설계 대상 건물에 적용한다면 통계적으로 약 30% 이상 감소시킬 수 있으며, 지진에 취약한 구조물의 안전성을 향상시킬 수 있음. 본 연구에서 개발하고자 하는 고분자 폴리머계 재료는 기존 FRP와 같은 에폭시의 사용이 없어 불필요한 계면 생성 없이 일체거동을 유도할 수 있으며, 불연속적인 면이 존재하지 않아 부착성능에 뛰어난 효과가 있음. 따라서 보수·보강용 폴리우레아 재료의 활용을 통해 조적식 구조물 뿐만 아니라 신설 구조물 및 필로티형 구조물 등 각종 토목 및 건축구조물 보수·보강에 활용할 수 있으며, 적은 공사비용으로 경제성 및 안전성 확보에 기여할 수 있을 것으로 예상됨. 이를 통해 지진 발생 시 국민의 생명 보호와 재산, 사회적 혼란을 방지를 기대하며, 기존 비내진 구조물의 구조 안전성 확보를 통한 사회적 안전성 증대에 기여함. 본 연구는 내진보강분야 전문인력을 양성 및 후속 연구의 기초자료로 활용 가능함. 폴리우레아는 고분자 기술을 바탕으로 하는 재료로써 토목, 건축 구조물의 내진 안전성 및 기본적인 방수성능도 포함되어 있으므로, 타 산업의 적용을 통한 동반성장을 기대함. 또한 기존의 보수·보강 건설재료와는 다른 물성치와 특성을 가지고 있기 때문에 지진에 대비하여 내진 성능 관련 기술 우위를 선정하는데 기여함.

### 3-3 기존 기술 대비 차별성

기존 조적식 구조물의 내진보강방법을 살펴보면 표 1에서 보는 바와 같이 다양한 보강기법이 적용되고 있음. 하지만 이러한 방법은 구조물의 자중이 증가하고 보강 효과가 미비하거나, 공사비용이 상당히 많이 발생하기 때문에 비경제적임. 따라서 이러한 문제를 해결할 수 있도록 구조물과 보수재료에 존재하는 계면을 제거하고 일체거동을 유도할 수 있는 획기적인 재료가 필요함. 본 연구에서는 지금까지 단순 방수재료로 사용되었던 고분자 폴리우레아를 활용하여 콘크리트 구조물의 내진 보수·보강 재료 및 공법을 개발하였음.

표 1 조적식 구조물에 적용되는 다양한 내진보강기법

| 보강기법                 | 장점                                                                                                                | 단점                                                                                                           |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 강재 스크류<br>앵커         | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 해외 시공실적 많음</li> <li>· 내진성능 향상이 뛰어나</li> <li>· 다양한 구조물에 적용 가능함</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 공사비용 과다</li> <li>· 고도의 정밀 시공 요구</li> <li>· 국내 보강공사 실적 미비</li> </ul> |
| Steel tie            | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 공사가 간편함</li> <li>· 공사비가 적음</li> <li>· 구조물 연성향상이 뛰어나</li> </ul>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 인방보가 없는 경우 보강효과 미비</li> <li>· 조적벽체의 국부파괴 유도</li> </ul>              |
| 벽체 전면<br>보강          | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 시공기술이 보편화</li> <li>· 화재에 강함</li> <li>· 내진성능 효과가 큼</li> </ul>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 공사비용 과다</li> <li>· 개구부 처리가 어려움</li> <li>· 자중이 증가</li> </ul>         |
| 외부 버팀벽<br>보강         | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 거주자가 이주할 필요 없음</li> </ul>                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 공사비용 과다</li> <li>· 넓은 대지 필요</li> </ul>                              |
| 철골골조<br>설치           | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 시공기술이 보편화</li> <li>· 역학적 분석이 용이</li> </ul>                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 자중이 증가</li> <li>· 공사비용 과다</li> </ul>                                |
| 벽체 슬래브<br>연결부위<br>보강 | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 공사가 손쉬움</li> </ul>                                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 보강 효율성이 낮음</li> </ul>                                               |
| 섬유보강재                | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 공사가 손쉬움</li> <li>· 벽체 강성증가 효과</li> <li>· 다양한 부위 보강 적용</li> </ul>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 화재에 취약</li> <li>· 기존 벽체와의 일체화 어려움</li> </ul>                        |

폴리우레아의 성질은 크게 연질형 폴리우레아인 FTPU(Flexible Type Polyurea)와 경질형 폴리우레아인 STPU(Stiff Type Polyurea)로 구분할 수 있음. 지난 연구에서 개발한 경질형 폴리우레아인 STPU는 일반적인 정적하중을 고려하여 인장강도가 상향조정된 재료였음. 본 연구에서 개발한 FTPU는 내진 보수·보강용 재료이므로 연성과 강도를 동시에 구현하는 폴리우레아임. 따라서 본 연구에서 개발한 FTPU와 지난 연구에서 개발한 STPU의 재료성능을 비교하여 이전 기술과의 차별성을 확보하고자 함.

그림 1 조적식 구조물 적용가능한 보수·보강용 폴리우레아 개발



### 기본 물성 비교

다음 표 2는 선행연구에서 개발한 폴리우레아의 배합비로 주제인 Prepolymer와 경화제인 Hardener로 구분하여 나타내었음. 이전 연구에서는 주제의 조성비는 고정 값으로 설정하고 경화제를 변경하여 강도는 향상시키고 신장률을 낮추는 연구를 진행하였음. 그러나 본 연구에서 사용한 배합비는 인장강도 역시 이전 연구에 비해 낮지 않으며, 신장률을 100% 이상 높은 배합을 사용하였음.

표 2 이전 연구에서 개발한 배합 비

| Material   | Component                                 | Weight (%) |
|------------|-------------------------------------------|------------|
| Prepolymer | Methylene diphenyl diisocyanate (MDI)     | 70         |
|            | Polyoxypropylene glycol                   | 20         |
|            | Propylenecarbonate                        | 10         |
| Hardener   | Polyoxypropylene diamine                  | 30 ~ 40    |
|            | Polyethertriamine                         | 10 ~ 20    |
|            | Diethyltoluenedimine (DETDA) 5            | 5          |
|            | Secondary amine                           | 20 ~ 30    |
|            | Propylene glycol                          | 2          |
|            | pigment                                   | 2          |
|            | UV sorbent                                | under 2    |
|            | $\gamma$ -glycidoxypropyltrimethoxysilane | 1          |

다음 표 3은 본 연구에서 사용하는 배합의 주제 성분표를 나타내었음. 주제와 경화제의 반응 시 안정적인 물리적 성질을 발현하기 위하여 이상적인 배합을 확보하였음. 그 결과 주제의 Monomeric MDI와 폴리올의 첨가율이 약 53%, 46% 일 때 가장 안정적이었음. 또한 배합 과정에서 Propylene Carbonate 첨가제를 첨가하여 경화가 너무 빨리 일어나지 않고 적합한 유동성을 유지할 수 있는 시간을 확보하였음.

표 3 본 연구에서 개발한 배합의 주제 성분표

| 구분    | 원료명            |                                                                                         | PU-1 |
|-------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| A 주원료 | Monomeric MDI. | (4,4'-Methylenediphenyl Diisocyanate)                                                   | 53%  |
|       | POLYOL         | alpha-(2-Aminomethylethyl)-omega-(2-aminomethylethoxy)-poly(oxy(methyl-1,2-ethanediyl)) | 27%  |
|       |                | POLYOXYPROPYLENEGLYCOL                                                                  | 19%  |
|       | 첨가제            | Propylene Carbonate                                                                     | 1%   |
|       | A 제 계          |                                                                                         | 100% |

안정적이고 이상적인 경화제 배합 선정을 위해서 Jeffamine과 Functionally amine의 첨가량을 변수로 시험을 진행하였음. 본 연구에서 사용하는 배합의 경화제의 경우 Jeffamine과 Functionally amine의 첨가량이 약 79.1% 와 19.4%이고 자외선 첨가제 ZIKASORB-BS 0.5%를 추가하였을 때 폴리우레아의 물성이 충분히 발현되면서 경화속도도 적당한 것으로 나타났음. 이에 따라 표 4에서는 본 연구에서 사용된 배합의 경화제 성분표를 나타내었음.

표 4 본 연구에서 개발한 배합의 경화제 성분표

| 구분    | 원료명                 |                                                                                         | PU-1  |
|-------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| B 경화제 | JEFFAMINE           | alpha-(2-Aminomethylethyl)-omega-(2-aminomethylethoxy)-poly(oxy(methyl-1,2-ethanediyl)) | 72.1% |
|       | FUNCTIONAL LY AMINE | 3,5 Diethyltoluene-2,4/2,6-diamine                                                      | 25.9% |
|       |                     | 4,4'-methylene Bis[N-(1-methylpropyl)benzenamine                                        | 1.5%  |
|       | 자외선 첨가제             | ZIKASORB-BS                                                                             | 0.5%  |
|       | B 제 계               |                                                                                         | 100%  |

표 5 본 연구에서 개발한 폴리우레아의 재료성능

| Monomeric<br>MDI | NCO%   | mole<br>fraction | Gel<br>time | Tack<br>Free<br>Time | 인장강도<br>(MPa) | 경도<br>(Shore<br>D) | 신장률<br>(%) |
|------------------|--------|------------------|-------------|----------------------|---------------|--------------------|------------|
|                  | 13%    | 1                | 22          | 50                   | 21            | 63                 | 320        |
|                  | 15.50% | 1                | 20          | 45                   | 25            | 66                 | 280        |
|                  | 18.00% | 1                | 20          | 45                   | 28            | 69                 | 250        |

표 6이전 연구에서 개발한 폴리우레아의 재료성능

| Assessment items | Gel time<br>(sec) | 인장강도<br>(MPa) | 경도<br>(Shore D) | 신장률 (%) |
|------------------|-------------------|---------------|-----------------|---------|
| STPU             | 20                | 26            | 70              | 150     |

#### 산환경 노출시험 결과

폴리우레아의 기본 물성시험 결과를 바탕으로 내구성 시험을 진행하였음. 표 7과 표 8에서 STPU와 본 연구에서 개발한 폴리우레아의 산환경 시험결과를 나타내었음. 산환경 노출시험 결과 STPU재료의 경우 기존 26MPa에서 24MPa로 저하하였으며, 본 연구에서 개발한 폴리우레아의 경우 28MPa에서 23MPa로 저하하였음. 신장률의 경우 STPU는 150%에서 170%로 증가한 반면 본 연구에서 개발한 폴리우레아의 경우 460%에서 457%로 미세하게 저하되는 경향을 보였음. 본 재료의 경우 산환경에 노출되었을 때 약간의 성능저하가 나타났지만 KS F 규격을 만족하는 범위임으로 저항성능이 충분한 것으로 판단됨.

표 7 이전 연구에서 개발한 폴리우레아의 산환경 시험결과

|           | STPU | 황산 2% 침지 | 비          |
|-----------|------|----------|------------|
| 인장강도(MPa) | 26   | 24       | 1.0 : 0.92 |
| 신장률(%)    | 150  | 170      | 1.0 : 1.13 |

표 8 본 연구에서 개발한 폴리우레아의 산환경 시험결과

|           | Monomeric MDI | 황산 2% 침지 | 비          |
|-----------|---------------|----------|------------|
| 인장강도(MPa) | 28            | 23       | 1.0 : 0.83 |
| 신장률(%)    | 460           | 457      | 1.0 : 1.0  |

#### 자외선 노출시험 결과

자외선 노출시험 결과 STPU재료의 경우 1,000시간 노출했을 경우 인장강도가 기존 26MPa에서 28MPa로 저하하였으며, 2,000시간 노출 시 16MPa로 저하하여 노출시간이 길어질수록 인장강도가 낮아지는 경향을 나타냄. 신장률의 경우 기존 150%에서 1,000시간 노출했을 경우 110%, 2,000시간 노출 시 90%로 저하하는 경향을 나타냄. 본 연구에서 개발한 폴리우레아의 경우 역시 기존 인장강도 28MPa에서 노출 시간에 따라 17 MPa, 18MPa로 줄어들고, 신장률 역시 460%에서 321%, 316%로 저하되었음. 하지만 1,000시간에서 2,000시간으로 노출시간을 늘렸음에도 불구하고 시험결과의 차이가 크지 않은 것을 확인하여 일정수준 이하로는 성능저하가 발생되지 않는 것으로 판단됨. 표 9-10은 STPU 재료와 본 연구에서 개발한 폴리우레아의 자외선 노출시험 결과를 나타냄.

표 9 이전 연구에서 개발한 폴리우레아의 자외선 노출시험 결과

|               | STPU | 1,000 hrs | 2,000 hrs | 비             |
|---------------|------|-----------|-----------|---------------|
| 인장강도<br>(MPa) | 26   | 18        | 16        | 1.0:0.69:0.62 |
| 신장률<br>(%)    | 150  | 110       | 90        | 1.0:0.73:0.60 |

표 10 본 연구에서 개발한 폴리우레아의 자외선 노출 시험결과

|               | Monomeric<br>MDI | 1,000 hrs | 2,000 hrs | 비             |
|---------------|------------------|-----------|-----------|---------------|
| 인장강도<br>(MPa) | 28               | 17        | 18        | 1.0:0.61:0.64 |
| 신장률<br>(%)    | 460              | 321       | 316       | 1.0:0.70:0.69 |

#### 탄산화 노출시험 결과

탄산화 노출시험 결과 이전 연구에서 개발한 폴리우레아를 원형공시체에 도포했을 경우 도포 전 탄산화 속도계수가 2.94에서 STPU 도포 후 0이 됨. 본 연구에서 개발한 폴리우레아의 경우 도포 전 탄산화 속도계수가 8.25에서 폴리우레아 도포 후 5.5가 됨. 본 연구에서 개발한 폴리우레아의 경우 탄산화 속도계수가 0이 되지 않은 원인은 폴리우레아 도포 전 콘크리트 원형 공시체의 탄산화 속도계수의 차이가 큼으로 제작 과정에서 생긴 표면 공극의 차이가 큰 것으로 판단됨. 폴리우레아가 공시체의 공극을 완전히 덮지 못해 이산화탄소가 침투하여 생겼을 것으로 판단됨. 따라서 공시체 제작 과정에서 콘크리트의 공극을 최소화하였을 경우 탄산화 속도 계수는 더욱 줄어들 것으로 판단됨. 표 11-12는 탄산화 노출시험 결과를 비교하여 나타냄.

표 11 STPU 탄산화 노출시험 비교

| 제품군    | 탄산화깊이<br>(mm) | 탄산화 기간<br>(week) | 탄산화 속도 계수 |
|--------|---------------|------------------|-----------|
| NON PU | 5.87          | 4                | 2.94      |
| STPU   | 0             | 4                | 0         |

표 12 본 연구에서 개발한 PU의 탄산화 노출시험 비교

| 제품군           | 탄산화깊이<br>(mm) | 탄산화 기간<br>(week) | 탄산화 속도 계수 |
|---------------|---------------|------------------|-----------|
| NON PU        | 16.5          | 4                | 8.25      |
| Monomeric MDI | 11.0          | 4                | 5.5       |

#### 동결융해 시험 결과

동결융해 시험 결과 이전 연구에서 개발한 폴리우레아를 원형공시체에 도포했을 경우 상대 동탄성계수가 무도포 대비 95.49에서 97.79로 증가하였음. 또한 본 연구에서 개발한 폴리우레아를 도포했을 경우 상대동탄성 계수가 무도포 대비 74.43에서 89.63으로 증가함. STPU의 경우 폴리우레아 도포 후 저항성능이 2.41%증가한 반면 본 연구에서 개발한 폴리우레아를 도포했을 경우 저항성능 20.42%증가 하는 것으로 확인됨. 하지만 탄산화 시험결과와 마찬가지로 이전 연구와 본 연구에서 진행한 무도포 시편의 상대동탄성계수의 차이가 큼으로 콘크리트 원형공시체 제작과정에서 공극을 줄였을 경우 시험 결과는 달라질 것으로 판단됨.

표 13 동결융해 노출시험 비교

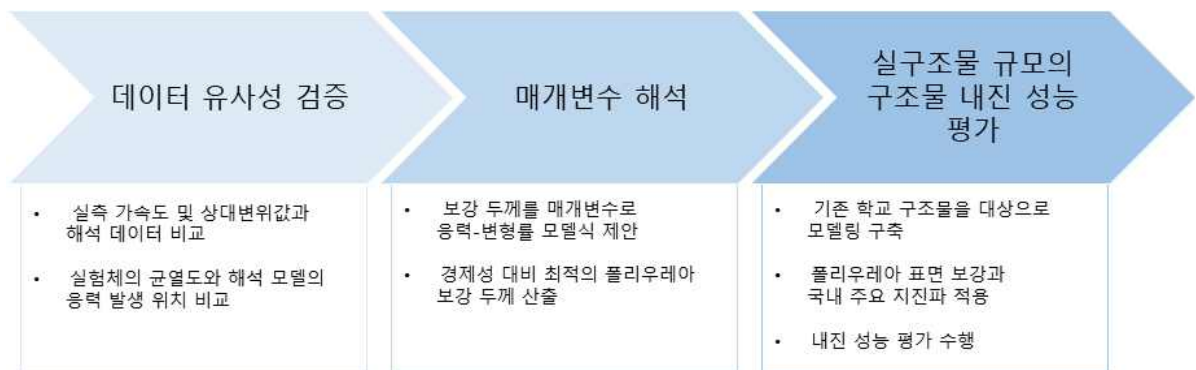
|               | 0cycle | 300cycle | 상대동탄성계수 |
|---------------|--------|----------|---------|
| NON PU (이전연구) | 22573  | 22040    | 95.49   |
| STPU          | 22573  | 22224    | 97.79   |
| NON PU (본연구)  | 23140  | 19979    | 74.43   |
| MONOMERIC MDI | 21040  | 19923    | 89.63   |

### 3-4 연구성과 활용 방안

본 연구에서 수행된 연구성과와 개발된 고인성·고연성 PU의 사업화를 위해 진동대 실험 데이터를 기반으로 추가적인 FEM 정밀해석을 수행 중이며, Parametric FEM 해석을 통해 실물 구조물 적용 방안을 고려하고 있음. 또한, 전국 각지의 교육청과 지속적인 협의를 통해 노후화된 학교 구조물에 PU를 적용하는 방안을 협의 중에 있음.

실험 데이터 검증 및 추가적인 매개 변수해석 수행을 위한 FEM 해석을 진행하였음. 해석 결과 응력 발생 위치 및 가속도와 변위 발생량은 실험 데이터와 유사하나, 실험 데이터와의 비교를 위한 추가 해석 데이터 구축이 요구되는 실정임. 추후 지진파의 스케일링 및 실구조물 규모의 해석을 진행할 예정임.

진동대 실험 데이터와 해석 데이터의 유사성 확인 후, 매개변수 해석 수행을 위해 폴리우레아 보강 두께를 변수로 콘크리트와 모르타르로 원형 공시체를 제작 및 보강하였으며, 응력-변형률 데이터를 확보할 예정임. 실험 데이터를 통하여 보강 두께를 매개변수로 한 응력-변형률 모델식을 산출 및 해석에 적용하여 PU의 코팅 두께에 따른 구조물의 강성 변화 분석을 통해 최적 현장 시공법을 검토할 예정임. 또한, 실제 현장 적용 시 PU 보강 두께를 변수로 하여 다양한 현장 적용 두께를 검토할 예정임.



#### 연구성과 활용 방안

실구조물 규모의 구조물 내진 성능 평가를 위해 80년도 학교 교사 표준 설계도에 따라 지어진 기존 학교 구조물을 대상으로 폴리우레아 보강과 최근 국내 발생한 경주 지진과 포항 지진파를 적용하여 Parametric 해석을 수행할 예정이며, 이를 통해 폴리우레아의 내진 보강 성능을 직접적으로 평가할 계획임.

조적식 벽체의 진동대 실험을 통해 내진 보수보강용 재료인 폴리우레아의 내진 성능 보강 효과를 검증하였으나, 해당 재료의 시공 효과를 구체화하기 위해서는 조적식 구조물이 포함된 학교 건축물에 시공하여 지속적인 계측을 통하여 고연성·고내구 PU의 보강 성능을 검토할 예정임.

### 3-5 최종성과물 일람

□ (일반) 국토교통기술촉진연구사업, 총연구기간 2019-04-15~2020-12-31, 연구기관 : 연세대학교 산학협력단 연구책임자 : 김장호

| 구분          | 과제명                                                    | 최종성과명                                | 최종성과물형태 | 기술수준                              |                                | 경제성                                       |                                                      | 성과 우수성                                                                                     |                                         | 성과물 발생 시기   | 최종수요처                         | 활용방안                                                                                                                     | 기대효과                                     | 기술실시계약 | 비고 |
|-------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------|----|
|             |                                                        |                                      |         | 연구 전                              | 연구 후                           | 연구 전                                      | 연구 후                                                 | 기존 기술과의 차별성                                                                                | 정량적 성과                                  |             |                               |                                                                                                                          |                                          |        |    |
| 연세대학교 산학협력단 | 사용 중인 조적조 학교 건물의 내진 보수·보강을 위한 저비용 분사형 PU 재료 및 시공 기술 개발 | 조적식 구조물의 내진 보수·보강을 위한 폴리우레아 재료 기술 개발 | 폴리우레아   | 현재 기술 수준 인장강도 : 16MPa, 신장률 : 300% | 인장강도: 28MPa, 신장률 460%          | FRP 시트 시공법은 인력 및 시공기간으로 인해 일일 작업량에 한계가 있음 | 폴리우레아는 시공기간이 규모에 따라 1일~2일이면 충분하여 약 30%의 비용 절감 효과 기대, | 조적식 구조물에 적용·가능한 보수·보강용 폴리우레아 내진 보강재 국내 최초 개발                                               | - 논문 1건 (비SCI)<br>- 시제품 1건<br>- 인력양성 1건 | 2020. 06.11 | 지방자치단체와 국가기관, 내진보강이 미흡한 건축물 등 | 건축, 토목분야의 내진 성능 향상을 위한 투자효과 기대 / 예상 활용시기 단순 방수목적 : 보수 보강 즉시 활용가능, 조적식 구조물 보강 목적 : 실험 해석 완료 및 안전성 확보 후 활용가능               | 급속시공이 가능하여 약 20% 이상의 공기 단축 효과            | - 미체결  |    |
|             | 조적조 구조물에 적용할 폴리우레아 시공 공법 개선 및 현장 적용성                   | 조적조 구조물에 적용할 폴리우레아 시공 공법 개선 및 현장 적용성 | 시공 방법   | 폴리우레아 도포 시 무보강 대비 휨강도 : 17% 증가    | 새로운 시공공법 적용 시 무보강 대비 휨강도 46%증가 |                                           |                                                      | 폴리우레아 도포부는 매립통로부에 매립된 폴리우레아와 도포된 폴리우레아가 일체로 형성되는 것을 특징으로 하는 폴리우레아를 이용한 건축구조물의 표면매립 보강공법이다. | - 논문 1건 (비SCI)<br>- 보고서 2건<br>- 현장검증 1건 | 2020. 12.31 |                               | 조적식 구조물 적용을 통한 고분자 폴리머계 보강재료의 응용분야 다양화 및 노후화된 조적식 구조물에 적용 가능한 고부가가치 보강재료 핵심 기술 확보 / 예상 활용시기 : 2021~2022년 특허등록 완료 시 활용 가능 | 구조내진 성능 보강효과로 인한 연간 약 10억 이상의 보수비용 절감 가능 | - 미체결  |    |

### 3-6 연구개발 핵심성과 요약

#### 1. 연구개발과제 개요

|                                         |                                                                                                                                                                              |             |                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 사 업 명                                   | 국토교통기술촉진연구사업                                                                                                                                                                 | 과 제 번 호     | 20CTAP-C151929-02                                                                                                                                                                                                                    |
| 연구개발단계                                  | <input checked="" type="checkbox"/> 기초연구 <input checked="" type="checkbox"/> 실험<br><input type="checkbox"/> 시작품 <input type="checkbox"/> 실용화<br><input type="checkbox"/> 사업화 | 최 종 성 과 유 형 | <input type="checkbox"/> 공법,기법 <input checked="" type="checkbox"/> 재료,자재<br><input type="checkbox"/> 소프트웨어 <input type="checkbox"/> 장비,장비<br><input type="checkbox"/> 시스템 <input type="checkbox"/> 정책,제도 <input type="checkbox"/> 기타 |
| 연구과제명                                   | 사용중인 조적조 학교건물의 내진 보수·보강을 위한 저비용 분사형 PU 재료 및 시공기술 과제                                                                                                                          | 과제구분        | <input checked="" type="checkbox"/> 일반 <input type="checkbox"/> 연구단 <input type="checkbox"/> 사업단                                                                                                                                     |
| 주 관 연 구 기 관                             | 연세대학교 산학협력단                                                                                                                                                                  | 연구책임자       | 김 장 호                                                                                                                                                                                                                                |
| 총 연구기간<br>및<br>연구개발비<br>(단위 : 천원)       | 2019년 04월 15일 ~ 2020년 12월 31일 (1년 9개월)                                                                                                                                       |             |                                                                                                                                                                                                                                      |
|                                         | 정부출연금                                                                                                                                                                        | 민간부담금       | 정부외 출연금                                                                                                                                                                                                                              |
|                                         | 370,000                                                                                                                                                                      | -           | -                                                                                                                                                                                                                                    |
| 당 해 년 도<br>연구기간 및<br>연구개발비<br>(단위 : 천원) | 2020년 01월 01일 ~ 2020년 12월 31일 (12개월)                                                                                                                                         |             |                                                                                                                                                                                                                                      |
|                                         | 정부출연금                                                                                                                                                                        | 민간부담금       | 정부외 출연금                                                                                                                                                                                                                              |
|                                         | 206,000                                                                                                                                                                      | -           | -                                                                                                                                                                                                                                    |

#### 2. 연구개발 핵심성과

☐ 핵심성과

| 연번 | 세부          | 핵심성과                                 | 최종 성과유형           | 핵심성과 달성을 위한 전체기간 중 주요실적                              |
|----|-------------|--------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------|
| 1  | 연세대학교 산학협력단 | 조적식 구조물의 내진 보수·보강을 위한 폴리우레아 재료기술 개발  | 공인성적서             | 공인성적서 : 6개                                           |
| 2  | 연세대학교 산학협력단 | 조적조 구조물에 적용할 폴리우레아의 시공공법 개선 및 현장 적용성 | 특허, 보고서, 논문, 현장검증 | 특허출원 : 1개<br>논문 (비SCI) : 2개<br>보고서 : 1개<br>현장검증 : 1개 |

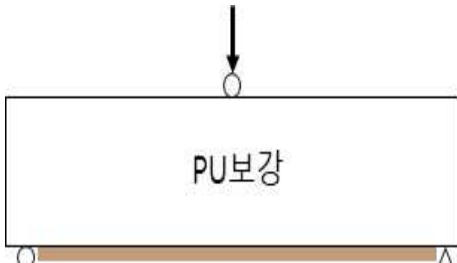
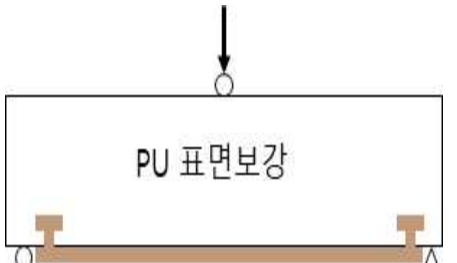
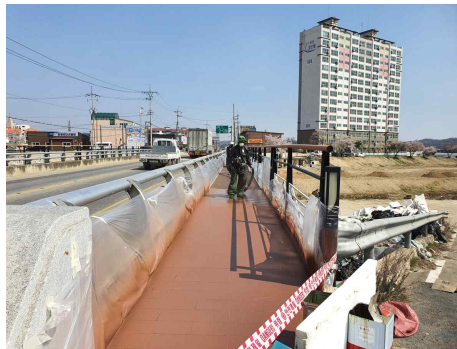
### 3. 핵심성과별 세부 설명

#### 1) 핵심성과명 : 조적식 구조물에 적용가능한 폴리우레아 최적 배합비 도출

|                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>관련 그림 / 사진</p>              | <div style="display: flex; flex-wrap: wrap;"> <div style="width: 50%; text-align: center;">  <p>(a) 산환경 노출시험</p> </div> <div style="width: 50%; text-align: center;">  <p>(b) 자외선 노출시험</p> </div> <div style="width: 50%; text-align: center;">  <p>(c) 탄산화 노출시험</p> </div> <div style="width: 50%; text-align: center;">  <p>(d) 동결융해 저항성시험</p> </div> <div style="width: 50%; text-align: center;">  <p>(e) 휨강도 시험</p> </div> <div style="width: 50%; text-align: center;">  <p>(f) 인장강도 및 신장률 시험</p> </div> </div> |
| <p>정의</p>                      | <p>일반적으로 사용되는 폴리우레아는 방수용으로 사용되지만 본 연구에서 개발된 폴리우레아를 통해 조적식 구조물을 대상으로 한 내진 보수·보강재 개발</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <p>목적</p>                      | <p>조적식 구조물에 적용 가능한 보수·보강용 폴리우레아의 최적 배합비 도출 및 재료성능 평가를 통한 물성검증</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <p>성능목표</p>                    | <p>(기존기술 수준)</p> <p>기존의 폴리우레아는 대부분이 방수 목적이기 때문에 16MPa, 신장률 300% 수준임.</p> <p>이전 연구에서 개발되었던 폴리우레아는 인장강도가 낮을 경우 신장률이 높고, 인장강도가 높을 경우 신장률이 낮았음. 예) 인장강도 18MPa 신장률 400%, 인장강도 26MPa 신장률 150%</p> <p>(개발기술 수준)</p> <p>본 연구에서 개발한 폴리우레아는 고강도 고연성의 재료로써 내진저항성능을 크게 향상 시킬 것으로 기대됨. 이는 질적성과(공인성적서)를 통해 증빙함.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <p>성과달성<br/>책임자<br/>(소속기관)</p> | <p>김장호 (연세대학교 산학협력단)</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

| 소요기간       |                | '19.04 ~ '20.04(1년, 1-2년차)                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |       |        |        |     |              |
|------------|----------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------|--------|-----|--------------|
| 핵심성과       | 달성<br>확인방<br>법 | 1차년도                                                | 인장강도, 신장률, 자외선 노출시험, 탄산화 노출시험, 휨강도 시험<br>공인성적서 증빙                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |       |        |        |     |              |
|            |                | 2차년도                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |       |        |        |     |              |
|            | 양적성<br>과       | 1차년도                                                | 특허 출원                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 특허 등록 | SCI 논문 | 비SCI논문 | S/W | 기타           |
|            |                |                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |       |        | 1      |     | 공인성적서 :<br>6 |
|            |                | 2차년도                                                | 특허 출원                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 특허 등록 | SCI 논문 | 비SCI논문 | S/W | 기타           |
|            |                |                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |       |        |        |     |              |
|            | 질적성<br>과       | 1차년도                                                | 1. 기본 물성<br>인장강도 : 목표치 : 20MPa -> 달성치 : 28MPa (공인성적서)<br>신장률 목표치 : 150%이상 -> 달성치 : 460% (공인성적서)<br><br>2. 내화학적<br>산환경 노출시험 : 인장강도비 : 0.83, 신장률 : 457% (KS F 4922 만<br>족) (공인성적서)<br>자외선 노출시험 : 인장강도 18MPa, 신장률 316% (KS F 4922 만족)<br>(공인성적서)<br>탄산화 노출시험 : 무도포 시편대비 33.3% 저항능력 증가 (공인성적<br>서)<br>동결융해 저항성시험 : 무도포 시편대비 20.4% 저항능력 증가<br><br>3. 휨 강도 증가 목표치 : 30%이상 -> 달성치 : 76% (공인성적서) |       |        |        |     |              |
|            |                | 2차년도                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |       |        |        |     |              |
| 성과<br>활용계획 |                | 80년대 이전에 지어진 대부분의 조적식 건물의 내진보강에 적용 가능할 것으<br>로 예상됨. |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |       |        |        |     |              |

2) 핵심성과명 : 조적조 구조물에 적용할 폴리우레아의 시공공법 개선 및 현장 적용성

|                       |                |                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                           |                                                                                    |        |        |     |    |
|-----------------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|-----|----|
| 관련 그림 / 사진            |                |                                                                                                                                                                                              |                                           |  |        |        |     |    |
|                       |                | (a) 휨 부재 일반보강                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                           | (b) 휨 부재 표면보강 공법                                                                   |        |        |     |    |
|                       |                |                                                                                                                                                                                              |                                           |  |        |        |     |    |
|                       |                | (c) 폴리우레아 시공 전                                                                                                                                                                                                                                                                |                                           | (d) 폴리우레아 시공 후                                                                     |        |        |     |    |
| 정의                    |                | 표면매립 보강공법을 폴리우레아 시공에 적용하여 표면에 도포된 폴리우레아의 부착력을 구조적으로 강화함으로써 시공공법을 개선함.                                                                                                                                                                                                         |                                           |                                                                                    |        |        |     |    |
| 목적                    |                | 폴리우레아를 건축구조물의 표면으로부터 도포된 폴리우레아가 쉽게 이탈되지 않도록 구조적인 개선을 하고자하며, 개발된 재료의 빠른 시공기간을 검증하고자 함.                                                                                                                                                                                         |                                           |                                                                                    |        |        |     |    |
| 성능목표                  |                | <p>(기존기술 수준)</p> <p>무보강 콘크리트와 이를 일반적인 방법으로 폴리우레아 도포했을 경우 휨강도 비교 결과 무보강 : 2.3MPa 일반 폴리우레아 보강 : 2.76MPa</p> <p>(개발기술 수준)</p> <p>표면매립 보강공법으로 콘크리트 휨부재를 보강하였을 경우 3.36MPa 강도를 발휘하여 무보강 대비 46% 증가, 일반보강 대비 22%증가 효과를 확인하였음.</p> <p>또한 폴리우레아 시공은 1일 이내에 완료하였으며, 이에 대한 사진증빙을 하였음.</p> |                                           |                                                                                    |        |        |     |    |
| 성과달성<br>책임자<br>(소속기관) |                | 김장호 (연세대학교 산학협력단)                                                                                                                                                                                                                                                             |                                           |                                                                                    |        |        |     |    |
| 소요기간                  |                | '19.04 ~ '20.12(1년9개월, 1-2년차)                                                                                                                                                                                                                                                 |                                           |                                                                                    |        |        |     |    |
| 핵심성과                  | 달성<br>확인방<br>법 | 1차년도                                                                                                                                                                                                                                                                          | 논문 (비SCI) : 1개, 특허출원 : 1개                 |                                                                                    |        |        |     |    |
|                       |                | 2차년도                                                                                                                                                                                                                                                                          | 논문 (비SCI) : 1개, 보고서 : 1개, 현장검증 : 1개[사진증빙] |                                                                                    |        |        |     |    |
|                       | 양적성<br>과       | 1차년도                                                                                                                                                                                                                                                                          | 특허 출원                                     | 특허 등록                                                                              | SCI 논문 | 비SCI논문 | S/W | 기타 |
|                       |                |                                                                                                                                                                                                                                                                               | 1                                         |                                                                                    |        |        |     |    |

|      |  | 2차년도       | 특허 출원                                                                                                             | 특허 등록     | SCI 논문 | 비SCI논문 | S/W | 기타 |
|------|--|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------|--------|-----|----|
|      |  |            |                                                                                                                   | 심사대기<br>중 |        | 1      |     |    |
|      |  | 1차년도       | 조적조 구조물에 적용할 폴리우레아의 시공 공법을 제시하고 이를 바탕으로 특허출원 1건을 완료함.                                                             |           |        |        |     |    |
| 질적성과 |  | 2차년도       | 폴리우레아 시공은 현장검증을 통해 1일 이내에 완료하였으며, 이에 대한 사진증빙을 하였음. 또한, 진동대 실험을 통해 얻은 데이터를 최종보고서에 작성하였음.                           |           |        |        |     |    |
|      |  | 성과<br>활용계획 | 비SCI 1편, 논문 2편을 과제종료 후 실험을 통해 얻은 데이터를 활용하여 사후 관리 예정임. 사후 5년까지 추적 및 관리하여 (사후 1차년도), SCI 논문 3편(사후 1-2차년도) 추후 달성 예정임 |           |        |        |     |    |

## 4. 연구개발성과의 활용 계획 등

### 4-1. 최종 연구 성과 활용계획

#### A. 과제 일반정보

|                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                |         |                                                                                                      |                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 사 업 명                                                                                                                                                                                                             | 국토교통기술촉진연구사업                                                                                   |         | 과학기술표준분<br>류                                                                                         | 재난·재해예방 등 안전기술<br>개발                                                  |
| 과 제 유 형                                                                                                                                                                                                           | <input checked="" type="checkbox"/> 기초 <input type="checkbox"/> 응용 <input type="checkbox"/> 개발 |         | 실용화대상여부                                                                                              | <input type="checkbox"/> 실용화 <input checked="" type="checkbox"/> 비실용화 |
| 연구과제명                                                                                                                                                                                                             | 사용중인 조적조 학교건물<br>의 내진 보수·보강을 위한<br>저비용 분사형 PU 재료 및<br>시공기술 개발                                  | 과 제 구 분 | <input checked="" type="checkbox"/> 일 반 <input type="checkbox"/> 연구단<br><input type="checkbox"/> 사업단 |                                                                       |
| 주관연구기관                                                                                                                                                                                                            | 연세대학교 산학협력단                                                                                    | 연구책임자   | 김장호                                                                                                  |                                                                       |
| 세 부 과 제 명                                                                                                                                                                                                         | 사용중인 조적조 학교건물의 내진 보수·보강을 위한<br>저비용 분사형 PU 재료 및 시공기술 개발                                         |         |                                                                                                      |                                                                       |
| 협동연구기관                                                                                                                                                                                                            | -                                                                                              | 연구책임자   | -                                                                                                    |                                                                       |
| 총 연구기간                                                                                                                                                                                                            | 2019 년 04 월 15 일 ~ 2020 년 12 월 31 일 ( 21개월)                                                    |         |                                                                                                      |                                                                       |
| 총 연구개발비                                                                                                                                                                                                           | 정부출연금                                                                                          | 민간부담금   | 합계                                                                                                   |                                                                       |
| (단위 : 천원)                                                                                                                                                                                                         | 370,000                                                                                        |         | 370,000                                                                                              |                                                                       |
| 공동연구기관                                                                                                                                                                                                            | -                                                                                              |         |                                                                                                      |                                                                       |
| 참 여 기 업                                                                                                                                                                                                           | -                                                                                              |         |                                                                                                      |                                                                       |
| 구 분                                                                                                                                                                                                               | 성과활용책임자                                                                                        |         | 성과활용실무자                                                                                              |                                                                       |
| 성 명                                                                                                                                                                                                               | 김장호                                                                                            |         | 박준희                                                                                                  |                                                                       |
| 소속기관/부서                                                                                                                                                                                                           | 연세대학교 산학협력단                                                                                    |         | 연세대학교 / 건설환경공학과                                                                                      |                                                                       |
| E-mail                                                                                                                                                                                                            | jjhkim@yonsei.ac.kr                                                                            |         | sdc03208@yonsei.ac.kr                                                                                |                                                                       |
| 연락처                                                                                                                                                                                                               | 010-5494-5802                                                                                  |         | 010-7578-4896                                                                                        |                                                                       |
| <p>국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제35조(연구개발결과의 보고) 제2항에<br/>의거 연구개발결과 활용계획서를 제출합니다.</p> <p>붙임 1. 성과총람 원고 1부.</p> <p style="text-align: center;">2021년      03월      05일</p> <p>주관연구기관장 : 연세대학교 산학협력단 (대표자)      이충용 (직인)</p> |                                                                                                |         |                                                                                                      |                                                                       |



# 국토교통연구개발사업 성과총람 원고

|         |                |
|---------|----------------|
| 주관연구기관명 | 연세대학교<br>산학협력단 |
| 연구책임자명  | 김장호            |

## 연구개발 배경 및 목표

### 1. 연구배경

- 조적식 구조물은 건설이 용이하면서도 충분한 강성을 가지고 있기 때문에 세계적으로 저층 구조물에 많이 사용되어 왔으나, 내진성능에 매우 취약하다는 단점이 있음.
- 현재 내진설계가 의무화된 전국의 시설물 107만 8천 72곳 중 81.6%에 달하는 87만 9천 771곳이 내진설계가 이루어지지 않은 것으로 나타남.
- 조적식 구조물은 전 세계적으로 중·저층 주거 및 상업시설, 종교용 건축물, 학교, 관공서 등의 용도로 폭넓게 사용되고 있으나, 지진과 같은 횡력 발생 시 접착력을 잃거나 미끄러지면서 파괴될 수 있어 수많은 인명피해가 예상됨.

### 2. 연구목표

- 조적식 구조물에 적용가능한 보수·보강용 폴리우레아의 최적 배합비 도출
- 보수·보강용 폴리우레아 재료성능 평가를 통한 물성 검증
- 조적식 구조물 벽체 축소부재의 휨강도 및 진동대 실험을 통한 내진성능 검증
- 구조물의 테스트 베드(Test-bed) 구축을 통한 현장 적용성 평가

## 연구개발 내용 및 결과물

## 1. 주요 연구내용

(1) 고연성 및 고인성 효과를 나타내는 내진보강재료를 개발하기 위하여 보수·보강용 폴리우레아의 최적배합비를 도출

- 인장강도 및 신장률
- 부착성능
- shore 경도

(2) 개발된 폴리우레아 재료를 도포한 후 수직 및 수평 강도시험

- 압축강도
- 휨강도
- 사인장 강도

(3) 개발된 폴리우레아 재료의 내구성 시험

- 산환경 노출시험
- 자외선 노출시험
- 탄산화 노출시험
- 동결융해 저항성시험

(4) 노후화된 구조물의 현장가능성 검토

- 빠른 시공기간의 증명을 위한 현장시험

(5) 진동대 시험을 통한 내진성능 실험

- 0.1g - 1.0g 강도의 내진성능 실험 진행

## 2. 연구개발 결과

(1) 고연성 및 고인성 효과를 나타내는 내진보강재료를 개발하기 위하여 보수·보강용 폴리우레아의 최적배합비를 도출

### (a) 인장강도 및 신장률

NCO 18.00% 조건에서 인장강도 28MPa 신장률 460%의 결과를 얻음. (공인성적서 첨부)

### (b) 부착성능

모든 조건에서 2.5~3.0MPa 이상 나타났지만 기반층 파괴로 정확한 측정값 측정불가함.

### (c) shore 경도

이소시아네이트 종류와 NCO(%) 변화에 따른 경도시험 결과 NCO 18.00%일 때 HS69의 결과를 얻음.



(a) 인장강도 및 신장률



(b) 부착성능



(c) shore 경도

(2) 개발된 폴리우레아 재료를 도포한 후 수직 및 수평 강도시험

### (a) 압축강도

압축강도의 증진효과를 확인하지 못했지만 급격한 구조물의 붕괴 방지효과를 확인함.

### (b) 휨강도

폴리우레아로 보강 시 무보강 대비 약 17%의 강도증진 효과를 확인함. (공인성적서 첨부)

### (c) 사인장 강도

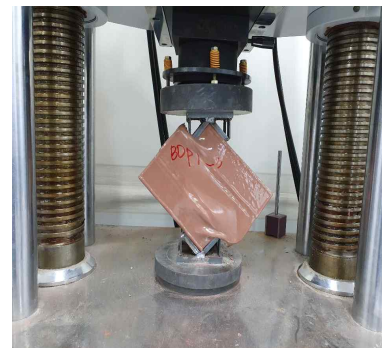
폴리우레아로 보강 시 무보강 대비 약 16.5%의 강도증진 효과를 확인함.



(a) 압축강도



(b) 휨강도



(c) 사인장 강도

### **(3) 개발된 폴리우레아 재료의 내구성 시험**

#### **(a) 산환경 노출시험**

황산 2% 침지 후 인장강도는 23MPa로 산환경 노출 전 인장강도비는 약0.83이고, 신장률은 457%로 산환경 노출전 신장률비는 약 1.0임. KS F 4922기준 인장강도 비는 0.8%이상, 신장률의 경우 250%이하를 모두 만족하였음. (공인성적서 첨부)

#### **(b) 자외선 노출시험**

자외선 노출 1000시간 2000시간 경과 후 인장강도는 17, 18MPa이고 신장률은 321, 316%로 두 시편의 차이는 크지 않았음. 또한 KS F 4922 기준인 인장강도 16MPa 및 신장률 250%로 KS 규격을 만족하였음. (공인성적서 첨부)

#### **(c) 탄산화 노출시험**

폴리우레아 무도포 시편의 탄산화 속도 계수는 8.25, 폴리우레아를 도포한 시편의 탄산화 속도 계수는 5.5로 폴리우레아를 도포한 시편의 경우 탄산화 침투에 대한 저항능력을 가지고 있는 것을 확인함. (공인성적서 첨부)

#### **(d) 동결융해 저항성시험**

폴리우레아 무도포 시편의 상대 동탄성계수의 평균은 74.4% 였으며, 폴리우레아를 도포한 시편의 경우 89.6%의 결과를 확인하였음. 이는 무도포 시편대비 20.4%의 동결융해에 대한 저항능력이 증가하는 효과를 확인함.



(a) 산환경 노출시험



(b) 자외선 노출시험



(c) 탄산화 노출시험



(d) 동결융해 저항성시험

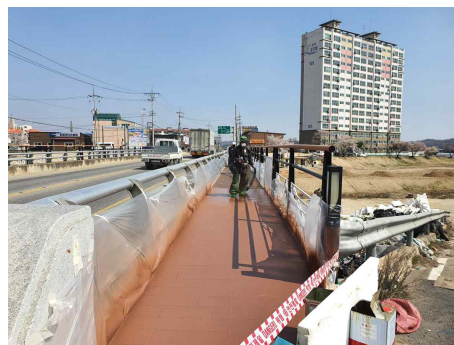
#### (4) 노후화된 구조물의 현장가능성 검토

빠른 시공기간의 증명을 위한 현장시험

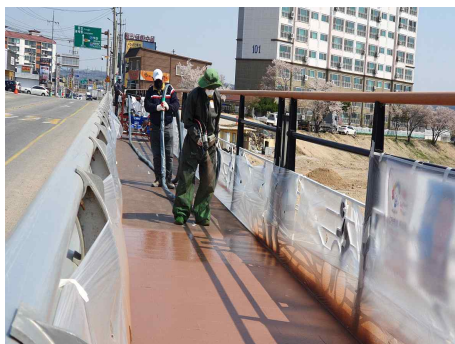
본 연구를 통해 개발된 폴리우레아의 적용 가능성과 신속한 보강 가능성을 검증하기 위해 진천군 이월면 교량 인도교의 보수 및 보강을 실시하였음. 또한 선행 연구과정 중 대표적인 조적식 구조물인 학교의 보수 보강을 진행 과정을 증빙하였음.



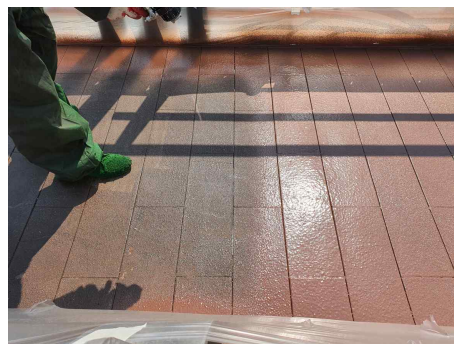
(a) 폴리우레아 도포 이전



(b) 폴리우레아 도포과정



(c) 폴리우레아 도포과정



(d) 폴리우레아 도포과정



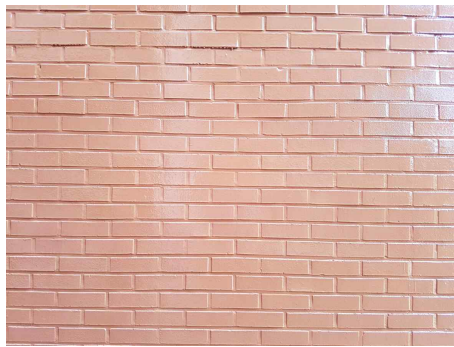
(a) 도포 전 전경



(b) 도포 전 벽면



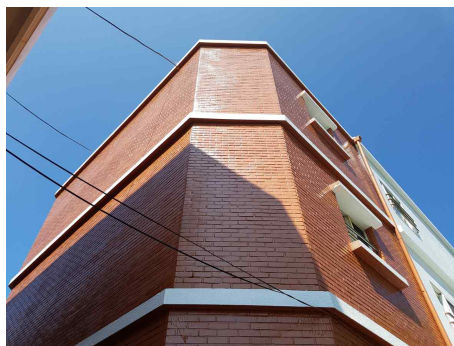
(c) 도포 후 전경



(d) 도포 후 벽면



(e) 도포 후 전경

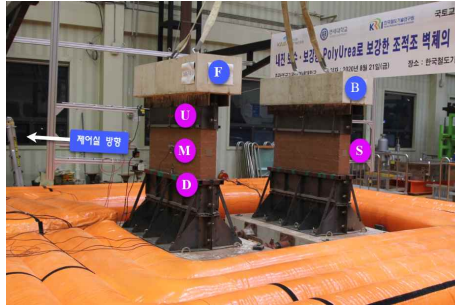


(f) 도포 후 전경

##### (5) 진동대 시험을 통한 내진성능 실험

0.1g - 1.0g 강도의 내진성능 실험 진행

가진파형은 1940년에 미국 캘리포니아 남동쪽 멕시코와 국경지역의 Imperial Valley에서 발생한 El-Centro 지진파를 이용하였음. 아래 지진파를 기준으로 최대 지반 가속도 (Peak ground acceleration, PGA)를 0.1g부터 1.0g 까지 Scale을 조정하여 시험체가 파손될 때까지 시험을 진행함. 시험결과 시험체별 입력가속도와 출력가속도의 비교를 실시하였고, 파괴시 주요측정치를 정리하였음. 또한 진동 시험결과 생긴 균열발생 패턴을 사진 및 개략도를 비교하였음. 이에 대한 실험 결과는 동영상으로 촬영하여 증빙하였음.



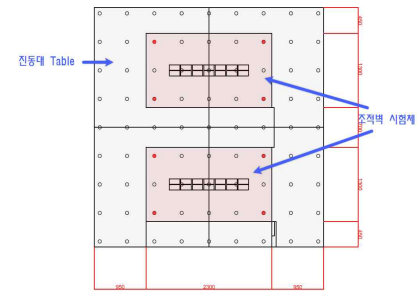
(a) 2개 시험체 동시 설치



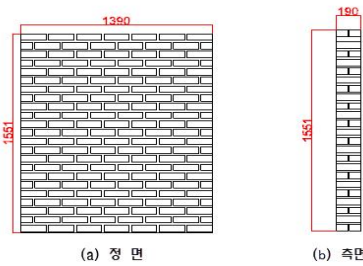
(b) Dummy Mass Setting



(c) Reference Frame 설치



(d) 시험체 설치 평면도



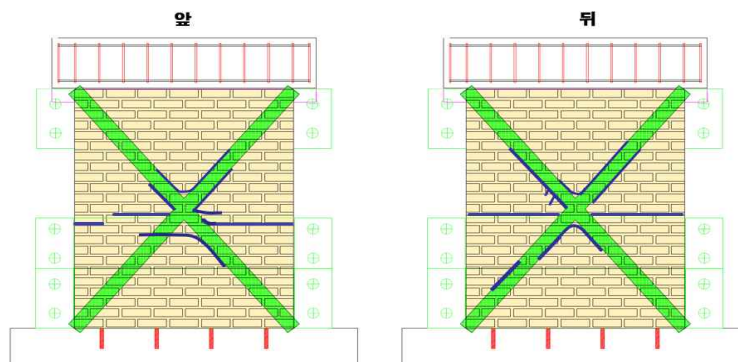
(e) 벽체 제원



(f) 진동대 실험



(g) 벽체 파괴양상



(h) 파괴양상 개략도

### 3. 연구개발 성과

#### (1) 공공적 성과

- 지진 발생 시 국민의 생명보호와 재산, 사회적 혼란 방지
- 기존 비내진구조물의 구조안전성 확보를 통한 사회적 안전성 증대
- 진보강분야 전문인력 양성 및 후속 연구의 기초자료로 활용 가능

#### (2) 기술적 성과

- 조적식 구조물에 적용·가능한 보수·보강용 폴리우레아 내진 보강재 국내 최초 개발
- 신재료 및 보수·보강 시스템 개발로 인한 내진성능 향상
- 노후화된 조적식 구조물에 적용 가능한 고부가가치 보강재료 핵심 기술 확보

#### (3) 학술적 성과

- 학술발표회 : 건 비SCI 논문 : 2편 달성 완료
- 비 SCI논문 : 2편(사후 1년차), SCI 논문 : 3편 추가 달성 예정(사후1-2년차)
- 시제품 : 1건, 현장검증 1건 달성 완료

#### (4) 경제적 성과

- 지진에 의한 구조물 안전성 확보와 저비용의 유지·보수 효과 기대
- 급속시공이 가능하여 약 20% 이상의 공기단축 효과
- 구조내진성능 보강효과로 인한 연간 약 10억 이상의 보수비용 절약 가능

## 활용계획 및 기대효과

### 1. 활용계획

- 80년대 이전에 지어진 대부분의 조적식 건물의 내진보강에 적용 가능할 것으로 예상됨.
- 조적식 구조물 뿐만 아니라 신설 구조물 및 필로티형 구조물 등 각종 토목 및 건축구조물 보수·보강에 활용할 수 있으며, 적은 공사비용으로 경제성 및 안전성 확보에 기여할 수 있을 것으로 예상됨

### 2. 기대효과

- 내진보강분야 전문인력 양성 및 후속 연구의 기초자료로 활용 가능
- 신재료 및 보수·보강 시스템 개발로 인한 내진성능 향상
- 조적식 구조물 적용을 통한 고분자 폴리머계 보강재료의 응용분야 다양화
- 건축, 토목분야의 내진성능 향상을 위한 투자효과 기대함

### 3. 선진 기술수준과의 기술격차 해소

- 본 연구에서 개발된 폴리우레아는 10% 이상의 변형율이 발생하더라도 파단되지 않고 연성을 통해 보강재가 부담하는 힘을 변형률에 따라 증가시킬 수 있는 장점이 있음.
- 조적식 구조물에 적용가능토록 최적의 재료배합비를 도출하여 내력 증진과 연성, 에너지 소산 능력 증가효과를 동시에 확보할 수 있는 보수·보강재료를 개발.

## 참고문헌

기상청 2018 지진연보, 발간등록번호, 11-1360000-000104-10

오상근, 김수련, 이성일 (2002), 초속경화 폴리우레아수지 도막방수재의 방수, 방식 성능평가에 관한 연구, *한국건축시공학회지* Vol2, No12 pp. 1-8.

이경훈, 김희철 (1998), 지진하중에 의한 저층 조적조 건물의 해석모델 및 거동평가, *대한건축학회 논문집*, Vol18, No2 pp. 87-92.

김홍범, 이준석, 한상환 (2001), 비보강 조적조 기준들의 강도식 비교, *한국지진공학회*, Vol15, No1 pp. 312-319.

이한선, 유인진 (2001), 호주의 비보강 조적조에 대한 내진기준, *한국콘크리트학회 봄 학술대회 논문집*, Vol13, No1 pp. 815-820.

정병주, 김윤일 (1998), 조적벽의 전단내력과 보수효과에 관한 연구, *대한건축학회 논문집*, Vol14, No1 pp. 307-318.

하주형, 이나현, 김성배, 최종권, 김장호 (2010), 철근콘크리트 패널의 FRP 보강에 의한 방폭 성능 향상에 관한 실험 연구, *콘크리트학회 논문집*, Vol22, No1 pp. 93-102.

P.A. Buchan, J.F.Chen (2007), Blast resistance of FRP composites and polymer strengthened concrete and masonry structures - A state-of-the-art review, *Composites Part B: Engineering*, Volume 38, Issues 5-6, pp.509-522

조철민, 김장호, 이두성, 김태균 (2017), 구조물 내진 보강용 폴리우레아의 내구 성능 평가, *한국구조물진단유지관리공학회 논문집*, Vol.21, No3, pp. 1-8.

조철민, 최지훈, 이승훈, 김태균, 김장호 (2017), 구조물 내진 보강용 폴리우레아의 재료 성능 평가, *콘크리트학회 논문집* Vol.29, No.2 pp. 131-139.

양승남 (2008), 지방족과 방향족 이소시아네이트를 이용한 폴리우레탄 비드의 합성 및 그

물성에 관한 연구, 성균관대학교 박사학위논문.

이재화 (2013), *경화제 무침가 비스페놀 F형 에폭시 수지를 이용한 폴리머 시멘트 모르타르의 특성*, 협성대학교 석사학위논문.

조용인 (2017), *콘크리트 구조물 보수용 폴리우레아-에폭시 레진 모르타르의 개발*, 충북대학교 박사학위논문

이광영 (2016), *폴리우레아 RC슬래브의 부착성능 향상을 위한 주입식 Dowel 공법*, 연세대학교 석사학위논문

국가기술표준원 (1967) “KS F 2405, 콘크리트의 압축 강도 시험 방법“

국가기술표준원 (1968) “KS F 2408, 콘크리트의 휨 강도 시험 방법“

국가기술표준원 (2006) “KS M ISO 7619-1, 가황 고무 및 열가소성 고무-압입 경도 측정방법 “

국가기술표준원 (2005) “KS F 4922, 폴리우레아 수지 도막 방수재“

국가기술표준원 (1977) “KS F 2274, 건축용 합성 수지재의 촉진 노출 시험방법“

국가기술표준원 (2005) “KS F 2584, 콘크리트의 촉진 탄산화 시험방법“

국가기술표준원 (1975) “KS F 2456, 급속 동결 융해에 대한 콘크리트 저항 시험방법“

국가기술표준원 (2005) “KS F 4923, 콘크리트 구조물 보수용 에폭시 수지“

국가기술표준원 (2002) “KS F 4042, 콘크리트 구조물 보수용 폴리머 시멘트 모르타르“

이윤구 (2010), *조적식 구조물의 부분 매입식 격자철근 보강기법의 내진 성능 평가*, 연세대학교 석사학위논문

조동호, 김진봉, 김태완, 은희창 (2019), 복합폴리우레아를 도포한 콘크리트 구조물의 구조성능 개선에 관한 실험적 연구, *대한건축학회 논문집*, 구조계, Vol.35, No1, pp. 21-28

김영석, 서치호 (1990), 조적조 벽돌 벽체의 균열 형태 분석에 관한 연구, *대한건축학회 학술발표대회 논문집*, 구조계, Vol.10, No2, pp. 631-634

권기혁, 최성모, 이수철, 조상민 (2004), 지진피해를 입은 조적조 건축물의 유리섬유보강에 따른 내진성능, *한국구조물진단유지관리공학회 논문집*, Vol.8, No1, pp. 231-237

김윤희, 최은규, 박진상, 김수연, 송제영, 오상근 (2013), 콘크리트 구조물에 적용되는 초속경 분사시공 도막 방수재료의 내화학 특성 분석 -폴리우레아, 폴리우레탄, 우레아, 폴리우레탄수지계 방수재료를 중심으로-, *대한건축시공학회 논문집*, 구조계, Vol.29, No12, pp. 113-120

이성복, 고진수, 원의재, 이오성 (2002), *콘크리트 구조물의 균열보수재료 및 공법의 선정방법 연구*, 대한주택공사 주택도시 연구원

박병철, 이정환, 김혜원, 김진선 (2009), 조적조 건축물의 내진보강기법 실태분석에 관한 연구, 국립방재교육연구원 방재연구소

한국도로공사 (1997), 구조물 보수·보강 매뉴얼, 한국도로공사

박정천, 이상원, 김성배, 김장호 (2011), 경질형 폴리우레아로 보강된 RC 슬래브의 성능 평가, *대한토목학회 논문집*, Vol.31, No.6, pp.457-464

김성배, 김장호, 최홍식, 허권 (2010), RC 구조물 보강을 위한 고성능 폴리우레아의 개발 및 적용성 평가, *대한토목학회 논문집*, Vol.30, No. 2A, pp.169-176

한승철, 양준모, 윤영수 (2008), 분사식 FRP에 의한 구조물의 보강 성능 및 반발률 평가, *한국구조물진단학회 논문집*, Vol12, No. 1, pp. 193-202

고경택, 한민철, 이병덕. (2015). 동결융해에 대한 내구성 설계. 콘크리트학회지, 27(5), 30-35.

권영진, 김재환, 한병찬, 백용관, (2006), 동해를 고려한 콘크리트 구조물의 내구성능 설계, 한국콘크리트 학회지 Vol18, No.4. pp. 41-48.

한천구. (2013). 콘크리트 표면층 박리 동해 이 일을 어찌할고?. 콘크리트학회지, 25(5), 46-48.

차철준, 허춘근, 정철수, (2014), 공용중인 교량에서 콘크리트 동결융해에 의한 열화현상 및 보수방안, 한국 시설안전공단 시설안전지, Vol.42, pp.71-80..

한민철, 한천구, (2002), 기온과 콘크리트, 기문당.

대건기술 주식회사. (2014), 콘크리트 보온단열양생용 거푸집, 한중 콘크리트 기술강좌.

노승철 (2012), 동결융해 파손사례 분석을 통한 콘크리트 포장의 품질관리 개선방안, 국내석사학위논문 中央大學校 建設大學院,

김두열, (2012), 옥상 누름 콘크리트 동결융해 저항성 개선을 위한 실험적 연구, 국내석사학위논문 단국대학교 부동산·건설대학원.

안지환, (2017), 콘크리트 동결융해 저항 공극구조 매개변수 도출 및 공용성 분석, 국내박사학위논문 中央大學校 大學院.

박재오, 최우진, 김광제, 이재홍, & 신재섭. (2018). 사슬 연장제의 에폭시기 함량에 의해 개질된 Poly (lactic acid) 의 유변 물성. 폴리머, 42(3), 394-399.

김현일, (2020), 조적식 구조물의 보수·보강을 위한 폴리우레아 재료 개발 및 성능 평가의 관한 연구, 국내석사학위논문 연세대학교 공학대학원.

김성래, (2015), 폴리우레아를 함유하는 불소계 공중합체의 합성 및 오존 저항 특성.“ 국내

박사학위논문 충북대학교.

박재철 (2020), 혼합 폴리에테르 아민을 이용한 수분산 폴리우레아의 합성과 콘크리트 바닥 용 표면 마감재로의 적용에 관한 연구, 국내박사학위논문 창원대학교.

박주남 (2016), 비보강 조적식 구조의 형상에 따른 내진성능 평가 해석, 한국지진공학회 논문집, Vol. 20, No. 5, p277-283

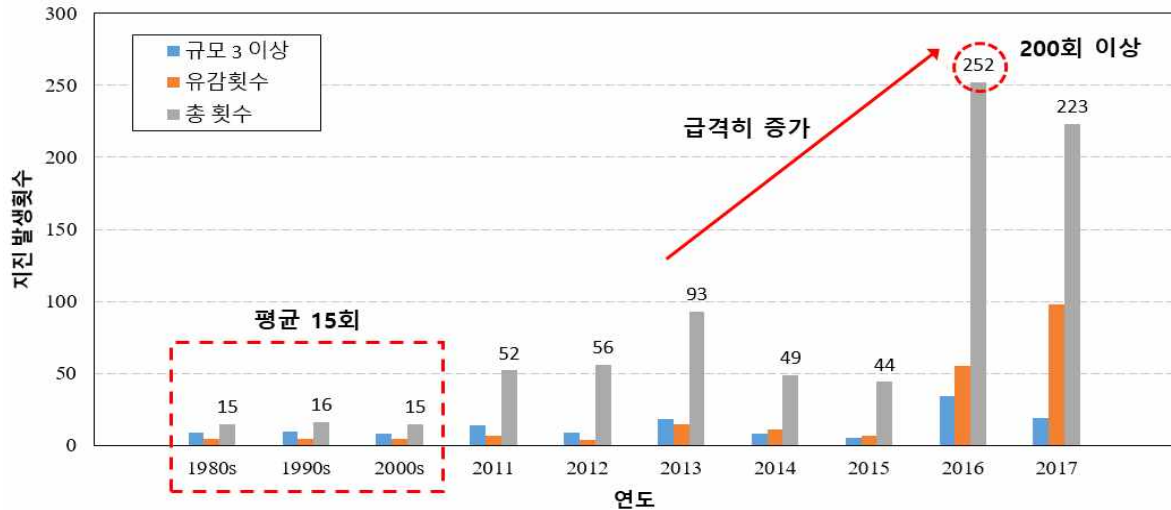
Marco Valente, Gabriele Milani (2018), Damage assessment and partial failure mechanisms activation of historical masonry churches under seismic actions: Three case studies in Mantua, Engineering Failure Analysis, Vol.92, pp. 495-519

Ahmad Basshofi Habieb, Marco Valente, Gabriele Milani (2019), Hybrid seismic base isolation of a historical masonry church using unbonded fiber reinforced elastomeric isolators and shape memory alloy wires, Engineering Structures, Vol. 196

G. Andreotti, F. Graziotti, G. Magenes (2018), Detailed micro-modelling of the direct shear tests of brick masonry specimens: The role of dilatancy, Engineering Structures, Vol. 168, pp. 929-949

## 발표자료

### ○ 연구개발 필요성



연도별 지진발생추이(기상청, 2017)

○ 2017년 기상청 자료에 따르면 지진(규모 2.0 이상)발생횟수는 총 252회로 계기관측을 시작한 1978년 이후 가장 많이 발생하였으며, 디지털 방식의 지진관측을 시작한 1999년부터 2017년까지의 지진발생 연평균 횟수인 67.6회보다 약 4배 더 많이 발생한 것으로 나타남.

○ 또한, 조적식 구조물은 전 세계적으로 중·저층 주거 및 상업시설, 종교용 건축물, 학교, 관공서 등의 용도로 폭넓게 사용되고 있으나, 지진과 같은 횡력 발생 시 접착력을 잃거나 미끄러지면서 파괴될 수 있어 수많은 인명피해가 예상됨.

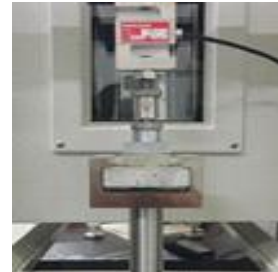
○ 앞서 언급한 바와 같이 노후화된 조적조 구조물은 내진설계반영이 부족하여 강도저하와 환경문제로 인한 내구성능 저하로 인해 구조적으로 보수·보강 뿐 아니라 안전성과 사용성을 동시에 확보할 수 있는 획기적인 구조물 보수·보강 및 내진보강공법이 반드시 필요한 실정임.

○ 제안하고자 하는 폴리우레아를 이용한 조적식 구조물의 내진성능 보강공법의 경우, 건물에 사람이 주거하는 동안에도 신속한 보수·보강시공이 가능하기 때문에, 기존 건물을 폐쇄하지 않아도 되는 점이 가장 큰 장점이라 할 수 있으며, 이를 통해 시간적, 경제적으로 효율적 시공이 가능하고, 무엇보다도 공사비 절감효과를 가져올 수 있음.

○ 조적식 구조물에 적용 가능한 보수·보강용 폴리우레아의 최적 배합비 도출 및 재료성능 평가를 통한 물성검증 (본문 p. 27-28)



(a) 폴리우레아 시편



(b) 부착강도 시험



(c) 경도측정 시험



(d) 인장강도 및 신장률 시험

|                | NCO%   | mole fraction | Gel time | Tack Free Time | 인장강도 (MPa) | 경도 (Shore D) | 신장율(%) |
|----------------|--------|---------------|----------|----------------|------------|--------------|--------|
| MODIFIED MDI.  | 13%    | 1             | 40       | 200            | 15         | 52           | 300    |
|                | 15.50% | 1             | 25       | 90             | 18         | 60           | 250    |
|                | 18.00% | 1             | 10       | 25             | 21         | 65           | 170    |
| POLYMERIC MDI. | 13%    | 1             | 50       | 330            | 18         | 60           | 150    |
|                | 15.50% | 1             | 46       | 220            | 22         | 63           | 120    |
|                | 18.00% | 1             | 35       | 150            | 25         | 66           | 100    |
| Monomeric MDI  | 13%    | 1             | 22       | 50             | 21         | 63           | 320    |
|                | 15.50% | 1             | 20       | 45             | 25         | 66           | 280    |
|                | 18.00% | 1             | 20       | 45             | 28         | 69           | 250    |

### 폴리우레아 재료별 특성

|               | 인장강도 | 신장률 |
|---------------|------|-----|
| Monomeric MDI | 상    | 상   |
| Modified MDI  | 하    | 중   |
| Polymeric MDI | 중    | 하   |

- 세가지 배합중 가장 성능이 좋은 Monomeric MDI 배합을 최종배합으로 선택함.
- 목표치 : 인장강도 : 20MPa 신장률 : 150%
- 자체시험 결과 : Monomeric MDI 배합의 인장강도 : 28MPa 신장률 : 250%
- 공인시험 결과 : 인장강도 : 28MPa 신장률 : 460% (공인성적서 증빙)

○ 개발한 폴리우레아의 내구성능 평가 진행 (본문 p. 54-64)



(a) 산환경 노출시험(p. 54-56)



(b) 자외선 노출시험(p. 56-58)



(c) 탄산화 노출시험(p. 59-61)



(d) 동결융해 저항성시험(p. 62-64)

- 산(acid) 환경 노출 시험** → KS F 4922에 준하여 실시하며, 황산 등급품 2%, 용액을 선정하여 측정함.
- 자외선 노출 시험** → KS F 2274에 준하여 실시하며, 제논-아크 시험기 챔버에 시편을 각각 1,000시간, 2,000시간 노출시켜 재료성능을 평가함.
- 탄산화 노출 시험** → KS F 2584에 준하여 실시하며, 탄산화 노출 챔버에서 측정함. 보수·보강용 PU 도포 후 4주 노출 된 공시체의 탄산화 깊이를 측정함.
- 동결융해 시험** → KS F 2456에 준하여 실시하며, 동결융해 챔버에서 시험을 진행함.

**산환경 노출 전·후 인장강도 및 신장률**

|           | Monomeric MDI | 황산 2% 침지 | 비          |
|-----------|---------------|----------|------------|
| 인장강도(MPa) | 28            | 23       | 1.0 : 0.83 |
| 신장률(%)    | 460           | 457      | 1.0 : 1.0  |

**KS F 4922 기준 (자외선)**  
**황산 규정품 2% 168시간(7일) 노출**  
**인장강도비 80%이상 150%이하 :**  
**만족**  
**신장률 250% 이상 : 만족**

(1) KS F 2274:2018 (자외선 노출), KS F 4922:2007 (인장강도 및 신장률)

| 시험항목                        | 단위  | 시험방법 | 시험결과 | 비고                        |
|-----------------------------|-----|------|------|---------------------------|
| 내후성(Xenon, 1000h) 후 인장강도    | MPa | (1)  | 17   | (23±2)°C,<br>(50±5)% R.H. |
| 내후성(Xenon, 1000h) 후 파단시 신장률 | %   | (1)  | 321  | (23±2)°C,<br>(50±5)% R.H. |
| 내후성(Xenon, 2000h) 후 인장강도    | MPa | (1)  | 18   | (23±2)°C,<br>(50±5)% R.H. |
| 내후성(Xenon, 2000h) 후 파단시 신장률 | %   | (1)  | 316  | (23±2)°C,<br>(50±5)% R.H. |

KS F 2274 기준 (자외선)  
KS 기준 250시간보다 4배, 8배 노출

16 Mpa 이상 : **만족**

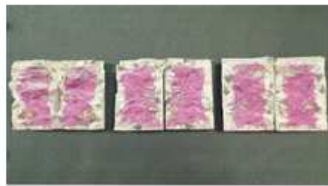
250% 이상 : **만족**

1000시간 노출

강도저하 : 40%, 신장률 저하: 31%

2000시간 노출

강도저하 : 36%, 신장률 저하: 32%



무도포 시험편



Monomeric MDI



MODIFIED MDI



POLYMERIC MDI

탄산화 깊이의 평균

Non PU : 16.5mm

Monomeric MDI : 11.0mm

Modified MDI : 9.5mm

Polymeric MDI : 12.0mm

폴리우레아를 도포하지 않은 시험  
체 대비 33.3%, 42.4%, 27.2%  
탄산화 침투깊이의 감소 확인

| Pc (%)    | Non PU | Monomeric MDI | Modified MDI | Polymeric MDI |
|-----------|--------|---------------|--------------|---------------|
| 100 cycle | 92,0   | 97,2          | 96,4         | 96,9          |
| 200 cycle | 81,6   | 93,9          | 94,2         | 93,8          |
| 300 cycle | 74,4   | 89,6          | 90,8         | 90,4          |

상대 등탄성계수의 평균

Non PU : 74.4%

Monomeric MDI : 89.6%

Modified MDI : 90.8%

Polymeric MDI : 90.4%

폴리우레아를 도포하지 않은 시험  
체 대비 20.4%, 22.0%, 21.5%의  
저항능력 증가효과

## 내구성 시험 결과

탄산화 시험 : Polymeric MDI < Monomeric MDI < Modified MDI

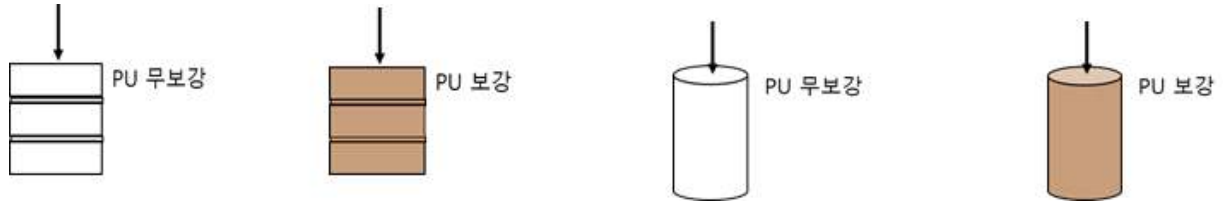
동결융해 시험 : Monomeric MDI < Polymeric MDI < Modified MDI

- 내구성 시험 결과 Monomeric MDI 배합의 성능이 가장 우수한 것은 아니지만 차이가 크지 않음.

- 내구성능의 차이 대비 기본 물성이 우수한 Monomeric MDI 배합이 보수·보강용 폴리우레아로 적합하다고 판단됨

## ○ 폴리우레아 재료 보강성능 검증

### - 폴리우레아 보강 실험체 압축실험 (본문 p. 30-41)



콘크리트 압축강도 시험결과 (평균) (p. 30-31)

| 시험편 번호        | 저강도<br>(MPa) | 고강도<br>(MPa) |
|---------------|--------------|--------------|
| 무도포           | 10.2         | 32.0         |
| Monomeric MDI | 14.0         | 32.5         |
| Modified MDI  | 13.2         | 32.5         |
| Polymeric MDI | 14.0         | 33.5         |

프리즘 압축강도 시험결과 (평균) (p. 31-36)

| 시험편 번호        | 최대하중<br>(kN) | 최대변위<br>(mm) | 강도<br>(MPa) |
|---------------|--------------|--------------|-------------|
| 무도포           | 326.5        | 3.1          | 19.1        |
| Monomeric MDI | 355.9        | 2.57         | 20.8        |
| Modified MDI  | 256.5        | 2.94         | 15.0        |
| Polymeric MDI | 422.3        | 3.25         | 24.7        |

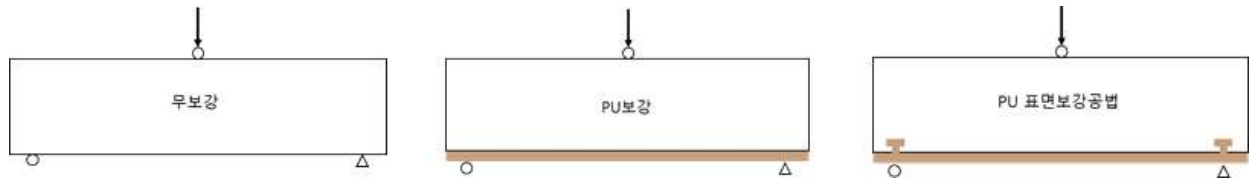
사인장강도 시험결과 (평균) (p. 37-41)

| 시험편 번호        | 최대하중<br>(kN) | 최대변위<br>(mm) | 강도<br>(MPa) |
|---------------|--------------|--------------|-------------|
| 무도포           | 55.8         | 1.23         | 1.09        |
| Monomeric MDI | 64.6         | 37.68        | 1.27        |
| Modified MDI  | 66.4         | 46.22        | 1.3         |
| Polymeric MDI | 75.07        | 46.7         | 1.47        |

시험체별 압축강도의 편차를 고려하였을 때 보강효과가 미미한 것으로 판단됨.

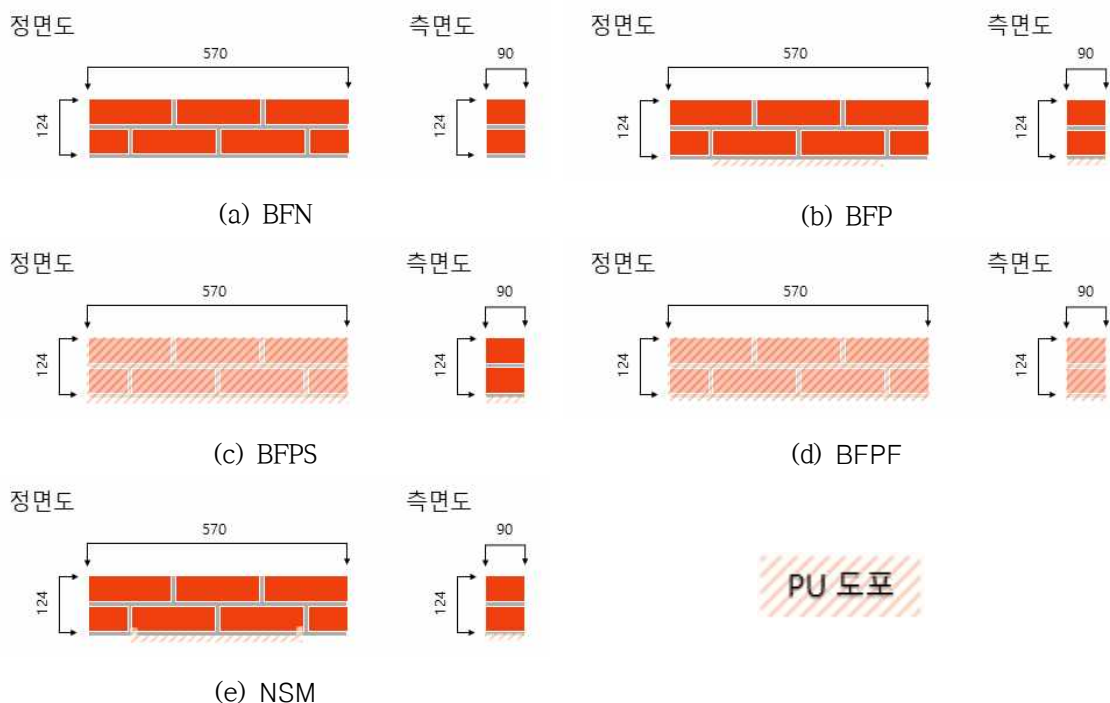
폴리우레아를 도포한 시험체는 콘크리트 압축강도와 동일하게 부정형으로 파괴 팽창을 일으키게 되고 편심에 의해 내부의 벽돌과 모르타르가 파괴되는 형상을 보였음. 하중 작용 시 취성 파괴가 발생하는 조적식 구조물의 단점을 폴리우레아 보수보강으로 보완이 충분히 가능함을 확인하였음.

- 폴리우레아 보강 실험체 휨강도 측정 (본문 p. 42-53)



- 무보강 콘크리트와 이를 일반적인 방법으로 폴리우레아 도포했을 경우 휨강도 비교 결과 무보강 : 2.3MPa 일반 폴리우레아 보강 : 2.76MPa

- 표면매립 보강공법으로 콘크리트 휨부재를 보강하였을 경우 3.36MPa 강도를 발휘하여 무보강 대비 31% 증가, 일반보강 대비 18%증가 효과를 확인하였음.



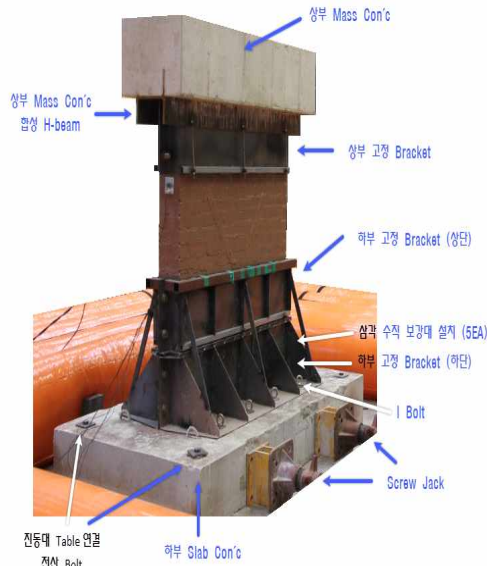
시험체별 모식도

내진보강용 폴리우레아의 수평 휨강도 보강성능을 평가 결과 (본문 p. 70-76)

시험체의 경우 폴리우레아 보강 처리한 면을 기준으로 무보강 시험체는 BFN, 하부 보강 처리한 경우(BFP), 하부와 균열 전파가 발생하는 면 보강 처리한 경우(BFPS), 가력면을 제외한 모든 면 보강 처리한 경우(BFPP), NSM 공법을 하부 면에 적용한 경우(NSM)로 명명하였음.

[무보강 : 4.15kN] < [NSM : 5.78kN] < [BFP : 6.13kN] < [BFPS : 6.91kN] < [BFPP : 8.40kN] 순으로 최대하중 증진효과를 확인함.

○ 조적식 벽체 진동대 시험 (벽체 치수, 본문 pp. 77)



상부 Mass Con' c

|                            |               |                                                                                                                          |
|----------------------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 사 양<br>(Specifica<br>tion) | 제 원<br>(mm)   | 1,750(L) × 540 (W) ×<br>370 (H)                                                                                          |
|                            | 중 량<br>(kg)   | 1,000                                                                                                                    |
|                            | 조적벽체와<br>연결방법 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Con' c에 H Beam (Flang t=12, Web h=220) 절반 매입 합성</li> <li>상부 고정 Bracket</li> </ul> |

하부 Slab Con' c

|                            |               |                                                                                          |
|----------------------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 사 양<br>(Specifica<br>tion) | 제 원<br>(mm)   | 2,300(L) × 1,300 (W) ×<br>300 (H)                                                        |
|                            | 중 량<br>(kg)   | 3,200                                                                                    |
|                            | 조적벽체와<br>연결방법 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Mortar 줄눈 10 mm</li> <li>하부 고정 Bracket</li> </ul> |

시험체 제원

- El Centro (1940) 지진파를 기준으로 최대 지반 가속도 (Peak ground acceleration, PGA)를 0.1g부터 1.0g까지 Scale을 조정하여 시험체가 파괴될 때까지 시험을 진행함.
- 시험 데이터 계측을 위해 Lazer 변위계 4개, 가속도 센서 4개를 시험체 별로 설치하였음.



센서 위치



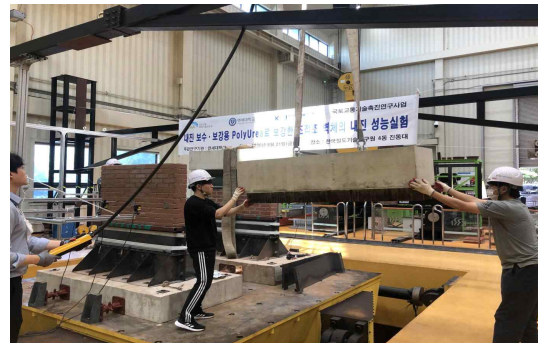
1. 시험체 조적



2. PU 도포



3. 시험체 이동



4. 벽체 및 상재하중 설치



5. 진동대 시험 전



6. 진동대 시험 후



7. 벽체 해체



8. 균열도

조적식 벽체 진동대 시험 개요

조적벽체 보강 방법 및 파괴 공칭 가속도 (시험체 Type 별 사진(본문 pp.90))

| 번호 | 시험체명     | 보 강 방 법               | 시 험 방 법                                                                                                    | 파괴 공칭 가<br>속도<br>(g, PGA) |
|----|----------|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1  | MWN-1    | 무보강                   | ■ Wave<br>• El-Centro<br>earthquake<br>■ Max Amp.<br>• 0.1g ~ 1.0g<br>■ Direction<br>• 1 axes,<br>in-plane | 0.4                       |
| 2  | MWN-2    | 무보강                   |                                                                                                            | 0.5                       |
| 3  | MWN-3    | 무보강                   |                                                                                                            | 0.4                       |
| 4  | MWP2-1   | Polyurea 2mm 도포       |                                                                                                            | 0.7                       |
| 5  | MWP2-2   | Polyurea 2mm 도포       |                                                                                                            | 0.8                       |
| 6  | MWP4-1   | Polyurea 4mm 도포       |                                                                                                            | 0.6                       |
| 7  | MWP4-2   | Polyurea 4mm 도포       |                                                                                                            | 0.7                       |
| 8  | MWF5-1   | GFRP 50mm부착           |                                                                                                            | 0.6                       |
| 9  | MWF5-2   | GFRP 50mm부착           |                                                                                                            | 0.5                       |
| 10 | MWPF5-1  | GFRP 50mm부착 PU 2mm 도포 |                                                                                                            | 1.0                       |
| 11 | MWPF5-2  | GFRP 50mm부착 PU 2mm 도포 |                                                                                                            | 0.9                       |
| 12 | MWPF10-1 | GFRP 50mm부착 PU 2mm 도포 |                                                                                                            | 1.0                       |

- El-Centro 지진파형을 Scale을 조정하여 최초 0.1g부터 0.1g 간격으로 1.0g까지 점진적으로 가진하여 시험을 실시함.
- 모든 시험체 파괴 시 벽체 측면으로부터 하부 bracket 끝단의 모르타르 중앙부로 균열이 전파됨.



시험체 파괴 형상 (시험체 균열도(본문 pp.133-144))

시험체별 최대 변위 및 상대 변위

| 번호 | 시험체명     | 파괴 공칭<br>가속도<br>(g, PGA) | Shaking<br>Table<br>(mm) | Masonry<br>Wall<br>(mm) | Relative<br>Displ.<br>(mm) | Range of<br>Relative<br>Displ.<br>(mm) |
|----|----------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------------------|
| 1  | MWN-2    | 0.5                      | 42.82                    | 44.91                   | 2.09                       | 4.33                                   |
|    |          |                          | -36.45                   | -38.69                  | -2.24                      |                                        |
| 2  | MWN-3    | 0.4                      | 30.30                    | 34.97                   | 4.67                       | 5.45                                   |
|    |          |                          | -32.23                   | -33.01                  | -0.78                      |                                        |
| 3  | MWP2-1   | 0.7                      | 58.62                    | 58.78                   | 0.16                       | 2.68                                   |
|    |          |                          | -55.26                   | -57.78                  | -2.52                      |                                        |
| 4  | MWP2-2   | 0.8                      | 67.23                    | 80.20                   | 12.97                      | 24.86                                  |
|    |          |                          | -57.44                   | -69.33                  | -11.89                     |                                        |
| 5  | MWP4-1   | 0.6                      | 50.37                    | 61.15                   | 10.78                      | 24.27                                  |
|    |          |                          | -43.43                   | -29.94                  | -13.49                     |                                        |
| 6  | MWP4-2   | 0.7                      | 57.84                    | 55.18                   | 2.66                       | 13.04                                  |
|    |          |                          | -55.88                   | -45.50                  | -10.38                     |                                        |
| 7  | MWF5-1   | 0.6                      | 52.77                    | 66.96                   | 14.19                      | 27.85                                  |
|    |          |                          | -45.58                   | -59.24                  | -13.66                     |                                        |
| 8  | MWF5-2   | 0.5                      | 44.78                    | 49.84                   | 5.06                       | 26.87                                  |
|    |          |                          | -37.66                   | -59.47                  | -21.81                     |                                        |
| 9  | MWPF5-1  | 1.0                      | 79.88                    | 109.29                  | 29.41                      | 82.86                                  |
|    |          |                          | -79.59                   | -133.04                 | -53.45                     |                                        |
| 10 | MWPF5-2  | 0.9                      | 74.63                    | 99.58                   | 24.95                      | 61.99                                  |
|    |          |                          | -69.63                   | -106.67                 | -37.04                     |                                        |
| 11 | MWPF10-1 | 1.0                      | 79.84                    | 87.85                   | 8.01                       | 24.75                                  |
|    |          |                          | -80.69                   | -97.43                  | -16.74                     |                                        |

- 상대 변위 비교 결과 무보강 < PU 보강 < GFRP 보강 < GFRP+PU 보강 순으로 상대변위의 범위가 증가함.
- 이를 통해 취성 파괴가 발생하는 단점이 있는 조적식 벽체의 보수보강재로 폴리우레아의 적합성을 확인함.
- 시험체의 발생 상대변위를 PU 표면 보강 유무를 기준으로 비교하여 폴리우레아의 보강 효과를 파악함.
- PU 보강 유무에 따라 비교 결과 최대 502.2%의 효과를 보였으며, FRP 부착 시 P U의 유무에 따른 비교 결과 최대 291.3%의 보강 효과를 보임.

시험체별 최대 변위 및 비교(무보강, PU)

| 시험체명   | 공칭<br>가속도<br>(g, PGA) | 최대 변위<br>(mm) | 최대 변위 비<br>(mm/mm) |
|--------|-----------------------|---------------|--------------------|
| MWN-2  | 0.5                   | 44.91         | 1.0                |
| MWP2-1 |                       | 42.99         | 0.95               |
| MWP2-2 |                       | 39.43         | 0.88               |
| MWP4-1 |                       | 40.58         | 0.90               |
| MWP4-2 |                       | 41.58         | 0.92               |

시험체별 최대 변위 및 비교(GFRP, GFRP+PU)

| 시험체명     | 공칭<br>가속도<br>(g, PGA) | 최대 변위<br>(mm) | 최대 변위 비<br>(mm/mm) |
|----------|-----------------------|---------------|--------------------|
| MWF5-1   | 0.6                   | 66.96         | 1.0                |
| MWPF5-1  |                       | 48.62         | 0.73               |
| MWPF5-2  |                       | 48.48         | 0.72               |
| MWPF10-1 |                       | 43.39         | 0.65               |

시험체별 최대 변위 및 상대 변위 (PU 보강 효과 식(본문 pp. 131))

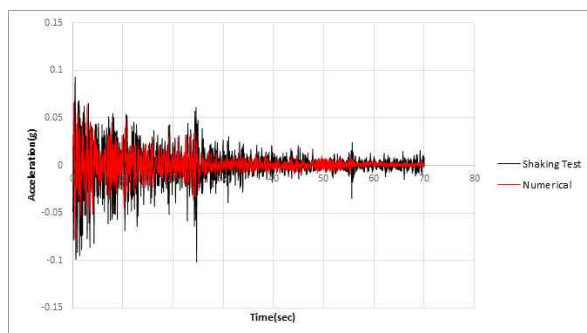
| 시험체명     | 파괴 공칭<br>가속도<br>(g, PGA) | Relative Displ.<br>(mm) | PU 보강 효과<br>(%) |
|----------|--------------------------|-------------------------|-----------------|
| MWN-2    | 0.5                      | 2.24                    | -               |
| MWP2-1   | 0.7                      | 2.52                    | 12.5            |
| MWP2-2   | 0.8                      | 11.89                   | 430.80          |
| MWP4-1   | 0.6                      | 13.49                   | 502.23          |
| MWP4-2   | 0.7                      | 10.38                   | 363.39          |
| MWF5-1   | 0.6                      | 13.66                   | -               |
| MWPF5-1  | 1.0                      | 53.45                   | 291.29          |
| MWPF5-2  | 0.9                      | 37.04                   | 171.16          |
| MWPF10-1 | 1.0                      | 16.74                   | 22.55           |

## ○ Abaqus/Explicit을 이용한 수치해석

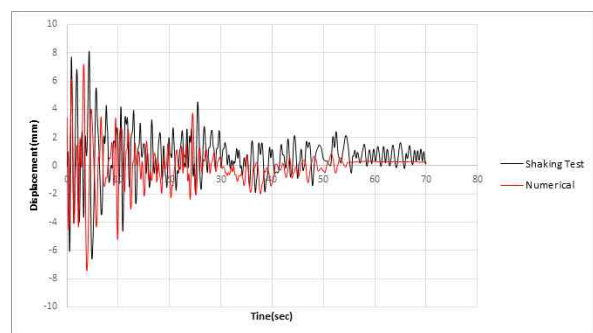
- 조적식 벽체의 진동대 데이터 검증 및 매개변수 해석을 위해 FEM 해석 프로그램인 ABAQUS(2020)을 사용하여 해석 모델을 구축함.
- 조적식 벽체의 경우 블록과 모르타르 간의 경계면을 고려하여야 하며, 따라서 접촉 모델링에서 뛰어난 성능을 보이는 ABAQUS/Explicit 모듈을 사용하였음
- 조적 블록 요소에 적용시킨 구성 모델은 ABAQUS 내 제공하고 있는 콘크리트 손상 소성 모델(Concrete Damaged Plasticity Model)을 사용하였음.
- 조적식 벽체의 블록과 모르타르 계면의 거동을 구현하기 위해 interaction으로 cohesive behavior을 적용하였으며, 1개의 적분점을 가지는 8절점 Solid 요소(C3D8R)를 Mesh로 적용하였음. (모델링 재료 입력값 및 경계 조건 (본문 pp. 150-151))
- 벽체를 상재하중을 구현하기 위해 Earthquake Step(Explicit) 이전에 Gravity Step을 추가하여 모델에 가속도로 인한 하중이 가해지기 전에 축응력을 발생시킴
- 실제 실험에서 Slab와 벽체 사이에 sliding이 발생하는 것을 방지하기 위해 설치한 bracket을 경계 조건을 통해 bracket이 끝나는 위치까지 상대 변위가 발생하지 않도록 하였음.

데이터 비교

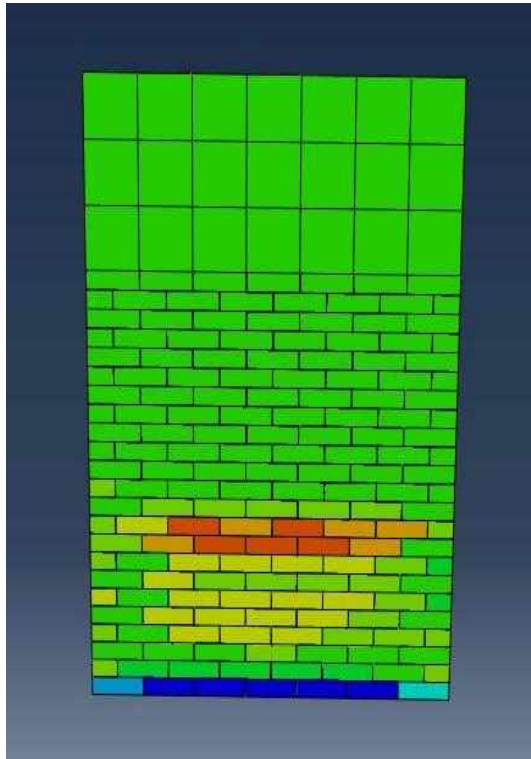
|                  | Shaking Table Test | Numerical Analysis | Ratio   |
|------------------|--------------------|--------------------|---------|
| Acceleration(g)  | 0.093              | 0.065              | 70.0%   |
|                  | -0.10              | -0.08              | 80.0%   |
| Displacement(mm) | 8.12               | 7.20               | 88.67%  |
|                  | -6.62              | -7.46              | 112.70% |



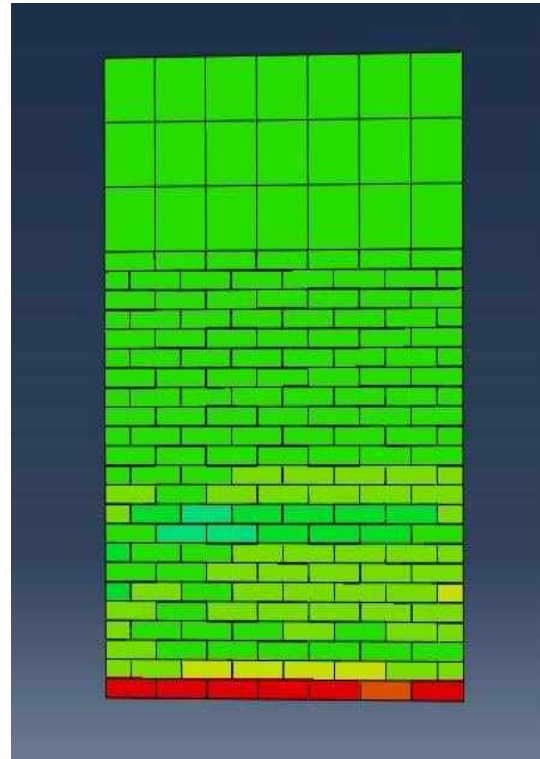
출력 가속도 비교 그래프



중양부 변위 비교 그래프



정면

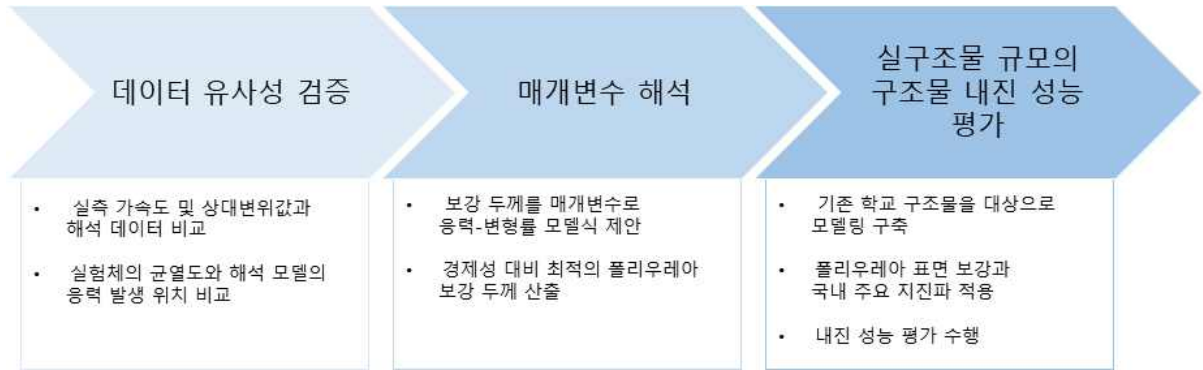


후면

응력 발생 모식도

실험 데이터 검증 및 추가적인 매개 변수해석 수행을 위한 동적 해석을 진행하였음. 해석 결과 응력 발생 위치 및 가속도와 변위 발생량은 실험 데이터와 유사하나, 실험 데이터와의 비교를 위한 추가 해석 데이터 구축이 요구되는 실정임. 추후 지진과의 스케일링 및 실구조물 규모의 해석을 진행할 예정임.

진동대 실험 데이터와 해석 데이터의 유사성 확인 후, 매개변수 해석 수행을 위해 폴리우레아 보강 두께를 변수로 콘크리트와 모르타르로 원형 공시체를 제작 및 보강하였으며, 응력-변형률 데이터를 확보할 예정임. 실험 데이터를 통하여 보강 두께를 매개변수로 한 응력-변형률 모델식을 산출 및 해석에 적용하여 재료의 경제성 대비 최적의 보강 두께를 제안할 계획임.



#### 추후 해석 진행 방향

실구조물 규모의 해석을 위해 80년도 학교 교사 표준 설계도에 따라 지어진 기존 학교 구조물을 대상으로 폴리우레아 보강과 최근 국내 발생한 경주 지진과 포항 지진파를 적용하여 동적 해석을 통해 수행할 예정이며, 이를 통해 폴리우레아의 보강 성능을 직접적으로 평가할 계획임.

#### 주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.