115171

철계형상기억합금의응력회복효과를이용한철근콘크리트구조물보강시스템개발최종보고서

2018 국토교통과학기술진흥원

국토교통부

Infrastructure R&D Report

보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( )

국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

R&D /
17CTAP-C115171-02

철계 형상기억합금의 응력 회복효과를 이용한 철근콘크리트 구조물 보강시스템 개발 최종보고서

2018.09.11.

주관연구기관 / 충북대학교 산학협력단

국 토 교 통 부

국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관 귀하

'철계 형상기억합금의 응력회복 효과를 이용한 철근콘크리트 구조물 보강시스템 개발'(연구개발 기간 : 2016.06.22 ~ 2018.06.21) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2018. 09. 11.

주관연구기관명 : 충북대학교 산학협력단 : 최 상 훈 (인)

주관연구기관책임자 : 홍 기 남 (인)

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>115171</td><td>해당 단계
연구 기간</td><td>2017.06.22.
~ 2018.06.21.</td><td>단계구분</td><td>2/2
(해당단계)/(총단계)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">국토교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">기초원천</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">철계 형상기억합금의 응력회복 효과를 이용한 철근콘크리트 구조물 보강시스템 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">홍 기 남</td><td>해당단계
참여
연구원 수</td><td>총: 6 명
내부: 5 명
외부: 1 명</td><td>해당단계
연구개발비</td><td>정부:150,000천원
기업: 천원
정부 외: 천원
계:150,000천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간
참여
연구원 수</td><td>총: 7 명
내부: 5 명
외부: 2 명</td><td>총 연구개발비</td><td>정부:150,000천원
기업: 천원
정부 외: 천원
계:150,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속 부서명</td><td colspan="3">충북대학교 산학협력단</td><td colspan="2">참여기업명</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명:</td><td colspan="2">상대국 연구기관명:</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명:</td><td colspan="2">연구책임자:</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약

■ 본 연구는 기존 외부 프리스트레스 보강공법의 단점을 대체하기 위해 철계-형상기억합금의 응력회복효과를 이용하여 철근콘크리트 구조물을 보강하기 위한 연구임.

■ 본 연구를 위하여 다음과 같은 실험을 실시함.

▪ 기존 에폭시 부착제의 단점을 대체할 우수한 역학성능 및 건조수축 특성을 지닌 시멘트 매트릭스 개발.
▪ 기초물성 실험을 통한 철계-형상기억합금의 역학적 특성 및 회복응력 특성 파악을 통한 사용가능성 확보.
▪ 개발된 시멘트 매트릭스와 철계-형상기억합금의 부착성능 및 복합거동 확인을 통한 특허 출원.
▪ 철계-형상기억합금을 이용하여 구조물 보강 후 휨 파괴실험을 통해 철계-형상기억합금의 프리스트레스 성능 확인 및 지식재산권 확보.
▪ 철계-형상기억합금을 이용하여 구조물 보강 후 장기처짐 실험을 통해 구조물 적용 가능성 확인.</td><td colspan="2">보고서 면수
67</td></tr>
</table>

〈 국문요약 〉

<table>
<tr><td rowspan="2">연구의
목적 및 내용</td><td colspan="5">• 연구개발목표

- 철계-형상기억합금의 회복응력을 이용하여 기존 구조물 보강공법인 외부 프리스트레스 보강공법의 단점을 대체한 새로운 철근 콘크리트 구조물 보강공법 개발</td></tr>
<tr><td colspan="5">• 연구개발내용

- 역학적 특성 및 건조수축 특성이 우수한 시멘트계 매트릭스 개발.
- 철계-형상기억합금의 역학적 특성 확인.
- 철계-형상기억합금의 회복응력 특성 확인.
- 철계-형상기억합금과 개발된 시멘트 매트릭스의 부착성능 확인.
- 철계-형상기억합금과 개발된 시멘트 매트릭스의 복합거동 확인.
- 철계-형상기억합금을 이용하여 보강된 철근 콘크리트 구조물의 단기거동 특성 파악 및 파괴 메커니즘 규명.
- 철계-형상기억합금을 이용하여 보강된 철근 콘크리트 구조물의 장기거동 특성 확인 및 재긴장 가능성 검증</td></tr>
<tr><td>연구개발성과</td><td colspan="5">• 역학성능 및 건조수축 특성이 매우 우수한 시멘트계 매트릭스 개발 완료.
• 철계-형상기억합금의 역학적 특성, 회복응력 특성 및 개발된 시멘트계 매트릭스와 부착특성 실험결과를 이용하여 SCI(E)급 논문투고.
• 철계-형상기억합금의 단기거동 특성을 파악하고 이론적 결과와 비교하였을 때 85~98%의 정확성을 확인하여 철계-형상기억합금 사용 가능성 확보 및 실험 결과를 이용하여 SCI(E)급 논문투고.
• 철계-형상기억합금의 장기거동 특성 파악을 통해 회복응력을 이용한 프리스트레스 효과 확인 및 실험결과를 이용하여 학술지 논문 투고.
• 연구내용을 토대로 지식재산권 확보(등록번호 : 10-1860142)</td></tr>
<tr><td>연구개발성과의
활용계획
(기대효과)</td><td colspan="5">• 개발된 시멘트계 매트릭스를 숏크리트용, 보수 보강용 모르타르로써 활용가능.
• 무리한 긴장작업과 장착장치 탈락 등의 문제로 인한 시공자의 위험 부담감 해결 및 공사기간 단축효과.
• 재긴장을 통한 구조물 사후관리비용 감소.
• 노후화된 사회기반시설물의 내력 보강 및 장기변형의 저감효과로 시설물을 이용자에게 심리적 안정감 부여.</td></tr>
<tr><td>핵심어
(5개 이내)</td><td>시멘트계
매트릭스</td><td>철계-형상기억
합금</td><td>외부
프리스트레스
보강공법</td><td>구조물 보강</td><td>회복응력</td></tr>
</table>

〈 SUMMARY 〉

<table>
<tr><td>Purpose & Contents</td><td>• Purpose

- Development of new RC Structure reinforcement method, which compensates for the disadvantages of externally prestressing method, using Fe-SMA

• Contents

- Development of cementitious matrix with good mechanical properties and drying shrinkage property.
- Identification of mechanical properties of Fe-SMA.
- Identification of recovery stress of Fe-SMA.
- Confirmation of the adhesion performance of Fe-SMA with cementitious matrix.
- Confirmation of the behavior about Fe-SMA with cementitious matrix.
- Characterization of short-term behavior of RC beams, which reinforced with Fe-SMA, and identify destruction mechanism.
- Characterization of long-term behavior of RC beams, which reinforced with Fe-SMA, and verification of re-activation .</td></tr>
<tr><td>Results</td><td>• Developed the cementitious matrix with better mechanical properties and drying shrinkage characteristics compared to commercial mortar.
• Submit the paper using result of mechanical properties of Fe-SMA, recovery stress of Fe-SMA and bond behavior with cementitious and Fe-SMA.
• The short-term behavior characteristics of beams strengthened Fe-SMA have 85~98% accuracy compared with theoretical result, and submit the paper using the result.
• Confirm the prestressing effect from the long-term behavior characteristics of beam strengthened Fe-SMA.
• Get a patent from the research(Patent No.10-1860142)</td></tr>
<tr><td>Expected Contribution</td><td>• The developed cementitious matrix can be used as shotcrete and reinforcemt mortar.
• Reduce workplace injuries for labors caused by detached anchor device and over-strained reinforcement.
• Reduced structure management cost through re-acvtivation.
• Provide stability to user by reinforcing the SOC structures and reducing long-term deformation.</td></tr>
<tr><td>Keywords</td><td>Cementitious matrix, Fe-SMA, Externally prestressing reinforcement, Structure reinforcement, Recovery Stress</td></tr>
</table>

〈 영문 목차 〉

1. Research Summary ····· 1
2. Development Status of Technology ····· 12
3. Research Performance and Evaluation ····· 17
4. Research Achievement and Contribution ····· 50
5. Application of Research Results ····· 53
6. Perception of Scientific Knowledge in other countries ····· 54
7. Security Level of Research Results ····· 56
8. Research Equipment and Facility in NTIS ····· 57
9. Security Performance and Evaluation in the Lab ····· 58
10. Results of Research Tasks ····· 60
11. Details ····· 61
12. Reference ····· 63

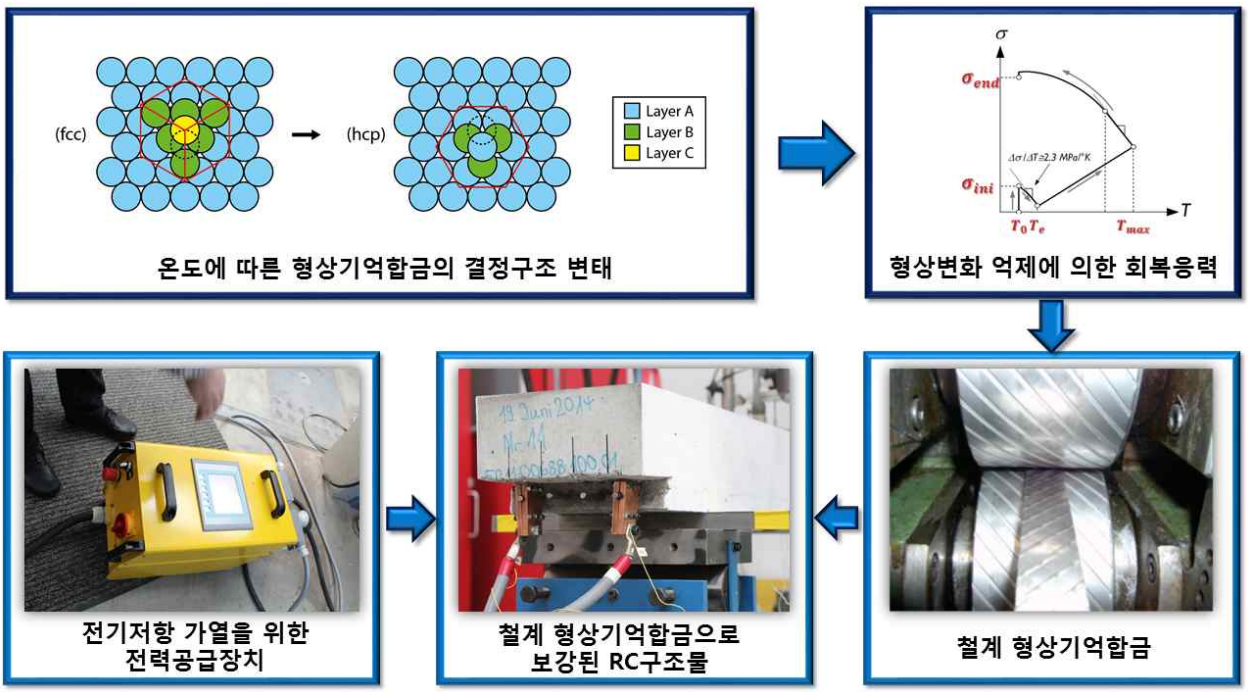
〈 국문 목차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 1
2. 국내외 기술 개발 현황 ····· 12
3. 연구 수행 내용 및 성과 ····· 17
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 50
5. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 53
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 54
7. 연구개발성과의 보안등급 ····· 56
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황 ····· 57
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ····· 58
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 ····· 60
11. 기타 사항 ····· 61
12. 참고 문헌 ····· 63

제1장. 연구개발과제의 개요

제 1절. 연구개발 목적

○ 기존에 건설된 RC(Reinforced Concrete)구조물은 설계상의 원인이나 재료상의 원인, 시공상의 원인 등의 기술적 요인과 환경적 요인으로 인해 구조적 성능 저하와 열화가 발생.
○ 노후화된 구조물을 철거하고 신축하기 위해 막대한 비용 손실이 발생.
○ 전 세계적으로 유지·보수에 대한 관심 증가.
○ 기존 구조물의 성능 개선과 열화를 방지하기 위해 다양한 보강공법이 개발되어 노후화 구조물에 적용되고 있음.
○ 사용되고 있는 보강공법은 여러 문제에 의해 재시공이 요구.
○ 본 연구개발을 통해 기존 보강공법의 문제를 개선한 새로운 보강공법을 제시.
○ 개발될 보강공법은 철계 형상기억합금의 응력회복 효과를 이용.
○ 철계 형상기억합금의 응력회복 효과를 이용한 구조물 보강공법의 방법을 아래와 같이 간략히 도시.



<철계 형상기억합금의 개요>

제 2절. 연구개발의 필요성

1. 철계 형상기억합금의 연구동향

○ 형상 기억 효과는 1962년 Buehler 등이 개발한 Ni-Ti 합금에서 발견.

○ Ni-Ti 합금 및 이를 기반으로 다양한 형상 기억 합금이 개발되었으나 높은 가격으로 인해 토목구조물에 적용에 큰 제약이 있었음.

○ 형상기억합금의 경제성 확보를 위해 철계가 혼용되었으며, Fe-Mn-Si 합금에서 형상 기억 효과가 발견된 것은 1982년.

○ 철계 형상기억합금의 특성을 개선하기 위한 연구가 진행되었으며 다양한 철계 형상기억합금들이 개발.

○ 이 과정에서 철계 형상기억합금들의 가격을 낮추는데 기여하였고 토목공학 구조물 적용에 상당한 경쟁력을 가질 수 있게 됨.

○ 철계 형상기억합금은 크게 온도이력현상의 차이에 따라 두 가지로 구분.

○ Fe-29Ni-18Co-5Al-8Ta-0.01B는 초탄성 능력이 우수하여 내진보강에 적용.

○ 우수한 특성임에 불구하고 Fe-29Ni-18Co-5Al-8Ta-0.01B는 건설산업의 실측부재에 적용하기 위해 대량생산이 불가하였으며, 가격도 건설표준에 비해 턱없이 높음.

○ 높은 온도이력현상을 갖는 Fe-Ni-C, Fe-Mn-Si는 낮은 가격과 성형성, 가공성 및 용접성이 우수.

○ 최근 스위스 EMPA에서 개발된 Fe-Mn-Si계 형상기억합금은 낮은 가격과 높은 역학적 특성으로 토목·건설 구조물에 적용성이 우수.

2. EMPA에서 개발된 철계 형상기억합금의 특성

○ 형상기억합금은 변형 전 형상을 저장하는 기억효과와 큰 변형 이후에도 잔류변형이 남지 않는 초탄성 능력 보유.

○ 형상기억효과는 상온에서 오스테나이트 결정구조로 형성된 형상기억합금이 특정 가열온도나 응력을 가함으로써 마르텐사이트로 결정구조가 변태되면서 발생.

○ 형상기억합금은 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태되는 가열구간과 마르텐사이트가 오스테나이트로 변태되는 냉각구간의 2 가지 단계에서 큰 변형회복을 보임.



<철계 형상기억합금의 변태과정>

○ 변태과정에서 발생되는 변형을 억제시키게 되면 형상기억합금에서 프리스트레스와 유사한 효과를 보임.

○ 초탄성 능력은 형상기억합금에 잔류변형이 남지 않아 긴 사용하중으로 인해 손실된 긴장력 복원 가능.

○ 스위스 EMPA에서 개발된 철계 형상기억합금의 역학적 특성과 온도에 따른 회복응력을 아래에 제시.

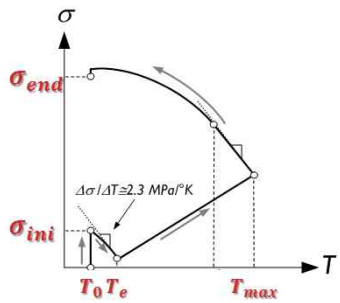
○ 본 연구개발에 사용된 형상기억합금은 Cr을 첨가시켜 스테인레스에 비해 우수한 내부식성 확보.

○ EMPA에서 개발된 형상기억합금의 가격은 철근의 약 3배정도로 기존 형상기억합금의 가격에 비해 대폭 감소되어 토목·건축 구조물에 적용성이 확보.

○ 형상기억합금의 응력회복 능력을 이용하여 구조물에 적용시 우수한 보강성능과 높은 사용수명을 기대할 수 있음.

Fe-SMA의 역학 특성
1. 항복시 인장강도: 700 MPa 이상
2. 항복시 인장변형률: 10% 이상
3. 탄성계수: 160,000 MPa 이상
4. 회복응력: 350 MPa 이상

<철계 형상기억합금의 역학 특성>



<가열온도에 따른 회복응력>

3. 형상기억합금을 이용한 보강공법 개발의 필요성

○ 기존 보강공법의 문제점을 개선한 새로운 보강공법은 아래와 같은 요구 조건을 충족하여야 함.

○ 잔류변형이 존재하는 형상기억합금을 콘크리트 구조물에 정착시켜 전기저항 가열을 수행하면 형상기억합금에 350MPa이상의 회복응력이 발생.

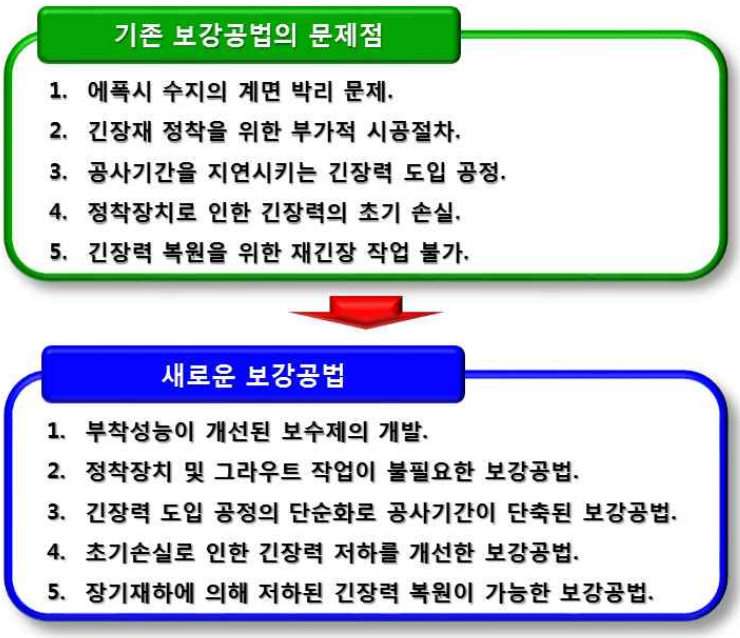
○ 회복응력에 의한 변형회복을 시멘트 매트릭스가 억제시켜 형상기억합금에 긴장력 발생.

○ 단면이 1.7×100mm인 Fe-SMA Plate의 긴장력은 약 6ton이상.

○ 형상기억합금에 발생된 긴장력은 구조물에 발생된 처짐을 회복.

○ 장기 사용하중에 의해 손실된 형상기억합금의 긴장력은 재 가열을 통해 복원 가능.

○ 에폭시 접착제의 박리 현상은 개발될 시멘트 기반 매트릭스로 완화 가능.



<철계 형상기억합금의 필요성>

○ 잔류변형이 존재하는 형상기억합금을 콘크리트 표면에 보강하기 때문에 초기 프리스트레스 도입을 위한 긴장 작업과 정착장치, 그라우트 작업이 불필요.

○ 따라서, 기존 보강공법이 갖는 부가적인 시공절차를 단순화시키며, 소요의 내력보강 효과 및 장기변형 회복, 긴장력 저하에 의한 재시공 문제를 해결할 수 있음.

4. 기술개발의 시의성 및 시급성

○ Fe-SMA(철계 형상기억합금, Fe-Mn-Si Based Shape Memory Alloys)는 최근 스위스 재료과학연구소(EMPA)에서 개발된 형상기억합금.

○ Ni-Ti SMA(Ni-Ti Based Shape Memory Alloys)에 비해 Fe-SMA는 매우 저렴하게 생산 가능(철근 가격의 3배이거나 스테인리스와 비슷한 정도).

○ 전 세계적으로 Fe-SMA를 RC 구조물 보강에 적용하기 위한 연구는 EMPA에서만 진행 중에 있으며, EMPA 역시 실용화 단계가 아닌 적용을 위한 기초 연구 단계 중 임.

○ 따라서 Fe-SMA를 이용한 보강공법을 국내의 독자적인 기술력으로 시급히 개발하여 세계 시장을 선점할 필요가 있음.

○ Fe-SMA는 PSC(Prestressed Concrete)의 긴장재 대체, 사면보강, 터널라이닝 등 다양한 분야에 적용할 수 있는 잠재력을 가짐.

○ 본 기술개발에서는 기존 보강공법의 문제점을 개선시키며 기존과는 다른 새로운 프리스트레스 보강공법인 Fe-SMA의 응력회복 효과를 이용한 보강공법을 개발하고자함.

제 3절. 연구개발 범위

1. 1차 연도

가. 고성능 시멘트 매트릭스의 개발

(1) 개발 목표

○ 접착제로 사용될 시멘트 매트릭스는 콘크리트와의 높은 부착성 확보 및 긴장력에 의해 균열이 발생되지 않는 우수한 역학적 특성, 시공시간을 줄이기 위한 작업성의 확보가 요구됨. 이에 근거하여 본 연구개발의 시멘트 매트릭스 최종 목표 값을 다음과 같이 설정.

<시멘트 매트릭스의 성능 목표>

주요 성능지표	단위	최종 개발목표	시험기준
1. 압축강도	MPa	50 이상	KS F 2405
2. 인장강도	MPa	3.5 이상	KS F 2423
3. 부착강도	MPa	1.5 이상	KS F 2761
4. 길이변화	%	0.002 이하	KS F 2424
5. 응결특성	-	초결: 4시간 이내 종결: 8시간 이내	KS F 2436
6. 슬럼프	mm	150 ± 15	KS F 2594
7. 공기량	%	3.0 ± 1.5	KS L 3136

(2) 개발 내용 및 범위

○ 기존 시멘트 기반 매트릭스 보강재의 선행연구 조사.

○ 고로슬래그와 실리카퓸, 플라이애쉬 등과 같은 산업부산물과 단섬유의 혼입량에 따른 변수를 설정하여 역학적 특성을 평가.

○ 역학적 특성은 압축강도, 인장강도, 부착강도, 길이변화, 응결특성, 슬럼프, 공기량 실험으로 얻어진 결과를 분석.

○ 목표 성능을 만족하는 실험변수를 적정 배합으로 선정.

○ 압축강도 및 인장강도, 부착강도, 길이변화 실험을 장기재령(91일 이상)까지 평가하여 개발될 시멘트 매트릭스의 적용 가능성 입증.



<고성능 시멘트 매트릭스의 개발 범위>

나. 인장실험을 통한 Fe-SMA의 응력회복 범위 설정

(1) 개발 목표

○ 전기저항 가열에 의한 Fe-SMA의 최대 회복응력을 도출하기 위해 Fe-SMA의 최대 잔류변형량 조사를 실시하여야함. 또한 Fe-SMA의 정확한 항복시 인장강도, 항복시 변형률, 극한시 인장강도, 극한시 변형률, 탄성계수를 도출하여 기초 물성값을 확보.

(2) 개발 내용 및 범위

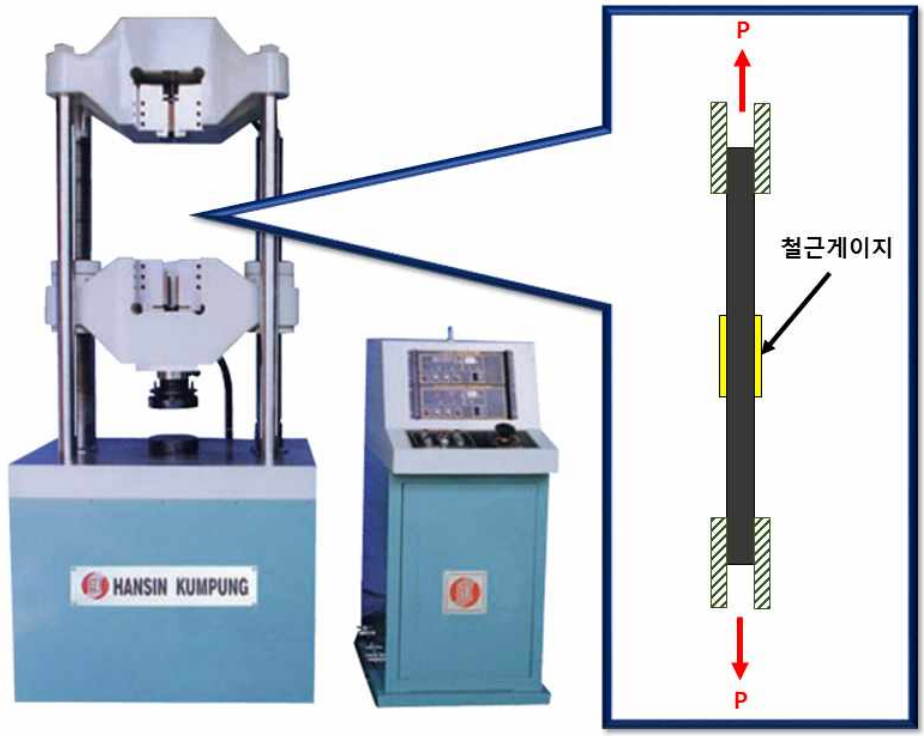
○ Fe-SMA의 길이에 따른 변수를 설정하여 인장시험기를 통한 프리스트레스 적용.

○ Fe-SMA의 프리스트레스 도입량을 인장변형량 2, 4, 6, 8%로 변형시켜 최대하중과 잔류변형 취득.

○ 인장 실험을 통한 Fe-SMA의 파괴실험을 수행하여 Fe-SMA의 기초물성값을 확보.

○ 실험은 200ton 용량의 UTM을 이용하고 분당 0.5mm의 속도로 변위재하 실시.

○ 시편 중앙부에 스트레인 게이지를 부착한 뒤 데이터로거를 이용하여 실시간 변형률 측정.



<Fe-SMA의 인장실험>

다. Fe-SMA의 전기저항 가열방법 정식화

(1) 개발 목표

○ Fe-SMA는 전력공급장치를 이용하여 고밀도의 전류(약 9A/mm^2)가 공급되어야함. 전력공급장치의 적정 전압 및 전류, 공급시간을 설정하기 위한 Fe-SMA 가열시험을 수행하여 가장 경제적인 전기저항 가열방법을 설정하여야함.

(2) 개발 내용 및 범위

○ 형상기억합금을 가열하여 회복응력을 평가하기위해 고전류를 일정하게 공급할 수 있는 전력공급장치를 사용.

○ 전력공급장치는 220V의 전압 코드로 충전하여 사용하는 카패시터이며, 원하는 량의 전압과

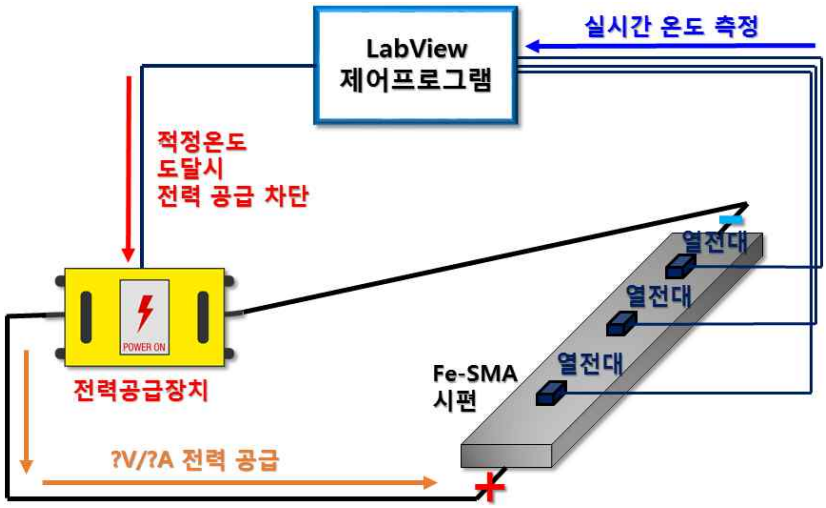
전류를 공급할 수 있음.

○ Fe-SMA시편에 3개의 열전대를 설치하여 Fe-SMA의 가열온도를 실시간으로 측정.

○ Fe-SMA가 적정온도에 도달하는 순간 전력공급을 차단하고 전력 공급시간을 측정.

○ 30V/200A, 35V/250A, 40V/300A 등 다양한 전력을 공급하여 적정 가열온도의 도달시간을 측정하고, 경제성을 고려하여 적정 전압 및 전류, 공급시간을 선정.

○ 적정온도 도달시 일정한 전력 공급 차단을 위해 LabView로 제어프로그램을 제작.



<Fe-SMA의 전기저항 가열방법>

라. Fe-SMA의 전기저항 가열방법에 의한 회복응력 평가

(1) 개발 목표

○ Fe-SMA의 전기저항 가열에 의한 복원력을 기존 외부 프리스트레스 보강공법의 긴장력과 비교하기 위한 회복응력 평가를 수행. 측정된 Fe-SMA의 회복응력은 콘크리트 구조물의 내력보강 정도를 예측하기 위한 기초자료로 사용.

(2) 개발 내용 및 범위

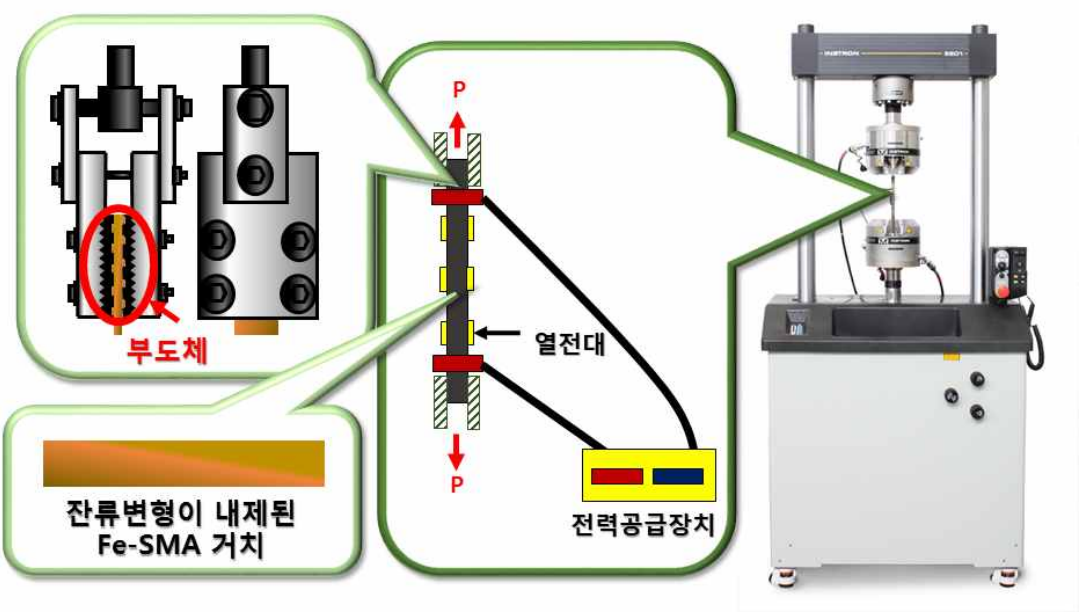
○ 인장실험을 통해 잔류변형이 존재하는 각각의 Fe-SMA를 100kN 용량의 Instron에 설치하여 전기저항 가열을 실시.

○ Fe-SMA에 3개의 열전대를 설치하여 가열구간과 냉각구간에 따른 Fe-SMA의 인장력을 계측.

○ 가열온도에 의해 스트레인 게이지가 손상될 우려가 있어 클릭 온 게이지를 이용하여 Fe-SMA의 변형률을 측정.

○ 가열시 발생되는 Fe-SMA의 열팽창을 고려하여 40kN정도의 초기 인장력 도입.

○ 가열이후 상온까지 냉각된 Fe-SMA의 최종 인장력과 초기 인장력을 고려하여 Fe-SMA의 회복응력을 산정.



<Fe-SMA의 회복응력 평가 방법>

마. Fe-SMA와 시멘트 매트릭스의 복합체 부착강도 모델 개발

(1) 개발 목표

○ 본 기술개발의 보강공법은 Fe-SMA와 시멘트 매트릭스의 복합체로 보강됨으로써 콘크리트 계면과 복합체사이의 거동이 지배됨. 이에 복합체의 부착강도 모델을 제시하여 복합체의 파괴 형태를 예측.

(2) 개발 내용 및 범위

○ 문헌조사를 통한 부착강도 실험을 계획.

○ 접착제와 콘크리트 계면의 부착력 저하를 방지하기 위해 샌드블라스트를 이용하여 레이턴스 제거.

○ 부착길이와 전기저항 가열에 의한 복원력 형성 여부에 따른 변수를 설정하여 전단강도 측정.

○ 시공환경 요인에 따른 보강재료와 콘크리트의 부착성능 검증.

○ 수집된 실험결과를 분석하여 복합체의 파괴 형태를 예측할 수 있는 부착강도 모델 개발.



<Fe-SMA와 시멘트 매트릭스 복합체의 부착강도 실험방법>

바. Fe-SMA로 보강된 RC구조물의 장기재하 실험셋팅

(1) 개발 목표

○ 사용하중으로 인한 Fe-SMA의 복원력 저하 및 장기변형을 측정하기 위해 1년간의 장기재하 실험을 수행.

(2) 개발 내용 및 범위

○ Fe-SMA로 보강된 7개의 RC구조물을 제작하여 1ton의 장기하중 재하 실시.

○ 지속하중을 받는 RC구조물의 Fe-SMA 크리프 영향 검토를 위한 계측자료 수집.

○ 1차년도 하반기에 실험을 시작하여 2차년도 하반기까지 총 1년간 수행될 예정.



<Fe-SMA로 보강된 RC구조물의 장기재하 실험방법>

2. 2차 연도

(1) 개발 목표

○ 전기저항에 의해 형상회복된 Fe-SMA로 보강된 RC 구조물의 파괴 메커니즘 규명.

- 형상회복된 Fe-SMA로 보강된 RC 구조물의 보강 성능을 확인하기 위한 파괴 메커니즘 규명이 필요. 이에 형상회복된 Fe-SMA로 보강된 RC 구조물의 항복하중과 처짐량, 형상회복된 Fe-SMA의 회복응력 등을 조사.
- 본 연구개발의 형상회복된 Fe-SMA로 보강된 RC 구조물의 목표성능 다음과 같이 설정.

<Fe-SMA로 보강된 RC구조물의 목표 보강성능>

주요 성능지표	최종 개발목표
1. 항복하중	- 보강되지 않은 RC 구조물대비 80% 이상 증진된 항복하중
2. 처짐량	- 보강되지 않은 RC 구조물과의 동일하중 대비 80% 이상 감소된 처짐량
3. 콘크리트 균열 발생시 하중	- 보강되지 않은 RC 구조물대비 100% 이상 증진된 균열하중
4. 회복응력	- 400 MPa 이상의 회복응력

(2) 개발 내용 및 범위(시스템 구성도, 구조 등을 그림으로 구체적 표현)

○ 주관연구기관(충북대학교 산학협력단):

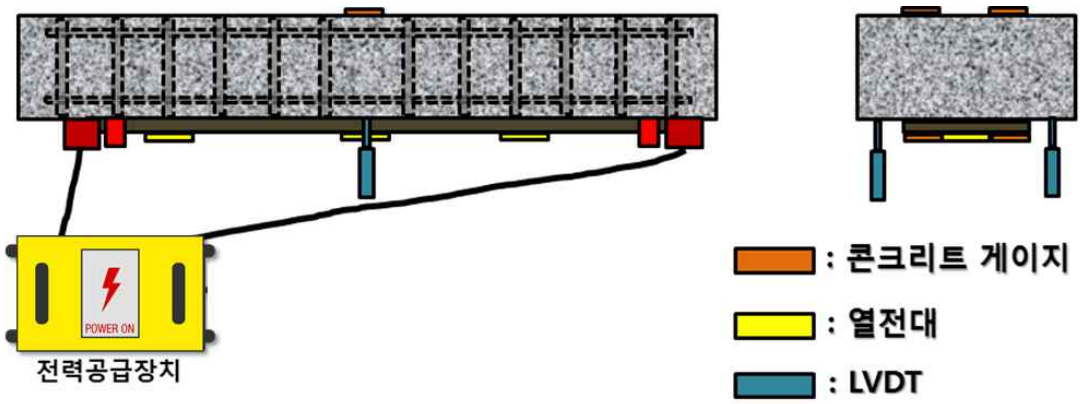
○ 비교대상체인 일반 RC구조물을 제작.

○ Fe-SMA의 보강개수와 정착장치 유무, 보강방법에 따른 RC 구조물을 제작.

○ 보강된 RC 구조물은 다음과 같은 단계로 실험을 수행.

○ 1단계: 전기저항 가열방법에 의한 RC구조물의 거동분석

- Fe-SMA로 보강된 RC 구조물의 전기저항 가열방법에 따른 거동 분석을 위해 구조물 상단과 하단에 변형률 게이지와 LVDT를 설치하여 사전변형을 관찰하며, 상온까지 냉각된 구조물의 7일간의 장기 변형량 측정.



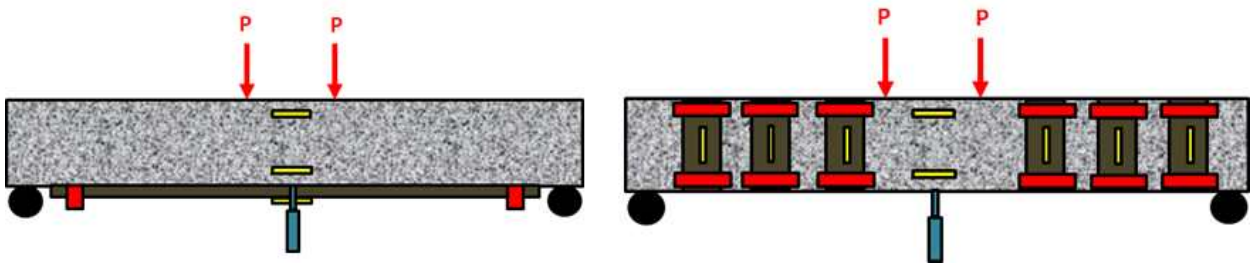
<Fe-SMA로 보강된 구조물의 회복응력 및 장기거동 평가>

○ 2단계: 반복재하 실험을 통한 잔류변형 분석

- 200kN 용량의 엑츄레이터를 이용하여 10kN까지 분당 0.5mm의 속도로 변위재하 5번 이상의 반복 하중 재하하여 Fe-SMA의 초탄성 능력 분석.

○ 3단계: 정적재하 실험을 통한 파괴 실험

- 보강된 구조물의 파괴까지 정적 재하실험을 수행하여 비교 대상체와 비교·분석.
- 200kN 용량의 엑츄레이터를 이용하여 분당 1.0mm의 속도로 변위재하.
- 인장부와 압축부에 부착된 콘크리트 게이지를 통한 구조물의 변형률 측정.
- 인장철근과 압축철근에 부착된 철근 게이지를 통한 철근의 변형률 측정.
- LVDT를 이용한 구조물의 변위 측정.
- Fe-SMA에 부착된 철근 게이지를 통한 Fe-SMA의 변형률 측정.



<Fe-SMA로 휨/전단 보강된 RC구조물의 파괴실험>

가. Fe-SMA의 장기재하 실험 종료 및 재긴장 가능성 평가

(1) 개발 목표

○ 장기 사용하중으로 인한 긴장력 저하 정도와 재긴장 가능성을 검증하기 위해 파괴실험을 수행. RC구조물에 보강된 Fe-SMA를 전기저항 가열방법으로 재가열한 뒤 정적 재하 실험을 수행하여 재긴장 가능성 평가. 초기 복원력 대비 90%이상의 재복원력 확보.

(2) 개발 내용 및 범위

○ 초기 자료 및 시간이력에 따른 계측자료를 통한 장기재하 및 피로 거동 분석.

○ 계측 완료된 Fe-SMA로 보강된 2개의 RC구조물의 재하실험을 수행하여 복원력 저하량 검토.

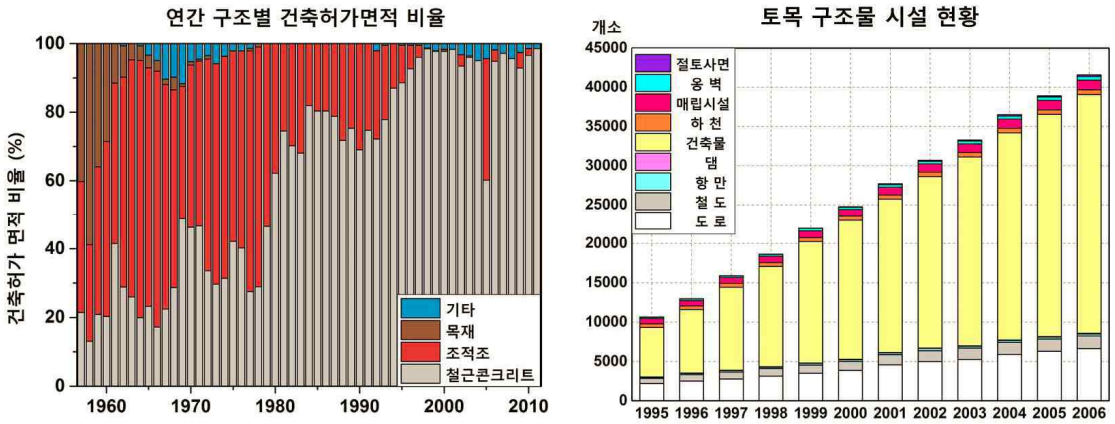
○ 계측 완료된 Fe-SMA로 보강된 2개의 RC구조물의 Fe-SMA를 재가열하여 재하 실험을 수행.

○ 실험방법은 앞서 설명된 “전기저항에 의해 형상회복된 Fe-SMA로 보강된 RC 구조물의 파괴 메커니즘 규명”과 동일.

제2장. 국내외 기술 개발 현황

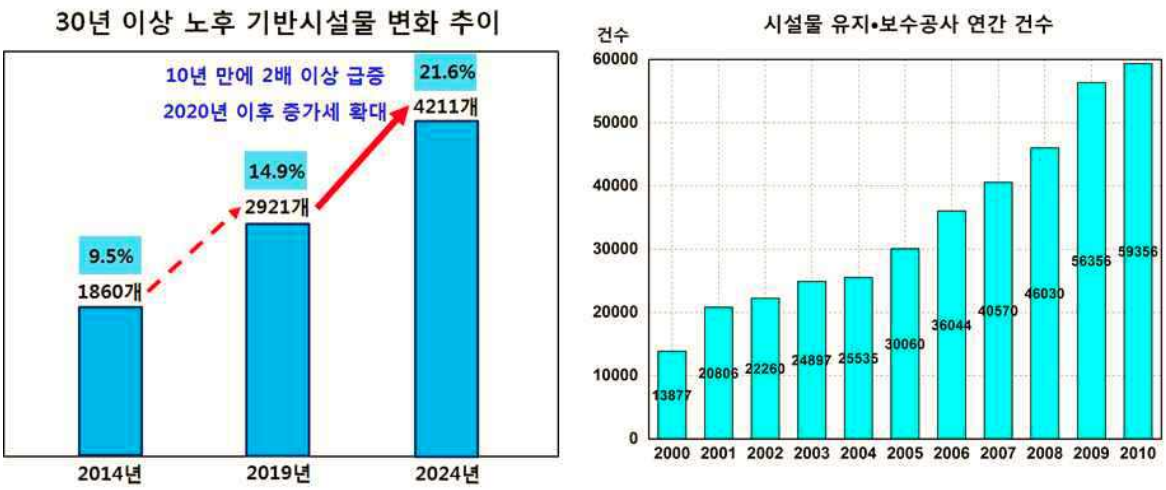
제 1절. 국내·외 RC구조물의 현황 및 전망

○ 90년대 경제 급성장과 더불어 철근콘크리트 구조물의 건축량이 증가.
○ 매년 2,000-3,000개의 토목 구조물이 건축되고 있으며, 2006년에는 토목 구조물의 수가 40,000개소 이상으로 나타남.
○ 경제성장 이전에 국내 건축구조물은 대부분 목재와 조적조로 건설됨.
○ 철근콘크리트가 도입되고 급격한 경제성장에 따라 철근콘크리트로 건축된 구조물의 사용면적은 97% 이상으로 급증.
○ 건축 및 토목 구조물의 대부분이 철근콘크리트로 제작되었으며, 30년 이상 사용된 구조물에서 많은 열화현상이 발생하고 이는 구조물의 내력 및 내구성을 저하시켜 구조물 안정성을 위험.

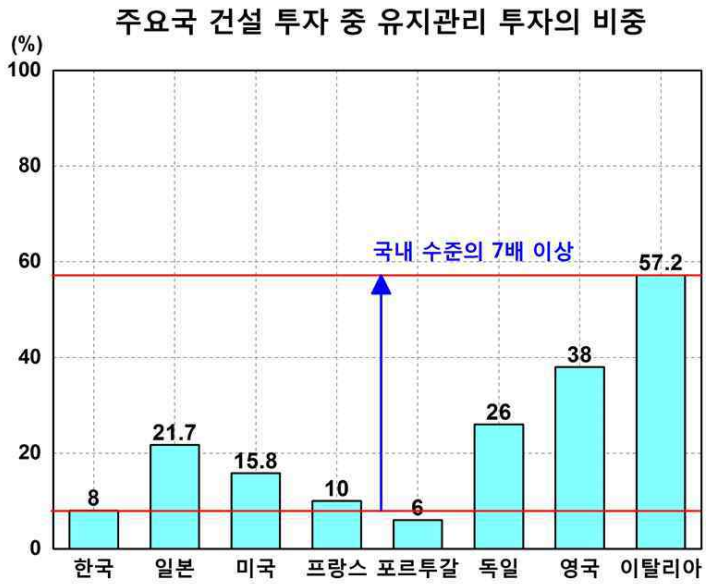


<구조별 건축허가면적 비율 및 구조물 시설 현황>

○ 한국시설안전공단에서는 2024년 이후에 노후화된 기반시설물의 양이 4,000개가 넘을 것으로 예상하고 있으며, 10년 만에 노후화 시설물의 양이 2배 이상 급증.
○ 구조물에 발생된 열화현상을 억제하고 내력을 증진시키기 위해 매년 유지·보수 시공사례가 증가하고 있는 실정.
○ 시설물 유지·보수공사는 2000년에 13,877건이었으나, 2010년에 59,356건으로 10년만에 4배 이상 증가.
○ 국내 유지관리에 대한 투자는 약 8% 수준으로 일본의 유지관리 투자에 비해 약 3분의 1 수준에 불과.
○ 유지관리의 투자비용이 57%이상인 이탈리아와 38%이상인 영국 등에 비해 낮은 수준.
○ 국외는 향후 건설업의 투자비용 중 50%이상이 유지관리에 사용될 것으로 전망.
○ 국내의 유지관리에 대한 투자가 다른 국가에 비해 낮은 점은 구조물의 사용연수가 짧기 때문이지만, 국내에서 사용 중인 많은 구조물의 열화와 내력저하의 가능성이 높아 보수·보강 및 유지관리에 대한 많은 투자가 필요한 실정.



<노후 기반시설물 변화 추이 및 연간 시설물 유지보수 건수>



<나라별 시설물 유지관리 투자 비중>

제 2절. 국내·외 기존 보강공법의 문제점

○ FRP(Fiber Reinforced Polymer)로 제작된 Sheet를 구조물 외벽에 부착하는 외부부착공법(Externally Bonded Reinforcement, EBR)과 Strip을 구조물 표면에 매립하여 보강하는 표면매립공법(Near-Surface Mounted, NSM)은 노후화된 구조물의 내력증진을 위해 주로 적용됨.

○ FRP를 이용한 단순부착보강공법은 콘크리트와 보강재를 부착시키기 위한 접착제로 10 MPa 이상의 높은 부착강도를 갖는 에폭시 수지를 사용.

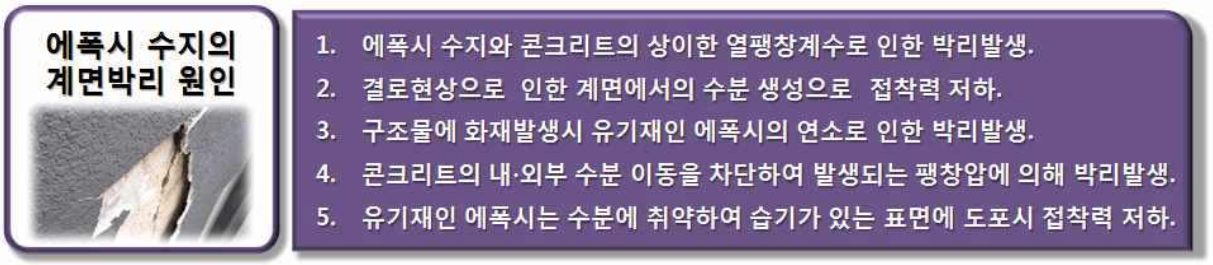
○ 에폭시 수지는 다음과 같은 이유로 콘크리트 계면에서 박리될 가능성이 있음.



<외부부착공법 및 표면매립공법>

○ 계면박리 가능성이 매우 큼에도 불구하고 에폭시 수지의 높은 접착성을 신뢰하여 무분별한 보강공사를 시행.

○ 외부 프리스트레스 보강공법은 노후화된 구조물에 정착장치로 탄소판이나 PC강연선을 부착시킨 뒤 긴장력을 도입하는 방식으로 EBR이나 NSM공법과 같은 내력보강 효과뿐만 아닌 다음과 같은 추가적인 장점을 갖는다.



<외부 프리스트레스 보강공법의 장점>

구분	외부 프리스트레스 보강공법의 장점
사용성	- 하중의 초기단계에서 콘크리트의 대부분이 압축영역에 있으므로 강성이 증가되며, 이로 인하여 처짐이 감소. - 보강 전에 발생되었던 균열 폭을 줄이거나 닫히게 할 수 있음. - 적재하중에 의한 균열 형성이 지연. - 균열 폭이 감소되며, 균열이 발생되더라도 넓은 범위로 분산. - 균열발생 지연 및 균열 폭의 감소로 인하여 사용성 및 내구성이 증가.
내 력	- 단순부착형 보강공법을 기준으로 동일한 보강효과를 얻기 위해 FRP 단면적 감소. - 적절한 정착장치를 이용하여 단순부착형 FRP 보강공법에서 관측되는 계면박리파괴를 방지. - FRP에 프리스트레스를 도입하여 보강하면 부재의 항복모멘트 증가.

○ 외부 프리스트레스 보강공법은 많은 장점이 있으나 그와 동시에 다음과 같은 여러 문제점으로 인해 실용화 되지 못하고 있는 실정.

<외부 프리스트레스 보강공법의 문제점>

외부 프리스트레스 보강공법의 문제점
- 단순부착형 FRP 보강공법에 비하여 프리스트레스의 도입공정 추가로 인해 시공비용 증가. - 프리스트레스 도입공정의 추가로 인하여 공사기간이 증가. - FRP에 프리스트레스를 도입하면서 콘크리트 표면에 부착하기 위한 각종 부착 기술 및 장비 개발의 요구. - 긴장력 도입이후 정착장치에서 초기 긴장력 손실이 발생. - 긴장 작업과정에서 정착장치 탈락에 의한 인명피해가 발생될 가능성 농후. - 장기변형과 피로 거동에 의한 긴장력 저하를 해결하기 위한 재긴장이 불가. - 복잡하고 전문성을 요하는 시공절차.



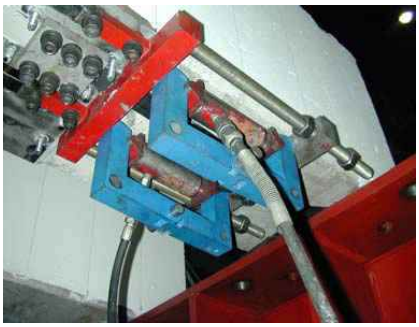
(a) 에폭시 도포



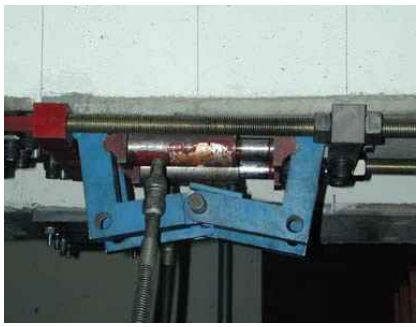
(b) 탄소섬유판 부착



(c) 고정단 정착



(d) 긴장장치 설치



(e) 긴장력 도입



(f) 이동단 앵커 설치

<FRP를 이용한 외부 프리스트레스 보강공법의 시공 전경>

제 3절. 기술개발 성숙도 구분

구분		연구 착수	연구 종료	단계별 설명
기초연구 단계	TRL 1	■	□	이론적 연구단계
	TRL 2	■	□	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	■	□	실험적 증명 단계
	TRL 4	■	□	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	□	□	유사환경 시험 단계
	TRL 6	□	□	유사환경 기술시험 단계
실용화 단계	TRL 7	□	□	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	□	□	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	□	□	현장적용/사업화 단계

○ TRL 1 : 시멘트 매트릭스의 개발과 철계-형상기억합금의 인장강도 평가 및 전기저항 가열 방법의 정식화로 이론적 연구를 수행.

○ TRL 2 : 개발된 시멘트 매트릭스와 철계-형상기억합금으로 제작된 복합체의 부착강도 모델 개발을 통해 기술적개념 정립.

○ TRL 3 : 철계-형상기억합금의 전기적 가열을 통한 회복응력 평가를 수행하여 외부 프리스트레스 적용 가능성 증명.

○ TRL 4 : 형상회복된 철계-형상기억합금으로 휨/전단 보강된 RC 구조물을 제작하여 파괴 거동 분석, 장기재하 실험을 통한 철계-형상기억합금으로 보강된 RC 구조물의 장기거동 및 재긴장 가능성을 분석하여 개발될 보강공법의 성능 평가 수행.

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

제 1절. 1차 연도수행 내용

1. 부착성능을 개선시킨 고성능 시멘트 매트릭스 개발

○ 부착성능을 개선시킨 고성능 시멘트 매트릭스 개발은 6가지 변수에 대하여 공기량, 플로우, 응결, 압축강도, 인장강도, 부착강도, 건조수축 평가를 실시하였으며, 실험을 통해 역학성능이 가장 우수한 배합을 최적 배합비로 선정.

가. 공기량 및 플로우 실험

○ 공기량 및 플로우 실험은 각각 KS F 2421과 KS L 5105 기준에 따라 실시하였으며, 보강용 시멘트 매트릭스의 작업성을 확보하기 위해 플로우와 공기량의 작업 범위를 각각 150±15 mm, 3.5±1.5%로 설정.

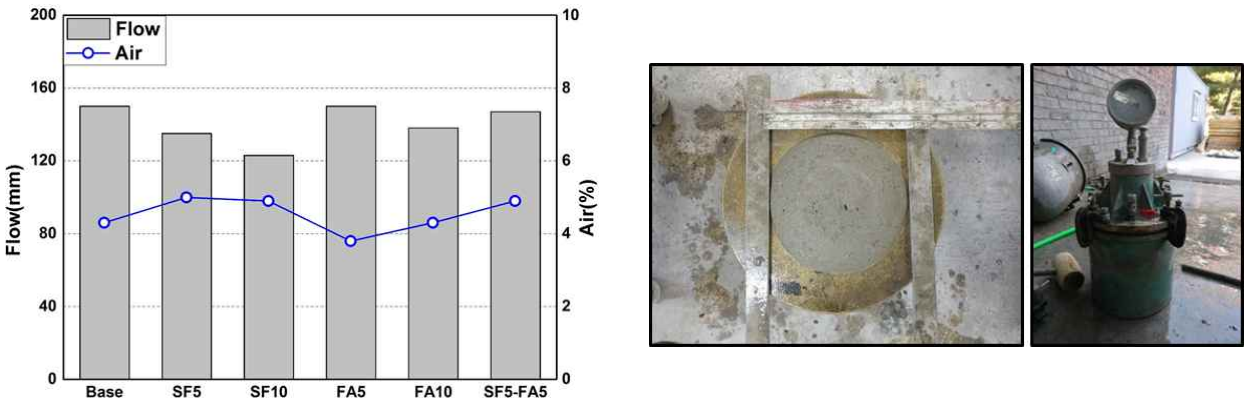
○ 실험결과 실리카퓸 치환량이 5%씩 증가할 경우 모르타르 플로우는 각각 15 mm, 28 mm가 감소되는 경향을 보였으며, 플라이애쉬의 경우 Base와 동일하거나 약 12 mm정도 감소.

○ 전반적으로 플라이애쉬가 포함된 실험체가 Base와 작업성이 유사하게 나타나는 경향을 확인하였으며, 공기량 실험결과에서도 플라이애쉬 실험체가 목표 범위인 3.5±1.5% 내에 기준을 만족.

<최종 배합표>

변수명	W	Binder(kg/m^3)			S	CF	SP	PF	CSA	PVA	AG
		C	SF	FA							
BASE	(C+S) ×15%	1102	0	0	1560kg/m^3 (0.65m^3)	C × 1.0%	C × 0.1%	C × 4.0%	C × 0.5%	1.0kg /m^3	C × 4.0%
SF5		1047	55	0							
SF10		992	110	0							
FA5		1047	0	55							
FA10		992	0	110							
SF5-FA5		992	55	55							

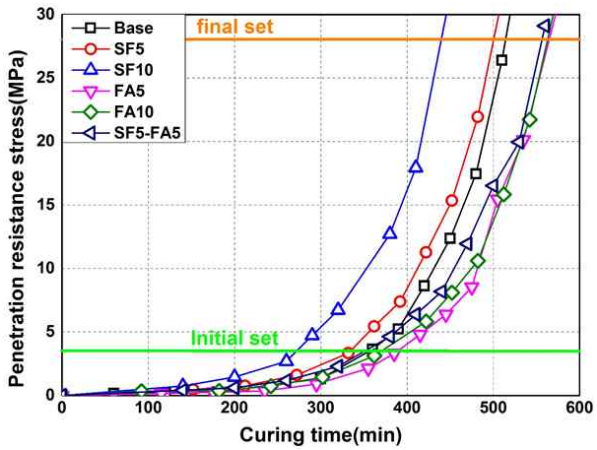
● C : 시멘트, SF : 실리카퓸, FA : 플라이애쉬, S : 실리카샌드, CF : 칼슘포메이트, PF : 폴리머 파우다 CSA : 팽창제, SP : 고성능 감수제, PVA : 섬유, AG : 무수석고



<최종 배합 모르타르 플로우 실험 및 공기량 측정결과>

나. 응결 실험

○ 모르타르의 응결 실험은 KS F 2436 기준에 따라 실시하였으며, 초결 및 종결에 대한 목표 시간은 각각 초결 4시간 이내, 종결 8시간 이내로 설정.
○ 실리카퓸 치환율이 증가함수록 초결 및 종결 시간은 약 20~60분 정도 응결 속도 증가.
○ FA5 실험체의 경우 Base 실험체보다 약 40분정도 초결 및 종결 시간이 지연되었으며 FA10은 FA5보다 초결은 20분 가량 빨라졌으나, 종결 시간은 유사함.
○ SF5-FA5의 경우 초결 시간은 실리카퓸의 지배를 받아 약 7분 정도 빨라졌으나, 종결 시간은 플라이애쉬의 영향 받아 약 40분가량 지연.
○ Base를 기준으로 평가하였을 때 실리카퓸 및 플라이애쉬가 사용된 배합 모두 초결 및 종결이 1시간 이내의 차이를 보임.

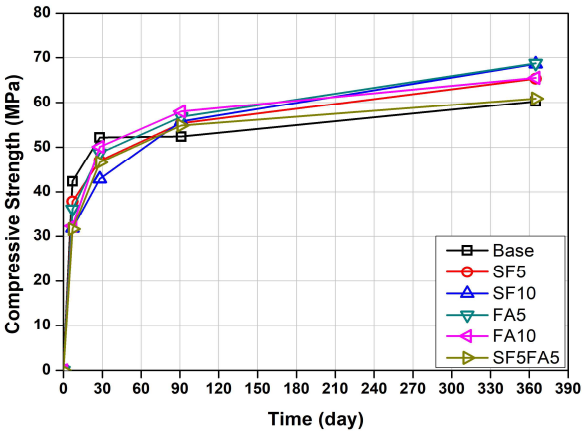


변수명	초결시간	종결시간
Base	5시간 55분	8시간 35분
SF5	5시간 35분	8시간 20분
SF10	4시간 30분	7시간 20분
FA5	6시간 30분	9시간 25분
FA10	6시간 10분	9시간 23분
SAF-FA5	5시간 48분	9시간 16분

<최종 배합 응결 특성 결과>

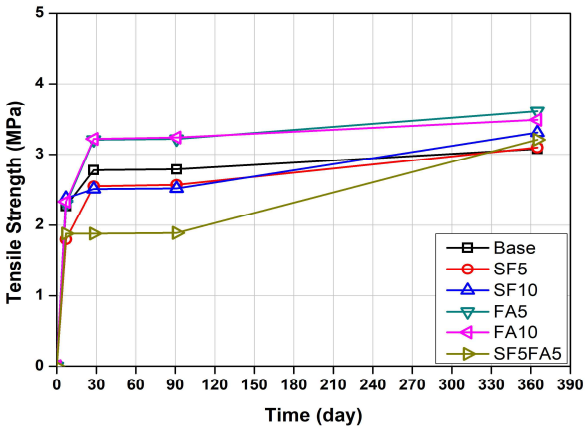
다. 압축강도 및 인장강도 실험

○ 압축강도 및 인장강도 실험은 KS L 5105, KS L 5104 기준에 따라 실험을 실시하였으며, 재령 7, 28, 91, 365일 각각 평가.
○ 압축강도 실험결과 Base의 재령 28일 강도는 52.2MPa로 나타났으며, SF5, SF10, FA5, FA10, SF5FA5 모두 기준보다 다소 낮은 압축강도를 발현하였다. 하지만, 장기재령일인 91일에서 Base보다 모두 높은 강도를 나타내었으며, 특히, FA10이 Base보다 최대 5.61MPa정도 강도 향상.
○ 재령 365일 압축강도의 경우 재령 91일 압축강도에 비하여 11~23% 향상된 강도를 보이고 있으며, 플라이애쉬(FA)와 실리카퓸(SF)으로 치환된 실험체들은 기준 실험체인 Base에 비하여 평균 10% 큰 압축강도 발현.



변수명	7day (MPa)	28day (MPa)	91day (MPa)	365day (MPa)
Base	42.37	52.20	52.39	60.25
SF5	37.87	47.00	55.36	65.32
SF10	31.79	42.90	55.79	68.62
FA5	36.16	48.70	56.82	68.75
FA10	32.29	50.10	58.00	65.54
SF5FA5	31.60	46.60	54.87	60.91

<최종 배합 압축강도 실험결과>



변수명	7day (MPa)	28day (MPa)	91day (MPa)	365day (MPa)
Base	2.27	2.78	2.79	3.08
SF5	1.80	2.55	2.57	3.1
SF10	2.38	2.51	2.52	3.31
FA5	2.30	3.21	3.22	3.61
FA10	2.33	3.22	3.24	3.49
SF5FA5	1.88	1.88	1.89	3.21

<최종 배합 인장강도 실험결과>

○ 인장강도 시험결과 실리카퓸(SF)을 사용한 배합이 재령 28일 강도에서 Base보다 미미하게 낮은 강도 발현을 나타내었으며, 플라이애쉬(FA)를 사용한 콘크리트의 경우 Base보다 다소 크게 나타남.

○ 재령 91일에서는 실리카퓸(SF), 플라이애쉬(FA) 배합 모두 재령 28일 인장강도와 유사하게 나타나는 것을 확인. 재령 365일에서는 실리카퓸으로 치환된 실험체는 Base와 유사한 인장강도를 보이는 반면 플라이애쉬를 치환한 경우 Base 실험체에 비하여 인장강도가 15% 증가.

라. 부착강도 실험

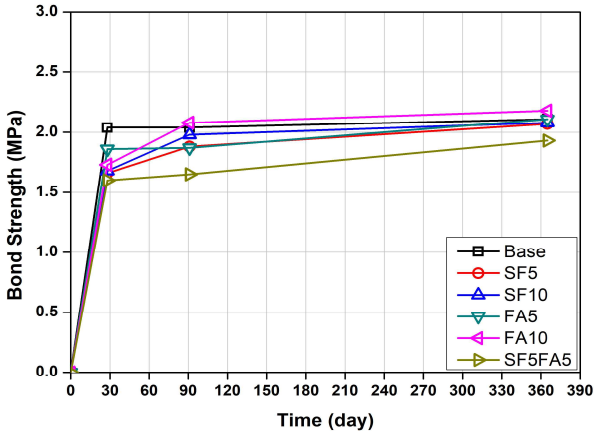
○ 부착강도 실험은 KS F 2762기준에 따라 실험하였으며 재령 28일, 91일, 365일에 각각 실시.

○ 부착강도 시험결과에서는 모든 배합이 부착강도 기준인 1.5MPa 이상을 모두 만족하는 경향을 나타내었으며, 플라이애쉬(FA)가 첨가된 배합이 다소 높게 나타나는 것을 확인.

○ 재령 91일에서는 Base의 경우 부착강도 결과가 재령 28일과 매우 유사하게 나타났지만, 실리카퓸(SF), 플라이애쉬(FA)가 사용된 배합의 경우 부착강도 다소 향상

○ 플라이애쉬(FA) 10%를 혼입한 배합의 경우 2.08MPa로 가장 높은 부착강도를 보임.

○ 재령 365일의 경우 플라이애쉬가 5% 치환된 실험체가 가장 높은 부착강도를 보이고 있으며, 재령일이 증가함에 따라 플라이애쉬, 실리카퓸이 치환된 순으로 높은 부착강도를 보임.



변수명	28day (MPa)	91day (MPa)	365day (MPa)
Base	2.04	2.04	2.11
SF5	1.66	1.88	2.07
SF10	1.68	1.98	2.08
FA5	1.86	1.87	2.11
FA10	1.73	2.08	2.18
SF5FA5	1.60	1.65	1.93

<최종 배합 부착강도 실험결과>

마. 건조수축 실험

○ 건조수축 실험은 KS F 2424 기준에 따라 진행하였으며, 재령 365일까지 평가.

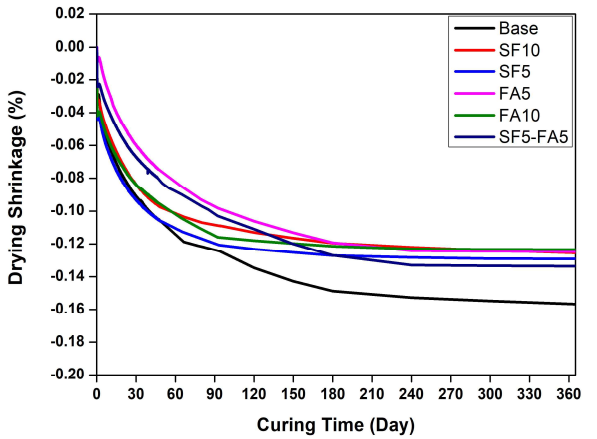
○ 실험결과 곡선이 기울기가 완만해지는 시점인 재령 91일의 경우 Base는 0.124%로 나타났으며, SF5, SF10, FA5, FA10, SF5FA5는 각각 0.109%, 0.121%, 0.093%, 0.116%, 0.103%로 나타남.

○ 전반적으로 Base보다 낮은 건조수축률을 보였으며, 특히 플라이애쉬(FA)가 첨가된 배합이 건조수축률이 낮게 나타나는 경향을 보임. 재령 365일까지 건조수축률을 확인한 결과 모든 실험체가 건조수축률 0.2% 이하를 만족.

○ FA10은 재령 365일 건조수축률이 0.123%로 가장 작게 나타남.

바. 고성능 시멘트 매트릭스 개발 소결

○ 플라이애쉬 10%가 혼합된 실험체가 공기량 및 슬럼프, 응결특성, 압축강도 및 인장강도, 부착강도, 건조수축 평가에서 대부분 만족하는 것으로 나타났으며, 보강용 매트릭스로 사용하기 위한 최적 배합은 FA10 배합으로 결정.



변수명	28 day	91 day	365 day
Base	0.07806	0.124	0.157
SF5	0.08284	0.109	0.126
SF10	0.0927	0.121	0.129
FA5	0.05374	0.093	0.125
FA10	0.07701	0.116	0.123
SF5FA5	0.06436	0.103	0.134

<최종 배합 건조수축 실험결과>

(2) Fe-SMA 부식성 테스트

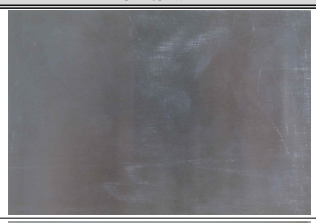
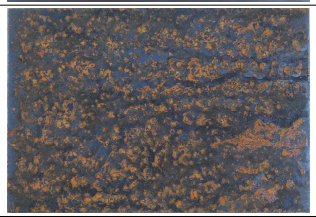
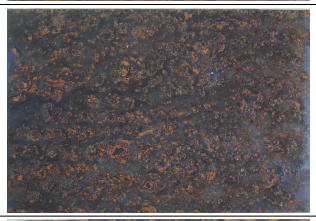
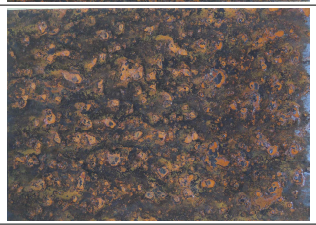
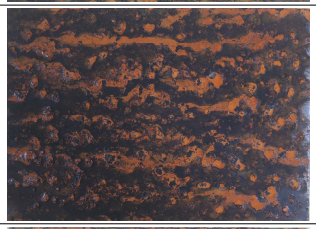
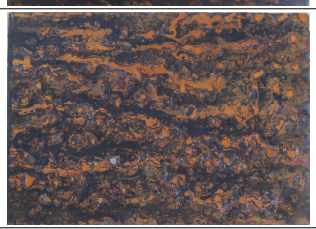
○ 철계 형상기억합금의 부식성 평가를 위하여 KS D 9502 규격에 따라 염수분무 시험을 진행하였으며, 시험체는 100 mm × 150 mm의 판 형태로 SS400, 스테인리스, Fe-SMA를 변수로 시험을 진행.

○ 육안평가 결과 시험 시작 후 24시간이 지난 뒤 모든 시험체에서 부식이 발생.

○ 시험 전 후 부식량을 측정 한 결과 일반 강재인 SS400의 경우 SMA 대비 약 132배정도 부식이 더 진행되었으며, 스테인리스의 경우 SMA 대비 약 2.05배 부식이 진행.

○ Fe-SMA는 내 부식성이 철근과 스테인리스보다 우수하며 건설현장에 적용 가능.

<Fe-SMA 부식성 실험결과>

염수분무시험	SS400	ST	Fe-SMA
시험전			
24 hr			
48 hr			
72 hr			
96 hr			
168 hr			
부식 제거 후			

<염수분무 실험결과>

염수분무시험	SS400	ST	Fe-SMA
시험 전(g)	187.576	169.171	168.874
시험 후(g)	182.861	169.105	168.842
부식률(%)	2.51	0.04	0.02

(3) 인장실험을 통한 Fe-SMA의 응력회복 범위 설정

○ 전기저항 가열에 의한 Fe-SMA의 최대 회복응력을 도출하기 위하여 Fe-SMA의 최대 잔류 변형량 조사를 실시하으며, Fe-SMA의 항복시 인장강도, 항복시 변형률, 극한시 인장강도, 극한시 변형률, 탄성계수 등 기초 물성값 확보를 위하여 Fe-SMA의 인장실험 실시.

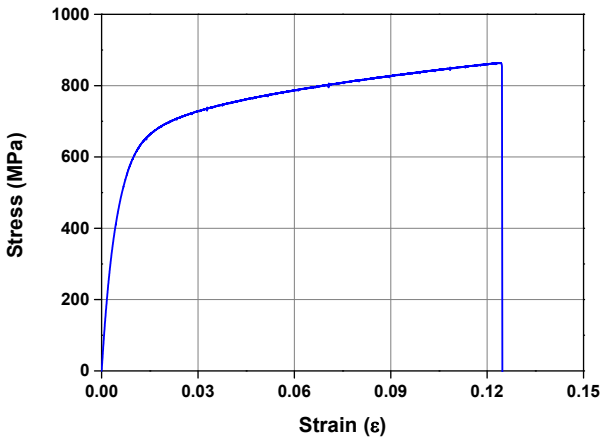
○ 실험 결과 Fe-SMA의 탄성계수 약 133.5GPa로 나타남.

○ Fe-SMA의 항복강도의 경우 오프셋 법을 이용하여 결정하면 약 465MPa의 항복강도를 보이며, 그 때의 변형률은 약 0.00545.

○ Fe-SMA의 극한강도는 약 865.97MPa이며, 극한 변형률은 0.125로 나타남.



<Fe-SMA 직접인장 실험 전경>



<Fe-SMA 직접인장 실험결과>

(4) Fe-SMA의 전기저항 가열방법 정식화

○ 전기저항을 통한 가열방법을 도출하기 위하여 Fe-SMA의 폭(20 mm, 25 mm, 50 mm) 길이(200 mm, 250 mm, 300 mm) 그리고 공급전류량(15A, 30A, 60A)을 변수로 하여 실험 진행.

○ 실험체 온도측정을 위하여 K타입의 열전대를 실험체 중앙에 부착한 후, 소요 전류를 공급하여 Fe-SMA의 온도가 160℃에 도달하는 시간 측정.

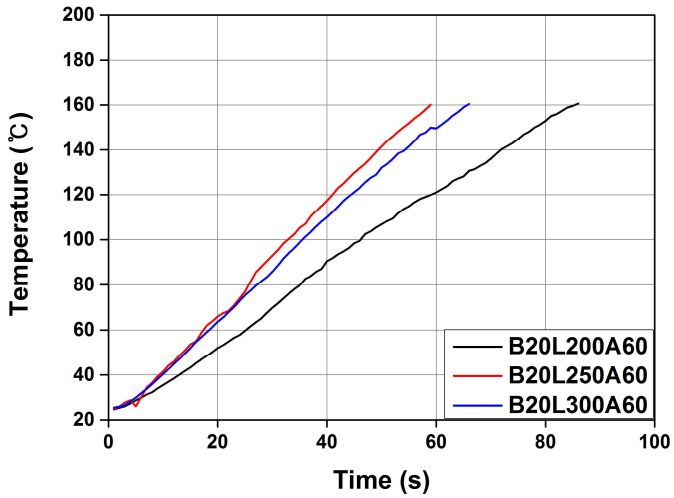
○ 실험 결과 SMA의 폭이 증가하며, 전류가 감소할수록 Fe-SMA가 160℃에 도달하는 시간 증가.

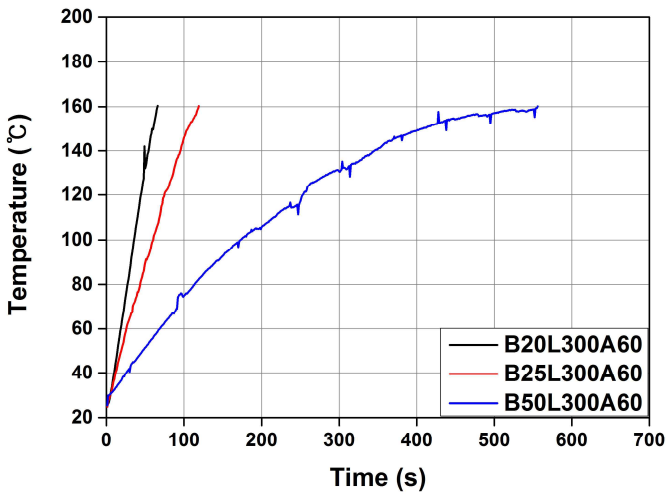
○ B50L300A60실험체와,B20L300A15, B20L300A30실험체의 경우 기울기가 급격히 감소하는 구간이 존재하여 160℃에 도달하는 시간이 급격히 증가.

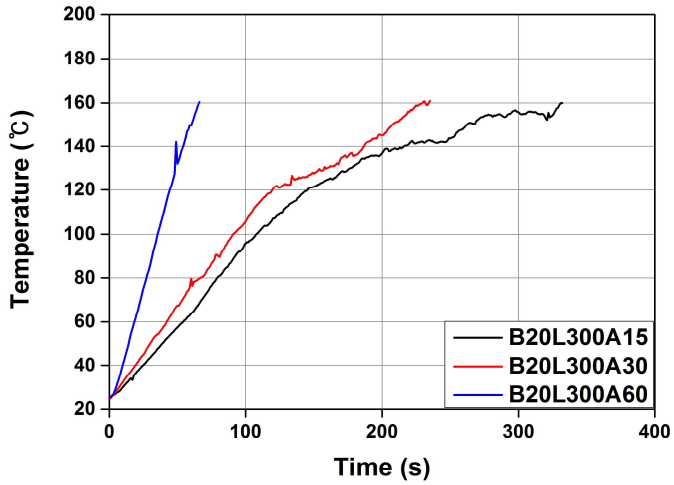
○ 실험결과 Fe-SMA를 일정량 가열하기 위하여 단위 폭 당 2A (2A/mm)로 가열하는 것이 가장 적절할 것으로 판단됨.



<Fe-SMA 전기저항 가열시간 및 전류 측정실험>







<변수별 시간-온도 곡선>

<실험 변수 및 160℃ 도달시간>

변수명	길이 (mm)	폭 (mm)	전류 (A)	도달시간 (s)
B20L200A60	200	20	60	86
B20L250A60	250			63
B20L300A15	300		15	336
B20L300A30			30	239
B20L300A60			60	70
B25L300A60		25		119
B50L300A60		50		556

(5) Fe-SMA의 전기저항 가열방법에 의한 회복응력 평가

○ 전기저항에 의한 Fe-SMA의 회복응력 평가 실험을 위하여 폭 10 mm, 길이 50 mm의 실험체 제작.

○ 실험 변수는 사전변형 2%, 4%, 6%, 8%로 하였으며, 온도는 100℃부터 30℃간격으로 0.25 mm/min의 변위제어 방식으로 하중을 가력하였고, 사전변형이 목표량에 도달한 후 잔류변형을 남기기 위하여 0.25mm/min의 속도로 응력을 감소시킴.

○ 응력이 0에 도달한 후 초기 열팽창에 의한 좌굴을 방지하기 위하여 50MPa의 초기응력을 가하였으며, 전력공급장치를 이용하여 저항열을 발생시키는 방법으로 목표 온도까지 가열.

○ 실험체가 목표 온도에 도달하면 전력을 차단한 후 대기중에서 20℃까지 서서히 냉각하며 회복응력 평가.

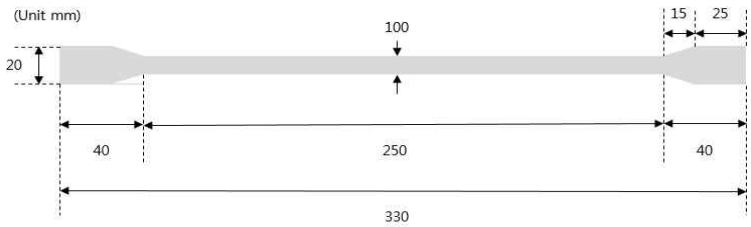
○ 실험결과 사전변형 2%, 4%, 6%, 8%의 경우 잔류변형은 각각 1.07%, 2.90%, 4.72%, 6.52%로 나타났으며, 이를 통하여 잔류변형(Y)과 사전변형(X)의 관계식을 도출 한 결과 Y=0.9234X-0.7696이라는 식 도출.

○ 사전변형 2%, 4%, 6%, 8%의 경우 온도가 증가함에 따라 평균 15%의 회복응력 증가.

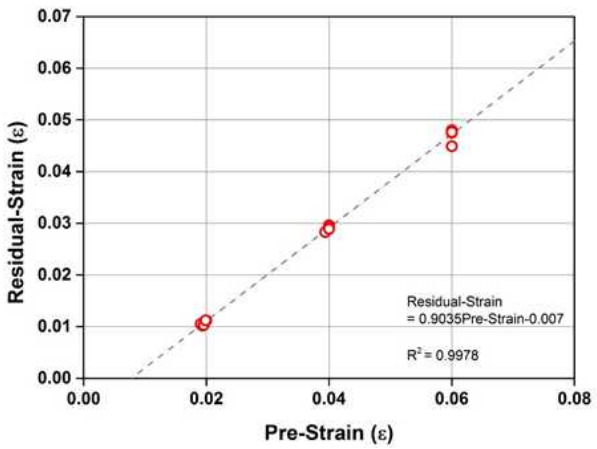
○ 목표 온도 160℃에서의 회복응력은 각각 358MPa, 398MPa, 374MPa, 349MPa.

○ 구조물 실험시 사전변형 4%가 가장 적절할 것으로 판단됨.



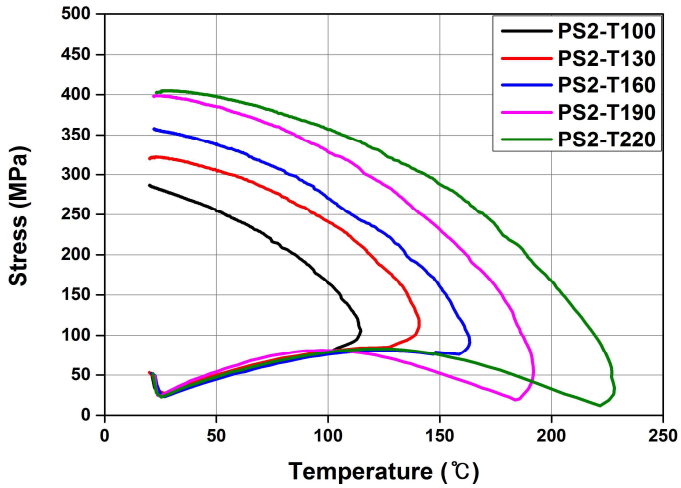


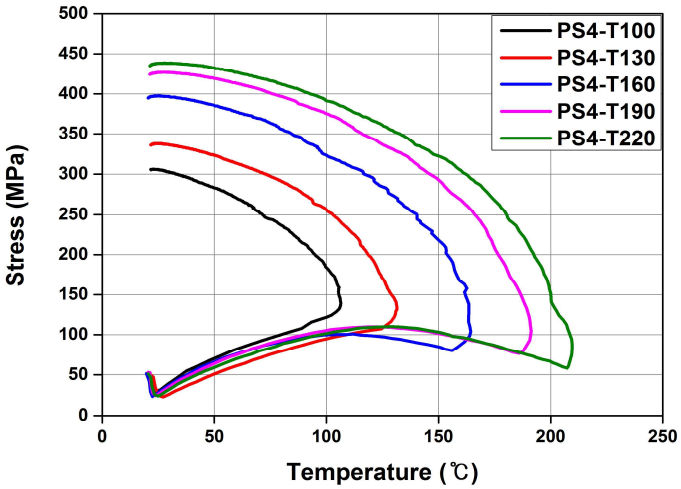
<실험전경 및 제원>

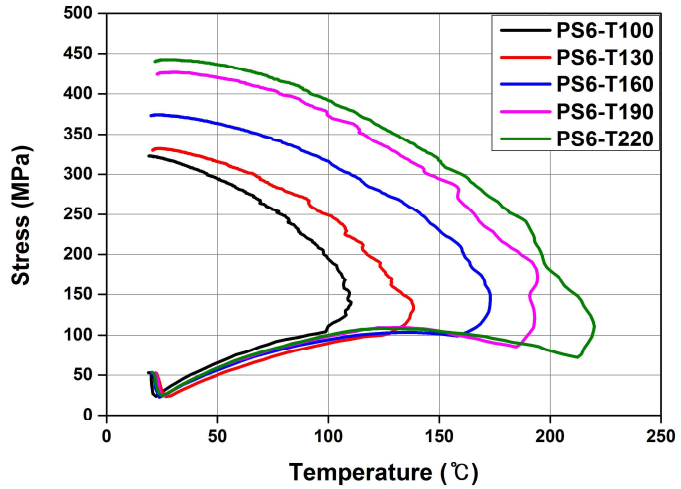


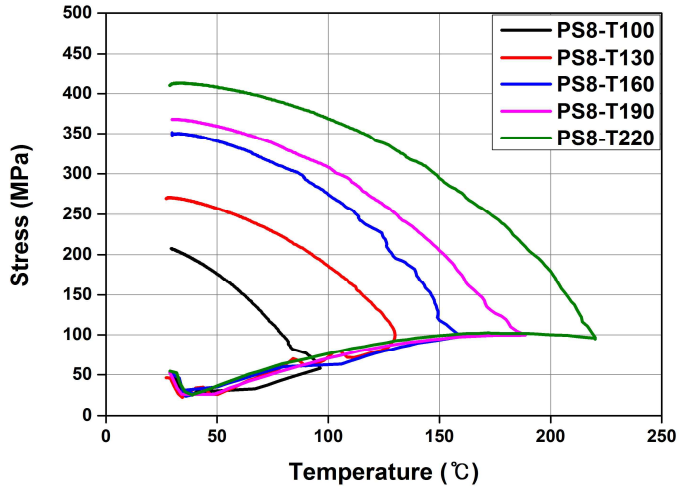
Pre-Strain	Residual-Strain
2%	1.07
4%	2.90
6%	4.72
8%	6.52

<사전변형-잔류변형 관계>









<Fe-SMA의 각 사전변형 및 온도별 회복응력 실험 결과>

(6) Fe-SMA와 모르타르 복합체의 거동평가

○ Fe-SMA와 모르타르 복합체의 거동을 확인하기 위해 폭 20 mm, 두께 1.5 mm의 Fe-SMA로 구성되어 있으며, 복합체는 폭 55 mm, 두께 30 mm, 길이 400 mm의 크기.

○ 실험체 제작은 소요의 변형률로 Fe-SMA를 인장시킨 후 K타입의 열전대를 3등분점을 부착한 뒤 개발된 모르타르를 타설하였으며, 28일간 양생을 거친 후 실험 진행.

○ 실험에 사용된 모르타르의 탄성계수는 28.47GPa로 측정되었으며, 이를 이용하여 Fe-SMA와 모르타르 복합체의 등가 탄성계수를 계산하면 30.64GPa.

○ 식 3.1을 사용하여 계산된 Fe-SMA와 모르타르 복합체의 온도-회복응력 관계는 회복온도가 100℃인 실험체의 경우 약 9.38MPa의 회복응력이 발생.

○ 회복온도가 130℃인 실험체는 회복온도 100℃인 실험체에 비하여 약 29.13% 증가된 12.11MPa의 회복응력이 발생.

○ 회복온도가 160℃인 실험체의 경우 회복온도 130℃인 실험체에 비하여 약 30% 증가된 15.75MPa의 회복응력이 발생.

○ 회복온도 100℃~160℃ 구간에서는 Fe-SMA의 회복온도가 30℃ 증가에 따라 회복응력은 약 30%씩 선형적으로 증가.

○ 회복온도가 190℃를 초과할 경우 수증기 발생과 함께 균열이 발생되며, 변형률 측정이 불가능.

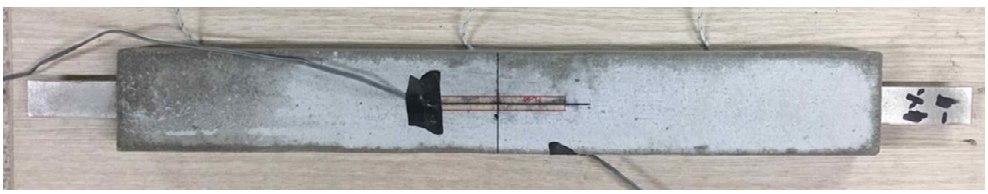
○ Fe-SMA를 콘크리트 구조물에 적용하기 위한 회복온도는 160℃가 가장 적절함.

$$\sigma_{recovery} = \epsilon_{recovery} \times E_{eq} \qquad \text{(식 3.1)}$$

여기서, $\sigma_{recovery}$: 회복응력(MPa)

$\epsilon_{recovery}$: 변형률

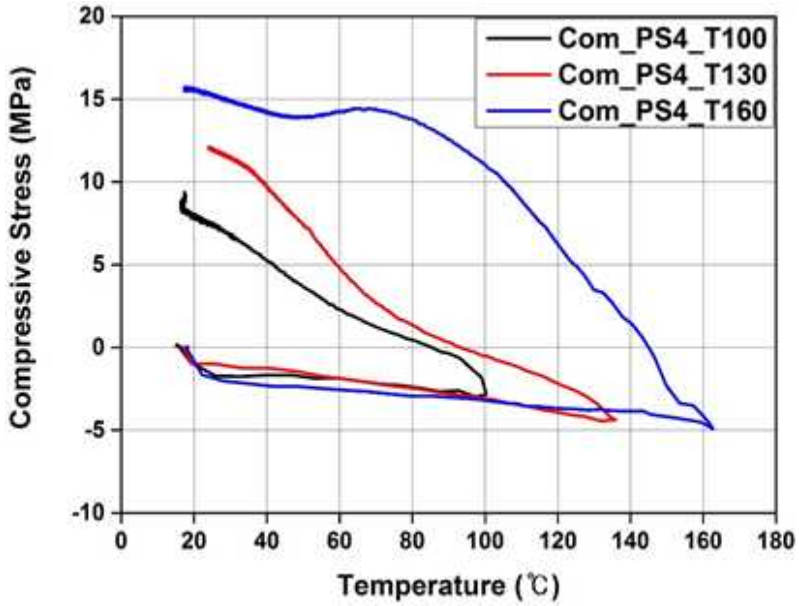
E_{eq} : 복합체 등가 탄성계수를 나타낸다.



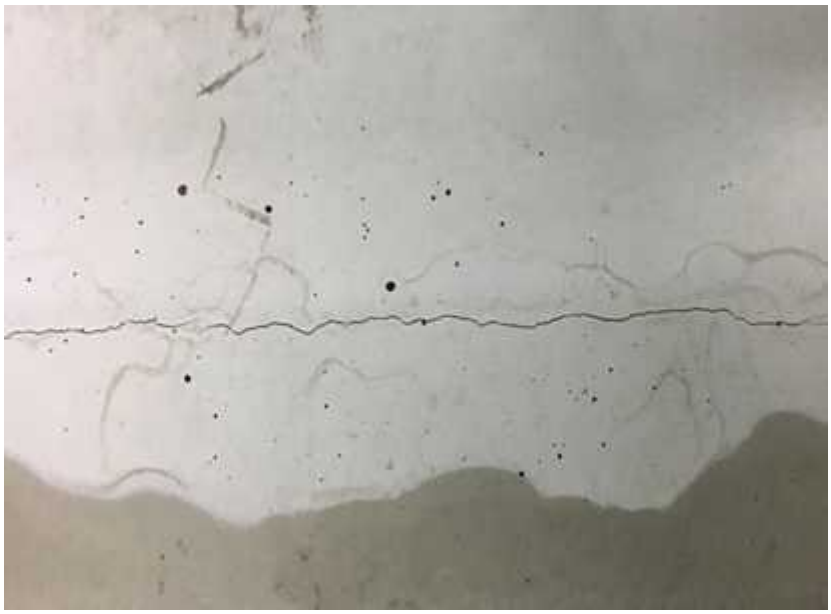
<Fe-SMA 모르타르 복합체 사진>



<Fe-SMA 복합체 실험전경>



<Fe-SMA 모르타르 복합체 온도-변형률 실험 결과>


<회복온도 190℃에서의 수증기 발생>

(7) Fe-SMA와 시멘트 매트릭스의 복합체 부착강도 모델 개발

○ Fe-SMA와 시멘트 매트릭스 복합체의 부착강도 모델 개발을 위해 모체의 크기는 500×130×150 mm 제작하였으며, 콘크리트 압축강도는 40MPa.

○ 모체 제작 21일 뒤 홈파기를 이용하여 폭 15mm 깊이 25 mm의 홈을 내었으며, 그 후 형상기억합금을 소요의 부착길이 만큼 삽입 후 고무를 이용하여 중심을 맞추는 동시에 SMA를 고정.

○ 모르타르를 보강재 사이에 주입한 후 소요기간 동안 기건양생을 실시하였으며, 양생이 끝난 뒤 회복이 필요한 변수의 경우 각 온도에 맞춰 회복을 시킨 뒤 1일 후 실험을 진행.

○ Fe-SMA와 시멘트 매트릭스 복합체의 부착강도 실험을 위하여, 정착길이(250 mm, 300 mm, 350 mm, 400 mm, 450 mm), 사전변형(2%, 4%, 6%, 8%), 회복온도(80℃, 120℃, 160℃, 200℃), 표면상태(Smooth, Rough, Saw tooth)를 변수로 고려함. 거친표면을 생성하기 위하여 샌드블라스터를 이용하여 SMA의 표면을 거칠게 만들었으며, 기계적 정착능력을 향상시키기 위하여 매 20mm 간격으로 2mm의 홈을 제작.

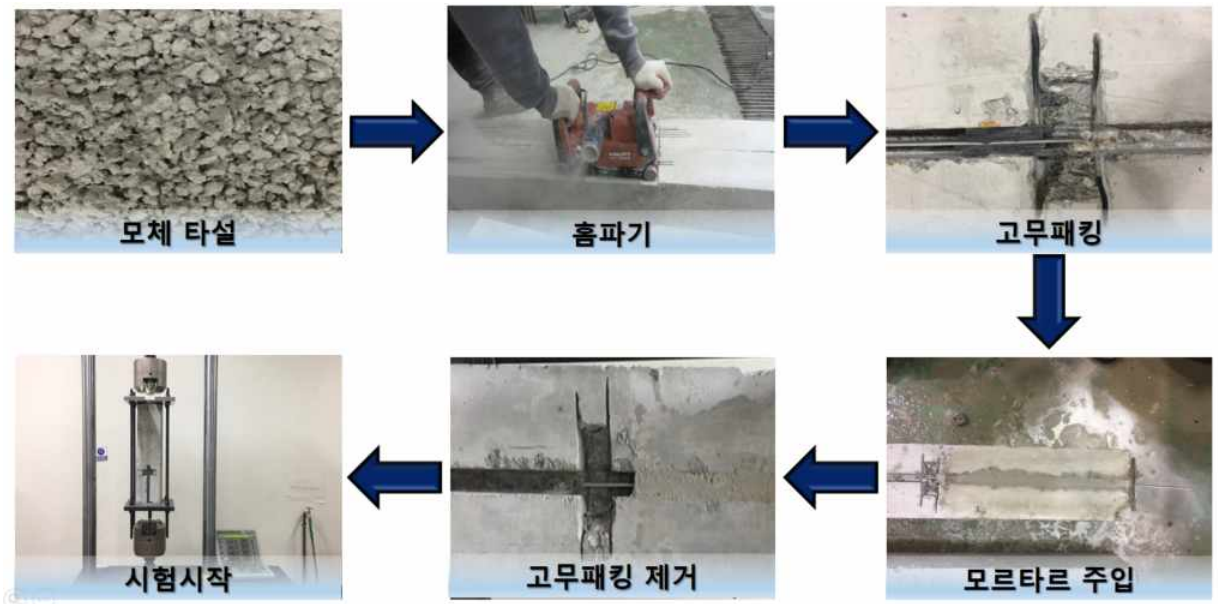
○ 실험결과 표면처리를 하지 않은 실험체에 비하여 샌드블라스터를 이용하여 표면 처리된 실험체가 약 10%정도 높은 부착하중을 나타냄.

○ 회복온도가 높아질수록 더 높은 부착하중이 증가하는 경향을 나타내었으며, 변형률 변화에 따른 부착하중 차이는 미미한 것으로 나타남. 또한, 부착 길이, 회복온도가 증가할수록 파괴전 슬립량은 증가.



<Smooth> <Rough> <Saw tooth>

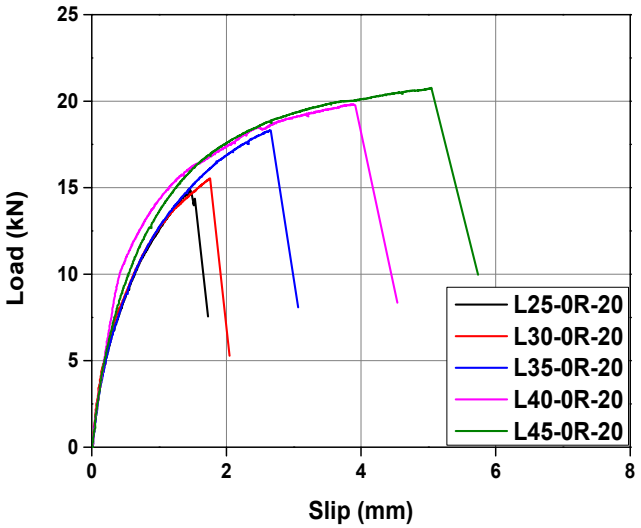
<형상기억합금 표면 변수>



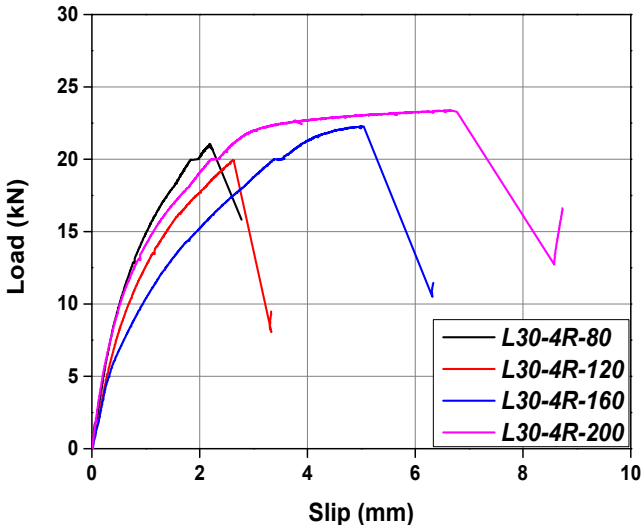
<Fe-SMA와 시멘트 매트릭스의 복합체 부착강도 실험과정>

<Fe-SMA와 시멘트 매트릭스의 복합체 부착강도 실험변수 및 결과>

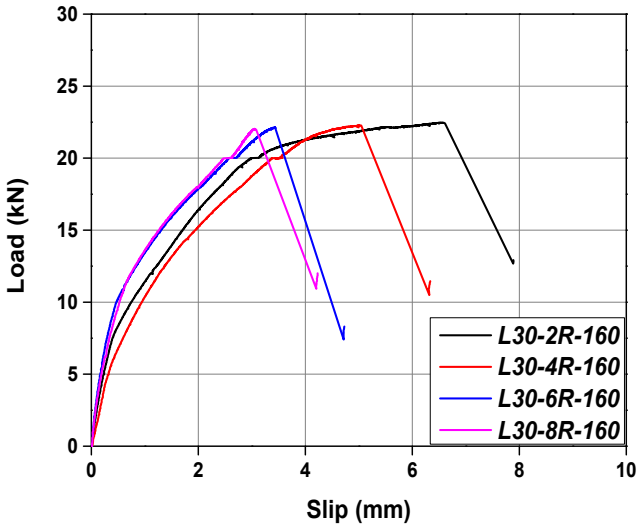
변수명	부착길이 (mm)	표면상태	회복온도 (℃)	사전변형 (%)	슬립하중 (kN)	해석값 (kN)	실험값/ 해석값
L25-0R-20	25	Rough	20	0	14.87	12.149	1.224
L30-0R-20	30				15.538	14.578	1.066
L35-0R-20	35				18.32'3	17.008	0.998
L40-0R-20	40				19.818	19.438	0.995
L45-0R-20	45				20.774	21.868	1.007
L30-2R-160	30		160	2	22.473	22.325	0.998
L30-4R-80	30		80	4	19.95	19.993	0.995
L30-4R-120			120		21.061	21.159	0.992
L30-4R-160			160		22.272	22.325	0.987
L30-4R-200			200		23.369	23.492	1.016
L30-6R-160			160	6	22.157	22.325	1.000
L30-8R-160			160	8	22.039	22.325	1.077
L30-0S-20		Smooth	20	0	13.978	13.971	1.002
L30-0ST-20		Saw-Tooth			18.323	18.223	0.950
평균							1.024



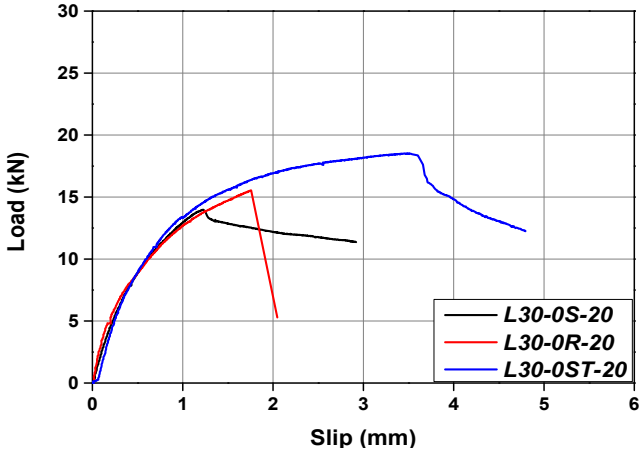
<길이별 하중-슬립 결과>



<회복 온도별 하중-슬립 결과>



<사전변형별 하중-슬립 결과>



<표면상태별 하중-슬립 결과>

○ 제안된 부착 모델식과 실험결과를 비교한 결과 약 97%의 높은 정확도를 보이며. 제안된 부착강도 모델은 다음과 같음.

$$P_u = \alpha\beta\gamma\sqrt{f_c}\,d_p^{1.36}b_p^{0.21} \ll f_{rup}b_p d_p \qquad \text{(식 3.2)}$$

여기서,

f_c : 콘크리트 모체 강도 d_p : Fe-SMA의 폭 b_p : Fe-SMA의 두께

f_{rup} : Fe-SMA의 극한강도 α : 표면상태 계수 β : 매립길이 계수

γ : 온도계수

α = 0.023 (표면처리를 하지 않았을 경우)

= 0.024 (샌드플라스팅을 이용하여 표면처리를 한 경우)

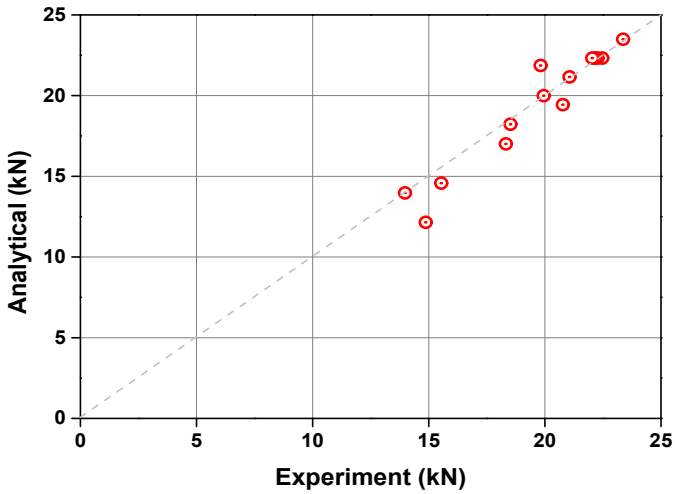
= 0.03 (샌드블라스팅 및 형상처리를 한 경우)

$\beta = L/200$

여기서 L : 부착길이(mm)

$\gamma = 0.002T + 1.2114$ (회복을 한 경우)

= 1 (회복을 하지 않은 경우)



<Fe-SMA와 시멘트 매트릭스의 복합체 부착강도 실험결과 및 해석결과 비교>

(8) 정착장치에 의한 Fe-SMA 보강성능 평가.

○ Fe-SMA와 시멘트계 매트릭스의 부착실험 결과를 이용하여 사용성 평가 실시.

○ 부착길이 증가에 따라 Fe-SMA의 사용성은 선형적으로 증가하는 경향을 보임.

○ 실험 결과를 이용하여 1차원 회귀 분석을 실시함.

○ 분석결과 시멘트계 매트릭스로 부착된 Fe-SMA의 사용성은 식 3.3과 같이 나타남.

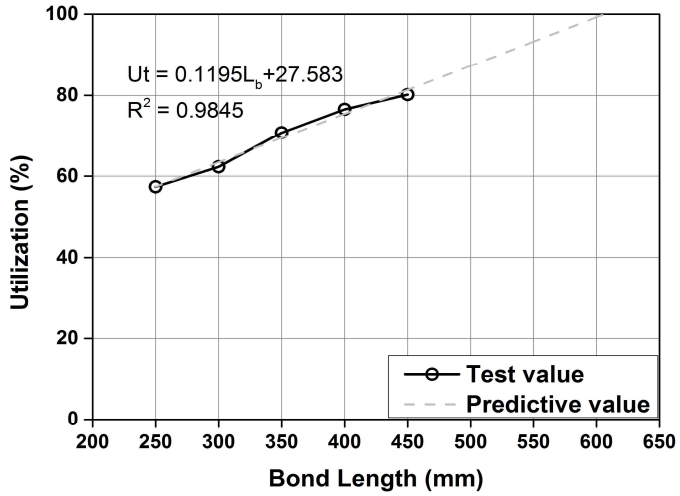
$$Utilization = 0.1195L_b + 27.583 \quad \text{(식 3.3)}$$

여기서,

$Utilization$: 사용성(%) L_b : 부착길이

○ 식 3.3을 통해 시멘트계 매트릭스로 부착된 Fe-SMA의 유효부착길이는 606 mm인 것을 확인.

○ 유효부착길이가 606 mm 이상인 경우 정착장치 적용의 무의미 한 것으로 판단.



제 2절. 2차연도 수행 내용

1. Fe-SMA로 보강된 RC구조물의 장기거동

○ Fe-SMA를 보강재로 사용하여 표면 매립보강공법(NSM)으로 구조물을 보강하였을 때 보강성능 및 부재의 처짐 회복여부를 확인하기 위해 총 6개의 슬래브를 제작.

○ 슬래브의 단면 치수는 300 × 200 mm, 길이는 3,000 mm이며, 지점간의 거리는 2,700 mm로 양쪽 부재 끝에서 중심부로 150 mm 거리를 두고 지점을 설치.

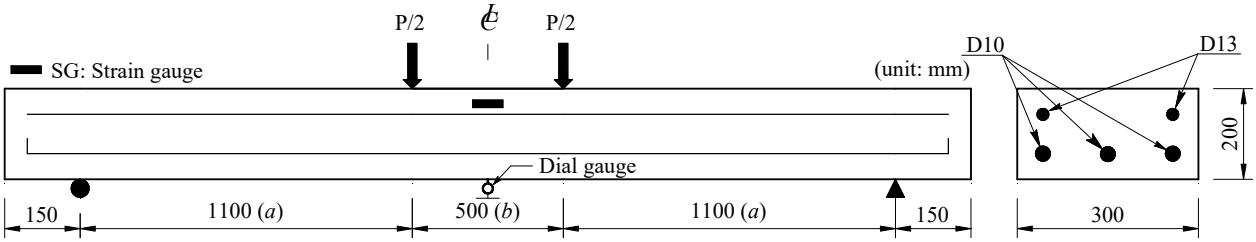
○ 콘크리트의 피복 두께는 30 mm이며, 인장철근으로 직경 10 mm의 SS400의 이형철근 3개를 배근하였으며, 실험체의 크리프와 건조수축에 대한 구속효과를 최소화하기 위하여 직경 13 mm의 이형철근 2개를 압축부 배근.

○ 실험체 제작 시 사용된 콘크리트의 압축강도는 30MPa.

○ 실험체 양생 후 홈파기를 이용하여 폭 20 mm, 깊이 30 mm, 길이 3,000mm의 홈을 형성하였으며, 홈파기가 완료 된 후 표면에 거칠기 면이 조성된 Fe-SMA 홈 삽입.

○ 삽입된 Fe-SMA의 폭과 두께는 각각 20 mm, 1.5 mm이며, 보강길이는 순지간의 90%인 2,430 mm.

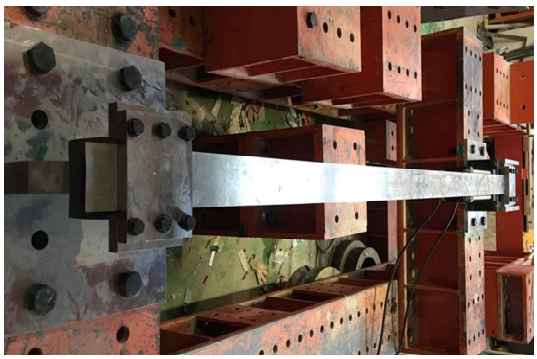
○ 삽입이 끝난 후 모르타르를 이용하여 홈을 충진하였으며, 28일간 기건양생 실시.



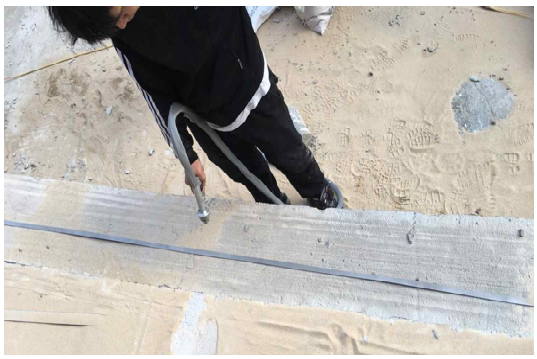
<Fe-SMA로 보강된 RC 구조물의 장기거동 실험체 제원>



(a) 홈파기



(b) Fe-SMA 사전변형



(c) 샌드블라스팅

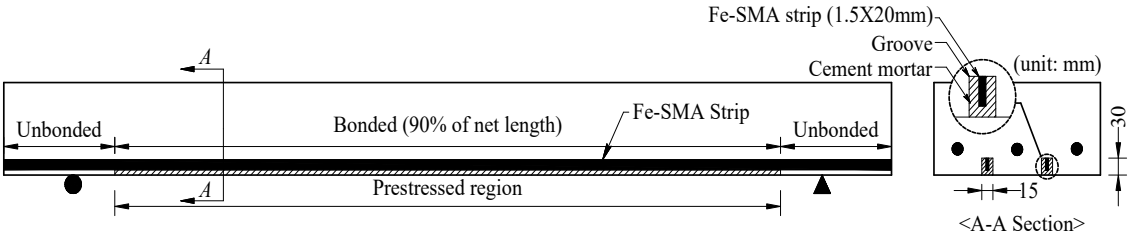


(d) 모르타르 주입

<Fe-SMA 보강>

○ 양생이 끝난 후 약 10kN 중량의 콘크리트 추를 시편 중앙에 거치하였으며. 즉시 처짐이 안정화된 후 전력공급장치를 이용하여 Fe-SMA에 10A/mm^{2}의 전류 공급.

○ Fe-SMA가 목표 온도에 도달하면 전력 차단 후 Fe-SMA 냉각, 그 후 다이얼게이지를 이용하여 실험체의 처짐 1일 간격으로 측정.



<Fe-SMA 보강 상세도>



<Fe-SMA 보강 실험전경>

○ Fe-SMA로 보강된 보의 장기거동을 평가하기 위해, Fe-SMA 보강 유·무, Fe-SMA의 활성화 유·무, Fe-SMA의 사전변형(0%, 2%, 4%), Fe-SMA 활성화 시간(6month, 1year)를 변수로 실험 진행.

<Fe-SMA로 보강된 RC 구조물의 장기거동 실험변수>

변수명	보강재료	사전변형	초기활성화 유무	재활성화 시간
Control	-	-	-	-
PRE0-NO-1Y	Fe-SMA	0%	None	1 year
PRE2-NO-1Y		2%	None	1 year
PRE2-AC-1Y			Activate	1 year
PRE4-NO-1Y		4%	None	1 year
PRE4-AC-6M			Activate	6 month
PRE4-AC-1Y			Activate	1 year

○ Fe-SMA가 보강되지 않은 Control은 10kN의 하중이 재하되었을 때 5.1 mm의 즉시 처짐이 발생.

○ 사전변형을 가하지 않고 보강한 실험체인 PRE0-NO-1Y는 약 10kN의 하중이 재하되었을 때 즉시 처짐은 1.78 mm로 Control 대비 65% 감소.

○ Fe-SMA에 사전변형을 2% 가한 후 보강한 실험체인 PRE2-NO-1Y, PRE2-AC-1Y는 약 10kN의 하중이 재하되었을 때 각각 2.08, 2.03 mm의 즉시 처짐이 발생하였으며, 이는 Control 대비 약 60% 감소된 즉시 처짐이 발생.

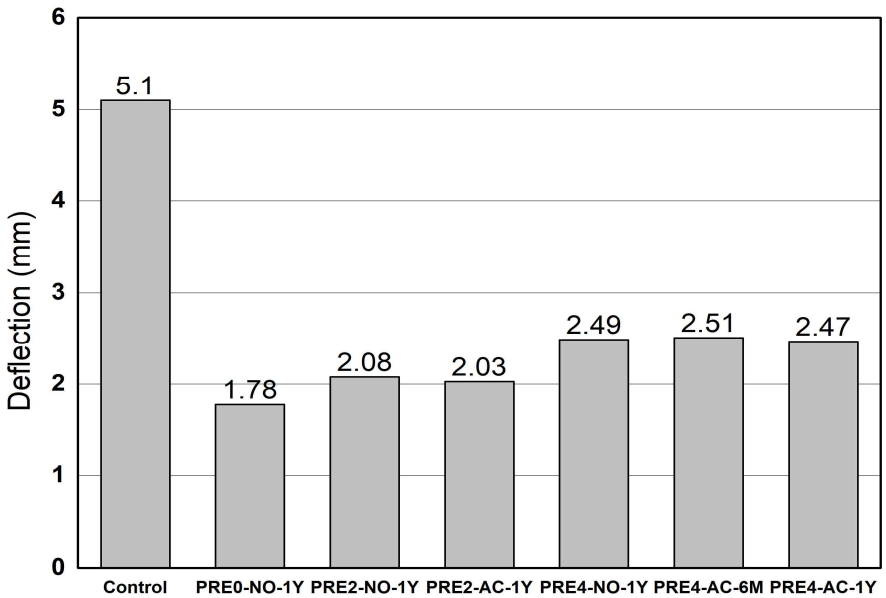
○ Fe-SMA에 사전변형을 4% 가한 후 보강한 실험체인 PRE4-NO-1Y, PRE4-AC-6M, PRE4_AC-1Y의 경우 10kN의 하중을 재하하였을 때 각각 2.49, 2.51, 2.47 mm의 즉시 처짐이 발생하였으며, 이는 Control 대비 약 50% 감소된 즉시 처짐이 발생.

○ Fe-SMA의 보강량이 같더라도 사전변형이 증가됨에 따라 10kN의 하중이 재하되었을 때 즉시 처짐은 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 사전변형 증가함에 따라 Fe-SMA의 강성이 감소되어 응력이완이 크게 발생되기 때문인 것으로 판단됨.

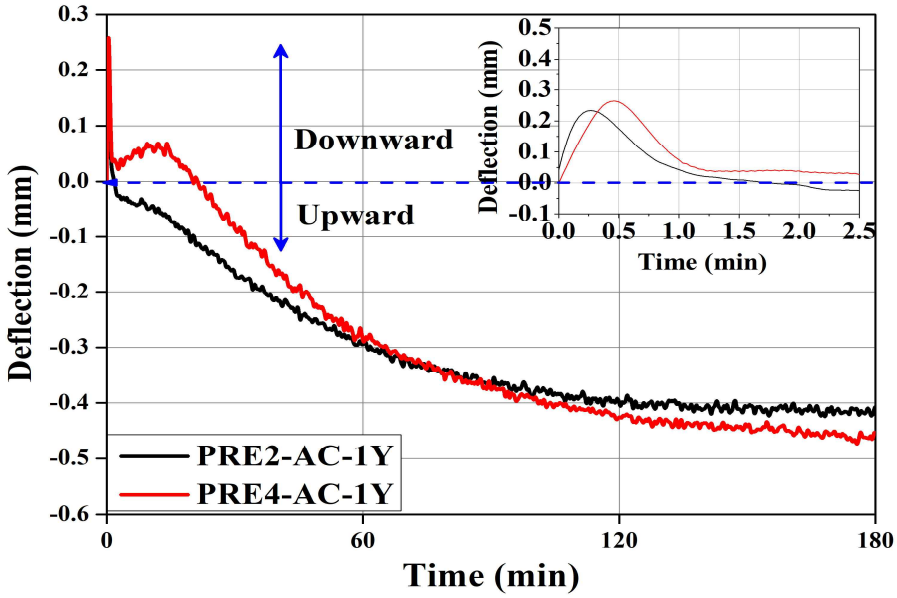
○ 즉시 처짐이 안정화 된 이후 Fe-SMA의 사전변형을 2%로 한 실험체인 PRE2-AC-1Y는 가열 초기에 열팽창으로 인하여 약 0.24 mm 하향 처짐이 발생하였으며, 그 후 약 3시간동안 Fe-SMA가 활성화가 되며 약 0.41 mm의 상향 처짐이 발생.

○ Fe-SMA의 사전변형이 4%인 PRE4-AC-1Y, PRE4-AC-6M의 경우 가열 초기에 열팽창으로 인하여 약 0.25 mm의 하향 처짐이 발생하였지만, Fe-SMA가 활성화되며 약 0.467 mm의 상향 처짐이 발생.

○ Fe-SMA가 활성화 됨에 따라 캠버효과(Camber Effect)에 의해 실험체에서 상향 처짐이 발생되는 것으로 판단됨.



<Fe-SMA 즉시 처짐 실험결과>



<Fe-SMA 활성화에 따른 시간-처짐 관계>

○ 실험체 거치 후 365일이 지난 시점에서 Fe-SMA로 보강하지 않은 실험체인 Control의 경우 즉시 처짐량에 비해 3.53 mm가 추가적으로 처진 8.63 mm의 처짐이 발생.

○ 초기 Fe-SMA를 활성화시키지 않은 실험체인 PRE0-1Y, PRE2-NO-1Y, PRE4-NO-1Y의 경우 실험체 거치 후 365일이 지난 시점에서의 총 처짐량은 각각 4.8 mm, 5.42 mm, 6.64 mm로 즉시 처짐 경향과 마찬가지로 Fe-SMA의 사전변형이 증가함에 따라 총 처짐량도 증가.

○ Fe-SMA의 사전변형이 증가함에 따라 강성이 감소하여 응력이완이 크게 발생.

○ 초기 Fe-SMA를 활성화시킨 실험체인 PRE2-AC-1Y, PRE4-AC-1Y의 경우 실험체 거치 후 365일이 지난 뒤 각각 2.46 mm, 2.62 mm의 추가 처짐이 발생되었으며, 이는 PRE2-NO-1Y, PRE4-NO-1Y와 비교해서 각각 26%, 37% 감소된 추가 처짐이 발생.

○ 초기 활성화를 시킨 후 180일 뒤에 Fe-SMA를 재활성화 시킨 실험체인 PRE4-AC-6M의 경우 재활성화 이전까지 PRE4-AC-1Y와 유사한 거동을 보이고 있지만 재활성화 직후 처짐량이 0.379mm 감소하였으며 이후 처짐 증가율이 감소되어 365일이 지난 시점에서 추가 처짐량은 PRE4-AC-1Y에 비하여 약 6.5% 감소된 2.45 mm로 나타남.

○ Fe-SMA를 활성화 시킨 실험체가 활성화시킨 실험체에 비하여 장기 처짐이 작게 나타나는 이유는 Fe-SMA의 회복응력으로 인한 프리스트레싱 효과에 의한 것으로 판단됨.

○ 실험체 거치 후 365일 후에 전력공급장치를 이용하여 Fe-SMA를 활성화 시킴.

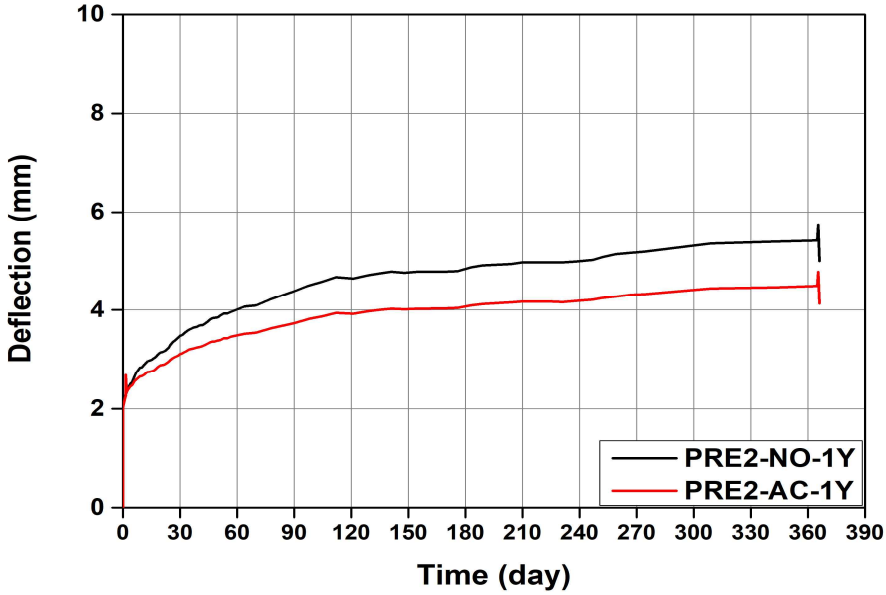
○ 사전변형이 0%인 PRE0-NO-1Y는 활성화 직후 0.23 mm의 하향 처짐 발생한 후 Fe-SMA 활성화에 따라 0.34 mm의 상향 처짐발생.

○ 사전변형 2%인 PRE2-NO-1Y, PRE2-AC-1Y는 재활성화시 열팽창에 의해 각각 0.31, 0.287 mm의 하향 처짐 발생 후 Fe-SMA 활성화에 따라 0.418, 0.358 mm의 상향 처짐이 발생.

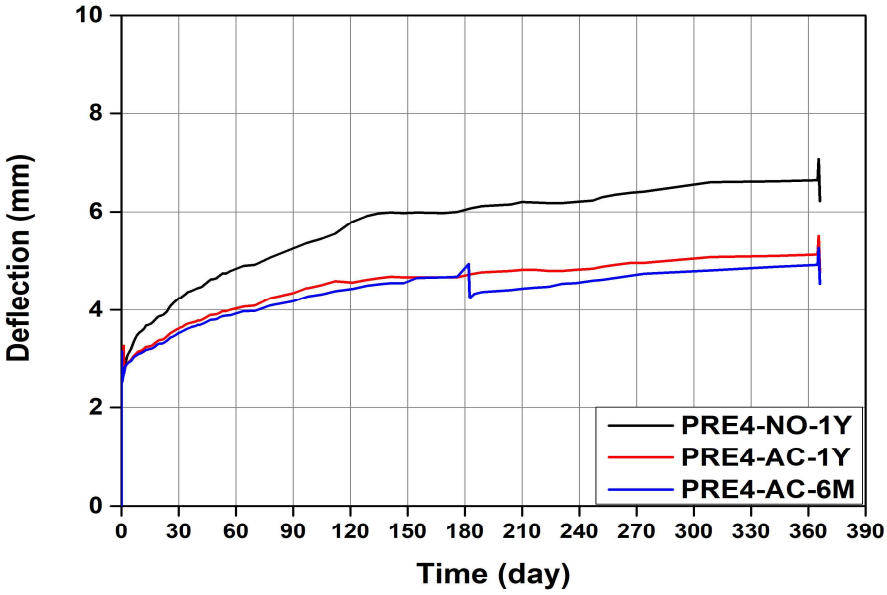
○ PRE2-NO-1Y, PRE2-AC-1Y의 상향 처짐은 초기복원력인 0.41 mm 대비 각각 102%, 87%로 나타남.

○ 사전변형 4%인 PRE4-NO-1Y, PRE4-AC-1Y, PRE4-AC-6M은 초기 복원력 대비 각각 81%, 77%, 82% 수준의 복원력을 보임.

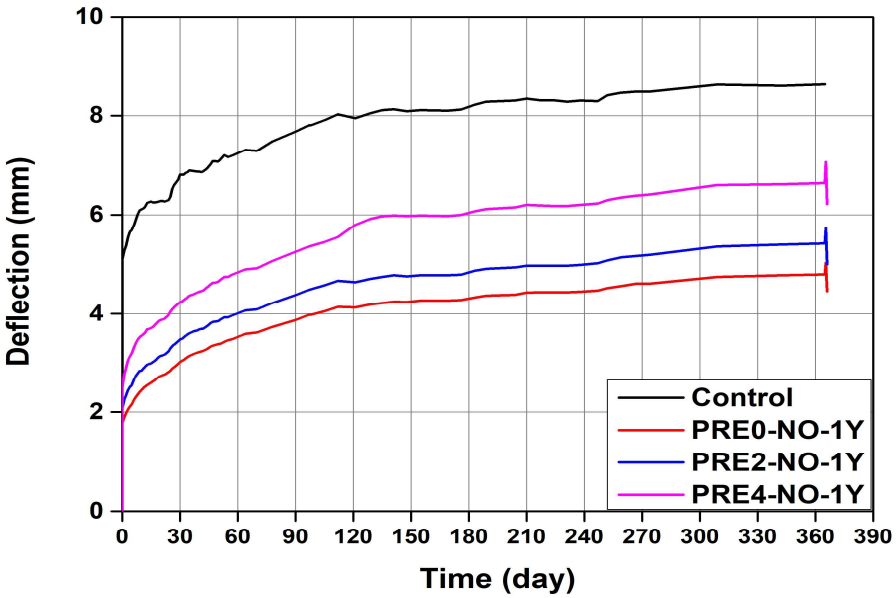
○ 이는 처짐발생에 따른 사전변형 증가에 의해 회복응력이 감소되었기 때문인 것으로 보임.



< Fe-SMA의 사전변형 2%에서 시간-처짐 관계>



<Fe-SMA의 사전변형 4%에서 시간-처짐 관계>



<Fe-SMA의 사전변형에 따른 시간-처짐 관계>

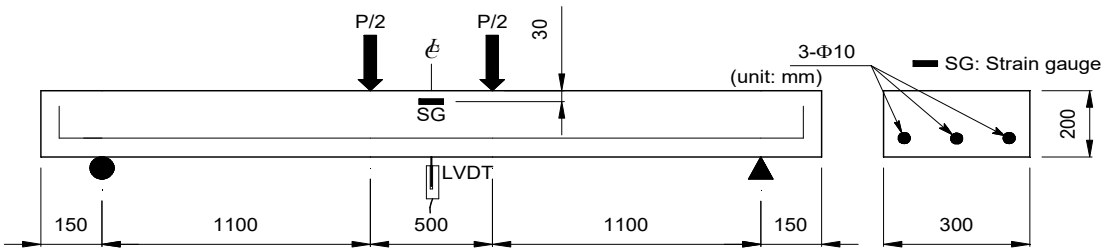
2. Fe-SMA로 보강된 구조물의 거동특성

○ Fe-SMA로 보강된 보의 거동특성을 파악하기 위하여 총 7개의 실험체를 제작.

○ 실험체의 단면치수는 장기거동 평가를 위한 실험체와 동일하게 폭 300 mm, 높이 200 mm 이며, 실험체의 길이는 3,000 mm 순지간은 2,700 mm로 설정.

○ 실험체의 피복두께는 30 mm이며, 인장철근으로 직경 10 mm의 SS400 철근 3개를 배근.

○ 실험체 제작 시 사용된 콘크리트는 32.2MPa.



<실험체 제원>

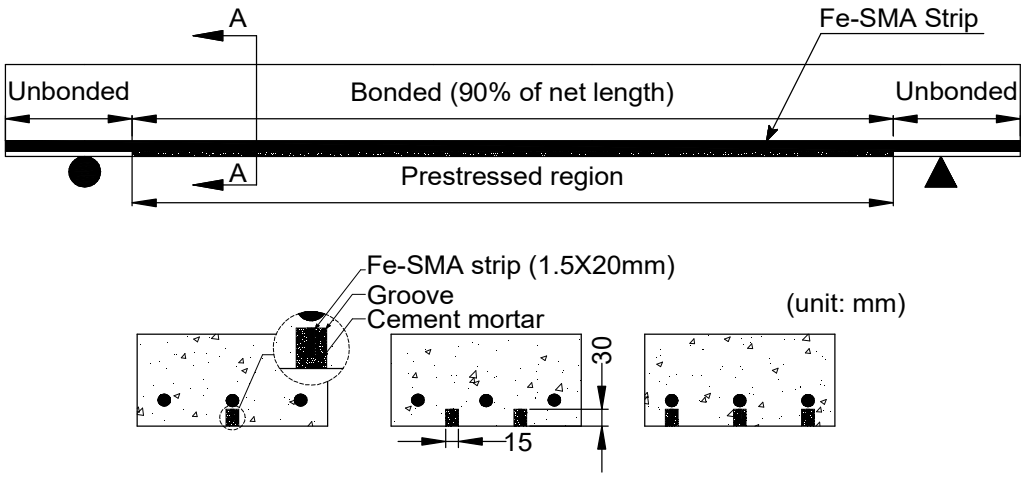
○ 실험체 양생 후 홈파기를 이용하여 폭 20 mm, 깊이 30 mm, 길이 3,000 mm의 홈을 형성하였으며, 홈파기가 완료 된 후 샌드 블라스터를 이용하여 표면에 거칠기 면을 조성.

○ 그 후 인장장치를 이용하여 Fe-SMA를 목표 변형률만큼 변형을 시켜 Fe-SMA에 사전변형을 가하였으며, Fe-SMA가 열에 의하여 변형되지 않도록 워터젯 컷팅을 사용하여 실험체를 규격에 맞게 절단.

○ Fe-SMA의 폭과 두께는 각각 20 mm, 1.5 mm이며, 보강길이는 순지간의 90%인 2,430 mm 이며, 형성된 홈에 시험체를 삽입한 후 개발된 모르타르를 이용하여 홈을 채워 28일간 기건양생을 실시.



<Fe-SMA 사전변형 가력>



<Fe-SMA 보강 상세도>

○ 실험 변수로써 보강재의 종류(무보강, CFRP, Fe-SMA) 보강재 개수(0, 1, 2, 3), 사전변형(0%, 2%, 4%)을 실험 변수로써 고려.

○ CFRP Plate의 경우 Fe-SMA와 같이 폭, 두께가 각각 20 mm, 1.5 mm이며, 보강길이 또한 순지간의 90%인 2,430 mm로 설정.

<Fe-SMA로 보강된 RC 구조물의 거동특성 실험변수>

변수명	보강재료	사전변형	보강량
SL-CTRL	-	-	-
SL-2C	CFRP	-	60mm^2
SL-2S-PS0	Fe-SMA	0	60mm^2
SL-2S-PS2		2	60mm^2
SL-1S-PS4		4	30mm^2
SL-2S-PS4			60mm^2
SL-3S-PS4			90mm^2

○ 콘크리트 보에 매립된 Fe-SMA를 활성화시키기 위하여 콘크리트 보를 거치한 후 전력공급장치를 이용하여 10A/mm^2 전류 공급.

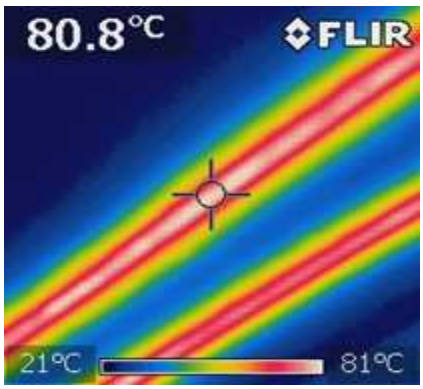
○ 전기저항을 통해 발생된 열은 삽입된 Fe-SMA 중앙에 부착된 K-Type 열전대를 이용하여 측정하였으며, Fe-SMA가 목표온도에 도달한 후 전력을 차단하여 열 공급 중단.

○ 전기저항시 발생된 열이 콘크리트 피복에 미치는 영향을 확인하기 위하여 적외선 카메라를 통해 표면온도 측정.

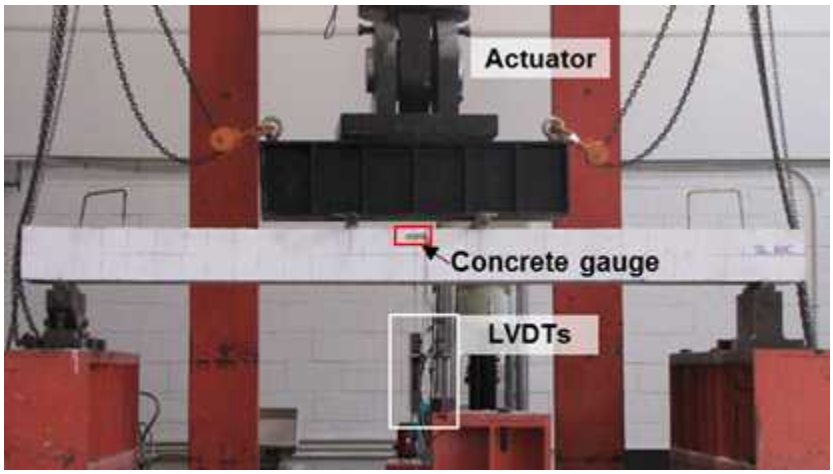
○ Fe-SMA가 활성화 되면서 발생된 캠버효과에 의한 상향 처짐이 수렴된 후에 2,000kN 용량의 엑츄레이터를 사용하여 3mm/min의 속도로 4점 휨 실험을 수행하였으며, 하중점 사이의 간격은 500 mm로 Fe-SMA로 보강된 보의 장기거동평가 실험체와 동일한 실험 조건으로 실험.



<전기저항을 통한 Fe-SMA 활성화>



<콘크리트 표면온도>

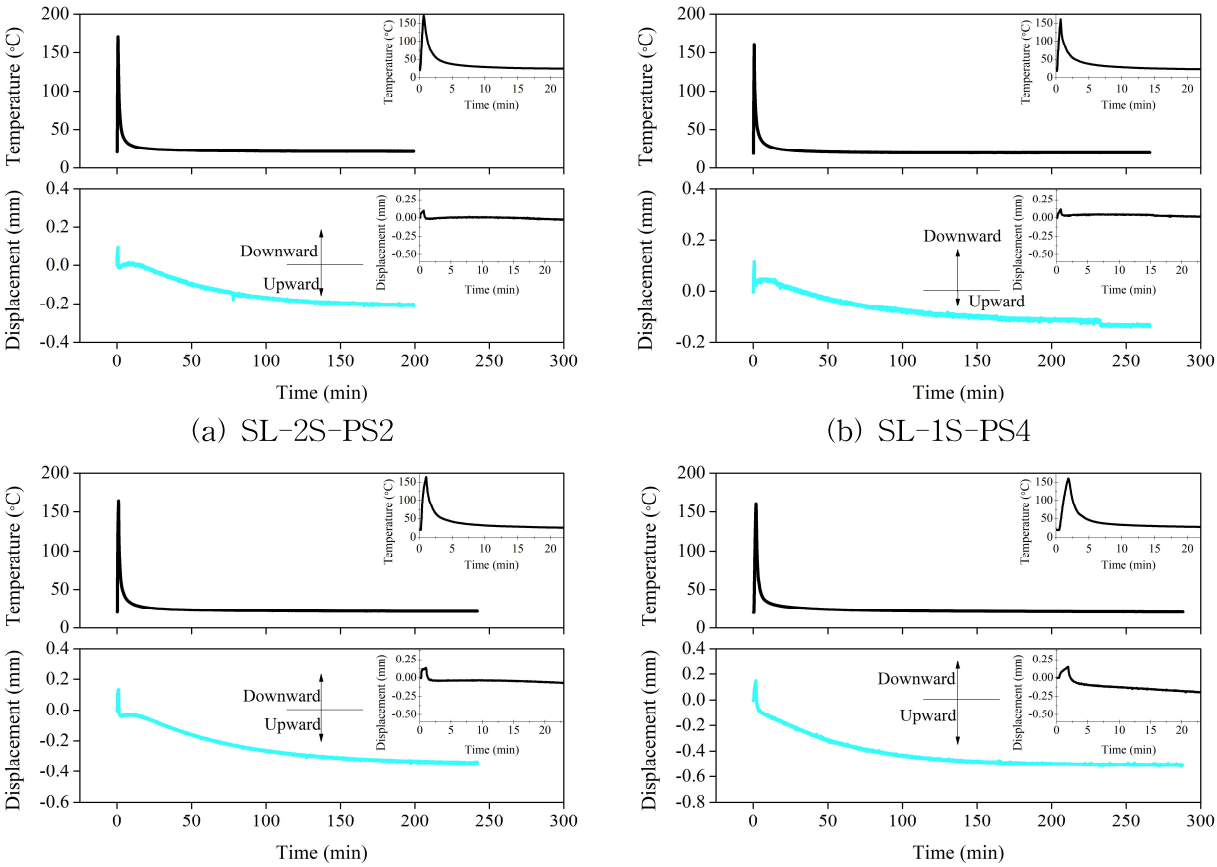


<실험전경>

○ Fe-SMA로 보강된 보는 활성화 시 두가지 처짐 양상을 나타냄. 가열 초기에는 Fe-SMA의 열팽창으로 인하여 SL-2S-PS2, S-1S-PS4, SL-2S-PS4, SL-3S-PS4 실험체 중앙에서 각각 0.097, 0.114, 0.134, 그리고 0.151 mm의 하향처짐 발생.

○ 가열 초기 Fe-SMA의 열팽창으로 인한 하향 처짐은 가열이 완료된 후 회복응력이 발생됨에 따라 프리스트레스 효과에 의해 복원되었으며, 캠버 효과로 상향 처짐 발생.

○ 캠버 효과에 의한 상향 처짐이 종료된 후 SL-2S-PS4, SL-4S-PS2, SL-4S-PS4, SL-6S-PS6 실험체 중앙의 상향 처짐은 각각 0.205, 0.218, 0.443, 그리고 0.625 mm.



(a) SL-2S-PS2 (b) SL-1S-PS4

(c) SL-2S-PS4 (d) SL-3S-PS4

<Fe-SMA 활성화 시간에 따른 변위 및 온도>

○ Fe-SMA 활성화시 발생한 상향 처짐과 콘크리트의 휨 강성 및 탄성계수를 토대로 Fe-SMA의 회복응력 계산.

○ 회복응력을 계산하기 위한 식 3.4~3.7은 Fe-SMA 매립길이를 고려하여 회복응력을 산정하는 식.

○ 회복응력 계산 시 건조수축 및 크리프, 보의 자중에 대한 영향은 무시하였으며, 콘크리트 보 하단에 매립된 Fe-SMA는 형상기억 효과에 의해 압축력을 발생시키고 이 힘은 편심과 함께 매립된 Fe-SMA 전구간에 동일한 휨 모멘트 유발.

○ 이론적으로 계산된 회복응력과 실험을 통해 얻은 회복응력은 약 2%~15%정도 차이를 나타내며, 평균적으로 약 92%의 정확도를 보여 비교적 적절하게 Fe-SMA가 활성화 됨.

○ SMA 보강량 증가에 따라 Fe-SMA의 가열시간은 증가하는 경향이 나타났으며, 가열시간 증가로 인한 실험체의 열팽창이 증가하였고 이는 보에 작용하는 회복응력을 감소시키는 원인이 된 것으로 판단됨.

○ Fe-SMA를 사용하여 실험체를 활성화 하였을 때, 기존 프리스트레스 보강공법과는 다르게 긴장 및 정착과정이 생략되어 철근 콘크리트 부재에 쉽게 프리스트레스를 도입시킬 수 있을 것으로 판단됨.

<Fe-SMA로 보강된 RC 구조물의 장기거동 실험변수>

변수명	회복응력(실험값)	회복응력(계산값)	실험/계산
SL-2S-PS2	358.09	351.7	1.02
SL-1S-PS4	397.5	363.5	1.09
SL-2S-PS4	397.5	369.3	1.08
SL-23-PS4	397.5	345.3	1.15

$$\delta = \frac{Ml_0(l-l_0)}{4EI} + \frac{Ml_0^2}{8EI} \quad \text{(식 3.4)}$$

$$M = 8EI\frac{Ml_0^2}{2l_0(l-l_0)+l_0^2} \quad \text{(식 3.5)}$$

$$M = P_{recovery}e = A_{SMA}\sigma_{recovery}e \quad \text{(식 3.6)}$$

$$\sigma_{recovery} = \frac{8EI\delta}{A_{SMA}e\left[2l_0(l-l_0)+l_0^2\right]} \quad \text{(식 3.7)}$$

여기서,

δ : 중앙 처짐 l_0 : Fe-SMA 보강 길이 l : 순지간

M : 프리스트레스 모멘트 $P_{recovery}$: 회복력 A_{SMA} : SMA 단면적

$\sigma_{recovery}$: 회복응력 EI : 강성 e : 편심거리 이다.

○ CFRP 스트립으로 보강된 실험체의 파괴 양상의 경우 항복하중 이전에 CFRP 스트립과 개발된 모르타르 충진재 사이에 계면부착응력 부족으로 슬립현상이 발생하여 조기에 파괴.

○ 무보강 실험체 및 Fe-SMA로 보강된 실험체들은 인장철근 및 보강재의 항복 이후 휨 균열이 압축부로 성장한 후 콘크리트 압축파괴로 이어지는 전형적인 휨 파괴 양상을 보임.

○ Fe-SMA 보강량 증가에 따라 더 많은 수의 휨 균열이 발생하였으며, 균열 폭은 감소.

○ 무보강 실험체인 SL-CTRL의 경우 7.42kN에서 초기균열이 발생하였지만, CFRP Plate와

활성화 되지 않은 Fe-SMA를 이용하여 보강한 SL-2C, SL-2S-PS0은 SL-CTRL에 비하여 각각 35%, 34%증가된 10.03kN, 9.94kN에서 초기균열이 발생.

○ 보강재에 의한 균열제어는 보강재의 탄성계수가 클수록 균열제어 효과가 크게 나타남.

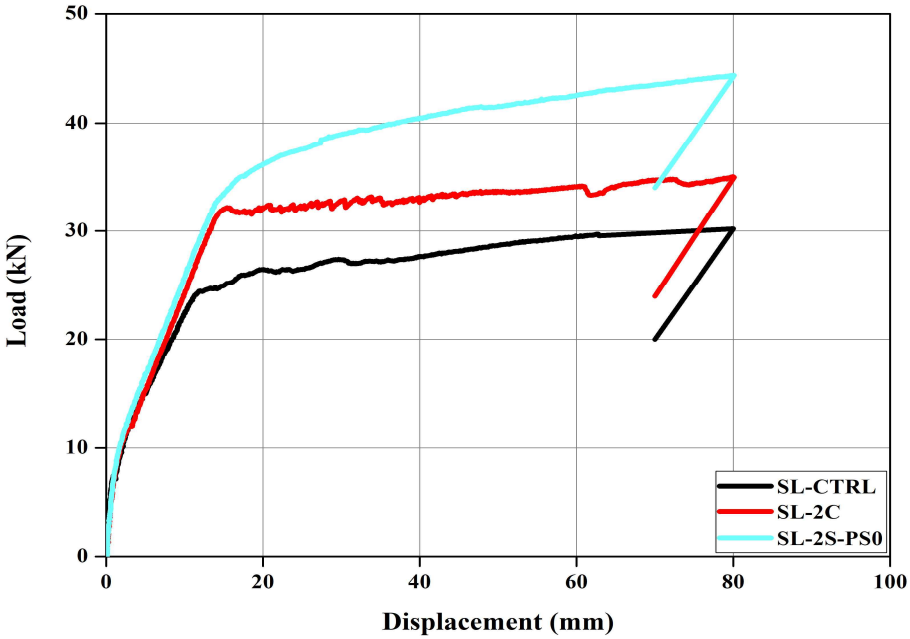
○ 보강재 종류에 따른 항복하중은 SL-2C, SL-2S-PS0이 SL-CTRL에 비하여 각각 31%, 35% 증가한 31.05kN, 32.09kN으로 측정되었으며, 특히 SL-2C는 항복하중에서 CFRP 보강재와 개발된 모르타르의 부착슬립으로 인한 조기파괴가 발생하였고, 그 이후의 하중은 큰 의미가 없는 것으로 판단됨.

○ Fe-SMA로 보강된 SL-2S-PS0의 경우 개발된 모르타르와 우수한 부착거동을 보였으며, 극한상태까지 부착파괴가 발생하지 않음.

○ 활성화되지 않은 Fe-SMA로 보강된 SL-2S-PS0의 극한하중은 SL-CTRL에 비하여 약 53% 증가된 45.22kN 의 극한하중을 보임.



<실험체 파괴 양상>



<보강재 종류에 따른 하중-변위 관계>

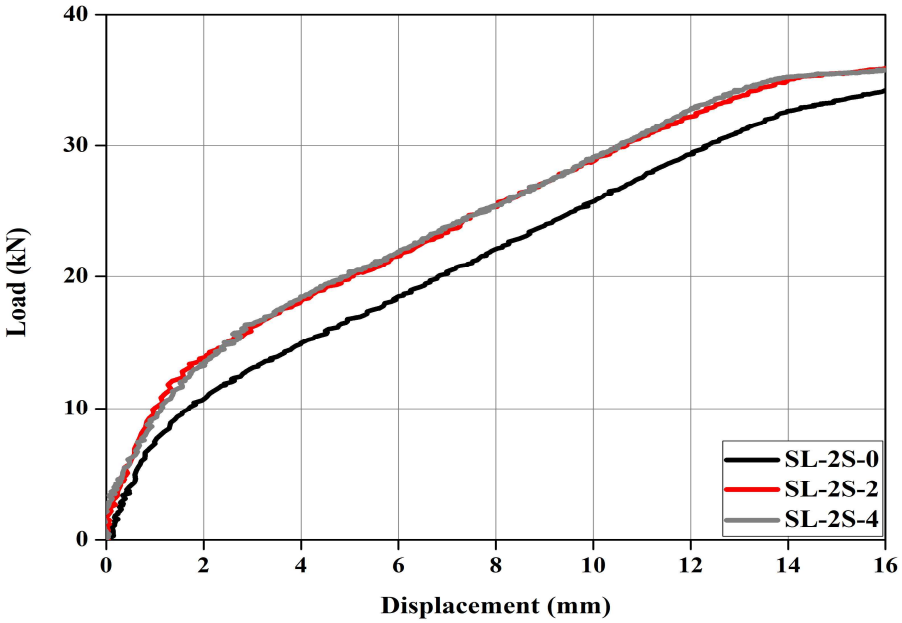
○ Fe-SMA의 사전변형을 2%, 4%를 가한 후 활성화시킨 실험체인 SL-2S-PS2와 SL-2S-PS4는 무보강 실험체인 SL-CTRL에 비하여 각각 55%, 81% 증가된 11.52kN, 13.46kN에서 초기균열 하중이 발생하였으며, Fe-SMA를 보강 후 활성화를 시키지 않은 실험체인 SL-2S-PS0에 비해서 각각 16%, 35% 증가.

○ Fe-SMA를 활성화시킨 실험체는 인장단에 압축응력이 작용하며 프리스트레스를 도입한 효과와 동일하게 작용하여 구조물의 휨 강성을 증가시키고 인장단의 초기균열 발생을 지연시키기 때문인 것으로 판단됨.

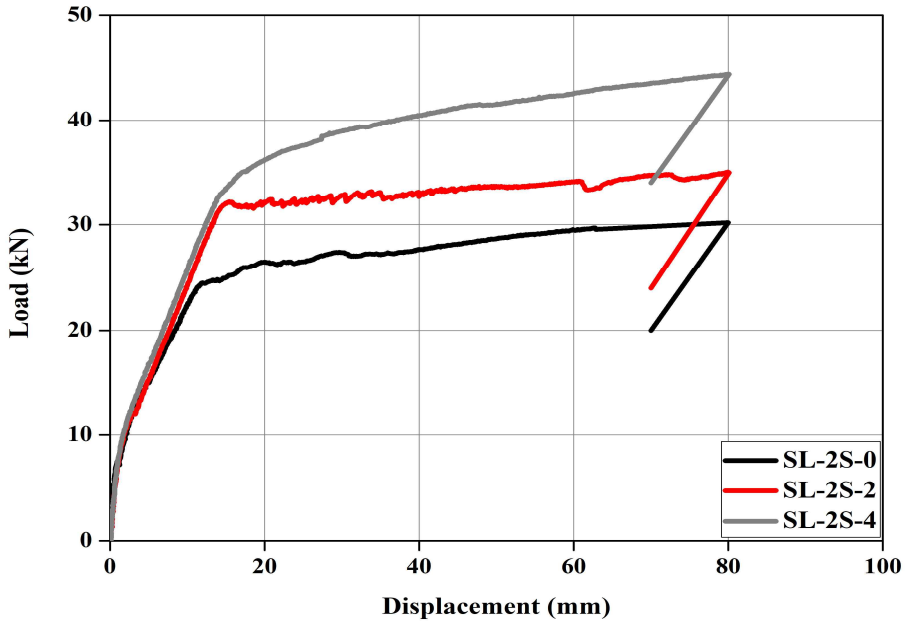
○ SL-2S-PS2와 SL-2S-PS4 실험체의 항복하중은 CTRL에 비해서 각각 39%, 43% 증가된 33.12kN, 34.02kN으로 나타났으며, 이는 SL-2S-PS0과 비교하였을 때 각각 3.2%, 6.0%과 비교하여 미미한 상승을 보임.

○ 극한하중의 경우 활성화 여부와 상관없이 거의 일정하게 나타남.

○ Fe-SMA를 보강재로 사용한 보의 거동은 강재를 긴장재로 사용한 일반 프리스트레스 보와 같이 프리스트레스 수준이 극한하중에 미치는 영향은 매우 미미함.



<Fe-SMA 사전변형에 따른 초기 강성>

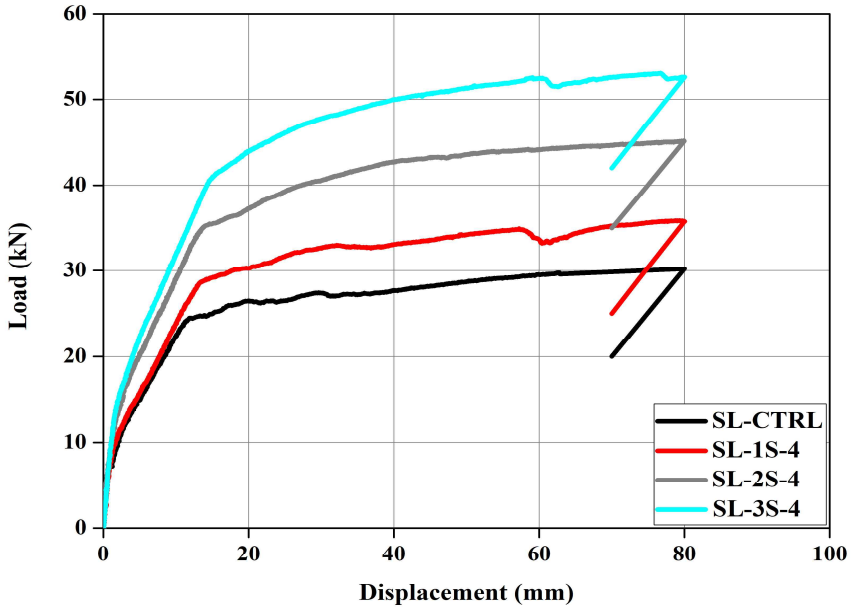


<Fe-SMA 사전변형에 따른 하중-변위 관계>

○ Fe-SMA의 사전변형을 4%로 고정한 한 후 보강재 개수를 1겹, 2겹, 3겹으로 한 실험체인 SL-1S-PS4, SL-2S-PS4, SL-3S-PS4의 경우 초기균열 하중은 각각 9.42kN, 13.46kN, 14.04kN으로 무보강 실험체인 SL-CTRL에 비하여 각각 27%, 81%, 89% 증가.

○ Fe-SMA 보강량이 증가는 초기균열 제어에 효과적인 것으로 판단됨. 또한 각각의 항복하중 역시 SL-CTRL에 비하여 각각 20%, 43%, 74% 증가하였으며 이는 보강량이 증가한 만큼 실험체의 초기균열 이후 강성이 증가되었기 때문으로 판단됨.

○ 극한하중도 항복하중과 같이 보강량이 증가할수록 SL-CTRL에 비하여 각각 24%, 58%, 87%가 증가하는 것으로 나타났으며, Fe-SMA 보강량이 1 겹($30mm^2$) 증가함에 따라 극한하중은 약 30%씩 상승.



<Fe-SMA 보강량에 따른 하중-변위 관계>

제 3절. 연구수행 성과

본 연구의 주요 기술적 성과는 철계-형상기억합금을 구조물 보강재로 사용하여 기존 보강재가 가진 문제점을 개선하기 위한 현재 기술 수준 확인 및 문제 해결방안에 대한 기초를 마련하는 것임.

1. 부착성능이 개선된 고성능 시멘트 매트릭스 개발

○ 인장강도, 응결특성을 제외한 대부분의 성과를 만족한 고성능 시멘트계 모르타르를 개발함으로써, 구조물 보강재료로써 활용이 가능.

○ 고성능 시멘트계 모르타르에 대한 1년 이상의 장기적인 역학성능 평가를 통한 보강 모르타르의 안정성 확보.

○ 실험 성과를 바탕으로 위기관리이론과실천 학회에 학술지 투고를 통한 기술홍보.

부착성능이 개선된 고성능 시멘트 매트릭스 개발

성과 목표	성과 달성도
압축강도: 50MPa 이상	압축강도: 50.1MPa
인장강도: 3.5MPa 이상	인장강도: 3.22MPa
부착강도: 1.5MPa 이상	부착강도: 1.73MPa
길이변화: 0.2% 이하	길이변화: 0.078%
응결특성: 초결 4시간 이내, 종결 8시간 이내	응결특성: 초결 6시간 10분 종결 9시간 23분
슬럼프: 150±15 mm	슬럼프: 138mm
공기량 3.0±1.5%	공기량 4.3%


TEST REPORT

FITI 시험연구원


Crisisonomy

Properties of Polymer Cementitious Matrix for Strengthening Structures Damaged by Natural Disasters


100 Crisisonomy Vol.14 No.3

감사의 글

References

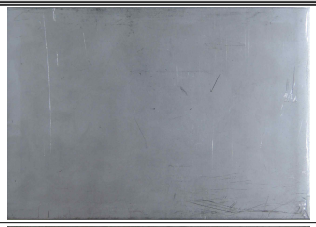
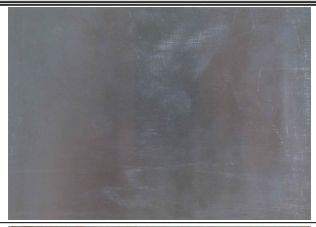
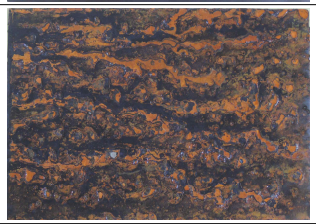
2. Fe-SMA 부식성 테스트

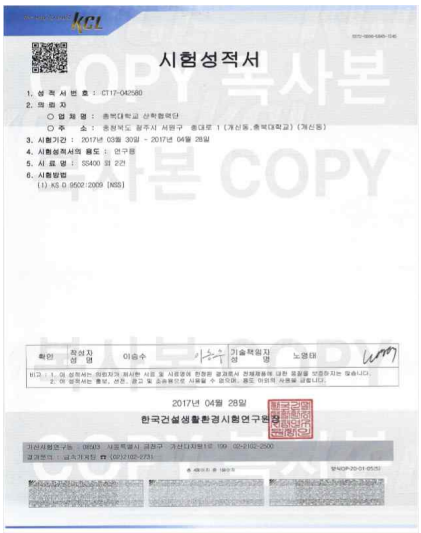
○ Fe-SMA의 내부식성 평가를 위하여 KS D 9502 규격에 따라 염수 분무시험을 진행.

○ 비교군으로 강재(SS400)과 스테인리스(ST)를 설정.

○ Fe-SMA의 내부식성은 철과 스테인리스에 비하여 우수함을 확인.

염수분무시험	SS400	ST	Fe-SMA
시험 전(g)	187.576	169.171	168.874
시험 후(g)	182.861	169.105	168.842
부식률(%)	2.51	0.04	0.02

염수분무시험	SS400	ST	Fe-SMA
시험전			
168 hr			









3. Fe-SMA 전기저항 가열방법에 의한 회복응력 평가

○ 철계-형상기억합금의 역학특성 및 회복응력 평가를 위하여 초기변형(2%, 4%, 6%, 8%), 회복온도(100℃, 130℃, 160℃, 190℃, 220℃)를 변수로 실험 진행.

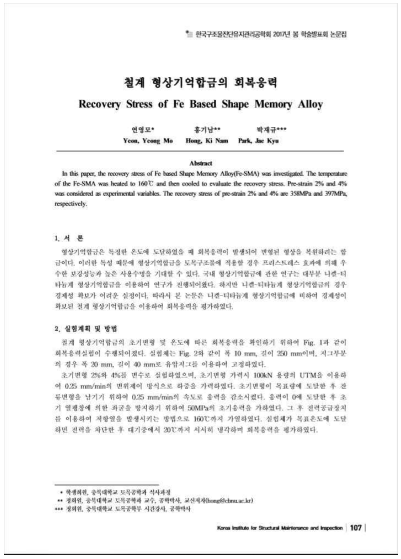
○ 철계-형상기억 합금의 탄성계수 133.5GPa, 항복강도 465MPa, 항복변형률 0.545%로 측정됨.

○ 극한강도 865MPa, 최대신장 12.5%로 측정됨.

○ 초기변형 4%, 회복온도 160℃에서 397.5MPa의 회복응력 발생.

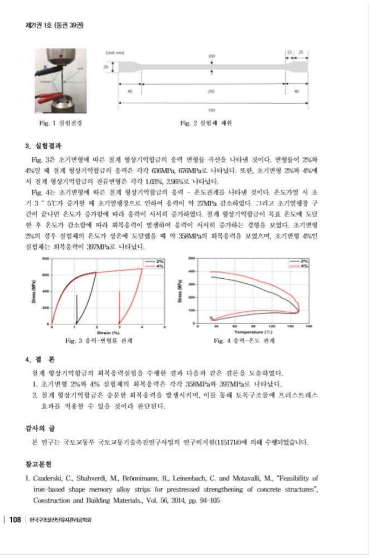
○ 실험 결과를 2017 구조물진단유지관리공학회 봄 학술발표대회 구두발표를 통한 기술홍보.

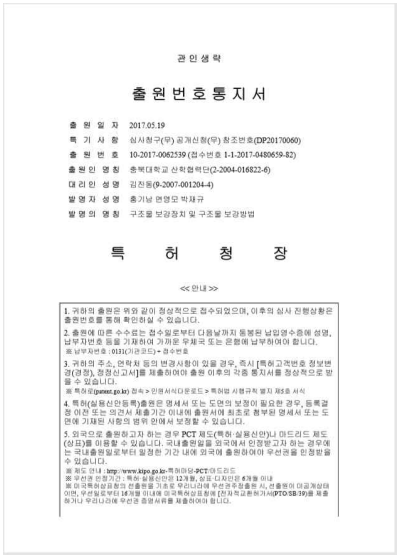
○ 실험 결과를 바탕으로 구조물 보강방법에 관한 특허 출원.



철계 형상기억합금의 회복응력

Recovery Stress of Fe Based Shape Memory Alloy





출원번호통지서

출원일자 2017.05.19

발명의 명칭 구조물 보강장치 및 구조물 보강방법

특 허 청 장

4. Fe-SMA와 시멘트 매트릭스 복합체의 부착강도 모델 개발

○ Fe-SMA와 시멘트 매트릭스 복합체의 부착강도 모델 개발을 위하여 정착길이(25cm, 30cm, 35cm, 45cm), 사전변형(2%, 4%, 6%, 8%), 회복온도(80℃,120℃, 160℃, 200℃), Fe-SMA 표면상태를 변수로 설정.

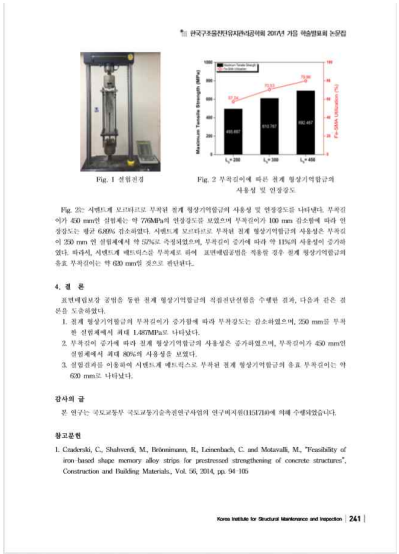
○ 실험 및 해석결과를 비교한 결과 목표로 한 80%보다 높은 97%의 높은 정확도를 보임.

○ 실험결과를 바탕으로 2017 구조물진단유지관리공학회 가을 학술발표대회 포스터 발표 및 MDPI에 SCIE급 논문 투고를 통한 기술홍보.



철계 형상기억합금의 부착응력

Bond Stress of Fe Based Shape Memory Alloy





applied sciences

MDPI

Article

Evaluation of Fe-Based Shape Memory Alloy (Fe-SMA) as Strengthening Material for Reinforced Concrete Structures

Kinam Hong, Sugyu Lee *, Sanghoon Han and Yeongmo Yeon

Department of Civil Engineering, Chungbuk National University, 1 Chungdae-ro, Seowon-Gu, Cheongju, Chungbuk 28644, Korea; hong8k@chungbuk.ac.kr (K.H.); shhan@chungbuk.ac.kr (S.H.); yym2358@chungbuk.ac.kr (Y.Y.)

* Correspondence: sugyulee@chungbuk.ac.kr; Tel.: +82-43-261-2377

Received: 6 April 2018; Accepted: 3 May 2018; Published: 5 May 2018

check for updates

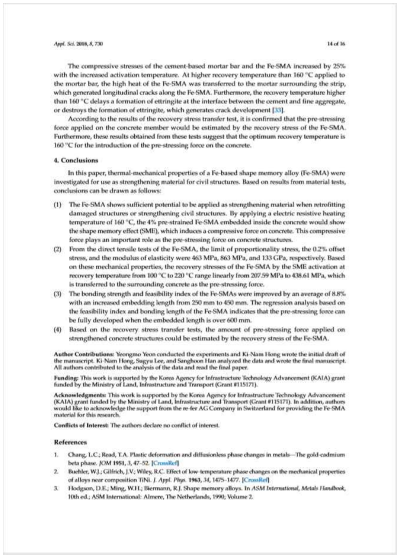
Abstract: This paper aims to evaluate potential of an Fe-based shape memory alloy (Fe-SMA) for strengthening civil structures. Mechanical properties of the Fe-SMA were investigated with a direct tensile test, which showed the stress-induced transformation, stress at fracture of the Fe-SMA, and modulus of elasticity. Heating temperature ranging from 110 °C to 220 °C and pre-straining level ranging from 2% to 8% of the Fe-SMA were considered as variables to provoke a shape memory effect (SME), which generates a recovery stress. The recovery stresses ranged from 207.59 MPa to 638.61 MPa, which plays a role in introducing a pre-stressing force to concrete members. Bonding behavior of the Fe-SMA embedded into a groove with a cement-based mortar filler was investigated to determine the required bonding length to fully develop the pre-stressing force of the Fe-SMA with a near-surface mounted (NSM) strengthening technique. All the tested specimens showed slippage failure and suggested a minimum bonding length of 600 mm. The pre-stressing force applied on the concrete can be calculated with the recovery stress of the Fe-SMA. Based on those test results, the Fe-SMA shows sufficient potential to be used as strengthening material for civil structures.

Keywords: Fe-based shape memory alloy (Fe-SMA); strengthening material; recovery stress; recovery temperature; bonding behavior; cement-based mortar filler

1. Introduction

Shape memory alloys (SMAs) are unique and widely known materials that can return to a pre-defined shape when heated above a defined temperature. The pre-defined shape is memorized by changes in temperature or action of stresses. The SMAs were developed from the discovery of Au-Cd alloys with a shape memory effect (SME) by Chang and Read in 1951 [1]. As well as Ti-Ni SMAs publicized by Buehler in 1962 [2], various SMAs such as Cu-Zn-Al alloys, Mn-Cu alloys, and Cu-Al-Ni alloys have been discovered with a SME [3–5]. The SME from those SMAs is generated by a thermoelastic phase transformation. The thermoelastic phase transformation known as transformation hysteresis is a transformation behavior of the crystal structure that depends on a change in temperature. The SMAs have two phases: martensite, which is stable in low temperature; and austenite, which is stable in high temperature. The phase transformation occurs between the martensite and austenite phase by change in temperature. Forward phase transformation takes place during temperature change from low to high. On the contrary, the reverse phase happens during change of temperature from high to low [6–9]. Although the aforementioned SMAs with such phase transformation process have been used in such fields as aerospace and the medical industry, due to expensive cost of production and raw material it is not feasible for them to be used in civil structures which require large and stable

Appl. Sci. 2018, 8, 730; doi:10.3390/app8050730 www.mdpi.com/journal/applsci



Appl. Sci. 2018, 8, 730 14 of 16

The compressive stresses of the cement-based mortar bar and the Fe-SMA increased by 25% with the increased activation temperature. At higher recovery temperature than 160 °C applied to the mortar bar, the high heat of the Fe-SMA was transferred to the mortar surrounding the strip, which generated longitudinal cracks along the Fe-SMA. Furthermore, the recovery temperature higher than 160 °C delays a formation of ettringite at the interface between the cement and fine aggregate, or destroys the formation of ettringite, which generates crack development [33].

According to the results of the recovery stress transfer test, it is confirmed that the pre-stressing force applied on the concrete member would be estimated by the recovery stress of the Fe-SMA. Furthermore, these results obtained from these tests suggest that the optimum recovery temperature is 160 °C for the introduction of the pre-stressing force on the concrete.

4. Conclusions

In this paper, thermal-mechanical properties of a Fe-based shape memory alloy (Fe-SMA) were investigated for use as strengthening material for civil structures. Based on results from material tests, conclusions can be drawn as follows:

(1) The Fe-SMA shows sufficient potential to be applied as strengthening material when retrofitting damaged structures or strengthening civil structures. By applying a electric resistive heating temperature of 160 °C, the 4% pre-strained Fe-SMA embedded inside the concrete would show the shape memory effect (SME), which induces a compressive force on concrete. This compressive force plays an important role as the pre-stressing force on concrete structures.
(2) From the direct tensile tests of the Fe-SMA, the limit of proportionality stress, the 0.2% offset stress, and the modulus of elasticity were 463 MPa, 863 MPa, and 133 GPa, respectively. Based on these mechanical properties, the recovery stresses of the Fe-SMA by the SME activation at recovery temperature from 100 °C to 220 °C range linearly from 207.59 MPa to 638.61 MPa, which is transferred to the surrounding concrete as the pre-stressing force.
(3) The bonding strength and feasibility index of the Fe-SMAs were improved by an average of 8.8% with an increased embedding length from 250 mm to 450 mm. The regression analysis based on the feasibility index and bonding length of the Fe-SMA indicates that the pre-stressing force can be fully developed when the embedded length is over 600 mm.
(4) Based on the recovery stress transfer tests, the amount of pre-stressing force applied on strengthened concrete structures could be estimated by the recovery stress of the Fe-SMA.

Author Contributions: Yeongmo Yeon conducted the experiments and Ki-Nam Hong wrote the initial draft of the manuscript. Ki-Nam Hong, Sugyu Lee, and Sanghoon Han analyzed the data and wrote the final manuscript. All authors contributed to the analysis of the data and read the final paper.

Funding: This work is supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Grant #13U71).

Acknowledgments: This work is supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Grant #13U71). In addition, authors would like to acknowledge the support from the re-fer AG Company in Switzerland for providing the Fe-SMA material for this research.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Chang, L.C.; Read, T.A. Plastic deformation and diffusionless phase changes in metals—The gold-cadmium beta phase. JOM 1951, 3, 47–52. [CrossRef]
2. Buehler, W.J.; Gilfrich, J.V.; Wiley, R.C. Effect of low-temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi. J. Appl. Phys. 1963, 34, 1475–1477. [CrossRef]
3. Hodgson, D.E.; Ming, W.H.; Biermann, R.J. Shape memory alloys. In ASM International, Metals Handbook, 10th ed.; ASM International: Almere, The Netherlands, 1990; Volume 2.

5. 철계-형상기억합금의 형상기억효과을 통한 보 인장부의 프리스트레스 하중도입으로 보강된 보의 단기거동 평가

○ Fe-SMA로 보강된 구조물의 단기거동 특성파악을 위하여 Fe-SMA의 사전변형(0%, 2%, 4%), 보강재 종류(무보강, CFRP Plate, Fe-SMA), 보강량(30mm^2, 60mm^2, 90mm^2)을 변수로 구조물 휨 파괴실험을 진행함.

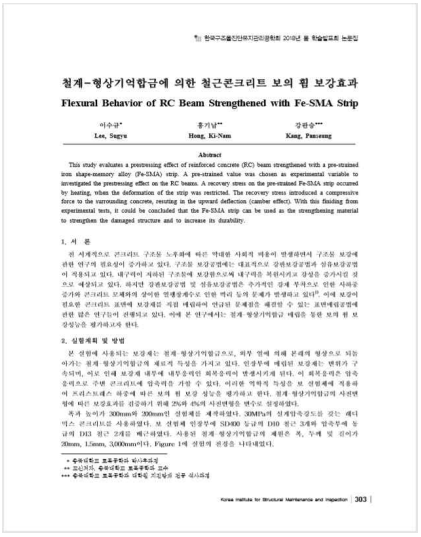
○ 실험결과 초기균열하중, 항복하중, 회복응력, 처짐량과 같은 모든 성과를 만족하는 결과를 보임.

○ 실험결과 및 이론식을 통하여 확인한 회복응력은 평균 92%의 높은 정확도를 보임.

○ 실험결과를 바탕으로 2018 구조물진단유지관리공학회 봄 학술발표대회 포스터 발표 및 International Journal of Concrete Structures and Materials에 SCIE급 논문 투고를 통한 기술홍보.

Fe-SMA로 보강된 구조물의 거동특성

성과 목표	성과 달성도
항복하중 30% 이상 증진	항복하중 43% 증진
처짐량 30%이상 감소	처짐량 32%이상 감소
콘크리트 균열하중 30%이상 증진	콘크리트 균열하중 81% 증진
회복응력 350MPa 이상	회복응력 369.3MPa



철계-형상기억합금에 의한 철근콘크리트 보의 휨 보강효과

Flexural Behavior of RC Beam Strengthened with Fe-SMA Strip

이수경* 홍기남** 강판승***

Lee, Sugyu Hong, Ki-Nam Kang, Pancung

Abstract

This study evaluates a prestressing effect of reinforced concrete (RC) beam strengthened with a pre-strained iron shape-memory alloy (Fe-SMA) strip. A pre-strained value was chosen as experimental variable to investigated the prestressing effect on the RC beams. A recovery stress on the pre-strained Fe-SMA strip occurred by heating, when the deformation of the strip was restricted. The recovery stress introduced a compressive force to the surrounding concrete, resuting in the upward deflection (camber effect). With this finding from experimental tests, it could be concluded that the Fe-SMA strip can be used as the strengthening material to strengthen the damaged structure and to increase its durability.

1. 서 론

2. 실험계획 및 방법

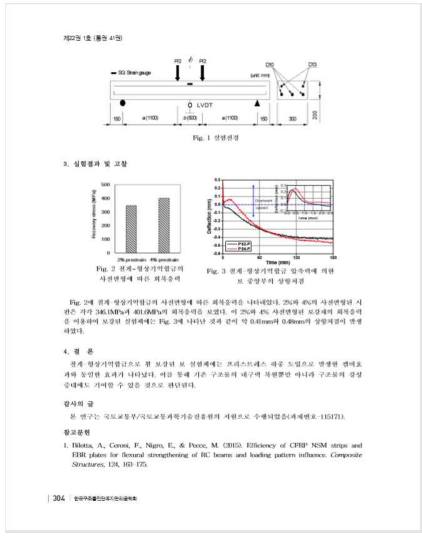


Fig. 1 실험전경

3. 실험결과 및 고찰

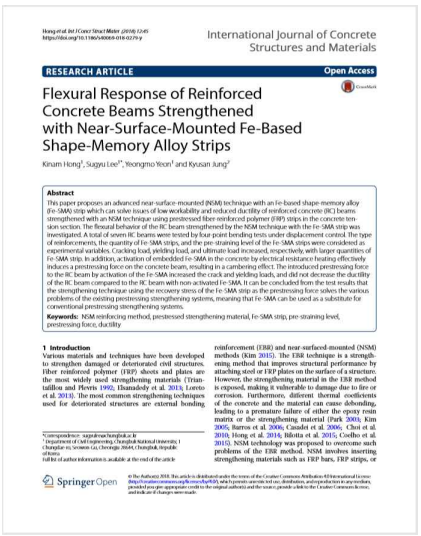
Fig. 2 철계-형상기억합금의 사전변형에 따른 회복응력

Fig. 3 철계-형상기억합금 압축력에 의한 보 중앙부의 상향처짐

4. 결 론

감사의 글

참고문헌



International Journal of Concrete Structures and Materials

RESEARCH ARTICLE Open Access

Flexural Response of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Near-Surface-Mounted Fe-Based Shape-Memory Alloy Strips

Kinam Hong[1], Sugyu Lee[2*], Yeongmo Yeon[1] and Kyusan Jung[2]

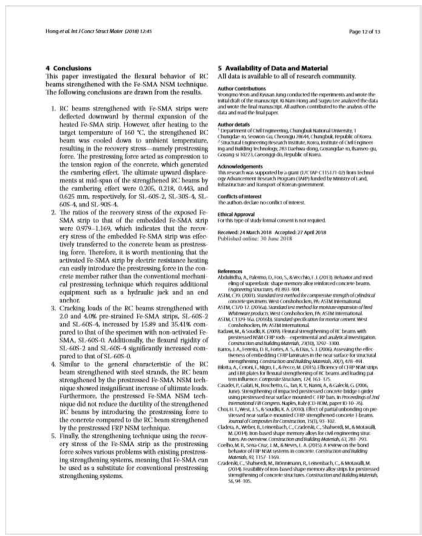
Abstract

This paper proposes an advanced near-surface-mounted (NSM) technique with an fe-based shape-memory alloy (Fe-SMA) strip which can solve issues of low workability and reduced ductility of reinforced concrete (RC) beams strengthened with an NSM technique using prestressed fiber-reinforced polymer (FRP) strips in the concrete tension section. The flexural behavior of the RC beam strengthened by the NSM technique with the Fe-SMA strip was investigated. A total of seven RC beams were tested by four-point bending tests under displacement control. The type of reinforcements, the quantity of Fe-SMA strips, and the pre-straining level of the Fe-SMA strips were considered as experimental variables. Cracking load, yielding load, and ultimate load increased, respectively, with larger quantities of Fe-SMA strip. In addition, activation of embedded Fe-SMA in the concrete by electrical resistance heating effectively induces a prestressing force on the concrete beam, resulting in a cambering effect. The introduced prestressing force to the RC beam by activation of the Fe-SMA increased the crack and yielding loads, and did not decrease the ductility of the RC beam compared to the RC beam with non-activated Fe-SMA. It can be concluded from the test results that the strengthening technique using the recovery stress of the Fe-SMA strip as the prestressing force solves the various problems of the existing prestressing strengthening systems, meaning that Fe-SMA can be used as a substitute for conventional prestressing strengthening systems.

Keywords: NSM reinforcing method, prestressed strengthening material, Fe-SMA strip, pre-straining level, prestressing force, ductility

1 Introduction

Springer Open



4 Conclusions

5 Availability of Data and Material

All data is available to all of research community.

Author Contributions

Author details

Acknowledgements

Conflicts of interest

Ethical Approval

References

6. 철계-형상기억합금의 형상기억효과을 통한 보 인장부의 프리스트레스 하중도입으로 보강된 보의 장기거동 평가

○ Fe-SMA로 보강된 구조물의 장기거동 특성파악을 위하여 Fe-SMA의 사전변형(0%, 2%, 4%), 보강재 유·무, 초기 활성화 유·무, 재활성화 시간(6month, 1years)을 변수로 구조물 장기거동 평가를 진행함.

○ 실험체 거치 직후 Fe-SMA를 활성화한 실험체는 활성화 하지 않은 실험체에 비해 시간 경과에 따른 처짐발생이 감소됨.

○ Fe-SMA를 365일 후에 활성화 시킨 실험체는 연구 목표인 초기 복원력 대비 80%를 만족하는 82%의 복원력 확보.

○ 실험결과를 바탕으로 한국구조물진단유지관리공학회에 학술지 논문 투고.

Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection
Vol. 22, No. 3, May 2018, pp.103~110
https://doi.org/10.11112/jksmi.2018.22.3.103
pISSN 2234-6952
eISSN 2287-0979

표면매립된 철계-형상기억합금 스트립으로 휨 보강된 RC보의 장기 휨거동

홍기남[1], 이수경[2]*, 하상훈[3], 강래성[4]

Long-term Flexural Behavior of RC Beams Strengthened in Flexure with NSM Fe-SMA Strips

Ki-Nam Hong[1], Sugyu Lee[2]*, Sang-Hoon Han[3], Paesung Kang[4]

Abstract: The long-term flexural behavior of reinforced concrete (RC) beams strengthened with an iron based shape memory alloys (Fe-SMAs) by a near surface mounted (NSM) method was evaluated. The pre-strained values of 3% and 4% and introduced prestressing force by an activation of a shape memory effect of the Fe-SMA strengthening material were considered as experimental variables. Deflections at the center of the RC beams were measured for six months after the 1 ton of concrete weight was loaded on the beam. Experimental results show that the deflections decreased because of the increased flexural stiffness of beams strengthened with the Fe-SMA strips. On the contrary, with increased pre-strained values, the deflection increased due to stiffness reduction of the strengthening material. It was confirmed that the specimens incorporating the prestressed force showed the deflection reduction of about 30%, compared to the ones without the prestressed force.

Keywords: Iron based shape memory alloy, Near surface mounted method, Long-term behavior, Shape memory effect, Pre-strain, Deflection

1. 서 론

콘크리트는 건설재료로 내구성, 내화성 등이 뛰어나 대부분의 도목구조물 시공에 사용되고 있다. 하지만, 콘크리트는 건설된 구조물의 내구력은 시간경과에 따르는 노후화 와 외부손상에 의한 손상으로 서viceability 한다. 이에 따른 해결 책으로, 구조물 보강에 관한 많은 연구와 적용이 이루어지고 있다[Triantafillou and Plevris, 1992; Chajes et al., 1994; Norris et al., 1997; Sim and Park, 2005; Chin et al., 2018].

최근에 강변은 부재에서 보강재는 강변보강공법과 섬유시트 으로 보강하는 섬유보강공법은 구조물의 내구력을 복원시키고 강 성을 증가시키는 대표적인 보강 공법이다[Lorenzis et al., 2002; Hamahelp et al., 2013]. 하지만, 강변보강공법의 경우 부식, 강 판 자중에 의한 사용중 증가 및 취급의 어려움 등의 문제점을 나 타내고 있으며, 섬유보강공법의 경우 부착에도 사용되는 에폭 시와 콘크리트 모재의 상이한 열팽창계수로 인한 계면의 부착 에 저해 및 보강재 박리 등의 한계점을 가지고 있다. 또한 에폭 시의 낮은 유리전이온도도 인해 낮은 내화성능을 가지고 있다 (Kim, 2005; Park, 2003; Choi et al., 2010; Hiskta et al., 2015).

이들의 한계점을 보완하고자 시멘트계 보수재료를 부착재 로 적용한 표면매립(Near Surface Mounted) 공법이 개발되어 구조물 부강분야에 적용되고 있다[De Lorenzis et al., 2002; El-Hacha and Rizkalla, 2004]. 시멘트계 보수재료는 시멘트를 주요 구성요소로 재령일 무에에도 우수에 에폭시보다 높은 알칼리주도와 콘크리트와의 일체거동으로 에폭시 수지의 단 점을 보완할 수 있다. 이와 더불어 표면매립공법은 보강이 효 구하는 콘크리트 인장부 최외단 피복에 홈을 성형한 후 보강 재를 매립하는 공법으로 강변보강공법에 나타난 부식등 방지 할 수 있고 섬유보강공법의 단점인 보강재 박리를 방지할 수 있다. 시멘트계 보수재료를 이용한 표면매립공법은 부재의 성능 및 내력을 높여 재부흥 연구로 많이[El-Hacha and Rizkalla, 2004; El-Hacha and Gaaflar, 2011].

그 중 대나로 표계-형상기억합금을 보강재로 활용한 연구 들이 최근 수행 · 되에서 수행되고 있다. 형상기억합금은 기 존 강과 에폭 · 섬수에 의해 자유에 기억된 특정한 형상으로 되 돌아가려는 특성을 가진 합금이며, 대표적인 Ti-Ni계와 Cu계 형상기억합금은 이미 수십 년 전부터 우수 항공 산업 분야 및 의료기기 분야 등 다방면에서으로 사용되고 있다[Miller and

[1]명예회, 공학박사, 도목공학과 교수
[2]명예회, 공학박사, 도목공학과 박사후연구원, 교신저자
[3]명예회, 공학박사, 도목공학과 교수
[4]박사회원, 공학박사, 도목공학과 박사과정
*Corresponding author: sugyulee@changhuk.ac.kr
Department of Civil Engineering, Changhuk National University, 1, Changhak-ro, Sowoon-Gu, Chungju, Changhuk, Korea
• 본 논문에 대한 도서인 2018년 4월 11일에 저 작자로 보내주시면 2018년 5월 30일까지 심사하여 결과를 통보하였습니다.

Copyright © 2018 by The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

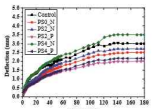


Fig. 9 Comparison of long-term deflection-time curves

4. 결 론

본 연구에서는 철계-형상기억합금으로 휨 보강된 보에 대 한 장기거동을 분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 보강하지 않은 실험체의 보강된 실험체의 처짐을 비교했 을 때, 철계-형상기억합금 보강재는 약 50~65%의 처짐 을 감소시키며 휨 강성을 증가시키는 것으로 나타났다.
2) 철계-형상기억합금의 시간변형 증가에 따라 휨시처짐이 16.8%, 19.9% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 시간변 형으로 인한 철계-형상기억합금의 강성감소가 확인되 것으로 생각된다.
3) 2%와 4%는 시간변형된 철계-형상기억합금 보강재를 활성 화한 실험체 이후처짐 실험체들이 각각 23.0 [3.6%] 10.5% 철 계-형상기억합금의 프레응력이 철근콘크리트 부재에 프 림하여 긴장력으로 전달됨을 확인할 수 있다.
4) 2%와 4%의 시간변형을 주기며, 장기재하으로 프레응력 을 활성화시킨 보강부로 보강된 실험체에는 6개월 이후 측기처으로 약 2.0mm, 2.16mm의 처짐이 발생하였다. 이는 활성화하지 않은 보강재를 사용한 실험체의 이처 모다 28%, 18% 감소한 것으로 프리스트레싱 효과에 기 인한 것으로 생각된다.
5) 6개월 간의 장기재하 실험을 통해 형상기억효과로 활성 화를 통한 긴장력 도입이 형상기억합금의 탈락에이션에 른 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 · 국토도통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 : 11171).

References

ASTM C1329 / C1329M-16a. Standard Specification for Mortar Cement. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
Bilotta, A., Ceroni, F., Nigro, E., and Pecce, M. (2015). Efficiency of CFRP NSM strips and EBR plates for flexural strengthening of RC beams and loading pattern influence. *Composite Structures*, 124, 163~175.
Chajes, M. J., Thomson Jr, T. A., Januszka, T. F., and Finch Jr, W. W. (1994). Flexural strengthening of concrete beams using externally bonded composite materials. *Construction and Building Materials*, 8(3), 191~201.
Chin, S. C., Tong, F. S., Doh, S. I., Gimbun, J., Foo, Y. K., and Singar, J. P. (2018). Potential Renewal Strengthening of Reinforced Concrete Beam Using Natural Fiber Composite Plate. *In Applied Mechanics and Materials* (Vol. 878, pp. 41-48). Trans Tech Publications.
Choi, H. T., West, J. S., and Soudki, K. A. (2010). Effect of partial unbonding on prestressed near-surface-mounted CFRP-strengthened concrete T-beams. *Journal of Composites for Construction*, 15(1), 95-102.
De Lorenzis, L., Rizzo, A., and La Tegola, A. (2002). A modified pull-out test for bond of near-surface mounted FRP rods in concrete. *Composites Part B: Engineering*, 33(8), 589-603.
El-Hacha, R., Wight, R. G., and Green, M. F. (2001). Prestressed fibre-reinforced polymer laminates for strengthening structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 3(2), 111-121.
El-Hacha, R., and Gaaflar, M. (2011). Flexural strengthening of reinforced concrete beams using prestressed, near-surface-mounted CFRP bars. *PCI Journal*, 56(4).
El-Hacha, R., and Rizkalla, S. H. (2004). Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures. *Structural Journal*, 101(5), 717-726.
Elsanadedy, H. M., Almusallam, T. H., Alharbi, Y. R., and Al-Salloum, Y. A. (2013). Flexural strengthening of RC beams using textile reinforced mortar-Experimental and numerical study. *Composite Structures*, 97, 40-55.
Kim, H. J., and Kim, W. (2005). Premature Failure Load of Reinforced Concrete Beams with Flexural Strengthened by Steel Plates. *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, 9(1), 283-292.
KS (2010). Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete, KS F 2405, Korean Standard Institute, Korea (in Korean).
Lee, W. J., Weber, B., Feltrin, G., Czaderski, C., Motavalli, M., and Leinenbach, C. (2013). Phase transformation behavior under uniaxial deformation of an Fe-bAn-Si-Cr-Nb-VC shape memory alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 581, 1-7.
Lorenz, G., Lourdini, L., Arboleda, D., and Nanni, A. (2013). Performance of RC slab-type elements strengthened with fabric-reinforced cementitious-matrix composites. *Journal of Composites for Construction*, 18(3), A4013003.
Miller, D. A., and Lagoudas, D. C. (2001). Influence of cold work and heat treatment on the shape memory effect and plastic strain development of NiTi. Materials Science and Engineering: A, 308(1-2), 161-175.
Norris, T., Saadatmanesh, H., and Ehsani, M. R. (1997). Shear and

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

제 1절. 목표 달성도

본 연구에서 설정한 연구목표에 대한 달성도를 아래 표를 통해 나타내었다.

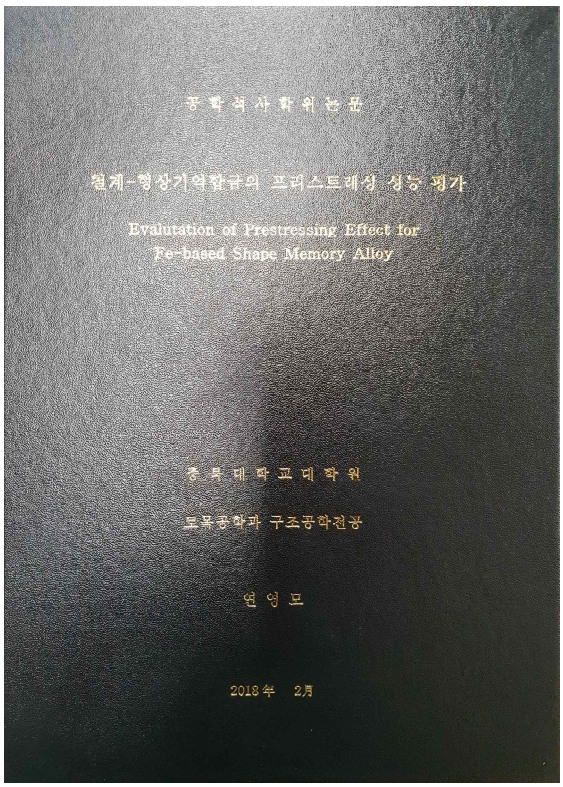
구분 / 개발내용	연구개발기간 2	4	6	8	10	12	2	4	6	8	10	12	진도(%)
매트릭스 개발													100
부착모델 개발													100
Fe-SMA 보강성능 평가													100
보강된 구조물의 보강성능 평가													100
보강된 구조물의 장기거동 평가													100
외부 프리스트레싱 보강공법 개발													100
총 진도율													100

연차	연구목표	주요연구내용	달성도 %
1차 년도	■ 고성능 시멘트 매트릭의 역학적 특성평가	○ 개발될 고성능 시멘트 매트릭스의 역학적 특성을 분석하여 접착제로서 사용성 검증. 구분 / 기존기술 / 개발수준 압축강도 (MPa) / 50 이상 / 50.1 인장강도 (MPa) / 3.5 이상 / 3.22 부착강도 (MPa) / 1.5 이상 / 1.73 응결특성 (시간) / 초결: 4 이내 종결: 8 이내 / 초결:6시간10분 종결:9시간23분 슬럼프 (mm) / 150±15 / 138 공기량 (%) / 3.0±1.5 / 4.3	90
	■ Fe-SMA와 시멘트 매트릭스의 복합체 부착강도 모델개발	○ 콘크리트 계면과의 부착성 예측을 위한 복합체의 부착강도 모델 개발. - Fe-SMA로 보강된 구조물의 파괴 거동 예측시 정확성이 우수한 부착강도 모델 제안.	100
	■ 정착장치에 의한 Fe-SMA의 보강성능 평가	○ 정착장치에 의한 Fe-SMA 보강성능 평가 - 슬립이 발생하지 않고 Fe-SMA이 파괴될 때까지 구속할 수 있는 정착장치의 적용성 검증.	100
2차 년도	■ Fe-SMA로 보강된 구조물의 거동특성	○ 형상 회복된 Fe-SMA로 휨/전단 보강된 RC구조물의 실험결과를 통한 거동 특성 분석. - 비보강 구조물 대비 43% 이상의 항복하중 증진. - 비보강 구조물 대비 32%이상 처짐량 감소. - 비보강 구조물 대비 81% 이상 균열하중 증진. - 회복응력 369.3MPa 이상.	100
	■ Fe-SMA로 보강된 구조물의 장기거동	○ Fe-SMA로 보강된 구조물의 장기거동 평가. - 초기 복원력 대비 재긴장을 통한 복원력 82% 발현.	100
	■ Fe-SMA의 응력회복효과를 이용한 외부프리스트레스 보강공법	○ Fe-SMA와 시멘트 매트릭스의 복합체 부착강도 모델과 Fe-SMA로 보강된 RC 구조물의 거동 특성 분석 결과를 이용한 새로운 보강공법을 제시. - 특허 등록을 통한 지식경제권 확보.	100

제 2절. 관련분야 기여도

1. 학문적 기여도

○ 본 연구는 토목 구조물 보강재로써 철계-형상기억합금의 사용성 검토를 목표로 수행.
○ 철계-형상기억합금을 철근콘크리트 구조물에 적용하기 위한 연구개발은 전 세계적으로 미흡한 실정.
○ 본 연구를 통해 국내에서 최초로 철근콘크리트 구조물 보강에 철계-형상기억합금을 사용.
○ 본 연구를 통해 철계-형상기억합금을 구조물 보강에 적용하기 위한 기초 데이터 확보 및 국내·외 논문발표를 통한 새로운 보강공법기술의 질적 수준 향상.
○ 본 연구를 통해 석사 1명의 전문인력 양성.


공학석사학위논문

철계-형상기억합금의 프리스트레싱 성능 평가

Evalutation of Prestressing Effect for
Fe-based Shape Memory Alloy

충북대학교대학원

토목공학과 구조공학전공

연 영 모

2018年 2月

Pre-Stress Effect of Fe-Shape Memory Alloy

Yeon, Yeong Mo

Department of Civil Engineering
Graduate School, Chungbuk National University
Cheongju, Korea
Supervised by Professor Hong, Ki Nam

Abstract

This thesis evaluates mechanical properties and recovery stress of Fe based shape memory alloy(Fe-SMA) as a fundamental study to develop structural strengthened method using the recovery stress of the Fe-SMA. Various experimental tests such as a direct tensile test, tests for the recovery stress, a lap-shear test were conducted.

From the direct tensile tests for the Fe-SMA specimens, the calculated yield strength of the Fe-SMA by the 0.2% offset method is 453.8 MPa and the ultimate strength and modulus elasticity of the Fe-SMA obtained through the experiment tests were 863.7 MPa and 133.54 GPa, respectively.

The recovery stress of the Fe-SMA was evaluated. As the experimental variables, the pre-strain and the recovery temperature of the Fe-SMA were considered. Experimental results show that 4% pre-strained specimen at the same recovery temperature shows the recovery stress of 27MPa

2. 경제적 기여도

○ 본 연구에서 개발된 성과를 통해 특허 출원 및 등록을 통한 지식재산권 확보.
  - 특허 내용으로써 철계-형상기억합금의 응력회복 효과를 이용한 구조물 보강방법 및 흄관 결합방법이 주를 이룸.
○ 긴장력 도입 공정의 단순화로 인한 공기 단축 및 단가 감소 예상.
○ 중장비 투입 및 보강공정이 없어 공사비 절감 예상.
○ 향후 원천기술의 기술이전을 통한 경제성 확보 가능.



관 인 생 략

출원번호통지서

출 원 일 자 2017.10.30
특 기 사 항 심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(DP20170159)
출 원 번 호 10-2017-0142813 (접수번호 1-1-2017-1075418-20)
출원인 명칭 충북대학교 산학협력단(2-2004-016822-6)
대리인 성명 김진동(9-2007-001204-4)
발명자 성명 홍기남 이수규 연영모
발명의 명칭 흄관 결합장치 및 이를 이용한 흄관 결합방법

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : http://www.kipo.go.kr-특허마당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.

특허증
CERTIFICATE OF PATENT

특허 Patent Number 제 10-1860142 호
출원번호 Application Number 제 10-2017-0142813 호
출원일 Filing Date 2017년 10월 30일
등록일 Registration Date 2018년 05월 15일

발명의 명칭 Title of the Invention
흄관 결합장치 및 이를 이용한 흄관 결합방법

특허권자 Patentee
충북대학교 산학협력단(150171-*******)
충청북도 청주시 서원구 충대로 1 (개신동)

발명자 Inventor
등록사항란에 기재

위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.
This is to certify that, in accordance with the Patent Act, a patent for the invention has been registered at the Korean Intellectual Property Office.

2018년 05월 15일

특허청
Korean Intellectual Property Office

특허청장
COMMISSIONER,
KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE

3. 기술적 기여도

○ 개발된 시멘트 매트릭스를 통해 기존 에폭시의 문제 해결한 새로운 부착제 개발.
○ 국내 최초로 철계-형상기억합금을 이용한 보강공법 기술 확보.
○ 본 연구에서 연구된 내용을 토대로 향후 시작품 및 시제품 제작을 위한 기초 데이터 확보.
○ 철계 형상기억합금의 보강공법을 통해 선진 구조물 유지관리 기술 확보.

제5장. 연구개발성과의활용계획

제 1절 추가 연구 계획

○ 현재 사용된 철계-형상기억합금은 스위스 국방과학기술 연구소에서 개발된 제품.
○ 한국생산기술연구원에서 철계-형상기억합금 샘플 제작에 성공함.
○ 한국 생산기술연구원과 논의하여 철계-형상기억합금 국내제조기술 개발에 관한 사용화 연구 진행에 관한 논의 중.
○ 연구결과를 토대로 실제 구조물에 적용하여, 연구결과에 대한 재평가 및 개선방향 제시.
○ 국내에서 철계-형상기억합금 제조시, 후속 연구를 통해 시험시공 및 실용화 가능성 정립.
○ 후속 연구는 국내 제조된 철계- 형상기억합금을 이용하여 암거, 지하구조물, 터널 등과 같은 구체적인 SOC 시설물 보강 방법에 관한 연구를 진행 예정.
○ 후속 연구 결과를 바탕으로 경제성 분석 및 시공성 분석 진행 예정.
○ 연구결과를 통해 국내 제작된 철계-형상기억합금을 이용한 구조물 보강 방법에 관한 지식재산권 확보.



제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1. 형상기억합금을 이용한 구조물 내력 증진 및 보강기술

(1) 스위스

○ Re-far에서 냉간성형을 통한 Fe-SMA 강재를 제작하였으며, 스위스 국방과학기술연구소(EMPA)에서 기초연구 및 실용화 연구를 진행.
○ EMPA에서 Fe-SMA를 활용하여 보 시험체를 제작하여 확인한 결과 내하력 및 강성 등의 역학적 성능이 증진되는 것을 확인.
○ Fe-SMA를 파이프 접합장치로써 사용하기 위한 연구를 진행.



(2) 미국

○ 2014년 조지아공과대학에서 형상기억합금을 내진 보강재로 사용하여 2층 구조물의 지진성능을 평가하였음.



(3) 일본

○ 2015년 나고야 JP타워에 지진력을 상쇄하기 위해 초탄성 효과를 갖는 Fe-SMA를 제진장치로 적용함.



제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		O
결정사유		

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

○ 해당사항 없음.

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

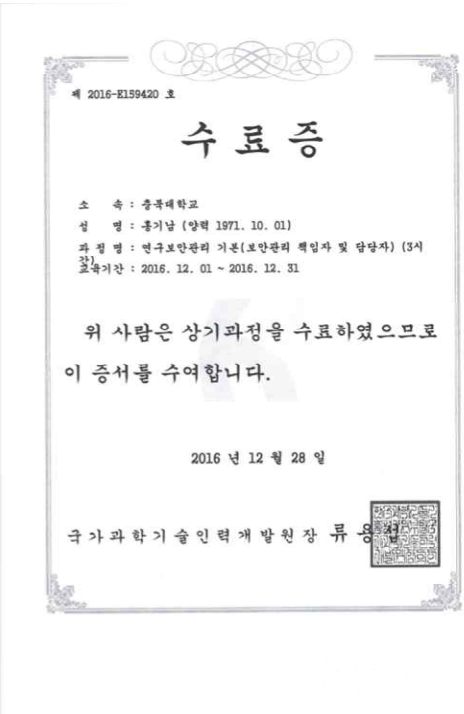
1. 연구실 사용에 안정성 확보 및 사고예방을 위해 안전교육 실시

○ 대학, 연구기관 등에서 과학기술분야 연구개발활동에 종사하는 연구원, 대학생, 대학원생 등을 대상으로 실시하는 안전교육 이수.

○ 시청각적인 사이버안전교육 및 연구실 자체적으로 실시하는 자체 안전교육 실시.

<안전교육 시간>

교육과정	교육대상	교육시간
정기 교육/훈련	연구활동 종사자	반기별 6시간 이상
신규채용 등에 따른 교육/훈련	신규채용된 연구활동종사자	8시간 이상
	대학 연구기관 등에 채용된 자 외의 자로서 신규로 연구개발활동에 참여하는 연구활동종사자	2시간 이상
특별안전교육/훈련	중대 연구실사고 발생 및 연구내용 변경 등의 경우 연구주체의 장이 필요하다고 인정되는 연구활동 종사자	2시간 이상



제 2016-E159420 호

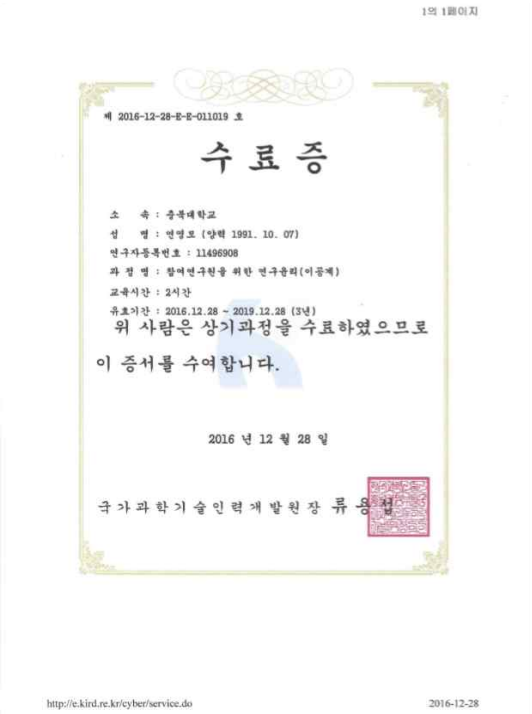
수 료 증

소 속 : 충북대학교
성 명 : 홍기남 (양력 1971. 10. 01)
과 정 명 : 연구보안관리 기본(보안관리 책임자 및 담당자) (3시간)
교육기간 : 2016. 12. 01 ~ 2016. 12. 31

위 사람은 상기과정을 수료하였으므로 이 증서를 수여합니다.

2016 년 12 월 28 일

국가과학기술인력개발원장 류용섭



1의 1페이지

제 2016-12-28-E-E-011019 호

수 료 증

소 속 : 충북대학교
성 명 : 안정호 (양력 1991. 10. 07)
연구자등록번호 : 11496908
과 정 명 : 참여연구원을 위한 연구윤리(이공계)
교육시간 : 2시간
유효기간 : 2016.12.28 ~ 2019.12.28 (3년)

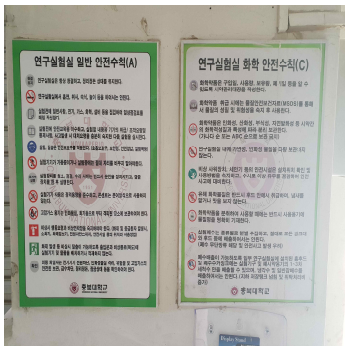
위 사람은 상기과정을 수료하였으므로 이 증서를 수여합니다.

2016 년 12 월 28 일

국가과학기술인력개발원장 류용섭

http://e.kird.re.kr/cyber/service.do 2016-12-28

2. 실험실 내 안전수칙 부착 및 비상보호구함 비치

<비상보호구함>	<소화기>	<실험실 안전 수칙>
		

3. 연구원 보험가입

연구원의 보험가입

- 본 주관기관에서는 학내 구성원(교원, 직원, 학생)에 대한 단체 상해보험이 가입되어 있음.
- 보험 가입 현황은 아래와 같음.

보험명	보상내용	대상	주관부서
연구실 안전공제	사망 1인당 1억원, 후유장해시 급수에 따라 620만원~1억원, 부상의 경우 1,000만원 한도로 상해 등급별 정액 및 실손 보상	연구활동 종사자	안전관리팀
학교 경영자 배상 책임 보험	사망 및 후유장애 1억원 대물 3,000만원 교내외 치료비 500만원	학부생 대학원생	학생과
교직원 단체보험	사망, 후유장해, 질병사망 5,000만원 입원의료비지원 1,000만원	교직원	총무과

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	특허	흄관 결합장치 및 이를 이용한 흄관 결합방법	충북대 산학협력단	발명자	대한민국		2018. 05. 15	등록: 10-1860142 출원: 10-2017-0142813	
2	논문	Flexural Response of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Near-Surface-Mounted Fe-Based Shape-Memory Alloy Strips	충북대	제 1 저자	International Journal of Concrete Structures and Materials	2.031	2018. 07. 05	단독	SCI(E)
3	논문	Evaluation of Fe-Based Shape Memory Alloy (Fe-SMA) as Strengthening Material for Reinforced Concrete Structures	충북대	제 1 저자	Applied Sciences	1.679	2018. 05. 05.	단독	SCI(E)
4	논문	자연재해로 손상된 구조물을 보강하기 위한 폴리머 시멘트 매트릭스의 특성	충북대	교신 저자	Crisisonomy	-	2018. 03. 30.	단독	학술등재지
5	논문	표면매립된 철계-형상기억 합금 스트립으로 휨 보강된 RC보의 장기 휨 거동	충북대	제 1 저자	한국구조물진단유지관리공학회	-	2018. 07. 01	단독	학술등재지

제11장. 기타 사항

제 1절. 2017년 구조물진단유지관리공학회 우수논문상 수상



제 2017-상031호

우수논문발표상

분 과 : 건설안전2

연영모 (충북대학교 토목공학과 석사과정)
홍기남 (충북대학교 토목공학과 교수)
박재규 (충북대학교 토목공학과 시간강사)

<논문> 철계 형상기억합금의 회복응력

귀하는 한국구조물진단유지관리공학회 2017년 봄 학술발표회 및 포럼에서 우수한 논문을 발표하였기에 이 상장을 수여합니다.

2017년 9월 21일

사단법인 한국구조물진단유지관리공학회
회 장 임 남 기

제 2절. 철계 형상기억합금의 건설분야 적용에 관한 세미나 개최

○ 산학연 각 분야의 관련자들과 함께 철계 형상기억합금의 건설분야 적용에 관한 세미나 개최.

- 일시 : 2017년 9월 23일
- 시간 : 14:00 ~ 17:00
- 장소 : 충북대학교 E8-6동 217호
- 내용 : 철계 형상기억합금의 건설분야 적용





제12장. 참고 문헌

1) 강원호, 한만엽, 이택성, 유영민 (1999), "유리섬유를 이용한 손쇄된 프리스트레스 콘크리트 보의 보강공법 개발연구, " 콘크리트학회지, 11(2), 167-175.

2) 국토교통부(2017), "도로 교량 및 터널 현황 조서," 국토교통부.

3) 김두현 (2010), "강판 및 형상기억합금(SMA Wire) 보강된 철근콘크리트의 부착강도," 홍익대학교 석사학위논문.

4) 김일봉(2001), "외부 프리스트레스 콘크리트 부재의 휨강도 계산에 관한 연구," 동아대학교 석사학위논문.

5) 김현광 (2013), "건축구조물 적용을 위한 형상기억합금의 거동특성 파악 및 유한요소해석," 인하대학교 석사학위논문

6) 김희애 (2015), "형상기억합금 섬유의 인발거동" 세종대학교 석사학위논문.

7) 송훈, 고정원, Shinichi, S.(2008), "고강도 콘크리트의 내화특성 및 폭렬현상, " 콘크리트학회지, 20(5), 26-32.

8) 안득만, 김영구, 김부섭, 박익민, 조경목, 최일동 (1997), "단섬유 형상기억합금에 의한 복합재료의 강화기구 해석," 한국복합재료학회 10(3), 1-15.

9) 연정흠, 김도균 (2004), "프리스트레스 콘크리트 합성단면에 도입되는 추가 긴장력 설계와 저항모멘트 평가," 콘크리트학회지, 16(3), 335-344.

10) 오병환, 최영철 (2004), "프리스트레스 콘크리트 구조물의 활용현황과 전망," 콘크리트학회지, 16(1), 1-12

11) 이우성 (2014), "표면매립보강을 위한 CFRP 긴장재의 부착거동에 관한 연구," 경희대학교 석사학위논문.

12) 정원용, 한민엽, 김동백 (2004), "외부 프리스트레싱을 이용한 보강공법," 콘크리트학회지, 16(1), 65-72.

13) Baruj, A., T., Kikuchi., S. Kajiwara., N. Shinya. (2002), "Effect of pre-deformation of austenite on shape memory properties in Fe-Mn-Si-based alloys containing Nb and C, " Materials Transactions, 43(3), 585-588.

14) Borden, T. (1990), "Shape memory alloy fastener rings, " Engineering Aspects of Shape Memory Alloy, 156-169.

15) Buehler, Whilliam J. L. V. Gilfrich, R. C. Wiley (1963), "Effect of low temperature phase changes on the mechanical properties of allys near composition TiNi," Journal of applied physics 34(5) 1475-1477.

16) Czaderski, C., Shahverdi, M., Bronnimann, R., Leinebach, C., Motavalli, M. (2014), " Feasibility of iron-based shape memory alloy strips for prestressed strengthening of concrete structures,"

Construction and Building Materials, 56, 94-105.

17) Czaderski, C., Weber, B., Shahverdi, M., Motavalli, M., Leinenbach, C., Lee, W. J., Bronnimann, R., Michels, J. (2015), "Iron-based shape memory alloys a new material for prestressing concrete structures, " Third Conference on Smart Monitering, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures.

18) Dong, Z., Klotz, U. E., Leinenbach, C., Bergamini, A., Czaderski, C., Motavalli, M. (2009), "A Novel Fe-Mn-Si Shape Memory Alloy With Improved Shape Recovery Properties by VC Precipitation, "Advanced Engineering Materials, 11(1-2), 40.

19) Farjami, S., Hiraga, K., Kubo, H. (2004), "Shape memory effect and crystallographic investigation in VN containing Fe-Mn-Si-Cr alloys, " Materials Transactions, 45(3), 930-935.

20) Justin, O., Reginald, D., Roberto, L. T., Gregory, H. W., Robert, W., Hayes, J. R., Steve, W. (2004), "Steel beam-column connections using shape memory alloys", 130(5), 732-740.

21) Kajiwara, S. (2001), "Remarkable improvement of shape memory effect in Fe-Mn-Si based shape memory alloys by producing NbC precipitates, " Scripta Materialia, 44(12), 2809-2814.

22) Lee, W. J., Weber. B., Czaderski, C., Motavalli, M., Leinenbach, C. (2013), "Phase transformation behavior under uniaxial deformation of an Fe-Mn-Si-Cr-Ni-Vc shape memory alloy," Materials Science & Engineering A, 581, 1-7.

23) Lee, W. J., Weber. B., Leinenbach. C. (2015), "Recovery stress formation in a restrained Fe-Mn-Si-based shape memory alloy used for prestressing or mechanical joining," Construction and Building Materials, 95, 600-610.

24) Leinenbach. C., Kramer, H., Bernhard, C., Eifler, D. (2012), "Thermo-mechanical properties of an Fe-Mn-Si-Cr-Ni-VC shape memory alloy with low transformation temperature," ADVANCED ENGINEERING MATERALS, 14(1-2), 62-67.

25) Li, K., Z. Dong,. Y. Liu., L. Zhang. (2013), "A newly developed Fe-based shape memory alloy suitable for smart civil engineering, " Smart Materials and Structures, 22(4)

26) Min, X. H., T. Sawaguchi., K. Ogawa., T. Maruyama., F. X. Yin., K. Tsuzaki (2011), "Shape memory effect in Fe - Mn - Ni - Si - C alloys with low Mn contents, " Materials Science and Engineering : A, 528(15), 5251-5258.

27) Ozbulut, O. E., Hurlebaus, S., Desroches, R. (2011), "Seismic response control using shape memory alloys: a review, " Journal of intelligent material systems and structures, 22(14), 1531-1549.

28) Reginald, D., Delemont, M., (2002), "Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloy," Engineering Strucutres, 24, 325-332.

29) Reginald, D., McCormick, J., Delemont, M. (2004) "Cyclic properties of superelastic shape

memory alloy wires and bars," Journal of Structural Engineering, 130(1), 38.

30) Sato, A., Chishima, E. Soma, K., Mori, T.(1982), "Shape memory effect in γ⇌ ε transformation in Fe-30Mn-1Si alloy single crystals, " Acta Metallurgica, 30(6), 1177-1183.

31) Shahverdi, M., Czaderski, C., Motavalli, M. (2016), "Iron-based shape memory alloys for prestressed near-surface mounted strengthening of reinforced concrete beams," Construction and Building Materials, 112, 28-38.

32) Shin, M., Andrawes, B. (2010), "Experimental investigation of actively confined concrete using shape memory alloy," Engineering Structures, 32, 656-664

33) Wang, C. P., Y. H. Wen., H. B. Peng., D. Q. Xu., N. Li. (2011), "Factors affecting recovery stress in Fe - Mn - Si - Cr - Ni - C shape memory alloys, " Materials Science and Engineering:A, 528(3), 1125-1130.

34) Wen, Y. H., W. Zhang., N. Li., H. B. Peng., L. R. Xiong. (2007) "Principle and realization of improving shape memory effect in Fe-Mn-Si-Cr-Ni alloy through aligned precipitations of second-phase particles, " Acta Materialia, 55(19), 6526-6534.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.