

20CTAP
-C151899
-02

보안 과제(), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개() / 발간등록번호(11-B552989-000360-01)
국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종 보고서

R&D / 20CTAP-C151899-02

극한지 콘크리트 구조물 급속시공용 회복응력 400MPa급 한국형 철계-형상기억 신합금 및 이를 이용한 인장재 개발 최종보고서

2021.02.16.

주관연구기관 / 충북대학교 산학협력단
협동연구기관 / 한국생산기술 연구원
협동연구기관 / 부경대학교 산학협력단

한국형철계형상기억신합금및이를이용한인장재개발최종보고서
400MPa급

2021 국토교통과학기술진흥원

국토교통부

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘극한지 콘크리트 구조물 급속시공용 회복응력 400MPa급 한국형 철계-형상기억 신합금 및 이를 이용한 인장재 개발’(연구개발 기간 : 2019.04.15 ~ 2020.12.31) 과제의 최종보고서 3부를 제출합니다.

주관연구기관명 : 충북대학교 산학협력단 (이영성)
협동연구기관명 : 한국생산기술연구원 (이낙규)
협동연구기관명 : 부경대학교 산학협력단 (오정환)



2021. 02. 16.

주관연구기관책임자: 홍기남
협동연구기관책임자: 이육진
협동연구기관책임자: 이정훈

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘극한지 콘크리트 구조물 급속시공용 회복응력 400MPa급 한국형 철계-형상기억 신합금 및 이를 이용한 인장재 개발’(연구개발 기간 : 2019.04.15 ~ 2020.12.31) 과제의 최종보고서 3부를 제출합니다.

2021. 02. 16.

주관연구기관명 : 충북대학교 산학협력단 (이영성)
협동연구기관명 : 한국생산기술연구원 (이낙규)
협동연구기관명 : 부경대학교 산학협력단 (오정환)



주관연구기관책임자: 홍기남
협동연구기관책임자: 이육진
협동연구기관책임자: 이정훈

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

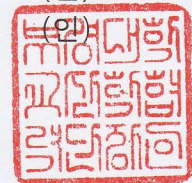
제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘극한지 콘크리트 구조물 급속시공용 회복응력 400MPa급 한국형 철계-형상기억 신탄금 및 이를 이용한 인장재 개발’(연구개발 기간 : 2019.04.15 ~ 2020.12.31) 과제의 최종보고서 3부를 제출합니다.

2021. 02. 16.

주관연구기관명 : 충북대학교 산학협력단 (이영성) (인)
협동연구기관명 : 한국생산기술연구원 (이낙규) (인)
협동연구기관명 : 부경대학교 산학협력단 (오정환) (인)



주관연구기관책임자: 홍기남
협동연구기관책임자: 이육진
협동연구기관책임자: 이정훈

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	20CTAP-C 151899-02	해당 단계 연구 기간	2차년도	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	극한지 콘크리트 구조물 급속시공용 회복응력 400MPa급 한국형 철계-형상기억 신합금 및 이를 이용한 인장재 개발			
연구책임자	홍기남	해당단계 참여연구원 수	총: 12명 내부: 12명 외부: 명	해당단계 연구 개발비	정부: 206,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 206,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 20명 내부: 20명 외부: 명	총 연구비	정부: 370,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 370,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	충북대학교 산학협력단 한국생산기술 연구원 부경대학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	해당사항 없음			해당사항 없음	
위탁연구	해당사항 없음			해당사항 없음	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	해당사항 없음
-------------------	---------

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호	11	2	1								

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약 본 연구는 극한지 콘크리트 급속시공용 한국형 철계-형상기억 신합금 및 이를 이용하여 제작된 인장재를 개발하기 위한 연구임 본 연구를 통해 한국형 철계-형상기억 신합금을 개발하였으며 다음과 같은 실험을 통해 신합금 인장재의 사용성을 평가하였음 - 한국형 철계-형상기억 신합금의 부식저항성 평가를 통한 부식저항 신뢰성 확보 - 한국형 철계-형상기억 신합금의 철근 및 강연선 대체 가능성 검토 - 전기가열에 의한 한국형 철계-형상기억 신합금의 회복응력 발생 메커니즘 규명 - 극한지 환경에서의 한국형 철계-형상기억 신합금의 사용성 검토	보고서 면수 116
--	-------------------

요약문

연구의 목적 및 내용	연구개발 목표 ○ 극한지 콘크리트 구조물 급속시공용 한국형 철계-형상기억합금 및 이를 이용한 인장재 개발 • 인장재로 사용하기 위한 한국형 철계-형상기억 신합금 개발 • 한국형 철계-형상기억 신합금의 부식저항 신뢰성 확보 • 한국형 철계-형상기억 신합금의 철근 및 강연선 대체 가능성 검토 • 전기가열, 유도가열에 의한 철계-형상기억합금의 회복응력 발생 메커니즘 규명 • 극한지 환경에서 철계-형상기억합금의 사용성 확보
	연구개발 내용 ○ 여러 가지 금속을 이용한 한국형 철계-형상기억 신합금의 배합비 산정을 통한 신합금 제조기술 국산화 ○ 한국형 철계-형상기억 신합금 Batch급 제작 및 형상화를 위한 주강괴 제작 및 소성가공 ○ 한국형 철계-형상기억 신합금의 전기화학적 부식평가를 통한 합금의 화학조성 및 열처리의 최적화 ○ 부식환경의 pH, 염소 이온 농도 제어를 통한 다양한 환경에서 한국형 철계-형상기억 신합금의 부식 거동 분석을 통한 합금의 화학조성 및 열처리의 최적화 ○ XPS 등을 활용하여 한국형 철계-형상기억 신합금의 부동태 피막에 대한 안정성 분석을 통한 신합금의 콘크리트 내부 안정성 평가 ○ 전기가열, 유도가열을 통한 콘크리트 내부에서 한국형 철계-형상기억 신합금의 활성화 메커니즘 분석 및 적정 회복온도 산정 ○ 한국형 철계-형상기억 신합금을 이용하여 RC 구조물 제작 후 휨 거동 평가를 통한 개발된 신합금 인장재의 철근 대체 가능성 검토 ○ 한국형 철계-형상기억 신합금의 회복응력 효과를 이용하여 PSC 구조물 제작 후 휨 거동 평가를 통한 개발된 신합금 인장재의 강연선 대체 가능성 검토 ○ 한국형 철계-형상기억 신합금-콘크리트 복합체의 극한지 환경에서 복합거동 분석을 통한 개발된 신합금의 극한지 적용성 검토
연구개발성과	○ 본 연구개발을 통해 다음과 같은 핵심 성과를 도출 함 • 인장재로 사용하기 위한 한국형 철계-형상기억 신합금 개발 • 한국형 철계-형상기억 신합금의 부식저항 신뢰성 확보 • 전기가열 및 유도가열에 의한 철계-형상기억합금의 회복응력 발생 메커니즘 규명 • 한국형 철계-형상기억 신합금의 철근 및 강연선 대체 가능성 검증 • 극한지 환경에서 한국형 철계-형상기억 신합금의 성능평가 ○ 본 연구개발을 통해 다음과 같은 성과를 도출 함 ▪ SCI(E)급 논문 6편, 국내 학술지 논문 5편, 특허 출원 2건, 특허 등록 1건 ▪ SCI(E)급 논문 1편(심사중)

연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	▪ 학술적 파급효과 ◆ 연구 수행 결과를 통해 국내·외 논문 실적을 확보하여 새로운 금속 및 건설재료에 대한 질적 수준 향상 ◆ 기술개발을 통한 재료분야, 토목분야의 석·박사급의 전문인력 양성 ▪ 경제적 파급효과 ◆ 릴랙세이션, 극한지 적설하중, 반복하중 등에 의한 구조물 손상시 재긴장이 가능하여 구조물의 사용수명이 대폭 증가 ◆ 새로운 패러다임의 시공방법, 건설재료 등에 대한 사업화, 기술이전 등을 통한 일자리 창출 ▪ 기술적 파급효과 ◆ 극한지에서 사용되고 있는 강재, 강연선의 취성특성, 부식특성 등을 개선한 새로운 개념에 금속재료 및 이를 이용한 인장재 개발 ◆ 새로운 패러다임의 건설재료인 한국형 철계-형상기억 신합금으로 제작된 인장재를 이용한 건설재료, 시공방법 등에 대한 신기술 확보 ▪ 공공적 파급효과 ◆ 극한지 구조물 급속시공 재료 개발을 통한 국제사회에서 한국의 위상 증진 ◆ 동토지역 국가와 기술협력 및 지원을 통한 국제 유대관계 확보				
국문핵심어 (5개 이내)	철계-형상기억 신합금	극한지 환경	프리스트레스 공법	전기저항 가열	인장재

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	6
2. 연구수행내용 및 성과	18
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	107
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	112
붙임. 참고 문헌	114

1. 연구개발과제의 개요

가 연구개발 목적

○ 본 연구개발의 목적은 크게 2가지로 분류됨

- 1. 한국형 철계-형상기억 신합금 개발
 - 구조부재로 사용하기 위해 고연성(연신률 20% 이상), 부식저항성 및 우수한 회복응력(400MPa 이상)을 확보한 한국형 철계-형상기억합금 개발
- 2. 한국형 철계-형상기억 신합금으로 제작된 인장재의 성능평가
 - 기존 RC부재의 사용성(처짐, 균열제어)을 개선하고, PSC부재의 시공성, 작업성을 개선한 구조부재 제작 공법 개발

○ 연구 목적 달성을 위한 최종 목표 및 세부목표는 다음과 같음

구분	내용
최종 목표	극한지, 일반 환경에서 사용가능한 철근, 강연선 대체용 한국형 철계-형상기억 신합금 및 이를 이용한 인장재 개발
세부 목표	▪ 연성능력 및 부식저항성을 확보한 철계-형상기억 신합금 개발 ▪ 토목구조물용 철계-형상기억 신합금 설계 및 제조공정 국내원천기술 획득 및 실용화 가능한 한국형 철계-형상기억 신합금 소재 개발 ▪ 한국형 철계-형상기억 신합금의 철근 및 강연선 대체 가능성 검증 ▪ 한국형 철계-형상기억 신합금 부식저항성 분석을 통한 소재신뢰성 확보 ▪ 전기가열 및 유도가열에 의한 철계-형상기억 신합금의 회복응력 발생 메커니즘 규명 ▪ 극한지 환경에서 철계-형상기억 신합금의 성능 평가

나. 연구개발의 필요성

- 인구증가 및 도시 밀집화로 인해 국토와 자원이 수용 가능한 수준을 넘어섬에 따라 새로운 공간에 대한 필요성이 대두되고 있음
- 지하 공간, 동토지역, 달, 화성 등과 같은 극한지역으로의 진출 및 개발을 위한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있음
- 전 세계적으로 남극대륙 기득권 확보 및 북극 천연자원 개발을 위한 극한지 진출을 서두르고 있음
- 새로운 환경에 생활공간 형성 및 연구활동을 위해 인프라 시설물 및 부속 시설물이 필수적으로 수반되어야 함



<2019년 주목해야할 과학이슈 1순위>



<남극 장보고기지 건설현장>

- 극한지 환경에서 구조물 건설은 짧은 시공가능기간(남극 기준 연간 2개월), 원자재 수급, 영하 50 ~ 70℃의 극저온 환경 등과 같은 많은 문제를 수반함
- 극한지 환경에서 구조물 건설은 자재 수급 및 운송, 현지 시공성 등을 고려하여 새로운 시공방법 및 건설재료 개발이 선행되어야 함
- 짧은 시공기간에 구조물을 건설하기 위한 방법으로 현장타설을 최소화할 수 있는 프리캐스트 형식이 필요함
- 프리캐스트 형식으로 구조물을 건설하기 위해 높은 부재강도 확보 및 효율적인 운반을 위한 부재 경량화가 필요함
- 일반적으로 구조부재를 경량화하기 위한 방법으로 프리스트레스 콘크리트(PSC)를 사용하고 있으나 PSC는 다음과 같은 문제가 있음
 - 응력을 받는 강재가 일반 강재에 비해 부식이 빠르게 진행되는 **응력부식 현상**
 - 프리스트레스 긴장재로 사용되는 강재는 **저온에서 취성적 파괴**를 나타냄
 - 크리프, 릴랙세이션 등의 원인으로 인한 긴장력 저하시 **재긴장 불가**
 - 잭킹장치 사용으로 인한 **복잡한 시공성 및 긴 시공기간**
 - 긴장과정에서 정착장치 탈락으로 인한 **시공자의 위험성**

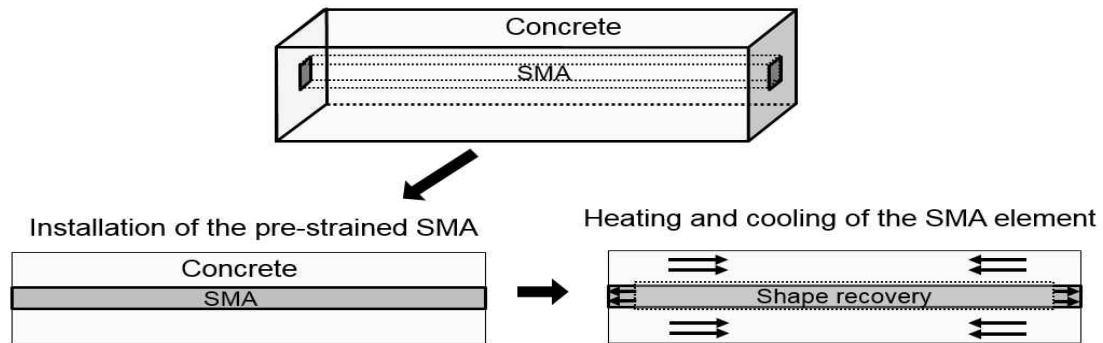


<PSC 시공중 잭킹작업>



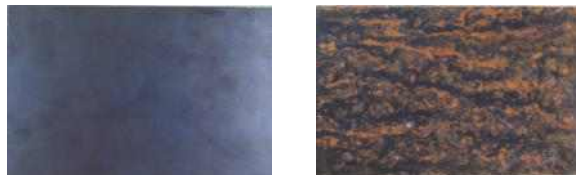
<응력부식에 의한 강연선 파단>

- 최근 위와 같은 PSC의 문제를 해결하기 위해 형상기억합금의 회복응력을 이용하여 구조물에 프리스트레스 효과 부여를 위한 연구가 진행됨
- 형상기억합금을 이용하여 철근 콘크리트 구조물에 프리스트레스 효과를 도입하기 위한 원리는 다음과 같음



<형상기억합금을 이용한 프리스트레스 효과 도입 원리>

- 형상기억합금을 이용하여 구조물에 프리스트레스 효과를 부여하면 구조부재의 강도를 증가시킬 수 있을 뿐 아니라 구조부재의 경량화, 재긴장 효과 등을 통해 효과적인 프리캐스트 부재 제작이 가능하여 극한지 구조물 급속시공에 효과적일 것으로 판단됨
- 하지만 기존 연구된 형상기억합금은 Ni-Ti계 형상기억합금이며, 높은 원재료 가격에 의한 경제성 문제로 인해 실제 건축구조물로 적용은 어려운 실정임
- 최근 스위스, 일본을 중심으로 개발된 철계-형상기억합금(Fe-SMA)은 철계를 중심으로 한 형상기억합금으로 Ni-Ti 형상기억합금에 비해 경제성이 확보되었으며, 이를 건설재료로써 활용하기 위한 연구가 진행됨
- 일본에서 개발된 Fe-SMA는 초탄성 효과를 극대화하였으며, 이를 이용하여 일본 나고야 JP 타워의 댐퍼로 실 적용을 실시함



SD400



Fe-SMA

<부식 실험 결과>



<철계-형상기억합금으로 제작된 댐퍼>

- 하지만 Fe-SMA의 국내 생산기술은 전무한 실정이기 때문에 향후 Fe-SMA를 건설재료로써 사용하기 위해 전량 수입에 의존해야함. 이로 인해 외화유출을 통한 국익 손상 뿐 아니라 건설재료로써 Fe-SMA를 실용화시 경제성이 문제가 됨
- 일반환경 및 극한지 환경의 건설재료로써 Fe-SMA를 사용하기 위해 Fe-SMA의 국내생산기술 확보가 시급한 상황임

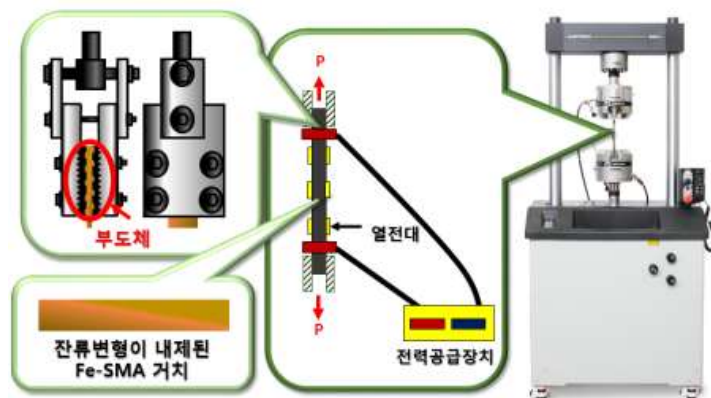
다. 연구개발 범위

(1) 1차 연도

(가) 주관연구기관 : 충북대학교 산학협력단

○ 한국형 철계-형상기억 신합금을 콘크리트 구조물 인장재로 사용하기 위한 신합금 기초 물성 확보

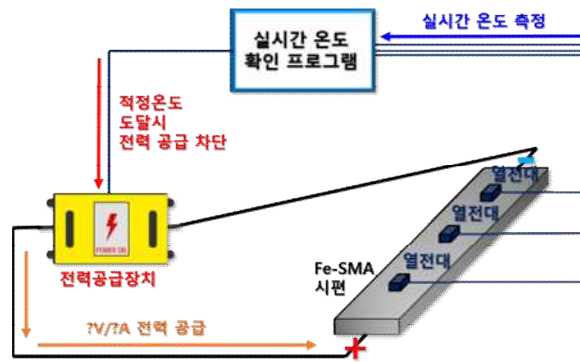
- 100kN 용량의 인스트론 장비를 이용하여 한국형 철계-형상기억 신합금의 인장실험을 진행
- 파괴실험을 통해 한국형 철계-형상기억 신합금의 항복 강도, 항복 변형률, 극한 강도, 극한 변형률, 탄성계수 측정
- 한국형 철계-형상기억 신합금의 사전변형을 1 ~ 10%까지 1%간격으로 변형시키며 잔류변형률 측정 및 사전변형-잔류변형 관계 분석
- 사전변형에 1 ~ 10%, 회복온도 100, 120, 140, 160℃를 변수로 하여 사전변형, 회복온도에 따른 회복응력 측정



<회복응력 평가 방법>

○ 전기가열에 의한 한국형 철계-형상기억 신합금의 회복응력 발생 메커니즘 규명

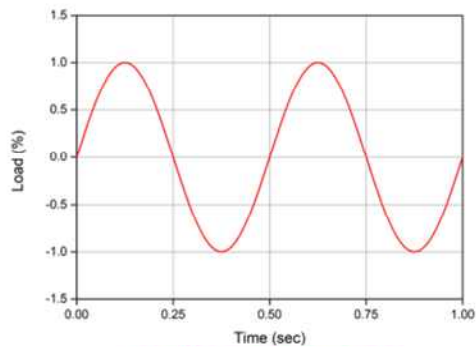
- 한국형 철계-형상기억 신합금의 사전변형에 따른 신합금의 밀도, 비저항, 비열 측정을 통한 활성화 기초 데이터 확보
- 상온에서 전기가열 장비를 통해 다양한 전력을 공급하여 적정 가열온도 도달시간 측정
- 콘크리트-신합금 복합체 제작 후 전기가열 및 유도가열에 의한 콘크리트 내부 매립된 철계-형상기억 신합금의 활성화 특성 분석
- 콘크리트 변형률 측정을 통한 회복응력 특성 분석



<전기가열 방법>

○ 한국형 철계-형상기억 신합금의 피로특성 평가

- 100kN 용량의 인스트론 장비를 이용하여 한국형 철계-형상기억 신합금의 피로실험을 진행
- 실험 변수로써 항복강도의 20%, 40%, 60%, 80%, 100%의 응력을 0.5 ~ 3Hz로 200만회 반복
- 실험 결과를 통한 한국형 철계-형상기억합금의 피로 거동 분석



피로실험을 위한 Sin파 주기

<피로시험 방법>

(나) 공동연구기관 : 한국생산기술연구원

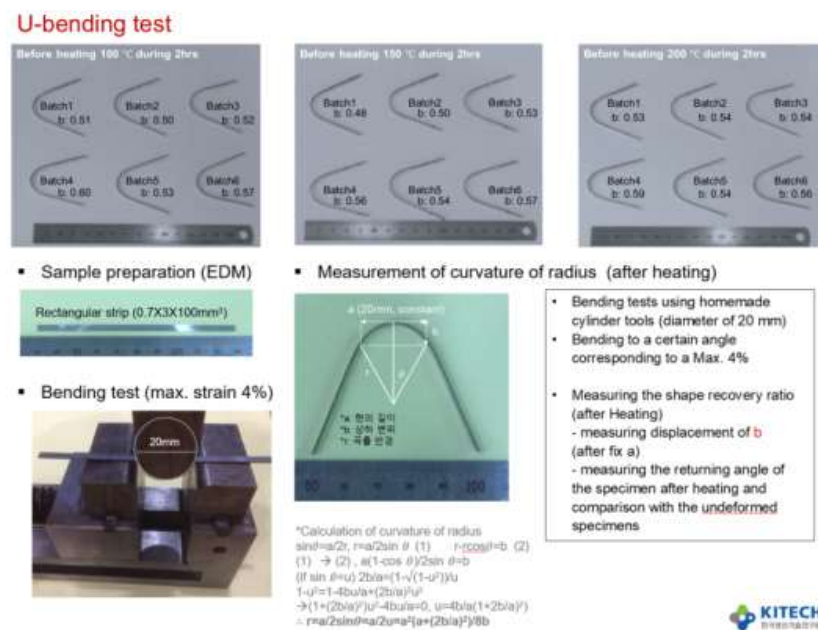
○ 한국형 철계 형상기억합금 조성 최적설계

- 형상기억 신합금 설계 및 최적조성 탐색
- 재료연구소와 협업 - 합금원소가 미세조절된 lab scale 철계 형상기억합금 제조



<lab scale 형상기억합금 strip 제작 사례>

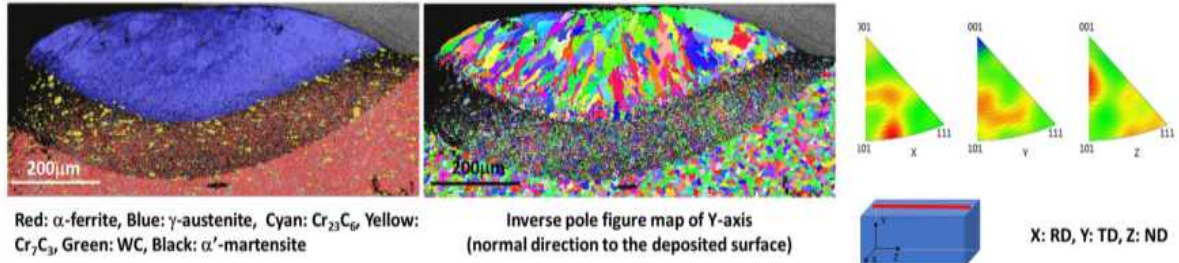
- U-bend test를 통한 의사탄성 (pseudo-elasticity) 및 회복변형을 간접측정



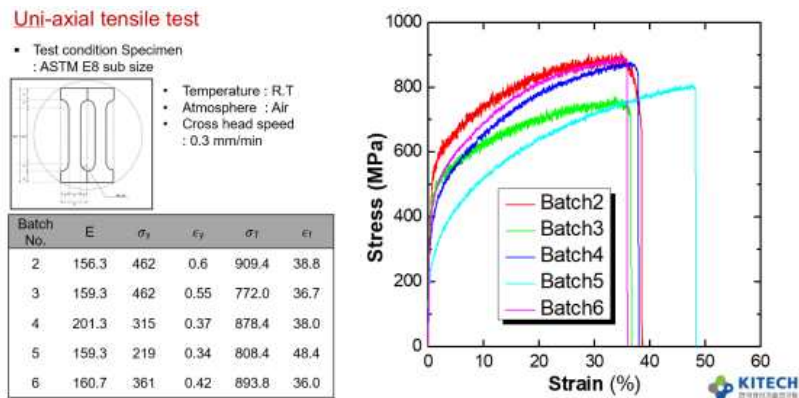
<strip U-bend test를 통한 합금조성별 형상기억능력 검증 사례>

○ 후보합금계 소재특성 분석 및 열처리 조건 선정

- 미세조직 분석 및 소재 기계적 특성 분석을 통한 최적합금계 조성선정 및 열처리 선행연구



<FE-SEM 및 EBSD 기법을 통한 미세조직 정밀분석 사례>



<철계 형상기억합금 sub-size 인장시험편을 통한 기계적 특성분석 선행연구 사례>

○ 토목구조물 적용시험을 위한 batch size 급 철계 형상기억합금 선행합금계 선정 및 제작지원

- 선행연구된 조성 기반 철계형상기억합금 batch size (>50Kg) 제작 조건 선정
- 주강괴 제작 및 소성가공을 통한 형상화 조건 선정

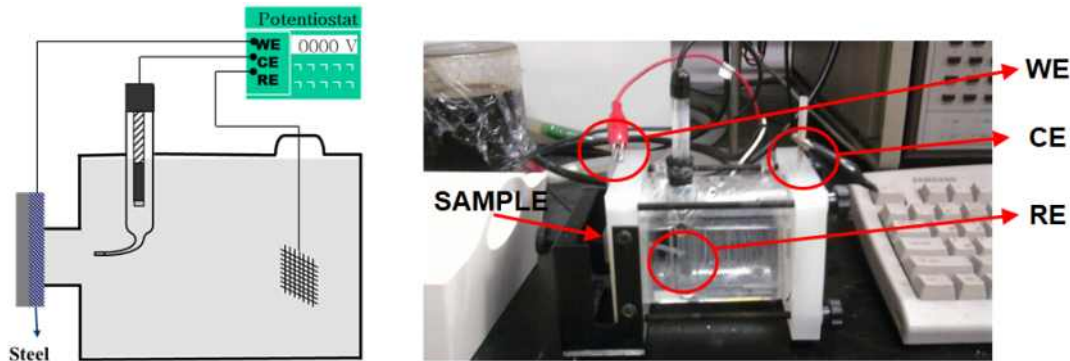


<batch size 주강괴 및 이를 통한 소성가공 시제품 제작 사례>

(다) 공동연구기관 : 부경대학교 산학협력단

○ 한국형 철계-형상기억 신합금의 부식저항성 평가

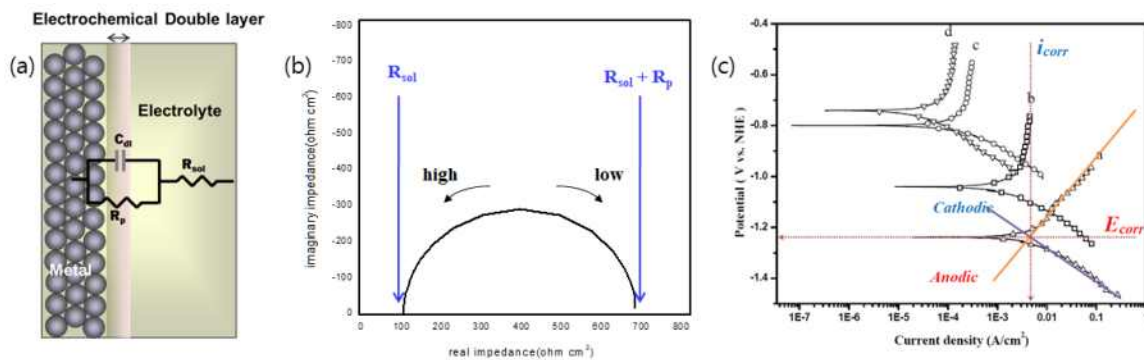
- 전기화학적 셀을 사용하여 동전위 분극법 및 임피던스 측정을 통하여 소재의 부식 속도 및 부식에 대한 저항성 분석
- pH 및 Cl^- 이온의 농도를 제어하여 다양한 환경에서의 부식 거동 분석



<부식 저항성 분석을 위한 전기 화학적 셀의 모식도 및 Flat Cell>

○ 한국형 철계-형상기억 신합금의 산화피막 분석

- XPS 등을 활용하여 소재 종류에 따라 표면 부동태 피막의 안정성 분석 및 소재 최적화



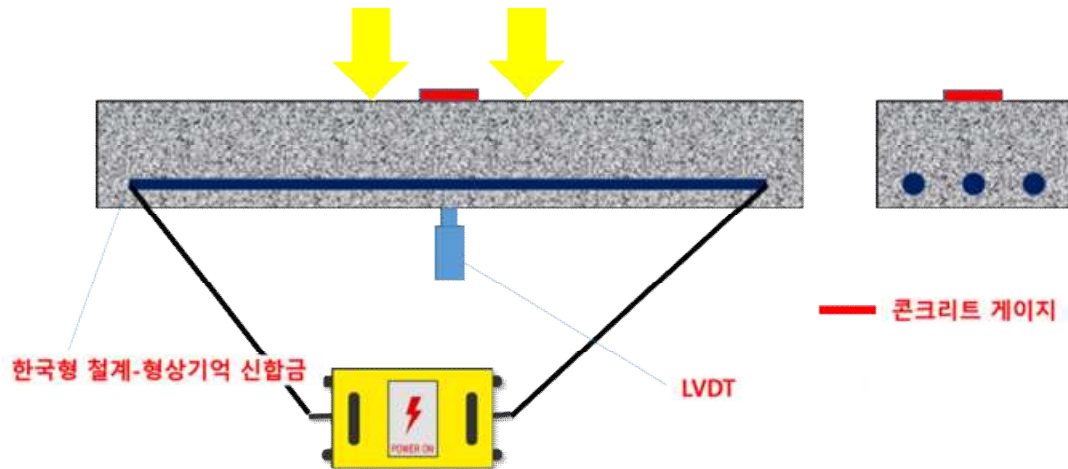
<부식 저항성 분석을 위한 전기 화학적 셀의 모식도 및 Flat Cell>

(2) 2차 연도

(가) 주관연구기관 : 충북대학교 산학협력단

○ 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재의 철근 및 강연선 대체 가능성 검증

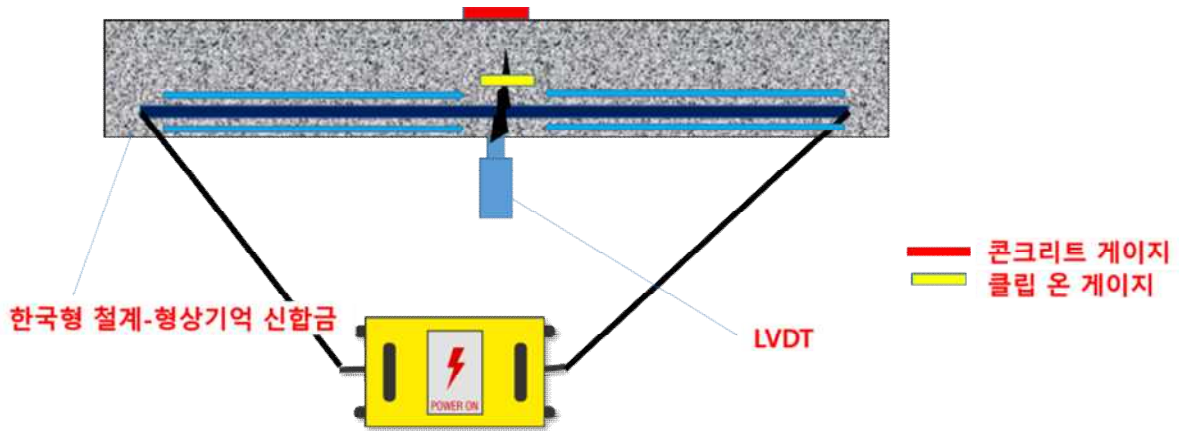
- 비교 대상체인 일반적으로 사용되는 SD400 강재를 이용하여 RC 구조물 제작
- SD400 강재는 가장 일반적으로 사용되는 강재이며 이보다 강한 강도의 강재는 극한지 환경에서 연성이 감소되므로 SD400 철근을 비교군으로 설정
- 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재의 철근비, 사전변형을 변수로 RC 구조물 제작
- 전기가열을 통해 사전변형이 발생한 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재 활성화
- 활성화 후 제작된 RC 구조물의 부착된 변형률 게이지 및 LVDT를 이용하여 구조물 프리스트레스 성능 확인
- 2000kN 용량의 액추레이터를 이용하여 분당 0.5mm의 속도로 변위재하
- LVDT 및 부착된 변형률 게이지를 이용하여 구조물의 변위 및 변형률 측정
- 일반 강재로 제작된 RC 구조물과 비교·분석 실시



<한국형 철계-형상기억 신합금 인장재로 제작된 RC/PSC 구조물의 휨강도 평가>

○ 한국형 철계-형상기억 신합금의 재긴장 가능성 검증

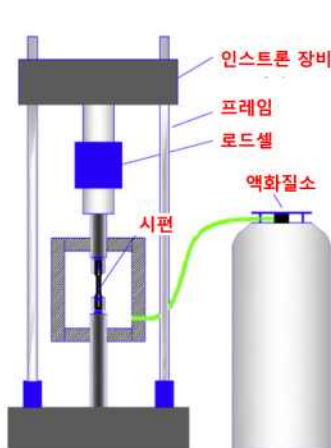
- 선행 실험 분석을 통해 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재로 제작된 RC 구조물의 변위-변형률 관계 분석
- 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재로 RC 구조물 제작
- 2000kN 용량의 액추레이터를 이용하여 신합금을 목표 변형률까지 분당 0.5mm의 속도로 변위재하
- 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재가 목표 변형률에 도달한 후 신합금 인장재 활성화
- 활성화 중 클립 온 게이지를 이용하여 RC 구조물의 균열 폭 측정
- 활성화 후 제작된 RC 구조물의 정적 재하실험 재 수행
- LVDT 및 변형률 게이지를 이용하여 구조물의 변위, 변형률 측정 후 선행 실험결과와 비교·분석 실시



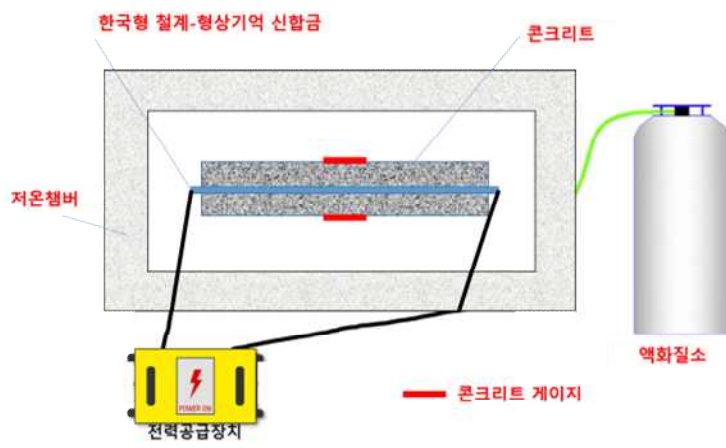
<한국형 철계-형상기억 신태금 인장재 재간장 가능성 평가>

○ 극한지 환경에서 한국형 철계-형상기억 신태금의 사용성 확보

- 100kN 용량의 인스트론 장비를 이용하여 한국형 철계-형상기억 신태금의 인장실험을 진행
- 액화 질소를 이용하여 실험체를 목표 온도까지 감소
- 실험체 목표온도 도달 후 인장실험을 진행
- 파괴실험을 통해 한국형 철계-형상기억 신태금의 극저온 온도에서 항복 강도, 항복 변형률, 극한 강도, 극한 변형률, 탄성계수 측정
- 콘크리트-신태금 복합체 제작
- 액화질소를 이용하여 복합체의 온도를 목표 온도까지 감소
- 전기가열 장비를 통해 다양한 전력을 공급하여 적정 가열온도 도달시간 측정 후 부착된 변형률 게이지를 이용하여 극저온 환경에서 신태금 인장재의 회복응력 발생 유·무 확인



<극저온 인장시험>

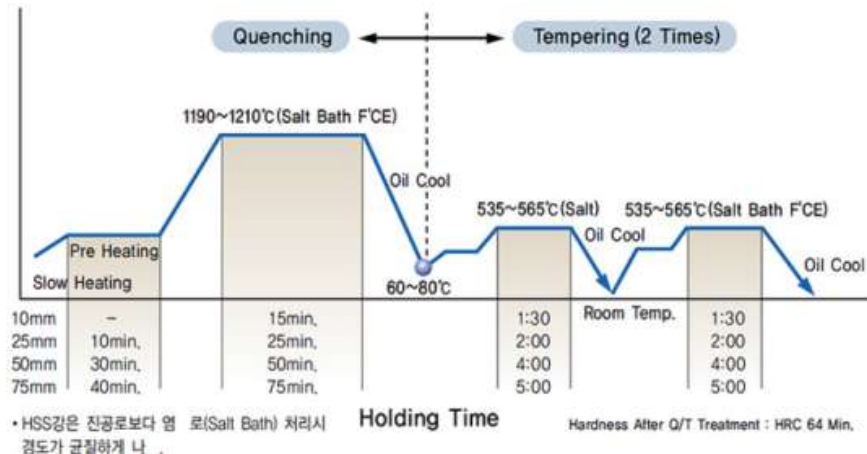


<극저온 회복응력 측정>

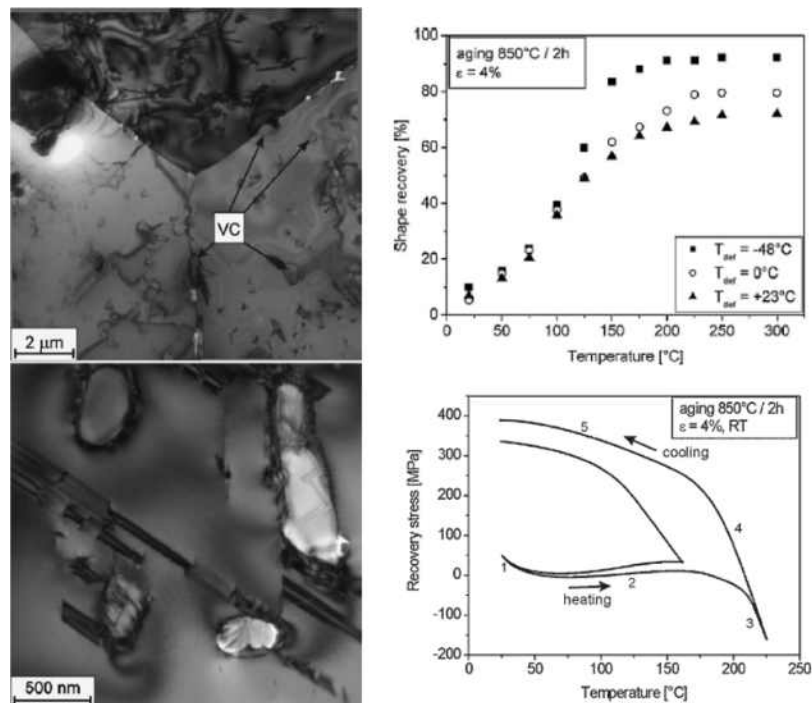
(나) 공동연구기관 : 한국생산기술연구원

○ 한국형 철계 형상기억합금 제조공정 및 성능 최적화

- 1차년도 실험결과 기반 신탐금계 최적 조성 선정
- 미세조직 분석 및 소재 기계적 특성 분석을 통한 소성변형 전후 열처리 조건 최적화



<원하는 물성을 얻기 위한 다단 열처리 설계 개념도>



<열처리를 통한 회복률 및 복원응력 최적화 사례>

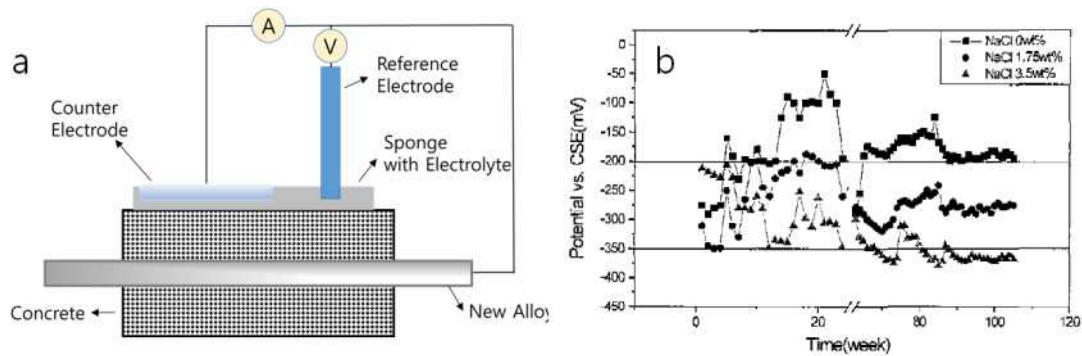
○ 조성 및 제조공정이 최적화된 형상기억합금 시제품 물성분석

- 신탐금계 batch 사이즈 시제품 봉형 및 판형 소재분석 및 후열처리 최적조건 선정
- pre-strain 및 온도변화에 따른 합금 내부 미세조직 및 상변화 상세분석

(다) 공동연구기관 : 부경대학교 산학협력단

○ 한국형 철계 형상기억합금의 콘크리트에서의 안정성 평가

- 콘크리트를 이용한 전기화학적 셀을 구성하여 시간에 따른 부식 전위 측정, 동전위 분극, 임피던스 측정
- 신합금에 대한 연구를 기존 인장재용 철강소재에 대한 분석과 병행하여 기존 대비 우수한 부식저항성 확보

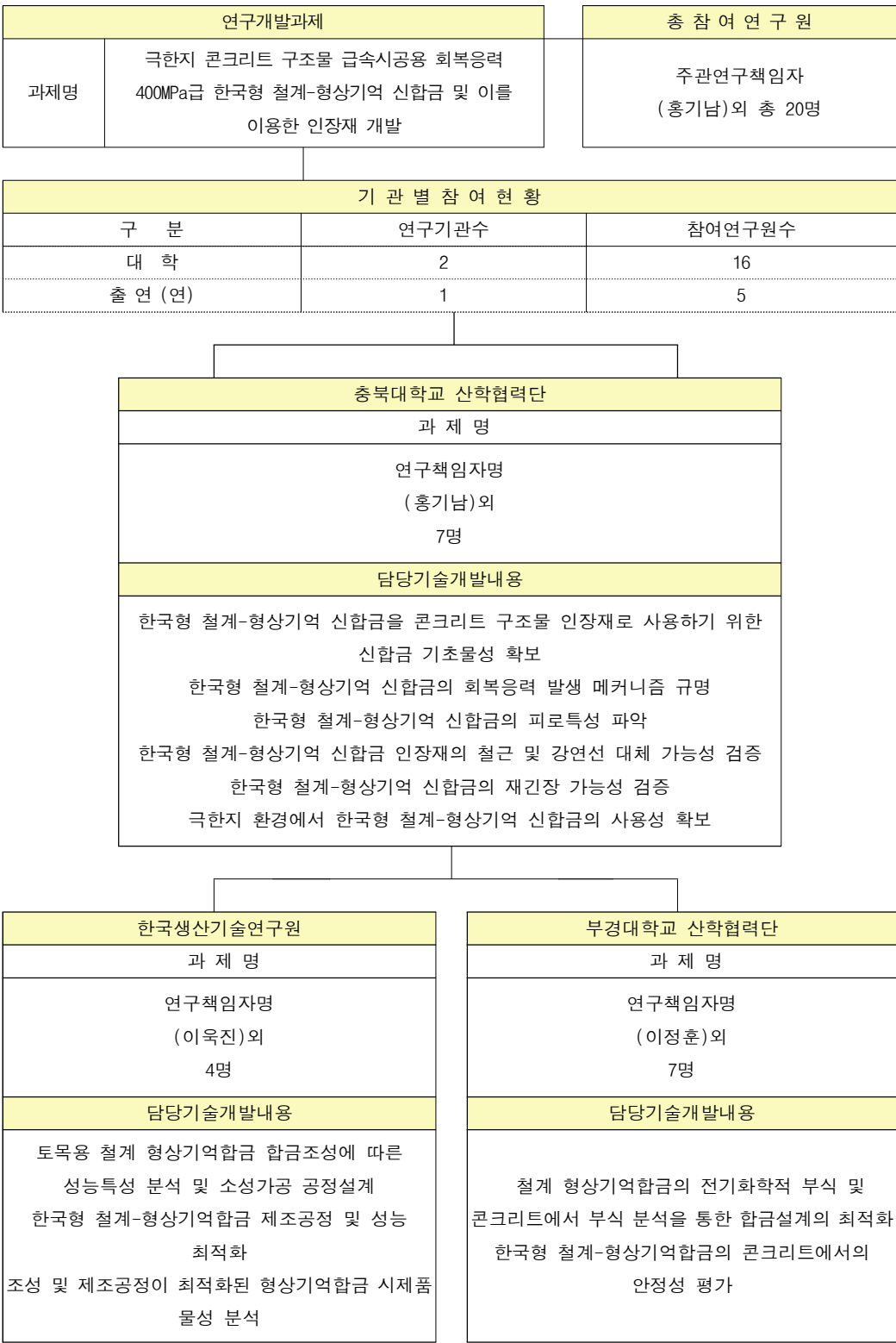


<한국형 철계-형상기억 신합금의 콘크리트 내부 부식안정성 평가 방법>

2. 연구수행내용 및 성과

가. 연구수행내용

본 연구는 다음과 같은 추진전략에 의해 수행되었음



(1) 1차 연도

(가) 공동연구기관 : 한국생산기술연구원

○ 한국형 철계 형상기억합금 조성 최적설계

진공 아크 용해



압연



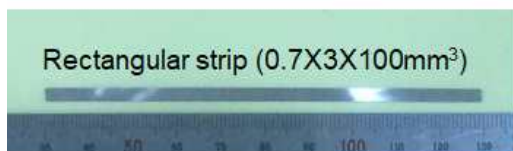
열연바 제조



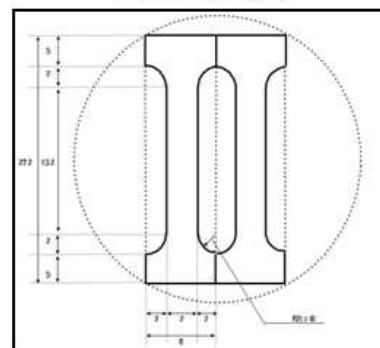
<lab scale 형상기억합금 strip 제작 기법 (재료연구소 타이타늄 연구실 협동연구)>

- 철계 형상기억합금의 기초합금조성을 설계하고 주요 합금첨가원소의 조성비에 따른 합금의 형상기억 특성 및 기계적 특성변화를 분석하기 위해 창원 소재 재료연구소 타이타늄 연구실과의 협연으로 다음의 6개 화학조성을 가지는 합금 열연바 소량 제조
- 제조된 합금 batch별 일람
- Batch 1: Fe-17Mn-5Si-5Cr
- Batch 2: Fe-17Mn-5Si-5Cr-Ni
- Batch 3: Fe-17Mn-5Si-5Cr-4Ni
- Batch 4: Fe-17Mn-5Si-5Cr-4Ni-0.05C
- Batch 5: Fe-17Mn-5Si-5Cr-4Ni-0.1C
- Batch 6: Fe-17Mn-5Si-5Cr-0.3C-1Ti (weight %)
- 제조된 열연바는 U-bend test를 위해 $0.7 \times 3 \times 100\text{mm}^3$ 의 사각 strip 형태와 게이지길이 13.2mm의 소형 dog-bone 타입 인장시험편 형태로 가공

U-bend test용 스트립



인장시험편



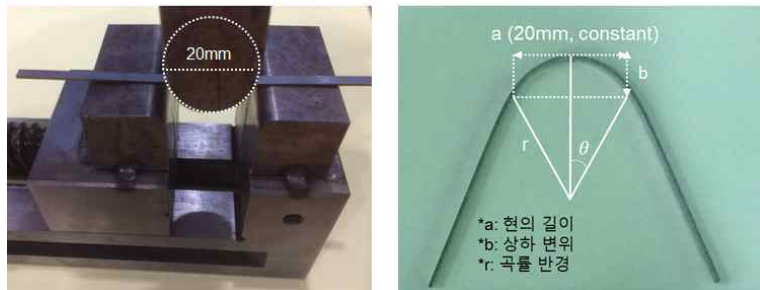
<형상기억특성 및 기계적 특성 분석을 위한 시험편 제조>

- 각 열연바의 합금조성별 형상기억특성은 strip의 u-bend test를 통해 알아보았으며, 상기 나타낸 간단한 lab-made u-bend 장치로 측정
- 실험방법은 스트립을 직경 20mm로 구부렸다가 펴고 온도를 올려가면서 곡률반경의 변화를 통해 스트립의 변형률을 간접측정하는 방식으로, theory of beam을 응용하면 스트립 중심축 (neutral axis) 에서의 거리 z에 따른 변형량은 다음과 같이 계산:

$$\epsilon(z) = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{z}{r}$$

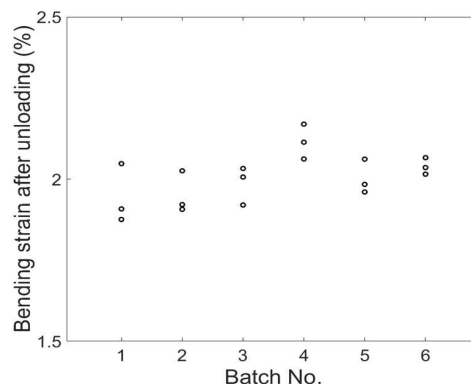
- 여기서 Δl 과 l_0 는 각각 변형증분과 변형되기 전의 원래 길이를 나타냄
- 실험에 사용된 스트립의 두께가 0.7mm이기 때문에, 20mm의 곡률반경으로 bending test를 한 경우 스트립 최외곽 (최하단 및 최상단)의 최대변형량은 약 0.35%

U-bend test (max. strain 3.5%)



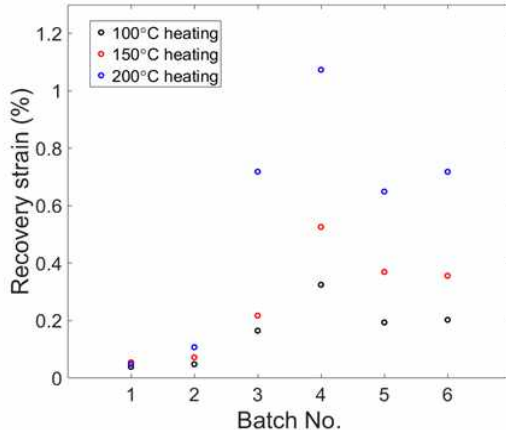
<U-bend test 장치 및 변형률 계산 개념도>

- 0.35%의 굽힘변형을 인가하는 실험을 batch당 3회 실시한 후 하중을 제거하여 남아 있는 굽힘변형률을 측정한 결과 시험편은 평균적으로 굽힘응력을 제거한 후 약 2%의 굽힘변형이 소성변형과 유사한 형태로 남아있었으며 Batch별 특별한 차이가 나타나지 않음

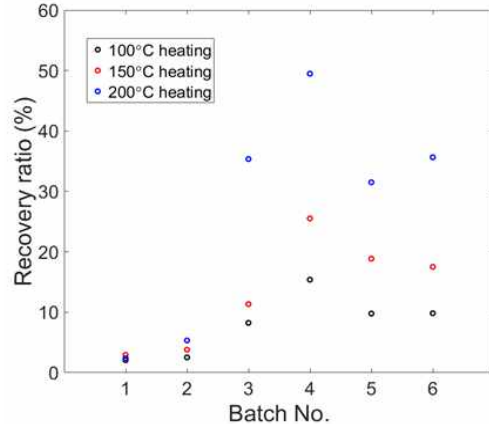


<굽힘하중을 제거한 후 측정된 batch별 굽힘변형률>

- Batch 1과 2의 경우는 200°C까지의 가열로 거의 형상복원을 나타내지 않았으며, Batch 3의 경우 150°C까지는 거의 형상복원을 하지 않다가 200°C에서 급격히 복원됨
- Batch 4-6은 150°C까지의 가열만으로도 상당한 수준의 형상복원력을 보였으며, 형상복원력은 Batch 4가 가장 우수하고 그 다음으로 Batch 3, 5, 6이 비슷한 수준임

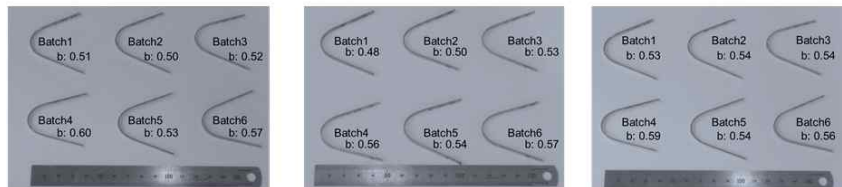


< batch별 형상복원률 >

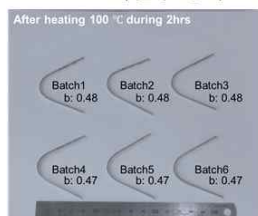


< 형상복원비율 >

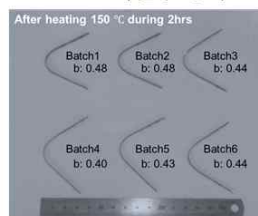
가열전



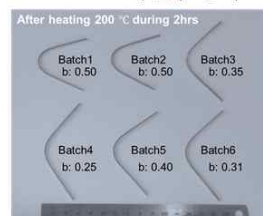
100°C 가열후 냉각



150°C 가열후 냉각



200°C 가열후 냉각

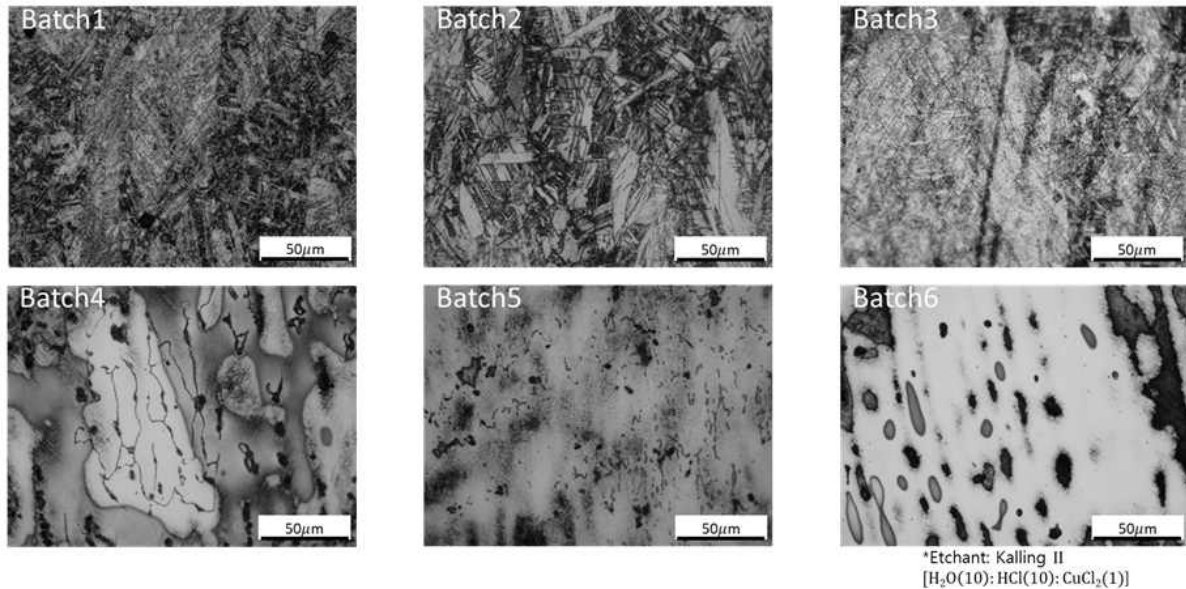


< strip u-bend test 및 100, 150, 200°C 가열에 의한 형상기억 효과 >

○ 후보합금계 소재특성 분석 및 열처리 조건 선정

- 제조된 열연바의 미세조직을 통해 주강괴의 제조조건을 도출하기 위해 Kalling II 에칭액을 사용하여 연마된 열연바 표면 에칭 후 광학현미경으로 미세조직 관찰
- Batch 1과 2는 전형적인 BCC martensite 혼재상으로 침상조직을 나타내며, batch 3의 경우도 일부 미세조직에서 침상조직이 관찰됨
- 이 결과는 batch 1 ~ 3은 소재내에서 형상기억 상변화를 만들 수 있는 FCC austenite 상이 충분히 안정화 되지 않아 상온으로 냉각할 시 BCC 구조로 일부 바뀐다는 것을 의미하며, 이로 인해 합금에서 충분한 형상기억 특성이 발현되지 않을 수 있을 확인

- 한편, batch 4 ~ 6에서는 탄화물로 보이는 석출상들이 미세조직에서 관찰되었으며, 탄화물의 후균질화처리 가능 여부를 위해 batch 6을 각각 1,100℃ 4시간, 1,200℃ 2시간 후균질화 처리를 실시하였으나, 이미 생성된 탄화물은 거의 제거 안됨
- 따라서 **주강괴 제조에서부터 1,200℃ 이상의 높은 온도에서 충분한 시간의 균질화 열처리를 수행하는 것이 바람직하다는 결론을 얻음**



<광학현미경 및 FE-SEM을 통한 미세조직 관찰>

Solution treatment / 1100 °C (4hr holding) → water quenching



Solution treatment / 1200 °C (2hr holding) → water quenching

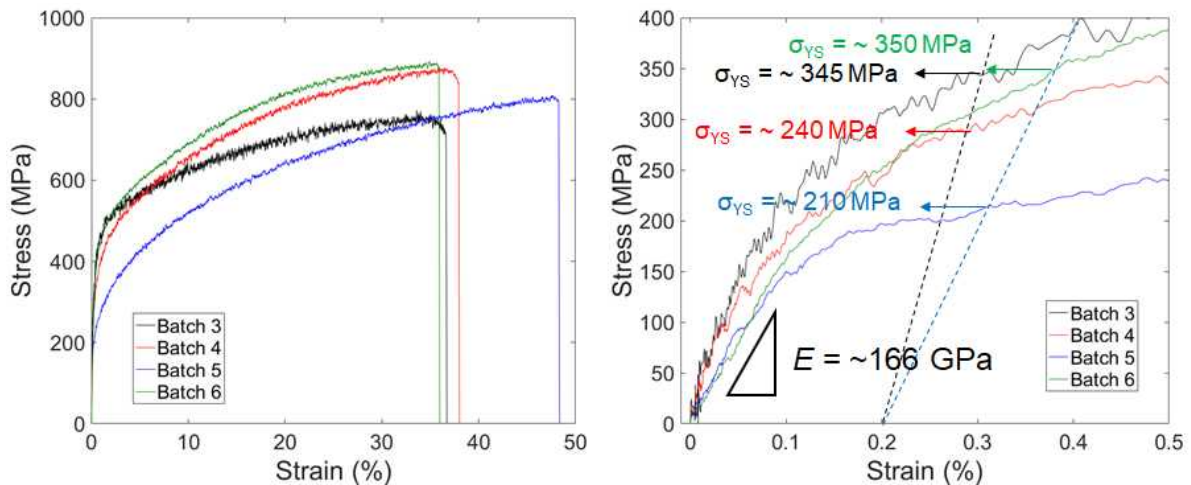


<Batch 6 후균질화처리 후 미세조직 관찰>

- 소량 제조된 열연바의 인장거동을 알아보기 위해 형상기억특성을 보이는 batch 3 ~ 6의 열연바 인장시험 실시
- Batch 3과 4, 5를 비교했을 때, 탄소의 첨가로 오히려 항복강도가 약간 낮아지는 현상을 볼 수 있는데, 이는 일반적인 철강재료의 특성(탄소함량이 높아질수록 높은 항복강도를 보임)과는 반대되는 현상으로, 탄소의 첨가에 의해 형상기억특성을 나타낼 수 있는 상변화가 활성화되기 때문으로 판단됨
- Batch 3, 4와 5, 6을 비교해 보면, C와 Ti의 첨가로 인해 탄성계수가 일부 낮아지는

것을 확인할 수 있으며, Ti가 첨가된 합금의 경우 탄성계수가 약 166GPa로 batch 3과 4에 비해 약간 낮게 나타남

- Batch 5와 6의 상대적으로 낮은 탄성계수는 재료의 탄성영역에서 발생할 수 있는 응력유기상변태 (stress-induced phase transformation) 에 의한 것으로 평가됨
- 최대연신률의 경우 batch 5의 경우가 약 50%로 다른 4개의 batch (35 ~ 40%) 에 비해 상당히 높지만, batch 5의 경우 항복강도가 약 210MPa로 batch 6의 350MPa에 비해 매우 낮기 때문에 **실용적인 철계형상기억합금의 설계를 위해서는 Ti가 첨가되는 것이 기계적 특성 측면에서 유리한 것으로 나타남**



<철계 형상기억합금 sub-size 인장시험편을 통한 소량제조 열연바 조성별 인장거동 분석>

○ 토목구조물 적용시험을 위한 batch size 급 철계-형상기억합금 선행합금계 선정 및 제작지원

- 전문업체 외주제작의뢰를 통해 다음의 두 가지 합금을 100 Kg단위 판재로 제작/성형함
- batch 5: Fe-17Mn-5Si-5Cr-4Ni-0.1C
- batch 6: Fe-17Mn-5Si-5Cr-0.3C-1Ti (weight %)
- 합금 제작과정은 먼저 100 Kg의 합금을 녹여 주강괴로 제작, 이후 1,250℃에서 6시간동안 균질화 열처리 과정을 거친 후 1,000℃로 단계적으로 온도를 올리면서 압연하여 최종 압연 플레이트의 두께가 5mm가 될 때까지 열연하여 제작함
- 제조된 합금의 최종조성은 상기 조성표와 같으며, 목표조성에서 **Mn의 경우 주조시의 성분변화로 약 1 wt.%정도 실제 조성에서 낮게 나왔으나 그 외의 다른 원소들은 대체로 목표조성과 일치함**



<batch size 주강괴 및 이를 통한 소성가공 시제품 제작 (100kg, t = 5mm)>

#1: Fe-17Mn-5Si-5Cr-4Ni-0.1C

CERTIFICATE OF MATERIAL

Customer: HVM
Project No.: HVM-000001
Product Type: Plate
Material Specification: Fe-17Mn-5Si-5Cr-4Ni-0.1C
Quantity: 100kg
Date of Issue: 2019. 06. 28

Heat No.	Chemical Composition	wt (%)							
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	Ti	Remarks
F2437	Target	0.07	4.0	15.0	5.0	3.0	89.0	0.8	
	Actual	0.07	4.0	15.0	5.0	3.0	89.0	0.8	

Remarks:

See Remarks: The material has been tested in accordance with the order and the plate specification. Quality management system is certified in accordance with ISO 9001:2015 by KQ700.

HVM-000001 (HVM-000001)

Heat No.	Chemical Composition	wt (%)						
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	Ti
F2437	Target	0.07	4.0	15.0	5.0	3.0	89.0	0.8
	Actual	0.07	4.0	15.0	5.0	3.0	89.0	0.8

#2: Fe-17Mn-5Si-5Cr-4Ni-0.3C-1Ti

CERTIFICATE OF MATERIAL

Customer: HVM
Project No.: HVM-000001
Product Type: Plate
Material Specification: Fe-17Mn-5Si-5Cr-4Ni-0.3C-1Ti
Quantity: 100kg
Date of Issue: 2019. 06. 28

Heat No.	Chemical Composition	wt (%)							
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	Ti	Remarks
F2438	Target	0.30	4.0	15.0	5.0	3.0	89.0	1.0	
	Actual	0.30	4.0	15.0	5.0	3.0	89.0	1.0	

Remarks:

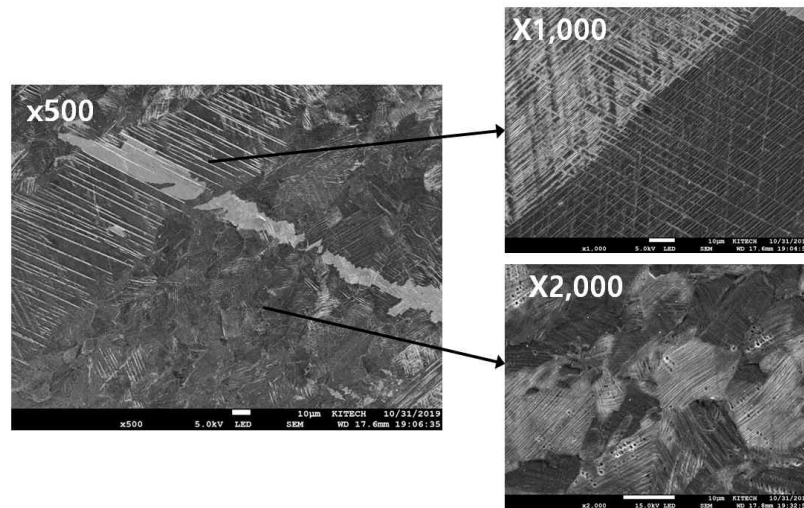
See Remarks: The material has been tested in accordance with the order and the plate specification. Quality management system is certified in accordance with ISO 9001:2015 by KQ700.

HVM-000001 (HVM-000001)

Heat No.	Chemical Composition	wt (%)						
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe	Ti
F2438	Target	0.30	4.0	15.0	5.0	3.0	89.0	1.0
	Actual	0.30	4.0	15.0	5.0	3.0	89.0	1.0

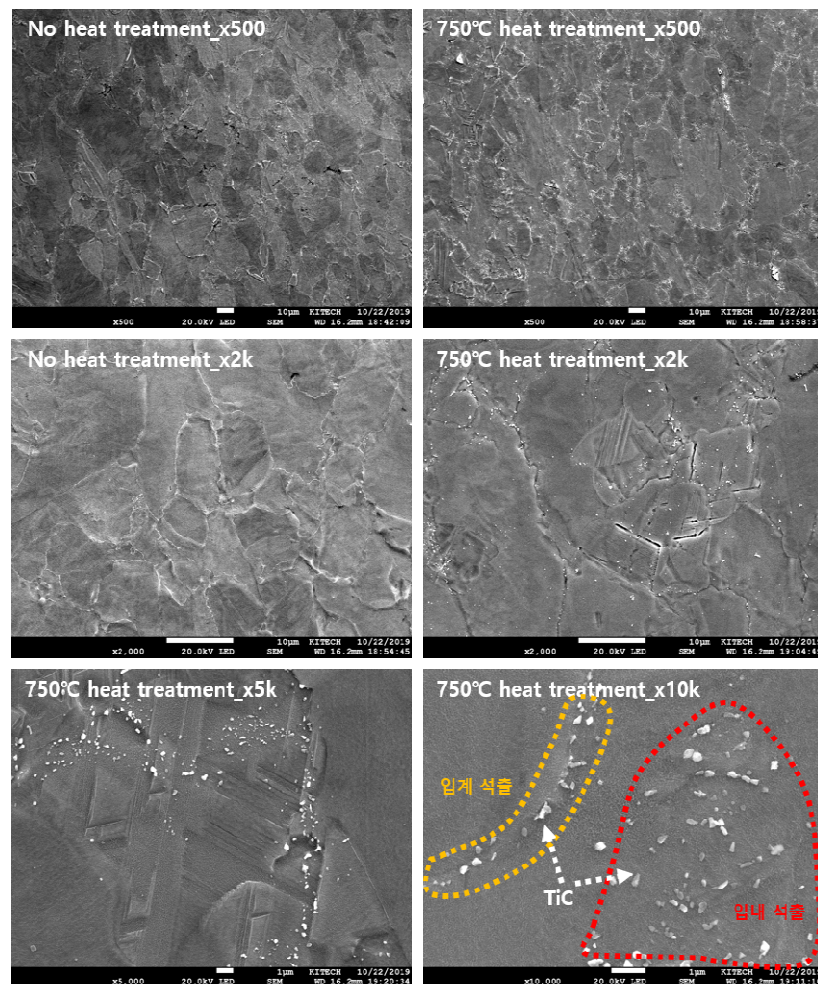
<제조된 합금의 최종 조성표>

- 아래의 전자현미경 이미지는 제조된 2개의 합금중 batch 5 (Fe-17Mn-5Si-5Cr-4Ni-0.1C) 의 미세조직을 나타냄
- batch 5 (Fe-17Mn-5Si-5Cr-4Ni-0.1C)의 경우 결정립 크기가 10 ~ 20 μm 전후의 아주 fine한 미세조직과, 비교적 큰 결정립이 혼재되어 있는 복잡한 미세구조를 나타내었으며, 1,000배 및 2,000배로 확대한 이미지를 보면 결정립 내에 빗살무늬와 유사한 패턴이 관찰되는데 이는 열연과정에서 이미 형상기억 상변화를 일으키는, ϵ 상이라고 불리우는 조밀육방격자 (Hexagonal closed packed, HCP) 구조의 상이 일부 형성되었음을 암시함
- 열연중 형성된 ϵ 구조는 원하는 방향으로의 형상복원력을 일으키지 않을 것으로 예상되므로 형상복원력을 더욱 높이기 위해서는 열처리를 통해 pre-straining 하기 전에 γ (austenite, FCC) 구조로 바꾸어 주는 것이 이상적일 것으로 판단됨
- 따라서 추후에 열처리를 통해 HCP 구조를 γ (austenite, FCC) 구조로 바꾸어서 추가로 형상복원력을 측정할 예정임



<batch 5 합금의 전자현미경 미세조직 분석>

- 아래의 전자현미경 이미지는 제조된 2개의 합금중 batch 6 (Fe-17Mn-5Si-5Cr-0.3C-1Ti)의 미세조직을 나타냄
- 앞서 제시한 batch 5 (Fe-17Mn-5Si-5Cr-4Ni-0.1C)의 미세조직과 비교해 보면, 열처리 전 조직에서 결정립이 더욱 미세하고 균일한 것을 확인할 수 있으며, 평균입도는 약 $5\mu m$ 전후로 판단됨
- 750°C에서 30분간 열처리를 한 후 미세조직을 관찰하면 합금내의 Ti와 C가 서로 반응하여 아주 미세한 (submicron) 탄화티타늄 석출물이 결정립 내와 입계에 동시에 석출되는 것을 확인함



<batch 6 합금의 전자현미경 미세조직 분석>

- 제조된 합금의 4% 인장 후 200℃ 가열에 의한 복원연신률을 측정하기 위해 연신률 4% 까지의 제한인장시험을 우선 수행함
- 합금 batch 5 (Fe-17Mn-5Si-5Cr-4Ni-0.1C) 의 경우 인장시험 도중 grip에서 slip이 발생하여 약 3.2%의 연신만을 줄 수 있었으며, 합금 batch 6 (Fe-17Mn-5Si-5Cr-0.3C-1Ti) 의 경우 약 4%의 연신을 부가함
- 4% 제한인장을 거친 시험편의 전체 길이를 200℃ 가열 전후로 측정한 결과를 다음 사진으로 나타내었으며, 측정결과는 다음 표에 나타냄

<4% 제한인장 부가후 ASTM E8 시험편의 200℃ 가열 전후 길이 측정 결과 및 복원연신률 계산>

		Fe-17Mn-5Si-5Cr-4Ni-0.1C	Fe-17Mn-5Si-5Cr-0.3C-1Ti
Total length (mm)	열처리 전 (A1)	120.48	122.24
	열처리 후 (A2)	120.21	121.8
Recovery strain (A3) (%)		0.870968	1.419355



<4% 사전변형 부가후 200℃ 가열 전후 인장시험편의 길이측정 결과>

- 두 합금 모두 가열 전후의 길이를 비교해 보면 길이가 짧아짐을 확인할 수 있으며, 길이변화는 합금이 형상회복되는 효과에 의한 것임을 확인함
- 복원연신률을 계산하기 위해 인장시험편의 가열 전후 길이변화를 4% 인장이 부가된 gauge section의 길이(31mm)로 나누었으며, 결과를 상기 표에 제시하였음
- 합금 #batch 5의 경우 약 3.2%의 인장후 200° C 가열시 복원연신률이 약 0.87%이며, 합금 #batch 6의 경우 4%의 인장 후 200° C 가열시 **복원연신률은 약 1.42% 목표(1.5%) 대비 94.6% 수준**

1. 시험품 정보

1.1 품명 : FeSMA

1.2 모델명 : KITECH1, KITECH2, KITECH2T

2. 시험 규격 / 방법

2.1 ASTM E8/E8M-16a (Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials)

3. 시험결과

품명		탄성계수 (GPa)	항복강도 (MPa)	비 고
FeSMA	KITECH1-1	171	403	① 시험편 치수 : ASTM E8-Rectangular Tension Test Specimens -Subsize Specimen ② 표점거리 : 25 mm ③ 시험 속도 : 3 mm/min
	KITECH1-2	180	414	
	KITECH2	198	574	
	KITECH2T	86.5	511	

<시험편의 항복강도 및 탄성계수 공인시험 결과 (성적서 발췌)>

- 항복강도 및 탄성계수를 ASTM E8 규격으로 공인시험 행하였으며, 샘플 ID는 다음과 같음:
- Sample ID: KITECH1 (batch 5, Fe-17Mn-5Si-5Cr-4Ni-0.1C)
- Sample ID: KITECH2 (batch 6, Fe-17Mn-5Si-5Cr-4Ni-0.3C-1Ti, 열처리 전)
- Sample ID: KITECH2T (batch 6, Fe-17Mn-5Si-5Cr-4Ni-0.3C-1Ti, 열처리 후)
- 항복강도는 batch 5 조성인 KITECH1의 경우 403 ~ 414MPa, batch 6 조성인 KITECH2는 574MPa (과제목표 초과달성)
- 탄성계수의 경우 KITECH1은 약 170 ~ 180GPa 수준이고 KITECH2는 198GPa 로 **탄성계수 및 항복강도 모두 목표치 초과달성함**

(나) 주관연구기관 : 충북대학교 산학협력단

○ 철계-형상기억 신합금을 콘크리트 구조물 인장재로 사용하기 위한 신합금 기초물성 확보

한국형 철계-형상기억 신합금의 기계적 특성

- 한국형 철계-형상기억 신합금을 콘크리트 구조물 인장재로 사용하기 위한 기초물성 확보를 위해 Batch size급으로 제작된 한국형 철계-형상기억 신합금의 인장시험 실시
- 시험체는 KS B 0801 규격에 따라 제작하였으며 원활한 전력공급을 위해 시편의 유효길이를 기존 60mm에서 100mm로 변경



<인장시험 시편>

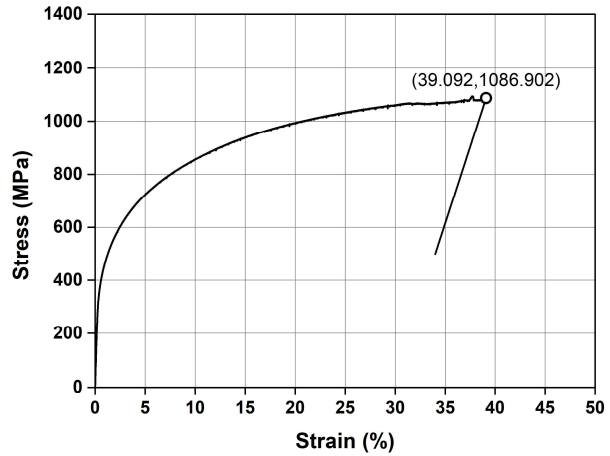
- 100kN 용량의 인스트론 장비를 이용하여 0.5mm/min의 속도로 시험체 파단까지 시험 진행
- 철계-형상기억합금 batch 2번 시편을 열처리 한 후 시험 진행
- 시험 결과를 요약하면 다음과 같음

<인장시험 결과>

시험결과	탄성계수 (GPa)	항복 변형률 (%)	항복 강도 (MPa)	극한 변형률 (%)	극한 강도 (MPa)
Batch 6	195.4	1.64	537.45	39.092	1087



<인장시험 전경>

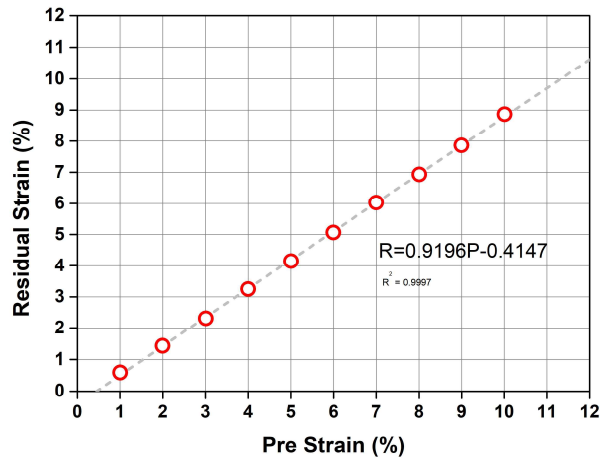


<인장시험 결과>

- 개발된 한국형 철계-형상기억 신합금의 탄성계수는 195.4GPa로 목표 탄성계수 170GPa에 비해 114.94% 수준으로 나타남
- 위 그림과 같이 철계-형상기억합금은 뚜렷한 항복점이 나타나지 않기 때문에 0.2% Offset법을 활용하여 항복강도를 측정한 결과 한국형 철계-형상기억 신합금은 1차년도 목표 항복강도(350MPa)를 충분히 만족하며 ASTM 규격에 따라 실험한 결과와 유사함
- 한국형 철계-형상기억 신합금의 극한 변형률은 스위스에서 기 개발된 철계-형상기억합금에 비해 315%의 높은 극한 변형률을 나타내며 목표 극한변형률(20%) 대비 195.5% 증가된 변형률을 나타냄
- 한국형 철계-형상기억 신합금의 극한 강도는 스위스에서 기 개발된 철계-형상기억합금에 비해 126% 높은 극한 강도를 나타내며 목표 극한강도(700MPa) 대비 155.3% 증가된 극한강도를 나타냄
- 인장시험 결과 개발된 한국형 철계-형상기억 신합금은 **모든 지표에서 목표를 충분히 만족**하며 극한 변형률 및 극한 강도는 스위스에서 기 개발된 철계-형상기억합금에 비해 우수함

한국형 철계-형상기억 신합금의 사전변형 및 잔류변형 관계 분석

- 한국형 철계-형상기억 신합금의 사전변형에 따른 잔류 변형량을 확인하기 위해 시편은 목표 사전변형까지 0.25mm/min으로 가력
- 실험체가 목표 사전변형에 도달 후 실험체를 동일한 속도로 응력이 0이 될 때까지 감력
- 사전변형이 증가함에 따라 잔류변형은 선형적으로 증가함
- 사전변형(P)에 따른 잔류변형(R)은 다음과 같은 관계이 확인됨



<사전변형-잔류변형 관계>

- 따라서 한국형 철계-형상기억합금의 **잔류변형이 발생하기 위한 최소 사전변형은 0.5%로 나타남**

○ 전기가열에 의한 한국형 철계-형상기억 신합금의 회복응력 발생 메커니즘 규명

한국형 철계-형상기억 신합금의 재료특성

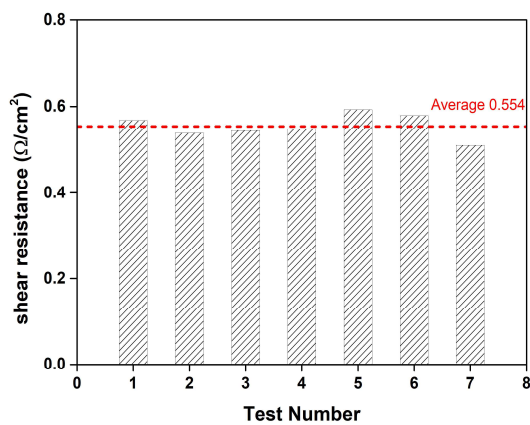
- 한국형 철계-형상기억 신합금의 면저항 측정을 위해 4 Point probe 장비 이용 실험 실시
- 한국형 철계-형상기억 신합금의 비저항은 $0.554 \Omega / \text{cm}^2$ 으로 측정됨
- 한국형 철계-형상기억 신합금의 비중을 측정하기 위하여 KS F 2503 방법을 응용하여 시험을 실시함
- 이를 이용하여 계산한 결과 한국형 철계-형상기억 신합금의 비중은 약 8.86으로 나타남
- 한국형 철계-형상기억 신합금의 열팽창 계수를 측정하기 위해 인스트론 장비를 이용
- 한국형 철계-형상기억 신합금을 고정된 후 시험체에 가해지는 응력범위를 $-6.5\text{MPa} \sim 6.5\text{MPa}$ 로 고정
- 전기저항을 통해 합금을 가열 및 냉각하여 시험체 변형률 측정
- 한국형 철계-형상기억 신합금의 열팽창 계수는 약 $3.58 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 로 측정됨



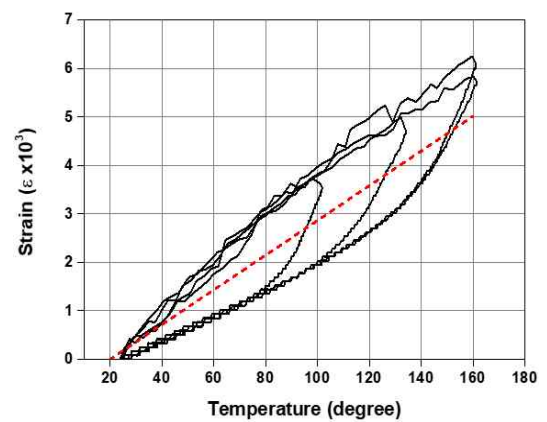
<면저항 측정 실험 전경>



<열팽창 실험 전경>



<면저항 측정 실험 결과>



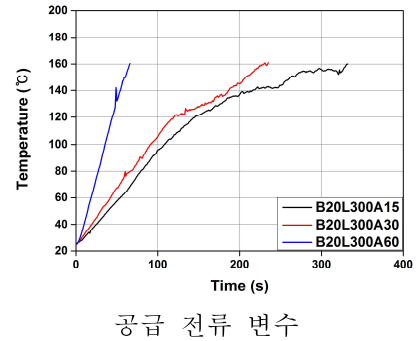
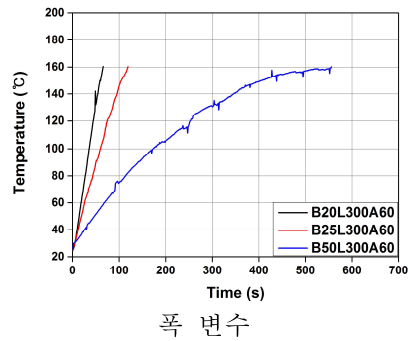
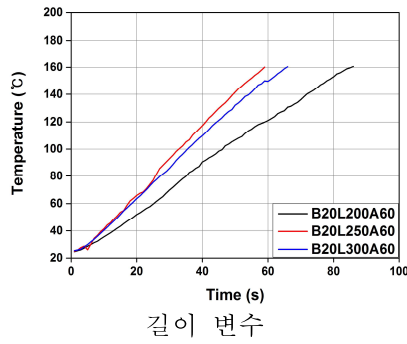
<열팽창 실험 결과>

<재료특성시험 결과>

	열팽창 계수 (10 ⁻⁵ /℃)	비중	면저항 (Ω/cm ²)
한국형 철계-형상기억 신합금	3.58	8.86	0.554

한국형 철계-형상기억 신합금의 전기저항 가열방법 정식화

- 한국형 철계-형상기억 신합금의 전기저항을 통한 가열 방법을 도출하기 위하여 폭 (20mm, 25mm, 50mm), 길이(200mm, 250mm, 300mm) 공급 전류량(15A, 30A, 60A)를 변수로 하여 실험을 진행



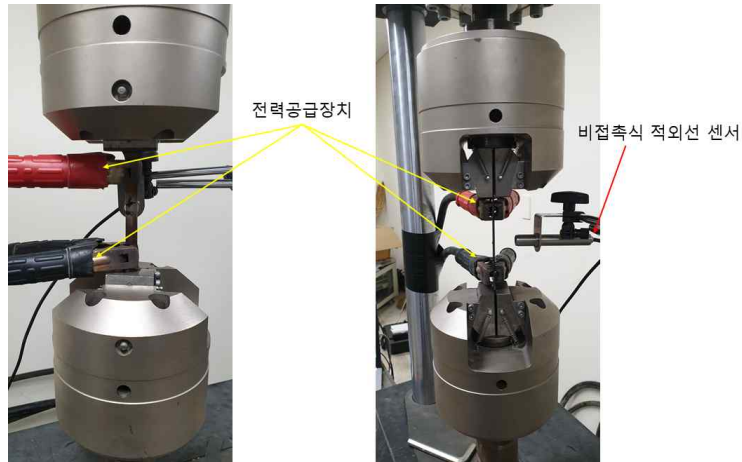
- 시편크기, 폭 증가, 공급 전류 감소에 따라 목표온도 도달시간은 감소함
- 이를 토대로 단위 면적에 따른 전류량이 $1.6\text{A}/\text{mm}^2$ 이하일 경우 비선형적 온도 상승을 나타남을 확인함
- 따라서 한국형 철계-형상기억 신합금을 가열하기 위한 적정 전류량은 $2\text{A}/\text{mm}^2$ 가 가장 적절할 것으로 판단됨

한국형 철계-형상기억 신합금의 회복응력 특성

- 한국형 철계-형상기억 신합금의 회복응력 특성을 파악하기 위한 실험 진행
- 실험에는 인장실험과 동일한 크기의 시편을 사용
- 실험 변수는 사전변형(1% ~ 8%, 1%간격), 회복온도(100°C ~ 160°C , 20°C 간격)를 고려
- 잔류변형이 생성된 실험체에 열팽창에 의한 좌굴을 방지하기 위해 약 50MPa의 초기응력 가력
- 15kW용량의 전력공급장치를 이용하여 실험체가 목표온도에 도달할 때까지 $2\text{A}/\text{mm}^2$ 의 전력 공급
- 실험체가 목표 온도에 도달한 후 전력을 차단하여 실험체를 20°C 까지 냉각
- 실험체의 온도를 측정하기 위하여 비접촉식 K 타입 적외선 센서 사용



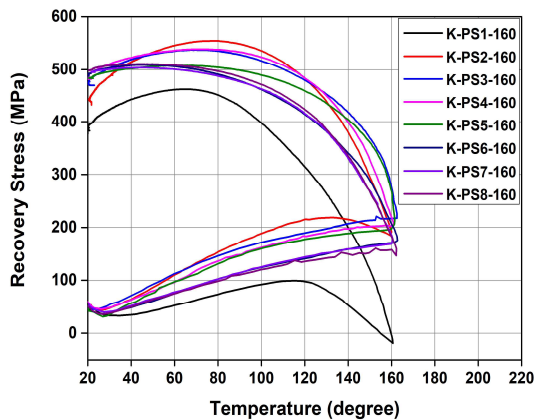
<회복응력실험체 제원>



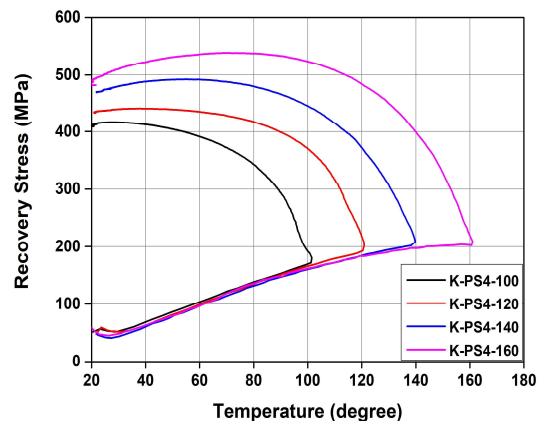
<회복응력 실험 전경>

<회복응력시험 결과>

시험변수	사전변형 (%)	회복온도 (°C)	극한 회복응력 (MPa)	최종 회복응력 (MPa)	단기 릴랙세이션 (%)
K-PS1-160	1	160	418	348	16.60
K-PS2-160	2		503	394	21.53
K-PS3-160	3		489	427	12.70
K-PS4-100	4	100	364	357	2.14
K-PS4-120		120	393	386	1.94
K-PS4-140		140	441	417	5.23
K-PS4-160		160	479	426	10.99
K-PS5-160	5	160	461	438	5.08
K-PS6-160	6		460	443	3.73
K-PS7-160	7		449	441	1.90
K-PS8-160	8		460	447	2.86



<사전변형 (회복온도 160°C)>



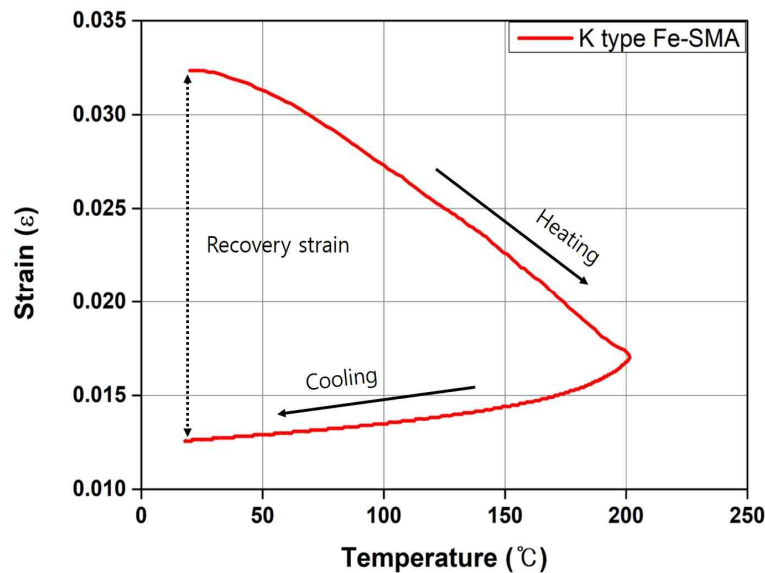
<회복온도 (사전변형 4%)>

온도-회복응력관계

- 실험 결과 한국형 철계-형상기억합금은 1% ~ 8%의 사전변형을 가한 후 160℃로 활성화 시켰을 때 417MPa ~ 503MPa의 극한 회복응력이 나타났으며 2%이상에서 사전변형이 증가함에 따라 극한 회복응력은 작아지는 경향이 나타남.
- 한국형 철계-형상기억합금의 사전변형을 1% ~ 8%로 가한 후 160℃로 활성화 시켰을 때 최종 회복응력은 348MPa ~ 447MPa로 사전변형 증가에 따라 최종 회복응력은 증가하는 경향을 보임
- 또한 사전변형 3% 이상일 경우 최종 회복응력은 사전변형 증가에 따라 큰 증가를 나타내지 않으며 사전 변형 증가에 따라 단기 릴랙세이션은 감소하는 경향을 보임
- 따라서 한국형 철계-형상기억 신합금의 적정 사전변형은 3%가 가장 적절할 것으로 판단되지만 보수적으로 사전변형을 고려하기 위해 한국형 철계-형상기억 신합금의 적정 사전변형을 4%로 설정
- 일반적으로 콘크리트는 160℃에서 에트린자이트가 가수 분해됨에 따라 이를 고려하기 위해 한국형 철계-형상기억 신합금의 최대 활성화온도는 160℃가 적절할 것으로 판단되지만 회복온도를 더 낮춰 콘크리트의 가수분해 및 과전류 공급을 방지하기 위해 적정 회복온도를 140℃로 설정
- 따라서 철계-형상기억 신합금의 사전변형 4%, 회복온도 140℃일 때 회복응력은 417.49MPa로 **최종 목표 회복응력(400MPa)를 만족**하는 결과를 나타냄

한국형 철계-형상기억 신합금의 회복 변형률

- 한국형 철계-형상기억 신합금의 회복변형률을 확인하기 위해 인장실험과 동일한 크기의 시편을 사용
- 실험조건으로 철계-형상기억 신합금의 사전변형 4%, 가열온도 200℃를 고려
- 실험체에 사전변형을 가한 후 15kW 용량의 전력공급장치를 이용하여 실험체가 목표온도에 도달할 때까지 2A/mm²의 전력을 공급
- 실험체가 200℃에 도달하면 실험체에 가해지는 전력을 차단한 후 실험체를 상온까지 냉각
- 철계-형상기억 신합금 활성화 과정 중 실험체에 가해지는 응력이 5MPa를 초과하지 않도록 설정하여 실험체 회복변형률 측정

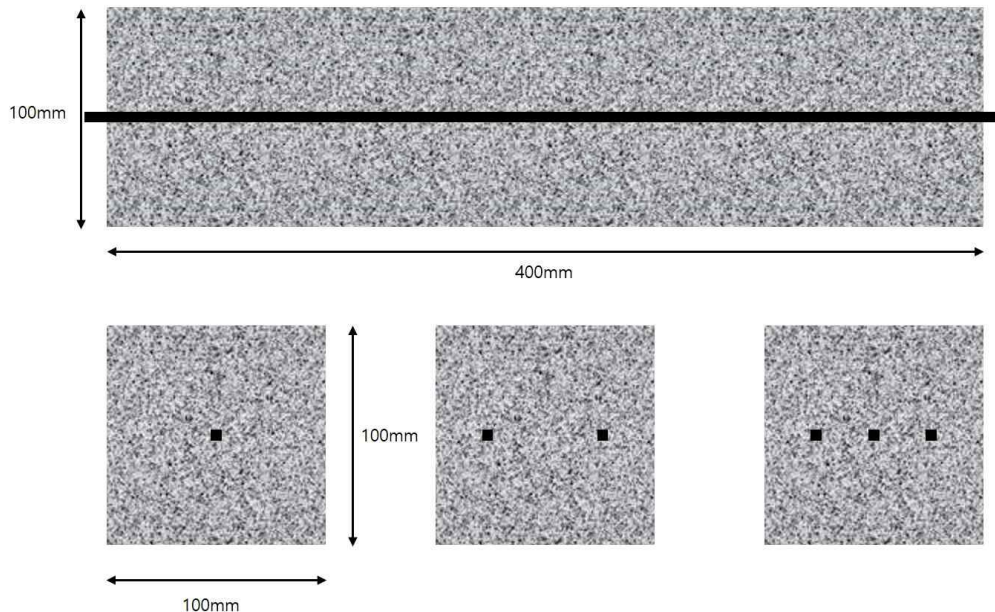


<한국형 철계-형상기억 신합금의 회복변형률-온도 관계>

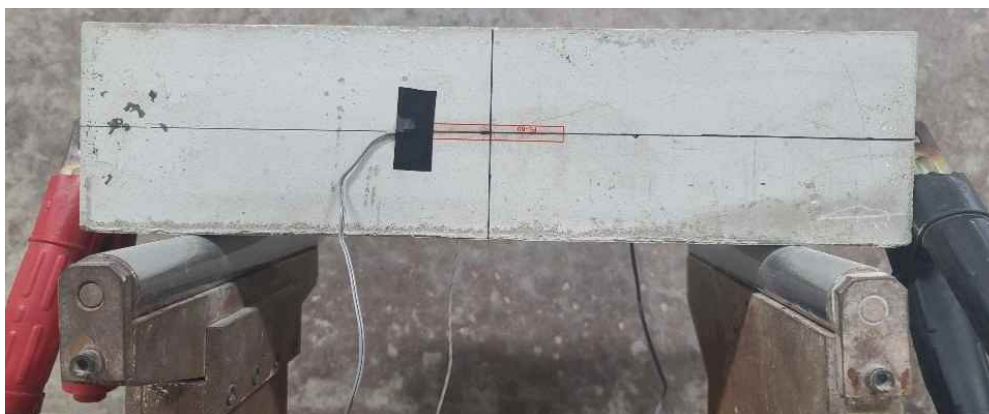
- 실험결과 사전변형 4%에서 한국형 철계-형상기억 신합금의 잔류변형은 약 3.234%로 나타남
- 한국형 철계-형상기억합금의 온도가 200℃에 도달 시 변형률은 약 1.703%이며 회복완료 후 변형률은 1.257로 나타남
- 따라서 개발된 한국형 철계-형상기억 신합금의 **사전변형 4%, 가열온도 200℃에서의 회복변형률은 1.977%로 목표 회복변형률인 1.5%를 상회**하는 결과를 나타냄

전기저항 가열을 통한 콘크리트-신합금 복합체 내부 한국형 철계-형상기억 신합금 회복 응력 특성

- 전기저항 가열을 통한 콘크리트-신합금 복합체의 활성화 특성 및 회복응력 특성 실험을 위해 다음과 같은 예비 시편을 제작완료
- 실험체의 크기는 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}^3$ 이며 한국형 철계-형상기억 신합금의 크기는 $5 \times 5 \times 410 \text{mm}$ 로 제작
- 실험체 제작은 사전변형 4%로 한국형 철계-형상기억 신합금을 인장시킨 후 실험체 중앙에 열전대를 부착한 뒤 콘크리트를 타설하였으며 28일간 양생을 거친 후 실험을 진행
- 실험변수로서 철계-형상기억합금 양(25mm^2 , 50mm^2 , 75mm^2)을 고려
- 실험에 사용된 콘크리트의 압축강도는 30MPa 로 설정



<복합체 회복응력 발생 메커니즘 시험체>



<복합체 회복응력 발생 메커니즘 실험전경>

- 초기 열팽창에 의해 인장변형이 발생되었으나 합금이 활성화됨에 따라 점차 압축변형을 발생
- 철계-형상기억 신태금 양이 25mm², 50mm², 75mm²인 복합체의 압축변형률은 각각 -48.34μϵ, -87.27μϵ, -123.30μϵ으로 나타남
- 실험 당일 콘크리트의 압축강도 실험을 실시한 결과 31.27MPa로 나타남
- 회복응력이 작용하였을 때 콘크리트의 변형률을 아래 식을 이용하여 계산한 결과 25mm², 50mm², 75mm²인 복합체의 압축변형률 이론 값은 각각 -42.67μϵ, -79.13μϵ, -114.53μϵ으로 나타남
- **계산된 이론값과 실험값은 약 89.58%의 정확도를 보여 연구 목표인 80% 이상의 정확도를 충분히 만족하는 것으로 나타남**

$$E_c = 8500 \sqrt[3]{f_{cu}}$$

$$\rho = \frac{A_{sma}}{A_g}$$

$$n = \frac{E_{sma}}{E_c}$$

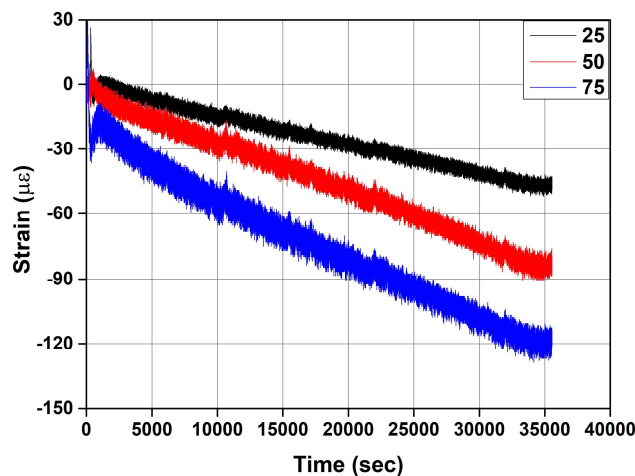
$$\Delta\sigma_{sma} = \frac{1 + n \rho \sigma_{sma}}{1 + n \rho}$$

$$\sigma_{cs} = \frac{\Delta\sigma_{sma}}{n}$$

$$\epsilon_c = \frac{\sigma_{cs}}{E_c}$$

여기서

A_{sma} 와 A_g 는 각각 철계-형상기억합금과 복합체의 단면적, E_c 와 E_{sma} 는 각각 콘크리트, Fe-SMA의 탄성계수, n 과 ρ 는 각각 콘크리트에 대한 철근과 Fe-SMA의 탄성계수 비, 단면의 철근 비를 나타냄



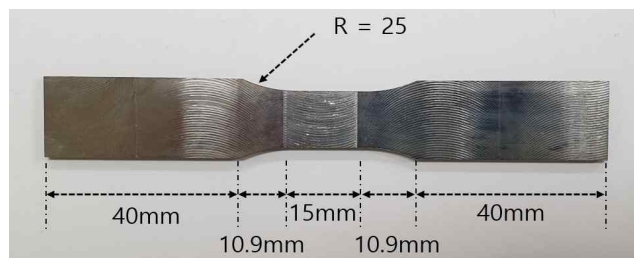
<복합체 회복응력 발생 메커니즘 실험 결과>

○ 한국형 철계-형상기억 신합금 피로특성 평가

- 한국형 철계-형상기억 신합금의 피로특성 파악을 위해 피로시험 진행
- KS B ISO 12106 기준에 따라 시험체 제작
- 본 연구는 한국형 철계-형상기억 신합금 개발 및 이를 구조물 인장재로써 사용하기 위한 연구임
- 따라서 피로시험은 한국형 철계-형상기억 신합금을 인장재로 사용 시 극한의 상태를 가정하여 강도 비(R)를 0으로 설정
- 시험은 하중제어를 통해 5Hz 주기로 실시함
- 시험은 700MPa부터 100MPa씩 최대응력을 감소시켜가며 시험체가 파단에 도달할 때 까지 시험을 진행.
- 반복횟수가 200만회를 초과하면 무한수명에 도달한 것으로 판단하여 시험을 중단하였으며 시험체 파단 유·무에 따라 최대응력을 50MPa, 25MPa 증감시켜가며 시험을 실시하여 피로강도를 확인
- 시험 결과 한국형 철계-형상기억 신합금은 450MPa ~ 475MPa사이에 파단이 발생하는 것으로 나타남
- 개발된 한국형 철계-형상기억합금은 항복강도 이상의 큰 응력조건에서는 반복횟수가 증가함에 따라 누적손상이 발생하여 변형률이 증가하는 반면 낮은 응력조건에서는 반복횟수가 증가함에 따라 변형률 회복이 발생하는 것으로 나타남
- 피로시험 결과를 분석하여 응력범위(S)-반복횟수(N) 관계를 도출한 결과 다음과 같은 관계가 나타남

$$S = -131.59 \log N + 1265.8$$

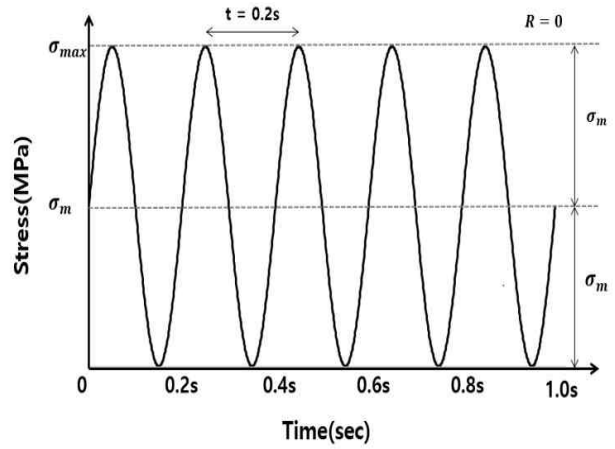
- 위 식을 이용하여 피로한계를 도출한 결과 **한국형 철계-형상기억 신합금의 피로한계는 약 437MPa로 목표피로한계(315MPa)를 상회**하는 것으로 나타남.



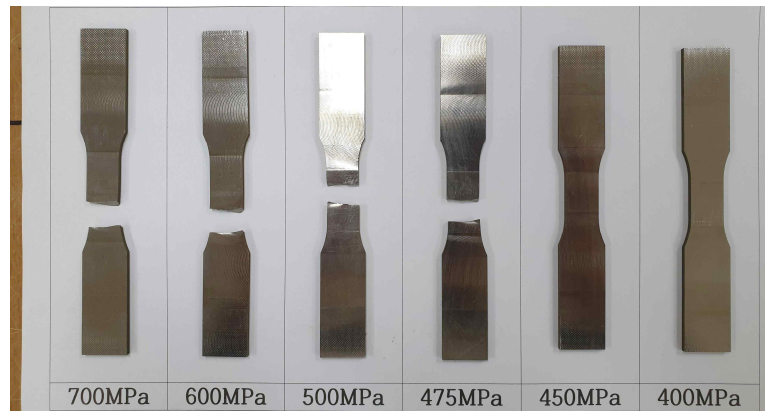
<피로 시험체 제원>



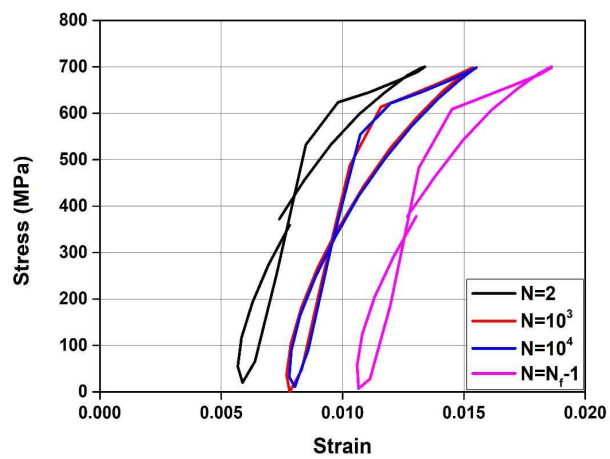
<피로시험 전경>



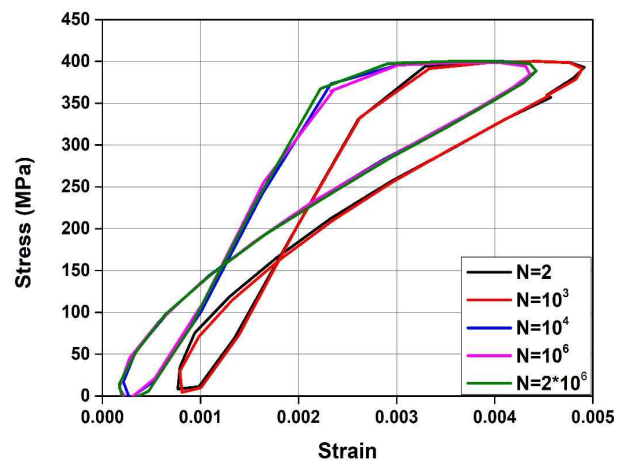
<하중가력 곡선>



시험체 피로파괴 양상



<700MPa>

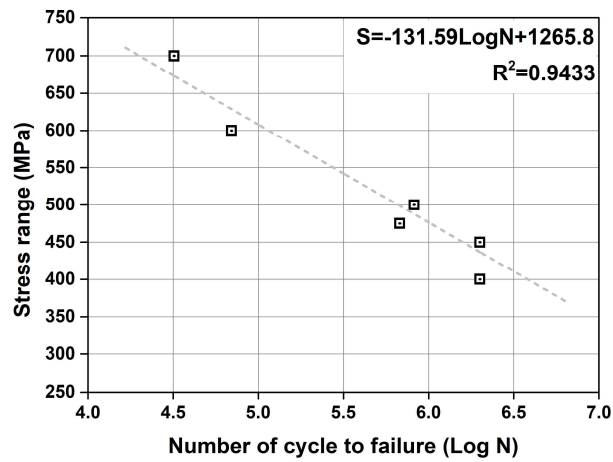


<400MPa>

<반복횟수에 따른 응력-변형률 관계>

<피로시험 결과>

최대응력 (MPa)	반복횟수(회)	Log N
700	32,018	4.505
600	69,580	4.842
500	823,869	5.916
475	677,805	5.831
450	2,000,000*	6.301
400	2,000,000*	6.301

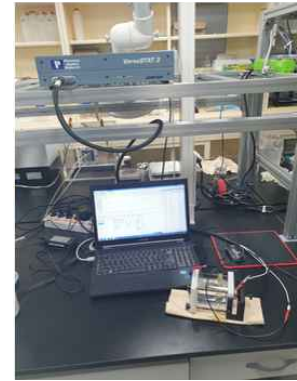
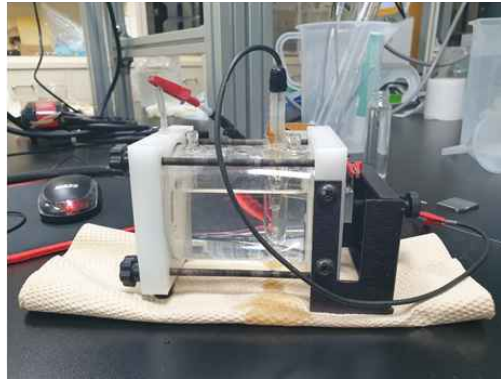


<최대응력-반복횟수 관계>

(다) 공동연구기관 : 부경대학교 산학협력단

○ 한국형 철계 형상기억합금의 부식 저항성 평가

동전위 분극 시험을 통한 내식성 비교 실험



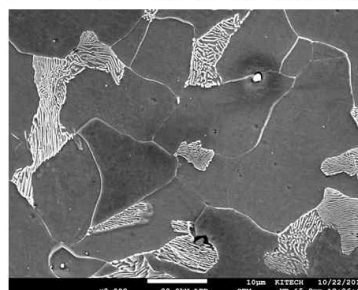
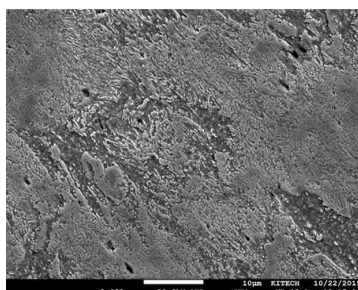
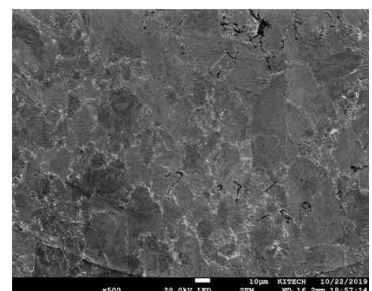
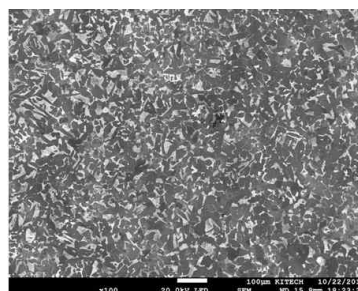
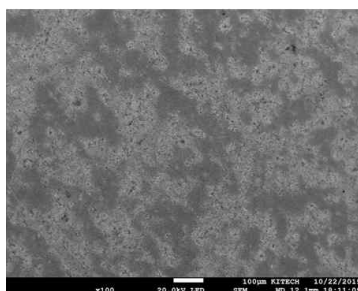
시료 가공 및 연마

전기화학 셀 구성

분석 및 평가

<한국형 철계 형상기억 신합금의 전기화학적 부식 저항성 분석을 위한 실험 준비과정>

- 철계 형상기억합금의 부식 저항성을 전기화학적으로 분석하기 위하여 표면을 연마 후 SCE 기준전극을 포함한 3전극 플랫셀(Flat Cell)에 설치하여 동전위분극시험 및 전기화학적 임피던스법을 이용하여 부식에 대한 저항을 구하였음
- 개발된 철계 형상기억합금의 내식성을 직관적으로 비교하기 위하여 비교재료 일반 건설용 콘크리트 보강 철근 및 SD400 탄소강을 사용하였음
- 다양한 환경에서의 안정성을 비교하기 위하여 실험은 증류수, 수돗물 및 염수(NaCl 수용액)에서 진행 되었고, 콘크리트 내부의 알칼리 분위기를 구현하기 위하여 Ca(OH)₂를 이용하여 pH를 조절하였음



일반 철근

S400 탄소강

철계 형상기억합금

<일반 철근, SD400탄소강 및 철계 형상기억합금의 미세조직 분석을 위한 SEM Images>

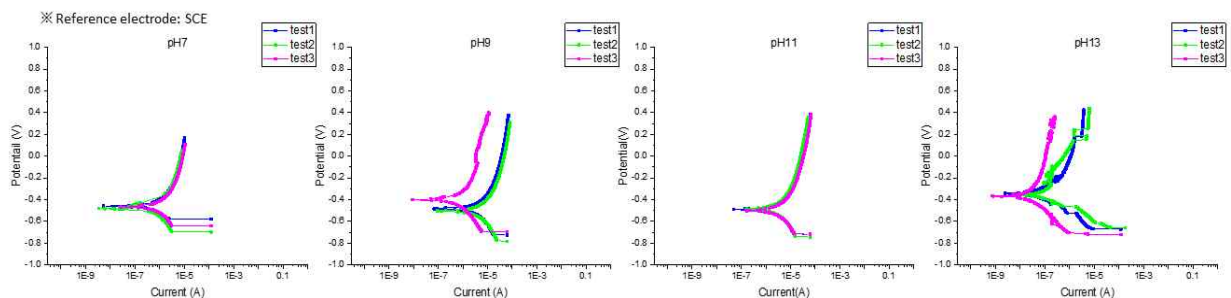
- 일반 철근의 경우 Tempered Martensite 조직이 일부 관찰되며, 침상조직으로 열처리되지 않은 특성을 보여줌, SD400 탄소강은 전형적인 Ferrite + Pearlite 조직으로 관찰되며 철계 형상기억합금은 Ti가 첨가되어 일부 TiC가 입계에 석출된 것을 관찰할 수 있음

증류수에서 동전위분극곡선을 이용한 내식성 비교

- 증류수는 이온을 거의 포함하고 있지 않기 때문에 순수한 물에 대한 반응성 및 부식 거동을 확인할 수 있음
- 3번의 분극곡선 측정 후 대표적인 Tafel fitting 결과(부식전위(E_{corr}), 부식전류밀도(i_{corr}), 분극저항(R_p))를 아래 표에 나타냄

<일반 철근의 증류수에서 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

시험결과	E_{corr} (mV)	I_{corr} (μ A)	B_c (mV)	B_a (mV)	R_p (k Ω)
pH7	-458.52	0.50	172.31	172.31	74.92
pH9	-484.97	1.90	188.41	164.81	20.12
pH11	-489.58	1.87	199.91	208.79	23.74
pH13	-360.09	0.074	129.02	227.85	484

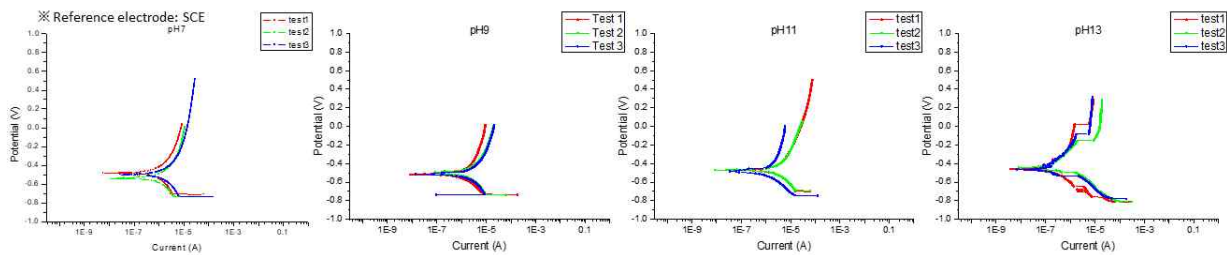


<일반 철근의 증류수에서 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

- 일반 철근은 중성의 증류수에서 74.92k Ω 의 분극저항(부식저항)을 가지며, pH가 11까지 높아지면서 부식저항이 감소하지만, 콘크리트 환경인 pH13에서는 오히려 부식저항이 크게 증가하여 484.00k Ω 으로 나타남으로써 강알칼리 환경에서 부식에 대한 안정성이 증가된다고 볼 수 있음

<SD400 탄소강의 중류수에서 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

시험결과	E_{corr} (mV)	I_{corr} (μ A)	B_c (mV)	B_a (mV)	R_p (k Ω)
pH7	-490.78	0.63	128.67	135.93	45.82
pH9	-503.67	1.68	283.53	260.49	35.18
pH11	-471.67	1.42	139.63	165.2	23.12
pH13	-459.02	0.07	106.99	150.55	376.31

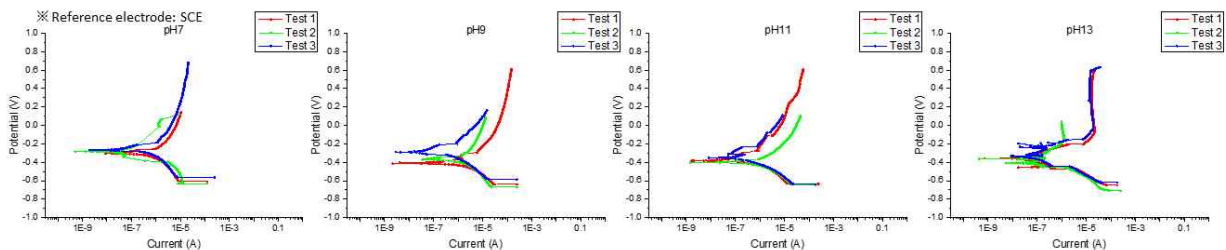


<SD400 탄소강의 중류수에서 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

- SD400 탄소강은 중성의 중류수에서 45.82k Ω 의 분극저항(부식저항)을 가지며, pH가 11까지 높아지면서 일반 철근과 유사하게 부식저항이 감소하는 거동을 보이지만, 콘크리트 환경인 pH13에서는 오히려 부식저항이 크게 증가하여 376.31k Ω 으로 나타남으로써 강알칼리 환경에서 부식에 대한 안정성이 증가된다고 볼 수 있음
- SD400 탄소강은 일반 철근에 비해서 부식성 이온이 없는 용액에서 내식성이 좋다고 볼 수 없음

<한국형 철계 형상기억합금의 증류수에서 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

시험결과	E_{corr} (mV)	I_{corr} (μ A)	B_c (mV)	B_a (mV)	R_p (k Ω)
pH7	-252.94	0.50	245.6	245.6	106.78
pH9	-397.7	0.79	146.63	163.91	42.49
pH11	-372.08	1.36	194.42	311.54	38.36
pH13	-360.09	0.05	116.77	130.45	505.44



<한국형 철계 형상기억합금의 증류수에서 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

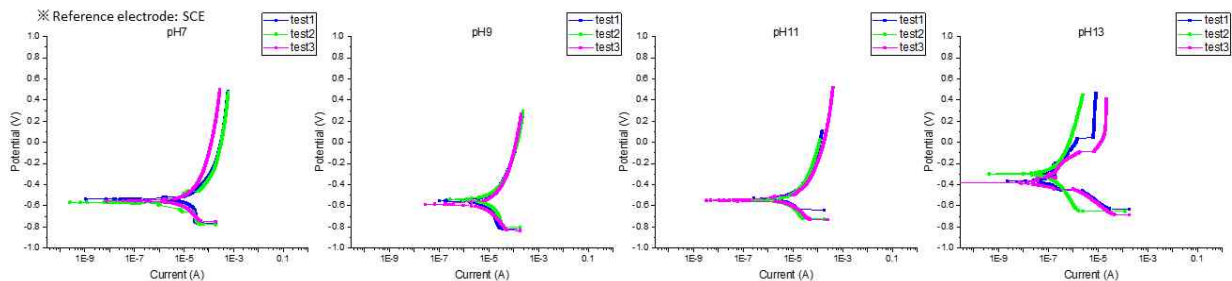
- 철계 형상기억합금은 중성의 증류수에서 106.78k Ω 의 분극저항(부식저항)을 가지며, pH가 11까지 높아지면서 일반 철근 및 SD400 탄소강과 유사하게 부식저항이 감소하는 거동을 보이지만, 비교재들에 비해서 동일 환경에서 가장 높은 저항을 보임
- 콘크리트 환경인 pH13에서는 오히려 부식저항이 크게 증가하여 504.44k Ω 으로 나타남으로써 강알칼리 환경에서 부식에 대한 안정성이 증가된다고 볼 수 있으며 이는 비교 소재에 비해 가장 높은 값으로 알칼리 환경에서 내식성이 가장 양호하고 볼 수 있음
- 철계 형상기억합금은 SD400 탄소강 및 일반 철근에 비해서 부식성 이온이 없는 용액에서 내식성이 우수함
- 강알칼리성(pH13) 증류수에서 철계 형상기억합금의 부식 저항은 SD400과 비교해 134% 수준임

수돗물에서 동전위분극곡선을 이용한 내식성 비교

- 수돗물은 소량의 부식성 염소를 포함하며, 건설 구조물 제작을 위한 시멘트 제조에 사용 됨에 따라 수돗물에 대한 반응성 및 부식 거동을 확인할 필요가 있음

<일반 철근의 수돗물에서 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

시험결과	E_{corr} (mV)	I_{corr} (μ A)	B_c (mV)	B_a (mV)	R_p (k Ω)
pH7	-576.73	1.54	73.25	121.35	12.90
pH9	-566.29	5.73	256.05	225.89	9.11
pH11	-554.23	4.040	125.4	136.65	7.04
pH13	-367.11	0.071	122.31	224.49	484.83

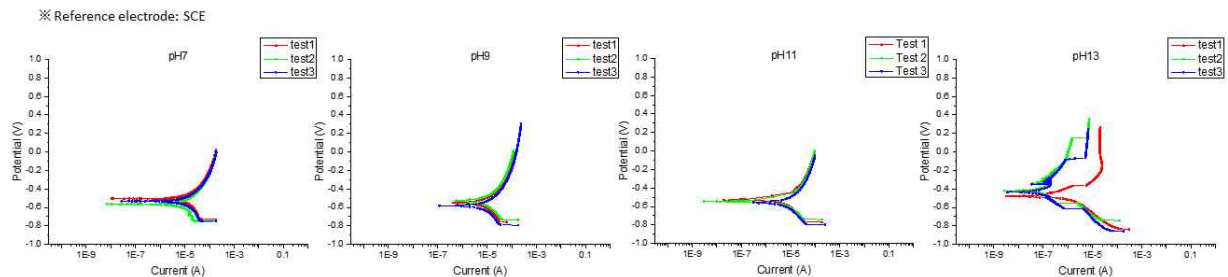


<일반 철근의 수돗물에서 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

- 일반 철근은 중성의 수돗물에서 12.90k Ω 의 분극저항(부식저항)을 가지며, 이는 증류수에 비해 부식 저항이 17%수준으로 감소했음
- 이를 통하여 수돗물에 포함된 이온과 부식성 물질이 철근의 부식을 가속화 시킬 수 있다는 것을 확인함
- pH가 11까지 높아지면서 부식저항이 감소하지만, 콘크리트 환경인 pH13에서는 오히려 부식저항이 크게 증가하여 484.83k Ω 으로 나타나는데, 이는 증류수 pH13과 비슷한 수치로 비록 부식성 물질과 이온이 포함된 물이라 하더라도 강알칼리 환경에서는 부식이 억제된다고 볼 수 있음
- 수돗물 사용시 강알칼리 환경에서 일반 철근을 사용해야 함

<SD400 탄소강의 수돗물에서 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

시험결과	E_{corr} (mV)	I_{corr} (μ A)	B_c (mV)	B_a (mV)	R_p (k Ω)
pH7	-530.18	3.45	81.58	66.92	4.64
pH9	-533.48	3.68	129.45	119.59	7.34
pH11	-531.47	2.54	102.44	109.91	9.09
pH13	-422.74	0.06	105.35	103.09	409.16

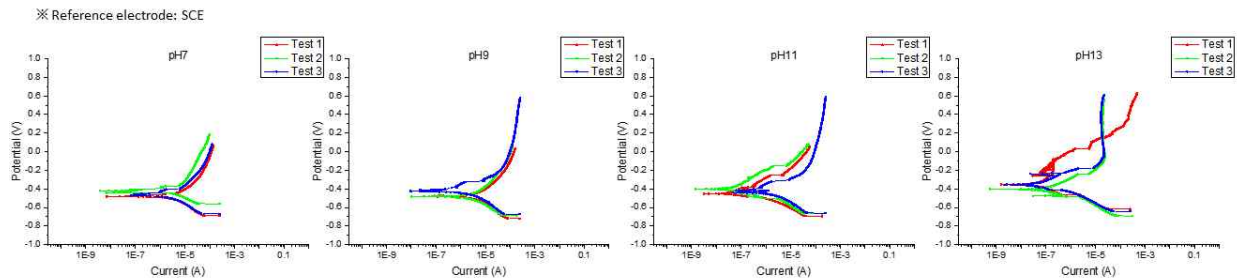


<SD400 탄소강의 수돗물에서 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

- SD400 탄소강은 중성의 수돗물에서 4.64 Ω 의 분극저항(부식저항)을 가지며, 이는 증류수에 비해 부식 저항이 10%수준으로 감소했음
- 수돗물에 포함된 이온과 부식성 물질이 SD400 탄소강의 부식을 가속화 시킬 수 있음
- pH가 11까지 높아지면서 부식저항이 증류수와는 달리 다소 증가하다가 콘크리트 환경인 pH13에서는 오히려 부식저항이 크게 증가하여 409.16k Ω 으로 나타나는데, 이는 일반 철근과 유사하게 증류수 pH13과 비슷한 수치로 비록 부식성 물질과 이온이 포함된 물이라 하더라도 강알칼리 환경에서는 부식이 억제된다고 볼 수 있음
- 수돗물 사용시 강알칼리 환경에서 SD400 탄소강을 사용해야 함

<한국형 철계 형상기억합금의 수돗물에서 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

시험결과	E_{corr} (mV)	I_{corr} (μA)	B_c (mV)	B_a (mV)	R_p (k Ω)
pH7	-459.85	1.85	142.08	118.79	15.23
pH9	-421.18	2.22	167.98	185.32	17.29
pH11	-402.71	0.58	111.71	195.32	53.27
pH13	-358.37	0.04	111.17	126.9	613.42



<한국형 철계 형상기억합금의 수돗물에서 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

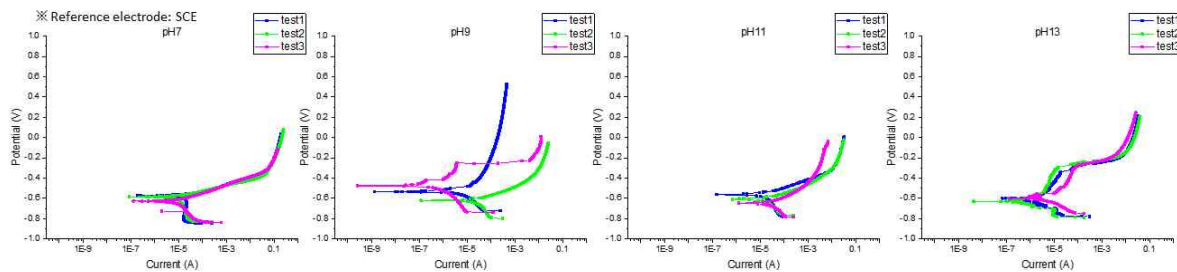
- 한국형 철계 형상기억합금은 중성의 수돗물에서 15.23k Ω 의 분극저항(부식저항)을 가지며, 이는 증류수에 비해 부식 저항이 14%수준으로 감소했지만, 일반철근 및 SD400 탄소강에 비해서는 높음
- 수돗물에 포함된 이온과 부식성 물질이 철계 형상기억합금의 부식을 가속화 시킬 수 있음
- pH가 11까지 높아지면서 부식저항이 증류수와는 달리 다소 증가하다가 콘크리트 환경인 pH13에서는 오히려 부식저항이 크게 증가하여 613.42k Ω 으로 나타나는데, 이는 일반 철근 및 SD400 탄소강과 유사하게 증류수 pH13과 비슷한 수치로 비록 부식성 물질과 이온이 포함된 물이라 하더라도 강알칼리 환경에서는 부식이 억제된다고 볼 수 있음
- 수돗물 사용시 강알칼리 환경에서 철계 형상기억합금을 사용해야 함
- 강알칼리성(pH13) 수돗물에서 **철계 형상기억합금의 부식 저항은 SD400과 비교해 150% 수준임**

염수에서 동전위분극곡선을 이용한 내식성 비교

- 염수는 부식성의 염소이온을 다량 포함하고 있어, 건설 콘크리트 구조물의 내부 철근 보강재의 부식을 촉진시키고 붕괴 위험을 가중시킴에 따라, 염수의 환경에서 각 소재의 반응성 및 부식 거동을 확인할 필요가 있음

<일반 철근의 염수에서 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

시험결과	E_{corr} (mV)	I_{corr} (μ A)	B_c (mV)	B_a (mV)	R_p (k Ω)
pH7	-634.82	3.82	56.43	59.61	3.30
pH9	-622.04	16.37	139.81	71.212	1.25
pH11	-642.11	25.55	199.96	89.04	1.05
pH13	-604.15	3.20	74.26	123.37	6.30

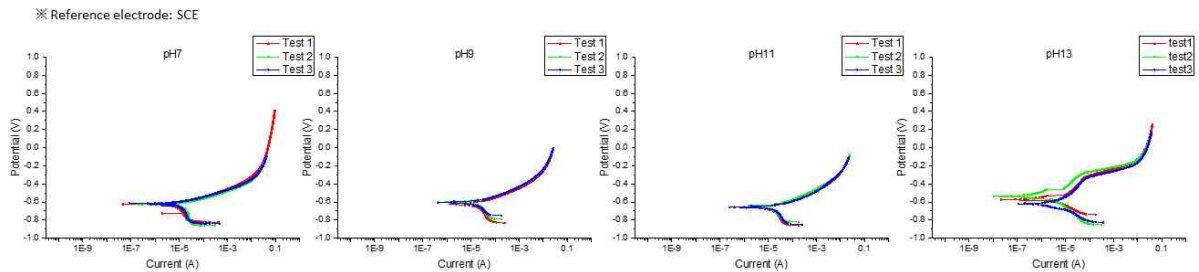


<일반 철근의 염수에서 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

- 일반 철근은 중성의 염수에서 3.30k Ω 의 분극저항(부식저항)을 가지며, 이는 증류수에 비해 부식 저항이 4%수준으로 감소했으며, 염수는 철근 부식에 치명적이라는 것을 시사함
- 염소이온에 의해 철근의 부식을 가속화 시킬 수 있으며, pH11 까지 pH의 증가에 따라 부식저항이 다소 감소함
- pH13에서는 오히려 부식저항이 다소 증가하여 6.30k Ω 으로 나타나지만, 수돗물 및 증류수에 비해서 매우 낮은 부식 저항임
- 염수 환경에서는 부식 저항이 크게 감소하고, 강알칼리라 할지라도 부식 저항을 크게 높여주지 못함

<SD400 탄소강의 염수에서 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

시험결과	E_{corr} (mV)	I_{corr} (μ A)	B_c (mV)	B_a (mV)	R_p (k Ω)
pH7	-618.42	2.39	58.55	27.66	3.41
pH9	-597.58	3.64	35.74	29.48	1.93
pH11	-652.6	9.48	169.63	50.93	1.80
pH13	-618.83	6.64	180.13	180.13	5.90

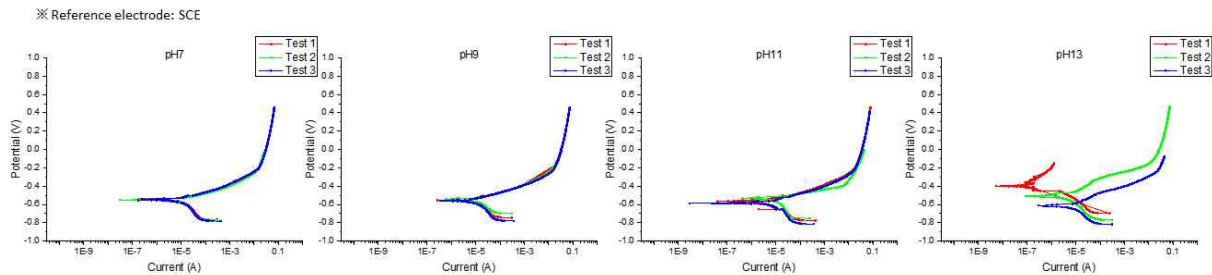


<SD400 탄소강의 염수에서 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

- SD400 탄소강은 중성의 염수에서 3.41k Ω 의 분극저항(부식저항)을 가지며, 철근과 동일하게 증류수에 비해 부식 저항이 4%수준으로 감소했으며, 염수는 철근 부식에 치명적이라는 것을 시사함
- pH 7, 9, 11 영역에서 철근과 비슷한 부식 저항을 가짐
- pH13에서 부식저항이 증가하여 5.90k Ω 으로 나타나지만, 일반 철근에 비해서 낮음
- 염수 환경에서는 SD400 탄소강이 쉽게 부식되고, 강알칼리라 할지라도 부식 저항을 크게 높여주지 못함

<한국형 철계 형상기억합금의 염수에서 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

시험결과	E_{corr} (mV)	I_{corr} (μ A)	B_c (mV)	B_a (mV)	R_p (k Ω)
pH7	-543.22	7.36	152.94	75.52	2.99
pH9	-550.9	6.18	145.53	79.33	3.61
pH11	-566.66	2.38	109.03	65.11	7.46
pH13	-510.07	4.03	208.47	123.41	8.37



<한국형 철계 형상기억합금의 염수에서 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

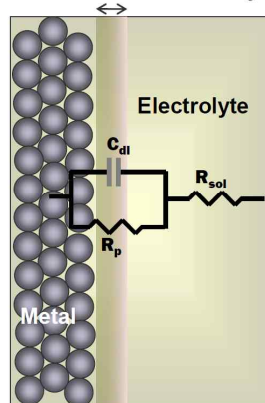
- 형상기억합금은 중성의 염수에서 2.99k Ω 의 분극저항(부식저항)을 가지며, 철근및 SD400과 동일하게 증류수에 비해 부식 저항이 크게 감소했으며, 염수는 개발된 합금에 치명적임
- pH의 증가에 따라 부식 저항이 다소 증가하는 거동을 보임
- 콘크리트 환경인 pH13에서 염분이 존재하더라도 여타 소재에 배해서 높은 부식 저항을 가지고 있음
- 해양의 콘크리트 환경에 즉, NaCl 3.5 wt.%에 pH 13에서 **개발된 형상기억합금의 부식 저항은 SD400 탄소강에 비해 140% 수준으로 높고, 일반 철근에 비해서 132% 수준으로 높음**
- 개발된 철계 형상기억합금은 기존의 철근 및 탄소강에 비해 부식 저항이 높아 콘크리트 보강재로 사용할 수 있을 것으로 판단됨

염수에서 전기화학적 임피던스를 이용한 내식성 비교

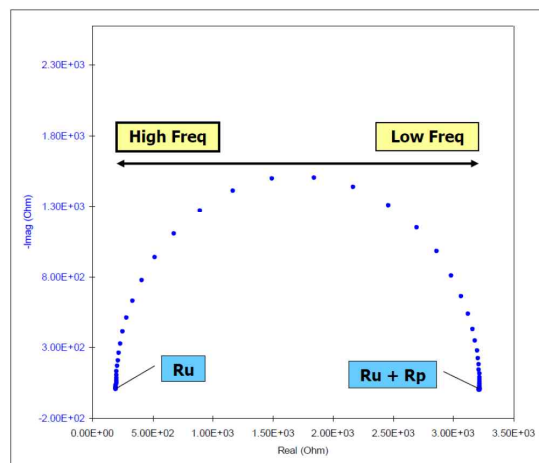
실험 방법 및 결과 해석을 위한 등가회로

- 염소이온은 한번 콘크리트 내부의 보강재로 침투하면 농축됨에 따라 염수의 농도 및 pH에 따라서 부식에 대한 저항성이 어떻게 변하는지 확인하기 위하여 전기화학적 임피던스법을 이용하여 부식저항을 측정하였음
- 측정결과를 해석하기 위하여 가장 기본적인 Randles Circuit를 이용하였고, R_p (분극 저항)에 해당하는 것이 부식 저항임
- 각 소재, pH, NaCl 농도에 따른 임피던스 결과를 해석해서 부식 저항을 분석함

Electrochemical Double layer



Nyquist Plot

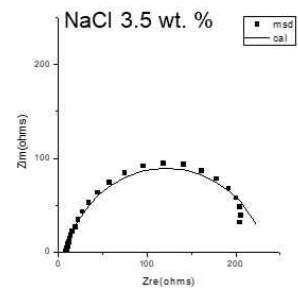
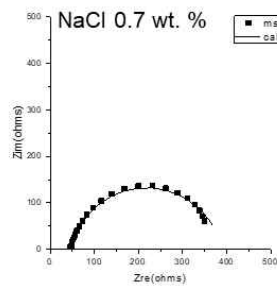
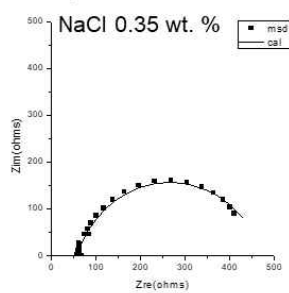


<임피던스 해석을 위한 Randles Circuit 모델 및 Nyquist Plot>

pH 7에서 염소이온 농도

<일반 철근의 pH 7 수용액에서 임피던스 측정결과(Nyquist Plot) 및 등가회로 분석>

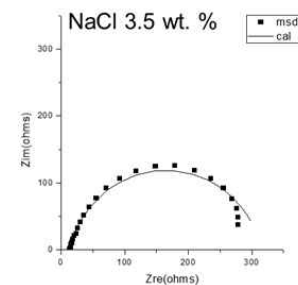
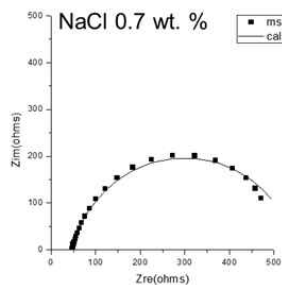
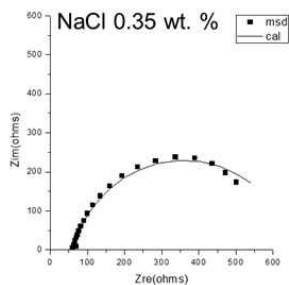
NaCl Conc. (wt.%)	R _{sol} (Ω)	CPE (mF)	n	R _P (Ω)
0.35	58.4	0.824	0.8245	414.2
0.7	44.57	0.7181	0.8318	364.8
3.5	9.075	0.9533	0.8565	224.8



<일반 철근의 pH 7 수용액에서 임피던스 측정결과(Nyquist Plot) 및 등가회로 분석>

<SD400 탄소강의 pH 7 수용액에서 임피던스 측정결과(Nyquist Plot) 및 등가회로 분석>

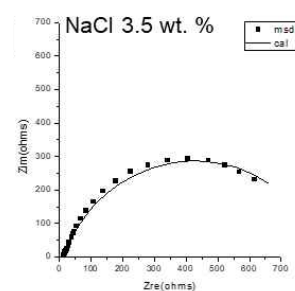
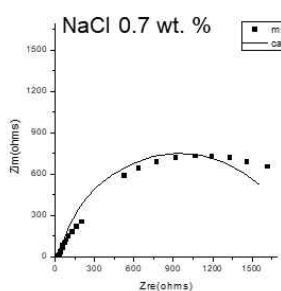
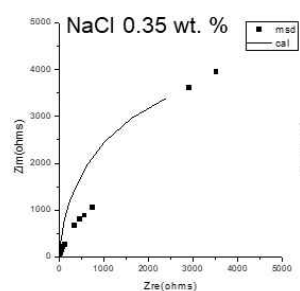
NaCl Conc. (wt.%)	R _{sol} (Ω)	CPE (mF)	n	R _P (Ω)
0.35	60.73	1.055	0.8333	597.8
0.7	46.47	0.7793	0.8411	505.8
3.5	13.8	0.8014	0.8509	301.9



<SD400 탄소강의 pH 7 수용액에서 임피던스 측정결과(Nyquist Plot) 및 등가회로 분석>

<한국형 철계 형상기억합금의 pH 7 수용액에서 임피던스 측정결과(Nyquist Plot) 및 등가회로 분석>

NaCl Conc. (wt.%)	R _{sol} (Ω)	CPE (mF)	n	R _p (Ω)
0.35	31.57	0.31	0.9828	7455
0.7	13.91	0.3071	0.8745	1832
3.5	4.431	0.7169	0.7744	825.8

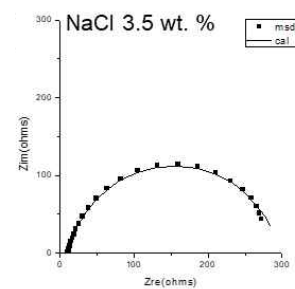
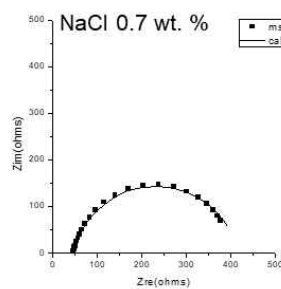
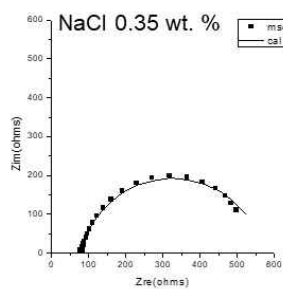


<한국형 철계 형상기억합금의 pH 7 수용액에서 임피던스 측정결과(Nyquist Plot) 및 등가회로 분석>

pH 9에서 염소이온 농도에 따른 내식성 비교

<일반 철근의 pH 9 수용액에서 임피던스 측정결과(Nyquist Plot) 및 등가회로 분석>

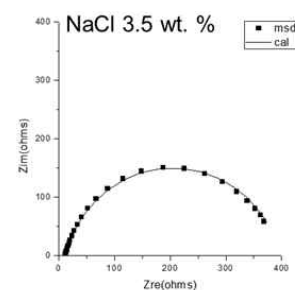
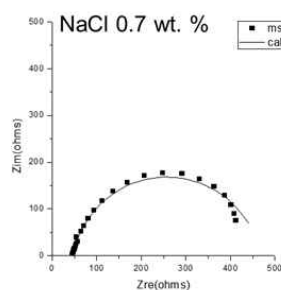
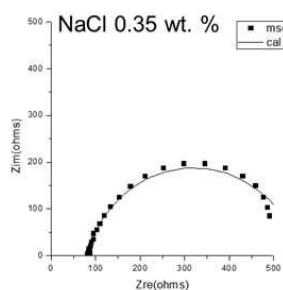
NaCl Conc. (wt.%)	R _{sol} (Ω)	CPE (mF)	n	R _P (Ω)
0.35	78.05	0.7228	0.8417	495.3
0.7	46.02	0.7148	0.8418	391.1
3.5	10.85	0.7036	0.8479	286.3



<일반 철근의 pH 9 수용액에서 임피던스 측정결과(Nyquist Plot) 및 등가회로 분석>

<SD400 탄소강의 pH 9 수용액에서 임피던스 측정결과(Nyquist Plot) 및 등가회로 분석>

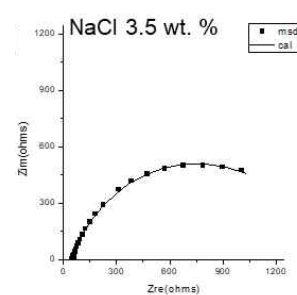
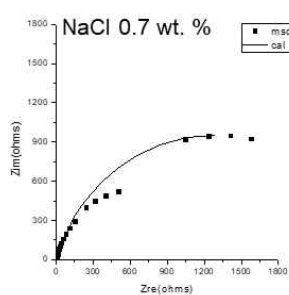
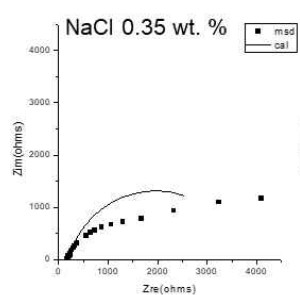
NaCl Conc. (wt.%)	R _{sol} (Ω)	CPE (mF)	n	R _P (Ω)
0.35	82.32	0.6189	0.8542	474.7
0.7	45.43	0.6534	0.8575	424.3
3.5	11.42	0.6357	0.841	386.2



<SD400 탄소강의 pH 9 수용액에서 임피던스 측정결과(Nyquist Plot) 및 등가회로 분석>

<한국형 철계 형상기억합금의 pH 9 수용액에서 임피던스 측정결과(Nyquist Plot) 및 등가회로 분석>

NaCl Conc. (wt.%)	R _{sol} (Ω)	CPE (mF)	n	R _P (Ω)
0.35	185.9	0.2662	0.8129	3554
0.7	51.19	0.5663	0.8201	2535
3.5	5.093	0.5968	0.7984	1411

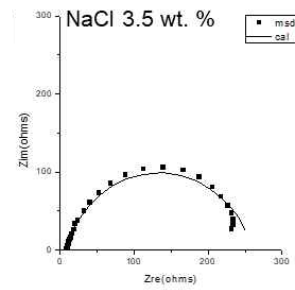
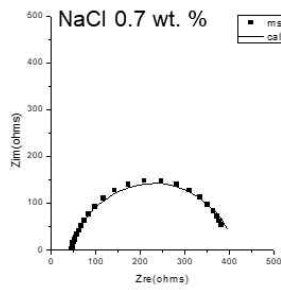
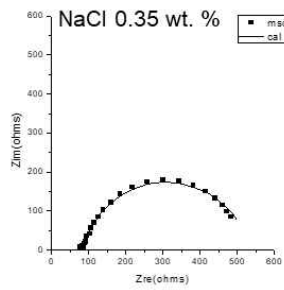


<한국형 철계 형상기억합금의 pH 9 수용액에서 임피던스 측정결과(Nyquist Plot) 및 등가회로 분석>

pH 11에서 염소이온 농도에 따른 내식성 비교

<일반 철근의 pH 11 수용액에서 임피던스 측정결과(Nyquist Plot) 및 등가회로 분석>

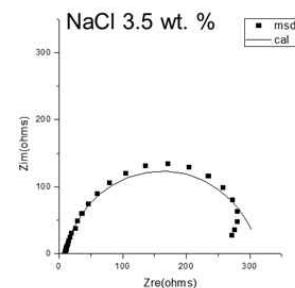
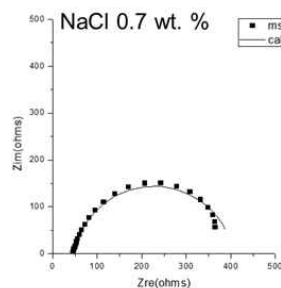
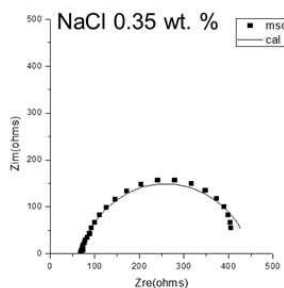
NaCl Conc. (wt.%)	R _{sol} (Ω)	CPE (mF)	n	R _P (Ω)
0.35	83.39	0.6412	0.8348	451.5
0.7	46.25	0.5222	0.844	365.7
3.5	9.391	0.6246	0.8541	249.4



<일반 철근의 pH 11 수용액에서 임피던스 측정결과(Nyquist Plot) 및 등가회로 분석>

<SD400 탄소강의 pH 11 수용액에서 임피던스 측정결과(Nyquist Plot) 및 등가회로 분석>

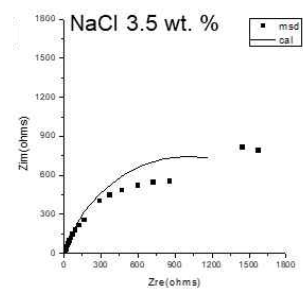
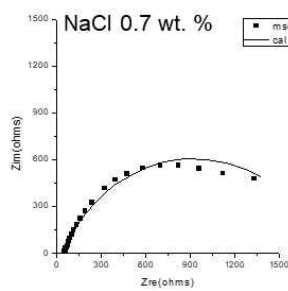
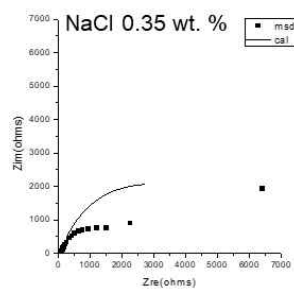
NaCl Conc. (wt.%)	R _{sol} (Ω)	CPE (mF)	n	R _P (Ω)
0.35	69.35	0.6183	0.849	379.7
0.7	45.28	0.6593	0.8547	363.3
3.5	9.852	0.6307	0.8679	340.6



<SD400 탄소강의 pH 11 수용액에서 임피던스 측정결과(Nyquist Plot) 및 등가회로 분석>

<한국형 철계 형상기억합금의 pH 11 수용액에서 임피던스 측정결과(Nyquist Plot) 및 등가회로 분석>

NaCl Conc. (wt.%)	Rsol (Ω)	CPE (mF)	n	R _P (Ω)
0.35	92.4	0.1739	0.8373	5326
0.7	48.31	0.5967	0.8083	2033
3.5	7.429	0.3715	0.7694	1755

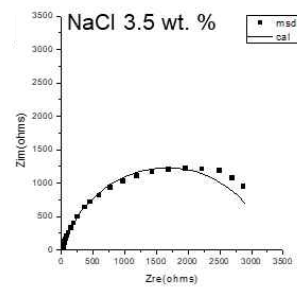
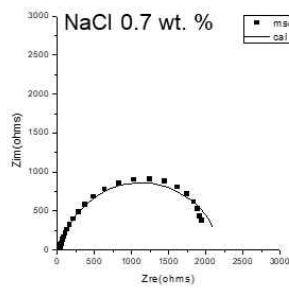
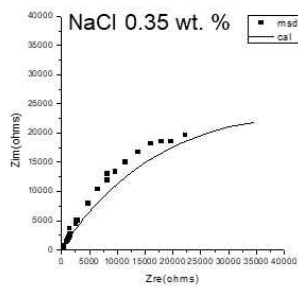


<한국형 철계 형상기억합금의 pH 11 수용액에서 임피던스 측정결과(Nyquist Plot) 및 등가회로 분석>

pH 13에서 염소이온 농도에 따른 내식성 비교

<일반 철근의 pH 13 수용액에서 임피던스 측정결과(Nyquist Plot) 및 등가회로 분석>

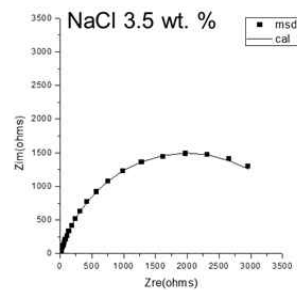
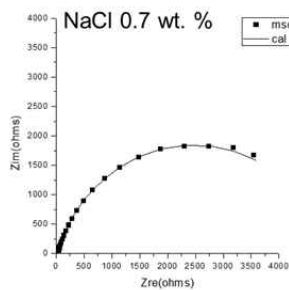
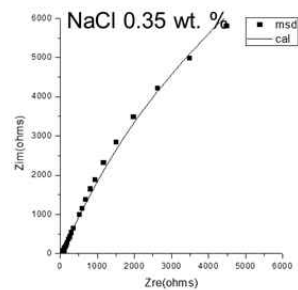
NaCl Conc. (wt.%)	R _{sol} (Ω)	CPE (mF)	n	R _P (Ω)
0.35	43.57	208.8	0.642	80310
0.7	38.99	0.104	0.853	4176
3.5	24.72	0.1204	0.8234	3268



<일반 철근의 pH 13 수용액에서 임피던스 측정결과(Nyquist Plot) 및 등가회로 분석>

<SD400 탄소강의 pH 13 수용액에서 임피던스 측정결과(Nyquist Plot) 및 등가회로 분석>

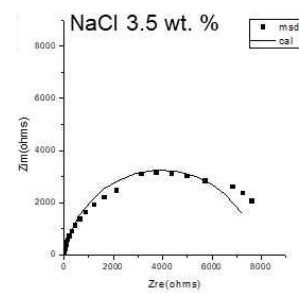
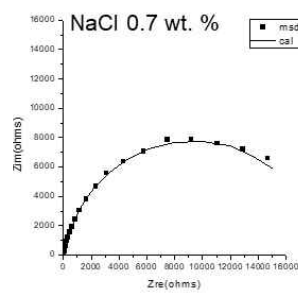
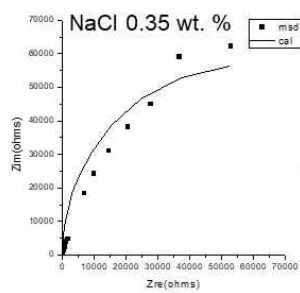
NaCl Conc. (wt.%)	R _{sol} (Ω)	CPE (mF)	n	R _P (Ω)
0.35	55.04	0.1425	0.7351	32440
0.7	33.37	0.1587	0.8276	4856
3.5	9.605	0.1841	0.8201	3977



<SD400 탄소강의 pH 13 수용액에서 임피던스 측정결과(Nyquist Plot) 및 등가회로 분석>

<한국형 철계 형상기억합금의 pH 13 수용액에서 임피던스 측정결과(Nyquist Plot) 및 등가회로 분석>

NaCl Conc. (wt.%)	R _{sol} (Ω)	CPE (mF)	n	R _P (Ω)
0.35	58.33	0.0151	1	112600
0.7	34.99	0.03468	0.8873	18610
3.5	10.26	0.0442	0.8811	7857



<한국형 철계 형상기억합금의 pH 13 수용액에서 임피던스 측정결과(Nyquist Plot) 및 등가회로 분석>

pH 7

- 철근, SD400 탄소강 및 개발된 철계 형상기억합금은 중성(pH 7)에서 염소이온의 농도가 증가함에 따라 부식의 저항이 감소함
- 각 NaCl의 농도에 따라 부식에 대한 저항은 철계 형상기억합금 > SD400 탄소강 > 일반 철근 순으로 나타남
- 개발된 형상기억합금은 중성인 수용액 염소이온의 존재하에 일반 철근과 SD400 탄소강에 비해 매우 높은 부식저항을 가짐

pH 9

- 철근, SD400 탄소강 및 개발된 철계 형상기억합금은 약 알칼리성(pH 9)에서 염소이온의 농도가 증가함에 따라 부식의 저항이 감소함
- 철근, SD400 탄소강 및 개발된 철계 형상기억합금은 중성의 용액에 비해서 약 알칼리성(pH 9)에서 염소 이온이 존재하더라도 부식 저항이 높음
- 약 알칼리성 용액에서 각 NaCl의 농도에 따라 부식에 대한 저항은 철계 형상기억합금 > SD400 탄소강 > 일반 철근 순으로 나타남
- 개발된 형상기억합금은 약 알칼리성인 수용액 염소이온의 존재하에 일반 철근과 SD400 탄소강에 비해 매우 높은 부식저항을 가짐

pH 11

- 철근, SD400 탄소강 및 개발된 철계 형상기억합금은 알칼리성(pH 11)에서 염소이온의 농도가 증가함에 따라 부식의 저항이 감소하지만, 그 감소폭은 중성(pH 7) 및 약알칼리(pH 9) 보다 작음
- 철근, SD400 탄소강 및 개발된 철계 형상기억합금은 중성 및 약알칼리성 용액에 비해서 알칼리성(pH 11)에서 염소 이온이 존재하더라도 부식 저항이 높으며 염소이온 농도 증가에 대한 부식 저항의 감소폭이 작음
- 알칼리성 용액에서 각 NaCl의 농도에 따라 부식에 대한 저항은 철계 형상기억합금 > SD400 탄소강 > 일반 철근 순으로 나타남
- 개발된 형상기억합금은 알칼리성(pH 11)인 수용액 염소이온의 존재하에 일반 철근과 SD400 탄소강에 비해 매우 높은 부식저항을 가짐

pH 13

- 철근, SD400 탄소강 및 개발된 철계 형상기억합금은 콘크리트 환경인 강 알칼리성(pH 13)에서 염소이온의 농도가 증가함에 따라 부식의 저항이 감소하지만, pH의 증가에 따라 그 감소폭이 감소함
- 철근, SD400 탄소강 및 개발된 철계 형상기억합금은 중성 및 약알칼리성 용액에 비해서 알칼리성(pH 13)에서 염소 이온이 존재하더라도 부식 저항이 높으며 염소이온 농도 증가에 대한 부식 저항의 감소폭이 작음
- pH 13에서 해수 정도의 NaCl농도 (3.5 wt.%)에서 철계 형상기억합금의 부식 저항은 중성의 저농도(0.35 wt.%)에서 보다 높음
- 철계 형상기억합금은 강알칼리성 환경에서 안정한 부동태 피막을 형성하여 내식성

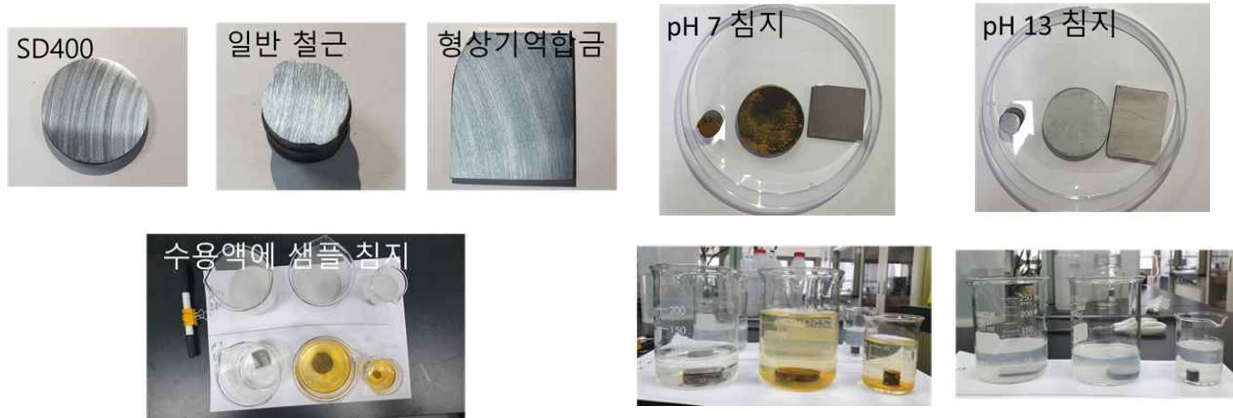
이 향상됨

- 강 알칼리성 용액에서 각 NaCl의 농도에 따라 부식에 대한 저항은 철계 형상기억합금 > SD400 탄소강 > 일반 철근 순으로 나타남
- 개발된 형상기억합금은 강 알칼리성(pH 13)인 수용액 염소이온의 존재하에 일반 철근과 SD400 탄소강에 비해 매우 높은 부식저항을 가짐
- 해양의 콘크리트 환경을 고려할 때 즉, NaCl 3.5 wt.%에 pH 13에서 개발된 형상기억합금의 부식 저항은 SD400 탄소강에 비해 198% 수준으로 높고, 일반 철근에 비해서 240% 수준으로 높음
- **개발된 철계 형상기억합금은 기존의 철근 및 탄소강에 비해 부식 저항이 높아 콘크리트 보강재로 사용할 수 있을 것으로 판단됨**

동전위 분극 시험을 통한 내식성 비교 실험

수용액에 침지를 통한 표면 비교

- 철근, SD400 탄소강 및 개발된 철계 형상기억합금을 중성의 증류수(pH7)와 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 이용하여 만든 강알칼리성 수용액에 각각 1일간 침지하여 그 표면을 관찰하고 XPS 분석을 실시하였음

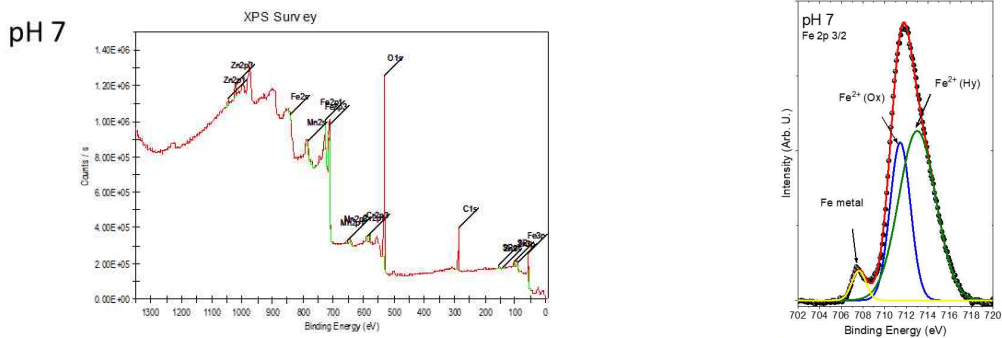


<철근, SD400 탄소강 및 개발된 철계 형상기억합금의 시료 가공 및 수용액에 침지>

- 중성의 증류수에서 부식성 이온이 없더라도 1일간 침지 후 철근, SD400 탄소강에서는 붉은 색깔의 녹(Fe_2O_3)이 발생되었지만, 개발된 철계 형상기억합금의 표면은 부식이 발생되지 않고, 우윳빛깔의 부동태 피막이 형성 되었음.
- 중성의 수용액에서 개발된 철계 형상기억합금의 부식이 발생되지 않았기 때문에 침지된 수용액의 색깔은 변화하지 않음.
- 강 알칼리성 수용액에서 세 소재 모두 부식이 발생되지 않고 표면에 우윳빛의 부동태 피막이 형성되어 있는 것을 확인할 수 있음.
- 개발된 철계 형상기억합금은 기존의 철근 및 SD400 탄소강에 비해서 표면에 안정적인 산화피막이 생성되어 부식이 억제됨

<개발된 철계 형상기억합금의 pH 7에 1일간 침지 후 표면의 XPS 분석 결과>

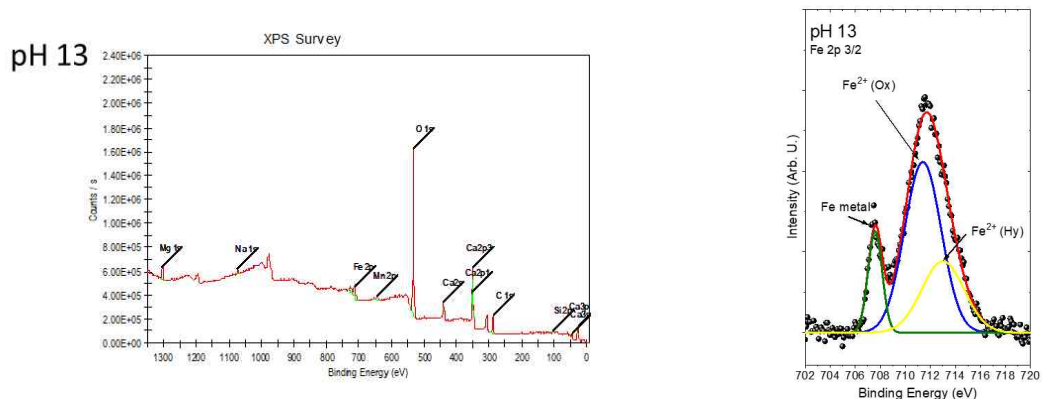
Name	Peak BE	FWHM eV	Area(P) CPS.eV	Atomic %
Mn2P	641.71	3.38	34615.94	0.88
O1s	530.96	2.73	503472.31	49.88
Si2p	102.24	1.97	19327.48	4.61
Zn2P	1022.47	1.77	67960.11	1.03
Fe2p	711.89	4.12	870859.39	20.26
C1s	285.48	1.43	92766.2	22.24
Cr2p	577.44	2.53	44031.29	1.11



<개발된 철계 형상기억합금의 pH 7에 1일간 침지 후 표면의 XPS 분석 결과>

<개발된 철계 형상기억합금의 pH 13에 1일간 침지 후 표면의 XPS 분석 결과>

Name	Peak BE	FWHM eV	Area(P) CPS.eV	Atomic %
Mn2P	641.82	3.55	30888.19	0.73
O1s	711.71	4.47	152649.76	3.33
Si2p	1304.01	1.71	39834.64	2.16
Zn2P	289.61	1.72	113060.13	25.52
Fe2p	347.02	1.71	279085.18	10.96
C1s	531.46	2.06	591876.72	55.07
Cr2p	102.22	1.67	6829.56	1.53



<개발된 철계 형상기억합금의 pH 13에 1일간 침지 후 표면의 XPS 분석 결과>

- 부동태 피막의 형성으로 금속 Fe, Fe 2가 산화물 및 Fe 2가 수산화물이 검출 됨
- 얇은 두께의 부동태 산화피막의 생성으로 모재인 금속 Fe가 검출됨, 두꺼운 부식 생성물이 생겼을 경우 금속 Fe는 검출되지 못함
- 강알칼리(pH 13)에서 산소의 농도가 높다는 것으로 부터 더 안정적인 산화물층이 형성됨을 확인
- **형성된 산화물층이 모재인 철계 형상기억합금의 부식을 억제하는 보호막으로 작용했으며, 이로 인하여 철근 및 SD400 탄소강에 비해 높은 내식성을 보이게됨**

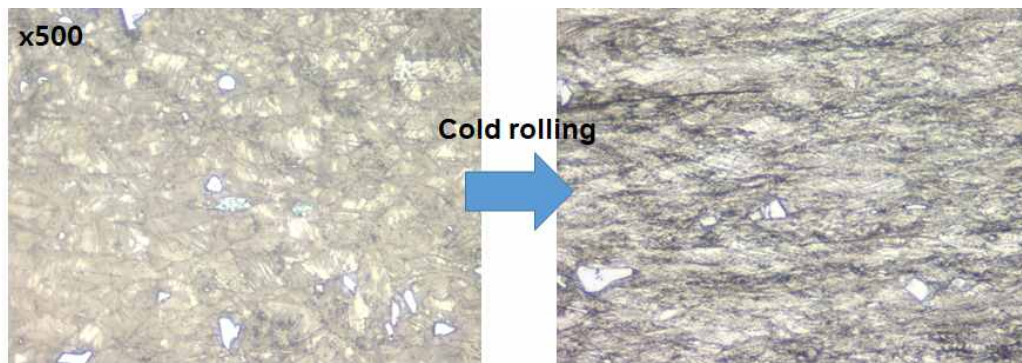
(2) 2차 연도

(가) 공동연구기관 : 한국생산기술연구원

○ 한국형 철계 형상기억합금 제조공정 및 성능 최적화

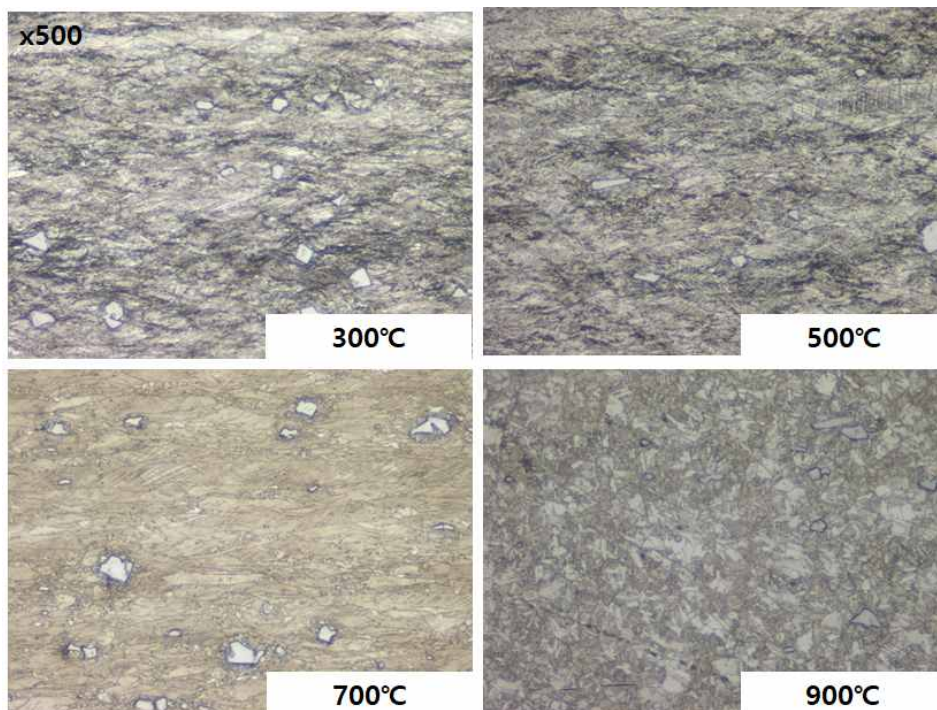
- Fe-17Mn-5Si-5Cr-0.3C-1Ti (weight %) 조성의 열연바의 강도와 경도, 회복연신률을 최적화할 수 있는 후처리공정을 알아보기 위해 열연바를 10%의 압하율로 추가 냉연 처리하여 풀림열처리 조건에 따른 기계적 특성 및 형상기억 특성의 변화를 상세 분석하였음

*상온의 낮은 온도에서 금속을 압연하여 가공경화시켜 금속내부구조를 치밀화 하는 추가공정



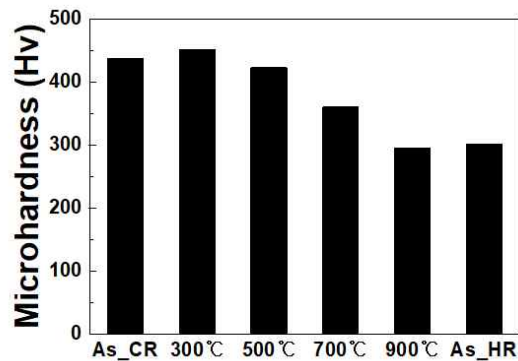
<열연후 10 %의 압하율로 냉간압연처리할 때의 합금 미세조직 변화>

- 상기 광학현미경 미세조직에서 확인할 수 있는 것처럼, 냉간압연에 의해 금속 내부의 결정립이 냉간압연방향으로 길게 늘어나며 매우 치밀화됨을 확인할 수 있으며, 복잡한 형태로 소성변형된 결정립의 형태가 뚜렷히 드러남



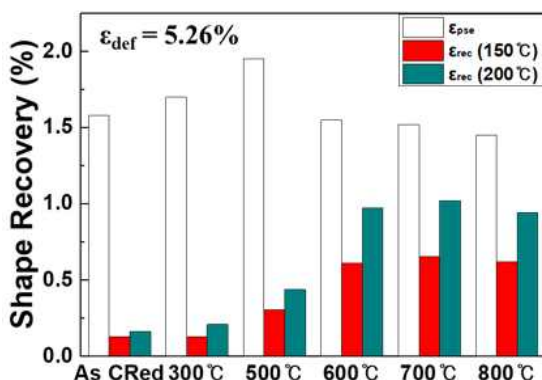
<냉연후 2시간의 풀림열처리를 각기 다른 온도에서 수행하였을 때의 미세조직 변화>

- 냉간압연 후 열처리 온도를 300 ~ 900℃로 달리하여 풀림열처리를 수행하였을 때의 미세조직의 변화를 보면, 300℃에서 열처리를 한 경우에는 미세조직의 변화가 거의 없었으며, 500℃ 이상의 열처리 온도에서 서서히 미세조직이 원래의 열연재의 미세조직과 유사한 형태로 바뀌는 것을 확인할 수 있음
- 900℃의 높은 온도에서 열처리를 할 경우 재결정이 일어나 길게 늘어난 형태의 결정립이 미세하고 랜덤한 형태의 결정립으로 재배치됨

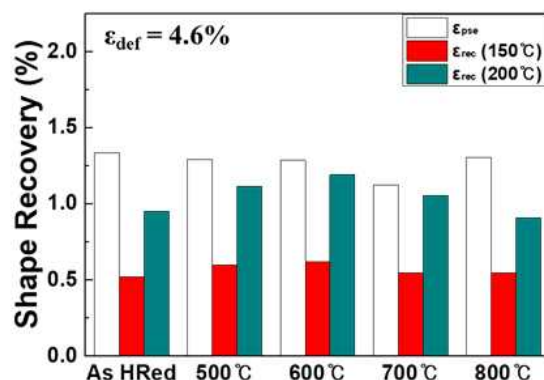


<냉연 및 풀림열처리에 따른 경도변화>

- 냉연 전후 마이크로비커스 경도의 변화를 살펴보면 열연후 냉연을 하지 않은 합금의 경도는 약 300 HV전후인데 비해 냉연후에는 경도가 약 450HV 정도로 경도가 대폭 상승하였음
- 냉연후 경도가 급상승하는 현상은 일반적인 현상으로, 소재가 가공경화에 의해 강도가 올라갔기 때문임
- 풀림열처리 온도에 따른 경도변화를 살펴보면 300℃까지는 경도의 큰 변화가 없다가 열처리 온도를 500℃ 이상으로 올리면 점차적으로 경도가 하락하는 것을 확인할 수 있으며, 900℃에서 열처리 할 경우 앞서 미세조직에서 관찰한 바와 같이 결정립의 재배치가 일어나기 때문에 열연상태의 경도와 비슷한 약 350HV 정도의 경도로 돌아오는 것을 확인할 수 있음
- 따라서 고강도의 합금을 얻기 위해서는 **냉간압연 후 900℃ 이하의 풀림열처리 온도에서 열처리**를 수행하는 것이 합리적임



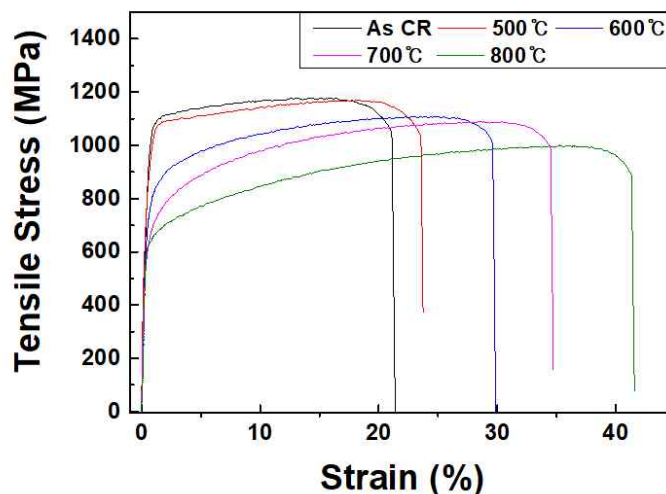
냉연후 풀림열처리시



냉연없이 열처리만 할 시

<냉연 및 풀림열처리시의 굽힘 형상복원 특성 및 열연재와의 비교분석>

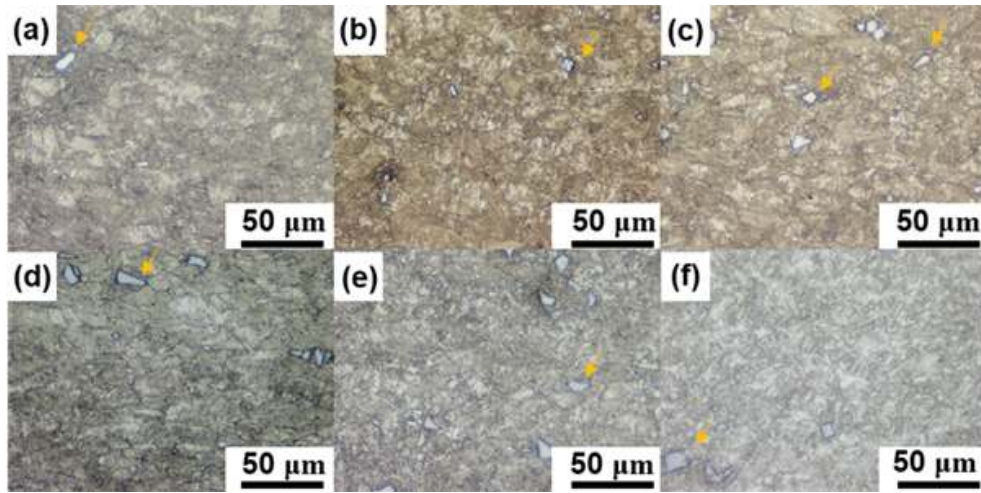
- 냉연후 풀림열처리 온도에 따른 형상기억합금의 굽힘 형상복원률을 측정하여 상기 그래프에 나타내었으며, 냉간압연 직후 풀림열처리를 하지 않은 경우에는 거의 형상기억특성이 없는 것을 확인할 수 있음
- 냉연후 형상기억효과가 나타나지 않는 이유는 소재가 소성경화되면서 형상복원특성을 나타낼 수 있는 오스테나이트 상이 이미 마르텐사이트 계열의 상으로 상변화 하였기 때문으로 생각되며, 풀림열처리를 500℃ 이상의 온도에서 추가로 수행하게 되면 형상복원특성이 다시 발현됨을 확인할 수 있음
- 그래프에서 비교를 위해 냉간압연 처리를 하지 않은 동 합금의 열처리 조건별 형상복원특성을 함께 나타내었으며, 두 그래프를 비교하면 냉간압연 처리후 600℃ 이상의 온도에서 풀림열처리를 수행할 시 열연재와 비슷한 수준의 형상복원효과를 얻을 수 있다는 것을 확인할 수 있음



<냉연 및 풀림열처리에 따른 인장특성 변화>

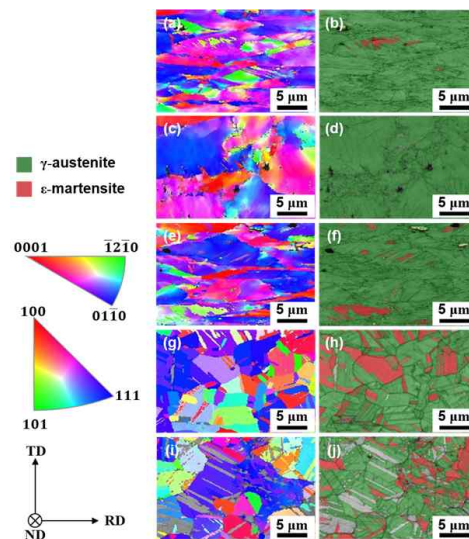
- 냉연 후 풀림열처리 조건별로 인장시험한 결과를 살펴보면, 냉연 직후에는 항복강도가 1,100MPa 전후로 열연재에 비해 약 2배의 항복강도를 나타내며 연신률의 경우에도 파단연신률이 20% 이상임
- 풀림열처리 온도를 높임에 따라 항복강도는 점차 낮아지고 연신률은 증가하여 900℃에서 풀림열처리를 했을 경우의 항복강도와 연신률은 냉연을 하지 않은 열연재와 유사한 수치가 나타남
- 600도에서 풀림열처리를 수행한 경우 항복강도는 약 800MPa 전후로 열연재에 비해 상당히 높으며, 이 경우 상당한 수준의 형상복원효과도 동시에 가지기 때문에, 추가적인 공정을 통해 복원응력과 항복강도를 높이려 한다면 냉연후 600℃에서 풀림열처리를 하는 게 바람직하다는 결론을 얻을 수 있었음

○ 조성 및 제조공정이 최적화된 형상기억합금 시제품 물성 분석



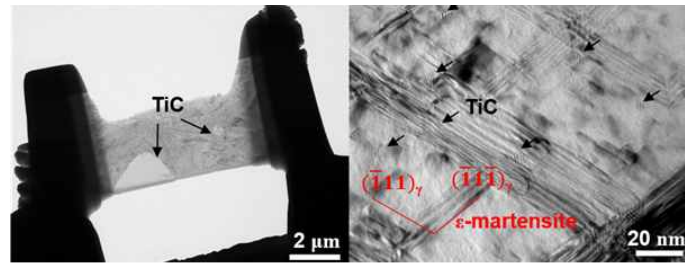
<열처리 조건에 따른 형상기억합금 시제품의 미세조직>

- 시제품 Fe-17Mn-5Si-5Cr-0.3C-1Ti (weight %) 합금의 열처리별 미세조직 및 물성, 형상회복 메커니즘을 전자후방산란회절 (EBSD) 및 전자투과현미경 (TEM)을 통해 상세히 분석하였음
- 상기 그림에서 (a), (b), (c), (d), (e), (f)는 각각 열연직후 및 500, 600, 700, 800, 900°C에서 시효경화 열처리를 했을 때의 미세조직임
- 시제품 형상기억합금에서 관찰되었던 조대한 TiC는 열처리의 유·무와 관계 없이 그대로 남아있는 것을 확인할 수 있음

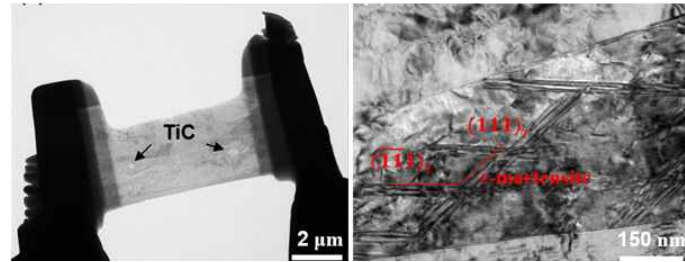


<Fe-17Mn-5Si-5Cr-0.3C-1Ti 시제품의 열처리별 EBSD 미세조직>

- 상기 그림에서 (a,b), (c,d), (e,f), (g,h), (i,j)는 각각 열연상태 및 600, 700, 800, 900°C에서 시효경화열처리를 2시간 했을 때의 EBSD 미세조직을 나타내며, (a,c,e,g,i)는 결정의 방향을, (b,d,f,h,j)는 상을 나타냄
- 열처리 온도가 높아짐에 따라 결정립의 재배치와 성장이 급격하게 일어나며, HCP 구조의 ϵ -마르텐사이트 상의 분율도 늘어나는 경향을 보임



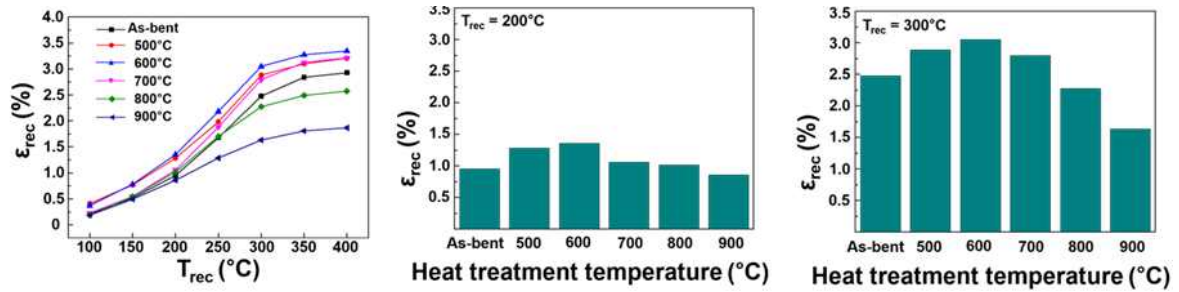
열연직후



600℃ 시효경화 열처리 후

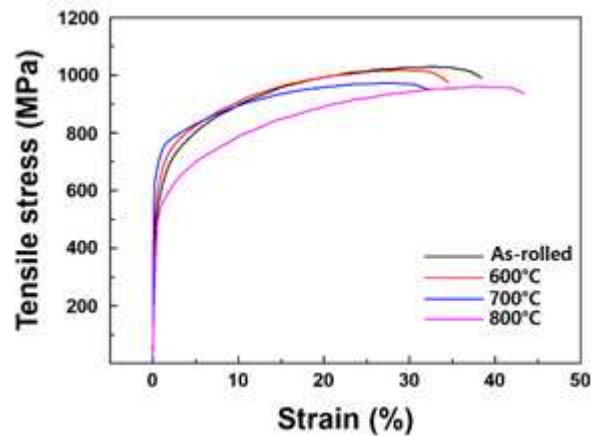
<600℃ 열처리에 따른 TEM 미세구조변화 분석결과>

- TEM으로 상세 분석해 보면 600℃ 열처리를 수행하였을 때의 전후로 미세조직의 차이가 크지 않다는 것을 알 수 있음
- 열연직후에도 TEM으로 확대해 보면 나노크기의 매우 미세한 TiC 입자가 고르게 분산되어 있는 것을 확인할 수 있으며, 이런 TiC 주위로 ε-마르텐사이트 상 역시 형성되어 있다는 것을 확인할 수 있음
- 이는 열연중에 TiC 입자가 이미 분산되어 있기 때문에 추가적인 시효경화 처리의 효과가 제한적이라는 것을 의미함



<Fe-17Mn-5Si-5Cr-0.3C-1Ti 시제품의 열처리별 굽힘 형상복원 특성>

- 시효경화열처리 온도에 따른 굽힘 형상복원특성의 변화를 살펴보면, 철계형상기억합금 시제품의 형상복원은 대부분 상온에서 300°C 사이의 구간에서 일어남을 알 수 있음
- 열연후 시제품의 굽힘 형상복원률은 400°C 까지 가열했을 때 약 2.5% 정도이며 열처리 온도가 600°C 미만일 경우 소폭 형상복원률이 올라가지만 그 변화는 크지 않음
- 열처리 온도가 700°C 이상일 경우 형상복원률이 큰 폭으로 감소하며 이는 EBSD 결과에서 관찰한 것처럼 결정립의 재배치와 관계된 것으로 판단됨
- 콘크리트 프리스트레스 용도로 사용할 경우의 가열온도구간인 200°C 까지의 형상복원률은 시효경화열처리 온도에 따라 소폭 달라지나 모두 1% 전후로 큰 차이가 없었음
- 300°C 까지 가열할 때의 형상복원률을 살펴보면 600°C 에서 열처리한 시험편의 형상복원이 약 3%로 다른 조건에 비해 비교적 큼
- 따라서 콘크리트 프리스트레스용이 아닌 클램프 등 대폭의 형상복원이 필요한 용도로 합금을 사용할 경우에는 600°C 열처리가 의미 있을 것으로 판단할 수 있음



<Fe-17Mn-5Si-5Cr-0.3C-1Ti 시제품의 열처리별 인장특성>

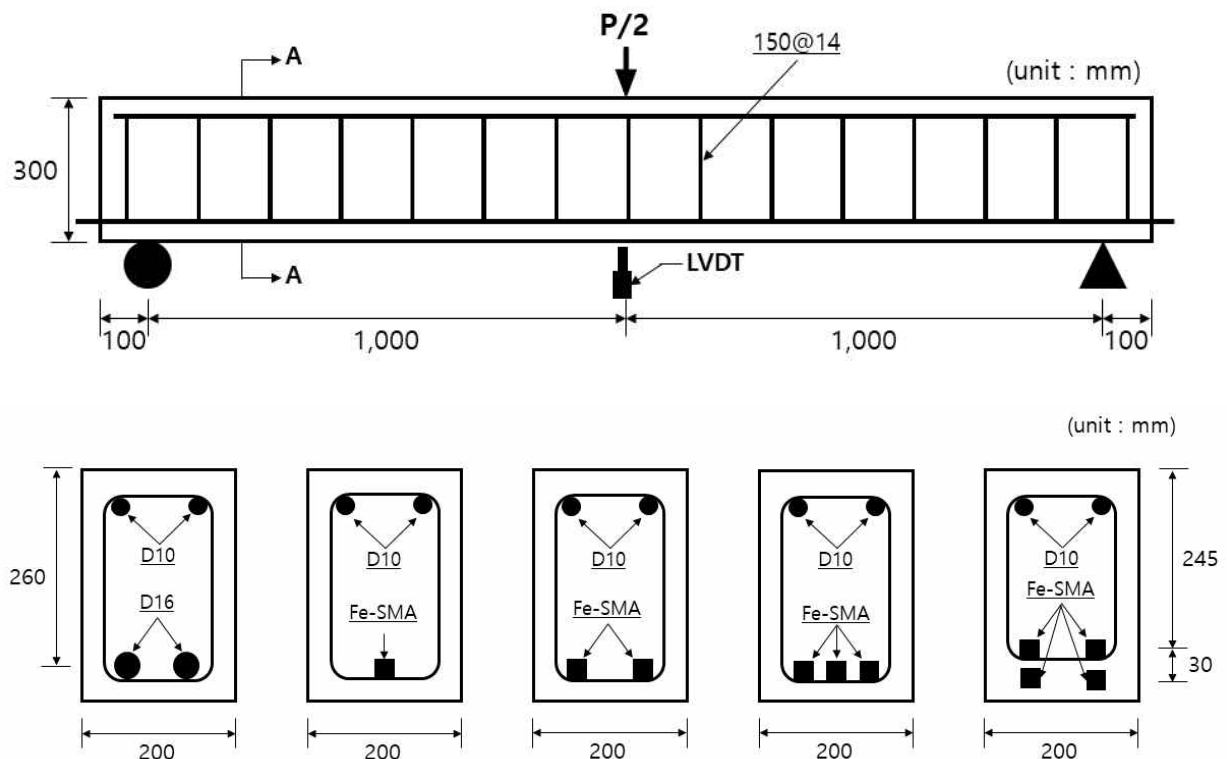
- 시제품의 열처리 조건별 인장곡선을 살펴보면 열처리를 600°C 에서 했을 때 항복강도가 소폭 상승하며 700°C 에서 열처리를 할 시 약간 더 상승하는 경향을 보이는데, 이는 미세조직 내에 열연과정에서 만들어진 ϵ -마르텐사이트가 열처리에 의해 γ -오스테나이트로 돌아가기 때문으로 보이며 형상복원률이 이 열처리 온도대에서 소폭 높아지는 이유도 동일한 것으로 사료됨
- 한편 800°C 이상에서 열처리를 수행하면 강도가 대폭 떨어지는데, 이는 결정립이 재배치되었기 때문임
- EBSD와 TEM을 이용한 본 상세분석에서 **TiC가 함유된 열연 철계형상기억합금 시제품은 열연과정중에 이미 미세한 TiC가 분산되어 있으며, 추가적인 열처리에 의해서도 강도상승 등 얻어지는 효과가 매우 미미하므로 공정비용 등을 함께 고려한다면 추가 열처리 없이 열연후 곧바로 합금을 콘크리트 프리스트레싱 용으로 활용하는 것이 가능할 것으로 판단됨**

(나) 주관연구기관 : 충북대학교 산학협력단

○ 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재의 철근 및 강연선 대체 가능성 검증

한국형 철계-형상기억 신합금 인장재로 제작된 콘크리트 보의 휨 성능 평가

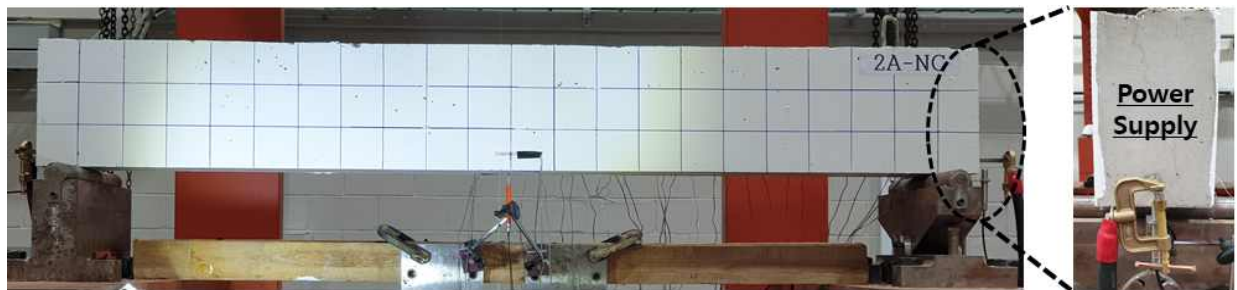
- 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재의 철근 및 강연선 대체 가능성을 검증하기 위해 총 7개의 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재로 제작된 콘크리트 보 제작
- 보의 단면치수는 200 × 300mm, 길이는 2,200mm, 지점간 거리는 2,000mm로 양쪽 부재 끝에서 중심부로 100mm 거리를 두고 지점 설치
- 유효깊이는 260mm이며, 시험변수로 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재의 철근비 (0.2%, 0.39%, 0.59%, 0.78%), 활성화 유·무, 인장재 종류(한국형 철계-형상기억 신합금, SD400)를 고려함
- 실험체 제작에 사용된 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재는 수평 가력장치를 통해 4% 사전변형 시킴
- 실험체 양생이 끝난 후 콘크리트 보에 매립된 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재를 활성화하기 위해 전력공급 장치를 이용하여 5A/mm²의 전류를 공급
- 전기저항시 발생된 열은 비 접촉식 K-type 적외선 열 센서를 이용하여 측정하였으며, 인장재가 목표온도에 도달 후 전력을 차단하여 열 공급을 중단
- 인장재 활성화에 따른 변위를 확인하기 위해 25mm 용량의 LVDT를 이용하여 실험체의 중앙 변위 측정



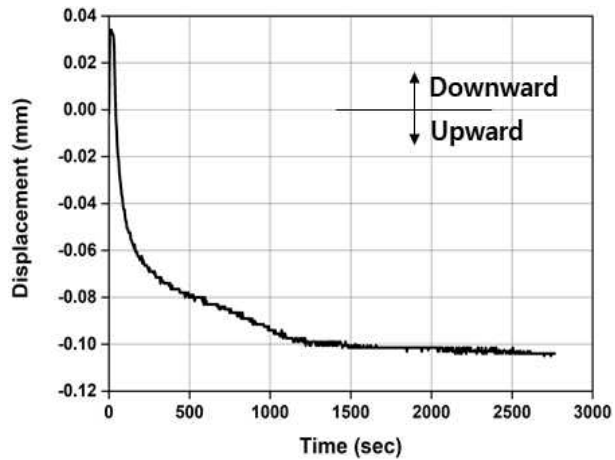
<한국형 철계-형상기억 신합금 인장재로 제작된 콘크리트 보 제원>

<실험 변수>

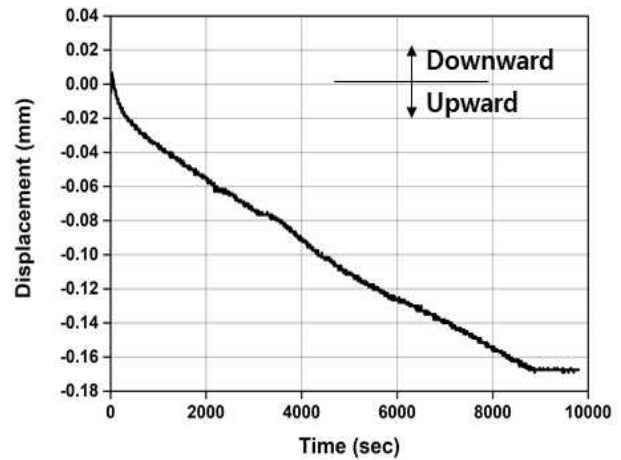
실험체명	철근비 (%)	인장재 종류	활성화 유·무
CTRL	0.78	SD400 이형철근	-
2A-NC	0.2	한국형 철계-형상기억 신합금 인장재	활성화
4A-NC	0.39		활성화
6A-NC	0.59		활성화
6N-NC	0.59		비활성화
8A-NC	0.78		활성화
8N-NC	0.78		비활성화



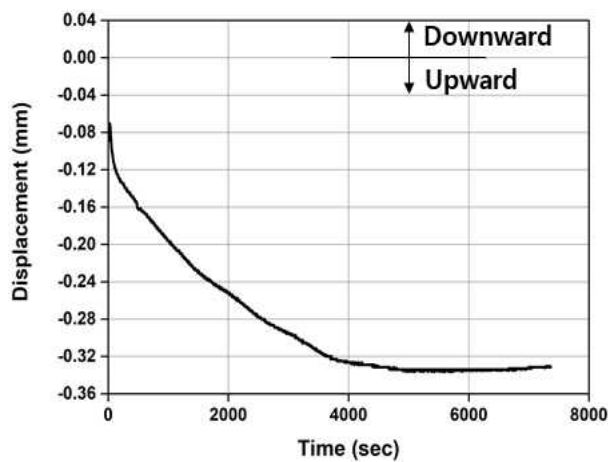
<전기저항을 통한 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재 활성화>



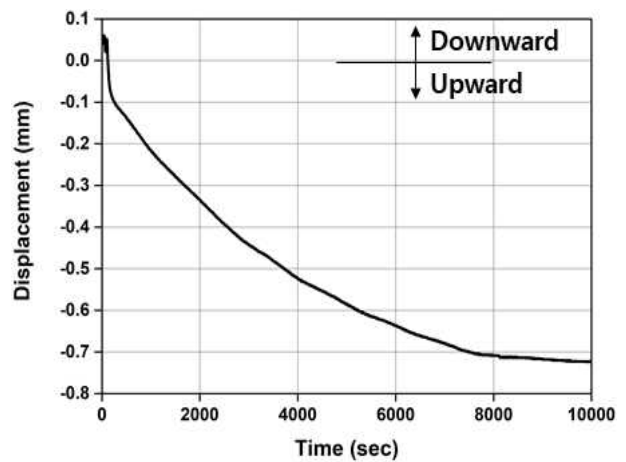
2A-NC



4A-NC



6A-NC



8A-NC

<한국형 철계-형상기억 신합금 활성화에 따른 시간-변위 관계>

- 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재를 활성화하면 두 가지 변위 양상이 나타남
- 가열 초기에는 열팽창으로 인해 실험체 중앙에 하향변위가 발생하며 이후 한국형 철계-형상기억 신합금 회복응력이 발현됨에 따라 프리스트레스 효과에 의해 하향변위가 복원되며 최종적으로 캠버 효과에 의해 상향변위가 발생됨
- 콘크리트의 휨강성 및 탄성계수를 적용하여 한국형 철계-형상기억 신합금의 회복응력이 작용하였을 때 이론적인 상향변위는 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있음
- 분석결과 이론값에 대한 실험값의 비는 평균 0.86으로 나타났으며, 이러한 차이는 탄성변형, 콘크리트-합금 사이의 슬립 등의 원인으로 회복응력이 작아졌기 때문으로 판단됨

$$\delta_{recovery} = \frac{ML^2}{8E_c I}$$

$$M = P_{recovery} e$$

$$P_{recovery} = A_{sma} \sigma_{recovery}$$

$$E_c = 8500 \sqrt[3]{f_{cu}}$$

$$n_s = \frac{E_s}{E_c}, n_{sma} = \frac{E_{sma}}{E_c}$$

$$y_t = \frac{0.5bh^2 + (n_s - 1)A_s d + (n_{sma} - 1)A_{sma} d}{bh + (n_s - 1)A_s + (n_{sma} - 1)A_{sma}}$$

$$e = d - y_t$$

$$I_c = \frac{bh^3}{12} + A_g (0.5h - y_t)^2$$

$$I_s = (n_s - 1)A_s (y_t - d)^2$$

$$I_{sma} = (n_{sma} - 1)A_{sma} (y_t - d)^2$$

$$I = I_c + I_s + I_{sma}$$

여기서

$\delta_{recovery}$: 회복응력에 의한 상향 변위

M , $P_{recovery}$, $\sigma_{recovery}$ 는 각각 Fe-SMA 바에 의해 발생하는 모멘트, 회복력, 회복응력

A_g , A_s , A_{sma} 는 각각 콘크리트, 압축철근, Fe-SMA 바의 단면적

E_c , E_s , E_{sma} 는 각각 콘크리트, 철근, Fe-SMA의 탄성계수

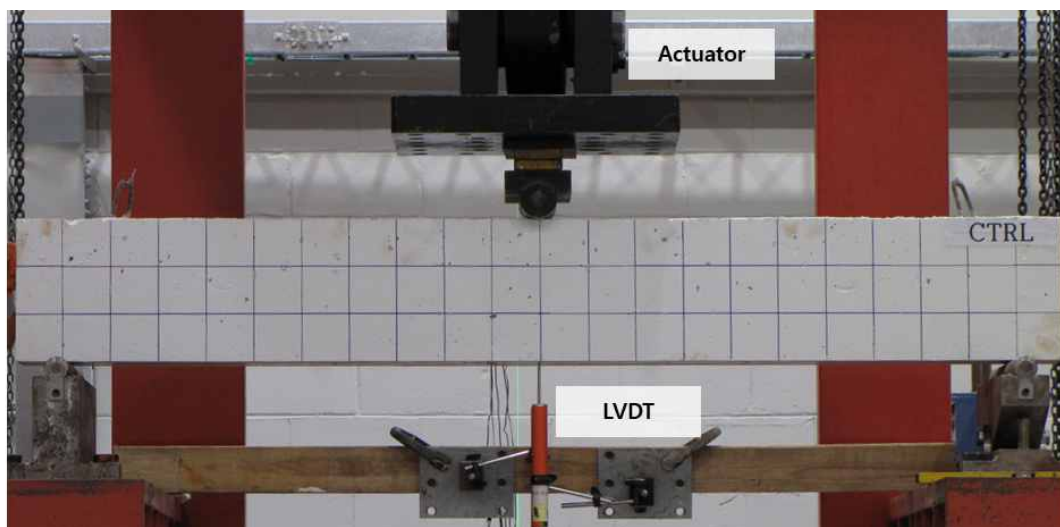
I_c , I_s , I_{sma} 는 각각 평행축 정리를 통해 계산된 콘크리트, 철근, Fe-SMA 바의 단면 2차모멘트.

e 와 y_t 는 각각 편심거리와 중립축 깊이

n_s 와 n_{sma} 는 각각 콘크리트에 대한 철근과 Fe-SMA의 탄성계수 비를 나타냄

<활성화에 따른 상향 변위>

실험체명	실험값 (mm)	이론값 (mm)	실험/이론
2A-NC	0.105	0.142	0.74
4A-NC	0.169	0.283	0.60
6A-NC	0.337	0.422	0.80
8A-NC	0.727	0.560	1.30

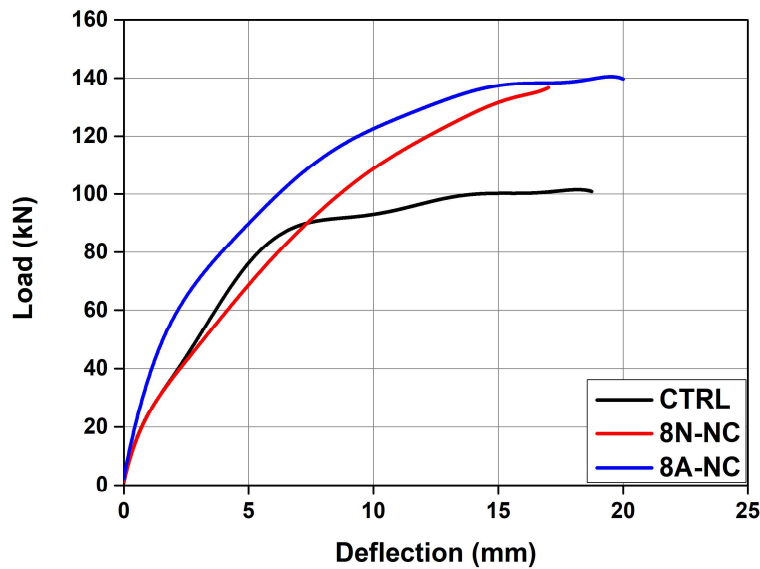


<실험 전경>

- 한국형 철계-형상기억 신탐금 인장재를 활성화시킨 후 캠버효과에 의한 상향 변위가 안정화된 뒤 2,000kN 용량의 액츄레이터를 이용하여 3점 휨 실험 수행
- 하중은 0.5mm/min의 변위제어로 가력하였으며 실험체의 처짐을 측정하기 위해 실험체 중앙에 LVDT 설치

<휨 파괴 실험 결과>

실험체명	초기균열		극한하중	
	변위(mm)	하중(kN)	변위(mm)	하중(kN)
CTRL	0.64	19.00	33.41	105.00
2A-NC	0.81	21.82	11.66	42.84
4A-NC	0.79	22.68	15.12	88.82
6A-NC	0.81	31.00	17.94	124.88
6N-NC	0.82	24.48	29.12	136.52
8A-NC	1.37	46.9	20.10	141.23
8N-NC	1.00	24.62	17.015	136.72

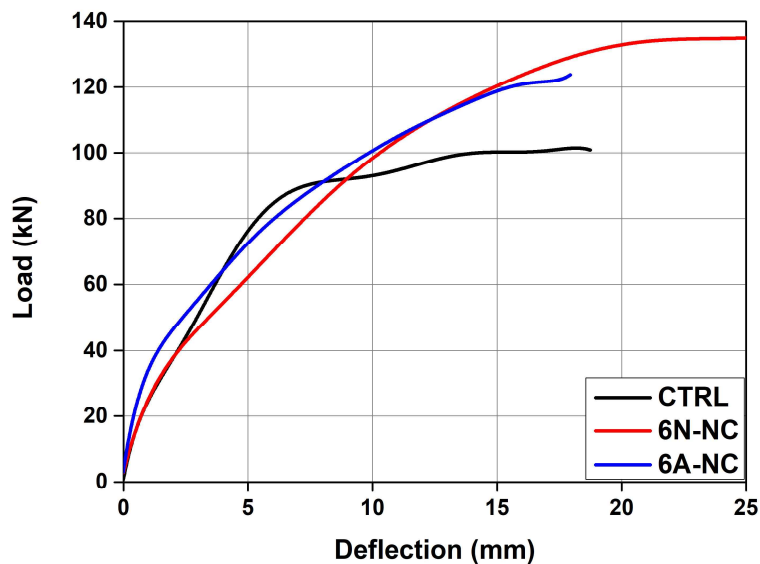


철근비 0.78%인 실험체의 하중-변위 관계

- SD400 등급으로 제작된 실험체인 CTRL은 약 19kN에서 초기 휨 균열이 발생한 후 휨 균열이 압축부로 성장하다가 약 105kN에서 압축부 콘크리트의 파쇄되는 전형적인 휨 균열 양상이 나타남
- CTRL과 동일한 수준의 철근비를 갖고 한국형 철계-형상기억 신탐금을 활성화시키지 않은 실험체인 8N-NC는 초기균열하중, 항복하중, 극한하중은 각각 24.62kN, 105.30kN, 136.72kN으로 **CTRL 대비 각각 129.6%, 119.7%, 130.2% 수준으로 연구 목표 성능인 80%, 110%, 110%를 상회하는 것으로 나타남**
- CTRL과 동일한 수준의 철근비를 갖고 한국형 철계-형상기억 신탐금을 활성화시킨

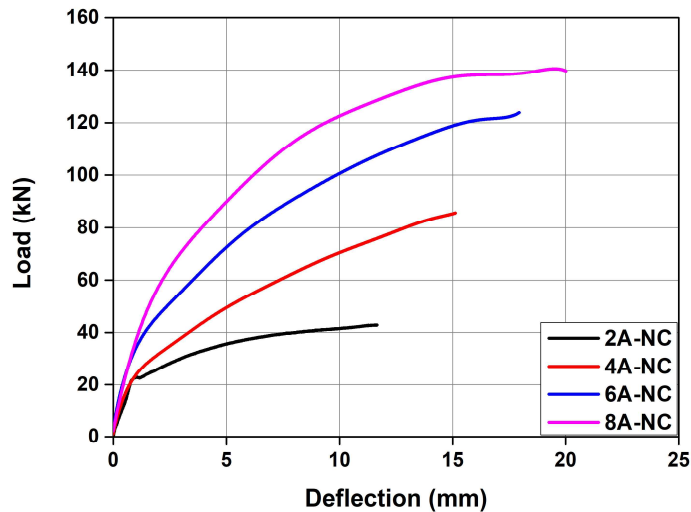
실험체인 8A-NC는 초기균열하중, 항복하중, 극한하중은 각각 46.9kN, 110.3kN, 141.23kN으로 **CTRL 대비 각각 246.8%, 125.3%, 134.5% 수준으로 연구 목표 성능인 120%, 120%, 120%를 상회**하는 것으로 나타남

- 8N-NC대비 8A-NC의 초기균열하중은 약 190.5% 수준의 큰 증가를 보였으나, 항복하중과 극한하중은 각각 4.7%, 3.3%의 미미한 증가를 나타냄
- 이는 일반적인 프리스트레스 콘크리트와 유사하게 프리스트레스의 도입은 초기균열하중을 증가시켜 구조물의 사용성을 효과적으로 확보하는 반면 항복하중 및 극한하중의 증가는 미미함을 의미함



철근비 0.59%인 실험체의 하중-변위 관계

- 6N-NC 실험체는 8N-NC 실험체와 유사한 초기균열 하중을 나타내었으며, 철근비가 더 높은 CTRL에 비해 더 우수한 초기균열 하중을 나타냄
- 6A-NC 실험체의 초기균열 하중은 31kN으로 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재를 활성화시킴에 따라 발생된 프리스트레스 효과에 의해 약 26.6%의 초기균열 하중이 증가됨
- SD400 철근으로 제작된 CTRL에 비해 75% 수준의 낮은 철근비를 가지고 있음에도 불구하고 한국형 철계-형상기억 신합금으로 제작된 6N-NC와 6A-NC의 극한하중은 각각 136.52kN, 124.88kN으로 CTRL에 비해 24.56%의 극한하중 증가가 나타남
- 따라서 **한국형 철계-형상기억 신합금 인장재로 제작된 콘크리트 보는 일반적으로 사용되는 SD400으로 제작된 RC보에 비해 더 우수한 역학성능을 확보**할 수 있는 것으로 판단됨



<철근비에 따른 하중-변위 관계>

- 2A-NC, 4A-NC, 6A-NC, 8A-NC의 초기균열 하중은 각각 21.82kN, 22.68kN, 31.00kN, 46.9kN으로 철근비가 증가함에 따라 초기균열 하중은 증가하는 것으로 나타남.
- 2A-NC, 4A-NC, 6A-NC, 8A-NC의 극한하중은 각각 42.84kN, 88.82kN, 124.88kN, 141.23kN으로 철근비가 0.2% 증가함에 따라 평균 34kN 증가하는 것으로 나타남

<휨 파괴 실험 결과>

실험체명	실험값(kN)	이론값(kN)	실험/이론
2A-NC	21.82	27.26	0.8
4A-NC	22.68	37.07	0.61
6A-NC	31.00	46.99	0.66
8A-NC	46.90	56.97	0.82

- 아래 식을 통해 철계-형상기억 신탄금의 회복응력이 작용하였을 때 이론적인 초기 균열 하중을 나타냄
- 2A-NC, 4A-NC, 6A-NC, 8A-NC의 이론적인 초기균열 하중은 각각 27.26kN, 37.07kN, 46.99kN, 56.97kN이며 이는 실험값 대비 평균 27.6%의 오차를 보임
- 이러한 오차는 콘크리트와 철근의 슬립, 초기 열팽창 및 탄성변형에 따른 프리스트레스 효과 손실 등의 원인에 기인된 것으로 판단됨

$$M_{cr} = \left[f_r Z_2 + P_{recovery} \left(\frac{I}{A_e (h - y_0)} + e \right) \right]$$

$$f_r = 0.63 \sqrt{f_{ck}}$$

$$P_{cr} = \frac{4M_{cr}}{L}$$

$$A_e = bh + (n_s - 1)A_s + (n_{sma} - 1)A_{sma}$$

$$Z_2 = \frac{I}{h - y_0}$$

여기서

M_{cr} , P_{cr} 은 각각 프리스트레스가 도입된 콘크리트의 균열모멘트 및 균열하중

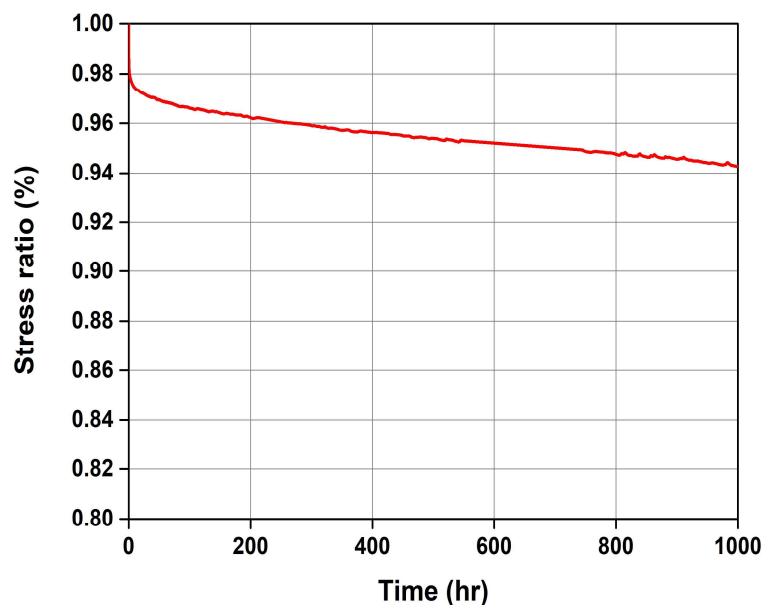
f_r 은 콘크리트의 인장강도

A_e 는 유효 단면

Z_2 는 단면계수를 나타냄

한국형 철계-형상기억 신합금의 릴랙세이션 평가

- 한국형 철계-형상기억 신합금의 릴랙세이션을 파악하기 위한 실험을 진행함
- 실험을 위해 인장실험과 동일한 크기의 시편을 사용
- 실험체의 사전변형은 4%로 설정
- 잔류변형이 생성된 실험체에 열팽창에 의한 좌굴을 방지하기 위해 약 50MPa의 초기 압축응력 도입
- 15kW용량의 전력공급장치를 이용하여 실험체가 목표온도(160℃)에 도달할 때까지 2A/mm²의 전력 공급
- 실험체가 목표 온도에 도달한 후 전력을 차단하여 실험체를 상온까지 냉각
- 이 후 실험체의 변형률을 고정하고 시간경과에 따른 하중감소를 측정
- 실험결과 1000시간 경과 후 회복응력은 초기 회복응력 대비 94.3% 수준으로 나타남
- 1000시간 경과 후 사전변형 4%, 회복온도 160℃에서 **한국형 철계-형상기억 신합금의 릴랙세이션은 약 5.71%로 연구 목표성능인 10% 이내를 충분히 만족함**

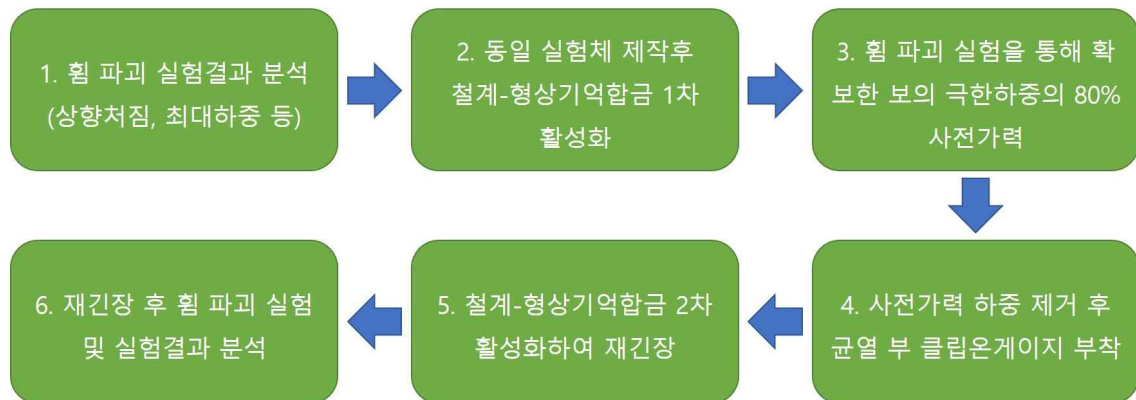


<릴랙세이션 실험 결과>

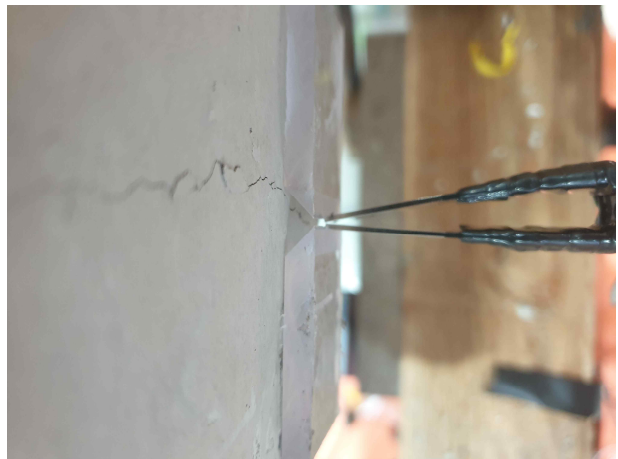
○ 한국형 철계-형상기억 신합금의 재긴장 가능성 검증

- 한국형 철계-형상기억 신합금의 재긴장 가능성을 검증하기 위해 4A-NC와 동일한 실험체를 제작
- 실험체 양생이 끝난 후 콘크리트 보에 매립된 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재를 활성화하기 위해 전력공급 장치를 이용하여 $5A/mm^2$ 의 전류를 공급
- 캄버효과에 의한 상향변위가 안정된 후 4A-NC의 80% 수준까지 변위제어를 통해 사전가력하여 실험체에 균열을 유도
- 이 후 초기 활성화와 동일한 방법으로 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재 재 활성화를 통한 재긴장 실시
- 재긴장 작업간 발생된 균열의 회복 유·무를 확인하기 위해 클립 온 게이지를 이용하여 균열 폭 측정
- 재긴장 작업 완료 후 휨 파괴실험을 통해 실시
- 재긴장 실험 순서를 아래 그림에 도식화 하여 나타냄

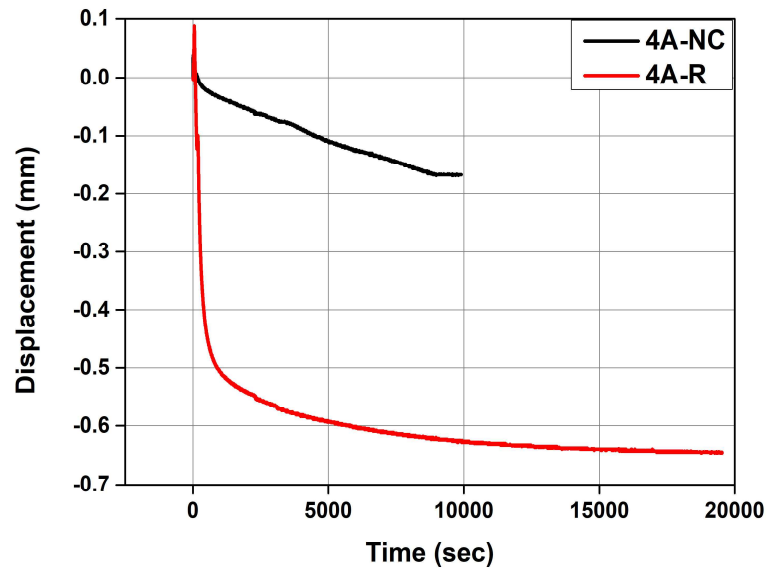
철계-형상기억합금의 재긴장 가능성 검토



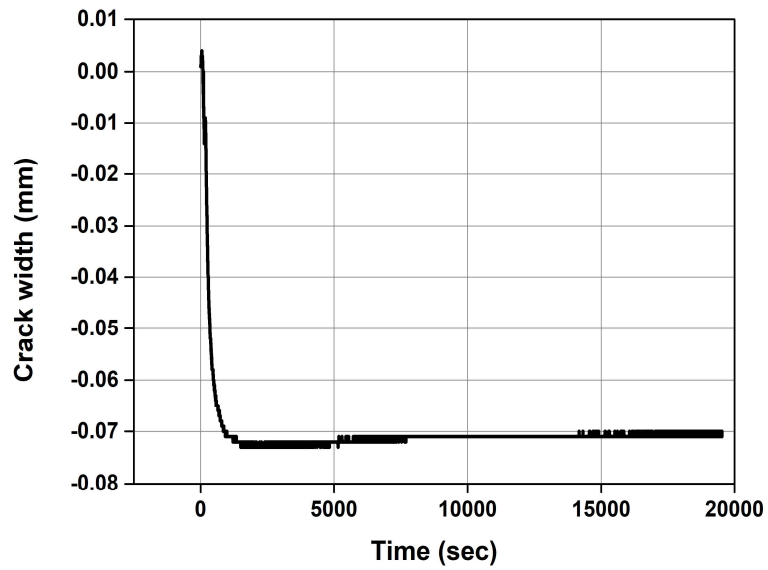
<재긴장 실험 방법 도식화>



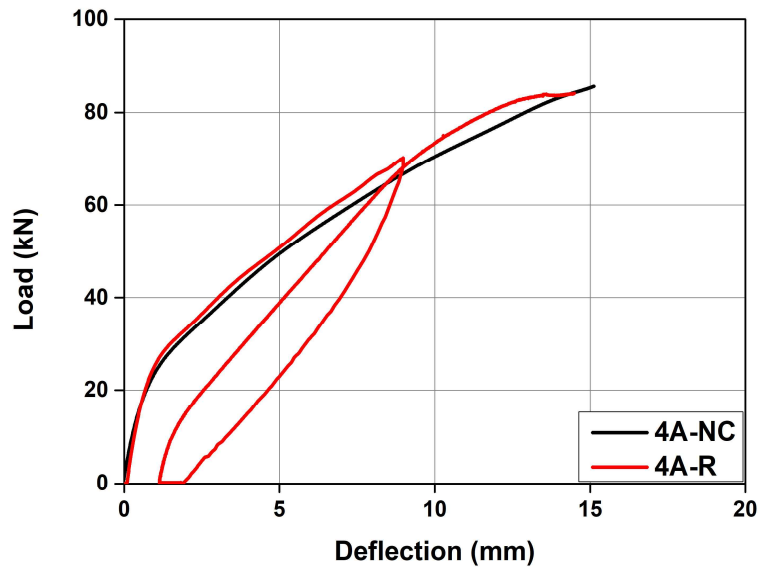
<재긴장 실험 전경>



<재긴장에 따른 실험체 변위>



<재긴장에 따른 균열 닫힘>



<재긴장 후 하중-변위 관계>

- 한국형 철계-형상기억 신탄금의 재긴장시 캠버효과에 의해 약 0.647mm의 상향 변위가 발생하였으며, 이는 초기 활성화시 발생된 상향변위인 -0.169에 비해서도 약 3.82배 높은 상향 변위임
- 재긴장 시 더 높은 상향변위가 발생하는 이유는 사전가력시 발생된 콘크리트 균열에 의해 실험체의 단면2차모멘트가 저하되었으며 이에 따라 강성이 저하되었기 때문으로 판단됨
- 또한 재긴장 작업을 실시하는 동안 사전가력을 통해 발생된 균열의 폭이 약 0.07mm 닫힌 것으로 확인됨에 따라 철계-형상기억합금 **재긴장을 통해 여러 가지 원인에 의해 발생된 콘크리트 균열을 효과적으로 제어**할 수 있을 것으로 판단됨
- 또한 일반적인 프리스트레스 콘크리트와 동일하게 재긴장에 따른 프리스트레스 수준의 증가는 실험체의 처짐 감소 효과를 보이는 반면 실험체의 극한하중에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타남

○ 극한지 환경에서 한국형 철계-형상기억 신합금의 사용성 확보

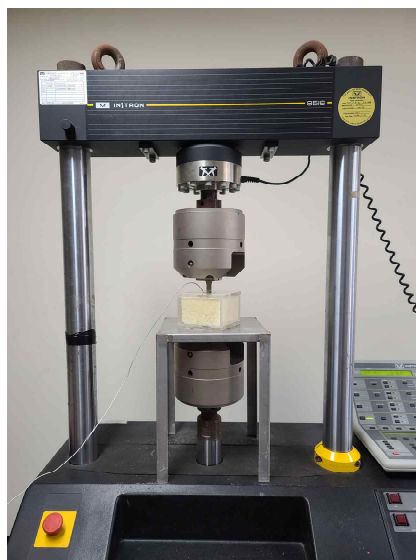
극한지 환경에서 한국형 철계-형상기억 신합금의 기계적 특성

- 극한지 환경에서 한국형 철계-형상기억 신합금을 콘크리트 구조물 인장재로 사용하기 위한 기초물성 확보를 극한온도(영하 60℃)에서 한국형 철계-형상기억 신합금의 기계적 특성 평가
- 시험체 인장시험과 동일한 시편으로 실시



<인장시험 시편>

- 100kN 용량의 인스트론 장비를 이용하여 0.5mm/min의 속도로 시험체 파단까지 시험 진행
- 극한지 환경을 모사하기 위해 드라이아이스와 보온챔버를 이용하여 시험체의 온도를 일정하게 유지시키며 시험 실시
- 시험체의 온도는 K-type 열전대 이용 측정

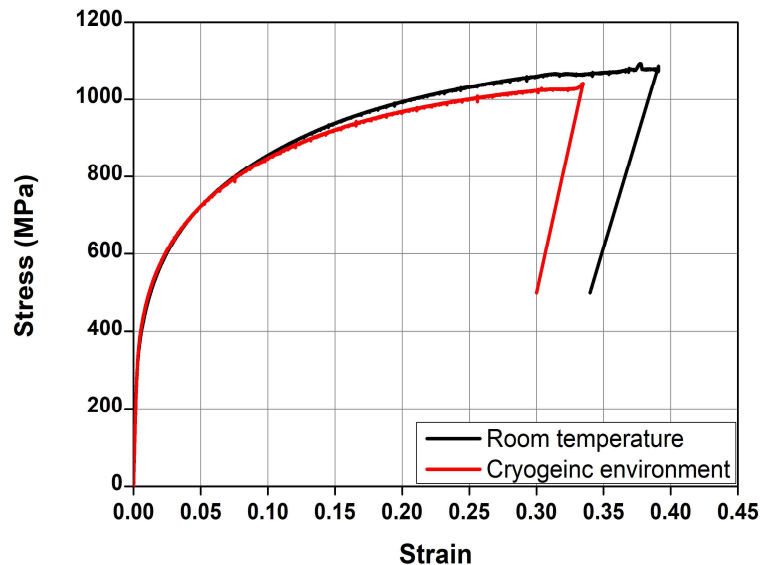


<인장시험 전경>

<극한지 인장시험 결과>

시험결과	탄성계수 (GPa)	항복 변형률 (%)	항복 강도 (MPa)	극한 변형률 (%)	극한 강도 (MPa)
상온	195.4	1.64	537.45	39.092	1087
극한지	196.3	1.61	540.38	33.49	1042

- 영하 64℃ 에서 실험 실시
- 실험결과 저온 온도조건에서 한국형 철계-형상기억 신태금의 초기 탄성계수, 항복 변형률, 항복강도는 상온상태와 큰 차이를 나타내지 않으며 유사한 관계를 보임
- 그러나 항복이후 강성이 점차 작아지기 시작하였으며 33.49%에서 파단이 발생함
- 이는 **상온대비 85.6% 수준의 극한변형률로 연구목표인 상온대비 80%이상을 만족** 하는 것으로 나타남



<상온 및 저온에서의 한국형 철계-형상기억 신태금의 응력-변형률 관계>

극한지 환경에서 콘크리트-신태금 복합체의 회복응력 특성 규명

- 극한지 환경에서 한국형 철계-형상기억 신태금 - 콘크리트 복합체의 회복응력 특성을 규명하기 위해 1차년도 실험과 동일한 크기의 실험체를 제작
- 실험변수로서 철계-형상기억합금 양(25mm², 50mm², 75mm²)을 고려
- 실험 당일 콘크리트의 압축강도는 31.7MPa로 측정됨
- 극한지 상태와 동일하게 보온챔버에 드라이아이스를 이용하여 실험체의 온도를 영하 62℃로 하여 실험을 실시
- 한국형 철계-형상기억 신태금 활성화 후 Dial gauge를 이용하여 실험체의 변형률 측정

- 실험결과 철계-형상기억 신태금양이 25mm², 50mm², 75mm²인 복합체의 압축변형률은 각각 -49.93μϵ, -93.18μϵ, -132.18μϵ으로 측정됨.
- 극한지 상태 및 상온에서의 실험결과는 평균 5.7%의 미미한 차이를 나타냄에 따라 온도에 의한 회복응력 영향은 미미한 것으로 판단됨
- 회복응력이 작용하였을 때 콘크리트의 변형률을 아래 식을 이용하여 계산한 결과 25mm², 50mm², 75mm²인 복합체의 압축변형률은 각각 -48.34μϵ, -78.83μϵ, -114.12μϵ으로 나타남
- **계산된 이론값과 실험값은 약 82.9%의 정확도를 보여 연구 목표인 80% 이상의 정확도를 만족**하는 것으로 나타남

$$E_c = 8500 \sqrt[3]{f_{cu}}$$

$$\rho = \frac{A_{sma}}{A_g}$$

$$n = \frac{E_{sma}}{E_c}$$

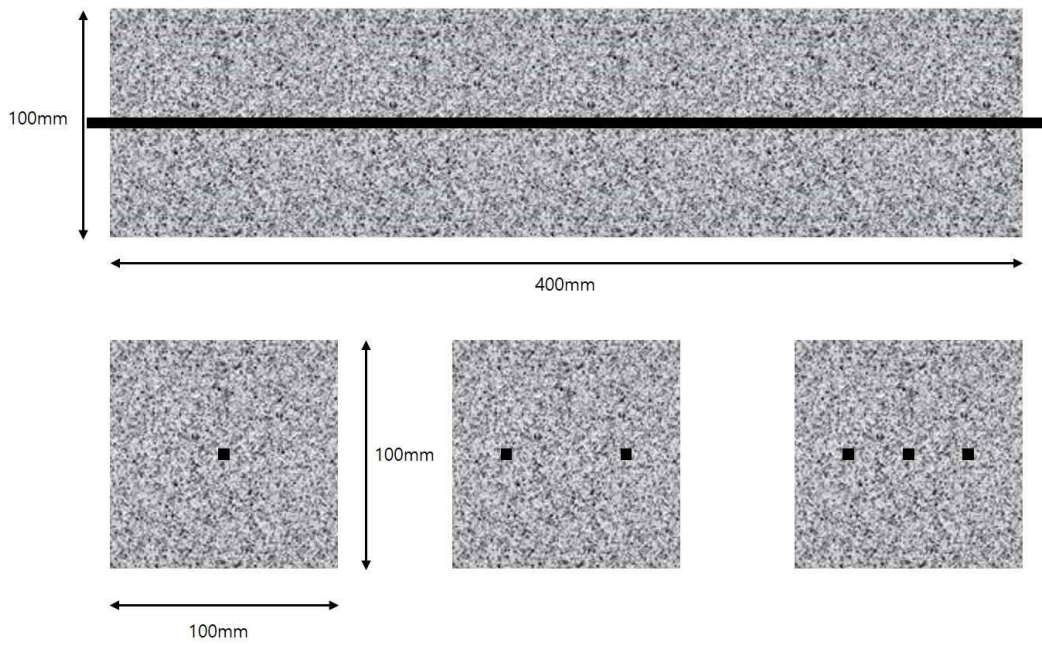
$$\Delta\sigma_{sma} = \frac{1 + n \rho \sigma_{sma}}{1 + n \rho}$$

$$\sigma_{cs} = \frac{\Delta\sigma_{sma}}{n}$$

$$\epsilon_c = \frac{\sigma_{cs}}{E_c}$$

여기서

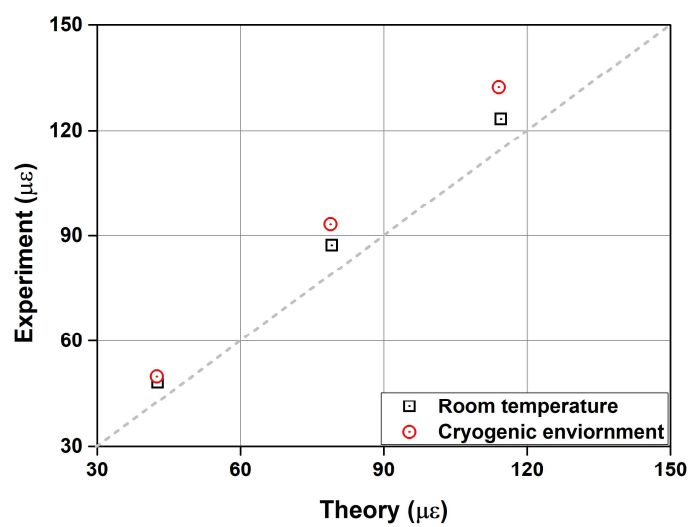
A_{sma} 와 A_g 는 각각 철계-형상기억합금과 복합체의 단면적, E_c 와 E_{sma} 는 각각 콘크리트, Fe-SMA의 탄성계수, n 과 ρ 는 각각 콘크리트에 대한 철근과 Fe-SMA의 탄성계수 비, 단면의 철근 비를 나타냄



<극한지 복합체 회복응력 특성 평가를 위한 시험체 제원>



<극한지 복합체 회복응력 특성 평가 실험 전경>



<극한지 복합체 회복응력 이론값 및 실험값 비교>

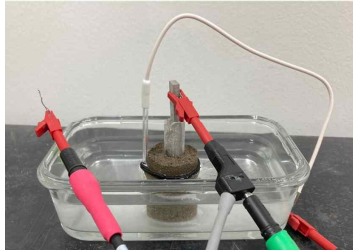
(다) 공동연구기관 : 부경대학교 산학협력단

○ 한국형 철계 형상기억합금의 콘크리트 내부 환경에서의 부식 저항성 평가

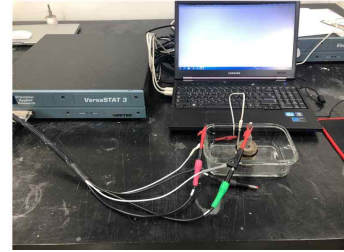
동전위 분극 시험을 내식성 비교



시료 가공 및 콘크리트 몰탈



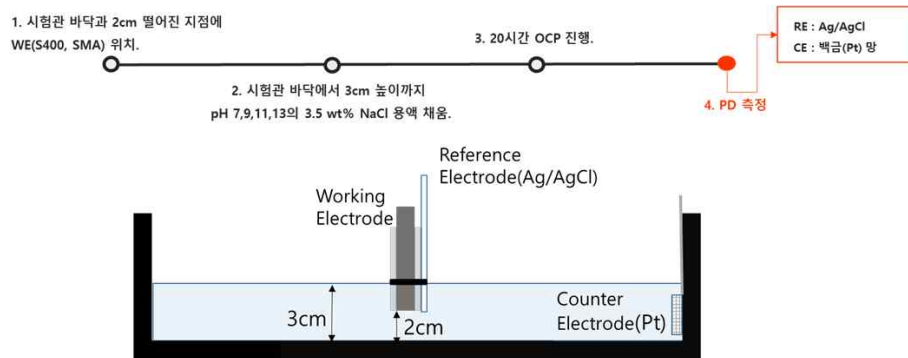
전기화학 셀 구성



분석 및 평가

<한국형 철계 형상기억합금의 콘크리트 내부 환경에서의 전기화학적 부식 저항성 분석을 위한 실험 준비과정>

- 철계 형상기억합금의 콘크리트 내부 환경에서의 부식 저항성을 전기화학적으로 분석하기 위하여 마운팅, 표면 마모 및 콘크리트로 제작 후 Ag/AgCl 기준전극을 포함한 3전극 셀에 설치하여 동전위분극시험을 이용하여 부식에 대한 저항을 구하였음
- 개발된 철계 형상기억합금의 내식성을 직관적으로 비교하기 위하여 비교재료로 SD400 탄소강을 사용하였음
- 다양한 pH 환경에서 생성되는 표면 산화층의 부식저항에 미치는 영향을 알아보기 위해 동전위분극실험 및 XPS 분석을 실시하였음
- 콘크리트로 제작 후 염수에서 침지 시간에 따른 pH 변화 및 내식성을 비교하였음
- 염수 pH 변화에 따른 동전위분극곡선을 이용한 내식성 비교



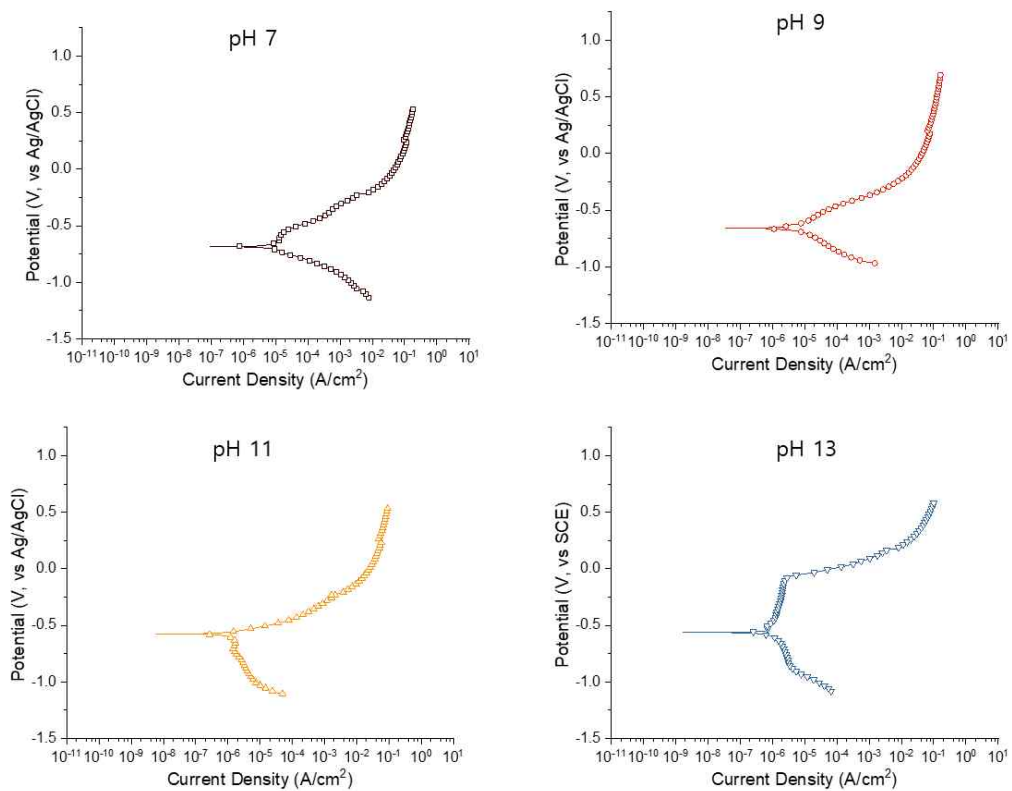
<염수 pH 변화에 따른 동전위분극곡선 실험 모식도>

- 염수는 부식성의 염소이온을 다량 포함하고 있어, 건설 콘크리트 구조물의 내부 철근 보강재의 부식을 촉진시키고 붕괴 위험을 가중시킴에 따라, 염수의 환경에서 각 소재의 반응성 및 부식 거동을 확인할 필요가 있음
- CaO 첨가를 통해 다양한 pH 환경에서의 부식 거동을 SD400 탄소강과 비교하기 위해 분극곡선 측정 후 Tafel fitting 결과(부식전위(E_{corr}), 부식전류밀도(i_{corr}), 분극저항(R_p))를 아래 표에 나타내었음

<CaO 첨가를 통한 염수 pH 변화에 따른 SD400 탄소강의 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

pH	$E_{\text{corr}}[\text{V}]$ vs.Ag/AgCl	$I_{\text{corr}}[\text{Acm}^{-2}]$	R_p [k Ω]
7	-0.685	1.66×10^{-5}	1.84
9	-0.659	4.34×10^{-6}	6.75
11	-0.575	2.15×10^{-6}	10.85
13	-0.558	7.65×10^{-7}	76.36

※ Reference Electrode: Ag/AgCl



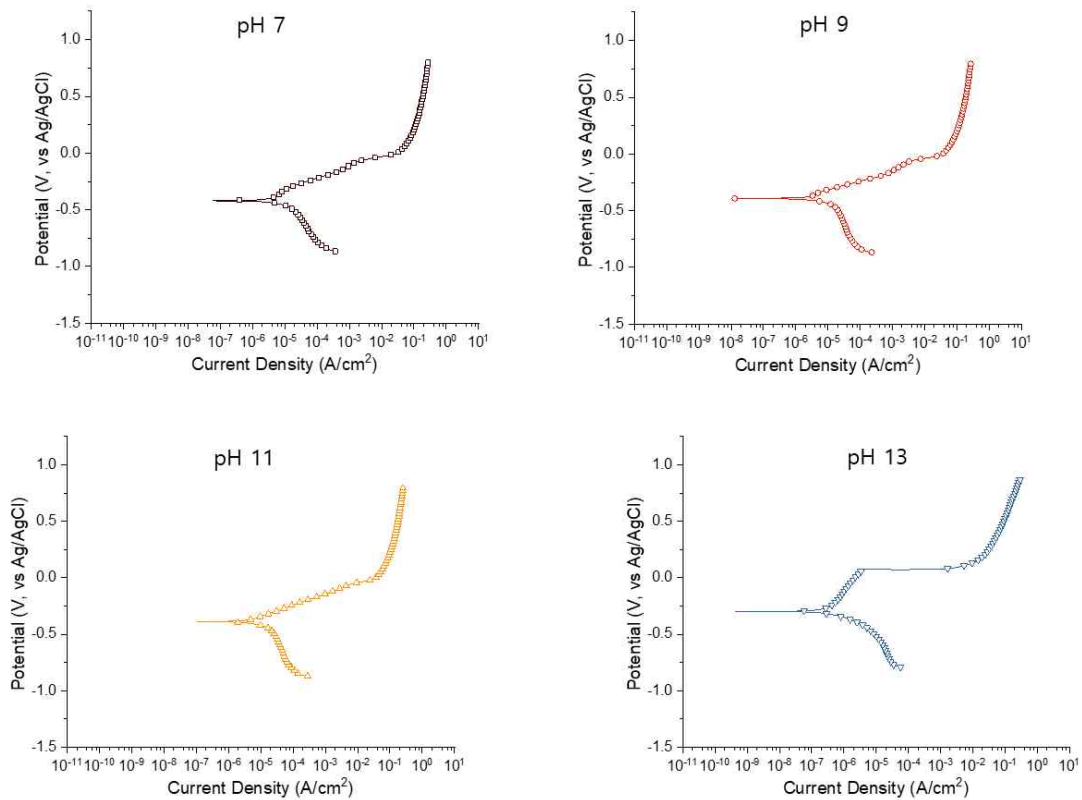
<CaO 첨가를 통한 염수 pH 변화에 따른 SD400 탄소강의 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

- SD400 탄소강은 중성의 염수에서 1.84k Ω 의 분극저항(부식저항)을 가지며, pH가 11까지 높아지면서 부식저항이 소폭 증가하며, 콘크리트 환경인 pH 13에서는 부식저항이 크게 증가하여 76.36k Ω 로 나타남으로써 알칼리 환경에서 안정한 산화 피막층의 형성에 의해 부식에 대한 안정성이 증가된다고 볼 수 있음.
- 중성에서 강알칼리성(pH13)으로 변화에 따라 부식저항이 41배 가량 증가함.

<CaO 첨가를 통한 염수 pH 변화에 따른 한국형 철계 형상기억합금의 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

pH	$E_{corr}[V]$ vs.Ag/AgCl	$I_{corr}[Acm^{-2}]$	R_p [k Ω]
7	-0.412	4.72×10^{-6}	8.73
9	-0.392	3.17×10^{-6}	9.82
11	-0.387	1.58×10^{-6}	23.21
13	-0.288	3.77×10^{-7}	111.23

※ Reference Electrode: Ag/AgCl



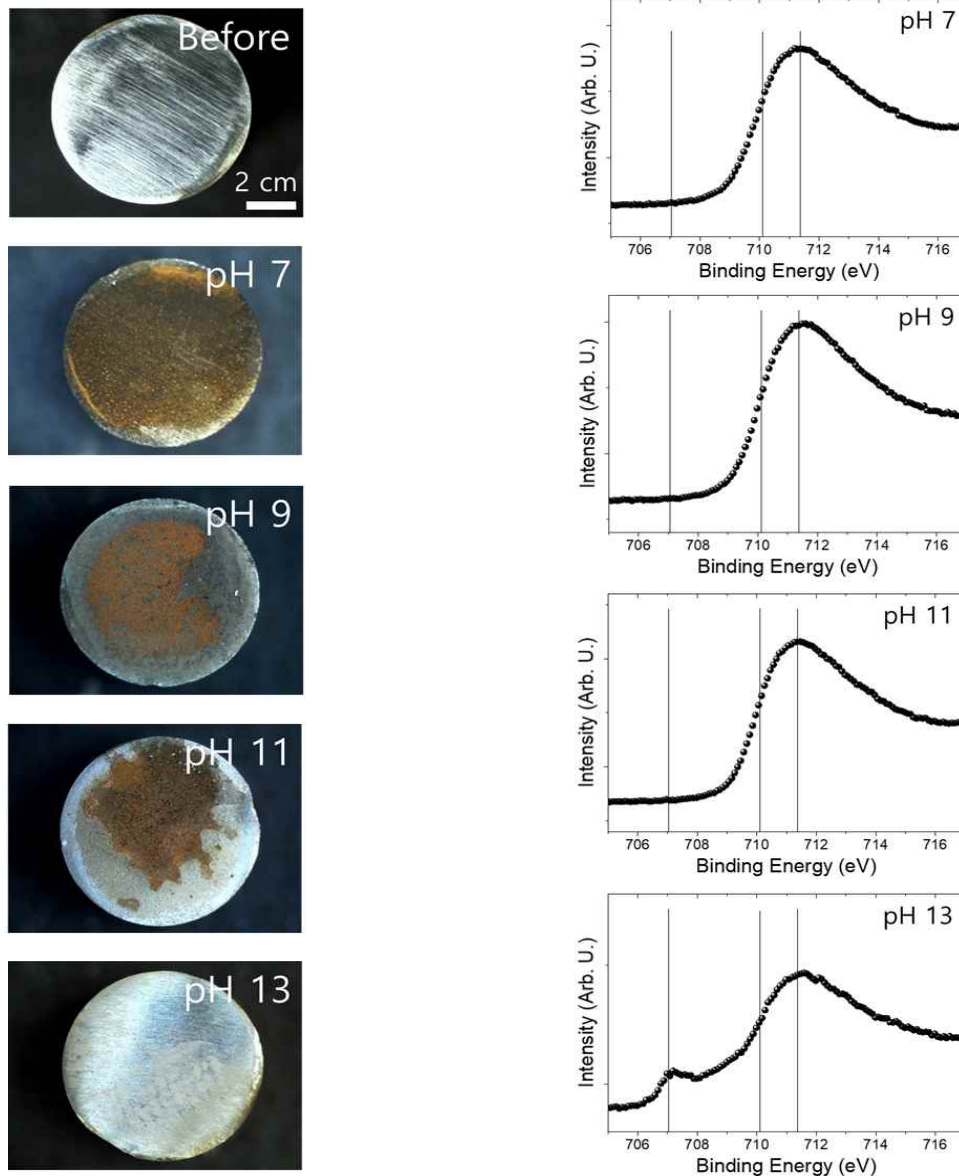
<CaO 첨가를 통한 염수 pH 변화에 따른 한국형 철계 형상기억합금의 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

- 한국형 철계 형상기억합금은 중성의 염수에서 8.73k Ω 의 분극저항(부식저항)을 가지며, pH가 11까지 높아지면서 부식저항이 소폭 증가하며, 콘크리트 환경인 pH 13에서는 부식저항이 크게 증가하여 111.23k Ω 으로 나타남으로써 일반적인 철계 합금의 부식 거동인 알칼리 환경에서의 안정한 부동태 산화 피막층 형성을 통해 부식에 대한 안정성이 증가된다고 볼 수 있음.
- 중성에서 강알칼리성(pH13)으로 변화에 따라 부식저항이 18배 가량 증가하며, 증가량은

SD400 보다 낮지만 더 높은 부식 저항을 보여줌

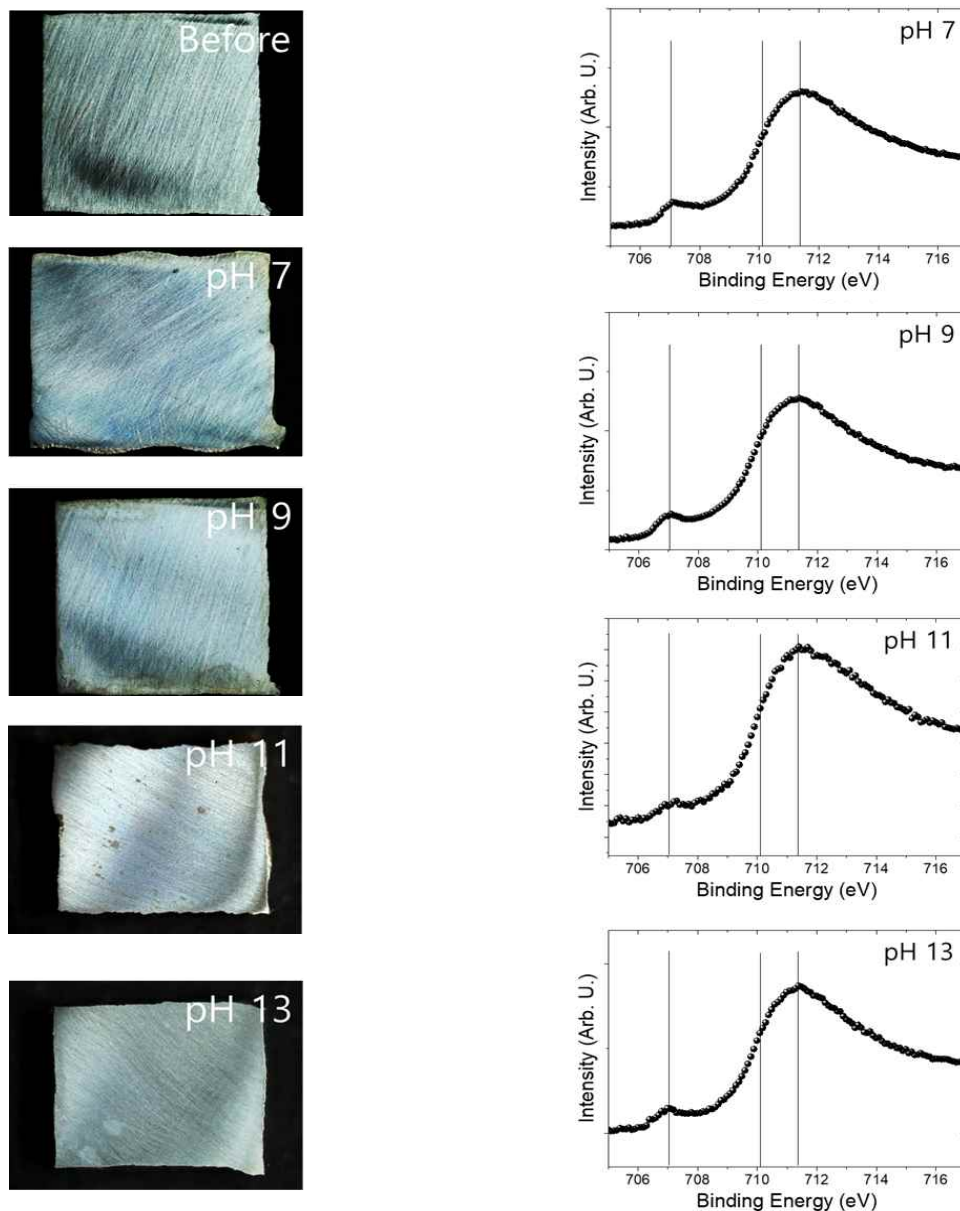
- pH 7 ~ 11의 염수에서 한국형 철계 형상기억합금의 부식저항 값이 SD400 탄소강에 비해 높게 측정되었으며, 콘크리트 환경인 pH 13에서는 개발된 형상기억합금의 **부식저항은 SD400 탄소강에 비해 146% 수준**으로 높음.

- 다양한 pH 조건에서 표면 산화층이 부식저항에 미치는 영향 비교



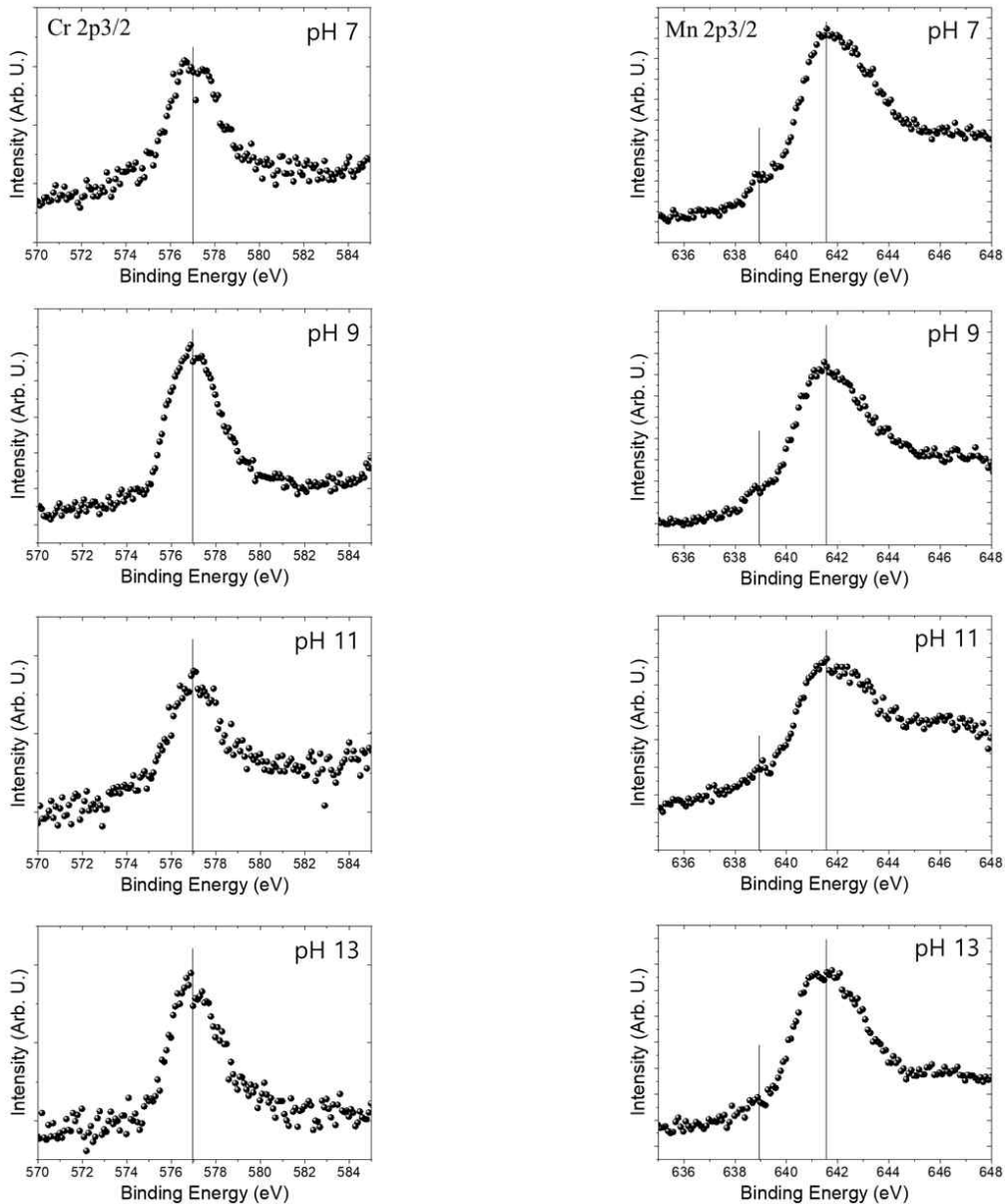
<Cao 첨가를 통한 중류수 pH7, 9, 11, 13에서 하루 침지 후 SD400 탄소강의 표면사진 및 XPS 분석결과>

- pH 7 ~ 11 증류수 조건에서 하루 침지 후 표면에 부식에 의한 녹이 생성되며, pH 13의 증류수에서는 부식에 의한 녹이 생성되지 않음
- pH 7 ~ 11의 증류수 조건에서 하루 침지 한 표면의 XPS 분석 결과 Fe +2가 산화물 및 수산화물이 검출되었으며, pH 13의 조건에서는 얇은 두께의 부동태 산화 피막층의 형성에 의해 Fe가 검출됨
- 강알칼리(pH 13)에서 생성된 부동태 산화 피막층이 부식성 물질에 대한 방어막 역할을 하여 보다 높은 부식저항성을 나타내는 것으로 볼 수 있음



<Cao 첨가를 통한 증류수 pH7, 9, 11, 13에서 하루 침지 후 한국형 철계 형상기억합금의 표면사진 및 XPS 분석결과>

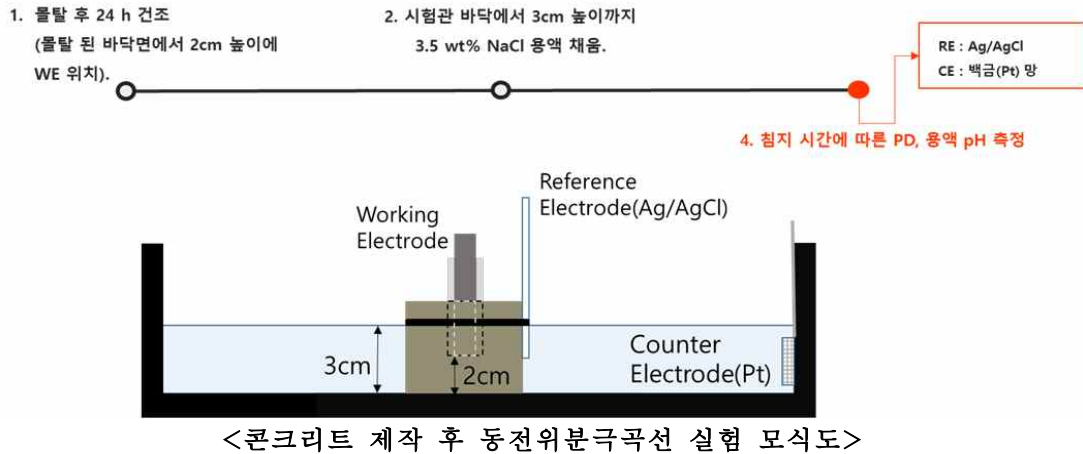
- pH 7 ~ 13 증류수 조건에서 하루 침지 후 표면에 부식에 의한 녹이 생성되지 않으며, Fe가 검출되는 것으로 보아 **SD400 탄소강에 비해 보다 안정적인 부동태 산화 피막층의 형성**을 통해 보다 높은 부식저항을 나타낸다고 볼 수 있음



<Cao 첨가를 통한 증류수 pH7, 9, 11, 13에서 하루 침지 후 한국형 철계 형상기억합금의 표면사진 및 XPS 분석결과>

- SD400 탄소강에 Mn 조성이 낮으며, Cr 포함되지 않아 한국형 철계 형상기억합금에 대해서만 Cr, Mn 대한 XPS 분석을 실시
- pH 7 ~ 13 증류수 조건에서 하루 침지 후 XPS 분석 결과 Cr 산화물과 수산화물이 검출되었으며, Mn과 Mn 산화물 및 수산화물도 검출됨
- Cr, Mn 산화물과 수산화물이 표면 산화층에 포함되어 부동태 효과를 증가시켜 SD400 탄소강에 비해 더 높은 부식저항을 나타낸다고 볼 수 있음

· 콘크리트 제작 후 염수에서의 침지시간에 따른 pH 변화 및 내식성 비교

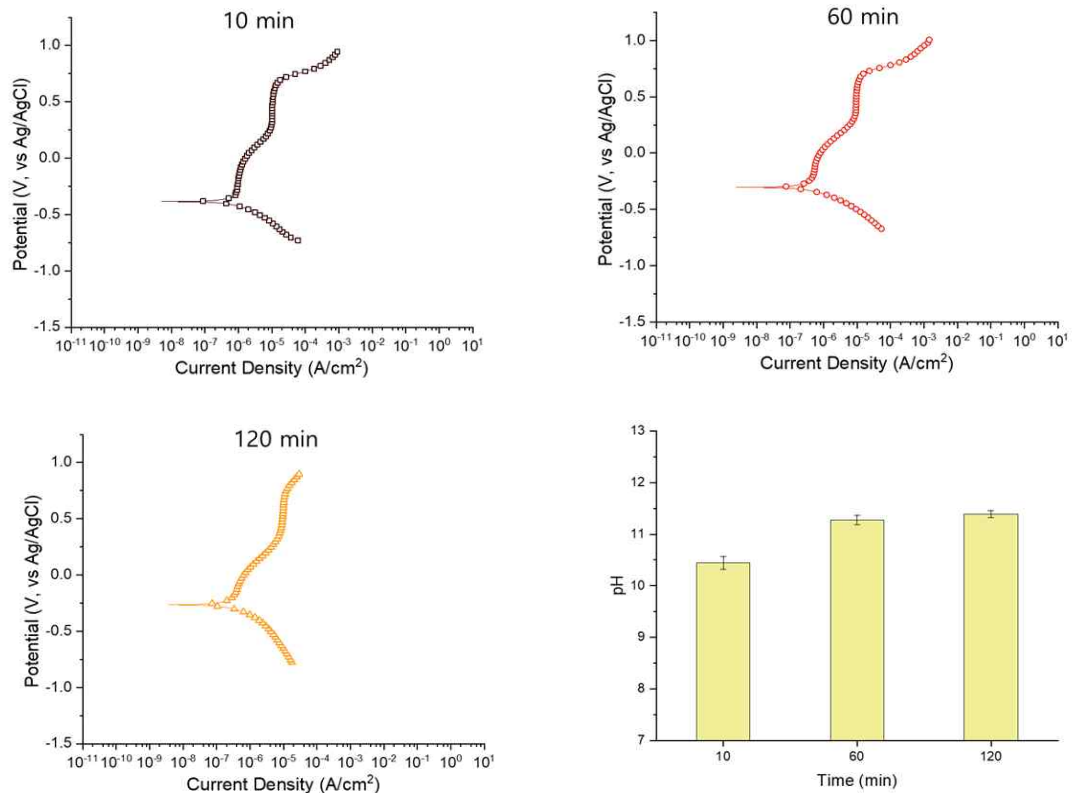


- 수용액에 침지 된 콘크리트는 시멘트에 존재하는 CaO의 수화 반응에 의해 생성 된 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 에 의해 pH가 변화하여 제작 후 침지 시간에 따른 pH 변화 및 부식거동을 확인할 필요가 있음
- 제작 후 염수에서의 침지 시간에 따른 pH 변화 및 부식 거동을 SD400 탄소강과 비교하기 위해 분극곡선 측정 후 Tafel fitting 결과(부식전위(E_{corr}), 부식전류밀도(i_{corr}), 분극저항(R_p))를 아래 표에 나타내었음

<콘크리트 제작 후 단기간 염수 침지에 따른 SD400 탄소강의 pH 변화 및 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

Time	$E_{corr}[V] \text{ vs. Ag/AgCl}$	$I_{corr}[A \text{ cm}^{-2}]$	$R_p [k\Omega]$	pH
10	-0.379	6.52×10^{-7}	72.61	10.44 ± 0.13
60	-0.305	2.27×10^{-7}	154.71	11.27 ± 0.09
120	-0.255	2.15×10^{-7}	267.88	11.39 ± 0.07

※ Reference Electrode: Ag/AgCl



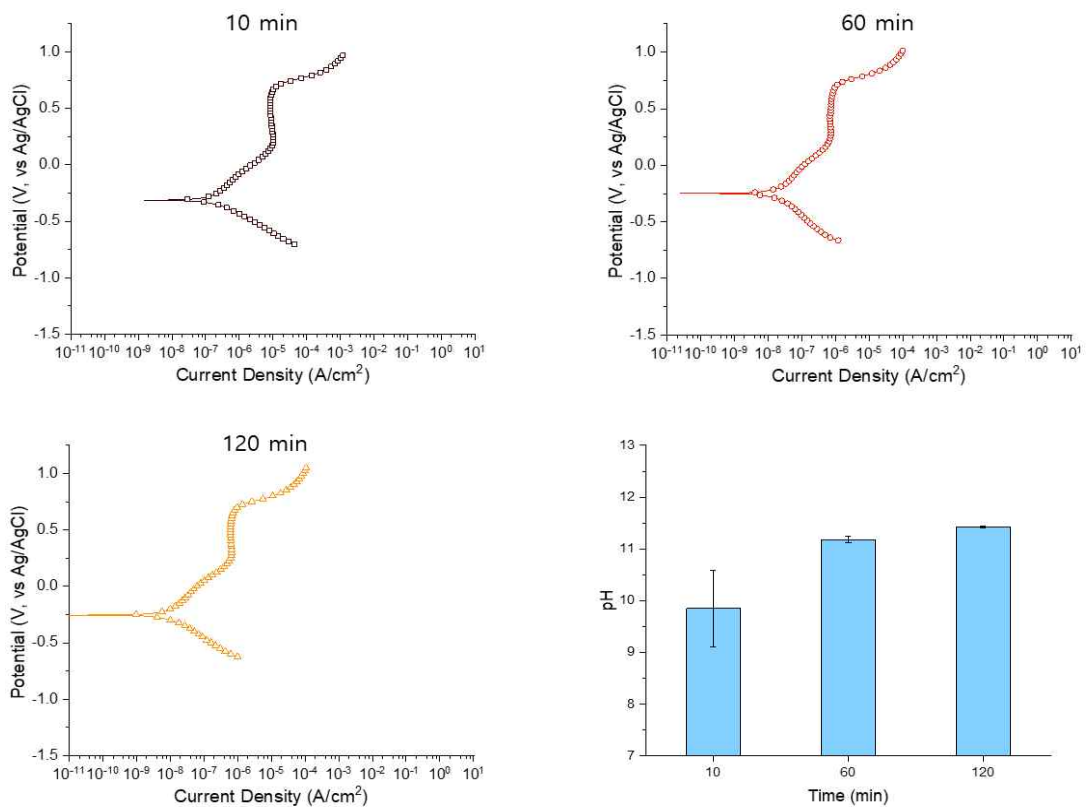
<콘크리트 제작 후 단기간 염수 침지에 따른 SD400 탄소강의 pH 변화 및 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

- 염수에 침지 10분 후 콘크리트로 제작한 SD400 탄소강 외부 용액의 pH는 10.44 ± 0.13 을 나타내며, 침지 120분 후 11.39 ± 0.07 까지 pH가 증가함
- 염수에 침지 10분 후 콘크리트로 제작한 SD400 탄소강의 분극저항(부식저항)은 $72.61 k\Omega$ 을 나타내며, 침지 시간 증가에 따른 pH 증가와 더불어 부식저항이 증가하여 120분 후 $267.88 k\Omega$ 의 부식저항을 나타냄

<콘크리트 제작 후 단기간 염수 침지에 따른 한국형 철계 형상기억합금의 pH 변화 및 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

Time	$E_{\text{corr}}[\text{V}]$ vs. Ag/AgCl	$I_{\text{corr}}[\text{Acm}^{-2}]$	R_p [k Ω]	pH
10	-0.312	1.93×10^{-7}	261.21	9.85 ± 0.74
60	-0.246	2.96×10^{-8}	2107.05	11.18 ± 0.08
120	-0.253	2.88×10^{-8}	2118.18	11.42 ± 0.03

※ Reference Electrode: Ag/AgCl



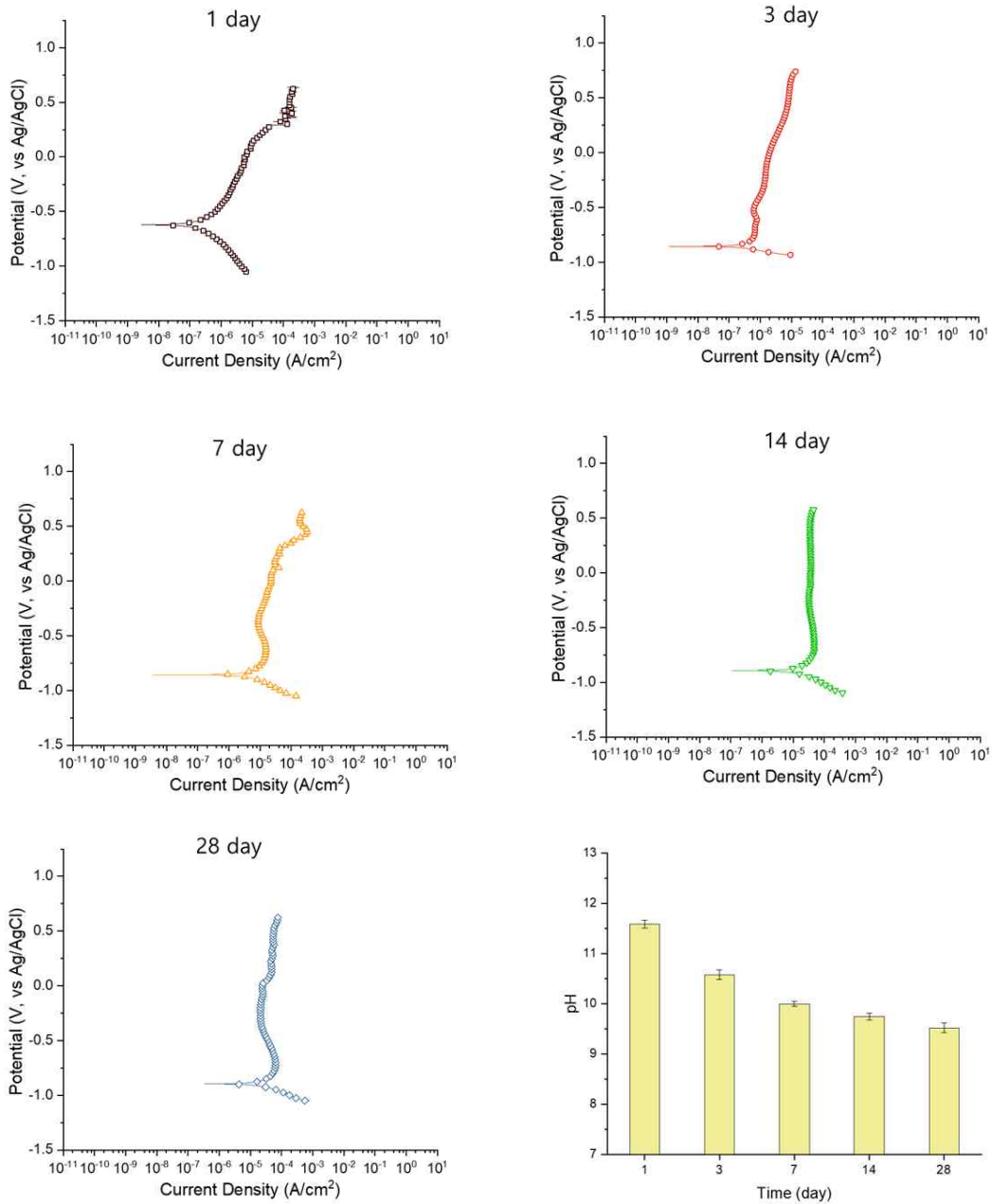
<콘크리트 제작 후 단기간 염수 침지에 따른 한국형 철계 형상기억합금의 pH 변화 및 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

- 염수에 침지 10분 후 콘크리트로 제작한 한국형 철계 형상기억합금의 외부 용액의 pH는 9.85 ± 0.74 을 나타내며, 침지 120분 후 11.42 ± 0.03 까지 pH가 증가함
- 염수에 침지 10분 후 콘크리트로 제작한 한국형 철계 형상기억합금의 분극저항(부식저항)은 261.21k Ω 을 나타내며, 침지 시간 증가에 따른 **pH 증가와 더불어 부식저항이 증가하여 120분 후 2118.18k Ω 의 부식저항을 나타내어 SD400 탄소강에 비해 790% 수준으로 높음**

<콘크리트 제작 후 장기간 염수 침지에 따른 SD400 탄소강의 pH 변화 및 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

Time[day]	E_{corr} [V] vs.Ag/AgCl	I_{corr} [Acm ⁻²]	R_p [k Ω]	pH
1	-0.621	3.25×10^{-7}	227.42	11.58±0.09
3	-0.856	5.23×10^{-7}	47.41	10.58±0.11
7	-0.858	9.21×10^{-6}	6.42	10.01±0.06
14	-0.895	1.29×10^{-5}	4.08	9.74±0.07
28	-0.895	3.74×10^{-5}	1.02	9.52±0.10

※ Reference Electrode: Ag/AgCl



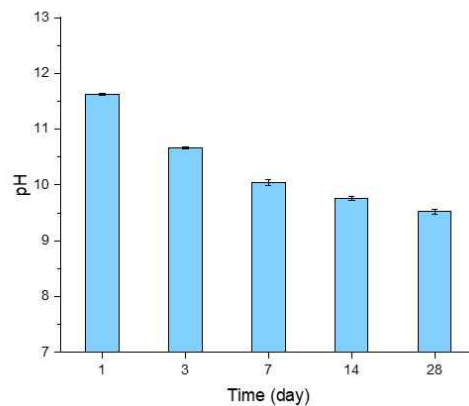
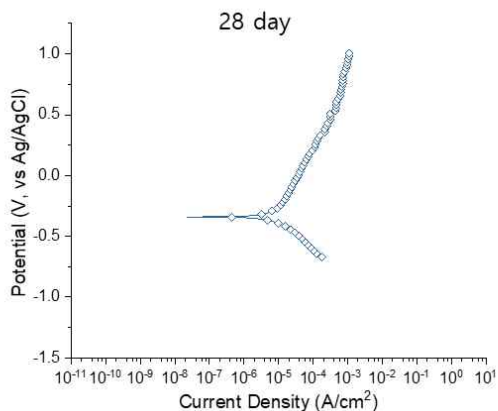
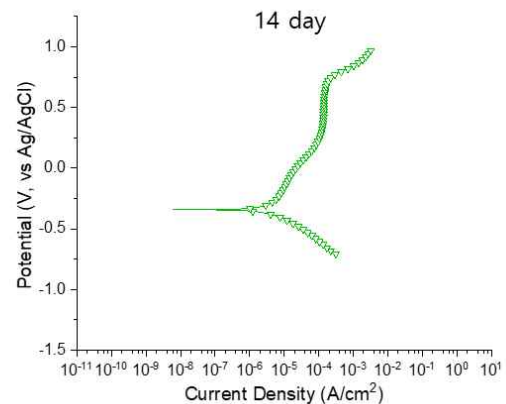
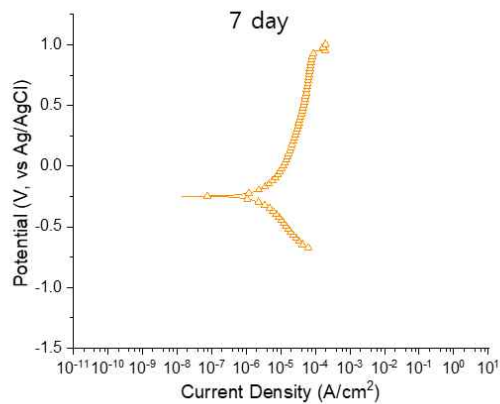
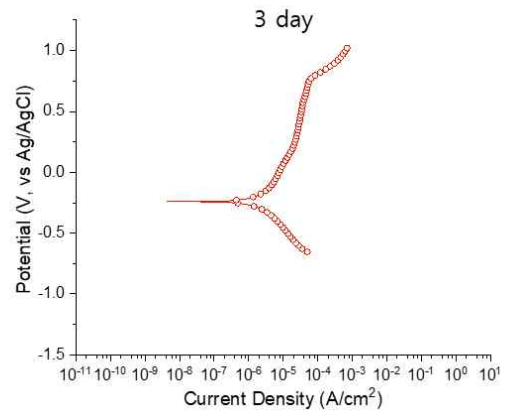
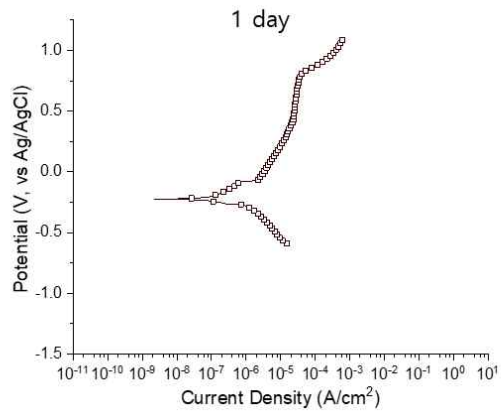
<콘크리트 제작 후 장기간 염수 침지에 따른 SD400 탄소강의 pH 변화 및 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

- 염수에 침지 1일 후 콘크리트로 제작한 SD400 탄소강의 외부 용액의 pH는 11.58 ± 0.09 을 나타내며, 침지 기간이 지남에 따라 pH가 점차 감소하여 28일 후 pH가 9.52 ± 0.10 까지 감소
- 염수에 침지 1일 후 콘크리트로 제작한 SD400 탄소강의 분극저항(부식저항)은 $227.42 \text{ k}\Omega$ 을 나타내며, 침지 시간 증가에 따른 pH 감소와 더불어 부식저항이 감소하여 28일 후 $1.02 \text{ k}\Omega$ 의 부식저항을 나타냄

<콘크리트 제작 후 장기간 염수 침지에 따른 한국형 철계 형상기억합금의 pH 변화 및 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

Time[day]	$E_{\text{corr}}[\text{V}]$ vs.Ag/AgCl	$I_{\text{corr}}[\text{Acm}^{-2}]$	R_p [k Ω]	pH
1	-0.231	2.21×10^{-7}	350.12	11.63±0.02
3	-0.241	1.31×10^{-6}	81.91	10.67±0.02
7	-0.248	3.54×10^{-6}	27.05	10.04±0.05
14	-0.342	4.98×10^{-6}	21.95	9.76±0.03
28	-0.341	6.85×10^{-6}	9.63	9.52±0.04

※ Reference Electrode: Ag/AgCl



<콘크리트 제작 후 장기간 염수 침지에 따른 한국형 철계 형상기억합금의 pH 변화 및 동전위분극곡선 및 Tafel fitting을 통한 결과>

- 염수에 침지 1일 후 콘크리트로 제작한 한국형 철계 형상기억합금의 외부 용액의 pH는 11.63 ± 0.02 을 나타내며, 침지 기간이 지남에 따라 pH가 점차 감소하여 28일 후 pH가 9.52 ± 0.04 까지 감소함
- 염수에 침지 1일 후 콘크리트로 제작한 한국형 철계 형상기억합금의 분극저항(부식 저항)은 $350.12k\Omega$ 을 나타내며, 침지 시간 증가에 따른 pH 감소와 더불어 부식저항이 감소하여 28일 후 $9.63k\Omega$ 을 나타냄
- SD400 탄소강의 경우 염수에 침지 28일 후의 부식저항은 침지 1일 후 부식저항의 ~0.4%에 해당하는 반면, 한국형 철계 형상기억합금은 ~2.8%에 해당하여 한국형 철계 형상기억합금이 SD400 탄소강에 비해 다양한 pH조건에서 부식저항에 대한 민감도가 낮다고 볼 수 있음

(3) 연구수행 결과

- 아래 표에 연구 평가항목 별 목표 성능 및 달성 성능을 나타냄
- 연구수행 결과 모든 목표 성능을 만족하는 우수한 연구성과를 도출함

평가 항목	단위	목표 성능		달성 성능	평가 방법 ³⁾
		1차년도 (2019년)	2차년도 (2020년)		
1. 한국형 철계-형상기억 신합금 개발(항복강도)	MPa	315	440	574	ASTM E8
2. 한국형 철계-형상기억 신합금 개발(탄성계수)	GPa	150	180	195.4	
3. 한국형 철계-형상기억 신합금 개발(회복응력)	%	320	400	424	자체시험 및 결과제시
4. 한국형 철계-형상기억 신합금 개발(극한변형률)	%	20	20	39.02	ASTM E8
5. 한국형 철계-형상기억 신합금 개발(극한강도)	MPa	700	700	1087	
6. 한국형 철계-형상기억 신합금의 부식저항 확보	%	110	120	140	기존 SD400과 비교, 자체시험 및 결과제시
7. 한국형 철계-형상기억 신합금의 콘크리트에서 내식성 확보	%	-	110	790	
8. 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재의 철근 대체 가능성 검토 (항복하중, RC 구조물 대비)	%	-	110% 이상	119.7	자체시험 및 결과제시
9. 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재의 철근 대체 가능성 검토 (극한하중, RC 구조물 대비)	%	-	110% 이상	130.2	자체시험 및 결과제시
10. 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재의 철근 대체 가능성 검토 (피로강도)	MPa	315	-	437	자체시험 및 결과제시
11. 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재의 강연선 대체 가능성 검토 (초기균열하중, RC 구조물 대비)	%	-	120% 이상	246.8	자체시험 및 결과제시
12. 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재의 강연선 대체 가능성 검토 (항복하중, RC 구조물 대비)	%	-	120% 이상	125.3	자체시험 및 결과제시
13. 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재의 강연선 대체 가능성 검토 (극한하중, RC 구조물 대비)	%	-	120% 이상	134.5	자체시험 및 결과제시
14. 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재의 강연선 대체 가능성 검토 (릴랙сей션)	%	-	10% 이하	5.71	자체시험 및 결과제시
15. 전기저항, 유도가열에 의한 철계-형상기억 신합금의 회복응력 발생 메커니즘 규명 (활성화 모델 정확도)	%	80% 이상	-	89.58	자체시험 및 결과제시
16. 극한지 환경에서 철계-형상기억 신합금의 사용성 확보 (극한변형률, 상온대비)	%	-	80% 이상	85.6	자체시험 및 결과제시
17. 극한지 환경에서 철계-형상기억 신합금의 사용성 확보 (활성화 모델, 정확도)	%	-	80% 이상	82.9	자체시험 및 결과제시

나. 연구 개발 성과

본 연구의 주요 기술적 성과는 극한지환경 및 일반환경에서 사용가능한 한국형 철계-형상 기억 신합금을 개발하고, 이를 이용하여 제작된 인장재의 적용성을 평가하는 것임

○ 연성능력 및 부식저항성을 확보한 한국형 철계-형상기억 신합금 개발

- 우수한 역학특성, 연성능력 및 부식저항성을 확보한 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재를 개발함
- 실험결과 한국형 철계-형상기억 신합금은 모든 성과목표를 만족하여 우수한 역학특성을 보이는 것으로 나타남
- 연구결과를 이용하여 ‘형상회복응력 및 기계적 강도가 우수하고 Ti 및 C를 함유하는 철계 형상기억합금 및 이의 제조방법’의 특허 출원 완료(연내 특허등록 가능할 것으로 예상됨)
- 실험성과를 바탕으로 SCI급 학술지 논문투고(2편 게재 완료, 1편 심사 중) 및 학술발표를 통한 기술 홍보 실시

<연성능력 및 부식저항성을 확보한 한국형 철계-형상기억 신합금 개발>

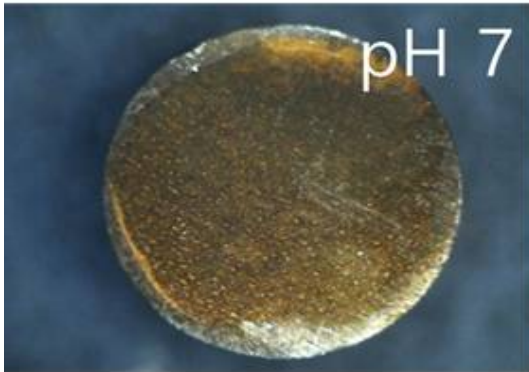
성과지표	성과 목표	성과 달성도	달성 유·무
탄성계수	180GPa	195.4GPa	달성
항복강도	440MPa	574MPa	달성
극한강도	700MPa	1087MPa	달성
극한 변형률	20%	39.092%	달성
회복응력	400MPa	424MPa	달성
회복 변형률	1.5%	1.98%	달성
부식 저항성	SD400대비 110%	140%	달성



<한국형 철계-형상기억 신합금 인장재>

○ 한국형 철계-형상기억 신합금 부식저항 신뢰도 확보

- 부식 저항성 확보를 위한 한국형 철계-형상기억 신합금 소재의 화학조성 및 공정 프로세스의 최적화 방법을 도출
- 실험결과 SD400 탄소강에 비해 우수한 부식저항성 확보 확인(콘크리트 환경에서 SD400 탄소강 대비 790%의 부식저항성)
- 실험성과를 바탕으로 연구재단 등재지 논문(2편 게재완료), SCI급 학술지 논문투고(2편 게재완료) 및 학술발표를 통한 기술 홍보 실시



SD400

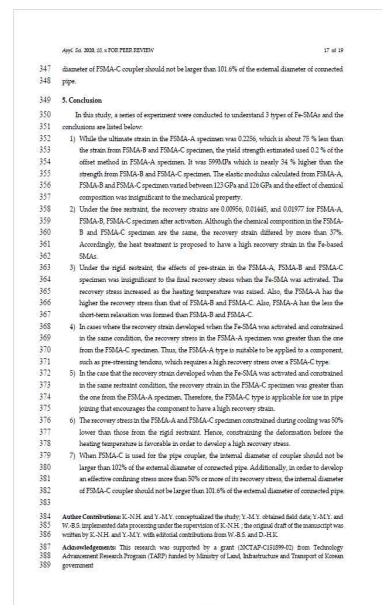
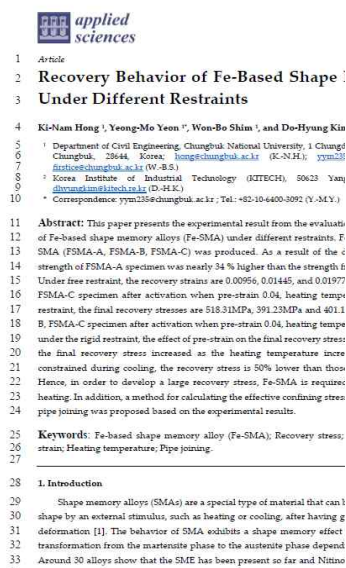


한국형 철계-형상기억 신합금

<pH 7에서 침지 후 표면 부식 상태>

○ 전기저항에 의한 철계-형상기억합금의 회복응력 발생 메커니즘 규명

- 개발된 한국형 철계-형상기억 신합금의 회복응력 실험을 실시하여 사전변형, 회복 온도에 따른 한국형 철계-형상기억 신합금의 회복응력 평가
- 형상기억합금의 폭, 길이, 공급 전류량 등을 변수로 한국형 철계-형상기억합금 활성화를 위한 적정 전류량 산정
- 실험성과를 바탕으로 연구재단 등재지 논문(1편 게재완료), SCI급 학술지 논문투고(1편 게재완료) 및 학술발표를 통한 기술 홍보 실시



○ 철계-형상기억합금의 철근 및 강연선 대체 가능성 검증

- 개발된 한국형 철계-형상기억 신합금의 인장재의 피로성능 검증, 휨 성능 평가, 재긴장 실험, 릴랙세이션 실험 등을 통해 개발된 인장재의 철근 및 강연선 대체 가능성 검증
- 모든 성과지표를 만족하는 우수한 성과를 보이는 것으로 나타남
- 연구결과를 이용하여 ‘철계형상기억합금을 이용한 신설 콘크리트 구조물의 시공공법 및 사용중인 신설 콘크리트 구조물의 균열 및 변형 회복을 위한 변형 회복공법’의 특허 등록 완료(제 10-2115900호)
- 실험성과를 바탕으로 연구재단 등재지 논문(1편 게재완료), SCI급 학술지 논문투고(1편 게재완료) 및 학술발표를 통한 기술 홍보 실시

<연성능력 및 부식저항성을 확보한 한국형 철계-형상기억 신합금 개발>

성과지표	성과 목표	성과 달성도	달성 유·무
초기균열하중	80% 이상 (합금 비활성화시)	126.9%	달성
항복하중	110% 이상 (합금 비활성화시)	119.7%	달성
극한하중	110% 이상 (합금 비활성화시)	130.2%	달성
초기균열하중	120% 이상 (합금 활성화시)	246.8%	달성
항복하중	120% 이상 (합금 활성화시)	125.3%	달성
극한하중	120% 이상 (합금 활성화시)	134.5%	달성
재활성화시 극한강도	80% 이상 (초기 극한하중 대비)	98.2%	달성
피로강도	315MPa 이상	437MPa	달성
릴랙세이션	10% 이하	5.71%	달성

○ 극한지 환경에서 한국형 철계-형상기억 신합금의 사용성 확보

- 개발된 한국형 철계-형상기억 신합금의 인장재의 극한지 환경에서 사용성 검토를 위해 영하 60℃ 온도조건에서 한국형 철계-형상기억 신합금의 기계적 특성을 평가
- 실험결과 저온온도 조건에서 한국형 철계-형상기억 신합금의 초기(항복이전) 기계적 특성은 상온에서와 유사한 결과를 보임
- 또한 저온온도 조건에서 한국형 철계-형상기억 신합금의 극한 변형률은 상온대비 85.6% 수준으로 연구 목표를 만족하는 결과를 나타냄
- 극한지 환경에서 회복능력 발생 유·무, 및 회복능력 특성 규명을 위한 실험결과 제안된 모델과 실험결과와는 약 82.9%의 정확도를 보임

○ 논문게제 성과

SCI(E)급 게제 완료 논문

1. Dohyung Kim, Taehwan Kim, Kyeongsik Ha, Jeong-Jung Oak, Jong Bae Jeon, Yongho Park, and Wookjin Lee, *Effect of Heat Treatment Condition on Microstructural and Mechanical Anisotropies of Selective Laser Melted Maraging 18Ni-300 Steel*, Metals, 10 (2020) 410, SCI
2. Dohyoung Kim, Yonghwan Kim, Jeong-Jung Oak, Junghoon Lee, Chan Hee Park, Wookjin Lee, and Yongho Park, *Effect of Ni, C and Ti Addition on Shape Recovery Behavior and the Mechanical Properties of Fe-17Mn-5Si-5Cr Shape Memory Alloys*, Korean J. Met. Mater, Vol. 58, No. 10 (2020) pp.660-671. SCI
3. Kinam Hong, Yeongmo Yeon, Wonbo Shim, Dohyung Kim, *Recovery Behavior of Fe-Based Shape Memory Alloy Under Different Restraints*, applied sciences, Vol. 10, No. 10 (2020). SCI(E)
4. Kinam Hong, Yeongmo Yeon, Wonbo Shim, Sangwon Ji, *Fatigue Characteristic of Fe-based Shape Memory Alloy*, applied sciences, Vol. 10, No. 17 (2020). SCI(E)
5. Jaehoon Joo, Minjoo Kang, Dongmin Shin, Eunhye Seo, Dohyung Kim, Yeongmo Yeon, Kinam Hong, Wookjin Lee and Junghoon Lee, *Corrosion Resistance of Shape Recoverable Fe-17Mn-5Si-5Cr Alloy in Concrete Structure*, Materials Vol.13 (2020) pp.5531-5542, SCI
6. Dohyung Kim, Kinam Hong, Jeessoo Sim, Junghoon Lee, Wookjin Lee, *Shape memory and mechanical properties of cold rolled and annealed Fe-17Mn-5Si-5Cr-4Ni-1Ti-0.3C alloy*, Materials Vol.14 (2021) pp.255-266. SCI

SCI(E)급 심사 중 논문

1. Dohyung Kim, Chanhee Park, Junghoon Lee, Kinam Hong, Yongho Park, Wookjin Lee, *Microstructure, shape memory behavior and mechanical properties of hot-rolled Fe-17Mn-5Si-5Cr-4Ni-0.3C-1Ti shape memory alloy*, Eng. Struct. (심사중), SCI

연구재단 등재지 게제 완료 논문

1. 주재훈, 이현준, 김도형, 이욱진, 이정훈, *콘크리트 보강재용 Fe-Mn-Si-Ni-Cr-Ti계 형상기억합금의 내식성*, 한국표면공학회지 (2019), 연구재단등재지

2. 연영모, 홍기남, 심원보, *흡입 철계-형상기억합금 스트립으로 보강된 RC보의 장기거동*, 한국복합신소재구조학회, Vol. 11, No.1, pp. 11-17 (2020), 연구재단등재지
3. 연영모, 홍기남, 지상원, *철계-형상기억합금 바로 제작된 콘크리트 보의 휨 거동*, 한국구조물진단유지관리공학회, Vol. 24, No.6, pp. 67-76 (2020), 연구재단등재지
4. 지상원, 연영모, 홍기남, *철계-형상기억합금 나선철근으로 횡구속된 콘크리트의 압축거동*, 한국복합신소재구조학회, Vol. 11, No.6, pp. 63-70 (2020), 연구재단등재지
5. 조현빈, 신동민, 서은혜, 이육진, 이정훈, *콘크리트의 소수성 표면처리를 통한 철강 보강재의 내식성 향상*, 한국표면공학회지, Vol. 53, No. 6, pp. 300-305 (2020), 연구재단등재지

○ 특허 성과

출원

- 형상회복능력 및 기계적 강도가 우수하고 Ti 및 C를 함유하는 철계 형상기억합금 및 이의 제조방법, 출원번호 10-2019-0128796, 출원일자 2019.10.17.

등록

- 철계형상기억합금을 이용한 실설 콘크리트 구조물의 시공공법 및 사용중인 신설 콘크리트 구조물의 균열 및 변형 회복을 위한 변형 회복공법, 등록번호 10-2115900, 등록일자 2020.05.21.

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 연구 목표 및 목표 달성도

(1) 1차 연도

구분	연구목표	주요결과	달성도	가중치	점수
충북대 학교 산학 협력단	한국형 철계-형상기억 신합금을 콘크리트 구조물 인장재로 사용하기 위한 신합금 기초물성 확보	목표 역학특성(항복강 도, 회복응력, 탄성계수) 달성, 철근대비 높은 극 한 변형률 달성	100%	0.09	9
	전기가열에 의한 한국형 철계-형상기억 신합금의 회복응력 발생 메커니즘 규명	정확도 89.1%를 갖는 한국형 철계-형상기억 신합금 활성화 모델 제 안 완료	100%	0.08	8
	한국형 철계-형상기억 신합금의 피로특성 평가	일반강재대비 높은 피로 특성(437MPa) 달성	100%	0.06	6
한국 생산기 술연구 원	한국형 철계-형상기억 신합금 설계 및 최적조성 탐색	6개 합금배치 제작 및 합금조성에 따른 상세분석 완료	100%	0.06	6
	토목구조물 적용시험을 위한 수십 Kg 이상 Batch급 신합금계 선정 및 제작지원	Ti가 함유된 배치합금 조성표 제시 및 100 Kg급 시제품 제작, strip 확보	100%	0.06	6
	후보합금계 소재특성 분석 및 열처리 조건 선정	열처리에 따른 미세조직 및 회복변형률, 인장특성 분석 완료	100%	0.02	2
부경대 학교 산학 협력단	신합금계 형상기억합금의 콘크리트에서 부식저항성 분석	1차년도 확정 신합금계의 콘크리트 내에서 부식저항 분석 및 기존소재(SD400)과 비교해 부식저항 110% 달성 여부	100%	0.04	4
	신합금계 형상기억합금의 콘크리트에서 화학적 안정성 분석	1차년도 확정 신합금계의 콘크리트 내에서 안정적이 부동태 산화피막의 형성 여부	100%	0.04	4

(2) 2차 연도

구분	연구목표	주요결과	달성도	가중치	점수
충북대 학교 산학 협력단	한국형 철계-형상기억 신합금 인장재의 철근 및 강연선 대체 가능성 검증	휨 실험결과 한국형 철계-형상기억 신합금 인장재 활성화 유·무 모두에서 일반 SD400 철근으로 제작된 RC보에 비해 목표 수준의 우수한 역학성능 확보	100%	0.17	17
	한국형 철계-형상기억 신합금의 재긴장 가능성 검증	초기 극한하중 대비 98.2% 수준으로 재긴장 가능	100%	0.04	4
	극한지 환경에서 철계-형상기억 신합금의 사용성 확보	극저온 온도에서 한국형 철계-형상기억 신합금의 극한변형률은 상온대비 85% 수준 확보	100%	0.08	8
한국 생산기 술연구 원	신합금계 형상기억합금 batch급 (수십 kg)제작지원	각형 시제품 200 Kg 제작 및 가공 완료	100%	0.08	8
	신합금계 형상기억합금 봉형 및 판형 소재특성 분석	냉간가공 및 폴림열처리 최적조건 선정, 항복강도 574 MPa 달성, 회복응력 478.68 MPa 달성	100%	0.08	8
부경대 학교 산학 협력단	신합금계 형상기억합금의 콘크리트에서 부식저항성 분석	1차년도 확정 신합금계의 콘크리트 내에서 부식저항 분석 및 기존소재(SD400)과 비교해 부식저항 110% 달성 여부	100%	0.04	4
	신합금계 형상기억합금의 콘크리트에서 화학적 안정성 분석	1차년도 확정 신합금계의 콘크리트 내에서 안정적이 부동태 산화피막의 형성 여부	100%	0.06	6
합계				1	100

나. 관련 분야 기여도

○ 학문적 기여도

- 한국형 철계-형상기억 신합금 개발 및 이를 이용하여 제작된 인장재의 사용성 검토를 목표로 연구를 수행
- 본 연구를 통해 철계-형상기억 신합금을 개발하였으며 이를 이용하여 국내·외 논문발표(SCI(E)급 논문 6편 게재완료, 1편 심사중, 연구재단등재지 논문 5편 게재 완료)를 및 학술발표를 통한 새로운 재료 및 공법에 대한 질적수준 향상
- 본 연구에서 수행된 연구결과는 박사급 인력(2명), 석사급 인력(1명)의 졸업논문 주제로 사용 예정
- 세미나 개최를 통한 국내 관련 연구진 질적수준 향상
- 2020.11.03.일 콘크리트학회 특별세션 “철계형상기억합금의 건설분야 적용” 개최를 통한 기술홍보



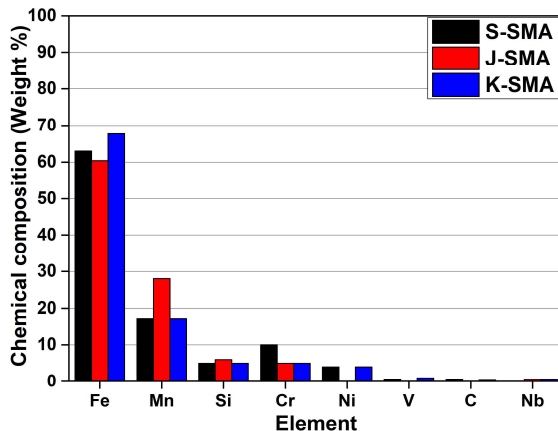
<학술 세미나 개최, 2020.08.13.>



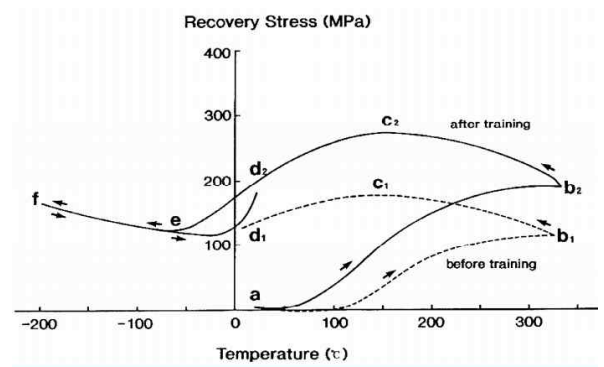
<콘크리트 학회 특별세션 개최, 2020.11.03.>

○ 경제적 기여도

- 향후 철계-형상기억합금을 국내 산업계에서 사용시 용이하게 합금을 사용 가능
- Ni-Ti 합금 판재와 와이어는 상업적 대량생산을 함에도 불구하고 30,000,000원/t 이상의 가격이 형성되어 있음
- 본 연구를 통해 개발된 한국형 철계-형상기억합금의 원소재 가격은 1,500,000원/t 이하 수준으로 충분한 가격 경쟁력을 확보할 수 있음
- 본 연구를 통해 개발된 한국형 철계-형상기억합금은 아래 그래프에 나타난 것과 같이 값이 가장 저렴한 Fe 원소의 비율이 가장 높아 원소재 가격이 가장 저렴함
- 특히 원소재가격이 상대적으로 높은 Cr 원소의 경우 한국형 철계-형상기억합금은 스위스 철계-형상기억합금의 절반만 투입하여 원소재 가격 경쟁력이 우수
- 일본 형상기억합금의 경우 소정의 회복응력을 발휘하기 위해 Training 공정이 필요하여, 추가 공정이 필요
- 반면 본 연구를 통해 개발된 한국형 철계-형상기억합금은 추가적인 Training 공정이 없어 재료 제작시 우수한 경제성 확보



<국가별 Fe-SMA의 성분비율>

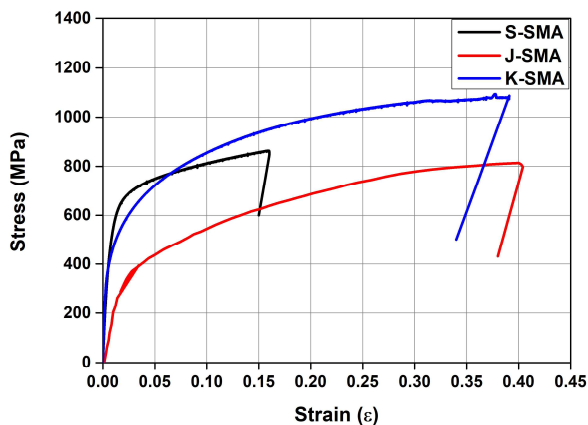


<일제 철계-형상기억합금 Trainig 공정 전·후 회복응력>

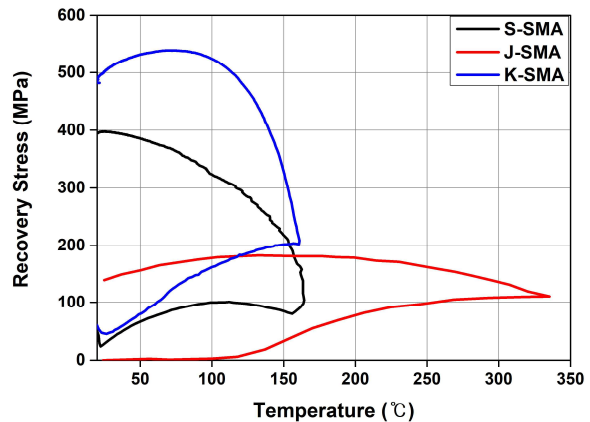
- 해외 소재기업과의 언어장벽 및 수출입에 걸리는 시간, 비용 등의 애로점을 개선
- 향후 국내 생산기술 확보를 통한 일자리 창출
- 프리스트레스 공법의 단점을 해결하고 공정의 단순화로 인한 공기 단축 및 인건비 감소 예상
- 향후 원천기술의 기술이전을 통한 경제성 확보 가능
- 한국형 철계-형상기억 신합금의 회복응력 효과를 통한 프리스트레스 도입으로 구조 부재 경량화 및 운송비용 감소
- 릴랙세이션, 극한지 적설하중, 반복하중 등에 의한 구조물 손상시 재긴장이 가능하여 구조물의 사용수명이 대폭 증가함에 따라 구조물 유지·관리 비용 감소
- 새로운 패러다임의 시공방법, 건설재료 등에 대한 사업화, 기술이전 등을 통한 일자리 창출

○ 기술적 기여도

- 극한지에서 사용되고 있는 강재, 강연선의 취성특성, 부식특성 등을 개선한 새로운 개념에 금속재료 및 이를 이용한 인장재 개발
- 본 연구에서 개발된 연구성과를 통해 한국형 철계-형상기억 신합금 제작방법, 신설 구조물에 적용하기 위한 공법 등의 지식재산권 확보
- 한국형 철계-형상기억 신합금 국내 제작기술 확보
- 철계-형상기억 신합금의 부식성 평가를 통해 건설용 콘크리트 보강재로 활용될 때 그 사용과정에서 기존 철강 소재보다 더욱 내식성이 높다는 인식에 도움을 줌으로써 내구성에 대한 우려 저감
- 기 개발된 철계-형상기억 신합금은 기존 스위스, 일본에서 개발된 철계-형상기억합금에 비해 추가 열처리 과정 없이 높은 극한강도, 극한 변형률을 확보
- 아래 그림에 나타난 것과 같이 동일한 조건(사전변형 4%, 가열온도 160℃)에서 한국형 철계-형상기억 신합금의 회복응력은 478MPa로 스위스 철계-형상기억합금(398MPa)보다 80MPa가량 높은 회복응력을 보이며, 일본 철계-형상기억합금보다 낮은 가열온도(일본 340℃)에서도 200MPa 이상 높은 회복응력을 보이는 우수한 회복응력 확보



<국가별 Fe-SMA의 응력-변형률 관계 비교>



<국가별 Fe-SMA의 온도-회복응력 관계 비교>

다. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

- 본 연구의 질적 목표는 모두 달성 완료함
- 본 연구의 양적 목표는 특허 출원 2건, 특허 등록 1건, SCI(E)급 논문 7편, 연구재단 등재지 5편임
- 현재 특허 출원 2건, 1건 등록 완료하였으며, 출원 중인 특허 1건도 등록될 예정임
- SCI(E)급 논문 7편 중 6편을 게재완료 하였으며, 연구재단 등재지는 5편 모두 게재 완료함
- 양적 목표 중 SCI(E)급 논문 1편의 양적 성과가 미달성 되었으나, 현재 투고를 완료 하여 심사 중에 있으며 가능한 신속히 게재 가능하도록 조치하겠음

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

○ 활용 계획

- 극한지 구조물 급속시공 시 구조부재 경량화 및 운송비용 절감을 목적으로 한국형 철계-형상기억 신합금의 프리스트레스 효과가 도입된 구조부재 제작
 - 국내·외 건설재료로써 철근, 강연선을 대체할 새로운 패러다임의 인장재로 활용
 - 한국형 철계-형상기억 신합금으로 제작된 인장재는 외부프리스트레스 보강공법, 표면매립보강공법 등의 구조물 보강공법을 대체할 새로운 개념의 구조물 보강공법으로 활용 가능
 - 개발된 한국형 철계-형상기억 신합금을 이용하여 구조물의 인장재뿐 아니라 관거 접합, 댐퍼, 보-기둥 접합부 등 다양한 건설분야에 이용 가능 할 것으로 기대됨
 - 철계-형상기억 신합금을 실용화하기 위한 정책, 제도, 관련법령 제정시 기초 데이터로 활용 가능함
 - 본 연구는 국내 최초로 철계-형상기억 신합금을 RC구조물, PSC 구조물에 적용하기 위한 연구로써 이후 실용화 연구 완료시 시공방법, 재료에 대한 신기술 확보가 가능할 것으로 판단됨
 - 연구결과를 토대로 실제 구조물에 적용하여, 연구결과에 대한 재평가 및 개선방향 제시
 - 본 과제로 개발된 한국형 철계-형상기억 신합금은 높은 형상복원률과 상당한 기계적 강도, 대량생산 용이, 저렴한 원소재 및 공정 비용등의 장점이 있으며 본 과제에서 활용된 콘크리트 프리스트레스 목적 이외에도 다음과 같은 분야에서 추후 활용될 수 있을 것으로 예상됨
- **건축 및 토목구조물 보수·보강 공법**
 - **구속콘크리트 제작 및 이를 이용한 구조물 내진성능 향상**
 - **철도 레일의 커플러용 기능성 구조물**
 - **파이프 플랜지 커플러용 기능성 구조물**
 - **내진합금 구조체**
 - **자기조립 구조체**
 - **기타 4D 프린팅 등 신산업분야**
- 본 과제에 활용된 콘크리트 내부에서 보강재로 활용되는 철강 구조물의 내식성을 평가하는 방법을 통하여 다양한 환경 변화 및 사용 과정에서 내부 금속 보강재의 수명 및 안정성에 대한 기초 성능 평가가 가능할 것이며, 추후 건설용 콘크리트 보강용 신합금 개발시에 그 안정성과 내식성을 판단하는데 활용될 수 있을 것으로 보임

○ 추가연구의 필요성

- 본 연구를 통해 한국형 철계-형상기억합금 제조방법 및 이를 이용한 시공기술에 대한 원천기술을 확보함
- 전술한 바와 같이 개발된 한국형 철계-형상기억합금은 건설재료 중 구조부재료의 직접 사용 뿐 아니라 표면부착 보강재, 홈삽입 보강재, 커플러, 횡구속철근, 이음판 등 건설분야에 다양한 분야에 활용 가능할 것으로 예상됨
- 그러나 철계-형상기억합금을 구조부재에 직접 적용하기 위해 여러 가지 추가 연구가 필요한 실정임
- 현재 한국형 철계-형상기억합금은 1 batch 당 500kg 정도로 소량 주문제작이 가능한 수준이며 향후 연구를 통해 대량생산 공정의 개발 및 합금 성능 최적화를 위한 추가 연구가 필요할 것으로 사료됨
- 또한 Plate 형태 뿐 아니라 bar 형태, Strip 형태, 와이어 형태 등 다양한 형태의 철계-형상기억합금 대량생산을 위한 추가연구개발이 필요할 것으로 사료됨
- 실제 스위스에서는 연구개발 기간 5년 이상, 연구개발비용 수십억을 투자하여 1 batch 당 40t 이상의 철계-형상기억합금을 다양한 형태로 제작이 가능한 수준이며, 철계-형상기억합금을 실 구조부재에 적용 및 사업화에 성공하여 수익을 창출하고 있음
- 본 연구는 기초원천연구로써 연구개발을 내용은 TRL 4단계 수준의 실험실에서의 성능 평가 수준까지 완료하였으나, 철계-형상기억합금을 구조부재에 적용하기 위해 실대형 구조물 성능 평가, 구조물 시험시공 및 장기성능 평가가 추가적으로 필요할 것으로 사료됨
- 전술한 연구가 완료되면 철계-형상기억합금 인장재가 적용된 구조물의 구조설계 기술 및 설계지침이 개발 가능할 것으로 사료되며 이후 본 연구를 통해 개발된 철계-형상기억합금의 건설부재료로서의 적용이 가능할 것으로 판단됨



<다양한 형태의 철계-형상기억합금 대량생산 공정, 스위스 Re-far>

붙임. 참고문헌

1. Lee, W. J.; Weber, B.; Leinenbach, C. Recovery stress formation in a restrained Fe-Mn-Si-based shape memory alloy used for prestressing or mechanical joining. *Construction and Building Materials*, 2015, 95, (1), 600-610.
2. Leinenbach, C.; Kramer, H.; Bernhard, C.; Eifler, D. Thermo-mechanical properties of an Fe-Mn-Si-Cr-Ni-VC shape memory alloy with low transformation temperature. *Advanced Engineering Materials*, 2012, 14(1-2), 62-67.
3. Kim, H. Pullout behavior of shape memory alloy fiber embedded in mortar matrices. M. S. Thesis, Sejong University, Seoul, Korea, 2015.
4. Hartl, D. j.; Mabe, J. H.; Benafan, O.; Coda, A.; Padan, R.; Van Doren, B. Standardization of shape memory alloy test methods toward certification of aerospace applications. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24, (8).
5. Park, N. J.; Park, S. B.; Cheong, C. C. Vibration and position tracking control of a smart structure using SMA actuators. *Journal of the Korean Society of precision Engineering*, 1996, 13, (8), 155-163.
6. Janke, L.; Czaderski, C.; Motavalli, M.; Ruth, J. Applications of shape memory alloys in civil engineering structures—Overview, limits and new ideas. *Materials and Structures*, 2005, 38, 578-592.
7. Czaderski, C.; Shahverdi, M.; Bronnimann, R.; Leinenbach, C.; Motavalli, M. Feasibility of iron-based shape memory alloy strips for prestressed strengthening of concrete structures. *Construction and Building Materials*, 2014, 56, (15), 94-105.
8. Sato, A.; Chishima, E.; Soma, K.; Mori, T. Shape memory effect in $\gamma \rightleftharpoons \epsilon$ transformation in Fe-30Mn-1Si alloy single crystals. *Acta Metallurgica*, 1982, 30, (6), 1177-1183.
9. Kajiwar, S.; Liu, D.; Kikuchi, T.; Shinya, N. Remarkable improvement of shape memory effect in Fe-Mn-Si based shape memory alloys by producing NbC precipitates. *Scripta Materialia*, 2001, 44(12), 2809-2814.
10. Shahverdi, M.; Czaderski, C.; Motavalli, M. Iron-based shape memory alloys for prestressed near-surface mounted strengthening of reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 2016, 112(1), 28-38.
11. Maruyama, T.; Kurita, T.; Kozaki, S.; Andou, K.; Farjami, S.; Kubo H. Innovation in producing crane rail fishplate using Fe-Mn-Si-Cr based shape memory alloy. *Materials Science and Technology*, 2008, 24, 908-912.
12. Michels, J.; Shahverdi, M.; Czaderski, C.; El-Hacha, R. Mechanical Performance of Iron-Based Shape-Memory Alloy Ribbed Bars for Concrete Prestressing. *ACI materials journal*, 2018, 115, (6), 877-886.
13. Rojob, H.; El-Hacha, R. Self-prestressing using iron-based shape memory alloy for flexural strengthening of reinforced concrete beams. *ACI Structural journal*, 2015, 114, (2), 523-532.
14. Hong, K.; Lee, S.; Han, S.; Yeon, Y. Evaluation of Fe-Based Shape Memory Alloy

- (Fe-SMA) as Strengthening Material for Reinforced Concrete Structures. *Applied sciences*, 2018, 8, (5).
15. ASTM A370-19e1, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
 16. Jee, K. K.; Han, J. H.; Jung, W. S.; Jang, W. Y. Suggestion of Pipe Coupling Method for Maximum and Uniform Joining Stress. *Materials transactions*, 2006, 47, (3), 750–752.
 17. Kim, Y. S.; Choi, E.; Kim, W. J. Characterization of the microstructures and the shape memory properties of the Fe-Mn-Si-Cr-Ni-C shape memory alloy after severe plastic deformation by differential speed rolling and subsequent annealing. *Materials Characterization*, 2017, 136, 12–19.
 18. Han, Y.; Shi, J.; Xu, L.; Cao, W.; Dong, H. TiC precipitation induced effect on microstructure and mechanical properties in low carbon medium manganese steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, 530, 643–651.
 19. Wang, G.; Peng, H.; Sun, P.; Wang, S.; Wen, Y. Effect of titanium addition on shape memory effect and recovery stress of training-free cast Fe-Mn-Si-Cr-Ni shape memory alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 657, 339–346.
 20. Shahverdi, M.; Michels, J.; Czaderski, C.; Motavalli, M. Iron-based shape memory alloy strips for strengthening RC members: Material behavior and characterization. *Construction and Building Materials*, 2018, 173, (10), 586–599.
 21. Wen, Y. H.; Yan, M.; Li, N. Effects of carbon addition and aging on the shape memory effect of Fe-Mn-Si-Cr-Ni alloys. *Scripta Materialia*, 2004, 50, (4), 441–444.
 22. Park, S. J.; Yim, H. J.; Kwak, H. G. Evaluation of microcracks in thermal damaged concrete using nonlinear ultrasonic modulation technique. *Journal of Korea Concrete Institute*, 2012, 24, (6), 651–658.
 23. Hosseini, E.; Ghafoori, E.; Leinenbach, C.; Motavalli, M.; Holdsworth, R. Stress recovery and cyclic behavior of an Fe-Mn-Si shape memory alloy after multiple thermal activation. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27, (2).

주 의

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