20CTAP
-C152012
-02

보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( )발간등록번호()
국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

R&D / 20CTAP-C152012-02

1일 이내 급속시공 가능한 유도가열기반의 환경 대응형 콘크리트 양생 핵심기술 개발 최종보고서

2021. 2. 15.

주관연구기관 / 충남대학교 산학협력단
공동연구기관 / 한국기술교육대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

1일 이내 급속시공 가능한 유도가열 기반의 환경 대응형 콘크리트 양생 핵심기술 개발
최종보고서
2020
국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'1일 이내 급속시공 가능한 유도가열기반의 환경 대응형 콘크리트 양생 핵심기술 개발'(연구개발 기간 : 2019. 4. 15 ~ 2020. 12. 31) 과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

2021. 2. 15.

주관연구기관명 : 충남대학교 산학협력단 (대표자) 손 영 아 (인)

공동연구기관명 : 한국기술교육대학교 산학협력단 (대표자) 민 준 기 (인)

주관연구기관책임자: 신 현 오

공동연구기관책임자: 백 제 훈

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>20CTAP-C152012-02</td><td>해당 단계 연구 기간</td><td>2020.1.1. ~2020.12.31.</td><td>단계구분</td><td>(2단계)/(2단계)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">국토교통기술촉진연구 사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">1일 이내 급속시공 가능한 유도가열기반의 환경 대응형 콘크리트 양생 핵심기술 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">신현오</td><td>해당단계 참여연구원 수</td><td>총: 10명
내부: 10명
외부: 0명</td><td>해당단계 연구비</td><td>정부: 200,000천원
민간: 천원
정부외: 천원
상대국: 천원
계: 200,000천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간 참여연구원 수</td><td>총: 14명
내부: 14명
외부: 0명</td><td>총 연구비</td><td>정부: 360,000천원
민간: 천원
정부외: 천원
상대국: 천원
계: 360,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및 소속 부서명</td><td colspan="3">충남대학교 산학협력단
한국기술교육대학교 산학협력단</td><td colspan="2">참여기업명</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명:</td><td colspan="2">상대국 연구기관명:</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명:</td><td colspan="2">연구책임자:</td></tr>
<tr><td colspan="6">※ 국내・외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음</td></tr>
<tr><td>연구개발성과의 보안등급 및 사유</td><td colspan="5"></td></tr>
</table>

9대 성과 등록・기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설・장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록・기탁 번호	Y	Y	Y	Y	Y	Y					

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설・장비 현황

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

요약

동절기(혹한기) 1일 이내 급속시공이 가능한 콘크리트 양생기법 개발(유도가열 성능 향상을 위한 콘크리트 혼합물 및 구조용 철근 배치 기술, 유도가열 기반 발열양생 콘크리트의 역학적 특성 및 내구성 확보 기술) 및 및 콘크리트 급속양생용 능동형 유도가열 전력변환 장치 시스템 개발(크리트 급속양생용 능동형 유도가열 시스템-전력변환장치, 급속양생 효율 최적화를 위한 유도가열 시스템 핵심 요소 기술)

보고서 면수

135

요약문

연구의 목적 및 내용	○ 최종목표: 동절기(혹한기) 1일 이내 급속시공 가능한 유도가열(Induction heating) 기반의 환경 대응형 콘크리트 양생 핵심기술 개발 ○ Activity 1: 콘크리트 급속 양생용 능동형 유도가열 시스템(전력변환장치) 개발 - 거푸집의 재질/코일 형상 변화에 능동적으로 제어되어 온도 자동 제어 모듈 개발 - 높은 전력변화 효율 유지 가능한 능동형 유도가열 시스템(전력변환장치) 개발 ○ Activity 2: 급속양생 효율 최적화를 위한 유도가열 시스템 핵심 요소 기술 개발 - 균열제어 및 강도 확보를 위한 최적의 온도이력곡선 및 가열곡선 개발 - 콘크리트 급속양생을 위한 거푸집, 코일, 가열 주파수 등 기술 조건 개발 - 유도가열 시스템 차폐기술 개발 ○ Activity 3: 유도가열 성능 향상을 위한 콘크리트 혼합물 및 구조용 철근 효과 분석 - 유도가열 성능 향상을 위한 전도성 재료 혼입 콘크리트 개발 및 최적 혼입률 도출 - 구조용 철근 배근 상세에 따른 유도가열기반 양생 효율성 평가 및 하이브리드 효과 평가 ○ Activity 4: 유도가열 기반 발열양생 콘크리트 미세구조 분석을 통한 역학적 특성 및 내구성 확보 기술 개발 - 발열양생 콘크리트 미세구조 분석, 역학적 특성 평가 및 내구성 평가 - 발열양생 콘크리트 장·단기강도 및 내구성능 확보 기술 개발
연구개발성과	○ 동절기(혹한기) 1일 이내 급속시공이 가능한 콘크리트 양생기법(공법·기법) ○ 콘크리트 급속양생용 능동형 유도가열 전력변환장치 시스템(장비·장치)
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 교량, 교각 및 빌딩 기둥 등 현장타설 콘크리트 활용 (급속시공, 품질향상, 작업자 안전성 향상, 탄소배출량 감소) ○ 프리캐스트 콘크리트 제작 공장 활용→기존 증기양생 대체 (양생시간 및 설비비용 저감) ○ 북한과의 교류 확대 시, 북한 도로 및 철도 등 인프라 시공 진출 및 향후 러시아, 중앙아시아, 북미 등 혹한지 건설시장 진출 ○ 동절기 도로파손 복구, 콘크리트 구조물 급속 보수 · 보강 기술에 활용 ○ 건설 작업자의 안전성 확보 및 건설 현장 미세먼지/대기오염 저감

국문핵심어 (5개 이내)	콘크리트 양생	유도가열	급속시공	전력변환기	전자파차폐

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 5

가. 연구개발 목적 ····· 5

나. 연구개발의 필요성 ····· 5

다. 연구개발 범위 ····· 8

라. 국내외 기술 개발 현황 ····· 9

2. 연구수행내용 및 성과 ····· 13

가. 연구수행 내용 ····· 13

(1) 능동형 유도가열용 전력변환장치 개발 ····· 13

(2) 급속양생 효율 최적화를 위한 유도가열 시스템 핵심 요소 기술 개발 ··· 37

(3) 유도가열 기반 발열양생 콘크리트 역학적 특성 및 내구성 확보 기술 개발 ·· 77

(4) 콘크리트 혼합물 및 철근 유도에 의한 유도가열 성능 향상 ····· 107

나. 연구개발 성과 ····· 123

(1) 기술적 성과 및 우수성 ····· 123

(2) 기술적 성과 상세(정량적 성과) ····· 125

(3) 경제적 성과 및 우수성 ····· 127

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 128

가. 목표 및 목표달성 여부 ····· 128

나. 관련 분야 기여도 ····· 129

다. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등) ····· 130

4. 연구개발성과의 활용 계획 등 ····· 131

붙임. 참고 문헌 ····· 133

<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발 목적

○ 동절기(혹한기) 1일 이내 급속시공 가능한 유도가열(Induction heating) 기반의 환경 대응형 콘크리트 양생 핵심기술 개발

- 콘크리트 급속양생용 능동형 유도가열 시스템(전력변환장치) 개발
- 급속양생 효율 최적화를 위한 유도가열 시스템 요소 핵심 기술 개발
- 발열양생 콘크리트의 역학적 특성 및 내구성 확보 기술 개발
- 유도가열 성능 향상을 위한 콘크리트 혼합물(전도체) 및 구조용 철근 효과 평가

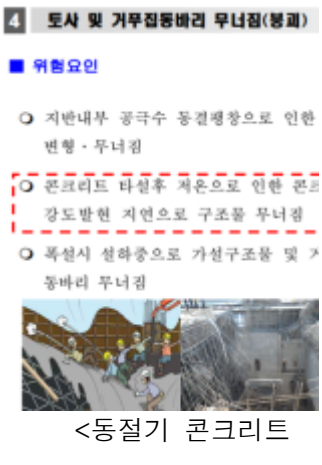
나. 연구개발의 필요성

○ **동절기(혹한기) 콘크리트 구조물 시공 시 공기지연 및 부실공사 문제**

혹한기 콘크리트 양생 문제로 인해 통상적으로 기온이 영하 4℃ 이하로 떨어질 경우, 콘크리트 타설을 하지 않음으로 인해 공기지연 문제가 발생함. 최근에는 토목·건축 구조물의 대형화 및 고층화에 따른 물량증가와 건설인력 부족으로 인해 한중콘크리트 타설이 불가피한 실정임. 한중콘크리트 시공 시 가장 중요한 사항은 초기동해를 방지하는 것이며, 초기강도가 5MPa 이상 될 때까지 온도 0℃ 이하가 되지 않도록 보온 또는 가열양생이 필요하지만 실제 현장에서 온도관리의 어려움으로 인해 부실공사의 문제가 발생하는 실정임.



<동절기 콘크리트 양생불량에 따른 문제 사례>



<동절기 콘크리트 양생 중 붕괴사고>

○ **건설작업자 안전성 확보 문제 및 환경오염 문제**

혹한기 공기 확보를 위해 가열양생을 통한 콘크리트 타설을 하는 경우, 일반적으로 갈탄을 사용함(일부 열풍기 사용). 그러나 이러한 방법은 유해가스(일산화탄소)발생[콘크리트 보온양생 작업장 일산화탄소 농도 10000ppm 이상-안전보건공단(2018)]및 화재 위험으로 인해 작업자

의 안전을 심각히 위협하며 화석연료의 사용으로 대기오염 및 미세먼지 발생을 증가시키는 문제가 있음.



<동절기 콘크리트 양생중 질식사고 사고 위험성 및 사례>

○ **북한 및 러시아, 중앙아시아 등 혹한지 건설시장 개척 가능성 대두**

지난 4/24일 남북정상회담 및 판문점 선언을 통해 동해선 및 경의선 철도·도로 연결이 진행되고 있으며, 남북경제 협력에 따른 북한 건설시장 진출이 기대되고 있음. 이는 향후 러시아 및 중앙아시아 등으로의 국내 건설업체 진출 또한 가속화 시키는 교두보가 될 것으로 전망됨. 이러한 혹한지 건설시 한중콘크리트 및 콘크리트 급속양생 기술의 필요성이 더욱 증가하며, 향후 시장 선점을 위한 선제적인 기술 확보가 필요함.



<북한 건설시장 진출 가능성>



<한파에 따른 북한 건설공사의 어려움 사례>

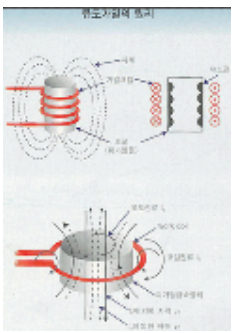
○ **융합기술을 활용한 창의적 해법 필요: 유도가열 기반 급속 양생기법**

상기의 문제를 해결하기 위한 해법으로, 증기 및 오토클레이브 양생, 열풍기 양생, 열선 가열 양생, 마이크로 웨이브 발열 거푸집 양생 기법 등 다양한 연구가 진행되었지만, 효율성, 현장 적용성 및 비용 등의 문제로 한계에 직면하였음. 본 연구에서는 타 산업과의 융합기술을 활용한 패러다임의 전환을 통해 문제 해결을 위한 기술을 개발하고자 함.

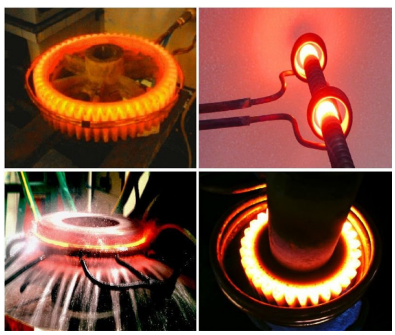


<연구의 필요성>

고주파를 활용한 유도가열은 코일내에 전류를 흘려주면 금속도체의 표면 가까이에 와전류가 생겨 이 손실의 열로 금속을 가열하는 기법으로, **철강·금속 분야**(금속합금의 용융 ·담금질 · 풀림 ·용접 ·경납땜 ·단조 등) 및 **반도체 업계**(게르마늄이나 실리콘의 용융정제 ·단결정 제조)에서 주로 활용이 되고 있으며, **최근에는 일반 가정에서 조리용 가열기구로도 많이 활용**이 되고 있는 기법임. **①유도가열 기법은 가열속도가 매우 빠르고 ② 온도 조절이 간편하며**, 열을 직접 공급하지 않고 자기 유도를 통해 **③ 전도체 자체를 가열**하는 기법으로 **④ 직접적인 화재의 위험이 없고, ⑤ 친환경적인** 장점으로 인해 앞서 언급된 타 산업에서는 광범위하게 적용이 되고 있음.



<유도가열의 원리>



<유도가열 활용 사례>



<유도가열 기법 콘크리트 적용성 평가>



<유도가열의 장점>

다. 연구개발 범위

(1) 1차 연도 (9개월)

<Activity 1>

- 콘크리트 양생 온도 모니터링을 위한 온도 센싱 시나리오 도출 및 온도 제어 모듈 설계
- 유도가열 전력변환 장치 기본 시스템 설계 및 온도 제어 가능한 전력변환 시스템 개발

<Activity 2>

- 탈형강도 확보 및 온도균열 제어가 가능한 최적의 양생온도 이력곡선 및 가열곡선 개발
- 콘크리트 양생실험을 통한 시간별 거푸집 발열 온도 특성 분석
- 거푸집 종류 및 시험체 크기효과에 따른 열전도율을 고려한 거푸집 가열온도-콘크리트 발열온도 관계식 도출
- 유도가열 주파수 및 코일 구조에 대한 기초 시뮬레이션 분석
- 유도가열 시스템 위치에 따른 전자파 세기 데이터 수집 및 전자파 차폐 기술 설계

<Activity 3>

- 급속 양생 효율 최적화 가능한 콘크리트 혼합용 전도체 선정
- 전도체 재료 및 혼입률에 따른 유도가열 특성 평가
- 역학적 특성 및 유도가열 성능 최대화를 위한 콘크리트 혼입용 전도체 및 혼입률 가이드라인 개발

<Activity 4>

- 발열양생 조건에 따른 콘크리트의 역학적 특성 평가
- 발열양생 기반 콘크리트의 미세구조 분석을 통한 강도 저하요인 분석
- 양생온도 및 배합 최적화를 통한 발열양생 콘크리트의 역학적 특성 향상기술 개발

(2) 2차 연도 기재

<Activity 1>

- 다양한 양생 환경에 적용 가능한 전력변환 시스템 능동 제어 시나리오 및 모듈 설계
- 고효율 능동제어 시스템 개발 및 다양한 양생 실험을 통한 능동제어 시스템 검증
- 과열(화재) 대비 안전제어 시스템 설계 및 성능 검증

<Activity 2>

- 유도가열 주파수, 코일 턴수, 코일간 간격, 거푸집 재질 및 거푸집과 코일 간격 등에 대한 시뮬레이션 해석 및 실험 수행
- 온도유지 및 유도가열 성능 최적화를 위한 거푸집 재료 및 형상 최적화
- 거푸집-인덕션 코일 상호관계를 고려한 코일형상 및 배치 최적화 기술 개발
- 전자파 차폐 규격에 만족하는 코일 일체형 차폐시스템 개발

<Activity 3>

- 보강용 철근 배치 형상에 따른 유도 특성 및 내부 온도 변화 특성 평가
- 철근 배근 특성을 고려한 유도가열 효율성 평가
- 구조물 크기효과를 고려한 철근배치에 따른 유도가열 효율성 평가
- 콘크리트 혼합물 및 구조 보강용 철근 하이브리드 효과에 의한 유도가열 특성 및

급속양생 효율 평가

<Activity 4>

- 발열양생 콘크리트의 장기 강도 특성 평가 및 발열양생 조건별 강도발현식 제안
- 발열양생 콘크리트의 내구성 평가(염소이온 침투, 동결융해, 탄산화 등)
- 발열양생 기반 콘크리트의 장기강도 및 내구성능 향상 방안 제안

라. 국내외 기술 개발 현황

○ 국내외 발열양생 활용 현황

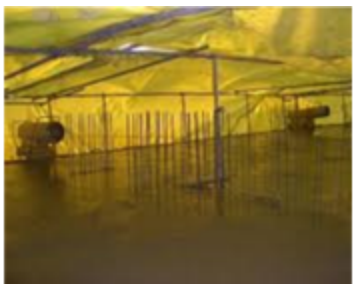
- 동절기(혹한기) 건설공사 시 타설된 콘크리트는 경화초기단계 내부수분이 동결에 의해서 초기동해가 발생하며, 이는 콘크리트 경화 후에 강도와 내동해성 등의 성상에 악영향을 미침.

- 이러한 문제로 동절기 공사시 대부분의 현장에서는 콘크리트 타설 중지 또는 구조물에 보온덮개 또는 양생보호막을 설치하는 방법, 가열보온 양생 및 배합의 조정으로 대응하고 있는 실정이며, 상세는 다음과 같음.

- 공간 가열법: 건설현장에서 가장 많이 사용하는 방법으로 타설을 마친 부분 전체를 열풍기, 전기·적외선 히터, 갈탄 등의 가열기기를 이용하여 가열하는 방법임. 특히 갈탄 양생의 경우, 저 비용으로 가장 많이 활용이 되는 반면 열효율이 좋지 않고, 수직 열에 의한 콘크리트의 품질결함이 발생할 우려가 있으며 일산화탄소 발생에 의한 작업자의 안전을 위협하는 문제가 있음.



<양생포 활용 양생>



<열풍기 양생>



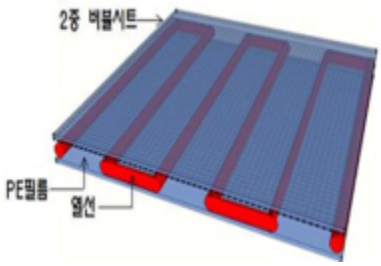
<갈탄 양생>

- 표면 가열법: 발열용 시트, 온상선 등을 이용해 직접열 또는 복사열을 부분적으로 이용하는 방법으로, 슬래브를 가열할 때 적당하며 공간 가열로 가열하기 어려운부분에 병용하는 것이 좋음. 이 방법은 소규모 공사에 적합하고, 이동에 따른 장비 파손이 쉬우며, 단열재를 함께 적용해야 하는 문제가 있음.

- 내부 가열법: 전기배선을 직접 콘크리트 내부에 매립하여 콘크리트를 가열하는 열선 매립방식은 효율이 우수하나 고비용, 전기배선, 콘크리트 내부에의 이물질 투입, 열관리의 어려움과 전기위험성 등이 따르므로 사용하는 예가 많지 않음.

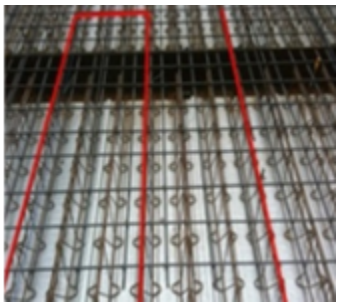
- 증기양생: 주로 프리캐스트 콘크리트 제작 공장에서 활용하는 방법으로, 조기탈형 및 조기강도를 촉진시키기 위해 고온의 증기를 활용해 촉진양생하는 기법임. 증기양생을 위해서는 수증

기 손실을 막기 위해 구조물 전체를 양생포로 보양해야 하며, 화석연료 사용으로 인한 환경오염 및 고유가에 따른 비용 상승 문제가 있음.

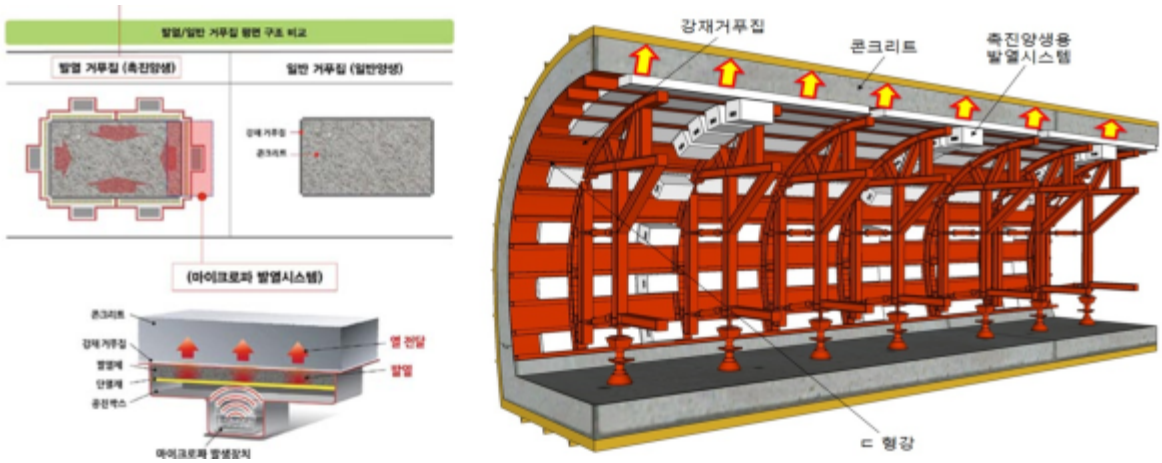


<표면가열 양생 장치>


<증기양생>


<열선매립 양생>

- 마이크로 웨이브 발열 거푸집: 상기의 문제들을 해결하기 위해 비교적 최근에 마이크로 웨이브를 이용해 발열이 되는 거푸집을 활용한 콘크리트 양생기법이 제안되었음. 그러나 이러한 방법은 발열체를 혼입한 별도의 거푸집을 제작하고, 추가적으로 마이크로파 발생장치를 거푸집에 설치하여야 하므로 고중량·고비용의 거푸집 사용이 요구되는 문제가 있음.



<마이크로 웨이브 발열 거푸집>

○ 선행연구 연구과제 분석 및 차별화 방안

- 선행연구과제 분석

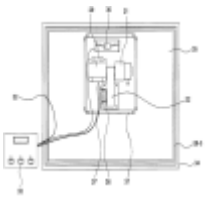
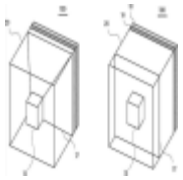
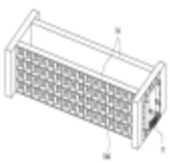
지원기관	과제명	연도 (년)	비고
지식경제부 (산업기술연구회)	저비용 철도 인프라 설계기술 및 신공법 개발 Part 2: 마이크로웨이브형 발열시스템에 의한 콘크리트 촉진양생기술 개발	2012	
미래창조과학부 (산업기술연구회)	저비용 고성능 철도 인프라 기술 개발 (3절: 마이크로웨이브형 발열시스템에 의한 콘크리트 촉진양생기술 개발)	2013~2015	

- 연구과제 차변화 방안

상기의 선행과제는 마이크로 웨이브(micro wave)를 활용한 발열거푸집 개발에 관한 과제로, 가열양생을 위한 에너지원으로 마이크로 웨이브를 사용하는 차이가 있음. 마이크로 웨이브를 에너지 원으로 사용하기 위해서는 별도의 거푸집 및 발열체, 발열시스템이 필요하고 이는 거푸집 비용을 급격히 증가시키는 문제가 있음. 또한, 마이크로 웨이브 발열 거푸집 시스템의 경우, 거푸집만을 가열하여 내부 콘크리트로 열을 전달하기 때문에 부재의 크기가 증가할수록 단면간 온도분포 차이가 증가하는 문제가 있음. 본 연구과제는 양생을 위한 에너지원으로 고주파 유도가열 기법을 사용하는데 가장 큰 차이가 있으며, 이러한 방법은 기존의 강재 거푸집(철재, 알루미늄, 마그네슘 거푸집)을 활용이 가능하여 별도의 거푸집 가격 상승요인이 없는 장점이 있음. 또한 거푸집 뿐만아니라, 콘크리트 내부에 혼입된 자기 유도가 가능한 전도체(전기로 산화 슬래그, 강섬유, 탄소나노 재료 등) 및 구조용 철근 보강재를 직접 유도 가열하여 전단면에 걸친 발열·촉진양생이 가능한 시스템으로 선행연구의 마이크로 웨이브기반 발열양생 기법과 차이가 있음. 상기의 선행연구에서 수행한 각 구조물별 최적 가열곡선 및 실규모 현장검증 방법 등을 활용하여 연계할 경우 본 과제를 수행하는데 도움이 될 것으로 판단됨.

○ 선행 특허 분석 및 회피 방안

- 선행 특허 분석

선행특허명	등록번호 (일자)	설명그림	내용
마이크로웨이브를 이용한 콘크리트 양생용 균일발열시스템 및 이를 이용한 콘크리트 구조물의 시공 방법	10192165570000 (2018.11.19.)		마이크로웨이브를 발열소스로 이용한 콘크리트 양생 발열시스템 및 시공 방법에 관한 특허임. 마이크로웨이브 소스를 포함한 시스템을 거푸집 표면에 부착하여 거푸집의 표면온도를 조절하여 양생을 균일하게 할 수 있음.
마이크로파에 의해 발열되는 발열 거푸집을 이용한 콘크리트 교량기초의 건설 방법	1012713970000 (2013.05.30)		마이크로웨이브 발생기, 마이크로웨이브 전파 도파관, 마이크로웨이브 전파 난반사를 위한 하우징르로 시스템을 구성하여 교량의 부분적인 단면을 발열하여 콘크리트양생 시간을 단축하도록 함.
마이크로파에 의해 발열되는 발열장치를 이용한 프리캐스트 콘크리트의 제조 방법	1012746580000 (2013.06.07.)		마이크로웨이브 발열 시스템을 이용하여 프리캐스트 콘크리트용 거푸집을 설치하여 기존의 기름이나 가스 보일러에 의한 증기 양생방법의 고에너지 고비용 문제 해결하는 방법임.

- 선행 특허 회피 방안

본 신청 과제의 기술은 유도코일에 의해 발생되는 자기장이 거푸집단면 또는 콘크리트 내부의 구조체에 열을 발생하도록 함. 또한, 이 열을 능동제어 전력변환장치에 의해 자동으로 양생용 온도를 제어 하는 특징이 있음. 선행 특허 분석은 본 과제의 기술과 유사한 전파(자기장 또는 전기장)를 이용하여 콘크리트를 발열 양생하는 내용에 대해서 조사하였으며, 결과적으로 본 신청 과제와 연관된 특허들만 확인을 하여 이해 대한 선행 특허 분석을 수행하였음.

선행 특허는 microwave를 발열소스로 하여 전파가 통과하는 도파관과 거푸집면에 부착되는 발열단면으로 구성된 시스템을 특징으로 함. 특허 기술은 하나 이상의 발열 소스가 포함된 양생용 발열 시스템은 거푸집 단면의 특정 부위를 발열하도록 하는 것으로 구조체가 클수록 발열 시스템의 수도 비례적으로 증가할 수 밖에 없는 특징이 있음. 즉, 구조체 크기에 비례적으로 증가되는 발열 시스템 수에 의해서 전력공급 에너지 증가, 다수 시스템 제어의 어려움, 전력선 비용 및 관리 어려움 등으로 대규모 토목현장 실용화에 한계성이 있음.

특히, 선행 특허는 발열 소스가 2.4GHz 대역의 마이크로웨이브(전자파)를 사용하는 반면 본 신청 과제 제안 기술은 50~100kHz 대역의 유도가열 코일을 이용한 자기장을 발열 소스로 하고, 구조체의 크기와 상관없이 단일 발열 시스템을 사용하는 특징들이 선행 특허들과의 차별성을 명확하게 하고 있음.

2. 연구수행내용 및 성과

가. 연구수행 내용

(1) 능동형 유도가열용 전력변환장치 개발

온도제어 기반 전력변환장치는 그림 1-1과 같이 교류(AC)전원(상용전원)을 입력으로 받아 Converter(Rectifier, 정류기)에서 교류를 직류(DC)로 변환한다. 변환된 직류를 다시 Inverter를 통해 직류를 원하는 주파수성분의 교류로 변환시킨다. C/T Box는 코일 부하부분과 인버터 출력을 매칭을 하여 워킹 주파수에서 공진을 잡아준 뒤 출력된 전류가 트랜스포머를 통하여 조절되도록 한다. 출력된 전류는 유도가열 코일(Workcoil)에 전달되어 자기장을 발생시키며 이 자기장으로부터 생성된 와전류가 피가열체상에 열을 발생시키도록 한다. 피가열체의 온도 제어를 위하여 측정된 온도를 피드백(feedback) 하여 다시 전력변환장치에 전달한 후 위의 과정을 반복하면서 동작한다. 피드백에 의한 출력제어는 Converter의 출력에서 이루어진다. 유도가열은 가열체의 침투 깊이(δ)에 의해 주파수가 매우 중요한 파라메타로 작용하기 때문에 인버터에서의 제어는 어렵다. 전원은 단상보다는 3상을 사용하는 것이 직류로 변환했을 때 DC성분의 최저점이 단상에 비해서 높으므로 전원에 대한 효율, 전원 안정성 등이 좋아진다. 3상 전원을 전력변환하기 위해서 단방형 전압저지소자 또는 양방향 전압저지소자의 전력용 반도체 소자와 전력용 스위칭 소자의 조합으로 만들어진다. 단방향 전압저지소자에는 다이오드, BJT, MOSFET 등이 있으며 양방향 전압저지소자에는 SCR 사이리스터, GTO 사이리스터, IGCR, IGBT등이 있다. P극에서 N극 방향으로 정방향 전류가 흐를 때만 동작하는 다이오드의 특성을 이용하여 전력변환을 할 수 있으나 출력제어가 불가능하다. 본 과제에서는 온도에 의한 출력을 제어하므로 신호에 의한 전력제어가 가능한 소자를 사용하여 전력변환장치를 구성한다.

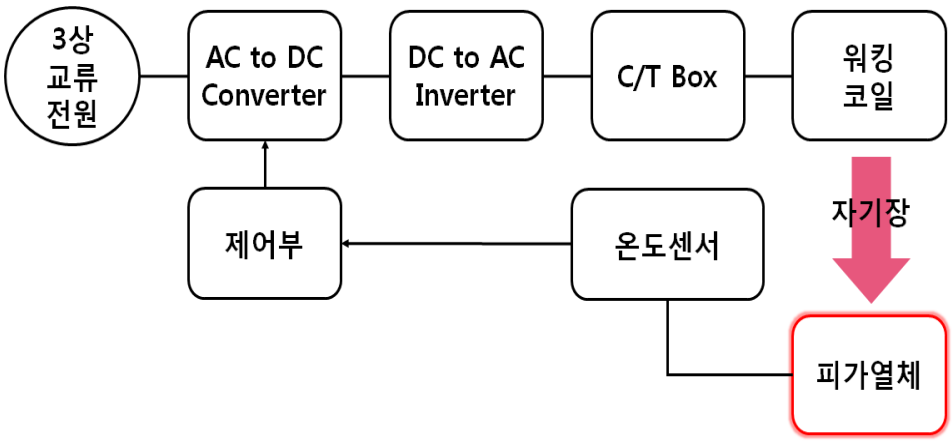


그림 1-1 유도가열 전력변환장치 블록 다이어그램

(가) 온도 자동제어 모듈 개발

① 온도 자동제어 모듈 설계

㉮ 온도제어에 따른 출력제어

온도제어 모듈을 통한 전력변환장치의 SCR UNIT 출력은 가열체(Workpiece)에 설치된 센서를 통해 온도 데이터를 읽은 후 해당 피드백 신호를 전력변환장치에 전달하면서 원하는 온도를 추정하는 방법으로 조절한다. 출력 전압의 제어 기법으로는 PID 제어 기법을 사용한다. PID 제어 기법은 피드백을 이용한 자동제어 방식 중 하나로 시스템 출력, 즉 제어량이 목표치에 유연하게 도달할 수 있도록 비례(Proportional), 적분(Integral), 미분(Differential) 3개 항을 조합하여 조작량을 조절하는 방식이다. 그림1-2는 각 항의 계수에 따른 제어 시스템 안정도의 변화를 나타낸다.

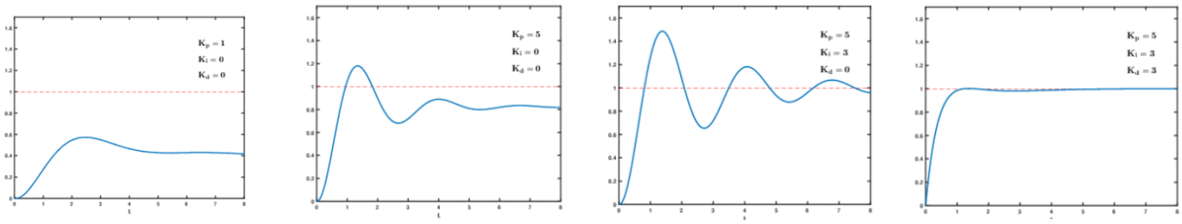


그림 1-2 PID 계수에 따른 시스템 출력

제어 방법으로는 정치 제어와 프로그램 제어가 있다. 정치 제어는 하나의 목표값을 추정하는 제어 방법으로, 설정된 목표 제어량과 현재 제어량의 차이에 따라 조작량을 조절한다. 프로그램 제어는 사용자가 1개 이상의 구역을 만들어 그에 따라 출력을 조절한다. 예를 들어 사용자가 시작온도 구역1에 대해서 0~20분이라는 시간 영역, 60℃ 까지라는 목표값 영역을, 구역2에 대해서 20~40분, 80℃를 각각 설정하였다면 온도제어가 시작한 순간부터 20분까지는 60℃를 목표로 제어를 하며 20분 후부터 40분까지는 80℃를 목표로 제어한다.

실험 환경은 0℃ 항온실이며, 가열체는 내부가 비어있는 거푸집이다. 유도가열시스템이 센서를 통해 측정 후 모듈에서 제어 신호를 SCR UNIT으로 피드백하는 방식으로 이루어진다. 센서는 가열체의 정중앙에 부착되어 있다.



그림1-3 전력변환장치

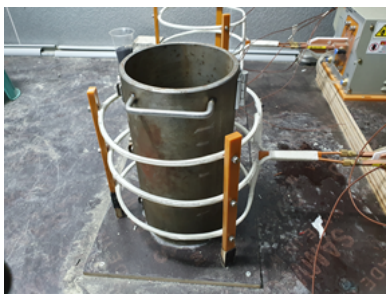




그림1-4 가열 코일 및 거푸집(피가열체)

㉯ 정치 제어

정치 제어는 목표 온도에 따라 정해진 시간 내에 도달하게 하는 제어방법이다. 가열체 온도에 따른 출력은 그림1-5와 같이 확인할 수 있다.



그림1-5 온도에 따른 전력변환장치 출력(60℃)

㉰ 프로그램 제어

프로그램 제어는 사용자가 구성한 프로그램에 의해 온도 추정에 대해서 진행된다. 구역 A에 20분, 목표 온도 60℃, 시작온도 40℃를 설정했을 경우 20분 동안 40℃에서 60℃를 올리기 위해 제어되므로 제어 온도는 시간에 따라 $\frac{\text{목표온도}-\text{시작온도}}{\text{설정시간}}$ 의 속도로 증가한다. 실험에 사용한 가열 시나리오는 표1-1과 같다.

표1-1 실험 가열 시나리오

구역	시간(분)	목표 온도
1	0~20	70
2	20~40	80
3	40~100	80

② 온도 자동 제어 모듈 사용 실험

온도 자동제어 모듈을 사용한 실험 시나리오는 2개가 있다. 초기 20도를 유지하고 온도상승, 3시간 동안의 온도유지, 10시간 동안 유도가열을 이용한 온도상승, 유지, 하강, 1~ 2시간 동안 온도유지로 4개의 구역으로 나뉜다. 가열 시나리오 곡선은 그림1-6를 참고한다. 실험 시간은 총 15시간을 유지한다. 실험실은 0℃ 항온실에서 이루어졌다.

㉮ 온도자동 제어 시나리오1

시나리오 1의 가열 정보는 표1-1을 참고하면 가열 시작(0h)부터 3시간 동안 20℃를 유지하고 3h부터 5.5h, 2시간 30분 동안 20℃에서 75℃로 가열한다. 5.5h부터 10.5h, 5시간 동안 75℃를 유지한 뒤 10.5h부터 14h, 3시간 30분 동안 75℃에서 20℃로 온도를 낮추기 위한 제어를 하고 14h부터 15h, 1시간 동안 20℃로 유지한다.

그림1-7은 가열 시나리오 1의 실험결과 그래프이다. SM은 모듈에서 설정된 제어 온도, CM은 콘크리트 내부 온도, SH는 제어 온도 윗단의 온도이다. SM의 온도가 제어 기준 온도이며 CM 온도와의 차를 읽어 온도제어 모듈에서 피드백 신호를 전력변환장치로 전송하여 피드백 제어를 수행한다. 그래프를 보면 제어 온도에 따라 콘크리트 내부온도가 따라가는 것을 알 수 있다. RT는 실험실의 온도, LT는 실험실 내의 또 다른 거푸집, 유도가열 양생을 하지 않는 것의 온도이다.

㉯ 온도자동 제어 시나리오2

시나리오 2의 가열 정보는 가열 시작(0h)부터 3시간 동안 20℃를 유지하고 3h부터 5.5h, 2시간 30분 동안 20℃에서 75℃로 가열한다. 5.5h부터 12.5h, 7시간 동안 75℃를 유지한 뒤 12.5h부터 15h, 2시간 30분 동안 75℃에서 20℃로 온도를 낮추기 위한 제어를 한다.

그림1-8은 가열 시나리오 2의 실험결과 그래프이다. SM은 모듈에서 설정된 제어 온도, CM은 콘크리트 내부온도, SH는 사용하지 않았다. SM의 온도가 제어 기준 온도이며 CM 온도와의 차를 읽어 온도제어 모듈에서 피드백 신호를 전력변환장치로 전송하여 피드백 제어를 수행한다. 그래프를 보면 제어 온도와 콘크리트 내부온도가 따라서 가는 것을 알 수 있다. 15시간 이후 그래프가 잘려있는 것은 실험 시간이 15시간으로 세팅되어 있기 때문이다.

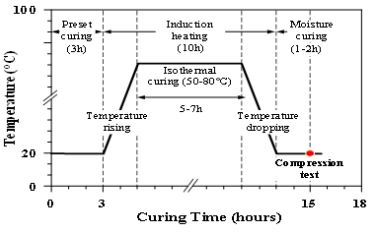


그림1-6 가열 그래프

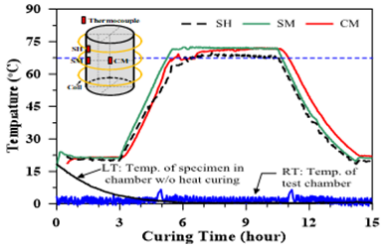


그림1-7 가열 시나리오1

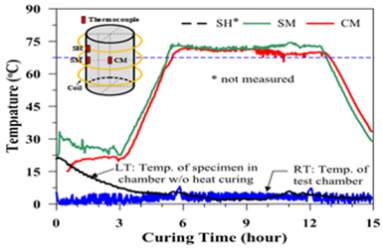


그림1-8 가열 시나리오2

③ 온도 자동 제어 시스템 구성 및 제작

시스템 구성은 그림1-9와 같이 검출부, 비교/판단부, 동작부 그리고 수집된 현재 온도 데이터를 저장하기 위한 기록부로 구성되며 동작 순서는 다음과 같다. 열전 소자(열전대 K)와 DSP를 이용하여 시스템을 제어하게 된다. DSP(Digital Signal Processor)의 ADC 기능을 이용하여 아날로그 데이터를 디지털화하여 코어가 인식할 수 있도록 한다. 이를 통해 거푸집에 부착된 열전 소자로부터 위치에 따른 제어량(현재 온도)을 수집한다. 비교/판단부에서는 목표량(목표 온도)과 제어량을 비교해 편차를 구한다. 이를 PID 제어식에 적용하여 목표 제어량 달성을 위해 필요한 조작량의 값을 도출한다. 최종적으로 동작부에서 DSP의 DAC 기능을 이용하여 PID 제어식의 결과인 디지털 데이터를 아날로그 데이트로 변환하여 유도가열 제어에 필요한 전압을 입력한다. 사용자가 정의한 시나리오에 따라 이 시스템은 반복 수행한다.

㉮ 검출부

가열체 각 지점의 온도 정보를 수집하여 DSP의 ADC로 보내주기 위한 역할을 수행한다. 그림1-10과 같이 도선형 K-Type 열전대 보상권선의 측정지점을 가열체 내부 표면의 측정하고

자 하는 지점에 부착한다. K-Type 열전대의 온도 측정 범위는 -200℃에서 1250℃ 사이이다. 측정지점의 반대편에는 온도에 따라 기전력이 발생하며, 유도가열 시스템의 가열범위 내에서 K-Type 열전대의 기전력은 1℃당 41.5μV씩 거의 선형적으로 증가하는 것으로 나타난다. 이는 매우 낮은 값으로 ADC에 입력하기 위해 열전대 증폭기(Thermocouple Amplifier) AD595를 이용해 증폭해주어야 한다. K-Type 열전대와 AD595의 온도에 따른 출력 전압 변화는 그림1-11과 같다. AD595는 그림1-12처럼 열전대 보상권선과 ADC 사이에 각 채널마다 구성하였다.

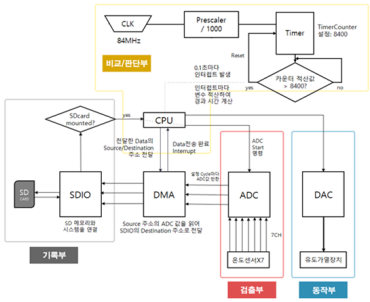
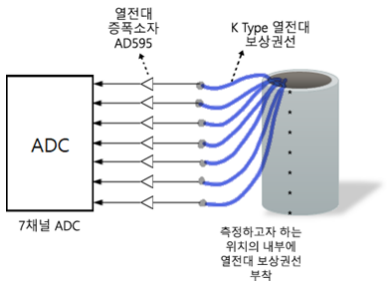


그림1-9 시스템 다이어그램



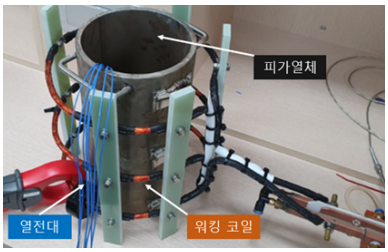


그림1-10 검출부 개요 및 실험 구성

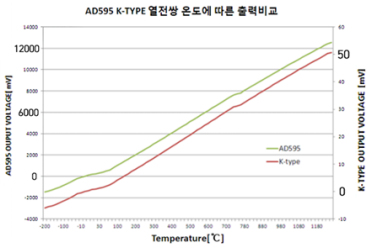
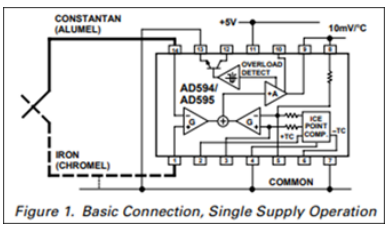


그림1-11 AD595 출력 그래프



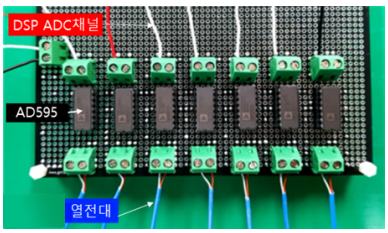


그림1-12 AD595를 이용한 열전대 증폭 회로

㉮ 비교/판단부

비교/판단부에서는 ADC를 통해 수집된 각 채널의 기전력을 온도 데이터로 변환하고, 현재 제어량과 사전에 셋팅된 목표 제어량의 차이를 비교하며 그에 따른 조작량을 PID 제어법으로 계산하는 기능을 수행한다. STM32의 최대 입력 전압은 3.3V이며 12bit(최대 4095) ADC를 사용했기 때문에 해상도는 1 데이터 당 0.8mV, 즉 0.08℃가 된다. ADC로 수집된 기전력을 온도값 데이터로 변환하는 알고리즘은 그림1-13과 같이 표현할 수 있다.

PID 제어식을 이산적으로 표현한 알고리즘은 그림1-14와 같으며 이를 DSP에 적용하여 제어 시스템을 구현한다. 각 구간 별로 적용되는 비례항, 적분항, 미분항에 각각 곱해주는 계수는 Simulink®등의 시스템 설계 소프트웨어로 구할 수 있으며, 대입한 값을 직접 변화시켜가며 최적화시킬 수도 있다. 온도 상승 구간과 하강 구간, 두 구간의 계수를 각각 정하여 제어하도록 하며, 설정해놓은 시간이 경과하면 상승 구간에서 하강 구간으로 전환하여 계수를 바꿔준다. 위 알고리즘을 통해 필요한 조작량을 연산한다. 경과 시간은 타이머 인터럽트를 통해 적산하며, 시간: 분: 초 단위로 기록하였다.

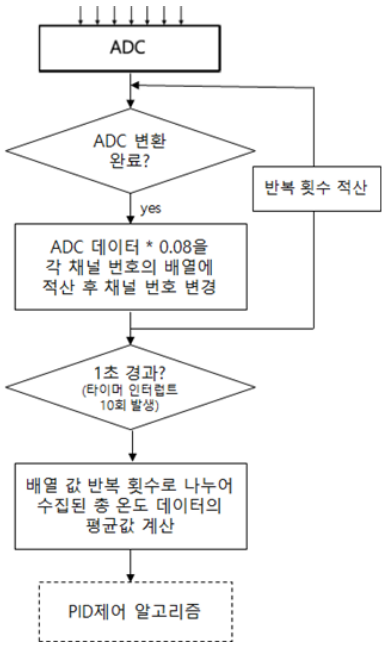


그림1-13 비교/판단부 알고리즘

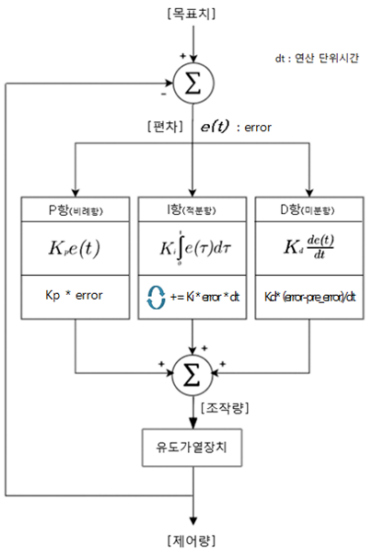


그림1-14 PID 제어 알고리즘

㉯ 동작부

비교/판단부에서 연산한 필요 조작량을 DAC로 직류 전압을 출력하여 유도가열장치로 전달한다. OP-Amp로 이상적인 적분기를 구성하면 그림1-15와 같이 구성된다. 이 경우, DAC로부터 입력된 전압으로 인해 커패시터가 선형적인 ramp 형태로 충전되고, +단자와 -단자의 전압을 일정하게 유지하려는 연산증폭기의 성질로 인해 OP-Amp의 출력 전압도 동일하게 ramp 형태를 그리며 상승한다. 따라서 출력파형은 삼각파를 그리게 되는데, 이렇게 생성된 삼각파는 위상제어를 위한 캐리어 신호로 이용될 수 있다. 이 캐리어 파형은 워킹 코일에 전달되는 고주파 고출력의 정현파 전원과 함께 비교기에 입력되며, 삼각파가 일정 전압을 달성한 순간과 정현파 전압 0일 때의 위상차를 구할 수 있게 된다. 그와 비례하게 출력 전압과 전류의 위상각이 차이나도록 하여 워킹 코일에 전달되는 전력을 제어한다.

㉰ 기록부

실험한 온도 데이터를 경과 시간과 함께 기록하기 위해 그림1-16과 같이 기록부를 구현하였다. 수집한 온도 데이터는 DMA를 거쳐 SD card에 저장된다. SD card가 제대로 마운트 되지 않으면 LCD로 에러 메시지를 출력하게끔 하였다. 데이터는 그림1-18과 같이 CSV 파일에 초 단위로 기록되며, 각 채널의 현재 온도와 해당 데이터가 기록된 경과시간이 함께 표기된다. 실험 중 현재 온도 확인을 위해 데이터 기록 시 그림1-17와 같이 LCD에 현재 온도가 출력 되게 하였다.

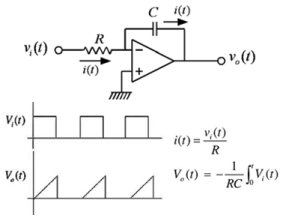


그림1-15 적분기 출력

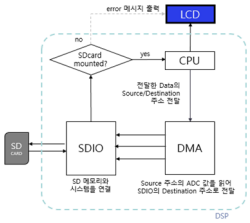


그림1-16 기록부 개요

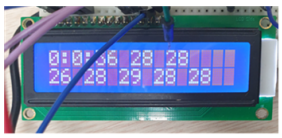


그림1-17 LCD 출력

0:04:10	25	25.8	23.4	26.6	25.8	28.3	26
0:04:11	25	25.8	23.4	26.6	25.8	28.3	26
0:04:12	25	25.8	23.4	26.6	25.8	28.3	26
0:04:13	25	25.8	23.4	26.6	25.8	28.3	26
0:04:14	25	25.7	23.4	26.6	25.8	28.3	26
0:04:15	25	25.8	23.4	26.6	25.8	28.3	26
0:04:16	25.1	25.7	23.3	26.4	25.9	28.7	25.9
0:04:17	25	25.7	23.3	26.5	25.9	28.8	25.9

그림1-17 저장된 값

㉮ 온도 자동제어 모듈

그림1-18은 온도 자동 제어 모듈의 설계도면이다. 온도 자동 제어 모듈은 상용전원(220V 60hz)을 입력으로 받아 동작한다. 해당 부분은 5V DC도 사용가능하도록 케이블을 교체하면 가능하다. 열전 소자(열전대 K type)으로부터 읽어온 온도값을 열전소자 증폭회로를 통하여 10mV/℃만큼 증폭된다. 이 값을 DSP가 ADC(Analog to Digital) 기능을 이용하여 읽어온다. 읽어온 데이터는 외부저장장치에 데이터가 저장된다. 읽어온 온도값을 바탕으로 PID 제어를 진행하여 고주파 유도가열기기의 SCR UNIT으로 제어 신호를 전송하게 된다. 제어 신호 출력을 위해 DAC(Digital to Analog) 기능을 사용한다. DSP의 출력 peak 값은 3.3V이므로 신호 증폭기를 통해 최대 5V가 출력될 수 있도록 한다.

표1-2는 온도 자동제어 모듈의 제품 사양서이다. 본 과제에서 개발한 온도 자동제어 모듈은 DSP를 기반으로 제작하였다. 온도 수집을 위해 사용한 열전 소자는 열전대 K type이다. 온도 범위는 DSP의 성능에 의해 0~330℃이다. 해당 모듈을 사용하기 위해서는 단상 220V 또는 DC 5V를 사용한다. 고주파 유도가열기의 제어를 위해서 PID 제어 기법을 사용하며 제어 출력 범위는 0 ~ 5V이다.

그림1-18과 같이 열전소자와 열전 소자 증폭회로는 DSP의 ADC 단자와 연결되어 있다. 열전 소자 증폭회로는 DSP 기판으로부터 5V를 공급 받아 동작한다. DSP 기판은 외부로부터 전원을 공급받는다. 이때 공급받는 전원은 DC 5V이다. DSP 기판과 연결된 LCD Display는 현재 수집되고 있는 온도를 출력한다. 사용자의 선택에 따라 외부 저장장치(SD card)에 센서로부터 읽어온 온도 데이터를 저장할 수 있다. 읽어온 현재 온도와 설정된 목표 온도의 차이를 계산하고, DSP는 이를 PID 제어 기법을 이용해 필요한 제어량을 연산한다. 연산된 제어량은 DAC를 통해 제어용 DC 전압을 출력한다. 제어용 DC 전압 신호는 유도가열장치로 전달되며 조작량에 따른 컨버터 위상각 제어를 진행한다.

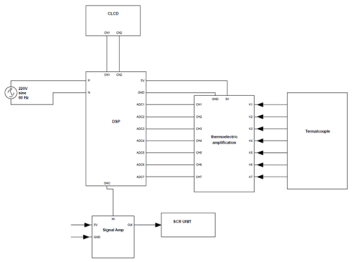


그림1-18 온도 자동제어 모듈 설계도면

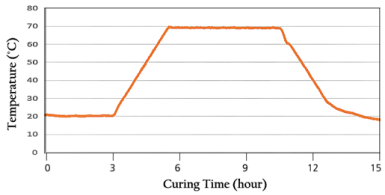


그림1-19 가열 곡선 그래프

표1-2 온도 자동제어 모듈 제품 사양

입력	전압	단상 220V / DC 5V
	주파수	60Hz / x
사용 전압	사용 전압	DC 5V
제어	제어방법	PID
	제어 출력	0 ~ 5V
온도	사용 열전 소자	Thermocouple K type
	온도 수집 범위	0 ~ 330℃

위상제어를 이용한 전력변환장치의 출력제어를 위한 캐리어 신호를 만들기 위해, 12bit DAC를 통해 0V에서 5V 사이의 제어전압을 출력한다. 각 온도차에서의 PID제어 전압 변화를 측정하는 실험을 위해 그림1-20과 같이 NTC 써미스터를 센서로 사용한 제어 모듈을 제작하였다. NTC 써미스터는 온도에 따라 저항이 반비례하게 변화하는 소자로(0℃에서 10KΩ), 별도의 10KΩ 저항을 이용해 간단한 전압 분배기를 구성하여 DSP의 ADC로 전압을 수집하면 현재 온도를 구할 수 있다. 그림1-21은 PID제어에 관련된 정보를 표시하고 있다. TIME은 경과 시간을 나타내며, AIM은 피가열체의 목표 온도를, now는 피가열체의 현재 온도를, ctr과 R ctr은 제어를 위한 출력 전압을, error는 AIM과 now의 차를 나타낸다. ctr은 제어기의 출력이며 R ctr은 전력변환장치의 출력 조절을 위해 증폭된 출력이다. 그림1-22은 그림1-21의 상태가 고정되었을 때 제어기에 의해 출력전압이 변화한 것을 시간대별로 측정한 그래프이다. 제어전압이 약 2.6V에서 시작해 3초가량 하강하여 2.4V까지 내려갔고, 이후 선형적으로 증가하여 5V에 도달하였다. 5V 도달까지 걸리는 시간은 86.5sec로 제어 전압의 증가량은 0.0289V/s로 나타났다. DAC 출력값이 4095이상, 즉 PID제어를 위한 제어전압이 5V 이상으로 연산 될 경우, 모두 5V를 출력하도록 하였다.

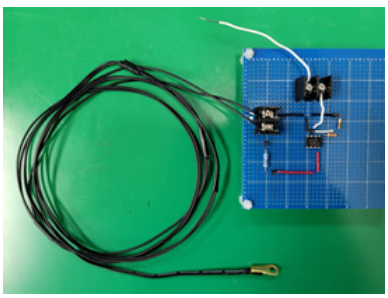


그림1-20 온도 자동제어 모듈



그림1-21 제어 데이터 출력

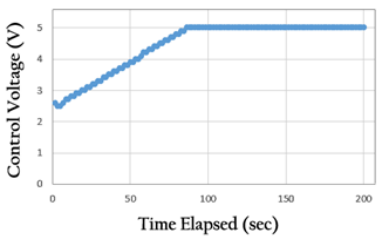


그림1-22 제어전압 변화 그래프

④ 결론

㉮ 온도 자동제어 시나리오

온도 자동제어 모듈을 설계, 제어방법, 종류를 보고서에서 나타냈으며 시나리오 2개에 대하여 실험결과를 제시하였다. 2개의 시나리오 모두 0℃ 항온실에서 제어 온도를 추정하며 시나리오에 맞게 따라가는 것을 확인할 수 있었다. 콘크리트 양생은 영하의 동결 온도가 아닌 경우에도 약 5℃ 이하의 저온에서는 콘크리트의 강도 발현이 거의 이루어지지 않지만 가열 시나리오 1의 콘크리트 압축강도는 상온양생과 비교하여 168%를, 시나리오 2의 콘크리트 압축강도는 182%를 갖는다. 시나리오1, 2 모두 외부온도 0℃ 환경에서 좋은 압축강도를 갖는 것을 알 수 있다.

표1-3 콘크리트 압축 강도

종류	MTC	LTC		HTC(가열챔버)		IHC(유도가열)	
	f_c' (MPa)	f_c' (MPa)	$f_c'/f_{c(MTC)}$ (%)*	f_c' (MPa)	$f_c'/f_{c(MTC)}$ (%)*	f_c' (MPa)	$f_c'/f_{c(MTC)}$ (%)*
S4-5h-70	15.4	0.4	2.4	27.2	177	25.9	168
S4-7h-70	14.7	0.3	2.3	29.0	197	26.7	182

㉯ 온도 자동제어 모듈

온도 자동제어 모듈을 설계하였으며, 설계, 검출부, 비교/판단부, 동작부, 기록부로 나누어 원리를 기입하였다. 검출부에는 K-Type 열전대를 센서로 사용하였으며, 해당 기전력을 DSP의 ADC로 수집하였다. 비교/판단부에서 1sec동안의 평균 온도 측정값을 구하도록 하여, 목표 온도와 현재 온도의 비교를 통해 PID 제어 방식의 조작량을 구하였다. 구한 조작량은 동작부에서 DAC를 통해 직류 전압의 형태로 출력되게 하였으며, 해당 신호는 유도가열 장치의 위상제어를 통한 출력을 조절하는 캐리어 신호로 이용되게 하였다. 유도가열기의 출력 제어방법을 보고서에서 나타냈으며 설계도면 및 제품사양서와 실험 결과를 기입하였다. 실험을 통해 PID 제어로 유도가열기에 입력되는 제어 신호를 조절하여 가열 시나리오에 맞추어 시간 경과에 따라 해당 온도에 도달하거나 유지할 수 있는 것을 확인하였다.

(나) 온도제어기반 전력변환장치 개발

① 온도제어 기반 전력변환장치 시스템

㉮ 온도제어 기반 전력변환장치 시스템

그림 1-1로 구성된 온도제어 기반 전력변환장치 시스템은 그림1-23과 같은 3상 전원을 입력받아 Converter에서 SCR 사이리스터를 사용하여 위상지연 제어에 의해 출력을 조절한다. 정류 방법에는 2가지가 있는데 반파 정류와 전파 정류이다. 반파 정류회로는 전원 파형에서 0°≤Θ≤180°의 각도일 때의 파형만을 정류하며 전파 정류회로는 전원 파형에서 0°≤Θ≤360°의 각도 파형을 정류하여 사용하는 것으로 모든 파형을 정류하여 사용한다. 전원 이용률, 효율, 안정성 등 전파 정류회로가 우수하므로 전파 정류회로를 사용한다. 위상제어 정류회로는 위상지연각에 따라 출력 평균값(직류값)이 달라진다. 위상지연각(α)가 0도일 때는 다이오드를 사용한 전파 정류와 같은 출력이 나오며 그 파형은 그림1-24과 같다. α = 30°일 때는 그림1-26, α = 90°일 때는 그림1-26와 같다. α가 120° 이상이면 SCR 사이리스터는 턴 온 될 수 없으므로 120° ≤ α 〈 180°에서 출력전압은 0V이다. 그림1-24부터 1-26까지의 파형을 보면 α에 따라 평균값이 다른 것을 알 수 있다. 이것을 식으로 표현하면 아래와 같다.

1. $0 \leq \alpha < 60°$

$$< V_0 > = \frac{3}{\pi}\int_{\alpha+60^\circ}^{\alpha+120^\circ} v_{ab}\,d(wt)$$

$$= \frac{3}{\pi}\int_{\alpha+60^\circ}^{\alpha+120^\circ} \sqrt{2}\,V sinw(dt)$$

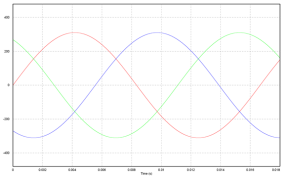
$$= \frac{3\sqrt{2}\,V}{\pi} cos(\alpha), (0^\circ \leq \alpha < 60^\circ)$$

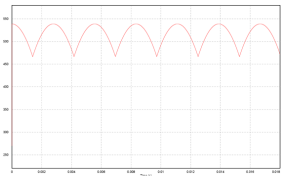
2. $60 \leq \alpha < 120°$

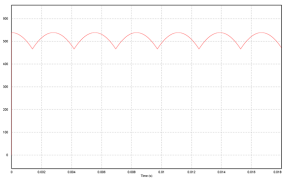
$$< V_o > = \frac{3}{\pi}\int_{\alpha+60^\circ}^{180^\circ} v_{ab}\,d(wt) = \frac{3}{\pi}\int_{\alpha+60^\circ}^{180^\circ} \sqrt{2}\,V sinwtd(wt)$$

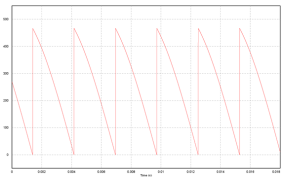
$$= \frac{3\sqrt{2}}{\pi}[\cos(\alpha+60^\circ) - \cos(180^\circ)]$$

$$= \frac{3\sqrt{2}}{\pi}[1+\cos(\alpha+60^\circ)], (60^\circ \leq \alpha < 120^\circ)$$


그림1-23 입력 파형


그림1-24 α = 0°


그림1-25 α = 00°


그림1-26 α = 90°

Converter를 통해 교류에서 직류로 변환된 전압은 inverter에 의하여 원하는 주파수 성분을 갖는 교류로 다시 변환된다. inverter의 스위칭 소자는 양방향 전압저지소자인 MOSFET, IGBT 등을 주로 사용하며, 특히 산업용 유도가열기의 경우 높은 전류 스위칭이 가능한 IGBT를 많이 사용한다. 구동 방식으로는 하프 브리지와 풀 브리지 형태가 있다. 하프 브리지 inverter 회로는 그림1-27와 같다. 하프 브리지 inverter는 Converter로 공급받는 직류 전압을 반으로 나누어 부하에 교류전압을 공급하게 되므로 사용률이 풀 브리지에 비해 좋지 않기 때문에 본 과제에서는 풀 브리지 inverter를 사용하며 회로는 그림1-28과 같다.

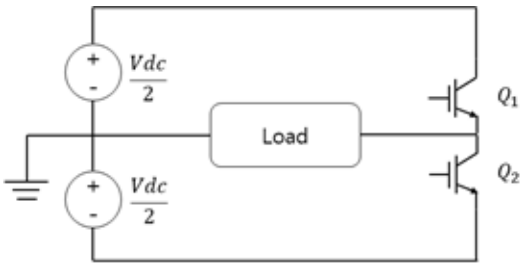


그림1-27 하프 브리지

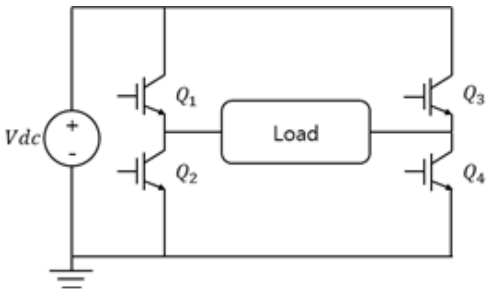


그림1-28 풀 브리지

풀 브리지 inverter의 동작은 그림1-29과 같다. PWM 방식을 사용하며 [Q1, Q4], [Q3, Q2]가 그룹으로 스위칭 동작이 이루어질 때 부하(Load)에 전류가 각 그룹 동작마다 다른 방향으로 흘러 교류 동작을 구성한다. [Q1, Q2], [Q3, Q4] 게이트 펄스가 같이 동작하는 경우 단락 회로가 구성되므로 일어날 수 없는 조건으로 설정한다. Q2의 게이트 펄스는 Q1과 반대이며 Q4의 게이트 펄스는 Q3와 반대의 신호를 가진다. 이상적인 스위칭은 Q1과 Q3, Q2와 Q4의 스위칭 전환 시간이 일치하지만, 현실적으로는 그 순간 단락이 발생하므로 5% 정도의 스위칭 딜레이를 설정한다. 즉, [Q1, Q4] 게이트 신호가 OFF일 때 시간 비율 5% 후에 [Q3, Q2] 게이트 신호가 ON이 되게 한다. inverter 출력 파형은 저항 부하에서 구형파를 가진다.

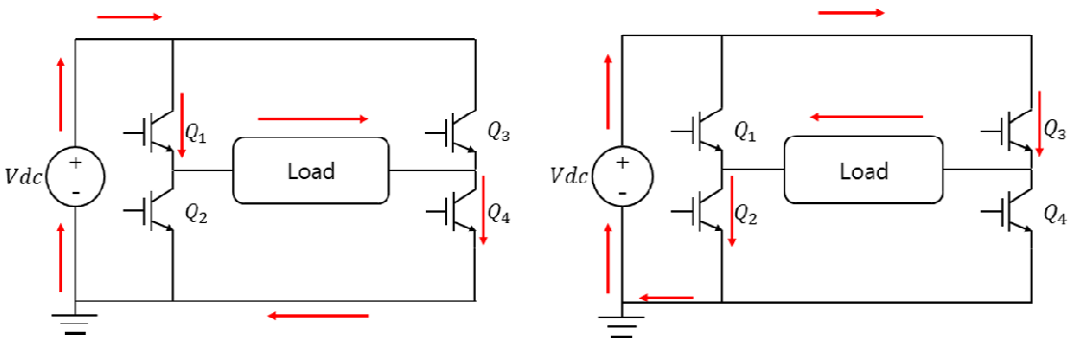


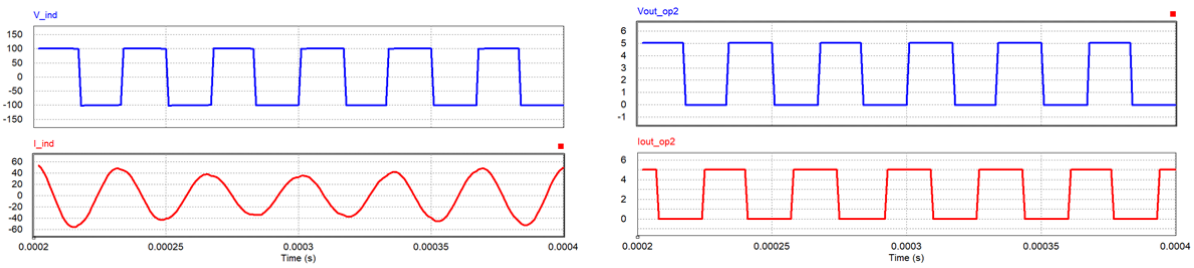
그림1-29

C/T BOX는 공진 캐패시터와 매칭 트랜스폼으로 구성되어 있다. inverter로 생성된 교류 전압은 가열체에 교류 전류를 흐르게 하는데 inverter 출력 전류는 Workpiece를 원하는 온도로 가열하기에 그 값이 적으므로 매칭 트랜스를 이용하여 전류를 증폭한다. 유도가열시스템의 부하는 L성분이 큰 부하를 가지므로 캐패시터를 연결해줌으로서 L성분을 소거하여 공진을 잡는다.

inverter의 동작 주파수(f_{op})는 코일에 걸리는 전압과 전류의 주파수 성분을 결정한다. 이는 코일에서 발생하는 자기장에 영향을 끼치며, 표피효과(skin effect)에 의한 침투 깊이(skin depth) 또한 영향을 끼친다. 이는 가열 정보에 대한 중요한 파라메타로 작용한다. 침투 깊이는 자계 또는 와전류 밀도가 표피효과로 인하여 도체 표면 값의 $1/e$이 되는 표면으로부터의 깊이로 즉, 37%로 저하하는 곳까지의 깊이를 의미한다.

즉, 도체는 주어진 inverter의 동작 주파수에 대하여 침투 깊이까지 와전류에 의한 유도가열이 된다는 것을 알 수 있다. 또한, CT/Box 항목에서 설명했듯이 교류전원에서는 L, C 성분으로부터 영향을 받아 전류가 전압에 비해 앞서거나 뒤지는 현상이 나타난다. 이는 전압과 전류의 위상차가 발생하여 무효전력이 발생하게 만든다. 무효전력이 발생한다는 것은 사용 효율이 낮다는 것을 의미한다. 그러므로 회로에 L과 C 성분을 제거하여 전압과 전류의 위상을 일치하게 만들어야 한다. 전압과 전류가 일치하는 위상에서의 동작 주파수를 공진주파수라 한다.

전류와 전압의 위상차를 줄이는 방법으로는 ZCD(Zero Crossing Detector)가 있다. ZCD는 전압과 전류의 ZCP(Zero Crossing Point)를 검출하여 해당 부분을 일치하게 만들어 위상차를 줄여나가는 방법이다. 전압과 전류의 파형을 읽어 이를 연산증폭기(OP-amp)를 통하여 구형파 형태의 신호로 변환한 뒤 Rising Edge와 Falling Edge 신호를 측정하여 위상정보를 검출한다. 그림1-30(a)은 inverter 출력 전압 및 전류를 나타내고, (b)은 전압 및 전류에 대한 구형파 정보 신호를 나타내는 그래프이다.



(a) inverter 출력 전압(청), 전류(적) (b) 구형파 정보 신호(청: 전압, 적: 전류)

그림1-30 inverter 출력 전압, 전류 및 정보 파형

그림1-31에서 빨간색 막대는 전류의 ZCP, 파란색 막대는 전압의 ZCP의 라인을 의미한다. 이 두 지점을 일치시켜주는 것으로 전압과 전류의 위상정보를 동일하게 만들어준다. 보통 ZCD에서 기준 전위(0V)보다 높은 영역에 대해서 사각파 출력이 나오게 하여 사용한다. 기준 전위를 기준으로 서로 다른 영역에 대해서 사용하게 되면 ZCP가 일치하게 된다 하여도 위상차가 180도가 발생하기 때문이다. 보통 L 성분과 C 성분만이 남아 있는 회로에서 위상차가 90도가 발생한다는 것을 생각했을 때, 서로 다른 영역에 대해서 ZCD를 적용했을 때 공진주파수 추종이 이루어지지 않는다.

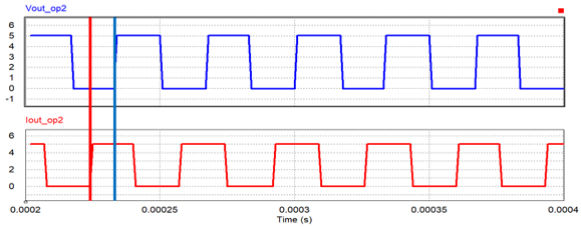
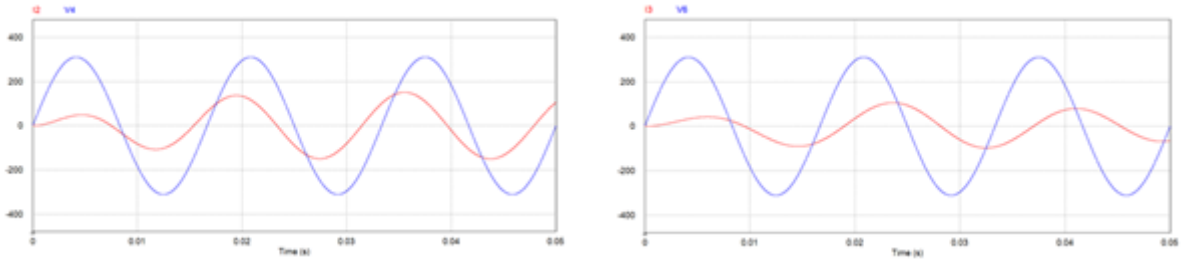


그림1-31 전압과 전류의 위상차

전압에 비해 전류가 빠른 경우 진상전류라 하며, 전압에 비해 전류가 뒤진 경우 지상전류라 한다. 진상전류의 경우에는 용량성으로서 $X_L < X_C$ 인 상태로서 주파수를 증가하여 X_L를 증가하고 X_C를 감소시켜 리액턴스 성분을 제거함으로서 공진회로를 만들어준다. 지상전류의 경우에는 유도성으로 $X_L > X_C$ 인 상태로서 주파수를 감소하여 X_L을 감소하고 X_C를 증가시켜 리액턴스 성분을 제거함으로서 공진회로를 만들어준다. 아래는 교류전원을 사용하는 회로에서 임피던스를 구하는 식으로 리액턴스 관계식에서 위의 경우를 유추할 수 있다. 그림1-32는 지상, 진상전류의 이해를 돕기 위한 파형 그래프이다. 이 그림에서 전류는 빨간색이며 전압은 파란색을 띄고 있다.



(a) 진상전류 (b) 지상전류

그림1-32 지상 및 진상 전류 파형 그래프

② 온도제어 기반 전력변환장치 제작

온도제어 기반 전력변환장치는 7kW의 용량, 40kHz의 주파수를 가지고 높이 315mm, 외경 158, 166mm의 콘크리트 배합 거푸집을 가열하기 위해 제작되었다. 가열 온도는 Workcoil의 턴수, inverter 주파수, Workcoil에 흐르는 전류에 따라 결정되며 온도제어를 위해 Workcoil에 흐르는 전류를 제어할 수 있도록 제작하였다.

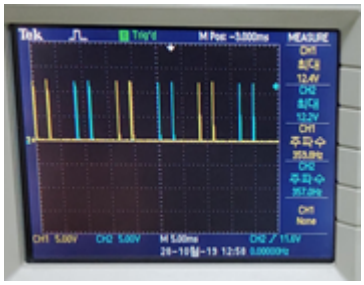
㉮ 온도제어 기반 전력변환장치 구조

3상 220V 전압이 유도가열장치에 전원을 공급한다. 3상(R-S-T)중 2상(R-S)에 의하여 OSC, SCR UNIT, DRIVE UNIT, SPM 회로에 전용 트랜스를 거쳐 전원이 공급되며 전원 표시등 점등, 환기팬과 S/C가 동작한다. 초기 WORK OFF 상태이며 SPM 회로를 통해 상태 점검을 시작한다. 이는 전원이 인가되어있는 모든 상황에 대하여 상시 수행된다. 점검 결과 이상이 있으면 해당 사항에 대하여 표시등이 점등되며 WORK OFF 상태를 유지한다. WORK ON 상태에서는 WORK OFF 상태로 전환된다. 점검 결과 이상이 있는 상태에서 Reset 스위치를 동작 후 복귀를 하지 않는다면 WORK OFF 상태를 계속 유지한다. 점검 결과 이상이 없으면 가열준비 램프가 점등되고 WORK ON 스위치로 가열 여부를 결정한다.

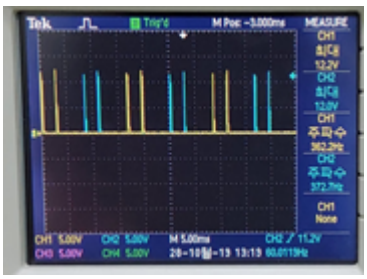
이상이 없는 상태에서 WORK ON 스위치를 동작시키면 가열 시퀀스를 시작한다. SCR UNIT은 6개의 SCR 사이리스터, Gate Driver 회로, 전원 공급 회로, Feedback 회로로 구성되어 있다. SCR 사이리스터는 Gate Driver로부터 생성된 Gate 펄스 신호를 받아 동작하여 교류 전압을 전파 정류하여 직류 전압으로 변환한다. Gate Driver는 온도제어를 통하여 위상지연각(α)를 조절하여 출력 전압 및 전류를 제어한다. 과전류가 발생했을 때 션트 저항을 통하여 입력 받아 동작을 멈추도록 제작하였다.

위상차를 검출하기 위해 3상 U, V, W를 U2/U3, V2/V3, W2/W3로 분리한다. U2와 W3는 [G1 K1], [G2 K2]의 신호를 만들기 위한 회로에, V2와 U3는 [G3 K3], [G4 K4]의 신호를 만들기 위한 회로에, W2와 V3는 [G5 K5], [G6 K6]의 신호를 만들기 위한 회로에 전원을 공급한다.

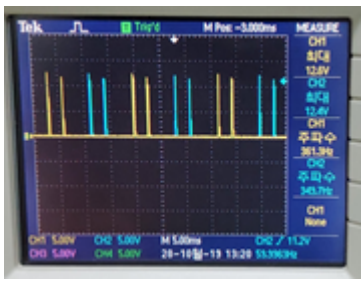
G1과 G2는 U과 W상을 비교하여 만들어지며 G1은 U상의 크기가 W상보다 클 때 신호가 발생하며 G2는 반대의 경우이다. G3과 G4는 V과 U상을 비교하여 만들어지며 G3은 V상의 크기가 U상보다 클 때 신호가 발생하며 G4는 반대의 경우이다. G5과 G6는 W과 V상을 비교하여 만들어지며 G5은 W상의 크기가 V상보다 클 때 신호가 발생하며 G6는 반대의 경우이다. 그림 1-33과 같이 게이트 드라이버 최종 파형은 2개의 파형의 조합으로 출력된다. 앞에 생성된 파형의 이름을 아래와 같이 변경한다. 그림1-34부터 그림1-36 3상 전압에서 SCR의 동작 흐름을 나타낸다.



G1 G2



G3 G4



G5 G6

그림1-33 SCR Gate 파형

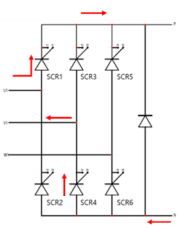


그림1-34 SCR1, 4/6 동작

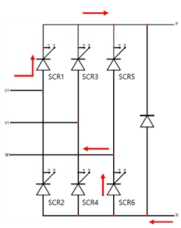


그림1-35 SCR3, 2/6 동작

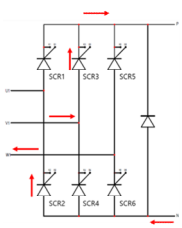


그림1-36 SCR5, 2/4 동작

SCR Rectifier 출력에 직렬로 리액터, 병렬로 캐패시터가 연결되어 출력 파형 리플을 제거하는 역할을 한다. 회로에 사용된 리액터는 10mH, 캐패시터는 6800uF이다. 그림1-37은 SCR UNIT 출력파형이다. 그림을 참고하면 리플성분이 제거된 출력파형을 볼 수 있다. 그림1-38은 SCR UNIT의 제어 회로이며 그림1-39은 SCR UNIT이다.

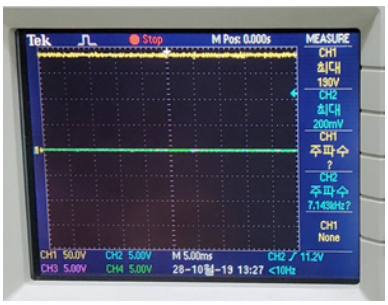


그림1-38 SCR UNIT 출력



그림1-39 SCR UNIT 제어회로

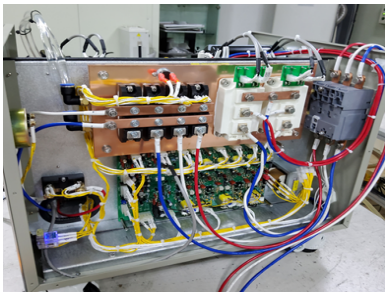
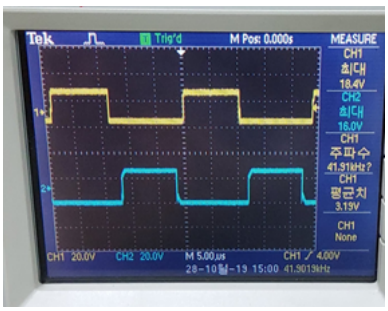


그림1-40 SCR UNIT

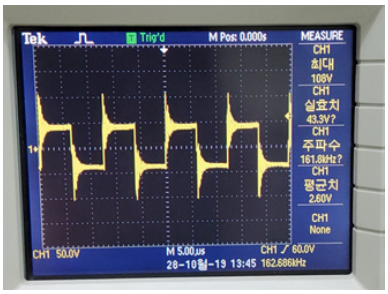
OSC 회로에서 듀티비 55%, 45%를 가지는 2개의 PWM 파형을 생성하고 그 파형을 Drive Unit으로 보내 신호를 증폭하여 IGBT 게이트로 연결한다. 그림1-40과 같은 풀 브리지 inverter 동작이 이루어지며 출력 파형은 정현파의 것을 보인다. 교류전원은 C/T Box를 통하여 공진 및 전류가 증폭되어 가열체에 전달되어 가열 시퀀스를 진행한다. INV UNIT과 연결된 CT로 과전류를 검출하여 SPM 회로에서 상시 점검을 한다. 과전류 검출 민감도는 SPM 회로의 가변저항을 조절함으로써 줄일 수 있다. 그림1-41와 같이 CT과 병렬로 연결된 저항의 파형은 가열 파형과 동일한 모양의 파형으로 Workcoil 또는 Workpiece가 바뀌었을 경우 병렬 저항 양단의 파형을 측정하여 OSC에서의 주파수를 변경한다.



(a) OSC 출력

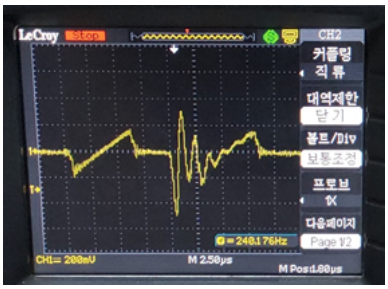


(b) Driver Unit 출력



(c) inverter 출력 파형

그림1-40 OSC, Drive Unit, inverter 파형



(a) 주파수 조절 전



(b) 주파수 조절 후



(c) 주파수 조절

그림1-41 주파수 조절에 따른 가열 파형 변화

㉰ 온도제어 기반 전력변환장치 제작

온도제어 기반 전력변환장치를 실험 환경에 의해 외적 영향을 받지 않게 그림1-42와 같이 케이스 내부에 조립했으며 설치 위치가 변해도 쉽게 이동할 수 있는 형태로 제작하였다. 유도

코일의 이동을 편리하기 위해 2개의 케이스로 분리하여 제작하였으며 케이스1에는 SCR UNIT, INV UNIT가 들어가 있는 전력변환장치가 주를 이루며 케이스2에는 C/T Box와 Workcoil이 연결되어 있다. 온도제어모듈은 가열체의 온도를 센서로부터 읽어와 전력변환장치의 SCR UNIT으로 피드백 신호를 주어 출력을 제어하게 한다.

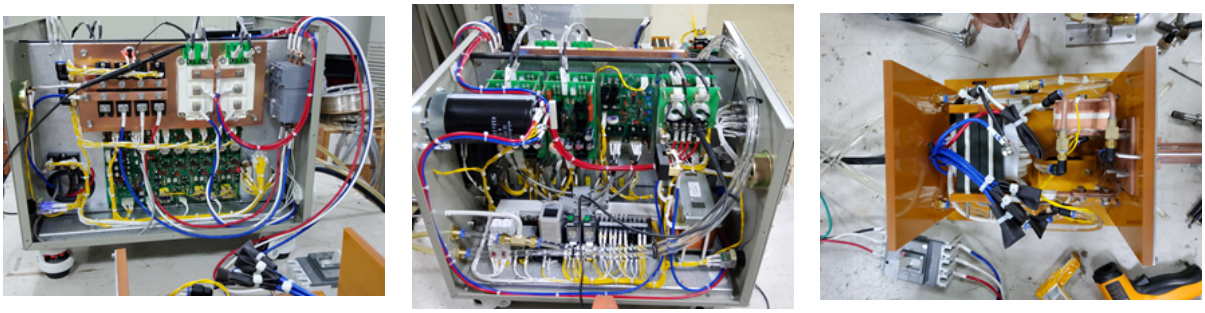


그림1-42 전력변환장치 및 C/T Box 내부

③ 능동제어 기반 전력변환장치 제작

능동제어 기반 전력변환장치 시스템은 프로토타입인 온도제어 기반 전력변환장치 시스템과 동일하게 7kW의 용량으로 설계하였으며 주파수 대역은 Workcoil과 피가열체에 따라 달라진다. 프로토타입에서 inverter의 동작 주파수를 부하가 바뀜에 따라 공진주파수를 수정하기 위해서는 사용자가 직접 계측기를 통해 가열 파형을 확인하면서 수정해야 한다. 능동제어 기반 시스템에서는 부하가 변경되었을 때 시스템에서 자동으로 공진주파수를 추종하도록 설계하였다. 피가열체가 변경될 때마다 자동으로 공진주파수를 맞춰주므로 사용자 편의성이 향상하게 시켰으며 향후 시험단계에서도 조정 시간을 줄일 수 있다. 가열 온도는 Workcoil의 턴수, inverter의 동작 주파수와 Workcoil에 흐르는 전류에 따라 결정되며 온도제어를 위해 Workcoil에 흐르는 전류를 제어할 수 있도록 설계 및 제작하였다.

㉮ 능동제어 기반 전력변환장치 구조

그림1-43은 능동제어 기반 전력변환장치 구성도를 나타낸다. 3상 AC 220V를 공급받아 전원표시등, FAN, S/C를 동작시키며 SCR UNIT, DRIVE UNIT, Control 회로에 전원을 공급한다. 3상 교류전원은 SCR UNIT을 통하여 DC로 변환되고 inverter에서 Control에서 지시한 주파수 성분을 가진 교류로 변환된다. C/T Box를 통해 전류를 증폭하여 피가열체에 전달된다. 공진주파수 자동 추종을 위해 ZCD 기법을 사용하였으며, 이 기법을 사용하기 위해 전압과 전류의 위상정보가 필요하다. 따라서 inverter 출력전압과 코일에 흐르는 전류를 센서를 통해 제어부(Control)에 입력해준다. 온도제어 기반 전력변환장치와는 inverter 부분을 제외하고는 동일하다. 능동제어 기반 전력변환장치에서의 inverter는 Control 회로에서 동작 주파수를 결정하여 inverter Gate에 전달한다. DRIVE UNIT에서는 Control 회로에서 출력된 작은 신호의 PWM 신호를 증폭한다. 이는 IGBT를 ON 시키기 위해 충분한 신호를 가지기 위함이다. inverter 동작 주파수를 부하에 따른 공진주파수와 동일하게 맞추기 위해서 ZCD 기법을 사용하였다. ZCD 기법은 전압과 전류의 ZCP를 감지하여 이를 일치하는 기법이다. 3상 교류전원이 Converter에서 직류로 변환한 뒤 inverter에서 고주파 교류로 변환된다. 부하에 흐르는 전

류는 inverter에서 생성된 고주파 교류 전류이므로 inverter 출력단에서의 전압과 전류의 위상을 일치시켜야 한다.

그림1-44는 공진주파수 추종을 위한 블록 다이어그램을 나타낸다. 공진주파수 추종이 시작되면 먼저 Control 회로에 쓰여진 Flash memory에서 저장된 데이터를 읽거나 없다면 프리셋 되어있는 데이터를 사용하여 PWM 파형을 생성하게 된다. 이 때의 PF(역률)을 측정하고 역률이 목표치를 만족한다면 주파수를 종료하지만 그렇지 않으면 주파수 조절을 진행하게 된다. 주파수 조절 단계는 우측의 붉은색 칸에 상세하게 나타나 있다. 생성된 PWM 파형에서 역률을 측정하고 해당 역률을 만족했을 경우 동작 주파수는 해당 주파수에서 고정되며 Flash memory에 해당 값을 기억하게 하여 다음 동작에서 우선 대입하여 사용하게 된다. 그렇지 안다면 동작 주파수 조절 단계를 진행하게 된다. 먼저 주파수의 증가 기준은 전압과 전류의 위상차 중 지상전류, 진상전류에 따라 정해진다. 위상정보는 전압과 전류의 센서를 통하여 읽게 된다. 주파수를 조정했을 때 순간적으로 위상차를 측정하지 않고 사용자의 선택에 따라 일정 횟수를 누적한 뒤 평균화하여 역률을 측정한다. 이는 순간적으로 역률을 측정하게 되었을 때 주파수가 발산하는 경우가 발생할 수 있다. 시스템의 안정화를 위해 어느 정도의 평균화 횟수가 필요하나 과한 횟수는 공진주파수를 추종하는 시간이 오래 걸리게 하여 동작시간이 오래 걸리게 만든다.

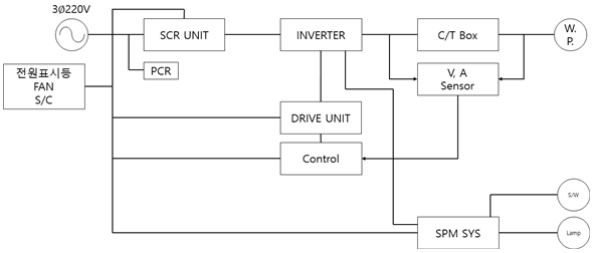


그림1-43 능동제어 기반 전력변환장치 구성도

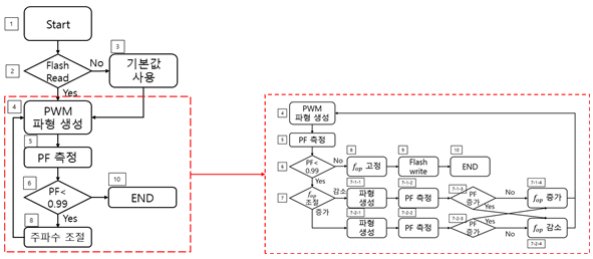


그림1-44 공진주파수 추종 블록 다이어그램

Control 회로에서 system timer clock frequency, prescaler, counter period를 조절하여 PWM 출력 주파수를 결정하게 된다. 이를 위해 시스템 코어로는 STM32F407Z 칩셋을 사용하였다. 그림1-45은 PWM 파형이 생성되는 과정을 보여준다. 시스템 클럭($f_{t,c}$)이 prescaler에 의해 나눠진다. 해당 값은 타이머 비트와 비교 레지스터를 비교하여 언제 타이머를 리셋할지 결정된다. 이 값이 counter period이다. 여기서 주파수가 결정되고 PWM 출력 폭은 Pulse로 counter period에 비율적으로 정해진다. 예를 들어 counter period가 1000일 경우 PWM의 폭을 40%로 원한다면 400의 값을 가진다. 폭을 50%로 원하면 500이 된다. 이는 그림1-46에 나타나 있다.

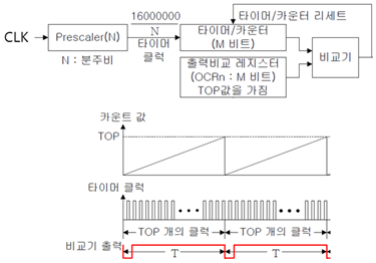


그림1-45 PWM 파형 생성과정

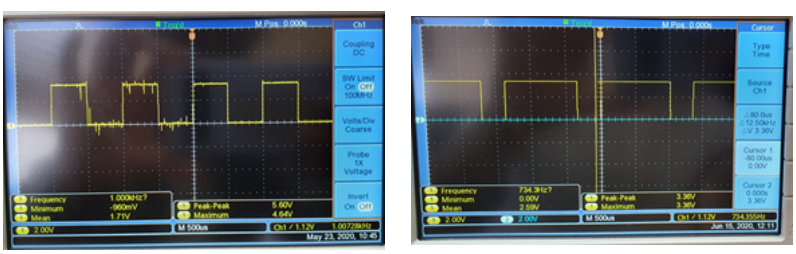


그림1-46 PWM 파형 듀티비 계측

역률은 전압과 전류의 위상차를 검출하여 계산한다. 위상차를 검출하기 위해서는 전압과 전류의 위상정보를 알고 있어야 한다. 위상정보를 검출하기 위해서 ZCD(Zero Crossing Detector)기법을 사용한다. ZCD 기법은 ZCP(Zero Crossing Point)을 검출 및 비교하여 위상차를 계산한다. 그림1-47은 두 파형의 위상차를 시간 단위에서 역률로 변환하는 과정을 보여준다. 먼저 두 파형의 상승 부분에서의 ZCP간의 시간을 계산한다. 시간을 라디안 단위로 변환하고 이를 각도 단위로 변환한다. 그리고 이 각도에 코사인(cos)을 취해주면 두 위상의 역률이 계산된다.

ZCD 기법은 전압 및 전류 파형을 센서와 연산증폭기를 통해 신호 크기를 낮춰 사각파를 만들어 Rising Edge 또는 Falling Edge를 검출하여 이를 비교하는 기법이다. 두 위상의 ZCP를 검출하여 이를 일치시켜나감으로써 공진주파수를 추종하는 기법이다. 이를 위해 2.4절에 설명한 것과 같이 전류가 진상, 지상에 따라서 주파수 증가 또는 감소를 결정한다. 결정한 뒤 주파수를 증감함으로써 진행된다. 해당 정보는 inverter의 출력 전압, Workcoil에 흐르는 전류에 대한 정보를 받는다. 그림1-48는 ZCD 기법을 사용하기 위한 회로이다. 이 회로를 PSIM을 통하여 시뮬레이션을 진행하여 정상적으로 동작하는지 확인하였다. Vout에서 Rising Edge 영역(기준 전위보다 높은 영역)만이 출력되게 회로를 구성하였다.

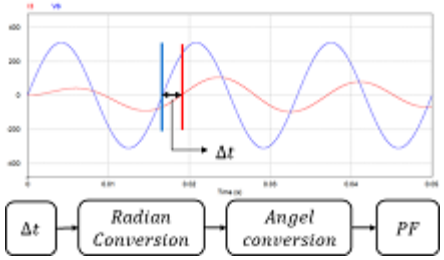


그림1-47 위상각 검출을 통한 역률 계산

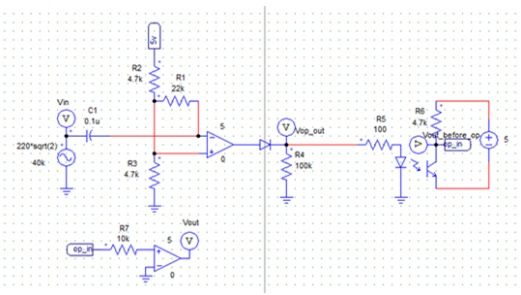
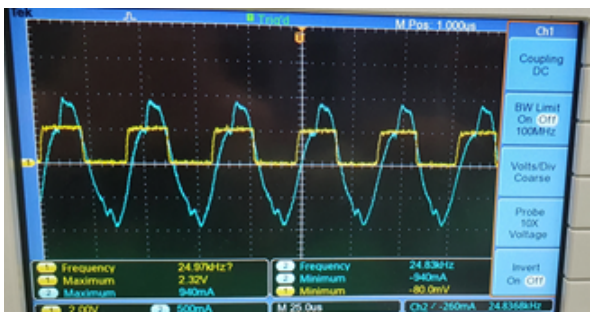


그림1-48 ZCD 회로

그림1-49은 ZCD 회로를 실험한 것이다. 그림1-49(a)는 inverter 출력전압을 ZCD 회로를 통하여 Rising Edge 영역에서 사각파가 발생하는 것을 확인하였다. 그림1-49(b)는 코일에 흐르는 전류를 ZCD 회로를 통하여 Rising Edge 영역에서 사각파가 발생하는 것을 확인하였다. 노란색 파형은 ZCD 회로의 출력 파형이며 청록색 파형은 그림1-49(a)에서는 inverter 출력전압, 그림1-49(b)에서는 코일에 흐르는 전류를 나타낸다.



(a) inverter 출력 전압 및 ZCD 출력



(b) 코일 전류 및 ZCD 출력

그림1-49 inverter 출력 및 ZCD 회로 출력

전압과 전류에 대한 ZCD 회로 출력 파형을 비교하여 위상차를 검출하고 공진주파수 추종 과정을 진행한다. 위상차는 두 파형의 Rising edge를 비교하여 계산하여 역률을 산출할 수 있다. 주파수 증감 여부는 진상전류, 지상전류에 따라 달라진다. 진상전류에서는 용량성 리액턴스 성분이 유도 리액턴스 성분보다 더 크다. 따라서 주파수를 증가하여 유도 리액턴스를 증가하고 용량성 리액턴스를 감소시킴으로써 공진을 추종한다. 지상전류에서는 유도 리액턴스 성분이 용량성 리액턴스 성분보다 더 크다. 따라서 주파수를 감소하여 용량성 리액턴스를 증가하고 유도 리액턴스를 감소시킴으로써 공진을 추종한다. 이를 바탕으로 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 구성하였으며 이는 그림1-50, 51에 나타나 있다.

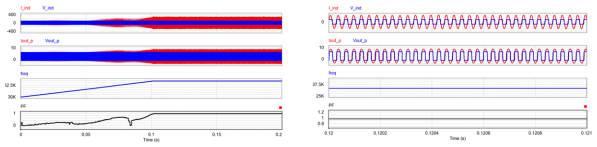


그림1-50 진주파수 추종 시뮬레이션(진상)

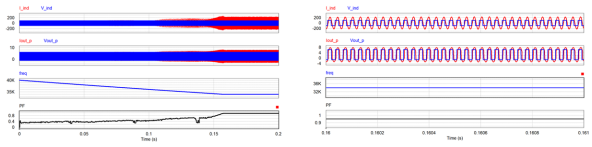


그림1-51 공진 주파수 추종 시뮬레이션(지상)

위와 같이 설계된 ZCD 기법을 이용한 공진주파수 자동 추종 알고리즘은 전압 스파이크가 발생할 때 정확하지 않은 값을 계산할 수 있다는 단점을 가지고 있다. 이를 보완하기 위해 알고리즘을 수정하였다. 전압 스파이크 성분은 inverter 출력 전압에서 발생한다. 그 파형은 그림 1-52과 같다. 전압 스파이크는 스위칭 소자의 스위칭 상황에서 발생되며 전류가 클수록, 스위칭 속도가 빠를수록(주파수가 높을수록) 더 크게 발생한다. 유도가열은 10khz 이상의 높은 주파수를 사용하므로 전압스파이크 현상은 필연적으로 발생한다. 이를 보완하기 위해 스너버와 같이 스파이크 성분을 열로 발산하여 잡는 회로가 있다. 스너버는 주파수에 따라 소자 조합을 달리 해야 한다. 따라서 부하에 따라 공진주파수를 추정하여 주파수 변경이 되는 능동제어 전력변환장치에서는 스너버를 사용해도 스파이크 현상이 발생하는 주파수 대역이 있을 수 있으므로 이를 사용하지 않은 방향으로 진행하였다. 그림1-53에서 노란색 파형이 inverter 출력 전압, 분홍색 파형은 코일에 흐르는 전류 파형이다.

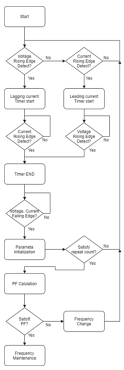


그림1-52 ZCD 제어 알고리즘

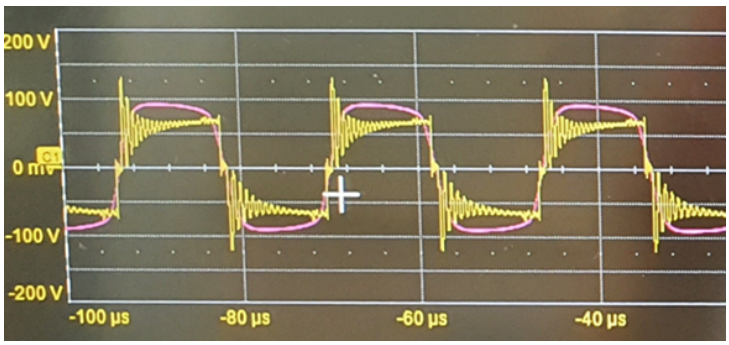
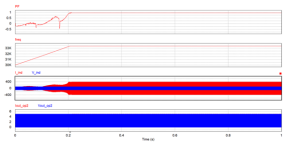
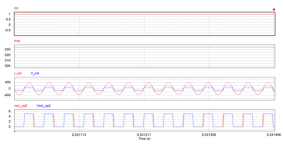
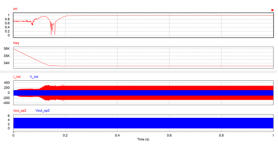
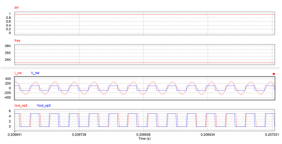


그림1-53 전압 스파이크

그림1-54은 주파수가 증가하면서 공진주파수를 추종하는 경우에 대한 PSIM 시뮬레이션 결과 그래프이다. 그림1-55은 주파수가 감소하면서 공진주파수를 추종하는 경우에 대한 PSIM

시뮬레이션 결과 그래프이다. 4개의 그래프 모두 첫 번째는 PF(역률), 두 번째는 주파수, 세 번째는 inverter의 출력 전압 및 전류, 네 번째는 ZCD 정보를 나타내고 있다. 세 번째와 네 번째 그래프에서 붉은색 그래프는 전류, 푸른색 그래프는 전압을 나타내고 있다. 그래프를 참고하면 공진주파수 추종을 이루어지는 것을 알 수 있다. 공진주파수 여부는 그림1-54, 55의 세 번째, 네 번째 그래프에서 전압과 전류의 Rising Edge point가 동일하게 나타나는 것에서 알 수 있다.



그림1-54 공진주파수 추종 시뮬레이션(진상)



그림1-55 공진 주파수 추종 시뮬레이션(지상)

알고리즘을 수정하여 유도가열 전력변환장치에 적용하였다. 그림1-56는 inverter 동작 주파수가 30 KHz일 때 inverter 출력 전압(노란색 파형)과 Workcoil에 흐르는 전류(분홍색 파형)를 오실로스코프에 출력하였다. 그림1-57은 inverter 동작 주파수가 60 KHz일 때이다. 그림1-58은 공진이 맞춰졌을 때의 파형을 나타내고 있다. 공진 상태에서의 전압과 전류의 Rising Edge를 비교하면 일치하는 것을 알 수 있다. 공진주파수는 41.4kHz로 측정되었다.

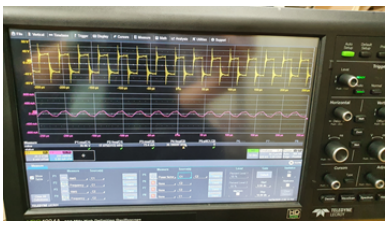

그림1-56 30kHz 전압, 전류


그림1-57 60kHz 전압, 전류


그림1-58 41.4kHz 전압, 전류


그림1-59 전압 계측


그림1-60 전류 계측

㈏ 능동제어 기반 전력변환장치 제작

능동제어 기반 전력변환장치는 실험 및 계측 등 여러 편의성을 고려하여 그림1-61와 같이 알루미늄 프로파일 프레임을 사용하여 제작하였다. 프레임 하단에 4개의 캐스터를 사용하여 이동성이 용이하게 하였으며 층마다 충분한 높이를 주어 작업 및 계측기 사용에 편리함을 추가하였다. 전력변환장치 1층에는 SPM SYS 회로, Control 회로, Driver Unit 회로가 설치되어 있다. 2층에는 IGBT, SCR, PHSCR회로가 설치되어 있다. 3층에는 IGBT의 전류 파형을 검출하는 회로와 SCR Converter 출력의 평활을 위한 리액터와 캐패시터가 설치되어 있다. 4층에

는 차단기, 릴레이와 같이 전원부에 해당하는 소자가 설치되어 있다.

그림1-63와 같이 Workcoil에는 리츠와이어를 사용하여 코일에 따로 냉각수를 운용하지 않아도 되게 설계하였다. ZCD를 위해 코일에 전류검출변압기(CT)를 채결하여 ZCD 회로에 전류정보를 전달하게 하였다. 인버터 양단에서 전압 정보를 측정하기 위해 ZCD 회로에 병렬연결하였으며 이 양단에는 100kohm의 저항을 연결하여 부하단에 큰 영향이 가지 않게 하였다. 수집된 정보를 바탕으로 ZCD 기법을 이용하여 공진주파수를 자동으로 추정되게 하였다.



그림1-61 능동제어 기반 전력변환장치

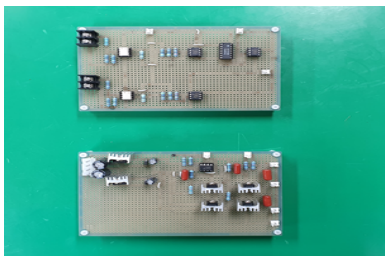


그림1-62 ZCD 회로

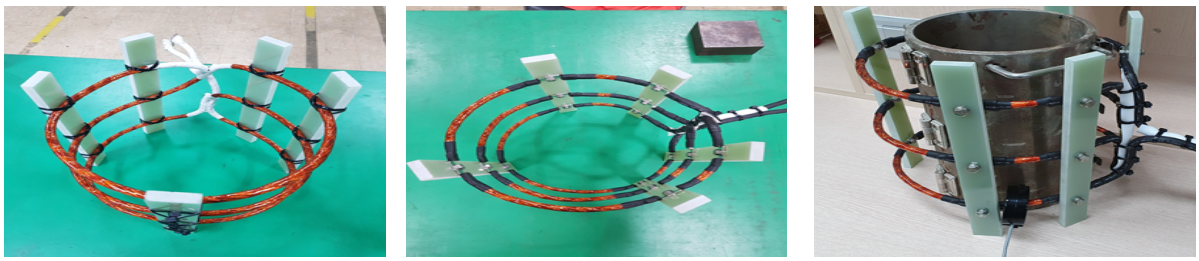


그림1-63 워크코일 및 전류검출 변압기 설치

④ 전력변환장치 전력량 측정

㉮ 전력량 측정 실험

유도가열 기반 콘크리트 가열양생에서의 전력량 측정을 위해 전력변환장치와 차단기 사이에 전력량계를 설치하였다. 그림1-64과 같이 3상 220V(전원)과 전력변환장치 사이에 그림1-65과 같은 3상 3선식 220V 전력량계를 설치하여 가열 실험 동안에 사용된 전력량을 측정한다.



그림1-64 전력량계 설치 후 전원 흐름도



그림1-65 전력량계

그림1-66와 같은 가열 그래프를 적용하여 전력량 측정 실험을 진행하였다. 0~3h 동안 20℃를 유지하고 3~5.5h 동안 20℃도에서 70℃로 온도를 상승시킨다. 70℃ 도달 후 5.5~10.5h 동안 70℃를 유지한 후 10.5~13h 동안 70℃에서 20℃로 온도를 하강시킨다. 20℃ 도달 후 13~15h 동안 20℃를 유지한 후 가열이 종료된다. 전력량 측정은 총 15h 동안 이뤄졌으며 전력변환장치의 기타 회로에서 소모되는 전력을 포함하여 측정되었다. 가열 환경은 그림1-67과 같은 온도 2.5℃, 습도 50%의 저온 환경을 구성하였다. 그림1-68과 같이 거푸집에 배합한 콘크리트를 타설한 상태로 턴 간격 75mm, 3턴 코일을 사용하여 측정 실험을 진행하였다.

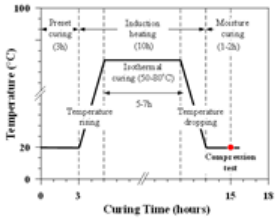
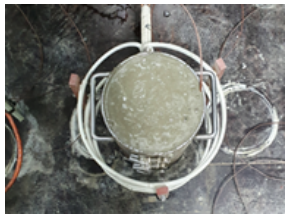


그림1-66 가열 그래프


그림1-67 실험 환경


그림1-68 콘크리트 타설

전력량 측정 실험 전 전력량계의 전력량 표시는 그림1-69와 같이 8kWh를 지시하고 있으며 실험 종료 후 전력량계의 전력량 표시는 그림1-70과 같이 10kWh를 지시하고 있다.


그림1-69 실험 전 전력량계 지시값, 8kWh


그림1-70 실험 후 전력량계 지시값, 10kWh

㉯ 단위 면적당 소요전력량 계산

실험에 사용된 거푸집은 그림1-71와 같이 외경 158mm, 높이 300mm를 가진다. 해당 정보를 바탕으로 거푸집의 겉표면 넓이를 계산하면 다음과 같이 계산된다. 그림1-66의 가열 그래프를 적용했을 때 거푸집 면적 $0.15m^2$ 당 2kWh의 전력량을 소모하는 것으로 도출할 수 있다. 따라서 단위 제곱미터 당으로 계산하면 다음과 같이 계산된다. 계산 결과 단위 제곱미터당 13.33kWh가 소모되는 것으로 계산된다.

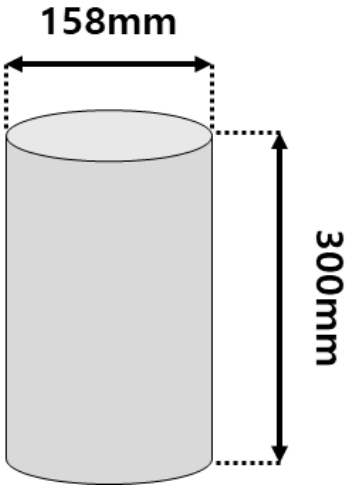


그림1-71 거푸집 모형

$$\pi \times D \times h = \pi \times 0.158 \times 0.3 = 0.15[m^2]$$

$$P = \frac{2\,kWh}{0.15\,m^2} = 13.3\,[kWh/m^2]$$

⑤ 결론

㉮ 온도제어 기반 전력변환장치

온도제어 기반 전력변환장치 개발을 위해 전력변환장치 동작 구성, 각 부분에 대한 상세 동작을 제시하였고 제작하였다. 전력변환장치는 온도제어 모듈에 의해 제어 온도에 따른 피드백 신호로 전력변환장치 출력이 결정되는 것을 실험(보고서 C-1)을 통해 확인하였다. 온도제어 모듈에서는 정치 제어를 통해서는 단순 가열할 때 원하는 목표까지 가열할 수 있으며 프로그램 제어를 통해서 가열 시나리오를 구성하여 가열할 수 있다. 온도제어 기반 전력변환장치의 사양은 표1-4과 같으며 설계도면은 그림1-72와 같다.

표1-4 온도제어 기반 전력변환장치 사양

정격입력	전압	3Φ 220V
	주파수	60Hz
최대출력	전압	250V
	전류	28A
출력범위	전압	0~250V
	전류	0~28A
출력주파수	40kHz	

㉯ 능동제어 기반 전력변환장치

지금까지 능동제어 기반 전력변환장치 개발을 위해 ZCD 기법에 대한 내용과 상세 동작 내용을 제시하였고 제작하였다. inverter는 ZCD 기법을 이용하여 공진주파수를 자동으로 추종 되는 것을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 이를 바탕으로 회로를 제작하여 실험하였고 공진주파수가 자동으로 추종 되는 것을 확인하였다. 초기 inverter 동작 주파수가 공진주파수보다 낮을 경우 그리곤 높은 경우에 대해서 진행하였으며 두 부분 모두 충족하는 것을 확인하였다. 능동제어 기반 전력변환장치의 사양은 표1-5과 같으며 설계도면은 그림1-73과 같다.

표1-5 능동제어 기반 전력변환장치 사양

정격입력	전압	3Φ 220V
	주파수	60Hz
최대출력	전압	250V
	전류	28A
출력범위	전압	0~250V
	전류	0~28A
출력주파수	부하에 따라 변화(최대 200KHz)	

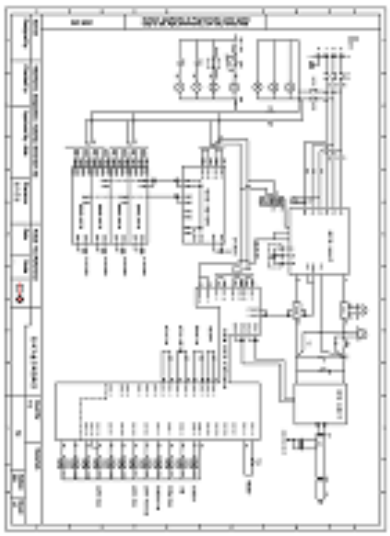


그림1-72 온도제어 기반 전력변환장치 설계도면

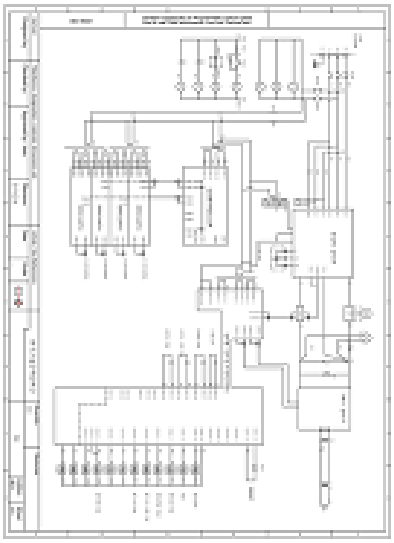


그림1-73 능동제어 기반 전력변환장치 설계도면

㉰ 전력변환장치 전력량 측정

전력량계를 사용하여 전력변환장치 전력량을 측정하였다. 그림1-66와 같은 가열 그래프를 적용하였을 때 단위 제곱미터 당 13.33kWh가 소요되며 그림1-75과 같은 콘크리트 구조물을 양생하는 경우에 대하여 요금을 계산한다. 요금계산 기준은 그림1-74 한국전력공사 전기요금표를 참고한다. 계약전력은 용도는 산업용(갑) I 이며 요금계산은 구분별, 계절별로 적용하였다. 해당 콘크리트 구조물에 대하여 월 30일 가열 양생한다고 가정했을 때 필요한 전력량은 1,230kWh로 계산된다. 표1-6에서 계산된 전력량을 바탕으로 그림1-74의 요금표를 적용한다. 그림1-74에서의 계약전력에 의한 기본요금은 계산에서 제외하고 전력량 사용에 따른 요금을 계산하였다. 계산 결과 그림1-75의 콘크리트 구조물 한 개를 월 30회 가열 양생하는 드는 비용은 표1-6과 같다.

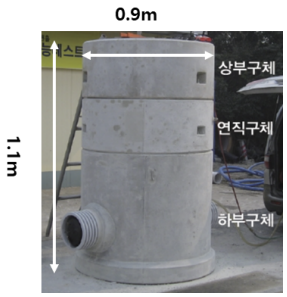
산업용(갑) I

광업, 제조업 및 기타사업에 전력을 사용하는 계약전력 4kW 이상 300kW 미만의 고객에게 적용

적용일자 : 2021년 1월 1일

구분		기본요금 (원/kW)	전력량 요금(원/kWh)		
			여름철(6~8월)	봄·가을철(3~5,9~10월)	겨울철(11~2월)
저압전력		5,550	76.0	54.2	74.3
고압A	선택 I	6,490	84.6	60.9	84.5
	선택 II	7,470	79.8	56.3	78.0
고압B	선택 I	6,000	83.4	59.8	83.0
	선택 II	6,900	78.7	55.2	76.9

그림1-74 한국전력공사 전기요금표



겉면적: $3.1m^2$

월 전력량: $1{,}230kWh$

그림1-75 콘크리트 구조물

표1-6 구분, 계절별 전력량 계산

구분		전력량 요금(원)			
		여름철 (6~8월)	봄·가을철 (3~5,9~10월)	겨울철 (11~2월)	월평균
저압전력		93,480	66,666	91,389	79,550
고압A	선택 I	104,058	74,907	103,935	89,451
	선택 II	98,154	69,249	95,940	83,148
고압B	선택 I	102,582	73,554	102,090	87,945
	선택 II	96,801	67,896	94,587	81,795

㉮ 전력변환시스템 활용 가능성

개발된 고주파 유도가열 전력변환시스템은 철강·금속 분야(금속합금의 용융 ·담금질 ·풀림 ·용접 ·경납땜 ·단조 등) 및 반도체 업계(게르마늄이나 실리콘의 용융정제 ·단결정 제조)분야 뿐만 아니라 일반 가정에서 조리용 가열기구로도 활용될 수 있다.

(2) 급속양생 효율 최적화를 위한 유도가열 시스템 핵심 요소 기술 개발

(가) 유도가열 최적화 기술 개발

① Al(알루미늄)

가열체의 재질은 Al(알루미늄)이며 턴수는 1~3회, 턴수가 2회 이상일 경우 턴간 간격 변화에 대해서 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션에 사용된 정보는 아래의 표 2-1과 같다.

표2-1 Al 시뮬레이션 정보

가열체 재질	Workcoil 재질	치수(mm)		주파수	시작온도
알루미늄	구리	높이	315	40kHz	20℃
		외경	158		
		두께	4		

㉮ 1 TURN

○ 그림2-1은 양생용 거푸집(Workpiece)을 열해석 시뮬레이션을 한 결과를 나타낸다. 양생용 거푸집은 원통형의 모양으로 아래는 막혀있으며 위는 뚫려 있는 형태이다. 높이 315mm, 외경 158mm, 두께 4mm의 치수를 가진다. 시뮬레이션 상은 단면적으로 진행되었으며 주파수는 전력변환장치 출력과 같은 40kHz, 시작온도는 상온임을 고려하여 20℃로 설정하였다. 코일은 거푸집의 가운데를 둘러싸는 형태이다. 시뮬레이션은 0초부터 300초 동안 코일에 전류를 흘려줬을 때 온도를 해석하였다.

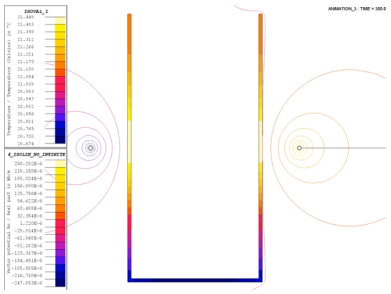


그림2-1 1Turn 열분포

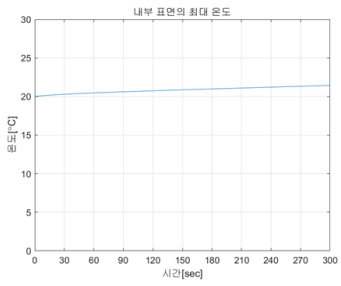


그림2-2 내부 최대온도 그래프

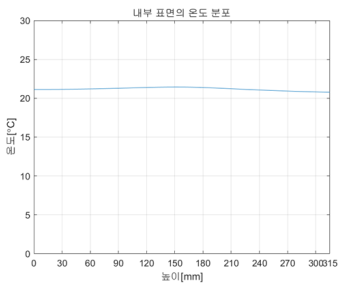


그림2-3 내부 표면 온도 그래프

㉯ 2 TURN

일이 거푸집을 2회 돌며 감싼다. 그러므로 턴 간격을 변경하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션에 사용한 간격은 100mm부터 300mm까지 20mm 단위로 증가한다. 그림2-3은 코일 간격에 따른 최대 온도와 온도분포 그래프를 하나의 그래프로 모은 그림이다. 턴수가 1회일 때와 비교하여 거푸집의 중간이 가장 높은 온도를 가지지 않는 것을 확인할 수 있다. 내부 최대 온도 또한 300초가 가장 높은 온도가 아닌 경우도 존재한다. 그래프와 아래의 시뮬레이션 해석 결과를 참고하면 알루미늄은 유도가열로 인한 온도상승이 40 kHz 대역에서는 거의 이루어지지 않는 것을 알 수 있다. 그림2-4~6 시뮬레이션 해석 결과 및 온도분포 그래프를 나타낸다.

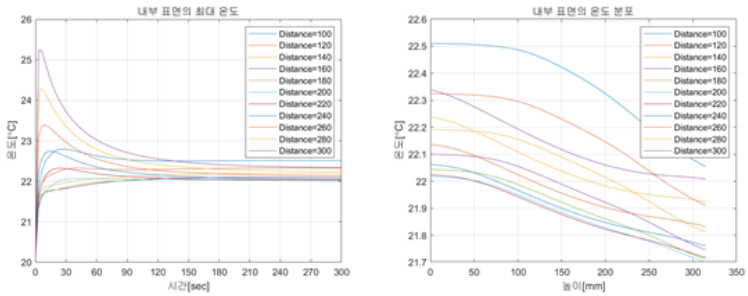


그림2-3 턴 간격에 따른 최대 온도 및 온도분포

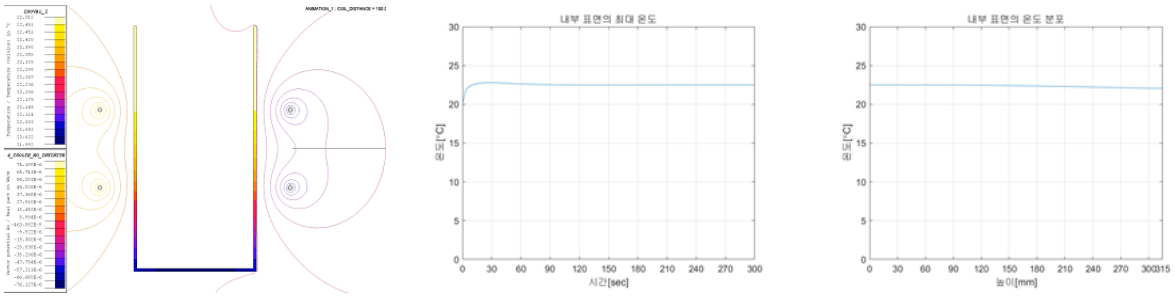


그림2-4 2 Turn, 100mm 열 분포

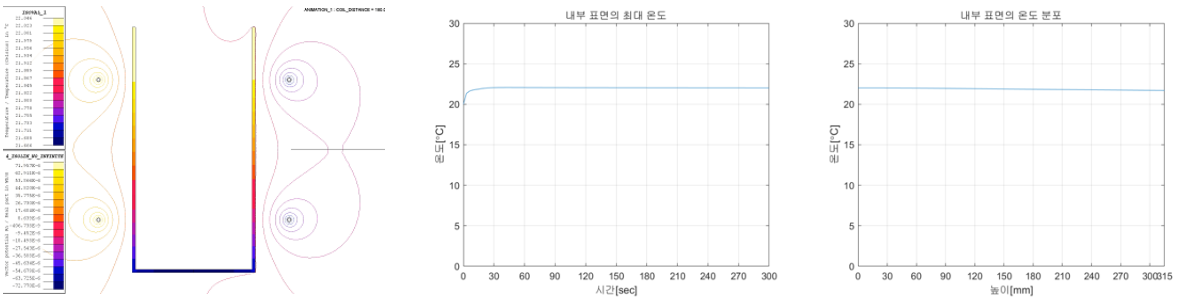


그림2-5 2 Turn, 200mm 열 분포

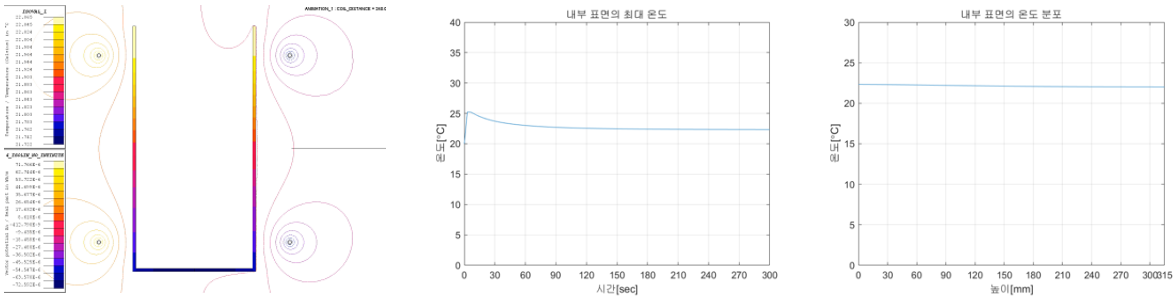


그림2-6 2 Turn, 300mm 열 분포

㉰ 3 TURN

코일이 거푸집을 3회 돌며 감싼다. 턴 간격은 양 끝 턴간의 간격으로 중앙에 위치한 턴은 거푸집 중간에 위치한다. 시뮬레이션에 사용한 간격은 50mm에서 150mm까지 10mm 단위로 증가한다. 그림2-7은 간격에 따른 최대 온도분포와 온도분포 그래프를 하나의 그래프로 모은 그림이다. 일부는 턴수가 1회일 때와 같이 거푸집 중간의 온도를 가지는 것을 확인할 수 있으며 턴수가 2회일 때와 달리 시간이 지날수록 온도가 상승하나 큰 변화는 없는 것을 알 수 있다. 그림2-8~10는 시뮬레이션 해석 결과 및 온도분포 그래프를 나타낸다.

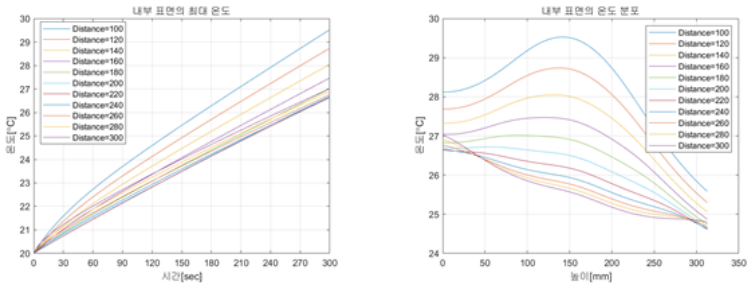


그림2-7 턴 간격에 따른 최대 온도 및 온도분포

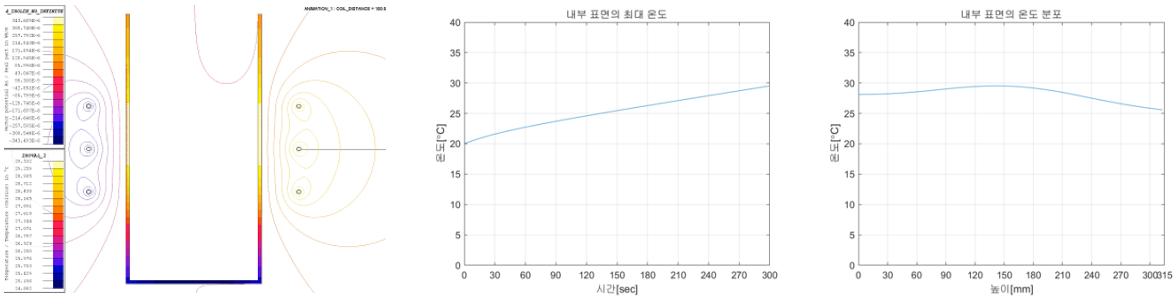


그림2-8 3 Turn, 50mm 열분포

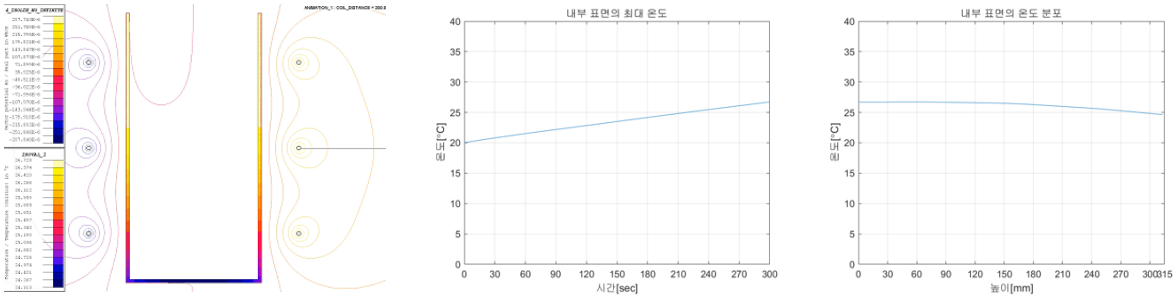


그림2-9 3 Turn, 100mm 열분포

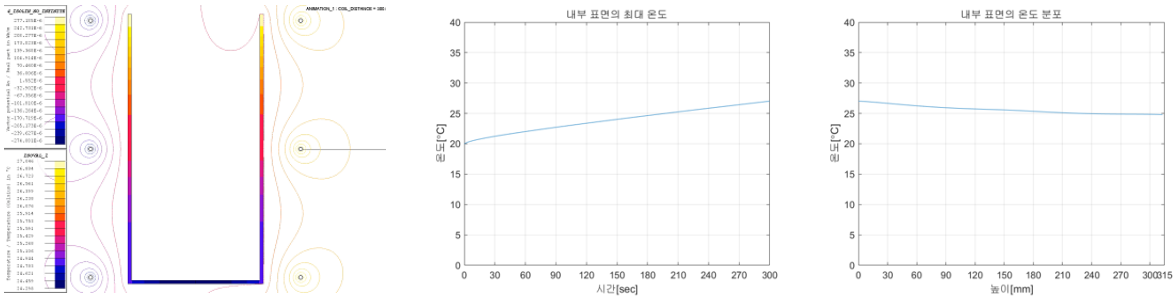


그림2-10 3 Turn, 150mm 열분포

② SUS(서스)

㉮ 1 TURN

그림2-11은 양생용 거푸집(Workpiece)을 열해석 시뮬레이션을 한 결과를 나타낸다. 시뮬레이션 상은 단면적으로 진행되었으며 주파수는 전력변환장치 출력과 같은 40kHz, 시작온도는 상온임을 고려하여 20℃로 설정하였다. 코일은 거푸집의 가운데를 둘러싸는 형태이다. 시뮬레이션은 0초부터 300초 동안 코일에 전류를 흘려줬을 때 온도를 해석한다.

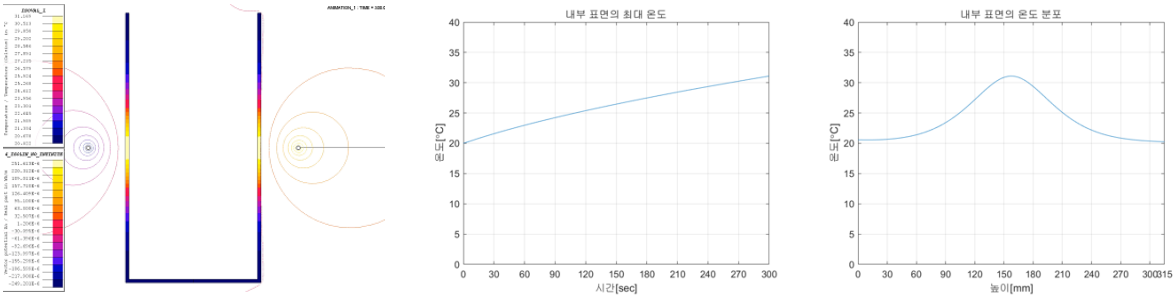


그림2-11 1 Turn 열분포

㉯ 2 TURN

코일이 거푸집을 2회 돌며 감싼다. 그러므로 턴 간격을 변경하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션에 사용한 간격은 위의 경우와 같다. 그림2-12은 간격에 따른 최대 온도와 온도분포 그래프를 하나의 그래프로 모은 그림이다. 턴수가 1회일 때와 비교하여 거푸집의 중간이 가장 높은 온도를 가지지 않는 것을 확인할 수 있다. 오히려 간격이 멀어질수록 양 끝의 온도가 올라가는 것을 볼 수 있다. 내부 최대 온도 또한 300초가 가장 높은 온도가 아닌 경우도 존재한다. 그림2-13~15는 시뮬레이션 해석 결과 및 온도분포 그래프를 나타낸다.

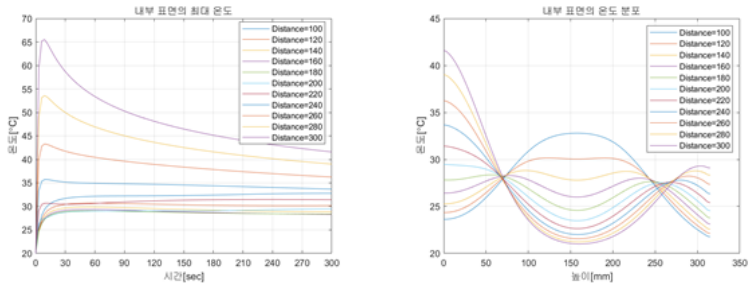


그림2-12 턴 간격에 따른 최대 온도 및 온도분포

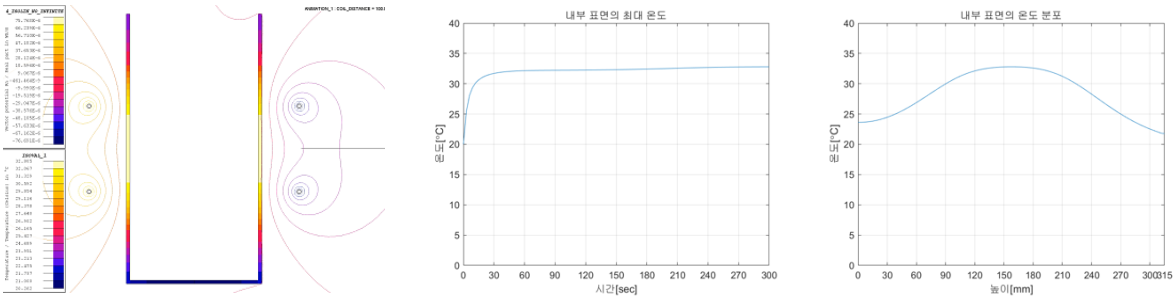


그림2-13 2 Turn, 100mm 열분포

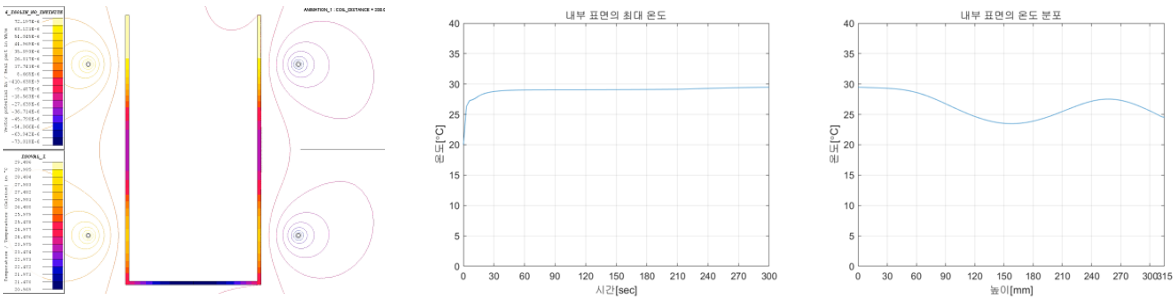


그림2-14 2 Turn, 200mm 열분포

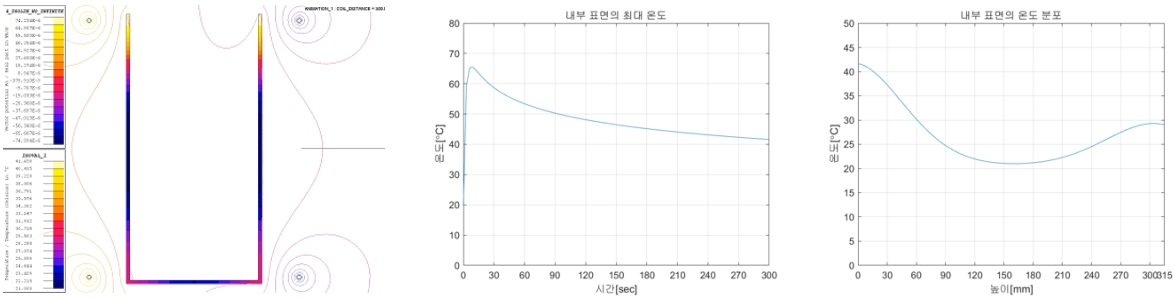


그림2-15 2 Turn, 300mm 열분포

㉰ 3 TURN

코일이 거푸집을 3회 돌며 감싼다. 턴 간격은 양 끝 턴간의 간격으로 중앙에 위치한 턴은 거푸집 중간에 위치한다. 시뮬레이션에 사용한 간격은 위의 경우와 같다. 그림2-16은 간격에 따른 최대 온도분포와 온도분포 그래프를 하나의 그래프로 모은 그림이다. 일부는 턴수가 1회일 때와 같이 거푸집 중간의 온도를 가지는 것을 확인할 수 있으며 턴수가 2회일 때와 비슷한 특성일 보이기도 하나 중간 부분의 온도가 보다 고르다. 그림2-17~19은 시뮬레이션 해석 결과 및 온도분포 그래프를 나타낸다.

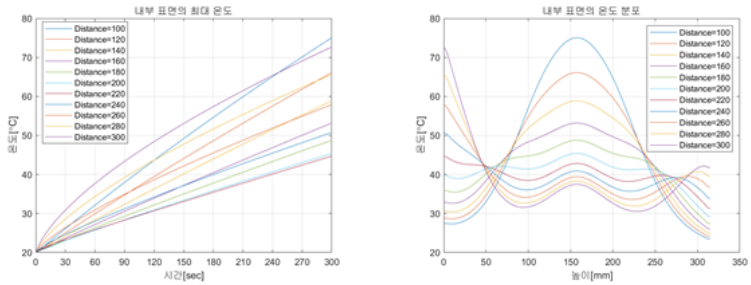


그림2-16 턴 간격에 따른 최대 온도 및 온도분포

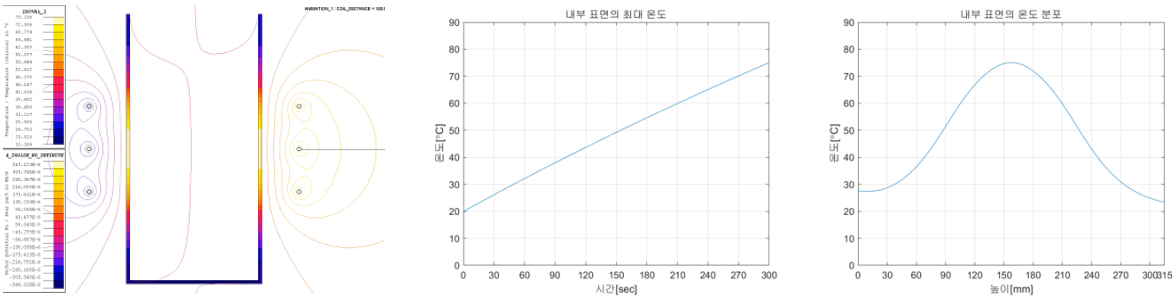


그림2-17 3 Turn, 50mm 열분포

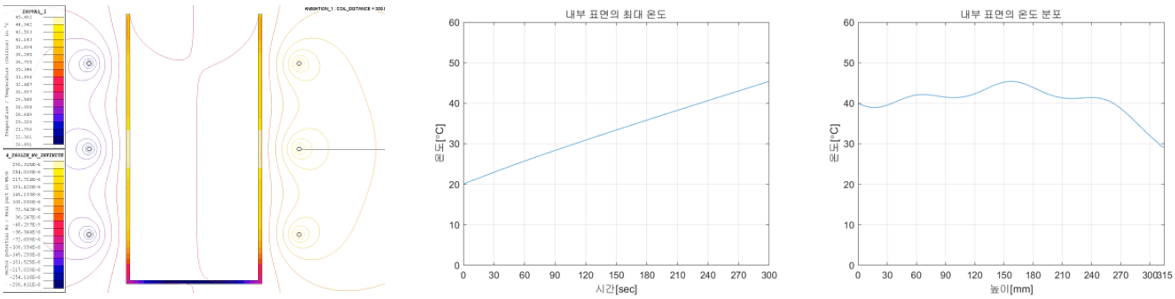


그림2-18 3 Turn, 100mm 열분포

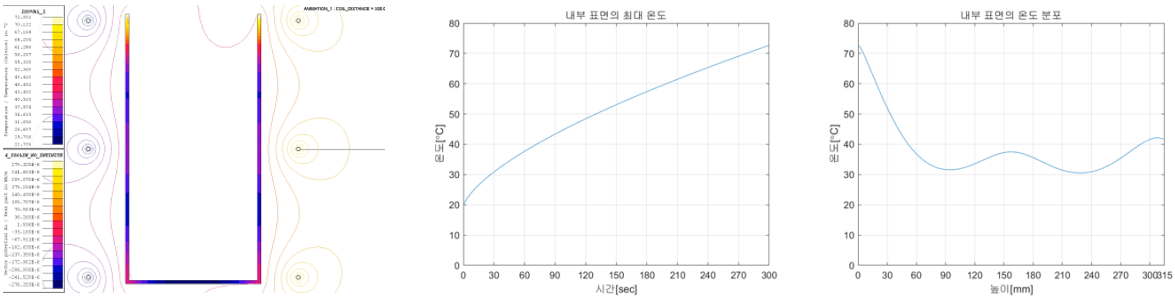


그림2-19 3 Turn, 150mm 열분포

③ Steel(철)

㉮ 1 TURN

그림2-20은 양생용 거푸집(Workpiece)을 열해석 시뮬레이션을 한 결과를 나타낸다. 높이 315mm, 외경 158mm, 두께 4mm의 치수를 가진다. 시뮬레이션 상은 단면적으로 진행되었으며 주파수는 전력변환장치 출력과 같은 40kHz, 시작온도는 상온임을 고려하여 20℃로 설정하였다. 코일은 거푸집의 가운데를 둘러싸는 형태이다. 시뮬레이션은 0초부터 300초 동안 코일에 전류를 흘려줬을 때 온도를 해석한다.

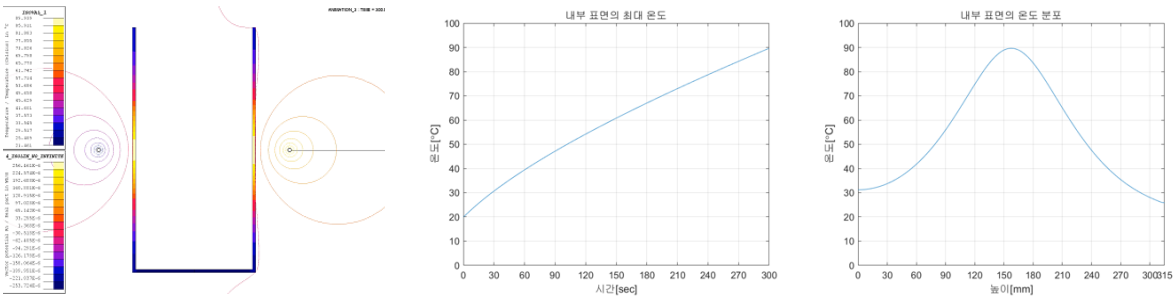


그림2-20 1 Turn 열분포

㉯ 2 TURN

코일이 거푸집을 2회 돌며 감싼다. 그러므로 턴 간격을 변경하여 시뮬레이션을 진행하였다. 그림2-21은 간격에 따른 최대 온도와 온도분포 그래프를 하나의 그래프로 모은 그림이다. 턴 수가 1회일 때와 비교하여 거푸집의 중간이 가장 높은 온도를 가지는 경우와 그렇지 않은 경우가 있다. 시간이 초기가 가장 높고 점점 낮아지는 것을 볼 수 있다. 그림2-22~24은 시뮬레이션 해석 결과 및 온도분포 그래프를 나타낸다.

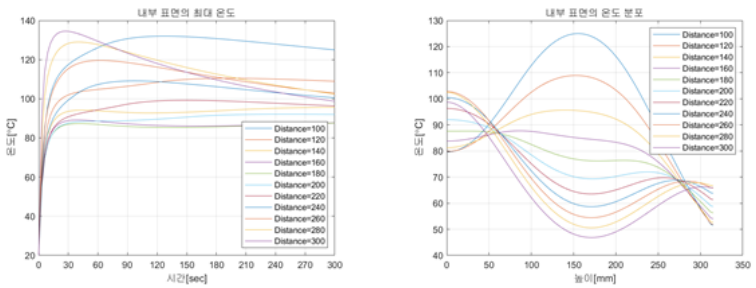


그림2-21 턴 간격에 따른 최대 온도 및 온도분포

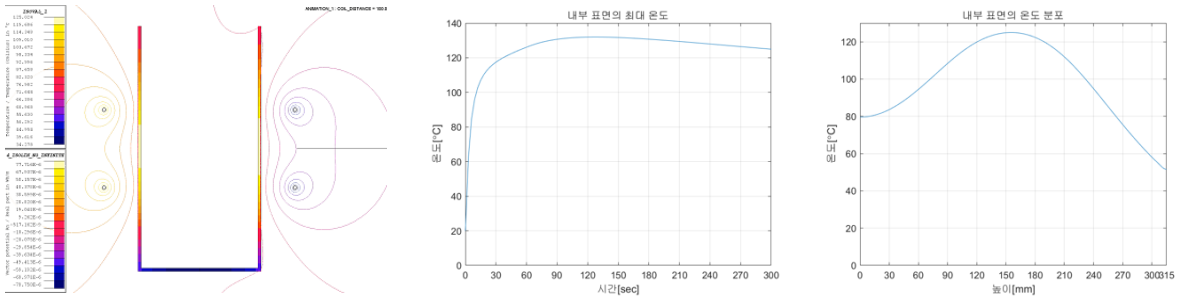


그림2-22 2 Turn, 100mm 열분포

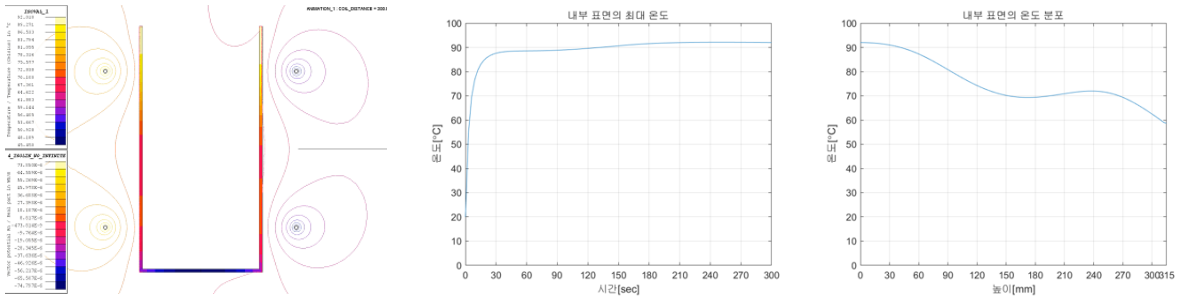


그림2-23 2 Turn, 200mm 열분포

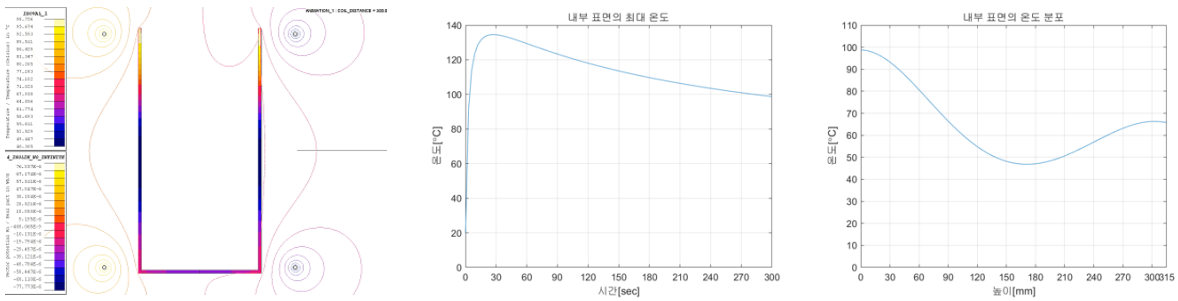


그림2-24 2 Turn, 300mm 열분포

㉰ 3 TURN

○ 코일이 거푸집을 3회 돌며 감싼다. 턴 간격은 양 끝 턴간의 간격으로 중앙에 위치한 턴은 거푸집 중간에 위치한다. 그림2-25은 간격에 따른 최대 온도분포와 온도분포 그래프를 하나의 그래프로 모은 그림이다. 일부는 턴수가 1회일 때와 같이 거푸집 중간의 온도를 가지는 것을 확인할 수 있으며 턴수가 2회일 때와 비슷한 특성일 보이기도 하나 중간 부분의 온도가 보다 고르다. 그림2-26~28은 시뮬레이션 해석 결과 및 온도분포 그래프를 나타낸다.

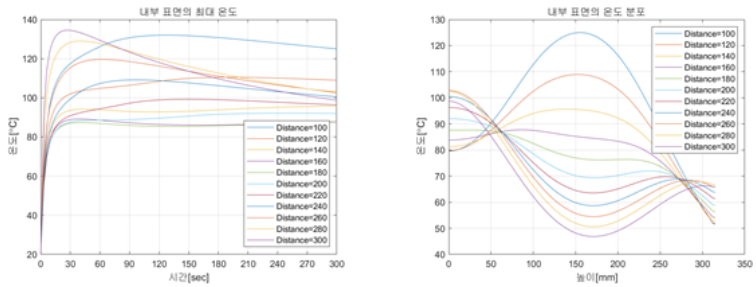


그림2-25 턴 간격에 따른 최대 온도 및 온도분포

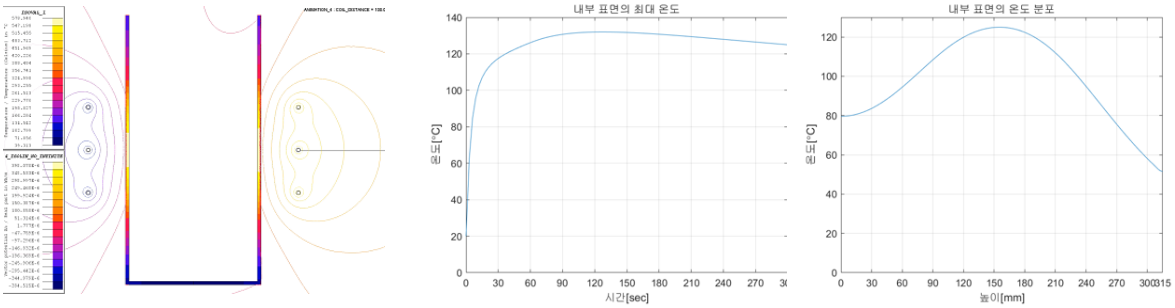


그림2-26 3 Turn, 50mm 열분포

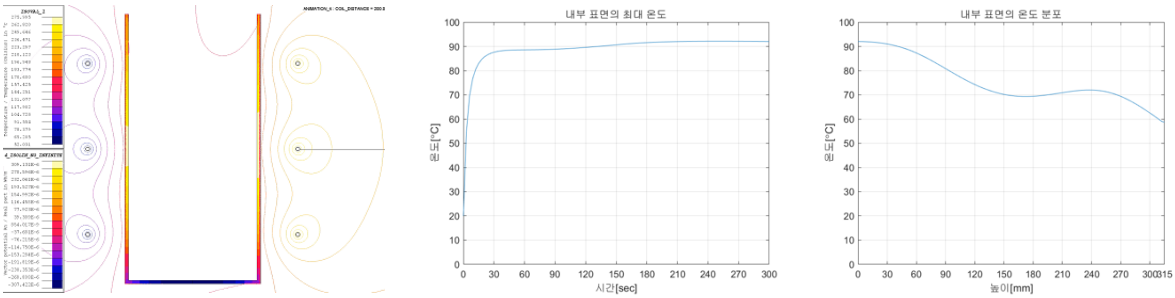


그림2-27 3 Turn, 100mm 열분포

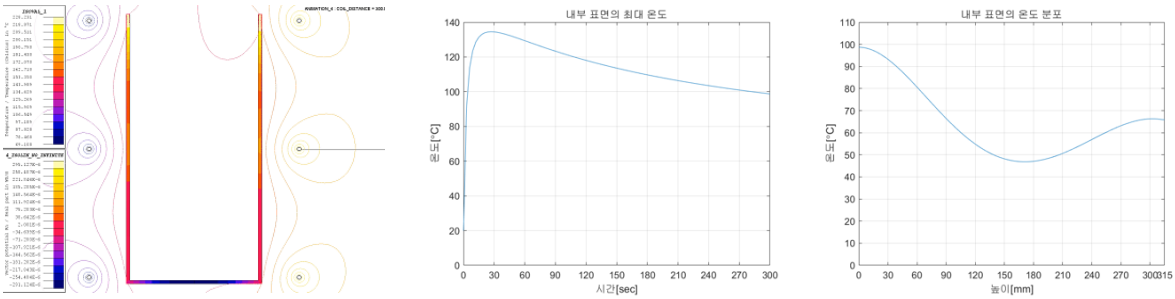


그림2-28 3 Turn, 150mm 열분포

④ 실험기반 유도가열 조건 도출

실험기반 유도가열 조건 결과를 얻기 위하여 서로 다른 3 가지의 가열체에 대하여 가열 시뮬레이션을 진행하였다. 가열 시뮬레이션 결과 중 가장 좋은 것에 대하여 유도가열 실험을 진행하였다. 본 실험에서는 ① 시뮬레이션 기반 유도가열 성능 시험의 결과에 따라 실험에 사용된 피가열체(거푸집)의 재질은 Steel(철)이며 그림2-80과 같은 관형 원통 모양을 사용하였다. 가열에 사용된 코일의 턴 수는 3~5회이다. 실험 변수로는 코일 턴 간 간격과 코일과 피가열체의 이격거리로 선정하였다. 그림2-29와 같이 콘크리트 가열 양생 그래프에 따르면 가열 양생 동안 최고 온도는 70oC 내외로 설정한다. 따라서 시뮬레이션을 피가열체의 최고온도가 70oC 내외를 기록했을 때의 온도 분포에 초점을 맞춰서 진행하였다. 시뮬레이션 결과 중 온도 분포가 가장 고른 것을 모델을 기반으로 실험을 진행하였다.

표5-1 피가열체(거푸집) 정보

	피가열체1	피가열체2	피가열체3
재질	Steel	Steel	Steel
내경(W)/두께(t)	150/4	150/4	300/4
높이(h)	300	600	300

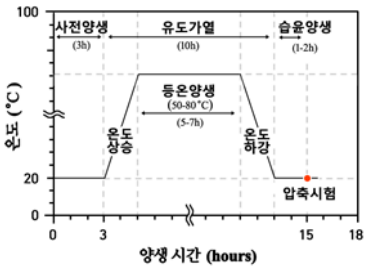


그림2-29 가열 그래프

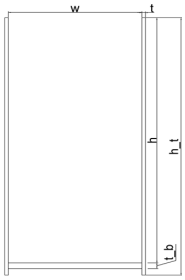


그림2-30 거푸집 단면도

㉮ 피가열체(거푸집)1

○ 코일 턴 수 3회에서 피가열체와 코일과의 이격거리(df) 40mm~100mm까지 20mm 단위로 진행하였으며 코일 턴 간격(D)은 25mm~150mm까지 25mm 단위로 진행하였다. 그림2-31~34는 각 이격거리에 따른 시뮬레이션에서의 내부 온도분포 그래프를 턴 간격에 따라 종합적으로 나타낸 그래프이다. 그림2-35는 턴 수 3회에서 가장 좋은 내부 온도분포를 가지며 이 때 df는 40mm, D는 75mm이다. 그림2-36은 동일한 df에서 D가 가장 좁은 경우로 그림2-85보다 끝 온도가 낮다. 그림2-37은 D가 가장 넓은 경우로 높이가 낮아질수록 온도가 낮아진다.

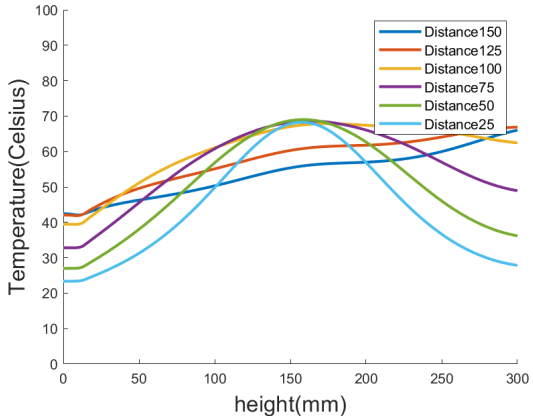


그림2-31 df: 40mm 내부 온도분포 그래프

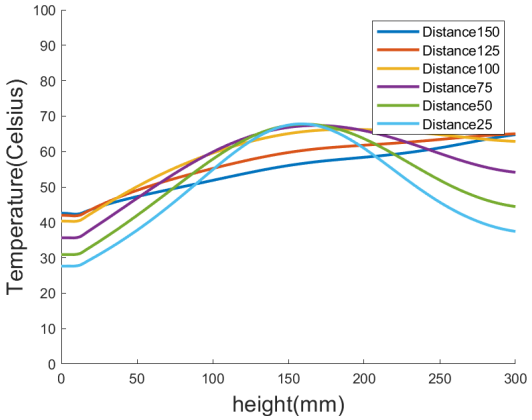


그림2-32 df: 60mm 내부 온도분포 그래프

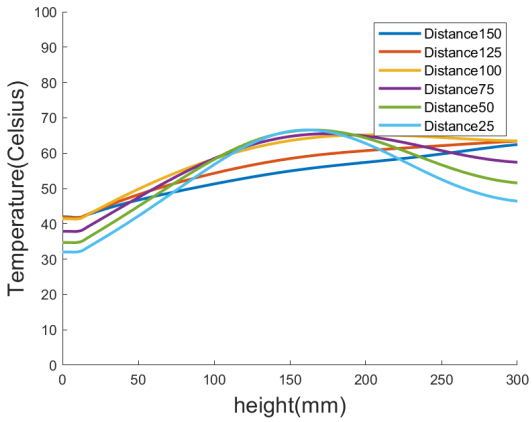


그림2-33 df: 80mm 내부 온도분포 그래프

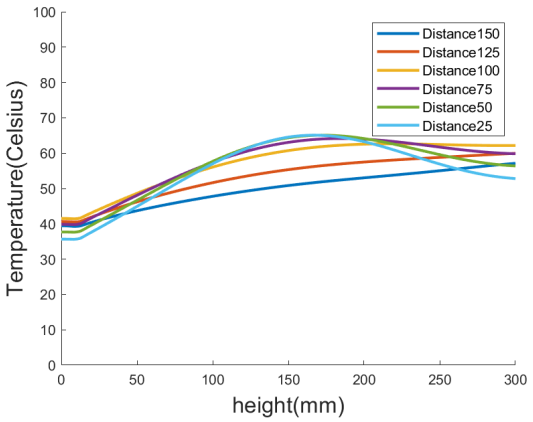


그림2-34 df: 100mm 내부 온도분포 그래프

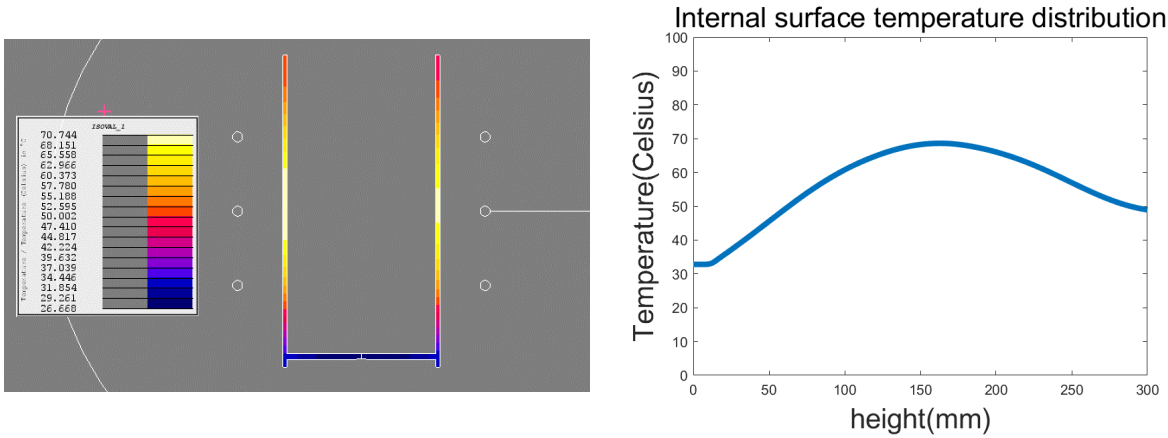


그림2-35 df: 40mm, D: 75mm 온도분포 및 내부 온도분포 그래프

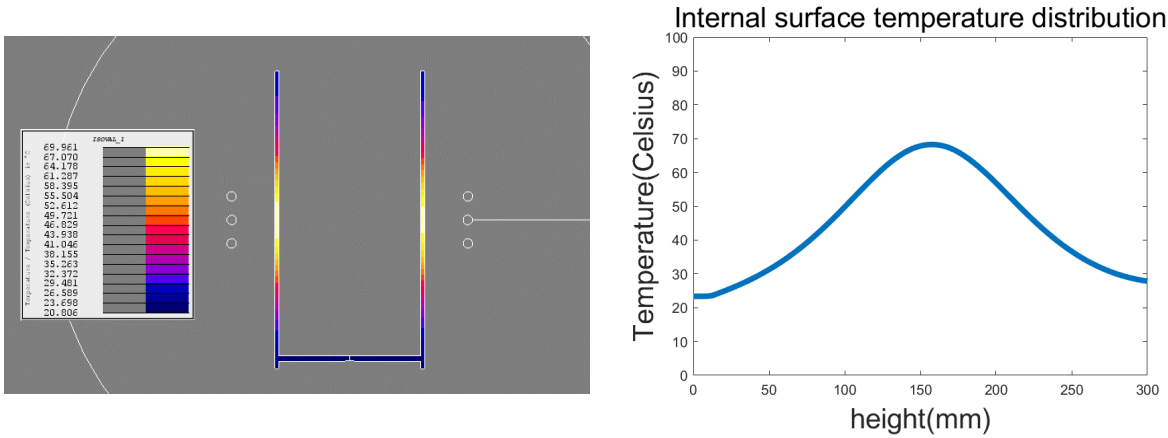


그림2-36 df: 40mm, D 25mm: 온도분포 및 내부 온도분포 그래프

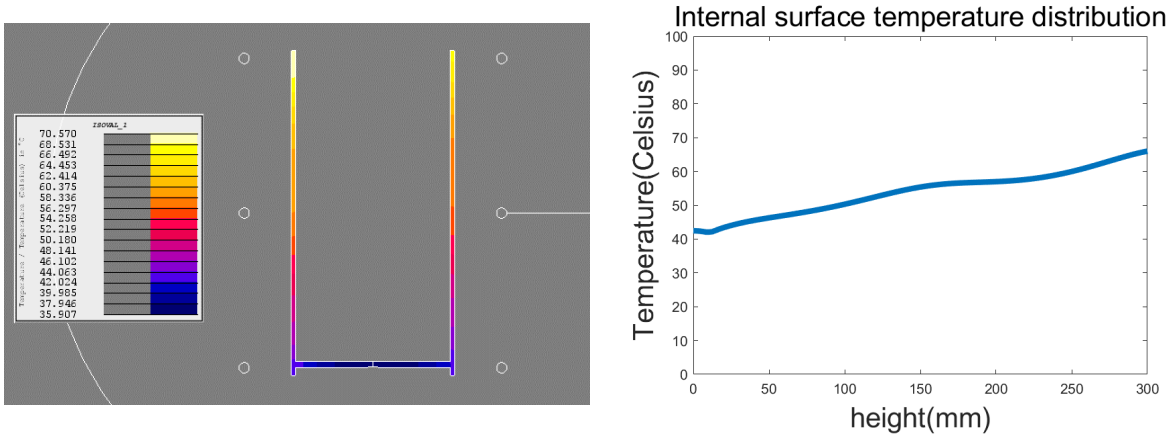


그림2-37 df: 40mm, D: 150mm 온도분포 및 내부 온도분포 그래프

○ 코일 턴수 4회에서 피가열체와 코일과의 이격거리 40mm~100mm까지 20mm 단위로 진행하였으며 코일 턴 간격은 10mm~90mm까지 10mm 단위로 진행하였다. 그림2-38~41는 각 이격거리에 따른 시뮬레이션에서의 내부 온도분포 그래프를 턴 간격에 따라 종합적으로 나타낸 그래프이다. 그림2-42는 턴 수 4회에서 가장 좋은 내부 온도분포를 가지며 이 때 df는 40mm, D는 70mm이다. 그림2-43은 동일한 df에서 D가 가장 좁은 경우로 그림2-42보다 끝 온도가 낮다. 그림2-44는 D가 가장 넓은 경우로 높이가 높아질수록 온도가 증가한다.

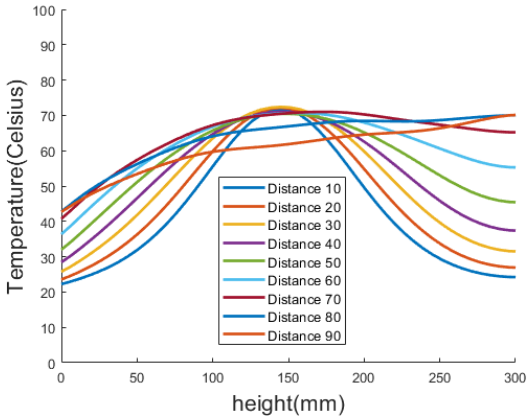


그림2-38 df: 40mm 내부 온도분포 그래프

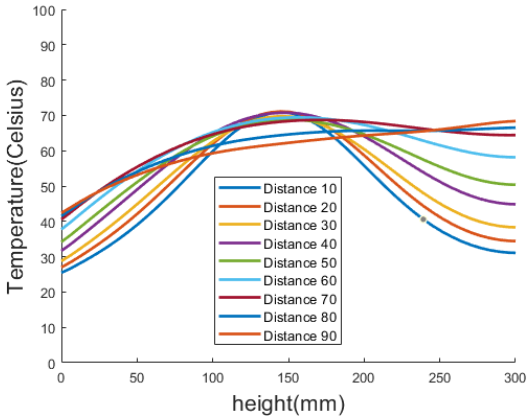


그림2-39 df: 60mm 내부 온도분포 그래프

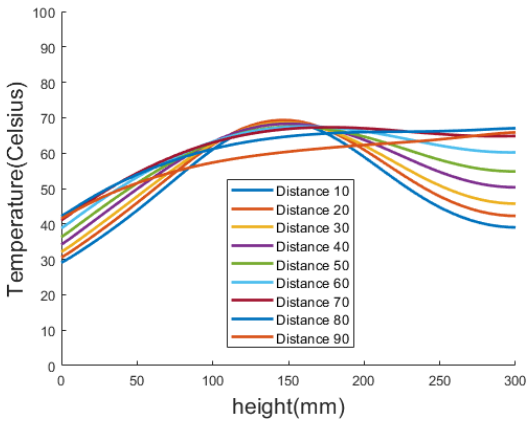


그림2-40 df: 80mm 내부 온도분포 그래프

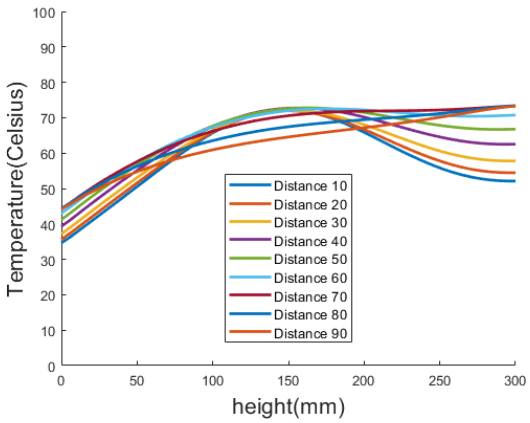
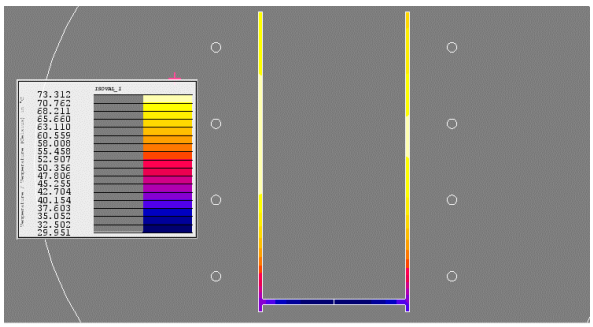


그림2-41 df: 100mm 내부 온도분포 그래프



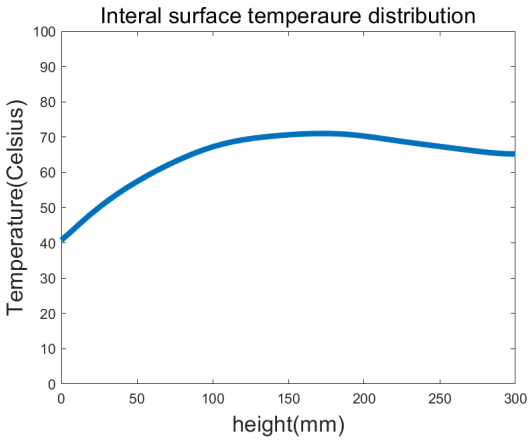
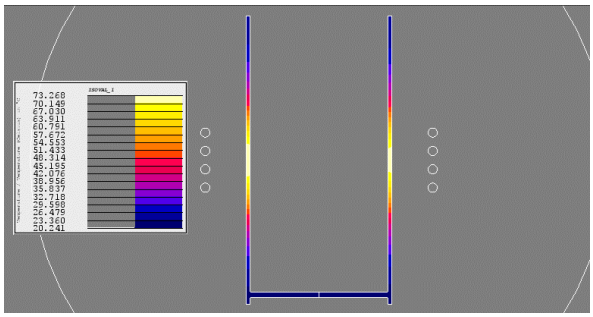


그림2-42 df: 40mm, D 70mm: 온도분포 및 내부 온도분포 그래프



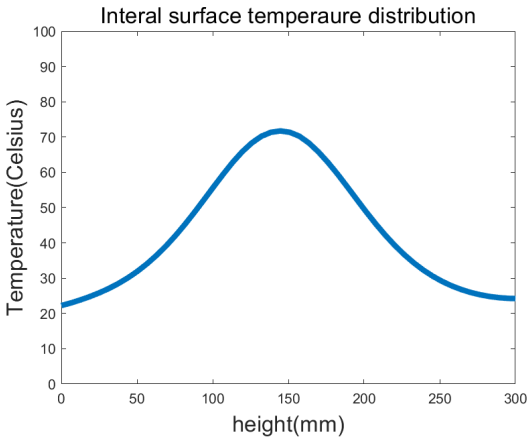
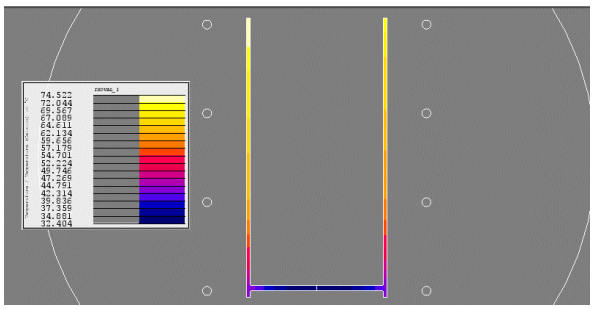


그림2-43 df: 40mm, D 10mm: 온도분포 및 내부 온도분포 그래프



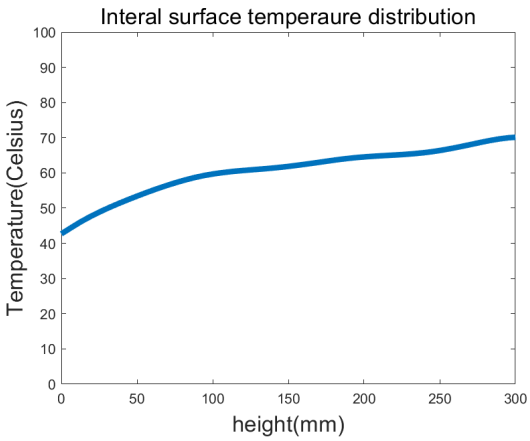


그림2-44 df: 40mm, D 90mm: 온도분포 및 내부 온도분포 그래프

코일 턴수 5회에서 피가열체와 코일과의 이격거리 40mm~100mm까지 20mm 단위로 진행하였으며 코일 턴 간격은 10mm~70mm까지 10mm 단위로 진행하였다. 그림2-45~48은 각 이격거리에 따른 시뮬레이션에서의 내부 온도분포 그래프를 턴 간격에 따라 종합적으로 나타낸 그래프이다. 그림2-49는 턴 수 5회에서 가장 좋은 내부 온도분포를 가지며 이 때 df는 40mm, D는 70mm이다. 그림2-50은 동일한 df에서 D가 가장 좁은 경우로 그림2-49보다 끝 온도가 낮다. 그림2-51는 D가 가장 넓은 경우로 위쪽 온도가 더 높은 것을 알 수 있다.

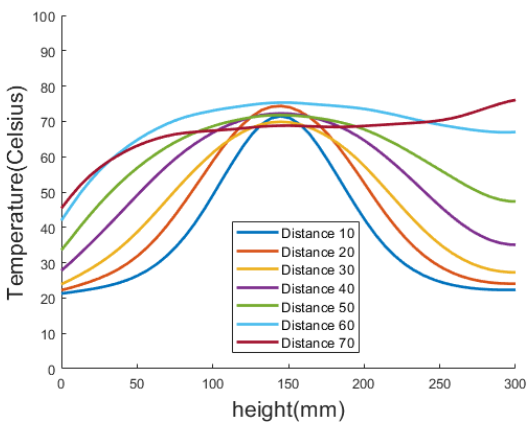


그림2-45 df: 40mm 내부 온도분포 그래프

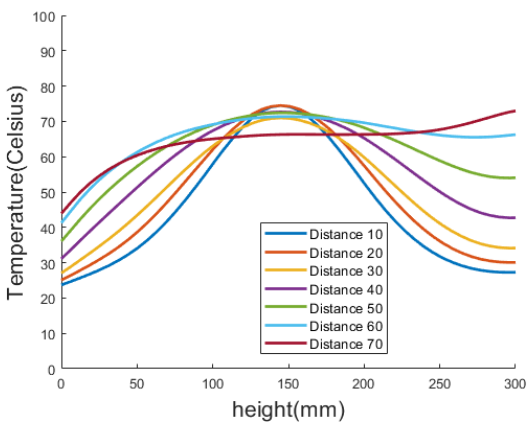


그림2-46 df: 60mm 내부 온도분포 그래프

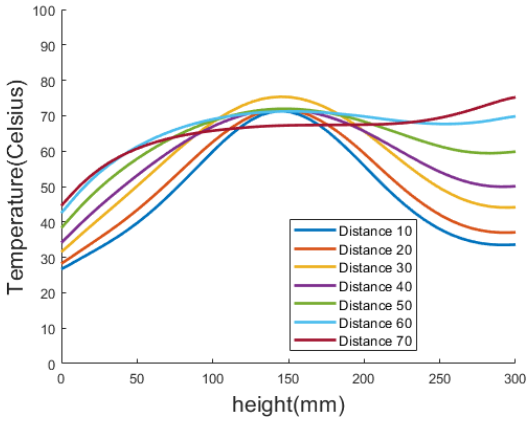


그림2-97 4f: 80mm 내부 온도분포 그래프

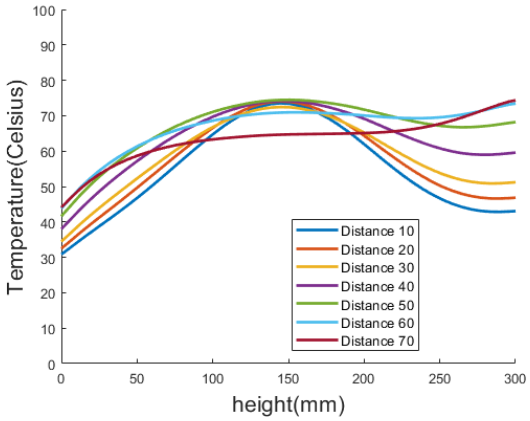
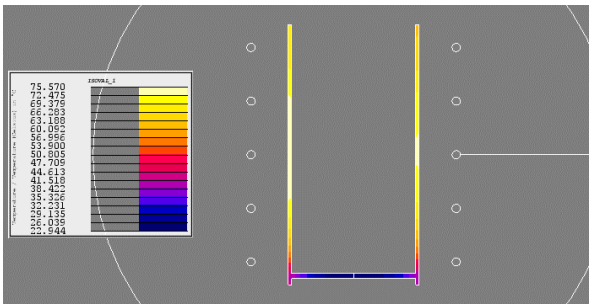


그림2-98 4f: 100mm 내부 온도분포 그래프



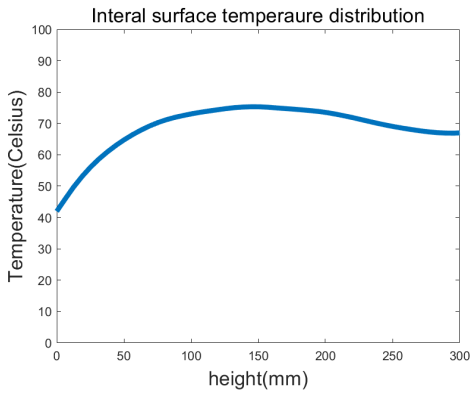
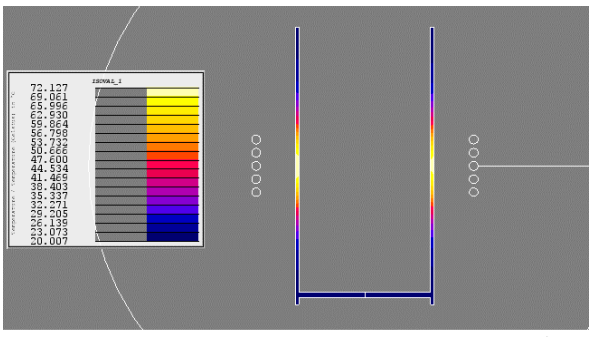


그림2-49 df: 40mm, D 60mm: 온도분포 및 내부 온도분포 그래프



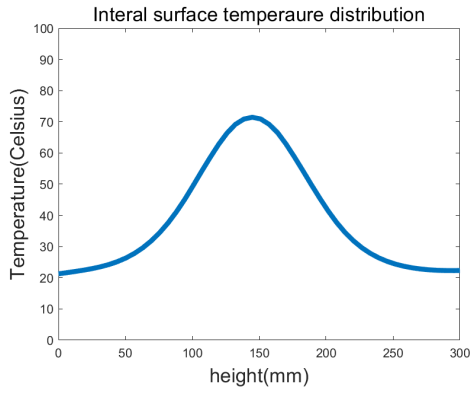
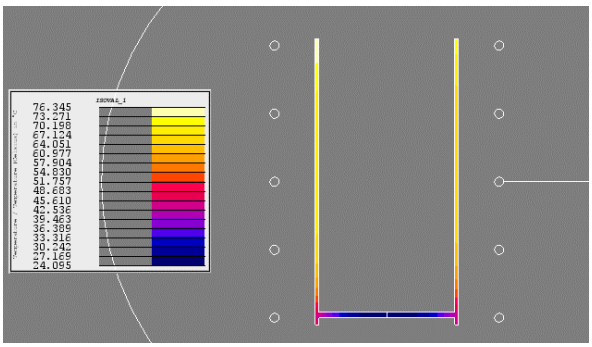


그림2-50 df: 40mm, D: 10mm 온도분포 및 내부 온도분포 그래프



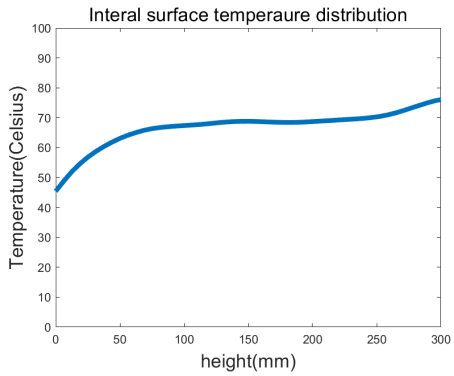


그림2-51 df: 40mm, D 70mm: 온도분포 및 내부 온도분포 그래프

코일 턴 수 3~5회에 대한 피가열체1의 70도 내외에서의 내부 온도분포 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 해석 결과 코일 턴 수 5회, 코일과 피가열체의 이격거리가 40mm, 코일 턴 간격 60mm의 경우에서 가장 좋은 내부 온도분포 그래프가 도출되었다. 따라서 해당 모델에 대하여 가열 실험을 진행하였다. 가열 실험은 시뮬레이션과 동일하게 내부 온도분포가 70도 내외에 대하여 진행하였다. 유도가열 과정 중 피가열체의 온도 데이터를 수집하기 위한 센서로는 열전대 K type을 사용했다. 그림2-52와 같이 거푸집에 온도 센서를 설치하였으며 리츠와이로 구성된 가열 코일을 사용하여 가열하였다. 가열 결과 그림2-53과 같은 온도 데이터를 수집하였으며 시뮬레이션과 비교하였다. 대부분의 온도센서 값과 시뮬레이션 수치가 유사한 것을 확인하였으며, TC1 부분의 온도차가 큰 것을 확인하였다. 이는 시뮬레이션 해석에서는 거푸집 밑판이 일체형으로 밑판도체로 열전달이 크게 이뤄졌기 때문인 것으로 고려된다.

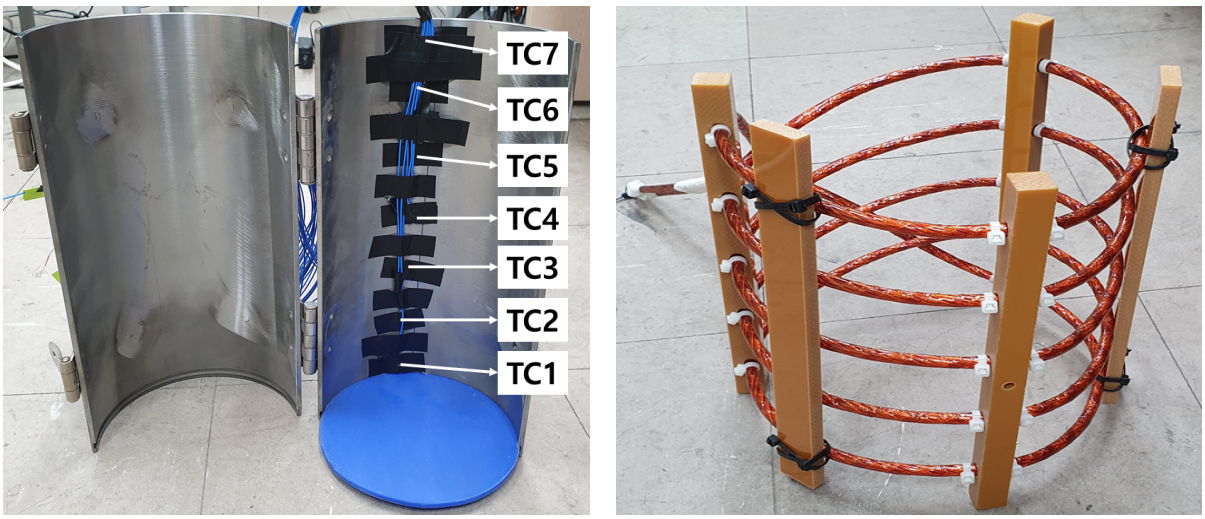


그림2-52 거푸집1(150x300) 내부 온도 센서 및 가열 코일

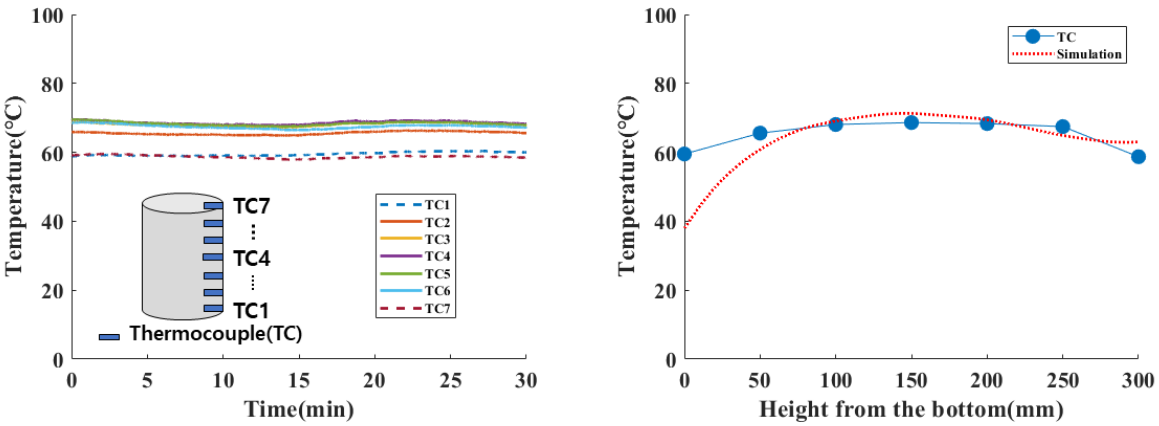


그림2-53 시간별 측정 온도 및 시뮬레이션, 온도 측정 데이터 그래프

㉯ 피가열체(거푸집)2

코일 턴 수 3회에서 피가열체와 코일과의 이격거리 20mm~100mm까지 20mm 단위로 진행하였으며 코일 턴 간격은 100mm~300mm까지 25mm 단위로 진행하였다. 그림2-54~58는 각 이격거리에 따른 시뮬레이션에서의 내부 온도분포 그래프를 턴 간격에 따라 종합적으로 나타

낸 그래프이다. 그림2-59는 턴 수 3회에서 가장 좋은 내부 온도분포를 가지며 이 때 df는 80mm, D는 175mm이다. 그림2-60은 동일한 df에서 D가 가장 좁은 경우로 그림2-109보다 끝 온도가 낮다. 그림2-61는 D가 가장 넓은 경우로 위쪽 온도가 더 높은 것을 알 수 있다.

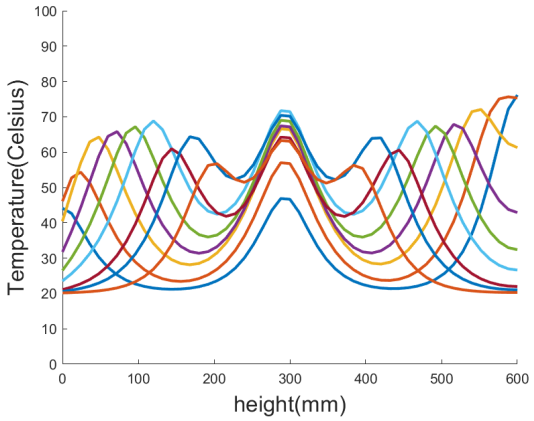


그림2-54 df: 20mm 내부 온도분포 그래프

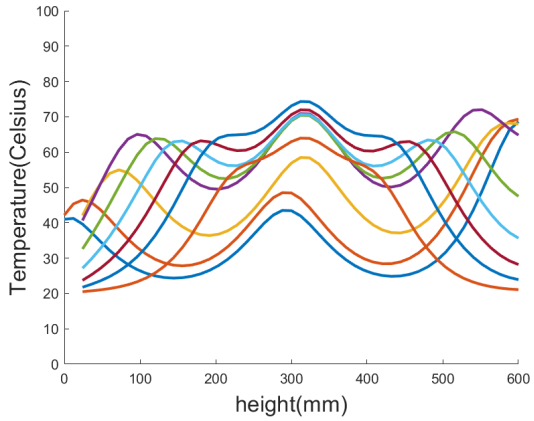


그림2-55 df: 40mm 내부 온도분포 그래프

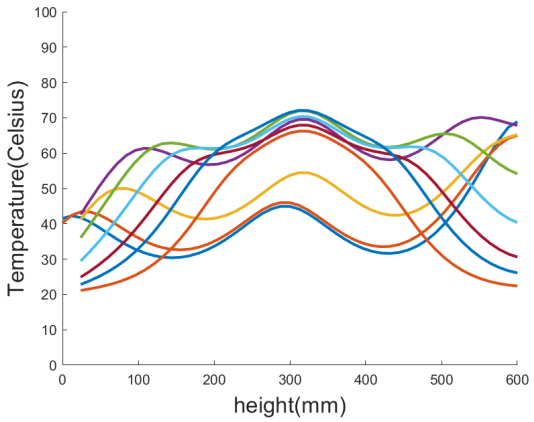


그림2-56 df: 60mm 내부 온도분포 그래프

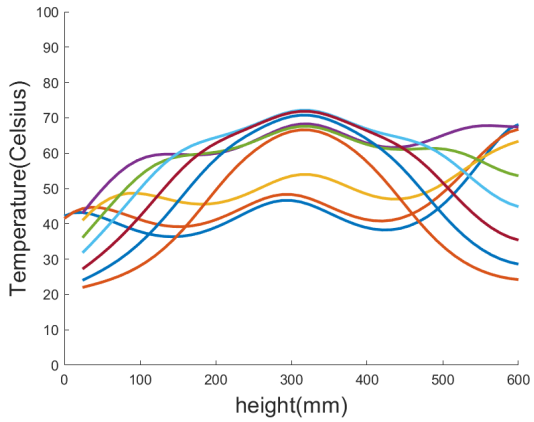


그림2-57 df: 80mm 내부 온도분포 그래프

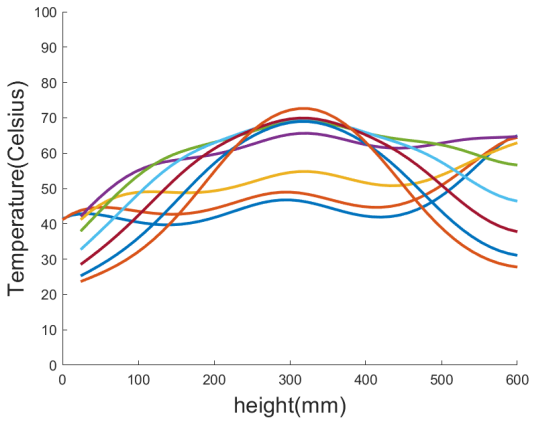
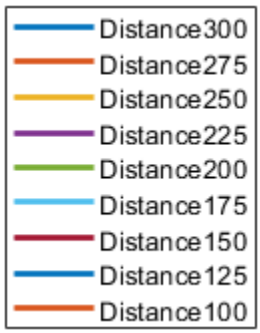


그림2-58 df: 100mm 내부 온도분포 그래프



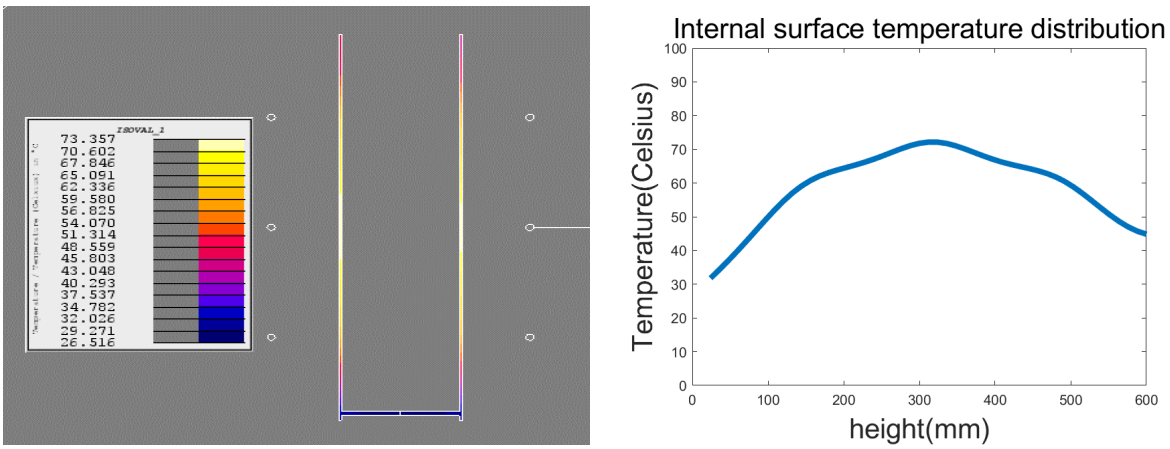


그림2-59 df: 80mm, D: 175mm온도분포 및 내부 온도분포 그래프

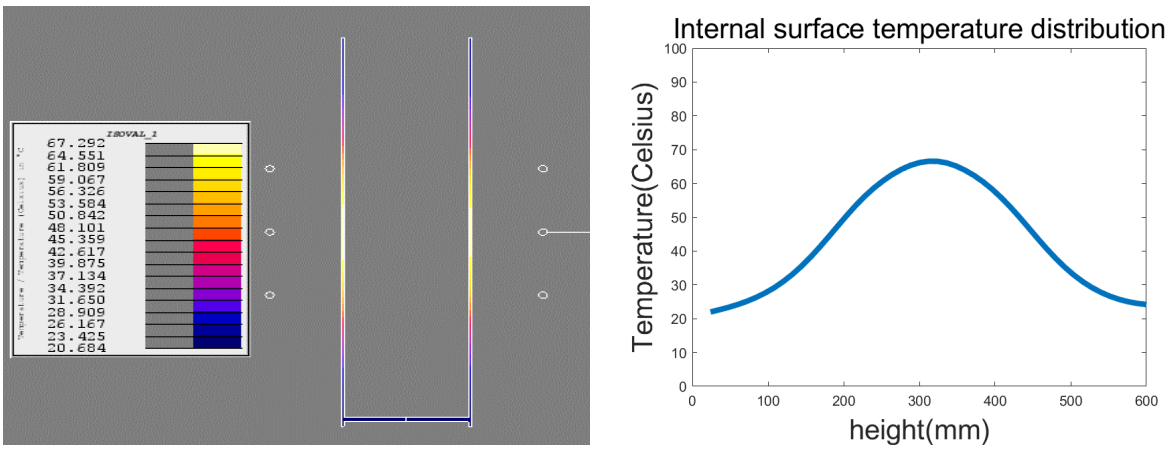


그림2-60 df: 80mm, D: 100mm온도분포 및 내부 온도분포 그래프

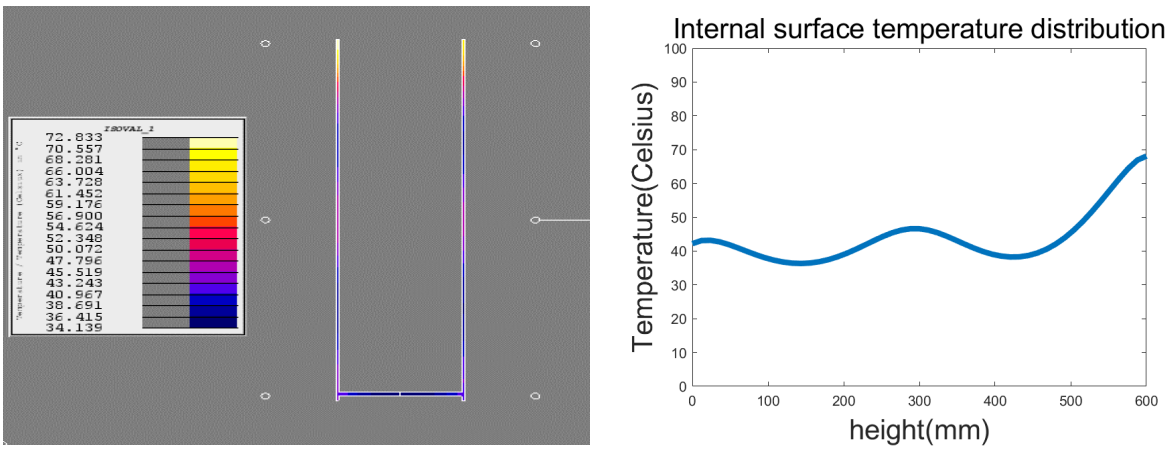


그림2-61 df: 80mm, D: 300mm온도분포 및 내부 온도분포 그래프

코일 턴 수 4회에서 피가열체와 코일과의 이격거리 20mm~100mm까지 20mm 단위로 진행하였으며 코일 턴 간격은 10mm~180mm까지 10mm 단위로 진행하였다. 그림2-63~67는 각 이격거리에 따른 시뮬레이션에서의 내부 온도분포 그래프를 턴 간격에 따라 종합적으로 나타낸 그래프이다. 그림2-68는 턴 수 4회에서 가장 좋은 내부 온도분포를 가지며 이 때 df는 60mm, D는 150mm이다. 그림2-69은 동일한 df에서 D가 가장 좁은 경우로 그림2-68보다 끝 온도가 낮다. 그림2-70는 D가 가장 넓은 경우로 위쪽 온도가 더 높은 것을 알 수 있다.

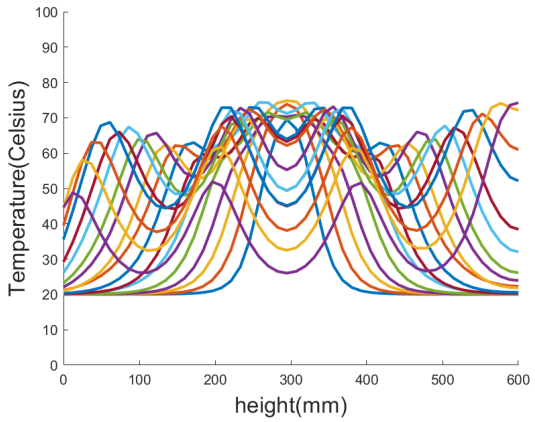


그림2-63 df: 20mm 내부 온도분포 그래프

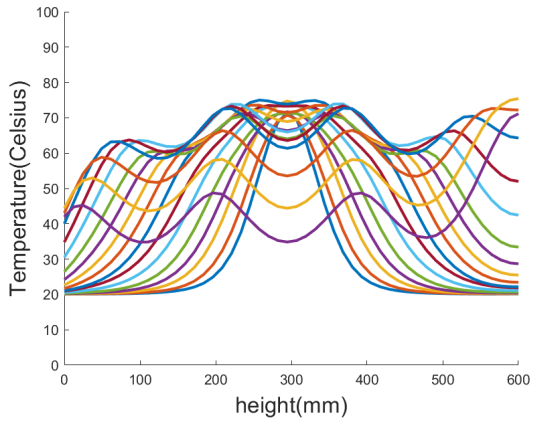


그림2-64 df: 40mm 내부 온도분포 그래프

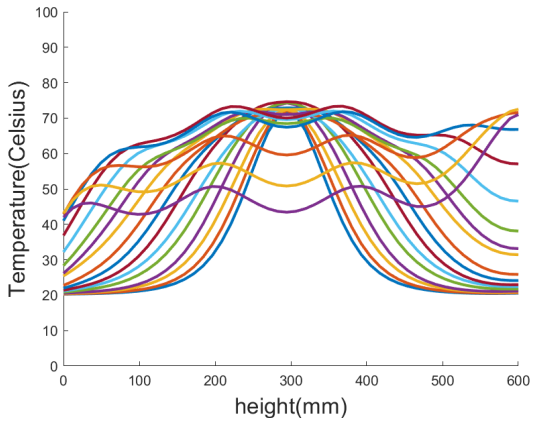


그림2-65 df: 60mm 내부 온도분포 그래프

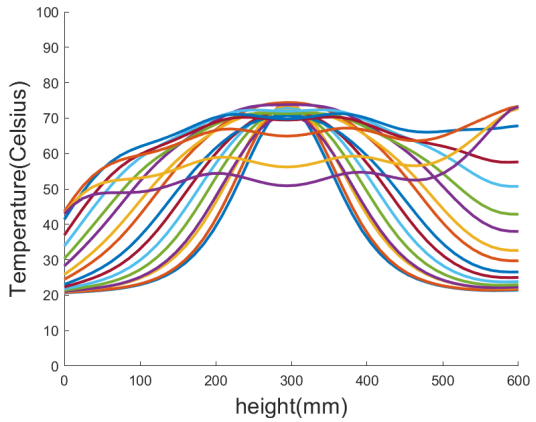


그림2-66 df: 80mm 내부 온도분포 그래프

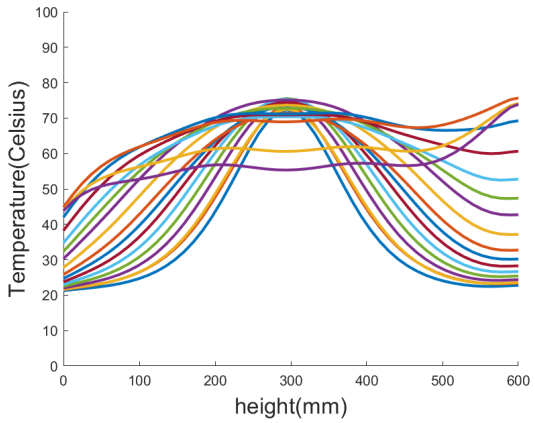
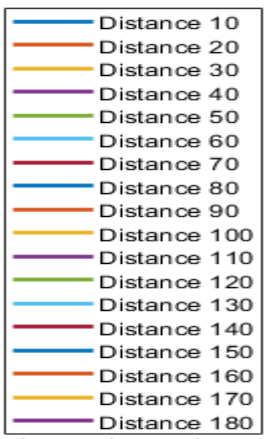
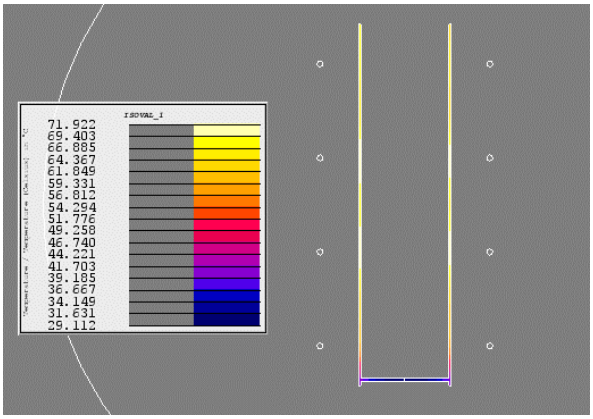


그림2-67 df: 100mm 내부 온도분포 그래프





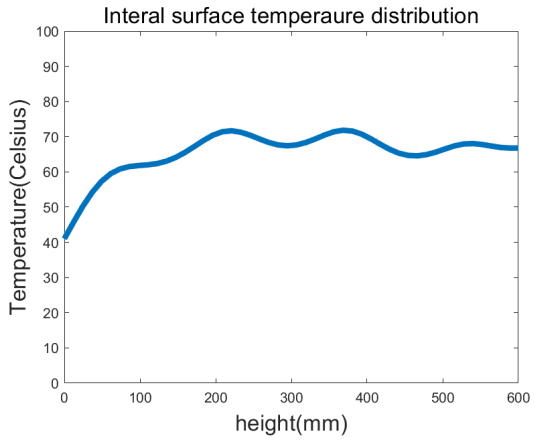
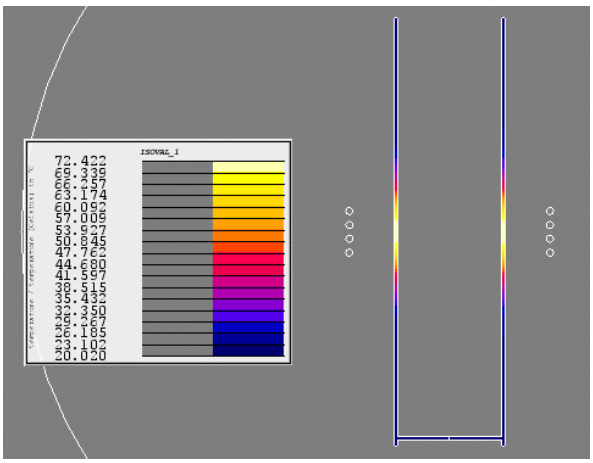


그림2-68 df: 60mm, D: 150mm온도분포 및 내부 온도분포 그래프



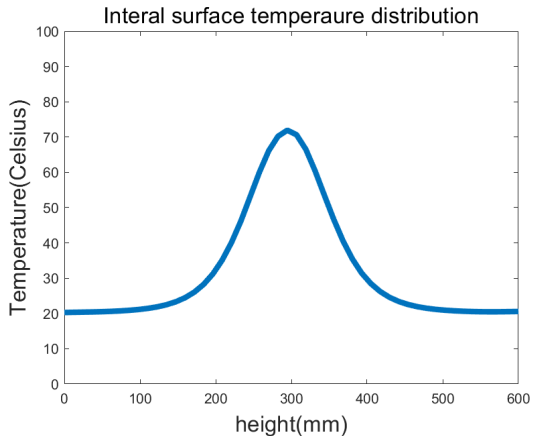
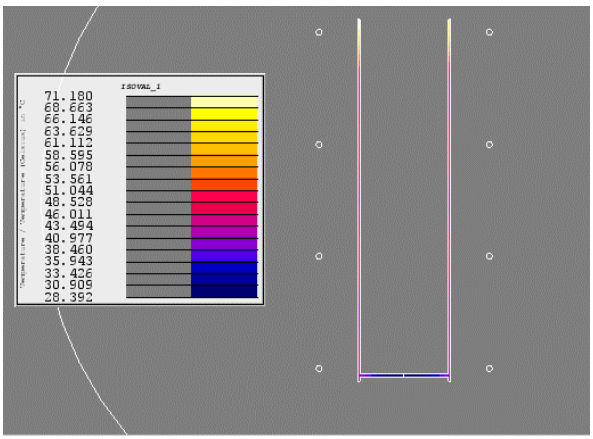


그림2-69 df: 60mm, D: 10mm온도분포 및 내부 온도분포 그래프



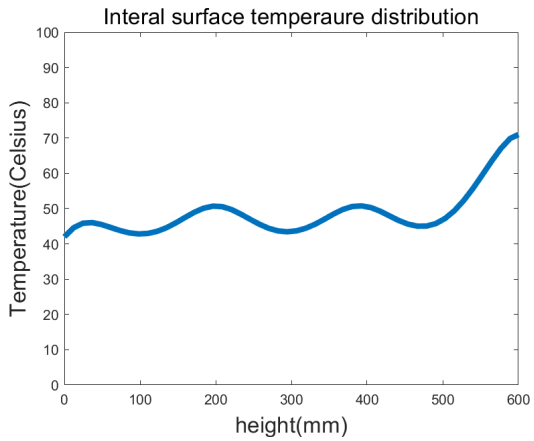


그림2-70 df: 60mm, D: 180mm온도분포 및 내부 온도분포 그래프

코일 턴 수 5회에서 피가열체와 코일과의 이격거리 20mm~100mm까지 20mm 단위로 진행하였으며 코일 턴 간격은 10mm~140mm까지 10mm 단위로 진행하였다. 그림2-71~75는 각 이격거리에 따른 시뮬레이션에서의 내부 온도분포 그래프를 턴 간격에 따라 종합적으로 나타낸 그래프이다. 그림2-76는 턴 수 5회에서 가장 좋은 내부 온도분포를 가지며 이 때 df는 60mm, D는 120mm이다. 그림2-77은 동일한 df에서 D가 가장 좁은 경우로 그림2-76보다 끝 온도가 낮다. 그림2-78는 D가 가장 넓은 경우로 위쪽 온도가 더 높은 것을 알 수 있다.

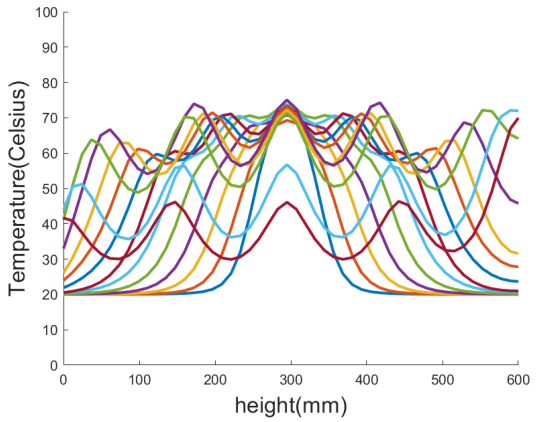


그림2-71 df: 20mm 내부 온도분포 그래프

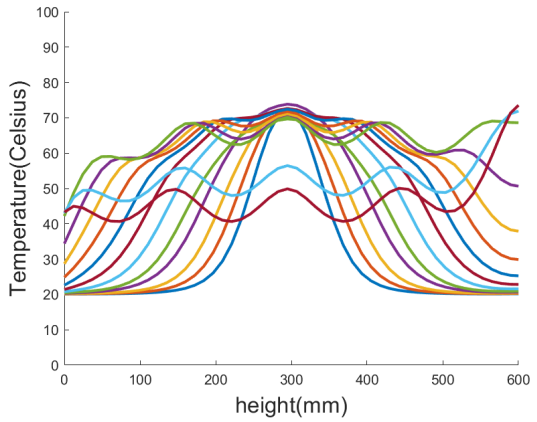


그림2-72 df: 40mm 내부 온도분포 그래프

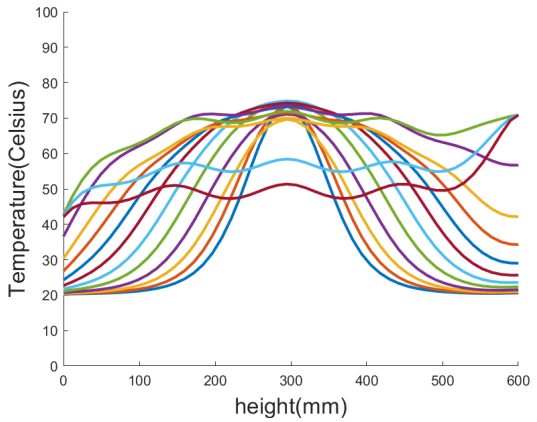


그림2-73 df: 60mm 내부 온도분포 그래프

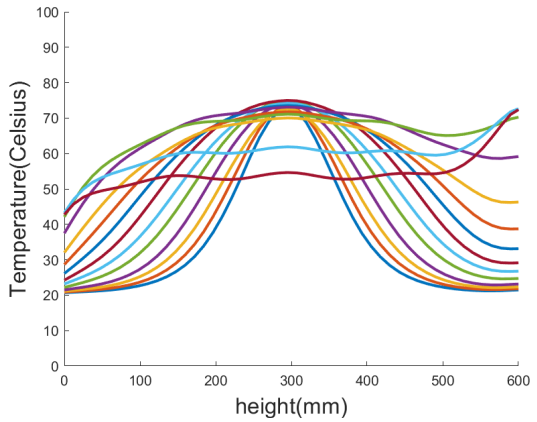
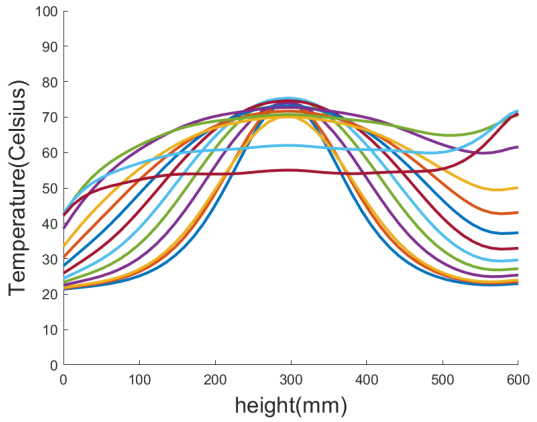


그림2-74 df: 80mm 내부 온도분포 그래프



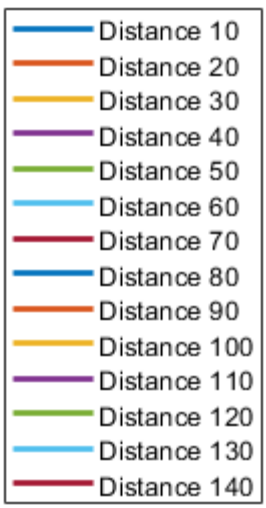
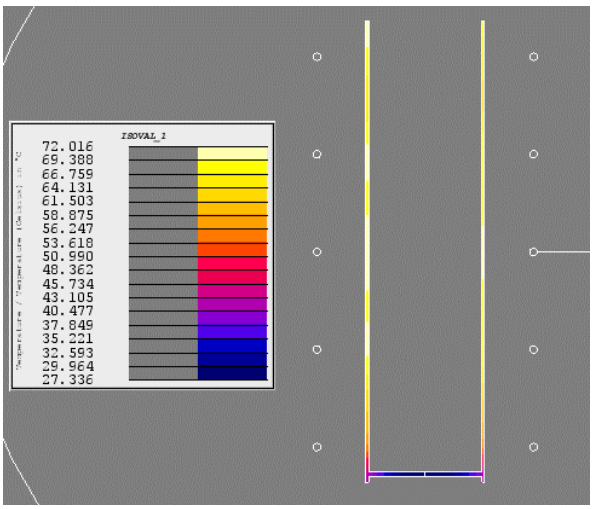


그림2-75 df: 100mm 내부 온도분포 그래프



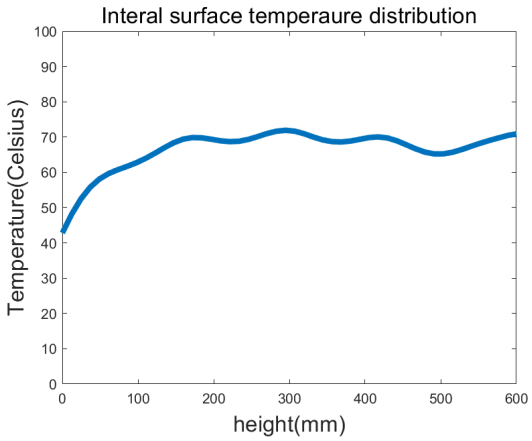
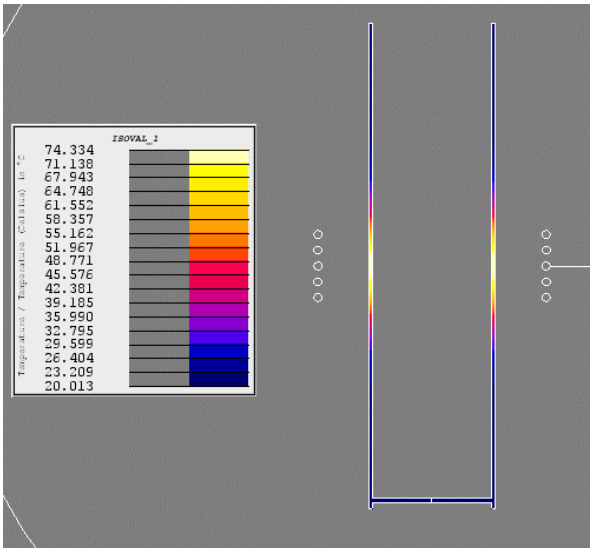


그림2-76 df: 60mm, D: 120mm온도분포 및 내부 온도분포 그래프



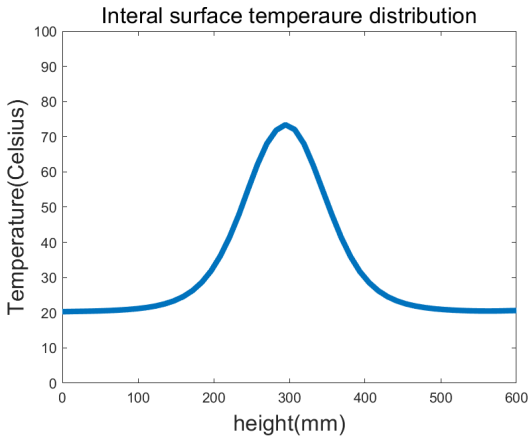
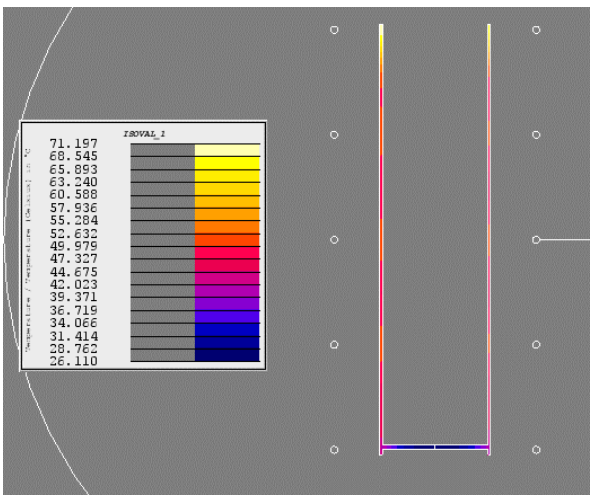


그림2-76 df: 60mm, D: 10mm온도분포 및 내부 온도분포 그래프



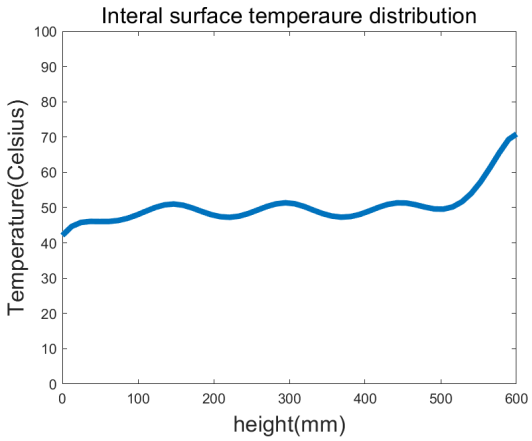


그림2-76 df: 60mm, D: 140mm온도분포 및 내부 온도분포 그래프

코일 턴 수 3~5회에 대한 피가열체1의 70도 내외에서의 내부 온도분포 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 해석 결과 코일 턴 수 5회, 코일과 피가열체의 이격거리가 60mm, 코일 턴 간격 120mm의 경우에서 가장 좋은 내부 온도분포 그래프가 도출되었다. 따라서 해당 모델에 대하여 가열 실험을 진행하였다. 가열 실험은 시뮬레이션과 동일하게 내부 온도분포가 70도 내외에 대하여 진행하였다. 유도가열 과정 중 피가열체의 온도 데이터를 수집하기 위한 센서로는 열전대 K type을 사용했다. 그림2-77과 같이 거푸집에 온도 센서를 설치하였으며 리츠와이로 구성된 가열 코일을 사용하여 가열하였다. 가열 결과 그림2-78과 같은 온도 데이터를 수집하였으며 시뮬레이션과 비교하였다. 거푸집 양 끝지점인 TC1, 7 부분을 제외하면 측정치와 시뮬레이션 결과가 매우 유사하였다. TC1의 경우에는 시뮬레이션 해석에서는 밑판과 일체형으로 되어있어 열전달이 크게 이뤄졌기 때문이다. TC7의 경우에는 대류에 의한 열전달이 가열 실험 중 이뤄졌기 때문인 것으로 고려된다.

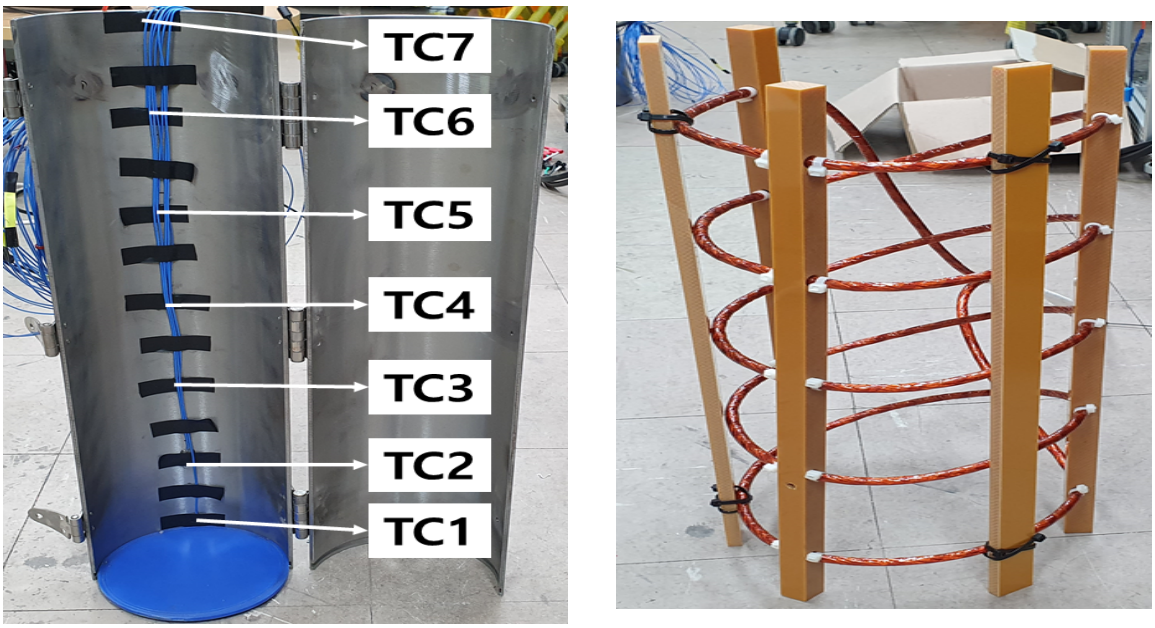


그림2-77 거푸집2(150x600) 내부 온도 센서 및 가열 코일

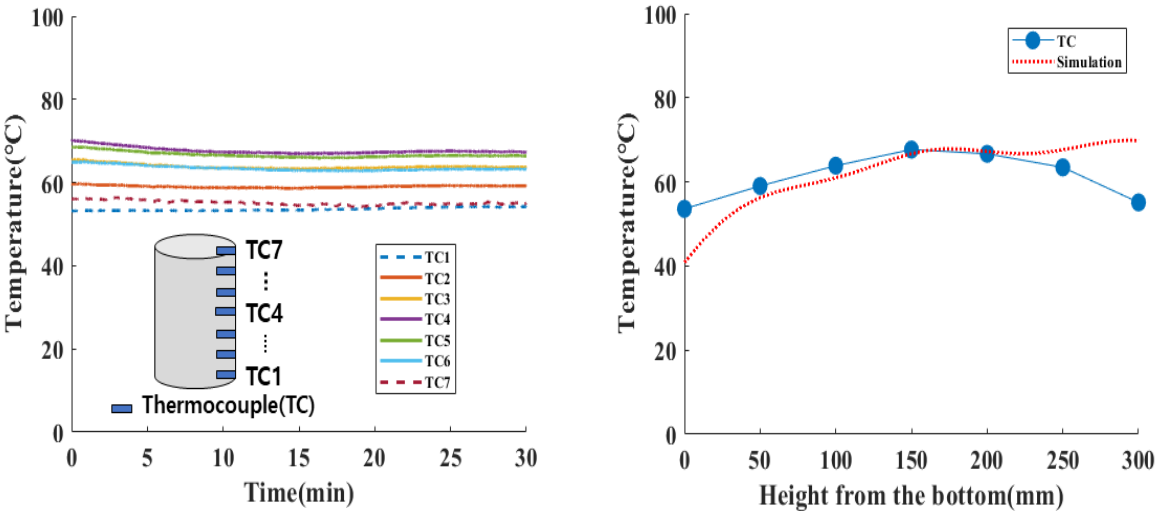


그림2-78 시간별 측정 온도 및 시뮬레이션, 온도 측정 데이터 그래프

㉰ 피가열체(거푸집)3

코일 턴 수 3회에서 피가열체와 코일과의 이격거리 10mm~90mm까지 20mm 단위로 진행하였으며 코일 턴 간격은 25mm~150mm까지 25mm 단위로 진행하였다. 그림2-79~83는 각 이격거리에 따른 시뮬레이션에서의 내부 온도분포 그래프를 턴 간격에 따라 종합적으로 나타낸 그래프이다. 그림2-84는 턴 수 3회에서 가장 좋은 내부 온도분포를 가지며 이 때 df는 50mm, D는 100mm이다. 그림2-85은 동일한 df에서 D가 가장 좁은 경우로 그림2-84보다 끝 온도가 낮다. 그림2-85는 D가 가장 넓은 경우로 위쪽 온도가 더 높은 것을 알 수 있다.

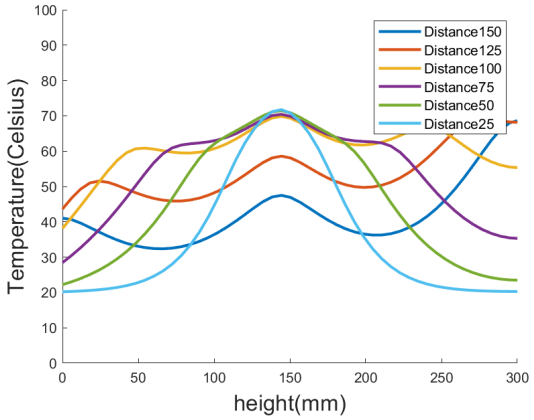


그림2-79 df: 10mm 내부 온도분포 그래프

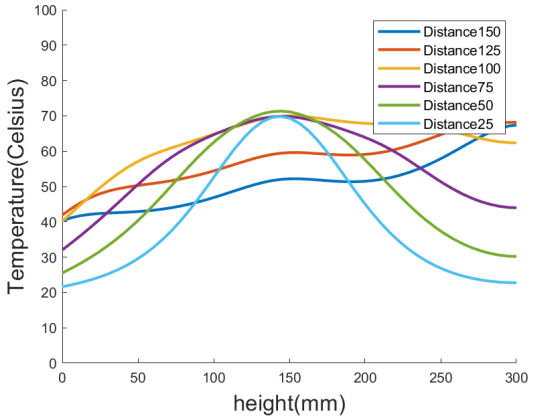


그림2-80 df: 30mm 내부 온도분포 그래프

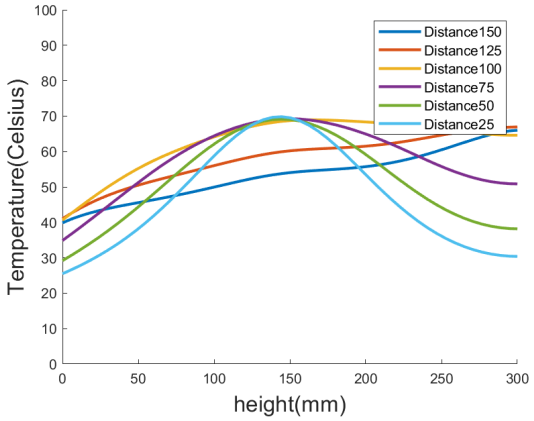


그림2-81 df: 50mm 내부 온도분포 그래프

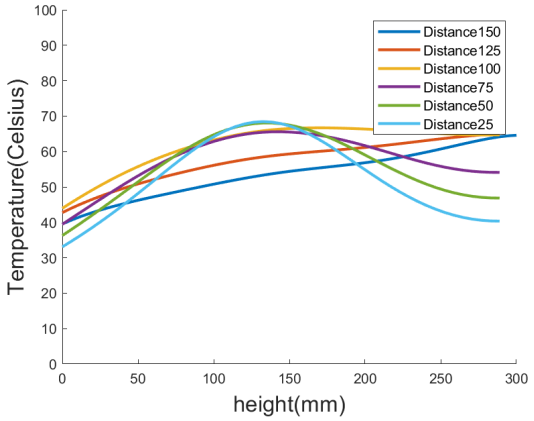


그림2-82 df: 70mm 내부 온도분포 그래프

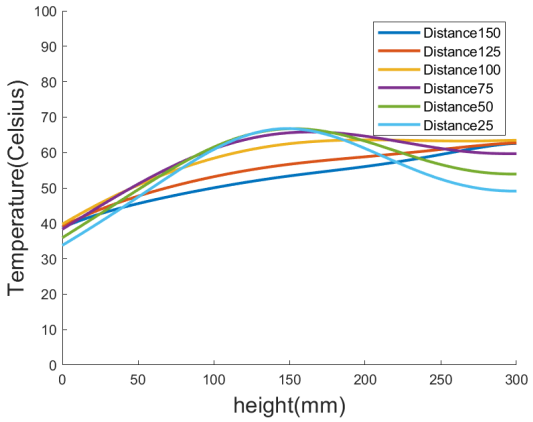


그림2-83 df: 90mm 내부 온도분포 그래프

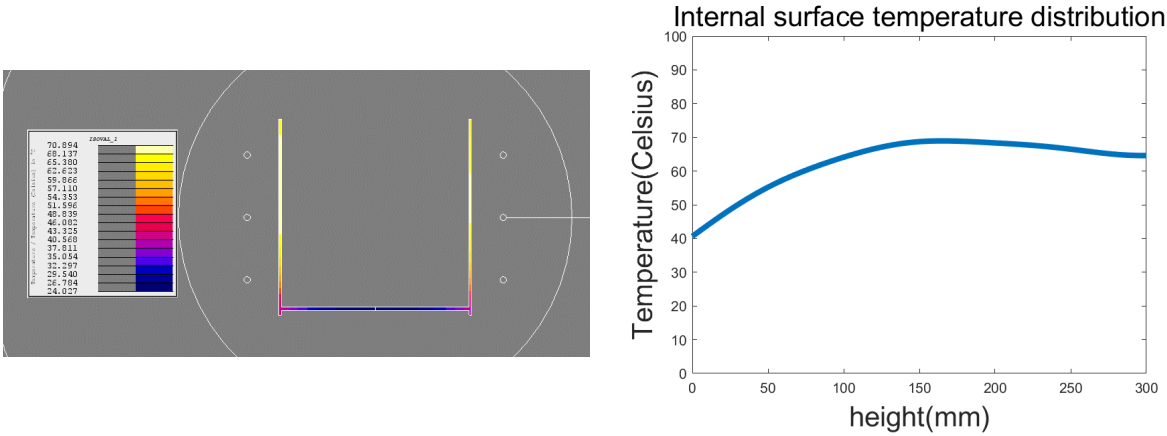


그림2-84 df: 50mm, D: 100mm온도분포 및 내부 온도분포 그래프

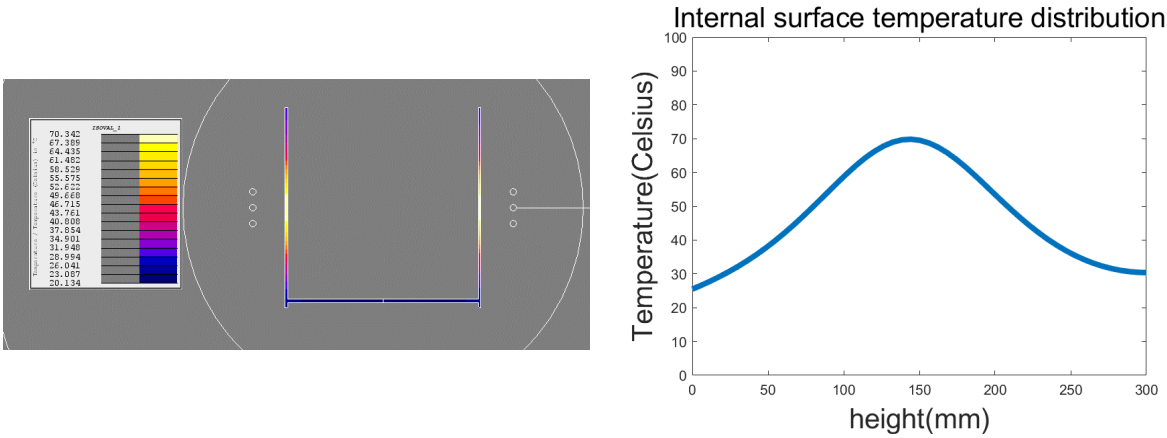


그림2-85 df: 50mm, D: 25mm온도분포 및 내부 온도분포 그래프

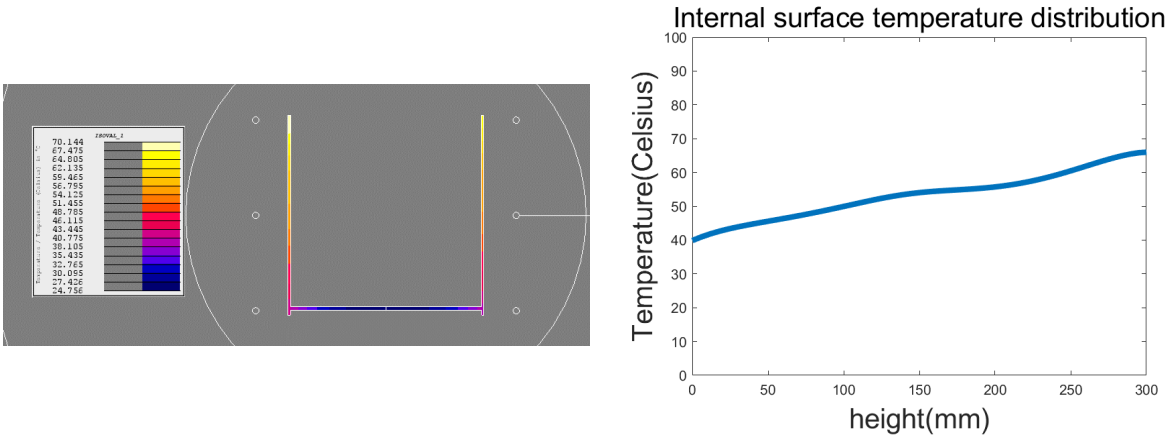


그림2-86 df: 50mm, D: 150mm온도분포 및 내부 온도분포 그래프

코일 턴 수 4회에서 피가열체와 코일과의 이격거리 20mm~100mm까지 20mm 단위로 진행하였으며 코일 턴 간격은 10mm~90mm까지 10mm 단위로 진행하였다. 그림2-87~91는 각 이격거리에 따른 시뮬레이션에서의 내부 온도분포 그래프를 턴 간격에 따라 종합적으로 나타낸 그래프이다. 그림2-92는 턴 수 4회에서 가장 좋은 내부 온도분포를 가지며 이 때 df는 40mm, D는 70mm이다. 그림2-93은 동일한 df에서 D가 가장 좁은 경우로 그림2-92보다 끝 온도가 낮다. 그림2-94는 D가 가장 넓은 경우로 위쪽 온도가 더 높은 것을 알 수 있다.

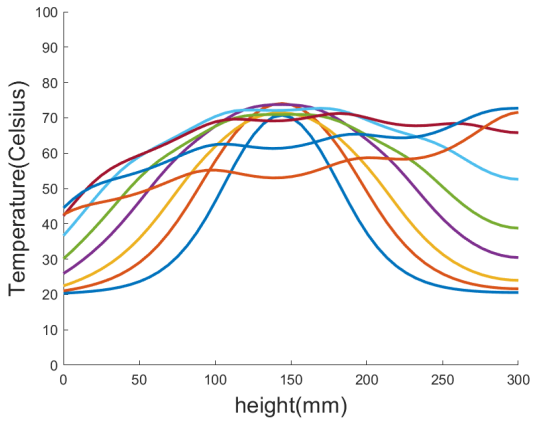


그림2-87 df: 20mm 내부 온도분포 그래프

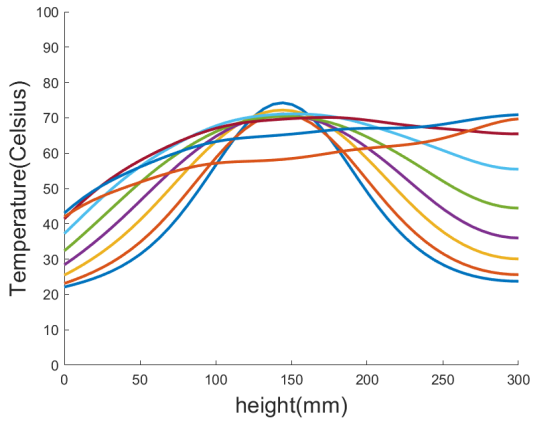


그림2-88 df: 40mm 내부 온도분포 그래프

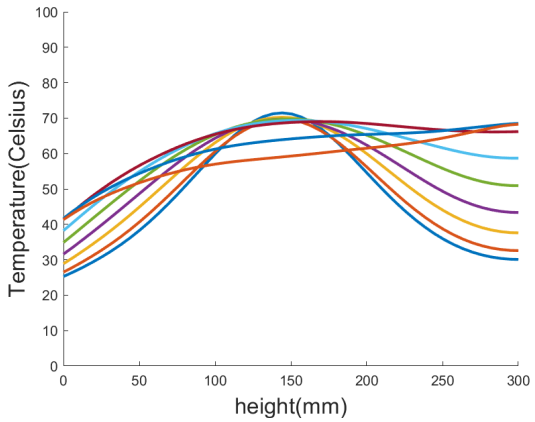


그림2-89 df: 60mm 내부 온도분포 그래프

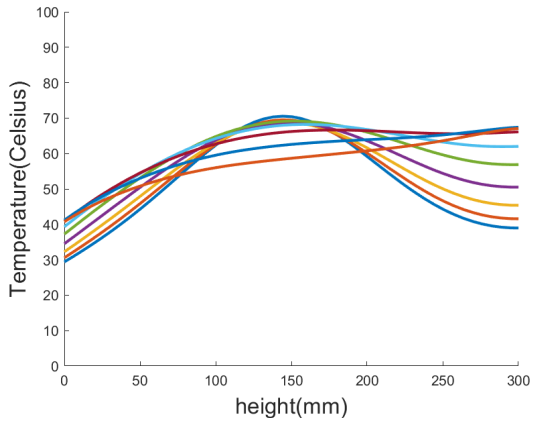


그림2-90 df: 80mm 내부 온도분포 그래프

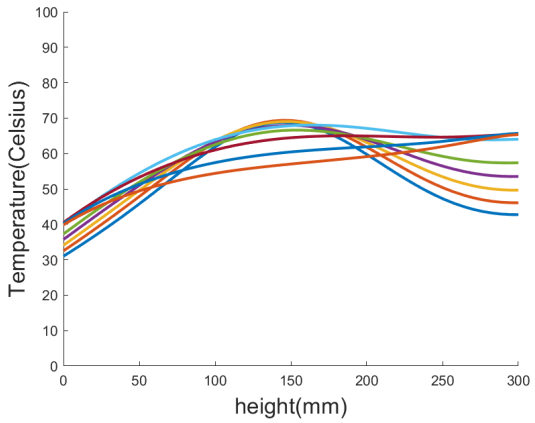
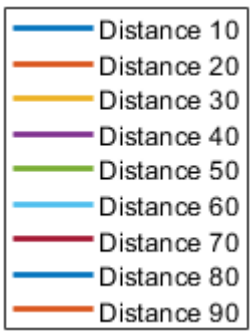


그림2-91 df: 100mm 내부 온도분포 그래프



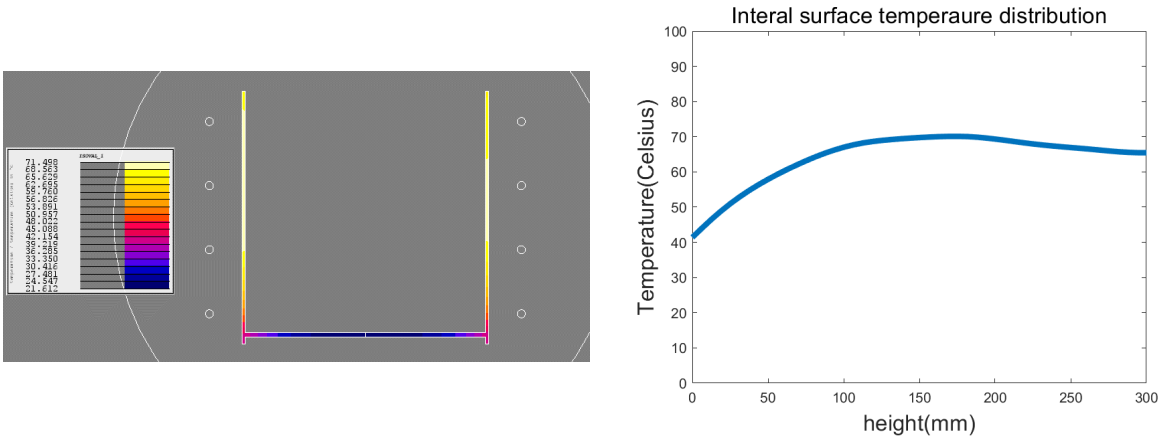


그림2-92 df: 40mm, D: 70mm온도분포 및 내부 온도분포 그래프

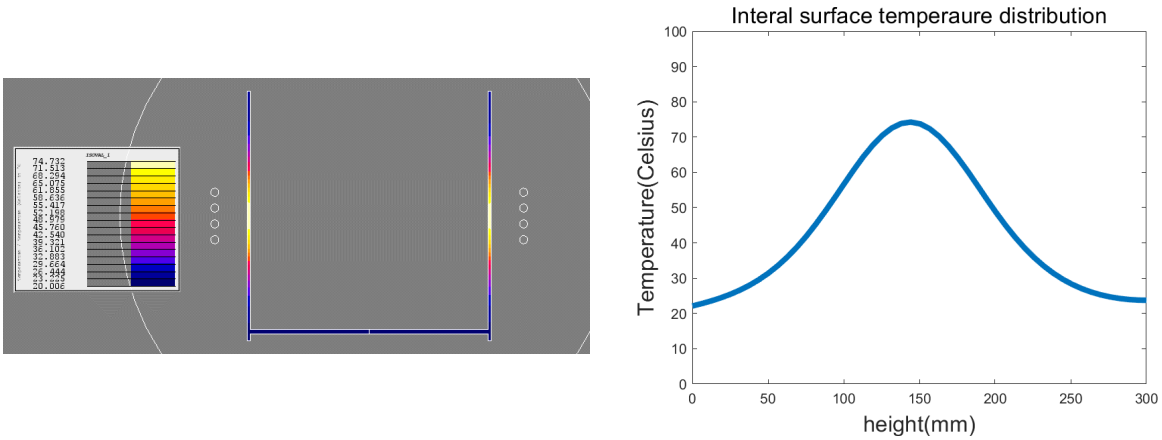


그림2-93 df: 40mm, D: 10mm온도분포 및 내부 온도분포 그래프

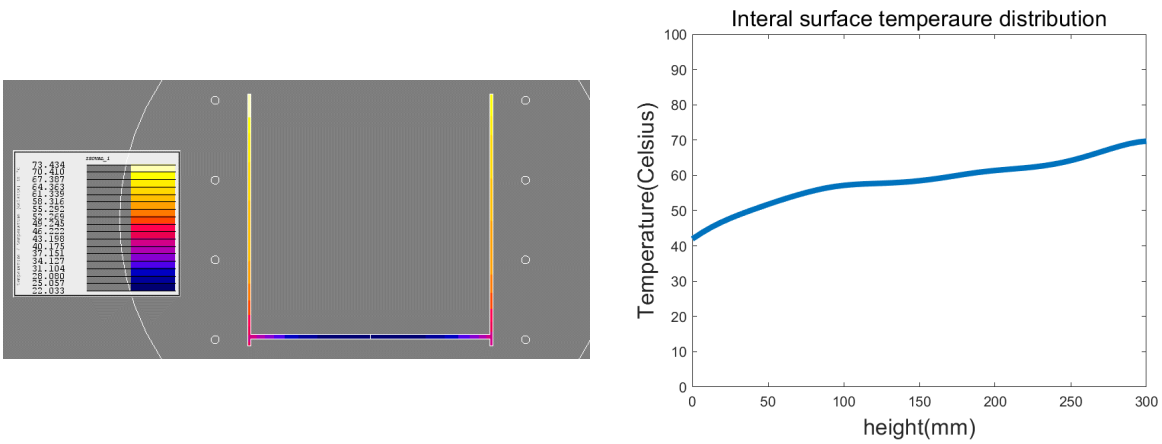


그림2-94 df: 40mm, D: 90mm온도분포 및 내부 온도분포 그래프

코일 턴 수 5회에서 피가열체와 코일과의 이격거리 20mm~100mm까지 20mm 단위로 진행하였으며 코일 턴 간격은 10mm~90mm까지 10mm 단위로 진행하였다. 그림2-95~99는 각 이격거리에 따른 시뮬레이션에서의 내부 온도분포 그래프를 턴 간격에 따라 종합적으로 나타낸 그래프이다. 그림2-100는 턴 수 5회에서 가장 좋은 내부 온도분포를 가지며 이 때 df는 40mm, D는 60mm이다. 그림2-111은 동일한 df에서 D가 가장 좁은 경우로 그림2-100보다 끝 온도가 낮다.

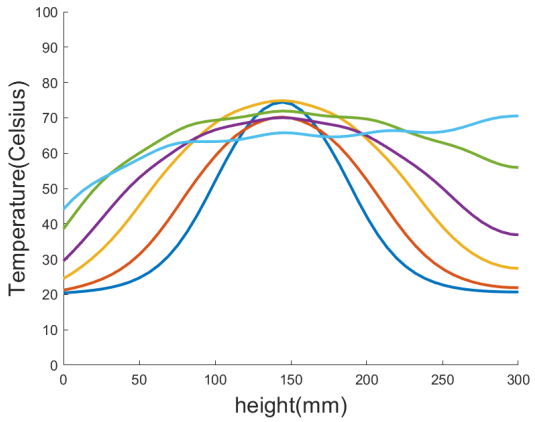


그림2-95 df: 20mm 내부 온도분포 그래프

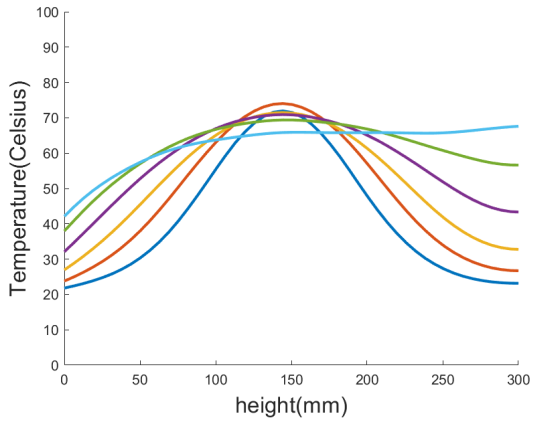


그림2-96 df: 40mm 내부 온도분포 그래프

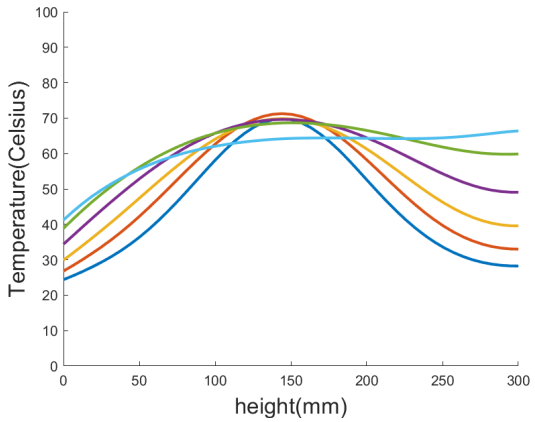


그림2-97 df: 60mm 내부 온도분포 그래프

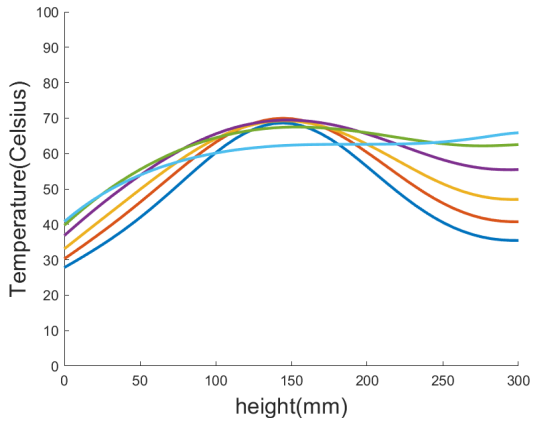


그림2-98 df: 80mm 내부 온도분포 그래프

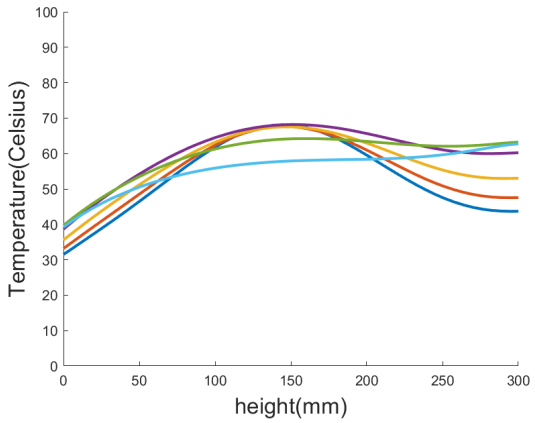


그림2-99 df: 100mm 내부 온도분포 그래프



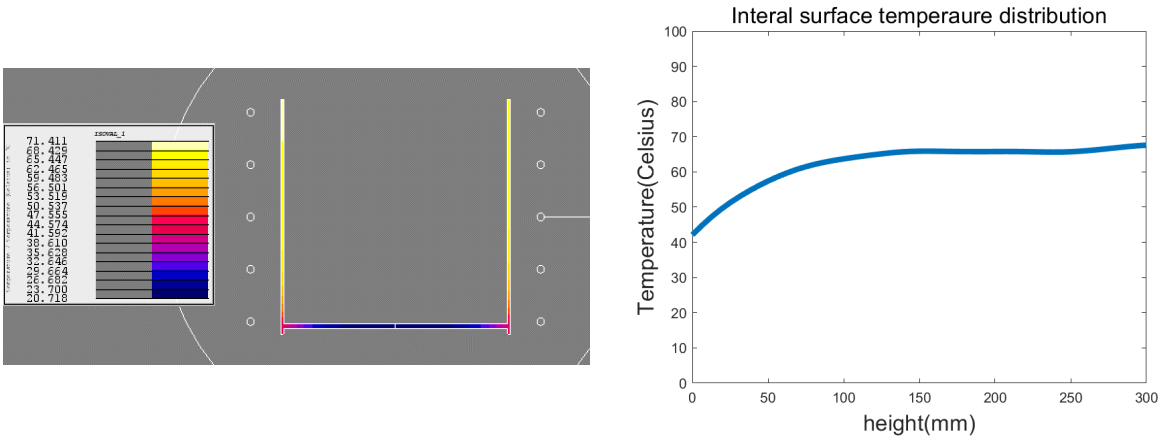


그림2-100 df: 40mm, D: 60mm온도분포 및 내부 온도분포 그래프

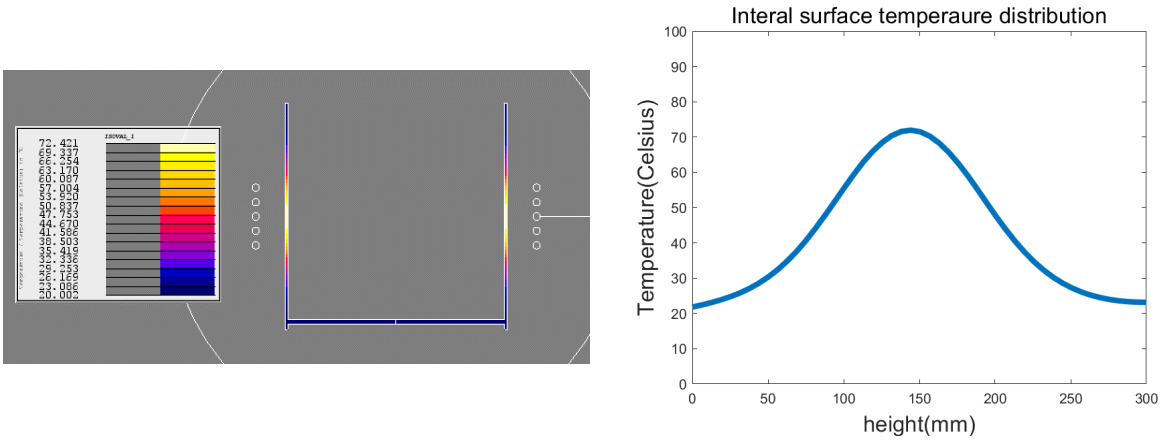


그림2-101 df: 40mm, D: 10mm온도분포 및 내부 온도분포 그래프

코일 턴 수 3~5회에 대한 피가열체1의 70도 내외에서의 내부 온도분포 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 해석 결과 코일 턴 수 5회, 코일과 피가열체의 이격거리가 40mm, 코일 턴 간격 60mm의 경우에서 가장 좋은 내부 온도분포 그래프가 도출되었다. 따라서 해당 모델에 대하여 가열 실험을 진행하였다. 가열 실험은 시뮬레이션과 동일하게 내부 온도분포가 70도 내외에 대하여 진행하였다. 유도가열 과정 중 피가열체의 온도 데이터를 수집하기 위한 센서로는 열전대 K type을 사용했다. 그림2-102와 같이 거푸집에 온도 센서를 설치하였으며 리츠와이로 구성된 가열 코일을 사용하여 가열하였다. 가열 결과 그림2-103과 같은 온도 데이터를 수집하였으며 시뮬레이션과 비교하였다. TC1 부분의 온도차가 큰 것을 볼 수 있다. 시뮬레이션 해석에서는 밑판과 일체형으로 되어있어 열전달이 크게 이뤄졌기 때문이다.

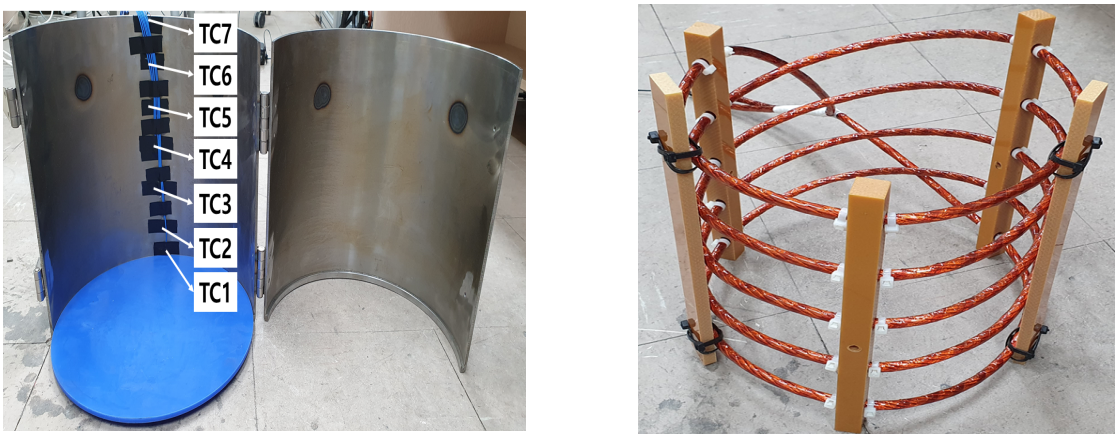


그림2-102 거푸집2(300x300) 내부 온도 센서 및 가열 코일

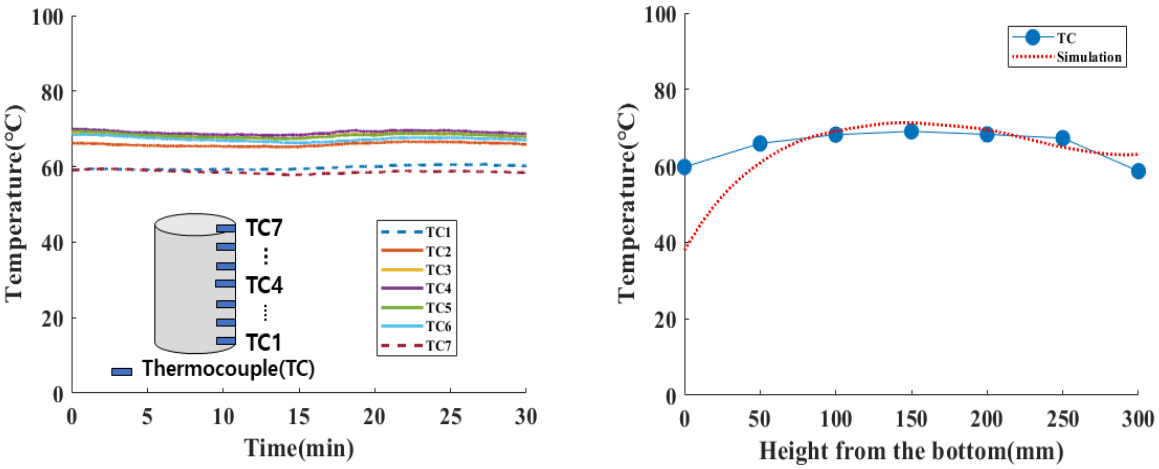


그림2-103 시간별 측정 온도 및 시뮬레이션, 온도 측정 데이터 그래프

⑤ 결론

㉮ 시뮬레이션 기반 유도가열 성능시험

○ 유도가열 최적화를 위한 거푸집 재질 3가지와 코일 3가지 종류(1~3턴)에 대해서 시뮬레이션 실험을 진행하였다. Al(알루미늄)의 경우 온도 상승이 더디지만 고르게 최고 온도에 가까운 온도분포를 가지는 것을 알 수 있다. SUS(서스)의 경우 알루미늄보다 온도 상승이 좋지만, 코일 주변을 제외한 곳은 온도 상승이 매우 현저한 것을 알 수 있다. 가장 유도가열 효율이 좋은 Steel(철)의 경우 온도 상승이 매우 좋지만, 코일 근처를 제외한 부분의 온도분포가 좋지 않아 매우 큰 온도 편차를 가지는 것을 보인다.

㉯ 실험기반 유도가열 조건

○ 실험기반 유도가열 조건 결과를 위해 3가지의 거푸집과 코일 턴 간격, 코일과 거푸집과의 이격거리를 변수로 하여 70도 내외에서의 내부 온도 분포 시뮬레이션을 진행하고 최적의 온도분포를 가진 모델에 대하여 가열 실험을 진행하였다. 내부 온도분포 시뮬레이션 결과 3가지의 거푸집에 대해서 코일 턴 수 5회에 대해서 가장 좋은 온도분포를 가지는 것을 확인했다. 거푸집1(150x300)에서는 거푸집과 코일 간의 거리 40mm, 코일 턴 간격 60mm일 때가 가장 좋은 온도분포를 가진다. 거푸집2(150x600)에서는 거푸집과 코일 간의 거리 60mm, 코일 턴 간격 120mm일 때가 가장 좋은 온도분포를 가진다. 거푸집3(300x300)에서는 거푸집과 코일 간의

거리 40mm, 코일 턴 간격 60mm일 때가 가장 좋은 온도분포를 가진다. 모든 거푸집의 재질은 steel이다.

○ 거푸집1(150x300)에서 턴 수 5회, 거푸집과 코일 간의 거리 40mm, 코일 턴 간격 60mm의 가열 코일을 이용하여 가열 실험을 진행했다. 실험결과 그림2-53과 같이 시뮬레이션과 가열 실험 온도 데이터가 50~250mm 범위에서 유사한 것으로 확인된다. 0mm(TC1) 지점에서 시뮬레이션 해석결과보다 가열 실험 온도가 더 높은 온도를 가지는 것으로 확인된다. 이는 시뮬레이션 환경에서는 거푸집 밑판이 일체형으로 되어 밑판 도체에 열전달이 크게 이뤄졌기 때문으로 고려된다. 300mm 지점에서는 가열 실험 온도보다 시뮬레이션 해석결과가 더 높은 온도를 가지는 것으로 확인된다. 이는 시뮬레이션 환경에서는 대류 계수를 적용하지 않아 대류 열전달이 발생하지 않지만 가열 실험에서는 대류 현상이 발생하기 때문에 발생한 차이 때문으로 고려된다. 가열 실험동안 가해지는 전류는 21A이며 주파수는 30kHz이다.

○ 거푸집2(150x600)에서 턴 수 5회, 거푸집과 코일 간의 거리 60mm, 코일 턴 간격 120mm의 가열 코일을 이용하여 가열 실험을 진행했다. 실험결과 그림2-77과 같이 시뮬레이션과 가열 실험 온도 데이터가 50~250mm 범위에서 유사한 것으로 확인된다. 0mm(TC1), 300mm(TC7) 지점에서 시뮬레이션 해석결과와 가열 온도 데이터의 온도차 원인은 거푸집1의 경우와 같다. 가열 실험동안 가해지는 전류는 28A이며 주파수는 33kHz이다.

○ 거푸집3(300x300)에서 턴수 5회 거푸집과 코일 간의 거리 40mm, 코일 턴 간격 60mm의 가열 코일을 이용하여 가열 실험을 진행했다. 실험결과 그림2-102와 같이 시뮬레이션과 가열 실험 온도 데이터가 50~250mm 범위에서 유사한 것으로 확인된다. 0mm(TC1), 300mm(TC7)지점에서 시뮬레이션 해석결과와 가열 온도 데이터의 온도차 원인 거푸집1의 경우와 같다. 가열 실험동안 가해지는 전류는 26A이며 주파수는 31kHz이다.

○ 거푸집1의 가열 실험에서 기록된 최대 온도는 68.63℃이며 최소 온도는 58.72℃로 최대최소차는 9.91℃이다. 거푸집2의 가열 실험에서 기록된 최대 온도는 67.69℃이며 최소 온도는 53.59℃로 최대최소차는 14.1℃이다. 거푸집3의 가열 실험에서 기록된 최대 온도는 69.03℃이며 최소온도는 58.62℃로 최대최소차는 10.41℃이다. 3가지의 거푸집 중 거푸집1(150x300)이 가장 낮은 최대최소차를 가진다.

(나) 전자파 차폐 기술 개발

① 전자파 적합성 기준

전자파 적합성 기준은 전파법 시행령 제67조의2에 따른 전자파적합성 기준의 세부적인 내용에 관하여 필요한 사항을 규정함을 목적으로 하며 전파법 제47조의 3에 의한 전자파 장해를 주거나 전자파로부터 영향을 받는 기자재에 적용한다. 본 과제의 유도가열시스템은 40kHz 대역을 사용하며 전자파(자계)를 유도하므로 이를 만족하여야 한다. 그러므로 계측기를 사용하여 측정하고 전자파 차폐 모델을 적용했을 때도 이를 행한다.

㉮ 대상 범위

대상은 크게 2가지로 나눌 수 있다. 주거·상업 및 경공업 환경에서 사용하는 기기로서 공공전원으로부터 250V 이하의 전압을 공급받는 장소로서 주거용 건축물(집, 아파트), 도·소매점(가게, 슈퍼마켓), 상업용 건물(사무실, 은행), 공공장소(극장, 대중주점, 무도 홀), 외부 건축물(주유소, 주차장, 공연장, 스포츠 센터), 경공업 건축물(작업장 실험실, 서비스 센터) 등이 이에 해당한다. 산업환경에 사용하는 기기로서 가목(주거·상업 및 경공업)외의 환경에 사용하며 1종, 2종 기기 하위 A급, B급기기로 분류된다. 분류 기준은 표 2-1과 같다. 유도가열시스템은 40kHz를 사용하며 전자파 유도의 형태를 의도적으로 발생시켜 재료의 가공에 이용하고 가정외의 지역에서 사용하므로 2종 A급기기에 해당한다.

표2-1 산업 환경 기기 분류

1종 기기	산업·과학·의료용 등 고주파 이용기기로서 2종 기기로 분류되지 않는 기기
2종 기기	산업·과학·의료용 등 고주파 이용기기로서 9kHz~400GHz 주파수 범위의 무선주파수 에너지를 전자파 방사, 유도, 용량성 결합의 형태로 의도적으로 발생시켜 재료의 가공, 검사, 분석에 이용하는 기기
A급 기기	산업·과학·의료용 등 고주파 이용기기류 및 정보기기류에 적용하며 가정외의 지역에서 사용하는 것을 목적으로 하는 업무용 기기
B급 기기	산업·과학·의료용 등 고주파 이용기기류 및 정보기기류에 적용하며, 주로 가정에서 사용하는 것을 목적으로 하는 가정용 기기

㉯ 전자파 측정 방법

40kHz의 주파수를 사용하는 실험용 유도가열시스템은 제3조3항과 관련된 가전기기 및 유사기기의 자기장 측정방법 문서를 참고하여 측정하게 된다. 위의 문서는 400kHz 이하 자기장을 다루며 시험에 필요한 평가방법을 규정한다. 측정기기는 자기장강도(자속밀도)는 각 방향의 100㎠의 면적에서 평균을 구한다. 측정거리는 측정 대상으로부터 30cm 이격하여 측정하며 측정 기기로는 EHP-200(그림2-104)을 사용한다.



그림2-104 EHP-200

㉰ 전자파 측정 실험 환경

그림2-105~107과 같은 환경에서 계측기기를 이용하여 측정하였다. 0oC 항온실에서 80oC를 유지하는 프로그램 제어 상태에서 진행하였으며 전자파차폐 모델은 그림2-108~110와 같은 5가지의 차폐모델을 사용하여 자속밀도(uT), 자계(A/m), 전계(A/m)를 측정하였다. 그림 2-108은 2mm(좌), 3mm(우)의 알루미늄 매쉬망으로 구성된 전자파 차폐 모델 1, 2이며 그림 2-109는 5mm(좌), 10mm(우)의 알루미늄 매쉬망으로 구성된 전자파 차폐 모델 3, 4이다. 그림 2-110은 알루미늄 판으로 구성된 전자파 차폐 모델 5이다. Model 1~4는 그림2-107와 같이 코일을 원형으로 감싸는 형태로 적용하고 Model 5는 뒷부분이 코일과 C/T Box 연결부를 향하게 하여 적용한다.

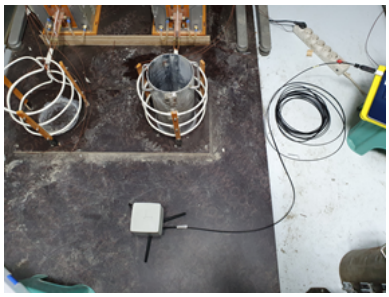


그림2-105 전자파 측정 환경



그림2-106 실험 준비



그림2-107 차폐 모델 적용



그림2-108 Model 1, 2



그림2-109 Model 3, 4

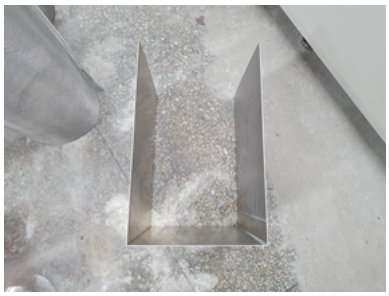


그림2-110 Model 5

② 모델별 자속밀도(uT) 측정

전자파차폐 모델은 5가지의 모델이 있다. 본 장에서는 자속밀도(uT)를 측정하는 실험을 진행한다. 실험은 30초 동안의 RMS 평균을 측정하였으며 측정 주파수 범위는 0~400kHz, RBW(분해대역폭)는 1kHz이다. 그래프의 X축은 주파수(MHz), Y축은 uT로 하였다.

㉮ No model

그림2-110는 전자파차폐 모델 없이 본 상태 그대로 진행한 결과이다. 각 방향에서 측정된 자속밀도의 합산 값으로 이 값을 바탕으로 전자파 적합성을 판단한다. 차폐 모델이 없을 때 45.8kHz에서 13.944uT로 가장 높았으며 WideBand(9k~400kHz)에서의 측정값은 14.086uT이다.

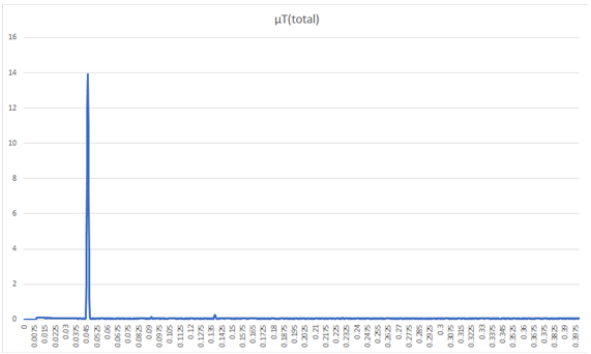


그림2-110 차폐모델 미적용, 자속밀도 측정 그래프

㉯ Model별 자속밀도 측정

전자파 차폐 Model 1~5에 대하여 ㉮와 같은 실험을 진행한다. Model 1~5의 최대 자속밀도(uT)값과 그 지점의 주파수, WideBand에서의 측정값은 표2-2와 같다. 그림2-111~115는 Model 1~5의 자속밀도 측정 데이터 그래프이다. Model 4에서 측정된 최대 자속밀도가 더 높게 측정되었는데 이는 Model 4를 측정하는 동안 전력변환장치에서 가열체에 떨어진 온도를 보상하는 과정에서 출력이 증가하여 나타난 현상이다.

표2-2 모델별 최대 자속밀도, 주파수, WideBand

Model	최대 자속밀도(uT)	WideBand(uT,9k-400kHz)	주파수(kHz)
1	12.783	14.086	45.8
2	4.9442	9.0068	46.8
3	8.2013	8.4559	47.3
4	15.448	15.791	47.0
5	7.1486	7.2633	47.3

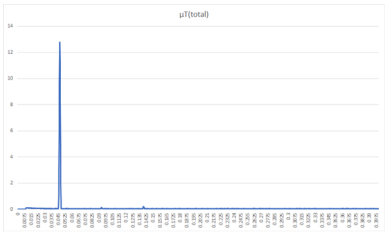


그림2-111 Model 1 자속밀도

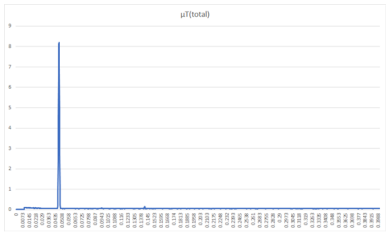


그림2-112 Model 2 자속밀도

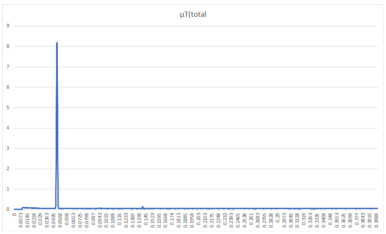


그림2-113 Model 3 자속밀도

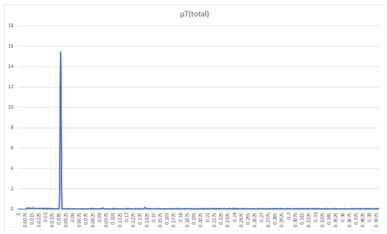


그림2-114 Model 4 자속밀도

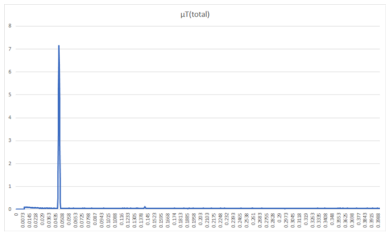


그림2-115 Model 5 자속밀도

③ Model별 자계(A/m) 측정

본 장에서는 자계(A/m)를 측정하는 실험을 진행한다. 실험은 30초 동안의 RMS 평균을 측정하였으며 측정 주파수 범위는 0~400kHz, RBW는 1kHz이다. 그래프의 X축은 주파수(MHz), Y축은 A/m이다.

㉮ No model

전자파차폐 모델 없이 본 상태 그대로 진행한다. 그림2-116은 각 방향에서 측정된 자계의 합산값으로 이 값을 바탕으로 전자파 적합성을 판단한다. 차폐 모델이 없을 때 45.8kHz에서 11.161A/m로 가장 높았으며 WideBand(9k~400kHz)에서의 측정값은 11.304A/m이다.

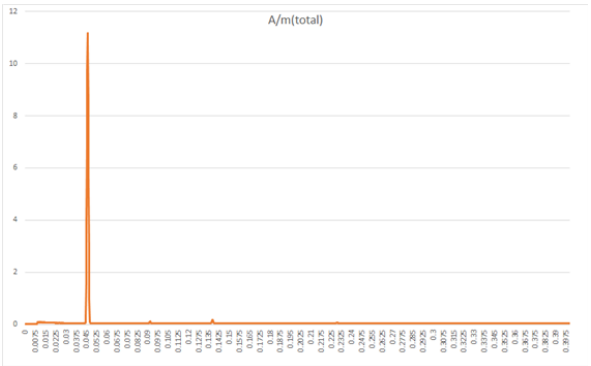


그림2-116 차폐모델 미적용, 자계 측정 그래프

㉯ Model 1-5

○ 전자파 차폐 Model 1-5에 대하여 위와 같은 실험을 진행한다. Model 1-5의 최대 자계(A/m) 값과 그 지점의 주파수, WideBand는 표2-3과 같다. 그림2-117~121는 Model 1~5의 자계 측정 데이터 그래프이다.

표2-3 모델별 최대 자계, 주파수, WideBand

Model	최대 자계(A/m)	WideBand(A/m, 9k-400kHz)	주파수(kHz)
1	8.8196	8.9085	46.5
2	10.254	10.496	46.8
3	7.7523	7.9049	47.3
4	8.7521	8.9845	46.8
5	5.3072	5.3482	47.3

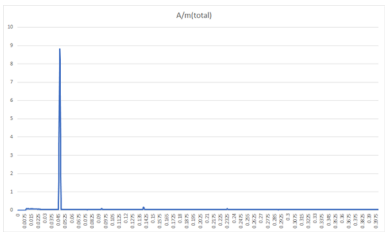


그림2-117 Model 1 자계

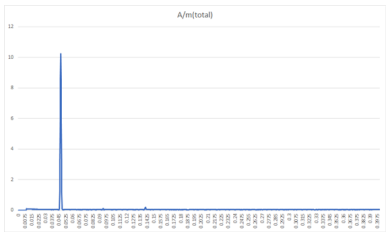


그림2-118 Model 2 자계

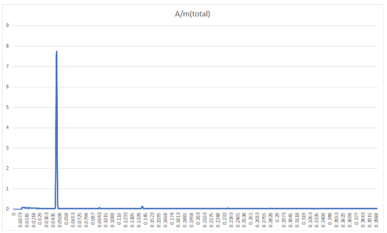


그림2-119 Model 3 자계

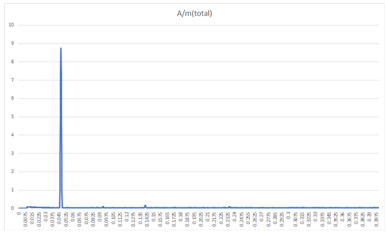


그림2-120 Model 4 자계

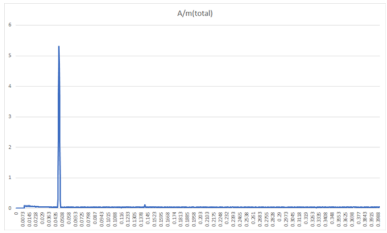


그림2-121 Model 5 자계

④ Model별 전계(V/m) 측정

본 장에서는 전계(V/m)를 측정하는 실험을 진행한다. 실험은 30초 동안의 RMS 평균을 측정하였으며 측정 주파수 범위는 0~400kHz, RBW는 1kHz이다. 그래프의 X축은 주파수(MHz), Y축은 V/m이다.

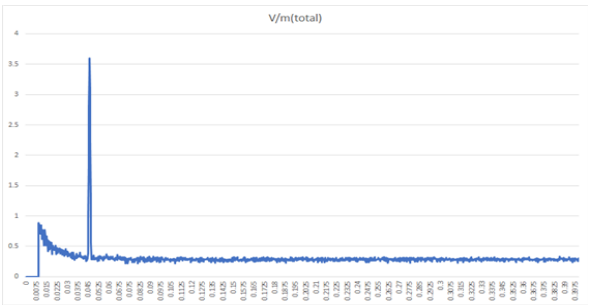


그림2-122 차폐모델 미적용, 전계 측정 그래프

㉮ No model

전자파차폐 모델 없이 본 상태 그대로 진행한다. 그림2-556은 각 방향에서 측정된 전계의 합산값으로 이 값을 바탕으로 전자파 적합성을 판단한다. 차폐 모델이 없을 때 46.0kHz에서 3.6V/m로 가장 높았으며 WideBand(9k~400kHz)에서의 측정값은 7.0V/m이다.

㉯ Model 1~5

전자파 차폐 Model 1~5에 대하여 위와 같은 실험을 진행한다. Model 1~5의 최대 전계(A/m)값과 그 지점의 주파수, WideBand는 표2-4와 같다. 그림2-123~127는 Model 1~5의

전계 측정 데이터 그래프이다. 차폐모델을 적용했을 때 최대 전계 값이 크게 나타났는데 이는 측정과정 중 피가열체의 온도보상으로 인해 전력변환장치의 출력이 증가하여 나타난 현상이다.

표2-4 모델별 최대 전계, 주파수, WideBand

Model	최대 전계(V/m)	WideBand(V/m, 9k-400kHz)	주파수(kHz)
1	3.8137	6.9903	46.5
2	4.0113	7.3699	47.0
3	4.9839	7.8670	47.0
4	3.1139	6.8569	47.0
5	5.0572	8.2586	47.3

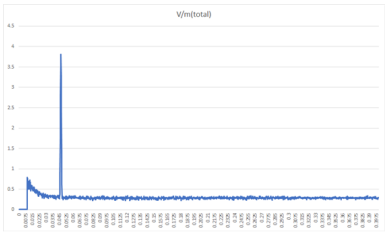


그림2-123 Model 1 전계

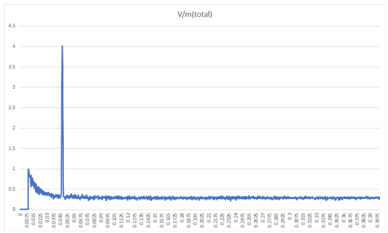


그림2-124 Model 2 전계

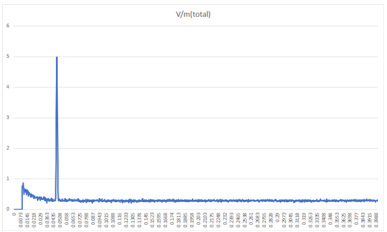


그림2-125 Model 3 전계

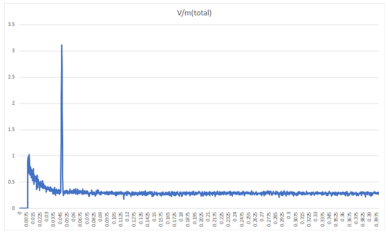


그림2-126 Model 4 전계

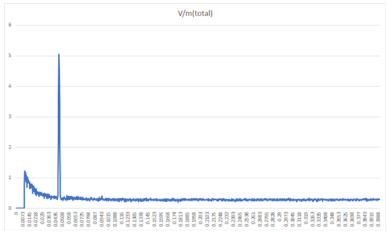


그림2-127 Model 5 전계

⑤ 전자파 차폐 시스템

유도가열은 유도코일에 흐르는 고주파 전류로부터 발생되는 자기장에 의하여 피가열체를 가열하는 방식이다. 유도된 자기장은 피가열체에 와전류가 흐르게 함으로써 줄열이 발생하게 된다. 따라서 유도가열의 사용은 전자파를 발생을 의미하며 코일에서 피가열체로 유도되므로 전자파가 외부로 표출될 수 있다. 전자파를 차폐하는데 여러 방법 중 본 과제에서는 페라이트를 이용하여 차폐하는 시스템을 제안한다. 페라이트는 체심입방구조를 가지는 α-Fe(알파 철)을 바탕으로 한 고용체이며 자성을 띄고 있다. 페라이트는 원통형으로 제작을 하여 노이즈 제거, 고주파 방사 차단 등 광범위하게 사용되고 있다. 거푸집을 가열하기 위해서 코일 내부에 거푸집을 위치시켜야 한다. 따라서 코일 내부 자기장은 거푸집에 대부분 쏠리게 되나 코일 뒷 편으로 전자파가 방사된다. 그러므로 페라이트를 이용한 자기장 차폐는 코일의 외부에 위치한다. 자기장 차폐를 위하여 코일을 외부로부터 감싸는 방법을 택하였다.

㉮ 전자파 측정 시뮬레이션

전자파 차폐모델을 제작하기 전, 해당 모델이 타당한지에 대하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션은 두께 4mm, 내경 150mm, 높이 315mm의 거푸집 모델(그림2-128, 표2-5)에 대하여 진행하였으며 코일 턴 수는 3회 턴 간격은 75mm이다. 전자파 차폐를 위해 사용된 소재는

앞서 말한 듯이 페라이트를 사용하였다. 시뮬레이션은 전자파 차폐모델의 유무에 대하여 진행하였다.



그림2-128 피가열체

표2-5 피가열체

재질	Steel
내경(w)	150mm
두께(t)	4mm
내높이(h)	300mm
높이(h_t)	315mm

○ 시뮬레이션에서 자기장 세기를 측정하기 위한 기준은 다음과 같다. 전자파 적합성 자료를 참고하면 자기장이 발생하는 부분에서 300mm 떨어진 곳에서의 자기장 값을 측정한다. 따라서 시뮬레이션에서 자기장 측정 위치는 코일에서 300mm 떨어진 곳에서 진행하였다. 또한, 코일에 흐르는 전류의 세기는 해당 피가열체를 그림2-129과 같은 가열 그래프를 적용하였을 때 가장 큰 값인 29.7A를 적용하였으며 주파수는 44 KHz다. 그림2-130은 가열 곡선을 적용한 실험에서 코일에 흐르는 전류를 표현한 그래프이다.

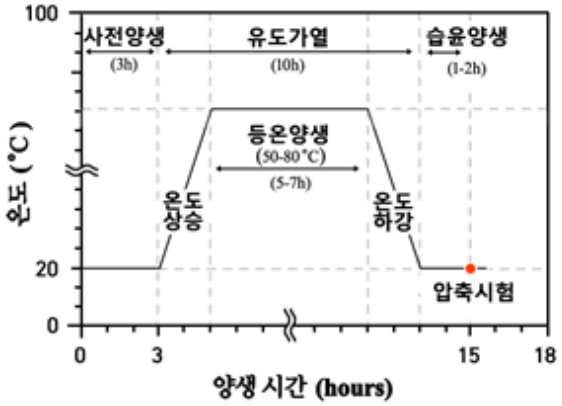


그림2-129 콘크리트 가열 곡선

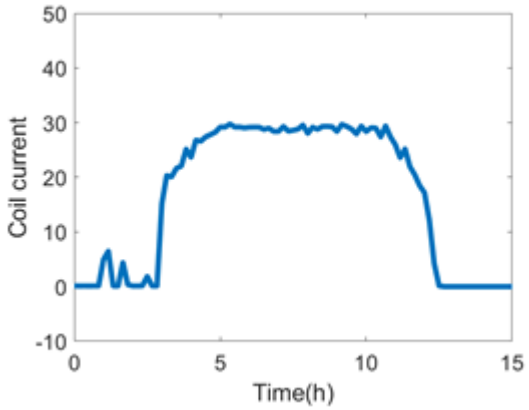


그림2-130 코일 전류 측정 그래프

그림2-131는 전자파 차폐모델을 미적용하였을 때 시뮬레이션 결과이다. 전자파 측정 위치는 코일에서 바깥 방향으로 300mm 떨어진 부분에서 진행하였으며 해당 데이터는 그림2-132과 같다. 자기장 세기의 최대값은 10[uT]에 근접하나 해당 데이터의 RMS(Root Mean Square)를 치하면 그림2-132의 검은색 점선과 같은 값을 가진다. 해당 값은 6.6462[uT]이다. 붉은색 점선은 각각 최대값, 최소값을 표시하였다.

그림2-133은 전자파 차폐모델을 적용하였을 때 시뮬레이션 결과이다. 차폐모델은 두께 4mm

의 이상적인 페라이트 코어를 적용하였으며 코일에 근접하여 설치하였다. 자기장 측정은 위와 동일하게 코일에서 300mm 떨어진 위치에서 측정하였으며 해당 데이터는 그림2-134과 같다. 자기장 세기의 최대값은 1[uT]에 근접하나 해당 데이터의 RMS를 치하면 그림2-134의 검은색 점선과 같은 값을 가지며 해당 값은 0.4897[uT]이다. 붉은색 점선은 각각 최대값, 최소값을 표시하였다.

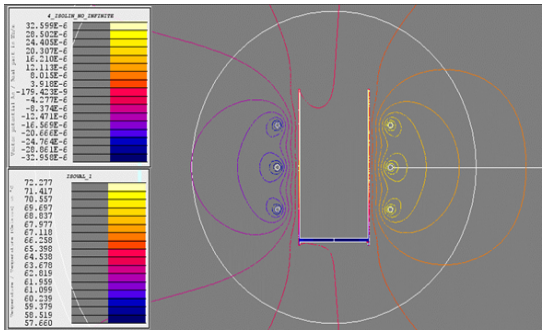


그림2-131 전자파 차폐모델 미적용 시뮬레이션 결과

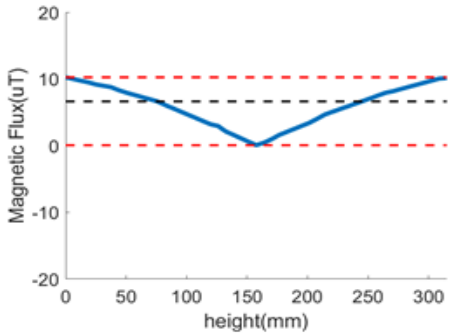


그림2-132 전자파 차폐모델 미적용 전자파 측정 데이터

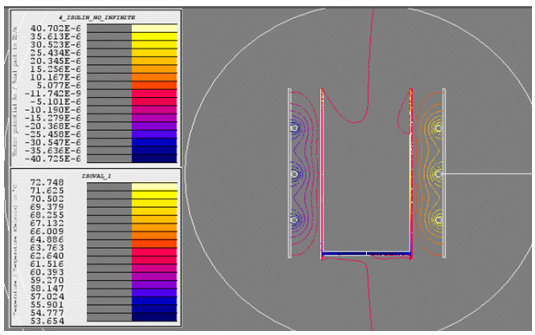


그림2-133 전자파 차폐모델 적용 시뮬레이션 결과

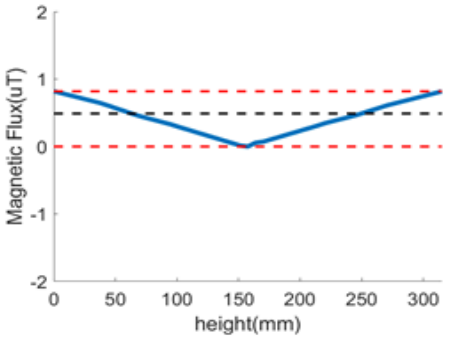


그림2-134 전자파 차폐모델 적용 전자파 측정 데이터

○ 전자파 차폐용 페라이트 모델이 없는 경우와 전자파 차폐용 페라이트 모델이 있는 경우에 대하여 시뮬레이션을 진행하였다. 이를 비교하였을 때 전자파가 90% 이상 감소한 것을 알 수 있다. 전자파 측정은 코일로부터 300mm 떨어진 거리에서 이루어졌다. 최대값 및 RMS 값을 비교하여 표2-6에 나타내었다.

표2-6 전자파 차폐 시뮬레이션 결과

	전자파 차폐모델 미적용	전자파 차폐모델 적용	전자파 감소율
	자기장 최대값(uT)	자기장 최대값(uT)	감소율(%)
최대값	10.1450	0.8173	91.95
RMS	6.6462	0.4897	92.63

㈏ 전자파 측정 실험

㈎에서 거푸집 가열 실험에서 측정된 가장 큰 코일 전류에서의 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션에 적용한 전류의 세기는 29.7A이며 주파수는 44 KHz다. 시뮬레이션과 동일한 전류 및 주파수에서 전자파 측정 실험을 진행하였다. 자기장 측정을 위한 계측기는 Narda 사의 ELT-400이다. 계측기는 그림2-135과 같다. 전자파 측정 실험에 사용된 코일은 그림2-136와 같다. 코일 턴 수는 3턴이며 턴 간격은 75mm이며 턴 중심은 거푸집 내높이의 중심에 위치한다. 코일과 거푸집과의 이격거리는 40mm이다. 그림2-137은 고주파 유도가열장치가 동작하지 않는 상태에서의 자기장 측정 결과이다. 자기장 측정은 코일에서 300mm 떨어진 위치에서 진행하였으며 측정값은 0.220[uT]이다.



그림2-135 ELT-400



그림2-136 가열 코일



그림2-137 가열장치 OFF
자기장 측정

전자파 차폐모델이 미적용된 상태에서 전자파 측정 실험을 진행하였다. 측정 위치는 앞서 언급했듯이 코일에서 300mm 떨어진 위치에서 진행하였다. 그림2-129를 적용한 가열 실험에서 측정한 코일에 흐르는 전류 데이터 중 가장 큰 값이 적용되게 장치를 설정하였다. 이때 코일에 흐르는 전류는 29.7A, 주파수는 44 KHz이다. 해당 실험 설정은 그림2-138와 같다. 그림2-138와 같이 장치 출력을 설정하고 전자파 측정을 ELT-400으로 진행하였다. 그림2-139는 전자파 측정 결과이며 2.831[uT]를 지시하고 있다.



그림2-138 전자파 차폐모델 미적용 실험
코일 전류 및 주파수 측정



그림2-139 전자파 차폐모델 미적용 실험
전자파 측정 결과

전자파 차폐모델은 두께 4mm의 페라이트 코어를 적용하였으며 그림2-140과 같다. 왼쪽의 정사각형 코어는 100*100*4mm이며 오른쪽의 직사각형 코어는 65*15*4mm이다. 해당 코어를 기반으로 차폐모델을 제작하였다. 그림2-130의 두 코어를 기반으로 제작한 전자파 차폐모델은 그림2-131과 같다. 페라이트 코어를 이어 붙여 코일의 모든 턴에 전자파 차폐가 적용될 수

있도록 하였다. 높이는 300mm으로 3턴의 코일을 모두 차폐할 수 있다. 모델 적용은 그림 2-136의 코일에서 넓은 공백 부분은 100*100*4 코어로 제작한 모델을 적용하였으며 좁은 부분은 65*15*4 코어로 제작한 모델을 적용하였다. 코일과 C/T Box가 이어진 부분과 전류 측정을 위하여 인접 부분에는 차폐모델을 적용하지 않았다. 그림2-132은 전자파 차폐모델을 적용한 후 코일에 흐르는 전류 및 주파수를 측정한 사진이다. 시뮬레이션과 동일하게 전류는 29.7A, 주파수는 44 KHz이다. 그림2-132와 같이 장치 출력을 설정하고 전자파 측정을 진행하였다. 그림2-133은 전자파 측정 결과로 1.359[uT]를 기록하고 있다. 그림2-134은 다른 방향에서 측정한 결과로 1.152[uT]를 기록하고 있다.

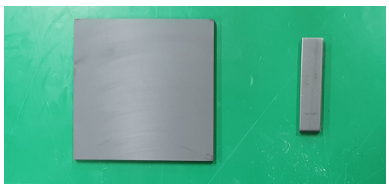


그림2-130 전자파 차폐제



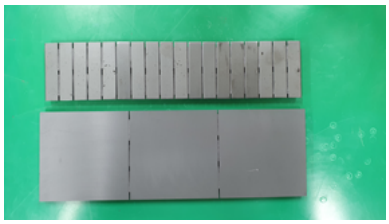


그림2-131 전자파 차폐모델

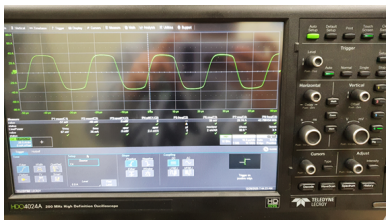


그림2-132 차폐모델 적용
코일 전류 및 주파수 측정



그림2-133 차폐모델 적용
전자파 측정 결과



그림2-134 차폐모델 적용
전자파 측정 결과

전자파 차폐용 페라이트 차폐모델이 없는 경우와 전자파 차폐용 페라이트 차폐모델이 있는 경우에 대하여 전자파 측정 실험을 진행하였다. 이를 비교하였을 때 전자파가 50% 이상 감소한 것을 알 수 있다. 전자파 측정은 코일로부터 300mm 떨어진 거리에서 이루어졌다. 이를 정리하면 표2-7과 같다.

표2-7 전자파 차폐 실험 결과

	전자파 차폐모델 미적용	전자파 차폐모델 적용	전자파 감소율
	자기장 수치(uT)	자기장 수치(uT)	감소율(%)
RMS	2.831	1.359 / 1.152	52.00 / 59.40

⑥ 결론

표2-8을 참고하면 자속밀도와 자계는 Model 5, 알루미늄 판으로 만든 차폐모델이 가장 성능이 좋은 것을 알 수 있다. 현재의 유도가열시스템은 어떤 모델에서든 적합성 기준을 만족하는 치수이다.

표2-8 모델별 자속밀도, 자계, 전계 비교

Model	자속밀도(uT)	자계(A/m)	전계(V/m)
0	13.944	11.161	3.6007
1	12.783	8.8196	3.8137
2	4.9442	10.254	4.0113
3	8.2013	7.7523	4.9839
4	15.448	8.7521	3.1139
5	7.1486	5.3072	5.0572

⑤에서 전자파 차폐 성능을 시뮬레이션 및 측정 실험을 통하여 확인하였다. 전류 세기는 그림 2-129를 적용한 실험에서 가장 큰 값인 29.7A를 적용하였으며 주파수는 44 KHz다. 자기장 세기는 코일에서 바깥 방향으로 300mm 떨어진 위치에서 측정하였다. ⑤ 전자파 측정 시뮬레이션에서는 제안한 전자파 차폐 시스템이 있을 때와 없을 때와의 자기장 세기를 비교하였다. 그 결과 자기장 세기는 90%이상 감소하였다. 이는 이상적인 페라이트를 적용한 결과이다. 전자파 측정 실험에서는 ELT-400을 사용하여 전자파를 측정하였다. 두께 4mm의 페라이트 코어를 이용하여 전자파 차폐모델을 제작하였으며 해당 모델을 적용하였다. 전자파 차폐모델이 없는 경우 시뮬레이션과 동일한 전류 및 주파수를 코일에 인가하여 실험을 진행하였다. 실험 결과 전자파는 50% 이상 감소된 것을 확인할 수 있었다.

현재 9kHz~150kHz 대역의 산업용 유도기기(유도조리기기 제외)의 전자파 적합성 기준은 규정되어 있지 않으나, 해당 주파수 대역에 대한 전자파 적합성 기준을 규정이 예상된다. 본 과제에서는 향후 기술의 실용화를 위하여 40kHz 대역의 콘크리트양생을 위한 산업용 유도가열 시스템에 대한 적합한 전자파 차폐 기술을 개발하였다.

(3) 유도가열 기반 발열양생 콘크리트 역학적 특성 및 내구성 확보 기술 개발

(가) 발열양생 콘크리트 역학적 특성(압축강도, 미세구조, 장기강도) 평가

① 발열양생 콘크리트의 역학적 특성(강도) 평가	⇨	② 발열양생 콘크리트의 미세구조 평가	⇨	③ 발열양생 콘크리트의 장기 강도 특성 평가	⇨	④ 발열양생 콘크리트의 역학적 특성(강도) 및 장기강도 향상기술 제안

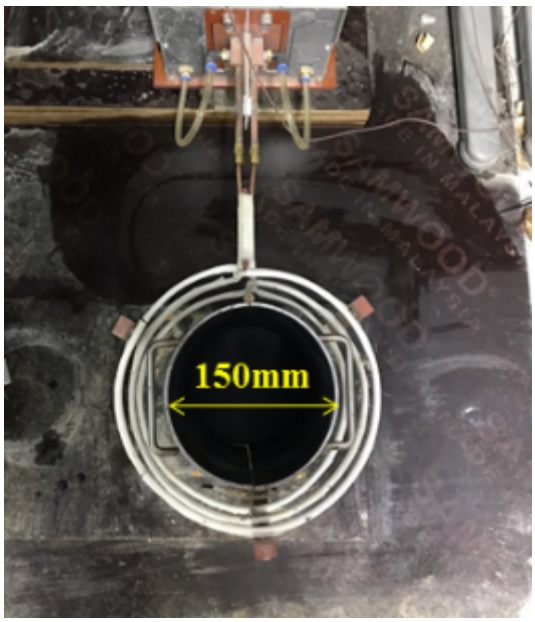
① 발열양생 콘크리트의 역학적 특성(강도) 평가

㉮ 실험계획 및 방법

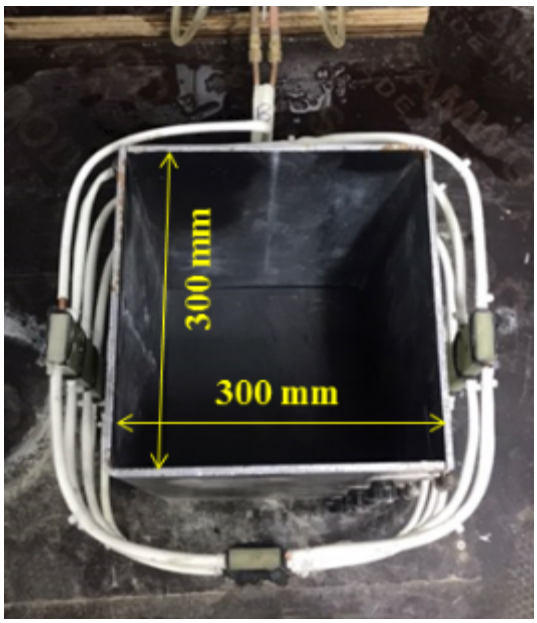
유도가열 기반 발열양생 콘크리트의 강도특성 평가를 위한 대상 구조물로는 원형의 수직부재인 교량의 교각부를 선정하였다. 일반적으로 전자기 유도 현상에 의해 코일을 폐회로 형태로 배치하는 경우 효율이 가장 우수하며(Kwak et al. (2000)), 교각의 경우 수직방향으로 타설이 진행되므로 폐회로 형태의 코일을 활용하기에 가장 효율적인 구조물로 판단을 하였다. 실험변수 상세를 표 3-1에 나타내었으며, 주요 변수로는 거푸집 종류, 거푸집 두께, 양생 최고온도 및 최고온도 유지시간을 고려하였다. 한편, 콘크리트 단면의 증가에 따라 유도가열에 의해 직접 가열되는 거푸집과 수화열 및 거푸집에서 발생한 열의 전달에 의해서 발열되는 콘크리트의 온도차이가 발생할 수 있다. 또한, 거푸집의 형상이 변화함에 따라 코일의 형상이 변화되고, 이는 코일과 거푸집의 일정한 간격유지가 어려운 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 추가적으로 콘크리트 및 거푸집의 단면크기, 거푸집의 형상에 대한 변수를 고려하여 실험을 진행하였다(그림 3-1).

표 3-1 유도가열기반 발열양생 콘크리트의 역학적 특성(강도) 평가 변수

시험체	거푸집	양생온도	비고
S4-8h-50	Steel-4mm ϕ150×300 mm	50℃-8h	원형 거푸집 (그림 3-1(a))
S4-5h-60	Steel-4mm ϕ150×300 mm	60℃-5h	
S4-5h-70	Steel-4mm ϕ150×300 mm	70℃-5h	
S4-5h-80	Steel-4mm ϕ150×300 mm	80℃-5h	
S4-7h-70	Steel-4mm ϕ150×300 mm	70℃-7h	
A4-5h-70	Aluminium-4mm ϕ150×300 mm	70℃-5h	
S8-5h-70	Steel-8mm ϕ150×300 mm	70℃-5h	
SS4-5h-70	Steel-4mm 300×300 mm	70℃-5h	사각형 거푸집 (그림 3-1(b))



(a) ϕ150×300 mm 원형 거푸집 및 코일



(a) ϕ150×300 mm 원형 거푸집 및 코일

그림 3-1 유도가열기반 발열양생 콘크리트의 거푸집 및 코일 형상

본 연구에서는 교량의 교각부를 대상 구조물로 하였으므로, 표 3-2와 같이 현장에서 교각용 한중 콘크리트로 사용이 되고 있는 물/시멘트 비 38%의 배합을 기본 배합으로 선정하여 모든 실험체에 적용하였다. 아래의 콘크리트 배합에는 밀도 3.15g/cm^3, 비표면적 3000cm^2/g, 평균 입경크기 13.2μm의 1종 보통 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement)를 사용하였다. 굵은골재는 최대치수 25mm, 밀도 2.67g/cm^3, 조립률 6.12의 쇄석을 사용하였으며, 잔골재는 밀도 2.56g/cm^3, 조립률 2.99의 자연사를 사용하였다. 혼화제는 폴리카본산계의 국내산 고성능 감수제가 약 0.3~0.6%만큼 사용되었다. 굳지 않은 콘크리트의 물성에서 KSF 2402 (KSA (2010))에 따라 슬럼프 시험을 수행하였으며, 평균 120mm 정도의 슬럼프를 나타내었다.

표 3-2 콘크리트 배합표

배합	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m^3)				SP (wt%)
			W	C	S	G	
W/C38	38.3	47.9	176	460	800	894	0.3-0.6

W/C: Water-to-Cement Ratio; S/a: Sand-to-Aggregate Ratio; W: Water; C: Cement; S: Sand; G: Gravel; SP: Super plasticizer(wt%);

그림 3-2에 본 연구에서 사용한 유도가열 장치 및 시험체 설치모습을 나타내었다. 유도가열기는 앞선 “1. 능동형 유도가열용 전력변환장치 개발”에서 개발된 최대출력 7kWh, 주파수 40 kHz의 장비가 사용되었다. 또한 유도가열을 위한 코일은 “2. 급속양생 효율 최적화를 위한 유도가열 시스템 핵심 요소 기술 개발”에서 도출된 결과를 활용하여 온도분포 및 균일도를 효율적으로 유지할 수 있도록 거푸집과 코일의 간격은 35mm, 코일은 75mm의 등 간격으로 제작

되었다. 유도가열 온도는 “온도자동제어 시나리오”에 기반하여 다음의 그림 3-3과 같이 최대 온도, 최도온도 유지시간을 변수로 하여 적용되었다. 이러한 유도가열 온도곡선은 설정된 목표 온도에 따라 PID (Proportional Integral Derivative Control) 제어 방식에 따라 전력변환장치에서 공급되는 출력을 조절하는 온도제어기(Temperature Controller, 그림 3-2)에 의해 정밀하게 조절된다. 온도제어기에서 기준이 되는 온도는 제어의 정확성을 위하여 콘크리트와 접하는 거푸집 내부면의 온도로 설정하였다. 제어기 조절부와 동일한 위치 및 콘크리트 중앙부에도 열전대(Thermocouple)를 별도로 삽입하여 콘크리트 내부의 온도분포를 계측하였다. 또한, 콘크리트 표면 및 거푸집 표면을 열화상 카메라로 촬영하여 온도분포를 추가적으로 검증하였다.

본 연구에서는 동절기 및 혹한기 콘크리트의 양생 성능 향상을 검증하고자 하였으므로, 유도가열 실험은 그림 3-4와 같이 0℃의 항온·항습 챔버를 구축하여 진행되었다. 모든 변수에 대해서 12개의 지름 150mm×높이 300mm의 압축강도 공시체를 제작하였으며, 양생과정에서의 수분 손실을 방지하기 위해 표면을 아크릴 판으로 밀봉하여 양생을 실시하였다. 각각 3개의 실험체를 유도가열양생(IHC), 고온가열양생(HTC), 상온양생(MTC), 저온양생(LTC)의 방법으로 총 15시간 동안 양생 후, 압축강도를 평가하였다. 유도가열양생 시험체에 적용된 가열온도 곡선은 Fig. 3와 같다(KCI (2015)). 콘크리트 타설 후 3시간 동안 전 양생을 실시하고, 표 3-1의 변수에서 설정한 최고온도(60-80℃)까지 유도가열을 통해 거푸집을 가열하였다. 그 이후 변수에 따라 최고온도를 5시간 및 7시간 동안 유지하였으며, 가열속도와 동일하게 온도를 상온까지 감소시키고 마지막으로 약 1-2시간 동안 상온에서 존치시켜 후 양생을 실시하였다. 고온가열양생 시험체는 유도가열과 동일한 온도의 가열 챔버에서 양생되었으며, 상온양생 및 저온양생 시험체는 각각 20℃ 및 0℃ 챔버에서 양생되었다. 모든 시험체는 동일한 시간(15시간) 동안 양생을 실시한 이후 탈형 및 KS F 2405(KSA (2010))에 준하여 압축강도 시험을 수행하였다.

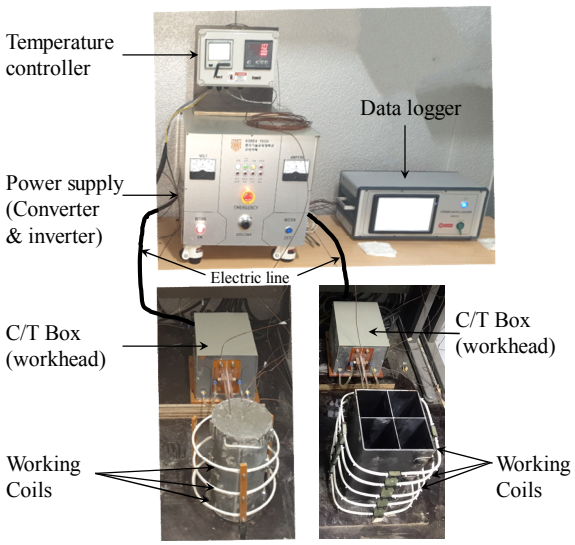


그림 3-2 유도가열기반 발열양생 콘크리트의 거푸집 및 코일 형상

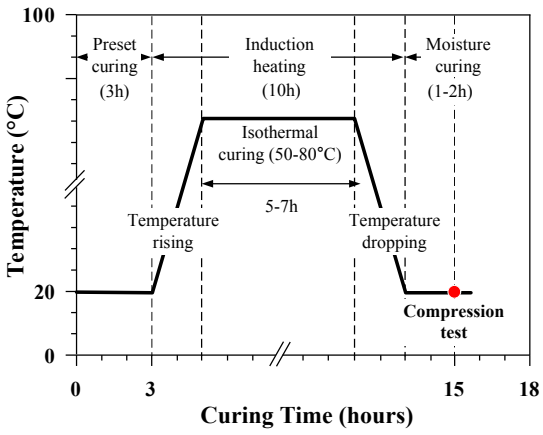


그림 3-3 발열양생 곡선



그림 3-4 동절기 환경모사 챔버 및 유도가열기 설치 모습

㉯ 실험결과 및 분석

○ 유도가열 콘크리트 온도이력 측정결과

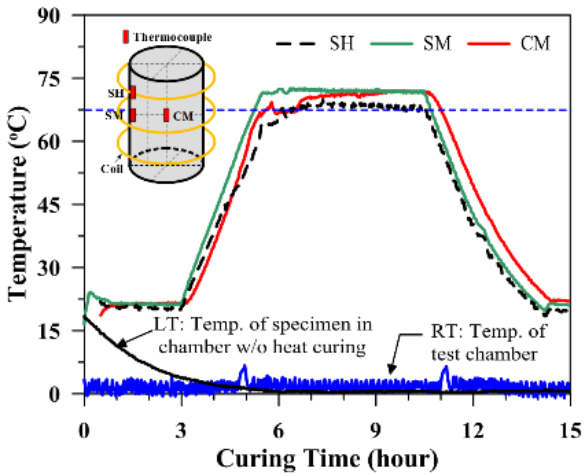
유도가열 기반 발열양생 콘크리트의 대표적인 온도이력 측정 결과를 그림 3-5에 나타내었다. 그림 3-5(a)는 ϕ150×300mm의 원형단면 스틸(4mm) 거푸집을 최고온도 70℃를 5시간 동안 유지하여 가열시킨 S4-5h-70 시험체의 결과이며, 그림 3-5(b)는 다른 조건은 동일하지만 단면의 형상이 300×300mm의 정사각형인 SS4-5h-70시험체의 온도이력 측정 결과이다. 한편, 예비 실험을 통해 코일 내부에 열전대만을 삽입한 상태에서도 열전대 자체의 유도에 의한 발열은 없음을 확인하였다. 그림 3-5에서 “SM”의 경우 거푸집 내측에서 콘크리트와 접하는 부분의 온도이며, “CM”은 지름 150mm인 콘크리트 공시체 중심에서의 온도 계측 결과이다. 두 경우 모두, 길이방향으로는 공시체 높이의 절반에 해당하는 위치의 온도를 의미한다. 원형거푸집의 경우(그림 3-5(a)), 추가적으로 거푸집 내측면 최상부 코일의 위치에서도 온도를 계측하여 코일 위치에 따른 온도분포를 확인하고자 하였다.

그림 3-5 모두에서 열전대 RT는 0℃ 저온 챔버의 공기온도를 측정한 결과이며, 실험변수에 관계없이 실제 계측된 온도는 약 -1~4℃ 정도의 분포를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 일반적인 열전대의 온도 오차 범위를 감안할 때, 겨울환경 모사를 위한 실험실 온도 제어가 적절히 이루어진 것으로 판단되었다. 다만 6시간 주기로 실험실 온도가 5C° 이상으로 다소 상승한 것은 냉동기의 동결방지를 위한 제상기능의 작동으로 인한 것이며, 온도 증가량이 크지 않아 실험에 미치는 영향은 미미할 것으로 판단된다. 열전대 LT의 경우, 0℃ 챔버에서 가열양생 없이 저온에서 양생한 콘크리트 시험체의 중앙부 온도를 나타내고 있다. 실험결과 초기에는 콘크리트 자체의 온도로 인해 약 18-22℃의 온도분포를 보이지만 이후 온도가 지속적으로 감소하여 약 4-6시간 이후부터는 챔버 내부의 온도와 동일하게 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 겨울철 별도의 열 공급 없이 외부 환경에서 자연 양생된 콘크리트에 동해가 발생할 가능성이 있음을 시사하는 결과이다.

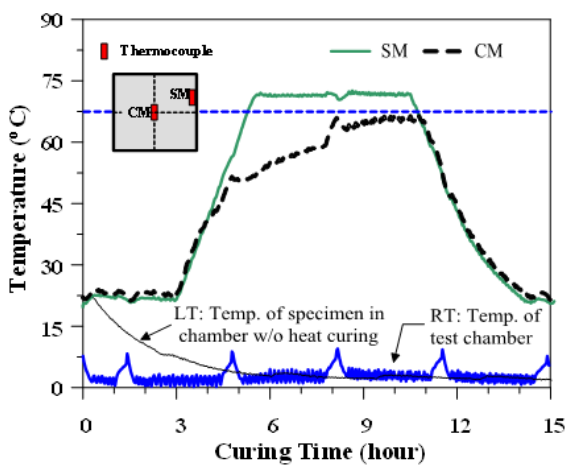
그림 3-5(a)에서 초기 전양생 구간에서는 내부 0℃ 챔버에서 상온과 비슷한 수준을 유지하기 위해 최소의 출력으로 유도가열기가 작동하며 콘크리트 내부와 거푸집의 온도가 유지되는 것

을 확인할 수 있다. 온도 상승구간에서는 본격적으로 유도가열에 의해 거푸집의 온도가 상승을 하게되어, 직접적으로 가열이 되는 거푸집의 온도 상승속도가 콘크리트 내부의 온도 상승속도 보다 빠른 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 최대온도 유지가 끝나는 시점(약 10:30h)에서 역전이 되어 온도하강 구간에서는 거푸집의 온도 하강이 콘크리트 중심부 온도 하강보다 다소 빠른 것을 알 수 있다. 한편, 최고온도 유지구간에서도 일정한 온도 유지를 위해 최소한의 출력이 발생되어 거푸집의 가열/비가열이 반복이 되며, 이에따라 직접적으로 가열이 되는 거푸집의 온도가 콘크리트 중심부 온도보다 약 0~4℃ 정도 높은 것을 확인할 수 있다. 한편 그림 3-5(b)는 단면이 300×300mm인 직사각형 거푸집으로, 그림 3-5(a)의 원형 거푸집과 비교하여 거푸집 표면에서 콘크리트 중심부까지의 최단거리가 약 2배정도 증가된 경우에 대한 발열양생 온도이력 결과이다. 전양생 구간 및 온도 상승구간 초기에는 거푸집과 콘크리트 내부의 온도가 비슷한 경향을 보이지만, 이후 콘크리트 내부 온도 상승 속도는 급격히 감소하여 유도가열에 의한 발열양생에서 최대온도 유지기간이 끝나는 시점(10:30h)에서도 목표 최대온도인 70℃에 도달하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 최대온도 유지구간에서 거푸집과 콘크리트 중심부의 온도차이는 약 5~20℃로 **콘크리트 단면적 증가에 따라 거푸집 유도가열을 통한 콘크리트 전단면의 균일한 발열성능을 확보하기에 한계**가 있음을 확인하였다.

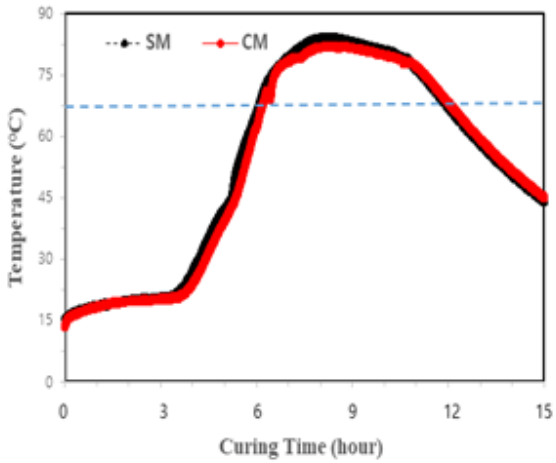
한편, 본 연구에서는 종래에 콘크리트 가열·촉진 양생 방법으로 대표적으로 활용이 되고 있는 증기양생과의 비교를 함께 수행하였다. 동일 온도조건에서의 S4-5h-70 시험체에 대한 증기양생 시의 발열양생 온도이력 결과를 그림 3-5(c)에 나타내었다. 그림 3-5(a)와 그림 3-5(c)의 비교를 통해, 유도가열양생(IHC)은 SM, CM 모두 가열곡선과 유사한 온도발현을 나타내었다. 반면, 증기양생(SHC)은 SM 및 CM 모두 최대온도 유지구간에서 목표온도 70℃를 10℃이상 상회하였으며, 온도상승 및 하강구간에서의 기울기가 그림 3-3의 발열양생 시나리오에 따른 곡선과 차이가 크게 발생하였다. 따라서, **증기양생을 이용할 경우 콘크리트 내부의 온도를 세밀하게 조절하기 어려운 것으로 판단**이 되며, 콘크리트 품질관리 및 정확한 목표강도 설계를 위해 현장에서 유도가열 기법을 이용하는 것이 증기양생 기법보다 이점이 있음을 시사하는 결과이다.



(a) S4-5h-70 시험체(ϕ150×300mm 원통형)



(b) SS4-5h-70 시험체(300×300mm 육면체형)



(c) S4-5h-70 시험체(증기양생)

그림 3-5 유도가열기반 발열양생 콘크리트의 거푸집 및 코일 형상

○ 유도가열 콘크리트의 역학적 특성(강도) 평가 결과

유도가열 기반 발열양생 콘크리트의 양생 방법별 압축강도(15시간 양생 직후) 시험결과를 표 3-3에 나타내었으며, 각 변수별 공시체의 압축강도 시험 후 모습을 그림 3-6에 나타내었다. 표 3-3 및 그림 3-6에서 “MTC”콘크리트 타설후 상온(약 20℃)에서 양생한 시험체, “LTC”는 0℃ 챔버에서 별도의 가열양생을 하지 않고 저온에서 양생한 시험체, “HTC:는 유도가열 최대 온도와 동일한 온도의 가열챔버에서 양생한 시험체, “IHC”는 0℃ 챔버에서, 거푸집을 유도에 의해 가열하여 발열양생을 한 시험체를 의미한다. 모든 변수에서 외부 열 공급 없이 0℃ 챔버에서 양생을 실시한 LTC 시험체의 15시간 압축강도는 0.3-0.6MPa로 나타났으며, 이는 동일 시간 동안 상온에서 양생한 콘크리트 강도의 약 2-3.5%로 강도 발현이 전혀 진행되지 않았음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 그림 3-6의 콘크리트 표면 관찰 및 앞선 그림 3-5의 콘크리트 내부 온도 결과로부터도 확인할 수 있다. 일반적으로 콘크리트가 -10℃ 이하에서 동결되었을 경우 강도 발현이 되지 않는 것으로 알려져 있으며 (Mehta & Monteiro (2006)), 본 연구 결과 영하의 동결 온도가 아닌 경우에도 약 5℃이하의 저온에서는 콘크리트의 강도 발현이 거의 이루어지지 않음을 알 수 있다. 한편, ACI 306에서는 부재의 단면이 300mm 이하인 경우 타설 및 유지를 위한 콘크리트의 최소 온도를 13℃로 제한하고 있다(ACI (1988)). 한편, 유도가열과 동일한 고온(60-80℃)의 챔버에서 양생한 HTC 시험체의 경우 상온양생 콘크리트 압축강도의 166-212%의 강도 발현율을 보이는 것으로 확인되었다.

표 3-3 압축강도 시험결과

시험체	상온양생 (MTC)	0℃챔버-저온양생 (LTC)		60~80℃챔버-고온양생 (HTC)		0℃챔버- 유도가열양생 (IHC)	
	f_c (MPa)	f_c (MPa)	$f_c/f_{c(MTC)}$* (%)	f_c (MPa)	$f_c/f_{c(MTC)}$* (%)	f_c (MPa)	$f_c/f_{c(MTC)}$* (%)
S4-8h-50	12.0	0.2	1.7	19.8	165	**18.9**	158
S4-5h-60	12.7	0.3	2.2	21.0	166	**19.8**	157
S4-5h-70	15.4	0.4	2.4	27.2	177	**25.9**	168
S4-5h-80	15.7	0.3	2.1	29.4	187	**26.4**	167
S4-7h-70	14.7	0.3	2.3	29.0	197	**26.7**	182
S4-9h-70	14.3	0.4	2.6	28.1	196	**28.0**	195
A4-5h-70	17.9	0.4	2.2	30.9	173	**21.8**	122
S8-5h-70	14.0	0.3	2.4	29.7	212	**25.1**	179

*상온양생 시험체(MTC)에 대한 강도비

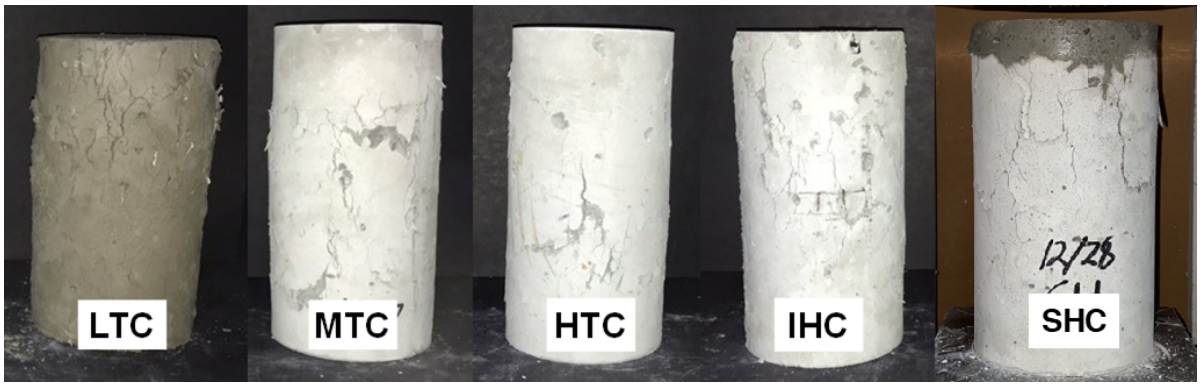


그림 3-6 변수별 공시체의 압축강도 시험 후 파괴 형상

표 3-3에서 유도가열을 통해 거푸집 발열 양생을 실시한 IHC 시험체의 경우 상온양생 콘크리트 압축강도의 122-188%의 강도 발현율을 보이는 것으로 확인되었으며, 모든 시험체에서 15시간 압축강도 19.8~28.0MPa을 확보하였다.

콘크리트표준시방서(MLIT (2016))에서는 한중 콘크리트의 양생 종료 때의 소요 압축강도를 아래의 표 3-4과 같이 5~15MPa로 규정하고 있다. 따라서, 물로 포하되지 않는 일반적인 경우에 대해서는 5MPa에 도달하는 경우 거푸집 탈형이 가능하며, 일반적인 건설현장에서 동절기 탈형강도 기준으로 5MPa을 적용하고 있다. 또한, 이러한 강도를 얻기 위한 양생 일수를 5℃ 및 10℃에서 양생할 경우에 대해서 다음의 표 3-5와 같이 규정하고 있으며, 보통포틀랜드 시멘트를 사용한 경우 약 3~9일을 필요로 하고 있다. 이를 통해 유도가열 기반 발열양생 기술을 활용할 경우, 1일 이내에 동절기 콘크리트 양생 종료를 위한 충분한 강도를 확보할 수 있음을 알 수 있다.

표 3-4 한중콘크리트의 양생 종료 때의 소요 압축강도의 표준(콘크리트 표준 시방서, 2016)

단면 / 구조물의 노출	얇은 경우 (MPa)	보통의 경우 (MPa)	두꺼운 경우 (MPa)
(1) 계속해서 또는 자주 물로 포화되는 부분	15	12	10
(2) 보통의 노출상태에 있고 (1)에 속하지 않는 부분	**5**	**5**	**5**

표 3-5 한중콘크리트의 소요 압축강도를 얻는 양생일수의 표준-보통의 단면(콘크리트 표준 시방서, 2016)

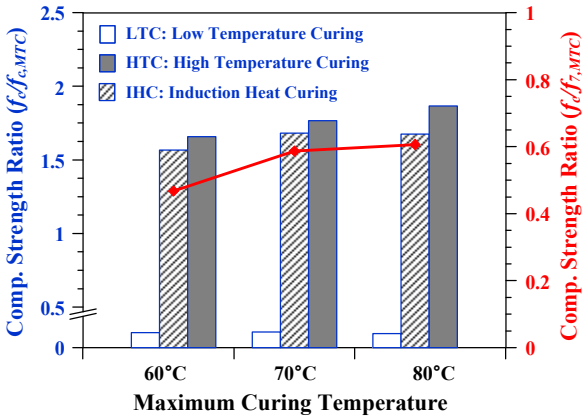
구조물의 노출 / 단면		보통포틀랜드 시멘트	조강포틀랜드 보통포틀랜드+촉진제	혼합시멘트 B종
(1) 계속해서 또는 자주 물로 포화되는 부분	5℃	9일	5일	12일
	10℃	7일	4일	9일
(2) 보통의 노출상태에 있고 (1)에 속하지 않는 부분	5℃	4일	3일	5일
	10℃	3일	2일	4일

각 배합에 따른 강도차이를 고려하기 위해 변수별 비교는 상온양생 콘크리트의 강도에 대한 비율로 평가하였으며, 이러한 결과를 그림 3-7에 나타내었다. 그림 3-7(a)에서 양생을 위한 최고온도를 60, 70, 80℃로 증가시킨 경우, HTC 시험체의 강도 발현율은 지속적으로 증가하였다. 그러한 유도가열 시험체인 IHC의 강도 발현율은 70℃에서는 60℃와 비교하여 약 7% 증가한 반면, 80℃로 온도를 더 상향 시킨 경우에도 70℃와 유사한 강도 발현율을 보이는 것으로 나타났다. 또한, 상온양생 콘크리트의 7일 재령 강도에 대한 유도가열 양생 시험체의 강도비 증가율 역시 70℃까지는 증가하지만, 더 이상의 온도증가에 따른 강도비 증가율은 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 따라서 유도가열을 위한 최적의 온도를 70℃로 결정하였다.

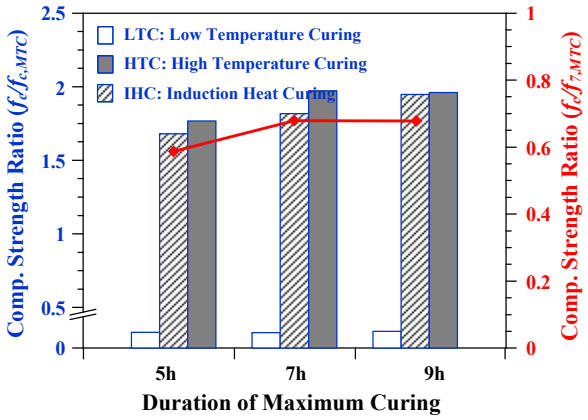
그림 3-7(b)에서 최고온도(70℃) 유지시간을 5시간→7시간→9시간으로 증가시킨 경우, HTC 및 IHC 모두 강도 발현율이 증가하여 콘크리트 적산온도 개념에 부합하는 결과를 나타내었다. 그러나, 최대온도를 5시간만 유지한 경우에도, 15시간 압축강도가 25MPa을 상회하여 조기강도 확보에 충분함을 확인하였다.

그림 3-7(c)에서는 거푸집 재질 및 두께에 따른 15시간 양생 후 압축강도 결과를 비교하였다. 거푸집으로 동일한 두께의 스틸과 알루미늄을 사용한 경우, HTC에서는 강도비의 차이가 약 2%로 거의 비슷한 것으로 나타났으며 이는 고온의 챔버에서 양생하는 경우 가열된 공기가 콘크리트 전체를 골고루 양생시키므로 거푸집 종류에 의한 영향이 크지 않기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 유도가열 양생을 실시한 IHC에서는 알루미늄 거푸집을 적용한 경우 스틸 거푸집에 비해 강도 발현율이 27%만큼 감소하였으며, 이는 유도가열에서 1차 전류가 2차에 전달되는 효율이 2차측 가열체의 투자율(permeability)에 비례하며, 알루미늄의 투자율(1이하)이 스틸의 투자율(5,000이상)에 비해 매우 작기 때문이다. 스틸 거푸집의 두께를 4mm에서 8mm로 증가시킨 경우 유도가열 시험체의 강도 발현율이 미세하게 증가하는 것으로 확인되었다. 한편, 상온양생 콘크리트의 7일 재령 강도에 대한 유도가열 양생 시험체의 강도비의 경우, 두

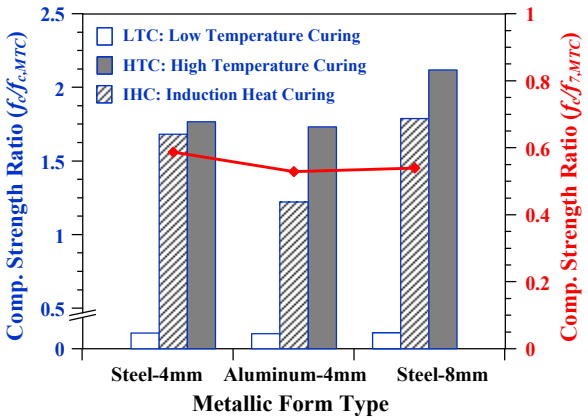
께 8mm 거푸집보다 4mm의 스틸거푸집이 우수한 결과를 보여주어 거푸집의 두께변화에 따른 유도가열양생의 효율성 차이는 크지 않은 것으로 확인이 되었다. 이는 거푸집의 두께에 따른 열손실 정도에 관계없이 PID제어 기반의 온도 조절기가 지속적으로 거푸집의 온도를 모니터링 하고, 설정된 온도(양생에 필요한 온도)를 유지시켜 주기 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로 건설현장에서 사용되는 갱폼(스틸 폼)의 경우, 건축용은 주로 3.2mm 및 교량용(고핑폼, 피어 폼)은 4.5mm로 현재 건설현장에서 활용되고 있는 스틸재질의 거푸집에 본 유도가열양생 기술을 적용할 수 있을 것으로 기대된다.



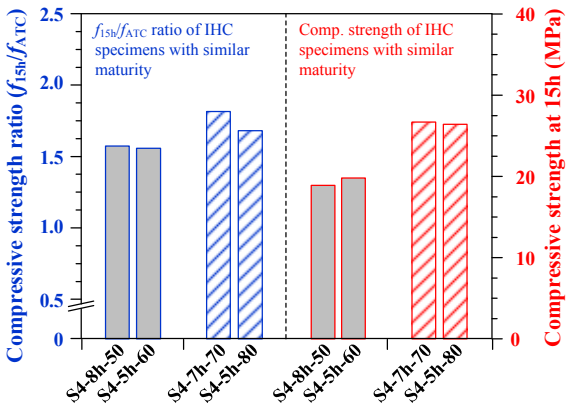
(a) 양생 최대온도에 따른 압축강도 비교



(b) 양생 최대온도 유지시간에 따른 압축강도 비교



(c) 거푸집 종류 및 두께에 따른 압축강도 비교



(d) 성숙도에 따른 압축강도

그림 3-7 변수별 압축강도 비교

○ 유도가열 및 증기양생 콘크리트의 압축강도 비교

한편, 표 3-6에 증기양생과 유도가열 양생 후의 압축강도 결과를 나타내었다. 증기양생과 유도가열 양생에 의한 15시간 압축강도 결과는 거의 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 이러한 결과는 유도가열 시험체의 경우 동절기 환경조건을 모사한 0℃의 챔버에서 거푸집만을 가열 양생하여 도출한 결과인 반면, 증기양생은 공간 전체를 고온의 수증기로 가열하여 도출한 결과라는데 의의가 있다. 한편, 그림 3-6에서 증기양생을 수행한 콘크리트는 노출면에서 수분에 의한 레이턴스가 크게 발생하여 표면이 고르지 못한 것을 확인할 수 있었다. 따라서, **유도가열 양생은 증기양생과 비교하여 레이턴스 저감 및 양생을 위한 밀폐된 공간**

의 확보가 필요 없는 장점이 있음과 함께, 증기양생과 동등 또는 이상의 조기강도가 확보 가능함을 알 수 있다.

표 3-6 압축강도 시험결과(증기양생 비교)

Specimen	상온양생 (MTC)	0℃챔버-저온양생 (LTC)		증기양생 (HTC)		0℃챔버- 유도가열양생 (IHC)	
	f_c (MPa)	f_c (MPa)	$f_c/f_{c(MTC)}$* (%)	f_c (MPa)	$f_c/f_{c(MTC)}$* (%)	f_c (MPa)	$f_c/f_{c(MTC)}$* (%)
S4-5h-60	12.0	0.3	2.5	23.9	199	**23.7**	198
S4-5h-70	8.6	0.3	3.5	22.0	255	**23.4**	272

*상온양생 시험체(MTC)에 대한 강도비

② 발열양생 콘크리트의 미세구조 평가

㉮ 실험계획 및 방법

일반적으로 콘크리트는 양생온도가 높으면 초기 강도는 증가하지만 장기재령에서 강도에 나쁜 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이처럼 고온 양생이 장기강도에 부정적인 영향을 미치는 이유는 고온의 촉진반응에 의해 생성된 조직이 두꺼운 수화물로서 시멘트 입자를 빠르게 감싸 입자 내부의 수화 저지, 고온에 의해 내부 수화물이 현저하게 치밀화하여 이후의 수화반응 속도를 저해, 초기의 급격한 수화반응에 의한 내부 구조 부실화(공극 등) 등이 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 유도가열에 의해 가열 양생된 콘크리트의 미세구조 분석을 통해 강도저하 요인을 분석하고자 하였다.

양생 조건에 따른 미세구조 변화를 관찰하기 위하여, 다음의 표 3-7의 4가지 변수에 대한 시험체를 제작하였다. 시험체 제작에 사용된 콘크리트 배합 및 양생방법은 앞선 “발열양생 콘크리트의 역학적 특성(강도) 평가”에 적용된 경우와 동일하다. 15시간의 양생 후, 시험체 촬영을 위한 전처리를 수행하였다. 전처리는 Cold Mounting 기법으로 수행되었으며, EpoxySet Resin과 EpoxySet Hardener가 100:12의 비율(무게비)로 섞인 수지에 콘크리트 시험체를 넣고 8시간동안 양생을 하게 된다. 이후 수지와 함께 경화된 콘크리트 시험체 표면을 Grinding & Polishing 과정을 거쳐 미세구조 관찰을 위한 최종 시편을 준비하였으며(그림 3-8(a)), 콘크리트 타설 시점을 기준으로 약 7일 재령에서 그림 3-8(b)의 SEM(Scanning Electron Microscope) 장비를 활용하여 미세구조를 관찰하였다. 아울러, SEM촬영 과정에서 EDS Spectrum을 통한 성분 분석을 함께 수행하였다.

표 3-7 미세구조 분석 시험체 상세

시험체	외부 환경 조건	양생조건 상세
MTC	20℃ 상온 챔버	상온 대기 중 양생 (별도 양생조치 없음)
LTC	0℃ 저온 챔버	0℃ 저온 대기 중 양생 (별도 양생조치 없음)
IHC	**0℃ 저온 챔버**	**70℃ 유도가열 양생**
HTC	70℃ 고온 챔버	고온 대기 중 양생 (별도 양생조치 없음)



(a) 전처리 완료후의 콘크리트 시편

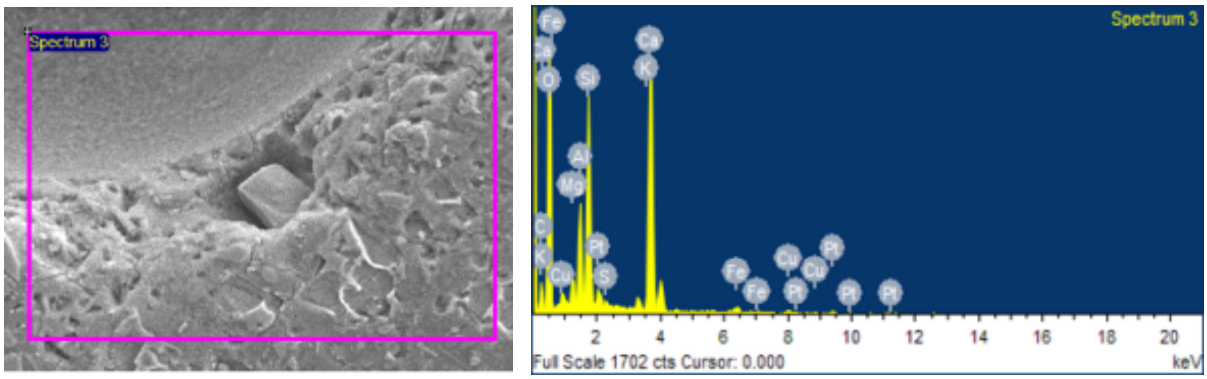


(b) SEM(Scanning Electron Microscope) 장비

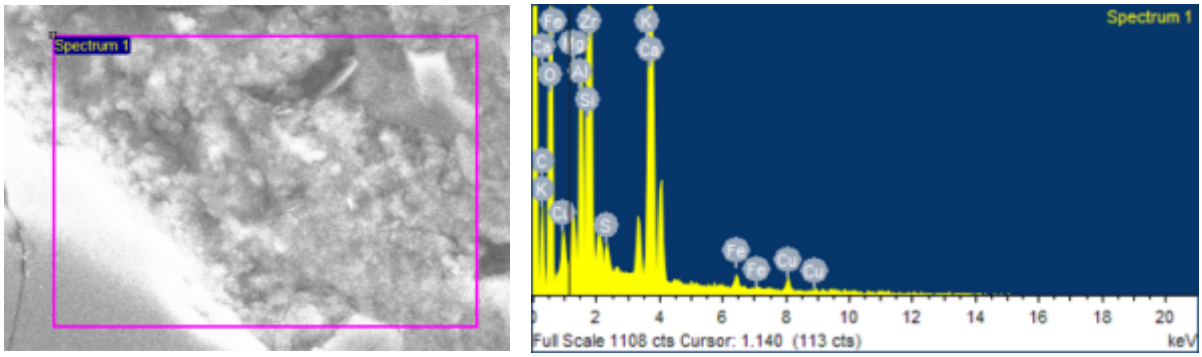
그림 3-8 미세구조 분석을 위한 시편 및 SEM 장비

㉯ 실험결과 및 분석

대표적인 수화물인 Calcium silicate hydrate (C-S-H)는 $3CaO{\cdot}2SiO_2{\cdot}4H_2O$로 구성되어 있다. 최근 다수의 연구결과에 따르면 C-S-H의 Ca/Si의 비율은 정해져 있지 않으며 Ca/Si비에 따라서 다양한 종류의 C-S-H가 생성될 수 있다. 일반적으로 Ca/Si비가 작을 경우 C-S-H가 가진 결합수의 양이 많아지기 때문에 밀도가 작아지게 되고 결과적으로 강도가 저감되는 하나의 요인으로 볼 수 있다. 이러한 결과 비교를 위해 그림 3-9의 예시와 같이 EDS spectrum 분석(MTC 및 IHC 시편 예시)을 수행 하였으며, 표 3-8에 각 시편에서의 Ca/Si 비율을 계산하여 나타내었다.



(a) MTC 시편



(b) IHC 시편

그림 3-9 EDS spectrum 분석 예시

표 3-8 미세구조 분석을 통한 Ca/Si 비율

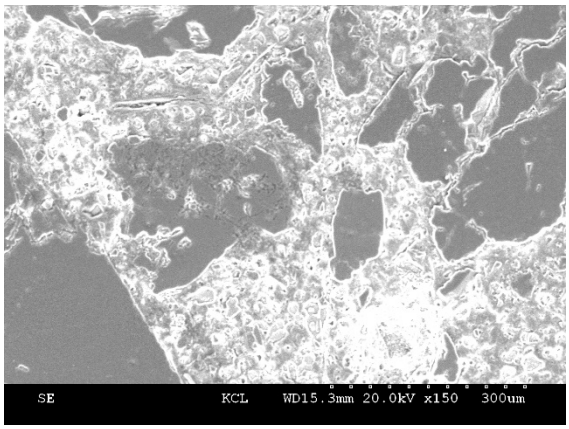
시험체	비율 상세	Ca/Si 결과
MTC	Ca/Si = 26.53/19.42	1.37
LTC	Ca/Si = 24.26/17.66	1.37
IHC	Ca/Si = 22.80/11.17	2.04
HTC	Ca/Si = 27.18/11.77	2.31

결과에서 보는바와 같이 가열양생을 한 HTC 및 IHC 시편의 경우 Ca/Si의 비율이 더 높은 것으로 나타났으며, 이는 초기 가열양생으로 인해 시멘트의 수화반응이 촉진되었기 때문으로 판단된다. 반면에서 상온에서 양생한 MTC와 0℃ 저온챔버에서 양생한 LTC의 경우 Ca/Si비는 동일하게 1.37로 나타났으며, 따라서 가열양생한 시편에 비해 극 초기재령에서의 강도가 작게 측정된 것으로 판단된다.

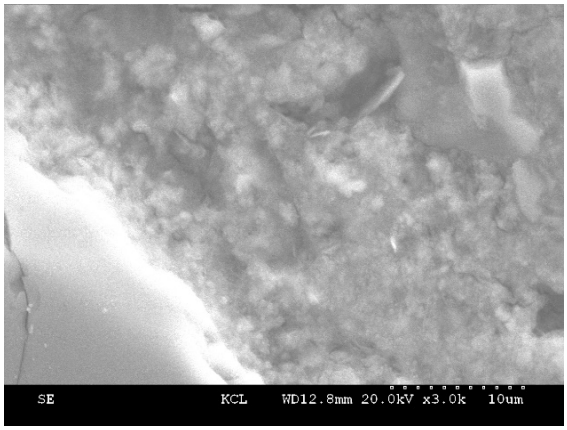
LTC 시편의 SEM 사진은 그림 3-10(a)와 같다. 보는 바와 같이 골재 주변에 시멘트 매트릭스가 채워져 있는 것을 확인할 수 있으나 아직 수화반응하지 않은 미수화 시멘트계 재료가 다수 발견되었다. 즉 타설 후 극 초기재령 양생온도가 매우 낮음(0℃)에 따라 수화반응이 지연되었다고 판단된다. 반면에 유도가열 양생을 한 IHC 시편의 경우(그림 3-10(b)~(d)), 극 초기재령에 동절기 환경조건을 모사하기 위해 0℃ 챔버에서 양생을 하였지만, 유도가열을 통한 거푸집 발열양생의 효과로 수화반응이 충분히 진행된 것으로 판단된다. 그림 3-10(b)에서 볼 수 있듯이 골재 주변으로 C-S-H가 생성된 것을 확인할 수 있으며, LTC 시편과는 다르게 골재 주변의 시멘트 매트릭스 내 미수화 시멘트계 재료는 관찰되지 않았다(그림 3-10(c)). 하지만 굳지않은 상태에서 70℃의 매우 높은 온도에 노출됨에 따라 그림 3-10(d)에서 볼 수 있듯이 온도팽창균열이 일부 발생한 것으로 판단되며, 또한 수화물의 생성도 균질하게 채워지지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 장기적인 측면에서의 강도 저하에 영향을 미치는 요인으로 판단할 수 있다.

그림 3-10(e)~(f)에서 볼 수 있듯이 HT 시편의 경우에도 골재 주변으로 C-S-H 형태의 수화물이 생성됨을 확인할 수 있었다. 하지만 IH 시편과 동일하게 극초기에 매우 높은 온도에 노

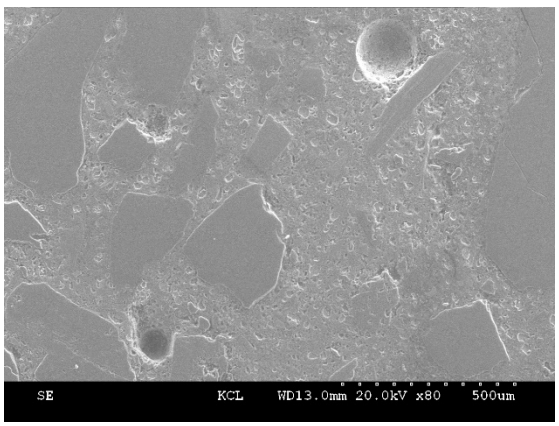
출됨에 따라 매트릭스내 균열이 발생하였으며, 이는 장기강도 발현에 부정적인 영향을 끼치는 것으로 판단된다. Mehta & Monteiro 에 따르면 초기양생온도가 높을 경우 수화물의 불균질한 확장으로 인해서 장기강도 저하가 발생하게 되며, 본 연구에서의 결과 또한 장기강도 측면에서는 부정적인 영향을 끼칠 것으로 판단된다.



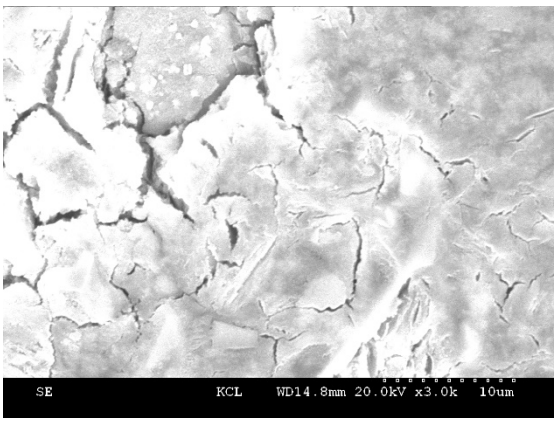
(a) LT 시편



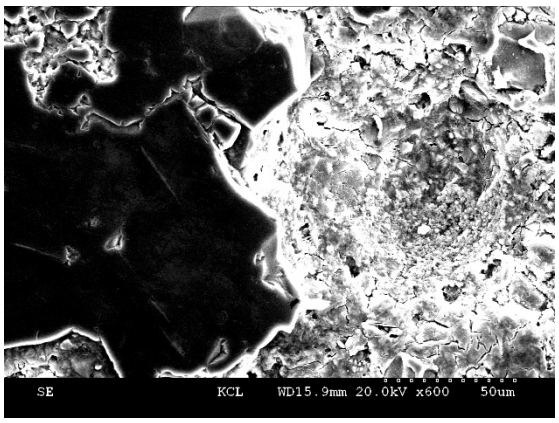
(b) IH 시편



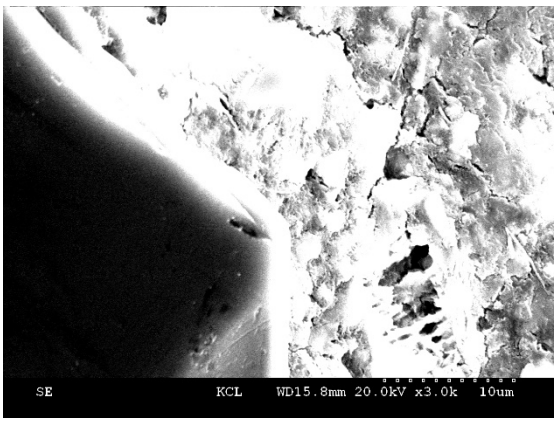
(c) IH 시편



(d) IH 시편



(e) HT 시편



(f) HT 시편

그림 3-10 LTC, IHC, HTC 시편의 SEM 사진

③ 발열양생 콘크리트의 장기 강도 특성 평가

㉮ 실험계획 및 방법

상기의 미세구조 분석을 통해, 유도가열 기반 발열양생 콘크리트의 장기강도 저하요인을 분석하였다. 따라서, 유도가열 기반의 초기 발열양생이 콘크리트의 장기강도에 미치는 영향을 실험적으로 검증하였으며, 각 배합 종류에 따른 장기강도 예측 모델을 개발하였다.

장기강도 평가를 위한 실험을 위한 주요변수로는 양생온도(최고온도 및 지속시간), 콘크리트 배합비, 고로슬래그 미분말 혼입을 고려하였으며 시험체 제작에 사용된 배합비를 표 3-9에 나타내었다. 각각의 배합별로 WC38, WC44, BS44 배합에 있어 목표 슬럼프에 도달하기 위해 고성능 감수제가 약 0.7~0.9%, 0.6~0.8%, 0.55~0.8%만큼 사용되었으며, 물/시멘트 비가 감소할수록 더 많은 양의 고성능 감수제가 혼입되었다. 굳지않은 콘크리트의 물성에서 KSF 2402(KSA (2010))에 따라 슬럼프 시험을 수행하였으며(그림 3-11(a)), 배합의 종류에 관계없이 평균 120mm 정도의 슬럼프를 나타내었다.

공시체 제작 및 유도가열 방법, 사용 장비의 상세는 앞선 “발열양생 콘크리트의 역학적 특성(강도) 평가”와 동일하다. 각각의 변수에 대해서, 상온양생(MTC), 0℃ 저온양생(LTC), 유도가열 양생(IHC)을 15시간 수행하였으며, 동절기 환경조건을 모사하기 위해 그 이후 모든 시험체들은 0℃챔버에서 보관되었다. 상온양생(MTC) 시험체에 대해서만 강도발현 성능을 확인하기 위해 상온에서 습윤양생을 실시하였다. 장기강도 확인을 위해, 15시간, 7일, 28일 및 56일 재령 압축강도를 평가하였다(그림 3-11(b)).

표 3-9 콘크리트 배합표

배합	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m^3)					SP (wt%)
			W	C	BS	S	G	
WC38	38.3	47.9	176	460	-	800	894	0.7-0.9
WC44	43.9	49.2	160	364	-	879	914	0.6-0.8
BS44	43.9	49.2	160	146	218	879	914	0.55-0.8

W/C: Water-to-Cement Ratio; S/a: Sand-to-Aggregate Ratio; W: Water; C: Cement; BS: Blast Furnace Slag; S: Sand; G: Gravel; SP: Super plasticizer(wt%);



(a) 슬럼프 시험(굳지않은 콘크리트) (b) 압축강도 시험 전후의 시험체(경화 콘크리트)

그림 3-11 굳지않은 콘크리트 및 경화 콘크리트의 물성평가

㉯ 실험결과

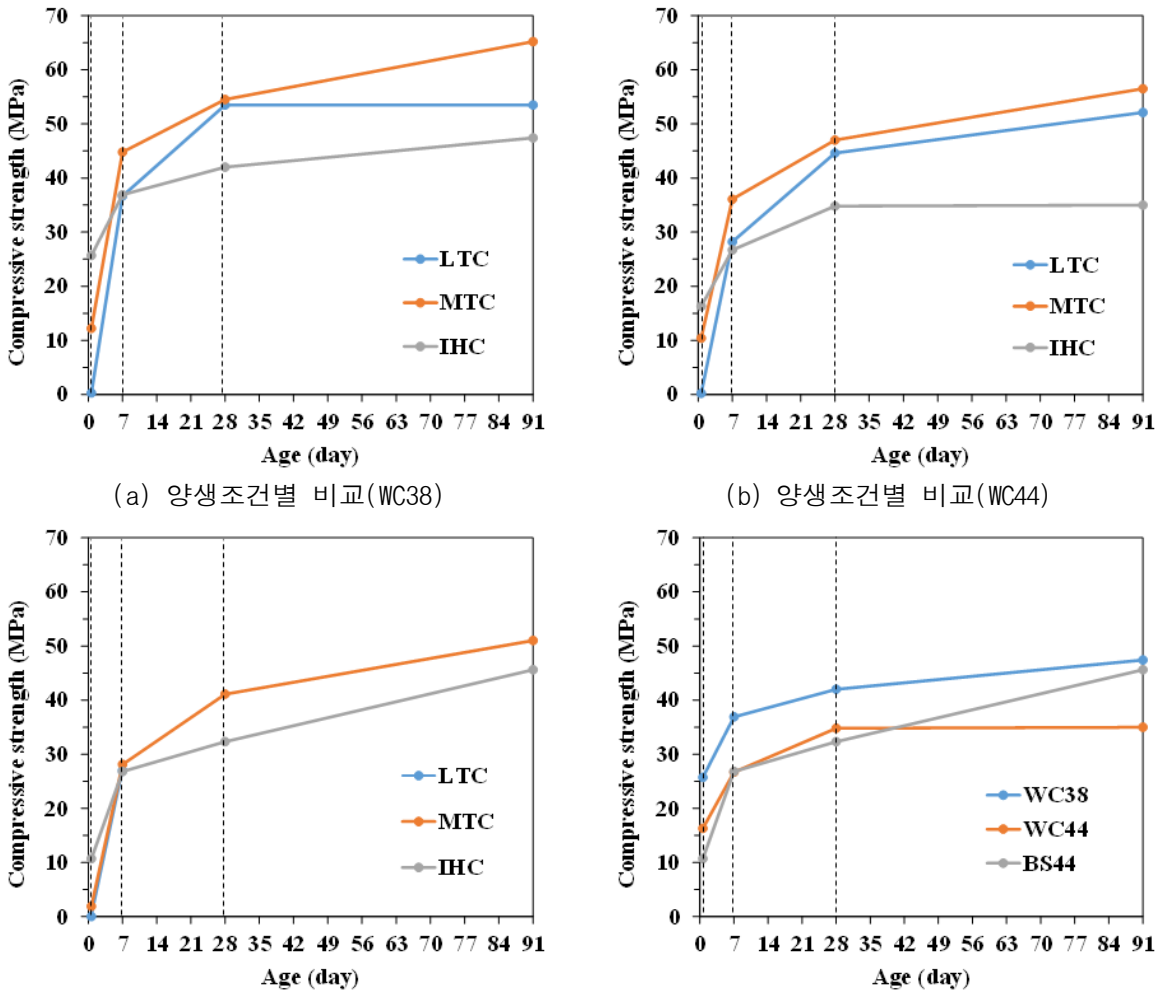
표 3-10에 재령별 압축강도 결과를 나타내었으며, 각 변수에서의 재령 증가(최대 91일 재령)에 따른 압축강도 결과를 그림 3-12에 나타내었다. 배합 변수에 관계없이 유도가열 시험체의 경우, 동절기 환경조건을 모사한 0℃의 저온챔버에서 양생되었음에도 불구하고 15시간의 극초기에도 약 11~26 MPa의 우수한 강도 발현 성능을 나타내었다. 한편, 상온양생 시험체의 경우, 15시간 극 초기에서 약 2~12MPa의 강도가 발현되었으며 특히 시멘트의 60%를 고로슬래그로 대체한 BS44 배합에서는 15시간 압축강도가 약 2MPa로 초기 강도 확보에 어려움이 있음을 확인하였다. 한편, 동절기 환경조건을 모사한 저온챔버에서 별도의 가열양생을 수행하지 않은 LTC 시험체의 경우, 모든 변수에서 15시간 압축강도가 0.3MPa 이하로 초기 동해에 의해 강도발현이 전혀 진행되지 않음을 확인 할 수 있다.

유도가열 양생 시험체의 경우, 7일 재령 이후부터 강도 증가량이 급격히 감소하여 28일 재령 이후에는 추가적인 강도 발현이 거의 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 일반적으로 “Crossover Effect”라고 알려져 있으며, 이는 초기 수화과정에서 높은 양생온도를 받은 콘크리트의 초기강도는 큰데 반해 장기발현 강도가 낮은 현상을 의미한다. 선행연구에서 Neville(1995)은 콘크리트의 양생초기에 고온으로 촉진양생을 시킬 경우 조기강도 확보가 가능하지만, 초기 급격한 수화반응으로 인한 공극의 증가로 인해 7일 이상에서의 재령에서 부정적인 영향을 미침을 확인하였다. 고태훈 등(2014)은 마이크로웨이브 발열양생 거푸집을 적용한 콘크리트의 코어강도 평가를 수행하였으며, 실험결과 일반습윤양생(6th)의 초기 평균강도가 2.3 MPa인데 반하여 발열거푸집 1차 및 2차의 압축강도 평균은 10MPa로 거푸집 탈형을 위한 소요강도 5MPa의 두배를 초과하는 것으로 나타났다. 그러나 재령 180일의 장기강도의 변화를 비교하였을 때, 발열거푸집은 25.8MPa인데 반해 일반습윤양생은 29.7MPa로 확인되었다. 결과적으로 촉진양생된 콘크리트 장기강도가 설계강도(24MPa)를 기준으로 일반양생 콘크리트에 비하여 약 16% 강도가 적게 발현되는 것을 확인할 수 있었으며, 이러한 결과는 본 연구의 결과와 일치하는 것으로 확인된다.

표 3-10 압축강도 시험결과

Mix	Curing condition	재령별 압축강도 (MPa)			
		15h	7d	28d	91d
WC38	0℃챔버- 유도가열양생 (IHC)	25.7	36.9	42.0	47.4
	상온양생 (MTC)	12.2	44.8	54.5	65.2
	0℃챔버-저온양생 (LTC)	0.3	36.7	53.5	53.5
WC44	0℃챔버- 유도가열양생 (IHC)	16.3	26.7	34.8	35.0
	상온양생 (MTC)	10.4	36.1	47.0	56.5
	0℃챔버-저온양생 (LTC)	0.2	28.2	44.6	52.1
BS44	0℃챔버- 유도가열양생 (IHC)	10.7	26.8	32.3	45.6
	상온양생 (MTC)	1.9	28.1	41.1	51.0
	0℃챔버-저온양생 (LTC)	0.0	27.0	-*	-*

*Not measured



(a) 양생조건별 비교(WC38)　(b) 양생조건별 비교(WC44)

(c) 양생조건별 비교(BS44)　(D) 배합별 비교(IHC)

그림 3-12 변수별 압축강도 비교

한편, 본 연구에서는 이러한 **초기 발열양생에 의한 "Crossover Effect"를 저감시키기 위한 방안**으로, **물/시멘트 비의 감소 및 시멘트의 일부를 고로슬래그로 대체하는 방안**에 대해 검토를 수행 하였다(그림 3-12(d)). 실험결과, 물/시멘트 비를 44%에서 38%로 감소시키거나, 동일한 물/시멘트 비에서 시멘트의 60%를 고로슬래그로 대체한 경우, 91일 재령 압축강도가 약 35% 및 30%만큼 증진되는 것을 확인 할 수 있으며, 장기재령에서도 지속적인 강도발현이 이루어져 장기재령 확보에 효과가 있음을 확인 할 수 있다.

㉰ 강도발현모델 제안

시간에 따른 콘크리트 강도 발현식은 국가별 설계기준에 따라 차이가 있으나 일반적으로 사용되는 시멘트 종류와 양생온도에 영향을 크게 받기 때문에 재료의 국지적 성격에 따른 제한이 크다. 따라서 사용 재료에서 차이가 있는 국외의 관계식을 비교하는 것은 한계가 있을 것으로 판단되어, 콘크리트구조기준(KCI 2012)에서 제안하고 있는 관계식을 시험결과와 비교하였다. 콘크리트구조기준에서는 시간에 따른 콘크리트 강도 발현식을 다음의 식과 같이 구할 수 있다고 정의하고 있다.

$$f_{cu}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cu} \quad \text{(식 3-1a)}$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left[\beta_{sc}\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right] \quad \text{(식 3-1b)}$$

여기서, β_{sc}= 시멘트 종류 및 양생방법에 따른 상수이며, 다음의 표 3-11과 같다.

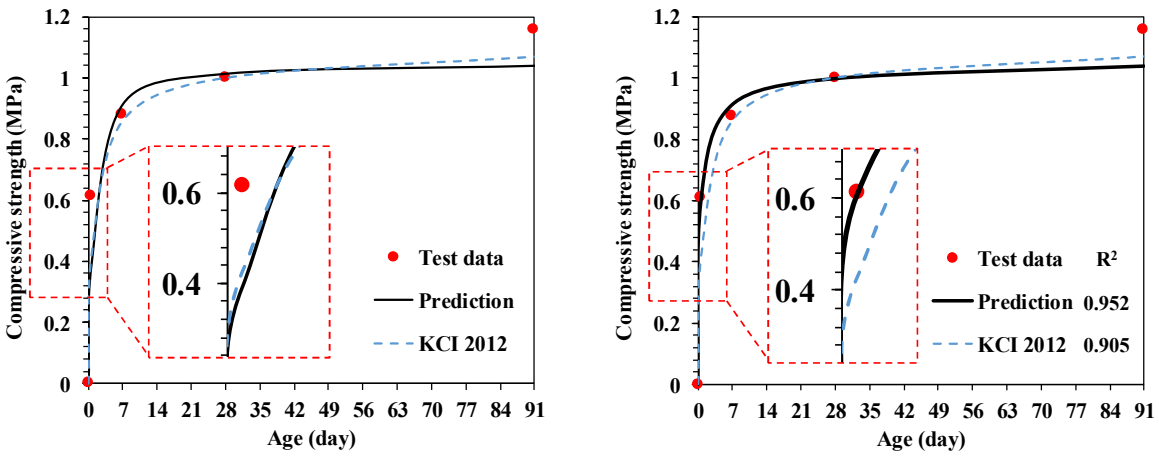
표 3-11 콘크리트 구조기준에 따른 β_{sc}

시멘트 종류 및 양생방법	1종 시멘트 습윤양생	1종 시멘트 증기양생	1종 시멘트 습윤양생	3종 시멘트 증기양생	2종 시멘트
β_{sc}	0.35	0.15	0.25	0.12	0.4

기존의 강도발현 모델식의 적용가능성을 평가하기 위하여, 식 3-1의 KCI 2012식(1종 시멘트 증기양생 적용) 및 ACI 209의 강도 발현식을 활용하여 유도가열 양생 콘크리트의 강도를 예측하였으며, 그 결과를 그림 3-13(a)에 나타내었다. ACI 209식 및 KCI 2012의 강도발현 식 모두 15시간 극초기에서 유도가열 양생 콘크리트의 강도를 크게(36%이상) 과소평가 하였으며 91일의 장기재령 강도 역시 보수적으로 예측하는 것으로 확인이 되었다.

유도가열 기반 발열양생 콘크리트의 재령별 압축강도를 보다 합리적으로 예측하기 위하여, 실험결과에 대한 비선형 회귀분석을 실시하였으며, 이를통해 다음의 식 3-2의 강도발현 식을 제안하였으며, 결과를 그림 3-13(b)에 나타내었다. 제안식은 91일의 장기재령 강도를 다소 보수적으로 예측하지만 기존의 설계기준 식과 비교하여 15시간에서의 극 초기 강도를 매우 정확히 예측하는 것으로 알 수 있다. R^2값 역시, 0.952로 설계기준 식(0.905) 대비 향상된 것을 알 수 있다. 그러나, KCI 2012 식 역시 극초기 재령강도를 제외한 구간에서 합리적인 수준으로 강도를 예측하고 있으므로, 현행 콘크리트구조설계 기준의 강도 예측식을 유도가열 양생 콘크리트에 적용하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

$$f_{cu}(t) = f_{cu} \cdot \exp\left[0.089\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right] \quad \text{(식 3-1a)}$$



(a) 설계기준 식 활용 (b) 제안식 및 설계기준 식 비교

그림 3-13 유도가열 콘크리트의 재령에 따른 강도 예측

④ 발열양생 콘크리트의 역학적 특성(강도) 및 장기강도 향상기술 제안

상기의 역학적 특성 평가, 미세구조 분석, 장기강도 평가 결과를 통해 유도기반 발열양생 콘크리트의 역학적 특성(강도) 및 장기강도 향상 방안에 대해 검토를 수행하였다. 본 연구는 "1일 이내 급속시공 가능한 유도가열기반의 환경 대응형 콘크리트 양생 핵심기술 개발"을 목적으로 하고 있으며, 구체적으로는 동절기 유도가열을 통한 콘크리트의 동해방지 및 거푸집 탈형을 위한 강도를 확보하고자 하였다. 콘크리트 타설 등에 소모되는 시간을 고려하여, 1일 이내 소요강도 확보를 위해 양생에 소모되는 시간은 15시간으로 제한하였다. 따라서, 유도가열에 의한 강도향상 효과를 양생 후의 극 초기(15시간) 강도를 중심으로 평가하였으며, 비교에 사용된 양생조건 변수 및 배합변수를 요약하면 아래의 표 3-12와 같다. 또한, 장기재령에서의 강도저하 현상을 제어하기 위한 방안으로 물/시멘트 비 및 고로슬래그 혼입에 따른 효과를 평가하였으며, 따라서 일부 시험체에 대해 91일 재령 강도를 비교하여 표 3-12에 함께 나타내었다.

표 3-12 유도가열기반 발열양생 콘크리트의 역학적 특성(강도) 평가 변수

양생 최고온도 및 유지시간	거푸집 종류 및 두께	물/시멘트 비	압축강도(15h)		압축강도(91d)	
			f_c (MPa)	$f_c/f_{c(MTC)}$* (%)	f_c (MPa)	$f_c/f_{c(MTC)}$* (%)
60-5h	steel-4mm	W/C = 38.3	**19.8**	157	-	-
70-5h	steel-4mm	W/C = 38.3	**25.9**	168	**47.4**	73
80-5h	steel-4mm	W/C = 38.3	**26.4**	167	-	-
70-7h	steel-4mm	W/C = 38.3	**26.7**	182	-	-
70-9h	steel-4mm	W/C = 38.3	**28.0**	195	-	-
70-5h	Aluminum-4mm	W/C = 38.3	**21.8**	122	-	-
70-5h	steel-8mm	W/C = 38.3	**25.1**	179	-	-
70-5h	steel-4mm	W/C = 43.9	**16.3**	157	**35.0**	62
70-5h	steel-4mm	W/C = 43.9 (BS60% 대체)	**10.7**	563	**45.6**	89

*상온양생 시험체(MTC)에 대한 강도비

○ 양생 최고온도 및 최고온도 유지 시간

앞선 역학적 특성 평가 결과에서도 확인 가능한 바와 같이 **양생 최대온도를 70℃로 설정하고, 최대온도를 약 5시간 유지**한 경우가 가장 우수한 강도 발현율을 나타내었으며, 유도가열기반 발열양생 콘크리트의 역학적 특성(강도) 향상에 효율적임을 확인하였다. 그러나, 미세구조 평가 결과에서 확인이 가능한 바와 같이, 극 초기 콘크리트가 굳지 않은 상태에서 고온에 노출될 경우 장기강도 저하를 유발할 수 있는 온도팽창에 의한 균열, 수화물의 불균질한 채움이 발생할 수 있으므로, 이에 대한 고려가 필요하다.

○ 거푸집의 종류 및 두께

알루미늄 재질의 알폼 보다는 **스틸재질의 갱폼을 사용하는 경우가 유도가열에 의한 발열**

양생 콘크리트의 역학적 특성(강도) 향상에 효율적임을 확인하였으며, **거푸집의 두께에 의한 영향은 크지 않은 것으로 확인이 되어 현재 건설현장에서 주로 활용이 되는 3.2~4.5mm의 갱폼을 활용하는 것이 유도가열을 통한 콘크리트 극 초기강도 향상에 효율적**일 것으로 판단된다.

○ 물/시멘트 비

물/시멘트 비가 각각 W/C=38.3, W/C=43.9인 경우의 배합은 현재 건설현장에서 교량용으로 활용되는 설계기준강도 35MPa 및 24MPa의 배합을 나타낸다. W/C=38.3 및 W/C=43.9인 경우 15시간 유도가열 양생 후의 강도가 25.7MPa 및 16.2MPa의 결과를 나타내었으며, 이러한 결과는 각각 동일재령 상온양생 시험체 강도의 약 173% 및 157%에 해당하는 값으로, 저온의 외부환경에서도 유도가열에 의한 발열양생을 통해 상온양생 이상의 조기강도 확보가 가능함을 확인하였다. **물/시멘트비가 낮을수록 이러한 수화 가속효과가 증가하여 강도증진 효율적**임이 확인되었다. 한편, 물/시멘트 비의 감소(W/C=43.9 → W/C=38.3)에 따라 장기재령 강도 발현율은 상온양생 시험체 대비 62% → 73%로 증가하여, 약 18%만큼 장기강도 발현 효율이 증가함을 확인하였다. **따라서, 물/시멘트 비의 감소는 장기재령에 따른 강도 저하를 보상할 수 있는 방안으로도 활용이 가능**하다. 그러나, 마찬가지로 초기의 급속한 수화는 장기강도 저하에 영향을 미칠 수 있으므로, 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

○ 고로슬래그 혼입(대체)

물/시멘트가 일정한 상태에서, 시멘트의 일부(최대 60%)를 고로슬래그로 대체한 경우 상온양생에서는 극초기 강도발현이 거의 이루어지지 않으나, 유도가열을 통해 매우 우수한 강도발현 성능을 확인할 수 있었다. 또한, 장기재령에서 동일한 물/결합재 비의 배합과 비교하여 고로슬래그를 혼입할 경우 상온양생 대비 강도 증진율이 약 44%만큼 향상 되는 것을 확인할 수 잇었다. 따라서, **시멘트 일부를 고로슬래그로 대체한 방법은 유도가열 기반의 초기 발열양생에 의한 “Crossover Effect” 저감 및 장기강도 확보 방안으로 효율적인** 것으로 확인된다.

(나) 발열양생 콘크리트의 내구성능 평가

① 동결융해 저항성능 평가	⇨	② 중성화 저항성능 평가	⇨	③ 염소이온 침투 저항성능 평가	⇨	④ 내구성능 향상 방안 제안

일반적인 철근콘크리트 구조물의 내구성능 설계는 콘크리트 내부 철근의 부식으로 인한 구조물의 열화를 방지하는 것을 목적으로 하며 염해, 탄산화, 동결융해 등 다양한 성능저하 요인들을 고려한 연구가 진행되고 있다. 유도가열 기반 발열양생 기법은 초기동해 때문에 콘크리트의 조기강도발현이 어려운 동절기 공사에 목적을 둔 발열양생 기법이다. 따라서 0℃ 이하의 외기온도에서 콘크리트의 반복적인 동결팽창에 의해 콘크리트가 열화 되어 품질저하 문제(표면 스케일링, 미세균열, 팝아웃 현상)가 발생 할 수 있다. 따라서 콘크리트 내구성을 평가하기 위해서 동결융해 성능 평가가 필요하다. 또한, 경화한 콘크리트는 초기에 알칼리성을 나타내나 환경적 요인 중 CO_2 의 영향을 받아 점차 중성으로 변한다. 콘크리트로 피복된 철근은 초기의 알칼리 환경에서는 부식되지 않으나 점차 콘크리트가 탄산화 되면서 부식된다. 콘크리트 탄산화가 진행되면서 철근은 부식되어 체적이 증가하기 때문에 콘크리트에 균열이 발생하고, 균열을 통한 수분 및 공기가 침투되어 콘크리트의 탄산화는 더욱 가속화 된다. 결국 철근은 더 빠른 속도로 부식되는 과정이 반복되어 구조물의 내구성이 떨어지게 된다. 따라서 콘크리트 내구성을 평가하기 위해서 탄산화의 정도를 파악하는 탄산화 깊이 측정 평가 역시 필요하다고 할 수 있다. 마지막으로 외부적인 환경에서 콘크리트 중으로 침투하는 이온, 수분, 이산화탄소 등의 물질은 여러 화학적 및 물리적 반응을 통해 철근의 부식과 콘크리트의 균열을 발생시키므로 콘크리트 내구성에 중대한 영향을 미친다. 때문에 최근 해양 환경이나, 한랭지의 동절기와 같은 특수 환경조건에서의 콘크리트 구조적 성능 및 내구성에 대한 관심이 증가하고 있다. 콘크리트의 내구성과 직결되는 이러한 물질의 침투에 대한 콘크리트의 저항성을 정확히 평가하는 것은 매우 중요하다. 따라서 콘크리트 투수성을 평가할 수 있는 염소이온침투 저항성 측정이 필요하다.

① 실험계획 및 방법

상기의 근거를 바탕으로 본 연구에서는 유도가열 기반 발열양생 콘크리트의 내구성능을 평가하고 내구성 증진 방안을 제시하기 위한 방안으로 배합변수 및 양생변수에 따른 동결융해 저항성, 촉진탄산화를 이용한 탄산화 깊이 측정, 염소이온침투 저항성능을 평가하였다.

내구성능에 대한 평가는 우선적으로, 물/시멘트비가 서로 다른 배합의 내구성능을 평가하였으며 고로슬래그를 혼입한 이성분계 배합을 추가하여 내구성능 향상을 도모하였다. 내구성능 평가에 사용된 콘크리트의 배합을 다음의 표 3-13에 나타내었다. 또한 양생조건에 따른 내구성능 차이를 비교하기 위해 WC38 배합에서 유도가열양생(IHC), 상온양생(MTC), 그리고 저온양생(LTC)를 비교하였다. 유도가열 양생변수는 거푸집 및 가열곡선을 선행연구를 통해 최적 조건으로 도출된, 스틸거푸집 4mm, 최고온도 및 유지시간 70℃-5시간으로 고정하였다.

표 3-13 콘크리트 배합표

배합	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m^3)					SP (wt%)
			W	C	BS	S	G	
WC38	38.3	47.9	176	460	-	800	894	0.7-0.9
WC44	43.9	49.2	160	364	-	879	914	0.6-0.8
BS44	43.9	49.2	160	146	218	879	914	0.55-0.8

W/C: Water-to-Cement Ratio; S/a: Sand-to-Aggregate Ratio; W: Water; C: Cement; BS: Blast Furnace Slag; S: Sand; G: Gravel; SP: Super plasticizer(wt%);

㉮ 동결융해 저항성 평가

콘크리트의 동결융해 저항성 평가는 KS F 2456에 준하여 B법(기중 급속 동결 후 수중융해 시험방법)으로 진행되었다. 100×100×400 각주형 시편을 변수별 2개씩 제작하여 28일 수중양생 후 동결융해 사이클이 진행되었으며, 0, 30(40), 60, 90(100), 120(130), 150, 180, 210, 240, 270, 300 사이클 주기로 1차 공명 진동수(Hz)와 중량(g)을 측정하였다. 그림 3-14에 동결융해 시험을 위한 챔버 및 동탄성계수 측정기를 나타내었다. 동결융행 사이클에서의 동탄성계수는 다음의 식을 통해 계산된다.

$$P_c = \left[\frac{n_c^2}{n_0^2}\right] \times 100 \qquad \text{(식 3-1)}$$

여기서, Pc : 동결융해 C사이클 후의 상대 동 탄성계수 (%)

n0 : 동결융해 0사이클에서의 변형 진동의 1차 공명 진동수(Hz)

nc : 동결융해 C사이클 후의 변형 진동의 1차 공명 진동수(Hz)

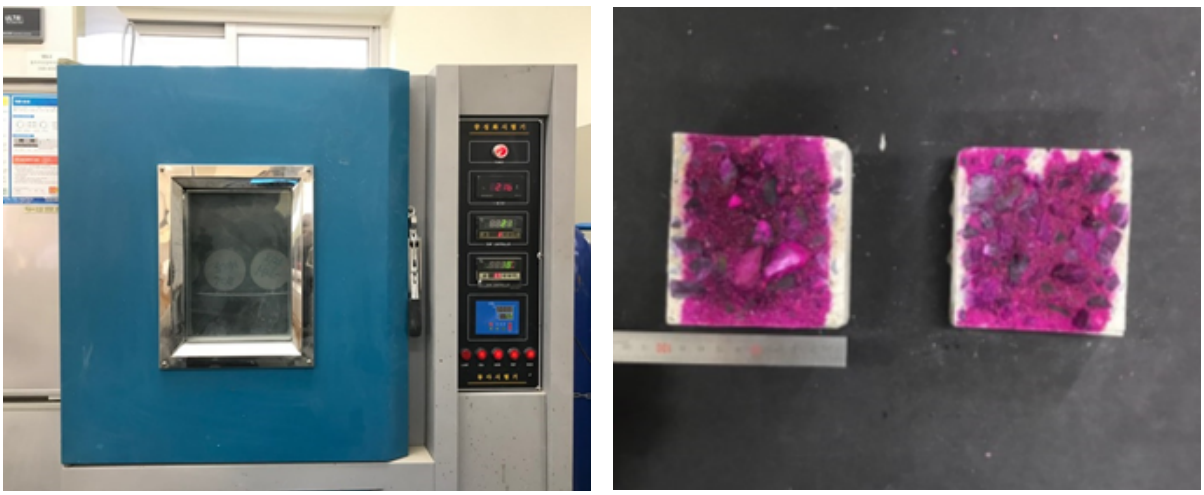


(a) 동결융해 챔버 (b) 동탄성계수 시험기

그림 3-14 동결융해 저항성 실험 장비

㉯ 중성화 저항성능 평가(촉진 탄산화 실험)

콘크리트의 중성화 실험은 양생 후의 시편의 양측을 제외한 모든 부분을 마감재로 도포한 후 KS F 2584에 준하여 촉진탄산화 챔버에서 탄산화를 진행 하였다. 측정으로는 KS F 2596에 준하여 시편의 탄산화 진행에 대해 최대깊이, 최소깊이, 평균을 내어 측정하였다. 100x100x400 각주형 시편을 변수별 2개씩 제작하여 온도 20±2℃, 상대습도 60±5%, CO2농도 5%의 챔버에서 촉진 탄산화를 진행하였다. 각 2주, 4주, 6주, 8주에 시편을 5cm 간격으로 할렬하고, 할렬면에 페놀프탈레인 1% 용액을 분사하여 탄산화 깊이를 측정하였다. 그림 3-15에 촉진 탄산화 챔버 및 탄산화 깊이 측정 모습을 나타내었다.



(a) 촉진탄산화 챔버　　(b) 탄산화 깊이 측정

그림 3-15 촉진 탄산화 챔버 및 탄산화 깊이 측정

㉰ 염소이온 침투 저항성능 평가

콘크리트의 염소이온 침투 저항성능 평가는 KS F 2711 및 ASTM C 1202 에 준하여 수행되었다. 양생이 완료된 ϕ100×200mm의 공시체를 절단하여 ϕ100×50mm의 시편을 변수별 3개씩 제작하였다(그림 3-16(a)). 준비된 시편에 도막제를 발라 외부의 구멍을 모두 메우고 진공의 데시게이터에 넣어 밀폐시킨 뒤 3시간 동안 진공상태를 유지하였다(그림 3-16(b)). 또한 실험에 사용되는 NaOH용액과 NaCl용액을 각각 0.3%, 3% 농도로 제작하여 사용하였다. 이후 진공게이지를 제작하여 시험셀을 완성하였으며, 시험편 윗면과 아랫면에 닿고 있는 시험셀을 3.0%의 염화나트륨 용액으로 채우고 각각 전원 공급 장치의 음극부와 양극부에 연결하였다. 이후 60.0±0.1V에 맞춰 초기 전류값을 측정하고 30분마다 전류값을 측정하였다. 시험장비는 전체 전류 범위 내에서 시험셀 양쪽에 60V의 직류 전압을 유지하고, ±0.1V의 전압과 ±0.1mA의 전류를 표시할 수 있는 장비를 사용하였다(그림 3-17). 염소이온의 침투개념 및 측정을 위한 시험셀의 전기 회로도 상세는 그림 3-18과 같으며, 통과전하량과 최종등급(표 3-14)을 평가하여 변수별 콘크리트의 염소이온 침투저항성을 분석하였다.



(a) ϕ100×50㎜ 시편



(b) 데이케이터 및 시편 진공상태 유지

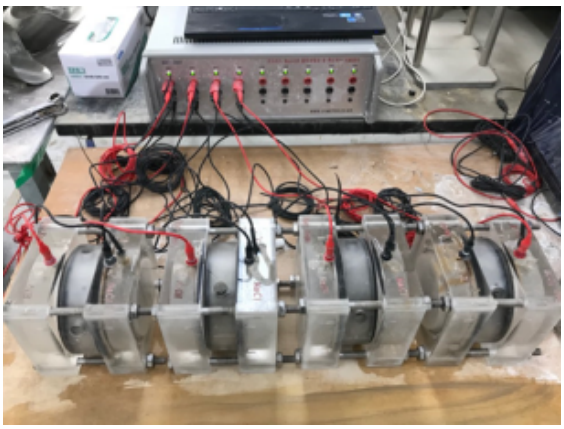
그림 3-16 염소이온 침투시험용 시편 준비



(a) 시험셀

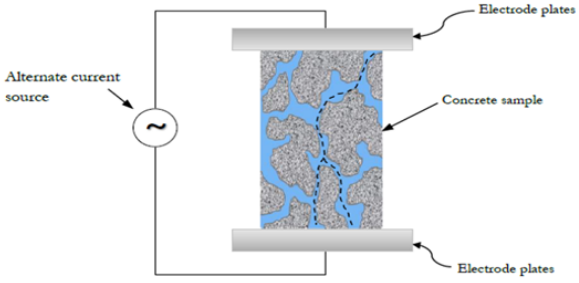


(b) 염화나트륨 용액 투입

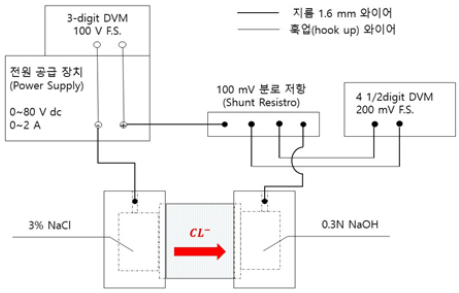


(c) 염소이온 침투시험

그림 3-17 염소이온 침투 시험 과정 및 장비



(a) 염소이온 침투 개념도



(b) 시험셀 전기 회로도

그림 3-18 염소이온 침투 개념 및 전기 회로도

표 3-14 통과전하량 값에 따른 염소이온 침투성 등급표

Chloride Permeability	Charge (coulombs)	Type of Concrete	Total Integral Chloride to 41 mm Depth After 90-day Ponding Test
High	>4,000	high water-to-cement ratio (>0.6) conventional Portland cement concrete	>1.3
Moderate	2,000-4,000	moderate water-to-cement ratio (0.4-0.5) conventional Portland cement concrete	0.8 - 1.3
Low	1,000-2,000	low water-to-cement ratio (<0.4) conventional Portland cement concrete	0.55 - 0.8
Very Low	100-1,000	latex modified concrete, internally sealed concrete	0.35 - 0.55
Negligible	<100	polymer impregnated concrete, polymer concrete	<0.35

② 실험결과

㉮ 동결융해 저항성 평가 결과

동결융해 사이클 과정에서의 변수별 표면관찰결과를 그림 3-19에 나타내었으며, 상대동탄성계수 변화율 및 중량 변화율을 그림 3-20 및 3-21에 나타내었다. 시편의 표면을 관찰한 결과 사이클 반복이 증가함에 따라 표면 박리가 진행되었다. 동결과 융해를 반복하면서 시편의 표면이 손상되었고 90cycle 이후부터는 WC44 시편과 WC38_LT 시편에서 모서리가 떨어져 나가는 현상이 확인되었다.

WC38 배합의 경우, 별도의 양생을 진행하지 않은 시험체에서는 상대동탄성계수가 120cycle 이후 급격히 감소하여, 300cycle에서 최종 75%까지 감소하였다. 한편, 유도가열 시험체에서는 지속적인 상대동탄성계수의 감소로 최종적으로 80%까지 감소가 발생하였다. 한편, WC44배합의 경우, 모든 양생조건에서 약 120cycle 이후부터 상대동탄성계수가 감소하였으며 별도의 양생을 진행하지 않은 WC44_LT시험체는 최종 79%까지 상대동탄성 계수가 감소하였다. 한편, 유도가열 시험체는 300cycle에서 상대동탄성계수가 87%로 나타났으며, 고로슬래그를 60%만큼 치환한 BS44 배합의 경우, 상대동탄성계수 감소가 크지 않았으며 최종적으로 92%로 확인되었다. 이는 고로슬래그를 다량 혼입할 경우 매트릭스의 공극율이 감소하고 매트릭스의 조직이 더욱 치밀해 지는 효과로부터 기인하는 것으로 판단된다.

중량감소율의 경우, WC38 배합에서는 양생조건에 따른 차이가 크지 않았으며(약 0.6~0.7% 감소), WC44 배합의 경우에도 양생조건에 따른 중량감소율의 차이는 거의 없었으며 동탄성계수의 결과와 마찬가지로 고로슬래그를 대체한 BS44배합에서 중량감소율이 가장 작게 나타났다.

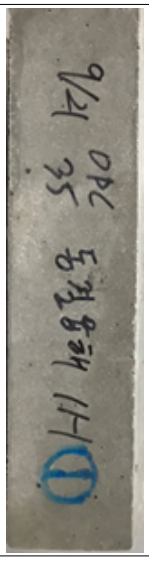
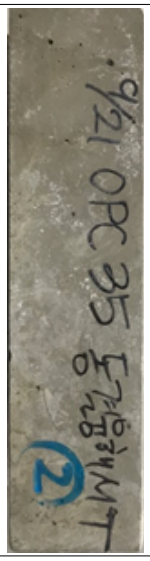
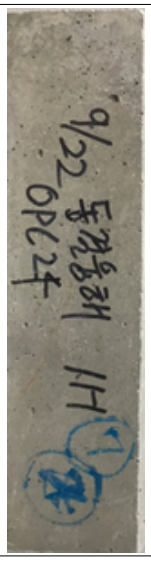
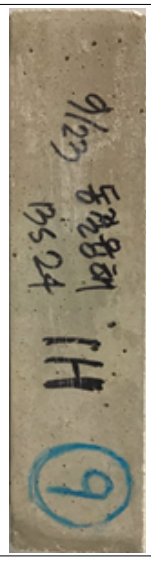
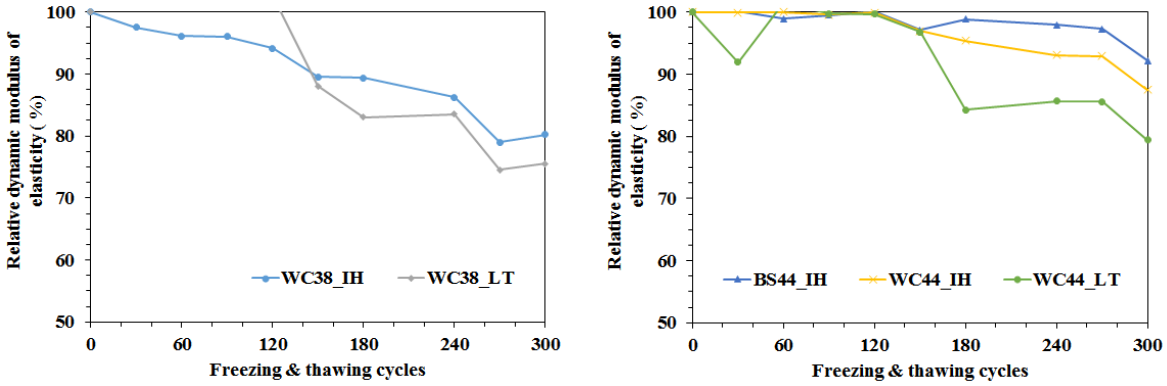
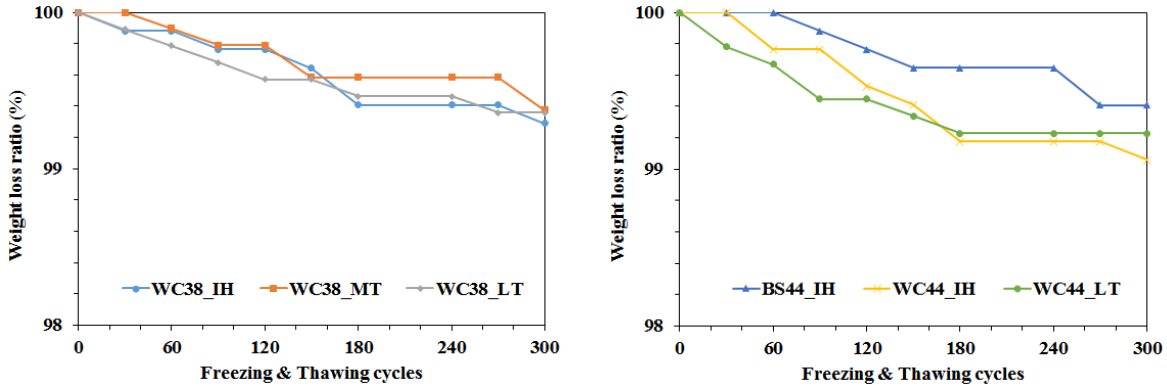
Cycle	Mix Plain					Mix BS
	WC38_IH	WC38_MT	WC38_LT	WC44_IH	WC44_LT	BS44
90						
150						
300						

그림 3-13 동결융해 사이클 과정에서의 변수별 표면관찰 결과



(a) WC38 배합 (b) WC44 배합

그림 3-14 동결융해 사이클에 따른 상대동탄성계수



(a) WC38 배합 (b) WC44 배합

그림 3-15 동결융해 사이클에 따른 중량감소율

일반적으로, 콘크리트 타설 후 극 초기에 고온 양생을 실시하는 경우 내부 미세균열의 발생으로 내구성이 저하되는 결과를 낳게 된다. 그러나, 상기의 실험결과를 통해 동절기 별도의 양생을 진행하지 않는 경우 동해에 의한 열화로 인해 추가적인 내구성의 감소가 발생함을 확인하였다. 한편, 시멘트의 일부를 고로슬래그로 대체하는 경우, 유도가열을 통한 촉진양생을 수행함에도 불구하고 별도의 양생을 진행하지 않는 경우와 비교하여 동결융해 저항성능은 상대동탄성계소 감소율 기준으로 약 62%만큼 향상되며, 동일한 유도가열 시험체의 경우와 비교할 경우 약 37%향상됨을 확인할 수 있다. 동절기 동해를 방지하기 위해 유도가열을 수행한 경우(WC44_IH)에도, 별도의 양생을 하지 동일조건(WC44_LT)과 비교하여 상대동탄성계수 기준으로 약 39%만큼 성능이 향상됨을 알 수 있다.

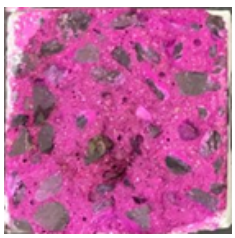
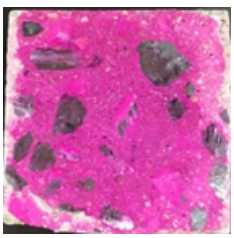
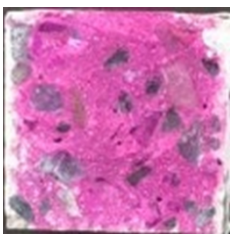
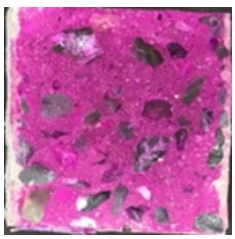
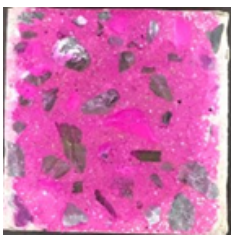
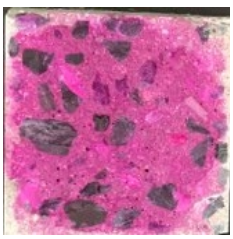
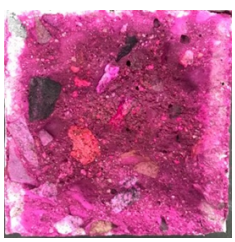
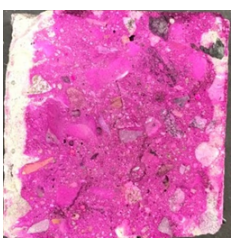
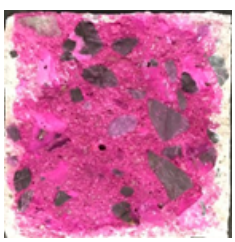
㉯ 중성화 평가(촉진 탄산화 실험 결과)

할렬 시편의 면에 페놀프탈레인용액을 분사 후 좌우에서 최대, 최소, 평균 총 6번의 측정(그림 3-22)을 통해 탄산화 깊이의 평균값을 구하여 그림 3-23에 나타내었다. WC38배합에서 상온양생과 유도가열 양생의 탄산화 깊이는 유사함을 확인할 수 있으며, 유도가열 양생을 수행한 경우 탄산화 깊이가 다소 감소하는 것을 확인할 수 있다. 한면, 유도가열 시험체와 동일한 외기 조건에서 별도의 추가적인 양생을 하지 않은 경우, 탄산화 깊이가 4주차부터 급격히 증

가하는 것을 알 수 있다. 한편, WC44배합의 경우에도 유도가열을 수행한 경우가 동일한 외기조건의 시험체와 비교하여 탄산화 깊이가 크게 감소한 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 초기 촉진양생을 통해 강도 발현속도가 빠르게 되고 따라서 외부로부터의 이산화탄소 침투속도가 저하되었기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 동결융해로 인한 열화에 있어 우수한 성능을 보여준 BS44 배합의 경우, 탄산화 깊이가 2~4주에서 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 고로슬래그의 혼입에 따라 매트릭스의 공극율이 감소하고 매트릭스의 조직이 더욱 치밀해 지는 반면, 콘크리트 중 시멘트 수화에 의해 생성된 수산화칼슘과 고로슬래그가 반응하여 콘크리트의 알칼리성이 저하되어 중성화 저항성능이 저하되는 것으로 보고되어 있다. 또한 고로슬래그 미분말의 치환 혼입으로 의해 콘크리트 중의 단위 포틀랜드 시멘트량이 감소되고, 이로 인해 콘크리트 중의 알칼리 성분이 감소하는 것으로도 기인한다.

배합비에 따른 탄산화 깊이 결과를 보면, WC44 배합이 동일한 양생조건에서 WC38에 비해 탄산화 깊이가 다소 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 물/시멘트 비가 증가할수록 탄산화 저항성이 나빠지는 것으로 판단되었다.

이상의 결과로부터, 물/시멘트 비가 낮을수록 탄산화 안정성이 높아지는 것을 확인 할 수 있었다. 한편, 유도가열을 통해 조기에 콘크리트 강도발현을 유도할 경우, 동일 외기조건에서 동해를 노출된 경우와 비교하여 약 45~50%만큼 중성화 저항성능이 향상됨을 확인할 수 있다.

Mix	2 weeks	4 weeks	6 weeks	8 weeks
WC38_IH				
WC38_MT				
WC38_LT				

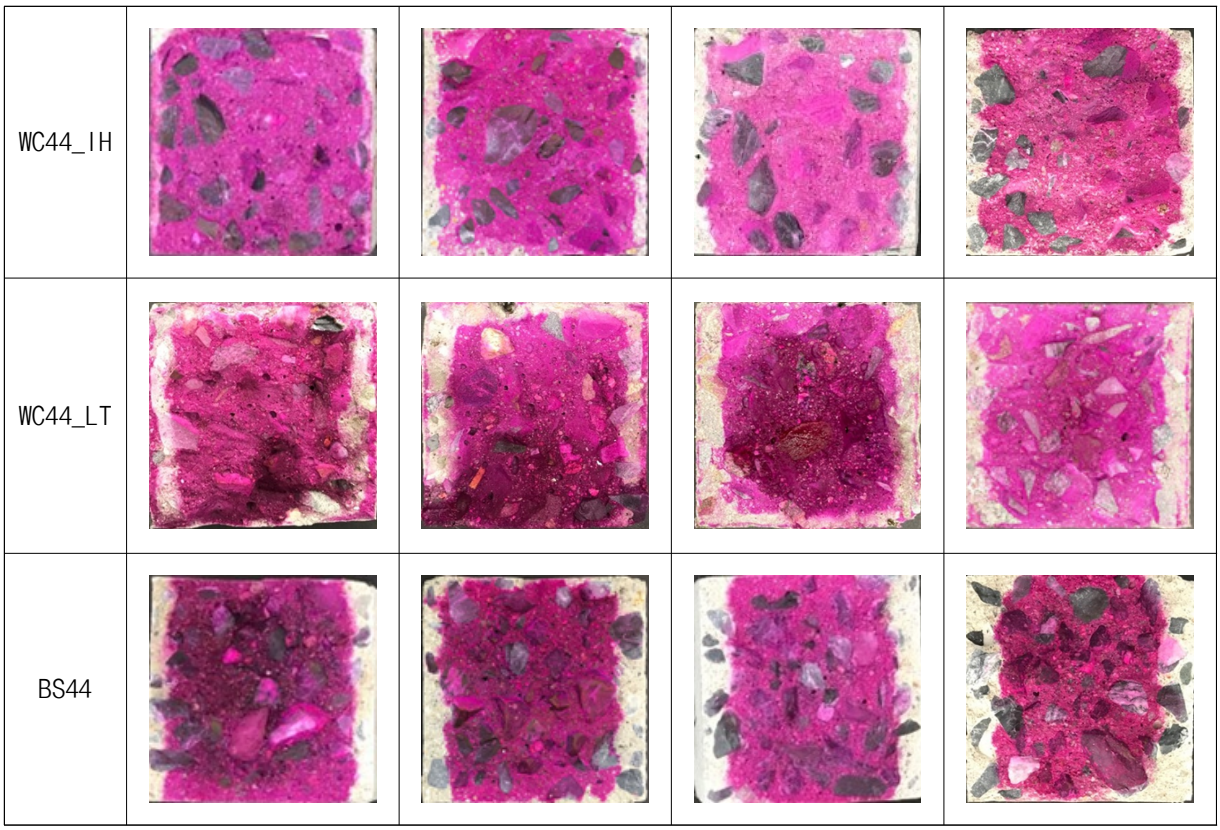
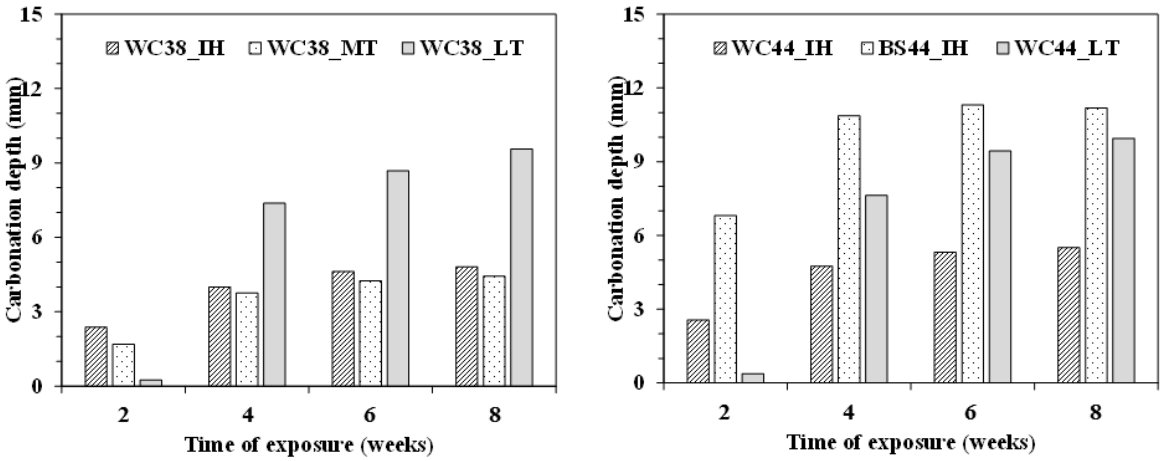


그림 3-22 탄산화 깊이 측정 결과



(a) WC38 배합 (b) WC44 배합

그림 3-23 변수별 탄산화깊이 측정결과 비교

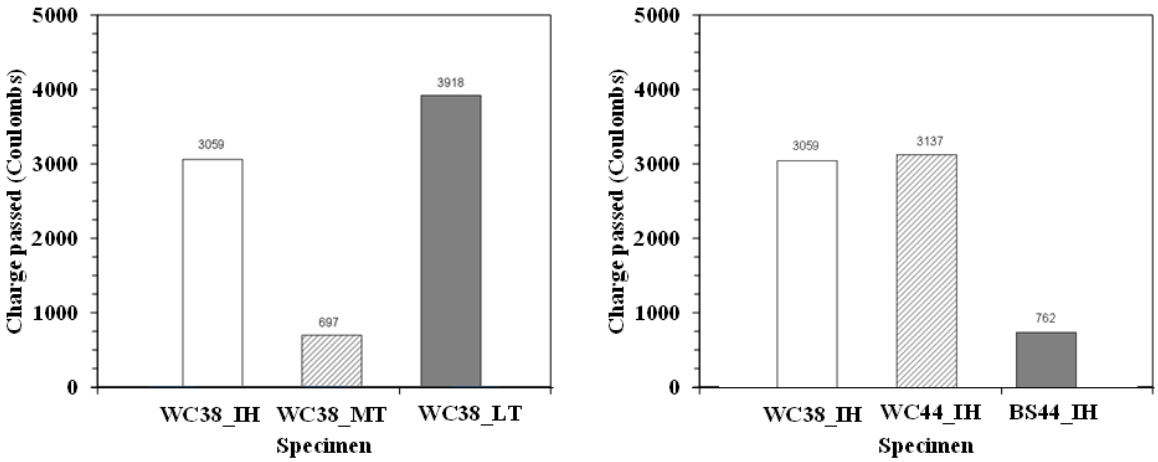
㉰ 염소이온 침투 저항성능 평가

염소이온 침투 시험의 결과를 표 3-15 및 그림 3-24에 나타내었다. 동일한 배합변수 조건에서의 양생온도 변수조건을 고려하여 실험을 진행한 결과 상온조건(MT)에서의 양생온도의 경우 총통과 전하량이 현저하게 작은 것을 확인할 수 있었다. 또한 유도가열양생(IH)의 통과전하량 또한 동일한 외기조건에서 별도의 양생을 진행하지 않은 경우(LT)와 비교하여 통과전하량이 약 22% 가량 감소함을 확인하였다.

일반적으로, 콘크리트의 강도가 증가할수록 염화물 이온 침투에 대한 관점에서 공극률의 감소를 통한 확산 계수의 감소로 인해 콘크리트 침투저항 성능이 향상된다. 반면, WC38과 WC44를 비교한 결과 물/시멘트 비 차이에 따른 염소 이온 침투 효과는 분석 및 평가에 있어 유의미한 차이를 보이지 않았으며, WC44의 경우 WC38에 비해 통과전하량이 미세하게 증가됨을 확인하였다. 이는 압축강도 시험 결과 WC38과 WC44의 강도발현이 유사한 수준으로 진행되었기 때문에 강도차이에 의한 염화물 침투저항 성능을 효과적으로 판단하지 못하였다. 또한 **결합재를 고로슬래그 미분말 60%로 대체한 BS44의 경우 동일한 물/시멘트 비의 WC44에 비해 통과전하량이 75% 감소**하였으며, '**매우낮음'의 최종등급으로 우수한 침투저항성**을 보였다. 이는 배합 시 사용된 고로슬래그 미분말 입자의 크기가 일반 포틀랜드 시멘트보다 미세하여, 결합재와 결합재 또는 결합재와 골재간의 미세 공극사이를 보다 조밀하게 침투하여 공극량을 저하시켰기 때문으로 판단된다. 이를 통해 고로슬래그 미분말이 혼입된 경우 염소이온 침투 저항성이 크게 증가함을 판단하였다.

표 3-15 통과 전하량 측정결과

배합변수	양생변수	실험결과		
		통과 전류(mA)	Charge Passed (Coulombs)	최종등급
WC38	IH	1.4	3200.8	보통
		171.4	3477.9	보통
		133.8	2499.2	보통
		AVG: 102.2	**AVG: 3059.3**	**보통**
	MT	146.7	1029.1	낮음
		1.4	366.0	매우 낮음
		AVG: 74.1	**AVG: 697.6**	**매우 낮음**
	LT	250.6	4783.2	높음
		216.0	3053.4	보통
		AVG: 233.3	**AVG: 3918.3**	**보통**
WC44	IH	202.7	3569.3	보통
		150.3	2704.7	보통
		AVG: 176.5	**AVG: 3137.0**	**보통**
	LT	**Not measured**	**Not measured**	-
BS44	IH	39.5	775.5	매우 낮음
		38.1	749.4	매우 낮음
		AVG: 38.8	**AVG: 762.5**	**매우 낮음**



(a) 양생조건에 따른 비교 (b) 배합변수에 따른 비교

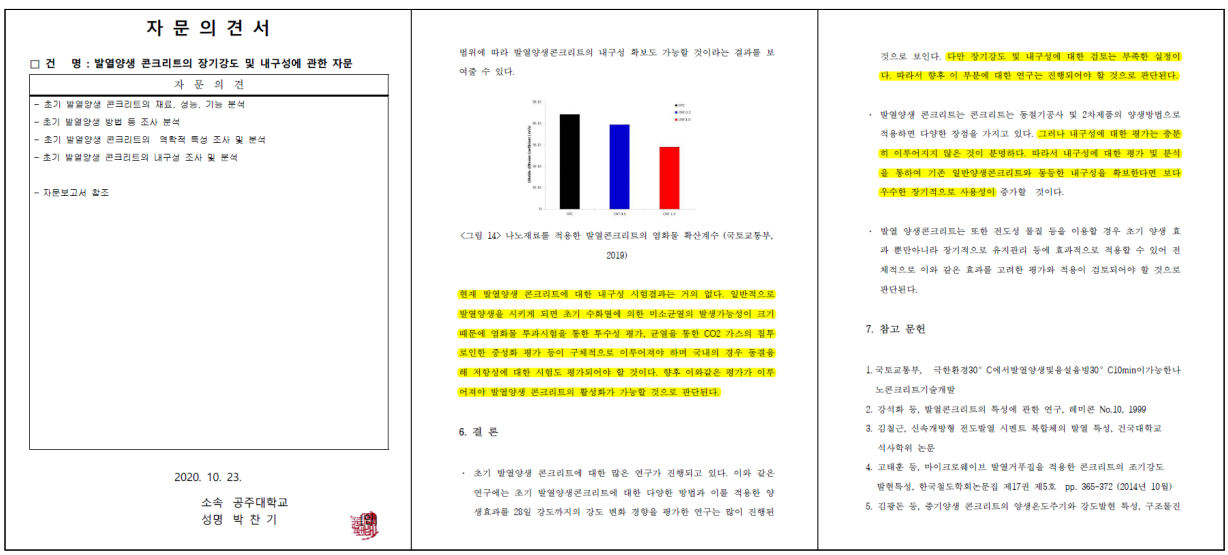
그림 3-24 변수별 통과 전하량 결과 비교

㉮ 소결

일반적으로, 콘크리트 타설 후 극 초기에 고온 양생을 실시하는 경우 내부 미세균열의 발생으로 내구성이 저하되는 결과를 낳게 된다. 이러한 문제를 개선하기 위한 방안으로, 물/시멘트비 및 콘크리트 배합시 고로슬래그를 시멘트 대체하는 방안에 대해서 검토를 수행하였다. 연구결과, **유도가열 양생 시 고로슬래그로 시멘트을 대체한 경우 동결융해 저항성능 및 염소이온 침투저항 성능을 동일 외기조건에서 가열양생을 하지 않은 경우와 비교하여 달성 목표인 30%를 상회하여 만족함을 확인**하였다. 이는 고로슬래그의 혼입에 따라 매트릭스의 공극율이 감소하고 매트릭스의 조직이 더욱 치밀해 지는 효과로부터 기인한 것으로 판단된다.

한편, **콘크리트 중성화 저항성능의 경우 유도가열을 통해 조기에 강도를 확보함**으로써 외부로부터의 이산화탄소 침투속도를 저하시킴으로 인해 동일 외기조건에서 동해를 노출된 경우와 비교하여 약 45~50%만큼 중성화 저항성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

[참고] 전문가 자문을 통한 내구성능 평가 결과 검증



자 문 의 견 서

□ 건 명 : 발열양생 콘크리트의 장기강도 및 내구성에 관한 자문

자 문 의 견
- 초기 발열양생 콘크리트의 재료, 성능, 기능 분석 - 초기 발열양생 방법 등 조사 분석 - 초기 발열양생 콘크리트의 역학적 특성 조사 및 분석 - 초기 발열양생 콘크리트의 내구성 조사 및 분석 - 자문보고서 참조

2020. 10. 23.

소속 공주대학교
성명 박 찬 기

범위에 따라 발열양생콘크리트의 내구성 확보도 가능할 것이라는 결과를 보여줄 수 있다.

<그림 14> 나노재료를 적용한 발열콘크리트의 염화물 확산계수 (국토교통부, 2019)

현재 발열양생 콘크리트에 대한 내구성 시험결과는 거의 없다. 일반적으로 발열양생을 시키게 되면 초기 수화열에 의한 미소균열의 발생가능성이 크기 때문에 염화물 투과시험을 통한 투수성 평가, 균열을 통한 CO2 가스의 침투로인한 중성화 평가 등이 구체적으로 이루어져야 하며 국내의 경우 동결융해 저항성에 대한 시험도 평가되어야 할 것이다. 향후 이와같은 평가가 이루어져야 발열양생 콘크리트의 활성화가 가능할 것으로 판단된다.

6. 결 론

· 초기 발열양생 콘크리트에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 이와 같은 연구에는 초기 발열양생콘크리트에 대한 다양한 방법과 이를 적용한 양생효과를 28일 강도까지의 강도 변화 경향을 평가한 연구는 많이 진행된 것으로 보인다. 따라서 장기강도 및 내구성에 대한 검토는 부족한 실정이다. 따라서 향후 이 부분에 대한 연구는 진행되어야 할 것으로 판단된다.

· 발열양생 콘크리트는 콘크리트는 동절기공사 및 2차제품의 양생방법으로 적용하면 다양한 장점을 가지고 있다. 그러나 내구성에 대한 평가는 충분히 이루어지지 않은 것이 분명하다. 따라서 내구성에 대한 평가 및 분석을 통하여 기존 일반양생콘크리트와 동등한 내구성을 확보한다면 보다 우수한 장기적으로 사용성이 증가할 것이다.

· 발열 양생콘크리트는 또한 전도성 물질 등을 이용할 경우 초기 양생 효과 뿐만아니라 장기적으로 유지관리 등에 효과적으로 적용할 수 있어 전체적으로 이와 같은 효과를 고려한 평가와 적용이 검토되어야 할 것으로 판단된다.

7. 참고 문헌

1. 국토교통부, 극한환경30° C에서발열양생및응실용성30° C10min이가능한나노콘크리트기술개발
2. 강석화 등, 발열콘크리트의 특성에 관한 연구, 레미콘 No.10, 1999
3. 김철근, 신축개방형 전도발열 시멘트 복합체의 발열 특성, 건국대학교 석사학위 논문
4. 고태훈 등, 마이크로웨이브 발열거푸집을 적용한 콘크리트의 조기강도 발현특성, 한국철도학회논문집 제17권 제5호 pp. 365-372 (2014년 10월)
5. 김광든 등, 중기양생 콘크리트의 양생온도주기와 강도발현 특성, 구조물진

(4) 콘크리트 혼합물 및 철근 유도에 의한 유도가열 성능 향상

(가) 유도가열 효율 향상을 위한 혼입재료 및 혼입률 선정

① 콘크리트 혼입용 전도체의 유도가열 특성 평가	⇨	② 최적 전도체 (혼입재료) 선정	⇨

③ 전도체 혼입비를 고려한 콘크리트 유도가열 및 강도 특성 평가	⇨	④ 콘크리트 혼입용 최적 전도체 및 혼입률 선정	

본 연구에서는 거푸집 가열 후 열전달을 통한 콘크리트 발열양생 뿐만 아니라, 콘크리트 내부에 혼입되는 전도성 재료의 직접 유도가열을 통한 발열양생 성능 향상 효과를 평가하고자 하였다. 실험은 다음의 표4-1의 과정을 통해 진행이 되었으며, **우선적으로 전도체 자체를 유도가열을 통해 가열성능을 평가**하여, 최적의 콘크리트 혼입용 전도체를 선정하였다. 이후, 자체 발열 성능이 우수한 전도체에 대해 **혼입비를 고려한 콘크리트 배합을 수행하여 강도를 평가함으로써 최적의 혼입률을 선정**하였다. 아울러, 거푸집에 의한 가열효과를 배제하기 위하여 거푸집으로 유도가열이 되지 않는 PVC를 사용한 경우에 대해서도 그 성능을 평가하였다.

사전조사		
▼		
혼입재료 유도가열 판정	⇨	▸재료 선정: 문헌조사를 통해 전도체 중 콘크리트 혼입재료로 사용되는 재료 선정 ▸가열여부 판정: 혼입재료인 전도체 자체의 유도가열 여부 판정
▼		
콘크리트 혼합물 유도가열시험 수행	⇨	▸최소 요구 가열온도 선정: 유도가열 양생 변수에 따른 최소 가열기울기 이상의 전도체 선정 ▸콘크리트 타설 작업, 유도가열기기 및 온도게이지 설치
▼		
유도가열시험 거푸집 선정		▸거푸집 선정: 거푸집 유도가열에 의한 콘크리트 양생효과를 알아보기 위하여 전도성 Steel과 비전도성 PVC재질의 거푸집 사용
▼		
혼입률에 따른 양생효율 판정	⇨	▸압축강도 측정 및 비교: 유도가열 양생과 상온, 고온, 저온양생 비교 및 거푸집 종류에 대한 비교 ▸강도성능 향상에 따른 최적 혼입률 결정
▼		
선정완료		

그림 4-1 유도가열 성능 향상을 위한 혼입 전도체 선정 과정

① 콘크리트 혼입용 전도체의 유도가열 특성 평가 및 최적 전도체(혼입재료) 선정

㉮ 실험계획 및 방법

콘크리트 내부 혼입을 통해 유도가열 효율을 향상시키기 위한 전도체 선정을 위해 콘크리트 혼입전 전도체 자체를 유도가열하여 발열 성능을 평가하였다. 콘크리트 혼입용 전도체 후보군으로는 다음의 표 4-1과 같이 총 6종을 선정하였으며, 전기로산화 슬래그의 경우 입경에 따른 유도가열 효율성을 함께 평가하였다. 각각의 전도체를 자기재료의 원형통에 넣고 그림 3-2에서 설명한 유도가열 장비를 이용하여 20℃→70℃까지 유도가열을 진행하면서 목표온도 도달까지의 시간을 측정하였다. 또한, 유도가열 중 표면사진을 열화상 카메라로 촬영하여 실제 발열 여부를 시각적으로 확인하였다.

표 4-1 콘크리트 혼입용 전도체 특성

전도체 종류	형태 및 형상비	역학적 특성	콘크리트 보강 시 기대효과
강섬유 (SF)	갈고리 형 길이(l) 30mm 지름(d) 0.5mm 형상비(l/d) 60	밀도 7.85g/cm^3 인장강도 1100MPa 탄성계수 200GPa	▪ 균열제어 및 인장강도 향상 ▪ 내충격 성능 향상
비정질강섬유 (AMF)	길이(l) 30mm 폭 1.6mm 두께 29μm	밀도 7.2g/cm^3	▪ 균열제어 및 인장강도 향상
전기로슬래그 (EAF)	입경(d) 2mm, 5mm, 20 mm	밀도 3.42g/cm^3 흡수율 0.23% 조립률 3.05	▪ 시멘트/잔골재/굵은골재 대체 ▪ 경제성, 친환경성
탄소섬유 (CF)	길이(l) 6mm, 12mm 지름(d) 7μm single chopped type	밀도 1.37g/cm^3 인장강도 4900MPa 탄성계수 230GPa	▪ 균열제어 및 인장강도 향상 ▪ 셀프센싱 효과
탄소나노튜브 (CNT)	길이(l) 10nm 지름(d) 5-20nm multi-walled type	밀도 1.30g/cm^3 인장강도 11000MPa	▪ 강성증가 ▪ 셀프센싱 효과
흑연나노섬유 (GNF)	길이(l) 10-30nm 지름(d) 50-200nm	밀도 1.94g/cm^3 인장강도 1860MPa	▪ 강성증가 ▪ 셀프센싱 효과

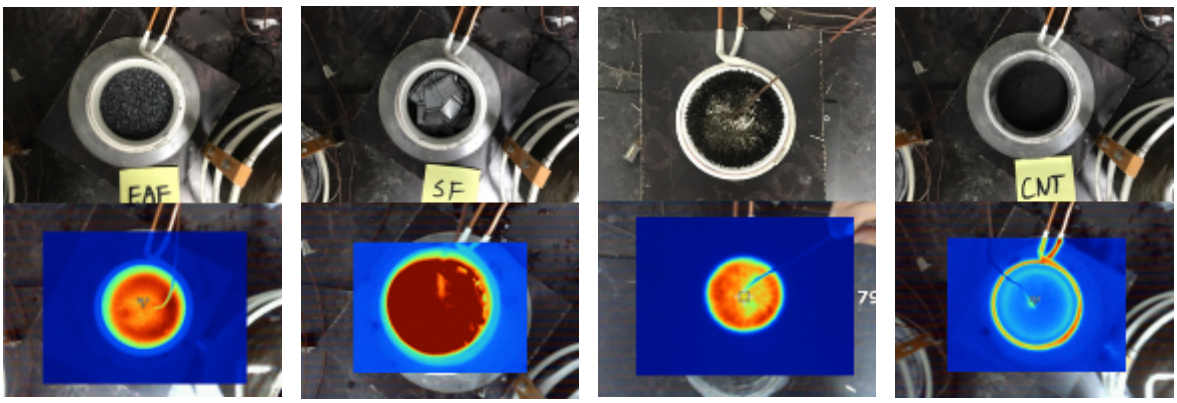
㉯ 실험결과

표 4-2에 전도체 유도가열 실험결과를 중심최대온도 및 도달시간을 중심으로 나타내었으며, 그림 4-2에 대표적인 열화상 카메라 촬영결과 예시를 나타내었다. 실험결과 탄소나노튜브(CNT) 및 흑연나노섬유(GNF)의 경우, 유도에 의한 가열을 시도하였으나 전혀 발열이 진행되지 않는 것을 확인할 수 있었다. 탄소섬유(CF)의 경우 실험초기 유도에 의해 온도가 일부 상승하였으나, 시간이 지속됨에도 불구하고 온도상승이 지속되지 않아 콘크리트 발열양생에 필요한 온도도달에 어려움이 예상되어 부적합 할 것으로 판단되었다. 한편, **강섬유(SF), 비정질 강섬유(AMF) 및 입경 5mm 이하의 전기로산화슬래그(EAF)의 경우, 1~7분 사이의 매우 빠른 시간에 가열 목표온도인 70℃에 근접하게 도달하여 유도가열에 의한 콘크리트 발열성**

능을 향상 시킬 수 있는 혼입재료로 최종 선정되었다. 한편, 굵은골재를 대체할 수 있는 약 20mm 입경의 전기로산화슬래그(EAF)도 합리적인 수준의 발열성능을 나타내었으나, 입형이 과도하게 불균질하여 콘크리트 혼입시 강도 및 슬럼프 저하요인이 있어 콘크리트 혼입용으로 선정하지 않았다.

표 4-2 전도체 종류별 중심가열 온도 및 도달시간

전도체 종류		중심 가열온도(℃)	도달시간(min)	적합성 판정
강섬유 (SF)		**71.6**	**4**	**적합**
비정질강섬유 (AMF)		**79.2**	**1**	**적합**
전기로슬래그 (EAF)	**2mm**	**70.7**	**6**	**적합**
	2-5mm	**67.1**	**7**	**적합**
	20mm	**59.4**	**9**	**적합**
탄소섬유 (CF)		32.5	-	부적합
탄소나노튜브 (CNT)		23.9	-	부적합
흑연나노섬유 (GNF)		24.0	-	부적합



(a) EAF(2mm) (b) SF (c) AMF (d) CNT

그림 4-2 전도체 종류별 유도가열에 의한 발열성능 비교

② 전도체 혼입 콘크리트의 유도가열 특성 평가 및 최적 전도체 혼입률 선정

㉮ 실험계획 및 방법

전도체 혼입률에 따른 내부 콘크리트의 발열양생 효율성 평가를 위한 실험변수를 표 4-3에 나타내었다. 특히, 거푸집의 가열에 의한 효과가 아닌 순수하게 내부 혼입된 전도체의 유도가열에 의한 발열효과를 평가하기 위하여 거푸집으로 전도체인 철재 거푸집을 사용한 경우와 함께 비 전도체인 PVC를 사용한 경우에 대한 평가를 수행하였다. 재료 가열실험에서 우수한 성능 보였던 강섬유(hooked end type)의 경우 1~2%의 혼입비를 사용하였으며, 비정질 강섬유의 경우 0.5% 이상을 혼입할 경우 콘크리트의 슬럼프가 급격히 감소하여 0.5%의 혼입비에 대

한 결과만을 검토하였다. 추가적으로 비정질 강섬유와 일반 강섬유를 각각 0.5%씩 혼입하여 하이브리드 효과를 평하였다. 전기로산화 슬래그의 경우, 잔골재의 50%를 대체하여 혼입되었다.

유도가열 실험은 앞선 그림 3-2의 장비를 사용하여, 역학적 특성 평가결과에서 최적의 가열효율을 나타내었던 최대온도 70℃를 5시간 동안 유지하는 발열양생 곡선을 사용하여 총 15시간 가열을 하면서 진행하였다.

표 4-2 전도체 혼입에 따른 유도가열 효율성 평가 실험변수

시험체	거푸집	전도체 혼입률	발열양생	평가항목
Plain	Steel-4mm	-	15시간 양생 (70℃-5시간 유지)	내부 온도분포 15시간 압축강도
S-SF1	Steel-4mm	SF 1.0%		
S-SF2	Steel-4mm	SF 2.0%		
S-EAF50	Steel-4mm	EAF: 잔골재 50% 대체		
P-SF1	PVC-4mm	SF 1.0%		
P-SF2	PVC-4mm	SF 2.0%		
P-AF0.5	PVC-4mm	AMF 0.5%		
P-Hy	PVC-4mm	SF 0.5% + AMF 0.5%		

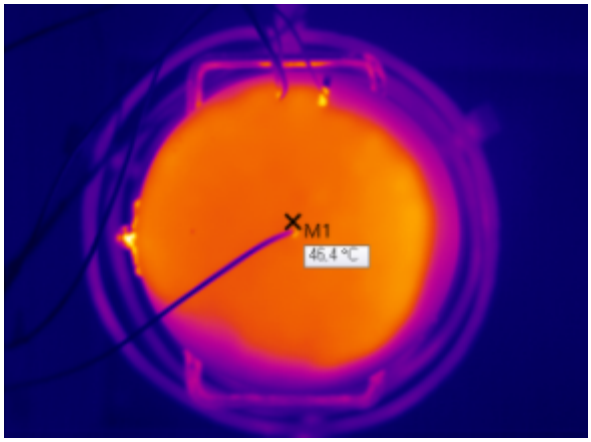
표 4-3 콘크리트 배합표

배합	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m^3)					SP (wt%)	Fiber (vol%)
			W	C	S	EAF	G		
Plain	38.3	47.9	176	460	800		894	0.3-0.6	-
Fiber 혼입	38.3	47.9	176	460	800		894	0.9-1.2	0.5-2.0
EAF 혼입	38.3	47.9	176	460	400	534	894	0.1-0.3	-

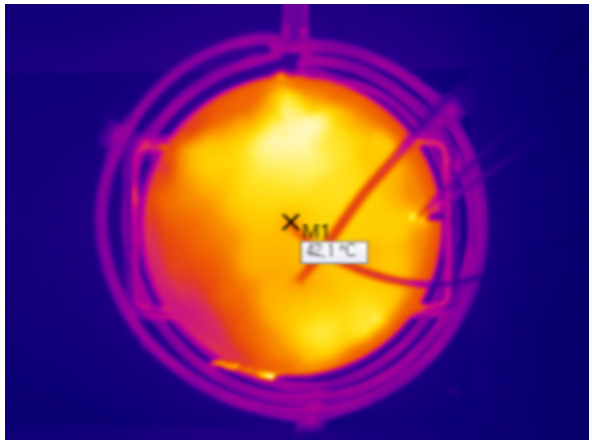
W/C: Water-to-Cement Ratio; S/a: Sand-to-Aggregate Ratio; W: Water; C: Cement; EAF: Electro Arc Furnace Slag; S: Sand; G: Gravel; SP: Super plasticizer(wt%);

㈏ 실험결과

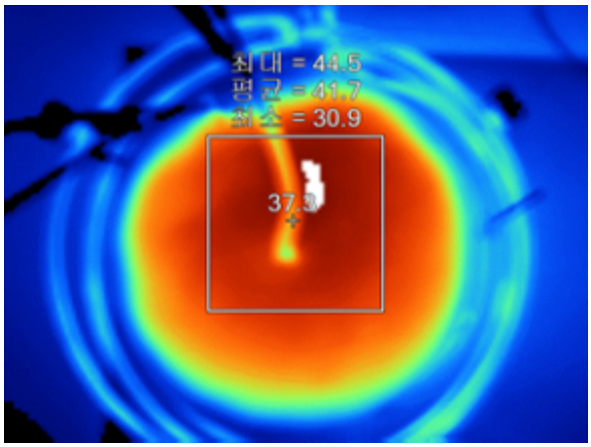
그림 4-3에 대표적인 시험체의 유도가열 중 열화상 카메라 촬영 결과를 나타내었다. 대부분의 경우에서 전도체 혼입에 따라 콘크리트 전단면의 고른 온도분포가 관측되었으며, 거푸집으로 전도체를 사용하지 않은 경우에도 콘크리트 내부에 혼입된 전도체가 유도에 의해서 직접 발열이 되는 것을 확인할 수 있었다.



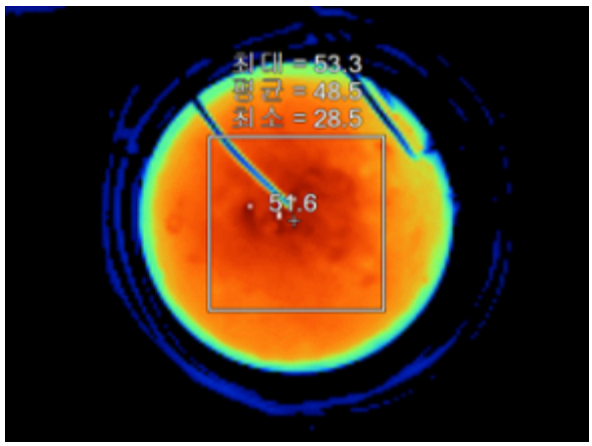
(a) 강섬유 2%혼입(steel 거푸집)



(b) 전기로슬래그 50% 대체(steel 거푸집)



(c) 비정질 강섬유 0.5% 혼입(PVC 거푸집)

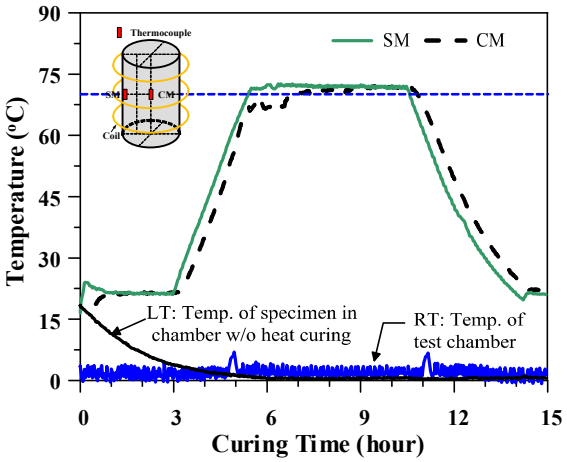


(d) 하이브리드(SF0.5%+AMF0.5%) 혼입(PVC 거푸집)

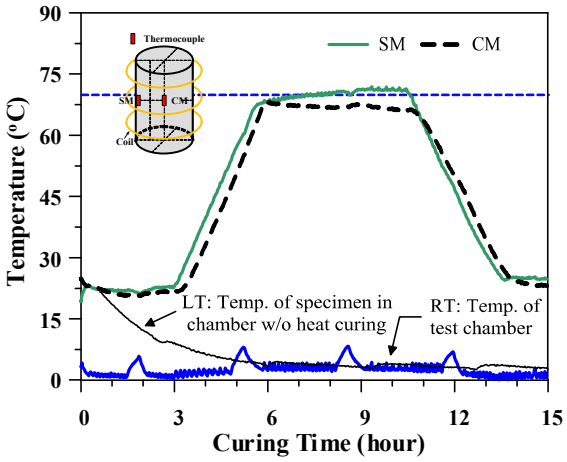
그림 4-3 유도가열기반 발열양생 콘크리트의 거푸집 및 코일 형상

그림 4-4에 열전대를 통해 계측한 콘크리트 온도분포를 나타내었다. 그림 4-4(a)-(b)는 내부 전도체를 혼입하지 않은 경우의 온도계측 결과이며(서로 다른 시험체 2개), 그림 4-4(c) 및 4-4(d)는 각각 내부에 2%의 강섬유를 혼입(Steel 거푸집)한 경우와 잔골재의 50%를 전기로산화 슬래그로 대체한 경우의 온도계측 결과이다. 그림에서 “SM”은 콘크리트와 접하는 거푸집 내측면의 온도계측 결과이며, “CM”은 콘크리트 중심부의 온도계측 결과이다. 4-4(a)와 (b) 모두에서, 콘크리트 내부에 전도체를 혼입하지 않은 경우, 온도상승 구간에서는 거푸집의 온도가 먼저 상승한 이후에 콘크리트 중심부의 온도가 상승하며, 하강구간에서는 반대의 현상이 관찰되었다. 또한, 최대 온도 유지구간에서 거푸집과 콘크리트의 중심부 온도가 약 4~5℃정도 차이가 있는 것으로 확인이 되었다. 이러한 결과는 비교적 단면이 작은(지금 150mm) 경우에도 콘크리트의 중심부와 유도에 의해서 직접 가열이 되는 거푸집의 온도차이가 발생하는 것을 보여주는 결과이며, 앞선 그림 3-5(b)와 같이 콘크리트 단면을 증가시키는 경우 이러한 차이는 더욱 심화됨을 알 수 있다. 콘크리트 내부에 전도체인 강섬유와 전기로산화 슬래그를 혼입한 경우, 그림 4-4(c) 및 4-4(d)에서 보이는 바와 같이 온도상승 및 하강부에서는 앞선 결과와 마찬가지로 거푸집의 온도가 먼저 상승 및 하강하는 결과를 나타내었다. 그러나 최대온도 유지구간에서는 거푸집과 콘크리트 중심부의 온도가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있으며,

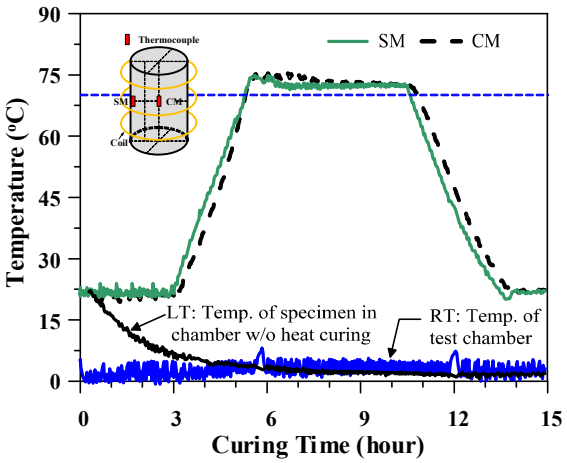
이러한 결과는 외부의 거푸집 뿐만아니라 콘크리트 내부의 전도체도 직접 유도에 의해 가열이 되어 콘크리트 전단면에서 균일한 온도분포를 나타내고 있음을 시사한다.



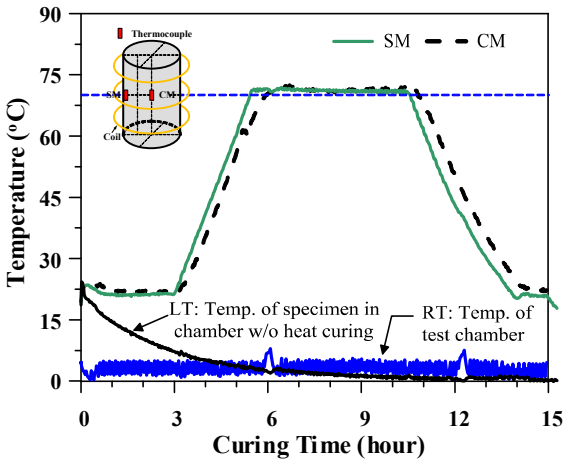
(a) 전도체 미혼입 #1(steel 거푸집)



(b) 전도체 미혼입 #2(steel 거푸집)



(b) 강섬유 2%혼입(steel 거푸집)



(b) 전기로슬래그 50% 대체(steel 거푸집)

그림 4-4 유도가열기반 발열양생 콘크리트의 거푸집 및 코일 형상

각 변수별 양생 직후인 15시간 압축강도 측정결과를 표 4-3에 나타내었다. 배합별 압축강도 변화를 고려하여, 변수별 비교는 상온양생 15시간 압축강도에 대한 비율로 표현하였다. 실험결과, 강섬유를 1~2%만큼 혼입할 경우, 상온양생 대비 강도 발현율이 약 181~198%로 내부에 전도체를 혼입하지 않은 기준 시험체의 강도 발현율 168%보다 높은 결과가 확인되었다. 이는 내부에 전도체로 강섬유를 혼입함으로 인해 거푸집뿐만 아니라 내부 전도체가 추가적으로 직접가열 됨으로 인해 발열효율이 증가했기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 거푸집을 유도가열이 되지 않는 PVC를 사용한 경우에도 내부 강섬유를 혼입할 경우, 철재 거푸집을 사용한 경우와 비슷한 수준의 강도발현율을 나타내었다. 이러한 결과는 거푸집으로 비 전도성의 재료를 사용하는 경우에도(일반적인 유로폼 등) 내부에 전도성 재료를 혼입함으로 인해서 유도가열에 의한 발열효과를 기대할 수 있음을 시사하는 결과이다. 전도체로 전기로산화 슬래그를 잔

골재의 50%만큼 대체한 경우에도 상온양생 대비 187%의 강도발현율을 나타내어 발열양생 효율성을 향상시키는 것으로 확인이 되었다. 한편, 비정질 강섬유 0.5% 및 비정질 강섬유와 일반 강섬유를 함께 혼입한 하이브리드 형태의 경우, 유도가열에 의해 15시간 후 20MPa 이상의 조기강도를 확보할 수 있으나, 거푸집만을 유도가열하여 발열양생을 한 경우와 비교하여 발열성능이 향상되지 않는 결과를 확인하였다. 이는 비정질 섬유의 뭉침 현상으로 인해 콘크리트 내부에 섬유가 고루 분포하지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

이상의 결과를 통해, 유도가열을 통한 콘크리트 전단면의 균일한 발열성능을 확보할 수 있는 최적의 전도체는 강섬유 및 전기로산화 슬래그임을 도출하였다. 강섬유 혼입률은 1%의 경우, 작업성능을 확보할 수 있는 범위에서 충분한 발열성능을 나타내는 것을 확인되었다. 전기로 산화 슬래그는 잔골재의 50%를 대체하여 활용할 경우, 유도가열에 의한 발열성능이 우수함을 확인하였다.

표 4-3 압축강도 시험결과

Specimen	상온양생 (MTC)		0℃챔버-저온양생 (LTC)		0℃챔버- 유도가열양생 (IHC)	
	f_c (MPa)	f_{28} (MPa)	f_c (MPa)	$f_c/f_{c(MTC)}$* (%)	f_c (MPa)	$f_c/f_{c(MTC)}$* (%)
Plain	15.9	44.2	0.4	2.6	24.0	151
S-SF1	**14.8**	**43.7**	**0.5**	**3.4**	**27.6 (15% ⇧)**	**186 (23% ⇧)****
S-SF2	16.8	47.5	0.6	3.6	**31.5 (31% ⇧)**	**188 (25% ⇧)**
S-EAF50	**14.4**	**40.7**	**0.3**	**2.1**	26.9 (12% ⇧)	**187 (24% ⇧)**
P-SF1	13.9	53.0	1.0	7.2	25.2 (5% ⇧)	**181 (20% ⇧)**
P-SF2	13.3	48.9	0.3	2.3	26.3 (10% ⇧)	**198 (31% ⇧)**
P-AF0.5	13.9	44.7	0.4	2.9	21.5 (10% ⇩)	154 (2% ⇧)
P-Hy	18.5	42.0	0.9	4.9	25.5 (6% ⇧)	138 (9% ⇩)

*$f_c/f_{c(MTC)}$: 상온양생 시험체(MTC)에 대한 강도비

**Plain 대비 증감율 (성과목표 20%증가)

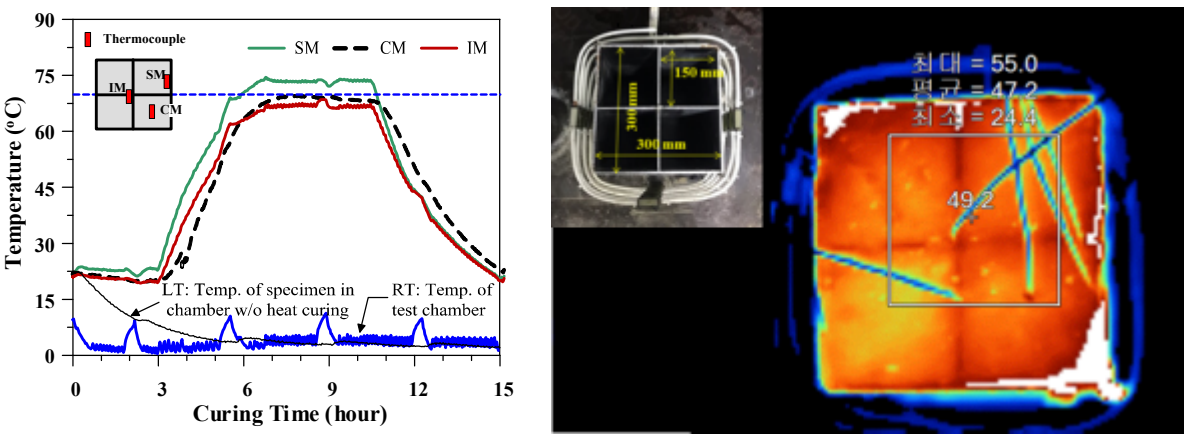
(나) 철근 유도에 의한 유도가열 효율 향상

① 구조용 철근 자체의 유도가열 성능 평가	⇨	② 콘크리트 내부 철근 유도에 의한 콘크리트 발열성능 향상 평가(8 변수)	⇨	② 전도체 혼입 및 내부 철근 유도에 의한 하이브리드 효과 평가(4 변수)

① 구조용 철근 자체의 유도가열 성능 평가

㉮ 개요

앞선, “발열양생 콘크리트 역학적 특성 향상기술 개발”에서 거푸집의 단면을 증가시킬 경우 콘크리트 내외부의 온도차이가 크게 발생하며, 거푸집 유도가열을 통한 콘크리트 전단면의 균일한 발열성능을 확보하기에 한계가 있음을 확인하였다. 이러한 문제는 앞서 제시되었던 콘크리트 내부 전도체 혼입을 통해 내부 전도체를 직접 유도가열 함으로써 개선시킬 수 있음을 확인하였다. 한편, 콘크리트는 내부에 철근이 포함이 되면 따라서 내부의 철근을 함께 유도가열 시킴으로써 발열양생 효율을 향상시키는 방안에 대한 연구를 수행하였다. 사전 연구로 내부 철근 양생에 의한 발열효율 향상 가능성을 검토하기 위해, 콘크리트 단면의 내부에 거푸집과 동일한 재료인 철재의 칸막이가 추가된 경우에 대해서 유도가열에 의한 발열성능 평가하였다 (그림 4-5).



(a) 온도계측결과 (b) 열화상 카메라 영상

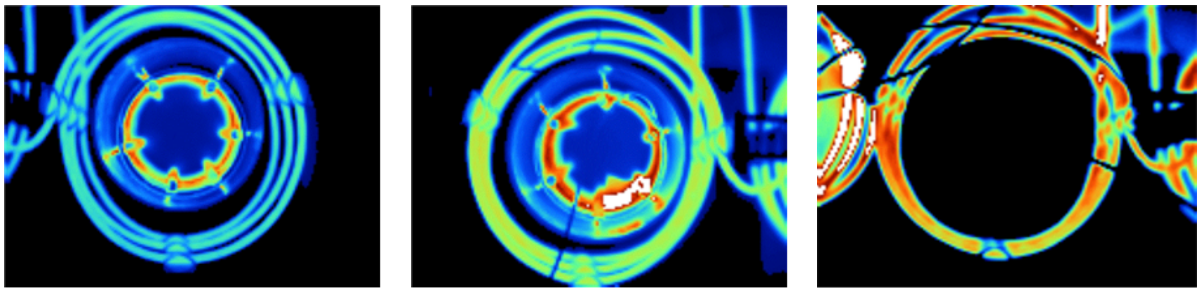
그림 4-5 내부 철재 칸막이가 추가된 300×300㎜ 단면의 발열성능 평가

그림 4-5(a)에서 유도에 의해 직접적으로 가열되는 외부 거푸집과 비교하여 콘크리트 중앙부 및 내부 철재 칸막이 부분의 온도가 다소 낮게 측정이 되었으나, 온도 차이는 약 5℃ 미만으로 확인이 되었다. 그림 4-5(b)의 열화상 카메라 촬영 결과에서도 온도가 가장 높은 외부 거푸집(약 55℃)과 비교하여 내부 콘크리트의 온도(약 49℃) 차이가 약 6℃ 정도로 열전대를 통해 계측한 내외부 온도차이(약 5℃ 미만)와 비슷한 결과를 나타내었으며, 콘크리트 전단면에서 온도편차가 크지 않음을 확인할 수 있다. 여기서, 열화상 카메라로 확인한 거푸집 및 콘크리트의 온도(약 47~55℃)가 열전대 계측결과(약 67~73℃)보다 다소 낮은 이유는 열전대의 경우 공시체의 길이방향 가운데 위치에서 콘크리트 및 거푸집의 내부 온도를 계측한 반면, 열화상 카메라의 경우 0°의 대기와 접하고 있는 콘크리트 및 거푸집의 표면에 대한 촬영 결과이

기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 본 사전실험을 통해 콘크리트 단면적이 증가하는 경우에도 내부에 유도 및 열전달이 가능한 재료를 넣어주는 경우 유도가열에 의한 거푸집 내부 콘크리트의 발열성능을 향상 시킬 수 있음을 확인하였으며, 내부 철근의 유도가열의 효과를 간접적으로 평가하였다.

㉯ 구조용 철근 자체의 유도가열에 의한 발열 성능 평가

콘크리트 내부 철근의 발열에 의한 콘크리트 양생 효과를 평가하기 위하여, 우선적으로 철근 자체의 유도가열 성능을 평가하여 그 결과를 그림 4-6에 나타내었다. 앞서 설명된 바와같이 본 연구에서 유도가열기반 발열양생 콘크리트를 적용하기 위한 최적의 부재로 폐회로 형태의 코일을 활용할 수 있는 교량의 교각부를 선정하였기 때문에, 철근 배치 형상은 주철근과 함께 나선철근이 제공된 형태를 선정하였다. 거푸집에 의한 영향을 배제하기 위하여 PVC 거푸집 내에 교각부 철근의 축소모형을 넣고 유도가열을 진행하였으며, 그림 4-6에서 보이는 바와 같이 가열 직후 10분 이내에 목표온도인 70℃에 도달하여 충분한 가열성능을 확인하였다.



(a) 내부 철근 유도에 의한 발열 (b) 내부 철근 미포함(발열 없음)

그림 4-6 유도가열에 의한 구조용 철근 자체 발열성능 평가

② 콘크리트 내부 철근 유도에 의한 콘크리트 발열성능 향상 평가

㉮ 실험계획 및 방법

상기의 철근 자체의 유도가열 성능 검증을 통해, 일반적인 철근콘크리트 부재에서 구조 보강용 또는 기타 균열 제어 목적으로 배근이 되는 철근이 전자기 유도에 의해 가열이 가능함을 확인하였다. 따라서, 본 연구에서는 철근 배근 변수에 따른 유도가열에 의한 콘크리트 내 온도 향상을 성능을 검증하였다. 철근 배치에 따른 내부 콘크리트의 발열양생 효율성 평가를 위한 실험변수를 표 4-4에 나타내었다. 주요 변수는 나선철근의 유무, 나선철근의 간격 및 피복두께이다. 시험체 크기 ϕ150×300mm의 축소모형임을 고려하여 주철근은 직경 10mm의 이형철근, 나선철근은 직경 6mm의 원형철근이 사용되었으며, 피복두께 역시 축소모형에 적합하도록 5~25mm를 가지도록 제작되었다. 주철근은 콘크리트 구조설계기준에 따라 원형단면의 최소 개수인 6개를 적용하였으며, 2.4%의 철근비로 설계되었다. 나선철근은 외부 코일의 배치와 유사한 80mm 및 간격을 1/2로 축소시킨 40mm의 두 가지 경우로 적용하였다. 추가적으로 시험체 크기 효과에 의한 영향을 확인하기 위하여, ϕ100×200mm의 시험체에 대한 변수를 함께 고려하였다.

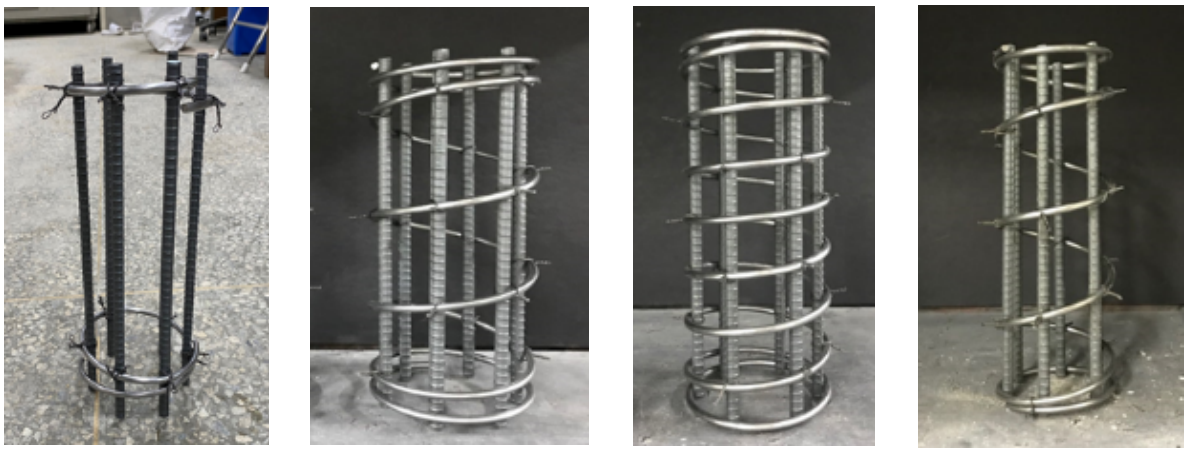
그림 4-7에 실험에 사용된 철근배근 형태를 나타내었다. 거푸집의 가열에 의한 효과가 아닌

순수하게 콘크리트 내부 철근의 유도가열에 의한 발열효과를 평가하기 위하여 거푸집으로 전도체인 철재 거푸집을 사용한 경우와 함께 비 전도체인 PVC를 사용한 경우에 대한 평가를 수행하였다. 시험체 제작에 사용된 콘크리트 배합은 표 4-5에 나타내었다.

유도가열 실험은 앞선 그림 3-2의 장비를 사용하여, 역학적 특성 평가결과에서 최적의 가열효율을 나타내었던 최대온도 70℃를 5시간 동안 유지하는 발열양생 곡선을 사용하여 총 15시간 가열을 하면서 진행하였다.

표 4-4 내부 철근형태에 따른 유도가열 효율성 평가 실험변수

시험체	거푸집	피복두께	주철근	나선철근	비고
Reference (MT)	Steel-4mm	0	-	-	15시간 양생 (70℃-5시간 유지)
S-C15	Steel-4mm	15	D10×6ea	-	
S-D80-C5	Steel-4mm	5	D10×6ea	D6@80mm	
S-D80-C15	Steel-4mm	15	D10×6ea	D6@80mm	
S-D80-C25	Steel-4mm	25	D10×6ea	D6@80mm	
S-D40-C15	Steel-4mm	15	D10×6ea	D6@80mm	
P-D80-C15	PVC-4mm	15	D10×6ea	D6@80mm	
S-D40-C5 (ϕ100X200)	Steel-4mm	5	D10×6ea	D6@40mm	
S-D40-C15 (ϕ100X200)	Steel-4mm	15	D10×6ea	D6@40mm	



(a) S-C15 (b) S-D80-C15 (c) S-D40-C15 (d) S-D80-C25

그림 4-6 철근 배근 형상

표 4-5 콘크리트 배합표

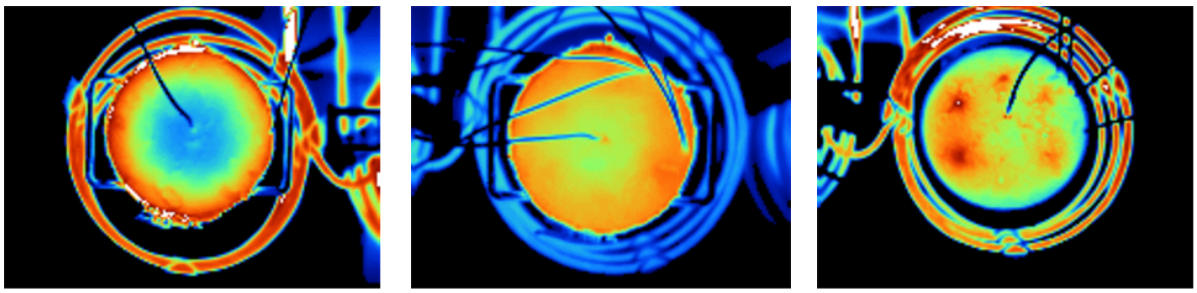
배합	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m^3)				SP (wt%)	Fiber (vol%)
			W	C	S	G		
Plain	38.3	47.9	176	460	800	894	0.5-0.8	-

W/C: Water-to-Cement Ratio; S/a: Sand-to-Aggregate Ratio; W: Water; C: Cement; S: Sand; G: Gravel; SP: Super plasticizer(wt%);

㈏ 실험결과

철근 배치에 따른 RC 실험체의 열화상 카메라 촬영결과를 그림 4-7에 나타내었으며, 15시간 유도가열 후 콘크리트의 압축강도 평가 결과를 표 4-6 및 변수별 비교를 그림 4-8에 나타내었다. 압축강도 결과는 콘크리트 배합에 따른 차이를 고려하기 위하여 상온양생 비보강 시험체의 강도(MT)에 대한 철근보강 유도가열 시험체(IHS), 철근보강 상온양생 시험체(MTS)에 대한 강도로 비교를 하였다.

열화상 카메라를 통한 RC실험체 표면온도 분포 분석결과, 철재 거푸집과 철근을 함께 적용한 경우 유도가열에 의한 발열 온도가 내부로 전달되는 것을 확인 할 수 있다. 한편, 플라스틱 거푸집을 적용한 경우에도, 내부의 주철근 위치에서는 발열이 확인이 되어 철재 거푸집이 아닌 일반 유로폼 등을 활용하는 경우에도 유도가열에 의한 콘크리트 온도상승이 가능함을 확인하였다.

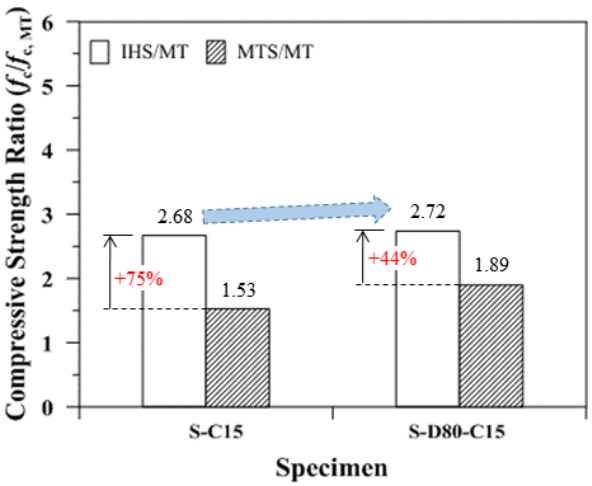


(a) S-D40-C15 (b) S-D80-C15 (c) P-D80-C15

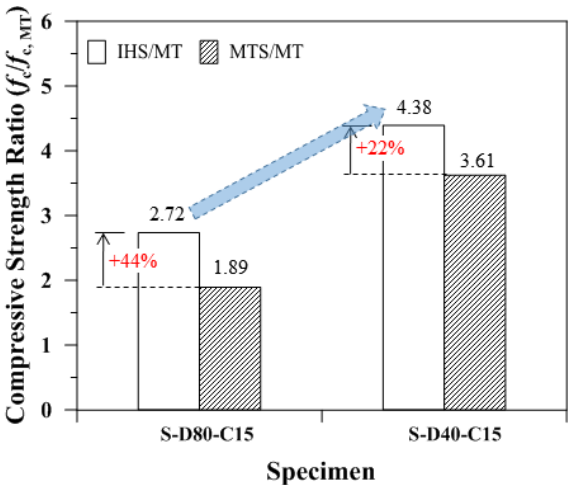
그림 4-7 철근 배근 형상에 따른 RC실험체 표면 온도 비교

표 4-6 철근 배근에 따른 유도가열 후 압축강도

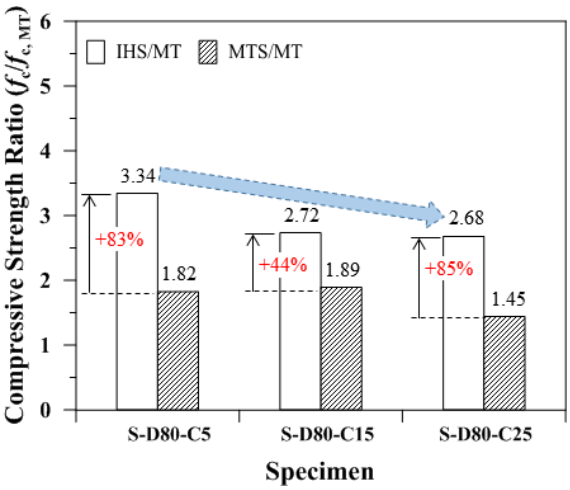
시험체	MT(상온양생 비보강) f_c (MPa)	MTS(상온양생 철근보강)		IHS(유도가열 철근보강)		
		f_c (MPa)	f_{MTS}/f_{MT}	f_c (MPa)	f_{IHS}/f_{MT}	f_{IHS}/f_{MTS}
S-C15	9.1	13.9	1.53	24.4	2.68	1.75
S-D80-C5	9.6	17.5	1.83	32.1	3.34	1.83
S-D80-C15	10.5	19.8	1.89	28.6	2.72	1.44
S-D80-C25	11.2	16.2	1.44	30.0	2.68	1.85
S-D40-C15	8.5	30.7	3.61	37.2	4.38	1.22
P-D80-C15	10.3	19.7	1.91	25.0	2.43	1.27
S-D40-C5 (100X200)	12.6	34.8	2.76	55.9	4.44	1.61
S-D40-C15 (100X200)	13.2	30.2	2.29	47.9	3.63	1.59



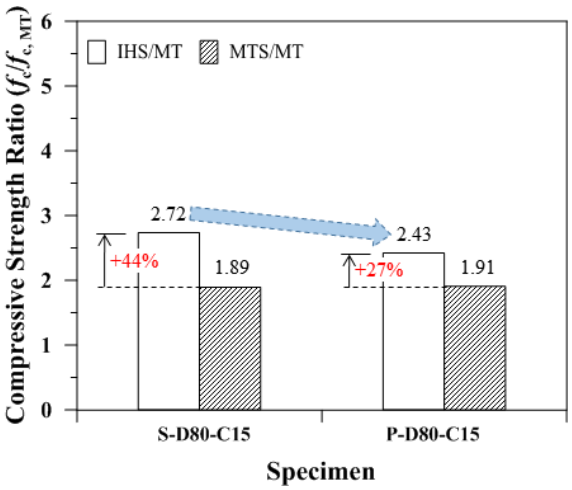
(a) 나선철근 유무에 따른 압축강도 결과



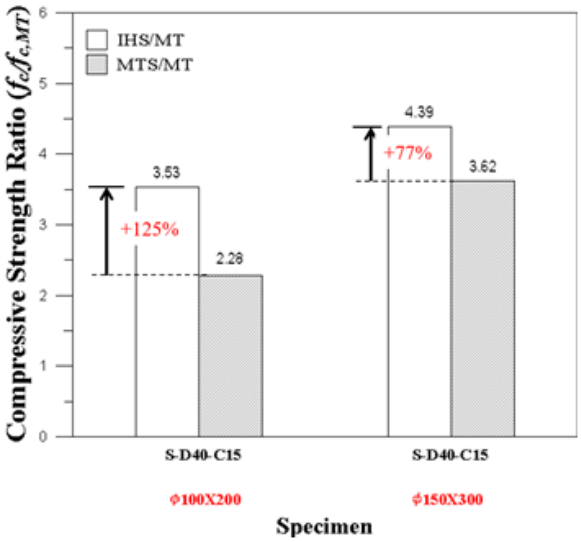
(b) 나선철근 간격에 따른 압축강도 결과



(c) 피복두께에 따른 압축강도 결과



(d) 거푸집 종류에 따른 압축강도 결과



(e) 시험체 크기에 따른 압축강도 결과

그림 4-8 철근 보강에 따른 유도가열 후 압축강도 결과

그림 4-8(a)에서, 나선철근 없이 주철근만 약 2.4% 보강한 경우 상온양생에서는 비보강 시험체와 비교하여 약 53%의 강도증진이 있는 것으로 확인되었으며 이는 비교적 작은 단면에서, 극 초기 콘크트의 강도 발현이 충분이 되지 않은 경우에 주철근 보강을 통해서 강도향상을 기대할 수 있음을 시사하는 결과이다. 주철근 보강 후 유도가열 양생 시험체의 경우, 유도가열을 하지 않은 경우와 비교하여 약 75%의 추가적인 강도발현 성능을 보였으며, 따라서 **주철근의 보강 및 이의 유도가열을 통해 콘크리트의 강도가 향상됨을 확인**하였다.

동일하게 주철근을 보강한 상태에서 나선철근을 유도가열기의 코일간격 75mm와 비슷한 80 mm 간격으로 배근한 경우, 상온양생에서 비보강 시험체와 비교하여 약 89%의 강도 증진이 확인되었다. 또한, 주철근 및 나선철근을 보강한 상태에서 유도가열을 실시한 경우, 유도가열을 하지 않은 경우와 비교하여 추가적인 강도향상이 44% 이루어짐을 확인하였다. 따라서, **내부 철근 보강을 통해, 코어 콘크리트의 구속 및 하중 저항성능의 향상뿐만 아니라 유도가열에 의한 콘크리트의 발열 및 양생 성능을 동시에 향상** 시킬 수 있음을 확인하였다.

그림 4-8(b)에서, 나선철근의 간격을 코일 간격의 1/2로 축소하여 40mm로 적용한 경우, 유도가열 후 15시간 압축강도는 약 37.2MPa로 상온양생 비보강 시험체 강도의 약 4.38배로 매우 우수한 강도 발현율을 나타내었다. 이는 나선철근의 간격이 80mm 인 경우와 비교하여 약 60% 이상의 발열성능이 향상됨을 의미하여, 따라서 **나선철근의 간격이 감소할 수 록 유도가열에 의한 발열효율이 향상**됨을 알 수 있다.

그림 4-8(c)에서 피복 두께가 증가할 경우(5mm → 15mm → 25mm) 상온양생 비보강 시험체와 비교하여 강도 발현율이 334% → 272% → 268%로 감소하는 것을 알 수 있으며, 따라서 **거푸집 두께의 증가는 유도에 의한 발혈효율이 저하**됨을 의미한다. 한편, 콘크리트 내부의 철근이 거푸집과 아주 가까운 위치(5mm)에 있을 경우 유도에 의한 추가적인 강도 발현 성능이 우수함을 확인할 수 있다.

그림 4-8(d)에서 **스틸 거푸집과 내부 철근을 동시에 유도가열 하는 경우가, 내부의 철근만을 유도에 의해서 가열시키는 경우보다 발열 효율이 우수함**을 알 수 있다. 그러나, 거푸집 재료에 상관없이 유도가열에 의해 내부 철근을 발열시킴으로 강도 증진효과를 기대할 수 있음을 확인하였으며, 따라서 건설현장에서 철재의 갱폼이 아닌 일반적인 유로폼을 활용하는 경우에도 유도가열을 이용해 내부의 구조용 철근을 가열시킴으로써 발열양생을 시킬 수 있음을 확인하였다.

그림 4-8(e)에서 시험체의 크기가 ϕ100×200으로 감소한 경우, 유도가열에 의한 발열효율이 비보강 상온양생 시험체와 비교하여 353%로 매우 크게 나타났다. 한편, 유도가열 후 압축강도를 동일한 철근 배근에서의 상온양생 시험체와 비교할 경우, ϕ100×200 시험체에서는 125%의 강도 증진, ϕ150×300 시험체에서는 77%의 강도 증진이 확인되었다. 이는 시험체의 크기가 작은 경우 유도가열로 인한 열전달 및 발열 효율이 우수함을 의미하며, 유도가열을 통한 콘크리트 발열양생은 시험체의 크기가 작을수록 효율적임을 알 수 있다. 따라서 코일과 콘크리트 코어의 거리를 감소시킬 경우, 유도가열에 의한 발열효율을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

이상의 결과에서, **내부 철근을 포함한 경우 유도가열에 의해서 발열 효율을 약 21~86% 만큼 증대** 시킬 수 있음을 확인할 수 있었으며 이는 구조용 철근 가열을 통해 동절기 발열양생 효율성을 향상시킬 수 있음을 시사하는 결과이다.

② 전도체 혼입 및 내부 철근 유도에 의한 하이브리드 효과 평가

㉮ 실험계획 및 방법

혼입 전도체와 철근배치의 하이브리드 효과에 대해서 평가하기 위한 변수를 표 4-7에 나타내었다. 혼입 전도체로는 앞선 혼입 전도체 성능시험에서 우수한 결과를 나타내었던 강섬유를 선정하였으며, 혼입비 역시 콘크리트 물성 및 발열효율이 우수한 것으로 확인이 된 1%를 적용하였다. 철근 배치는 피복두께 15mm를 가지며, 각각 40mm와 80mm의 나선철근이 배근된 경우에 대해서 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 콘크리트 배합비는 다음의 표 4-8과 같으며, 강섬유 혼입에 따라 목표 슬럼프에 도달하기 위한 혼화제 량이 다소 증가하는 경향을 확인하였다.

표 4-4 내부 철근형태에 따른 유도가열 효율성 평가 실험변수

시험체	거푸집	주철근	나선철근	강섬유 혼입률	평가항목
Reference (MT)	Steel-4mm	-	-	-	15시간 양생 (70℃-5시간 유지)
S-C15	Steel-4mm	D10×6ea	-	0%	
S-C15_SF1%	Steel-4mm	D10×6ea	-	1%	
S-C15_SF2%	Steel-4mm	D10×6ea	-	2%	
S-D80-C15	Steel-4mm	D10×6ea	D6@80mm	0%	
S-D80-C15_SF1%	Steel-4mm	D10×6ea	D6@80mm	1%	
S-D40-C15	Steel-4mm	D10×6ea	D6@40mm	0%	
S-D40-C15_SF1%	Steel-4mm	D10×6ea	D6@40mm	1%	

표 4-5 콘크리트 배합표

배합	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m^3)				SP (wt%)	Fiber (vol%)
			W	C	S	G		
Plain	38.3	47.9	176	460	800	894	0.5-0.8	-
Fiber 혼입	38.3	47.9	176	460	800	894	0.6-1.0	1-2%

W/C: Water-to-Cement Ratio; S/a: Sand-to-Aggregate Ratio; W: Water; C: Cement; S: Sand; G: Gravel; SP: Super plasticizer(wt%);

㉯ 실험결과

철근 배치 및 전도체를 하이브리드 형식으로 보강한 시험체의 15시간 유도가열 후 압축강도 결과를 표 4-7 및 그림 4-9에 나타내었다. 압축강도 결과는 콘크리트 배합에 따른 차이를 고려하기 위하여 상온양생 비보강 시험체의 강도(MT)에 대한 철근보강 유도가열 시험체(IHS), 철근보강 상온양생 시험체(MTS)에 대한 강도로 비교를 하였다.

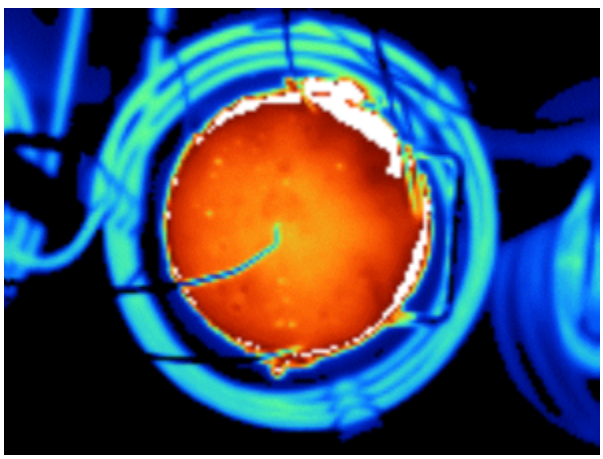
그림 4-9(a)에 대표적인 하이브리드 보강 시험체의 열화상 카메라 촬영결과도 나타내었다.

거푸집, 내부 철근, 내부 강섬유의 유도에 의한 가열로 인해 콘크리트 전단면의 고른 발열성능이 확인이 되었다. 강섬유 및 철근이 동시에 혼입된 경우, 유도가열 후 15시간 압축강도가 약 34.4-45.7MPa로 상온양생 비보강 시험체 대비 3.16-4.44배의 우수한 강도발현 성능을 나타내었다. 내부의 구조용 철근만 보강된 경우와 비교하여 강섬유를 추가로 1% 혼입해 준 경우 압축강도 발현율은 약 1-32%정도 향상이 되는 것을 확인 할 수 있었으며, 이러한 증진효과는 철근 나선철근의 배근량이 감소할수록 효율적이었다. 구조용 철근만 보강된 경우와 비교하여 강섬유를 추가로 2% 혼입해준 경우에는 압축강도 발현율이 약 51%만큼 추가로 향상되는 것으로 확인 되었다.

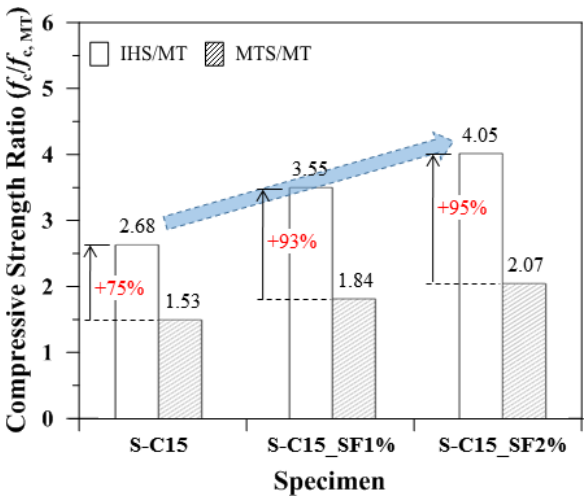
한편 내부 전도체 혼입에 의한 강도 증진 효과 보다는 철근의 배근 간격 감소에 따른 효율성이 더 우수함을 확인하였다. 이상의 결과에서, **내부 구조용 철근 및 혼입 전도체(강섬유 등)의 하이브리드 보강을 통해서 콘크리트 강도 향상 및 유도가열에 의한 발열성능 향상**을 모두 기대할 수 있음을 확인하였다.

표 4-6 철근 배근에 따른 유도가열 후 압축강도

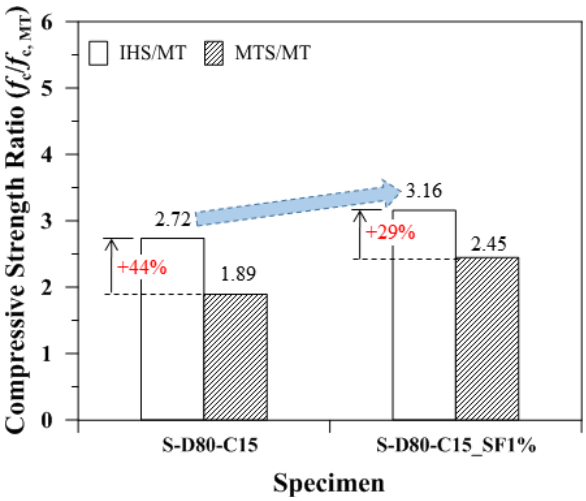
시험체	MT(상온양생 비보강) f_c (MPa)	MTS(상온양생 철근보강)		IHS(유도가열 철근보강)		
		f_c (MPa)	f_{MTS}/f_{MT}	f_c (MPa)	f_{IHS}/f_{MT}	f_{IHS}/f_{MTS}
S-C15	9.1	13.9	1.53	24.4	2.68	1.75
S-C15_SF1%	**11.5**	**21.2**	**1.84**	**40.8**	**3.55**	**1.93**
S-C15_SF2%	**8.5**	**17.6**	**2.07**	**34.4**	**4.05**	**1.95**
S-D80-C15	10.5	19.8	1.89	28.6	2.72	1.44
S-D80-C15_SF1%	**11.2**	**27.5**	**2.45**	**35.5**	**3.16**	**1.29**
S-D40-C15	8.5	30.7	3.61	37.2	4.38	1.22
S-D40-C15_SF1%	**10.3**	**37.2**	**3.61**	**45.7**	**4.44**	**1.23**



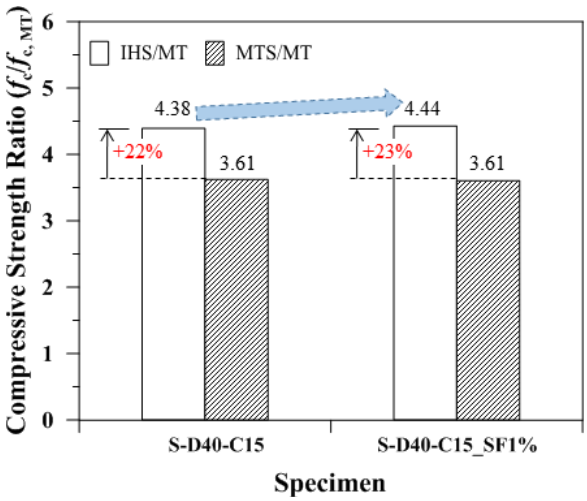
(a) SF1%+S-D40-C15 열화상 사진



(b) SF1-2% + 주철근 조합에 따른 강도 비교



(c) SF1% + 나선철근 80㎜ 조합에 따른 강도 비교



(d) SF1% + 나선철근 40㎜ 조합에 따른 강도 비교

그림 4-9 전도체 및 철근 하이브리드 효과에 의한 유도가열 성능 향상

나. 연구개발 성과

(1) 기술적 성과 및 우수성(기존기술 대비 차별성)

연번	핵심성과	개발기술의 기술적 성과
1	**콘크리트 급속 양생용 능동형 유도가열 시스템 개발 (1~2차년)**	**○ 목적** - 콘크리트 양생을 위한 다양한 거푸집(재료, 구조)의 표면 온도 제어 목적 - 유도가열 기반의 거푸집 온도제어 장치를 이용한 콘크리트 양생의 효율성 향상을 으로 양생 시 필요한 에너지 소모비용 감소 목적 - 다양한 거푸집에 대응 가능한 능동형 전력변환장치의 설계 및 제작 (기존기술 현황) - 콘크리트 양생을 위한 기름 보일러, 열풍기 등은 거푸집 표면 이외에 밀폐된 불필요 공간까지 온도상승을 유발하는 에너지 불가피 - 기존 콘크리트 양생장치는 시간설정에 따른 온도제어만 가능하여 구조물에 따른 효율적인 양생 한계 (기술개발 성과) - 유도가열 기반의 장치를 이용하여 능동적으로 거푸집의 온도 제어 가능한 장치 개발 - 거푸집 크기에 변화하는 유도가열 코일의 구조에 자동으로(능동적으로) 최적화 상태를 설정 (주파수 및 전류, 전압 크기 설정)하는 시스템 개발 - 효율적인 최적화 상태 설정을 통한 콘크리트 양생에 필요한 필요전력 최소화 - **○ 정량적 성과:** 논문(비 SCI-1건), 시제품(3건), 소프트웨어(등록-2건)
2	**급속양생 효율의 최적화를 위한 유도가열 시스템 핵심요소기술 개발 (1~2차년)**	**○ 목적** - 콘크리트 양생에 필요한 가열 시스템 요소기술 개발 - 거푸집 재질, 크기 및 유도가열 코일의 조건(재질, 간격, 턴수)에 따른 요소 기술 개발 - 유도가열로 인한 자기장 차폐 기술 개발 **○ 기술개발 성과** (기존기술 현황) - 콘크리트 양생을 위한 기름 보일러, 열풍기, 갈탄, 열선 등 장치 이용 - 시간에 따른 양생 온도 제어 기능이 없이 일률적인 열변환 장치 가동으로 양생의 효율성을 고려 못함, 화석연료 사용으로 환경오염 문제 발생 (기술개발 성과) - 양생용 거푸집 표면 구조에 최적화된 코일 설계를 통한 불필요한 전력소모 최소화 - 유도가열에 효율적인 거푸집 재질 설정 및 크기에 따른 유도가열 효율적인 코일 구조 설계 기술 개발 - 가열시 자기장 세기 분석을 통한 차폐의 필요성 분석 및 차폐기술 개발 **○ 정량적 성과:** 논문(SCI-1건), 특허(출원-2건)

3	**유도가열 기반 발열양생 콘크리트 역학적 특성 및 내구성 확보 기술 개발 (1~2차년)**	**○ 목적** - 유도가열을 통한 동절기 콘크리트 조기강도 확보 - 유도가열 기반 발열양생 콘크리트의 강도특성에 대한 원인규명 - 유도가열 기반 발열양생 콘크리트의 장기강도 및 내구성능 평가 ○ 기술개발 성과 (기존기술 현황) - 동절기 콘크리트 동해에 따른 문제 및 촉진양생(갈탄, 열풍기, 증기양생) 기법 적용에 따른 문제 발생 - 증기양생 적용시 콘크리트 내부 온도 세밀 조정 어려움 및 레이턴스 발생 - 양생 조건별 강도차이에 의한 원인 규명 방법 미비 - 양생조건별(발열양생 포함) 강도발현 및 내구성능 평가를 통한 성능 검증 필요 (기술개발 성과) - 유도가열을 활용한 거푸집 발열양생을 통해 15시간 압축강도 20MPa 이상 확보 - 유도가열을 통한 콘크리트 발열온도 정밀 제어 및 레이턴스 저감 달성 - 다양한 양생조건(저온, 상온, 고온 등)에 따른 강도비교 및 미세구조 분석을 통한 강도차이 원인 분석 수행 - 양생조건에 다른 장단기 강도특성 평가 및 내구성능 평가를 통한 발열양생 콘크리트의 장기 내구성능 평가 - 유도가열 조건, 거푸집 조건, 재료 조건 변화에 따른 발열양생 콘크리트의 역학적 특성 확보 방안 제시 **○ 정량적 성과:** 논문(SCI-2건, 비SCI-1건), 특허(출원-1건)
4	**콘크리트 혼합물 및 철근 유도에 의한 유도가열 성능 향상기술 개발 (1~2차년)**	**○ 목적** - 유도가열에 의한 콘크리트 발열양생 효율성 향상 - 콘크리트 내외부 온도 균질화 - 비 금속 재질의 거푸집(일반 유로폼)의 유도가열 양생 기법 적용 **○ 기술개발 성과** (기존기술 현황) - 발열양생 적용 시 외부에서 온도 전달을 통한 콘크리트 양생으로 내외부 온도 차이 발생 - 마이크로웨이브 발열 거푸집 등 특정 공법 적용 시 별도의 거푸집 적용 필요 - 증기양생 적용시 구조물 전체를 밀폐하는 방안 마련 필요 (기술개발 성과) - 내부 전도체(강섬유, 전기로 슬래그 등) 혼입을 통한 콘크리트 내외부 온도 균질화 달성 및 유도가열 효율성 증대 - 구조용 철근 유도가열에 의한 발열효율성 향상 - 콘크리트 혼입 전도체 및 구조용 철근 유도가열에 의한 비금속 거푸집(일반 유로폼 등) 활용 콘크리트 발열양생 방안 마련 - 전도체 및 철근 하이브리드 효과에 의한 유도가열에 의한 콘크리트 양생 효율성 향상 **○ 정량적 성과:** 논문(SCI-1건, 비 SCI-1건), 특허(출원-1건)

(2) 기술적 성과 상세(정량적 성과)

○ 논문게재 성과 (SCI 4편/목표 3편, 비 SCI 3편/목표 4편)

번호	국내/국외	SCI 여부 (비고)	논문명	저자명	논문 게재지	논문 게재일/ Vol.(No.), page
1	국외	SCI (상위 10%)	Optimized mix design for 180 MPa ultra-high-strength concrete	Hyun-Oh Shin Doo-Yeol Yoo Joo-Ha Lee Seung-Hoon Lee Young-Soo Yoon	Journal of Materials Research and Technology	2019.09.01./ Vol.8, No.5 pp.4182-4197
	증빙자료집 p.768-783					
2	국외	SCI (상위 20%)	Mechanical and Dynamic Behavior of an Elastic Rubber Layer with Recycled Styrene-Butadiene Rubber Granules	Seongdo Kim Hyun-Oh Shin* Doo-Yeol Yoo *(corresponding)	Polymers	2020.12.17./ Vol.12, No.12 pp.3022
	증빙자료집 p.784-799					
3	국외	SCI	Development of a Novel Concrete Curing Method Using Induction Heating System	Chi-Hyung Ahn Jinbok Lee Dong-Jin Kim Hyun-Oh Shin* *(corresponding)	Applied Sciences	2020.12.29./ Vol.11, No.1 pp.3022
	증빙자료집 p.800-815					
4	국외	SCI	Optimal IP Current Controller Design Based on Small Signal Stability for THD Reduction of a High-Power-Density PFC Boost Converter	Ahmed H. Okilly Hojin Jeong Jeihoon Baek* *(corresponding)	Applied Sciences	2021.01.07./ Vol.11, No.2 pp.539
	증빙자료집 p.816-840					
5	국내	비SCI	유도가열 기반 발열양생 콘크리트의 압축강도 특성	이진복, 김경택, 안치형, 백재훈, 신현오	한국방재학회 논문집	2019.12.31./ Vol.19, No.7 pp.331-337
	증빙자료집 p.745-751					
6	국내	비SCI	유도가열 기반 콘크리트 양생용 거푸집 온도분포 분석	김동진, 최용석, 정호진, 신현오, 안치형	조명전기설비학회 논문집	2020.10.30./ Vol.34, No.10 pp.16-23
	증빙자료집 p.760-767					
7	국내	비SCI	유도가열을 활용한 동절기 콘크리트의 발열양생 효율성 평가	이진복, 김경택, 최진수, 안치형, 신현오	한국방재학회 논문집	2020.12.31. Vol.20, No.6 pp.23-30
	증빙자료집 p.752-759					

○ 특허 성과 (출원 4건/목표 출원 4건)

번호	등록/출원	출원(등록) 국가	특허명	출원인	발명자	출원(등록) 번호/ 출원(등록) 일자
1	출원	대한민국	콘크리트 양생 장치	한국기술교육대학교 산학협력단	안치형	10-2019-0170557/ 2019.12.19
	증빙자료집 p.711-744					

2	출원	대한민국	그라우트 양생 장치	한국기술교육대학교 산학협력단	안치형 김동진	10-2020-0160004/ 2020.11.25
	증빙자료집 p.650-672					
3	출원	대한민국	고주파 유도 가열을 이용한 도로포장 긴급보수용 콘크리트 양생 장치 및 그 방법	충남대학교 산학협력단	신현오 이진복 김경택	10-2020-0163300 / 2020.11.27
	증빙자료집 p.26-43					
4	출원	대한민국	콘크리트 혼합물 및 이를 이용한 콘크리트 발열양생 방법	충남대학교 산학협력단	신현오 이진복 김경택	10-2020-0165494 / 2020.12.01
	증빙자료집 p.158-183					

○ 소프트웨어 성과 (등록 2건/목표 0건)

번호	소프트웨어 구분	창작일	소프트웨어명	저작자	등록 번호/등록 일자
1	시스템 소프트웨어	2020.09.25	콘크리트 급속 양생 시스템 온도 제어용 데이터 수집 프로그램	한국기술교육대학교 산학협력단	제C-2020-034089호/ 2020.10.07
	증빙자료집 p.850-851				
2	시스템 소프트웨어	2020.09.25	콘크리트 급속 양생용 전력변환장치 공진 주파수 추종 프로그램	한국기술교육대학교 산학협력단	C-2020-034090/ 2020.10.07
	증빙자료집 p.852-853				

○ 시제품 (3건/목표 2건)

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야
1	온도제어 기반 전력변환장치 프로토타입 v1	2020.09.	한국기술교육대학교	충남대학교	콘크리트 가열 양생 실험
	증빙자료집 p.846-847				
2	온도제어 기반 전력변환장치 프로토타입 v2	2020.09.	한국기술교육대학교	충남대학교	콘크리트 가열 양생 실험
	증빙자료집 p.846-847				
3	능동제어 기반 전력변환장치	2020.10.	한국기술교육대학교	한국기술교육대학교	거푸집 가열 특성 실험 및 능동제어 회로 실험
	증빙자료집 p.848-849				

○ 학술발표 성과 (2건/목표 0건)

번호	국내/국외	논문명	저자명	학술대회명	발표일
1	국내	GFRP bar 및 강섬유로 보강된 프리캐스트 콘크리트 슬래브 궤도의 구조성능 평가	신현오, 이진복 김경택, 민경환, 이승정	2019 한국콘크리트학회 가을학술대회	2019.11.07
	증빙자료집 p.841-843				

2	국내	혼입재료에 따른 유도가열 기반 발열양생 콘크리트의 특성	이진복, 김경택 최진수, 조승환, 신현오* *(corresponding)	2020 한국농공학회 학술발표회	2020.10.16
	증빙자료집 p.844-845				

○ 인력양성 성과 (학사 3인)

번호	학위	성명	국가	학교	학위취득일
1	학사	김동진	대한민국	한국기술교육대학교	2019.08.17
	증빙자료집 p.854-855				
2	학사	이진복	대한민국	충남대학교	2020.02.25
	증빙자료집 p.857				
3	학사	김경택	대한민국	충남대학교	2020.08.25
	증빙자료집 p.856				

(3) 경제적 성과 및 우수성

항목	경제적 성과
기술개발을 통한 경제성 향상	○ 고효율 콘크리트양생용 (전기→열)전력변환장치 개발로 기존 화석연료 기반 보일러를 이용한 양생 경우보다 전기료(에너지사용료) 절감에 따른 경제성 향상 * 전력소모량 : 13.33kWh/m^2 확인 ○ 기존 콘크리트양생용 화석연료 보일러 시스템을 이용한 경우 대비 시스템 소형화, 경량화 및 쉬운 현장 적용성능 향상으로 설치비용 및 유지보수 비용 절감에 따른 경제성 향상 ○ 동절기 콘크리트 타설을 통한 공기단축에 따른 경제성 향상 ○ 콘크리트 극초기 강도 확보에 따른 거푸집 탈형시점 단축에 따른 시공속도 및 경제성 향상 ○ 다양한 콘크리트양생용 거푸집용 유도가열 코일 조건 최적화를 통한을 통한 콘크리트 양생 효율 향상에 따른 경제성 향상 ○ 기존 대단위 공간 내(거푸집 아닌 공간 포함) 스팀 양생을 이용한 비효율적 전력소모 대비 가열 거푸집 표면에만 최적화된 유도가열 코일 설계를 통하여 필요 전력 사용 최적화에 따른 경제성 향상
현장적용 및 실용화	○ 프리캐스트 공장 및 실외 현장타설 콘크리트 양생 시 적용 가능한 실시간 온도제어 전력변환시스템 프로토타입 제품 개발(시제품 3종) ○ 콘크리트양생용 코일의 전자파 차폐를 위한 차폐장치 프로토타입 제품 개발 ○ 발열양조건, 거푸집 조건 등을 고려한 유도가열 콘크리트의 강도 특성 평가 완료 ○ 실용화를 위한 원천특허 4종 확보 완료
사회경제적 파급효과	○ 건설 작업자의 안전성 확보: 유도가열 기반 촉진양생 기술을 통해, 기존의 보온양생을 위한 갈탄 등을 대체함으로 인해 겨울철 작업자 질식사고로부터 안전성 확보 ○ 건설 현장 미세먼지 및 대기오염 저감: 유도가열 기반 촉진양생 기술은 콘크리트 양생을 위한 에너지원으로 화석연료를 사용하지 않으므로, 최근 문제가 되고 있는 건설현장의 미세먼지 및 대기오염 저감이 가능함 ○ 국가 정책 부합 및 국가 위상 제고: 화석연료 저감 및 에너지 효율성 향상을 추구하는 국가 정책에 부응하며, 친환경 기술로서 국제적 위상 제고 가능 ○ 북한과의 교류 확대 시, 북한 도로 및 철도 등 인프라 시공에 있어서 국내 기업의 선진적인 진출이 가능하며, 향후 러시아, 중앙아시아, 북미 등 혹한지 건설공사 입찰시 기술적 우위 확보로 인한 시장 진출 가능

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표 및 목표달성 여부

○ 정성목표 및 달성도

구분	핵심 성과물 (CTE)		단위 성과물		성과점검기준					
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정 방법	검증 방법	가중치
주관	A	유도가열 성능 향상을 위한 콘크리트 혼합물 및 구조용 철근 배치 기술	A-1	급속양생 효율 극대화를 위한 콘크리트 재료 최적화 기술 개발	①	유도가열 성능 최대화를 위한 콘크리트 혼입용 최적 전도체 및 구조보강용 철근 최적 배근 형상 선정	Plain콘크리트대비 유도가열성능 20% 향상	31% 향상	가이드라인 및 특허 출원 건수	가이드라인 특허출원 (증빙 A-1-①)	15
					②	콘크리트 혼합물 및 구조용 철근 하이브리드 효율평가	하이브리드 조합 4종 시험 수행	4종 시험 수행	실험결과서 작성 건수	실험결과서 (증빙 A-1-②)	5
	B	유도가열 기반 발열양생 콘크리트의 역학적 특성 및 내구성 확보 기술	B-1	발열양생 콘크리트의 역학적 특성 향상 기술 개발	①	미세구조 및 역학적 특성 평가	미세구조 3변수, 물성시험 5종 평가	미세구조 4변수, 물성 8변수평가	실험결과서 작성 건수	실험결과서 (증빙 B-1-①)	10
					②	역학적 특성 및 장기 강도 향상 기술 제안	일반양생 대비 동일 재령 성능 향상 30%향상	22-95% 향상	특허출원 건수	특허출원 (증빙 B-1-②)	10
			B-2	발열양생 콘크리트의 내구성능 평가 및 내구성능 향상 기술 개발	①	내구성능 평가 및 내구성능 향상 기술 제안	일반양생 대비 내구성능 향상 30%향상	40-75% 향상	가이드라인 개발 건수	가이드라인 (증빙 B-2)	10
공동	C	능동형 유도가열용 전력변환장치	C-1	온도자동 제어 모듈 설계	①	온도자동 제어 시나리오 제안	시나리오 2건 개발	2건 개발	보고서작성 건수	도면 및 보고서 (증빙 C-1)	5
					②	설계 도면 및 제품 사양서	설계도면, 제품사양서 개발	도면, 사양서 각 1건	도면/사양서 개발 건수	도면 및 보고서 (증빙 C-1)	5
			C-2	온도제어 기반 전력변환장치 개발	①	프로토타입 설계 도면 및 제품 사양서 개발	설계도면, 제품사양서 개발	도면, 사양서 각 1건	도면/사양서 개발 건수	도면 및 보고서 (증빙 C-2)	5
					②	능동제어기반 시스템 설계 도면 및 제품 사양서	설계도면, 제품사양서 개발	도면, 사양서 각 1건	도면/사양서 개발 건수	도면 및 보고서 (증빙 C-2)	10
	D	급속양생용 유도가열 시스템 요소기술	D-1	유도가열 최적화 기술 개발	①	시뮬레이션 기반 유도가열 성능 시험	거푸집 종류 3종 코일 3종 변수 시뮬레이션 수행	거푸집 3종류, 코일 3종 수행	보고서 작성 건수	보고서 (증빙 D-1)	5
					②	실험기반 유도가열 조건 결과	거푸집 종류 3종 코일 3종 변수 시험 수행	거푸집 3종류, 코일 3종 수행	보고서작성 건수	보고서 (증빙 D-1)	5
			D-2	전자파 차폐기술 개발	①	전자파 차폐 시나리오 제안	전자파 차폐 시나리오 2건 개발	4건 개발	특허출원 건수	특허출원 (증빙 D-2)	5
					②	전자파 차폐 시스템 개발	전자파 50% 감소	55% 감소	보고서작성 건수	도면 및 보고서 (증빙 D-2)	10

- 상기와 같이 전체 정성적 목표를 달성하였으며, 상세 내용은 별첨 “성과기준점검표” 및 부록에 나타내었음.

○ 정량목표 및 달성도

구분	핵심 성과물 (CTE)		단위 성과물		양적성과 현황			
					목표치	달성치	가중치	비고
주관	A	유도가열 성능 향상을 위한 콘크리트 혼합물 및 구조용 철근 배치 기술	A-1	급속양생 효율 극대화를 위한 콘크리트 재료 최적화 기술 개발	논문(비SCI) : 1 건 특허 : 출원 1 건	논문(비SCI) : 1 건 특허 : 출원 1 건	10	
					논문(SCI) : 1 건	논문(SCI) : 1 건	10	
	B	유도가열 기반 발열양생 콘크리트의 역학적 특성 및 내구성 확보 기술	B-1	발열양생 콘크리트의 역학적 특성 향상 기술 개발	논문(SCI) : 1 건	논문(SCI) : 1 건	10	
					특허 : 출원 1 건 논문(비SCI) : 1 건	특허 : 출원 1 건 논문(비SCI) : 1 건	10	
			B-2	발열양생 콘크리트의 내구성능 평가 및 내구성능 향상 기술 개발	논문(비SCI) : 1 건	논문(SCI) : 1 건	10	당초 비SCI급 논문 예정이었으나, SCI급 논문으로 게재
공동	C	능동형 유도가열용 전력변환장치	C-1	온도자동 제어 모듈 설계	논문(비SCI) : 1 건	논문(비SCI) : 1 건 소프트웨어 : 1 건	5	소프트웨어 1건 초과달성
			C-2	온도제어 기반 전력변환 장치 개발	시제품 : 1 건	시제품 : 2 건	10	시제품 1건 초과달성
					시제품 : 1 건	시제품 : 1 건 소프트웨어 : 1 건	5	소프트웨어 1건 초과달성
	D	급속양생용 유도가열 시스템 요소기술	D-1	유도가열 최적화 기술 개발	특허 : 출원 1 건	특허 : 출원 1 건	10	
			D-2	전자파 차폐기술 개발	특허 : 출원 1 건	특허 : 출원 1 건	10	
					논문(SCI) : 1 건	논문(SCI) : 1 건	10	
계					특허 : 출원 4 건 논문(SCI) : 3 건 논문(비SCI) : 4 건 시제품 : 2 건 소프트웨어 : 0 건	특허 : 출원 4 건 논문(SCI) : 4 건 논문(비SCI) : 3 건 시제품 : 3 건 소프트웨어 : 2 건	100	논문 및 특허출원 달성완료, 소프트웨어 2건, 시제품 1건 초과달성

- 상기와 같이 전체 정량적 목표를 초과 달성하였으며, 상세 내용은 별첨 “성과기준점검표” 및 부록에 나타내었음.

나. 관련 분야 기여도

○ 최근에는 토목·건축 구조물의 대형화 및 고층화에 따른 물량증가와 건설인력 부족으로 인해 한중콘크리트 타설이 불가피한 실정임. 한중콘크리트 시공시 가장 중요한 사항은 초기동해를 방지하는 것이며, 초기강도가 5MPa 이상 될 때까지 온도 0℃ 이하가 되지 않도록 보온 또는 가열양생이 필요하지만 실제 현장에서 온도관리의 어려움으로 인해 부실공사의 문제가 발생하는 실정임. 이를 극복할 수 있는 기술로 판단 됨.

○ 일반적으로 콘크리트양생에 사용되는 연료인 갈탄은 유해가스(일산화탄소)발생 및 화재 위험으로 인해 작업자의 안전을 심각히 위협하며 화석연료의 사용으로 대기오염 및 미세먼지 발생을 증가시키는 문제가 있음. 이를 극복할 수 있는 기술로 판단 됨.

○ 향후 북한 및 러시아, 중앙아시아 등으로의 국내 건설업체 진출이 예상되며, 이러한 혹한지 건설시 한중콘크리트 및 콘크리트 급속양생 기술의 필요성이 더욱 증가될 예정임. 향후 시장 선점을 위한 선제적인 원천 기술 확보가 필요함.

○ 기존 이용되는 콘크리트양생 기술 대비 양생 효율성, 경제성, 적용성, 유지보수 비용 절감 가능한 시스템 개발을 통하여 토목 기초공사의 효율성, 경제성 향상 기여

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

○ 정성적 목표 및 정량적 목표를 달성함.

○ 후속연구의 필요성: 본 과제는 유도가열 기술기반의 새로운 콘크리트 급속양생 기술을 상용화하기 위한 원천기술 개발 과제로 TRL 3, 4 단계까지의 기초기술 개발을 수행하였으며, 이를 바탕으로 상용 거푸집 적용 및 건설 현장 조건 적용에 대한 후속과제 수행 필요함.

○ 현재 후속과제 수행을 통한 실용화를 위한 핵심원천 기술(4건) 확보 완료하였으며, 구체적 적용 대상 구조물에 대한 기초연구 수행 완료 하였음.

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

○ 최종성과물별 활용방안

최종성과물	활용방안
동절기(혹한기) 1일 이내 급속시공이 가능한 콘크리트 양생기법 (공법 · 기법)	- 외부 조건을 고려한 콘크리트 강도별 최적 발열이력 곡선을 동절기 현장 타설 콘크리트 온도관리에 활용 - 유도가열 기반 급속양생 기술을 동절기 도로파손 복구 및 구조물 급속 보수 · 보강시 콘크리트 급속경화 기술에 활용 - 급속양생용 유도가열 코일에 대한 전자파 해석 및 분석 방법 결과를 일반 철강 · 반도체 산업 유도가열 히터용 코일 시뮬레이션 해석 및 분석에 활용 - 급속양생 유도가열 전자파 차폐 방법을 대용량 무선충전시스템(무선충전 버스 등) 에 필요한 자기장 차폐 기술에 활용
콘크리트 급속양생용 능동형 유도가열 전력변환 장치 시스템 (장비 · 장치)	- 온도 제어 모듈을 이용한 서중 콘크리트 및 한중 콘크리트 온도 자동관리 시스템 개발에 활용 - 주파수 자동설정이 가능한 전력변화시스템의 능동제어 기술 확보를 통한 유도가열 히터용 인버터 장치에 활용

○ 최종성과물의 건설현장 활용방안 (최종 연구성과의 활용가능성)

-본 과제의 수행을 통하여 유도가열양생의 원천기술을 확보하였으며, 실험실 수준의 거푸집을 이용한 기술의 실용화 가능성을 확인하였음. 이에 대한 구체적 활용방안은 다음과 같음.

-교량, 교각 및 빌딩 기둥 등 현장타설 콘크리트 활용, 극한지 건설공사 활용: 급속시공, 품질향상, 작업자 안전성 향상, 탄소배출량 감소

-**프리캐스트 콘크리트 공장 활용→기존 증기양생 대체**: 양생시간 및 설비비용 저감, 레이턴스 저감

-강합성 보 및 강합성 기둥 생산 활용: 콘크리트 내외부 강제 유도가열에 의한 별도의 거푸집 미적용, 비용절감 및 급속시공

-**도로포장 긴급복구 활용(선행특허 "고주파 유도 가열을 이용한 도로포장 긴급보수용 콘크리트 양생 장치 및 그 방법" 확보, 기술이전 협의 중):** 동절기 도로파손 복구 및 구조물 급속 보수·보강시 콘크리트 급속경화 기술에 활용, 비용절감 및 급속시공

-**매입말뚝 급속 시공기술에 활용(선행특허 "그라우트 양생 장치" 확보):** 매입말뚝 지지력 조기 확보를 위한 시멘트 풀 고용양생에 활용, 조기강도 확보, 비용절감

○ 후속연구 및 현장적용 방안

- 2년 동안의 원천기술 개발 과정을 통하여 과제 초기 유도가열이용 콘크리트양생 개념 정립, 유도가열 전자장, 열해석 시뮬레이션 구축, 콘크리트양생 관련 문헌 및 자료 분석, 콘크리트 강도 측정 프로세스 정립 등 TRL 1,2 단계에 해당하는 기초 개념 수립을 완료하였음. 또한,

정립된 기술 개념을 적용하기 위하여 실험실 환경에 적용 가능한 소형 거푸집을 이용하여 유도가열 시스템 프로토타입 개발, 실험실 환경내 온도제어 기술 개발, 실험실 환경 내 코일 최적화 및 차폐 기술 개발, 발열양생 콘크리트의 성능평가 기술 개발, 유도가열 콘크리트의 발열성능 향상기술 개발 등 TRL 3, 4 단계 기술까지 성공적으로 수행하였음.

- 제안된 고효율 급속양생 기술의 성공적인 신기술 인증 및 상용화를 위하여 추가되어야 하는 기술 개발은 상용 거푸집에 적용 가능한 기술 개발 임. 특히 실제 토목·건축 환경에서의 다양한 환경변수를 고려한 실험 및 각각의 현장 맞춤형 기술 개발을 통해 상용화가 가능할 것으로 판단됨.
- 상기의 과정을 통해 유도가열 기반의 발열양생 공법에 대한 신기술인증 및 사업화 추진이 원활히 진행될 것으로 판단됨.
- 아래 그림은 본 제안 기술의 성공적인 상용화를 위하여 필요한 기술 개발 단계를 나타냄.



붙임. 참고문헌

1. American Concrete Institute (1988). ACI 306R-88: Cold Weather Concreting.
2. Kim, D. J., Choi, Y. S., Jeong, H. J., Shin, H. O., Ahn, C. H. (2020) Analysis of temperature distribution of mold for curing concrete based on induction heating. The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.34, pp.16-23.
3. Kim, Y.J., Kim,K.H., and Shin, D.C. (2002) Electromagnetic indirect induction fluid heating system using series resonant PWM inverter and its performance evaluations. The Transactions of The Korean Institute of Power Electronics, Vol.7, No.1, pp.48-53.
4. Koh, K. T., Cheong, H, M., Yoon, G. W. and Lee, J. H., “Properties of Concrete to Curing Temperature,” Korea Concrete Institute, Vol. 17, No. 1, pp. 22-27, 2005.
5. Koh, T., Moon, D., Bae, J., and Yoo, J. (2016) Compressive strength development model for concrete cured by microwave heating form. Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.27, pp.669-676.
6. Koh, T., Hwang, S., Moon, D., Yoo, J., Song, J., and Ko, J. (2014) Early strength development of concrete cured with microwave heating form. Journal of the Korean Society for Railway, Vol.17, pp.365-372.
7. Korea Concrete Institute (2015). KCI PM303.1-15: Concrete Curing.
8. Korea Standards Association (2010). KS F 2405: Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete.
9. Kwak, I.G., Byun, J.K., Choi, K., and Hahn, S.Y. (2000) Optimal design of the induction heating coil using transient design sensitivity analysis. The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers B. Vol.49, No.5, pp.327-337.
10. Lee, J. B., Kim, K. T., Ahn, C. H., Back, J. H. and Shin, H. O. (2019) Compressive Strength of Heat-Cured Concrete based on Induction Heating. KOREAN SOCIETY OF HAZARD MITIGATION, Vol. 19, No. 7, pp. 331-337, 2019.
11. Leung, C. and Pheeraphan, T. (1995) Very high early strength of microwave cured concrete. Cement and Concrete Research, Vol.25, pp.136-146.
12. Makul, N., Rattanadecho, P., and Agrawal, D. K. (2014) Applications of microwave energy in cement and concrete - A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.37, pp.715-733.
13. Mehta, P.K. and Monteiro, P. J. (2006). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials.
14. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016). Concrete Standard Specification.
15. National Radio Research Agency (2019). Electro Magnetic Compatibility.
16. Neelakantan, T. R., Ramasundaram, S., Shanmugavel, R., and Vinoth, R. (2013) Prediction of 28-day compressive strength of concrete from early strength and accelerated curing parameters. International Journal of Engineering & Technology, Vol.5, pp.1197-1201.
17. Neville, A. M. (1995). Properties of concrete (Vol. 4). London: Longman.
18. Prommas, R. and Rungsakthaweekul, T. (2014) Effect of Microwave curing conditions on high

strength concrete properties. Energy Procedia, Vol.56, pp.26-34.
19. Shin, D.C. and Woo, H.G. (2012) A Study on the electrical fan heater using high efficiency induction heating. Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.26, No.3, pp.24-30.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.

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

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

210㎜×297㎜[백상지(80g/㎡) 또는 중질지(80g/㎡)]