19CTAP
-C151889
-01

고전도 초고성능 콘크리트를 이용한 400도 이상의 열사이클 조건에서의 열저장 기술개발 최종보고서

2020

국토교통부 국토교통과학기술진흥원

보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개( ), 비공개( )발간등록번호()

국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

R&D / 19CTAP-C151889-01

고전도 초고성능 콘크리트를 이용한 400도 이상의 열사이클 조건에서의 열저장 기술개발 최종보고서

2020. 12. 31.

주관연구기관 / 군산대학교산학협력단

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

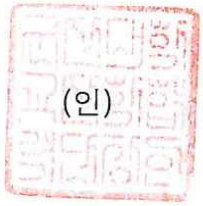
제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

'고전도 초고성능 콘크리트를 이용한 400도 이상의 열사이클 조건에서의 열저장 기술개발 '(연구개발 기간 : 2019.04.15. ~ 2020.12.31.) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2021. 1. 11.

주관연구기관명 : 군산대학교산학협력단 김영철 (인)



주관연구기관책임자: 양인환

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>19CTAP-C151889-01</td><td>해당 단계 연구 기간</td><td>2019.04.15-2020.12.31</td><td>단계구분</td><td>2/2</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">국토교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4">고전도 초고성능 콘크리트를 이용한 400도 이상의 열사이클 조건에서의 열저장 기술개발</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">양인환</td><td>해당단계 참여연구원 수</td><td>총:8 명
내부:8 명
외부: 0 명</td><td>해당단계 연구비</td><td>정부:200,000 천원
민간: 천원
정부외: 천원
상대국: 천원
계: 200,000 천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간 참여연구원 수</td><td>총:15 명
내부:15 명
외부: 0 명</td><td>총 연구비</td><td>정부:360,000 천원
민간: 천원
정부외: 천원
상대국: 천원
계: 360,000 천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및 소속 부서명</td><td colspan="3">군산대학교산학협력단</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>
</table>

※ 국내・외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	본 연구과제는 400℃ 고온의 태양열 에너지를 저장하기 위한 고전도 섬유보강 콘크리트 현열 저장장치 기술개발에 활용하기 위한 것으로, 연구과제 보안등급의 분류상 일반과제로 분류하는 것이 합당함.

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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설・장비 현황

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

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

연구의 목적 및 내용	○ **연구목적** • 400도 이상 극한 열사이클(thermal cycling) 조건에서 열저항 성능을 갖는 고전도 섬유보강 초고성능 콘크리트 고체 매체를 활용한 고온 태양열 저장 기술 개발 ○ **연구내용** • 고온의 충열(charging)과 방열(discharging) 극한환경 조건에서 적용하기 위한 고전도 초고성능 콘크리트 제조기술 연구 • 고전도(high-thermal conductivity) 초고성능 섬유보강 복합 건설재료를 활용하는 고온 열에너지 저장을 위한 콘크리트 최적 배합기술 개발 • 400℃ 이상 고온의 열사이클(thermal cycling) 조건의 성능평가실험 및 분석 • 고온 열사이클 조건에서의 고전도 초고성능 콘크리트의 열적 특성을 파악 • 열사이클 조건에서의 고전도 섬유보강 기반 콘크리트의 강도 특성을 파악 • 고전도 초고성능 섬유보강 콘크리트 고체 열저장 매체를 이용한 현열 저장 기술 개발 • 고체 열저장 콘크리트 블록 모듈 장치 제작 및 모듈 장치의 열전달 성능평가
연구개발성과	• 고전도 초고성능 콘크리트의 최적의 PP섬유량=2kg/m^3 및 강섬유 혼입량 = 1.0, 1.5, 2.0%에서의 열적 성능 및 강도성능을 확인함. • 400도 이상 온도 범위에서의 콘크리트 열사이클 가열시험 기법 구축 • 고온 조건에서의 반복 열사이클에 따른 콘크리트의 역학적 특성과 열적 특성을 파악 • 콘크리트의 축열과정을 모사하는 온도상승 및 방열단계를 모사하는 온도하강단계를 적용한 고온 열싸이클에 따른 콘크리트의 열적 특성을 면밀히 분석 • 강섬유 보강 초고성능 콘크리트의 고온 열싸이클에 따른 압축강도 및 인장강도 특성을 확인함. • 고온 열싸이클에 따른 콘크리트의 열전도율 및 비열 성능을 분석함. • 콘크리트 블록 가열시험을 수행하여 열전달 특성을 분석함. • 콘크리트의 재료특성에 따른 열용량 성능 분석 기법을 개발.
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	• 태양열 에너지 저장용 콘크리트 저장 매체에 대한 원천기술 개발을 통한 세계 수준의 기술적 토대 마련 • 고전도 고성능 콘크리트 활용 태양 열저장 장치의 새로운 방안 도출에 따른 고부가가치 건설 인프라 설계 기술력 확보 • 신재생 에너지 내수시장 창출과 확대로 대규모 신규투자를 유도하고 일자리 확대를 기대 • 태양열 산업 투자 활성화에 따른 새로운 비즈니스 모델 출현

핵심어 (5개 이내)	태양열 에너지	열저장	초고성능 콘크리트	고열전도	현열
영문핵심어 (5개 이내)	solar energy	thermal storage	ultra-high- performance concrete	high-thermal conductivity	sensible heat

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 6
가. 연구개발 목적 ····· 6
나. 연구개발의 필요성 ····· 7
다. 연구개발의 범위 ····· 8
2. 연구수행내용 및 성과 ····· 9
가. 1차년도 연구수행내용 및 성과 ····· 9
(1) 고온 현열 저장용 초고성능 콘크리트 제조 ····· 9
(가) 사용재료 및 제조개념 ····· 9
(나) 고온 현열 저장용 초고성능 콘크리트 배합 ····· 10
(다) 고온 현열 저장용 초고성능 콘크리트의 작업성능 ····· 13
(2) 고온 축열 및 방열 모사를 위한 열사이클 특성 ····· 13
(가) 고온 조건 열사이클 모델링 ····· 13
(나) 고온 열사이클 조건 초고성능 콘크리트의 특성 ····· 16
(다) 고온 열사이클 조건 축열 콘크리트의 미세구조 분석 ····· 17
(3) 열사이클 조건 초고성능 콘크리트의 역학 특성 ····· 22
(가) 단위중량 ····· 22
(나) 압축강도 ····· 26
(다) 쪼갬인장강도 ····· 28
(라) 초음파속도 ····· 30
(4) 열사이클링 조건 초고성능 콘크리트의 열특성 ····· 34
(가) 열전도율 ····· 34
(나) 비열 ····· 39
(5) 축열 모듈 장치 성능 평가 ····· 42
(가) 축열 블록 제작 ····· 42
(나) 열전달 파이프 설정 계측 계획 ····· 44
(다) 온도 분포 계측 설정 ····· 45
나. 2차년도 연구수행내용 및 성과 ····· 47
(1) 고온 현열 저장용 고전도 초고성능 콘크리트 제조 ····· 47
(가) 사용재료 ····· 47
(나) 고전도 초고성능 콘크리트 배합 및 제작 ····· 48
(다) 고전도 초고성능 콘크리트 작업성능 ····· 52
(라) 실험 절차 ····· 53
(2) 고온 축열 및 방열 모사를 위한 열사이클 특성 ····· 54
(가) 고온 조건 열사이클 모델링 ····· 54
(나) 고온 열사이클 조건 고전도 초고성능 콘크리트 특성 ····· 56
(다) 고전도 초고성능 콘크리트의 미세구조 분석 ····· 57
(3) 열사이클링 조건 고전도 초고성능 콘크리트의 역학 특성 ····· 70
(가) 단위중량 ····· 70
(나) 압축강도 ····· 75
(다) 쪼갬인장강도 ····· 81

(라) 초음파속도 ····85
(4) 열사이클링 조건 고전도 초고성능 콘크리트의 열 특성 ····90
(가) 열전도율 ····90
(나) 비열 ····97
(5) 고전도 초고성능 콘크리티의 역학특성과 열특성 상관관계 분석 ····102
(가) 압축강도와 물리적 특성 상관관계 ····102
(나) 열전도율과 물리적 특성 상관관계 ····102
(다) 열전도율과 압축강도 관계 ····105
(6) 고전도 초고성 콘크리트의 축열 및 방열 효율성 평가 ····107
(가) 열전도율에 따른 열성능 특성 평가 ····107
(나) 콘크리트 축열 블록 유한요소해석 모델링 ····108
(다) 열전달계수의 변화에 따른 수치해석 결과 ····111
(라) 열전도율 변화에 따른 콘크리트 블록 열에너지 변화량 ····112
(7) 고전도 초고성능 콘크리트 축열 모듈 장치 성능평가 ····117
(가) 고전도 초고성능 콘크리트 축열 블록 제작 ····117
(나) 열전달 파이프 상세 ····121
(다) 고온 열사이클 시뮬레이션 ····122
(라) 콘크리트 축열 블록 가열 방법 및 온도 계측 설정 ····125
(마) 고전도 초고성능 콘크리트 모듈의 열전달 및 축열 ····128
(8) 고전도 초고성능 콘크리트 축열 모듈 장치의 열전달 평가 기법 ····154
(가) 콘크리트 블록의 열전달 수치해석 ····154
(나) 열전달 수치해석 결과 ····158
(다) 수치해석 결과와 측정 결과의 적합성 ····162
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····166
가. 목표 달성도 ····166
(1) 성과점검기준 ····166
(2) 양적성과현황 ····166
(3) 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등) ····167
(가) 목표 미달성 원인 ····167
(나) 추가 연구의 필요성 ····167
나. 관련 분야 기여도 ····167
(1) 기술적 측면 ····167
(2) 경제적·산업적 측면 ····168
(3) 사회적 측면 ····168
4. 연구개발성과의 활용 계획 등 ····169
가. 태양열 열에너지 저장 활용방안 ····169
나. 저비용 고효율 열에너지 저장 콘크리트 모듈 시스템 실용화 ····169
다. 태양열 발전 이외의 분야에서의 연구개발성과의 주요 활용방안 ····170
라. 핵심 지식재산권(특허, 프로그램 등) 활용과 실제 현장 또는 제품화에 관계된 기업(건설사, 관공사, 지자체 등) 등에 협력관계 및 기술이전 ····171
붙임. 참고 문헌 ····172

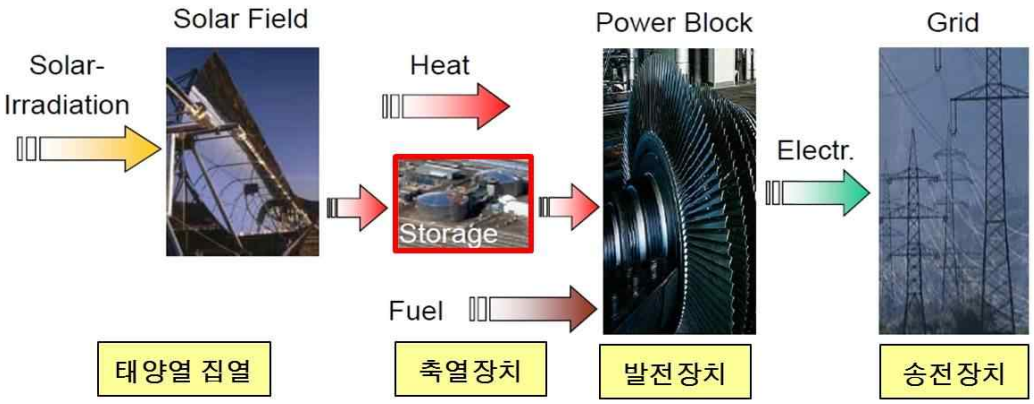
<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

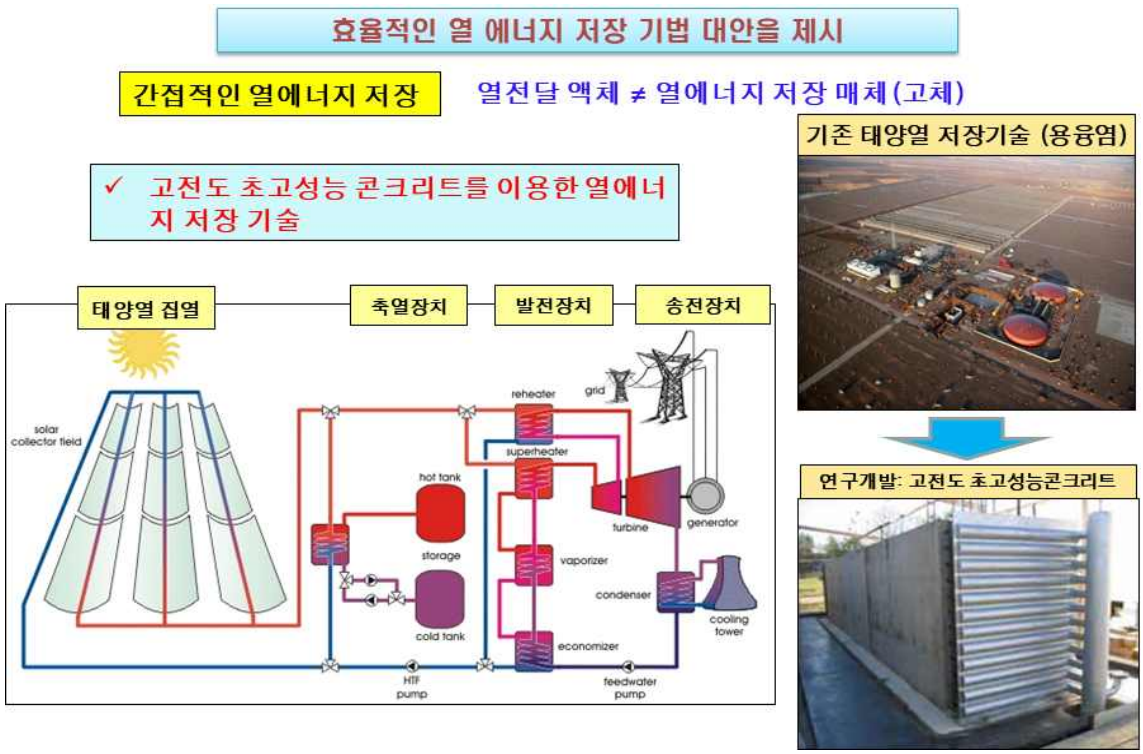
1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발 목적

구분	내용
최종 목표	• 400℃ 이상의 태양열 고온 열에너지를 저장하기 위한 고전도 초고성능 섬유보강 콘크리트 복합재료를 이용한 현열 저장장치 기술 개발
세부 목표	• 400℃ 이상의 고온의 열에너지를 효율적으로 저장하기 위한 최적의 무기 계열 복합재료 제조 및 배합 기술개발 • 초고성능 콘크리트 복합재료를 이용한 현열 저장 형태의 고온 축열 기술개발 및 성능평가

□ 태양열 발전은 계절과 시간에 따른 태양열 에너지를 변화를 고려한 집열 기술과 축열 기술이 핵심 기술임.





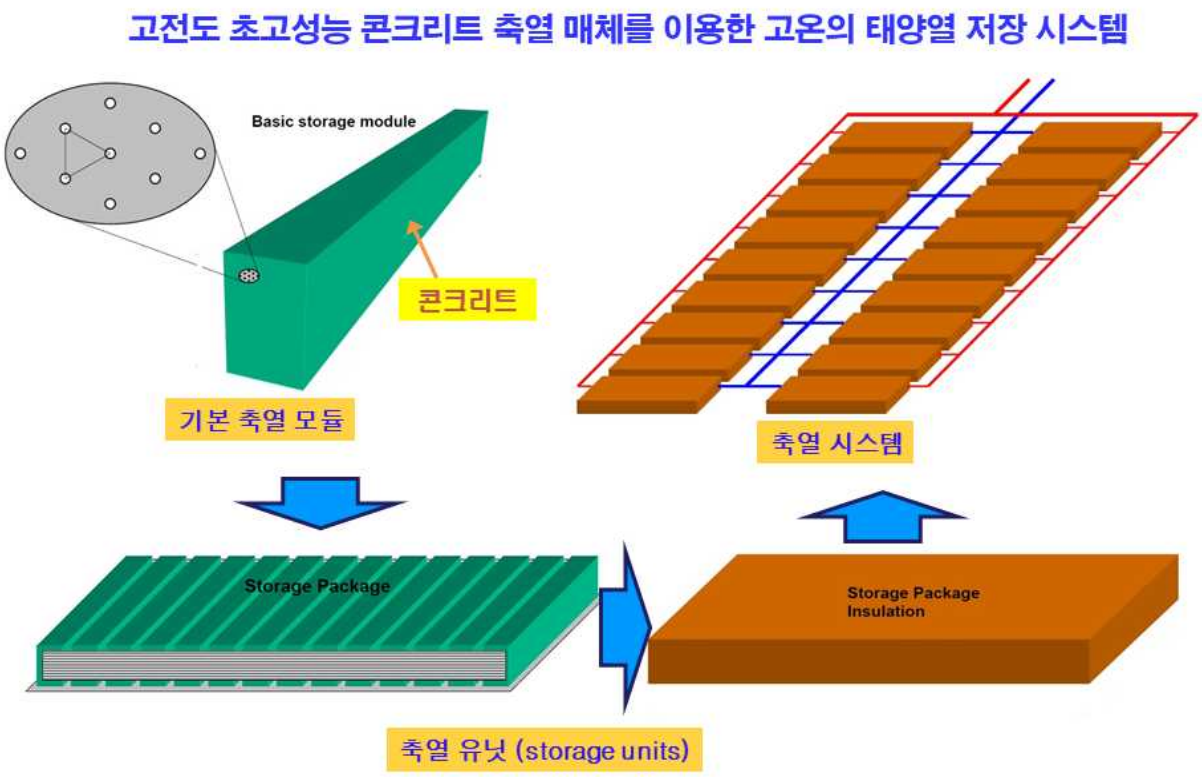
나. 연구개발의 필요성

□ 태양열 발전은 통상 300℃ 이상의 열을 이용하는 고온 태양열 이용 기술로서 집열장치를 집열한 태양열을 이용하여 고압 수증기를 발생시켜 발전기를 구동하는 방식.

- 태양열 발전은 상대적으로 경제성이 높아 대규모 발전에 적합하다고 평가됨.
- 태양열 발전 실용화를 위한 핵심기술은 저비용 · 고효율의 태양열에너지 저장 기술임
- 대규모 태양열 발전에 활용할 수 있는 고성능 콘크리트 복합재료를 이용한 저비용 · 고효율 축열 저장시스템이 세계적인 주목을 받고 있음.
- 따라서, 고전도 초고성능 콘크리트를 열에너지 저장 매체로써 활용하기 위한 기초연구가 절실히 필요하며, 특히 다음 내용의 연구가 필요함.

□ 강섬유로 보강한 초고성능 콘크리트는 우수한 강도와 내구성을 나타내며, 열전달에 유리한 장점을 보유하므로 고온의 열사이클 적용 조건 열저장 매체로서의 특성 분석

- 열에너지를 저장하기 위해 콘크리트가 저장 매체로써 요구되는 성능을 확보해야 하며, 이에 물리적, 역학적, 열적 및 미세구조 특성 분석
- 고온 축열용 콘크리트 블록을 제작하여 열전달 성능 및 열에너지 분석을 수행 필요



다. 연구개발의 범위

□ 고전도 초고성능 섬유보강 복합 건설재료를 활용하는 고온 열에너지 저장을 위한 콘크리트 제조용 바인더 특성 분석

□ 고온의 축열(charging)과 방열(discharging) 극한환경 조건에서 적용하기 위한 복합재료를 이용한 콘크리트 제조기술 연구

□ 400℃ 이상의 고온에서의 열사이클(thermal cycling) 실험 수행 및 성능평가

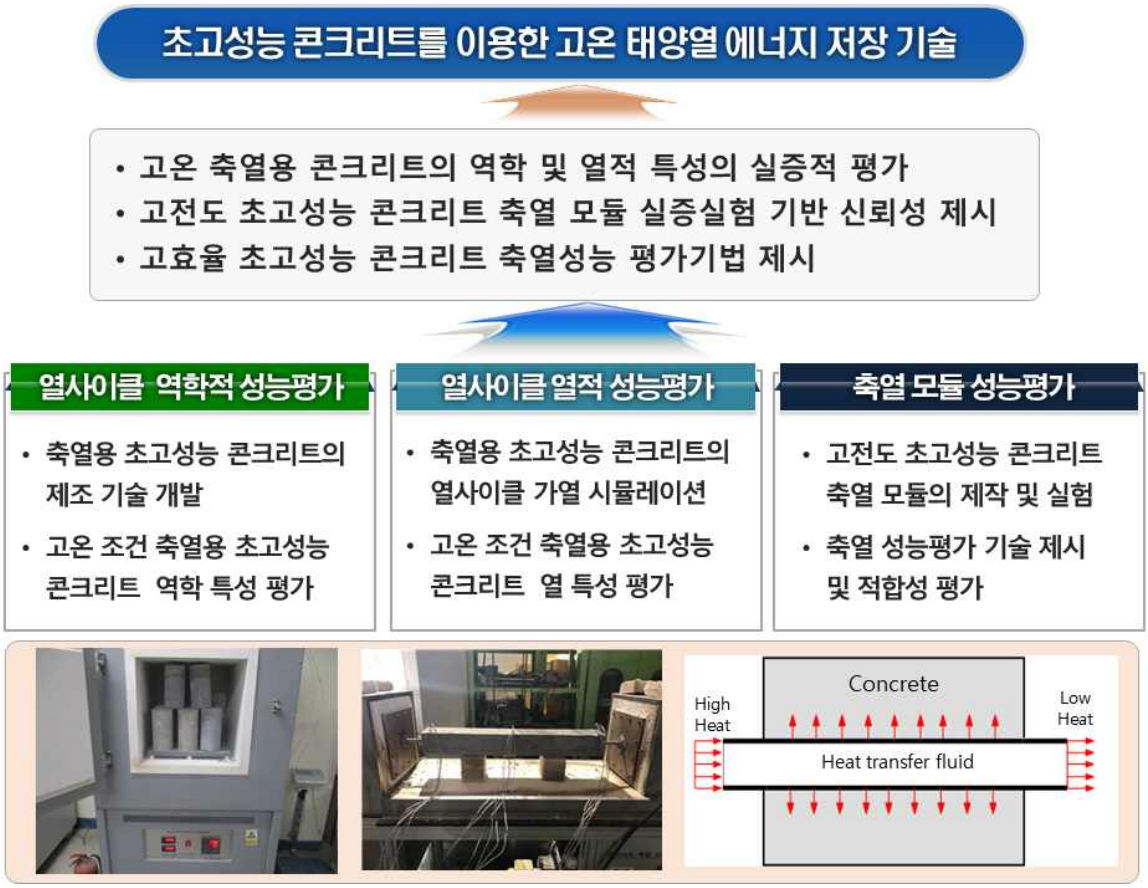
□ 현열 저장용 고전도 초고성능 복합 재료 기반 콘크리트의 역학 성능 평가

□ 열사이클 조건에서의 고전도 섬유보강 기반 콘크리트의 열적 특성 변화 연구

□ 고전도(high-thermal conductivity) 섬유보강 콘크리트 고체 매체를 이용한 현열 저장 모듈의 열저장 성능 실험

□ 고체 열저장 모듈 유닛(unit)장치 모델링 및 모듈 장치의 열전달 성능평가기술 개발

□ 열저장 실험결과와 열저장 성능평가결과와의 적합성 분석



2. 연구수행내용 및 성과

가. 1차년도 연구수행내용 및 성과

(1) 고온 현열 저장용 초고성능 콘크리트 제조

(가) 사용재료 및 제조개념

□ 배합에 사용된 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트이며, 반응성 분체로 지르코늄을 사용

▪ 지르코늄은 OPC에 비해 단위밀도가 높아 고전도 초고성능 콘크리트를 제조하기 위한 배합 패킹이론(packing theory) 관점에서 유리함. 지르코늄 혼입에 따라 공극률 감소가 가능하고, 단위중량 증가 및 이에 따른 열전도율 향상이 기대됨.

□ 잔골재는 성능 변동성을 최소화하기 위하여 입도 0.5 mm 이하의 모래를 사용

□ 사용되는 충전재(filler)는 구성 입자들의 평균 크기가 4 μm정도이고 SiO_2 96% 이상, 밀도 2.60 g/cm^3의 재료를 사용

□ 강섬유의 밀도는 7,500 kg/cm^3, 인장강도는 2,500 MPa이며, 섬유 직경은 0.2 mm, 길이 16.5 mm의 직선 형상의 강섬유를 적용

▪ 강섬유 적용에 따라 고온에서의 고전도 초고성능 콘크리트의 인장강도와 연성능력 증대가 기대됨. 특히, 고온에서 콘크리트는 높은 열응력(thermal stress)에 의한 인장균열 가능성이 크므로 높은 인장강도 발현이 필요하며, 강섬유 혼입은 인장강도를 증가시킴.

□ 폴리프로펠렌 섬유(polypropylene fiber)는 콘크리트가 고온에 노출되었을 때 나타나는 폭렬 현상을 방지하기 위한 보강 섬유로써 지름은 21 ㎛, 비중은 0.91, 길이는 12.7 mm이며, 인장강도는 400 MPa

□ 그림 2.1에 배합에 사용된 강섬유와 폴리프로필렌 섬유를 나타냄



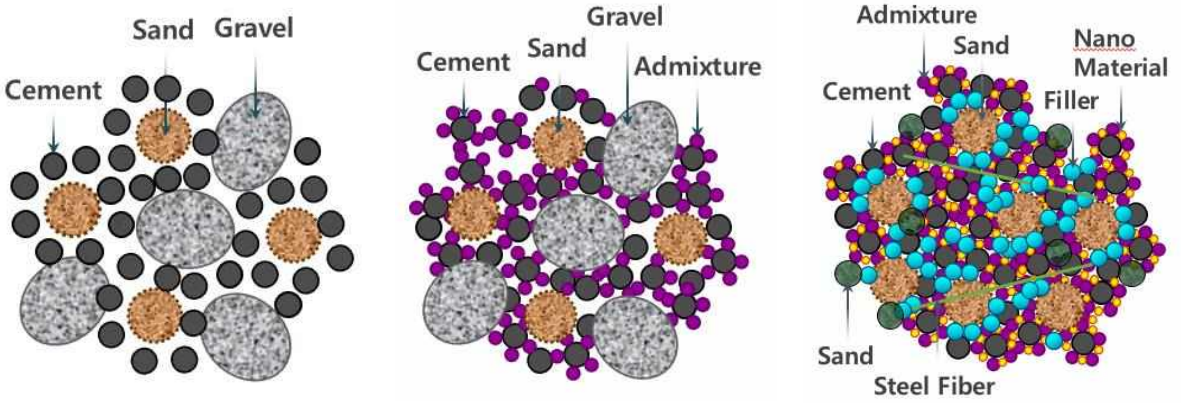
(a) 강섬유 (b) 폴리프로필렌 섬유(PP 섬유)

그림 2.1. 콘크리트에 적용된 섬유 형상

□ 초고성능 콘크리트는 미세 공극과 균열 등의 내부구조 결함을 최소화하고, 복합재료로서 구성재료가 갖는 특성을 최대한 발휘하여 재료성능을 극대화하는 개념에 근거하여 배합한다(그림 2.2).

□ 이를 위해 굵은 골재를 제거하여 골재의 자체와 골재와 바인더 사이의 계면부착영역(ITZ, interfacial transition zone)에서 기인하는 결함 유발 가능성을 최소화한다.

□ 초고성능 콘크리트 내부 구조는 패킹 모델(packing model)을 이용하여 최적화하고자 하였다.



(a) 보통 콘크리트 (b) 고성능 콘크리트 (c) 초고성능 콘크리트

그림 2.2. 초고성능 콘크리트의 제조 개념

표 2.1. 고전도 초고성능 콘크리트 배합표

배합	W/B (%)	단위중량 (kg/m^3)						섬유 혼입량	
		W	OPC	Zr	BFS	F.A	F	강섬유 (%)	PP섬유 (kg/m^3)
1	0.22	209	770	58	135	847	231	1.0	2.0
2	0.22	209	770	58	135	847	231	1.5	2.0
3	0.22	209	770	58	135	847	231	2.0	2.0

W: 배합수(water), B: 바인더(binder), OPC: 보통 포틀랜드 시멘트(ordinary portland cement), Zr: 지르코늄(zirconium), BFS: 고로슬래그, FA: 잔골재(fine aggregate), F: 필러(filler)

(나) 고온 현열 저장용 초고성능 콘크리트 배합

□ 콘크리트를 고체 현열 저장 매체로 적용하기 위해서는 콘크리트의 구성 성분에 대한 최적의 선택 및 배합기술이 필요하며, 이에 관한 충분한 기초연구가 필요함(그림 2.3).

□ 굵은 골재를 사용하지 않고, 콘크리트 부피비 1.0, 1.5 및 2.0%의 강섬유를 혼입하여 제작

□ 콘크리트가 고온에 노출되었을 때, 발생하는 폭렬 현상을 방지하기 위하여 PP 섬유를 2kg/m^{3}을 적용

□ 물-결합재 비(W/B)는 0.22를 적용하였고, 낮은 물-결합재 비에 의한 비빔 작업성을 확보하기 위하여 밀도 1.01 g/cm^3의 폴리카르본산계 고성능 감수제를 사용



그림 2.3. 고온 열에너지 저장을 위한 초고성능 콘크리트의 요구성능

□ 배합은 다음과 같은 순서로 수행

- 1 단계: 잔골재, 시멘트, 지르코늄, 고로슬래그, 플라이애시, PP 섬유를 믹서 속도 1단으로 5~10분간 건비빔 실시
- 2 단계: 1단계 건비빔 후, 배합수와 혼화제 투입하여 재료가 골고루 섞여 풀리는지 확인
- 3 단계: 풀림이 확인된 후, 믹서 속도 3단으로 변경하여 1분간 비빔
- 4 단계: 3단계 비빔 후, 믹서 속도 1단으로 변경하여 강섬유 투입
- 5 단계: 믹서 속도 3단으로 변경하여 2분간 비빔 실시 후 배합 종료

□ 고전도 콘크리트의 배합표를 표 2.1에 나타내었으며, 그림 2.4에 배합과정을 나타냄



(a) PP섬유 투입



(b) 건비빔 실시



(c) 배합수+혼화제 투입



(d) 강섬유 투입



(e) 배합완료



(f) 시편 제작 완료

그림 2.4. 고전도 초고성능 콘크리트 배합과정

(다) 고온 현열 저장용 초고성능 콘크리트의 작업성능

□ 초고성능 콘크리트 믹싱 시에 강섬유 및 P.P 섬유 혼입으로 인한 비빔 작업성능이 감소할 가능성이 있으므로 충분한 비빔성능을 확보하여야 한다.

□ 콘크리트의 작업성능 향상을 위한 배합 순서 및 과정이 중요한 요소

- 강섬유와 P.P 섬유를 배합 순서 및 과정에 관계없이 혼입하여 배합을 할 경우, 섬유 뭉침 현상이 발생
- 섬유가 뭉쳐 시편이 제작될 경우, 고온 현열 저장용 초고성능 콘크리트의 성능을 감소시킬 우려가 있음.
- 이에 P.P 섬유는 건비빔 단계에 건재료와 혼입하여 재료 간에 골고루 혼합될 수 있도록 설정
- 상대적으로 고인성 및 고강성을 갖는 강섬유는 P.P 섬유 및 건재료가 배합수 및 혼화제와 섞여 유동성을 갖는 재료 상태 단계에서 혼입하여 적절한 분산성을 갖도록 하였다.

□ 그림 2.5에 배합이 완료된 후 시편 단면을 절단한 면을 나타냄. 콘크리트 내에 섬유가 적절히 분산되어 있는 것을 육안으로 확인하였다.



그림 2.5. 단면내 섬유 분포 형상

(2) 고온 축열 및 방열 모사를 위한 열사이클 특성

(가) 고온 조건 열사이클 모델링

□ 태양열 에너지는 낮 시간대에 태양으로부터 열에너지를 축열하고, 밤 시간대에 저장된 열에너지를 방열하여 에너지를 사용하는 구조로 이루어짐.

- 낮 시간대와 밤 시간대에 최대 및 최소 온도로 반복되는 열사이클 과정이 적용되어야 함.
- 해외문헌조사 결과, 집광형 태양열 발전소의 집광장치에서 축열장치로 유입되는 열전달 유체의 온도는 300~390℃를 나타냄. 따라서, 본 연구에서는 고온 열사이클 온도 조건을 400℃ 이상으로 제시하였음.

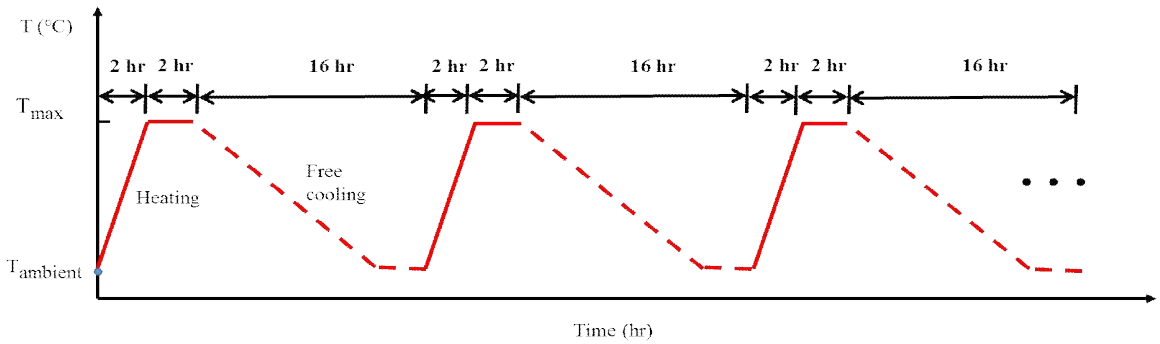
□ 고온용 소성로(그림 2.6의 (b))를 이용하여 최대온도 조건 300, 400 및 500℃의 3가지

목표 온도를 설정하고, 열사이클을 적용함.

- 상온에서 2시간 동안 최대 목표 온도까지 가열, 최대 목표 온도에서 2시간 동안 유지, 최대 목표 온도에서 상온까지 16시간 동안 냉각하는 열사이클을 설정하여 총 6회 적용하였으며, 그림 2.6의 (a)에 도시화한 그림을 나타냄

□ 가열온도와 시편 내부의 온도를 비교하기 위하여 온도 센서(thermo couple)를 매립하여 측정을 수행하였으며, 온도측정결과를 그림 2.7에 나타냄

□ 최대 목표 온도까지 상승 구간에서 가열되는 챔버 내부 온도와 콘크리트 시편 중심부 온도와의 차이는 약 50℃로 측정되었으며, 유지되는 구간에서 최대 목표 온도까지 도달한 것을 확인

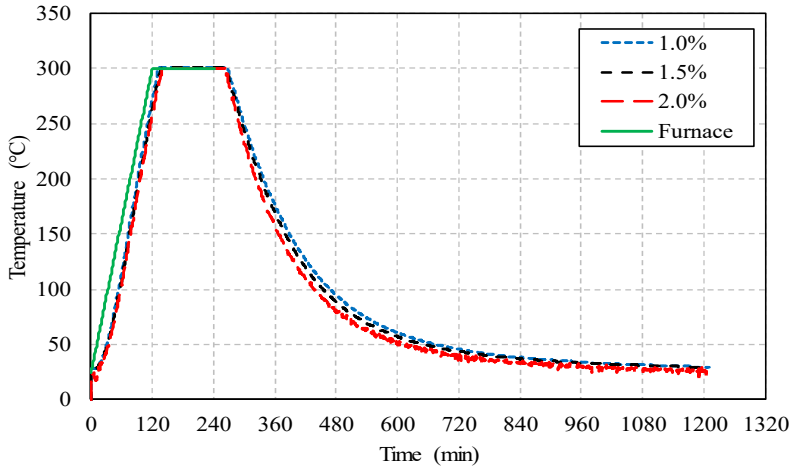


(a) 열사이클 설정

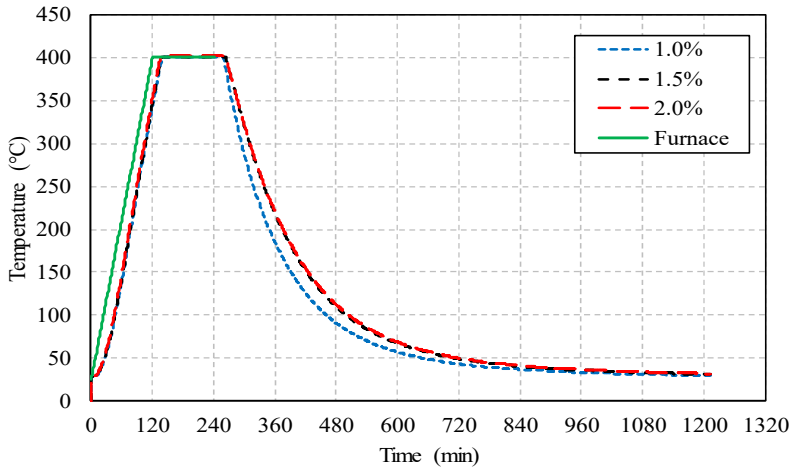


(b) 고온 소성로

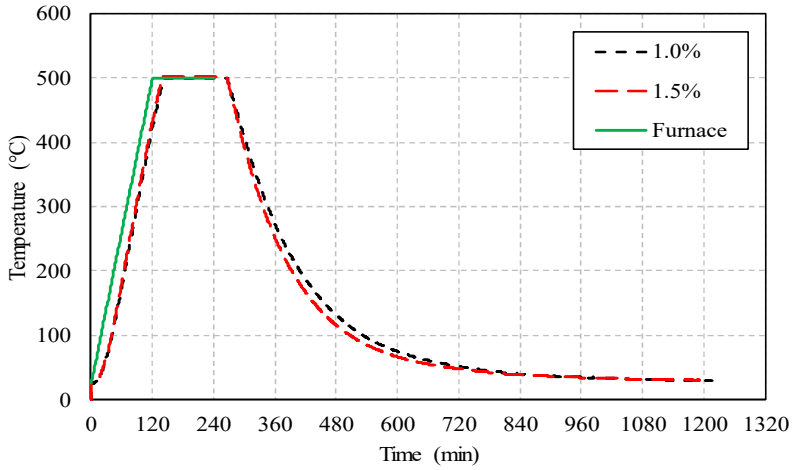
그림 2.6. 열사이클 과정



(a) 300℃ 열사이클 적용



(b) 400℃ 열사이클 적용



(c) 500℃ 열사이클 적용

그림 2.7. 시편 중심부의 열사이클 곡선

(나) 고온 열사이클 조건 초고성능 콘크리트의 특성

□ 콘크리트가 고온에 노출될 경우, 콘크리트 내부에 존재하는 수분은 기화하여 팽창됨. 팽창이 거듭될수록 최종적으로 콘크리트 폭렬 현상이 발생

□ 폭렬 현상의 미시적 매커니즘은 다음과 같음

- 고온에 노출된 콘크리트에 열이 내부로 전달되는 단계
- 콘크리트 내부에 함유된 수분이 수증기로 변화하면서 팽창하고 공극의 압력이 증가하는 단계
- 과도한 공극 내압으로 인하여 콘크리트 내에서부터 폭렬이 발생함.

□ 콘크리트 강도가 고강도일수록 콘크리트 내부 공긍이 작아 폭렬 현상이 증가할 가능성이 존재한다.

□ 폭렬 현상을 효과적으로 방지할 수 있는 P.P 섬유를 혼입

- 선행되었던 연구들에서 단위배합당 P.P 섬유량 2kg/m^3 혼입 시, 효과적으로 폭렬 현상을 방지할 수 있는 것으로 나타남.
- 본 연구에서는 모든 배합에 P.P 섬유량을 2kg/m^3을 혼입하였으며, 고온의 열사이클 적용 후에 폭렬 현상은 나타나지 않음

□ 고온 열사이클 후에는 보통 콘크리트의 경우, 시편 표면에 균열이 다수 발생함.

- 반면에, 본 연구의 고전도 초고성능 콘크리트는 미세균열의 거의 발생하지 않는다(그림 2.8). 이는 P.P 섬유뿐만 아니라 강섬유 혼입이 고온 열사이클 조건에서 초고성능 콘크리트의 균열 발생 억제에 효과적인 역할을 한 것을 의미한다.



(a) 열사이클 적용 전 (b) 열사이클 적용 후

그림 2.8. 열사이클 적용 전과 후의 시편 표면 상태

(다) 고온 열사이클 조건 축열 콘크리트의 미세구조 분석

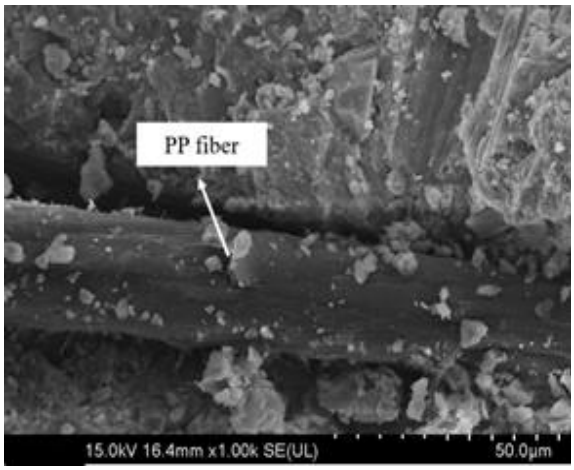
① 미세구조 분석(SEM)

□ 최대온도 조건에 따른 영향을 분석하기 위하여 SEM 촬영을 수행하였으며, 그림 2.9에 나타냄.

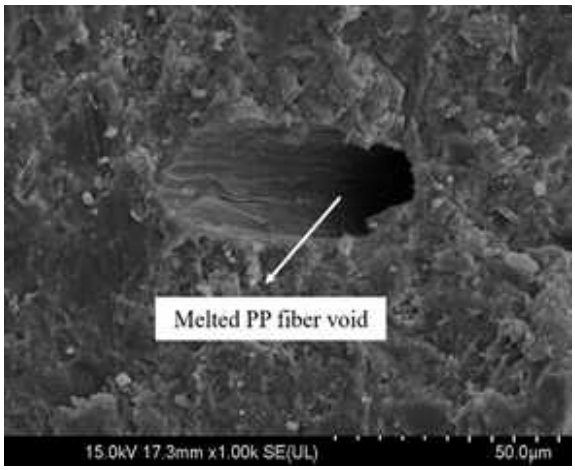
□ 최대온도 조건 25℃에서 PP섬유가 관찰되었으나, 최대온도 조건 300, 400 및 500℃에서 PP섬유가 존재하던 자리는 녹아서 공극을 형성하고 있음을 확인

□ PP섬유가 녹음으로써 콘크리트의 폭렬 방지에 기여하는 부분도 있으나, 이러한 공극은 콘크리트 내에 존재하는 수분이 이동할 수 있는 통로 역할을 함으로써 수분 증발을 촉진시키고, 동시에 고전도 콘크리트의 성능 저하의 원인이 되는 것으로 판단

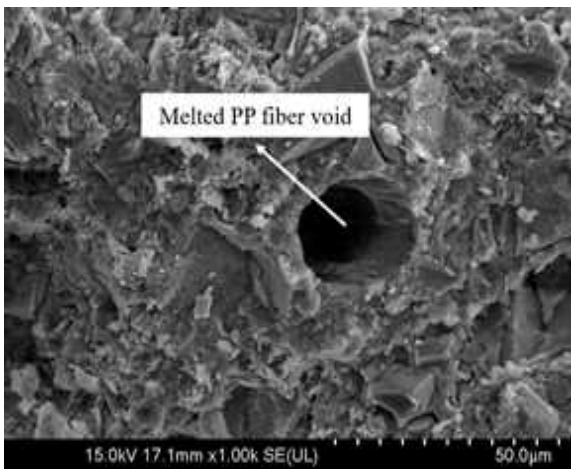
□ 또한, 최대온도 조건이 증가함에 따라 표면의 조직구조에서 미세균열의 양과 크기 등이 증가하는 것을 확인 가능함.



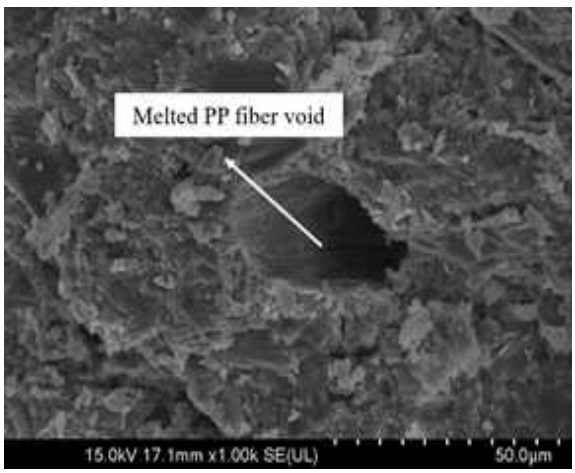
(a) 최대온도 조건: 25℃



(b) 최대온도 조건: 300℃



(c) 최대온도 조건: 400℃



(d) 최대온도 조건: 500℃

그림 2.9. 열사이클 최대온도 조건 별 SEM 분석

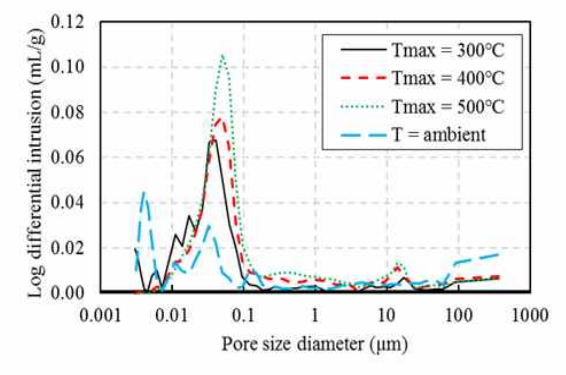
② 공극 특성(MIP)

□ 고온의 열사이클을 수행한 고전도 콘크리트의 공극 특성을 분석하기 위하여 MIP 실험을 수행하였으며, 그 결과를 그림 2.10에 나타냄

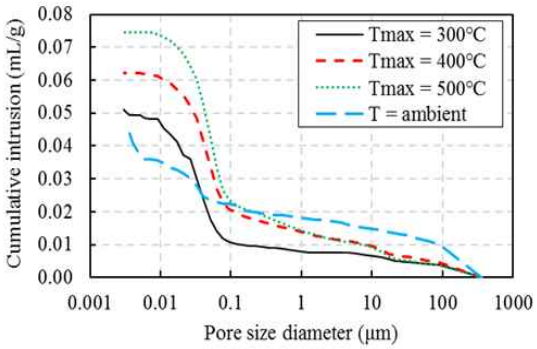
□ 대다수의 공극은 0.01~0.1μm에 존재하는 것으로 나타났으며, 최대온도 조건이 증가함에 따라 누적 공극 부피, 즉, 총 공극 부피가 증가하는 것을 확인

□ 또한, 20 μm 부근의 공극이 최대온도 조건 300, 400 및 500℃에서 점차 증가하는 것으로 나타나며, 이는 21 μm의 직경을 가진 PP섬유가 녹으면서 형성된 공극으로 판단됨.

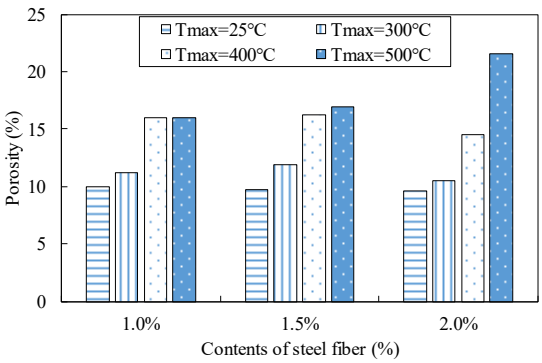
□ 공극 부피의 증가는 곧 공극률의 증가를 의미하며, 최대온도 조건 500℃에서 가장 큰 공극률을 나타냄



(a) 공극 부피 비교



(b) 누적 공극 부피 비교



(c) 공극 부피 비교

그림 2.10. 최대온도 조건별 MIP 결과

③ 열중량 분석 (TGA)

□ 최대온도는 1,000℃, 온도 상승 속도는 10℃/min으로 설정하여 TGA 분석 수행하였으며, 결과 그래프를 그림 2.11~2.13, 온도 구간별 열중량 감소를 표 2.2에 나타냄

□ 대표적으로 강섬유 혼입률 1.0%에서 상온 조건(25℃)의 경우, 0~150℃ 온도 범위에서 모세관수 증발에 의한 7.60%의 급격한 중량 감소를 나타냄

□ 350~450℃ 온도 범위에서 수화생성물인 수산화칼슘의 탈수가 이루어져 1.21%의 중량 감소를 나타냄

- 400℃ 부근에서 중량 감소는 열사이클 적용 최대온도 조건 300, 400 및 500℃에서 각각 1.44, 0.49 및 0.17%로 나타남.
- 이는 400℃ 이상의 열사이클을 수행한 콘크리트의 경우, 수산화칼슘의 대부분이 이미 분해되었음을 의미하며, 콘크리트 성능 저하를 나타냄

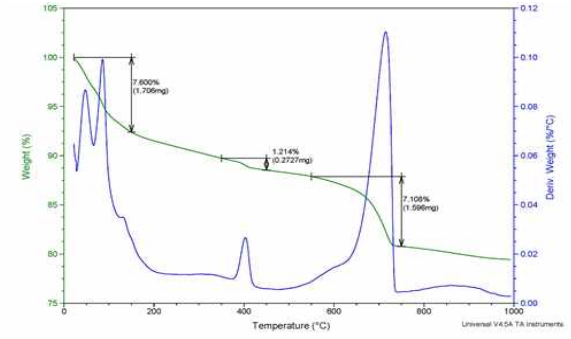
□ 또한, 550~750℃ 온도 범위에서 7.11%의 중량 감소를 나타냈으며, 이는 탄산칼슘의 탈탄산이 원인이라고 분석됨

□ 550~750℃에서 중량 감소는 열사이클 적용 최대온도 조건 300, 400 및 500℃에서 각각 7.17, 8.19 및 7.10%로 나타남.

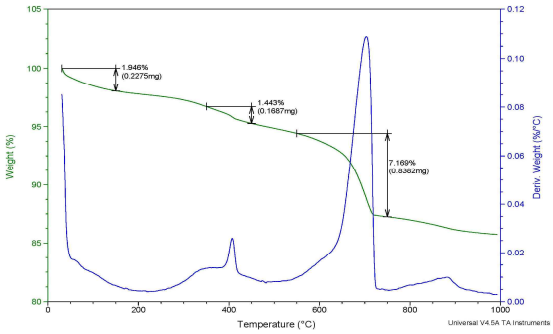
□ 본 연구에서 열사이클을 적용한 최대온도 조건에서 수화생성물인 탄산칼슘의 분해가 온전히 이루어지지 않았음을 의미

표 2.2. 온도구간별 열중량 감소 결과

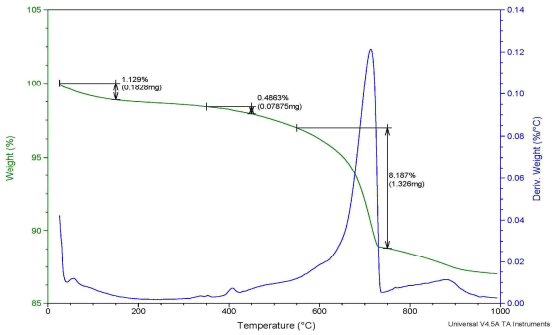
Steel fiber content (%)	Target temperature (℃)	Temperature range (℃)		
		0 ~ 150	350 ~ 450	550 ~ 750
1.0	25 (상온)	7.60	1.21	7.11
	300	1.95	1.44	7.17
	400	1.13	0.49	8.19
	500	0.83	0.17	7.10
1.5	25 (상온)	7.01	1.97	7.02
	300	1.59	1.32	7.19
	400	1.21	0.48	7.44
	500	0.70	0.19	7.32
2.0	25 (상온)	6.53	1.05	7.52
	300	1.59	1.20	7.33
	400	1.14	0.43	7.45
	500	0.98	1.56	7.74



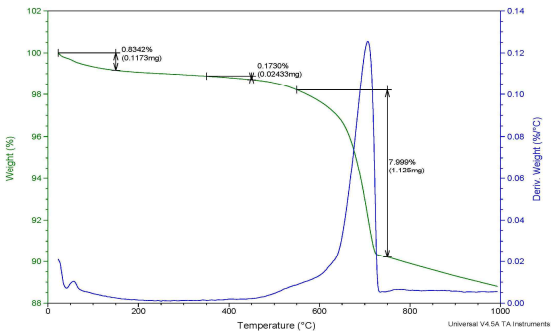
(a) 상온조건: 25℃



(b) 최대온도 조건: 300℃

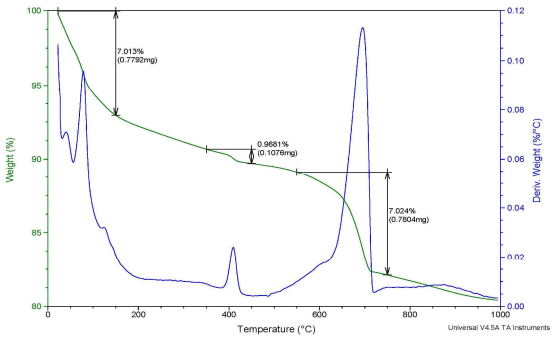


(c) 최대온도 조건: 400℃

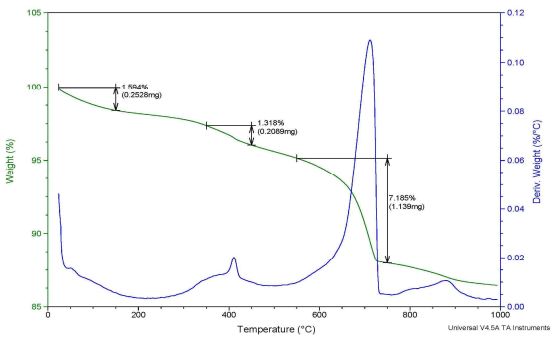


(d) 최대온도 조건: 500℃

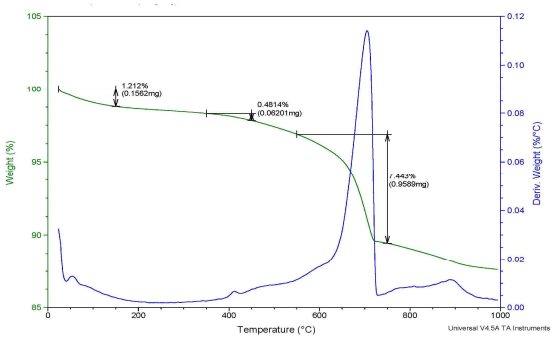
그림 2.11. TGA 분석에 의한 중량 변화(강섬유 혼입률=1.0%)



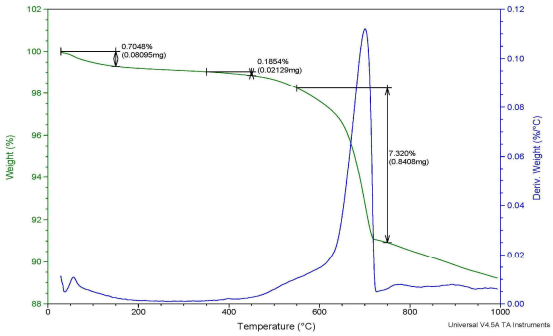
(a) 상온조건: 25℃



(b) 최대온도 조건: 300℃

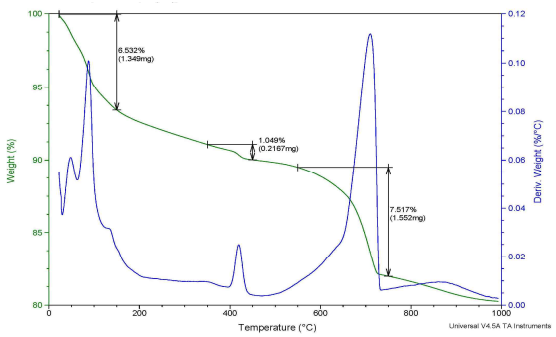


(c) 최대온도 조건: 400℃

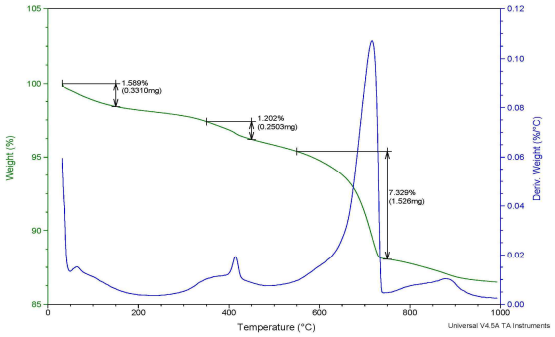


(d) 최대온도 조건: 500℃

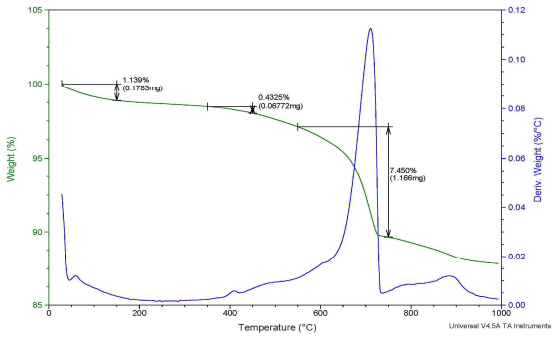
그림 2.12. TGA 분석에 의한 중량 변화(강섬유 혼입률=1.5%)



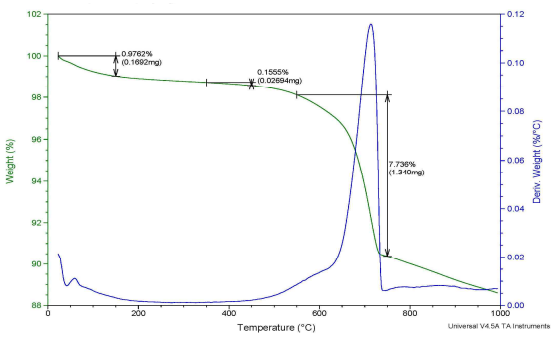
(a) 상온조건 : 25℃



(b) 최대온도 조건 : 300℃



(c) 최대온도 조건 : 400℃



(d) 최대온도 조건 : 500℃

그림 2.13. TGA 분석에 의한 중량 변화(강섬유 혼입률=2.0%)

(3) 열사이클 조건 초고성능 콘크리트의 역학 특성

(가) 단위중량

□ 열사이클 적용 전과 매회 열사이클 적용 후의 단위중량 측정 수행

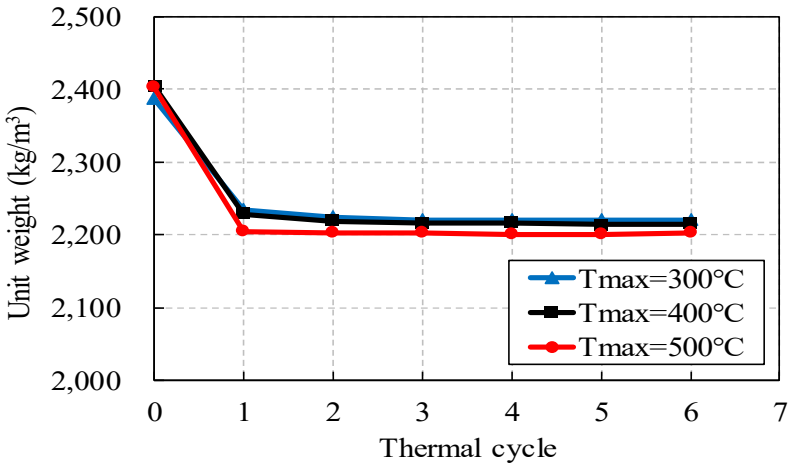
- 콘크리트의 단위중량은 콘크리트의 열용량에 영향을 미치므로 콘크리트의 단위중량이 클수록 축열 성능에 유리
- 고온의 열사이클을 받는 동안 콘크리트 내부의 자유수 및 흡착수는 증발하며, 이는 콘크리트의 단위중량 감소를 유발
- 또한, 콘크리트 내부의 수분 증발은 공극을 형성시켜 강도 특성, 즉, 역학적 특성에 불리하게 작용

□ 표 2.3에 강섬유 혼입률별 열사이클 횟수에 따른 단위중량 결과를 나타냄

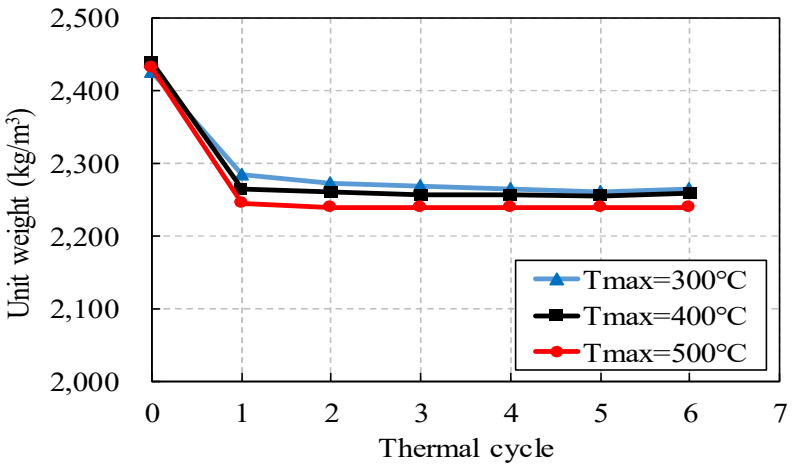
- 1회의 열사이클 적용 이후의 단위중량은 급격한 감소를 나타내었으며, 2~3회의 열사이클 적용에서는 단위중량이 소폭 감소(그림 2.14)
- 실질적으로 4회의 열사이클부터 단위중량은 일정하게 유지되었으며, 중량감소가 안정화된 것을 의미하며, 콘크리트 내부에 존재하는 대부분의 수분이 증발한 것으로 판단
- 강섬유 혼입률 1.0%에서 열사이클 적용 전 대비 6회의 열사이클 적용 후 단위중량 감소율은 300, 400 및 500℃에서 각각 6.9, 7.8 및 8.4%로 증가하는 경향을 나타냄
- 최대온도 조건 400℃에서 열사이클 적용 전 대비 6회의 열사이클 적용 후 단위중량 감소율은 강섬유 혼입률 1.0, 1.5 및 2.0%에서 각각 7.8, 7.4 및 7.2%로 나타났으며, 감소하는 경향을 나타냄
- 최대온도 조건이 증가할수록 단위중량 감소율도 증가하지만, 강섬유 혼입률이 증가할수록 단위중량 감소율은 감소하는 것으로 나타남(그림 2.15)

표 2.3. 매회 열사이클 적용에 따른 단위중량 측정 결과(kg/㎥)

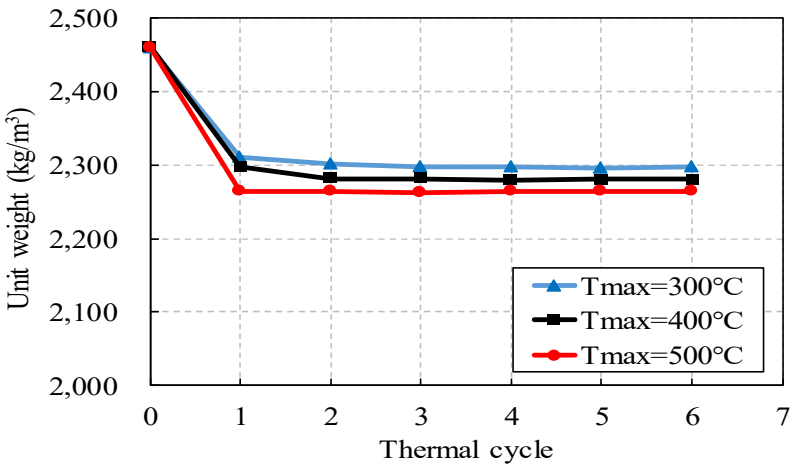
강섬유 혼입률 (%)	열사이클 횟수	최대온도 조건(℃)		
		300	400	500
1.0	0	2,387.0	2,404.8	2,403.9
	1	2,234.5	2,228.9	2,204.9
	2	2,223.5	2,219.2	2,202.8
	3	2,220.1	2,216.1	2,202.7
	4	2,219.8	2,216.7	2,201.1
	5	2,219.4	2,213.9	2,201.0
	6	2,220.9	2,215.0	2,202.0
1.5	0	2,426.3	2,439.1	2,432.3
	1	2,284.2	2,263.9	2,245.9
	2	2,271.8	2,260.6	2,239.8
	3	2,268.9	2,256.4	2,239.5
	4	2,263.7	2,256.6	2,240.0
	5	2,260.1	2,255.8	2,240.0
	6	2,265.5	2,257.9	2,239.9
2.0	0	2,459.6	2,460.6	2,458.6
	1	2,310.0	2,297.1	2,264.0
	2	2,300.8	2,281.7	2,263.5
	3	2,297.9	2,281.3	2,262.4
	4	2,298.5	2,279.9	2,263.5
	5	2,296.2	2,280.4	2,263.9
	6	2,297.2	2,280.1	2,263.6



(a) 강섬유량=1.0%

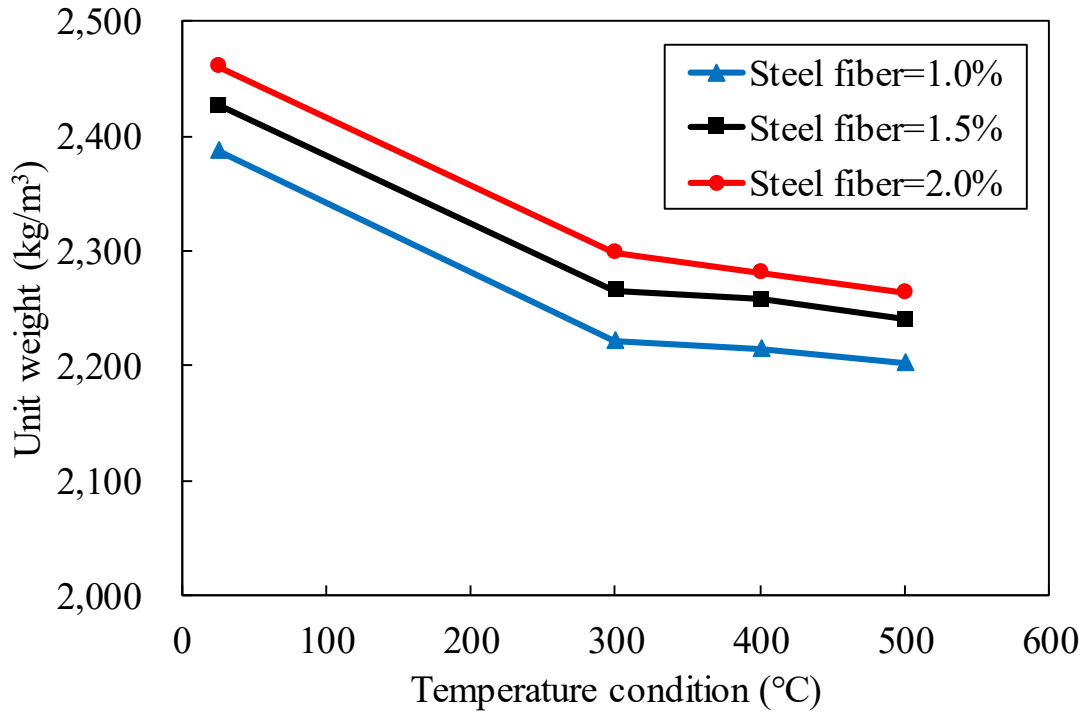


(b) 강섬유량=1.5%

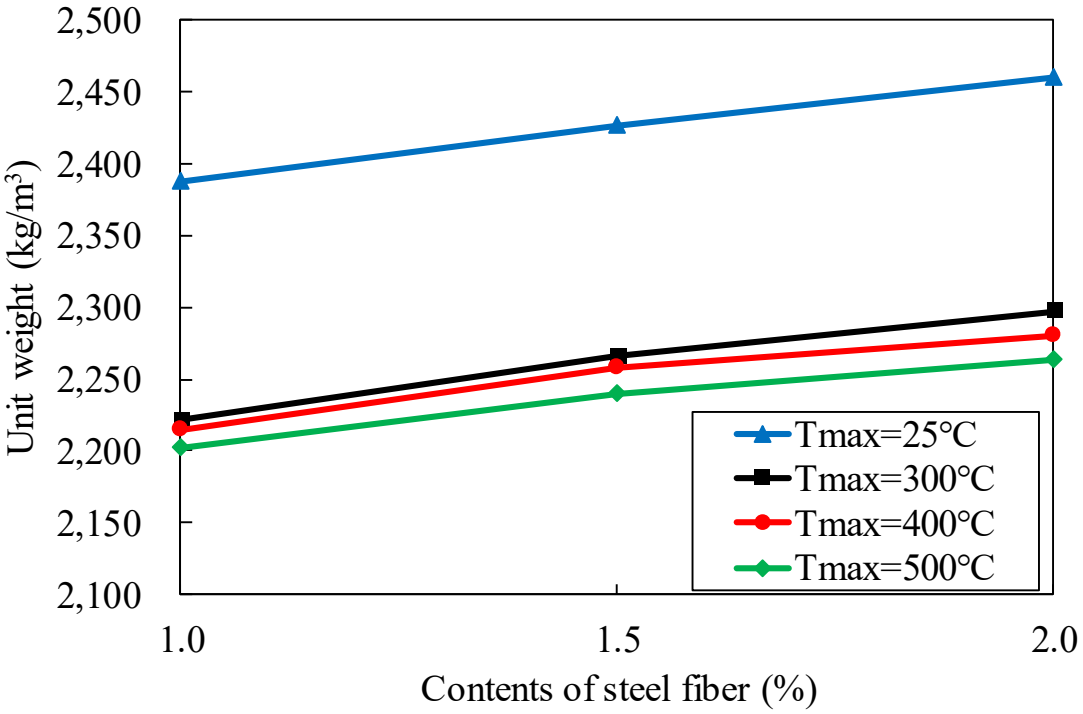


(c) 강섬유량=2.0%

그림 2.14. 강섬유 혼입률별 열사이클에 따른 단위중량 변화



(a) 최대온도 조건에 따른 영향



(b) 강섬유 혼입률에 따른 영향

그림 2.15. 변수에 따른 단위중량 변화

(나) 압축강도

□ 열사이클 적용 전과 6회 열사이클 적용 후의 압축강도 실험을 수행하여 측정(그림 2.16)

□ 강섬유 혼입률별 최대온도 조건에 따른 압축강도 결과를 표 2.4에 나타내었으며, 도시화한 그래프를 그림 2.17에 나타냄

- 최대온도 조건에서 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 압축강도는 점차 감소
- 고온의 온도 조건에서 콘크리트 내에 존재하는 수분의 증발은 내부 공극을 형성하여 압축강도 감소를 유발
- 강섬유 혼입률 1.0%에서 상온 온도 조건 대비 300, 400 및 500℃ 온도 조건의 압축강도 감소율은 각각 4.8, 9.6 및 19.0%로 나타났으며, 500℃ 온도 조건에서의 압축강도 감소율이 가장 크게 나타남
- 이는 500℃ 이상의 온도 조건에서 수분의 증발뿐만 아니라 수화물의 분해도 이루어지므로 콘크리트 압축강도를 감소시키는 것에 대해 지배적인 것으로 판단
- 반면, 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 상온 및 모든 최대온도 조건에서 압축강도는 증가
- 강섬유의 혼입은 콘크리트의 압축강도 증가에 기여도가 큰 것으로 나타남

표 2.4. 열사이클 적용 전과 후의 압축강도 결과(MPa)

강섬유 혼입률(%)	최대온도 조건 (℃)			
	25(상온)	300	400	500
1.0	122.8	116.9	111.0	91.6
1.5	138.7	133.7	126.5	115.9
2.0	145.3	139.2	133.4	117.7

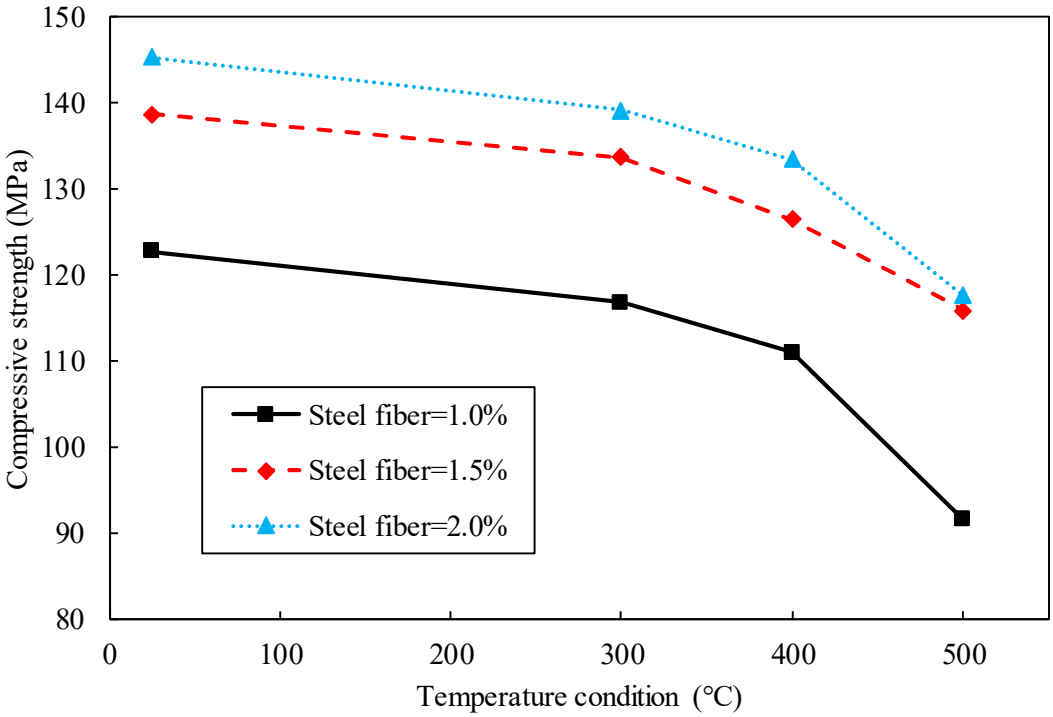


(a) 압축강도 실험 전

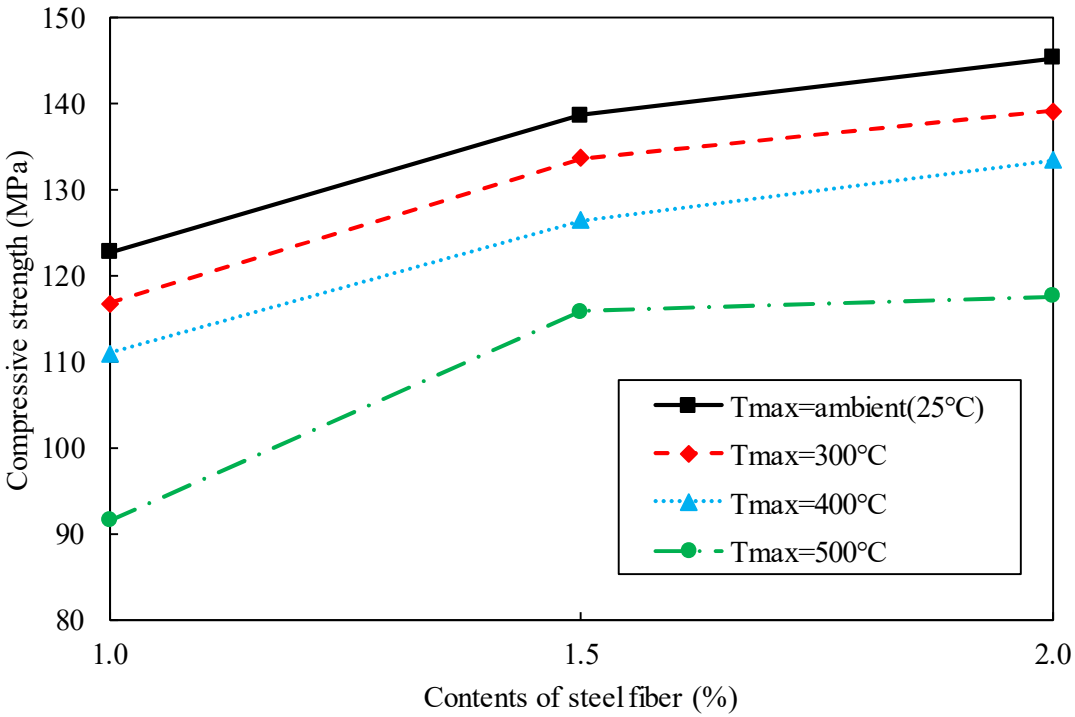


(b) 압축강도 실험 후

그림 2.16. 압축강도 실험



(a) 최대온도 조건에 따른 영향



(b) 강섬유 혼입률에 따른 영향

그림 2.17. 변수에 따른 압축강도 변화

(다) 쪼갬인장강도

□ 열사이클 적용 전과 6회 열사이클 적용 후의 쪼갬인장강도 실험을 수행하여 측정(그림 2.18)

□ 강섬유 혼입률별 최대온도 조건에 따른 압축강도 결과를 표 2.5에 나타내었으며, 도시화한 그래프를 그림 2.19에 나타냄

- 강섬유 혼입률 1.0%에서 최대온도 조건이 증가함에 따라 측정된 쪼갬인장강도는 각각 9.8, 9.3, 8.9 및 7.4 MPa로 점차 증가하는 경향을 나타냄.
- 위와 같은 결과는 다른 강섬유 혼입률에서도 같은 경향을 나타냄
- 최대온도 조건이 증가함에 따라 쪼갬인장강도는 감소하며, 500℃ 온도 조건에서 쪼갬인장강도 감소율은 가장 큰 값을 나타냄
- 상온 및 최대온도 조건에서 강섬유 혼입률이 증가할수록 쪼갬인장강도도 증가
- 강섬유의 우수한 인성이 콘크리트의 인장강도를 확보하고 증가시키는데 기여하는 것을 의미함

표 2.5. 열사이클 적용 전과 후의 쪼갬인장강도 (MPa)

강섬유 혼입률(%)	최대온도 조건 (℃)			
	25(상온)	300	400	500
1.0	9.8	9.3	8.9	7.4
1.5	11.7	11.3	10.7	10.0
2.0	12.4	11.9	11.4	10.2

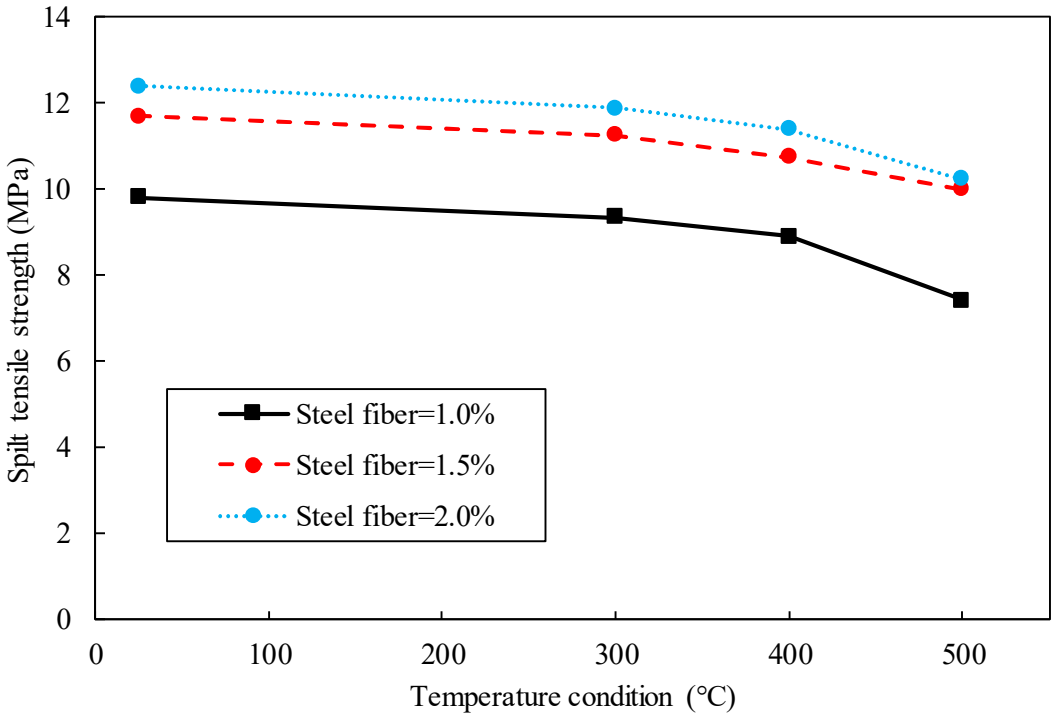


(a) 쪼갬인장강도 실험 전

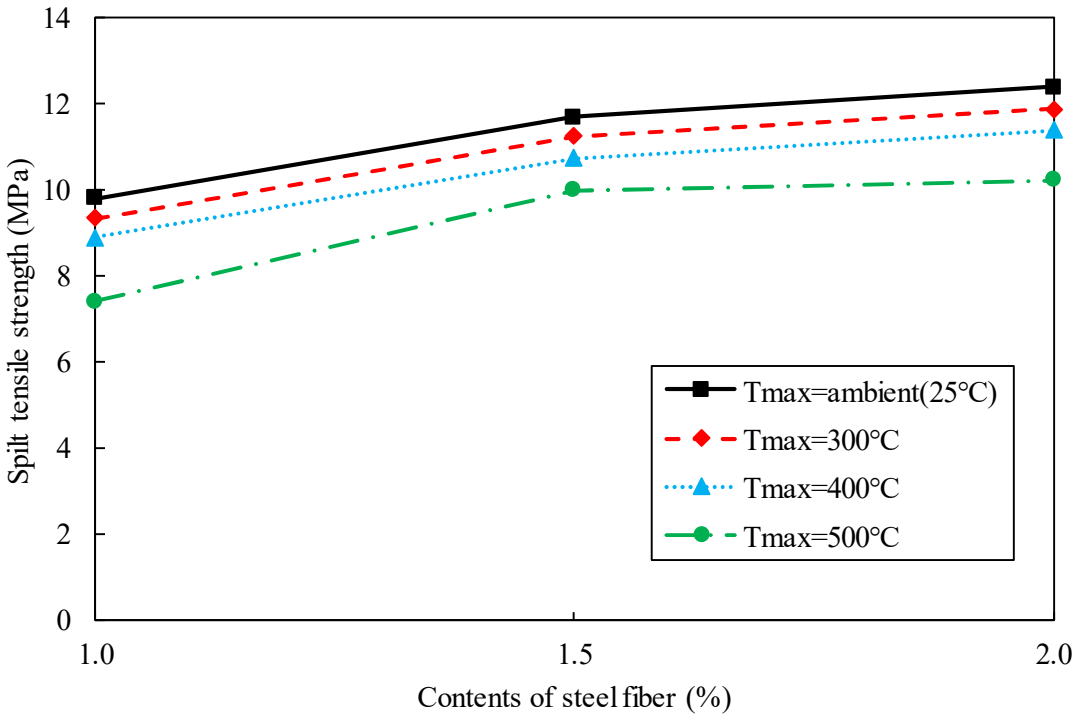


(b) 쪼갬인장강도 실험 후

그림 2.18. 압축강도 실험



(a) 최대온도 조건에 따른 영향



(b) 강섬유 혼입률에 따른 영향

그림 2.19. 변수에 따른 쪼갬인장강도 변화

(라) 초음파속도

□ 열사이클을 6회 수행하는 동안 매회 열사이클 수행 후에 원주형 공시체를 이용하여 초음파속도를 측정

□ 콘크리트의 압축강도와 초음파속도는 서로 상관관계가 있으며, 초음파속도 측정을 통하여 열사이클 횟수 증가에 따른 콘크리트의 압축강도 변화 양상을 분석

□ 표 2.6에 초음파속도 측정 결과를 나타냄

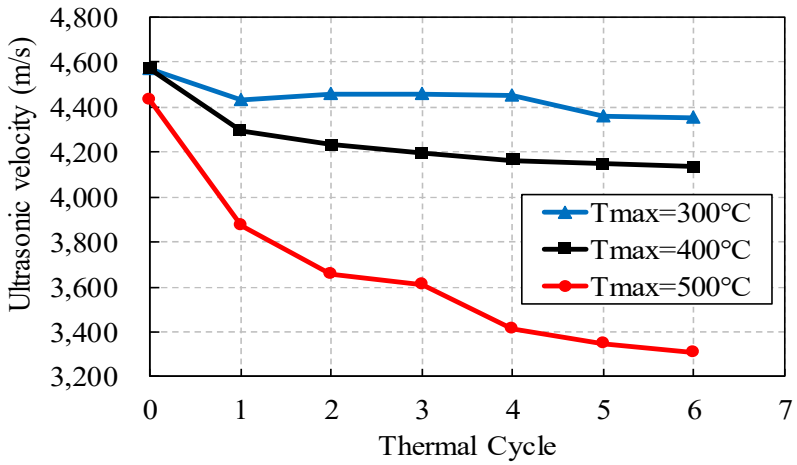
- 1회 열사이클 적용 후 초음파속도는 큰 폭으로 감소하며, 3회 열사이클 적용까지 초음파속도 감소는 뚜렷하게 나타남(그림 2.20).
- 반면, 4회 열사이클 적용 후부터 초음파속도의 변화량은 대체로 미미하며, 이러한 실험결과는 3회 열사이클 적용 후에 콘크리트의 역학적 안정성이 이루어지는 것을 나타냄
- 따라서, 3회까지의 열사이클이 콘크리트의 강도 감소에 크게 영향을 미치는 것으로 판단

□ 초음파속도의 최대온도 조건과 강섬유 혼입률에 따른 영향을 그림 2.21에 그래프로 나타냄

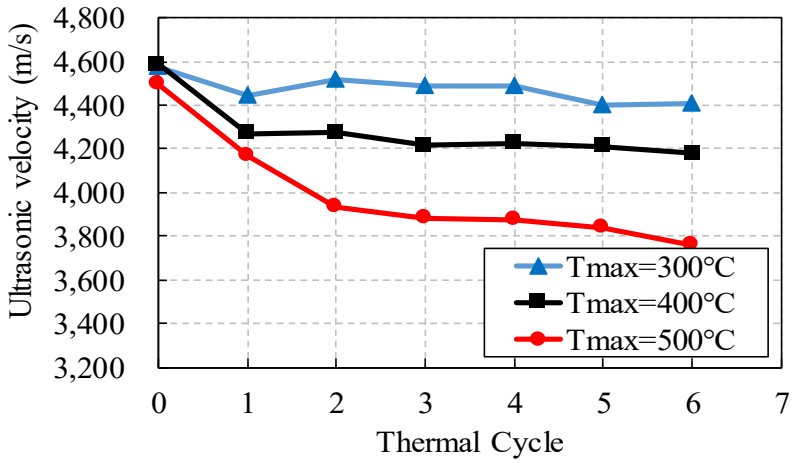
- 최대온도 조건이 증가함에 따라 초음파속도 감소율은 증가하며, 특히, 500℃ 온도 조건에서의 초음파속도 감소율이 극적으로 나타남
- 300℃ 및 400℃ 온도 조건에서의 초음파속도 감소율보다 500℃ 온도 조건에서 초음파속도 감소율이 크게 나타나며, 이는 500℃ 이상의 온도 조건이 콘크리트 성능 저하에 치명적인 것으로 판단
- 강섬유 혼입률에 따른 영향은 최대온도 조건이 증가함에 따라 상온, 300℃ 및 400℃에서 거의 일정하게 유지되는 경향을 나타내고 있으나, 강섬유 혼입률 2.0%에서는 뚜렷한 경향을 나타내지 않음

표 2.6. 매회 열사이클 적용에 따른 초음파속도 측정결과(m/s)

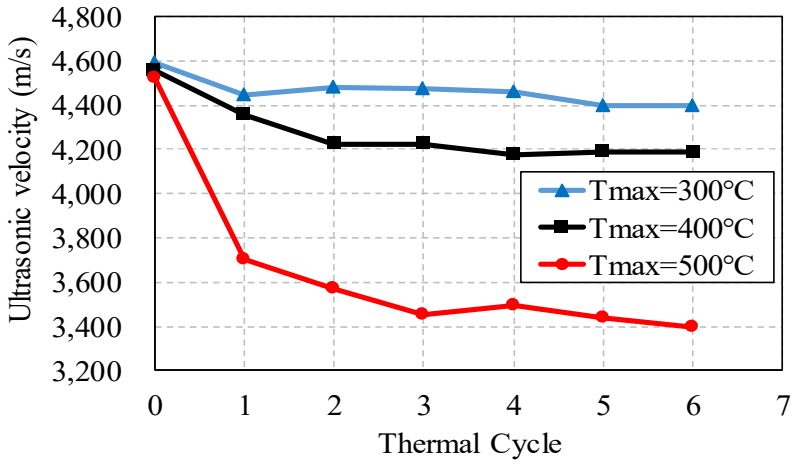
강섬유 혼입률 (%)	열사이클 횟수	최대온도 조건(℃)		
		300	400	500
1.0	초기	4,573.3	4,571.6	4,433.0
	1	4,430.0	4,296.3	3,872.5
	2	4,460.0	4,233.4	3,658.4
	3	4,460.0	4,193.5	3,606.7
	4	4,450.0	4,163.6	3,410.0
	5	4,360.0	4,148.5	3,348.7
	6	4,353.3	4,134.0	3,306.4
1.5	초기	4,573.3	4,586.1	4,493.8
	1	4,446.7	4,272.4	4,164.0
	2	4,513.3	4,274.9	3,933.0
	3	4,490.0	4,215.3	3,883.8
	4	4,486.7	4,227.7	3,873.0
	5	4,400.0	4,212.5	3,835.9
	6	4,410.0	4,181.2	3,756.0
2.0	초기	4,593.3	4,559.5	4,522.6
	1	4,446.7	4,357.6	3,701.0
	2	4,483.3	4,227.1	3,573.5
	3	4,476.7	4,226.7	3,454.8
	4	4,463.3	4,178.7	3,492.5
	5	4,400.0	4,190.7	3,441.0
	6	4,400.0	4,187.6	3,400.2



(a) 강섬유량=1.0%

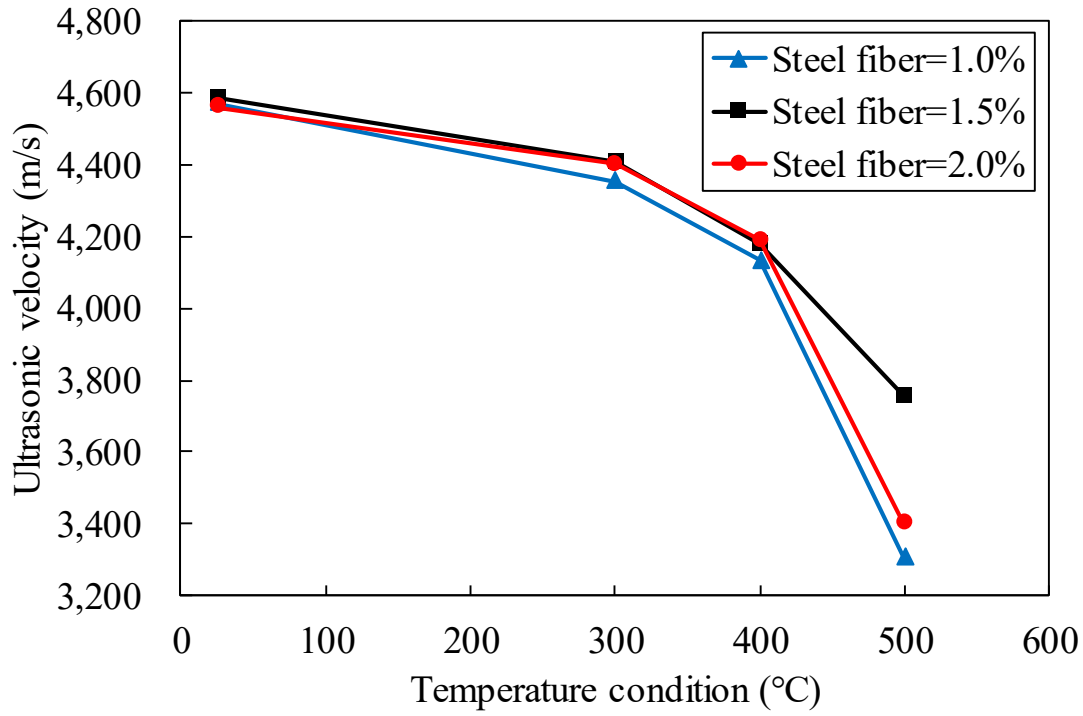


(b) 강섬유량=1.5%

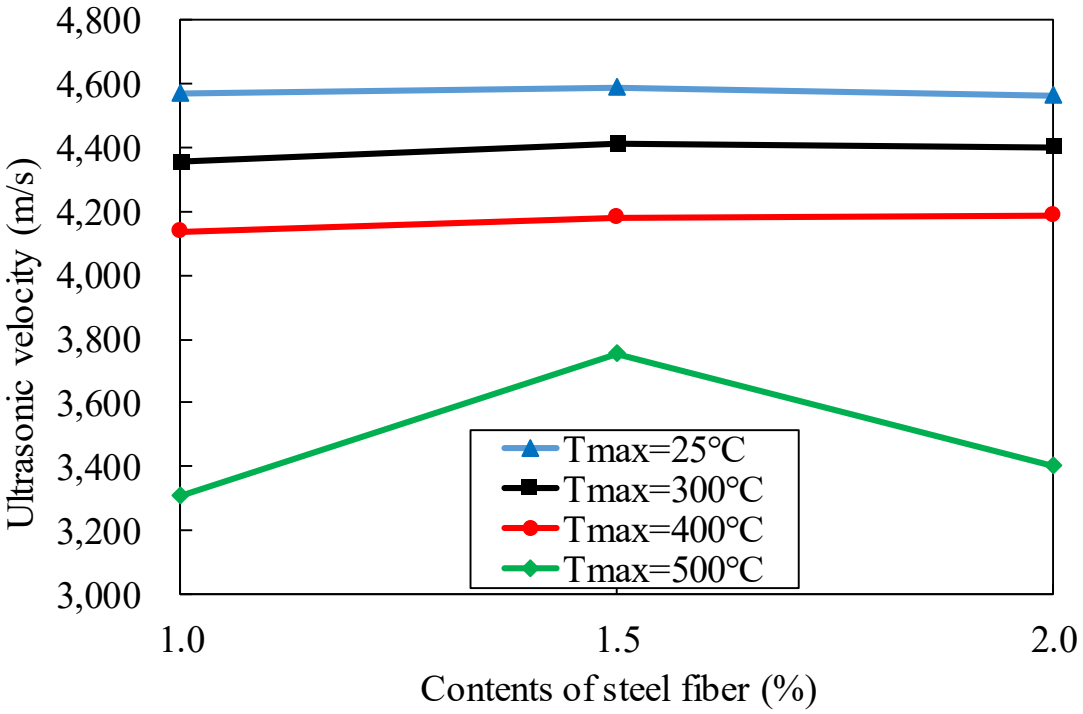


(c) 강섬유량=2.0%

그림 2.20. 강섬유 혼입률별 열사이클에 따른 초음파속도 변화



(a) 최대온도 조건에 따른 영향



(b) 강섬유 혼입률에 따른 영향

그림 2.21. 변수에 따른 초음파속도 변화

(4) 열사이클링 조건 초고성능 콘크리트의 열특성

(가) 열전도율

□ 콘크리트 열전도율을 측정하는 기법으로서 ASTM D 5334-05 방법, TLPP(two linear parallel probe) 방법 및 TPS(transition plane source) 방법이 있다.

- 콘크리트 열전도율을 측정하기 위해 ASTM D 5334-05 방법을 적용할 수 있다. 이 방법은 열원을 열전달 매체에 삽입한 후 열원을 공급하며, 열전달 매체의 온도 상승은 매체의 열전도율과 연관이 있는 성질을 이용하는 기법이다. 장치는 가열 와이어와 온도 계측 센서로 구성된다. 장치를 열전달 매체에 평행한 두 개의 구멍을 뚫어 삽입한다.
- 유사한 방법으로서 TLPP방법이 사용된다. TLPP 방법의 경우, 두 개의 센서가 열전달 매체에 뚫어 놓은 서로 다른 두 개의 평행한 구멍에 삽입된다. 하나의 센서는 열을 공급하기 위해 사용되며, 또 다른 하나는 온도를 측정하기 위해 사용된다.

□ 본 연구에서는 TPS 방법을 적용하였다. 이 방법의 경우, 두 개의 시편 사이에 온도 장치를 삽입하며 두 시편의 접촉하는 면은 평탄성을 확보하여야 한다. ASTM D 5334-05 방법과 달리 열전달 매체에 구멍을 뚫어야 하지 않기 때문에 콘크리트 열전달 특성을 파악하기 위해 널리 사용된다.

- TPS 방법을 사용하기 위해 TPS 1500 장비(Hot Disk Ltd., 스웨덴)을 사용함.
- 두 시편 접촉면의 평탄성을 확보하고 두 시편의 재료 동질성을 확보하기 위해 원주형 공시체의 중앙면을 절단하여 두 개의 시편을 제작하여 열전도율을 측정하였다.
- 두 시편 사이에 열 측정 센서를 삽입하여 열전도율을 측정하였다. 열측정 센서는 니켈 성분의 이중 나선으로 구성되며, 이를 통해 시편에 열파(heating pulse)를 공급한다.
- 실험실의 상온 조건에서 약 90분 동안 열평형을 유지한 후, 0.3 W 전원으로 열파를 공급하여 콘크리트의 열전도율을 측정하였다. 각 시편에 대해 3회의 측정을 수행하여 실험결과의 정밀도를 확보하고자 하였다. 열전도율 측정 장비를 이용하여 열사이클 적용 전과 매회 열사이클 이후의 열전도율을 측정(그림 2.22)

□ 강섬유 혼입률별로 열사이클 적용 전과 후의 열전도율 측정 결과를 표 2.7에 나타냄

- 1회 열사이클 적용 후, 열전도율은 급격한 감소를 나타냈으며, 이후 열사이클이 진행됨에 따라 열전도율은 감소 없이 일정하게 유지되는 경향을 나타냄(그림 2.23)
- 최대온도 조건이 증가함에 따라 열전도율은 감소하는 경향을 나타내지만, 강섬유 혼입률이 증가할수록 열전도율은 증가하는 경향을 나타냄(그림 2.24)



(a) TPS 측정 시스템

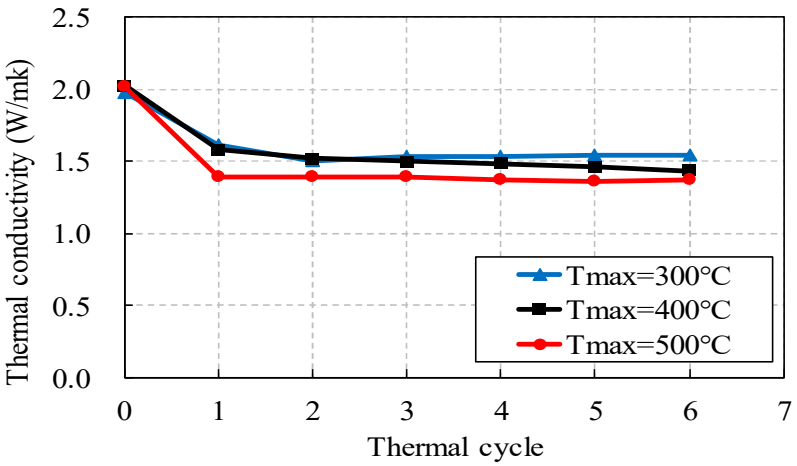


(b) 콘크리트 열전도율 측정용 콘크리트 시편 상세

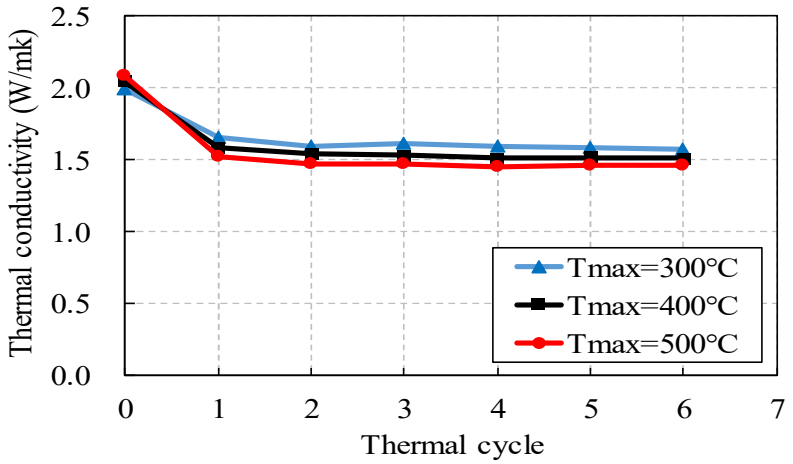
그림 2.22. 콘크리트 열전도율 측정 장치

표 2.7. 열사이클 적용 전과 후의 열전도율 측정 결과I(W/m·K)

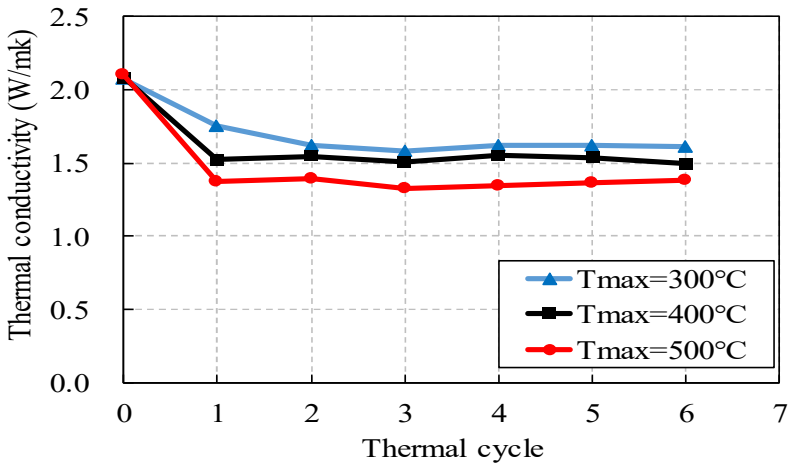
강섬유 혼입률 (%)	열사이클 횟수	최대온도 조건(℃)		
		300	400	500
1.0	초기	1.977	2.027	2.024
	1	1.612	1.580	1.397
	2	1.506	1.524	1.390
	3	1.536	1.500	1.390
	4	1.536	1.488	1.374
	5	1.541	1.463	1.365
	6	1.541	1.435	1.373
1.5	초기	1.997	2.049	2.087
	1	1.652	1.580	1.525
	2	1.595	1.542	1.468
	3	1.612	1.529	1.477
	4	1.592	1.511	1.457
	5	1.589	1.513	1.461
	6	1.578	1.512	1.460
2.0	초기	2.079	2.083	2.100
	1	1.751	1.524	1.378
	2	1.624	1.548	1.395
	3	1.580	1.506	1.323
	4	1.622	1.551	1.350
	5	1.616	1.536	1.368
	6	1.609	1.495	1.384



(a) 강섬유량=1.0%

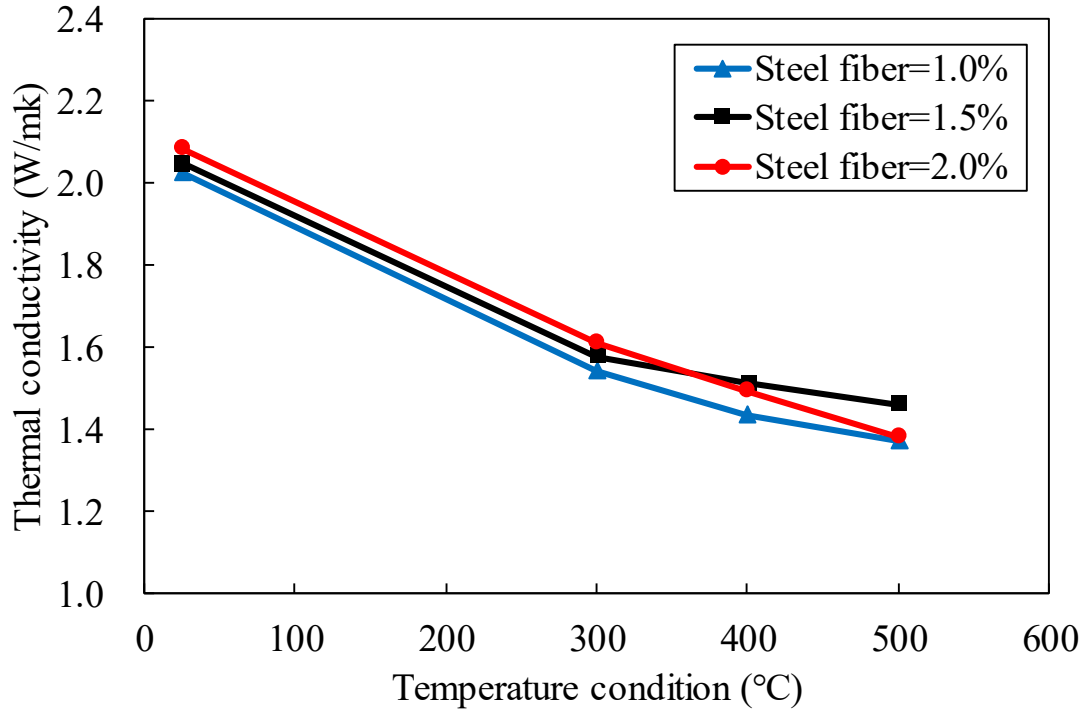


(b) 강섬유량=1.5%

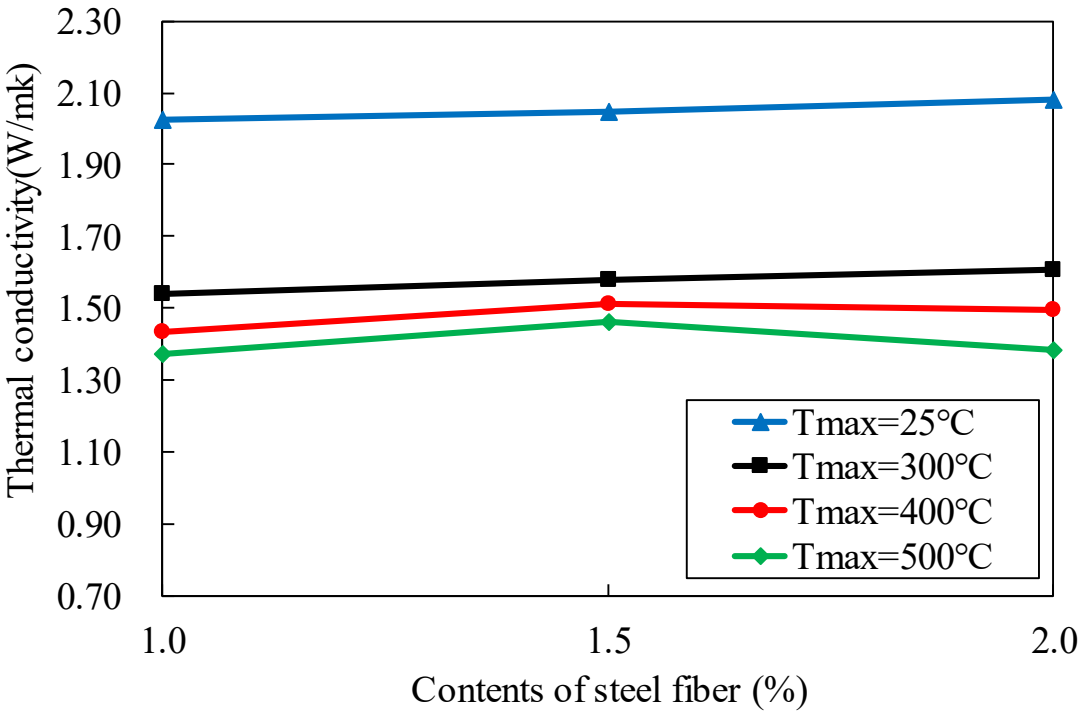


(c) 강섬유량=2.0%

그림 2.23. 강섬유 혼입률별 열사이클에 따른 열전도율 변화



(a) 최대온도 조건에 따른 영향



(b) 강섬유 혼입률에 따른 영향

그림 2.24. 변수에 따른 열전도율 변화

(나) 비열

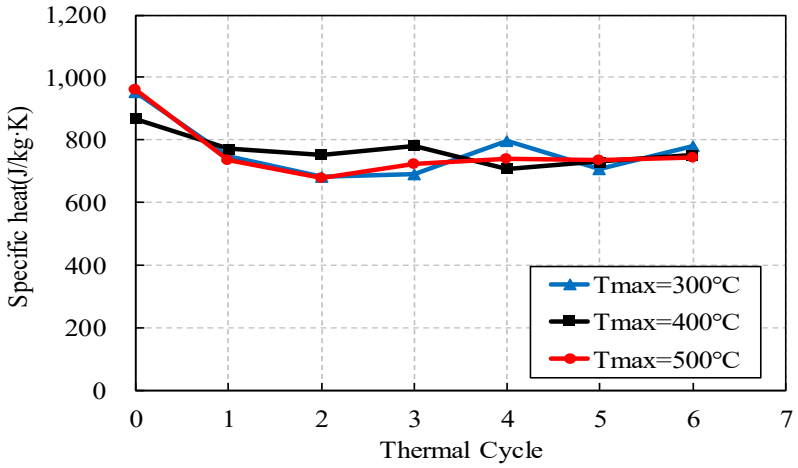
□ 열사이클 적용 전과 매회 열사이클 이후의 비열을 측정

□ 강섬유 혼입률별로 열사이클 적용 전과 후의 비열 측정 결과를 표 2.8에 나타냄

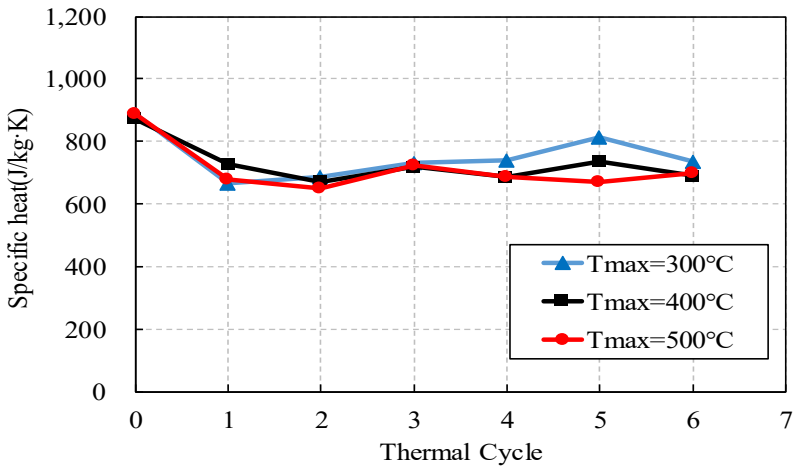
- 1회 열사이클 적용 후, 비열은 급격한 감소를 나타냈으며, 이후 열사이클이 진행됨에 따라 비열은 대체적으로 감소하는 경향을 나타냄(그림 2.25)
- 최대온도 조건에서 증가함에 따라 비열은 감소하는 경향을 나타내었으며, 강섬유 혼입률이 증가할수록 비열은 감소하는 경향을 나타냄(그림 2.26)

표 2.8. 열사이클 적용 전과 후의 비열 측정 결과(J/kg·K)

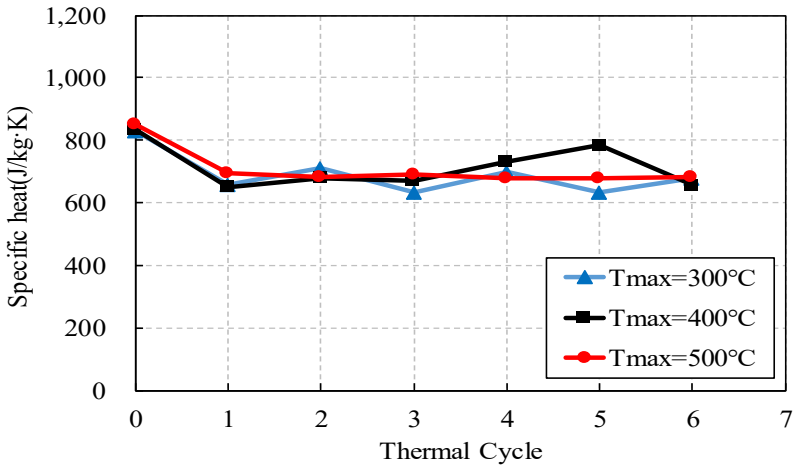
강섬유 혼입률 (%)	열사이클 횟수	최대 목표 온도(℃)		
		300	400	500
1.0	0	952	868	959
	1	749	772	736
	2	683	753	679
	3	691	781	725
	4	796	708	741
	5	705	731	735
	6	781	751	743
1.5	0	888	871	889
	1	666	726	679
	2	685	671	650
	3	731	718	725
	4	740	685	687
	5	814	737	671
	6	737	690	697
2.0	0	828	836	851
	1	656	650	697
	2	712	678	681
	3	632	670	690
	4	697	733	678
	5	634	783	677
	6	677	658	684



(a) 강섬유량=1.0%

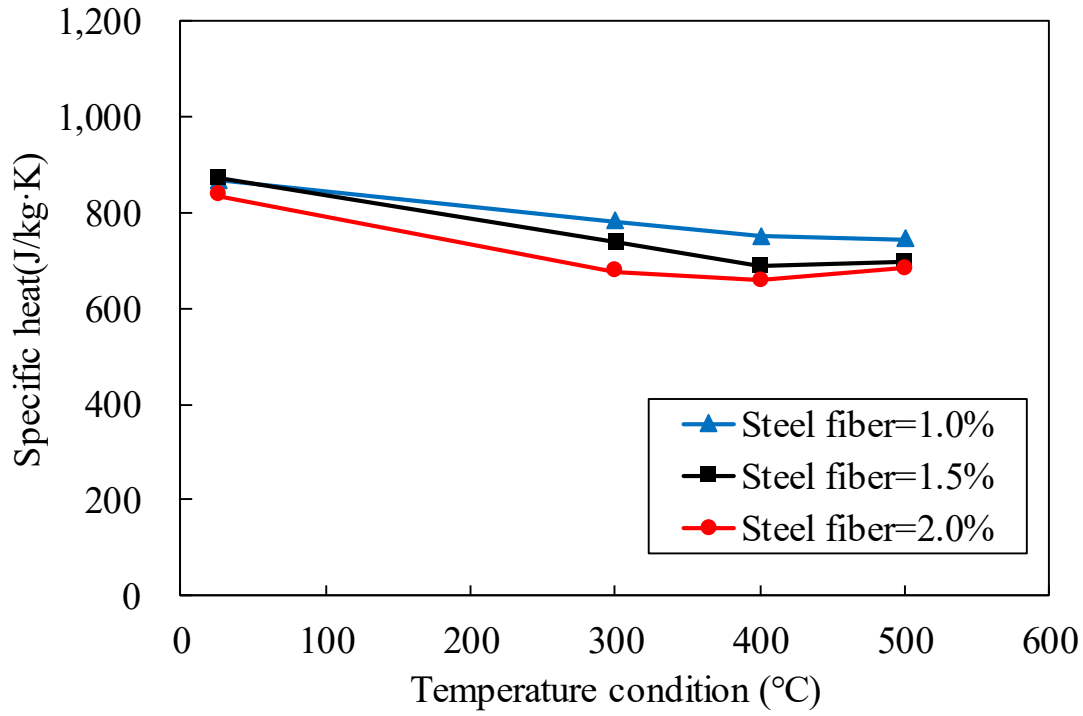


(b) 강섬유량=1.5%

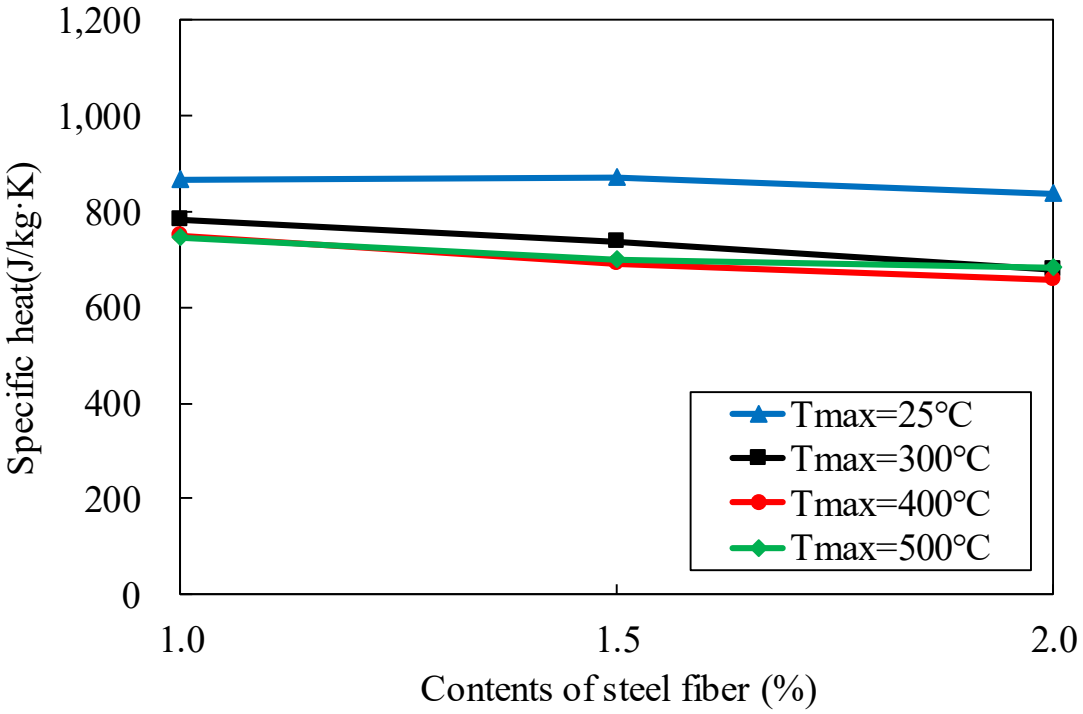


(c) 강섬유량=2.0%

그림 2.25. 강섬유 혼입률별 열사이클에 따른 비열 변화



(a) 최대온도 조건에 따른 영향



(b) 강섬유 혼입률에 따른 영향

그림 2.26. 변수에 따른 비열 변화

(5) 축열 모듈 장치 성능 평가

(가) 축열 블록 제작

□ 축열 성능 분석을 위한 고전도 초고성능 콘크리트 블록을 제작

□ 콘크리트 부피비 1.0%의 강섬유를 혼입하여 배합을 수행하였으며(표 2.9), 콘크리트가 고온에 노출되었을 때, 발생하는 폭렬 현상을 방지하기 위하여 PP 섬유를 2kg/m^{3}을 적용

□ 물-결합재 비(W/B)는 0.22를 적용하였고, 낮은 물-결합재 비에 의한 비빔 작업성을 확보하기 위하여 밀도 1.01 g/cm^3의 폴리카르본산계 고성능 감수제를 사용

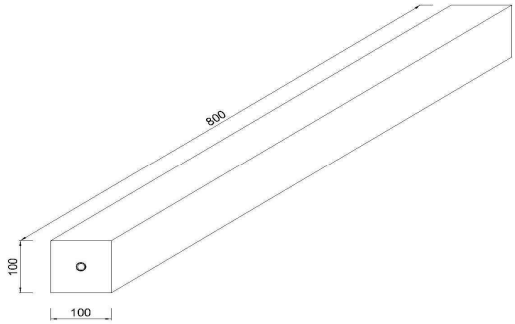
표 2.9. 축열 콘크리트 블록 배합표

배합	W/B (%)	단위중량 (kg/m^3)						섬유혼입량	
		W	OPC	Zr	BFS	F.A	F	강섬유 (%)	PP섬유 (kg/m^3)
1	0.22	209	770	58	135	847	231	1.0	2.0

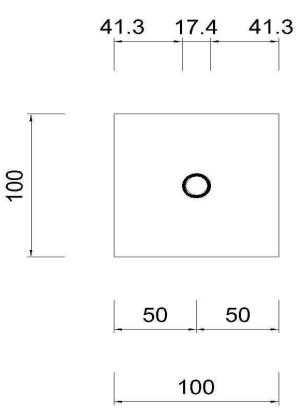
W: 배합수(water), B: 바인더(binder), OPC: 보통 포틀랜드 시멘트(ordinary portland cement), Zr: 지르코늄(zirconium), BFS: 고로슬래그, FA: 잔골재(fine aggregate), F: 필러(filler)

□ 제작된 축열용 콘크리트의 도면을 그림 2.27에 나타내었으며, 제작된 블록을 그림 2.28에 나타냄

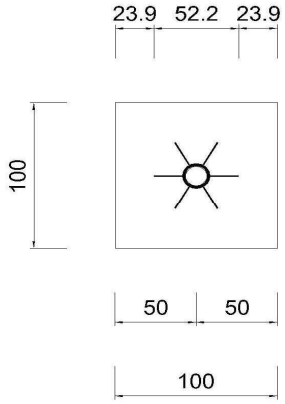
□ 콘크리트 블록 중심을 관통하는 파이프를 통하여 열유체가 순환되고, 열 유체가 지닌 열에너지를 콘크리트에 전달하는 시스템으로 설계하였다.



(a) 콘크리트 블록 크기



(b) 원형 파이프

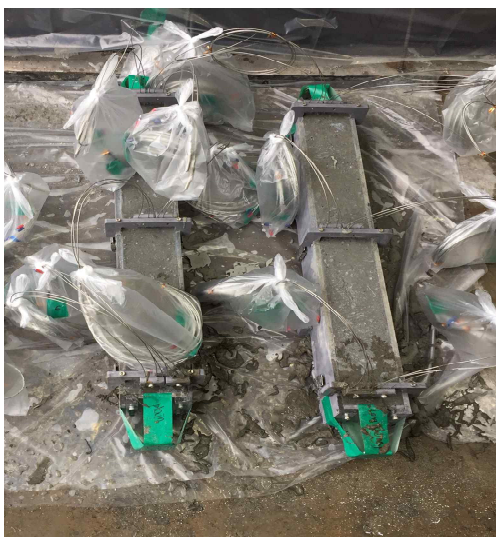


(c) 종방향 핀 파이프

그림 2.27. 콘크리트 축열 블록 상세



(a) 제작 전 열전달 파이프 및 온도센서 거치



(b) 축열용 고전도 콘크리트 블록

그림 2.28. 축열용 고전도 콘크리트 블록 제작 과정

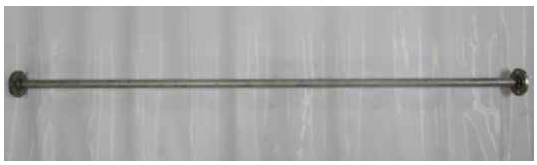
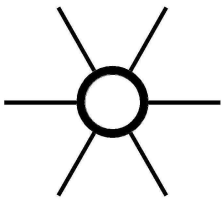
(나) 열전달 파이프 설정 계측 계획

□ 열에너지 전달이 용이하도록 블록 중심을 관통하는 파이프 설정

□ 파이프 형상에 따라 열전달 성능을 파악하기 위하여 원형 파이프(plain), 길이 방향으로 핀이 달린 종방향 핀 파이프(longitudinal fin)를 적용

- 파이프 양끝 단에는 열유체 순환 장비에 장착이 용이하도록 플렌지를 부착하였으며, 파이프의 형상을 표 2.10에 나타냄

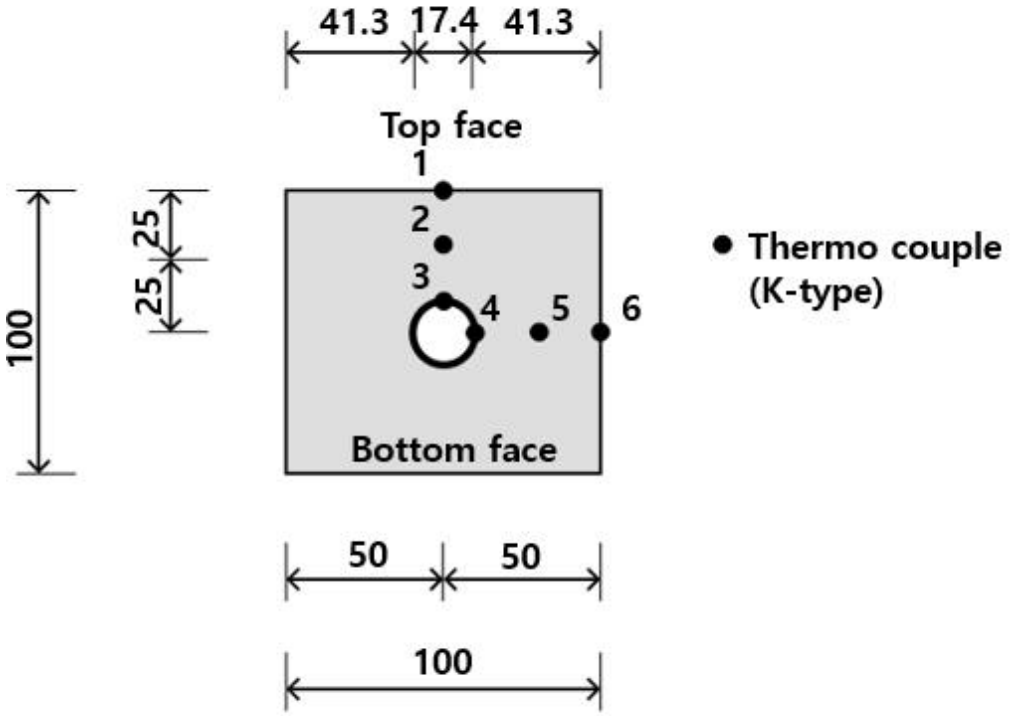
표 2.10. 파이프 상세

<table>
<tr><td colspan="4">(a) 원형 파이프(plain)</td></tr>
<tr><td rowspan="5">  </td><td>파이프 외경</td><td>17.4 mm</td><td rowspan="5">  </td></tr>
<tr><td>파이프 내경</td><td>13.4 mm</td></tr>
<tr><td>파이프 두께</td><td>2.0 mm</td></tr>
<tr><td>핀 두께</td><td>-</td></tr>
<tr><td>핀 높이</td><td>-</td></tr>
<tr><td>(1) 단면도</td><td colspan="2">(2) 파이프 상세</td><td>(3) 열전달 파이프</td></tr>
<tr><td colspan="4">(b) 종방향 핀 파이프 (longitudinal)</td></tr>
<tr><td rowspan="5">  </td><td>파이프 외경</td><td>17.4 mm</td><td rowspan="5">  </td></tr>
<tr><td>파이프 내경</td><td>13.4 mm</td></tr>
<tr><td>파이프 두께</td><td>2.0 mm</td></tr>
<tr><td>핀 두께</td><td>3.0 mm</td></tr>
<tr><td>핀 높이</td><td>17.4 mm</td></tr>
<tr><td>(2) 단면도</td><td colspan="2">(2) 파이프 상세</td><td>(3) 열전달 파이프</td></tr>
</table>

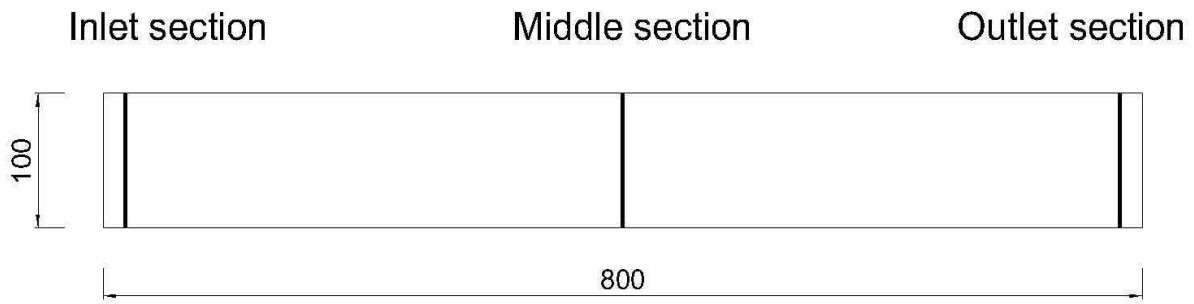
(다) 온도 분포 계측 설정

□ 온도센서를 콘크리트 블록 제작 전 거푸집에 고정하여 콘크리트와 함께 타설하여 매립

- 온도센서(thermo couple)를 데이터로거(TDS-530) 장비와 연결하여 콘크리트 블록 입구단면(Inlet Temperature), 중앙단면(Middle Temperature), 출구단면(Outlet Temperature)의 온도 분포를 측정
- 한 단면에 열전달 파이프를 중심으로 수직방향 3개, 수평방향 3개로 6개가 배치하여 총 18개의 온도 센서를 매립하였으며, 그림 2.29에 매립 위치를 나타냄



(a) 단면 내 온도센서 매립 위치



(b) 단면 별 온도센서 매립 위치

그림 2.29. 콘크리트 축열 블록 온도센서 매립 위치

□ 콘크리트 블록의 열전달 성능을 평가하기 가열 - 유지 - 냉각의 열사이클을 설정

- 열사이클 구성은 1구간에서 2시간 동안 400℃로 온도 상승, 2구간에서 2시간 동안 400℃ 온도로 유지, 3구간에서 2시간 동안 200℃로 온도 하강
- 위의 내용을 도식화한 열사이클 곡선을 그림 2.30에 나타냄

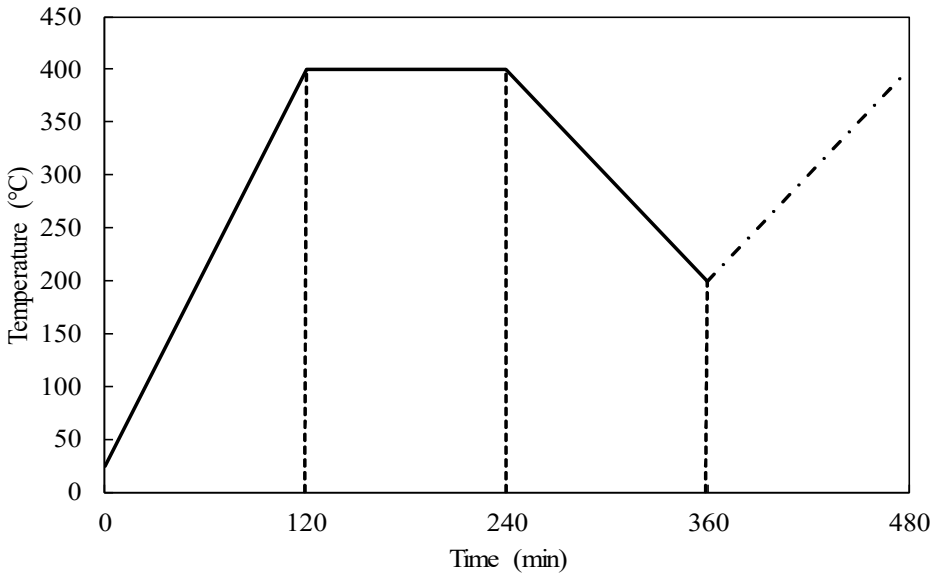


그림 2.30. 열사이클 곡선

나. 2차년도 연구수행내용 및 성과

(1) 고온 현열 저장용 고전도 초고성능 콘크리트 제조

(가) 사용재료

□ 보통포틀랜드시멘트를 고전도 초고성능 콘크리트 배합의 기본 바인더로 사용

□ 지르코늄 분체 첨가로 인한 열성능 향상을 도모

- 그림 2.1에 나타낸 지르코늄 분체의 단위중량은 6,500 kg/m^{3}이며 보통포틀랜드시멘트(OPC)의 단위중량(=3,140 kg/m^3)보다 크다. 지르코늄 단위중량이 보통콘크리트에 사용되는 OPC의 단위중량보다 훨씬 크므로 지르코늄을 혼입한 콘크리트의 열용량은 증대된다.
- 지르코늄 분체의 열전도율은 12.7 W/m·K로써 지르코늄을 혼입한 콘크리트의 열전도율 증진에 유리
- 따라서 콘크리트에 지르코늄 혼입은 콘크리트의 축열 성능에 유리함.
- 또한 축열 콘크리트 제조 시 패킹 이론(packing theory)을 적용하였으며(그림 2.2), 이때 반응성 분체를 OPC만을 사용할 때에 비해 지르코늄을 혼입할 때 콘크리트 미세공극 구조는 더욱 밀실해지며 이는 열성능과 축열 용량 증진에 유리하게 기여함.



(a) OPC　　(b) 지르코늄

그림 2.1. 사용재료 종류 및 형상

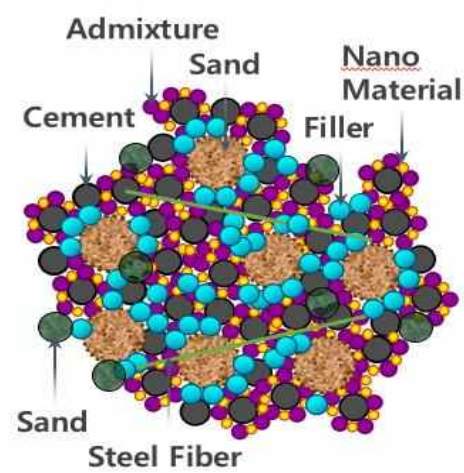


그림 2.2. 초고성능 콘크리트의 패킹 이론에 의한 내부 미세조직

□ 입도 0.5 mm 이하의 모래를 사용 잔골재는 성능 변동성을 최소화함

□ 구성 입자들의 평균 크기가 4 μm, SiO_2 96% 이상, 밀도 2.60 g/cm^3의 특성을 갖는 충전재(filler)를 사용

□ 사용된 강섬유는 밀도 7,500 kg/cm^3, 인장강도는 2,500 MPa이며, 섬유 직경은 0.2 mm, 길이 16.5 mm의 직선 형상의 강섬유를 적용

□ 콘크리트가 고온에 노출되었을 때 나타나는 폭렬 현상을 방지하기 위한 보강 섬유로 폴리프로펠렌 섬유(polypropylene fiber, P.P 섬유)를 사용하였으며, 지름 21 ㎛, 비중 0.91, 길이는 12.7 mm이며, 인장강도는 400 MPa

□ 다음 그림 2.3에 배합에 사용된 강섬유와 폴리프로필렌 섬유를 나타냄



(a) 강섬유



(b) 폴리프로필렌 섬유(P.P 섬유)

그림 2.3. 초고성능 콘크리트에 적용된 섬유 종류 및 형상

(나) 고전도 초고성능 콘크리트 배합 및 제작

□ 고전도 초고성능 콘크리트의 배합을 수행하기 전에 지르코늄을 혼입한 모르타르 배합을 수행하여 지르코늄이 콘크리트의 열전도율에 미치는 영향을 파악하였음.

- 표 2.1에 지르코늄을 혼입 유무에 따른 세 가지 기본 배합을 나타냄.
- 각 배합은 OPC만을 바인더로 사용한 경우(M1 배합), OPC를 지르코늄으로 5%(M2 배합) 및 10%(M3 배합) 치환한 경우임.

표 2.1. 지르코늄 혼입 콘크리트 배합표

Mixture	W/B (%)	Unit weight (kg/m^3)			
		W	OPC	Zr	F.A.
M1	0.40	312	780	-	1,008
M2	0.40	312	741	39	1,008
M2	0.40	312	702	78	1,008

W: 배합수(water), OPC: 보통 포틀랜드 시멘트(ordinary portland cement), Zr: 지르코늄(zirconium), F.A.: 잔골재(fine aggregate)

- 세 가지 모르타르 배합에 따른 열전도율 측정 결과를 나타냄. 기본 바인더로 OPC만을 사용한 배합(M1)에 비해 OPC를 지르코늄으로 5% 치환한 배합(M2) 및 10% 치환한 배합(M3)의 열전도율이 증가함(그림 2.4).
- 따라서, 고전도 초고성능 콘크리트의 열성능을 향상시키기 위해 지르코늄 혼입량을 증가하는 것이 유리하다고 판단됨.

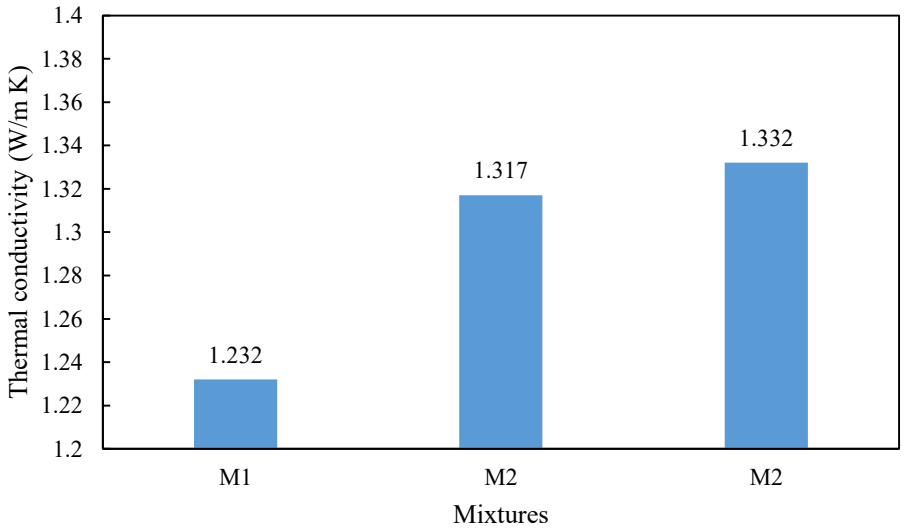


그림 2.4. 지르코늄 혼입률에 따른 열전도율 비교

□ 고전도 콘크리트의 재료 특성을 파악하기 위하여 재료 시편 제작

- 고전도 콘크리트 초기 배합 (S120 배합)의 경우, 물-결합재 비 0.22를 설정하고, 강섬유 1.0%, 1.5% 및 2.0%를 부피비로 혼입하여 시편을 제작하고 실험을 수행함 (표 2.2).
- 그러나 본 연구에서 추구하는 고전도 축열 특성 파악과 성능 향상을 기대하기 위해서 최적 배합 도출을 위한 배합비 변경 필요

□ 개선된 고전도 초고성능 콘크리트의 최적 배합(S180)을 나타냄(표 2.2).

- 강도의 향상은 콘크리트 내부 조직이 더욱 치밀하게 형성되며 상대적으로 높은 단위중량과 더불어 우수한 내구성을 보유하고 있다는 것을 나타내며 축열 성능 향상에 중요한 요소로 작용할 것으로 판단.
- 이에, 초기 배합에서 목표로 하였던 120 MPa보다 높은 목표 강도 수준인 180 MPa로 배합설계를 수행.
- 초기 배합에서 사용하였던 고로슬래그를 제외하고 지르코늄의 함유량을 증가시켜 축열 성능 증진을 도모
- 따라서, 물-결합재 비(W/B)는 0.18로 낮추어 적용하여 180 MPa의 목표 강도 수준을 기대하였으며, 낮은 물-결합재 비에 의한 작업성을 확보하기 위하여 밀도 1.01 g/cm^3의 폴리카르본산계 고성능 감수제를 사용
- 콘크리트 내부 구조에 존재하는 공극을 대체하여 더욱 치밀한 조직이 될 수 있도록 필

러(filler)를 혼입

- 개선 배합에서도 굵은 골재는 사용하지 않고 잔골재만을 혼입하여 배합의 변동성을 최소화하였으며, 콘크리트 부피비 0.0, 1.0, 1.5 및 2.0%의 강섬유 혼입 설정
- 콘크리트가 고온에 노출되었을 때, 발생하는 폭렬 현상을 방지하기 위하여 P.P 섬유를 적용하였으며, P.P섬유 혼입률에 따른 영향을 파악하기 위하여 단위배합당 2kg/m^3 및 4kg/m^3 적용

□ 배합은 다음과 같은 순서로 수행하였으며, 그 과정을 그림 2.5에 나타냄.

- 1단계: 잔골재, 시멘트, 지르코늄, 필러 및 P.P 섬유를 믹서 속도 1단으로 5~10분간 건비빔 실시
- 2단계: 1단계 건비빔 후, 배합수와 혼화제 투입하여 재료가 골고루 섞여 풀리는지 확인
- 3단계: 풀림이 확인된 후, 믹서 속도 3단으로 변경하여 1분간 비빔
- 4단계: 3단계 비빔 후, 믹서 속도 1단으로 변경하여 강섬유 투입
- 5단계: 믹서 속도 3단으로 변경하여 2분간 비빔 실시 후 배합 종료

□ 제작이 완료된 시편은 90±5℃에서 72시간 동안 증기양생을 실시. 이후, 재료 시편은 재령 27일까지 수중양생을 실시하고, 실험 수행 전 24시간 기건양생을 실시하여 건조

표 2.2. 강섬유 보강 고전도 콘크리트 최적 배합표

Mixture		f_{ck} (MPa)	W/B (%)	Unit weight (kg/m^3)						섬유 혼입량	
				W	OPC	Zr	BFS	F.A	F	강섬유 (%)	P.P 섬유 (kg/m^3)
S120	1	120	0.22	209	770	58	135	847	231	1.0	2.0
	2	120	0.22	209	770	58	135	847	231	1.5	2.0
	3	120	0.22	209	770	58	135	847	231	2.0	2.0
S180	1	180	0.18	178	783	196	-	862	235	0	2.0
	2	180	0.18	178	783	196	-	862	235	0	4.0
	3	180	0.18	178	783	196	-	862	235	1.0	2.0
	4	180	0.18	178	783	196	-	862	235	1.0	4.0
	5	180	0.18	178	783	196	-	862	235	1.5	2.0
	6	180	0.18	178	783	196	-	862	235	1.5	4.0
	7	180	0.18	178	783	196	-	862	235	2.0	2.0
	8	180	0.18	178	783	196	-	862	235	2.0	4.0

W: 배합수(water), B: 바인더(binder), OPC: 보통 포틀랜드 시멘트(ordinary portland cement), Zr: 지르코늄(zirconium), BFS: 고로슬래그, F.A: 잔골재(fine aggregate), F: 필러(filler)



(a) 건재료 및 P.P 섬유 투입



(b) 배합수 및 혼화제 투입



(c) 강섬유 투입



(d) 배합 완료



(e) 시편 제작



(f) 제작 완료 시편

그림 2.5. 강섬유 보강 고전도 콘크리트 배합과정

(다) 고전도 초고성능 콘크리트 작업성능

□ 재료 배합 시, 강섬유 및 P.P 섬유 혼입으로 인해 비빔 작업성이 감소

□ 콘크리트의 작업성능 향상을 위한 배합 순서 및 과정이 중요한 요소

- 강섬유 및 P.P 섬유를 배한 순서 및 과정에 관계없이 혼입하여 배합 수행 시, 섬유 간의 뭉침 현상이 발생
- 섬유가 뭉쳐 시편이 제작될 경우, 고온 현열 저장용 초고성능 콘크리트의 성능을 감소시킬 우려가 있음.
- 이에 P.P 섬유는 건비빔 단계에 건재료와 혼입하여 재료 간에 골고루 혼합될 수 있도록 설정
- 상대적으로 고인성 및 고강성을 갖는 강섬유는 P.P 섬유 및 건재료가 배합수 및 혼화제와 섞여 유동성을 갖는 재료 상태 단계에서 혼입하여 적절한 분산성을 갖도록 설정

□ 그림 2.6에 배합이 완료된 후 시편 단면을 절단한 면을 나타냄. 콘크리트 내에 섬유가 적절히 분산되어 있음을 정성적으로 확인.



그림 2.6. 단면내 섬유 분포 형상

(라) 실험 절차

□ 그림 2.7에 수행된 전체 실험 과정을 나타냈으며, 강섬유 보강 고전도 콘크리트의 특성을 파악하기 위하여 열사이클 적용 전과 후의 실험을 수행

- 물리적 특성을 파악하기 위하여 열사이클 적용 전과 매회 열사이클 적용 후의 단위중량 및 초음파속도 측정
- 열사이클 적용 전과 매회 열사이클 적용 후의 열전도율 및 비열을 측정하여 열적 특성 파악
- 열사이클 적용 전과 6회의 열사이클 적용 후의 압축강도 및 쪼갬인장강도 실험을 수행하여 역학적 특성 분석

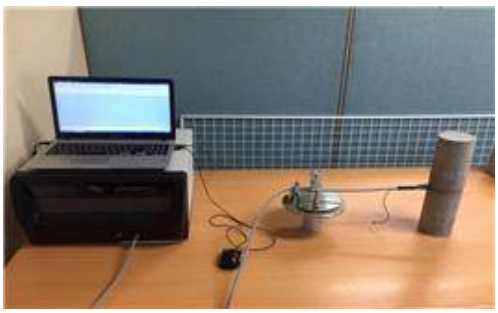
□ 다양한 조건의 열사이클을 적용하여 고전도 콘크리트 블록의 온도 분포를 측정하고 특성을 분석



(a) 단위중량 측정



(b) 초음파속도 측정



(c) 열전도율 및 비열 측정



(d) 압축강도 실험



(e) 쪼갬인장강도 실험

그림 2.7. 측정 실험 과정

(2) 고온 축열 및 방열 모사를 위한 열사이클 특성

(가) 고온 조건 열사이클 모델링

□ 고온용 소성로(그림 2.8)를 이용하여 최대온도 조건 400℃의 목표 온도를 설정하여 재료 시편에 열사이클을 적용

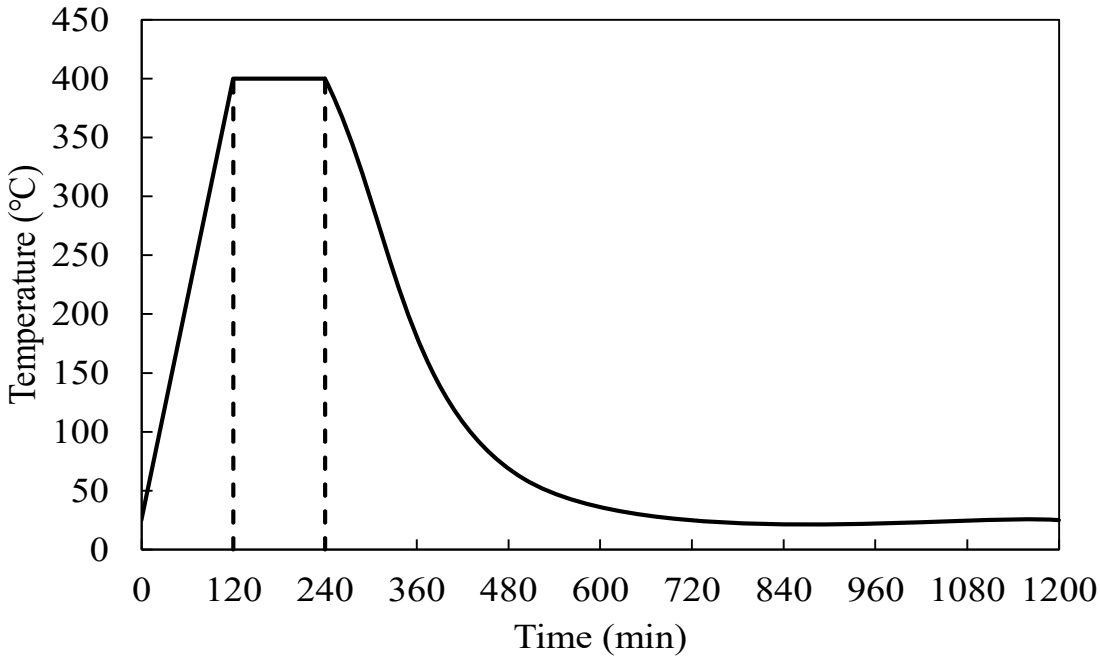
- 상온에서 2시간 동안 최대 목표 온도까지 가열, 최대 목표 온도에서 2시간 동안 유지, 최대 목표 온도에서 상온까지 16시간 동안 냉각하는 열사이클을 설정하여 총 6회 적용하였으며, 그림 2.9의 (a)에 도시화한 그림을 나타냄

□ 가열온도와 시편 내부의 온도를 비교하기 위하여 온도센서(thermo couple)를 매립하여 측정을 수행하였으며, 그 결과를 그림 2.9의 (b)에 나타냄

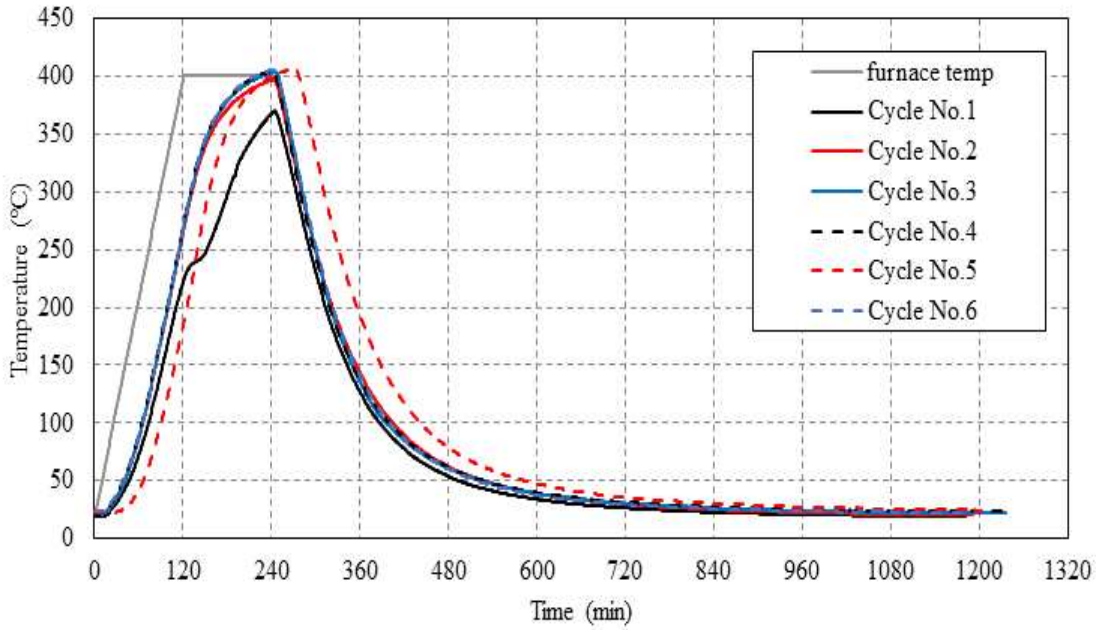
- 상승 구간에서 가열되는 기체 온도와 콘크리트 내부 온도와의 차이는 약 50℃로 측정되었으며, 유지되는 구간에서 최대 목표 온도까지 도달한 것을 확인
- 1회의 열사이클 적용 시 콘크리트 시편은 최대 목표 온도까지 도달하지 못한 것으로 나타나며, 이는 콘크리트 내부 공극의 수분 증발에 에너지가 소모되어 나타나는 현상으로 판단. 즉, 소성로 공급 열에너지가 콘크리트 내부 수분 증발에 필요한 에너지로 사용되어 콘크리트 온도 상승 능력에 영향을 미친 것으로 판단됨.
- 2번째 이후의 열사이클 가열조건에서 콘크리트 내부온도는 소성로 가열온도에 근접한다.



그림 2.8. 열사이클용 고온 소성로



(a) 열사이클 시나리오



(b) 콘크리트 내부의 열사이클 측정 온도

그림 2.9. 재료 특성을 분석하기 위한 열사이클 곡선

(나) 고온 열사이클 조건 고전도 초고성능 콘크리트 특성

□ 콘크리트가 고온에 노출될 경우, 콘크리트 내부에 존재하는 수분은 기화하여 팽창됨. 팽창이 거듭될수록 최종적으로 콘크리트 폭렬 현상이 발생

□ 폭렬 현상의 미시적 매커니즘은 다음과 같음

- 고온에 노출된 콘크리트에 열이 내부로 전달되는 단계
- 콘크리트 내부에 함유된 수분이 수증기로 변화하면서 팽창하고 공극의 압력이 증가하는 단계
- 과도한 공극 내압으로 인하여 콘크리트 내에서부터 폭렬이 발생함.

□ 콘크리트 강도가 고강도일수록 콘크리트 내부 공긍이 작아 폭렬 현상이 증가할 가능성이 존재한다.

□ 폭렬 현상을 효과적으로 방지할 수 있는 P.P 섬유를 혼입

- 선행되었던 연구들에서 단위배합당 P.P 섬유량 2kg/m^3 혼입 시, 효과적으로 폭렬 현상을 방지할 수 있는 것으로 나타남.
- 본 연구에서는 모든 배합에 P.P 섬유량을 2kg/m^3을 혼입하였으며, 고온의 열사이클 적용 후에 폭렬 현상은 나타나지 않음

□ 고온 열사이클 후에는 보통 콘크리트의 경우, 시편 표면에 미세균열이 다수 발생됨.

- 반면, 본 연구에서 설정한 고전도 초고성능 콘크리트는 미세균열의 수가 현격히 적게 관찰되었으며, P.P 섬유의 균열제어 효과뿐만 아니라 강섬유가 균열 발생 억제에 효과적인 역할을 한 것으로 판단(그림 2.10).



(a) 열사이클 적용 전　　(b) 열사이클 적용 후

그림 2.10. 고전도 초고성능 콘크리트의 열사이클 적용 전과 후 시편 표면 상태 비교

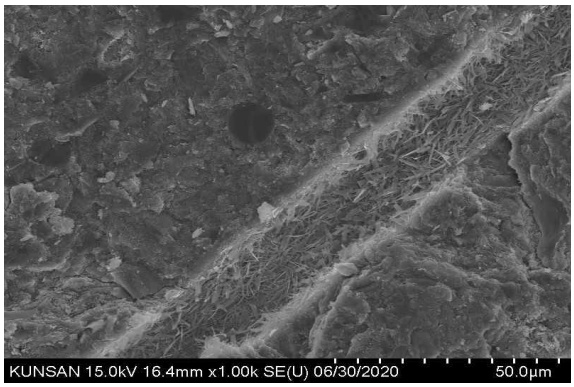
(다) 고전도 초고성능 콘크리트의 미세구조 분석

① SEM

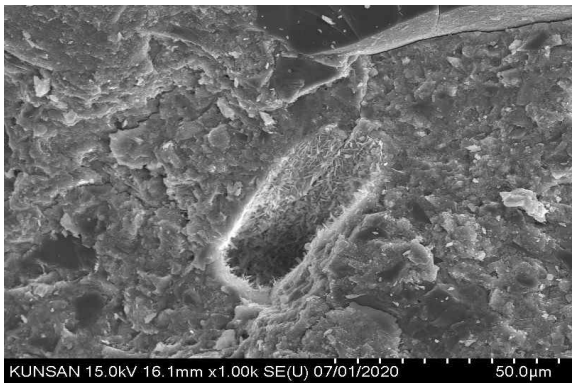
□ 열사이클 적용에 따른 영향을 분석하기 위하여 SEM 촬영을 수행하였으며, 그림 2.11과 그림 2.12에 나타냄.

- 고온의 열사이클 적용 후, 모든 실험군에서 P.P 섬유가 용해된 것을 관찰하였으며, 용해된 위치에는 P.P 섬유 잔여물이 남아있는 것으로 나타남.
- 강섬유 혼입률이 증가할수록 SEM 이미지에서 관찰되는 강섬유의 수는 뚜렷한 차이를 나타내지 않았으며, 이는, 강섬유가 콘크리트 내에서 전체적으로 적절히 분산되었으나, 일부 국부적인 위치에서 뭉치는 현상에 기인한 것으로 판단.
- 고온의 열사이클 적용 후 P.P 섬유는 용해됨으로써 콘크리트의 폭렬 방지를 하는 역할을 하나, P.P 섬유가 위치하던 부위에 공극을 형성함과 동시에 열린 기공이 되므로 콘크리트 내부와 외부를 잇는 통로로 전환. 이후 콘크리트 내에 존재하는 수분이 이동할 수 있는 역할을 하여 수분 증발을 촉진시키고, 동시에 고전도 콘크리트의 성능 저하를 유발하는 것으로 판단됨.

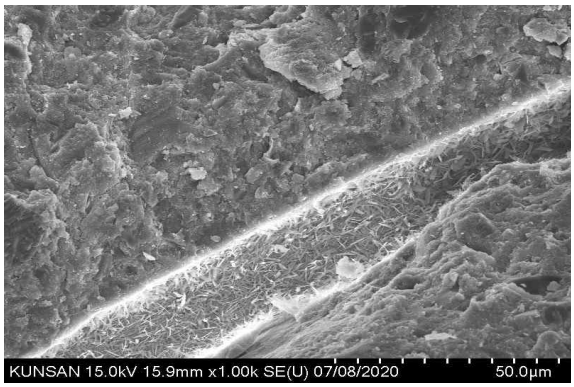
□ 동일한 배합의 콘크리트를 사용하였기 때문에 생성되는 수화물은 뚜렷한 차이를 나타내지 않음. 반면에 P.P 섬유량 2kg/m3보다 4kg/m3에서 상대적으로 많은 수의 공극과 미세균열이 관찰.



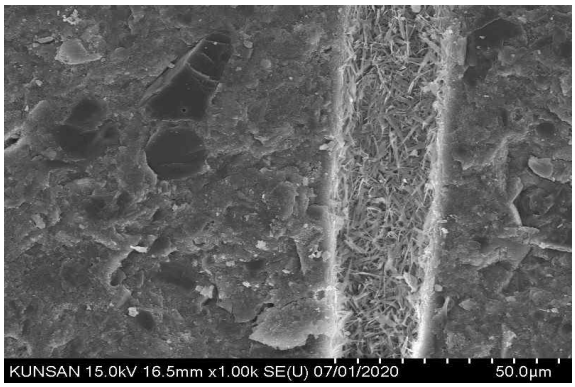
(a) 강섬유 혼입률= 0.0%



(b) 강섬유 혼입률= 1.0%

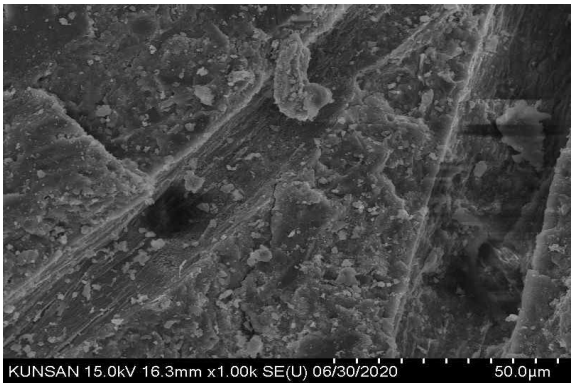


(c) 강섬유 혼입률= 1.5%

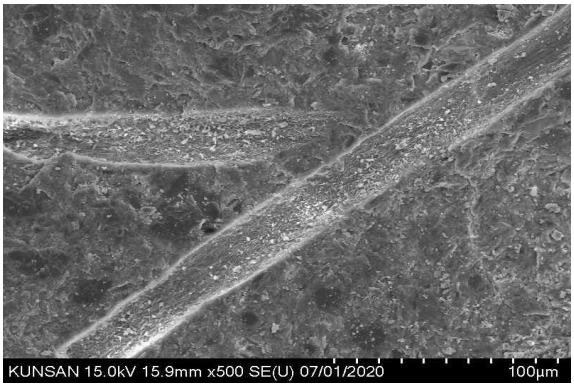


(d) 강섬유 혼입률= 2.0%

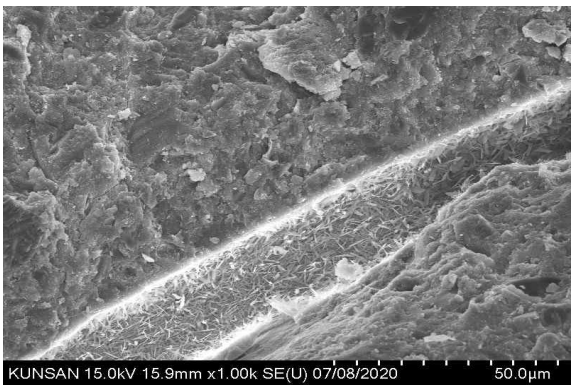
그림 2.11. 미세구조 분석 (6회 열사이클 적용 후, P.P 섬유량= 2kg/m^3)



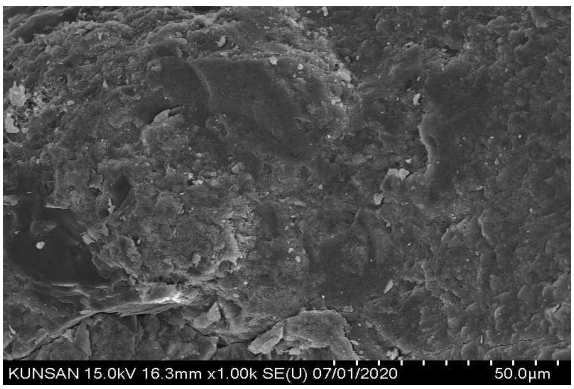
(a) 강섬유 혼입률= 0.0%



(b) 강섬유 혼입률= 1.0%



(c) 강섬유 혼입률= 1.5%



(d) 강섬유 혼입률= 2.0%

그림 2.12. 미세구조 분석 (6회 열사이클 적용 후, P.P 섬유량= 4kg/m^3)

② TGA (열중량 분석)

□ 최대온도 1,000℃, 승온 속도 10℃/min의 조건으로 TGA 분석을 수행하였으며, 결과를 그림 2.13에서 그림 2.20에 나타냄

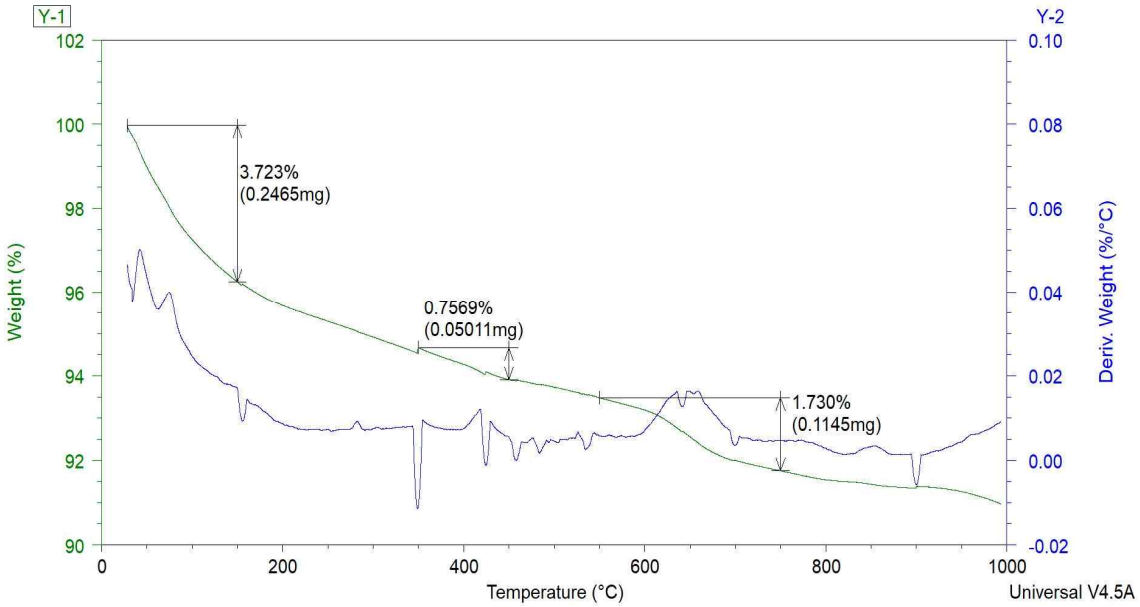
□ 큰 중량 감소를 나타낸 0~150℃, 350~450℃ 및 550~750℃의 세 가지 경우로 온도 구간을 구분하여 중량 감소율을 표 2.3에 나타냄.

- 0~150℃ 온도 구간에서 열사이클 적용 전의 실험군에서는 표면수 및 모세관수 증발에 의하여 3.28~4.34%의 급격한 중량 감소율을 나타내고 있으며, 열사이클 적용 후에서는 0.54~2.13%의 상대적으로 낮은 중량 감소율을 나타냄. 400℃ 이상의 열사이클 적용 후에는 콘크리트 내부 대부분의 수분이 증발되므로 이와 같은 결과를 나타낸 것으로 판단
- 350~450℃ 온도 구간에서는 수화생성물인 수산화칼슘의 탈수가 이루어지며, 열사이클 적용 전 및 후에서의 중량 감소율은 각각 0.42~0.79% 및 0.16~0.31%로 나타남. 중량 감소율이 낮다는 것은 고온의 열사이클로 인해 수화물이 분해되어 소실된 양이 크다는 것을 의미함.
- 400℃ 이상의 열사이클을 적용한 실험군에서 이미 수화물의 분해가 일부 진행되었을 것으로 판단. 이로 인해 열사이클을 적용한 초고성능 콘크리트의 물리적, 역학적 및 열적 특성에 불리한 영향을 준 것으로 판단.
- 600~750℃ 온도 구간은 탄산칼슘의 탈탄산이 나타나는 구간이며, 열사이클 적용 전 및

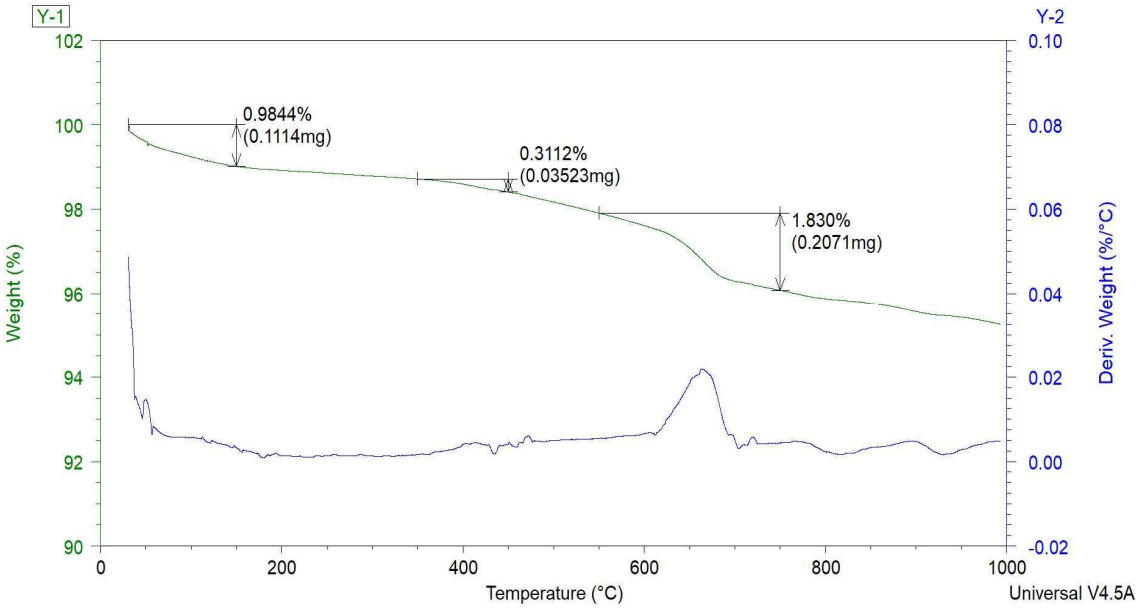
후에서의 중량 감소율은 각각 1.38~1.96% 및 1.30~1.83%로 나타남. 강섬유 혼입률 0%를 제외한 다른 강섬유 혼입률에서는 열사이클 적용 전보다 열사이클 적용 후의 중량 감소율이 낮은 것으로 나타남. 실질적으로 열사이클 최대온도는 400℃이므로 600~750℃에서 분해가 이루어지는 수화물의 분해에 영향을 준 것으로 판단된다.

표 2.3. 온도 구간별 중량감소율(%)

강섬유 혼입률 (%)	P.P 섬유 혼입량 (kg/m^3)	열사이클	온도 고려 범위 (℃)		
			0~150	350~450	550~750
0.0	2.0	초기 상태	3.72	0.76	1.73
		6회 열사이클 적용	0.98	0.31	1.83
	4.0	초기 상태	4.25	0.69	1.67
		6회 열사이클 적용	0.54	0.16	1.30
1.0	2.0	초기 상태	3.28	0.42	1.38
		6회 열사이클 적용	0.79	0.17	1.31
	4.0	초기 상태	4.12	0.79	1.96
		6회 열사이클 적용	0.57	0.26	1.65
1.5	2.0	초기 상태	4.19	0.67	1.95
		6회 열사이클 적용	0.89	0.16	1.75
	4.0	초기 상태	3.83	0.59	1.76
		6회 열사이클 적용	2.13	0.28	1.74
2.0	2.0	초기 상태	3.61	0.58	1.74
		6회 열사이클 적용	0.72	0.20	1.35
	4.0	초기 상태	4.34	0.66	1.94
		6회 열사이클 적용	0.68	0.31	1.65

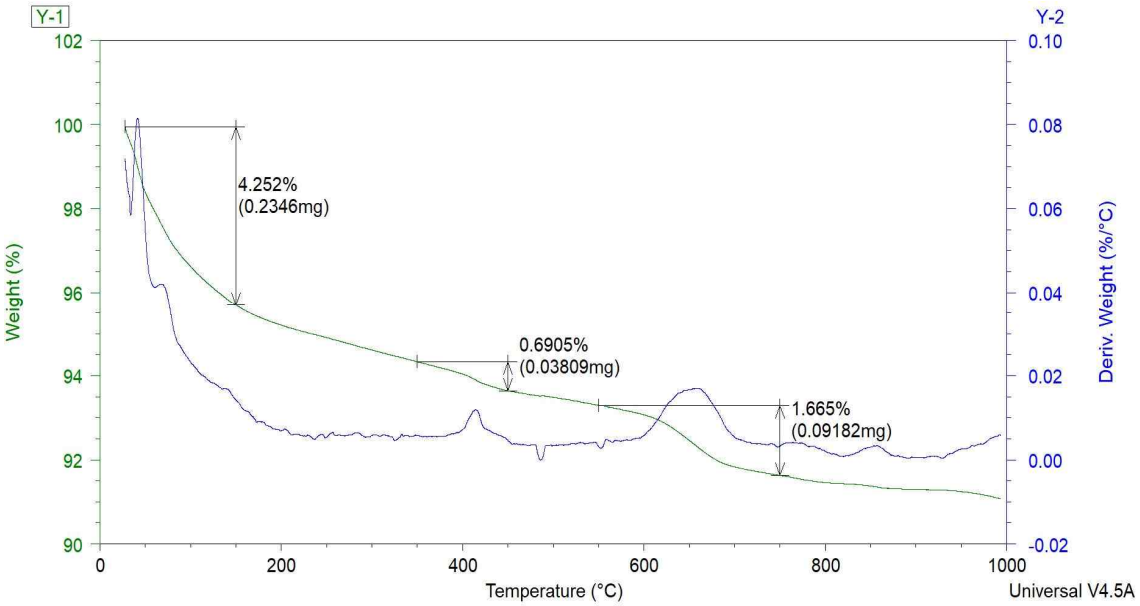


(a) 열사이클 적용 전(초기 상태)

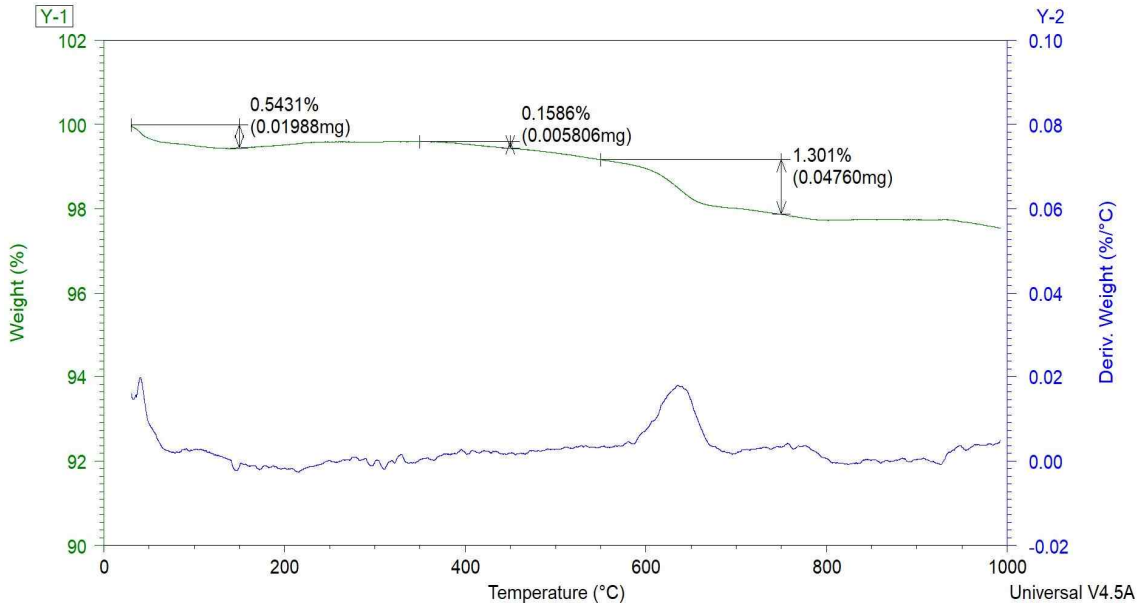


(b) 6회 열사이클 적용

그림 2.13. 열사이클 적용 전·후의 TGA 분석 비교 (강섬유 혼입량= 0.0%, P.P 섬유량= 2kg/m³)

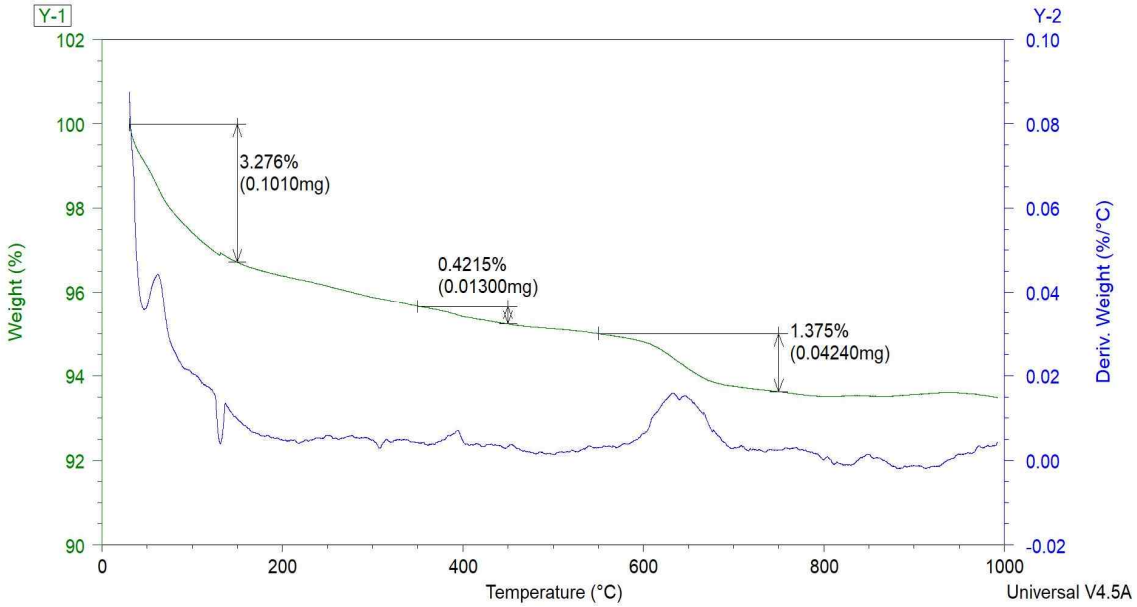


(a) 열사이클 적용 전(초기 상태)

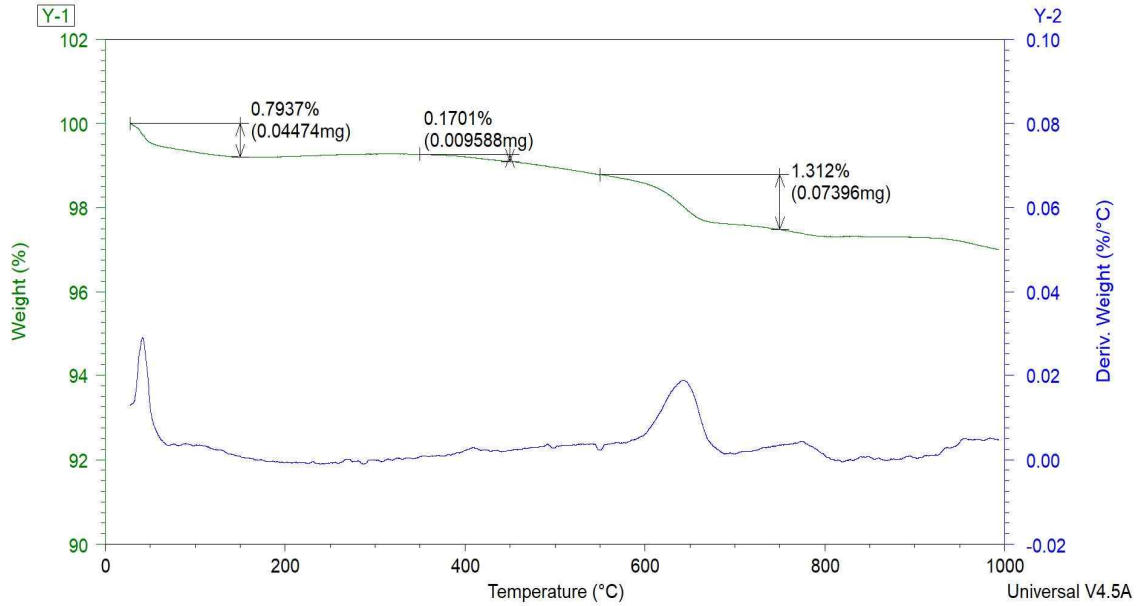


(b) 6회 열사이클 적용

그림 2.14. 열사이클 적용 전·후의 TGA 분석 비교(강섬유 혼입량= 0.0%, P.P 섬유량= 4kg/m³)

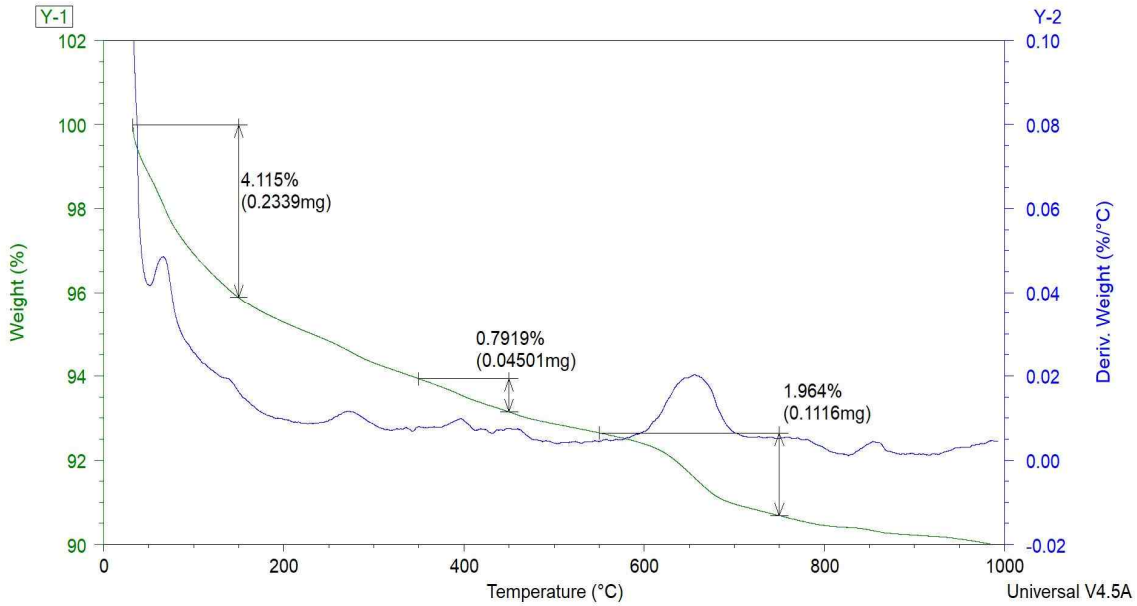


(a) 열사이클 적용 전(초기 상태)

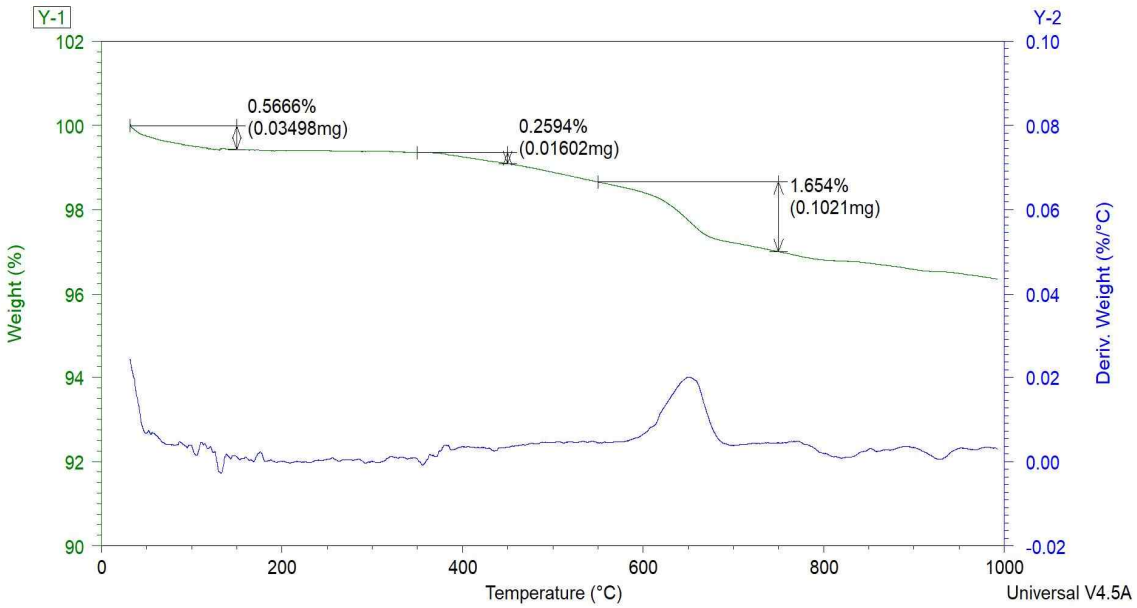


(b) 6회 열사이클 적용

그림 2.15. 열사이클 적용 전·후의 TGA 분석 비교(강섬유 혼입량= 1.0%, P.P 섬유량= 2kg/m³)

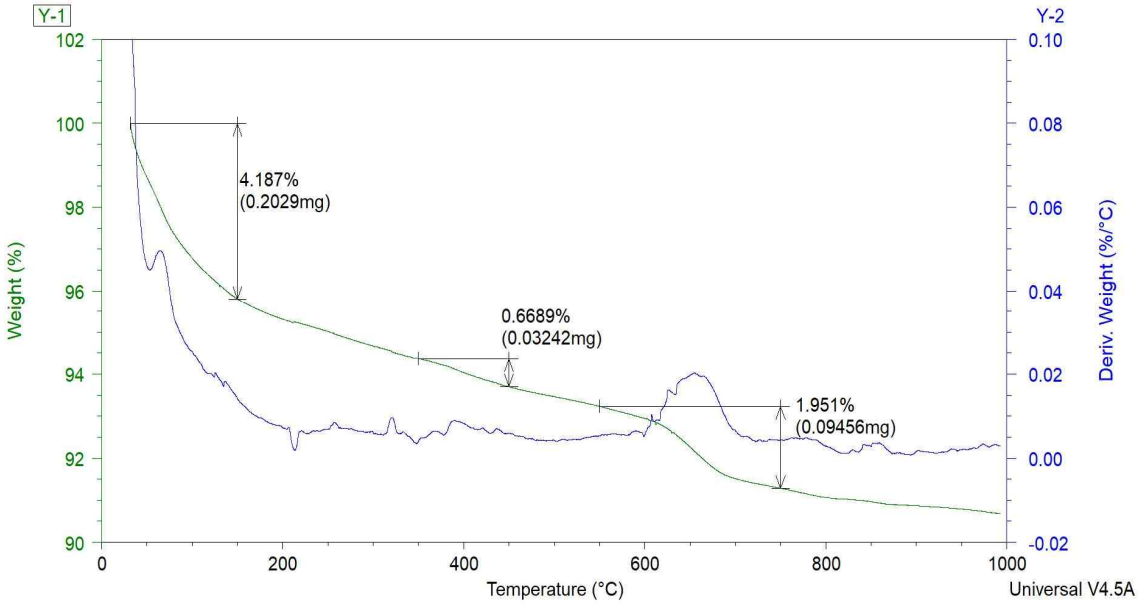


(a) 열사이클 적용 전(초기 상태)

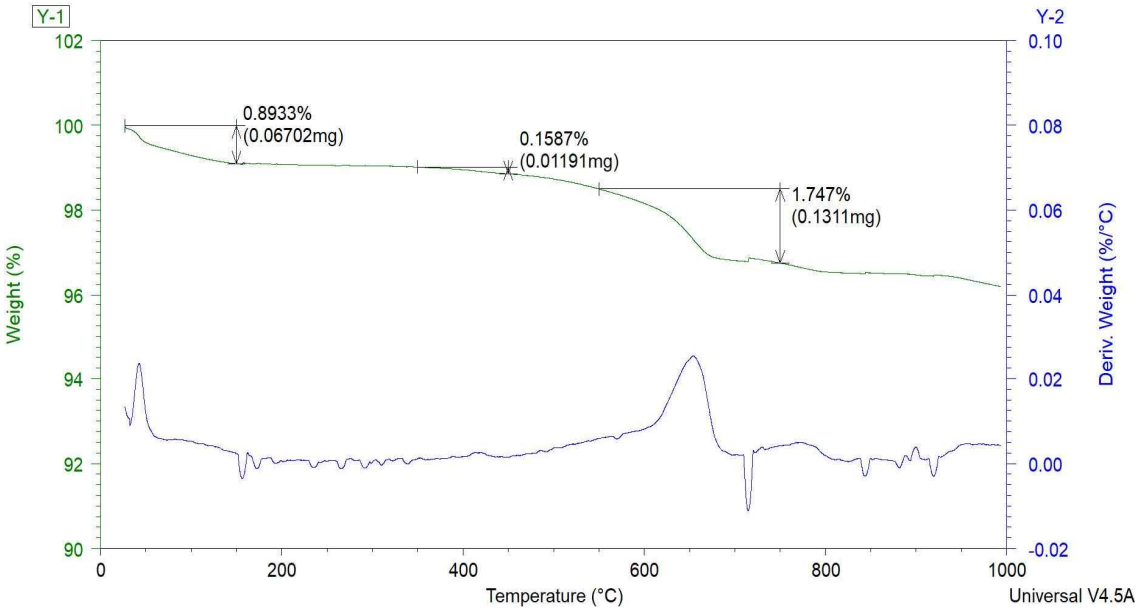


(b) 6회 열사이클 적용

그림 2.16. 열사이클 적용 전·후의 TGA 분석 비교(강섬유 혼입량= 1.0%, P.P 섬유량= 4kg/m³)

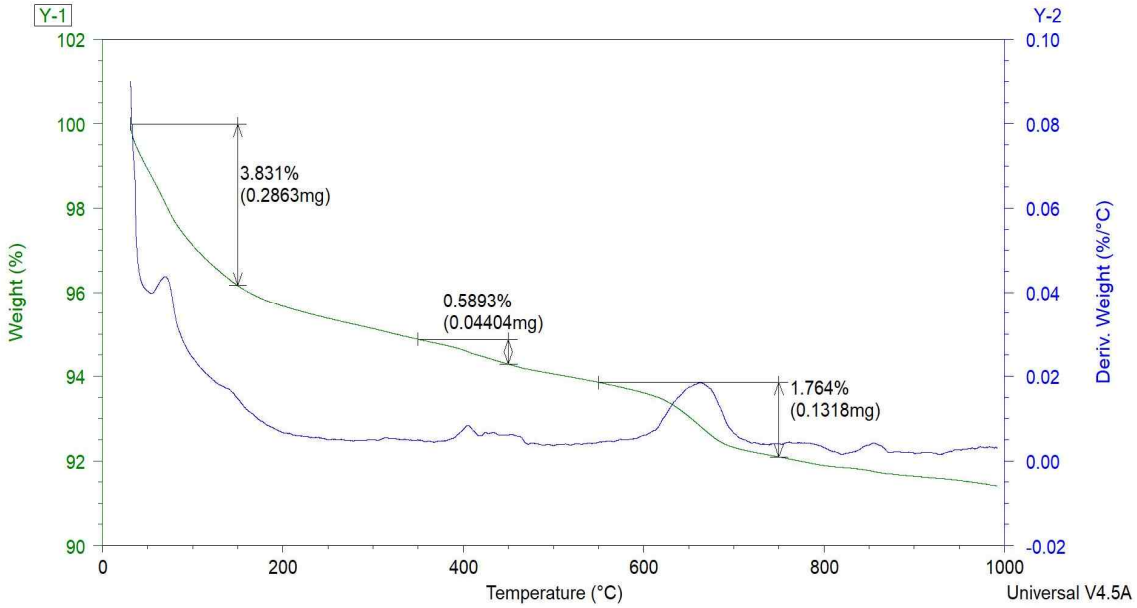


(a) 열사이클 적용 전(초기 상태)

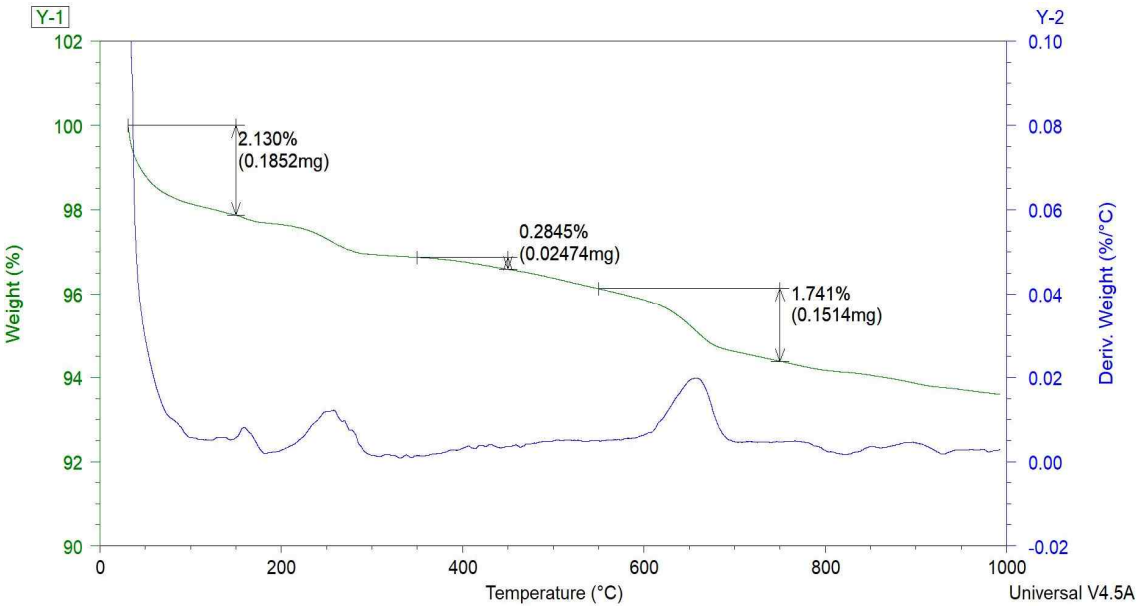


(b) 6회 열사이클 적용

그림 2.17. 열사이클 적용 전·후의 TGA 분석 비교(강섬유 혼입량= 1.5%, P.P 섬유량= 2kg/m³)

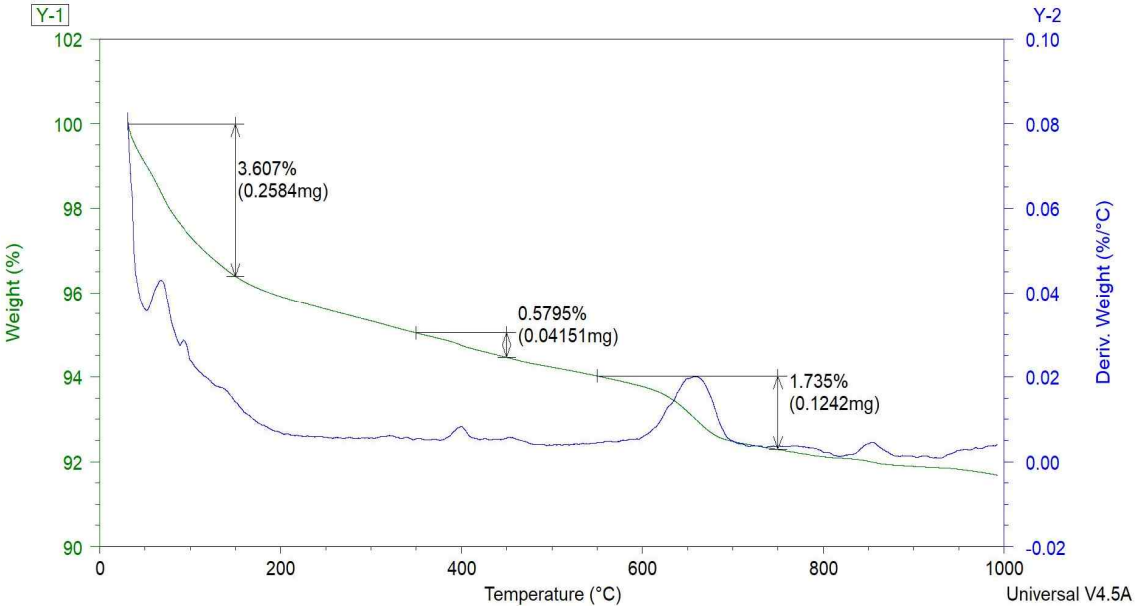


(a) 열사이클 적용 전(초기 상태)

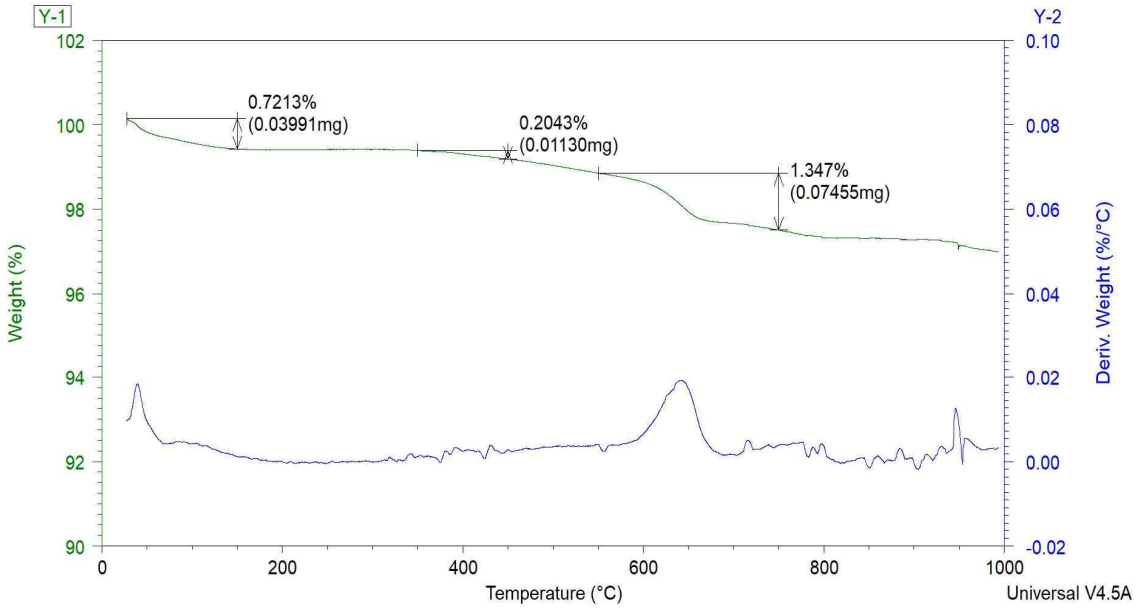


(b) 6회 열사이클 적용

그림 2.18. 열사이클 적용 전·후의 TGA 분석 비교(강섬유 혼입량= 1.5%, P.P 섬유량= 4kg/m³)

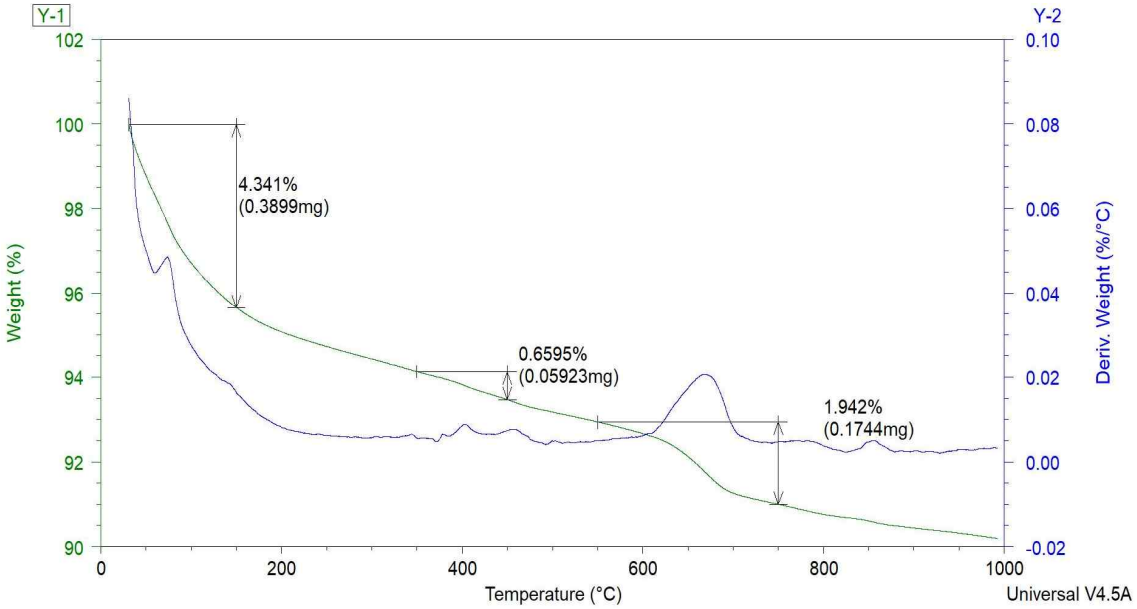


(a) 열사이클 적용 전(초기 상태)

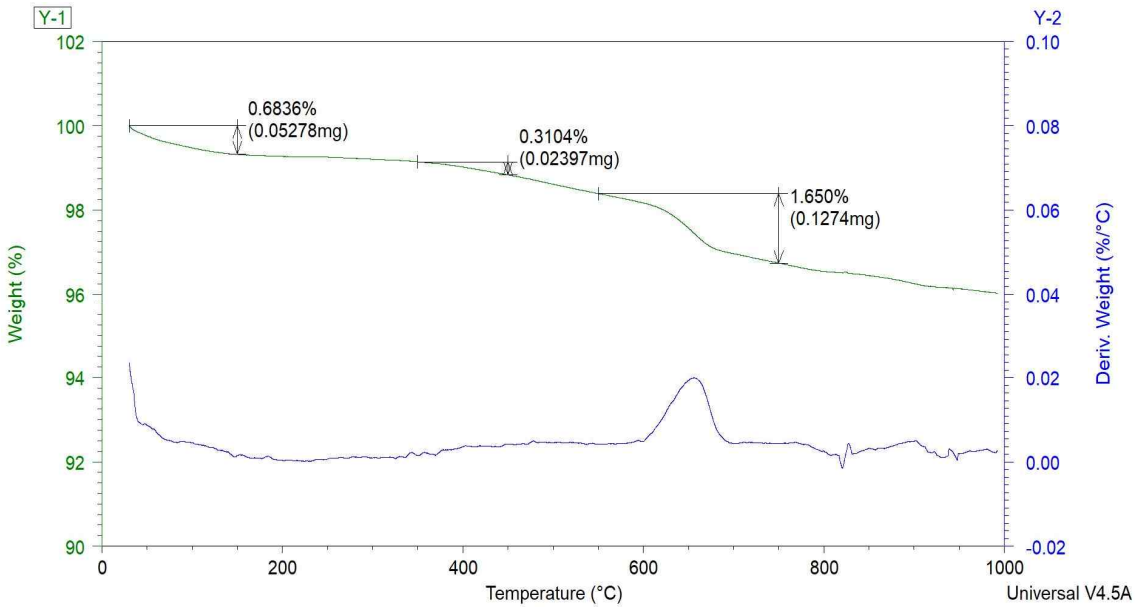


(b) 6회 열사이클 적용

그림 2.19. 열사이클 적용 전·후의 TGA 분석 비교(강섬유 혼입량= 2.0%, P.P 섬유량= 2kg/m³)



(a) 열사이클 적용 전(초기 상태)



(b) 6회 열사이클 적용

그림 2.20. 열사이클 적용 전·후의 TGA 분석 비교(강섬유 혼입량= 2.0%, P.P 섬유량= 4kg/m³)

③ 초고성능 콘크리트 열중량 감소 비교(120 vs. S180)

□ S120 시리즈 고전도 초고성능 콘크리트와 S180 시리즈 고전도 초고성능 콘크리트의 TGA 분석을 통해 감소된 총감소량을 그래프로 나타냄(그림 2.21).

※ S120: 120 MPa의 목표 압축강도를 갖는 고전도 초고성능 콘크리트

※ S180: 180 MPa의 목표 압축강도를 갖는 고전도 초고성능 콘크리트

□ 상온 조건(25℃) 및 열사이클 적용 후에서 S120의 열중량 총감소량이 S180의 열중량 총감소량보다 크게 나타남.

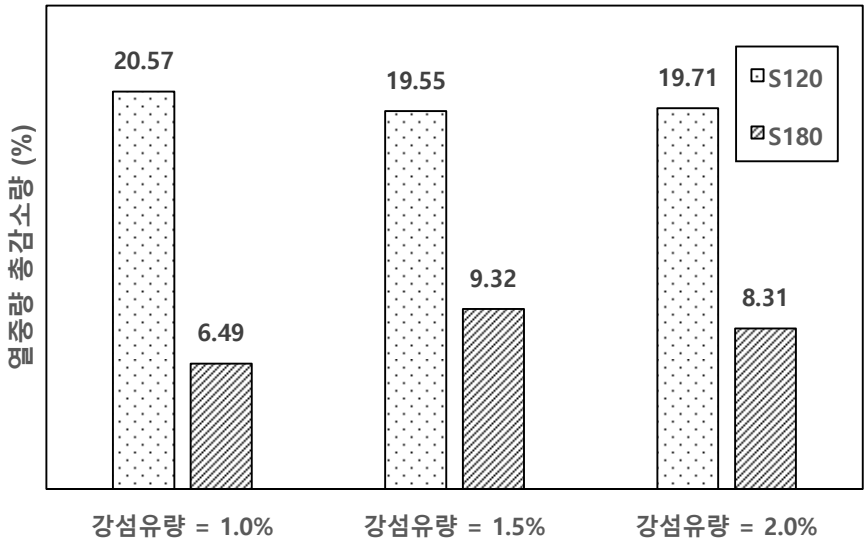
- 표면수 및 모세관수의 증발이 열중량 총감소량에서 가장 큰 부분을 차지하고 있음.
- 따라서, 고전도 초고성능 콘크리트 배합표에서 알 수 있듯이 W/B가 상대적으로 큰 S120 시리즈에서 높은 감소량을 나타낸 것으로 판단.

□ S120 시리즈의 열사이클 적용 전과 후의 열중량 총감소량의 차이는 강섬유량 1.0, 1.5 및 2.0%에서 각각 7.6, 7.2, 7.5%로 나타남. 또한, S180 시리즈의 열사이클 적용 전과 후의 열중량 총감소량의 차이는 강섬유량 1.0, 1.5 및 2.0%에서 각각 3.5, 5.5 및 5.2%의 결과가 도출됨

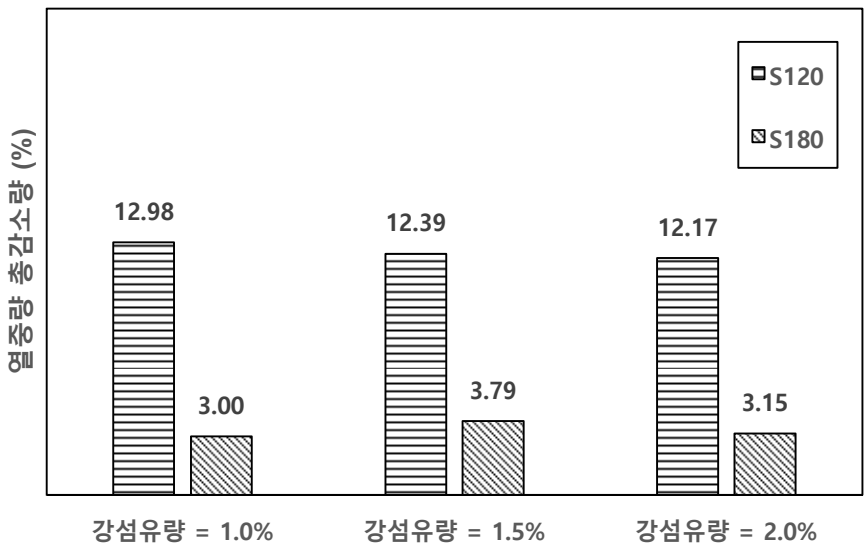
- S180의 열사이클 적용 전과 후의 열중량 총감소량의 차이는 S120의 열사이클 적용 전과 후의 열중량 총감소량보다 낮게 나타남. 고온 조건을 적용한 후의 중량의 변화가 낮다는 것은 그만큼 고온 조건의 영향이 적다는 것을 의미하며, 안정성이 확보된다는 것을 의미. 따라서, 내구성이 상대적으로 우수할 것으로 판단.

□ 동일 강섬유 혼입률에서 S120 시리즈보다 S180 시리즈의 열중량 총감소량이 낮게 나타남.

- 강도가 높을수록 고온의 열사이클을 수행하더라도 시편에 존재하는 수분의 증발 또는 수화물의 분해로 인해 감소하는 양이 적어 내구성에 주는 영향이 상대적으로 낮다는 것으로 판단됨.
- 따라서, 상대적으로 S180 시리즈의 초고성능 콘크리트는 고온 조건에서 내구성을 확보하기에 유리한 조건이라고 판단.



(a) 상온 조건 (25℃)



(b) 열사이클 적용 (6회, 최대온도 = 400℃)

그림 2.21. 열 중량 총감소량 비교 (S120 시리즈 vs S180 시리즈)

(3) 열사이클링 조건 고전도 초고성능 콘크리트의 역학 특성

(가) 단위중량

□ 열사이클 적용 전과 매회 열사이클 적용 후의 단위중량 측정 수행(그림 2.22)

- 콘크리트의 단위중량은 콘크리트의 열용량에 중요한 인자이며 콘크리트의 단위중량이 클수록 열에너지 저장 성능에 효과적임
- 열에너지 저장의 열역학을 정확하게 시뮬레이션하기 위해서는 콘크리트의 단위중량에 관한 정보가 필요

□ 1회의 열사이클 적용 이후의 단위중량은 급격한 감소를 나타내었으며, 2의 열사이클 적용 후에서는 단위중량이 소폭 감소(그림 2.23). 이후, 3회 열사이클 적용 후부터 단위중량은 일정하게 유지되었으며, 물리적 안정성에 거의 도달했음을 나타냄.

- 그림 2.24에서 열사이클 적용 전 대비 6회 적용 후의 단위중량 감소율은 P.P 섬유량 2kg/m^3일 때, 강섬유 혼입률 0.0%, 1.0%, 1.5% 및 2.0%에서 각각 7.03%, 6.85%, 6.77% 및 6.59%로 감소하는 경향을 나타냈으며, P.P 섬유량 4kg/m^3일 때, 강섬유 혼입률 0.0%, 1.0%, 1.5% 및 2.0%에서 각각 7.00%, 7.01%, 6.85% 및 6.71%로 감소하는 경향을 나타냄. 강섬유 혼입률이 증가할수록 열사이클 적용 전 대비 적용 후의 단위중량 감소율은 감소하였으며, 강섬유는 열사이클에 영향을 받아도 단위중량이 감소하지 않는 것을 의미하므로 열에너지를 저장하는데 유리하게 작용할 것으로 판단됨.
- 그림 2.25에서 열사이클 적용 전 및 6회 적용 후, 강섬유 혼입률 0.0%에서 P.P 섬유량에 따른 영향은 거의 없는 것으로 나타남. 반면에, 열사이클 적용 전 및 6회 적용 후, 강섬유 혼입률 1.0%, 1.5% 및 2.0%에서 P.P 섬유량이 증가함에 따라 단위중량은 감소. P.P 섬유는 150℃~200℃ 사이에 융점이 형성되어 있으며, 본 연구에서 적용한 400℃ 온도 조건의 열사이클 적용 후에는 융해되어 사라지며 그 위치에 공극이 형성. 따라서, P.P 섬유량이 증가할수록 생성되는 공극은 증가하고 단위중량은 감소하는 경향을 나타냄.
- 또한, 고온의 열사이클을 받는 동안 콘크리트 내부의 자유수 및 흡착수는 증발하며, 이는 궁극적으로 콘크리트의 단위중량 감소를 유발
- 콘크리트 내부의 수분 증발은 단위중량의 감소뿐만 아니라 공극을 형성시켜 강도 특성, 즉, 역학적 특성에 불리하게 작용

□ 표 2.4에 단위중량 전체 측정 결과를 나타냄.

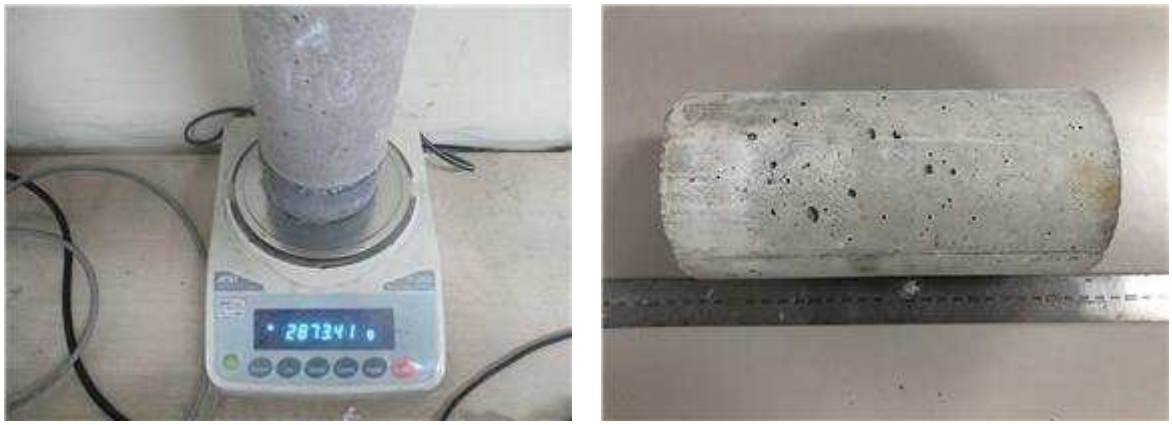
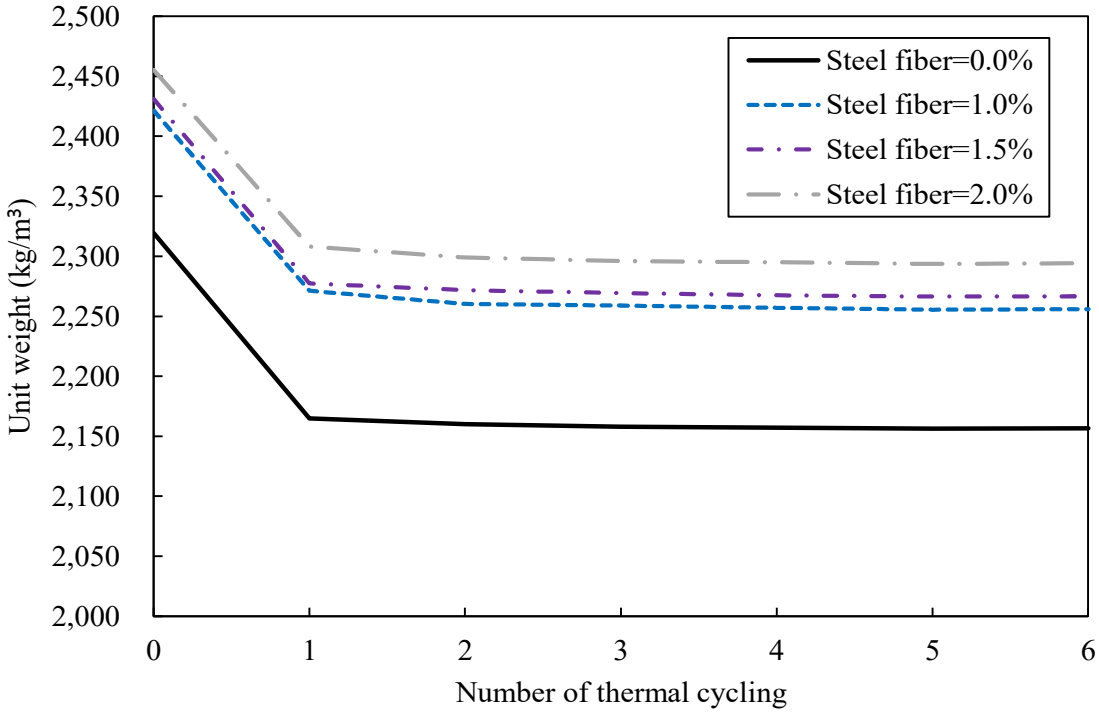


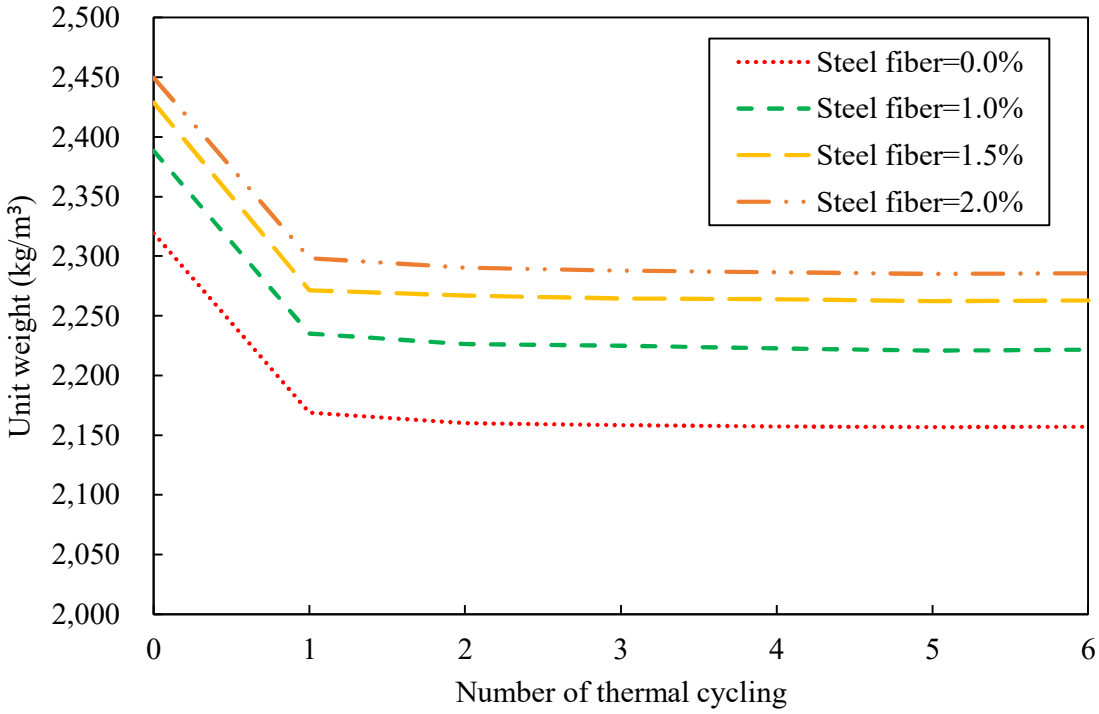
그림 2.22. 단위중량 측정

표 2.4. 단위중량 측정 결과(kg/m^3)

Steel fiber content	P.P fiber content	Thermal cycling						
%	kg/m^3	Initial state	1 cycle	2 cycles	3 cycles	4 cycles	5 cycles	6 cycles
0.0	2	2,319	2,165	2,160	2,158	2,157	2,156	2,157
	4	2,319	2,169	2,160	2,158	2,157	2,157	2,157
1.0	2	2,421	2,271	2,260	2,259	2,257	2,255	2,256
	4	2,388	2,235	2,226	2,225	2,223	2,221	2,222
1.5	2	2,431	2,277	2,272	2,269	2,267	2,266	2,267
	4	2,429	2,272	2,267	2,265	2,264	2,262	2,263
2.0	2	2,455	2,308	2,299	2,296	2,295	2,293	2,294
	4	2,450	2,298	2,290	2,288	2,287	2,285	2,286

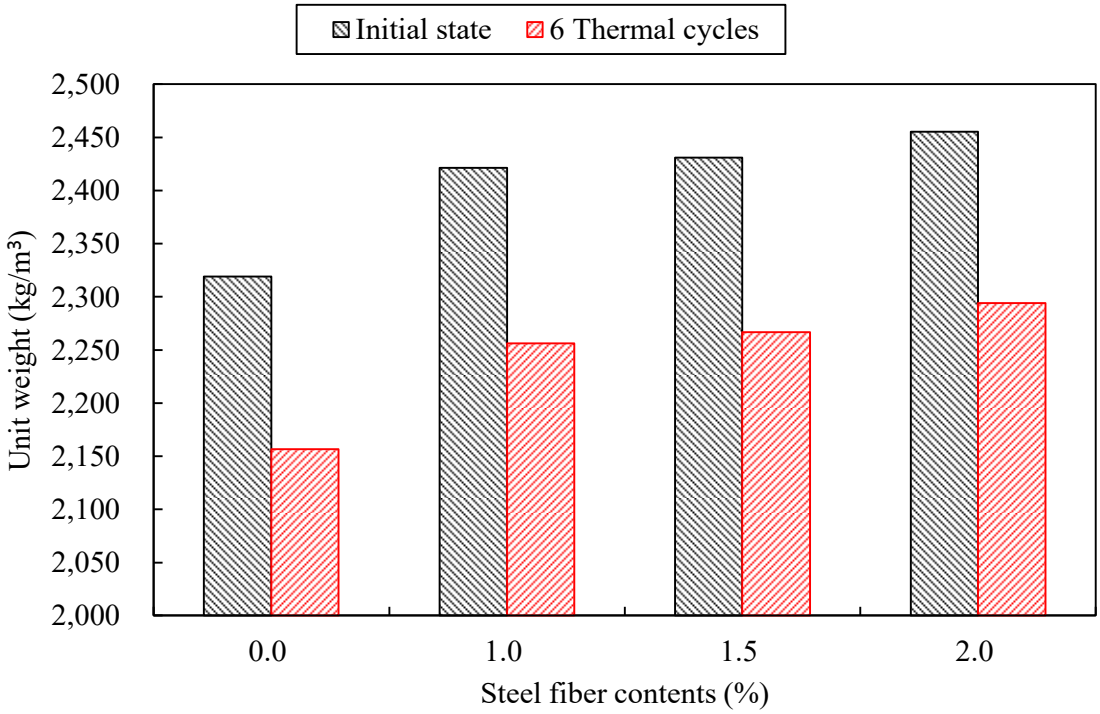


(a) P.P 섬유량= 2kg/m³

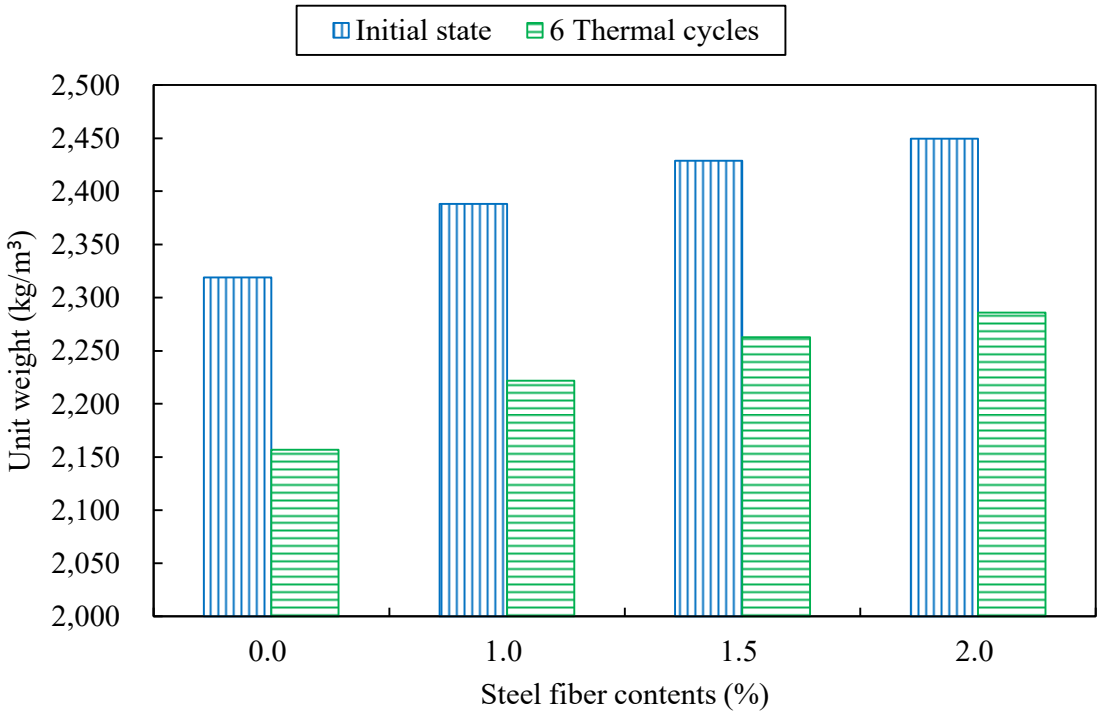


(b) P.P 섬유량= 4kg/m³

그림 2.23. 열사이클 적용 횟수에 따른 단위중량 변화

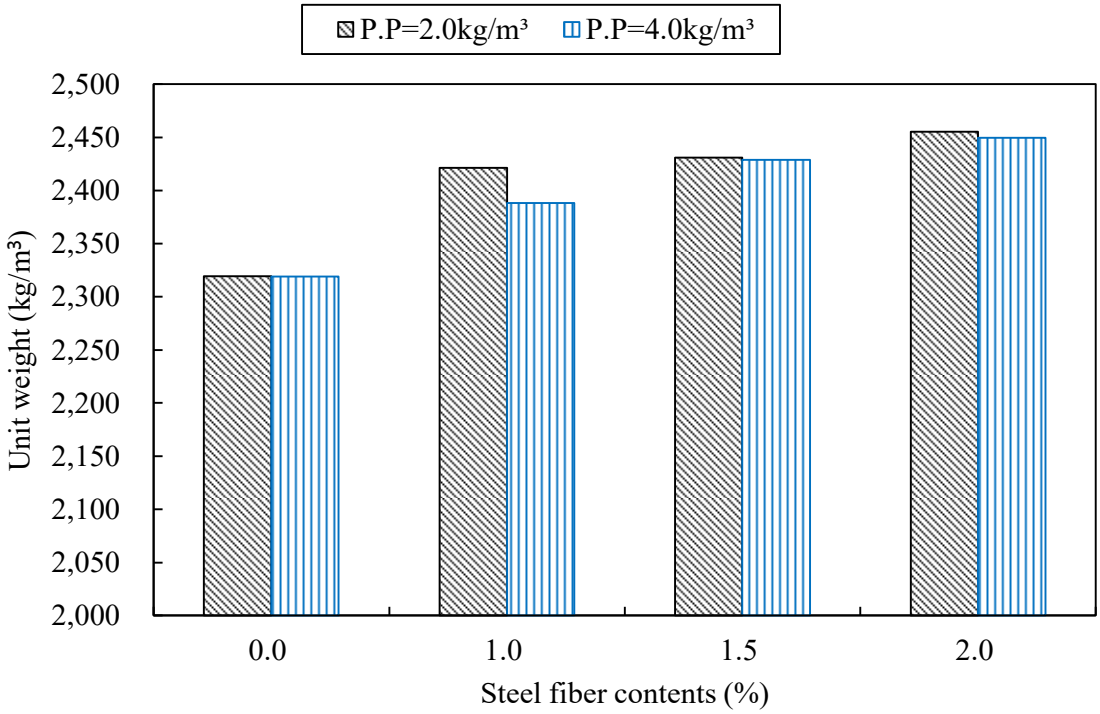


(a) P.P 섬유량= 2kg/m³

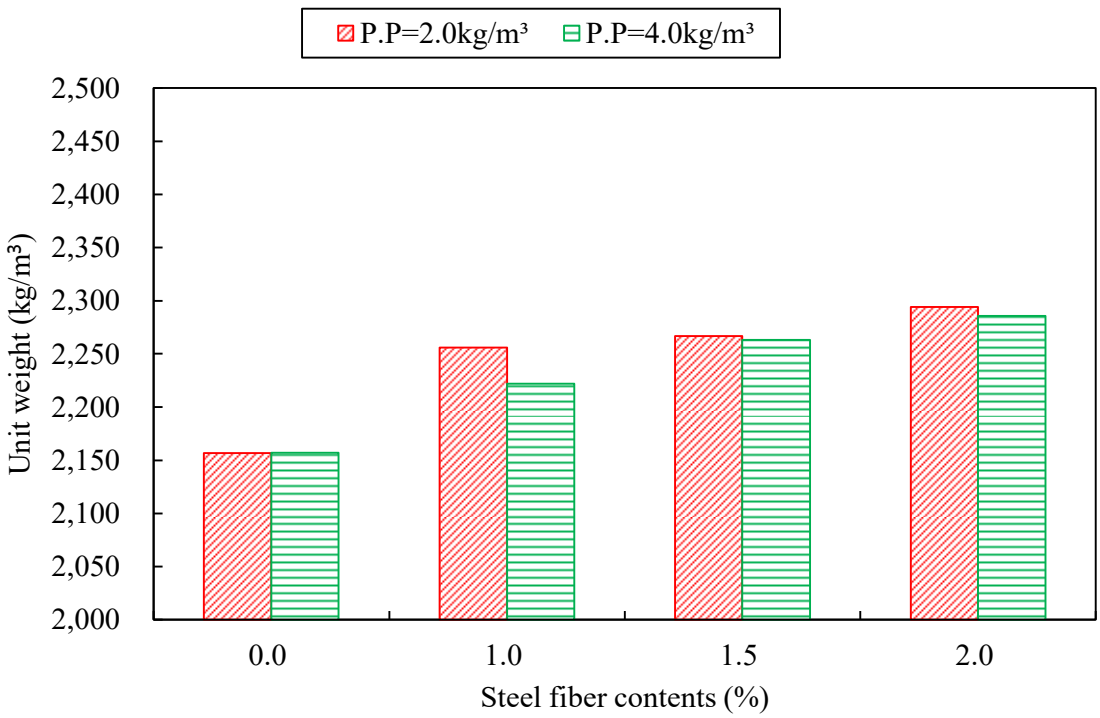


(b) P.P 섬유량= 4kg/m³

그림 2.24. 열사이클 적용 전·후의 강섬유 혼입률에 따른 단위중량 결과 비교



(a) 열사이클 적용 전(초기 상태)



(a) 열사이클 6회 적용

그림 2.25. 강섬유 혼입률별 P.P 섬유 혼입량에 따른 단위중량 결과 비교

(나) 압축강도

□ 열사이클 적용 전과 6회 열사이클 적용 후의 압축강도 실험을 수행하여 측정(그림 2.26)

□ 강섬유 혼입률별 P.P 섬유량에 따른 압축강도 결과를 열사이클 적용 전과 6회 열사이클 후로 구분하여 표 2.5에 나타내었음.

- 그림 2.27에서 P.P 섬유량 2kg/m3 및 4kg/m^3에서 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 압축강도는 증가하며, 강섬유 혼입률이 증가할수록 압축강도 증진에 기여하는 영향이 큰 것으로 판단됨.
- 열사이클 적용 전 대비 6회 적용 후의 압축강도 감소율은 P.P 섬유량 2kg/m^3일 때, 강섬유 혼입률 0.0%, 1.0%, 1.5% 및 2.0%에서 각각 7.9%, 15.5%, 18.4% 및 17.9%로 나타났으며, 강섬유 혼입률 1.5%에서 가장 큰 값을 나타냄. P.P 섬유량 4kg/m^3에서는 강섬유 혼입률 0.0%, 1.0%, 1.5% 및 2.0%에서 각각 8.4%, 11.4%, 18.4% 및 17.9%로 강섬유 혼입률 1.5%에서 가장 큰 값을 나타냄.
- 고온의 열사이클은 콘크리트 내에 존재하는 수분의 증발을 유발하고 내부 공극을 형성시켜 압축강도를 감소시킨 것으로 판단됨.

□ 그림 2.28은 열사이클 적용 전과 후의 섬유 혼입량에 따른 영향을 비교한 그래프이며, P.P 섬유량이 2kg/m^3인 변수에서 4kg/m^3인 변수보다 압축강도가 높은 것으로 나타남.

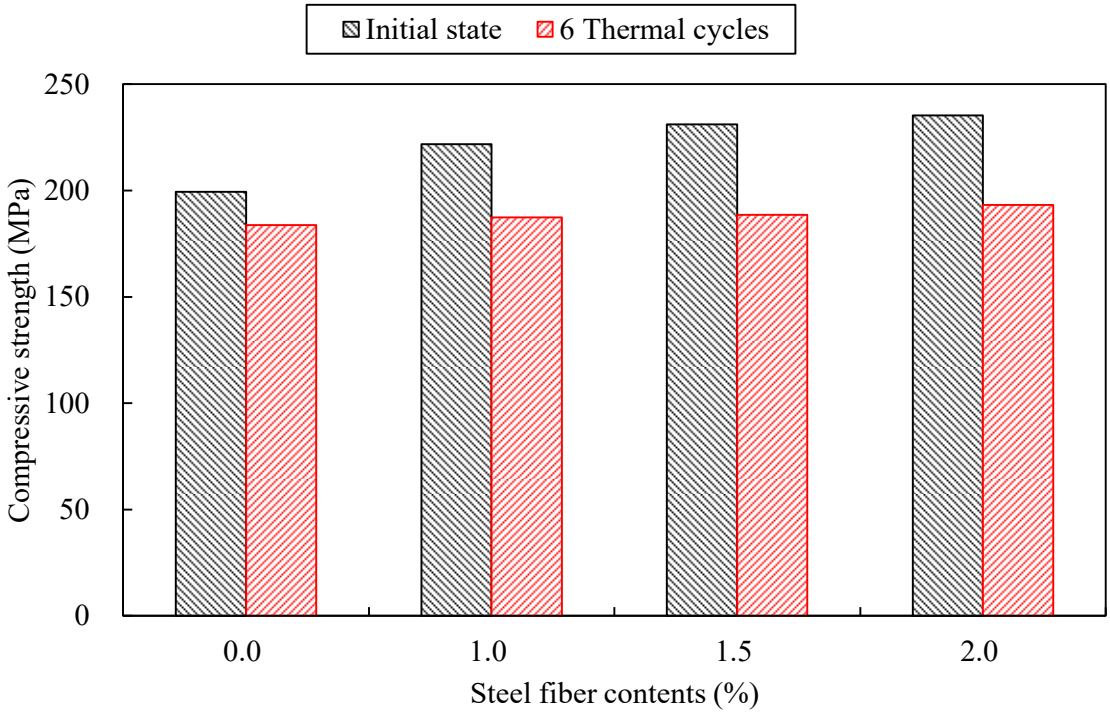
- 또한, 강섬유 혼입률 0.0%, 1.0%, 1.5% 및 2.0%의 열사이클 적용 전과 6회 열사이클 적용 후에 P.P 섬유 혼입량 2kg/m^3에서보다 4kg/m^3에서 더 작은 값을 나타냄.
- 일정량 이상의 P.P 섬유 혼입은 오히려 강도를 감소시키므로 고온 노출 시 발생되는 폭렬을 억제시킬 수 있는 범위내에서 최적량을 도출하여 적용하는 것이 유효할 것으로 판단.



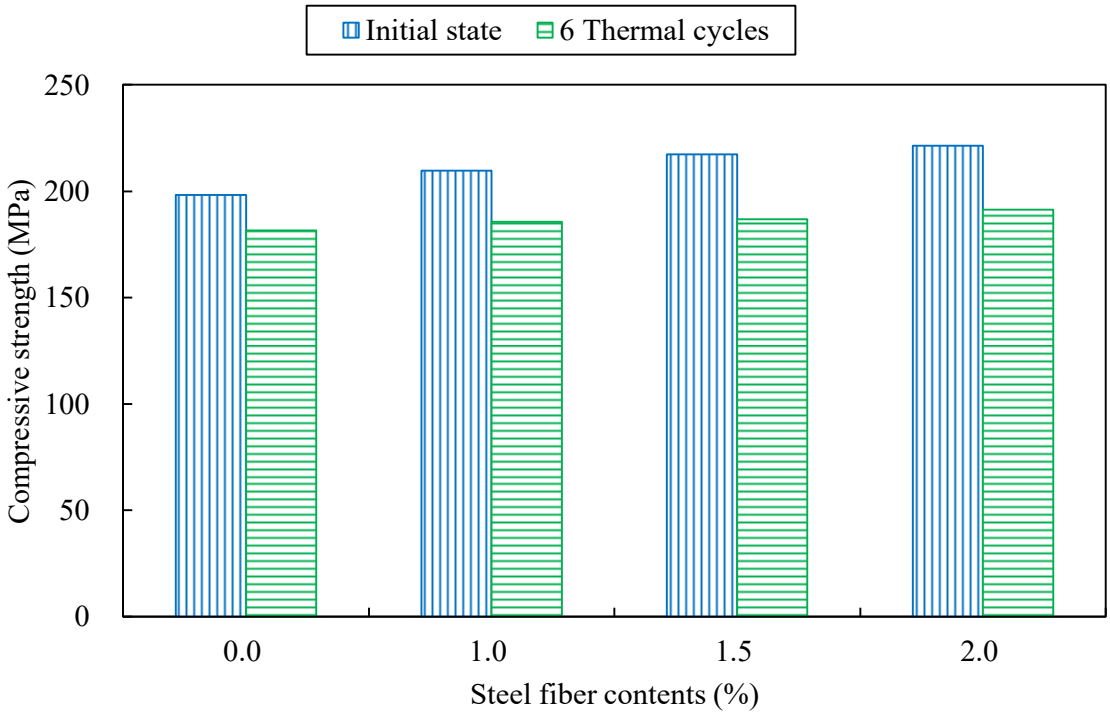
그림 2.26. 압축강도 실험

표 2.5. 압축강도 결과(MPa)

Steel fiber content	P.P fiber content	Thermal cycling		Loss
%	kg/m^3	Initial state	6 cycles	(%)
0.0	2	199.4	183.7	7.9
	4	198.3	181.6	8.4
1.0	2	221.7	187.3	15.5
	4	209.6	185.7	11.4
1.5	2	231.1	188.6	18.4
	4	217.3	186.8	14.0
2.0	2	235.4	193.3	17.9
	4	221.5	191.3	13.6

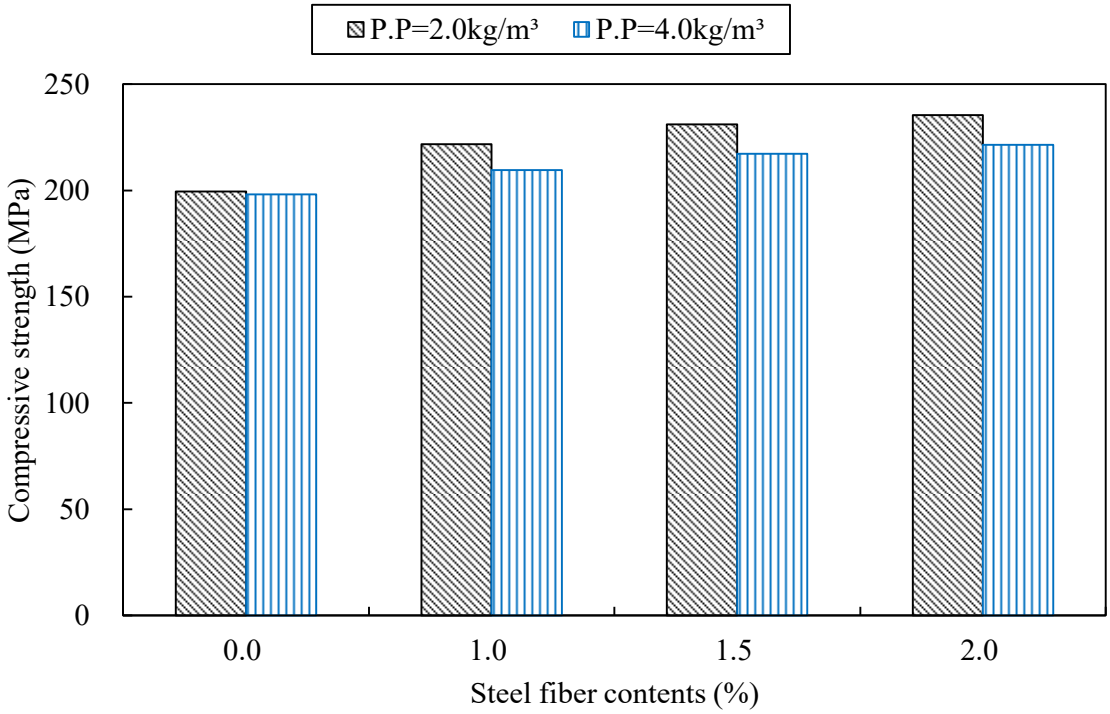


(a) P.P 섬유량= 2kg/m³

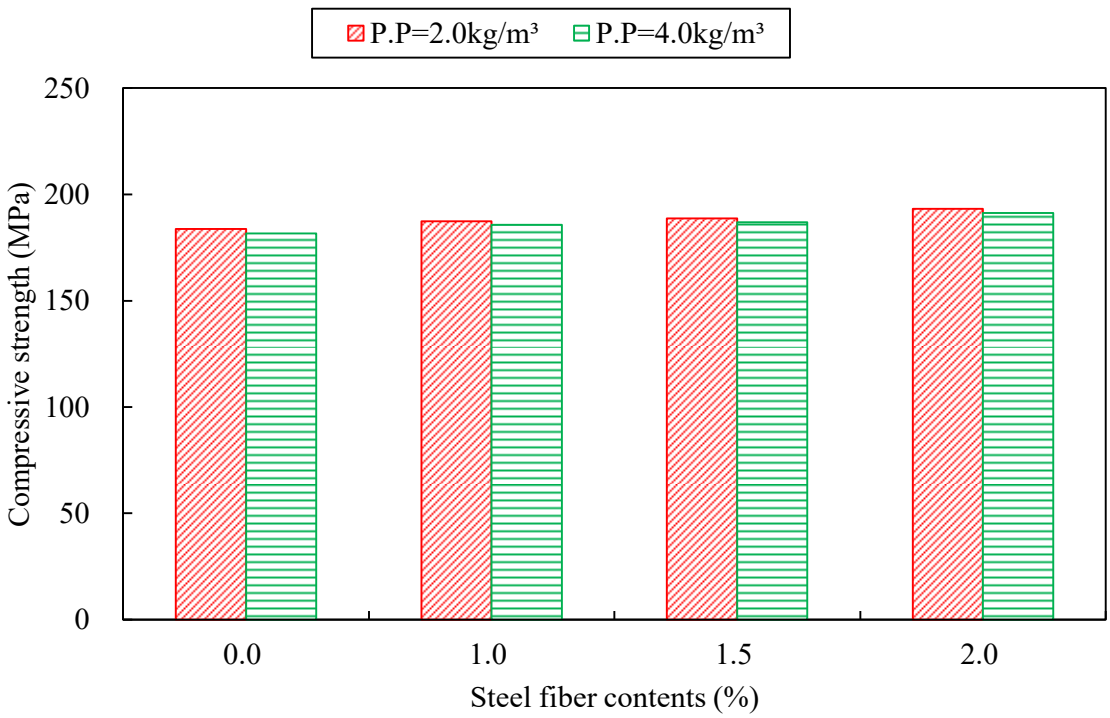


(b) P.P 섬유량= 4kg/m³

그림 2.27. 열사이클 적용 전・후의 강섬유 혼입률에 따른 압축강도 결과 비교



(a) 열사이클 적용 전(초기 상태)



(b) 열사이클 6회 적용

그림 2.28. 열사이클 적용 전・후의 P.P 섬유 혼입량에 따른 압축강도 결과 비교

□ S120 시리즈 초고성능 콘크리트와 S180 시리즈 초고성능 콘크리트의 압축강도와 단위중량과의 관계 분석을 수행

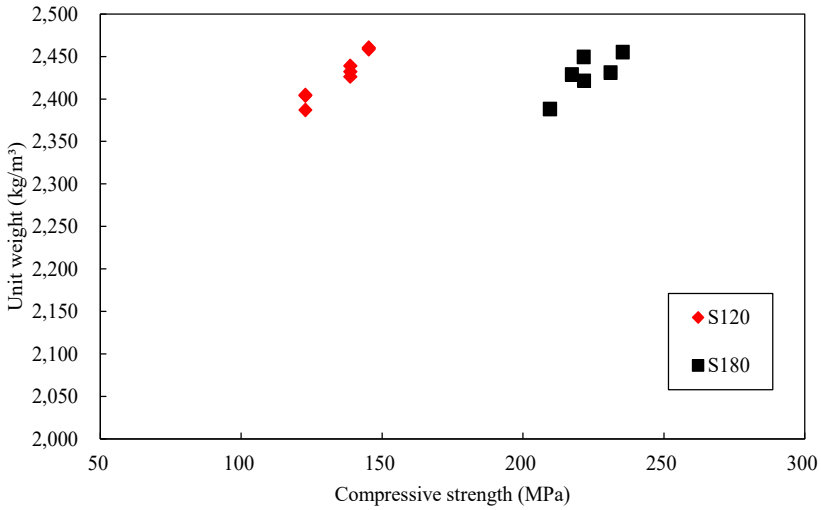
※ S120: 120 MPa의 목표 압축강도를 갖는 고전도 초고성능 콘크리트

※ S180: 180 MPa의 목표 압축강도를 갖는 고전도 초고성능 콘크리트

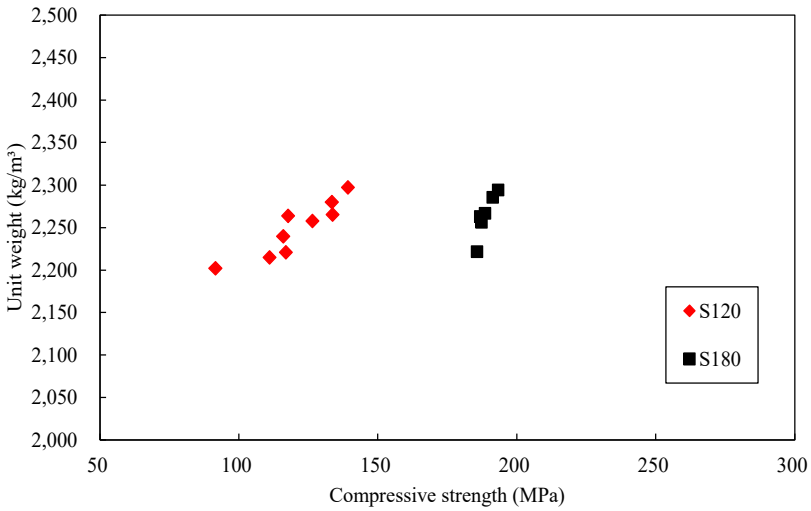
- 상대적으로 낮은 목표 압축강도를 갖는 S120 시리즈 상관관계 결과는 좌측 영역에 나타나고, 높은 목표 압축강도를 갖는 S180 시리즈 상관관계는 우측 영역에 나타난다.

□ 압축강도가 증가함에 따라 단위중량도 증가하는 경향을 나타내며, 압축강도 및 단위중량간의 관계는 우상향의 비례관계를 나타냄(그림 2.29).

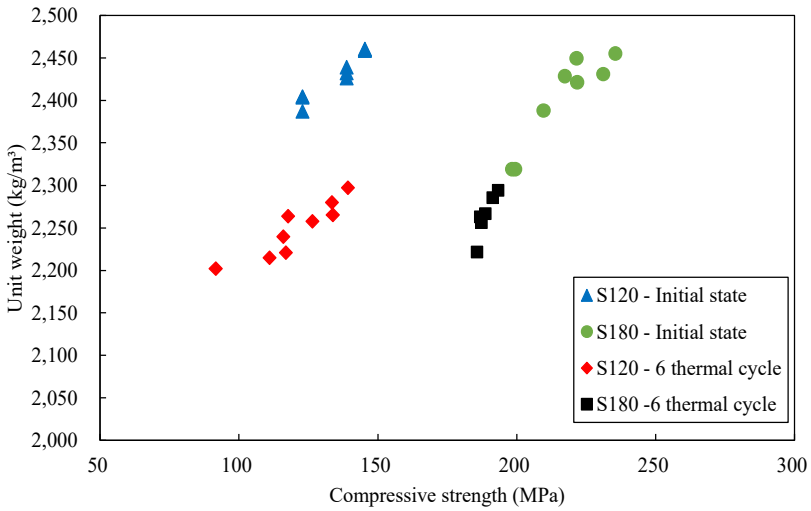
- 단위중량은 콘크리트의 열용량 산정에 매우 중요한 인자로 작용
- 관계 분석을 통해 단위중량과 압축강도는 유기적인 관계를 나타냄. 따라서, 높은 압축강도는 단위중량의 높음을 의미하며, 우수한 내구성과 축열 성능을 나타낼 것으로 기대.



(a) 상온 상태 (Initial state)



(b) 열사이클 적용 (6 thermal cycle)



(c) 상온 상태와 열사이클 적용 실험 결과

그림 2.29. 압축강도와 단위중량 관계 분석

(다) 쪼갬인장강도

□ 열사이클 적용 전과 6회 열사이클 적용 후의 쪼갬인장강도 실험을 수행하여 측정(그림 2.30)

□ 강섬유 혼입률별 P.P 섬유량에 따른 쪼갬인장강도 결과를 열사이클 적용 전과 6회 열사이클 후로 구분하여 표 2.6에 나타내었음.

- 그림 2.31에서 P.P 섬유량 2kg/m^3 및 4kg/m^{3}에서 강섬유 혼입률이 증가할수록 쪼갬인장강도는 증가하는 경향을 나타냈으며, 강섬유 혼입률이 증가할수록 강섬유의 높은 인성으로 인해 강도 증진에 기여하는 영향이 큰 것으로 판단됨.
- 또한, 열사이클 적용 전 대비 6회 적용 후의 쪼갬인장강도 감소율은 P.P 섬유량 2kg/m^3 일 때, 강섬유 혼입률 0.0%, 1.0%, 1.5% 및 2.0%에서 각각 26.4%, 8.0%, 12.9% 및 20.7%로 나타났으며, 강섬유 혼입률 0.0%에서 가장 큰 값을 나타냄.
- P.P 섬유량 4kg/m^{3}에서는 강섬유 혼입률 0.0%, 1.0%, 1.5% 및 2.0%에서 각각 26.9%, 11.8%, 16.7% 및 19.9%로 강섬유 혼입률 0.0%에서 가장 큰 값을 나타냄.
- 강섬유가 혼입되지 않은 콘크리트에 고온의 열사이클이 노출될 경우, 인장강도에 매우 취약한 것으로 판단.

□ 그림 2.32는 열사이클 적용 전과 후의 섬유 혼입량에 따른 영향을 비교한 그래프이며, P.P 섬유량이 2kg/m^{3}인 변수에서 4kg/m^{3}인 변수보다 쪼갬인장강도가 높은 것으로 나타남.

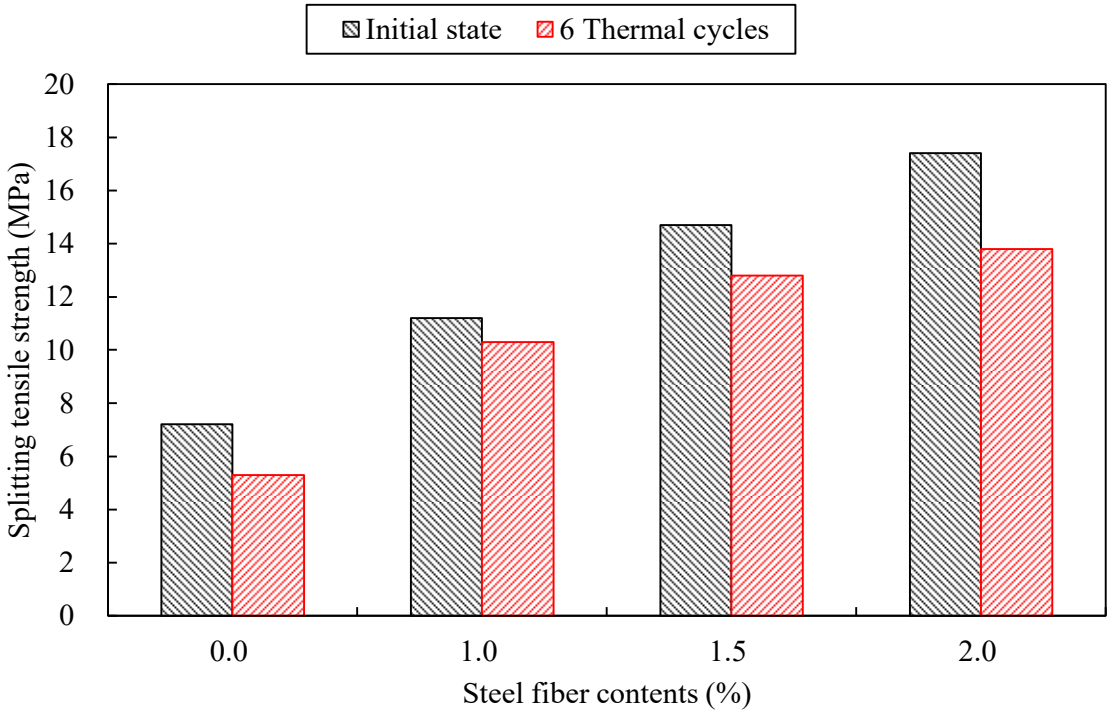
- 또한, 강섬유 혼입률 0.0%, 1.0%, 1.5% 및 2.0%의 열사이클 적용 전과 6회 열사이클 적용 후에 P.P 섬유 혼입량 2kg/m^{3}에서보다 4kg/m^{3}에서 더 작은 값을 나타냄.
- 일정량 이상의 P.P 섬유 혼입은 오히려 강도를 감소시키므로 고온 노출 시 발생되는 폭렬을 억제시킬 수 있는 범위내에서 최적량을 도출하여 적용하는 것이 유효함.



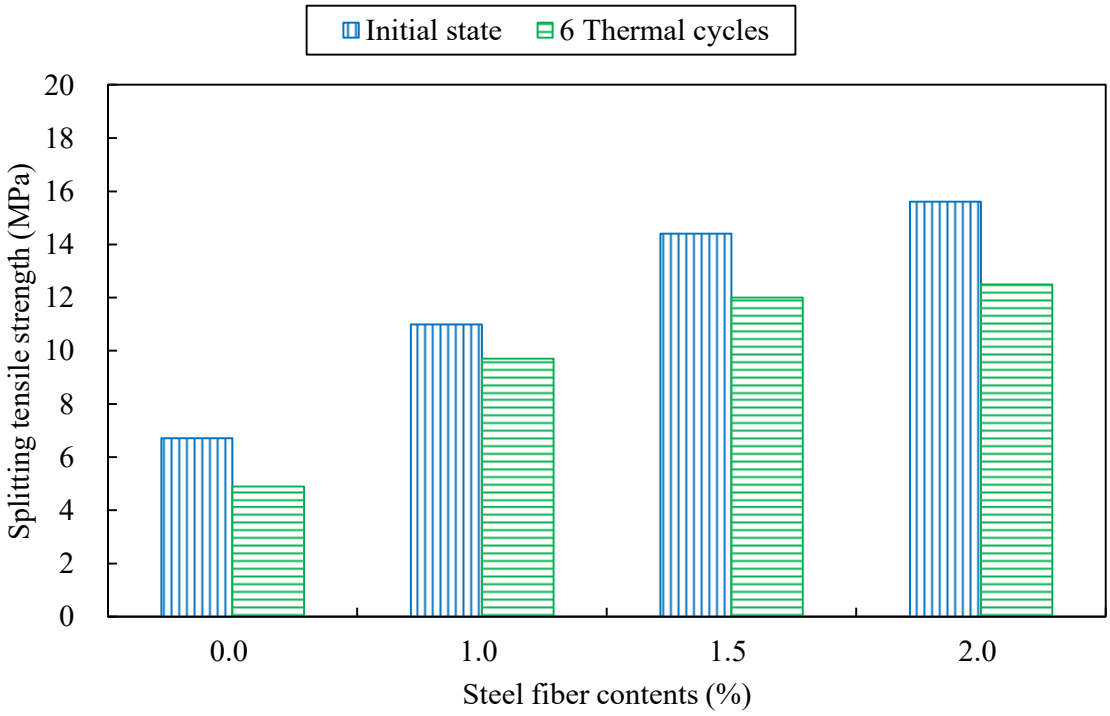
그림 2.30. 쪼갬인장강도 실험

표 2.6. 쪼갬인장강도 결과(MPa)

Steel fiber content	P.P fiber content	Thermal cycling	
%	kg/m^3	Initial state	6 cycles
0.0	2	7.2	5.3
	4	6.7	4.9
1.0	2	11.2	10.3
	4	11.0	9.7
1.5	2	14.7	12.8
	4	14.4	12.0
2.0	2	17.4	13.8
	4	15.6	12.5

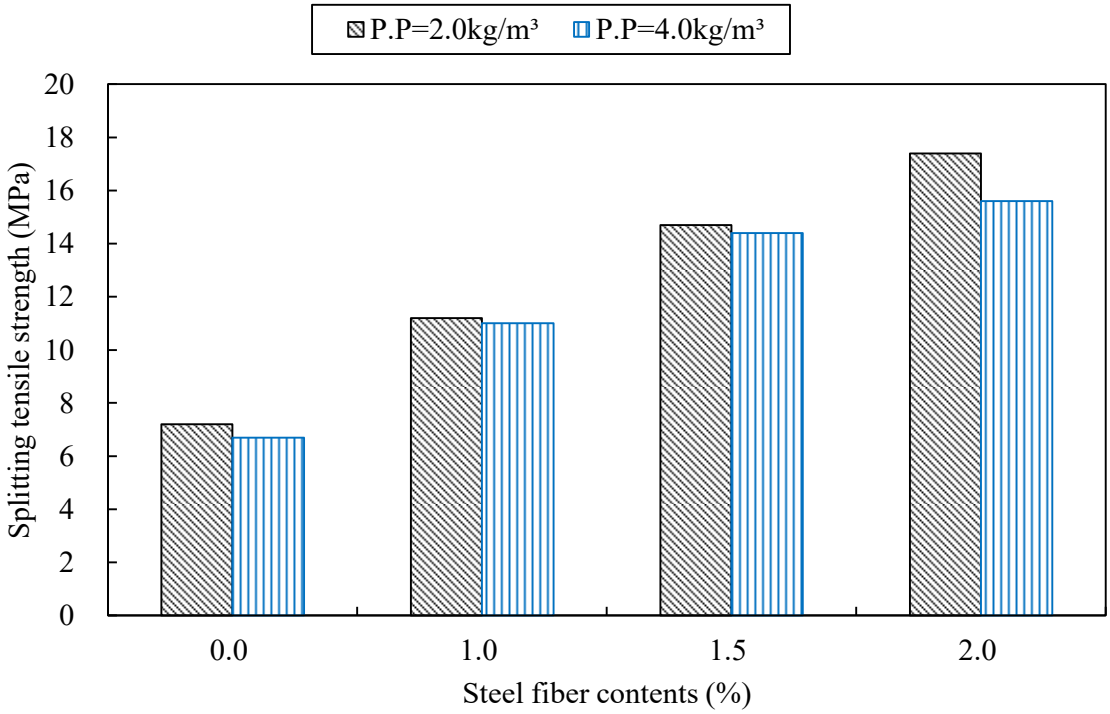


(a) P.P 섬유량= 2kg/m³

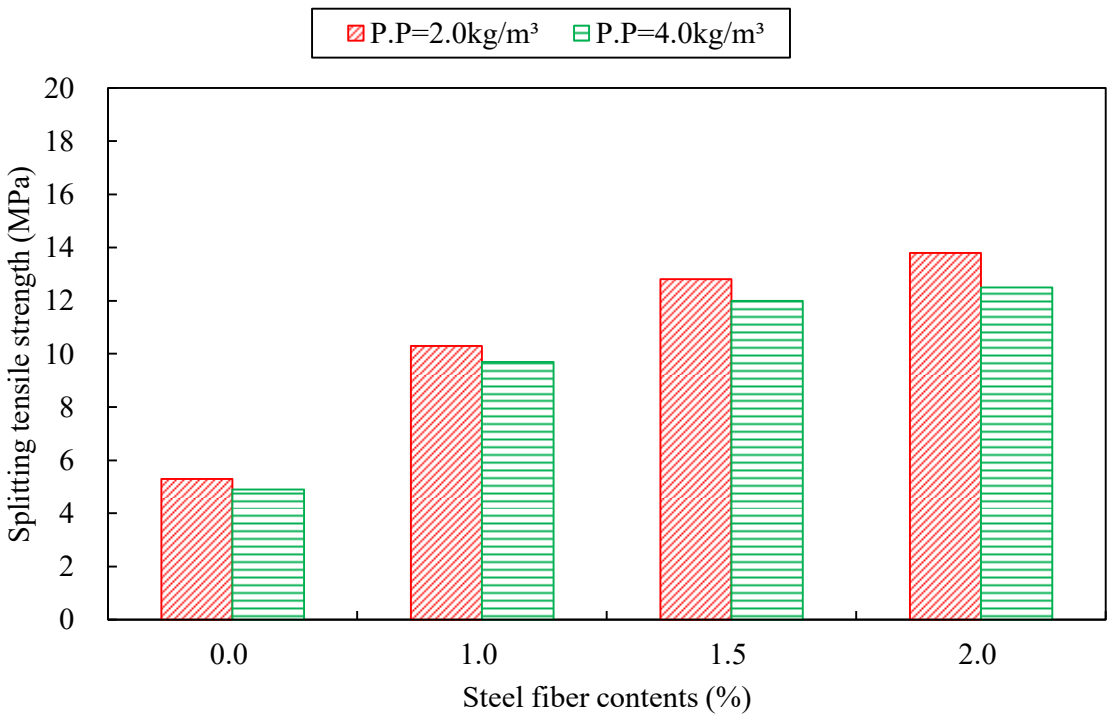


(b) P.P 섬유량= 4kg/m³

그림 2.31. 열사이클 적용 전·후의 강섬유 혼입률에 따른 쪼갬인장강도 결과 비교



(a) 열사이클 적용 전(초기 상태)



(b) 열사이클 6회 적용

그림 2.32. 열사이클 적용 전・후의 P.P 섬유 혼입량에 따른 쪼갬인장강도 결과 비교

(라) 초음파속도

□ 열사이클을 총 6회 수행하는 동안 매회 열사이클 수행 후에 원주형 공시체를 이용하여 초음파속도를 측정(그림 2.33)

□ 콘크리트의 압축강도와 초음파속도는 서로 상관관계가 있으며, 초음파속도 측정을 통하여 열사이클 횟수 증가에 따른 콘크리트의 압축강도 변화 양상을 분석

□ 그림 2.34에서 강섬유 혼입률 0.0%에서 1회 열사이클 적용 시에는 초음파속도 감소가 미미하게 나타났으나, 2회 열사이클 적용 후부터는 극명한 감소율을 나타냄.

- 반면, 1.0%, 1.5% 및 2.0%에서 1회~2회 열사이클 적용 후, 초음파속도는 감소하는 경향을 나타냈으며, 3회~4회의 열사이클 적용 후에는 일정하게 유지되는 결과를 나타냄. 이는, 우수한 인성을 지닌 강섬유 혼입으로 인해 고온의 반복적인 열사이클이 콘크리트에 미치는 불리한 영향을 억제시키고 초음파속도가 감소되는 효과를 상쇄하여 나타나는 현상이라고 판단됨.
- 그림 2.35에서 열사이클 적용 전 대비 6회 적용 후의 초음파속도 감소율은 P.P 섬유량 2kg/m^{3}일 때, 강섬유 혼입률 0.0%, 1.0%, 1.5% 및 2.0%에서 각각 31.28%, 4.50%, 7.03% 및 4.51%로 나타났으며, P.P 섬유량 4kg/m^{3}일 때, 강섬유 혼입률 0.0%, 1.0%, 1.5% 및 2.0%에서 각각 31.46%, 8.07%, 7.02% 및 7.72%로 뚜렷한 경향을 나타내지 않음.

□ 그림 2.36은 P.P 섬유량에 따른 초음파속도 결과를 나타냄.

- 열사이클 적용 전 및 6회 열사이클 적용 후에 P.P 섬유량이 증가할수록 초음파속도는 강섬유 혼입률 0.0%, 1.0%, 1.5% 및 2.0%에서 모두 감소.
- 또한, 열사이클 적용 전보다 6회 열사이클 적용 후의 초음파속도 감소가 P.P 섬유량 4kg/m^{3}에서 더욱 명확히 나타나며, 많은 P.P 섬유가 함유된 시편에서 P.P 섬유 융해로 인해 나타난 것으로 판단됨.

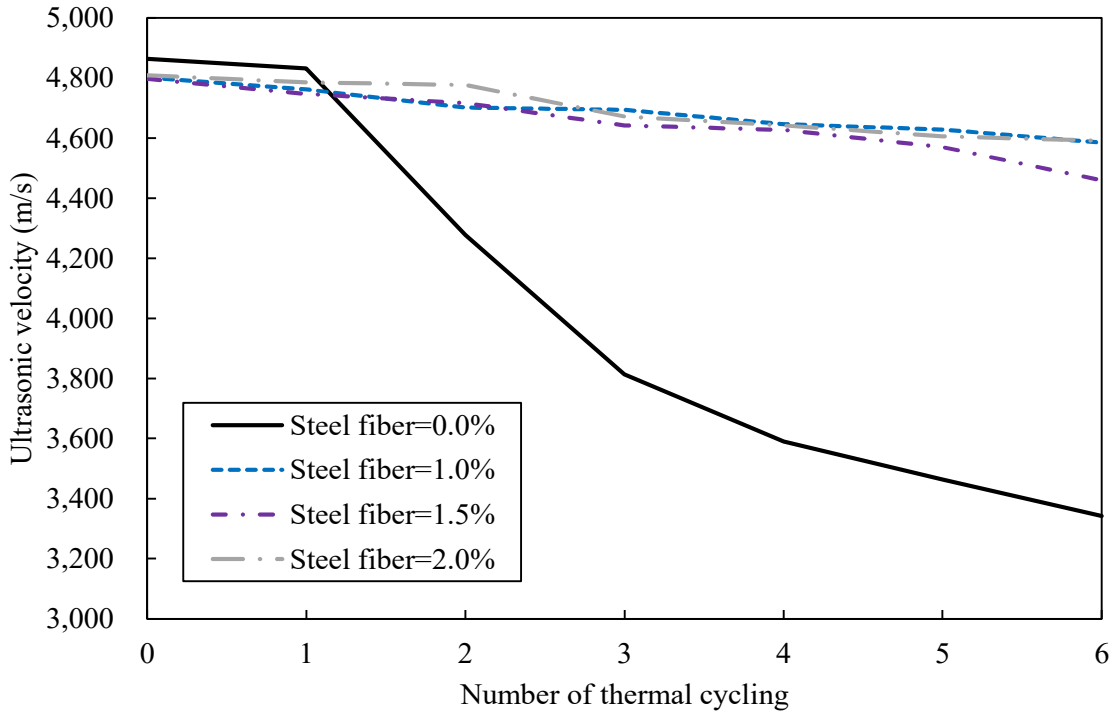
□ 표 2.7에 초음파속도 전체 측정 결과를 나타냄.



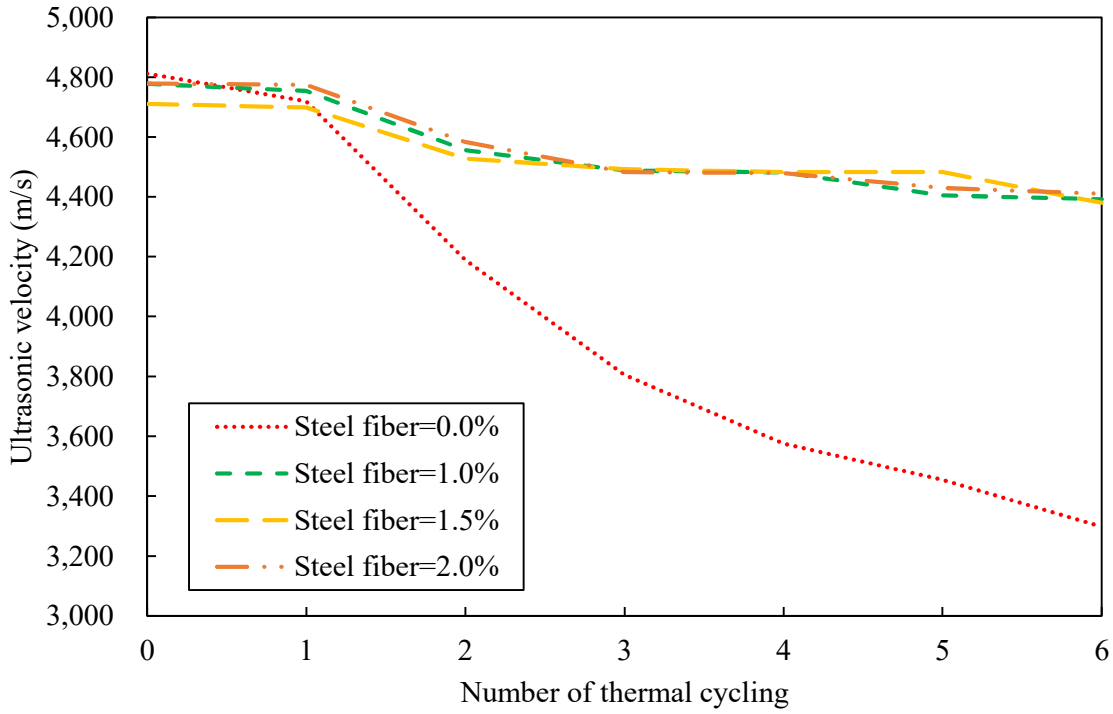
그림 2.33. 초음파속도 측정

표 2.7. 초음파속도 측정 결과(m/s)

Steel fiber content	P.P fiber content	Thermal cycling						
%	kg/m^3	Initial state	1 cycle	2 cycles	3 cycles	4 cycles	5 cycles	6 cycles
0.0	2	4,864	4,832	4,278	3,813	3,591	3,464	3,342
	4	4,812	4,720	4,189	3,805	3,576	3,455	3,298
1.0	2	4,801	4,763	4,702	4,695	4,647	4,628	4,585
	4	4,777	4,754	4,556	4,488	4,482	4,405	4,392
1.5	2	4,797	4,748	4,716	4,642	4,628	4,570	4,460
	4	4,711	4,699	4,528	4,492	4,483	4,482	4,380
2.0	2	4,809	4,785	4,777	4,671	4,642	4,606	4,592
	4	4,779	4,775	4,584	4,483	4,480	4,430	4,410

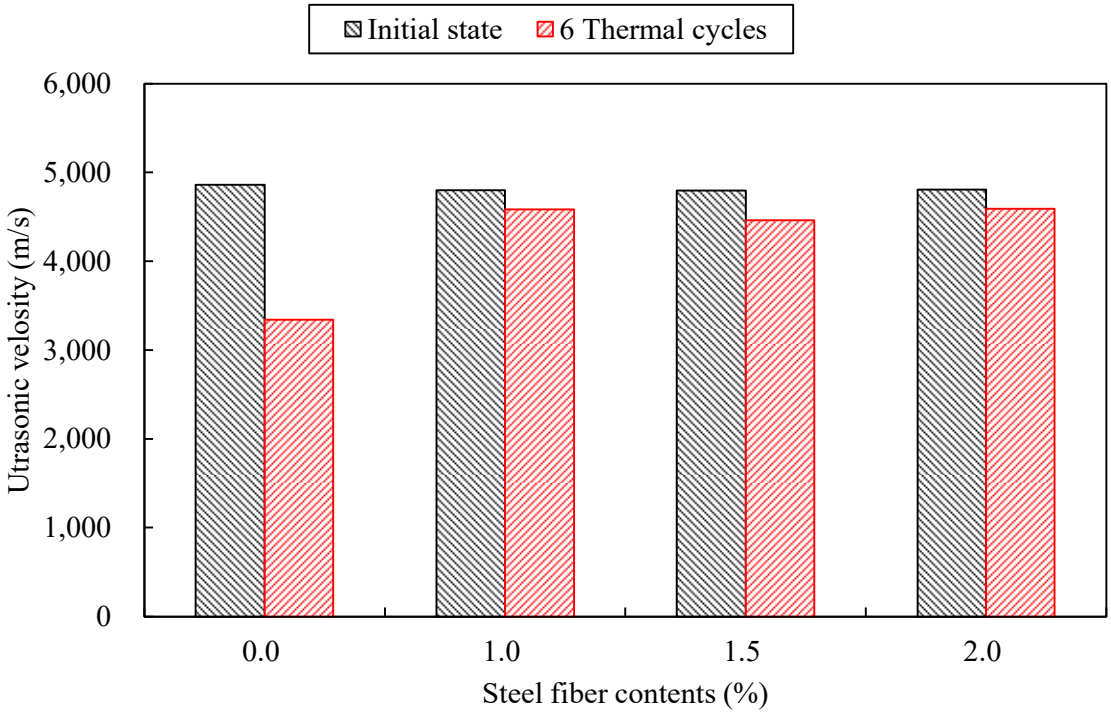


(a) P.P 섬유량= 2kg/m³

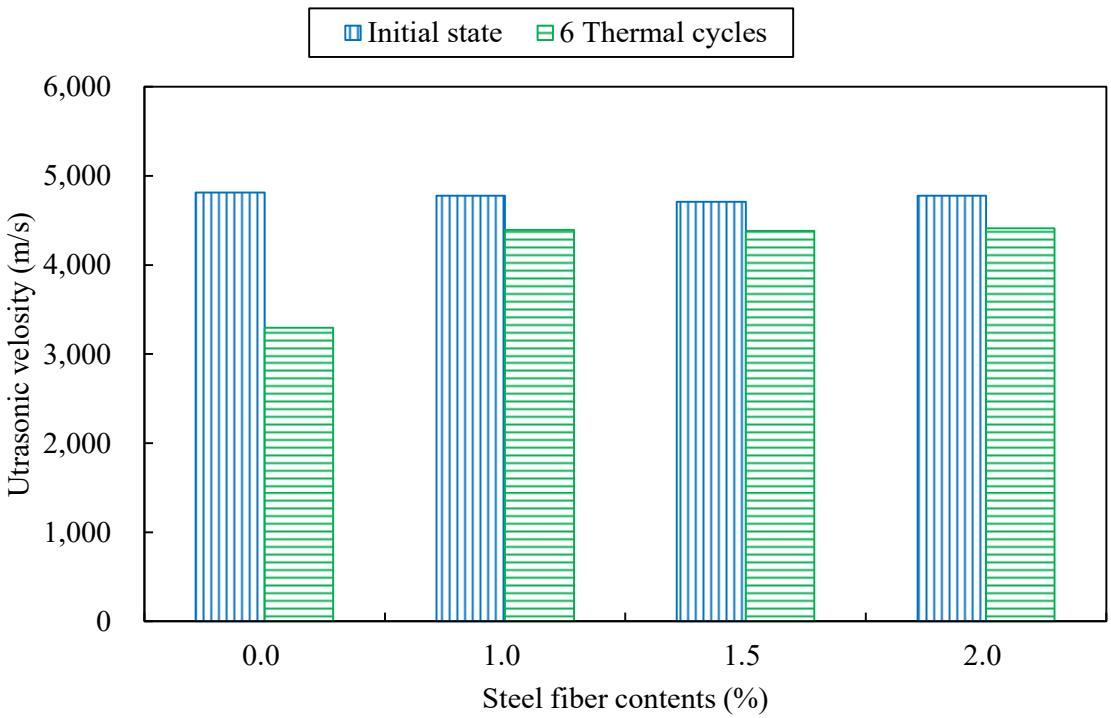


(b) P.P 섬유량= 4kg/m³

그림 2.34. 열사이클 적용 횟수에 따른 초음파속도 변화

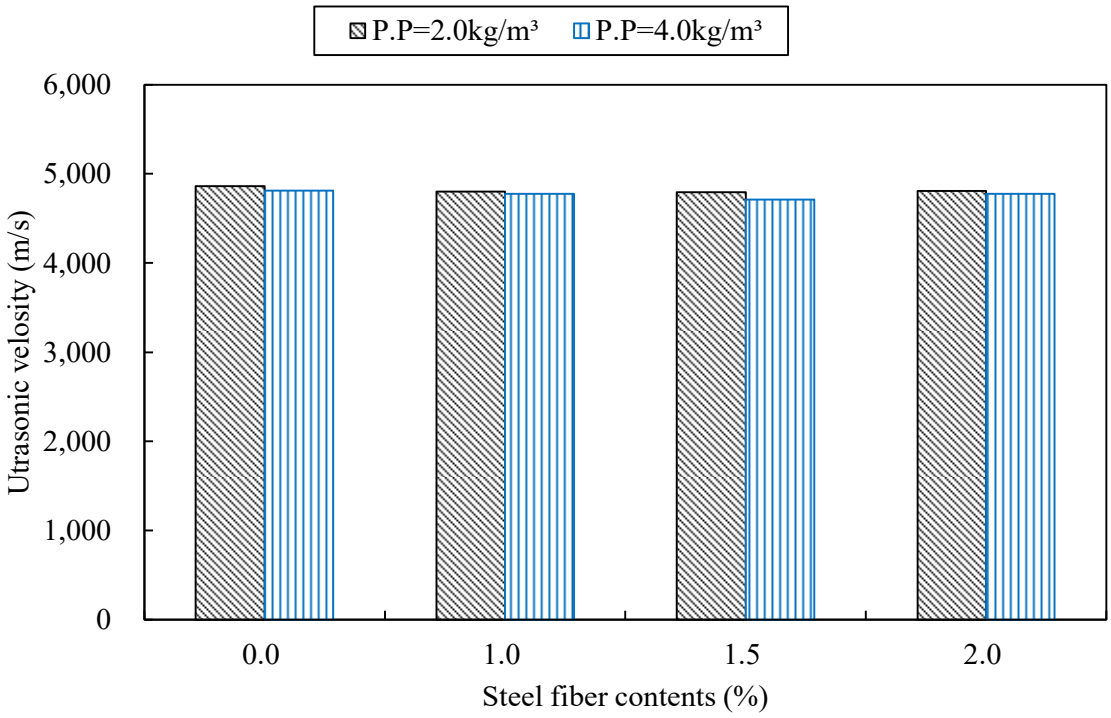


(a) P.P 섬유량= 2kg/m³

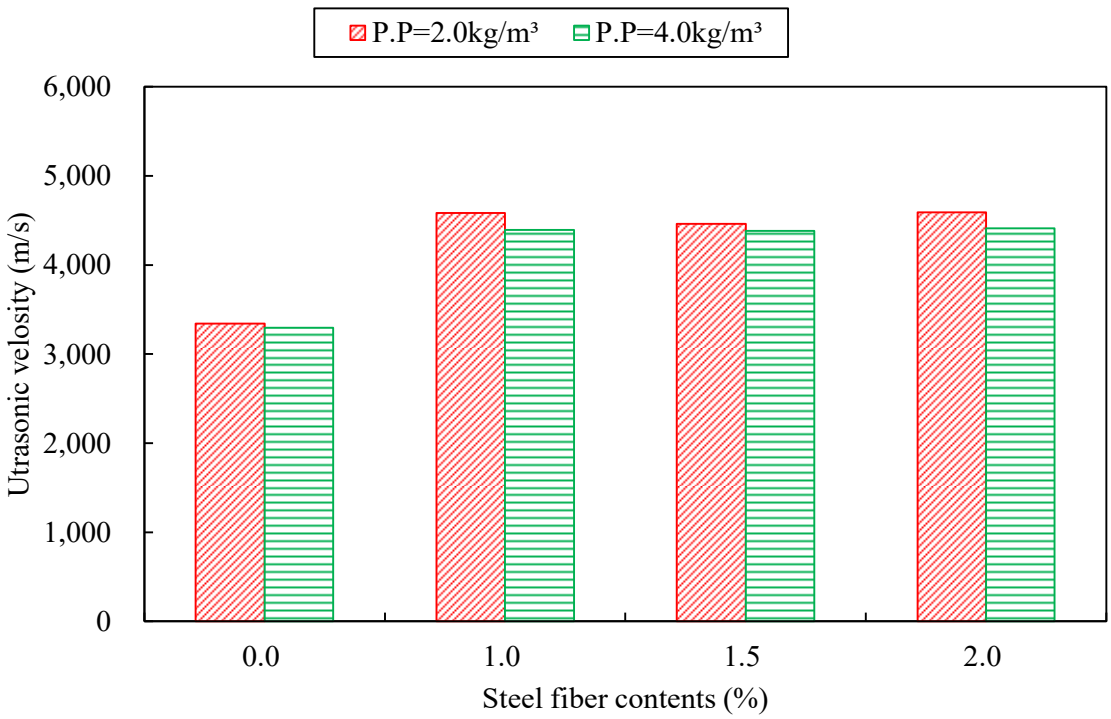


(b) P.P 섬유량= 4kg/m³

그림 2.35. 열사이클 적용 전・후의 강섬유 혼입률에 따른 초음파속도 결과 비교



(a) 열사이클 적용 전(초기 상태)



(a) 열사이클 6회 적용

그림 2.36. 강섬유 혼입률별 P.P 섬유 혼입량에 따른 초음파속도 결과 비교

(4) 열사이클링 조건 고전도 초고성능 콘크리트의 열 특성

(가) 열전도율

□ 열전도율 측정 장비를 이용하여 열사이클 적용 전과 매회 열사이클 이후의 열전도율을 측정(그림 2.37)

□ 콘크리트 열전도율을 측정하는 기법으로서 ASTM D 5334-05 방법, TLPP(two linear parallel probe) 방법 및 TPS(transition plane source) 방법이 있다.

- 콘크리트 열전도율을 측정하기 위해 ASTM D 5334-05 방법을 적용할 수 있다. 이 방법은 열원을 열전달 매체에 삽입한 후 열원을 공급하며, 열전달 매체의 온도상승은 매체의 열전도율과 연관있는 성질을 이용하는 기법이다. 장치는 가열 와이어와 온도계측센서로 구성된다. 장치를 열전달 매체에 평행한 두 개의 구멍을 뚫어 삽입한다.
- 유사한 방법으로서 TLPP방법이 사용된다. TLPP 방법의 경우, 두 개의 센서가 열전달 매체에 뚫어 놓은 서로 다른 두 개의 평행한 구멍에 삽입된다.하나의 센서는 열을 공급하기 위해 사용되며, 또 다른 하나는 온도를 측정하기 위해 사용된다.

□ 본 연구에서는 TPS 방법을 적용하였다. 이 방법의 경우, 두 개의 시편 사이에 온도장치를 삽입하며 두 시편의 접촉하는 면은 평탄성을 확보하여야 한다. ASTM D 5334-05 방법과 달리 열전달 매체에 구멍을 뚫어야 하지 않기 때문에 콘크리트 열전달 특성을 파악하기 위해 널리 사용된다.

- TPS 방법을 사용하기 위해 TPS 1500 장비(Hot Disk Ltd., 스웨덴)을 사용함.
- 두 시편 접촉면의 평탄성을 확보하고 두 시편의 재료 동질성을 확보하기 위해 원주형 공시체의 중앙면을 절단하여 두 개의 시편을 제작하여 열전도율을 측정하였다.
- 두 시편 사이에 열측정 센서를 삽입하여 열전도율을 측정하였다. 열측정 센서는 니켈 성분의 이중 나선으로 구성되며, 이를 통해 시편에 열파(heating pulse)를 공급한다.
- 실험실의 상온 조건에서 약 90분 동안 열평형을 유지한 후, 0.3 W 전원으로 열파를 공급하여 콘크리트의 열전도율을 측정하였다. 각 시편에 대해 3회의 측정을 수행하여 실험결과의 정밀도를 확보하고자 하였다.



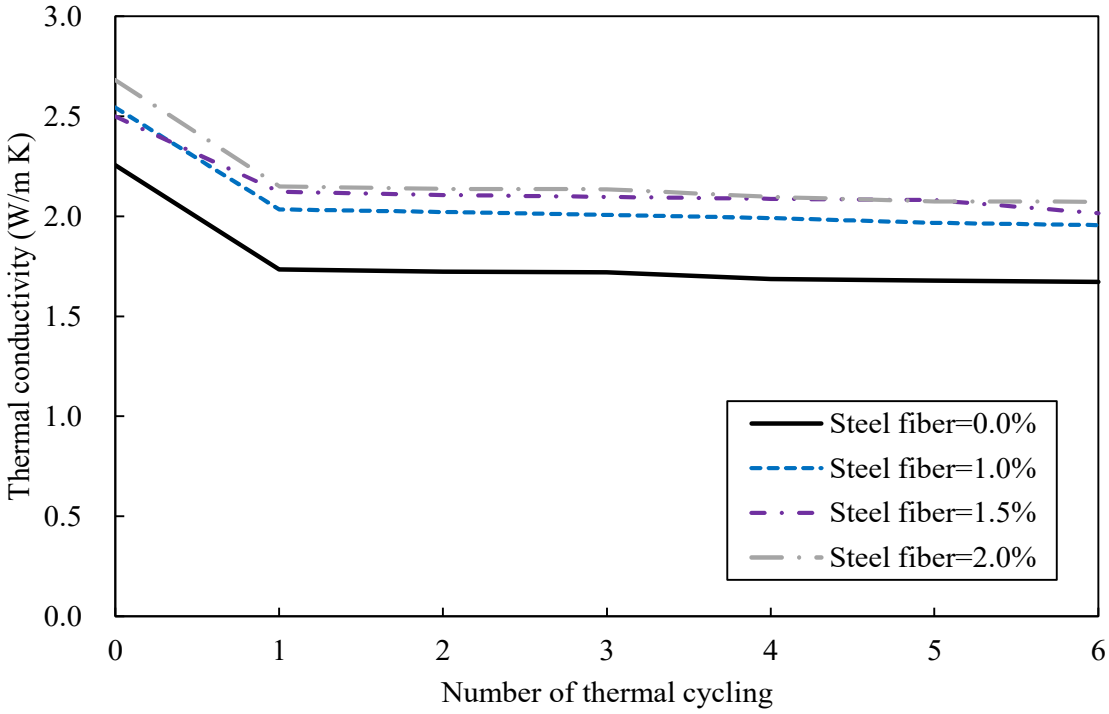
그림 2.37. TPS 측정 시스템

□ 강섬유 혼입률별로 열사이클 적용 전과 후의 열전도율 측정결과를 표 2.8에 나타냄

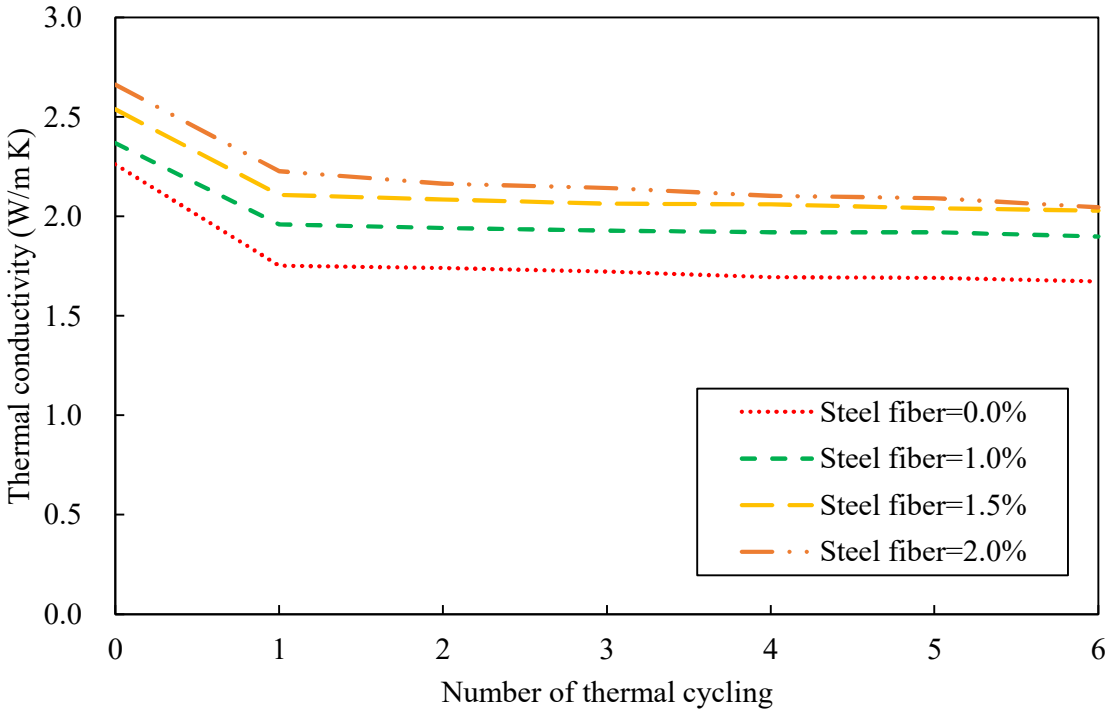
- 그림 2.38에서 1회 열사이클 적용 후, 열전도율은 급격한 감소를 나타냈으며, 이후 열사이클 횟수가 증가함에 따라 열전도율은 큰 변화 없이 일정하게 유지되는 경향을 나타냄
- 그림 2.39에서 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 열전도율은 증가하는 경향을 나타냄. 강섬유의 혼입은 역학적 특성의 증진을 도모하여 고온의 온도 노출에도 내구성을 보유할 수 있을 뿐만 아니라 열전도율을 증가시켜 열에너지 전달 효율을 향상시키므로 열에너지 저장에 유리할 것으로 판단.
- 그림 2.40은 강섬유 혼입률별 P.P 섬유 혼입량에 따른 열전도율 결과를 비교한 그래프이며, P.P 섬유 혼입량의 따른 영향은 뚜렷한 경향을 나타내지 않음.

표 2.8. 열전도율 측정결과 (W/mK)

Steel fiber content	P.P fiber content	Thermal cycling						
%	kg/m^3	Initial state	1 cycle	2 cycles	3 cycles	4 cycles	5 cycles	6 cycles
0.0	2	2.255	1.735	1.724	1.720	1.686	1.679	1.671
	4	2.262	1.753	1.740	1.722	1.694	1.691	1.673
1.0	2	2.544	2.034	2.021	2.008	1.990	1.966	1.955
	4	2.369	1.959	1.942	1.929	1.921	1.920	1.898
1.5	2	2.498	2.123	2.106	2.097	2.088	2.080	2.014
	4	2.538	2.108	2.085	2.063	2.061	2.041	2.029
2.0	2	2.682	2.149	2.137	2.136	2.096	2.075	2.072
	4	2.663	2.227	2.164	2.143	2.103	2.092	2.045

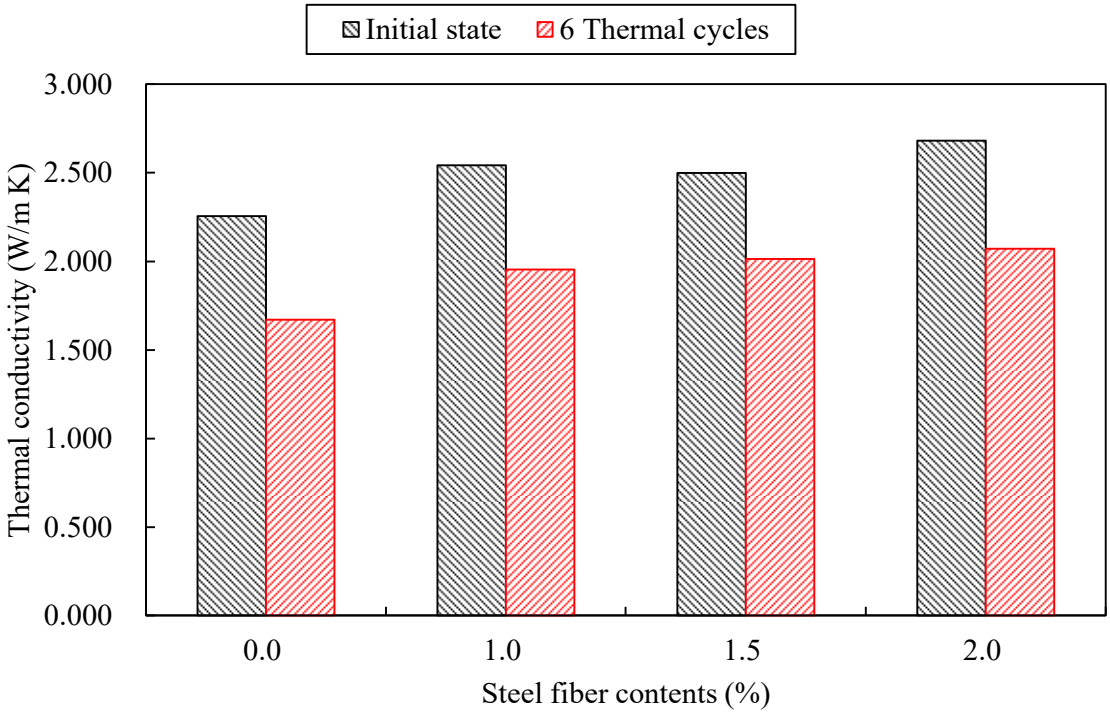


(a) P.P 섬유량= 2kg/m³

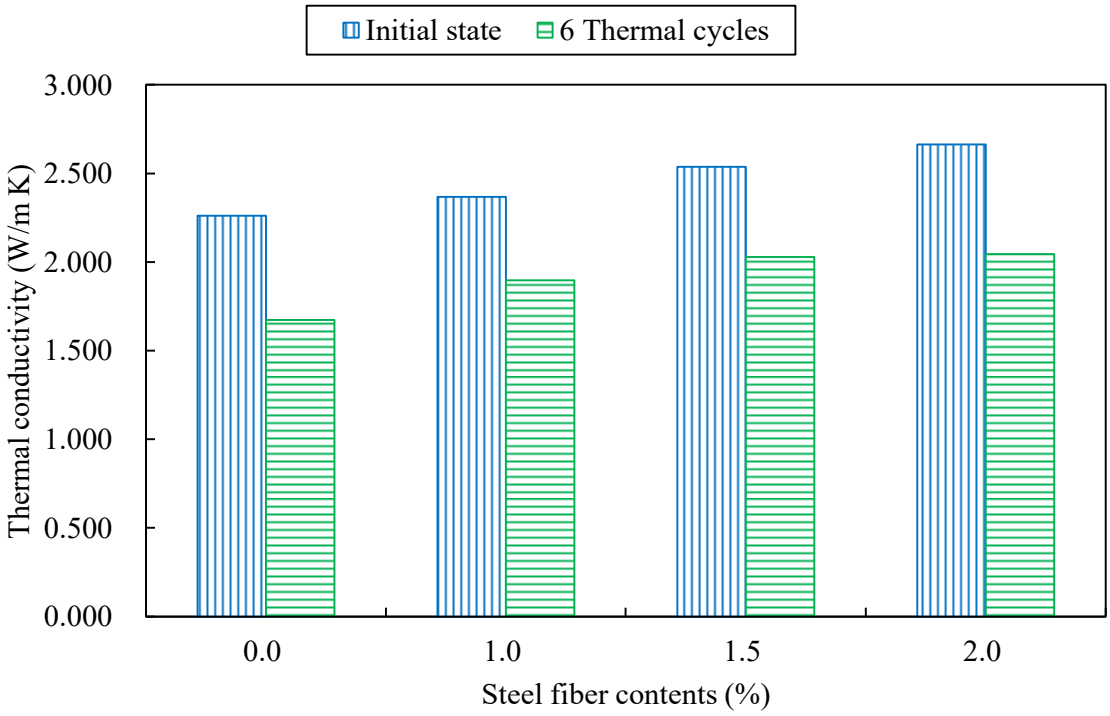


(b) P.P 섬유량= 4kg/m³

그림 2.38. 열사이클 적용 횟수에 따른 열전도율 변화

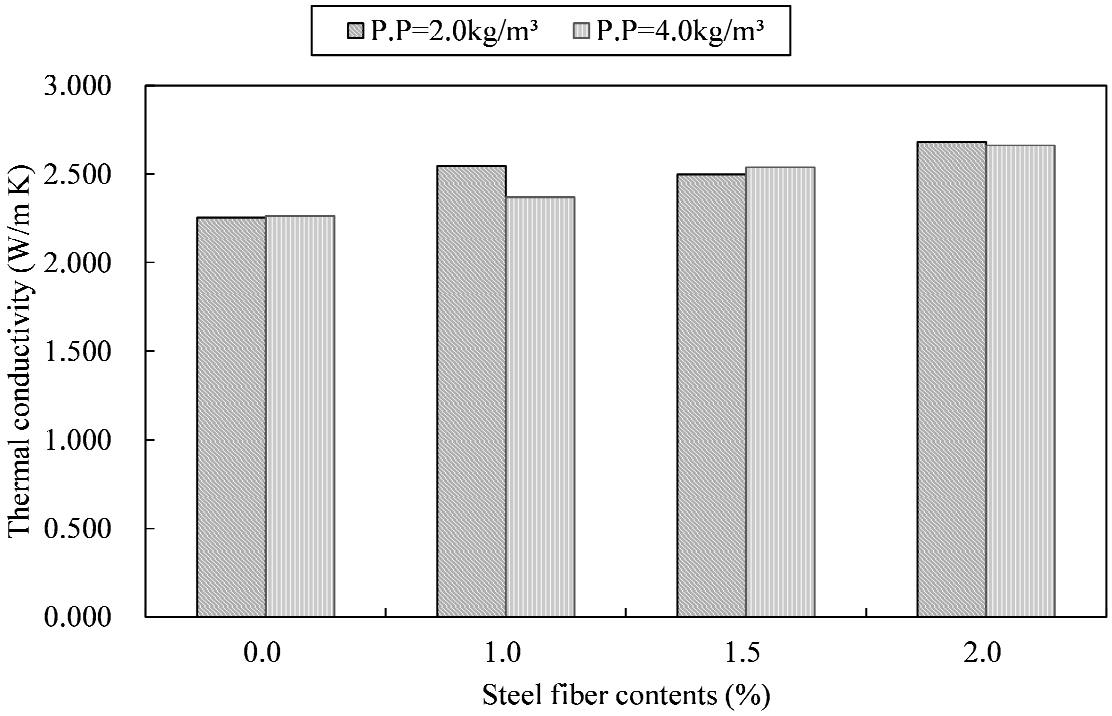


(a) P.P 섬유량= 2kg/m³

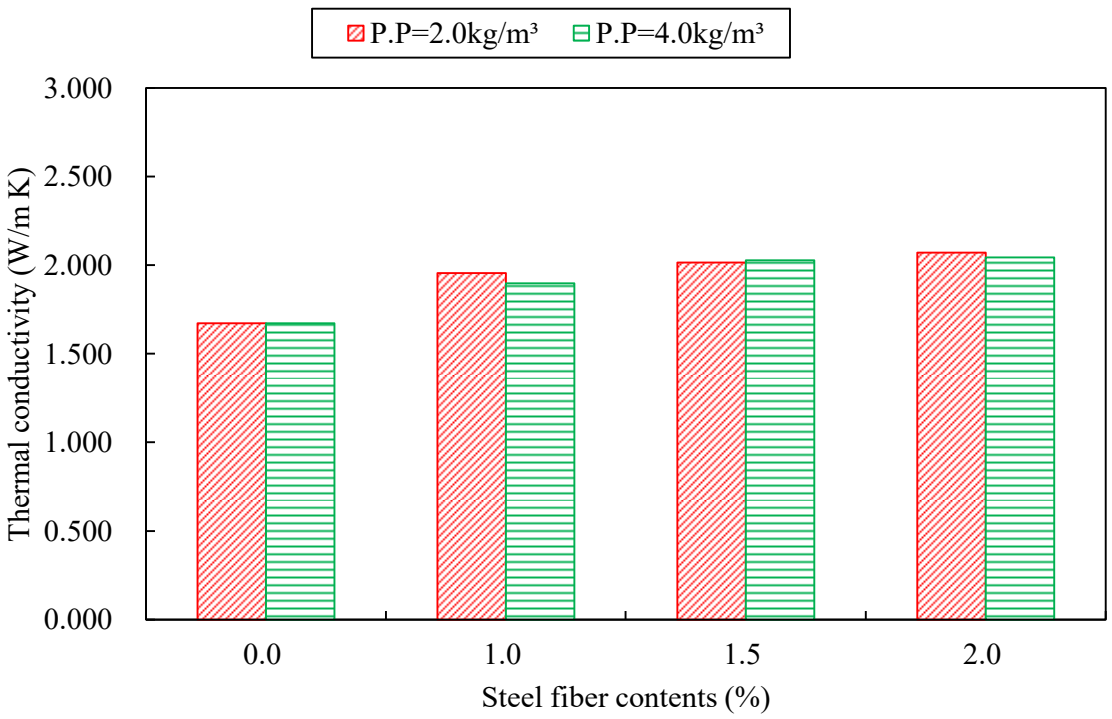


(b) P.P 섬유량= 4kg/m³

그림 2.39. 열사이클 적용 전・후의 강섬유 혼입률에 따른 열전도율 결과 비교



(a) 열사이클 적용 전(초기 상태)



(a) 열사이클 6회 적용

그림 2.40. 강섬유 혼입률별 P.P 섬유 혼입량에 따른 열전도율 결과 비교

□ S120 시리즈 초고성능 콘크리트와 S180 시리즈 초고성능 콘크리트의 압축강도 및 열전도율과의 관계 분석을 수행하였으며, 그림 2.41에 나타냄.

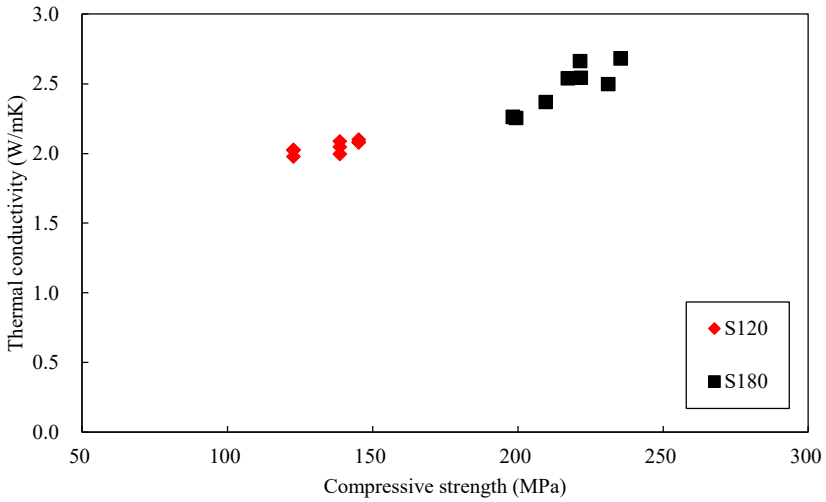
※ S120: 120 MPa의 목표압축강도강도를 갖는 고전도 초고성능 콘크리트

※ S180: 180 MPa의 목표압축강도강도를 갖는 고전도 초고성능 콘크리트

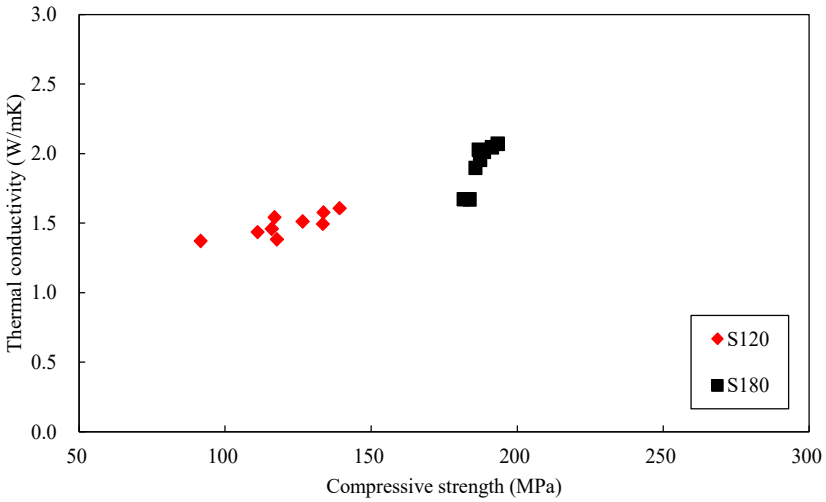
- 상대적으로 낮은 목표압축강도를 갖는 S120 시리즈 상관관계 결과는 좌측 영역에 나타나고, 높은 목표압축강도를 갖는 S180 시리즈 상관관계는 우측 영역에 나타난다.

□ 압축강도가 증가함에 따라 열전도율은 증가하는 경향을 나타냄.

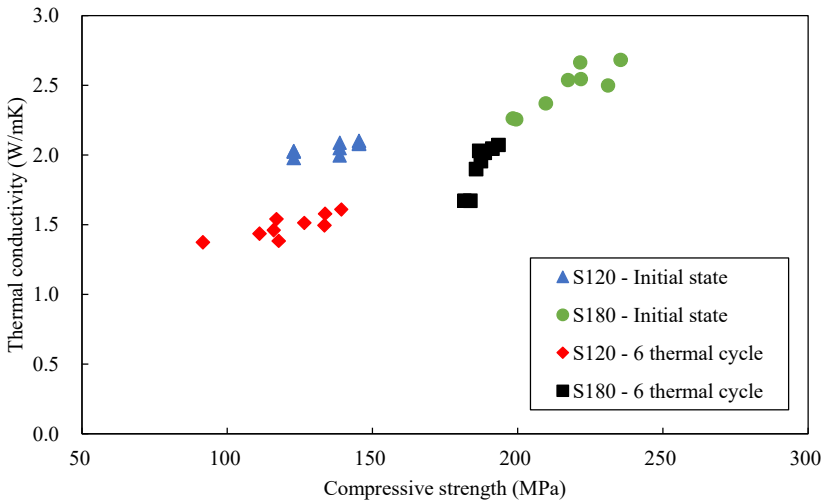
- 열전도율은 콘크리트의 축열 및 방열의 열전달 성능에 직접적인 영향을 주는 매우 중요한 역할을 함.
- 따라서, 열전도율이 높을수록 열전달 성능은 향상될 것이며, 최종적으로 고전도 초고성능 콘크리트의 향상된 축열 성능을 확보할 것으로 기대.
- 압축강도가 증가할수록 열전도율은 증가할 것으로 판단되며, 우수한 내구성과 열전달 성능을 보유할 것으로 판단.



(a) 상온 상태 (Initial state)



(b) 열사이클 적용 (6 thermal cycle)



(c) 상온 상태와 열사이클 적용 실험 결과

그림 2.41. S120 시리즈 및 S180 시리즈의 압축강도와 열전도율 관계 비교

(나) 비열

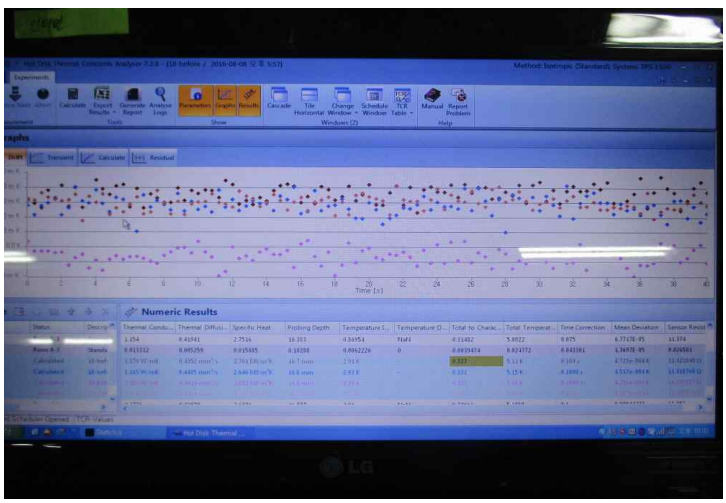
□ 열전도율 측정 장비를 이용하여 열사이클 적용 전과 매회 열사이클 이후의 비열을 측정(그림 2.42)

□ 강섬유 혼입률별로 열사이클 적용 전과 후의 비열 측정 결과를 표 2.9에 나타냄

- 그림 2.43에서 1회 열사이클 적용 후, 비열은 급격한 감소를 나타냈으며, 이후 열사이클 횟수가 증가함에 따라 비열은 큰 변화 없이 일정하게 유지되는 경향을 나타냄.
- 그림 2.44에서 열사이클 적용 전에는 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 비열은 감소하는 경향을 나타냄. 강섬유의 혼입이 비열을 감소시키는 요인으로 작용.
- 그림 2.45는 강섬유 혼입률별 P.P 섬유 혼입량에 따른 비열 결과를 비교한 그래프이며, 열사이클 적용 전의 P.P 섬유 혼입량이 증가할수록 비열은 감소하는 경향을 나타냄.
- 6회 열사이클 적용 후에는 P.P 섬유 혼입량에 따른 비열 결과가 유사하게 나타남. 고온의 열사이클 후, P.P 섬유의 융해로 인해 나타나는 현상이라고 판단됨.



(a) 비열 측정을 위한 장비 설정

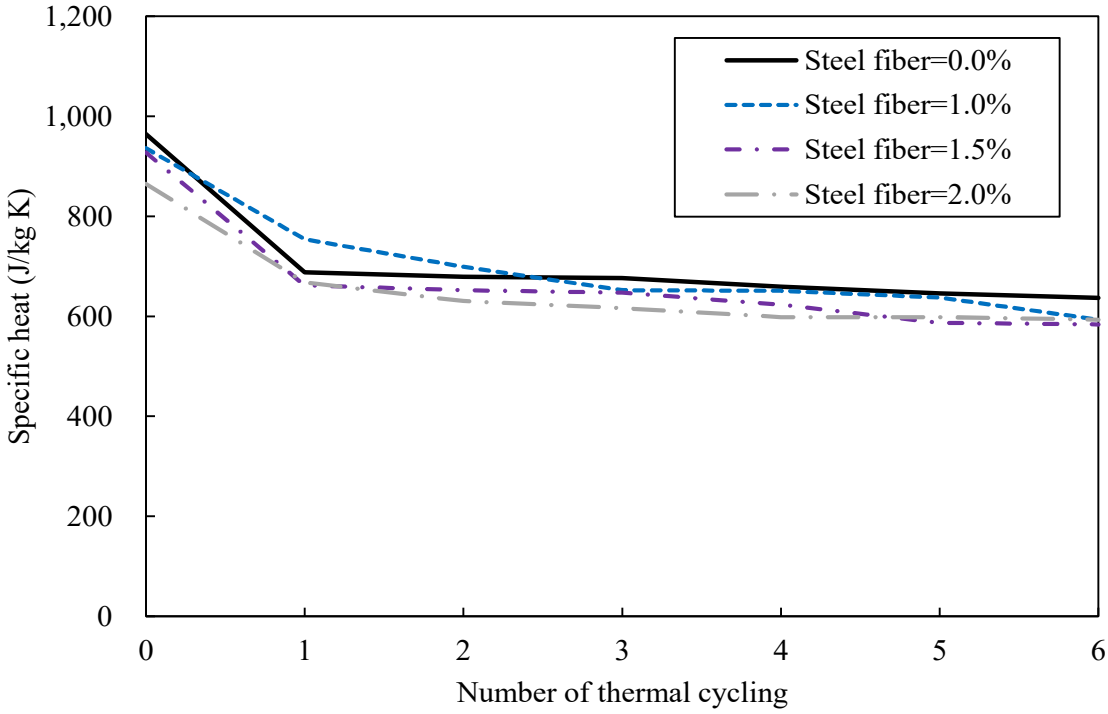


(b) 비열 측정 결과 분석

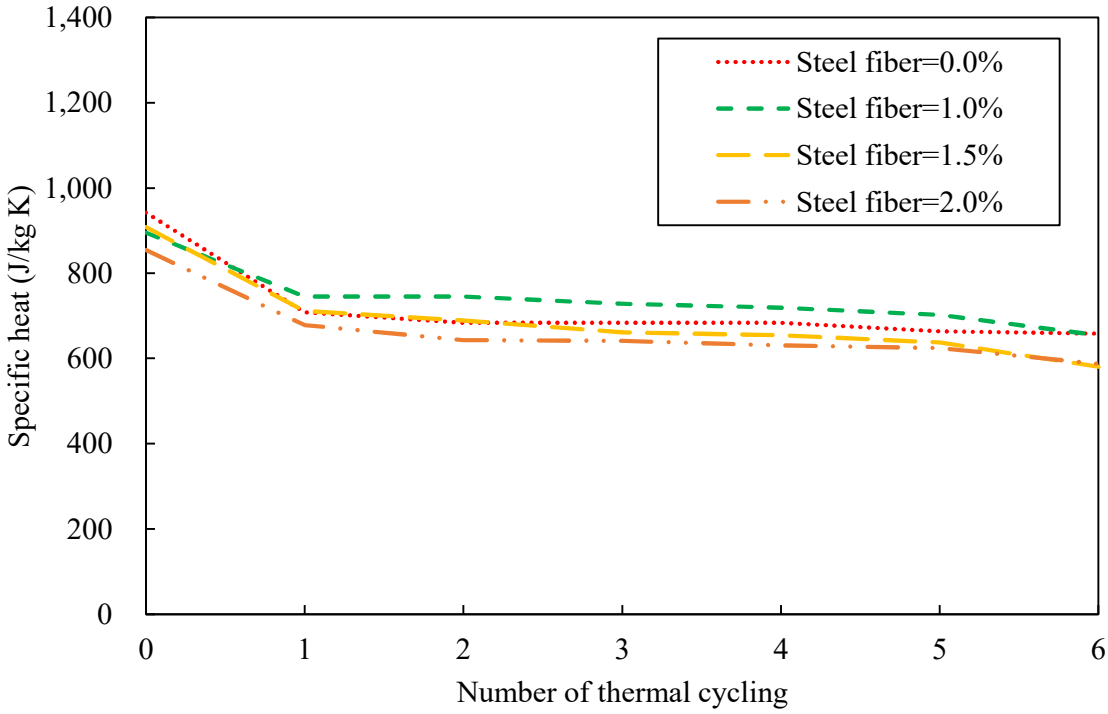
그림 2.42. 비열 측정

표 2.9. 비열 측정결과 (J/kgK)

Steel fiber content	P.P fiber content	Thermal cycling						
%	kg/m^3	Initial state	1 cycle	2 cycles	3 cycles	4 cycles	5 cycles	6 cycles
0.0	2	965	688	679	676	659	645	637
	4	942	708	684	683	683	664	658
1.0	2	936	754	699	652	651	637	593
	4	895	745	745	728	719	702	655
1.5	2	928	662	652	647	623	587	583
	4	909	712	689	661	655	638	581
2.0	2	865	667	630	616	598	598	593
	4	855	678	643	641	631	625	587

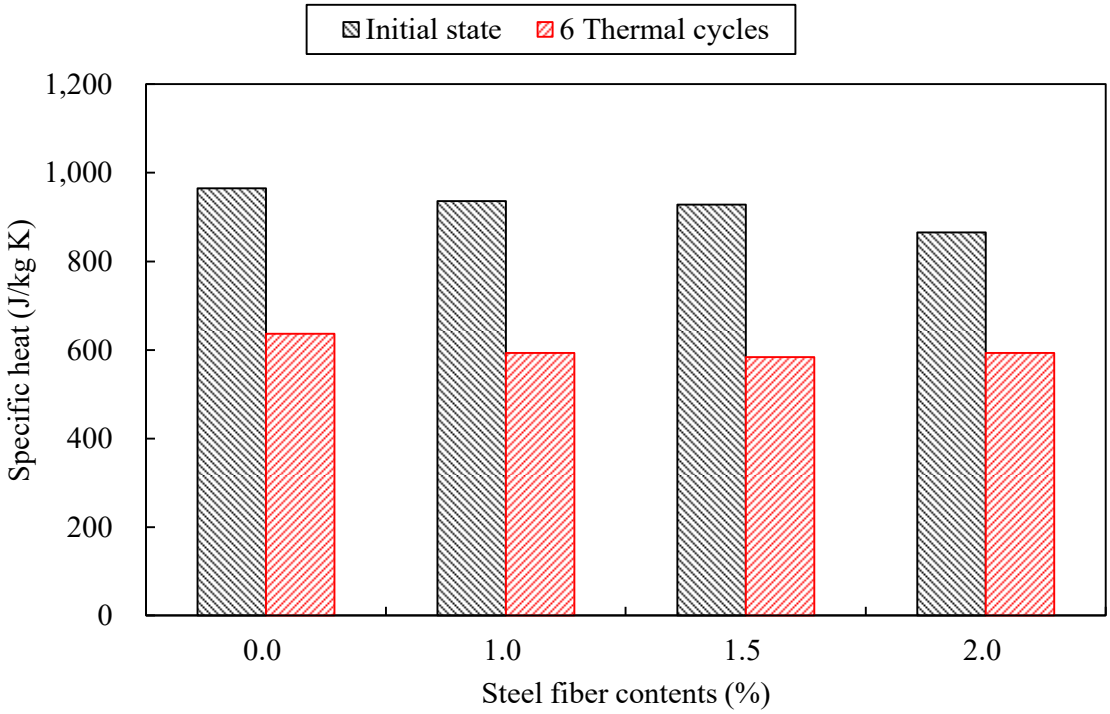


(a) P.P 섬유량= 2kg/m³

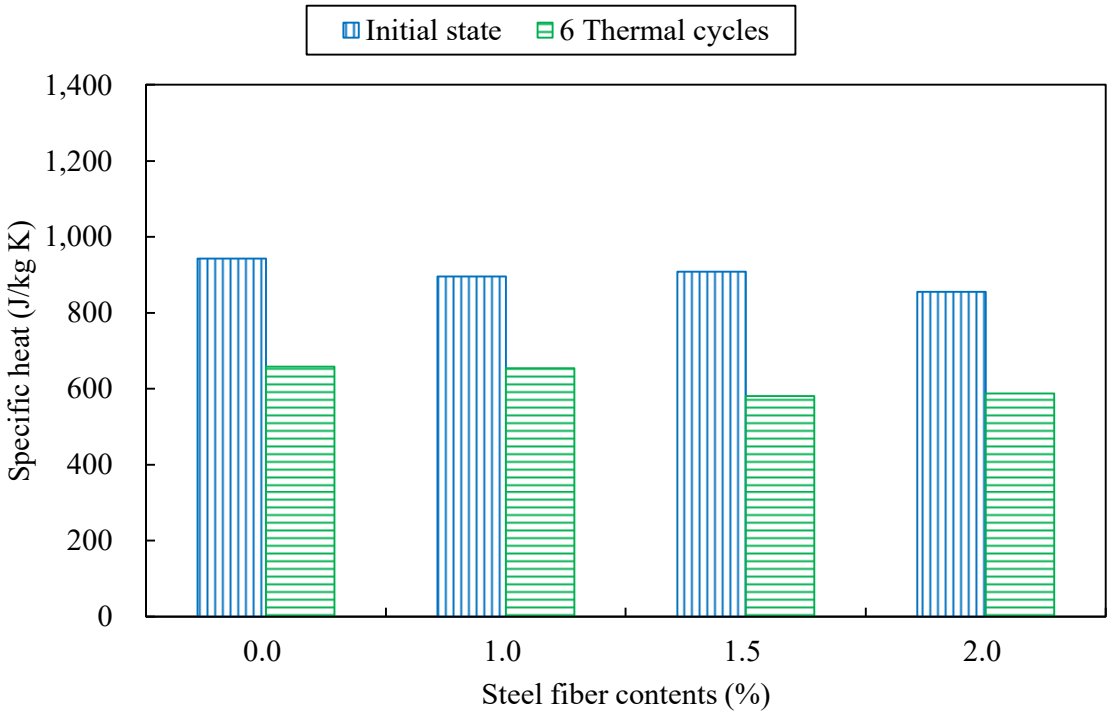


(b) P.P 섬유량= 4kg/m³

그림 2.43. 열사이클 적용 횟수에 따른 비열 변화

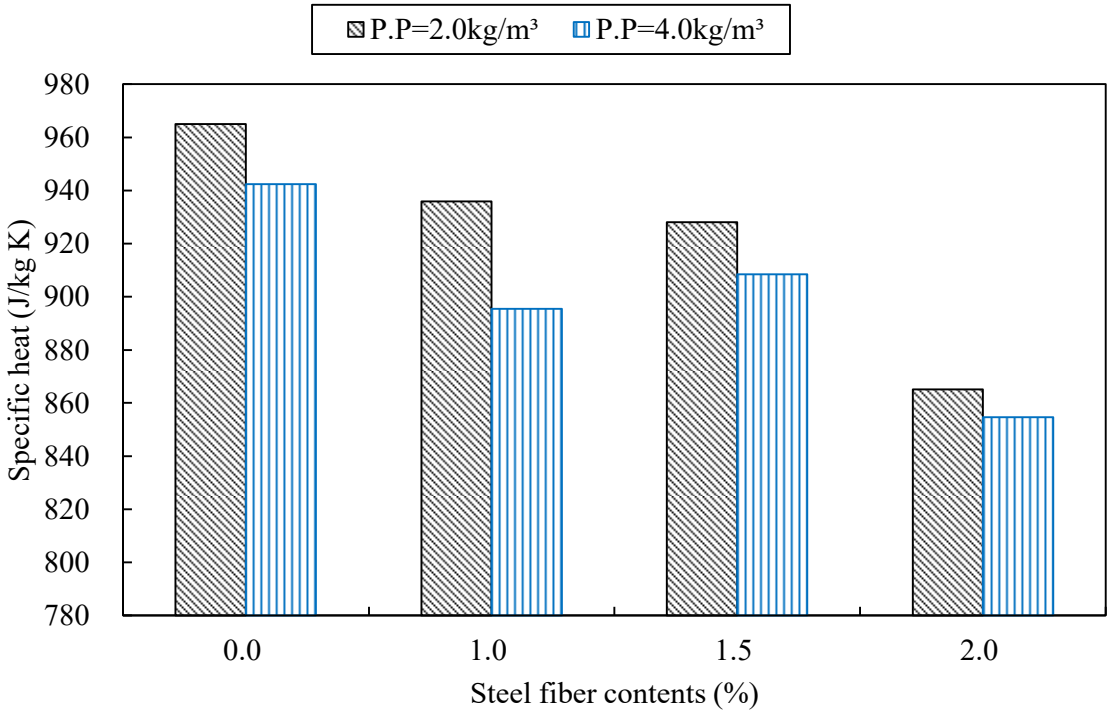


(a) P.P 섬유량= 2kg/m³

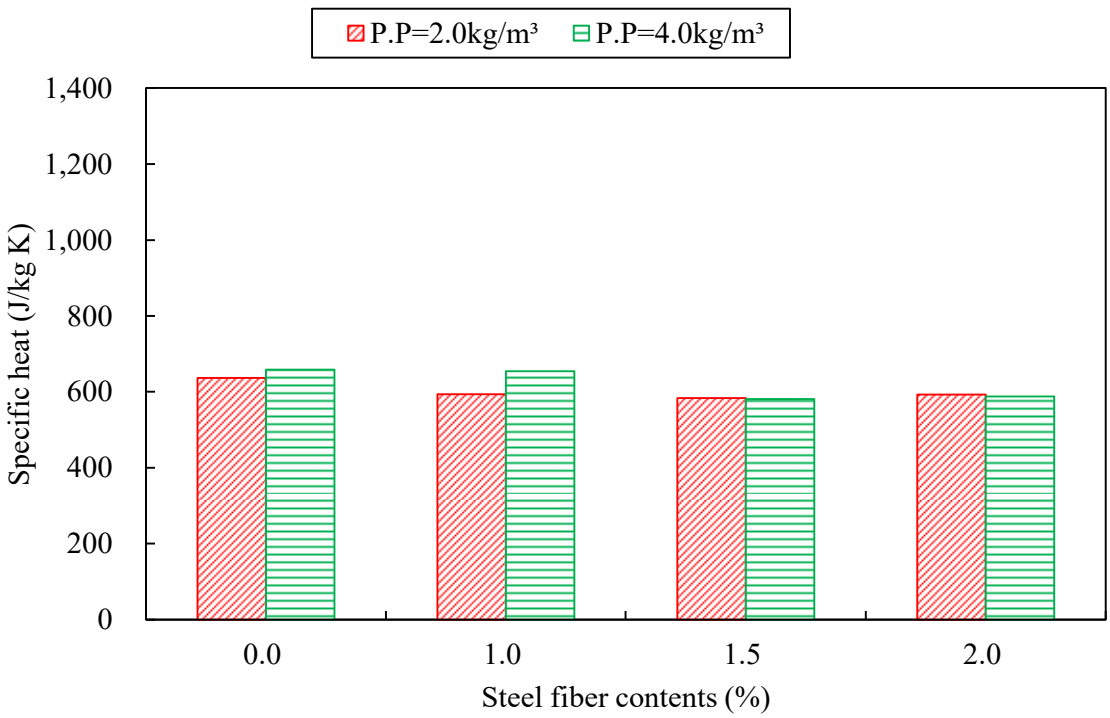


(b) P.P 섬유량= 4kg/m³

그림 2.44. 열사이클 적용 전·후의 강섬유 혼입률에 따른 비열 결과 비교



(a) 열사이클 적용 전(초기 상태)



(a) 열사이클 6회 적용

그림 2.45. 강섬유 혼입률별 P.P 섬유 혼입량에 따른 비열 결과 비교

(5) 고전도 초고성능 콘크리트의 역학특성과 열특성 상관관계 분석

(가) 압축강도와 물리적 특성 상관관계

□ 콘크리트의 각 물리적, 역학적 및 열적 특성은 유기적인 관계를 형성하며, 두 인자 간의 관계를 토대로 경향을 예측할 수 있음.

□ 그림 2.46에 압축강도와 물리적 특성인 단위중량 및 초음파 속도와의 관계를 나타냈으며, 우상향으로 비례하며 증가하는 경향을 나타냄.

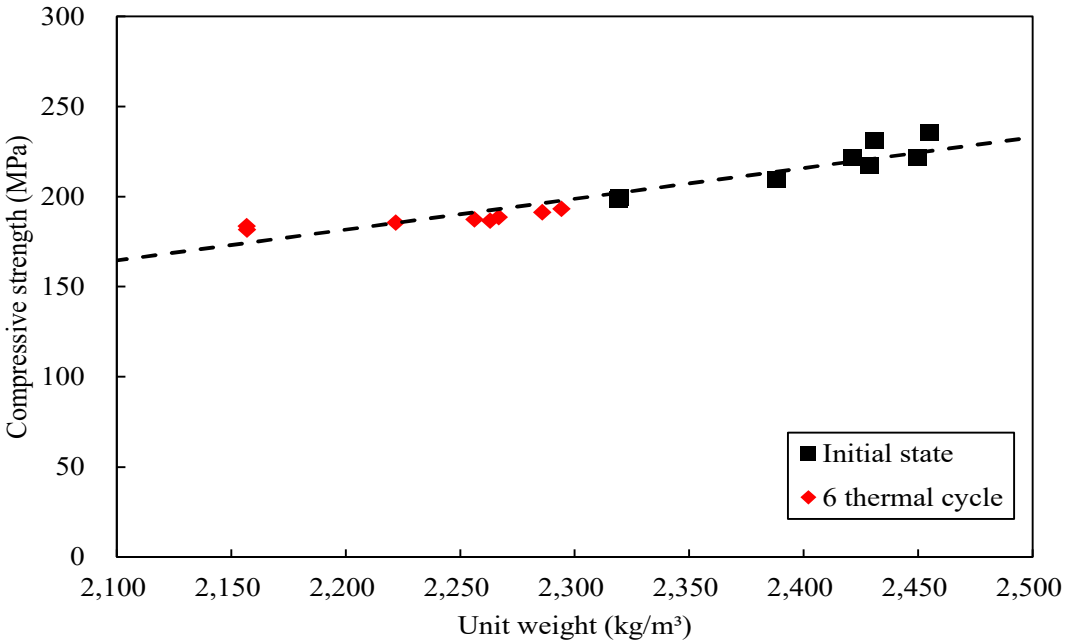
- 단위중량이 높을수록 또는 초음파 속도가 빠를수록 콘크리트가 내부에 공극이 적어 밀실한 구조를 갖는다는 것을 의미하므로 압축강도가 그에 비례하여 높은 것을 예측할 수 있음.
- 열사이클 적용 전의 실험 결과들은 우측에 그룹을 형성하고 있으며, 6회 열사이클 적용 후의 실험 결과들보다 상대적으로 높은 값을 나타내고 있음.

(나) 열전도율과 물리적 특성 상관관계

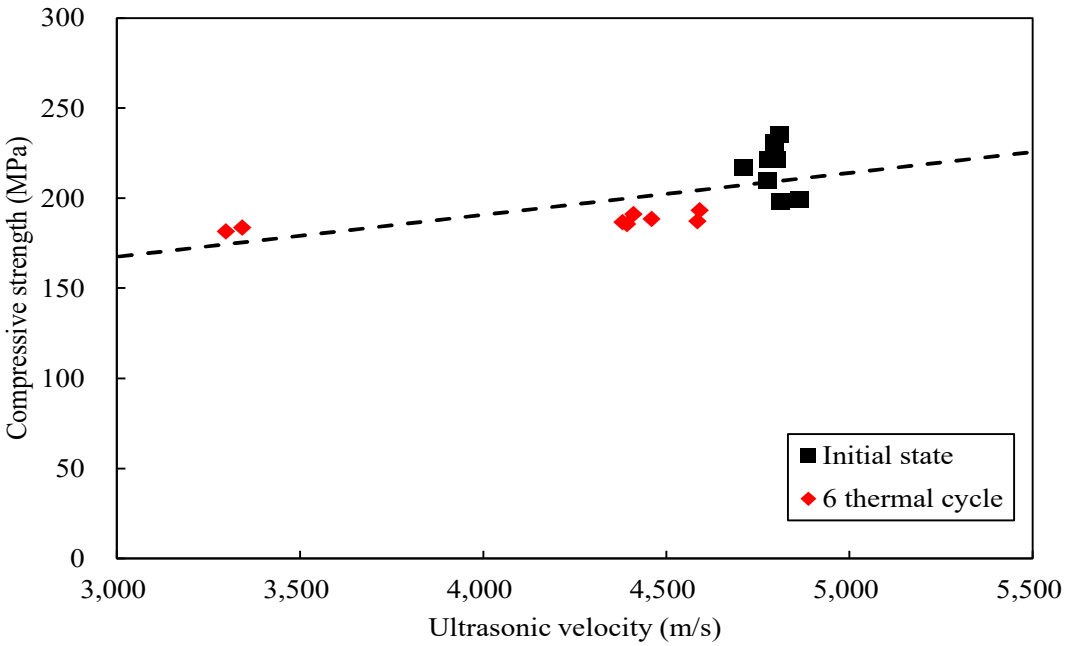
□ 그림 2.47에 열전도율과 물리적 특성인 단위중량 및 초음파 속도와의 관계를 나타냈으며, 우상향으로 비례하며 증가하는 경향을 나타냄.

□ 단위중량이 높을수록 또는 초음파 속도가 빠를수록 콘크리트가 내부에 공극이 적어 밀실한 구조를 가지며, 열전도율 성능을 감소시킬 요소가 현격히 낮은 것으로 판단됨. 따라서, 물리적 특성이 높다는 것은 열전도율이 비례하여 높은 것을 의미.

□ 열사이클 적용 전의 실험 결과들은 우측에 그룹을 형성하고 있으며, 열사이클이 횟수별로 수행됨에 따라 비례하여 좌하향 쪽으로 그룹이 형성됨.

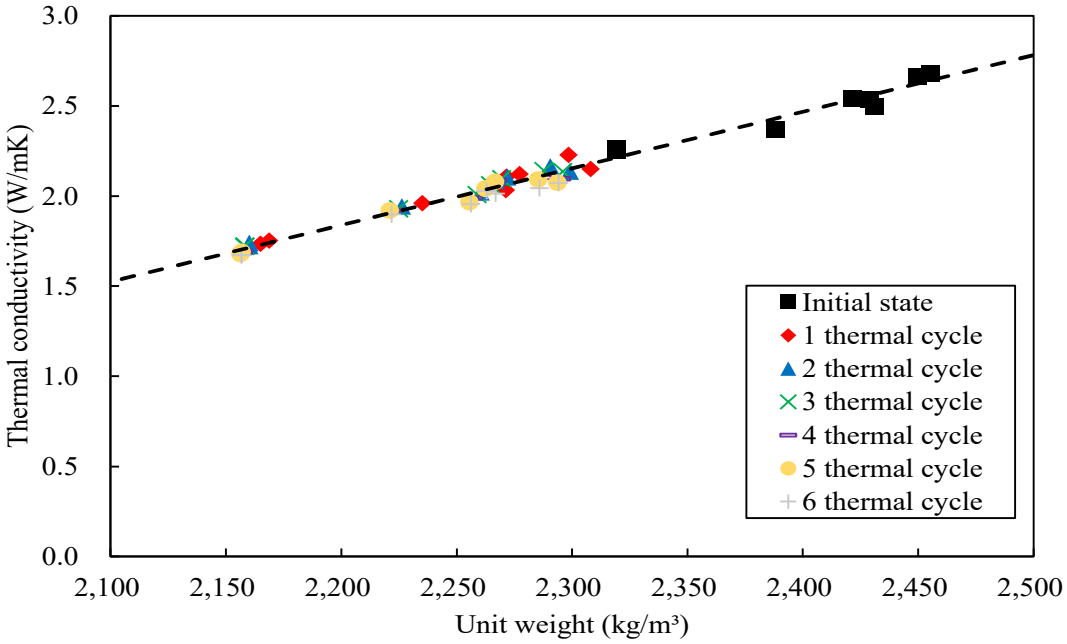


(a) 압축강도 - 단위중량 관계

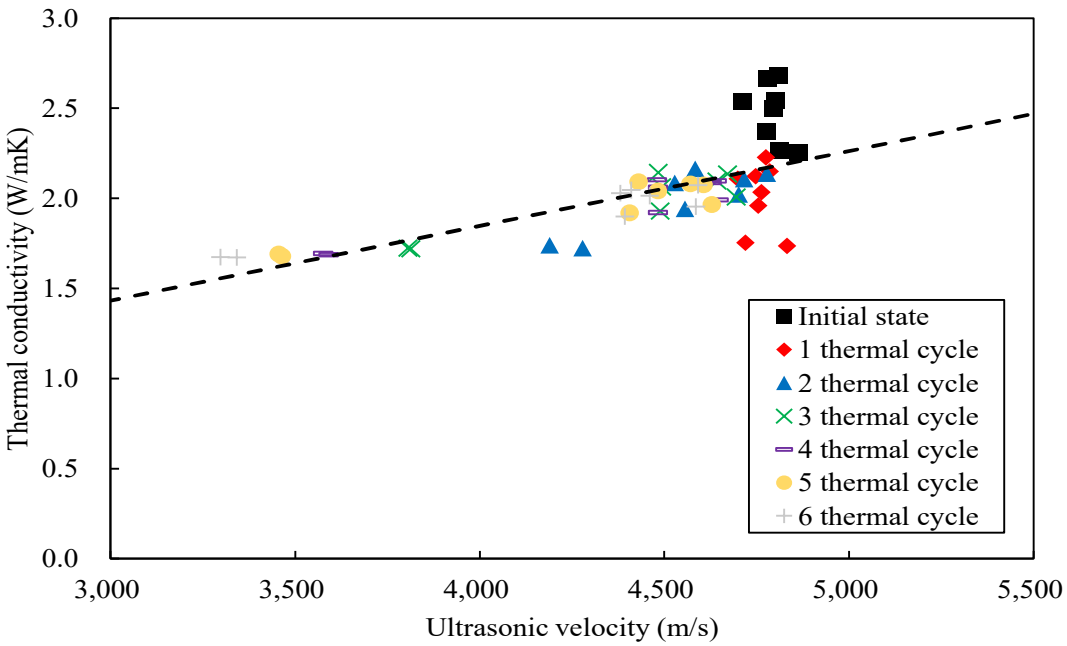


(b) 압축강도 - 초음파 속도 관계

그림 2.46. 압축강도와 물리적 특성 관계 분석



(a) 열전도율 - 단위중량 관계



(b) 열전도율 - 초음파 속도 관계

그림 2.47. 열전도율과 물리적 특성 관계 분석

(다) 열전도율과 압축강도 관계

□ 그림 2.48은 열전도율과 압축강도와의 관계 그래프이며, 비례하여 증가하는 경향을 나타내고 있음.

- 열전도율과 압축강도가 비례한다는 것은 두 인자가 서로 유기적인 관계를 형성하고 있다는 것을 의미
- 높은 압축강도를 갖는 콘크리트는 우수한 열전도율을 보유할 것이며, 열에너지 전달에 유리할 것으로 판단.

□ 그림 2.49에는 기존 연구 결과의 보통 콘크리트 (normal concrete)의 열전도율-압축강도 관계와 본 연구에서 수행한 고전도 초고성능 콘크리트의 열전도율-압축강도 관계를 비교한 그래프를 나타냄.

- 보통 콘크리트와 고전도 초고성능 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 열전도율은 거의 비례하여 증가함.
- 고전도 초고성능 콘크리트의 경우, 보통 콘크리트보다 우수한 압축강도를 나타내고, 또한, 보통 콘크리트의 1.231~1.943W/mK 범위의 열전도율보다 높은 1.671~2.682W/mK 범위의 열전도율 나타냄.
- 강도가 큰 콘크리트는 매트릭스 구조가 치밀하여 공극이 적고 더욱 밀실하므로, 고전도 초고성능 콘크리트의 열전도율이 보통 콘크리트의 열전도율보다 더 크게 나타나는 것으로 판단됨. 결과적으로, 콘크리트 강도 향상은 단위중량의 증대와 더불어 열전도율 향상에 기여하며, 콘크리트 축열 성능 증진을 도모할 수 있는 요소로 작용.

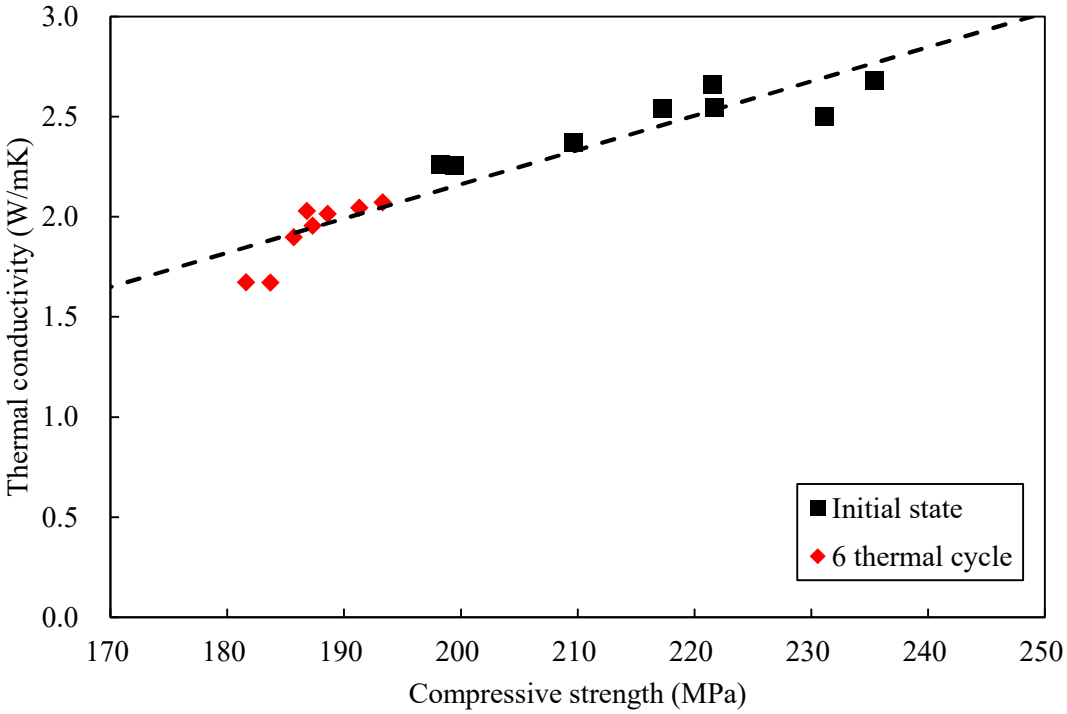


그림 2.48. 열전도율과 압축강도 관계 분석

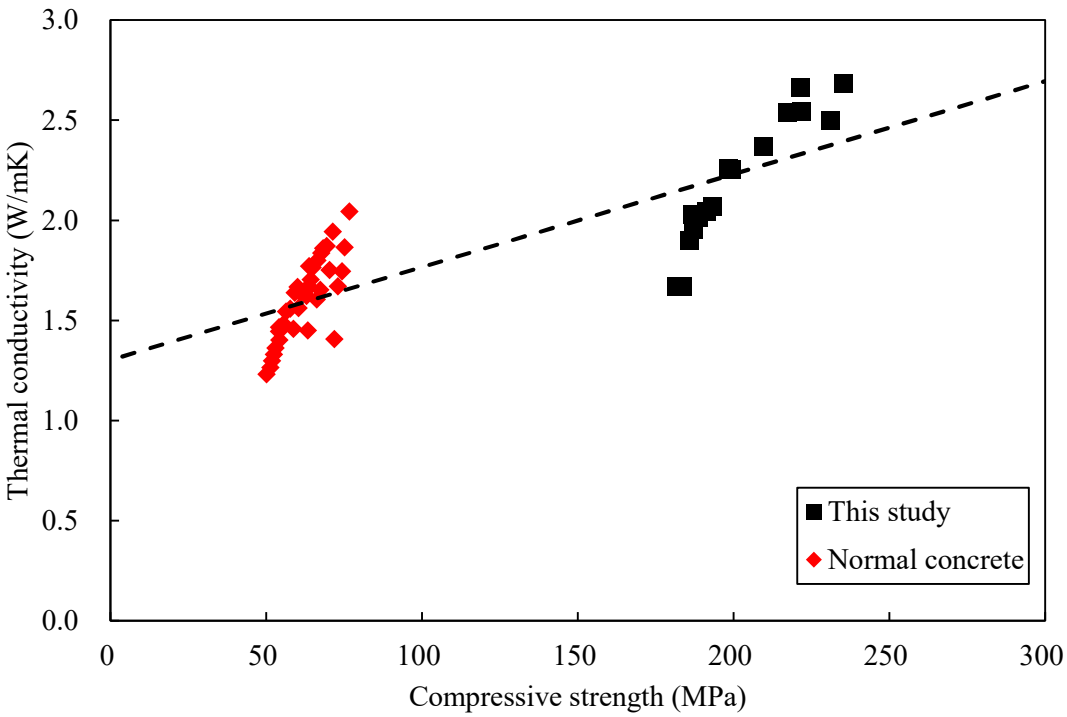


그림 2.49. 보통 콘크리트와 고전도 초고성능 콘크리트의 열전도율과 압축강도 관계 비교

(6) 고전도 초고성 콘크리트의 축열 및 방열 효율성 평가

(가) 열전도율에 따른 열성능 특성 평가

□ 기존 일반 콘크리트 대비 고전도 초고성능 콘크리트의 열전도율 특성

- 기존 일반 콘크리트(conventional concrete)의 열전도율은 1.0~1.6 W/m・K의 범위를 나타냄.
- 반면에 본 연구에서 개발한 고전도 초고성능 콘크리트의 열전도율은 1.7~2.7 W/m・K 정도로 일반 콘크리트 열전도율의 2배 이상을 나타냄(그림 2.50).

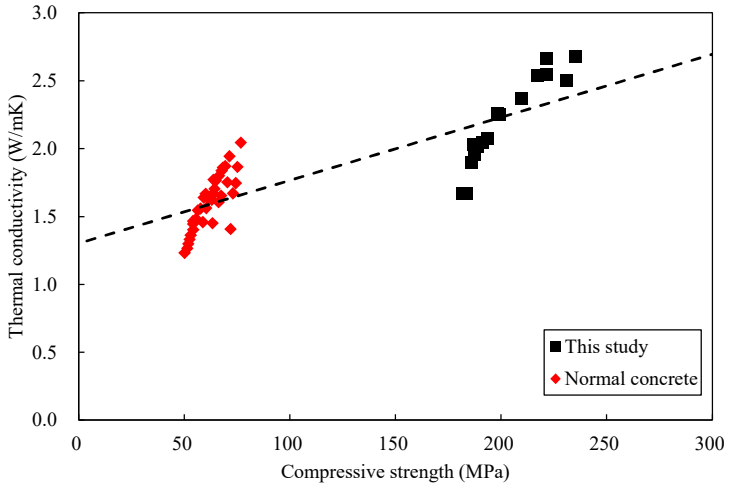


그림 2.50. 보통 콘크리트와 고전도 초고성능 콘크리트의 열전도율 비교

□ 태양열 열교환장치의 축열(charging) 및 방열(discharging) 메카니즘(그림 2.51)

- 집열장치에서 가열된 고온의 열전달 유체는 열전달 파이프를 통해 콘크리트 내부로 흘러들어갈 때, 고온의 열전달 유체에서 저온의 콘크리트로 열이 전달되어 콘크리트에 열에너지가 축열됨.
- 저온의 열전달 유체는 열전달 파이프를 통해 콘크리트 내부로 흘러 들어갈 때, 고온의 콘크리트에서 저온의 열전달 유체로 열이 전달되어 콘크리트 열에너지가 방열됨.
- 이와 같이 콘크리트와 열전달 유체 사이에 열교환이 발생할 때, 열전도율이 우수할수록 축열과 방열이 빠른 속도로 진행되어 열교환 효율이 증가함.

□ 콘크리트의 열전도율에 따른 특성 축열 블록의 열성능평가를 수행

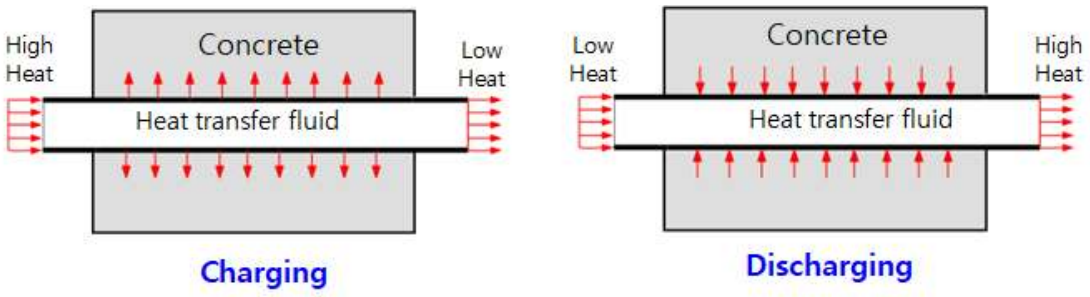


그림 2.51. 축열 및 방열 메카니즘

(나) 콘크리트 축열 블록 유한요소해석 모델링

□ 콘크리트의 열전도율에 따른 특성 축열 블록의 열 성능평가를 수행하여 콘크리트 축열 블록 유한요소 해석 모델링(그림 2.52)

□ 콘크리트 축열 블록 내부의 열전달 파프는 규칙적으로 반복 배열된다. 사각 단면의 콘크리트 블록 내에 원형 단면의 열전달 파이프가 규칙적으로 배열되고 열전달 파이프를 중심으로 블록 유닛(unit)을 구성하고 있는 형태이다.

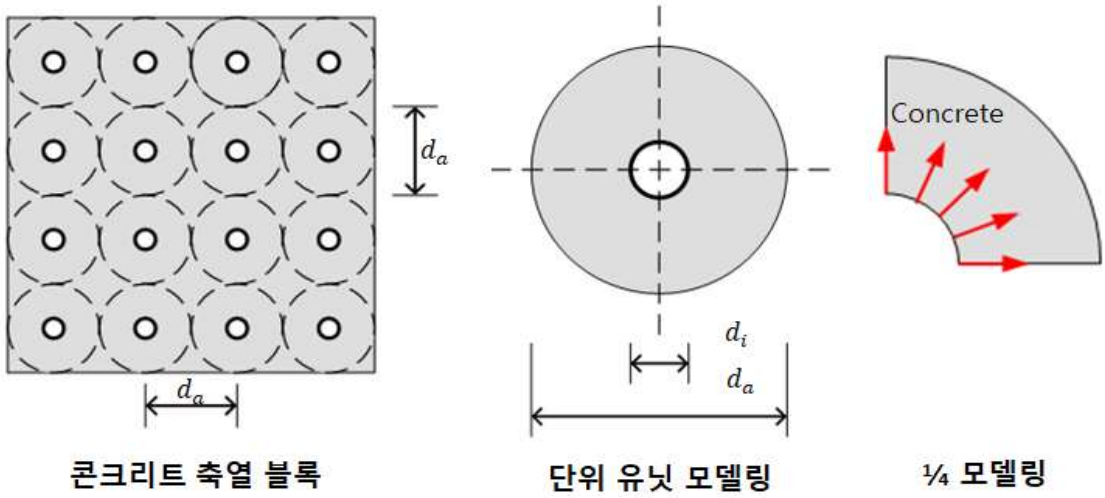
- 유한요소해석은 ANSYS CFX 프로그램을 사용

□ 열전달 파이프로부터 콘크리트 블록으로 열전달은 파이프 중심을 기준으로 방사형으로 전달된다. 유한요소해석의 용이성을 위해 콘크리트 유닛을 원주형 실린더로 가정하여 축대칭 조건으로 모델링이 가능하다. 따라서 실린더 형상의 콘크리트 단위 유닛 블록을 1/4로 모델링하였다.

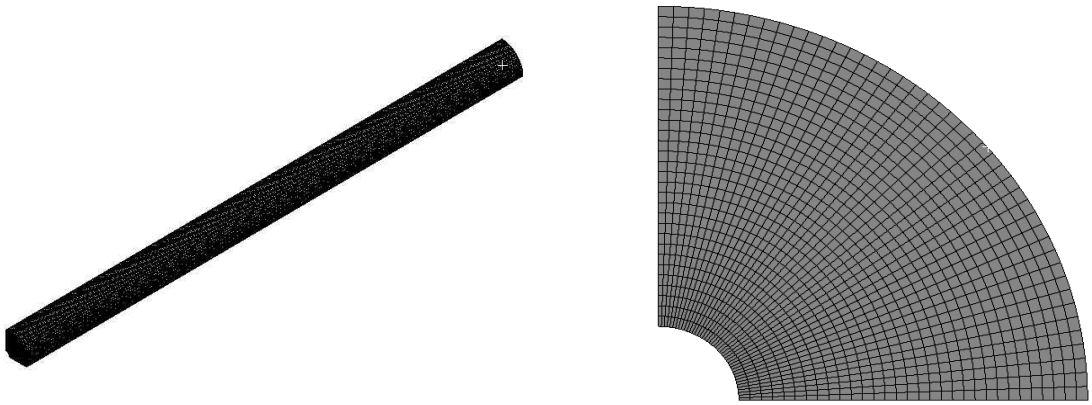
- 1/4 실린더 블록의 yz 평면과, xz 평면에 대칭반복(periodicity) 조건을 부여(그림 2.53)
- 해석 시간은 1시간의 축열 구간 (charging), 1시간의 온도 유지 기간 (heat-break) 및 1시간의 방열 구간으로 구성하여 총 3시간으로 수행하고 해석 단계별 시간 간격은 100s이다.

※ 축열(charging) : 0~3,600s (단계 시간 증분량= 100s)
※ 온도 유지(break) : 3,600~7,200s (단계 시간 증분량= 100s)
※ 방열(discharging) : 7,200~10,800s(단계 시간 증분량= 100s)

- 블록의 길이 L=0.8m로 가정. 열전달 파이프의 직경(d_i) 기본값은 20 mm, 열전달 파이프의 중심간격(d_a) = 100 mm를 기본값으로 하여 모델링을 수행하였다.
- 콘크리트 초기온도 조건은 25 ℃, 열전달 파이프 내부의 열전달 유체 온도는 400 ℃로 설정



(a) 축열 블록의 유한요소 해석 조건 설정



(b) 유한요소해석 3D 메쉬

그림 2.52. 유한요소 해석 모델

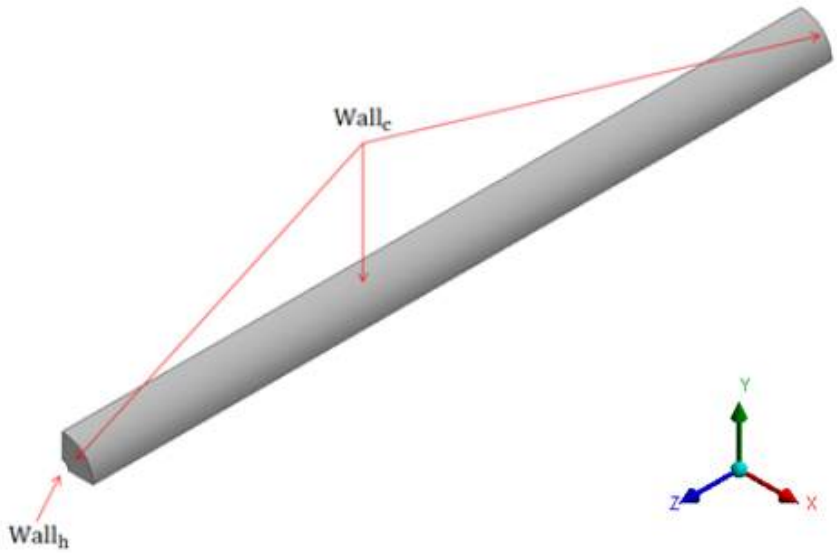


그림 2.53. 유한요소해석 경계조건

표 2.10. 콘크리트 블록 수치해석 경계조건

경계 구분	항목 구분	적용값
콘크리트	초기온도	25 ℃
	단위중량	2,200 kg/m^3
	비열	600 J/kg·K
	열전도율	1.0, 1.5, 2.0 2.5 W/m·K
Wall$_c$ (원주형 단위 유닛 외면)	온도 조건	단열 조건
Wall$_h$ (원주형 단위 유닛 내면)	온도 조건	(Charging 단계) 400 ℃ (Break 단계) 단열조건 (Discharging 단계) 25 ℃
Wall$_{yz}$	대칭 조건	Periodicity
Wall$_{xz}$	대칭 조건	Periodicity

(다) 열전달계수의 변화에 따른 수치해석 결과

□ 콘크리트의 열전도율을 1.0, 1.5, 2.0 및 2.5 W/m·K로 하여 열전달 수치해석을 수행하였다.

- 콘크리트 열전도율 적용 조건 = 1.0, 1.5, 2.0, 5.0 W/mK

□ 콘크리트의 열전도율 변화에 따른 해석 시간 단계별 온도변화를 그림 2.54에 나타내었다. 온도는 $(R_i+R_a)/2$ 위치에서의 해석 결과이다.

□ 축열 구간(charging)에서 콘크리트의 열전도율이 클수록 시간이 지남에 따라 콘크리트 온도가 더욱 빨리 증가한다. 콘크리트 온도는 열전달 파이프 속에 흘러가는 유체의 온도인 400℃에 더 빨리 근접함을 알 수 있다.

□ 열원 공급을 중단한 Break 단계에서는 유체가 흘러간 유닛 내벽의 온도와 콘크리트 블록 외벽 중간지점에서의 온도는 일정한 시간이 지나고 난 뒤 온도가 일정한 것을 나타낸다.

□ Break 단계에서 열전달계수가 1 W/m-K 일 때 온도는 약 303℃ 1.5 W/m-K 일 때 온도는 약 325℃, 2.0 W/m-K 일 때 온도는 약 349℃, 2.5 W/m-K 일 때 온도는 약 373℃이다.

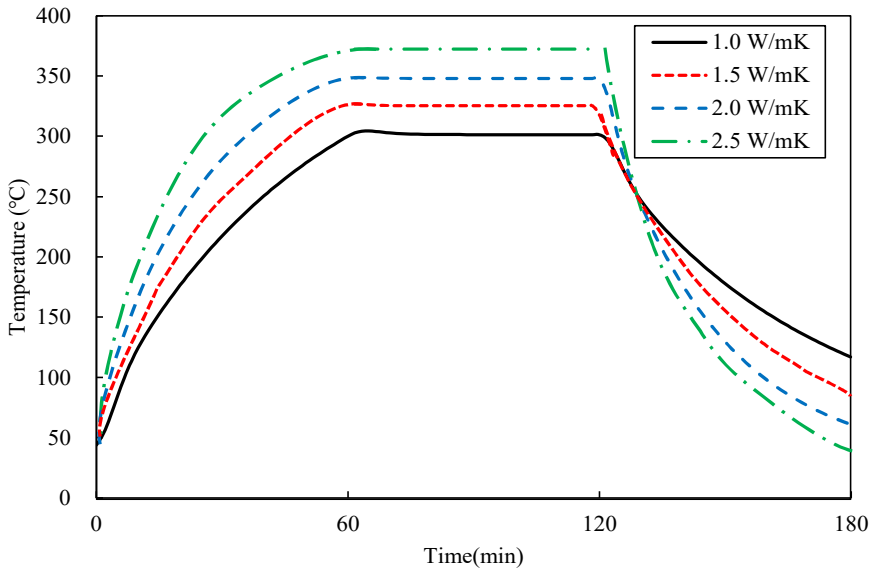


그림 2.54. 콘크리트 열전도율 변화에 따른 콘크리트 블록 온도변화

□ 방열 구간(discharging)에서는 축열 구간에서와 마찬가지로 열전도율 높을수록 콘크리트 온도는 더욱 빠르게 하강하며, 이는 방열이 더욱 빨리 발생함을 의미한다. 궁극적으로 콘크리트 온도는 열전달 파이프 내부에 흘러가는 유체의 온도인 25℃에 근접한다.

□ 유한요소해석 결과는 콘크리트의 열전도율이 클수록 축열과 방열이 더욱 빠르게 나타내며, 이는 큰 열전도율이 콘크리트 블록 열교환 장치에 유리함을 의미한다.

□ 따라서, 본 연구의 고전도 초고성능 콘크리트의 큰 열전도율은 일반콘크리트의 열전도율에 비해 크므로 축열 블록에 매우 효과적이라고 판단됨.

(라) 열전도율 변화에 따른 콘크리트 블록 열에너지 변화량

□ 그림 2.55는 콘크리트 열전도율 변화할 때, 축열 구간에서의 시간에 따른 콘크리트 열에너지 변화량을 나타낸 그래프이며, 그림 2.56~59는 열전도율별 시간에 따른 블록 단면 내 온도장을 도시화한 그림이다.

- 콘크리트 열전도율이 클수록 시간이 지남에 따라 열에너지 변화량의 기울기가 큰 것을 확인할 수 있다. 콘크리트 열전도율이 1~2 W/m·K일 때 10분 이전까지 열에너지 변화량 차이가 크게 나타나지만, 30분 이후에는 비슷한 값에 수렴한다.

□ 따라서, 본 연구의 고전도 초고성능 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 열전도율이 크기 때문에 더욱 짧은 시간 내에 열에너지를 교환할 수 있고, 특히 축열 단계에서 더욱 신속히 열에너지를 저장할 수 있음을 나타낸다.

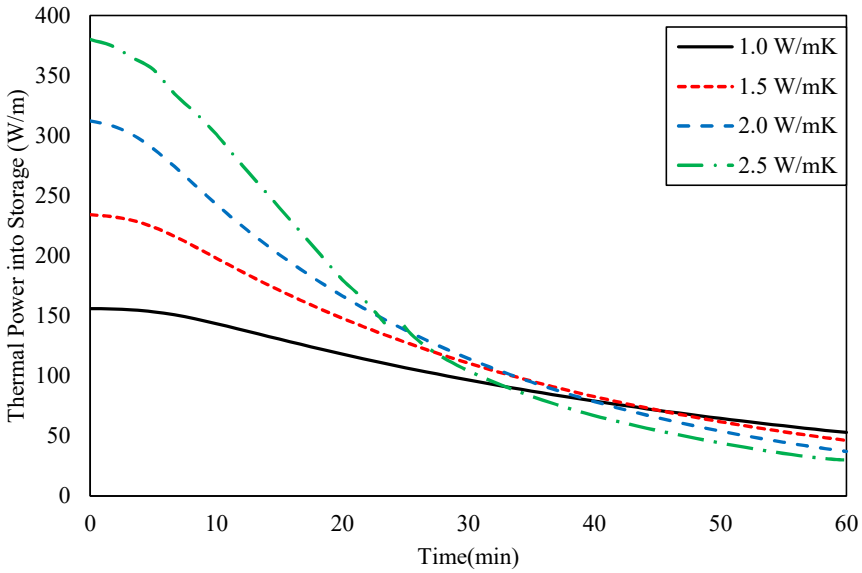
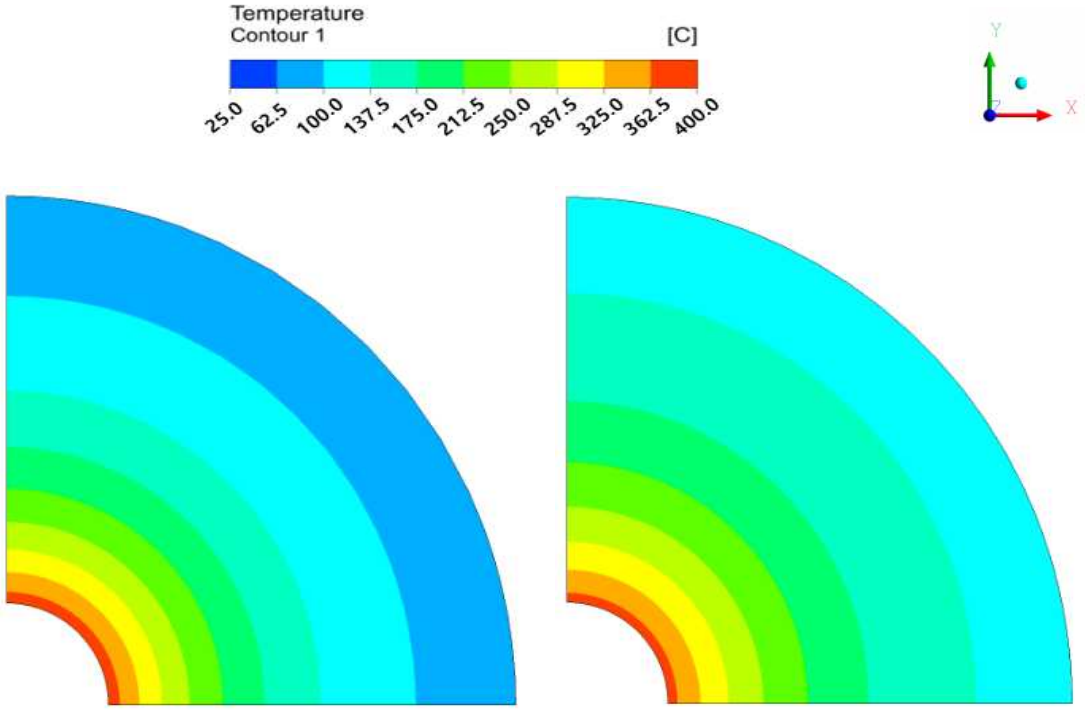


그림 2.55. 시간에 따른 각 열전달계수에 대한 열에너지변화량



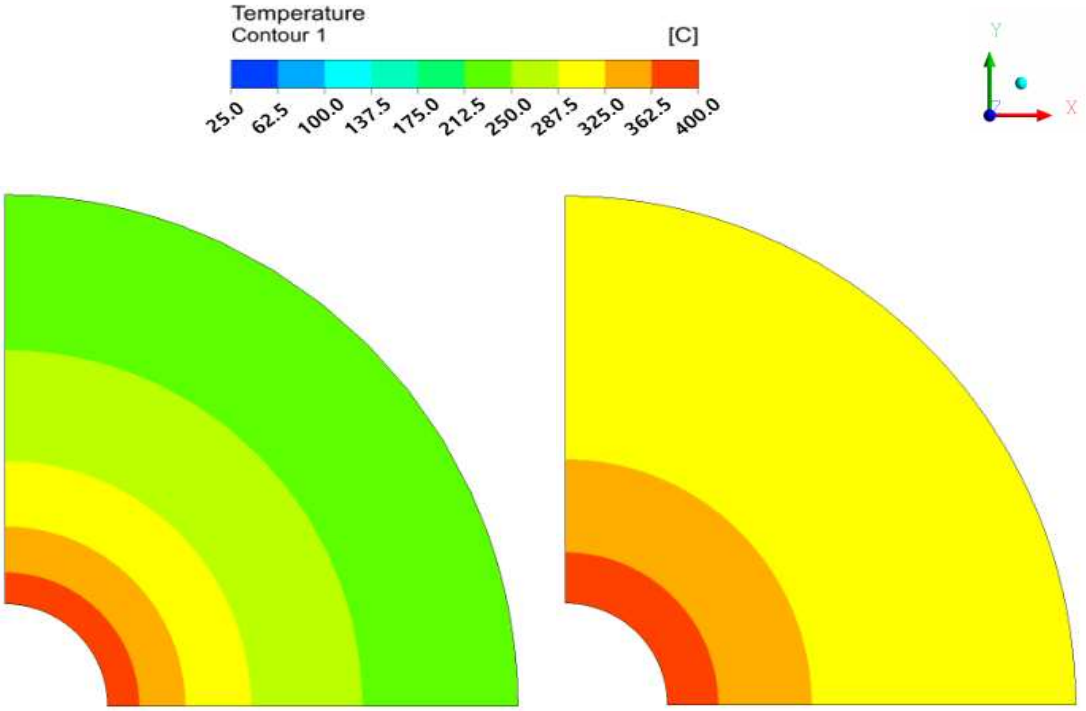
(a) 열전도율=1.0 W/m·K

(b) 열전도율=1.5 W/m·K

(c) 열전도율=2.0 W/m·K

(d) 열전도율=2.5 W/m·K

그림 2.56. Charging 단계에서 블록 단면 내 온도장 (Time = 15 min)



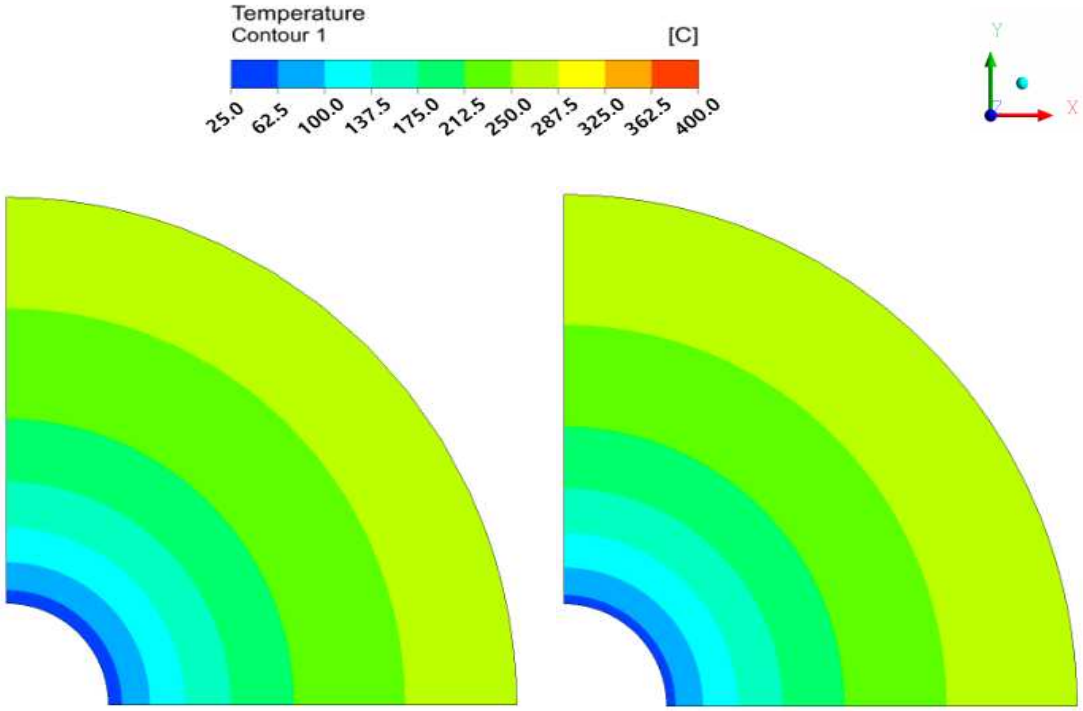
(a) 열전도율=1.0 W/m·K

(b) 열전도율=1.5 W/m·K

(c) 열전도율=2.0 W/m·K

(d) 열전도율=2.5 W/m·K

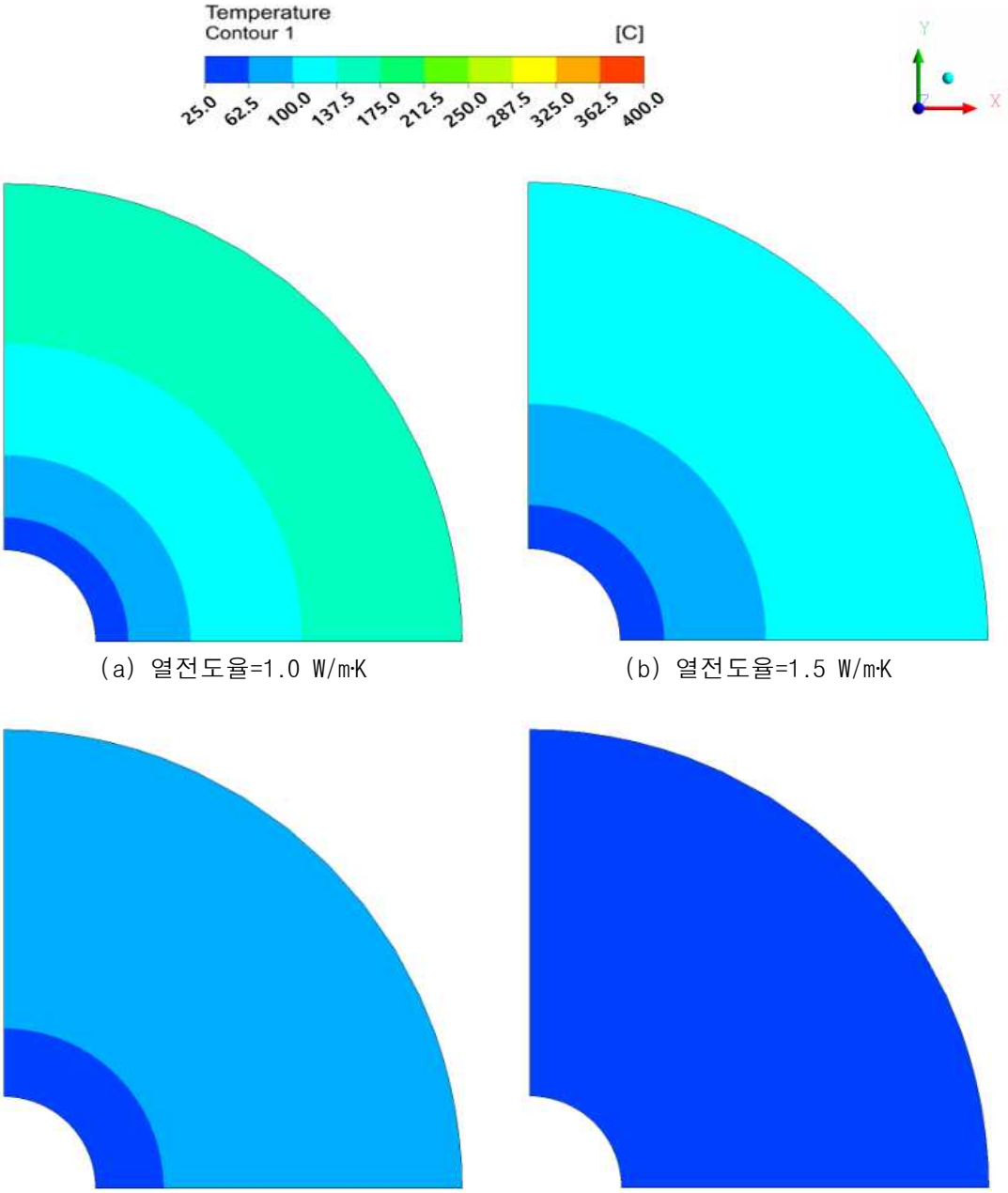
그림 2.57. Charging 단계에서 블록 단면 내 온도장 (Time = 45 min)



(a) 열전도율=1.0 W/m·K (b) 열전도율=1.5 W/m·K

(c) 열전도율=2.0 W/m·K (d) 열전도율=2.5 W/m·K

그림 2.58. Discharging 단계에서 블록 단면 내 온도장 (Time = 135 min)



(a) 열전도율=1.0 W/m·K

(b) 열전도율=1.5 W/m·K

(c) 열전도율=2.0 W/m·K

(d) 열전도율=2.5 W/m·K

그림 2.59. Discharging 단계에서 블록 단면 내 온도장 (Time = 165 min)

(7) 고전도 초고성능 콘크리트 축열 모듈 장치 성능평가

(가) 고전도 초고성능 콘크리트 축열 블록 제작

□ 고전도 콘크리트의 축열 성능 및 온도 분포 특성 분석을 위하여 강섬유 보강 고전도 콘크리트 블록을 제작

- 열에너지를 효율적으로 활용하기 위해서는 축열 및 방열 성능이 우수해야 하며, 그 특성을 파악해야 함. 따라서 콘크리트를 열에너지 저장 매체로 활용하기 위해서는 저장매체의 역할을 수행하기 위한 시스템이 필요
- 본 연구에서는 콘크리트에 열전달 파이프를 매립하여 열교환, 즉 열에너지 전달인 축열 및 방열이 용이한 콘크리트 블록 모듈을 모사함.
- 실제 열저장 콘크리트 모듈 형태는 여러 개의 열전달 파이프가 규칙적으로 배열되는 형상을 갖게 되며, 열전달 파이프를 중심으로 열전달은 등방성을 나타내며 목표 열용량에 따라 축열 블록 크기와 열전달 파이프 개수가 결정됨 (그림 2.60).
- 따라서, 단면 내 등방성 열전달 특성을 고려하여 한 개의 열전달 파이프를 갖는 콘크리트 축열 블록을 제작하여 열적 성능을 분석하고자 하였음.

※ 가로×세로×길이가 각각 100×100×800mm의 크기를 갖는 블록을 하나의 모듈로 설정(표 2.11 및 그림 2.61의 (a))

□ 콘크리트 블록 중심을 관통하는 열전달 파이프를 매립하여 열에너지를 전달을 모사함.

- 파이프 형상에 따라 열전달 성능을 파악하기 위하여 원형 파이프(plain), 길이 방향으로 핀이 달린 종방향 핀 부착 파이프(longitudinal fin), 리브형 핀 부착 파이프(ribbed fin)를 선정하여 블록 제작 수행(그림 2.61의 (b), (c), (d))
- 파이프 양 끝 단에는 열전달 장비에 장착이 용이하도록 플렌지를 부착하여 열손실을 방지

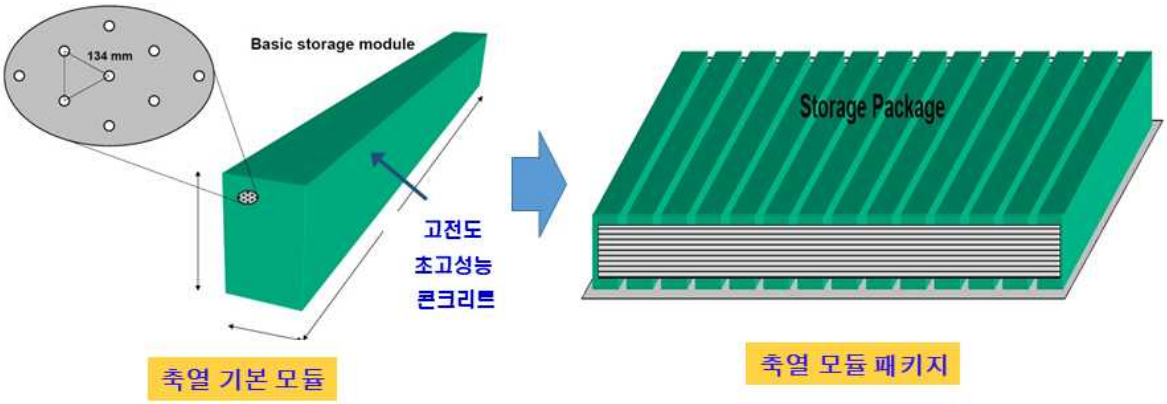
□ 블록 제작과정을 그림 2.62에 상세히 나타내었음.

- 제작이 완료된 시편은 90±5℃에서 72시간 동안 증기양생을 실시
- 블록 시편의 경우, 매립된 파이프와 센서로 인하여 수중양생을 실시하기에는 다소 무리가 있어 기건양생을 실시

표 2.11. 강섬유 보강 고전도 콘크리트 블록 배합표

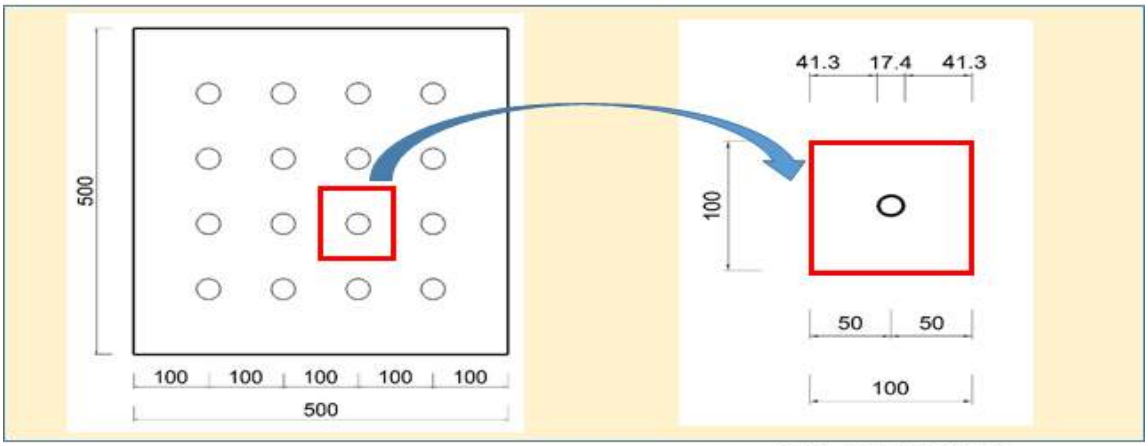
배합	f_{ck} (MPa)	W/B (%)	단위중량 (kg/m^3)					섬유 혼입량	
			W	OPC	Zr	F.A	F	강섬유 (%)	P.P 섬유 (kg/m^3)
1	180	0.18	178	783	196	862	235	1.5	2.0

W: 배합수(water), B: 바인더(binder), OPC: 보통 포틀랜드 시멘트(ordinary portland cement), Zr: 지르코늄(zirconium), F.A: 잔골재(fine aggregate), F: 필러(filler)



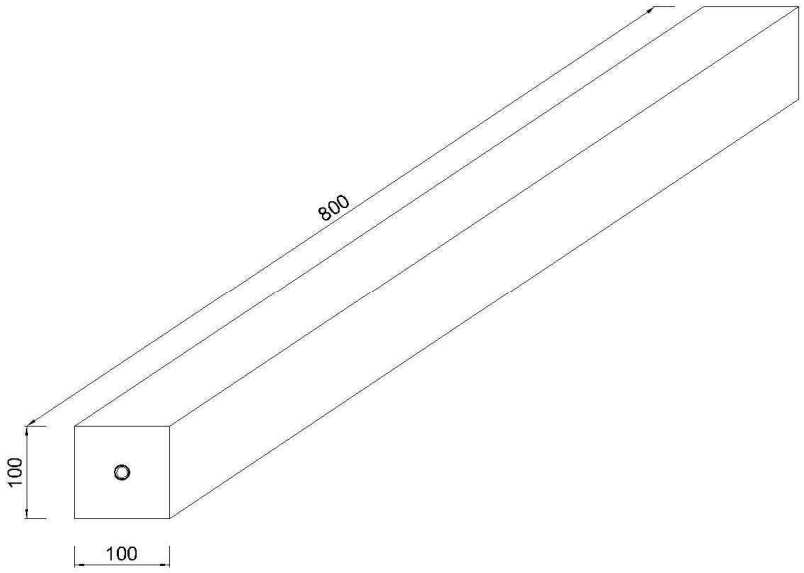


초고성능 콘크리트 열저장 모듈

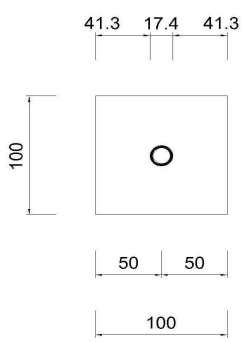


열저장 모듈 단면 모듈 유닛 모델링

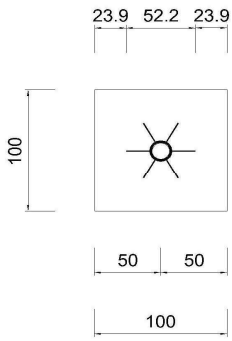
그림 2.60. 열저장 콘크리트 블록의 모듈 유닛



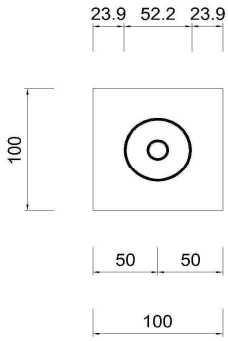
(a) 콘크리트 블록 크기



(b) 원형 파이프



(c) 종방향 핀 부착 파이프



(d) 리브형 핀 부착 파이프

그림 2.61. 고전도 콘크리트 블록 상세



(a) 고전도 콘크리트 블록 제작



(b) 고전도 콘크리트 배합



(c) 고전도 콘크리트 타설



(d) 타설면 평탄화 작업



(e) 마감처리



(f) 제작 완료

그림 2.62. 강섬유 보강 고전도 콘크리트 블록 제작과정

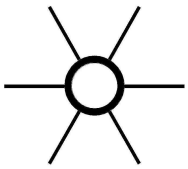
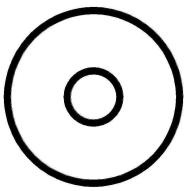
(나) 열전달 파이프 상세

□ 각 열전달 파이프의 형상, 치수 및 핀 정보에 대하여 표 2.12에 자세히 나타내었음

- 열전달 파이프 단면 형상은 3종류를 적용하였으며, 원형 파이프, 종방향 핀 부착 파이프 및 리브형 핀 부착 파이프로 구분함.
- 파이프의 외경, 내경 및 두께는 모두 동일하며, 핀의 두께 및 높이가 일정

□ 파이프 양 끝단에 플렌지를 부착하여 체결하였을 시, 열 유체 공급의 누수를 방지하고 열손실을 줄일 수 있도록 설계

표 2.12. 열전달 파이프 상세

파이프 구분	단면 형상	외경 (㎜)	내경 (㎜)	파이프 두께 (㎜)	핀 두께 (㎜)	핀 높이 (㎜)	열전달 파이프
형상 1 (원형)		17.4	13.4	2.0	-	-	
형상 2 (종방향 핀)		17.4	13.4	2.0	3.0	17.4	
형상 3 (리브형 핀)		17.4	13.4	2.0	3.0	17.4	

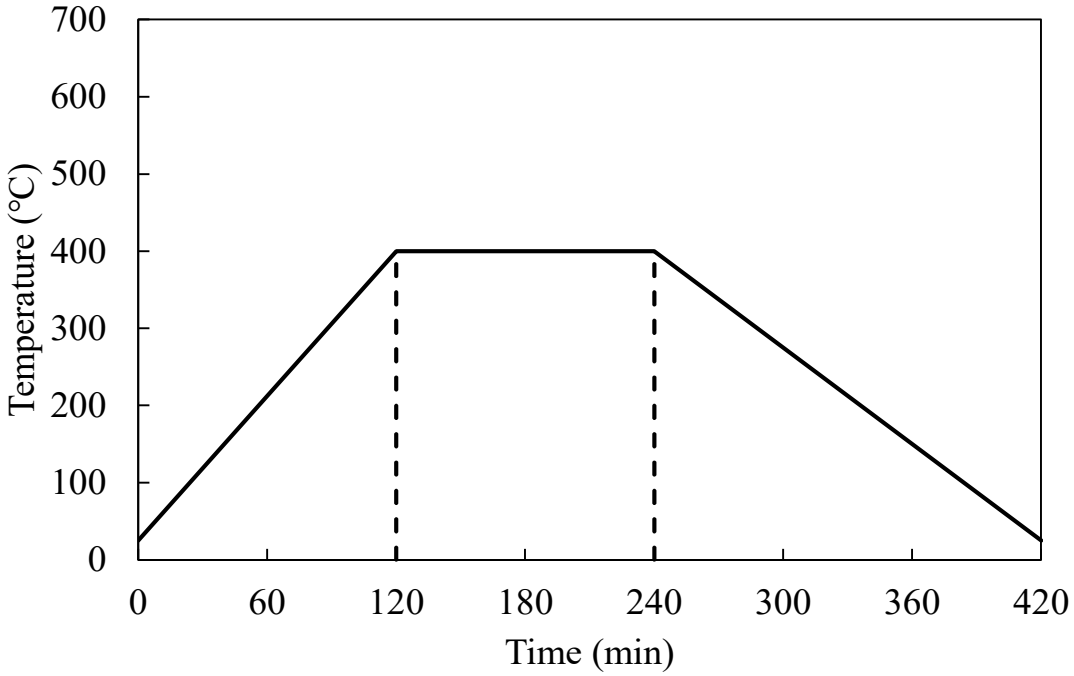
(다) 고온 열사이클 시뮬레이션

□ 열 유체 순환 장비를 이용하여 목표 온도 및 시간을 설정하여 고전도 콘크리트 블록에 서로 다른 타입의 열사이클을 적용

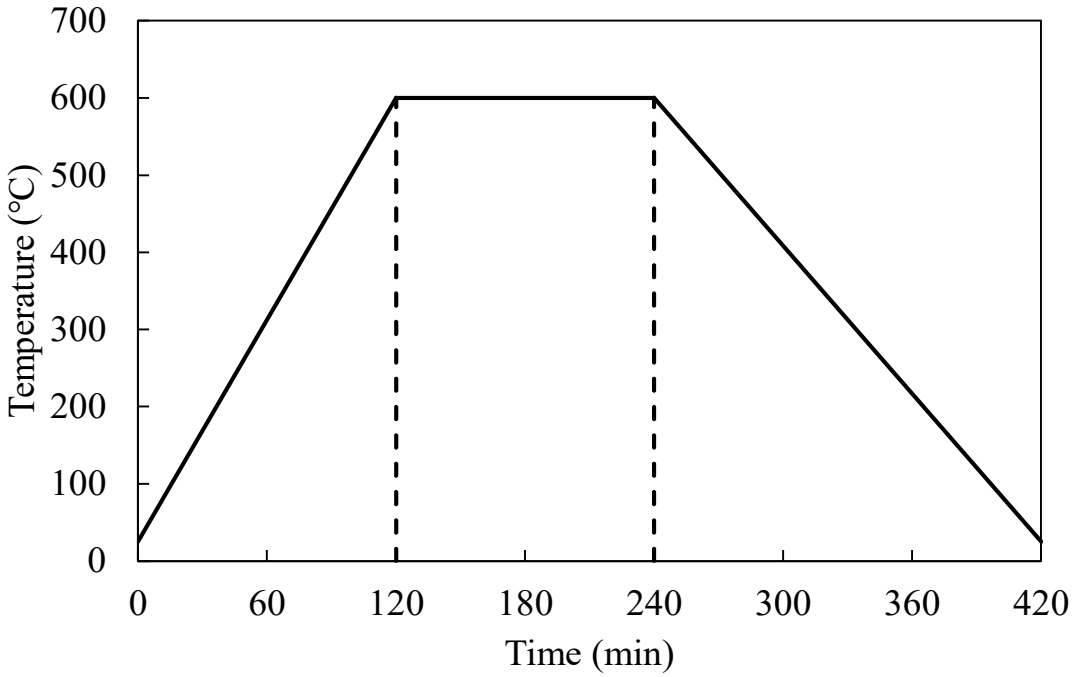
□ 다양한 조건의 열사이클에서 콘크리트 블록의 온도 분포를 분석하기 위하여 4가지 타입의 열사이클을 설정하였으며, 표 2.13와 그림 2.63 및 2.64에 상세히 나타냄

표 2.13. 콘크리트 블록 적용 타입별 열사이클 상세

Type	Temperature heating		Keep temperature		Temperature cooling	
	Time (min)	Temp. (℃)	Time (min)	Temp. (℃)	Time (min)	Temp. (℃)
A	120	400	240	400	360	25
B	120	600	240	600	360	25
C	20	400	320	400	620	25
D	30	600	330	600	630	25

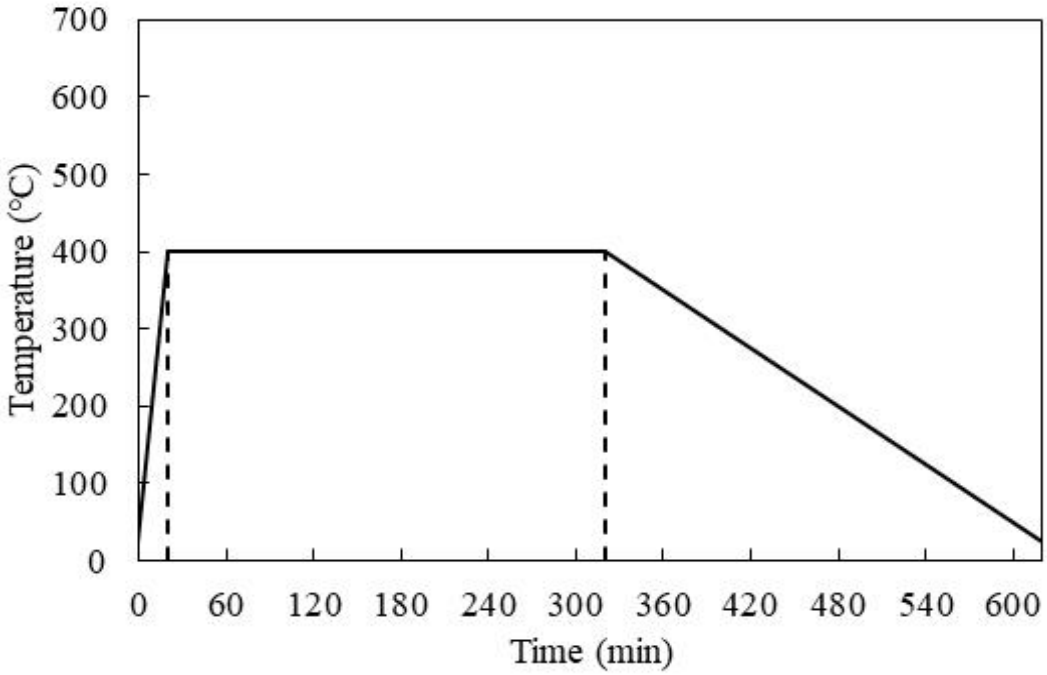


(a) A 타입 열사이클

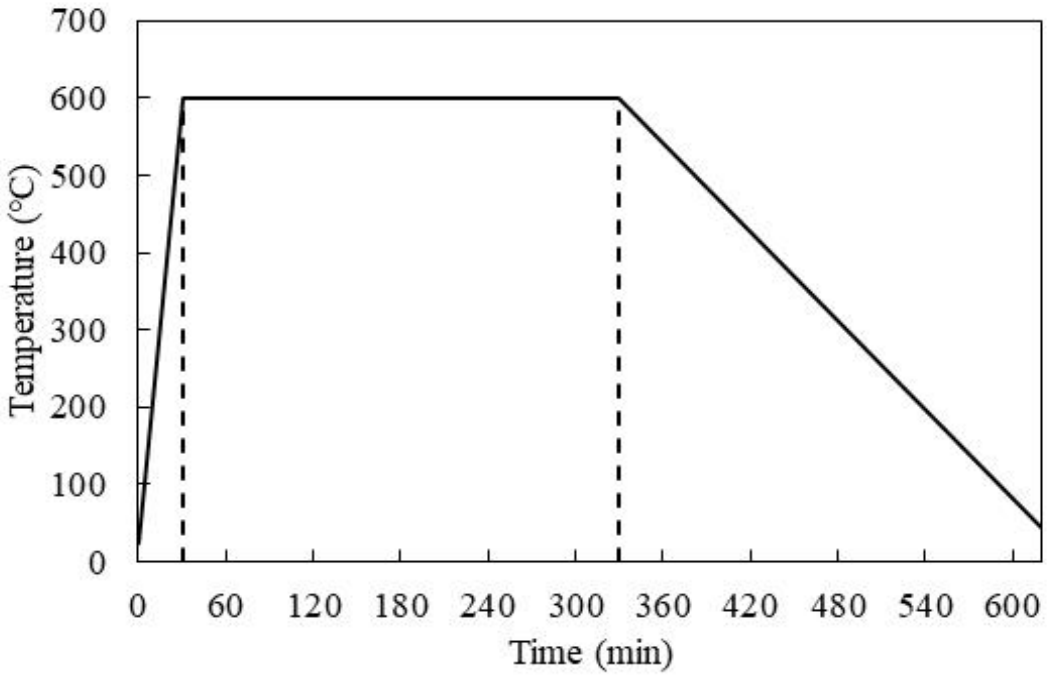


(b) B 타입 열사이클

그림 2.63. 고전도 콘크리트 축열 블록에 적용한 열사이클 곡선(계속)



(c) C 타입 열사이클



(d) D 타입 열사이클

그림 2.64. 고전도 콘크리트 축열 블록에 적용한 열사이클 곡선

(라) 콘크리트 축열 블록 가열 방법 및 온도 계측 설정

□ 그림 2.65에 콘크리트 축열 블록에 열사이클을 적용할 수 있는 가열 장비에 축열 블록을 장착하고 단열재로 보호하기 전과 후를 나타내었다.

- 가열 장비는 열전달 유체 공급장치(블로우어, blower), 열유체 가열장치, 배기장치 및 계측장치로 구성된다. 공기를 가열하여 열전달 유체로 사용하는 방법을 적용하였다(그림 2.66 (a)).
- 장치 하단에 위치한 블로우어에서 상온의 공기를 일정한 유속으로 내보낸다. 블로우어에서 가열장치로 이송된 공기는 목표 온도로 가열되어 열전달 유체 역할을 한다.
- 열전달 유체가 콘크리트 블록에 매립된 파이프를 통과할 때, 열 전달 유체에서 콘크리트 블록으로 열이 전달(축열)되거나 콘크리트 블록에서 열 전달 유체로 열이 전달(방열)되는 과정을 거치게 된다.
- 콘크리트 블록에서 빠져나온 열전달 유체는 장치 외부로 방출된다.

□ 장비 내 제어 기기판(control panel)을 통해 열전달 파이프에 흘러가는 열유체의 유량, 콘크리트 블록 입구와 출구에서의 차압, 콘크리트 블록 입구의 열유체 온도, 콘크리트 블록 출구의 열유체 온도를 제어 및 계측한다(그림 2.66 (b)).

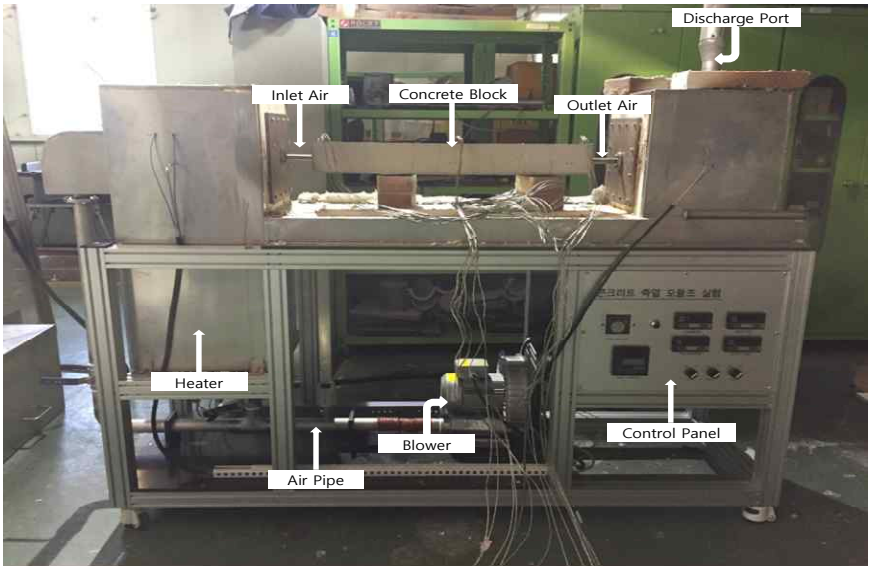
□ 열유체 가열 장비를 활용하여 열전달 실험을 수행하였다. 양생이 완료된 콘크리트 축열 블록을 열유체 가열 장비의 상부에 장착한다.

- 가능한 콘크리트 블록 표면에서의 열손실을 방지하기 위하여 콘크리트 블록을 단열재로 보호
- 또한 단열재로 이루어진 장치 덮개를 거치하여 열손실 및 외부온도와의 간섭을 최소화하였다.



(a) 단열재 보호 전 (a) 단열재 보호 후

그림 2.65. 가열 실험용 축열 블록



(a) 열사이클 가열장비 상세



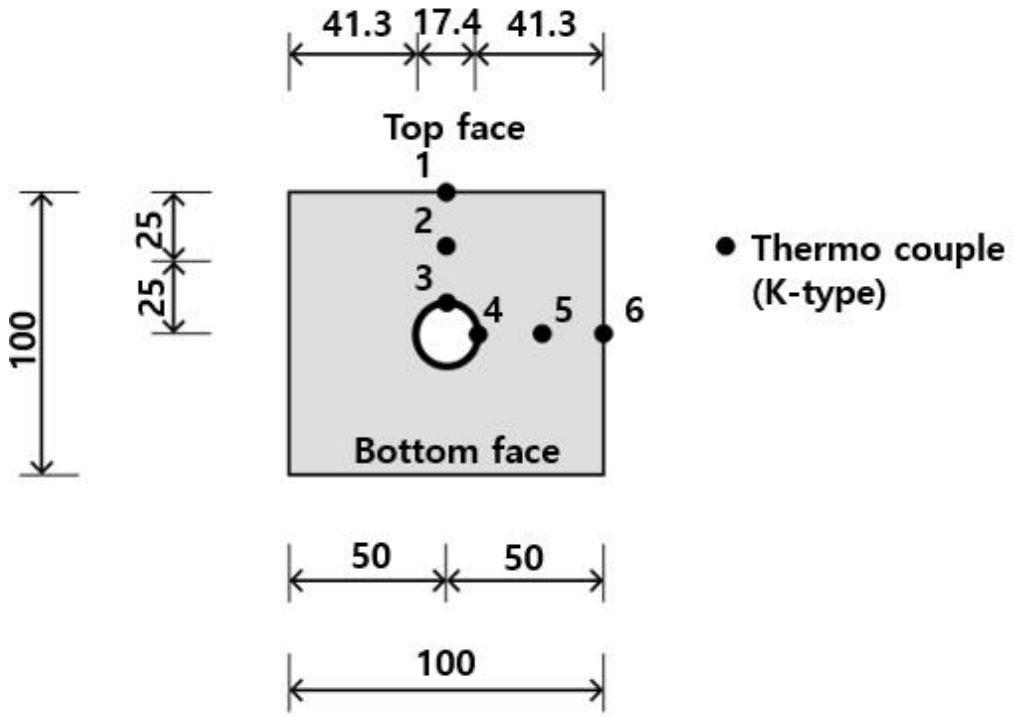
(b) 열사이클 가열 실험 및 자동 계측

그림 2.66. 콘크리트 블록의 열사이클 실험

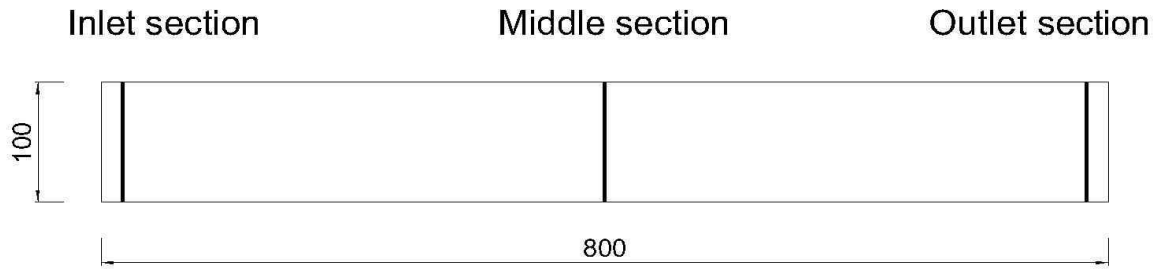
□ 온도센서(thermocouple)를 콘크리트 블록 입구 단면(Inlet section), 중앙 단면(Middle section), 출구 단면(Outlet section)에서의 온도 분포를 측정

▪ 한 단면에 열전달 파이프를 기준으로 온도센서를 수직 방향 3개와 수평 방향 3개에 배치하여 총 6개를 매립하였으며, 입구 단면, 중앙 단면 및 출구 단면에 걸쳐 총 18개의 온도센서를 설정(그림 2.67)

□ 고전도 콘크리트 블록을 열 유체 순환 장비에 장착 후, A, B, C 및 D 타입 순으로 열 사이클을 연속적으로 수행하였으며, 그에 따른 온도 분포를 측정.



(a) 단면 내 온도센서 매립 위치



(b) 단면별 온도센서 매립 위치

그림 2.67. 콘크리트 축열 블록 온도센서 매립 위치

(마) 고전도 초고성능 콘크리트 모듈의 열전달 및 축열

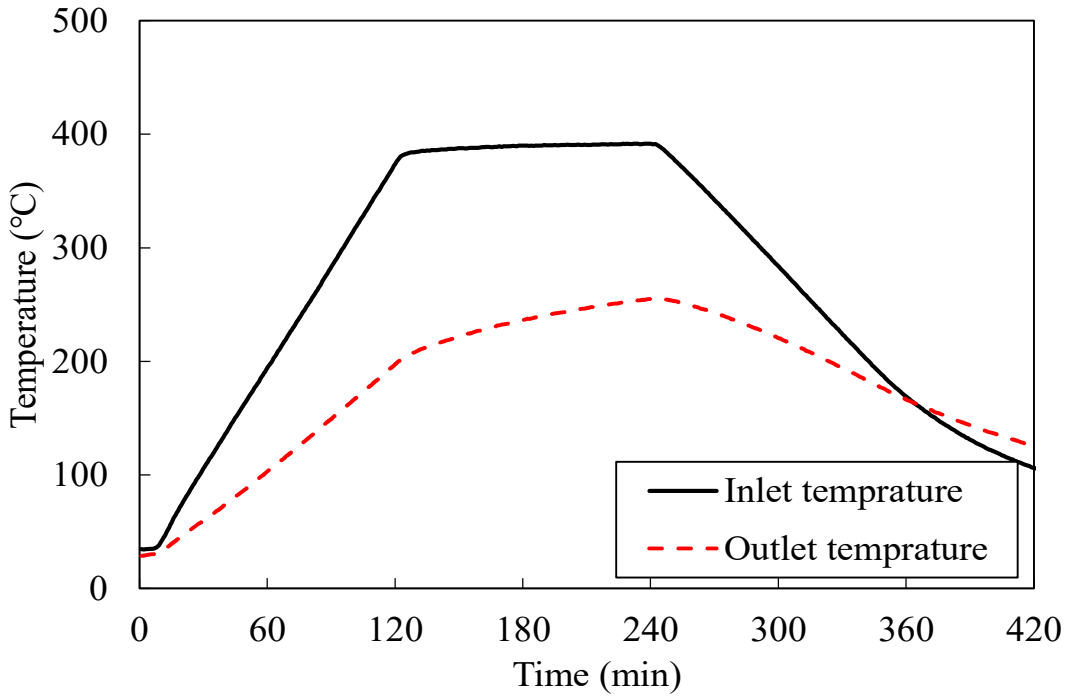
① 열사이클 횟수에 따른 온도 분포

□ 콘크리트 블록에 전달하는 열에너지 및 온도 분포를 파악하기 위하여 열 유체 순환 장비에서 주는 온도를 계측하였으며, 열사이클 타입에 따른 온도 측정 결과를 그림 2.68과 그림 2.69에 나타내었음.

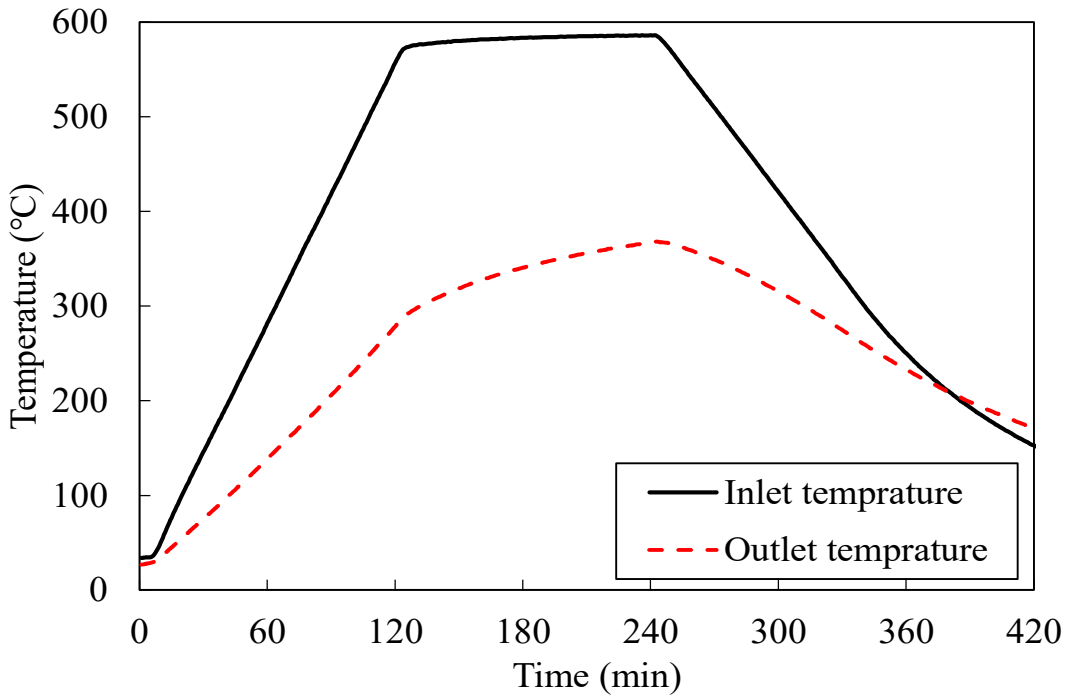
- 본 연구에서 설정한 열사이클에 맞게 일정한 기울기를 가지며 가열 실험을 수행한 것으로 나타남.

□ 원형 파이프 블록의 중앙 단면에서 열사이클 횟수에 따른 온도 분포 비교 그래프를 나타내었음(그림 2.70 및 그림 2.71).

- 범례에 나타낸 G.2, 5는 온도센서 위치를 의미하며 고전도 콘크리트 블록의 표면부와 중심부 사이에 위치.
- A 타입 열사이클에서는 2회의 열사이클까지 온도 분포는 점차 증가하는 경향이 나타나며, 3회 열사이클부터는 뚜렷한 경향을 나타내지 않고 일정한 온도 분포를 나타냄. 즉, 열사이클이 반복될수록 콘크리트는 고온에 대한 영향이 줄어들고 안정화를 나타내는 것으로 판단.
- 278분에서 228.1℃의 최대온도를 나타내며, 온도 하강 구간에 위치함. 이는, 실제 열사이클의 300분에서 열 유체 순환 장비에서 전달하는 온도는 입구 및 출구에서 각각 326.7℃ 및 237.0℃로 측정된 콘크리트 블록의 온도보다 높은 온도를 나타냄. 결과적으로 열사이클에서는 하강구간이지만 열 유체 순환 장비는 콘크리트 블록에 온도를 전달하고 있으며, 최대온도를 나타내는 이유로 판단.
- B 타입, C타입 및 D타입 열사이클은 A 타입 열사이클을 적용한 블록에 적용한 이후로써, 일정한 온도 분포를 나타냄.
- B 타입 열사이클에는 277분에 327.4℃의 최대온도를 나타냄.
- C 타입 및 D 타입 열사이클에서는 각각 347분에서 259.9℃, 352분에서 381.3℃의 최대온도가 관찰됨.

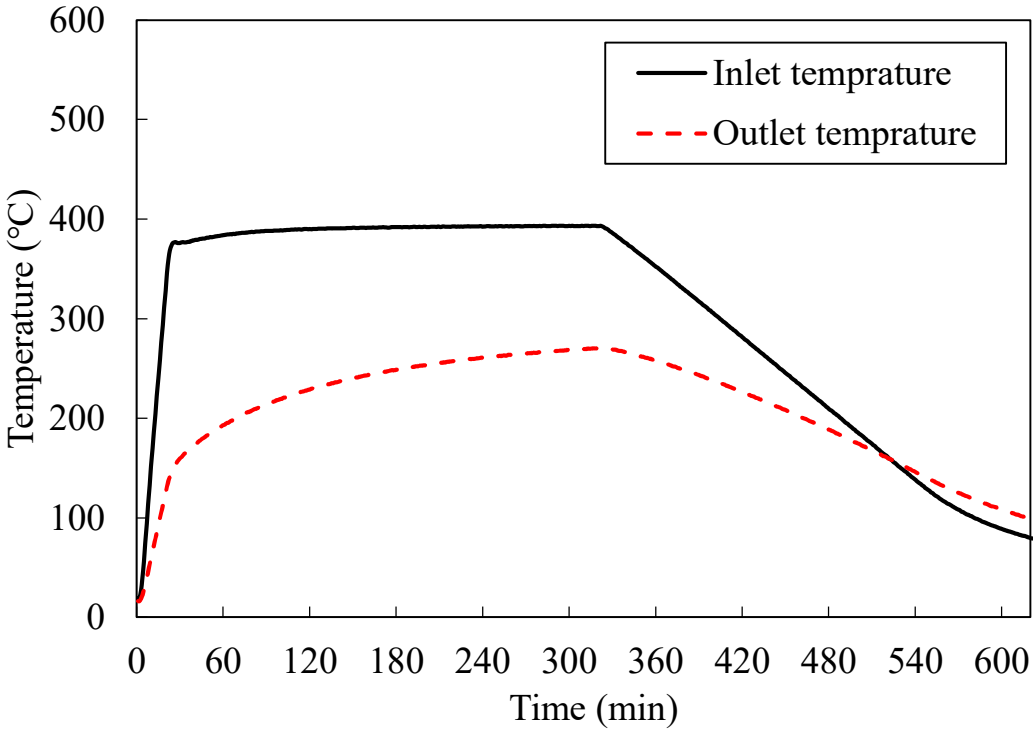


(a) A 타입 열사이클

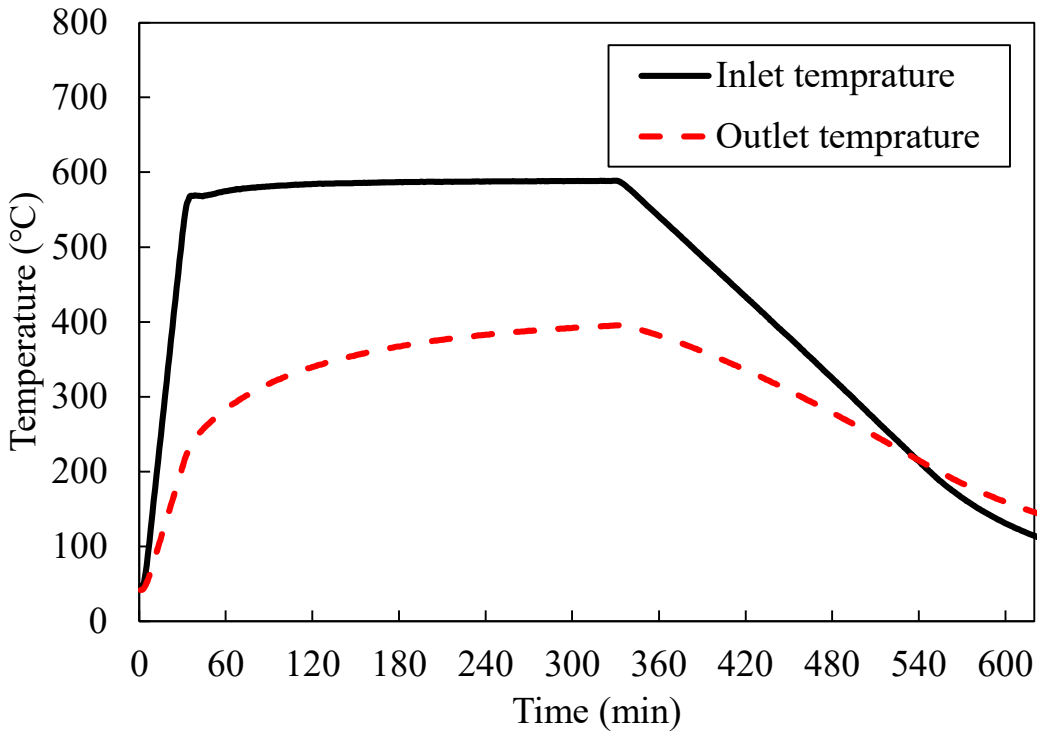


(b) B 타입 열사이클

그림 2.68. 열 유체 순환 장비의 입구 및 출구 온도(계속)

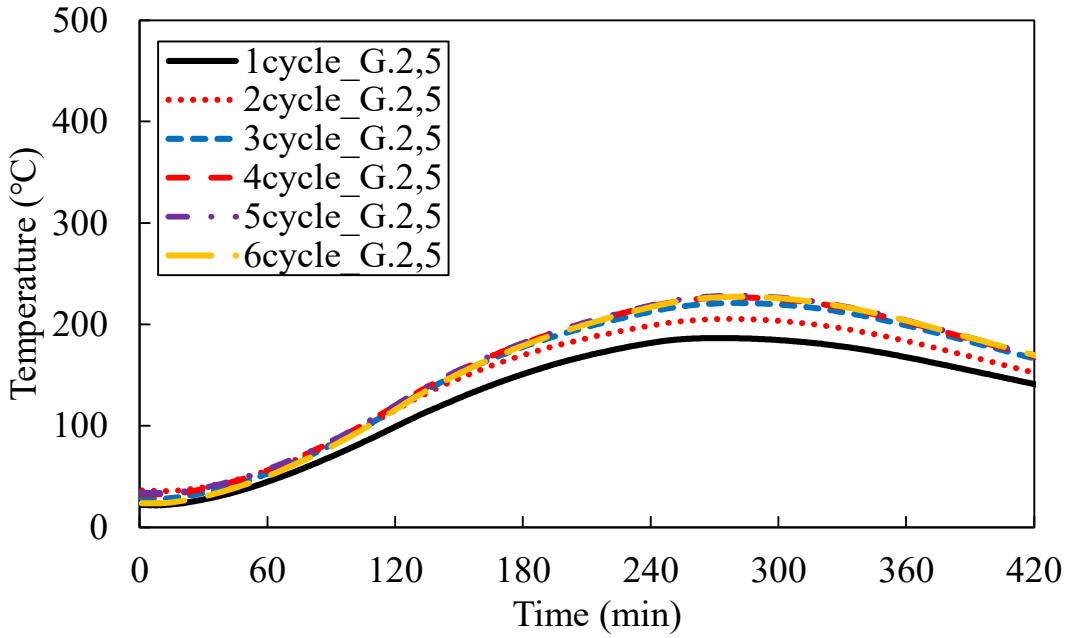


(c) C 타입 열사이클

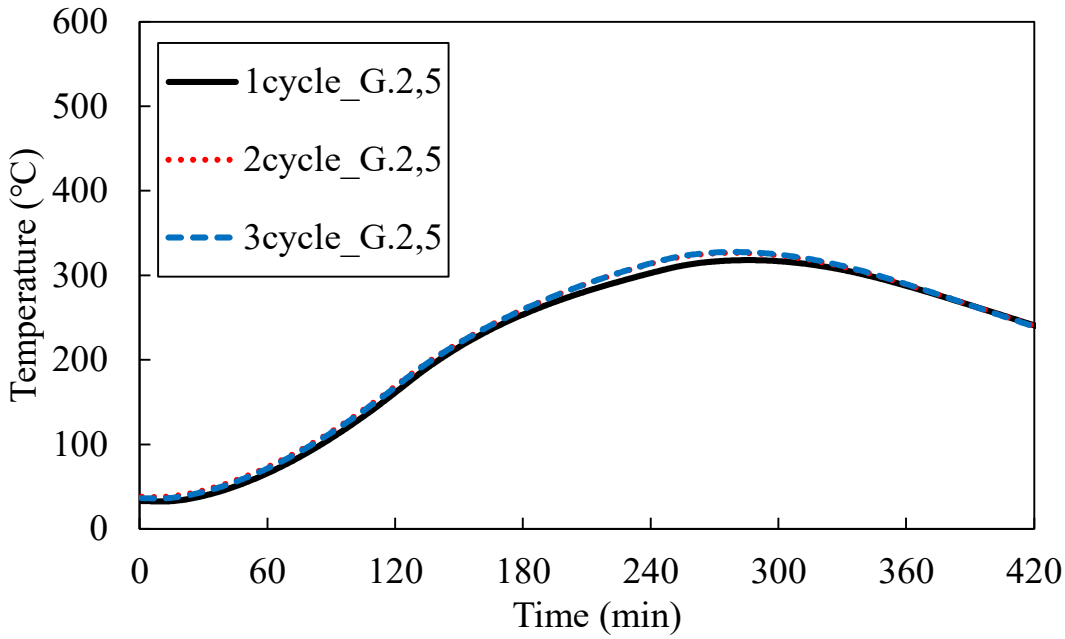


(d) D 타입 열사이클

그림 2.69. 열 유체 순환 장비의 입구 및 출구 온도

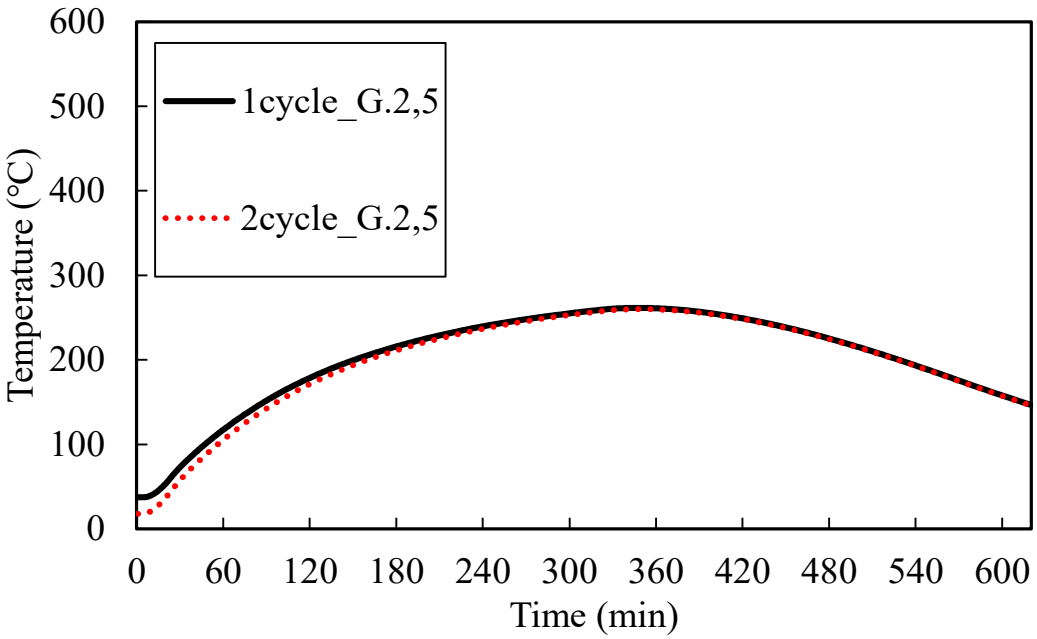


(a) A 타입 열사이클

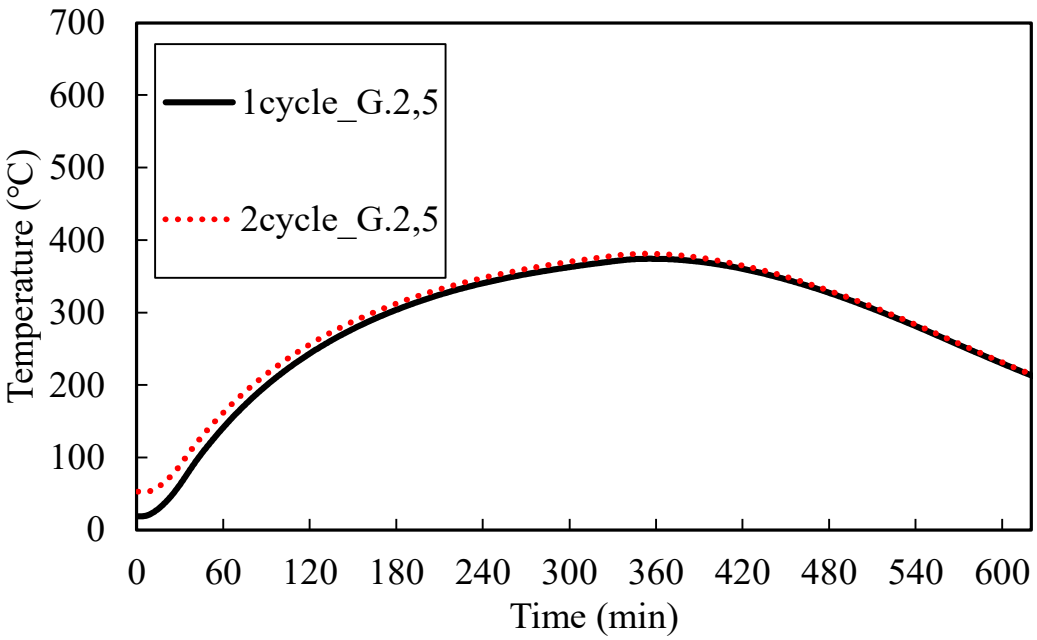


(b) B 타입 열사이클

그림 2.70. 축열 블록 중앙 단면에서 열사이클 횟수에 따른 온도변화(원형 열전달 파이프) (계속)



(c) C 타입 열사이클



(d) D 타입 열사이클

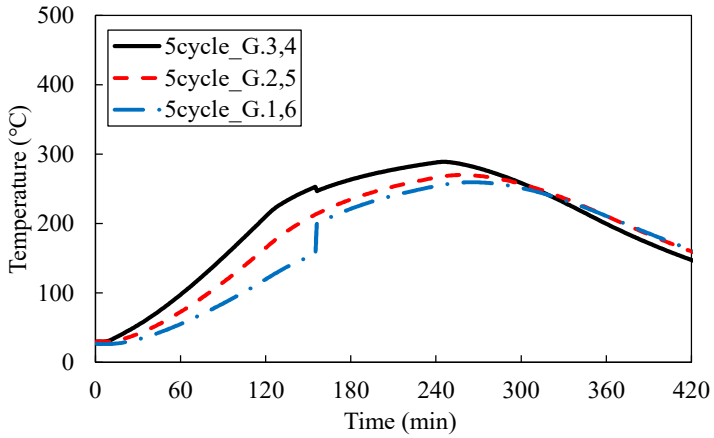
그림 2.71. 축열 블록 중앙 단면에서 열사이클 횟수에 따른 온도변화
(원형 열전달 파이프)

② 단면별 온도 분포

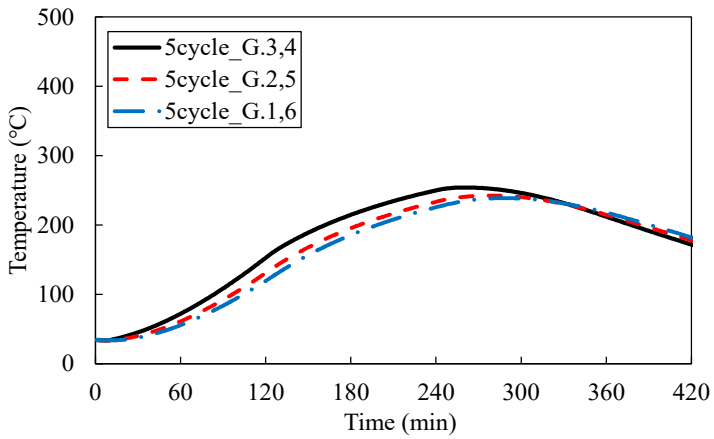
□ 리브형 핀 부착 파이프를 매립한 고전도 콘크리트 블록의 열사이클 타입에 따른 단면별 온도 분포 비교 그래프를 그림 2.72 ~ 그림 2.75에 나타냄.

- 입구 단면에서 콘크리트 블록 중심부에 위치한 온도센서(G.3,4)에서 가장 높은 온도 분포를 나타냈으며, 중앙 단면 및 출구 단면으로 갈수록 낮은 온도 분포를 나타냄. 이는 입구 단면쪽에서 출구 단면쪽으로 열 유체가 이동하기 때문에 나타나는 것으로 판단됨.
- 입구 단면에서 온도 측정 위치인 콘크리트 블록 중심부(G.3,4), 중심부와 표면부 사이 위치(G.2,5) 및 콘크리트 블록 표면부(G.1,6)간의 온도 분포 차이가 가장 크게 나타났으며, 중앙 단면 및 출구 단면으로 갈수록 온도 분포 차이는 감소하는 경향을 나타냄.

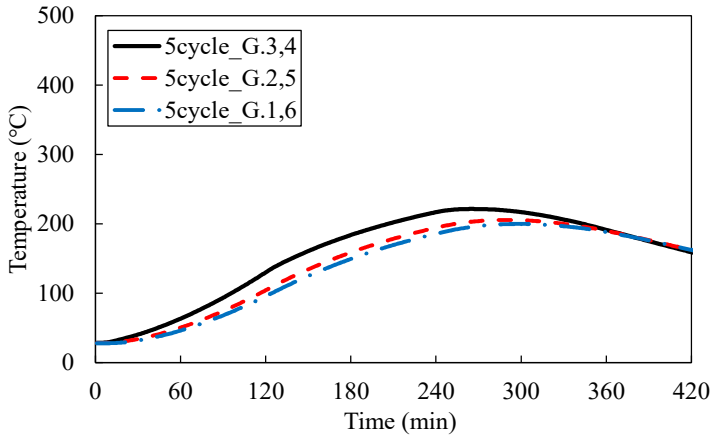
□ A, B, C 및 D 타입 열사이클에서 약 360분 경과 후에 콘크리트 블록 중심부(G.3,4), 중심부와 표면부 사이 위치(G.2,5) 및 콘크리트 블록 표면부(G.1,6)의 온도 분포는 동일 또는 역전되는 현상이 나타남.



(a) 입구 단면

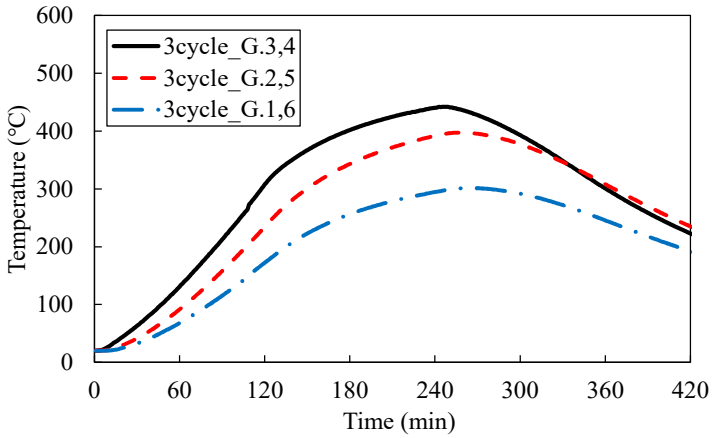


(b) 중앙 단면

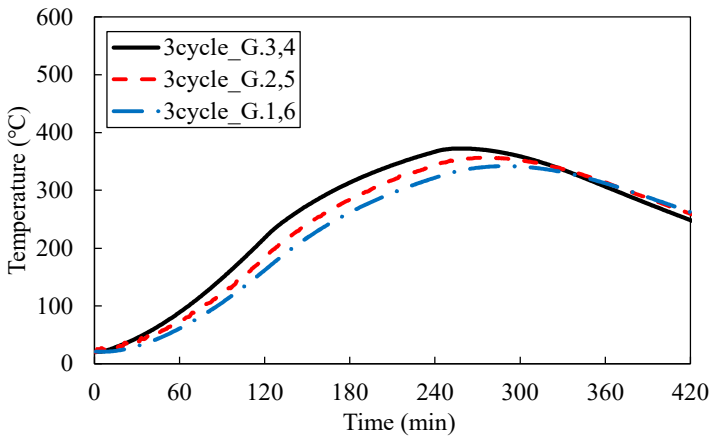


(c) 출구 단면

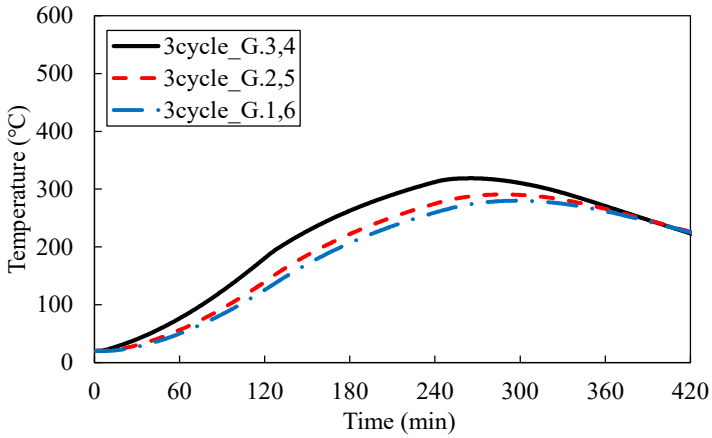
그림 2.72. 초고성능 콘크리트 축열 블록의 단면별 온도 분포
(A 타입 열사이클, 리브형 핀 부착 파이프)



(a) 입구 단면

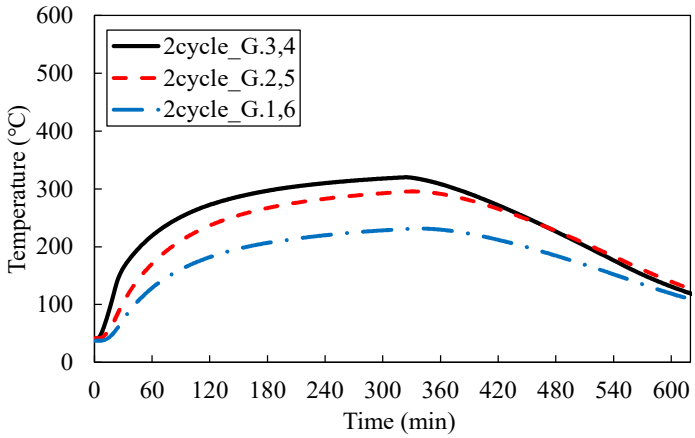


(b) 중앙 단면

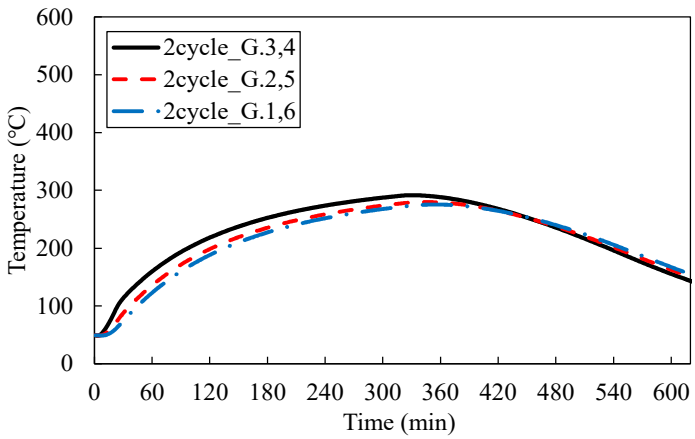


(c) 출구 단면

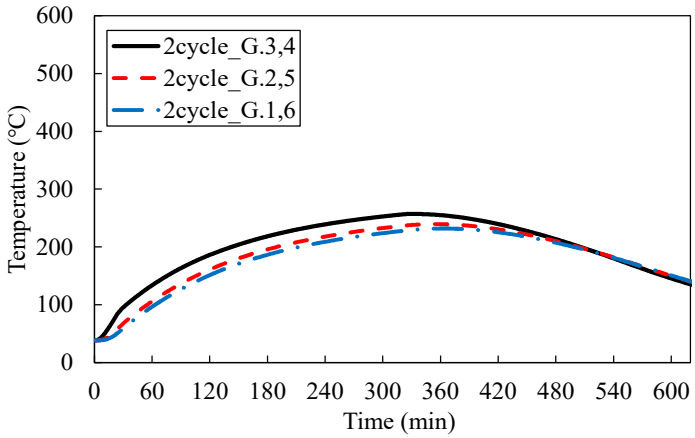
그림 2.73. 초고성능 콘크리트 축열 블록의 단면별 온도 분포
(B 타입 열사이클, 리브형 핀 부착 파이프)



(a) 입구 단면

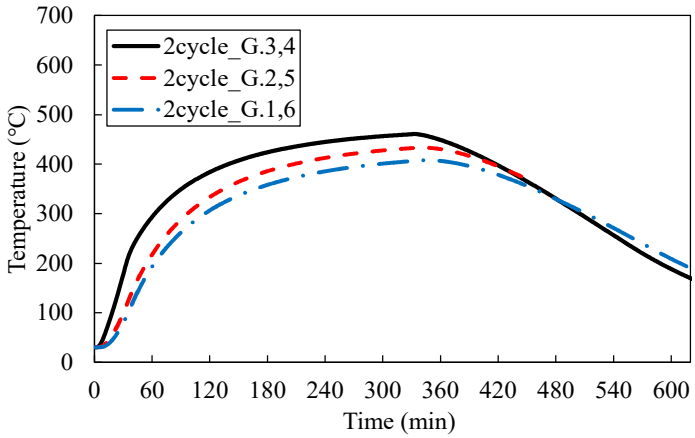


(b) 중앙 단면

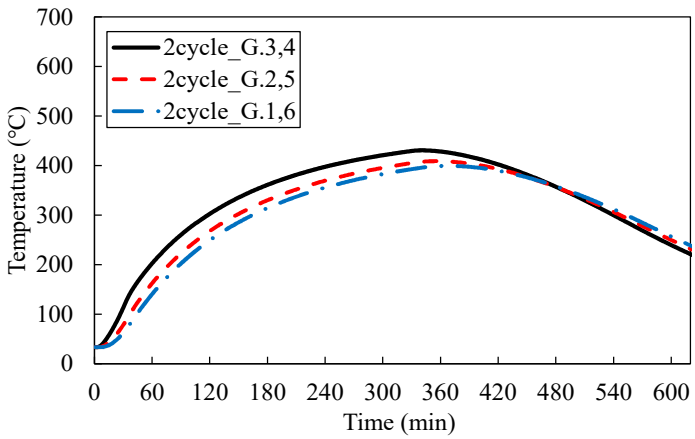


(c) 출구 단면

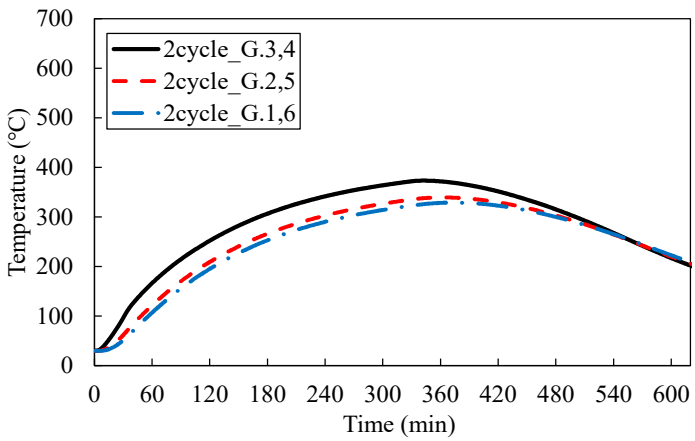
그림 2.74. 초고성능 콘크리트 축열 블록의 단면별 온도 분포
(C 타입 열사이클, 리브형 핀 부착 파이프)



(a) 입구 단면



(b) 중앙 단면



(c) 출구 단면

그림 2.75. 초고성능 콘크리트 축열 블록의 단면별 온도 분포
(D 타입 열사이클, 리브형 핀 부착 파이프)

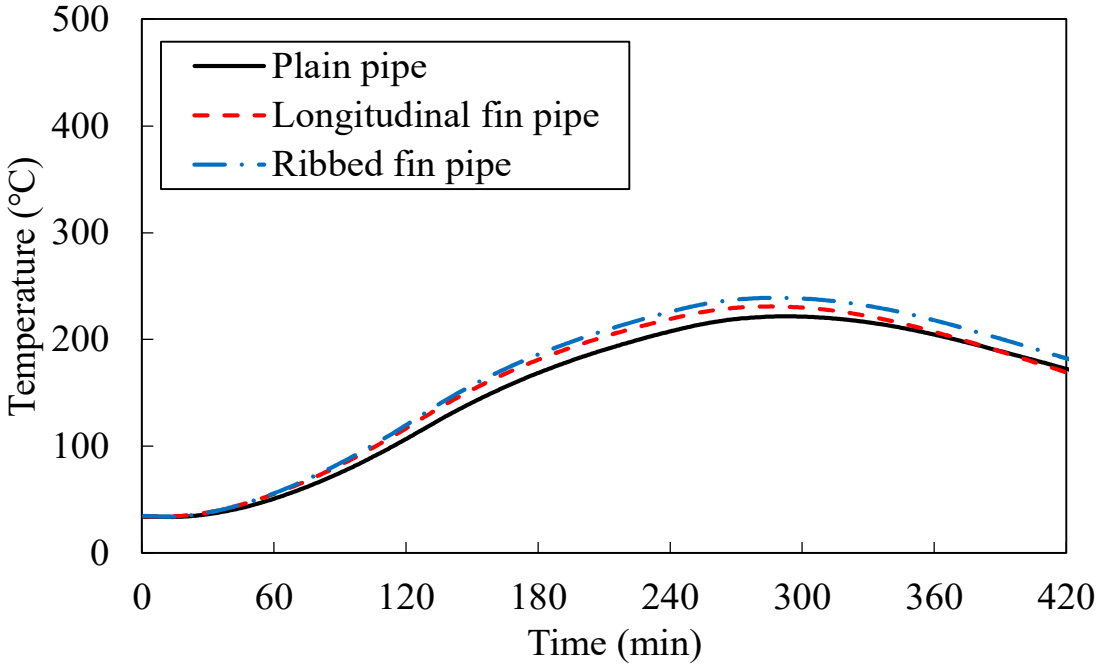
③ 열전달 파이프에 따른 온도 분포

□ A 및 B 타입 열사이클에서 열전달 파이프에 따른 온도 분포 비교를 그림 2.76 및 그림 2.777에 나타냄.

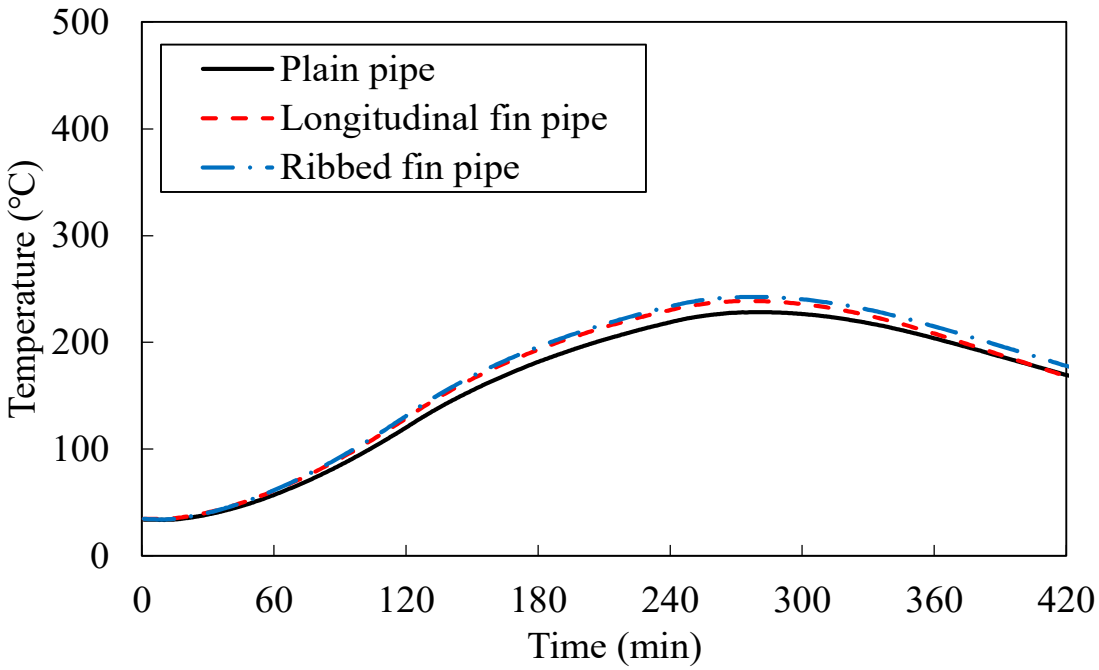
- A 타입 열사이클에서 원형 파이프의 온도 분포가 가장 낮게 나타남. 반면, 종방향 핀 파이프 및 리브형 핀 파이프의 온도 분포는 상대적으로 원형 파이프보다 높게 나타나지만, 핀 부착 두 파이프 간의 온도 분포 차이는 거의 없는 것으로 나타남.
- B 타입 열사이클에서 원형 파이프의 온도 분포가 가장 낮게 나타났으며, 상대적으로 종방향 핀 파이프 및 리브형 핀 파이프 순으로 온도 분포가 높게 나타남. 또한, 360분에서 종방향 핀 파이프의 온도가 원형 파이프보다 낮게 나타났으며, 종방향 핀 파이프가 보유한 종방향 핀의 효과로 인해 열전달 성능이 우수한 것으로 판단됨.

□ C 및 D 타입 열사이클에서 열전달 파이프에 따른 온도 분포 비교를 그림 2.78 및 그림 2.79에 나타냄.

- C 타입 열사이클에서 원형 파이프의 온도 분포가 가장 낮게 나타났으며, 상대적으로 종방향 핀 파이프 및 리브형 핀 파이프 순으로 온도 분포가 높게 나타남. 핀의 형상에 따라 열전달 성능에 차이가 나타나는 것으로 판단됨. 또한, 450분에서 종방향 핀 파이프의 온도가 원형 파이프와 유사하게 나타나다가 480분 이후에 종방향 핀 파이프의 온도가 오히려 더 낮게 측정됨. 종방향 핀 파이프의 열을 전달하는데 유리하며, 축열 및 방열에 기여하는 역할이 효과적일 것으로 판단됨.
- D 타입 열사이클에서 원형 파이프의 온도 분포가 가장 낮게 나타났으며, 종방향 핀 파이프 및 리브형 핀 파이프 순으로 온도 분포가 높게 나타남. 또한, 420분에서 종방향 핀 파이프는 원형 파이프와 유사한 온도를 나타내고 있으며, 450분 이후 종방향 핀 파이프의 온도가 원형 파이프보다 낮게 분포함.

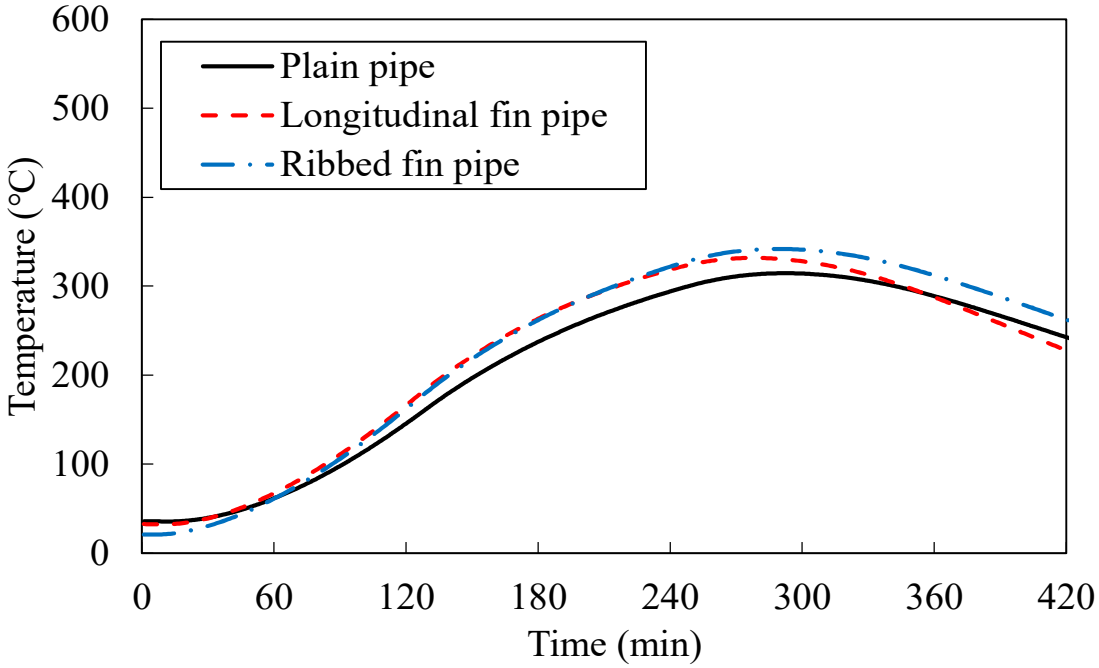


(a) 중앙 단면에서 표면 위치

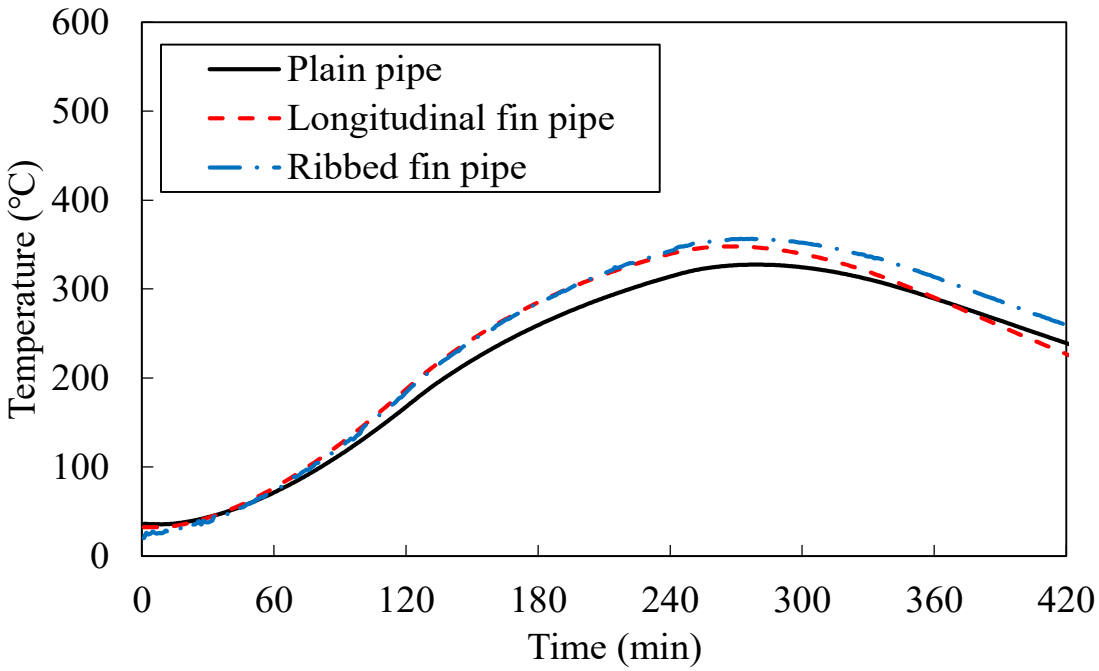


(b) 중앙 단면에서 중심부와 표면부 중간위치

그림 2.76. A 타입 열사이클(5회 적용)에서 열전달 파이프에 따른 온도 분포 비교

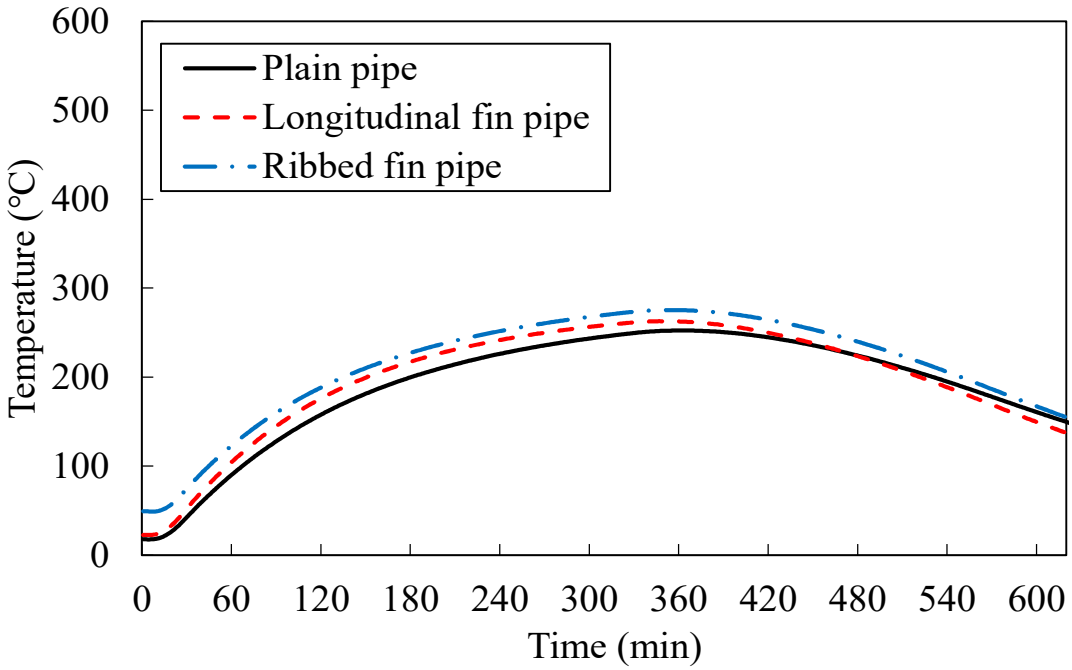


(a) 중앙 단면에서 표면 위치

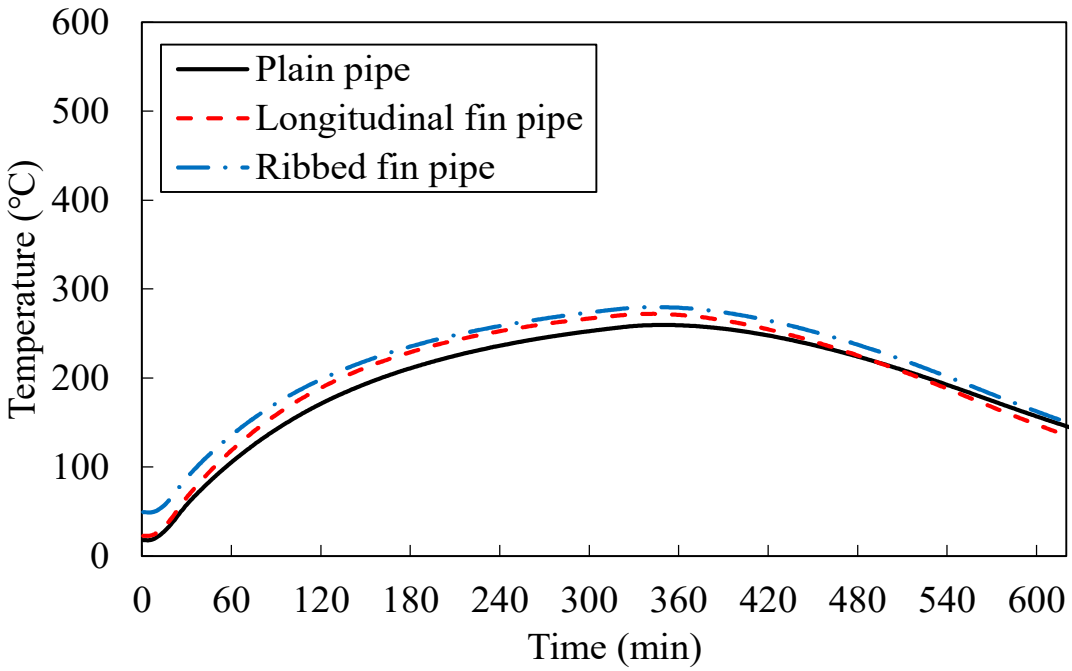


(b) 중앙 단면에서 중심부와 표면부 중간위치

그림 2.77. B 타입 열사이클(3회 적용)에서 열전달 파이프에 따른 온도 분포 비교

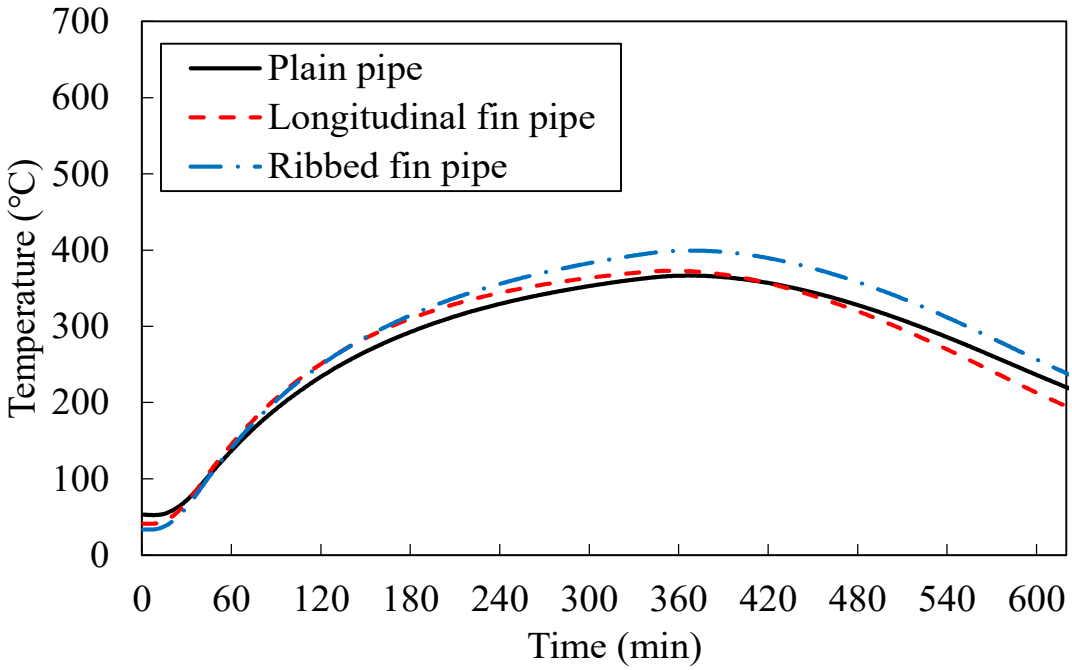


(a) 중앙 단면에서 표면 위치

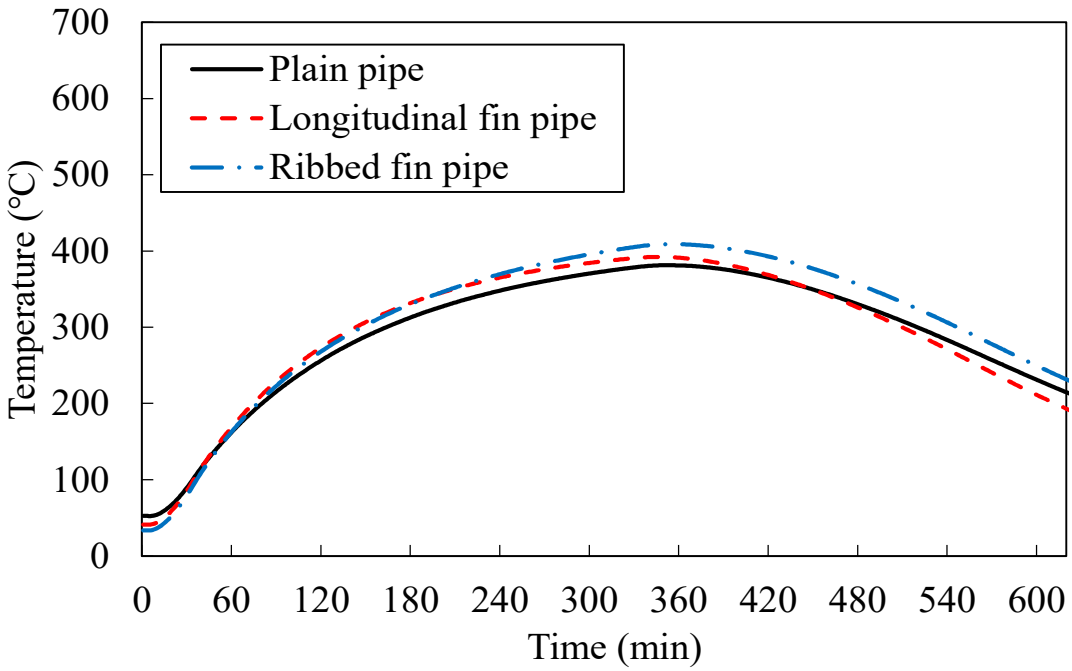


(b) 중앙 단면에서 중심부와 표면부 중간위치

그림 2.78. C 타입 열사이클(2회 적용)에서 열전달 파이프에 따른 온도 분포 비교



(a) 중앙 단면에서 표면 위치

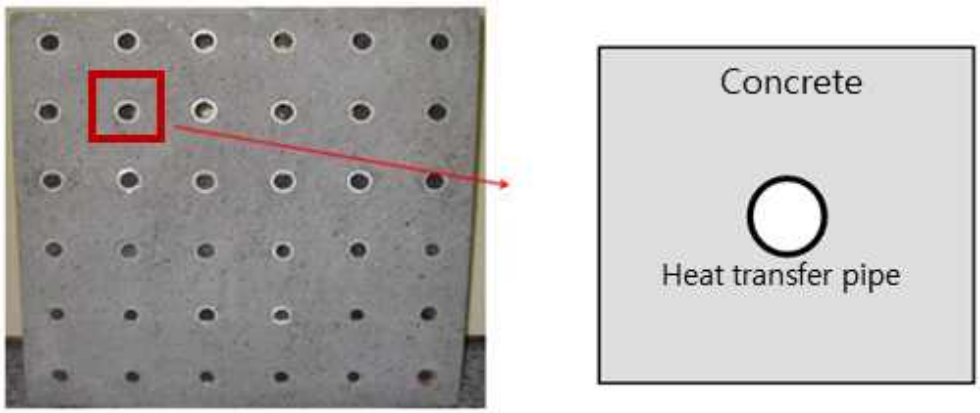


(b) 중앙 단면에서 중심부와 표면부 중간위치

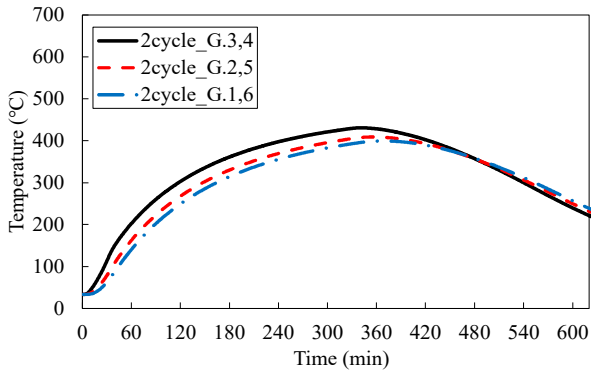
그림 2.79. D 타입 열사이클(2회 적용)에서 열전달 파이프에 따른 온도 분포 비교

④ 열에너지 산정

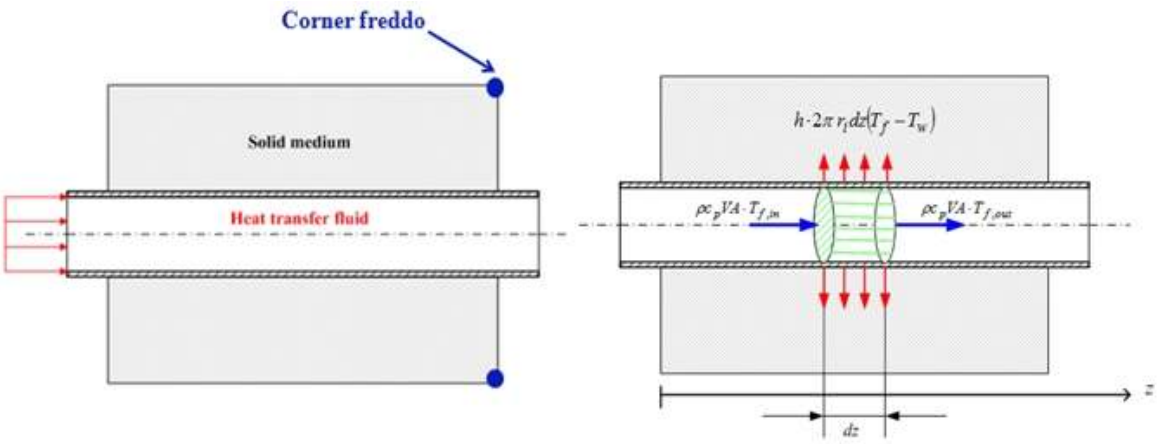
㉮ 열전달 유체의 열에너지



(a) 콘크리트 열저장 장치



(b) 콘크리트 온도 분포 특성



(c) 열전달 매커니즘

그림 2.80. 콘크리트 열저장 장치의 열전달 성능평가

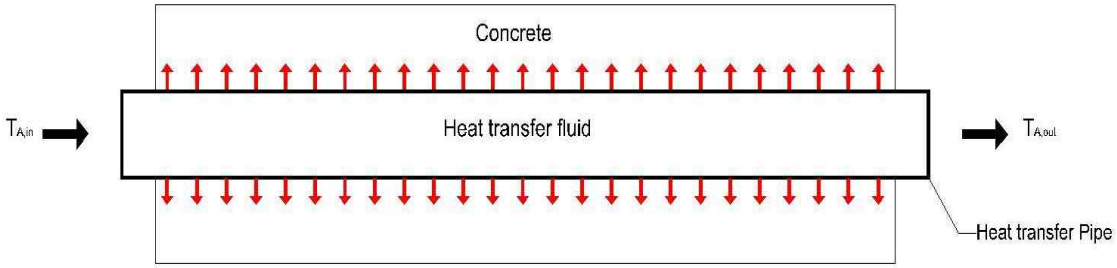


그림 2.81. 열에너지 산정을 위한 콘크리트 블록 상세도

□ 이 연구에서는 열전달 유체로서 뜨거운 공기를 사용하였으며, 콘크리트 블록에 유입되는 열전달 유체의 열에너지 변화량($\dot{Q}_A$)은 다음과 같다.

$$\dot{Q}_A = \dot{m}_A \, c_{p,A} \, (T_{A,in} - T_{A,out})$$

$$= \rho_A \, c_{p,A} \, \dot{V}_A \, (T_{A,in} - T_{A,out})$$

여기서, $\dot{Q}_A$: 열전달 유체(공기)의 열에너지 변화량 ($J/s = W$)

ρ_A : 열전달 유체(공기) 밀도 (kg/m^3)

$c_{p,A}$: 열전달 유체의 비열 ($J/kg \cdot K$)

$\dot{V}_A$: 열전달 유체의 유량 (m^3/s)

□ 이때 열전달 유체에 의한 열에너지(Q_A)는 다음과 같다.

$$Q_A = \int_0^t \dot{Q}_A \, dt$$

$$= \int_0^t \rho_A \, c_{p,A} \, \dot{V}_A \, (T_{A,in} - T_{A,out}) \, dt$$

여기서, Q_A : 유입되는 열전달 유체의 열에너지 (J)

㉰ 콘크리트 블록의 축열 에너지

□ 콘크리트 블록의 온도변화에 따라 블록에 저장되는 열에너지는 다음과 같다.

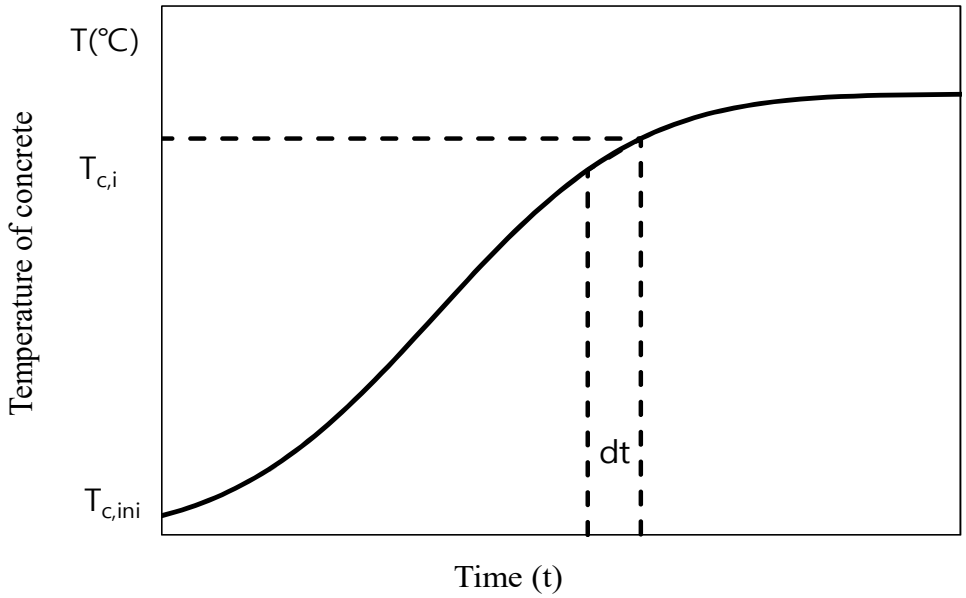


그림 2.82. 콘크리트 블록 내의 온도변화

$$Q_{c,i} = \rho_c \; c_{p,c} \; V_{c,i} \; (T_{c,i} - T_{c,ini})$$

여기서, $Q_{c,i}$: 콘크리트 각 영역에서의 열에너지 (J)

ρ_c : 콘크리트의 밀도 (kg/m^3)

$c_{p,c}$: 콘크리트의 비열 ($J/kg{\cdot}K$)

$V_{c,i}$: 콘크리트 영역 별 콘크리트 부피 (m^3)

$T_{c,i}$: 콘크리트의 온도 (K)

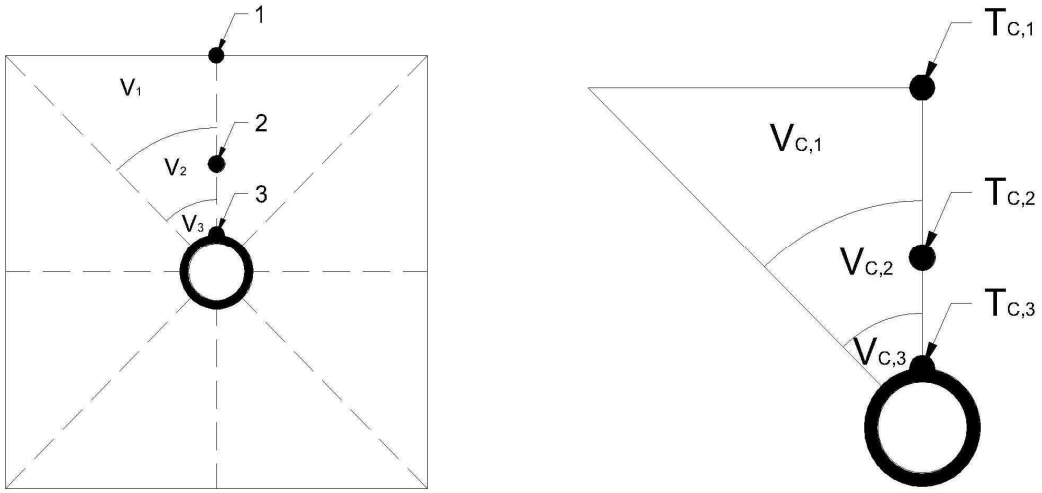
$T_{c,ini}$: 콘크리트의 초기온도 (K)

□ 따라서, 콘크리트 전체블록에 저장되는 열에너지는 다음과 같다.

$$Q_c = \sum_{i=1}^{3} Q_{c,i}$$

$$= \sum_{i=1}^{3} \rho_c \; c_{p,c} \; V_{c,i} \; (T_{c,i} - T_{ini})$$

여기서, Q_c : 콘크리트 전체 블록 열에너지 (J)



(a) 블록 단면도 (b) 영역 구분 상세

그림 2.83. 열에너지 산정 영역 구분

□ 또는, 콘크리트 블록에 저장되는 열에너지를 다음과 같이 계산할 수 있음

$$Q_c = \rho_c \, c_{p,c} \, V_c \, (T_{c,mean} - T_{c,ini})$$

여기서, ρ_c : 콘크리트의 밀도 (kg/m^3)
$c_{p,c}$: 콘크리트의 비열 (J/kgK)
V_c : 콘크리트 전체 블록 부피 (m^3)
$T_{c,mean}$: 콘크리트 블록의 평균온도 (K)
$T_{c,ini}$: 콘크리트 블록의 초기온도 (K)

㉱ 콘크리트 블록의 열에너지 손실량

□ 열에너지량은 보존되므로 열전달 유체(뜨거운 공기)가 공급하는 열에너지는 콘크리트 블록에 저장되는 열에너지와 열에너지 손실량의 합과 같아야 한다. 따라서, 열손실은 다음과 같이 계산한다.

$$Q_L = Q_A - Q_c$$

여기서, Q_L : 열에너지 손실량 (J)
Q_A : 열전달 유체가 공급하는 열에너지 (J)
Q_c : 콘크리트 축열 블록에 저장되는 열에너지 (J)

□ 또는 콘크리트 블록의 열손실률은 축열 블록 표면에서의 열전달 조건을 고려하여 다음과 같이 계산할 수도 있다.

$$\dot{Q}_L = A_s\ h_o\ (T_{c,surface} - T_{air})$$

여기서, $\dot{Q}_L$: 콘크리트 블록의 열에너지 변화량(손실률) (W)

A_s : 콘크리트 블록의 전체표면적 (m^2)

h_o : 콘크리트 표면에서의 열전달계수 ($W/m^2 \cdot K$)

(= 8 $W/m^2 \cdot K$, 통상 적용 가능)

$T_{c,surface}$: 콘크리트 블록 표면에서의 온도 (K)

T_{air} : 주변 대기온도 (K)

□ 그러므로, 콘크리트 블록의 열에너지 손실량 (heat loss)은 다음과 같다.

$$Q_L = \int_0^t \dot{Q}_L\ dt$$

$$= \int_0^t A_s\ h_o\ (T_{c,surface} - T_{air})dt$$

여기서, Q_L : 열에너지 손실량 (J)

t : 열에너지 계산 시점에서의 시간 (s)

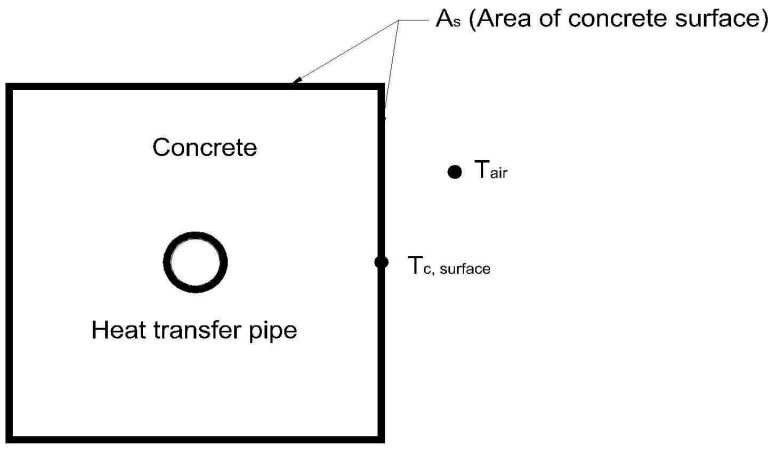


그림 2.84. 열손실 계산을 위한 콘크리트 블록 상세

⑤ 고전도 초고성능 콘크리트의 열에너지 특성

□ 열사이클 시나리오 타입별로 초고성능 콘크리트 축열 블록의 단위 시간(분)당 열에너지 변화량 및 총(누적) 열에너지량을 그림 2.85~그림 2.88에 나타냄. 또한, 온도 유지 기간 종료 시점에서 총 열에너지 저장량을 표 2.14에 나타냄.

□ 열전달 유체의 온도가 상승하는 구간(온도 상승 구간)의 경우, 콘크리트도 온도가 꾸준히 상승하므로 콘크리트에 저장되는 단위 시간당 열에너지 변화량은 점진적으로 증가한다. 반면에 열전달 유체의 온도를 최대온도에서 일정하게 공급하는 구간(온도 일정 구간)의 경우, 열전달 유체의 온도와 콘크리트 열저장 매체의 온도가 거의 근접하는 열평형 상태가 되므로 상대적으로 온도 증분량이 작고 이에 따라 단위 시간당 열에너지 증분량도 작게 나타난다.

□ 또한, 단위 시간당 열에너지 변화량을 누적하여 시간에 따른 총 축열에너지를 산정하였다. 열전달 파이프에 유입되는 열전달 유체의 온도가 급격히 변하는 경우(열사이클 온도 상승 구간), 콘크리트 열에너지 변화량은 크므로 결과적으로 축열에너지량도 증가한다. 반면에 열전달 유체의 온도가 일정하게 유입되는 경우(열사이클 온도 유지 구간), 상대적으로 느린 단위 시간당 열에너지 증가로 인해 축열에너지량도 완만히 증가한다.

□ 열사이클 시나리오에 따른 콘크리트 축열 블록의 열에너지 저장 특성은 다음과 같다.

- A 및 B 타입 열사이클 적용 블록의 경우, 열사이클 온도 상승 구간인 0~120분까지 단위 시간(분)당 열에너지 저장량은 지속적으로 증가하나, 열사이클 시나리오에서 온도가 일정하게 유지되는 120~240분 동안에는 단위 시간당 열에너지 저장량이 점진적으로 감소함.
- A 타입의 열사이클을 적용하는 경우, 열사이클 적용 후 240분 (열사이클 시나리오의 온도 유지 기간 종료 시각)까지 원형 파이프, 종방향 핀 부착 파이프 및 리브형 핀 부착 파이프 콘크리트 블록의 총 열에너지는 각각 1,980, 1,810 및 2,079 kJ로 나타난다.
- B 타입의 열사이클을 적용하는 경우, 열사이클 적용 후 240분 (열사이클 시나리오의 온도 유지 기간 종료 시각)까지 원형 파이프, 종방향 핀 부착 파이프 및 리브형 핀 부착 파이프 콘크리트 블록의 총 열에너지는 각각 2,963, 2,910 및 3,236 kJ임.
- C 타입 열사이클 적용 블록의 열사이클 온도 상승 구간인 0~20분까지 단위 시간(분)당 열에너지 저장량은 지속적으로 증가하나, 열사이클 시나리오에서 온도가 일정하게 유지되는 20~320분 시간 구간에서는 단위 시간당 열에너지 저장량이 점진적으로 감소함.
- C 타입의 열사이클을 적용하는 경우, 열사이클 적용 후 320분 (열사이클 시나리오의 온도 유지 기간 종료 시각)까지 원형 파이프, 종방향 핀 부착 파이프 및 리브형 핀 부착 파이프 콘크리트 블록의 총 열에너지는 각각 2,422, 2,202 및 2,349 kJ로 나타남.
- D 타입 열사이클 적용 블록의 경우, 열사이클 온도 상승 구간인 0~30분까지 단위 시간(분)당 열에너지 저장량은 지속적으로 증가하나, 열사이클 시나리오에서 온도가 일정하게 유지되는 30~330분 동안에는 단위 시간당 열에너지 저장량이 점진적으로 감소함.
- D 타입의 열사이클을 적용하는 경우, 열사이클 적용 후 330분 (열사이클 시나리오의 온도 유지 기간 종료 시각)까지 원형 파이프, 종방향 핀 부착 파이프 및 리브형 핀 부착

파이프 콘크리트 블록의 총 열에너지는 각각 3,181, 3,118 및 3,827 kJ.

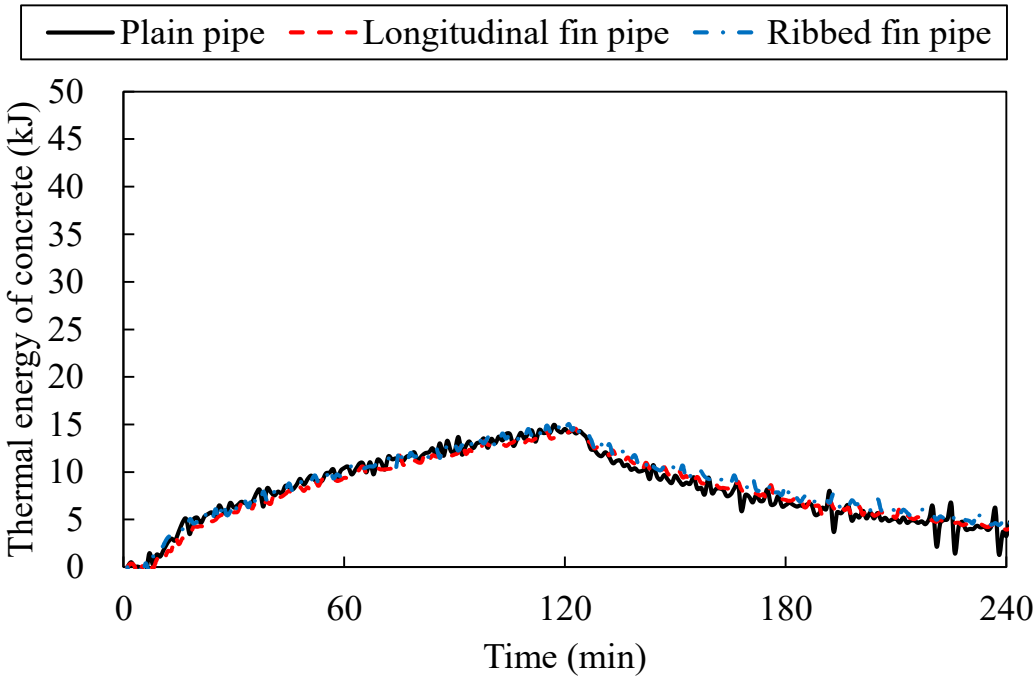
□ 이러한 고전도 초고성능 콘크리트 축열 블록 실험 결과는 열전달 파이프의 핀 부착 형상에 따른 총 열에너지 저장량의 차이는 뚜렷한 차이를 나타내지 않는다. 이는 핀 형상의 차이에 따른 열전달 효과가 크지 않아 콘크리트 내부에 매설된 온도센서가 그러한 차이를 정밀하게 계측하지 못했기 때문으로 판단된다.

□ 한편, A, B, C 및 D 타입의 열사이클 시나리오를 적용한 고전도 초고성능 콘크리트 축열 블록의 열에너지 손실률은 18.4~22.1%의 값을 나타냄.

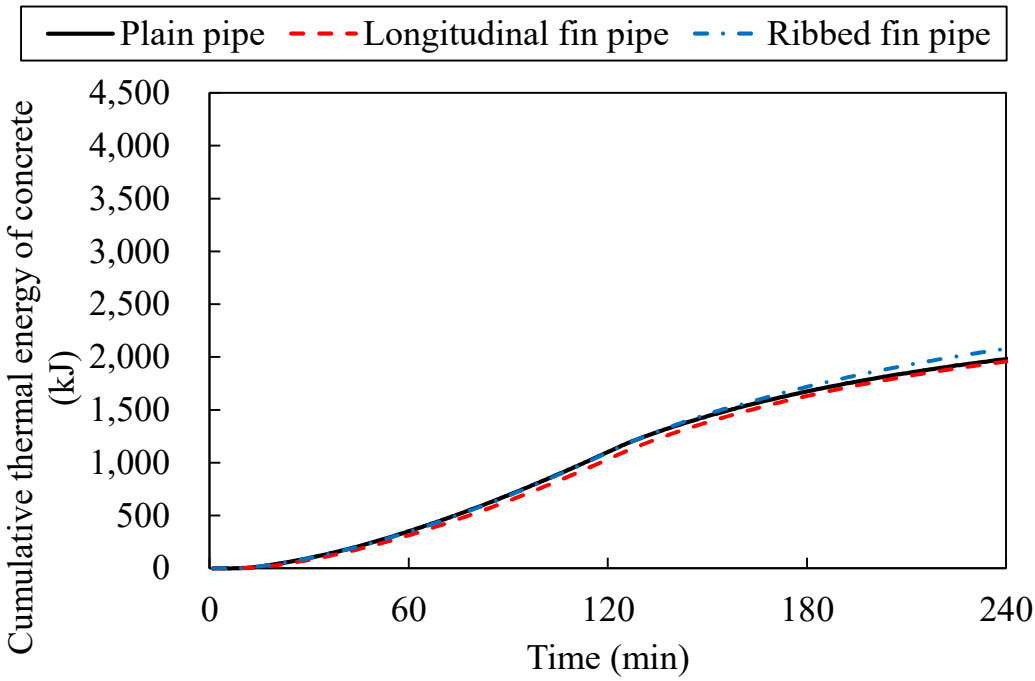
- 초고성능 콘크리트 블록에 저장되는 열에너지와 열손실률은 콘크리트 축열블록 내의 온도센서에서 측정한 온도 분포 특성과 열전달 유체의 유속, 열용량을 토대로 산정하였다.
- 이때, 열전달 유체 흐름 방향 (파이프 방향)으로 열전달 구배(thermal gradient)가 실제적으로 일정하지 않고 콘크리트 블록 외부에서의 불완전한 단열 경계조건으로 인해 열손실이 발생한 것을 추정됨.

표 2.14. 초고성능 콘크리트 축열 블록의 열에너지 저장량 (kJ)

열사이클 시나리오	열전달 파이프 단면 형상		
	원형 단면	종방향 핀 부착 단면	리브형 핀 부착 단면
A 타입	1,980	1,810	2,079
B 타입	2,963	2,910	3,236
C 타입	2,422	2,202	2,349
D 타입	3,181	3,118	3,827

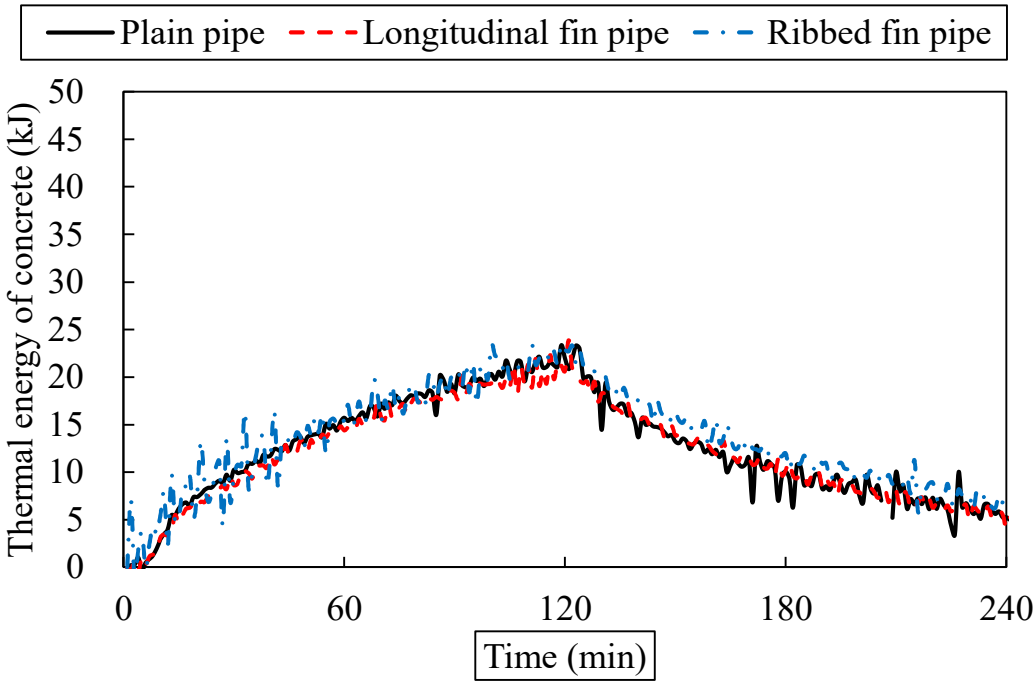


(a) 시간에 따른 열에너지 저장량

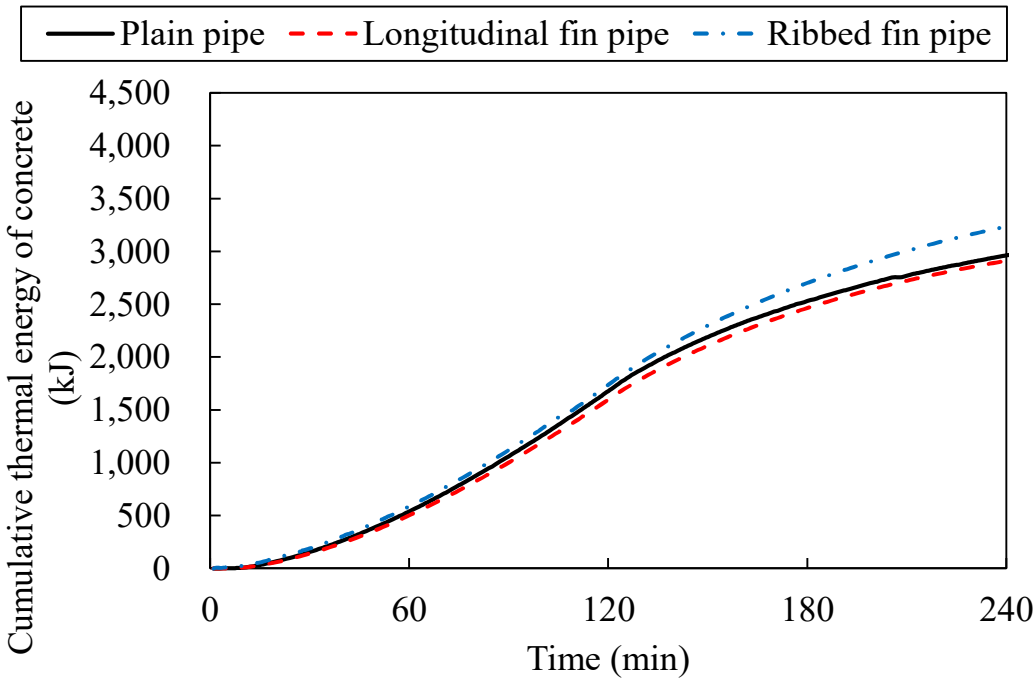


(b) 누적 열에너지

그림 2.85. 고전도 초고성능 콘크리트 축열 블록의 열에너지 저장성능
(A 타입 열사이클 5회 적용)

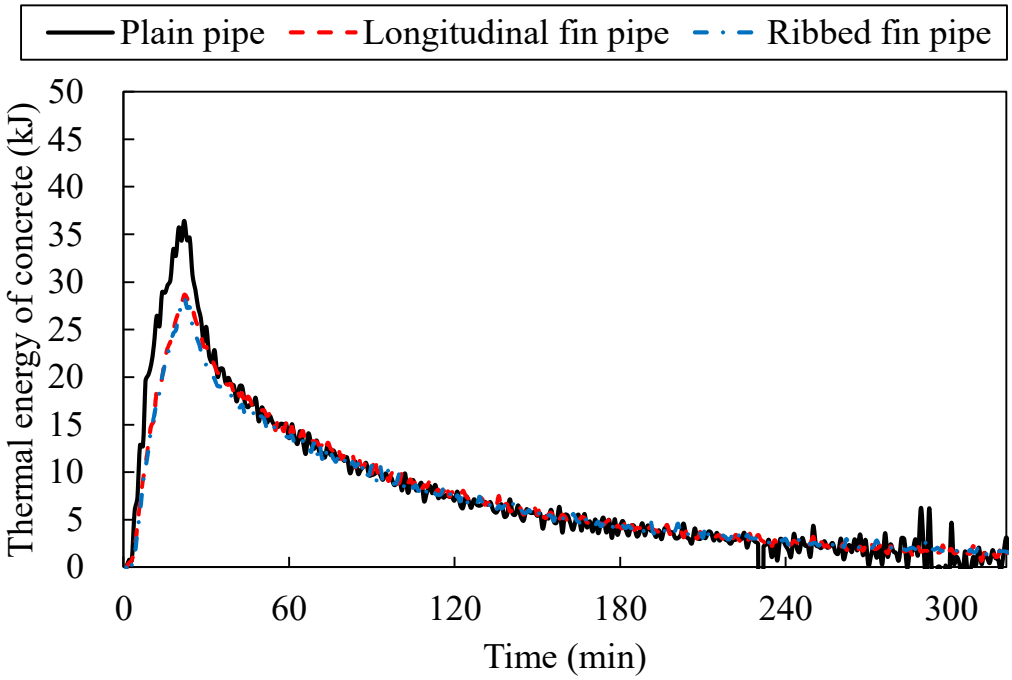


(a) 시간에 따른 열에너지 저장량

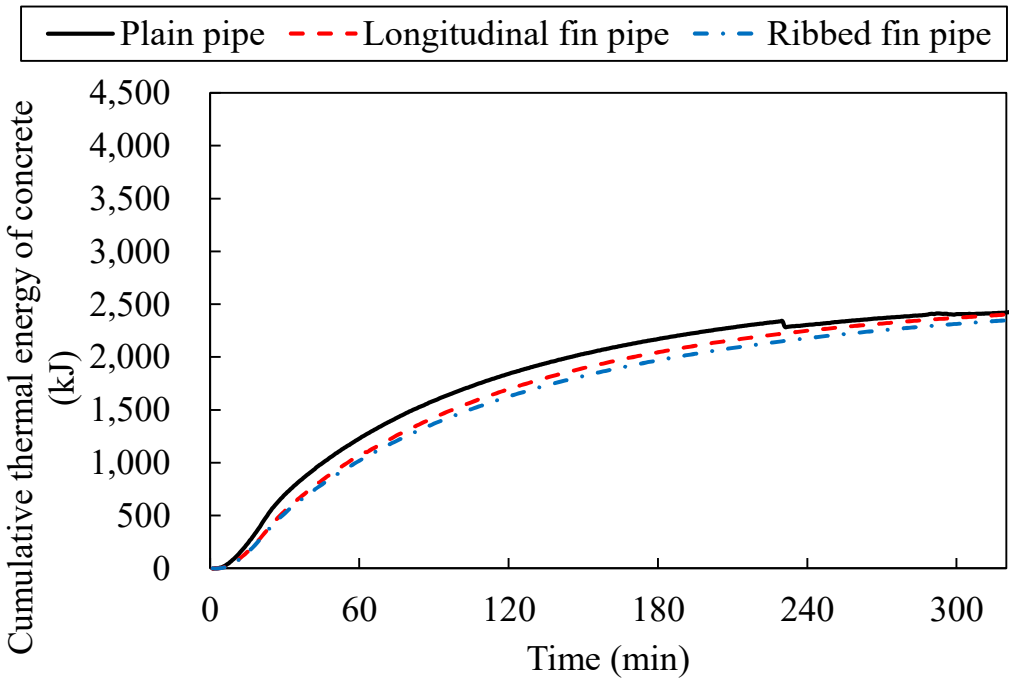


(b) 누적 열에너지

그림 2.86. 고전도 초고성능 콘크리트 축열 블록의 열에너지 저장성능
(B 타입 열사이클 3회 적용)

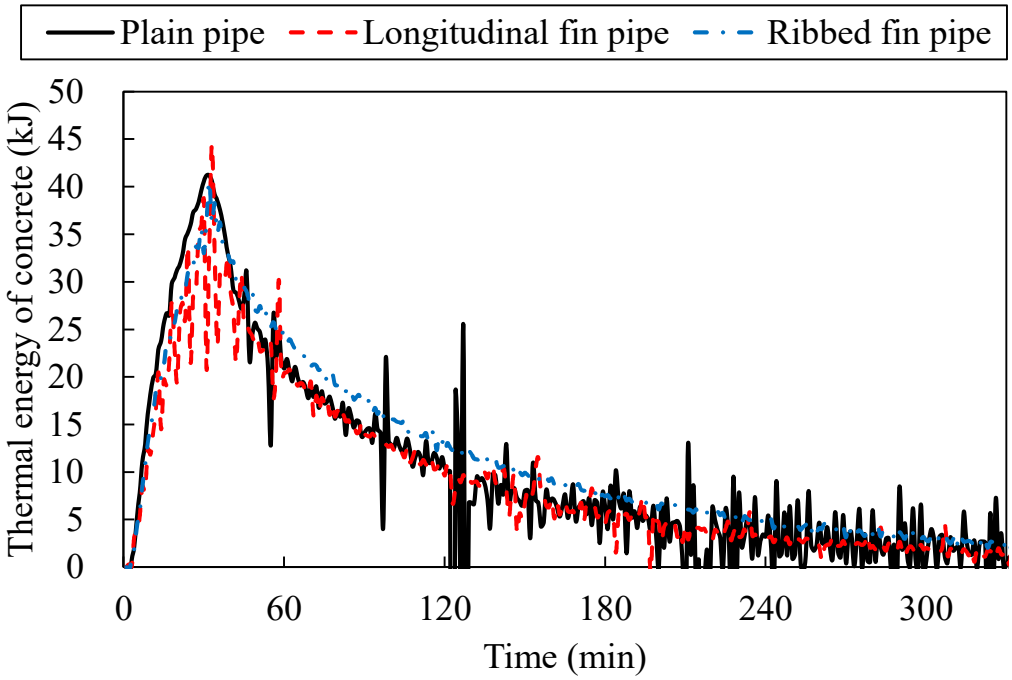


(a) 시간에 따른 열에너지 저장량

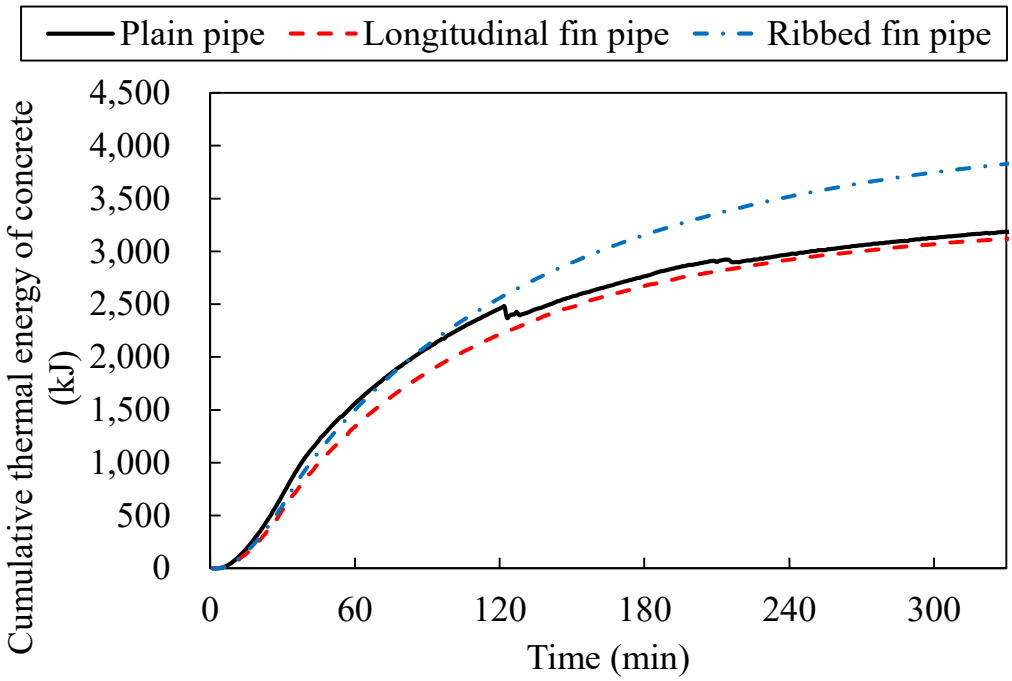


(b) 누적 열에너지

그림 2.87. 고전도 초고성능 콘크리트 축열 블록의 열에너지 저장성능
(C 타입 열사이클 2회 적용)



(a) 시간에 따른 열에너지 저장량



(b) 누적 열에너지

그림 2.88. 고전도 초고성능 콘크리트 축열 블록의 열에너지 저장성능
(D 타입 열사이클 2회 적용)

(8) 고전도 초고성능 콘크리트 축열 모듈 장치의 열전달 평가 기법

(가) 콘크리트 블록의 열전달 수치해석

① 수치해석을 위한 블록 상세

□ 그림 2.89와 그림 2.90은 유한요소 수치해석에 사용된 고전도 초고성능 콘크리트 축열 블록의 단면도이다.

- 여기서 W는 콘크리트 블록의 넓이, H는 콘크리트 블록의 높이, D는 열전달 유체 유체가 흐르는 파이프의 내경, t는 파이프 두께를 나타냄.
- H_f는 종방향 핀의 높이, t_f는 핀의 두께를 나타내고, D_f는 리브 핀의 직경을 나타낸다. L은 콘크리트 축열 블록의 길이로서 모든 블록에 대해 일정하다.

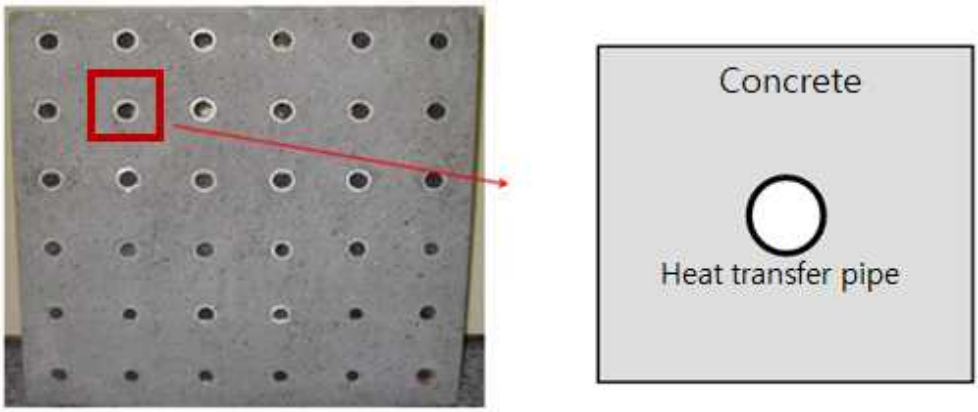
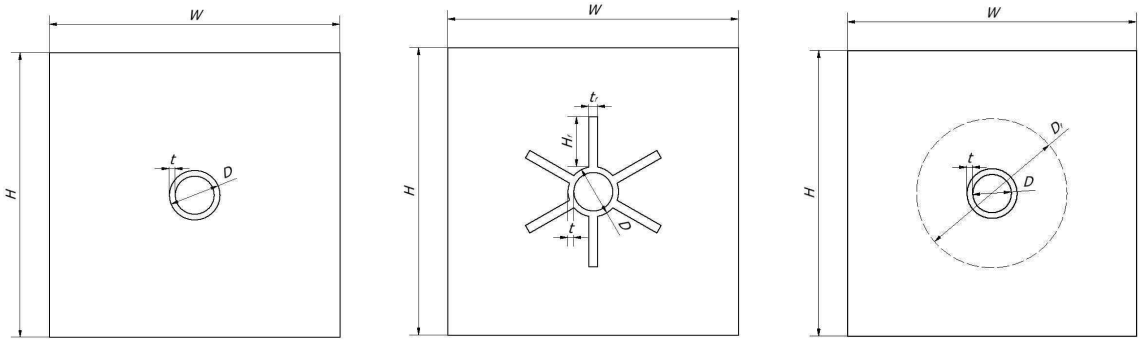


그림 2.89. 축열 모듈 상세



(a) 원형 파이프 (b) 종방향 핀부착 파이프 (c) 리브형 핀부착 파이프

그림 2.90. 열전달 파이프를 갖는 콘크리트 블록 단면

▪ 콘크리트 블록에 대한 제원은 표 2.15와 같다.

표 2.15. 콘크리트 블록 제원

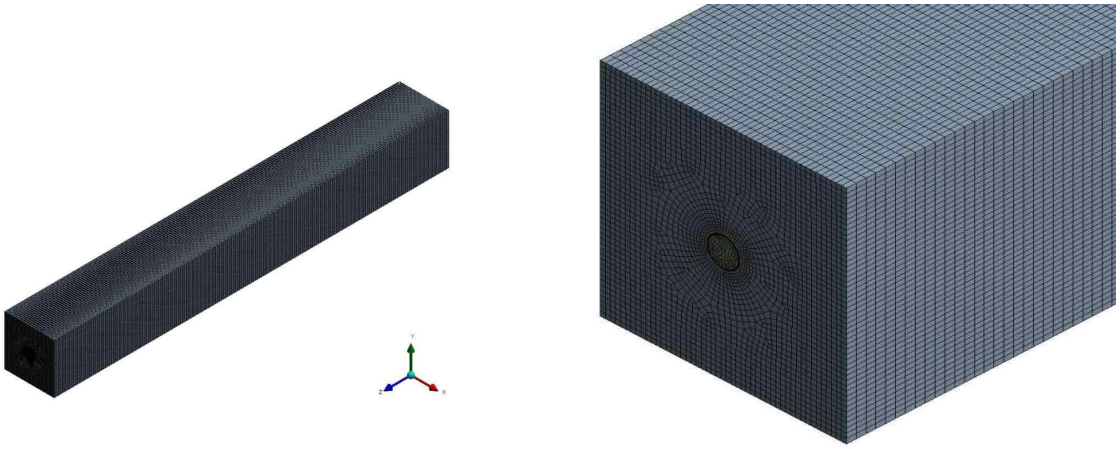
파이프 종류	W (mm)	H (mm)	L (mm)	D (mm)	t (mm)	Df (mm)	Hf (mm)	tf (mm)
Plain tube	100	100	800	17.4	2	-	-	-
Longitudinal-fin tube	100	100	800	17.4	2	-	17.4	3
Ribbed-fin tube	100	100	800	17.4	2	52.2	-	3

② 수치해석 모델링 및 방법



그림 2.91. 고전도 초고성능 콘크리트 축열 블록

□ 그림 2.92 및 그림 2.93에 콘크리트 블록의 유한요소 모델(mesh)을 나타내었다. 유한요소해석을 위한 요소는 solid element를 사용하였으며 사면체 형상과 육면체 형상의 요소를 사용하였다.



(a) 축열 블록 전체 모델링　　(b) 축열 블록 단면 상세

그림 2.92. 유한요소해석망

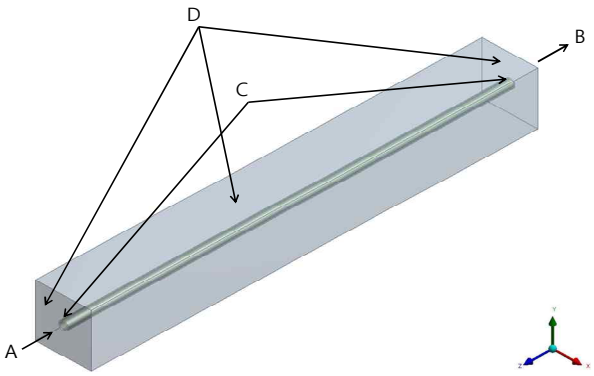


그림 2.93. 1-파이프 콘크리트 블록 수치해석을 위한 경계조건

표 2.16. 1-파이프 콘크리트 블록 수치해석을 위한 경계조건

Air domain (열전달 유체)			
경계조건		구 분	사용 값
열전달 유체		유체 타입	Air
		초기값 (℃)	25
		기준 압력 (atm)	1.0
		열유체 흐름 모델	k-Ω
		열전달 모델	열에너지 모델
		열유체 흐름 속도	12.0 m/s
STS 304 Domain			
Solid		Solid type	STS 304
		초기값 (℃)	25
C	Wall	초기 온도 (℃)	25
Concrete Domain			
콘크리트 축열 블록		구분	사용값
		초기값 (℃)	25
		단위중량 (kg/m^3)	2,264
		비열 (J/kg·K)	580
		열전도율 (W/m·K)	2,01
D	Wall	온도 조건	단열 조건
		접촉면 열전달 계수 (W/m^2·K)	8.2

□ 표 2.16은 콘크리트 축열 블록 열전달 수치해석을 위한 조건을 나타낸다.

□ 콘크리트의 재료 특성치는 고전도 초고성능 콘크리트의 재료값을 적용하였다.

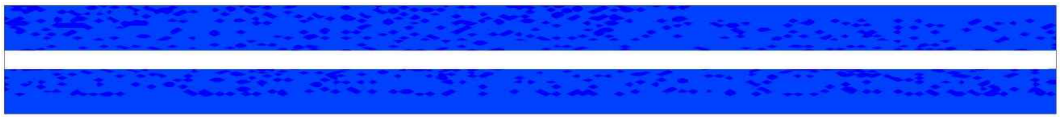
□ 열전달 파이프로 들어가는 열유체의 속도는 실험값을 기준으로 하였으며, 유체의 온도는 가열 단계(charging), 유지 단계(break) 및 냉각 단계(discharging)에 대응하여 시간에 따른 함수 및 일정한 값을 설정하였다.

□ 유한요소해석의 해의 수렴조건은 질량, 운동량, 에너지 방정식의 잔류항의 합이 10-6 이하이며, 각 보존식의 균형값이 99.9% 이상을 만족하는 것으로 하였다.

(나) 열전달 수치해석 결과

□ 그림 2.94~그림 2.96은 열유체의 유동 방향과 수평한 중앙 단면에서 고전도 초고성능 콘크리트를 사용한 콘크리트 블록의 시간에 따른 온도변화를 나타낸 그림이다.

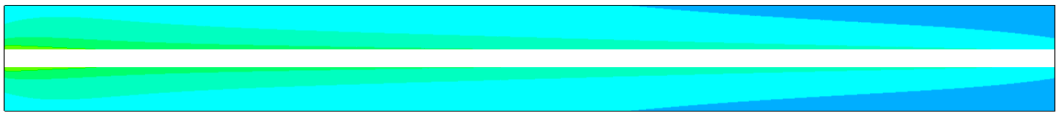
- 원형 파이프, 리브 핀 파이프 및 종방향 핀 파이프를 사용한 콘크리트 블록의 대표적으로 중앙 단면에서의 시간에 따른 온도변화를 나타낸 그래프이다.
- 리브 핀 파이프, 종방향 핀 파이프를 사용한 콘크리트 축열 블록이 원형 파이프를 사용한 축열 블록보다 동일한 시간에서 온도변화가 다소 빠르게 나타난다.
- 승온 구간과 온도 유지 구간에서 전체적인 온도 분포가 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.
- 열전달 유체가 들어가는 입구와 가까울수록 콘크리트 블록의 온도변화가 빠르게 일어난다. 또한 각 단면에서 유체가 흘러가는 관과 가까울수록 온도변화가 빠르게 변하는 것을 확인할 수 있다.
- 각 단면에서 열전달 파이프로 들어가는 유체를 가열하는 승온 구간과 유체를 냉각하는 온도 하강 단계에서 열전달 파이프와 가까울수록 콘크리트 온도변화가 빠르게 일어나며, 일정한 온도의 유체가 들어가는 온도 유지단계에서는 온도변화 기울기가 작게 나타난다.



(a) 초기 조건



(b) t = 60분



(c) t = 180분



(d) t = 240분

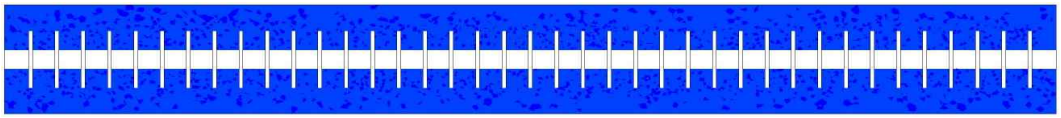


(e) t = 300분

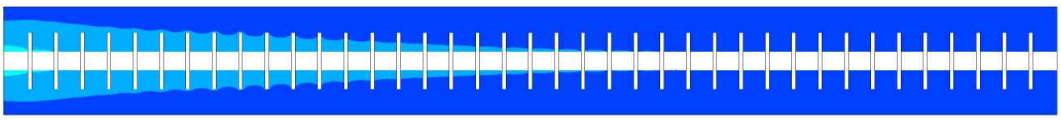


(f) t = 360분

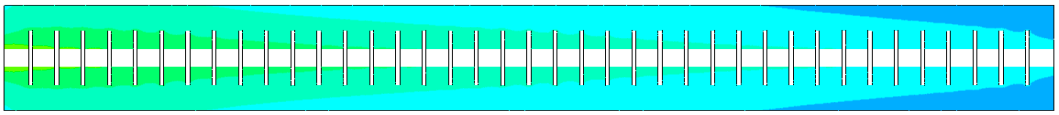
그림 2.94. 고전도 초고성능 콘크리트 블록의 해석 단계별 온도변화 (Plain pipe)



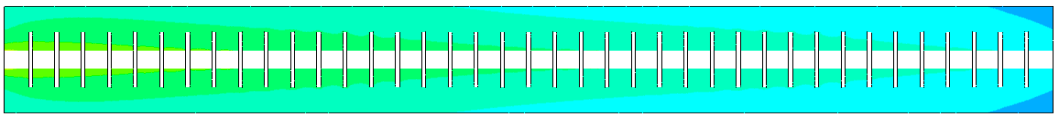
(a) 초기 조건



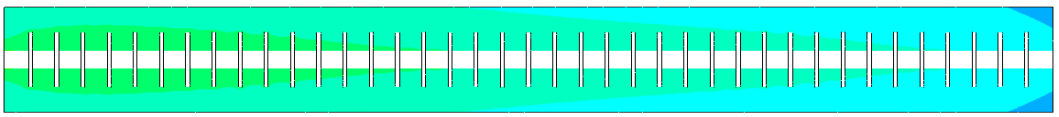
(b) t = 60분



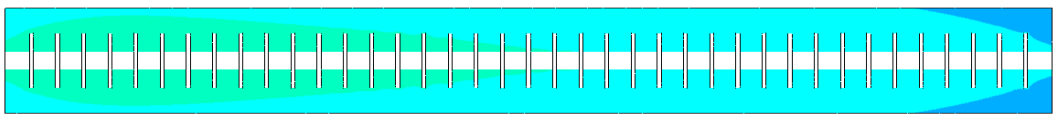
(c) t = 180분



(d) t = 240분

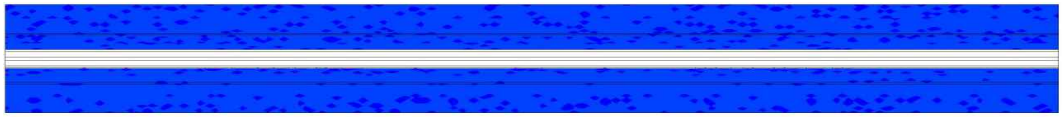


(e) t = 300분

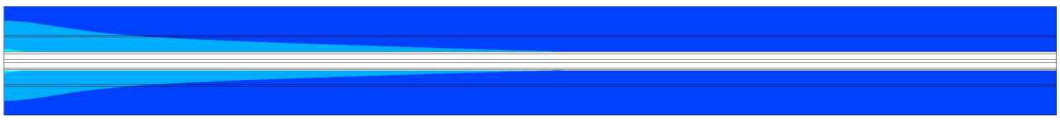


(f) t = 360분

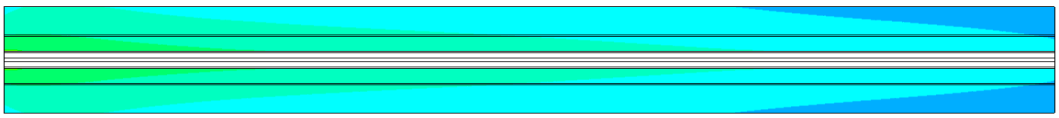
그림 2.95. 고전도 초고성능 콘크리트 블록의 해석 단계별 온도변화 (Rib fin pipe)



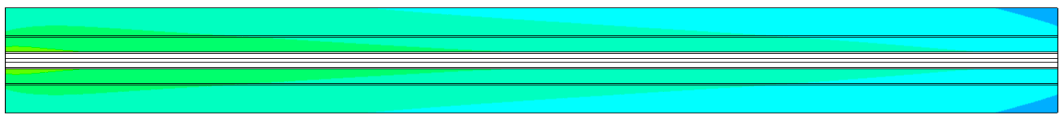
(a) 초기 조건



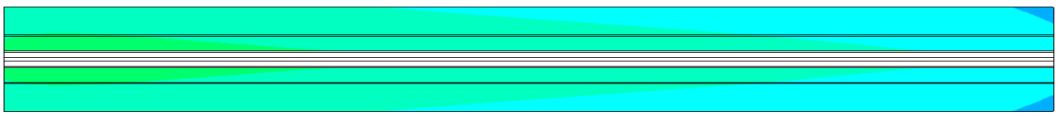
(b) t = 60분



(c) t = 180분



(d) t = 240분



(e) t = 300분



(f) t = 360분

그림 2.96. 고전도 초고성능 콘크리트 블록의 해석 단계별 온도변화 (Longitudinal fin pipe)

(다) 수치해석 결과와 측정 결과의 적합성

① 온도변화 비교

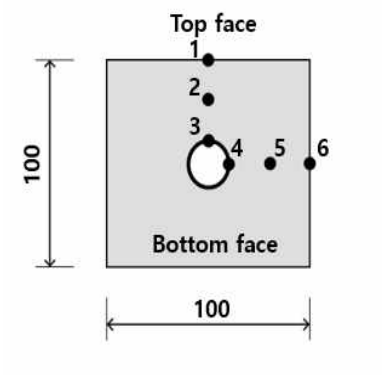


그림 2.97. 콘크리트 블록 내 온도 측정 위치

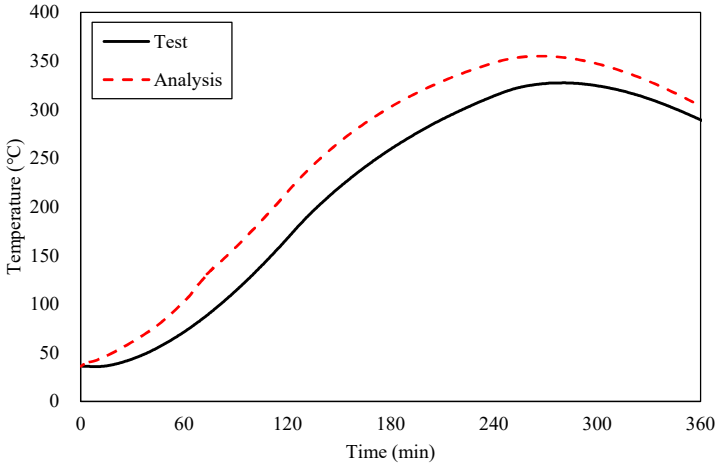
□ 그림 2.97은 고전도 초고성능 콘크리트 축열 블록 단면 내의 온도 측정 위치를 나타낸 그림이다.

- 1번과 6번 위치는 콘크리트 블록의 외측면을 나타낸다
- 3번과 4번은 콘크리트와 열전달 파이프와의 접촉면을 나타낸다
- 2번과 5번 위치는 각각 1번과 3번의 중간 위치, 4번과 6번의 중간 위치를 나타낸다.

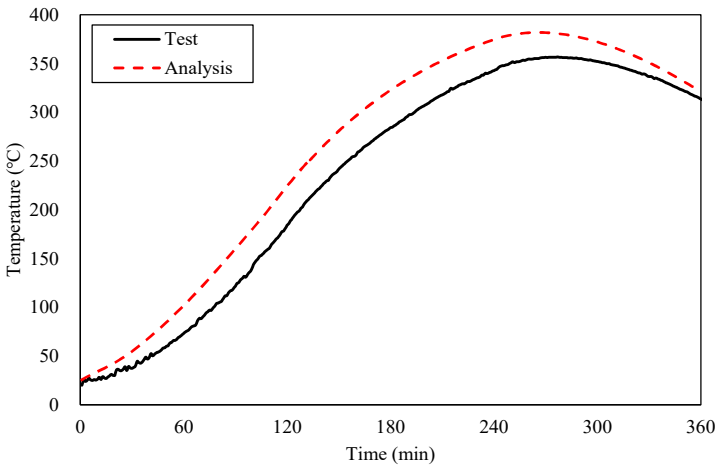
□ 본 연구에서 고려한 온도 측정 위치는 2번 위치이며, 온도 분포 및 열에너지 산정을 수행.

□ 고전도 초고성능 콘크리트를 사용한 축열 블록을 이용하여 측정한 단면 내 온도변화와 유한요소해석에 의한 해석값을 비교하였다(그림 2.98).

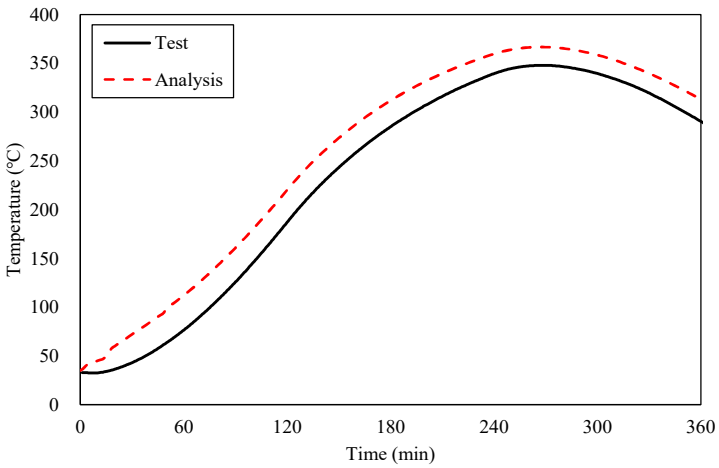
- 원형 파이프, 리브 핀 파이프 및 종방향 핀 파이프를 사용한 콘크리트 블록의 대표적으로 중앙 단면에서의 시간에 따른 온도변화를 나타낸 그래프이다.
- 콘크리트 블록의 표면을 단열 경계조건으로 한 수치해석 결과는 실험값보다 크게 나타난다. 이는 콘크리트 블록 가열 실험 시에 콘크리트 표면에서 완벽한 단열 조건을 확보하지 못하여 콘크리트 블록 표면에서 열손실이 발생하기 때문이다.
- 블록 표면에서의 대류에 의한 열손실을 고려하여 수치해석을 calibration하였으며, 이에 따른 비교 결과를 나타내었다.
- 열사이클을 고려한 해석 결과는 실험 결과와 전반적으로 잘 일치하고 있다. 이는 본 연구에서 구축한 온도해석 모델링이 고전도 초고성능 콘크리트의 온도변화를 합리적으로 예측할 수 있음을 의미한다.
- 따라서, 본 연구에서 제시한 수치해석 기법은 추후 고전도 초고성능 콘크리트를 활용한 대규모 축열 모듈의 열용량 또는 축열에너지 산정 시에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.



(a) 원형 열전달 파이프



(b) 리브 핀 파이프



(c) 종방향 핀 파이프

그림 2.98. 초고전도 고성능 콘크리트 블록의 시간에 따른 온도변화 비교

② 열에너지 변화 비교 분석

□ 고전도 초고성능 콘크리트를 사용한 축열 블록의 온도 수치해석 결과 및 측정 결과를 이용하여 열에너지를 계산하여 비교하였다(그림 2.99).

▪ 원형 파이프, 리브 핀 파이프 및 종방향 핀 파이프를 사용한 콘크리트 블록의 대표적으로 중앙 단면에서의 시간에 따른 온도변화를 나타낸 그래프이다.

□ 시간에 따른 콘크리트 블록 단위 요소에서의 열에너지는 다음과 같이 산정하였다.

$$Q_{c,i} = \rho_c \; c_{p,c} \; V_{c,i} \; (T_{c,i} - T_{c,ini})$$

여기서, $Q_{c,i}$: 콘크리트 각 영역에서의 열에너지 (J)

ρ_c : 콘크리트의 밀도 (kg/m^3)

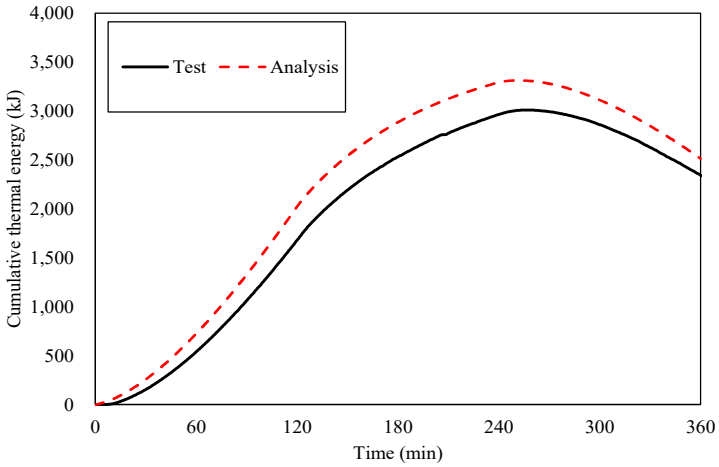
$c_{p,c}$: 콘크리트의 비열 $(J/kg{\cdot}K)$

$V_{c,i}$: 콘크리트 영역 별 콘크리트 부피 (m^3)

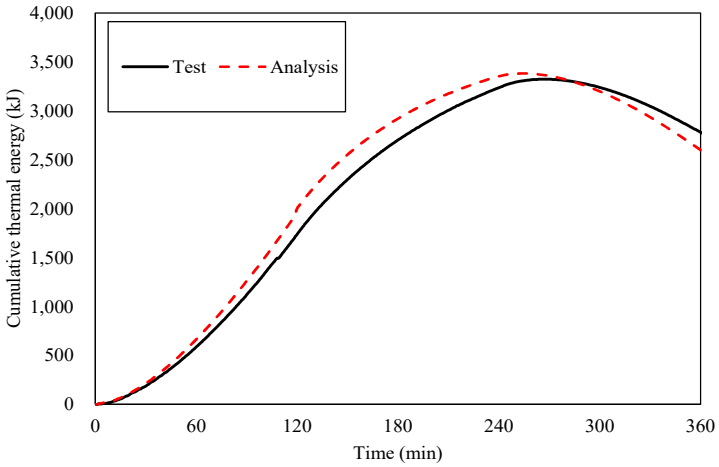
$T_{c,i}$: 콘크리트의 온도 (K)

$T_{c,ini}$: 콘크리트의 초기온도 (K)

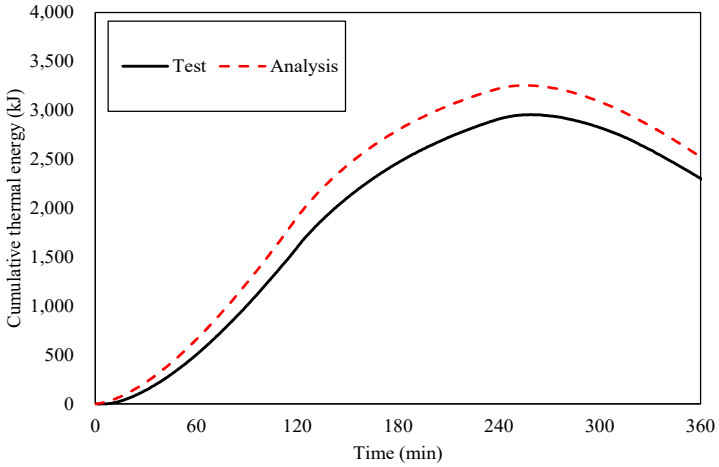
□ 열에너지 해석 결과는 실험 결과를 전반적으로 잘 예측하고 있다. 이는 본 연구에서 제시한 해석기법이 고전도 초고성능 콘크리트의 열용량을 합리적으로 예측할 수 있음을 의미한다. 따라서, 본 연구에서 제시한 수치해석 기법은 향후 고전도 초고성능 콘크리트를 활용한 대규모 축열 모듈의 열용량 산정 시에 유용하게 적용이 가능하다.



(a) 원형 열전달 파이프



(b) 리브 핀 파이프



(c) 종방향 핀 파이프

그림 2.99. 초고전도 고성능 콘크리트 블록의 시간에 따른 열에너지 변화 비교

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표 달성도

(1) 성과점검기준

구분	핵심 성과물 (CTE)		단위 성과물		성과점검기준			
					질적 성과지표		목표치	달성치
주관	A	태양열 고온의 현열 저장용 고전도 초고성능 건설재료 제조 및 열성능 평가 (1차년도)	A-1	고온 현열 저장용 무기재료 콘크리트 제조 기술	①	축열용 콘크리트 압축강도	120 MPa 이상	133.4
					②	축열용 콘크리트 인장강도	6.0 MPa 이상	8.1
			A-2	고온 현열 저장용 무기재료 콘크리트 열성능	①	축열용 콘크리트 압축강도 손실률 (고온 열싸이클)	40% 이하	24.1
					②	축열용 콘크리트 열전도율	1.2 W/m-K 이상	2.02
	B	태양열 고온 현열 저장 고성능 콘크리트 모듈 열성능 평가 (2차년도)	B-1	콘크리트 고체 현열 저장 모듈의 열거동 평가기술	①	축열용 콘크리트 압축강도	150 MPa 이상	198.2
					②	축열용 콘크리트 인장강도	8.0 MPa 이상	12.1
			B-2	콘크리트 고체 현열 저장 모듈의 열성능 평가 기술	①	축열용 콘크리트 압축강도 손실률 (고온 열싸이클)	30% 이하	15.8
					②	축열용 콘크리트 열전도율	1.5 W/m-K 이상	2.51
					③	축열모듈 열 손실률	35% 이하	19.7

(2) 양적성과현황

구분	핵심 성과물 (CTE)		단위 성과물		양적성과 현황	
					목표치	달성치
주관	A	태양열 고온의 현열 저장용 고전도 초고성능 건설재료 제조 및 열성능 평가 (1차년도)	A-1	고온 현열 저장용 무기재료 콘크리트 제조 기술	특허: 출원 1건	특허: 출원 1건
			A-2	고온 현열 저장용 무기재료 콘크리트 열성능	인력양성: 2명	인력양성: 0명
					논문(SCI) :1건	논문(SCI): 1건
	B	태양열 고온 현열 저장 고성능 콘크리트 모듈 열성능 평가 (2차년도)	B-1	콘크리트 고체 현열 저장 모듈의 열거동 평가기술	특허: 출원 1건	특허: 출원 1건
					특허: 등록 1건	특허: 등록 0건
			B-2	콘크리트 고체 현열 저장 모듈의 열성능 평가 기술	논문(SCI) :2건	논문(SCI): 1건
					논문(비SCI): 1건	논문(비SCI): 2건
					인력양성: 4명 (당초 계획) 1차년도:2명 2차년도:2명 총: 4명 (변경 계획) 2차년도: 4명	인력양성: 5 명

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

(가) 목표 미달성 원인

□ 2차년도 특허 등록 1건:

- 1차년도 (2019년)에 출원한 특허 심사가 지연되어 2차년도 (2020년) 특허등록 1건의 목표를 달성하지 못함.
- 1차년도와 2차년도에 출원한 특허를 등록하여 목표를 달성하도록 할 예정임.

□ 2차년도 SCI 논문 게재 1건:

- 연구종료일 이후라도 SCI 논문 1건을 게재하도록 할 예정임.

(나) 추가 연구의 필요성

□ 태양열 발전은 기존 화석연료를 이용한 발전을 대체할 수 있는 핵심 신재생 에너지원 중의 하나이며 이에 대한 기초 및 응용연구는 매우 중요하다. 따라서 초고성능 콘크리트를 적용한 고온 조건 대규모 태양열 모듈의 시제품 제작 및 현장적용 관련한 후속 연구가 필요함.

□ 이 연구는 고전도 초고성능 콘크리트를 이용하여 고온의 태양열을 저장하기 위한 핵심연구이지만, 이를 실질적으로 산업 현장에서 응용하기 위한 대규모(full-scale)의 열특성 연구가 필요하므로 후속 추가연구가 반드시 필요함.

나. 관련 분야 기여도

(1) 기술적 측면

□ 태양열 발전 관련 TES 용도의 콘크리트에 대한 원천기술 확보를 통한 해외기술 의존도 해소 및 세계 최고 수준 기술 확보를 위한 초석 마련

- 기술 성숙도 및 수준: 추격 위치 → 선도적 위치(선진국과 비슷한 수준 또는 그 이상의 수준으로 발전)
- 태양열 발전 열저장 장치에 대한 새로운 방안 도출에 따른 신재생에너지 분야의 기술력 증대

□ 축열 기능 향상으로 인한 태양열 발전효율 20% 증대.

- 태양열 발전 가동시간 증대 및 에너지 손실 최소화

□ 화석에너지의 고갈문제와 온실가스 감축에 대한 태양열 발전 방안을 위한 열저장 장치 솔루션 제공

□ 건축(빌딩, 패시브 하우스, 제로에너지 하우스 등) 분야에 에너지 효율 향상에 대한 새로운 대안 제시 가능

(2) 경제적 · 산업적 측면

□ (시장 창출) 신재생에너지 내수시장 창출·확대로 대규모 신규투자를 유도하고 일자리 확대 기대

- 태양열 산업 투자 활성화와 함께, 새로운 비즈니스 모델 출현 가능

※ 전력에 비해 소외되었던 태양열·지열 등 신재생 열분야 시장이 본격적으로 확대될 것으로 예상

- TES(Thermal Energy Storage) 분야 해외 수출 경쟁력 증대 (중동, 중국 등)

□ (전력수요 감소) 신재생 발전을 통해 전력수요를 감축, 전환손실(열→전력)을 방지하고 안정적인 에너지수급에 기여

※태양열 에너지 활용시, 냉난방을 위한 전력수요도 절감 가능

□ 태양열 발전설비에 대한 수요 증가로 관련 산업의 활성화 및 고용 창출 기여 , 에너지 생산방식을 태양열로 대체함으로 환경오염 감소 기대, 태양열 산업의 활성화로 태양열 기반 시설 및 부품에 대한 시장 경제성 확보 기대

(3) 사회적 측면

□ 미세먼지 발생이 없는 청정에너지로 신성장동력 및 일자리를 창출

- 지속적인 경제성장을 뒷받침하고 미래세대의 수요를 고려한 에너지 안보(energy security), 에너지 효율 등 국가 에너지 정책에 부합

※ 태양에너지는 무공해 에너지원으로서 화석 연료를 대체하고 이산화탄소를 배출하는 화석연료와는 달리 환경오염 없는 녹색 에너지로 각종 환경규제에 가장 적극 대응할 수 있는 산업이며, 에너지 소비 및 수급 특성상 우리나라 여건에 필수적인 산업

□ 신재생에너지(태양열) 분야 기술 축적에 따른 에너지 자립사회 구현

- 에너지 저소비 사회, 탈석유사회로 전환
- 에너지 사용 효율의 개선 및 에너지시장의 효율화에 이바지
- 신·재생에너지 개발·보급 확대 및 성장 동력화에 이바지

□ 신재생에너지의 청정성에 대한 신뢰 확보로 사회적 입지 강화 효과와 무한 에너지원인 태양열의 활용 촉진 효과

- 태양열 발전 시설물의 유지관리 비용절감 효과 기대
- 태양열 발전 효율 증대에 따른 국가예산 절감효과

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

가. 태양열 열에너지 저장 활용방안

□ CSP(concentrated solar power, 집광형 태양열 발전) 발전장치는 대규모로 태양열을 집광하여 고온의 열에너지를 이용하여 전력을 생산한다. 이러한 대규모 태양열 에너지를 축열하는 경우, 이 연구에서 개발한 기술을 적용할 수 있다.

□ 모듈형 프리캐스트 제품화를 통한 고온의 신재생 태양열 에너지 저장 효율성을 극대화하는데 활용할 수 있다.

□ 고온의 현열 에너지 저장을 위한 최적화된 초고성능 콘크리트 배합기술은 고온 저항성 콘크리트 제조에 적용이 가능하다.

□ 기술개발 완료 후 일사량이 풍부한 해외의 중동, 아프리카, 미주 지역 등의 태양열 발전소 설계와 건설을 위한 중장기 해외수출 전략에 활용한다.



집광형 태양열 발전 (CSP)


고전도 초고성능 콘크리트 축열 장치

나. 저비용 고효율 열에너지 저장 콘크리트 모듈 시스템 실용화

□ 고온(400℃) 상태의 고효율성 charging과 discharging 저항이 가능한 무기 재료 기반 콘크리트 최적 배합기술 확대

□ 고온 상태의 열적 특성(비열, 열전도율, 열용량 등) 파악 및 분석기술 개발

□ 콘크리트 TES(thermal energy storage) 모듈형 시스템의 활성화를 위한 원천기술 확보

□ 지역난방공사, 지방자치단체 등 수요처에 적극적 홍보전략 수립 및 활동

다. 태양열 발전 이외의 분야에서의 연구개발성과의 주요 활용 방안

지역난반용 열저장장치 제품

- 태양열 중앙공급시스템
- 태양열 지역난방시스템

산업 분야 폐열 활용

- 중온 수준의 열저장 시스템

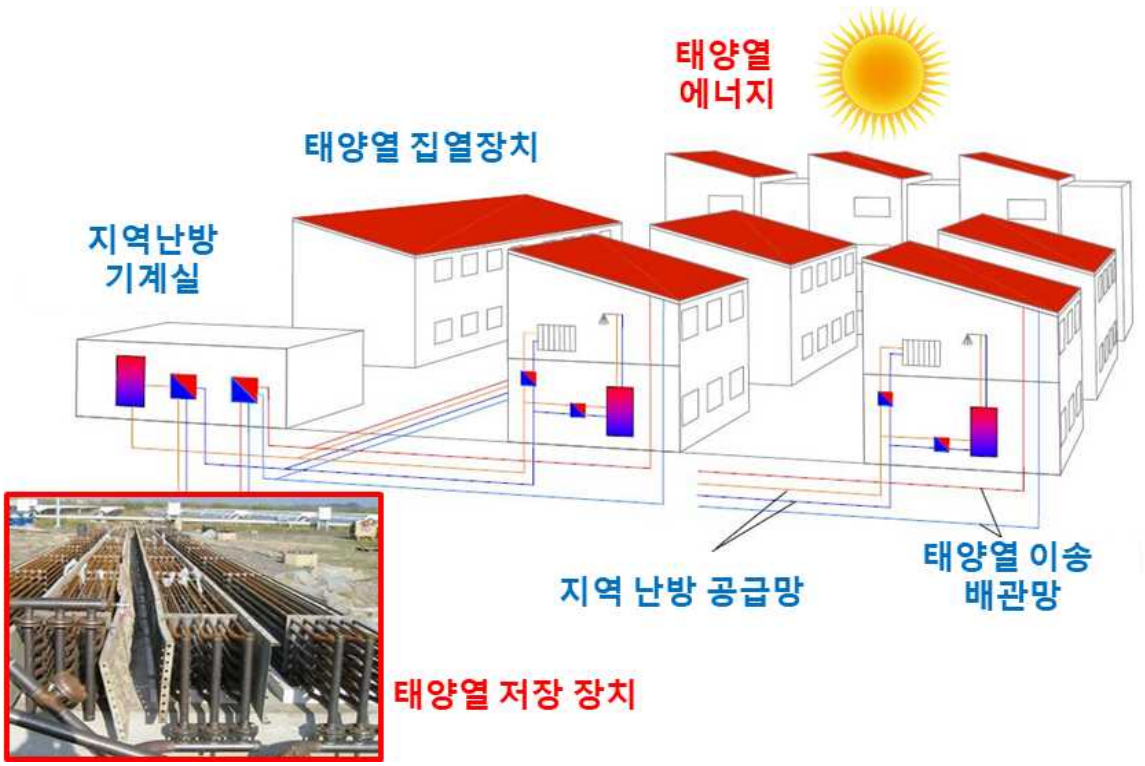
태양열 발전 이외의 연구성과 활용방안

주택, 빌딩 등의 태양열 저장 자재

- 중·저온용 태양열 저장 콘크리트 건축자재 사업 분야

주택 및 빌딩 등의 패시브 하우스

- 건물 에너지 자립을 위한 열에너지 저장 자재
- 주거 단지의 난방 및 온수 공급 활용



□ 지역난방용 중대형 콘크리트 열저장 장치 제품화

▪ 태양열 중앙공급시스템, 태양열 지역 난방시스템 등

□ 산업 분야의 폐열을 활용하기 위한 중온 수준의 열저장 시스템

□ 주택, 빌딩 등의 중·저온용 태양열 저장 콘크리트 건축 자재 사업 분야

□ 프리캐스트 TES 콘크리트 제품 기술을 이용하여 100도 이하 저온의 태양열을 이용하는 주택 및 빌딩 등의 에너지 제로하우스, 패시브하우스 등 건물 에너지 자립을 위한 건축용 자재 사업으로 활용 가능

▪ 특히 대단위 주거 단지의 난방 및 온수 공급에 활용 가능

라. 핵심 지식재산권(특허, 프로그램 등) 활용과 실제 현장 또는 제품화에 관계된 기업(건설사, 관공사, 지자체 등) 등에 협력관계 및 기술이전

□ 태양열 발전소 건설을 위한 업체군은 크게 시공회사, 레미콘 공급업체, 프리캐스트 제품 제조업체 등으로 구분됨.

□ 지역난방용 중대형 콘크리트 축열조 관련 기술의 고객군은 태양열을 활용하여 지역난방을 해결하고자 하는 한전, 발전사(동서발전, 중부발전 등) 등이 있음.

붙임. 참고문헌

[1] R. Tamme, D. Laing, and W. D. Steinmann, “Advanced thermal energy storage technology for parabolic trough,” *Transactions of the ASME*, vol. 126, pp. 794-800, 2004.

[2] J. E. Skinner, B. M. Brown, and R. P. Selvam, “ Testing of high performance concrete as a thermal energy storage medium at high temperatures,” in *Proceedings of the ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability*, ES2011, Washington, DC, USA, August 7-10, 2011.

[3] V. A. Salomoni, C. E. Majorana, G. M. Giannuzzi, A. Miliozzi, R. D. Maggio, F. Girardi, D. Mele, and M. Lucentin, “Thermal storage of sensible heat using concrete modules in solar power plants,” *Solar Energy*, vol. 103, pp. 303 - 315, 2014.

[4] E. E. John, W. Micah Hale, and R. P. Selvam, “Development of a high performance concrete to store thermal energy for concentrating solar power plants,” in *Proceedings of the ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability*, ES2011, Washington, DC, USA, August 7-10, 2011.

[5] D. Laing, W. D. Steinmann, R. Tamme, and C. Richter, “Solid media thermal storage for parabolic trough power plants,” *Solar Energy*, vol. 80, pp. 1283-1289, 2006.

[6] E. John, M. Hale, and P. Selvam, “Concrete as a thermal energy storage medium for thermocline solar energy storage systems,” *Solar Energy*, vol. 96, pp. 194-204, 2013.

[7] A.I. Fernandez, M. Martínez, M. Segarra, I. Martorell, and L. F. Cabeza, “Selection of materials with potential in sensible thermal energy storage,” *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 94, pp. 1723 - 1729, 2010.

[8] T. C. Ling and C. S. Poon, “Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete: an overview,” *Construction and Building Materials,* vol. 46, pp. 55-62, 2013.

[9] D. Laing, D. Lehmann, M. Fib, and C. Bahl, “Test results of concrete thermal energy storage for parabolic trough power plants,” *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 131, pp. 0410071- 0410076, 2009.

[10] D. Laing, C. Bahl, T. Bauer, M. Fiss, N. Breidenbach, and M. Hempel, “High-temperature solid-media thermal energy storage for solar thermal power plants,” in *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 2, pp. 516-524, 2012.

[11] H. Yuan, Y. Shi, Z. Xu, C. Lu, Y. Ni, and X. Lan, “Influence of nano-ZrO_2 on the mechanical and thermal properties of high temperature cementitious thermal energy storage materials,” *Construction and Building Materials*, vol. 48, pp. 6 - 10, 2013.

[12] H. Yuan, Y. Shi, Z. Xu , C. Lu, Y. Ni, and X. Lan, “Effect of nano-MgO on thermal and mechanical properties of aluminate cement composite thermal energy storage materials,” *Ceramics International*, vol. 40, pp. 4811-4817, 2014.

[13] B. A. Graybeal, *Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete*, Report No. FHWA-HRT-06-103, FHWA, U.S. Department of Transportation, McLean, VA, pp. 186, 2006.

[14] T. Leutbecher and E. Fehling, “Tensile behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with reinforcing bars and fibers,” *ACI Structural Journal*, vol. 109, no. 2, pp. 253-263, 2012.

[15] I. H. Yang, C. Joh, and B. S. Kim, “Flexural response predictions for ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams,” *Magazine of Concrete Research*, vol. 64, no. 2, pp. 113-127, 2012.

[16] A. Abrishambaf, M. Pimentek, and S. Nunes, “Influence of fibre orientation on the tensile behavi our of ultra-high performance fibre reinforced cementitious composites,” *Cement and Concrete Research*, vol. 97, pp. 28-40, 2017.

[17] K. C. Kim, I. H. Yang, and C. Joh, “Effects of single and hybrid steel fiber lengths and fiber contents on the mechanical properties of high-strength fiber-reinforced concrete,” *Advances in Civil Engineering*, vol. 2018, 14 pages.

[18] J. H. Lee, S. H. Lee, and Y. S. Sohn, “ Fire resistance of hybrid fibre-reinforced, ultra-high-stre ngth concrete columns with compressive strength from 120 to 200 MPa,” *Magazine of Concret e Research*, vol. 64, issue 6, pp. 539-550, 2012.

[19] A. Iravani and S. Anders, “Time dependent mass loss of UHPC after single and cyclic thermal exposure,” in *Proceedings of HiperMat*, 2016.

[20] M. Abid, X. Hou, W. Zheng, and R. R. Hussain, “Effects of fibers on high-temperature mechani cal behavior and microstructures of reactive powder concrete,” *Materials*, vol. 12. pp.1-30, 201 9.

[21] G. F. Peng, W. W. Yang, J. Zhao, Y. F. Liu, S. H. Bian, and L. H. Zhao, “Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures,” *Cement and Concrete Research*, vol. 36, pp. 723-727, 2006.

[22] S. Aydin, H. Yazici, and B. Baradan, “High temperature resistance of normal strength and autoc laved high strength mortars incorporated polypropylene and steel fibers,” *Construction and Bui lding Materials,* vol. 22, pp. 504-512, 2008.

[23] W. C. Wang, “Compressive strength and thermal conductivity of concrete with nanoclay under various high-temperatures,” *Construction and Building Materials,* vol. 147, pp. 305-311, 2017.

[24] M. Abid, X. Hou, W. Zheng, and R. R. Hussain, “High temperature and residual properties of reactive powder concrete - a review,” *Construction and Building Materials,* vol. 147, pp. 339-351, 2017.

[25] X. Li, Y. Bao, L. Wu, Q. Yan, H. Ma, G. Chen, and H. Zhang, “Thermal and mechanical properti es of high-performance fiber-reinforced cementitious composites after exposure to high temper atures,” *Construction and Building Materials,* vol. 157, pp. 829-838, 2017.

[26] T. Log and S. E. Gustafsson, “Transient plane source (TPS) technique for measuring thermal transport properties of building materials,” *Fire and Materials*, vol. 19, pp. 43-49, 1995.

[27] D. P. Bentz, MA. Peltz, A. D. Herrera, P. Valdez, and C. A. Juarez, “Thermal properties of high-volume fly ash mortars and concretes,” *Journal of Building Physics*, vol. 34, pp. 263-275, 2011.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.

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

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