

(옆면)

(앞면)

17CTAP
-C13299
8-02

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개()
국토교통기술촉진사업 제3차 연도 최종보고서

발간등록번호()

R&D /
17CTAP-C132998-02

-20℃ 이하
극한
환경에서의
무양생용
CA 계열
시멘트
콘크리트
개발

-20℃ 이하 극한 환경에서의 무양생용 CA 계열 시멘트 콘크리트 개발

최종보고서

최
종
보
고
서

2019. 01. 18.

2018

주관연구기관 / 한양대학교 에리카산학협력단

국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘-20℃ 이하 극한 환경에서의 무양생용 CA 계열 시멘트 콘크리트 개발’(연구개발 기간 : 2017. 06. 30~ 2018. 12. 31.) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2019. 1. 18.

주관연구기관명 : 한양대학교 에리카산학협력단

(대표자) 좌용호 (인)



주관연구기관책임자: 안기용

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	17CTAP-C132 998-02	해당 단계 연구 기간	2017.06.30. - 2018.12.31.	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	-			
	세부사업명	국토교통기술촉진사업			
연구과제명	대과제명	대과제가 있을 경우 기재합니다(단위과제일 경우에는 아래에 기재합니다)			
	세부과제명	-20℃ 이하 극한 환경에서의 무양생용 CA 계열 시멘트 콘크리트 개발			
연구책임자	안기용	해당단계 참여연구원 수	총: 9명 내부: 9명 외부: 0명	해당단계 연구비	정부: 200,000천원 민간: 0천원 정부외: 0천원 상대국: 0천원 계: 200,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 18명 내부: 18명 외부: 0명	총 연구비	정부: 330,000천원 민간: 0천원 정부외: 0천원 상대국: 0천원 계: 330,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	한양대학교 에리카산학협력단			-	
국제공동연구	-			-	
위탁연구	-			연구책임자: 안기용	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반
-------------------------	----

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호	5	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-

국가과학기술중합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

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

본 연구의 최종목표는 “-20℃ 이하 극한 환경에서의 무양생용 CA 계열 시멘트 콘크리트 개발”이며, 이는 기존의 동절기 혹은 극한 환경에서 콘크리트 경화를 위해 가열 혹은 보온양생 등 양생기술 위주의 방법에서 벗어나 재료의 특성만을 이용하여 추가적인 양생 처리가 필요 없는 콘크리트 개발을 위한 연구를 수행함. 이에 따라 CA계열 시멘트계 재료의 자기발열 성능 및 해당 시멘트를 이용한 콘크리트의 온도 이력, 굳지 않은/굳은 콘크리트의 기초물성 평가를 통해 최적의 배합설계를 도출함. 이후 CA 계열 수화물의 상변화 현상 억제제를 위한 Silicate 계열 및 수화 촉진 유도를 위한 Sulfate 계열 첨가제를 사용한 균열 억제 자기발열 콘크리트를 개발함.

〈 요약문 〉

연구의 목적 및 내용	본 연구의 최종목표는 “-20℃ 이하 극한 환경에서의 무양생용 CA 계열 시멘트 콘크리트 개발”이며, 이는 기존의 동절기 혹은 극한 환경에서 콘크리트 경화를 위해 가열 혹은 보온양생 등 양생기술 위주의 방법에서 벗어나 재료의 특성만을 이용하여 추가적인 양생 처리가 필요 없는 콘크리트 개발을 목표로 함. ○ 극한 환경에서의 자기발열 시멘트계 재료 및 콘크리트 개발 - CA계열 시멘트계 재료의 자기발열 (Self-heating) 성능 평가 - 외기 온도 조건에서 자기발열 콘크리트 온도 및 경화 특성 평가 - 콘크리트 내부 온도 이력에 따른 균열 특성 평가 - 극한 환경 하 자기발열 콘크리트 배합설계 도출 및 성능 평가 ○ 극한 환경에서의 내부균열 억제형 자기발열 콘크리트 개발 - 상변화 (Conversion) 억제형 Silicate 계열 치환재 성능 평가 - 수화 유도형 Sulfate 계열 첨가제 성능 평가 - 외기 온도 조건에서 내부균열 억제형 자기발열 콘크리트 온도 및 경화 특성 평가 - 극한 환경 하 내부 균열 억제형 자기발열 콘크리트 배합설계 도출 및 성능 평가				
연구개발성과	○ 극한 환경에서의 무양생용 자기발열 및 균열 억제 콘크리트 개발				
연구개발성과 의 활용계획 (기대효과)	○ 활용계획 - 동토지역 및 극지방에서의 건설구조물 자재개발 필요성에 대응 - 국내 극심한 기후변화로 인한 동절기 시공 필요성에 대응 - 세계 건설시장 중 극한 환경 진출을 위한 국내 업계의 요구에 대응 - 국내 극한 환경 건설재료 분야 세계적 기술 수준으로의 확대 - 기술 특허 등록을 통한 향후 현장 적용 및 사업화 방안 모색 ○ 기대효과 - 선진기술력 확보, 업계의 기술 수준 향상, 공사기간 단축 - 가격 경쟁력 확보, 건설 경기 부양, 원가 절감 - 사회적 불안감 해소, 건설재료 분야의 전문인력 양성, 해외진출 기회 제공				
핵심어 (5개 이내)	극한지역	자기발열	균열억제	콘크리트	`무양생

< SUMMARY >

Purpose & Contents	The main purpose of this research is to develop a curing-free concrete made with CA-type cement under temperature 20 degrees below zero, which will be free from the needs of further heating or curing techniques for cement hydration to achieve given material performances. ○ Development of a self-heating cement material and concrete - Performance evaluation of a self-heating concrete with CA-type cement - Assesment of hardening process for self-heating concrete under outdoor temperature - study on the effect of temperature distributions in concrete on crack properties - Determination of optimized mix design for concrete submitted to extreme low temperature condition and evaluation of the properties ○ Development of a self-heating concrete for suppressing crack evolution in extreme low temperature condition - Evaluation of a silicate-type admixture for inhibiting conversion - Performance evaluation of silicate-type admixture for promoting hydration - Assessing hardening process for a self-heating concrete for reducing crack in outdoor temperature - Determination of mix design for a self-heating concrete for suppressing crack exposed to extreme low temperature				
Results	○ Development of self-heating and curing-free concrete optimized for extreme low temperature				
Expected Contribution	○ Application plan - Responding the need of development of concrete structure submitted to extreme low temperature condition - Responding to the need of domestic construction against extreme weather conditions - Plan to support the need of global markets to implement construction at extreme environments - Plan to enhance the construction techniques for extreme environemnts toward world-class - Plan to enroll the technology patent for applying in-situ construction and commercialization. ○ Expectation - Advanced technology, short-cut of construction period - Ensuring competitive price, enhanced economic benefit, reduction in production cost - Enhancing serviceability, Experts of radiation, Opportunity for advancing carrier in foreign country				
Keywords	Extreme cold region	Self-heating	Crack-free	Concrete	Non-curing

< Contents >

1. Outline of the research project	1
2. State of the are in the technology development	9
3. Development results of the research	12
4. Achievement and contributions in related area	84
5. Application plan of the R&D results	87
6. Scientific and technological informations obtained in the research	88
7. Security level for research products	89
8. Registered facility and apparatus for research on NTIS	90
9. Safety action at laboratory in the research process	91
10. Representative results of the research project	92
11. Remarks	93
12. References	94

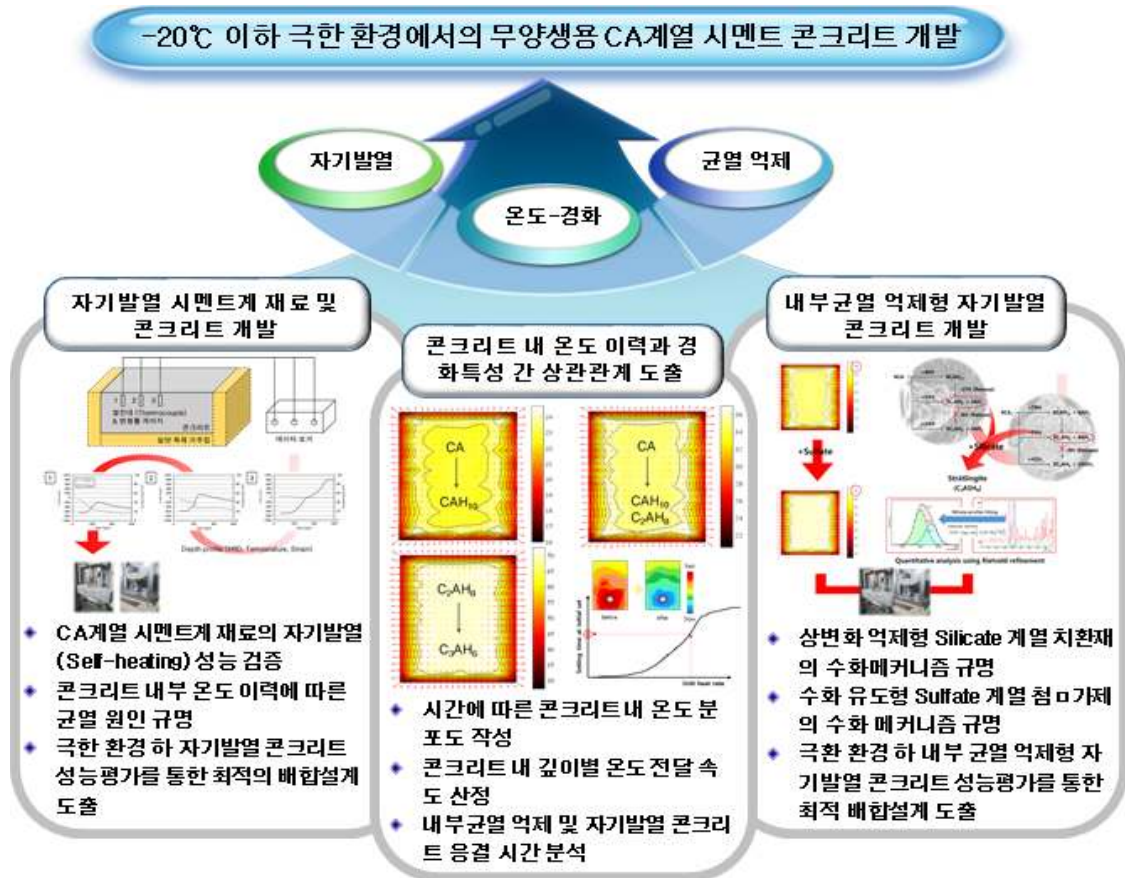
< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	9
3. 연구수행내용 및 성과	12
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	84
5. 연구개발성과의 활용 계획	87
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	88
7. 연구개발성과의 보안등급	89
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	90
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	91
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	92
11. 기타 사항	93
12. 참고 문헌	94

제1장. 연구개발과제의 개요

1.1 연구개발 목적

본 연구의 최종목표는 “-20℃ 이하 극한 환경에서의 무양생용 CA 계열 시멘트 콘크리트 개발”이며, 기존의 동결기 혹은 극한 환경에서 콘크리트 경화를 위해 가열 혹은 보온양생 등 양생기술 위주의 방법에서 벗어나 재료의 특성만을 이용하여 추가적인 양생 처리가 필요 없는 콘크리트 개발이 최종 목표임. 이를 달성하기 위한 세부 핵심 연구목표는 다음과 같음.



< 그림 1.1 최종 연구 목표에 대한 모식도 >

○ 극한 환경에서의 자기발열 시멘트계 재료 및 콘크리트 개발

- CA계열 시멘트계 재료의 자기발열 (Self-heating) 성능 평가
- 외기 온도 조건에서 자기발열 콘크리트 온도 및 경화 특성 평가
- 콘크리트 내부 온도 이력에 따른 균열 특성 평가
- 극한 환경 하 자기발열 콘크리트 배합설계 도출 및 성능 평가

○ 극한 환경에서의 내부균열 억제형 자기발열 콘크리트 개발

- 상변화 (Conversion) 억제형 Silicate 계열 치환재 성능 평가
- 수화 유도형 Sulfate 계열 첨가제 성능 평가
- 외기 온도 조건에서 내부균열 억제형 자기발열 콘크리트 온도 및 경화 특성 평가
- 극한 환경 하 내부 균열 억제형 자기발열 콘크리트 배합설계 도출 및 성능 평가

1.2 연구개발의 필요성

1.2.1 극한 환경에서의 건설구조물 공사 필요성 대두

국내 건설시장의 수요 포화상태로 해외로의 진출하고 있으며 특히, 몽골, 시베리아, 러시아 등 동토지역 및 극지방까지 진출함에 따라 동절기 평균 기온이 약 -20°C 이하로 떨어지는 극한 환경에서의 건설구조물 시공 기술 및 재료 개발의 필요성이 대두됨.

뿐만 아니라, 국내의 경우에도 한파, 폭설 등 극심한 기후 변화로 인해 동절기 공사는 선택이 아닌 필수적인 상황이지만 시공 현장에 적합하지 않은 보온 양생 기법 적용, 기간을 단축하기 위한 공사 강행 등 콘크리트의 품질저하를 일으키는 부실공사가 빈번히 일어나고 있음.



그림 1.2 하바로브스키 신축공사
- 영하 20°C 에서의 열선 설치 및 타설
(콘크리트학회지, 2009.03)

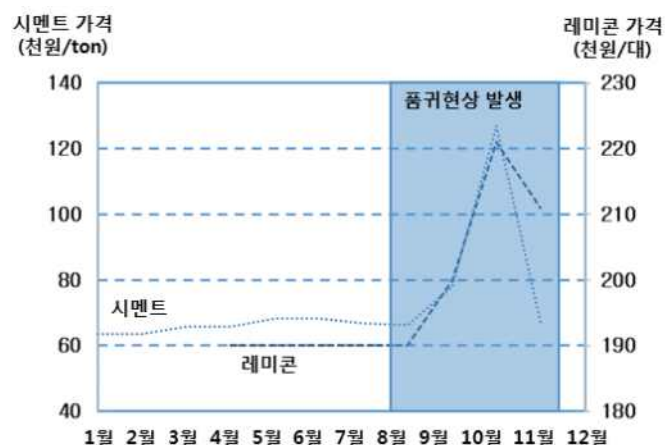


그림 1.3 세종특별자치시 주추지하차도
- 혹한기 겨울공사 강행으로 인한 균열
(금강일보, 2017. 04. 26)

1.2.2 극한 지역 내 하절기 수요 급증으로 인한 건설자재 공급 부족 현상 발생

극한 지역에 속해있는 국가에서는 동절기 콘크리트 타설에 엄격한 기준을 적용하고 있으며 특히 영하 18°C 이하의 온도에서는 공사를 제한하고 있음. 또한 일부 레미콘 회사의 경우 품질 관리의 이유로 동절기 납품을 하지 않는 경우도 존재함.

동절기 시멘트 및 레미콘의 수급 부족으로 인해 하절기에 공사가 집중되며, 이로 인한 건설재료의 품귀현상이 발생하여 지역에 따라 가격이 최대 1.5배가량 증가함.



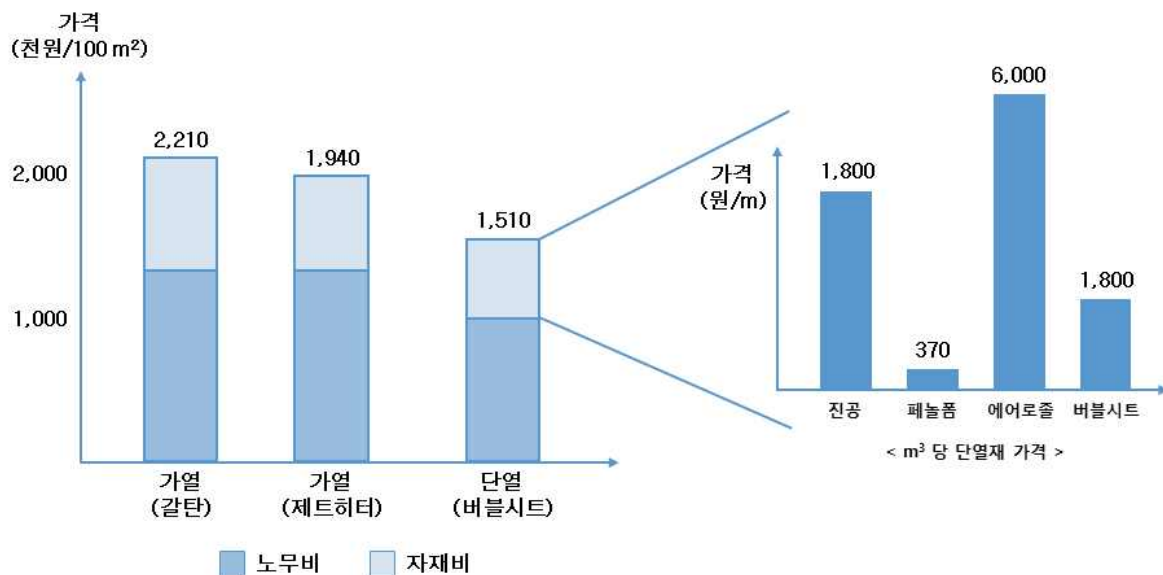
< 그림 1.4 몽골 시멘트 및 레미콘 가격 변동 (2013년) >

1.2.3 콘크리트 보온 양생법의 한계

이를 해결하기 위한 수단으로 한중 콘크리트와 가열, 단열 또는 전기 양생 등 보온 양생을 함께 적용하는 시공이 일반적이나 추가적인 공정으로 인해 그에 따른 공사비의 증가가 동반됨. 또한 가열 및 단열 양생은 효율의 저하로 인한 초기 동해 위험 및 소요 강도를 확보가 어려워 그 효과는 미비한 실정이며, 가열을 위해 사용되는 갈탄에서 배출되는 일산화탄소에 의해 질식사망하는 사고사례가 매년 보고됨 (건설경제신문, 2017.01.23.).

또한, 콘크리트 내 열선을 매립하여 전기 저항에 의해 생기는 열을 이용하는 전기 양생은 그 효율이 다른 보온 양생에 비해 월등히 높다는 장점이 있지만 한번 매립된 열선은 수거 및 재사용이 불가능해 경제적인 측면에서 불리함.

최근 들어, 마이크로파를 이용한 급속 양생 기술, 콘크리트 내 직접 열선 매립과 함께 단열재를 사용한 복합 보온양생법 등 기존 양생 기법의 단점을 보완 혹은 향상시킨 기술들이 개발되었지만 기존의 양생이라는 틀을 벗어나지 못함.



< 그림 1.5 보온 양생 방법별 공사비 (2015-16년 가격기준) >

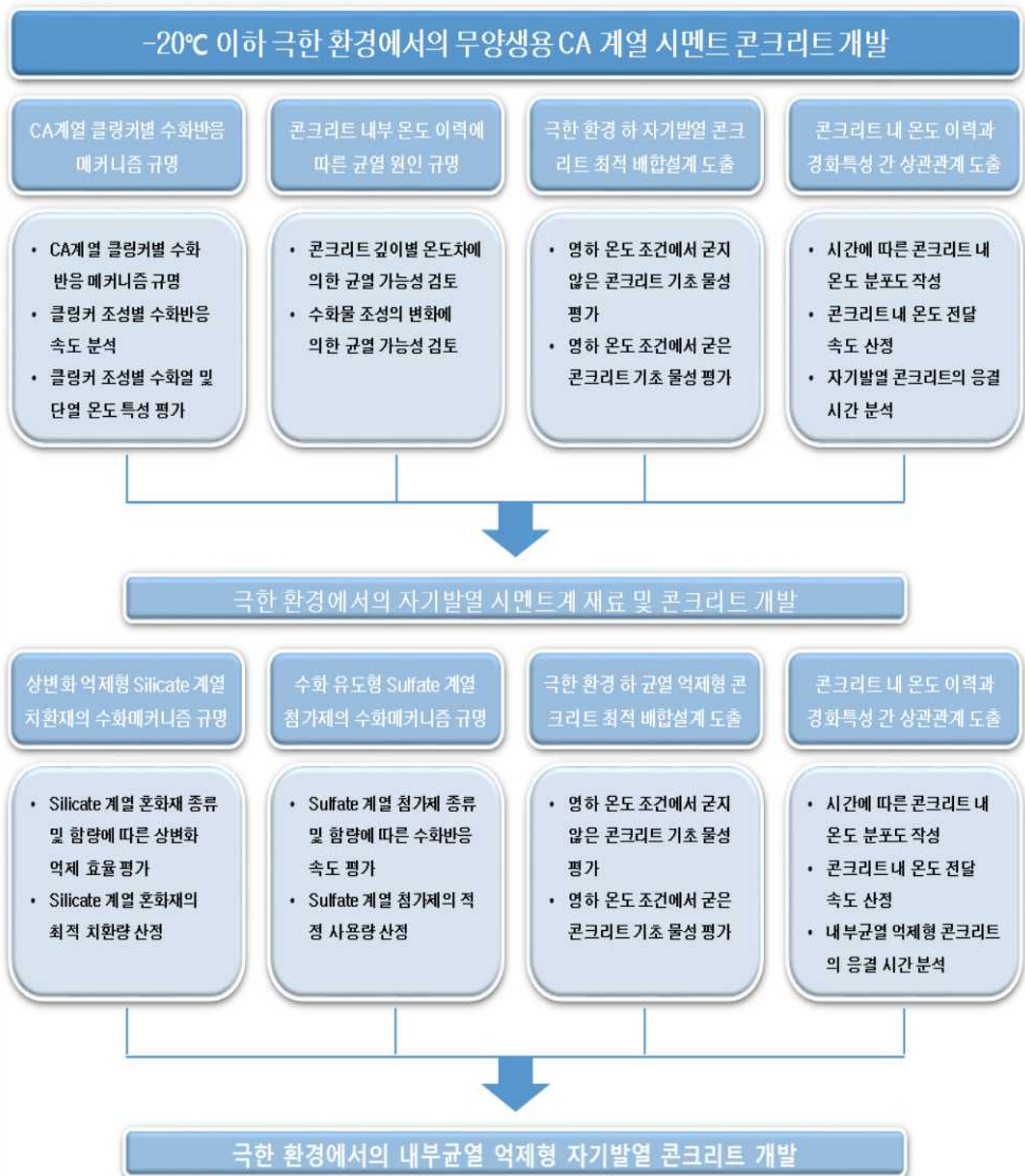
1.2.4 극한 환경에서의 건설재료에 관한 연구 부재

막대한 공사비의 증가를 방지하기 위한 방법으로 내한촉진제, 빙점강하제 등을 이용한 저온 환경에서의 수화반응 유도 기술과 클링커의 조성 개선, 높은 반응성을 지닌 혼화재 등을 사용한 저온 경화형 시멘트계 재료의 연구가 시도되었지만 효율성에 있어 아직 개발단계에 머물러 있으며 보온 양생 적용 없이 재료 특성만을 활용한 시공사례는 전무함.

결과적으로 본 연구에서 자기발열 콘크리트 개발을 통해 기존의 양생 의존적 시공에서 벗어나 재료 중심 시공으로, 극한 환경에서의 건설구조물 축조 시스템의 변화를 도모하고 전체 공사 비용저감 효과를 제고. 뿐만 아니라 내부 균열을 억제함으로써 콘크리트 강성을 향상시켜 구조물의 공용기간을 극대화시킴.

1.3 연구개발 범위

본 연구과제의 최종목표인 **-20℃ 이하 극한 환경에서의 무양생용 CA 계열 시멘트 콘크리트 개발**을 위한 전체 연구개발 범위 및 흐름은 다음과 같음.



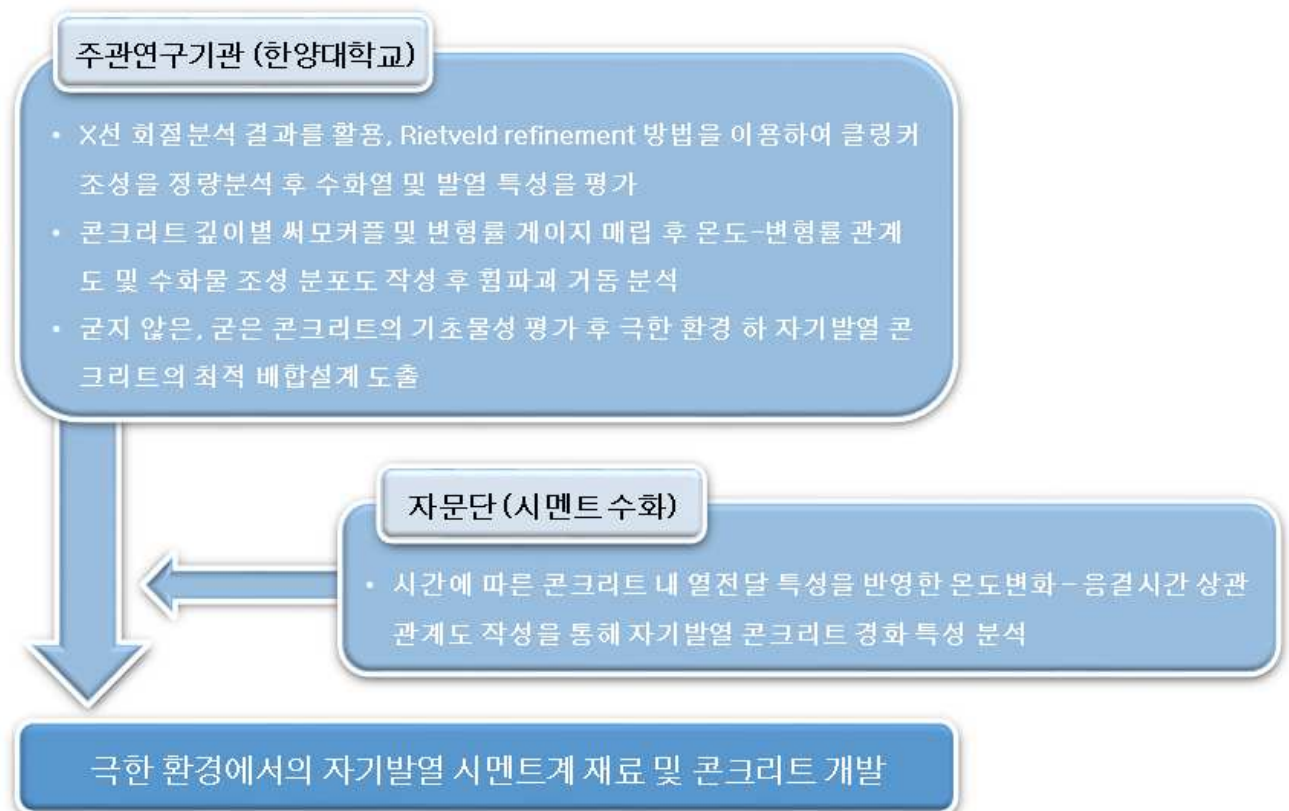
< 그림 1.6 연구 개발 흐름도 >

1.3.1 1차 연도

가. 개발 목표

	개발 목표	세부 개발 목표
주관연구기관 (한양대학교)	극한 환경에서의 자기발열 시멘트계 재료 및 콘크리트 개발	- CA계열 시멘트계 재료의 자기발열 (Self-heating) 성능 검증 - 콘크리트 내부 온도 이력에 따른 균열 원인 규명 - 극한 환경 하 자기발열 콘크리트 성능 평가를 통한 최적의 배합설계 도출 - 자기발열 콘크리트 내 온도 이력과 경화특성 간 상관관계 도출

나. 개발 내용 및 범위

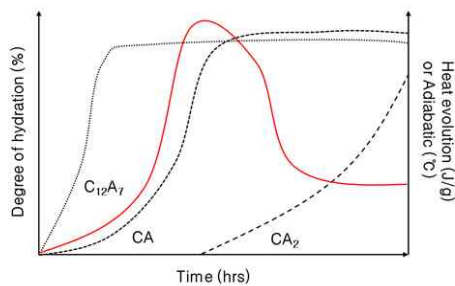


< 그림 1.7 1차 연도 시스템 구성도 >

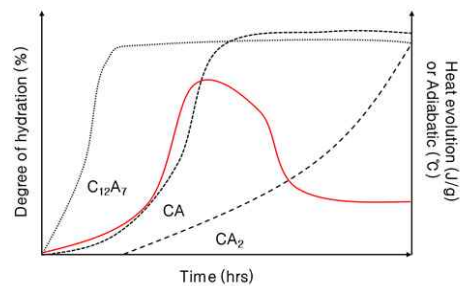
- CA계열 시멘트계 재료의 자기발열 (Self-heating) 성능 검증
 - CA 계열 클링커 별 수화반응 메커니즘 규명
 - 클링커 조성별 수화반응속도 분석
 - 클링커 조성별 수화열 및 단열 온도 특성 평가
- 콘크리트 내부 온도 이력에 따른 균열 원인 규명
 - 콘크리트 깊이별 온도차에 의한 균열 가능성 검토
 - 수화물 조성의 변화에 의한 균열 가능성 검토
- 극한 환경 하 자기발열 콘크리트 성능 평가를 통한 최적의 배합설계 도출
 - 영하 온도 조건에서 굳지 않은 콘크리트 기초 물성 평가 (슬럼프, 공기량, 응결시간)
 - 영하 온도 조건에서 굳은 콘크리트 기초 물성 평가 (휨, 압축강도)
- 자기발열 콘크리트 내 온도 이력과 경화특성 간 상관관계 도출
 - 시간에 따른 콘크리트 내 온도 분포도 작성 (Heat evolution mapping)
 - 콘크리트 내 깊이별 온도 전달 속도 산정
 - 자기발열 콘크리트의 응결 시간 분석

1. 클링커 조성비에 따른 내부발열 검증 (Q-XRD, Calorimetry, Thermocouple)

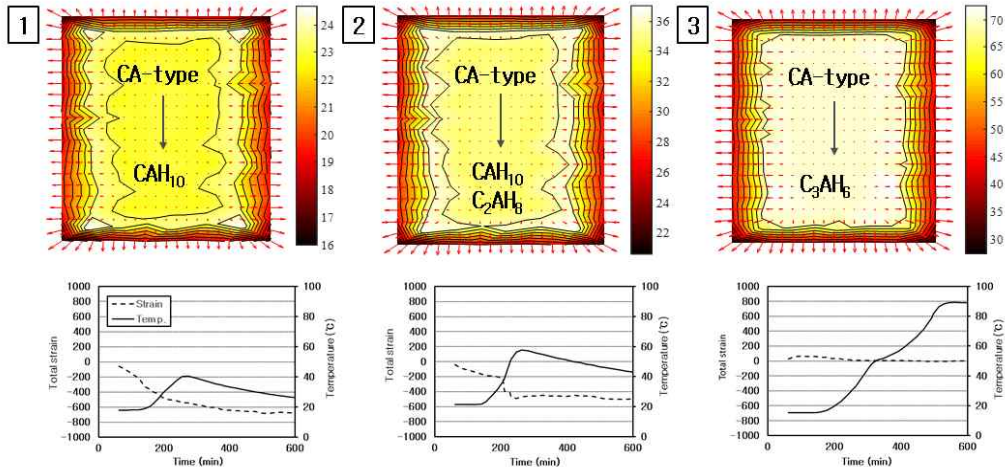
Scenario A
CA : CA₂ : C₁₂A₇ = x₁ : y₁ : z₁



Scenario B
CA : CA₂ : C₁₂A₇ = x₂ : y₂ : z₂



2. 깊이별 수화물 조성 및 균열 지점 예측 (XRD, Temperature, Strain)



극한 환경에서의 자기발열 시멘트계 재료 및 콘크리트 개발

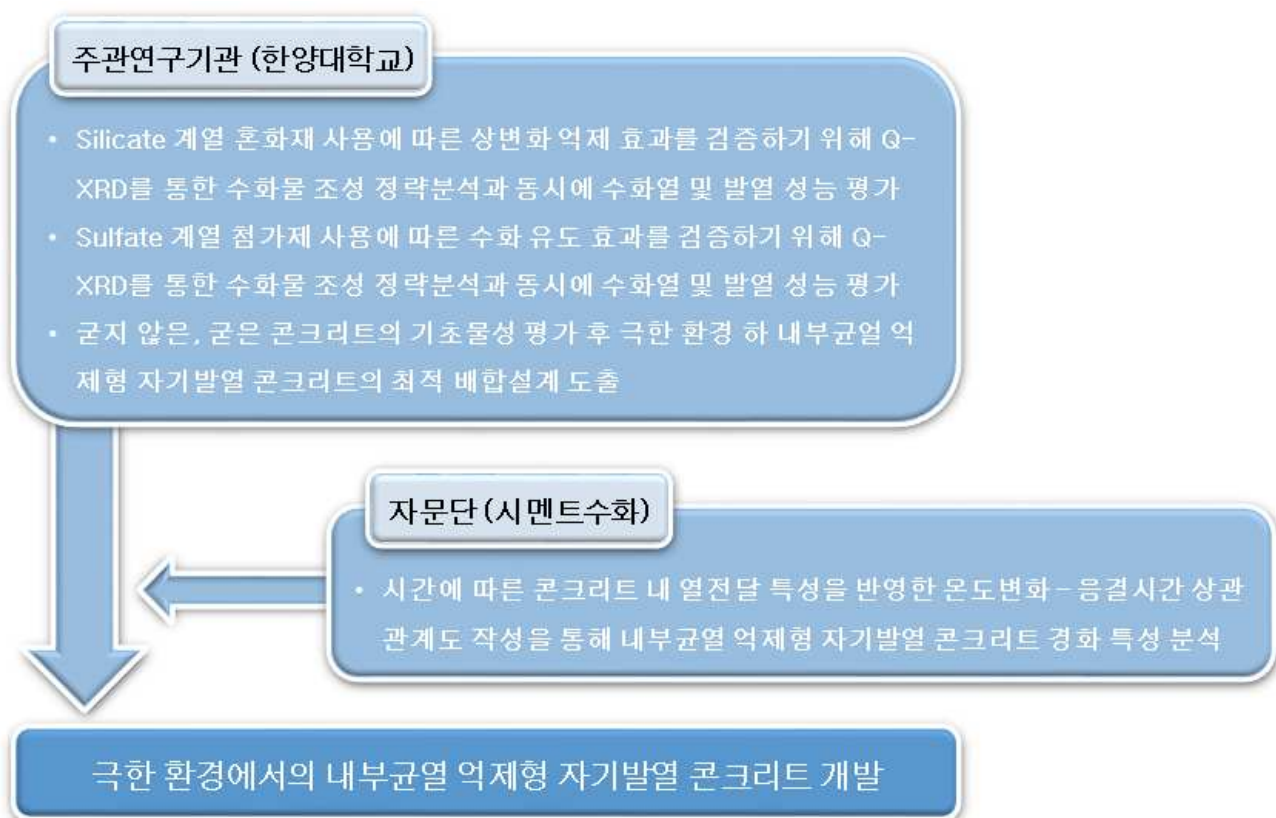
< 그림 1.8 1차 연도 개발 내용 모식도 >

1.3.2 2차 연도

가. 개발 목표

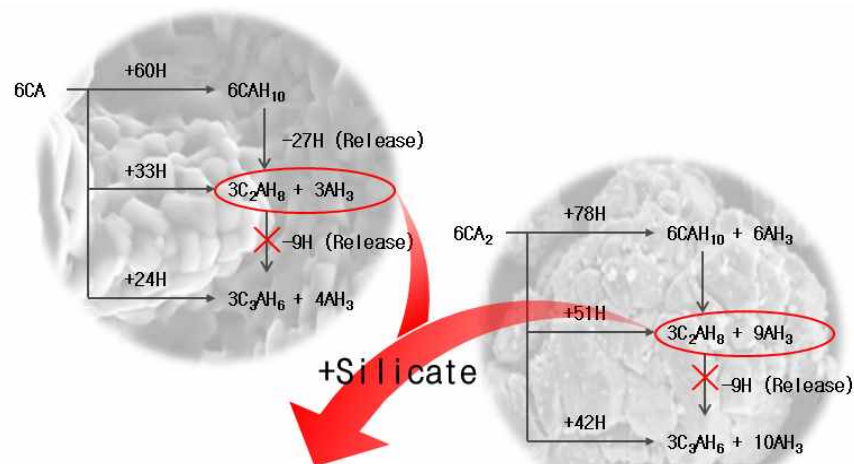
	개발 목표	세부 개발 목표
주관연구기관 (한양대학교)	극한 환경에서의 내부균열 억제형 자기발열 콘크리트 개발	- 상변화 (Conversion) 억제형 Silicate 계열 치환재의 수화 메커니즘 규명 - 수화 유도형 Sulfate 계열 첨가제의 수화 메커니즘 규명 - 극한 환경 하 내부 균열 억제형 자기발열 콘크리트 성능평가를 통한 최적 배합설계 도출 - 내부균열 억제형 자기발열 콘크리트 내 온도 이력과 경화특성 간 상관관계 도출

나. 개발 내용 및 범위

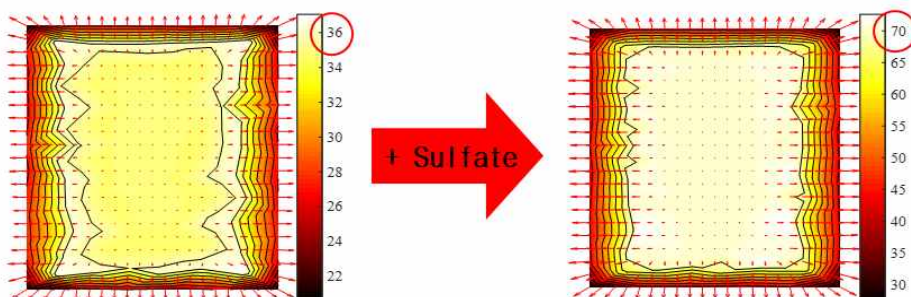


< 그림 1.9 2차 연도 시스템 구성도 >

- 상변화 (Conversion) 억제형 Silicate 계열 치환재의 수화 메커니즘 규명
 - Silicate 계열 혼화재 종류 및 함량에 따른 상변화 억제 효율 평가
 - Silicate 계열 혼화재의 최적 치환량 산정
- 수화 유도형 Sulfate 계열 첨가제의 수화 메커니즘 규명
 - Sulfate 계열 첨가제 종류 및 함량에 따른 수화반응 속도 평가
 - Sulfate 계열 첨가제의 적정 사용량 산정
- 극한 환경 하 내부 균열 억제형 자기발열 콘크리트 성능평가를 통한 최적 배합설계 도출
 - 영하 온도 조건에서 굳지 않은 콘크리트 기초 물성 평가 (슬럼프, 공기량, 응결시간)
 - 영하 온도 조건에서 굳은 콘크리트 기초 물성 평가 (휨, 압축강도)
- 내부균열 억제형 자기발열 콘크리트 내 온도 이력과 경화특성 간 상관관계 도출
 - 시간에 따른 콘크리트 내 온도 분포도 작성 (Heat evolution mapping)
 - 콘크리트 내 깊이별 온도 전달 속도 산정
 - 내부균열 억제형 자기발열 콘크리트의 응결 시간 분석



1. 상변화 억제를 통한 균열 방지



2. 첨가제를 통한 콘크리트 내부 온도 균등 분포 유도

극한 환경에서의 내부 균열 억제형 자기발열 콘크리트 개발

<그림 1.10 2차 연도 개발 내용 모식도>

제2장. 국내외 기술 개발 현황

2.1 국내현황

국내 한중콘크리트와 관련된 연구는 2000년대에 들어서 본격적으로 진행되었으며, 현재 보온양생 중심의 기술 개발과 함께 내한축진제 (빙점강하제, 고성능 감수제 등)의 사용을 병행하여 그 효율성을 극대화하는 방향으로 나아가고 있으나 시멘트 자체 특성을 이용한 연구는 미비함.

- 과거 한중콘크리트 시공 시 빈번히 사용되었던 가열 보온양생은 저조한 열효율 및 안전상의 문제로 인해, 최근 들어 부직포, PE필름 등 보양재를 이용하여 콘크리트 내 수화열을 이용한 단열 보온양생의 연구가 급격히 증가함.
- 영하 10℃의 조건에서 보통 포틀랜드 시멘트에 이중버블시트 단열 보온양생을 적용하였을 경우 약 20% 정도의 단열효과를 보였으며 약 50% 강도 증진 효과를 보였음. 또한 효율을 증가시키기 위해 가열공법을 병행하여 콘크리트 내부 온도를 5℃ 이상 유지하는 성과를 보임 (손호정, 2013).
- 경질 우레탄 보드를 사용한 단열강품의 경우 -10℃의 환경에서 표준양생시편 (20±2℃ 수중양생)의 압축강도에 재령일에 관계없이 50% 수준으로 나타남 (남경용, 2012)

구분	제목	이름
논문	이중버블시트의 포설 시공조건 변화에 따른 한중콘크리트의 단열보온 성능분석	한천구
	저온 조건에서 타설된 콘크리트의 보온 양생법 개발	손호정
	경질우레탄 보드를 접착한 강품 사용에 따른 콘크리트의 온도이력 및 강도발현 특성	남경용
	저온 양생조건에서 재령에 따른 압축강도 변화에 관한 실험	이승국
특허	콘크리트 양생용 단열강품	강인선
	한중 콘크리트 양생용 조립형 전기발열시트 및 이를 이용한 한중 양생공법	박천진
과제	친환경성 및 에너지 저감형 단열 시스템 거푸집 개발	정상진
	기밀성과 단열성능이 우수한 한중콘크리트 가열보온양생용 양생막 개발	한천구
	내한축진제를 사용한 한중콘크리트의 단열보온양생용 열판 거푸집 개발	최광호

- 저온 환경 하에서 콘크리트의 수화 유도를 위해 저알칼리형 내한축진제를 사용한 경우 5 MPa 이상 강도차이를 보임. 하지만 현장과 실험실 간 83%가량 압축강도의 차이가 나타남 (원철, 2006).
- 칼슘계 혹은 리튬계 내한축진제는 영하의 온도에서 초기 발열 반응을 유도하여 초기 동해를 방지하고 최고 온도에 도달하는 시간을 단축함. 거푸집 해체 요구강도인 5 MPa에 도달하는 시간은 평균 3일로 나타남 (임동한, 2017).

구분	제목	이름
논문	내한축진제를 사용한 한중콘크리트의 실구조물 적용에 관한 연구	김영진
	내한축진제를 사용한 한중콘크리트의 현장적용 사례	원철
	조강형시멘트를 사용한 저온경화형 모르타르의 압축강도 및 유동특성에 미치는 방동제, 내한축진제 및 감수제의 영향	박정훈
특허	발열 콘크리트용 내한축진제 조성물	임동한
과제	PVA 분말 코팅법에 의한 콘크리트용 혼화제의 작용시간조절 연구	류재석
	고기능성 콘크리트 제조를 위한 Polycarboxylate계 및 Amine계 고성능 유동화제의 합성 및 응용	송재빈

- 마그네시아 (MgO)와 제1인산암모늄 (MAP)을 결합재로 사용하여 -15℃에서 압축강도를 실험한 결과, 3시간 내에 10 MPa에 도달하는 것을 알 수 있음. 하지만 너무 빠른 응결 시간 (종결 시간 10분 내외)을 가지며 지연체를 사용할 경우 최대 30분까지 연장시킬 수 있음 (조현우, 2013).
- 자기발열 특성을 지닌 탄소나노튜브를 첨가한 실리카폼 모르타르 (치환량 20%)의 내부 발열량은 인가전압에 따라 최대 110℃까지 상승함 (이행기, 2015).
- C₃A 클링커의 함량을 조절하여 개발된 시멘트의 경우 **-5℃ 환경에서 3일 배합설계에 따라 최대 10 MPa**의 압축강도를 확보하였으며 약 50℃까지 내부온도가 상승하는 것을 알 수 있음 (최현국, 2015).

구분	제목	이름
논문	양생온도를 고려한 극한지용 초속경 건설재료 개발	조현우
특허	도로 용성용 자기발열성 시멘트 복합체	이행기
	자기발열 슬래그를 포함한 시멘트 조성물, 이를 포함한 한중 콘크리트 조성물 및 이를 이용한 구조물의 시공방법	최현국
	입도분급 고분말도 시멘트를 포함하는 혼합 시멘트 조성물 및 이를 이용하는 한중 콘크리트 조성물	최현국
과제	극한환경 대응 재료 및 급속시공기술 개발	신협섭

2.2 국외현황

국외의 경우, 국내와 크게 다르지 않은 실정으로 -5 ~ 0℃의 온도조건에서 한중콘크리트와 관련해 혼화제 및 보온 양생방법의 연구가 주를 이루고 있으며, 사용된 재료 역시 포틀랜드 시멘트 혹은 포졸란계열의 혼화재로 국한됨. 최근 들어 발열 시멘트와 관련된 연구가 보고 되었으나 아직 초창기 개발단계이며, 다만 제작된 콘크리트의 구조 실험 (휨, 부착 및 압축 강도)을 실시하여 강성의 연구가 병행되었다는 특징이 있음.

구분	제목	이름
논문	Bonding properties between reinforcement and concrete at cryogenic temperatures	Li, H.J.
	A comparative study on the performance of limestone – blended cement mortars exposed to cold curing conditions	Felekoglu, B.
	Effects of cold regions climate on the tensile strengths of aged composite reinforcing bars	Dutta, P.K.
	Sprayed concrete on frozen ground	Eddie, C.
특허	Evaluation of effect of chemical admixtures on the performance of cement–stabilized materials in cold weather	Wang, J.
	Evaluation of fresh properties of Self–Consolidating concrete under long transportation time and extreme temperature	Francais
	Curable hydraulic binder–based cement material intended to be used at low temperatures	Ghafoori, N.

제3장. 연구수행내용 및 성과

3.1 극한 환경에서의 자기발열 시멘트계 재료 및 콘크리트 개발

3.1.1 CA계열 시멘트계 재료의 자기발열 성능평가

가. X선 정량분석을 통한 클링커 조성 분석

시멘트 내 클링커는 물과 반응하여 열을 발생시키고, 해당 수화열은 클링커 종류에 따라 상이한 경향을 나타낸다. 일반적으로 사용되는 포틀랜드 시멘트 (Portland cement; PC)의 경우 alite (Ca_3SiO_5 ; C_3S), belite (Ca_2SiO_4 ; C_2S), calcium aluminate phase ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$; C_3A) 및 calcium alumino-ferrite phase ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$; C_4AF) 클링커를 함유하고 있으며, 이 중 C_3A 클링커는 많은 양의 수화열을 방출하며 (표 3.1), 초기 반응 (24시간 이내)에서 수화열은 C_3S 와 C_3A 의 함량에 따라 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (Neville, 1995; Winter, 2009).

표 3.1 클링커 종류 별 수화열 (Neville, 1995)

Clinker	Heat of hydration	
	J/g	cal/g
C_3S	502	120
C_2S	260	62
C_3A	867	207
C_4AF	419	100

포틀랜드 시멘트와는 달리 알루미나 시멘트 (Calcium aluminate cement; CAC)의 경우 PC의 클링커 조성과 달리 종류에 따라 CA , CA_2 , C_{12}A_7 , C_2AS 클링커로 구성되어 있다 (표 3.2). 이 중 CA 클링커의 경우 CAC 종류와 상관없이 공통적으로 함유되어 있으며, 대부분의 수화열을 담당하고 있다. 특히, C_{12}A_7 의 경우 물과의 반응성이 높아 초기 반응열에 많은 기여를 하는 것으로 알려져 있다 (Lea and Hewlett, 2003).

극한 환경에서의 시공성 및 성능을 확보하기 위해서 사용되는 건설재료는 초기 시공단계 중 콘크리트 및 외부 등 온도가 중요한 요인으로 작용한다. 시공 초기 낮은 온도로 인해 콘크리트의 동결이 이루어지면 응결 및 경화 지연, 불안정한 강도발현 등 콘크리트 물성에 악영향을 미칠 수 있다. 그러므로 이러한 피해를 방지하기 위해서는 영하의 온도에서도 안정적인 발열을 유지하는 최적의 시멘트 클링커 조성을 파악하여 자기발열 시멘트재료를 개발하는 것은 초기 동해 피해를 최소화함과 동시에 장기적 관점에서의 콘크리트 구조물의 안정성 확보에 큰 기여를 할 수 있다.

상기 목적을 달성하는데 있어 자기발열 시멘트계 재료 3종류의 화학성분 분석을 위해 X선 형광분석 (X-ray fluorescence; XRF)를 실시하였다. 분말도 및 비중은 규정 “KS L 5106:2009 공기 투과 장치에 의한 포틀랜드 시멘트의 분말도 시험방법” 및 “KS L 5201:2016 포틀랜드 시멘트”에 의거하여 측정하였고, 해당 결과를 표 3.2와 같다.

표 3.2 사용된 재료의 물리적 특성 및 화학적 조성

	Type I	Type II	Type III
CaO	38.96	38.83	32.01
Al ₂ O ₃	39.22	52.03	67.25
SiO ₂	4.34	5.02	0.11
Fe ₂ O ₃	14.56	0.86	0.08
Oxides (%)			
SO ₃	0.18	0.09	0.01
MgO	0.47	0.42	0.21
K ₂ O	0.20	0.68	0.01
Na ₂ O	0.06	0.17	0.28
MnO	0.22	0.03	0.02
Fineness (cm ² /g)	4,380	5,150	4,800
Density	3.24	3.03	2.92

이후 시멘트 내 클링커 조성을 파악하기 위해 X선 회절분석 (X-ray diffraction; XRD) 및 리트벨트법 (Rietveld method) 이용한 정량분석을 진행하였다. XRD은 측정 각 5-55° 및 측정 범위 0.4° /분의 조건으로 실시하였다. 측정된 XRD 회절 패턴을 바탕으로 리트벨트법을 이용한 정량분석을 실시하였다. 리트벨트법은 해당 시멘트 내 클링커의 결정구조정보 (Crystal structure data)를 활용하여 이론적으로 재현한 회절패턴과 관측값 (XRD 실험결과)을 최소자승법을 이용한 회귀분석을 통해 오차가 최소가 되는 값을 구하는 것으로 각 물질의 함량을 정량적으로 계산할 수 있다. 계산에 사용된 결정구조정보는 ICSD 및 ICDD로부터 취득하였으며, 계산의 타당성 확보를 위해 문헌의 실험조건이 1 atm, 273-295 K인 것만 선택하였다 (표 3.3). 또한, 해당 방법은 사용자의 숙련도에 따라 결과 값이 상이할 수 있으나 Refinement 신뢰성 지표를 통해 검증이 가능하며, 해당 지표는 식 3.1을 통해 계산하였고, 해당과정은 다음과 같다.

Step 1. XRD 회절 패턴 배경 추출 (Background Extraction)

XRD 회절의 정량 분석에서 정확한 배경 값의 추출은 관측된 패턴에서의 노이즈를 최소화시키는 과정으로 향후 분석 결과 값의 정확도와 관련이 있다. 배경 값은 해당 측정 각에서의 피크 값 (I_{calc}) 계산 시 경계 조건 값으로 사용되며, 이에 대한 오차는 해당 영역의 수화물 또는 클링커의 정량 분석 값의 과대/과소평가 (Overestimation/Underestimation)를 야기한다. 배경 추출은 MATCH! 3 (Crystal Impact) 및 Profex (Nicola Döbelin) 프로그램을 이용하여 다음과 같이 실시한다.

Profex

- 1) XRD 회절 관측 값 입력
- 2) 클링커 및 수화물 정보 입력
- 3) 리트벨트 보정 (Refinement) 실시 (초기 설정 값 이용)
- 4) 배경 값 추출

표 3.3 ICSD 및 ICDD로부터 추출된 XRD 기준 자료 (Guirado and Gali, 2006; Salvador, 2006)

Clinker	Main peak* (° of 2θ)	ICSD**	ICDD***
AM	–	97180	01-072-7280
C ₁₂ A ₇	18.14	62040	01-087-0970
C ₂₀ A ₂₆ M ₃ S ₃	31.02	26353	07-074-0695
C ₂ AS	31.4	82706	01-078-0910
C ₃ FT	33.28	203100	01-084-2068
C ₄ AF	33.72	9197	01-071-0667
CA	30.1	260	01-078-0134
CA ₂	25.5	16191	01-072-0767
CT	33.36	31865	01-075-2100
F	35.41	64599	01-072-2303
fF	–	20596	01-077-2355
β-C ₂ S	32.2	963	01-078-0388

* Derived from ICDD data

** Inorganic crystal structure database

*** International center for diffraction data

MATCH! 3

- 1) Profex 프로그램으로부터 추출된 배경 값 입력
- 2) Flexibility 최댓값 적용
- 3) Fullprof 배경 포맷으로 변환 및 저장

Step 2. 리트벨트법 (Rietveld refinement) 실시

리트벨트법을 이용한 XRD 회절 정량분석은 입력된 클링커 및 수화물의 계산된 XRD 회절 패턴의 값의 합을 해당 영역의 관측 값과 비교하여 최소오차를 가질 때까지 입력 데이터의 결정구조정보를 조정하고, 이때의 화합물 조성비를 계산하는 방법이다. 이 방법의 과정은 표준화되지 않았지만, 많은 연구자들에 의해 오랜 시간동안 검증되었다. 정량화를 위한 리트벨트법은 배경 추출에서 사용된 프로그램을 이용하여 다음과 같이 실시한다. 이때 계산 값의 이상 수렴을 방지하기 위해 조정할 변수 (Scale factor 및 Unit Cell parameter)의 범위를 초기 값의 1% 미만, 조정 횟수는 3회 미만으로 제한한다.

MATCH!3

- 1) XRD 회절 관측 값 입력
- 2) 배경 값 입력
- 3) 클링커 및 수화물 정보 입력

- 4) 기준 화합물 (Internal standard, TiO_2) 설정
- 5) 클링커 및 기준 화합물의 결정구조정보 조정
 - 5-1) Scale factor 조정
 - 5-2) Cell parameter 조정
- 6) 수화물의 결정구조정보 조정
 - 6-1) Scale factor 조정
 - 6-2) Cell parameter 조정
- 7) 각 화합물의 조정된 결정구조정보 저장

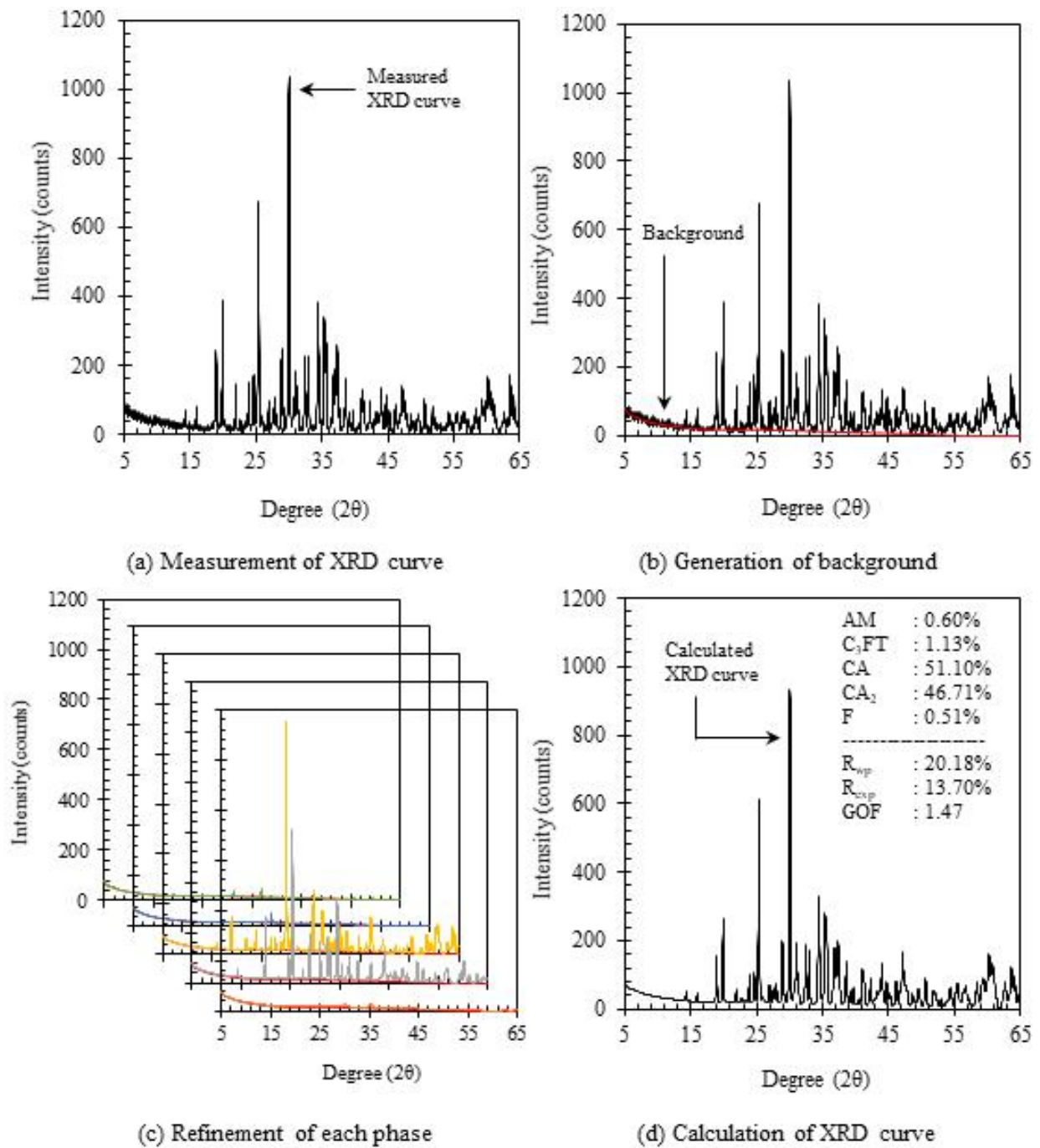
Profex

- 1) 조정된 결정구조정보의 Profex 포맷으로 변환
- 2) 클링커 및 수화물 정보 입력
- 3) 기준 화합물 및 해당 함량 설정 (TiO_2 , 5%)
- 4) Profile 변수 설정
- 5) 리트벨트법 실시

결과 값의 신뢰도는 아래 식에 나타난 지수 (Agreement index)를 통해 확인할 수 있다. 이 때, GOF 값이 1.0 가까울수록 계산된 결과가 신뢰할만하다고 할 수 있으며, 다양한 화합물로 이루어진 세라믹 즉, 시멘트의 경우 1.5 부근의 값도 유의미하다.

$$GOF = \frac{R_p}{R_{exp}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\sum w_i (y_{i,obs} - y_{i,calc})^2}{\sum w_i (y_{i,obs})^2} \right)}}{\sqrt{\left(\frac{(N-P)}{\sum w_i (y_{i,obs})^2} \right)}} \quad (\text{식 3.1})$$

여기서, w_i 는 가중치 ($\frac{1}{y_{i,obs}}$), $y_{i,obs}$ 는 i지점에서의 관측 값, $y_{i,calc}$ 는 i지점에서의 계산 값, N은 지점의 수, P는 적용된 변수의 수이다. 다음 그림 3.1은 리트벨트법을 이용한 XRD 정량분석의 예시이다.



< 그림 3.1 리트벨트법을 이용한 시멘트 내 클링커 조성의 XRD 정량분석 예시 >

다음 표 3.4는 자기발열 시멘트 종류에 따른 클링커 조성의 리트벨트법을 이용한 XRD 정량분석 결과를 나타낸 것이다. 예상한 바와 같이 공통적으로 CA 클링커가 포함되어 있으며, 시멘트 종류별 각 함량은 Type I 47.5%, Type II 70.3% 및 Type III 51.1%였다. 또한 높은 초기 반응성을 지닌 $C_{12}A_7$ 클링커의 경우, Type I과 II에 함유되어 있는 것을 알 수 있다. Type II의 경우 C_2AS 클링커가 약 20% 가량 존재하는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 물과의 반응이 느려 초기 수화열 및 강도 발현에는 영향을 끼치지 못할 것으로 예상되었다 (Gosellin, 2009). 마찬가지로 Type III 내 CA_2 클링커 역시 초기 반응성이 매우 낮으므로 초기 발열량과 연관이 없을 것으로 판단되었다.

표 3.4 리트벨트법을 이용한 XRD 정량분석에 따른 자기발열 시멘트의 클링커 조성 (%)

		Type I	Type II	Type III
Clinker	AM	1.1 ± 0.2	1.7 ± 0.1	0.6 ± 0.1
	$C_{12}A_7$	9.7 ± 0.6	2.2 ± 0.5	-
	$C_{20}A_{26}M_3S_3$	-	0.2 ± 0.1	-
	C_2AS	6.7 ± 0.4	19.5 ± 0.6	-
	C_3FT	1.9 ± 0.4	0.6 ± 0.3	1.1 ± 0.1
	C_4AF	11.0 ± 0.6	-	-
	CA	47.5 ± 0.6	70.3 ± 0.7	51.1 ± 0.4
	CA_2	-	-	46.7 ± 0.4
	CT	7.0 ± 0.5	3.2 ± 0.3	-
	F	1.3 ± 0.3	-	0.5 ± 0.1
	fF	2.3 ± 0.1	-	-
	$\beta-C_2S$	11.5 ± 0.6	2.5 ± 0.5	-
Agreement index	GOF	1.22	1.33	1.47

본 실험 결과를 통해 극한 환경에서 사용 가능한 자기발열 시멘트 3종류의 클링커 조성을 정량 평가하였다. CAC의 경우 수화반응 속도가 빠른 즉, 반응성이 높은 CA계열 클링커로 이루어져있고, 이로 인한 발열로 영하 이하의 온도에서 별도의 보온양생 없이 안정적인 수화반응을 할 수 있고, 또한 빠른 초기강도 발현의 성질을 이용하여 거푸집 해체시기를 앞당길 수 있을 것으로 예상되어 해당 재료를 사용하였다. 다만 낮은 온도에서 생성된 불안정한 수화물의 상변화 (Conversion)로 인한 균열, 강도저하 등의 부작용을 보일 수 있으므로 이에 대한 평가가 적절히 이루어져야 할 것으로 판단되었다.

나. 미소수화열량계를 통한 수화열 특성 평가

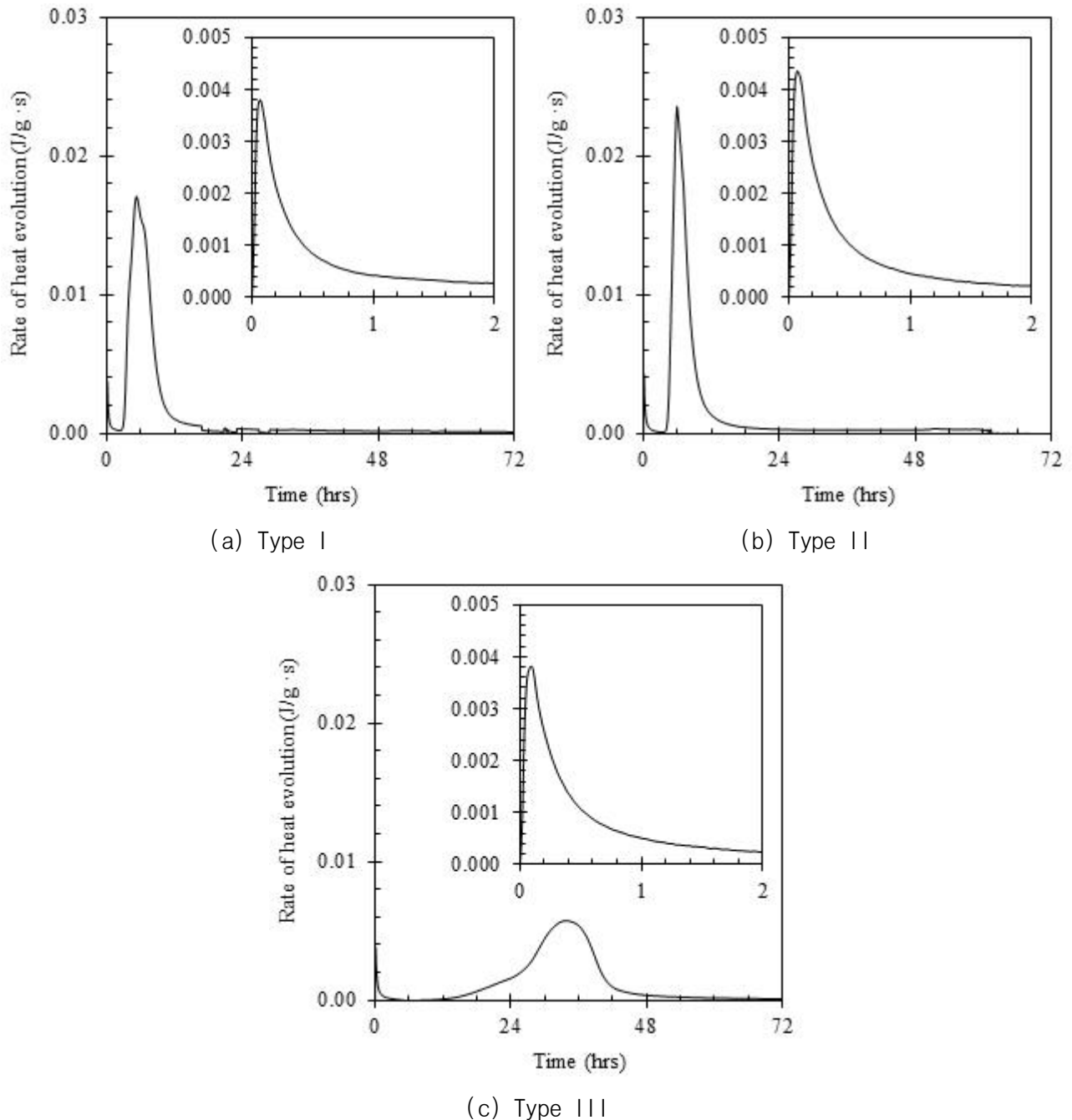
CA계열 자기발열 시멘트의 수화반응성을 확인하기 위해 그림 3.2와 나타낸 것과 같이 미소수화열량계 (Three-point Multi-Purpose Conduction Calorimeter, Tokyo-Riko Co., Ltd.)를 활용하여 수화열을 측정하였다. 일반적으로 CAC를 사용하는 경우, 물-시멘트비의 증가는 누적 단위수화열량의 증가를 야기한다. Gosellin et al. (2010)의 실험결과에 따르면, 물-시멘트비가 증가할수록 제 1 피크점 또는 제 2 피크점에서의 단위수화열량은 비슷하나 24시간 기준 누적 단위수화열량은 점진적으로 증가한다고 보고하였다. 하지만, CAC의 배합설계에서 물-시멘트의 증가는 수화기간 동안 상변화로 인한 강성 저하의 영향성 또한 커지므로 높은 물-시멘트비의 사용은 피해야한다 (Neville, 1995; The Concrete Society, 1995; Lea and Hewlett, 2003). 따라서, 본 실험에서의 물-시멘트비는 발열량을 충분히 발현함과 동시에 상변화의 영향을 최소화시키기 위해 “BS EN 14647:2005 Calcium aluminate cement - composition, specifications and conformity criteria”에 따라 물-시멘트비를 0.4로 설정하여 대략 10 g의 시멘트로 실험을 진행하였다. 장비의 한계로 0℃의 온도조건에서 72시간 동안 측정하였으며, 클링커 조성에 따른 단위열량을 확인하기 위한 실험이므로 위 조건은 타당한 것으로 판단되었다.



< 그림 3.2 3점식 미소수화열량계 >

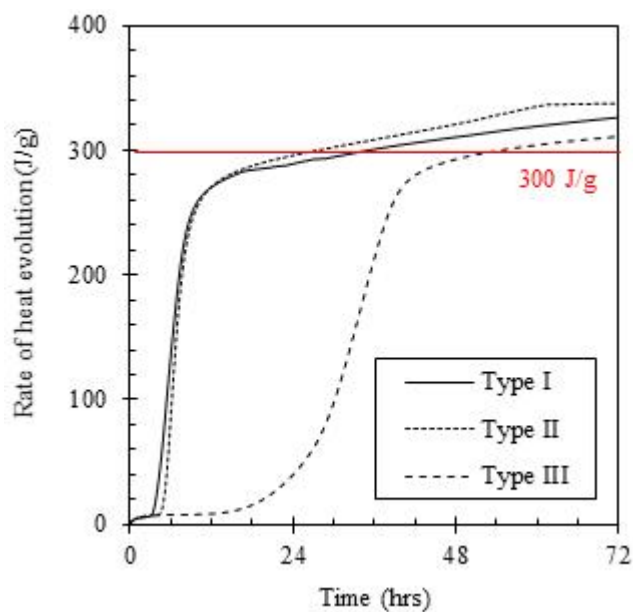
다음 그림 3.3은 클링커 조성에 따른 자기발열 시멘트의 시간에 따른 단위수화열량을 나타낸 것이다. 실험 결과는 시멘트 종류와 관계없이 제 1 피크점이 생성되는 것을 보였다. 이는 공통적으로 함유된 CA 클링커의 역할인 것으로 사료된다. 이 기간 동안 CA 클링커는 CA^{2+} 및 $Al(OH)_4^-$ 로 이온화되어 용액 (공극수) 내 해당 이온의 농도가 최대치로 도달한다. 이후 이온 농도 임계치 (Critical or threshold concentration level) 또는 온도/습도 환경에 따라 CAH_{10} , C_2AH_8 및 C_3AH_6 등 다양한 수화물을 생성하게 된다 (Rodger and Double, 1984; Barret et al., 1974a; Barret et al., 1974 b). 따라서, 지속적인 수화물 생성으로 인해 클링커의 용해와 평형을 이루면서 제 2 피크점에 도달하기 전까지 유도기를 형성하게 된다. 이러한 유도기는 시멘트 내 클링커 조성에 따라 상이한 것으로 나타났다. 다량의 CA 클링커를 함유하고 있는 Type II의 짧은 유도기의 경우 예상한 결과이지만, 이와 반대로 Type I은 적은 양의 CA 클링커 함량에도 불구하고 제 2 피크점까지 도달하는 시간이 가장 짧은 것을 알 수 있었다. 이는 초기 반응성이 매우 높은 $C_{12}A_7$ 을 함유하고 있기 때문인 것으로 판단되었다. Type III의 경우 CA 클링커를 50% 이상

함유하고 있음에도 제 2 피크점까지 도달하는 시간이 상당히 지연되는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 CA_2 클링커로 인한 반응성 저하 영향으로 판단되었다. Klaus (2013)에 따르면 시멘트 내 CA 와 CA_2 클링커가 함께 존재하는 환경에서 CA_2 클링커는 일정량 이상의 CA 클링커가 소모될 때까지 반응성을 나타내지 않으며, 또한 CA 클링커 역시 반응이 지연되는 현상을 나타낸다고 하였다. 이로 인해 해당 시멘트로 콘크리트 구조물 제작 시 초기 수화열의 방출로 인한 초기 동해 방지 등의 이점을 보기 힘들 것으로 판단되었다.



< 그림 3.3 CA계열 자기발열 시멘트의 시간에 따른 단위수화열량 >

그림 3.4는 물과의 반응 이후 72 시간 동안의 누적 단위수화열량을 나타내고 있다. 해당 수화시간 동안 시멘트 종류와 관계없이 모두 300 J/g을 초과하였고, 특히 표 3.5에 나타내었듯이 24시간동안의 누적 단위수화열량에서 Type II의 경우만 300 J/g에 도달하는 것을 알 수 있었다. 위 실험 결과를 통해 CA 계열 클링커의 초기 반응성이 높아 다량의 열을 방출하는 것을 알 수 있었고, 이는 자기발열 시멘트로써의 활용이 적합한 것으로 판단되었다.



< 그림 3.4 CA계열 자기발열 시멘트의 시간에 따른 누적 단위수화열량 >

표 3.5 CA계열 자기발열 시멘트의 24시간 누적 단위수화열량 (J/g)

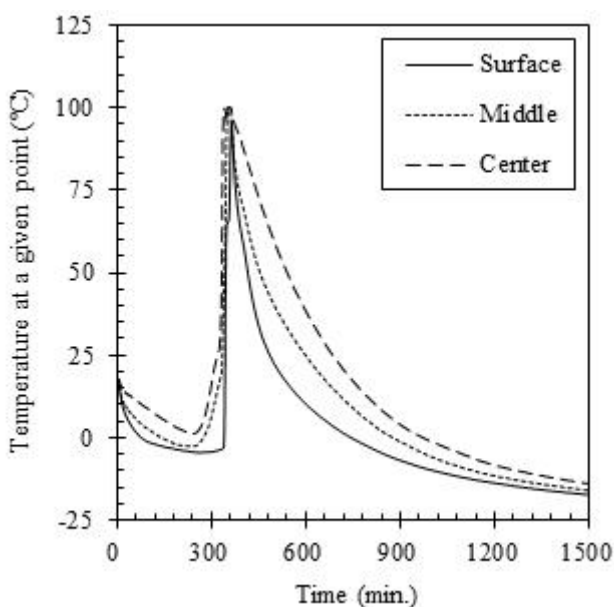
	Type I	Type II	Type III
누적 단위수화열량	289.17	305.98	40.02

다. 매립형 열전대를 통한 발열성능 평가

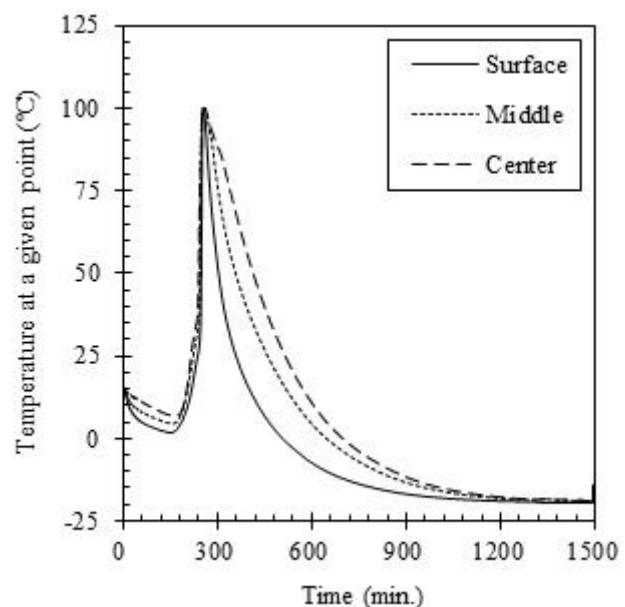
본 연구에서의 주어진 조건 즉, -20°C 의 환경에서의 시멘트 수화반응 및 강도 발현을 위해 자기발열 시멘트의 안정적인 발열은 필수적이다. 기존 한중콘크리트의 경우 보온 양생 및 방한촉진제 등 콘크리트 이외에 부수적인 요소들이 요구되었으며 이는 공사기간, 부대비용 등 경제적 이익을 저하시키는 요인으로 작용하였다. 이에 물과 반응하여 시멘트 자체적으로 열을 발산하는 재료를 도입함으로써 기술적 한계를 극복하고자 하였다.

CA계열 자기발열 시멘트 종류별 발열성능 평가를 위해 -20°C 극저온 챔버에서 시공 현장을 재현하기 위해 $15 \times 15 \times 60$ cm 목재 거푸집 이용하여 페이스트 시편을 제작하였다. 배합설계는 미소수화열량계 실험과 동일하게 물-시멘트비 0.4로 설정하였으며, 표면부, 중심부 및 두 지점 간 중앙점에 열전대 (Thermo-couple, K-type)를 매립하여 24시간 동안의 발열 성능을 확인하였다. 또한 시편 크기 에 따른 시편 내 발열량 변화를 비교, 분석하기 위해 같은 조건에서 $10 \times 10 \times 40$ cm 목재 거푸집을 이용하여 페이스트 시편을 제작하여 동일한 실험을 진행하였다.

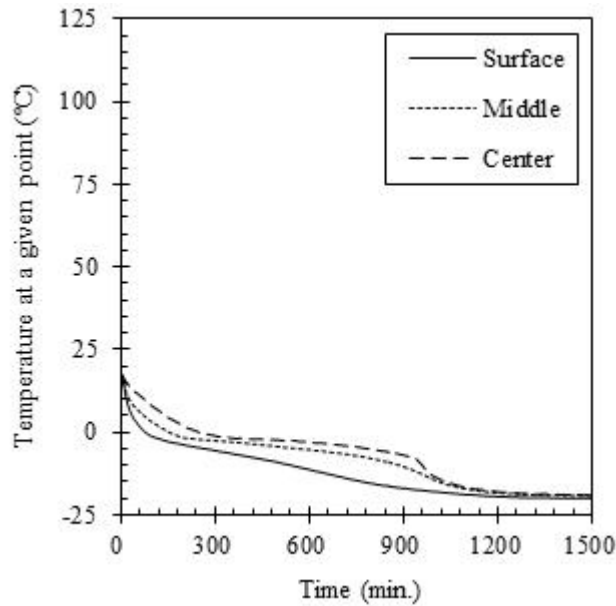
그림 3.5는 -20°C 환경에서 자기발열 시멘트 페이스트 내 3 지점에서의 시간에 따른 온도 변화를 나타낸 것이다. Type I 및 II 시멘트의 경우, 위치에 관계없이 시간이 지남에 따라 시편 내 온도는 100°C 에 도달하였다. 이때, 중심부에서의 최고점까지 도달하기까지의 시간은 Type I의 경우 355분, Type II는 252분이 소요되었다. 또한, CA 클링커 함량이 높은 Type II의 경우 중심부에서부터 시작된 발열이 표면부로 도달하는 시간의 차가 매우 적은 것을 알 수 있었는데, 이를 통해 온도에 따라 생성되는 수화물 종류가 다른 CA계열 시멘트에서 위치별 또는 깊이별 수화물 조성이 다르지 않고 이에 따른 내부 균열의 위험이 낮음을 유추할 수 있다. 반면, Type III 시멘트의 경우 동일한 온도 환경에서 내부 온도의 증가 없이 점진적으로 내려가는 것을 확인할 수 있었는데 이는 미소수화열량계 실험결과와 동일한 경향임을 알 수 있었다. 저온 환경에서 시멘트 내 CA_2 클링커의 존재는 CA 클링커의 수화 촉진을 방해하여 충분한 발열 성능을 확보하는데 적합하지 않은 것으로 밝혀졌다.



(a) Type I



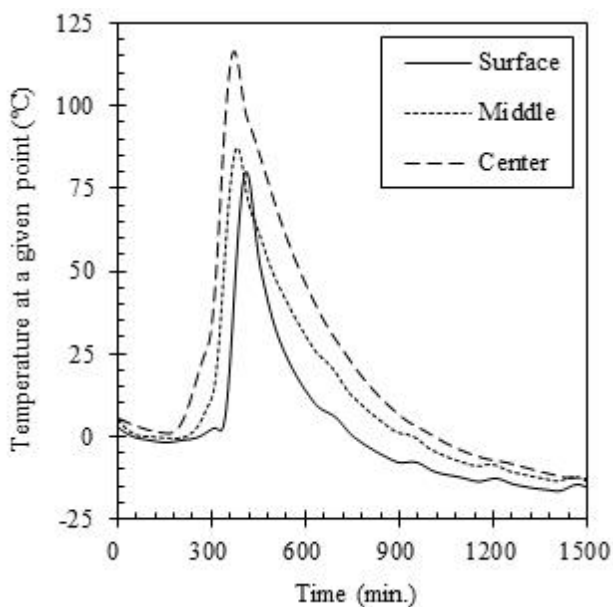
(b) Type II



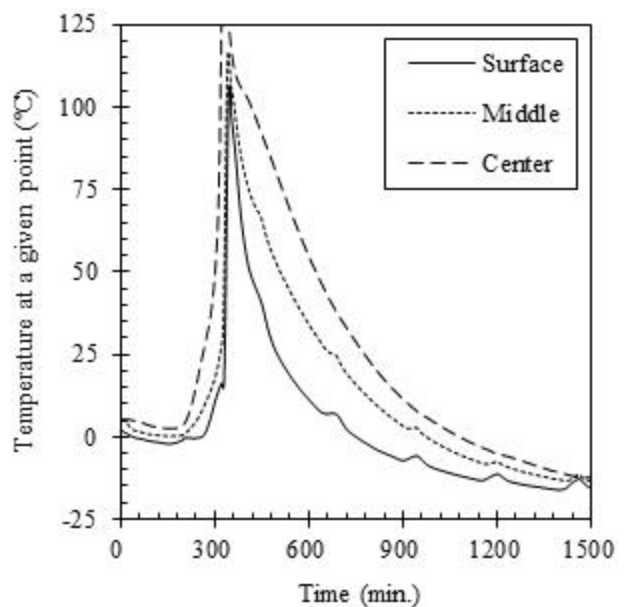
(c) Type III

< 그림 3.5 CA계열 자기발열 시멘트의 시간에 따른 발열 성능 >

시편 크기에 따른 발열 성능 변화를 확인하기 위해 가장 안정적인 발열 성능을 보여준 Type II 시멘트를 이용하여 동일한 조건에서 10×10×40 cm의 시편을 제작하여 실험을 진행하였고, 결과는 그림 3.6과 같다. 중심부에서의 온도 및 최고점까지의 도달 시간은 비슷하였으나 (최고점 온도의 차이는 측정 장비의 설정 값에 따라 100°C에서 125°C로 변경됨) 나머지 두 지점에서 충분한 발열성능을 발휘하지 못하는 것을 알 수 있었다. 또한 중심부-표면부간 온도 전달이 상대적으로 느린 것을 확인하였는데, 이는 시편 크기의 감소로 인해 외기의 영향성이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.



(a) 10×10×40 cm



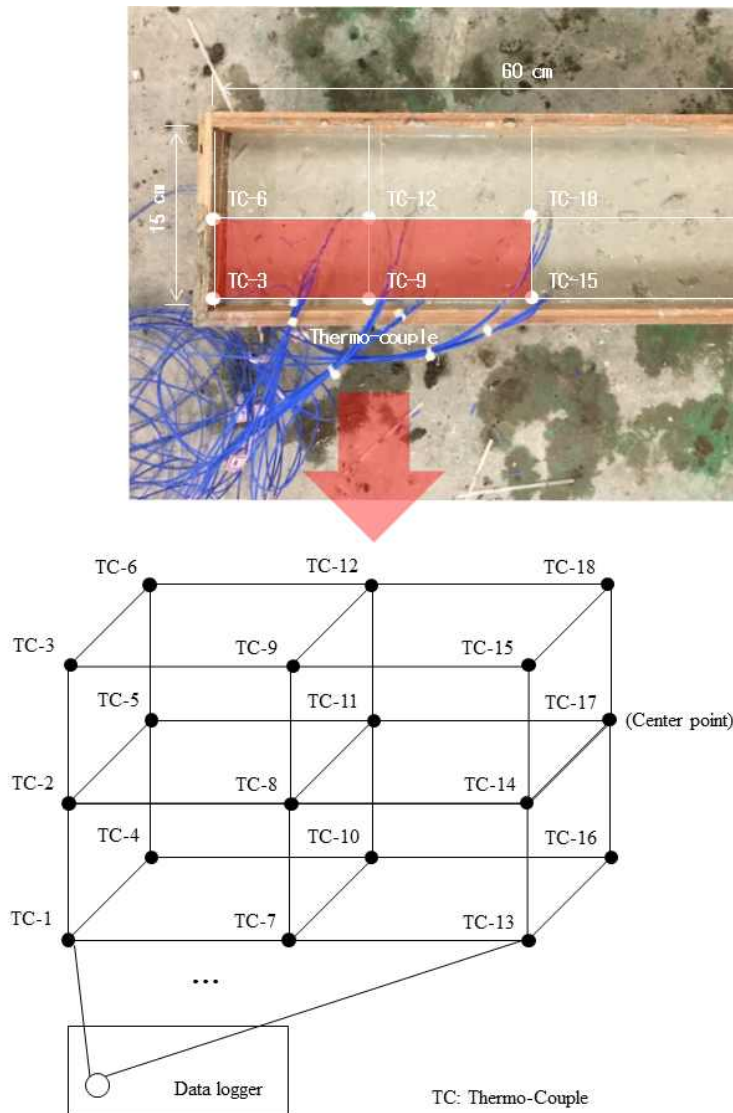
(b) 15×15×60 cm

< 그림 3.6 시편 크기에 따른 Type II 시멘트의 발열 성능 >

3.1.2 콘크리트 내부 온도이력에 따른 균열 특성평가

가. 깊이별 온도 분포 평가

실제 CA계열 자기발열 시멘트를 사용한 콘크리트 시편 내 온도 이력 분포를 확인하기 위해 페이스트 발열성능 평가와 동일한 조건에서 깊이별 온도를 측정하였다. 그림 3.7과 같이 총 18개 지점에 열전대를 매립하였고 이 때, 열전대는 시편의 1/4 영역에만 매립을 하였으며 데이터로거를 통해 확보된 온도 데이터를 이용하여 나머지 영역은 대칭적인 열전달을 가정 하에 매틀랩 3차원 보간법을 적용하여 재현하였다. 또한, 콘크리트 다짐 중 매립된 열전대의 이탈을 방지하기 위해 투명 실을 이용하여 해당 위치에 고정하였다. 본 실험에서는 상변화의 영향을 최소화시키기 위해 “BS EN 14647:2005 Calcium aluminate cement - composition, specifications and conformity criteria” 에서 제시된 시멘트 최소 함량 400 kg 및 최대 물-시멘트비 0.4를 만족하도록 배합 설계를 진행하였다 (표 3.6). 배합 및 타설 직후 저온 챔버에서 양생을 실시하였으며 24시간 동안의 온도 데이터를 확보하였다.



< 그림 3.7 콘크리트 내 발열성능 평가 실험 모식도 >

표 3.6 콘크리트 배합설계

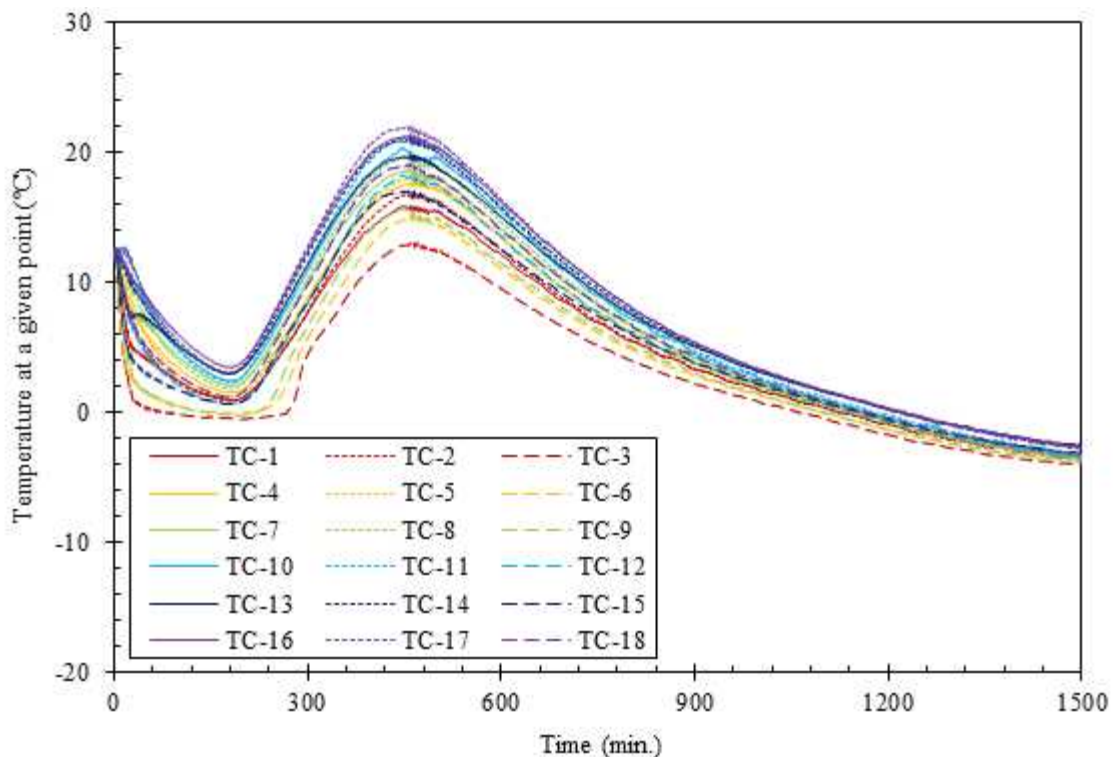
	배합설계 (중량비)			
	시멘트*	물**	잔골재	굵은골재
콘크리트	1	0.4	1.5	2.5

* 400 kg/m³ 이상 사용 권장 (BS EN 14647: 2005)

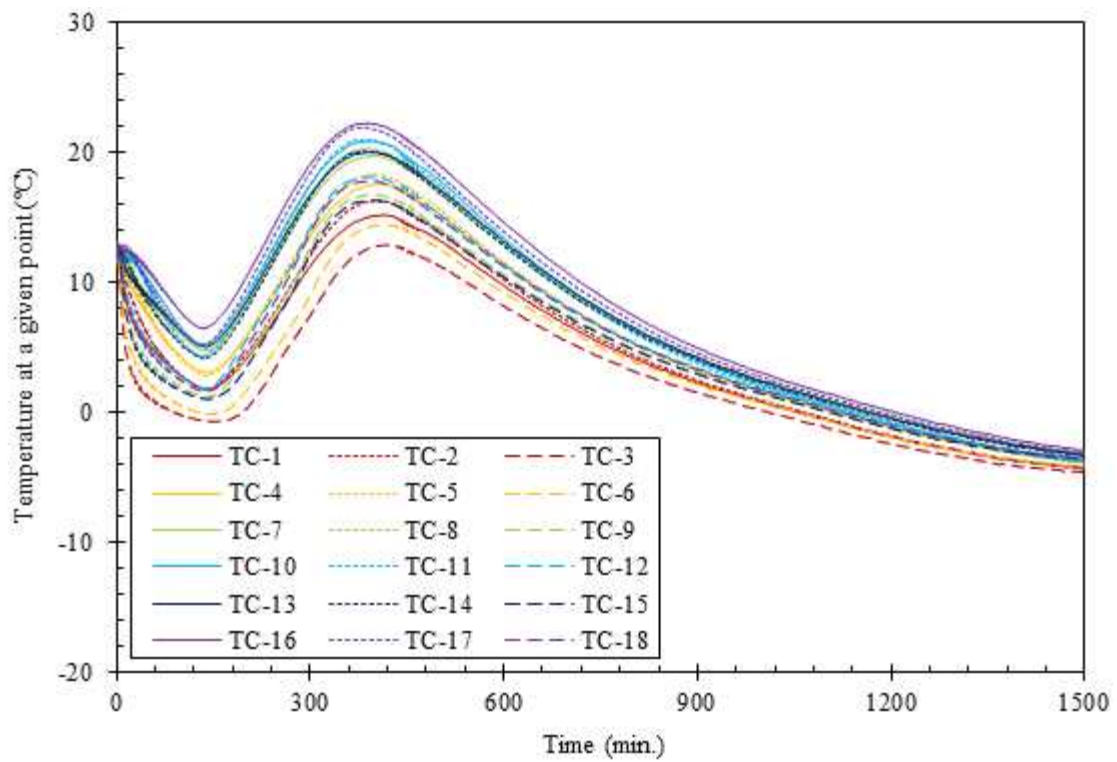
** 물-시멘트비 0.4 이하 사용 권장 (BS EN 14647: 2005)

그림 3.7은 -20℃ 환경에서의 시간에 따른 CA계열 자기발열 시멘트 종류별 콘크리트 시편 내 온도이력을 나타낸 그래프이다. Type III 시멘트를 제외하고 콘크리트 내 온도는 깊이에 관계없이 매우 균형적으로 상승하였다. 앞서 언급한 바와 같이 CA₂ 클링커를 함유하고 있는 Type III 시멘트 콘크리트의 경우 CA 클링커의 반응이 지연되어 온도 상승이 없는 것으로 판단된다. 반면, Type I 콘크리트 내 중심부의 경우 180분 이후 점차 온도가 상승하여 460분경 최대 온도인 22.05℃에 도달하였다. 그러나 표면부의 경우 외기 온도의 영향으로 인해 240분 이후 점진적으로 증가하기 시작하였으며, 최대 13.05℃까지 온도가 상승하였다. Type II 콘크리트 또한 Type I 콘크리트와 비슷한 경향을 보였는데, 140분 이후 온도가 상승하여 타설 이후 380분이 지난 후 최고점인 22.25℃에 도달한 후 이후 차츰 감소하였다. 하지만, 깊이에 따른 온도 상승 시점이 Type I 콘크리트와 달리 크게 차이가 나지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 주어진 저온 환경에서 Type I, II 시멘트를 사용한 콘크리트 내 발열은 안정적으로 이루어지며, 해당 시멘트는 적합한 재료로 판단된다.

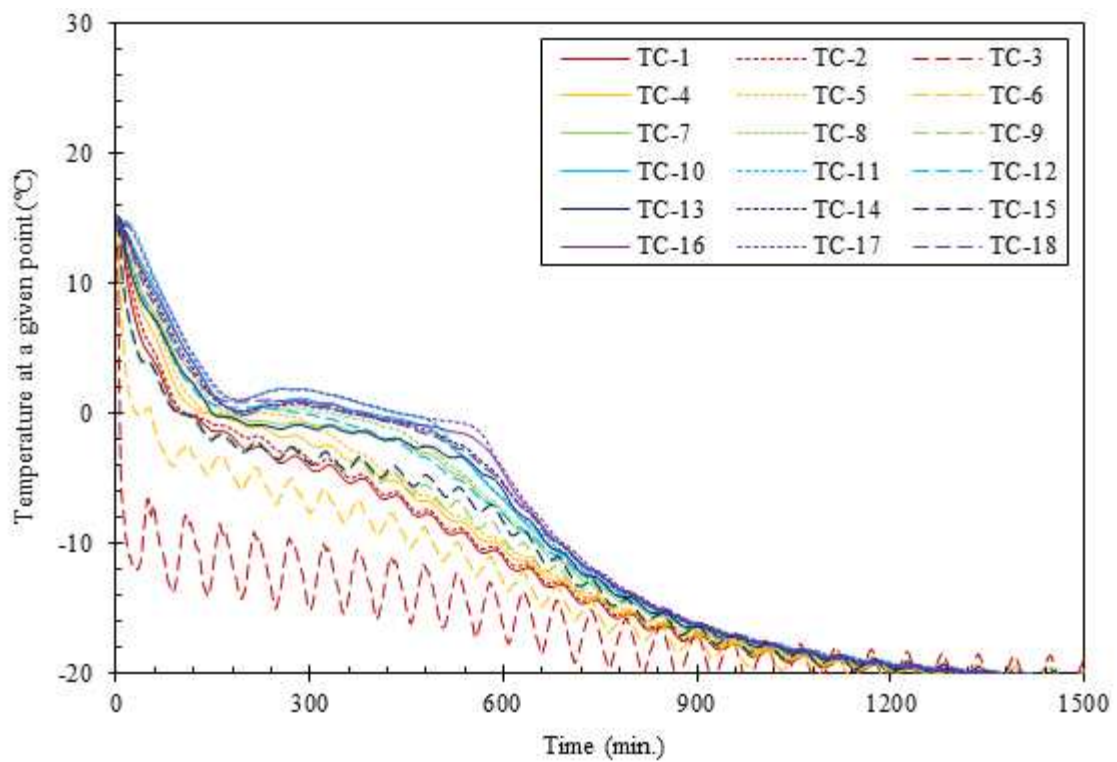
페이스트 발열 성능 실험과 마찬가지로 시편 크기에 따른 온도 상승의 영향성 평가를 위해 동일한 조건에서 10×10×40 cm 시편을 제작하여 시간에 따른 온도 변화를 측정하였다. 그림 3.9에서 알 수 있듯이 온도 상승 및 최대 온도 도달 시점은 큰 차이가 없으며, 최대 온도의 값은 15×15×60 cm 크기의 콘크리트 시편이 약 0.5℃ 가량 높은 정도의 근소한 차이를 보여주었다.



(a) Type I

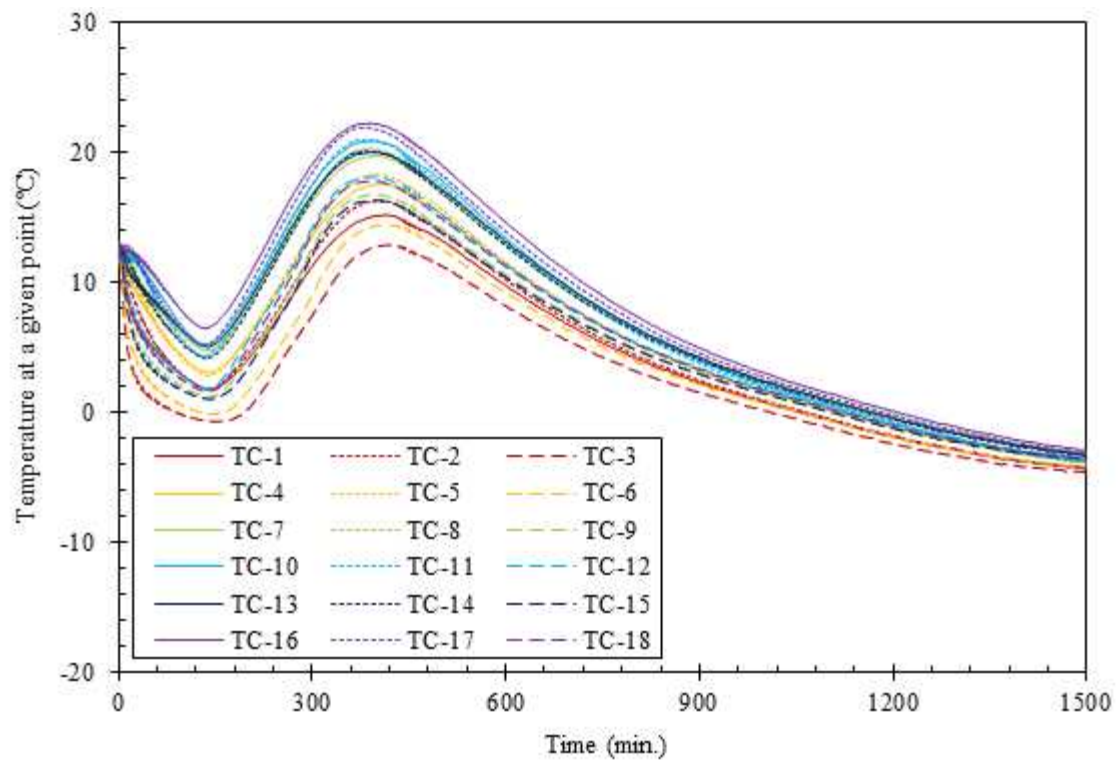


(b) Type II



(c) Type III

< 그림 3.8 시간에 따른 CA계열 자기발열 시멘트 콘크리트 온도 이력 >



< 그림 3.9 시간에 따른 Type II 시멘트 콘크리트 (10×10×40 cm) 온도 이력 >

나. 깊이별 수화물 조성 평가

극한 환경 하 자기발열 시멘트 콘크리트의 시간에 따른 수화물 조성 변화를 비교, 분석하기 위해 XRD 분석을 실시하였다. 앞서 언급한 콘크리트 배합설계를 이용하여 시편을 제작 후 -20°C 챔버에서 주어진 기간 동안 양생을 진행하였다. 해당 재령일의 콘크리트 시편에서 코어드릴을 이용하여 그림 3.10과 같이 중심부, 중앙부 및 표면부의 샘플을 채취하였다. 이때, XRD 시험 분석 시 골재의 영향을 배제하기 위해 분쇄 과정에서 선택적으로 페이스트 부분만을 추출하여 선택적으로 분쇄하였다. 분쇄된 샘플은 -20°C 환경에서 7일단 아세톤에 침지하여 용매교환법 (Solvent exchange)을 이용하여 샘플 내부에 존재하는 물을 제거하여 수화 정지를 유도하였다. 이후 진공데시케이터에서 2일간 건조한 후 즉시 XRD 분석을 실시하였다. XRD 분석은 측정 각 $5\text{--}55^{\circ}$ 및 측정 범위 0.4° /분의 조건으로 진행하였다.

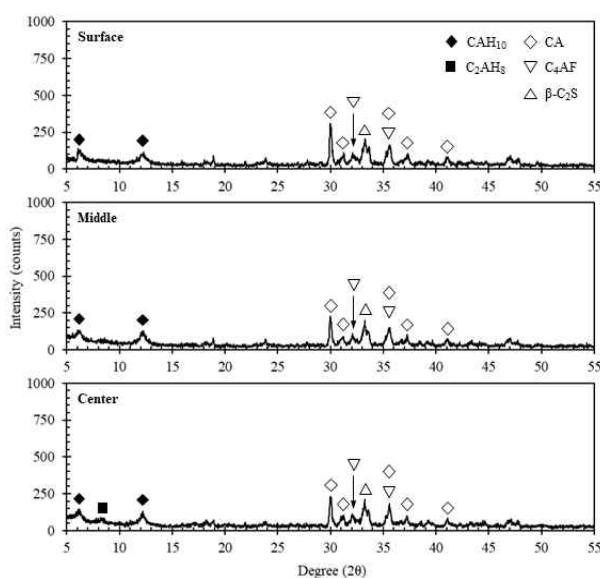


< 그림 3.10 콘크리트 시편 코어 샘플 채취 전경 >

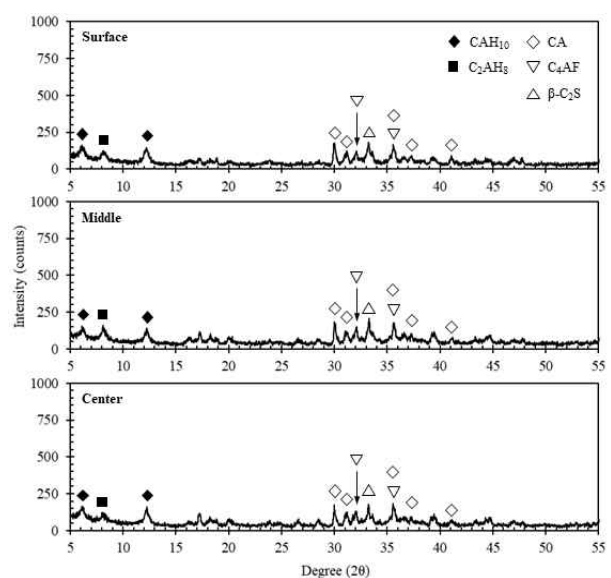
그림 3.11-3.13은 영하 20도 환경에서 시간에 따른 CA계열 자기발열 시멘트 콘크리트 내 위치별 XRD 분석 결과를 나타낸 그래프이다. 시멘트 종류 및 위치 (깊이)와 관계없이 재령 1일에서 CAH_{10} 수화물이 생성되는 것을 알 수 있다. 또한, Type III와는 달리 Type I, II 콘크리트 중심부 (Center)에서 C_2AH_8 수화물 생성이 확인되었는데 이러한 경향은 콘크리트 온도 이력 결과를 통해 뒷받침될 수 있다. 해당 시멘트 콘크리트의 중심부 온도는 $15\text{--}25^{\circ}\text{C}$ 까지 상승하는데 이 범위에서는 CAH_{10} 과 C_2AH_8 수화물이 생성된다고 알려져 있다. 일반적으로 이러한 준안정 수화물은 이후 시간이 지남에 따라 C_3AH_6 및 AH_3 수화물로 상변화를 하며, 이에 따른 강도감소 현상이 발생할 우려가 있지만, 극저온 환경이 계속해서 유지되는 환경임을 감안하면 해당 상변화로 인한 강성의 변화는 미비할 것으로 예상된다. 그러나 C_2AH_8 수화물의 경우,

안정성이 매우 떨어져 주변 환경의 변화와는 별개로 상변화의 위험성이 존재한다고 할 수 있다. 초기 수화에서 C_2AH_8 수화물의 생성을 방지하기 위한 방법으로는 1) Silicates계열 혼화재를 치환하여 C_3AH_6 수화물이 아닌 C_2ASH_8 수화물 생성 유도 또는 2) Sulfate계열 화학첨가제를 통해 수화 촉진 및 초기 상변화 유도 등이 있다. 하지만 상기 방법은 상온에서 적용된 사례는 있으나 저온 환경에서의 적용을 아직 보고된 바가 없으므로 본 과제 연구 수행 범위에 포함하도록 하였다.

주어진 환경에서 28일간 양생한 Type II 및 III 시편에서 위치에 따라 C_3AH_6 및 AH_3 수화물이 발견되었는데, 특히 Type III의 경우 모든 깊이에서 해당 수화물이 생성된 것을 알 수 있었다. 이는 시간이 지남에 따라 일정량의 CA 클링커가 소모되고, 이후 CA_2 클링커가 점진적으로 물과 반응하여 생성된 것으로 사료된다. Klaus et al. ()을 비롯한 여러 연구자들에 따르면, 장기간 수화과정에서 CA_2 클링커가 물과 반응하면, C_3AH_6 및 AH_3 수화물이 생성한다고 한다. 그러므로 상변화에 따른 강도저하 현상이 발생할 가능성이 아직 존재하고 있음을 알 수 있다. 마찬가지로, Type I의 경우 28일이 지났음에도 불구하고 상변화 전 물질인 CAH_{10} 및 C_2AH_8 만이 존재하는 것을 알 수 있는데 이는 이후 장기수화과정에서 상변화가 일어날 위험성을 내포하고 있다고 말할 수 있다. 한편, Type II의 경우 콘크리트 중앙부 및 중심에서 C_3AH_6 및 AH_3 수화물의 존재를 확인할 수 있었는데, 이는 재령 1일 결과와 비교하였을 때 불안정한 수화물의 상변화로 인해 생성된 것임을 유추할 수 있고 또한 표면부와의 수화물 조성이 상이함을 나타낸다. 보통, 준안정 수화물로 이루어진 콘크리트 경화체 (Concrete matrix)는 안정한 물질로 구성된 경화체에 비해 낮은 공극도를 가진다 (A. Dunter et al.,). 또한, 콘크리트 온도 이력 결과를 통해 Type II 콘크리트는 초기 수화과정에서 균형적이면서 비교적 높은 온도를 발현하고 이는 콘크리트 전 단면에서 비슷한 수화물 조성을 이룬다는 것을 짐작할 수 있다. 이후 시간이 지남에 따라 내/외부 온도차에 의해 중심부 (Center)는 상변화가 일어나고, 표면부는 그대로 유지되는 현상이 오랜 기간 유지될 수 있다. 따라서, 이렇게 생성된 표면부는 낮은 공극률을 가지는 일종의 보호막 (Barrier) 역할을 하게 되는데 이는 콘크리트 구조물의 공용기간 동안 외부로부터의 유해이온이 침투하는 것을 효과적으로 막아줄 것으로 예상된다.

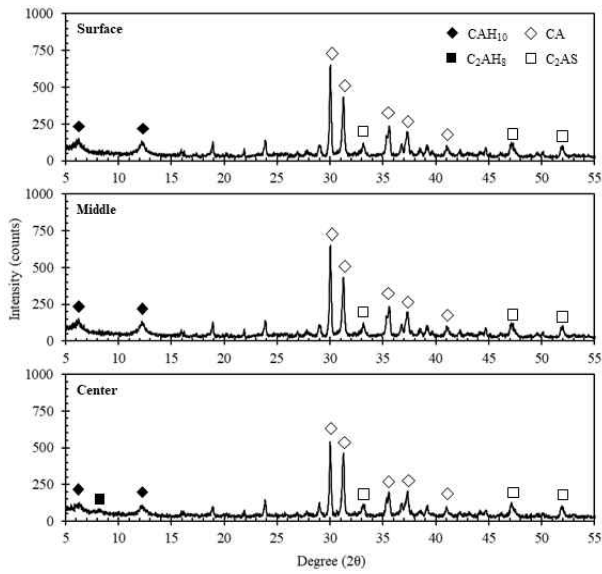


(a) 재령 1일

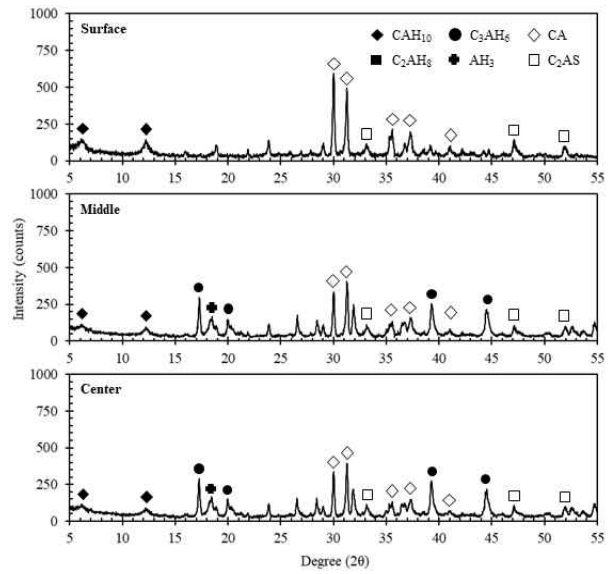


(b) 재령 28일

< 그림 3.11 시간에 따른 Type I 콘크리트 내 위치별 XRD 결과 >

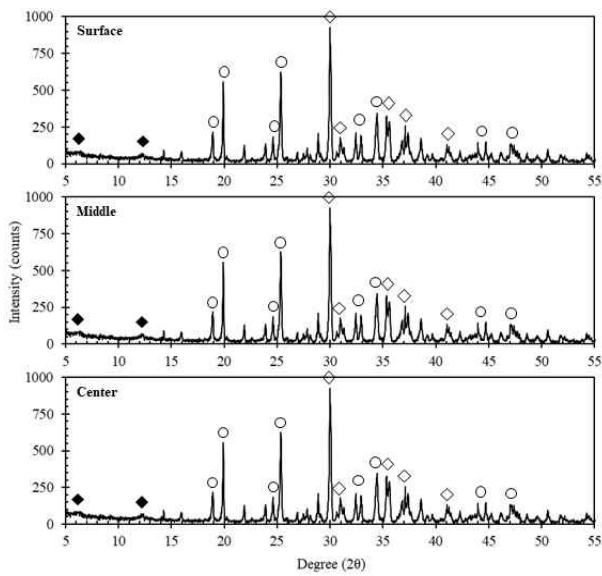


(a) 재령 1일

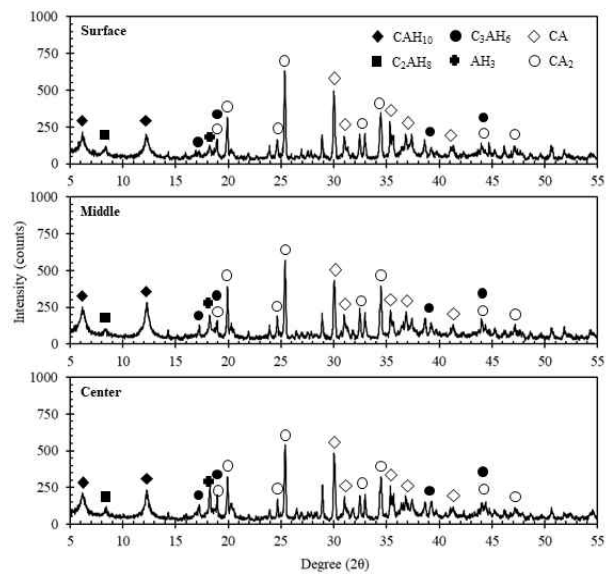


(b) 재령 28일

< 그림 3.12 시간에 따른 Type II 콘크리트 내 위치별 XRD 결과 >



(a) 재령 1일

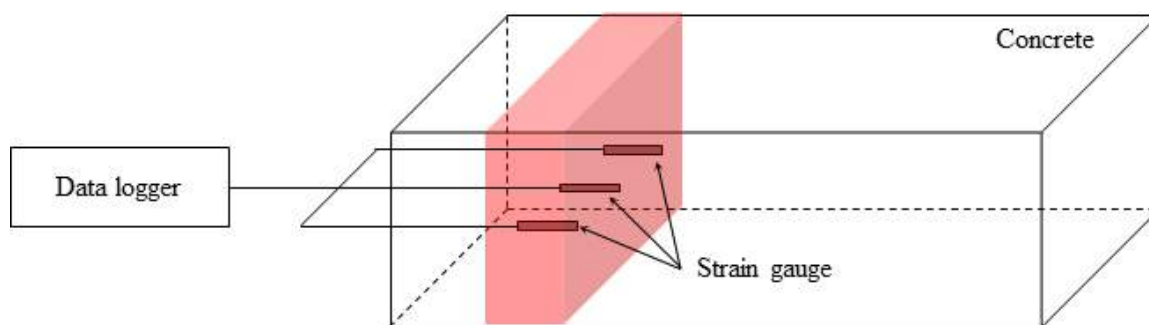


(b) 재령 28일

< 그림 3.13 시간에 따른 Type III 콘크리트 내 위치별 XRD 결과 >

다. 균열 지점 예측 및 분석

극한 지역의 낮은 온도와 CA계열 시멘트의 발열로 인해 중심부와 외곽의 온도 차이가 발생하며 이는 수화물 및 수화 정도 차이를 유발할 수 있다. 이는 수축 팽창으로 인한 변형 차이를 유발하여 응력이 발생하고 최종적으로 콘크리트에 균열을 유발할 수 있다. CA계열 시멘트를 활용한 콘크리트의 안정성 및 최적 배합을 도출하기 위해 균열 발생이 가장 우려되는 구역에 스트레인 게이지를 매립하여 응력/변형을 측정하였다. 측정용 공시체는 15×15×60 cm의 콘크리트 시편을 제작하였으며, 스트레인 게이지는 중심부와 외곽부의 중점인 측면면으로부터 15 cm의 이격을 두고 3개의 게이지가 5 cm 간격으로 매립되었다 (그림 3.14). 이는 가장 높은 발열이 발생하는 중심부와 온도가 가장 낮은 외곽부의 횡단 변형을 측정하기 위함이다. 각각의 스트레인게이지는 데이터로거에 연결되어 60초에 1회씩 변형 값을 기록하였다.



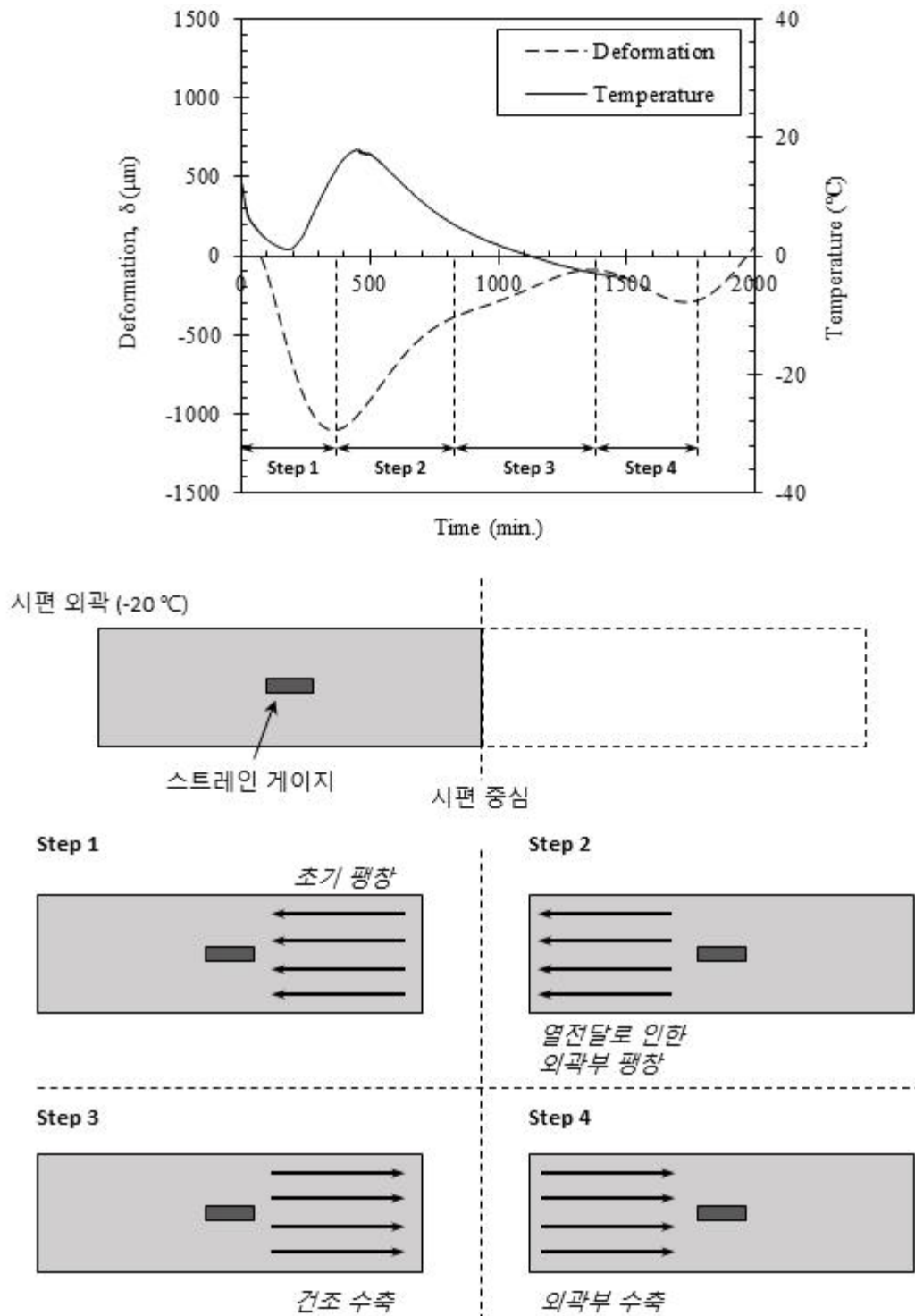
< 그림 3.14 콘크리트 응력/변형 실험 모식도 >

콘크리트 구조물의 양생에 있어 내측과 외측은 발열 차이로 인해 수화 거동이 달라진다. 일반적인 OPC를 사용한 콘크리트의 경우 내측에서 높은 온도로 인해 건조수축이 발생하며, 이러한 수화 거동의 차이는 균열을 야기한다. 반면에 CA 계열 자기 발열 시멘트는 초기 수화 단계에서 발열 온도에 따라 변형 메커니즘이 상이하다. 문헌에 따르면 20℃ 이하의 온도에서는 수축을 하며, 그 이상의 온도에서는 초기에는 팽창을 하지만 이후 온도가 내려가면서 수축을 하는 거동을 보인다. 이러한 복잡한 CA 계열 시멘트의 수화 변형 역시 콘크리트 내부에 균열을 발생시킬 수 있으며, 또한 본 연구에서 활용되는 배합의 경우 열전도에 차이를 보이고 있기 때문에 내부의 응력 변형에 대한 세밀한 관측이 필요한 것으로 판단된다.

콘크리트 구조물의 양생에 있어 내측과 외측은 발열 차이로 인해 수화 거동이 달라진다. 일반적인 OPC를 사용한 콘크리트의 경우 내측에서 높은 온도로 인해 건조수축이 발생하며, 이러한 수화 거동의 차이는 균열을 야기한다. 반면에 CA 계열 자기 발열 시멘트는 초기 수화 단계에서 발열 온도에 따라 변형 메커니즘이 상이하다. 문헌에 따르면 20℃ 이하의 온도에서는 수축을 하며, 그 이상의 온도에서는 초기에는 팽창을 하지만 이후 온도가 내려가면서 수축을 하는 거동을 보인다. 이러한 복잡한 CA 계열 시멘트의 수화 변형 역시 콘크리트 내부에 균열을 발생시킬 수 있으며, 또한 본 연구에서 활용되는 배합의 경우 열전도에 차이를 보이고 있기 때문에 내부의 응력 변형에 대한 세밀한 관측이 필요한 것으로 판단된다.

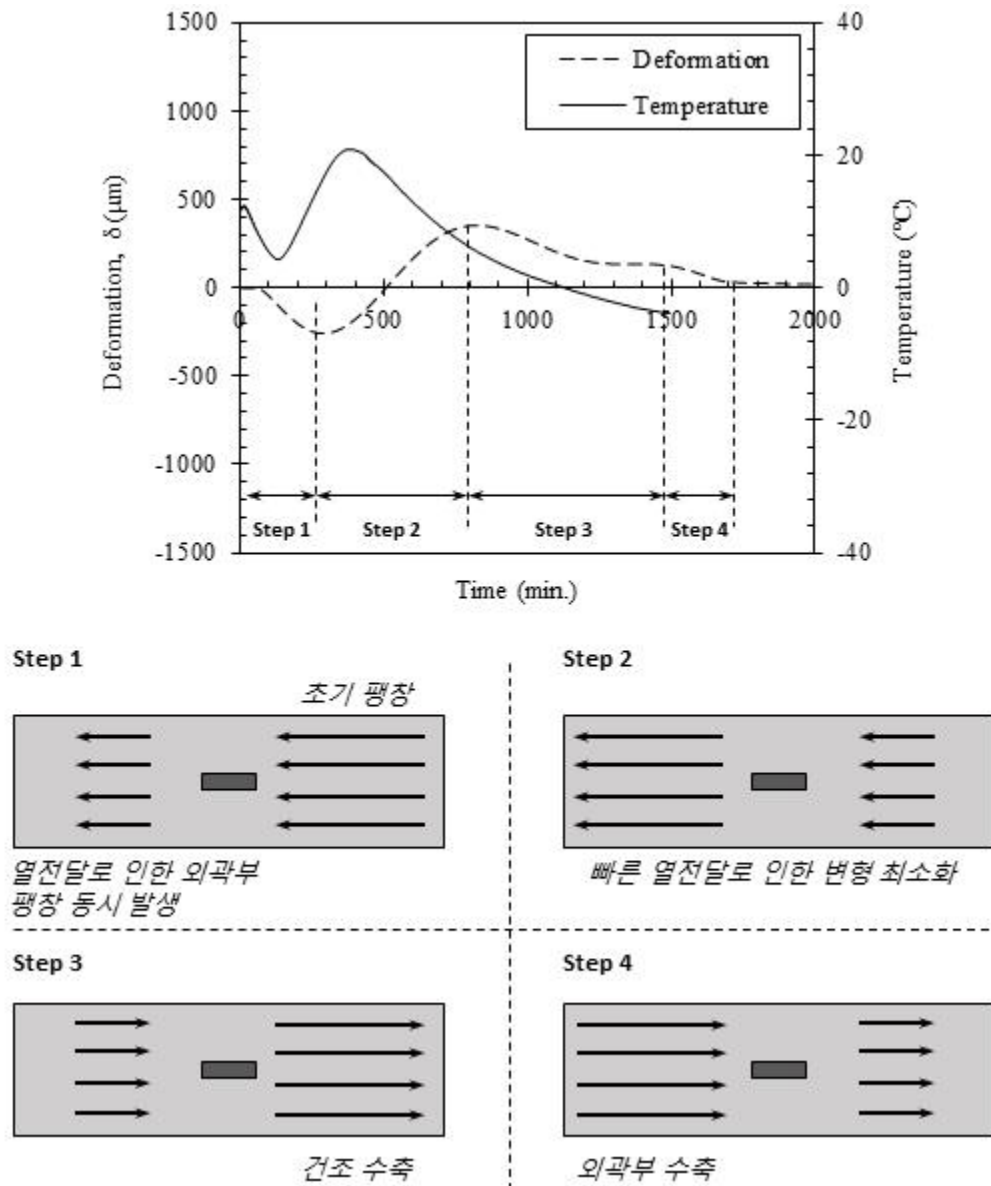
그림 3.15는 Type I 배합의 시간에 따른 변형을 나타내고 있다. 3가지 배합 중 Type I 배합이 가장 높은 변형을 나타내고 있다. 응력 변화를 단계별로 4단계를 구분하면, 초기 수화 단계에서 내부의 온도가 100℃까지 상승하며 내측의 팽창이 먼저 일어나고 그로 인해 내부와

외곽부 사이는 높은 압축 응력을 받는다 (Step 1). 이후 내부의 팽창은 줄어들지만 열전도로 인해 외곽부의 시멘트 팽창이 일어나며 인장력을 받는 단계에 이른다 (Step 2). 이후 내측 콘크리트에서는 공극수의 증발과 함께 건조수축이 발생을 하며 (Step 3) 인장 변형이 계속되지만, 최종적으로 외곽부의 수축이 발생하며 다시 압축응력을 받는 단계에 이른다 (Step 3). 두 번째 단계까지의 수화 거동은 약 500 ~ 600 분 이내의 짧은 시간에 이루어지지만 세 번째와 네 번째 단계는 1000 ~ 1200 분 사이의 비교적 긴 시간동안 이루어진다. 본 실험에서는 균열 발생에 대한 측정 또는 육안 확인이 이루어지지 않았지만, 1 mm 이상의 압축 변형이 발생한 것으로 판단하였을 때 실제 구조물과 같은 대형 구조에서는 내부의 균열 발생 위험이 가장 높은 배합인 것으로 판단된다.



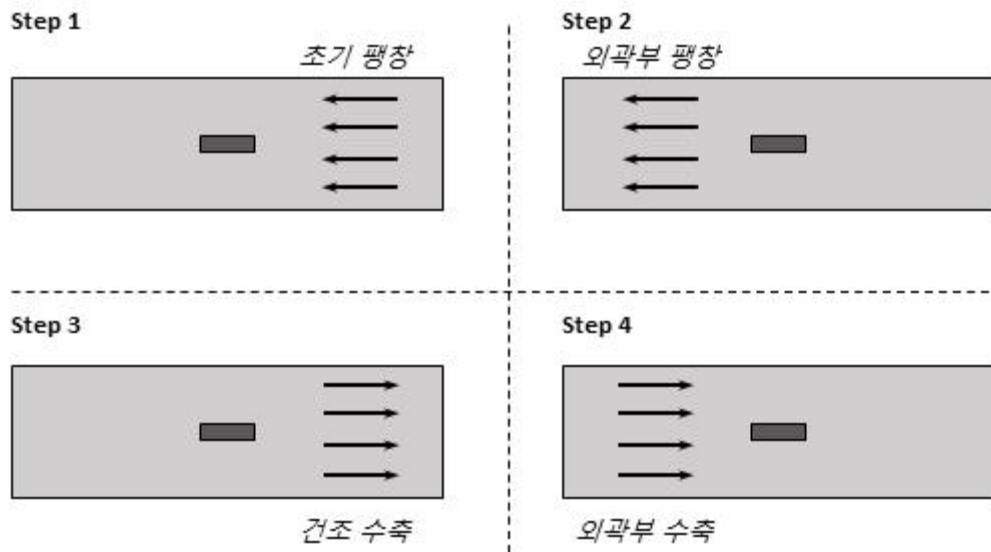
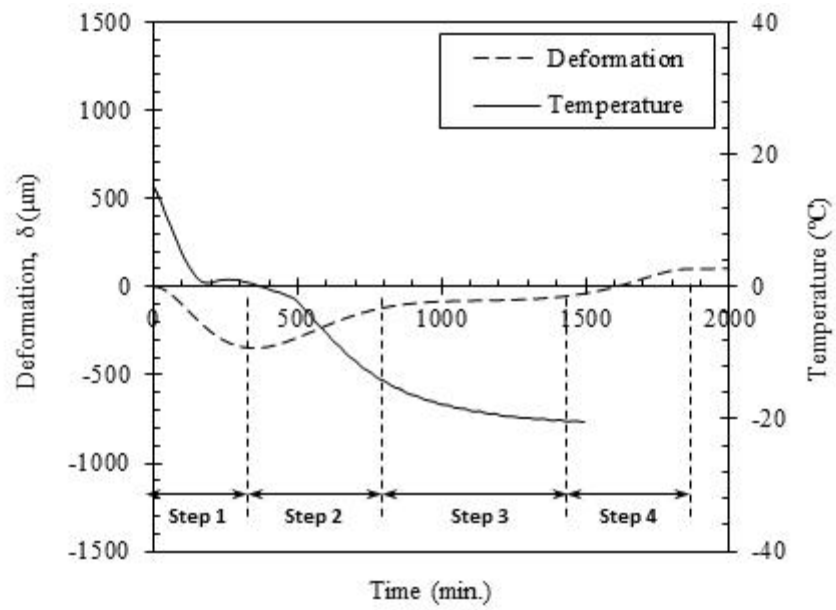
< 그림 3.15 Type I의 시간에 따른 응력 변형 >

Type II 배합의 시간에 따른 변형은 그림 3.16과 같다. Type II의 경우 Type I과 비교하였을 때 상대적으로 낮은 변형을 나타내고 있으며 이는 비교적 빠른 열전달로 인해 수화 거동에 큰 차이가 없는 것에 원인이 있는 것으로 판단된다. 초기 팽창에 의한 압축 변형의 발생은 비슷하지만 외곽부의 변형이 짧은 시간 내에 동시 다발적으로 이루어지기 때문에 완화되는 경향을 나타낸다. 이후 건조수축 단계에서도 내측부에서 먼저 수축이 발생을 하지만 외측부의 수축으로 인해 변형이 줄어들며, 최종적으로 수화 완정화가 이루어진 이후에 가장 안정된 거동을 보이고 있다.



< 그림 3.16 Type II의 시간에 따른 응력 변형 >

Type III의 경우에는 열전도의 특성에 있어 높은 수화 거동을 나타내고 있지 않기 때문에 눈에 띄는 변형의 발생을 나타내지 않았다. 이는 Type III의 낮은 초기 반응성으로 인해 수화 온도의 변화가 Type I 또는 Type II에 비해 낮은 것에 원인이 있으며, 장기 변형에 있어서의 관찰은 필요로 하지만 초기 단계에서의 변형으로 인한 균열 발생의 위험성은 낮은 것으로 판단된다.

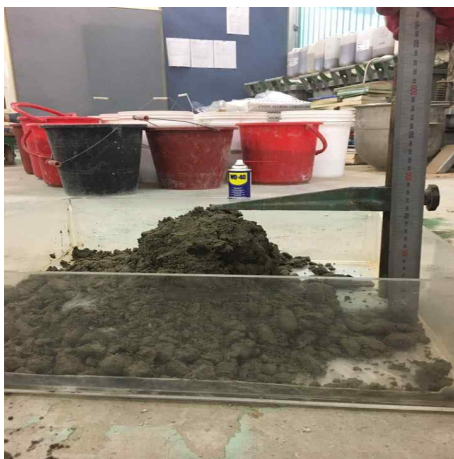


< 그림 X Type 3.17의 시간에 따른 응력 변형 >

3.1.3 극한환경 하 자기발열 콘크리트 배합설계 도출

가. 굳지 않은 콘크리트 물성 평가

굳지 않은 콘크리트 (Fresh concrete)의 공기량 및 슬럼프는 콘크리트 배합의 작업성 및 유동성을 확인할 수 있는 주요 시험이다. 본 연구에서 목표하고 있는 극저온 환경에서 적용 가능한 무양생용 자기발열 시멘트 개발은 발열 성능뿐만 아니라 실제 작업 시 적당한 작업성이 확보되는 것 또한 중요하다. 뿐만 아니라 적정량의 공기량은 극한 환경에 노출된 콘크리트 내 동해 피해를 저감시킬 수 있다. 앞서 제시된 3종류의 자기발열 시멘트 콘크리트 배합설계에 따라 현장에서의 작업성 확보 여부를 확인, 판단하기 위해 “KS F 2402 콘크리트의 슬럼프 시험 방법”에 따라 슬럼프 실험을 실시하였다. 동시에 공기량 시험은 그림과 같이 가압식 공기량 측정기를 사용하여 “KS F2421 압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험 방법”에 따라 수행하였다.



(a) 슬럼프 시험



(b) 공기량 측정 시험

< 그림 3.18 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 및 공기량 측정 시험 >

표 3.7은 CA계열 자기발열 시멘트 콘크리트의 슬럼프 및 공기량 측정 시험 결과이다. 슬럼프의 경우 시멘트 종류에 따라 140~160 mm의 값을 나타냈다. 또한, 일반적으로 국내외 규정 또는 시방서에서는 동결융해에 노출된 구조물의 굳지 않은 콘크리트 공기 함유량은 4% 이상이 권장되고 있는데, 3가지 배합 모두 이를 만족하는 것으로 나타났다.

표 3.7 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 및 공기량 측정 시험 결과

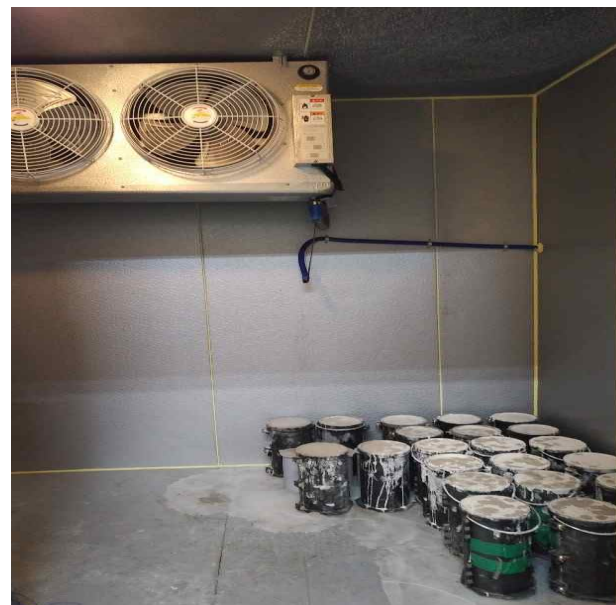
	슬럼프 (mm)			공기량 (%)		
	1	2	3	1	2	3
Type I	165	155	150	6.4	5.7	6.1
	157			6.07		
Type II	145	135	140	5.4	5.8	5.9
	140			5.70		
Type III	150	155	155	6.1	5.2	5.6
	153			5.63		

나. 굳은 콘크리트 물성 평가

극한지역에서의 시공 적합성 평가를 위해 CA계열 자기발열 시멘트 콘크리트 배합 종류에 따른 응결 시간을 “KS F 2763 관입 저항침에 의한 콘크리트 보수재의 응결시간 측정방법”에 준하여 측정하였다. 그림 3.19 (a)와 같이 -20°C 환경에서 콘크리트 배합 후 체가름 방법으로 채취한 모르타르 시료를 $15\times 15\times 60\text{ cm}$ 의 몰드에 담은 뒤 관입저항 시험기를 이용하여 관입침 재하에 따른 관입 저항을 시간별로 측정하였다. 이 때, 초결 및 종결 시점은 각각 관입 저항이 3.5, 27.6 MPa가 되는 시간으로 결정하였다. 또한, 해당 환경에서의 강도발현 성능 평가를 위해 “KS F 2405 콘크리트 압축 강도 시험방법” 및 “KS F 2408 콘크리트의 휨 강도 시험방법”에 따라 압축 및 휨강도를 재령 1, 3, 7, 28일에 측정하였다. 이 때, 굳은 콘크리트 물성 시험은 시편 크기에 따른 영향을 평가하기 위해 Type II 시멘트 콘크리트 배합에 한해 압축강도의 경우 $\Phi 100\times 200\text{ cm}$ 및 $\Phi 150\times 300\text{ cm}$ 시편을, 응결시간 및 휨강도는 $100\times 100\times 400\text{ cm}$ 및 $150\times 150\times 600\text{ cm}$ 시편을 제작하여 측정하였다.



(a) 응결시간



(b) 양생



(c) 압축강도



(d) 휨강도

< 그림 3.19 굳은 콘크리트 물성 실험 전경 >

표 3.8-2.9는 CA계열 시멘트의 응결 특성을 시멘트 Type별 그리고 시편 크기별로 나타내고 있다. 일반 시편 크기(150×150×600 mm)에서 Type I, II, III의 초결은 각각 381, 332, 439 분에서 발생하였으며, 종결은 439, 414, 501분에서 발생하였다. Type II의 응결 시간이 가장 짧으며 이는 Type II 시편이 수화 단계에서 중심부의 온도가 가장 높은 온도에 도달하는 시점이 384분으로 가장 빠른 것에 기인한 결과인 것으로 판단된다. Type I의 경우 수화 온도가 가장 높은 온도에 도달하는 시점이 460분이며 그로인해 약 400분 이후 응결이 발생하였으며, 온도 변화가 가장 미미한 Type III 시편이 가장 늦게 응결이 발생하였다. 시편 크기에 따른 영향성을 판단하기 위해 100×100×400 mm의 시편에 대해서도 동일한 실험을 진행하였으며 그 결과 시편 크기가 줄어들어 따라 초결과 종결 모두 7분 정도 응결시간이 감소하는 것을 확인하였다. 반대로 최고 온도에 도달하는 시간은 100×100×400 mm의 시편이 5분 더 늦었으나 관입 저항 시험의 특성상 오차 범위 내의 시험 결과로 시편 크기에 의한 영향성은 상당히 미미한 것으로 판단된다.

표 3.8 CA계열 자기발열 시멘트 콘크리트 배합에 따른 응결시간 (분)

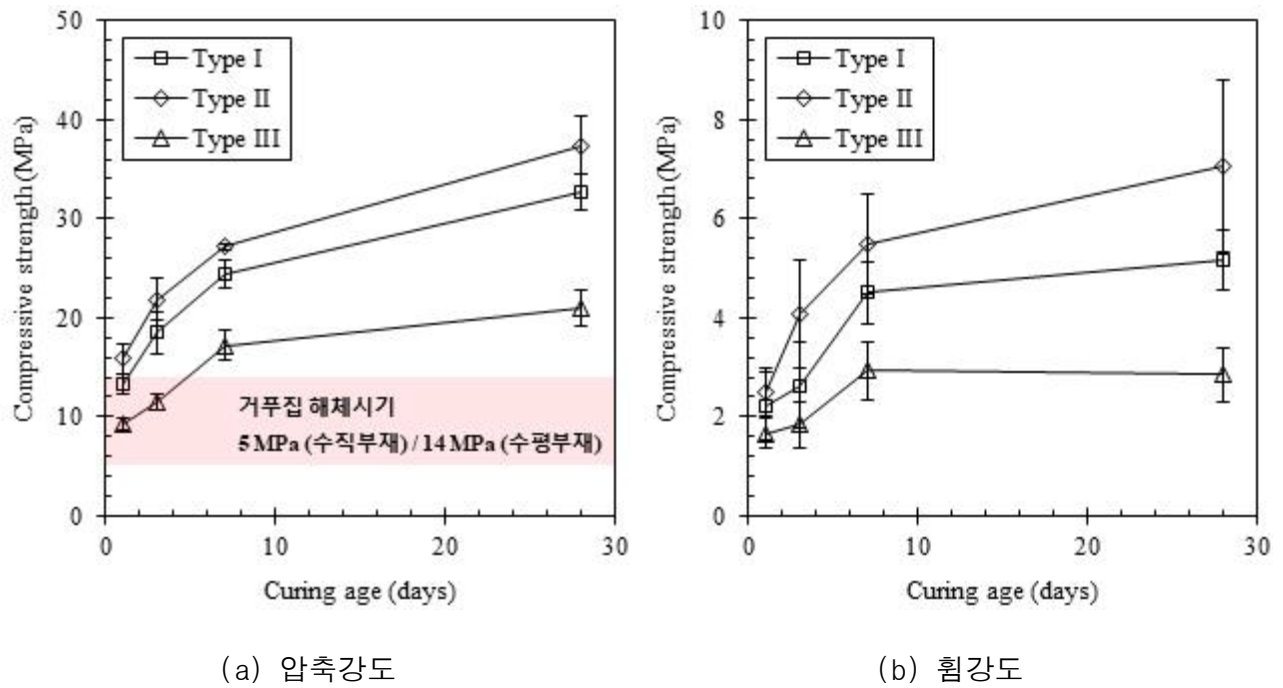
	Type I	Type II	Type III
초결	381	332	439
종결	439	414	501

표 3.9 Type II 시멘트 콘크리트의 크기에 따른 응결시간 (분)

	100×100×400 mm	150×150×600 mm
초결	315	332
종결	407	414

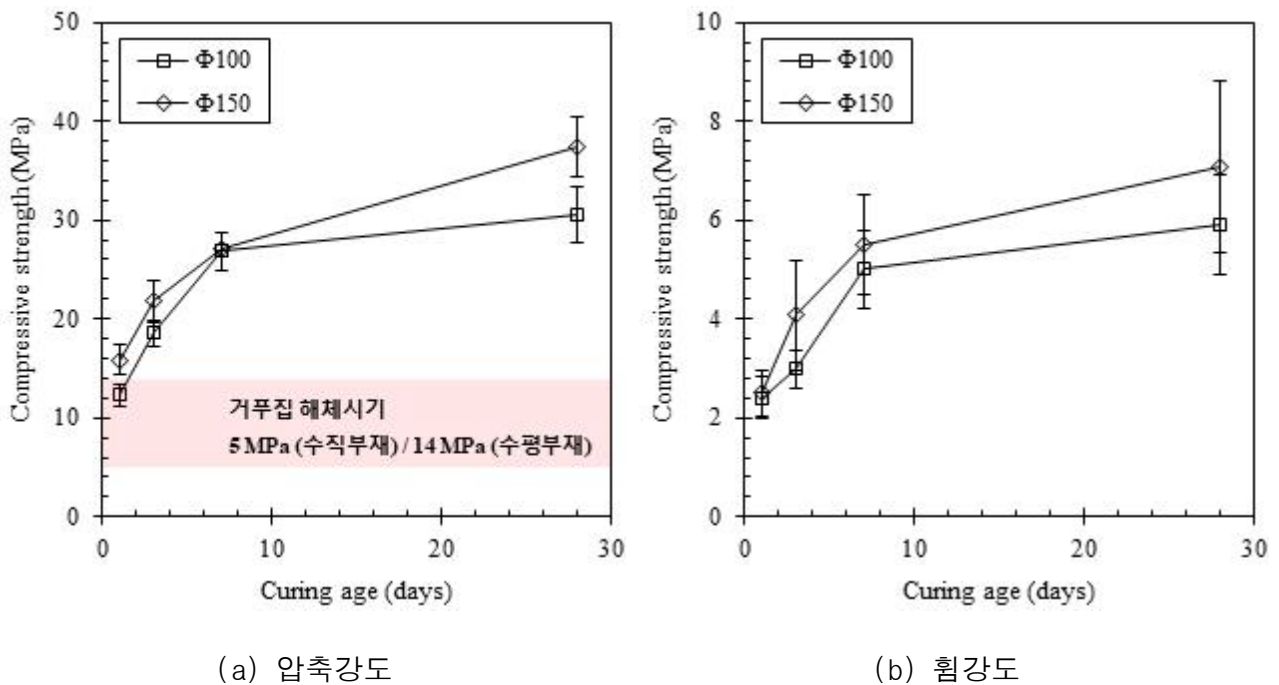
-20℃의 극한 환경에서 CA 계열 시멘트 콘크리트의 자기발열로 인한 강도 발현을 검증하기 위해 시멘트 종류별 압축강도 시험 결과를 그림 3.20에 나타내었다. Type I, II 및 III 시멘트 콘크리트의 재령 28일 압축강도는 32.7, 37.4 및 20.9 MPa로 측정되었다. 재령일에 관계없이 Type II의 압축강도가 높게 나타났으며 특히, 재령 1일 압축강도는 15.8 MPa로 거푸집 해체 요구 강도인 5-14 MPa를 초과하는 결과를 보였다. 이는 보온 양생의 적용 없이 시멘트 자체 발열만으로 강도를 발현한 것으로 기존의 보온 양생 및 방한촉진제 사용에 따른 최소 양생일 3일에서 매우 단축된 시간임을 알 수 있었다. 이는 미소수화열량계 및 발열 성능 시험에서 알 수 있듯이 다량의 CA 클링커를 함유하고 있는 Type II 시멘트와 물이 반응하였을 때 발생하는 수화열의 누적으로 인한 수화 촉진 반응에 의한 것으로 판단된다. 이 결과는 혹한기 한중콘크리트 공사에서 별도의 보온 양생처리하지 않음으로써 발생되는 시공편리성 및 빠른 거푸집 해체 등으로 인한 공사기간 단축 등 시공성 및 경제성 모든 영역에서 긍정적인 효과를 불러일으킬 것으로 예상된다. 하지만 Type III 시멘트의 경우 강도 발현이 다른 종류에 비해 느린 것을 알 수 있는데, 앞서 언급한 바와 같이 CA₂ 클링커로 인한 CA 클링커의 반응 지연으로 충분한 양의 열을 방출하지 못한 결과로 사료된다. 이러한 결과를 토대로 극저온 환경에서의 CA계열 자기발열 시멘트는 그 조성에서 CA₂ 클링커를 포함하지 않아야 하며, 현장에서 요구되는 가사시간에 따라 시멘트 내 CA 클링커의 함량을 조절해야한다. 또한, 시멘트 종류와 무관하게 상변화로 인한 압축강도의 저하 현상은 발생하지 않았는데 이는 지속적인 외기의 영향으로

콘크리트 내 온도가 상온 이상으로 올라가지 않기 때문인 것으로 사료된다. 하지만 상변화는 온도의 변화 외에 콘크리트 구조물의 공용 기간 중 자연적으로 발생할 수 있으므로 이에 대한 위험성을 제거하는 노력이 필요할 것으로 판단된다.



< 그림 3.20 영하 20도에서의 자기발열 시멘트 콘크리트 강도 결과

그림 3.21은 시편 크기에 따른 Type II 시멘트 콘크리트의 시간에 따른 압축 및 휨강도를 나타낸 그래프이다. 재령 28일을 제외하고 모든 재령에서 압축 및 휨강도 차이는 미미함을 알 수 있다.



< 그림 3.21 영하 20도에서의 자기발열 시멘트 콘크리트 강도 결과

3.2 극한 환경에서의 내부균열 억제형 자기발열 콘크리트 개발

3.2.1 상변화 억제형 Silicate 계열 치환재 성능평가

가. 미소수화열량계를 통한 수화열 특성 평가

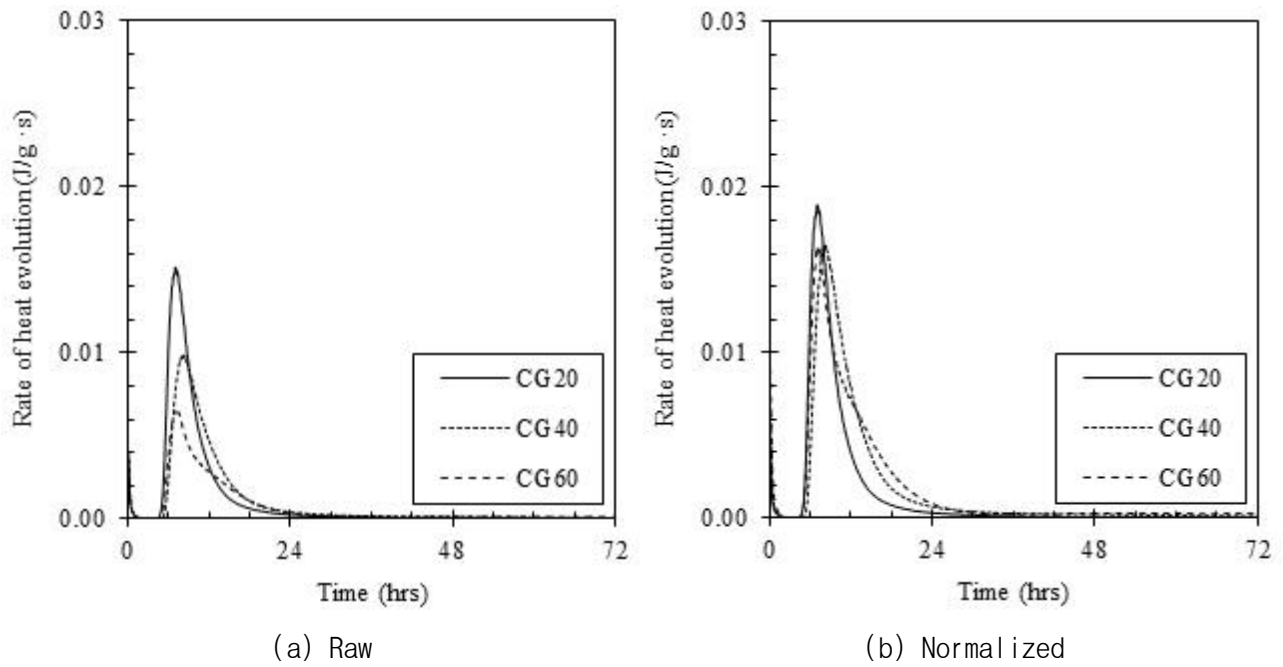
앞서 설명한 바와 같이 CA계열 자기발열 시멘트는 -20°C 환경에서 물과 반응하여 CAH_{10} 및 C_2AH_8 수화물을 생성하는데 이는 주변 환경 특히 온도에 따라 상변화 현상을 겪게 된다. 영하 이하의 온도가 유지되는 극저온 환경일지라도 시간이 흐름에 따라 자연적으로 상변화는 발생할 수 있으므로 이를 방지하기 위해 Silicate 계열 치환재 즉, 고로슬래그 (Granulated ground blast-furnace slag)를 혼입하여 준안정 수화물에서 C_2ASH_8 수화물로의 생성을 유도하였다. 이러한 혼합 시멘트의 상변화 억제 효과 및 극한 환경에서의 사용성을 검증하기 위해 자기발열 시멘트와 동일한 물-시멘트 및 GGBS 치환량을 변수로 미소수화열량계 시험을 진행하였다. 해당 시멘트의 명명 및 혼입량은 표 3.10과 같다.

표 3.10 미소수화열량계 시험을 위한 페이스트 배합설계

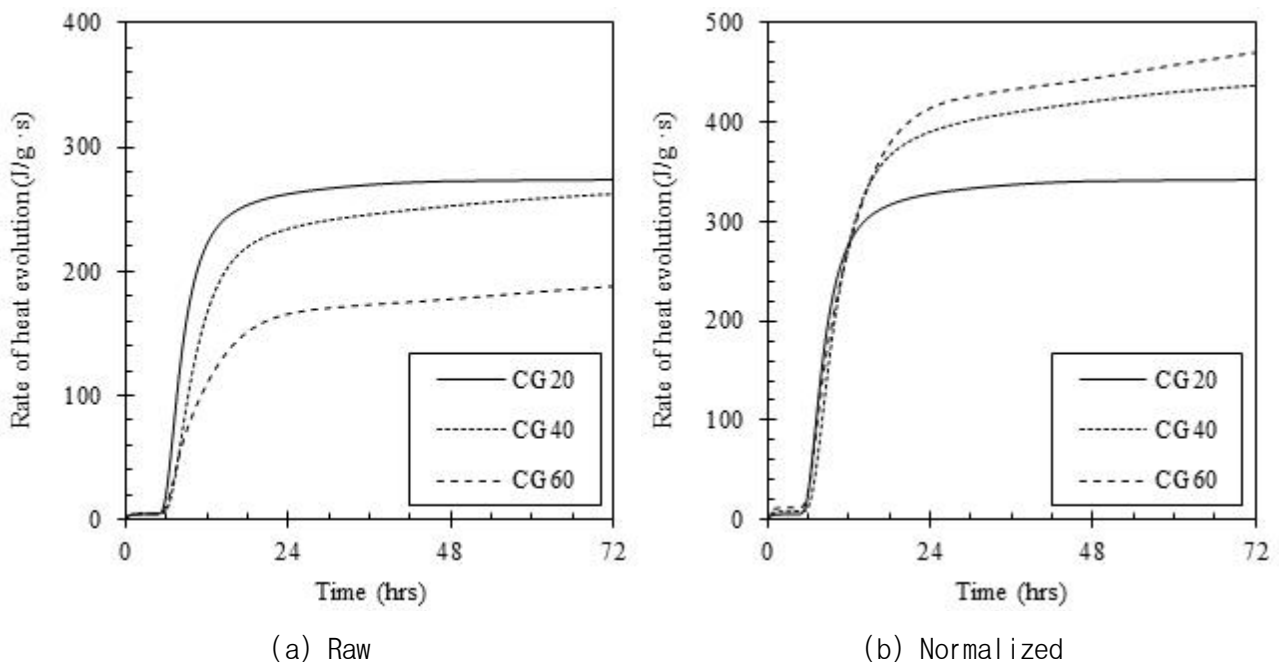
	배합설계 (중량비)		
	CAC	GGBS	물
CG20	0.8	0.2	
CG40	0.6	0.4	0.4
CG60	0.4	0.6	

그림 3.22는 고로슬래그 혼입 시멘트의 시간에 따른 단위수화열량을 나타낸 것이다. 고로슬래그의 치환량이 증가할수록 제 2 피크점이 발생하는 시간은 근소한 차이를 가지지만, 단위수화열량 값은 작아지는 것을 알 수 있다. 하지만, 이 결과를 혼합 시멘트 내 CAC 함량으로 정규화하였을 경우 그림 3.22 (b)와 같이 단위수화열량 값이 비슷해지는 것을 확인할 수 있다. 이는 초기 수화 반응 시 반응성이 낮은 고로슬래그로 인해 알루미나 시멘트의 관점에서 물-시멘트가 증가하는 효과를 보이기 때문인 것으로 사료된다.

그림 3.23은 고로슬래그 혼입 시멘트의 72시간 동안의 누적 단위수화열량을 나타내고 있다. 해당 수화시간 동안 자기발열 시멘트와는 달리 혼입량과 관계없이 300 J/g에 도달하지 못하는 것을 알 수 있다. 하지만 혼입 시멘트 내 CAC 함량으로 정규화하였을 경우 모든 시멘트에서 24시간 이내에 300 J/g에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 특히 치환량이 60%인 CG60의 경우 24시간 누적 단위수화열량은 414 J/g으로 상당히 높은 값을 나타내었다. 위 실험 결과를 통해 고로슬래그의 치환은 초기 수화 과정에서 다량의 수화열 확보에 이점을 가질 수 있으며, 콘크리트 물성이 확보된다면 극한 환경에서의 자기발열 시멘트 재료로서의 활용이 가능할 것이라 판단된다.



< 그림 3.22 고로슬래그 혼입 시멘트의 시간에 따른 단위수화열량 >



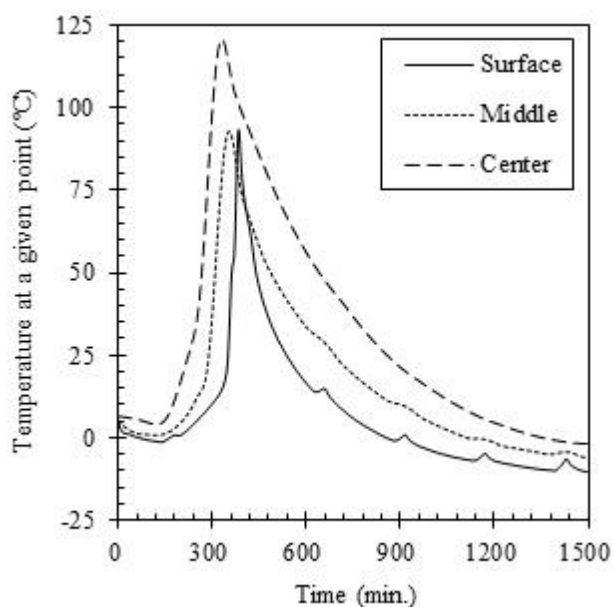
< 그림 3.23 고로슬래그 혼입 시멘트의 시간에 따른 누적 단위수화열량 >

표 3.11 고로슬래그 혼입 시멘트의 24시간 누적 단위수화열량 (J/g)

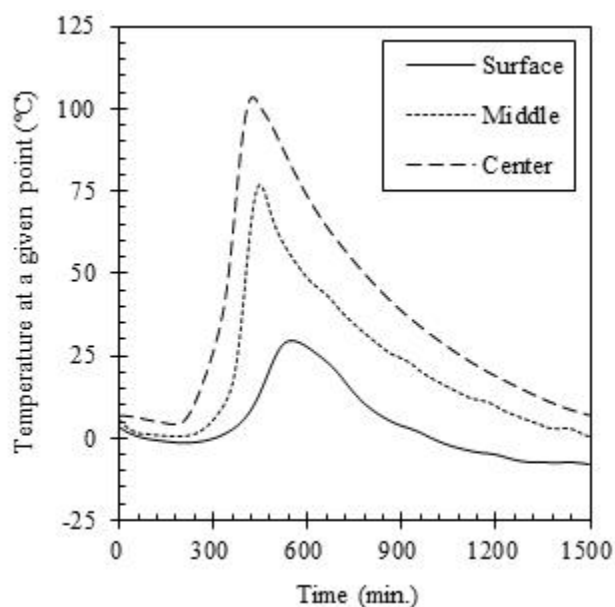
	Type I	Type II	Type III
누적 단위수화열량	327.69	390.29	414.00

나. 매립형 열전대를 통한 발열성능 평가

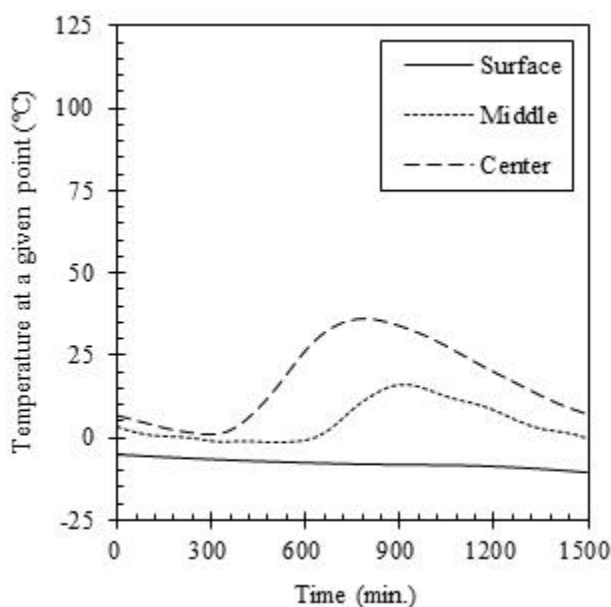
극저온 환경에서의 고로슬래그 혼입 시멘트 페이스트 및 콘크리트의 발열성능 평가를 위해 시편 내 온도 이력 분포를 측정하였다. 미소수화열량계와 동일한 고로슬래그 치환범위에서 자기발열 시멘트의 발열성능 평가의 콘크리트 배합비를 사용하여 각 시편을 제작하였으며, 24시간 동안 수집된 데이터를 그림 3.24에 나타내었다. 페이스트 시편 내 표면부, 중심부 및 두 지점간 중앙부의 온도는 고로슬래그 혼입량의 증가에 따라 감소하는 결과를 보였다. CG20 시편의 중심부는 최대 120.6℃에 도달하였으며 그 외 지점에서 약 93℃에 달하는 발열 성능을 보였다. CG60의 경우도 우수한 발열 성능을 가졌지만, 지점별 온도차이가 있음을 알 수 있었다. 또한, 고로슬래그 혼입량의 증가는 중심부에서의 최대온도 도달 시간 증가의 결과는 보였는데, 치환량 20, 40, 60% 순서로 332, 425, 785분이었다.



(a) CG20



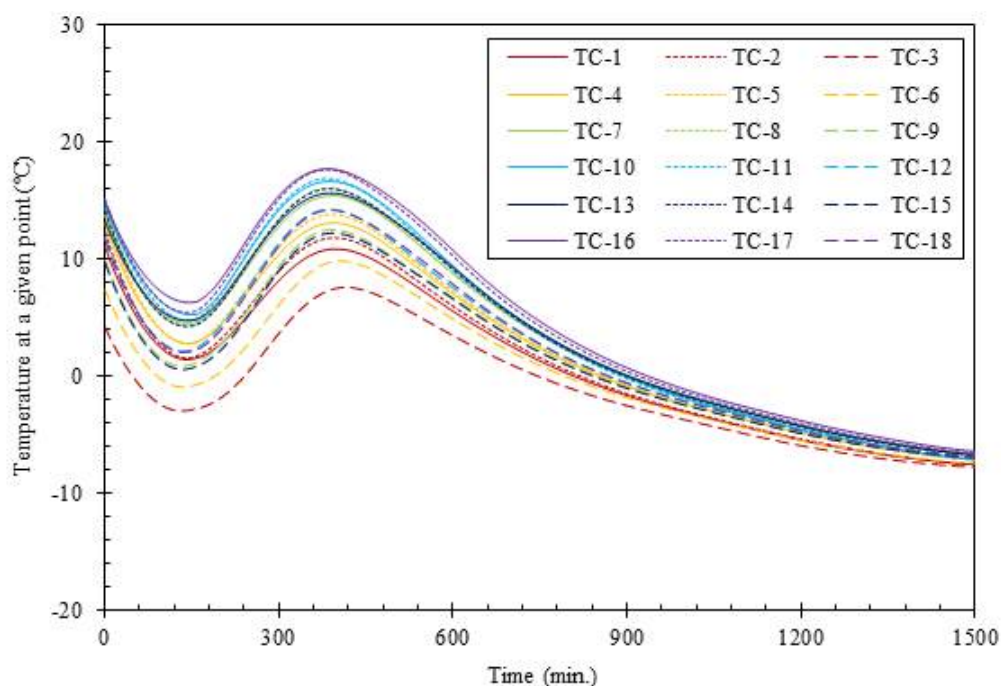
(b) CG40



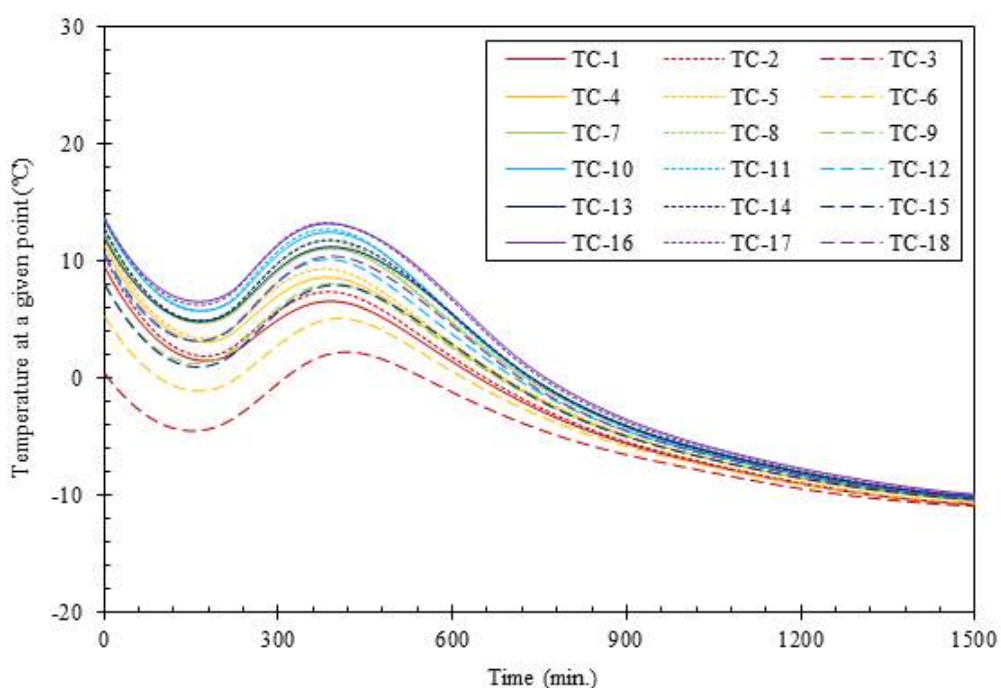
(c) CG60

< 그림 3.24 CA계열 자기발열 시멘트의 시간에 따른 발열 성능 >

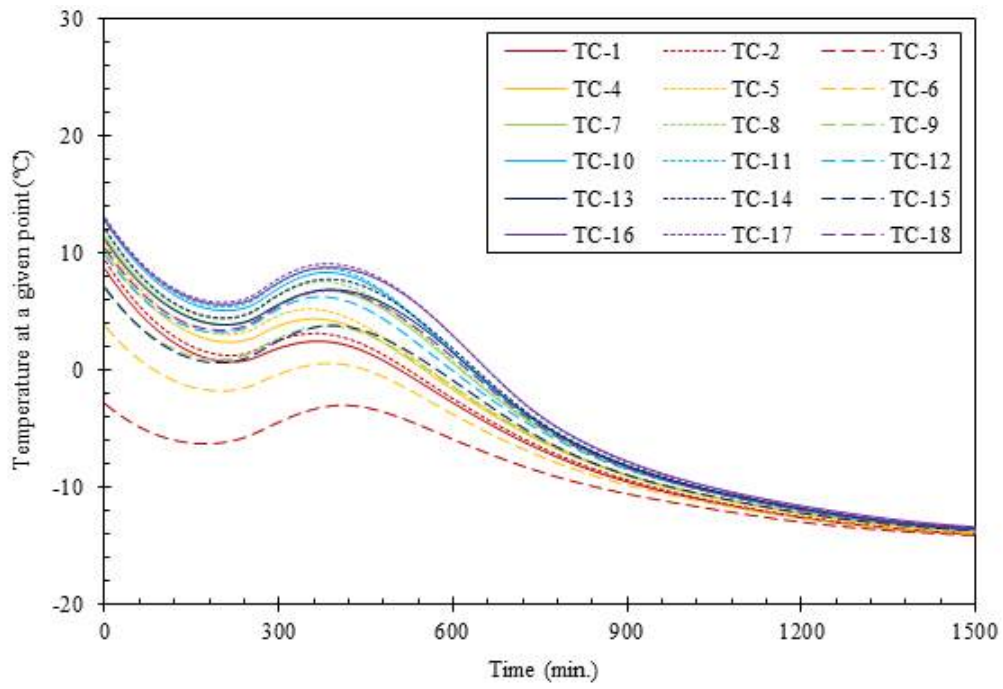
그림 3.25는 -20°C 환경에서의 시간에 따른 혼입 시멘트 치환량 별 콘크리트 시편 내 온도이력을 나타낸 그래프이다. 페이스트 내 온도이력과 비슷하게 고로슬래그 치환량이 증가할수록 최대 온도는 감소하고, 해당 온도 도달 시기는 증가하는 것을 알 수 있다. 혼입 시멘트 페이스트 내 상대적인 물-시멘트비가 증가하여 자기발열 시멘트에 비해 단위수화열량이 증가하는 것과는 별개로 실제 콘크리트 시편 내 발열로 인한 온도 상승에 관여하는 CA 클링커의 함량이 감소하므로 전체적인 온도 발열 성능은 고로슬래그 치환량의 증가에 따라 낮아지는 것으로 판단된다. 두 실험 결과로써 시편 내 온도의 균형적인 분포 및 안정적인 발열성능 확보를 위해 고로슬래그의 혼입량은 최대 20%가 적절하며, 경제적 관점에서 그 이상의 혼입량이 요구될 경우 적절량의 수화촉진제가 필요할 것으로 사료된다.



(a) CG20



(b) CG40

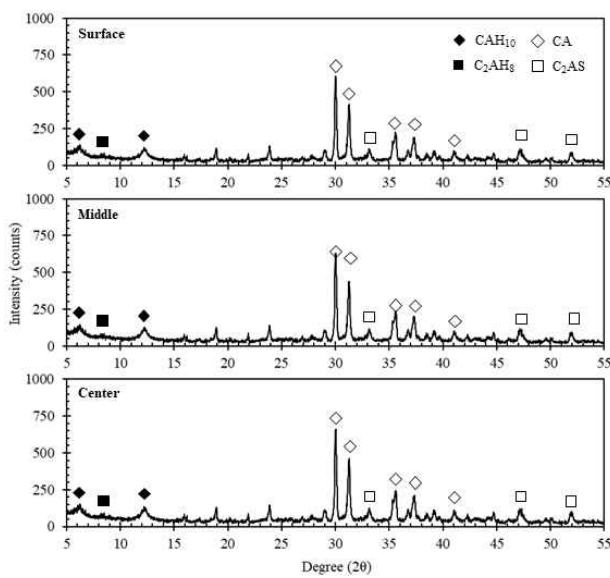


(c) CG60

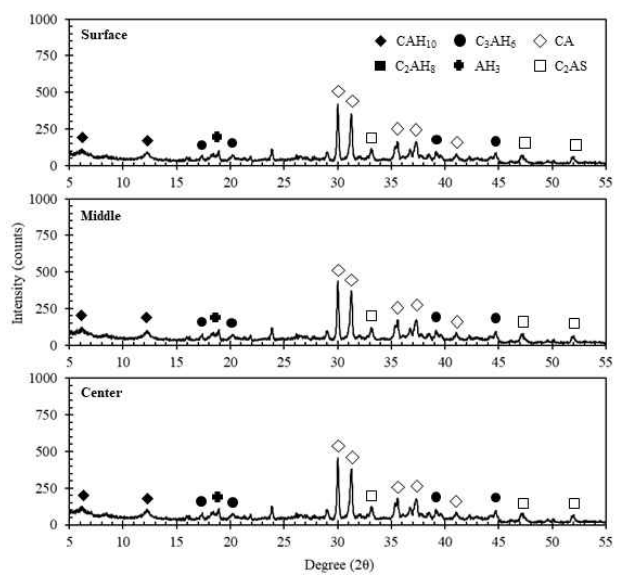
< 그림 3.25 시간에 따른 CA계열 자기발열 시멘트 콘크리트 온도 이력 >

다. X선 회절분석을 통한 수화물 조성 분석

C_2ASH_8 수화물 생성유도를 통한 CA계열 수화물의 상변화 억제 효과를 검증하기 위해 $-20^{\circ}C$ 환경에서 시간에 따른 고로슬래그 혼입 시멘트 콘크리트 내 위치별 XRD 분석 결과를 그림 3.26-3.28에 나타내었다. 고로슬래그 혼입량 및 위치와 관계없이 재령 1일에서 CAH_{10} 및 C_2AH_8 수화물이 생성되는 것을 알 수 있다. 이후 시간이 지남에 따라 재령 28일 XRD 결과에서 C_2AH_8 수화물이 C_3AH_6 및 AH_3 로 상변화한 것을 알 수 있는데, 예상과 달리 C_2ASH_8 수화물의 생성은 이루어지지 않은 것을 확인하였다. 일반적으로 Silicate 혼화재로 인한 C_2ASH_8 의 생성은 충분한 양의 C_2AH_8 수화물 생성이 뒷받침되어야하는데, 극저온 환경에서 해당 수화물의 생성은 제한적일 수 있으며 이로 인해 해당 현상을 관측하기에는 재령이 상대적으로 짧은 것으로 판단된다. 이로 인해 초기 C_2AH_8 수화물 생성 유도를 위해 별도의 첨가제가 필요할 것으로 사료된다.

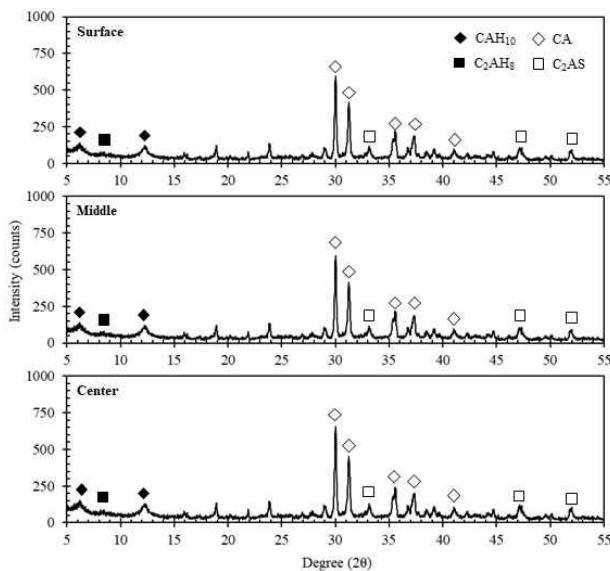


(a) 재령 1일

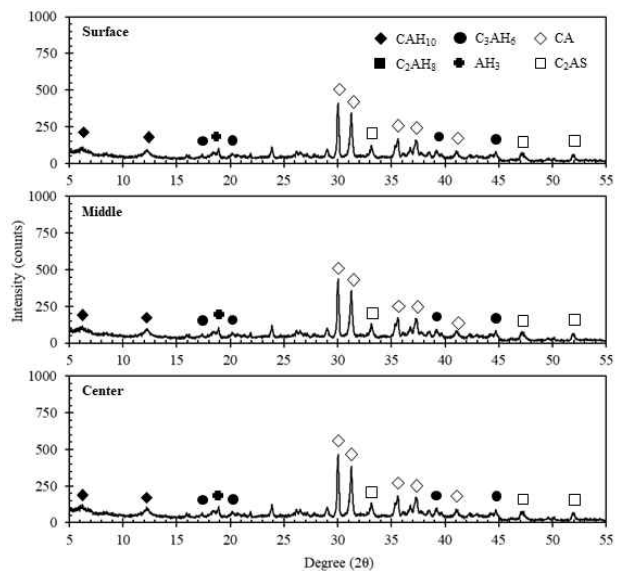


(b) 재령 28일

< 그림 3.26 시간에 따른 CG20 시멘트 콘크리트 내 위치별 XRD 결과 >

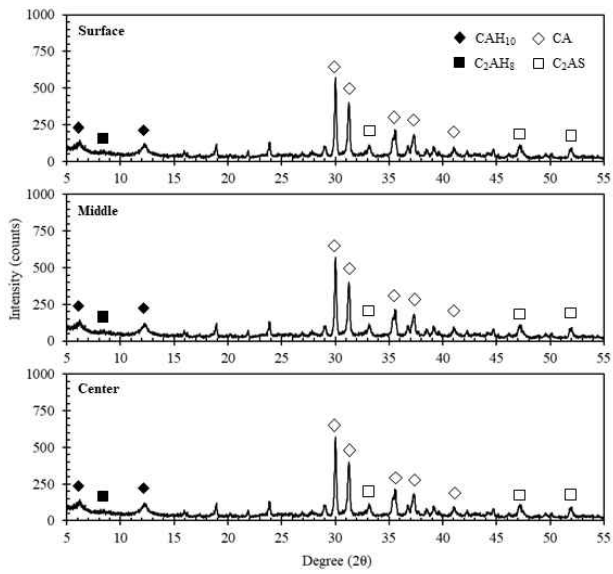


(a) 재령 1일

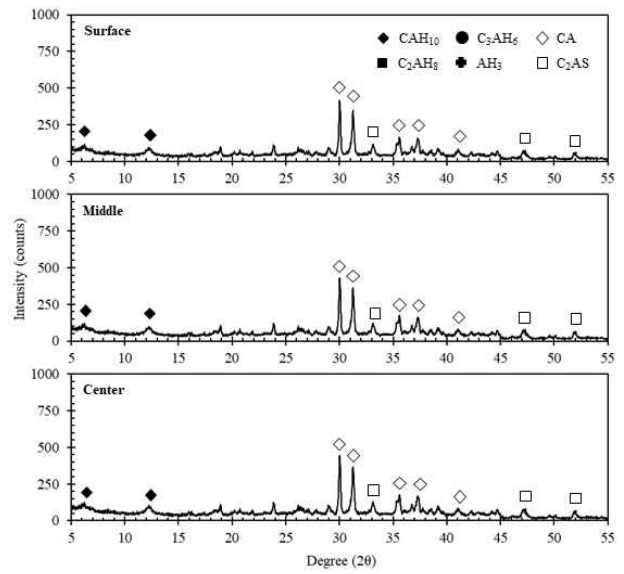


(b) 재령 28일

< 그림 3.27 시간에 따른 CG20 시멘트 콘크리트 내 위치별 XRD 결과 >



(a) 재령 1일



(b) 재령 28일

< 그림 3.28 시간에 따른 CG20 시멘트 콘크리트 내 위치별 XRD 결과 >

3.2 극한 환경에서의 내부균열 억제형 자기발열 콘크리트 개발

3.2.2 수화 유도형 Sulfate 계열 첨가제 성능평가

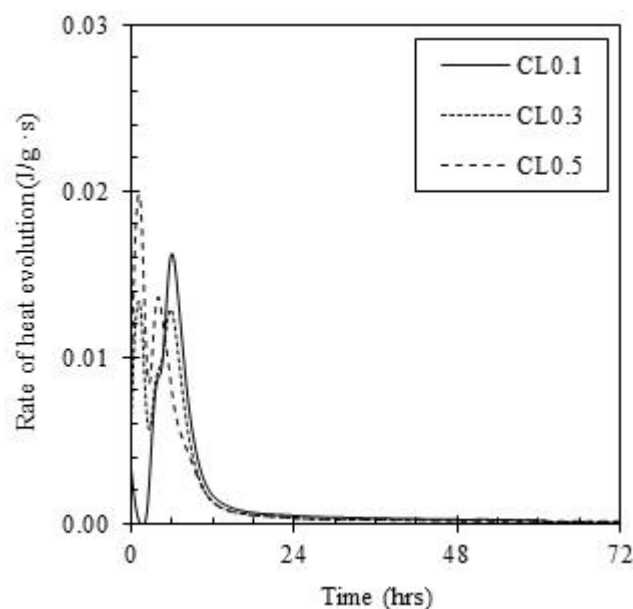
가. 미소수화열량계를 통한 수화열 특성 평가

앞선 실험 결과를 통해 Silicate 혼화재를 사용한 상변화 억제를 위해 C_2AH_8 수화물의 초기 생성이 필요함을 확인하였고, 이를 해결하기 위해 Sulfate 계열 수화촉진제를 사용에 따른 수화열 특성을 평가하였다. 물-시멘트는 동일하게 0.4을 유지하였고, 표 3.12와 같이 $LiSO_4$ 첨가량을 변수로 미소수화열량계 시험을 진행하였다.

표 3.12 미소수화열량계 시험을 위한 페이스트 배합설계

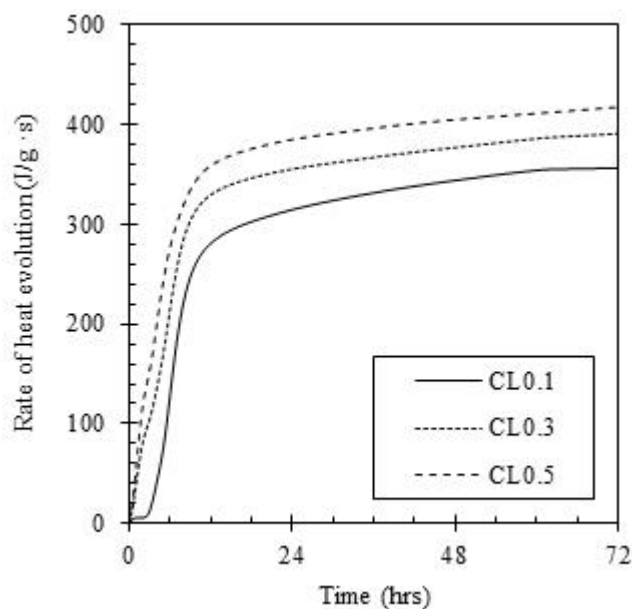
	배합설계 (중량비)		$LiSO_4$ (%, cem.)
	CAC	물	
CL0.1	1.0	0.4	0.1
CL0.3			0.3
CL0.5			0.5

그림 3.29는 $LiSO_4$ 를 수화 촉진제로써 첨가한 자기발열 시멘트의 시간에 따른 단위수화열량을 나타낸 것이다. $LiSO_4$ 의 첨가는 제 2 피크점이 발생 전 유도기를 단축하는 결과를 보였고, 시멘트량 대비 0.3%이상을 치환하였을 경우 유도기 없이 바로 제 2 피크점이 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한, 제 1 피크점의 단위수화열량이 첨가량에 따라 증가하는 것을 확인하였다. 이를 통해 $LiSO_4$ 이 CA계열 클링커의 초기 수화반응을 촉진한다는 것을 짐작할 수 있으며, 초기 발열 성능 또한 우수할 것으로 판단된다.



< 그림 3.29 $LiSO_4$ 를 첨가한 자기발열시멘트의 시간에 따른 단위수화열량 >

그림 3.23은 LiSO_4 를 첨가한 자기발열 시멘트의 72시간 동안의 누적 단위수화열량을 나타내고 있다. 예상한 바와 같이 LiSO_4 를 첨가하지 않은 자기발열 시멘트에 비해 상대적으로 높은 누적 단위수화열량을 나타냈으며, 24시간 이내에 300 J/g을 초과하였다. 하지만, 초기 수화에서 필요 이상의 발열은 급결 반응 (Flash set)을 야기해 작업성을 떨어뜨릴 수 있으므로 LiSO_4 사용에 따른 응결 시간 검증이 필요할 것으로 사료된다.



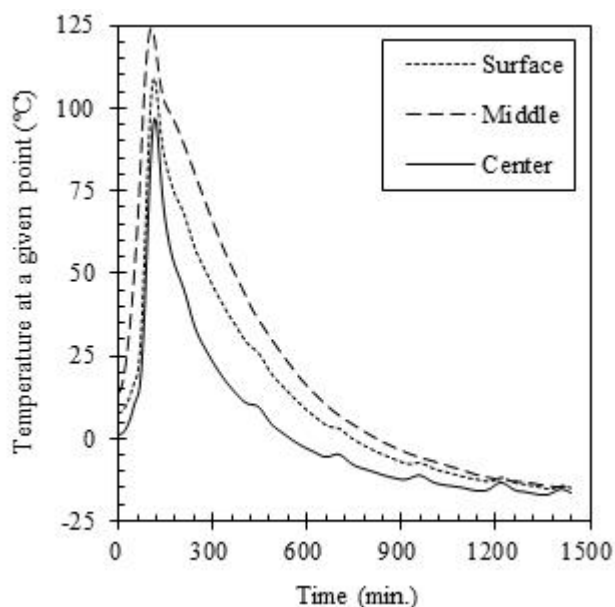
< 그림 3.30 LiSO_4 를 첨가한 자기발열시멘트의 시간에 따른 누적 단위수화열량 >

표 3.11 LiSO_4 를 첨가한 자기발열시멘트의 24시간 누적 단위수화열량 (J/g)

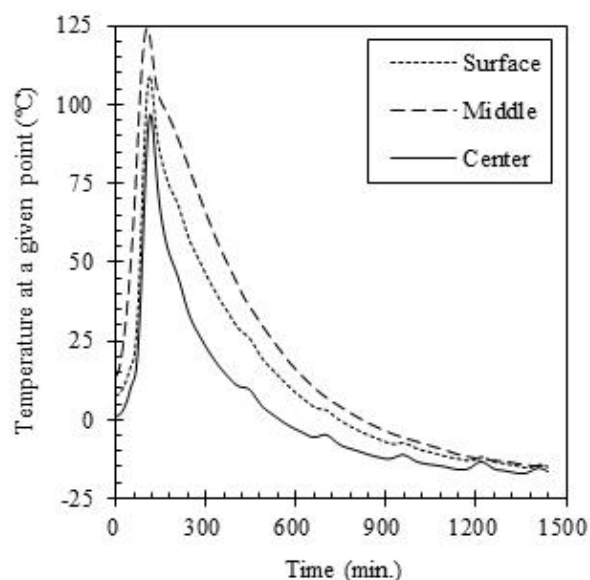
	CL0.1	CL0.3	CL0.5
누적 단위수화열량	327.69	390.29	414.00

나. 매립형 열전대를 통한 발열성능 평가

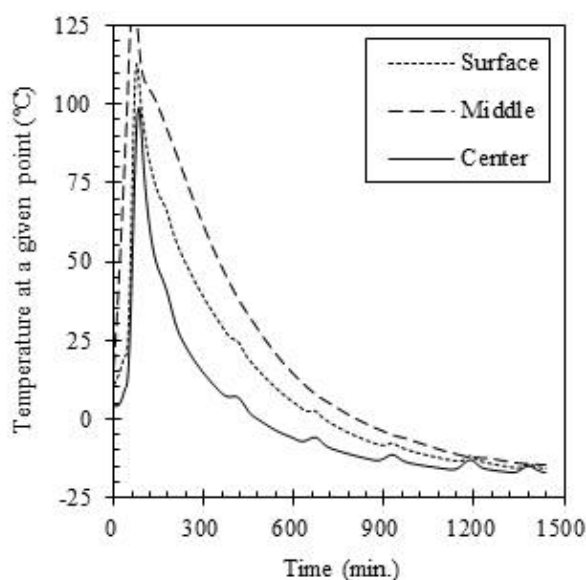
-20℃ 환경에서의 수화촉진을 위한 LiSO_4 첨가에 따른 페이스트 및 콘크리트의 발열성능 평가를 위해 시편 내 온도 이력 분포를 측정하였다. 앞선 미소수화열량계 시험과 동일한 첨가 범위 및 물-시멘트를 사용하였고, 콘크리트 배합설계는 자기발열 시멘트의 발열 성능평가와 같은 배합비를 사용하였다. 데이터로거를 통해 수집된 24시간 동안 페이스트 시편 내 3 지점의 온도 이력은 그림 3.31과 같다. LiSO_4 의 첨가량이 증가할수록 최대온도는 비슷한 범위를 지나 도달 시기가 단축되는 것을 알 수 있다. 특히, 0.5%를 첨가한 경우 약 2시간 이내에 최대 온도에 도달하는 것을 확인하였다.



(a) CL0.1



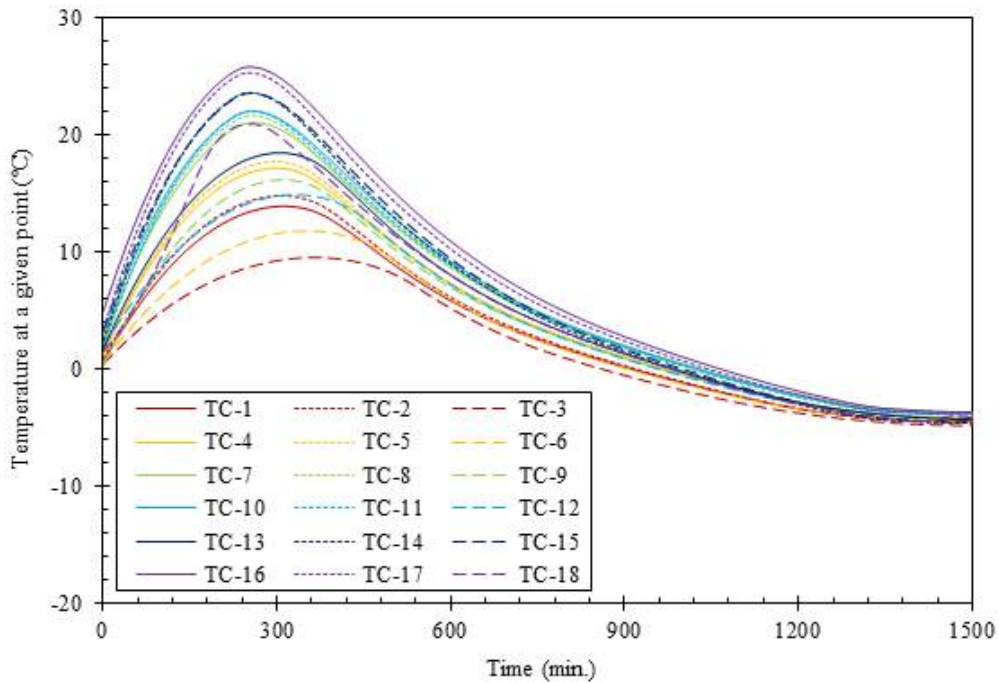
(b) CL0.3



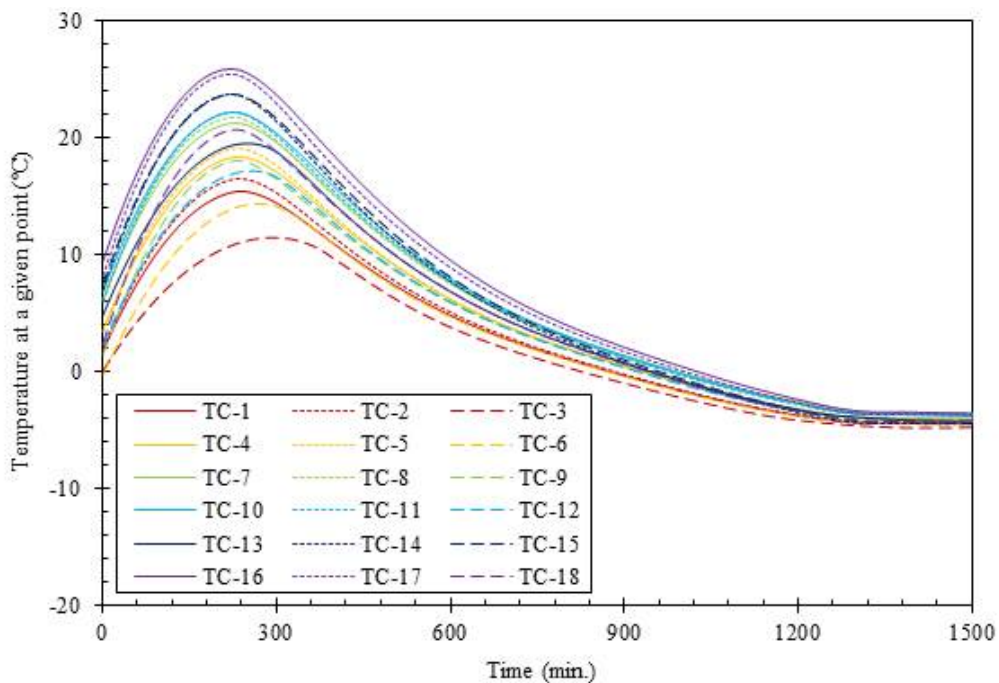
(c) CL0.5

< 그림 3.31 CA계열 자기발열 시멘트의 시간에 따른 발열 성능 >

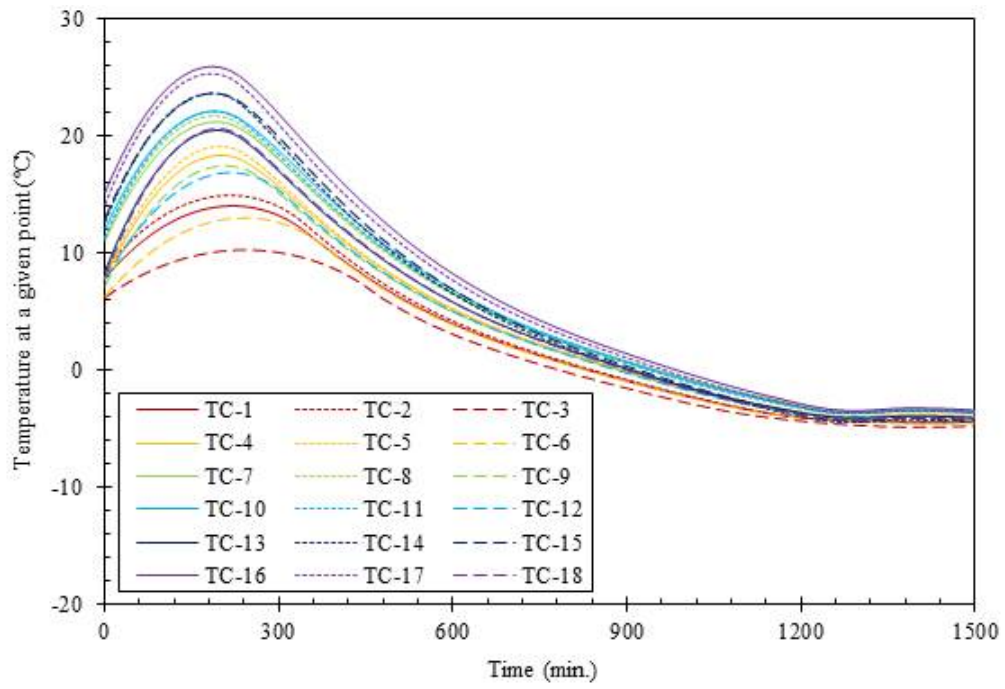
그림 3.32는 -20°C 환경에서의 시간에 따른 자기발열 시멘트의 LiSO_4 첨가량 별 콘크리트 시편 내 온도이력을 나타낸 그래프이다. 첨가량에 관계없이 콘크리트 내 최대 온도는 약 26°C 였으며, 해당 온도 도달 시기는 LiSO_4 첨가량 0.1, 0.3, 0.5% 순으로 187, 224, 259분이었다. CA계열 클링커로 구성된 시멘트 수화 시 LiSO_4 의 존재는 초기 반응에서 $\text{Li}_2\text{O} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ 를 형성하여 CAH_{10} 및 C_2AH_8 의 침전을 유도한다. 이로 인해 수화 반응이 촉진되고, 발생한 수화열로 인해 다시 CA계열 클링커의 반응이 이어지는 연쇄반응이 나타나게 된다. 때문에 극저온 환경에서도 충분한 수화반응이 일어날 수 있으며, 해당 첨가제의 사용량은 요구사항에 맞게 적절히 조절되어야 한다.



(a) CL0.1



(b) CL0.3

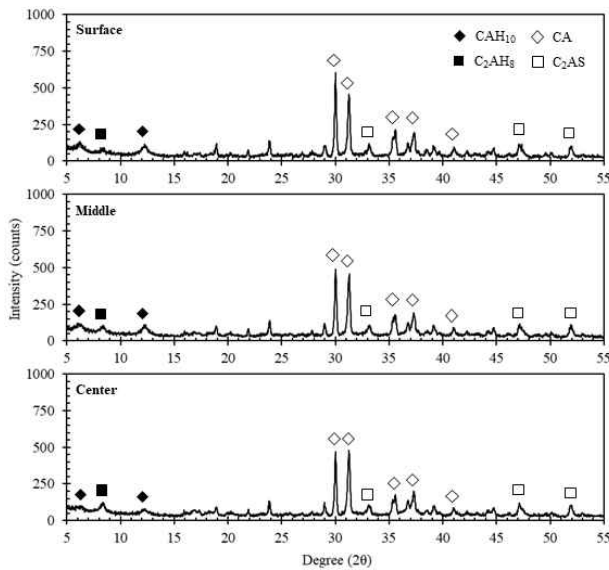


(c) CL0.5

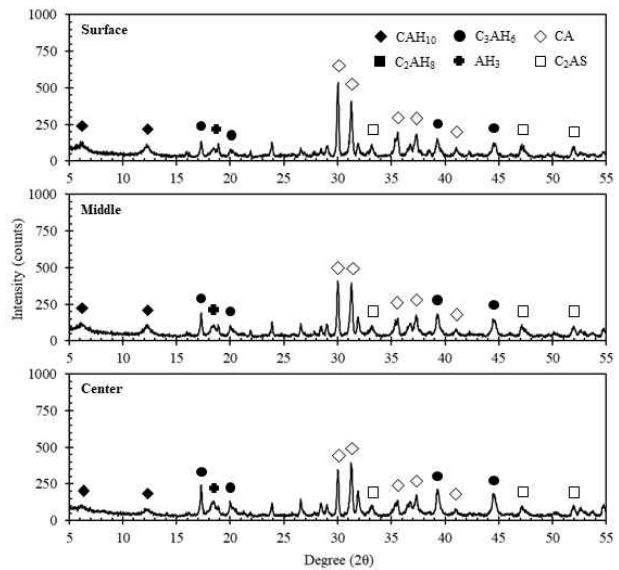
< 그림 3.32 시간에 따른 CA계열 자기발열 시멘트 콘크리트 온도 이력 >

다. X선 회절분석을 통한 수화물 조성 분석

LiS04의 수화 촉진 반응 및 첨가량에 따른 생성된 수화물 조성을 확인하기 위해 -20°C 환경에서 시간에 따른 LiS04를 첨가한 시멘트 콘크리트 내 위치별 XRD 분석 결과를 그림 3.33-3.35에 나타내었다. 예상한 바와 같이 LiS04의 첨가는 초기 재령에서 자기발열 시멘트 및 고로슬래그 혼입 시멘트와 비교하여 상대적으로 많은 양의 CAH_{10} 및 C_2AH_8 수화물을 생성하였고, 이후 시간이 지남에 따라 상변화 현상으로 인해 C_3AH_6 및 AH_3 수화물이 생성되는 것을 확인하였다. 또한 중심부에서 생성된 수화물의 피크점이 상대적으로 높은 것을 알 수 있는데 이는 누적된 수화열로 인해 외기의 영향을 받는 표면부에 비해 좀 더 수화가 일어난 것으로 사료된다.

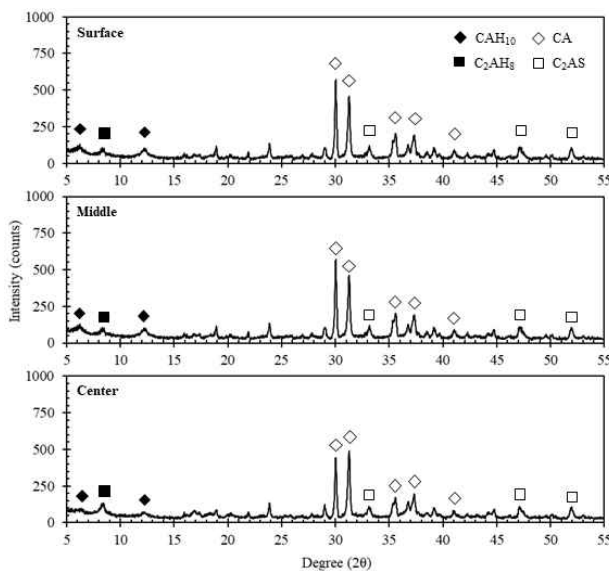


(a) 재령 1일

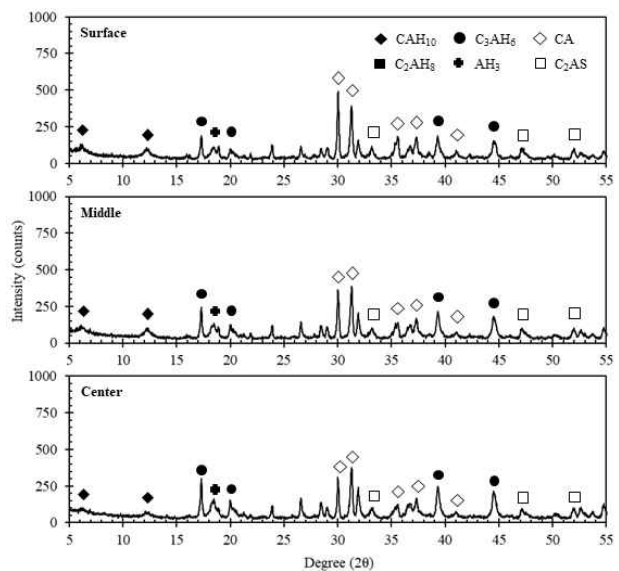


(b) 재령 28일

< 그림 3.33 시간에 따른 CL0.1 시멘트 콘크리트 내 위치별 XRD 결과 >

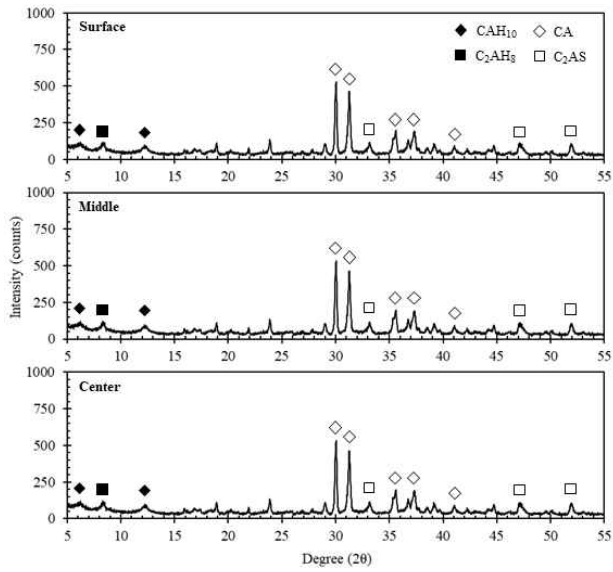


(a) 재령 1일

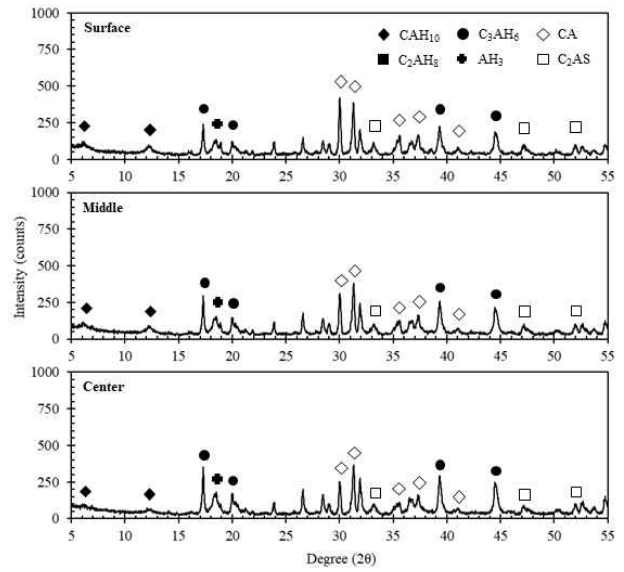


(b) 재령 28일

< 그림 3.34 시간에 따른 CL0.3 시멘트 콘크리트 내 위치별 XRD 결과 >



(a) 재령 1일



(b) 재령 28일

< 그림 3.35 시간에 따른 CL0.5 시멘트 콘크리트 내 위치별 XRD 결과 >

3.2.3 극한 환경 하 내부균열 억제형 자기발열 콘크리트 배합설계 도출

가. 굳지 않은 콘크리트 물성 평가

표 3.12는 고로슬래그 및 LiSO_4 를 사용한 자기발열 시멘트 콘크리트의 슬럼프 및 공기량 측정 시험 결과이다. 슬럼프의 경우 Type II 시멘트 콘크리트와 비교하였을 때 고로슬래그의 치환량이 증가할수록, LiSO_4 의 첨가량이 감소할수록 감소하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 보통 포틀랜드 시멘트에 고로슬래그를 치환할수록 유동성이 증가하는데 CA계열 시멘트에서도 비슷한 경향을 나타냈다. LiSO_4 의 경우 초기 수화반응을 촉진시키는 역할을 하는데 이로 인해 유동성이 소폭 감소하는 것으로 사료된다. 공기량의 경우, 일반적으로 국내외 규정 또는 시방서에서 제시하는 4.0% 이상을 모두 만족하는 것으로 나타났는데 이는 극한 환경에서의 콘크리트 구조물에 동결융해로 인한 피해를 완화시킬 것으로 판단된다.

표 3.12 고로슬래그를 혼입한 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 및 공기량 측정 시험 결과

		슬럼프 (mm)			공기량 (%)		
		1	2	3	1	2	3
Silicate 계열 혼화재	CG20	140	135	135	5.7	5.1	5.3
		137			5.4		
	CG40	135	120	125	5.1	4.8	5.2
		127			5.0		
	CG60	120	125	120	4.9	4.2	4.8
		122			4.6		
Sulfate 계열 첨가제	CL0.1	140	140	135	5.7	5.2	5.0
		138			5.3		
	CL0.3	145	140	130	5.9	5.8	5.6
		138			5.8		
	CL0.5	150	145	140	6.2	5.4	5.6
		145			5.7		

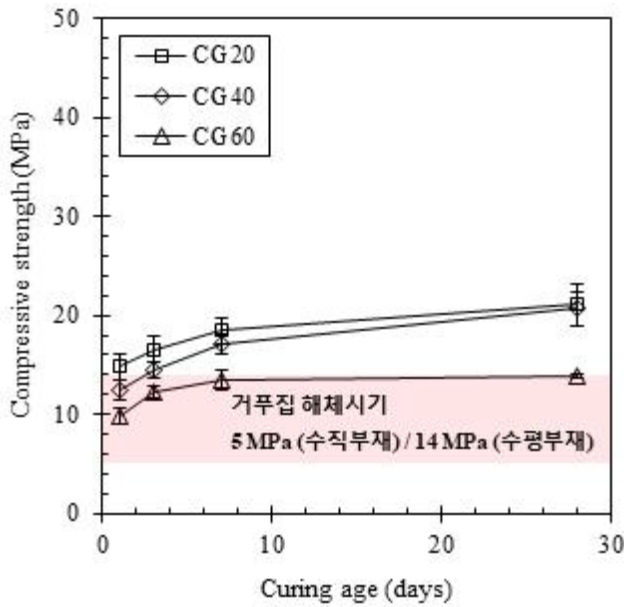
표 3.13은 고로슬래그와 LiSO_4 를 사용하였을 때 관입저항법에 의한 초결 및 종결 시간을 측정한 결과이다. 고로슬래그를 20, 40, 60% 치환하였을 경우 초결은 각각 290, 380, 317 분이며, 종결은 390, 501, 399 분에 발생하였다. 40% 치환한 시편의 경우 Type II만을 사용한 시편보다 응결이 지연되었으며, 60%를 치환한 경우에는 큰 차이를 나타내지 않았다. 특히 40%를 치환한 경우에는 콘크리트 시편 내 최대 온도에 도달하는 시간을 약 80분 정도 지연시켰으며, 그에 따라 치환량에 따라 그 차이가 있지만 GGBS의 치환이 CA 계열의 수화 과정 혹은 생성 수화물에 영향을 미쳐 응결 지연을 발생시키는 것으로 판단된다.

반면, LiSO_4 의 혼입은 응결시간을 대폭 감소시키는 것으로 확인하였으며, 감소폭은 혼입량이 증가함에 따라 증가하였다. 0.5%를 혼입할 경우 Type II만을 사용한 경우보다 초결에서는 2시간 이상의 응결시간 차이를 보였으며, 종결은 약 3시간의 차이를 보였다. 본 연구결과에는 포함되어있지 않지만 LiSO_4 첨가량이 1.0%를 초과하는 경우 배합 직후 바로 굳어버리는 급격반응이 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 본 연구에서의 LiSO_4 의 첨가량범위를 최대 0.5%로 설정하였다.

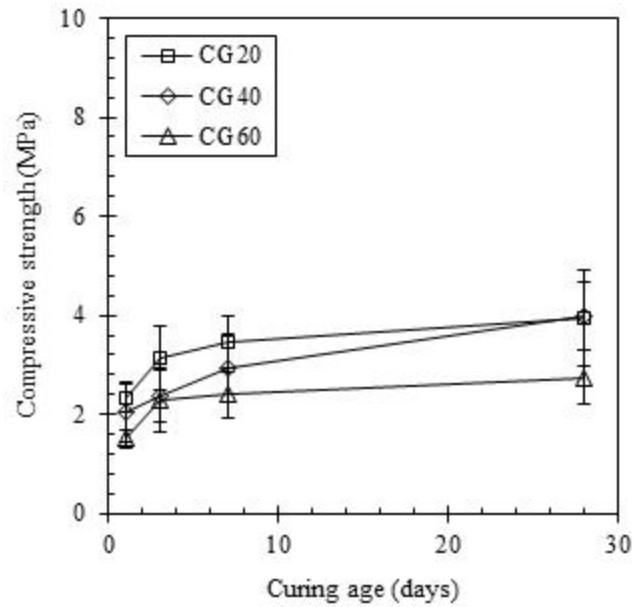
표 3.13 콘크리트 배합 종류에 따른 응결시간 (분)

	초결	종결
CG20	290	390
CG40	380	501
CG60	317	399
CL0.1	243	321
CL0.3	234	310
CL0.5	188	239

나. 굳은 콘크리트 물성 평가

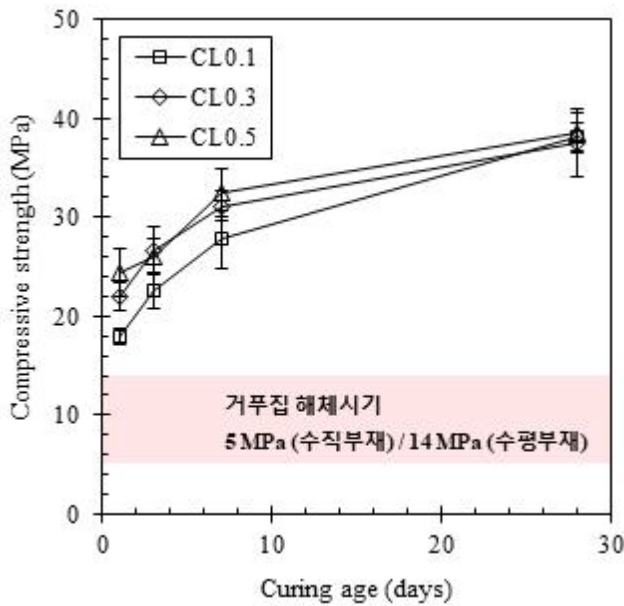


(a) 압축강도

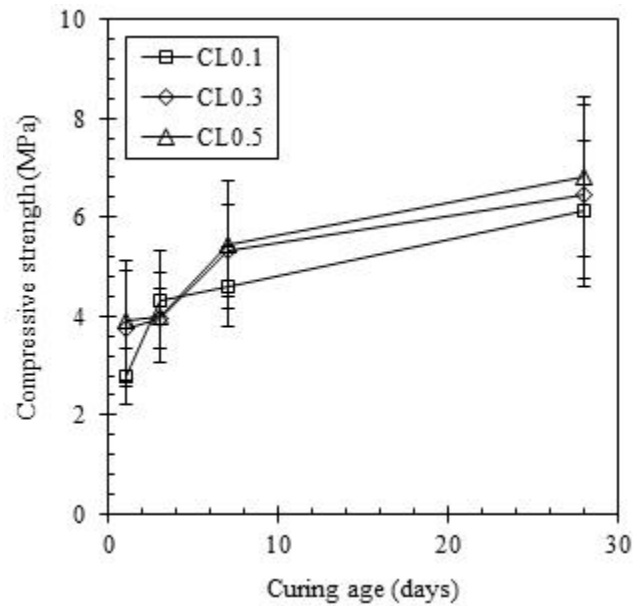


(b) 휨강도

< 그림 3.36 영하 20도에서의 자기발열 시멘트 콘크리트 강도 결과



(a) 압축강도



(b) 휨강도

< 그림 3.37 영하 20도에서의 자기발열 시멘트 콘크리트 강도 결과

3.3 콘크리트 내 온도 이력과 경화특성 간 상관관계 도출

3.3.1 시간에 따른 열전달 특성 평가

앞서 관측한 콘크리트 내 온도 이력 데이터를 이용한 매트랩 기반 3차원 보간법을 적용하였고, 각 축의 단면 (x축 : 30 cm, y축 : 7.5 cm, z축 : 7.5 cm)을 기준으로 내부 온도 분포를 표현하였다. 온도 분포도는 일정시간 간격으로 작성하였으며, 온도분포도에서의 등고선 (Contour)는 데이터로거 설정에 맞춰 -20 - +30℃로 설정하여 온도변화를 손쉽게 확인할 수 있도록 하였다. 그림 3.38은 3차원 보간법의 예시이며, 사용된 매트랩 코드는 다음과 같다.

3차원 보간법 Matlab Code

% 변수 및 범위 설정

```
filename = '측정 값.xlsx';  
Data=xlsread(filename, Sheet #, '해당 데이터 행:열');  
[X,Y,Z] = meshgrid(X축 범위, Y축 범위, Z축 범위);  
V=zeros(size(X));
```

% 측정 값 입력 및 대칭 이동

```
time=해당 시간;  
Temp=Data(time,:);
```

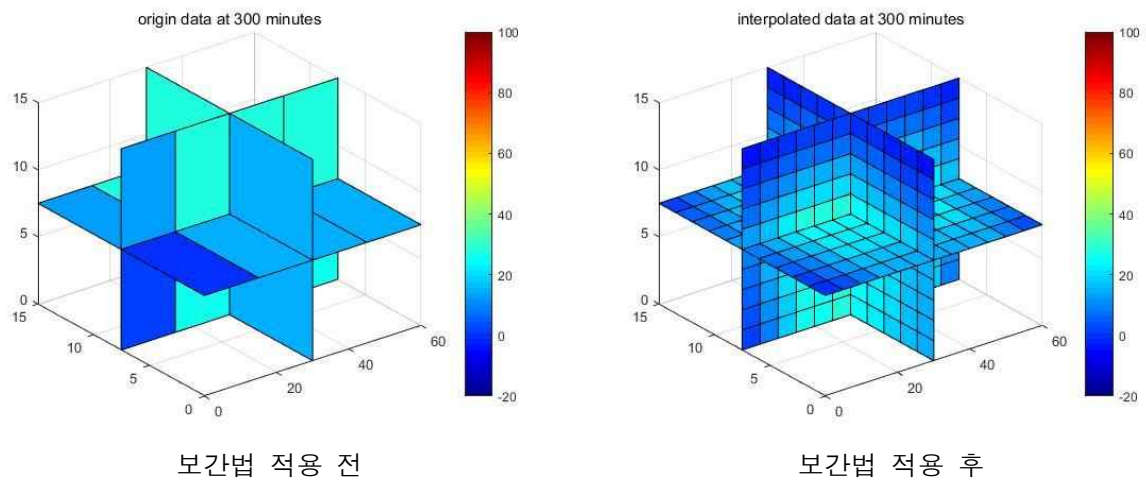
```
%-----  
% 1 층  
V(1,1,1)=Temp(1); V(1,end,1)=Temp(1); V(1,2,1)=Temp(7); V(1,4,1)=Temp(7); V(1,3,1)=Temp(13);  
V(2,1,1)=Temp(4); V(2,end,1)=Temp(4); V(2,2,1)=Temp(10); V(2,4,1)=Temp(10); V(2,3,1)=Temp(16);  
V(3,1,1)=Temp(1); V(3,end,1)=Temp(1); V(3,2,1)=Temp(7); V(3,4,1)=Temp(7); V(3,3,1)=Temp(13);  
  
% 2 층  
V(1,1,2)=Temp(2); V(1,end,2)=Temp(2); V(1,2,2)=Temp(8); V(1,4,2)=Temp(8); V(1,3,2)=Temp(14);  
V(2,1,2)=Temp(5); V(2,end,2)=Temp(5); V(2,2,2)=Temp(11); V(2,4,2)=Temp(11); V(2,3,2)=Temp(17);  
V(3,1,2)=Temp(2); V(3,end,2)=Temp(2); V(3,2,2)=Temp(8); V(3,4,2)=Temp(8); V(3,3,2)=Temp(14);  
  
% 3 층  
V(1,1,3)=Temp(3); V(1,end,3)=Temp(3); V(1,2,3)=Temp(9); V(1,4,3)=Temp(9); V(1,3,3)=Temp(15);  
V(2,1,3)=Temp(6); V(2,end,3)=Temp(6); V(2,2,3)=Temp(12); V(2,4,3)=Temp(12); V(2,3,3)=Temp(18);  
V(3,1,3)=Temp(3); V(3,end,3)=Temp(3); V(3,2,3)=Temp(9); V(3,4,3)=Temp(9); V(3,3,3)=Temp(15);  
%-----
```

% 3차원 보간

```
[Xq,Yq,Zq] = meshgrid(X축 범위, Y축 범위, Z축 범위);  
Vq = interp3(X, Y, Z, V, Xq, Yq, Zq);
```

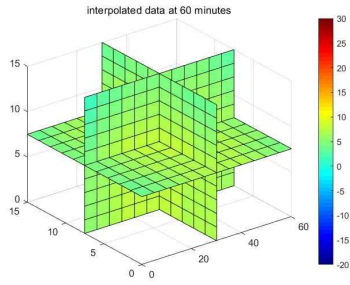
% 그림 출력

```
figure, slice(Xq, Yq, Zq, Vq, X축 절단면, Y축 절단면, Z축 절단면);  
colorbar; caxis([-20 100]); colormap(jet);  
title(['interpolated data at ' num2str(time) ' minutes']);
```

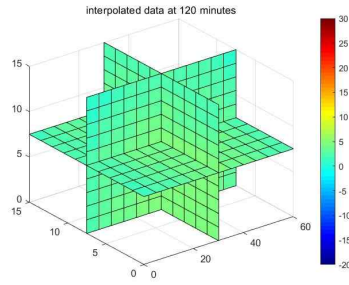


< 그림 3.38 3차원 보간법을 적용한 온도 맵핑 예시 >

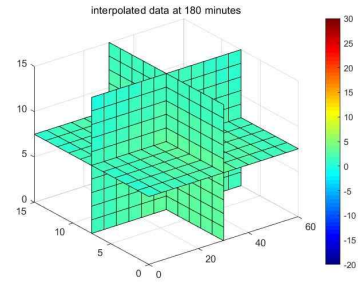
Type I



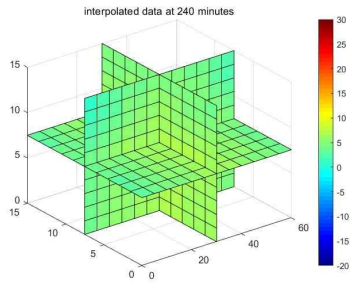
60분



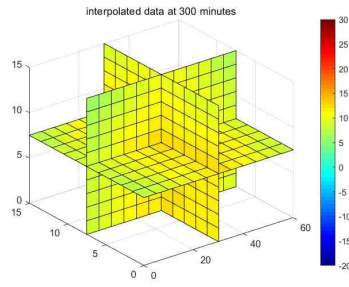
120분



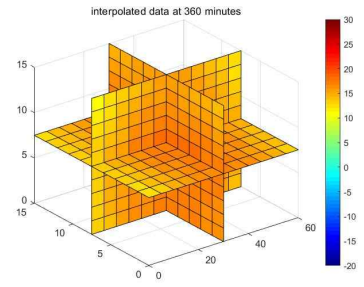
180분



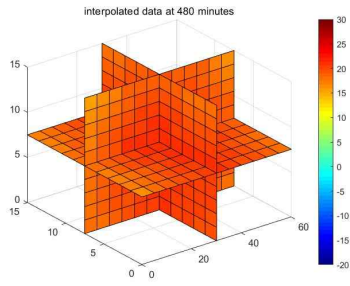
240분



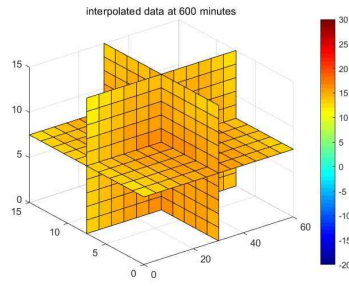
300분



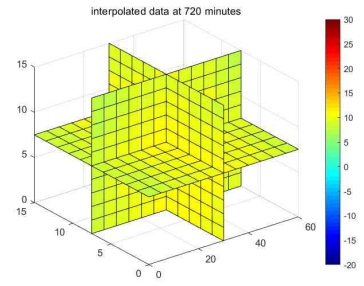
360분



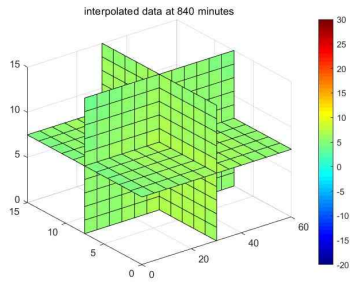
480분



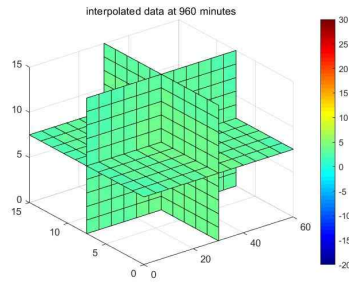
600분



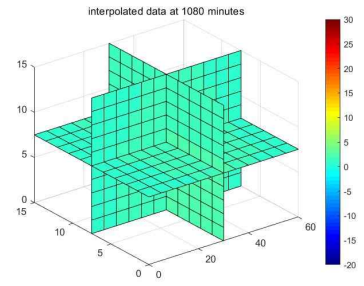
720분



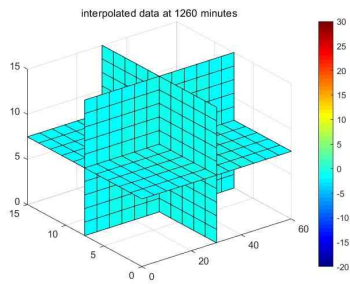
840분



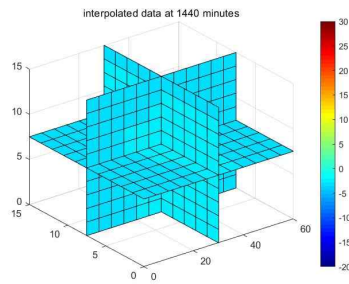
960분



1080분

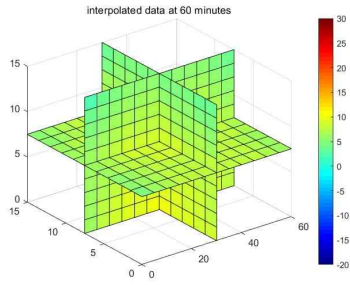


1260분

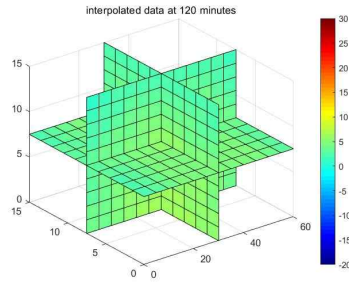


1440분

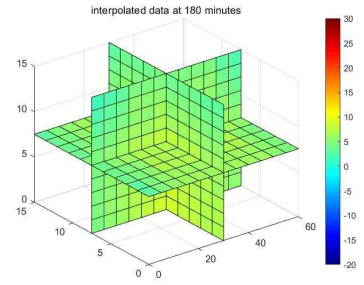
Type II



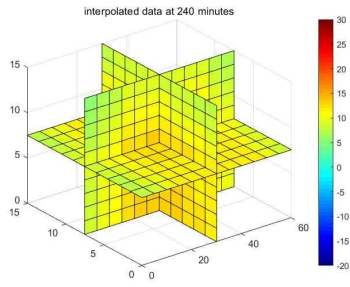
60분



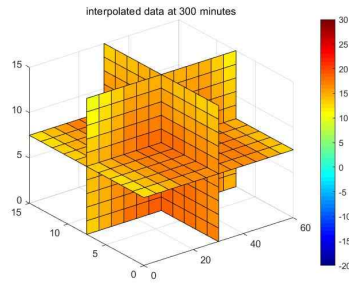
120분



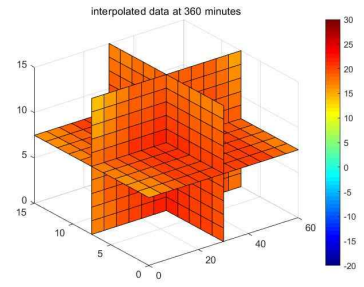
180분



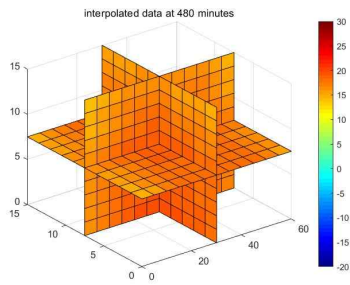
240분



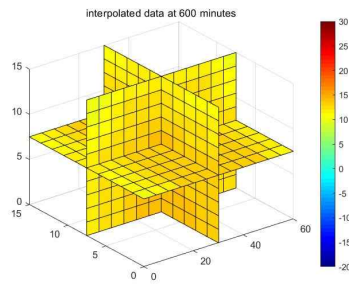
300분



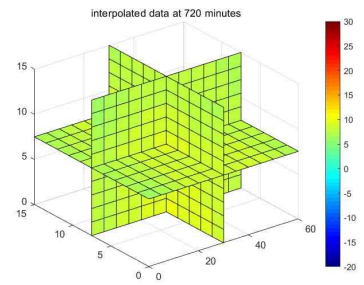
360분



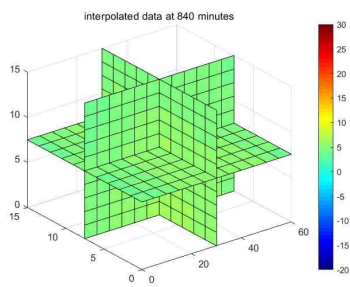
480분



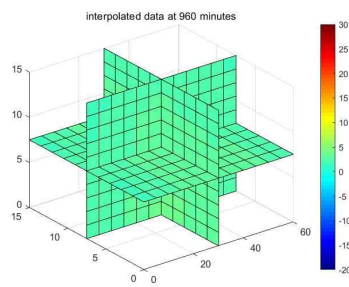
600분



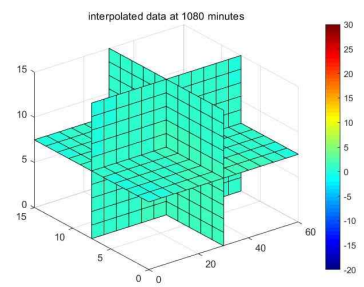
720분



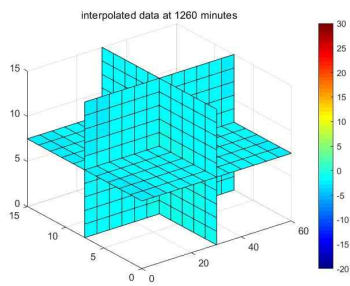
840분



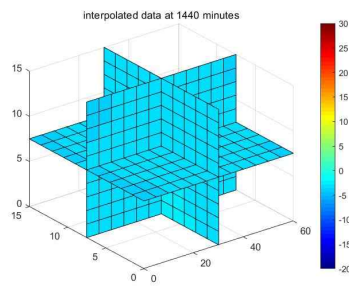
960분



1080분

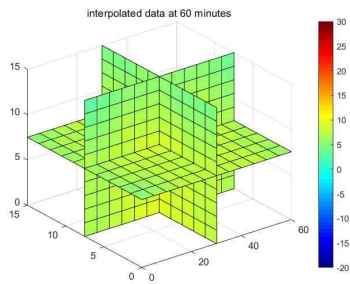


1260분

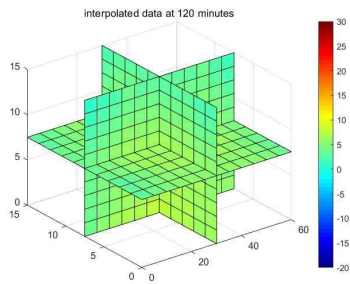


1440분

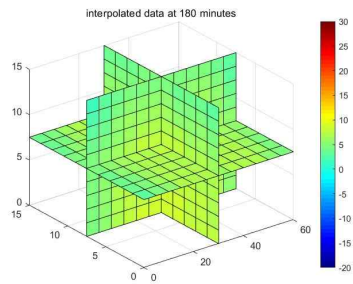
Type II (100×100×400 mm)



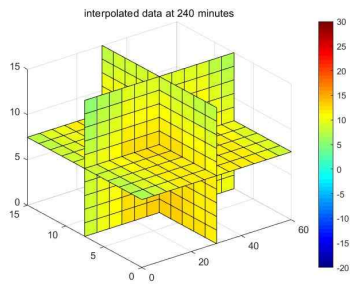
60분



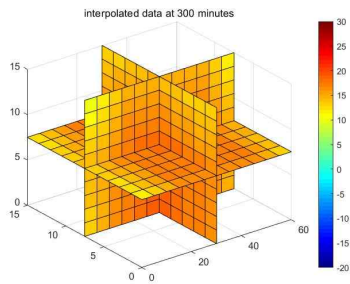
120분



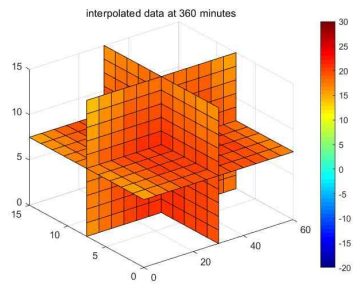
180분



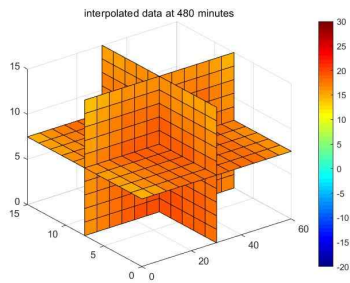
240분



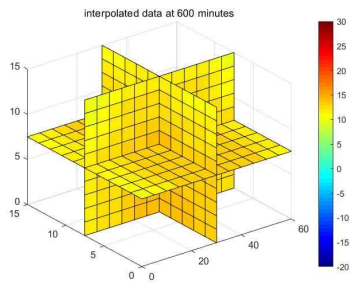
300분



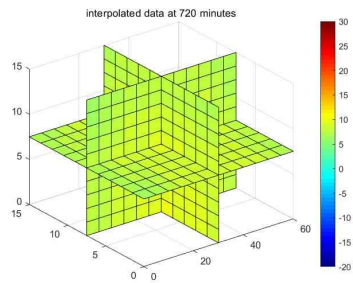
360분



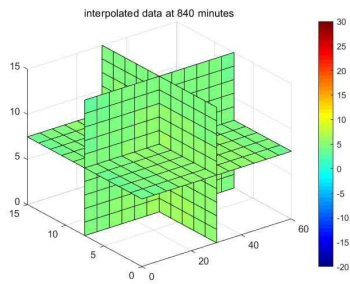
480분



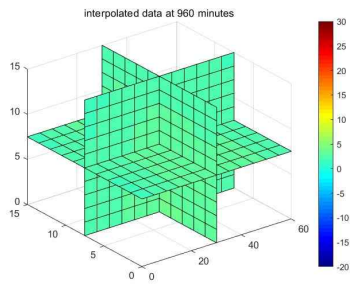
600분



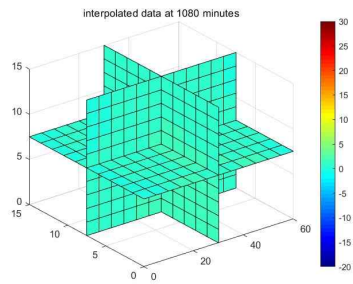
720분



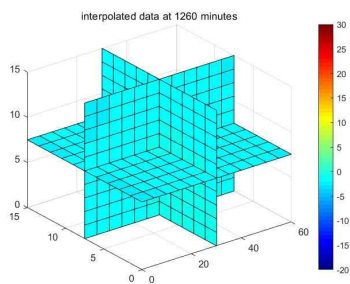
84



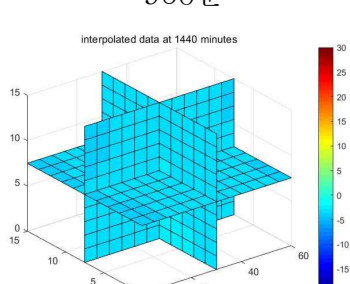
960분



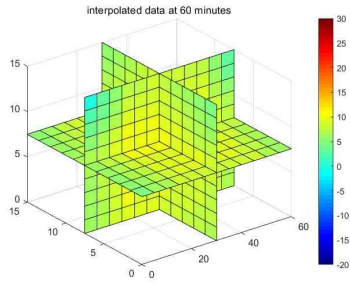
1080분



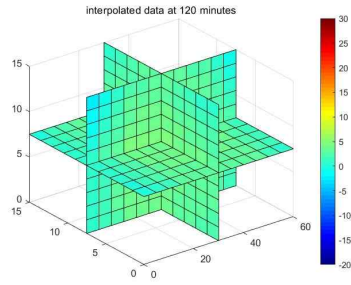
0분



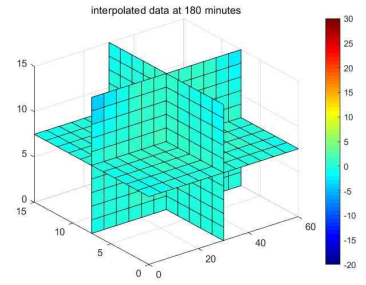
Type III



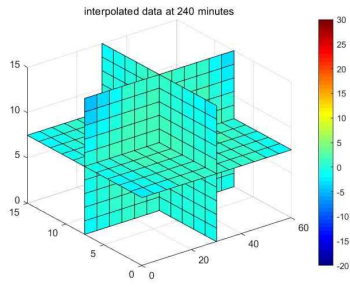
60분



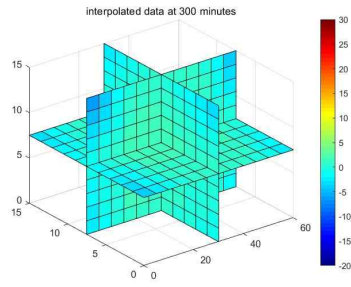
120분



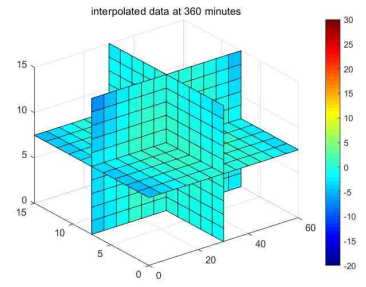
180분



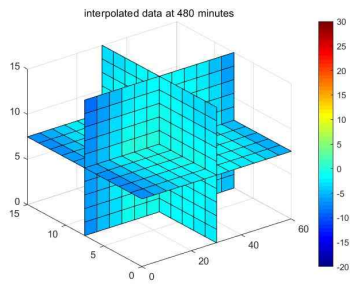
240분



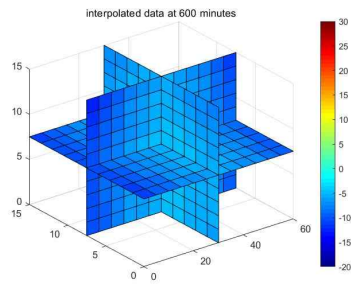
300분



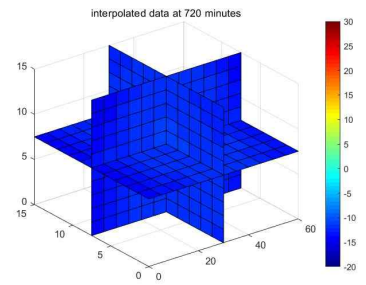
360분



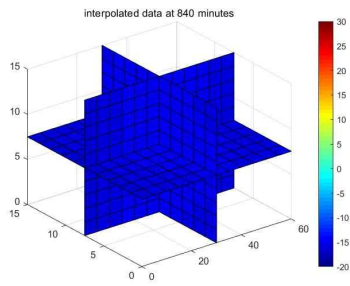
480분



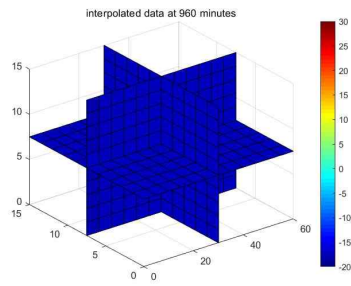
600분



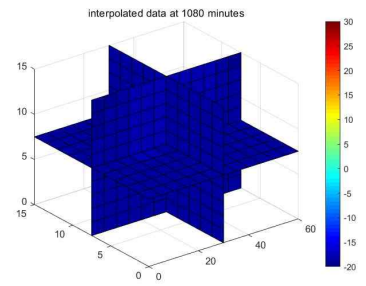
720분



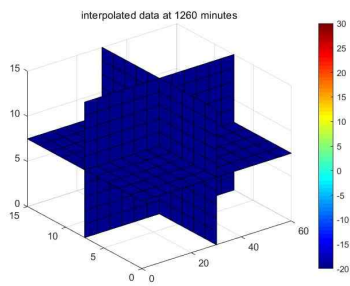
840분



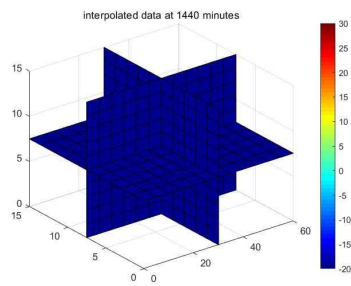
960분



1080분

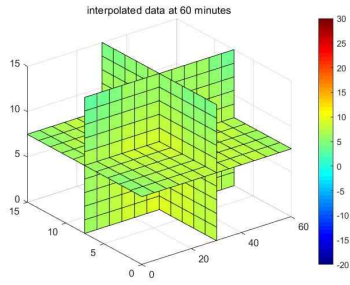


1260분

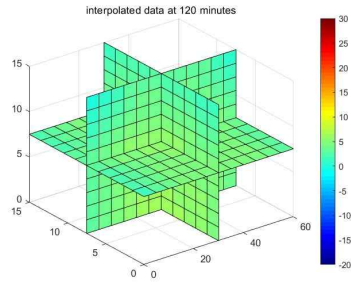


1440분

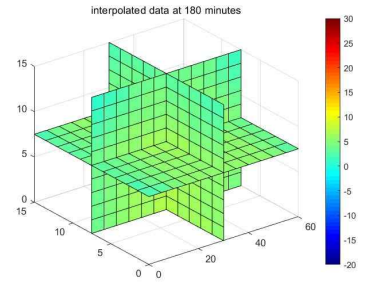
CG20



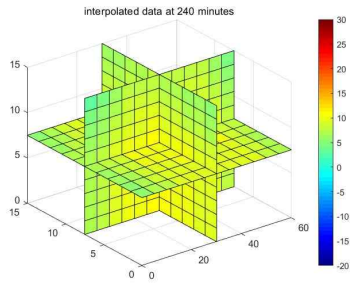
60분



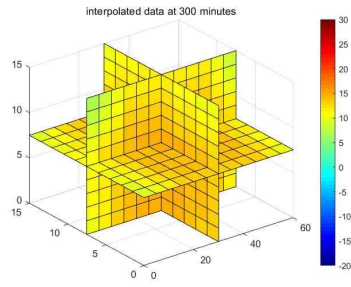
120분



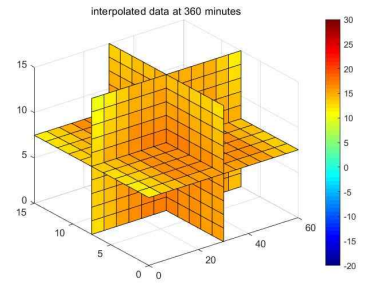
180분



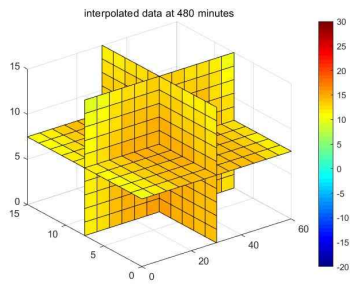
240분



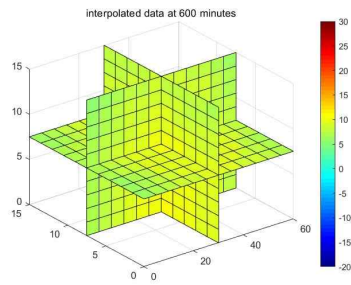
300분



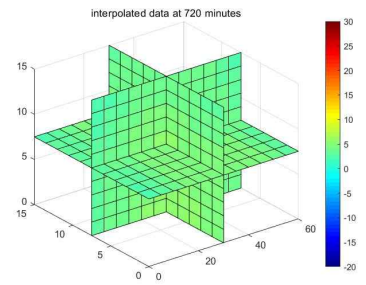
360분



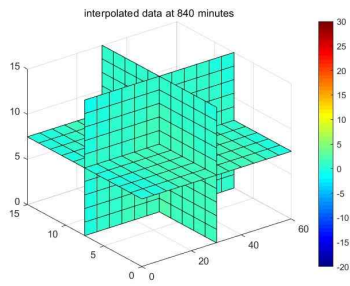
480분



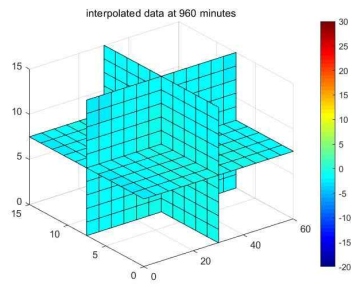
600분



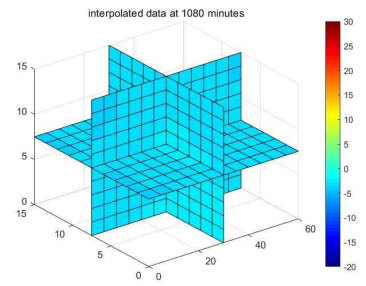
720분



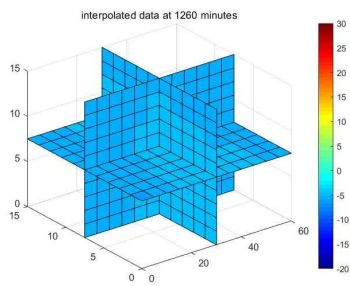
840분



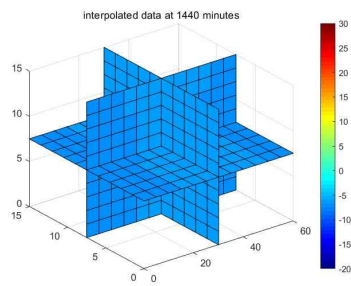
960분



1080분

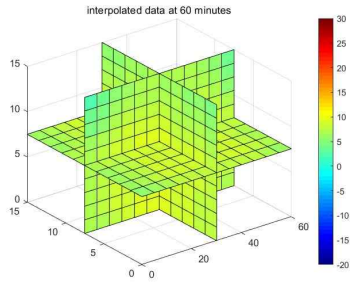


1260분

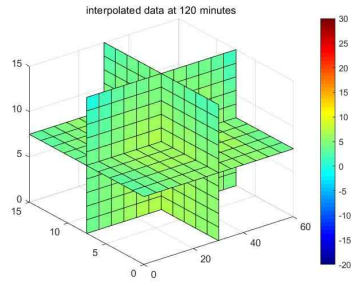


1440분

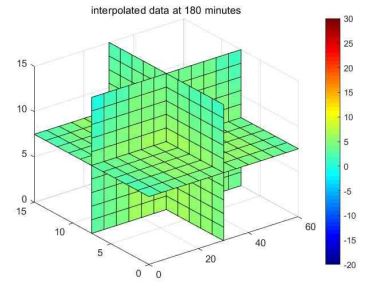
CG40



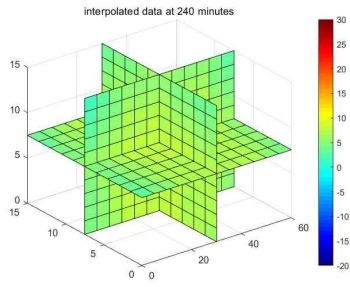
60분



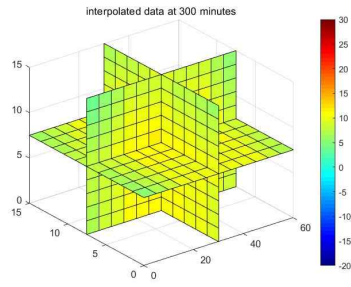
120분



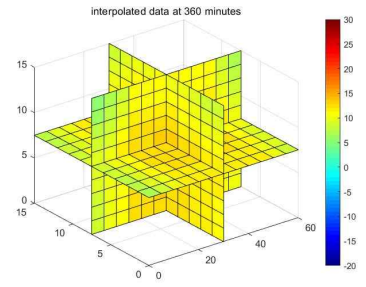
180분



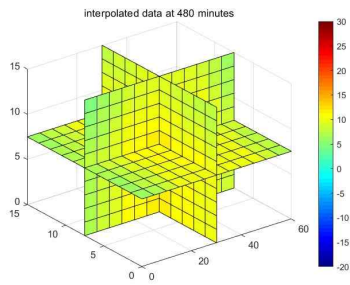
240분



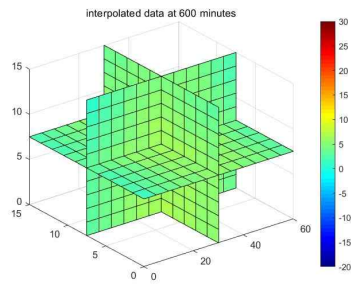
300분



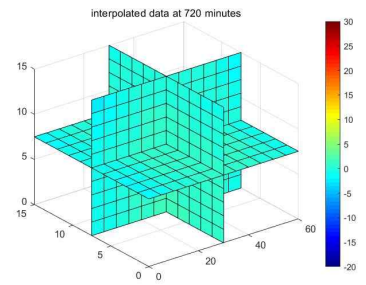
360분



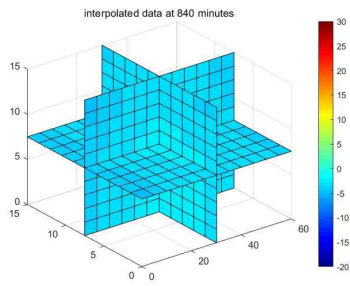
480분



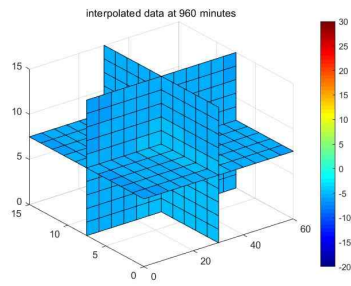
600분



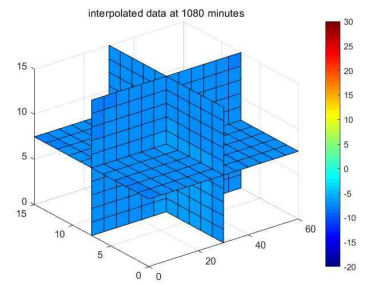
720분



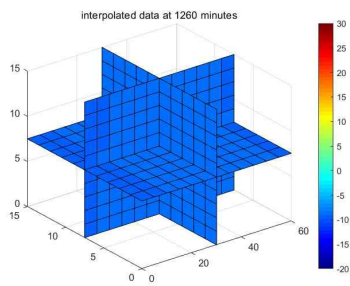
840분



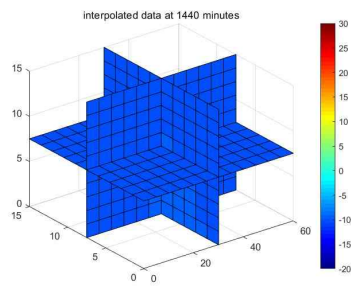
960분



1080분

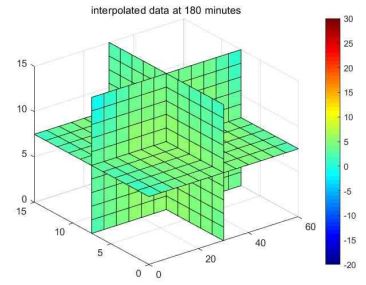
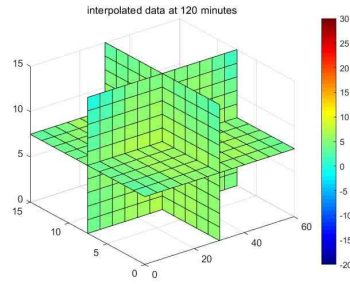
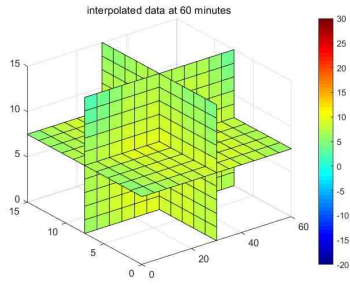


1260분



1440분

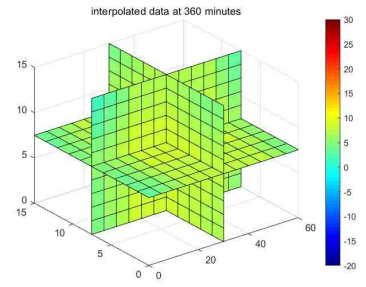
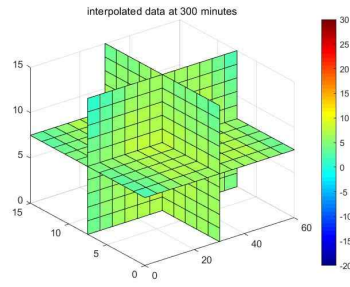
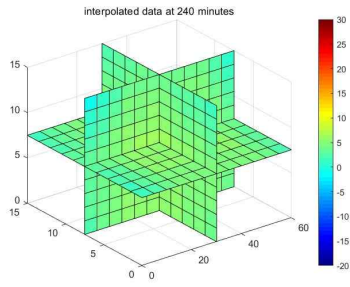
CG60



60분

120분

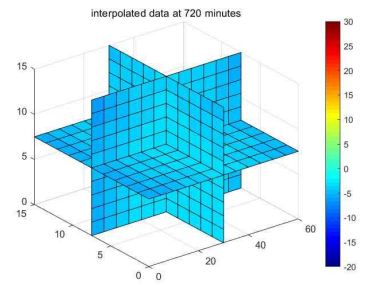
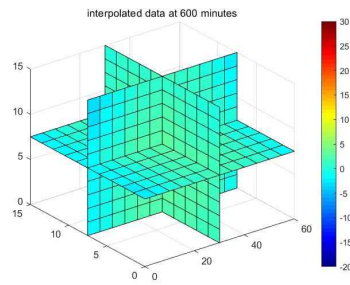
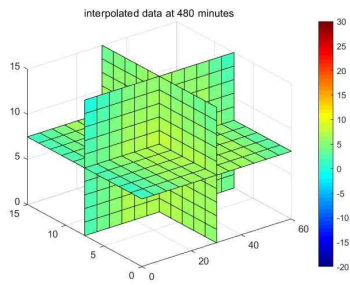
180분



240분

300분

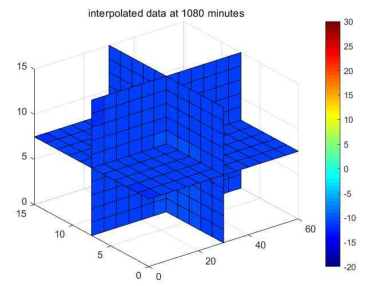
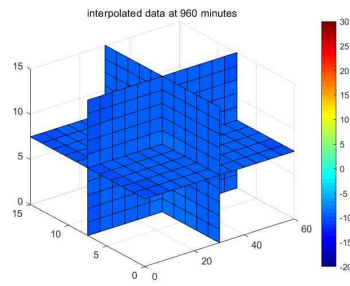
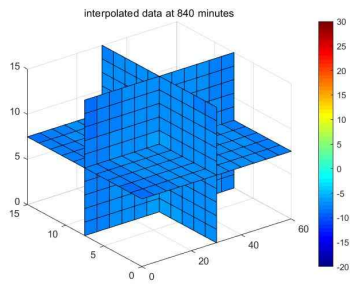
360분



480분

600분

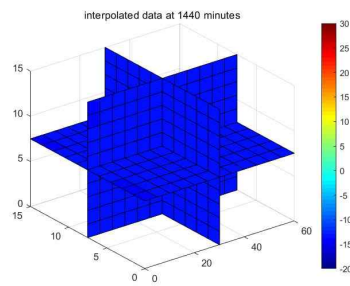
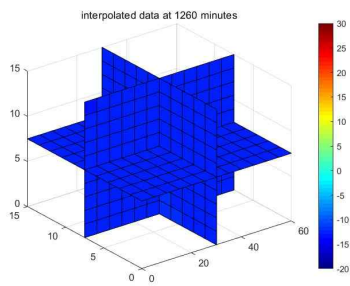
720분



840분

960분

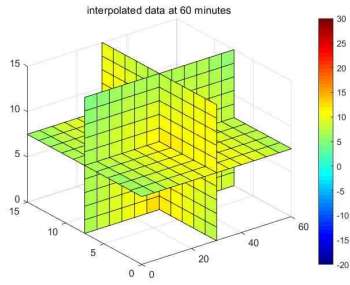
1080분



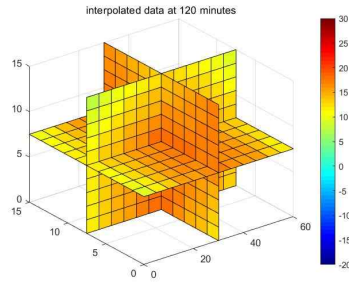
1260분

1440분

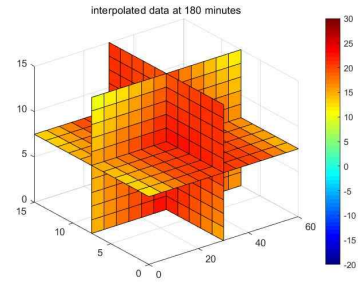
CL0.1



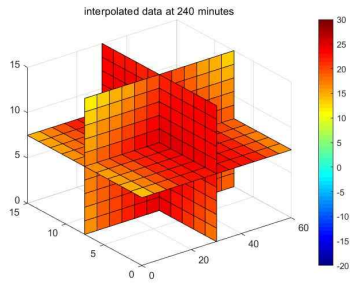
60분



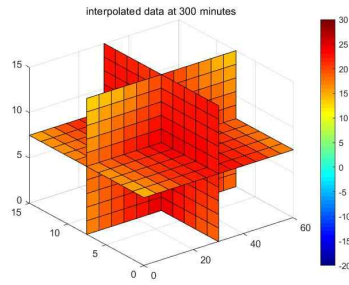
120분



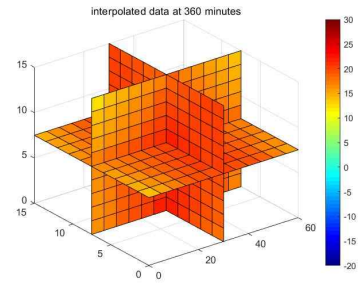
180분



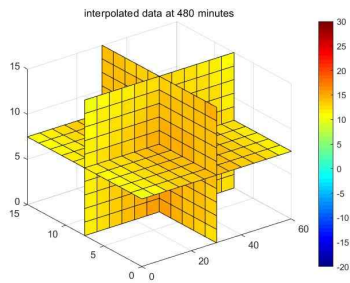
240분



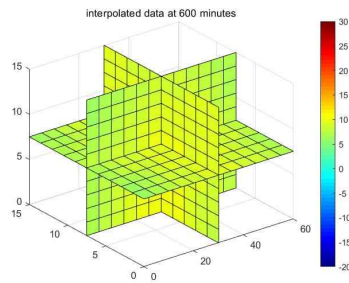
300분



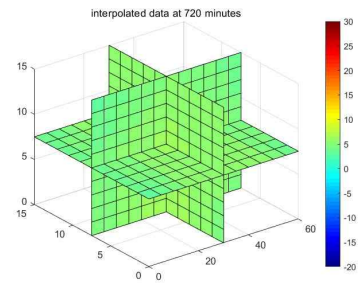
360분



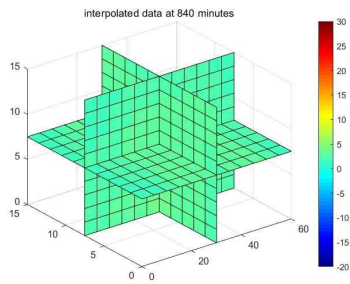
480분



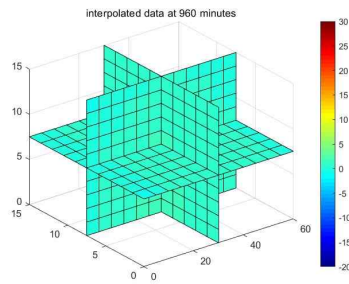
600분



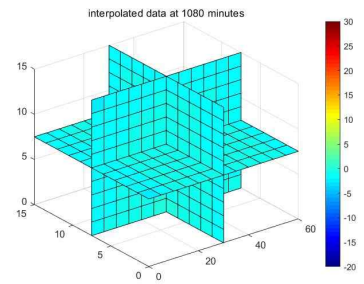
720분



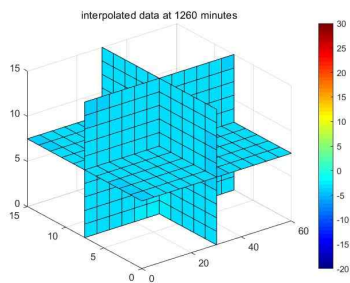
840분



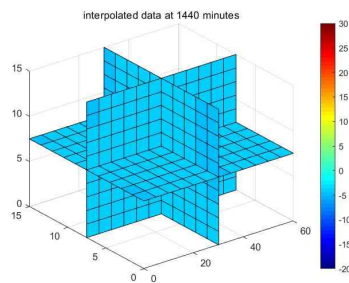
960분



1080분

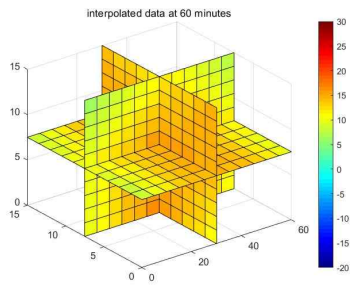


1260분

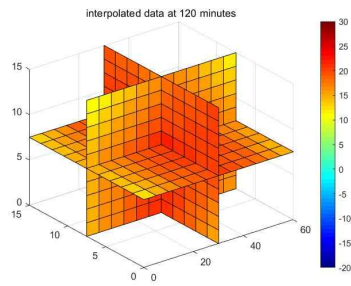


1440분

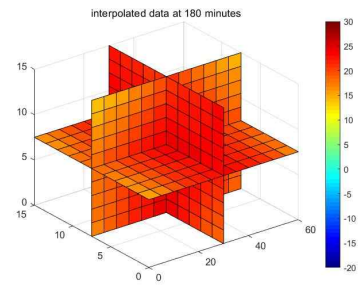
CL0.3



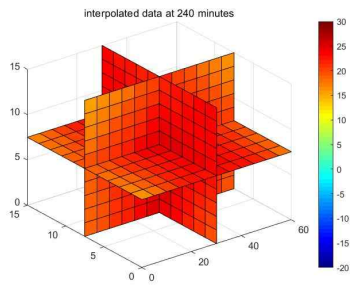
60분



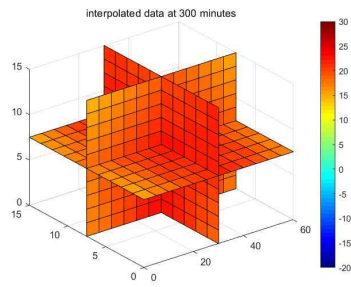
120분



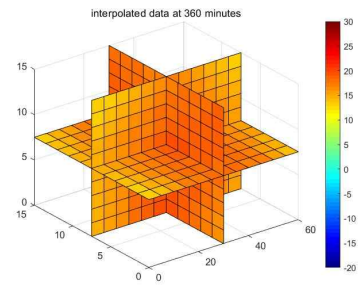
180분



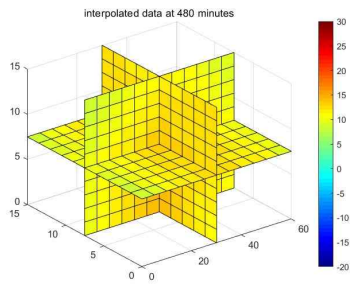
240분



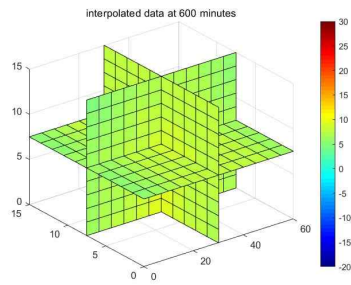
300분



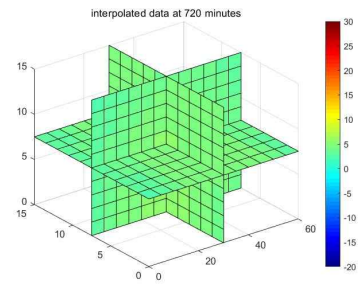
360분



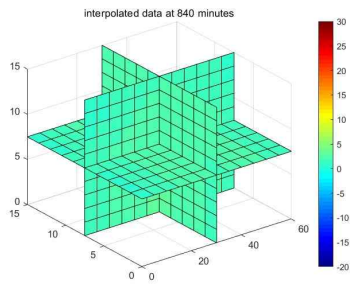
480분



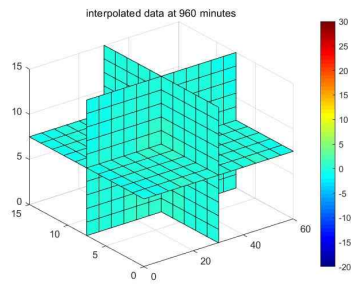
600분



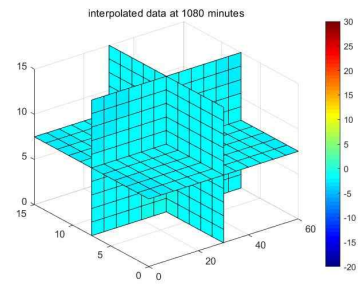
720분



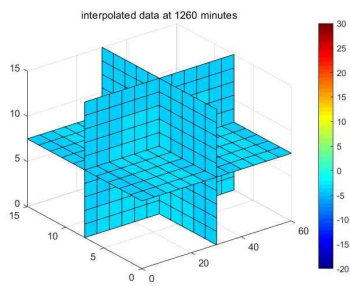
840분



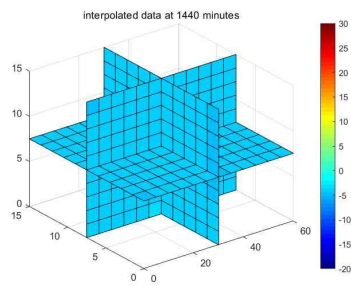
960분



1080분

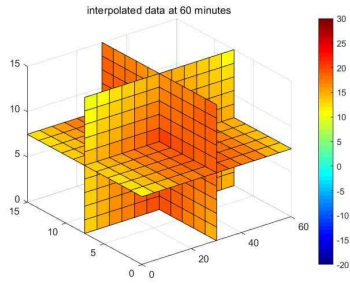


1260분

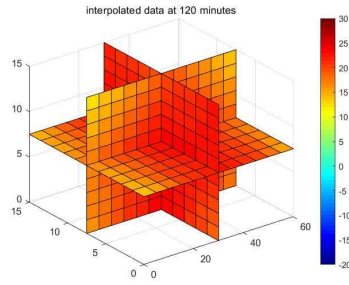


1440분

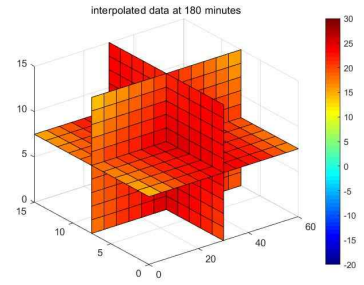
CL0.5



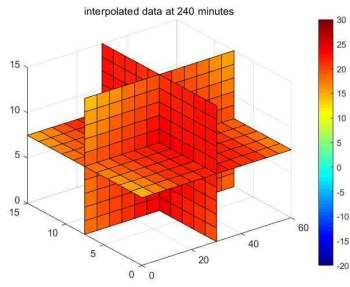
60분



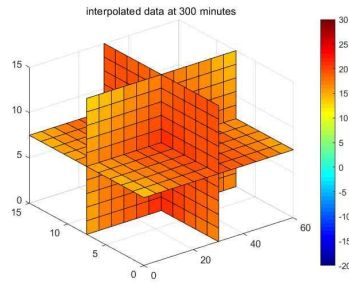
120분



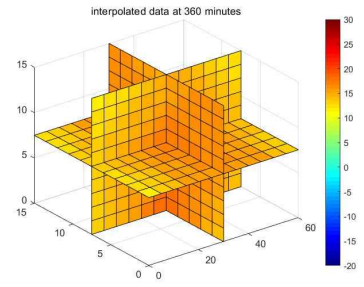
180분



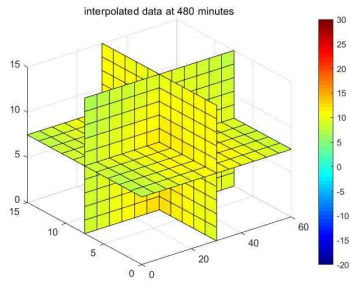
240분



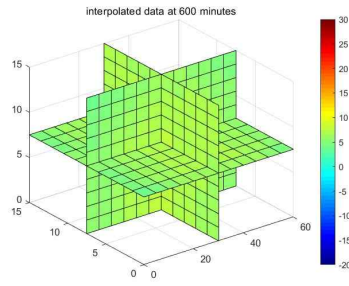
300분



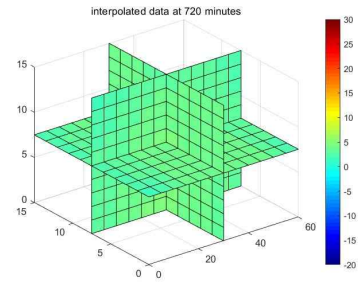
360분



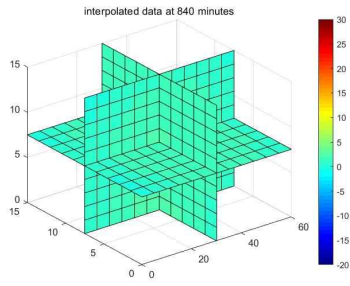
480분



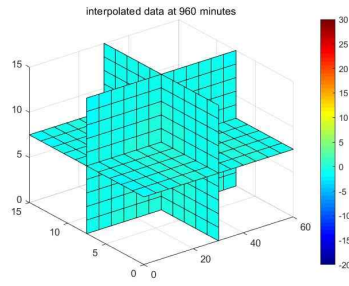
600분



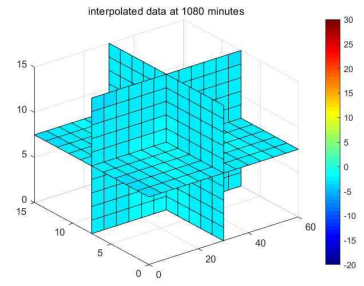
720분



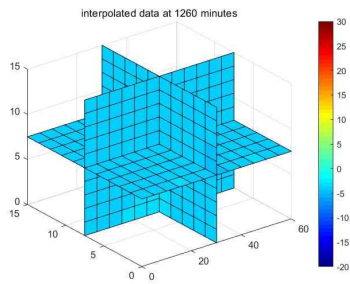
840분



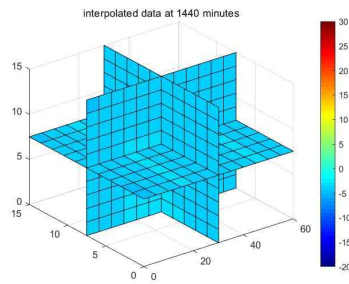
960분



1080분

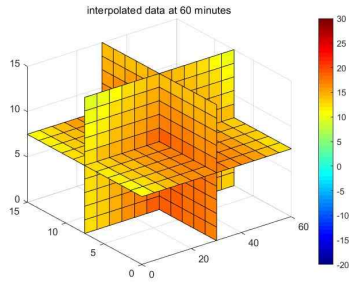


1260분

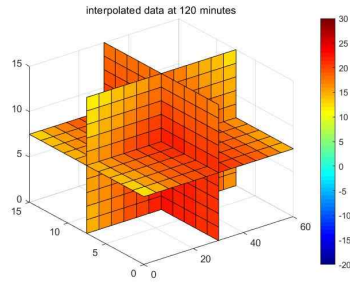


1440분

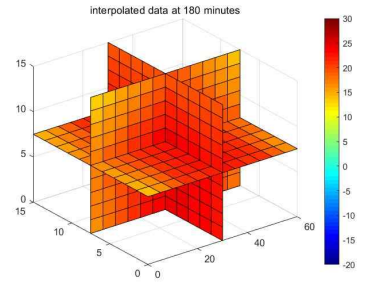
CGL



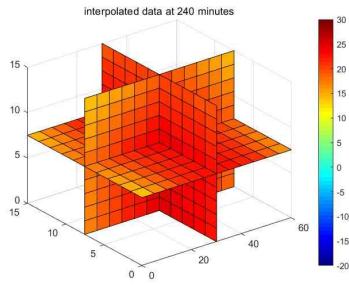
60분



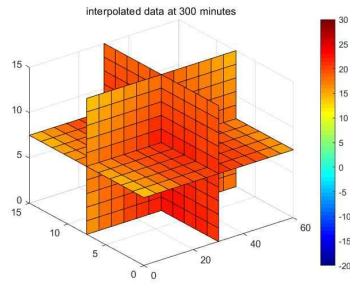
120분



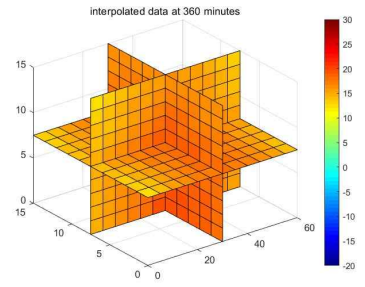
180분



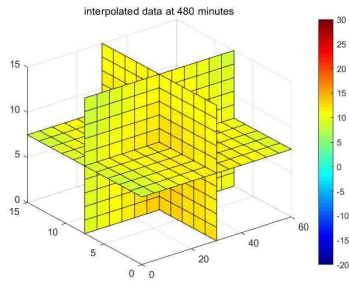
240분



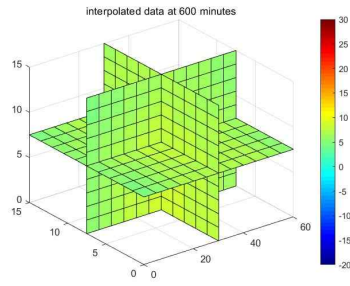
300분



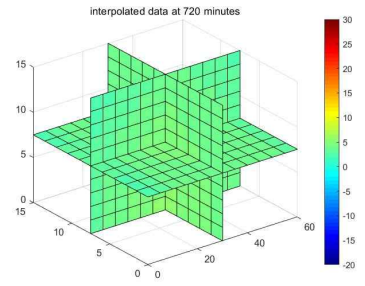
360분



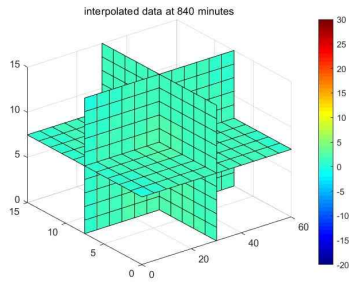
480분



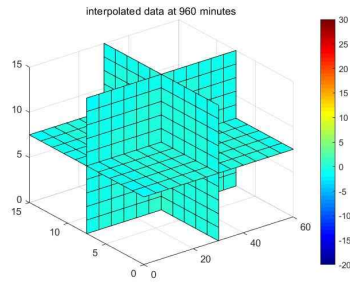
600분



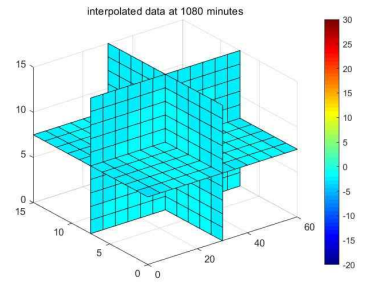
720분



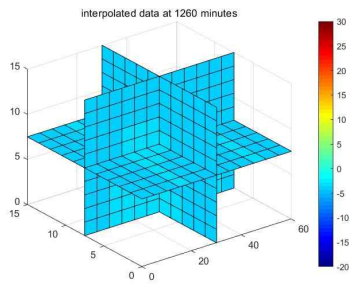
840분



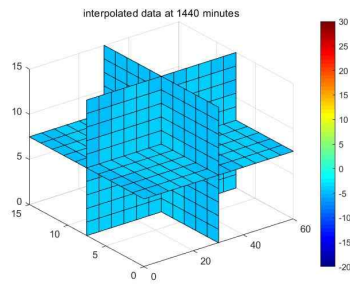
960분



1080분



1260분



1440분

3.3.2 열전달-응결 관계 분석

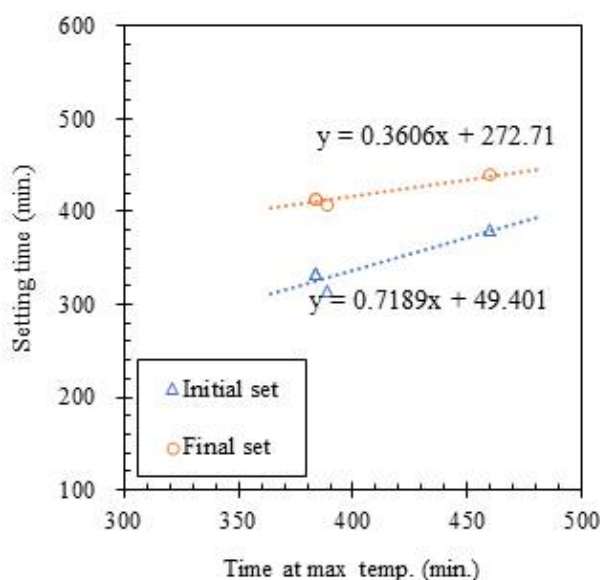
표 3.14는 CA계열 시멘트의 응결 시간 및 최고 온도 도달 시점을 시멘트 Type별 그리고 시편 크기별로 나타내고 있다. 일반 시편 크기(150×150×600 mm)에서 Type I, II, III의 초결은 각각 381, 332, 439 분에서 발생하였으며, 종결은 439, 414, 501분에서 발생하였다. Type II의 응결 시간이 가장 짧으며 이는 Type II 시편이 수화 단계에서 중심부의 온도가 가장 높은 온도에 도달하는 시점이 384분으로 가장 빠른 것에 기인한 결과인 것으로 판단된다. Type I의 경우 수화 온도가 가장 높은 온도에 도달하는 시점이 460분이며 그로인해 약 400분 이후 응결이 발생하였으며, 온도 변화가 가장 미미한 Type III 시편이 가장 늦게 응결이 발생하였다. 시편 크기에 따른 영향성을 판단하기 위해 100×100×400 mm의 시편에 대해서도 동일한 실험을 진행하였으며 그 결과 시편 크기가 줄어들에 따라 초결과 종결 모두 7분 정도 응결시간이 감소하는 것을 확인하였다. 반대로 최고 온도에 도달하는 시간은 100×100×400 mm의 시편이 5분 더 늦었으나 관입 저항 시험의 특성상 오차 범위 내의 시험 결과로 시편 크기에 의한 영향성은 상당히 미미한 것으로 판단된다.

표 3.14 응결 배합종류별 시간 및 최고 온도 도달 시점

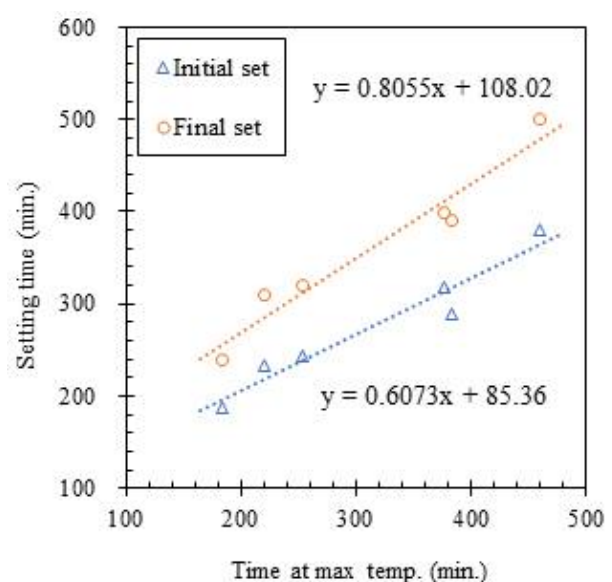
		Initial set (min)	Final set (min)	Time at maximum temperature (min)
Self-heating	Type I	381	439	460
	Type II	332	414	384
	Type III	439	501	N/A
Size effect	100	315	407	389
	150	332	414	384
Silicates replacement	CG20	290	390	383
	CG40	380	501	460
	CG60	317	399	377
Lithium sulfate	CL0.1	243	321	253
	CL0.3	234	310	220
	CL0.5	188	239	184
Crack-free	CGL	215	295	218

2차년도 연구 내용에 따라 GGBS와 LiSO_4 를 치환하였을 때 응결시간에 미치는 영향을 알아본 결과를 다음 그림 3.39에 나타내었다. GGBS를 20, 40, 60% 치환하였을 경우 초결은 각각 290, 380, 317 분이며, 종결은 390, 501, 399 분에 발생하였다. 20%를 치환하였을 때 응결시간 감소가 가장 높았으며 CA 계열 시멘트 Type II 만을 사용하였을 경우에 비해 초결은 약 40분 단축되는 것을 확인하였다. 다만 40% 치환한 시편의 경우 Type II만을 사용한 시편보다 응결이 지연되었으며, 60%를 치환한 경우에는 큰 차이를 나타내지 않았다. 특히 40%를 치환한 경우에는 수화열이 최대 온도에 도달하는 시간을 약 80분 정도 지연시켰으며, 그에 따라 치환량에 따라 그 차이가 있지만 GGBS의 치환이 CA 계열의 수화 과정 혹은 생성 수화물에 영향을 미쳐 응결 지연을 발생시키는 것으로 판단된다. 반면 LiSO_4 의 혼입은 응결시간을 대폭 감소시키는 것으로 확인하였으며, 감소폭은 혼입량이 증가함에 따라 증가하였다. 0.5%를 혼입할 경우 Type II만을 사용한 경우보다 초결에서는 2시간 이상의 응결시간 차이를 보였으며, 종결은 약 3시간의 차이를 보였다. 최대 수화 온도에 도달하는 시간 역시 150분 이상의 차이를 보였다. 다만, 0.5%의 LiSO_4 를 치환하는 경우 초결 시간이 200분 이하이며 종결과 초결 간의 시간차가 약 50분정도로 매우 급격하게 응결 반응이 발생하며, 그로인해 시공현장에서 활용하기에는 다소 무리가 있을 것으로 판단된다.

그림 3.39는 수화 온도가 최고점에 도달하는 시간과 초결 및 종결의 상관관계를 나타내고 있다. 최고점에 도달하는 시간이 증가할수록 응결 시간이 지연되는 결과를 통해, 초결 시간과 종결 시간 모두 수화 온도가 최고점에 도달하는 시간과 선형적인 관계를 나타내고 있음을 확인하였다. 온도 이력 분포 결과에서 확인된 바와 같이 CA 계열 시멘트가 일반 포틀랜드 시멘트에 비하여 더 높은 수화열을 발생시키며, 급속도로 열전달이 진행되기 때문에 수화 온도가 가장 높은 시점에서 시편 전반에 걸쳐 응결이 일어나는 것으로 판단된다. 그림 X는 2차년도 실험결과에 대한 수화 온도가 최고점에 도달하는 시간과 초결 및 종결의 상관관계를 나타내고 있으며, 1차년도의 실험 결과에 비하여 보다 명확한 선형 관계를 나타내고 있다. 특히 종결 시간이 초결에 비하여 더 민감하게 영향을 받았으며, 이는 배합에 따라 차이는 있으나 GGBS 또는 LiSO_4 의 혼입이 수화 온도가 최고점에 도달하는 시간을 앞당길 뿐만 아니라 최고 온도를 높여 전반적인 수화 반응을 촉진 시키는 것에 기인된 결과로 예상된다.



(a) 자기발열 시멘트



(b) 균열억제 시멘트

그림 3.39 콘크리트 배합 종류에 따른 연전달-응결시간 간 상관관계

시험성적서

성적서번호 : KCTL-B-19-00015
접수번호 : KCTL-18-02425
페이지 (1) / (총 1)
주소: 경기도 오산시 동부대로 372
전화: 031-283-1892 팩스: 031-373-1893
홈페이지: <http://www.kctl.or.kr>

1. 기 관 명 : 한양대학교 에리카 캠퍼스 안기용
2. 주 소 : 경기도 안산시 상록구 한양대학로 55 2공학관 112호 구조물내구성연구실
3. 시 료 명 : 알루미늄 시멘트(CAC)외 1종
4. 성 과 이 용 목 적 : 연구목적용

5. 시험 결과 :

시 험 항 목	단 위	시험결과 값	시험방법	비 고
압축강도 A (재령 1일)	MPa	17.0	KS F 2422 : 2017	
		15.6		
		17.0		
		16.1		
		17.9		
압축강도 B (재령 1일)	MPa	16.6	KS F 2422 : 2017	
		20.8		
		19.3		
		19.9		
		18.8		

- 위 시험항목은 현장시험 결과임.
- A: CAC, B: CAC (60)+GGBS(40)+lithium sulfate(0.3)
- 공시체 크기: (150×300)mm, 양생온도:-20℃

끝.

작성자 : 이 재 호



승인자 : 이 용 수



※ 본 성적서의 시험결과는 고객이 제시한 시료에 대한 결과임.

2019 . 01 . 08 .

한 국 콘 크 리 트 시 험 원



KCTL-TP-22-08(01)



Korea Concrete Testing Laboratory

* 진위여부는 상단 홈페이지 및 QR마크로 확인가능

< 그림

CA계열 시멘트를 활용한 한중콘크리트

시공 지침 (안)

목 차

1. 일반사항	1
1.1 적용 범위	1
1.2 일반 사항	1
1.3 관련 시방절	1
1.4 참조 규격	2
1.5 용어의 정의	2
1.6 제출물	2
2. 재료	2
2.1 일반사항	2
2.2 배합	3
2.3 비비기	4
2.4 자재 품질 관리	4
3. 시공	4
3.1 운반 및 타설	4
3.2 양생	6
3.3 거푸집 및 동바리	6
3.4 현장 품질관리	6
첨부	8

1. 일반사항

1.1 적용 범위

- (1) 이 장은 CA계열 시멘트 한중콘크리트의 시공에서 특히 필요한 사항에 대한 일반적인 표준을 규정한다.
- (2) 하루의 평균기온 0 ~ -20℃의 기상조건 하에서는 응결경화반응이 몹시 지연되어, 밤중이나 새벽뿐만 아니라 낮에도 콘크리트가 동결할 염려가 있으므로 CA계열 시멘트 한중콘크리트로서 시공한다.
- (3) 한중콘크리트의 적용을 받는 기간은 공사시방에 따른다. 다만, 공사시방서가 없는 경우는 상기 (2)의 기온조건을 만족하는 기간을 기상청 자료 등을 이용하여 정한 후 책임기술자의 승인을 얻어 적용할 수 있다.
- (4) 일평균기온이 -20℃ 이하가 예상될 경우 콘크리트를 타설하지 말아야 하며, 부득이 한 경우에는 시공계획서를 작성하여 공사감독자의 승인을 받아야 한다.

1.2 일반 사항

- (1) CA계열 시멘트 한중콘크리트를 시공할 때에는 소요의 품질이 얻어지도록 적절한 조치를 취하여야 한다.
- (2) 한중콘크리트의 시공에서 특히 주의할 사항은 다음과 같다.
 - ① 응결경화 초기에 건조 수축이 일어나지 않도록 할 것
 - ② 양생종료 후 받는 동결융해 작용에 대하여 충분한 저항성을 가지게 할 것
 - ③ 공사 중의 각 단계에서 예상되는 하중에 대하여 충분한 강도를 가지게 할 것
- (3) 매스콘크리트, 고강도 콘크리트 등은 타설 후 콘크리트에 많은 수화열이 발생하므로 이 경우에는 책임감리원의 승인을 얻어 규정의 일부 또는 전부를 적용하지 않을 수 있다.

1.3 관련시방절

- (1) 제2장 일반콘크리트
- (2) 제5장 거푸집 및 동바리
- (3) 제7장 매스콘크리트
- (4) 제14장 한중콘크리트
- (5) 제20장 팽창콘크리트
- (6) 도로공사표준시방서 6-4-2 한중콘크리트
- (7) 건축공사표준시방서 05025 한중콘크리트 공사

1.4 참조규격

다음 규준은 이절에 명시되어 있는 범위 내에서 이절의 일부를 구성하고 있는 것으로 본다.

- (1) KS F 2560 콘크리트용 화학 혼화제
- (2) KS F 2563 콘크리트용 고로슬래그 미분말
- (3) KS F 1004 콘크리트 용어
- (4) KS F 2562 콘크리트용 팽창재

1.5 용어의 정의

이 가이드라인에서 사용하는 주된 용어와 정의는 국가기술표준원(이하 KS)에서 개정된 콘크리트 용어 (KS F 1004)를 따르며 그 외에는 다음과 같다.

- (1) CA계열 시멘트 (칼슘 알루미네이트 시멘트): 조기강도 발현, 저온 경화 등 극한 환경에 최적화된 특성을 지닌 건설 재료.
- (2) CA계열 시멘트 한중콘크리트: CA계열 시멘트를 시공 재료로 사용한 콘크리트로서, 높은 수화열로 인한 내부 열화를 방지하기 위해 혼화재와 첨가제를 혼입한 콘크리트.

1.6 제출물

- (1) 사용거푸집 및 보온양생 방법
- (2) 제품자료
- (3) 수급인은 당해 공정 착수 시에는 3일전까지 시공계획서를 작성하여 공사감독자에게 제출하여야 한다.
- (4) 다음 사항을 추가로 제출하여야 한다.
 - (4.1) 수급인은 공사착수 전에 시험 및 검사계획서를 일반시방서 ‘품질관리 계획’의 해당요건에 따라 작성하여 공사감독자에게 제출하여야 한다.
 - (4.2) 수급인은 시공 상세도면은 일반시방서 ‘제출서류 및 공정관리’에 따라 작성하고, 시공순서도를 추가하여 공사감독자에게 제출하여야 한다.
 - (4.3) 제품자료는 일반시방서 ‘제출서류 및 공정관리’에 따라 혼화재료의 성분, 특성 등 제반사항과 제조업체의 생산현황, 기술자료, 사용지침서, 사용실적 등을 추가하여 작성하여야 한다.

2. 재료

2.1 일반사항

- (1) 시멘트는 수경성 시멘트 종류 중의 하나인 알루미나 시멘트(50%)를 사용하는 것을 표준으로 한다.
- (2) 골재가 동결되어 있거나 골재에 빙설이 혼입되어 있는 골재는 그대로 사용하지 않아야 한다.
- (3) 결합재 및 혼화제를 사용할 때는 품질이 확인된 것을 사용하여야 한다.

2.2 배합

2.2.1 일반사항

- (1) CA계열 시멘트 한중콘크리트에는 알루미나시멘트, 고로슬래그 및 Lithium sulfate 사용하는 것을 원칙으로 하지만, 시공 환경 및 요건에 따라 증감이 가능하다.
- (2) 고로슬래그 미분말을 사용하여 무양생 시공을 하는데 필요한 온도 제어를 할 수 있으며, 콘크리트 경화 중 수화열로 인한 건조 수축에 의한 해를 적게 할 수 있다.

- (3) 알루미나 시멘트 단위수량은 초기 내부발열로 인한 열화를 최소화하기 위하여 적정 수화열을 유지할 수 있는 범위 내에서 정하되 그 값은 0.4를 넘지 않도록 한다. 단위수량을 감소시키는 것은 특히 높은 온도에서 많아지는 건조수축을 감소시켜 콘크리트 온도의 상승을 방지하는 효과도 기대할 수 있다.
- (4) 시멘트 및 결합재 사용으로 내부 발열 감소로 인한 수화 지연은 Lithium sulfate를 첨가함으로써 수화 촉진을 유도하여 발열량을 유지시킨다.

2.2.2 배합

- (1) CA계열 시멘트 한중콘크리트의 배합은 초기동해에 필요한 압축강도가 초기양생기간 내에 얻어지도록 하고, 또한, 콘크리트의 설계기준강도가 소정의 재령에서 얻어지도록 정하여야 한다.
- (2) 배합강도 및 물-시멘트 비는 시공 환경 및 구조물 요구 조건에 따라 결정하여야 한다.
- (3) 적산온도방식에 의한 배합강도 및 물-시멘트 비는 다음과 같이 정한다.
- ① 이 방법은 적산온도가 210° D·D 이상일 경우에 적용한다. 다만, 알루미나시멘트 등 조강성 시멘트를 사용하며, 신뢰할 수 있는 자료에 의하여 물-시멘트비를 정할 때는 책임기술자의 승인을 얻어 적산온도가 105° D·D 이상의 경우에도 적용할 수 있다.
 - ② 구조체 콘크리트의 강도관리 재령은 91일 이내에서, 또한 적산온도는 420° D·D 이하가 되는 재령으로 한다.
 - ③ 적산온도는 콘크리트 강도를 콘크리트 온도와 시간과의 함수로서 일반적으로는 다음 식으로 나타낸다.

$$M = \sum_0^t (\theta + A) \Delta t$$

여기서, M : 적산온도 (° D·D(일), 또는 ° C·D)
 θ : Δt 시간 중의 콘크리트의 일평균 양생온도 온도 (°C)
 A : 정수로서 일반적으로 10°C가 사용된다.
 Δt : 시간 (일)

다만, CA계열 시멘트 한중콘크리트는 양생기간을 별도로 필요로 하지 않기 때문에 θ 는 0으로 산정한다.

- ④ 배합강도는 (2)의 요구 조건에 따른다.
- ⑤ 적산온도 M (° D·D)일 때, 재령 Δt (일)에 있어서 배합강도를 얻기 위한 물-시멘트비는 다음 식에 따라 정한다.

$$\chi(\%) = \alpha \chi_{20}$$

여기서, χ : 적산온도가 M (° D·D) 일 때 배합강도를 얻기 위한 물-시멘트비
 α : 적산온도 M 에 대한 물-시멘트비의 보정계수로서 표 xx의 산정식에 의하여 정한다. 다만, 적산온도 M 이 840° D·D 이상의 경우는 1로 한다.
 χ_{20} : 콘크리트의 양생온도가 20±3°C에서 재령 28일 배합강도를 얻기 위한 물-시멘트비로서 시방서 제2장 “2.4.3 물-시멘트비” 을 참고하며, 요구 조건 및 상황에 따라 적용한다.

표 1 적산온도 M 에 대응하는 물-시멘트비의 보정계수 α 의 산정식

시멘트의 종류	산정식
조강포틀랜드시멘트	$\alpha = \frac{\log M + 0.08}{3}$
보통포틀랜드시멘트	$\alpha = \frac{\log(M-100) + 0.13}{3}$
고로슬래그시멘트 특급	
포틀랜드포졸란시멘트 A종	
플라이애쉬시멘트 A종	
고로슬래그시멘트 1급	$\alpha = \frac{\log(M-100) - 0.37}{2.5}$
포틀랜드포졸란시멘트 B종	
플라이애쉬시멘트 B종	

2.3 비비기

- (1) 동결되어 있는 골재나 빙설이 혼입되어 있는 골재는 그대로 사용해서는 안 된다.
- (2) 재료는 건조되지 않아야 한다.
- (3) 콘크리트를 비빈 직후의 온도는 기상조건, 운반 시간 등을 고려하여 타설할 때에 소요의 콘크리트 온도가 얻어지도록 하여야 한다. 타설이 끝났을 때 콘크리트의 온도는 운반, 타설 도중의 열손실 때문에 믹서에서 비뚤을 때의 온도보다 저하하는데, 이 저하의 정도는 일반적으로 운반 및 타설 시간 1시간에 대하여 콘크리트 온도와 주위 기온과의 차이는 15% 정도로 본다. 즉,

$$T_2 = T_1 - 0.15(T_1 - T_0)t$$

여기서, T_0 : 주위 기온 (°C)
 T_1 : 비빈 직후 콘크리트의 온도 (°C)
 T_2 : 타설 직후 콘크리트의 온도 (°C)
 t : 비빈 직후부터 타설 직후까지의 시간 (hrs)

- (4) 재료를 믹서에 투입하는 순서는 CA계 시멘트가 급결하지 않도록 정해야 한다. 물과 CA계 시멘트가 접촉하면 시멘트가 급결할 우려가 있으므로 먼저 물과 굵은 골재, 다음에 잔골재를 넣어서 믹서 안의 재료 온도가 시멘트 급결 예방 온도 이하가 된 후 시멘트를 넣는 것이 좋다.
- (5) 콘크리트를 비빈 직후의 온도는 변동이 작아지도록 결합재 및 혼화제 치환 배합으로 예방하여야 한다.

2.4 자재 품질 관리

한중콘크리트의 자재 품질 관리는 시방서 제2장 “2.6 자재 품질관리”를 따른다.

3. 시공

3.1 운반 및 타설

- (1) 콘크리트의 운반 및 타설은 열량의 손실을 가능한 한 줄이도록 해야 한다. 콘크리트 펌프를 사용할 경우 수송관이 너무 냉각되어 있으면, 관의 내벽에 모르타르의 동결로 인한 부착으로 예기치 않은 고장이 생기는 수가 있다. 이것을 방지하기 위해서는 관로의 보온, 타설 전의 온수에 의한 예열, 타설 종료 시의 청소 등을 철저히 하여야 한다.
- (2) 타설할 때의 콘크리트 온도는 구조물의 단면치수, 기상조건 등을 고려하여 정한다. 기상조건이 가혹한 경우나 부재두께가 얇을 경우에는 칠 때의 콘크리트 최저온도를 확보해야 한다.
- (3) 콘크리트를 타설할 때에는 철근이나 거푸집 등에 빙설이 부착해 있어서는 안 된다.
- (4) 동결된 지반 위에 콘크리트를 타설하면 급격한 온도저하를 일으키며, 또 동결한 지반이 녹았을 때 콘크리트가 침하한다. 따라서 마무리된 지반은 콘크리트 타설까지의 사이에 동결하지 않도록 시트 등으로 덮어놓아야 한다. 이미 지반이 동결되어 있는 경우에는 적당한 방법으로 이것을 녹인 후 콘크리트를 타설해야 한다.
- (5) 시공이음부의 콘크리트가 동결되어 있는 경우는 적당한 방법으로 이것을 녹여 제3장 “3.5.1 일반사항” 및 “3.6.3 연직시공이음”에 제시한 방법으로 콘크리트를 이어 타설하여야 한다.
- (6) 타설이 끝난 콘크리트는 양생을 시작할 때까지 콘크리트 표면의 건조가 발생할 가능성이 있으므로, 콘크리트를 타설한 후 즉시 시트나 기타 적당한 재료로 표면을 덮고 특히, 바람을 막는다.

3.2 양생

CA계 시멘트 한중콘크리트는 타설이 종료된 후 별도의 양생을 필요로 하지 않음을 원칙으로 하지만, 외기, 온도, 배합, 구조물의 종류 및 크기 등을 고려하여 정한다.

3.3 거푸집 및 동바리

- (1) 거푸집은 보온성이 좋은 것을 사용하는 것을 원칙으로 한다.
- (2) 동바리의 기초는 지반이 동결하여 올라오거나 동결된 지반의 융해에 의하여 변위를 일으키지 않도록 지반의 동결을 막거나, 말뚝기초로 시공하여야 한다.
- (3) 거푸집 떼어내기는 콘크리트의 온도를 갑자기 저하시키지 않도록 하여야 한다. 콘크리트가 갑자기 냉각되면 콘크리트 내외부의 온도차가 커져서 균열이 생길 염려가 있다.

3.4. 현장 품질관리

- (1) 한중콘크리트의 현장 품질관리는 제2장 “2.8.4 콘크리트 시공 검사” 외에 표 4를 따른다.
- (2) 양생을 끝낼 시기, 거푸집 및 동바리를 해체할 시기에 대하여는 현장 콘크리트와 가급적 동일한 상태에서 양생한 공시체의 강도시험에 의하거나 콘크리트의 온도기록에 의한 적산온도로부터 추정된 강도에 의해 정한다.

- (3) 물-시멘트비를 적산온도 방식에 의하여 정한 경우, 사용한 콘크리트의 품질관리 또는 품질검사를 위한 압축강도시험의 재령은 다음 식으로부터 정한다. 다만, 시험체의 양생은 $20\pm3^{\circ}\text{C}$ 인 수중양생으로 한다.

$$Z_{20} = \frac{M}{30} (\text{일})$$

여기서, Z_{20} : 압축강도 시험을 할 재령 (일)

M : 배합을 정하기 위하여 사용한 적산 온도의 값 ($^{\circ}\text{C}$)

- ① 구조체 콘크리트의 압축강도 검사는 현장봉합양생으로 실시한다.
- ② 양생기간 중에는 콘크리트의 온도, 보온된 공간의 온도 및 기온을 자기기록 온도계로 기록한다. 다만, 콘크리트가 동결할 위험성이 적은 경우에는 그 주위의 기온만을 기록하여 양생관리를 하여도 좋다.

표 2 한중콘크리트의 온도관리 및 검사

항목	시험·검사방법	시기·횟수	판정기준
외기온			일평균기온 0°C 이하
타설 시의 온도	온도 측정	공사 시작 전	계획된 온도의 범위 내, 계획하는 온도의 범위는 “3.1 운반 및 타설”에 적합할 것
양생 중의 콘크리트 온도 혹은 보온양생된 공간의 온도		공사 중	계획된 온도 범위 내, 계획할 온도 범위는 “3.2 양생”에 적합할 것

부록 A

콘크리트용 알루미나 시멘트 Alumina cement for use in concrete

1. 원재료 및 제조 방법

알루미나 시멘트는 산화칼슘의 원재료인 석회석과 산화알루미늄의 원재료인 보크사이트를 1450-1550 °C의 고온에서 용융 후 급냉한 뒤 미분쇄하는 물리·화학적 개질화 기술을 통하여 제조된 것이다. 공정에 따라 비표면적은 4,000-5,500 cm²/g으로 생산되며, 보통포틀랜드 시멘트와 비교하여 높은 산화알루미늄 함유량을 가진다.

2. 재료 특성

일반적으로 알루미나 시멘트의 주요 화학 성분인 산화알루미늄 (Al₂O₃)의 함량에 따라 총 4가지로 분류한다. 각각의 화학 조성은 표 A.1과 같다.

표 A.1 알루미나 시멘트의 화학 조성

Grade	Oxide composition (%)							
	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	FeO+Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
Low alumina	36-42	36-42	3-8	12-20	< 2	~ 1	~ 0.1	~ 0.15
Low alumina, low iron	48-60	36-42	3-8	1-3	< 2	~ 0.1	~ 0.1	~ 0.05
Medium alumina	65-75	25-35	< 0.5	< 0.5	< 0.05	~ 0.1	< 0.3	~ 0.05
High alumina	> 80	< 20	< 0.2	< 0.5	< 0.05	< 0.1	< 0.2	~ 0.05

알루미나 시멘트는 산화 알루미늄 함량에 따라 알루미나 시멘트의 화학 조성이 달라지며, 그로인해 수화 과정에서 생성되는 수화물 및 수화 거동이 달라진다. 따라서 시멘트 대체용 혼화재로 사용할 경우 본 원재료의 재료 특성에 따라 적합한 제품을 사용할 것을 권장한다. 또한 타설 현장의 요구조건(유동성, 응결 지연 및 촉진 등)을 만족시키기 위하여 화학 혼화제를 첨가하여 사용 할 수 있다.

3. 수화 특성

알루미나 시멘트의 수화 및 강도 발현은 여러 종류의 CA 계열 수화물(CA, C₁₂A₇, C₂AS, CA₂ 등)이 복합적으로 관여하여 결정된다. 여기서, 수화물의 형성은 양생 조건에도 영향을 받지만 알루미나 시멘트의 클링커 조성에 큰 영향을 받기 때문에 알루미나 시멘트 종류에 따라 수화물 조성이 달라진다. 하지만, 알루미나 시멘트의 종류에 따라 수화 특성에 차이는 있으나, 기본적으로 빠른 응결 및 경화 특성을 보여준다. 일반적인 경우 상온에서 양생할 경우 4-6시간 이내에 응결이 완료되며, 28일 기준 40-50 MPa의 강도를 발현한다. 이 때, 저온 환경에서의 초기 강도발현을 위해 CA₂ 클링커가 포함되어 있지 않은 Al₂O₃ 함량 60% 이하인 시멘트의 사용을 권장한다.

발 명 신 고 서

1. 발명의 명칭

자기발열 알루미늄 슬래그 혼합 시멘트 조성물, 이를 포함한 한중 콘크리트 조성물 및 이를 이용한 구조물의 시공 방법

2. 발명의 요약 :

본 발명은 동결기 극한 환경에서 콘크리트 경화들 위해 추가적인 양생 처리가 필요 없는 무양생용 콘크리트 개발에 관한 것이다.

본 발명에 따른 무양생용 콘크리트 개발은 자기발열 시멘트에 클링커 및 재료; 부피 변화가 적은 상변화 억제형 치환재; 적정 수화를 위한 수화 유도형 혼화재; 상기 재료를 포함한 최적 배합설계 도출; 을 포함하여 이루어진다.

3. 기술분야 및 종래기술 (종래기술의 문제점 포함)

① 관련분야

극한 지역에서 일 평균 기온이 영하일 때 콘크리트 타설 이후 자기 발열을 통해 추가적인 양생 처리가 없이도 응결 및 경화가 이루어지며, 초기 동해에 대한 저항성을 지닌 CA 계열 시멘트 및 콘크리트 배합

자기발열 콘크리트, 한중콘크리트, 극한환경 시멘트 재료, 초기동해 방지

② 적용가능제품 및 방법

댐, 다리, 교량, 옹벽, 주택 등의 건설 시공 재료로의 활용

③ 향후 적용이 예상되는 분야

극한지역에서 건설되는 모든 토목 및 건설 구조물 (댐, 다리, 교량, 옹벽, 주택 등)

④ 가장 관련도가 높은 종래기술

콘크리트 타설 후의 양생기간 중에 동결에 대한 위험이 있을 경우 한중(寒中) 콘크리트의 사용, 보온 양생 또는 동결 방지 시공법의 적용 등을 통해 동해를 방지한다. 한중 콘크리트의 경우 양생 초기의 높은 발열반응으로 동해에 대한 자체적 저항성을 지닌 시멘트를 사용한 콘크리트이다. (등록번호 10-156003) 보온 양생의 경우 열선 부착 또는 열풍을 통해 양생 시 콘크리트가 일정 온도 이하로 내려가는 것을 방지하는 방법이며, 시공법에서는 고온의 배합수 사용 또는 배합 전 끓인 골재를 사용하는 등의 방법이 활용되고 있다.

⑤ 종래기술의 문제점

한중 콘크리트의 경우 $C_3A(3CaO \cdot Al_2O_3)$ 를 주요광물로 포함하며, Al_2O_3 를 전체 중량 대비 20% 이상 함유하고 있기 때문에 황산염 침식에 취약하고, 고발열로 인한 건조수축 등 콘크리트의 외부환경 저항성 및 내구성 저하가 우려된다. 그 외 보온 양생 또는 동결 방지 시공법은 높은 시공 비용과 시공 절차가 복잡해짐에 따라 시공 효율성이 저하되는 문제점을 가지고 있다.

4. 발명의 구성 및 특징

① 종래기술의 문제점을 해결하기 위한 구체적 수단 (종래기술과의 차이점)

CA 계열 시멘트의 경우 자기 발열을 통해 저온 조건에서 배합수가 동결되지 않고 양생이 가능하다. 하지만 콘크리트 내 열의 불균등 분포로 열팽창 또는 수화물 상변화로 인한 부피팽창 등이 예상됨에 따라 내부 균열을 억제하기 위해 Silicate계 혼화재 및 Sulfate계 첨가제의 적정 혼합을 통해 극한지역 최적 배합비율 산정하도록 한다.

② 실시예

[참조예]

표 1 조성물의 구성성분 및 물성

조성 (%)	시멘트 ¹⁾	슬래그 ²⁾
CaO	38.83	47.18
Al ₂ O ₃	52.03	13.13
SiO ₂	5.02	29.70
Fe ₂ O ₃	0.86	0.64
SO ₃	0.09	2.30
MgO	0.42	4.55
K ₂ O	0.68	0.53
Na ₂ O	0.17	0.22
MnO	0.03	0.29
Ignition loss	0.53	1.29
분말도 (cm ² /g)	5.150	5.420
비중 (g/cm ³)	3.03	2.93
¹ 자기발열 시멘트; ² 고토슬래그		

[실시예 1-2 및 비교예 1의 조성물]

표 2 조성물 시료들에 대한 배합비

배합	조성 (중량%)		
	비교예 1 (배합 1)	실시예 1 (배합 2)	실시예 2 (배합 3)
자기발열 시멘트	100	60	60
고로슬래그	-	40	40
황산리튬	-	-	0.3
	100	100	100 (+0.3)

[실험예 1. 자기발열 특성 평가]

표 3 -20℃ 온도 조건에서의 콘크리트 온도 상승 실험

배합	온도 (℃)		
	배합 직후	12시간	24시간
비교예 1 (배합 1)	12.4	13.7	13.3
실시예 1 (배합 2)	9.4	1.2	4.96
실시예 2 (배합 3)	-2.8	-9.8	-4.1

[실험예 2. 저온 환경하에서 압축강도 특성 평가]

표 4 -20℃ 온도 조건에서의 콘크리트 압축강도 평가 시험

배합	압축강도 (MPa)		
	1일	3일	28일
비교예 1 (배합 1)	15.8	21.8	37.4
실시예 1 (배합 2)	12.5	14.5	20.7
실시예 2 (배합 3)	19.8	23.0	33.4

5. 발명의 효과

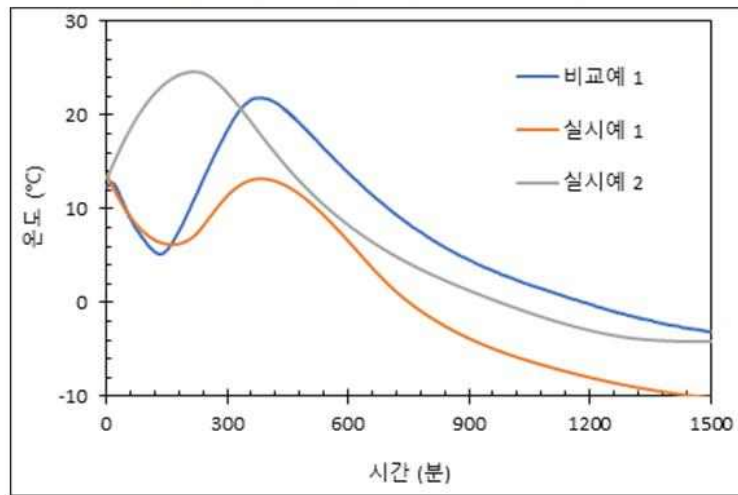
본 발명품인 무양생용 CA 계열 시멘트 및 그들 이용한 콘크리트는 기존의 극한지역에 사용되는 한중 콘크리트의 단점을 보완하며, 콘크리트 양생을 위한 추가적으로 발생되는 비용을 저감시키는 효과를 가져다 준다. 또한 자기발열로 인한 짧은 양생 기간으로 인해 공기 단축이 가능하여 기존 제품에 비해 높은 시공 비용 절감 효과를 기대한다.

6. 특허청구범위

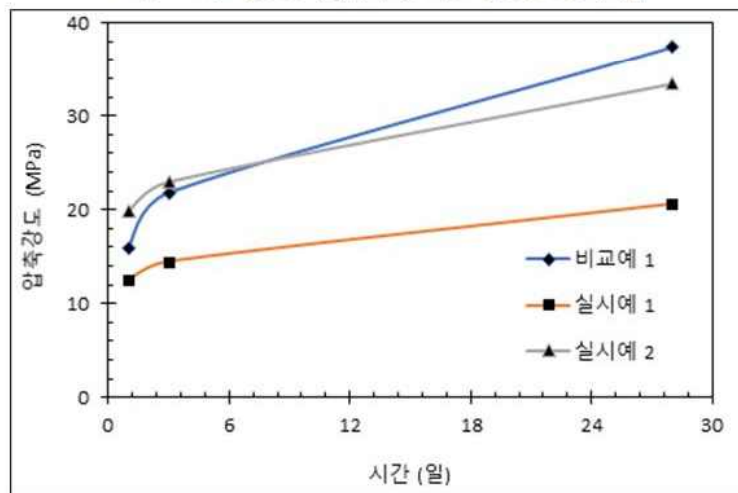
- (1) 조기강도 발현, 저온 경화 등 극한 환경에 최적화된 특성을 지닌 CA 계열 시멘트의 산화물 및 클링커 조성 범위
- (2) 높은 자기 발열 및 그로 인한 부피팽창을 억제 할 수 있는 Silicate계 혼화재 및 Sulfate계 혼화제 종류
- (3) 현장 시공 조건에 따른 자기발열 CA 계열 시멘트, Silicate계 혼화재 및 Sulfate계 혼화제를 함유한 콘크리트 배합설계

7. 도면(간단한 설명 포함)

도면 1 -20℃ 온도 조건에서의 콘크리트 온도 상승 실험



도면 2 -20℃ 온도 조건에서의 콘크리트 압축강도 평가 시험



제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

4.1 목표 달성도

4.1.1 최소 성과 목표

성과지표	성과 목표	최소 성과 목표
SCI(E)급 학술지 게재(2점)	2건	1건
일반학술지게재(1점)	3건	3건
특허출원(1점)	1건	
특허등록(2점)		
소계(점수)	8점	5점

4.1.2 성과점검기준표 및 달성도

[총괄]

구분	핵심성과 (CTE)	단위성과	성과점검기준							양적 성과 건수	
			질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치			
주관	1	극한 환경에서의 자기발열 시멘트계 재료 및 콘크리트 개발	1-1 CA계열 시멘트계 재료의 자기발열 성능평가	①	클링커조성 정량분석	오차 < 10%	100%	X선회절분석	보고서, 학회발표	5	학술회의 : 2건 논문 : 1건
				②	수화열 특성	1일 누적 >300 J/g·h	100%	미소수화열량계	보고서	4	
				③	발열성능	1일 > 40℃	100%	단열온도상승시험	보고서	4	
		1-2 콘크리트 내부 온도이력에 따른 균열 특성평가	①	깊이별 온도 분포	온도 분포도	100%	열전대 기록	보고서	5	학술회의 : 3건 논문 : 1건	
			②	깊이별 수화물 조성	오차 < 10%	100%	X선회절분석	보고서	4		
			③	휨 파괴 거동	변형률 분포도	100%	휨강도	보고서, 학회발표	4		
		1-3 극한환경 하 자기발열 콘크리트 배합설계 도출	①	굳지 않은 콘크리트 기초물성	종결시간 < 12시간	100%	응결시간	보고서	4		
			②	굳은 콘크리트 기초물성	1일 압축강도 > 5 MPa	100%	압축강도	보고서, 학회발표	10		
		2	극한 환경에서의 내부균열 억제형 자기발열 콘크리트 개발	2-1 상변화 억제형 Silicate 계열 치환재 성능평가	①	수화물조성 정량분석	오차 < 10%	100%	X선회절분석	보고서, 학회발표	
	②				수화열 특성	1일 누적 >300 J/g·h	100%	미소수화열량계	보고서	4	
	③				발열성능	1일 > 40℃	100%	단열온도상승시험	보고서	4	
	2-2 수화 유도형 Sulfate 계열 첨가제 성능평가		①	수화물조성 정량분석	오차 < 10%	100%	X선회절분석	보고서, 학회발표	5		
			②	수화열 특성	1일 누적 >300 J/g·h	100%	미소수화열량계	보고서	4		
			③	발열성능평가	1일 > 40℃	100%	단열온도상승시험	보고서	4		
	2-3 극한환경 하 내부균열 억제형 자기발열 콘크리트 배합설계 도출		①	굳지 않은 콘크리트 기초물성	종결시간 < 12시간	100%	응결시간	보고서	4		
			②	굳은 콘크리트 기초물성	1일 압축강도 > 5 MPa	100%	압축강도	보고서, 학회발표	10		
	3		콘크리트 내 온도 이력과 경화특성 간 상관관계 도출	3-1 자기발열 콘크리트 경화특성 분석	①	열전달 특성	온도변화 분포도 작성	100%		보고서	5
		②			응결시간 변화	상관관계도 작성	100%	응결시간	보고서	5	
3-2 내부균열 억제형 콘크리트 경화특성 분석		①		열전달 특성	온도변화 분포도 작성	100%		보고서	5		
		②		응결시간 변화	상관관계도 작성	100%	응결시간	보고서	5		
계									100	학술회의 : 5건 논문 : 3건	

[1차년도]

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수	
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	기준치		
주관	1	극한 환경에서의 자기발열 시멘트계 재료 및 콘크리트 개발	1-1	CA계열 시멘트계 재료의 자기발열 성능평가	①	클링커 조성 정량분석	오차 < 10%	100%	X선회절분석	보고서, 학회발표	5	학술회의 : <u>2 건</u>
					②	수화열 특성	1일 누적 >300 J/g·h	100%	미소수화열량계	보고서	4	
					③	발열성능	1일 > 40℃	100%	단열온도상승시험	보고서	4	
			1-2	콘크리트 내부 온도이력에 따른 균열 특성평가	①	깊이별 온도 분포	온도 분포도	100%	열전대 기록	보고서	5	
					②	깊이별 수화물 조성	오차 < 10%	100%	X선회절분석	보고서	4	
					③	휨 파괴 거동	휨강도 변화	100%	휨강도	보고서, 학회발표	4	
	3	콘크리트 내 온도 이력과 경화특성 간 상관관계도출	3-1	자기발열 콘크리트 경화특성 분석	①	열전달 특성	온도변화 분포도 작성	100%	실측데이터 기반 3차원 보간	보고서	5	
					②	응결시간 변화	상관관계도 작성	100%	응결시간	보고서	5	
계											36	학술회의 : <u>2 건</u>

[2차년도]

구분	핵심성과 (CTE)	단위성과	성과점검기준							양적 성과 건수	
			질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	기준치			
주관	1	극한 환경에서의 자기발열 시멘트계 재료 및 콘크리트 개발	1-3 극한환경 하 자기발열 콘크리트 배합설계 도출	①	굳지 않은 콘크리트 기초물성	종결시간 < 12시간	100%	응결시간	보고서	4	논문 : <u>1 건</u>
				②	굳은 콘크리트 기초물성	1일 압축강도 > 5 MPa	100%	압축강도	보고서, 공인인증, 가이드라인 (안)	10	
	2	극한 환경에서의 내부균열 억제형 자기발열 콘크리트 개발	2-1 상변화 억제형 Silicate 계열 치환재 성능평가	①	수화물조성 정량분석	오차 < 10%	100%	X선회절분석	보고서, 학회발표	5	학술회의 : <u>3 건</u> 논문 : <u>1 건</u>
				②	수화열 특성	1일 누적 >300 J/g·h	100%	미소수화열량계	보고서	4	
				③	발열성능	1일 > 40℃	100%	단열온도상승시험	보고서	4	
			2-2 수화 유도형 Sulfate 계열 첨가제 성능평가	①	수화물조성 정량분석	오차 < 10%	100%	X선회절분석	보고서, 학회발표	5	
				②	수화열 특성	1일 누적 >300 J/g·h	100%	미소수화열량계	보고서	4	
				③	발열성능평가	1일 > 40℃	100%	단열온도상승시험	보고서	4	
			2-3 극한환경 하 내부균열 억제형 자기발열 콘크리트 배합설계 도출	①	굳지 않은 콘크리트 기초물성	종결시간 < 12시간	100%	응결시간	보고서	4	
				②	굳은 콘크리트 기초물성	1일 압축강도 > 5 MPa	100%	압축강도	보고서, 공인인증, 가이드라인 (안)	10	
	3	콘크리트 내 온도 이력과 경화특성 간 상관관계도출	3-2 내부균열 억제형 콘크리트 경화특성 분석	①	열전달 특성	온도변화 분포도 작성	100%		보고서	5	논문 : <u>1 건</u>
				②	응결시간 변화	상관관계도 작성	100%	응결시간	보고서	5	
계									64	학술회의 : <u>3 건</u> 논문 : <u>3 건</u>	

4.2 관련 분야 기여도

4.2.1 연구개발성과의 활용방안

- 동토지역 및 극지방에서의 건설구조물 자재개발 필요성에 대응
- 국내 극심한 기후변화로 인한 동절기 시공 필요성에 대응
- 세계 건설시장 중 극한 환경 진출을 위한 국내 업계의 요구에 대응
- 국내 극한 환경 건설재료 분야 세계적 기술 수준으로의 확대
- 기술 특허 등록을 통한 향후 현장 적용 및 사업화 방안 모색

4.2.2 기대효과

기술적 측면	• 기존 양생 방법에 의존하던 한중콘크리트 공사에서 벗어나 일반 거푸집의 적용이 가능한 국내·외 혹한기 공사 선진 기술력 확보 • 기술 특허를 통한 원천기술 확보 및 국내 시멘트/콘크리트 관련 업계의 기술 수준 향상 • 극지방에서의 사회 인프라 시설 구축 시 콘크리트 타설 및 거푸집 해체시기단축 등 효율적인 시공으로 인한 공사기간 감소 • 극한 환경에서의 조기강도 확보를 통한 콘크리트 품질 향상 및 장기간 내구수명 확보
경제적 측면	• 국내 업계의 세계 건설시장 진출 시 보온 양생 공법의 미적용으로 인한 가격 경쟁력 확보 및 건설경기 부양 효과 • 극한 환경에서의 공기 단축 및 원가절감으로 인한 경제적 이익 발생
사회적 측면	• `조기 강도 발현으로 인한 품질확보를 통해 국내 동절기 공사 시 발생하는 사회적 불안감 해소 및 건설 분야로의 재조명 기회 마련 • 극지방 건설재료 개발과 관련하여 전문 인력 양성과 동시에 사업화 및 해외진출 기회 제공

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

본 연구에서 제시한 질적 성과지표는 100% 달성하였으며, 양적 성과 중 국외 논문 및 국내 논문 각 1편은 현재 심사 중에 있으며, 특허 출원과 관련하여 산학협력단 특허전담 변리사와 청구항 및 범위에 대한 의견 조율 중이므로 무리 없이 달성할 것으로 예상됨.

- CA계열 자기발열 시멘트 콘크리트의 균열 억제 방안 마련
 - 본 연구의 결과를 통해 실제 현장에서 발생 가능한 온도, 건조 수축으로 인한 균열을 억제할 수 있는 방안을 제시함.
 - 예를 들어, 콘크리트 내/외부 CA계열 수화물 조성의 차이로 인해 발생할 수 있는 균열의 경우 Lithium sulfate와 같은 CA계열 클링커 수화 촉진제를 사용하여 균형적인 발열 및 열전달을 통해 초기 상변화를 유도하여 해결 가능함.
 - CA계열 자기발열 및 균열 억제 시멘트 콘크리트를 활용한 한중 콘크리트 시공 지침 작성
 - 본 연구의 개발 결과인 -20°C 이하 극한 환경에서의 무양생용 CA 계열 시멘트 콘크리트의 시공 지침 작성 통해 동절기 공사의 어려움을 해소하는 방안을 마련하며, 이에 대한 신규 시장을 개척함.
 - 뿐만 아니라, 한국콘크리트학회 구조설계위원회 협조아래 기존의 콘크리트 변형률이 아닌 개발된 재료 맞춤형 콘크리트 단면 설계 법을 제시하고, 이에 따른 구조물 적용 방안 및 표준화 제정의 기반을 마련함.
 - 자기발열 시멘트 콘크리트의 현장 적용
 - 한국도로공사 관할 구역 내 도로구조물, 교량구조물의 현장 시험 (Mock up 및 시제품 제작) 및 지속적인 피드백 통해 출원된 특허의 국외특허 등록을 실시하고, 사업화 및 제품화를 도모함.
 - 이후 앞서 제작된 시공지침에 맞춰 실제 현장 적용을 통해 개발된 제품의 검증을 실시하고, 적극적인 마케팅을 통해 국내/외 판로를 확보함.
 - 극한 지역을 포함한 국가와의 기술 교류
 - 몽골 러시아 등 극한 지역에서의 사용성이 확보된 건설재료 개발은 건설 시장 확보에 큰 기여를 할 것으로 기대되며, 특히 보온 양생 처리 없이 재료 자체 특성만으로 시공이 가능한 점은 경제적 측면에서도 이점으로 작용함.
 - 해당 재료의 산화물, 클링커 조성 등을 포함한 배합설계를 국내 특허로 출원/등록한 후 최종적으로 해외 특허 출원/등록을 예정하고 있으며, 이에 따른 동절기 공사 시 요구되는 재료의 지적재산권 확보는 해외 진출 시 큰 기여를 할 것으로 예상됨.
-

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1. *fib* (International federation for structural concrete)

“Task Group 10.1 - Model Code 2020”

: Model Code 2020에서 작성중인 새로운 유럽 구조설계 지침서의 제작 관련 회의에 참석하여 각 국의 전문가들과 다양한 환경에서의 콘크리트 구조설계 시 고려해야할 사항에 대해 토론을 실시하고, 기존의 시멘트 외 활용가능한 대체재에 관한 의견 제시. 또한 저자로 참여하여 본 연구 주제에 대한 필요성을 피력함.

2. ACI Fall 2018 Convention

“Recent advances in alternative cements”

: 시멘트 소성은 막대한 에너지와 이산화탄소 배출로 환경 정책의 영향을 많이 받아왔으며 이에 따라 대체제 역시 꾸준히 연구되는 주제임. 널리 쓰이는 결합재 추가 시 변형되는 내부 공극 및 새로운 대체 재료에 대해 발표가 이루어짐.

- 1) Recent advances in alternative (non-portland) cements and concretes.
- 2) Chemical and mineralogical characterization of alternative cements
- 3) Mechanical properties and durability of concrete made with alternative cements
- 3) Case studies and applications of concretes made with alternative cements.

3. 해외 문헌 구입

콘크리트 내 발생 가능한 온도 균열에 관한 다양한 문헌 및 저온 환경에서의 CAC에 관한 논문을 구매함. 이를 바탕으로 극한 환경에서의 CA계열 자기발열 시멘트 콘크리트 내 온도 불균형 및 건조 수축으로 균열이 발생할 수 있는 지점을 예측하고, 이에 대한 연구 수행을 진행함.

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		○
결정 사유		

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
-	-	-	-	-	-	-	-	-

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

○ 기술적 위험 요소 분석

시험 장비	유해인자 종류	위험분석
믹서	진동, 소음, 협착, 분진	- 작업 중 기계작동으로 인한 끼임 - 90 데시벨 이상의 소음 발생 - 작업 중 발생하는 미세 분진
진동다짐기	진동, 소음, 전기	- 90 데시벨 이상의 소음 발생 - 작업 중 발생하는 미세 분진으로 인한 흡선, 화재 등
항온항습챔버	전기	- 24시간 연속 작동으로 인한 전기 흡선, 화재 등
압축, 휨강도 시험기	전기, 협착	- 가동 중인 기계의 정비 등으로 인한 끼임
커팅기	진동, 소음, 협착, 분진	- 작업 중 기계작동으로 인한 신체 절단 - 90 데시벨 이상의 소음 발생 - 작업 중 발생하는 미세 분진

○ 안전 관리 대책

유해인자 종류	안전 관리 대책	공통사항
진동	- 보호 장비 착용 - 장비 취급 방법 명시	6개월 1회 해당 분야온라인 및 현장 안전교육 실시
소음	- 청력 보존을 위한 귀마개 착용 - 장비 취급 방법 명시	
협착	- 방호장치 설치를 통한 기계 작동 중 접근 최소화 - 장비 취급 방법 명시	
분진	- 미세 분진 발생 시 작업 중지 조치 - 신체 내 흡입 방지를 위한 마스크 착용	
전기	- 적정 굵기의 전선을 짧게 사용 - 문어발식 사용 제재 - 배전함 항시 점검	

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번 호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/기 타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Development of Strength for Calcium Aluminate Cement Mortars Blended with GGBS	한양대 학교	공동 (안기용) 제1저자 (양희준)	Advances in Materials Science and Engineering	1.372	2019	단독	-
2	논문	Corrosion resistance of steel in concrete containing different calcium aluminate cements	한양대 학교	교신 (안기용) 제1저자 (양희준)	ACI Materials Journal	1.252	-	단독	-
3	논문	Evaluation on Sulfate Resistance of the High-durability Culvert using CAC and GGBS	한양대 학교	교신 (안기용) 제1저자 (이상아)	Journal of the Korea Concrete Institute	-	2018	단독	-
4	논문	Evaluation on Sulfate Resistance of the High-durability Culvert using CAC and GGBS	한양대 학교	교신 (안기용) 제1저자 (이상아)	Journal of the Korea Concrete Institute	-	2018	단독	-
5	논문	A Study on the Hydration behavior and porosimetry of ferronickel slag powder in cement paste	한양대 학교	교신 (안기용) 제1저자 (이상아)	Journal of the Korea Concrete Institute	-	-	단독	-
6	논문	자기발열 알루미나 슬래그 혼합 시멘트 조성물, 이를 포함한 한중 콘크리트 조성 물 및 이를 이용한 구조물의 시공 방법	한양대 학교	-	-	-	-	단독	-

제11장. 기타 사항

없음

1. Balonis, M. and Glasser, F. P. (2009). "The density of cement phases" , Cement and Concrete Research 39(9): 733-739.
2. Barnes, P. A. and Baxter, J. H. (1978). "A critical analysis of the application of derivative thermogravimetry to the determination of the degree of conversion of high alumina cement", Thermochimica Acta 24(2): 427-431.
3. Bentsen, S., Seltveit, A. and Sanderg, B. (1990). "Effect of microsilica conversion of high alumina cement" , Calcium Aluminates Cements - Proceedings of the International Symposium, London, UK.
4. Bradbury, C., Callaway, P. and Double, D. D. (1976). "The conversion of high alumina cement/concrete", Materials Science and Engineering 23: 43-53.
5. British Standard international. (2005). "BS EN 14647: Calcium aluminate cement - composition, specifications and conformity criteria" , London
6. Cardoso, F. A., Innocentini, M. D. M., Akiyoshi, M. M. and Pandolfelli, V. C. (2004). "Effect of curing time on the properties of CAC bonded refractory castables", Journal of the European Ceramic Society 24(7): 2073-2078.
7. Christensen, A., Lebech, B., Sheptyakov, D. and Hanson, J. C. (2007). "Structure of calcium aluminate decahydrate ($\text{CaAl}_2\text{O}_4 \cdot 10\text{D}_2\text{O}$) from neutron and X-ray powder diffraction data" , Acta Crystallographica Section B Structural Science 63(6): 850-861.
8. Christensen, A. N., Jensen, T. R., Lebech, B., Hanson, J. C., Jakobsen, H. J. and Skibsted, J. (2008). "Thermal decomposition of monocalcium aluminate decahydrate ($\text{CaAl}_2\text{O}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) investigated by in-situ synchrotron X-ray powder diffraction, thermal analysis and ^{27}Al , ^2H MAS NMR spectroscopy" , Dalton Transactions 8(4): 455-462.
9. Collepardi, M., Monosi, S. and Piccioli, P. (1995). "The influence of pozzolanic materials on the mechanical stability of aluminous cement" , Cement and Concrete Research 25(5): 961-968.
10. Collins, R. J. and Gutt, W. (1988). "Research on long-term properties of high alumina cement concrete", Magazine of Concrete Research 40: 195-208.
11. Crammond, N. J. and Currie, R. J. (1993). "Survey of condition of precast high-alumina cement concrete components in internal locations in 14 existing buildings" , Magazine of Concrete Research 45(165): 275-279.
12. Ding, J., Fu, Y. and Beaudoin, J. J. (1995). "Stratlingite formation in high alumina cement-silica fume systems: significance of sodium ions" , Cement and Concrete Research 25(6): 1311-1319.
13. Ding, J., Fu, Y. and Beaudoin, J. J. (1996). "Effect of different inorganic salts/alkali on conversion-prevention in high alumina cement products" , Advanced Cement Based Materials 4(2): 43-47.
14. Dunster, A. M., Bigland, D., Reeves, B. and Holton, I. (2000). "Durability of pre-case HAC concrete in buildings" , Garston: Building Research Establishment IP8-00.
15. Dunster, A. M., Holton, I. R. and Crammond, N. J. (2006). "Recent site and laboratory studies of surface densification in high-alumina cement concrete" , Magazine of Concrete Research 58 (3): 173-182.

-
16. Dunster, A. M., Moulinier, F., Quillin, K. C. and Osborne, G. J. (2008). "Durability of concrete made with calcium aluminate cement and ground granulated blastfurnace slag in sulfate and marine environments" , Calcium Aluminates Cements - Proceedings of the International Symposium, Avignon, France.
 17. Edmonds, R. N. and Majumdar, A. J. (1988). "The hydration of $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ at different temperatures" , Cement and Concrete Research 18: 473-478.
 18. Edmonds, R. N. and A. J. Majumdar (1989b). "The hydration of mixtures of monocalcium aluminate and blastfurnace slag." Cement and Concrete Research 19(5): 779-782.
 19. Edmonds, R. N. and A. J. Majumdar (1989a). "The hydration of Secar 71 aluminous cement at different temperatures" , Cement and Concrete Research 19(2): 289-294.
 20. Gosselin, C. (2009). "Microstructural development of calcium aluminate cement based systems with and without supplementary cementitious materials" , PhD. Thesis, EPFL.
 21. Hueller, F., Naber, C., Neubauer, J. and Goetz-Neunhoffer, F. (2018). "Impact of initial CA dissolution on the hydration mechanism of CAC" , Cement and Concrete Research 113: 41-54.
 22. Ideker, J. H. (2008). "Early-age behavior of calcium aluminate cement systems" , PhD. Thesis, The University of Texas at Austin.
 23. Klaus, S. R., Neubauer, J. and Geotz-Neunhoffer, F. (2013). "Hydration Kinetics of CA_2 and CA-hydrations Performed on A Synthetic Calcium Aluminate Cement" , Cement and Concrete Research 43: 62-69.
 24. Luz, A. P. and Pandolfelli, V. C. (2011). "Halting the calcium aluminate cement hydration process" , Ceramics International 37: 3789-3793.
 25. Majumdar, A. J. and Singh, B. (1992). "Properties of some blended high-alumina cements." Cement and Concrete Research 22: 1101-1114.
 26. Midgley, H. G. and Midgley, A. (1975). "The conversion of high alumina cement" , Magazine of Concrete Research 27: 59-77.
 27. Neville, A. M. (1995). "Properties of concrete - 3th edition" , Prentice Hall.
 28. Rashid, S., Barnes, P., Bensted, J. and Turrillas, X. (1994). "Conversion of calcium aluminate cement hydrates reexamined with synchrotron energy-dispersive diffraction" , Journal of Materials Science Letters 13(17): 1232-1234.
 29. Scrivener, K. (2003). "Advanced concrete technology - 2. Calcium aluminate cements" , Elsevier.
 30. Scriviner, K. L. and Capmas, A. (2003). "Lea's chemistry of cement and concrete - 13. Calcium aluminate cements, fourth edition" , Butterworth-Heinemann.
 31. Singh, B. and A. J. Majumdar (1992). "The hydration of calcium dialuminate and its mixtures containing slag" , Cement and Concrete Research 22(6): 1019-1026.
 32. Toby, B. H. (2006). "R factors in Rietveld analysis: How good is good enough?" , Powder Diffraction 21(1): 67-70.
-

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.