건설기술혁신사업

R&D-09기술혁신30

MgO를 혼입한 장기팽창성 콘크리트의 현장 실용화 최종보고서

2013. 10.

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / 한국수자원공사
공동연구기관 / 성균관대학교
대림산업(주)
위탁연구기관 / 중국수리수전과학연구원
울산대학교

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

이 보고서를 “MgO를 혼입한 장기팽창성 콘크리트의 현장 실용화” 과제의 최종 연구보고서로 제출합니다.

2013. 10. 25.

주관연구기관명 : 한국수자원공사
부 사 장 김 완 규(사장직무대행)
공동연구기관명 : 대림산업(주)
사 장 김 윤
공동연구기관명 : 성균관대학교 산학협력단
단 장 김 현 수

■ 총 괄 연 구 책 임 자 / 책임연구원 장 봉 석 연구총괄

■ 주관연구기관 참여연구원 / 책임연구원 김 완 영 직무분석
책임연구원 정 우 성 직무분석
책임연구원 임 정 열 직무분석
수석연구원 오 병 현 직무분석
선임연구원 권 용 길 직무분석

■ 공동연구기관 참여연구원 / 책임연구원 이 상 호 공동연구책임자
수석연구원 송 치 용
선임연구원 김 태 홍
선임연구원 김 동 진
연 구 원 이 규 현
연 구 원 김 민 정

■ 공동연구기관 참여연구원 / 교 수 이 광 명 공동연구책임자
연 구 원 최 슬 우
연 구 원 김 대 왕

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>09기술혁신
F03</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>4차년도</td><td>단 계
구 분</td><td>4차년도/
4차년도</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 사 업 명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="4">건설기술혁신사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>대 과 제 명</td><td colspan="4">MgO를 혼입한 장기팽창성 콘크리트의 현장 실용화</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">장 봉 석</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 22명
내부 : 6명
외부 : 18명</td><td>해당단계
연 구 비</td><td>정부:166,000천원
기업:144000천원
계:310,000천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 22명
내부 : 6명
외부 : 18명</td><td>총연구비</td><td>정부:591,000천원
기업:698,000천원
계:1,289,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명
및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">한국수자원공사
K-water연구원</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">한국수자원공사
대림산업(주)
(주)계림건축사사무소
(주)삼우건축사사무소
(주)실크로드
(주)케이엠티엘</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="5">상대국명 : 상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="5">연구기관명 :
중국수리수전과학연구원(IWHR) 연구책임자 : Chen Gaixin
울산대학교 산학협력단 연구책임자 : 차 수 원</td></tr>
</table>

요 약	보고서면수	439 page

■ 장기팽창 메커니즘 규명 및 내구성 검증
- 기 건설된 실구조물을 대상으로 한 적용 사례와 MgO 혼화재의 팽창특성 등을 국외 문헌조사를 통해 분석
- 시험 배합별 배합설계를 실시
- 안정도 시험을 이용하여 MgO 혼화재의 안정성 분석
- 동해융해, 중성화, 염해, 황산염시험 등 총 6개의 내구성 검증시험을 위해 재령에 따른 시험체를 제작
- XRD, SEM, DSC 분석시험을 통한 팽창반응 메커니즘 규명을 위해 시험체를 제작하였으며 재령 7, 28, 56, 91, 180, 360일, 1.5년 그리고 2년에서 분석시험 실시

■ 장기팽창성 콘크리트의 팽창특성 규명
- 재령에 따른 장기팽창성 콘크리트의 강도 및 팽창특성를 규명하기 위해 빔 몰드 시험체를 제작하고 자기팽창 시험을 실시하여 재령 경과에 따른 팽창량을 지속적으로 장기계측 실시
- 국내 재료를 이용한 장기팽창 재현성 시험을 국외연구기관(IWHR)에 의뢰

■ 장기팽창성 콘크리트의 팽창특성 규명
- 재령에 따른 장기팽창성 콘크리트의 강도 및 팽창특성 실험결과를 바탕으로 장기팽창성 콘크리트의 팽창모델을 개발
- 현장계측결과와의 비교를 통해 팽창모델의 신뢰성 검증

■ 장기팽창성 콘크리트의 현장 실용화
- 실구조물 시험시공 대상현장, 대상구조물 선정
- 선정된 2개의 시험시공 대상구조물에 대한 MgO혼입 콘크리트 타설
- 장기계측을 위한 신뢰성 높은 장기 계측시스템 구축 및 2년 계측

■ 장기팽창성 콘크리트의 해석프로그램 개발
- 팽창성 해석 프로그램 보완 및 해석(팽창해석모델 개발)
- 실구조물 시범적용 계측결과 해석 및 분석

색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	장기팽창성, 무균열, 팽창율, 혼화재, 매스콘크리트
	영 어	Long term Expansibility, Crack-free, Expansion rate, Admixture, Mass concrete

요 약 문

Ⅰ. 연구 제목

MgO를 혼입한 장기팽창성 콘크리트의 현장 실용화

Ⅱ. 연구개발의 목적

일반적으로 시멘트의 수화는 콘크리트의 체적을 변화시키는 원인이 된다. 이러한 현상은 콘크리트의 고유한 특성이며 매스콘크리트의 경우, 큰 체적으로 인해 매우 큰 인장응력이 발생할 수 있으며 상대적으로 낮은 인장강도로 인해 균열이 발생하게 된다. 또한, 습도와 온도 구배와 같은 인자들은 인장응력을 발생시켜 균열을 발생시킬 수 있다. 시멘트의 팽창성분 중 하나인 MgO의 경우, 비록 체적팽창을 야기시키는 성분이나 저온소성한 MgO의 경우 수축을 보상할 수 있으며 콘크리트의 체적팽창에 따른 안정성을 유지시킬 수 있는 장점이 있다.

본 과제는 MgO 콘크리트의 장기팽창 특성 파악과 내구성 검증 그리고 MgO 콘크리트의 실용화를 위한 기술 자료의 제공을 주된 목적으로 한다.

장기팽창성 콘크리트의 국내 실용화를 위하여, 장기팽창성 콘크리트의 메커니즘 정립, MgO 혼입량에 따른 장기팽창특성 자료의 획득 그리고 내구성 검증 연구 등을 수행하며, 실구조물에 대한 시범 적용 계측 등을 통한 실용화 가능성의 검증 그리고 실구조물의 최적 팽창량을 예측할 수 있는 프로그램의 개발 등을 세부 연구 목적으로 설정하였다.

Ⅲ. 연구개발의 내용

■ 장기팽창 메커니즘 규명 및 내구성 검증

- 장기팽창제 성분분석(성분분석, 활성도 시험)
- 내구성 검증시험 (동해융해시험, 중성화촉진시험, 염소이온침투저항성시험, 염소이온확산계수시험, 황산용액침지시험, 기포간격계수시험)
- 팽창반응 메커니즘 규명 (XRD, SEM, DSC)

■ 장기팽창성 콘크리트의 팽창특성 규명 및 모델 개발

- 장기팽창성 콘크리트 재령에 따른 강도/팽창특성 규명(강도: 배합 3변수×양생 1변수, 팽창: 배합 3변수, 양생 2변수)
- 장기팽창성 콘크리트 재령에 따른 강도/팽창특성 재현성 시험(강도: 배합 3변수×양생 1변수, 팽창: 배합 3변수, 양생 2변수)
- 장기팽창성 콘크리트의 강도 및 팽창 모델 정립
- 720일까지의 재령별 팽창량 측정 완료

■ 장기팽창성 콘크리트의 현장 실용화

- 실구조물 시범적용 대상현장 및 대상구조물 선정
- 선정된 시범적용 대상구조물에 대한 MgO혼입 콘크리트 타설
- 시공된 시범적용 대상구조물에 대한 장기계측시스템 구축 및 계측
- 장기팽창성 콘크리트 시공지침서 작성
- 장기팽창재 적용 및 활용분야 발굴

■ 장기팽창성 콘크리트의 해석 프로그램 개발

- 팽창성 해석 프로그램 보완 및 해석(팽창해석모델 개발)
- 실구조물 시범적용 계측결과 해석 및 분석

Ⅳ. 연구개발 결과

MgO 콘크리트의 장기팽창특성에 영향을 미치는 인자선정, 이를 바탕으로 한 각 인자별 배합설계를 통한 배합결정 등의 연구결과를 바탕으로 장기팽창 메커니즘의 규명 및 MgO 혼입량에 따른 장기팽창특성 파악, 내구성 검증 시험을 실시하였다. 또한, 국외 위탁연구기관을 통한 재현성 검증 시험을 실시하였다.

실구조물 시범적용을 위한 시험시공 장소 및 대상구조물을 최종 선정하여 MgO혼입 콘크리트의 타설, 장기팽창량 계측을 완료하고 팽창해석 프로그램을 이용한 분석을 완료하였다.

수행한 연구 상세는 다음과 같다.

■ 장기팽창 메커니즘 규명 및 내구성 검증

- 기 건설된 실구조물을 대상으로 한 적용 사례와 MgO 혼화재의 팽창특성 등

을 국외 문헌조사를 통해 분석하였다.

- 시험 배합별 배합설계를 실시하였다
- 동해, 탄산화, 염해, 황산염시험 등 총 6종류의 내구성 검증시험을 위해 양생 재령 1년에 달한 시험체를 내구성 검증시험을 완료, 분석하였다.
- XRD, SEM, DSC 분석시험을 통한 팽창반응 메커니즘 규명을 위해 추가로 시험체를 제작하여 재령 7, 28, 56, 91, 180, 360일, 1.5년 그리고 2년에서 분석시험을 실시하였다.

■ 장기팽창성 콘크리트의 팽창특성 규명

- 재령에 따른 장기팽창성 콘크리트의 강도 및 팽창특성 규명하기 위해 빔몰드 시험체를 제작하고 자기팽창 계측을 계속해온 시험값으로 팽창량 예측식을 개발하였다
- 국내 재료를 이용한 재현성 시험중인 국외연구기관(IWHR)의 팽창 특성은 국내와 조금 다르긴 하나 전체적인 경향은 일치하는 것으로 나타났으며, 국내의 시험 결과를 활용한 팽창/강도 예측식을 유도하였다.

■ 장기팽창성 콘크리트의 현장 실용화

- 시공된 시범적용 대상구조물에 대한 장기계측시스템 구축 및 계측 완료하였다.
- 장기팽창성 콘크리트 시공지침서 작성하였다.

■ 장기팽창성 콘크리트의 현장 실용화 및 프로그램 개발

- 선정된 실구조물 시범적용 및 장기계측을 위한 2개의 시범적용 대상구조물에서 2년 동안 장기 계측을 수행하였으며, 이들 계측데이터와 개발된 프로그램 분석 결과를 비교하여 프로그램의 신뢰성을 검증하였다.

SUMMARY

Ⅰ. RESEARCH TITLE

Utilization of Long-term expansionary concrete using MgO

Ⅱ. RESEARCH OBJECTIVE

Generally, the cement hydration can be caused the volumetric shrinkage in concrete. this phenomenon is an intrinsic property of concrete. The little shrinkage can also be caused the high tension stress in the mass concrete due to its large volume, and that finally concrete will be subject to cracking, because its relatively low tension strength. The factors such as temperature and humidity gradation in concrete can also induce the tension stress and thus cracked in the mass concrete.

MgO is one of the expansionary component of the cement. Although MgO can cause the volumetric expansion, lightly burnt MgO(burnt temperature is relatively low with about 950℃) can be compensated the shrinkage and can be maintained the volumetric stability of concrete.

The main aims of this project are to study long-term expansionary properties of MgO concrete, to verify it's durability and to provide the technical support for the practical use of MgO concrete in domestic.

For the final aim to utilize the long-term expansionary properties of concrete in domestic, This study perform that an establishment of mechanism for long-term expansionary concrete, an achievement of data for long-term properties according to amount of MgO and a verification research of it's durability. This study also perform the verification of possibility for the utilization using the measurement for test-bed of real construction and develope the program for the prediction of optimal expansion value.

Ⅲ. RESEARCH SCOPES

■ **Investigation of expansion mechanism and verification of durability for long-term expansionary concrete**

- Component analysis of long-term expansion agent
- Verification test of durability (Frost, Carbonation, Salt-attack, Sulfate test etc.)
- Investigation of expansion reaction mechanism(XRD, SEM, DSC etc.)

■ **Investigation of expansionary properties of long-term expansionary concrete**

- Strength and expansion properties for long-term expansionary concrete according to aging
- Reproducibility test for long-term expansionary concrete according to aging
- Foundation of analytical model for strength and expansion of long-term expansionary concrete
- Self expansion test is measuring according to aging

■ **Utilization of long-term expansionary concrete**

- Construction of test-bed and measurement for real structure
- MgO mixed concrete was placed on selected test-beds
- Long-term measurement system was built and carry out measuring for test-beds
- Make a construction guide for long-term expansionary concrete
- Development for fields of application and practical use of long-term expansionary concrete

■ **Development of analysis program for long-term expansionary concrete**

- Expansion analysis program and expansion model
- Analysis for Test-bed structure

Ⅳ. RESEARCH RESULTS

In this 4th year of the total research periods, we performed that 1) carry out the autogenous expansion test for determining an indices affected to long-term properties of MgO concrete, 2) carry out the durability test an experiment specimens in 360 aging days, which were used the establishment for mechanism of long-term expansionary concrete, 3) investigate an expansion properties according to amount of MgO, 4) reproducibility test for long-term expansionary concrete according to aging, 6) carry out placing the MgO mixed concrete for two type test-beds.

The detailed results are following that,

■ **Investigation of expansion mechanism and verification of durability for long-term expansionary concrete**

- Analyzed the state-of-the-art for MgO agent and concrete, especially, the applied examples on the real construction structural and the expansion properties of MgO agent and concrete in China.
- For the verification of durability such as Frost test, Carbonation test, Salt-attack test and Sulfate test, made a specimens according to aging.
- For investigation of expansion mechanism using XRD, SEM, DSC analysis test, made also a specimens according to aging.
- Using manufactured specimen, performed XRD, SEM, DSC analysis at 7, 28, 56, 91, 180, 360 days, 1.5 year and 2 year will be carried at the age.

■ **Investigation of expansionary properties of long-term expansionary concrete**

- To investigate the strength and expansion properties of long-term expansionary concrete according to aging, made a beam mold specimens and performed autogenous expansion test until 720 days.

- For reproducibility test using by domestic law materials, assigned the long-term expansion test to foreign research center(IWHR, China).'s expansion level are also similar to our test. so expansion estimate

■ **Utilization of long-term expansionary concrete**

- For construction of the test-bed, it was determined two construction structure. construction field is Hantan-river dam and test-bed structures are retaining wall in stilling basin and foundation block of Hantan-river main dam.

■ **Development of expansion program**

- For the test-bed's data is good, this program is being run checking the measured data is proper.

CONTENTS

Ch. 1. INTRODUCTION ---- 1
1. Background ---- 3
2. Objective ---- 6
3. Annual research scopes ---- 7

Ch. 2. OVERVIEW OF RESEARCHES ---- 9
1. Overview of domestic ---- 11
2. Overview of foreign ---- 12

Ch. 3. RESULTS AND CONTENTS OF RESEARCH ---- 17
1. Cases of application ---- 19
2. Overview of MgO agent ---- 52
3. Properties of MgO concrete ---- 65
4. Experiment for expansion mechanism of MgO concrete(Ⅳ) ---- 71
5. Experiment for expansion properties of MgO concrete(Ⅳ) ---- 116
6. Reproducibility test for expansion properties of MgO concrete(Ⅳ) 145
7. Verification for durability of MgO concrete(Ⅲ) ---- 165
8. Construction of test-bed with MgO concrete(Ⅲ) ---- 192
9. Analysis of measured data from test bed structures ---- 237
10. Development of expansion program for MgO concrete(Ⅱ) ---- 249
11. Utilization manual ---- 304

Ch. 4. ACHIEVEMENT AND CONTRIBUTION ---- 353
1. Objective of the research ---- 355
2. Objective of 4th year ---- 357
3. Contribution of results of 4th year ---- 358
4. Contribution for relevant field ---- 360

Ch. 5. APPLICATION PLAN OF RESULTS OF RESEARCH ---- 363
1. Application plan of the results ---- 365

Ch. 6. RELATIVE FOREIGN INFORMATION ---- 369

1. Cases with MgO concrete of international ---- 263
2. Cases with MgO concrete of Chinese ---- 267

Ch. 7. REFERENCES ---- 379

APPENDIX Ⅰ ---- 385
APPENDIX Ⅱ ---- 395
APPENDIX Ⅲ ---- 403
APPENDIX Ⅳ ---- 435

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요 ····· 1

제 1 절 연구개발의 필요성 ····· 3
1. 연구개발의 개요 ····· 3
2. 연구개발의 중요성 ····· 5
제 2 절 연구개발의 목적 ····· 6
제 3 절 연차별 연구개발의 범위 ····· 7

제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 9

제 1 절 국내 기술개발 현황 ····· 11
1. 국내 기술 및 산업 동향 ····· 11
제 2 절 국외 기술개발 현황 ····· 12
1. 주요국가의 시장규모 ····· 12
2. 특허 동향 ····· 14
3. 국외 기술동향 ····· 15

제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과 ····· 17

제 1 절 국내외 적용사례 분석 ····· 19
1. 국내 적용사례 ····· 19
2. 국외 적용사례 ····· 19
제 2 절 팽창재(MgO)의 개요 ····· 52
1. MgO의 일반사항/제조방법 및 분류 ····· 52
2. MgO의 물리/화학적 특성 ····· 52
3. MgO 팽창재(MgO expansive agents)의 특성 ····· 53
4. 팽창 메커니즘 ····· 64
제 3 절 MgO 혼입 콘크리트의 특성 ····· 65
1. 개요 ····· 65
2. MgO 혼입 콘크리트의 안정도 ····· 65
3. MgO 혼입 콘크리트의 특성 ····· 69

제 4 절 MgO혼입콘크리트의 팽창메커니즘 분석 실험(Ⅳ)····· 71
1. 실험 개요····· 71
2. 팽창재(MgO) 특성 분석····· 72
3. 팽창매커니즘 분석····· 73
4. 시멘트 제조사별 MgO 혼입콘크리트의 팽창특성 ····· 95
제 5 절 MgO 혼입 콘크리트의 팽창 특성 실험(Ⅳ)····· 116
1. 실험 개요····· 116
2. MgO 콘크리트 배합····· 116
3. 초음파 속도 모니터링 ····· 117
4. 강도 특성 실험····· 123
5. 팽창 특성 실험····· 127
6. 소결론····· 144
제 6 절 MgO 혼입 콘크리트의 팽창특성 재현성 실험(Ⅳ)····· 145
1. 실험 개요····· 145
2. MgO팽창재의 시험 및 결과····· 150
3. MgO 콘크리트····· 153
4. MgO 콘크리트의 팽창모델····· 163
제 7 절 MgO 혼입 콘크리트의 내구특성 및 검증(Ⅲ)····· 165
1. 실험 개요····· 165
2. MgO 혼입 콘크리트의 내구성 시험체 제작····· 166
3. MgO 혼입 콘크리트의 내구성 시험····· 169
제 8 절 MgO 혼입 콘크리트의 현장 적용(Ⅲ)····· 192
1. 개요····· 192
2. MgO 혼입 콘크리트 제조····· 196
3. 현장 계측 시스템 구축····· 199
4. 콘크리트 타설····· 214
5. 체적변화 계측결과····· 216
6. 계측결과 분석····· 226
7. 소결론····· 236
제 9 절 시험시공 구조물의 응력 및 팽창량 계측 분석····· 237
1. 본댐 응력 계측값 분석····· 237
2. 감세지 옹벽 응력 계측값 분석····· 242
3. 본댐 팽창량 분석····· 244
4. 감세지 옹벽 팽창량 분석····· 247

제 10 절 장기팽창량 예측 프로그램 개발(Ⅱ)····· 249
1. 개요····· 249
2. 해석 이론····· 251
3. 프로그램 구조 및 특성····· 270
4. 팽창량 예측 모델····· 286
5. 신뢰성 검증····· 288
6. 시험시공구역 해석 및 계측값 비교····· 293
제 11 절 실용화 매뉴얼····· 304

제 4 장 목표 달성도 및 관련분야에의 기여도····· 353

제 1 절 최종 연구 목표····· 355
1. 연구개발 목표····· 355
2. 연구개발결과의 평가 착안점····· 356
제 2 절 4차년도 연구목표 달성도····· 357
1. 연구개발 수행 진도율····· 357
제 3 절 4차년도 연구목표 달성도····· 358
1. 연구개발 수행 진도율····· 358
2. 연구개발 목표의 달성도····· 359
제 4 절 관련분야 기여도····· 360
1. 관련 연구 분야····· 360
2. 연구개발 결과의 기여도····· 361

제 5 장 연구개발 결과의 활용 계획····· 363

제 1 절 연구개발 결과의 활용방안····· 365
1. 개요····· 365
2. MgO 혼입 콘크리트 활용 기대 분야····· 365
3. 연구결과의 활용방안····· 367

제 6 장 해외 관련 기술정보····· 369

제 1 절 MgO 콘크리트와 관련한 국외연구동향····· 371
제 2 절 MgO콘크리트와 관련한 중국의 연구동향····· 375

제 7 장 참고문헌 ····· 379

부 록 Ⅰ (시험시공 사진첩:감세지 옹벽) ····· 385
부 록 Ⅱ (시험시공 사진첩:본댐 우안부) ····· 395
부 록 Ⅲ (수화생성물분석결과 : SEM, XRD, DSC) ····· 403
부 록 Ⅳ (연구성과 발표 목록) ····· 435

< 공 란 >

제 1 장 연구개발과제의 개요

< 공 란 >

제 1 절 연구개발의 필요성

1. 연구개발의 개요

최근 콘크리트 구조물이 대형화, 특수화되고 이로 인한 시공법의 발전에 따라 대량급속 시공이 증가되고 있으며 상대적으로 고강도 콘크리트의 시공이 빈번해 지고 있다. 더욱이 콘크리트의 경화과정에서 발생하는 수화열과 수축의 경우 구조물에 균열을 발생시키며 이러한 균열이 사용성, 방수성, 내구성에 지대한 영향을 미치는 경우도 자주 일어나고 있다. 1970년까지만 해도 이러한 현상은 주로 콘크리트 댐 또는 부재치수가 수 미터 이상이 되는 콘크리트 구조물에서만 나타나는 것으로 인식되었다. 그러나 최근에는 사용재료, 콘크리트의 설계강도 및 시공조건 등에 따라, 또는 부재의 최소치수가 비교적 작은 50 ㎝ 이상의 벽체구조물의 경우에도 매스콘크리트 범주에서 설계 시공하도록 규정하고 있다. 매스콘크리트의 경우 외부로 방출되는 열량에 비해 시멘트의 수화반응에 따른 발열량이 더 크기 때문에, 콘크리트의 내부온도가 상당히 높아지게 된다. 이때 부재치수에 따라 중심부와 표면부의 온도차가 커지게 되며, 상승한 온도가 하강시에 표면부 혹은 타설 이음부에 발생하는 수축변형이 기존 구조물 등에 의해 구속되거나 내부구속에 의한 경우 균열이 발생하게 된다. 매스콘크리트에 발생하는 균열은 일반적으로 폭이 크고 부재의 관통하는 경우가 많아 구조물의 내력, 내구성, 수밀성 및 미관 등의 소요품질을 손상시킨다. 이에 매스콘크리트 대한 새로운 연구는 유지관리 및 비용절감 면에서 큰 효과가 있을 것으로 판단된다.

한편, 포틀랜드 시멘트는 200년 전에 생산을 시작한 이후 세계적으로 광범위하게 사용되고 있다. 생산 초기부터 포틀랜드 시멘트는 피할 수 없는 문제를 수반하고 있었다. 즉, 시멘트 성분의 수화반응은 팽창부산물을 발생시킨다. 예를 들어, f－CaO에 의한 수화반응의 지연, C_3A시멘트의 수화반응으로부터 나타나는 ettringite와 MgO 팽창재의 수화생성물 등이다. 이러한 문제는 연구자의 관심을 증가시켜 시멘트의 안정도 개념을 도입하게 되였다. 안정도는 일반적으로 시멘트와 콘크리트의 균열에 대한 저항(anti-cracking) 능력과 손상에 대한 저항(anti-breakdown) 능력이라고 말할 수 있다. 이것은 또한 체적변형에 대한 저항능력(capacity counteracting volumetric deformation)으로 부르기도 한다. 콘크리트는 낮은 인장강도를 나타내는 취성재료이며 팽창과 수축은 인장응력을 야기하여 균열을 발생시킨다. 그러므로 이러한 팽창원인인 수화생성물들은 콘크리트의 안정도 문제를 야기 시킬 가능성이 있다. 결과적으로 유럽국가을 제외하고 다른 나라들

은 이들 성분들을 제한하고 있다. 중국의 경우, MgO의 성분은 5%를 초과하지 않아야 한다고 규정하고 있는데 이는 다른 나라와 유사하게 시멘트의 MgO 성분을 보다 엄밀히 제한하고 있음을 나타낸다. 전 세계 많은 과학자들이 시멘트에 포함된 팽창성분에 관한 연구를 수행하고 있으며 연구자들은 f-Cao의 지연 수화반응과 ettringite의 형성에 관한 연구를 주고 수행하고 있다. 그들은 지연 수화반응의 유해성을 장점으로 변화시켜 팽창시멘트와 팽창재의 연구를 포함한 여러 업적을 남겼을 뿐만 아니라 MgO 팽창재에 관한 연구를 지속적으로 수행하고 있다. 현재, 보통의 수화작용을 하는 MgO 팽창재는 800~900℃의 소성온도에서 magnesite를 통해 제조할 수 있는 것으로 믿고 있다. 한편, 만약 소성온도가 900℃ 이상이면 MgO의 팽창과 수화반응은 급격히 감소하고 1200℃ 이상이면 수화반응이 나타나기 어렵다. 더욱이, 1500℃이상이면 일반적인 조건에서 MgO가 수화반응하는 것이 불가능하다. 또한, 시멘트 속의 slag와 fly-ash는 MgO의 수화반응으로 인해 나타나는 팽창효과를 감소시킨다는 연구결과도 보고되고 있다. MgO의 수화반응은 팽창을 유발하여 자기수축, 온도수축과 같은 콘크리트의 수축을 보상할 수 있다. 또한, 온도응력을 감소시켜 콘크리트의 체적 안정성(volumetric stability)를 유지할 수 있다. 과거에는 MgO 팽창재를 작은 규모의 건설현장에서만 사용하였다.

실제 건설현장에서 사용되는 수공전용 콘크리트는 다음과 같은 몇 가지 문제점을 가지고 있다.

(1) 재료적 관점에서, 시멘트의 수화반응은 콘크리트의 체적수축을 동반한다. 이것은 콘크리트 재료의 기본적인 특징이다. 수공전용 콘크리트 구조물의 체적은 일반적으로 매우 크며 작은 수축이라도 큰 인장응력을 발생시키므로 댐 콘크리트는 균열에 매우 취약하다.
(2) 구조적 관점에서, 실제 건설현장에서는 온도균열의 발생을 억제하고 온도응력 제어를 위해 전체 댐 구조물을 분할시공(수평, 수직시공이음)과 블록타설법을 채택하고 있다. 시공이음부는 구조물의 건전성과 시공속도에 영향을 미치지 않으나 시공이음이 없거나 몇 개의 이음부만 존재한다면 온도제어 대책은 보다 엄밀해져야만 한다.

중국에서는 콘크리트의 수축이 저감되는 XMR(Magnesia) 콘크리트를 댐 구조물에 적용할 경우 수축균열을 최소화시킬 수 있는 것으로 보고된 바 있다[1,2,3,4].

XMR(magnesia) 콘크리트는 수축보상(shrinkage-compensating) 콘크리트로서 저온에서 소성된 산화마그네슘(MgO) 분말을 시멘트 대체재로 사용한 콘크리트이다.

MgO가 수화반응을 하면 최종생성물은 수산화마그네슘(Magnesium hydroxide, $Mg(OH)_2$ 이 되며 수산화마그네슘은 그 조성물들보다 더 큰 부피를 갖기 때문에, MgO 콘크리트는 팽창성을 가진다. ASTM C845의 M, K 그리고 S type의 대표적인 팽창성 시멘트를 이용한 콘크리트는 초기재령에서 팽창하지만 저온 소성한 MgO 콘크리트는 7일 이후의 늦은 재령에서 팽창하며 저온소성한 MgO 콘크리트의 팽창성은 매스콘크리트의 온도가 하강할 때 발생하는 수축을 거의 상쇄하게 된다. 따라서 저온 소성한 MgO 콘크리트는 댐 건설에서 균열 진전의 최소화, 온도제어 기준의 단순화 그리고 시공속도의 향상을 위하여 특별한 관심의 대상이 되고 있다. 이에 따라, 댐과 같은 매스콘크리트구조물의 시공성능 향상을 위하여 재료적 측면에서 저온소성 MgO를 사용한 장기팽창성 콘크리트의 실용화를 위한 연구가 반드시 필요하다 하겠다.

2. 연구개발의 중요성

가. 기술적 측면

- 장기팽창성 콘크리트를 적용한 매스콘크리트의 장기팽창 특성 확보
- 장기팽창성 콘크리트의 장기팽창성에 대한 기초 데이터 확보
- 장기팽창성 콘크리트의 내구성 데이터 확보
- 장기팽창성 콘크리트의 국내 고유 기술확보로 국내 시공능력 향상
- 외국 선진 사례 도입의 국내 적용성 검토

나. 경제・산업적 측면

- 시공속도의 향상 및 균열제어 능력향상에 따른 시공능력 향상
- 매스콘크리트 구조물의 균열제어를 통한 공사비 절감

다. 사회・문화적 측면

- 장기팽창성 콘크리트의 실용화를 통한 관련 산업 활성화 기대

제 2 절 연구개발의 목적

본 연구는 장기팽창성 콘크리트의 국내 실용화를 위하여, 장기팽창성 콘크리트의 메커니즘 정립, MgO 혼입량에 따른 장기팽창특성 자료 획득, 내구성 검증 및 실구조물 시범 적용 계측 등을 통하여 실용화 가능성을 검증하고, 최적팽창량 예측을 위한 프로그램을 개발함으로써 장기팽창성 콘크리트의 국내 실용화가 최종목표이다.

이를 위해 장기팽창성 특성을 발현하는 것으로 알려진 MgO 분말의 특성을 규명하고 MgO 분말의 혼입율에 따른 모르타르 및 콘크리트의 유동특성, 강도 특성 및 길이변화 특성을 실내실험과 실구조물 적용 시험을 통해 규명하고자 한다. 이를 위한 세부적인 연구목표와 내용은 표 1.1.1에 나타내었으며 연구의 범위는 표 1.1.2에 나타내었다.

표 1.1.1 연구목표 및 내용

세부목표	기술개발 내용	목표구분
장기팽창 메커니즘 규명 및 내구성 검증	▪ 장기팽창재 성분분석(성분분석,활성도 시험)및 품질기준 확립	핵심기술 개발
	▪ 내구성 검증시험 (동해, 탄산화, 염해, 황산염)	핵심기술 개발
	▪ 팽창반응 메커니즘 규명 (2년간 재령별 XRD, SEM, DSC)	Test-bed 지원기술
장기팽창성 콘크리트의 팽창특성 규명	▪ 장기팽창성 콘크리트 재령에 따른 강도/팽창특성 규명(강도 3변수, 양생온도 2변수)	핵심기술 개발
	▪ 장기팽창성 콘크리트 재령에 따른 강도/팽창특성 재현성 시험(강도 3변수, 양생온도 2변수)	핵심기술 개발
	▪ 장기팽창성 콘크리트의 강도 및 팽창 모델 정립	핵심기술 개발
장기팽창성 콘크리트의 현장 실용화	▪ 실구조물 시범적용 및 계측	Test-bed 지원기술
	▪ 장기팽창성 콘크리트 시공지침서 작성	Test-bed 지원기술
	▪ 장기팽창재 적용 및 활용분야 발굴	Test-bed 지원기술
장기팽창성 콘크리트의 해석 프로그램 개발	▪ 팽창성 해석 프로그램 보완 및 해석(팽창해석모델 개발)	핵심기술 개발
	▪ 실구조물 시범적용 계측결과 해석 및 분석	Test-bed 지원기술

제 3 절 연차별 연구개발의 범위

표 1.1.2 연구개발 범위

연 차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	장기팽창성 콘크리트의 팽창특성 규명(I)	▪ 장기팽창성 콘크리트 재령에 따른 강도/팽창특성 규명(강도: 배합 3변수×양생 1변수, 팽창: 배합 3변수, 양생 2변수) ▪ 장기팽창성 콘크리트 재령에 따른 강도/팽창특성 재현성 시험(강도: 배합 3변수×양생 1변수, 팽창: 배합 3변수, 양생 2변수)
	장기팽창 메커니즘 규명 및 내구성 검증(I)	▪ 국내외 기술동향 분석 ▪ 장기팽창제 성분분석(성분분석, 활성도 시험) ▪ 내구성 검증시험(I)(동해, 탄산화, 염해, 황산염) ▪ 팽창반응 메커니즘 규명(I) (XRD, SEM, DSC)
	장기팽창성 콘크리트의 현장 적용 설계	▪ 시범적용 배합의 물리적 특성 시험(강도, 수화열) ▪ 실구조물 시범적용 대상 선정 및 설계
2차년도	장기팽창성 콘크리트의 팽창특성 규명(II)	▪ 장기팽창성 콘크리트 재령에 따른 강도/팽창특성 규명(강도: 배합 3변수×양생 1변수, 팽창: 배합 3변수, 양생 2변수) ▪ 장기팽창성 콘크리트 재령에 따른 강도/팽창특성 재현성 시험(강도: 배합 3변수×양생 1변수, 팽창: 배합 3변수, 양생 2변수)
	장기팽창 메커니즘 규명 및 내구성 검증(II)	▪ 내구성 검증시험(II)(동해, 탄산화, 염해, 황산염) ▪ 팽창반응 메커니즘 규명(II)(XRD, SEM, DSC)
	장기팽창성 콘크리트의 현장 적용(I)	▪ 실구조물 시범적용 및 계측(I)
3차년도	장기팽창성 콘크리트의 팽창특성 규명(III)	▪ 장기팽창성 콘크리트 재령에 따른 강도/팽창특성 규명(강도: 배합 3변수×양생 1변수, 팽창: 배합 3변수, 양생 2변수) ▪ 장기팽창성 콘크리트 재령에 따른 강도/팽창특성 재현성 시험(강도: 배합 3변수×양생 1변수, 팽창: 배합 3변수, 양생 2변수)
	장기팽창성 콘크리트의 현장 적용(II)	▪ 실구조물 시범적용 및 계측(II)
	장기팽창성 콘크리트의 해석프로그램 개발(I)	▪ 실구조물 시범적용 계측결과 해석 및 분석 ▪ 팽창성 해석 프로그램 보완
4차년도	장기팽창성 콘크리트의 팽창특성 규명(IV)	▪ 장기팽창성 콘크리트의 강도모델 정립 ▪ 장기팽창성 콘크리트의 팽창모델 정립
	장기팽창성 콘크리트의 실용화	▪ 실구조물 시범적용 및 계측(III) ▪ 장기팽창성 콘크리트 시공지침서 작성 ▪ 장기팽창재 적용 및 활용분야 발굴
	장기팽창성 콘크리트의 해석 프로그램 개발(II)	▪ 실구조물 시범적용 계측결과 해석 및 분석 ▪ 팽창성 해석 프로그램 팽창모델개발

< 공 란 >

제 2 장 국내외 기술개발 현황

< 공 란 >

제 1 절 국내 기술개발 현황

1. 국내 기술 및 산업 동향

MgO를 사용한 팽창성 콘크리트에 대한 연구는 국내에서는 거의 전무한 상태이며 혼화재료 특성에 대한 연구나 콘크리트의 팽창특성 및 내구특성 분야에 대한 연구는 활발히 진행되고 있다. 표 2.1.1에 현재까지 진행된 국내 무균열 콘크리트의 연구개발 현황을 나타내었다.

표 2.1.1 국내 팽창콘크리트 개발 현황[5,6)]

년도	연구개발 내용
2007～2008	매스콘크리트용 무균열 콘크리트의 국내 적용 연구 -팽창성 콘크리트의 메커니즘 규명을 중심으로
2001～2003	소각재용융슬래그의 건설용재료 적용성평가
2000～2003	제강슬래그의 환경적 재활용 제품기술개발
2001～2002	포졸란 광물을 이용한 기능성건자재 제품개발
2006～	혼합시멘트를 이용한 콘크리트의 내구성평가
2002～2003	스테인레스 정련로 슬래그 실용화 기술개발
2001	아미노산부산물의 콘크리트 혼화제 적용연구

국내의 경우 장기팽창성 콘크리트에 대한 연구가 거의 이루어지지 않고 있으며 정부에서 지원하는 국책 연구는 없는 상태이다. 또한, 국내의 장기팽창성 콘크리트에 대한 시장 형성이 되어 있지 않으며, 현장 적용성을 검토하고 있는 단계에 머물러 있는 실정이다. 따라서 무균열 콘크리트의 실현을 위해서는 먼저, 가장 중요한 요소 중 하나인 장기팽창재인 MgO를 혼입한 콘크리트의 메커니즘 규명, 배합에 따른 팽창량의 재현성, 내구성 검증 및 현장 적용을 위한 해석기법의 정립 등에 대한 체계적인 연구가 필요하며, 이를 토대로 국내 실용화를 실현할 수 있을 것으로 사료된다.

제 2 절 국외 기술개발 현황

1. 주요국가의 시장규모

기술개발에 성공할 경우 세계 각국의 댐 건설에 사용될 가능성이 있으나 기본적으로는 국내의 매스콘크리트 구조물의 수요를 충당할 것으로 판단된다. 구체적인 수치를 예상하기는 어렵다.

가. 세계시장을 선도하는 주요 업체

<table>
<tr><th>업체명(국적)</th><th>업체별 능력</th><th>중점 분야</th></tr>
<tr><td>중국수리수전과학원
(IWHR) 등 (중국)</td><td>약 30년 전부터 약 20여개의 댐 건설을 선도하여
지원했으며 주요 댐 및 준공연도는 다음과 같다.
<table>
<tr><th>댐명</th><th>준공연도</th><th>높이(m)</th><th>길이(m)</th></tr>
<tr><td>Qingxi</td><td>1993</td><td>52</td><td>-</td></tr>
<tr><td>Changsha</td><td>1999</td><td>55.5</td><td>143</td></tr>
<tr><td>Shalaohe</td><td>2001</td><td>63.7</td><td>185</td></tr>
<tr><td>Longshou</td><td>2001</td><td>80</td><td>141</td></tr>
<tr><td>Datan</td><td>2002</td><td>65.4</td><td>150</td></tr>
<tr><td>Bamei</td><td>2003</td><td>53.0</td><td>124</td></tr>
<tr><td>Luguhe</td><td>2004</td><td>69.0</td><td>187</td></tr>
</table></td><td>콘크리트
댐 건설</td></tr>
</table>

나. 해외 시장예측 및 발전전망

세계적인 건설산업에 대한 분포를 조사한 자료를 참고로 하여 약 1%정도의 규모로 팽창성 콘크리트의 시장규모를 판단한다면 다음의 통계청 및 KICM의 기술조사자료를 근거로 작성된 전 세계 건설산업분포 현황을 참고로 할 수 있을 것이다.

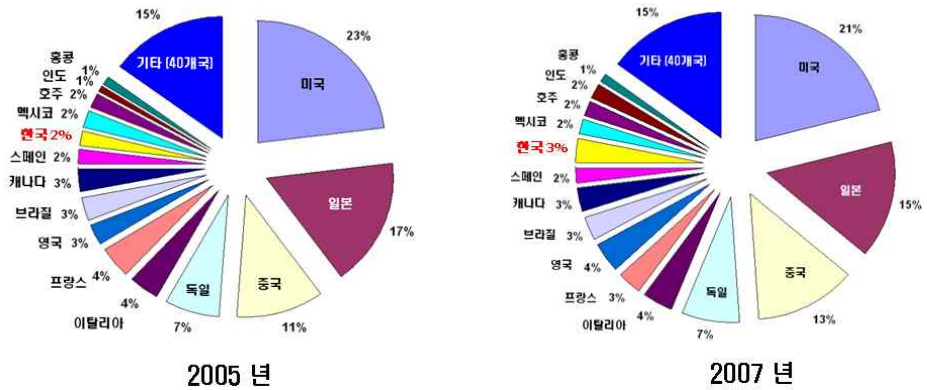


그림 2.1.1 세계 건설 산업 분포현황

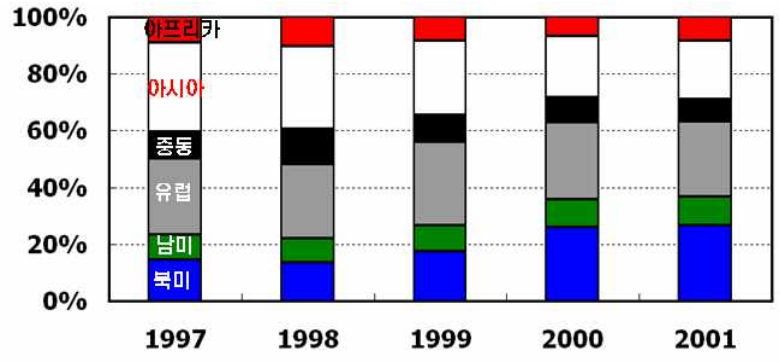


그림 2.1.2 아시아의 건설산업 분포추이

다. 해외 업체 · 연구기관과의 공동연구 필요성 및 추진 방안

중국에서 관련 연구결과를 발표한 기관으로는 '중국수리수전과학연구원', '국가전력회사 성도탐사설계연구원 과학연구소', '광동성 수력수전과학연구원', '광동성 수력수전 제2공정국', '광동성 수력전력답사설계연구원', '남경공업대학' 등의 기관이 있다. 그 중에서 중국 수리수전과학원(IWHR)은 정부연구기관으로 30여 년 전부터 장기팽창성 콘크리트의 메커니즘 정립을 통하여 댐 설계 및 시공을 위한 연구를 주도하고 있는 기관으로, 많은 연구 결과의 발표해 왔으며 관련 연구 기초 자료도 보유하고 있어, 공동연구를 통하여 장기팽창성 콘크리트의 품질관리 방안 등에 대한 기술뿐만 아니라 실내실험 방법 등에 대한 기술에 대한 도움을 받기 위하여 위탁연구를 수행하는 것이 본 연구의 실용화 사기를 앞당기기 위하여 꼭 필요하다.

'남경공업대학' 재료과학 및 공정학원의 등민(鄧敏) 교수팀은 장기팽창성 재료인 저온소성 MgO 제조공장과 활발하게 연구를 수행하고 있는 것으로 확인되어, 관련 국외 전문가로 본 연구에 참여하도록 하였다.

라. 개발된 기술의 해외 시장 진출 방안

장기팽창성 재료인 산화마그네슘(MgO)은 원석의 존재여부가 생산에 직결되므로 국내 생산은 어려울 것으로 예상되나, 중국에서 생산가격이 일반 시멘트 가격 수준에서 거래되는 것으로 알려져 있었으나 회소광물의 가격 급등으로 실리카흄 가격대로 올랐으나 그 사용량이 매우 적어, 국내 수입을 통하여 활용이 가능할 것으로 예측된다. 원재료의 개발 생산은 본 연구의 목표가 아니지만, 장기팽창성 재료를 활용한 무균열 콘크리트의 검증과 관련 기술을 개발함으로써, 향후 우리나라 건설산업의 해외진출시에 특화된 기술로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

2. 특허 동향

본 연구의 최종목적인 장기팽창성 콘크리트의 실용화와 관련된 특허 동향 파악을 위하여, 아래의 검색조건으로 검색한 결과 선행 특허와는 차별성을 갖고 있는 것으로 판단되며, 한국수자원공사에서는 자체 선행연구를 통하여 '산화마그네슘(MgO) 분말을 이용한 장기 팽창성 콘크리트(출원번호:제2008-127463호)'에 대한 특허를 출원하여 특허를 확보한 상태이다.

검 색 조 건			
사용 DB		1. 한국특허(WIPS, KIPRIS), 2. 미국특허(WIPS, USPTO), 3. 일본특허(WIPS, JPO), 4. 유럽특허(WIPS, EPO)	
검색어	한 국	TL=[(콘크리트+팽창재)*(방법+시스템)]	1건
	일 본	(콘크리트+팽창재+시멘트)*(방법+시스템)]	1건
	한 국	(수처리+정수장)*((기기+펌프+밸브)*제어)*TL = [(분산+다중화+이중화)*(방법+시스템)]	1건

검 색 결 과						
번호	국가	문헌번호	출원일	출원인	등록일/공개일	관련도
1	한국	특허공개번호 2006-093562	2005.09.22.	한국건설기술연구원	2006.08.25.	A
2	일본	wo 2004-099100	2003.05.7	가부시키가이샤니본쇼쿠가이	2004.11.18	A
3	한국	특허공개번호 2003-16891	2001.08.21	포스코외 다수	2003.03.03	A

<관련도 표시기호>
X : 본 발명(고안)의 신규성 판단에 영향을 줄 수 있는 문헌
Y : 본 발명(고안)의 진보성 판단에 영향을 줄 수 있는 문헌
A : 본 발명(고안)의 관련 정도가 낮은 일반 선행자료

※ 본 조사결과는 본 발명(고안)의 권리취득을 보장하는 등의 어떠한 법적 효력도 갖지 않습니다.

종 합 의 견	
유사점	인용문헌들에서는, - 소정의 혼합비율로 혼합한 콘크리트용 품질향상재를 사전에 제조한 후, 콘크리트 제조시 시멘트에 일정량의 상기 품질향상재를 치환하여 콘트리트의 경화를 강화시키는 과정, - 수쇄슬래그를 포함하여 콘크리트 조성물은 내구성 및 수밀성 등을 강화하는 과정, - 시멘트 혼화제 복합물 첨가하여 제조한 콘크리트와 같은 경화품의 강도 및 내구성을 강화시키는 과정 등을 구비합니다.
차이점	본 의뢰 발명에서는 - 시멘트량 중량비 4~5%의 저온소성 MgO 분말을 첨가하는 단계와, - 저온소성한 MgO 분말을 치환단계로 구성됩니다.
결론 및 보완사항	따라서 본 의뢰 발명은, 인용문헌들과 일부 콘크리트의 내용물을 강화시키는 유사한 작용, 효과를 포함하고 있지만, 시멘트량 중량비 4~5%의 저온소성 MgO 분말을 첨가하는 과정과, 저온소성한 MgO 분말을 치환하는 과정에 대해 구체적으로 기술하여 그 차이점을 부각되게 출원 준비하는 것이 바람직합니다.

3. 국외 기술동향

중국에서는 1966에서 1976년에 Baisham 아치 중력식 댐 건설시 우연히 저온소성된 MgO가 포함된 콘크리트의 수축보상 효과를 발견하게 되었다. 이후 1980년대부터, 저온소성한 MgO 콘크리트의 댐 건설에 대한 연구와 적용이 활발하게 이루어지고 있으며, 1980년대와 1990년대 초반에는 저온 소성한 MgO 콘크리트에 대한 현장 시험적용이 코퍼댐, 댐 기초부 그리고 외부 구속이 강하게 작용하는 펜스톡 수로의 뒷채움 등에 성공적으로 이루어졌다. 이러한 시도를 통하여, 귀중한 결과와 경험들이 얻어졌다. 1998년부터 저온 소성한 MgO 콘크리트는 몇 개의 아치 댐의 전체 구조물에 사용되었고, 괄목할만한 기술적, 경제적인 이득을 얻을 수 있었다.

표 2.1.2에 중국에서 저온 소성한 MgO 콘크리트를 이용하여 건설된 댐들의 사례가 정리되어 있다. 1999년 1월에서 4월까지 건설된 중국 남동부의 얇은 아치댐인 Changsha댐은 특히, 저온 소성한 MgO 분말 3.5～4.5%(시멘트에 포함된 2.5～3.5%에 더하여)를 약 138$\mu\epsilon$의 자기팽창을 얻기 위하여 사용하였다. 댐 현장에서 최고 기온과 최저 기온은 각각 36.8℃, -1.8℃이었다. 이 댐은 댐 축방향과 횡방향 모두 수축조인트 없이 시공되었다. 특별한 온도제어 조치를 취하지 않았으나 댐 건설 중이나 이후에 균열은 발견되지 않았다. 이 댐의 성공적인 건설 및 운영의 사례는 댐에 대한 장기팽창성 콘크리트의 효과를 증명하는 것이다.

중국에서 사용하는 수공전용 MgO 팽창재의 사용목적을 정리하면 다음과 같다.

(1) 수공전용 콘크리트의 자기수축를 감소시킴
(2) 시공기간동안 온도균열을 방지하고 온도저하로 인한 수축을 보상함
(3) 강제유입기간(impound period)동안 온도저하로 인한 수축을 보상함
(4) 시공속도를 증가시키기 위해 시공이음을 생략하거나 블록 수 감소을 위함

표 2.1.2 MgO 콘크리트를 적용한 댐(중국의 경우)[1,2,3,4)]

댐명	높이 (m)	길이 (m)	부피 (x10^{3}m^3)	MgO (%)	시멘트 (kg/m^3)	플라이애시 (kg/m^3)	자기팽창 (με)	준공 연도
Changsha	55.5	143	31	3.5～4.5	120～140	60～80	70～138	1999
Bamei	53.0	124	35	5.0～5.5	183	46	92～100	2003
Datan	65.4	150	62	7.0	-	-	-	2002
Luguhe	69.0	187	64	7.0	-	-	-	2004
Shalaohe	63.7	185	57	4.0～4.5	107	72	100～130	2001
Longshou	80	141	208	3～4.5	58～96	109～113	45～60	2001
Qingxi	52	-	150	5.0	120～150	52～64	90～100	1993

제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과

< 공 란 >

제 1 절 국내외 적용사례 분석

1. 국내 적용사례

국내의 경우 MgO를 혼입한 콘크리트에 대한 연구가 아직 활발히 진행되지 않고 있다. 또한 정부에서 지원하는 국책 연구 역시 이제 시작 단계에 있기 때문에 MgO 콘크리트에 대한 사회적 인식 및 그 적용 기술에 대한 자료가 부족한 실정이다. 따라서 MgO 콘크리트를 실제 시공에 적용하기에는 향후 폭넓은 연구가 요구되며 그 중에서 MgO를 혼입한 콘크리트의 메커니즘 규명, 배합에 따른 팽창량의 재현성, 내구성 검증 및 현장 적용을 위한 해석기법의 정립 등에 대한 체계적인 연구가 필요하다. 표 3.1.1에 정리되어 있는 국내 기술 개발 수준을 보면 국내의 장기팽창성 콘크리트에 대한 시장이 형성되어 있지 않으며 현장 적용성을 검토하고 있는 단계에 그치고 있음을 알 수 있다.

표 3.1.1 MgO 콘크리트의 국내 기술 개발 수준

세부기술 내용	국외 현황 (주요선진국명)	국내 개발 현황	수준 (국외대비)
장기팽창성 콘크리트 현장 적용기술	지난 30년 동안 약 30개의 댐에 적용됨(중국)	실내 시험 단계 및 물성 파악 단계 (한국수자원공사, 성균관대학교)	10
수축 평가 기술	평가기법의 적용 단계 (유럽연합)	평가기법 개발 및 적용단계(성균관대학교)	80
균열 제어 기술	설계에 반영하여 적용하는 단계	설계에 반영하여 적용하는 단계	100

2. 국외 적용사례

가. MgO 팽창재를 사용한 수공구조물의 특징

중국에서는 수십 년 전부터 수공 구조물에 MgO 팽창재가 사용하였다. MgO 콘크리트로 건설된 첫 번째 댐은 Baishan 중력식 댐으로 1973년 중국의 북동부 지역의 한랭지역에 건설되었다. 1982년 Jilin성에 Hongshi 중력식 댐, 1990년 Guandong성의 Qingxi댐과 Fujian성의 Shuikou댐의 몇 개의 세그먼트 등이 MgO

콘크리트를 이용하여 건설되었다. 또한, Zhejiang성의 Shitang댐의 터널블록과 기초 채움재, Sichuan성의 Tongjiezi댐, Guizhou성의 Dongfeng댐과 Puding댐이 MgO 콘크리트로 건설되었다.

MgO 콘크리트 댐의 건설기술에 관한 연구는 온도응력 보상 기준, MgO 시멘트의 수화반응 메커니즘, MgO 시멘트와 콘크리트의 안정도, MgO 혼입 콘크리트의 장기변형에 대한 안정성과 균질성에 관한 연구 등을 주로 수행 있다. 과거 10년 동안, 수공 구조물의 건설에 있어 MgO 콘크리트의 적용을 통한 댐건설기술은 큰 진전을 이루었다. 현재, 수공 구조물의 건설에 있어 MgO를 혼입한 시멘트가 대부분을 차지하고 있다.

일반적인 MgO 팽창재를 사용한 수공구조물의 특징은 다음과 같다

▷ 프로젝트 규모 : MgO 콘크리트를 사용한 댐의 프로젝트 규모는 일반적으로 작다. 프로젝트는 주로 thin arch dam과 partially gravity dam이다. MgO 콘크리트는 중력식댐의 구속구간에 주로 사용된다.

▷ 구조물 특성 : MgO 콘크리트를 사용하는 thin arch dam에는 수평시공이음이 없다. 몇 개의 댐만이 온도 보상을 위해 이음부를 도입하였다.

▷ 온도제어 특성 : MgO 콘크리트는 상대적으로 세장한 댐의 기초부와 적은 표면 작업 공간(small working surface)을 가지는 댐에 주로 사용된다. 일반적인 시공방법이 채택되더라도 온도제어 대책은 어렵지 않다. 그러므로 MgO 콘크리트의 팽창은 온도수축을 보상하는데 사용되며 수평, 수직시공이음이 없는 콘크리트 현장을 실현할 수 있다. 또한, 시공속도를 향상시키며 온도제어를 위한 비용을 절감할 수 있다.

▷ 재료특성 : MgO 콘크리트는 낮은 설기기준강도 등급을 가지는데 중국에서는 주로 C20등급이 사용된다. 콘크리트에는 고밀도(high volume)의 fly-ash를 사용할 수 있는데 이것은 타설을 용이하게 하는데 적합하고 외기온도의 상승 시 유리하다. 결론적으로 온도제어 대책을 단순화하는데 유리하다. MgO 콘크리트는 팽창성능과 균열저항성을 나타낸다.

▷ 온도특성 : 만약 기온이 연평균 18~20℃정도이며 겨울의 기온이 15~17℃로 따뜻하면 수평시공이음이 없는 시공기술이 적합하다. 타설 기간은 일반적으로 1~2년으로 짧고 기온이 낮은 계절에 타설을 시작할 수 있다. 이것은 콘크리트의 최대 온도를 제어하는데 유용하다.

▷ 시공방법 : 수평, 수직 시공이음이 없는 step casting method가 주로 사용되는

데 이것은 열을 방출할 수 있어 온도제어에 유리하다. 댐 건설이 마무리된 후, 강제유입(impounding)은 주로 겨울에 이루어진다. 그 이유는 댐체가 얕아 단기간에 안정적인 온도에 도달할 수 있으며 온도강하과정의 영향이 적기 때문이다.

MgO 콘크리트는 거대한 규모의 수력 댐에 안전하게 사용할 수 있는가 혹은 현재까지의 수공 구조물 건설 프로젝트에 MgO 팽창재의 적용이 성공적이었는가에 대한 질문에 대해서는 많은 논란이 있었던 것이 사실이다. 처음으로 MgO 팽창재에 관해 연구한 전문가 중 한 사람인 Tang Mingshu는 MgO 팽창재의 안전한 사용을 위해서는 세 부분에서 제어가 가능해야 한다고 하였다. 즉, 팽창속도, 팽창시간 그리고 팽창량을 제어할 수 있어야만 한다. MgO 팽창재에 대한 연구는 이들 3개의 주요 인자에 초점을 맞추고 있다.

(1) 안정도 문제

MgO를 시멘트나 콘크리트에 혼입하는 경우, 안정도에 대해 의문시해야 한다. 시멘트의 팽창성분에 대한 장기간의 연구결과, 시멘트의 MgO 성분을 엄격히 제한해야한다는 것은 일반적인 사실이다. 만약 MgO 성분이 5%를 초과한다면 오토크레이브 시험법을 수행해야만 한다. 안정도시험을 만족한 시멘트만이 사용될 수 있다. 현재까지의 연구결과, MgO 팽창재에 대한 안정도 시험에 오토크레이브 시험법은 적합하지 못하다. 그러나 현재 시멘트나 콘크리트의 안정도에 영향을 미치는 MgO를 판단할 방법이 존재하지 않는다. 현재의 안정도 시험법은 MgO 팽창재의 적용과 연구에만 제한적으로 사용되고 있다.

MgO의 수화팽창에 영향을 미치는 인자

① 소성온도

② MgO 팽창재의 분말도와 첨가량

③ MgO의 수화 환경(온도 물 등)

④ 시공구조물의 제반 특성

표 3.1.2 Active index of lightly burnt MgO

Burnt temperature (℃)	950	1000	1050	1190
Active index (s)	83	140	268	〉720

(2) MgO콘크리트의 팽창특성

콘크리트에 MgO 팽창재를 사용하는 방법은 2가지가 있다. Inner-dropped법과 out-dropped법이다. Inner-dropped법은 시멘트의 소성과정에서 MgO 광물을 첨가하는 방법이다. 반면 out-dropped법은 이미 생산된 시멘트 혹은 시멘트 클링커에 저온소성 MgO를 첨가하는 방법이다. 이들 두 가지 방법은 MgO 시멘트의 자기팽창변형에 다른 영향을 미친다. 그림 3.1.1은 inner-dropped MgO를 첨가한 시멘트에 대한 자기팽창변형과 시간과의 관계를 나타낸 것이다. 곡선으로부터, 초기재령에서의 자기팽창변형은 수축형태를 나타내며 재령 7일 이후에는 점진적으로 팽창한다는 결론을 얻을 수 있다. 그림 3.1.2는 out-dropped MgO를 첨가한 시멘트에 대한 자기팽창변형과 시간과의 관계를 나타낸 것이다. MgO 첨가량을 증가시킬수록 자기팽창변형이 증가하고 있으나 이들의 관계는 비례적이 아니다. 이것은 콘크리트 속의 MgO의 팽창이 여러 가지 인자에 의해 영향을 받는 다는 것을 나타낸다.

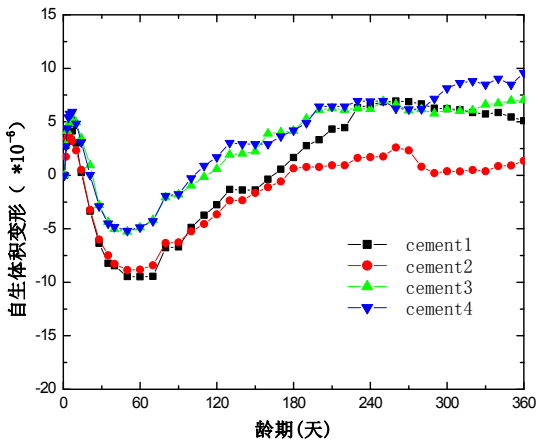


그림 3.1.1 the relationship between autogenous volumetric deformation and time of different cement with inner-doped MgO

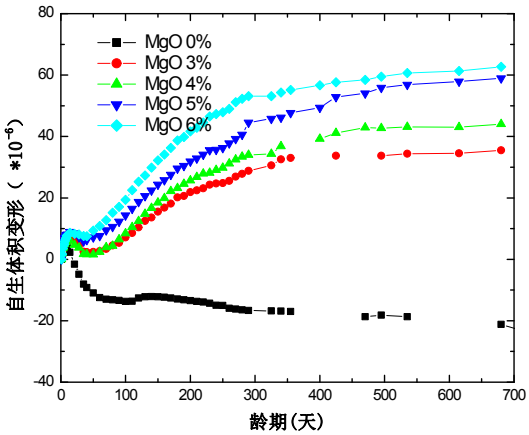


그림 3.1.2 The relationship between autogenous volumetric deformation and time of one type of cement with out-doped MgO

실제 시공현장에서 가장 중요한 것은 MgO 콘크리트의 팽창 성능이다. 콘크리트 속의 MgO 수화반응은 많은 인자(예를 들어, 시멘트, 광물 혼화재, 화학 혼화재, 환경조건 등)에 의해 영향을 받기 때문에 MgO 콘크리트의 적용은 제한적으로 사용되어야 한다. 그러므로 MgO 팽창재에 관한 연구는 시공현장의 환경과 시공구조물에 대해 합리적인 혼입량을 결정하는데 초점을 맞추어야만 한다. 동시에 내구성과 안정도 문제를 피하기 위해 MgO 팽창재의 팽창량은 제어 가능한 범위 내에 있어야 한다. 수공 구조물은 완공 이후 매우 오랜 시간 운용되어야만 하는 반영구적인 구조물이다. 그러나, MgO 콘크리트에 관한 실험은 길어야 1~2년 정도만 실시하고 있다. 짧은 시험기간을 통한 MgO 콘크리트의 장기 팽창성능을 예측한다는 것은 어려운 일이다. 따라서 매우 큰 규모의 댐 구조물의 건설에 있어 MgO 콘크리트를 사용할 경우에는 주의를 기울여야만 한다. 현재까지, MgO 콘크리트의 실용화는 30년 정도의 기간 동안 이루어졌으며 해결되지 않은 많은 문제가 존재한다.

(3) MgO 콘크리트의 장기 관찰결과

MgO 콘크리트의 적용에 있어 나타나는 하나의 문제는 안정성(stability)이다. 내부콘크리트의 온도가 안정화된 이후, MgO 콘크리트는 계속해서 팽창하는가? 만약, 팽창이 지속된다면 댐 구조물에 손상을 일으킬 수 있을 것이다. 그러므로 MgO의 수화반응은 설정된 시간 내에 종료되어야만 한다. 현재, 관찰된 결과에 따르면 MgO 콘크리트는 타설 후 10년이 지난 이후까지도 팽창을 지속하고 있다. 그러나 대부분의 자료들은 콘크리트가 안정화되어 있다는 것을 나타낸다. 그림 3.1.3은 MgO 콘크리트의 온도에 따른 장기관측결과를 나타낸다.

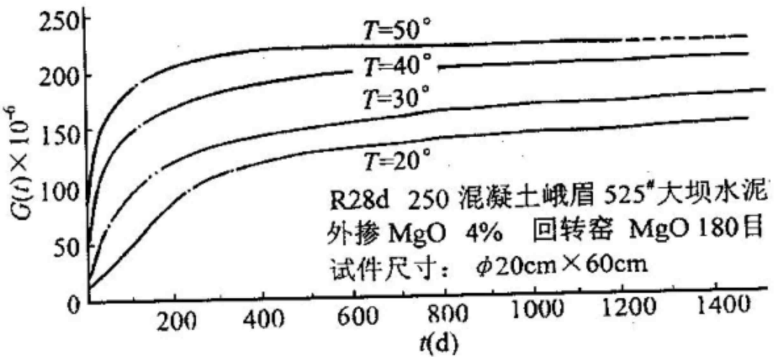


그림 3.1.3 Long term observation result of a kind of MgO concrete

(4) 온도응력 보상

댐 콘크리트의 온도응력 보상 연구는 댐 구조물에 대한 MgO 콘크리트의 효과에

관해 주로 연구되고 있다. 다양한 종류의 변형(온도변형, 건조수축, 자기수축 등)특성에 기초한 구속조건과 팽창과정, 미세팽창변형 및 온도변형과 온도응력과의 관계 등을 시뮬레이션기법을 이용하여 해석한다. 이를 위해서는 팽창량의 효과, 팽창곡선, 타설온도, 강제유입시간과 댐 구조물 주변의 기온 등이 요구된다. 댐 콘크리트의 온도응력 보상에 관한 제안 모델들에 대한 연구가 앞으로 진행될 것이다. 한편, 댐 콘크리트의 응력분포는 콘크리트 댐의 타설 블록에 대한 시뮬레이션 해석을 통해 계산할 수 있으며 MgO 콘크리트의 팽창량과 시간 역시 결정할 수 있다.

팽창 콘크리트의 자기팽창 변형의 발달 과정과 기초 콘크리트의 온도변화는 다르며 시멘트 수화과정은 초기재령에서 발생한다. 또한, 만약 콘크리트의 자기팽창 변형이 온도응력을 보상하는데 사용된다면 원하는 보상결과를 얻기 위해 팽창시간을 지연시킬 필요가 있다. 그러나 장기 재령에서의 팽창은 안정도 문제와 구조물의 내구성 문제를 야기하므로 최종 팽창량의 이점이 무엇이지를 말하는 것은 어렵다.

요약하면, 수공 콘크리트 구조물에 MgO 팽창재를 적용하는 것은 주로 수화반응으로 인한 체적팽창 때문이며 이것은 시멘트와 콘크리트의 안정도에 분명히 영향을 미친다. 그러므로 이것의 사용에 있어 신중을 기해야만 한다.

시멘트, 광물 혼화재, 화학 혼화재, 시공환경과 같은 많은 인자들이 콘크리트 속의 MgO 팽창재의 수화반응에 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 MgO 팽창재의 적용은 시공조건에 따른 실험적 연구에 기반 해야 하며 비정상적인 변형과 내구성 문제가 발생하지 않도록 주의해야만 한다. 실제 구조물에 대한 MgO팽창재의 적용목적은 다양하다. 또한, MgO 팽창량에 대한 요구조건과 팽창시간도 다양하다. 시공 요구조건과 상황들에 맞는 실험을 통해서만 적합한 MgO 타입을 선택해야 하고 합리적인 MgO 팽창재의 혼입량을 결정해야 한다.

다. MgO콘크리트의 적용사례 - 중국 사례를 중심으로 -

1976년부터 1982년까지 Jilin에 건설된 Baishan 댐은 중력식 아치댐이며 Fushun Cement Plant에서 생산된 MgO 5%를 혼입한 시멘트로 건설되었음에도 심각한 균열이 발생하지 않았다. 실험결과, 댐 콘크리트에 사용된 시멘트에 존재하는 periclase는 50~100 με의 팽창변형률이 발생하는 brucite를 형성하는 것으로 나타났다. 1980년 Metha 등은 매스콘크리트에 자기응력을 발생시키기 위해 산화마그네슘 혼화재를 혼입할 것을 제안하였다. 이후, 시멘트 클링커와 팽창재에 존재하는 MgO는 매스콘크리트의 온도변화에 의해 발생하는 인장응력을 상쇄하는데 유용한 것으로 받아들여지고 있다.

(1) Shitang dam

1987년 8월부터 1989년 4월까지 Zhejiang의 Shitang댐 감압조(pool for elimination water pressure) 시험시공 콘크리트 블록에 저온소성 MgO를 첨가한 콘크리트를 처음으로 타설하였다. 1987년 타설한 콘크리트 블록의 치수는 12 m x 7 m x 1.5 m이며 1989년 4월 11일 타설한 9 kg/m^{3}의 MgO 혼입 콘크리트와 무혼입 콘크리트 블록의 치수는 22 m x 6.5 m x 1.8 m 이다. 표 3.1.3에 배합표를 나타내었다.

표 3.1.3 Concrete batches of Shitang test blocks

No	Concrete	Materials (kg/m^3)								
		Cement	Fly ash	MgO	Sand	5~20 ㎜ rock	20~40 ㎜ rock	40~80 ㎜ rock	Water	Water reducer
1	C_{90}20-I	173	43	0	467	324	486	810	119	0.320
2	C_{90}20-II	173	43	9	462	321	486	810	124	0.331

그림 3.1.4는 콘크리트 속에 매설된 응력계와 온도계를 나타내었으며 1989년 타설된 콘크리트의 발생 응력을 그림 3.1.5에 나타내었다. 9 kg/m^{3}의 MgO를 혼입한 콘크리트는 0.1~1.0 MPa의 압축응력을 발생하였으나 무혼입 콘크리트는 인장응력이 발생하였다. 콘크리트 속의 MgO는 인장응력을 보상하기에 충분한 팽창응력을 발생시켰다.

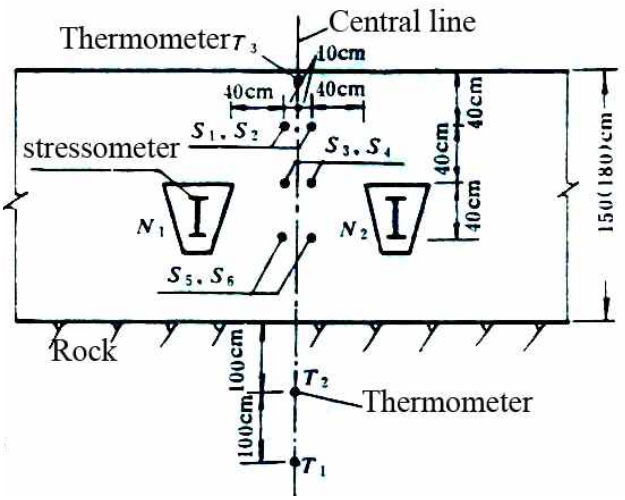
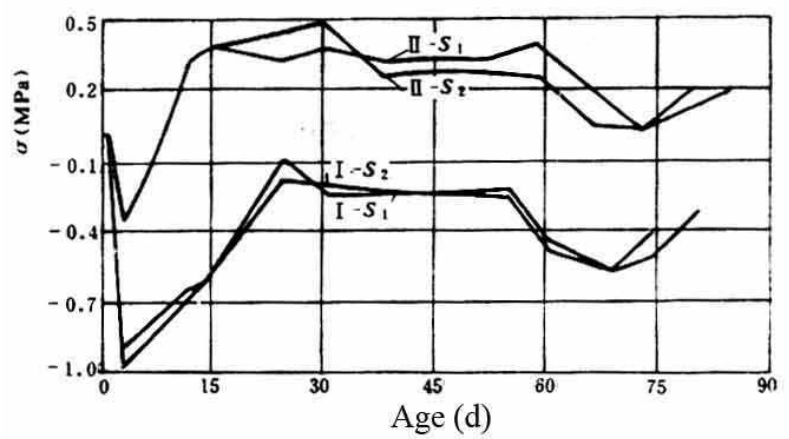
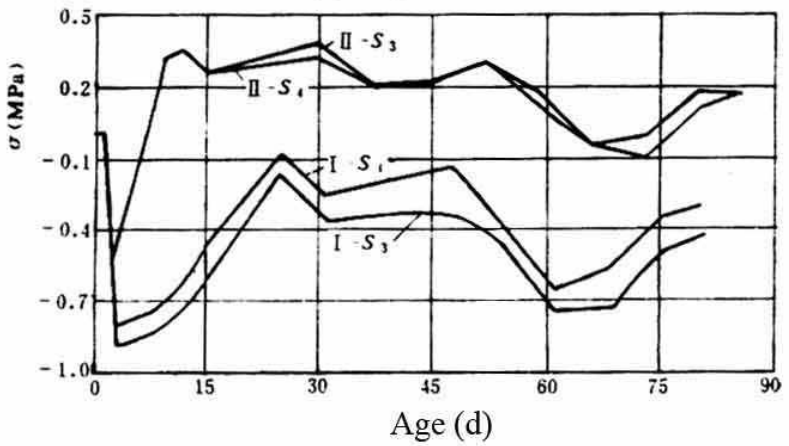


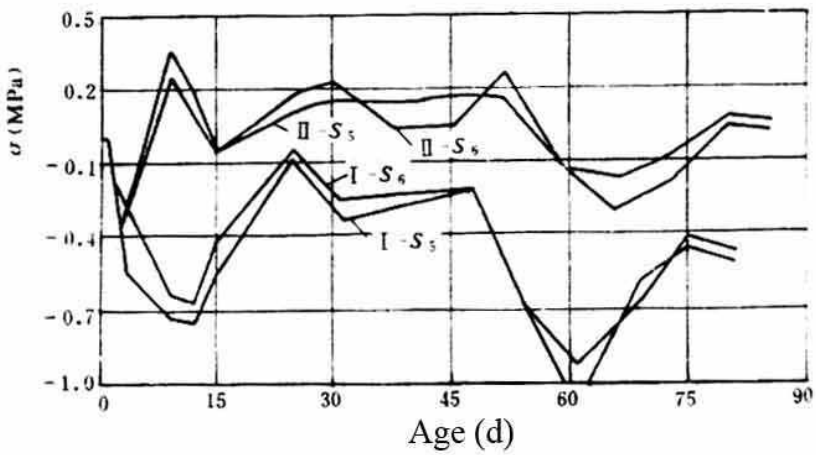
그림 3.1.4 Location of stress gages and thermometers in concrete



(a) Gage S1 and S2



(b) Gage S3 and S4



(c) Gage S5 and S6

Ⅰ Concrete contained MgO, Ⅱ Concrete without MgO

그림 3.1.5 Stress of Shitang concrete

(2) Qingxi gravity dam

본 댐은 Guangdong성 Dapu주 Dingjiang 하천에 위치해 있으며 연평균기온은 21℃이다. 7월과 1월의 평균기온은 28.3℃, 11.8℃이다. 높이 51.5 m, 길이 315 m의 중력식 댐이며 150,300 m^3의 콘크리트가 타설되었다. 그림 3.1.6의 2-18단면의 기초부(0.4~0.5 L, 두께 약 7~8 m)에 저온소성 MgO 약 68,000 m^3가 사용되었다. 1990년 7월부터 1991년 7월까지 3~15번 단면을 타설하였고 1992년 4월부터 1992년 7월까지 16~18번 단면을 타설하였다. 얼음을 이용한 온도제어를 실시한 14~15번 단면을 제외하고 콘크리트의 온도제어를 실시하지 않았다.

전체 시공기간 동안 댐 표면는 20 ㎜ 두께의 폴리스틸렌(polystyrene)판을 이용하여 열 차단을 실시하였다. Wenfu Cement Plant의 P.O 42.5 시멘트를 사용하였으며 yong'an에서 운반한 플라이애쉬와 Liaoning성 Haicheng의 MgO 팽창재 500 ton을 사용하였다.

표3.1.4 Chemical compositions of MgO expansive agent, cement and fly ash

No	MgO expansive agent				Cement		Fly ash		Date
	Residue(%)	MgO(%)	LOI(%)	Reactivity Index(s)	MgO(%)	CaO(%)	MgO(%)	CaO(%)	
1	5.6	96.13	11.8						1990.06.29
2		91.40			1.22	58.53	0.40	0.57	1990.07.11
3		85.40			2.01	61.03	0.36	0.73	1990.07.18
4		92.73			2.32	60.48	0.15	0.50	1990.07.26
5		91.47			1.26	59.49	0.36	1.05	1990.08.05
6		90.33			1.46	59.89	0.28	0.52	1990.08.17
7	3.80	88.43	3.79						1990.08.24
8		89.09			1.44	59.57	0.31	0.70	1990.09.03
9		89.23			1.24	61.01	0.45	0.49	1990.10.07
10		90.68			1.53	61.83	0.33	0.49	1990.10.26
11		91.49			1.50	59.21	0.32	0.75	1990.11.02
12		92.44			1.06		0.41		1990.11.11
13	4.08	86.78	4.02	139					1990.11.23
14	3.65	91.08	3.74	117					1990.12.05
15		88.91			1.36		0.13	0.13	1990.12.10
16		89.38			1.54	57.91	0.53	0.53	1991.01.13
17		83.44			2.11	54.70	0.40	0.67	1991.03.26

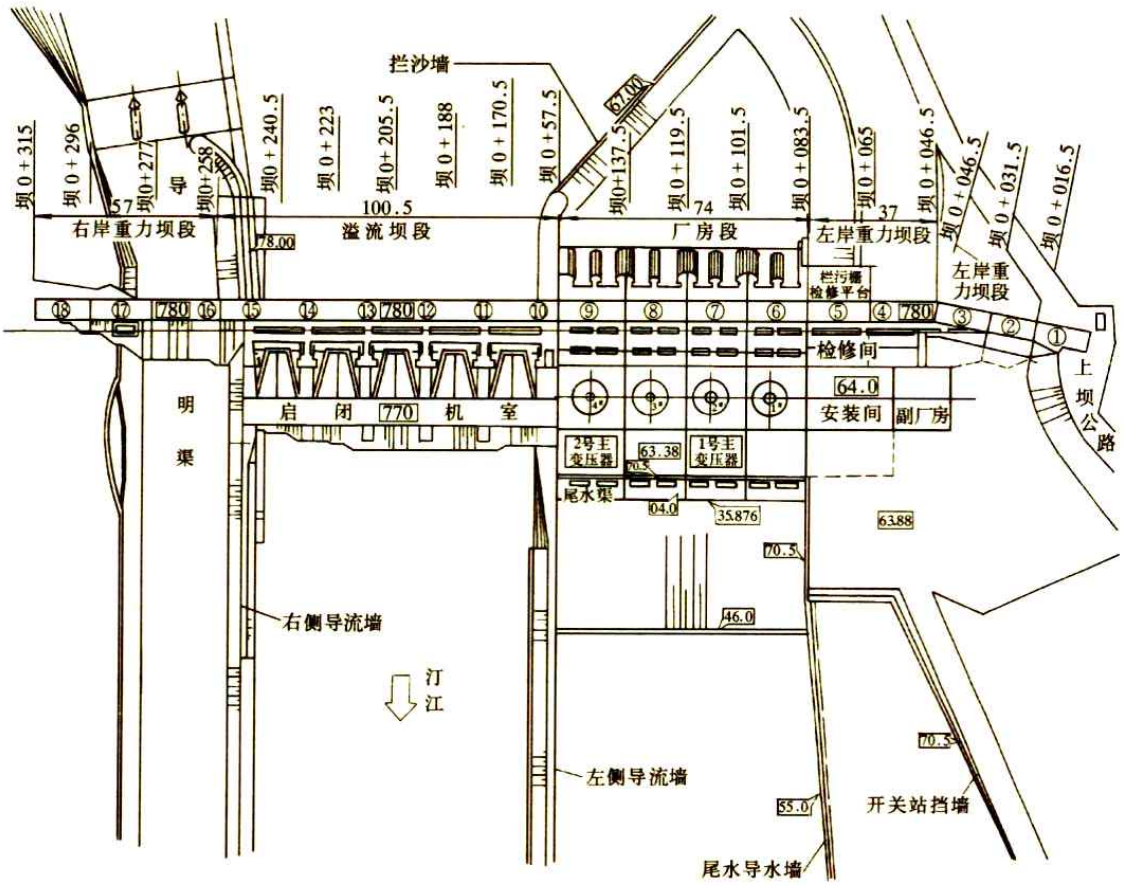


그림 3.1.6 Illustration of plan of Qingxi dam

재료의 주요 화학성분들을 표 3.1.4에 나타내었으며 콘크리트 배합표를 표 3.1.5에 나타내었다. 강한 구속영역(0~0.2L)에서는 10.75 kg/m^{3}의 MgO를 혼입하였고, 약한 구속영역(0.2 ~ 0.4L)에서는 8.6 kg/m^{3}의 MgO를 혼입하였다.

표 3.1.5 Concrete batches of Qingxi dam

No	Concrete	Materials (kg/m^3)				Rock grade	Sand ratio (%)
		Cement	Fly ash	MgO	Water		
1	C9015	150.5	64.5	10.75	129	4	25
2	C9015	173.8	74.5	10.75	150	3	28
3	C9010	120.4	51.6	8.6	129	4	28
4	C9010	139.1	59.6	8.6	149	3	31

콘크리트에 포함된 MgO에 대한 균질성(Homogeneity)는 화학적 방법으로 실험을 실시하여 그 결과를 표 3.1.6에 나타내었다. 콘크리트에 포함된 MgO의 균질성

등급은 단면 10번을 제외하고 A, B, C등급으로 나타났다. 이들 결과는 MgO의 균질성을 확보한 것으로 판단된다.

표 3.1.6 Statistics of homogeneity of MgO in concrete

Section of dam	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Sample Numbers	40	40	50	30	30	40	70	20	100	90	120
Average MgO (%)	4.49	4.84	4.41	4.56	4.33	4.69	4.72	4.35	4.36	4.31	4.23
Mean square deviation (%)	0.53	0.71	0.74	0.71	0.49	0.36	0.57	1.12	0.65	0.64	0.54
Coefficient of deviation (%)	11.9	14.6	16.8	15.5	11.3	7.6	12.0	25.7	14.9	14.8	12.9
Maximum deviation (%)	3.49	2.39	4.22	3.76	2.73	1.53	3.96	4.06	4.07	5.49	2.93
Evaluation	B	C	C	C	B	A	B	D	C	C	B

Note: A, B, C and D represent excellent, good, normal and bad, respectively.

그림 3.1.7는 양생온도 40℃, 0.0, 8.6, 10.75 kg/m^{3}의 MgO를 혼입한 콘크리트 시편의 자기체적변형을 나타낸 것이다. 8.6 kg/m^{3}과 10.75 kg/m^{3}의 MgO 혼입 콘크리트 시편은 60일 전에 급격히 팽창하였고 상대적으로 느린 속도로 팽창하였다. 180일경의 자기체적변형은 각각 147 με과 193 με이였다.

그림 3.1.8, 그림 3.1.9과 그림 3.1.10에는 9번과 10번 단면에서 나타난 자기체적변형과 온도의 변화과정을 나타내었다. 온도 계측기 S2, S6, S10는 댐 단면 10번에 위치한 것으로 암반기초로부터 2.5 m, 5.7 m, 8.0 m의 높이에 위치해 있다. S2와 S6에 기록된 최대온도는 재령 20일경에 44℃와 45℃이였으며 이후 점차 하강하였다. S10에서는 재령 10일경에 약 39℃의 최고온도를 기록하였다. MgO 혼입 콘크리트의 자기팽창변형은 90일까지 증가하고 이후 점차 안정화되었다. MgO 혼입 콘크리트의 자기팽창변형은 콘크리트의 온도가 하강하는 시점까지 팽창하였다. 상대적으로 급격한 온도변화를 보이는 30일과 90일까지 콘크리트는 압축상태에 있었다(그림 3.1.11, 그림 3.1.12). MgO 혼입 콘크리트로 건설된 댐에서는 심각한 균열을 발견하지 못하였다.

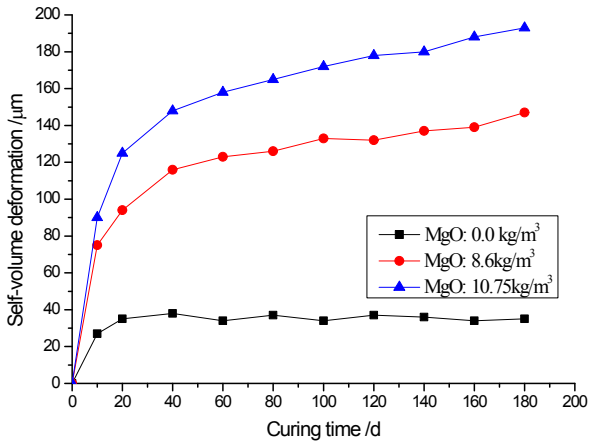


그림 3.1.8 Self volume deformation of concrete specimens with 0.0, 8.6 and 10.75 kg/m^3 MgO cured in 40℃

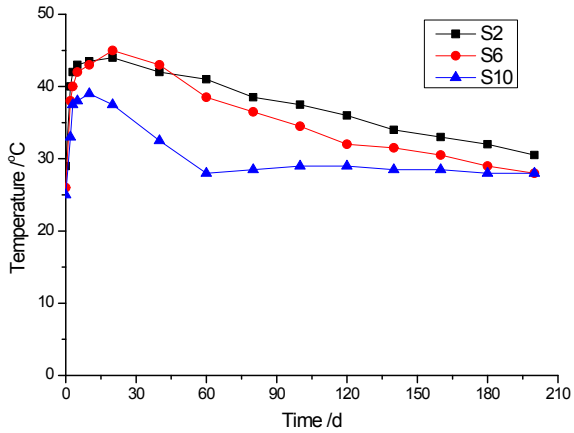


그림 3.1.9 Temperature processes recorded in different parts of section 10 of dam

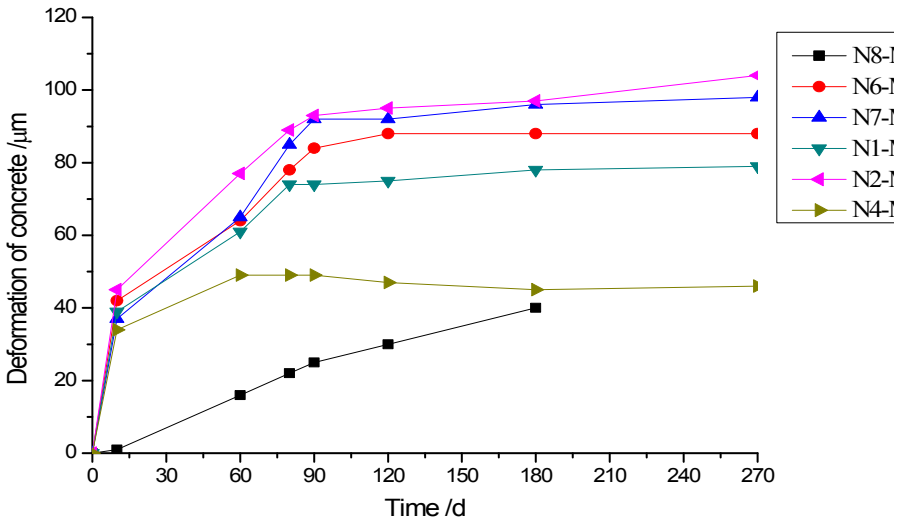


그림 3.1.10 Self volume deformation of concrete in section 10 of dam

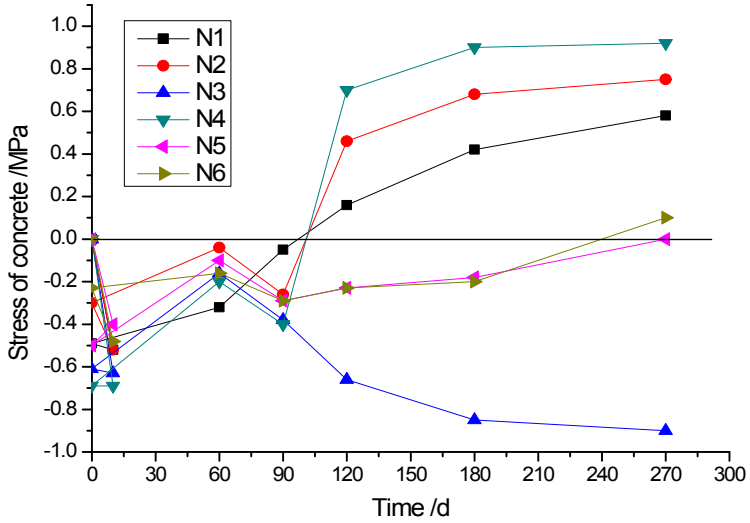
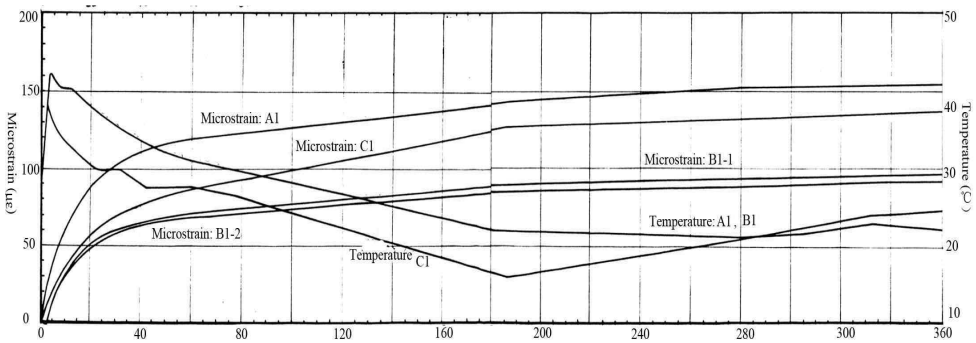
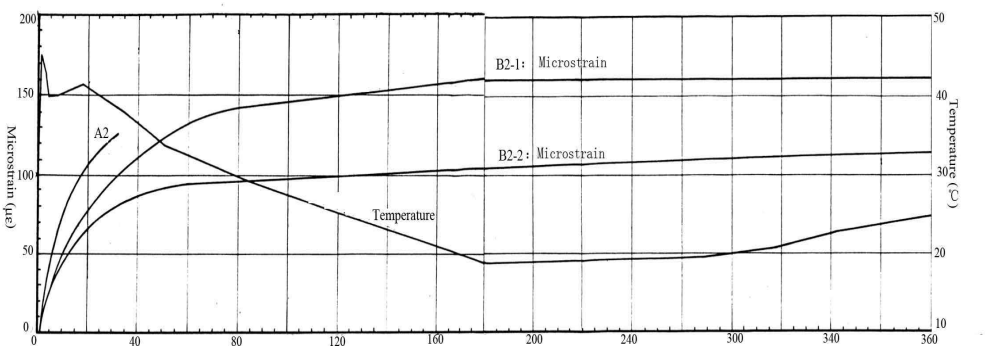


그림 3.1.11 Stress of concrete in section 10 of dam
(Negative stress: Pressed stress, Positive stress: Tensile stress)



Age (days)
Strain meters A1, B1 and C1



Age (days)
Strain meters A2 and B2

그림 3.1.12 Temperature of self volume deformation of concrete in section 9 of dam
(MgO=10.75 kg/m^3)

(3) Shuikou gravity dam

Shuikou 중력식 댐은 Fujian성 Minqing주 Min하천에 위치해 있다. 길이 783 m 높이 80~101 m 폭 16~20 m 이다. 하단부 최대폭은 72 m 이다.(그림 3.1.13) 횡방향 조인트가 있으며 연평균기온은 19.6℃이다. 7월과 1월의 평균기온은 28.7℃와 10.0℃이다. 1990년 8월부터 1990년 12월까지 7번~15번 단면의 기초 암반부에 MgO 혼입 콘크리트를 타설하였다. 그림 3.1.13에 댐 평면도를 도시하였다. MgO 콘크리트를 타설한 영역에 대해서는 전통적인 온도제어법을 사용하지 않았다. 시멘트는 Shunchang Cement Plant의 P.I 52.5 시멘트를 사용하였고 플라이애쉬는 Fuzhou에서 운반하여 사용하였다. Liaoning성 Haicheng의 MgO 를 사용하였다. 사용재료의 화학성분과 물리특성은 표 3.1.7에 나타내었다.

표 3.1.7 Chemical compositions and physical properties of materials

No	Material	Chemical compositions (%)							Copressive strength /MPa		Reactivity index (s)
		SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	LOI	3d	28d	
1	Cement	23.02	4.63	3.78	61.32	0.47	2.03		31.2	63.4	
2	Fly ash	47.72	38.58	6.22	2.50	0.66	0.20	0.88			
3	MgO				0.83	91.25		7.76			240
					0.20	92.73		3.96			421
					1.20	90.52		6.63			237
					1.94	90.53		7.13			238
					1.61	89.13		4.36			179



그림 3.1.13 Shuikou dam

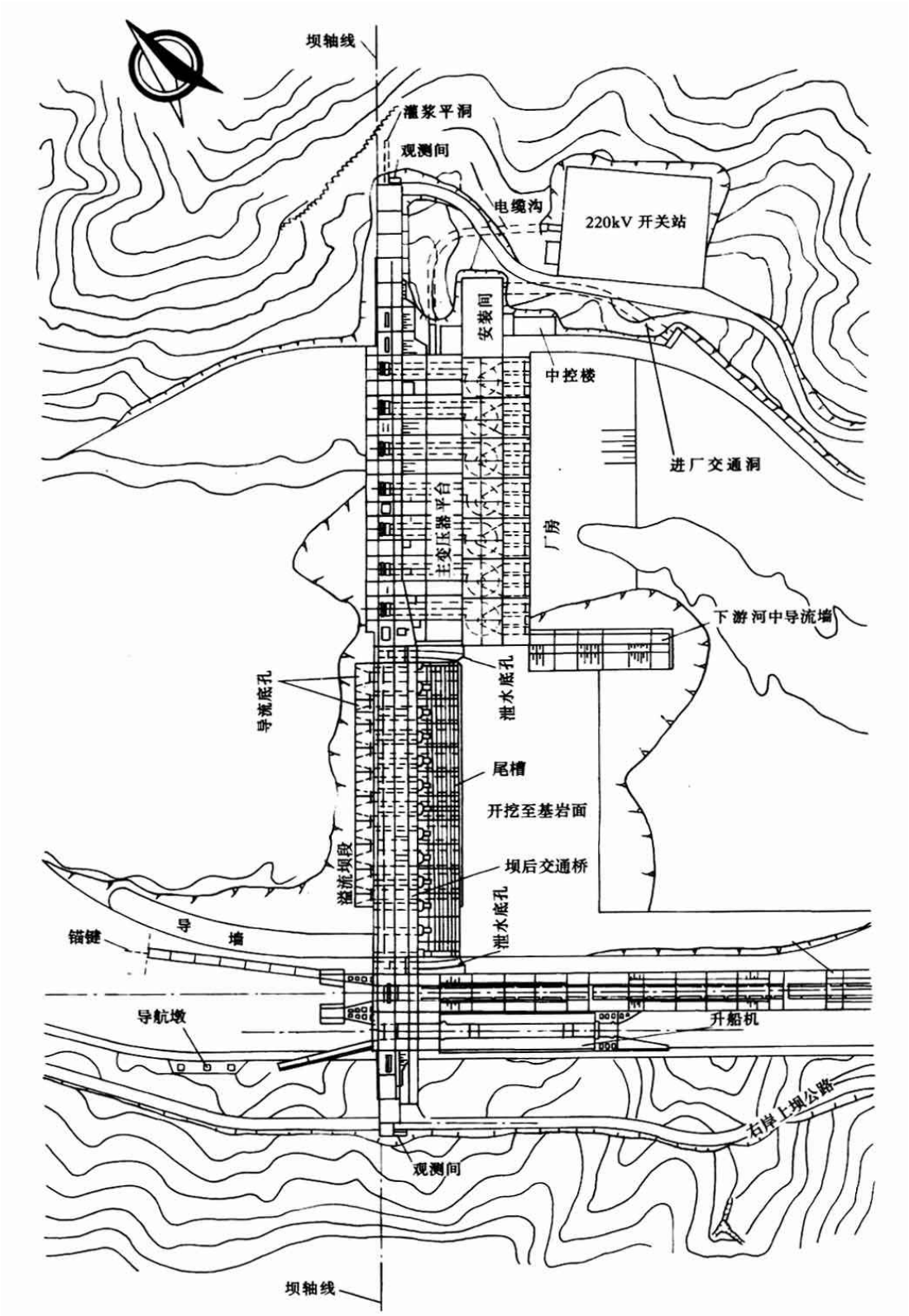


그림 3.1.14 Illustration of plan of Shuikou dam

표 3.1.8 Concrete batches of Shuikou dam

No	Concrete	Materials (kg/m^3)						Rock grade
		Cement	Fly ash	MgO	water	Sand	Rock	
1	C9015	116	39	7.4	90	510	1678	4
2	C9015	125	42	7.4	100	599	1558	3

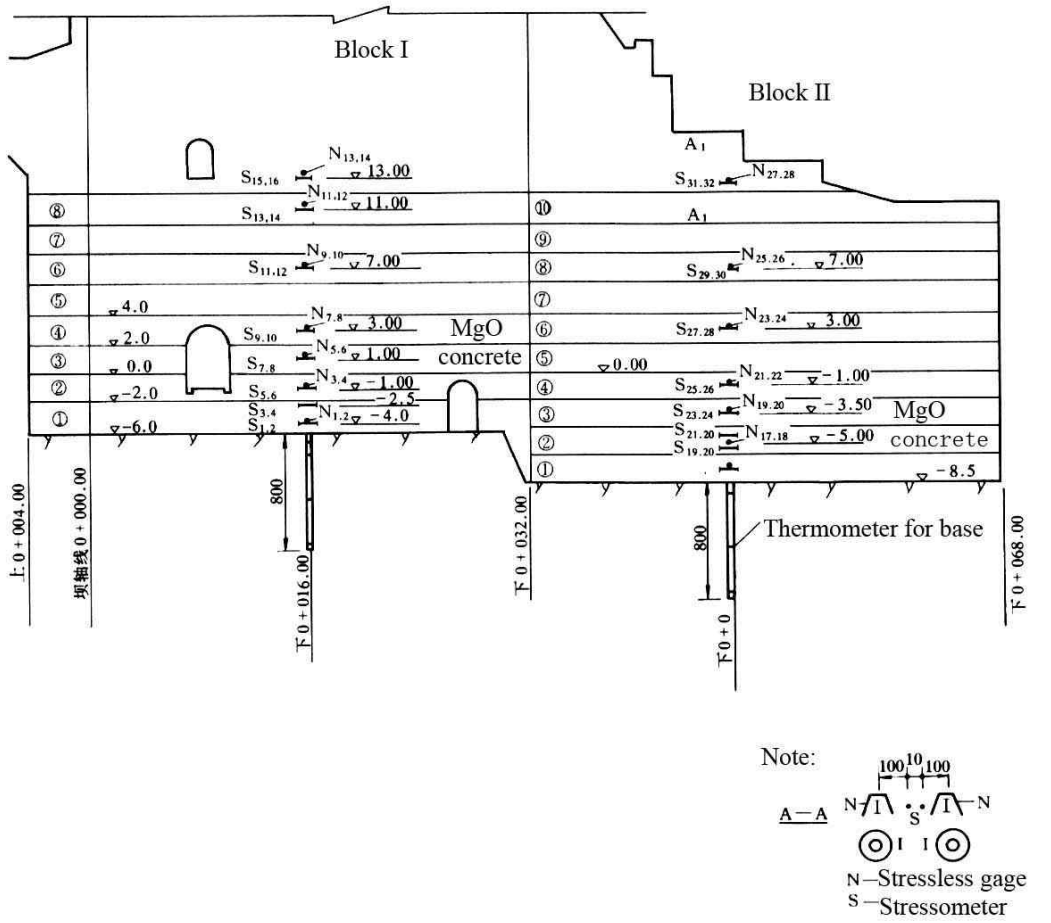


그림 3.1.15 MgO concrete in block I and block II as well as gages buried in concrete

콘크리트 배합비를 표 3.1.8에 나타내었다. MgO 혼입량은 7.4 kg/m^{3}이며 MgO 콘크리트는 기초부 구속영역에 타설하였다. 그림 3.1.15에 6 m ~ 4 m의 블록 I 과 8.5 m~0.0 m의 블록Ⅱ에 타설한 MgO 콘크리트를 도시하였다.

화학시험법을 이용하여 콘크리트 속의 MgO 균질성을 시험하였고 이들 결과를 표 3.1.9에 나타내었다. 7-1번, 7-2번, 8-1번, 8-2번 단면의 MgO 균질성 등급은 A와 B였다. 이들 결과는 MgO의 균질성을 확보한 것으로 판단되나 10, 13, 14, 15번 단면의 균질성은 불충분한 것으로 판단된다.

그림 3.1.16에 0%, 4%, 5%의 MgO를 혼입한 콘크리트 시험체의 자기변형량을 도시하였다. MgO를 혼입하지 않은 콘크리트는 매우 적은 변형량을 나타내었으나 콘크리트 팽창량은 MgO의 혼입량이 증가함에 따라 증가하였다. 양생온도 40℃인 경우, MgO 수화로 인한 팽창은 주로 90일 전에 일어난다.

단면 15번에서의 콘크리트 온도와 자기체적변형을 그림 3.1.17에 도시하였다. 콘크리트는 온도가 하강하는 동안에도 팽창하였다. 그림 3.1.18에 나타내었듯이 콘크리트의 팽창은 온도하강에 따른 수축을 보상하고 있는 것을 알 수 있다. MgO 혼입 콘크리트를 이용하여 건설된 댐에서는 심각한 온도균열이 발견되지 않았다.

표 3.1.9 Statistics of homogeneity of MgO in concrete

Section of dam	7-1	7-2	8-1	8-2	10	12	13	14	15
Sample Numbers	20	40	30	57	70	40	120	100	110
Average MgO (%)	4.25	4.38	5.30	4.40	4.12	4.46	4.02	4.05	3.79
Mean square deviation (%)	0.44	0.22	0.40	0.60	0.87	0.12	0.99	1.20	1.44
Coefficient of deviation (%)	9.79	4.91	7.62	13.55	21.19	3.68	24.48	29.86	38.00
Maximum deviation (%)	1.41	0.87	1.51	4.61	4.80	4.80	4.77	5.02	5.7
Evaluation	A	A	A	B	D	A	D	D	D

Note: A, B, C and D represent excellent, good, normal and bad, respectively.

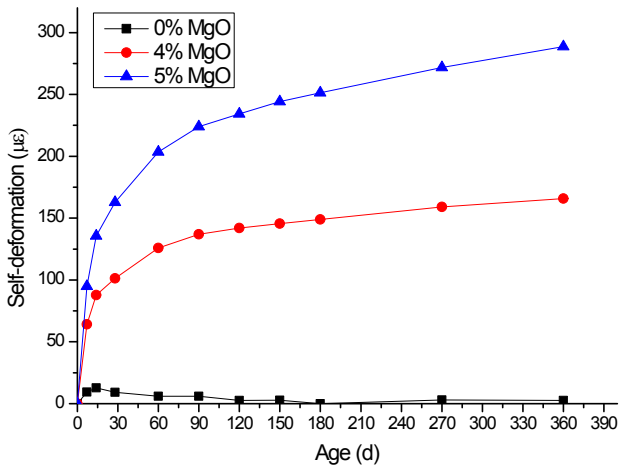


그림 3.1.16 Self deformation of concrete specimens with different dosages of MgO cured in 40℃

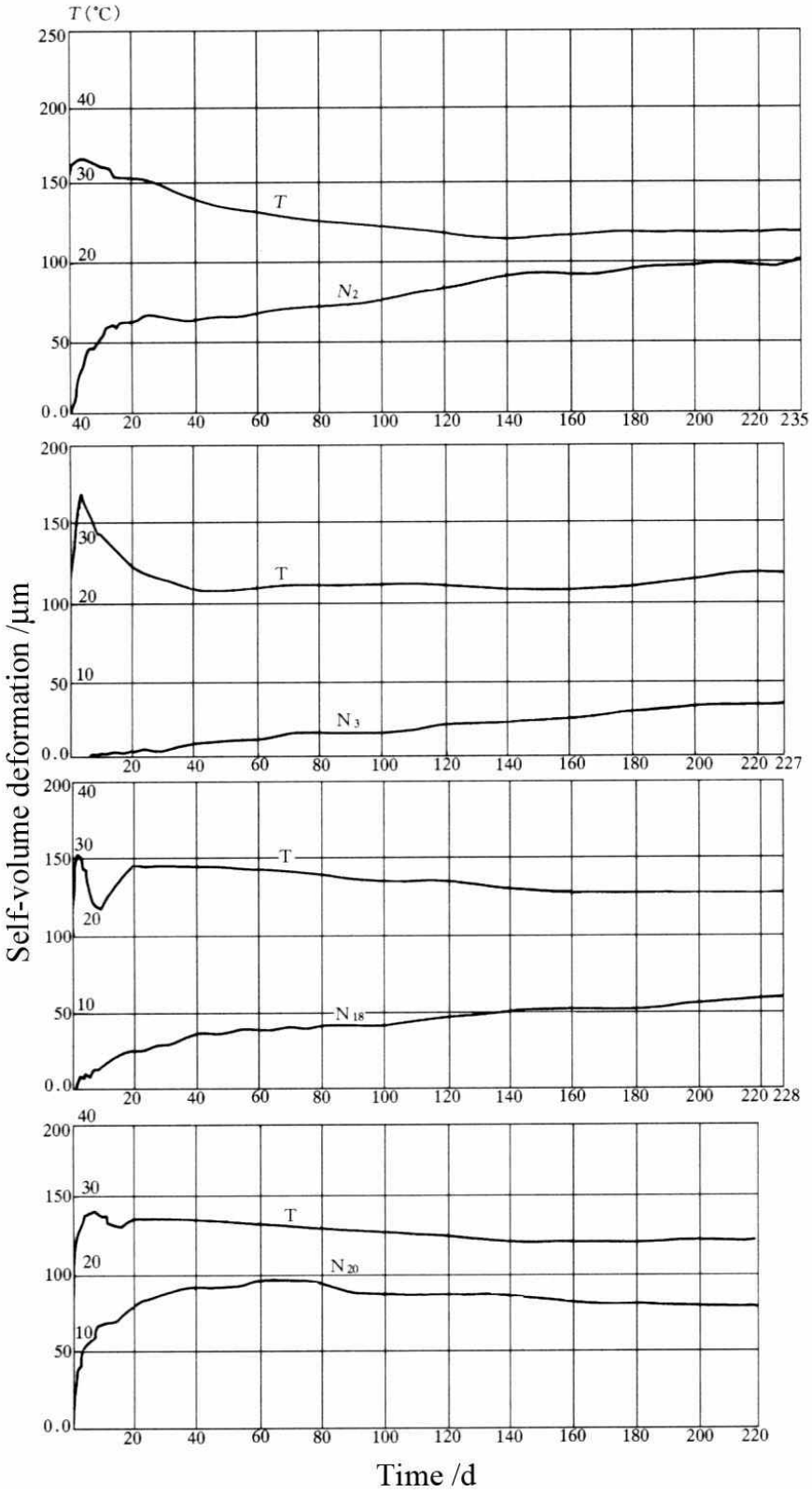


그림 3.1.17 Self volume deformation and temperature of concrete in section 15 of dam

(T: temperature, N: self volume deformation recorded by strain meters)

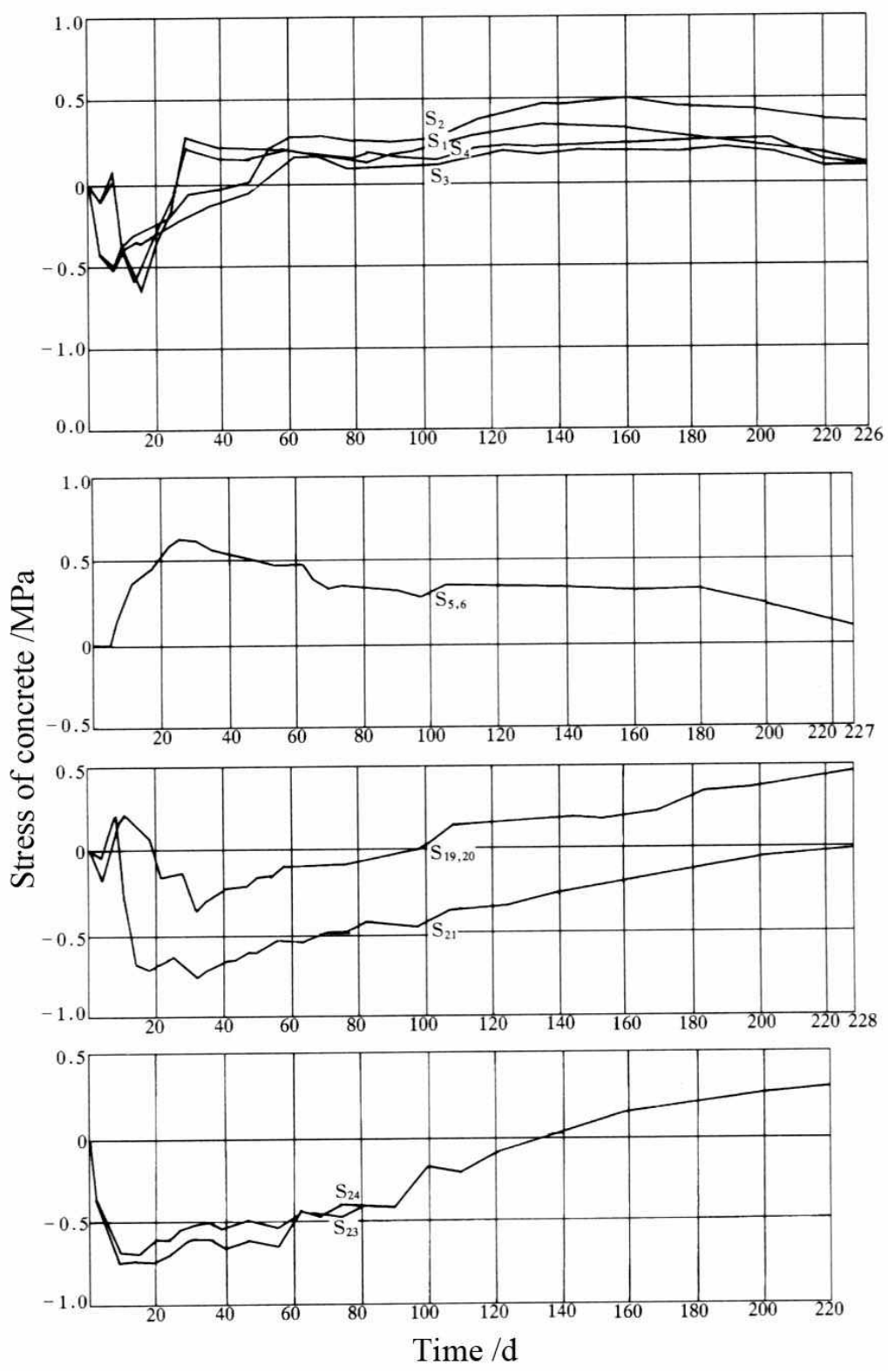


그림 3.1.18 Stress of concrete in section 15 of dam cast with MgO concrete (Negative stress: Pressed stress, Positive stress: Tensile stress)

(4) Feilaixia hydro junction

Feilaixia hydro junction (그림 3.1.19)은 Guangdong성 Qingyuan의 North 하천에 위치해 있다. 높이 52.3 m의 중력식 댐이며 1995년 11월부터 1997년 10월까지 건설되었다. 160,000 m^3의 MgO 콘크리트를 댐의 구속영역에 사용하였다. 전통적인 온도제어를 사용하지 않았다.



그림 3.1.19 Feilaixia dam

Guangdong성의 Yinde에서 생산된 P.O 42.5 시멘트와 Huangpu발전소에서 운반된 플라이애쉬를 사용하였다. Loaoning성 Haicheng East Huanmei Company에서 생산된 저온소성 MgO를 사용하였다. 화학성분과 물리성질을 표 3.1.10에 나타내었다. 표 3.1.11에 MgO 혼입 콘크리트의 배합표를 나타내었으며 MgO 혼입량은 3.6 ~ 7.1 kg/m^3이다.

표 3.1.10 Chemical compositions and physical properties of materials

No	Material	Chemical compositions (%)					Specific surface area (m^2/kg)	Reactivity index (s)
		SiO_2	CaO	MgO	SO_3	LOI		
1	Cement			2.48	2.37	1.09	344	
2	Fly ash				0.52	5.78		
3	MgO	3.33	1.09	90.41		2.16		232

표 3.1.11 Concrete batch of Feilaixia dam

No	Concrete	Materials (kg/m^3)			Rock grade	Sand ratio (%)	MgO (%)
		Cement	Fly ash	water			
1	C9020	142.3	61	122	4	24.5	1.75 3.5

댐 단면 15번에서의 자기체적변형과 온도와의 관계를 그림 3.1.20에 도시하였다. 온도하강에 따른 수축을 보상할 수 있을 정도로 충분한 팽창을 나타내었다.

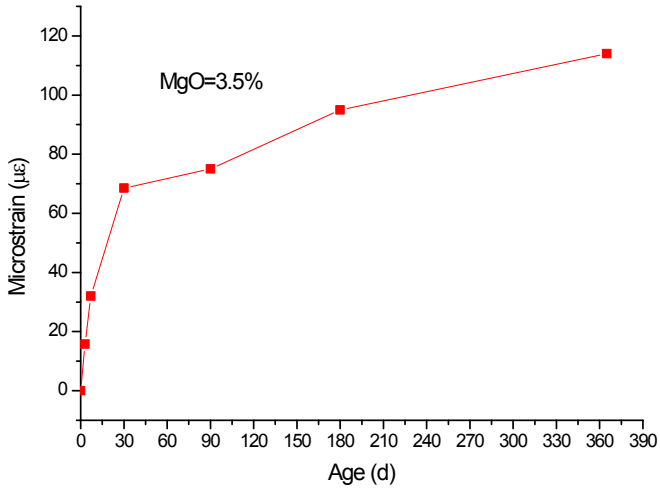


그림 3.1.20 Self deformation of concrete with 3.5% MgO

(5) Dam of Changsha reservoir

Changsha하천의 Changsha 저수지 댐은 Guangdong성 Yangchun에 위치해 있다. 길이 142.6 m, 높이 55.5 m, 폭 3.87 m(상부) ~ 9.66 m(하부)인 이중곡률 아치댐이다. 콘크리트 사용량은 30,000 ㎥이며 연평균기온은 22℃이다. MgO 콘크리트는 1999년 1월부터 1999년 4월까지 전체 댐에 타설하였다. 콘크리트의 온도제어를 위한 횡방향 이음부와 전통적인 측정법을 사용하지 않았다.



그림 3.1.21 Dam of Changsha reservoir

Guangdong성의 Yunfu에서 생산된 P.O 42.5 시멘트와 Huangpu발전소에서 운반된 Ⅱ등급 플라이애쉬를 사용하였다. Loaoning성 Haicheng East Huanmei Company에서 생산된 MgO를 사용하였다. 화학성분과 물리성질을 표 3.1.12에 나타내었다. 표 3.1.13에 MgO 혼입 콘크리트의 배합표를 나타내었으며 MgO 혼입량은 3.5% ~ 4.5%이다.

표 3.1.12 Chemical compositions and physical properties of materials

No	Material	Chemical compositions (%)							Residue on 0.080 ㎜ sieve (%)	Reactivity index (s)
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	LOI		
1	Cement	20.16	5.29	3.42	61.06	3.69	2.58	1.93	1.3	
2	Fly ash	50.44	23.49	9.08	6.08	1.44	0.87	5.06	11.0	
3	MgO	2.43	0.36	0.53	0.60	88.57		7.06	0.2	183
					1.61	92.24		1.62		236

표 3.1.13 Concrete batch of dam of Changsha reservoir

No	Concrete	Materials (kg/㎥)			MgO (%)	Rock grade	Sand ratio (%)
		Cement	Fly ash	Water			
1	C9020	145	60	100	3.5 4.5	3	27

화학시험법을 이용하여 콘크리트 속의 MgO 균질성을 시험하였고 이들 결과를 표 3.1.14에 나타내었다. MgO 균질성 등급은 A와 B였다. 이들 결과는 MgO의 균질성을 확보한 것으로 판단된다.

표 3.1.14 Statistics of homogeneity of MgO in concrete

Altitude of dam (m)	190.0~200.0	200.0~207.5	207.5~215.0	215.0~230.0	230.0~245.0
Sample Numbers	90	45	45	88	90
Dosage of MgO (%)	3.5	3.5	4.5	4.2	4.5
Average MgO (%)	3.57	3.70	4.40	4.39	4.34
Mean square deviation (%)	0.41	0.39	0.45	0.55	0.22
Coefficient of deviation (%)	11.5	10.5	10.2	12.5	4.0
Maximum deviation (%)	2.08	1.45	1.81	2.51	0.80
Evaluation	B	B	B	B	A

Note: A and B represent excellent and good, respectively.

그림 3.1.22는 댐 콘크리트의 자기체적변형을 나타낸다. MgO 수화로 인한 변형으로 인해 온도하강에 따른 수축을 효과적으로 보상하였으며 심각한 균열은 관찰되지 않았다.

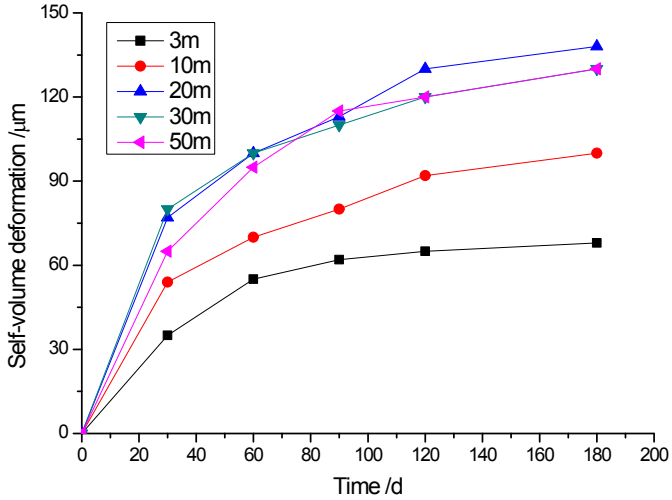


그림 3.1.22 Self volume deformation of dam concrete at 3 m, 10 m, 20 m, 30 m and 50 m away from rock base

(6) Bamei hydraulic power station

Datan 하천의 Bamei댐은 guangdong성 Ruyuan에 위치해 있으며 길이 125 m, 높이 53 m, 폭 3.5 m(상부) ~ 10.0 m(하부)의 이중 곡률 아치 댐이다. 댐 콘크리트는 31,000 m^3가 타설되었으며 MgO 콘크리트는 2003년 2월부터 2003년 8월까지 전체 댐에 타설하였으며 3.0℃~35.4℃의 온도범위를 나타내었다. 횡방향 이음부는 설치하지 않았으며 온도제어를 위한 전통적인 측정법을 사용하지 않았다.

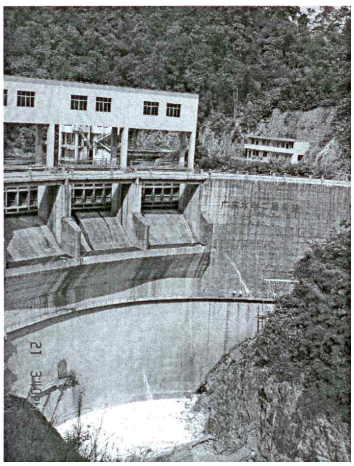


그림 3.1.23 Dam of Bamei

Liaoning 주 Haicheng의 MgO를 사용하였으며 MgO의 화학성분과 물리적 특성은 표 3.1.15에 나타내었다. 표 3.1.16에 MgO 혼입 콘크리트의 배합표를 나타내었으며 MgO 혼입량은 5.0%이다. 그림 3.1.24은 댐 콘크리트의 자기체적변형을 나타낸다. MgO 수화로 인한 변형은 온도하강에 따른 수축을 효과적으로 보상하였으며 심각한 균열은 관찰되지 않았다.

표 3.1.15 Chemical compositions and physical properties of MgO

No	Material	Chemical compositions (%)						Reactivity index (s)
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	LOI	
1	MgO	0.10	0.36	0.24	1.99	93.38	2.00	262

표 3.1.16 Concrete batch of Bamei dam

No	Concrete	Materials (kg/m^3)			MgO (%)	Rock grade	Sand ratio (%)
		Cement	Fly ash	Water			
1	C9020	183	46	126	5	3	27

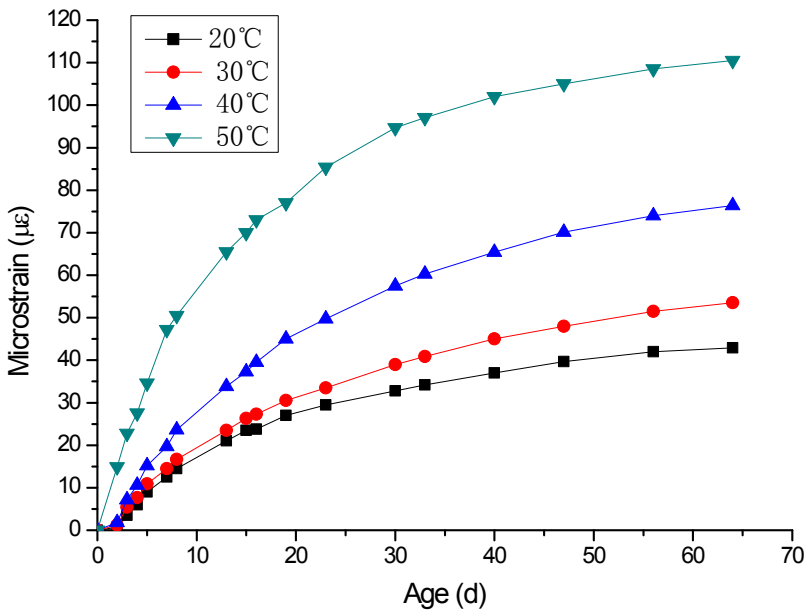


그림 3.1.24 Self volume deformation of concrete contained with 5% MgO and cured at different temperatures

(7) Changtan hydraulic power station

Changtan 댐은 길이 121.5 m, 높이 53.5 m 폭 4.0 m(상부)~12.0 m(하부)인 이중곡률 아치댐이다. 댐 콘크리트는 29,000 ㎥이 사용되었으며 MgO 콘크리트는 2004년 4월부터 10월까지 전체 댐에 타설되었다. 댐에는 2개의 이음부가 있으며 댐콘크리트의 온도제어를 위해 사용하는 전통적인 측정법을 사용하지 않았다. 현장 콘크리트 온도는 약 30.0℃, 댐콘크리트에서 측정된 최대 온도는 52.7℃였다.

Liaoning성 Haicheng의 MgO를 사용하였으며 시멘트량의 5.5% ~ 5.75%의 MgO를 혼입하였다.

(8) Dam of Shalaohe reservoir

Shalaohe 저수지 댐은 Guizhou성 Guiyang에 위치해 있다. 길이 184.81 m, 높이 61.2 m, 폭 4.0 m(상부) ~ 12.8 m(하부)인 이중곡률 아치댐이다. 50,000 ㎥의 댐콘크리트가 사용되었다. 2001년 3월부터 10월까지 MgO콘크리트를 전체 댐에 타설하였다. 횡방향이음부는 설치하지 않았으며 댐 콘크리트의 온도제어를 위한 전통적인 측정법을 사용하지 않았다. 2002년 댐 어버트먼트에서 5개의 균열이 발견되었다.

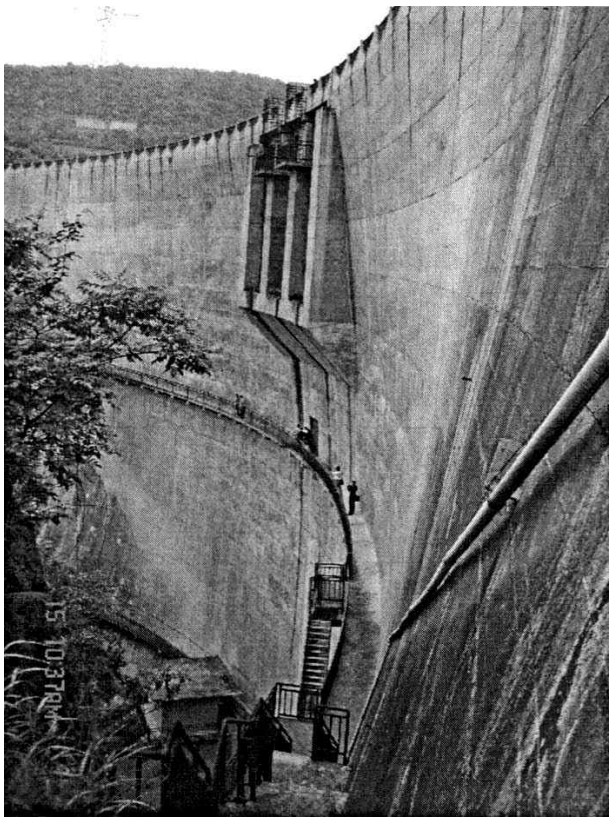


그림 3.1.25 Dam of Shalaohe reservoir

Guizhou Cement Plant의 중용열 포틀랜드 시멘트(middle heat Portland cement)가 사용되었으며 Guiyang 발전소의 Ⅱ등급 플라이애쉬를 사용하였다. Liaoning성 Haicheng의 MgO를 사용하였으며 시멘트의 3.5%~5.5%를 혼입하였다. MgO 수화로 인한 변형이 온도하강에 따른 수축을 효과적으로 보상하는 것을 알 수 있다.

그림 3.1.26는 댐 콘크리트 내에 매립한 변형률계의 위치를 나타낸 것이다. 그림 3.1.27는 해발 1177.0 m와 1189.0 m에서의 댐 콘크리트의 온도와 변형률을 나타낸 것이다. MgO의 수화로 인한 콘크리트의 팽창이 상당한 온도의 하강이 발생하는 시점에서 주로 발달하고 있는 것을 알 수 있다. 3.5%와 4.0%의 MgO 혼입 콘크리트는 재령 6년에서의 변형률은 약 120 με과 140 με이 측정되었다.

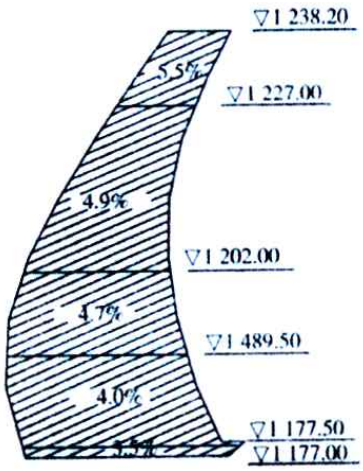


그림 3.1.26 Dosage of MgO in concrete

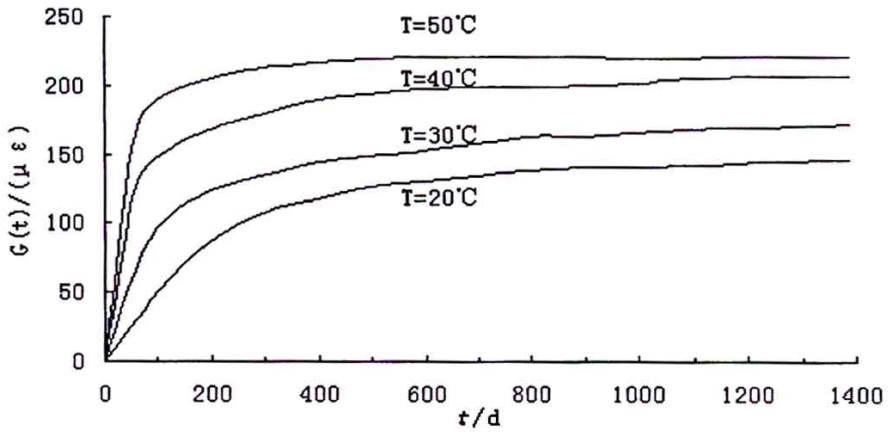


그림 3.1.27 Self deformation of concrete specimens contained 4% MgO and cured at from 20℃ to 50℃

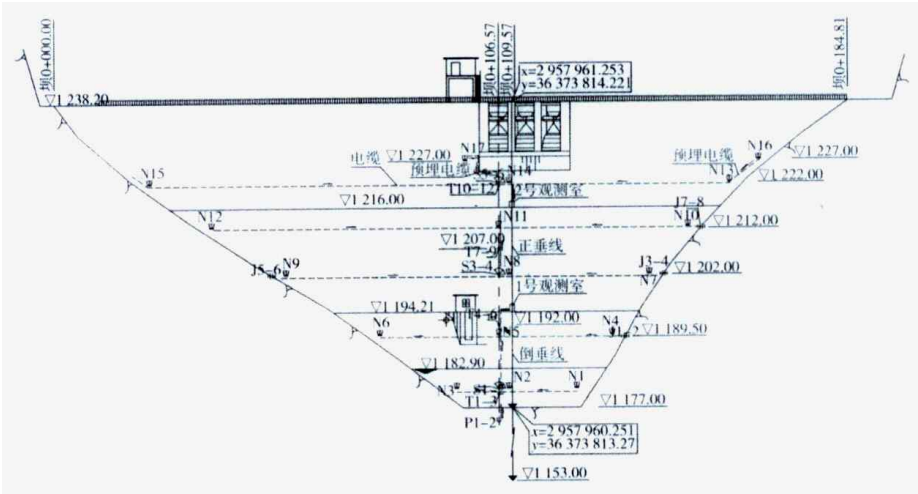
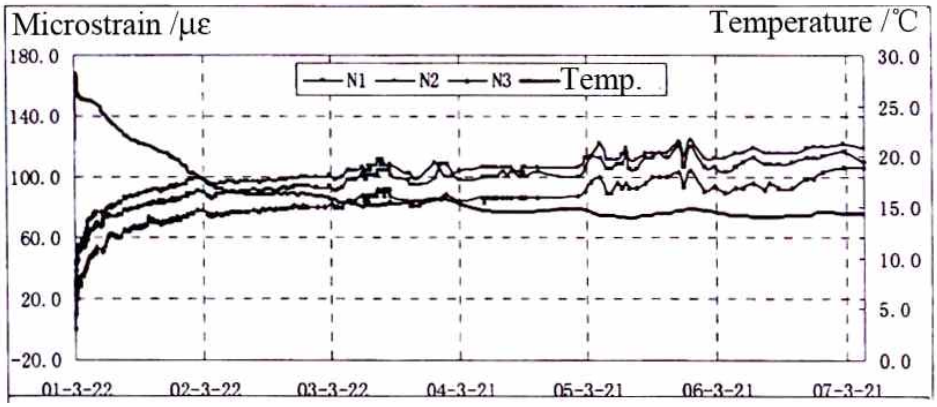
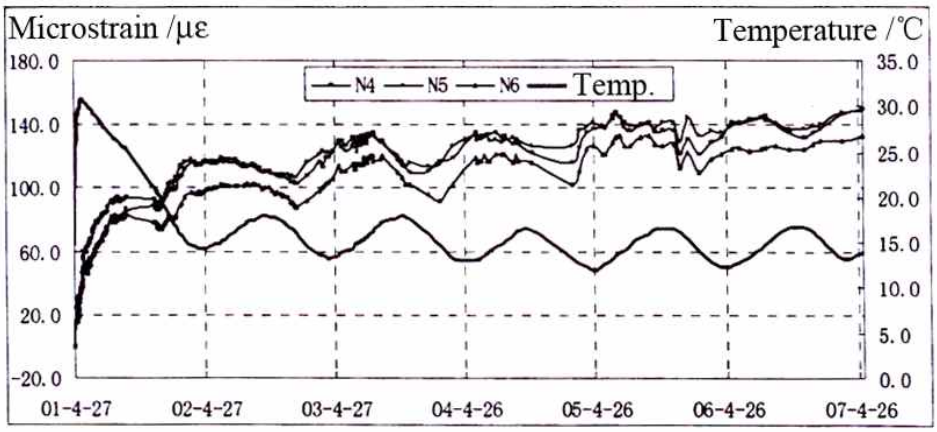


그림 3.1.28 Strain meters buried in dam concrete



Altitude 1177.0 m (MgO=3.5%)



Altitude 1189.5 m (MgO=4.0%)

그림 3.1.29 Self volume deformation of dam concrete at altitude 1177.0 m and 1189.5 m

(9) Dam of Sanjiang reservoir

Guizhou성 Guiyang의 Sanjiang 하천에 위치한 Sanjiang 저수지 댐은 길이 137.4 m, 높이 71.5 m, 폭 4.0 m(상부) ~ 10.4 m(하부)의 아치댐이다. 연평균기온은 15.3℃, 1월과 7월의 평균온도는 5.1℃, 24℃이다. 37,000 ㎥의 댐 콘크리트가 사용되었으며 2002년 12월부터 2003년 5월까지 MgO 콘크리트가 전체 댐에 타설되었다.

댐 콘크리트의 온도제어를 위한 전통적인 측정법은 사용되지 않았으며 두 개의 횡방향 이음부가 설치되었고 균열은 발견되지 않았다.

Liaoing성 Haicheng의 MgO를 사용하였으며 하부콘크리트와 상부콘크리트에 시멘트의 4.5%, 5.0%의 MgO를 혼입하였다. 그림 3.1.32는 해발 1100.0 m와 1115.0 m에서의 댐 콘크리트의 온도와 변형률을 나타낸 것이다. MgO 수화로 인한 팽창이 온도하강 시점에서 주로 발달하고 있는 것을 알 수 있다. 3.5%와 4.0%의 MgO 혼입 콘크리트는 재령 4~5년에서의 변형률은 약 1050 με이 측정되었다.

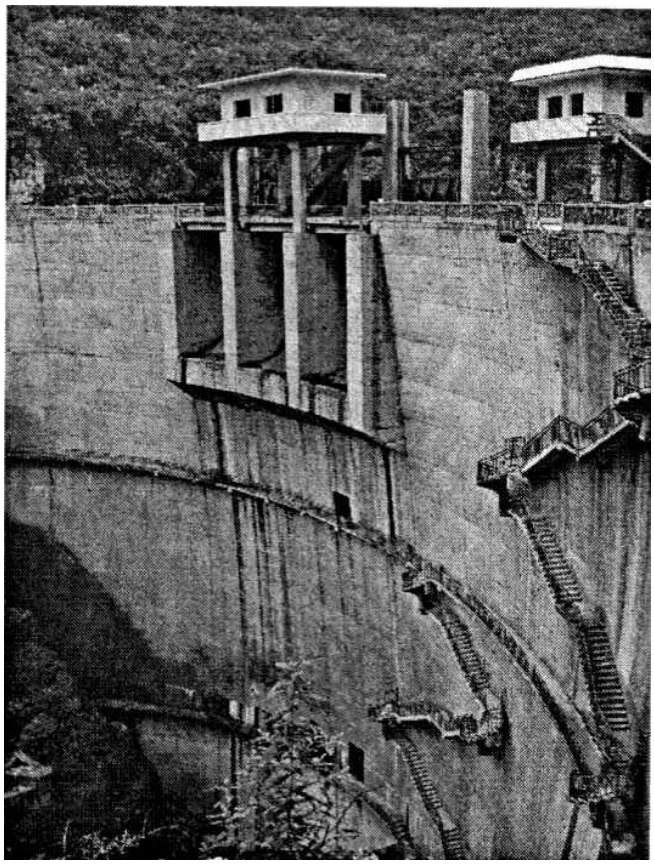


그림 3.1.30 Dam of Sanjiang reservoir

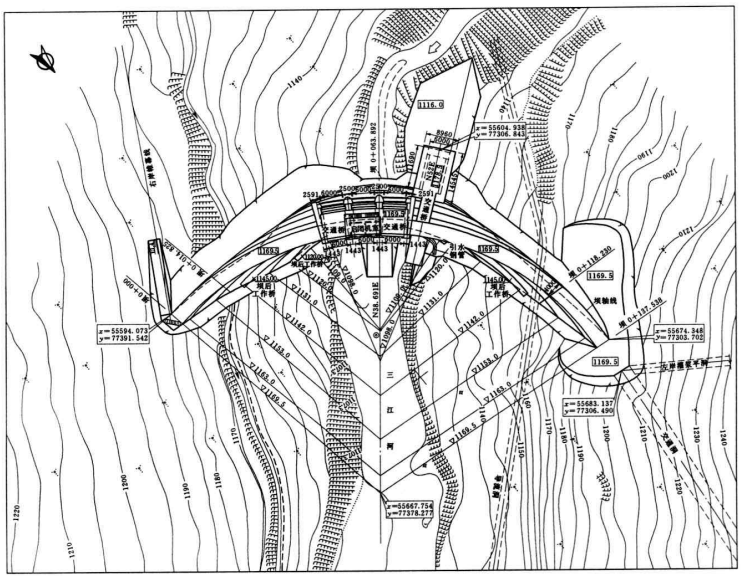
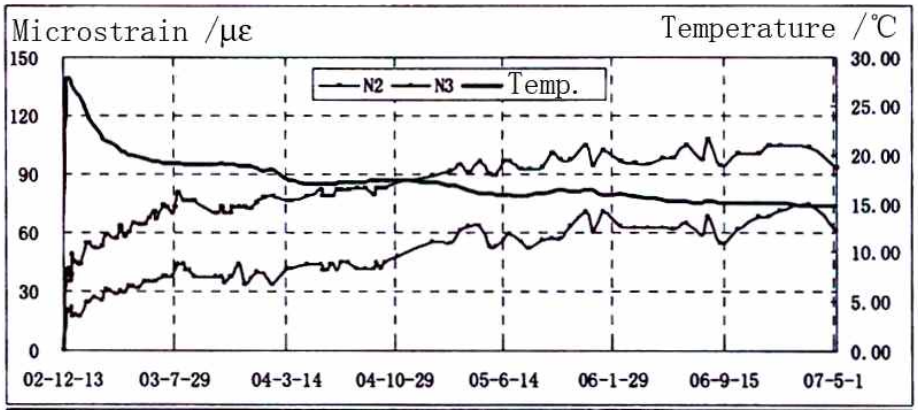
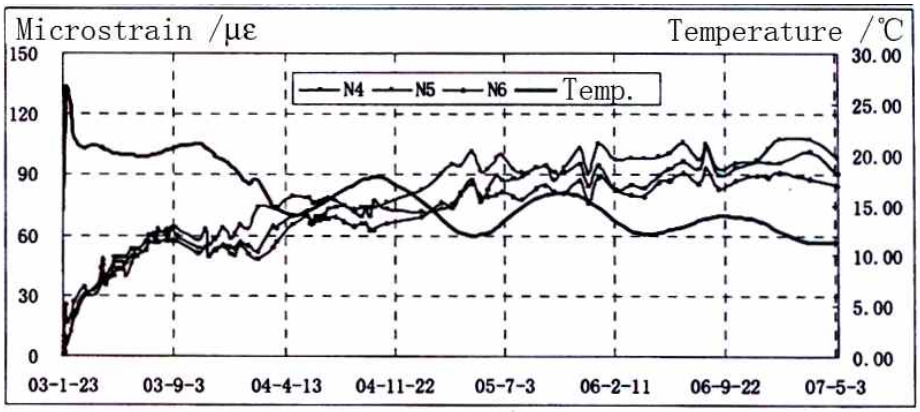


그림 3.1.31 Plan of Sanjiang dam



(a) Altitude 1100.0 m



(b) Altitude 1115.0 m

그림 3.1.32 Self volume deformation of dam concrete at altitude 1100.0 m and 1115.0 m

(10) Luojiaohe hydraulic station

Guizhou성 Dafang의 Baipu 하천에 위치한 Luojiaohe 수력발전소 댐(그림 3.1.33)은 길이 195.6 m, 높이 81.0 m, 폭 4.0 m(상부) ~ 15.8 m(하부)의 아치댐이다. 연평균기온은 14.1℃, 1월과 7월의 평균온도는 4.0℃, 23.1℃이다. 96,000 ㎥의 댐 콘크리트가 사용되었으며 2005년 12월부터 2006년 9월까지 MgO 콘크리트를 전체 댐에 타설하였다.

댐 콘크리트의 온도제어를 위한 전통적인 측정법은 사용되지 않았으며 네 개의 횡방향 이음부가 설치되었고 균열은 발견되지 않았다. Liaoing성 Haicheng의 MgO를 사용하였으며 시멘트량의 5.0%, 5.5% MgO를 혼입하였다.

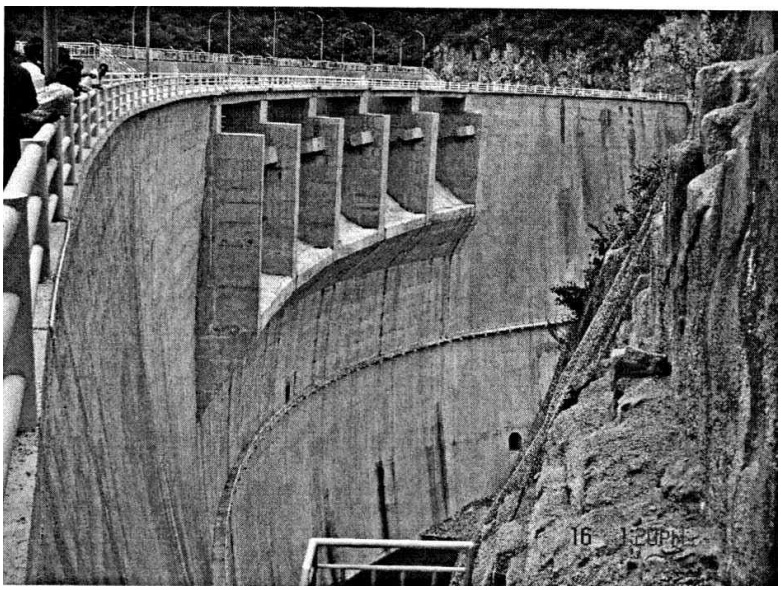


그림 3.1.33 Luojiaohe Dam

(11) Machaohe hydraulic station

Guizhou성 Sangtao의 Daliang 하천에 위치한 Machaohe 수력발전소 댐은 길이 142.0 m, 높이 67.5 m, 폭 4.0 m(상부) ~ 9.5 m(하부)의 아치댐이다. 연평균기온은 14.1℃이다. 50,000 ㎥의 댐 콘크리트가 사용되었으며 2007년 1월부터 11월까지 MgO콘크리트를 전체 댐에 타설하였다.

댐 콘크리트의 온도제어를 위한 전통적인 측정법은 사용되지 않았다. Qiandong Cement Plant의 P.O 32.5 시멘트를 사용하였으며 Dalong 발전소의 Ⅱ등급 플라이애쉬를 사용하였다. Liaoing성 Haicheng의 MgO 팽창재를 사용하였으며 팽창재의 순도와 활성도는 각각 90.23%, 232s 이였다. 표 3.1.17에 댐 콘크리트의 배합표와 자기변형을 나타내었다. 콘크리트는 75~82 με의 팽창변형률을 나타내었다.

표3.1.17 Batch and self deformation of concrete

No	Material (kg/m^3)										Self deformation of concrete at 90d
	Cement	Fly ash	Water	MgO	Water reducer	Sand	Rock				
							5~20	20~40	40~80	80~150	
1	144	62	109	12.4	1.65	611	315	315	472	472	75
2	132	88	110	13.2	1.76	608	312	312	469	469	82

(12) Laojiangdi hydraulic station

Guizhou성 Xinyi의 Huangni 하천에 위치한 Laojiangdi 수력발전소 댐(그림 3.1.34)은 길이 121.25 m, 높이 67.0 m, 폭 5.0 m(상부) ~ 16.0 m(하부)의 아치댐이다. 연평균기온은 16.1℃이다. 62,000m^{3}의 댐 콘크리트가 사용되었으며 2007년 12월부터 2008년 10월까지 MgO 콘크리트를 전체 댐에 타설하였다.

댐 콘크리트의 온도제어를 위한 전통적인 측정법은 사용되지 않았다. Nanxia Cement Plant의 P.O 42.5 시멘트를 사용하였으며 MgO 혼입량은 1.3%이며 Anshun 발전소의 Ⅱ등급 플라이애쉬를 사용하였다. Liaoing성 Haicheng의 MgO 팽창재를 사용하였다. 표 3.1.18에 댐 콘크리트의 배합표와 자기변형을 나타내었다. 콘크리트는 69 ~ 93 με의 팽창변형률을 나타내었다.



그림 3.1.34 Laojiangdi Dam

표 3.1.18 Batch and self deformation of concrete

No	Material (kg/m^3)									Self deformation of concrete at 90d
	Cement	Fly ash	Water	MgO	Water reducer	Sand	Rock			
							5~20 ㎜	20~40 ㎜	40~80 ㎜	
1	147	63	118	10.5	1.68	743	414	414	552	69
2	142	94	121	11.8	1.89	712	414	414	552	93

(13) Longtan downstream cofferdam with roller compacted concrete

가물막이 댐(coffer dam)은 Roller Compacted Concrete로 건설되었다. 길이 273.0 m, 높이 51.0 m, 폭 40.9 m(상부) ~ 7.0 m(하부)이다.

시멘트 : 플라이애쉬 : 물 = 55 : 105 : 87이며 60%의 MgO 팽창재가 사용되었다. 혼입량은 단위체적당 14 kg을 사용하였으며 30,000 ㎥의 MgO 콘크리트가 암반기초로부터 4.5 ~ 26.4 m 떨어진 두께 21.9 m의 가물막이 댐에 타설되었다. 2004년 3월 12일부터 4월 19일까지 타설하였다. 횡방향 이음부는 설치하지 않았으며 댐 콘크리트의 온도제어를 위한 전통적인 측정법은 사용하지 않았다.

그림 3.1.35에 팽창재에 의해 발생된 팽창량을 나타내었다. 온도하강으로 인한 콘크리트의 온도수축을 보상하는데 사용될 것으로 판단된다.

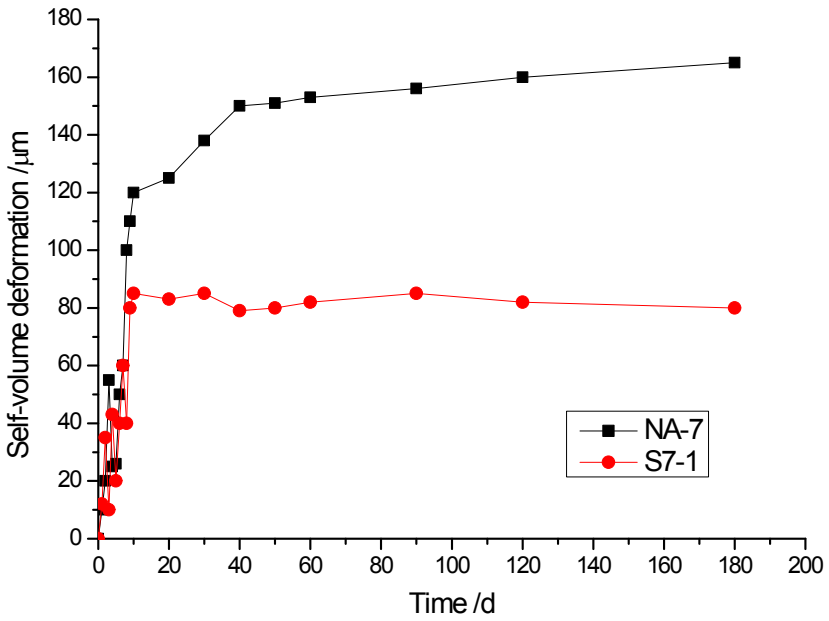


그림 3.1.35 Self volume deformation of MgO concrete in cofferdam

라. 소론

중국에서는 1987년 이후 저온소성 MgO 팽창재를 혼입한 콘크리트를 이용하여 10개 이상의 수력발전소들을 건설하였다. MgO 콘크리트는 구속영역, 혹은 전체 댐에 사용되었으며 대부분의 댐들에는 횡방향 이음부를 설치하지 않았으며 몇 개의 댐만이 1~3개 정도의 횡방향 이음부를 설치하였다.

댐 콘크리트의 온도 제어를 위해 사용되는 전통적인 측정법을 사용하지 않고 MgO 혼입량은 3.6~13.2 kg/m^3 범위에서 사용하였다. 그럼에도 심각한 균열은 발견되지 않았다.

이를 통해, 저온소성 MgO가 수공 콘크리트에서 나타나는 온도하강에 따른 수축을 보상하기 위해 성공적으로 사용되었다는 것을 알 수 있다.

제 2 절 팽창재(MgO)의 개요

1. MgO의 일반사항/제조방법 및 분류

일반적으로 MgO는 $MgCO_3$를 CO_2가 분리될 때까지 연소하여 얻어진다. $MgCO_3$의 이론적인 분해온도는 600~650℃이다. 하지만 공장에서 생산하는 경우에는 생산효율을 올리기 위하여 일반적으로 분해온도를 800~850℃로 높인다.

공학적 의도로 MgO는 약 850~1,200℃로 저온 소성한 MgO와 1,500~1,800℃로 고온 소성(heavily burnt)한 MgO의 두 가지 등급으로 분류되며, 시멘트에 자연적으로 포함되어 있는 MgO는 일반적으로 약 1,450℃에서 고온 소성된 등급에 속한다. 하지만 본 연구에 사용된 MgO 분말은 1,100℃ 근처에서 저온소성된 것으로 유해한 영향이 없는 팽창성을 나타낸다.[25)]

Metha(1980)가 발표한 연구 결과에 의하면 900~950℃ 근처에서 소성하고 입자가 300~1180 ㎛인 MgO 분말은 매스콘크리트의 온도응력에 의한 균열 방지 및 온도 수축의 보상효과를 기대할 수 있다. 하지만 이러한 종류의 MgO는 공업용으로 생산되지 않으며 매스콘크리트에 적용되지 않는다고 한다.

2. MgO의 물리/화학적 특성

수화반응이 일어날 경우, MgO로부터 형성되는 $Mg(OH)_2$ 결정의 부피는 MgO와 H_2O 부피의 합보다 현저하게 크다. 예를 들면, 1,000℃에서 연소된 MgO가 수화할 경우, $Mg(OH)_2$의 부피는 MgO와 물 부피의 합보다 두 배 이상이 된다. 연소온도가 MgO의 결정 크기와 비표면적에 직접적인 영향을 미치기 때문에 MgO의 연소온도가 MgO 팽창성능에 영향을 주는 핵심요소라고 보고된 바 있다.[25)]

또한 표 3.2.1에서 알 수 있듯이 연소온도가 높을수록 MgO의 수화반응 비율은 감소한다.[26)] 따라서, 사연소(dead-burnt) 결정의 MgO(물과 느린 반응 시간을 갖는 MgO) 즉, 페리클레이스(periclase)는 시멘트에 유해한 성분이라고 알려져 있다. 고온에서 소성한 MgO는 초기에 늦은 수화반응을 일으키지만 늦은 재령에서 과도한 팽창을 일으킨다.[27)] 따라서 MgO의 과도한 함유는 매우 늦은 재령에서 지나친 팽창을 유발한다. 이는 콘크리트의 불건전성을 유발할 수 있고 따라서 결국 콘크리트의 붕괴 원인이 되는 유해한 팽창을 일으킨다. 이러한 이유로, 대부분의 국제규격은 시멘트의 MgO 함유량을 최대 4~6%로 제한하고 있다. 하지만, 단지 페리클레

이스(periclase)가 어떤 특정한 온도범위에서 유해하게 반응하고, 저온 소성한 (lightly- burnt) MgO분말은 무해하다고 이미 보고된 바 있다.[28)]

표 3.2.1 MgO 분말의 수화반응 비율

수화기간 (일)	연소 온도		
	800℃	1200℃	1400℃
1	75.4%	6.5%	4.7%
3	100%	23.4%	9.3%
30	-	94.8%	32.8%
360	-	97.6%	-

3. MgO 팽창재(MgO expansive agents)의 특성

소성된 산화마그네슘를 첨가한 시멘트는 지연팽창되는 특성을 가진다.[24~26)] 시멘트페이스트가 50℃에서 수화반응 할 때, 팽창속도는 수화반응이 발생한지 약 3~15일 정도에서 최대값을 나타낸다. 매스콘크리트의 온도는 이 기간 동안 현저히 감소하게 되며 이러한 팽창은 온도하강으로 인해 나타나는 체적수축량을 보상할 수 있고 온도제어를 위한 계측방법을 단순화할 수 있다. 팽창재를 첨가한 시멘트의 팽창특성은 소성된 산화마그네슘의 팽창특성에 주로 의존한다. 실험결과들은 팽창재의 소성조건을 변화시켜 팽창재의 팽창속도, 팽창량 그리고 완료기간들을 조절할 수 있다는 것을 알게 해 준다.

그림 3.2.1에 다른 소성조건으로 인해 알 수 있는 MgO의 SEM 미세구조사진을 도시하였다[27)]. S900-1.0, S1100-1.0, S1100-1.5 그리고 S1300-1.0들은 MgO를 각각 900℃에서 1시간, 1,100℃에서 1시간, 1,100℃에서 1.5시간, 1300℃에서 1시간 동안 소성한 시료들을 나타낸다. 그림을 통해 많은 MgO 입자로 구성된 하나의 MgO 덩어리, 소성시간과 소성온도가 증가하면서 MgO 입자의 크기 역시 증가하는 것을 볼 수 있다. MgO 입자의 성장은 고온에서 MgO 침전물에 기인하는 것으로 생각된다. 소성과정 동안, MgO의 미세결정 속에서 마그네사이트가 처음으로 분해되고 이 미세결정은 고온에서 침전하게 되고 MgO 입자는 성장하게 된다. MgO 입자의 성장과 함께 MgO의 원자배열은 더욱 규칙적으로 되며 MgO 결정 속에 있는 결함은 감소하게 된다.

그림 3.2.2는 MgO의 내부 비표면적에 대한 소성온도와 소성시간의 효과를 나타낸 것이다. MgO의 비표면적은 소성시간과 소성온도가 증가할수록 확실히 내려가

는 것을 알 수 있다. 이것은 MgO 입자의 성장과 상당히 관련이 있는 것으로 생각된다. 마그네사이트의 분해과정동안, 공극구조는 먼저 CO_2의 탈출경로로서 형성되고 나서 MgO의 계속적인 첨전으로 인해 MgO의 입자가 성장하게 되고 이로 인해 전체 공극체적은 감소하나 공극크기는 확대되고 비표면적은 감소하게 된다.

표 3.2.2에 나타낸 것과 같이 S1000-0.5와 S1000-1.0의 전체 공극체적은 동일하다. 그러나 후자의 경우(S1000-1.0), 공극크기가 더 크며 따라서 비표면적은 보다 더 작다. 비록 S900-1.0의 소성시간이 S900-0.5에 비해 더 길지만 전자가 더 큰 비표면적을 나타낸다. 표 3.2.2에 나타낸 것과 같이 소성온도와 소성시간이 증가하면 MgO의 밀도는 증가한다.

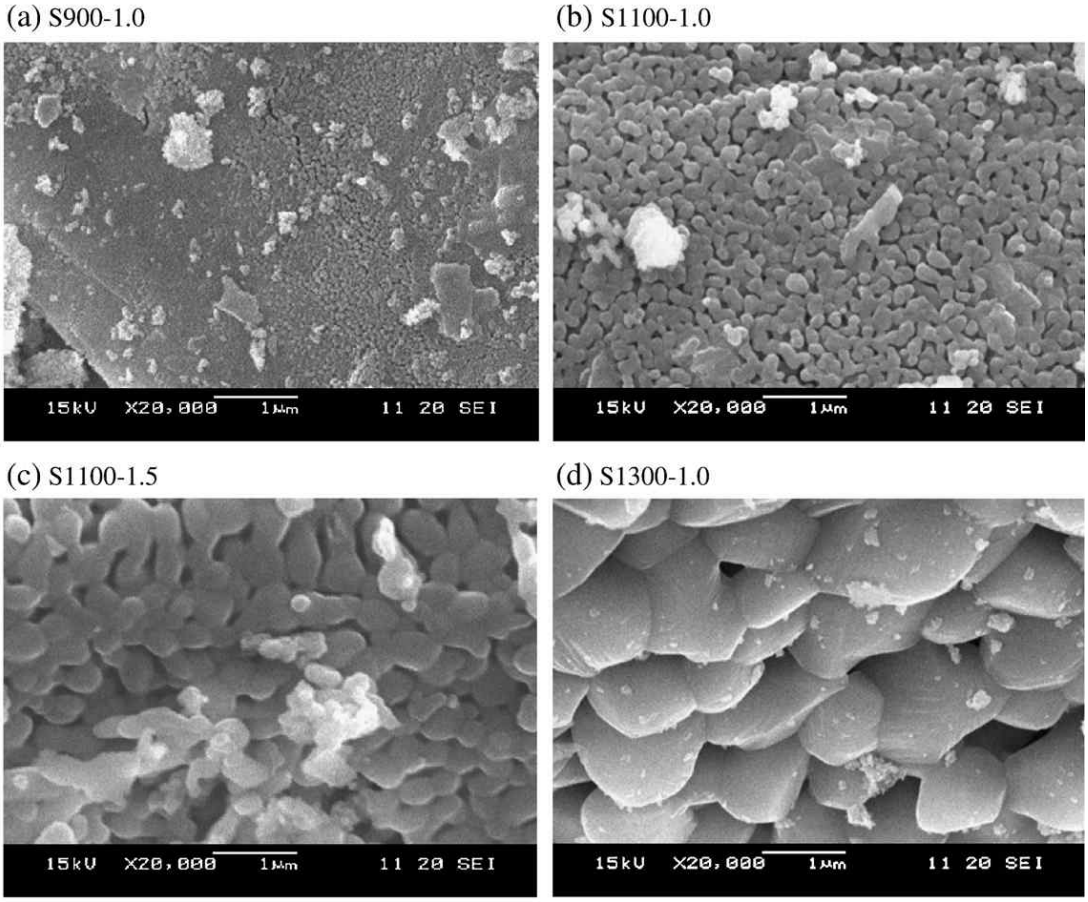


그림 3.2.1 Effects of calcination temperature and residence time on the morphology of MgO[27]

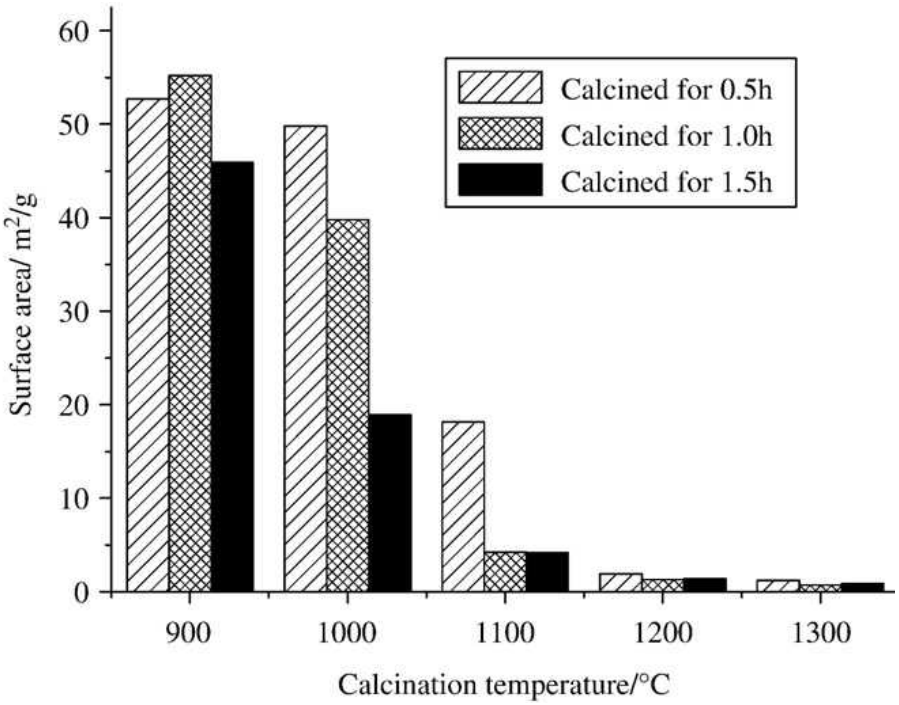


그림 3.2.2 Effect of calcination temperature and residence time on the specific surface area of MgO[27]

표 3.2.2 Properties of MgO calcined under different calcination conditions[27]

Sample	Calcination temperature (℃)	Residue time (h)	Crystal grain size (nm)	Lattice distortion (%)	Specific surface area (m2/g)	Pore volume (cm3/g)	Average pore width (nm)	Density (g/cm3)
S900-0.5	900	0.5	21	0.16	53	0.19	15	2.97
S900-1.0	900	1.0	29	0.06	55	0.22	16	3.02
S900-1.5	900	1.5	37	0.04	46	0.18	16	3.12
S1000-0.5	1000	0.5	30	0.02	50	0.24	19	3.13
S1000-1.0	1000	1.0	43	0.02	40	0.24	24	3.26
S1000-1.5	1000	1.5	66	0.01	19	0.10	25	3.32
S1100-1.0	1100	1.0	>100	-	4	0.02	23	3.43

다른 소성조건에서 소성된 MgO의 중성화 시간을 그림 3.2.3에 도시하였다. 중성화 시간은 MgO 1.70±0.1 g을 이용하여 30±1℃에서 0.07 ㏖/L의 산성용액 200 ㎖ 속에서 완전히 중성화 되는데 걸리는 시간으로 결정한다. 중성화시간은 MgO의 활성도를 평가를 위한 지표로 사용된다. 같은 소성시간에 있어 중성화시간은 온도가 증가할수록 증가하는데 이는 MgO의 수화활성도가 온도가 증가할수록 감소함을 나

타낸다. 또한, 소성시간이 길어질수록 MgO의 중성화시간 역시 길어진다. 고온일 경우에는 소성시간은 중성화시간에 많은 영향을 미친다. 예를 들어, 소성시간이 0.5시간에서 1.5시간으로 증가할 경우, 900℃의 소성시간에서 MgO의 중성화시간은 24초가 증가한다. 반면, 1000℃와 1100℃에서는 각각 81초와 400초가 증가한다.

양생온도 20℃에서 수중양생한 S900-1.0, S1100-1.0, S1100-1.5 그리고 S1300-1.0의 MgO에 대한 SEM사진을 그림 3.2.4에 도시하였다. MgO의 중성화시간은 46초, 325초, 1966초이며 이들을 MEA-46, MEA-325, MEA-1966으로 표시하기로 한다.

MEA-46은 대부분이 급격히 수화반응 하였으며 수많은 6면체 판형의 $Mg(OH)_2$가 2일 만에 형성되고 MgO의 97.05%가 수화반응 하였다{그림 3.2.4(a)).

재령 7일에서 MEA-46에 있는 모든 MgO가 완전히 수화반응 하였으며 $Mg(OH)_2$의 판형은 두께는 증가하였다(그림 3.2.4(b)). MEA-325의 경우, 약간의 조밀한 막형태의 $Mg(OH)_2$가 재령 2일에서 형성되었으며 약간의 부산물들이 공극을 채웠다(그림 3.2.4(c)). MgO의 수화도는 4.53%였다. 재령 7일에서 $Mg(OH)_2$가 성장하였으며 수화도가 9.9%로 증가하였다(그림 3.2.4(d)). MEA-1966는 매우 천천히 수화반응이 발생하였으며 재령 2일에서 약간의 lamellar 형태의 $Mg(OH)_2$가 MgO 입자의 표면에 형성되었다. 특히 MgO 입자의 경계에서 주로 형성되었는데 이것은 MgO 입자의 경계와 표면에서 수분과의 반응이 시작되었음을 나타낸다(그림 3.2.4(e)). 재령7일에서 수화반응물이 증가하였으며 MgO 입자의 표면을 덮었다(그림 3.2.4(f)). 그러나 MgO의 0.98%만이 수화반응 하였다. 이들 결과로부터, MgO 입자의 수화활성도가 MgO의 수화활성도에 있어 표면적보다 더 중요한 역할을 하는 것으로 생각된다.

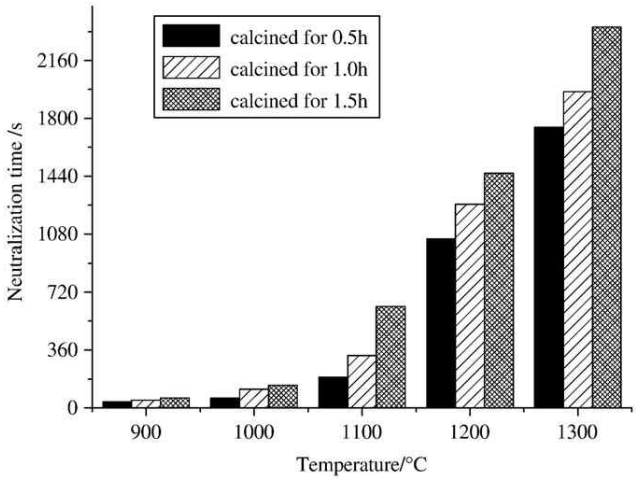
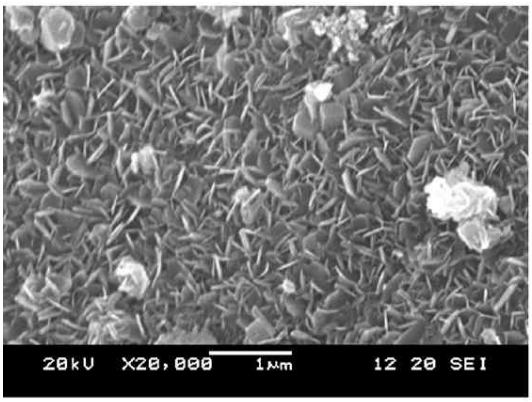
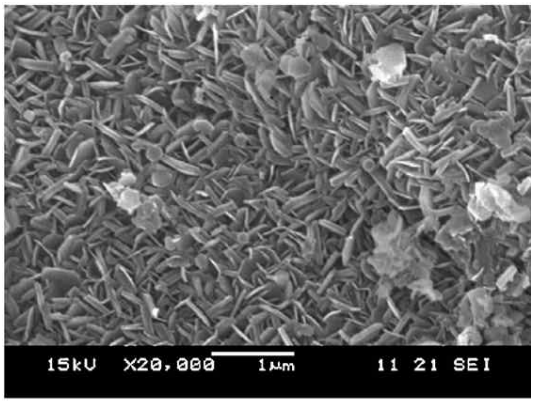


그림 3.2.3 Effect of calcination temperature and residence time on the neutralization time of MgO[27]

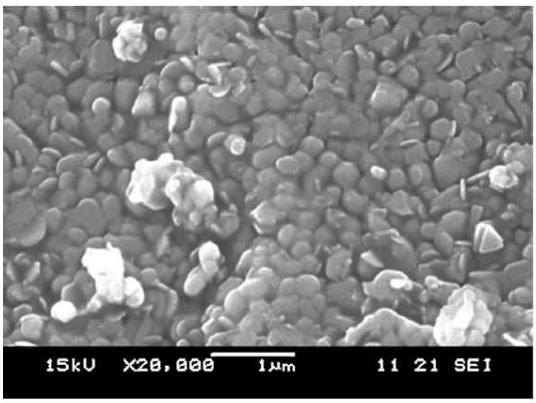
(a) MEA-46, cured for 2d



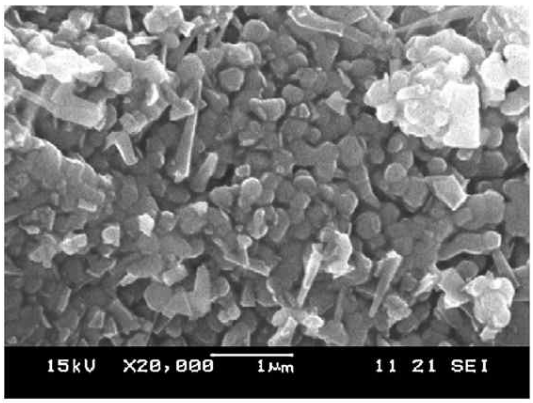
(b) MEA-46, cured for 7d



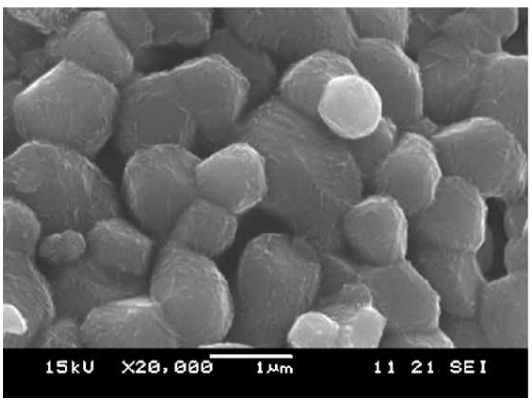
(c) MEA-325, cured for 2d



(d) MEA-325, cured for 7d



(e) MEA-1966, cured for 2d



(f) MEA-1966, cured for 7d

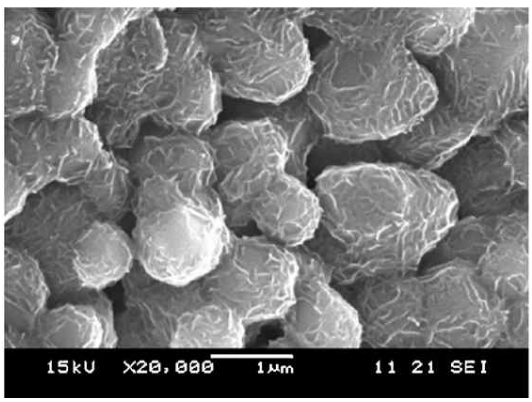
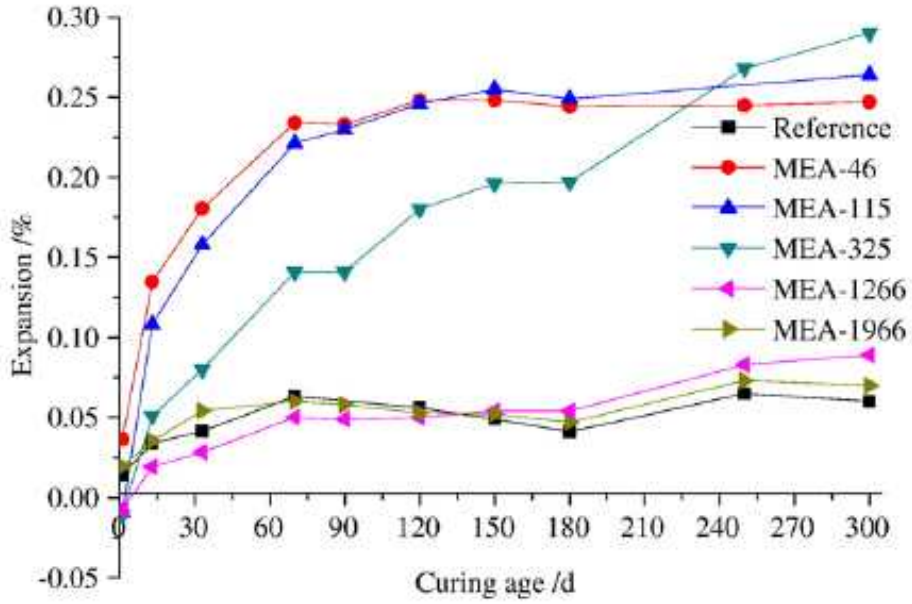
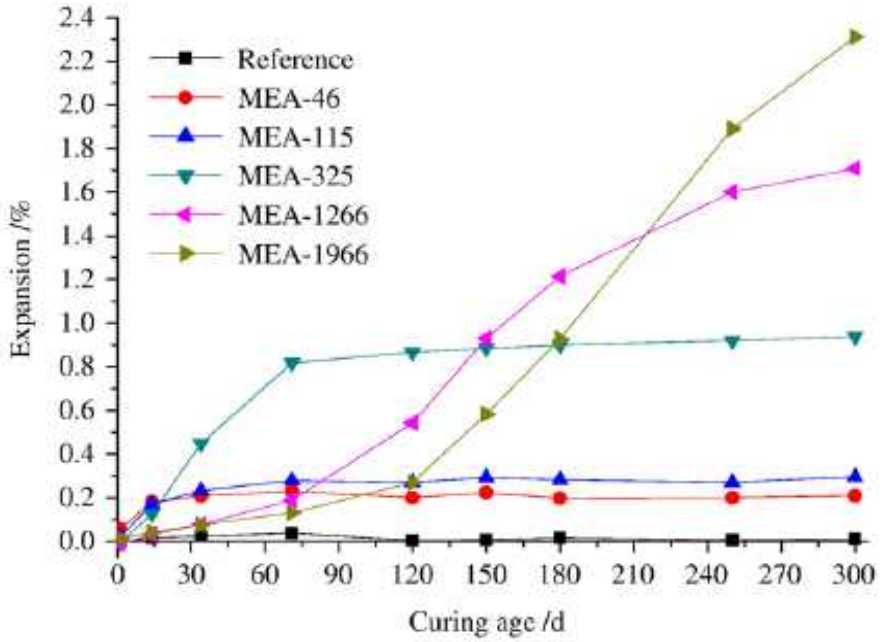


그림 3.2.4 SEM images of the hydration products of MgO cured in water at 20°C[27]



(a) Pastes cured in 20℃ water



(b) Pastes cured in 40℃water

그림 3.2.5 Expansion curves of cement pastes containing 8 wt.% of MgOwith different neutralization time[27]

그림 3.2.5의 결과는 높은 활성도(짧은 중성화시간)을 가지는 MgO는 초기재령에서 빠르고 큰 팽창을 발생시키며 팽창곡선은 안정적이라는 것을 나타낸다. 반면, 낮은 활성도(긴 중성화시간)을 가진 MgO는 초기재령에서 느리며 적은 팽창을 발생시키나 최종재령에서는 빠르고 큰 팽창을 나타내며 완전한 팽창곡선을 그리기 위해서는 장기간의 계측이 필요하다. 추가적으로, 40℃수중양생시의 팽창곡선은 낮은 활성도를 가지는 MgO의 팽창량은 유발기간(induction period) 이후에 가속화되었다. MgO의 활성도가 더 낮을수록 유발기간은 더 길어질 것이다.

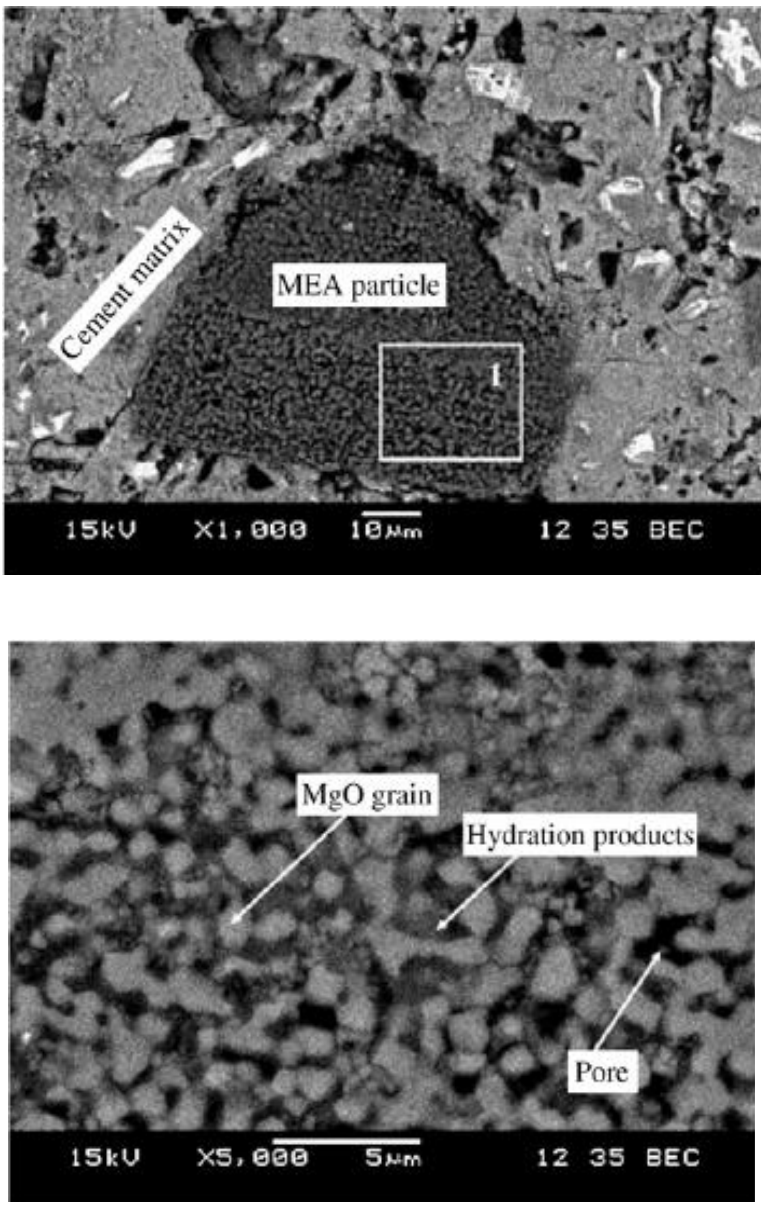


그림 3.2.6 Backscatter SEM images of MgO embedded in cement paste cured in 40°C at the age of 270d[27]

그림 3.2.6는 40℃에서 양생한 시멘트페이스트의 재령 270일에서의 MgO 입자에 대한 후방산란(backscatter) 이미지를 나타낸다. 시멘트 수화물에 의해 둘러싸여진 MgO 입자를 나타내며 MgO 입자와 시멘트 매트릭스 사이의 경계가 명확히 나타나있다. 고배율 이미지에서는 MgO 입자 표면에 형성된 수화생성물 $Mg(OH)_2$ 외에도 약간의 수화생성물이 MgO 입자 내부에 MgO 침전물을 둘러싸여 형성되어있으며 내부공극을 채우고 있다. 더욱이 어떤 MgO 침전물은 수화생성물에 의해 깨어져 있는데 이는 MgO 알갱이의 경계에서 형성된 수화생성물에 의한 팽창이 원인일 수 있다. MgO 입자 둘레 혹은 내부에 생성된 수화생성물은 MAE입자의 자기팽창의 원인이 되며 MgO입자의 자기팽창은 입자 주위의 시멘트 메트릭스를 구속하게 되고 이로 인해 팽창응력이 발생하여 시멘트 페이스트가 팽창하게 된다.

MgO의 미세구조는 팽창특성을 제어하기 위한 기본적인 인자이다. 이것은 소성온도에 의해 영향을 받는다. 높은 소성온도와 긴 소성시간에서 생성된 MgO는 적은 내부공극을 가지며 MgO의 결정크기는 크고 작은 비표면적을 가지므로 초기재령에서는 낮은 수화활성도와 느린 팽창을 보이지만 장기적으로는 매우 큰 팽창을 나타낸다. 한편, 이러한 결과를 설명하기 위해 새로운 MgO 팽창모델이 제안되었다.

Xu 등[28]은 원재료를 백운암(dolomite)과 실리카를 함유한 광물을 이용한 MgO 함유 팽창재를 제조하였다. MgO에 기초한 팽창재는 주로 MgO, C_2S 그리고 CaO로 이루어져 있다(그림 3.2.7, 그림 3.2.8). 고온양생(80℃)과 오토크레이브시험에 의한 팽창재의 팽창 결과(그림 3.2.9)는 MgO에 기초한 팽창재가 원하는 팽창량으로 팽창한다는 것을 나타내고 있다. 만약 소성온도와 소성시간, 시멘트 혼입량을 콘크리트 건설규정에 의거하여 제어할 수 있다면, 설계에서 요구하는 수축보상 팽창재로 사용할 수 있다.

중국에서 MgO 팽창재의 제품화는 주로 수직소성로(vertical kilns)에서 이루어진다. 생산과정을 제어하거나 모니터링 하는데 적은 수의 장치가 사용되어 팽창재의 품질을 제어하는 데는 어려움이 따른다. 회전소성로(rotary kilns)와 여타의 소성로를 이용한 생산기술은 난징공업대학과 Jiangsu Bote New Materials Co. Ltd.가 공동으로 개발 중에 있다. 개발 중인 기술에 의해 생산된 MgO는 소비자의 요구에 따라 쉽게 특성을 조절할 것으로 기대하고 있으며 MgO 팽창재도 일정수준의 품질을 확보할 것으로 기대된다.

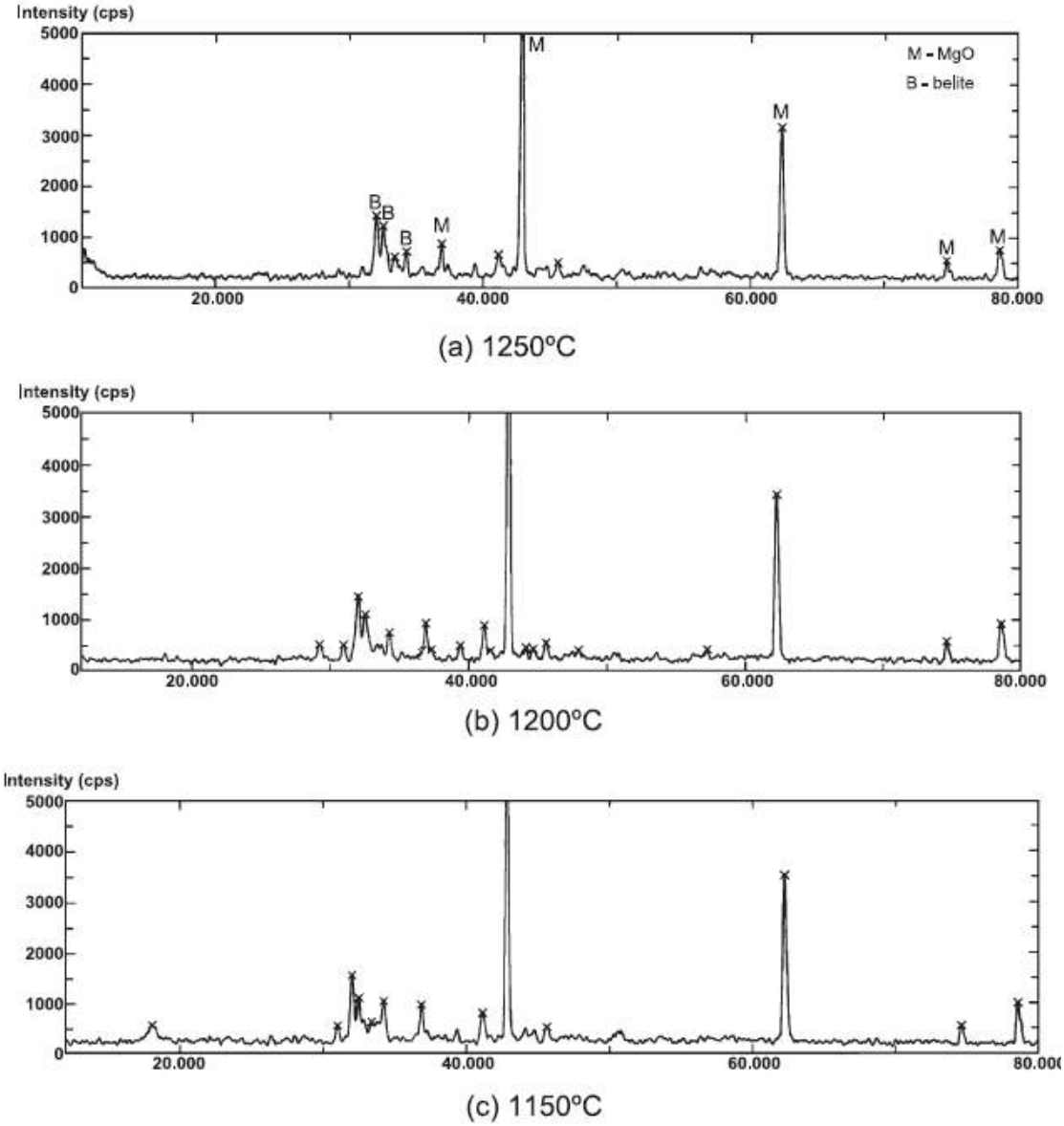
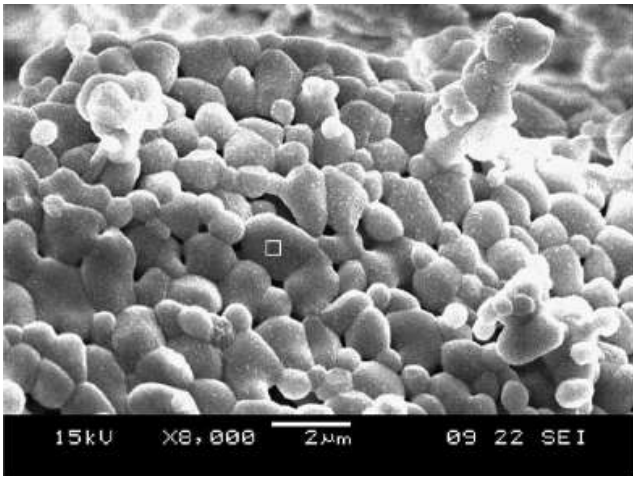


그림 3.2.7 XRD patterns of clinkers burned at 1100-1250℃ for 1 h



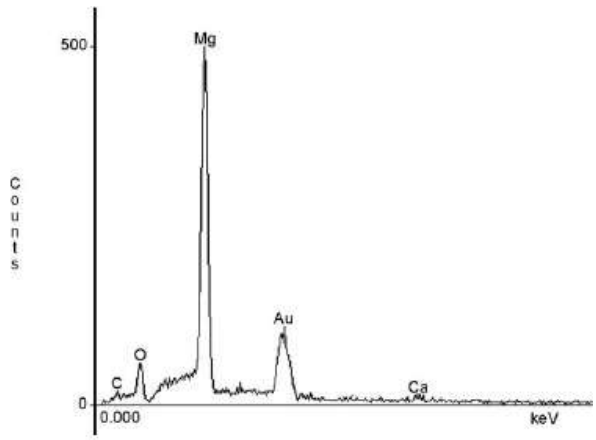


그림 3.2.8 SEM and EDS of MgO-bearing expansive agent burnt at 1200°C for 1 h

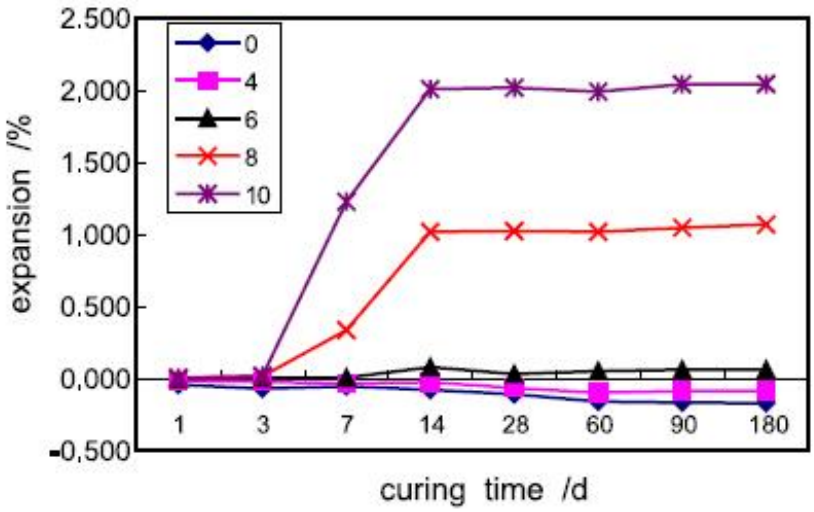


그림 3.2.9 Expansion of pastes contained 0%, 4%, 6%, 8% and 10% expansive agent burned at 1200℃ for 1.0 h and cured at 80℃ in water

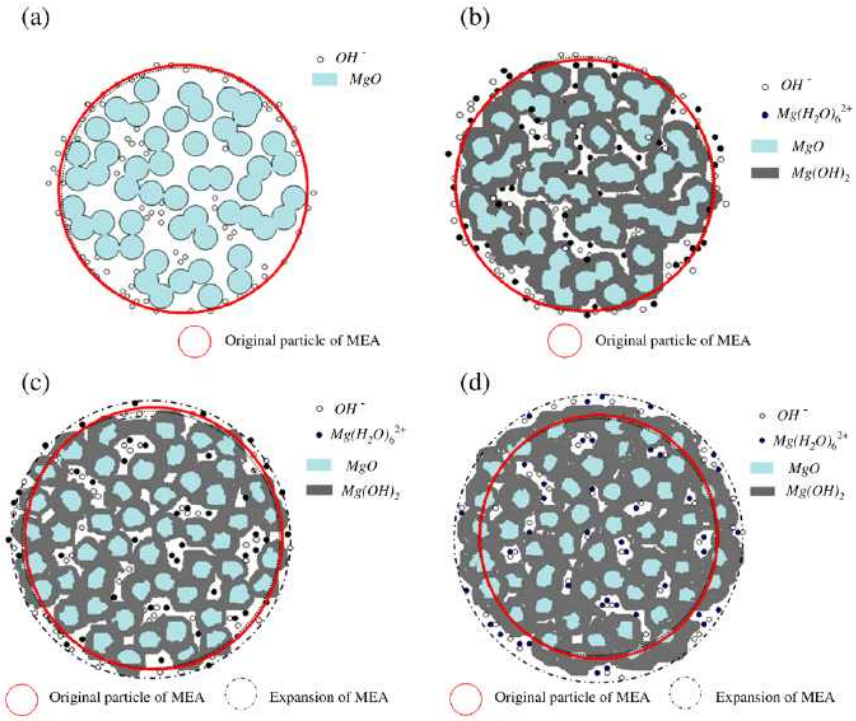


그림 3.2.10 Hydration and expansion model of the porous MEA with high activity in the cement paste.

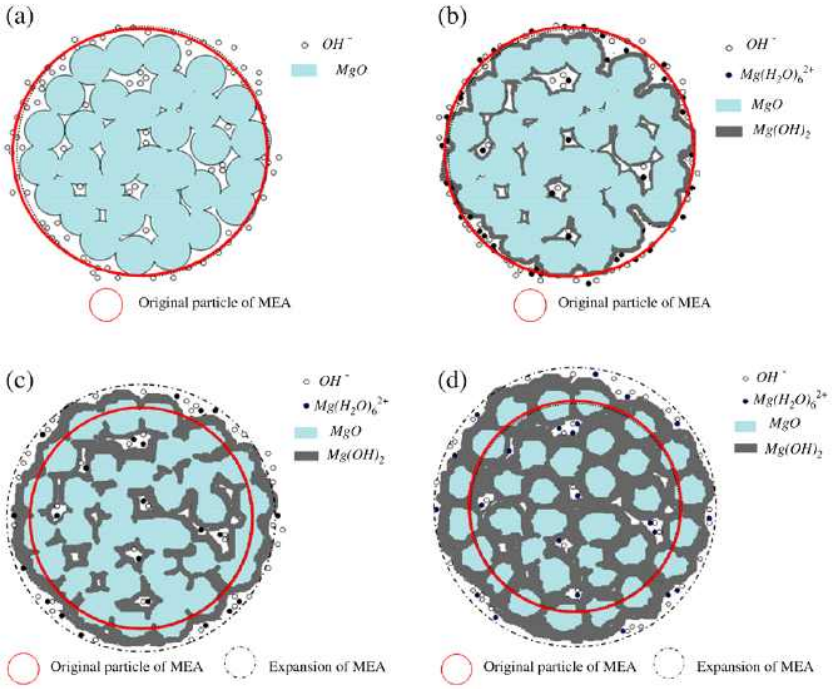


그림 3.2.11 Hydration and expansion model of the porous MEA with low activity in the cement paste.

4. 팽창 메커니즘

MgO혼입 시멘트의 팽창은 $Mg(OH)_2$ 결정체의 형성과 성장의 결과이다. 팽창은 $Mg(OH)_2$ 결정체의 형성[29]뿐만 아니라 이들의 크기에 의존한다.

팽창유도력(driving force of the expansion)는 $Mg(OH)_2$ 결정체의 성장으로 인해 발생하는 결정압력(crystallization pressure)과 얇은 $Mg(OH)_2$ 결정체에 수분이 흡수되어 나타나는 팽창압력(swelling pressure)등이 있다. 그러나 후자는 덜 중요한 역할을 한다. 슬래그와 fly-ash는 시멘트페이스트의 공극용액(pore solution)의 알칼리성을 감소시키며 페이스트의 공극률을 증가시키며 팽창을 방해한다.

MEA[27]의 팽창특성을 변화시키는 주된 인자로는 두 가지를 생각할 수 있다. 첫 번째는 수화활성도이다. 낮은 활성도를 가지는 MgO는 초기재령에서 느리게 수화반응하여 적은 양의 MgO가 수화되고 작은 팽창을 나타낸다. 그러나 장기 재령에서는 더 많은 MgO가 수화반응하며 큰 팽창을 나타낸다. 높은 활성도의 MgO는 초기재령에서 많은 MgO가 수화반응하여 급격한 팽창을 보이는 반면 장기 재령에서는 적은 MgO가 수화반응하고 적은 팽창을 나타낸다.

다른 중요한 인자는 MEA의 미세구조이다. 느린 활성도를 나타내는 MEA 내부에 공극을 적게 함유하고 있어 입자 경계면에서의 수화반응이 매우 중요한 역할을 하며 미세공간은 팽창할 수 있는 공간을 제공하여 큰 팽창을 유발시킨다. 거시적 관점으로부터도 이것을 이해할 수 있다. 시멘트 중량비 대비 같은 양의 MgO를 첨가할 경우, 느린 활성도의 MEA가 더 큰 밀도를 나타내듯이 미수화된 MEA입자만으로 채워져 좁아진 공간은 수화생성물의 거처를 제공하게 되므로 매우 큰 팽창을 발생시킨다.

제 3 절 MgO 혼입 콘크리트의 특성

1. 개요

콘크리트의 수축 보상을 위해 설포알루미늄염 타입과 CaO 타입의 첨가가 효과적인 방법으로 알려져 있다. 하지만 이러한 첨가제는 초기 재령(보통 재령 14일 이전)에서 팽창이 일어나며, 따라서 시멘트계 물질의 늦은 재령에서 나타나는 건조수축과 온도수축은 효과적으로 보상되지 않는다. 또한 설포알루미늄염 타입의 첨가제의 경우, 에트린가이트와 같은 수화물을 형성하는데 필요한 배합수의 양이 크기 때문에 낮은 W/B를 가지는 고성능 콘크리트 또는 양생시 충분한 수분이 공급되지 않는 일부 구조물에는 적용하기 힘들다. 게다가 에트린가이트는 고온에서 (70℃ 이상) 변질될 수 있으며, 따라서 높은 수화열을 내는 매스콘크리트에 적합하지 않다. 앞서 언급한 두 종류의 팽창제와 비교하여 MgO는 수화반응에 필요한 배합수량이 적고 시멘트 페이스트 내에서 안정적으로 $Mg(OH)_2$를 생성한다. 따라서 수축보상을 위한 MgO의 사용은 광범위하게 적용될 수 있다[19]. 장기적인 연구와 관찰을 통하여, 콘크리트에 MgO 분말을 첨가하는 것은 기계적 성질에 영향을 미치지만, 온도 특성에는 거의 영향을 주지 않음을 알게 되었다. 장기적인 연구들은 수화 반응은 비가역적이고 MgO는 안정적이며 MgO 콘크리트의 역학적 거동은 안정적이라는 것을 증명하였다.[29,30] MgO 콘크리트의 팽창량은 초기 재령기간에는 CaO의 수화반응에 의해 좌우되며, 재령 28일 이후 비로소 MgO의 수화반응에 의하여 콘크리트의 팽창량이 결정되어진다. 이런 MgO의 수화작용은 매우 느리며, 28일 후에 수화반응을 시작한다. MgO의 분해결정은 약 90일 양생 후에 발견할 수 있으며 이것은 지연된 팽창을 나타내며 MgO 수화반응은 양생온도가 증가할 때 가속화된다.

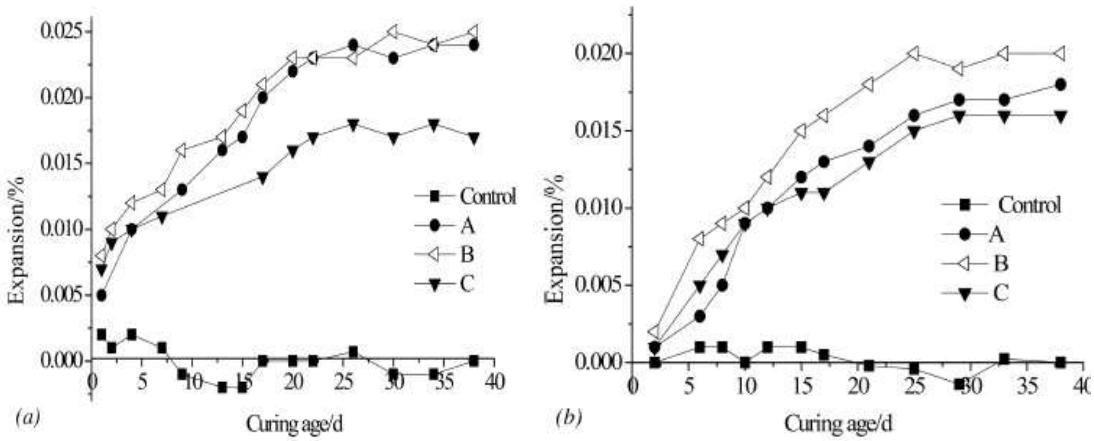
$$MgO + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2 \uparrow \qquad (3.3.1)$$

2. MgO 혼입 콘크리트의 안정도

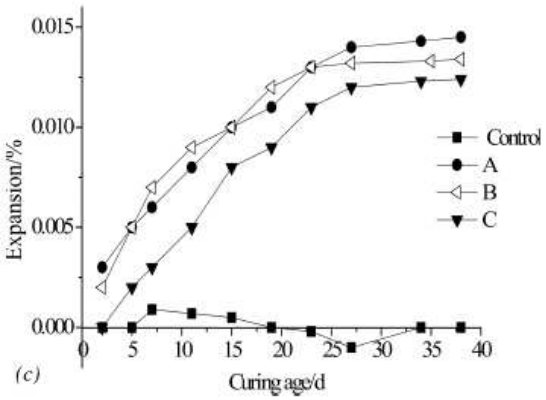
오토크레이브시험법은 시멘트계열 재료의 MgO에 대한 안정도를 평가하는데 주로 사용된다. 그러나 수화반응에 의한 MgO의 팽창은 시멘트 페이스트, 모르터르와는 다르다. 시멘트 페이스트를 시험하기 위한 ASTM C151 오토크레이브시험법는 저온소성 MgO 혼입 콘크리트의 안정도를 시험하기에는 적합하지 않는 것으로

생각된다. 콘크리트의 MgO의 안정도를 평가하기 위한 오토크레이브 시험법의 적용 가능성에 대한 많은 논의가 있었다[30-31].

가압 처리된(autoclaved) 콘크리트 시험체의 팽창, 강도 그리고 미세구조는 저온소성 콘크리트의 안정도를 평가하기 위해 사용된다. 그러나 MgO가 포함되지 않은 콘크리트는 가압 처리 이후 팽창과 distress가 발생한다. 이것은 시멘트페이스트와 골재사이의 온도특성의 차이에 기인한 것으로 생각된다. 콘크리트의 특성에 있어 양생온도의 영향을 배제하기 위해 80℃의 항온항습기에 콘크리트 시험체를 거치한다. 다른 양생기간동안 각주형 콘크리트 시험체의 팽창결과를 그림 3.3.1과 그림 3.3.2에 도시하였다[32]. 각주형 콘크리트 시험체 모두 빠르게 팽창하였으며 팽창곡선은 점진적이나 완전한 MgO의 수화반응으로 인해 재령 30일경에 완만한 곡선을 나타내었다. 따라서, 양생온도가 80℃일 경우, 콘크리트 속 MgO의 수화반응은 효과적으로 가속화될 수 있다.

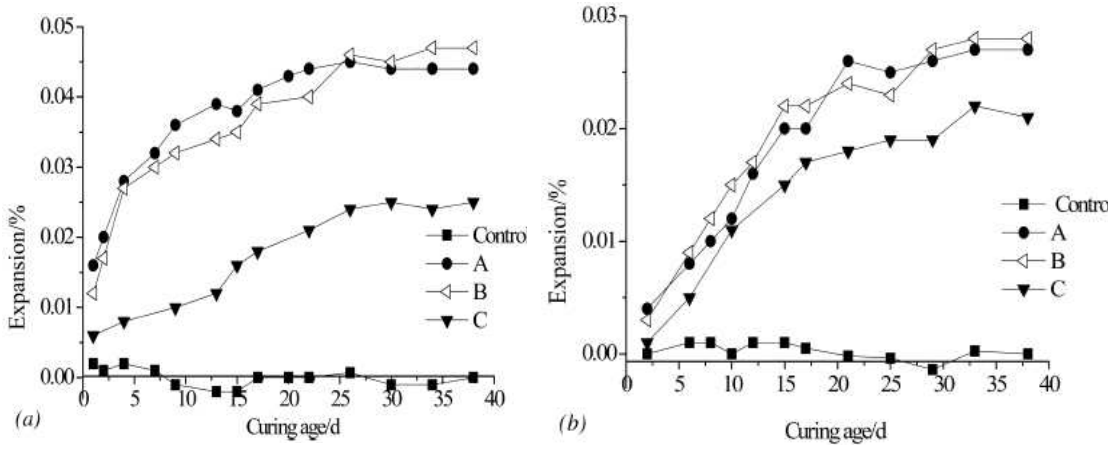


(a) 0% fly ash (b) 30% fly ash

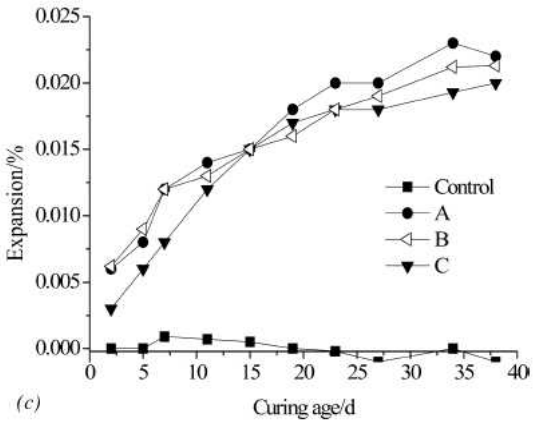


(c) 60% fly ash

그림 3.3.1 Expansions of concrete prisms containing 5% MgO cured at 80°C in water with: fly ash[32]



(a) 0% fly ash (b) 30% fly ash



(c) 60% fly ash

그림 3.3.2 Expansions of concrete prisms containing 8% MgO cured at 80°C in water with fly ash[32]

표 3.3.1 Flexural strength of concrete prisms after curing at 80°C in water

Concrete	Fly ashes (%)	MgO (%)	Flexural strength (MPa)		
			MEA-A	MEA-B	MEA-C
F00	0	0	7.96	7.96	7.96
F05	0	5	8.18	8.62	8.67
F08	0	8	8.72	8.06	9.03
F30	30	0	7.27	7.27	7.27
F35	30	5	7.30	7.38	7.84
F38	30	8	8.15	8.40	7.39
F60	60	0	6.14	6.14	6.14
F65	60	3	7.08	5.72	6.18
F68	60	8	7.22	5.66	6.94

표 3.3.1에서 알 수 있듯이, 8%의 MgO를 첨가하더라도 콘크리트의 휨강도를 크게 저하시키지 않는다. 심지어 어떤 시험체는 MgO를 첨가하지 않은 기준 시험체보다 큰 휨강도값을 나타낸다. 이로부터 MgO의 수화반응이 콘크리트의 구조를 붕괴시키지 않으며 MgO의 첨가량은 콘크리트에 대해 안전하다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 시멘트 매트릭스의 팽창은 콘크리트 속의 골재에 의해 구속되고 적절한 팽창은 시멘트 매트릭스를 보다 치밀하게 하여 강도를 증가시키는 것으로 생각된다. 8%의 Type A MgO 혹은 8%의 Type B MgO를 혼입할 경우, 시멘트 페이스트는 균열이 발생하고 불안정하지만 MgO의 수화반응이 완전히 끝난 이후에는 표면과 강도가 매우 좋은 상태를 보였다는 것은 주목할 만하다. 더욱이 이들의 역학적 성능은 기준 시험체에 비해 매우 우수하다.

저온소성한 MgO의 수화반응은 양생온도를 상승시켜 가속시킬 수 있다. 합리적인 시간 안에 MgO의 잠재적 팽창량을 알기 위해 효과적인 가속장치를 사용한 결과, 모든 MgO 타입은 80℃의 양생온도에서 30일 이내에 완전히 수화 반응하였다. 첨가된 MgO의 수화반응은 효과적으로 가속화할 수 있었으며 3개의 다른 타입의 MgO에 대한 팽창곡선은 fly-ash첨가와 무관하게 30일 이전에 완만해졌다. 이 가속화시험은 중국에서 사용되는 일반적인 MgO의 활성도 범위를 만족하는 78초~264초 범위의 활성도 값을 가지는 저온소성 MgO에 적용가능하다.

오토크레이브 시험법과 비교하여, 양생온도 80℃와 현장 콘크리트와 같은 배합특성을 가지는 시험체는 공용기간의 콘크리트와 같이 일반적인 조건에 가깝다. 그러므로 이 가속화 조건하에서의 안정도 시험결과는 더욱 신뢰할 만하다. 최대팽창량은 제외하고라도 콘크리트의 형상, 콘크리트의 휨강도와 같은 역학적 성능은 안정도평가에 고려해야만 한다.

이 연구는 저온소성한 MgO를 첨가한 콘크리트의 안정도를 평가하기 위한 잠재적 접근법을 제공한다. 그러나, 80℃~100℃의 온도, 다른 종류의 시멘트와 MgO에 대해서도 연구할 필요가 있으며 평가기준의 개발이 추후 연구에서 수행되어야 한다. 시험 콘크리트의 미세구조와 동결융해저항성은 안정도 평가시 추가적으로 고려해야만 한다. 제안한 시험방법은 실제 콘크리트 배합의 soundness 평가를 통하여 평가할 수 있을 것이다.

3. MgO 혼입 콘크리트의 특성

가. 자기 팽창

MgO 콘크리트의 자기팽창성은 MgO 분말의 종류에 따라 달라지고 첨가하는 양과 콘크리트의 온도에 비례한다. 팽창의 규모와 반응은 MgO 분말의 소성온도에 따라 달라진다. 높은 온도에서 소성될수록 초기재령에서 팽창의 크기가 작아지고 MgO의 수화반응 과정은 길게 지속된다. MgO의 수화반응은 점진적이고 비가역반응이기 때문에, $Mg(OH)_2$는 안정적이고 그 팽창성은 무한하지 않다.[31] 그림 3.3.3에서 볼 수 있듯이 온도가 높을수록 MgO의 팽창 속도가 빨라진다. 이는 고온에서의 자기팽창 속도가 상온에 비해 크고 변형량도 온도의 증가에 따라 신속히 증가됨을 나타낸다. 고온에서의 자기팽창 속도는 상온에 비해 감쇠가 더 빠르며 상응한 변형도 상온에 비해 안정이 더 빠르다.[29] 따라서 MgO의 종류와 양에 대한 적절한 규격과 콘크리트의 온도 조절을 통하여 MgO 콘크리트의 자기팽창량을 조절할 수 있다.

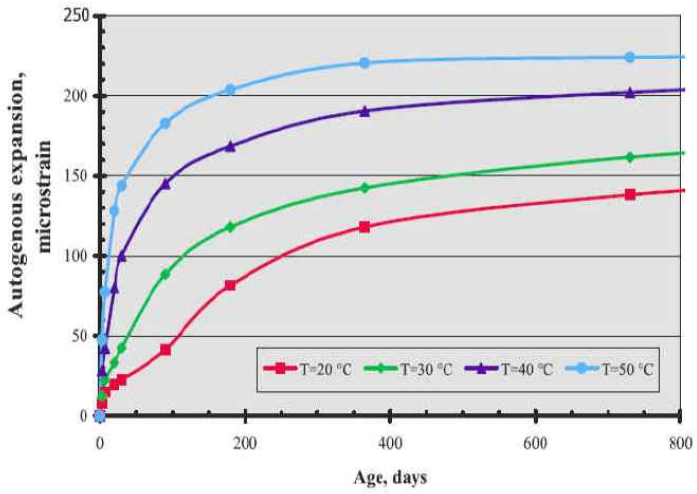


그림 3.3.3 Fly ash 30%, MgO 4%의 자기팽창 실험결과 예[31]

요구되는 자기 팽창량에 따라 적절한 MgO 사용량을 선택하는 것이 중요하다. 일반적으로 MgO의 사용량(시멘트 속의 MgO 제외)은 최대 결합재량의 5%로 제한하여야 한다. 콘크리트의 시멘트에 포함된 MgO와 첨가되는 MgO 분말을 포함한 이론적인 MgO의 최대 함유량은 약 8%이다.[31]

나. 강도와 탄성계수

MgO 콘크리트의 압축 및 인장강도는 일반 콘크리트보다 향상된다. 강도의 증가

는 첨가하는 MgO 분말의 양과 콘크리트의 재령이 증가함에 따라 커지며 높은 양생 온도는 MgO의 수화반응 비율을 증가시킨다. 이는 또한 콘크리트의 미세구조를 더욱 치밀하게 만들어 주어 미세 균열의 수를 감소시키게 된다. MgO 분말의 첨가는 콘크리트의 물-결합재비 또한 감소시키며, 이것이 앞서 설명한 강도증진을 부분적으로 설명할 수 있다.

강도증가와 일치하여 MgO 콘크리트의 탄성계수는 강도증가보다는 작지만, 일반 콘크리트보다 조금 높게 나타났으며 일반적으로 더 높은 탄성계수는 콘크리트의 균열을 증가시킬 수 있음을 염두에 두어야 한다.

다. 인장거동

압축강도와 비슷하게 MgO 콘크리트의 인장변형용량은 MgO 분말량과 양생온도에 따라 증가한다. 예를 들면, MgO 함유량이 4.5%인 콘크리트의 인장변형용량은 양생온도가 20℃에서 약 19% 증가할 것이다. 인장변형용량의 증가는 콘크리트의 균열저항성에 유리하게 작용한다.

라. 크리프

MgO 콘크리트의 장기적인 실내실험에서 크리프는 시간과 재하하중에 따라 다르지만 MgO 함유량이 3.5～4.5%인 콘크리트의 크리프 양은 동일한 배합을 가지는 일반 콘크리트보다 20～25% 정도 크게 나타난다. 따라서, MgO 팽창효과는 결과적으로 크리프를 증가시키며 이것은 인장응력과 압축응력을 완화하는데 도움이 되며 콘크리트 균열저항성을 증가시킬 수 있다.

마. 건조수축

일반적으로 콘크리트의 건조수축에 제일 큰 영향을 미치는 것은 단위수량과 단위 시멘트량이다. 건조수축으로 인한 균열에 있어 가장 중요한 요인 중의 하나는 배합의 물-시멘트비인데 이것이 증가함에 따라 수축을 증가시킴과 동시에 콘크리트의 강도를 저하시키게 된다. 단위 시멘트량의 증가는 수축과 그에 따른 균열경향을 증가시키는 부정적인 측면이 있지만 강도측면에서는 긍정적인 영향을 주게 되며 MgO를 포함하는 콘크리트의 경우 장기팽창의 영향으로 그 함량에 비례하여 수축량을 보상하게 되고 대체율이 큰 경우에는 강도저하의 요인이 될 수 있다.

제 4 절 MgO혼입콘크리트의 팽창메커니즘 분석 실험(Ⅳ)

1. 실험 개요

MgO는 소성온도에 따라 그 특성이 틀려지는데 본 연구에서 사용되는 MgO는 1,000℃정도의 저온에서 소성한 MgO이다. MgO 혼입 콘크리트의 역학적 특성은 첨가되는 MgO의 품질에 따라서 달라지기 때문에 저온소성 MgO의 품질을 관리하는 것은 매우 중요하다. 과거 수 십 년간 중국의 댐에 사용되어져 온 MgO의 품질 규격은 다음의 표 3.4.1과 같다. 본 품질기준은 중국 국가자원부의 수리수전계획설계 총원으로부터 1994년 허가된 기술요구서의 일부이다.[4)]

본 연구에서는 표 3.4.1의 품질기준을 이용하여 실험에 사용된 모든 MgO의 품질을 평가하였다.

표 3.4.1 MgO의 품질

구 분	품질기준
MgO 함량(순도)	90% 이상
활성지표	240s±40s
CaO 함량	2% 이하
입도	0.077mm
체에 남아있는양	3% 이하
손실된 양	4% 이하
SiO2 함량	4% 미만

현장에서 사용되는 MgO에 있어서 가장 중요한 지표는 공기 중의 수분에 의해 수화되었는지 판단하기 위해서 실시하는 활성지표 평가이다. 또한 수화반응을 통해 일어나는 팽창이 잠재적인 위험성이 있는지 검사하기 위해서 MgO를 첨가한 시멘트 모르타르 시편을 만들어 오토클레이브에 의해 양생 전후 길이변화를 측정하며, 첨가량을 조절하여 실험을 실시하여 첨가량과 팽창율의 관계곡선에 근거하여 적합한 MgO의 첨가량을 결정할 수도 있다.

저온소성 MgO 콘크리트의 팽창량은 초기 재령기간에는 CaO의 수화반응에 의해 좌우되며, 재령 28일 이후 비로소 MgO의 수화반응에 의하여 콘크리트의 팽창량이 결정되어진다. 이런 MgO의 수화작용은 매우 느리며, 28일 후에 수화반응을 시작한다. $Mg(OH)_2$의 분해결정은 약 90일 양생 후에 발견할 수 있으며 이것은 지연된 팽창을 나타내며 MgO 수화반응은 양생온도가 증가할 때 가속화된다. MgO의 수화반응식은 다음과 같다.

$$MgO + H_2O = Mg(OH)_2 \uparrow \quad (3.4.1)$$

이러한 MgO의 수화 반응을 검토하기 위해서 미세조직구조를 촬영할 수 있는 SEM(주사전자현미경)으로 재령별로 수화물의 성상을 분석하였고, XRD를 사용하여 각 재령에서 생성된 수화물의 종류를 분석하였으며, DSC(시차열분석)을 통하여 각 재령에서 수화정도의 평가를 진행할 예정이다.

2. 팽창재(MgO) 특성 분석

가. 성분분석

MgO의 성분분석결과를 표 3.4.2에 나타내었다.

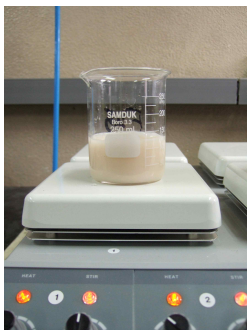
표 3.4.2 MgO의 성분분석 결과

항목 / 종류	SiO2 (%)	Fe2O (%)	Al2O3 (%)	MgO (%)	CaO (%)	SO3 (%)	Fe2O3 (%)	강열 감량 (%)	불용해 잔분 (%)	비중 (g/cm^3)
MgO	1.56	0.40	0.34	93.58	1.21	0.08	0.40	2.68	7.800	3.56

나. 활성지표 시험

활성지표 시험은 저온소성 MgO의 반응성을 판단하는데 유용한 제일 중요한 시험으로 시험방법은 다음과 같으며, 5회 측정결과는 269초, 275초, 277초, 259초, 272초로 모두 활성지표 품질기준을 만족하였다. 그림 3.4.1은 활성지표 시험과정을 나타낸 것이다.

① 1.7 g의 MgO 샘플을 pH=7인 증류수 100 ㎖에 녹인다.
② 구연산 2.6 g을 증류수 100 ㎖에 녹인다.
③ ①용액과 ②용액을 섞으면서 혼합액의 온도를 30~35℃를 유지한다.
④ 교반을 유지하면서 즉시 1~2 방울의 페놀프탈레인 용액을 넣는다.
⑤ 혼합액이 옅은 붉은색을 띄기 시작할 때까지 걸린 시간을 측정한다.


a) MgO 희석액


b) 구연산 희석액

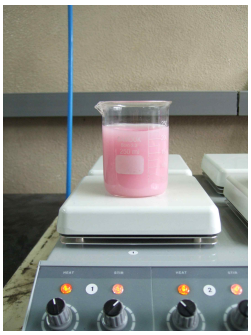

c) 페놀프탈레인 첨가후

그림 3.4.1 활성지표 시험

3. 팽창매커니즘 분석

가. 개요

MgO 혼입 콘크리트의 팽창매커니즘을 분석하고 위하여 재령에 따른 수화생성물 분석을 통해 평가하였다. 이를 위해 MgO를 10% 혼입한 페이스트와 혼입하지 않은 시멘트 페이스를 제작하여 비교 평가를 진행하였다. 시험 내용은 다음과 같다.

표 3.4.3 팽창메커니즘 분석시험

구 분	MgO혼입율(%)	양생온도(℃)	시험재령(일)
DSC	0. 5. 10	20, 35, 50	7, 28, 56, 91, 180, 360, 540, 720
SEM	0, 10	20, 50	
XRD	0, 10	20, 50	

나. 시험공시체 제작

수화생성물 시험분석을 위한 시멘트 페이스트의 제조는 물-결합재비 50%로 제작을 하였으며, 분석하고자 하는 시험내용에 따른 MgO 혼입율을 0, 5, 10%로 하여 제작을 실시하였다. 배합내용은 아래와 같으며 그림 3.4.2에 제작한 시멘트 페이스트를 나타내었다.

표 3.4.4 팽창메커니즘 분석시험 배합

구 분	물-결합재비(%)	MgO혼입율(%)	양생온도(℃)	시험체 개수[1)]	시험재령(일)
DSC	50	0, 5, 10	20, 35, 50	3*3*8 = 72	7, 28, 56, 91, 180, 360, 540, 720
SEM		0, 10	20, 50	2*2*8 = 32	
XRD		0, 10	20, 50	2*2*8 = 32	

Note : 1) 각 재령별 시험횟수 : 0% - 1회, 5% - 2회,10% - 2회

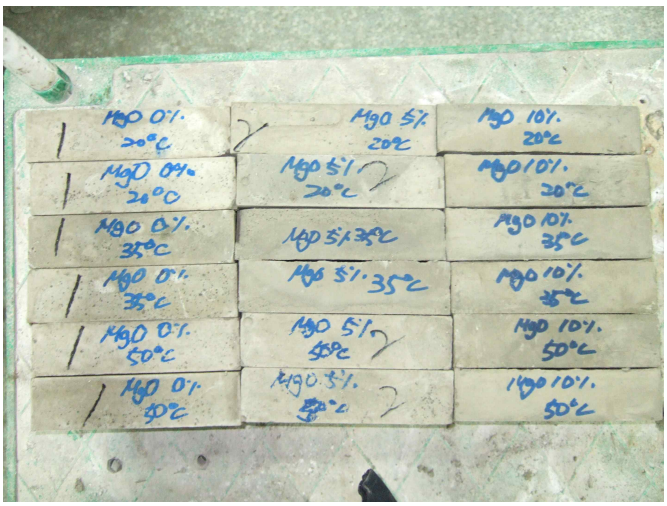


그림 3.4.2 시멘트 페이스트 제작 및 양생

다. 수화생성물 분석

SEM(Scanning Electron Microscope)는 ABT 150F, 최대 60만 배의 성능을 가지는 Topcon(일본) 사용하여 측정하였고, XRD(X-ray Diffraction) 는 PAN analytical (네덜란드)가 사용되었으며, 측정조건은 CuKα radiation, tube electric current 40 mA, voltage 40 kV, 스캐닝 스피드 2°/min, 2Θ=5～65와 같다. DSC(Differential Scanning Calorimeter)는 NET6SCH(독일) 을 사용하였고, 1,000℃까지 10 ℃/min 의 속도로 측정하였다.

각 재령에서 수화정지는 XRD, DSC를 측정하기 위한 샘플의 경우는 막자사발에서 분쇄하여 아세톤과 혼합하면서 3회 증발시키고 밀봉하였으며, SEM 샘플의 경우는 촬영에 적합하게 조각을 낸 후 아세톤에 10분간 침지 후 증발시키는 것을 3회 반복하였으며, 측정 시까지 건조로에 보관하였다.

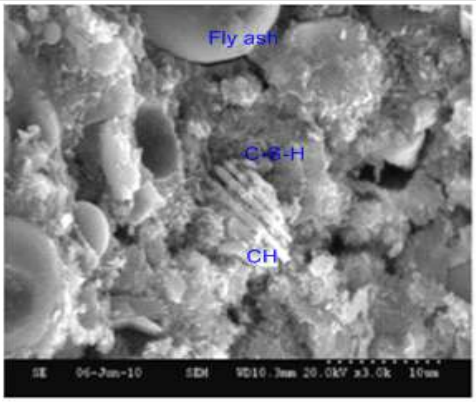
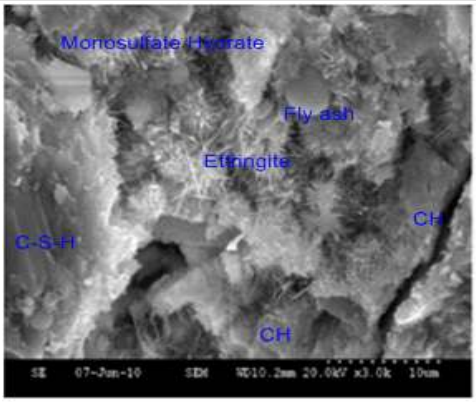
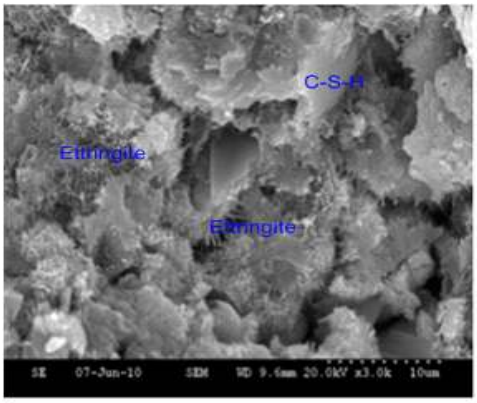
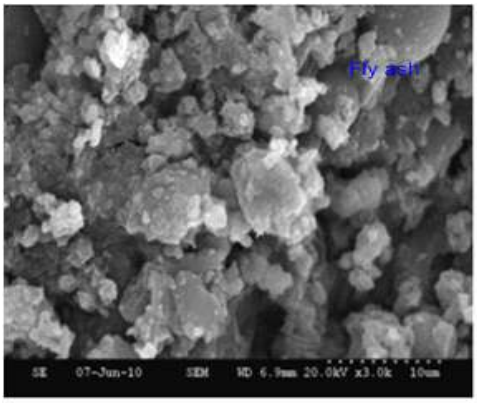
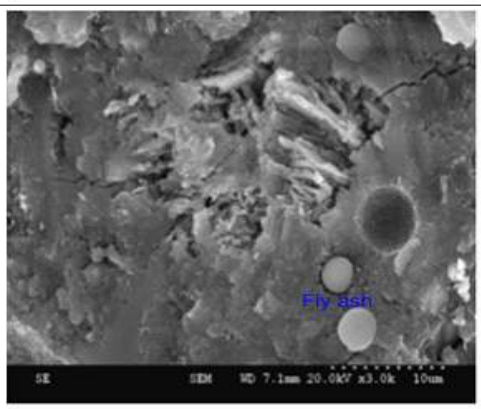
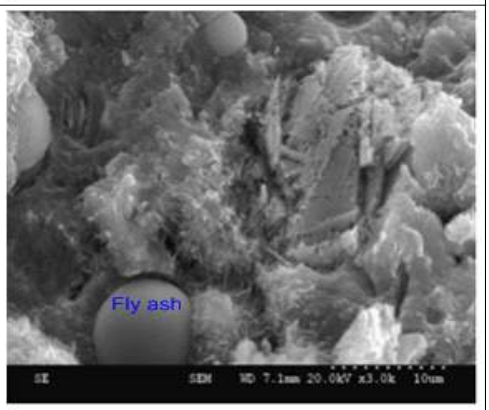
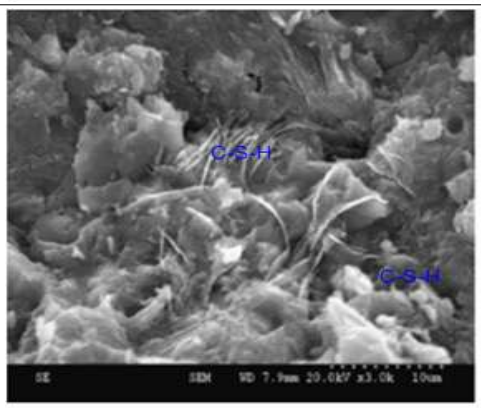
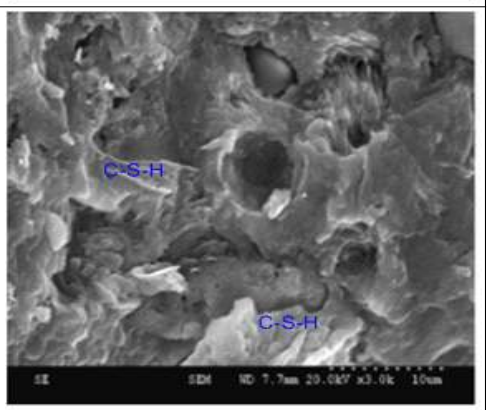
라. SEM 분석 결과

재령 7일까지는 MgO 10%를 혼합한 시멘트 페이스트가 혼합하지 않은 시멘트 페이스트보다 수화진행이 늦어지는 것을 볼 수 있었으며, 28일 이후에서는 사진상으로 수화정도가 거의 비슷했다. 또한 50℃에서 양생한 시편이 20℃에서 양생한 시편보다 빠른 수화정도를 보였다.

표 3.4.5 SEM 결과 요약

	0%-20℃	10%-20℃
7일	CSH 상이 많이 보이고 에트린가이트는 일부 보임	CSH 상이 많이 보이고 에트린가이트는 일부 보임
28일	판사의 수화물이 대부분이며, 기공들은 에트린가이트가 채우고 있음.	판사의 수화물이 대부분이며, 기공들은 에트린가이트가 채우고 있음.
56일	판사의 수화물이 대부분을 이루고 있으며, 미수화된 플라이애시가 보임.	판사의 수화물이 대부분을 이루고 있으며, 미수화된 플라이애시가 보임.
91일	판사의 수화물이 대부분을 이루고 있음	판사의 수화물이 대부분을 이루고 있음
180일	판사의 수화물이 대부분을 이루고 있음	판사의 수화물이 대부분을 이루고 있음
360일	판사의 수화물이 대부분을 이루고 있음	판사의 수화물이 대부분을 이루고 있음
1.5년	판사의 수화물이 대부분을 이루고 있음	판사의 수화물이 대부분을 이루고 있음
2년	판사의 수화물이 대부분을 이루고 있음	판사의 수화물이 대부분을 이루고 있음

	0%-50℃	10%-50℃
7일	CSH 상이 많이 보이고 에트린가이트는 일부 보임	CSH 상이 많이 보이고 에트린가이트는 일부 보임
28일	판사의 수화물이 대부분이며, 기공들은 에트린가이트가 채우고 있음.	판사의 수화물이 대부분이며, 기공들은 에트린가이트가 채우고 있음.
56일	판사의 수화물이 대부분을 이루고 있음	판사의 수화물이 대부분을 이루고 있음
91일	판사의 수화물이 대부분을 이루고 있음	판사의 수화물이 대부분을 이루고 있음
180일	판사의 수화물이 대부분을 이루고 있음	판사의 수화물이 대부분을 이루고 있음
360일	판사의 수화물이 대부분을 이루고 있음	판사의 수화물이 대부분을 이루고 있음
1.5년	판사의 수화물이 대부분을 이루고 있음	판사의 수화물이 대부분을 이루고 있음
2년	판사의 수화물이 대부분을 이루고 있음	판사의 수화물이 대부분을 이루고 있음

	0%-20℃	10%-20℃
7일		
28일		
56일		
91일		

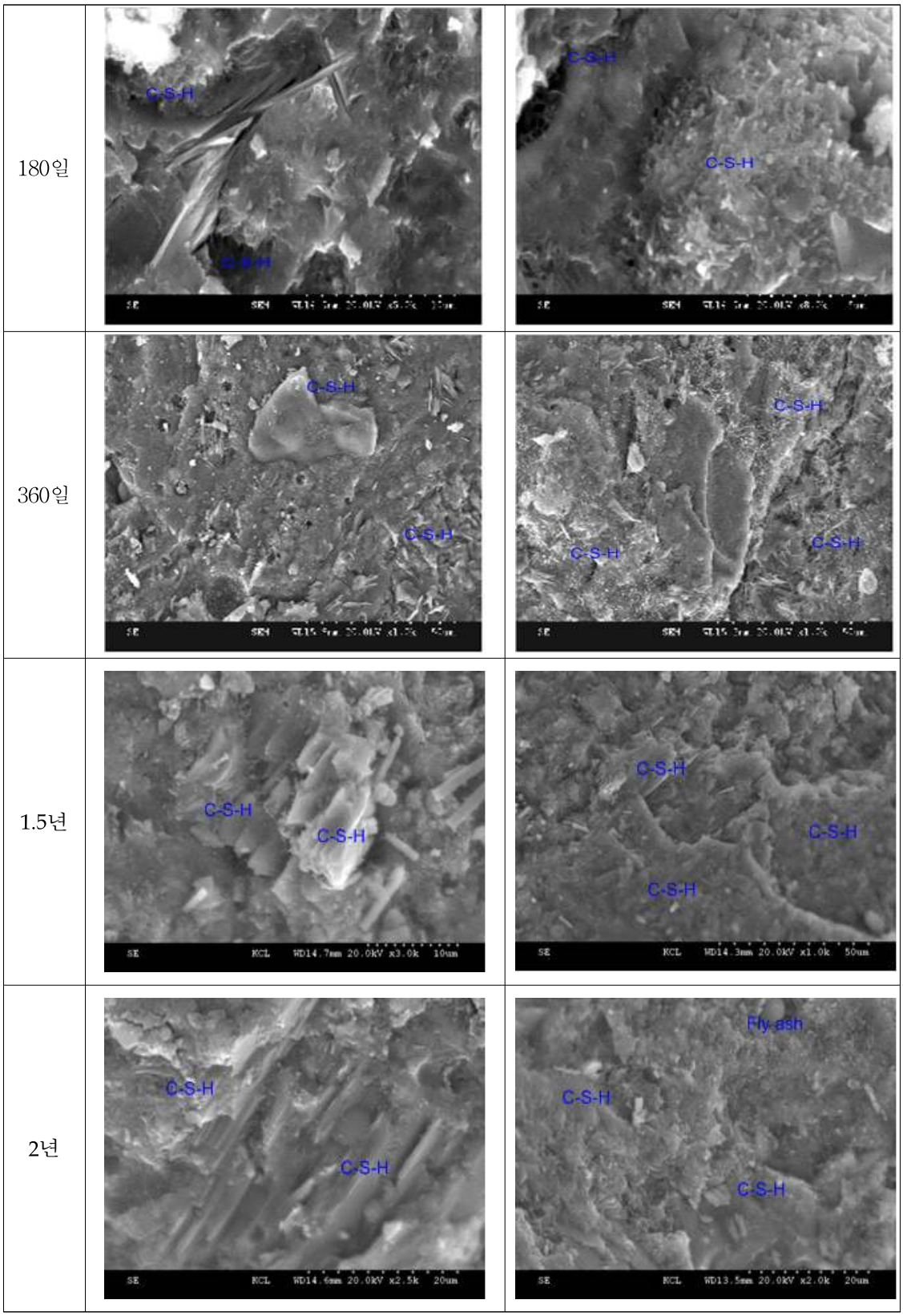
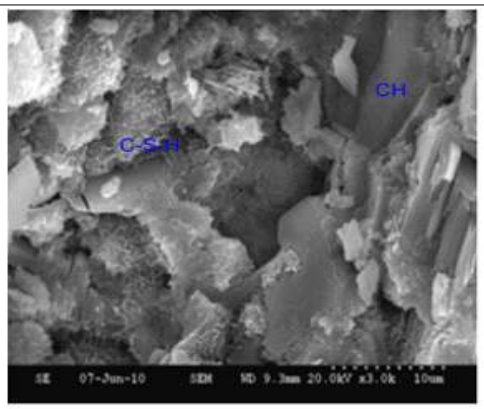
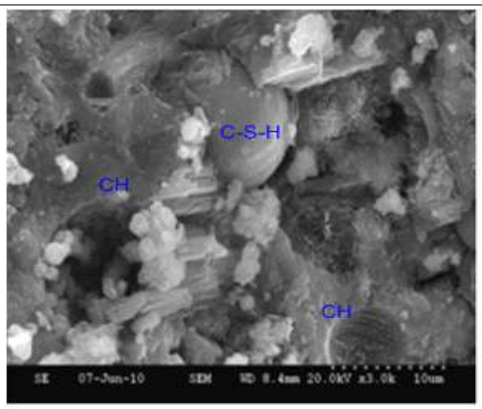
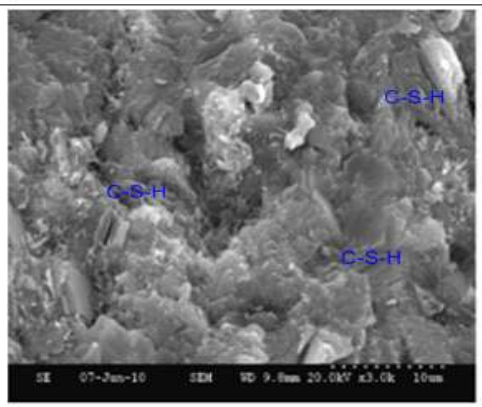
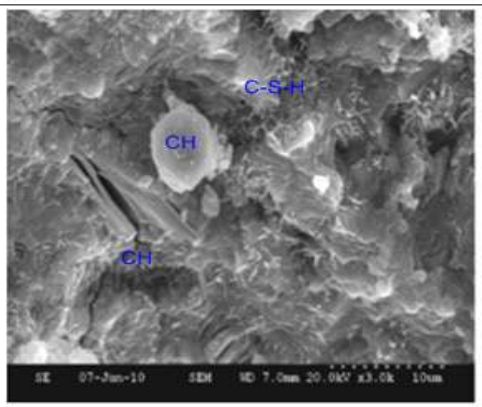
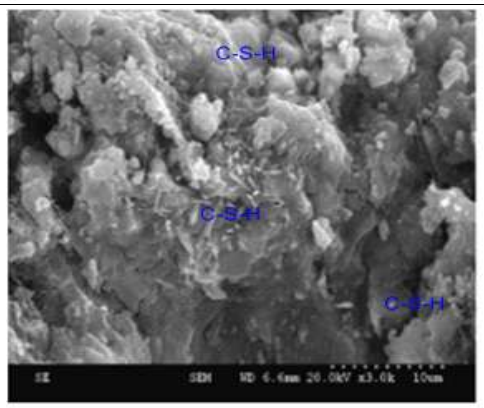
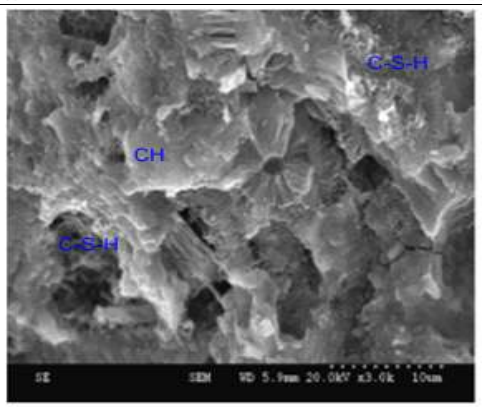
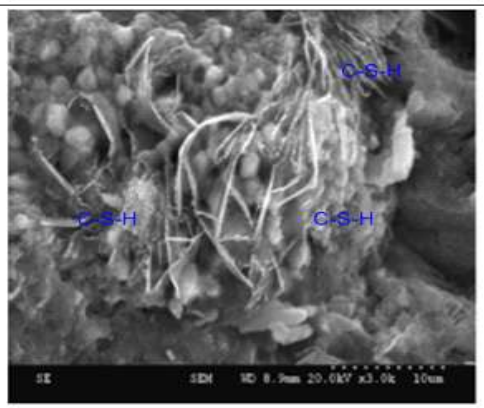
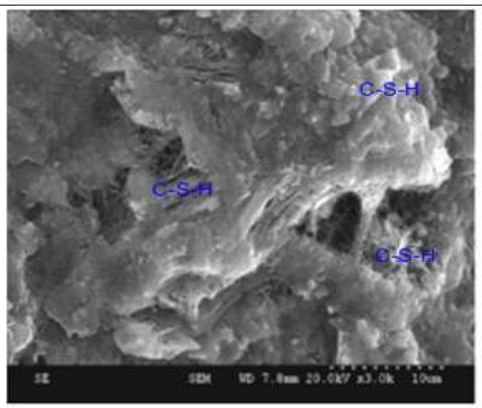


그림3.4.3 SEM 분석자료(0, 10%-20℃)

	0%-50℃	10%-50℃
7일		
28일		
56일		
91일		

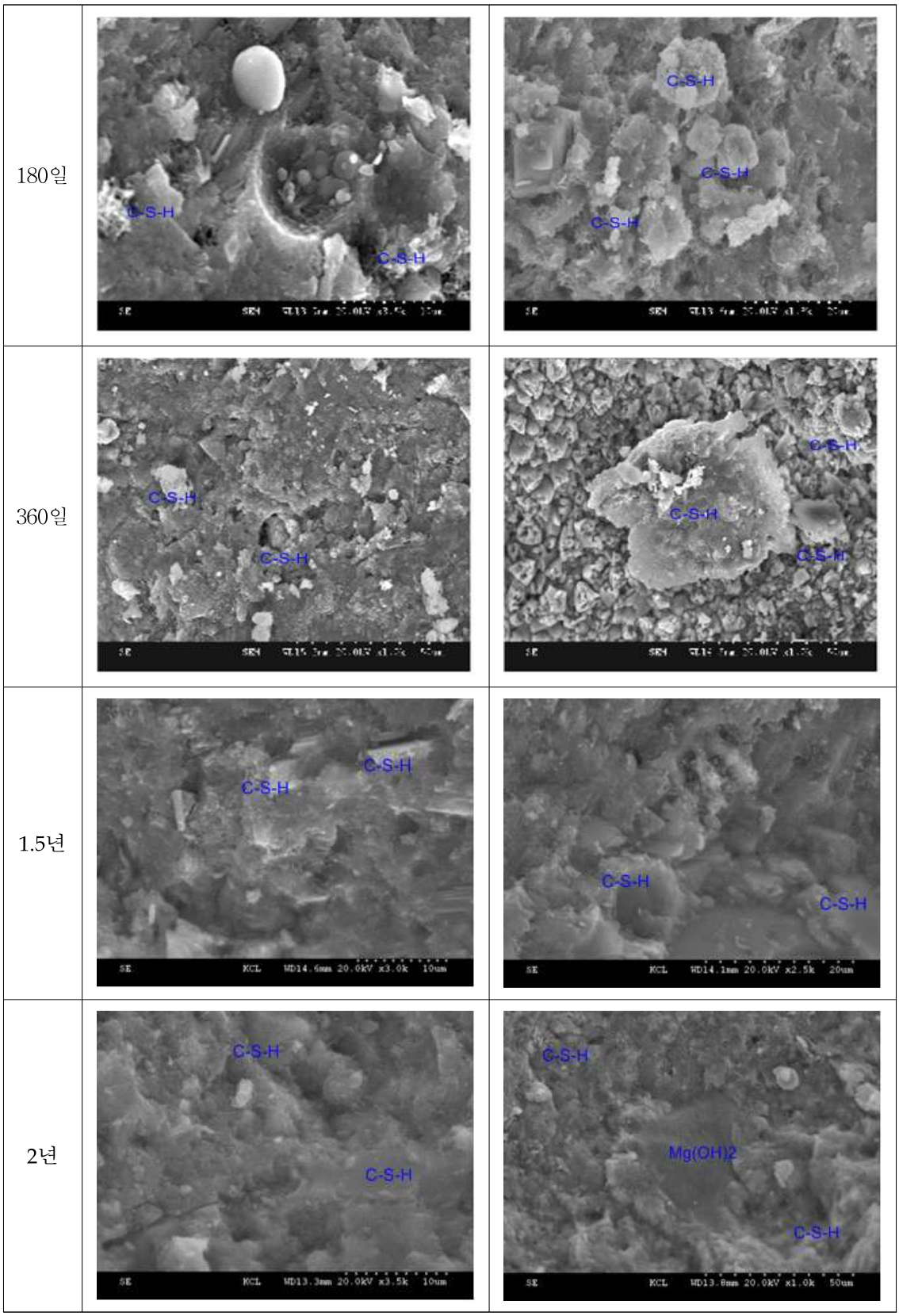
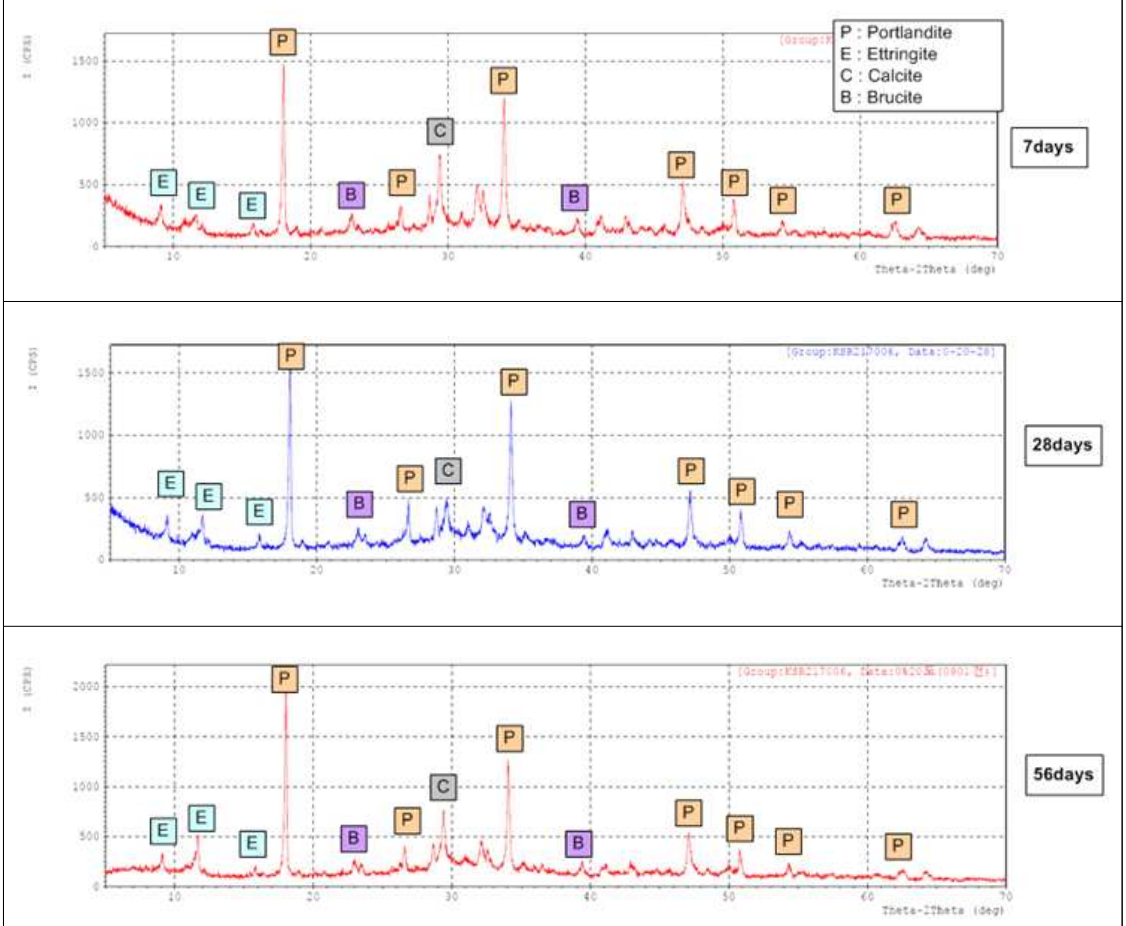


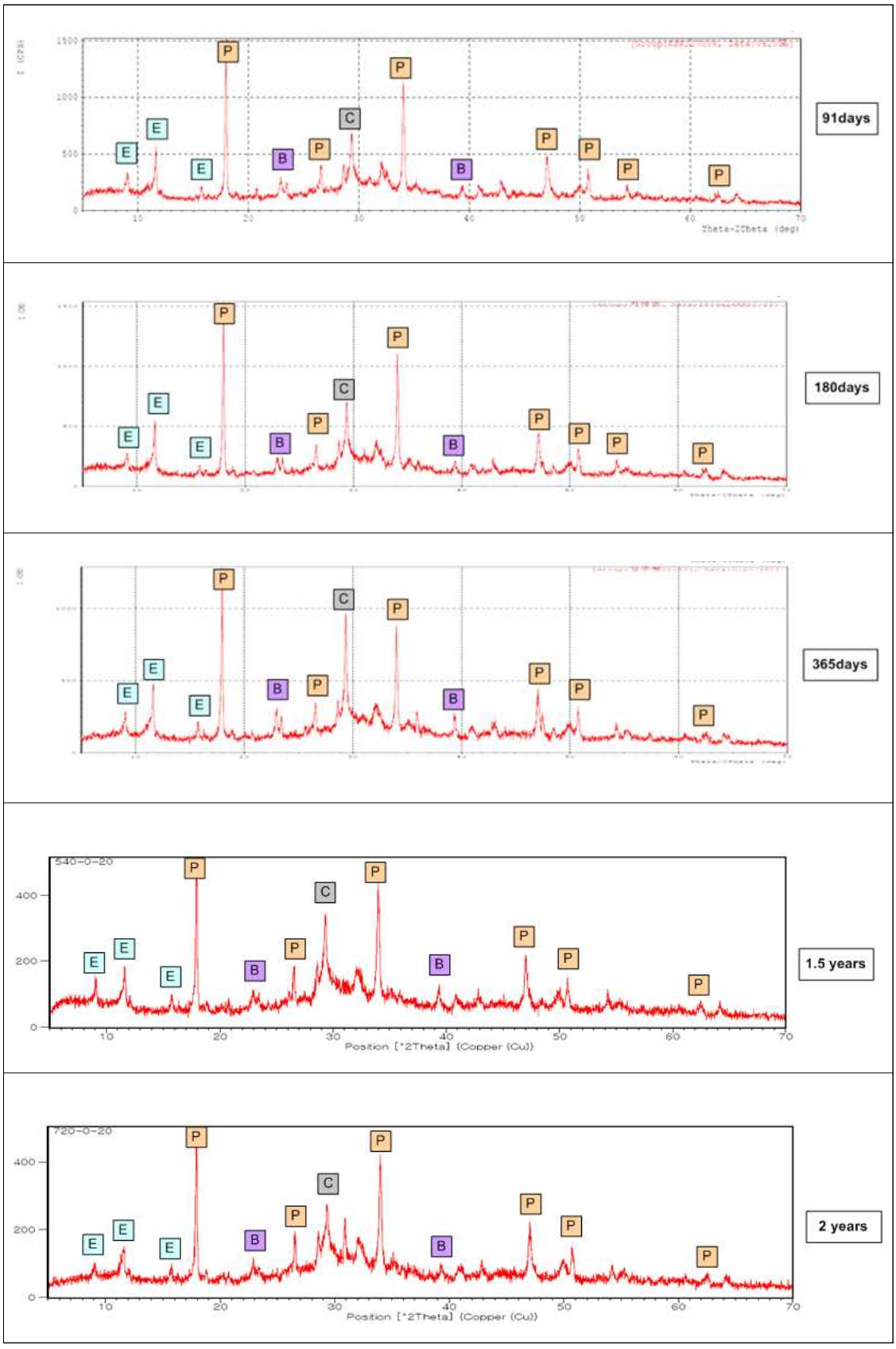
그림 3.4.4 SEM 분석자료(0, 10%-50℃)

마. XRD 분석 결과

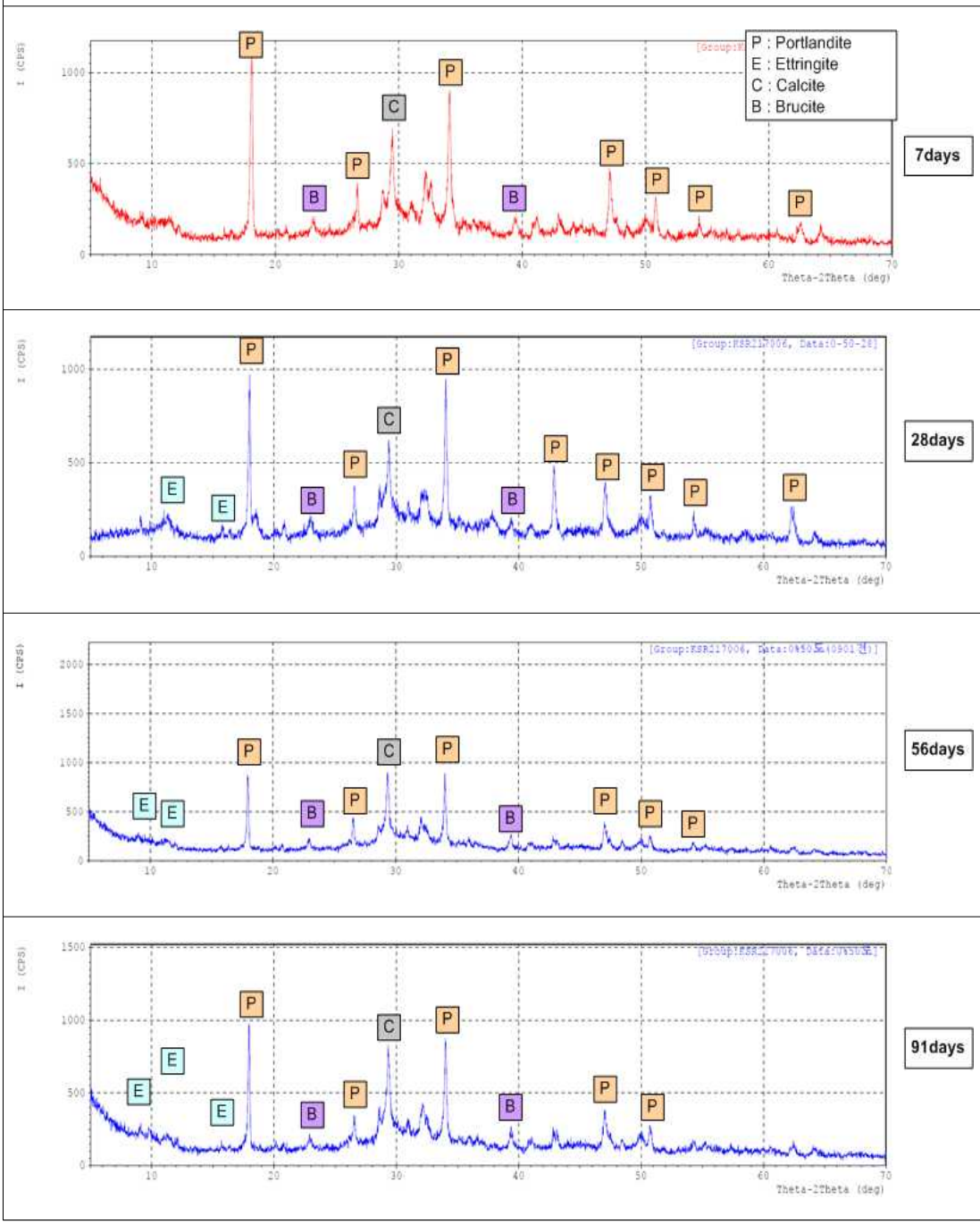
위의 그림은 XRD 분석결과를 종류 및 재령별로 그래프에 나타낸 것이다. MgO를 혼합하지 않은 시멘트 페이스트는 일반적인 OPC의 수화분석 결과와 동일하지만 MgO 혼합 시멘트 페이스트는 아직 반응하지 않은 MgO 성분이 있으며, 재령이 지날수록 MgO는 소모되어 양이 작아지고, 수화 생성물인 $Mg(OH)_2$를 나타내는 Brucite는 그 양이 점점 증가하고 있다.

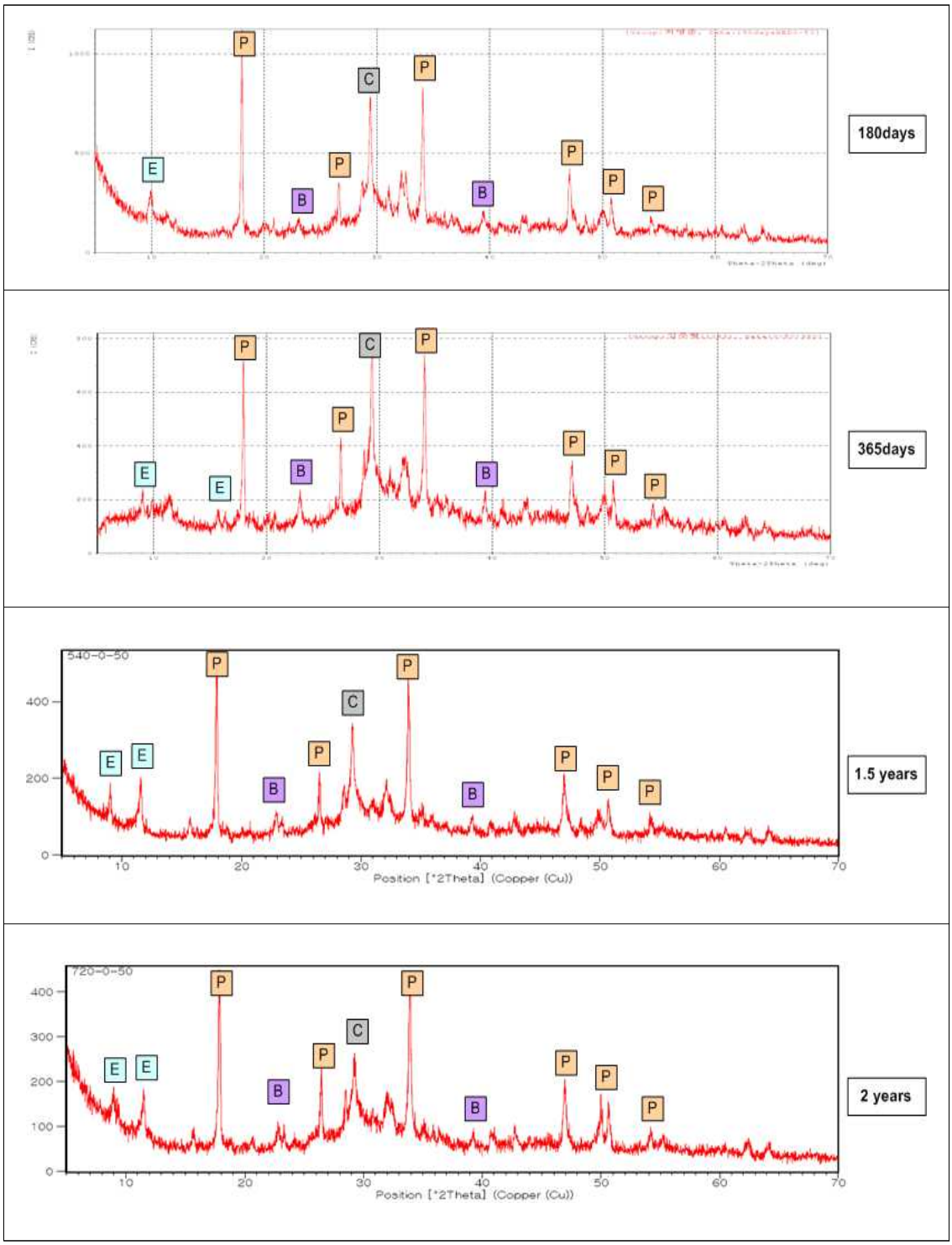
[0%-20℃]



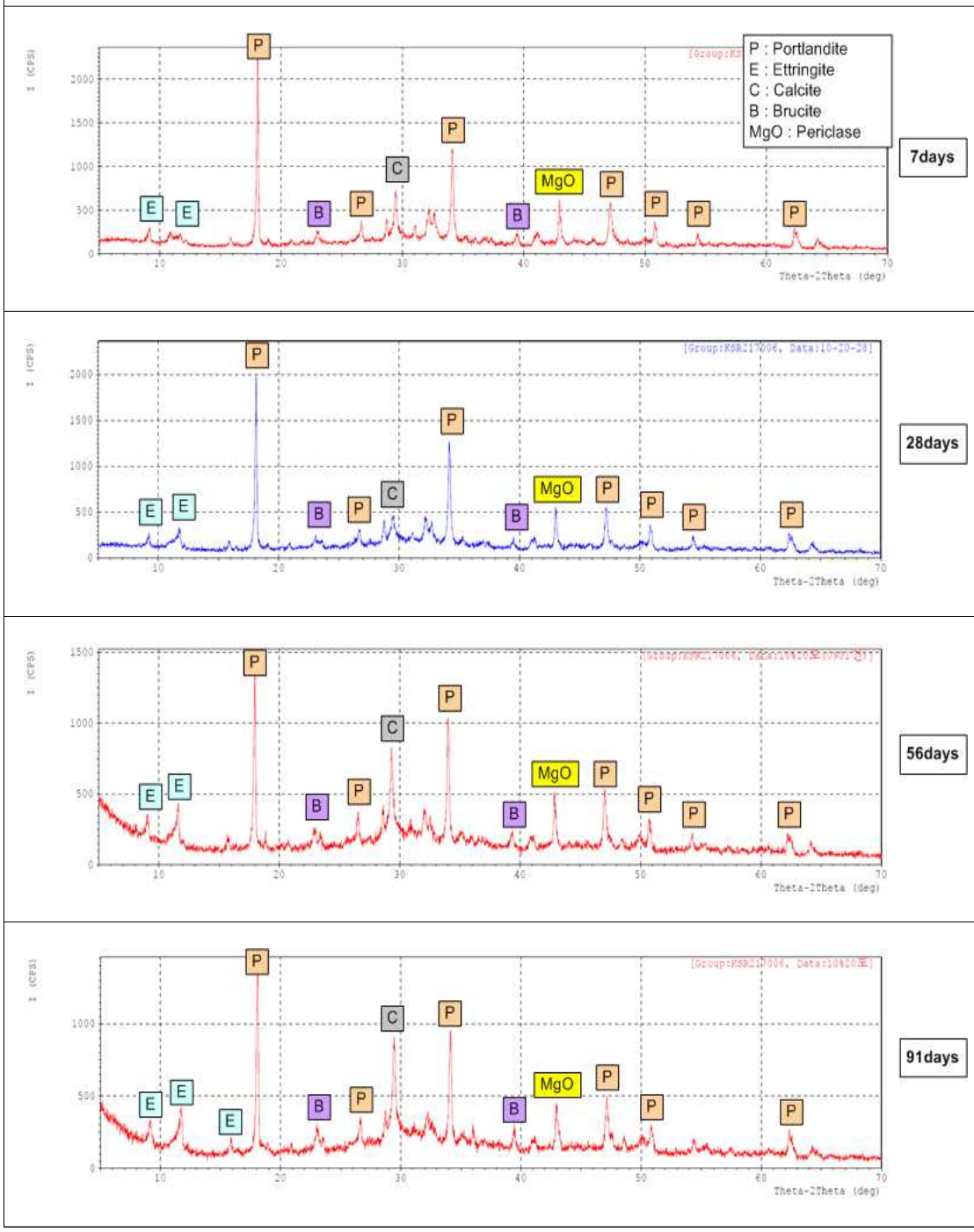

91days
180days
365days
1.5 years
2 years
Position [°2Theta] (Copper (Cu))

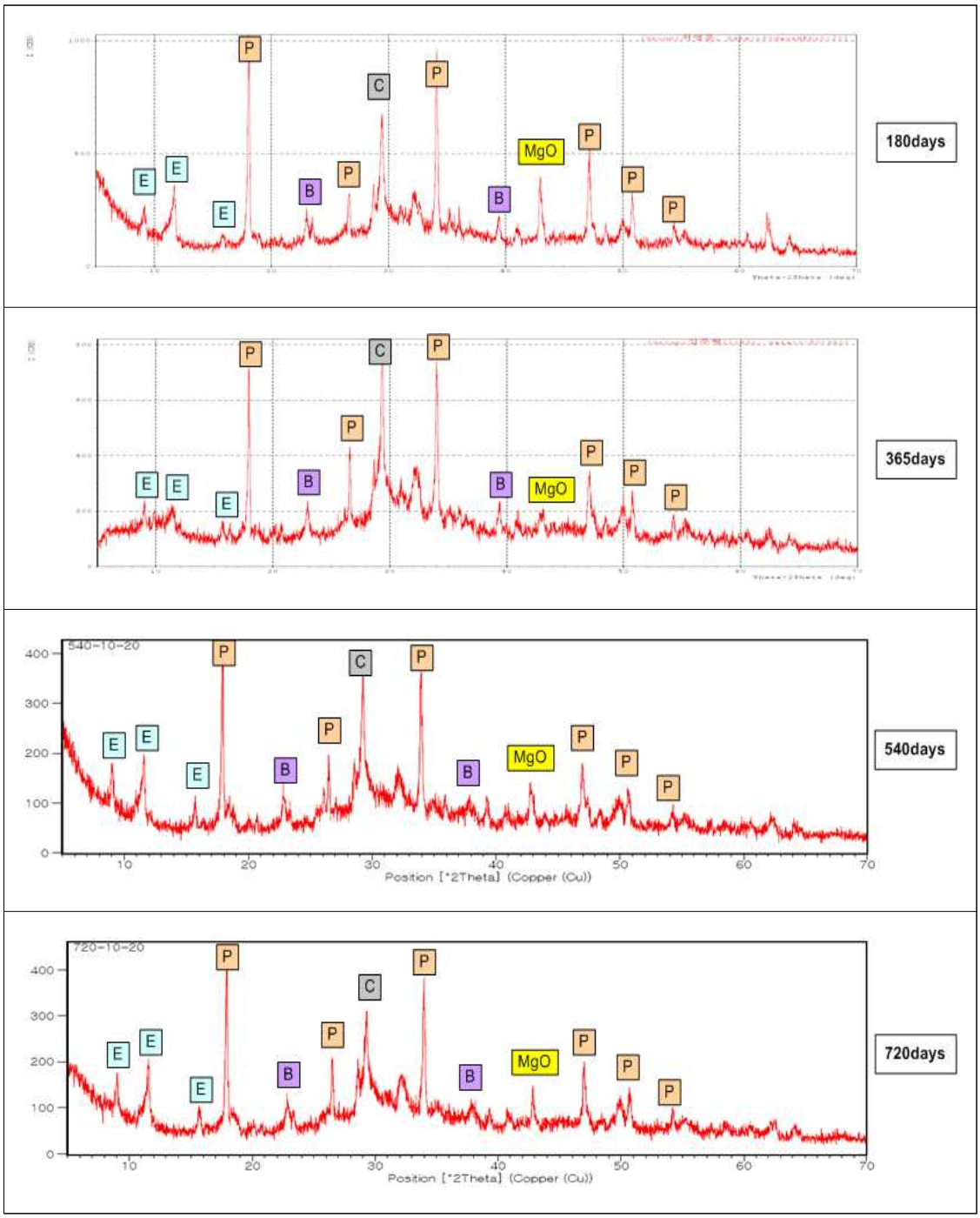
[0%-50℃]


P : Portlandite
E : Ettringite
C : Calcite
B : Brucite
7days
28days
56days
91days
Theta-2Theta (deg)

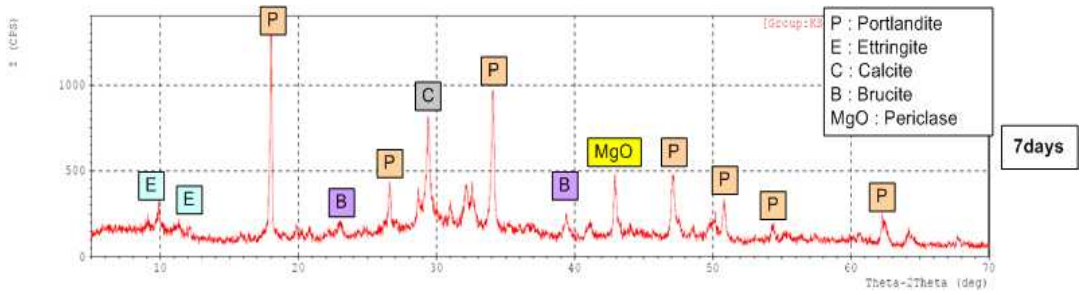

180days
365days
1.5 years
2 years
540-0-50
720-0-50
Position [°2Theta] (Copper (Cu))
Position [°2Theta] (Copper (Cu))

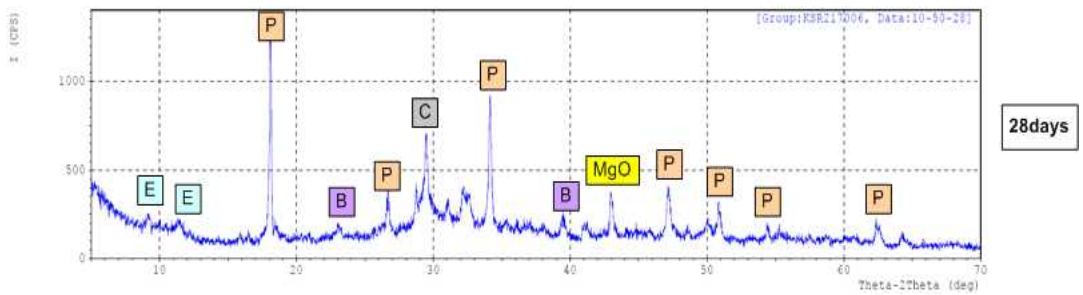
[10%-20℃]

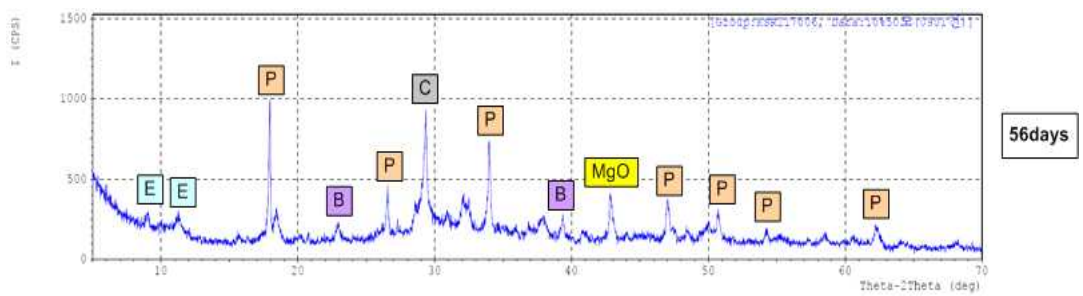

P : Portlandite
E : Ettringite
C : Calcite
B : Brucite
MgO : Periclase
7days
28days
56days
91days
I (CPS)
Theta-2Theta (deg)

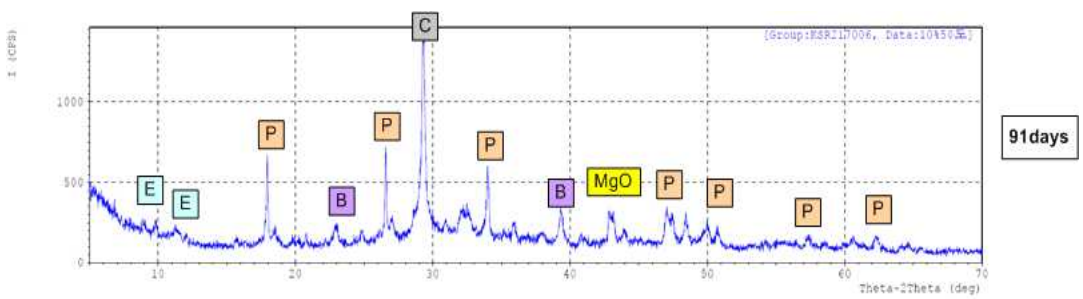

180days
365days
540days
720days
540-10-20
720-10-20
Position [°2Theta] (Copper (Cu))
P
C
E
B
MgO

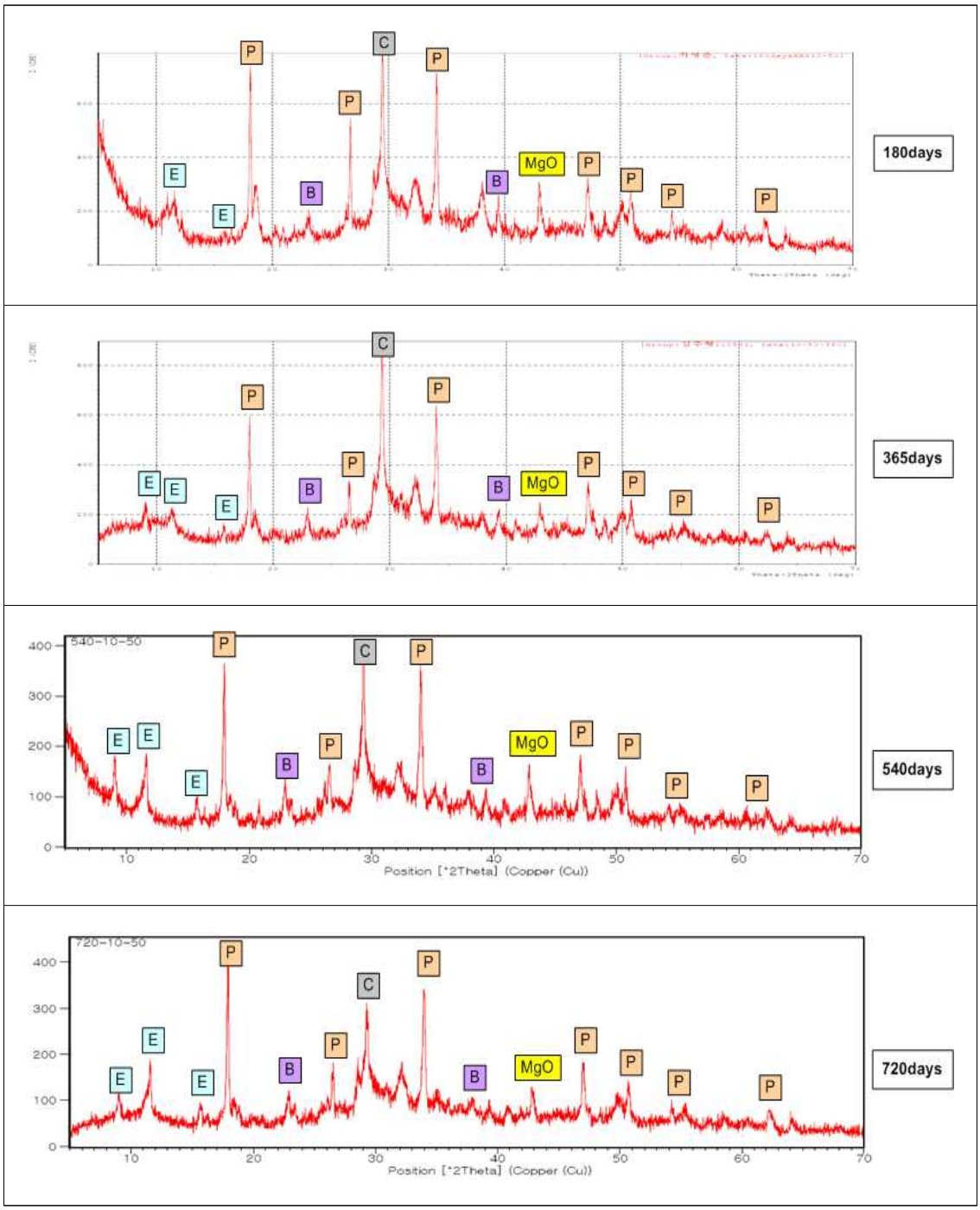
[10%-50℃]


P : Portlandite
E : Ettringite
C : Calcite
B : Brucite
MgO : Periclase
7days
Theta-2Theta (deg)


28days
Theta-2Theta (deg)


56days
Theta-2Theta (deg)


91days
Theta-2Theta (deg)

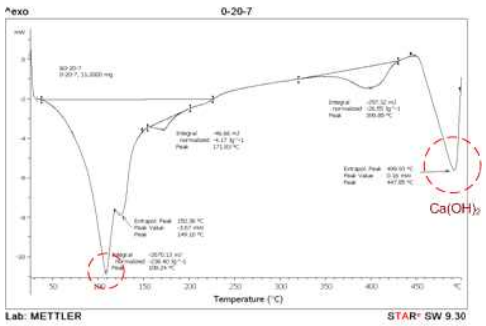
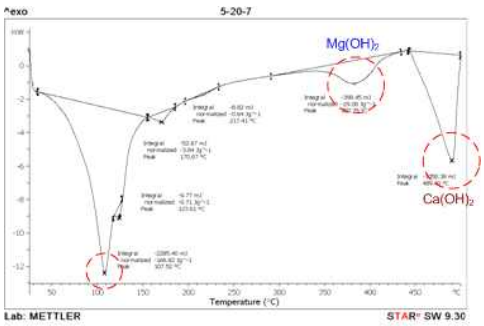
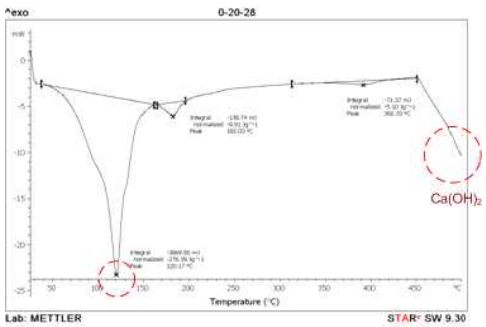
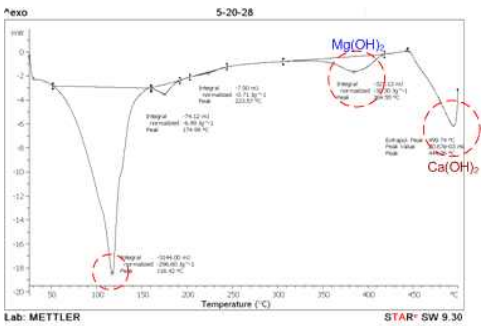
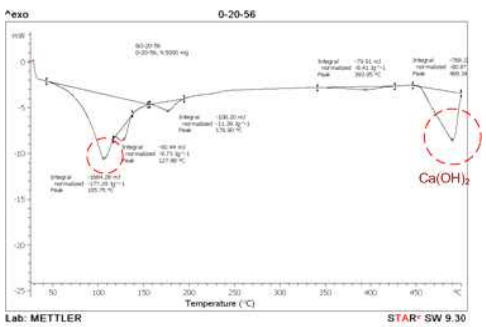
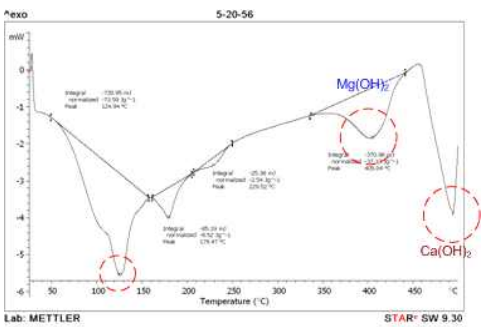


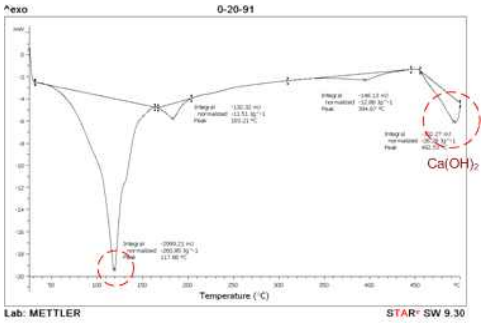
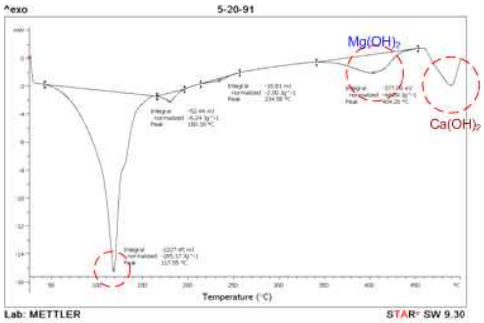
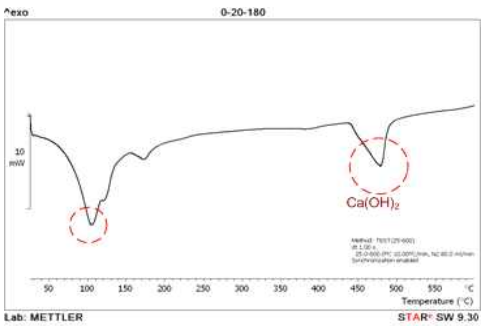
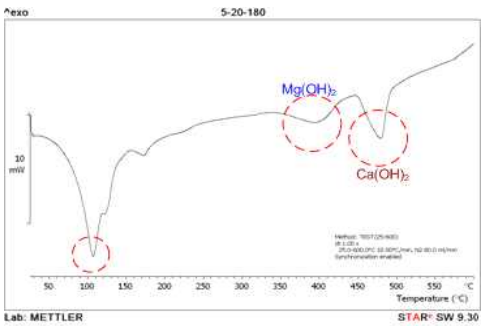
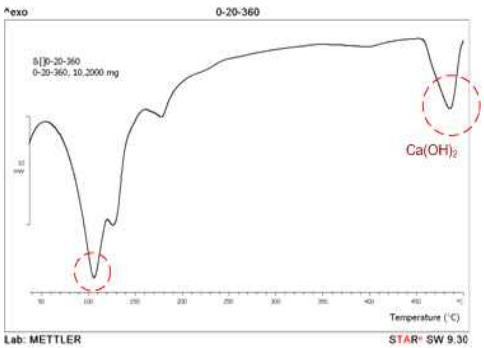
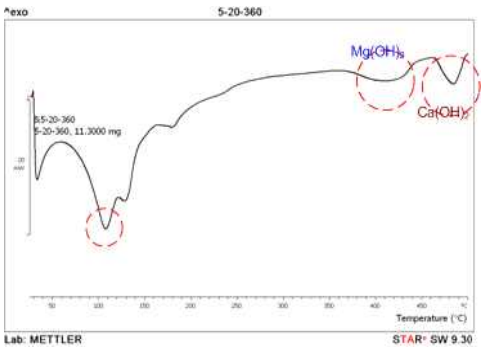
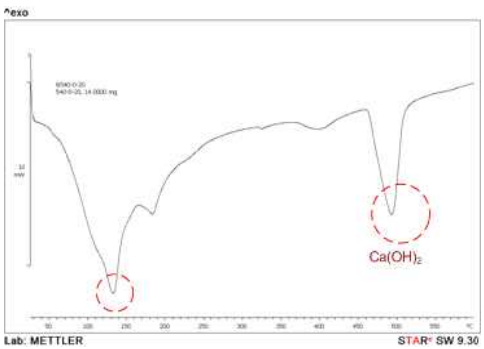
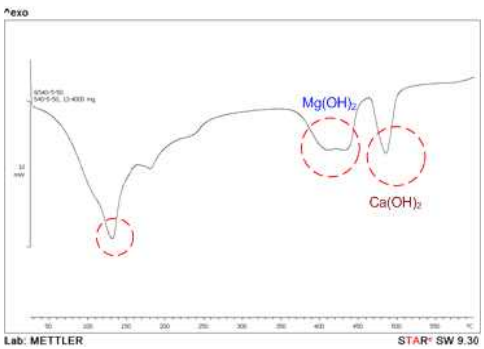
바. DSC 분석 결과

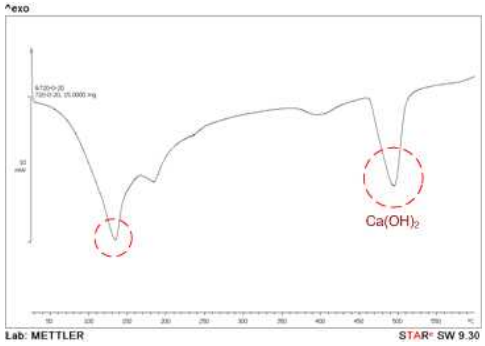
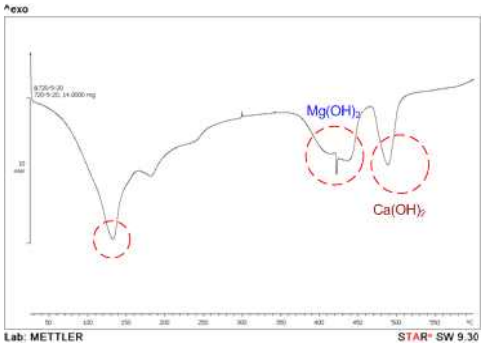
수화생성물인 에트린가이트, $Mg(OH)_2$와 $Ca(OH)_2$는 서로 다른 열분석 곡선을 나타내는데 일반적으로 에트린가이트는 110℃에서 피크점이 발생하며, $Mg(OH)_2$는 370℃정도에서 피크점이 발생하고 $Ca(OH)_2$는 460℃근방에서 피크점이 발생한다. 위의 그림에서 보면 CaO의 수화물($Ca(OH)_2$)은 수화 시작 후 바로 발생하지만

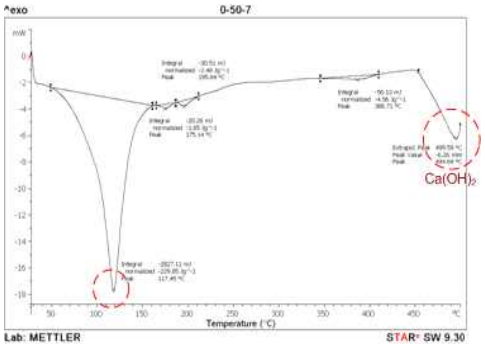
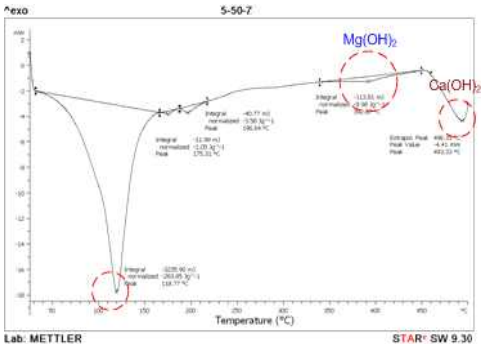
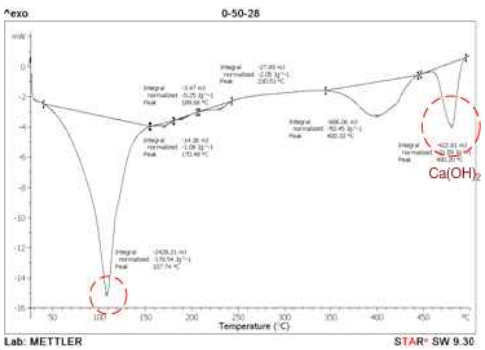
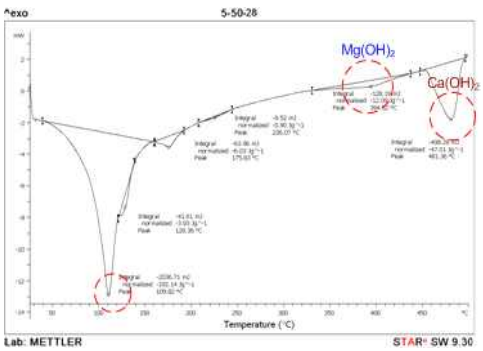
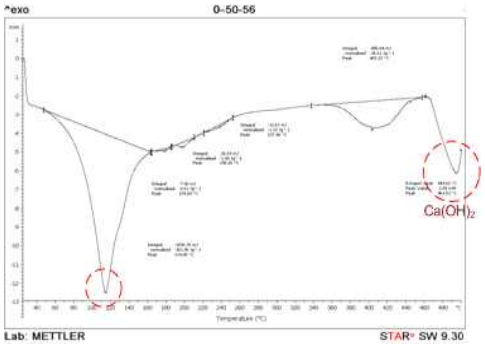
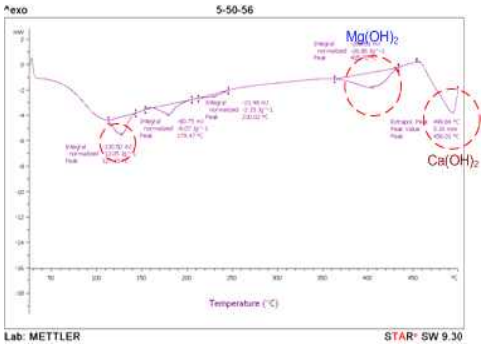
MgO의 수화물($Mg(OH)_2$)은 그에 비해 천천히 발생한다. 따라서 MgO는 재령이 지나감에 따라 곡선의 피크치가 점점 커지고 뚜렷해지며, CaO와는 달리 수화반응이 매우 느린 것을 알 수 있다. 또한 MgO의 수화는 $Mg(OH)_2$를 발생하고 이것은 콘크리트의 팽창으로 나타난다.

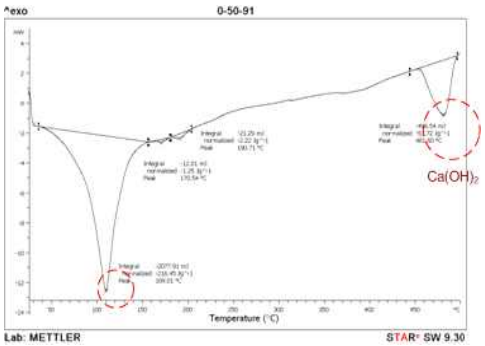
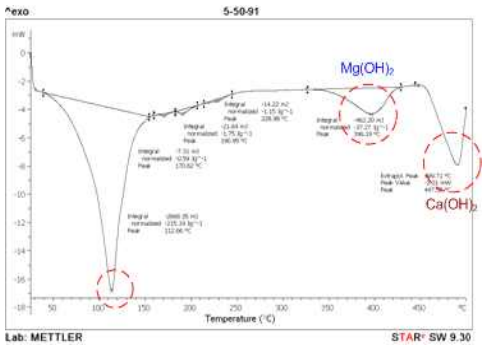
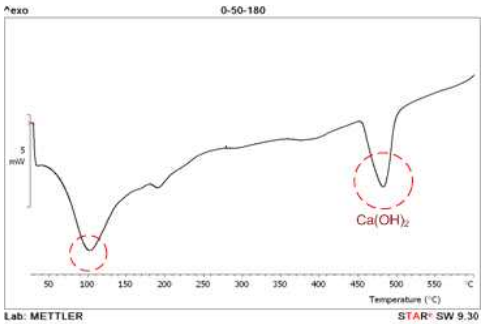
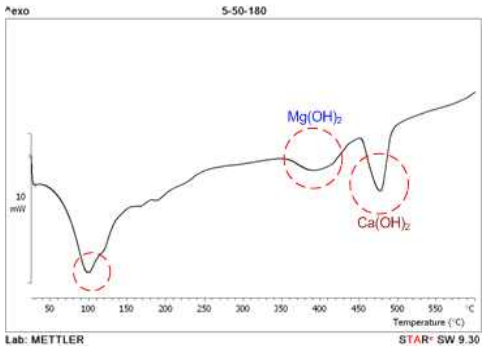
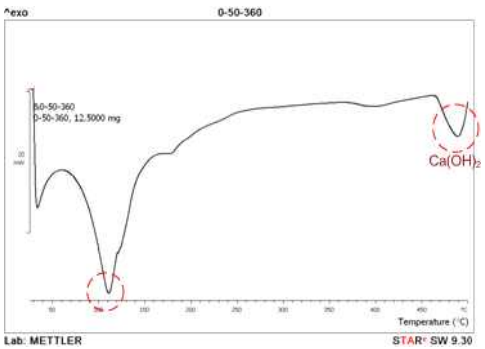
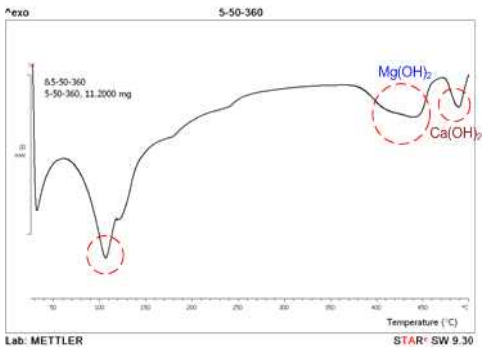
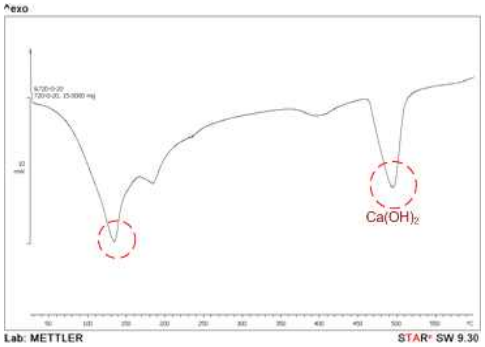
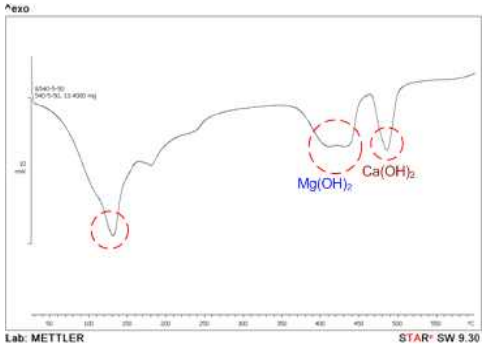
또한, EDS분석을 통해 $Mg(OH)_2$의 성상 및 성분을 확인할 수 있었으며, EDAX분석을 통해서는 $Ca(OH)_2$ 화합물과 일부 MgO 성분을 확인할 수 있었다.

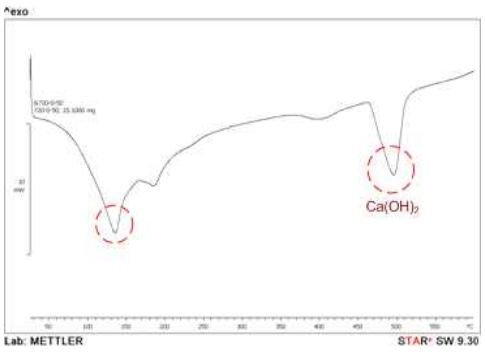
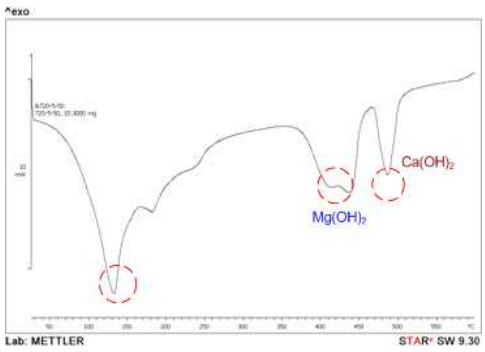
	0%-20℃	5%-20℃
7일		
28일		
56일		

91일		
180일		
360일		
1.5년		

2년		

	0%-50℃	5%-50℃
7일		
28일		
56일		

91일		
180일		
360일		
1.5년		

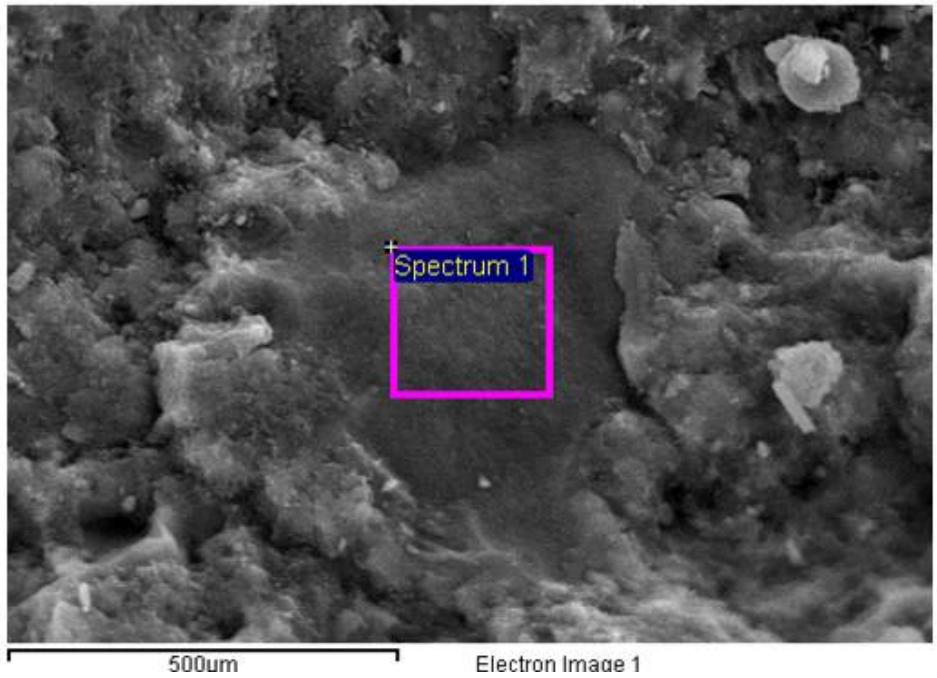
2년	 ^exo Ca(OH)2 Lab: METTLER STARe SW 9.30	 ^exo Mg(OH)2 Ca(OH)2 Lab: METTLER STARe SW 9.30

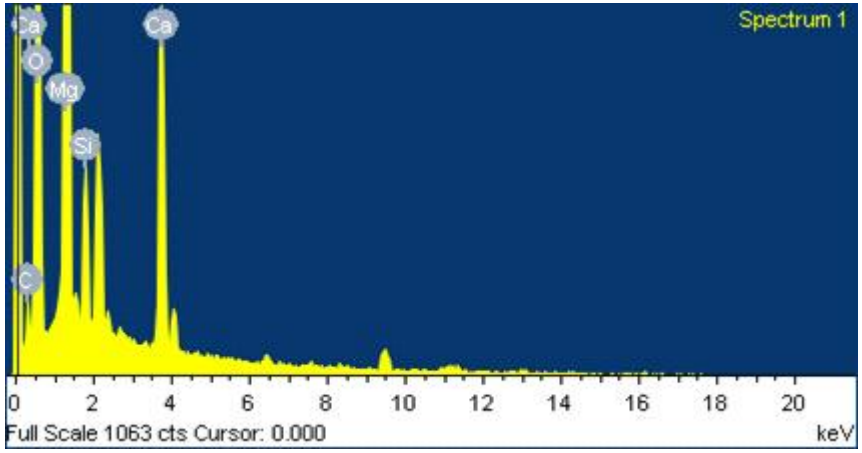
Spectrum processing :
Peaks possibly omitted : 2.073, 2.320, 6.390, 9.427, 12.970 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 4

Standard :
C CaCO3O
SiO2
Mg MgO
Si SiO2
Ca Wollastonite

Element	Weight%	Atomic%
C K	3.34	5.16
O K	57.06	66.17
Mg K	33.45	25.52
Si K	1.53	1.01
Ca K	4.62	2.14
Totals	100.00	



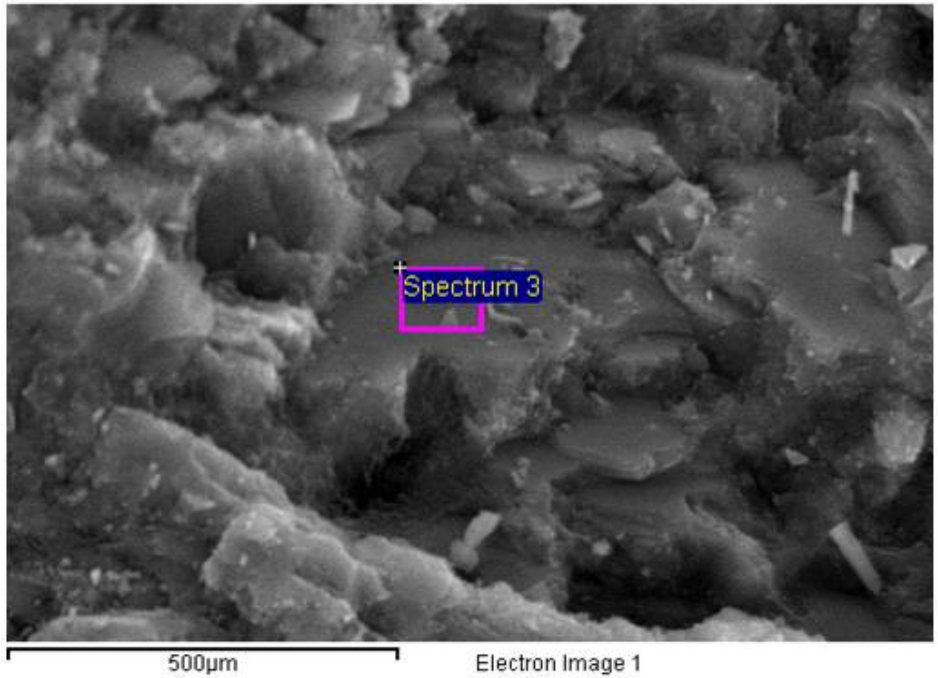


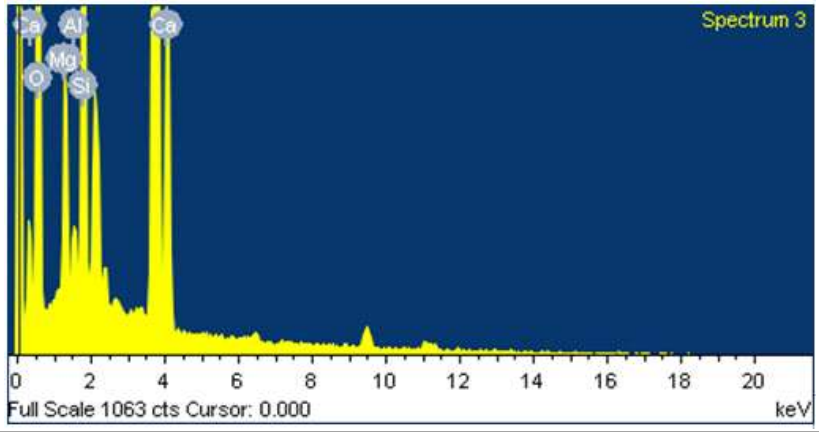
Spectrum processing :
Peaks possibly omitted : 2.075, 2.328, 9.430, 11.032, 12.580 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 5

Standard :
O SiO2
Mg MgO
Al Al2O3
Si SiO2
Ca Wollastonite

Element	Weight%	Atomic%
O K	59.29	76.99
Mg K	2.54	2.17
Al K	0.45	0.35
Si K	4.27	3.16
Ca K	33.44	17.33
Totals	100.00	





4. 시멘트 제조사별 MgO 혼입콘크리트의 팽창특성

가. 개요

국내에서 생산된 제조사별 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 대상으로 MgO 팽창재와 Fly-ash를 혼입한 시험체를 제작하고 6개 재령별(최대 1년)로 수화 생성물 분석 시험을 실시하였다.

국내 시멘트 제조회사 2개사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 이용하여, 플라이애쉬 20%로 치환한 결합재에 MgO를 혼입한 후 MgO 혼입량에 따른 수화생성물의 미세구조 변화특성을 알아보는 것을 목적으로 시험을 실시하였다. 각 시멘트 제조사별로 양생온도와 MgO 혼입량을 변화시켜 재령 7일, 28일, 56일, 91일, 180일 그리고 1년에 대하여 미세구조 특성 및 수화생성물 분석을 실시하였다. 재령 1년 동안 재령별 압축강도 시험, XRD, SEM, DSC 분석 시험을 실시하였다. Autoclave 안정도 시험은 MgO 혼입량 0%, 3%, 5%에 대하여 분석을 실시하였다. 표 3.4.6에 분석에 사용된 각 시험방법별 시험변수를 기술하였다.

표 3.4.6 시험항목 및 변수

시험항목	시험변수	
XRD분석	시멘트 2종류 (제조회사별 OPC)	MgO치환율 : 0, 10% 양생온도 : 20, 30, 40℃ 재령 : 7, 28, 56, 91, 180, 360일
SEM분석		MgO치환율 : 0, 10% 양생온도 : 20, 30, 40℃ 재령 : 7, 28, 56, 91, 180, 360일
DSC분석		MgO치환율 : 0, 5% 양생온도 : 20, 30, 40℃ 재령 : 7, 28, 56, 91, 180, 360일
오토크레이브 안정도시험		MgO치환율 : 0, 3, 5%

나. 배합 및 시험체 제작

(1) Mortar Mixing

국내에서 생산되는 두 개 사의 1종 보통 포틀랜드시멘트에 대한 배합계획을 표3.4.7에 나타내었다. 잔골재는 주문진 표준사를 사용하였으며, Fly-ash는 시멘트 중량의 20%를 혼입하였다. Fly-ash의 성분분석표는 표 3.4.8에 나타내었다. MgO는 시험계획에 따라 0%, 5%, 10%를 혼입하였다.

표 3.4.7 시험에 사용된 모르터르 배합표

시험 방법	*번호	양생온도 (℃)	재령	시편 수	배합비(%)			시료량(g)		
					OPC	Fly ash	MgO	OPC	Fly ash	MgO
SEM, XRD, DSC	A0	20	7, 28, 56, 91, 180, 360일	12	80	20	0	608	152	0
	A0	40								
DSC	A5	20		18	75	20	5	570	152	38
	A5	30								
	A5	40								
SEM, XRD, DSC	A10	20		12	70	20	10	532	152	76
	A10	40								
SEM, XRD, DSC	B0	20	7, 28, 56, 91, 180, 360일	12	80	20	0	608	152	0
	B0	40								
DSC	B5	20		18	75	20	5	570	152	38
	B5	30								
	B5	40								
SEM, XRD, DSC	B10	20		12	70	20	10	532	152	76
	B10	40								

*A0 : A cement, MgO 0%인 시멘트종류
1) 1일 습기함 양생 후 탈형, 각 양생온도별 수조양생을 실시한다.
2) 재령도달 시험체의 처리는 압축강도를 측정하고 아세톤으로 수화정지 한다.
3) A0, A3, A5 시편에 대해 Autoclave test를 실시한다.
4) 각 재령별 압축강도시험을 실시한다.
5) 시멘트는 시험기관의 제품을 제외한 2개 제조회사의 OPC를 사용한다.

표 3.4.8 Fly-ash 성분분석표

구 분	SiO2	Al2O3	TiO2	P2O5	Fe2O3	CaO	MgO	K2O	Na2O	LOI	분석방법
삼천포 -F/A	49.82	23.96	1.10	0.87	7.64	7.89	3.13	1.11	0.49	3.99	XRF

(2) 시험체 제작

모르타르 시험체의 제조는 전동 혼합기를 사용하여 KS L 5109 (수경성 시멘트 반죽 및 모르타르의 기계적 혼합 방법)에 따라 혼합하였고, 실험계획에 따라 디지털 저울로 정밀하게 재료량을 계량하여 배합하였다. 배합된 모르타르의 압축강도 공시체 제작은 배합별로 50×50×50 mm의 공시체를 각 배합별로 3개씩 제작하였다. 1일 습기함 양생 후 탈형하여 각 양생온도별 (20℃, 30℃, 40℃) 수조양생을 실시하였다. 그림 3.4.5은 시험체의 제작과정을 나타내고 있다. 재령에 도달한 시험체에 대해서는 압축강도를 측정한 후 아세톤으로 수화정지하여 분석을 실시하였다.

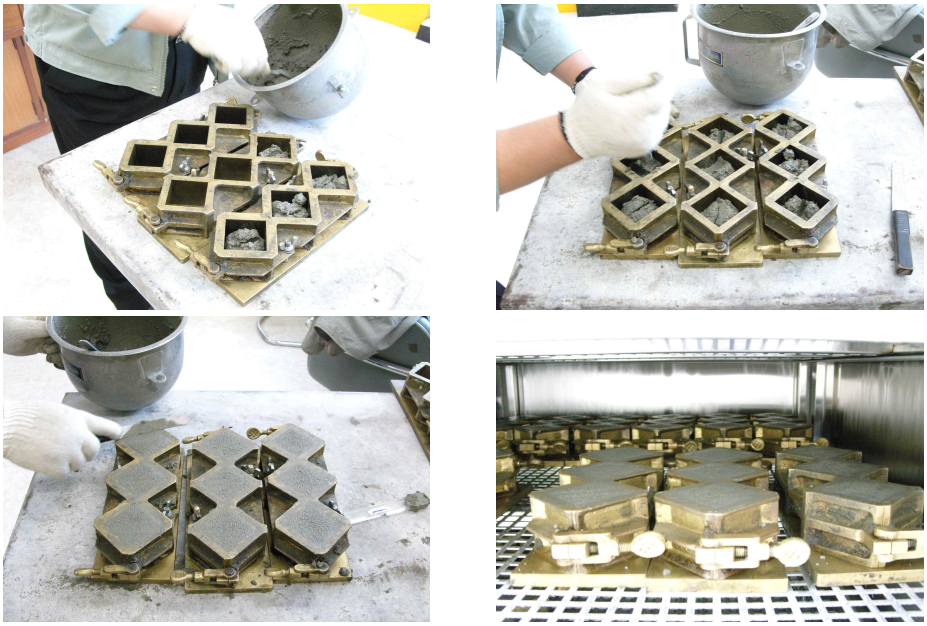


그림 3.4.5 시험체 제작과정

다. 시험결과 및 분석

(1) 재령별 압축강도

KS L ISO 179 방법에 따라 Mortar 제작 후 1일간 습기함에서 양생을 실시하고 탈형 후 습윤양생(양생온도 20, 30, 40℃)을 실시하고 재령별로 압축강도를 측정하였다. 측정된 재령별 압축강도는 표 3.4.9에 나타내었다. 그림 3.4.6과 그림 3.4.7에는 A, B시험체의 재령별 압축강도 추이를 도시하였다. 또한, 각 재령별 압축강도 추이는 그림 3.4.8~3.4.13에 도시하였다.

- 온도에 의한 강도변화

양생온도가 증가하면 수화 재령 91일 까지 압축강도가 증가하나, 180일 이상의 장기재령에서는 오히려 감소한다. 이러한 결과는 강도 향상을 위해서 증기양생이나 고온양생을 할 경우 초기강도는 증가하나 장기재령에서는 강도 증진율이 떨어지는 현상과 유사한 것으로 판단된다.

- MgO의 영향

MgO 함량이 5%에서 10%로 증가함에 따라 압축강도는 전반적으로 감소하였다. 일반적으로 시멘트 수화반응시 Ca(OH)2가 생성된 후 CSH, Ettringite의 수화물로 전이되어 미세조직이 치밀해지며 강도가 증가하는 경향을 나타낸다. 그러나 이런 현상과 달리 MgO를 첨가할 경우, Mg(OH)2의 생성으로 인해 시멘트 수화물 생성량이 줄어드는데 반해 Mg(OH)2의 체적은 증가하게 되어 수화조직이 치밀해지지 못하는 것으로 판단된다.

표 3.4.9 재령별 압축강도 측정치

시험체	7ds	28ds	56ds	91ds	180ds	360ds
A0-20	25.25	39.03	43.78	51.94	57.30	59.86
AO-40	32.86	43.47	48.71	51.74	54.24	54.18
A5-20	24.04	35.00	40.76	43.36	50.55	53.46
A5-30	27.68	38.45	43.97	45.30	48.00	49.44
A5-40	26.12	40.66	44.73	48.39	47.26	46.43
A10-20	20.72	31.78	37.27	40.50	46.41	50.00
A10-40	26.32	37.73	41.65	42.73	38.65	37.06
B0-20	28.52	36.47	41.99	45.81	52.76	56.24
B0-40	33.81	41.28	44.52	44.19	48.60	48.86
B5-20	25.55	34.57	40.88	44.84	49.88	54.71
B5-30	26.89	35.08	40.98	44.76	48.01	48.50
B5-40	27.15	40.40	45.60	47.79	47.24	49.98
B10-20	24.68	30.72	35.87	40.97	47.05	49.70
B10-40	26.19	34.97	40.57	40.35	38.41	36.79

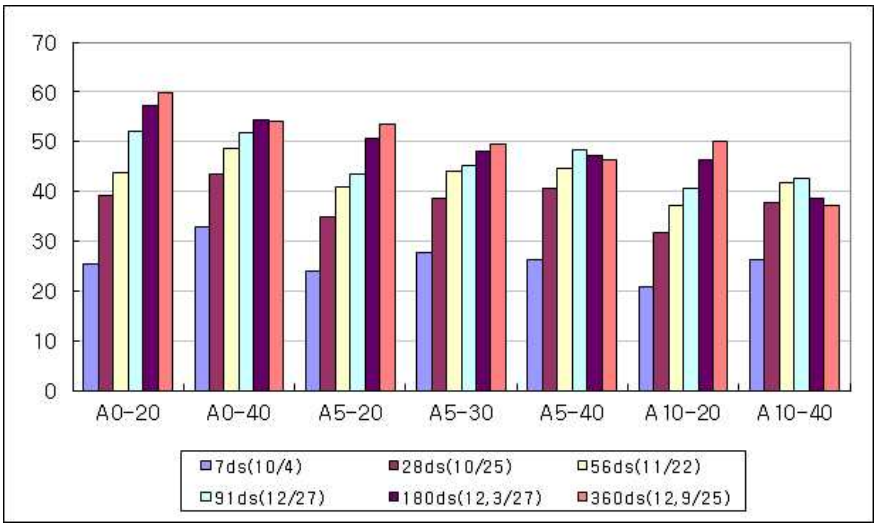


그림 3.4.6 각 재령별 압축강도 추이(A시험체)

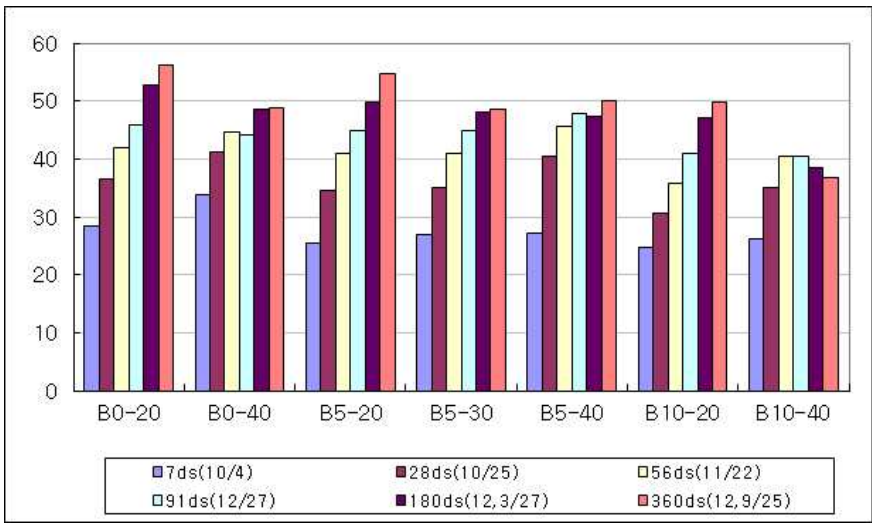


그림 3.4.7 각 재령별 압축강도 추이(B시험체)

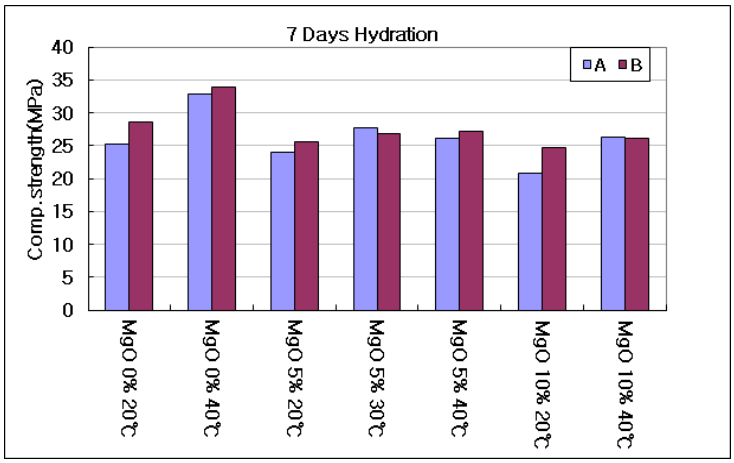


그림 3.4.8 7일 강도

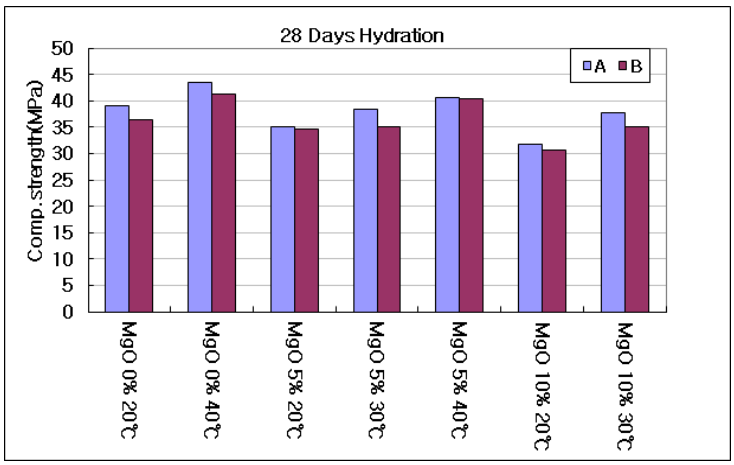


그림 3.4.9 28일 강도

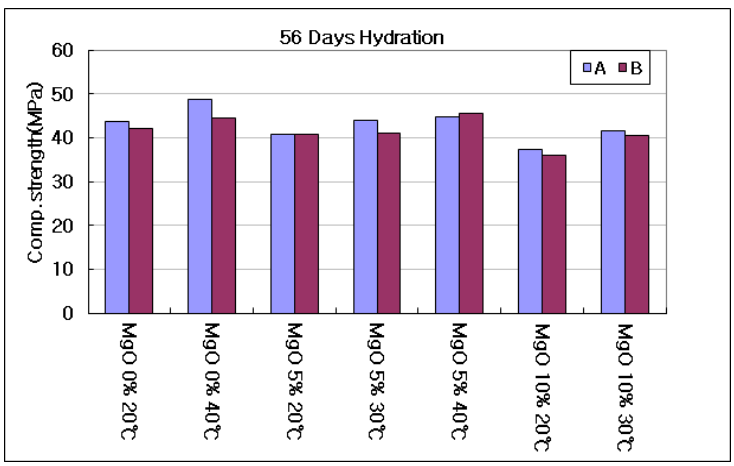


그림 3.4.10 56일 강도

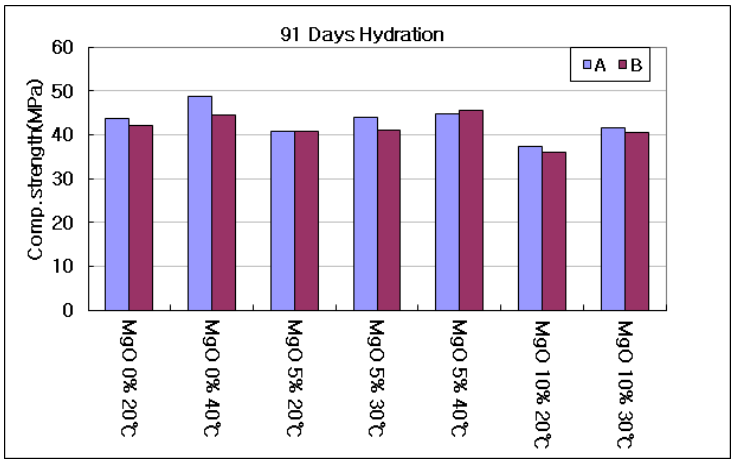


그림 3.4.11 91일 강도

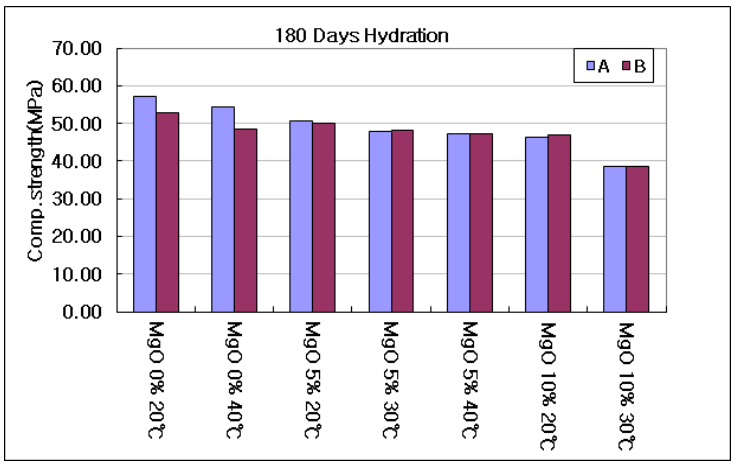


그림 3.4.12 180일 강도

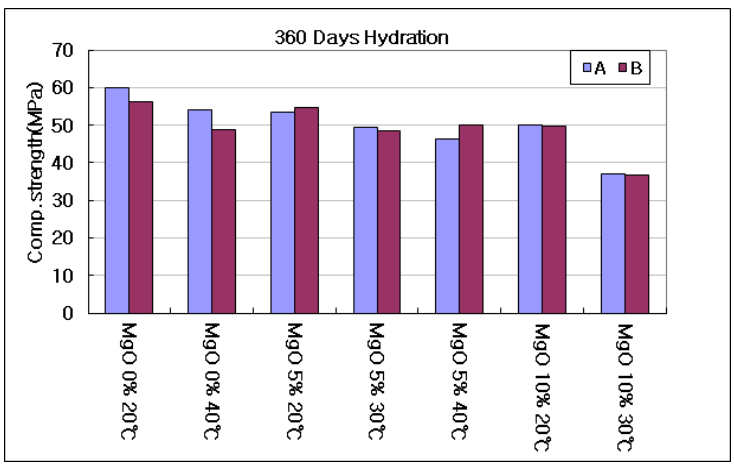


그림 3.4.13 360일 강도

(2) SEM 시험

일본 Topcon社의 FE－SEM(Field Emission Scanning Microscope, D150F)를 이용하여 미세구조를 관찰하였다. MgO를 사용하지 않은 시료와 비교 분석한 결과 7, 28, 56일 수화물은 전형적인 시멘트 수화조직과 같게 나타냈으며 Fly Ash 입자를 다량 확인 할 수 있었다. 91일 이후 시료에서는 $Mg(OH)_2$ 입자의 팽창에 의해 Pop-Up 된 것과 같은 미세조직이 관찰되었다. 그림 3.4.14는 MgO 10%, 양생온도 40℃, 재령 91일에서의 A시험체에 대한 SEM 사진을 나타내며, 그림 3.4.15은 MgO 0%, 양생온도 20℃, 재령 360일에서의 A시험체에 대한 SEM 사진을 나타낸다.

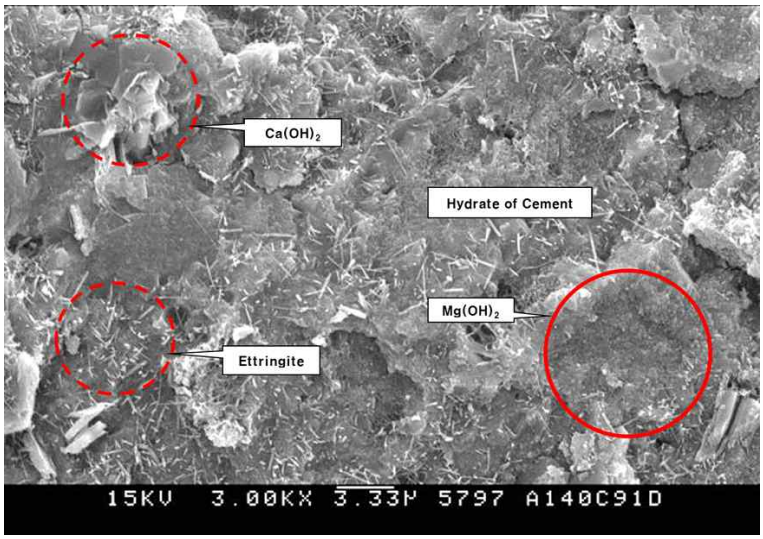


그림 3.4.14 A10-40℃-91days SEM 사진

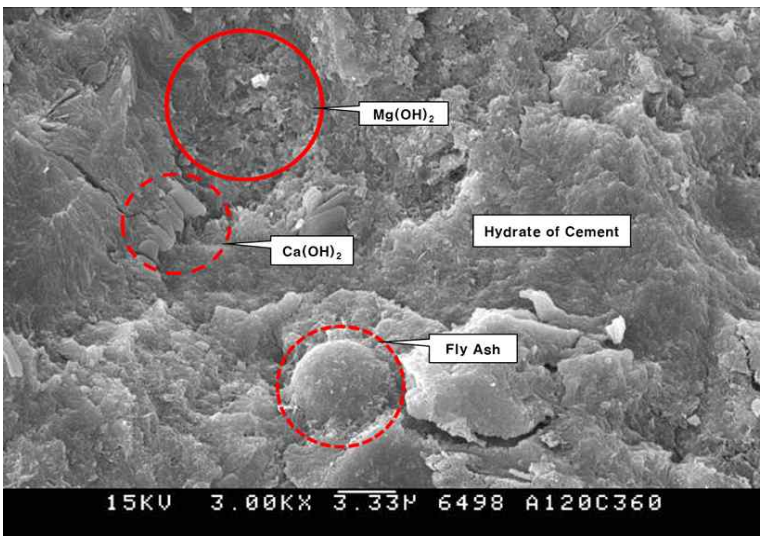
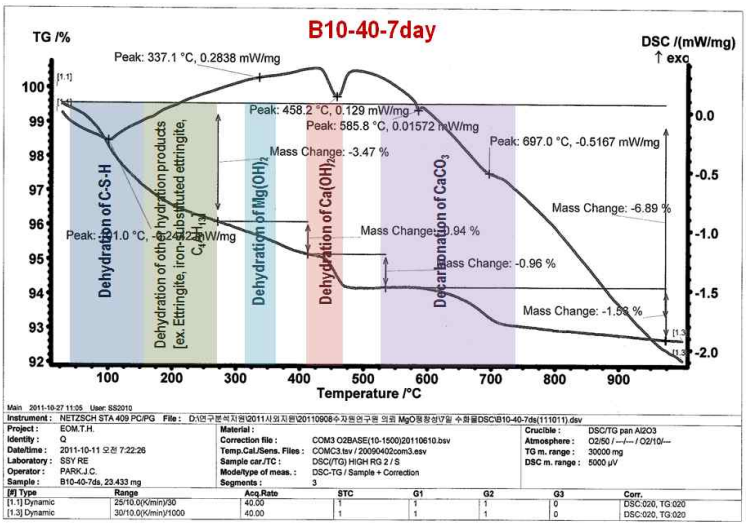


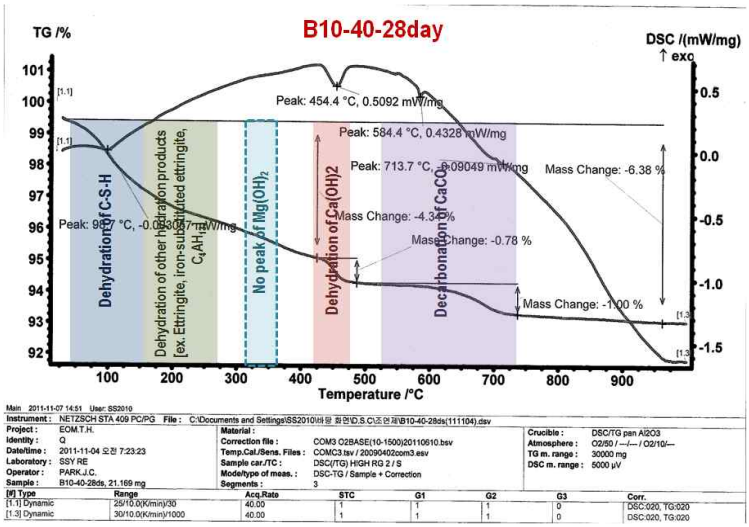
그림 3.4.15 A0-20℃-360days SEM 사진

(3) DSC 시험

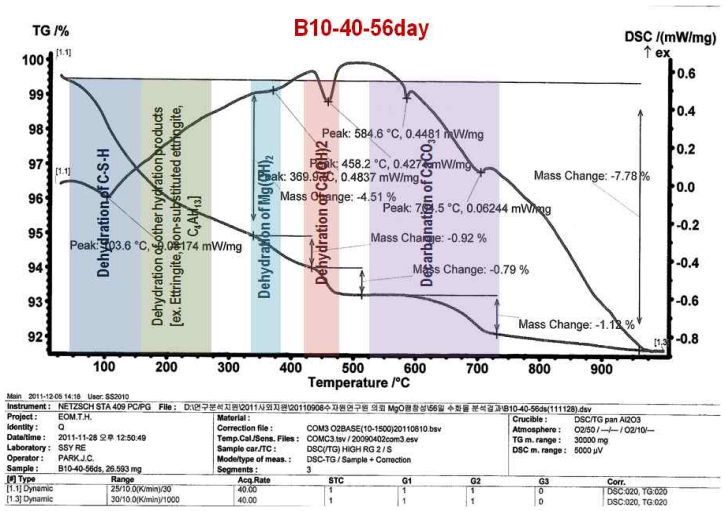
독일 Netzsch社의 TG-DSC(Thermo Gravimetric Differential Scanning Calorimeter, STA409PC)를 이용하여 시차열 중량분석을 실시하였다. 분석하고자 하는 샘플에 대하여 TG 및 DSC 분석을 동시에 수행할 경우, peak의 위치, 크기 및 질량 변화를 통해 샘플 내 열적 물리화학적 특성이 두드러지는 구성 물질에 관하여 정성 및 정량화가 가능하다. 일반적으로 분석 자료를 통해 얻어진 peak에 관한 정보는 peak의 크기차이는 있지만 위치차이는 동일하므로 peak에 관한 정보는 대표적인 분석 자료를 이용하여 분석을 실시하였으며 360일까지의 대표 분석 자료를 그림 3.4.16 ~ 그림 3.4.18에 나타내었다.



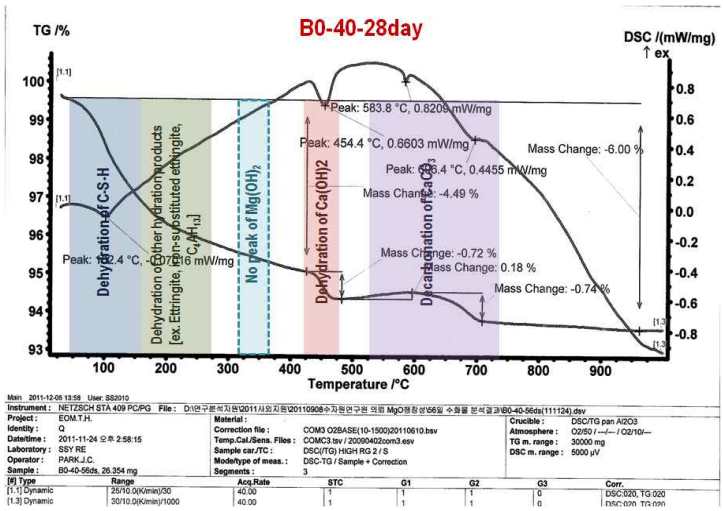
(a) B10-40℃-7days 에 대한 대표 분석자료



(b) B10-40℃-28days 에 대한 대표 분석자료



(c′) B10-40℃-56days 에 대한 대표 분석자료



(d) B0-40℃-28days 에 대한 대표 분석자료

그림 3.4.16 B cement에 대한 대표 분석자료(7, 28, 56일)

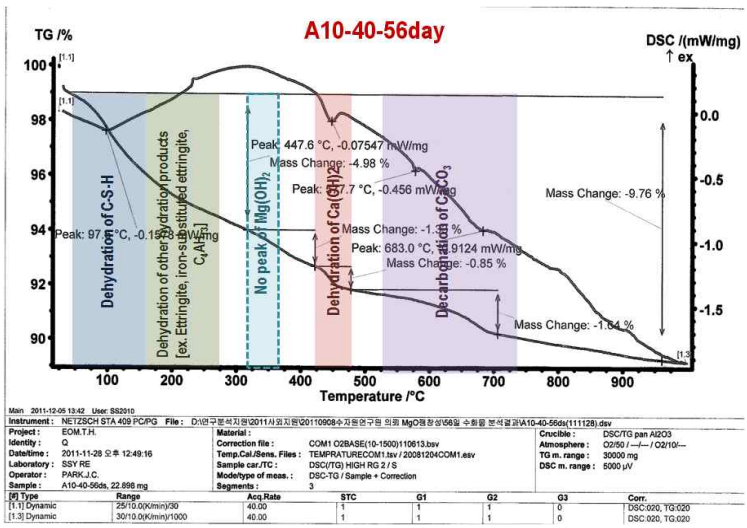
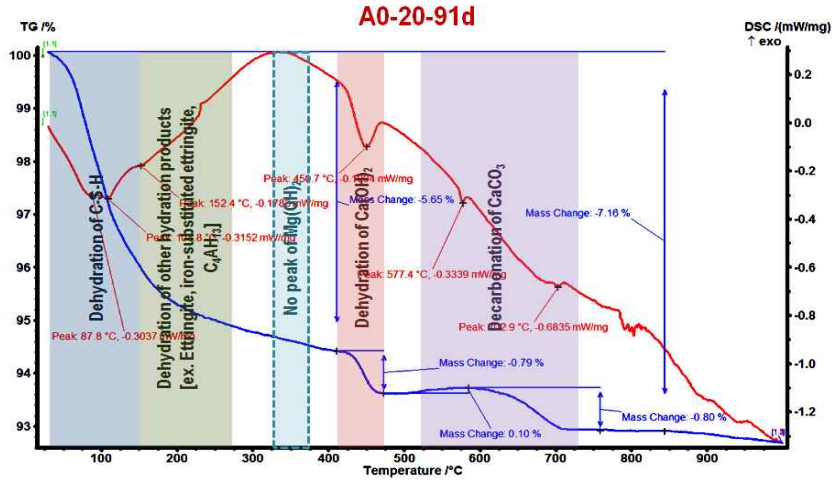
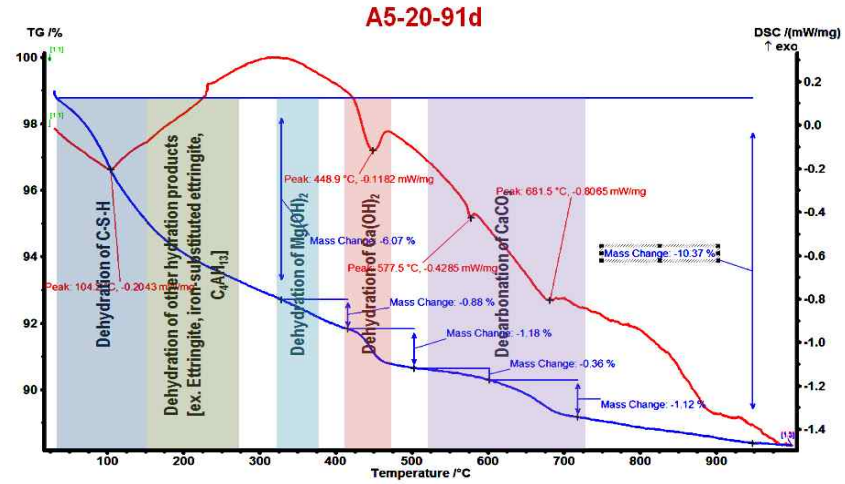


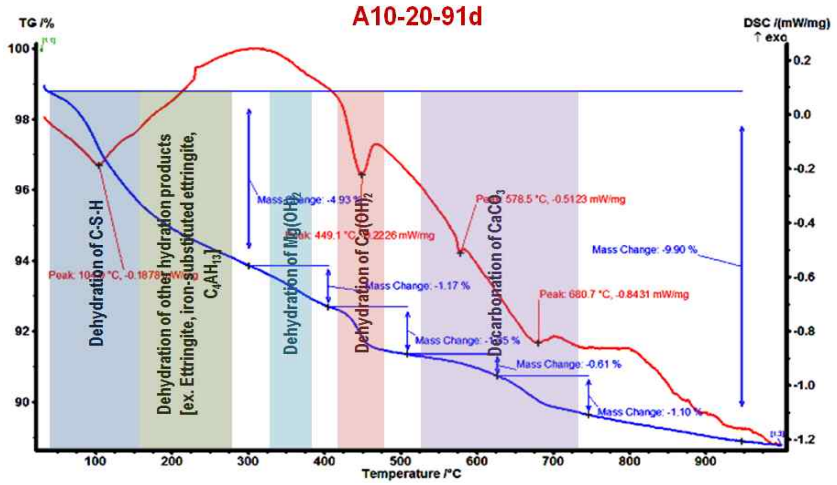
그림 3.4.17 A cement(40℃-56days)에 대한 대표 분석자료



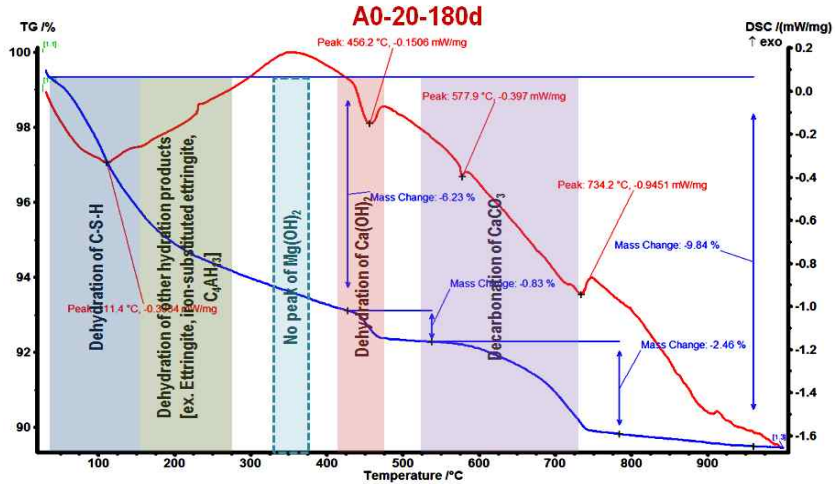
(a) A시멘트, MgO 함량 0%, 20℃에서 91일 양생한 샘플의 TG-DSC 결과



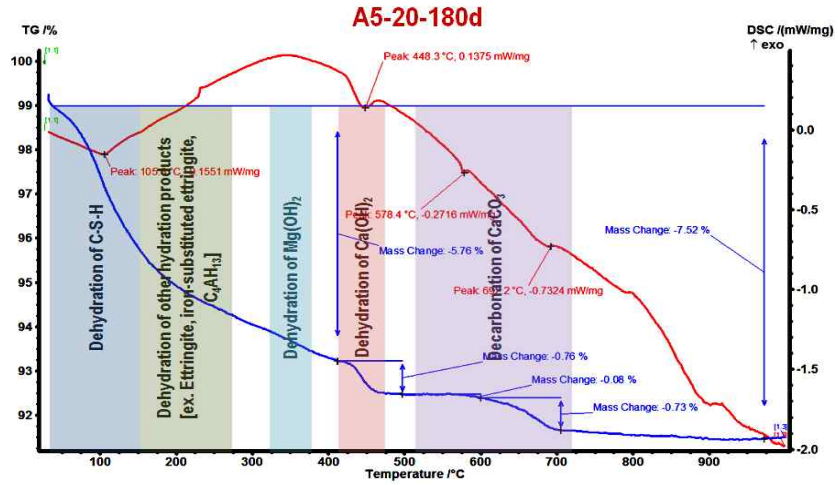
(b) A시멘트, MgO 함량 5%, 20℃에서 91일 양생한 샘플의 TG-DSC 결과



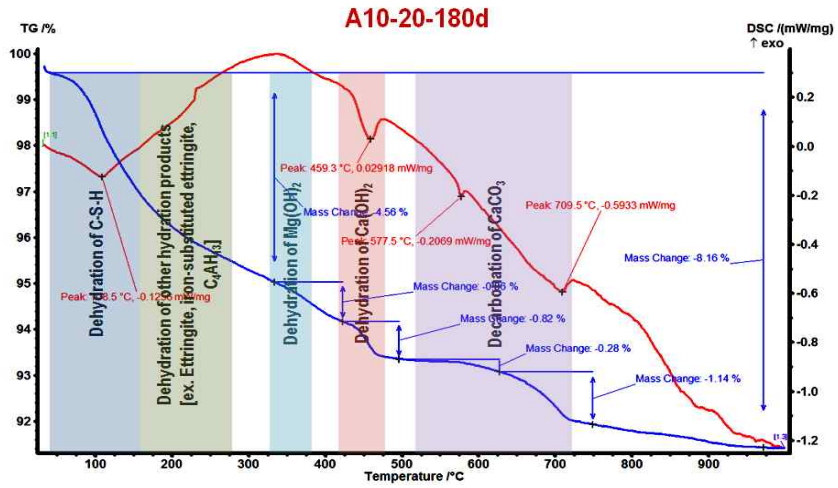
(c) A시멘트, MgO 함량 10%, 20℃에서 91일 양생한 샘플의 TG-DSC 결과



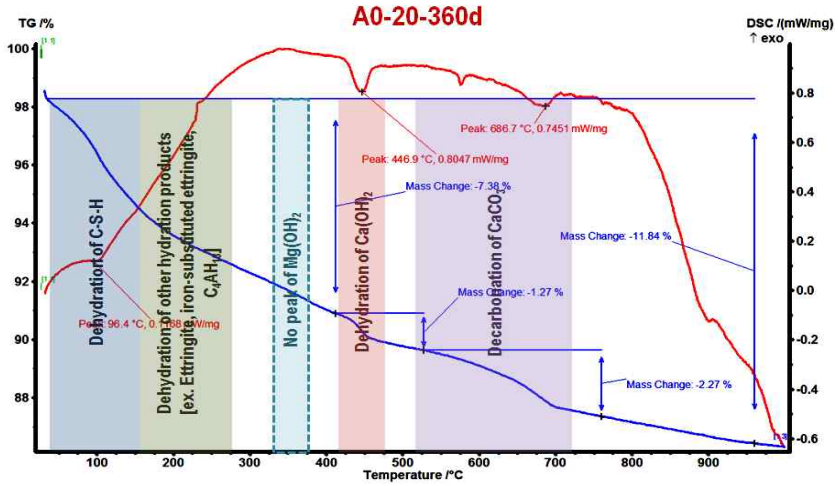
(d) A시멘트, MgO 함량 0%, 20℃에서 180일 양생한 샘플의 TG-DSC 결과



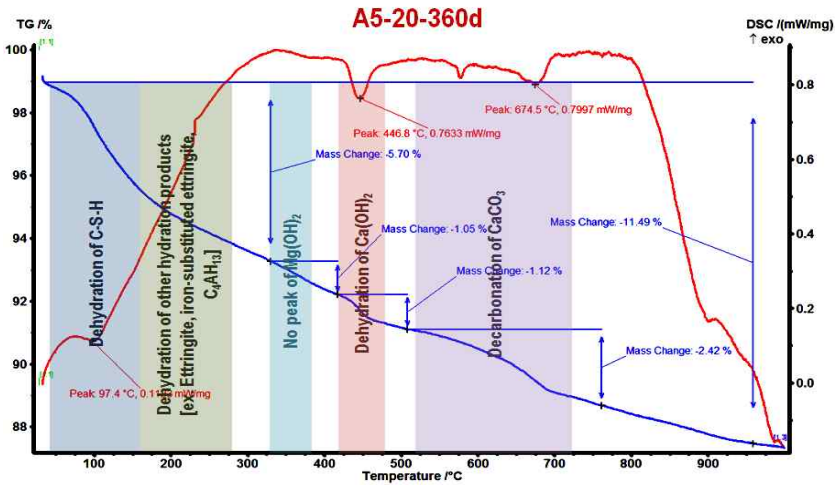
(e) A시멘트, MgO 함량 5%, 20℃에서 180일 양생한 샘플의 TG-DSC 결과



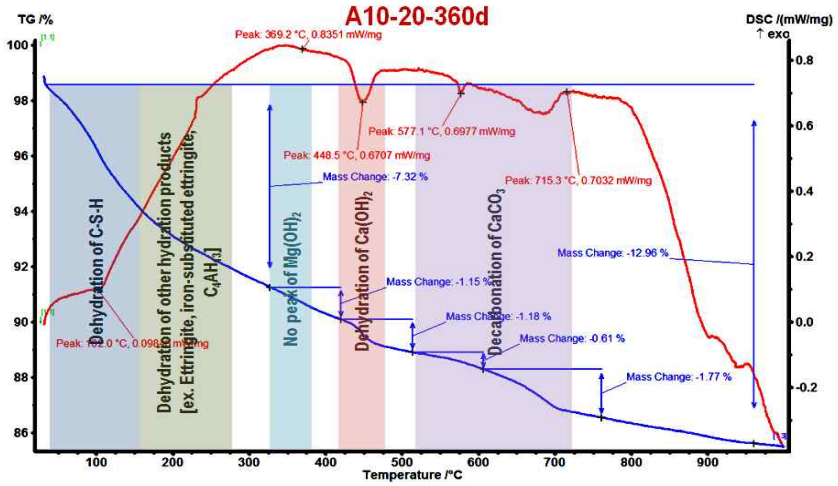
(f) A시멘트, MgO 함량 10%, 20℃에서 180일 양생한 샘플의 TG-DSC 결과



(g) A시멘트, MgO 함량 0%, 20℃에서 360일 양생한 샘플의 TG-DSC 결과



(h) A시멘트, MgO 함량 5%, 20℃에서 360일 양생한 샘플의 TG-DSC 결과



(i) A시멘트, MgO 함량 10%, 20℃에서 360일 양생한 샘플의 TG-DSC 결과

그림 3.4.18 A cement에 대한 대표 분석자료(91, 180, 360일)

Jo Dweck et al.(2000) 및 W. Sha et al.(1999)에 의하면 DSC에서 나타나는 일반적인 시멘트의 수화물 및 여타 구성물질의 peak는 표 3.4.10, 표 3.4.11과 같다. 또한, P.A. Larcey et al.(1995)에 의하면 DSC에서 나타나는 $Mg(OH)_2$의 peak는 대략 340℃이며, 이는 열에 의한 탈수 반응에 의한 peak을 나타내는 것으로 보고되어 있다.

표 3.4.10 온도별 생성 수화물(Jo Dweck et al.(2000))

온도(℃)	수화물 및 구성물질	비고
40 ~ 60	C-S-H	물질들의 peak는 모두 열에 의한 탈수 및 탈 이산화탄소에 의한 peak를 나타냄
110 ~ 145	dihydrated calcium sulfate	
410 ~ 460	Ca(OH)2	
520 ~ 730	CaCO3	

표 3.4.11 온도별 생성 수화물(W. Sha et al.(1999))

온도(℃)	수화물 및 구성물질	비고
80 ~ 120	C-S-H	물질들의 peak는 모두 열에 의한 탈수 및 탈 이산화탄소에 의한 peak를 나타냄
150 ~ 180	Ettringite	
400 ~ 500	Ca(OH)2	
650	CaCO3	

A시멘트에 MgO가 10% 첨가되어 40℃에서 양생된 A10-40에 관하여 각각 7일, 28일, 56일 양생한 샘플의 DSC 및 TG실험 결과 C-S-H, $Ca(OH)_2$, $CaCO_3$ peak를 확인하였으며, $Mg(OH)_2$ peak는 찾기 어려웠다. 이는 A시멘트와 첨가된 MgO가 수화반응에 의해 $Mg(OH)_2$로 전환되는 양이 매우 작음을 의미한다.

B시멘트에 MgO가 10% 첨가되어 40℃에서 양생된 B10-40에 관하여 각각 7일, 28일, 56일 양생한 샘플의 DSC 및 TG실험 결과 C-S-H, $Ca(OH)_2$, $CaCO_3$ peak를 확인하였며, $Mg(OH)_2$ peak는 7일과 56일에 열 흐름의 변곡점을 확인하였다. 28일의 경우, DSC data 상에서는 peak를 확인하지 못하였으나 육안 상으로 약 360℃정도에서 변곡점을 확인하였다. B시멘트에 MgO가 0% 첨가되어 40℃에서 양생된 B0-40의 경우, 각각 7일, 28일, 56일 양생한 샘플의 DSC 및 TG실험 결과 C-S-H, $Ca(OH)_2$, $CaCO_3$ peak를 확인하였으며, $Mg(OH)_2$ peak는 찾을 수 없었다.

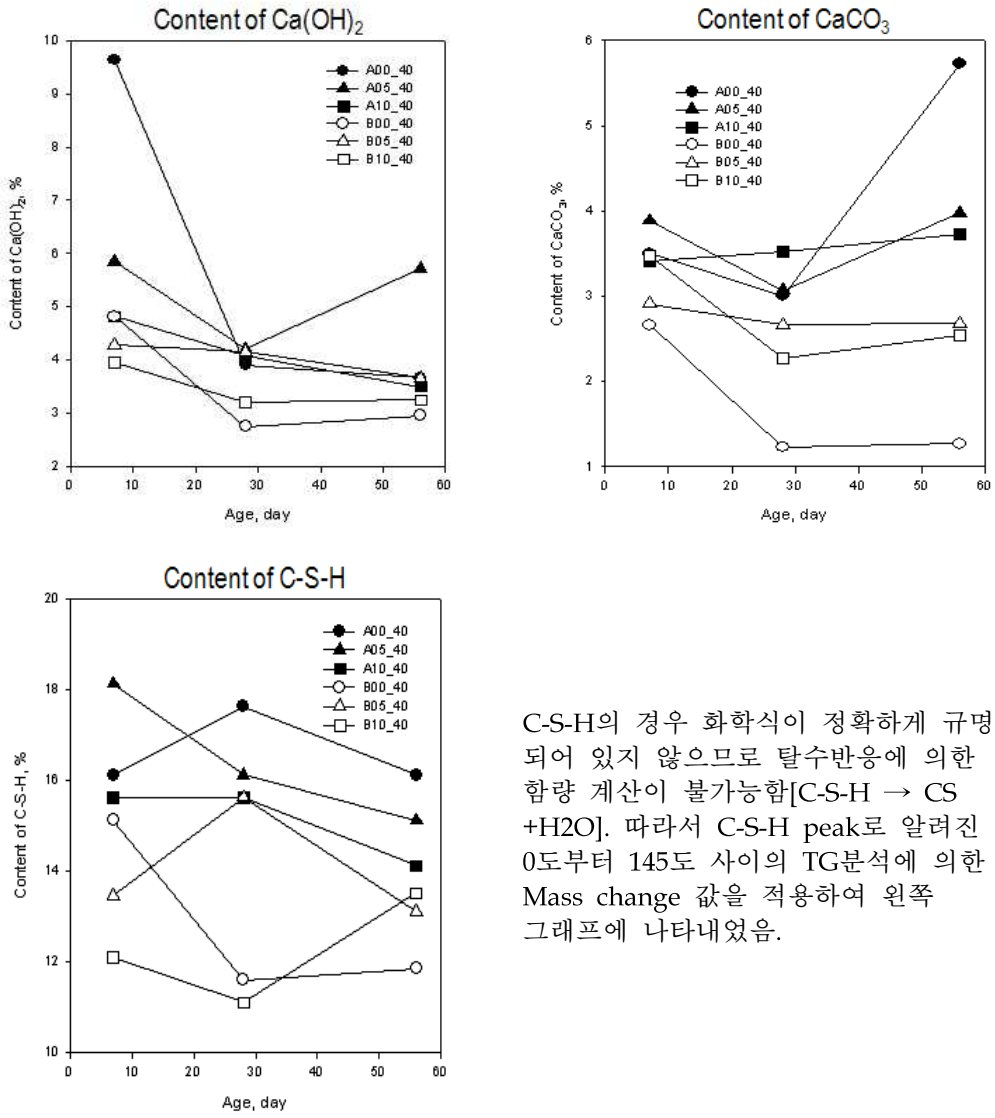
91일, 180일, 360일 양생한 A와 B 시멘트의 모든 샘플의 TG 및 DSC 분석 결과, MgO의 함량과 관계없이 C-S-H, Ca(OH)2, CaCO3 peak가 확인되었다. 약 150℃근처에서 에트린가이트로 추정되는 peak DSC peak가 A0-20-91 샘플에서 발견되었으며, 나머지 샘플에서도 TG의 열

분해 변화와 자료상에서 peak로 인식되지 않은 150℃ 근처의 DSC 흡열 peak를 고려하였을 때, 에트린가이트 등의 물질들이 확인되었다.

MgO가 첨가되지 않은 샘플을 제외한 모든 첨가 샘플에서 MgO가 수화된 형태의 $Mg(OH)_2$ 물질이 약 360℃ 근처 구간에서 발견되었다. DSC의 흡열 peak를 인식하지 못한 몇몇 자료가 있으나, MgO가 첨가된 모든 샘플의 약 360℃ 근처에서 흡열 peak가 확인되었다.

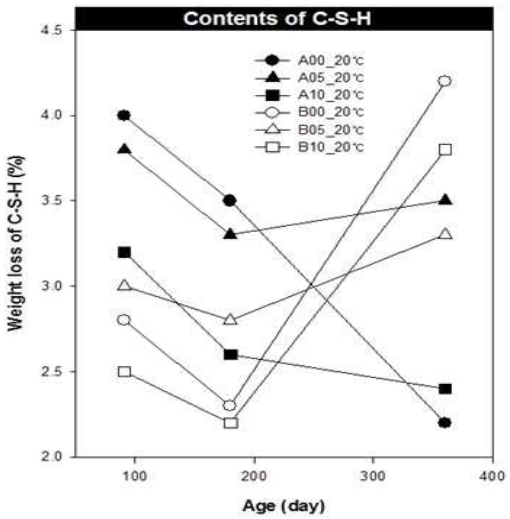
MgO가 첨가 되지 않은 시멘트 샘플에서 DSC의 흡열 peak는 없지만 TG curve의 질량 변화가 있는 이유는 해당 A, B 시멘트의 입자 내에 존재하는 Mg 성분에 의해 형성된 $Mg(OH)_2$ 때문이거나, 정확하게 구분되지 않은 다른 물질의 열분해에 의한 질량 변화로 사료된다.

정량분석을 위해 TG의 mass change(%)를 통해 경화체 내 대표적 구성 물질의 함량을 20℃로 양생한 모든 조건을 아래 그림 3.4.19와 3.4.20과 같이 재령에 따른 수화생성물량을 도시하였다.

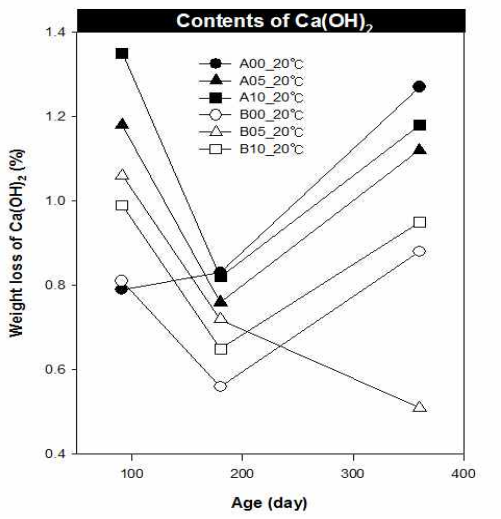


C-S-H의 경우 화학식이 정확하게 규명되어 있지 않으므로 탈수반응에 의한 함량 계산이 불가능함[C-S-H → CS +H2O]. 따라서 C-S-H peak로 알려진 0도부터 145도 사이의 TG분석에 의한 Mass change 값을 적용하여 왼쪽 그래프에 나타내었음.

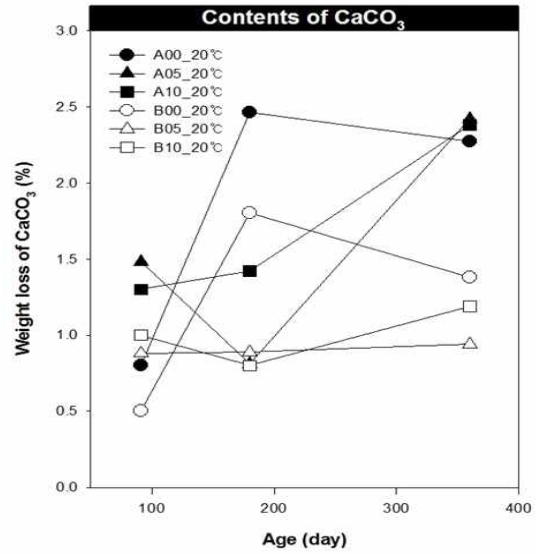
그림 3.4.19 DSC분석을 통한 양생별 $Ca(OH)_2$, $CaCO_3$ 및 C-S-H의 중량 그래프(7, 28, 56일)



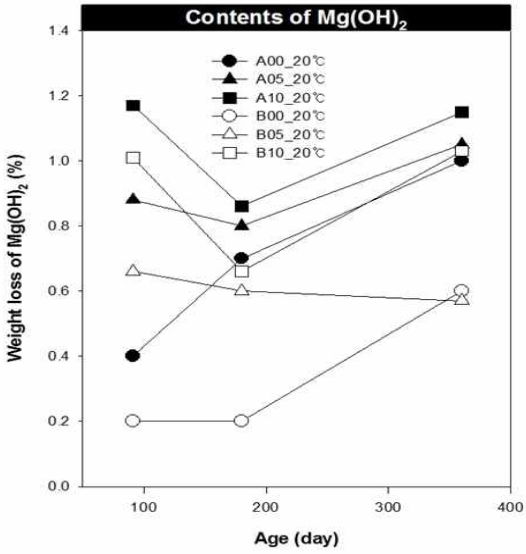
(a) 양생일에 따른 C-S-H의 거동



(b) 양생일에 따른 Ca(OH)2의 거동



(c) 양생일에 따른 CaCO3의 거동



(d) 양생일에 따른 Mg(OH)2의 거동

그림 3.4.20 DSC분석을 통한 양생별 $Ca(OH)_2$, $CaCO_3$ 및 C-S-H의 중량 그래프(91 180, 360일)

일반적으로 OPC의 재령일별 수화물의 조성변화는 다음과 같은 경향성을 보여야 한다.(그림 3.4.21 참조)

1. 재령 초기 약 0-24hr에서 시멘트의 구성성분인 석고(gypsum)가 거의 전부 소모되면서 에트린가이트(Ettringite)를 형성.
2. 수화물질인 에트린가이트(Ettringite)와 C-S-H는 재령일이 지나면 지날수록 함량이 증가하여야 함.
3. 수중양생을 제외하고 일반적인 양생법에서 양생된 경화체는 공기 중의 CO_2와 경화체 표면 및 근방의 $Ca(OH)_2$가 서로 반응하여 Calcite (=$CaCO_3$)를 생성하여 그 함량이 다소 증

가하나 경화된 시멘트의 투수성이 크게 낮아짐에 따라 일정 기간 이후에는 증가비가 현저히 낮아짐.

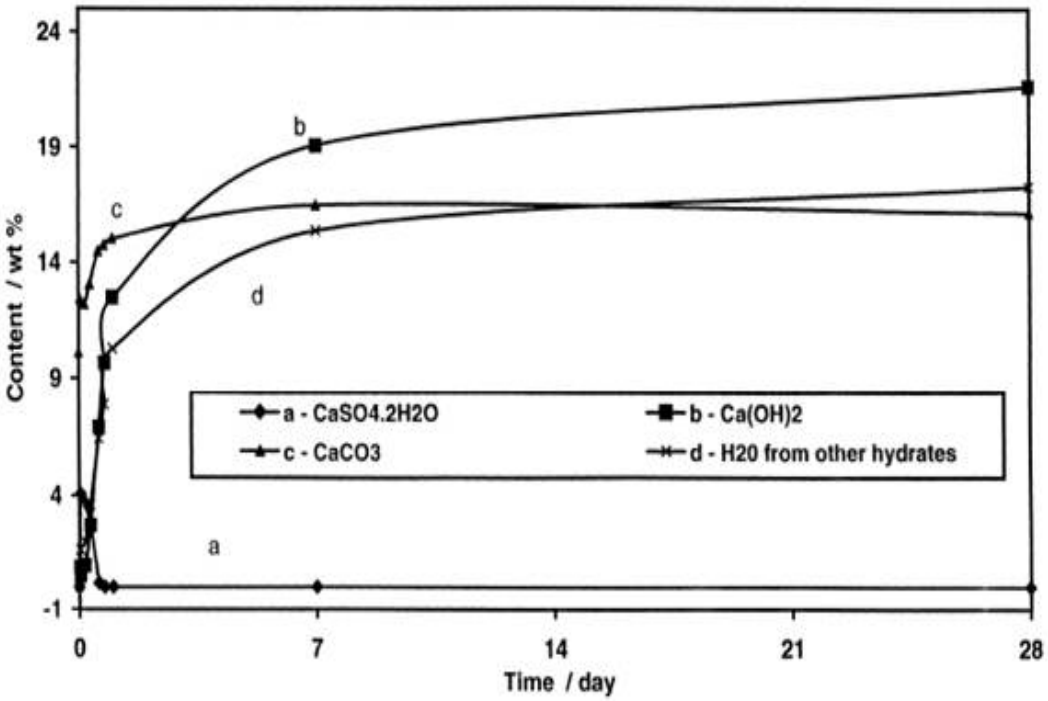


그림 3.4.21 시멘트 반응물 및 석고의 재령별 중량 변화 [Jo Dweck et al.(2000)]

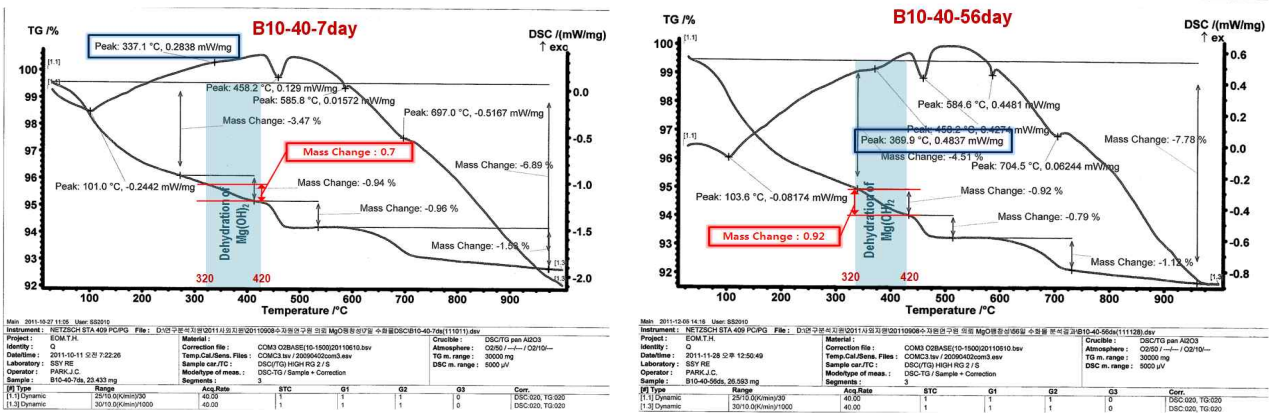
이러한 경향성을 바탕으로 TG의 mass change(%)를 통해 경화체 내 대표적 구성 물질의 함량을 40℃로 양생한 모든 재령에 대해 비교하였다.

$Mg(OH)_2$의 경우, B시멘트에 MgO가 10% 첨가되어 40℃에서 양생된 B10-40에 관하여 각각 7일, 56일 TG에 의한 Mass change를 온도 구간 320℃~420℃에서 비교한 것을 아래 그림 6.3.16~그림 6.3.17에 나타내었다. $Mg(OH)_2$의 탈수 분해 시 weight loss가 30.9%임을 감안했을 때, 7일의 $Mg(OH)_2$함량은 2.26%이며, 56일의 $Mg(OH)_2$함량은 2.97%로서 양생일에 따라 MgO의 $Mg(OH)_2$로의 전환이 이루어 진 것을 확인할 수 있었다. 그러나 A시멘트에서는 $Mg(OH)_2$ peak를 발견하기 힘들었다.

분석결과, MgO를 첨가하지 않은 시료에서는 $Mg(OH)_2$에 의한 수화물의 분해반응은 확인하지 못하였으며 전형적인 시멘트 수화물인 CSH, $Ca(OH)_2$ 상태의 수화물을 확인하였다. 또한 $Ca(OH)_2$의 탄산화 반응에 의한 $CaCO_3$의 존재를 확인하였다. MgO를 첨가한 경우, 28일 수화물부터 $Mg(OH)_2$에 의한 흡열반응을 확인하였다. 재령별로는 28일 수화물에서 가장 많은 $Mg(OH)_2$를 확인하였으며, 양생온도를 40℃로 증가하면 56일에서는 감소하다 다시 91일, 180일에서 증가하는 현상을 확인하였다. 이와 같이, $Mg(OH)_2$가 생성 감소를 반복하는 것은 $Ca(OH)_2$의 수화물과 같이 일부가 다른 수화물을 형성하고 다시 $Ca(OH)_2$을 형성하는 것과 같은 현상으로 판단된다.

B시멘트의 경우 비록 180일 경에 C-S-H의 함량이 감소하였으나 360일에 지속적인 수화반응을 통해 C-S-H의 함량이 증가한 것을 확인할 수 있다. 반면에 A시멘트의 경우 거의 모든 경우에서 C-S-H의 함량이 감소하고 있는데, 이는 Carbonation에 의한 영향으로 보여 진다. A시멘트의 $CaCO_3$ 거동을 보면, 재령일이 지남에 따라 지속적으로 $CaCO_3$의 함량이 증가하는데, 이는 공기 중의 CO_2와 시멘트 샘플 표면의 C-S-H와 Ca(OH)2가 반응하면서 C-S-H 및 $Ca(OH)_2$는 소모되며 $CaCO_3$가 생성되게 된다. B시멘트는 Carbonation의 영향을 덜 받는 것으로 판단된다. $Mg(OH)_2$의 경우, MgO를 따로 추가하지 않은 샘플에서도 TG curve의 중량변화가 나타났다. 이는 시멘트 입자내 존재하는 MgO가 용해되어 $Mg(OH)_2$로 수화된 것이거나 다른 물질의 열분해가 겹쳐진 것으로 판단된다. MgO를 별도로 추가한 경우 91일과 360일의 $Mg(OH)_2$ 함량 변화는 없었으며, 이는 넣어준 MgO의 수화가 거의 모두 이루어졌음을 나타낸다.

그림 3.4.23의 양생온도에 따른 영향을 살펴보면, 20℃에서 양생한 샘플의 C-S-H 등을 포함한 400℃까지의 수화물함량이 7.38%으로 40℃의 7.14%보다 높으며, $Ca(OH)_2$의 함량역시 20℃가 40℃보다 높다. 또한 Carbonation의 영향 역시 40℃에서 더욱 진행 된 것을 $CaCO_3$의 함량을 통해 확인하였다. 상대적으로 높은 양생온도는 장기강도에 좋지 않은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.



(a) B10-40-7days (b) B10-40-56days

그림 3.4.22 Mass change 추이

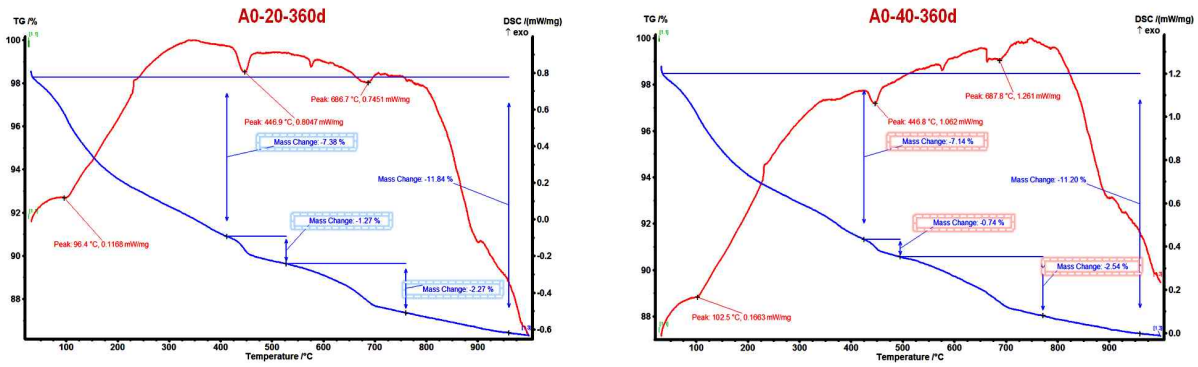


그림 3.4.23 C-S-H, Ca(OH)2, CaCO3 등의 양생 온도에 따른 영향

(4) XRD 시험결과

네덜란드 PAN analytical X'Pert pro社의 XRD(X-Ray Diffractometer, CuKα)를 이용하여 시편별 결정구조를 분석하였다. 모든 샘플에서 Quartz, Microcline, Portlandite, C-S-H, Albite가 검출되었으며, MgO를 첨가한 샘플에서는 반응이 일어나지 않은 MgO가 검출되었다. Mg의 수화물인 $Mg(OH)_2$ peak는 XRD 분석에서 발견되지 않았다. Quartz는 플라이애시 혹은 골재에 함유된 것으로 보이며 Microcline과 Albite는 골재에 함유된 것으로 판단된다. C-S-H 및 Portlandite는 수화반응물이며 MgO를 첨가한 콘크리트에서는 XRD 패턴의 2θ = 42.9° 위치에서 peak가 나타났다. 이 peak는 반응하지 않은 MgO를 나타내며 56일 샘플에서도 상당량의 MgO가 반응되지 않은 상태로 존재함을 확인하였으나 MgO 수화물은 XRD 패턴에서 분명하게 나타나지는 않았다. 그림 3.4.24 및 그림 3.4.25에서와 같이 MgO의 peak 크기가 양생기간이 길어짐에 따라 작아지는 경향이 있으며 이는 MgO가 반응하고 있음을 나타내는 것으로 판단된다. 그림 6.3.30에서 42.5°에 위치한 Quartz 및 Albite를 나타내는 피크가 감소하는 것은 양생과 무관하며 시험 샘플에 함유된 골재의 양과 관련된 것으로 판단된다. 그러나 DSC 결과를 보면 A시멘트에 첨가된 MgO는 B시멘트보다 $Mg(OH)_2$로 변환되는 양이 더 적음을 알 수 있다. B10-20-56D 샘플의 XRD 패턴에서는 θ = 28.202° 위치에서 다른 샘플들에서는 보이지 않는 특이한 피크나 나타났으나 MgO와는 무관한 피크로 판단된다.

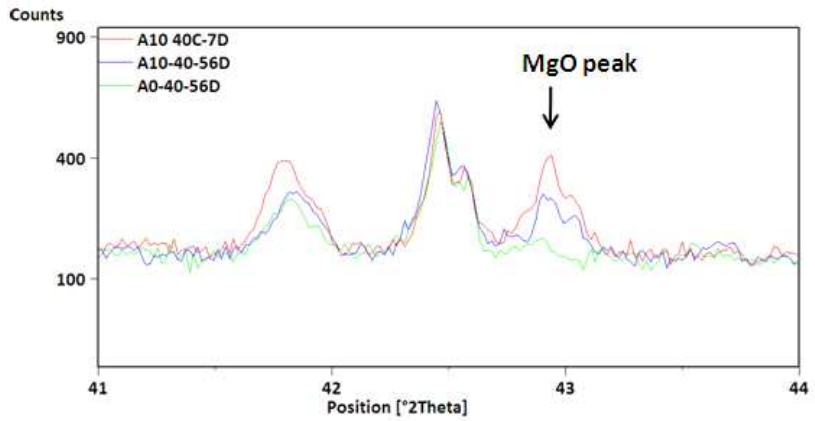


그림 3.4.24 A시멘트 : MgO 10%, 재령 7, 56일

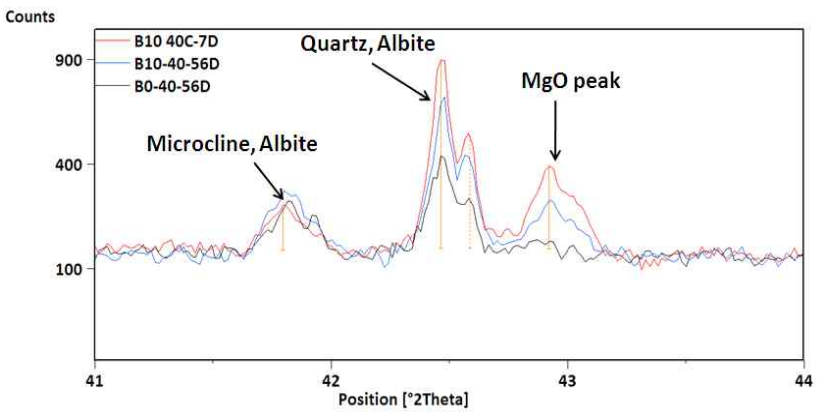


그림 3.4.25 B시멘트 : MgO 10%, 재령 7, 56일

MgO Peak은 43° 부근에서 확인할 수 있으며, 수화 재령이 길어질수록 MgO Peak Intensity가 감소하여 360일에서는 7일 수화물의 절반정도로 Intensity가 감소하였다(그림 3.4.26 참조). 이는 MgO가 수화함으로 MgO의 Intensity가 감소하는 것으로 판단된다. 그러나 $Mg(OH)_2$의 Peak는 확인하지 못하였으며 이는 MgO가 수화하여 $Mg(OH)_2$를 생성하지만 $Mg(OH)_2$가 비정질이기 때문으로 판단된다. 이러한 현상은 대부분의 수화물 결정상이 비정질이라 분석이 곤란한 것과 같은 현상으로 보인다. MgO를 첨가한 콘크리트에서는 XRD 패턴의 2Θ = 42.9° 위치에서 피크가 나타났다. 이 피크는 반응하지 않은 MgO (마그네시아 혹은 페리클레이스)를 나타내며 A시멘트의 경우 365일 재령까지도 선명하게 남아 있으나, B시멘트의 경우 365일 재령에서는 사라져 수화가 완전히 일어난 것으로 판단된다.(그림 3.4.27참조)

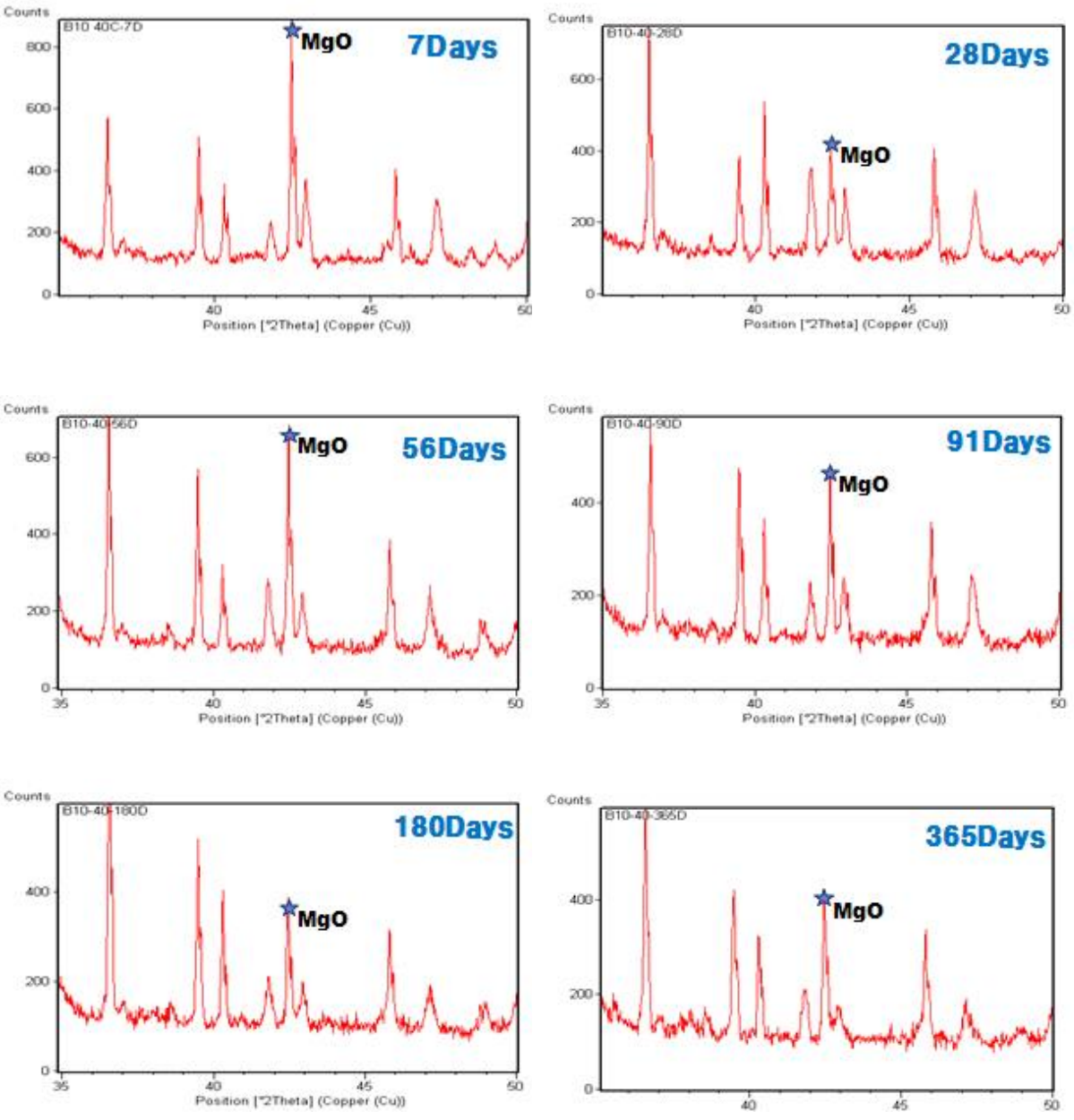
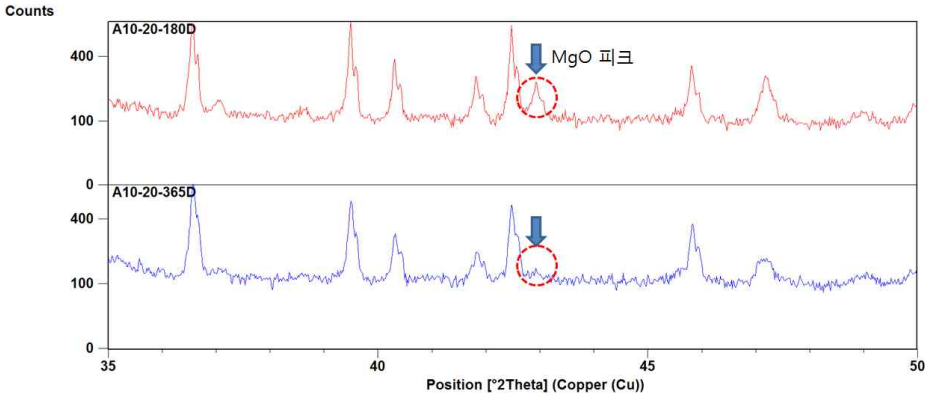
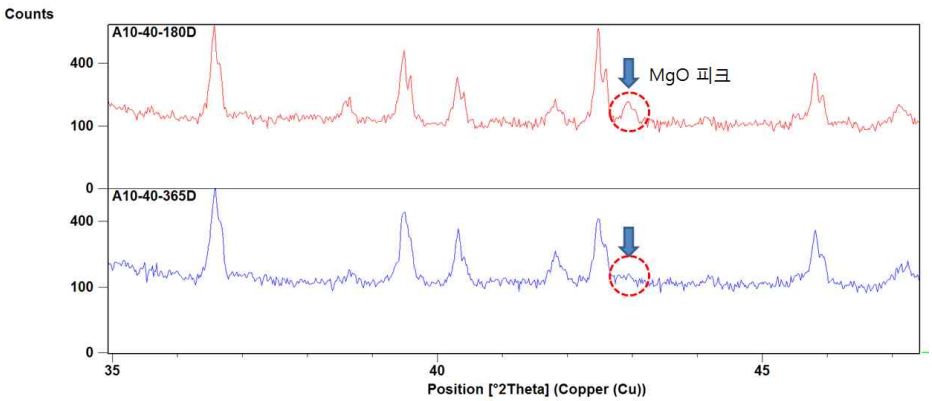


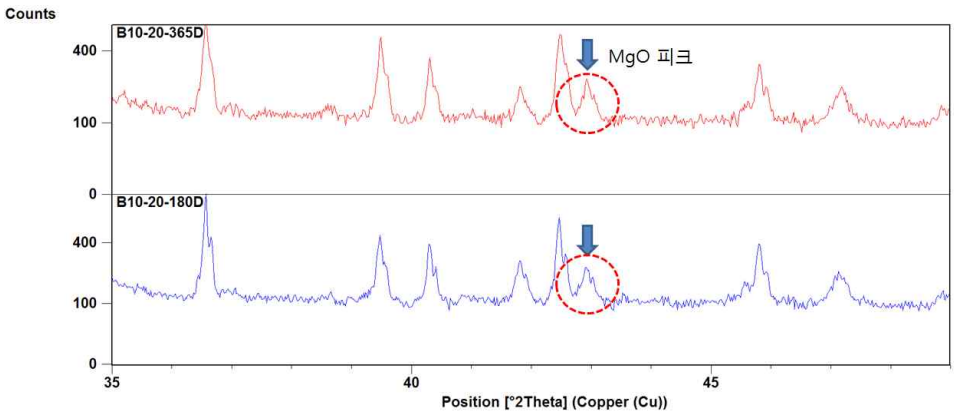
그림 3.4.26 재령별 MgO의 Intensity 변화



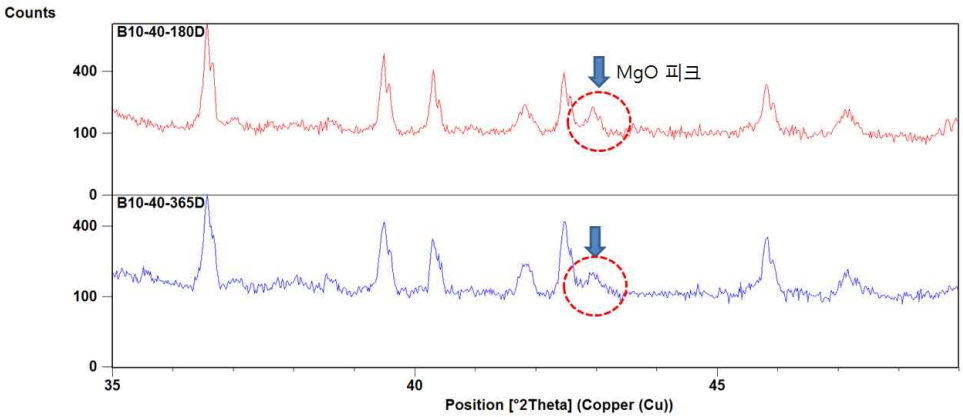
(a) A10-20 샘플의 180일과 365일 재령간의 비교. MgO 피크가 사라짐



(b) A10-40 샘플의 180일과 365일 재령간의 비교. MgO 피크가 사라짐.



‘(c) B10-20 샘플의 180일과 365일 재령간의 비교. MgO 피크가 거의 그대로 유지됨.



(d) B10-40 샘플의 180일과 365일 재령간의 비교. MgO 피크가 거의 그대로 유지됨.

그림 3.4.27 재령별 MgO의 피크 변화

요약하면, 모든 샘플에서 Quartz, Microcline, Portlandite, C-S-H, Albite가 검출되었고 MgO가 함유된 샘플에서는 재령 180일까지 높은 MgO 피크가 관찰되었다. 365일 재령 샘플에서는 A시멘트의 경우 MgO 피크가 모두 사라졌으나 B시멘트의 경우 어느 정도의 피크가 유지되고 있었다. 따라서 시멘트의 종류에 따라 MgO의 수화정도가 차이가 나며, MgO는 최소 6개월이 지나야 수화반응이 일어나는 것으로 판단된다. 그러나 MgO의 첨가량이 전체 샘플 중량에 비해 매우 낮아 MgO의 수화물인 $Mg(OH)_2$ (brucite) 피크가 B10-30-365d 샘플을 제외하고는 거의 보이지 않아 수화가 완전히 일어난 것으로 사료된다.

(5) Autoclave 시험결과

포틀랜드 시멘트의 안정도를 결정하는 오토클레이브 시험 방법은 시멘트의 오토클레이브 팽창도 시험 방법(KS L 5107)에 의하여 시험을 실시하였다. 오토클레이브 팽창도 시험은 시멘트에 있는 산화칼슘(CaO), 산화마그네슘(MgO) 또는 이 두 가지 성분으로 인한 잠재적으로 지연되어 있는 팽창(후기 팽창, potential delayed expansion)의 지표를 알아보기 위한 시험에 적용하는 방법이다.

시험결과, 3% MgO 혼입 시험체인 A3, B3의 경우, KS L 5201의 포틀랜드 시멘트의 화학적 성능 기준(0.8%이하)를 만족하는 결과를 얻었으나 5% MgO 혼입 시험체인 A5, B5 시험체의 경우, 과대팽창을 확인하였다.(표.3.4.12참조)

표 3.4.12 안정도 시험결과

시험체	결과(%)	비고
A0	-0.10	표준 : 0.8%이하 (KS L 5201)
A3	0.07	
A5	측정불가 (과대팽창)	
B0	0.07	
B3	0.23	
B5	1.45	

제 5 절 MgO 혼입 콘크리트의 팽창 특성 실험(Ⅳ)

1. 실험 개요

MgO 혼입 콘크리트의 팽창 특성 실험 연구에서는 표 3.5.1에 나타낸 것과 같이 물/결합재 비(w/b), MgO 대체율, 양생온도와 같이 세 종류의 실험변수를 선정하였다. 목표 강도 12, 24, 45 MPa의 콘크리트에 대해 물/결합재 비(w/b)는 65, 48, 35 %를 사용하였으며, 각각의 콘크리트에 5 % 수준의 MgO를 혼입하였다. 또한 양생온도를 20, 30, 40℃로 달리하여 양생온도에 따른 MgO 혼입 콘크리트의 팽창 특성을 확인하고자 하였다.

표 3.5.1 실험 변수 및 범위

실험 변수	범 위	비 고
물/결합재 비	65, 48, 35 %	
MgO (산화 마그네슘)	0, 5 %	시멘트 중량비
양생온도	20, 30, 40 ℃	상대습도 60 %

2. MgO 콘크리트 배합

MgO를 혼입한 콘크리트를 제조하기 위한 결합재로는 국내 S사의 1종 시멘트와 국내에서 생산된 플라이애시를 사용하였으며, 각각의 성분 분석 결과를 표 3.5.2와 3.5.3에 나타내었다. MgO는 중국의 료녕해성에서 수리 구조물 전용으로 생산한 MgO 분말을 사용하였으며, 성분 분석 결과를 표 3.5.4에 나타내었다.

MgO 콘크리트 배합에 사용된 골재로는 잔골재는 밀도가 2.60 g/cm^{3}이고, 흡수율이 1.07 %인 해사를 사용하였으며, 굵은 골재로는 12 MPa 콘크리트에는 최대 치수가 40 mm, 밀도가 2.73 g/cm^3, 흡수율이 0.57 %인 쇄석을 사용하였으며, 24, 45 MPa 콘크리트에는 최대 치수가 25 mm, 밀도가 2.70 g/cm^3, 흡수율이 0.44 %인 쇄석을 사용하였다. 유동성 확보 및 공기량 조절을 위하여 국내 H사의 폴리카르본산계 고성능 AE감수제를 사용하였다.

콘크리트는 골재 및 결합재로 1분 이상 건비빔을 실시한 후 배합수를 첨가하여 제조하였으며, 총 배합시간은 건비빔을 포함하여 4분 이상 실시하여 MgO의 균일성을 확보하도록 하였다.

표 3.5.2 시멘트의 화학적 조성과 물리적 성질

	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	CaO (%)	Fe_2O_3 (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	불용해 잔분 (%)	밀도 (g/cm^3)	분말도 (cm^2/g)
Cement	21.60	6.00	61.40	3.10	3.40	2.50	0.21	3.14	3,539

표 3.5.3 플라이애시의 화학적 조성과 물리적 성질

	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	CaO (%)	Fe_2O_3 (%)	SO_3 (%)	P_2O_5 (%)	MgO (%)	Na_2O (%)	K_2O (%)	SrO_3 (%)	밀도 (g/cm^3)
Fly ash	67.8	18.27	3.17	2.40	2.40	1.00	0.8	0.78	0.68	0.19	2.20

표 3.5.4 MgO 분말의 화학적 조성과 물리적 성질

	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	MgO (%)	CaO (%)	SO_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	강열 감량 (%)	불용해 잔분 (%)	밀도 (g/cm^3)
MgO	1.56	0.20	92.02	2.01	0.13	0.98	2.68	2.83	3.24

표 3.5.5에 시편 제작에 사용한 콘크리트의 배합비가 정리되어 있다. 목표 강도 12, 24, 45 MPa (w/b = 65, 48, 35 %)인 세 종류의 콘크리트에 대해 1종 시멘트와 플라이애시만을 사용한 일반 콘크리트 배합과 시멘트 질량의 5 %를 MgO로 대체한 MgO 콘크리트를 포함하여 총 6종류의 콘크리트 배합을 실험에 사용하였다.

표 3.5.5 실험에 사용한 콘크리트 배합비

Mix No.	Mix Type	w/b (%)	s/a (%)	Unit mass (kg/m^3)					
				W	C	FA	MgO	S	G
1	K12-0	65	52	165.0	203.1	50.8	0.0	949.4	920.2
2	K12-5				190.4	50.8	12.7	949.6	920.4
3	K24-0	48	48	165.0	275.0	68.8	0.0	837.6	942.3
4	K24-5				257.8	68.8	17.2	837.8	942.6
5	K45-0	35	46	165.0	377.1	94.3	0.0	749.9	914.2
6	K45-5				353.6	94.3	23.6	750.2	914.6

3. 초음파 속도 모니터링

가. 개요

그림 3.5.1은 전형적인 초음파 속도의 발현 곡선을 나타내며, 초음파 속도의 변화 경향은 크

게 세 구간으로 나눌 수 있다. 그림 3.5.2는 수화가 진행됨에 따른 시멘트 풀의 미세구조를 도식적으로 나타낸 것으로, 미세구조 변화와 초음파 속도의 관계는 다음과 같이 설명할 수 있다.

그림 3.5.2 (a)에서 보듯이, 배합 직후에는 시멘트 입자들 사이의 거리가 다소 멀리 떨어져 있으며, 입자들 사이가 물로 채워진 유체에 가까운 상태가 된다. 이 때 초음파 속도는 유체를 통과하는 것으로 간주할 수 있으며, 초음파 속도는 거의 일정하게 된다<그림 3.5.1의 Step Ⅰ>.

시간이 지나 수화 반응에 의해 생성된 수화물이 시멘트 입자 표면에 쌓이면서 입자 크기는 서서히 증가하여 시멘트 입자의 일부는 서로 연결되나 전체가 연결되는 것은 아니다<그림 3.5.2 (b)>.

계속된 수화로 시멘트 입자는 더욱더 커지게 되어 입자들이 서로 연결되며, 파가 서로 연결된 시멘트 입자들을 통해 전달되는 퍼코레이션(percolation)이 발생한다<그림 3.5.2 (c)>.

시간이 더 경과하면, 시멘트 풀 내 물의 양은 점차 줄어들고 수화에 의해 발생된 공극에는 물이 채워진 다공질의 매질로 간주될 수 있다<그림 3.5.2 (d)>.

이러한 변화를 겪는 동안, 파는 유체에서 고체의 매질을 통과하게 된다. 배합 초기, 시멘트 풀의 강성은 작지만 수화가 진행됨에 따라 내부 미세 구조의 성장으로 점점 커지게 되어 초음파 속도가 증가하게 된다<그림 3.5.1의 StepⅡ>.

이후에는 매질의 강성이 최종 값에 근접함에 따라 초음파 속도가 일정한 값에 접근하는 경향을 나타낸다<그림 3.5.1의 StepⅢ>.

따라서 초음파 속도를 이용하여 콘크리트의 응결을 간접적으로 추정할 수 있으며, 응결은 곧 콘크리트의 탄성 계수, 즉 강성이 발현되는 시점으로 간주할 수 있다.

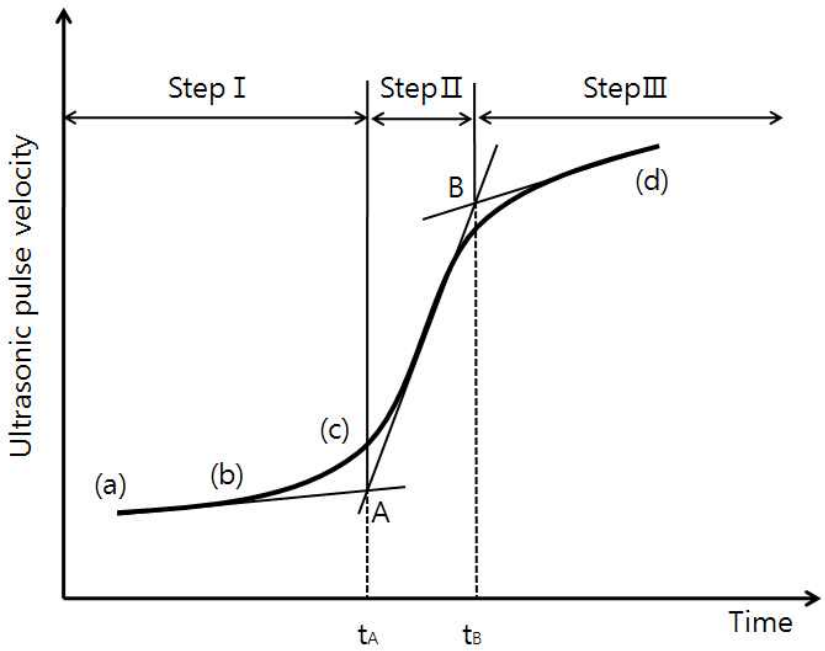


그림 3.5.1 초음파 속도의 발현 곡선

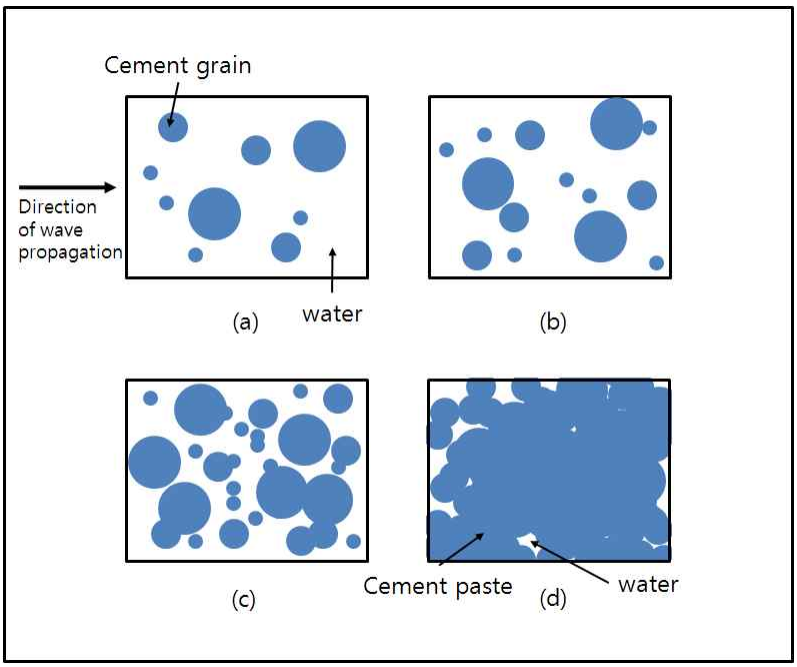


그림 3.5.2 수화도에 따른 시멘트 풀의 미세구조

시멘트의 수화 반응 속도는 물/결합재 비(w/b)와 양생온도에 영향을 받으며 일반적으로 w/b가 낮을수록, 양생온도가 높을수록 수화 반응이 촉진되는 것으로 알려져 있다. 또한 Liu et al.(1992)는 MgO 분말의 혼입에 따라 시멘트의 응결 시간 및 수화반응이 지연되는 현상을 보고한 바 있다. 본 연구에서는 w/b와 MgO 분말 대체율, 양생 온도를 실험 변수로 설정하였기 때문에 이에 따른 초기 수화 속도를 고려해야 한다. 특히 고강도 콘크리트인 45 MPa 콘크리트의 경우 24 시간 전부터 큰 수축이 발생하기 때문에 초결 시간에 대한 검토가 필요하다. 따라서 45 MPa 콘크리트의 초기 수화에 대한 MgO 대체율, 양생온도의 영향을 살펴보기 위해 초음파 속도 모니터링을 실시하였다.

나. 실험 방법

배합 후 굳지 않은 상태부터 초음파 속도를 측정하기 위하여 그림 3.5.3의 초음파 속도 모니터링 시스템을 사용하였다. 두 개의 아크릴 판(두께 : 4 cm, 초음파 속도 : 2,740 m/s) 중앙에 3.5 cm 깊이의 홈을 파고 한쪽에는 발진자(직경 : 5 cm)를, 다른 한쪽에는 수신자를 각각 위치시키고, 초음파 속도 측정 시 주위로부터의 영향을 최소화하기 위해 콘크리트에 비해 댐핑이 크고 재료 자체의 속도가 매우 작은 발포 고무(초음파 속도 : 266 m/s)로 만든 틀을 아크릴 판 사이에 놓고 판의 양쪽 모서리를 볼트를 사용하여 고정시켰다.

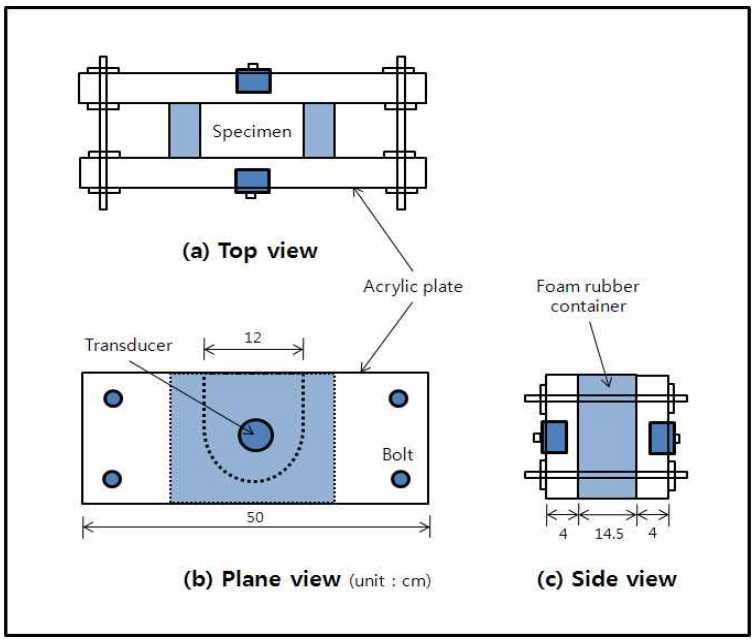


그림 3.5.3 초음파 속도 모니터링 장치 개요도

콘크리트 시료를 용기에 채운 후 적당하게 다짐을 하고 표면을 비닐로 덮어 시료 표면에서의 수분 증발을 방지하였다. 그 후 온도가 각각 20, 30, 40 ℃, 상대 습도 60 %로 유지되는 항온항습기에서 24 시간 동안 양생하며, 20분 간격으로 발진자와 수신자 사이를 통과하는 초음파의 전달 시간을 측정하였다. 초음파 속도는 시료의 길이를 초음파 전달 시간으로 나누어서 결정하였는데, 이 때 전달 시간은 탐촉자와 시료 사이의 거리를 고려하여 보정하였다. 초음파 속도 측정에는 Q사의 초음파속도 측정기가 사용되었으며, 사용 중심 주파수는 54 kHz이었다. 그림 3.5.4는 실제 초음파 속도를 측정하는 장면을 나타낸 것이다.



그림 3.5.4 초음파 속도 측정 장면

다. 실험 결과 및 분석

그림 3.5.5 ~ 그림 3.5.7은 양생온도에 따른 45 MPa 콘크리트의 초음파 속도 모니터링 결과에 초음파의 속도가 증가하는 지점(A)과 속도가 수렴하는 지점(B)을 나타낸 것이다. K45-0과 K45-5 콘크리트에서 초음파 속도가 발현되는 경향은 비슷하게 나타나지만 K45-5 콘크리트의

경우 K45-0에 비해 초음파 속도가 증가하기 시작하는 시점이 늦게 나타나며, 이로부터 MgO 분말의 혼입이 콘크리트의 수화를 지연시키는 것을 확인할 수 있다. 또한 양생온도가 20, 30, 40 ℃로 높아질수록 K45-0과 K45-5 콘크리트의 A, B점 차이(표 3.5.6 참조)가 작아지는데 이는 양생온도가 높을수록 MgO 분말의 수화가 촉진되어 MgO 분말 혼입에 따른 수화 지연 시간이 감소하는 것으로 사료된다.

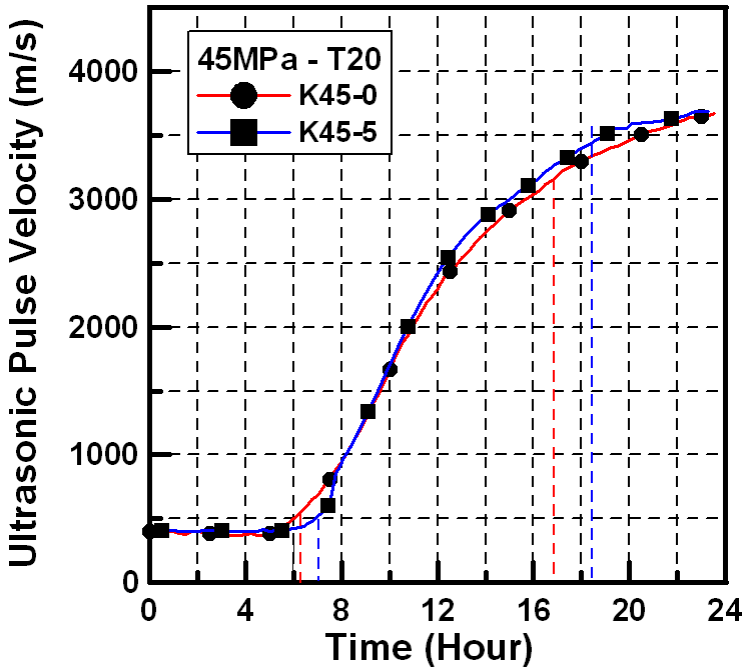


그림 3.5.5 양생온도 20℃에서의 초음파 속도 발현 곡선

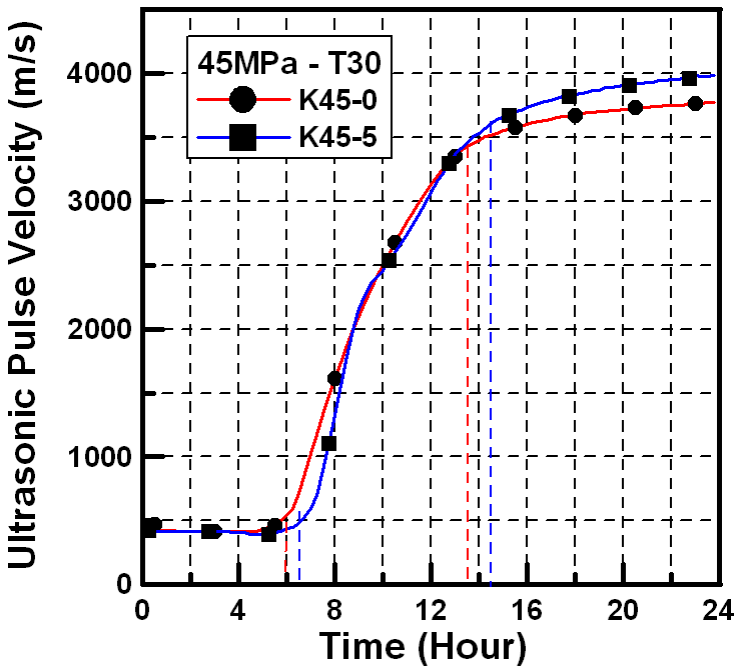


그림 3.5.6 양생온도 30℃에서의 초음파 속도 발현 곡선

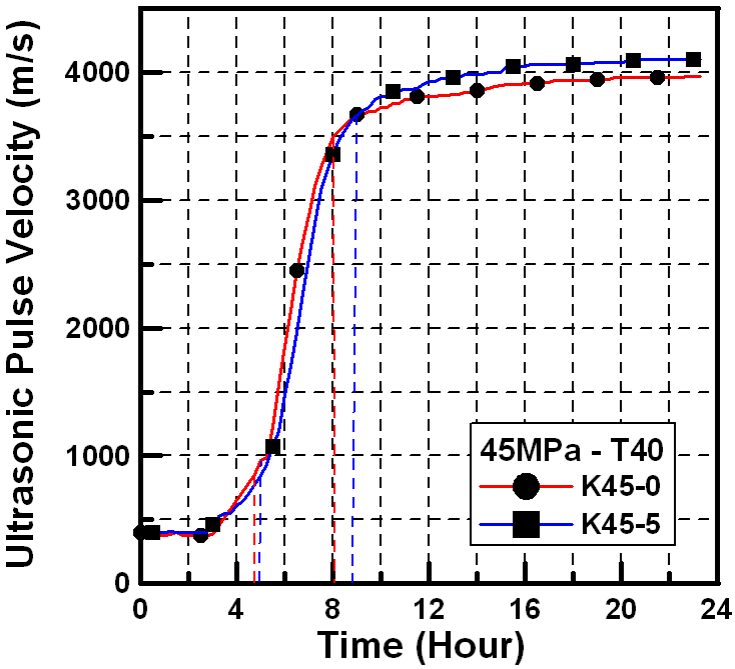


그림 3.5.7 양생온도 40℃에서의 초음파 속도 발현 곡선

표 3.5.6 양생온도에 따른 초음파 곡선상 K45-0과 K45-5 콘크리트의 A, B점 차이

구분	A점 간의 차이	B점 간의 차이
20℃	1h	2h
30℃	40min	1h 10min
40℃	15min	40min

45 MPa 콘크리트의 경우 고강도 콘크리트이므로 초기에 나타나는 자기수축량이 크기 때문에 올바른 콘크리트의 수축량 및 MgO 분말의 팽창량을 확인하기 위해서는 초결시간을 기준(Strain=0)으로 데이터를 정리하여야 한다. 또한 40 ℃에서 양생한 콘크리트의 초음파 속도 발현곡선을 살펴보면, 초기에 수직적으로 강도가 발현되기 때문에 초기에 큰 수축이 나타날 것으로 판단되므로 40 ℃에서 양생한 콘크리트의 경우 20 ℃와 같은 시간을 기준으로 데이터를 정리한다면 초기의 수축량을 전부 고려하지 못하게 된다. 따라서 양생온도에 따라 서로 다른 기준으로 하여 데이터를 정리하여야 한다. 따라서, 45 MPa 콘크리트의 길이변화 데이터를 양생온도에 따라 초음파 속도 모니터링 결과를 바탕으로 서로 다른 기준으로 하여 정리하였으며, 표 3.5.7에 각각의 기준점이 정리되어 있다.

표 3.5.7 초음파 속도 모니터링을 통해 결정한 K45-0과 K45-5 콘크리트의 길이변화 측정 기준점 (Strain=0)

양생 온도 (℃)		20	30	40
tA	OPC 콘크리트 (K45-0)	6 h 30 min	6 h	4 h 30 min
	MgO 콘크리트 (K45-5)	7 h 30 min	6 h 30 min	5 h

4. 강도 특성 실험

가. 개요

본 연구는 MgO 분말을 혼입한 콘크리트의 강도 데이터를 확보하여 장기팽창성 콘크리트의 강도 모델을 제안하는 것을 목표로 하고 있다. 일반적으로 MgO 분말의 혼입은 콘크리트의 역학적 성질에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 알려져 있다. 하지만 저온소성한 MgO에 대한 연구가 활발한 중국에서는 MgO 콘크리트를 수리구조물에 적용하기 때문에 댐 콘크리트 또는 저강도 콘크리트에 한정되어 연구가 진행되었다. 따라서 본 연구에서는 댐 콘크리트인 12 MPa 콘크리트 이외에 고강도 콘크리트인 45 MPa 콘크리트와 보통 강도 콘크리트인 24 MPa 콘크리트에도 MgO 분말을 혼입하여 다양한 강도 조건에서의 MgO 분말 혼입에 따른 강도 특성을 알아보았다.

나. 실험 방법

강도 측정용 시편은 Φ100 × 200 mm의 실린더 공시체를 사용하였으며 실험 실시 전까지 20 ± 3 ℃로 유지되는 항온수조에서 수중 양생하였다. 압축강도 실험은 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험 방법)를 따라 수행하였다.

다. 실험 결과 및 분석

재령 720일까지의 압축강도 데이터를 표 3.5.8에 정리하였다. 모든 시편의 28일 압축강도가 목표 강도를 만족한 것으로 미루어 5 % 수준의 MgO 분말의 혼입은 콘크리트의 강도 측면에 문제를 발생시키지 않는 것으로 사료된다. 하지만 전체적으로 MgO 분말을 혼입한 콘크리트의 압축강도는 재령 180일까지 일반 콘크리트에 비해 다소 낮은 압축강도를 보였다. 반면 12, 24 MPa 콘크리트의 경우 재령 360 일에서 MgO를 혼입한 콘크리트에서 더 높은 압축강도를 얻을 수 있었다. 이를 통해 MgO의 혼입이 콘크리트의 초기 압축강도를 다소 저하시키지만 장기재령에서는 강도를 증진시키는 효과가 있는 것으로 판단되며, 이는 MgO의 팽창효과에 따른 미세구조의 밀실화 때문으로 사료된다. 반면 낮은 w/b로 인해 밀실한 미세구조를 가지고

있는 45 MPa 콘크리트의 경우 MgO의 팽창효과로 장기재령까지 강도저하가 나타나는 것으로 판단된다. 하지만 MgO 분말을 혼입한 콘크리트의 재령에 따른 강도비를 살펴보면 재령 간 강도차가 일정한 경향을 나타내지 않는 것으로 미루어 MgO 분말의 혼입에 따른 강도 저하보다 다짐 또는 MgO 콘크리트 제조 시 MgO 분말의 균일성 문제에 따른 시편 간 편차의 영향이 더 큰 것으로 사료된다.

표 3.5.8 재령에 따른 콘크리트의 압축강도

재령	K12-0	K12-5	K24-0	K24-5	K45-0	K45-5
7일	9.0	7.8	18.7	17.6	37.3	35.2
28일	14.0	13.2	30.5	25.1	46.3	45.0
56일	17.6	15.5	34.4	33.3	54.1	47.7
91일	22.6	21.7	38.9	37.3	59.7	52.8
180일	24.7	24.7	47.1	46.5	61.3	55.6
360일	25.9	26.5	47.4	47.1	62.4	59.1
540일	27.0	27.8	47.1	47.5	63.7	61.3
720일	28.9	29.2	48.6	48.6	65.0	63.2

라. 장기팽창성 콘크리트의 강도 모델

성능중심 콘크리트 구조설계 기준은 20℃에서 습윤 양생을 실시한 콘크리트의 압축강도 예측하기 위해 다음의 식을 이용하고 있다.

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm} \tag{3.5.1}$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left[\beta_{sc}\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right] \tag{3.5.2}$$

여기서, $f_{cm}(t)$는 재령 t에서의 압축강도, f_{cm}는 재령 28일에서의 평균 압축강도, $\beta_{cc}(t)$는 시간에 따른 콘크리트의 강도발현속도를 반영하는 계수, β_{sc}는 콘크리트의 강도발현 속도에 따른 상수로 콘크리트의 성질에 따른 값이다.

하지만 식 (3.5.2)는 28일 압축강도를 기준으로 하기 때문에 느린 수화반응을 거치는 MgO의 경우 MgO 수화에 따른 압축강도의 영향을 잘 반영할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 장기팽창성 콘크리트의 압축강도 예측모델을 아래와 같이 재령 91일을 기준으로 하여 수정한 식을 사용하도록 제안하였다.

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm(91)} \tag{3.5.3}$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left[\beta_{sc}\left(1 - \sqrt{\frac{91}{t}}\right)\right] \tag{3.5.4}$$

여기서, $f_{cm(91)}$는 재령 91일에서의 평균 압축강도이다.

표 3.5.9는 식 (3.5.3)에 사용한 β_{sc} 계수를 콘크리트 배합 종류에 따라 정리하여 놓은 것이다. 강도발현속도 계수(β_{cc})를 살펴보면 MgO를 혼입한 콘크리트가 더 큰 값을 가지는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 MgO 콘크리트가 일반 콘크리트보다 느린 강도발현 속도를 가지는 것을 알 수 있다. 또한 각각의 목표 강도에 따라 β_{sc}의 증가폭이 동일하였는데, 이는 동일한 수준의 MgO의 혼입이 w/b에 상관없이 콘크리트의 강도발현 속도에 유사한 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다.

표 3.5.9 91일 강도를 기준으로 얻은 β_{sc} 계수 값

구 분	K12-0	K12-5	K24-0	K24-5	K45-0	K45-5
$f_{cm(91)}$ (MPa)	21.6	21.7	38.9	37.3	59.7	52.8
β_{sc}	0.41	0.46	0.35	0.40	0.17	0.22
R^2	0.987	0.982	0.989	0.983	0.994	0.989

그림 3.5.8 ~ 3.5.9는 식 3.5.3을 이용한 예측값을 본 연구에서 얻은 실험값과 비교하여 나타낸 것으로 실험값과 예측값이 잘 부합하는 것을 알 수 있다.

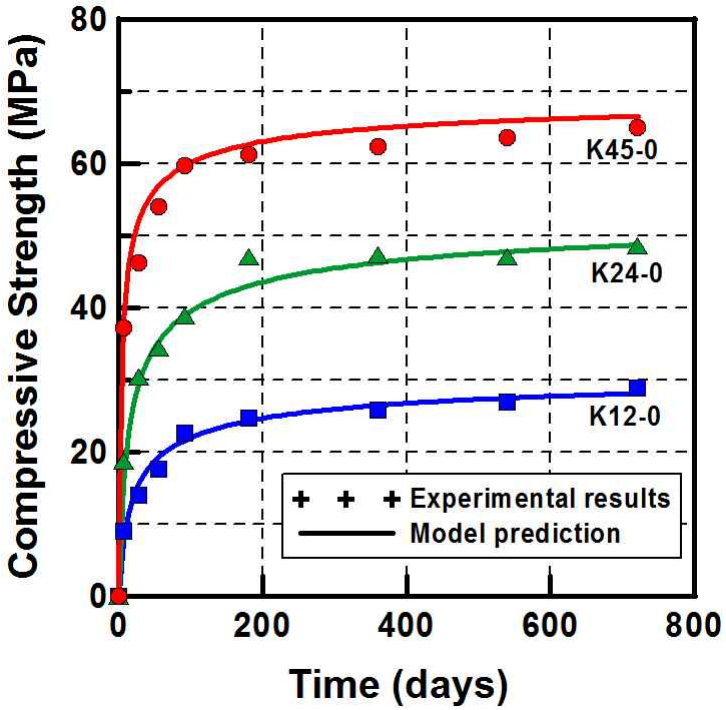


그림 3.5.8 MgO를 혼입하지 않은 일반 콘크리트의
강도 모델 예측값과 실험값의 비교

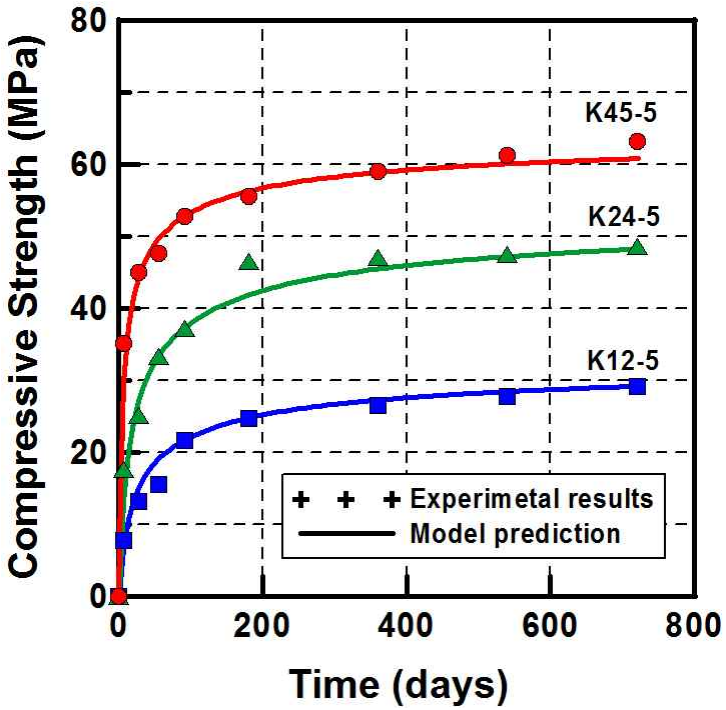


그림 3.5.9 MgO를 혼입한 MgO 콘크리트의 강도 모델 예측값과 실험값의 비교

5. 팽창 특성 실험

가. 개요

본 연구는 MgO 분말을 혼입한 콘크리트의 길이변화 데이터를 확보하여 장기팽창성 콘크리트의 길이변화 모델을 제안하는 것을 목표로 하고 있다. 저온소성한 MgO 분말은 4년 이상 팽창성을 유지하는 것으로 알려져 있다. 하지만 이러한 MgO에 대한 연구가 비교적 활발한 중국에서는 MgO 콘크리트를 수리구조물에 적용하였기 때문에 댐 콘크리트로 사용되는 저강도 콘크리트에 한정되어 연구가 진행되었다. 본 연구에서는 댐 콘크리트인 12 MPa 콘크리트 이외에 보통 강도 콘크리트인 24 MPa 콘크리트와 고강도 콘크리트인 45 MPa 콘크리트에도 MgO 분말을 혼입하여 다양한 강도 조건에서의 MgO 분말 혼입에 따른 팽창 특성을 알아보았다.

나. 실험 방법

MgO를 혼입한 콘크리트의 팽창 측정을 위한 시편을 제작하기 위해 12 MPa 콘크리트의 경우 굵은 골재 최대치수를 고려하여 150×150×450 mm인 빔 몰드를 사용하였으며, 24, 45 MPa 콘크리트는 100×100×400 mm인 빔 몰드를 사용하였다. 이 때 몰드의 바닥과 양단에 테프론 시트를 깔아서 시편의 이동이 몰드에 의해 구속받지 않게 하였으며, 낚시줄을 이용하여 게이지가 몰드 중앙에 고정될 수 있도록 하였다. 또한 시편의 변형률은 수화열에 의하여 온도의 영향을 받을 수 있기 때문에 매립 게이지와 동일한 위치에 T-타입의 온도 센서를 설치하여 시편의 온도 변화를 모니터링하였다. 그림 3.5.10은 실험에 사용된 몰드와 매립 게이지, 온도센서의 모습을 나타낸다.

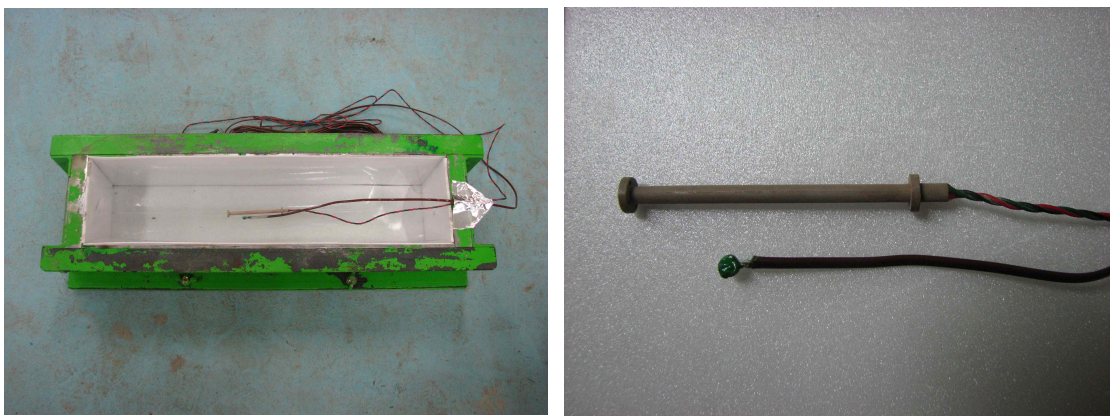


그림 3.5.10 실험에 사용된 몰드와 매립 게이지, 온도센서

콘크리트 타설 후 표면에서의 수분 증발 및 흡수를 막기 위해 시편의 표면을 비닐로 덮고, 온도가 각각 20, 30, 40 ℃이고 상대 습도가 60 %인 항온항습기에 넣고 게이지를 데이터 수신 장치에 연결하였다. 그 후 재령 24 시간 이전에 몰드를 제거하고 알루미늄 테이프를 이용하여 시편을 밀봉하여 시편으로부터 수분의 증발과 흡수를 방지하였다. 이때, 알루미늄 테이프가 시편의 팽창을 구속하지 않도록 하기 위해 시편을 폴리스틸렌 보드(Polystyrene board)로 감

싼 후 알루미늄 테이프로 밀봉하였으며, 폴리스틸렌 보드와 시편의 마찰을 최소화하기 위해 보드와 시편 사이에 폴리에스터 필름을 두었다. 그리고 양생 조건의 목표 온도에 도달하도록 충분한 시간이 지난 뒤, 매립 게이지와 데이터로거를 이용하여 변형률을 측정하였다.

다. 실험 결과 및 분석

그림 3.5.11 ~ 그림 3.5.13은 12 MPa 콘크리트의 재령 900일까지의 길이변화를 나타낸 것이다. 실험 결과, 40 ℃에서 양생한 시편에서는 재령 200일 이후 장기팽창량이 큰 변화 없이 수렴하는 경향을 나타내었으나 20 ℃에서 양생한 시편은 재령 900일까지 지속적으로 팽창하는 결과를 보였다. 이는 MgO 분말이 고온에서는 수화 반응이 촉진되기 때문에 초기재령에서 큰 팽창량이 나타나지만 장기적인 팽창성을 유지할 수 없는 것으로 사료된다. 반면 20 ℃에서 양생한 경우, MgO의 느린 수화반응으로 인해 장기적인 팽창성이 유지되는 것으로 판단된다.

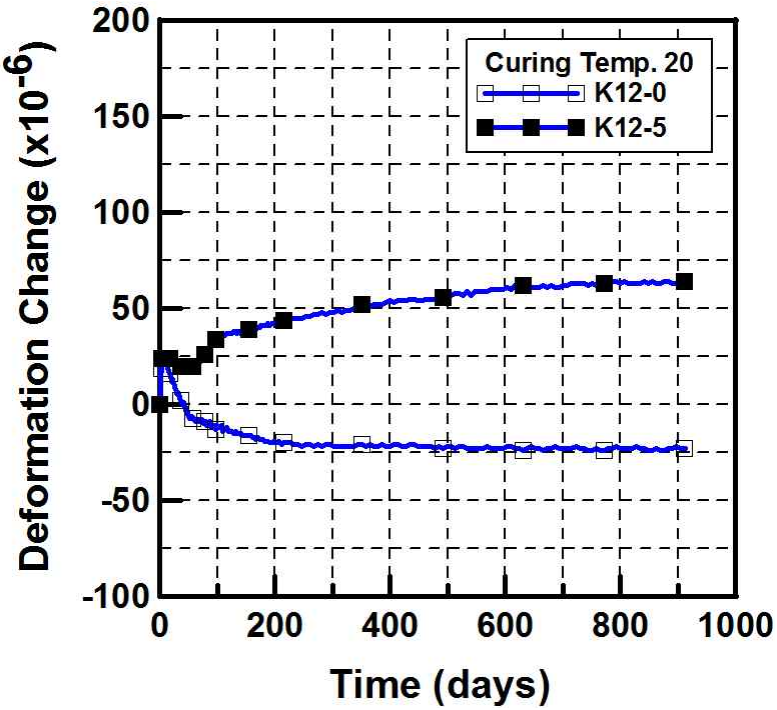


그림 3.5.11 양생온도 20℃에서의 12 MPa 콘크리트의 길이변화

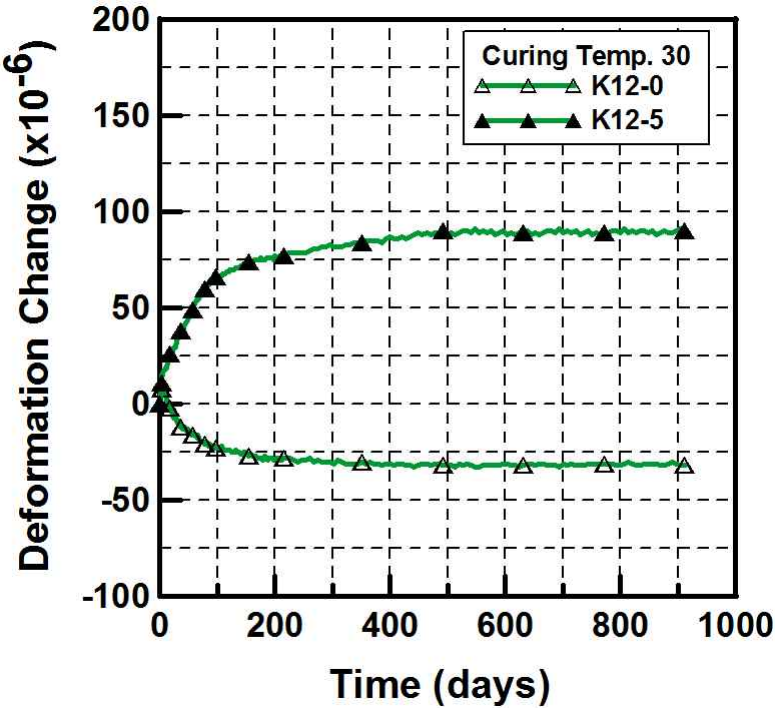


그림 3.5.12 양생온도 30℃에서의 12 MPa 콘크리트의 길이변화

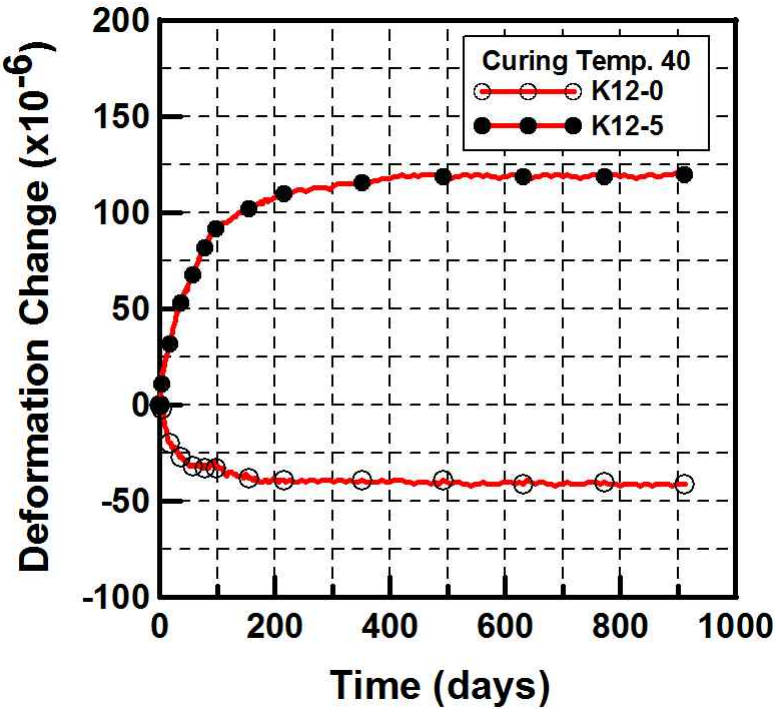


그림 3.5.13 양생온도 40℃에서의 12 MPa 콘크리트의 길이변화

그림 3.5.14에 K12-0에 대한 K12-5 콘크리트의 상대적인 팽창량이 양생온도에 따라 정리되어 있다. MgO 콘크리트는 양생온도가 높아짐에 따라 팽창량이 커지는 경향을 나타냈는데, 이는 고온에서 양생할수록 MgO 분말의 수화가 활발히 진행되기 때문에 초기 재령에서의 팽창

속도가 빠르고 장기팽창량도 큰 것으로 사료된다. 또한 OPC를 고온에서 양생한 경우 초기 자기수축이 크게 나타나기 때문에 40 ℃에서 양생한 시편에서 상대 팽창량이 크게 나타나는 것으로 판단된다.

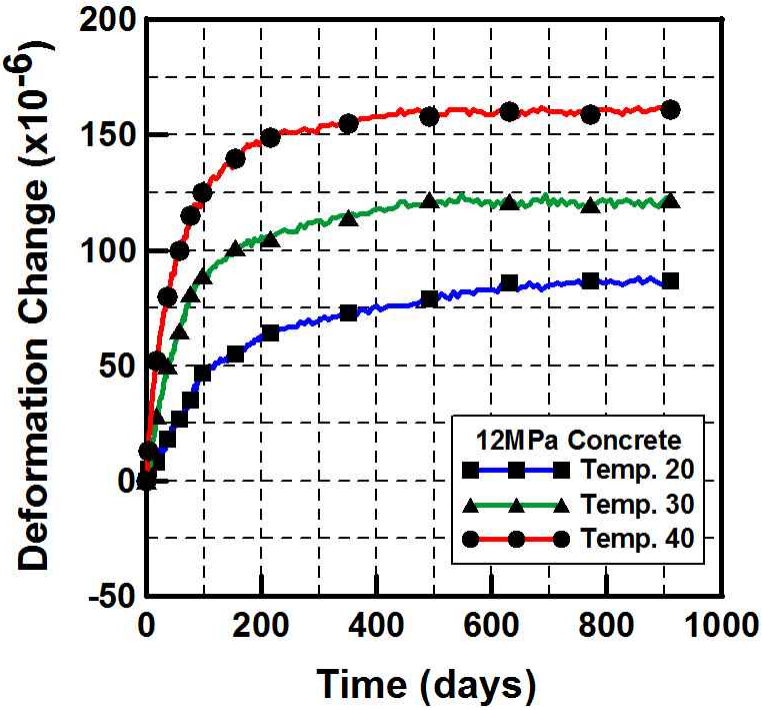


그림 3.5.14 양생온도에 따른 K12-0에 대한 K12-5의 팽창량

그림 3.5.15 ~ 그림 3.5.17은 24 MPa 콘크리트의 재령 900일까지의 길이변화를 나타낸 것이다. 그림 3.5.18은 K24-0 콘크리트에 대한 K24-5 콘크리트의 상대적인 팽창량을 양생온도에 따라 정리해 놓은 것이다. 그림을 보면 양생온도가 높을수록 MgO의 팽창효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 고온에서 양생한 시편일수록 초기에 빠른 팽창속도를 보였다. 이는 양생온도가 높을수록 MgO의 수화도가 높고 MgO의 수화속도가 빠르게 나타나기 때문으로 판단된다. 또한 20℃에서 양생한 시편의 경우 길이변화가 점차적으로 증가한 반면, 40℃에서 양생한 시편은 초기에 큰 팽창을 보이고 장기재령에서 팽창속도가 감소하였는데 양생온도가 높을수록 MgO의 수화반응이 촉진되어 초기 재령에 MgO에 의한 팽창효과가 집중되었고 낮은 양생온도에서는 긴 재령에 걸쳐 느리게 진행되었기 때문으로 판단된다.

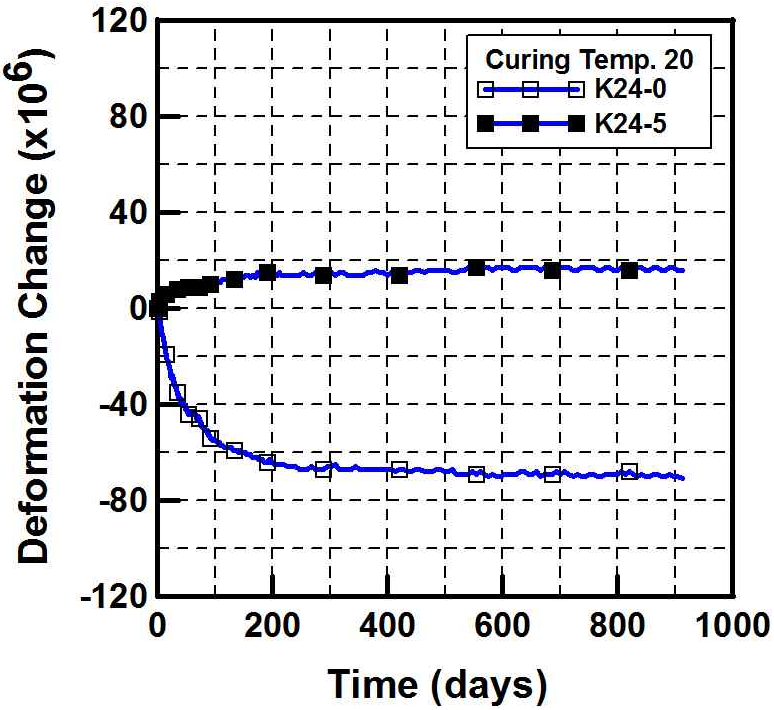


그림 3.5.15 양생온도 20℃에서의 24 MPa 콘크리트의 길이변화

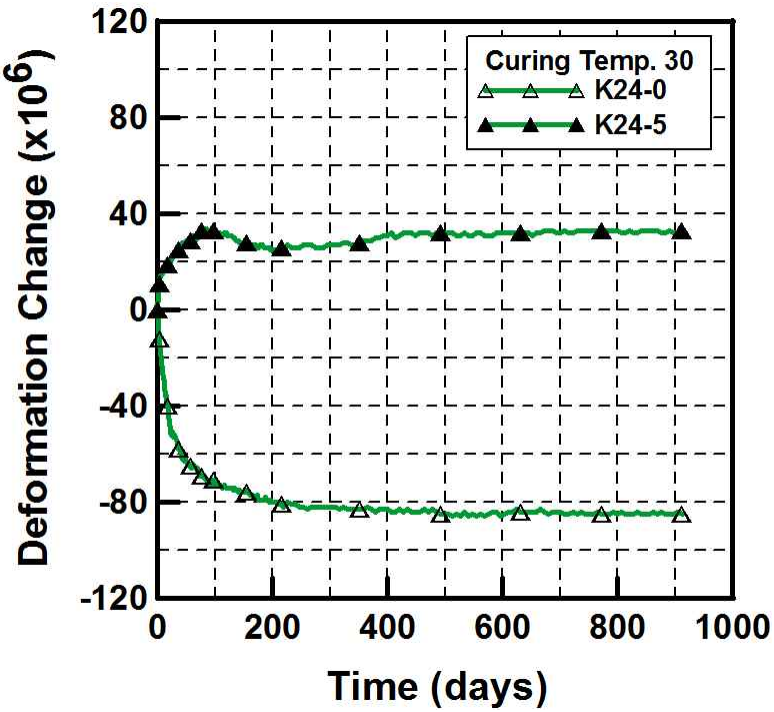


그림 3.5.16 양생온도 30℃에서의 24 MPa 콘크리트의 길이변화

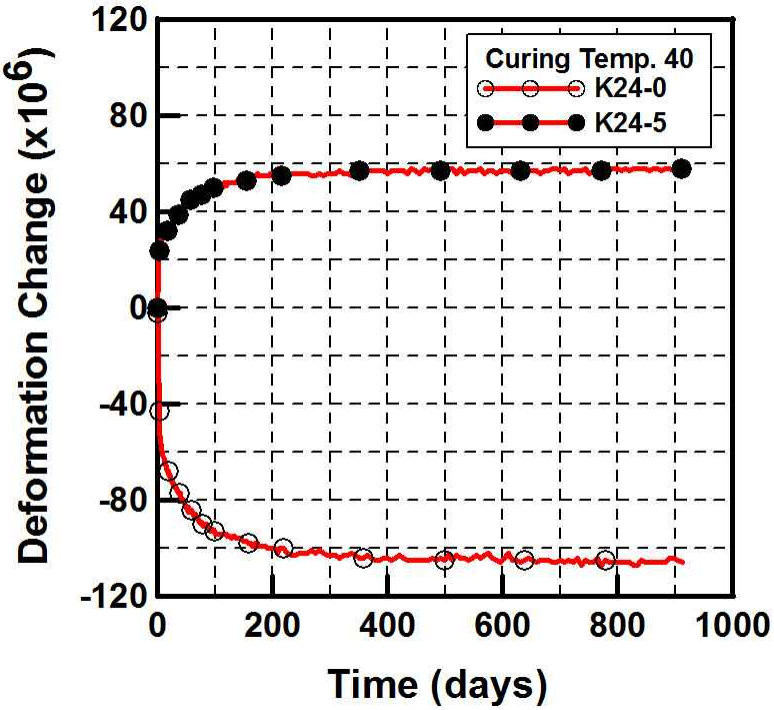


그림 3.5.17 양생온도 40℃에서의 24 MPa 콘크리트의 길이변화

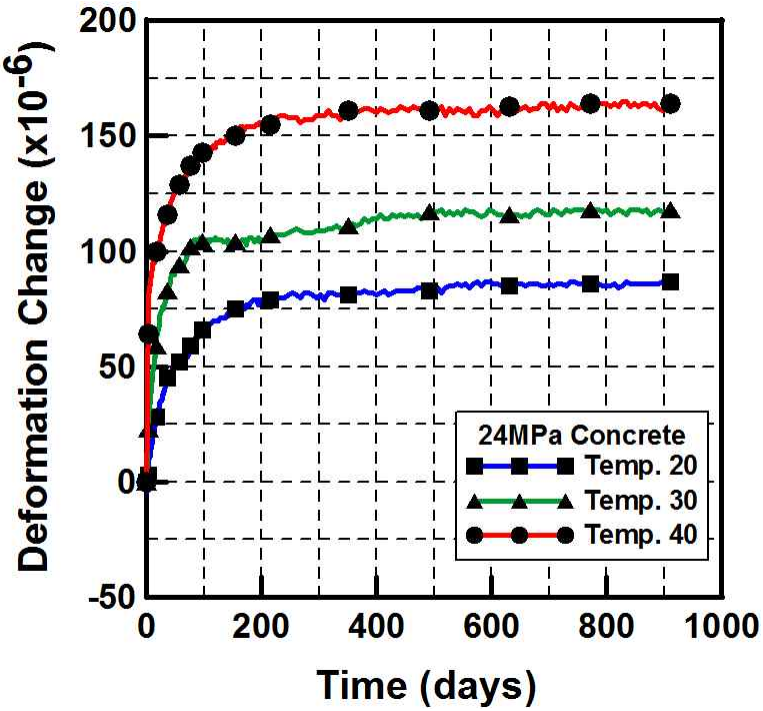


그림 3.5.18 양생온도에 따른 K24-0에 대한 K24-5의 팽창량

그림 3.5.19 ~그림 3.5.21에 45 MPa 콘크리트의 재령 900일까지의 길이변화가 정리되어 있다. 45 MPa 콘크리트는 대부분의 시편에서 길이변화가 일정한 값에 수렴하는 형태를 보였다. 이는 모든 시편에서 낮은 w/b로 인해 초기에 많은 자기수축이 일어났기 때문에 장기재령에서 팽창량이 상대적으로 작기 때문으로 판단된다.

그림 3.5.22는 K45-0에 대한 K45-5의 상대적인 팽창량을 양생온도에 따라 정리한 것이다. 40℃에서 양생한 시편의 경우 20, 30℃에서 양생한 시편에 비해 큰 팽창량을 보였다. 이는 고온에서 양생한 경우 수화가 활발히 진행되어 초기재령에서 MgO의 팽창성이 집중되고 그 팽창효과가 장기재령까지 유지되기 때문에 재령 900일에 관찰된 장기팽창량이 큰 것으로 사료된다. 또한 20, 30, 40℃로 양생온도가 증가할수록 팽창량이 빨리 수렴하는 것을 확인할 수 있었으며, 특히 양생온도 20℃의 K45-5는 900일까지 팽창효과가 계속 나타났다.

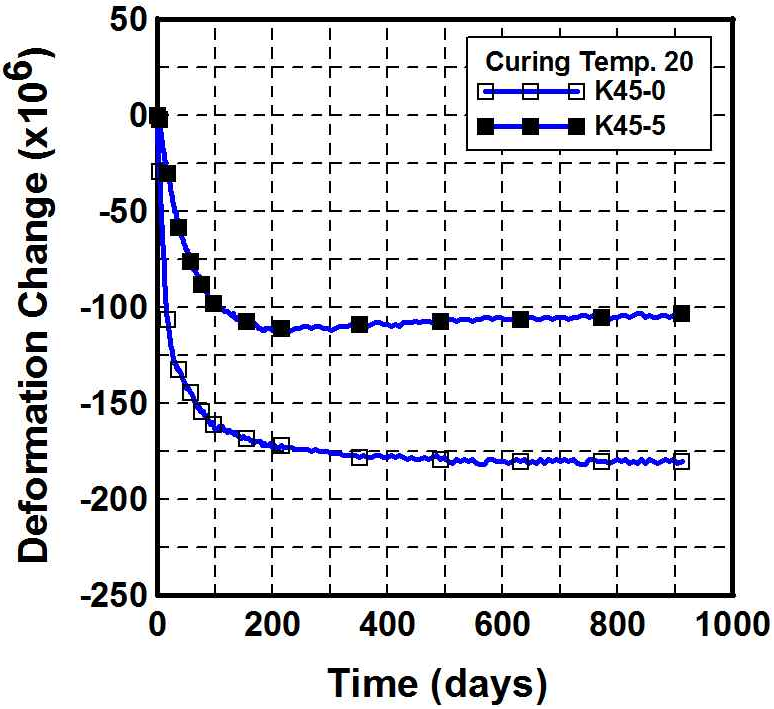


그림 3.5.19 양생온도 20℃에서의 45 MPa 콘크리트의 길이변화

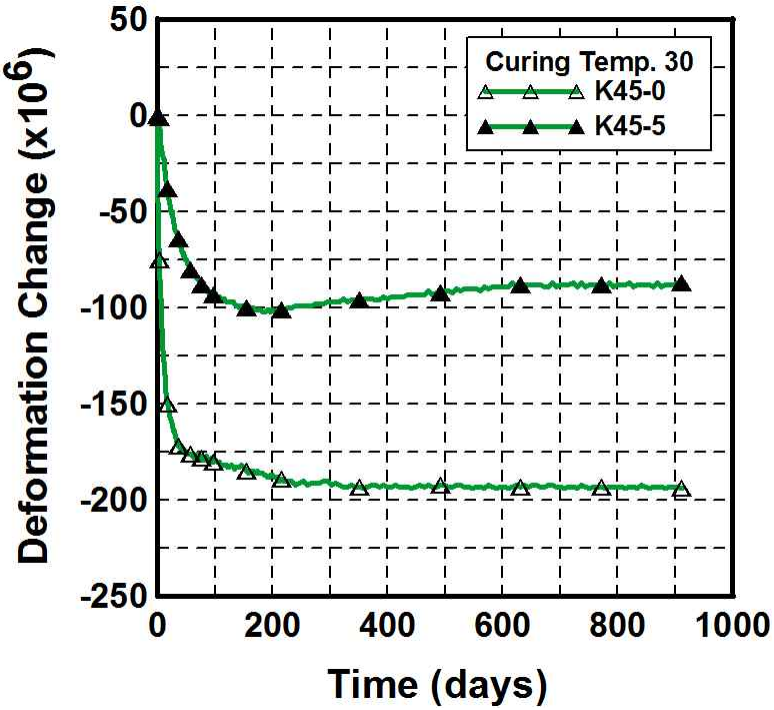


그림 3.5.20 양생온도 30℃에서의 45 MPa 콘크리트의 길이변화

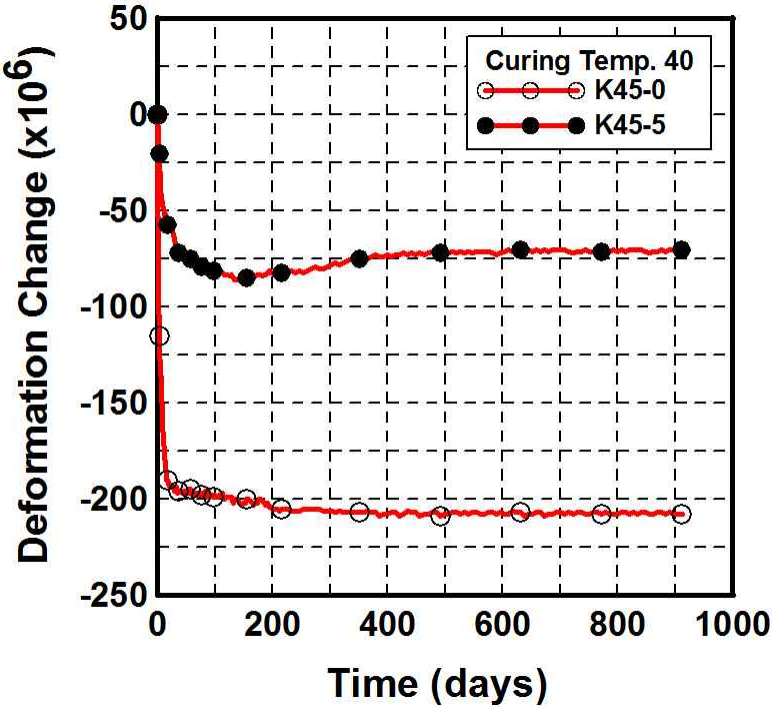


그림 3.5.21 양생온도 40℃에서의 45 MPa 콘크리트의 길이변화

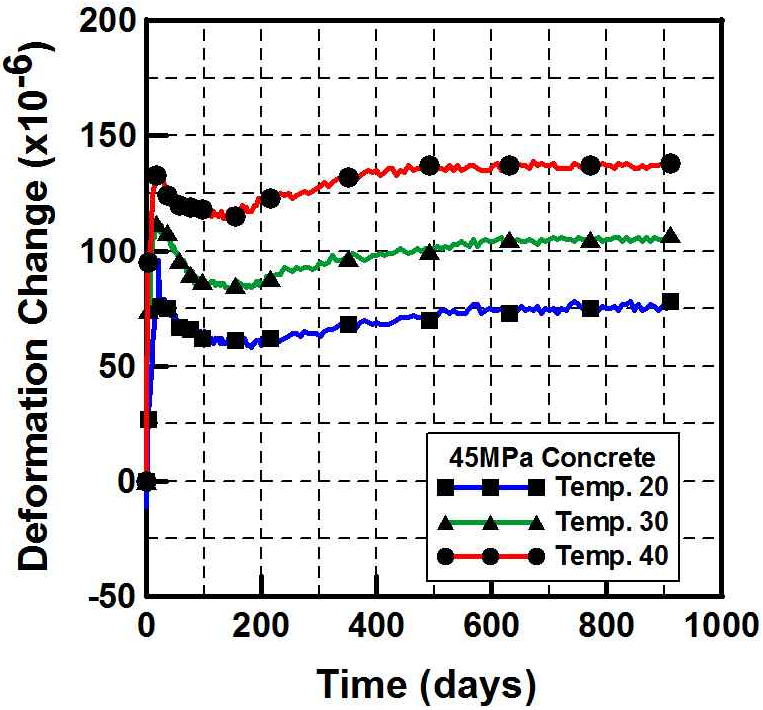


그림 3.5.22 양생온도에 따른 K45-0에 대한 K45-5의 팽창량

라. 장기팽창성 콘크리트의 팽창 모델

본 연구에서는 장기팽창성 콘크리트의 팽창 모델을 다음과 같이 제안하였다.

$$\epsilon(t) = \triangle\epsilon_{MgO}(t) + \epsilon_0(t) \tag{3.5.5}$$

여기서, $\epsilon(t)$는 재령 t에서의 MgO를 혼입한 장기팽창성 콘크리트의 자기변형량, $\triangle\epsilon_{MgO}(t)$는 재령 t에서의 MgO 혼입에 의한 자기팽창 증가량, $\epsilon_0(t)$는 재령 t에서의 일반 콘크리트의 자기수축량이다.

식 (3.5.5)를 이용하면 MgO를 혼입한 장기팽창성 콘크리트의 자기변형량을 MgO를 혼입함으로써 증가되는 자기팽창 증가량($\triangle\epsilon_{MgO}$)과 일반 콘크리트의 자기수축량(ϵ_0)으로 구분하여 예측할 수 있으며, 이때 일반 콘크리트의 자기수축량(ϵ_0)은 다양한 예측 모델 및 실험값을 사용할 수 있기 때문에 여러 가지 배합 및 양생 조건에서 장기팽창성 콘크리트 팽창효과를 보다 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

먼저, MgO 혼입에 의한 자기팽창 증가량($\triangle\epsilon_{MgO}$)은 5 % 수준으로 MgO 분말을 혼입한 장기팽창성 콘크리트의 길이변화 시험결과를 바탕으로 다음과 같이 예측식을 제안하였다.

$$\triangle\epsilon_{MgO}(t) = \triangle\epsilon_{\infty}\{1-\exp(-\alpha\times t^{0.7})\} \quad (3.5.6)$$

여기서, $\triangle\epsilon_{MgO}(t)$는 재령 t에서의 MgO의 자기팽창 증가량, $\triangle\epsilon_{\infty}$는 MgO의 최종 자기팽창 증가량, α는 MgO의 팽창 속도 계수, t는 재령(day)이다.

본 연구에서 수행한 길이변화 실험결과를 바탕으로 최종 자기팽창 증가량은 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$\triangle\epsilon_{\infty} = 67.8\times\exp(0.4\times w/b)\times\left(\frac{T}{20}\right)^{0.86} \quad (3.5.7)$$

여기서, $\triangle\epsilon_{\infty}$는 MgO의 최종 자기팽창 증가량, T는 양생온도(℃)이다. 콘크리트의 최종 자기팽창 증가량($\triangle\epsilon_{\infty}$)은 양생온도, 적용 콘크리트의 물/결합재 비(w/b)에 영향을 받는다. 실험결과, 양생온도가 높고 콘크리트의 w/b가 클수록 MgO 콘크리트의 팽창량은 크게 나타났는데 이는 w/b가 높은 콘크리트에서 MgO의 수화에 필요한 수분이 충분히 공급되기 때문으로 판단된다.

콘크리트의 팽창 속도 계수(α)는 양생온도(℃), 콘크리트의 물/결합재 비(w/b)에 영향을 받는다. MgO 콘크리트의 팽창속도는 양생온도가 높을수록 MgO의 수화반응이 촉진되어 팽창이 빠르게 나타났다. 또한 콘크리트의 w/b가 높을수록 MgO 콘크리트의 초기 팽창이 빠르게 나타났는데, 이는 w/b가 낮은 콘크리트에서 시멘트의 수화반응이 빠르게 일어나 pH가 급격히 높아지기 때문에 MgO의 수화 또한 빠르게 진행되었기 때문인 것으로 판단된다. 본 연구에서 측정한 MgO 콘크리트의 팽창실험결과를 통해 얻은 팽창속도 계수식은 다음과 같다.

$$\alpha = 0.0022\times T^{0.68}\times(w/b)^{-1.75} \quad (3.5.8)$$

여기서, α는 MgO의 팽창 속도 계수, T는 양생온도(℃)이다.

식 3.5.6에서 제안한 MgO 혼입에 따른 팽창량의 팽창속도계수(α)와 최종 자기팽창 증가량($\triangle\epsilon_{\infty}$) 및 실험에서 얻은 최종 자기팽창 증가량을 표 3.5.10에 정리하였다. 실험값과 예측값의 최종 자기팽창 증가량 및 상관계수(R^2)를 미루어 본 연구에서 제안한 식으로 MgO의 최종 자기팽창 증가량을 잘 예측할 수 있음을 알 수 있다.

표 3.5.27 MgO 팽창효과 예측 모델식 (3.5.6)의 계수 $\triangle\epsilon_{\infty}$과 α값

구분		K12-T20	K12-T30	K12-T40	K24-T20	K24-T30	K24-T40	K45-T20	K45-T30	K45-T40
$\triangle\epsilon_{\infty}$ ($\times10^{-6}$)	실험값	87	122	161	84	118	156	77	107	138
	예측값	88	125	160	82	116	149	78	111	142
α		0.0359	0.0472	0.0574	0.0609	0.0803	0.0976	0.1059	0.1396	0.1697
R^2		0.981	0.995	0.999	0.997	0.980	0.959	0.637	0.405	0.662

그림 3.5.23 ~3.5.25는 MgO 혼입에 따른 자기팽창 증가량($\triangle\epsilon_{MgO}$)의 예측값과 실험값을 비교하여 나타낸 것으로 K12, K24의 실험결과가 MgO 자기팽창 증가량 모델의 예측값과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 반면 K45의 모델은 실험값과 초기 슬로프에서 다소 차이를 보이는데, 이는 K45-5 실험결과가 다른 배합과 다르게 초기에 팽창효과가 잘 유지되지 않고 상이한 팽창 경향을 보였기 때문으로 사료된다.

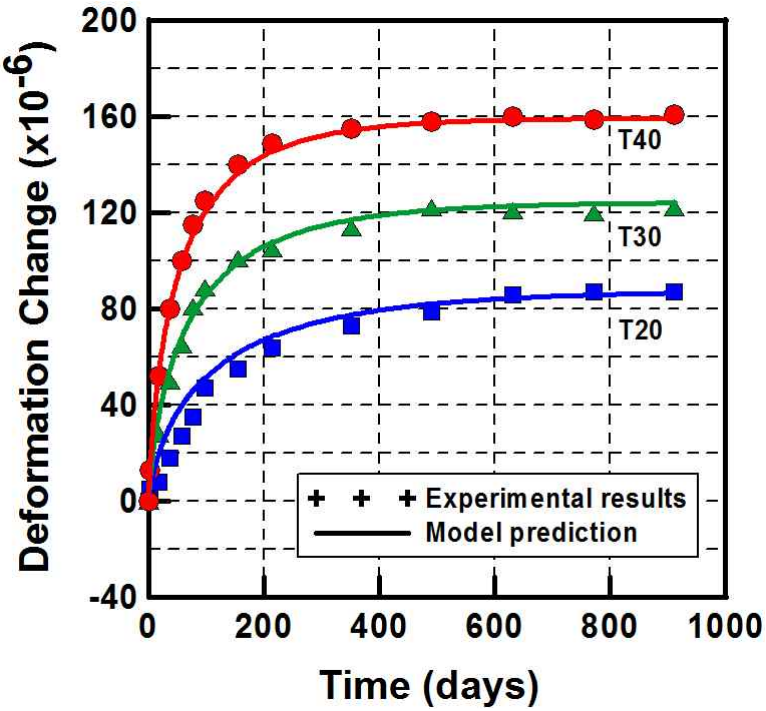


그림 3.5.23 K12 콘크리트의 양생온도에 따른 MgO 자기팽창 증가량 실험값과 모델 예측값의 비교

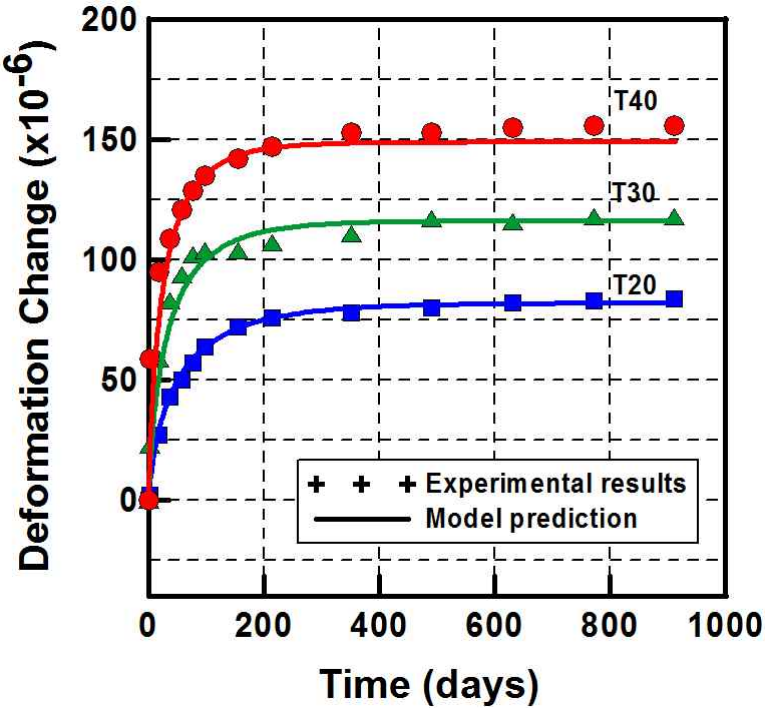


그림 3.5.24 K24 콘크리트의 양생온도에 따른 MgO 자기팽창 증가량 실험값과 모델 예측값의 비교

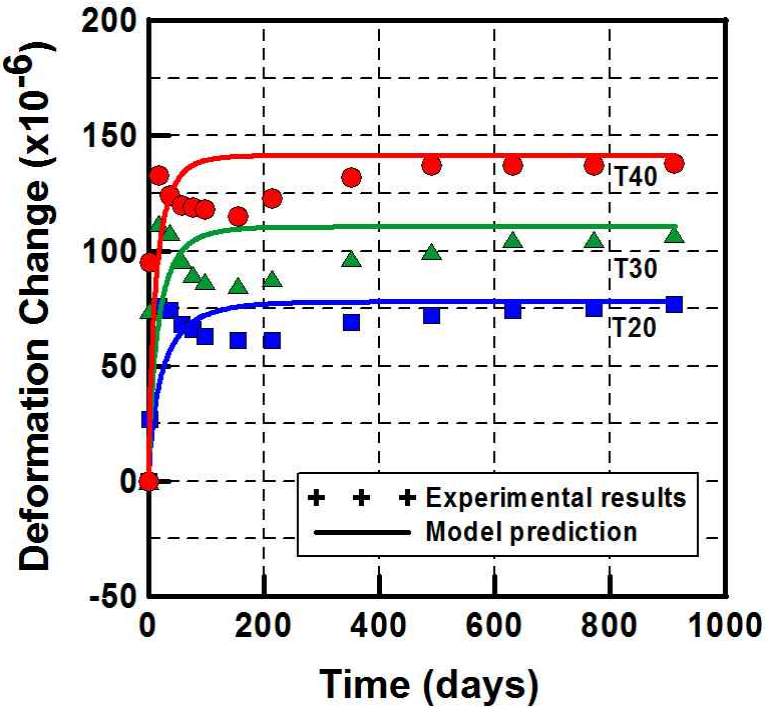


그림 3.5.25 K45 콘크리트의 양생온도에 따른 MgO 자기팽창 증가량 실험값과 모델 예측값의 비교

본 연구에서 수행한 일반 콘크리트의 길이변화 시험 결과를 이용하여 Miyazawa & Tazawa 모델을 MgO를 혼입하지 않은 일반 콘크리트의 자기수축량(ϵ_0)를 예측할 수 있도록 다음과 같이 수정하였다.

$$\epsilon_0(t) = \epsilon_\infty(w/b) \times \beta(t) \tag{3.5.9}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_\infty(w/b) &= -2{,}360\exp[-7.2(w/b)] \quad \text{for } T=20℃ \\ \epsilon_\infty(w/b) &= -1{,}760\exp[-6.3(w/b)] \quad \text{for } T=30℃ \\ \epsilon_\infty(w/b) &= -1{,}430\exp[-5.5(w/b)] \quad \text{for } T=40℃ \end{aligned} \tag{3.5.10}$$

$$\beta(t) = 1 - \exp(-a \times t^b) \tag{3.5.11}$$

여기서, $\epsilon_\infty(w/b)$는 w/b에 따른 최종 자기 수축 변형률($\times 10^{-6}$)이며, t는 재령(day), a, b는 w/b에 대한 상수로 본 연구에서 제안한 값은 표 3.5.11과 같다.

표 3.5.11 w/b에 따른 상수 a, b

	w/b = 0.65	w/b = 0.48	w/b = 0.35
a	0.02(T/20)	0.06(T/20)	0.6(T/20)
b	0.85	0.70	0.30

콘크리트의 수축 속도를 결정하는 계수 a, b 모두 w/b가 낮아질수록 작아지는 것을 알 수 있으며, 이는 콘크리트의 w/b가 낮을수록 초기부터 시멘트의 수화가 빠르게 진행되어 콘크리트의 수축이 크게 나타나기 때문으로 사료된다.

식 (3.5.9)의 콘크리트의 수축모델에 의한 예측 결과 및 일반 콘크리트의 길이변화 실험 결과가 그림 3.5.26~28에 비교 정리하였다. 저강도인 12 MPa의 콘크리트를 20℃에서 양생한 경우 예측 모델의 초기 수축이 실험 결과와 상이하게 나타났는데, 이는 20℃에서 양생한 K12-0의 경우 초기에 약간의 팽창양상을 나타냈는데 이는 수축모델이 팽창경향을 반영하지 않았기 때문이다. 하지만 전체적으로 Miyazawa & Tazawa의 수정모델이 본 연구에서 얻은 MgO를 혼입하지 않은 K12-0, K24-0, K45-0의 길이변화를 잘 나타내는 것을 알 수 있다.

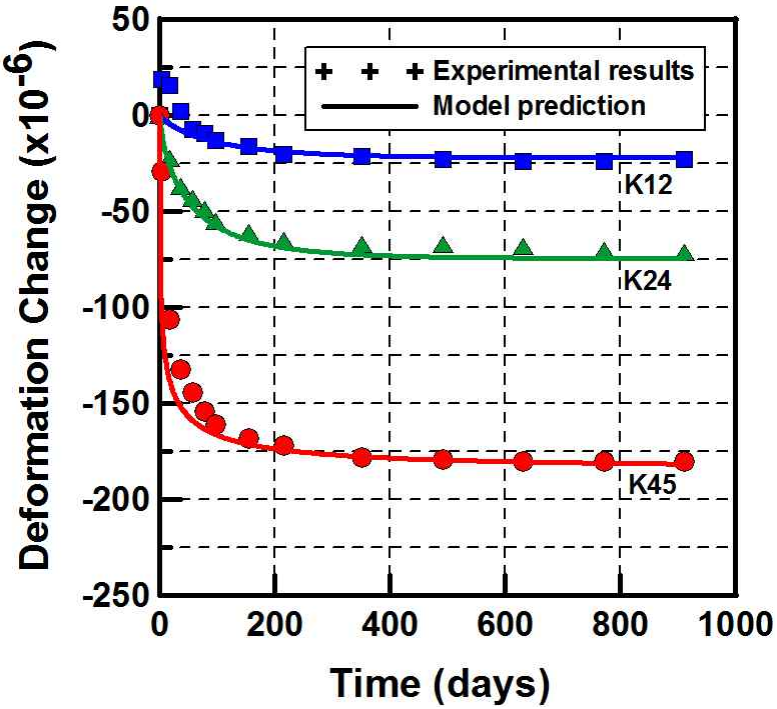


그림 3.5.26 양생온도 20℃에서 w/b에 따른 일반 콘크리트의 자기수축량 실험값과 모델 예측값의 비교

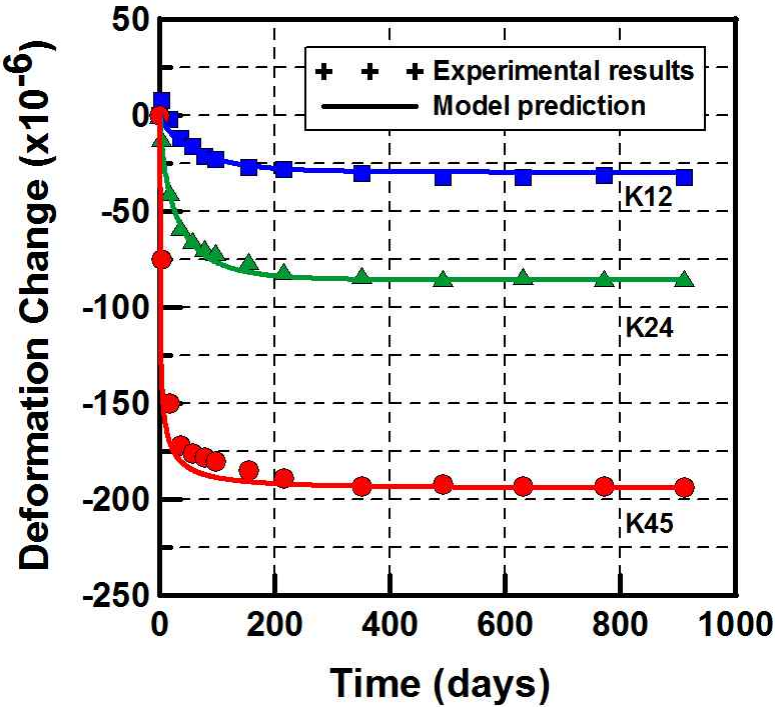


그림 3.5.27 양생온도 30℃에서 w/b에 따른 일반 콘크리트의 자기수축량 실험값과 모델 예측값의 비교

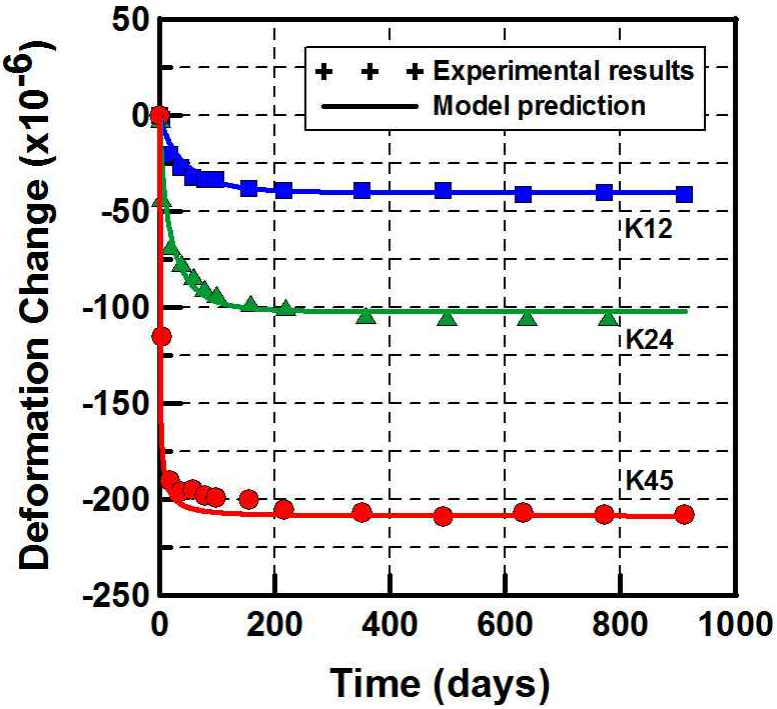


그림 3.5.28 양생온도 40℃에서 w/b에 따른 일반 콘크리트의 자기수축량 실험값과 모델 예측값의 비교

식 (3.5.6)을 이용하여 예측한 MgO 혼입에 따른 자기팽창 증가량($\triangle\epsilon_{MgO}$)과 식 (3.5.9)의 자기수축모델을 통해 얻은 일반 콘크리트의 자기수축량(ϵ_0)을 합산한 자기변형량(ϵ)을 실험결과와 함께 그림 3.5.29 ~ 3.5.31에 나타내었다. 식 (3.5.5)를 이용하여 얻은 자기변형 모델 예측값을 5%수준으로 MgO를 치환한 MgO 콘크리트의 실험값과 비교하면, K45-5 콘크리트를 제외하고 예측모델이 실험값을 잘 반영하는 것을 알 수 있다. K45-5 콘크리트의 경우, 모델이 최종 자기변형량은 비교적 잘 예측하지만 초기 기울기와 상이한 경향을 나타내었는데, 이는 45 MPa 콘크리트가 12, 24 MPa 콘크리트와 초기 팽창경향이 다르게 나타났기 때문으로 판단된다. (그림 3.5.22 참조).

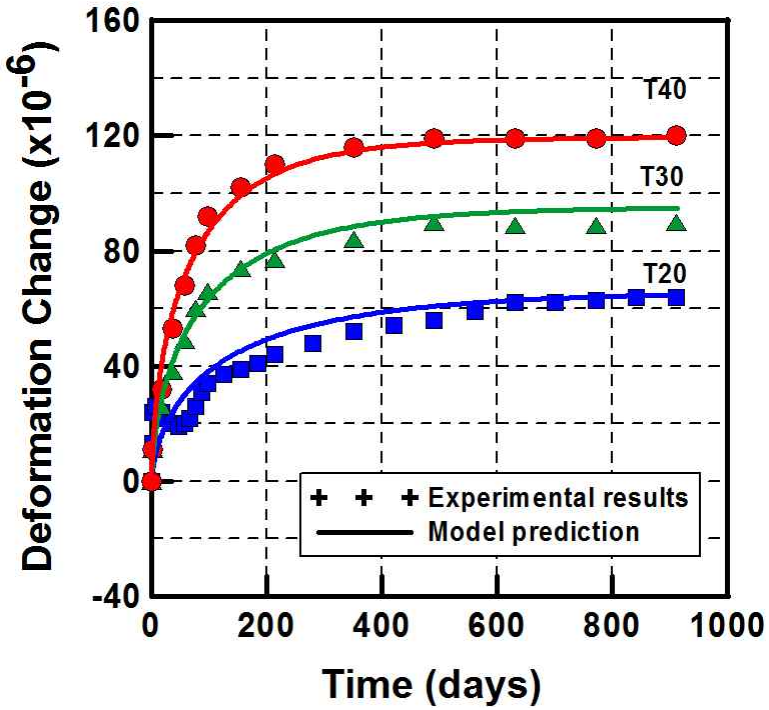


그림 3.5.29 K12-5의 팽창모델식에 의한 예측값과 실험값의 비교

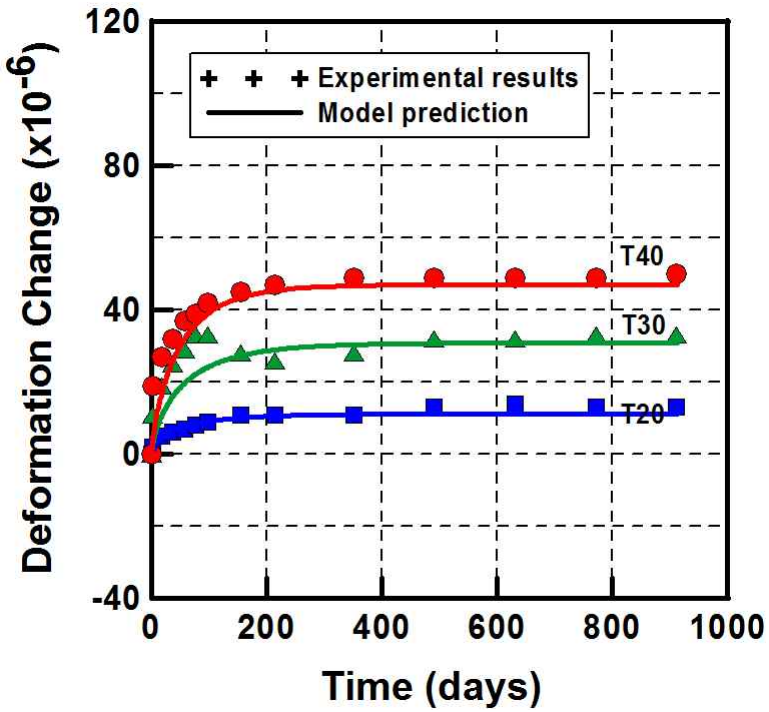


그림 3.5.30 K24-5의 팽창모델식에 의한 예측값과 실험값의 비교

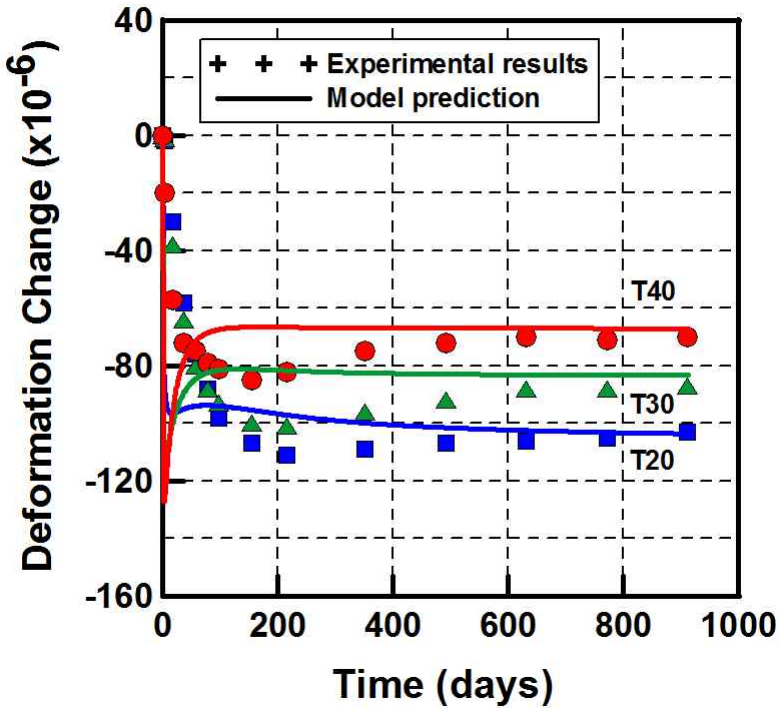


그림 3.5.31 K45-5의 팽창모델식에 의한 예측값과 실험값의 비교

6. 소결론

1) 본 연구에서는 장기팽창성 재료인 MgO를 5 % 수준으로 혼입한 콘크리트의 강도 특성 및 길이변화 특성을 장기재령까지 관찰하였으며, 실험결과를 바탕으로 강도 예측 모델 및 팽창 예측 모델을 제안하였다.

2) MgO를 혼입한 콘크리트에서 초기재령에서 다소 낮은 압축강도를 보였지만 장기적으로 MgO의 수화가 진행됨에 따라 강도가 증진되는 경향을 나타냈다. 이는 MgO의 수화반응이 진행함에 따라 콘크리트의 미세구조가 변화하기 때문으로 판단되며 이러한 미세구조의 변화는 콘크리트의 물/결합재 비(w/b)에 따라 다른 영향을 끼칠 수 있기 때문에 팽창재료로 MgO를 사용할 경우 이에 대한 고려가 필요하다고 판단된다. 본 연구에서 제안한 압축강도 모델을 통해 MgO 콘크리트가 MgO를 혼입하지 않은 일반 콘크리트에 비해 다소 느린 강도발현속도를 보이는 것을 확인할 수 있었으며 따라서 팽창재료로 MgO를 사용할 경우 이에 대한 고려가 필요하다고 사료된다.

3) MgO의 혼입으로 팽창효과를 얻을 수 있었으며 장기재령에서 팽창속도가 감소하여 팽창량이 수렴하는 경향을 나타내 MgO를 이용하여 안정적인 팽창효과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 또한 MgO의 팽창효과는 양생온도에 따라 팽창량 및 팽창속도에 큰 차이를 보였는데 고온에서 큰 팽창량과 초기 재령에 빠른 팽창속도를 나타냈다. 이를 통해 MgO의 팽창효과 및 팽창속도를 양생온도를 통해 조절할 수 있다고 판단된다. 본 연구에서는 길이변화 실험결과를 바탕으로 장기팽창성 콘크리트의 팽창 모델을 제안하였으며, 또한 모델을 이용한 예측값을 실험값과 비교하여 모델 예측값이 실험값과 일치하는 것을 확인하였다. 따라서 기존의 콘크리트 자기수축예측 모델을 이용하여 다양한 배합 조건 및 양생조건의 콘크리트에 MgO의 팽창효과를 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

4) 본 연구에서는 콘크리트의 물/결합재 비, 양생온도를 변수로 장기팽창성 콘크리트의 특성을 파악하였다. 추후 MgO의 사용량 등에 대한 변수를 추가하여 MgO의 압축강도 및 팽창 모델을 제안한다면 MgO를 장기팽창성 혼화재료로 사용하는데 기초적인 자료로 유용할 것이다.

제 6 절 MgO 혼입 콘크리트의 팽창특성 재현성 실험(Ⅳ)

1. 실험 개요

가. 시멘트

<Medium-Heat Portland Cement, Low-Heat Portland Cement and Low-Heat Slag Portland Cement> (GB200-2003)에 의해 시멘트특성시험을 수행하였다. 시험결과는 표 3.6.1과 표 3.6.2에 도시하였다. 시멘트의 화학특성은 <Test Methods for Chemical Analysis of Cement>(GB/T176-2008)를 사용하여 시험하였다.

시험결과는 표 3.6.3에 도시하였다. 재령 3일과 7일에서의 수화열은 278,300 kJ/㎏이다. TAM air micro-thermal analyzer를 이용하여 일정온도에서 시멘트의 수화열과 Fly-ash 혹은 MgO를 혼입한 시멘트에 대한 시험을 실시하였다. 이 실험결과는 시멘트의 수화열 진행과정을 이해하는데 도움을 준다. 실험결과는 표 3.6.4와 그림 3.6.1에 도시하였다.

표 3.6.1 시멘트의 물리적 특성

	밀도 (g/㎤)	0.080㎜ 체통과율 (%)	표준입도 (%)	비표면적 (㎠/g)	안전성	시간 (h : min)	
						개시시간	종결시간
시멘트	3.17	0.91	26.6	341	합격	3 : 21	4 : 51
GB200-2003 (서중시멘트)	-	≤12	-	-	합격	≥1:00	≤12 : 00

표 3.6.2 시멘트 강도 시험결과(MPa)

	Compressive strength			Bending strength		
	3d	7d	28d	3d	7d	28d
시멘트	34.4	45.8	58.1	6.2	7.5	8.5
중용열시멘트의 요구조건 (GB200-2003)	≥12.0	≥22.0	≥42.5	≥3.0	≥4.5	≥6.5

표 3.6.3 시멘트의 화학성분 분석 결과 (%)

Chemical composition	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	LOI
시멘트	21.19	4.54	3.20	61.74	3.10	2.15	1.03	0.14	2.39
중용열시멘트의 요구조건 (GB200-2003)					≤5	≤3.5	$Na_2O+0.658K_2O$ ≤0.6		

표 3.6.4 TAM air micro-thermal analyzer에 의한 수화열 시험결과

No.	Hydration heat (kJ/kg)							
	12h	1d	2d	3d	4d	5d	6d	7d
시멘트	14.6	110.0	184.0	221.5	249.5	271.6	289.5	304.2
시멘트 80% : FA 20%	30.4	106.9	162.4	193.3	215.2	232.0	244.8	254.9
시멘트 95% : MgO 5%	12.9	106.3	184.4	221.3	248.7	269.9	286.9	300.8
시멘트 75% : FA 20% : MgO 5%	26.3	104.3	163.7	194.8	216.7	233.2	245.6	255.4

No.	Hydration heat (kJ/kg)							
	8d	9d	10d	11d	12d	13d	14d	15d
시멘트	316.3	326.3	334.4	341.3	347.1	352.1	356.4	360.3
시멘트 80% : FA 20%	263.3	270.4	276.6	281.9	286.7	291.0	295.0	298.6
시멘트 95% : MgO 5%	312.2	321.6	329.4	336.0	341.5	346.3	350.5	354.2
시멘트 75% : FA 20% : MgO 5%	263.3	270.0	275.8	280.9	285.3	289.3	293.0	296.4

No.	Hydration heat (kJ/kg)							
	16d	17d	18d	19d	20d	21d	22d	23d
시멘트	363.7	366.8	369.6	372.1	374.4	376.6	378.6	380.4
시멘트 80% : FA 20%	302.0	305.3	308.4	311.3	314.2	316.9	319.6	322.2
시멘트 95% : MgO 5%	357.5	360.4	363.1	365.6	367.9	369.9	371.9	373.7
시멘트 75% : FA 20% : MgO 5%	299.6	302.6	305.4	308.1	310.7	313.2	315.6	318.0

No.	Hydration heat (kJ/kg)							
	24d	25d	26d	27d	28d			
시멘트	382.2	383.8	385.3	386.8	388.1			
시멘트 80% : FA 20%	324.6	327.0	329.3	331.4	333.5			
시멘트 95% : MgO 5%	375.4	377.7	378.4	379.8	381.2			
시멘트 75% : FA 20% : MgO 5%	320.2	322.3	324.3	326.3	328.1			

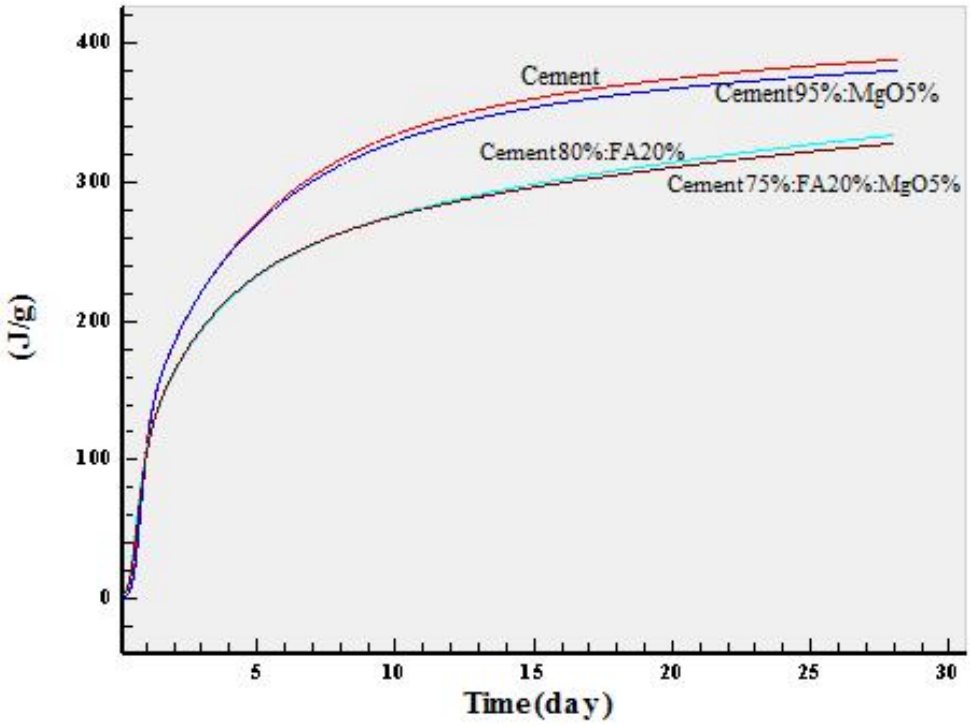


그림 3.6.1 20℃에서의 시멘트 수화열 변화

Red curve : MgO 0%, Blue curve : MgO 5%, Brown curve : MgO 0% + Fly-ash 20%, Green curve : MgO 5% + Fly-ash 20%

나. Fly-ash

Fly-ash는 <Fly Ash Used for Cement and Concrete>(GB/T1596－2005)에 의해 시험을 실시하였으며 시험결과는 표 3.6.5에 나타내었다. Fly-ash를 혼입한 시멘트의 몰탈강도는 표 3.6.6에 나타내었다. Fly-ash의 화학적 특성은 <Test Methods for Chemical Analysis of Cement>(GB/T176-2008)를 이용하여 시험하였으며 시험결과는 표 3.6.7에 나타내었다.

표 3.6.5 Fly-ash 의 물리적 특성 평가 결과

No.	Gravity (g/㎤)	Fineness (%)	Water requirement ratio(%))	Loss on Ignition (%)	SO_3 (%)
Fly-ash	2.34	20.96	94.0	1.07	0.60
GB/T1596－2005 (Grade I fly ash)		≤12	≤95	≤5	≤3

표 3.6.6 Fly-ash를 혼입한 시멘트의 강도시험 결과(MPa)

No.	Compressive strength			Bending strength		
	3d	7d	28d	3d	7d	28d
시멘트	34.4	45.8	58.1	6.2	7.5	8.5
Fly-ash : 20%		36.1	48.8		6.8	8.7
Fly-ash : 30%		29.4	42.9		5.7	7.9

표 3.6.7 Fly-ash의 화학성분 분석 결과 (%)

Chemical composition	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	LOI
Fly-ash	54.65	19.62	9.32	8.66	2.20	0.60	1.02	0.63	1.07

다. 골재

(1) 잔골재

잔골재의 시험은 <Test Code for Aggregates of Hydraulic Concrete >(DL/T5151-2001)에 의해 실시하였으며 잔골재의 입도분포, 조립율, 석분성분, S.S.D 상태에서의 중량, 수분흡수율 등의 특성을 파악하였다. 입도분포는 표 3.6.8과 그림 3.6.2에 나타내었다. 잔골재의 특성은 표 3.6.9에 나타내었다.

표 3.6.8 국내골재의 입도시험 결과

Size of sieve pores (mm)		Accumulative sieve residue (%)							Fineness modulus
		5	2.5	1.25	0.63	0.315	0.16	<0.16	
Sand from K-water		0.32	1.92	6.36	25.53	88.27	98.74	100	2.20
Sand classification	fine	0	3～10	5～30	30～50	55～70	85～90	100	1.78～2.50
	medium	0～8	10～25	30～50	50～67	70～83	90～94	100	2.50~3.19
	coarse	8～15	25～40	50～70	67～83	83～95	94～97	100	3.19~3.85

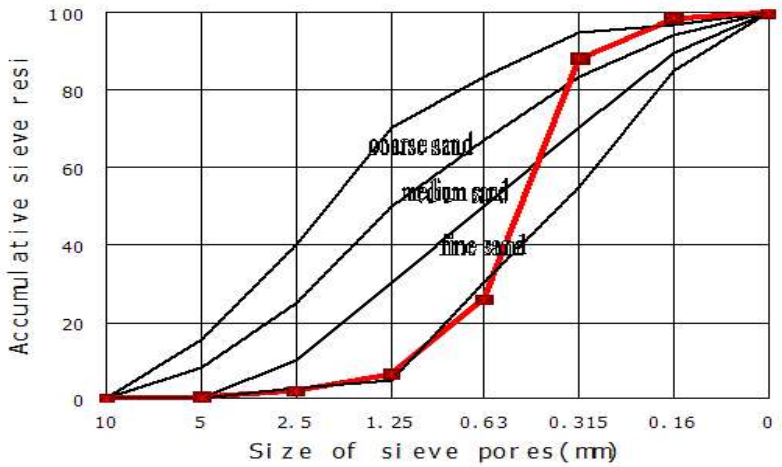


그림 3.6.2 Gradation curve of Sand

표 3.6.9 잔골재의 물리적 성질 시험결과

Items \ Sand	Sand
Fineness modulus	2.20
Stone powder content, %	1.26
Gravity on S.S.D basis, kg/㎥	2.607
Water absorption ratio on S.S.D basis, %	0.69
Mica content, %	0.02
Sulfide content, %	0.05
Organic material content	Passed
Light weight material content, %	0.07

(2) 굵은 골재

굵은 골재는 <Test Code for Aggregates of Hydraulic Concrete >(DL/T5151-2001)에 의해 실시하였으며 S.S.D상태에서의 중량, 수분흡수율 firmness and crushing index 등을 시험하였다.

표 3.6.10 굵은 골재의 물리적 성질 시험결과

Items		5~25 ㎜ aggregate	5~40 ㎜ aggregate
Gravity on S.S.D basis, kg/㎥		2.698	2.724
Water absorption ratio on S.S.D basis, %		0.55	0.43
Firmness, %	5~10 ㎜	4.5	-
	10~20 ㎜	5.2	-
	20~40 ㎜	-	0.3
Crushing index, %		8.4	-

라. MgO 팽창재

MgO팽창재에 대한 시험은 <Test Methods for Chemical Analysis of Cement>(GB/T176-2008), <Medium-Heat Portland Cement, Low-Heat Portland Cement and Low-Heat Slag Portland Cement> (GB200-2003), <Fly Ash Used for Cement and Concrete>(GB/T1596－2005)을 이용하여 실시하였다. 시험결과는 표 3.6.11과 표 3.6.12에 나타내었다.

표 3.6.11 MgO 팽창재의 물리적 특성 시험결과

Producer	Gravity (g/㎤)	Fineness (%)	Specific surface area (㎠/g)
Haicheng DongFangHuaMei	3.43	3.48	2920

표 3.6.12 MgO 팽창재의 화학적 특성 시험결과(%)

Producer	MgO	CaO	SiO_2	Loss on Ignition
Haicheng DongFangHuaMei	92.44	1.16	2.60	3.15
Standard Requirement*	≥90	<2	<4	≤4

* Note: The requirement was according to <Requirement on Lightly Burnt MgO for Hydraulic Engineering>(Trial Implementation) established by State Resources Burea and Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Designing in 1994.

2. MgO팽창재의 시험 및 결과

가. 활성도 시험

MgO 팽창재의 활성도는 구연산염 시험법(citrate method)를 이용하여 실시하였다. 2.6000±0.0005 g의 구연산($C_6H_8O_7 \cdot H_2O$)과 증류수로 200 ㎖의 구연산용액을 준비하고 일정한 온도(30℃±1℃)의 수조에 용액을 담근 후 교반을 위해 4.5 ㎝의 교반기와 분당회전수 200±10의 회전속도를 가지는 HO1-1B type의 자성교반기(magnetic agitator)로 이동시킨다. 교반과정동안 용액을 가열하지 않는다. 1.7 g의 MgO 시료를 용액에 넣고 페놀프탈레인 용액 2 방울을 첨가한 후 용액의 색깔이 밝은 붉은색이 될 때까지의 시간을 기록한다.

시험시작부터 종료할 때까지의 시간을 MgO의 활성지표로 정의한다. 시험오차를 줄이기 위해 온도는 30℃로 일정하게 유지해야 하며 하단이 평평한 비이커를 사용해야한다. 1% 페놀프탈레인용액 1 g과 100 ㎖의 알코올시약(95%)를 준비한다.

나. 활성도시험 결과

MgO 팽창재의 활성도 시험결과, 활성지표는 337초였다.

다. 안정도 시험

<Autoclave Method for Soundness of Portland Cement>(GB/T750-1992)에 의한 오토크레이브 시험법을 이용하여 실시하였다. 물-시멘트 비는 시방서에 의해 결정하였다. MgO와 fly-ash의 혼입량은 시멘트 중량비로 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6%를 사용하였다.

라. 안정도 시험 결과

안정도 시험결과는 표 3.6.13에 나타내었다.

표 3.6.13 오토크레이브 안정도 시험결과

Cement Type	FA dosage (%)	MgO dosage (%)	Expansion ratio after boiling (%)	Expansion ratio after autoclaved test (%)	Remarks
Cement from K-water	0	0	0.087	0.130	
		1	0.092	0.187	
		2	0.097	0.282	
		3	0.109		Distorted and curved, unable to measure
		4	0.113		Distorted and curved, unable to measure
		5	0.145		Distorted and curved, unable to measure
		6	0.161		Distorted and curved, unable to measure
	20	0	0.056	0.103	
		1	0.064	0.159	
		2	0.073	0.247	
		3	0.083		Distorted and curved, unable to measure
		4	0.096		Distorted and curved, unable to measure
		5	0.105		Distorted and curved, unable to measure
		6	0.113		Distorted and curved, unable to measure

3. MgO 콘크리트

가. MgO 콘크리트의 배합표와 굳지 않은 콘크리트의 특성

MgO 콘크리트의 배합표는 한국(K-water)에서 제공하였으며. 시험배합의 경우, 슬럼프(8㎝)와 공기량(5±1.5%)를 맞추기 위해 화학혼화재의 혼입량을 조절하였다.

W/B:35%-MgO:0%, W/B:35%-MgO:5%, W/B:45%-MgO:5%의 콘크리트에는 5～25㎜ 골재를 사용하였으며 W/B:65%-MgO:5%에 대해서는 5～40㎜ 골재를 사용하였다. 배합표는 표 3.6.14에 나타내었다. 굳지 않은 콘크리트의 특성은 <Test Code for Hydraulic Concrete>(DL/T5150-2001)에 의거하여 시험을 실시하였으며 시험결과는 표 3.6.15에 나타내었다.

표 3.6.14 콘크리트 배합표 (㎏/㎥)

No.	Water	Cement	FA	MgO	Sand	Stone	SP
W/B:35%-MgO:0%	165.0	377.1	94.3	0	749.9	914.2	2.83
W/B:35%-MgO:5%	165.0	353.6	94.3	23.6	750.2	914.6	2.83
W/B:48%-MgO:5%	165.0	257.8	68.8	17.2	837.8	942.6	1.72
W/B:65%-MgO:5%	165.0	190.4	50.8	12.7	949.6	920.4	1.27

표 3.6.15 굳지 않은 콘크리트의 물리적 특성 시험결과

No.	SP (%)	Slump (cm)	Air Content (%)
W/B:35%-MgO:0%	0.6	20.0	4.8
W/B:35%-MgO:5%	0.6	18.0	5.0
W/B:48%-MgO:5%	0.5	9.2	6.3
W/B:65%-MgO:5%	0.5	7.0	5.6



그림 3.6.3 Slump Tests



그림 3.6.4 Air content test





그림 3.6.5 Specimens for compressive strength 그림 3.6.6 Molding of expansion specimens





그림 3.6.7 Molding of expansion specimens 그림 3.6.8 Specimen (W/B:35%-MgO:0%, 20℃)

나. 콘크리트의 역학성 특성

역학적 특성을 파악하기 위해 콘크리트의 압축강도 시험을 <Test Code for Hydraulic Concrete>(DL/T5150-2001)에 의해 실시하였다. 150 ㎜ × 150 ㎜ × 150 ㎜ 직사각형 시험체를 제작하여 시험을 실시하였다. 시험결과는 표 3.6.15에 나타내었다.

표 3.6.15 콘크리트 압축강도 시험결과

No.	Compressive strength (MPa)								
	7d	14d	28d	56d	90d	0.5y	1y	1.5y	2y
W/B:35%-MgO:0%	44.4	50.9	59.6	65.9	72.8	81.4	79.6	71.6	75.7
W/B:35%-MgO:5%	44.7	48.7	59.4	64.5	68.5	69.9	60.1	58.2	72.5
W/B:48%-MgO:5%	22.2	28.7	35.6	42.7	44.6	48.3	52.1	57.7	58.4
W/B:65%-MgO:5%	11.8	14.0	18.5	24.6	26.8	30.3	32.9	32.9	34.3

다. MgO 콘크리트의 팽창 메커니즘특성 분석 시험결과

이 시험에서는 자기체적 변형에 의해 체적변형(혹은 팽창)의 특성을 파악할 수 있다. 자기체적 변형에 대한 시험은 <Test Code for Hydraulic Concrete> (DL/T5150-2001)에 의해 실시하였으며 자기팽창 변형에 대한 시험결과를 표 3.6.16에 나타내었다.

표 3.6.16 콘크리트 자기팽창 변형 시험결과

No.	Sample No.	W/B	FA dosage, (%)	Cement, (g/㎥)	MgO, (kg/㎥)	Water (kg/㎥)	Temp. (℃)	Autogenous volumetric deformation, ($\times 10^{-6}$)									
								1d	2d	3d	4d	5d	6d	7d	8d	9d	10d
1	W/B35% -MgO0%	0.35	20	377.1	0	165.0	20℃	0	-25.71	-32.05	-38.58	-43.55	-49.14	-54.86	-60.38	-66.09	-71.72
2	W/B35% -MgO5%	0.35	20	353.6	23.6	165.0	20℃	0	-9.95	-9.58	-9.93	-10.68	-12.51	-14.82	-17.29	-20.56	-22.02
3							30℃	0	-16.67	-24.82	-29.88	-34.13	-37.68	-40.45	-43.39	-45.81	-48.59
4							38℃	0	-9.42	-17.53	-22.59	-25.83	-19.57	-24.11	-24.23	-24.74	-25.03
5	W/B48% -MgO5%	0.48	20				20℃	0	2.97	5.17	7.70	8.44	9.06	10.02	11.16	13.11	13.51
6							30℃	0	12.84	14.74	12.57	9.87	5.84	2.71	0.76	1.31	0.75
7							38℃	0	7.35	9.28	8.48	6.27	4.44	4.49	6.86	7.31	6.86
8	W/B65% -MgO5%	0.65	20				20℃	0	1.14	4.15	6.73	9.08	11.42	14.07	17.23	18.59	19.46
9							30℃	0	11.24	14.92	17.08	18.82	20.22	21.12	22.68	22.87	24.04
10							38℃	0	10.85	16.75	21.61	25.82	29.56	32.82	35.81	37.63	40.09

(continued)

No.	Sample No.	W/B	FA dosage, (%)	Cement, (g/㎥)	MgO, (kg/㎥)	Water (kg/㎥)	Temp. (℃)	Autogenous volumetric deformation, ($\times 10^{-6}$)									
								11d	12d	13d	14d	16d	18d	20d	22d	24d	26d
1	W/B35% -MgO0%	0.35	20	377.1	0	165.0	20℃	-76.25	-81.27	-85.83	-90.22	-97.23	-103.1	-111.4	-113.2	-118.3	-122.3
2	W/B35% -MgO5%	0.35	20	353.6	23.6	165.0	20℃	-24.24	-27.29	-29.04	-31.02	-34.43	-36.78	-39.18	-41.18	-42.84	-44.15
3							30℃	-49.90	-51.08	-51.60	-51.56	-54.90	-56.30	-56.61	-57.16	-57.28	-57.75
4							38℃	-24.19	-24.32	-23.10	-23.13	-19.88	-17.40	-14.95	-11.34	-9.06	-10.21
5	W/B48% -MgO5%	0.48	20				20℃	12.27	11.90	10.48	9.76	8.03	5.60	4.84	4.93	5.62	4.72
6							30℃	2.28	2.78	4.16	3.87	4.47	3.92	2.68	3.24	1.35	1.51
7							38℃	7.40	6.54	6.01		-0.37			2.67		0.44
8	W/B65% -MgO5%	0.65	20				20℃	19.61	20.81	20.96	22.01	23.23	23.94	24.74	25.19	25.80	24.74
9							30℃	25.21	26.57	28.20	28.78	32.13	33.45	35.59	37.16	39.26	39.96
10							38℃	42.83	44.20	40.79	40.88	40.32	42.28	44.48	51.42	52.03	53.86

(continued)

No.	Sample No.	W/B	FA dosage, (%)	Cement, (g/㎥)	MgO, (kg/㎥)	Water (kg/㎥)	Temp. (℃)	Autogenous volumetric deformation, ($\times 10^{-6}$)									
								28d	30d	35d	40 d	45d	50d	55d	60d	70d	80d
1	W/B35% -MgO0%	0.35	20	377.1	0	165.0	20℃	-126.5	-129.9	-142.5	-149.5	-150.2	-156.9	-161.3	-165.6	-174.8	-178.8
2	W/B35% -MgO5%	0.35	20	353.6	23.6	165.0	20℃	-45.65	-46.57	-52.54	-55.81	-52.77	-55.76	-56.40	-57.10	-61.17	-59.98
3							30℃	-55.96	-54.22	-47.80	-37.64	-39.94	-35.17	-30.90	-26.21	-17.65	-9.22
4							38℃	-9.24	-6.66	-0.49	2.01	6.37	4.97	7.98	10.96	12.85	17.19
5	W/B48% -MgO5%	0.48	20				20℃	3.60	3.25	4.53	5.10	5.53	6.44	6.44	6.54	6.27	7.21
6							30℃	0.96	-1.57	1.03	1.59	2.78	1.73	2.73	4.87	10.93	12.01
7							38℃			0.73	0.33	2.09	6.41	7.97	9.38	9.37	13.29
8	W/B65% -MgO5%	0.65	20				20℃	23.81	24.33	24.45	24.71	24.91	24.77	25.13	25.74	26.25	27.89
9							30℃	41.60	42.03	47.27	49.56	53.11	57.43	58.57	61.49	65.36	69.85
10							38℃	54.00	55.10	58.39	60.68	62.40		68.10	72.76	72.51	78.23

(continued)

No.	Sample No.	W/B	FA dosage, (%)	Cement, (g/㎥)	MgO, (kg/㎥)	Water (kg/㎥)	Temp. (℃)	Autogenous volumetric deformation, ($\times 10^{-6}$)									
								90d	100d	120d	140d	160d	180d	200d	220d	240d	260d
1	W/B35% -MgO0%	0.35	20	377.1	0	165.0	20℃	-180.2	-182.1	-183.2	-184.1	-182.3	-182.3	-183.3	-184.5	-185.6	-185.8
2	W/B35% -MgO5%	0.35	20	353.6	23.6	165.0	20℃	-57.19	-55.26	-49.70	-44.58	-38.29	-33.5	-31.0	-27.7	-26.5	-24.4
3							30℃	-6.15	4.92	10.01	13.30	7.82	1.88	-1.51	0.32	5.70	7.10
4							38℃	20.30	22.24	31.54	39.65	47.12	50.36	45.45	37.73	48.13	46.4
5	W/B48% -MgO5%	0.48	20				20℃	6.54	7.24	8.73	11.04	11.72	13.01	12.82	13.45	15.95	18.92
6							30℃	10.25	14.77	7.57	2.94	3.63	2.16	0.94	0.96	1.46	1.01
7							38℃	15.94	20.13	25.86	30.19	30.91	31.46	32.55	35.12	37.75	39.82
8	W/B65% -MgO5%	0.65	20				20℃	28.00	29.39	31.82	33.80	34.63	36.27	37.11	38.35	39.57	41.46
9							30℃	68.03	68.38	59.54	62.14	61.18	68.36	63.94	69.14	60.61	62.42
10							38℃	80.99	86.50	91.95	97.05	92.48	86.45	90.8	92.0	93.4	94.0

(continued)

No.	Sample No.	W/B	FA dosage, (%)	Cement, (g/㎥)	MgO, (kg/㎥)	Water (kg/㎥)	Temp. (℃)	Autogenous volumetric deformation, ($\times 10^{-6}$)									
								280d	300d	320d	340d	360d	380d	400d	420d	440d	460d
1	W/B35% -MgO0%	0.35	20	377.1	0	165.0	20℃	-185.3	-185.0	-180.8	-180.4	-178.6	-174.1	-174.7	-171.8	-174.6	-174.6
2	W/B35% -MgO5%	0.35	20	353.6	23.6	165.0	20℃	-21.5	-18.3	-12.6	-9.7	-5.5	0.4	1.1	3.6	7.8	10.5
3							30℃	7.79	9	9.6	10.6	11.3	11.6	11.1	11.2	12	12.6
4							38℃	45.1	42.3	49.7	46.6	52.6	53.2	52.3	51.2	52.1	54.7
5	W/B48% -MgO5%	0.48	20				20℃	21.5	25.1	28.1	31.2	36.3	38.7	36.8	38.8	40.4	41.5
6							30℃	1.2	1.3	0.5	0.3	2.3	3.8	2.5	1.5	1.0	1.2
7							38℃	43.0	44.7	46.3	44.7	44.7	47.8	60.0	58.6	58.9	60.3
8	W/B65% -MgO5%	0.65	20				20℃	43.5	46.6	48.8	51.6	56.2	56.4	55.1	56.2	57.2	58.1
9							30℃	65.2	65.5	59.1	63.8	64.9	64.6	66.9	68.9	70.3	72
10							38℃	95.8	96.4	96.2	96.1		96.7	99.1	97.4	98.1	98.2

(continued)

No.	Sample No.	W/B	FA dosage, (%)	Cement, (g/m³)	MgO, (kg/m³)	Water (kg/m³)	Temp. (℃)	Autogenous volumetric deformation, ($\times 10^{-6}$)									
								480d	500d	550d	600d	650d	700d	750d	800	850	900
1	W/B35% -MgO0%	0.35	20	377.1	0	165.0	20℃	-173.7	-174.2	-173.8	-178.9	-175.6	-176.5	-181.0	-181.1	-180.3	-180.5
2	W/B35% -MgO5%	0.35	20	353.6	23.6	165.0	20℃	11.1	11.2	14.8	13.3	13.4	14.1	14.2	13.7	14.7	14.4
3							30℃	13.2	12	11.8	11.9	10.2	12.1	12.8	12.6	13.8	12.8
4							38℃	53.3	53.6	54.2	52.9	53.1	53.0	53.3	54.2	54	53.8
5	W/B48% -MgO5%	0.48	20				20℃	42.4	43.3	46.2	47.5	46.2	48.1	48.3	48.9	49.3	48.4
6							30℃	1.5	-1.9	-1.3	-2.1	-1.9	-3.2	-3.8	-3.8	-4.5	-4.7
7							38℃	61.0	60.7	63.0	62.2	63.1	62.5	64.8	63.8	62.6	62.8
8	W/B65% -MgO5%	0.65	20				20℃	59.6	60.8	65.2	66.6	66.8	67.2	67.5	69.3	71.1	72
9							30℃	71.4	68.2	68.3	69.7	68.8	70.1	71.7	70.9	70.8	69.1
10							38℃	100.1	100.1	100.6	100.9	101.0	99.9	100.3	99.4	98.7	99.6

Note: The age of concrete autogeneous volumetric deformation is t-1, that is, the benchmark is the value measured 24h after the molding of specimens.

(continued)

No.	Sample No.	W/B Ratio	Dosage of FA, %	Cement, g/m3	MgO, kg/m3	Water, kg/m3	Curing Temperature	Autogenous volumetric deformation, ($\times 10^{-6}$)									
								950	1000	1050							
1	W/B35%-MgO0%	0.35	20	377.1	0	165.0	20℃	-180.9	-182.7	-183							
2	W/B35%-MgO5%	0.35	20	353.6	23.6	165.0	20℃	13.4	14.3	14.5							
3							30℃	13.1	12.4	13.4							
4							38℃	54.2	54.3	53.9							
5	W/B48%-MgO5%	0.48	20	257.8	17.2	165.0	20℃	46.7	48.3								
6							30℃	-4.3	-5.1								
7							38℃	63.2	64.9								
8	W/B65%-MgO5%	0.65	20	190.4	12.7	165.0	20℃	72.4	72.6								
9							30℃	69.2	70.2								
10							38℃	100.3	103.2								

Note: The age of concrete autogeneous volumetric deformation is t-1, that is, the benchmark is the value measured 24h after the molding of specimens.

4. MgO 콘크리트의 팽창모델

중국 학자인 Bofang Zhu의 연구에 따르면, 실내시험 결과를 바탕으로 한 MgO 콘크리트의 팽창모델은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F(T,t) = F_0[1-\exp(-aT^b t^c)] \tag{3.6.1}$$

여기서, T : MgO콘크리트의 온도(℃)
t : MgO 콘크리트의 양생시간(d)
F_0 : 시편의 최종팽창량($\times 10^{-6}$)
a, b, c : 파라메터

위 수식에 자연로그를 두 번 취하면, 아래의 수식을 얻을 수 있다.

$$\ln a + b\ln T + c\ln t = \ln[-\ln(1-F/F_0)] \tag{3.6.2}$$

만약 $\ln T$와 $\ln[-\ln(1-F/F_0)]$를 각각 가로축과 세로축이라고 생각한다면, 시간 t_1과 t_2에서의 시험결과를 이용하여 두 개의 평행 직선을 그릴 수 있고 b는 직선의 기울기, 파라메터 a와 c는 직선의 절편으로부터 구할 수 있다. 이들 세 개의 파라메터를 적절히 조절하면 실험결과와 보간 결과를 일치시키는 것이 가능하다.

이 팽창모델에서, 양생온도가 다르고 물-시멘트비와 MgO 혼입량이 동일할 경우, MgO 콘크리트의 최종팽창량은 같다. 높은 양생온도에서 MgO의 반응속도는 빠르므로 38℃에서 양생한 콘크리트의 MgO는 더 높은 수화반응도를 보인다. 따라서 38℃에서 양생한 MgO 콘크리트의 시험결과를 포물선 함수를 이용한 보간 분석에 사용하여 물-시멘트비가 0.65와 0.48인 MgO 콘크리트의 최종팽창량을 구하였다. 보간곡선을 그림 3.6.9와 그림 3.6.10에 나타내었다. 보간식는 식 3.6.3과 식 3.6.4와 같다.

$$F(t) = 104t/(t+21.25) \tag{3.6.3}$$
$$F(t) = 103t/(t+450.65) \tag{3.6.4}$$

보간식 3.6.3과 3.6.4로부터, 물-시멘트비 0.65와 0.48의 MgO콘크리트의

최종팽창량은 104×10^{-6}과 103×10^{-6}이다.

보간시 양생온도가 20℃와 38℃이고 재령 100일과 200일인 시험결과를 이용하여 파라메터 a, b, c를 구하였다. 이를 이용하여, 물-시멘트비 0.65와 0.48을 가지는 MgO 콘크리트의 팽창모델을 식3.6.5와 식3.6.6과 같이 결정하였다.

$$F(T,t)=104[1-\exp(-0.00002T^{2.62}t^{0.41})] \tag{3.6.5}$$

$$F(T,t)=103[1-\exp(-0.000008T^{1.70}t^{0.87})] \tag{3.6.6}$$

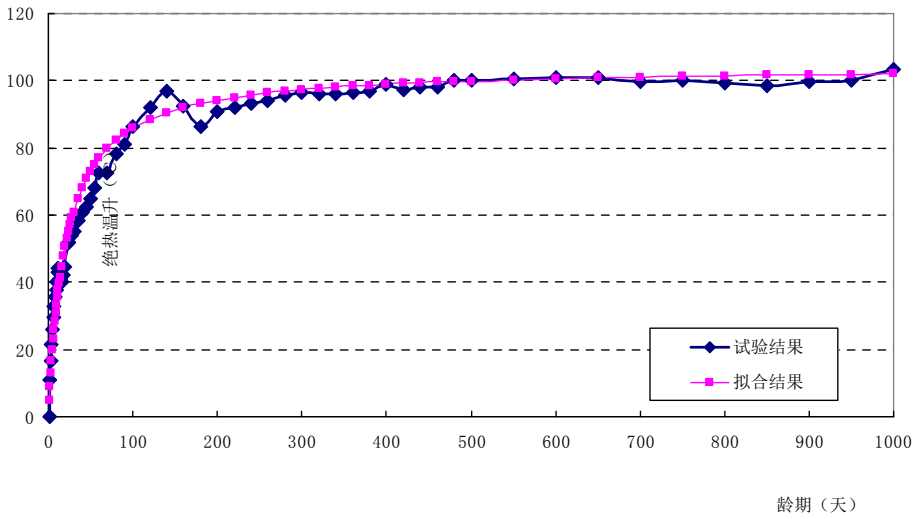


그림 3.6.9 Test results and fitting results of AVD of MgO concrete (w/c=0.65, MgO dosage=5%)

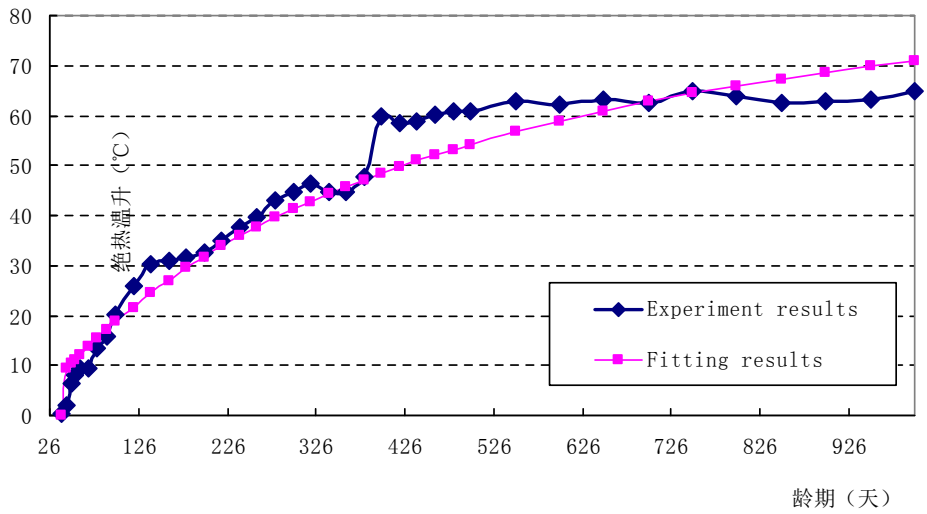


그림 3.6.10 Test results and fitting results of AVD of MgO concrete (w/c=0.48, MgO dosage=5%)

제 7 절 MgO 혼입 콘크리트의 내구특성 및 검증(Ⅲ)

1. 실험 개요

본 연구에서는 3 종류의 강도를 고려한 콘크리트에 대해 동결융해, 탄산화, 염해, 황산염에 대한 내구성을 평가하고 표 3.7.1과 같이 실험변수 및 범위를 선정하였다.

표 3.7.1 실험 변수 및 범위

실험 변수	기 호	범 위	비 고
강도	MPa	12, 24, 45	
플라이애시	FA	20%	
산화 마그네슘	MgO	0, 5%	시멘트 중량비
양생온도	T	20, 50℃	수중양생

목표강도 12 MPa는 댐 콘크리트용, 24 MPa는 정수장 구조물용, 45 MPa는 고강도 콘크리트용이며 배합비는 표 3.7.2와 같다.

표 3.7.2 실험 변수 및 범위

배합 종류 (목표강도-MgO혼입율-양생온도)	Gmax (mm)	W/B (%)	S/a (%)	단위량(kg/m3)						
				W	C	FA	MgO	S	G	AE 감수제 (B×%)
12-0-20	40	65	52	175.0	215.4	53.8	0	928.7	900.2	0.5
12-0-50										
12-5-20				175.0	201.9	53.8	13.5	928.9	900.3	0.5
12-5-50										
24-0-20	25	48	48	165.0	275.0	68.8	0	837.6	942.3	0.5
24-0-50										
24-5-20				165.0	257.8	68.8	17.19	837.8	942.6	0.5
24-5-50										
45-0-20	25	35	46	165.0	377.1	94.3	0	749.9	914.2	0.5
45-0-50										
45-5-20				165.0	353.6	94.3	23.6	750.2	914.6	0.5
45-5-50										

2. MgO 혼입 콘크리트의 내구성 시험체 제작

가. 사용재료

(1) 시멘트

시멘트는 KS L 5201을 만족하는 국산 S사의 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 화학적, 물리적 조성표는 표 3.7.3과 같다.

표 3.7.3 OPC의 화학조성 및 물리적 성질

항목 / 종류	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	CaO (%)	Fe_2O_3 (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	Insol. (%)	밀도 (g/㎤)	분말도 (㎠/g)
OPC	21.60	6.00	61.40	3.10	3.40	2.50	0.21	3.14	3,539

(2) MgO

MgO 분말의 세밀도와 활성지수는 MgO 콘크리트의 팽창특성에 영향을 주는 중요한 요소이기에 엄격히 통제되어야 한다. 따라서 광동에서 이미 건설된 몇 개 공정에서 사용한 MgO로써 요녕해성에서 수공전용으로 약간 가소하여 생산한 질량이 비교적 안정적인 MgO를 사용하였으며, 그 MgO의 물리적 성질은 표 3.7.4와 같으며, 활성지수 및 안정성을 평가하여 사용가능한 저온소성 MgO 임을 확인하였다.

표 3.7.4 MgO의 화학성분 및 물리적 성질

항목 / 종류	SiO_2 (%)	Fe_2O (%)	Al_2O_3 (%)	MgO (%)	CaO (%)	SO_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	강열감량 (%)	불용해잔분 (%)	비중 (g/cm^3)
MgO	1.56	0.40	0.34	93.58	1.21	0.08	0.40	2.68	7.80	3.24

(3) 플라이애시

콘크리트의 수화열 억제 대책으로 플라이애시를 사용하게 되는데 본 연구에서는 콘크리트의 20% 혼입을 실시하였다. 국산 S사의 플라이애시를 사용하였으며, 화학성분표는 표 3.7.5와 같다.

표 3.7.5 플라이애시의 화학성분 및 물리적 성질

항목 / 종류	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	CaO (%)	Fe_2O_3 (%)	SO_3 (%)	P_2O_5 (%)	MgO (%)	Na_2O (%)	K_2O (%)	SrO_3 (%)	비중 (g/㎤)
플라이애시	67.8	18.27	3.17	2.40	2.40	1.00	0.8	0.78	0.68	0.19	2.20

(4) 골재

MgO 콘크리트 배합에 사용된 골재로는 잔골재는 비중이 2.45이고, 흡수율이 1.07인 해사를 사용하였으며, 굵은 골재로는 최대 치수가 40 ㎜인 경우, 비중은 2.73, 흡수율이 0.57인 쇄석을 사용하였으며, 최대 치수가 25 ㎜인 경우, 비중은 2.70, 흡수율이 0.44인 쇄석을 사용하였다.

(5) 혼화제

유동성 확보 및 공기량 조절을 위하여 국내 H사의 폴리카르본산계 고성능 AE감수제을 사용하였으며 그 화학적, 물리적 조성은 표 3.7.6과 같다.

표 3.7.6 화학 혼화제의 물리적 성질

항목 / 종류	성 상	색 상	비 중	함유 고형분 (%)	pH	사용량 (C×wt %)
고성능 AE감수제	액 상	황갈색	1.05	20	7±2	0.5～2.0

나. 공시체 제작 및 양생

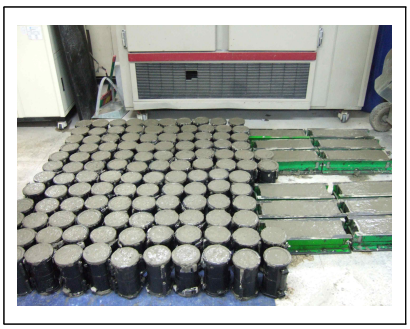
MgO 콘크리트 제조는 KS F 2403 콘크리트 강도시험용 공시체 제작방법에 따라 굵은 골재, 잔골재, 시멘트 및 MgO 분말을 투입하여 건비빔을 1분 30초간 한 후 배합수를 첨가하여 1분 30초간 배합하였다. 각 수준별로 압축강도용, 동결융해 시험용, 탄산화시험용, 염화물 확산계수 측정용, 황산염 저항성 시험용 공시체를 제작하였다. 양생은 온도조건(20℃, 50℃)에 따라 항온수조에서 실시하였다.



콘크리트 믹싱



MgO 혼입 콘크리트



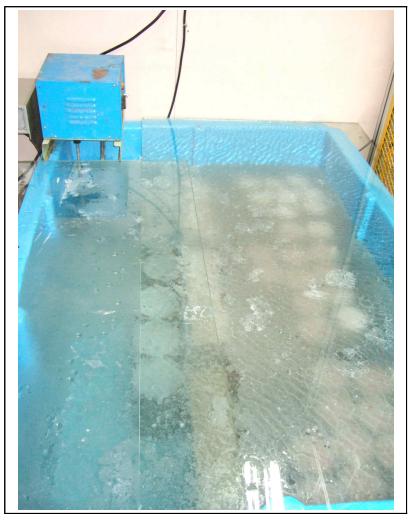
공시체 제작



1일 기건 양생



탈형 및 양생(20℃)



탈형 및 양생(50℃)

그림 3.7.1 공시체 제작 및 양생

3. MgO 혼입 콘크리트의 내구성 시험

가. 강도시험

압축강도 시험은 국내 시험 규격인 KS F 2405 : 2005 "콘크리트의 압축 강도 시험 방법"에 의해 수행하였으며 쪼갬인장강도는 KS F 2423 : 2006 "콘크리트의 쪼갬 강도 시험 방법"에 의해 수행하였다.

나. 압축강도시험 결과

(1) 압축강도시험 결과(7일 강도)

시료명 (강도-혼입율-양생온도)	Test 1	Test 2	Test 3	평균 (MPa)
12-0-20	8.83	9.32	8.90	9.0
12-5-20	7.81	7.69	7.78	7.8
24-0-20	18.91	18.31	18.89	18.7
24-5-20	17.10	18.32	17.49	17.6
45-0-20	36.86	37.82	37.25	37.3
45-5-20	34.16	36.92	34.38	35.2
12-0-50	12.41	12.11	12.63	12.4
12-5-50	10.83	11.64	10.65	11.0
24-0-50	28.19	30.00	28.62	28.9
24-5-50	26.18	26.31	26.52	26.3
45-0-50	48.12	46.05	47.77	47.3
45-5-50	43.45	43.59	45.58	44.2

(2) 압축강도시험 결과(28일 강도)

시료명 (강도-혼입율-양생온도)	Test 1	Test 2	Test 3	평균 (MPa)
12-0-20	14.90	13.80	13.43	14.0
12-5-20	13.04	13.43	13.22	13.2
24-0-20	30.81	30.75	30.01	30.5
24-5-20	24.59	25.32	25.52	25.1
45-0-20	45.94	46.40	46.64	46.3
45-5-20	44.87	45.11	44.98	45.0
12-0-50	19.17	19.05	18.47	18.9
12-5-50	18.45	19.52	17.78	18.6
24-0-50	31.00	28.41	31.56	30.3
24-5-50	28.39	29.89	29.03	29.1
45-0-50	55.51	56.76	55.67	56.0
45-5-50	50.17	50.64	50.78	50.5

(3)압축강도시험 결과(56일 강도)

시료명 (강도-혼입율-양생온도)	Test 1	Test 2	Test 3	평균 (MPa)
12-0-20	16.51	17.33	18.85	17.6
12-5-20	15.56	15.45	15.39	15.5
24-0-20	33.92	33.3	35.95	34.4
24-5-20	33.33	33.26	33.17	33.3
45-0-20	53.24	53.89	55.25	54.1
45-5-20	47.99	47.41	47.76	47.7
12-0-50	20.81	21.66	22.54	21.7
12-5-50	19.62	21.27	20.96	20.6
24-0-50	35.70	35.89	36.50	36.0
24-5-50	35.24	34.68	34.87	34.9
45-0-50	53.80	55.19	54.82	54.6
45-5-50	51.51	51.98	52.10	51.9

(4)압축강도시험 결과(90일 강도)

시료명 (강도-혼입율-양생온도)	Test 1	Test 2	Test 3	평균 (MPa)
12-0-20	22.62	22.90	22.32	22.6
12-5-20	20.39	22.20	22.51	21.7
24-0-20	38.86	37.73	40.10	38.9
24-5-20	37.36	37.26	37.19	37.3
45-0-20	59.35	59.84	59.97	59.7
45-5-20	51.88	52.71	53.67	52.8
12-0-50	24.97	24.35	22.93	24.1
12-5-50	23.84	23.12	22.39	23.1
24-0-50	38.05	35.81	36.99	36.9
24-5-50	33.06	33.42	34.82	33.8
45-0-50	54.03	53.83	57.86	55.2
45-5-50	54.17	54.97	54.56	54.6

(5)압축강도시험 결과(180일 강도)

시료명 (강도-혼입율-양생온도)	Test 1	Test 2	Test 3	평균 (MPa)
12-0-20	24.37	25.10	24.76	24.7
12-5-20	24.85	25.45	23.86	24.7
24-0-20	49.20	42.32	49.65	47.1
24-5-20	47.19	45.16	47.11	46.5
45-0-20	63.73	58.12	61.94	61.3
45-5-20	54.97	54.57	57.18	55.6
12-0-50	25.75	2303	23.84	24.2
12-5-50	24.10	23.38	23.56	23.7
24-0-50	39.59	43.68	43.35	42.2
24-5-50	35.10	37.47	35.77	36.1
45-0-50	68.00	65.26	64.63	66.0
45-5-50	55.00	59.11	63.16	59.1

(6)압축강도시험 결과(360일 강도)

시료명 (강도-혼입율-양생온도)	Test 1	Test 2	Test 3	평균 (MPa)
12-0-20	25.87	26.17	25.57	25.9
12-5-20	26.68	26.30	26.57	26.5
24-0-20	46.46	45.84	49.87	47.4
24-5-20	46.67	47.48	47.27	47.1
45-0-20	61.06	61.37	64.65	62.4
45-5-20	58.94	59.57	58.90	59.1
12-0-50	26.88	26.45	26.18	26.5
12-5-50	27.61	28.22	27.87	27.9
24-0-50	42.37	43.38	44.00	43.3
24-5-50	43.28	43.65	43.70	43.5
45-0-50	67.08	65.15	66.39	66.2
45-5-50	59.18	59.88	58.93	59.3

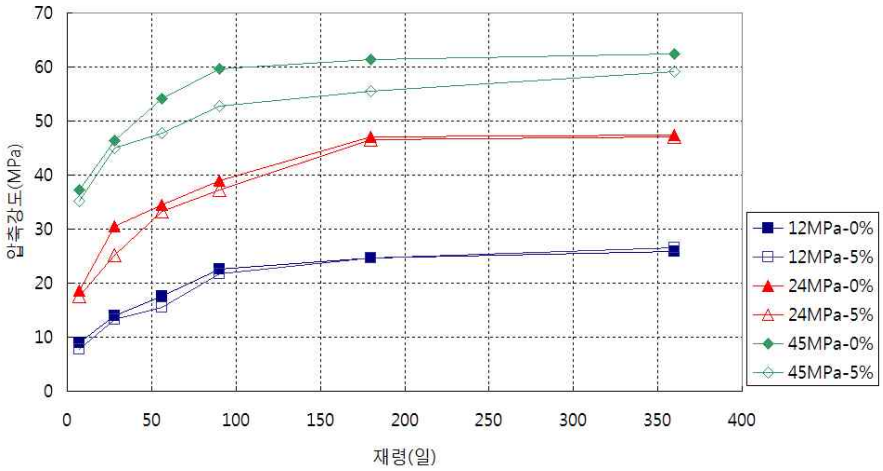


그림 3.7.2 재령별 압축강도 (양생온도 20℃)

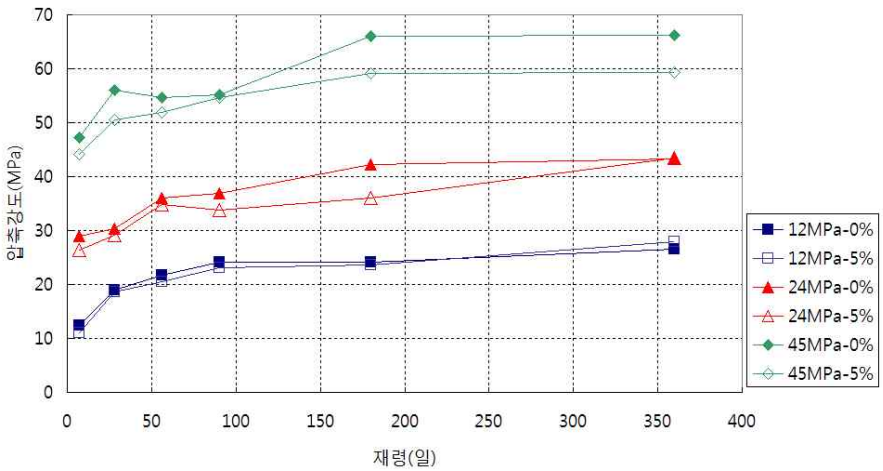


그림 3.7.3 재령별 압축강도 (양생온도 50℃)

다. 쪼갬인장강도 시험결과

(1) 쪼갬인장강도 시험 결과(7일 강도)

시료명 (강도-혼입율-양생온도)	Test 1	Test 2	Test 3	평균 (MPa)
12-0-20	1.11	1.26	1.07	1.1
12-5-20	0.96	0.96	1.01	1.0
24-0-20	1.98	1.83	1.86	1.9
24-5-20	1.59	1.67	1.68	1.6
45-0-20	2.66	2.46	2.55	2.6
45-5-20	2.43	2.34	2.42	2.4
12-0-50	1.84	1.52	1.62	1.7
12-5-50	1.39	1.37	1.34	1.4
24-0-50	2.36	2.38	2.46	2.4
24-5-50	2.31	2.41	2.25	2.3
45-0-50	3.29	3.37	3.20	3.3
45-5-50	2.87	2.89	2.96	2.9

(2) 쪼갬인장강도 시험 결과(28일 강도)

시료명 (강도-혼입율-양생온도)	Test 1	Test 2	Test 3	평균 (MPa)
12-0-20	1.57	1.48	1.48	1.5
12-5-20	1.45	1.43	1.44	1.4
24-0-20	2.56	2.47	2.50	2.5
24-5-20	2.30	2.34	2.33	2.3
45-0-20	3.36	3.29	3.29	3.3
45-5-20	3.14	3.26	3.23	3.2
12-0-50	2.30	2.11	1.99	2.1
12-5-50	1.87	1.92	2.05	1.9
24-0-50	2.63	2.44	2.50	2.5
24-5-50	2.48	2.38	2.40	2.4
45-0-50	3.64	3.49	3.61	3.6
45-5-50	3.61	3.57	3.25	3.5

(3) 쪼갬인장강도 시험 결과(56일 강도)

시료명 (강도-혼입율-양생온도)	Test 1	Test 2	Test 3	평균 (MPa)
12-0-20	2.03	2.03	1.98	2.0
12-5-20	1.87	1.89	1.85	1.9
24-0-20	2.67	2.73	2.79	2.7
24-5-20	2.56	2.56	2.55	2.6
45-0-20	3.57	3.54	3.58	3.6
45-5-20	3.21	3.29	3.26	3.3
12-0-50	2.33	2.34	2.33	2.3
12-5-50	2.26	2.28	2.28	2.3
24-0-50	3.03	2.88	2.91	2.9
24-5-50	2.75	2.75	2.74	2.7
45-0-50	4.12	4.14	4.15	4.1
45-5-50	4.02	3.96	3.95	4.0

(4) 쪼갬인장강도 시험 결과(90일 강도)

시료명 (강도-혼입율-양생온도)	Test 1	Test 2	Test 3	평균 (MPa)
12-0-20	2.45	2.43	2.41	2.4
12-5-20	2.43	2.42	2.41	2.4
24-0-20	3.58	3.37	3.51	3.5
24-5-20	3.15	2.96	3.00	3.0
45-0-20	3.87	4.30	4.18	4.1
45-5-20	3.48	3.61	3.22	3.4
12-0-50	2.54	2.36	2.40	2.4
12-5-50	2.28	2.25	2.28	2.3
24-0-50	3.45	3.40	3.35	3.4
24-5-50	3.16	3.07	3.05	3.1
45-0-50	4.30	4.70	4.53	4.5
45-5-50	4.05	4.06	4.05	4.1

(5) 쪼갬인장강도 시험 결과(180일 강도)

시료명 (강도-혼입율-양생온도)	Test 1	Test 2	Test 3	평균 (MPa)
12-0-20	2.58	2.62	2.59	2.6
12-5-20	2.39	2.58	2.59	2.5
24-0-20	3.79	3.69	3.64	3.7
24-5-20	3.44	3.45	3.24	3.4
45-0-20	4.15	4.22	4.12	4.2
45-5-20	4.24	4.16	4.10	4.2
12-0-50	2.46	2.62	2.57	2.6
12-5-50	2.42	2.36	2.34	2.4
24-0-50	3.73	3.73	3.67	3.7
24-5-50	3.56	3.93	3.61	3.7
45-0-50	5.03	5.10	4.97	5.0
45-5-50	4.38	4.46	4.42	4.4

(6) 쪼갬인장강도 시험 결과(360일 강도)

시료명 (강도-혼입율-양생온도)	Test 1	Test 2	Test 3	평균 (MPa)
12-0-20	2.59	2.65	2.62	2.6
12-5-20	2.43	2.55	2.58	2.5
24-0-20	3.84	3.81	3.78	3.8
24-5-20	3.52	3.58	3.97	3.7
45-0-20	4.21	4.21	4.20	4.2
45-5-20	4.22	4.21	4.24	4.2
12-0-50	2.53	2.69	2.62	2.6
12-5-50	2.52	2.51	2.50	2.5
24-0-50	3.71	3.77	3.76	3.7
24-5-50	3.83	3.85	3.90	3.9
45-0-50	4.99	5.13	5.07	5.1
45-5-50	4.75	4.69	4.77	4.7

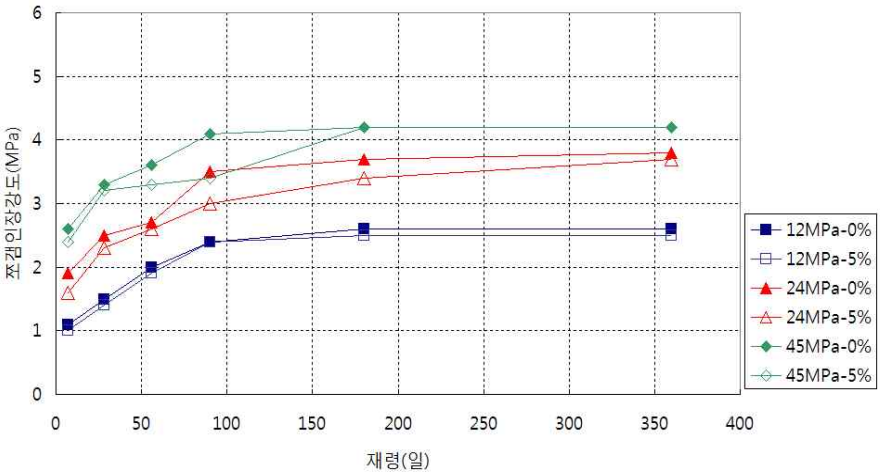


그림 3.7.2 재령별 쪼갬인장강도 (양생온도 20℃)

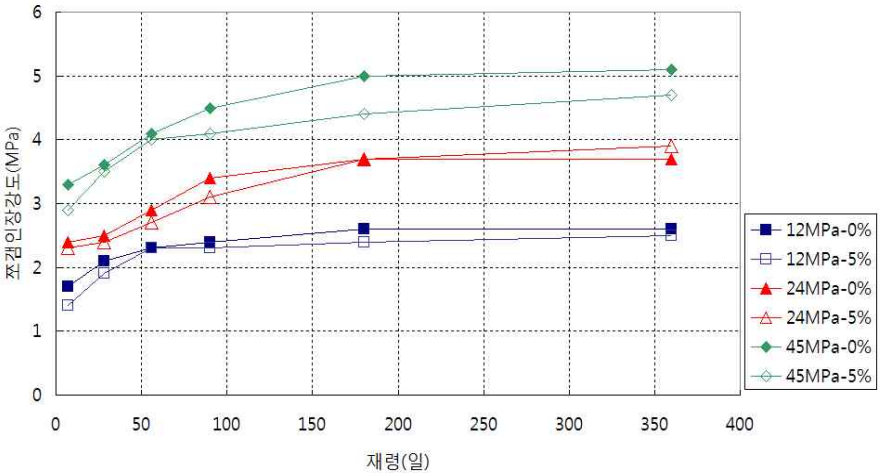


그림 3.7.2 재령별 쪼갬인장강도 (양생온도 50℃)

마. 중성화 촉진시험

경화 콘크리트는 표면으로부터 공기중의 탄산가스를 흡수하여 콘크리트중의 수화반응으로 생성된 수산화칼슘이 탄산칼슘으로 변화하면서 알칼리성을 잃게 된다. 일반적으로 이 현상을 탄산화라 한다. 탄산화는 콘크리트의 표면에서부터 시작되어 피복 콘크리트 부분을 거쳐, 내부의 철근방향으로 진행된다. 탄산화면이 철근표면에 도달하게 되면 철근표면을 감싸고 있던 부동태피막이 파괴되면서 철근표면에 부식이 시작된다. 이러한 콘크리트의 탄산화현상은 일반적인 환경하에서도 확실하게 진행되어 철근을 부식환경으로 만들기 때문에, 콘크리트의 수명에 관계되는 가장 기본적이며 중요한 문제이다. 보통 환경아래에서의 콘크리트 탄산화는 장기간에 걸쳐 발생되기 때문에, 촉진탄산화시험은 이것을 단기간에 발생시켜서 탄산화

를 예측하고자 하는 것이다. 일반적으로 촉진탄산화시험은 고농도의 탄산가스 양생기 내에서 콘크리트 탄산화를 촉진시켜, 콘크리트 구조물중의 강재부식이나 콘크리트의 탄산화속도에 미치는 각종요인의 검토를 행하는 것이 주된 목적으로 사용되고 있다. 본 연구에서 촉진탄산화 시험은 KS F 2584 '콘크리트의 촉진탄산화 시험방법'을 적용하였고 간략하게 소개하면 다음과 같다.

(1) 시험방법

시험에 사용되는 공시체는 단면은 정방형으로 한 변의 길이가 100 ㎜이고, 공시체의 길이는 400 ㎜를 기본으로 한다. 또한, 굵은골재의 최대치수는 공시체단면의 한 변의 1/3 이하로 하지만 시험의 목적에 따라서 다른 형상, 치수의 공시체를 사용가능 하기 때문에 본 시험에서는 φ100 × 100 ㎜ 공시체를 사용하였다.

공시체의 제작은 KS에 규정된 공시체 제작법에 따라야 하며, 몰드의 탈형은 다짐이 종료된 후 16 시간 이상 3일 이내로 한다. 이 사이 공시체는 진동, 충격 및 수분의 증발을 방지하지하여야 한다. 공시체를 탈형한 후, 재령 4주까지 온도 20±2℃의 습윤상태에서 양생을 실시하고, 재령 4주 후에는 상대습도 60±5%, 온도 20±2℃의 항온항습실에 재령 8주까지 정치한다. 재령 7~8주의 기간에, 공시체의 타설면, 하부면 및 양단면을 이산화탄소를 차단하기에 충분하도록 실링한다.(수중에서 양생하는 경우는 공시체가 끊임없이 신선한 물로서 세정되는 상태로 하여야 하며, 실링은 에폭시수지, 폴리우레탄수지, 알루미늄 테이프 등을 이용하면 좋다.)

① 탄산화의 촉진방법

탄산화의 촉진조건은 온도 20±2℃, 상대습도 60±5%, 이산화탄소 5±0.2%로 한다. 공시체 개별 환경조건이이 동일하게 되도록 해야 하며, 각 공시체는 20 ㎜ 이상의 간격을 유지하도록 한다. 공시체는 측면이 수직이 되도록 설치한다.

② 탄산화 깊이 측정방법

측정면은 소정의 촉진기간에 달한 시점에서 공시체의 길이방향과 직각으로 공시체 단부에서 약 60 ㎜ 위치에서 할열 또는 절단한 면으로 한다. 측정면의 준비 또는 측정방법은 KS F 2596의 측정방법에 따른다. 계측개소는 1개 측면에 약 6 등분한 5 개소로 한다. 탄산화 깊이의 측정위치의 예를 그림 3.7.4에 나타내었다. (측정은 촉진시험개시 후 촉진시기가 1, 4, 8, 13, 26주가 되면 행하며, 시험의 목적에 따라 시기는 변경가능하다.)

③ 할렬면 또는 절단면의 실링

측정을 연속하는 공시체의 할렬면 또는 절단면은 실링을 해야 하며, 다음 측정시기에 다시 시험을 실시한다. 공시체를 시험기에 다시 넣을 때에는 시험기내에 정위치를 정하지 않고 넣든가, 또는 미리 정한 방법에 따라 위치를 변화하여 넣는다.

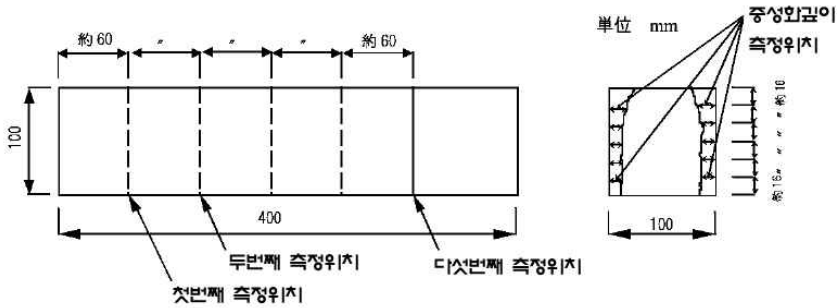


그림 3.7.4 탄산화 깊이 측정위치

(2) 계산

탄산화 깊이는 공시체의 2 개면, 10 개소의 평균값과 3개의 공시체의 각 2면, 합계 6 면의 30 개소의 탄산화 깊이의 평균값을 계산하여, 0.5 ㎜ 단위로 구한다. 탄산화의 속도를 표시하는 방법으로서, 탄산화 깊이(㎜)를 촉진개시시기에서의 기간의 평방근에서 배서 구한 탄산화속도계수(㎜/ $\sqrt{week}$)가 사용되기도 한다.

(3) 중성화 촉진시험 결과

시료명 (강도-혼입율-양생온도)	중성화침투깊이(mm)
12-0-20	7.5
12-5-20	5.3
12-0-50	6.4
12-5-50	5.3
24-0-20	2.3
24-5-20	2.1
24-0-50	1.7
24-5-50	1.7
45-0-20	침투깊이 없음
45-5-20	침투깊이 없음
45-0-50	침투깊이 없음
45-5-50	침투깊이 없음

12-0-20	12-5-20
	
12-0-50	12-5-50
	
24-0-20	24-5-20
	
24-0-50	24-5-50

	
45-0-20	45-5-20
	
45-0-50	45-5-50
	

바. 황산용액 침지 시험

콘크리트가 외부에서 화학작용을 받아 시멘트 경화체를 구성하는 수화생성물이 변질 혹은 분해되어 결합능력을 잃어가는 현상을 총칭하여 화학적 부식이라 말한다. 화학적 부식에 영향을 미치는 요인은 산종류, 알칼리 종류, 염류, 유류, 부식성 가스등 많이 있으며, 그 결과로서 발생하는 열화의 상황도 여러 가지가 있다. 일반적인 환경에서 이들의 화학적 부식이 문제시되는 것은 적고, 온천지나 산성 하천유역에 건조된 구조물 등이 그 대표적인 예이다.

다만, 하수도 관련시설이나 화학공장, 식품공장 등의 특수환경하에 있는 구조물에서는 화학적 부식이 빈번히 나타난다. 물에 녹은 황산염은 시멘트수화물 중 $CaO(OH)_2$와 반응하여 석고를 생성하여 콘크리트를 열화 시키고 석고는 시멘트 경화체 중의 칼슘알루미네이트($3CaO \cdot Al_2O_3$) 수화물 및 수화되지 않은 칼슘알루미네이트 페라이트(ferrite)상과 반응한다.

그때 에트린가이트 등을 생성하여 큰 팽창압을 일으키기 때문에 콘크리트의 팽창균열 및 조직 붕괴를 유발한다. 또한 황산염은 시멘트 경화체 중의 수산화칼슘과 반응하여 이수석고를 생성한다. 이수석고는 수용성이기 때문에 용출하여 조직이 다공화되어 침식이 가속된다. 황산염은 각종 공업원료 및 비료로서 널리 사용되며, 온천 및 하천수에도 함유되어 있는 것이 있다. 또 해수 중에도 포함되어 있어 해수에 의한 콘크리트의 열화에도 영향을 미친다. 황산염에 의한 열화의 징후는 산에 의한 열화와는 다르고 침적기간이 비교적 장기간에 걸쳐 나타나는 경향이 있다.

황산염 저항성 실험에 대한 시험규격은 국내에 아직 제정되어 있지 않기 때문에 본 연구에서는 일본 건재시험센터에서 제정한 침적에 의한 콘크리트의 내약품성 시험방법에 의해 황산염 저항성 실험을 실시하였다.

황산염 침지시험



(1) 시험방법

공시체는 휨강도를 위해서는 100 × 100 × 400 ㎜의 각주체, 압축강도용으로 ϕ100 × 200 ㎜의 원주형 공시체를 이용한다. 공시체의 양생은 표준양생으로 하고 피복의 유무에 따라 다음과 같이 행한다.

① 피복이 있는 경우 : 탈형(1～2일)→20℃수중양생(～7일)→20℃봉합양생(～21일)
→20℃, 습도 60%(～24일)→피복(24일)→20℃수중(～28일)
② 피복이 없는 경우 : 탈형(1～2일)→20℃, 습도60%(～26일)→20℃수중(～28일)

시험액의 양은 공시체 (10 × 10 × 40 ㎝) 1개당 약 5 L로 한다. 2% 염산과 5% 황산은 산에 대한 화학저항성, 10% 황산나트륨과 10% 황산마그네슘은 황산염에 대한 화학저항성을 시험하는 경우에 이용한다. 공시체의 개수는 동일 조건에 대하여 3개 이상으로 하지만, 5개 정도가 바람직하다. 필수적인 시험 항목은 외관, 질량, 길이, 동탄성계수, 휨강도, 압축강도, 중성화 깊이의 7개 항목이고, 보조적으로 pH 분포, 침식깊이, 세공 크기 분포의 3 항목이다. 결과는 시험액에 침투된 공시체의 초기값에 대한 변화율로, 수중침투된 공시체와 동일 기간에 있어서 상대비율로 표시한다.

(2) 계산

결과는 시험액에 침투된 공시체의 초기값에 대한 변화율로, 수중 침투된 공시체와 동일 기간에 있어서 상대비율로 표시한다.

(3) 결과

구분	압축강도(MPa)		
	침지 전	침지 후	강도비(%)
12-0-20	25.9	23.2	89.6
12-5-20	26.5	24.8	93.6
12-0-50	26.5	23.0	86.8
12-5-50	27.9	25.0	89.6
24-0-20	47.4	42.9	90.5
24-5-20	47.1	43.7	92.8
24-0-50	43.3	39.9	92.1
24-5-50	43.5	40.5	93.1
45-0-20	62.4	54.3	87.0
45-5-20	59.1	54.9	92.9
45-0-50	66.2	59.9	90.5
45-5-50	59.3	54.7	92.2

사. 염해 시험

콘크리트의 염해는 콘크리트중의 강재부식이 염화물 이온의 존재에 의해 촉진되어 부식생성물의 체적팽창이 콘크리트에 균열이나 박리를 일으키고, 강재의 단면감소 등을 동반하는 것에 의해 구조물의 성능이 저하하며, 구조물이 소정의 기능을 다할 수 없게 되는 현상을 말한다. 이처럼 열화를 촉진하는 염화물 이온은 해수나 동결방지제처럼 구조물의 외부환경에서 공급되는 경우와 콘크리트 제조시에 재료에서 공급되는 경우가 있다.

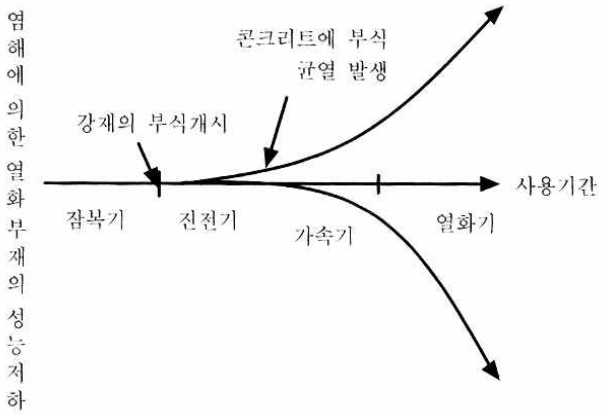


그림 3.7.5 염해 열화의 진행과정

외부에서 유입된 염화물이온의 확산계수에 영향을 미치는 요인으로서는 온도, 함수율, 수화율, 염화물이온농도, 다른 물질의 이온농도 등을 들 수 있다. 또한, 실험실의 침지액 혹은 실환경의 해수 등 외부 침지액에 접한 콘크리트 표면에서는 농도차 이외의 구동력의 작용으로 염화물이온이 콘크리트 내로 침투, 콘크리트 표층의 염화물이온농도가 외부의 농도보다도 높아지는 현상도 발생한다. 그림 3.7.6는 콘크리트 표층부에 있어서 염화물 이온의 농축 현상의 모식도를 나타낸 것이다. 의사흡착이라는 것은 콘크리트 표층부의 전기를 띠고 있는 세공표면의 전하에 끌어당겨져, 음이온인 염화물이온이 외부에서 콘크리트 내부로 침투하는 기구이다. 의사흡착에서는 세공표면의 대전 상태가 현저하게 변화하지 않으면 염화물이온의 이동은 항상 외부에서 내부로 향한다.

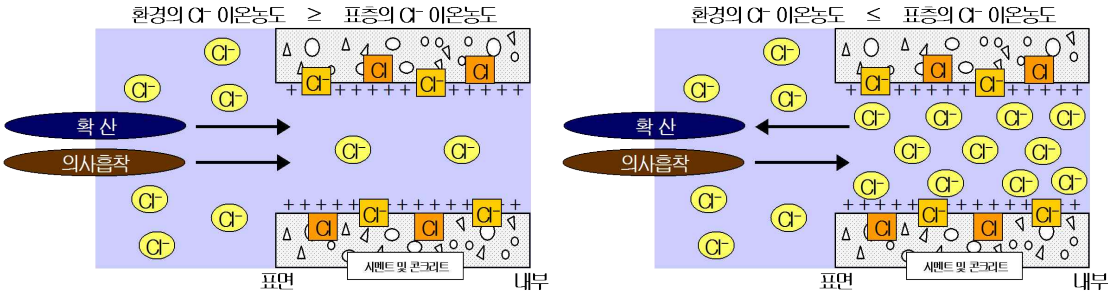


그림 3.7.6 콘크리트 표층부에 있어서 염화물 이온의 농축

콘크리트 표층의 액상 염화물이온 농도가 환경(실환경에서는 해수, 실험에서는 침지액)의 염화물이온 농도보다도 낮은 경우, 콘크리트 표면의 염화물이온 이동은 농도확산 및 의사흡착에 의해 모든 경우 외부에서 내부로 향한다. 반대로 콘크리트 표층의 액상 염화물이온 농도가 환경의 염화물이온 농도보다도 높은 경우, 염화물이온의 이동은 의사흡착으로는 외부에서 내부로 향하지만, 농도확산으로는 내부에서 외부로 향한다. 따라서, 염수침지액의 염화물 농도가 높을수록 시편 표면에 염화물의 농축이 빨라서 내부로서의 빠른 확산에 의하여 침투깊이별 염화물의 농도가 높은 것으로 보인다. 단, 표층의 염화물이온이 증가함에 따라 세공표면과 침지액 사이에는 염화물이온이 많이 존재하게 되기 때문에 의사흡착이 일어나기 어렵게 된다. 더욱이 외부에서 내부로의 의사흡착, 내부에서 외부로의 농도확산 및 표층에서 콘크리트 내부로의 농도확산에 의한 이동이 거의 평형이 될 때, 콘크리트 표층의 액상 염화물이온 농도는 환경의 염화물이온 농도보다도 높은 상태에서 거의 일정하게 된다고 생각할 수 있다.

아. 염소이온침투저항성 시험

콘크리트의 염해 내구성을 평가하기 위해서 국내 규격인 KS F 2711 "전기전도도에 의한 염소이온 침투저항성 시험방법" 통해 시편의 전위차를 이용하여 염소이온을 강제로 통과시켜 염소이온 침투저항성 평가하는 방법이다. 시험에 나온 데이터와 계산식을 통해 정성적인 판단을 하게 되며, 기준은 다음과 같다.

표 3.7.9 통과전하량에 따른 염소이온 침투성

통과 전하량(C)	염소이온 침투성
> 4,000	높음
2,000 ~ 4,000	보통
1,000 ~ 2,000	낮음
100 ~ 1,000	매우 낮음
< 100	무시할 만함

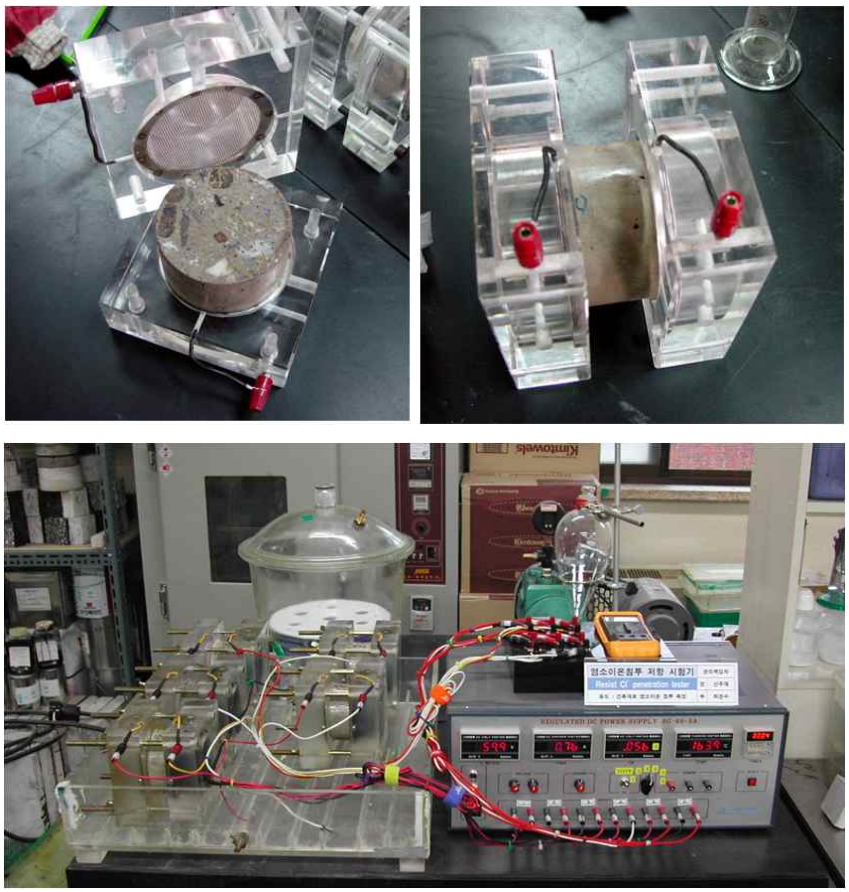
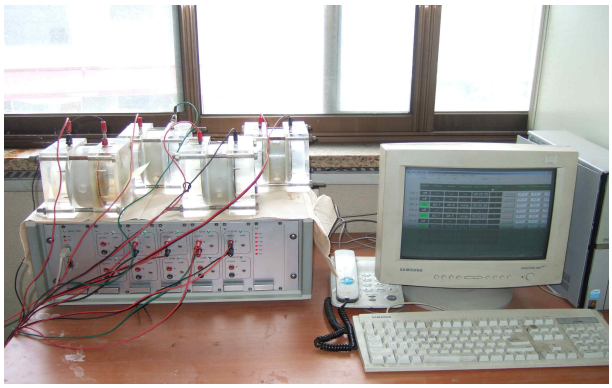


그림 3.7.7 염소이온 침투 저항성 시험장비

(1) 시험방법

시험에 사용되는 공시체는 $\phi 100 \times 50$ ㎜ 인 공시체를 사용하며, 양극용액으로는 0.3 M NaOH 용액을 사용하고, 음극용액으로는 3% NaCl 용액을 사용한다. 시험시편을 에폭시 수지로 도포를 한 후, 진공상태에서 증류수를 이용하여 포화를 시킨 후 시험을 진행한다. 아래 그림과 같은 확산셀에 거치를 한 후 셀에 60±0.1 V의 전압을 6 시간동안 걸어 전하량을 측정한다.

염소이온침투저항성 시험



(2) 시험결과(재령 1년)

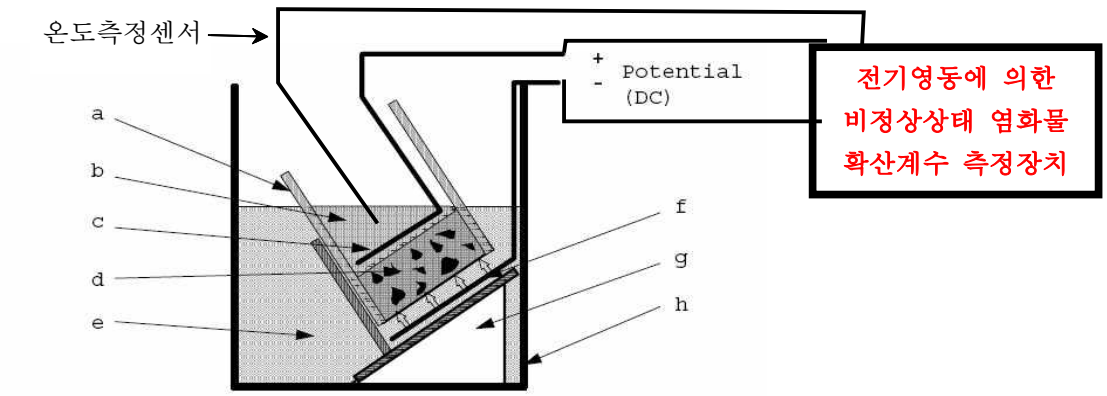
시료명 (강도-혼입율-양생온도)	Coulombs(C)
12-0-20	1359
12-5-20	1326
12-0-50	1380
12-5-50	1279
24-0-20	665
24-5-20	634
24-0-50	691
24-5-50	640
45-0-20	269
45-5-20	255
45-0-50	272
45-5-50	263

차. 염소이온확산계수 시험

콘크리트의 염해 내구성을 평가하기 위해서는 염화물의 확산계수를 구하는 것이 필수적인데 이것을 구하는 방법은 크게 침지실험, 정상상태 확산실험, 전기적 실험 방법 등으로 나누어지고, 전기적인 실험방법은 최근 NT Build 492 등에 의해 일정한 전압으로 콘크리트 시편에 전류를 흘려서 염화물 이온이 강제로 투과하도록 하고 일정 시간이 지난 후에 전류를 제거하고 시편을 절단하여 통과한 염화물의 침투깊이를 측정하고, 이를 규격에 제안된 식으로 계산하여 비정상 상태의 염화물 확산계수를 측정하는 방법이다. 이러한 방법에 의해 구해진 값을 전기영동에 의한 비정상상태의 염화물 확산계수라고 하며, 본 연구에서는 NT Build 492에 따라 실험을 실시하였다.

(1) 시험방법

시험에 사용되는 공시체는 $\phi 100 \times 50$ ㎜ 인 공시체를 사용하며, 양극용액으로는 0.3N NaOH 용액을 사용하고 음극용액으로는 10% NaCl 용액을 사용한다. 그림 5.6과 같은 상태로 시편을 거치하고 일정한 전압을 인가하고, 전류를 측정할 수 있는 장치를 사용하여 전류를 측정하고, 초기와 마지막의 온도도 측정한다.



a. 고무(실리콘)슬리브 e. 음극용액
b. 양극용액 f. 음극
c. 양극 g. 플라스틱지지대
d. 콘크리트 시편 h. 플라스틱 박스

그림 3.7.8 전기영동에 의한 비정상상태 염화물 확산계수 측정 모식도

전기영도는 초기에 30 V의 전압을 가해 각 시편의 초기 전류를 측정하고 다음의 표 3.7.10에 의해 따라 적정 전압으로 적정 기간 동안 전류를 보내 실험을 종료한다.

표 3.7.10 적용전압 및 전류

Initial current I_{30V} (with 30 V) (mA)	Applied voltage U (after adjustment) (V)	Possible new initial current I_0 (mA)	Test duration t (hour)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \le I_0 < 10$	60	$10 \le I_0 < 20$	48
$10 \le I_0 < 15$	60	$20 \le I_0 < 30$	24
$15 \le I_0 < 20$	50	$25 \le I_0 < 35$	24
$20 \le I_0 < 30$	40	$25 \le I_0 < 40$	24
$30 \le I_0 < 40$	35	$35 \le I_0 < 50$	24
$40 \le I_0 < 60$	30	$40 \le I_0 < 60$	24
$60 \le I_0 < 90$	25	$50 \le I_0 < 75$	24
$90 \le I_0 < 120$	20	$60 \le I_0 < 80$	24
$120 \le I_0 < 180$	15	$60 \le I_0 < 90$	24
$180 \le I_0 < 360$	10	$60 \le I_0 < 120$	24
$I_0 \ge 360$	10	$I_0 \ge 120$	6

실험이 끝나면 시편을 물에 헹구고 시편 표면의 물을 완전히 제거한 후 축방향으로 쪼갠다. 쪼개진 면에 0.1 N $AgNO_3$를 분무하고 15분 후에 쪼개진 면에서 은색 염화물 침전물이 육안으로 확실하게 나타날 때 0.1 ㎜ 단위까지 정확하게 염화물 침투깊이를 측정한다.

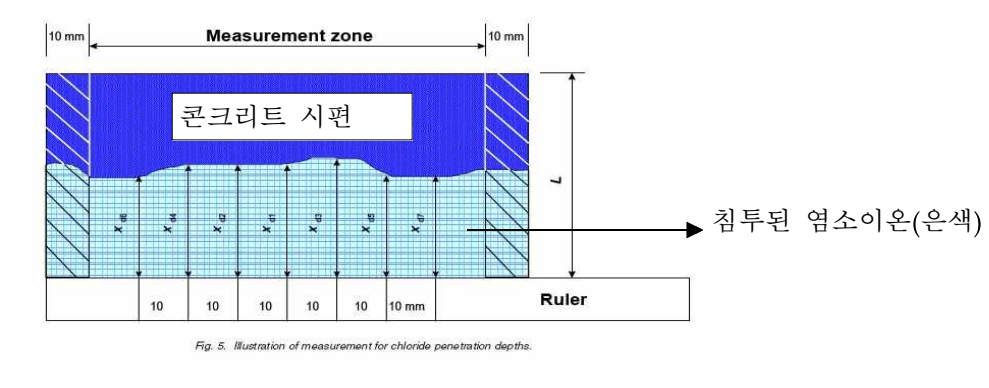


Fig. 5. Illustration of measurement for chloride penetration depths.

그림 3.7.9 침투깊이 측정

(2) 계산

모든 작업을 수행한 후 측정된 평균온도와 침투깊이를 다음의 간략식에 대입하여 염화물 확산계수를 산정할 수 있다.

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t}\left(x_d - 0.0238\sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{U-2}}\right) \quad (3.7.1)$$

여기서,

Dnssm : 불안정상태의 염화물 확산계수($\times 10^{-12} m^2/sec$)

U : 적용한 볼트의 절대값(V)

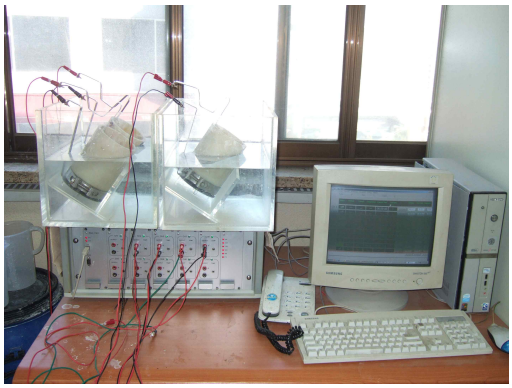
T : 처음과 끝의 양극 용액의 평균온도(℃)

L : 시편의 두께(㎜)

x_d : 염소이온 침투깊이(㎜)

t : 실험 지속시간(hour)

염소이온확산계수시험



(3) 시험결과(재령 1년)

시료명 (강도-혼입율-양생온도)	$\times 10^{-12}$ (m^2/s)
12-0-20	16.46
12-5-20	13.67
12-0-50	15.52
12-5-50	14.40
24-0-20	8.58
24-5-20	8.05
24-0-50	9.00
24-5-50	8.70
45-0-20	3.85
45-5-20	3.43
45-0-50	4.23
45-5-50	3.50

파. 동결융해 시험

동해는 콘크리트 조직중 수분의 동결에 의해 생기며, 이와 같은 노화는 동결융해 작용의 반복에 의해 촉진된다. 이 때문에, 동해에 대한 저항성을 내동결융해저항성으로 지칭한다. 그러나, 장기적인 관점에서 동결융해작용의 반복은 필수조건이 아니며, 수분의 존재하에서 동결한다면 그 콘크리트는 동해를 입을 가능성이 있다.

자연환경아래에서 받는 동결융해의 반복회수는 한랭지에서는 일 년에 수번에서 백회를 넘는다. 그러나 동해의 작용은 반복회수만으로 결정되는 것은 아니며, 동결시의 최저온도, 물의 조건 등의 영향도 크다. 시험은 KS F 2456 '급속동결융해 시험방법'을 적용하였고 간략하게 소개하면 다음과 같다.

표 3.7.11 동결융해 사이클 조건

시험법		최저온도	최고온도	융해시간 (1사이클공정)	1사이클 소요시간
A법	수중동결 수중융해법	-18±2℃	4±2℃	25% 이상	2~4시 간
B법	기중동결 수중융해법			20% 이상	



그림 3.7.10 동결융해 시험 장치 및 시험광경

(1) 계산

시험에 사용되는 공시체는 각주 공시체로 하고 KS F 2403에 따라 공시체를 만들고 양생하여야 하며, 소정의 양생기간이 끝나면 즉시 공시체를 6±3℃의 상태로 옮겨, 동탄성계수를 측정 하여 무게를 알고 KS F 2437에 따라 측정한다. 공시체는 양생이 끝나는 시간부터 동결융해 사이클이 개시되는 기간까지 함수량이 변하지 않게 보호해야 한다. 동결융해 사이클의 조건은 표 3.7.11과 같으며, 본 실험에서는 B법으로 실시하였다. 사이클 중 동결상태의 초기에 융해수내에 공시체를 넣고 동결융해시험을 시작한다. 일정한 사이클 간격으로 융해상태에서 장치로부터 공시체를 꺼낸다. 다음에 바로 6±3℃의 온도조건하에서 동탄성계수 측정을 하고 무게를 잰 후 다시 시험장치내로 옮긴다. 시험은 300 사이클의 동결융해작용을 받을 때까지 또는 공시체의 중량이 동결융해개시 직전의 중량이 75% 또는 상대동탄성계수가 60%로 될 때까지 시험을 계속한다. 동결융해 사이클이 계속될 수 없을 때는 동결상태로 공시체를 저장해야 한다.

(2) 계산

① 공시체 중량비

$$\alpha[\%] = (Wn/W) \times 100 \tag{3.7.2}$$

여기서,

α : 동결융해 C 사이클 후의 공시체 중량비

W : 동결융해 0 사이클에서의 공시체 중량

Wn : 동결융해 C 사이클에서의 공시체 중량

② 상대동탄성계수

$$Pc[\%] = (n12/n2) \times 100 \tag{3.7.3}$$

여기서,

Pc : 동결융해 C 사이클 후의 상대동탄성계수 [%]

n : 동결융해 0 사이클에서의 가로 1차 진동주파수

n1 : 동결융해 C 사이클에서의 가로 1차 진동주파수

③ 내구성지수

$$DF[\%] = PN/M \qquad (3.7.4)$$

여기서,

DF : 시험용 공시체의 내구성 지수

P : N사이클에서 상대동탄성 계수[%]

N : P가 시험을 단속시킬 수 있는 소정의 최소값이 된 순간의 사이클 수 또는 동결융해의 노출이 끝나게 되는 순간의 사이클 수

M : 동결융해에 노출이 끝날 때의 사이클 수

동결융해처리	동탄성계수 측정
	

(3) 시험결과

시료명	상대 동탄성 계수(%) [100 cycles]	상대 동탄성 계수(%) [200 cycles]	상대 동탄성 계수(%) [300 cycles]
12-0-20	85	81	80
12-5-20	86	82	80
12-0-50	85	82	80
12-5-50	85	83	80
24-0-20	94	90	87
24-5-20	94	90	87
24-0-50	93	90	87
24-5-50	94	91	88
45-0-20	98	94	91
45-5-20	98	94	92
45-0-50	97	94	91
45-5-50	98	94	92

하. 기포간격계수 시험

콘크리트의 동결융해에 대한 평가를 하는 방법으로 기포간격계수 측정을 통해 공극이 얼마만큼 잘 분포가 되어있는지 평가하는 시험이다. ASTM C 672 시험방법에 대해 수행되며, 시험규격에는 200 ㎛ 이하를 제시하고 있다.

(1) 시험방법

① 폴리셔(Polisher) 장비를 이용하여 표면 연마를 실시한다.

② 연마 시 No. 100, No. 200, No. 400, No. 800)을 사용하여 실시한다.

- ASTM에는 시료에 따라 적절하게 사용하게 되어 있음.

③ 연마를 마친 시료를 광학(화상분석) 현미경을 이용하여 측정을 실시한다.

④ 시험 절차에 따라 측정을 실시하며, 측정 데이터를 이용하여 공기량, 기포간격계수 등의 값을 산출한다.

제 8 절 MgO 혼입 콘크리트의 현장 적용(Ⅲ)

1. 개요

한탄강댐 감세지 옹벽의 일부 부재 및 본댐 우안부의 일부 부재에 MgO 혼입 장기팽창성 콘크리트를 적용하는 시험시공을 수행하였다. 그리고 MgO 혼입 콘크리트를 적용한 부재의 장기팽창성을 확인하기 위한 2년간의 현장계측을 수행하였다.

시험시공 및 현장계측은 감세지 좌안 옹벽과 본댐 우안부에서 각각 1쌍의 부재를 선정하여, MgO를 혼입하지 않은 일반 콘크리트와 MgO를 혼입한 콘크리트를 동일한 조건에서 비교 적용하여, 비교 계측하는 형식으로 이루어 졌다.

다음 그림 3.8.1은 한탄강댐의 조감도이며, 조감도 내에 원으로 표시된 부분이 본 시험시공 대상 구조물인 감세지 좌안 옹벽과 본댐 우안부의 위치를 나타낸다.



그림 3.8.1 한탄강댐 조감도 및 시험시공 대상 구조물의 위치

다음 그림 3.8.2는 한탄강댐 평면도 내에 시험시공 계획을 도시한 것으로서, 시험시공 대상 부재의 배치와 콘크리트 타설높이 및 타설물량 등을 나타낸다.

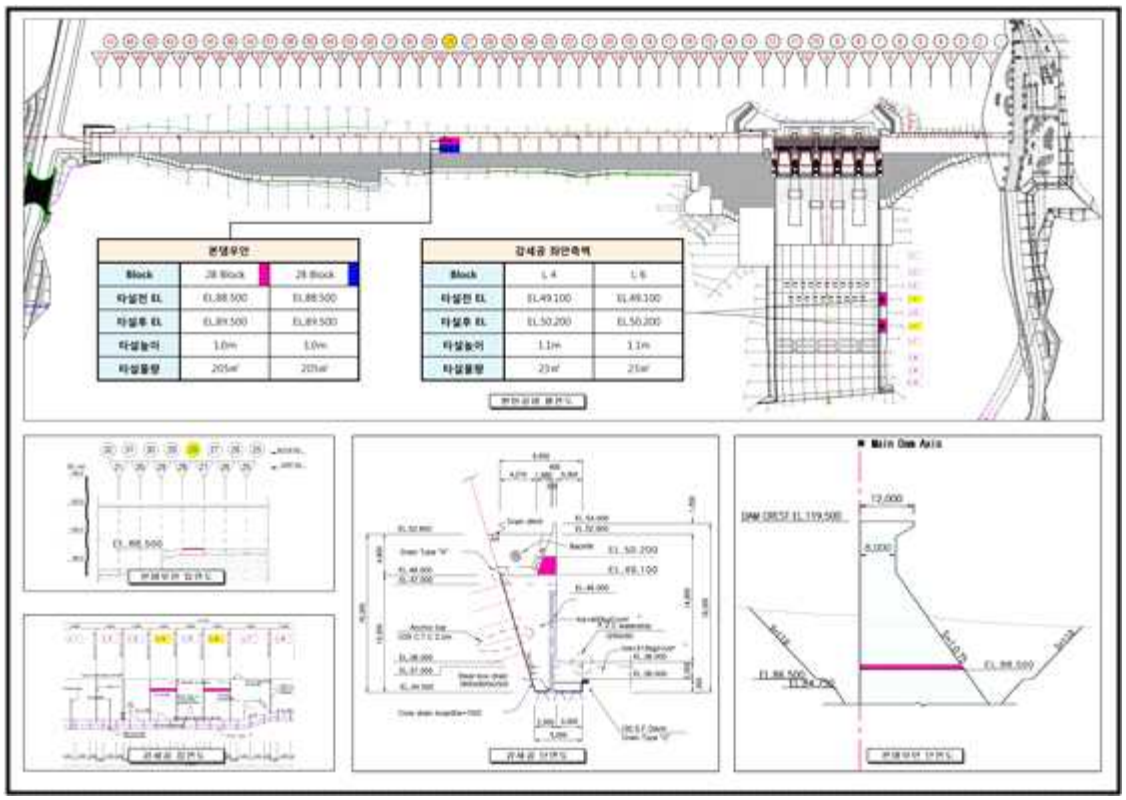


그림 3.8.2 시험시공 대상 부재 배치 및 콘크리트 타설물량

이상의 시험시공 계획에 따른 콘크리트 타설 계획을 정리하면 다음 표 3.8.1과 같다.

표 3.8.1 시험시공 부재별 콘크리트 타설 계획

구조물 구분	부재 구분	콘크리트 구분	콘크리트 물량
감세지 좌안 옹벽	BL.3	일반 콘크리트	각각 23 m^3
	BL.5	MgO 혼입 콘크리트	
본댐 우안부	BL.28(EL.88.5) 상류	일반 콘크리트	각각 205 m^3
	BL.28(EL.88.5) 하류	MgO 혼입 콘크리트	

다음 그림 3.8.3은 시험시공 대상 구조물인 감세지 좌안 옹벽 시공 현장전경을, 그림 3.8.4는 시험시공 대상 부재를 각각 나타낸다.



그림 3.8.3 감세지 좌안 옹벽 시공 현장전경



그림 3.8.4 감세지 좌안 옹벽 중 시험시공 대상 부재(거푸집 내)

다음 그림 3.8.5은 시험시공 대상 구조물인 본댐 우안부의 시공 현장전경을, 그림 3.8.6는 시험시공 대상 부재의 위치를 각각 나타낸다.



그림 3.8.5 본댐 우안부 시공 현장전경



그림 3.8.6 본댐 우안부 중 시험시공 대상 부재의 위치

2. MgO 혼입 콘크리트 제조

가. 콘크리트용 MgO 선정

MgO 혼입 장기팽창성 콘크리트를 안정적으로 생산하기 위해서는 콘크리트용 MgO를 엄선하여 사용하여야 한다. 다음 표 2.1은 중국 국가자원부의 수리수전계획설계총원이 1994년 제정한 기술요구서상의 콘크리트용 MgO 품질기준이다.

3.8.2 장기팽창성 콘크리트용 MgO 품질기준(중국, 1994년)

구 분	품질기준
MgO 함량(순도)	90% 이상
활성지표	240s±40s
CaO 함량	2% 이하
입도	0.077mm
체에 남아있는양	3% 이하
손실된 양	4% 이하
SiO2 함량	4% 미만

※ 또한, MgO의 소성 온도는 (1,050±50)℃이어야 한다.

시험시공에 사용된 콘크리트용 MgO에 대한 품질시험을 실시하였다. 품질시험 결과, 화학성분 분석 결과 및 활성도 시험 결과는 다음 표 3.8.3 및 표 3.8.4와 같다.

표 3.8.3 콘크리트용 MgO의 화학성분 분석 결과

구 분	화학성분(%)						
	SiO2	Al2O3	MgO	CaO	SO3	Fe2O3	LOI
품질기준 (중국 기술요구서)	4 미만	-	90 이상	2 이하	-	-	-
시험 결과 (확인시험)	2.31	0.23	92.79	1.40	0.19	0.34	2.54
공급자의 시험 성적서	2.70	-	91.50	2.40	-	-	-

표 3.8.4 콘크리트용 MgO의 활성도 시험 결과

구 분	활성지표(sec.)					
	1회	2회	3회	4회	5회	평균
품질기준 (중국 기술요구서)	240±40					
시험 결과 (확인시험)	260	249	246	251	255	252

이상에서 나타난 바와 같이 본 시험시공에 사용된 콘크리트용 MgO는 중국 국가자원부의 수리수전계획설계총원이 1994년 제정한 기술요구서상의 콘크리트용 MgO의 품질기준을 모두 만족한다.

나. MgO 혼입 콘크리트 배합설계

감세지 옹벽은 본래 25-21-120 규격의 일반 콘크리트로 시공하도록 설계되어있었다. 현장에서 사용중인 25-21-120 규격의 콘크리트 배합에 결합재 중량의 3%를 MgO로 치환하는 MgO 혼입 장기팽창성 콘크리트를 배합설계를 실시하였다. 콘크리트의 배합설계 결과는 다음 표 3.8.5와 같다.

표 3.8.5 감세지 좌안 옹벽 콘크리트 배합설계(25-21-120)

콘크리트 구분	W/CM (%)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m^3)						
			W	CM			S	G	AD
				C	FA	MgO			
일반 콘크리트	55.0	50.4	178	324	-	-	910	923	2.592
MgO 혼입 콘크리트	55.0	50.4	178	314	-	10	910	923	2.592

여기서, C는 1종 시멘트이고, AD는 나프탈렌계 AE감수제이다.

표 3.8.5의 콘크리트 배합의 굳지 않은 콘크리트 물성 시험 결과는 다음 표 3.8.6과 같다.

표 3.8.6 감세지 옹벽 콘크리트 물성 시험 결과

콘크리트 구분	시험 결과	
	슬럼프(mm)	공기량(%)
일반 콘크리트	110	4.5
MgO 혼입 콘크리트	115	4.7

표 3.8.6의 시험 결과에서 나타난 바와 같이 결합재 중량의 3%를 MgO로 치환한 MgO 혼입 콘크리트는 굳지 않은 상태에서 일반 콘크리트와 물성에 차이가 없다.

본댐 우안부에는 RCD 공법을 적용할 경우 80-12-0 규격의 빈배합 콘크리트를, ELCM 공법을 적용할 경우 80-14-30 및 80-18-30 규격의 일반 콘크리트를 적용하도록 설계되어 있으나, 본 시험시공을 위하여 25-18-120 규격의 일반 콘크리트 및

MgO 혼입 콘크리트를 적용하였다. 현장에서 사용중인 25-18-120 규격의 일반 콘크리트에 결합재 중량의 3%를 MgO로 치환하여 MgO 혼입 장기팽창성 콘크리트를 제조하였다. 콘크리트의 배합설계 결과는 다음 표 3.8.7과 같다.

표 3.8.7 본댐 콘크리트 배합설계(25-18-120)

콘크리트 구분	W/CM (%)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m3)						
			W	CM			S	G	AD
				C	FA	MgO			
일반 콘크리트	56.5	49.5	176	218	93	-	900	920	3.110
MgO 혼입 콘크리트	56.5	49.5	176	212	90	9	900	920	3.110

여기서, C는 2종 시멘트이고, AD는 나프탈렌계 AE감수제이다.

앞선 감세지 좌안 옹벽 콘크리트 배합설계를 통해 결합재 중량의 3%를 MgO로 치환하는 것은 굳지 않은 콘크리트 물성에 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었기 때문에 본댐 콘크리트 배합설계에서는 굳지 않은 콘크리트 물성 확인 시험을 생략하였다.

3. 현장 계측 시스템 구축

가. 콘크리트 체적변화 계측장비

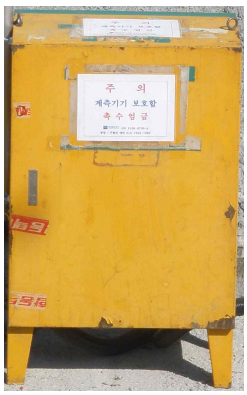
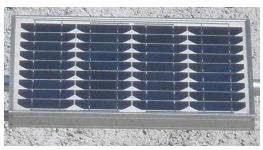
MgO 혼입 콘크리트의 장기팽창성 확인을 위하여 본 현장계측에 사용된 매립형 콘크리트 체적변화 계측센서의 종류, 용도 및 사양을 정리하면 다음 표 3.8.8과 같다.

표 3.8.8 콘크리트 체적변화 측정용 매립형 센서

계측 항목	계측센서	용 도	사 양
콘크리트 응력	매립형 변형률계 (KM-100B)	• 각종 외력에 의한 응력분포 특성 파악 • 온도에 의한 변형률 거동 파악	• 제조사: 동경측기연구소 • 측정방식: 전기저항식 • 정확도: 1μ Strain • 측정범위: ±5,000μ Strain
철근응력	철근계 (KSA-19A)	• 각종 외력에 의한 철근응력 측정 • 배근되는 철근(D19)과 동일한 철근으로 철근계 제작하여 철근 배근시 배근	• 제조사: 동경측기연구소 • 측정방식: 전기저항식 • 사용철근: D16 • 측정범위: 300MPa
무응력 및 유효응력	무응력계 (KMF-51)	• 건조수축 및 온도변화에 의한 자기 수축 변형률 측정 • 외부의 힘없이 건조수축, 온도변화에 의한 변형률	• 제조사: 동경측기연구소 • 측정방식: 전기저항식 • 정확도: 1μ Strain • 측정범위: ±5,000μ Strain
	유효응력계 (GK-10N_505)	• 콘크리트 양생 중 콘크리트의 응력을 직접적으로 측정	• 제조사: ELMES • 측정방식: 전기저항식 • 측정범위: 10MPa • 정격출력: 1mV/V(2,000×10-6)
온도	온도계 (Thermocouple)	• 측정 변형률과 구조물 온도와의 상관 관계분석 • 설치 단면의 온도분포 특성 파악	• 제조사: (한국)동양센서 • 측정방식: 전기저항식 • 정확도: 0.5℃ • 측정범위: -100~200℃

본 현장계측에는 Data Logger와 더불어 별도의 통신장비 및 전원공급 장치 등이 사용되었다. 통신장비의 설치 목적은 사무실에서 계측 상황을 수시로 점검하여 계측결과를 안정적으로 확보하고, 계측기 등에 이상이 발생할 경우 신속하게 대처하기 위함이다. 또한, 안정된 전원공급을 위하여 배터리와 태양열 발전장치를 병행하여 사용하였다. 본 계측에 사용된 장비의 내용은 다음 표 3.2와 같다.

표 3.8.9 계측에 사용된 장비 : 계측기, 통신장비, 전원공급 장치

항 목	계측기기	사용 목적	이 미 지
계측장비	Data Logger	• 정적 데이터 확보(계측)	
통신장비	무선모뎀	• 현장 계측기 → 서버PC의 무선통신	
보호장비	계측기 보호함	• 계측기, 통신장비, 전원장비의 보호	
전원장비	태양열 접지판	• 계측기 및 통신장비의 전원 공급	

나. 체적변화 계측센서 설치

감세지 옹벽 내 콘크리트 체적변화 계측센서 설치 위치는 다음 그림 3.8.7 ~ 그림 3.8.9과 같다.

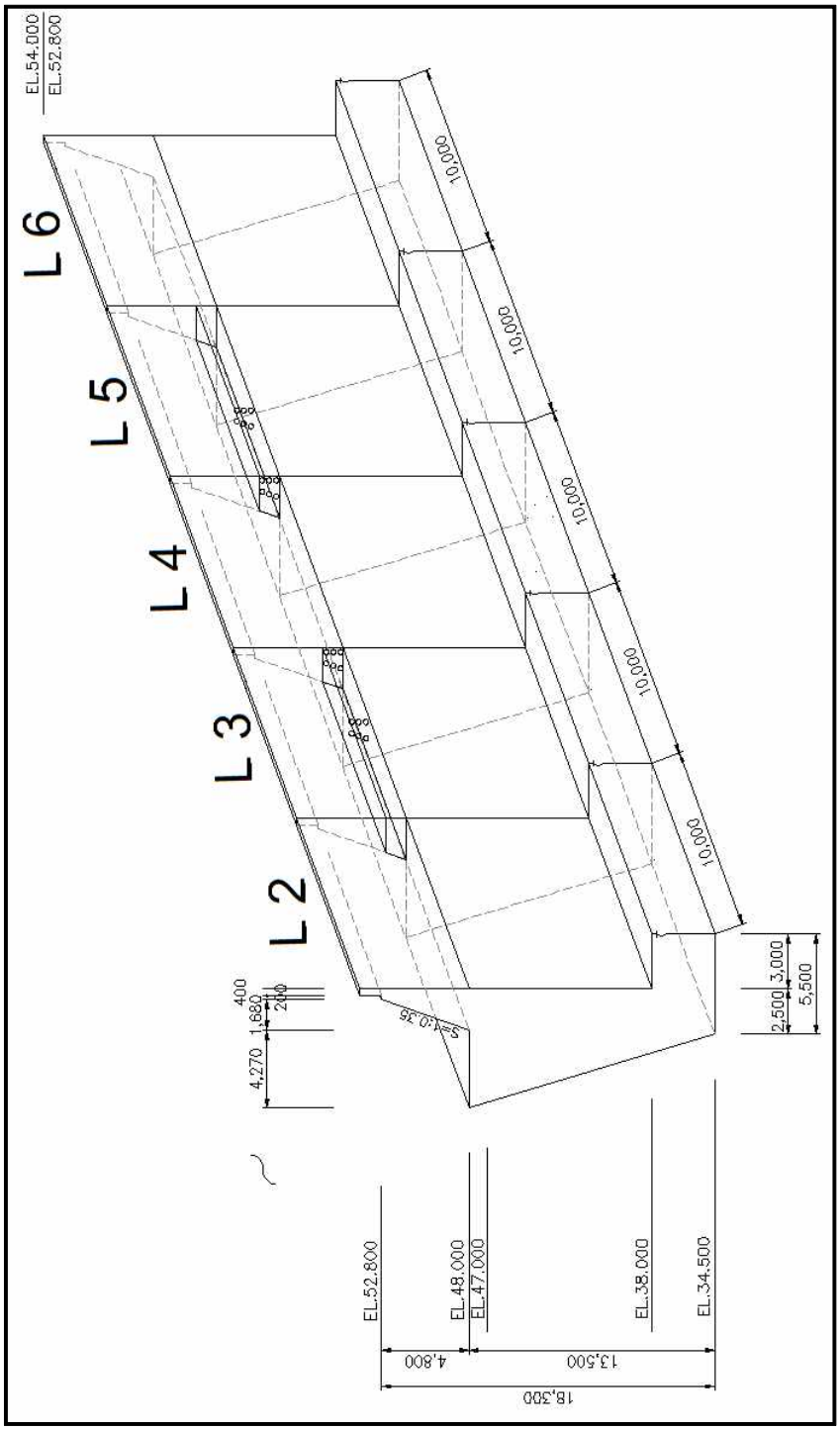


그림 3.8.7 감세지 옹벽 내 계측센서 설치 위치

위의 그림 3.8.8과 3.8.9의 원으로 표시된 부분이 계측센서 설치 위치를 나타낸다.

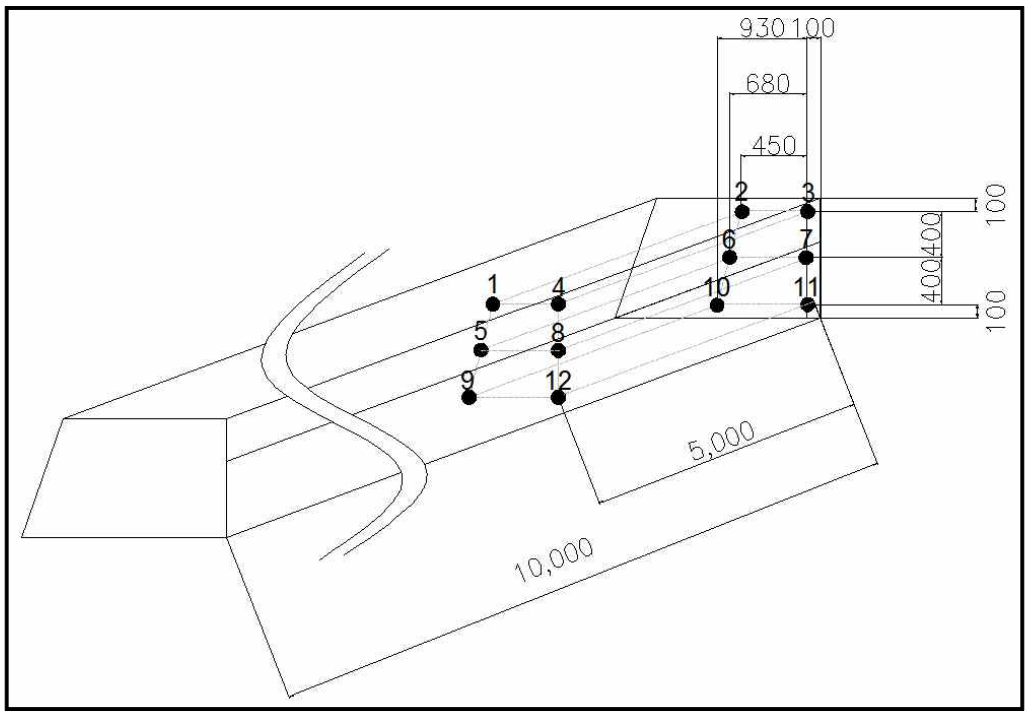


그림 3.8.8 감세지 옹벽 내 계측센서 설치 위치(일반 콘크리트 적용 부재, L3)

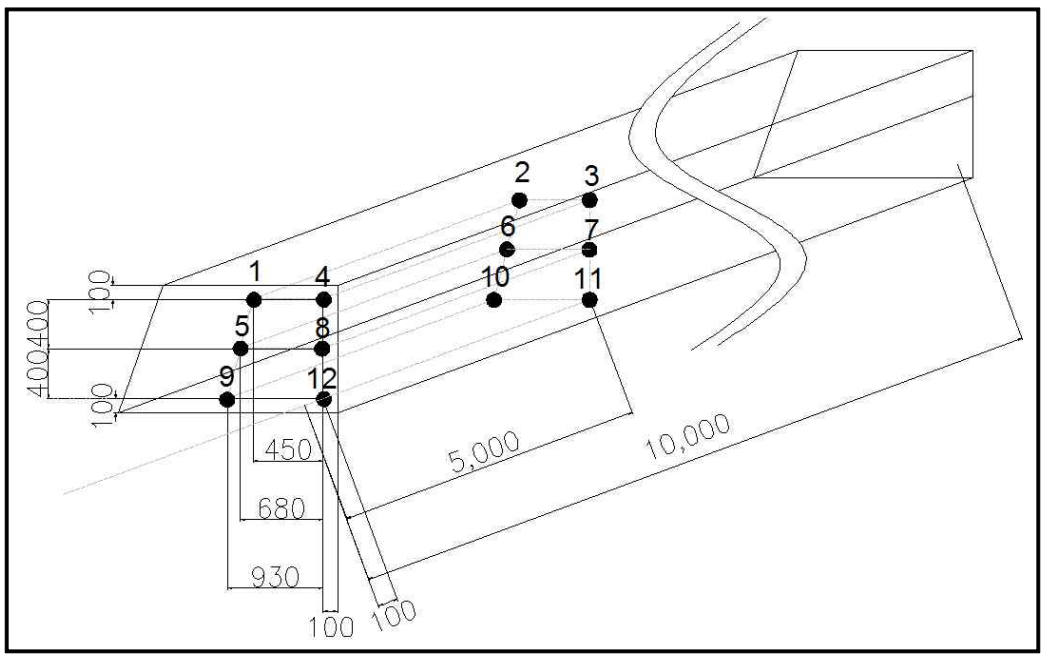


그림 3.8.9 감세지 옹벽 내 계측센서 설치 위치(MgO 혼입 콘크리트 적용 부재, L5)

계측결과 분석을 위하여 옹벽 내에 설치된 모든 체적변화 계측센서에 고유번호를 부여하였다. 고유번호 부여 현황은 다음 그림 3.8.10 ~ 그림 3.8.12와 같다.

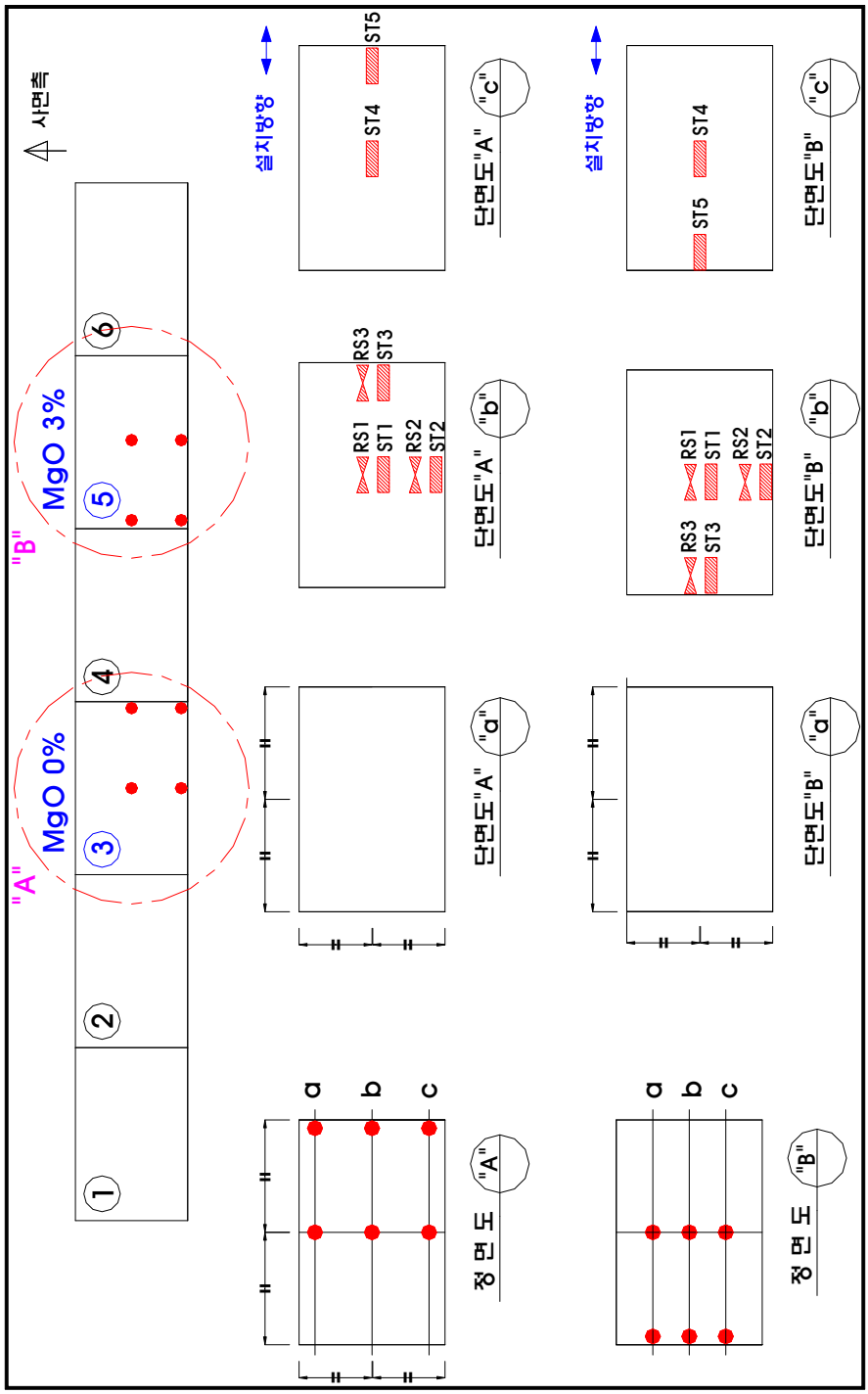


그림 3.8.10 옹벽 내 계측센서 고유번호(콘크리트 변형률계 및 철근 변형률계)

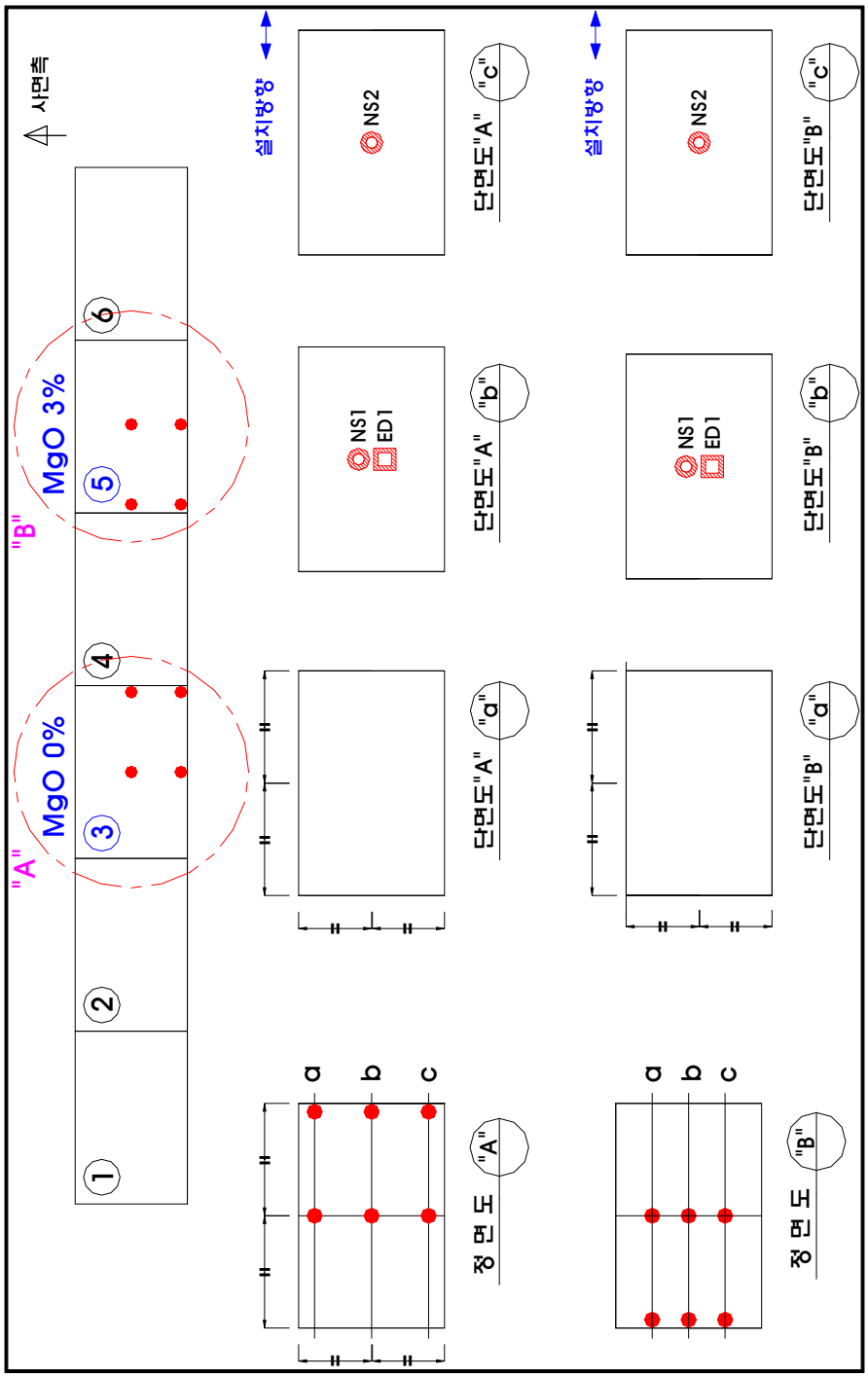


그림 3.8.11 옹벽 내 계측센서 고유번호(콘크리트 무응력계 및 유효응력계)

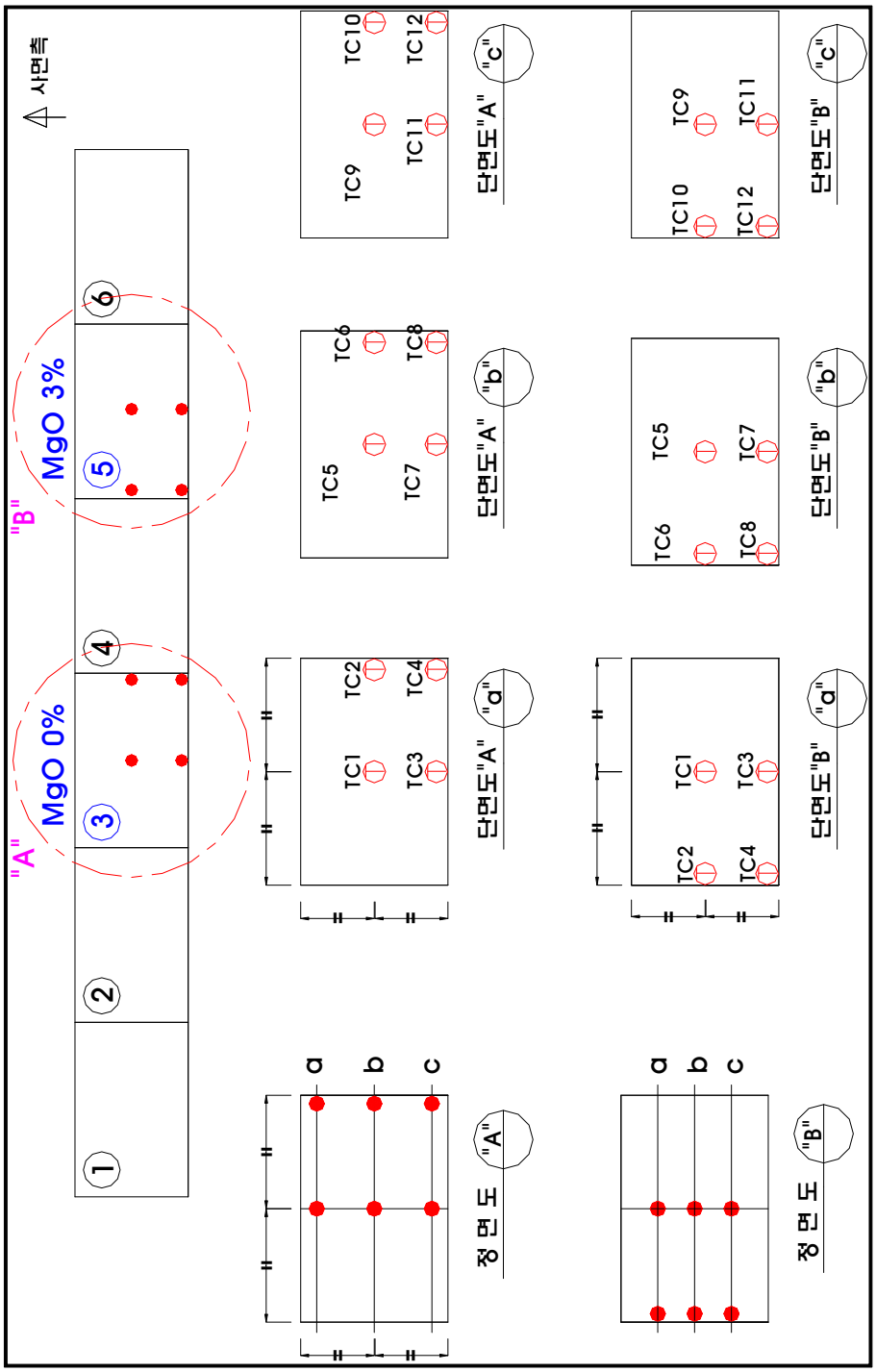


그림 3.8.12 옹벽 내 계측센서 고유번호(온도계)

그림 3.8.13은 옹벽 내 체적변화 계측센서 설치 결과로서 콘크리트 변형률계, 철근 변형률계, 콘크리트 무응력계, 콘크리트 유효응력계의 설치 현황을 보여준다.



콘크리트 변형률계 설치　　철근 변형률계 설치

콘크리트 무응력계 설치　　콘크리트 유효응력계 설치

그림 3.8.13 감세지 옹벽 내 계측센서 설치 결과

그림 3.8.13에서 생략된 감세지 옹벽 내의 나머지 계측센서 설치 현황은 부록으로 작성하여 제시하였다.

본댐 우안부 내에 설치된 체적변화 계측센서의 종류 및 설치 위치는 다음 그림 3.8.14 및 그림 3.8.15와 같다. 그림에서 검은색 점이 계측센서의 위치를 나타낸다.

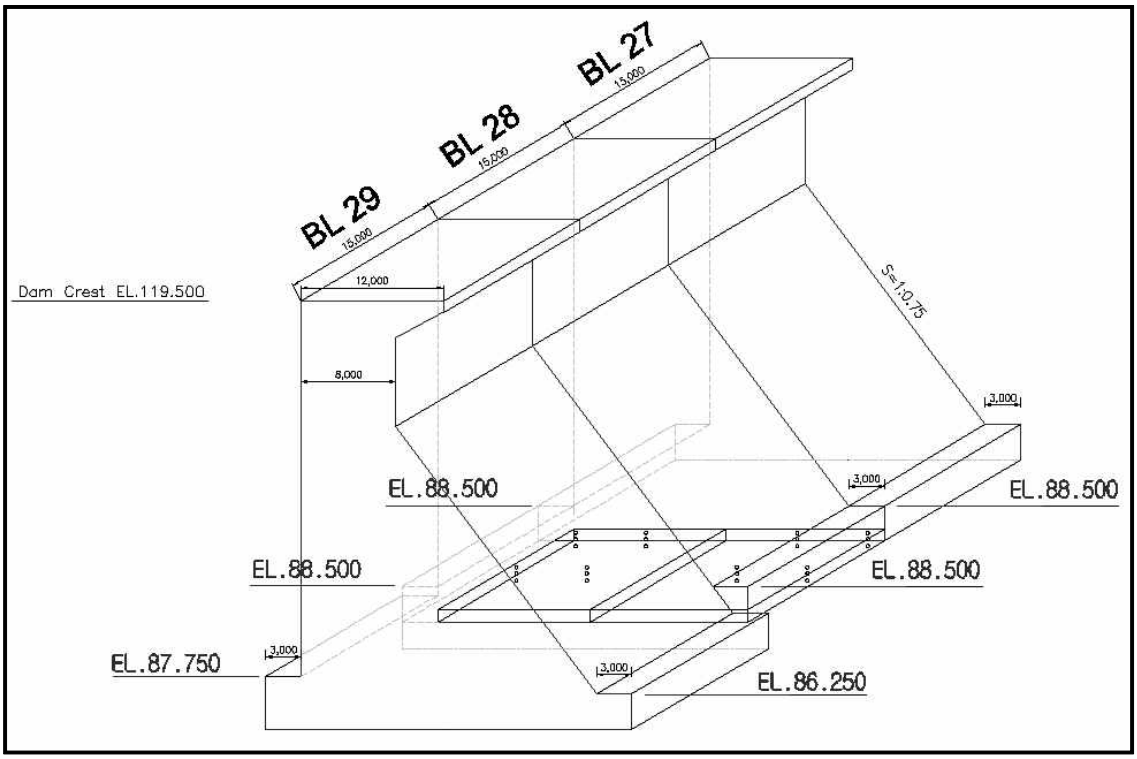


그림 3.8.14 본댐 우안부 내 계측센서 설치 위치

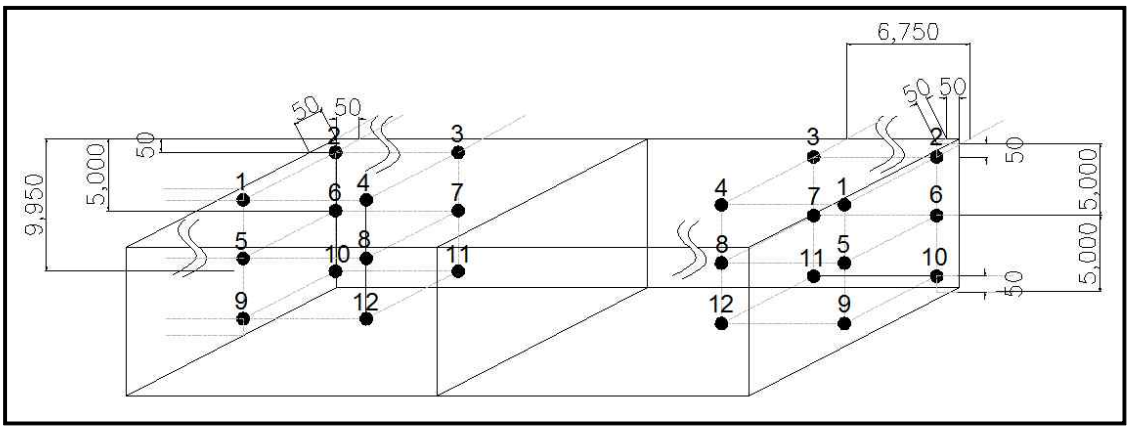


그림 3.8.15 본댐 우안부 내 계측센서 설치 위치 상세

감세지 옹벽에서와 마찬가지로 본댐 우안부 내에 설치된 모든 체적변화 계측센서에 고유번호를 부여하였다. 고유번호 부여 현황은 다음 그림 3.8.16 ~ 그림 3.8.18과 같다.

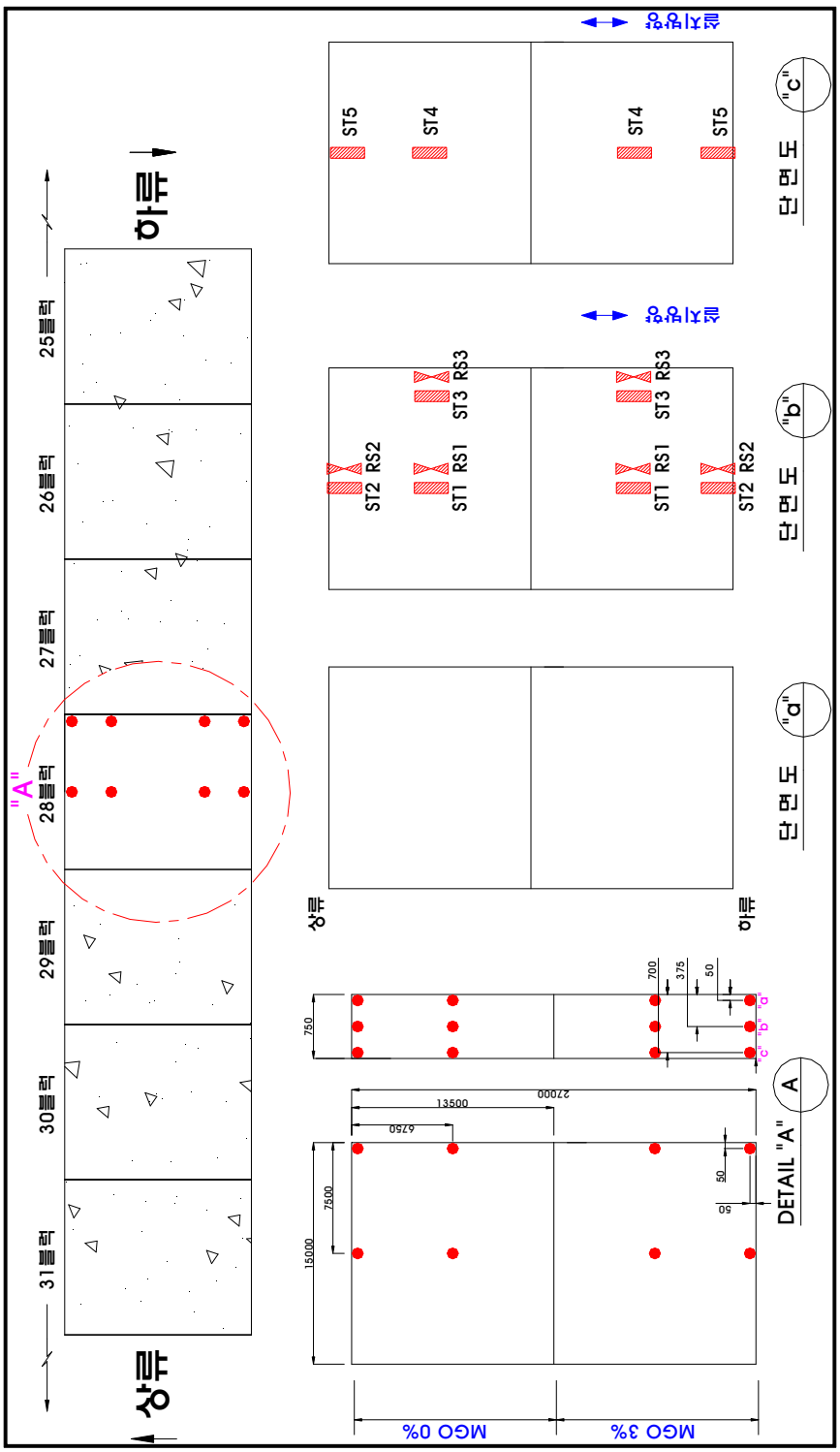


그림 3.8.16 본댐 우안부 내 계측센서 고유번호(콘크리트 및 철근 변형률계)

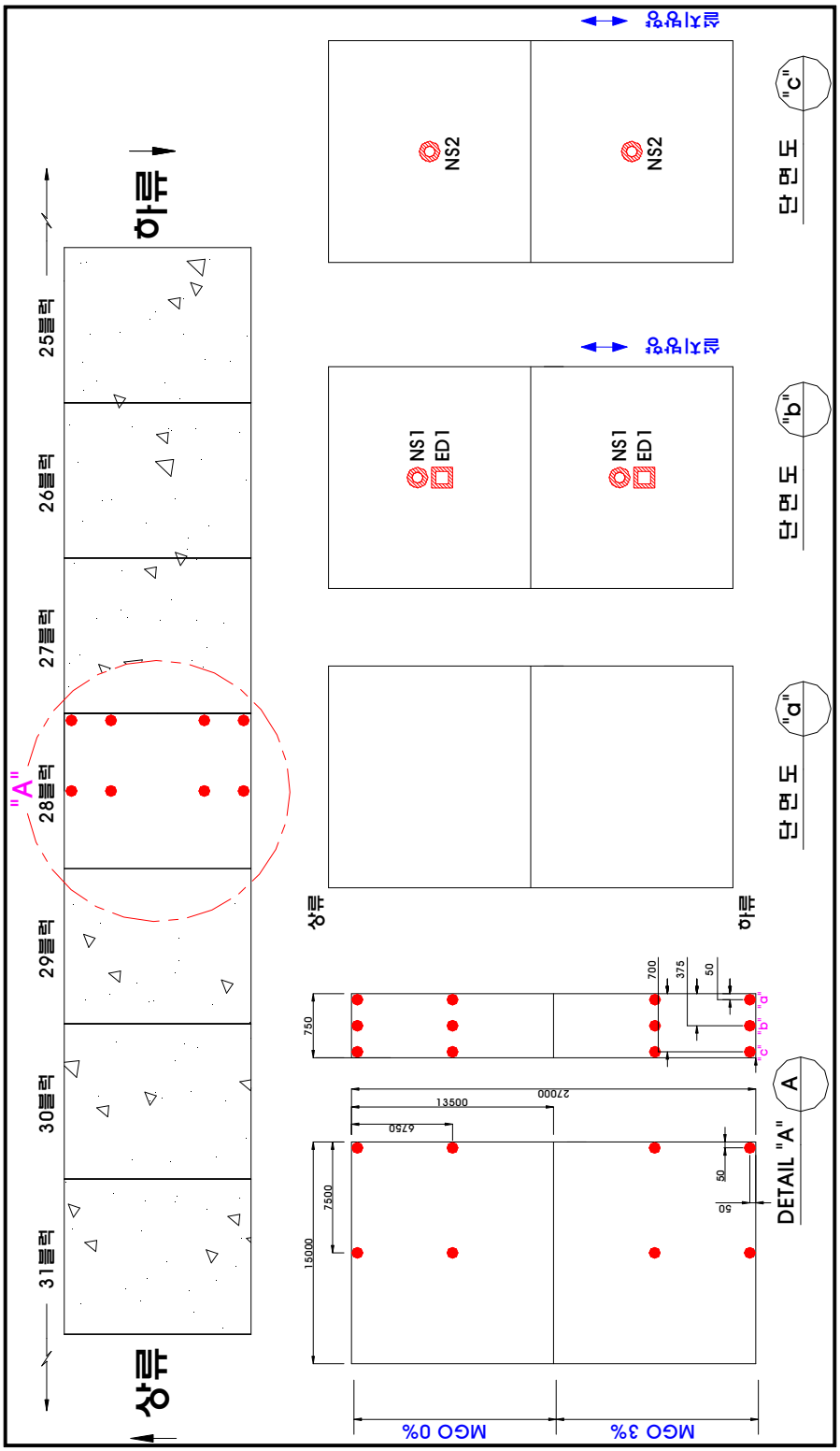


그림 3.8.17 본댐 우안부 내 계측센서 고유번호(콘크리트 무응력계 및 유효응력계)

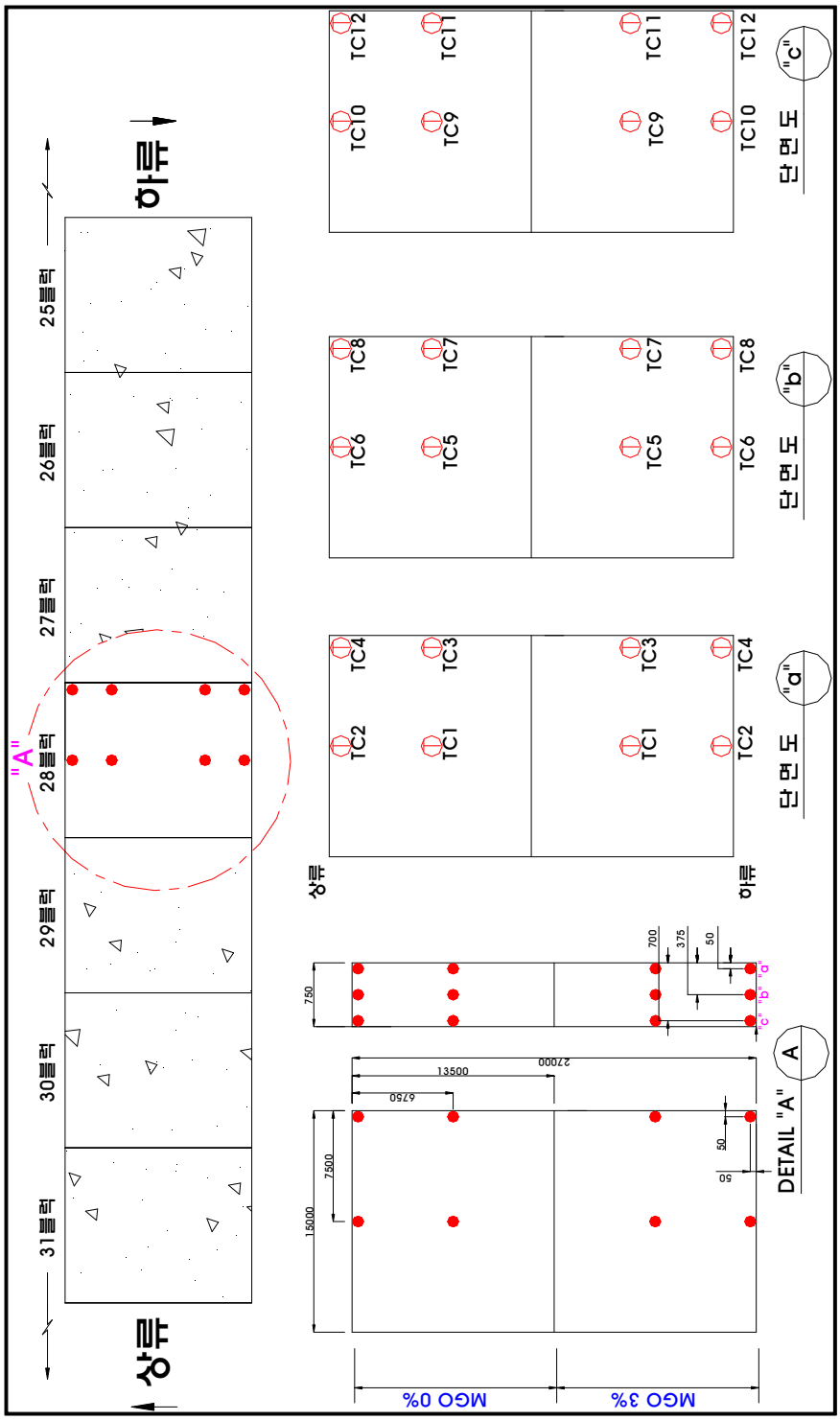
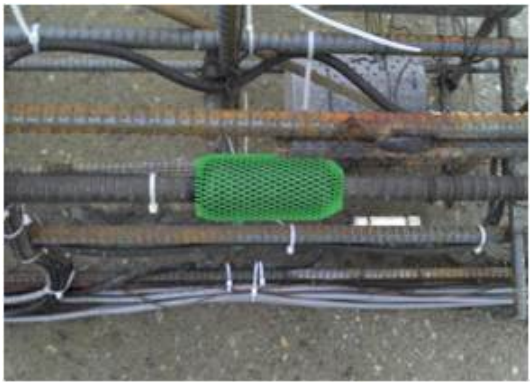


그림 3.8.18 본댐 우안부 내 계측센서 고유번호(온도계)

다음 그림 3.8.19는 본댐 우안부 내에 설치된 체적변화 계측센서로서 콘크리트 변형률계, 철근 변형률계, 콘크리트 무응력계, 콘크리트 유효응력계의 설치 현황을 보여준다. 그림에서 생략된 본댐 우안부 내의 나머지 계측센서 설치 현황은 부록으로 작성하여 제시하였다.



콘크리트 변형률계 설치



철근 변형률계 설치



콘크리트 무응력계 설치



콘크리트 유효응력계 설치

그림 3.8.19 본댐 우안부 내 계측센서 설치 결과

다. 자동계측 시스템 구축

본 현장계측에 사용된 시스템은 크게 현장과 원격지 사무실로 구분하여 설치 및 관리되었으며, 현장 계측시스템은 계측센서와 계측기기로 구분할 수 있다. 자동계측 시스템 구성 현황은 다음 그림 3.8.20 및 표 3.8.10과 같다.

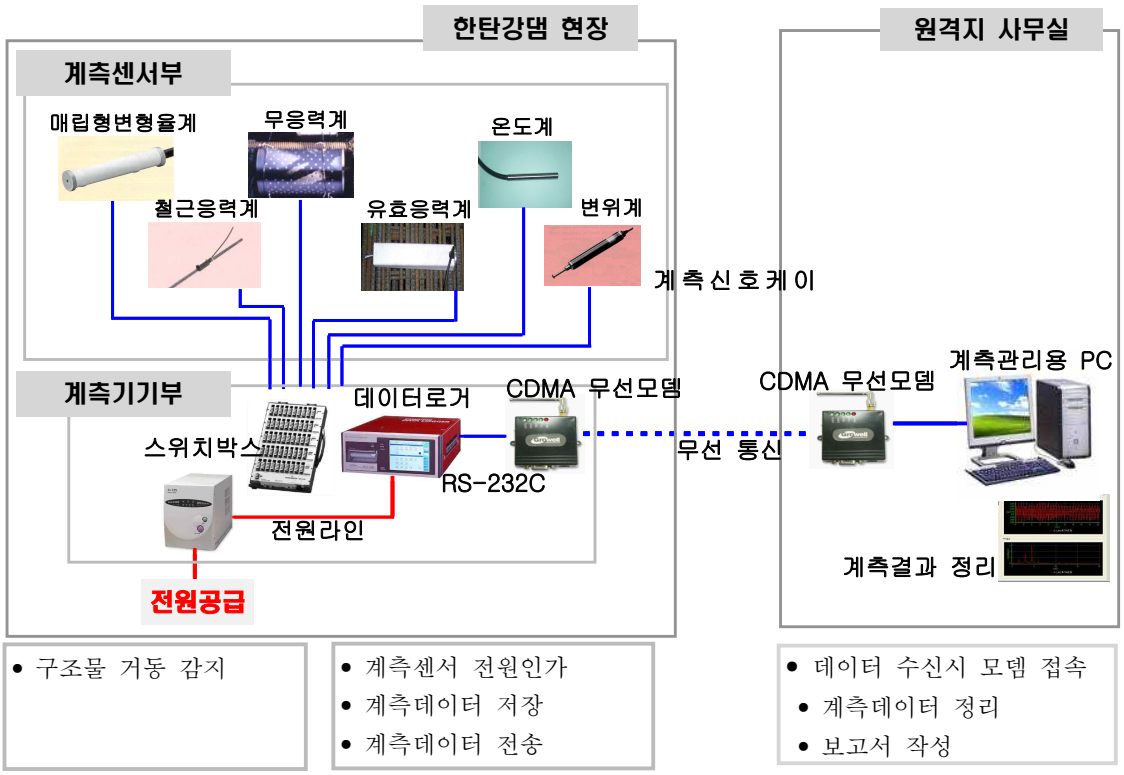


그림 3.8.20 자동계측 시스템 구성 현황도

표 3.8.10 자동계측 시스템 구성 현황

계측센서부	계측기기부	원격지 사무실	계측관리자
• 구조물 거동 감지 • 계측신호 전송	• 계측센서로 전원 인가 • 계측데이터 저장 • 계측데이터 전송	• 계측데이터 획득 • 계측서버 구축 • 계측관리를 위한 인터넷망 구축 • 계측관리자 PC에 전송	• 계측관리 프로그램 구축 • 계측관리 수행

다음 표 3.8.11는 한탄강댐 시험시공 부재에 설치된 계측센서의 전체 현황을 나타낸다.

표 3.8.11 한탄강댐 시험시공 부재에 설치된 계측센서 전체 현황

계측항목	계측기기	감세지 옹벽		본댐 우안부		계측빈도	계측관리
		일반 콘크리트	MgO 혼입 콘크리트	일반 콘크리트	MgO 혼입 콘크리트		
콘크리트 변형률	변형률계	5	5	5	5	1회/30분	정적
	무응력계	2	2	2	2		
철근 변형율	변형률계	3	3	3	3		
콘크리트 응력	유효응력계	1	1	1	1		
콘크리트 온도	온도계	12	12	12	12		
계		23	23	23	23		

다음 표 3.8.12는 현장계측 수행에 있어서 데이터 취득, 정리, 그리고, 분석 계획을 나타낸다.

표 3.8.12 데이터 취득, 정리 및 분석 계획

계측데이터 취득	계측결과 정리	계측결과 분석
• 일정기간(주1회)으로 정기적 계측데이터 수신 • 1일 1회 통신, 계측시스템 이상 여부 확인 ※이상시 즉시 조치	• 계측데이터 구분 및 정리 -일자별, 센서별 텍스트화 (*.csv→excel로 변환) • 위치별, 센서별, 타계측 항목간 외 계측결과 도식화	• 계측결과 이상 여부 파악 및 추세 확인 • 구조물 거동 분석 • 계측결과보고서 작성

4. 콘크리트 타설

가. 감세지 옹벽 콘크리트 타설

콘크리트 체적변화 계측센서를 설치한 감세지 좌안 옹벽 L3과 L5의 거푸집내에 일반 콘크리트와 MgO 혼입 콘크리트를 각각 타설하였다. 감세지 좌안 옹벽 콘크리트 타설 내용은 다음 그림 3.8.20 및 표 3.8.12와 같다.



그림 3.8.20 감세지 좌안 옹벽 콘크리트 타설 전경

표 3.8.12 감세지 좌안 옹벽 콘크리트 타설 결과

구 분	L2 (10.0 m)	L3 (10.0 m)	L4 (10.0 m)	L5 (10.0 m)	L6 (10.0 m)
EL.50.30	2011. 06. 02	2011. 05. 27	2011. 06. 02	2011. 05. 27	2011. 06. 02
	일반 콘크리트 (25-21-120)	일반 콘크리트 (25-21-120)	일반 콘크리트 (25-21-120)	일반 콘크리트 (25-21-120)	일반 콘크리트 (25-21-120)
	20 ㎥	23 ㎥	20 ㎥	23 ㎥	20 ㎥
EL.49.20	2011. 05. 22	2011. 05. 19	2011. 05. 22	2011. 05. 19	2011. 05. 22
	일반 콘크리트 (25-21-120)	일반 콘크리트 (25-21-120)	일반 콘크리트 (25-21-120)	MgO 혼입 콘크리트 (25-21-120)	일반 콘크리트 (25-21-120)
	23 ㎥	27 ㎥	23 ㎥	27 ㎥	23 ㎥
EL.48.10	2011. 05. 04	2011. 04. 26	2011. 05. 04	2011. 04. 26	2011. 05. 10
	일반 콘크리트 (25-21-120)	일반 콘크리트 (25-21-120)	일반 콘크리트 (25-21-120)	일반 콘크리트 (25-21-120)	일반 콘크리트 (25-21-120)
	70 ㎥	108 ㎥	70 ㎥	108 ㎥	98 ㎥

나. 본댐 우안부 콘크리트 타설

콘크리트 체적변화 계측센서를 설치한 본댐 우안 28번 블록의 거푸집내에 일반 콘크리트와 MgO 혼입 콘크리트를 상하류로 구분하여 타설하였다. 본댐 우안 28번 블록의 콘크리트 타설 내용은 다음 그림 3.8.21 및 표 3.8.13과 같다.

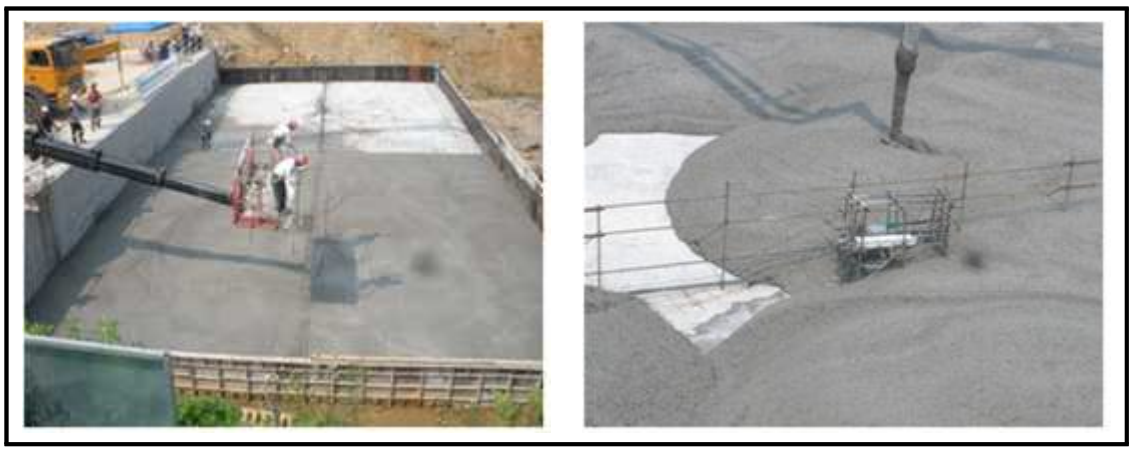


그림 3.8.21 본댐 우안부 콘크리트 타설 전경

표 3.8.13 본댐 우안부 콘크리트 타설 결과

구 분	BL 27 (15.0 m)	BL 28 (15.0 m)	BL 29 (15.0 m)
EL.86.25	2010	2011. 10. 02	2011. 10. 22
	일반 콘크리트 (25-18-120)	ELCM 공법 (80-14-30)	RCD 공법 (80-12-0)
	유로폼	강재거푸집	강재거푸집
		652 ㎥	320 ㎥
EL.85.50	2010	2011. 06. 08	2011. 10. 04
	일반 콘크리트 (25-18-120)	일반 콘크리트 MgO 혼입 콘크리트 (25-18-120)	RCD 공법 (80-12-0)
	유로폼	유로폼	강재거푸집
		179 ㎥ + 179 ㎥	317 ㎥
EL.84.75	2010	2010	2011. 09. 25
	일반 콘크리트 (25-18-120)	일반 콘크리트 (25-18-120)	RCD 공법 (80-12-0)
	유로폼	유로폼	강재거푸집
			279 ㎥

5. 체적변화 계측결과

가. 감세지 옹벽 계측결과

감세지 좌안 옹벽 시험시공 부재의 콘크리트 변형률 계측결과는 다음 그림 3.8.22 및 그림 3.8.23와 같다.

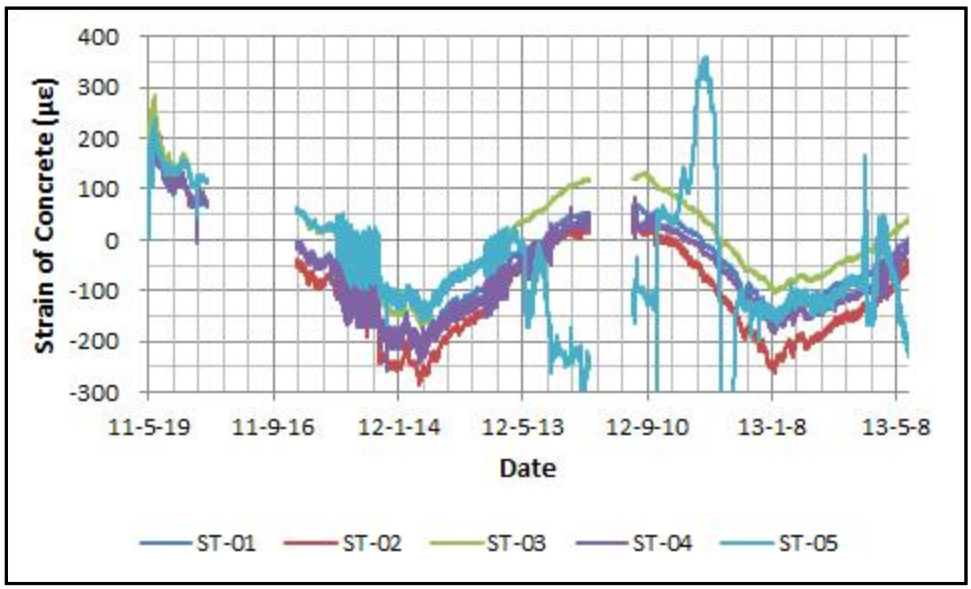


그림 3.8.22 감세지 좌안 옹벽 콘크리트 변형률 계측결과 : 일반 콘크리트

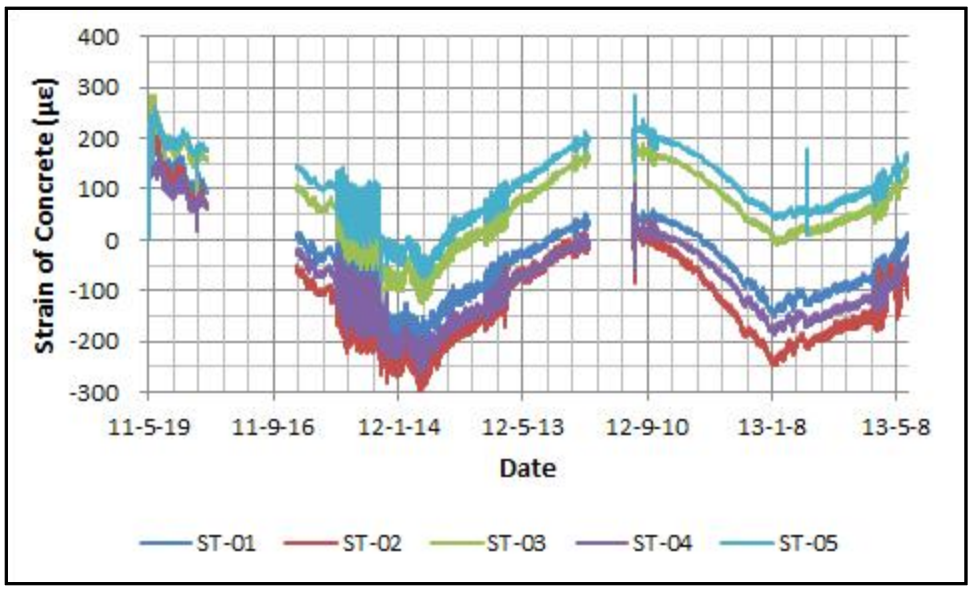


그림 3.8.23 감세지 좌안 옹벽 콘크리트 변형률 계측결과 : MgO 혼입 콘크리트

감세지 좌안 옹벽 시험시공 부재 내 철근 변형률 계측결과는 다음 그림 3.8.24 및 그림 3.8.25와 같다.

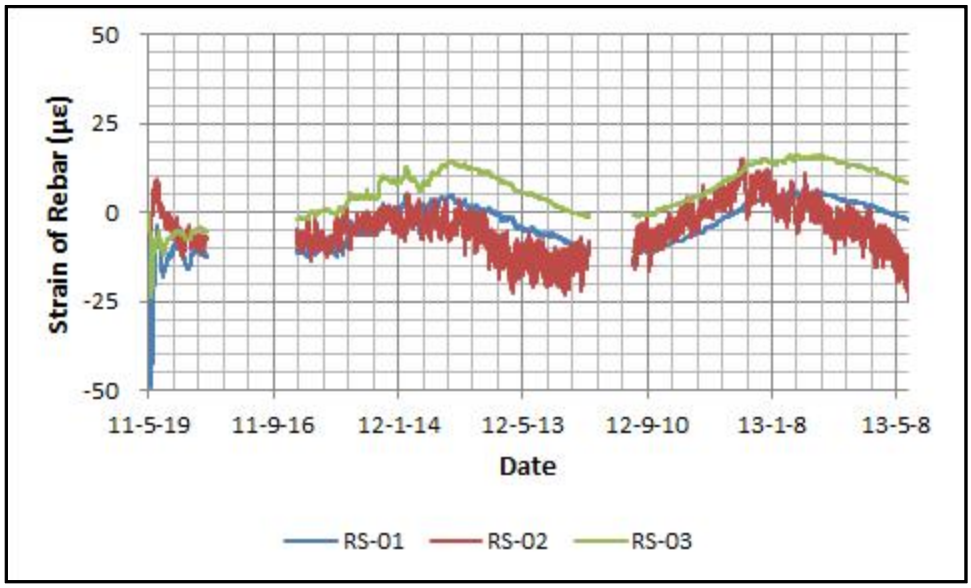


그림 3.8.24 감세지 좌안 옹벽 내 철근 변형률 계측결과 : 일반 콘크리트

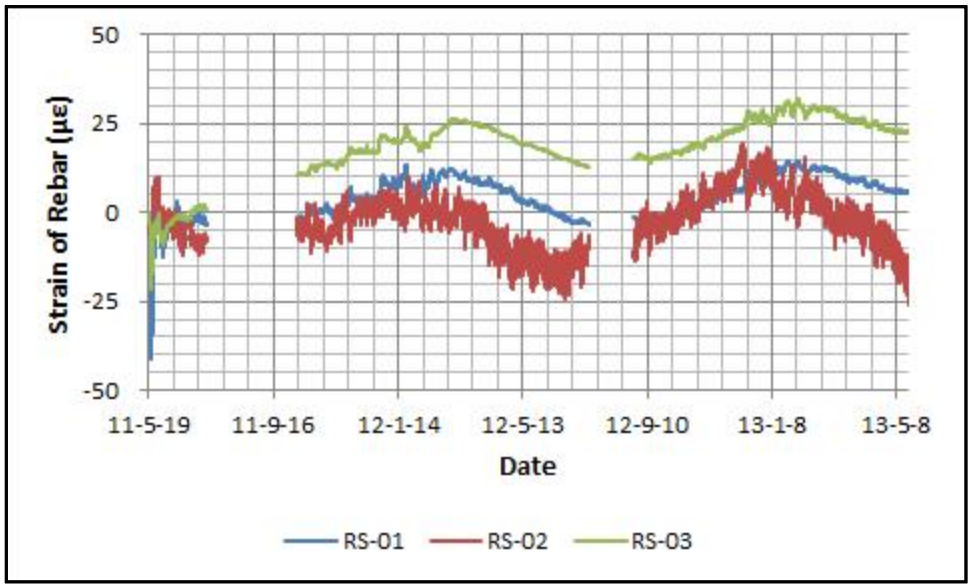


그림 3.8.25 감세지 좌안 옹벽 내 철근 변형률 계측결과 : MgO 혼입 콘크리트

무응력계를 이용한 감세지 좌안 옹벽 시험시공 부재의 콘크리트 변형률 계측결과는 다음 그림 3.8.26 및 그림 3.8.27과 같다.

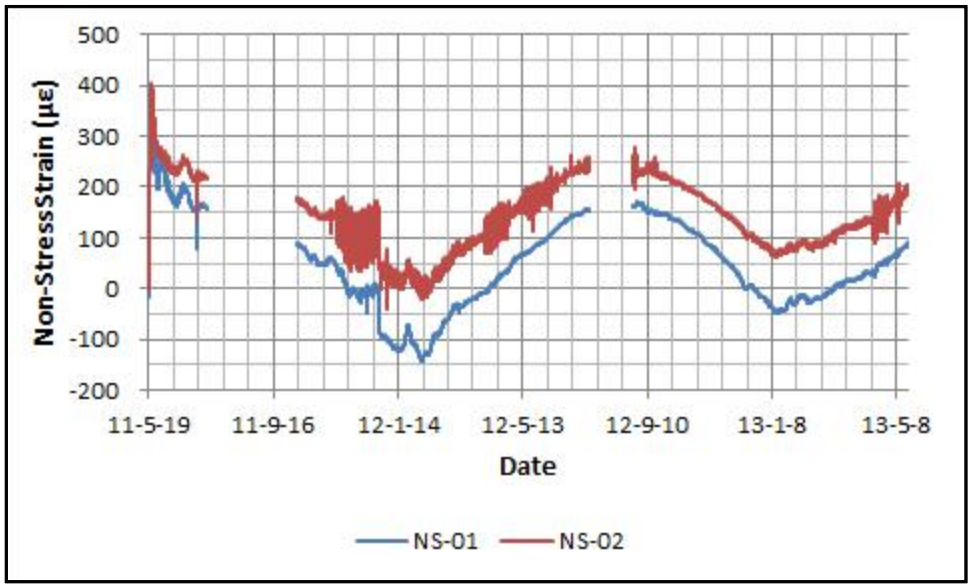


그림 3.8.26 무응력계를 이용한 감세지 좌안 옹벽 콘크리트 변형률 계측결과
: 일반 콘크리트

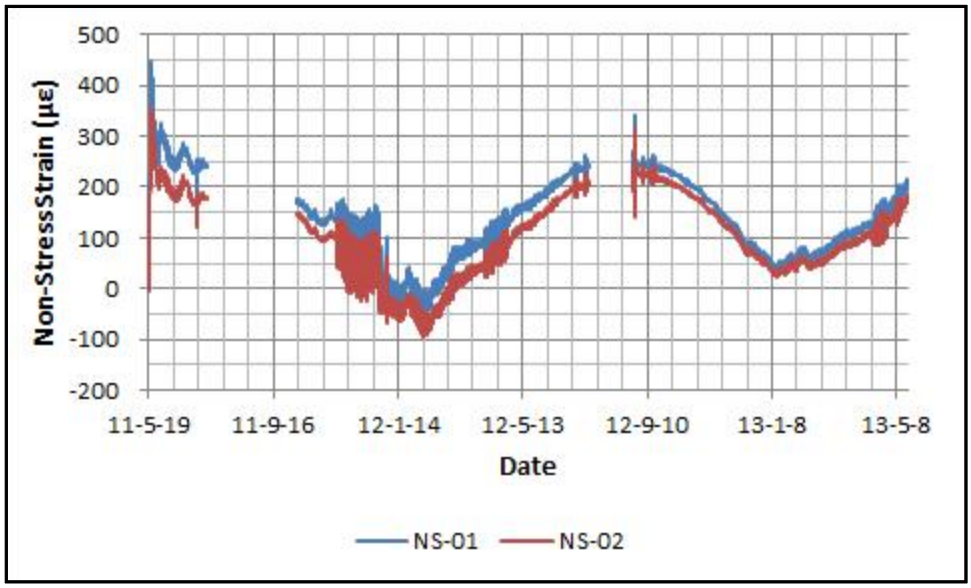


그림 3.8.27 무응력계를 이용한 감세지 좌안 옹벽 콘크리트 변형률 계측결과
: MgO 혼입 콘크리트

감세지 좌안 옹벽 시험시공 부재의 콘크리트 유효응력 계측결과는 다음 그림 3.8.28 및 그림 3.8.29와 같다.

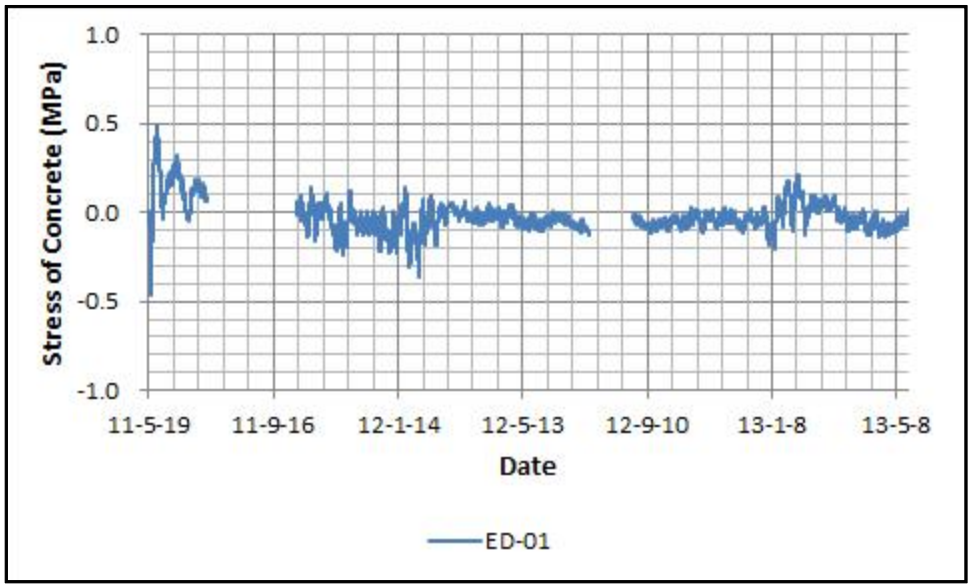


그림 3.8.28 감세지 좌안 옹벽 콘크리트 유효응력 계측결과 : 일반 콘크리트

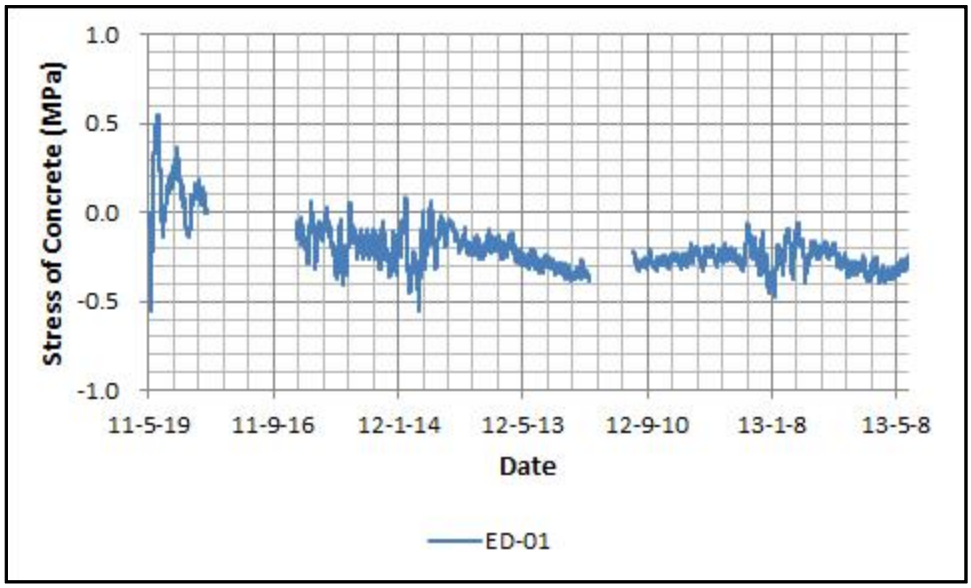


그림 3.8.29 감세지 좌안 옹벽 콘크리트 유효응력 계측결과 : MgO 혼입 콘크리트

감세지 좌안 옹벽 시험시공 부재 내외부의 콘크리트 온도 계측결과는 다음 그림 3.8.30 및 그림 3.8.31과 같다.

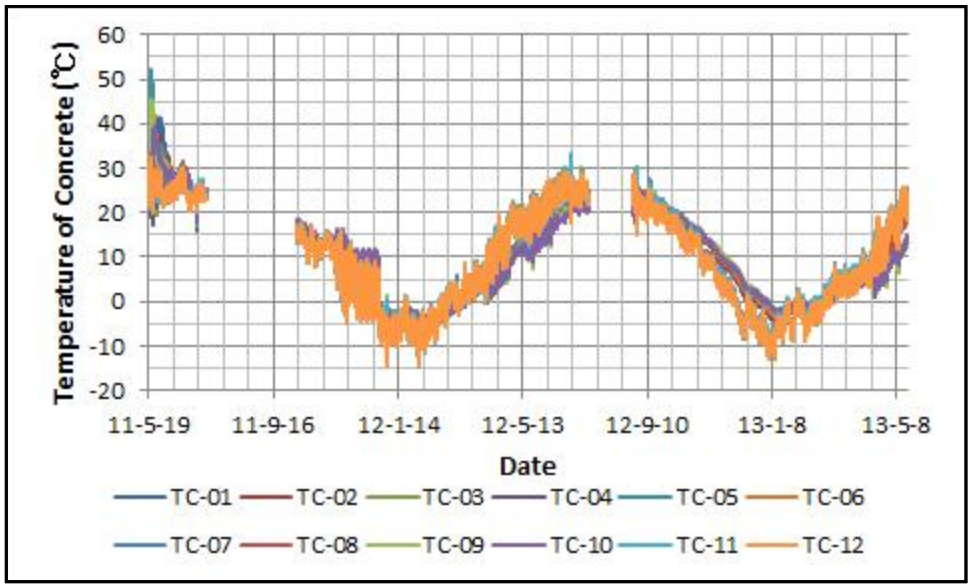


그림 3.8.30 감세지 좌안 옹벽 콘크리트 온도 계측결과 : 일반 콘크리트

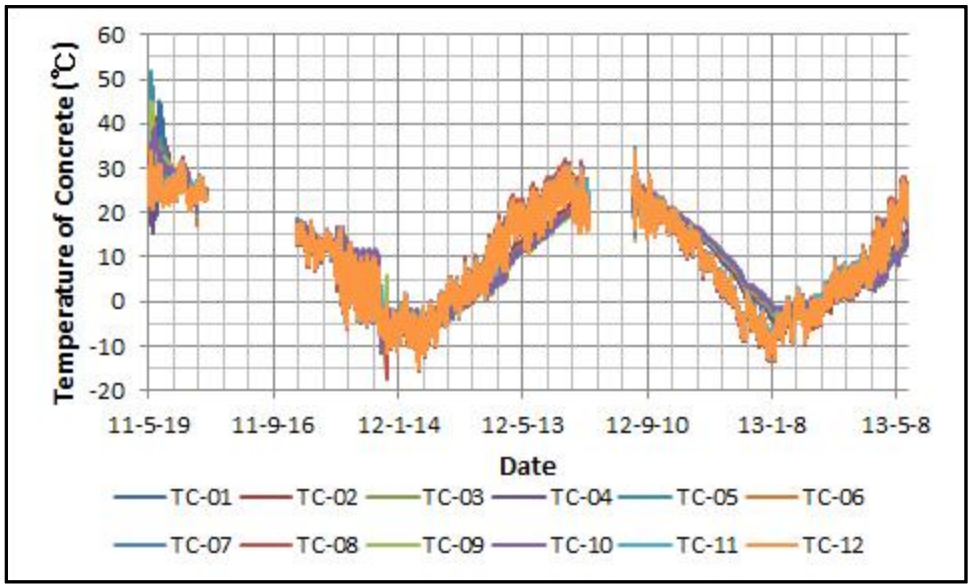


그림 3.8.31 감세지 좌안 옹벽 콘크리트 온도 계측결과 : MgO 혼입 콘크리트

나. 본댐 우안부 계측결과

본댐 우안부 시험시공 부재의 콘크리트 변형률 계측결과는 다음 그림 3.8.32 및 그림 3.8.33과 같다.

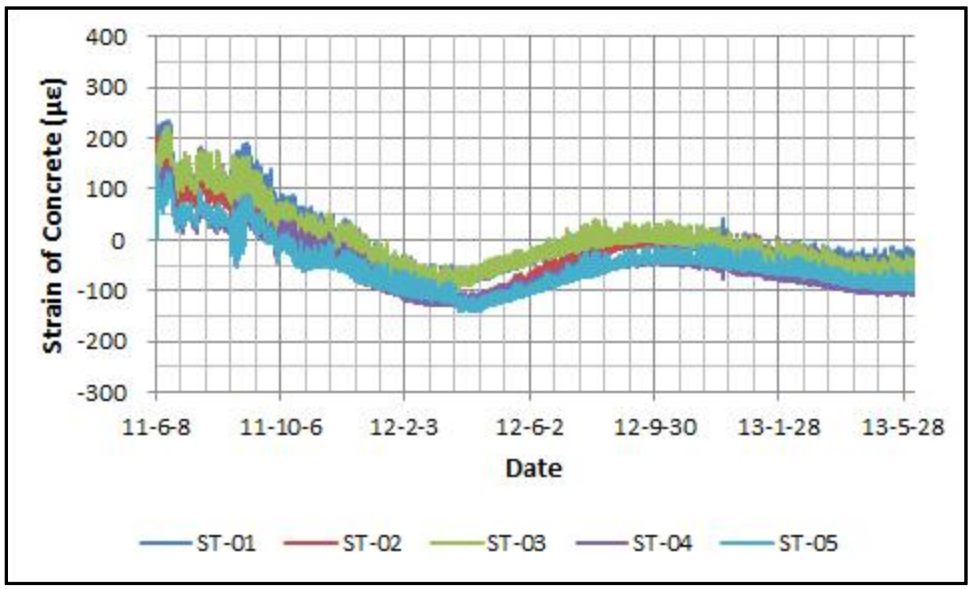


그림 3.8.32 본댐 우안부 콘크리트 변형률 계측결과 : 일반 콘크리트

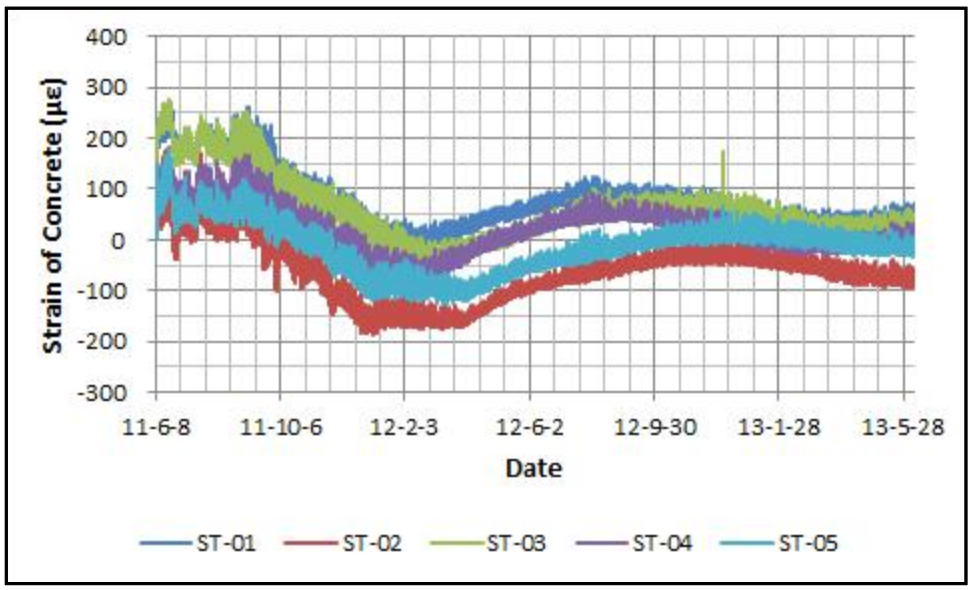


그림 3.8.33 본댐 우안부 콘크리트 변형률 계측결과 : MgO 혼입 콘크리트

본댐 우안부 시험시공 부재 내 철근 변형률 계측결과는 다음 그림 3.8.34 및 그림 3.8.35와 같다.

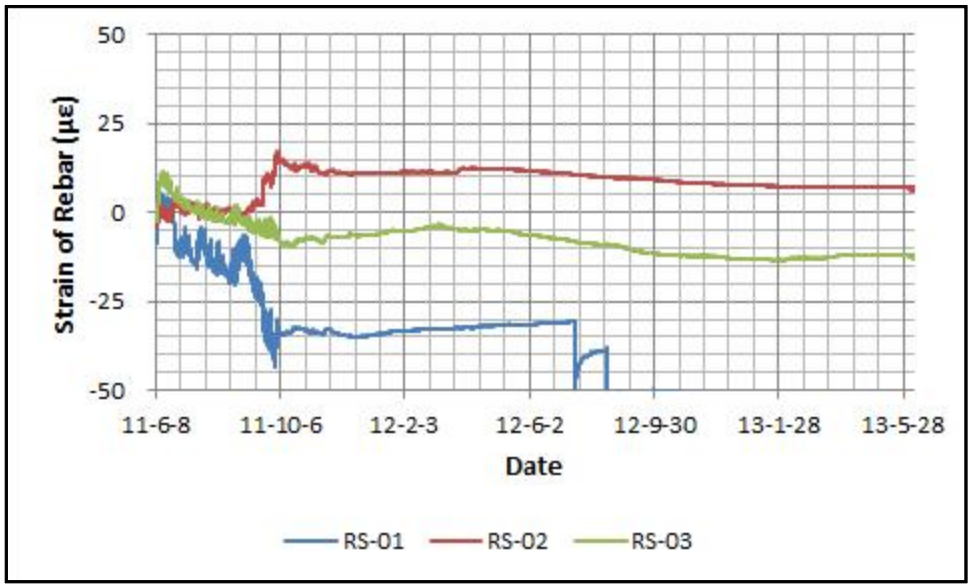


그림 3.8.34 본댐 우안부 내 철근 변형률 계측결과 : 일반 콘크리트

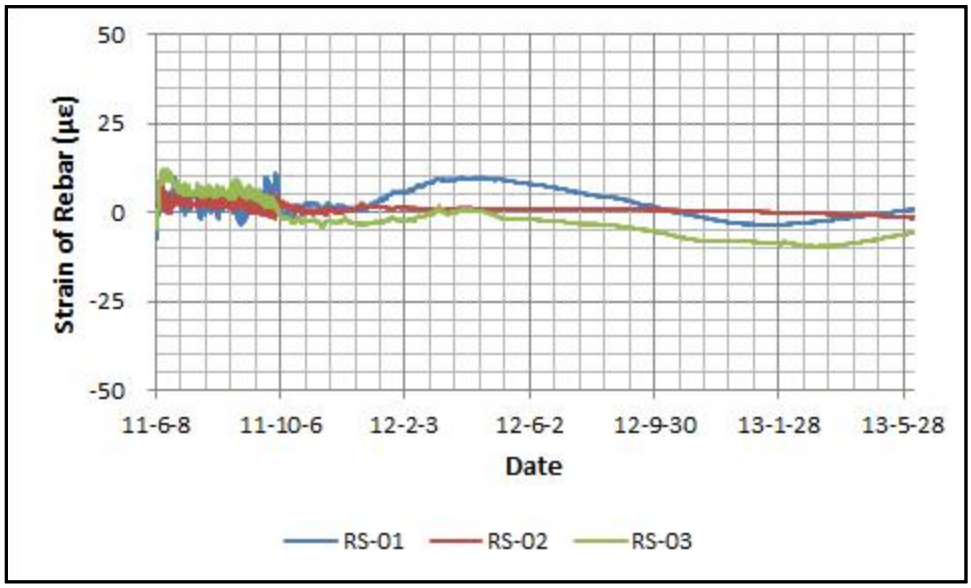


그림 3.8.35 본댐 우안부 내 철근 변형률 계측결과 : MgO 혼입 콘크리트

무응력계를 이용한 본댐 우안부 시험시공 부재의 콘크리트 변형률 계측결과는 다음 그림 3.8.36 및 그림 3.8.37과 같다.

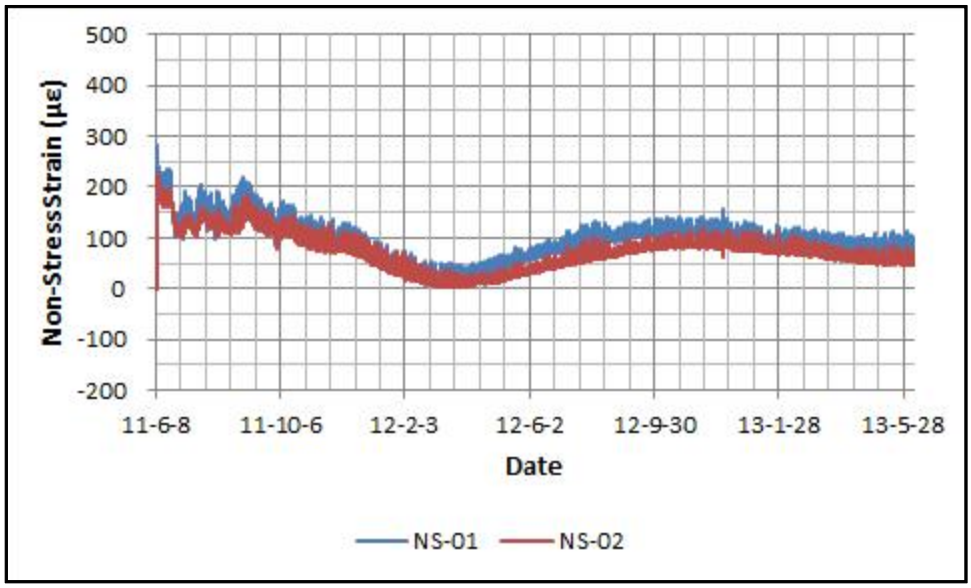


그림 3.8.36 무응력계를 이용한 본댐 우안부 콘크리트 변형률 계측결과
: 일반 콘크리트

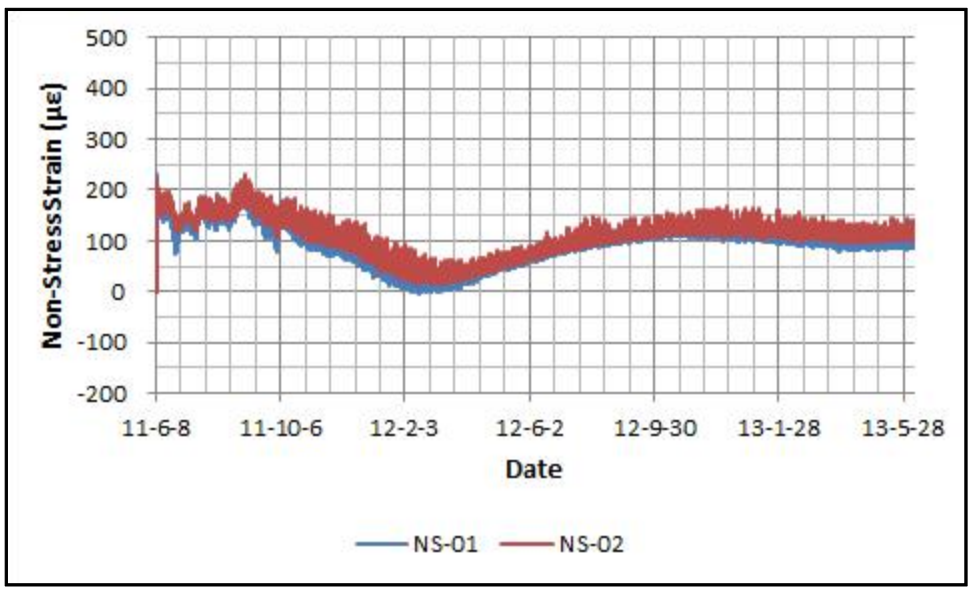


그림 3.8.37 무응력계를 이용한 본댐 우안부 콘크리트 변형률 계측결과
: MgO 혼입 콘크리트

본댐 우안부 시험시공 부재의 콘크리트 유효응력 계측결과는 다음 그림 3.8.38 및 그림 3.8.39와 같다.

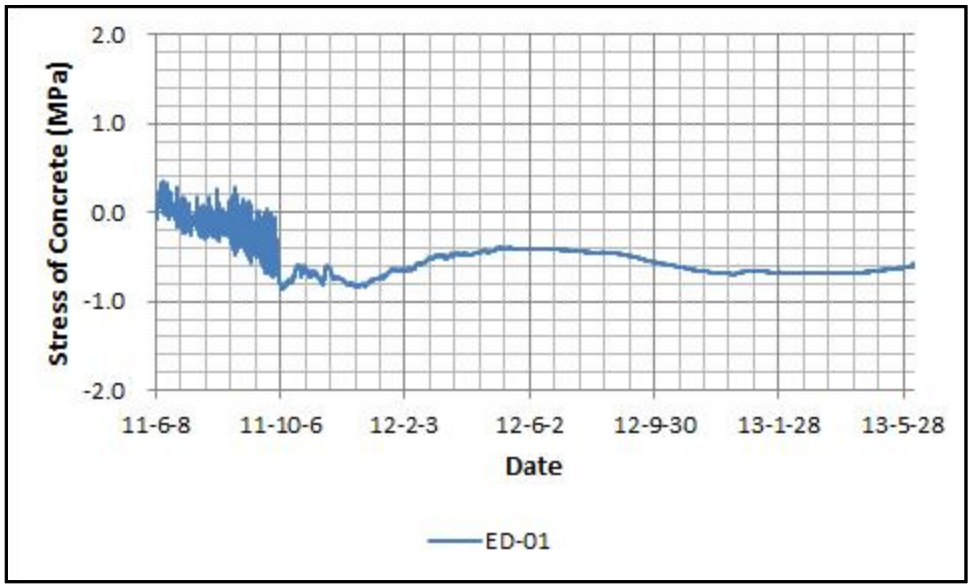


그림 3.8.38 본댐 우안부 콘크리트 유효응력 계측결과 : 일반 콘크리트

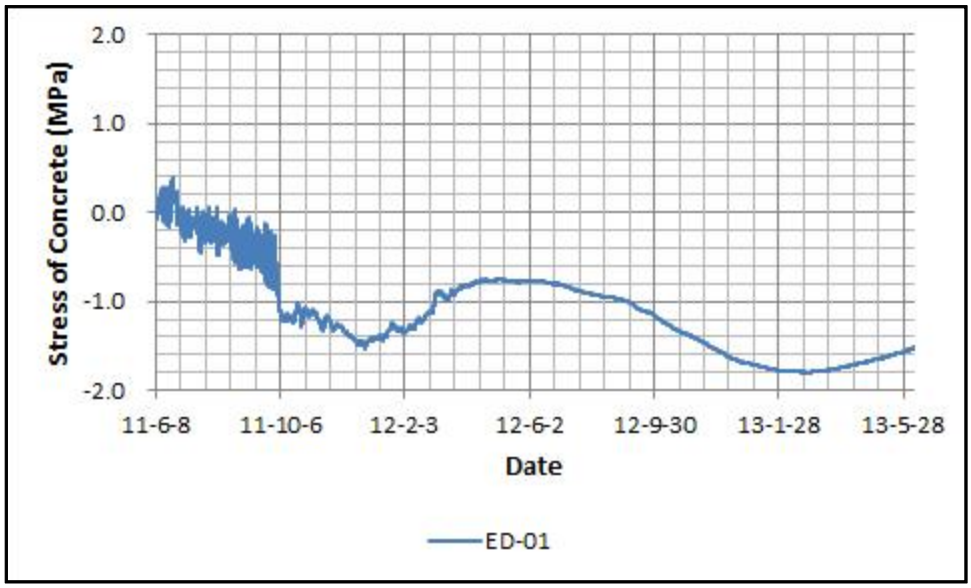


그림 3.8.39 본댐 우안부 콘크리트 유효응력 계측결과 : MgO 혼입 콘크리트

본댐 우안부 시험시공 부재 내외부의 콘크리트 온도 계측결과는 다음 그림 3.8.40 및 그림 3.8.41과 같다.

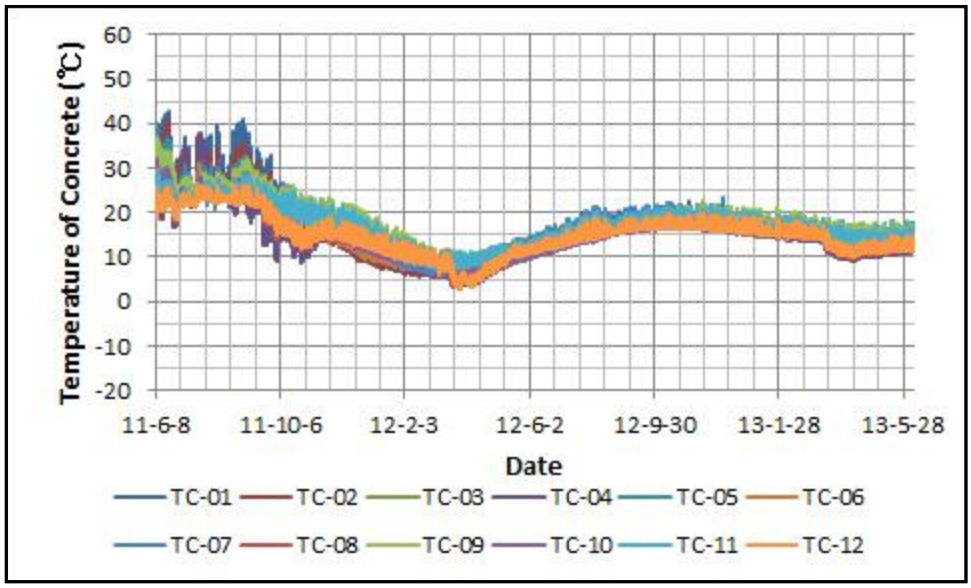


그림 3.8.40 본댐 우안부 콘크리트 온도 계측결과 : 일반 콘크리트

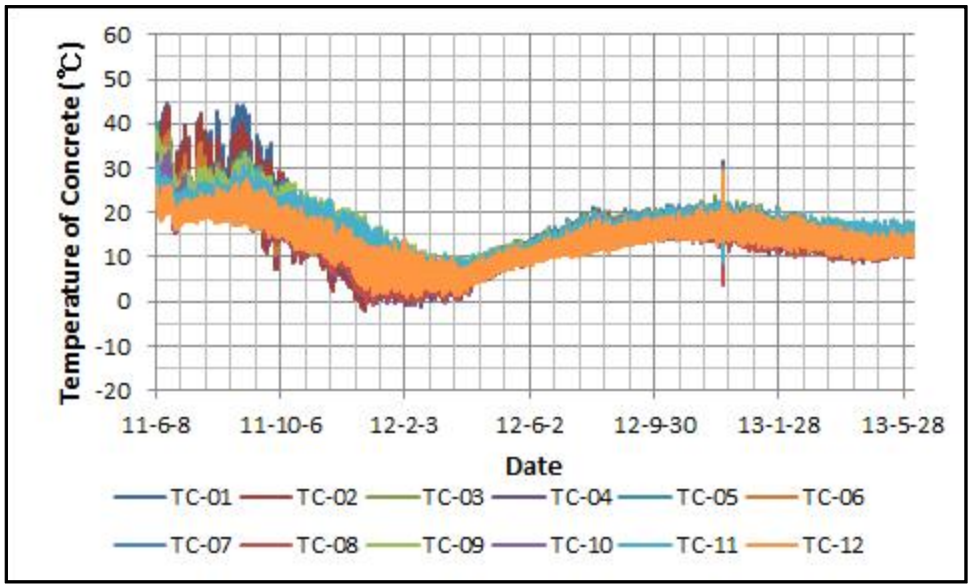


그림 3.8.41 본댐 우안부 콘크리트 온도 계측결과 : MgO 혼입 콘크리트

6. 계측결과 분석

가. 감세지 옹벽 계측결과 분석

감세지 옹벽 시험시공 부재(L3과 L5) 사이에서 서로 인접한 부재(L4)와 접하는 지점 중간 높이(h=0.5 m)에서 계측된 콘크리트 변형률을 비교하면 다음 그림 3.8.42와 같다. 장기계측 완료 시점 즉, 재령 2년에 일반 콘크리트를 적용한 부재는 42×10^{-6} 팽창했다. 반면, MgO 혼입 콘크리트를 적용한 부재는 125×10^{-6} 팽창했다. 즉, MgO 혼입 콘크리트를 적용한 부재가 일반 콘크리트를 적용한 부재에 비해 상대적으로 83×10^{-6} 더 팽창했다. 이러한 팽창률의 차이는 콘크리트 탄성계수를 20,000 MPa로 가정하고 응력으로 환산할 경우 약 2 MPa에 해당하는 매우 큰 값으로서 수축균열 제어 측면에서 의미 있는 값이다.

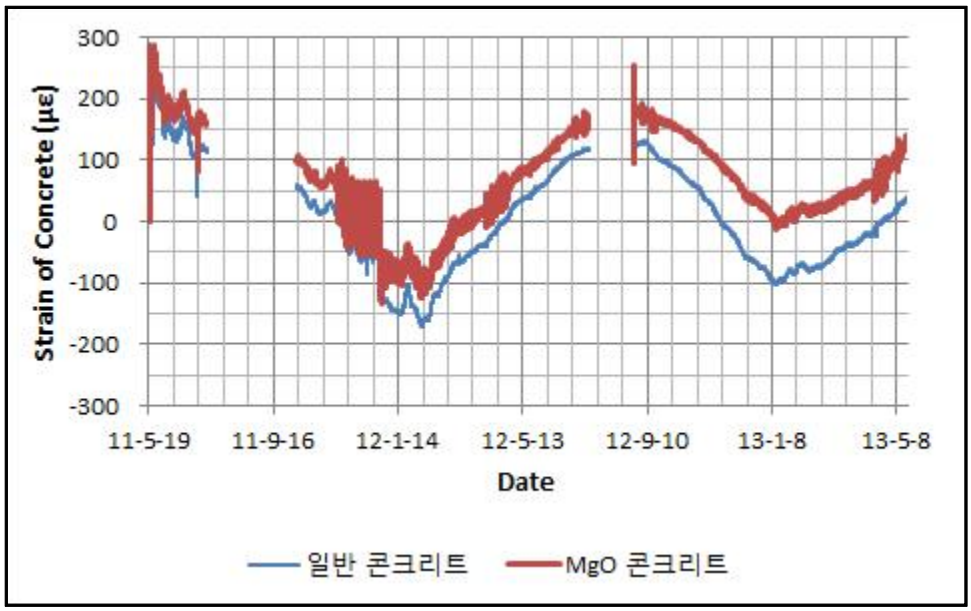


그림 3.8.42 콘크리트 변형률 비교(일반 콘크리트 vs MgO 혼입 콘크리트)

감세지 옹벽 시험시공 부재(L3과 L5) 사이에서 서로 인접한 부재(L4)와 접하는 지점 중간 높이(h=0.5 m)에서 계측된 콘크리트 내부의 철근 변형률을 비교하면 다음 그림 3.8.43과 같다.

재령 2년에 일반 콘크리트를 적용한 부재 내부의 철근 변형률은 23×10^{-6}으로 나타났다. 반면, MgO 혼입 콘크리트를 적용한 부재 내부의 철근 변형률은 8×10^{-6}으로 나타났다. 즉, MgO 혼입 콘크리트 부재 속의 철근이 일반 콘크리트를 적용한 부재 속의 철근에 비해 상대적으로 15×10^{-6} 더 팽창했다.

같은 위치에서 콘크리트의 변형률 차이는 83×10^{-6}인 반면 철근의 변형률 차이는 23×10^{-6}으로 감소한 이유는 콘크리트에서 발생한 체적변화 차이가 철근으로 전량 전달되지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 변형률 손실은 콘크리트와 철근 사이의 부착이 완벽하지 못하기 때문일 수도 있고, 콘크리트의 변형이 크리프 등으로 일부 손실되기 때문일 수도 있다.

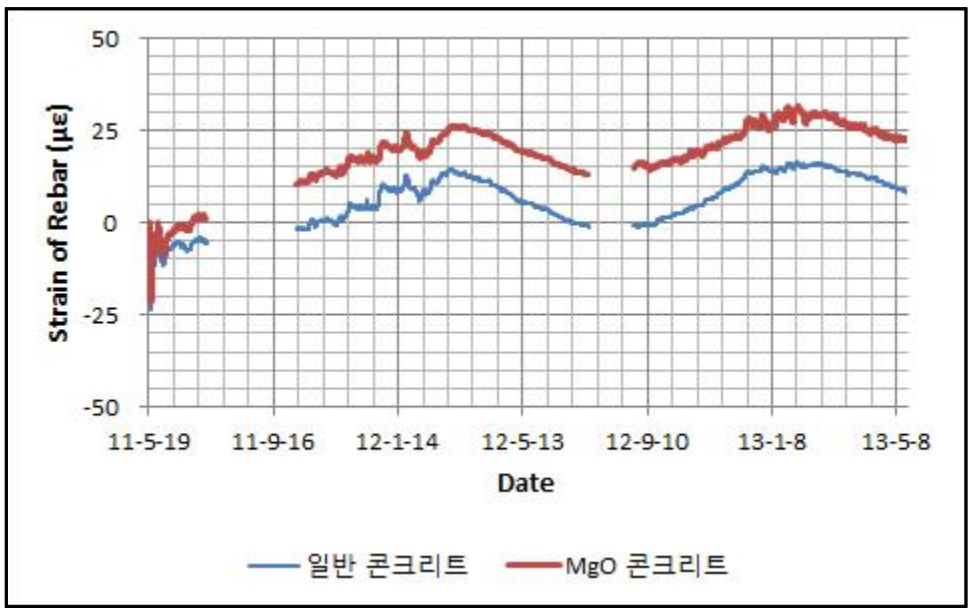


그림 3.8.43 콘크리트 내 철근 변형률 비교(일반 콘크리트 vs MgO 혼입 콘크리트)

무응력계를 이용해 계측한 감세지 옹벽 시험시공 부재 각각의 중심부에서 콘크리트 변형률을 비교하면 다음 그림 3.8.44와 같다.

재령 2년에 일반 콘크리트를 적용한 부재는 91×10^{-6} 팽창했다. 반면, MgO 혼입 콘크리트를 적용한 부재는 216×10^{-6} 팽창했다. 즉, MgO 혼입 콘크리트를 적용한 부재는 일반 콘크리트를 적용한 부재에 비해 상대적으로 125×10^{-6} 더 팽창했다.

무응력계내 콘크리트 변형률계는 여러 가지 외적인 요인을 배제한 상태에서 순수한 콘크리트 변형률을 나타내기 때문에 MgO 혼입 효과를 확인함에 있어 매우 의미 있는 결과 값이라 할 수 있다. 이러한 변형률 값이 125×10^{-6}으로 큰 차이를 나타낸다는 것은 MgO 혼입으로 인해 콘크리트가 장기팽창 했음을 보여주는 증거이다.

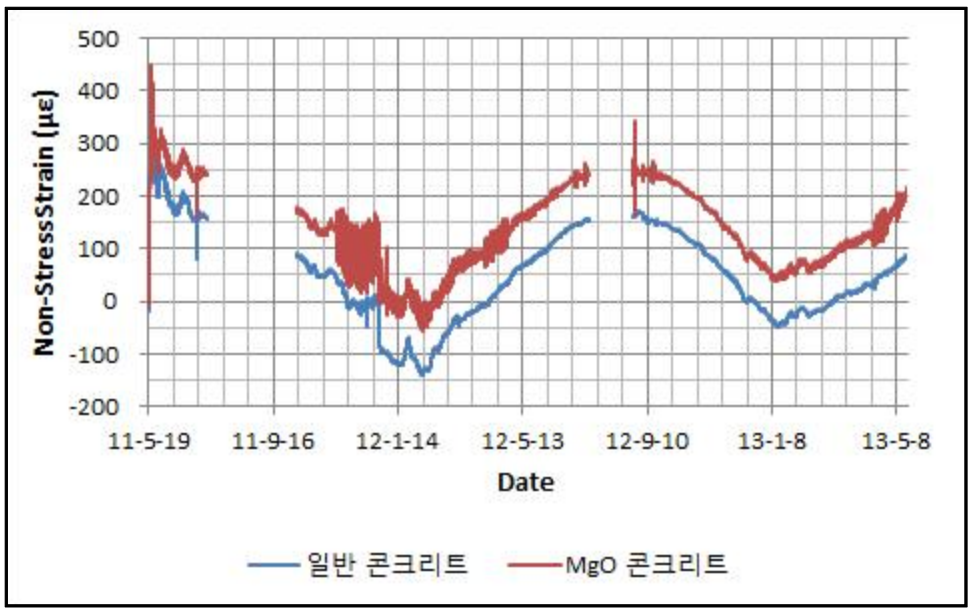


그림 3.8.44 무응력계내 콘크리트 변형률 비교(일반 콘크리트 vs MgO 혼입 콘크리트)

감세지 옹벽 시험시공 부재 각각의 중심부에서 유효응력계를 통해 계측된 콘크리트 유효응력을 비교하면 다음 그림 3.8.45와 같다.

일반 콘크리트를 적용한 부재와 MgO 혼입 콘크리트를 적용한 부재 모두에서 유효응력은 매우 작게 발생하였다. 감세지 옹벽 특히, 옹벽의 축방향에는 사실상 외력이 작용하지 않기 때문에 유효응력이 작게 계측된 것은 당연한 것으로 보여 진다. 콘크리트 타설 1개월 이내에 발생한 유효응력은 콘크리트 수화열 등에 의한 체적변화가 내적 그리고 외적으로 구속되기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 또한, 매년 1월경에 주기적으로 응력 변동이 크게 발생하는 이유는 이때에 외기온도 변화가 커서 이로 인해 체적변화 발생했기 때문인 것으로 추정된다. 일반 콘크리트를 적용한 부재의 유효응력은 최종적으로 '0'으로 수렴한 반면 MgO 혼입 콘크리트를 적용한 부재의 유효응력은 최종적으로 마이너스 값 즉, 압축응력으로 나타났다. 이는 MgO 혼입 콘크리트를 적용한 부재의 팽창을 주변의 부재가 구속하기 때문인 것으로 판단된다. 즉, MgO 혼입 콘크리트를 적용한 부재의 팽창이 유효응력 계측 결과에서도 간접적으로 확인되었다.

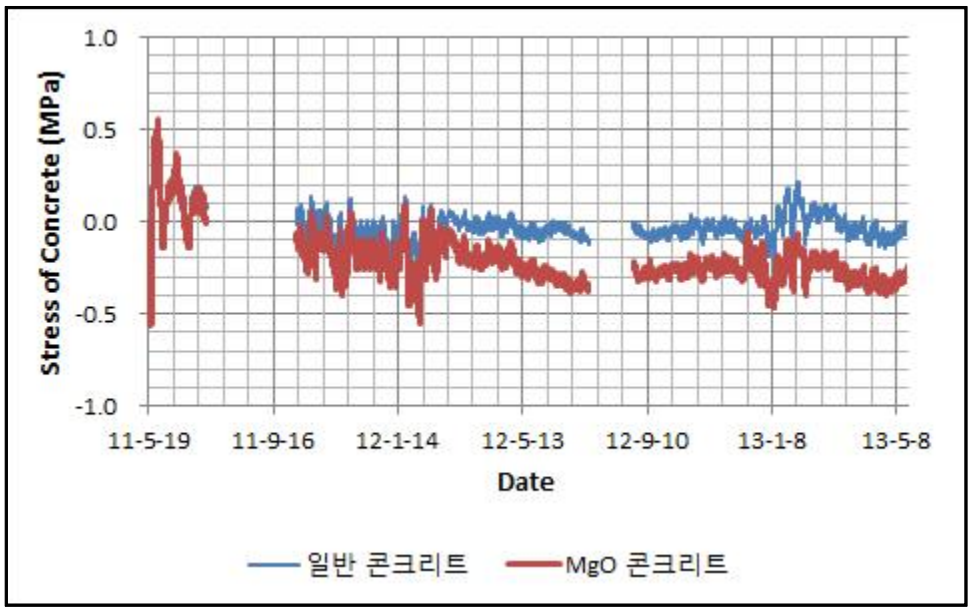


그림 3.8.45 부재 중심부 콘크리트 유효응력 비교
(일반 콘크리트 vs MgO 혼입 콘크리트)

감세지 옹벽 시험시공 부재의 수화열 계측결과 중 부재 각각의 중심부 온도를 비교하면 다음 그림 3.8.46과 같다. 그림에서와 같이 일반 콘크리트를 적용한 부재와 MgO 혼입 콘크리트를 적용한 부재의 수화열 차이는 사실상 없다.

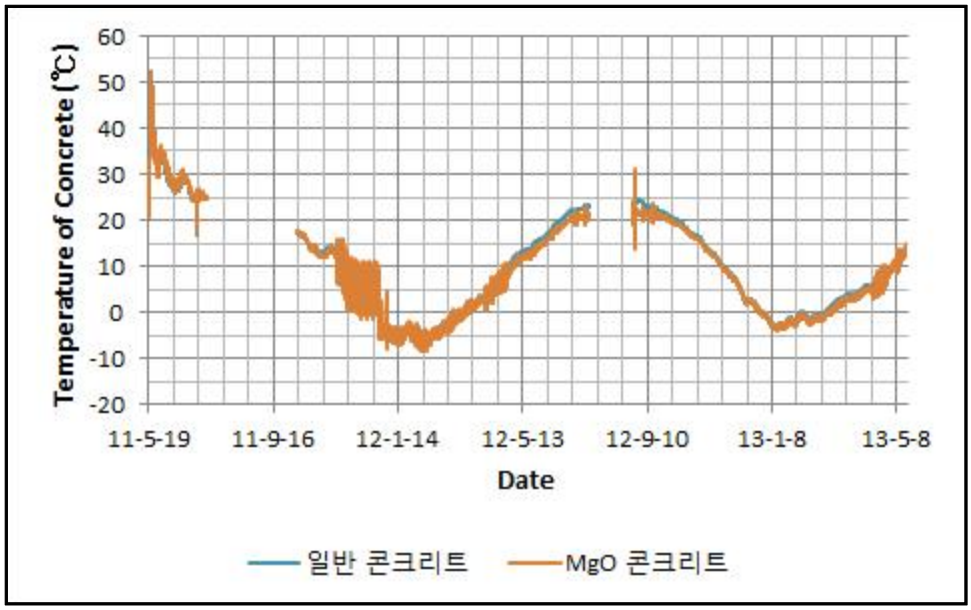


그림 3.8.46 중심부 수화열 계측 결과 비교
(일반 콘크리트 vs MgO 혼입 콘크리트)

나. 본댐 우안부 계측결과 분석

본댐 우안부 시험시공 부재 각각의 중심부에서 계측된 콘크리트 변형률을 비교하면 다음 그림 3.8.47과 같다.

장기계측 완료 시점 즉, 재령 2년 시점에 일반 콘크리트를 적용한 부재는 -51×10^{-6} 팽창 즉, 51×10^{-6} 수축했다. 반면, MgO 혼입 콘크리트를 적용한 부재는 44×10^{-6} 팽창했다. 즉, MgO 혼입 콘크리트를 적용한 부재는 일반 콘크리트를 적용한 부재에 비해 상대적으로 95×10^{-6} 더 팽창했다.

본댐 우안부 시험시공 부재에서 발생한 MgO 혼입 콘크리트의 상대적인 팽창량은 감세지 옹벽 시험시공 부재에서 발생한 MgO 혼입 콘크리트의 상대적인 팽창량과 거의 같은 값이다. 이는 각각의 시험시공 시 콘크리트 배합설계에서 사용한 MgO 혼입량이 10 kg/m^{3}과 9 kg/m^{3}으로 유사한 값이기 때문인 것으로 판단된다.

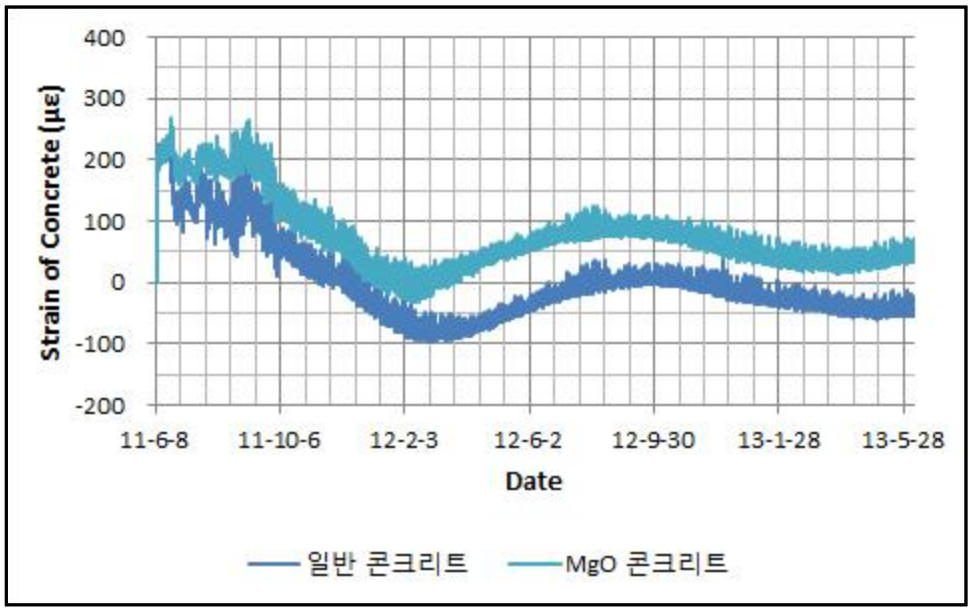


그림 3.8.47 콘크리트 변형률 비교
(일반 콘크리트 vs MgO 혼입 콘크리트)

본댐 우안부 시험시공 부재 각각의 중심부에 위치한 철근의 변형률을 비교하면 다음 그림 3.8.48과 같다.

재령 2년 시점에서 일반 콘크리트를 적용한 부재 내부의 철근 변형률은 -52×10^{-6}으로 나타났다. 반면, MgO 혼입 콘크리트를 적용한 부재 내부의 철근 변형률은 1×10^{-6}으로 나타났다. 즉, MgO 혼입 콘크리트 부재 속의 철근이 일반 콘크리트를 적용한 부재 속의 철근에 비해 상대적으로 53×10^{-6} 더 팽창했다.

그런데 일반 콘크리트를 적용한 부재내의 철근 변형률 계측에 다소 문제가 있었던 것으로 보여 진다. 이러한 문제의 원인으로는 계측센서의 손상 또는 계측센서 연결 케이블의 손상 등 몇 가지를 추정할 수는 있으나, 매립형 계측센서의 특성과 실구조물에서 이루어진 계측의 특성상 정확한 원인을 파악하기가 쉽지 않았다.

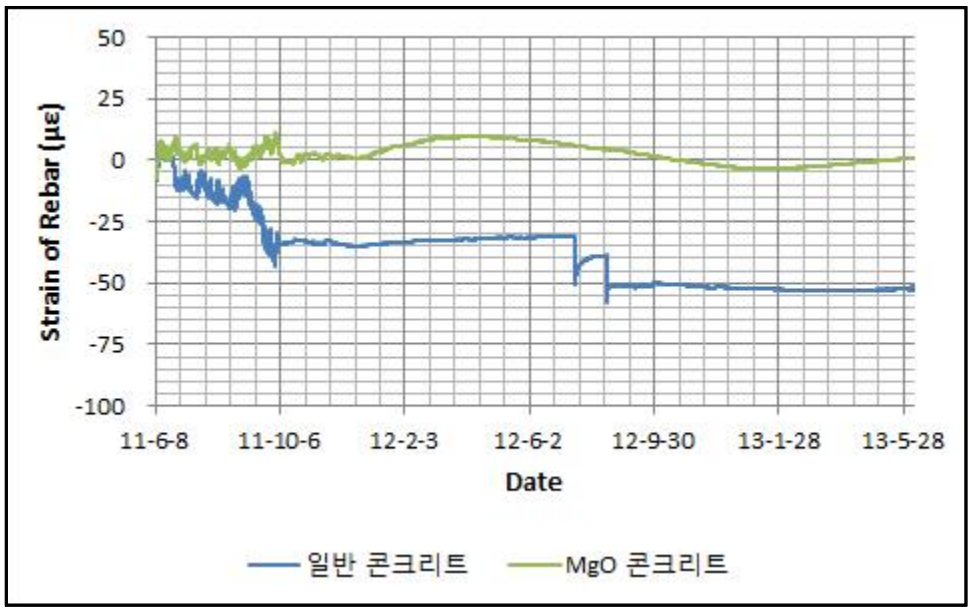


그림 3.8.48 콘크리트 내 철근 변형률 비교
(일반 콘크리트 vs MgO 혼입 콘크리트)

본댐 우안부 시험시공 부재 각각의 중심부에서 무응력계내 콘크리트 변형률을 비교하면 다음 그림 3.8.49와 같다.

재령 2년 시점에 일반 콘크리트를 적용한 부재는 76×10^{-6} 팽창했다. 반면, MgO 혼입 콘크리트를 적용한 부재는 93×10^{-6} 팽창했다. 즉, MgO 혼입 콘크리트를 적용한 부재는 일반 콘크리트를 적용한 부재에 비해 상대적으로 17×10^{-6} 만큼 더 팽창했다. 최종적인 팽창량 차이는 비교적 작았다.

무응력계내 콘크리트 변형률은 MgO 혼입 유무에 따라 초기(재령 28일 이내)에 약 80×10^{-6}까지 차이가 발생하였다가 재령 경과에 따라 점차 감소한다. 이렇게 장기재령에서 변형률 차이가 감소한 이유는 MgO 자체 및 MgO 혼입 콘크리트의 특성이라기보다는 시공단계 즉, 시험시공 부재의 상부에 연속하여 시공되는 부재의와 시험시공 부재 주변의 복토 등 환경의 영향 때문인 것으로 판단된다.

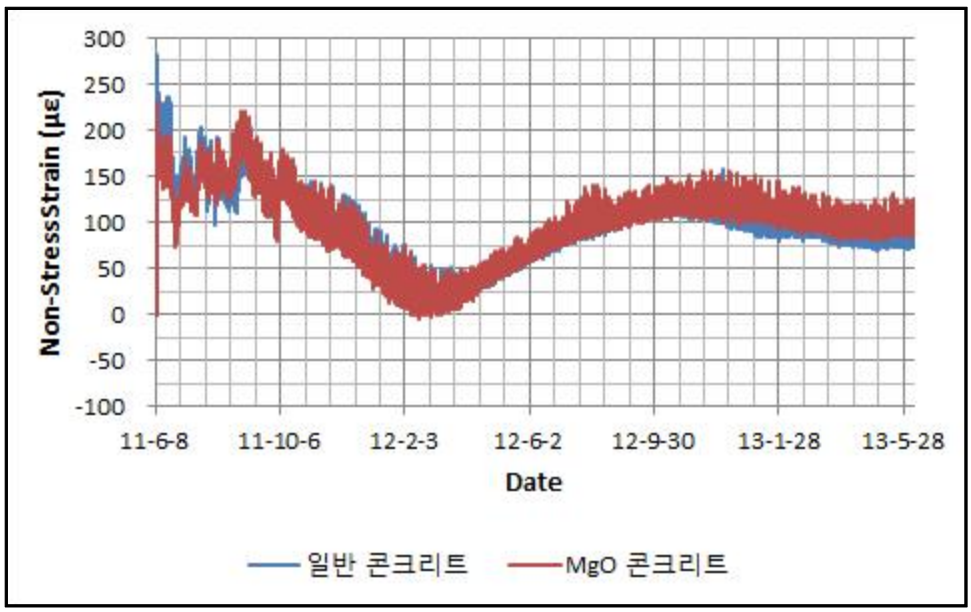


그림 3.8.49 무응력계내 콘크리트 변형률 비교
(일반 콘크리트 vs MgO 혼입 콘크리트)

본댐 우안부 시험시공 부재 각각의 중심부에서 유효응력계를 통해 계측된 콘크리트 유효응력을 비교하면 다음 그림 3.8.50과 같다.

일반 콘크리트를 적용한 부재와 MgO 혼입 콘크리트를 적용한 부재 모두에서 유효응력은 매우 작게 발생하였다. 본댐 우안부에는 시공중 외력이 작용하지 않기 때문에 유효응력이 작게 발생한 것은 타당한 계측결과로 보여 진다.

2011년 10월 이전과 이후 응력의 변동폭에 변화가 발생했는데, 이는 시험시공 부재 주변에 복토가 이루어지면서 시험시공 부재에 외기온도 변화 등 외부의 영향이 줄어들었기 때문인 것으로 판단된다.

체적변화 계측 완료 시점인 재령 2년에 MgO 혼입 콘크리트를 적용한 부재에서 상대적으로 더 큰 압축응력이 발생하는 것으로 나타났는데, 이는 MgO 혼입 콘크리트를 적용한 부재가 상대적으로 더 팽창하고 이러한 팽창이 인접 부재에 의하여 구속되었기 때문인 것으로 판단된다.

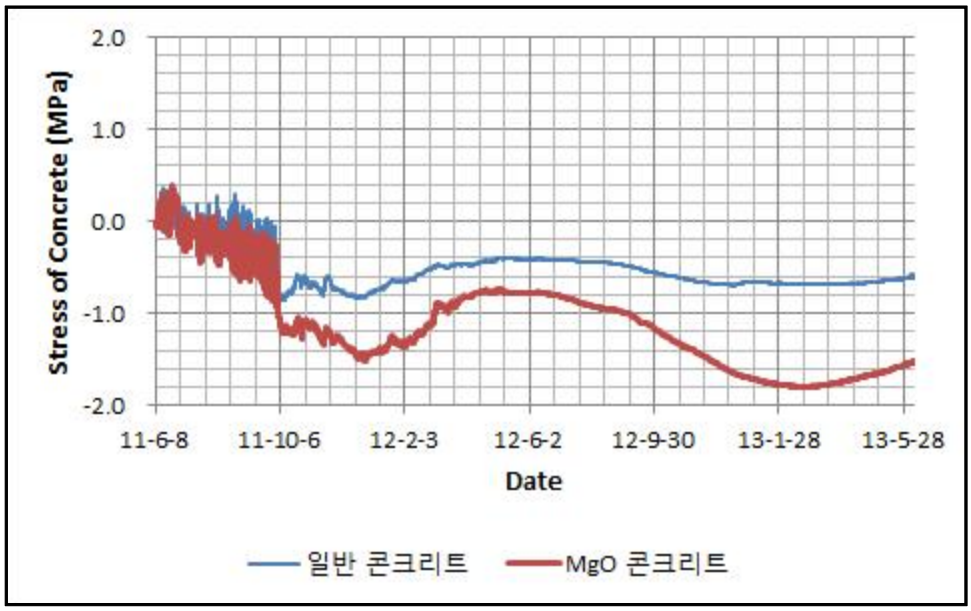


그림 3.8.50 부재 중심부 콘크리트 유효응력 비교
(일반 콘크리트 vs MgO 혼입 콘크리트)

본댐 우안부 시험시공 부재의 수화열 계측결과 중 각각 부재의 중심부 온도를 비교하면 다음 그림 3.8.51과 같다. 그림 3.8.51에서 나타난 바와 같이 일반 콘크리트를 적용한 부재와 MgO 혼입 콘크리트를 적용한 부재의 수화열 차이는 사실상 없다.

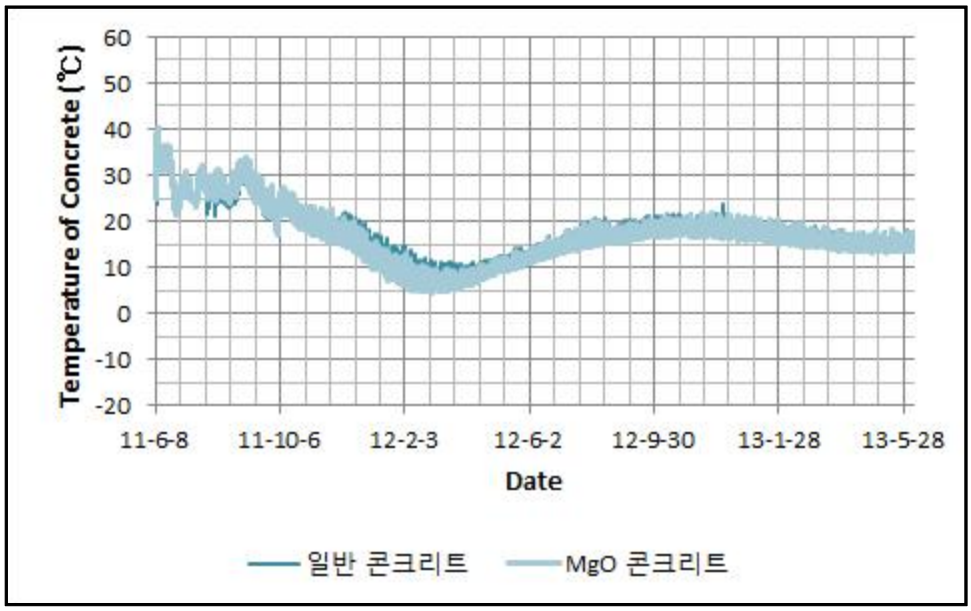


그림 3.8.51 중심부 수화열 계측 결과 비교
(일반 콘크리트 vs MgO 혼입 콘크리트)

7. 소결론

저온소성 MgO를 혼입한 콘크리트의 장기팽창성 확인을 위해 MgO 혼입 콘크리트를 실구조물에 적용하고, 장기간 구조물의 체적변화를 계측하는 시험시공을 수행하였다. 본 시험시공의 대상 구조물은 한탄강댐 감세지 옹벽의 일부와 본댐 우안의 일부였으며, 체적변화 계측기간은 2년이었다. 본 시험시공을 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

첫째, 저온소성 MgO 혼입은 굳지 않은 콘크리트 물성에 영향을 미치지 않는다. 이때 사용한 MgO 혼입량은 결합재 중량의 3%이다.

별도로 MgO를 혼입하지 않은 일반 콘크리트와 결합재 중량의 3%를 MgO로 치환하여 혼입한 MgO 혼입 콘크리트를 제조하여 물성 비교시험을 수행하였다. 이때 MgO 혼입 이외의 시험조건은 동일하게 유지하였다. 시험결과, 결합재 중량의 3%를 MgO로 치환하는 것은 굳지 않은 콘크리트 물성에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

둘째, 벽체형 부재에 MgO 혼입 콘크리트를 적용하여 장기팽창이 발생하는 것을 확인하였다. 이때 발생한 팽창량은 수축균열을 제어할 수 있는 수준이었다.

결합재 중량의 3%를 MgO로 치환한 MgO 혼입 콘크리트를 적용하여 한탄강댐 감세지 옹벽 일부를 시공하였다. 이후 이루어진 2년간의 장기계측에서 일반 콘크리트를 적용한 부재에서는 42×10^{-6}의 팽창이, MgO 혼입 콘크리트를 적용한 부재에서는 125×10^{-6}의 팽창이 계측되었다. 즉, MgO 혼입 콘크리트를 적용한 부재가 일반 콘크리트를 적용한 부재에 비해 상대적으로 83×10^{-6} 더 팽창했다.

셋째, 슬래브형 부재에 MgO 혼입 콘크리트를 적용하여 장기팽창이 발생하는 것을 확인하였다. 이때 발생한 팽창량은 수축균열을 제어할 수 있는 수준이었다.

결합재 중량의 3%를 MgO로 치환한 MgO 혼입 콘크리트를 적용하여 한탄강댐 본댐 우안부 일부를 시공하였다. 이후 이루어진 2년간의 장기계측에서 일반 콘크리트를 적용한 부재에서는 -51×10^{-6} 팽창 즉, 51×10^{-6} 수축이, MgO 혼입 콘크리트를 적용한 부재에서는 44×10^{-6} 팽창이 계측되었다. 즉, MgO 혼입 콘크리트를 적용한 부재는 일반 콘크리트를 적용한 부재에 비해 상대적으로 95×10^{-6} 더 팽창했다.

제 9 절 시험시공 구조물의 응력 및 팽창량 계측 분석

1. 본댐 응력 계측값 분석

계측된 값으로부터 유효응력을 계산하기 위하여 유효변형률 및 탄성계수를 분석, 계산 하였다. 콘크리트 게이지에서는 총 변형률(ϵ_{tot})이 계측되며 이는 유효변형률(ϵ_e), 크리프에 의한 변형률(ϵ_{cr}), 수축에 의한 변형률(ϵ_{sh}), 온도에 의한 변형률(ϵ_{temp}), MgO 팽창에 의한 변형률($\epsilon_{\exp}$)의 합을 계측한다. 무응력계($\epsilon_{n\sigma}$)에서는 온도에 의한 변형률(ϵ_{temp}), 수축에 의한 변형률(ϵ_{sh}), 팽창에 의한 변형률($\epsilon_{\exp}$)의 합을 계측한다. 따라서 콘크리트 게이지에서 무응력계 계측값을 제외하면 유효변형률과 크리프에 의한 변형률의 합을 알 수 있으며, 크리프에 의한 영향을 제외하면 유효변형률을 구할 수 있다. 유효변형률에 콘크리트의 탄성계수를 곱하면 콘크리트 내부에 발생하는 유효응력을 계산할 수 있다. 여기서 변형률의 팽창 및 수축은 +, -값으로 표현되며, 또한 응력의 인장 및 압축은 +, -값 이다.

총 변형률과 무응력계 변형률을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_e + \epsilon_{cr} + \epsilon_{sh} + \epsilon_{\exp} + \epsilon_{temp} \quad (3.9.1)$$

$$\epsilon_{n\sigma} = \epsilon_{sh} + \epsilon_{\exp} + \epsilon_{temp} \quad (3.9.2)$$

그림 3.9.1은 콘크리트 게이지에서 계측된 총 변형률(ϵ_{tot})이고, 그림 3.9.2는 무응력계에서 계측된 변형률($\epsilon_{n\sigma}$)이다. 총변형률과 무응력계 변형률에서 타설 후 30일까지는 수화열의 영향을 받아 변형률이 상승 및 하강을 하였으며, 30~100일은 인접블록 타설로 인한 온도변화 때문에 변형률이 불안정함을 알 수 있다. 100일 이후는 구조물의 온도가 외기온도에 수렴하면서 변형률이 안정적으로 변화하였다. 그리고 MgO가 3% 혼입된 블록과 일반콘크리트 블록의 변형률 차이가 발생하고 있으며 이것은 MgO의 팽창에 의한 것임을 확인할 수 있다.

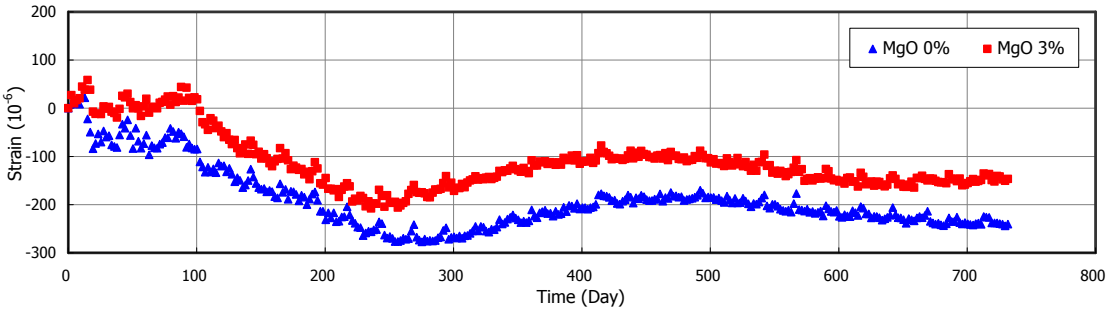


그림 3.9.1 본댐 중심부 총 변형률(ϵ_{tot})

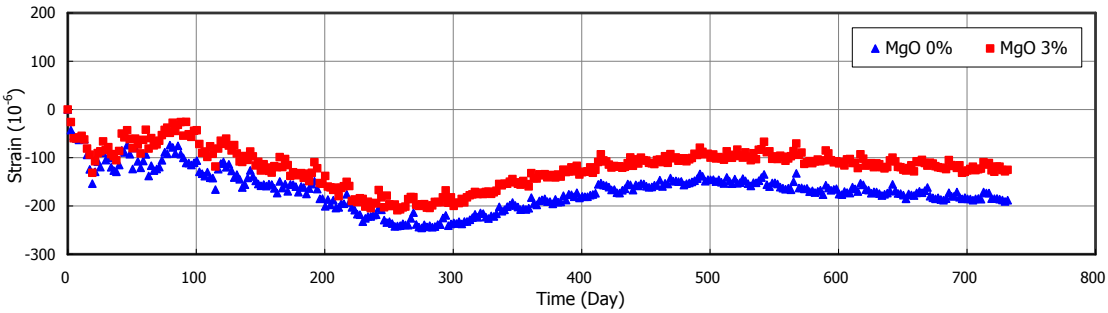


그림 3.9.2 본댐 중심부 무응력계 변형률($\epsilon_{n\sigma}$)

그림 3.9.3은 총 변형률에서 무응력계 변형률의 차인 유효변형률(ϵ_e)을 나타낸다. 계산결과 MgO가 혼입된 구역의 유효변형률이 크며 유효응력계에서 계측된 경향(MgO 구역의 압축응력 증가)과는 반대이다. MgO의 팽창으로 인한 압축응력이 증가된 MgO구역의 계측결과와 상이하다.

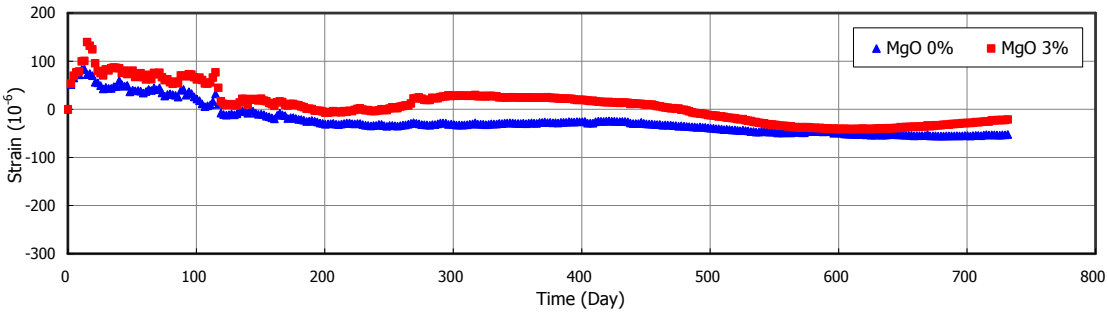


그림 3.9.3 본댐 중심부 유효 변형률(ϵ_e) [총 변형률(ϵ_{tot}) - 무응력계 변형률($\epsilon_{n\sigma}$)]

유효응력의 계산을 위해 시간에 따른 탄성계수가 필요하며, 탄성계수는 2009 콘크리트 표준시방서(제18장 매스 콘크리트)에 의거한 탄성계수 추정법을 사용하였다.

$$E(t) = 4700 \times \sqrt{f_{cu}(t)} \tag{3.9.3}$$

여기서, $E(t)$: 재령 t일의 탄성계수(MPa)

$f_{cu}(t)$: 재령 t일의 콘크리트 압축강도(MPa)

콘크리트의 압축강도 시험값을 다음식과 같이 회귀분석하여 사용하였다.

$$f_{cu}(t) = \frac{t}{a+bt} f_{c28} \tag{3.9.4}$$

여기서, $f_{cu}(t)$: 재령 t일의 콘크리트 압축강도(MPa)

f_{c28} : 재령 28일의 콘크리트 압축강도(MPa)

t : 재령(일)

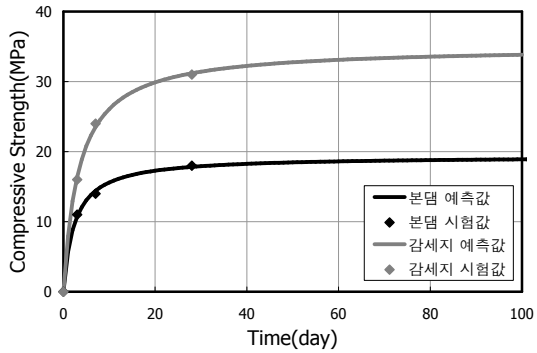
a,b : 시험자료를 회기 분석한 값 사용

표 3.9.1 압축강도 시험값

	3일	7일	28일
본 댐	11	14	18
감세지 옹벽	16	24	31

표 3.9.2 압축강도식의 a, b

	a	b
본 댐	2.24	0.93
감세지 옹벽	3.02	0.88



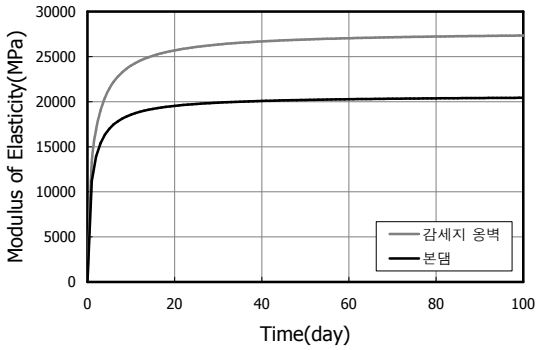


그림 3.9.4 본댐 및 감세지 옹벽 압축강도그림 3.8.5 본댐 및 감세지 옹벽 탄성계수

계측된 값으로부터 유효변형률을 계산하고 계산된 유효변형률 증분에 그 시점의 탄성계수를 곱하면 각시간의 유효응력증분을 구할 수 있으며, 유효응력 증분치($\Delta\sigma_e$)의 누적으로 시간에 따른 유효응력을 계산한다. 계산과정은 다음과 같이 총 변형률(ϵ_{tot})에서 무응력계 변형률($\epsilon_{n\sigma}$)의 차는 유효변형률(ϵ_e)과 크리프에 의한 변형률(ϵ_{cr})의 합이며, 여기서 크리프에 변형을 제외하면 유효변형률의 각 시간의 증분($\Delta\epsilon_e$)을 구할 수 있다. 본 연구에서는 계산의 간편성을 위해 크리프에 의한 변형을 무시하였으며, 계산된 유효변형률의 증분값($\Delta\epsilon_e$)에 그 시점의 탄성계수를 곱하면 응력의 증분($\Delta\sigma = E \bullet \Delta\epsilon_e$)이다. 그리고 시점의 응력을 0이라 두고 시간에 따른 유효응력은 응력의 증분을 누적($\sigma_i = \Delta\sigma_{i-1} + \Delta\sigma$)하여 계산할 수 있다.

그림 3.8.6은 유효응력계에서 계측된 응력 값과 변형률로부터 계산된 응력 값을 비교한 것이며, 계산값은 계측된 유효응력계 응력과 반대의 경향을 보이고 있다. 계산된 응력이 정값인 유효응력계의 응력을 잘 유추하지 못하고 있으며 이것의 원인을 파악하기에는 계측시스템상 어려움이 따른다.

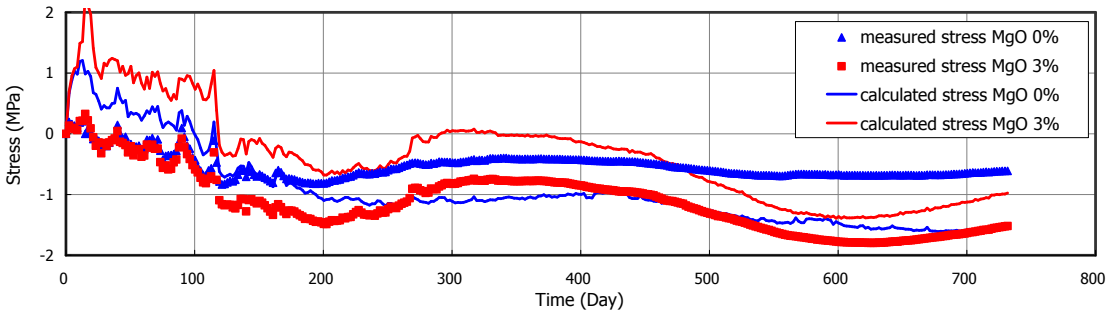


그림 3.9.6 본댐 중심부 유효응력계 응력계측 값과 변형률로부터 계산된 응력 값의 비교

그림 3.9.7~그림 3.9.10은 본댐 중심하부의 총 변형률, 무응력계 변형률, 유효 변형률, 계산된 응력이며 분포 및 결과가 본댐 중심과 유사하다.

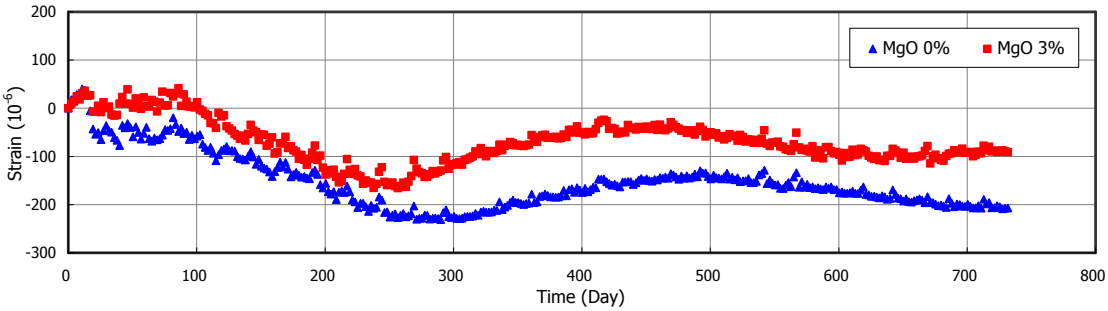


그림 3.9.7 본댐 중심하부 총 변형률(ϵ_{tot})

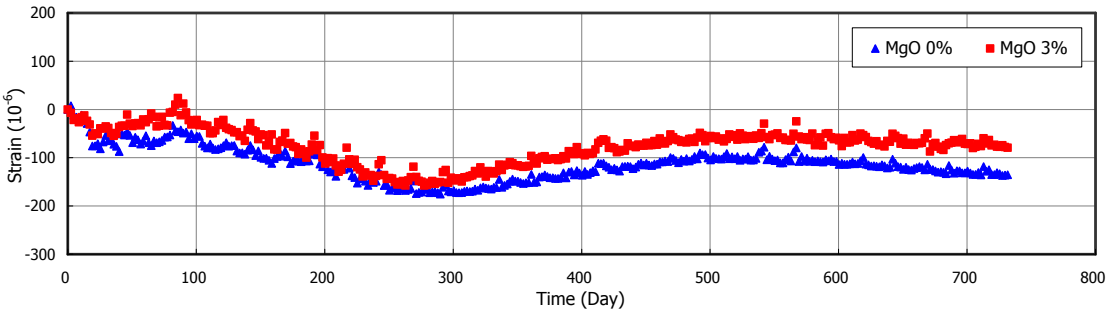


그림 3.9.8 본댐 중심하부 무응력계 변형률($\epsilon_{n\sigma}$)

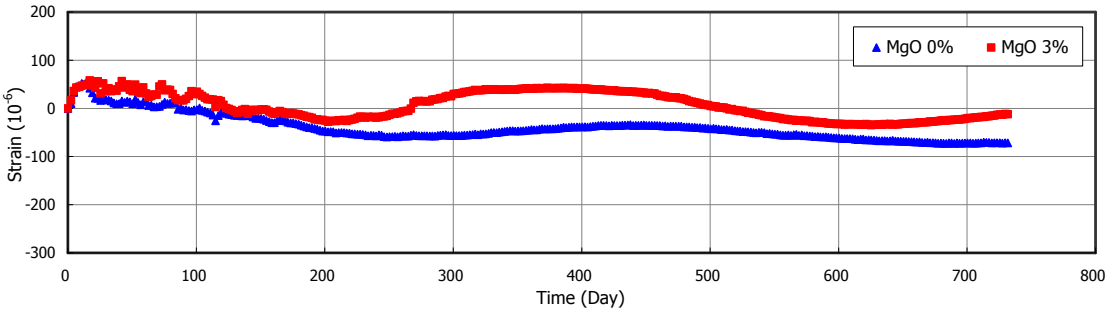


그림 3.9.9 본댐 중심하부 유효 변형률(ϵ_e) [총 변형률(ϵ_{tot}) - 무응력계 변형률($\epsilon_{n\sigma}$)]

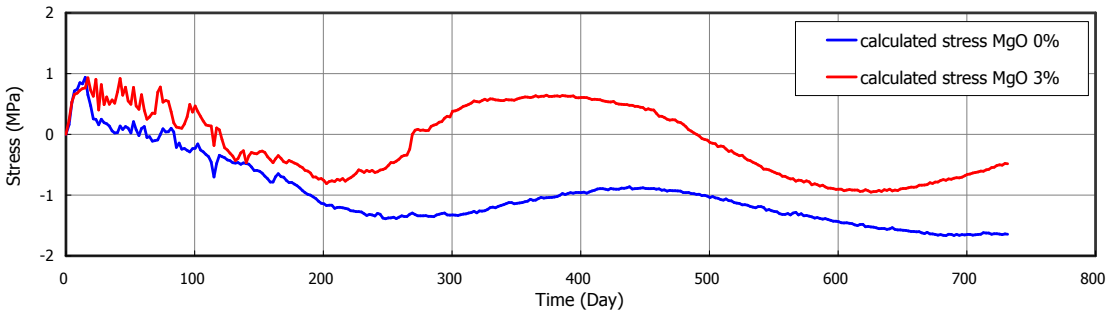


그림 3.9.10 본댐 중심하부 변형률로부터 계산된 응력

2. 감세지 옹벽 응력 계측값 분석

감세지 옹벽 중심부를 본댐과 동일한 과정으로 응력을 계산한 결과는 그림 3.9.11~그림 3.9.14와 같다. 변형률의 변화는 본댐과 유사하며 총변형률과 무응력계 변형률에서 타설 후 30일 까지는 수화열의 영향을 받아 변형률이 상승 및 하강을 하였으며, 30일 이후는 구조물의 온도가 외기온도에 수렴하면서 변형률이 안정적으로 변화하였다. 본댐에 비해 작은크기의 구조물로써 외기온도에 따른 변형률의 변화가 크다.

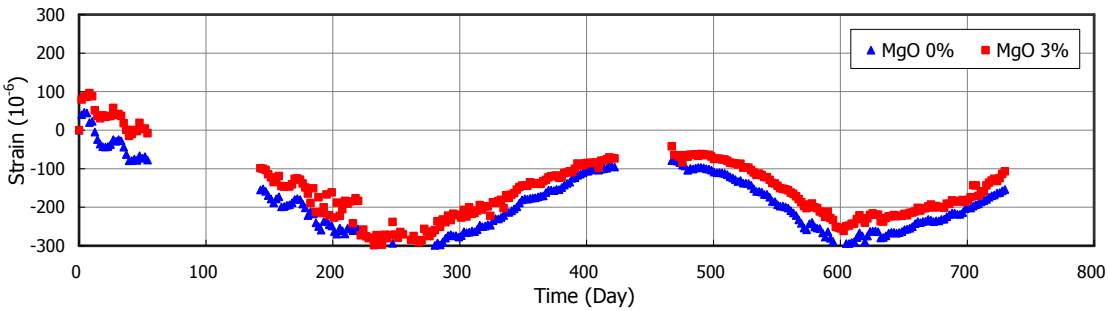


그림 3.9.11 감세지 옹벽 중심부 총 변형률(ϵ_{tot})

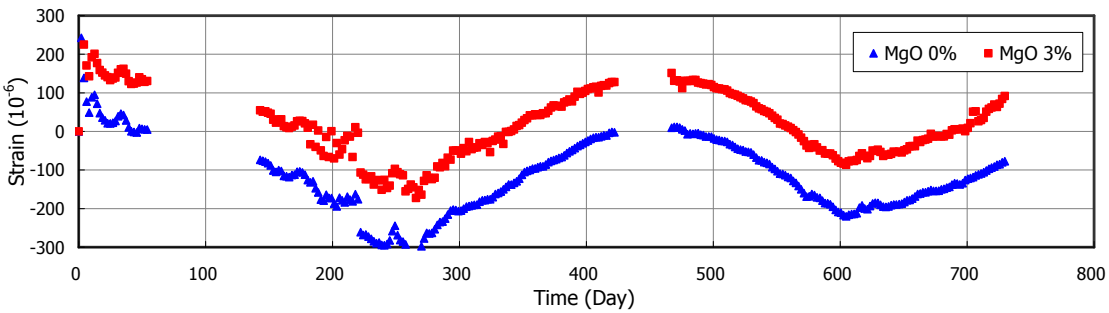


그림 3.9.12 감세지 옹벽 중심부 무응력계 변형률($\epsilon_{n\sigma}$)

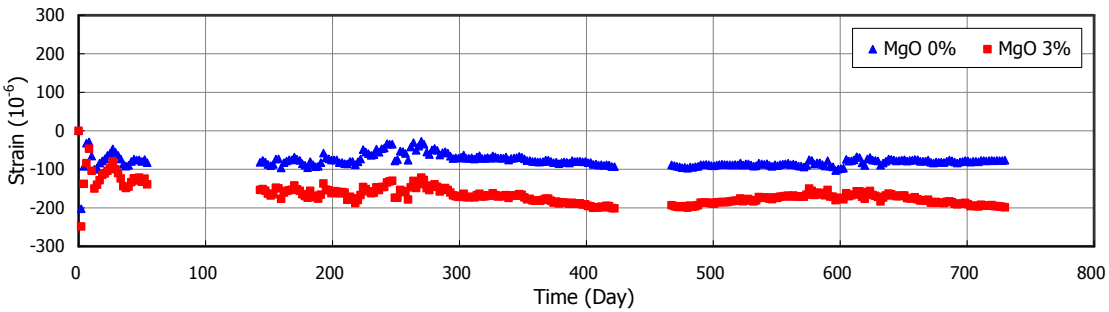


그림 3.9.13 감세지 옹벽 중심부 유효 변형률(ϵ_e) [총 변형률(ϵ_{tot}) - 무응력계 변형률($\epsilon_{n\sigma}$)]

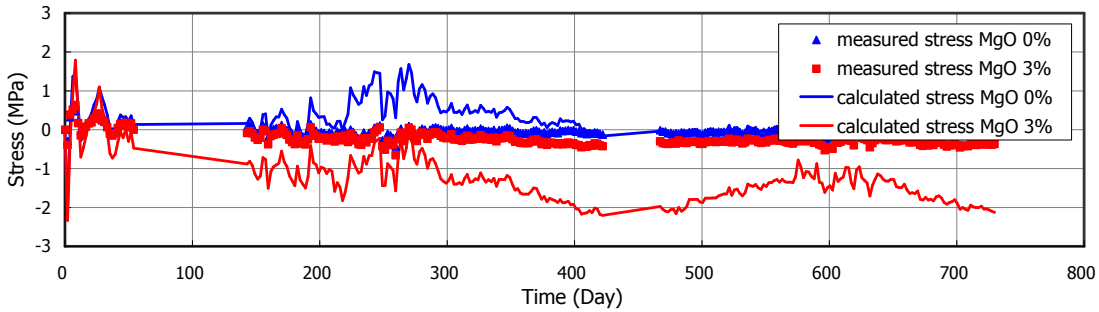


그림 3.9.14 감세지 옹벽 중심부 유효응력계 응력계측 값과 변형률로부터 계산된 응력 값의 비교

MgO 3% 혼입된 블록과 일반콘크리트 블록의 변형률 차이가 발생하고 있으며 이것은 MgO의 팽창에 의한 것임을 확인할 수 있다. 그림 3.9.14의 계산된 응력이 유효응력계와 유사한 경향을 보이고 있으나 값의 차이는 크며 초기재령 콘크리트의 열팽창계수 및 크립의 영향을 계산에 반영하면 정확한 유효응력을 유추할 수 있을 것이다.

그림 3.9.15~그림 3.9.18은 감세지 옹벽 중심하부의 총 변형률, 무응력계 변형률, 유효 변형률이며 분포 및 결과가 감세지 옹벽 중심과 유사하다. 계산된 응력은 예상(MgO 구역의 압축응력 증가)과 반대의 경향을 보이고 있다.

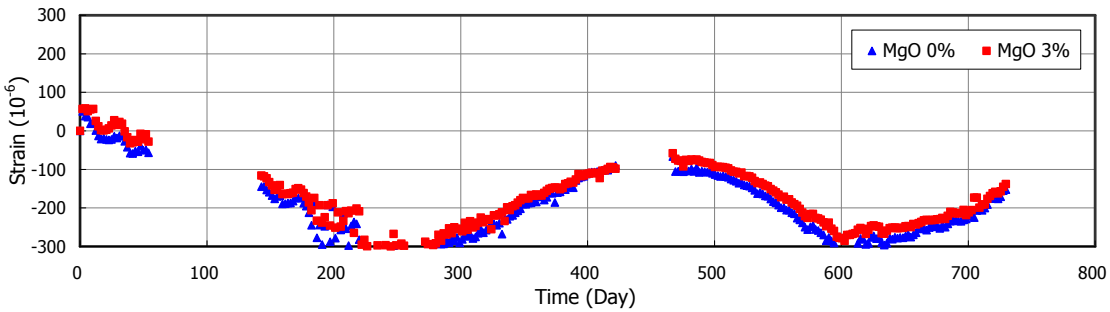


그림 3.9.15 감세지 옹벽 중심하부 총 변형률(ϵ_{tot})

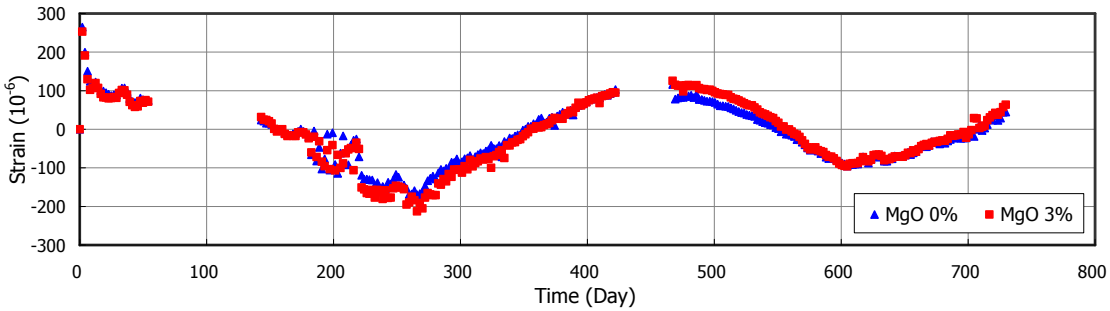


그림 3.9.16 감세지 옹벽 중심하부 무응력계 변형률($\epsilon_{n\sigma}$)

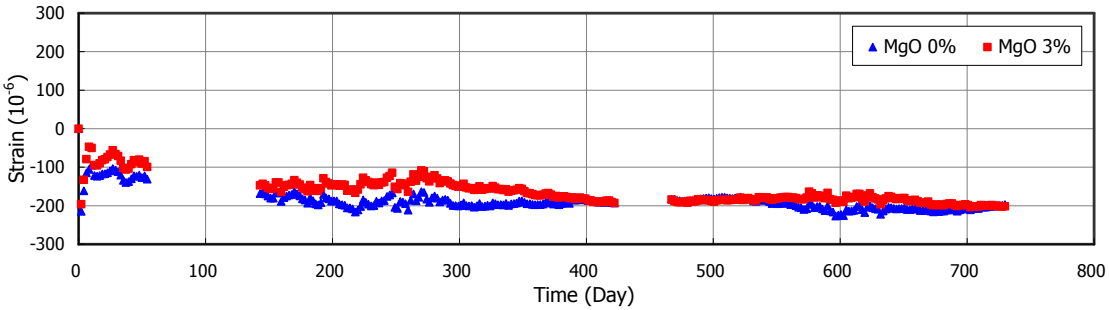


그림 3.9.17 감세지 옹벽 중심하부 유효 변형률(ϵ_e) [총 변형률(ϵ_{tot}) - 무응력계 변형률($\epsilon_{n\sigma}$)]

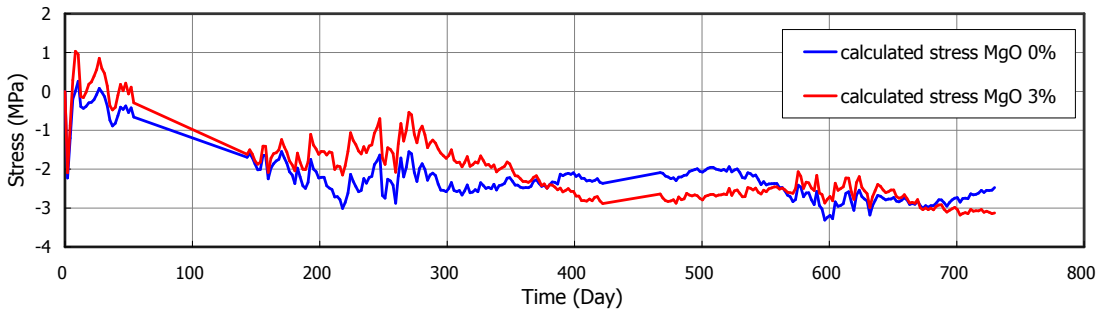


그림 3.9.18 감세지 옹벽 중심하부 변형률로부터 계산된 응력

3. 본댐 팽창량 분석

팽창량 분석을 위해 계측된 값으로부터 변형률의 요소를 분해하는 방법을 사용하여 팽창량을 계산하였다. 무응력계에서 계측된 변형률($\epsilon_{temp} + \epsilon_{sh} + \epsilon_{\exp}$)에서 온도에 의한 변형률($\epsilon_{temp}$)을 제외하면 수축($\epsilon_{sh}$)과 팽창($\epsilon_{\exp}$)에 의한 변형률만 남게되며, MgO를 사용한 콘크리트의 변형률에서 일반 콘크리트의 변형률의 차는 MgO에 의한 팽창량이다. 여기서 변형률의 팽창 및 수축은 +, -값으로 표현된다.

표 3.9.3 계측센서의 변형률 성분

	MgO concrete	normal concrete
변형률계	$\epsilon_{tot} = \epsilon_e + \epsilon_{cr} + \epsilon_{sh} + \epsilon_{\exp} + \epsilon_T$	$\epsilon_{tot} = \epsilon_e + \epsilon_{cr} + \epsilon_{sh} + \quad + \epsilon_T$
무응력계	$\epsilon_{n\sigma} = \quad \epsilon_{sh} + \epsilon_{\exp} + \epsilon_T$	$\epsilon_{n\sigma} = \quad \epsilon_{sh} + \quad \epsilon_T$
온도계	$\mathrm{T} \times \mathrm{CTE} = \epsilon_T$	$\mathrm{T} \times \mathrm{CTE} = \epsilon_T$

*CTE: Coefficient of Temperature Expansion

그림 3.9.19는 본댐 중심부 온도분포로 MgO 혼입 구역과 일반 구역의 차이가 없으며 MgO 혼입에 의한 수화열등 열적특성의 변화는 발생하지 않는 것으로 생각된다.

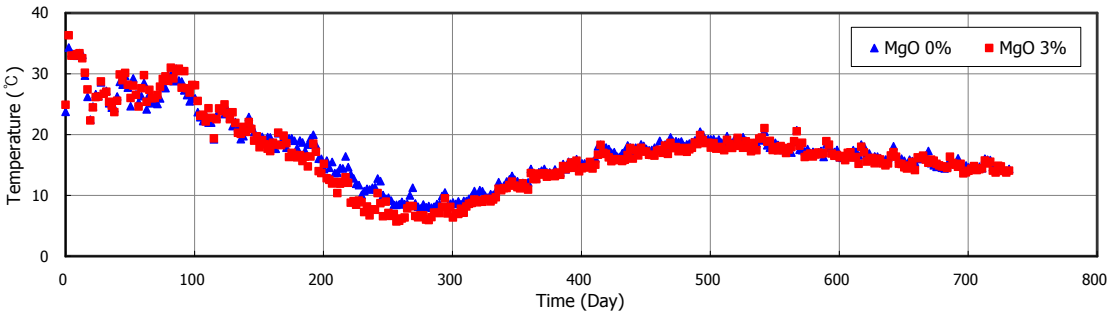


그림 3.9.19 본댐 중심부 온도

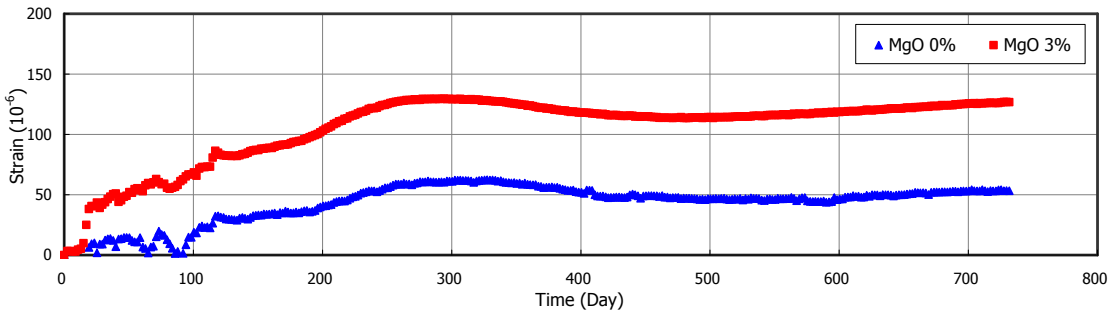


그림 3.9.20 본댐 중심부 수축+팽창, 수축 변형률 [무응력계변형률($\epsilon_{n\sigma}$) - 온도변형률(ϵ_{temp})]

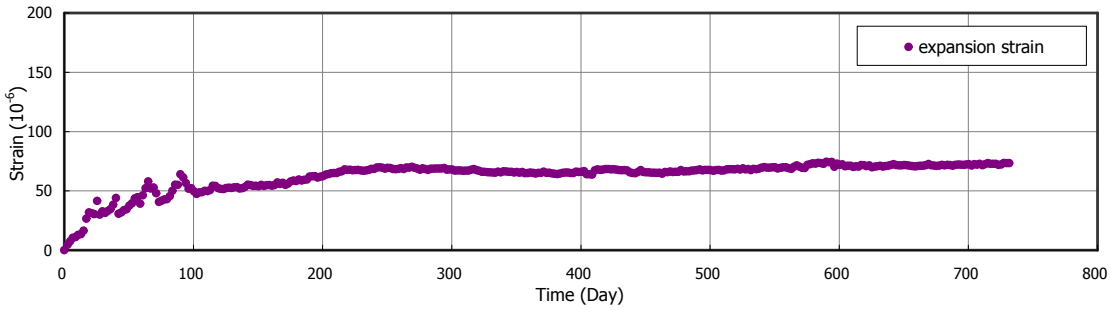


그림 3.9.21 본댐 중심부 MgO에 의한 팽창량

그림 3.9.20은 본댐 중심부의 무응력계 변형률에 온도와 열팽창계수의 곱을 제외한 수축+팽창, 수축 변형률이며 그 차는 MgO에 의한 팽창량(그림 3.8.21)이다. 팽

창량은 시간에 따라 꾸준히 장기간 증가하고 있으며 730일에 본댐 중심부 최종 팽창량은 70με이다.

그림 3.9.24는 본댐 중심하부의 팽창량이고 중심과 유사한 경향을 보이고 있으며 730일의 최종 팽창량은 70με으로 동일하다.

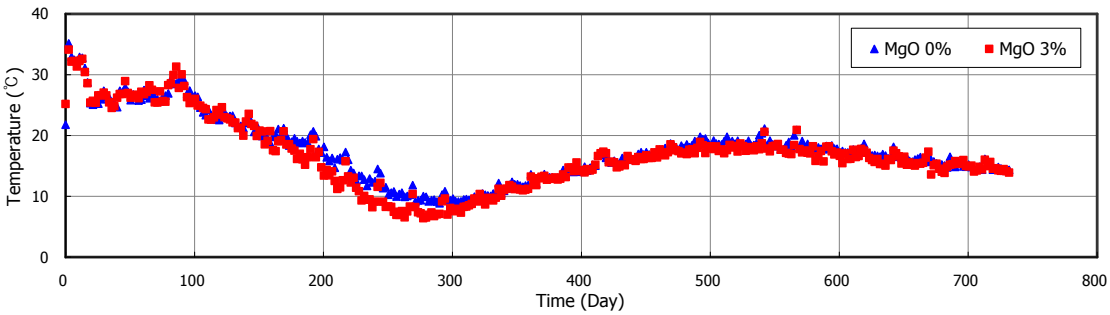


그림 3.8.22 본댐 중심하부 온도

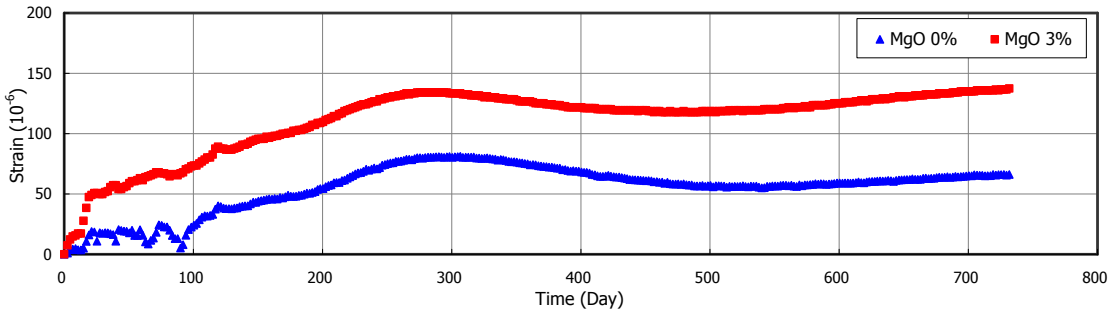


그림 3.9.23 본댐 중심하부 수축+팽창, 수축 변형률
[무응력계변형률($\epsilon_{n\sigma}$) - 온도변형률(ϵ_{temp})]

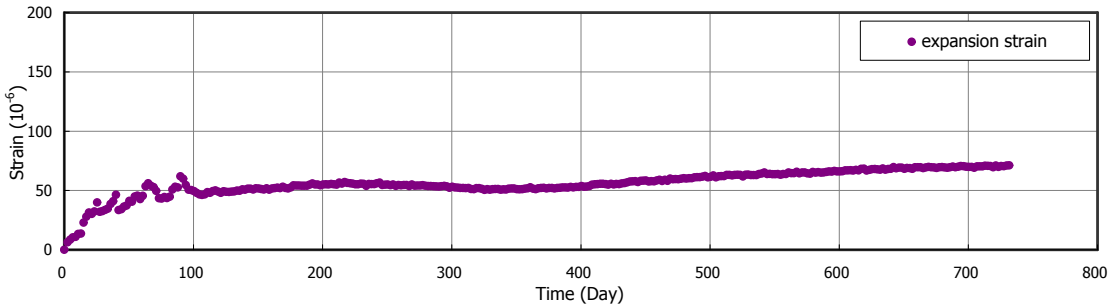


그림 3.9.24 본댐 중심하부 MgO에 의한 팽창량

4. 감세지 옹벽 팽창량 분석

감세지 옹벽 중심부를 본댐과 동일한 과정으로 팽창량을 계산한 결과는 그림 3.9.25~그림 3.9.27과 같다. 그림 3.9.25는 감세지 옹벽 중심부 온도분포로 MgO 혼입구역과 일반구역의 차이가 없으며 MgO 혼입에 의한 수화열등 열적특성의 변화는 발생하지 않는 것으로 생각된다. 그림 3.9.25는 감세지 옹벽 중심부의 팽창량이며, 초기에 높은 수화열에 의한 급격한 팽창이 발생하였고, 이후 꾸준히 팽창량이 증가하여 730일의 최종 팽창량은 136με이다.

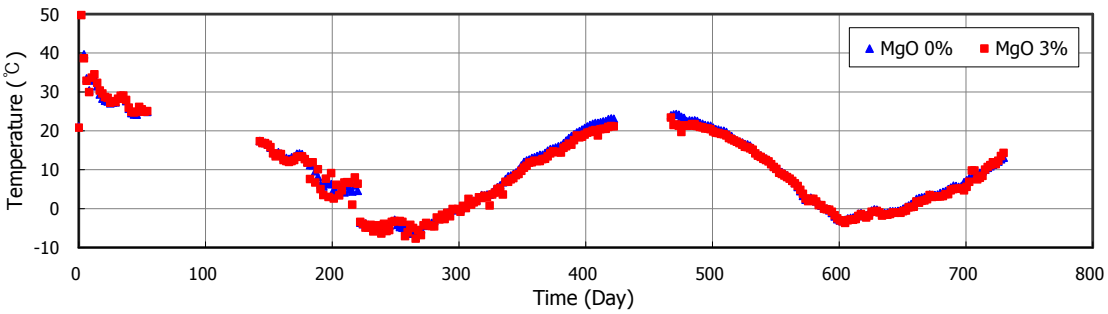


그림 3.9.25 감세지 옹벽 중심부 온도

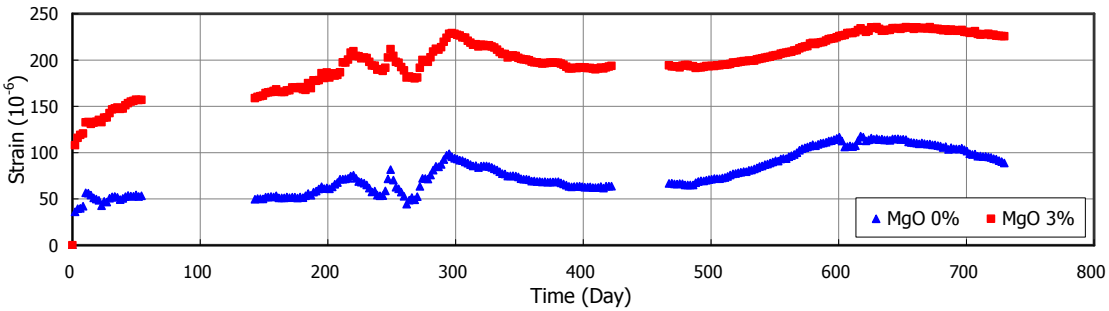


그림 3.9.26 감세지 옹벽 중심부 수축+팽창, 수축 변형률
[무응력계변형률($\epsilon_{n\sigma}$) - 온도변형률(ϵ_{temp})]

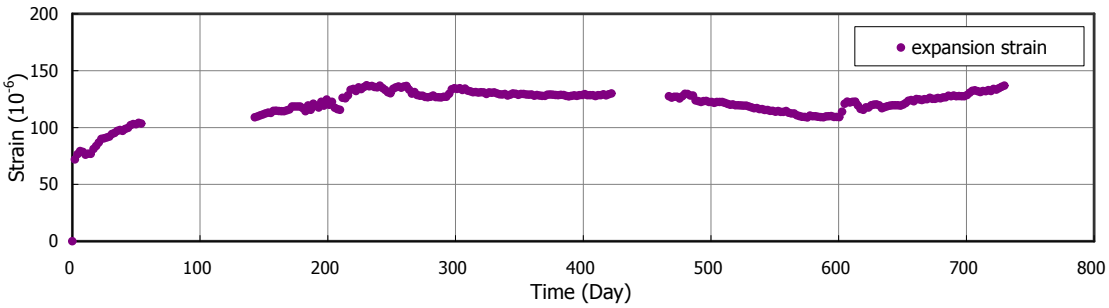


그림 3.9.27 감세지 옹벽 중심부 MgO에 의한 팽창량

그림 3.9.30은 감세지 옹벽 중심하부의 MgO에 의한 팽창량이며 예상(MgO에 의한 장기팽창 발생)과는 다른 경향을 보이고 있으며 이것의 원인을 파악하기에는 계측시스템상 어려움이 따른다.

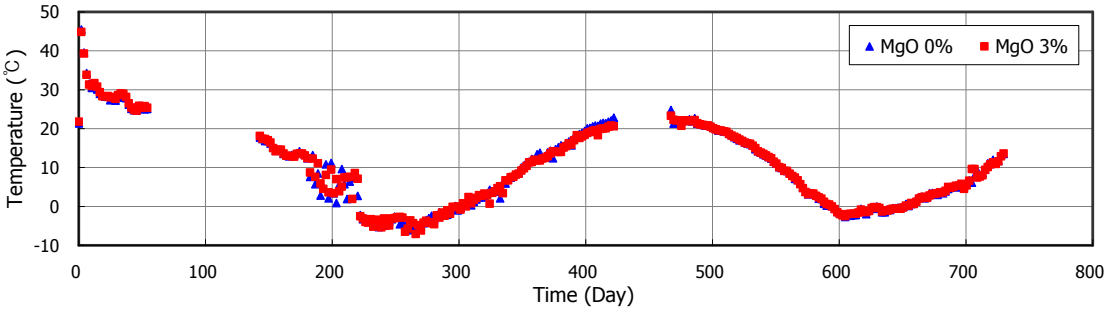


그림 3.9.28 감세지 옹벽 중심하부 온도

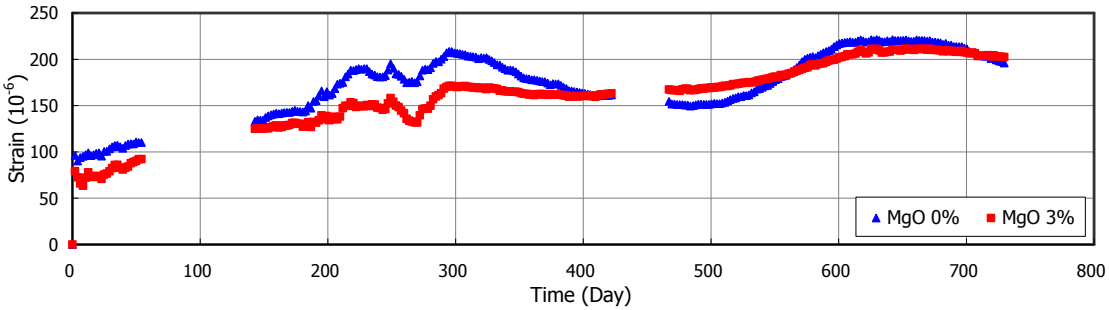


그림 3.9.29 감세지 옹벽 중심하부 수축+팽창, 수축 변형률
[무응력계변형률($\epsilon_{n\sigma}$) - 온도변형률(ϵ_{temp})]

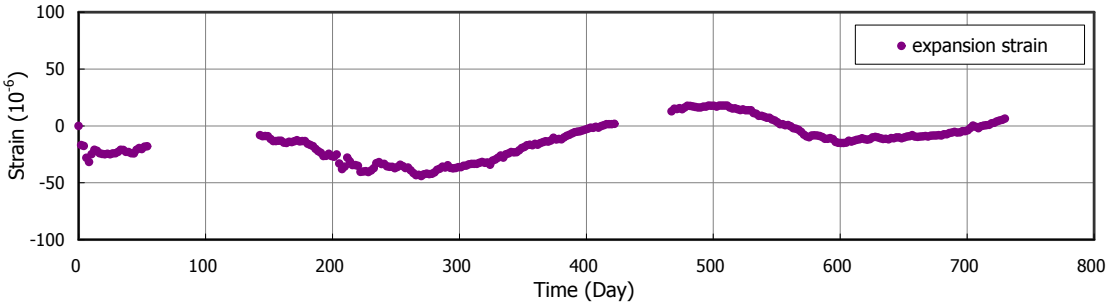


그림 3.9.30 감세지 옹벽 중심하부 MgO에 의한 팽창량

제 10 절 장기팽창량 예측 프로그램 개발(Ⅱ)

1. 개요

수화열, 수축 및 팽창 등에 의한 균열을 예측할 수 있는 방법으로 경험에 의한 방법, 실험에 의한 방법, 해석적인 방법 등이 있으나, 해석에 의한 방법이 다양한 구조형상과 경계조건, 시공조건의 변화 등을 효과적으로 고려할 수 있을 것이다. 따라서, 본 연구에서는 MgO 콘크리트를 사용한 경우 온도, 수축, 팽창 등의 체적 변화 요인을 고려한 3차원 온도 및 응력해석 프로그램 이용하여 MgO 콘크리트의 특성을 연구하였다. 수화열 온도해석 프로그램에서는 콘크리트 구조물의 시공에 따른 수화열 문제를 합리적으로 검토하기 위하여 열역학 이론에 기초하여 콘크리트의 수화과정을 포함하는 비정상(transient) 온도해석을 수행할 수 있도록 구성되었으며 콘크리트가 타설되는 지반이나, 기 타설된 콘크리트의 접촉면에서의 열전달 문제도 고려할 수 있도록 하였다. 또한, 콘크리트의 수화진행에 따른 강도증진 현상을 고려할 수 있도록 개발하였다. 매스콘크리트에서는 온도 상승시에는 단면내의 온도차에 의해 발생하는 내부구속응력이 주로 문제가 되지만, 최대 온도에 도달한 후 온도 강하시에는 외부 구속과 내부 구속에 의한 두 가지의 응력이 겹쳐진 복합응력이 문제가 되며, 각각의 성분의 대소에 따라 온도균열의 발생 시기 및 발생양상도 달라진다. 또한 온도응력을 실제적으로 평가하기 위하여 콘크리트의 역학적 특성이 급변하는 초기재령에서의 강도, 탄성계수 및 인장강도를 정확히 예측하여야 하고, 응력의 이완을 초래하는 초기재령 특성이 고려되어야 한다.

이러한 다양한 구조형상과 경계조건 및 재령에 따른 역학적 특성의 변화를 고려하기 위하여, 본 프로그램은 콘크리트의 수화과정 중에 발생하는 온도응력과 콘크리트의 역학적 재료 특성과 크리프 및 건조수축을 고려하여 해석을 수행할 수 있으며, 콘크리트의 수화진행에 따른 강도증진현상을 고려하기 위하여 등가재령의 개념을 도입하여 역학적 특성을 표현하였다. 자기팽창에 의한 변형은 온도의 함수이고 먼저 단면내 온도분포를 구한 후 결정된다. 따라서 수화열에 의한 온도해석을 수행한 후, 응력해석시 팽창량을 구하여 초기변형률 성분으로 하중항을 결정하게 된다. 각 시간단계의 변위와 변형률을 구한 후 일반화된 구성방정식을 통하여 응력을 계산하게 된다. 해석프로그램은 장기적인 MgO콘크리트의 팽창특성에 대한 자료가 확보되면 이를 반영하여 해석할 수 있도록 구성되었다. 실험결과를 반영하는 절차는 팽창특성에 대한 자료를 회귀 분석하여 재료 상수값을 사용자가 직접 입력 가능하도록 하였다. 또한 콘크리트의 역학적 특성을 ACI나 CEB-FIP MC90모델

뿐 만 아니라 수화도에 따른 물성변화를 고려할 수 있다.

가. 온도 및 재령에 따른 장기팽창성 유한요소해석 기법

경화중인 콘크리트의 온도, 수축, 팽창응력의 알고리즘은 다음과 같다. 단면내 온도 및 습도에 의한 온도, 수축변형에 MgO 콘크리트 자기팽창변형이 추가되고, 자기팽창변형은 시간과 온도의 함수로 정의된다.

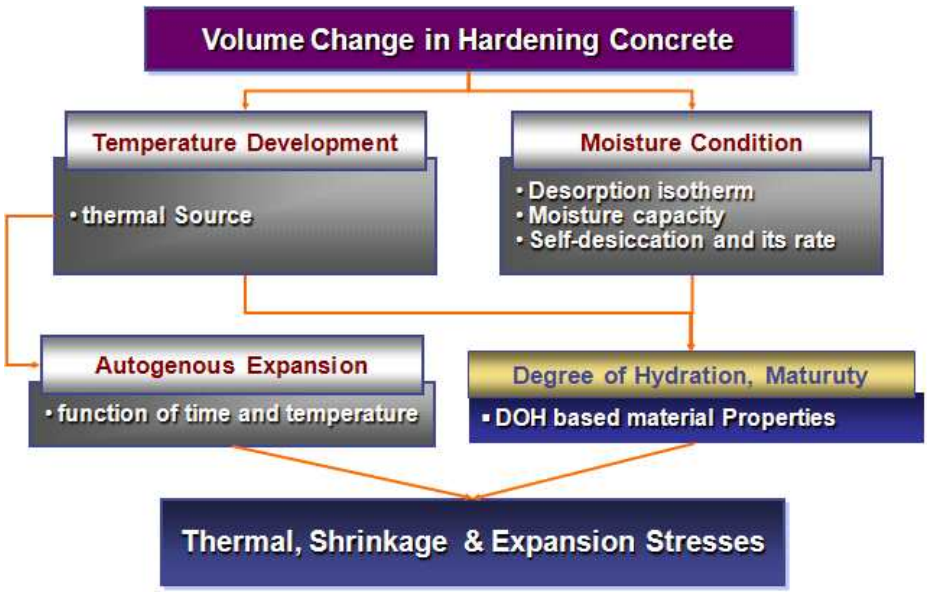


그림 3.10.1 경화중인 콘크리트의 온도, 수축, 팽창응력의 알고리즘

자기팽창에 의한 변형은 온도의 함수이고 먼저 단면내 온도분포를 구한 후 결정된다. 따라서 수화열에 의한 온도해석을 수행한 후, 응력해석시 팽창량을 구하여 초기변형률 성분으로 하중항을 결정하게 된다. 각 시간단계의 변위와 변형률을 구한 후 일반화된 구성방정식을 통하여 응력을 계산하게 된다.

나. 장기팽창 수치해석의 기본가정

- MgO의 반응은 온도에 독립적이지 않다. 높은 온도에서 높은 반응률을 보인다. MgO를 사용한 콘크리트의 팽창은 MgO의 수화율에 직접적으로 영향을 받는다. 그래서 MgO 콘크리트의 함수는 시간(t)와 온도(T)의 함수이다.
- MgO 콘크리트의 극한 팽창률은 MgO의 첨가량이 결정하며, 극한 팽창에 도달하는 시간은 온도에 영향을 받는다.
- MgO의 수화반응은 비가역적이며, MgO 콘크리트의 팽창은 단조증가하며 비가역적이다.

2. 해석 이론

가. 온도해석이론

구조물의 정확한 온도응력의 해석을 위해서는 예상되는 구조물 내의 온도 분포를 정확히 예측해야 한다. 이러한 필요에 의해 열전달해석이 필요하다.

(1) 열전달 해석

- 열전도 지배방정석의 유도

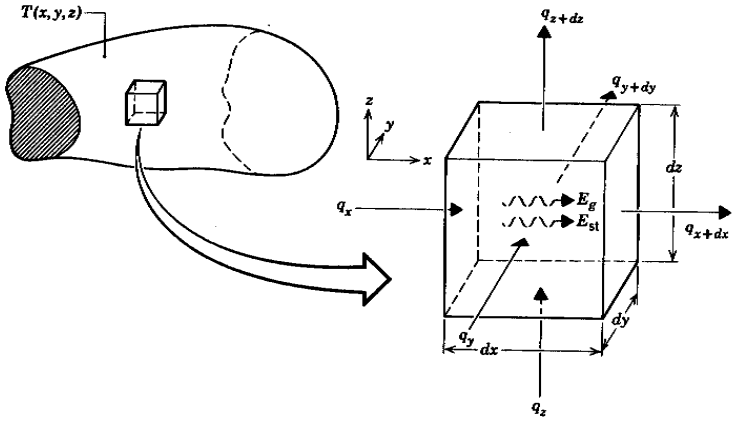


그림 3.10.2 전도 해석을 위한 미소체적 요소

내부 발열이 있는 고체 내에서의 온도분포는 Fourier법칙을 따르게 된다. 그림 3.10.2 과 같은 미소체적요소를 생각해보자. 이 미소체적내의 각각의 표면을 따라 온도구배에 의한 열전달 현상이 발생한다. 각 축방향으로의 열전달률을 q_x, q_y, q_z 라 하면, 다른 한쪽 표면에서의 열전달률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz$$

또한, 매질내에는 열에너지발생률과 관련된 에너지생성이 존재할 수 있다. 단위 체적당 발생된 에너지의 비율을 q 라 한다면, 미소체적에서의 에너지 발생률은 다

음과 같이 구해진다.

$$E_g = q\,dx\,dy\,dz$$

그리고, 미소체적내의 물질에 의하여 저장된 내부 에너지 양의 변화가 발생할 수 있다. 이 에너지 저장률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{st} = \rho\, c_p \frac{\partial T}{\partial t}\, dx\, dy\, dz$$

여기서, $\rho\, c_p \frac{\partial T}{\partial t}$ 는 시간에 따른 내부에너지의 단위체적당 변화율이다.

에너지 보존 법칙의 일반적인 형태는 다음과 같다.

$$E_{in} + E_g - E_{out} = E_{st}$$

따라서, 위의 식들을 에너지 보존법칙에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$q_x + q_y + q_z + q\,dx\,dy\,dz - q_{x+dx} - q_{y+dy} - q_{z+dz} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx\,dy\,dz$$

식을 다시 대입하면, 다음 식을 얻는다.

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x}dx - \frac{\partial q_y}{\partial y}dy - \frac{\partial q_z}{\partial x}dz + q\,dx\,dy\,dz = \rho\, c_p \frac{\partial T}{\partial t}\, dx\,dy\,dz$$

Fourier 법칙으로부터 열전달률은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$q_x = -k\,dy\,dz \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_y = -k\,dx\,dz \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$q_z = -k\,dx\,dy \frac{\partial T}{\partial z}$$

그러므로, Fourier 법칙을 열전달 평형식에 대입하여 정리하면

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)+q=\rho c_p\frac{\partial T}{\partial t}$$

위와 같은 열전도 편미분 방정식을 얻는다.

재료가 등방성 균질(homogeneous isotropic solid)하다고 가정하면 다음의 열전달 편미분 방정식을 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\frac{q}{k}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t}$$

여기서, $\alpha=\frac{k}{\rho c}$이며, 상수 α는 재료의 열확산율을 의미한다.

- 초기조건과 경계조건

편미분 방정식의 형태로 주어진 3차원 열류 평형 방정식을 풀기 위해서는 열현상에 대한 물리적 상황에 적합한 초기조건과 경계조건이 주어져야 한다. 경계조건으로는 물체의 표면에서 온도를 아는 경우와 물체의 표면에서 열흐름을 아는 두가지 경우가 있다.

표면에서 온도를 아는 경우

$$T(x,y,z,t)=f(x,y,z,t)\quad x,\ y,\ z\ \text{on}\ S_t$$

표면에서 열류 출입량을 아는 경우

$$k\frac{\partial T}{\partial n}(x,y,z,t)=q_n(x,y,z,t)\quad x,\ y,\ z\ \text{on}\ S_q$$

q_n는 (x,y,z)에서의 열류의 출입량을 나타낸다. 열출입은 대류에 의해 생기는 경우가 있으며 그 값은 외부의 온도와 표면의 온도의 차이에 대류 계수를 곱한 다음과 같은 식을 쓴다.

$$q_n(x,y,z,t)=h(T_\infty-T_s)$$

또한, 표면에서 열류 출입이 없는 단열 조건의 경우의 식은 다음과 같다.

$$q_n(x,y,z,t)=0$$

(2) 공간영역에서 유한요소 정식화

열전달 문제를 유한요소 해석을 이용하여 수행하기 위해서 Variational formulation을 적용한 후 전체좌표계의 절점온도에 대하여 각각의 요소를 Assemble하면 다음과 같은 행렬식을 유도할 수 있다.

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{R\}$$

열용량행렬은 콘크리트에 의한 것과 Pipe에 의한 것으로 나눌 수 있다.

$$\text{열용량행렬:}[C] = \int_{con} [N]^T \rho c_c [N] dV + \int_{pip} [N]^T \rho c_p [N] dV$$

열전달행렬은 전도에 의한 것과 대류에 의한 것 두 가지가 있다.

$$[K] = [K^{cond}] + [K^{conv}]$$

$$\text{전도행렬:}[K^{cond}] = \int_{conc} [B]^T [k_c][B] dV + \int_{pip} [B]^T [k_p][B] dV$$

$$\text{대류행렬:}[K^{conv}] = \int_{conc} [N]^T h_c [N] dS + \int_{pip} [N]^T h_p [N] dS$$

그런데, 콘크리트의 부피에 비하여 파이프의 부피는 매우 작고, 또한 파이프요소의 모델링을 1차원요소를 사용함으로 파이프에 의한 열용량행렬과 전도행렬은 무시하였다.

하중벡터는 내부발열에 의한 것과 대류에 의한 것이 있으며 대류는 콘크리트의 표면과 파이프의 표면에서 발생한다.

$$\{R\} = \{R^{heat}\} + \{R^{conv}\}$$

$$\text{발열하중벡터: } \{R^{heat}\} = \int_{conc} [N]^T q \, dV$$

$$\text{대류하중벡터: } \{R^{conv}\} = \{R_{conc}\} + \{R_{pip}\}$$

$$= \int_{conc} [N]^T h_c T_c \, dS + \int_{pip} [N]^T h_p T_w \, dS$$

콘크리트의 온도 T 와 파이프내의 유체의 온도 T_w 를 분리하여 행렬의 형태로 정리하면 다음과 같다.

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{R\} + \int_{pip} [N]^T h_p T_w dS$$

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{R\} + [H_p]\{T_w\}$$

(3) 시간영역에서 유한요소 정식화

시간에 대한 일계도함수의 근사값을 얻기 위한 방법으로는 두 개의 연속적인 시간 단계에서 각 단계에서의 변수를 선형보간에 의해 가중평균해서 근사시키는 방법을 보편적으로 사용한다.

$$\alpha\{\dot{T}\}_{n+1} + (1-\alpha)\{\dot{T}\}_n = \frac{\{T\}_{n+1} + \{T\}_n}{\Delta t_{n+1}}$$

α값이 0이면 Euler의 전방차분법이 되고 1/2이면 중앙차분법 또는 Crank-Nicolson방법, 2/3이면 Galerkin방법, 1이면 후방차분법이 된다.

α값이 1/2보다 작은 경우 시간 간격 Δt_n의 크기에 따라 해의 안정성이 결정되고 $1/2 \leqq \alpha \leqq 1$인 경우에는 해가 Δt_n의 크기에 관계없이 안정하게 된다.

one step method를 사용하여, 시간 단계 (n+1)에서 방정식은

$$[C]\{\dot{T}\}_{n+1} + [K]\{T\}_{n+1} = \{R\}_{n+1}$$

으로 쓸 수 있고 시간(n)에서의 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[C]\{\dot{T}\}_n + [K]\{T\}_n = \{R\}_n$$

위의 두식을 가중평균하면

$$[C](\alpha\{\dot{T}\}_{n+1} + (1-\alpha)\{\dot{T}\}_{n+1}) + [K](\alpha\{T\}_{n+1}) + (1-\alpha)\{T\}_n) = \alpha\{R\}_{n+1} + (1-\alpha)\{R\}_n$$

$$[C](\frac{\{T\}_{n+1} - \{T\}_n}{\Delta t_{n+1}}) + [K](\alpha\{T\}_{n+1}) + (1-\alpha)\{T\}_n) = \alpha\{R\}_{n+1} + (1-\alpha)\{R\}_n$$

으로 쓸 수 있고 이것을 다시 정리하면 다음의 관계식을 얻는다.

$$[\hat{K}]\{T\}_{n+1} = \{\hat{R}\}$$

여기서, $[\hat{K}] = [C] + \alpha\Delta t_{n+1}[K]$

$$[\hat{R}] = ([C] - (1-\alpha)\Delta t_{n+1}[K])\{T\}_n + \Delta t_{n+1}(\alpha\{R\}_{n+1} + (1-\alpha)\{R\}_n)$$

(4) 비선형 해석이론

비선형성을 가지고 있는 발열모델이나 재료모델 등을 사용할 경우 비선형해석을 수행해야 한다. 본 프로그램에서는 비선형 해석방법으로 Tangent Stiffness Method를 사용하였다.

나. 온도관련 콘크리트 모델링

(1) 수화발열과정의 이론 및 모델링

콘크리트는 타설 후 수화과정을 거치면서 경화되어진다. 이러한 수화과정은 발열반응으로써 시멘트 구성성분들의 화학적 반응이다. 콘크리트구조물의 온도해석을 하기 위해서는 콘크리트의 수화반응에 대한 모델링식이 필요하다. 일반적으로 콘크리트 시방서에서 제시하고 있는 지수형태의 단열온도 상승곡선을 많이 사용하며, 수화도를 이용한 단열온도 상승식을 사용할 수도 있다. 그러나, 지수형태의 단열온도 상승곡선의 경우 타설후의 온도이력을 고려하지 못하는 등의 단점이 있다. 수화도를 이용한 단열온도상승식의 경우 온도이력을 정확하게 고려할 수 있으나 결정해야 하는 상수들이 다소 많으며 비선형 해석을 하여 시간이 많이 걸리는 단점이 있다.

- 지수형태의 단열온도 상승곡선

일반적으로 사용되고 있는 단열온도상승곡선은 다음 같은 지수형태의 함수로 나타내며, 최대온도 상승량(K)와 반응속도(α)로써 단열상승 특성을 표현한다.

일반적으로 콘크리트의 발열과정을 모델링하기 위하여 다음의 식과 같은 최대온도 상승량(K)와 반응속도(α)의 함수인 단열온도상승곡선을 사용한다.

$$T = K(1 - e^{-\alpha t})$$

여기서, T : 시간 t 일에서의 단열온도 상승량(℃)

K : 최종단열온도상승량(℃)

α : 반응속도

t : 시간 (일)

이와 같은 단열온도상승곡선은 간단한 식으로써 콘크리트 발열과정을 손쉽게 모델링 하였으나, 시간에 대한 함수이므로 타설온도, 온도이력 등에 따른 변화를 나타내기에는 어려움이 있다. 또한, 단열온도상승 실험으로부터 구해지는 곡선은 그림3.10.3과 같이 S자 형태로 기존의 지수형태의 단열온도 상승식과는 형태가 다르다. 그러나, 단열온도 상승식의 결정시에 초기에 발열이 지연되는 부분을 제외하면 비슷한 발열경향을 보이며, 실제로 콘크리트의 운송시간과 타설시간 등을 고려하는 방법에 따라 초기발열이 지연되는 부분을 제외하고 해석하는 것이 합리적인 경우도 있다.

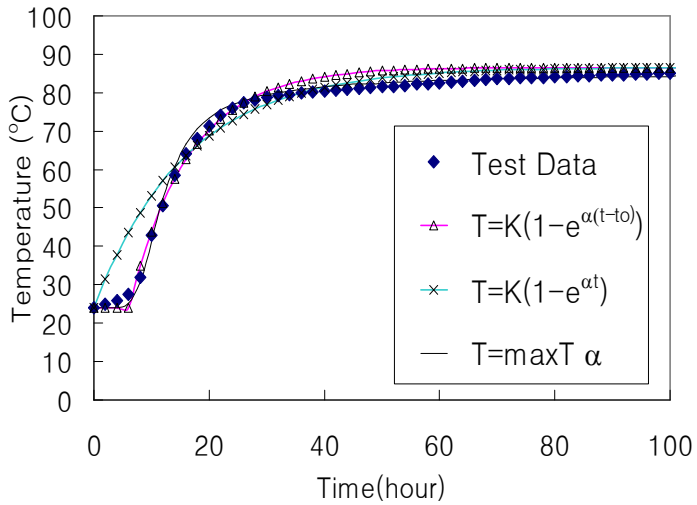


그림 3.10.3 단열온도 상승곡선

단열온도 상승곡선은 필요에 따라 시험에 의하여 결정하는 것이 바람직하지만, 시험에 의하지 않을 경우에 콘크리트 표준시방서(2009)에서 다음과 같은 추정방법을 제시하고 있다.

표 3.10.1 Q_∞ 및 r의 표준값

시멘트의 종류	타설온도 (℃)	$Q(t)=Q_\infty(1-e^{-rt})$			
		$Q_\infty(C)=aC+b$		$r(C)=gC+h$	
		a	b	g	h
보통 포틀랜드 시멘트	10	0.12	11.0	0.0015	0.135
	20	0.11	13.0	0.0038	-0.036
	30	0.11	12.0	0.0040	0.337
중용열 포틀랜드 시멘트	10	0.11	6.0	0.0003	0.303
	20	0.10	9.0	0.0015	0.279
	30	0.11	9.0	0.0021	0.299
조강 포틀랜드 시멘트	10	0.13	15.0	0.0016	0.478
	20	0.13	12.0	0.0025	0.650
	30	0.13	10.0	0.0014	1.720
저열 포틀랜드 시멘트	10	0.10	1.9	0.00018	0.229
	20	0.10	2.2	0.00032	0.225
	30	0.10	2.6	0.00062	0.218
고로 슬래그 시멘트	10	0.11	14.0	0.0014	0.073
	20	0.10	15.0	0.0025	0.207
	30	0.10	15.0	0.0035	0.332
플라이 애쉬 시멘트	10	0.15	-3.0	0.0007	0.141
	20	0.12	8.0	0.0028	-0.143
	30	0.11	11.0	0.0030	0.059

주 1) C는 결합재 질량으로서 단위는 kg/m^{3}임.
2) 이 표에서 결합재 질량을 기준으로 고로 슬래그 시멘트는 슬래그 40 퍼센트, 플라이 애쉬 시멘트는 플라이 애쉬 20 퍼센트의 혼입률을 고려한 것임.

단열온도 상승에 영향을 미치는 여러 가지 요인 가운데 시멘트의 종류, 단위시멘트량, 혼화재의 사용 및 치기온도 등의 영향이 크므로 계산 혹은 기존의 자료에 의하여 단열온도상승을 추정할 경우에는 이들의 요인을 고려할 필요가 있다. 따라서, 시멘트의 종류, 단위시멘트량 및 치기 온도에 따라 다음의 회귀식에 의하여 최대온도 상승량(K or Q_∞)와 반응속도(α or r)를 추정할 수 있다.

혼합시멘트 특히 고로시멘트 B종의 단열온도 상승은 포틀랜드 시멘트에 비하여 제품의 롯트나 공장 등에 의한 차이가 크므로 수화열을 지정하는 등의 주의가 필요하다.

- 수화도와 등가재령을 이용한 단열온도 상승곡선

콘크리트의 발열과정에서 발열량은 수화정도에 따라 달라지게 된다. 따라서, 반응이 어느 정도 진행되었는지 알기 위해, 수화도(α)라는 개념을 사용한다. 수화도는 다음 식과 같이 정의 할 수 있으나, 시멘트 반응정도를 정량적으로 구하기는 어려우므로, 일반적으로 수화반응에 기인한 발열량의 크기로 다음식과 같이 수화도를

정의할 수 있다.

$$\alpha = \frac{\text{시간 } t \text{ 에서 반응한 시멘트량}}{\text{시간 } t=0\text{에서 총시멘트량}}$$

$$\alpha = \frac{Q_{ad}(t_{ad})}{\max Q_{ad}} = \frac{\Delta T_{ad}(t_{ad})}{\max \Delta T_{ad}}$$

수화과정은 온도이력에 따라 다른 특성을 가지게 된다. 따라서 서로 다른 이력에서의 수화도를 나타내기 위해서 등가재령시간을 도입한다.

$$t_e = \int_0^t \frac{f(T)}{f(T_0)} dt$$

여기에서, $f(T)$: 성숙도 함수

T_0 : $293K$이다.

성숙도 함수는 여러 가지가 제안되고 있으나 본 연구에서는 Freisleben Hansen and Pedersen에 의해 제안된 다음 식과 같은 온도활성화에 대한 Arrhenius equation형태의 함수를 사용하였다.

$$f(T) = k e^{-\frac{\theta}{T}}$$

여기서, θ : 활성에너지/기체상수

따라서, 식을 정리하면 다음과 같이 된다.

$$t_e = \int_0^t e^{\Theta(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T})}$$

또한, θ값은 Jonasson에 의해 제안된 다음 식을 사용하였다.

$$\theta = \theta_0 (\frac{T_0 - T_a}{T - T_a})^{\kappa_0}$$

여기서, Θ_0와 κ_0는 실험에 의해 구해지는 상수

$$T_a = 263 \ K$$

한편, 위에서 구한 등가재령시간에 대한 식으로 수화도를 모델링하기 위해서는 Jonasson에 의해 제안된 등가재령시간에 대한 수화도식을 사용하였다.

$$\alpha = e^{-\lambda_1 (\ln(+ \frac{t_e}{t_1}))^{-\kappa_1}}$$

여기서, λ_1 , t_1 , κ_1 은 실험에 구해지는 상수

따라서, 콘크리트에서의 발열량 Q와 단위시간당 발열량 q는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = (max\ Q) \cdot \alpha$$

$$q = (max\ Q) \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial t}$$

$$= (max\ Q) \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial t_{eq}} \cdot \frac{\partial t_{eq}}{\partial t}$$

수화도를 고려한 식을 사용할 경우 그림 3.10.4와 같이 단열온도상승실험값을 적절히 모사하고 있음을 알 수 있다.

동일한 배합의 콘크리트의 경우에도 타설온도에 발열 특성이 틀려지게 된다. 그림 3.10.4에 타설온도에 따른 단열온도상승실험값을 나타내었다. 타설온도가 높을수록 반응속도가 빨라지고 최대온도 상승량이 적어짐을 알 수 있다. 콘크리트표준시방서의 단열온도상승식으로는 타설온도에 따른 변화를 낼 수 없기 때문에 각각의 타설온도마다 다른 식을 사용해야 한다. 그러나, 수화도를 고려한 발열량식을 사용할 경우 그림 3.10.4의 곡선과 같이 타설온도에 대한 영향을 효과적으로 모델링 할 수 있다.

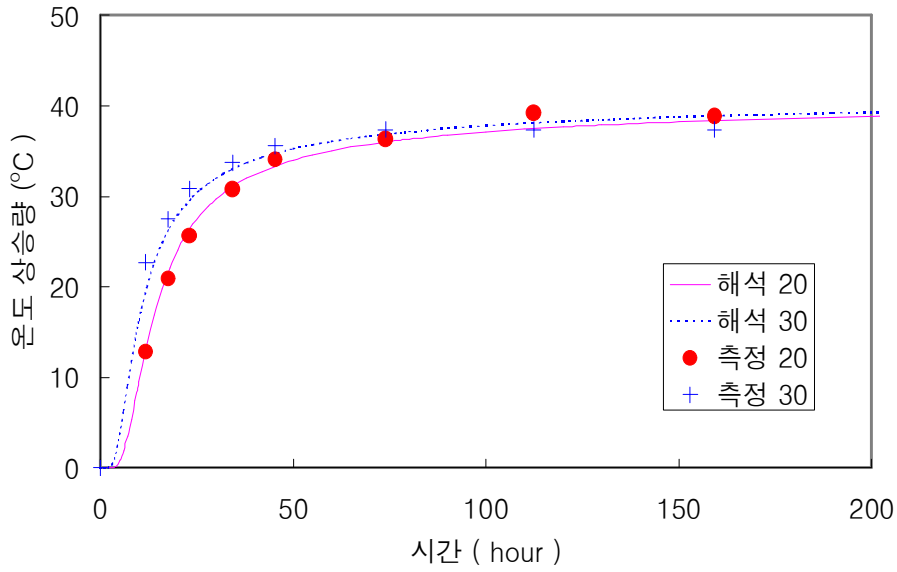


그림 3.10.4 타설온도에 따른 단열온도 상승곡선

(2) 열특성치

콘크리트의 재료 및 온도해석에 사용하는 열특성치(열전도율, 열확산율, 비열)는 사용하는 콘크리트의 배합에 따라 적절한 값을 취해야 하며, 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$h_c^2 = \lambda_c / (C_c \cdot \rho)$$

여기서 λ_c : 열전도율 (㎉/mh℃)

C_c : 비열 (㎉/㎏℃)

h_c^2 : 열확산율 (㎡/h)

ρ : 밀도 (㎏/㎥)

콘크리트의 열계수는 사용하는 콘크리트의 배합 특히 골재의 성질 및 단위골재량이나 콘크리트의 습윤상태에 좌우되므로 이러한 영향을 적절히 고려해서 정해야 한다. 그러나 일반적인 콘크리트 구조물에 쓰이는 열전도율, 비열, 열확산율은 표 3.10.2 에 나타낸 정도로 본다.

표 3.10.2 콘크리트의 열특성계수 일반값

열특성계수	사용값
열전도율(W/m℃)	2.6~2.8
비열(J/kg℃)	1,050~1,260
열확산율(m^2/s)	$(0.83\sim1.10)\times10^{-6}$
밀도(kg/m^3)	2,300
열팽창계수(/℃)	1×10^{-5}

지반이나 암반 위에 타설된 콘크리트에 대하여 온도해석을 시행 할 경우 지반이나 암반의 열특성값이 필요하게 되는데, 이들 값은 기왕의 자료를 참고로 정해도 좋다. 한편, 일빈적으로 암반의 밀도는 2600～2900 ㎏/㎥, 열전도율은 1.5～4.5 ㎉/mh℃, 비열은 0.17～0.21 ㎉/㎏℃ 정도이다.

(3) 경계조건의 설정

콘크리트의 온도해석에 사용되는 경계조건, 열전달경계, 단열경계, 고정온도경계는 구조물의 형상, 방열조건 등을 고려하여 적절히 정해야 한다. 특히 열전도율이 부재표면부의 콘크리트 온도에 큰 영향을 미치며 부재두께가 비교적 작을 경우에는 내부온도 상승에도 영향을 미치므로 거푸집의 유무, 종류, 두께, 존치기간, 양생방법, 주위의 풍속등을 고려하여 정해야 한다. 콘크리트표준시방서(2009)에서 표 3.10.3과 같은 참고값을 제시하고 있다.

표 3.10.3 열전달률 η의 참고값

No.	양생 방법	η ($W/m^2℃$)
1	강재 거푸집	14
	살수(담수깊이 10 mm 미만)	
2	양생포 + 살수	8
3	담수(담수깊이 50 mm～100 mm)	8
4	합판거푸집	8
5	시트(sheet)	6
6	시트(또는 양생매트) + 담수	5
7	발포스티로폼(두께 50 mm) + 시트	2

(4) 파이프쿨링 경계조건의 설정

파이프 쿨링을 시행하는 경우, 콘크리트 구조물 속에 파이프가 매설되고, 그 속

으로 낮은 온도의 유체가 지나가면서 열 교환이 일어나서 수화열로 인한 온도상승을 감소시켜 주게 된다. 이 때, 열교환이 일어나는 형태는 파이프 표면과 통과하는 유체사이의 대류에 의한 것이라고 할 수 있다.

따라서, 이러한 파이프 냉각을 모델링 하기 위해서는 공기와 접하고 있는 콘크리트의 바깥 면뿐만 아니라 유체와 접하고 있는 파이프 안쪽 면에서도 대류로 인한 열전달 현상이 생기는 것으로 모델링 한다. 콘크리트 바깥면의 외기의 온도는 통상 일정하다고 보던지, 주기적으로 상승과 하강을 반복하는 것으로 보는 등, 이미 알고있는 특정한 값을 지정해주면 된다.

그러나, 파이프 속을 통과하는 유체는 수화열에 의하여 온도가 상승하게 된다. 따라서, 파이프 냉각을 모델링 하기 위해서는 파이프 속의 유체의 온도변화를 계산하는 식을 도입해야 한다. 또한, 유체와 파이프와의 열교환량을 표현하는 상수인 대류 열전달 계수(h) 값도 알아야 한다.

유수대류계수 h는 파이프 내에서의 대류계수로서 실험에 의해서 구하거나, 또는 일반적으로 알려져 있는 열전달 공식을 이용하여 구할 수 있다.

일본 콘크리트 공학협회 보고서에 의하면, 콘크리트의 파이프 냉각시 유수와 콘크리트의 열전달을 나타내는 유수 대류계수는 냉각수의 속도에 따라 변하며, 유속이 20~60cm/sec인 경우 아래의 식을 추천하고 있다. 이 경우 h_w의 값은 138~328 kcal/m^2 · hr · ℃ 의 값을 보인다.

$$h_w = 4.75u + 43.0 \ (\mathrm{Kcal/m^2 \cdot hr \cdot ℃})$$

여기서, u : 유속 cm/sec

기타 여러 논문을 살펴볼 경우 표 3.4와 같은 값들을 이용하여 해석을 수행한 것을 알 수 있다.

표 3.10.4 유수 대류계수의 예

h(kcal/m^2 · hr · ℃)	D(m)	비고
328	0.025	
275	0.025	
386	0.04	
32	0.1	Air Cooling

다. 응력해석이론

(1) 지배방정식의 유도

응력해석문제에 대한 유한요소정식화에서 변형도-변위관계는 중요한 위치를 차지하고 있다. 본 해석에서 변형도-변위관계는 다음과 같이 직교좌표계에서 3차원 변형도-변위관계를 가진다.

$$\begin{aligned}
\epsilon_x &= \partial u/\partial x = u,_x \\
\epsilon_y &= \partial v/\partial y = v,_y \\
\epsilon_z &= \partial w/\partial z = w,_z \\
\gamma_{xy} &= u,_y + v,_x \\
\gamma_{yz} &= v,_z + w,_y \\
\gamma_{zx} &= u,_z + w,_x
\end{aligned}$$

여기서, u, v, w 는 x, y, z의 함수이다. 식을 행렬 연산자를 사용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$$

변형도-변위관계를 변형도 행렬 $\{\epsilon\}$와 변위 행렬 $\{u\}$로 나타내면,

$$\{\epsilon\} = [\partial]\{u\}$$

여기서,

$$[\partial] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}$$

3차원 공간에서 탄성체의 포텐셜에너지는 다음 식으로 표현된다.

$$\Pi = \int (\frac{1}{2}\{\epsilon\}^T[E]\{\epsilon\} - \{\epsilon\}^T[E]\{\epsilon_0\} + \{\epsilon\}^T\{\sigma_0\})dV - \int \{u\}^T\{F\}dV - \{d\}^T\{P\}$$

여기서, $\{u\} = [uvw]^T$, 변위장(displacement field)

$\{\varepsilon\} = [\varepsilon_x \varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \gamma_{xy} \gamma_{yz} \gamma_{zx}]^T$, 변형도장(strain field)

$[E]$ = 재료 물성 행렬(material property matrix)

$\{\varepsilon_0\}, \{\sigma_0\}$ = 초기변형도 및 응력(initial strains and initial stresses)

$\{F\} = [F_x F_y F_z]^T$, 물체력(body forces)

$\{d\}$ = 요소 절점 자유도(element nodal d.o.f.)

$\{P\}$ = 외력(loads applied to d.o.f. by external agencies)

condition of stationarity of Π ($\delta\Pi = 0$)를 이용하여,

$$\int \{\delta\varepsilon\}^T[E]\{\varepsilon\} = \int \{\delta\varepsilon\}^T[E]\{\varepsilon_0\} - \int \{\delta\varepsilon\}^T\{\sigma_0\}dV + \int \{\delta u\}^T\{F\}dV + \{\delta d\}^T\{P\}$$

(2) 유한요소의 정식화

요소내 변위는 요소 절점 자유도 $\{d\}$에 의해 보간하여 얻을 수 있다.

$$\{u\} = [N]\{d\}$$

변형도는 변위를 미분하여 다음과 같이 표현된다.

$$\{\varepsilon\} = [B]\{d\}$$

여기서, $[B] = [\partial][N]$

따라서, 위의 두식을 대입하면

$$\left\{\int [B]^T[E][B]dV\right\}\{d\} = \int [B]^T[E]\{\varepsilon_0\}dV - \int [B]^T\{\sigma_0\}dV + \int [N]^T\{F\}dV + \{P\}$$

전체좌표계의 절점 자유도 $\{D\}$ 에 대하여 각 요소를 결합하여 평형방정식을 유도하면,

$$[K]\{D\} = \{R\}$$

여기서, 강성행렬(stiffness matrix), $[K] = \sum_{i=1}^{n}\int [B]^T[E][B]dV$

하중벡터(load vector), $\{R\} = \{R_\varepsilon\} - \{R\sigma\} + \{R_F\} + \{R_P\}$

초기변형도하중벡터(initial strain load vector), $\{R_\varepsilon\} = \sum_{i=1}^{n}\int [B]^T[E]\{\varepsilon_0\}dV$

초기응력하중벡터(initial stress load vector), $\{R_\sigma\} = \sum_{i=1}^{n}\int [B]^T\{\sigma_0\}dV$

물체력하중벡터(body force load vector), $\{R_F\} = \sum_{i=1}^{n}\int [N]^T\{F\}dV$

외력하중벡터(external load vector), $\{R_P\} = \sum_{i=1}^{n}\{P\}$

온도응력해석에서도 온도해석과 마찬가지로 3차원 등매개 요소(isoparmetric elements)를 사용하였다. 그러므로 변형도-변위관계와 위의 식을 이용하면, $[B]$ 행렬은 다음과 같이 정방행렬의 곱으로 표현된다.

$$[B] = [H][\overline{\Gamma}][\overline{DN}]$$

여기서,

$$[H] = \begin{bmatrix} 1&0&0&0&0&0&0&0&0 \\ 0&0&0&0&1&0&0&0&0 \\ 0&0&0&0&0&0&0&0&1 \\ 0&1&0&1&0&0&0&0&0 \\ 0&0&0&0&0&1&0&1&0 \\ 0&0&1&0&0&0&1&0&0 \end{bmatrix}$$

$$[\overline{\Gamma}] = \begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} & \Gamma_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Gamma_{31} & \Gamma_{32} & \Gamma_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Gamma_{11} & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Gamma_{21} & \Gamma_{22} & \Gamma_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Gamma_{31} & \Gamma_{32} & \Gamma_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Gamma_{11} & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Gamma_{21} & \Gamma_{22} & \Gamma_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Gamma_{31} & \Gamma_{32} & \Gamma_{33} \end{bmatrix}$$

$$[\overline{DN}]^T = \begin{bmatrix} N_{1,\xi} & N_{1,\eta} & N_{1,\zeta} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_{1,\xi} & N_{1,\eta} & N_{1,\zeta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{1,\xi} & N_{1,\eta} & N_{1,\zeta} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ N_{8,\xi} & N_{8,\eta} & N_{8,\zeta} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_{8,\xi} & N_{8,\eta} & N_{8,\zeta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{8,\xi} & N_{8,\eta} & N_{8,\zeta} \end{bmatrix}$$

콘크리트 재료의 물성은 일적으로 탄성계수 E, 포아송비 ν포 나타낼 수 있다. 콘크리트를 등방성 재료로 가정하면 등방성 3차원 요소의 재료 물성 행렬 $[E]$는 다음과 같이 표현된다.

$$[E] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}$$

초기변형도는 비역학적 변형도(nonmechanical strain)를 의미하고 다음과 같은 요소로 나눌 수 있다.

$$\{\epsilon_0\} = \{\epsilon_c\} + \{\epsilon_s\} + \{\epsilon_{ae}\} + \{\epsilon_T\}$$

여기서, $\{\varepsilon_c\}$ = 크리프 변형도 벡터(creep strain vector)

$\{\varepsilon_s\}$ = 수축 변형도 벡터(shrinkage strain vector)

$\{\epsilon_{ae}\}$ = MgO 팽창 변형도 벡터(autogenous expansion strain vector)

$\{\epsilon_T\}$ = 온도에 따른 변형도 벡터(temperature strain vector)

$$\alpha_c(\sum N_i \Delta T_i)\,[1\,1\,1\,0\,0\,0]^T$$

여기서, ΔT_i 는 요소의 각 절점의 상대온도이고, α_c 는 열팽창계수이다.

한편으로, 초기변형도는 초기응력으로 고려될 수도 있다. 본 해석에서는 온도의 영향을 초기변형도로 고려하여 해석하므로 위의 식에서 $\{\sigma_0\}=\{0\}$로 나타낼 수 있다. 콘크리트 자중은 다음과 같이 표현된다.

$$\{F\}=\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho \end{pmatrix}$$

여기서, ρ 는 콘크리트 자중을 의미한다.

요소내 응력 $\{\sigma\}$ 는 기지의 절점 자유도 $\{d\}$ 로 부터 계산된다. 따라서 요소내 응력 {σ}는 $\{\sigma\} = [E](\{\epsilon\} - \{\epsilon_0\})$으로 구할 수 있다.

라. 응력관련 콘크리트 모델링

(1) 콘크리트의 역학적 특징

온도균열의 발생을 추정하기 위해서는 새로 타설된 콘크리트의 인장강도를 적절히 정해야 한다. 콘크리트의 인장강도는 사용하는 시멘트의 종류, 물-결합재비. 골재의 종류, 온도이력, 재령 등의 영향을 받는다. 본 프로그램에서는 콘크리트표준시방서의 강도발현식과 CEB-FIP의 강도발현식을 사용할 수 있다.

- 콘크리트표준시방서(2009)

$$f_{ck}(t_{eq}) = \frac{t_{eq}}{a + b t_{eq}} d(28) f_{ck}$$

$$E_c(t_{eq}) = 4.7 \times 10^3 \times \sqrt{f_{ck}(t_{eq})}$$

$$f_{sp}(t_{eq}) = 0.44 \sqrt{f_{ck}(t_{eq})}$$

여기서, $f_{ck}(t_{eq})$: 재령 t일(등가재령 t_{eq}) 기준 콘크리트의 설계기준강도 (MPa)

$E_c(t_{eq})$: 재령 t일(등가재령 t_{eq}) 기준 콘크리트의 탄성계수 (MPa)

$f_{sp}(t_{eq})$: 재령 t일(등가재령 t_{eq}) 기준 콘크리트의 인장강도 (MPa)

f_{ck} : 설계기준강도 (MPa)

표 3.10.5 계수 a, b의 값

시멘트의 종류	a	b	d_i
보통포틀랜드시멘트	4.5	0.95	1.11
중용열포틀랜드시멘트	6.2	0.93	1.15
조강포틀랜드시멘트	2.9	0.97	1.07
저열포틀랜드시멘트	16.2	0.82	1.40

이들 강도는 일반적으로 배합강도에 따르지만, 실제의 단계 등 부득이 할 경우에는 설계기준강도에 바탕을 두어 실시한다. 또한, 본 프로그램에서는 보정계수를 사용하여 재령91일 강도대신 재령28일 압축강도를 사용하도록 하였다.

(2) MgO 콘크리트의 자기팽창 특징

MgO 콘크리트의 자기팽창은 동역학모델에 근거하여 모델링하였다. MgO콘크리트 자기팽창의 여부를 다음과 같이 입력문에서 정의할 수 있다.

- MgO 콘크리트를 고려하지 않을 경우

  MgO=None

- MgO 콘크리트를 고려하는 경우

  MgO=act e0=225 a=5.85e9 b1=3.3057 b2=0.009393 b3=-0.00073214 gam=8200

상기의 재료상수값을 쓰지 않더라도 default로 위의 값이 기본으로 입력되도록 하였다.

3. 프로그램 구조 및 특성

본 프로그램은 Windows 환경 가진 PC에서 수행될 수 있으며 Visual Language를 이용하여 개발되었다. 수화열 해석 프로그램의 수행에는 많은 시간과 메모리가 소요되고, 수화열 해석의 수행시 모델링 형상보다는 경계조건 등의 변경이 많은 수화열 해석의 특성을 고려하여, 전처리부분과 주해석부분, 후처리부분의 프로그램을 독립적으로 수행할 수 있도록 하였다.

가. 전처리 프로그램의 구조

프로그램은 크기 파일처리를 하는 파일부분과 해석관련값들을 입력하는 입력부분으로 나뉘어져 있다.

(1) 파일부분(File Module)

전처리프로그램의 상태를 입력, 저장하는 새파일, 열기, 저장 의 메뉴가 있다.

「새파일」의 경우 전처리프로그램을 초기화하여 새로운 입력을 받을 수 있도록 하는 메뉴이다.

「열기」 의 경우 기존에 저장된 전처리프로그램의 파일을 읽어들이는 메뉴이다.

「저장」 은 현재 작업이 된 전처리프로그램의 상태를 저장하는 메뉴이다.

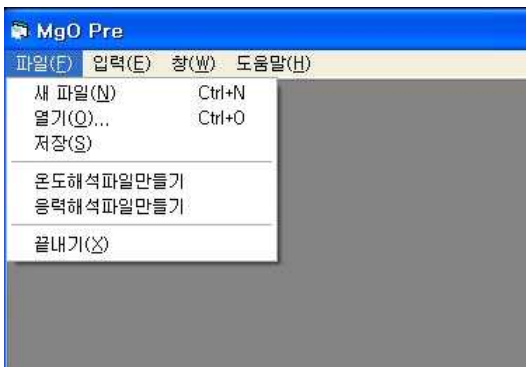


그림 3.10.5 파일부분의 그림

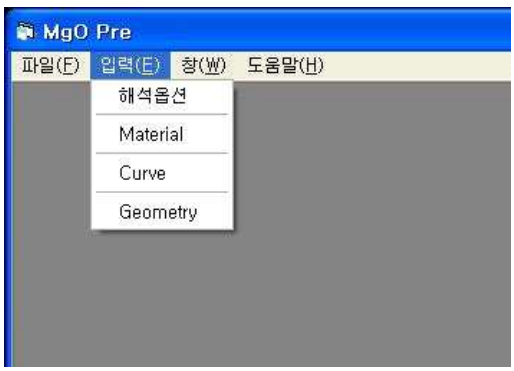


그림 3.10.6 입력부분의 그림

전처리프로그램의 작업이 완료되어서 해석 프로그램에서 사용되는 온도해석 입력 파일과, 응력해석 입력 파일을 만드는 메뉴가 있다

「온도해석 파일 만들기」 의 경우 온도해석 프로그램의 형식에 맞도록 입력파일을 만들어 주는 메뉴이다.

「응력해석 파일 만들기」 의 경우 응력해석 프로그램의 형식에 맞도록 입력파

일을 만들어 주는 메뉴이다.

실제 프로그램을 운용할 경우에는, 수화열에서 자주 쓰이는 재료 물성치와 사용자입력변수 등을 미리 전처리 파일로 만들어 놓고, 반복되는 구조물의 모델링시에 재료관련 물성치만 입력된 파일을 읽어서 작업하면 편리할 것이다.

(2) 입력부분(Input Module)

해석시간, 시간적분방법 등을 결정하는 「해석옵션」부분, 발열량 등의 재료물성치를 결정하는 「Material」부분, 사용자정의 변수를 입력하는 「Curve」부분 과 구조물의 형상과 경계조건, 지점조건 등을 입력하는 「Geometry」부분으로 나뉘어져 있다.

(3) 해석옵션

수화열의 해석에 사용되는 시간간격과 적분종류, 종료시간을 결정한다.

「시간간격」의 경우 그냥 숫자를 입력하여도 되지만 사용자정의 곡선에서 시간에 따라 변하는 값으로 정의하여 사용하여도 된다.

「적분종류」의 경우 전방차분법(forward difference)을 사용할 경우 0, 후방차분법(backward difference)을 사용할 경우 1, 중앙차분법(central difference, Crank-nicolson)을 사용할 경우 0.5 를 사용하게 된다

「종료시간」은 해석 종료시간을 결정한다.

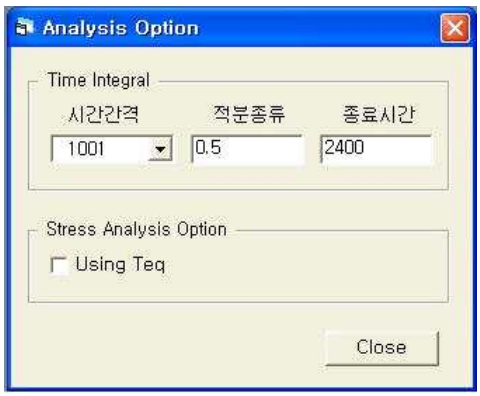


그림 3.10.7 해석옵션 그림

(4) 재료입력

열전도도, 비열, 단위중량, 열팽창계수, 시멘트의 종류, 강도발현모델링의 종류, 28일 압축강도(또는 탄성계수), 포와송비를 결정한다.

수화열 발열모델링과 크리프, 건조수축 등의 모델도 재료입력창에서 입력하게 된다. 창의 하단부분에 발열, 크리프, 건조수축 모델이 요약되어 나타난다.



그림 3.10.8 재료입력의 그림

(5) 사용자정의 곡선입력

시간에 따라 변하는 상수값이 있을 경우 사용자 곡선에서 정의해 준다. 시간과 그 시간에서의 값을 입력해주게 된다. 연속곡선(continuous option)이 선택되면 프로그램 수행시 직선보간하여 값을 사용하게 된다. 그림 3.10.9의 예는 시간적분간격을 입력한 예이다.

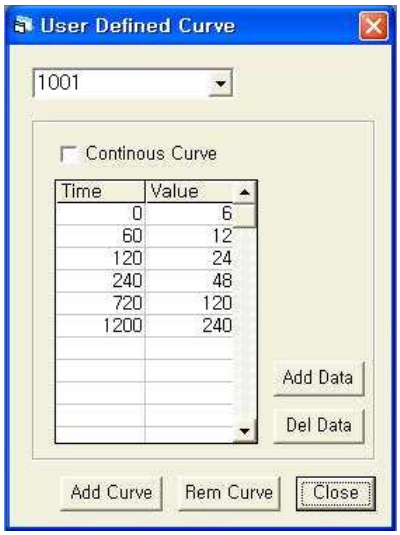


그림 3.10.9 사용자정의 곡선

(6) 형상입력

[Geometry] 버튼을 선택할 경우 그림 3.10.10의 타설 시간 입력창이 나타나게 된다. 본 창에서 분할 타설 정보를 입력하게 되고 입력을 진행할 타설 횟수를 결정한다.

입력할 타설 단계가 결정되면 그림 3.10.11의 창이 나타나게 되며 입력창에서 Point, Block, Sweep, 대류조건, 고정온도조건, 구속조건 등을 입력하게 된다. 구조물 형상의 입력은 Block 단위로 하게 되며 경계조건은 Block의 면 단위로 하게 된다.

8개의 점을 선택해서 하나의 Block을 구성하고 X,Y,Z 방향으로의 분할수를 입력하여 메쉬를 만들게 된다.

4개의 점을 선택해서 한 면을 구성하고 X,Y,Z 방향으로의 이동좌표와 분할수를 입력하여 Block을 구성할 수 도 있다.

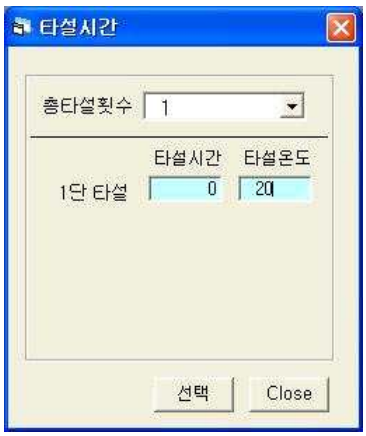


그림 3.10.10 타설시간과 분할 타설정도입력

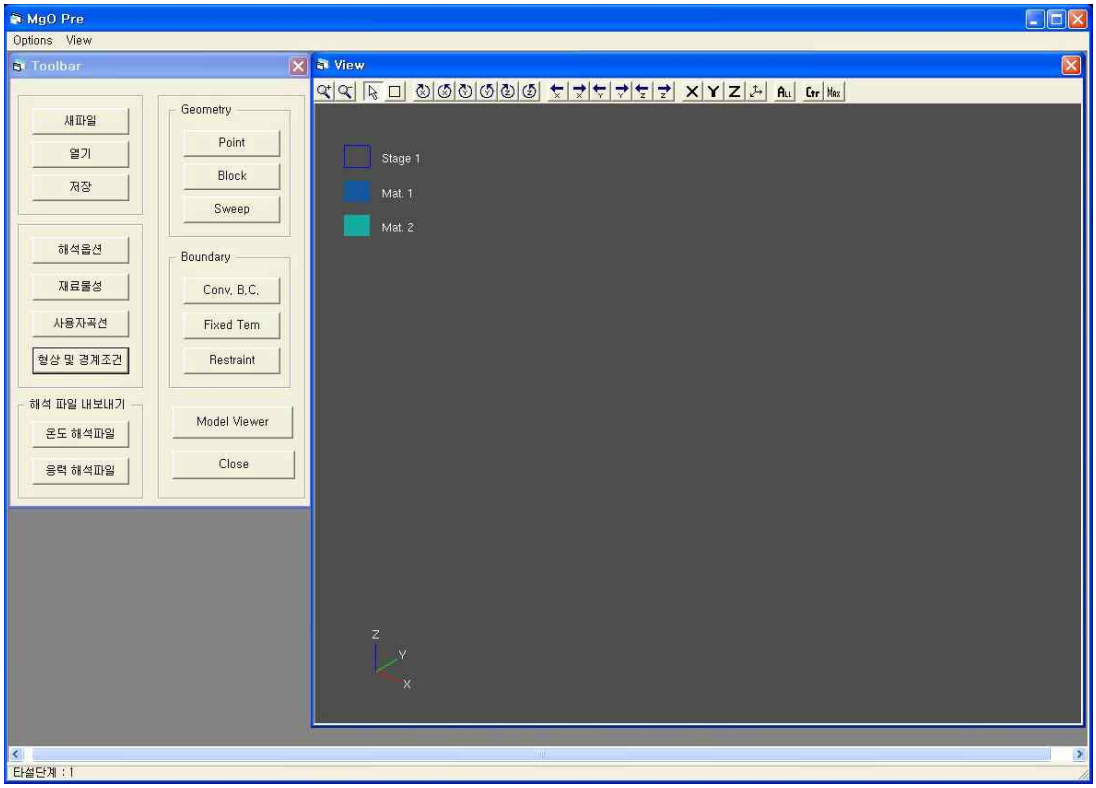


그림 3.10.11 형상입력 그림

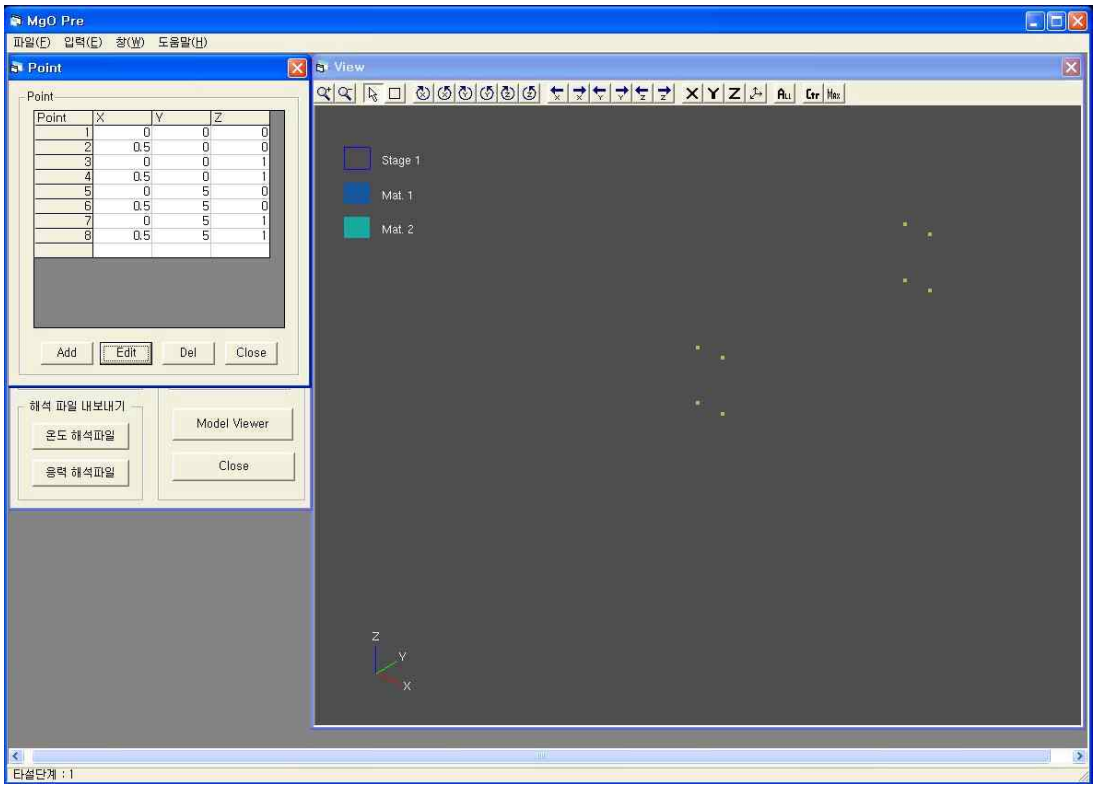


그림 3.10.12 Point의 입력 그림

그림 3.10.12에 점을 입력하는 예를 나타내었다. [Add] 버튼을 선택하면 좌표입력모드로 바뀌면서 좌표를 입력할 수 있다. 삭제[Del] 의 경우 맨뒤에 입력한 점부터 삭제된다.

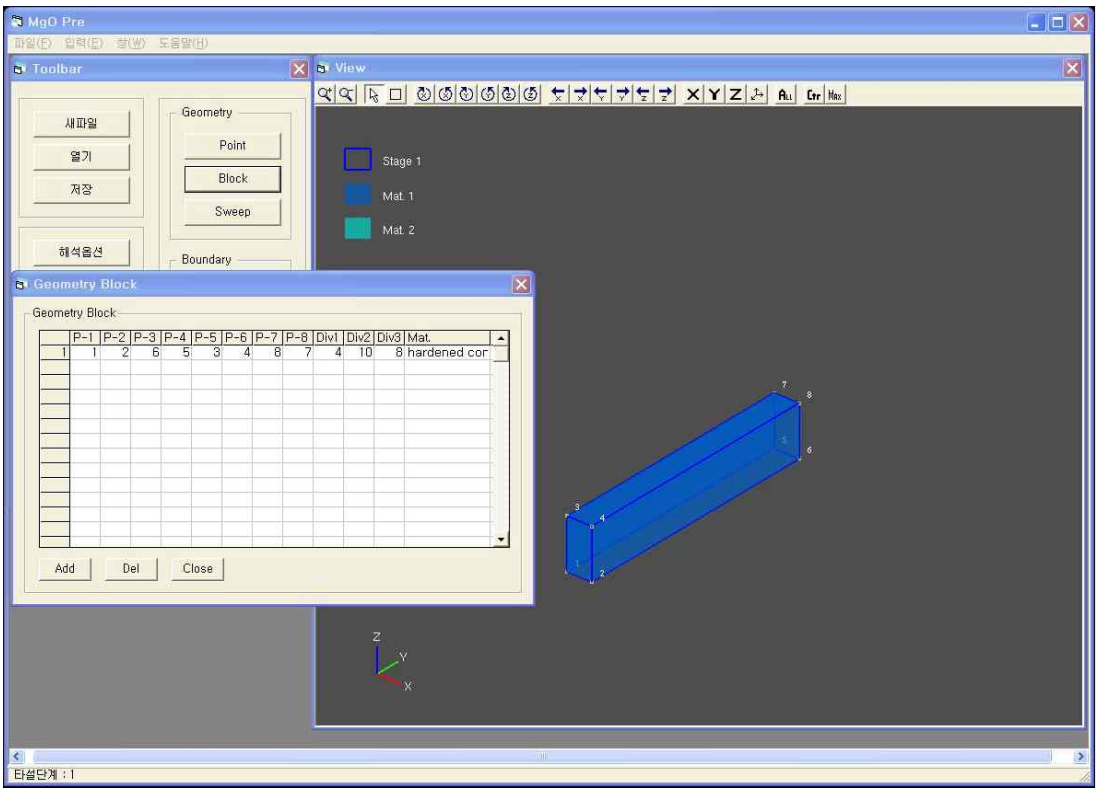


그림 3.10.13 Block의 입력그림

그림 3.10.13에 Block 입력 예를 나타내었다. [Add] 버튼을 선택하면 입력한 점들을 선택하여 Block을 결정하게 된다. 점들의 선택은 마우스를 이용하여 그림을 보면서 선택할 수 있다. 선택 순서는 해석프로그램의 부호법칙(오른손법칙)에 의한다. 삭제[Del] 의 경우 맨 뒤에 입력한 Block부터 삭제된다.

그림 3.10.13의 경우 점1~점8을 선택하였고, 1방향으로 3등분, 2방향으로3등분, 3방향으로 3등분을 하고 Conc 재료를 선택하여 Block을 생성하였다.

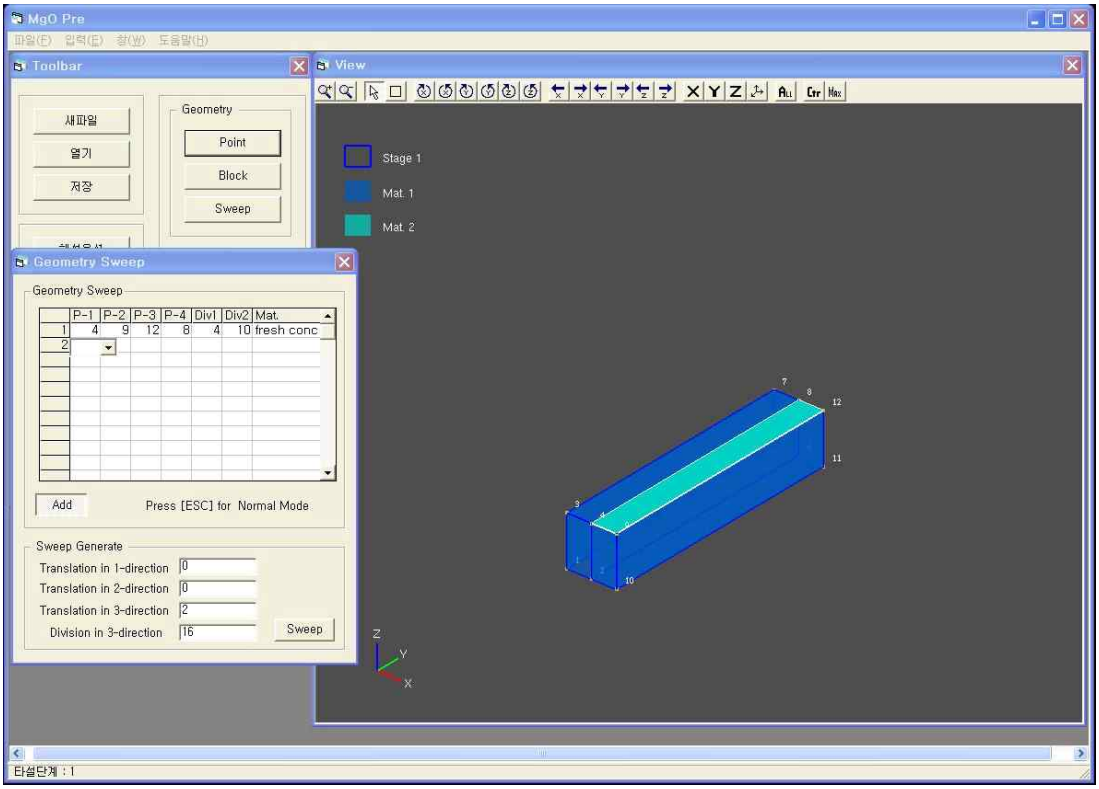


그림 3.10.14 Sweep을 이용한 Block 입력

그림 3.10.14에 Sweep을 이용한 Block 입력 예를 나타내었다. [Add] 버튼을 선택하면 입력한 점들을 선택하여 Sweep을 하게 될 면을 결정하게 된다. 점들의 선택은 마우스를 이용하여 그림을 보면서 선택할 수 있다. 선택 순서는 해석프로그램의 부호법칙(오른손법칙)에 의한다. 삭제[Del] 의 경우 맨 뒤에 입력한 Sweep면부터 삭제된다. 여러 개의 면을 선택하여 동시에 Sweep을 하게 된다. Sweep을 실행할 경우 전처리프로그램내에서 Block으로 변환하여 저장되게 된다. 따라서, Sweep을 수행한 정보는 저장이 되지 않는다.

그림 3.10.14의 경우 점5~점8을 선택하였고, 1방향으로 3등분, 2방향으로 3등분하고 Conc 재료를 선택하여 Sweep면을 정의하였다. 선택된 면을 이용하여 z 방향으로 2만큼 이동하여 Block을 생성하였다. z 방향 분할 수는 3이다.

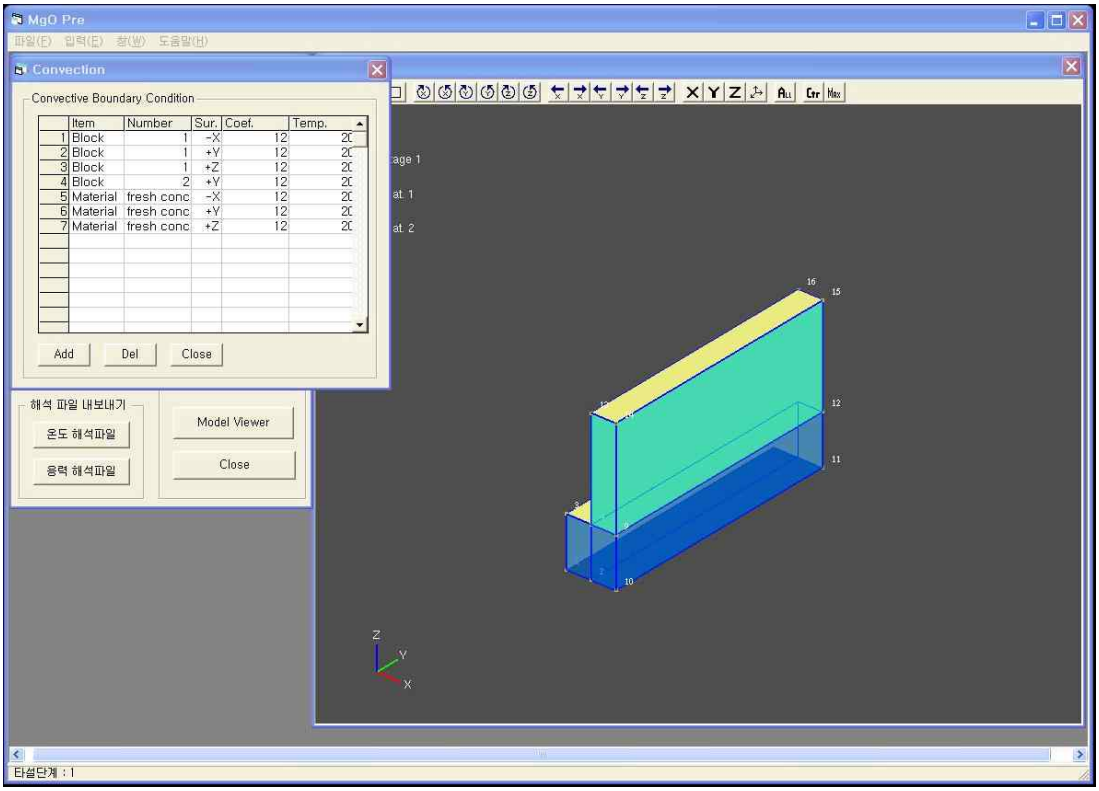


그림 3.10.15 대류경계조건의 입력

그림 3.10.15에 대류경계조건 입력의 예를 나타내었다. 대류경계조건, 고정온도조건, 구속조건의 경우 입력방법이 같다. 입력방법으로 「몇 번 Block의 어느 면」으로 선택하는 방법과 「몇 번 재료를 사용한 Block의 어느 면」으로 선택하는 두 가지 방법이 있다.

외기대류계수와 온도값은 숫자로 직접 입력하여도 되고 적절한 사용자정의곡선을 선택하여도 된다.

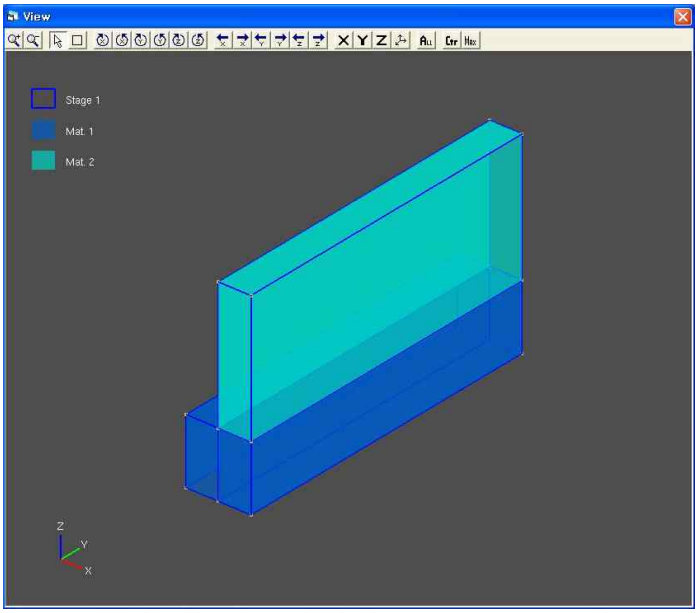


그림 3.10.16 그래픽 창의 예

그래픽 창을 선택하여 메뉴를 조정하면 방향축의 종류와 노드번호의 출력유무를 선택할 수 있다. 또한, 회전과 이동, 축소, 확대 등이 가능하다. 그리고 입력모델을 화면에 맞게 보이게 하는 기능과 x축 방향에서 보기, y축 방향에서 보기, z축 방향에서 보기 등이 가능하다.

나. 후처리 프로그램의 구조

프로그램은 크기 해석된 결과를 입력받는 파일부분과 해석결과를 보여주는 결과부분으로 나뉘어져 있다.

(1) 파일부분

해석된 결과를 입력하는 메뉴와 요약된 결과를 출력하는 부분으로 되어있다.



그림 3.10.17 후처리프로그램의
입력부분



그림 3.10.18 후처리프로그램의 결과부분

(2) 결과부분

입력받은 해석결과를 이용하여 결과요약과 각단계별 최대응력을 출력한다. 각 위치별로 온도, 응력의 이력 그래프를 출력하거나, 각 시간별로 온도, 응력분포를 출력할 수 있다.



그림 3.10.19 결과요약의 예

결과 요약창을 실행시키면 최대온도발생시점과 최대온도가 출력된다.

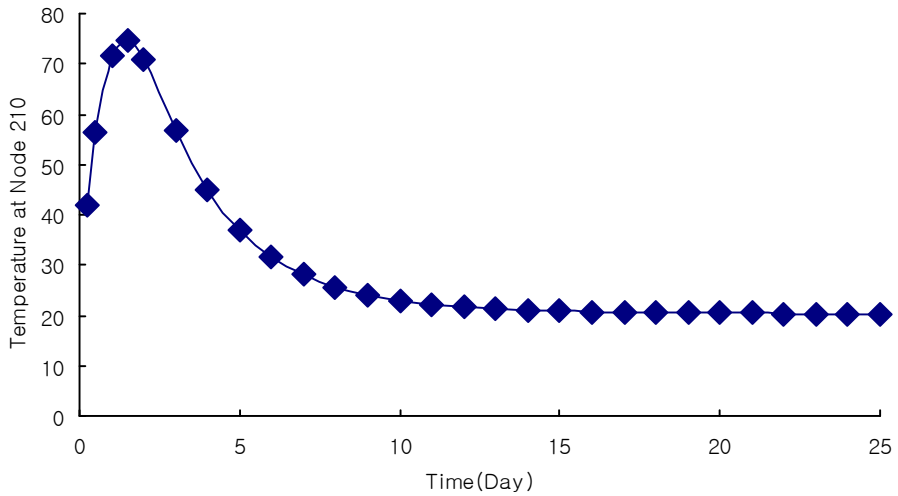


그림 3.10.20 최대온도발생지점의 온도이력의 예

[온도이력]을 선택하면 최대온도발생지점의 온도이력그래프를 출력한다.

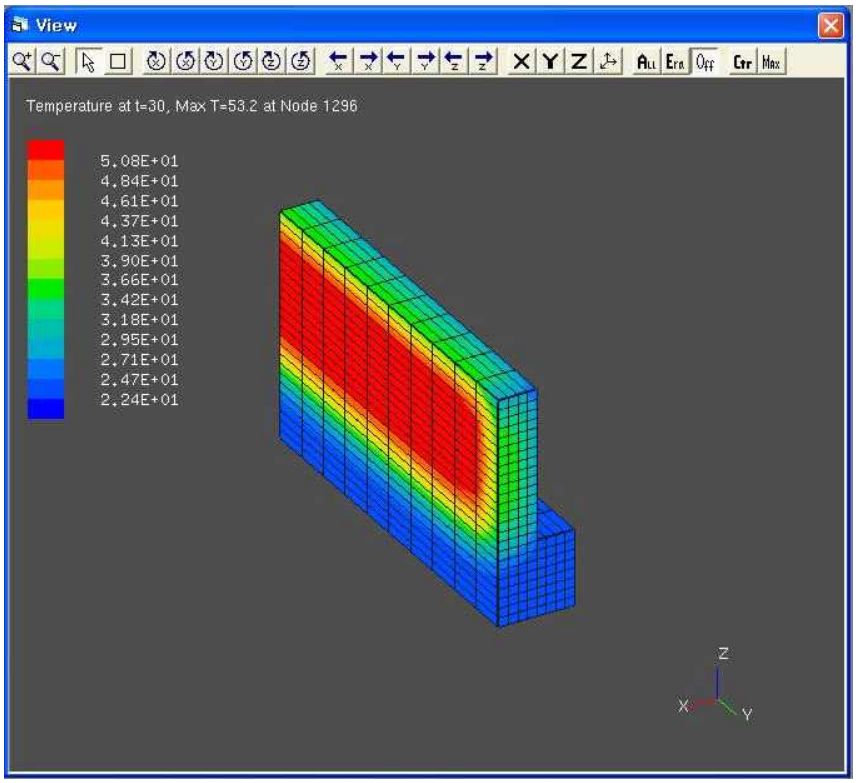


그림 3.10.21 최대온도발생시점의 온도분포의 예

[온도분포]를 선택하면 최대온도발생시점의 구조물의 온도분포를 출력한다.

온도 및 응력분포의 경우 오른쪽마우스단추로 화면내의 요소를 선택하면 선택된 요소가 삭제되어 구조물 내부의 분포를 확인할 수 있다. [All] 단추를 클릭하면 원래대로 모든 요소가 다 보이게 된다.

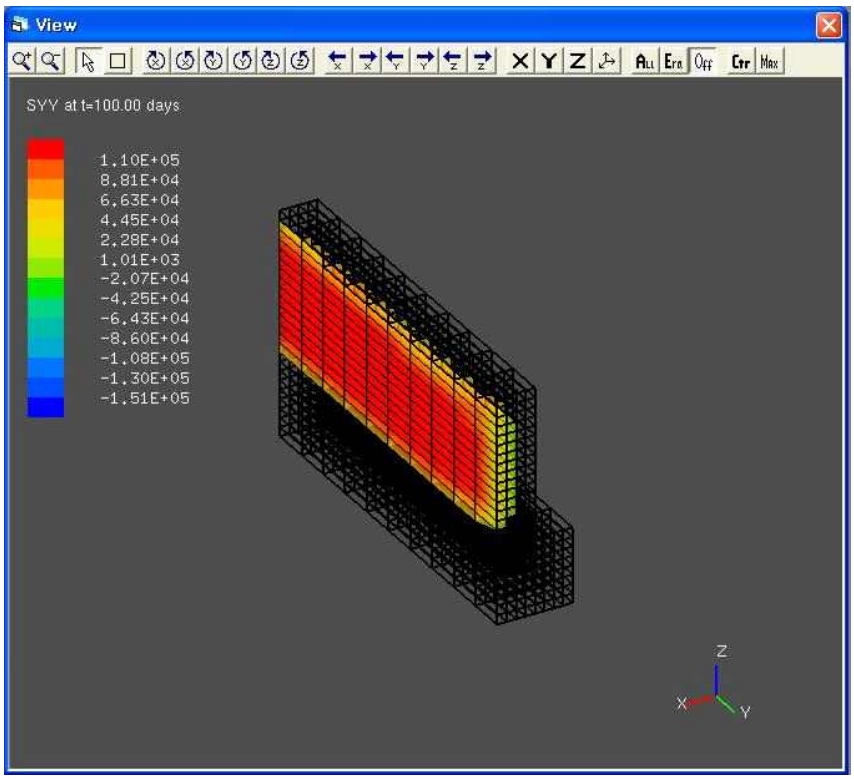


그림 3.10.22 응력결과 분포의 예

응력결과의 경우 최대온도상승시점 부근까지의 결가를 요약한 -타설초기- 부분과 해석종료까지의 결과를 요약한 -타설후기- 부분으로 나뉘어져 있다. 결과를 보고자하는 부분을 선택하여 [응력이력] 또는 [응력분포] 버튼을 선택하면 선택된 결과가 보여진다. 그림 3.10.23의 경우 타설초기 SXX응력의 응력분포를 선택하여 출력하였으며 [Max] 단추를 선택하여 최대값이 발생한 부분만 표시를 하였다. 그림에 의하면 모서리 부분에서 인장응력이 크게 발생하여 균열발생의 위험이 높은 것으로 나타난다.

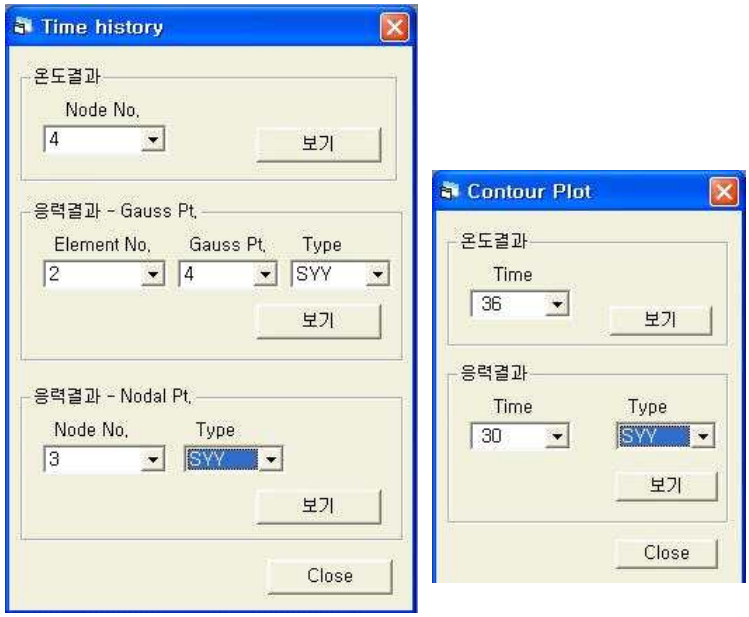


그림 3.10.23 시간이력과 Contour plot 창

그림 3.10.23 에 각 절점의 온도이력 또는 각 가우스 포인트의 온도이력을 출력할 수 있는 「시간이력」창과 임의의 시점에서의 온도분포 또는 응력분포를 출력할 수 있는 「Contour Plot」창을 나타내었다.

다. 프로그램의 특징

(1) 전처리 프로그램

- 입력부분(INPUT MODUEL)

프로그램의 입력부분에서는 문제정의를 위한 변수들과 열적특성, 경계조건 등을 읽어들인다.

해석모델의 형상입력부분에서는 입력자료준비 편리성을 위하여 선형(linear) 및 평면(surface) 절점 자동생성 기능을 부여하였다. 해석모델의 형상이 비교적 단순한 경우에는 유한요소 모델링기법중 등매개변수(isoparameteric)개념을 적용한 3차원 절점및 요소의 자동생성기능(automatic mesh generation)을 이용하여 입력자료 준비를 손쉽게 할 수 있도록 하였다.

- 내부발열량 모델링

프로그램의 온도해석부분에서는 콘크리트의 수화과정을 모델링하기 위하여 등가재령에 따른 수화도에 따른 발열모델과 지수함수형태의 발열모델을 사용할 수 있다.

- 시공단계별 온도해석

대류경계조건은 대류면에 접하는 외기의 온도가 일정한 경우, 변하는 경우에 대하여 고려할 수 있도록 하였다. 또한 경계면이 시간에 따라 변하는 경우도 해석시간이 경과함에 따라 경계면을 새로이 정의 할 수 있도록 하였다. 외기의 온도변화 곡선은 사용자 정의에 의해서 시간에 따라 입력할 수 있게 하였다. 또한, 시공단계에 따른 분할타설의 해석도 가능하다.

- 수치해석방법

온도해석의 해를 얻기 위한 수치해법으로는 구조물 전체 강성행렬(stiffness matrix)의 최적화 과정을 통한 Band Matrix Solver를 사용하였다. 본 해석프로그램을 이용하여 열특성(열전도도, 비열, 대류계수 등)이 온도에 관계없이 일정한 선형재료의 해석이 가능하다.

- 프로그램의 부호규약

프로그램에서 사용된 좌표계는 오른손 직교좌표계이다. 요소의 절점은 다음 그림 3.10.24와 같은 순서로 정의 된다. 요소의 자동생성을 위한 블럭의 정의도 아래 그림의 요소절점의 정의를 따른다.

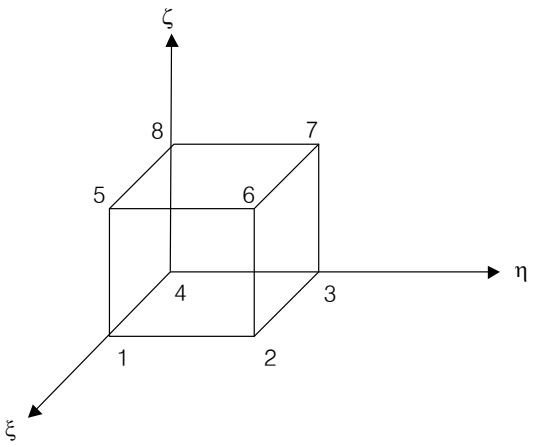


그림 3.10.24 요소 절점번호

대류경계조건을 설정하기 위한 면의 정의는 다음 그림 3.10.25과 같이 정의된다.

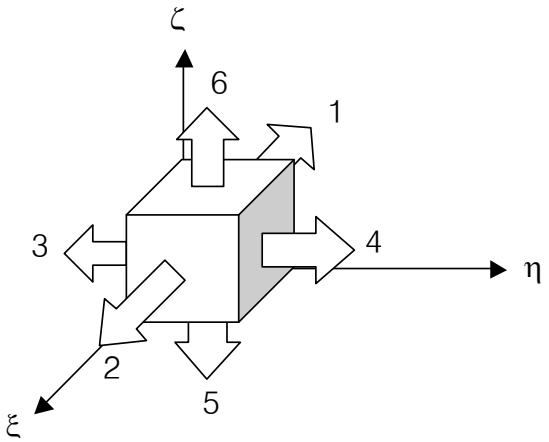


그림 3.10.25 유한요소 모델에서 면의 정의

표 3.10.6 유한요소 모델에서의 면, 요소절점 번호 및 좌표

면번호	요소절점번호	좌표
1	1-4-8-5	ξ=-1.0
2	2-3-7-6	ξ= 1.0
3	1-2-6-5	η=-1.0
4	4-3-7-8	η= 1.0
5	1-2-3-4	ζ=-1.0
6	5-6-7-8	ζ= 1.0

(2) 후처리 프로그램의 특징

- 입력부분(INPUT MODULE)

프로그램의 입력부분에서는 문제정의를 위한 변수들과 역학적 특성, 경계조건 등을 읽어들인다. 열응력을 계산하기 위하여 온도해석을 먼저 수행하여 해석 모델의 형상 데이타와 온도 데이타를 먼저 준비한 후 해석을 수행한다.

- 콘크리트의 역학적 특성

콘크리트의 수화진행에 따른 강도증진현상을 고려하기 위하여 등가재령의 개념을 사용할 수 있다. 등가재령은 기준온도 20℃로 양생된 콘크리트와 동일한 수화정도(degree of hydration)를 얻는데 소요되는 시간으로, 각 콘크리트 단면의 위치별 등가재령을 식으로 계산하여 수화정도를 평가한다.

강도발현 예측식은 KCI/ACI모델과 CEB-FIP 모델을 적용할 수 있다. 각 모델은 시멘트의 종류에 따른 강도발현속도를 감안하여 콘크리트의 강도를 산정하도록 하였으며 이 강도로부터 탄성계수를 추정하였다.

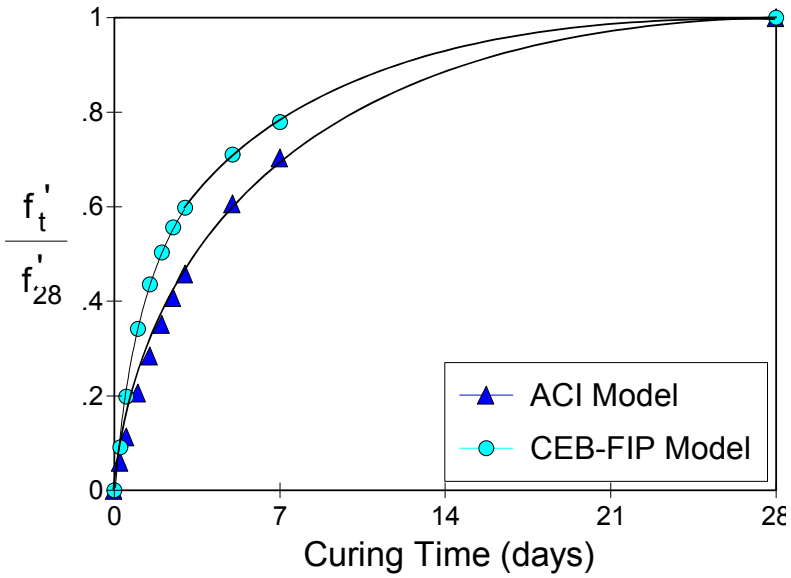


그림 3.10.26 ACI 및 CEB-FIP 모델의 강도 발현 양상

콘크리트의 크리프 및 건조수축 변형도는 온도 변형도와 마찬가지로 초기변형도로 고려하여 계산된다. 이 중 크리프 변형도는 직접적으로 구하기 위하여 각 시간단계의 응력이력을 모두 기억하여야만 하므로 기억용량 및 연산과정이 방대해지는 문제점을 안고 있다. 이러한 수치적 문제를 해결하기 위하여 크리프 컴플이언스를 Dirichlet series의 kernel로 근사화하여 전체 응력이력을 저장하지 않고 전단계의 응력증분$\Delta\sigma_{n-1}$ 과 계수 $A_{i,n-1}$만을 기억함으로써 각 시간단계의 크리프변형도 증분을 구하였다. 또한, 콘크리트 표준시방서의 간편식을 사용할 수 있다.

- 시공단계별 온도해석

시공단계별로 구조물의 형상이 변하는 분할타설의 경우 온도해석결과에서 형상데이타를 넘겨받는다. 지점조건의 경우 각 단계별로 변화하는 조건을 정의하여 준다.

- 수치해석방법

온도해석의 해를 얻기 위한 수치해법으로는 구조물 전체 강성행렬(stiffness matrix)의 최적화 과정을 통한 Band Matrix Solver를 사용하였다.

- 프로그램의 부호규약

프로그램에서 사용된 좌표계는 오른손 직교좌표계로써 온도해석 프로그램과 동일하다.

4. 팽창량 예측 모델

MgO 콘크리트의 팽창은 MgO의 수화반응으로 MgO 분자의 체적이 증가하면서 발생하므로 그 팽창특성은 화학반응의 일반적인 법칙에 부합하게 된다. 즉 화학반응은 온도가 높을수록 반응속도가 더 빠르고 팽창증가량이 더 크며 동시에 팽창속도와 반응에 참여한 MgO의 함량(액체상태 화학반응중의 농도)은 정비례관계에 있다.

따라서 MgO 콘크리트의 팽창은 하나의 화학반응의 과정이며 화학반응의 일반법칙을 따르게 되어 MgO 반응속도는 온도와 농도의 함수이다. 온도가 반응속도에 미치는 영향을 표현하는 방법 중 Arrhenius방정식은 가장 광범하게 사용되는 방정식이다.

물질의 화학반응은 온도와 농도가 반응속도에 영향을 주는 주요요인이다. τ시각의 팽창속도$d\epsilon(\tau)/d\tau$은 그 시간의 잔여팽창량(농도)과 온도의 함수라고 가정하고 이를 표현하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d\epsilon(\tau)}{d\tau} = \alpha\epsilon_o(1-\frac{\epsilon(\tau)}{\epsilon_0})^{\beta} e^{-\frac{\gamma}{T+273}}$$

여기서, $\epsilon_o(1-\frac{\epsilon(\tau)}{\epsilon_0})$은 MgO의 팽창잔여량이고 화학반응방정식중의 농도에 해당하며, $e^{-\frac{\gamma}{T+273}}$는 온도가 반응속도에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

기존의 실험 자료의 분석으로부터 온도가 농도작용에 영향 주는 인자인 반응계수 β는 온도와 밀접한 관계가 있다는 사실을 알 수 있다. β가 온도 T의 함수라고 가정하면 윗 식은 아래와 같이 수정된다.

$$\frac{d\epsilon(\tau)}{d\tau} = \alpha\epsilon_o(1-\frac{\epsilon(\tau)}{\epsilon_0})^{(\beta_1+\beta_2 T+\beta_3 T^2)} e^{-\frac{\gamma}{T+273}}$$

윗 식은 일반 화학반응의 반응속도를 표현하고 있는 MgO 팽창의 동역학모델이다. 윗 식은 하나의 증분형 모델로서 일반문제에 대해 해석해를 구하기 힘들며 임의의 시간의 팽창량은 아래식과 같이 순차적인 증분형태로 구할 수 있다.

$$\epsilon_g{}^0 = 0$$

$$\epsilon_g{}^n = \epsilon_g{}^{n-1} + \Delta\epsilon_g{}^n$$

$$\Delta\epsilon_g{}^n = \alpha\epsilon_o(1-\frac{\epsilon_g{}^{n-1}}{\epsilon_0})^{(\beta_1+\beta_2 T+\beta_3 T^2)}\, e^{-\frac{\gamma}{T+273}}\Delta\tau$$

반응계수 β는 온도에 대한 대수함수형태로 표현되어 있고, 이를 지수함수 형식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{d\epsilon(\tau)}{d\tau} = \alpha\epsilon_o(1-\frac{\epsilon(\tau)}{\epsilon_0})^{\beta_1 e^{\beta_2 T}}\, e^{-\frac{\gamma}{T+273}}$$

동력학 모델은 화학반응의 일반법칙으로부터 팽창속도과 농도(팽창잔량)및 온도의 관계를 수립하여 모델을 구성하였다. 이는 등온조건에서 실험한 결과를 회귀분석하여 식의 계수를 구하게 된다. 표 3.10.7은 각기 다른 양생온도에서의 MgO 콘크리트의 팽창량을 측정한 실험결과를 보여주고 있다. 이를 동력학모델의 재료상수값을 회귀분석으로 얻은 것이 표 3.10.8과 같다.

표 3.10.7 양생온도에 따른 MgO 콘크리트의 팽창량(단위: με) - 중국

T \ τ	3days	7days	30days	93days	180days	389days	730days	1107days
20℃	8	10.3	23.2	52	78	110	136	150
30℃	12.5	22.5	42.5	88.5	120	148	169	181
40℃	28.3	42.3	100	145.1	168.5	190.5	202.1	208
50℃	47.5	77.5	143.7	182.8	203.8	220.4	224	224.3

표 3.10.8 동역학모델의 재료상수 - 중국

ϵ_0	α	β_1	β_2	β_3	γ
225	5.85×10^9	3.3057	0.009393	-0.00073214	8200

동역학모델과 다른 연구자들의 모델은 기본가정과 팽창량에 대한 영향인자는 유사하고, 온도에 따른 팽창량도 유사하다. 그러나 수치해석을 위한 프로그램은 기본적으로 수화열에 의한 온도해석 및 응력해석이 동반되어야 하고, 이 때 프로그램의 수학적 정식화 과정이 증분형태로 이루어져 있으므로 동력학 모델이 가장 유용한 모델이라고 생각된다. 또한 기존모델은 단지 실험결과를 회귀분석하고 있지만 동

역학모델은 화학반응 원리에 입각한 모델인 강점을 가지고 있다. 따라서 해석 프로그램에서 MgO 팽창모델은 동력학 모델이 적용되었다.

5. 신뢰성 검증

가. 개요

본 연구의 해석프로그램은 매스콘크리트의 수화열에 의한 온도응력 뿐 만 아니라 MgO 콘크리트의 팽창에 의한 응력을 계산할 수 있도록 구성되었다. 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 양생온도가 변화할 때 MgO 콘크리트의 팽창량이 동력학 모델에서 계산되는 결과와 유사함을 분석하였다. 또한 수계산을 통한 프로그램의 검증을 위하여 온도조건을 등온으로 가정하게 되면 온도응력은 발생하지 않고, 팽창에 의한 압축응력만 유발되게 되어 팽창에 의한 응력만을 검증할 수 있다. 이 때 역학적 경계조건은 계산의 편의를 위하여 양단 고정되어 구속도가 100%인 경우를 가정하였다.

표 3.10.9 콘크리트 재료특성 및 해석조건

해석조건 및 재료특성	입 력 값
해석부위	양단 구속 구조물
타설시 외기온도 (℃)	20
타설시 콘크리트온도 (℃)	20
타설길이 (m)	10
콘크리트 설계기준강도 (MPa), f_{ck}(28일)	27
콘크리트 탄성계수 (MPa), E_c(28일)	24,600
콘크리트 인장강도 (MPa), f_{sp}(28일)	2.4
포아송비	0.18
시멘트 종류	1종시멘트
단열온도상승량, Q_∞(℃), 반응속도계수, r	Q_∞=55.9 r=1.4460

해석조건 및 재료특성		입 력 값
콘크리트 열적특성	밀도 (kg/m^3)	2,500
	열전도율 (kcal/mh℃)	2.3
	비열 (kcal/kg℃)	0.25
	열팽창계수 (/℃)	10×10^{-6}
	대류계수-외기 (kcal/m^{2}h℃)	12
	대류계수- 철제거푸집 (kcal/m^{2}h℃)	12

나. 양생온도 변화에 따른 팽창량 검증

자기팽창 예측모델이 프로그램에 적절히 탑재되었는가에 대한 검증을 위하여 동역학모델을 회귀분석한 실험과 마찬가지로 양생온도를 T=20, 30, 40, 50℃일 경우의 자기 팽창량 실험결과와 계산결과를 비교하였다. 양생온도가 증가할수록 자기팽창량의 크기는 증가하였으며, 동력학모델을 적용한 프로그램 결과와 실험 결과는 동일하였다. 본 해석에 사용된 동력학모델의 재료상수(표 3.10.8)는 중국에서 실시된 시험결과(표 3.10.7)를 기반으로 회귀분석하여 해석프로그램에 적용하였으며, 국내수행 실험결과를 확보하여 재료 상수값을 회귀분석을 통해 구하고 동일한 모델을 적용할 수 있다.

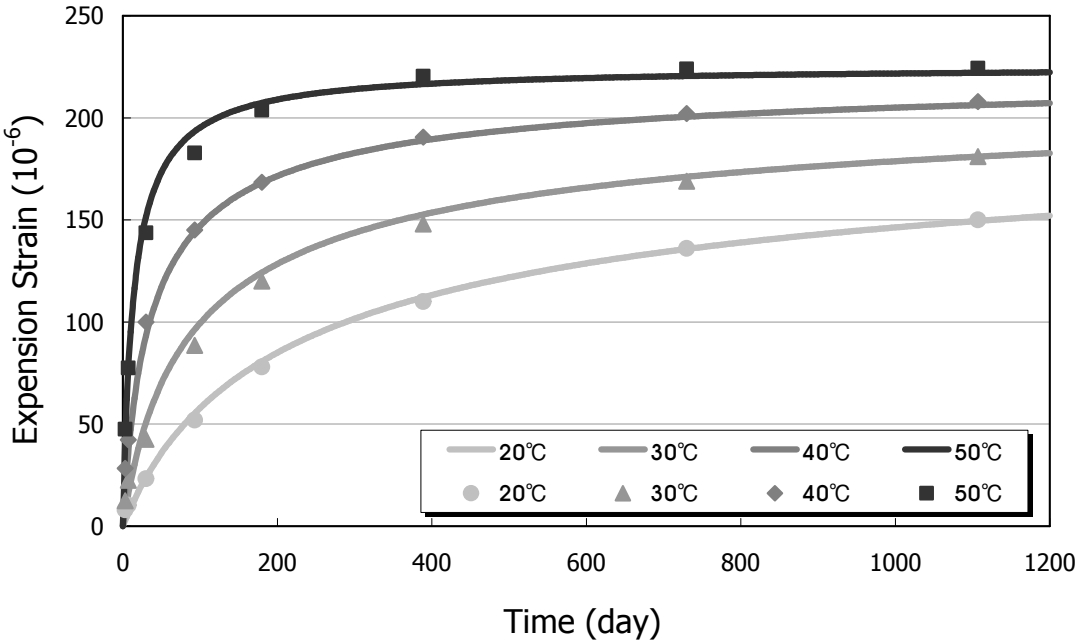


그림 3.10.27 등온조건에서 MgO 콘크리트의 팽창량

온도조건이 변화할 때 팽창량의 변화를 분석하기 위하여 그림 3.10.28과 같이 양생온도를 20℃~40℃~20℃~40℃로 변화하여 자기팽창량을 프로그램을 통하여 계산하였다. 그림 3.9.28과 같이 첫 번째 사이클에서 온도가 20℃에서 40℃로 상승하면 팽창속도가 빨라지고, 온도가 40℃에서 20℃로 하강하여도 팽창량은 여전히 증가하지만 단지 팽창속도만 다소 감소하였고, 팽창량은 단조증가하였다. 또한 두 번째 사이클에서 온도가 20℃에서 40℃로 재상승하면 팽창속도는 다시 증가하는 경향을 보인다. 이는 기존 변온조건에서 수행한 자기팽창결과와 부합할 뿐 만 아니라 자기팽창 계산의 기본 가정과도 일치하는 결과를 보이고 있다.

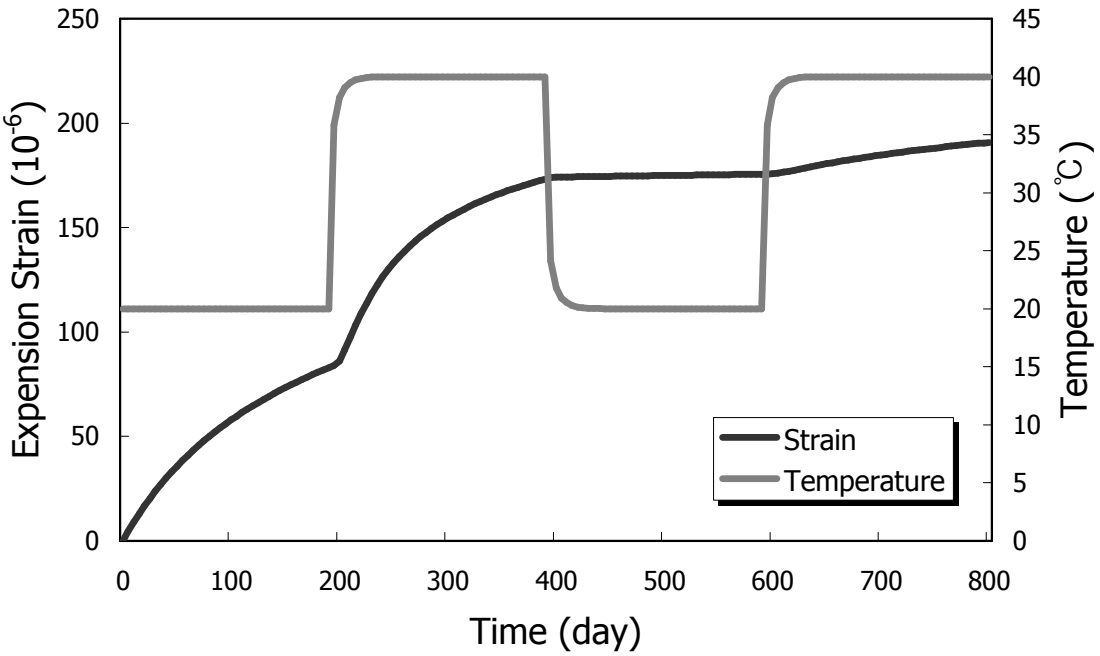


그림 3.10.28 온도가 변화할 때 MgO 콘크리트의 팽창량

다. 수계산을 통한 응력해석 프로그램 검증

팽창에 의한 응력계산이 합리적인지에 대하여 검토하기 위하여, 응력프로그램의 검증은 수계산이 가능하도록 가정을 단순화하여 수계산한 결과와 비교하여 수행하였다. 이 때 온도조건을 등온($T=40℃$)으로 가정하게 되면, 그림 3.10.29와 같이 온도변형은 발생하지 않고 팽창 변형만 발생하게 된다. 등온조건으로 가정하였으므로 팽창량은 그림 3.10.28에서 $T=40℃$인 경우와 동일하게 되고 약 1000일이 경과한 후 팽창변형률이 200με 발생한다. 초기변형률성분이 팽창만 존재하며 이에 따른 압축응력만 유발되게 되어 팽창에 의한 응력만을 검증할 수 있고, 이 때 역학적 경계조건은 계산의 편의를 위하여 양단 고정되어 구속도가 100%인 경우를 가정하였다.

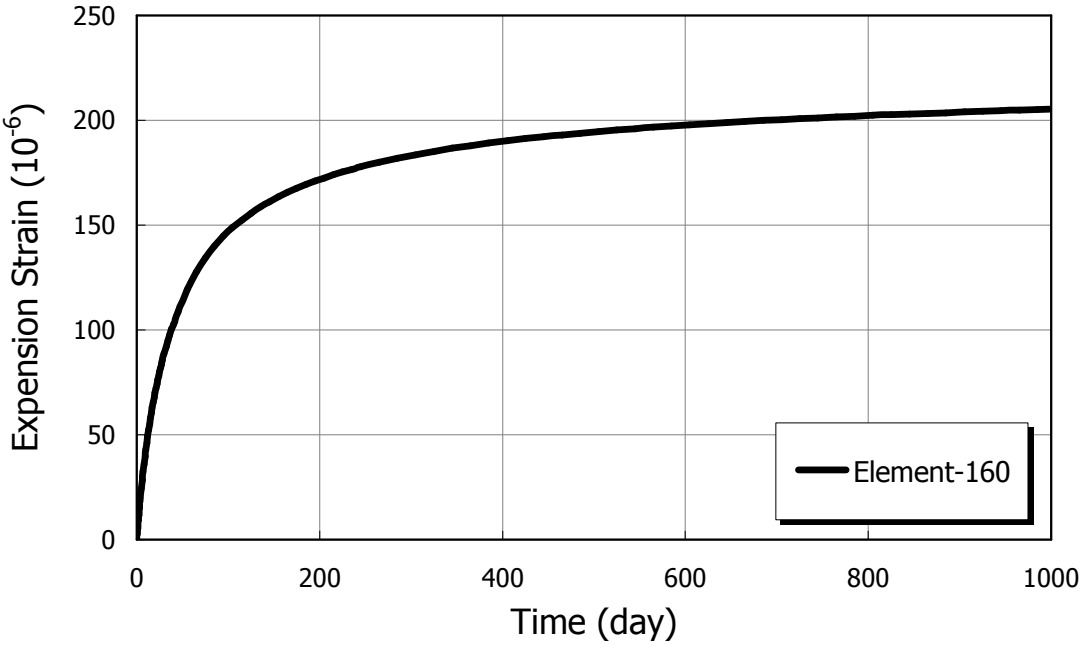


그림 3.10.29 등온조건(T=40℃)에서 콘크리트의 팽창량

수계산에 의한 계산과정은 그림 3.10.30의 자기팽창변형률(ϵ_g)은 다음의 관계에 있다.

$$\epsilon_g{}^0 = 0$$

$$\epsilon_g{}^n = \epsilon_g{}^{n-1} + \Delta\epsilon_g{}^n$$

$$\Delta\epsilon_g{}^n = \alpha\epsilon_o(1-\frac{\epsilon_g{}^{n-1}}{\epsilon_0})^{(\beta_1+\beta_2 T+\beta_3 T^2)}\, e^{-\frac{\gamma}{T+273}}\,\Delta\tau$$

또한 수계산에 의한 응력은 일반화된 구성방정식에서 완전구속인 경계조건으로 인하여 전체 변형률(ϵ)과 각 시간단계의 증분값($\Delta\epsilon$)은 모두 "0"이 된다. 이러한 수계산하는 과정을 표현하면 다음과 같다.

$$\sigma^n = \sigma^{n-1} + \Delta\sigma^n$$

$$\Delta\sigma^n = E(t)(\Delta\epsilon^n - \Delta\epsilon_g^n) = E(t)(0-\Delta\epsilon_g^n) = -E(t)\Delta\epsilon_g^n$$

그림 3.10.30은 프로그램으로 계산된 응력과 상기의 방법으로 수계산한 응력 계산결과를 비교한 것으로 2가지 결과가 완전하게 동일한 결과를 얻을 수 있다. 따라서 MgO 콘크리트의 자기팽창량과 이에 따른 응력 계산 프로그램은 합리적으로 구

성되었다는 것을 알 수 있다.

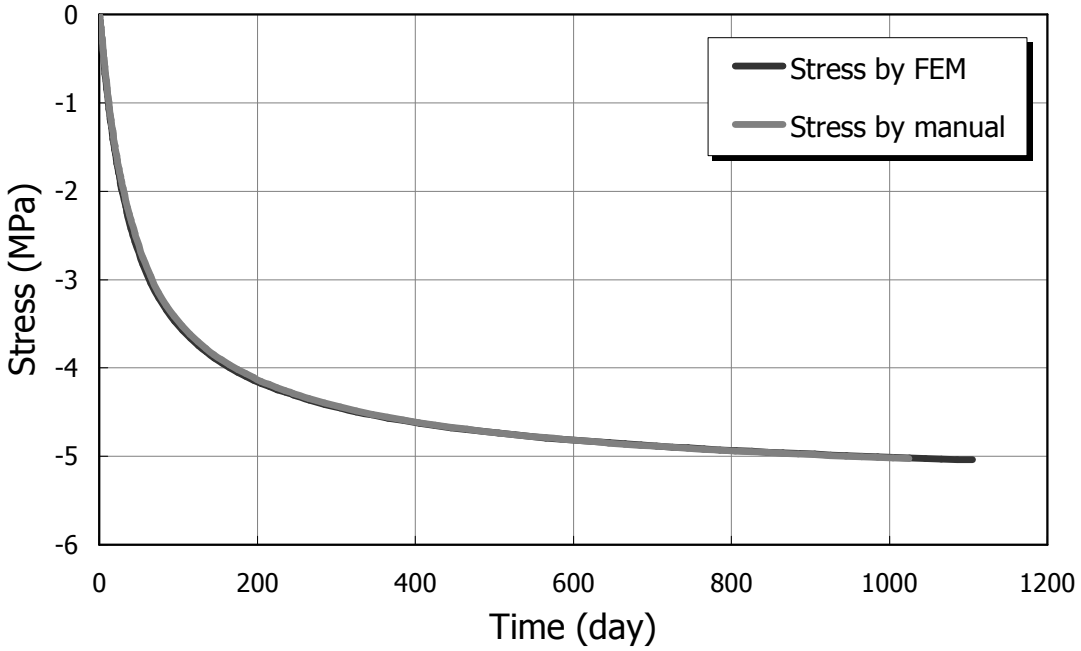


그림 3.10.30 등온조건(T=40℃)에서 MgO 콘크리트의 팽창에 의한 압축응력 검증

6. 시험시공구역 해석 및 계측값 비교

가. 본댐

개발된 MgO 해석 프로그램을 이용하여 본댐 시험시공구역의 MgO의 장기팽창 특성 및 구조물에 미치는 영향을 중심(P1), 중심하부(P2)를 대상으로 해석 및 계측값과 비교하였다. 여기서 변형률의 팽창 및 수축은 +, -값으로 표현되며, 또한 응력의 인장 및 압축은 +, -값 이다.

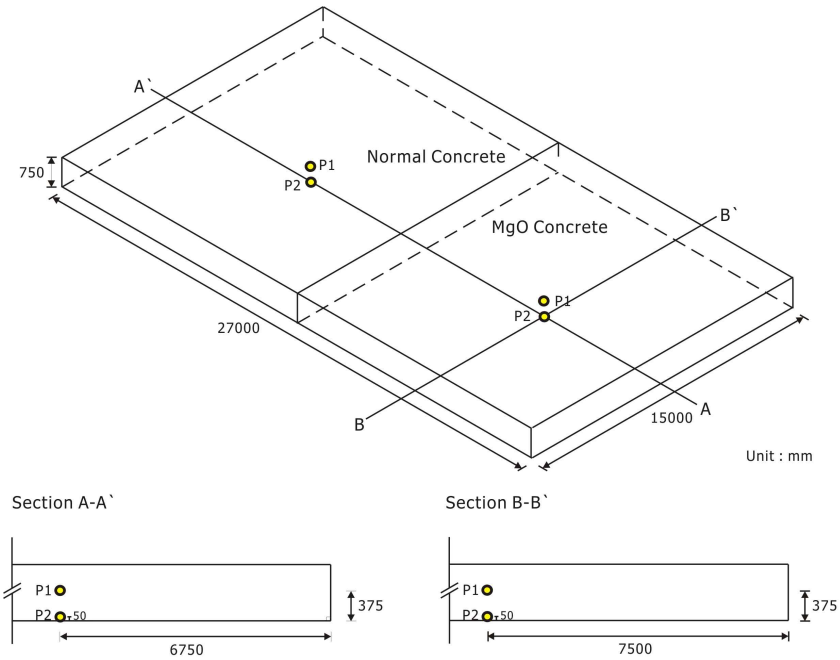


그림 3.10.31 본댐 시험시공구역 검토위치

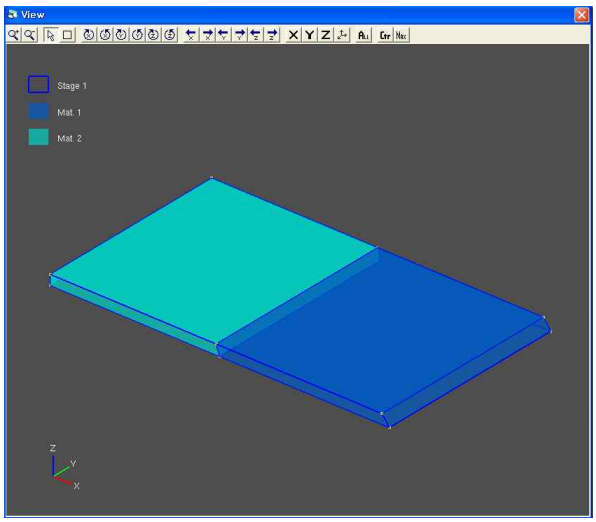


그림 3.10.32 본댐 해석 모델링

본댐우안의 시험시공구역과 동일크기로 모델링(그림 3.10.32) 하였으며, 해석에 요구되는 역학적 특성은 설계기준압축강도를 기준으로 콘크리트표준시방서(2009)를 기반으로 입력하였고, 열적특성은 MgO와 Fly ash가 혼입된 콘크리트의 실내시험중 결합재량이 본댐 우안과 유사한 배합(표 3.10.11)을 선정하여 적용하였다. 외기온도는 현장에서 근접한 지역의 기상청 자료를 활용하였다(그림 3.10.33).

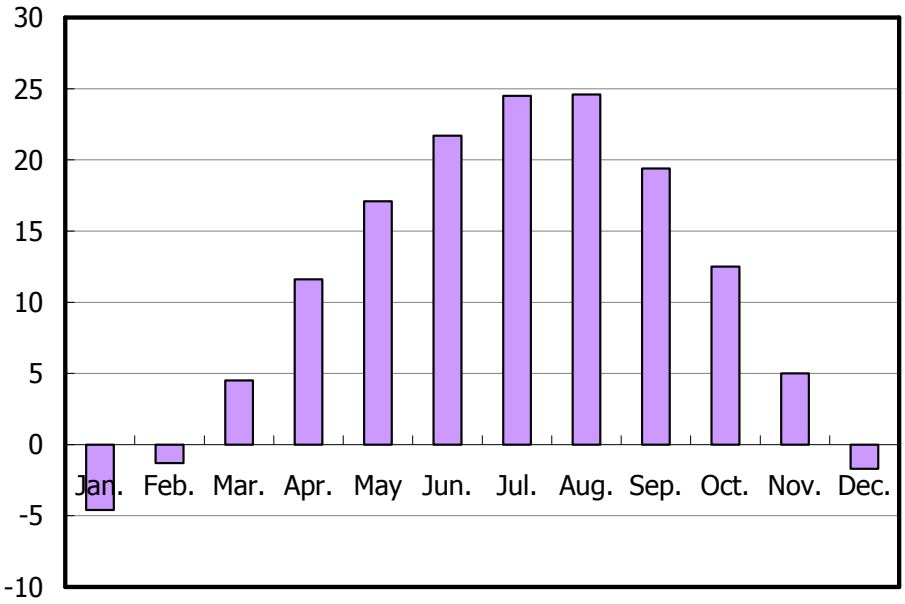


그림 3.10.33 해석 외기온도 (춘천)

표 3.10.10 재료특성 및 해석조건

해석조건 및 재료특성	입력값	
타설시 외기온도	20℃	
타설시 콘크리트 온도	20℃	
콘크리트 설계기준강도	18 MPa	
콘크리트 28일 탄성계수	19940 MPa	
포아송비	0.18	
단열온도상승량, Q∞	MgO concrete	37.8℃
	Normal concrete	35.1℃
반응속도계수, r	MgO concrete	0.745
	Normal concrete	0.735

표 3.10.11 MgO 콘크리트 배합비 - 국내실험(12 MPa) 및 본댐

	G_{max}	W/B (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m^3)					
				65	C	FA	MgO	S	G
12MPa 국내실험	40	65	52	175	201.9	53.8	12.7	949.6	920.4
18MPa 본댐	25	56.5	49.5	176	212	90	9	900	920

본댐 해석에 사용된 팽창량 동역학 모델의 재료상수는 국내에서 실험한 12 MPa의 재료상수를 반영하였고, 시험구역에서는 18 MPa의 콘크리트를 사용하였다. 12 MPa의 MgO 함유량은 5%(12.7 kg/m^3)이며 18 MPa의 MgO 함유량은 3%(9 kg/m^3)으로 3.7 kg/m^{3}의 차이가 있으며, 동일한 온도이력에서 강도 및 MgO함유량의 차이가 상이한 팽창이력을 유발할 수 있다. 하지만 MgO 함유량의 차이가 미소하며 현재 국내에서 보유하고 있는 시험구역배합에 근접한 12 MPa의 재료상수가 본댐의 팽창량을 예측하는데 유효할 것으로 판단된다.

표 3.10.12은 MgO가 함유된 12 MPa 콘크리트의 팽창량의 국내 실험값이며, 그 값을 이용하여 표 3.10.14와 같이 재료상수를 회귀분석하였다. 재료상수의 검증을 위해 프로그램을 사용하여 20, 40℃등온온도 상태의 팽창량을 해석하였고 그림 3.10.34와 같이 실험값과 유사하게 유추함을 알 수 있다.

표 3.10.12 양생온도에 따른 MgO 콘크리트의 팽창량(단위: με) - 12 MPa

T \ τ	3days	7days	28days	56days	90days	180days	360days
20℃	0	0	3	16	35	50	65
40℃	21	30	90	125	145	165	170

표 3.10.13 동역학모델의 재료상수 - 12MPa

ϵ_0	α	β_1	β_2	β_3	γ
175	5.33×10^9	13.8835	-0.509566	0.004718	8200

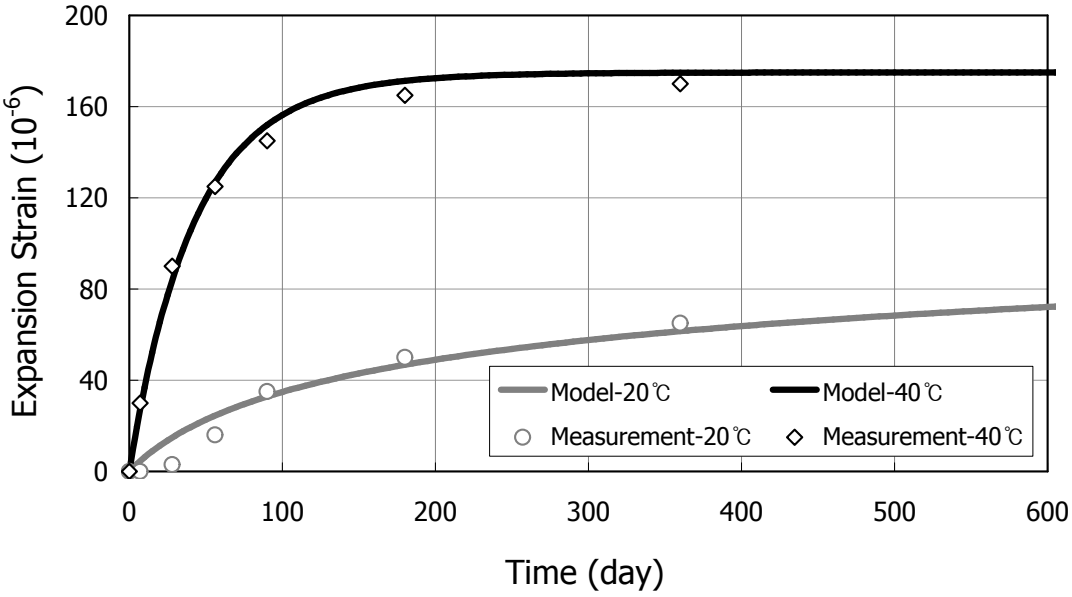


그림 3.10.34 등온조건에서 MgO 콘크리트의 팽창량 - 12 MPa

온도해석결과(표 3.10.14) MgO concrete의 중심부(P1)의 계측과 해석값이 동일하며, Normal concrete의 온도차는 1.7℃이다. 중심하부(P2)의 온도차는 다소 큰 6.9℃, 13℃로 실제현장과 모델링의 대류경계조건의 차이에 인한 것으로 생각된다. 해석결과 전반적으로 온도이력곡선을 잘 유추하며(그림 3.10.35, 그림 3.10.36), 재료와 구조물 형상 등 기본자료를 이용하여 시공전 구조물 내외부의 온도분포를 개발된 MgO 프로그램을 이용하여 예측할 수 있을 것이라 판단된다.

표 3.10.14 해석 및 계측 온도비교

		측정		해석	
		최대온도	시간	최대온도	시간
MgO concrete	P1	40.3℃	1.19day	40.3℃	2.25day
	P4	37.0℃	1.19day	43.9℃	2.25day
Normal concrete	P1	40.3℃	1.23day	42.0℃	2.25day
	P4	32.9℃	1.19day	45.9℃	2.25day

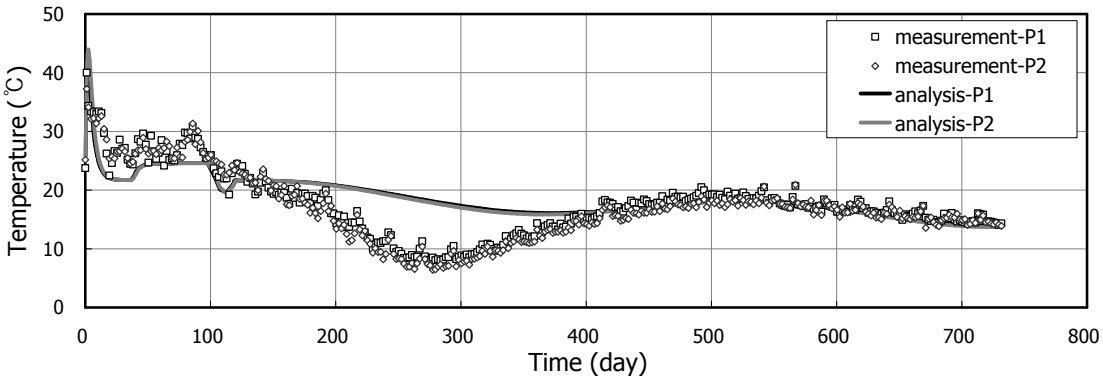


그림 3.10.35 MgO concrete 온도이력곡선

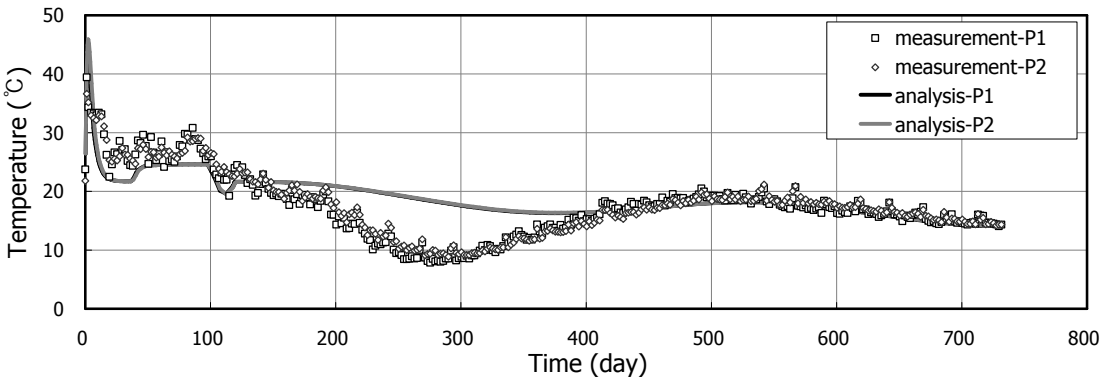


그림 3.10.36 Normal concrete 온도이력곡선

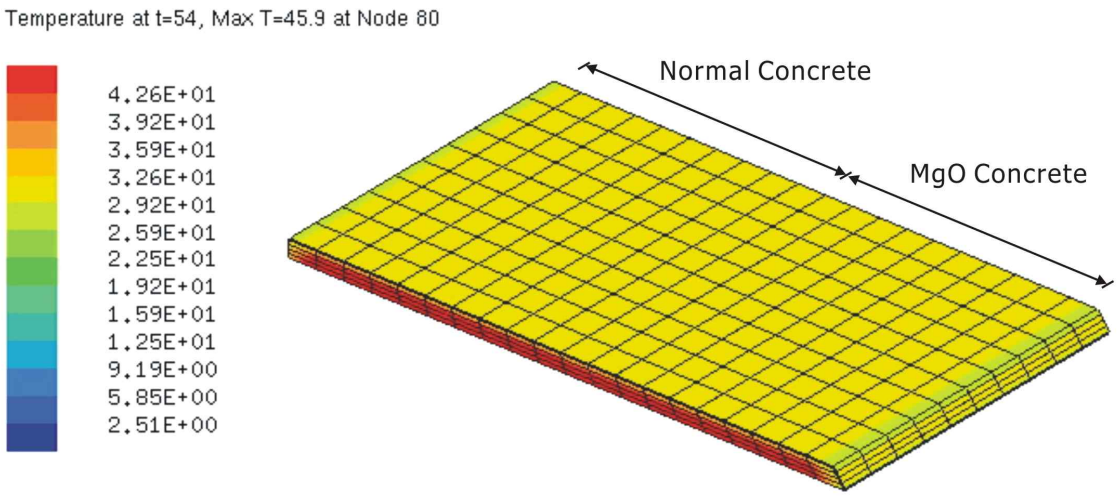


그림 3.10.37 온도분포

응력에서 해석값과 계측값은 많은 차이를 보이고 있으며 해석시 콘크리트의 creep, shrinkage등 콘크리트 시간의존적 특성의 미반영에 인한 것으로 생각된다. 해석결과 중심부(P1)의 응력이 MgO의 팽창으로 인하여 Normal concrete보다 MgO concrete가 3 MPa 저감되었으며(그림 3.10.38), 응력분포(그림 3.10.39)에서 저감된 응력을 확인할 수 있다.

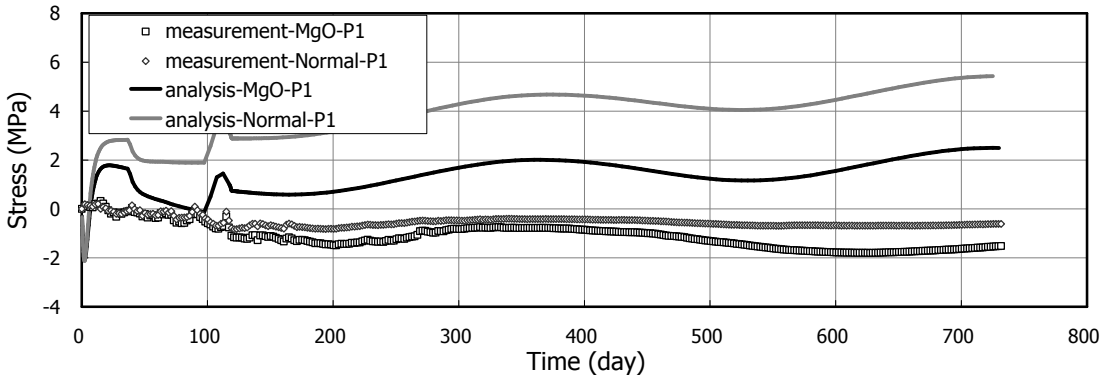


그림 3.10.38 응력이력곡선

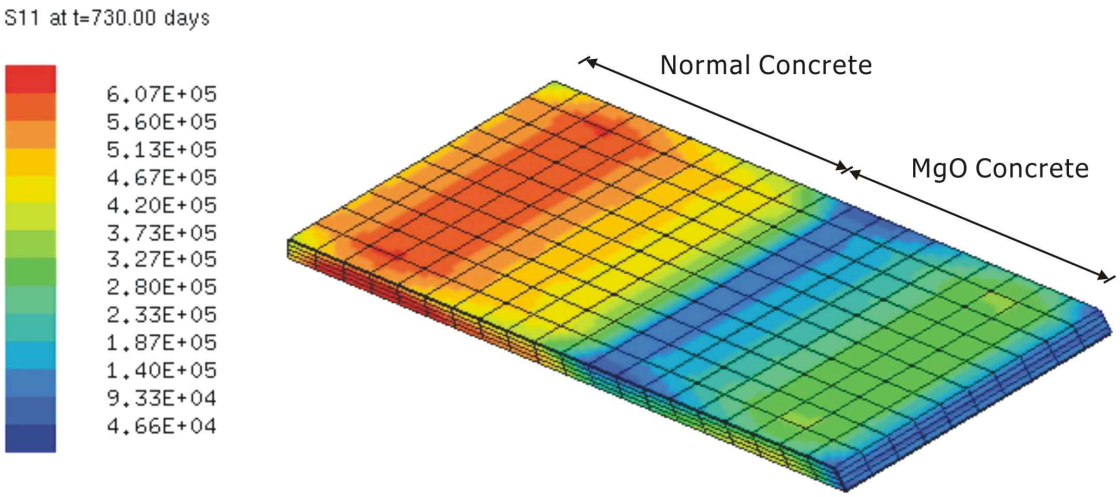


그림 3.10.39 응력분포

해석결과 중심(P1) 및 중심하부(P2)에서 730일의 팽창량은 90με으로(그림 3.10.40) 해석되었으며, 계측값(70μ)과는 20με의 차이가 발생하였다. 계측값과의 차이는 동력학모델의 재료상수 회귀분석의 기준배합과 실구조물의 배합이 상이하며, 선행된 온도해석에서 계측과 해석의 차이에 의한 것으로 생각된다.

MgO의 온도의존적 장기팽창성 예측을 위해서는 정확한 온도해석과 MgO의 팽

창특성정보가 수반되어야 하며, 해석을 통해서 MgO의 온도의존적 팽창성을 확인할 수 있었다.

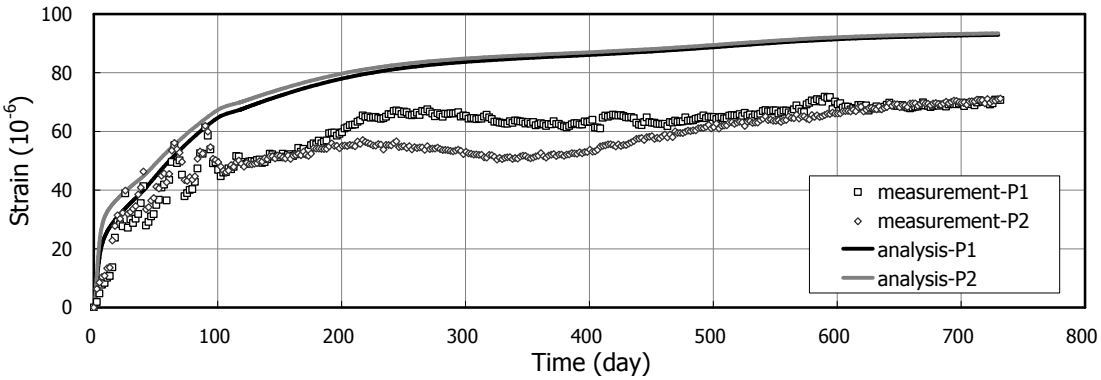


그림 3.10.40 팽창이력곡선

나. 감세지 옹벽

개발된 MgO 해석 프로그램을 이용하여 감세지 옹벽 MgO혼입 시험시공구역의 MgO의 장기팽창특성 및 구조물에 미치는 영향을 중심(P1)을 대상으로 해석 및 계측값과 비교하였다.

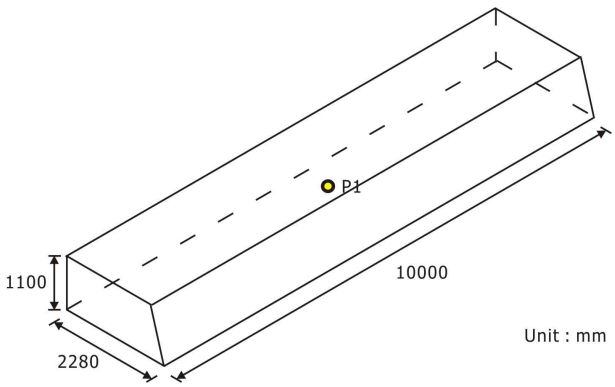


그림 3.10.41 감세지 옹벽 시험시공구역 검토위치

감세지 옹벽의 MgO혼입 시험시공구역과 동일크기로 모델링 하였으며, 해석에 요구되는 역학적 특성 및 열적특성은 설계기준압축강도와 결합재량을 기준으로 콘크리트표준시방서(2009)를 기반으로 입력하였다(표 3.10.15). 외기온도는 현장에서 근접한 지역의 기상청 자료를 활용하였다(그림 3.10.33).

표 3.10.15 재료특성 및 해석조건

해석조건 및 재료특성	입력값
타설시 외기온도	20℃
타설시 콘크리트 온도	20℃
콘크리트 설계기준강도	21 MPa
콘크리트 28일 탄성계수	21540 MPa
포아송비	0.18
단열온도상승량, Q∞	48.64℃
반응속도계수, r	1.195

표 3.10.16 MgO 콘크리트 배합비 - 국내실험(24MPa) 및 감세지 옹벽

	W/B (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m^3)					
			W	C	FA	MgO	S	G
24MPa 국내실험	48	48	165	257.8	68.8	17.2	837	942
21MPa 감세지 옹벽	55	50.4	178	314	0	10	910	923

감세지 옹벽 해석에 사용된 팽창량 동역학 모델의 재료상수는 국내에서 실험한 24 MPa의 재료상수를 반영하였고, 시험구역에서는 21 MPa의 콘크리트를 사용하였다. 24 MPa의 MgO함 유량은 5%(17.19 kg/m^3)이며 21 MPa의 MgO 함유량은 3%(10kg/m^3)으로 7.19 kg/m^{3}의 차이가 있으며, 동일한 온도이력에서 강도 및 MgO 함유량의 차이가 상이한 팽창이력을 유발할 수 있다.

표 3.10.17은 MgO가 함유된 24 MPa 콘크리트의 팽창량의 국내 실험값이며, 그 값을 이용하여 표 3.10.18과 같이 재료상수를 회귀분석하였다. 재료상수의 검증을 위해 프로그램을 사용하여 20, 40℃등온온도 상태의 팽창량을 해석하였고 그림 3.10.57과 같이 실험값과 유사하게 유추함을 알 수 있다.

표 3.10.17 양생온도에 따른 MgO 콘크리트의 팽창량(단위: με) - 24 MPa

T \ τ	4days	7days	30days	80days	160days	350days	500days
20℃	15	21	49	73	82	91	97
40℃	91	92	103	120	124	134	136

표 3.10.18 동역학모델의 재료상수 - 24 MPa

ϵ_0	α	β_1	β_2	β_3	γ
136	9.67×10^9	3.1495	-0.0398	0.000049	8200

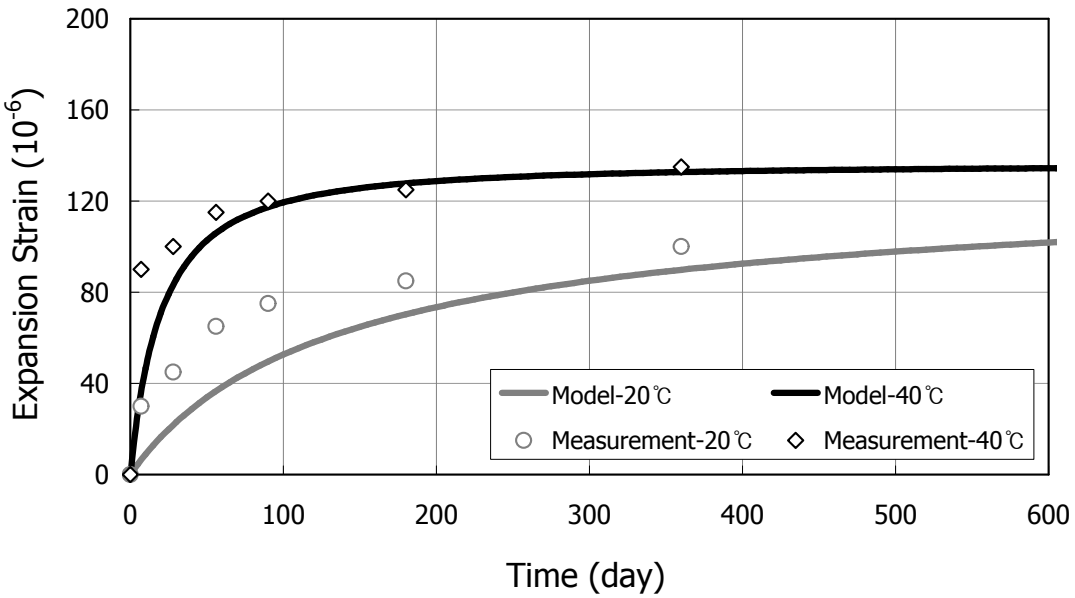


그림 3.10.42 등온조건에서 MgO 콘크리트의 팽창량 - 24MPa

온도해석결과(표 3.10.14) MgO concrete의 중심부(P1)의 계측(52.3℃, 1.42day)과 해석값(55.75℃, 1.75day)의 온도차는 3.5℃이다. 해석결과 전반적으로 온도이력곡선을 잘 유추한다(그림 3.10.43).

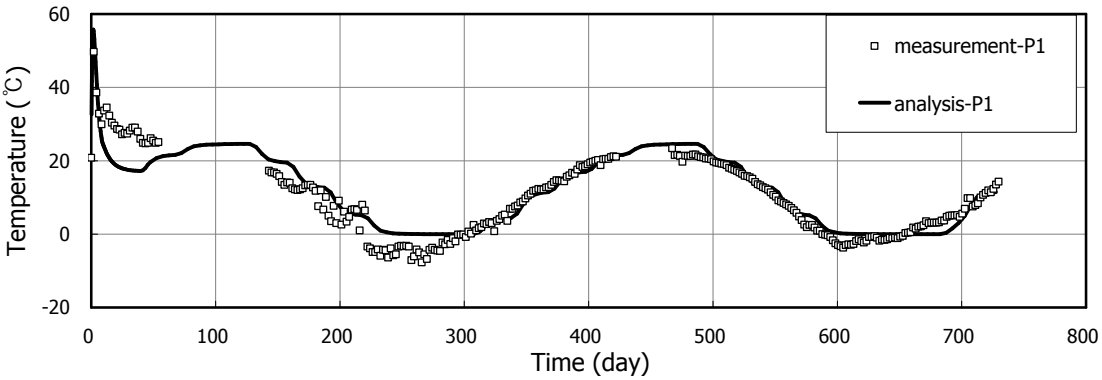


그림 3.10.43 MgO concrete 온도이력곡선

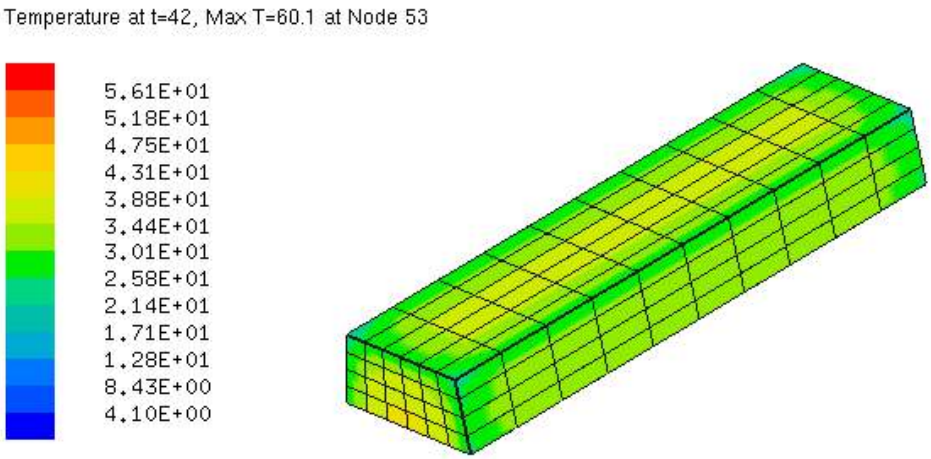


그림 3.10.44 온도분포

응력에서 해석값과 계측값은 많은 차이를 보이고 있으며 해석시 콘크리트의 creep, shrinkage등 콘크리트 시간의존적 특성의 미반영에 인한 것으로 생각된다 (그림 3.10.45).

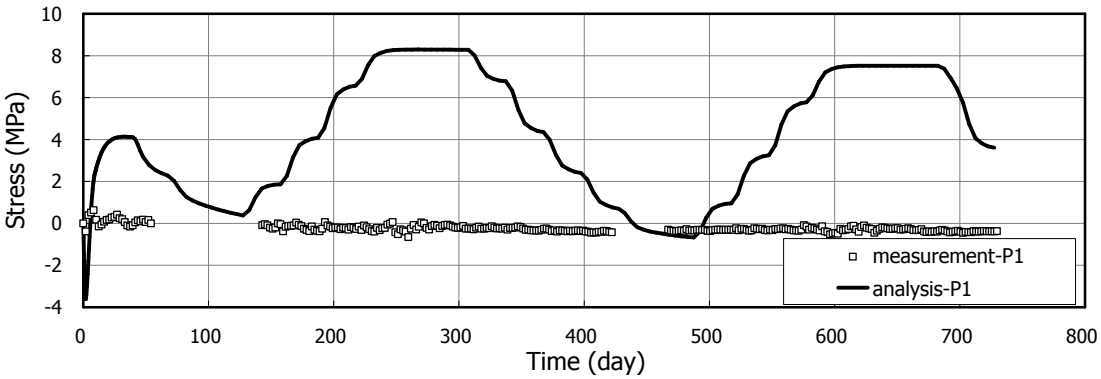


그림 3.10.45 응력이력곡선

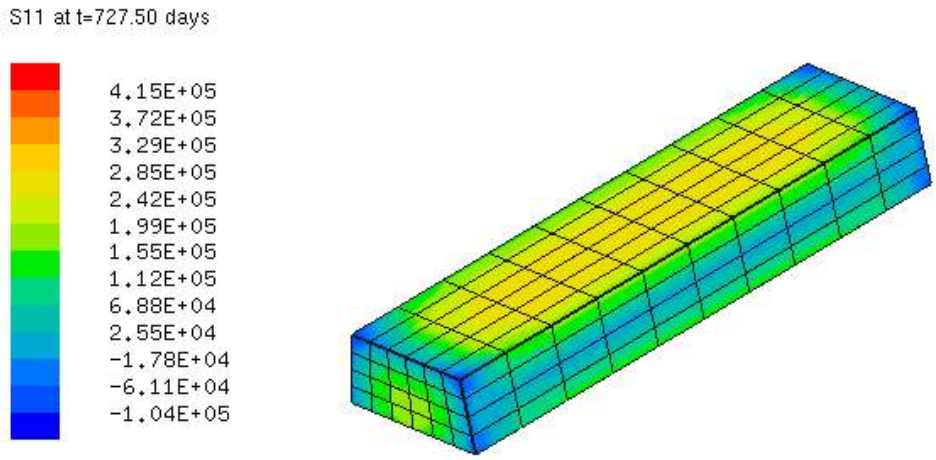


그림 3.10.46 응력분포

해석결과 중심(P1)에서 730일의 팽창량은 164με으로(그림 3.10.47) 해석되었으며, 계측값(136μ)과는 28με의 차이가 발생하였다. 계측값과의 차이는 동력학모델의 재료상수 회귀분석의 기준배합과 실구조물의 배합이 상이하며, 선행된 온도해석에서 계측과 해석의 차이에 의한 것으로 생각된다.

MgO의 온도의존적 장기팽창성 예측을 위해서는 정확한 온도해석과 MgO의 팽창특성정보가 수반되어야 하며, 해석을 통해서 MgO의 온도의존적 팽창성을 확인할 수 있었다.

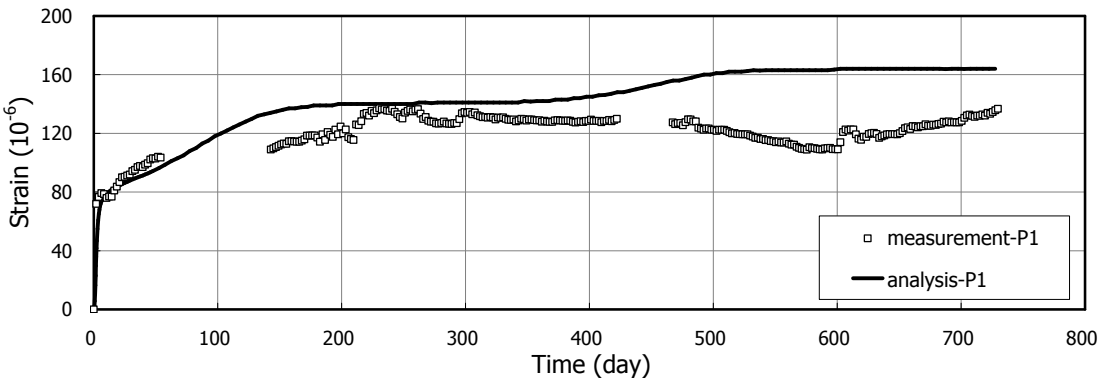


그림 3.10.47 팽창이력곡선

제 11 절 실용화 매뉴얼

[MgO를 혼입한 장기팽창성 콘크리트 현장 실용화]

MgO 혼입 콘크리트 현장적용 매뉴얼

- 콘크리트 댐 -

2013. 10

목 차

제 1장 총 칙

1. 적용범위 ····· 1
2. 일반사항 ····· 1
3. 관련 시방서 ····· 2
   3.1 국내 시방서 ····· 2
   3.2 국외(중국) 시방서 ····· 2
4. 참조표준 ····· 2
5. 용어정의 ····· 3
6. 제출물 ····· 5
   6.1 품질관리 계획서 ····· 5
      6.1.1 원재료 관리 ····· 5
      6.1.2 레디믹스트 콘크리트 반입 ····· 5
      6.1.3 품질관리 계획 ····· 6
   6.2 시공계획서 ····· 6
      6.2.1 시공계획 ····· 6
      6.2.2 시공 상세도면 ····· 7
      6.2.3 콘크리트 시공계획 ····· 7
      6.2.4 시공계획 변경 ····· 8

제 2장 수축균열 제어

1. 일반사항 ····· 9
2. 시공이음 및 수축이음 ····· 9
   2.1 시공이음 ····· 9
   2.2 수축이음 ····· 10
3. 균열제어 계획 ····· 11

제 3장 온도균열 제어

1. 일반사항 ····· 12
2. 수화열 해석 ····· 14
   2.1 매스 콘크리트 ····· 14
   2.2 온도균열지수 ····· 15
   2.3 콘크리트의 열 특성 ····· 16
   2.4 열응력 해석 ····· 18
      2.4.1 콘크리트 강도와 탄성계수 ····· 18
      2.4.2 열응력 해석 ····· 20
      2.4.5 온도균열폭 제어 ····· 21

3. 수화열 제어 ····· 21
3.1 일반사항 ····· 21
3.2 분할타설 높이와 간격 ····· 21
3.3 블록간 타설간격 ····· 21
3.4 선행 냉각 ····· 22
3.5 양생온도 ····· 22
3.6 관로식 냉각 ····· 23

제 4장 재료 선정
1. 일반사항 ····· 24
2. 결합재 ····· 24
2.1 시멘트 ····· 24
2.2 광물질 혼화재료 ····· 24
2.3 저온소성 MgO ····· 25
2.4 잔골재 ····· 26
2.5 굵은 골재 ····· 26
2.6 배합수 ····· 26
3. 저장 ····· 27
3.1 일반사항 ····· 27
3.2 결합재 저장 ····· 27
3.3 화학 혼화재료 저장 ····· 27
3.4 골재 저장 ····· 28
4. 배합 ····· 28
4.1 일반사항 ····· 28
5. 계량 및 생산 ····· 29
5.1 일반사항 ····· 29
5.2 재료 계량 ····· 30
5.3 생산 ····· 30

제 5장 품질관리
1. 일반사항 ····· 31
2. 원재료 품질관리 ····· 31
3. 콘크리트 품질관리 ····· 31
3.1 배합관리 ····· 31
3.2 굳지 않은 콘크리트 ····· 32
3.3 굳은 콘크리트 ····· 32
4. 시공 중 품질관리 ····· 33

제 6장 시 공

1. 일반사항 ····· 35
2. 콘크리트 운반 ····· 35
3. 콘크리트 타설 및 다짐 ····· 36
3.1 일반사항 ····· 36
3.2 타설 준비 ····· 36
3.3 타설 ····· 37
3.3.1 저슬럼프 콘크리트 타설 ····· 37
3.3.2 RCD 콘크리트 타설 ····· 37
3.4 다짐 ····· 38
3.4.1 유슬럼프 콘크리트 ····· 38
3.4.2 RCD 콘크리트 ····· 38
3.5 표면 마무리 ····· 39
4. 콘크리트 양생 ····· 39
4.1 일반사항 ····· 39
4.2 양생 ····· 40
4.3 표면 보호 ····· 40
5. 콘크리트 품질관리 ····· 40

[부록 A] 콘크리트용 저온소성 MgO의 품질사양
[부록 B] MgO 활성지수 시험 방법
[부록 C] 콘크리트 장기팽창 시험 방법
[부록 D] 팽창도 시험시 참고 자료(중국 자료)

제 1장 총 칙

1. 적용범위

(1) 본 매뉴얼은 저온소성 MgO를 혼입한 장기팽창성 콘크리트를 콘크리트 댐 등에 적용하고자 할 때 설계, 재료 선정, 시공 등의 단계에서 준수해야 할 일반적이고 기본적인 사항을 규정한다.

(2) 본 매뉴얼은 MgO 혼입 콘크리트를 이용한 댐의 시공이음 및 타설구획 설계, 재료 시험 및 선정, 수화열 및 온도균열 제어, 시공관리, 계측관리 및 안전관리 등에 관해서 규정한다.

2. 일반사항

(1) 본 매뉴얼은 MgO 혼입 콘크리트 댐의 적용을 장려하고, 그 기술적 장점을 적극 활용하여 댐 콘크리트의 품질을 개선하여 콘크리트 댐의 품질을 개선하는데 그 목적이 있다.

(2) 콘크리트 구조물의 균열 발생을 최소화 하기 위하여, 적절한 방법으로 콘크리트의 체적변화를 예측하고, 이에 대한 대책을 수립하여야 한다. 이때, MgO 혼입 콘크리트의 장기팽창성을 활용할 수 있다.

(3) 댐 콘크리트는 다량의 콘크리트를 단기간에 시공하게 되므로 매스 콘크리트로 관리하여야 한다.

(4) 본 매뉴얼에 규정되지 않은 사항은 국토해양부가 제정한 「댐설계기준 2005」 및 「콘크리트 표준시방서 2009」 등 관련 시방서의 해당 규정에 따른다.

3. 관련 시방서

3.1 국내 시방서

댐설계기준 2005 제 6장 콘크리트 중력댐
댐설계기준 2005 제 7장 롤러다짐 콘크리트댐
콘크리트 표준시방서 2009 제 2장 일반 콘크리트
콘크리트 표준시방서 2009 제 4장 거푸집 및 동바리
콘크리트 표준시방서 2009 제 14장 한중 콘크리트
콘크리트 표준시방서 2009 제 15장 서중 콘크리트
콘크리트 표준시방서 2009 제 18장 매스 콘크리트
콘크리트 표준시방서 2009 제 23장 댐 콘크리트

3.2 국외(중국) 시방서

귀주성 지방 기술기준 DB52/T720-2011 MgO 혼입 콘크리트 아치댐 시방서

4. 참조표준

(1) KS F 2401 굳지 않은 콘크리트의 시료 채취 방법
(2) KS F 2402 콘크리트의 슬럼프 시험 방법
(3) KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험 방법
(4) KS F 2427 굳지 않은 콘크리트의 반죽질기 시험 방법
(5) KS F 2502 굵은 골재 및 잔골재의 체가름 시험 방법
(6) KS F 2510 콘크리트용 모래에 포함되어 있는 유기 불순물의 시험 방법
(7) KS F 2511 골재에 포함된 잔 입자 시험 방법
(8) KS F 2512 골재 중에 함유되는 점토 덩어리량의 시험 방법
(9) KS L 5201 포틀랜드 시멘트
(10) KS L 5405 플라이 애쉬
(11) KS L 2510 고로 슬래그 시멘트

5. 용어정의

(1) MgO 함량 (MgO Content)
MgO를 제외한 전체 결합재 중량에 대한 MgO의 중량비

(2) MgO 혼입 콘크리트(MgO-admixed Concrete)

저온소성 MgO를 혼입한 콘크리트. MgO 콘크리트의 장기팽창성은 온도 강하 등으로 유발되는 수축을 보상하는 방법으로 활용될 수 있음

(3) RCD용 콘크리트 (Roller Compacted Dam Concrete)

진동 롤러를 사용하여 다짐 시공을 하는 슬럼프가 0인 댐 콘크리트

(4) RI 시험 (RI Test)

진동 롤러로 다짐 후 다짐면의 다짐 정도를 평가하기 위해 라디오 아이스토프(Radio Isotope)를 이용하여 다짐도를 판정하는 것

(5) VC값 (Vibrating Consistency Value)

RCD용 콘크리트의 반죽질기를 나타내는 값으로 진동대식 반죽질기 시험 방법에 의하여 얻어지는 시험값. 초로 나타낸다.

(6) 그린컷 (Green Cut)

RCD 콘크리트의 시공 시 시공이음 면에 고압살수 청소, 진공흡입 청소 등을 실시하는 것

(7) 내부구속 (Internal Restraint)

콘크리트 단면 내의 온도 차이에 의한 변형의 부등분포에 의해 발생하는 구속작용

(8) 단열온도상승곡선 (Adiabatic Temperature Rising Curve)

단열조건에서 재령에 따른 콘크리트 수화열에 의한 온도상승을 도시한 곡선으로서 콘크리트 수화발열 특성을 나타냄

(9) 매스 콘크리트 (Mass Concrete)

부재 치수가 커서 수화열에 의한 온도 상승 및 강하를 고려하여 설계 및 시공해야 하는 콘크리트

(10) 시공단계별 해석 (Construction Stage Analysis)

시공과정 및 사용 중 댐 콘크리트의 수화열 및 열응력을 모사하는 구조해석을 수행하는 계산방법

(11) 온도균열지수 (Thermal Crack Index)

매스 콘크리트의 온도균열 발생 예측에 쓰이는 지수로, 콘크리트의 안장강도를 수화열에 의한 인장응력으로 나눈 값

(12) 외부구속 (External Restraint)

새로 타설된 콘크리트 타설구획의 변형이 외부로부터 구속되는 작용

(13) 선행 냉각 (Pre Cooling)

콘크리트 타설온도를 낮추기 위하여 타설 전에 콘크리트 원재료를 냉각시켜 콘크리트 수화열을 제어하는 방법

6. 제출물

6.1 품질관리 계획서

6.1.1 원재료 관리

(1) 콘크리트 공사를 시작하기에 앞서 콘크리트 표준시방서 2009「제 2장 2.6 자재품질관리」 및「제 2장 3.8 현장 품질관리」에서 제시하고 있는 기준에 따라 검사 및 시험계획서를 작성하여야 한다.

① 원재료의 온도관리방법
② 콘크리트 단열온도상승시험 결과
③ 원재료 및 콘크리트 냉각장치 설치도
④ 수화열 및 온도균열 제어 계획서
⑤ 원재료 시험성적서
⑥ 기타 : 콘크리트 표준시방서 2009「제 2장 1.6 제출물」해당 사항

6.1.2 품질관리 계획

(1) 콘크리트 공사 수행 시 재료 검사 및 시험 계획서, 시공계획서에 따라 콘크리트 품질관리 계획서를 작성하여야 한다.

6.2 시공계획서

6.2.1 시공계획

(1) 공사를 시작하기 전에 환경에 대한 부하, 시공 안전성, 공사비용, 공사기간 등과 같은 공사 요건을 만족하도록 구조물의 설계에 기초하여 시공계획을 수립하여 책임기술장의 승인을 받아야 한다.

(2) 시공계획서에는 일반적으로 다음과 같은 사항에 대하여 기술한다.

① 공사 개요
② 공사 요건
③ 구조물의 요구성능
④ 콘크리트의 성능, 원재료, 배합 등
⑤ 조직표 및 노무계획
⑥ 재료 사용 계획
⑦ 시공기계 및 시공설비
⑧ 가설비
⑨ 콘크리트 시공계획
⑩ 품질관리 계획
⑪ 시공관리 계획, 안전 및 위생 계획
⑫ 검사 및 유지관리 계획
⑬ 그 밖의 필요 사항

6.2.2 시공 상세도면

(1) 콘크리트 공사를 시작하기에 앞서 시공계획서를 참고로 콘크리트 타설순서, 블록분할과 이음위치, 수축이음의 설치위치 및 간격, 양생방법 등 콘크리트 시공에 관한 상세한 사항 등이 명시된 시공 상세도면을 작성하여야 한다.

6.2.3 콘크리트 시공계획

(1) 콘크리트 시공계획은 다음과 같은 사항을 포함하여야 한다.

① 콘크리트 공정
② 콘크리트 운반 및 반입
③ 현장 내 콘크리트 운반
④ 콘크리트 타설

⑤ 콘크리트 다짐
⑥ 콘크리트 마무리
⑦ 콘크리트 양생
⑧ 시공이음 설치
⑨ 철근 배치
⑩ 거푸집 및 동바리 설치
⑪ 환경보호

(2) 거푸집 및 동바리 설치 계획은 콘크리트 표준시방서 2009「제 4장 거푸집 및 동바리」에 일반적인 표준이 제시되어 있으므로, 이를 참조하여 구조물의 구조특성, 현장여건, 시공조건 등을 고려하여 구체적인 시공계획을 수립하여야 한다.

6.2.4 시공계획 변경

(1) 공사 중 계획 변경이 필요하게 된 경우에는 공사의 요건 및 구조물의 요구성능 등을 만족할 수 있도록 시공계획 변경을 실시하여야 한다.

(2) 시공계획 변경은 변경에 의한 영향을 받는 범위가 최소가 되도록 실시한다. 시공계획 변경은 합리적인 콘크리트 시공이 가능한 범위 내에서 실시하여야 한다.

제 2장 수축균열 제어

1. 일반사항

(1) 댐의 수축균열 및 온도균열 제어의 기초 자료 확보를 위하여 MgO 혼입 콘크리트의 자기수축 및 팽창 시험결과를 반영한 시공단계별 체적변화 해석이 수행하여야 한다.

(2) 장기팽창 등 체적변화 응력해석에는 유한요소해석 방법을 적용하여야 한다.

(3) 시공단계별 체적변화 해석에는 레디믹스트 콘크리트 규격, 단위 결합재량, 환경조건 등이 고려하여야 한다.

2. 시공이음 및 수축이음

2.1 시공이음

(1) 콘크리트 타설구획의 크기와 이음의 위치 및 구조는 온도균열 제어를 위한 방열조건, 구속조건과 레디믹스트 콘크리트 생산배치플랜트의 능력이나 1회 콘크리트 타설 가능량 등 시공할 때의 여러 조건을 종합적으로 판단하여 결정하여야 한다.

(2) 시공이음에 있어 수평 시공이음은 먼저 타설된 콘크리트 표면의 레이턴스를 제거한 후 시공하며, 수직 시공이음은 구조물의 기능을 손상하지 않도록 주의하여 시공하여야 한다.

2.2 수축이음

(1) 콘크리트에 유해한 온도균열이 발생하는 것을 방지하기 위해서 콘크리트 댐체에 적정한 간격의 수축이음을 설치하여야 한다.

(2) 벽체 구조의 경우 온도균열을 제어하기 위해서는 구조물의 길이 방향에 일정 간격으로 단면 감소 부분을 만들어 그 부분에 균열이 집중되도록 하고, 나머지 부분에서는 균열이 발생하지 않도록 하여 균열이 발생한 부분에 대한 사후 조치를 쉽게

하기 위해 수축이음을 설치할 수 있다. 계획된 위치에서 균열 발생을 확실히 유도하기 위해서 수축이음의 단면 감소율을 35% 이상으로 하여야 한다.

(3) 수축이음 위치는 구조물의 내력에 영향을 미치지 않는 곳에 설치하며, 필요한 간격은 구조물의 치수, 철근량, 타설온도, 타설방법, 등에 의해 큰 영향을 받으므로 이들을 고려하여 정하여야 한다. 균열 발생 위치에서는 누수 및 철근부식 등이 발생할 가능성이 높으므로 시공 전에 이에 대한 대책을 세울 필요가 있다.

(4) MgO 혼입 콘크리트의 장기팽창성 성능에 따라 수축이음의 간격이 조정될 수 있다. 즉, MgO 혼입 콘크리트를 적용할 경우 일반 콘크리트를 적용한 경우와 달리 수축이음의 간격을 조정할 수 있다. 구조물의 조건과 MgO 혼입 콘크리트의 장기팽창 성능에 따라 수축이음을 생략할 수도 있다.

(5) 댐체에는 일반적으로 세로 방향 시공이음을 설치하지 않는다. 반면, 균열유발줄눈과 수평 시공이음이 설치될 수 있다. 연교차가 작은 지역이나 외기온도가 낮은 계절에 타설하는 콘크리트에서는 시공이음 생략을 검토할 수 있다.

(6) 구조적으로 일체화를 도모할 필요가 있는 부분의 수축이음에는 조인트 그라우팅을 실시하여야 한다.

(7) 누수를 방지하기 위해서 가로 방향 수축이음에는 지수판을 설치하여야 한다.

3. 균열제어 계획

(1) MgO 함량을 결정할 때에는 MgO가 콘크리트의 팽창성, 열역학 특성, 내구성 등에 미치는 영향을 검토하여야 한다.

(2) MgO 함량은 설계상 요구되는 팽창량과 체적변화에 적합하게 결정하여야 한다.

제 3장 온도균열 제어

1. 일반사항

(1) 온도균열 발생을 억제하기 위하여 적절한 수화열 제어 계획을 수립하여야 한다.

(2) 수화열 제어 방안은 현장의 기상조건, 콘크리트 성능, 시공계획 등을 고려한 시공단계별 해석을 통하여 결정하여야 한다.

(3) 수화열 제어 방안은 MgO 콘크리트의 자기수축 보상 성능을 최대한 활용할 수 있도록 설계하여야 한다.

(4) 부재 내외부 온도차 제어 목표는 수화열, 열응력, 인장강도 등을 고려한 시공단계별 해석 결과로부터 결정하여야 한다.

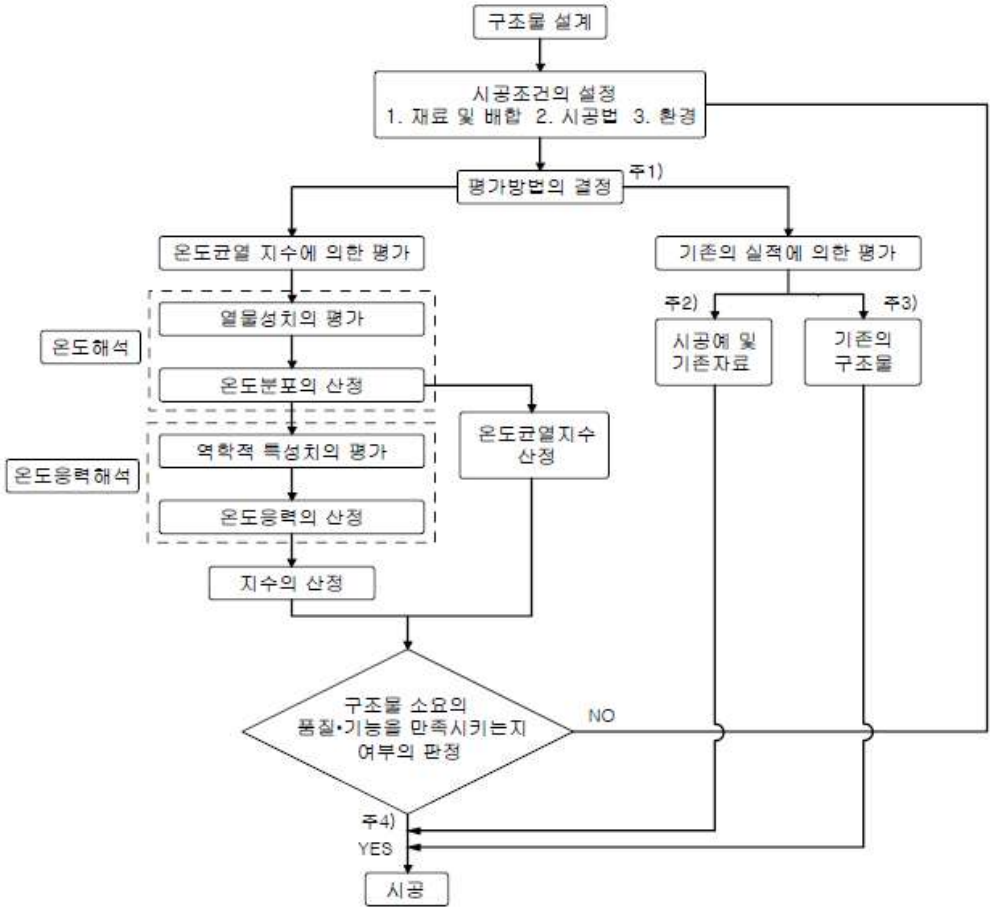
(5) 시공현장에서 갑작스런 온도강하가 예상될 경우 부재 표면의 온습도를 계측 및 관리하여야 한다.

(6) 댐체 내부의 온도가 최종 안정온도에 도달했을 때 열응력 상태를 충분히 고려하여야 한다.

(7) 콘크리트 타설은 가급적 외기온도가 낮은 계절에 최대한 이루어져야 한다. 특히, 외부구속이 심한 부재는 외기온도가 높아 적합한 수화열 제어 방안이 없는 계절에 타설해서는 안 된다.

(8) 시공단계별 해석 결과, MgO에 의한 팽창량만으로 수축보상이 어렵다고 판단될 때에는 시공이음과 수화열 제어 방안 등이 함께 검토하여야 한다.

(9) 일반적인 수화열 제어 방안은 다음 그림 3.1과 같이 콘크리트 표준시방서 2009「제 18장 매스 콘크리트」따른다.



[그림 3.1] 균열발생 검토 흐름도

(10) 구조물이 소요의 품질과 기능을 만족할 수 있도록 사전에 수화열에 의한 열응력 및 온도균열에 대해 충분히 검토한 후에 시공계획서를 작성하여 이것에 따라 실시하여야 한다.

2. 수화열 해석

2.1 매스 콘크리트

(1) 매스 콘크리트를 시공할 때에는 구조물에 요구되는 기능 및 품질을 손상시키지 않도록 온도균열을 제어해야 하며, 이를 위해 콘크리트의 시공 및 품질관리 방법의 선정, 수축·온도철근 배치 등의 적절한 조치를 취하여야 한다.

(2) 매스 콘크리트 설계와 시공 시 우선 고려사항은 온도균열 제어이기 때문에 건설되는 구조물의 용도 및 기능, 품질관리에 적합하도록 균열 제어 대책을 수립하거나 균열의 폭, 간격, 발생 위치에 대한 제어를 실시하여야 한다.

(3) 매스 콘크리트 시공 시 시멘트, 광물질 혼화재료, 골재 등의 재료선정 및 배합설계, 시공이음 위치, 콘크리트 타설의 시간간격 선정, 거푸집 재료 및 종류, 콘크리트 냉각 및 양생방법의 선정 등을 검토하여야 한다.

(4) 구조물을 설계할 때 신축이음이나 수축이음을 계획하여 균열을 제어할 수도 있으며, 이때 구조물의 기능을 고려하여 위치 및 구조를 결정하고, 필요에 따라서 배근, 지수판, 충전재를 설계한다. 특히, 외부구속을 많이 받는 벽체 구조의 경우에는 수축이음을 설치하여 균열 발생 위치를 제어하는 것이 효과적이므로 이를 검토하여야 한다.

(5) 그 밖의 균열 제어 방법으로는 콘크리트의 선행 냉각, 관로식 냉각 등에 의한 수화열 제어 방법, 팽창 콘크리트 사용에 의한 방법, 또는 수축·온도철근 배근에 의한 방법 등이 있는데, 그 효과와 경제성을 종합적으로 고려하여 판단하여야 한다.

2.2 온도균열지수

(1) 매스 콘크리트의 온도균열 발생에 대한 검토는 온도균열지수에 의해 평가하는 것을 원칙으로 한다.

(2) 정밀한 해석방법에 의한 온도균열지수는 식 3.1과 같이 임의 재령에서 콘크리트 인장강도와 수화열에 의한 열응력의 비로서 구한다.

온도균열지수 $$I_{cr}(t) = \frac{f_{sp}(t)}{f_t(t)}$$ 식 3.1

여기서, t : 재령(일)

$f_{sp}(t)$: 재령 일에서의 쪼갬 인장강도(MPa)

$f_t(t)$: 재령 일에서의 수화열에 의하여 발생한 열응력(MPa)

(3) 온도균열지수의 산정에 필요한 임의 재령에서 열응력 해석은 유한요소해석 방법

등과 같은 정밀한 방법을 사용할 수 있다.

(4) 온도균열지수는 구조물의 중요도, 기능, 환경조건 등에 대응할 수 있도록 선정하여야 하며, 철근이 배치된 일반적인 구조물의 표준적인 온도균열지수 값은 다음 표 3.1과 같다.

[표 3.1] 균열 제어 수준에 따른 온도균열지수

균열 제어 수준	온도균열지수
균열 발생을 방지하여야 할 경우	1.5 이상
균열 발생을 제한할 경우	1.2 ~ 1.5
유해한 균열 발생을 제한할 경우	0.7 ~ 1.2

2.3 콘크리트의 열 특성

(1) 콘크리트의 단열온도상승 특성은 시멘트의 종류, 단위 시멘트량, 타설온도 등을 고려하여 적정한 방법으로 정하여야 한다. 일반적으로 콘크리트 단열온도상승량은 단열온도상승 시험을 통하여 구하는 것을 원칙으로 한다.

(2) 콘크리트 단열온도상승 특성은 타설이 끝난 후 콘크리트 자체의 온도 변화를 해석하기 위한 기본 자료이며, 일반적으로 식 3.2 및 식 3.3으로 나타낼 수 있다.

단열온도상승량 $\mathrm{K(t)=K(1-e^{\alpha t})}$ 식 3.2

단열온도상승량 $\mathrm{K(t)=K(1-e^{\alpha t^{\beta}})}$ 식 3.3

여기서, t : 재령(일)
K : 최종 단열온도상승량(℃)
α,β : 단열온도상승 속도

(3) 계산이나 기존의 자료에 의해 단열온도상승 특성을 추정할 경우에는 시멘트의 종류, 단위 시멘트량, 타설온도를 고려하여 표 3.2에 나타낸 회귀식에 의해 K 및 α을 추정할 수 있다.

[표 3.2] 식 3.2의 및 표준값

결합재 종류	타설온도 (℃)	$K(t)=K(1-e^{\alpha t})$			
		$K=aC+b$		$\alpha=cC+d$	
		a	b	c	d
보통 포틀랜드 시멘트	10 20 30	0.12 0.11 0.11	11.0 13.0 12.0	0.0015 0.0038 0.0040	0.135 -0.036 0.337
중용열 포틀랜드 시멘트	10 20 30	0.11 0.10 0.11	6.0 9.0 9.0	0.0003 0.0015 0.0021	0.303 0.279 0.299
저열 포틀랜드 시멘트	10 20 30	0.10 0.10 0.10	1.9 2.2 2.6	0.0002 0.0003 0.0006	0.229 0.225 0.218
고로 슬래그 시멘트	10 20 30	0.11 0.10 0.10	14.0 15.0 15.0	0.0014 0.0025 0.0035	0.073 0.207 0.332
보통 포틀랜드 시멘트 + 플라이 애쉬 20%	10 20 30	0.15 0.12 0.11	-3.0 8.0 11.0	0.0007 0.0028 0.0030	0.141 -0.143 0.059

※ 는 결합재 질량으로서 단위는 임

고로 슬래그 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트 + 고로 슬래그 미분말 40%임

(4) 고로 슬래그 시멘트 콘크리트의 단열온도상승은 포틀랜드 시멘트 콘크리트에 비해 제품의 종류나 생산공장 등에 의한 차이가 크므로 수화열을 예측할 때 주의가 필요하다.

(5) 콘크리트 열특성 계수는 배합 특히 골재의 성질 및 단위 골재량과 콘크리트의 습윤상태에 좌우되므로 이러한 영향을 적절히 고려해서 결정하여야 한다. 그러나 일반적인 값은 다음 표 3.3에 나타낸 값으로 볼 수 있다.

[표 3.3] 콘크리트 열특성 계수 표준값

열특성 계수	표준값
열전도율(W/m℃)	2.6 ~ 2.8
비열(J/kg℃)	1,050 ~ 1,260
밀도(kg/m^3)	2,300
열팽창계수(/℃)	1×10^{-5}

(6) 일반적인 암반의 밀도는 2,600~2,700kg/m^3, 열전도율은 1.7~5.2W/m℃, 비열은 710~880J/kg℃로 취할 수 있다.

2.4 열응력 해석

(1) 수화열 해석은 구조물의 종류 및 형상 등에 따라 적정한 방법으로 실시하여야 한다.

(2) 수화열 해석에 사용되는 열 경계조건 즉, 대류계수, 단열 조건, 고정온도 조건 등은 구조물의 형상, 방열 조건 등을 고려하여 적정하게 결정하여야 한다. 특히, 대류계수는 부재 표면의 온도에 큰 영향을 미치며, 부재 두께가 비교적 작은 경우에는 부재 내부 온도에도 영향을 미치므로 거푸집의 종류, 두께, 존치기간, 외기온도, 주변 풍속 등을 고려하여 적정한 값을 적용하여야 한다.

2.4.1 콘크리트 강도와 탄성계수

(1) 온도균열 발생을 해석적으로 추정하기 위해서는 신규 타설 콘크리트의 인장강도를 적정하게 산정해야 하며, 콘크리트의 인장강도는 시멘트 종류, 물-결합재비, 골재의 종류, 온도이력, 재령 등의 영향을 고려하여 산정할 수 있다.

(2) 근사적으로 인장강도를 구하고자 할 때에는 식 3.4에 의하여 압축강도를 구해, 이것으로부터 식 3.5를 사용하여 인장강도 값을 구할 수 있다.

압축강도 $$f_{cu}(t) = \frac{t}{a+bt} f_{ck,91}$$ 식 3.4

쪼갬 인장강도 $$f_{sp}(t) = c\sqrt{f_{cu}(t)}$$ 식 3.5

여기서, t : 재령(일)

a, b : 강도발현계수로, 표 3.4의 값을 표준으로 한다.

$f_{ck,91}$: 재령 91일 설계기준강도(MPa)

c : 콘크리트 건조 정도에 따라 다르지만 0.44를 표준으로 한다.

[표 3.4] 콘크리트 열특성 계수 표준값

결합재 종류		
보통 포틀랜드 시멘트 고로 슬래그 시멘트	4.5	0.95
중용열 포틀랜드 시멘트	6.2	0.93
저열 포틀랜드 시멘트	16.2	0.82

(3) 열응력을 추정하기 위해서는 재령을 고려한 콘크리트의 유효탄성계수를 적정하게 정하여야 한다. 유효탄성계수는 탄성계수에 크리프 및 응력이완 등에 의한 강성 저하를 고려한 값이다.

유효탄성계수 $\mathrm{E_e(t)} = \psi(\mathrm{t}) \times 4{,}700 \times \sqrt{\mathrm{f_{cu}(t)}}$ 식 3.6

여기서, $\psi(t)$: 온도가 상승할 대 크리프의 영향이 커짐에 다른 탄성계수 보정계수

① 재령 3일까지 = 0.73

② 재령 5일 이후 = 1.00

③ 재령 3일에서 5일까지는 직선보간법으로 구한다.

2.4.2 열응력 해석

(1) 열응력을 구하고자 할 때는 부재에서 균열 발생 위험이 가장 큰 위치 및 재령에서 열응력을 산정하여야 한다. 계산방법은 그 목적에 따라서 적절한 방법을 선택하여야 한다.

(2) 열응력은 새로 타설한 블록 내의 온도차만으로 발생하는 내부구속 응력과 새로 타설한 블록의 온도변화로 인한 열변형이 외부구속되기 때문에 발생하는 외부구속 응력이 있으며, 외부 구속체가 경화한 콘크리트 또는 암반 등인 경우에는 구속체와 새로 타설한 콘크리트 블록 경계면에는 활동이 발생하지 않는 것으로 간주하여 그 구속효과를 산정하는 것을 원칙으로 한다.

(3) 중요한 구조물에 대하여 해석을 수행할 때에는 요구되는 정밀도가 얻어질 수 있도록 요소(element) 분할의 정도, 해석영역, 경계조건 설정, 구속체와 피구속체의 물성값 선택 등에 충분히 주의하여야 한다. 또한, 부재의 크기가 매우 큰 경우 최종 안정온도에 도달했을 때의 응력도 고려하여야 한다.

2.4.5 온도균열폭 제어

(1) 기존의 실적으로부터 열응력 및 온도균열 발생이 문제가 되지 않는다고 판단되는 경우나 열응력 해석으로부터 산정한 온도균열지수가 1.50 이상이면 별도의 온도균열 제어 대책을 수립하지 않을 수 있다.

(2) 구조물의 내구성에 손상을 줄 수 있는 큰 폭의 유해한 온도균열을 철근에 의해 제어할 경우에는 먼저 기존에 배치된 철근으로부터 균열폭이 제어되는지 검토하고 철근량이 부족한 경우에는 추가의 온도철근을 배치하여야 한다.

3. 수화열 제어

3.1 일반사항

(1) 부재 분할 계획은 댐 콘크리트에 발생하는 유해한 온도균열을 방지할 수 있도록 계획하여야 한다.

3.2 분할타설 높이와 간격

(1) 분할타설 높이와 간격은 댐 콘크리트에 유해한 온도균열이 발생하지 않도록 충분히 고려하여 결정하여야 한다.

3.3 블록간 타설간격

(1) 블록간 타설간격은 균열제어의 관점으로부터 구조물의 형상과 구속조건에 따라 적정하게 선정하여야 한다.

(2) 열응력은 신구 콘크리트 유효탄성계수 및 온도차가 크면 클수록 커지므로 신구 콘크리트 블록간 타설간격을 지나치게 길게 하는 것을 피하여야 한다.

(3) 부재를 몇 개의 블록으로 나누어 타설할 경우, 타설간격을 너무 짧게 하면 앞서 타설한 블록이 새로 타설한 블록의 온도에 영향을 주고, 결국 부재 전체의 온도가 상승하여 균열 발생 위험이 커질 우려가 있으므로 이를 고려하여 타설계획을

수립하여야 한다.

3.4 선행 냉각

(1) 타설온도를 낮추는 방법으로 물, 골재 등의 원재료를 미리 냉각시키는 선행 냉각 방법이 있으며, 선행 냉각은 냉수나 얼음을 따로 혹은 조합해서 사용하는 방법, 냉각한 골재를 사용하는 방법, 액화질소를 사용하는 방법 등이 있으며 이들 중 적정한 방법을 고려하여야 한다.

(2) 배합수의 일부로서 얼음을 사용하는 경우에는 그 얼음은 콘크리트 믹싱 종료 전에 완전히 녹아 있어야 한다.

(3) 온도균열 제어 관점에서 타설온도는 가능한 한 낮게 관리하여야 한다.

3.5 양생온도

(1) 양생은 콘크리트의 온도변화를 제어하기 위하여 적정한 방법에 따라 실시하여야 하며, 부재의 온도가 가능한 한 천천히 외기온도에 수렴하도록 하기 위해 필요에 따라 부재 표면의 보온 및 보호조치 등을 취하여야 한다.

3.6 관로식 냉각

(1) 콘크리트 타설 후 콘크리트 온도제어 대책으로 파이프쿨링을 검토할 수 있는데, 소정의 효과를 거둘 수 있도록 파이프의 재질, 지름, 간격, 길이, 냉각수 온도, 순환속도, 통수기간 등을 검토한 후 적용하여야 한다.

제 4장 재 료

1. 일반사항

(1) 재료는 시험 등에 의하여 그 품질을 확인한 것을 사용하여야 한다.

2. 구성재료

2.1 시멘트

(1) 시멘트는 콘크리트의 강도 및 내구성을 만족시킬 수 있어야 하고, 되도록이면 부재의 온도상승이 적은 것을 택하며, 구조물의 종류, 환경조건, 시공조건 등을 고려하여 적절히 산정하여야 한다.

(2) 시멘트는 수화열이 작은 것이어야 한다.

2.2 광물질 혼화재료

(1) 고로 슬래그 미분말은 온도의존성이 크기 때문에 콘크리트 타설온도가 높아지면 고로 슬래그 미분말을 사용하지 않는 경우보다 발열속도가 증가하여, 오히려 수화열이 상승하는 경우도 있으므로 사용 전에 시험에 의해 그 특성을 확인해 두어야 한다.

(2) 저발열형 시멘트에 석회석 미분말 등을 혼합하여 수화열을 더욱 저감시킨 혼합형 시멘트는 충분한 실험을 통해 그 특성을 확인할 필요가 있다.

(3) 저발열 시멘트는 장기 재령의 강도 증진이 보통 포틀랜드 시멘트에 비하여 크므로, 91일 장기재령을 설계기준 압축강도의 기준 재령으로 정하는 것이 바람직하다. 구조체 콘크리트 강도관리를 위한 공시체 양생방법은 표준양생으로 하여야 한다.

(4) 플라이 애쉬는 KS L 5405에 적합한 것을 표준으로 한다. KS L 5405에 적합하지 않은 것을 사용하는 경우에는 시험에 의하여 그 품질의 적합성을 확인한 후에 사용하여야 한다.

(5) 고로 슬래그 미분말은 KS F 2563에 적합한 것을 표준으로 한다. KS F 2563에 적합하지 않은 것을 사용하는 경우에는 시험에 의하여 그 품질의 적합성을 확인한 후에 사용하여야 한다.

(6) 상기 (4), (5) 이외의 광물질 혼화재료를 사용하는 경우에는 시험에 의하여 그 품질의 적합성을 확인한 후에 사용하여야 한다.

2.3 저온소성 MgO

(1) MgO는 부록 A의 콘크리트용 저온소성 MgO의 품질사양을 만족시키는 것이어야만 한다.

(2) 전체 MgO의 함량이 결합재량의 5%를 초과하는 경우, KS L 5107에 따른 오토클레이브 팽창도 시험이 수행하여야 한다.(부록 D를 참고하여 시행)

(3) MgO 콘크리트 자기수축 시험은 각기 다른 양생온도 조건에서 수행되어야 하고, 시험결과가 제시되어야 하며, 그 값은 시공단계별 해석에 적용하여야 한다.

(4) MgO 콘크리트의 단열온도상승시험, 탄성계수 시험, 인장강도 시험 등이 수행하여야 한다.

2.4 잔골재

(1) 잔골재는 콘크리트 표준시방서 2009「제 2장 2.1.3 잔골재」에 따른다.

2.5 굵은 골재

(1) 골재는 소요의 내구성을 가지며 온도변화에 의한 체적변화가 되도록 작은 것을 선정하여야 한다.

(2) 굵은 골재의 최대치수는 작업성이나 건조수축 등을 고려하여 되도록 큰 값을 사용하여야 한다.

2.6 배합수

(1) 배합수는 특히 하절기의 경우 콘크리트의 비비기 온도를 낮추기 위해 되도록이면 저온의 것을 사용하며, 콘크리트 배합 온도를 제어할 목적으로 얼음을 사용할 경우에는 배합 후 콘크리트 속에 얼음 덩어리가 남아 있지 않도록 하여야 한다.

3. 저장

3.1 일반사항

(1) MgO 콘크리트 원재료 선정은 「콘크리트 표준시방서 2009」의 해당 규정과 부록 A의 요구조건을 만족하여야 한다.

(2) 댐 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 빈배합이므로 적당량의 석분을 함유한 잔골재가 콘크리트 품질관리에 유리할 수 있다. 석분의 함량이 낮은 경우 플라이애쉬로 대체될 수 있다. 이때 단위 시멘트량을 줄여서는 안 된다.

(3) 원재료 저장량은 연속시공에 지장이 없도록 충분하여야 한다.

(4) 콘크리트 혼화재료의 종류 및 량은 시험에 의해 결정하여야 한다.

3.2 결합재 저장

(1) 결합재는 소요의 품질을 확보할 수 있는 방법으로 저장하여야 한다.

(2) 시멘트와 광물질 혼화재료를 현장에서 혼합하는 경우, 각각의 재료는 상기 (1)과 같은 방법으로 저장하여야 한다.

3.3 화학 혼화재료 저장

(1) 화학 혼화재료는 소요의 품질을 확보할 수 있는 방법으로 저장하여야 한다.

3.4 골재 저장

(1) 골재는 잔골재와 굵은 골재로 분리하고, 굵은 골재는 소정의 입경별로 분리하여 저장한다.

(2) 골재 저장설비는 표면수율이 안정적인 골재를 공급할 수 있는 구조이어야 한다.

(3) 골재 저장은 알맞은 배수설비와 배수시간에 의해 표면수가 일정한 골재를 사용할 수 있도록 하여야 한다.

(4) 서중 콘크리트 생산온도 관리를 위하여 골재 저장설비에 선행 냉각 설비의 필요 여부를 사전에 검토하여야 한다.

4. 배합

4.1 일반사항

(1) 매스 콘크리트 재료선정 및 배합설계를 할 때에는 설계기준강도와 소정의 작업성을 만족하는 범위 내에서 콘크리트의 온도상승이 최소가 되도록 정하여야 한다.

(2) 콘크리트 발열량은 대체적으로 단위 시멘트량에 비례하므로 콘크리트 온도상승을 감소시키기 위해 소요의 품질을 만족시키는 범위 내에서 단위 시멘트량이 적어지도록 배합설계하여야 한다.

(3) 댐 콘크리트는 댐의 안전성과 저수 기능을 확보하는데 필요한 강도, 수밀성, 내구성 및 열특성을 가져야 한다.

(4) 댐 콘크리트 품질은 댐 콘크리트 요구조건을 만족시키는 동시에 매스 콘크리트의 요구조건 또한 만족시켜야 한다.

5. 계량 및 생산

5.1 일반사항

(1) 혼합설비는 MgO 혼합 방식에 따라 결정되는데, 현장혼합 방식인 경우 혼합시간을 늘려서 MgO가 충분히 혼합될 수 있게 하여야 한다. MgO를 시멘트 플랜트에서 시멘트와 함께 분쇄하는 경우 연속식 믹서도 가능하다.

(2) 콘크리트 생산배치플랜트의 모든 재료는 질량으로 계량되고 적절한 설비 시스템으로 제어하여야 한다. 시멘트(고로 슬래그 미분말 포함) 및 물의 허용 계량오차는 ±1%, 광물질 혼화재료(고로 슬래그 미분말 제외)의 허용 계량오차는 ±2%, 골재 및 화학 혼화재료의 허용 계량오차는 ±3%이다.

(3) 시험배합은 시험실 주관으로 시험 대상 배합에 대하여 수행하여야 한다.

(4) 필요 시 MgO 혼입 콘크리트의 균질성이 검증하여야 한다.

(5) 콘크리트 혼합은「콘크리트 표준시방서 2009」의 해당 규정에 따라야 한다.

5.2 재료 계량

(1) 재료 계량장치는 소정의 정도로 재료를 계량할 수 있는 것이어야 한다.

(2) 재료는 시방배합을 현장배합으로 수정하고 현장배합에 따라 계량하여야 한다.

(3) 골재 표면수율은 정기적으로 측정하고, 그 결과를 현장배합에 반영하여야 한다.

5.3 생산

(1) 댐 콘크리트 생산 시 사용되는 믹서는 충분한 성능을 가지고 콘크리트를 출하할 때 재료분리를 일으키지 않는 것이어야 한다.

(2) 재료 투입 순서나 믹싱 시간은 시험에 근거해서 결정한다.

제 5장 품질관리

1. 일반사항

(1) 댐 콘크리트에 필요한 품질을 확보하기 위해서 공사중에는 재료의 품질, 배합, 굳지 않은 콘크리트 성질, 표준 공시체 강도, 현장다짐 등에 의해 관리하여야 한다.

(2) 콘크리트 소요의 품질확보가 어려울 것으로 판단될 경우 재료, 배합설계, 혼합 방법 또는 다짐 방법 등을 변경하여야 한다.

2. 원재료 품질관리

(1) 시멘트 및 광물질 혼화재료의 품질은 제조공장에서 작성한 시험성적서 또는 필요에 따라 현장에서 수행한 추가 시험결과에 근거해서 관리하여야 한다.

(2) 골재의 품질은 밀도, 흡수율, 조립률 등의 필요 항목을 관리하여야 한다.

3. 콘크리트 품질관리

3.1 배합관리

(1) 댐 콘크리트의 배합은 재료의 계량기록에 의해 관리하여야 한다.

(2) 댐 콘크리트 시공에 적합한 작업성을 갖는 범위 내에서 될 수 있는 대로 된 반죽이어야 한다.

(3) 롤러다짐용 콘크리트의 반죽질기시험은 VC시험을 사용하며, 20±10초를 표준으로 한다

(4) 댐 콘크리트의 단위질량은 콘크리트 댐의 구조설계에 사용한 값에 대해서 설계상 안전측 또는 설계상 허용되는 변동폭 이내에 들어야 한다.

3.2 굳지 않은 콘크리트

(1) 굳지 않은 콘크리트 반죽질기, 단위질량, 공기량 등의 필요 항목을 관리하여야 한다.

3.3 굳은 콘크리트

(1) 굳은 콘크리트 품질은 압축강도 등의 필요 항목을 관리하여야 한다.

(2) 댐 콘크리트의 탄성계수, 포아송비 및 열팽창계수 등의 역학특성은 콘크리트 댐의 구조설계에 사용한 값에 대해서 설계상 허용되는 변동폭 이내에 들어야 한다.

(3) 댐 콘크리트의 설계기준강도는 구조계산에 의해 구한 댐체 내의 응력 크기에 적절한 안전율을 곱하여 정하여야 한다.

(4) 댐 콘크리트의 배합강도는 별도로 기준이 주어지지 않은 경우에는 콘크리트 표준시방서 2009「제 2장 2.4.2 배합강도」에 따른다.

(5) 댐 콘크리트는 댐의 저수 기능을 확보하는데 필요한 수밀성을 가지는 것이어야 한다.

(6) 댐 콘크리트는 목표 내구수명 동안 댐 구조 안전성과 저수 기능을 유지하는데 필요한 내구성을 가지는 것이어야 한다.

(7) 댐 콘크리트의 단열온도상승량, 열전도율, 비열 및 열확산률의 값은 콘크리트 댐의 수화열 제어 계획에 사용한 값과 비교해서 설계상 허용되는 변동폭 이내이어야 한다.

4. 시공 중 품질관리

(1) 품질관리는 콘크리트 표준시방서 2009 제 2장「3.8 현장 품질관리」의 해당요건 외에 표 5.2 따른다.

(2) 탈형 후에 통상의 검사에 추가하여 온도균열 검사를 실시하여 유해한 온도균열이 발생한 것으로 판단되는 경우에는 보수 등 적정한 조치를 취하여야 한다.

(3) 양생기간 중에는 콘크리트의 온도상승 속도, 최대온도, 강하속도, 온도분포 등이 사전의 예측값과 비교하여 큰 차이가 없는지 확인하여야 한다. 만약 예측값과 큰 차이가 발생한 경우에는 그 원인을 규명하고 책임기술자는 적정한 조치를 취하여야 한다.

[표 5.1] 매스 콘크리트 온도관리

항 목	시험·검사 방법	시기·횟수	판정 기준
타설온도	실시간 온도계측 및 분석	협의에 의해 정함	계획된 온도관리 기준에 부합할 것
양생온도			
균 열	육안관찰		예상된 온도균열 수준일 것

제 6장 시 공

1. 일반사항

(1) 사전에 검토한 온도균열 제어 대책의 효과가 얻어지도록, 또한 대량의 콘크리트를 연속적으로 시공하기 위한 모든 조건을 만족하도록 운반, 타설, 양생 등에 대하여 적절한 조치를 취하여야 한다.

(2) 넓은 면적에 타설할 경우에는 콜드조인트가 발생하지 않도록 하나의 시공구간 면적, 레디믹스트 콘크리트 생산 및 운반 능력, 이어치기 허용시간 등을 고려하여 시공계획을 수립하여야 한다. 특히, 기온이 높은 경우에는 콜드조인트가 발생하지 않도록 지연제 사용, 타설 블록 크기 조정 등의 대책을 고려하여야 한다.

(3) 타설 후 침하가 커서 침하균열이 발생할 수 있으므로, 침하가 우려되는 경우에는 재다짐 등을 실시하여야 한다.

2. 콘크리트 운반

(1) 콘크리트 생산 및 운반 설비는 콘크리트 타설 능력과 현장 여건에 적합한 것이어야 한다.

(2) 콘크리트 타설방식은 콜드조인트가 생기지 않도록 연속타설이 가능한 방식이어야 한다.

(3) 기타 운반에 관한 사항은「콘크리트 표준시방서 2009」의 해당 규정에 따라야 한다.

(4) 댐 콘크리트 운반설비는 소요의 운반성능을 가지고 있고, 댐 콘크리트의 출하, 운반 및 배출할 때 재료분리가 발생하지 않는 설비이어야 한다.

(5) 생산된 댐 콘크리트는 신속히 타설 장소로 운반하여야 한다.

3. 콘크리트 타설 및 다짐

3.1 일반사항

(1) 결정된 타설구획 내에 댐 콘크리트 운반, 타설 및 다짐은 연속적으로 신속하게 수행해야 하며, 타설구획 내 댐 콘크리트 타설의 순서는 타설중에 노출면적이 가능한한 작도록 결정하여야 한다.

(2) 댐 콘크리트의 품질에 영향이 작은 강우 때에는 댐 콘크리트를 타설할 수 있다. 또한, 작업 중 강우에 의하여 어쩔 수 없이 타설을 중단하는 경우에는 그 타설 정지면을 수평 시공이음 처리하여야 한다.

3.2 타설 준비

(1) 암반 위에 댐 콘크리트를 타설할 경우에는 암반 표면의 약한 암, 암 부스러기 및 기타 이물질을 제거하고 용수가 있는 곳은 적정한 방법으로 조치하여야 한다.

(2) 굳은 댐 콘크리트 위에 새로운 댐 콘크리트를 타설할 경우에는 수평시공이음의 처리 및 청소를 하여야 한다.

3.3 타설

(1) 댐 본체 콘크리트 타설은 콜드조인트가 생기지 않도록 연속적으로 이루어져야 한다.

(2) 콘크리트 진동다짐은 저슬럼프 콘크리트에 적합한 진동기를 이용하여 수행하여야 한다.

(3) 기타 타설에 관한 사항은「콘크리트 표준시방서 2009」의 해당 규정에 따라야 한다.

(4) RCD용 콘크리트에 관한 사항은「콘크리트 표준시방서 2009」의 해당 규정에 따라야 한다.

3.3.1 저슬럼프

(1) 타설 위치에 댐 콘크리트를 배출할 때에는 재료분리가 발생하지 않도록 주의하여야 한다.

(2) 콘크리트를 타설하는 한 층의 두께는 내부진동기의 길이와 성능을 고려하여 결정하여야 한다.

3.3.2 RCD 콘크리트

(1) 타설 위치에 콘크리트를 배출할 때에는 재료분리를 최소한으로 억제하도록 주의하여야 한다.

(2) 타설 위치에 배출한 RCD용 콘크리트는 불도저로 포설하면서 균질하게 되도록 타설하여야 한다. 또한, 한 층당 포설 두께는 댐 콘크리트의 혼합이 쉬운 정도와 불도저에 의한 다짐 효과를 고려하여 결정하여야 한다.

3.4 다짐

3.4.1 저슬럼프 콘크리트

(1) 콘크리트 다짐은 충분한 다짐성능을 갖는 내부진동기를 이용하여 수행하여야 한다.

(2) 콘크리트는 재료분리가 발생하지 않도록 하는 동시에 충분히 다짐하여야 한다. 특히, 이종 콘크리트의 경우 경계부는 다짐할 때 주의를 기울여 일체화를 도모하여야 한다.

3.4.2 RCD 콘크리트

(1) RCD용 콘크리트를 다짐할 때에는 충분한 다짐성능을 갖고 있는 진동롤러를 이용하여야 한다.

(2) RCD용 콘크리트의 생산부터 다짐까지는 콘크리트 표준시방서 2009의 해당 기준에 따라야 한다.

(3) RCD용 콘크리트는 충분한 다짐 밀도를 얻을 수 있도록 다짐하여야 한다. 특히, 타설구획간 경계부나 이종 콘크리트 경계부를 다질 때 주의해 일체화를 도모하여야

한다.

3.5 표면 마무리

(1) 저수지에 접하는 댐 상류면은 소요의 수밀성을 확보할 수 있도록 마무리하여야 한다.

(2) 외부에 노출되는 댐 하류면은 소요의 내구성을 확보할 수 있도록 마무리하여야 한다.

(3) 월류부, 도류부 및 감세지 콘크리트 표면은 유수에 의한 침식에 버틸 수 있도록 평탄하게 마무리하여야 한다.

4. 콘크리트 양생

4.1 일반사항

(1) 콘크리트 타설 완료 후 표면이 어느정도 경화되면 콘크리트 표면의 습윤상태를 유지하여야 한다.

(2) 댐 본체의 보온양생이 필요한 경우 작업이 가능할 만큼 콘크리트가 경화된 즉시 이루어져야 한다.

(3) 동절기 및 하절기에 시공되는 콘크리트에 관한 사항은 「콘크리트 표준시방서 2009」의 해당 규정에 따라야 한다.

4.2 양생

(1) 댐 콘크리트 타설 후에는 살수양생 또는 담수양생을 실시하여 부재 표면을 습윤상태로 유지하여야 한다.

(2) 댐 콘크리트 타설 후에는 부재 표면이 저온에 노출되지 않도록 해야 하며, 필요 시 보온양생을 실시하여야 한다.

(3) 댐 콘크리틀 양생방법과 양생기간은 외기온도, 환경조건, 타설 스케줄 등을 고려하여 결정하여야 한다.

4.3 표면 보호

(1) 댐 콘크리트는 양생 중에 과도한 진동, 충격, 하중 등의 유해한 영향을 받지 않도록 보호하여야 한다.

(2) 장기간 타설을 중단하는 경우에는 댐 콘크리트의 동결 및 유해한 온도균열 발생을 억제하기 위하여 콘크리트 표면을 적정한 방법으로 보호하여야 한다.

5. 콘크리트 품질관리

(1) 콘크리트 품질관리와 시험은 「콘크리트 표준시방서 2009」의 해당 규정에 따라야 한다.

(2) MgO 혼입 콘크리트 제조 시 MgO를 현장에서 혼합하는 경우, 현장에서 콘크리트 균질성이 확보될 수 있도록 방안이 수립되어야 하며, 확인 시험을 거쳐야 한다. 시멘트 플랜트에서 MgO 분쇄와 혼합이 이루어지는 경우, 현장 시험은 생략한다.

[부록 A] 콘크리트용 저온소성 MgO의 품질사양

MgO 혼입 장기팽창성 콘크리트는 콘크리트 구조물의 품질개선을 위하여 새롭게 개발된 기술이다. 저온소성 MgO의 장기팽창성은 콘크리트의 수축으로 인한 인장응력을 보상함으로써 균열로 인한 누수 방지, 수화열 제어 방안의 단순화, 시공 원가절감 및 공기단축 방안으로 활용될 수 있다.

A.1 일반사항

A.1.1 MgO의 장기팽창성을 확보하고, 유해한 팽창을 방지하기 위하여 양질의 MgO가 사용하여야 한다. 따라서, 물리성능 및 화학성분과 생산 품질관리 요구사항이 규정된다.

A.1.2 실제 시공 경험과 MgO 혼입 콘크리트의 팽창성 시험 결과를 바탕으로 품질사양이 결정되었다. 본 품질기준은 MgO 혼입 장기팽창성 콘크리트에 적용될 수 있다.

A.1.3 저온소성 MgO의 안정적 품질관리를 위해 콘크리트용 MgO는 별도의 공정으로 생산하여야 한다.

A.2 MgO의 물리성능 및 화학성분

A.2.1 순수 MgO 함량 ≥ 90%
A.2.2 활성지수 240±40초
A.2.3 CaO 함량 < 2%
A.2.4 0.08mm 표준체 잔량 ≤ 3%
A.2.5 강열감량 ≤ 4%
A.2.6 SiO_2 함량 < 4%

A.3 MgO 생산 중 품질관리

A.3.1 물리성능 및 화학성분은 활성도에 따라 좌우되므로 활성도는 엄격하게 관리하여야 한다. 생산 중 품질관리를 위하여 60ton 이하의 포장단위마다 30번의 시료가 채취되어야 하며, 변동계수는 0.1이하이어야 한다. 변동계수가 0.1을 초과하는 MgO는 사용될 수 없다. 각 포장단위마다 활성도 시험 이외의 시험도 수행하여야 한다.

A.3.2 MgO 생산품은 화학성분 및 물리성능 시험성적서를 갖추어 출하하여야 한다.

A.3.3 마그네사이트의 직경은 50~150mm로 제어하여야 한다. 이때 직경은 소성로에서 소성된 후 반출된 상태에서 측정하여야 한다.

A.3.4 저온소성 공정에서 소성온도는 매우 중요하다. 1,050±50℃로 일정하게 유지되어야 하며, 최대 온도는 30분 동안 유지하여야 한다.

A.3.5 저온소성 MgO는 쉽게 풍화될 수 있다. 따라서, 방습이 될 수 있게 밀봉되어야 하며, 운송과 저장에 용이하게 포장하여야 한다. 출고 이후 사용기한은 3개월이다. 사용기한이 지난 제품은 재시험을 거쳐야 한다.

[부록 B] MgO 활성지수 시험 방법

B.1 일반사항

저온소성 MgO 활성지수는 MgO의 반응성을 판단하는 지표로써, 그 값은 240±40초이어야 만 콘크리트용으로 사용이 가능하다.

B.2 시험방법

B.2.1 1.7g의 MgO 샘플을 pH=7인 증류수 100ml에 녹인다.

B.2.2 구연산 2.6g을 증류수 100ml에 녹인다.

B.2.3 B.2.1 용액과 B.2.2 용액을 섞는다. 이때 혼압액의 온도는 30~35℃를 유지한다.

B.2.4 교반하면서, 즉시 1~2 방울의 페놀프탈레인 용액을 넣는다.

B.2.5 혼합액이 옅은 붉은색을 띄기 시작할 때까지 걸린 시간을 측정한다. 이때 측정된 시간(초)이 MgO의 활성지수이다.

[부록 C] 콘크리트 장기팽창 시험 방법

C.1 일반사항

C.1.1 본 시험 방법은 콘크리트 체적변화를 측정하는 기술에 관한 것으로, 측정에 필요한 장비 및 시편 제작방법, 측정방법 및 측정결과 분석방법 등을 설명한다.

C.1.2 본 시험 방법을 이용하여 장기팽창을 측정함으로써 궁극적으로 콘크리트의 균열을 제어하여 구조물의 사용성 및 내구성을 향상시키는데 그 목적이 있다.

C.1.3 본 시험방법은 장기팽창성 콘크리트 시편의 장기팽창을 측정하기 위한 것이다.

C.2 시험시편

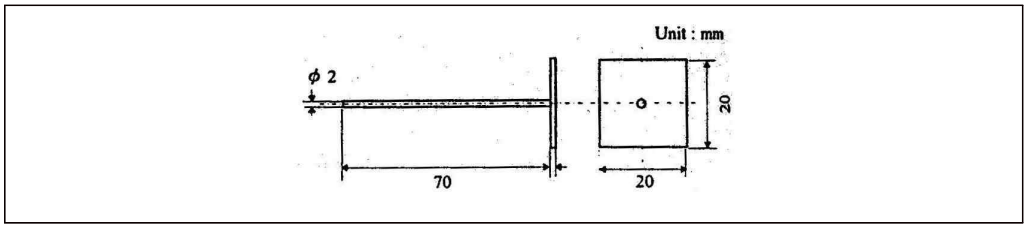
C.2.1 시편의 크기
콘크리트 시편의 폭과 높이는 같아야 하며, 굵은 골재 최대치수의 3배 이상이어야 한다. 시편의 길이는 폭과 높이의 3.5배 이상이어야 한다. 굵은 골재 최대치수가 30 이상이면 100×100×400(또는 500)의 시편을 사용한다.

C.2.2 시편의 수
각각의 시험에 대하여 시편은 최소 3개 이상이어야 한다.

C.3 시험장비

C.3.1 몰드
몰드는 강재 등으로 제작되어야 하며, 충분한 강성을 가져야 한다. 몰드 길이방향 양쪽 끝 판의 중심부에는 게이지 플러그를 끼울 수 있도록 직경 3~5의 구멍이 있어야 한다.

C.3.2 게이지 플러그
게이지 플러그는 길이변화 측정 포인트를 설정하는데 사용되며, 변위계와 연결될 수 있어야 한다. 다음 그림 C.1은 게이지 플러그의 예이다.



[그림 C.1] 게이지 플러그

C.3.3 변위계

변위계로는 다이얼 게이지 및 LVDT가 이용될 수 있다. 다이얼 게이지를 사용할 경우, JIS B 7503에 적합하여야 한다. 변위계는 0.001 이상의 정밀도를 가져야 한다.

C.3.4 변형계

탈형 후 변형을 측정할 때에는 JIS A 1129에 따른 비교측정 방법(comparator method) 또는 부착 게이지 측정방법(contact gauge method) 등이 이용된다.

C.4 시험방법

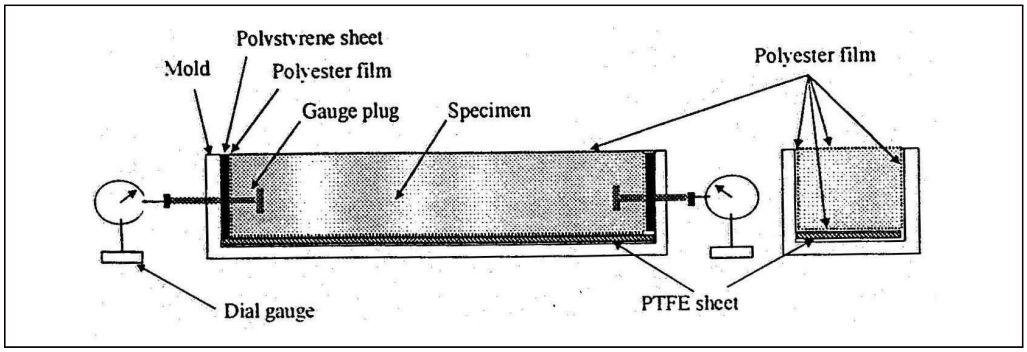
C.4.1 몰드 제거 전까지의 길이변화

① 몰드 처리

두께 1의 PTFE(Poly Tetra Fluor Ethyleme) 시트를 몰드의 안쪽 바닥에 깔아야 하며, 두께 3의 polystyrene 시트를 길이방향 양쪽 끝 판 안쪽에 대어서 시편의 자유로운 이동이 저항을 받지 않도록 하여야 한다. 두께 0.1의 polyester 필름을 PTFE 시트 위와 polystyrene 시트 및 몰드의 나머지 안쪽 면에 대어 몰드와 시편의 부착이 발생하지 않게 한다.

② 변위계 설치

몰드의 양쪽 끝 판의 구멍에 게이지 플러그를 끼운다. 이때 게이지 플러그의 주축과 시편의 길이방향 축이 일치하여야 한다. 시편에 묻히는 게이지 플러그의 길이는 30±5로 한다. 게이지 플러그의 양쪽 끝 사이의 초기 거리(L)를 1의 정밀도로 측정한다.



[그림 C.2] 탈형 전 길이변화 측정

③ 콘크리트 타설

콘크리트를 몰드 안에 부어 넣고 잘 다진다. 이때 게이지 플러그가 진동에 의해 움직이지 않게 주의한다.

④ 시편 양생

콘크리트 표면을 마무리하고 두께 0.1의 polyester 필름과 젖은 헝겊을 사용하여 덮어 콘크리트에서 물의 증발이 발생하지 않게 한다. 시편을 20±2℃의 온도 조건에서 보관한다.

⑤ 초기값 측정

초결의 시점에서 게이지 플러그와 다이얼 게이지를 연결한다. 이때 다이얼 게이지의 주축과 시편의 길이방향 축이 일치하여야 한다. 다이얼 게이지의 초기값(X_{oa}와 X_{ob})를 기록한다.

⑥ 변위 측정

재령 24시간에서 다이얼 게이지 값들(X_{ia}와 X_{ib})을 적는다. 필요하다면 초결과 재령 24시간 사이의 값들을 기록한다.

⑦ 온도 측정

시편 중심부의 온도를 측정한다. 온도변형은 측정된 변형에서 제거되어야 하며, 콘크리트의 열팽창계수는 10×10^{-6}/℃를 사용한다.

C.4.2 몰드 제거 후의 길이변화

① 시편 탈형 및 실링

몰드에서 시편을 재빨리 제거한 후 시편의 무게를 측정하고 시편의 표면을 두께 0.05의

알루미늄 접착 테이프를 사용하여 완전히 밀봉한다.

② 시편의 길이 측정
시편의 길이를 측정한다.

③ 시편 양생
시편을 비닐봉지에 넣고 밀봉한 후 20±2℃의 온도에 보관한다.

④ 재령별 길이변화 측정
시편의 길이를 필요한 장기 재령 동안에 측정하여 장기팽창성 확인한다.

C.4.3 장기팽창 계산

장기팽창을 다음 식에 의해 변형률(ΔL)로 표현하고, 시험 시편의 평균값을 취한다.

탈형 전, $\Delta L = \Delta L_1$

탈형 후, $\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2$

여기서, ΔL : 길이 변형률

1. ΔL_1 : 탈형 전 길이 변형률 $\Delta L_1 = \dfrac{(X_{ia} - X_{0a}) + (X_{ib} - X_{0b})}{L}$

ΔL_2 : 탈형 후 길이 변형률

L : 게이지 플러그 사이의 거리

X_{0a}, X_{0b} : 다이얼 게이지 초기값

X_{ia}, X_{ib} : i시점에서의 다이얼 게이지 값

C.5 매립형 스트레인 게이지를 이용한 팽창시험

① 몰드 처리

두께 3의 polystyrene 보드를 길이방향 양쪽 끝 판 안쪽에 대고 두께 1mm의 polystyrene 보드를 몰드의 바닥과 나머지 안쪽 면에 대어 대어서 탈형 전 시편의 팽창이 몰드에 구속받지 않도록 한다. 또한 두께 0.1의 Teflon 시트를 polystyrene 보드 안쪽 면에 대어 시편과 polystyrene 보드의 부착이 발생하지 않게 한다.

② 게이지

스트레인 게이지는 몰드의 정중앙에 위치할 수 있도록 한다. 또한 콘크리트의 수화열에 의한 온도 팽창을 보정하기 위해 스트레인 게이지와 함께 Thermocouple을 매립하여 온도 모니터링을 실시하도록 한다.



[그림 C.3] 탈형 전 시편의 길이변화 측정

③ 콘크리트 타설

콘크리트를 몰드 안에 부어 넣고 잘 다진다. 이때 콘크리트는 2층으로 다지며 스트레인 게이지가 몰드 길이방향으로 평행하게 매립될 수 있도록 주의 한다.

④ 시편 양생

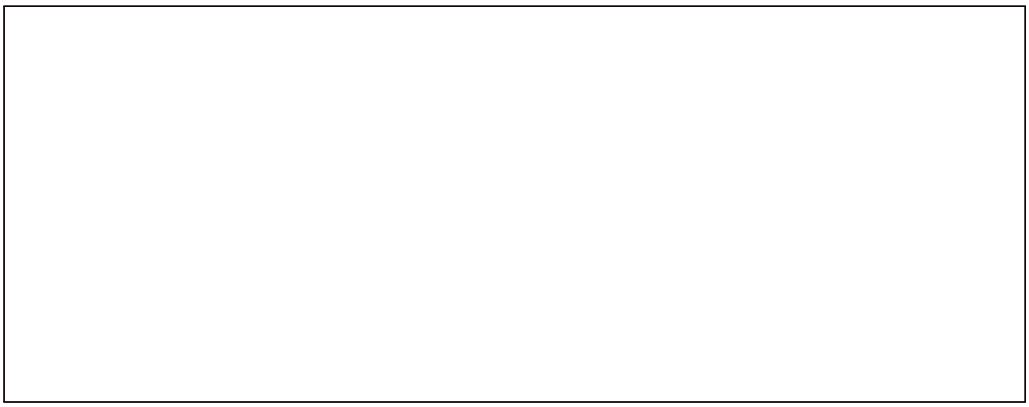
콘크리트 표면을 마무리하고 두께 0.1의 polyester 필름으로 표면을 덮어 콘크리트의 수분이 증발하지 않도록 한다. 시편을 20±2℃의 온도 조건에서 보관한다.

⑤ 게이지 연결

스트레인 게이지와 Thermocouple을 데이터 수신 장치에 연결하고 시편의 초기 스트레인을 측정한다. 이후 일정한 간격에 따라 시편의 길이변화와 온도를 측정한다.

⑥ 시편 탈형 및 밀봉

콘크리트 타설 후 24시간 이전에 탈형을 실시하며, 이때 매립된 게이지가 손상되지 않도록 주의한다. 탈형한 시편은 두께 3의 polystyrene 보드를 이용해 만든 6면체 상자에 넣고 상자의 표면을 두께 0.05의 알루미늄 접착 테이프로 밀봉하여 수분의 이동을 방지한다. 이때 polystyrene 상자와 시편 사이의 공간이 4±1mm정도 확보되게 하여 상자가 시편의 팽창을 구속하지 않게 한다.



[그림 C.4] 탈형 후 실링한 시편의 길이변화 측정

⑦ 시편 양생

밀봉한 시편은 20±2℃의 온도에 보관한다.

⑧ 길이변화 측정 및 데이터정리

데이터 수신 장치를 통해 시편의 길이변화를 장기 재령까지 측정한다. 시편의 온도가 24시간 이상 동일하게 유지되는 경우 Thermocouple을 이용한 시편의 온도 측정은 더 이상 실시하지 않아도 되며, 초기 재령에서 콘크리트 수화열에 의한 열팽창은 사용한 스트레인게이지의 온도보정식과 측정된 시편의 온도를 이용하여 보정하도록 한다.

[부록 D] 팽창도 시험시 참고 자료(중국 자료)

D.1 적용범위

이 방법은 다양한 MgO혼입 시멘트의 수화 불균형 페리클레이스(Periclase)에 의한 시멘트 모르타르 혹은 콘크리트의 체적변형을 측정하기 위해 적용한다.

D.2 측정장비

D.2.1 시험몰드
모르타르 몰드의 크기 : 30mm×30mm×280mm
콘크리트 몰드의 크기 : Grade 1 C1=55mm×55mm×280mm

D.2.2 네일(Nails), 템핑로드(Tamping rod) 그리고 콤퍼레이터(comparator)는 JC/T603를 만족하여야 한다.

D.2.3 믹서(Mixer) : GB/T 17671의 시멘트 잔 골재 믹서를 사용하여야 한다.

D.2.4 보일링 박스(Boiling box) : GB/T 1346의 규정을 따라야 한다.

D.2.5 오토클레이브 : 압력게이지와 자동제어장치, 안전벨브, 배출밸브, 전기히터가 설치되어 있는 고압 가스용기이다. 오토클레이브는 45분~75분 동안 2.0MPa까지 유압을 증가시킬 수 있어야 한다. 오토클레이브의 압력는 일정압력하에서 약 3시간동안 증기소모가 없이 자동적으로 (2.0±0.05) MPa (내부온도 (215.7±1.3) ℃와 동일)을 유지하여야 한다. 온도 상승을 시작하고 90분 후 오크클레이브의 압력은 2.0MPa에서 0.1MPa정도 떨어질 수 있다. 배출밸브는 온도상승 시점에서 오토클레이브 내부 공기의 배출 혹은 냉각시 남아있는 유압을 배출할 때 사용한다.

D.3 재료

D.3.1. 시멘트 시료는 0.9mm체를 통과한 시료여야 하며 골재시료는 표준시방서의 표준체를 통과한 시료여야 한다.

D.3.2. 시멘트, 플라이 애쉬, 혼화재, MgO, 잔골재와 굵은 골재는 관련규정의

요구조건을 만족하여야 한다.

D.4 시험조건

D.4.1 모든 시험재료와 시험몰드는 (20±3)℃를 유지하는 시험실에 시험 하루 전에 준비한다. 배합수와 양생수의 온도는 (20±2)℃을 유지하여야 한다.

D.4.2 양생 수조의 온도는 온도(20±3)℃, 습도는 95%를 유지하여야 한다.

D.4.3 시편길이 측정은 (20±0.5)℃의 온도를 유지하는 시험실에서 수행하여야 한다. 측정장비는 시험실 온도와 같아야 한다. 측정 시편은 일정온도의 시험실에 적어도 1시간이상 놓아두어야 한다.

D.4.4 오토클레이브 시험실은 별도로 사용해야 하며 환기장치와 수돗물이 설치되어 있어야 한다.

D.5 시편제작

D.5.1 시험몰드의 준비
몰드 내부에 오일을 얇게 바르고 몰드의 양쪽에 구멍을 내어 nail를 삽입한다. Nail의 돌출부분은 오일이 묻지 않도록 주의한다.

D.5.2 시멘트 모르타르 시편의 준비
시멘트 모르타르 재료는 콘크리트 작업에 사용된 것과 동일한 것을 사용하여야 한다. 잔골재는 표면건조습윤상태여야 하며 시멘트-잔골재비는 콘크리트와 같아야 한다. 혼화재, MgO양는 콘크리트의 시멘트 총량에 따라 계량하여야 한다. 혼화재는 잔골재 모르타르 시편에서는 필요치 않다. 프로젝트 규모에 따른 요구조건에 맞게 시멘트 모르타르 시편의 종류는 적어도 5종류 이상의 MgO 시편으로 구성할 수 있다. MgO양의 참고기준은 표 D.1에 나타내었다.

Table D.1 Reference table of MgO amount

Cementing material (%)		MgO expander amount (%)	Cementing material (%)		MgO expander amount (%)
cement	플라이애쉬		cement	플라이애쉬	
100	0	0、3、4、5、6、7	70	30	0、4、5、6、7、8
80	20	0、3、4、5、6、7	60	40	0、5、6、7、8、9、10

D.5.3 시멘트 모르타르 배합

시멘트 모르타르의 시편은 각 종류별 2개를 제작하여야 한다. 재료량은 시편체적에 따라 계량하며 MgO양은 성분비에 따라 계량한다. GB/T17671에서 사용한 방법에 따라 60초동안 건비빔을 하고 30초동안 천천히 물을 추가한다. 비빔은 (240±5)초 동안 실시 후 멈추고 다시 한번 비빈다.

D.5.4 시멘트 모르타르 시편의 제작

비빈 시멘트 모르타르를 준비된 시험몰드에 2층으로 균일하게 채운다. 첫번째 층은 시험몰드 전체높이의 2/3까지 투입한다. 시편의 양쪽에 nail를 삽입한다. Nail의 안쪽에서 시작하여 두 개의 nail 사이의 temper에 약 10배정도 앞뒤로 압력을 가한다. 이어서 시멘트 모르타르의 두번째 층을 성형한다. 시험몰드가 채워지면 tamper를 이용하여 12번 정도 시멘트 모르타르의 위아래로 압력을 가하여 성형한다. 압력을 가하는 동안 temper는 시멘트 모르타르 표면과 접해 있어야 하며 강하게 압착시킨다. 압착이 끝나면 몰드에 나머지 시멘트 모르타르를 투입하고 표면을 정리한다. 몰드에 번호를 부여하고 몰드가 완전히 성형될 때까지 24시간 정도 습윤양생실에 보관한다.

D.5.5 Grade 1 콘크리트 시편의 제작

시멘트 재료, 골재, Grade1 콘크리트의 단위질량은 dry sieving method에 의해 계산하여야 한다. Grade 1 콘크리트의 시멘트 재료는 일반적으로 260～280kg/m^3 골재비 S/a= 40~38%, MgO양은 표 D.1을 따른다.

D.5.6 콘크리트 배합

콘크리트 종류별 2개의 시편을 만든다. 재료량은 시편체적에 따라 계량하고 MgO는 성분비에 따라 계량한다. 배합방법은 두 단계를 포함한다. 첫 번째 단계는 위의 시멘트 모르타르 배합방법과 동일한 배합방법에 의해 시멘트 모르타르를 만드는 것이고 두 번째 단계는 시멘트 모르타르에 굵은 골재를 추가하고 배합기에 의해 배합하는 것이다.

D.5.7 콘크리트 시편의 제작

SL352의 방법을 따라야 한다. 진동판에서 다지는 동안, 시편은 다짐밀도를 증진하기 위해, 그리고 굵은 골재가 튀어 오르는 것을 방지하기 위해 덮개를 덮어야 한다.

D.6 시편 가열 및 양생

D.6.1 초기길이 측정

탈형 직 후 초기길이를 측정하여야 한다. 측정자는 측정 전과 후에 교정하여야 한다. 초기값과 이후 값에 0.001mm 이상 차이가 있는 경우, 재측정 하여야 한다.

D.6.2 시편 가열

초기길이 측정 후, 시편을 가마 속 선반에 넣는다. 3시간 동안 안정도 시험 방법에 의거 가열한다.

D.6.3 시편 양생

시편 가열이 완료된 즉시 전원을 끈다. 오토클레이브 전까지 시편은 가마 속 온수에 보관하여야 한다. 양생 시간은 보통 20시간 이상이다.

D.7 시편 오토클레이브

D.7.1 가열된 시편은 4일 동안 오토클레이브하여야 한다. 시편을 가마 속 선반에 간격을 두고 위치시킨다. 가마 속에서 지속적인 포화 수중기 확보를 위하여 증류수가 지속적으로 공급되어야 하고, 가마 체적의 7~10%에 해당하는 물(900ml 보다 작아서는 안됨)이 필요하고, 시편이 물 표면에 닿아서는 안 된다.

D.7.2 스팀 방출 밸브는 가열을 시작하는 시점에 열려있어야 한다. 스팀 방출 밸브를 닫고 가열 이후 45~75분이내에 압력을 (2.0±0.5)MPa까지 올린다. 다시 90분 뒤에는 0.1MPa 이하가 되도록 냉각한다.

D.7.3 가마를 열고 시편을 꺼내서 90℃ 이상의 물속에 넣는다. 차가운 물을 서서히 넣어서 15분 이내에 외기온도 수준까지 낮춘다. 차가운 물이 시편에 직접 닿아서는 안 된다. 15분이 경과한 후 시편을 꺼내서 길이측정을 할 수 있도록 닦는다. 곡률,

길이변화, 균열 등을 기록한다. 시편을 꺼낸 후 항온실에 보관한다. 1~2시간 식은 후 시편의 길이를 측정한다.

D.8 오토클레이브 후 시편 강도 측정

오토클레이브 및 길이 측정 후 휨강도 및 압축강도 시험이 수행하여야 한다.

D.9 오토클레이브 후 시편 강도 측정

D.9.1 시험 결과 계산

시편의 팽창률은 퍼센트(%)로 표현하여야 한다. 이 값은 두 개 시편의 평균값이어야 하고, 0.001mm까지 측정하여야 한다. 두 개 시편의 팽창률에 ±10% 이상 차이가 있을 때에는 재시험한다.

D.9.2 시편의 오토클레이브 팽창도 계산

$$\lambda = \frac{L_1 - L_0}{L} \times 100 \qquad \text{식 3.6}$$

여기서, λ : 시편의 오토클레이브 팽창도

L : 시편의 유효길이, 250mm

L_0 : 탈형 후 시편의 초기길이, mm

L_1 : 오토클레이브 후 시편의 길이, mm

D.9.3 휨강도 및 압축강도 계산

① 휨강도 계산

$$R_L = \frac{3PL}{2bh^2} \qquad \text{식 3.6}$$

여기서, R_L : 휨강도 MPa

P : 항복하중, N

L : 지점에서 시편 중심까지의 거리, 100mm

b, h : 시편 단면의 폭과 높이, mm

D.10 시험 결과 평가

본 시험 방법은 오토클레이브 후 시편의 강도 저하가 없을 것이라는 가정에 기초한다. MgO 함량에 따른 오토클레이브 팽창도 도표를 그렸을 때 급격한 변화를 나타내는 점이 오토클레이브 안정도 측면에서 최대 MgO 첨가량이다. 최대 MgO 첨가량에 0.85~0.90을 곱한 값을 현실적으로 안전한 첨가량으로 볼 수 있다.

제 4 장 목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

< 공 란 >

제 1 절 최종 연구 목표

1. 연구개발 목표

본 연구의 최종목표는 장기팽창성 MgO 콘크리트의 국내 실용화를 위하여, 장기팽창성 콘크리트의 메커니즘 정립, MgO 혼입량에 따른 장기팽창특성 자료 획득, 내구성 검증 및 실구조물 시범 적용 계측 등을 통하여 실용화 가능성을 검증하고, 최적팽창량 예측을 위한 프로그램을 개발함으로써 장기팽창성 MgO 콘크리트의 국내 실용화가 최종목표이다.

세부목표	기술개발 내용	목표구분
장기팽창 메커니즘 규명 및 내구성 검증	▪ 장기팽창제 성분분석(성분분석,활성도 시험)및 품질기준 확립	핵심기술개발
	▪ 내구성 검증시험 (동해, 탄산화, 염해, 황산염)	핵심기술개발
	▪ 팽창반응 메커니즘 규명 (2년간 재령별 XRD, SEM, DSC)	Test-bed 지원기술
장기팽창성 콘크리트의 팽창특성 규명	▪ 장기팽창성 콘크리트 재령에 따른 강도/팽창특성 규명(강도 3변수, 양생온도 2변수)	핵심기술개발
	▪ 장기팽창성 콘크리트 재령에 따른 강도/팽창특성 재현성 시험(강도 3변수, 양생온도 2변수)	핵심기술개발
	▪ 장기팽창성 콘크리트의 강도 및 팽창 모델 정립	핵심기술개발
장기팽창성 콘크리트의 현장 실용화	▪ 실구조물 시범적용 및 계측	Test-bed 지원기술
	▪ 장기팽창성 콘크리트 시공지침서 작성	Test-bed 지원기술
	▪ 장기팽창재 적용 및 활용분야 발굴	Test-bed 지원기술
장기팽창성 콘크리트의 해석 프로그램 개발	▪ 팽창성 해석 프로그램 보완 및 해석(팽창해석모델 개발)	핵심기술개발
	▪ 실구조물 시범적용 계측결과 해석 및 분석	Test-bed 지원기술

2. 연구개발결과의 평가 착안점

장기팽창성 콘크리트의 팽창특성 규명(Ⅳ)	- 장기팽창 특성의 학술 논문 발표 - 장기팽창성 콘크리트의 강도모델 정립 - 장기팽창성 콘크리트의 팽창모델 정립
장기팽창 메커니즘의 규명 및 내구성 검증(Ⅳ)	- 장기 팽창 메커니즘 규명 - 내구성 검증 결과의 학술 논문 발표
장기팽창성 콘크리트의 실용화	- 실구조물 시범적용 및 계측(III) - 장기팽창성 콘크리트 시공지침서 작성 - 장기팽창재 적용 및 활용분야 발굴
장기팽창성 콘크리트의 해석프로그램 개발(Ⅱ)	- 실구조물 시범적용 계측결과 해석 및 분석 - 팽창성 해석 프로그램 팽창모델개발

제 2 절 4차년도 연구목표 달성도

1. 연구개발 수행 진도율

연구수행기관	연 구 내 용 (연구책임자)	추 진 일 정																진도(%)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
주관-Kwater	장기팽창 메커니즘 규명을 위한 시험결과 분석(IV) (장봉석)																	100
주관-Kwater	내구성 검증을 위한 적용성 시험 및 분석(IV) (장봉석)																	8100
위탁-IWHR	팽창특성 재현성 시험(Chen Gaixin)																	100
위탁-울산대	실구조물 시범적용 계측결과 해석 및 분석(차수원)																	100
위탁-울산대	팽창성 해석 프로그램 보완(차수원)																	100
공동-성균관대	장기팽창특성 시험 및 모델 개발(이광명)																	100
공동-대림	현장 시범적용 대상구조물의 계측시스템 유지관리(이상호)																	100
공동-대림	팽창변형률, 응력, 수화열등 계측 계속실시 (이상호)																	100
사업진도(%)		40%					20%			20%			20%					100%

제 3 절 4차년도 연구목표 달성도

1. 연구개발 수행 진도율

구분 / 개발내용	연구개발기간 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	진도(%)
장기팽창특성 시험 및 모델 개발	·····	———											100
장기팽창특성 재현성		·····	———										100
실구조물 적용 및 매뉴얼작성			·····	———									100
계측 결과 분석				·····	———								100
실구조물 시범적용 계측결과 해석 및 분석(II)					·····	———							100
팽창성 해석 프로그램 팽창모델개발						·····	———						100
						·····	———						100
팽창성 해석프로그램 보완							·····	———					100
총 진도율	8	18	26	34	40	50	57	66	73	80	97	100	100

····· 당초계획

——— 실　　적

2. 연구개발 목표의 달성도

목 표	달성도(%)	내 용
장기팽창성 콘크리트의 팽창특성 규명(Ⅳ)	100.0	- 장기팽창 특성의 학술 논문 발표 - 장기팽창성 콘크리트의 강도모델 정립 - 장기팽창성 콘크리트의 팽창모델 정립
장기팽창 메커니즘 규명 및 내구성 검증(Ⅳ)	100.0	- 장기 팽창 메커니즘 규명 - 내구성 검증 결과의 학술 논문 발표
장기팽창성 콘크리트의 현장 실용화	100.0	- 실구조물 시범적용 및 계측(III) - 장기팽창성 콘크리트 시공지침서 작성 - 장기팽창재 적용 및 활용분야 발굴
실구조물 시범적용 계측결과 해석 및 분석	100.0	- 시험적용 실구조물의 계측결과분석 및 해석프로그램을 이용한 결과분석
팽창성 해석 프로그램 보완	100.0	- 팽창체적변화 예측능력 검증 및 보완 - 팽창성 해석 프로그램 팽창모델개발

제 4 절 관련분야 기여도

1. 관련 연구 분야

가. 장기팽창 메커니즘의 규명 및 내구성 검증

MgO 혼화재의 장기팽창특성을 이용할 경우, 매스콘크리트에서 발생하는 수화열로 인한 균열발생을 최소화 시키는 것이 가능하며 이를 통해 시공의 단순화 및 시공속도의 가속화가 가능한 장점이 있다. 또한, 균열발생의 최소화는 구조물의 장기내구성능을 향상시키는데도 기여할 것으로 사료된다. 이러한 장점들을 기대하기 위해서는 먼저, MgO 혼화재의 팽창메커니즘을 규명하는 것이 선행되어야만 한다. MgO 의 팽창메커니즘이 명확히 규명된다면, 시공 및 공용 중에 발생하는 팽창특성을 적절히 제어 가능할 뿐만 아니라 팽창으로 인해 나타날지 모르는 여러 문제점들을 사전에 제거 혹은 최소화하여 합리적이고 경제적인 매스콘크리트의 설계 및 시공이 가능할 것으로 판단된다. 앞에서 언급한 내용을 국내 등재학술지에 투고하여 검증을 완료하였다.

나. 장기팽창성 콘크리트의 팽창특성 규명

MgO 를 혼입한 콘크리트의 팽창특성을 이해하고 이를 통해 합리적인 제어방법을 규명하다면, 팽창특성에 따른 시공방법 및 콘크리트의 배합방법 등을 최적화할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 통해 시공속도의 가속화 및 장기 내구성능의 향상을 기대할 수 있을 것이다. 또한, MgO 콘크리트라는 신재료를 통해 관련 산업의 성장을 촉진시킴은 물론, 건설관련 기술의 개발에도 이바지할 것으로 사료된다. 앞에서 언급한 내용을 국내 등재학술지에 투고하여 검증을 완료하였다. 또한 재현성 시혐 결과를 국외 논문집에 수록하였다.

다. 장기팽창성 콘크리트의 현장 실용화

MgO 를 혼입한 장기팽창성 콘크리트의 실용화를 위해서는 MgO 혼화재의 팽창특성, MgO 혼입 콘크리트의 장기팽창 거동특성 등을 종합적으로 검토 및 파악해야만 한다. 또한, 이러한 재료수준에서의 특성을 이용하여 실제 현장에서의 시험시공을 실시하고 이를 바탕으로 MgO 혼입 콘크리트의 적용가능성 및 시공시 개선점 그리고 실제 팽창거동 특성을 사전에 파악할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서 실시하고자 하는 현장 시험시공을 통해 실제 시공시 나타날 수 있는 문제점을 확인하였으며 또한 현장의 의견 수렴을 통하여 현장 실무 매뉴얼을 작성 완료하였다.

라. 장기팽창성 콘크리트의 해석프로그램 개발

MgO 혼입 콘크리트의 설계를 위해서는 최종 팽창량 및 실구조물의 팽창거동을 사전에 예측하는 것이 무엇보다 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 MgO 혼입 콘크리트의 팽창특성 및 팽창량을 정량적으로 평가하고 설계에 반영할 수 있는 해석프로그램을 개발/개선하였다. 이를 통해 장기팽창성 콘크리트의 설계 및 해석을 위한 기초를 마련하였으며, 앞으로 실용화시에 도움을 줄 것으로 사료된다.

2. 연구개발 결과의 기여도

가. 기대효과

(1) 기술적 측면

- MgO를 적용한 매스콘크리트의 수화메커니즘 정립 및 균열진전의 최소화를 위한 배합비 및 설계자료 확보를 통해 새로운 신재료 시장의 창출
- 매스콘크리트의 온도제어 기준의 단순화를 위한 기초데이터 확보를 통해 기술적 선진화 와 시공기술력의 확보를 위한 발판 마련
- 외국 선진 사례 도입의 국내 적용성 검토를 통해 중국으로부터의 시공기술의 직수입이 아닌 자체 기술의 개발을 도모함
- 장기팽창성 콘크리트의 특성규명 시험 등을 통하여 관련 전문인력의 배출함

(2) 경제·산업적 측면

- 시공속도의 향상 및 균열제어 능력향상에 따른 공사비 절감을 이루어 경제성에 향상을 가져올 수 있음
- 시공 후 관리비 절감에 따른 경제성 확보를 할 수 있음
- 새로운 재료의 사용으로 인한 신재료 관련 산업의 발전에 기여

나. 관련 후속연구개발의 전망

- 콘크리트 구조물의 내구성능설계 기법의 개발 및 적용으로 인해 향후 콘크리트 구조물의 내구성능 향상 기법의 수요는 증가할 것으로 판단됨
- 이러한 수요 증가에 맞추어 장기팽창성 콘크리트의 수축보상 효과를 이용한 무균열 콘크리트의 적용은 점진적으로 증가할 것으로 판단됨
- 장기팽창성 콘크리트의 팽창특성을 이용하여 프리스트레스에 대한 영향을 연구하면, PSC 구조물의 프리스트레스 손실을 방지할 수 있는 특정 기술의 개발에도 긍정적인 효과를 기대할 것으로 전망

< 공 란 >

제 5 장 연구개발 결과의 활용 계획

< 공 란 >

제 1 절 연구개발 결과의 활용방안

1. 개요

1차년도부터 시작한 특성규명, 내구성 특성 및 팽창메커니즘 규명을 위한 계속 연구의 일환으로 지속적인 분석을 실시하며, 2차년도 시범적용한 실구조물의 계측 데이터를 획득하며, 실내실험과 실구조물의 실험 및 계측 자료를 바탕으로 4차년도에는 관련 성과들을 국내 등재학술에 게재하였으며, 팽창해석 프로그램에 사용할 팽창모델을 개발하였다. 또한, 현장 시범 적용 및 현장 의견수렴을 통하여 'MgO 혼입 콘크리트 현장적용 매뉴얼'을 작성하였다. 이러한 것들은 향후 실용화 현장의 의사결정과 준비 작업들에 도움이 될 것이다.

2. MgO 혼입 콘크리트 활용 기대 분야

가. 수처리 콘크리트 구조물

수처리 시설은 크게 정수처리시설과 하수처리시설로 나눌 수 있는데, 두 시설 모두 유량조정조, 침사지, 화학처리시설, 생물반응조 등의 콘크리트 구조물로 구성된다.

이상의 콘크리트 구조물은 벽체 두께 1,000mm 이상의 매스 콘크리트 구조물이다. 또한, 구조물 특성 상 균열유발줄눈 등을 설치할 경우 기능상은 물론 내구성 등에도 지장을 초래할 수 있다. 결국, 수처리시설은 균열을 최대한으로 억제해야 함에도 불구하고 균열 발생 가능성은 크게 증가할 수밖에 없다. 많은 수처리 시설에서 이러한 문제점이 실제로 발생하고 있다.

이러한 균열을 제어하기 위해 최근 수처리시설 시공에는 보통 포틀랜드 시멘트 + 고로 슬래그 미분말 + Fly Ash를 혼합한 3성분계 시멘트를 사용하고 있다. 3성분계 시멘트는 콘크리트 수화열을 낮추기 때문에 온도균열 제어에는 유리한 점이 있으나, 건조수축 균열 제어에 취약할 수 있을 뿐만 아니라 강도발현이 늦어 공기에도 지장을 초래할 수 있는 단점이 있다.

콘크리트 수조에 MgO 혼입 콘크리트를 적용하게 되면 수화열로 인한 부재 내 온도 상승 이후 온도 하강 시점의 수축을 제어할 수 있다. 이를 통해 콘크리트 수조의 벽체 등에서 발생하는 수축균열을 제어하거나 방지할 수 있을 것으로 판단된다.



그림 5.1.1 수처리 콘크리트 구조물 : 정수처리시설

나. 원전 콘크리트 구조물

원전 콘크리트 구조물 특히, 반응시설을 보호하는 격납 건물은 안전을 최우선적으로 고려해야만 하는 구조물이다.

원전의 격납 건물은 벽체 두께 1,200 ㎜의 매스 콘크리트 구조물이다. 더욱이 최근 건설되는 원전에서는 격납 건물에 40 MPa 규격의 비교적 고강도 콘크리트를 적용하고 있다. 따라서 격납 건물은 수화열로 인한 온도균열 발생 위험이 매우 높은 구조물이다.

이러한 균열을 제어하기 위해서 원전 건설 시에는 매스 콘크리트 타설온도를 매우 엄격하게 관리하고 있다. 또한, 구조적으로는 PSC 구조와 SC 구조를 도입하여 균열 등으로 발생할 수 있는 문제점을 원천적으로 봉쇄하고 있다. 그럼에도 불구하고 적지 않은 균열이 발생하는 것이 현실이다.

원전 격납 건물에 MgO 혼입 콘크리트를 적용할 경우 수화열로 인한 온도균열 및 건조수축으로 인한 수축균열을 성공적으로 제어할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 무리한 콘크리트 타설온도 규정을 완화할 수 있어 경제적인 시공도 가능할 것으로 기대된다.

최근 중국에서 많은 원전이 건설되고 있으며 앞으로도 그 추세는 당분간 유지될 것으로 판단된다. 국내 기업이 중국 원전 건설에 참여하게 될 경우, MgO 혼입 콘크리트를 이용한 원전 콘크리트 구조물 균열 제어를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.



그림 5.1.2 원전 콘크리트 구조물 : 격납 건물

3. 연구결과의 활용방안

구분	연구목표	활용방안	
현장실용화	장기팽창성 콘크리트의 현장 적용	- 장기팽창성 콘크리트의 실구조물 시범 적용 및 적용 대상 확대	· 교육자료 · 관련 연구분야의 기초지침서 · 신기술 개발에 적용

가. 연구결과의 기업 활용방안

(1) 참여기업의 현황분석

본 연구과제에 참여하고 있는 기업으로는, 주관기관인 한국수자원공사는 국내 다목적댐의 건설 및 유지관리 전담기관으로, 향후 본 연구의 성과를 가장 활발하게 사용할 수 있는 기업이며 공동연구기관으로 참여하는 (주)대림산업은 국내 주요 시공사로서, 매스콘크리트 구조물에 대한 많은 시공경험과 시공계획을 보유하고 있어, 본 연구단계에서 실구조물 현장 시범적용 등이 용이할 뿐만 아니라, 다양한 건설시공분야에 기술 활용을 위한 검토 및 분석이 가능하다. 그 외 참여기업인 (주)케이엠티엘은 국내 계측전문회사로 다양한 계측경험을 보유하고 있어, 본 연구의 추진에 그 역할이 크며, 추후 본 연구 성과를 다양한 계측 업무에 활용이 가능할 것으로 판단되며, (주)실크로드이앤티는 국내 최대 규모의 혼화재 전문회사로 본

연구의 기술 개발 결과를 활용하는 데에 관심이 있고, (주)삼우공간건축사사무소와 (주)계림건축사사무소는 설계 및 감리회사로 건축물의 대형 기초 등의 시공 감리분야에 본 연구 성과를 활용하여 감리 기술을 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

(2) 참여기업별 연계방안 및 추진전략

본 연구과제의 참여 기업들은 설계사 및 계측전문회사로, 진보된 콘크리트 재료가 개발되어 실구조물에 적용되기까지의 프로세스에 관련된 설계와 시공 및 유지관리 계측에 관련되어 있다. 따라서 본 참여 기업들은 기존의 많은 연구과제들에서와 같이 단순히 현금 및 현물을 제공하는 수준에서 벗어나, 각 참여 기업들의 장점을 살려 협동・공동・위탁연구 주체와 유기적으로 연결되어 시너지 효과를 발휘하도록 연구를 추진할 계획에 있다.

제 6 장 해외 관련 기술정보

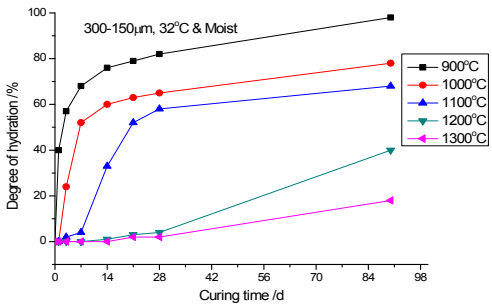
< 공 란 >

제 1 절 MgO 콘크리트와 관련한 국외연구동향

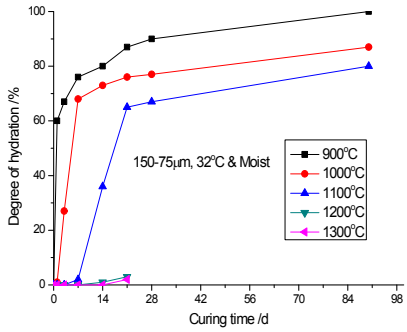
Mehta[7,8] 등은 MgO의 수화, 시멘트페이스트의 팽창, 팽창량, 탄성계수 그리고 콘크리트의 압축강도 등에 있어, MgO의 소성(calcination)온도와 입자크기의 영향을 조사하였다. 사용된 MgO는 900~1300℃의 온도범위에서 약 1시간 동안 가열하였으며 300~150 ㎛, 150~75 ㎛, 75~45 ㎛, <45 ㎛로 체가름시험을 실시하였다.

상대습도 60%, 32℃의 항온항습기에서 양생한 MgO 페이스트의 수화도를 그림 6.1.1과 6.1.2에 도시하였다. 32℃에서의 MgO가 혼입된 시멘트 페이스트의 팽창량을 그림 6.1.3에 도시하였으며 그림 1.4는 900, 920, 950℃에서 가열한 MgO혼입 시멘트 페이스트를 32℃에서 수중양생하여 얻은 팽창량을 나타낸다.

그림을 통해 알 수 있듯이, 저열처리하지 않은 일반적인 매스콘크리트의 양생온도에서, 900~950℃의 온도범위에서 소성시킨 0.31~1.18 ㎜의 입자크기를 가진 5%의 MgO를 첨가했을 때 만족할 만한 팽창율을 나타내는 것을 알 수 있다.

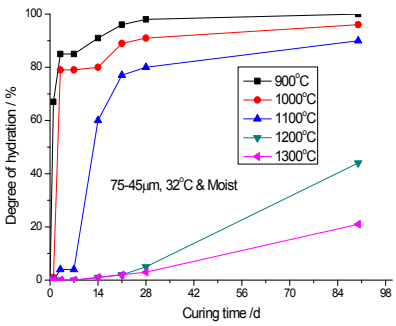


(a) 150~300 ㎛ MgO

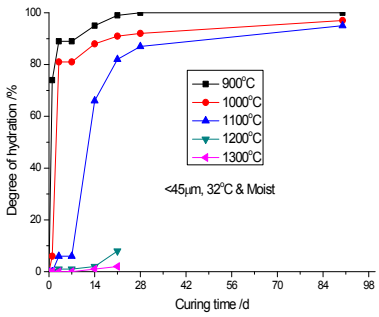


(b) 75~150 ㎛ MgO

그림 6.1.1 소성온도 900, 1000, 1100, 1200 1300℃에서의 MgO 수화도
(양생온도: 32℃)

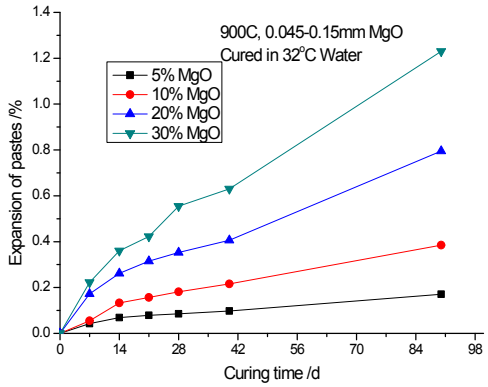


(a) 45~75 ㎛ MgO

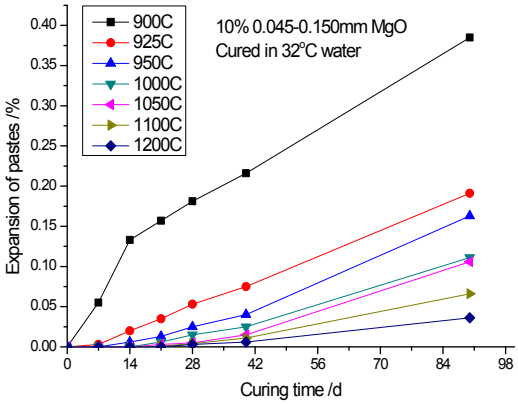


(b) <45 ㎛ MgO

그림 6.1.2 소성온도 900, 1000, 1100, 1200, 1300℃에서의 MgO 수화도
(양생온도 : 32℃)



(a) MgO혼입율 5, 10, 20, 30%에 대한 시멘트페이스트 팽창율(소성온도 : 900℃)



(b) 소성온도 900, 925, 950, 1000, 1050, 1100, 1200℃에서의 시멘트페이스트 팽창율 (MgO 혼입율 : 10%)

그림 6.1.3 입자크기 0.045~0.150 ㎜ MgO을 혼입한 시멘트페이스트의 팽창율 (양생온도 : 32℃, 수중양생)

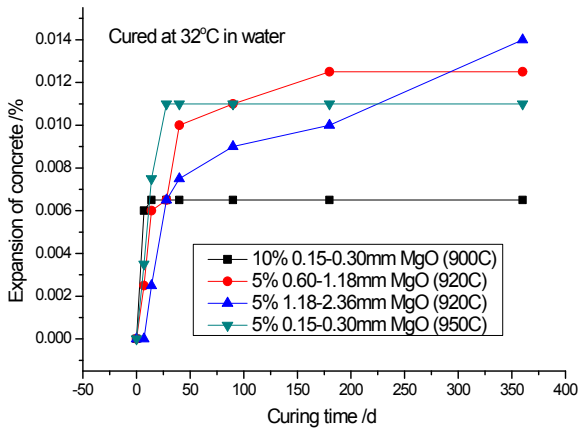


그림 6.1.4 MgO를 혼입한 콘크리트의 팽창율 (양생온도:32℃, 수중양생, 시멘트=120 ㎏/㎥, W/C=0.71, 잔골재=571 ㎏/㎥, 굵은골재=1594 ㎏/㎥)

Alvarado[9] 등은 멕시코의 백운암광물(mineral dolomite)과 세 개의 염화마그네슘 선구물질인 $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, $MgNO_3 \cdot 6H_2O$, $Mg(CH_3CO_2)_2 \cdot 4H_2O$로부터 제공된 MgO분말의 서로 다른 물리적 특성의 특징들에 관한 비교연구를 수행하였다.

낮은 온도에서 시료는 브루사이트(brucite)를 생성하였으며 순수 페리클레이스(periclase)는 500℃로 온도를 증가시킬 경우 나타났다. 또한, MgO결정도(the degree of MgO crystallinity)는 소성온도에 따라 증가하였다. 블루사이트(brucite)의 겉보기밀도와 비표면적 그리고 페리클레이스(periclase)는 다음과 같은 순서로 감소하였다.

sulfate > nitrate > acetate > dolomite

반면, 입자크기, 집적도(the degree of agglomeration)와 전체 공극율은 증가하는 경향을 나타내었다.

황산염 선구물질(sulfate precursors)을 이용한 제작 방법의 경우, 산화마그네슘 분말의 높은 표면적과 매우 작은 입자크기로 인해 가장 이상적인 밀도 값을 가지는 우수한 방법으로 보고하였다. 또한, 비표면적값은 중심핵 주변에 배열된 엽판상(lamellars)의 미세구조와 관련 있는 것으로 파악하였다.

아세트산염(acetate)과 질산염(nitrate)으로 제작된 분말은 일정하게 입자가 성장하는 초기 소결(sintering)단계에서 개별입자 사이의 병목영역(neck regions)으로 물질이 충분히 확산되도록 촉진시킨다. 이것은 집적도에서 얻어진 값과 거의 일치한다.

백운암은 낮은 표면적으로 인해 가장 큰 입자가 나타난다. 이로 인해 염화마그네슘과 비교하여 더 높은 집적도를 나타낸다. 결정질 크기의 급격한 성장은 입자사이의 공극영역의 확장을 촉진시키며 이로 인해 전체 공극율이 높아지는 것으로 사료된다.

MgO결정의 크기는 그림 6.1.5에 나타낸 것과 같이 열처리온도의 증가에 비례하여 증가하였다. 그림 6.1.6에 1200℃에서 소성한 MgO분말의 미세구조를 나타내었다.

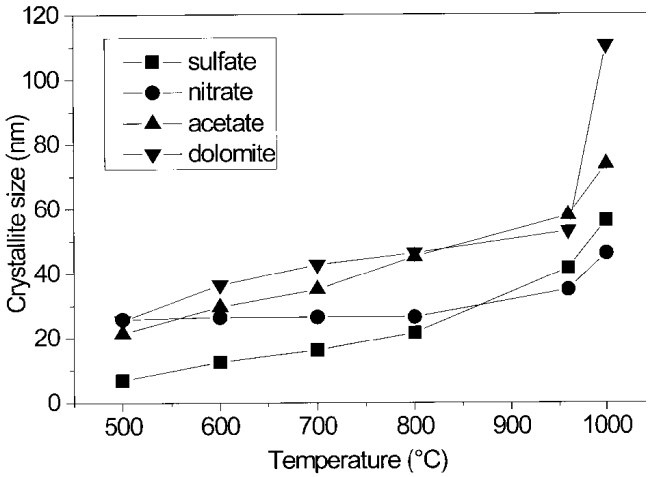


그림 6.1.5 온도변화에 따른 MgO의 입자크기 발달

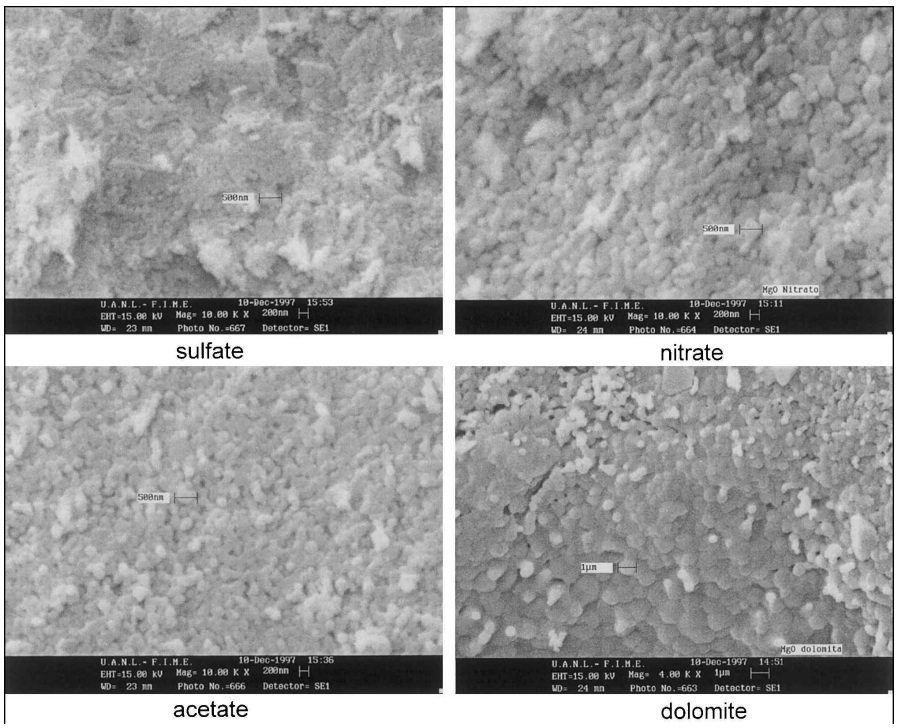


그림 6.1.6 1200°C(40 min)의 소성초기에 흡착된 MgO 분말의 미세구조

제 2 절 MgO콘크리트와 관련한 중국의 연구동향

중국에서는 저온소성 산화마그네슘을 혼입한 콘크리트를 이용한 댐건설 기술에 관한 연구그룹이 1970년대 말에 설립되어 MgO팽창재에 의한 온도응력 저감에 관한 연구를 시작하였다[10].

Cao[11]는 유한요소해석을 통해 댐콘크리트의 온도응력에 있어 MgO의 수화반응으로부터 나타나는 팽창으로 인한 보상효과에 관한 연구를 수행하였다. 그에 따르면, MgO콘크리트는 콘크리트가 기초암반에 의해 강력히 구속될 수 있는 기초암반 부근에서만 사용되어야 하며, 콘크리트는 수직시공이음이 없이 일괄타설, 연속상향타설 그리고 표면에서의 온도구배를 감소시키기 위해 콘크리트 표면을 차폐시켜야만 한다고 주장하였다. Li 등[12,13,14,15]은 1977년부터 저온소성된 MgO혼입 콘크리트에 대한 자기체적변형, 역학적 특성, 온도특성 그리고 안정도시험 등을 실시하였다. 그림 6.1.7은 저온소성 MgO를 첨가한 콘크리트의 자기체적변형을 나타낸 것이다.

MgO의 수화반응에 의한 콘크리트의 팽창은 주로 1,200일 이내에 발생하며 1,200일 이후에는 팽창이 지연되는 경향을 나타낸다고 보고하였다. 또한, MgO의 혼입량이 증가할수록 콘크리트의 팽창량도 증가하며 MgO는 콘크리트에 사용된 시멘트의 종류가 다를 경우, 다른 팽창량을 나타낼 수 있다고 보고하였다. 5.5%의 MgO가 혼입된 콘크리트에 대한 재령 10년에서의 압축강도는 재령 1년의 압축강도에 비해 4.7%가 감소하였다. 이것으로부터 MgO의 팽창이 콘크리트의 압축강도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단할 수 있다.

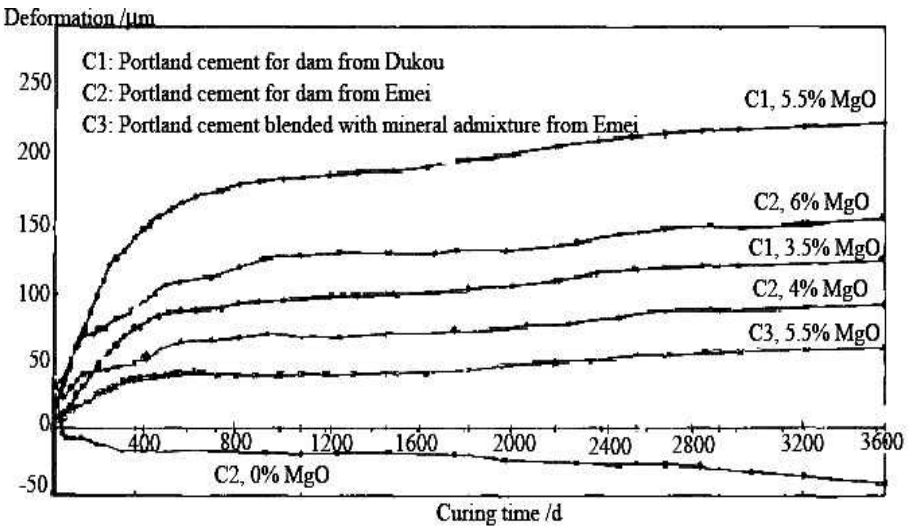


그림 6.1.7 MgO를 혼입한 콘크리트의 자기팽창변화

시멘트계열 재료에 혼입된 MgO의 안정도는 일반적으로 ASTM C151과 GB/T 750과 같은 오토크레이브 시험법을 이용하여 평가한다. 그러나, 저온소성한 2.5% MgO는 ASTM C151에 따르면 불안정한 시멘트 페이스트이다. Jin[16]는 180℃의 오토크레이브 콘크리트를 이용하여 MgO의 안전한 혼입량을 결정하는 방법을 개발하였다. Liu와 Li 등[17,18]은 콘크리트 시험체를 이용하여 저온소성한 MgO혼입 콘크리트의 안정도를 평가하기 위해 ASTM C151에 의한 오토크레이브시험법을 사용할 것을 제안하였다. 양생온도는 그림 6.1.8에 나타낸 것과 같이 MgO콘크리트의 자기체적 팽창의 발달을 촉진시키는 경향이 있다. 양생온도 20℃에서 양생한 4% MgO 콘크리트는 재령 400일 이전에 매우 큰 팽창속도를 나타내었으며 재령 400일 이후에는 팽창속도가 점차 둔화되었다. 재령 1400일에는 양생온도 20℃에서 양생한 콘크리트의 자기체적 팽창량은 150$\mu\epsilon$이다. 재령 300일 전, 콘크리트의 팽창속도는 양생온도의 증가에 따라 빨라진다. 콘크리트의 팽창량이 안정적일 때 높은 양생온도는 시간을 단축시킨다.

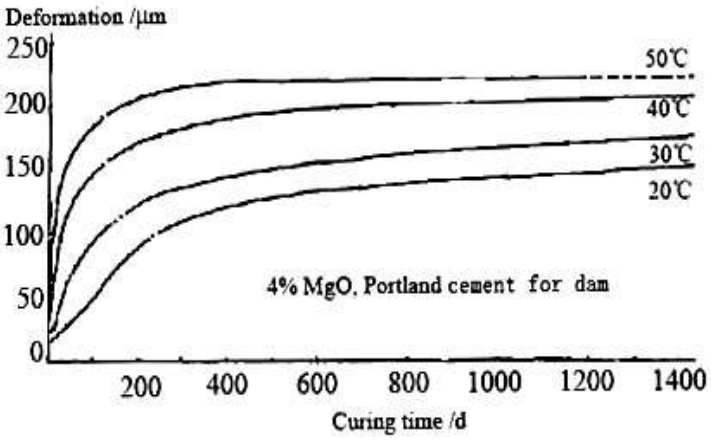


그림 6.1.8 MgO 콘크리트의 자기팽창에 대한 양생온도의 영향
(PFA=30%, MgO=4%)12)

그림 6.1.9은 MgO 콘크리트의 자기체적 팽창량에 대한 Fly-ash의 효과를 나타낸다.[14] Fly-ash 첨가량이 20%～40%일 경우, 양생온도 20℃에서는 MgO콘크리트의 팽창을 촉진시키는 경향이 있다. 그러나 Fly-ash는 양생온도 40℃에서는 MgO콘크리트의 팽창을 억제하는 경향을 보인다. Fly-ash가 이렇게 다른 역할을 하는 이유에 대해서는 아직까지 보고되고 있지 않다.

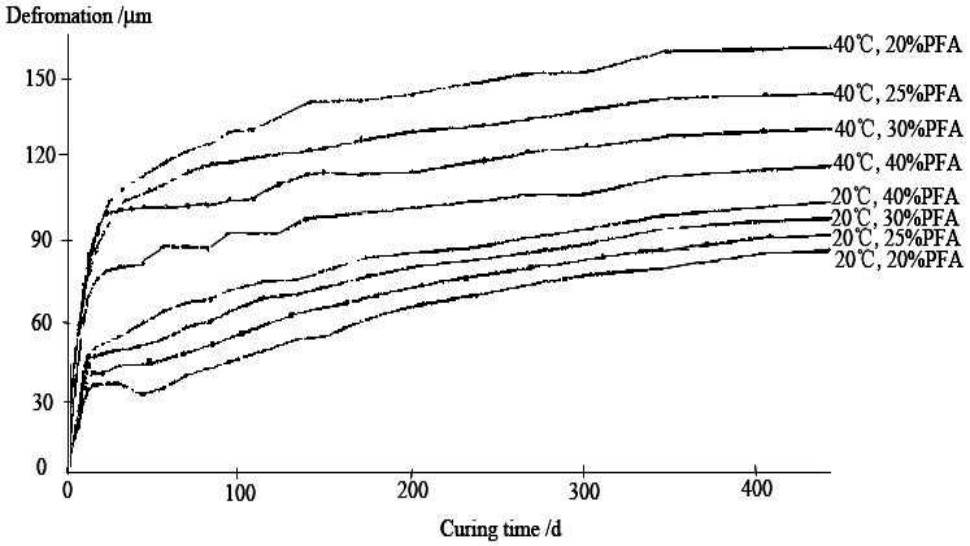


그림 6.1.9 5% MgO를 혼입한 콘크리트의 자기체적변형에 대한 Fly-ash의 영향

< 공 란 >

제 7 장 참고문헌

< 공 란 >

1. Song Shenhua, Li Haowei. “Application of technology of dam construction with concrete added with MgO”, Guangdong Water Resources and Hydropower, 2002, (supplement): 5-7 (in Chinese)
2. Li Shaopeng. “Application in Guangdong of technology of rapid construction of arch dam with concrete added with MgO”, Guangdong Water Resources and Hydropower, 2006, (supplement): 6-8,14(in Chinese)
3. Middle-South Engineering Corporation, “Investigation on properties of concrete with characteristic MgO”, Technical Report, 2004(in Chinese)
4. 조택성, 채금화 편저, “MgO콘크리트의 댐축조 기술, 부록-Ⅱ : 수리수전공정 저온소성 MgO의 재료품질 기술요구서”, 중국전력 출판사, 2003.
5. 장봉석 외, “매스콘크리트용 무균열 콘크리트의 국내 적용연구”, 한국수자원공사, 2008
6. 건설교통부, “소각재 용융슬래그의 건설자재 활용기술 개발 연구보고서”, 2003
7. Mehta P K., “History and status of performance tests for evaluation of soundness of cements”, ASTM STP 663, 1978, 35-60
8. Mehta P K, Pirtz D and Komanant G J., “Magnesium oxide additive for producing selfstress in dam concrete”, Proceedings of the 7th International Conference on Cement Chemistry, 1980, Paris, V6-V9
9. Alvarado E, Torres-Martinez L M, Fuentes A F and Quintana P., “Preparation and characterization of MgO powders obtained from different magnesium salts and the mineral dolomite”. Polyhedron, 2000, 19: 2345–2351
10. Deng Min, "2009년 건설기술혁신사업 : 09기술혁신F03, 1차년도 국외자문보고서", 한국수자원공사, 2010.
11. Cao Zesheng, Xu Jinhua, “Technology for Dam Construction with MgO Concrete”, China Electric Power Publisher, 2003(in Chinese)
12. Li Chengmu, “Long-term self-volume deformation of concrete with MgO”, Hydro Power Generation, 1998, (2): 53-57 (in Chinese)
13. Li Chengmu, “Self-volume deformation of MgO concrete cured at different temperatures”, Study on Hydroelectric Engineering, 1998, (3): 1-9 (in Chinese)
14. Li Chengmu, “Effect of fly ashes on deformation and mechanic properties of MgO concrete”, Study on Hydroelectric Engineering, 1997, (2): 1-9, 15 (in Chinese)
15. Li Chengmu, “Review on application of dam-construction technology with MgO concrete”, Study on Hydroelectric Engineering, 1999, (1): 1-9, 29 (in Chinese)
16. Jin Hongwei, “Investigation on safe dosage of MgO in concrete”, Concrete, 2001, (7): 30-33 (in Chinese)

17. Li Chengmu, Li Xiaoyong, Chen Xuemao, “Influence or pressure-braise system On the pressure-braise expansion ratio of concrete and cement mortar mixed with MgO”, Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(50): 24-28 (in Chinese)
18. Liu Li, Zhao Shunzeng and Zhang Yuan, “Experimental research on soundness of roller compacted concrete mixed with MgO”, Hydroelectric Technology, 2008, (5): 56-58,73 (in Chinese)
19. Mo Liwu, Deng Min, Tang Mingshu, “Effects of calcination condition on expansion property of MgO-type expansive agent used in cement-based materials”, Cement and Concrete Research, 2010, 40: 437-447
20. Deng Min, Cui Xuehua and Tang Mingshu, “Expansive mechanism of magnesia as additive of cements”, Il Cemento, 1990, 87: 161-176
21. Gao Peiwei, Wu Shengxing, Lu Xiaolin, Deng Min, Lin Pinghua, Wu Zhongru and TangMingshu, “Soundness evaluation of concrete with MgO”, Construction and Building Materials, 2007, 21: 132-138
22. Cai Shuyuan, “Expansion of concrete added with MgO under autoclave conditions”, Nanjing University of Technology, Matser thesis, 2002
23. Mo Liwu, Deng Min, and Tang Mingshu, “Potential approach to evaluating soundness of concrete containing MgO-based expansive agent”, ACI Materials Journal, 2010, (2): 99-105
24. Takahashi, T., Nakata, H., Yoshida, K., and Goto, S., "Influence of hydration on autogenous shrinkage of cement paste," Concrete Research and Technology, Japan Concrete Institute, Vol. 7, No. 2., 1996
25. Chiu, X.H. Liu, Z. and Tang, M.S., "MgO as Expansive Constituent," East-China Hydropower Technology, No. 3, pp. 28-32, 1992 (in Chinese)
26. Fang, K.H., "Hydration of MgO and its Influence on Autogenous Volume Expansion." Journal of Hydroelectric Engineering, No. 4, pp. 46-49, 2004 (in Chinese)
27. Wang, X., “Hydration and expansion of MgO and the preparation and performance of the novel MgO - type expansion agent”, PhD thesis, Nanjing, 2002
28. Neville, A.M., “Properties of Concrete”. 4th Edition, Pearsom Education Limited, Essex, Egland, 884, 1995
29. Li, C.M., "Effects of Temperature on Autogenous Volume Expansion of MgO Concrete," Design of Hydropower Stations, V. 15, No. 2, pp.96-100, 1999 (in Chinese)
30. Li, C.M., "Mechanical Properties and Durability of MgO Concrete," Advanced

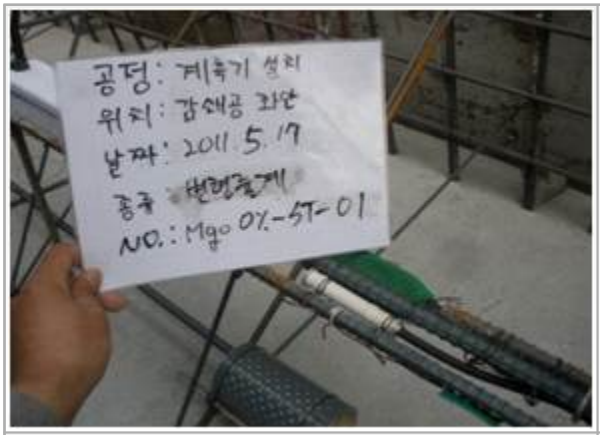
in Science and Technology of Water Resources, V. 20, No. 5, pp. 30-35, 2000 (in Chinese)
31. Du, C., "A Review of Magnesium Oxide in Concrete", Concrete International, Vol. 27, 2005
32. Mo Liwu, Deng Min, "Thermal behavior of cement matrix with high-volume mineral admixtures at early hydration age", Cenment and Concrete research, Vol. 36, pp. 1992-1998, 2006.
33. Deng Min et.al. "Mechanism of Expansion in Hardened Cement Pastes with Hard-Burnt Free Lime", Cement and Concrete Research. Vol. 25, No.2, pp. 440-448, 1995.
34. Liwu Mo, Min Dong, Mingshu Tang, "Potential Approach to Evaluating Soundness of Concrete Containing MgO-Based Expansive Agent", ACI Materials Journal, Vol.107, No.2, pp. 99-105, March-April 2010.
35. Pei-wei Gao et.al. "Soundness evaluation of Concrete with MgO", Construction and Building Materials, Vol. 21, pp-132-138, 2007.
36. M.M.Ali and A.K. Mullick, "Volume Stabilisation of High MgO Cement : Effect of Curing Conditions and Fly ash Addition", Cement and Concrete Research, Vol.28, No.11, pp. 1585-1594, 1998.
37. Liwu Mo, Min Deng, Mingshu Tang, "Effects of Calcination condition on Expansion Property of MgO-type Expansive agent used in Cement-based Materials", Cement and Concrete Research, article in press.
38. Kasselouris, V. et.al., "On the Hydration of MgO in Cement Pastes Hydrated up to Eight Years", Cement and Concrete Research, Vol. 15, No. 5, pp. 758-764, 1985.
39. Nagatak, S., and Gomi, H.,"Expansive Admixtures(Mainly Ettringite)", Cement and Concrete Composites, Vol. 20, pp. 163-170, 1998.
40. Lea F M., “The Chemistry of Cement and Concrete”, New York, Chemical Publishing Company, p. 369, 1971
41. Mehta P K., “History and status of performance tests for evaluation of soundness of cements”, ASTM STP 663, 1978, 35-60
42. Yuan Meixi, Tang Mingshu, “Study on mechanisms of self-volume expansion of concrete in dam of Baishan”, Jilin. Journal of Nanjing Institute of Chemical Technology, 1984, 6(2): 38-45
43. Birchal V S S, Rocha S D F and Ciminelli V S T, “The effect of magnesite clacinaion conditions on magnesia hydration”, Minerals Engineering, 2000, 13(14-15): 1629-1633
44. Aphane M E., “The hydration of magnesium oxide with different reactivities

by water and magnesium acetate", Master Thesis, University of South Africa, 2007
45. Chung Kong Chauw and Zongjin Li., "Accelerated Reactivity Assessment of Light Burnt Magnesium Oxide", J. Am. Ceram. Soc., 2008, 91(5): 1640-1645
46. Nokken Michelle R., "Expansion of MgO in Cement Pastes MgOsured by Different Methods", ACI Materials Journal, 2010, 107(1): 80-84
47. Vandeperre L J and Al-Tabbaa A., "Accelerated carbonation of reactive MgO cements", Advances in Cement Research, 2007, 19(1): 1-13
48. Vandeperre L J, Liska M, Al-Tabbaa A., "Micro-structures of reactive magnesia cement blends", Cement & Concrete Composites, 2008, 30: 706–714
49. Liska M and Al-Tabbaa A., "Ultra-green construction: reactive magnesia masonry products", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Waste and Resource Management, 2009, Issue WR0, 1-12
50. Xu Lingling and Deng Min, "Dolomite used as raw material to produce MgO-based expansive agent", Cement and Concrete Research, 2005, 35: 1480-1485

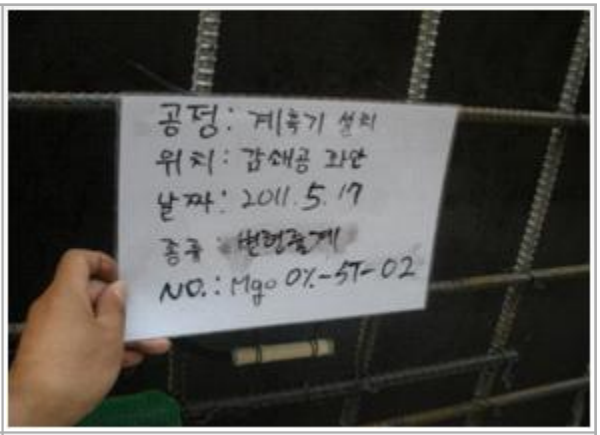
부 록 Ⅰ
(시험시공 사진첩 : 감세지 옹벽)

< 공 란 >

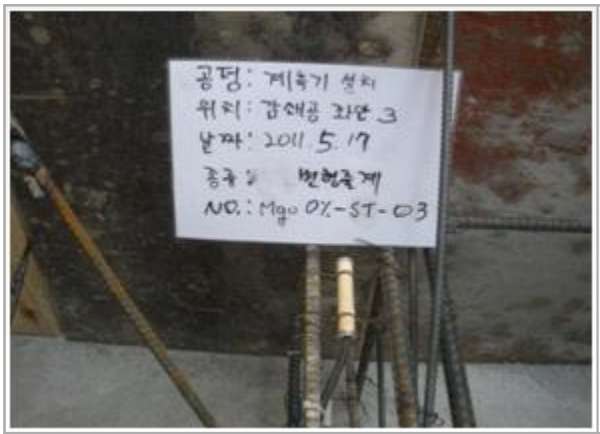
[MgO를 혼입하지 않은 일반 콘크리트]



콘크리트 변형률계(ST-01) 설치



콘크리트 변형률계(ST-02) 설치



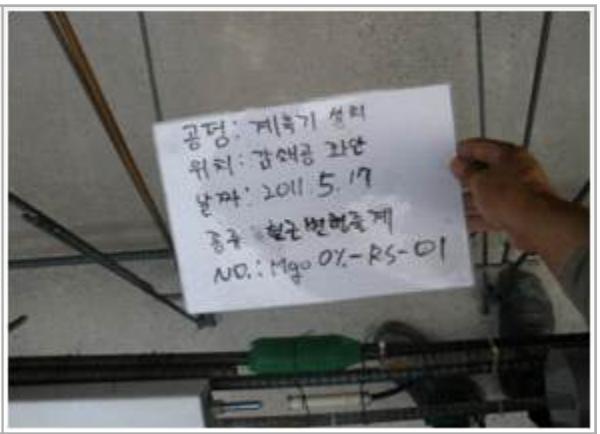
콘크리트 변형률계(ST-03) 설치



콘크리트 변형률계(ST-04) 설치



콘크리트 변형률계(ST-05) 설치



철근 변형률계(RS-01) 설치



철근 변형률계(RS-02) 설치



철근 변형률계(RS-03) 설치



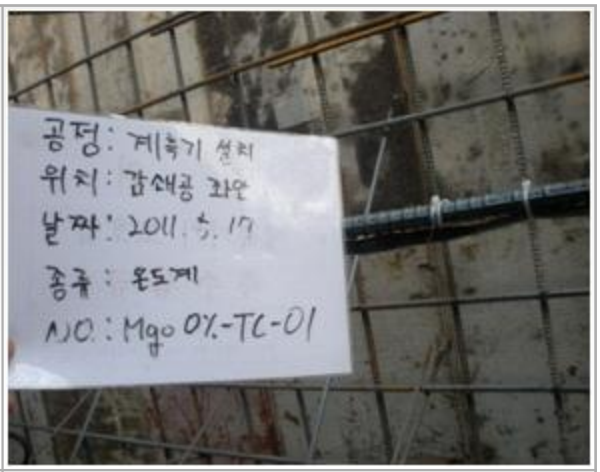
무응력계(NS-01) 설치



무응력계(NS-02) 설치



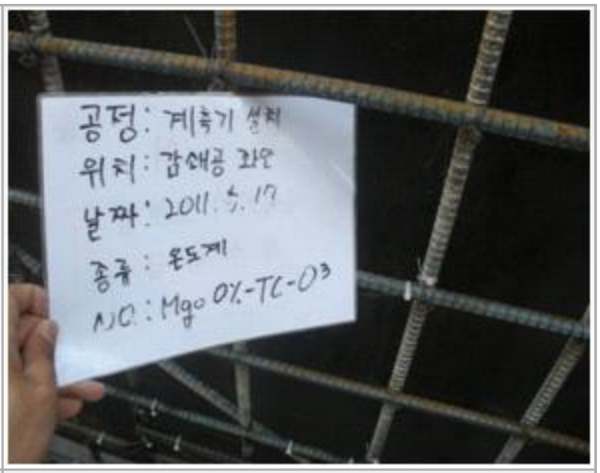
유효응력계(ED-01) 설치



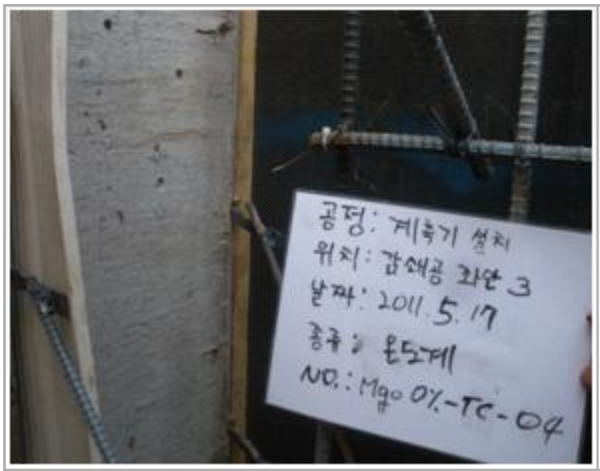
온도계(TC-01) 설치



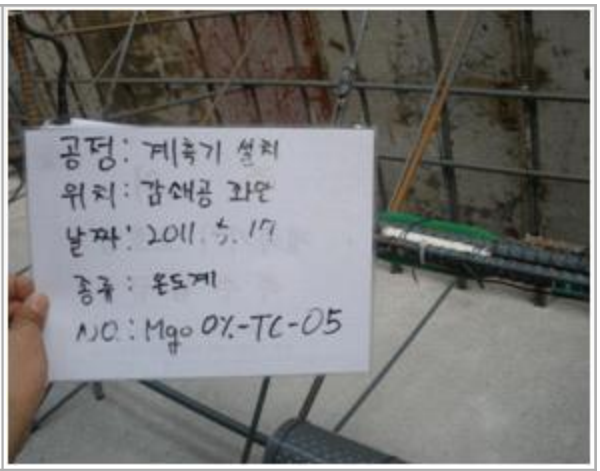
온도계(TC-02) 설치



온도계(TC-03) 설치



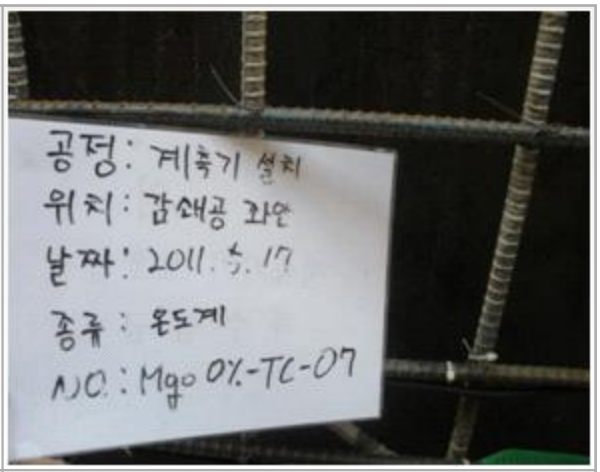
온도계(TC-04) 설치



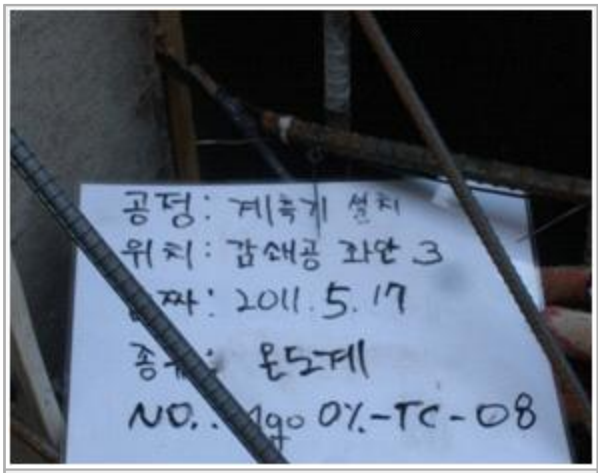
온도계(TC-05) 설치



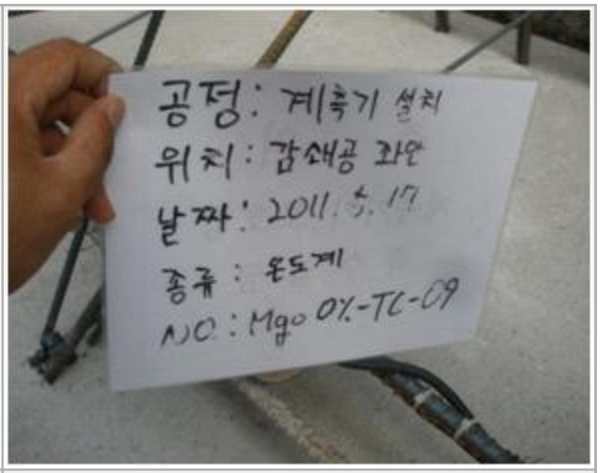
온도계(TC-06) 설치



온도계(TC-07) 설치



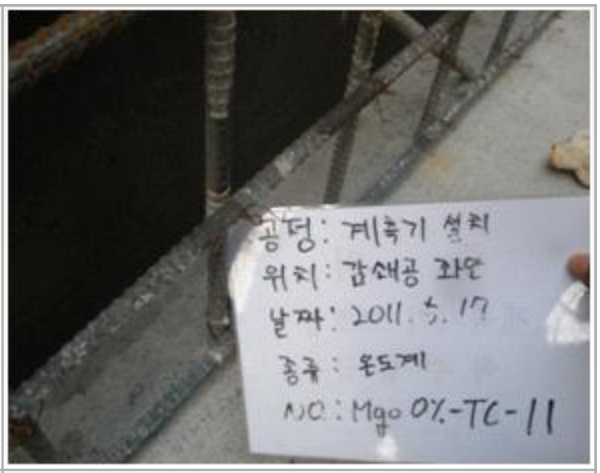
온도계(TC-08) 설치



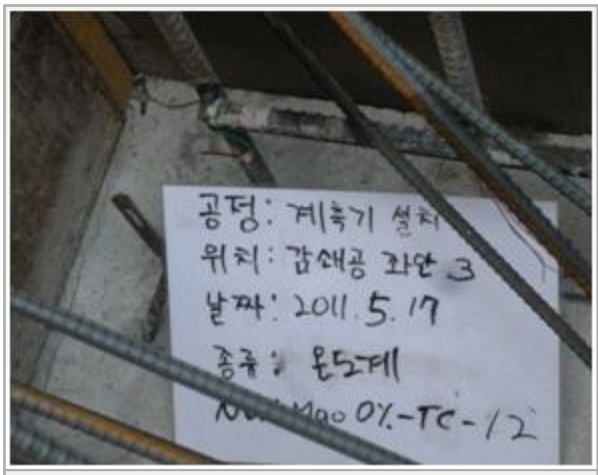
온도계(TC-09) 설치



온도계(TC-10) 설치



온도계(TC-11) 설치

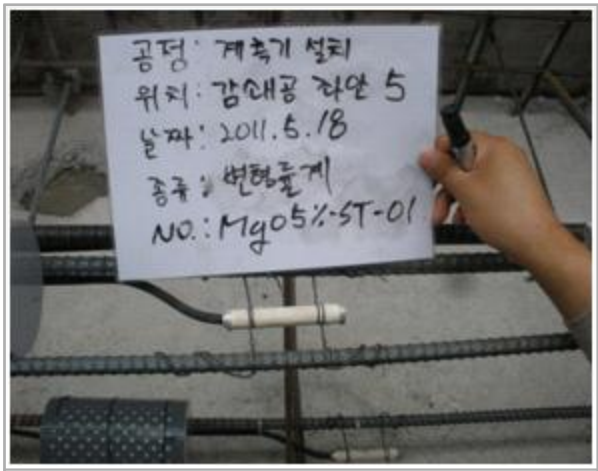


온도계(TC-12) 설치



계측기 함체 및 전원공급 장치 설치

[MgO를 혼입한 장기팽창성 콘크리트]



콘크리트 변형률계(ST-01) 설치



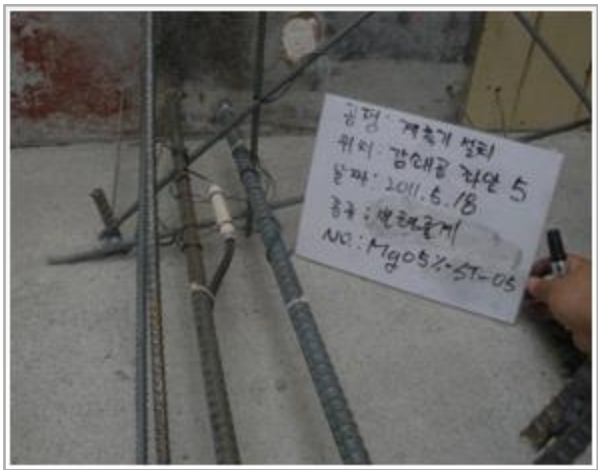
콘크리트 변형률계(ST-02) 설치



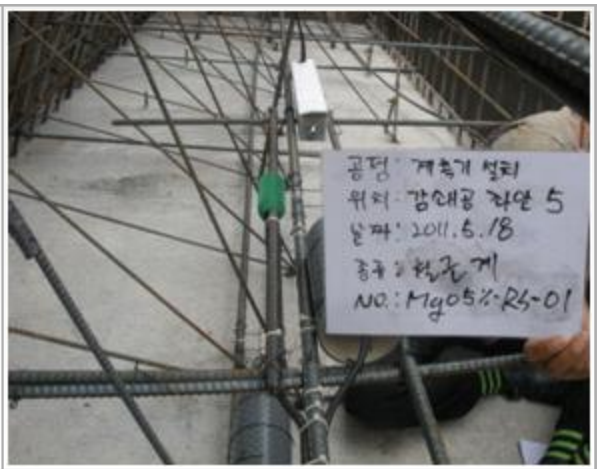
콘크리트 변형률계(ST-03) 설치



콘크리트 변형률계(ST-04) 설치



콘크리트 변형률계(ST-05) 설치



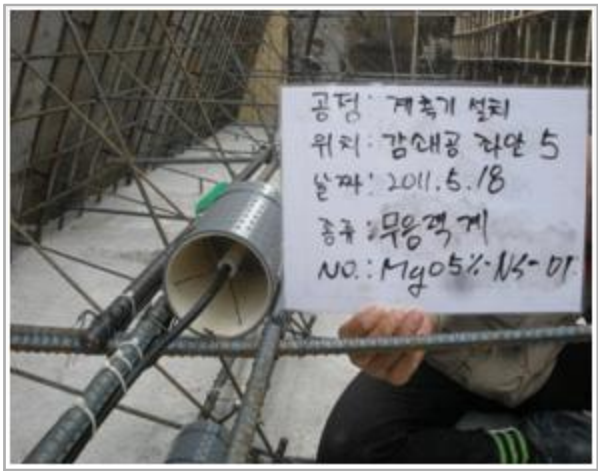
철근 변형률계(RS-01) 설치



철근 변형률계(RS-02) 설치



철근 변형률계(RS-03) 설치



무응력계(NS-01) 설치



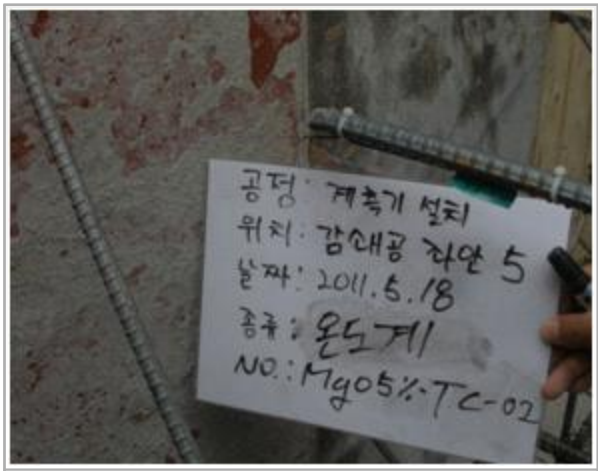
무응력계(NS-02) 설치



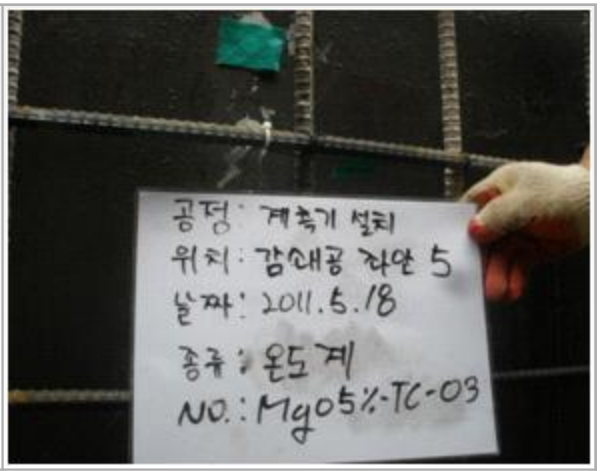
유효응력계(ED-01) 설치



온도계(TC-01) 설치



온도계(TC-02) 설치



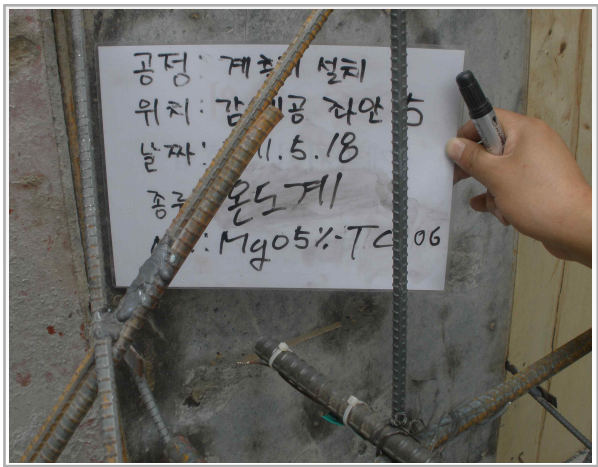
온도계(TC-03) 설치



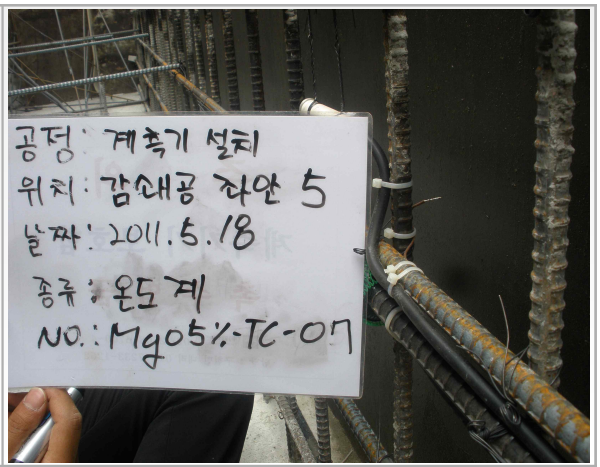
온도계(TC-04) 설치



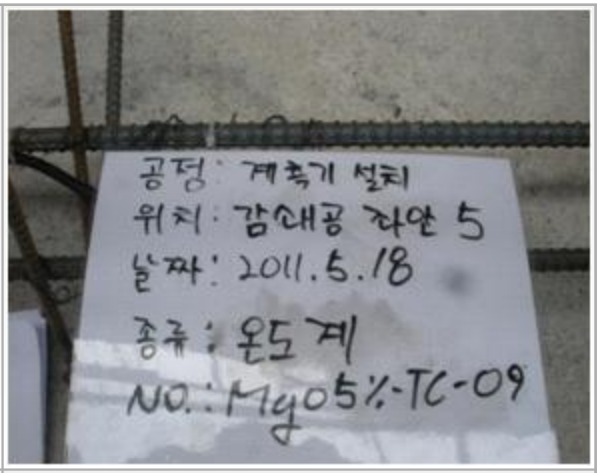
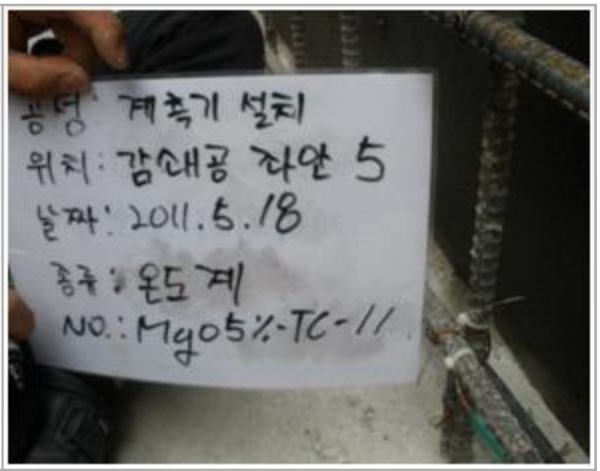
온도계(TC-05) 설치



온도계(TC-06) 설치



온도계(TC-07) 설치

<table>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>온도계(TC-08) 설치</td><td>온도계(TC-09) 설치</td></tr>
<tr><td>  </td><td> 
</td></tr>
<tr><td>온도계(TC-10) 설치</td><td>온도계(TC-11) 설치</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>온도계(TC-12) 설치</td><td>계측센서 매립</td></tr>
</table>

부 록 II
(시험시공 사진첩 : 본댐 우안부)

< 공 란 >

[MgO를 혼입하지 않은 일반 콘크리트]



콘크리트 변형률계(ST-01) 설치



콘크리트 변형률계(ST-02) 설치



콘크리트 변형률계(ST-03, 04) 및
철근 변형률계(RS-02) 설치



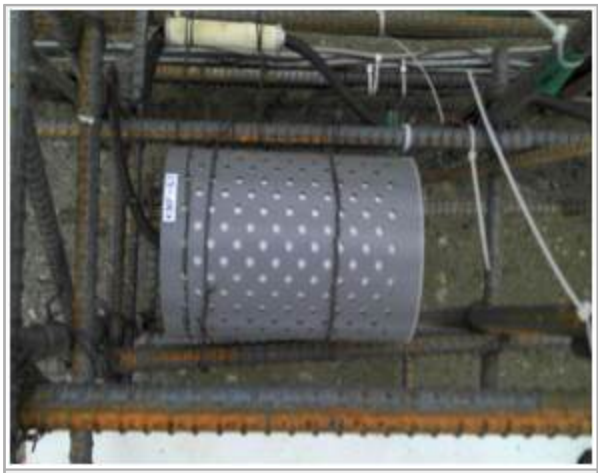
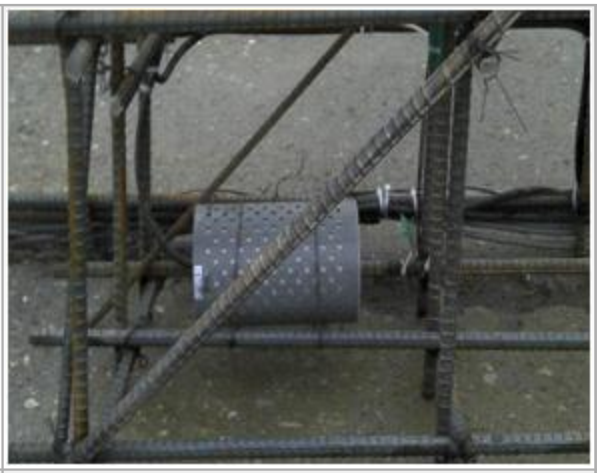
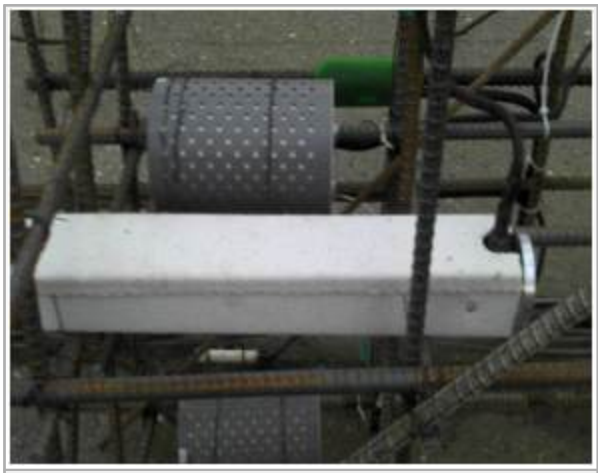
콘크리트 변형률계(ST-05) 설치



철근 변형률계(RS-01) 설치



철근 변형률계(RS-03) 설치

	
무응력계(NS-01) 설치	무응력계(NS-02) 설치
	
유효응력계(ED-01) 설치	계측센서 설치 결과(1/3)
	
계측센서 설치 결과(2/3)	계측센서 설치 결과(3/3)

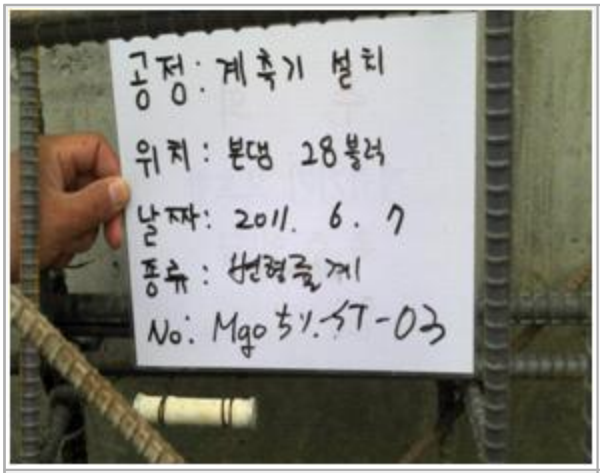
[MgO를 혼입한 장기팽창성 콘크리트]



콘크리트 변형률계(ST-01) 설치



콘크리트 변형률계(ST-02) 설치



콘크리트 변형률계(ST-03) 설치



콘크리트 변형률계(ST-04) 설치



콘크리트 변형률계(ST-05) 설치



철근 변형률계(RS-01) 설치



철근 변형률계(RS-02) 설치



철근 변형률계(RS-03) 설치



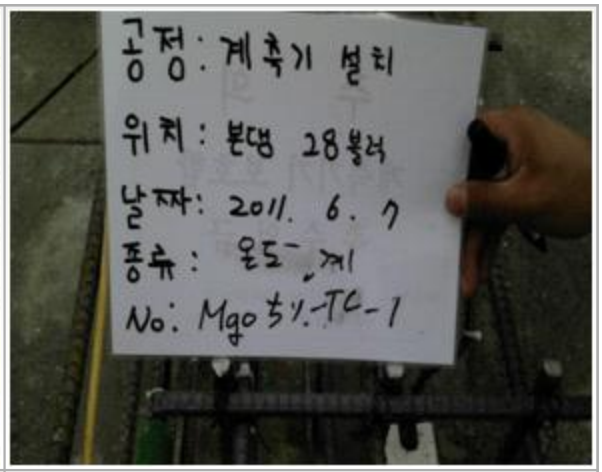
무응력계(NS-01) 설치



무응력계(NS-02) 설치



유효응력계(ED-01) 설치



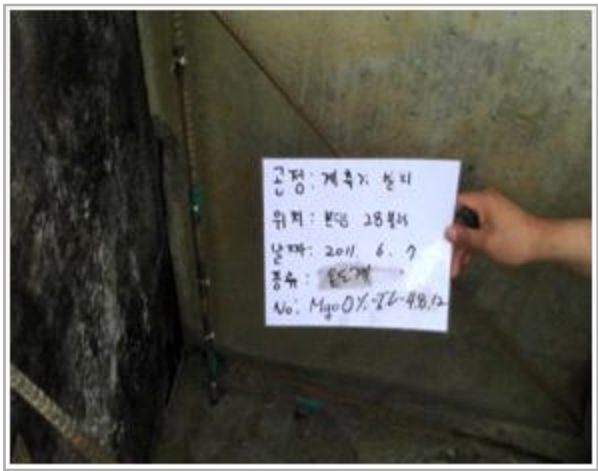
온도계(TC-01) 설치



온도계(TC-02) 설치



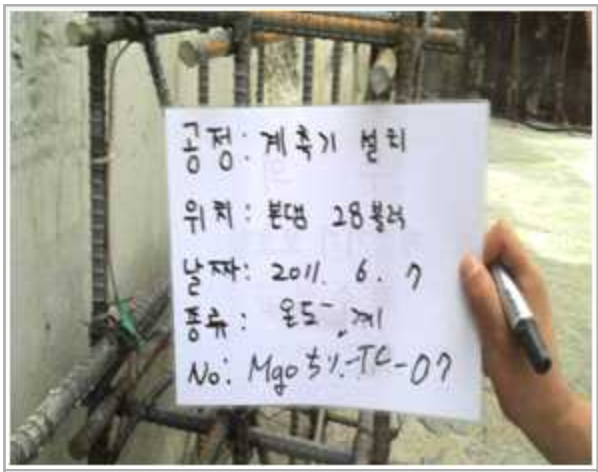
온도계(TC-03) 설치



온도계(TC-04, 08, 12) 설치



온도계(TC-05) 설치



온도계(TC-07) 설치



온도계(TC-09) 설치



온도계(TC-10) 설치



온도계(TC-11) 설치



장기팽창성 콘크리트 다짐 전경



일반 콘크리트 타설 전경



계측기 설치

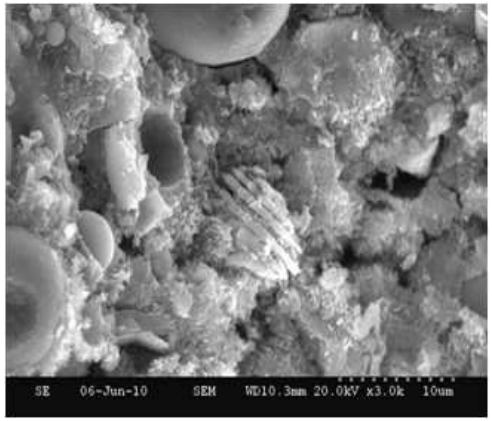
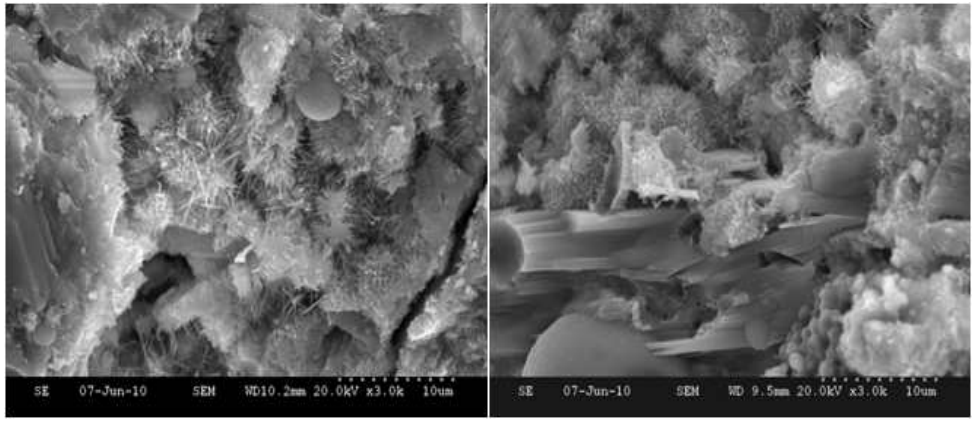
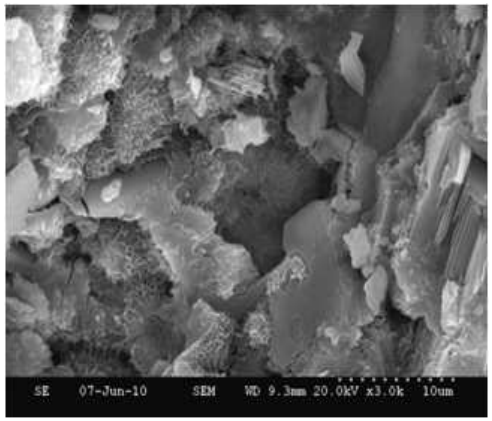
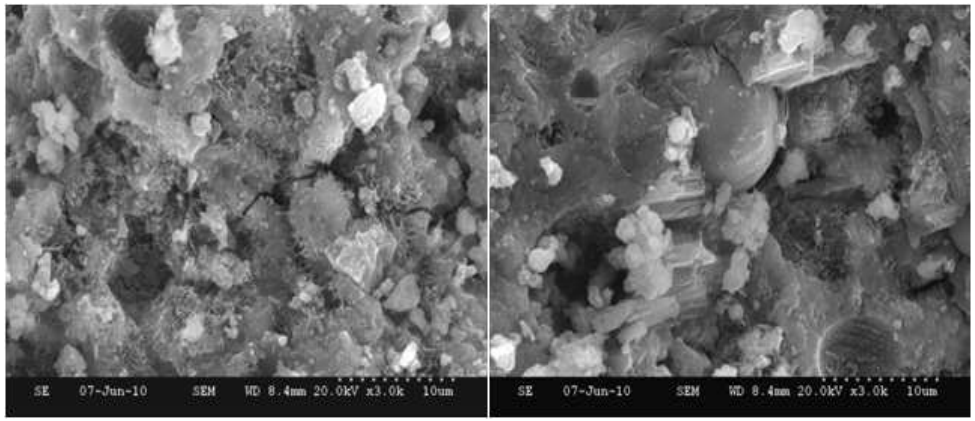


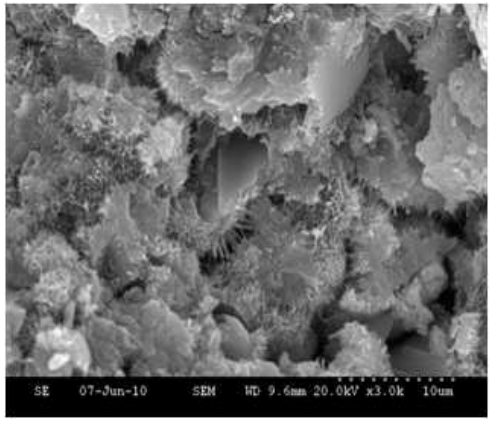
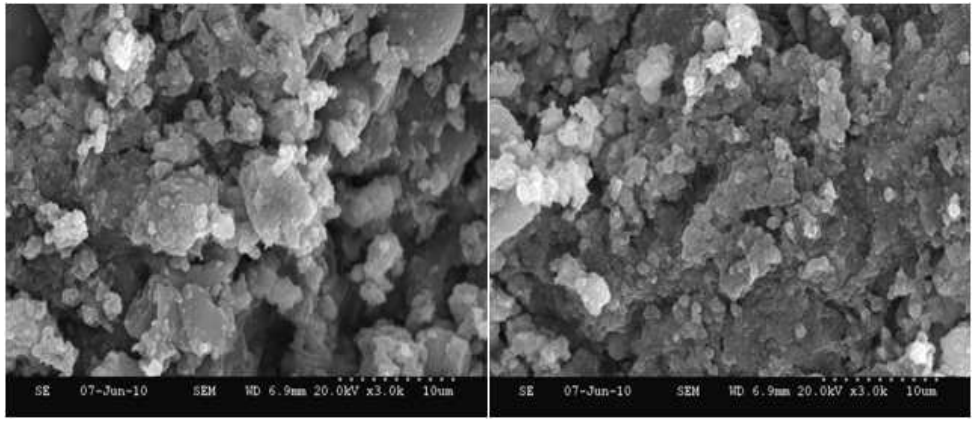
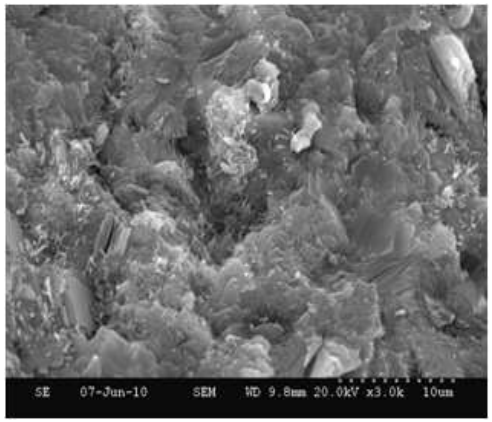
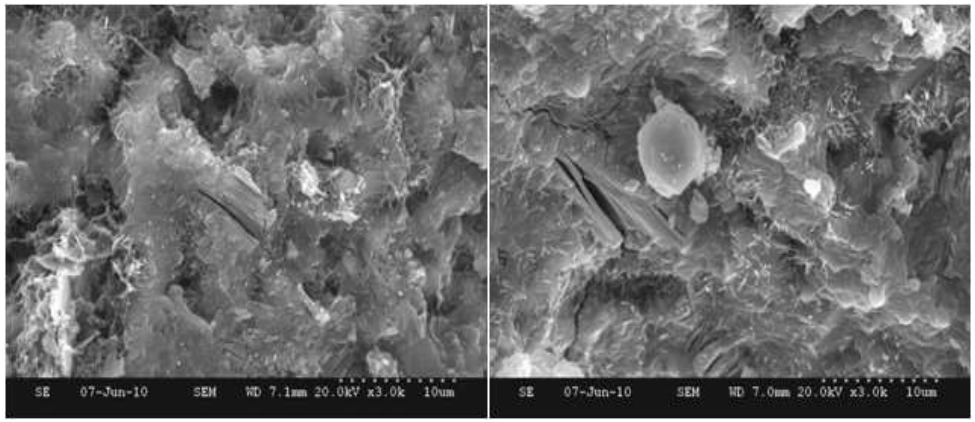
계측기 함체 및 전원공급 장치 설치

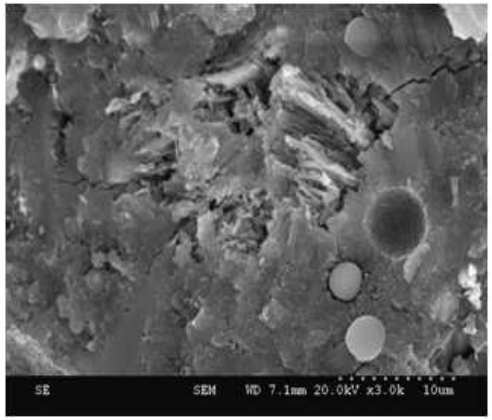
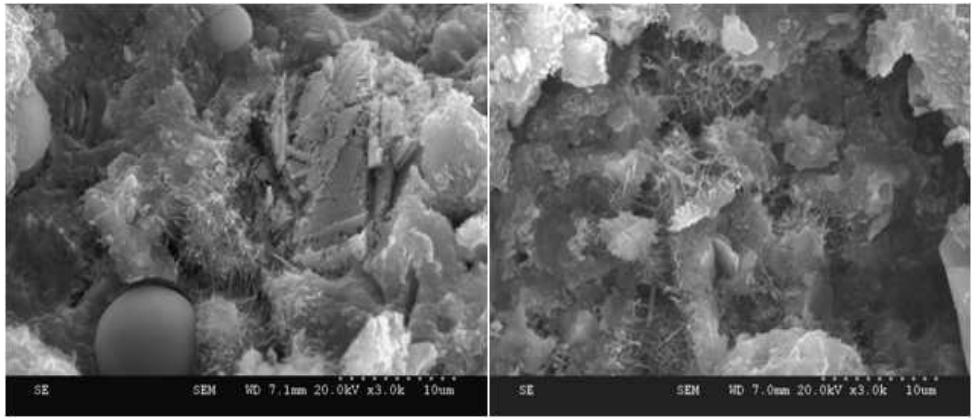
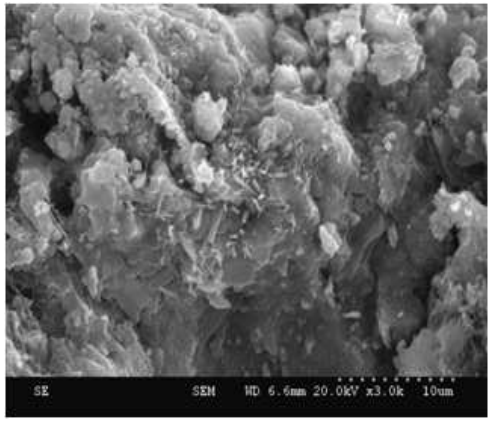
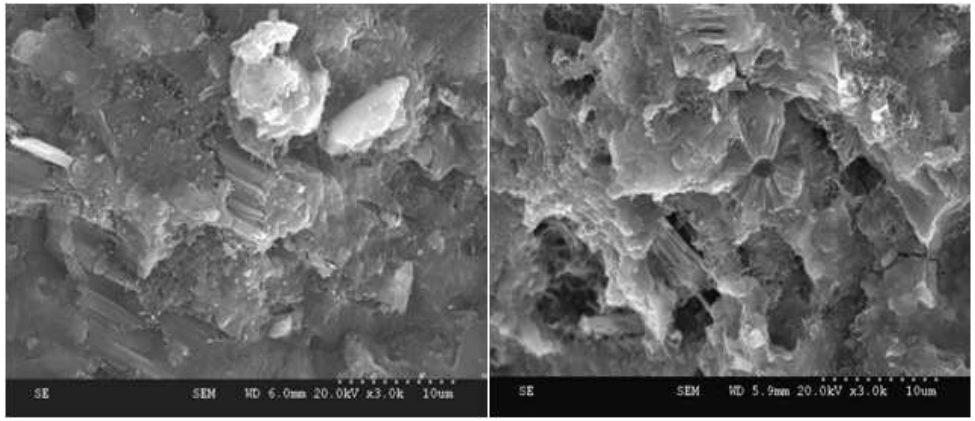
부 록 III
(수화생성물분석결과 : SEM, XRD, DSC)

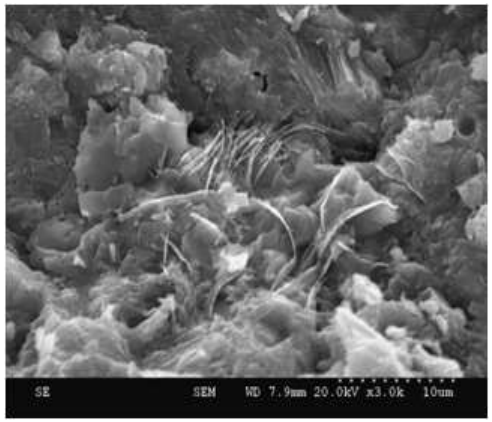
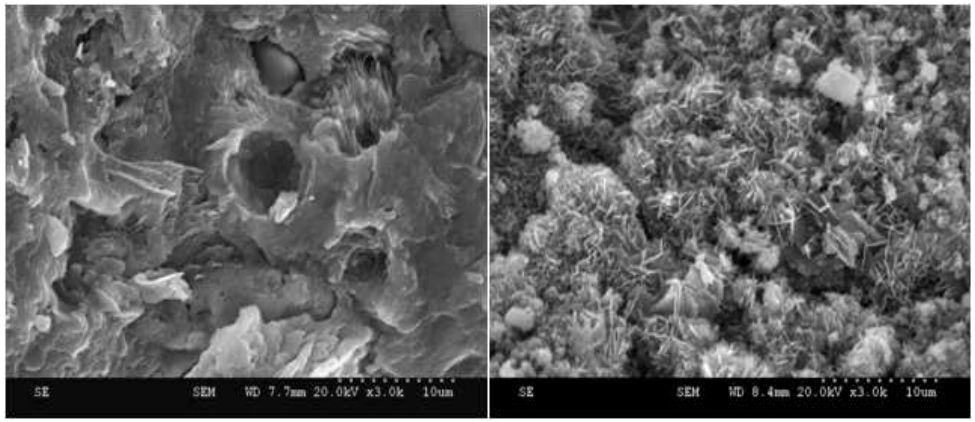
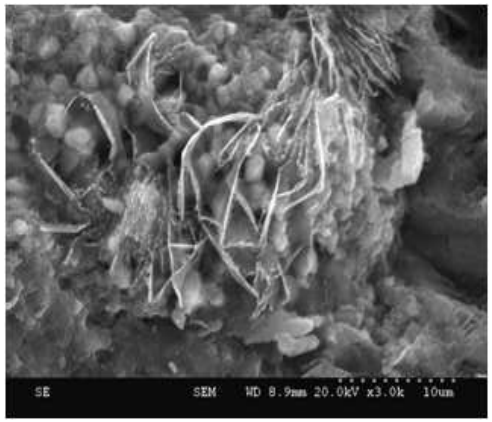
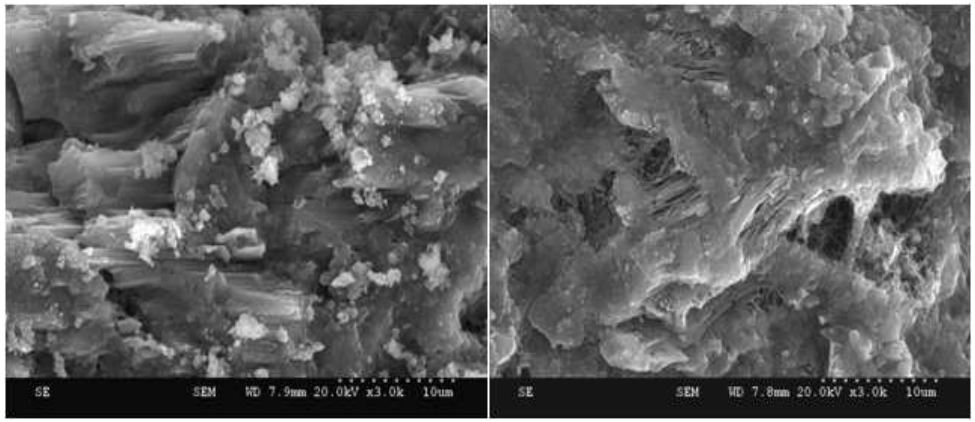
< 공 란 >

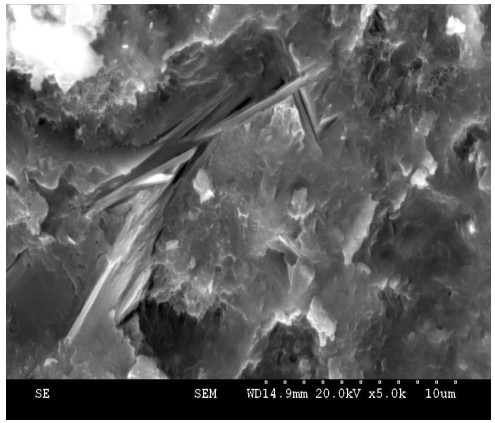
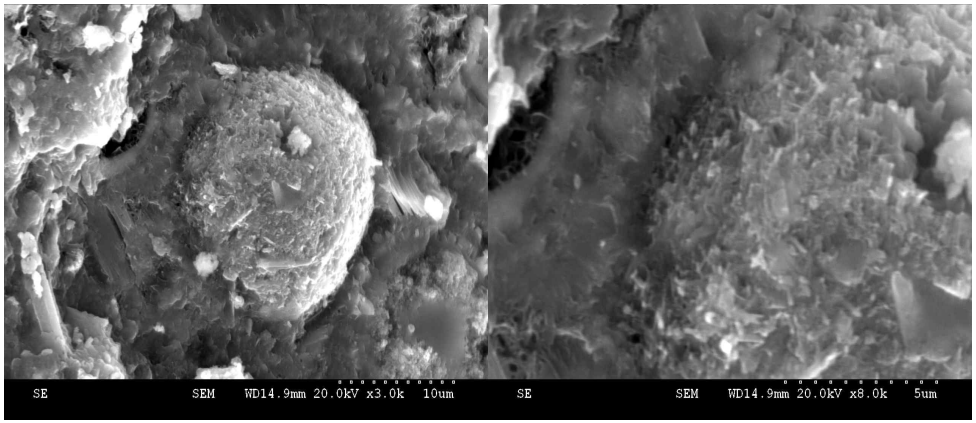
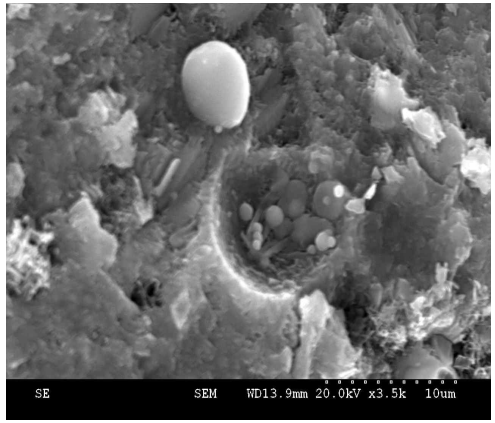
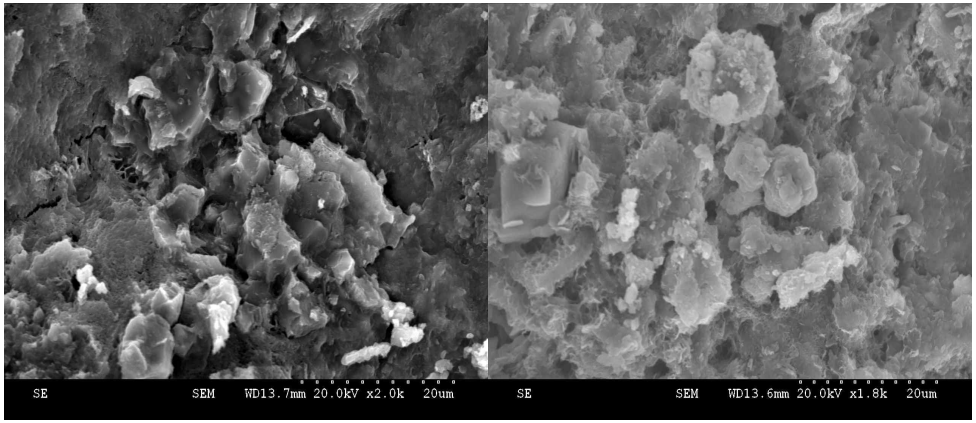
가. SEM 분석 결과

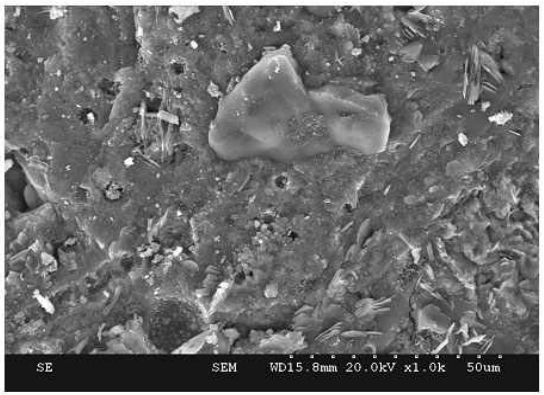
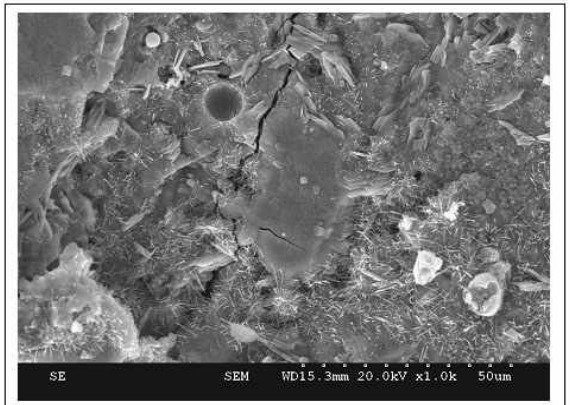
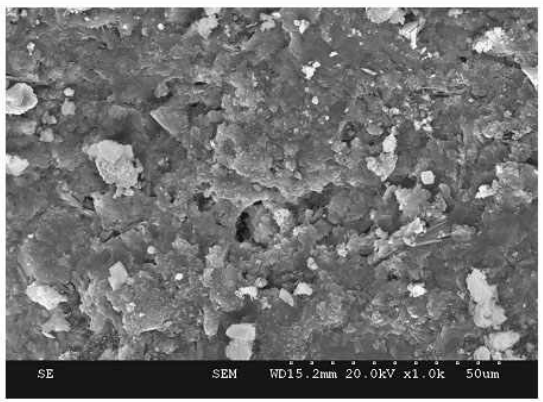
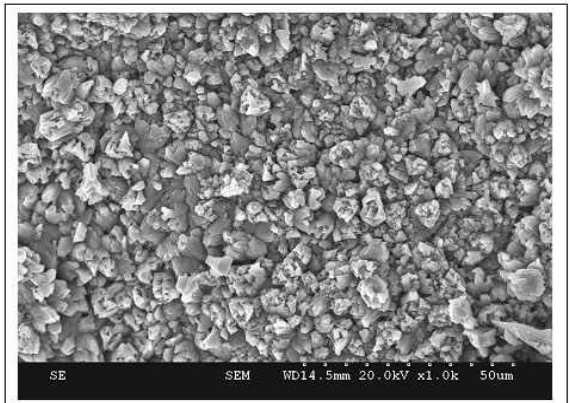
(1) 7일-0%-20℃	(2) 7일-10%-20℃
	
(3) 7일-0%-50℃	(4) 7일-10%-50℃
	

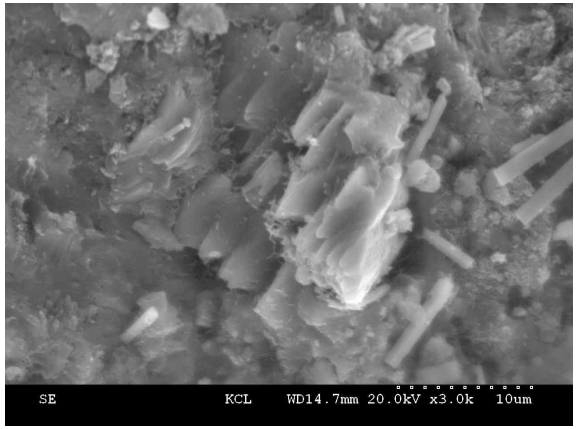
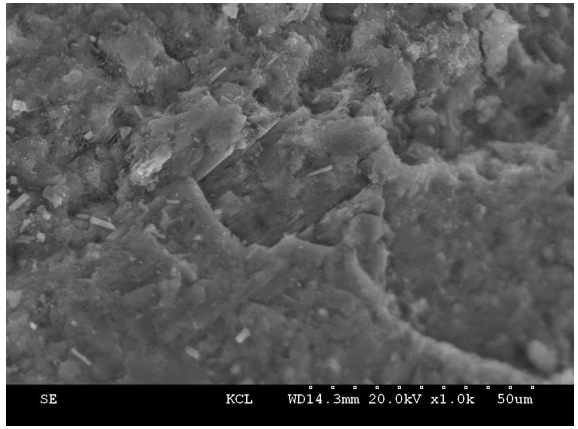
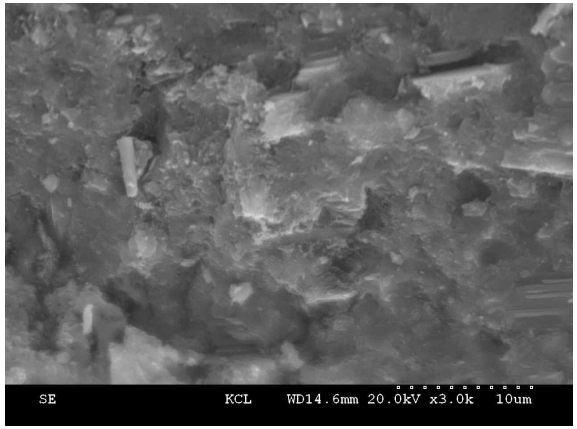
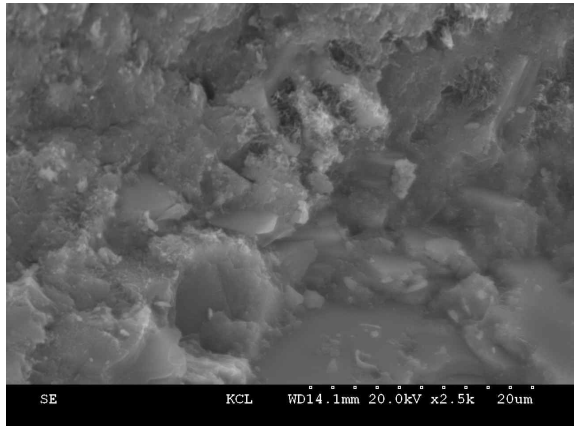
(1) 28일-0%-20℃	(2) 28일-10%-20℃
	
(3) 28일-0%-50℃	(4) 28일-10%-50℃
	

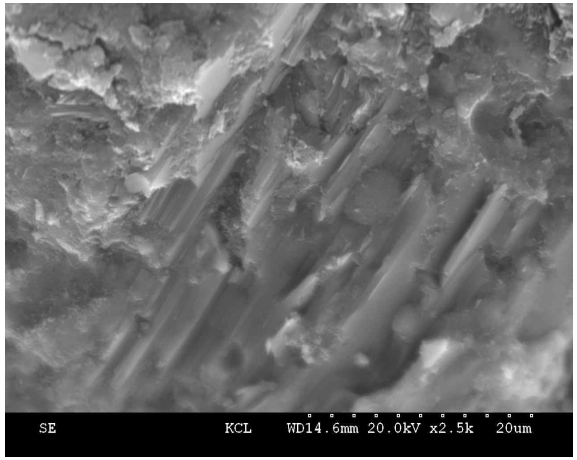
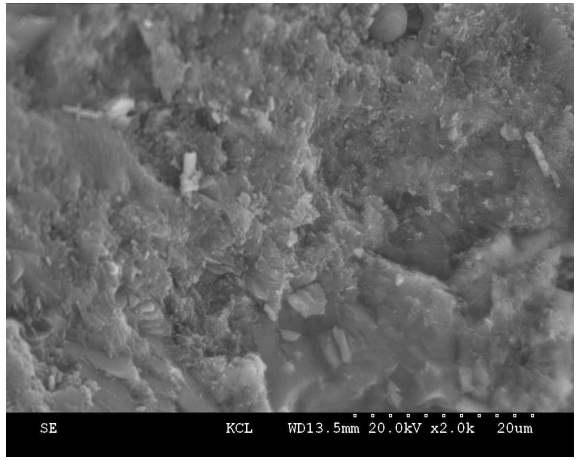
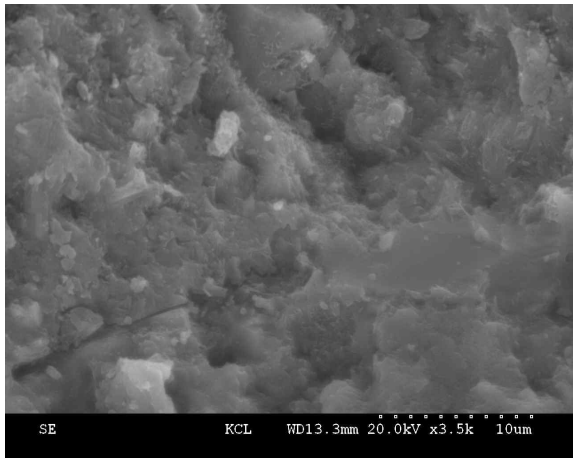
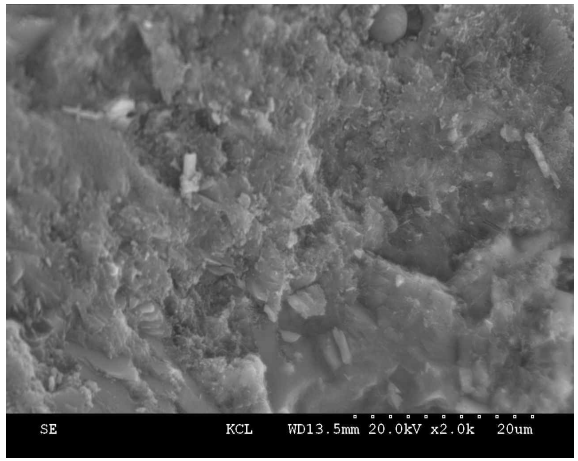
(1) 56일-0%-20℃	(2) 56일-10%-20℃
	
(3) 56일-0%-50℃	(4) 56일-10%-50℃
	

(1) 90일-0%-20℃	(2) 90일-10%-20℃
	
(3) 90일-0%-50℃	(4) 90일-10%-50℃
	

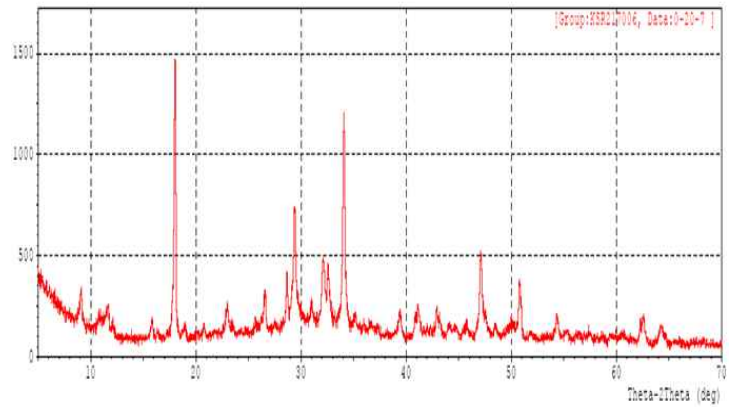
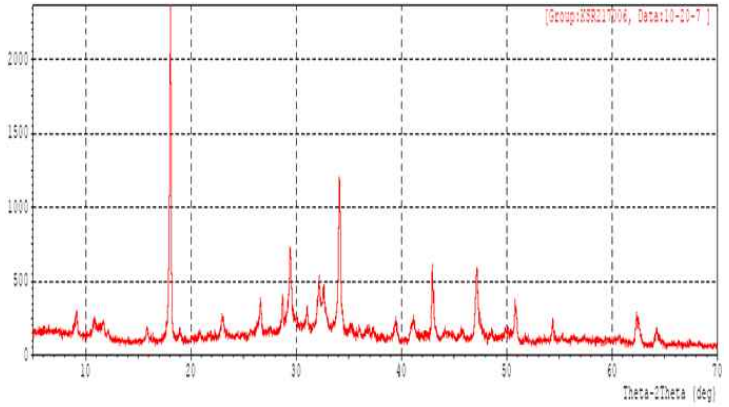
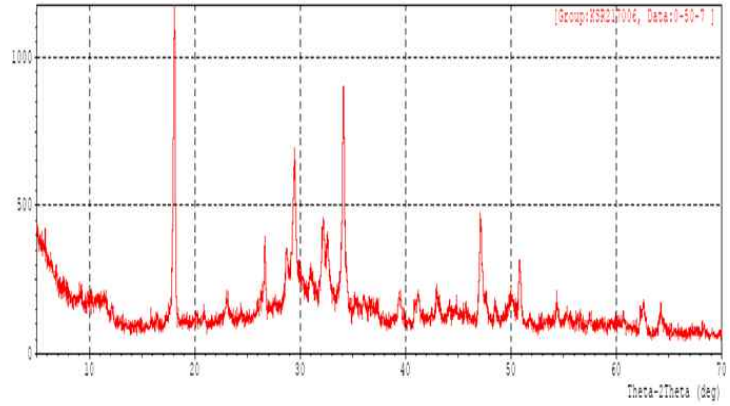
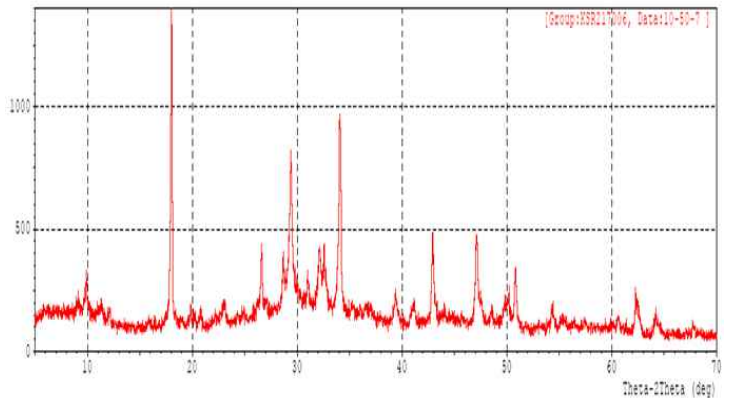
(1) 180일-0%-20℃	(2) 180일-10%-20℃
	
(3) 180일-0%-50℃	(4) 180일-10%-50℃
	

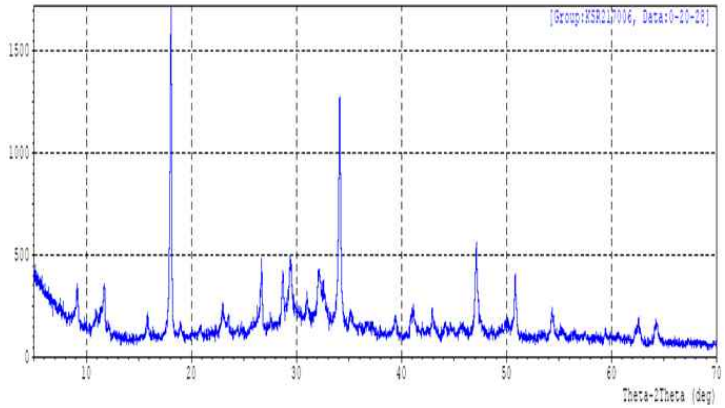
(1) 360일-0%-20℃	(2) 360일-10%-20℃
 [MgO 콘크리트(360일 - 0% - 20℃)]	 [MgO 콘크리트(360일 - 10% - 20℃)]
(3) 360일-0%-50℃	**(4) 360일-10%-50℃**
 [MgO 콘크리트(360일 - 0% - 50℃)]	 [MgO 콘크리트(360일 - 10% - 50℃)]

(1) 540일-0%-20℃	(2) 540일-10%-20℃
	
(3) 540일-0%-50℃	(4) 540일-10%-50℃
	

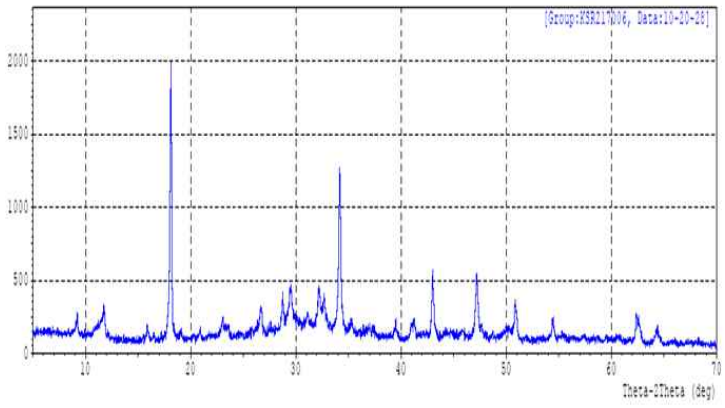
(1) 720일-0%-20℃	(2) 720일-10%-20℃
	
(3) 720일-0%-50℃	(4) 720일-10%-50℃
	

나. XRD 분석 결과

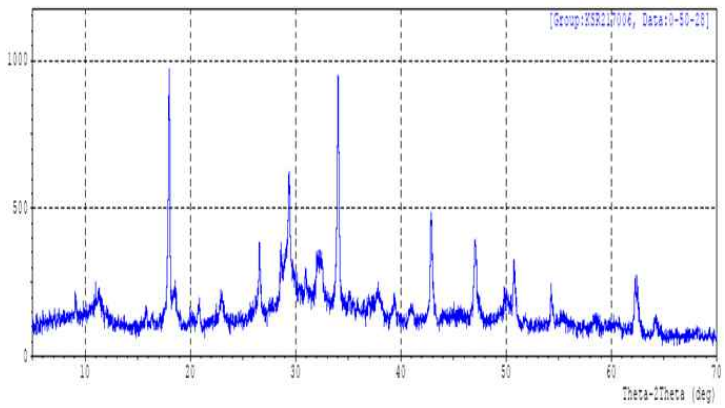
(1) 7일-0%-20℃	(2) 7일-10%-20℃
	
(3) 7일-0%-50℃	(4) 7일-10%-50℃
	
(1) 28일-0%-20℃	(2) 28일-10%-20℃

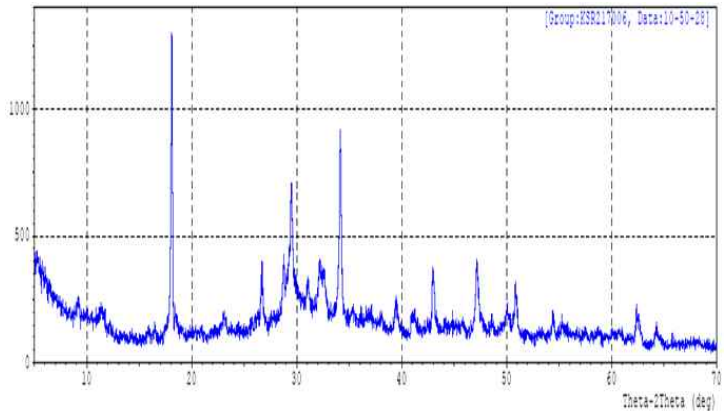


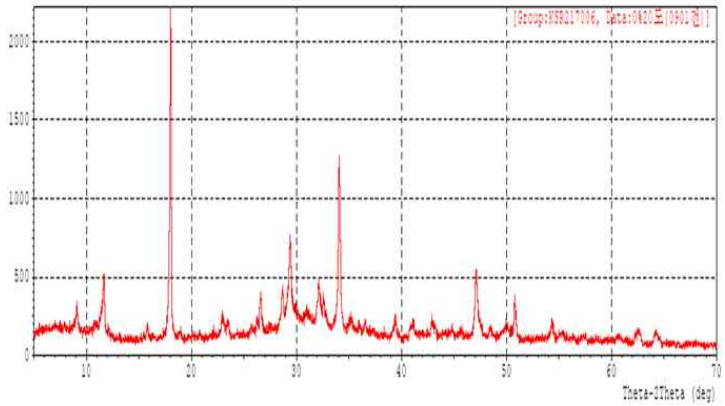
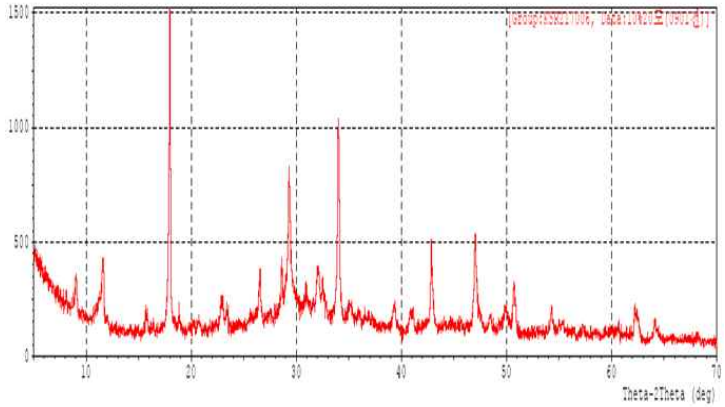
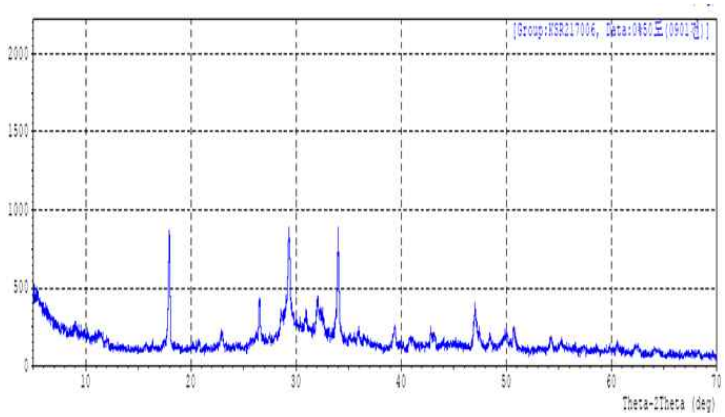
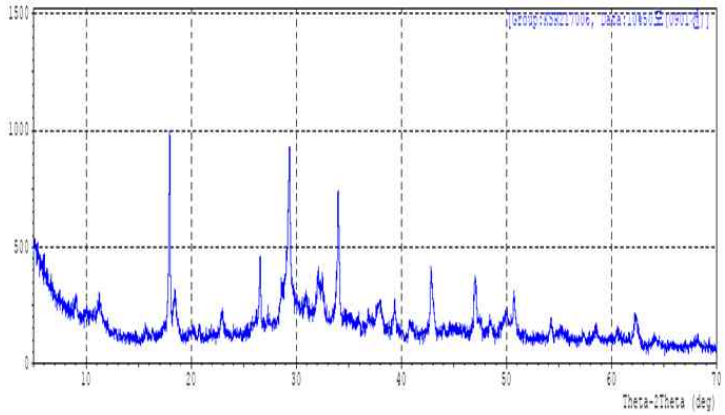
(3) 28일-0%-50℃

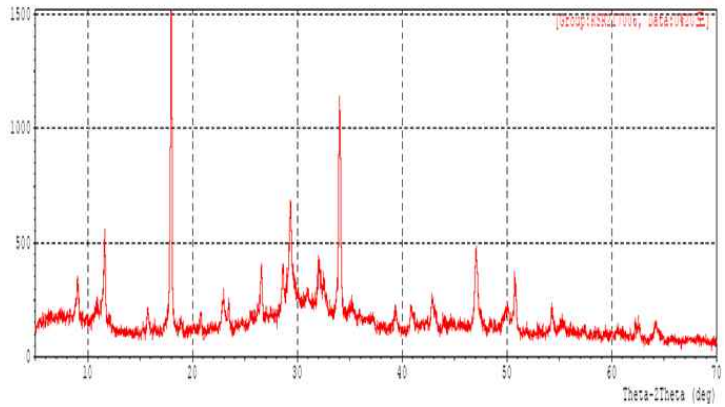
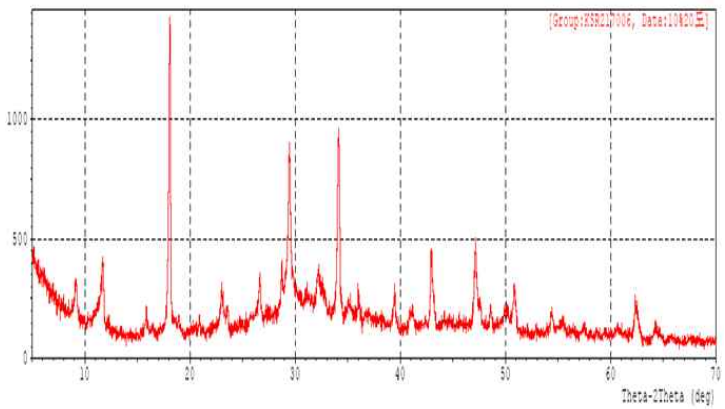
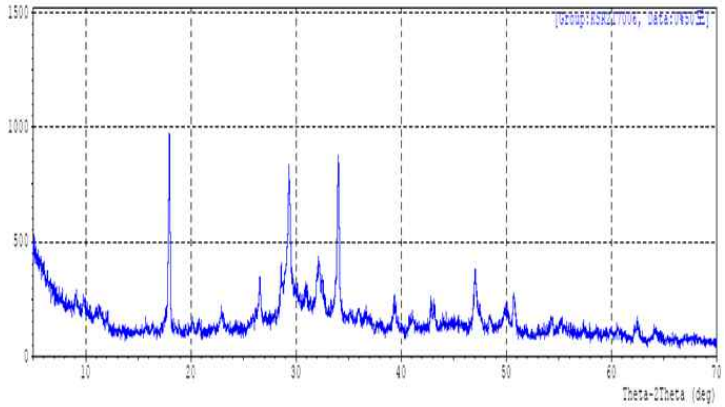
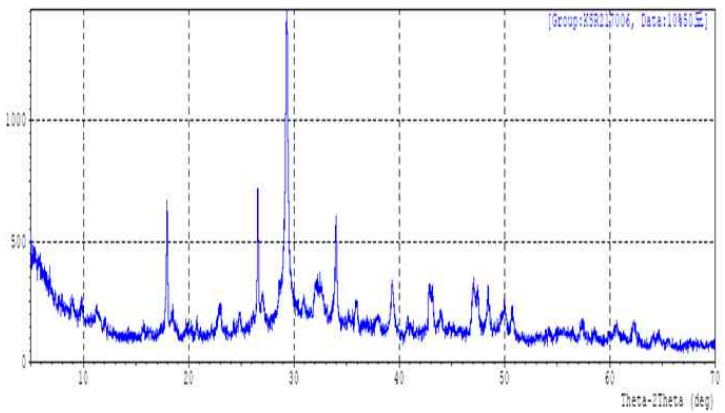


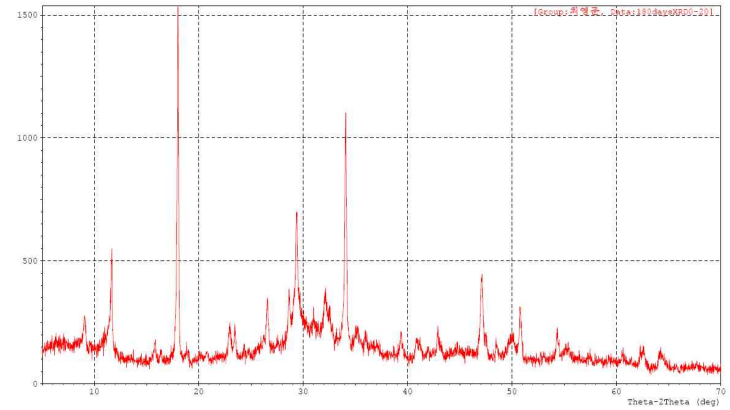
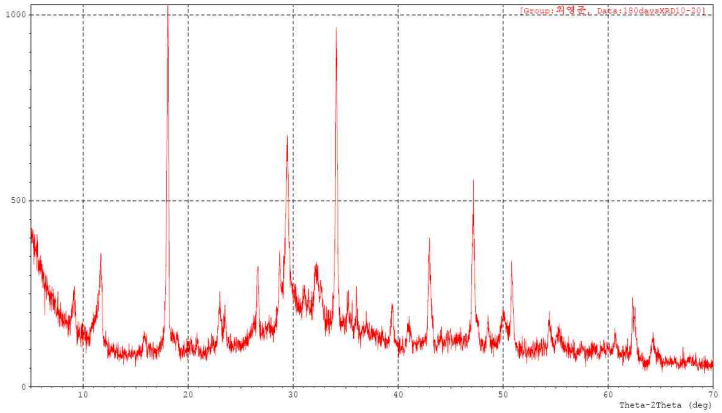
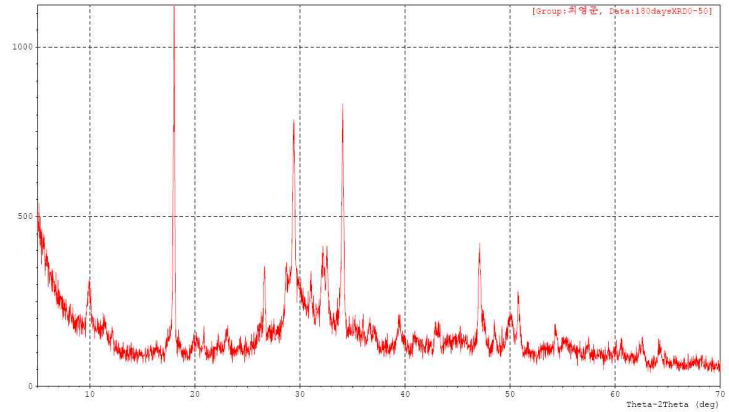
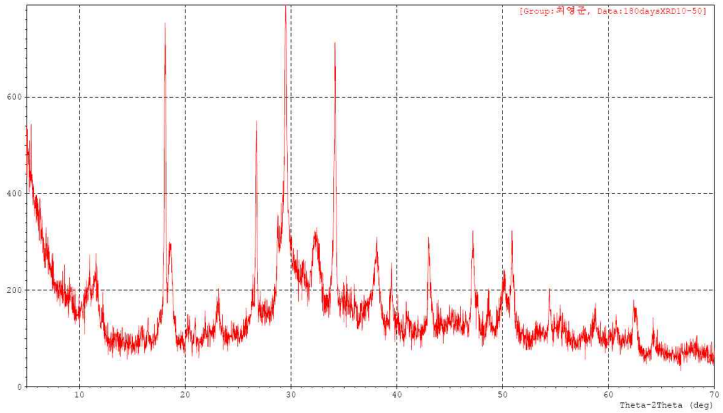
(4) 28일-10%-50℃

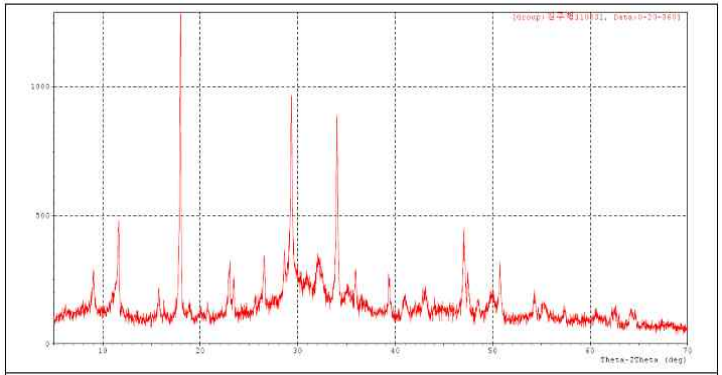
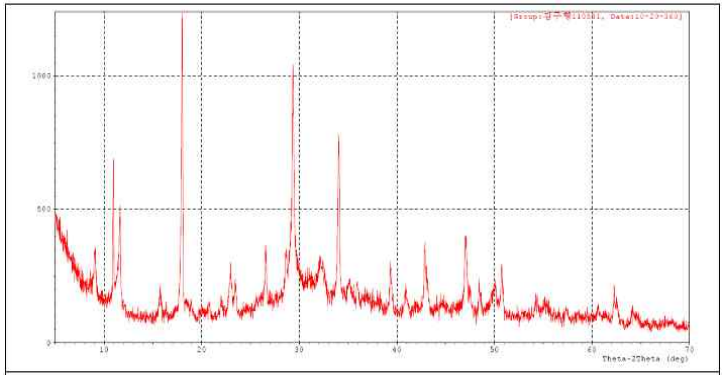
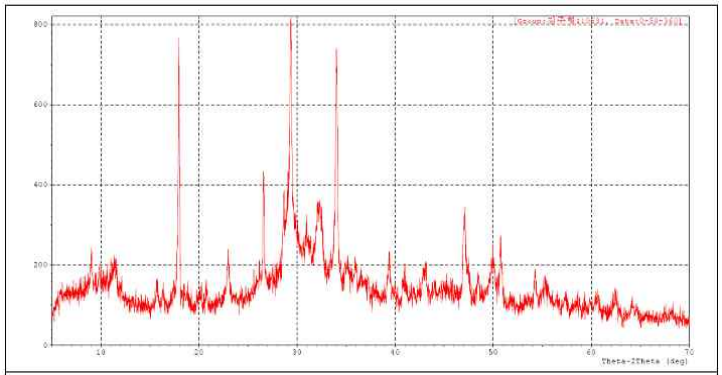
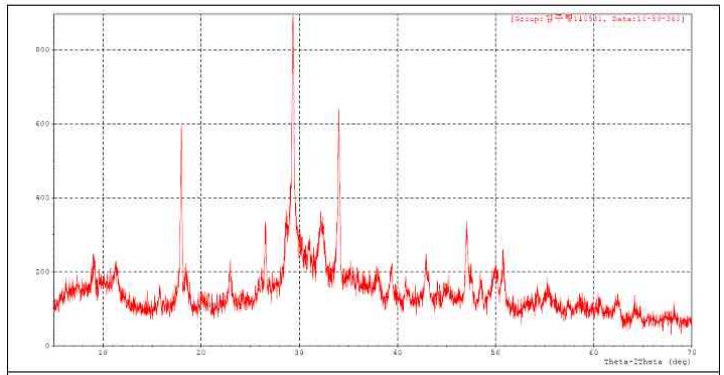


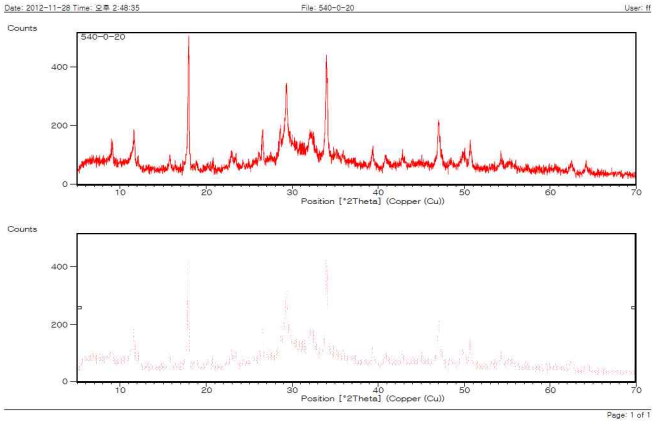
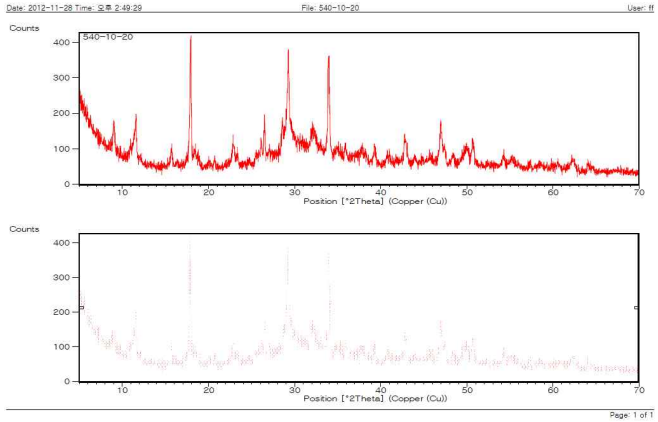
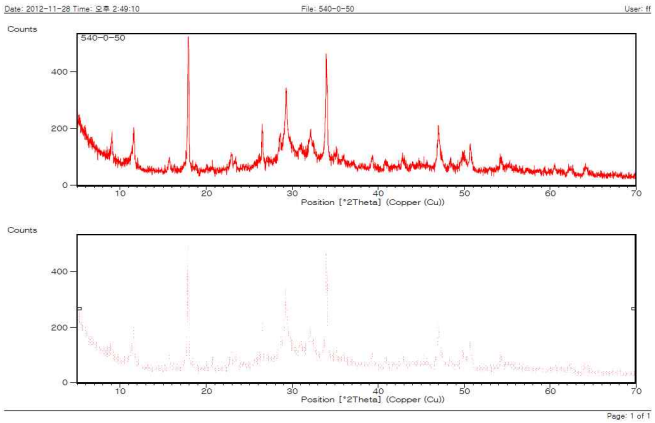
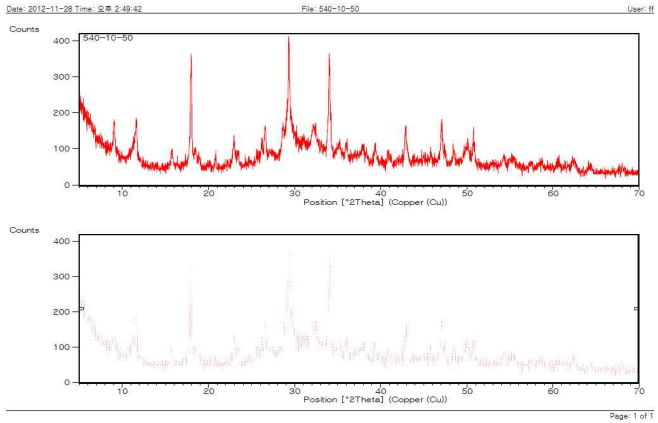


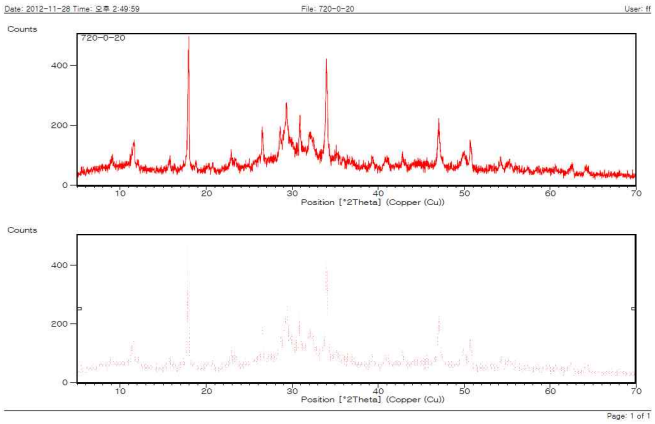
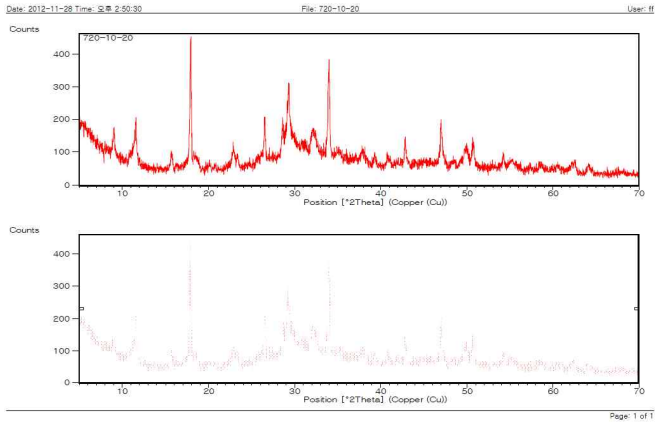
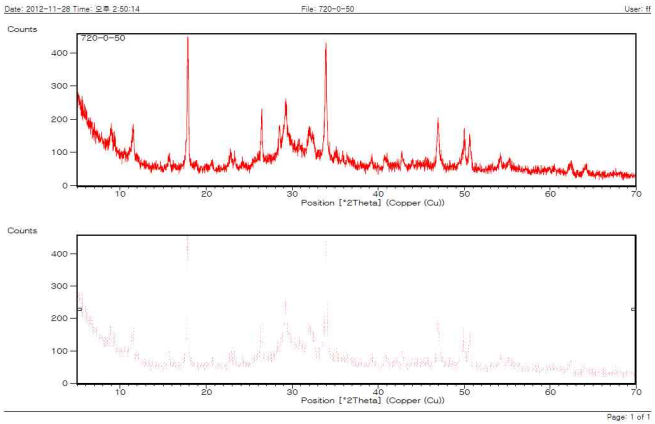
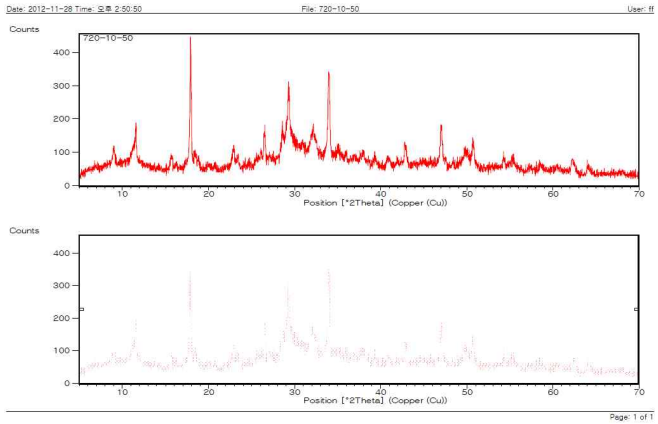
(1) 56일-0%-20℃	(2) 56일-10%-20℃
	
(3) 56일-0%-50℃	(4) 56일-10%-50℃
	

(1) 90일-0%-20℃	(2) 90일-10%-20℃
	
(3) 90일-0%-50℃	(4) 90일-10%-50℃
	

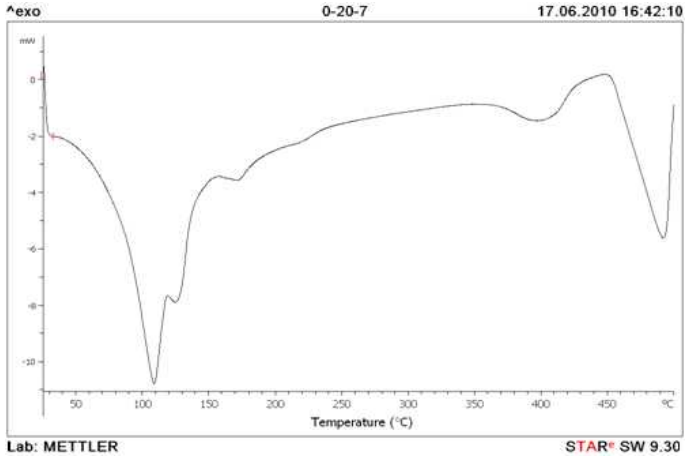
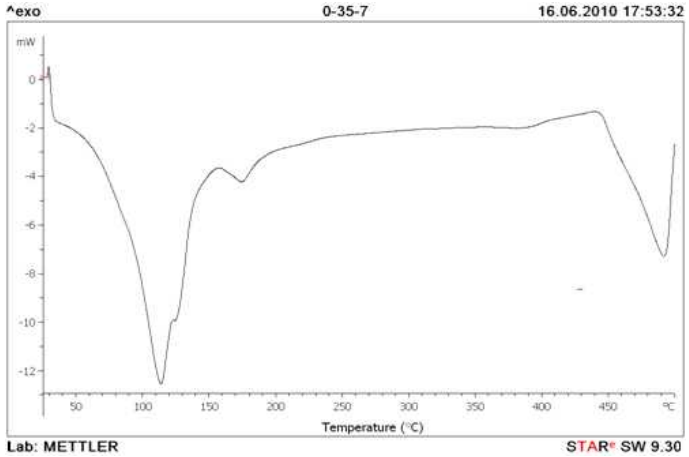
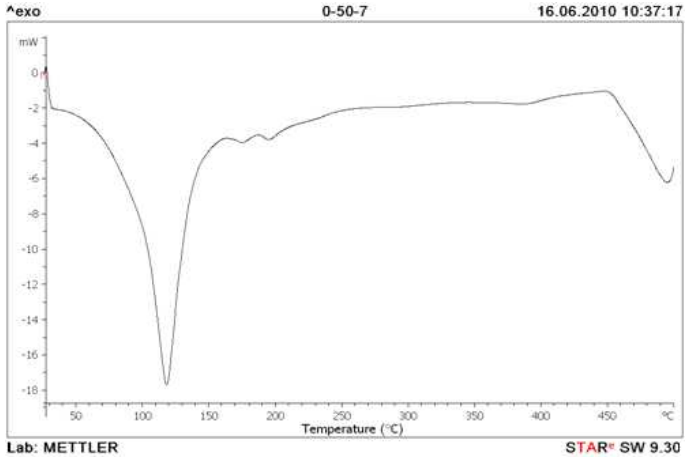
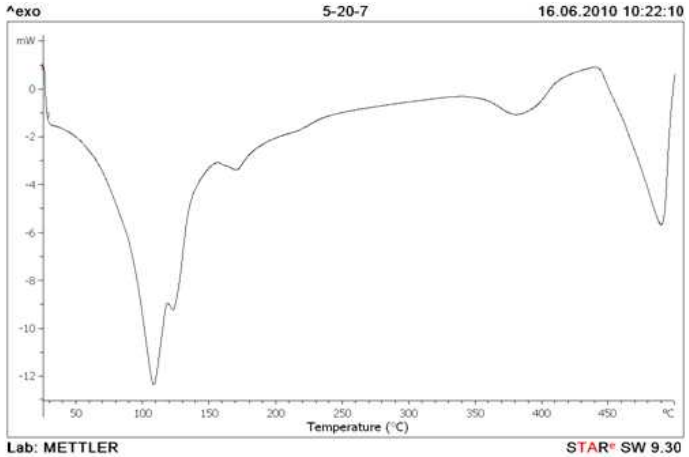
(1) 180일-0%-20℃	(2) 180일-10%-20℃
	
(3) 180일-0%-50℃	**(4) 180일-10%-50℃**
	

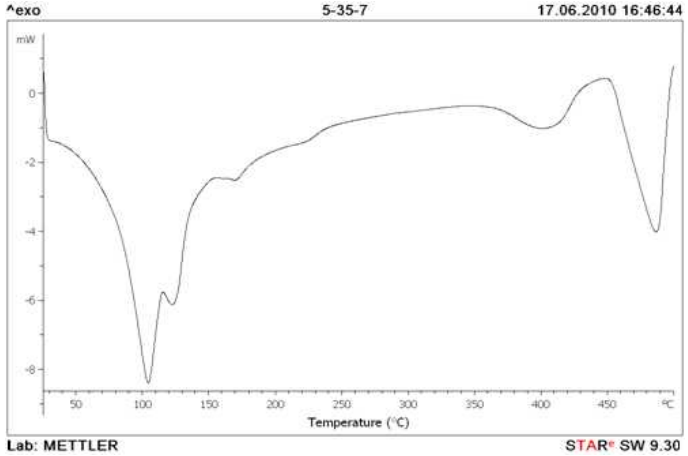
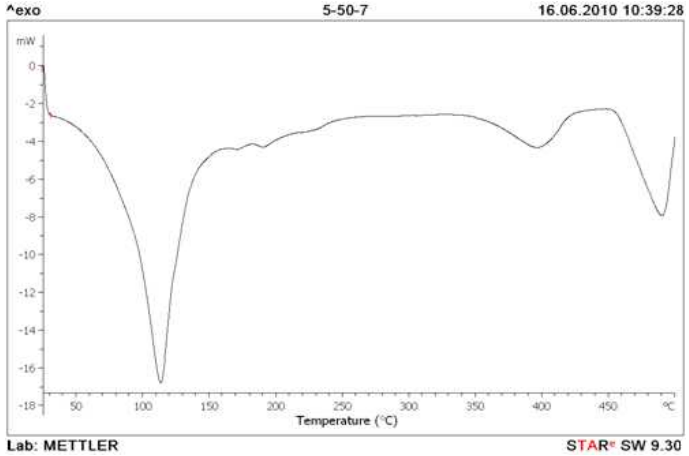
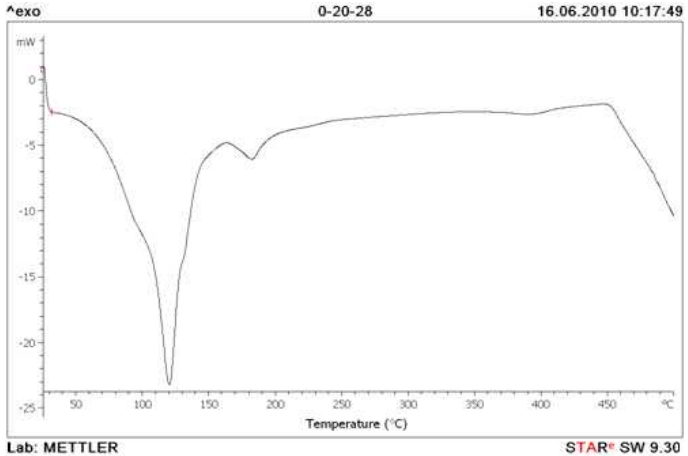
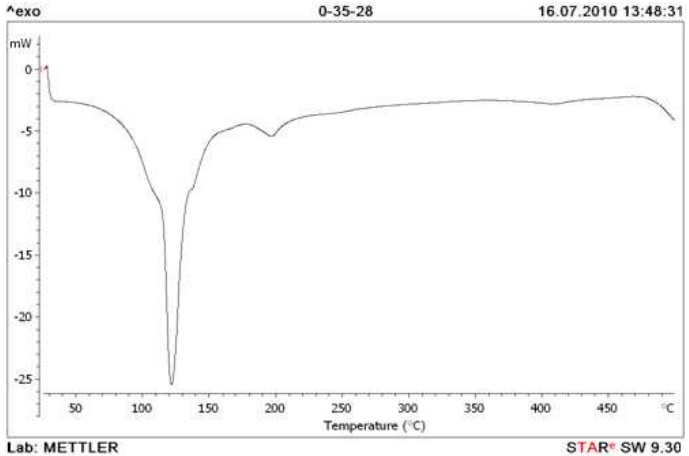
(1) 360일-0%-20℃	(2) 360일-10%-20℃
 [MgO 콘크리트(360일 - 0% - 20℃)]	 [MgO 콘크리트(360일 - 10% - 20℃)]
(3) 360일-0%-50℃	**(4) 360일-10%-50℃**
 [MgO 콘크리트(360일 - 0% - 50℃)]	 [MgO 콘크리트(360일 - 10% - 50℃)]

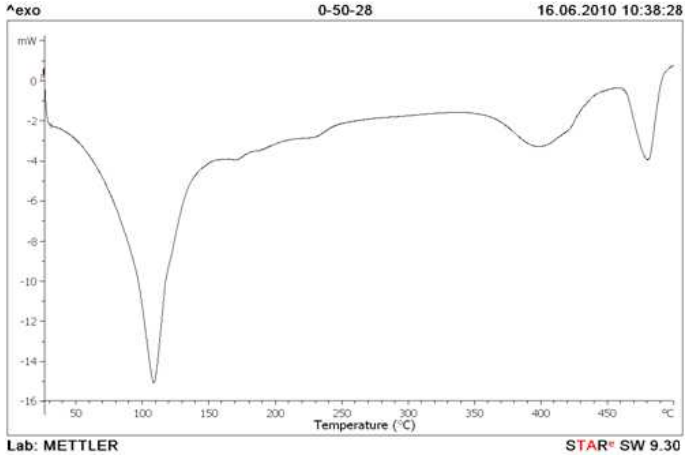
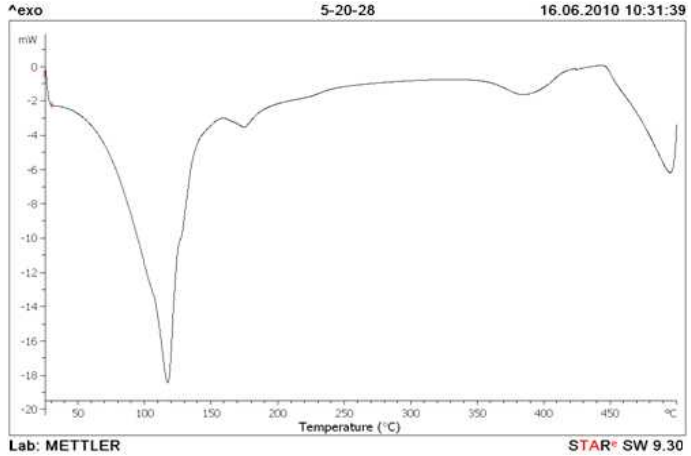
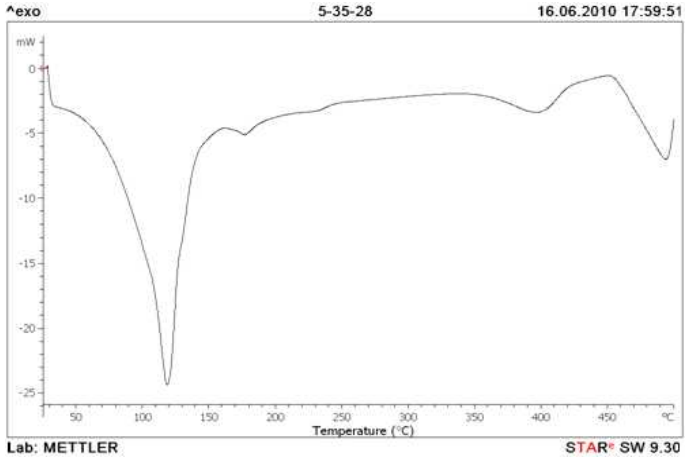
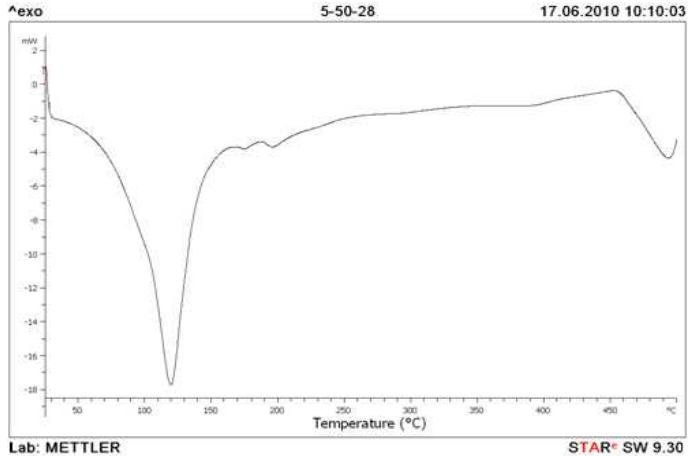
(1) 540일-0%-20℃	(2) 540일-10%-20℃
	
(3) 540일-0%-50℃	(4) 540일-10%-50℃
	

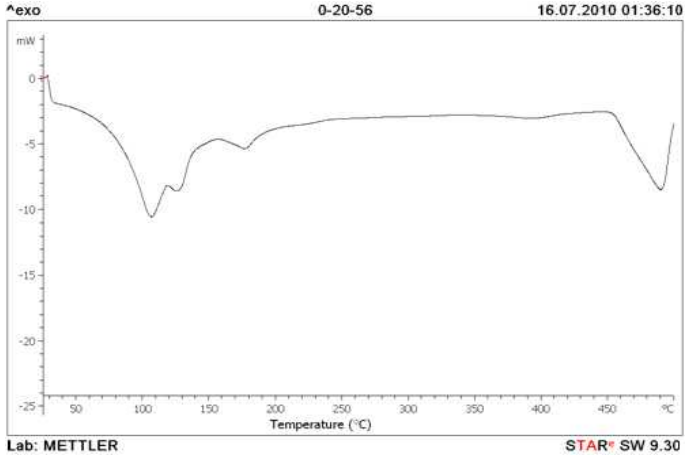
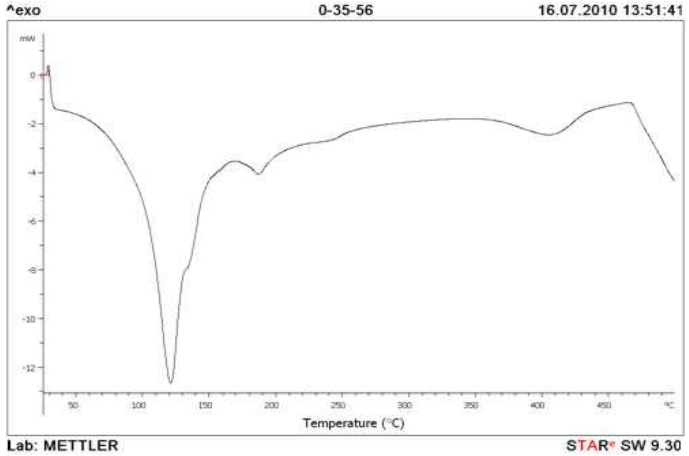
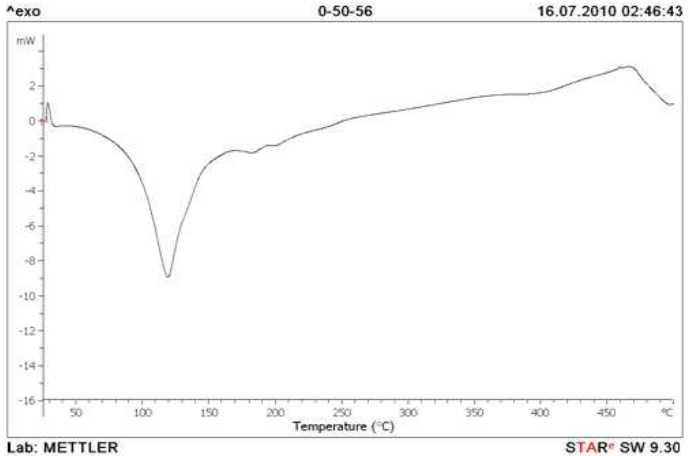
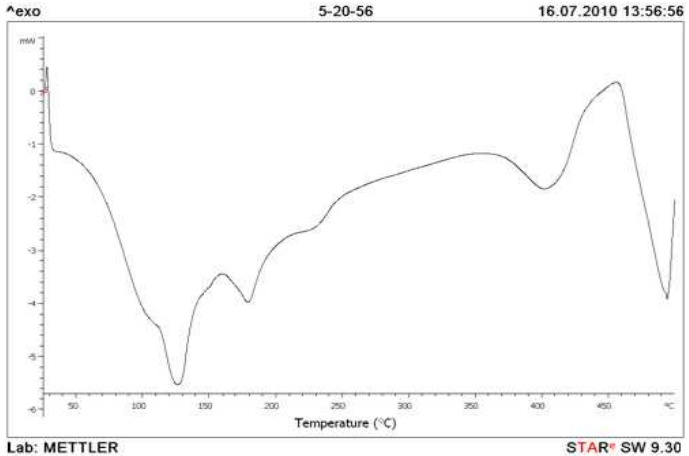
(1) 720일-0%-20℃	(2) 720일-10%-20℃
	
(3) 720일-0%-50℃	(4) 720일-10%-50℃
	

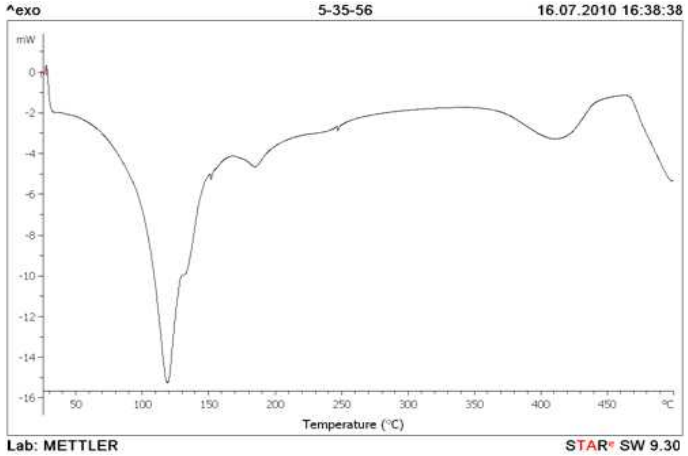
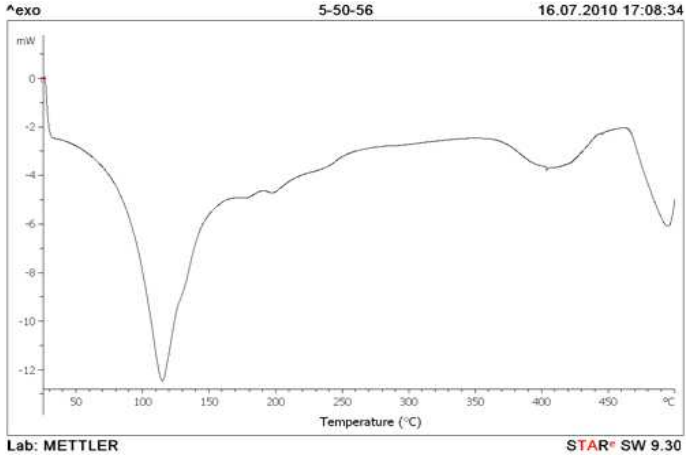
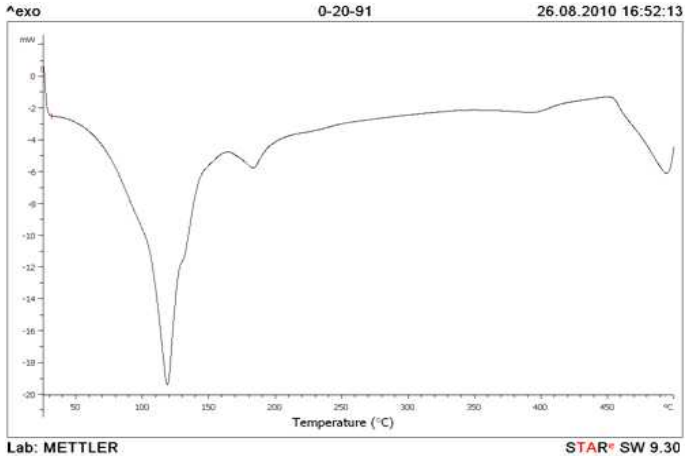
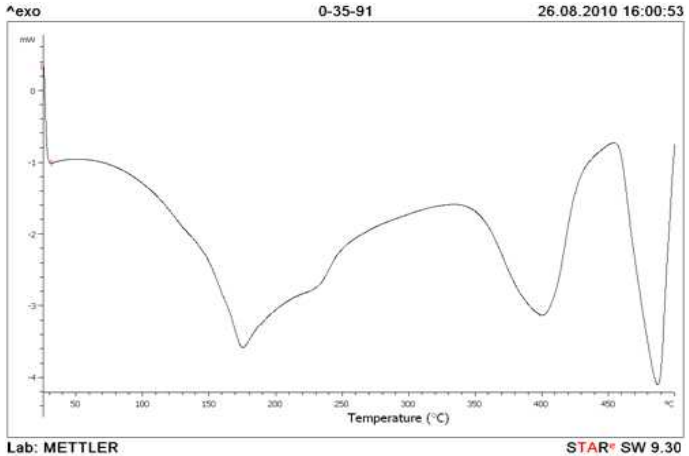
다. DSC 분석 결과

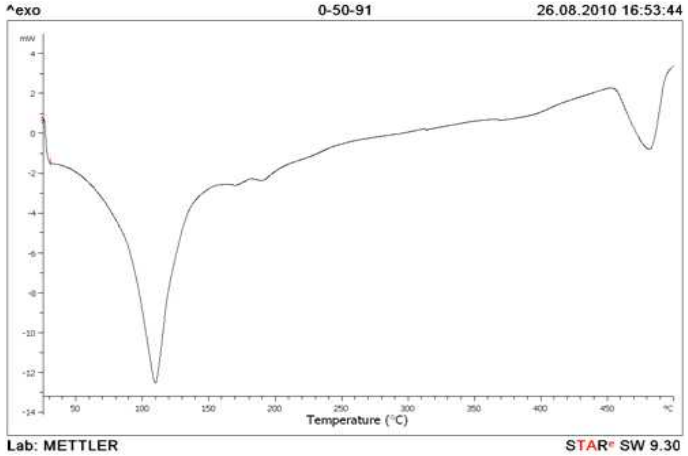
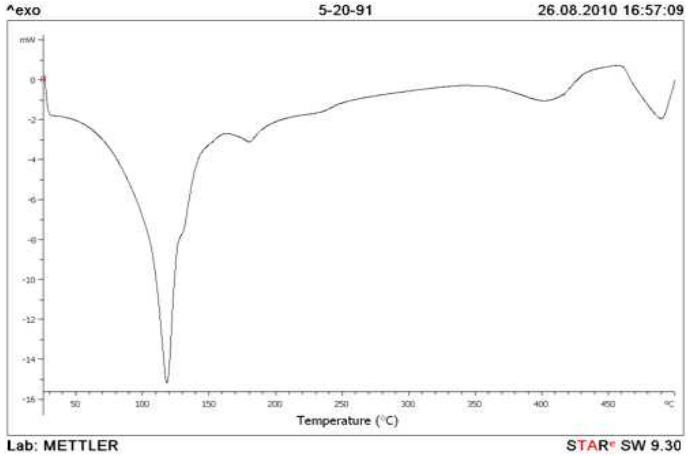
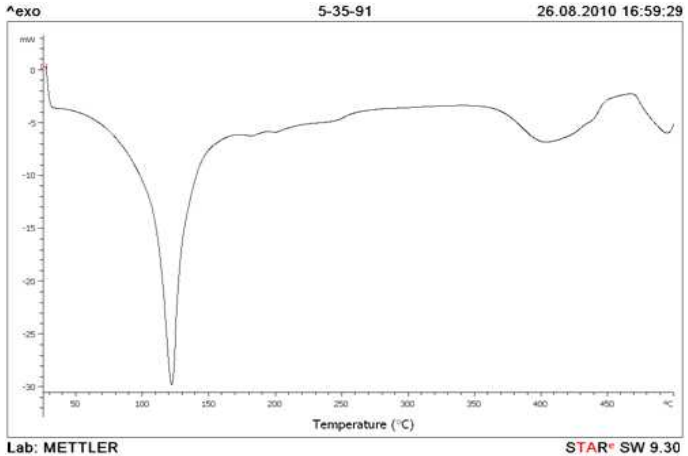
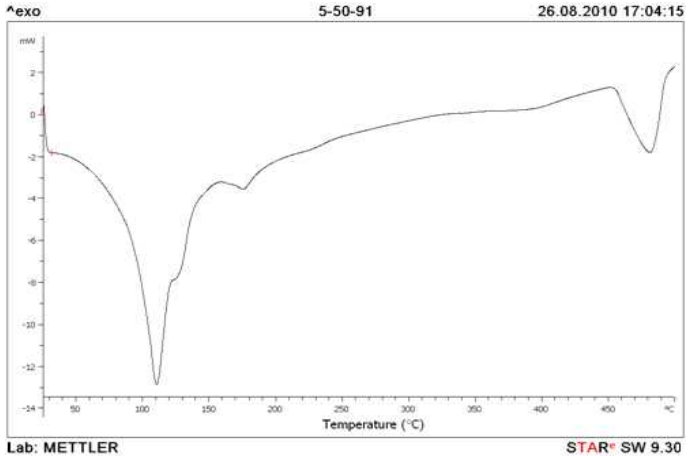
(1) 7일-0%-20℃	(2) 7일-0%-35℃
	
(3 7일-0%-50℃	(4) 7일-5%-20℃
	

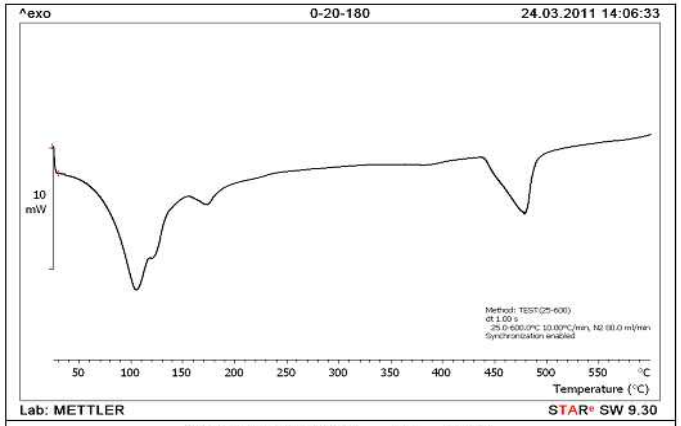
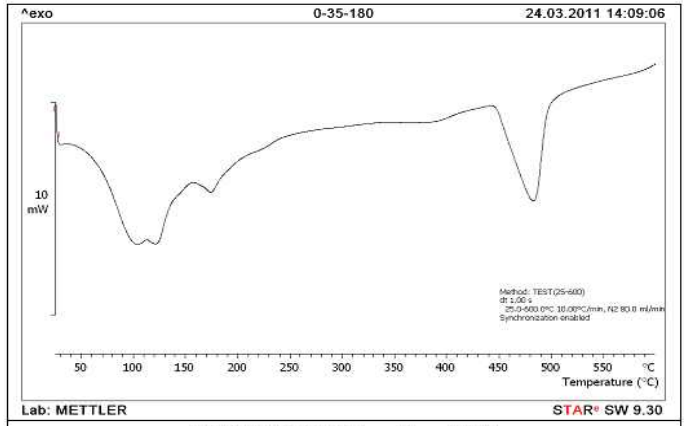
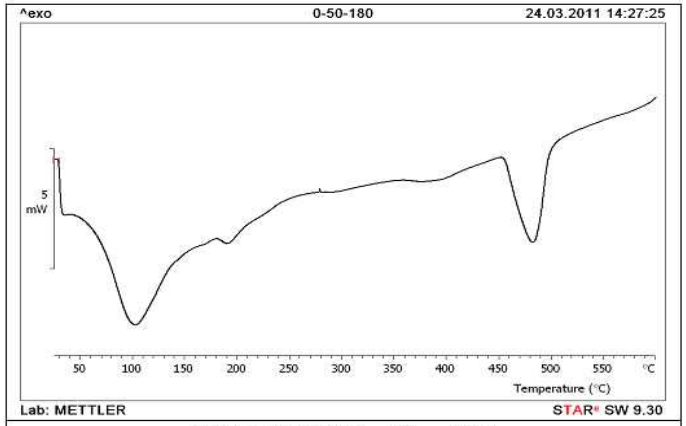
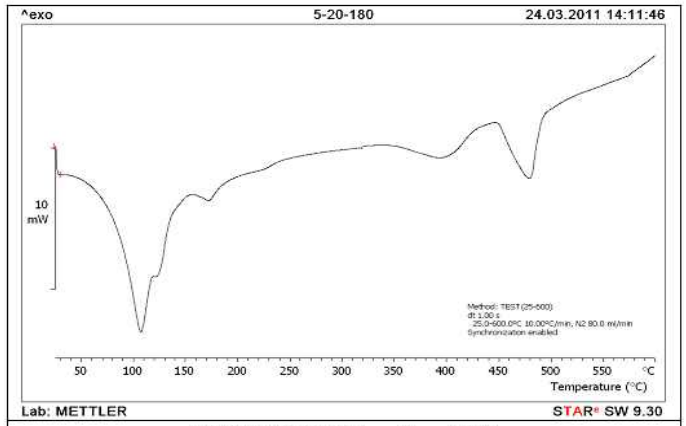
(5) 7일-5%-35℃	(6) 7일-5%-50℃
	
(1) 28일-0%-20℃	(2) 28일-0%-35℃
	

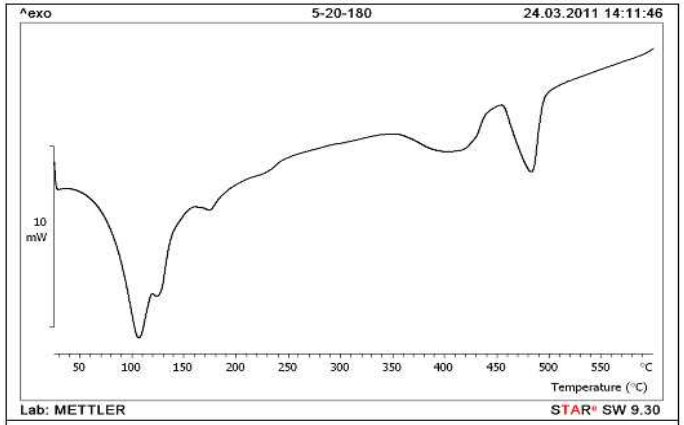
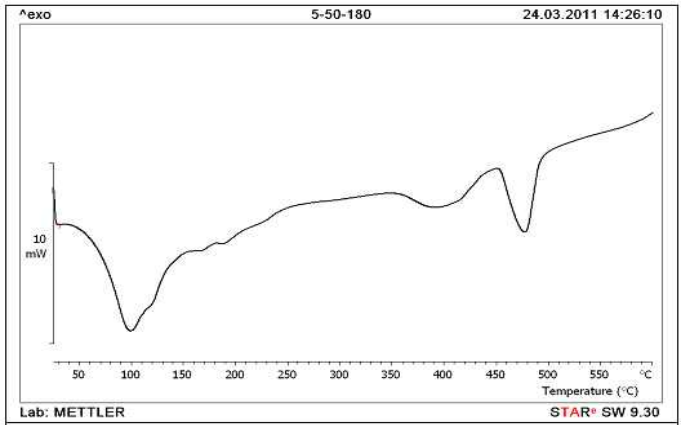
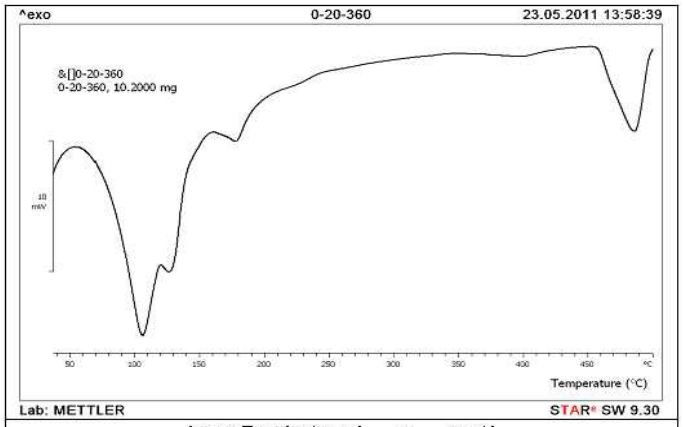
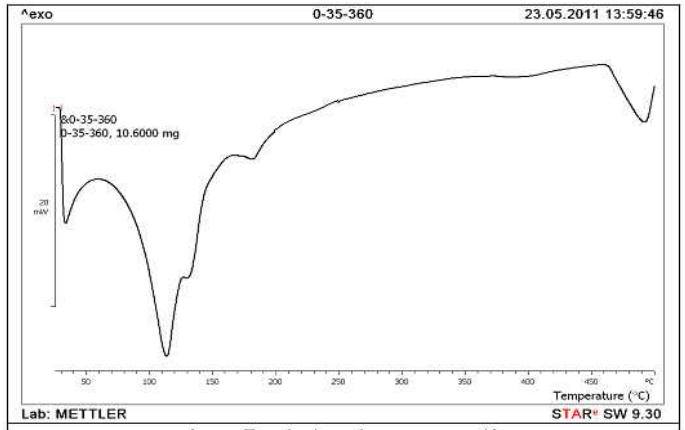
(3) 28일-0%-50℃	(4) 28일-5%-20℃
	
(5) 28일-5%-35℃	(6) 28일-5%-50℃
	

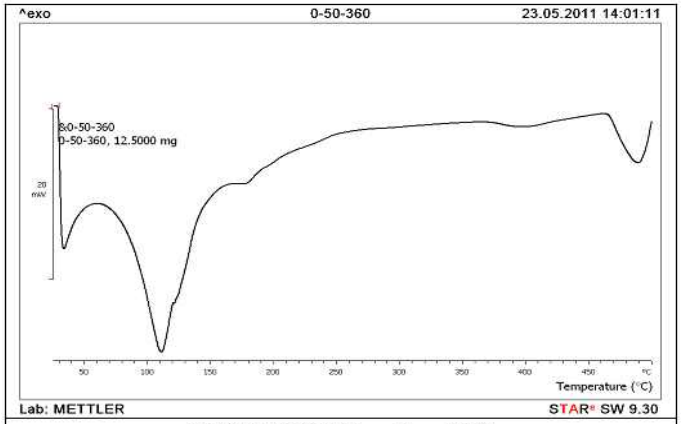
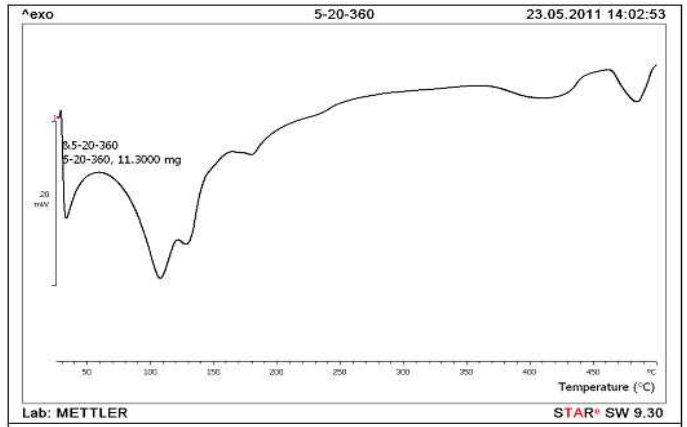
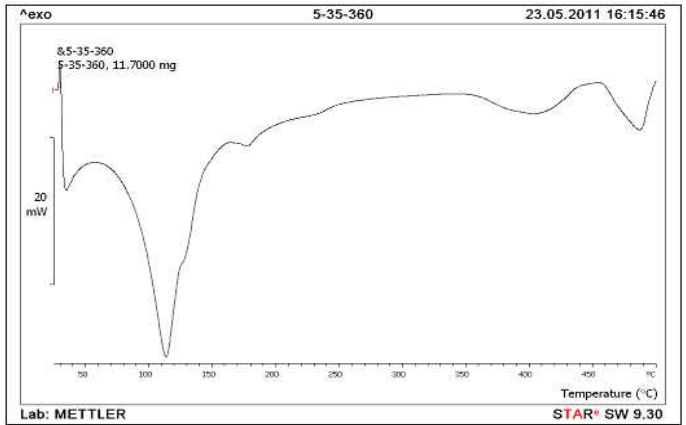
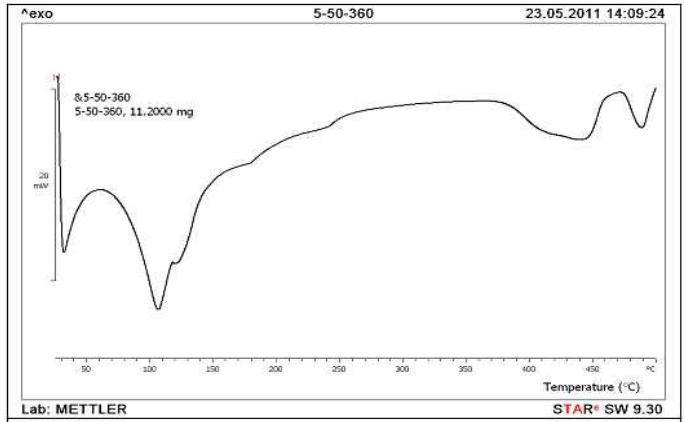
(1) 56일-0%-20℃	(2) 56일-0%-35℃
	
(3) 56일-0%-50℃	(4) 56일-5%-20℃
	

(5) 56일-5%-35℃	(6) 56일-5%-50℃
	
(1) 90일-0%-20℃	(2) 90일-0%-35℃
	

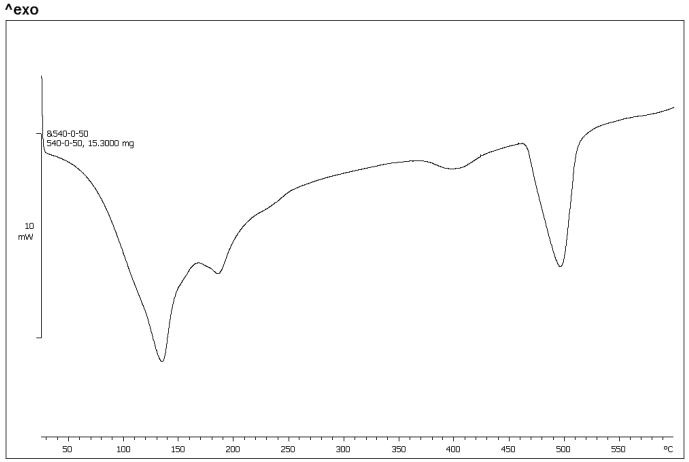
(3) 90일-0%-50℃	(4) 90일-5%-20℃
	
(5) 90일-5%-35℃	(6) 90일-5%-50℃
	

(1) 180일-0%-20℃	(2) 180일-0%-35℃
 [MgO 콘크리트(180일 - 0% - 20℃)]	 [MgO 콘크리트(180일 - 0% - 35℃)]
(3) 180일-0%-50℃	(4) 180일-5%-20℃
 [MgO 콘크리트(180일 - 0% - 50℃)]	 [MgO 콘크리트(180일 - 5% - 20℃)]

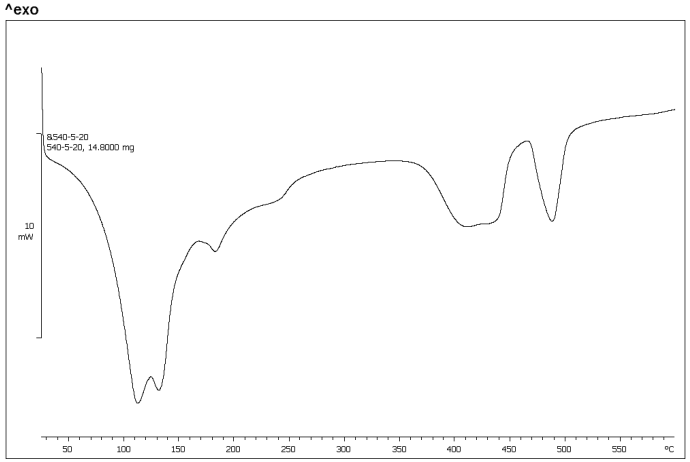
(5) 180일-5%-35℃	(6) 180일-5%-50℃
 [MgO 콘크리트(180일 - 5% - 35℃)]	 [MgO 콘크리트(180일 - 5% - 50℃)]
(1) 360일-0%-20℃	(2) 360일-5%-35℃
 [MgO 콘크리트(360일 - 0% - 20℃)]	 [MgO 콘크리트(360일 - 0% - 35℃)]

(3) 360일-0%-50℃	(4) 360일-5%-20℃
 [MgO 콘크리트(360일 - 0% - 50℃)]	 [MgO 콘크리트(360일 - 5% - 20℃)]
(5) 360일-5%-35℃	(6) 360일-5%-50℃
 [MgO 콘크리트(360일 - 5% - 35℃)]	 [MgO 콘크리트(360일 - 5% - 50℃)]

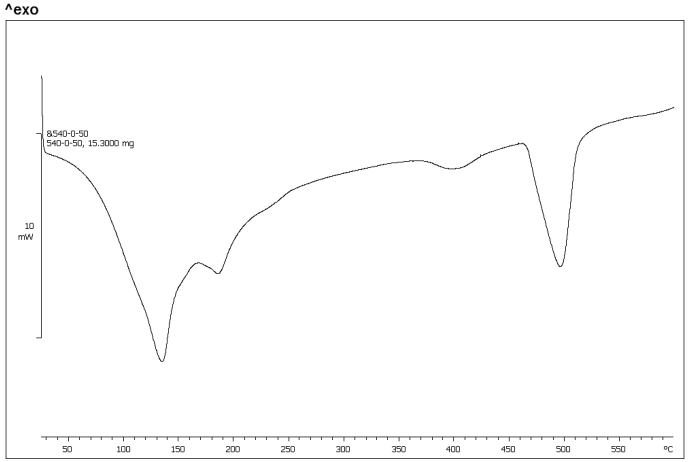
(1) 540일-0%-20℃



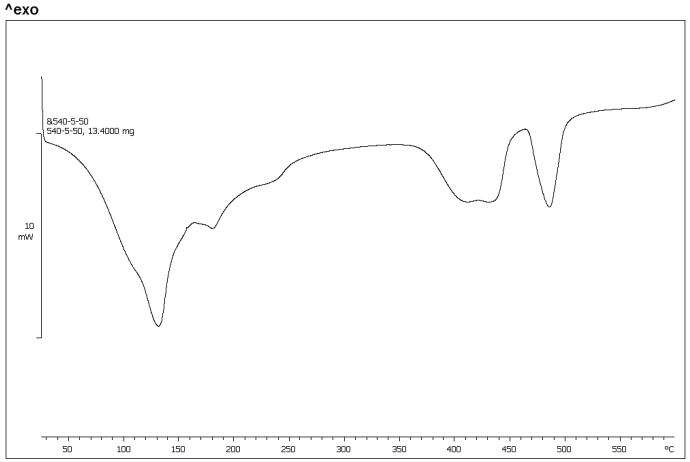
(2) 540일-5%-20℃



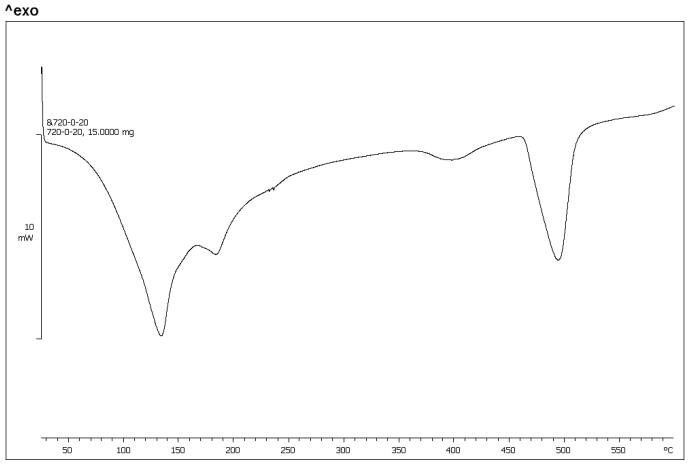
(3) 540일-0%-50℃



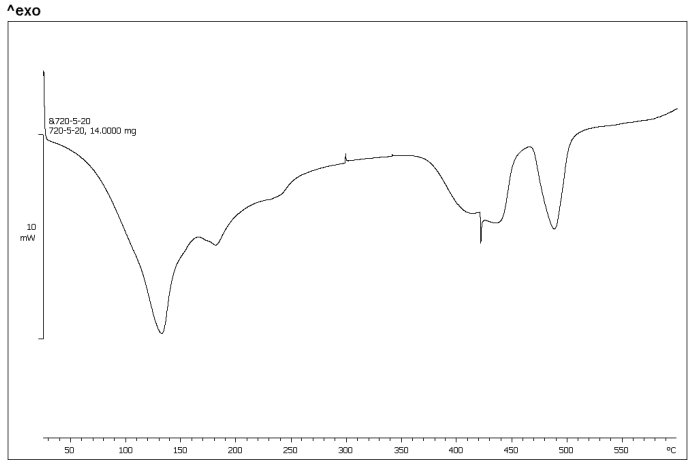
(4) 540일-5%-50℃



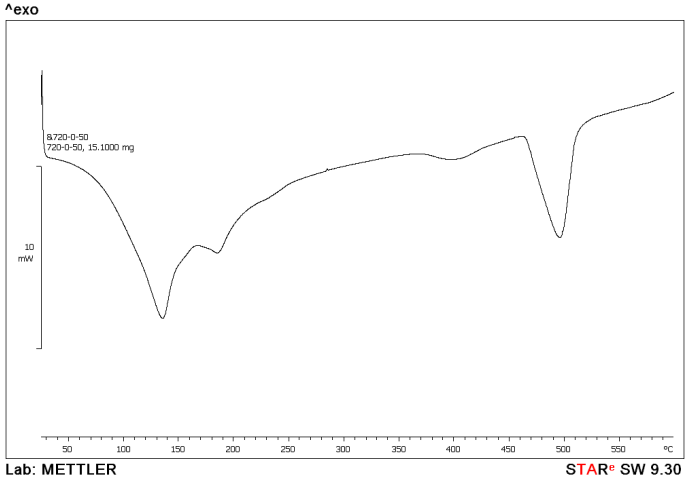
(1) 720일-0%-20℃



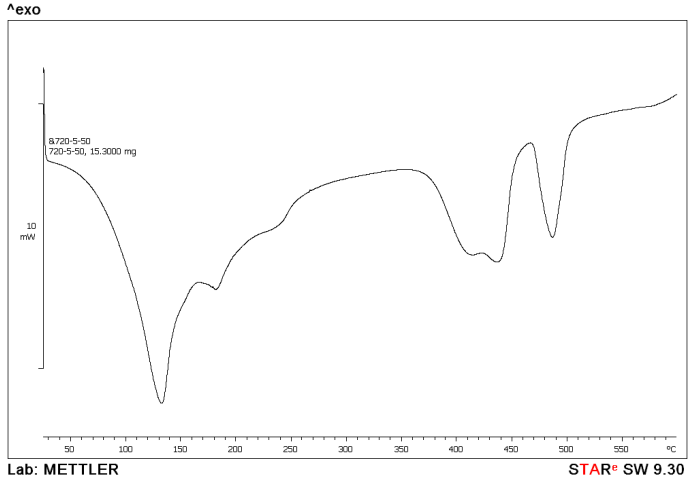
(2) 720일-5%-20℃



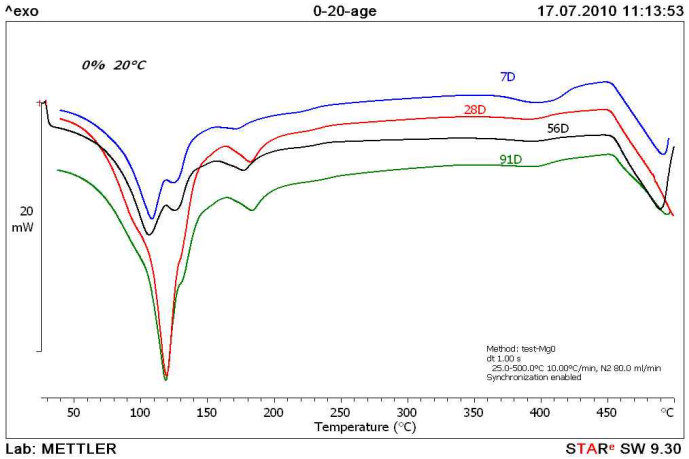
(3) 720일-0%-50℃



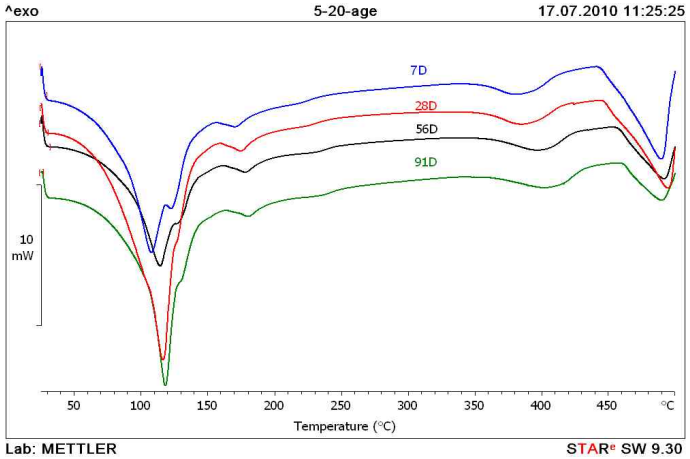
(4) 720일-5%-50℃



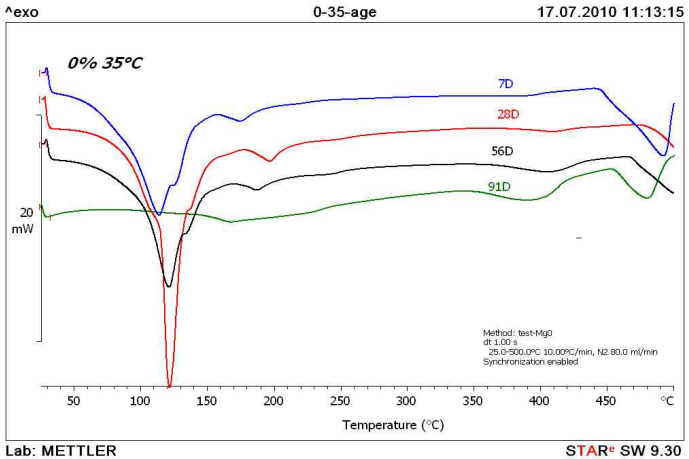
0%-20℃ 재령별 비교



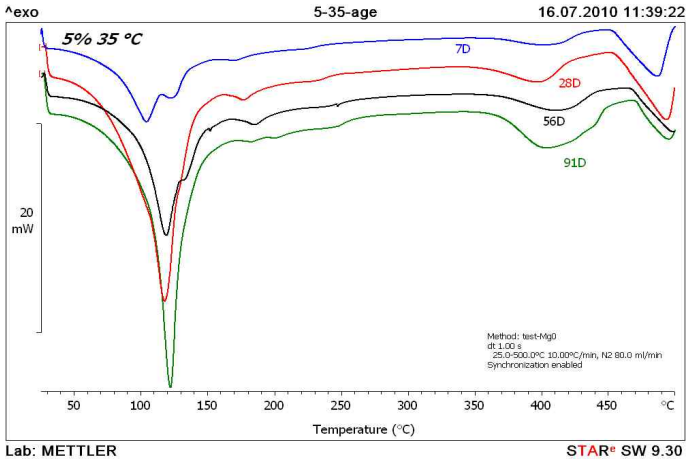
5%-20℃ 재령별 비교

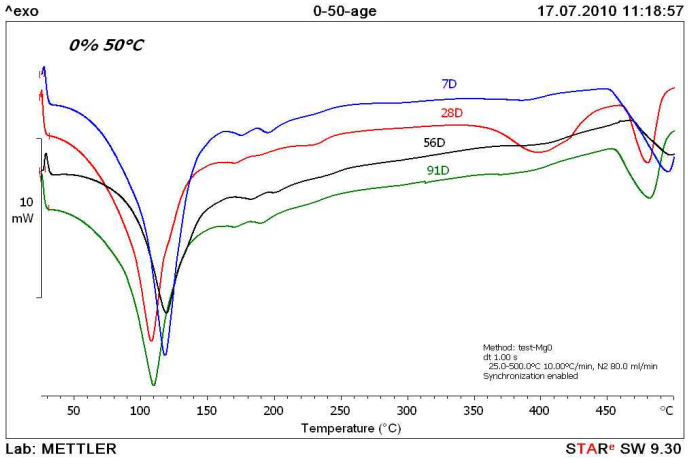
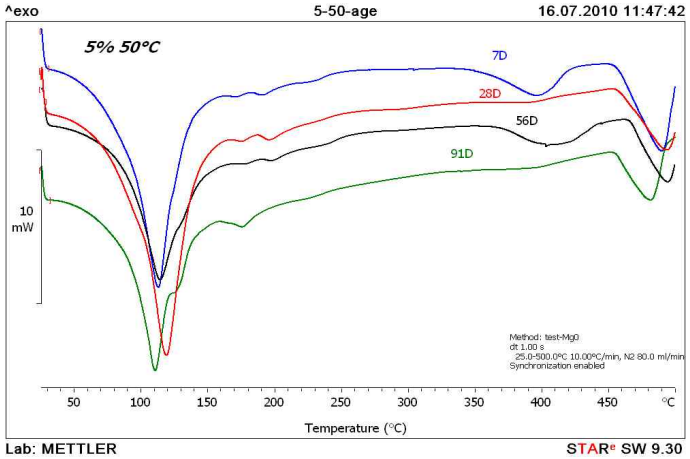


0%-35℃ 재령별 비교



5%-35℃ 재령별 비교



0%-50℃ 재령별 비교	5%-50℃ 재령별 비교
	

< 공 란 >

부 록 Ⅳ
(연구성과 발표 목록)

< 공 란 >

1. 논문집 발표

게재연도	논문명	저자			학술지명	Vol. (No.)	국내외 구분	SCI 구분
		주저자	교신저자	공동저자				
2011	저온소성한 MgO 분말을 혼입한 시멘트 복합체의 기초 물성	장봉석	장봉석	권용길 최슬우 이광명	한국콘크리트학회 논문집	Vol. 23 No. 2	국내	비SCI
2011	저온소성한 MgO분말을 혼입한 콘크리트의 내구특성	최슬우	장봉석	김주형 이광명 권용길 장봉석	한국콘크리트학회 논문집	Vol.23 No. 5	국내	비SCI
2012	混凝土自生体积变形试验方法的再认识 (콘크리트 자기체적변형 시험방법의 재인식)	雷爱中	雷爱中	장봉석 刘艳霞	水力发电 (수력발전)		국외	비SCI
2013	저온 소성한 MgO 분말을 함유한 플라이애시 콘크리트의 기본 물성	최슬우	장봉석	이광명	대한토목학회 논문집	Vol.33 No.2	국내	비SCI
2013	저온 소성한 MgO 분말을 함유한 플라이애시 콘크리트의 장기재령에서의 내구특성	장봉석	장봉석	최슬우 이광명	대한토목학회 논문집	Vol.33 No.3	국내	비SCI
2014	Durability Characteristics of Fly ash Concrete Containing Lightly Burnt MgO	최슬우	이광명	김주형 장봉석	Construction and Building Materials	Vol.58	국외	SCI

2. 학술대회 발표

게재연도	논문명	저자			학술지명	Vol.(No.)	국내외 구분
		주저자	교신저자	공동저자			
2010	MgO를 혼입한 댐 콘크리트의 자기팽창 모델	최슬우		오상혁 이광명 장봉석	한국콘크리트학회 2010년 봄 학술발표회	Vol. 22 No. 1	국내
2010	물-결합재비(W/B)와 양생온도가 MgO혼입 콘크리트의 자기팽창 변화에 미치는 영향	장봉석		권용길 이광명 최슬우	한국콘크리트학회 2010년 봄 학술발표회	Vol. 22 No. 1	국내
2010	국내외 자기팽창시험 방법에 따른 MgO 혼입 콘크리트의 특성 비교	장봉석	-	권용길 이광명 최슬우	대한토목학회 2010년 정기학술대회 논문집	-	국내
2011	MgO를 혼입한 시멘트 복합체의 초기 수화 지연에 대한 연구	최슬우	-	오상혁 김대왕 이광명 장봉석	한국콘크리트학회 2011년 봄 학술대회 논문집	Vol. 23 No. 1	국내
2011	자기팽창시험 방법에 따른 장기팽창성 콘크리트의 팽창특성 비교	장봉석	-	권용길 최슬우 이광명	한국콘크리트학회 2011년 봄 학술발표회	Vol. 23 No. 1	국내
2011	MgO를 혼입한 장기팽창성 콘크리트 실용화	김태홍		김동진 박종범	한국콘크리트학회 2011년 가을 학술대회 논문집	Vol.23 No. 2	국내
2011	플라이애시 혼입율에 따른 MgO 모르타르의자기팽창에 관한 실험적 연구	최슬우		오상혁 김대왕 이광명 장봉석	한국콘크리트학회 2011년 가을 학술대회 논문집	Vol.23 No. 2	국내
2011	플라이애쉬를 혼입한 MgO콘크리트의 장기내구특성	장봉석		권용길 임정열 김주형	한국콘크리트학회 2011년 가을 학술대회 논문집	Vol.23 No. 2	국내

2011	저온소성한 MgO분말의 팽창 메커니즘	장봉석	-	최슬우 권용길 오상혁 이광명 김주형	대한토목학회 2011년 정기학술대회 논문집	-	국내
2012	시멘트 종류에 따른 장기팽창 특성	장봉석	-	권용길 이광명 임정열	한국콘크리트학회 2012년 봄 학술대회 논문집	Vol.24 No. 1	국내
2012	Fly-ash와 MgO를 혼입한 콘크리트의 수화발열 특성	장봉석	-	권용길 최슬우 이광명	한국콘크리트학회 2012년 봄 학술대회 논문집	Vol.24 No. 1	국내
2012	저온 소성한 MgO 혼입에 따른 플라이애시 콘크리트의 자기팽창 특성	최슬우		오상혁 이광명 장봉석	한국콘크리트학회 2012년 봄 학술대회 논문집	Vol. 24 No. 1	국내
2012	시멘트 종류에 따른 MgO 반응 분석	장봉석	-	권용길 임정열	한국구조물진단유지관리공학회 2012년 가을 학술발표회 논문집	Vol.16 No. 2	국내
2012	MgO가 혼입된 팽창성 콘크리트를 적용한 댐 구조물의 장기 계측 및 팽창성능 평가	공영식	-	장봉석 차수원	한국콘크리트학회 2012년 가을 학술발표회 논문집	Vol.24 No. 2	국내
2013	MgO 기반 팽창재를 사용한 콘크리트 구조물의 체적변화 특성	김태홍		김동진 송치용	한국콘크리트학회 2013년 가을 학술발표회 논문집	Vol.25 No. 2	국내
2013	MgO를 혼입한 콘크리트 구조물의 장기팽창특성 계측 및 해석	차수원	-	배성근 장봉석	한국콘크리트학회 2013년 가을 학술발표회 논문집	Vol.25 No. 2	국내

3. 소프트웨어 등록

순번	S/W 명칭	창작일	등록일	등록번호
1	자기팽창을 고려한 온도응력 해석 프로그램 v 2.0	2013. 10. 2	2013. 12. 18	C-2013-028088

< 공 란 >

R&D / 09기술혁신F03

MgO를 혼입한 장기팽창성 콘크리트의 현장 실용화

■ 발 행 일 / 2013. 10. 25.
■ 발 행 처 / 한국수자원공사
대전광역시 대덕구 신탄진로 200
TEL : 042-629-3114(대)

< 공 란 >

주 의 사 항

1. 이 보고서는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술연구개발사업의 최종보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.