

기초원천
-391

가할 수 있는 세계최초 원천 기술 개발
거동 예측 및 잔존 내구성을 30일안에 평
화재손상 콘크리트 구조물의 중·장기 2차

최종보고서

2016

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

Infrastructure R&D Report

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개()

국토교통기술촉진연구사업 최종보고서

발간등록번호
11-1613000-001529-01

R&D /
기초원천-391

화재손상 콘크리트 구조물의 중·장기 2차 거동 예측 및 잔존 내구성을 30일안에 평가할 수 있는 세계최초 원천기술 개발 최종보고서

2016. 8. 25

주관연구기관 / 한국건설기술연구원

국토교통부

(전문기관) 국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관 귀하

‘화재손상 콘크리트 구조물의 중·장기 2차 거동 예측 및 잔존 내구성을 30일안에 평가할 수 있는 세계최초 원천기술 개발’(연구개발 기간 : 2014. 7.11. ~ 2016. 7.10.) 과제의 최종보고서 12부를 제출합니다.

2016 . 08. 25.

주관연구기관명 : 한국건설기술연구원 (대표자) 이태식 (인)

주관연구기관책임자: 허영선

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	기초원천-391	해당 단계 연구 기간	2014.7.111. ~ 2016.7.10.	단계구분	2/2 (해당단계)/(총단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명	화재손상 콘크리트 구조물의 중·장기 2차 거동 예측 및 잔존 내구성을 30일안에 평가할 수 있는 세계최초 원천기술 개발			
	세부과제명				
연구책임자	허영선	해당단계 참여 연구원 수	총: 3 명 내부: 3 명 외부: 0 명	해당단계 연구개발비	정부: 200,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계: 200,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 5 명 내부: 5 명 외부: 명	총 연구개발비	정부: 400,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계: 400,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국건설기술연구원 화재안전연구소			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
화재손상을 입은 구조물에 대한 화재조사 (Fire forensic investigation)는 국내에서는 그 동안 다루지 않은 생소한 분야에 해당되지만 그 중요성이 크다는 데는 많은 학자들이 의견을 같이하고 있다. 특히, 콘크리트 구조물에 대한 올바른 화재조사 기술은 2차 피해를 막고, 합리적인 보수보강 방법을 제안함으로써, 국민의 안전을 보장하고, 구조물의 잔존수명 회복 등 효율적인 유지관리 측면에서도 반드시 필요한 기술에 해당된다.				보고서 면수	
고온피해를 입은 콘크리트 구조물은 시멘트 매트릭스를 구성하고 있는 수화물의 화학적 분해가 일어나는데, 이러한 영향으로 공극 구조가 무너지고, 탄산화 진행속도가 급격히 빨라짐에 따른 심각한 내구성 저하를 발생시킨다.					
콘크리트의 내구성 평가는 이미 오래전부터 많은 학자들에 의해 연구가 진행된 분야이지만, 화재피해를 입은 구조물의 경우는 제한적으로 연구가 수행되었다. 본 연구에서는 이러한 지식의 공백 (knowledge gap)을 메우기 위한 것으로 기존의 내구성 평가방법에 화재피해온도 예측 기술을 적용하여 궁극적으로 본 연구의 최종목표를 달성하고자 하였다.					

〈 요약 문 〉

연구의 목적 및 내용	연구의 목적 화재피해규모를 저감시키기 위해서는 과학적 화재조사 (fire forensic investigation)를 통해 유사한 화재피해가 발생되지 않도록 관련 제도를 개선하고, 진보된 화재안전기술이 현장에 적용될 수 있도록 하는 것이 중요하다. 일반적으로 화재조사는 화재발생지 (origin) 조사, 화재원인 (cause) 조사, 화염전파 (development) 조사로 크게 구분되는데, 현재 국내의 경우는 화재발생지 및 원인규명에 국한된 화재조사만이 이루어지고 있고, 화염전파 분야는 극히 제한적으로 진행된다. 또한, 구조체의 화재손상규모 평가 및 올바른 보수보강방법 제안 등 건설분야에서의 공학적인 접근이 필요하지만, 건설분야에서는 화재안전관련 원천기술의 부재로 피해규모 저감에 아무런 기여를 하지 못하고 있는 실정이다. 특히, 화재손상을 입은 구조체의 피해 규모를 과학적으로 평가하는 것은 합리적인 보수·보강 방법을 제안 (시기, 공법, 적절성 평가)하여, 구조체의 수명을 보존하는데 반드시 필요한 원천 기술에 해당되지만, 현재는 관련 기술이 없다. 따라서 본 연구에서는 화재 피해를 입은 콘크리트 구조물의 중·장기 잔존 내구성능을 올바르게 평가할 수 있는 평가 기술을 개발하여, 화재피해 진단을 국내기술로 실현하고자 하였다. 연구의 내용 본 연구의 내용을 정리하면 다음과 같다. (1) 고온에 노출된 원재료의 물리적 거동 특성 • 시멘트 페이스트의 열거동 규명 • 다양한 콘크리트용 골재의 열거동 규명 (2) 고온에 노출된 시멘트 경화체의 중·장기 화학적 특성 • XRD, XRF, FT-IR, NMR 장비를 활용하여 화학분석 실시 • 다양한 온도조건에서의 화학적인 열분해 특성을 규명 • 향후 화재피해온도 예측 기술 개발에 핵심 자료로 활용 (3) 고온에 노출된 시멘트 경화체의 중·장기 공극구조 및 균열 거동 특성 • MIP 장비를 활용하여 공극구조 특성 규명 • X-ray CT 장비를 활용하여 균열거동 규명
------------------------	--

	• 향후 화재손상 구조체의 온도피해 수준별 구조체의 잔존성능 규명에 활용 (4) 고온에 노출된 시멘트 경화체의 탄산화 특성 및 잔존내구성 평가 • 촉진 중성화 시험 장비를 활용하여 화재손상 콘크리트의 탄산화 피해 규모 조사 • 향후 화재손상 구조체의 잔존수명 평가에 핵심자료로 활용 (5) 화재피해 온도 시뮬레이션 구동 및 화재조사 기술의 적용성 실험평가 • 온도확산 시뮬레이션 구동 실현 • 화재실험을 통해 얻은 실 데이터와 개발된 기술의 일치여부 확인 • 화재피해규모 예측·평가 시스템 개발
연구개발성과	(1) 공공적 성과 • 국내최초 건설구조물에 대한 화재조사 분야 개척 • 화재 후 보수보강 분야의 기술 혁신을 위한 초석 다짐 • 화재손상 구조물의 과학적인 평가를 통해 국민 삶의 질 향상에 기여 (2) 기술적 성과 • 세계최초 화재피해온도예측 시스템 개발 • 세계최초 NMR장비를 이용한 화재시 시멘트 경화체의 화학적 열분해 현상 규명 • 표준화 디렉터리를 이용한 손쉬운 화재진단 기술 개발 (3) 학술적 성과 • 관련내용 SCI 논문 게재 • 2015년 International fire forum에서 발표 및 긍정적 피드백 • 국내 최초 구조체의 화재조사분야의 새로운 학문영역 개척 (4) 경제적 성과 • 건설분야 세계최초 화재조사 원천기술 확보를 통해 유럽무대를 시작으로 해외 기술 수출 성과 기대 • 합리적인 보수보강 방법 제안 및 적용으로 화재손상 구조물의 안전성 확보 및 불필요한 보수비용 저감 기대 • 화재조사분야의 전문인력 양성을 통해 새로운 시장 개척 추진 (5) 기타 성과 • 100년 전통 덴마크 화재전문기관 DBI와의 국제업무교류 합의 • DBI와의 국제공동연구수행 (한국과 덴마크 양자교류사업 협약, 국가 과학기술연구회 융합연구단 사업 추진, Eurostar project 추진 등) • 2016년 5월 미래창조과학부와 덴마크 고등교육과학부와의 차관급 회의에서 핵심 Agenda로 화재조사 분야 채택 및 향후 국제협력분야로 발전 합의 • 2016년 10월 외교부 주관 KICT & DBI MoU행사 참여 (예정)

연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	연구개발성과의 활용계획				
	• 화재조사 분야 A부터 Z까지의 패키지 원천기술 개발 ※ 패키지 기술: 화재발생지 조사, 화재발생원인 조사, 화염전파경로 조사 (화재확산), 구조체 화재손상규모 조사, 보수보강 방법 조사, 보수보강의 적절성 평가 • 국내 건설분야 과학적 화재조사 (Fire forensic investigation of structures) 신규업무 창출 ※ 유럽 화재조사 대표기관인 덴마크의 DBI와의 국제공동업무교류 추진 합의를 통해 숙련된 국내 화재조사팀 구축에 실질적 협조 (DBI 화재전문가 파견 예정) • 화재조사 분야 전문자격인증제도 개발 및 화재전문가 양성 • 화재조사 패키지 기술을 화재안전감리 및 화재컨설팅 업무의 핵심기술로 활용				
핵심어 (5개 이내)	연구개발성과의 기대효과				
	• 2010년 이후 증가추세에 있는 화재피해규모 저감에 혁신적으로 기여하여 국민의 안전한 삶을 보장하고, 국가의 화재 안전수준을 한 단계 높임 • 화재조사분야 100년 전통의 덴마크 DBI와의 국제업무교류를 성공적으로 추진하여 유럽무대 진출 • 건설분야 화재안전 관련 이웃 산업의 기술혁신을 촉진시켜 새로운 국내 시장을 창출하고, 중소기업에서 생산하는 관련 제품을 유럽 시장에 소개 ※ 화재확산방지 건축 마감재, 화재확산방지 전기케이블 등 관련 중소기업 제품 수출				
	내구성	콘크리트	2차거동	공극구조	화재손상

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	Purpose It is important to improve the related national regulation, code and standards in line with fire forensic investigation to reduce the extent of national disaster, fire. However, the fire investigation of structure in Korea is very limited. Engineering approach to fire investigation does not applied to industry. It is believed that this could be the main reason why fire safety technologies have not been contributed to the reduction of the fire disaster. More seriously, even though fire forensic investigation of structure (F2IS) is the key technology in maintenance of building structures by providing appropriate repairing methods, at the moment, there is no practical technology in Korea. Therefore, this project aims to develop the new technology that can predict the damage level of building structures after fire exposure and evaluate their residual service life.
	Contents Contents of this study can be summarized as followings (1) Properties of physical behavior of concrete' constituents at fire • Thermal behavior of cement paste • Thermal behavior of aggregates (2) Chemical analysis of cement paste at fire • XRD, XRF, FT-IR and NMR analysis • Analyzing the specific temperature of decomposition of hydration products of cement paste • Applying the standard directory for predicting the fire-damaged temperatures (3) Properties of pore structure and crack development of cement exposed before and after fire exposure • MIP analysis for pore structure of cement paste • X-ray CT scanning for finding the mechanism of crack development • Applying the standard directory for evaluating the residual service life of building structures after fire exposure (4) Evaluation of carbonation and residual durability of cement paste after fire exposure • Measuring carbonation depth of fire-damaged samples • Applying the standard directory for evaluating the residual service

	life of building structures (5) Simulation for the temperature variation in cement paste at fire • Heat transfer simulation for cement paste at fire • Validation of the developed technology for predicting the fire-damaged temperature • Development of fire prediction and evaluation system for fire damaged concrete
Results	(1) Public achievement • Creating the new area of fire forensic investigation • Providing key information for repairing the fire-damaged structures • Improving the quality of human's life by providing the service of fire forensic investigation (2) Technical achievement • Development of the world's first technology for predicting the fire-damaged temperature of building structures • Finding the specific temperatures of chemical decomposition of cement paste by NMR analysis, attempted for the first time in the world (3) Academic achievement • Publication in international scientific journal • Good feed back from the member of international fire forum • Creating a new national academic area of fire investigation (4) Economical achievement • Expecting export of technology of F2IS (fire forensic investigation of structure), starting from European countries • Saving unnecessary additional cost for repair and securing structural safety at the same time by recommending an appropriate method for repair and rehabilitation • Creating a new business market in the area of fire forensic investigation with professional manpower training program (5) Other achievement • Establishing international business collaboration with DBI (Danish institute of fire and security technology) working for around 100 years in the area of fire • Submitting international joint project with DBI to both National Research Foundation of Korea & Innovation Fund Denmark and planning to submit 'Eurostar project' • The area of fire investigation was selected as one of the key agenda in the meeting between vice ministers of Korea and

	Denmark in May 2016				
Expected Contribution	Expected contribution • Development of a package technology of F2IS (fire forensic investigation of technology) from A to Z • Creating a new business area of F2IS • Development of a new certificate for F2IS and training program for professional fire investigators • Applying the package technology of fire investigation as a key technology to the areas of fire inspection and fire consulting work				
	Expected effect • Securing the good quality of human's life by upgrading the level of fire safety resulted from dramatic reduction of national disaster, fire • Creating a new business market in European countries by successful international collaboration with DBI • Inspiring fire investigation-related industries, leading to creation of a new business market in Korea • Introducing new products of medium-sized enterprises to European market				
Keywords	Durability	Concrete	Subsequent behavior	Pore structure	Fire damage

< 목 차 >

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

< Contents >

1. Overview of Research and Development Project	
2. Domestic and Overseas Technology Development Status	
3. Contents of Research and Results	
4. Target Achievement and Contribution to related fields	
5. Future Plans of Research and Development Results	
6. International Scientific and Technical Information Collected in the Research Process	
7. Security Level of Research and Development Achievements	
8. Research Facility Registered with the National Science and Technology Information System, Equipment Status	
9. Safeguards Implementation Performance Results for Research and Development Projects	
10. Representative Research Results of Research and Development	
11. ETC.	
12. References	

제1장. 연구개발과제의 개요

본 연구에서는 화재 손상을 입은 콘크리트 구조물의 화재피해규모와 잔존 내구성을 평가할 수 있는 세계 최초 원천기술 개발을 목적으로 하고 있다. 여기서 다루고 있는 잔존 내구성 평가는 촉진 중성화 시험 결과에 기반한 것으로 고온에 노출된 콘크리트 구조물의 경우 시멘트 매트릭스를 구성하고 있는 수화물의 화학적 분해가 일어나는데, 이러한 영향으로 공극구조가 무너지고, 탄산화 진행속도가 급격히 빨라짐에 따른 내구성 저하를 확인하고자 하였다.

콘크리트의 내구성 평가는 이미 오래전부터 많은 학자들에 의해 연구가 진행된 분야이지만, 화재피해를 입은 구조물의 경우는 제한적으로 연구가 수행되었다. 본 연구에서는 이러한 지식의 공백 (knowledge gap)을 메우기 위한 것으로 기존의 내구성 평가방법에 화재피해 온도 예측 기술을 적용하여 궁극적으로 본 연구의 최종목표를 달성하고자 하였다.

다만, 콘크리트 구조물의 경우 일반적으로 철근과 함께 시공되므로 보다 정밀하게 내구성 평가를 하기 위해서는 철근의 내력 검토가 필요할 수 있으나, 이는 화재피해규모가 심각하여 철근 (피복두께 30 ~ 40 mm에 위치)의 온도가 300 ~ 500°C 이상의 고온피해를 입은 경우에만 해당될 것으로 판단된다. 이 경우에는 콘크리트 단면 전체를 철거해야 하기 때문에 본 연구에서는 이를 다루지 않는 것으로 하였다.

1. 연구개발 목적

지난 20년 동안 화재발생건수는 지속적으로 증가하여 2010년 이후에는 연간 평균 약 4만 건 이상의 피해사례가 보고되었고, 인명피해 역시 등락을 반복하며 연간 약 2천명 이상의 사상자 (사망자: 약 400명)를 발생시키고 있다. 이러한 화재 피해 증가의 이유 중 하나는 화재 발생 후 과학적 화재조사 (Fire forensic investigation)가 제대로 이루어지지 않고 있으며, 조사 방법으로 1차 원인규명에 국한되어 진행되기 때문인 것으로 분석된다. 증가추세에 있는 화재피해 규모를 저감시키고, 국민의 생명을 지키기 위해서는 현재 시행 중인 1차 화재 원인 조사 외에도 화재확산 (화염전파추적), 구조체의 화재손상규모평가 및 올바른 보수보강방법 제안까지 건설분야에서 공학적인 접근이 필요하지만, 건설분야에서는 화재안전관련 원천기술의 부재로 피해규모 저감에 아무런 기여를 하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구는 다음과 같은 목적을 두고 수행된다.

- 화재손상 콘크리트 구조체의 화재피해온도 예측 기술 개발
- 화재 피해를 입은 콘크리트 구조물의 중·장기 2차 팽창 거동 규명
- 화재손상 콘크리트의 잔존 탄산화 내구성능 평가
- 화재피해 진단을 국내기술로 실현하고 화재에 의해 발생할 수 있는 국가적 재난 및 사회적 이슈를 해결

2. 연구개발의 필요성

2-1 연구개발과제의 설명

가. 연구개발 배경

건축물의 초고층화 및 초대형화 추세에 따라 화재피해를 입은 콘크리트 구조물에 대한 진단 및 유지관리기술이 시기적으로 중요하게 다루어져야 하는 시점에 놓여 있다. 화재피해를 입은 건축물의 무조건적인 철거나 지나치게 과한 보수·보강은 지양되어야 하고, 건축물의 부분 혹은 전체 철거에 소요되는 비용을 최소화하면서 안전하게 사용할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 화재손상을 입은 건축구조물의 화재진단을 과학적 토대위에서 행해야 하고, 보수·보강공법은 화재진단 결과를 기반으로 건축구조물의 미관회복, 열화인자 차단, 열화인자 제거, 내하중력 및 변형성능 개선 등의 요구 성능을 충분히 파악한 후, 최적공법을 선정하는 것이 중요하다. 화재피해를 입은 콘크리트 구조물에 대한 진단과 관련하여 화재의 원인과 재산상의 피해규모는 국내 소방당국에 의해서 조사가 이루어지지만, 건설 구조물의 수명 등 장기적인 측면에서 구조물에 직접적으로 미치는 화재 피해에 대한 조사는 제대로 행해지지 않고 있다.

일본 및 세계 각국의 여러 나라에서는 초음파 분석, 열 해석, 중성화 시험, 변색도 시험, 슈미트 해머에 의한 비파괴 압축강도 시험, 코아 샘플에 의한 압축강도 시험, 철근 인장강도 시험, 진동시험 등 다양한 검사방법을 활용하여 콘크리트의 잔존성능을 파악하여 적합한 보수·보강 공법의 기준을 정하고 있다. 그러나 국내의 경우는 화재진단에 대한 원천기술 부재 등에 기인하여 이상에서 나열한 화재진단과 관련한 절차와 방법 규정 또는 가이드라인이 제한적으로 마련되어 있다.

※ 중성화 시험 : 고온에 노출된 콘크리트 부재는 450℃ ~ 550℃ 범위에서 수산화칼슘의 분해가 일어나므로 중성화 시험을 통해 콘크리트의 화재 노출 온도를 추론할 수 있음

나. 콘크리트를 사용한 건설구조체에서만 발생하는 독특한 장기거동 특성

콘크리트는 시멘트, 골재, 물, 혼화재료 등 이질재료 (heterogeneous material)로 구성되어 있는 혼합물으로써, 시멘트와 물의 화학적 반응에 의해 생긴 수화물 (hydration products)과 골재의 결합에 의해 궁극적으로 강도를 발휘한다. 이러한 화학반응에 의해서 강도를 발휘하는 콘크리트는 화재와 같이 외부에서 강한 자극을 받게 되면 다른 건축구조재료와 달리 독특한 거동특성을 나타낸다. 아래는 이러한 콘크리트 구성 재료의 화재 노출 전, 화재 노출 중, 화재 노출 후 상태변화에 따라 결국 이상 팽창반응이 일어나는 특성을 정리하여 나타낸

것이다.

① 고온에 노출된 시멘트 경화체의 장기거동 특성

표 1.1 같이 시멘트는 대기 중에서 물과의 화학적 반응에 의해 안정한 상태를 유지하지만, 화재와 같이 고온에 노출될 경우에는 화학적 결합이 끊어지면서 불안정한 상태로 대기 중에 노출된다. 그러나 시간이 경과하면 대기 중의 수분과 화학적인 재결합 반응이 일어나는데, 이는 팽창반응으로 시멘트 조직을 완전한 파괴시킬 수 있다. (그림 1.1 참조). 재결합 반응에는 리하이드레이션 (rehydration), 리카보네이션 (recarbonation), DEF (delayed-ettringite-formation) 반응 등이 해당될 수 있는데, 이 중 시멘트 경화체에서 나타나는 이상 팽창반응의 원인은 리하이드레이션과 DEF 반응이다. 이러한 팽창반응은 시멘트를 사용한 경화체에서만 발생하는 독특한 현상으로 다른 재료를 사용한 구조체와는 화재 노출 후의 거동특성에서 현저한 차이를 나타내기 때문에 화재피해 진단 및 잔존 내력 평가시 반드시 유념해야할 부분이지만 현재의 기술은 이를 반영하지 못하고 있다.

표 1.1 화재 노출 전, 노출 중, 노출 후 시멘트의 거동 특성

조건	시멘트 거동 특성
화재 노출 전	시멘트의 주원료인 석회석 (대기 중 안정) → 소성과정을 거친 시멘트 (대기 중 불안정) → 시멘트와 물의 화학반응 (대기 중 안정)
화재 노출 중	시멘트 수화물의 화학적 결합이 끊어짐 (대기 중 불안정) (예: $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$)
화재 노출 후	불안정한 상태의 시멘트 수화물이 대기 중의 수분과 화학적으로 재결합 (대기 중 안정 그러나 이상팽창 반응) → 외부구속력에 의해 균열발생 (예: $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$)



화재 노출 직후 시험체의 모습 (800℃)



화재 노출 후 1년째 시험체의 모습

그림 1.1 고온 노출 후 시간경과에 따른 경화시멘트의 외형변화

출처: Alessandra M. (2009) long-term progressive deterioration following fire exposure of OPC versus slag blended cement paste. Materials and Structure 42:95-101

② 고온에 노출된 골재의 장기거동 특성

골재가 화재와 같이 고온의 조건에 노출될 경우 최초 팽창거동을 나타내고, 이후 열원이 제거되면 다시 수축거동을 일으키는 것을 자연현상으로 보고 있다. 그러나 특정 골재의 경우는 후기단계에 접어들면서 급격한 팽창거동을 나타내고, 최종적으로는 파괴현상이 일어날 수 있는 것으로 보고되고 있다.

현재의 기술은 이상에서 논의된 화재 노출 후 콘크리트 구조물의 장기거동 특성을 제대로 반영하지 못하고 있기 때문에 화재손상을 입은 콘크리트 구조물은 잠재적으로 위험성이 큰 상태에 놓여 있다. 따라서 국가적인 차원에서 이에 대한 대책을 시급히 마련해야한다.

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 관련 분야의 국내외 연구동향 및 학술적 성과

1-1 국가 연구개발사업 유사연구 실적

가. 연구개발과제의 중복방지를 위한 조사 및 검토결과

국가과학기술지식정보서비스에서 연구의 중복성을 검색한 결과 화재강도를 고려한 FRP 보강 콘크리트 개발, 설계하중조건을 고려한 건축구조부재의 내화성능 향상, 탄소섬유보강하여 내화성능 개선 등에 관한 연구는 모두 화재 노출 중 구조물의 거동에 관한 연구로써, 본 연구에서 진행할 화재 노출 후 구조물의 거동 분석과는 차이를 나타내고 있다. 또한, 화재피해를 입은 구조물의 유지관리방법과 화재에 노출된 고강도콘크리트의 내구성 회복 기술은 모두 보수보강과 제도개선에 관한 연구로써, 본 연구에서 진행할 화재진단 평가기술과는 차이를 나타내고 있다.

특히, 본 연구에서 개발하고자하는 기술은 화재를 진단하는 방법적인 측면에서 화재손상된 구조물의 표면에서 샘플을 채취한 후 화학분석을 통해 온도이력과 공극구조를 예측하여 최종적으로 내구성능을 평가하는 세계최초 원천기술에 해당된다.

(단위 : 억원)

부처명	사업명	과제명	예산
교육과학기술부	일반연구자지원사업	색상분석법을 이용한 콘크리트 부재의 화재 손상도 평가기술 연구	0.41
교육과학기술부	일반연구자지원사업	화재강도를 고려한 FRP로 보강된 콘크리트 구조물의 부작손상 평가모델	0.5
교육과학기술부	중견연구자지원	설계하중조건을 고려한 건축구조부재의 내화성능 및 잔존 내력평가기법	0.99
지식경제부	산업기술표준화 및 인증지원	화재피해를 입은 콘크리트 구조물의 유지관리방법에 관한 표준기술개발	1.00
중소기업청	산학연협력기술개발	건축물의 탄소섬유 보강 시 난연성 단열재를 활용한 내화성능 개선 기술	0.36
교육과학기술부	일반연구자지원	화재에 노출된 고강도콘크리트의 강도 및 내구성 회복기술 및 지침 개발	0.48
교육과학기술부	중견연구자지원	고로슬래그시멘트 수화반응모델을 이용한 콘크리트의 탄산화 예측에 관한 연구	0.99

나 연구개발과제의 차별화 방안

과제명	과제기간	주요 연구내용	차별성
색상분석법을 이용한 콘크리트 부재의 화재 손상도 평가기술 연구	2012.5 ~ 2015.4	콘크리트의 색상과 역학적 특성을 규명하여 색상변화를 정량적으로 평가하기 위한 방법을 제안하고 내화성능평가를 수행하여 궁극적으로 색상분석법에 의한 평가모델 및 손상도 평가지침서 작성	[기존기술:색상분석법으로 화재손상 정도 평가] vs. [개발기술: 화학분석과 공극 분석을 통해 화재손상도 평가]
화재강도를 고려한 FRP로 보강된 콘크리트 구조물의 부착손상 평가모델	2011.5 ~ 2014.4	화재노출에 의한 콘크리트의 잔존강도 저감을 차단하기 위해 FRP 보강을 적용한 평가모델 개발	[기존기술:화재노출 중 내화성능 분석] vs. [개발기술: 화재 노출 후 콘크리트의 거동 분석]
설계하중조건을 고려한 건축구조부재의 내화성능 및 잔존 내력 평가기법	2010.5 ~ 2013.4	산업부산물을 활용한 콘크리트의 폭발메커니즘 규명 및 내화성능평가 기법 개발	[기존기술:화재노출 중 내화성능 분석] vs. [개발기술: 화재 노출 후 콘크리트의 거동 분석]
화재피해를 입은 콘크리트 구조물의 유지관리방법에 관한 표준기술개발	2012.6 ~ 2015.5	화재피해를 입은 콘크리트구조물의 안전성과 장기적인 내화수명확보를 위한 유지관리기술에 관하여 국제표준으로 등록하기 위한 WG 및 NP 제안서 제출	[기존기술:보수보강과 제도 제안] vs. [개발기술:화재진단용 평가기술로써 세계최초로 표준화 디렉터리 개발 및 콘크리트의 1차, 2차거동 해석 반영]
건축물의 탄소섬유 보강 시 난연성 단열재를 활용한 내화성능 개선 기술	2012.6 ~ 2013.5	세라믹 용액이나 알칼리 규산염 등의 난연성 단열재를 도포하여 탄소섬유보강의 내화성능을 개선시키는 기술 확보	[기존기술:화재 노출 중 내화성능 분석] vs. [개발기술:화재 노출 후 콘크리트의 거동 분석]
화재에 노출된 고강도 콘크리트의 강도 및 내구성 회복기술 및 지침 개발	2010.6 ~ 2012.4	화재 발생 후 고강도 콘크리트의 성능저하 평가 및 각종 열화요인 규명과 강도 및 수열온도 변화에 따른 열화정도 평가 및 합리적 평가기준 제시	[기존기술:보수보강] vs. [개발기술:세계최초 진단도구/진단방법/평가기술 개발]
고로슬래그시멘트 수화반응모델을 이용한 콘크리트의 탄산화 예측에 관한 연구	2010.5 ~ 2013.4	고로슬래그시멘트를 사용한 콘크리트의 수화반응모델 개발을 통해 콘크리트의 탄산화 반응모델 및 예측모델 개발	[기존기술:대기 중 탄산화 예측] vs. [개발기술:화재피해를 입은 구조체의 1차,2차 거동 분석]

1-2 국내외 연구동향 및 학술적 흐름 분석

가. 국내연구 동향

현재 국내의 기술 수준은 미국보다 36년 뒤쳐져 있다. 앞서 연구배경에서 언급한 바와 같이 국내의 경우는 화재피해진단과 관련한 절차와 방법 규정 또는 가이드가 마련되어 있지 않고 있다. 다만, 화재피해 대상이 콘크리트 구조체인 경우에는 슈미트 햄머 (비파괴 시험)등을 이용하여 화재 노출 후 단기간에 잔존강도를 간접적으로 평가하고 있으나, 이렇게 얻은 자료는 표면경도만 측정할 수 있는 방법으로 그 정확성을 보증할 수 없다. 또한, 중성화 측정방법은 500~600°C 범위에 해당되는 경우에만 확인이 가능하다. 따라서 기존에 이러한 방법들은 화재 후 장기 재령에서 콘크리트 구조체에서 발생하는 고유한 거동 특성 및 콘크리트의 잔존 내구성능을 대변할 수는 없는 한계를 가지고 있다.

나. 국외연구 동향

① 일본

일본의 경우는 화재피해로 인한 철근콘크리트구조 건물의 진단 및 조사 방법의 개요를 제시함과 동시에 화재피해 정도를 판정할 때, 화재피해 등급분류를 통해 화재진단을 실시한다. 이를 통해 피해 건물의 재사용 여부 판단 및 재사용의 경우 보수·보강 방법의 검토·선정에 사용되는 기초 자료를 얻게 된다. 화재피해 정도에 의한 예비조사, 일차조사 및 이차조사를 통한 진단의 흐름은 그림 2.1에 따라 진행되는데, 그 내용을 살펴보면 다음과 같다.

예비조사는 소방 활동 기록, 목격자, 신문기사 등에서 정보를 수집하여 화재 발생원인, 화재 연소시간, 연소경로, 피해범위, 가연물의 종류 및 양과 같은 정보를 통해 화재상황을 파악한다. 그 밖에 과거 지진 등에 의한 건물의 피해경력 및 보수기록의 조사, 상세설계도서의 준비 등을 실시한다.

1차 조사는 육안으로 관찰하여 화재피해 상황을 대략적으로 파악한 후, 화재피해 등급을 분류하고, 조사대상 개소를 한정하기 위한 목적으로 실시한다. 외관조사는 화재피해의 특이 상황에 주목한다. 조사결과 및 추정결과를 근거로 2차조사 여부 및 조사대상 부위를 좁혀 나간다. 그리고 화재피해가 무피해 상태라면 조사는 종료하게 되나, 화재피해 등급이 1급이 아닌 경우 보다 상세한 2차 조사로 진행된다.

2차 조사는 1차 조사에 의해 좁혀진 조사대상 개소에 대해 간단한 조사 또는 상세한 조사

를 실시하게 된다. 2차 조사는 주로 재료·부재의 강도특성 파악과 수열온도 추정이라는 두 개의 항목으로 나누어진다. 간단한 조사는 슈미트해머에 의한 반발경도시험과 중성화깊이의 측정을 실시한다. 상세한 조사는 콘크리트 코어 채취시험, 철근 채취시험, 부재의 진동시험 및 재하시험 등의 역학적 시험과 무기 또는 유기화합물이 고온을 받은 경우의 조직변화 등에 착안한 분석 장치를 사용한 시험 (재료분석에 의한 방법) 등을 실시한다.

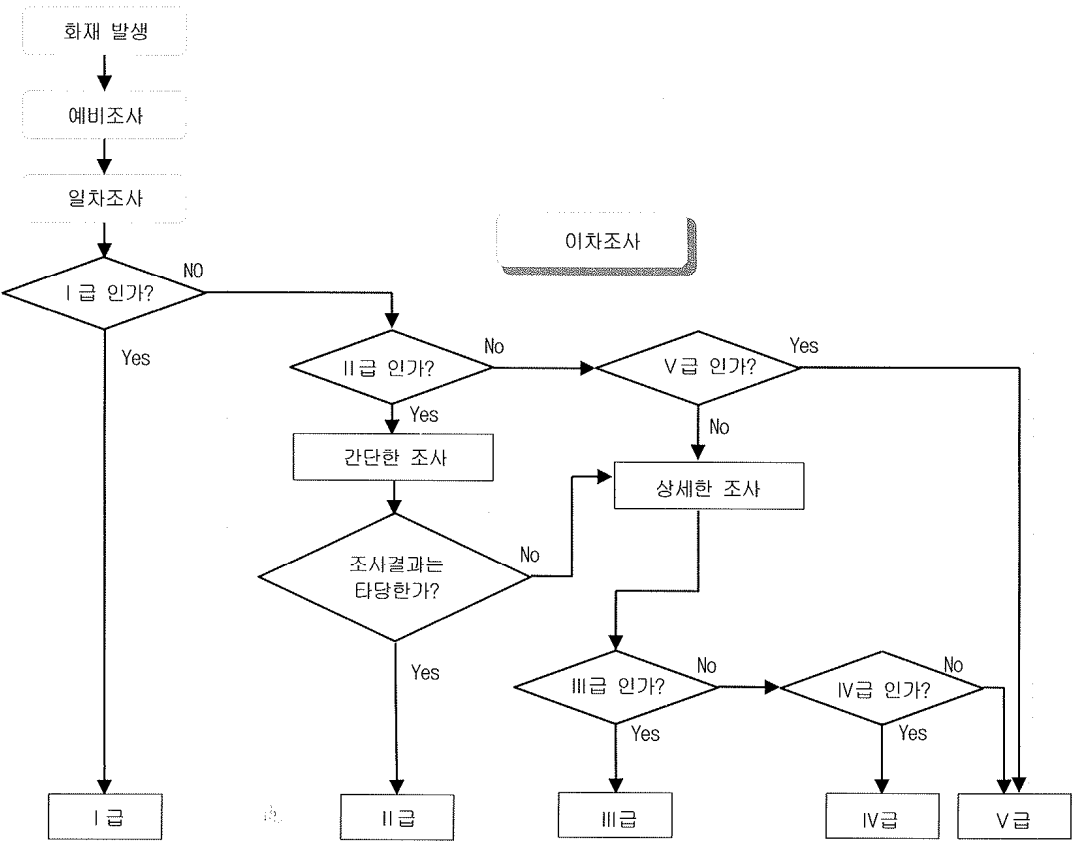


그림 2.1 화재피해 진단의 흐름도 (일본)

② 미국

미국의 경우는 국가적으로 표준화된 규정은 없지만, 많은 연구자들에 의해 보고서나 논문을 통해 화재진단 방법이 소개되어 있다. 그림 2.2는 일례로 Tovey A.K. (structural engineer)가 제안한 화재진단 프로세스를 도식화하여 나타낸 것이다.

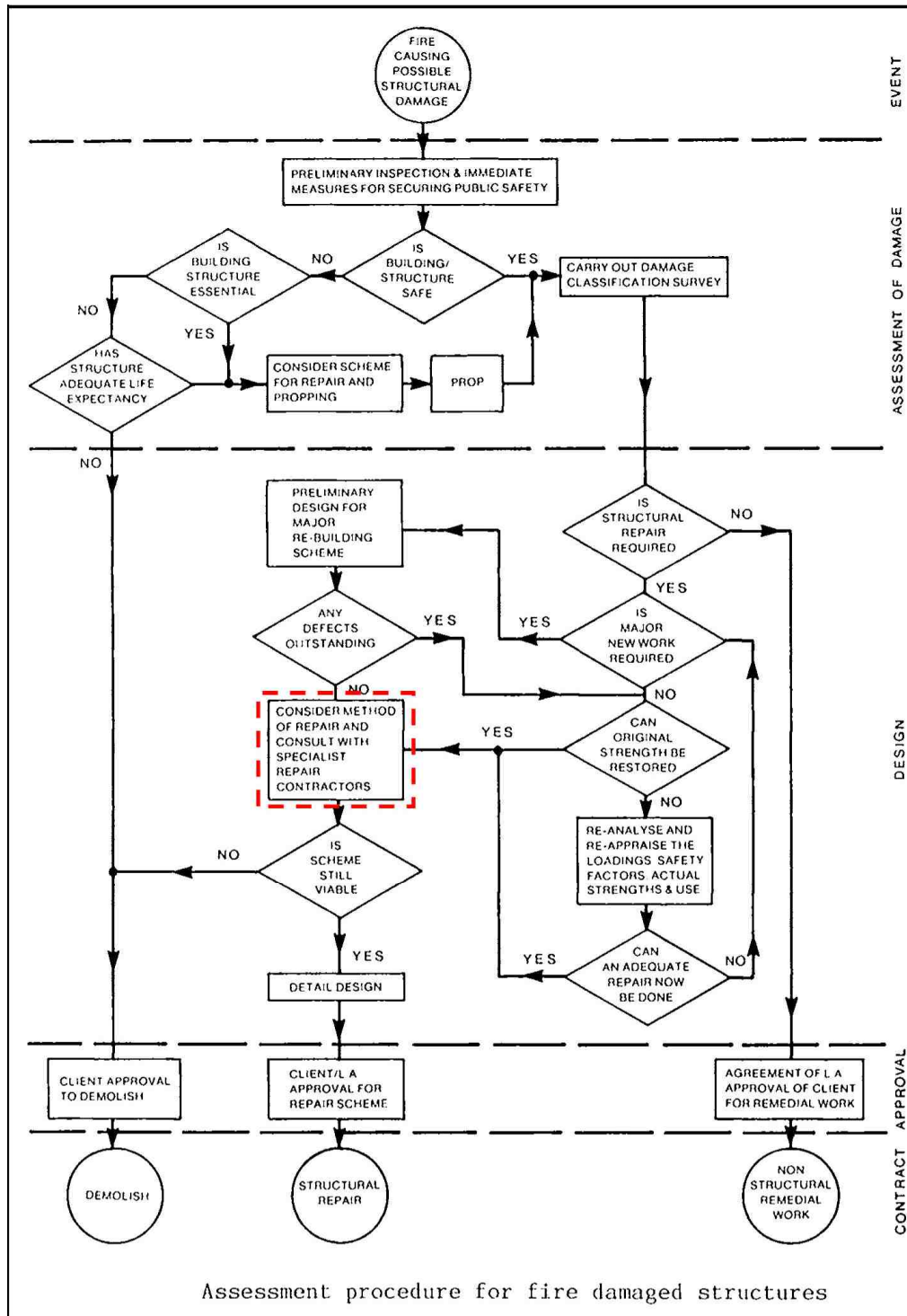
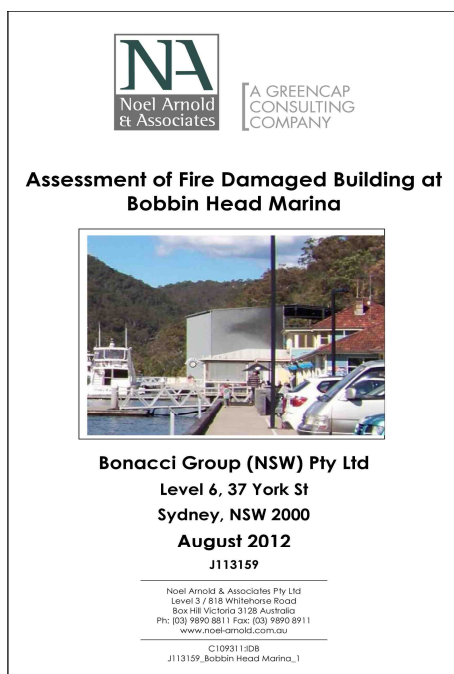


그림 2.2 화재진단 프로세스 (미국)

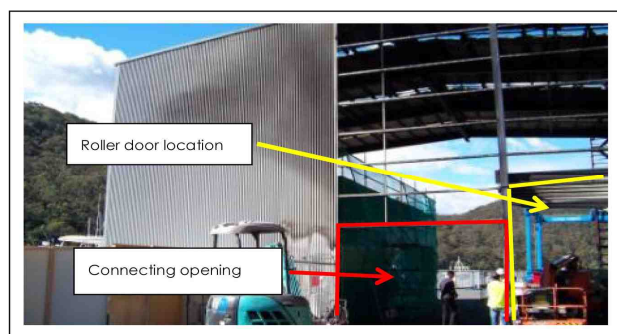
③ 호주

호주 역시 화재진단과 관련하여 국가적인 차원에서의 품질규정은 마련되어 있지 않지만, 사설전문기관에 소속되어 있는 화재 전문가들 (specialist)에 의해 진단/평가/보수 등이 이루어진다. 대부분 이러한 진단기술은 현장경험이 20년 이상 있는 매니저급이 책임을 맡아 진행하고, 화재조사는 계약조건에서 명시한 범위 안에서 이루어지는데, 통상적으로 과학적 현장조사 (forensic investigation)를 포함하는 경우가 많다. 최종적으로 조사가 끝났을 경우, 화재진단 매니저는 진단내용과 보수보강에 대한 의견을 작성하여 보고서 형식으로 제출하면 의뢰자는 그 보고서에서 추천한 내용대로 보수보강을 실시한다.

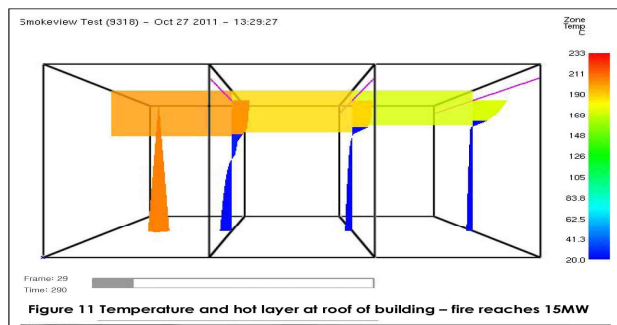
아래 그림은 2012년도 호주에서 화재피해를 입은 구조물을 대상으로 화재진단이 이루어진 사례로써 화재진단을 실시한 후 제출된 보고서의 표지 (그림 2.3.1)와 피해를 입은 실제 건축물 (그림 2.3.2) 및 시뮬레이션을 이용한 온도분석 결과 (그림 2.3.3)를 나타낸 것이다. 화재는 Bobbin Head Marina 지역에 있는 건축물에서 발생하였고, 화재진단 기관은 Noel Arnold & Associates이다. 화재진단은 책임자인 Ian Bennetts (risk consultant manager)에 의해 이루어진 것을 확인할 수 있다. 해당 건축물에는 콘크리트 구조체도 피해를 입은 것으로 나타났으나, 본 연구에서 개발하고자 하는 콘크리트의 2차 거동 평가기술에 대한 내용은 포함되어 있지 않았다. 따라서, 본 연구가 종료되는 시점에서 완성될 평가기술은 호주의 진단기술과 비교하여 기술적 우위를 점할 수 있을 것으로 판단된다.



(1) 화재진단 보고서 표지



(2) 화재 후 건축물 사진



(3) 열전달 시뮬레이션

그림 2.3 화재진단 보고서 (호주)

1-3 국내외 관련 기술 특허 동향

가. 국내 기술개발 수준 및 해외기술개발 수준 비교

- 국내기술개발 수준: 원천기술 부재에 따라 관련 법령이나 화재진단 매뉴얼 등이 마련되어 있지 않은 상태임
- 해외기술개발 수준: 미국, 일본, 호주 등 선진국의 경우는 보다 정밀한 화재진단 도구를 이용하여 과학적 조사 (예: forensic investigation)를 통해 체계적으로 관리가 이루어지고 있음 (그림 2.4 참조)



그림 2.4 국내·외 화재진단 기술수준 비교

특히, 해외의 경우는 화재피해를 입은 콘크리트 구조물에 대해서 화재 전문기관에 소속되어 있는 스페셜리스트(specialist)에 의해 비교적 올바르게 화재진단이 이루어지고 있다. 특히, 미국의 경우는 화재분야의 세계권위자들이 다수 존재하고 있기 때문에 국가재난에 해당되는 문제가 발생하였을 경우에는 TF팀을 조직하여 즉각적인 대응이 이루어질 수 있는 시스템 등을 갖추고 있다. 또한, 일본의 경우는 일본건축학회 주관으로 화재진단 및 보수·보강방법에 대한 매뉴얼을 출간하여 다수의 현장 근로자들이 이를 참고할 수 있도록 하고 있어 현 시점에서 국내의 상황과는 많은 차이를 나타내고 있다.

나. 특허 동향 및 본 연구와의 관련성

국내에서 보유하고 있는 특허는 판넬, 섬유복합재 등과 같은 물리적 방법에 의한 개발기술이 주를 이루고 있는데, 이는 모두 보수·보강 기술에 해당된다. 보수·보강 기술은 본 연구의 후속연구에서 진행할 계획으로 지적 재산권 등에 대한 분쟁은 없을 것으로 판단된다.

구 분	난연성 섬유복합재 및 내화성 모르타르를 이용한 콘크리트 구조물의 보강법	구조물의 보수보강에 적용되는 파이어 가드패널과 그 제조 및 시공방법	난연 부착력강화 파형 하이텐셜 판넬과 이의 제조방법 및 이를 이용한 콘크리트 구조물의 보수보강 방법
대표도			
국 적	대한민국	대한민국	대한민국
발명내용	- 본 발명은 열화된 콘크리트 구조물의 내하력을 향상시키고, 성능개선이 필요한 콘크리트 구조물의 성능을 향상시킬 목적으로 난연성 섬유 복합재와 내화성 모르타르를 이용하는 공법임.	- 본 발명은 미려한 외관을 유지 하면서 구조물이 화재로부터 안전하게 보호될 수 있도록 한 파이어 가드패널과 그 제조 및 시공방법에 관한 것임.	- 난연 부착력강화 파형 하이텐셜 판넬과 이의 제조방법 및 이를 이용한 콘크리트 구조물의 보수보강 방법에 관한 것임.
기술내용	- 보강을 필요로 하는 구조물 단면에 앵커를 이용하여 난연성 섬유봉을 부착하거나, 지름보다 약간 크고 깊게 홈을 만들어 난연성 섬유봉을 설치하고 내화성 보수 모르타르를 미장이나 스프레이 방법으로 피복하여 콘크리트와 섬유봉을 일체화시키는 공법임.	- 파이어가드패널(난연성 투명패널)은 각종 구조물의 보수보강을 위한 부착식 패널로 사용됨에 있어 강/연성의 판상체 재료와 파워스트링의 적절한 배치, 투명한 난연성 팽창재 및 씰링테이프의 부착에 따라 시공의 용이성과 강도향상 그리고 화재발생시 난연성 팽창재의 표면보호작용으로 구조물의 안전성 향상에 기여함.	- 화재의 확산을 방지하는 난연재로서의 기능과 화재 발생 시 화염에 의한 유독가스의 발생을 방지할 수 있는 난연 부착력 강화 파형 하이텐션 판넬과 이의 제조방법 및 이를 이용한 콘크리트 구조물의 보수보강 방법을 제공하고자 함.

1-4 국내외 시장분석 및 산업동향

해외의 경우 화재피해를 입은 콘크리트 구조물의 화재진단 기술은 사설 화재전문 기관에 의해 주도적으로 이루어지고 있다. 화재진단은 화재에 노출된 콘크리트 구조물의 피해수준을 명확히 파악하여 보수·보강에 활용하기 위한 기술로써, 사설 화재전문 기관은 화재진단 기술과 보수·보강 기술을 함께 보유하고 있다. 그러나 국내의 경우는 이러한 화재진단 및 보수보강 산업은 미개척분야에 해당되므로 이에 대한 연구가 매우 시급한 실정이다.

1-5 종합결론

Strength	Weakness
국내시장 확보율, 인프라 수준, 기술개발 수준 모두 미개척 분야에 해당되므로 신규시장 창출에 기여할 수 있음 재난 안전성 확립에 기여할 수 있음 국민의 삶의 질 향상에 기여할 수 있음	국내에서는 최초로 연구되는 분야에 해당되므로 시행착오가 예상됨
Opportunity	Threat
세계 석학들에 의해 제기되어 왔던 이론들을 통합반영한 세계 최초의 원천기술 확보	중·장기 내구성능을 평가해야 하기 때문에 실패할 경우 반복실험이 어려움

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

화재에 노출된 콘크리트 구조물은 수열온도조건에 따라 피해 규모가 다르게 나타나기 때문에 올바른 화재진단을 위해서 가장 먼저 수행되어야 하는 것은 콘크리트의 화재피해온도를 정확하게 추정하는 것이다. 그 다음 수행되어야 하는 것은 추정된 화재피해온도 조건에서의 균열과 내구성능을 검토하고, 이에 따른 피해규모를 진단하며, 최종적으로 화재에 노출된 콘크리트 구조물의 잔존내구성을 예측하는 것이다.

- 화재피해 온도 예측 (1단계)
- 피해온도에서의 공극구조 분석 (2단계)
- 피해온도에서의 내구성능 검토 (3단계)
- 피해규모 평가 및 잔존내구성 예측 (4단계)

본 연구에서는 콘크리트 원재료인 시멘트와 골재의 화재노출 초·중·후기 열적거동을 분석하였고, 화재피해 온도조건에 따른 시멘트 경화체의 화학특성 변화, 공극특성 변화, 균열특성 변화 및 내구특성 변화를 조사하였다. 특히, 1차적으로 화염에 의해 피해를 입은 시멘트 경화체를 지속적으로 모니터링하여 대기 중에서의 2차 거동까지 규명하는 것을 목표로 하였고, 최종적으로는 과학적 화재조사 (fire forensic investigation) 수행의 핵심 원천기술에 해당되는 화재손상 콘크리트 구조체의 피해규모 예측 및 잔존 내구성 평가 기술을 세계 최고의 기술수준으로 개발하고자 하였다. 그 상세한 내용을 살펴보면 다음과 같다.

1. 고온에 노출된 원재료의 물리적 거동 특성

1-1 개요

본 연구에서는 화재손상 콘크리트의 피해규모를 예측하고 잔존 내구성을 평가할 수 있는 기술 개발을 목적으로 하고 있다. 피해규모를 예측하기 위해 가장 우선적으로 수행되어야 할 일은 앞서 기술한바와 같이 화재피해온도를 예측하는 것이다. 그러나 이는 기술이 완성된 후 실제 화재 현장에서 수행되어야 하는 순서에 해당되는 것이고, 이와는 별도로 피해규모를 보다 정확히 예측하기 위해서는 재료의 열적 특성을 파악하는 측면에서 콘크리트 구조체가 화재노출 초·중·후기에 대기 중에서 어떤 변화를 일으킬 수 있는지 확인해 볼 필요성이 있다.

즉, 문헌에서는 시멘트 경화체가 고온피해를 입은 경우 상온에서 2차 팽창거동을 일으키고, 심각할 경우 해당 샘플의 붕괴까지도 이르게 할 수 있다는 것으로 보고된 바 있다. 그러나 현

재까지 많은 연구자들은 이를 심각하게 받아들이고 있지 않기 때문에 잘 정비된 실험계획과 함께 진보된 장비를 이용하여 이를 확인해 볼 필요성이 있을 것으로 판단된다. 이는 결국 본 연구에서 최종적으로 개발하고자 하는 화재손상 구조체의 피해규모 예측과 직접적으로 관련된 사항이고, 본 연구의 핵심 과제 중 첫 번째 단계로 수행되어야 할 내용에 해당된다.

문헌으로 확인하기 어려운 사항으로 본 절에서 집중적으로 다루고자 하는 연구내용은 다음과 같다.

- 고온에 노출된 시멘트 경화체의 열거동 규명
- 고온 피해를 입은 시멘트 경화체의 대기 중 상온에서의 2차 팽창 거동 증빙 자료 제시
- 콘크리트용 골재 중 시멘트 생산의 주원료인 석회암이 시멘트 경화체와 유사한 열거동 특성을 나타내는지 여부 확인
- 기타 콘크리트용 골재인 화강암, 현무암의 열거동 특성 규명
- 콘크리트 원재료간의 열거동 특성 비교 및 콘크리트에 미치는 영향성 분석 자료 제시

1-2 시멘트 페이스트의 열거동 규명

그림 3.1.1은 Dilatometer 분석장비를 이용하여 시멘트 경화체를 1000°C까지 가열한 후 대기 중에 노출시킨 후 상온에서 약 2주 동안 지속적으로 모니터링한 결과를 나타낸 것이다. 1000°C까지의 승온속도와 상온까지의 냉각속도는 모두 1°C/min으로 진행하였다.

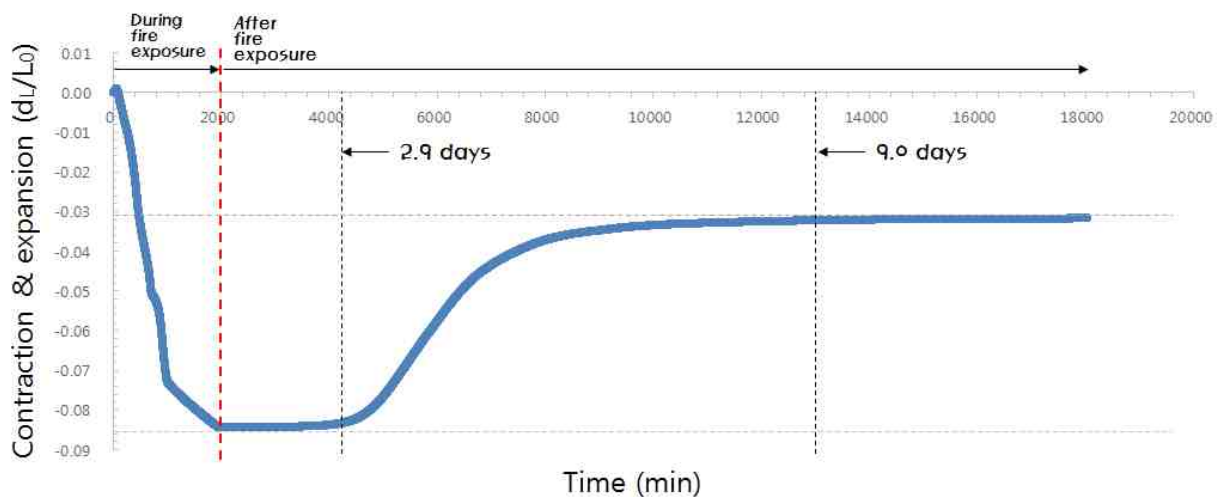


그림 3.1.1 고온에 노출 전·중·후 시멘트 경화체의 수축 및 팽창거동

그림 3.1.1에서 확인할 수 있는 바와 같이 고온 노출 초기에는 약간의 팽창성 거동을 나타냈지만 이후 대부분의 고온 노출 기간 동안 시멘트 경화체는 수축이 크게 진행되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 냉각이 진행되는 동안에도 상온보다 높은 온도조건에서는 수축이 계속 진행되다가 상온으로 온도가 떨어지는 시점인 2000분이 경과하면서 부터는 수축이 멈추고 유지되는 것을 확인할 수 있었다.

그러나 고온에 노출된 지 2.9일이 경과되는 시점부터 시멘트 경화체는 갑자기 급속한 팽창 거동을 일으키기 시작했고, 고온 노출 후 약 4.5일이 경과하는 시점부터는 완만한 팽창거동으로 이어가는 것을 확인할 수 있었다.

이상의 결과는 과거 문헌에서 제시하지 못했던 화재노출 전·중·후 실시간 측정결과를 제시함으로써 일부 해외 학자들의 주장을 뒷받침할 수 있고, 실제 화재피해를 입은 콘크리트 구조물을 진단하면서 전문가들에 의해 전혀 고려되지 않았던 시멘트 경화체의 2차 팽창거동에 의한 추가 피해 가능성 문제를 제기할 수 있는 중요한 데이터에 해당된다.

1-3 석회암 콘크리트용 골재의 열거동 규명

콘크리트용 골재로 국내에서 가장 많이 사용되는 골재는 물론 화강암이지만, 비교적 많은 현장에서는 탄성계수가 높은 장점을 가지고 있는 석회암을 콘크리트용 골재로 사용하고 있다. 석회암은 시멘트 생산에 주원료로써 다른 종류의 콘크리트용 골재와 달리 시멘트와 유사한 열적 거동을 나타낼 수 있는데, 그림 2는 이러한 특징을 확인하기 위해 진행된 실험결과를 나타낸 것이다.

그림 3.1.2에서와 같이 석회암 골재 역시 고온노출 후 일정시간이 흐른 뒤 급격한 팽창거동이 일어나는 것을 확인할 수 있었는데, 이러한 특징은 다양한 콘크리트용 골재 중 시멘트와 화학적 성분이 유사한 석회암 골재에서만 관찰되었다.

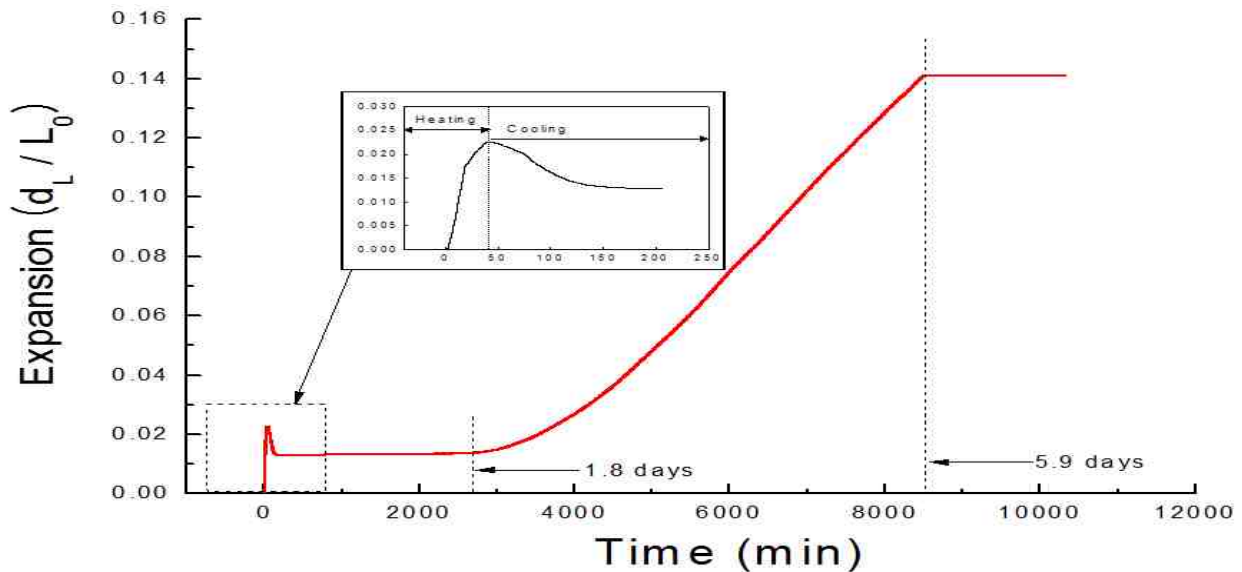


그림 3.1.2 고온에 노출 전·중·후 석회암 골재의 팽창거동

고온피해를 입은 시멘트 경화체와 석회암 골재가 대기 중 상온에서의 2차 팽창거동을 일으키는 것은 각 재료가 가지고 있는 고유한 화학적 특성 변화와 관련이 깊은 것으로 자세한 내용은 다음 섹션 ‘고온에 노출된 시멘트 경화체의 화학적 특성’에서 추가 논의하도록 하겠다.

1-4 고온 노출 중 시멘트 및 다양한 콘크리트용 골재의 열적 거동 비교 분석

그림 3.1.3은 앞서 그림 3.1.1과 3.1.2에서 사용한 동일한 Dilatometer 분석장비를 이용하여 시멘트 및 각종 골재의 열적거동을 1000°C까지 비교 분석한 결과를 나타낸 것이다. 시멘트 경화체는 앞서 그림 3.1.1에서 분석한바와 같이 지속적인 수축 거동을 일으켰지만, 골재는 모두 팽창거동을 나타내었다. 이때 골재 종류에 따라 팽창정도의 크기가 다르게 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 시멘트의 수축과 골재의 팽창간의 간격 크기는 화재피해를 입고 있는 콘크리트 내부의 골재와 시멘트 매트릭스 계면간의 천이지대 (Interfacial transition zones = ITZs)에 발생하는 균열발생량에 영향을 미치고, 최종적으로는 콘크리트의 화재피해 규모를 결정짓는데 중요한 요소로 작용할 수 있다.

한편, 골재의 팽창크기는 그림 3.1.3에서 확인할 수 있는 바와 같이 basalt (현무암)가 가장 작게 나타났고, limestone (석회석)과 granite (화강암)은 700°C까지는 유사한 수준의 팽창거동을 나타내었지만, granite의 경우 700°C를 넘어서면서 거의 수직에 가까운 급격한 팽창거동이 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 국내 대부분의 건설현장에서 사용하는 골재가 화강암 (granite)인 점을 감안했을 때, 국내 화재피해 사례 중 건물의 붕괴 등 피해규모가 비교적 큰 사건의 경우는 콘크리트의 노출온도가 이 범위를 초과하면서, 시멘트 매트릭스의 수축거동과 화강암 골재의 급격한 팽창거동의 차가 급격히 커진데 기인한 것으로 분석될 수 있다.

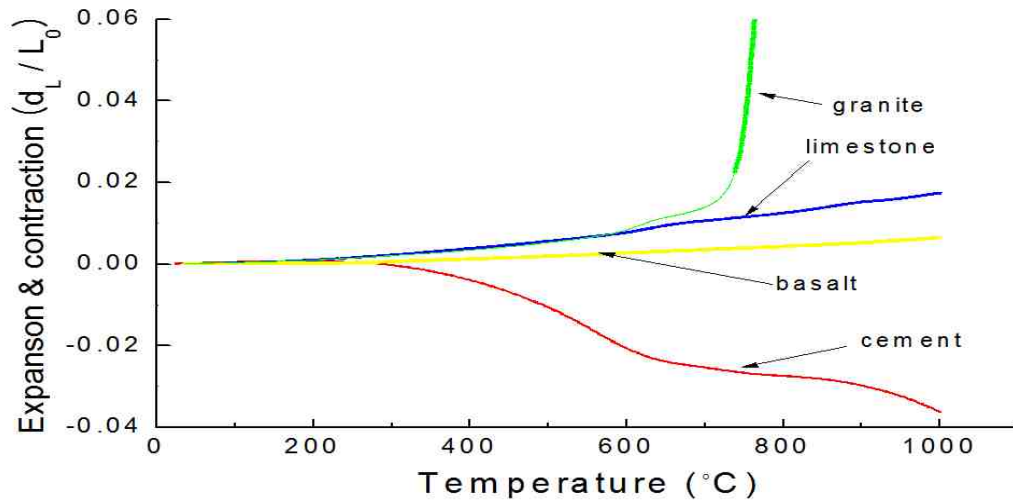


그림 3.1.3 고온에 노출된 시멘트와 골재의 수축 및 팽창 거동 (상온~1000°C)

1-5 종합분석

표 3.1.1은 그림 3.1.1~3.1.3에서 나타난 결과로써 콘크리트 원재료의 고온 노출 전·중·후 열 거동을 간단하게 정리한 것이다. 앞서 기술한 바와 같이 고온 노출 전에는 자연의 법칙에 따라 콘크리트의 원재료 모두 매우 안정적인 상태로 존재하다가 고온에 노출되면서 시멘트 경화체는 수축하고, 골재는 팽창하는 것으로 나타났다. 또한, 고온의 피해를 입은 후 대기 중 상온에서는 화강암과 현무암은 안정적인 상태를 유지하였으나, 시멘트와 석회석은 2차 팽창거동을 일으키는 것으로 나타났다. 따라서 본 과제의 최종 연구목표인 화재손상 콘크리트 구조체의 피해규모를 정확히 예측하기 위해서는 이러한 콘크리트 원재료의 2차 팽창거동을 반드시 검토해야 한다. 관련 추가분석은 다음 섹션에서 논의하도록 하겠다.

표 3.1.1 고온노출 전·후 원재료의 물리학적 거동 분석표

구분		고온 노출 전	고온 노출 중		고온 노출 후	
			가열 중	냉각 중	초기	후기
시멘트		안정적	수축	지속적인 수축 ²⁾	안정적	급격한 팽창 ³⁾
골재	화강암	안정적	급격한 팽창 ¹⁾	수축	안정적	안정적
	현무암	안정적	팽창	수축	안정적	안정적
	석회암	안정적	팽창	수축	안정적	급격한 팽창 ⁴⁾

1) 700 ~ 800°C에 노출되었을 때 급격히 진행

2) 고온에 노출되어 온도가 상승하고 있을 때 뿐만 아니라 목표온도 도달 후 냉각 중에도 지속적으로 수축현상이 발생 (온도가 상온까지 떨어질 때까지 진행)

3) 재령 2.9일부터 재령 4.5일까지 급격한 팽창 거동을 일으켰고, 이후 완만한 팽창 거동

4) 재령 1.8일부터 팽창이 시작하여 재령 5.9일까지 급격히 진행

2. 고온에 노출된 시멘트 경화체의 화학적 특성

2-1 개요

화재 현장에서 건설구조물에 대한 과학적인 화재조사 (Fire forensic investigation of structure)를 수행하는데 있어 앞 절에서 논의된 ‘화재 노출 후 대기 중 상온에서 2차 거동을 일으키는 콘크리트의 후기거동 메커니즘’을 이해하는 것은 매우 중요하다. 이는 화재 손상을 입은 콘크리트의 피해규모를 정확히 예측하고, 향후 화재손상 구조체의 보수보강 시기, 보수보강 방법 등 다양한 후속 조치를 수행하는데 중요한 결정을 내릴 수 있는 핵심 자료로 활용될 수 있기 때문이다.

따라서 본 절에서는 콘크리트의 후기 거동을 이해하는데 필요한 핵심 자료를 확보하기 위해 시멘트 경화체를 대상으로 다양한 화학장비를 이용하여 고온 노출 전·중·후 아래와 같은 연구내용을 수행하였다.

- XRD, XRF, NMR, FT-IR 등 다양한 화학 장비의 장점을 각각 활용하여 화재피해를 입은 시멘트 경화체의 화학특성 변화 추적 조사 (화재노출 전·중·후)
- 시멘트 경화체의 열거동 메커니즘을 화학적 관점에서 규명
- 고온 피해를 입은 시멘트 경화체의 화학특성 변화를 분석한 표준화 디렉터리 구축 (향후 과학적 화재조사업무 수행시 화재피해온도를 예측하는데 핵심자료로 이용)

2-2 XRD (X-ray diffraction) 분석

가. 화재노출 후 초기재령에서의 화학적 특성 변화

그림 3.2.1은 XRD를 이용하여 열처리된 시멘트 경화체 (Room temperature, 이하 RT)와 시멘트 경화체를 100 °C까지 가열한 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 것이다.

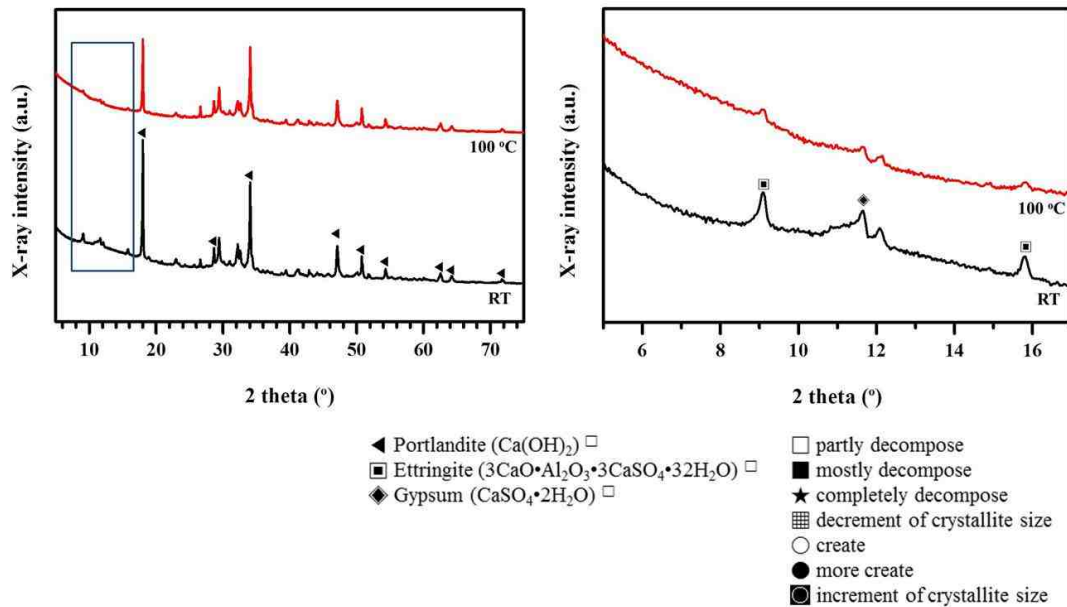


그림 3.2.1 1일차 R.T.와 100 °C의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.1에서 확인할 수 있는 바와 같이 100°C에 노출된 샘플의 경우 구조 내에 배워된 수분(전자를 하나씩 공유하는 것이 아니라 물의 비공유 전자쌍을 이용하여 결합하는 형태)이 제거됨에 따라 Ettringite, Gypsum이 부분적으로 감소하는 경향을 나타내었다.

그림 3.2.2는 XRD를 이용하여 시멘트 경화체를 100 °C 와 200 °C 까지 가열한 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

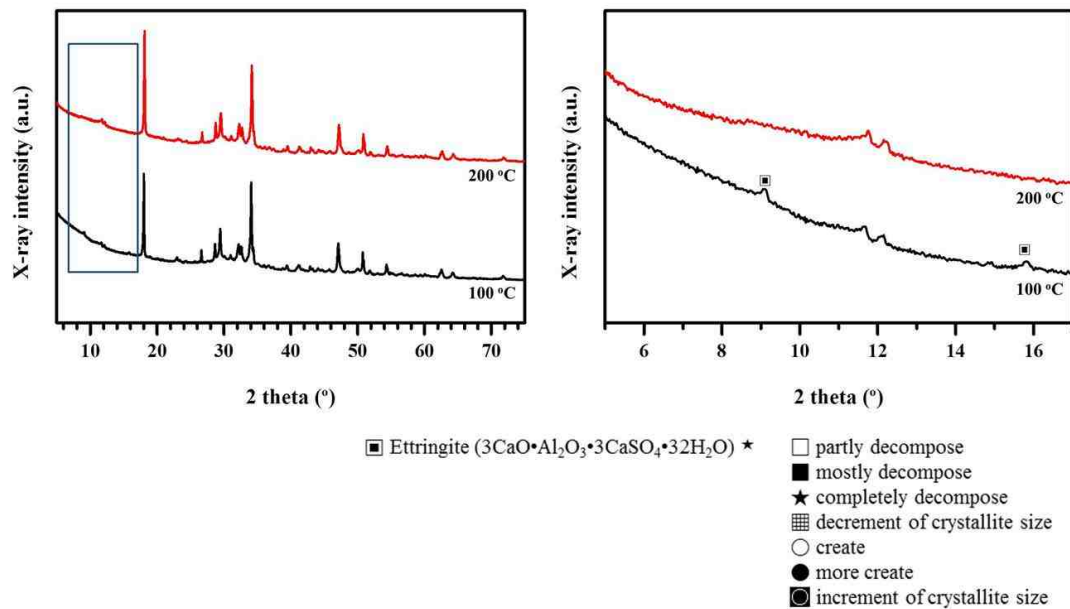


그림 3.2.2 1일차 100 °C와 200 °C의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.2에서 확인할 수 있는 바와 같이 100 °C에 비해 고온인 200 °C의 열처리로 인한 구조 내의 배워된 수분이 지속적으로 제거됨에 따라 Ettringite가 먼저 제거 되는 것을 확인할 수 있었다.

그림 3.2.3은 XRD를 이용하여 시멘트 경화체를 200 °C 와 300 °C 까지 가열한 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

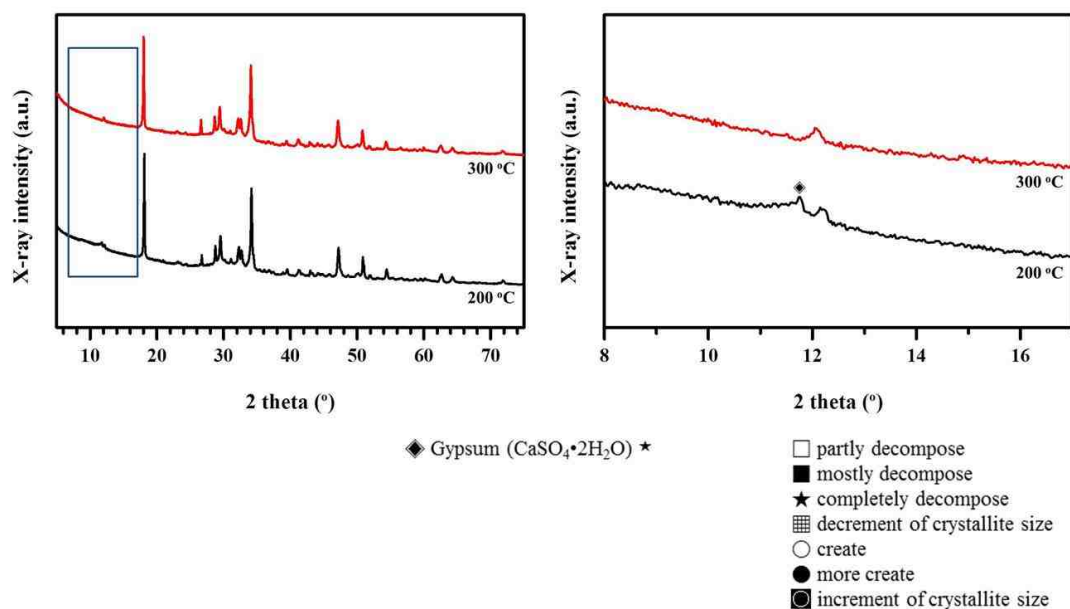


그림 3.2.3 1일차 200 °C와 300 °C의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.3에서 확인할 수 있는 바와 같이 200 °C에 비해 고온인 300 °C의 열처리로 인한 구조 내의 배워된 수분이 지속적으로 제거됨에 따라 Ettringite에 이어서 Gypsum 의 구조가 붕괴되는 것을 확인할 수 있었다.

그림 3.2.4는 XRD를 이용하여 시멘트 경화체를 300 °C 와 400 °C 까지 가열한 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다. 300 °C에 비해 고온인 400 °C에 노출된 샘플의 경우 Quartz low가 발생되었는데, 이는 Quartz 의 결정구조인 Si-O-Si 간의 결합이 늘어남에 따라 부분적으로 Quartz의형태가 Quartz low로 변형된 것으로 판단된다.

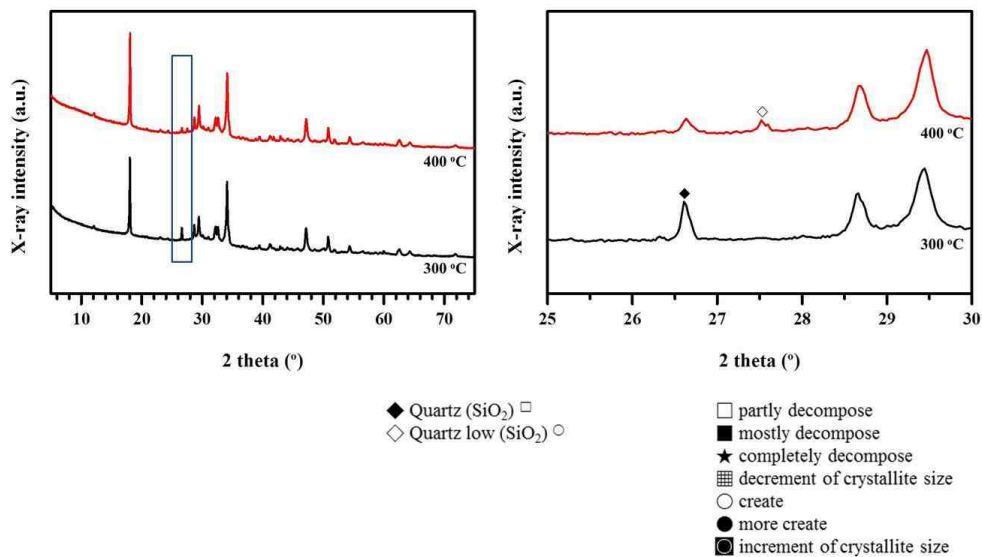


그림 3.2.4 1일차 300 °C와 400 °C의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.5는 XRD를 이용하여 시멘트 경화체를 400 °C 와 500 °C 까지 가열한 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

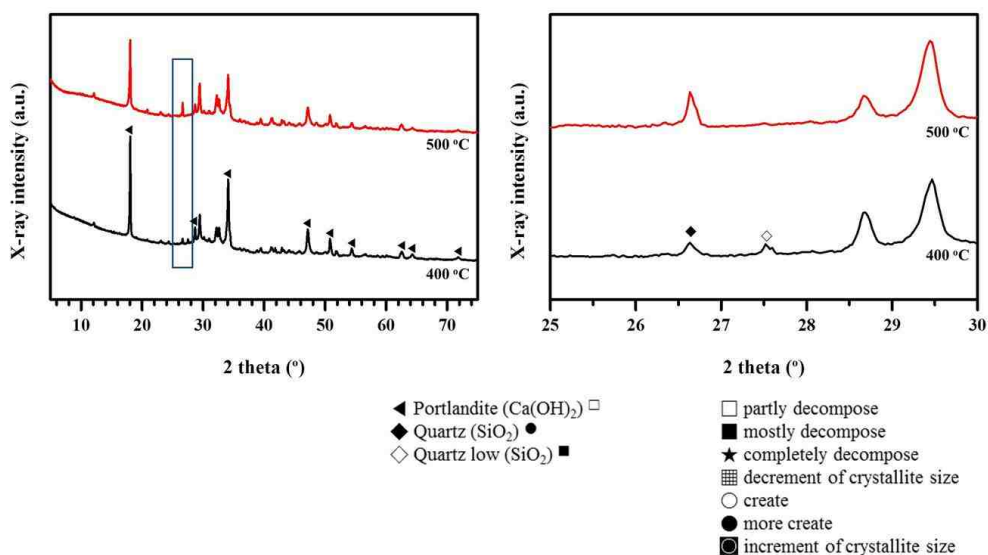


그림 3.2.5 1일차 400 °C와 500 °C의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.5에서 확인할 수 있는 바와 같이 400 °C에 비해 고온인 500 °C의 경우 열처리로 인하여 Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)의 dehydration 반응으로 격자내의 -OH 작용기가 제거됨으로써 층상형 구조가 일부 붕괴되어 XRD 패턴이 감소하기 시작 하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 25-30 구간을 자세히 보면 Quartz low의 구조가 보다 고온으로 감으로써 다시 안정한 Quartz 형태로 변형된 것을 확인할 수 있었다.

그림 3.2.6은 XRD를 이용하여 시멘트 경화체를 500 °C 와 600 °C 까지 가열한 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

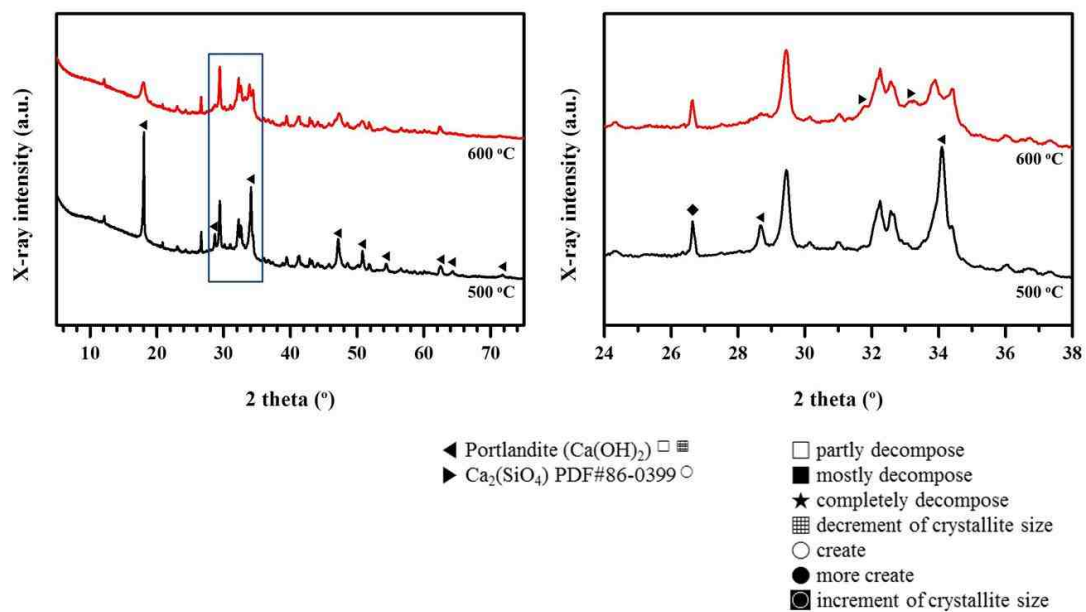


그림 3.2.6 1일차 500 °C와 600 °C의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.6에서 확인할 수 있는 바와 같이 500 °C에 비해 고온인 600 °C의 경우 Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)의 지속적인 dehydration 반응으로 인하여 구조의 대부분이 붕괴되고 동시에 Scherrer equation(결정의 크기에 따라 X-선 회절피크의 폭이 달라지는 현상을 이용하여 피크의 폭으로부터 결정 크기에 의해 Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)의 결정 크기가 작아진 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 25-30 구간을 자세히 보면 $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ 가 생성된 것을 확인 할 수 있는데, 이는 Portlandite의 dehydration반응으로 생성된 CaO와 Quartz의 SiO_2 가 반응하여 생성된 것으로 예상되어 진다.

그림 3.2.7은 XRD를 이용하여 시멘트 경화체를 600°C 와 700°C 까지 가열한 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 것이다. 700°C에 노출된 샘플의 경우 $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ PDF#86-0399와 Larnite ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 Calcite (CaCO_3)와 Hatruite ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)가 감소되면서 생성된 CaO 와 SiO_2 가 지속적으로 반응함에 따라 나타난 결과로 판단된다.

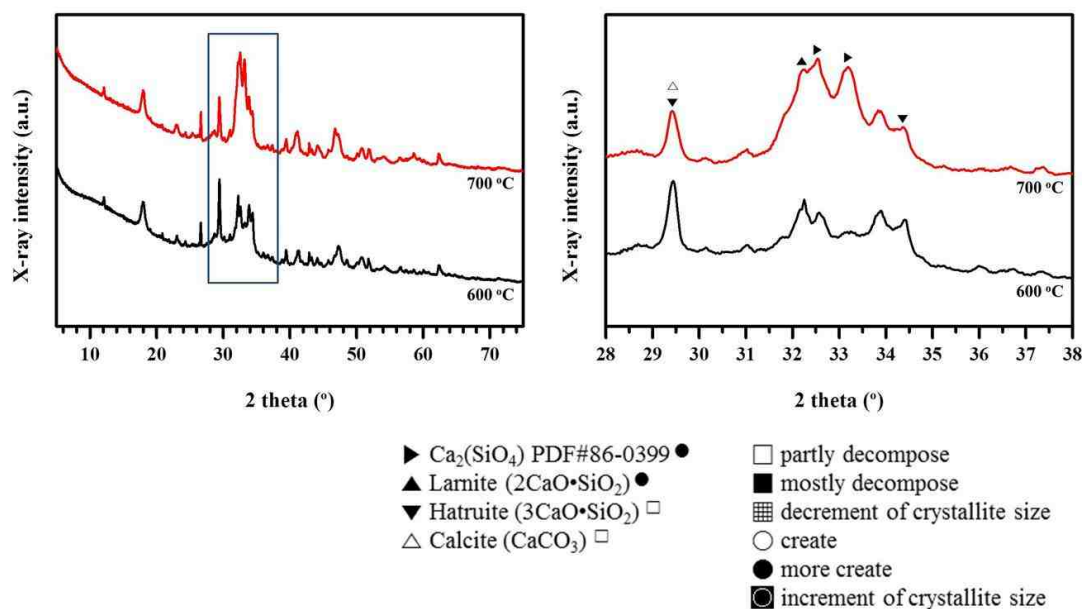


그림 3.2.7 1일차 600 °C와 700 °C의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.8은 XRD를 이용하여 시멘트 경화체를 700 °C 와 800 °C 까지 가열한 샘플간의 XRD 패턴을 나타낸 것이다.

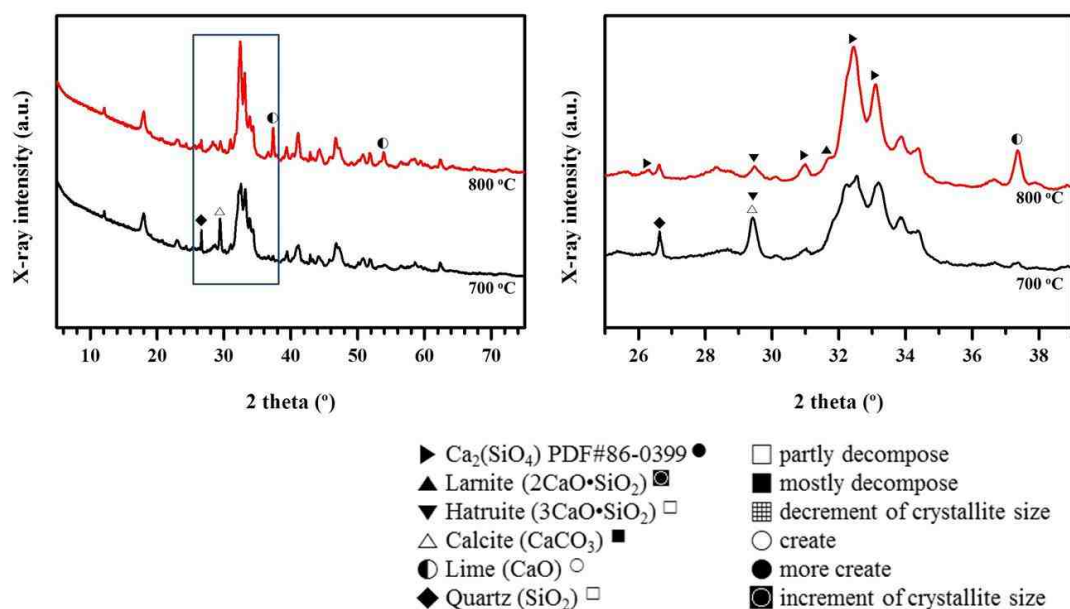


그림 3.2.8 1일차 700 °C와 800 °C의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.8에서 확인할 수 있는 바와 같이 700 °C에 비해 고온인 800 °C의 열처리로 인하여 Calcite (CaCO_3)가 열분해 되어 Lime (CaO) 이 생성되는 결과를 확인 할 수 있었다.

또한, 25-39 구간을 자세히 보면 700 °C에 이어서 Calcite (CaCO_3)와 Hatruite ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)가 지속적으로 감소되면서 생성된 CaO 와 Quartz (SiO_2)가 지속적으로 반응함으로써 Quartz의 감소가 진행 되고, $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ 가 증가되었다.

Scherrer equation의 이론을 기반으로 Larnite ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)의 피크의 폭이 좁아진 것으로 부터 고온으로 인한 결정 크기(crystallite size)가 증가한 것을 확인할 수 있었다.

그림 3.2.9는 XRD를 이용하여 시멘트 경화체를 800 °C 와 900 °C 까지 가열한 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

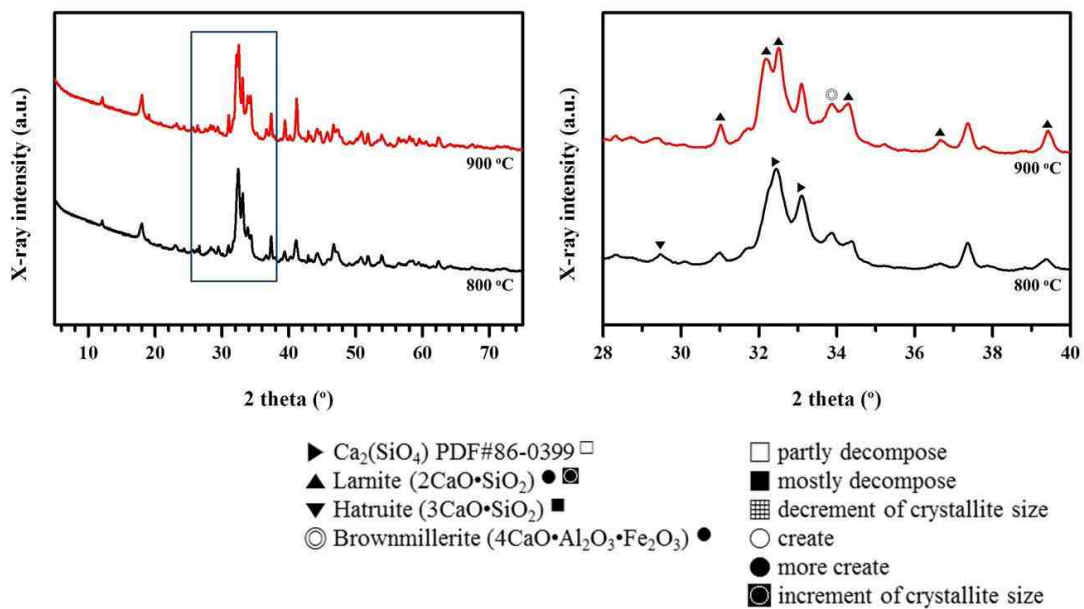


그림 3.2.9 1일차 800 °C와 900 °C의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.9에서 확인할 수 있는 바와 같이 800 °C에 비해 고온인 900 °C의 열처리로 인하여 CaO 와 SiO_2 의 반응으로 생성된 $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ 가 고온에 의해서 보다 안정한 구조인 Larnite ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)으로 변환됨에 따라 $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ 의 감소가 진행되고 Larnite ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)의 함량 증가와 결정 크기 (crystallite size)가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 추가적으로 Brownmillerite 도 고온으로 인하여 생성되면서 증가하는 결과를 나타낸다.

그림 3.2.10은 XRD를 이용하여 시멘트 경화체를 900 °C 와 1000 °C 까지 가열한 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 것이다. 900 °C에 비해 고온인 1000 °C의 열처리로 인하여 $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ 가 지속적으로 안정한 구조인 Larnite ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)으로 변환됨에 따라 $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ 의 패턴은 사라지고 Larnite ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)및 Lime (CaO)의 증가와 결정 크기 (crystallite size)가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

Brownmillerite의 결정 크기도 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 고온으로 인하여 Gehlenite ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$)가 생성된 것을 확인 할 수 있었다.

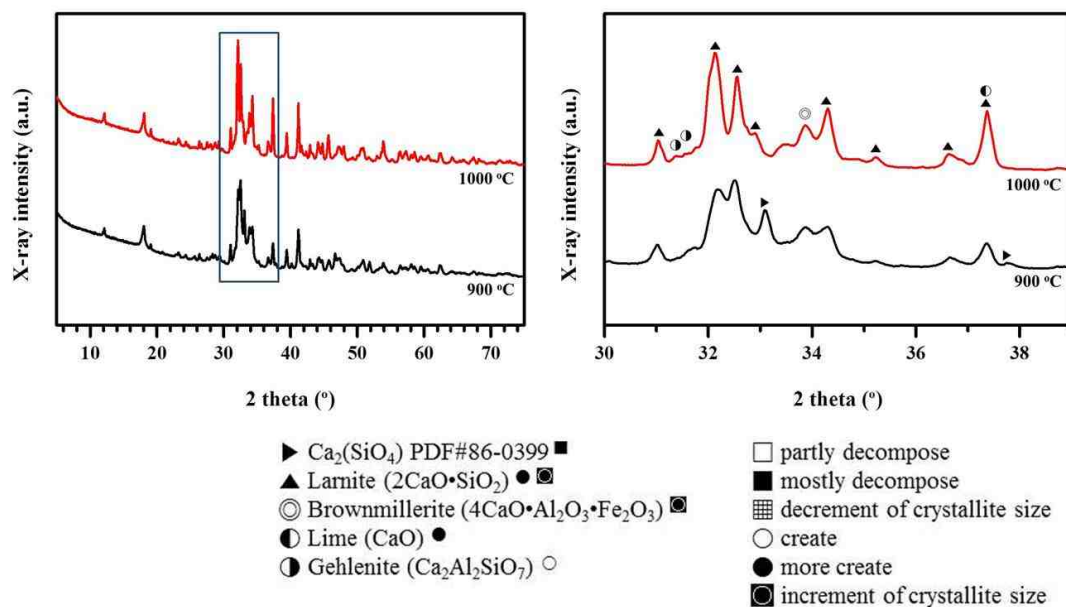


그림 3.2.10 1일차 900 °C와 1000 °C의 XRD 패턴 비교

나. 화재노출 후 시간 경과에 따른 후기 재령에서의 화학적 특성 변화

그림 3.2.11은 XRD를 이용하여 100 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온에서 대기 중에 1일과 3일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다. 1일에 비해 3일 동안 노출한 시멘트에서 Portladite (Ca(OH)_2)가 감소하면서 동시에 Vaterite (CaCO_3)는 증가한 것을 볼 수 있었다. 이는 공기 중의 CO_2 로 인하여 소량의 Ca(OH)_2 가 CaCO_3 로 변형된 것으로 판단된다.

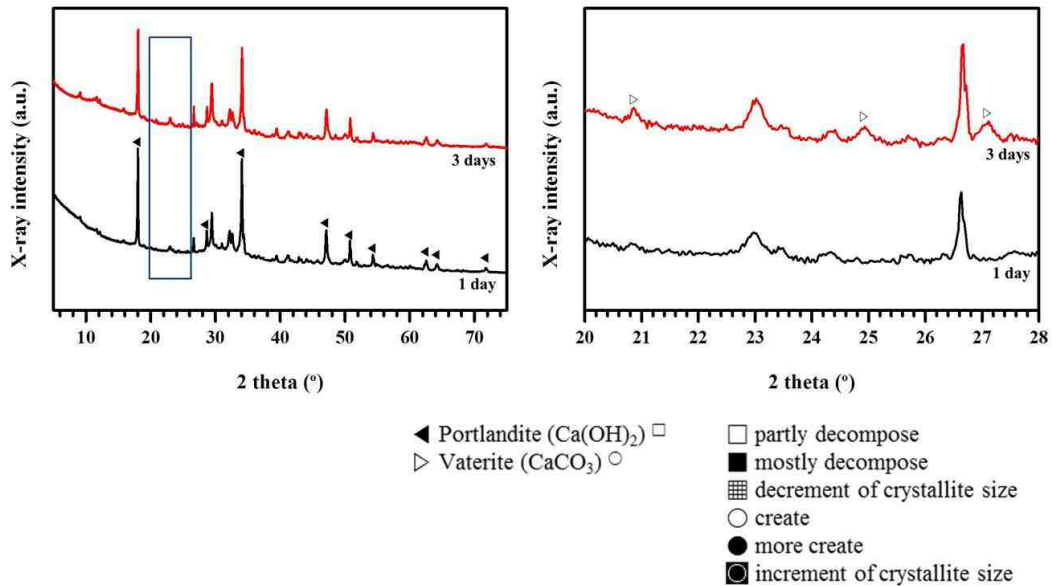


그림 3.2.11 100 °C로 열처리 후 1일과 3일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.12는 XRD를 이용하여 100 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 3일과 7일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

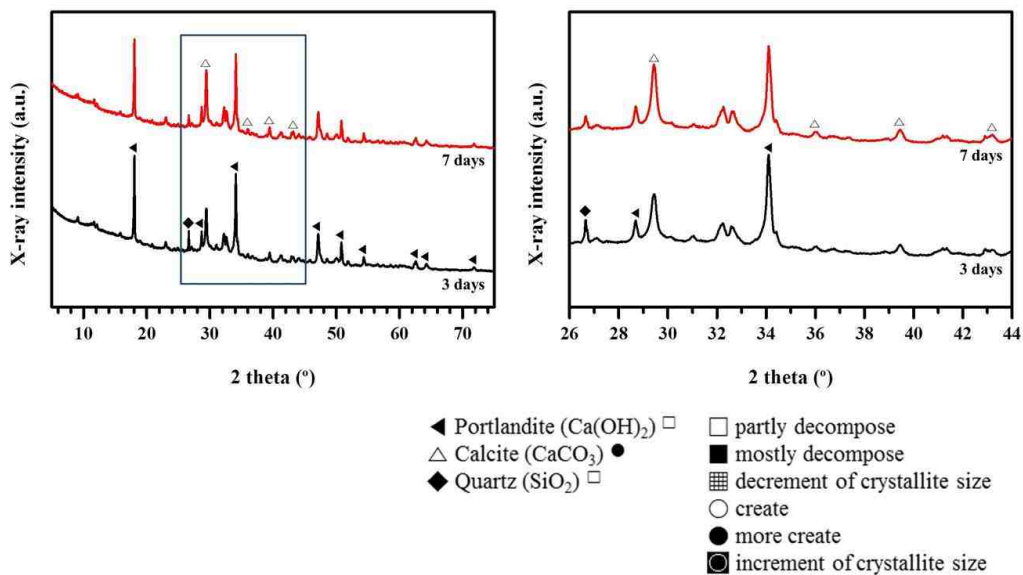


그림 3.2.12 100 °C로 열처리 후 3일과 7일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.12에서 확인할 수 있는 바와 같이 3일에 비해 7일 동안 노출한 시멘트에서 Portladite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)가 감소하면서 동시에 Calcite (CaCO_3)는 증가한 것을 볼 수 있었다. 이는 지속적으로 공기 중의 CO_2 로 인하여 소량의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 CaCO_3 로 변형된 것으로 판단된다. Quartz (SiO_2)는 시간이 지남에 따라 자연적인 감소를 나타낸다.

그림 3.2.13은 XRD를 이용하여 100 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 7 일과 28 일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

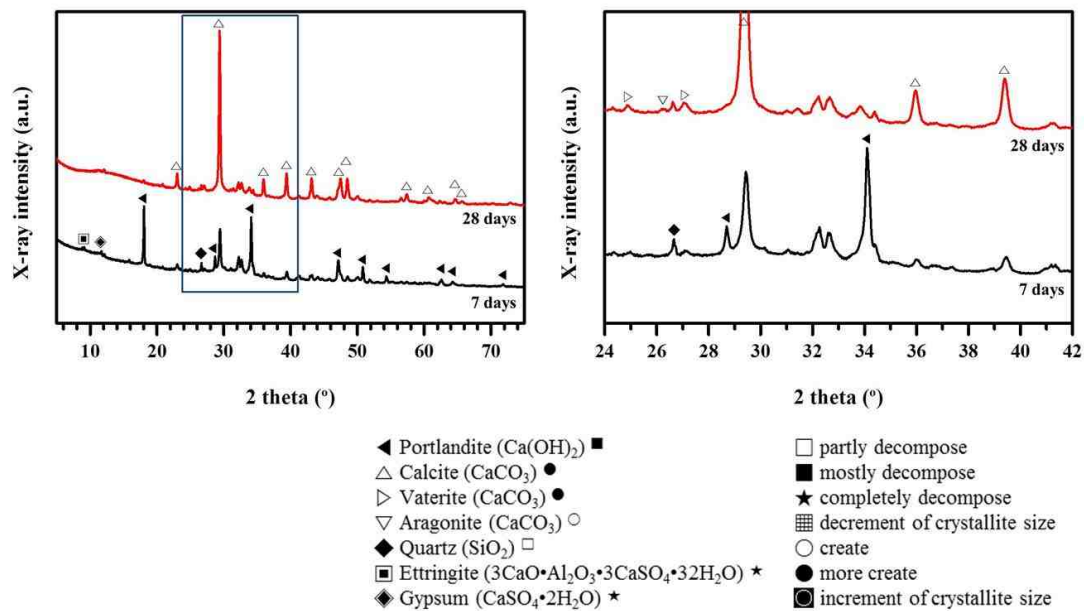


그림 3.2.13 100 °C로 열처리 후 7일과 28일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.13에서 확인할 수 있는 바와 같이 7일에 비해 28일 동안 노출한 시멘트에서 Portladite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)가 급격히 감소하면서 동시에 Calcite (CaCO_3)와 Vaterite (CaCO_3)가 증가 및 Aragonite (CaCO_3)생성한 것을 확인할 수 있었다. 이는 공기 중의 CO_2 로 인하여 소량의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 CaCO_3 로 변형된 것으로 예상된다. 형성된 CaCO_3 는 세 가지 구조 중에서 주로 Calcite로 변환 되었다. 또한, Quartz (SiO_2)는 시간에 따른 지속적인 감소를 보였다.

그림 3.2.14는 XRD를 이용하여 100 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 28 일과 3개월 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 것이다. 28일에 비해 3개월 동안 노출한 시멘트에서 Portladite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)의 지속적인 CO_2 흡수로 구조가 Calcite (CaCO_3)로 변화됨으로써 Portladite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 패턴은 사라지고 Calcite (CaCO_3) 패턴이 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

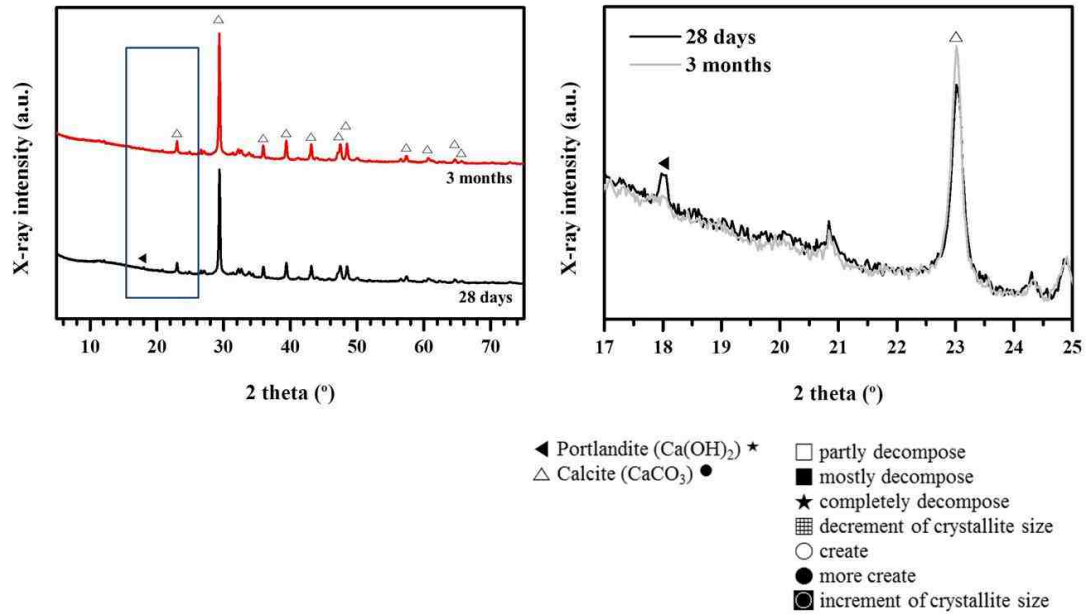


그림 3.2.14 100 °C로 열처리 후 28일과 3개월 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.15는 XRD를 이용하여 100 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 3개월과 6개월 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

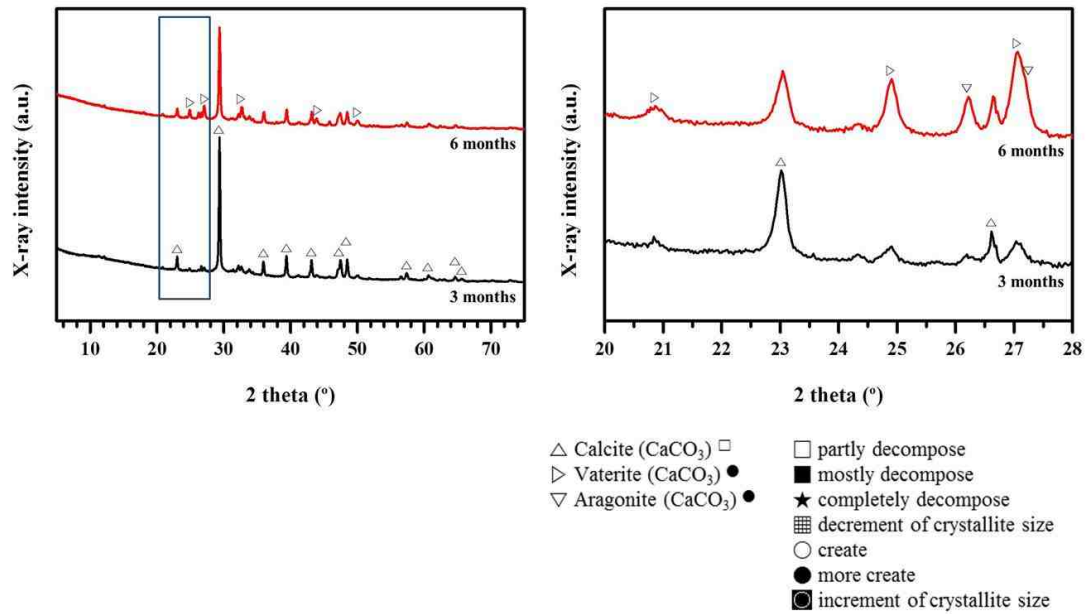


그림 3.2.15 100 °C로 열처리 후 3개월과 6개월 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.15에서 확인할 수 있는 바와 같이 3개월에 비해 6개월 동안 노출한 시멘트에서 Calcite (CaCO_3)가 감소하고 Vaterite와 Aragonite가 증가하는 것으로부터 형성된 CaCO_3 가 열처리 후 시간이 지나면서 Calcite구조에서 Vaterite와 Aragonite로 변환되는 것으로 예상된다.

그림 3.2.16은 XRD를 이용하여 200 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 1일과 3일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다. 1일에 비해 3일 동안 노출한 시멘트에서 Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)가 감소하면서 동시에 Calcite (CaCO_3)는 증가하고 Vaterite (CaCO_3)는 생성된 것을 볼 수 있었다. 이는 공기 중의 CO_2 로 인하여 소량의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 CaCO_3 로 변형된 것으로 예상된다.

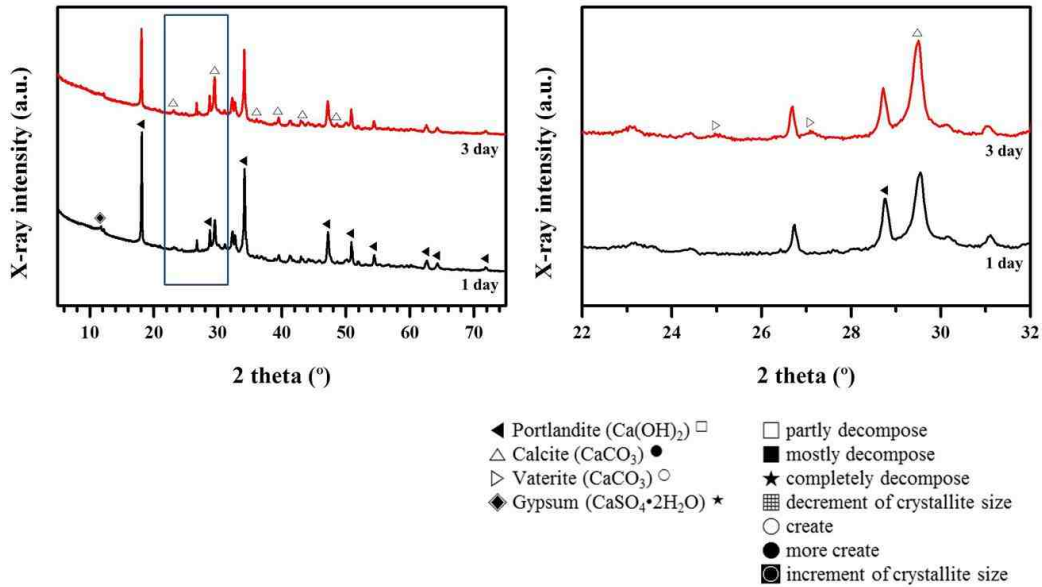


그림 3.2.16 200 °C로 열처리 후 1일과 3일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.17은 XRD를 이용하여 200 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 3일과 7일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

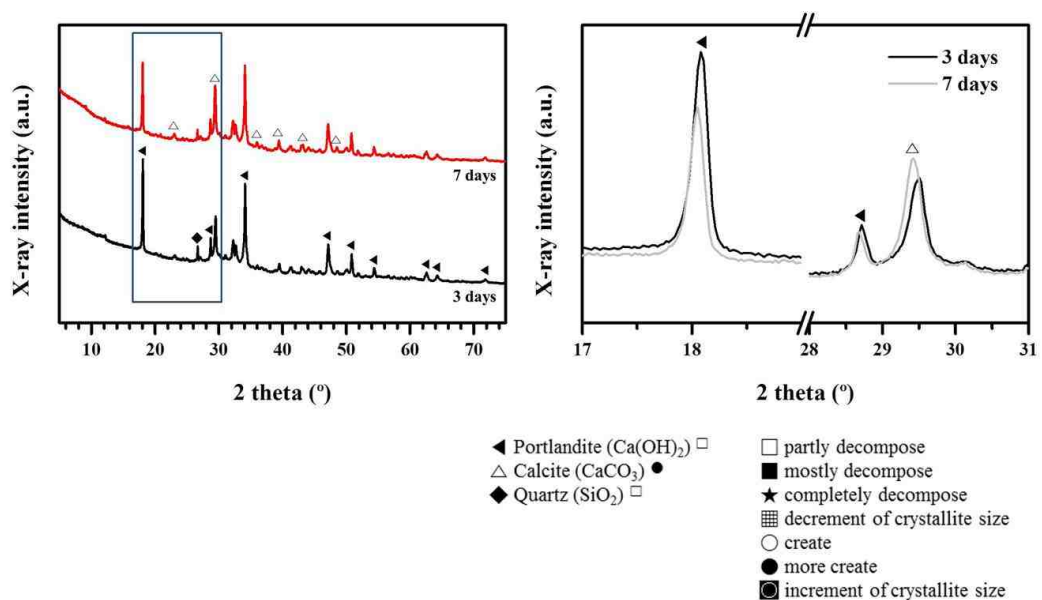


그림 3.2.17 200 °C로 열처리 후 3일과 7일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.17에서 확인할 수 있는 바와 같이 3일에 비해 7일 동안 노출한 시멘트에서 Portlandite (Ca(OH)_2)가 감소하면서 동시에 Calcite (CaCO_3)는 증가한 것을 볼 수 있었다. 이는 지속적으로 공기 중의 CO_2 로 인하여 소량의 Ca(OH)_2 가 CaCO_3 로 변형된 것으로 예상된다. Quartz (SiO_2)는 시간이 지남에 따라 자연적인 감소를 나타내었다.

그림 3.2.18은 XRD를 이용하여 200 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 7일과 28일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

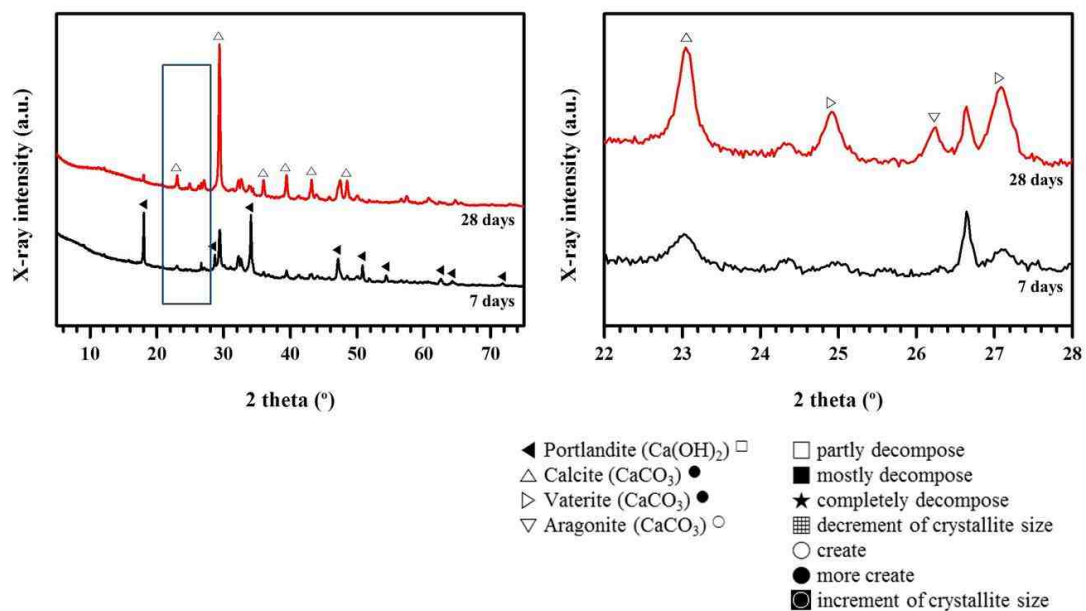


그림 3.2.18 200 °C로 열처리 후 7일과 28일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.18에서 확인할 수 있는 바와 같이 7일에 비해 28일 동안 노출한 시멘트에서 Portlandite (Ca(OH)_2)가 급격히 감소하면서 동시에 Calcite (CaCO_3)와 Vaterite (CaCO_3)가 증가 및 Aragonite (CaCO_3)생성한 것을 확인할 수 있었다. 이는 공기 중의 CO_2 로 인하여 소량의 Ca(OH)_2 가 CaCO_3 로 변형된 것으로 예상된다. 형성된 CaCO_3 는 세 가지 구조 중에서 주로 Calcite로 변환 되었다. 또한, Quartz (SiO_2)는 시간에 따른 지속적인 감소를 보였다.

그림 3.2.19는 XRD를 이용하여 200 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 28일과 3개월 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다. 28일에 비해 3개월 동안 노출한 시멘트에서 공기 중의 CO_2 로 인하여 Calcite (CaCO_3)가 지속적으로 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

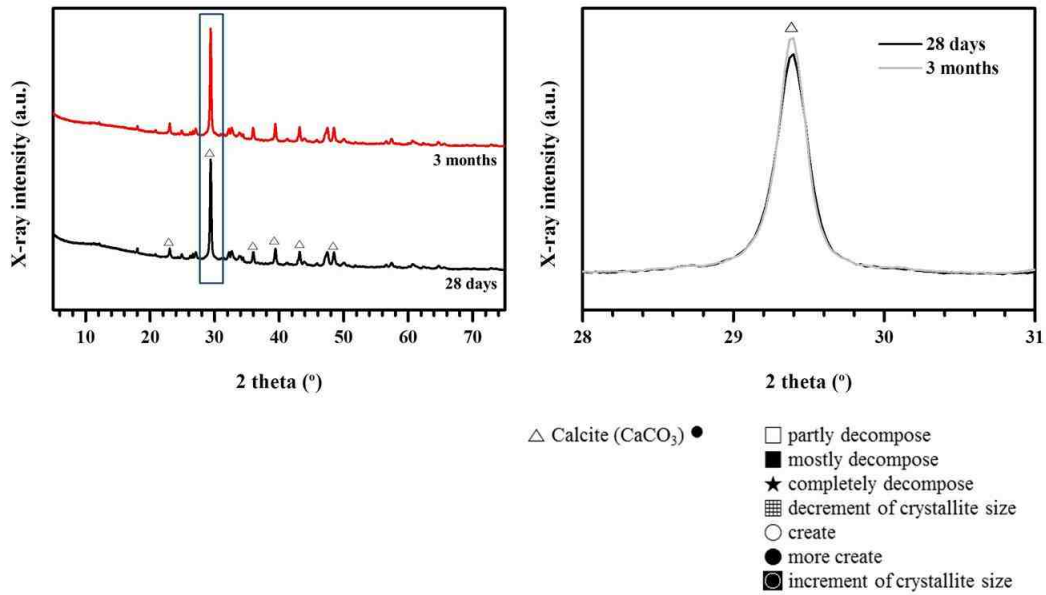


그림 3.2.19 200 °C로 열처리 후 28일과 3개월 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.20은 XRD를 이용하여 200 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상은 하에서 대기 중에 3개월과 6개월 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

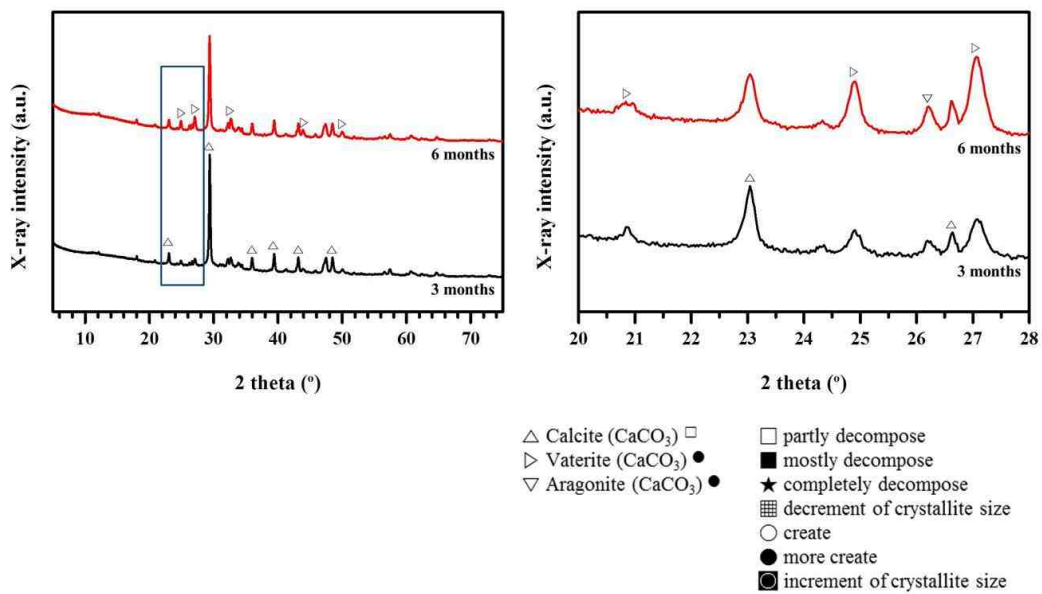


그림 3.2.20 200 °C로 열처리 후 3개월과 6개월 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.20에서 확인할 수 있는 바와 같이 3개월에 비해 6개월 동안 노출한 시멘트에서 Calcite (CaCO_3)가 감소하고 Vaterite와 Aragonite가 증가하는 것으로부터 형성된 CaCO_3 가 열처리 후 시간이 지나면서 Calcite구조에서 Vaterite와 Aragonite로 변환되는 것으로 예상된다.

그림 3.2.21은 XRD를 이용하여 300 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 1일과 3일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다. 1일에 비해 3일 동안 노출한 시멘트에서 Portlandite (Ca(OH)_2)가 감소하면서 동시에 Calcite (CaCO_3)는 증가하고 Vaterite (CaCO_3)와 Aragonite (CaCO_3)는 생성된 것을 볼 수 있었다. 이는 공기 중의 CO_2 로 인하여 소량의 Ca(OH)_2 가 CaCO_3 로 변형된 것으로 예상된다. Quartz (SiO_2)는 시간에 따른 자연적인 감소를 보였다.

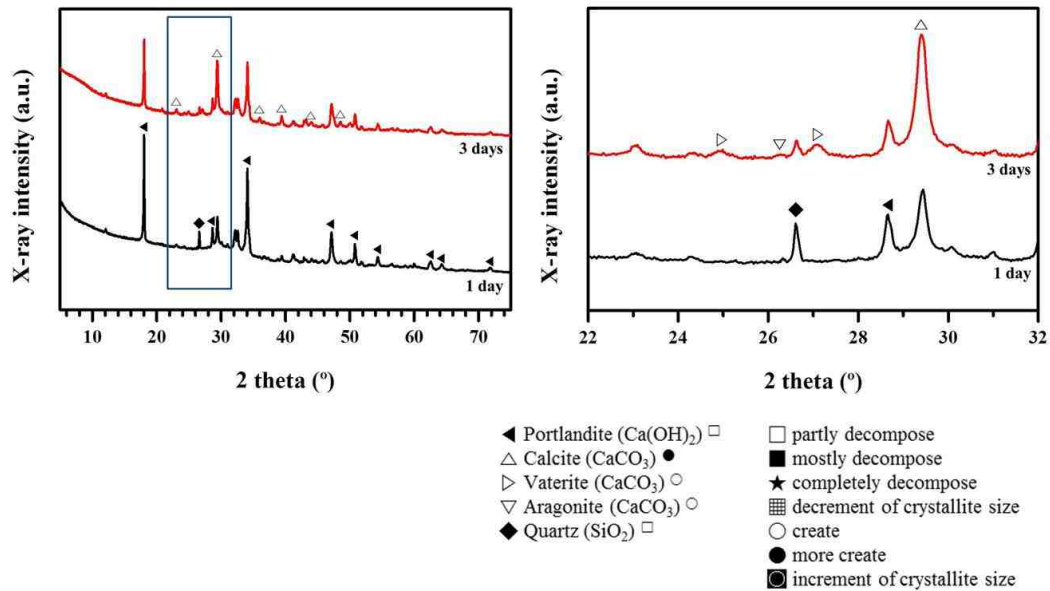


그림 3.2.21 300 °C로 열처리 후 1일과 3일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.22는 XRD를 이용하여 300 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 3일과 7일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

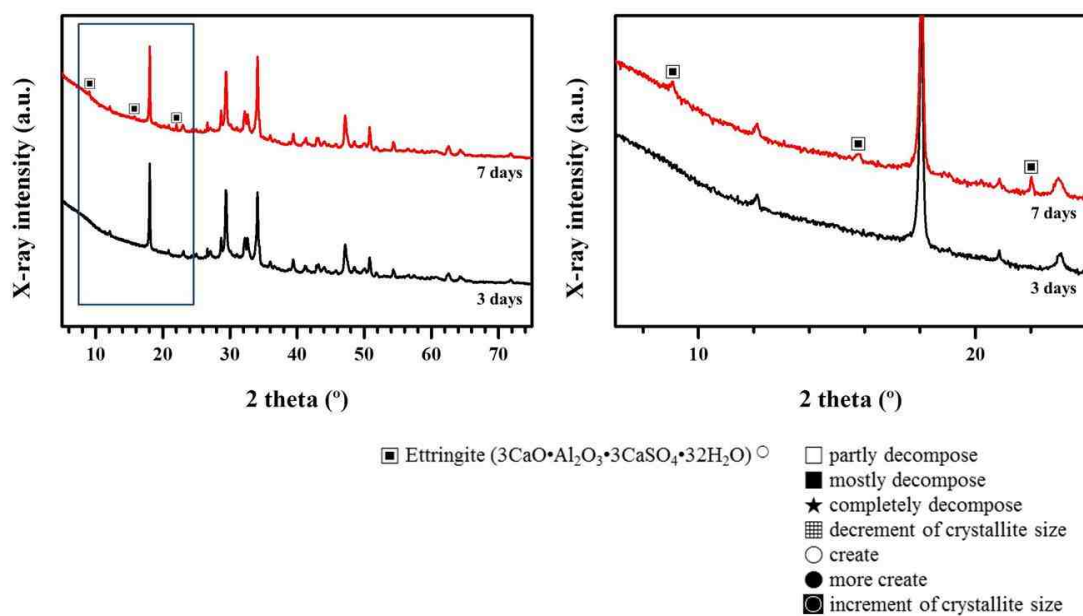


그림 3.2.22 300 °C로 열처리 후 3일과 7일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.22에서 확인할 수 있는 바와 같이 3일에 비해 7일 동안 노출한 시멘트에서 시간이 지남에 따라 공기 중의 H_2O 를 흡수하면서 Delayed ettringite formation (이하 DEF) 반응에 기인하여 Ettringite ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$)가 다시 생성된 것을 확인할 수 있었다.

그림 3.2.23은 XRD를 이용하여 300 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 7일과 28일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

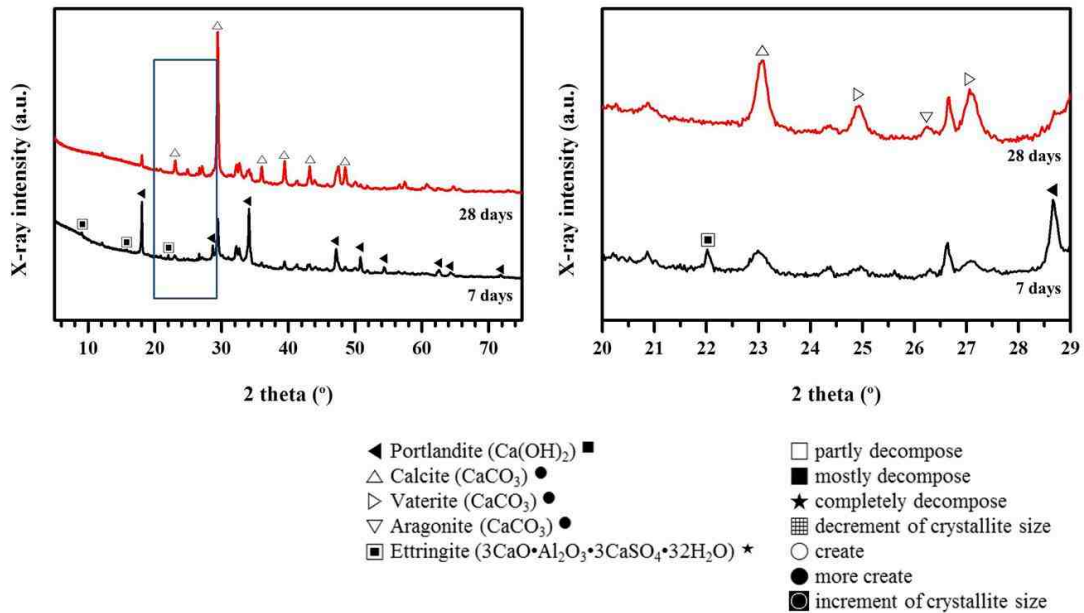


그림 3.2.23 300 °C로 열처리 후 7일과 28일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.23에서 확인할 수 있는 바와 같이 7일에 비해 28일 동안 노출한 시멘트에서 Portlandite ($Ca(OH)_2$)가 급격히 감소하면서 동시에 Calcite ($CaCO_3$), Vaterite ($CaCO_3$) 및 Aragonite ($CaCO_3$)가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 공기 중의 CO_2 로 인하여 소량의 $Ca(OH)_2$ 가 $CaCO_3$ 로 변형된 것으로 예상된다. 7일에 형성된 Ettringite가 자연적으로 사라진 것을 확인할 수 있는데, 이는 지속적으로 H_2O 를 흡수하여 배위수 이상의 H_2O 이 구조를 붕괴시킨 것으로 판단된다.

그림 3.2.24는 XRD를 이용하여 300 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 28일과 3개월 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 것이다. 28일에 비해 3개월 동안 노출한 시멘트에서 Calcite ($CaCO_3$)의 증가와 $Ca_4Al_2SO_{10} \cdot 16H_2O$ 가 일시적으로 생성되는 것으로 나타났다.

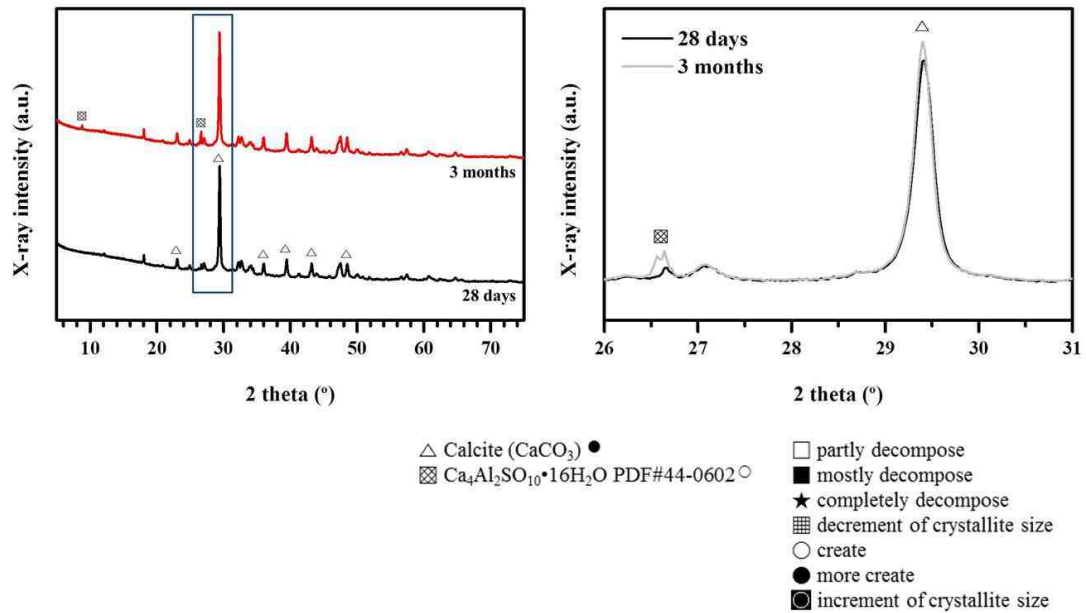


그림 3.2.24 300 °C로 열처리 후 28일과 3개월 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.25는 XRD를 이용하여 300 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 3개월과 6개월 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

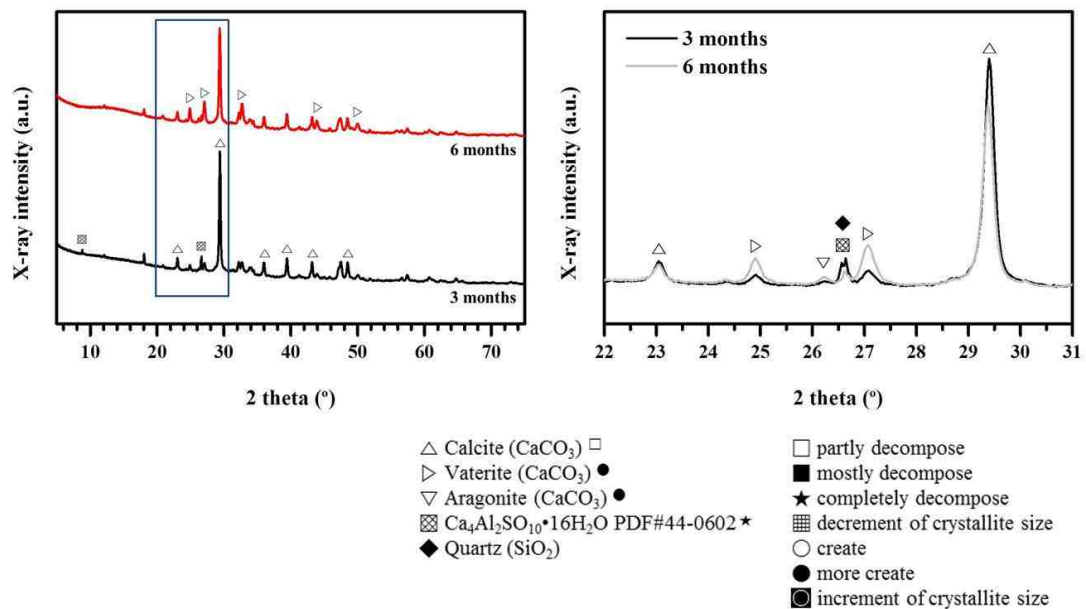


그림 3.2.25 300 °C로 열처리 후 3개월과 6개월 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.25에서 확인할 수 있는 바와 같이 3개월에 비해 6개월 동안 노출한 시멘트에서 Calcite (CaCO_3)가 감소하고 Vaterite와 Aragonite가 증가하는 것으로부터 형성된 CaCO_3 가 열처리 후 시간이 지나면서 Calcite구조에서 Vaterite와 Aragonite로 변환되는 것으로 예상된다. 3개월 샘플에서 일시적으로 생성된 $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{SO}_{10} \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ 가 지속적인 수화로 인한 구조 붕괴로 사라진 것을 확인할 수 있었다.

그림 3.2.26은 XRD를 이용하여 400 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 1일과 3일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 것이다. 1일에 비해 3일 동안 노출한 시멘트에서 Portladite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)가 감소하면서 동시에 Calcite (CaCO_3)는 증가하고 Vaterite (CaCO_3)가 생성되는 것을 볼 수 있었다. 이는 공기 중의 CO_2 로 인하여 소량의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 CaCO_3 로 변형된 것으로 예상된다. Quartz low(SiO_2)는 보다 안정한 Quartz 형태로 변환되면서 Quartz low는 사라지고 Quartz가 증가 하였다.

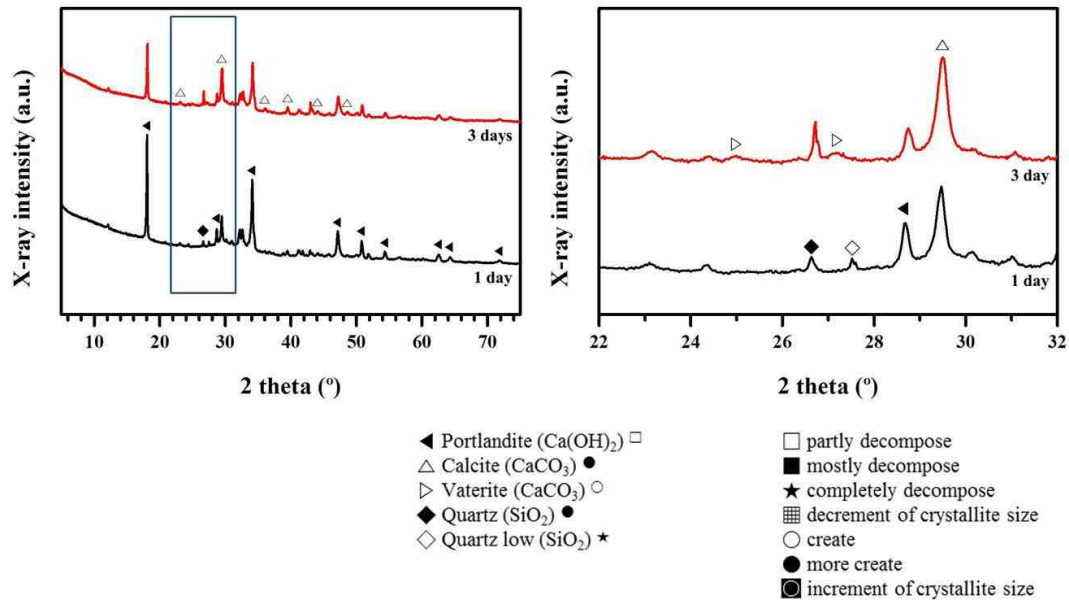


그림 3.2.26 400 °C로 열처리 후 1일과 3일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.27은 XRD를 이용하여 400 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 3일과 7일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

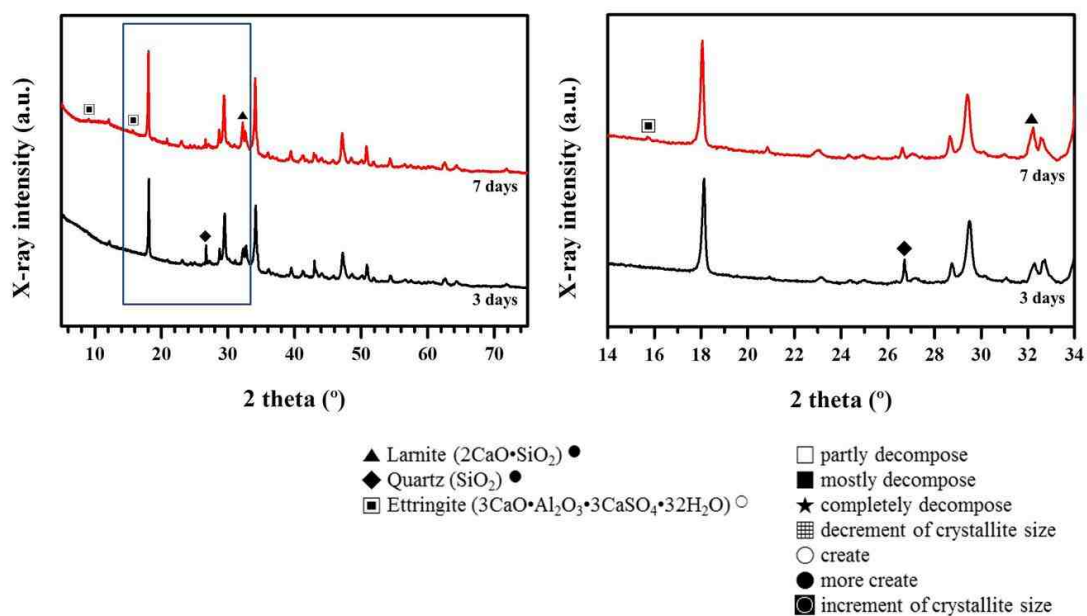


그림 3.2.27 400 °C로 열처리 후 3일과 7일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.27에서 확인할 수 있는 바와 같이 3일에 비해 7일 동안 노출한 시멘트에서 시간이 지남에 따라 DEF 반응에 기인하여 Ettringite ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$)가 다시 생성된 것을 확인할 수 있었다. 또한, Larnite ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)가 일시적으로 생성된 것을 확인할 수 있었다.

그림 3.2.28은 XRD를 이용하여 400 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 7일과 28일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

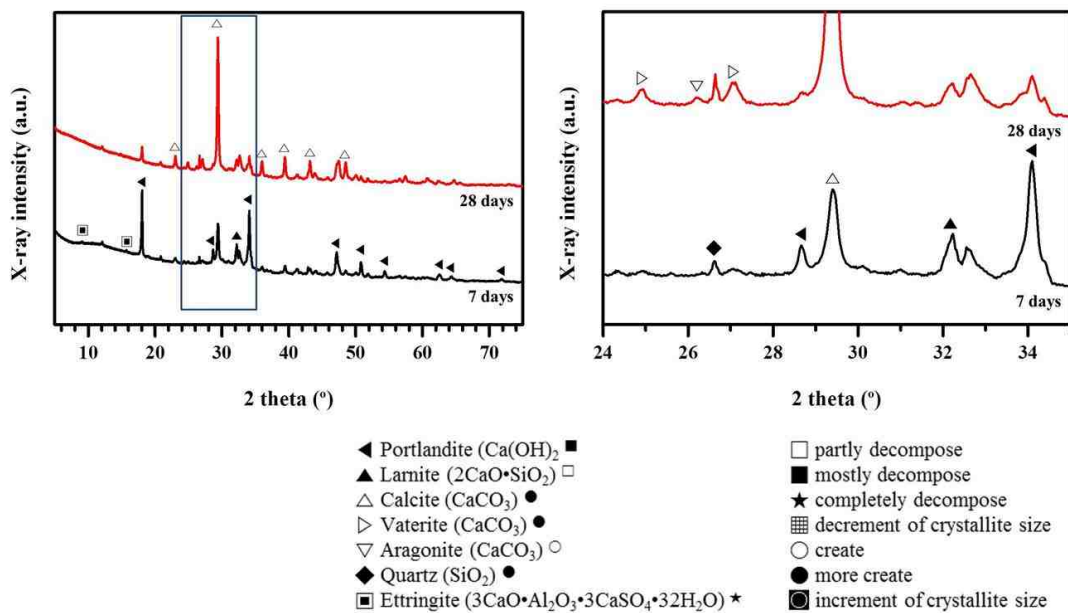


그림 3.2.28 400 °C로 열처리 후 7일과 28일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.28에서 확인할 수 있는 바와 같이 7일에 비해 28일 동안 노출한 시멘트에서 Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)가 급격히 감소하면서 동시에 Calcite (CaCO_3)와 Vaterite (CaCO_3) 증가 및 Aragonite (CaCO_3)가 생성되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 공기 중의 CO_2 로 인하여 소량의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 CaCO_3 로 변형된 것으로 예상된다. 특히, 형성된 CaCO_3 는 세 가지 구조 중에서 주로 Calcite로 변환 되었다. 7일에 형성된 Ettringite가 자연적으로 사라진 것을 확인할 수 있었다. 또한, 7일에 일시적으로 생성되었던 Larnite는 감소하는 것으로 나타났다.

그림 3.2.29는 XRD를 이용하여 400 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 28일과 3개월 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 것이다.

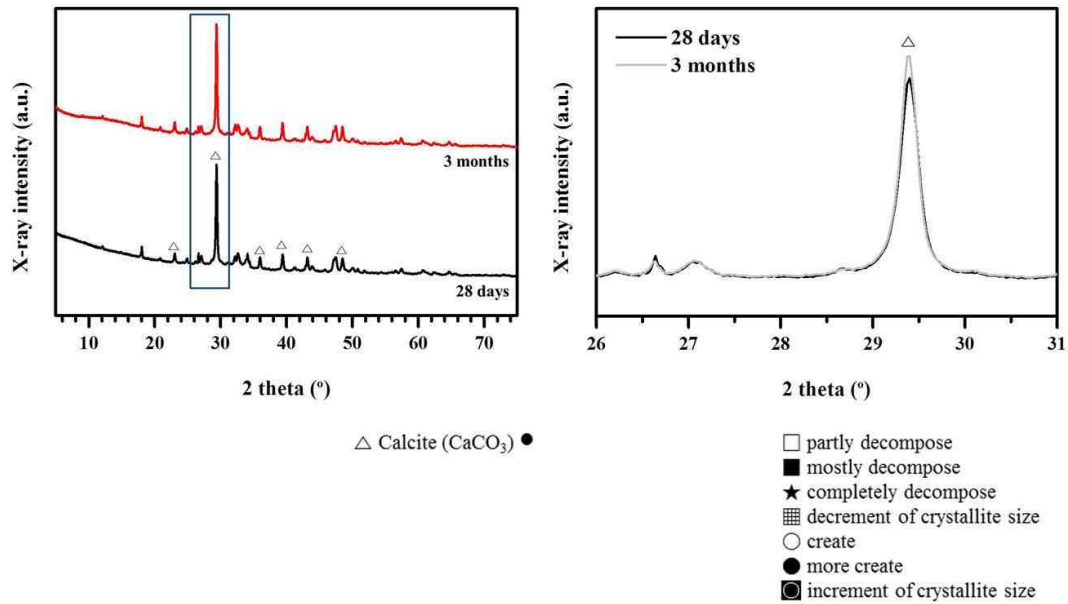


그림 3.2.29 400 °C로 열처리 후 28일과 3개월 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.29에서 확인할 수 있는 바와 같이 28일에 비해 3개월 동안 노출한 시멘트에서 Calcite (CaCO_3)의 증가가 확인되었다.

그림 3.2.30은 XRD를 이용하여 400 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 3개월과 6개월 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 것이다.

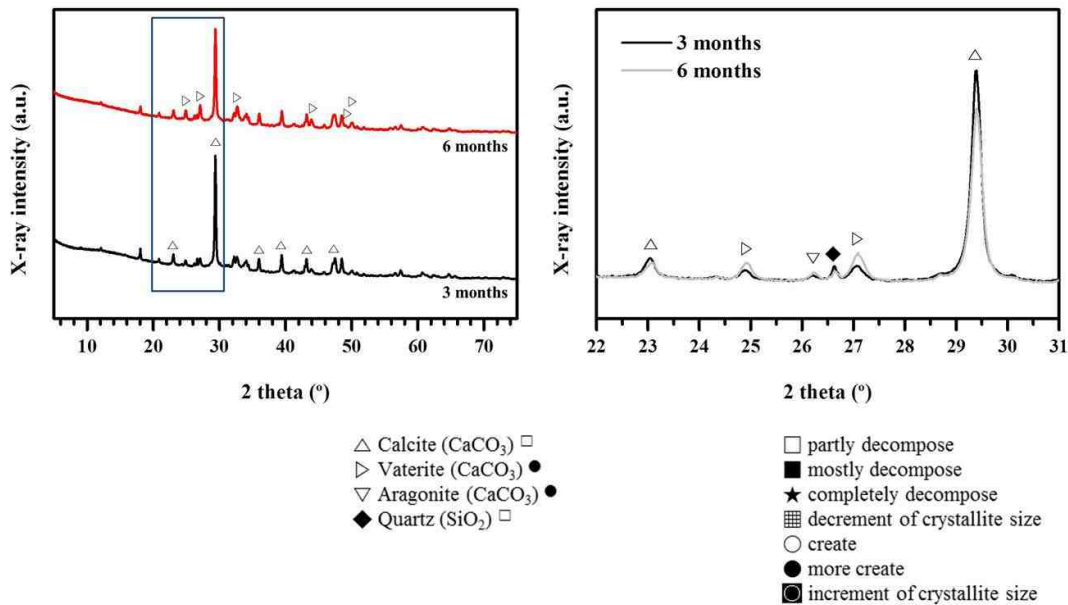


그림 3.2.30 400 °C로 열처리 후 3개월과 6개월 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.30에서 확인할 수 있는 바와 같이 3개월에 비해 6개월 동안 노출한 시멘트에서 Calcite(CaCO_3)가 감소하였는데, 이는 열처리 후 시간이 지나면서 Calcite구조가 Vaterite와

Aragonite로 변환된데 기인한 것으로 판단된다.

그림 3.2.31은 XRD를 이용하여 500 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 1일과 3일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 것이다. 1일에 비해 3일 동안 노출한 시멘트에서 Portladite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)가 감소하면서 동시에 Calcite (CaCO_3)는 증가하는 것을 볼 수 있었다.

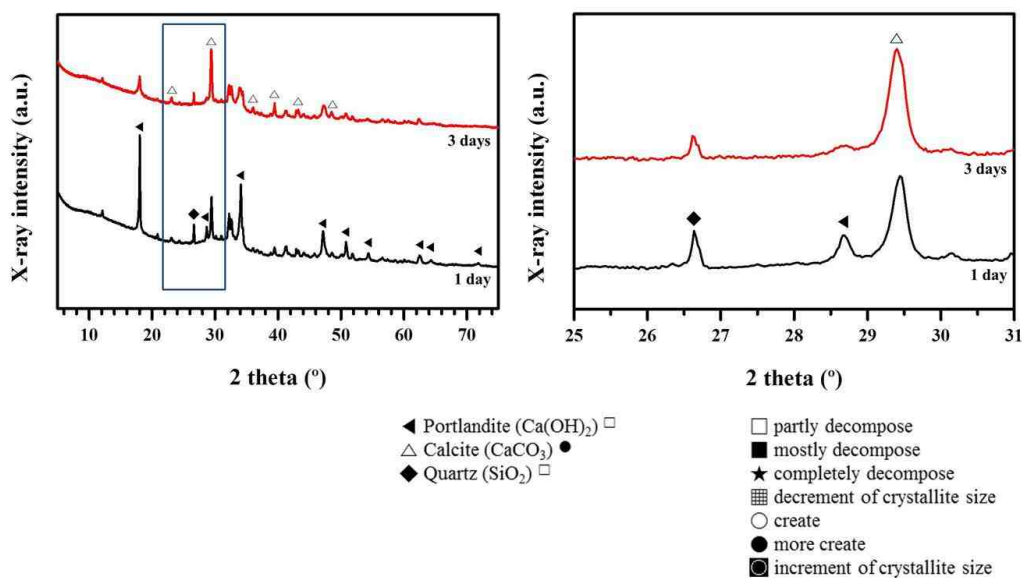


그림 3.2.31 500 °C로 열처리 후 1일과 3일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.32는 XRD를 이용하여 500 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 3일과 7일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

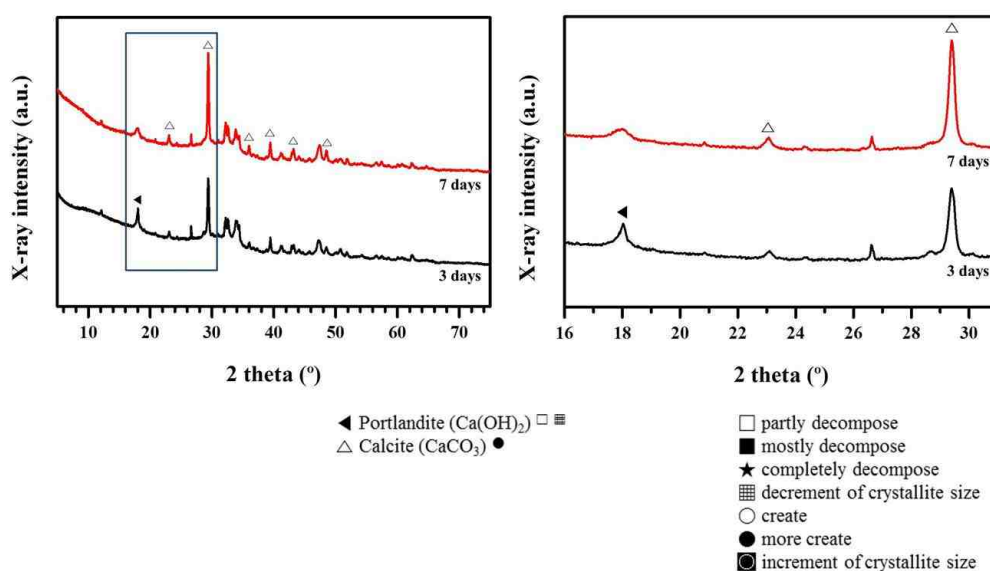


그림 3.2.32 500 °C로 열처리 후 3일과 7일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.32에서 확인할 수 있는 바와 같이 3일에 비해 7일 동안 노출한 시멘트에서 공기 중의 CO_2 와 Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)가 지속적으로 반응하여서 감소하면서 동시에 Calcite (CaCO_3)는 증가하는 것을 볼 수 있었다. 또한, Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)의 피크 폭 증가로부터 Portlandite의 결정 크기(crystallite size)가 작아진 것을 확인 할 수 있었다.

그림 3.2.33은 XRD를 이용하여 500 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 7일과 28일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

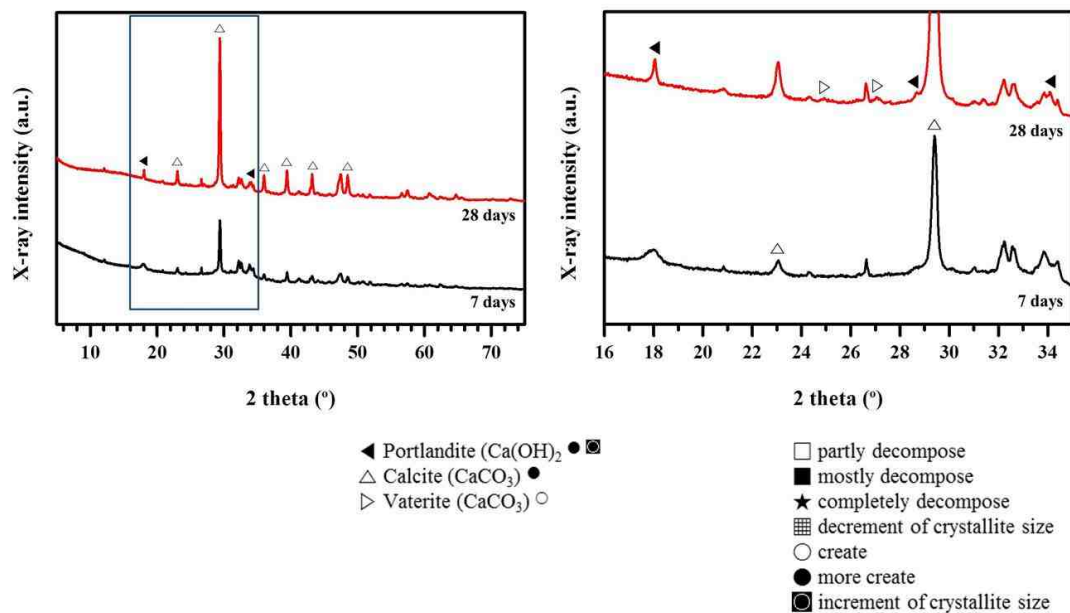


그림 3.2.33 500 °C로 열처리 후 7일과 28일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.33에서 확인할 수 있는 바와 같이 7일에 비해 28일 동안 노출한 시멘트에서 감소한 Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)가 장시간에 걸친 수화로 인하여 작은 결정이 천천히 반응하여 큰 결정으로 변화된 것을 피크 폭 감소로부터 확인 할 수 있었다. 동시에 Calcite (CaCO_3)와 Vaterite (CaCO_3)가 생성되는 것을 확인할 수 있었다. CaCO_3 는 주로 Calcite로 변환 되었다.

그림 3.2.34는 XRD를 이용하여 500 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 28일과 3개월 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다. 28일에 비해 3개월 동안 노출한 시멘트에서 공기 중의 CO_2 로 인한 지속적인 Carbonate 반응으로 Calcite (CaCO_3)의 지속적인 증가가 확인되었다.

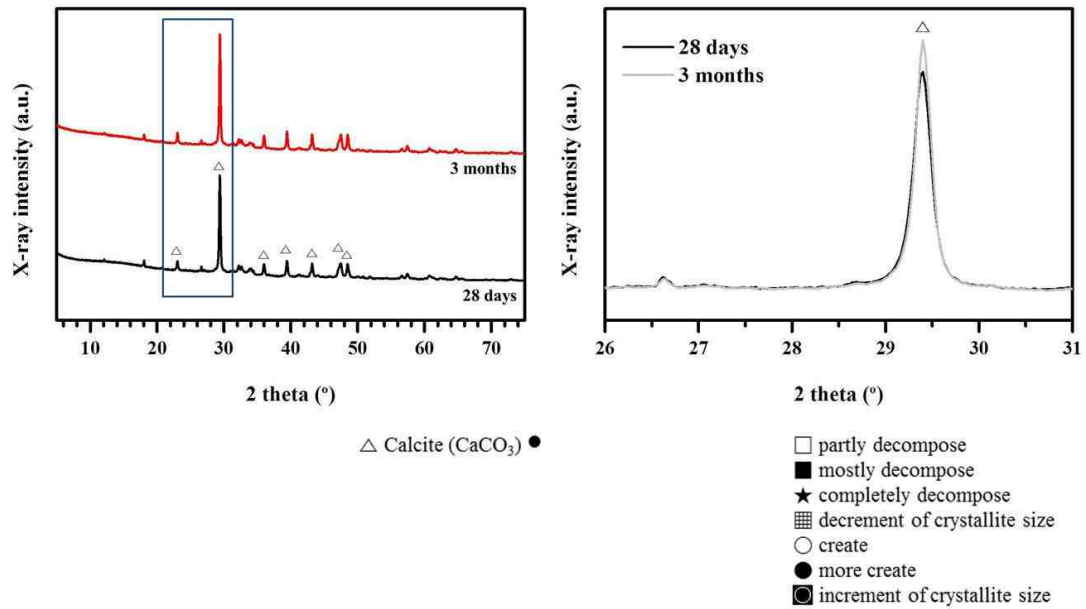


그림 3.2.34 500 °C로 열처리 후 28일과 3개월 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.35는 XRD를 이용하여 500 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 3개월과 6개월 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 것이다.

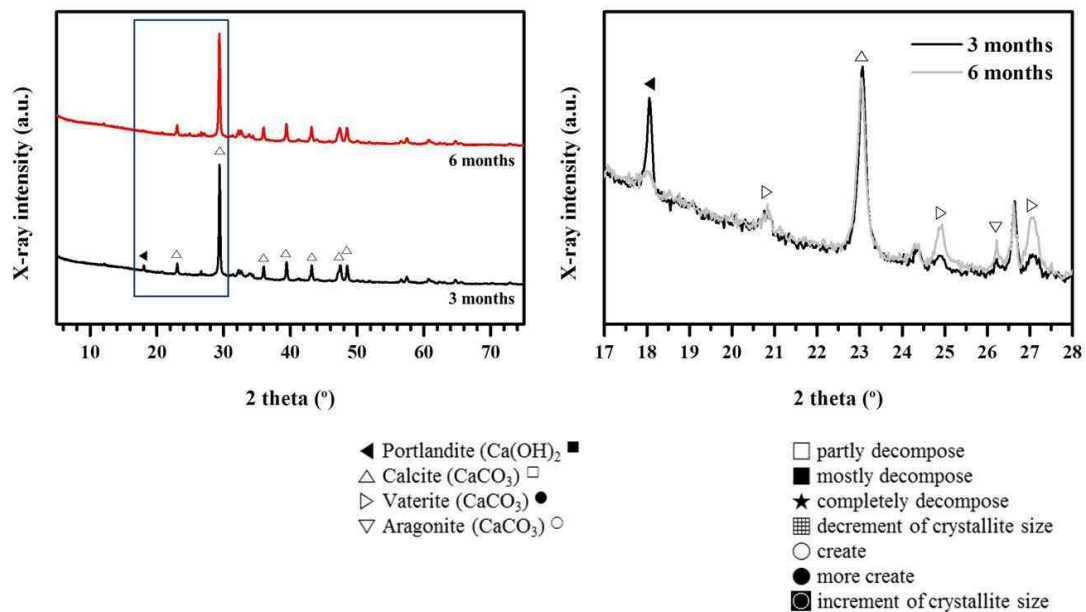


그림 3.2.35 500 °C로 열처리 후 3개월과 6개월 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

시간이 경과하면서 Calcite (CaCO_3)가 감소하였는데, 이는 CaCO_3 가 열처리 후 시간이 지나면서 구조가 Vaterite와 Aragonite로 변환된 것으로 판단된다.

그림 3.2.36은 XRD를 이용하여 600 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에

서 대기 중에 1일과 3일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다. 1일에 비해 3일 동안 노출한 시멘트에서 공기 중의 H_2O 와 CO_2 와의 반응으로 Portlandite($Ca(OH)_2$), $Ca_2(SiO_4)$, Larnite($2CaO \cdot SiO_2$)는 감소하였고, Calcite ($CaCO_3$)는 생성되는 것을 나타냈다.

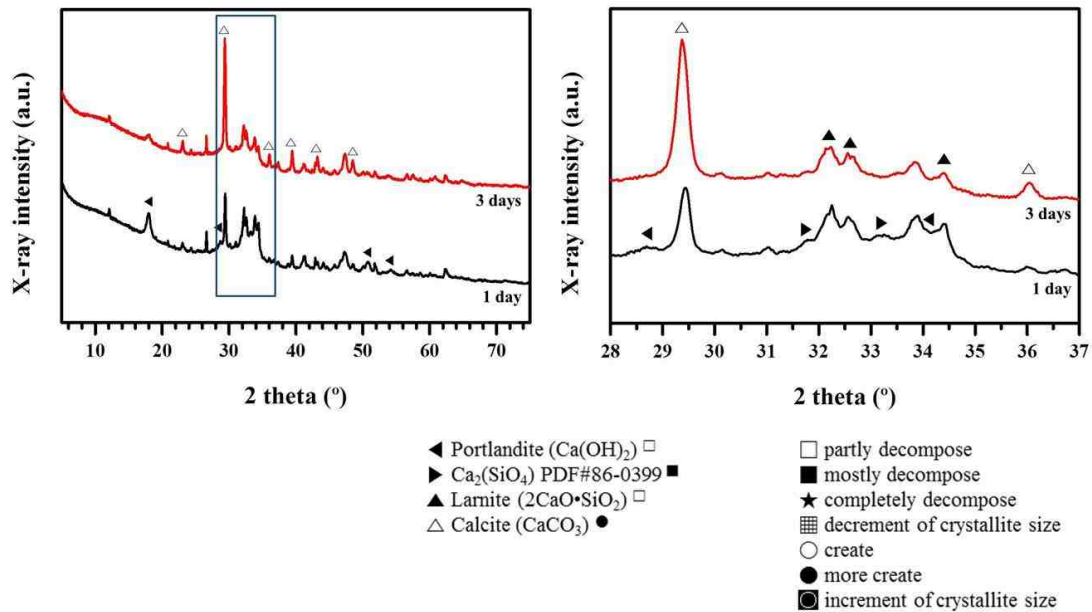


그림 3.2.36 600 °C로 열처리 후 1일과 3일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.37은 XRD를 이용하여 600 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 3일과 7일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 것이다. 3일에 비해 7일 동안 노출한 시멘트에서 초기에 급격한 수화와 carbonation으로 인하여 사라진 $Ca_2(SiO_4)$ 가 다시 생성된 것으로 나타났다.

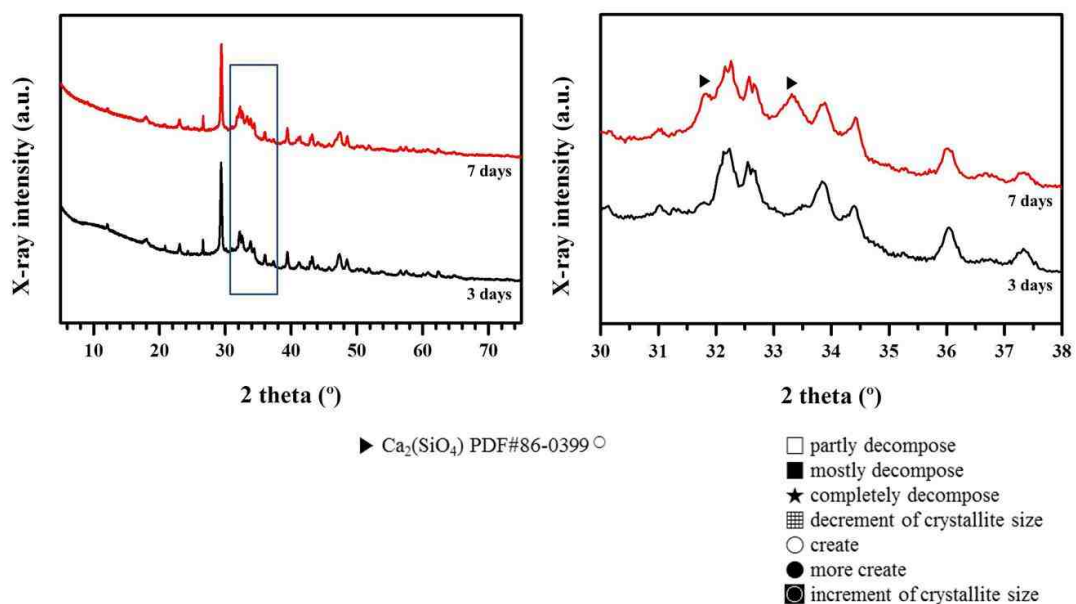


그림 3.2.37 600 °C로 열처리 후 3일과 7일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.38은 XRD를 이용하여 600 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 7일과 28일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다. 7일에 비해 28일 동안 노출한 시멘트에서 역시 Calcite (CaCO_3)의 양이 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다.

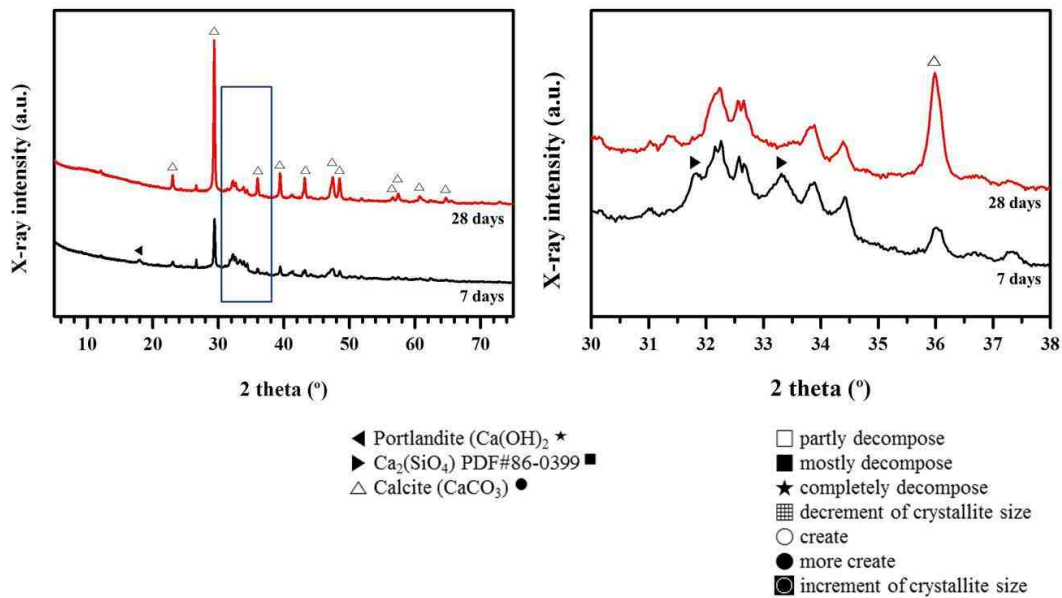


그림 3.2.38 600 °C로 열처리 후 7일과 28일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.39는 XRD를 이용하여 600 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 28일과 3개월 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 것이다.

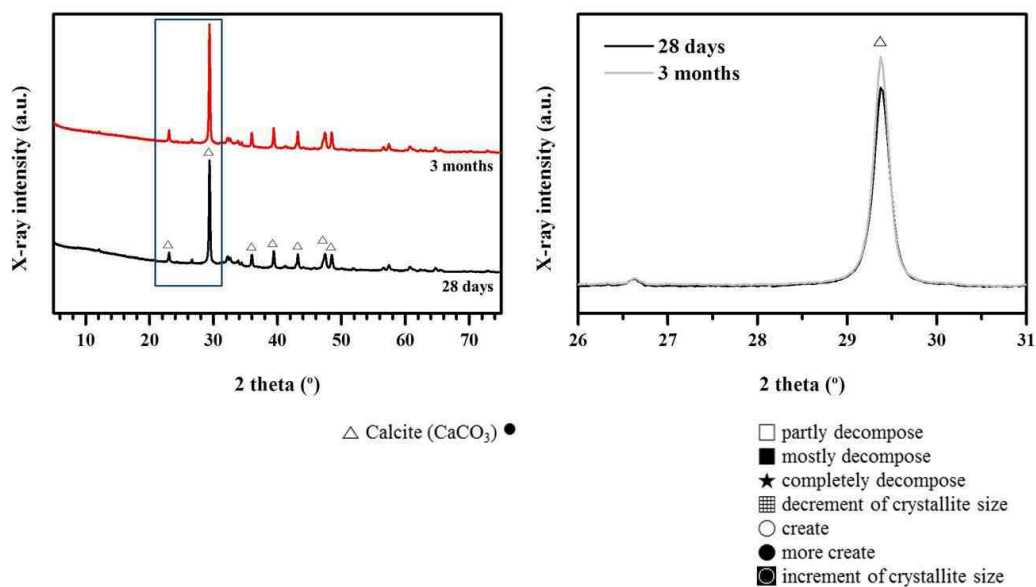


그림 3.2.39 600 °C로 열처리 후 28일과 3개월 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.39에서 확인할 수 있는 바와 같이 28일에 비해 3개월 동안 노출한 시멘트에서 공

기 중의 CO₂로 인한 지속적인 Carbonate 반응으로 Calcite (CaCO₃)의 꾸준히 증가하는 것으로 나타났다.

그림 3.2.40은 XRD를 이용하여 600 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 3개월과 6개월 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다. 3개월에 비해 6개월 동안 노출한 시멘트에서는 Calcite (CaCO₃)가 감소하고 Vaterite가 증가하는 것으로 나타났다.

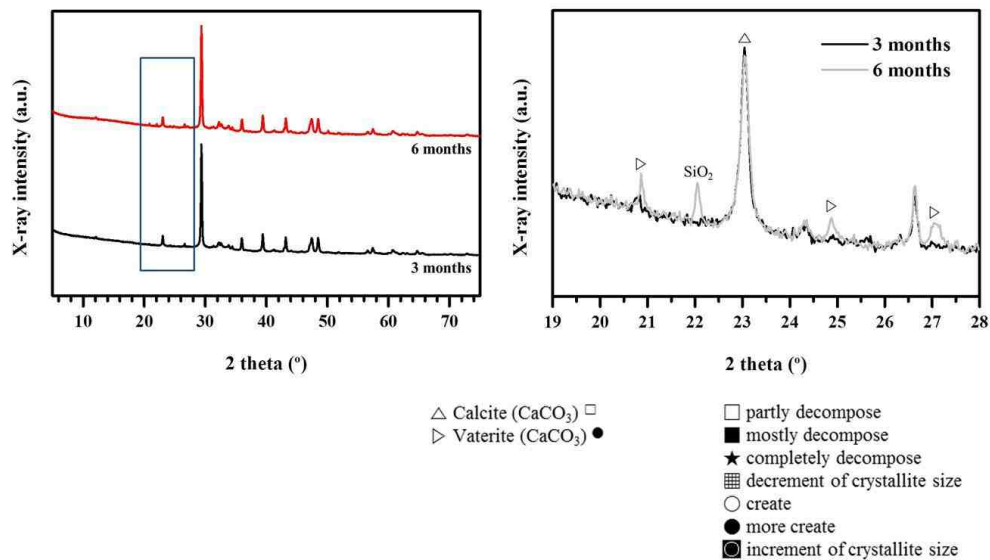


그림 3.2.40 600 °C로 열처리 후 3개월과 6개월 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.41은 XRD를 이용하여 700 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 1일과 3일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

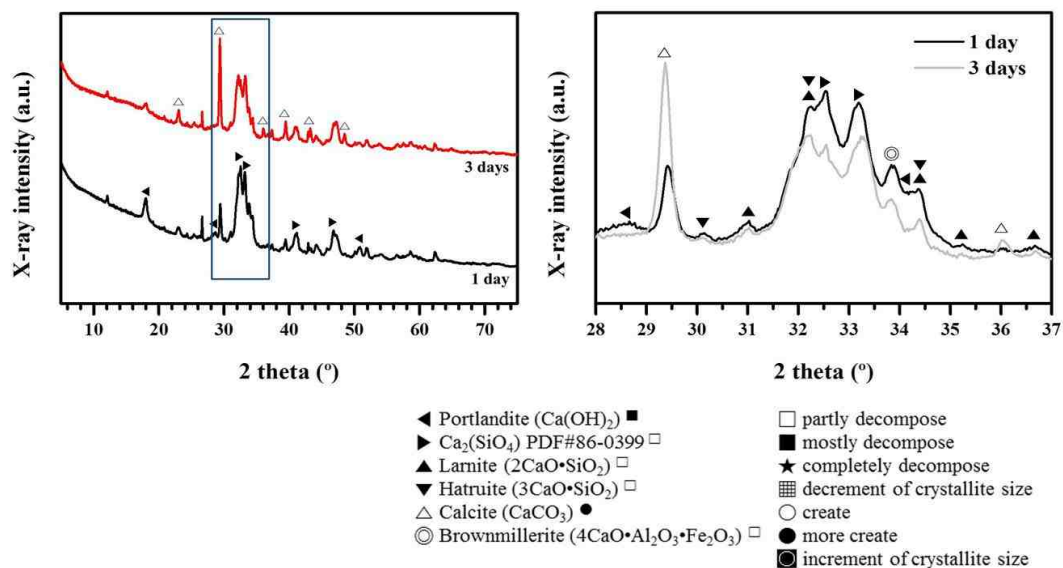


그림 3.2.41 700 °C로 열처리 후 1일과 3일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.41에서 1일에 비해 3일 동안 노출한 시멘트에서 공기 중의 H_2O 와 CO_2 로 인하여 Portladite($Ca(OH)_2$), $Ca_2(SiO_4)$, Larnite($2CaO \cdot SiO_2$), Hatruite ($3CaO \cdot SiO_2$), Brownmillerite 가 감소하였고, carbonation을 통하여 Calcite ($CaCO_3$)는 생성되는 것으로 나타났다.

그림 3.2.42는 XRD를 이용하여 700 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 3일과 7일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다. 3일에 비해 7일 동안 노출한 시멘트에서 지속적인 carbonation으로 인하여 Calcite ($CaCO_3$)가 더 생성되었다.

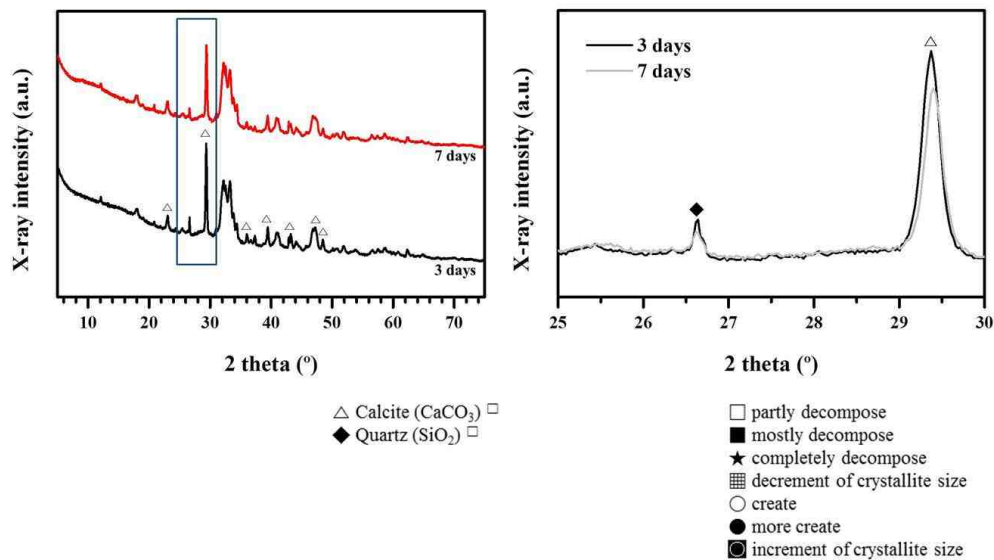


그림 3.2.42 700 °C로 열처리 후 3일과 7일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.43은 XRD를 이용하여 700 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 7일과 28일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

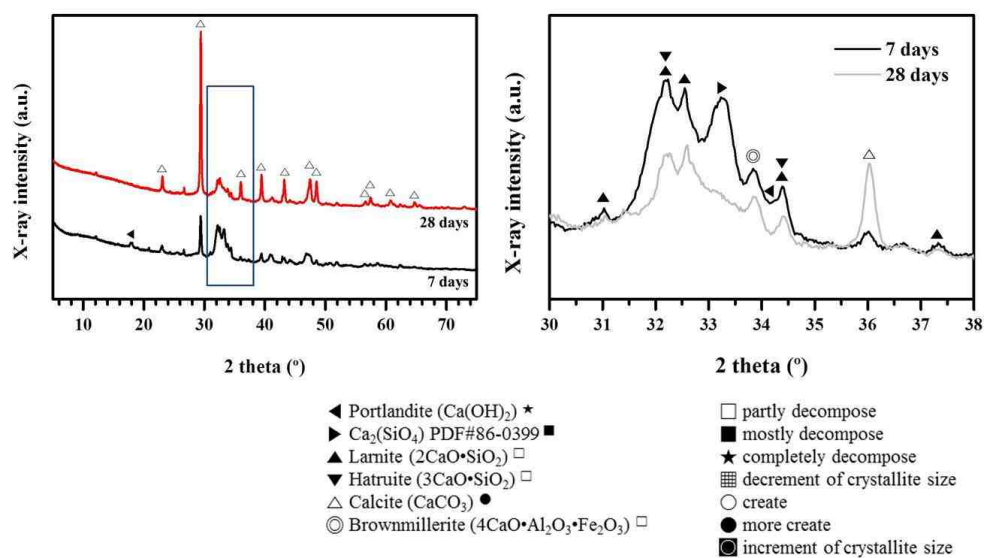


그림 3.2.43 700 °C로 열처리 후 7일과 28일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.43에서 확인할 수 있는 바와 같이 7일에 비해 28일 동안 노출한 시멘트에서 역시 Portladite($\text{Ca}(\text{OH})_2$), $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$, Larnite($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), Hatruite($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), Brownmillerite가 감소하였고, Calcite (CaCO_3)는 증가하는 것으로 나타났다.

그림 3.2.44는 XRD를 이용하여 700 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 28일과 3개월 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 것이다.

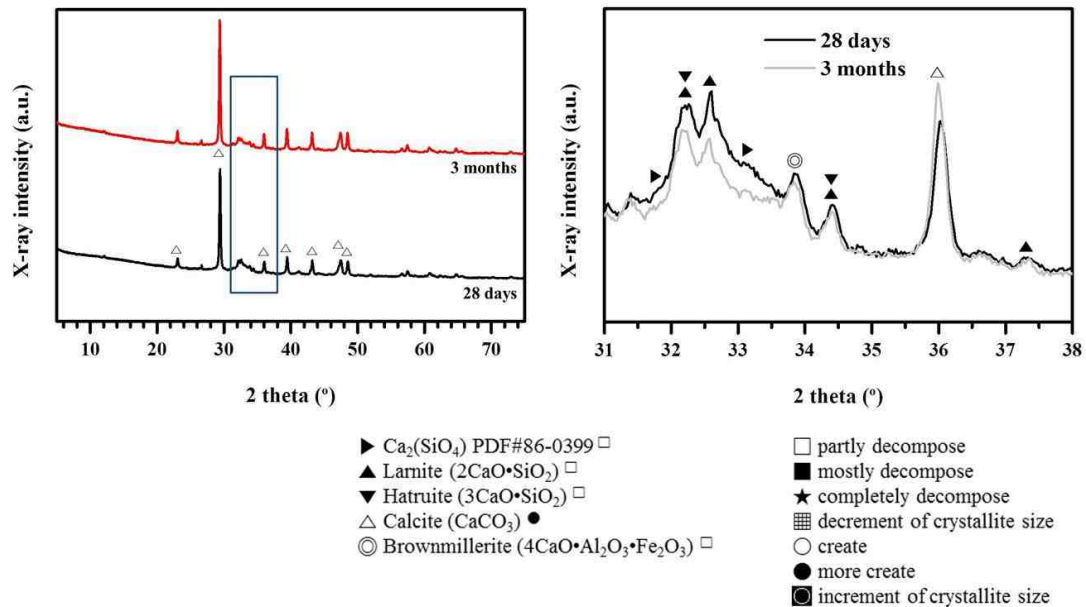


그림 3.2.44 700 °C로 열처리 후 28일과 3개월 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.44에서 확인할 수 있는 바와 같이 시간이 지나면서 $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$, Larnite($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), Hatruite($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), Brownmillerite가 감소하였고, Calcite (CaCO_3)는 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

그림 3.2.45은 XRD를 이용하여 700 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 3개월과 6개월 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다. 3개월에 비해 6개월 동안 노출한 시멘트에서 이전에 생성된 Calcite (CaCO_3)가 안정화 되면서 다시 $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ 와 Hatruite ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)로 소량 변화 된 것으로 나타났다.

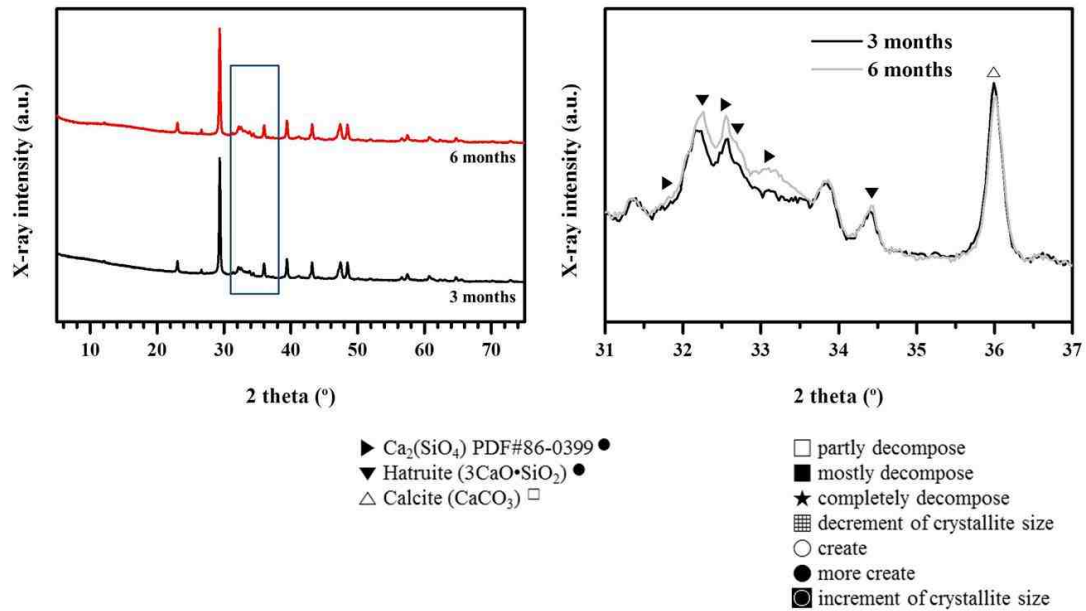


그림 3.2.45 700 °C로 열처리 후 3개월과 6개월 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.46은 XRD를 이용하여 800 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 1일과 3일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

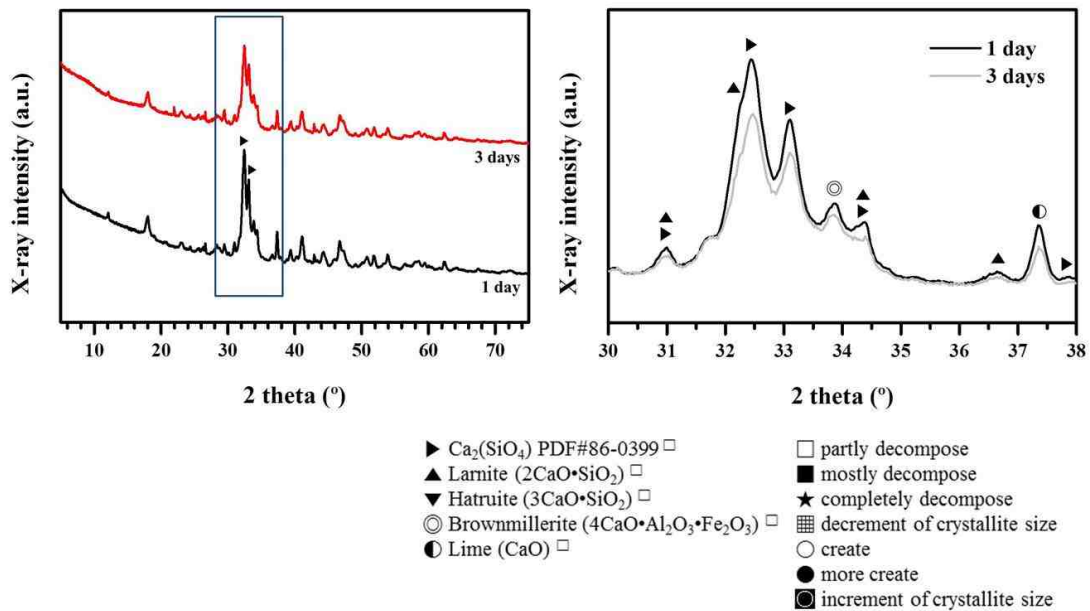


그림 3.2.46 800 °C로 열처리 후 1일과 3일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.46에서 확인할 수 있는 바와 같이 1일에 비해 3일 동안 노출한 시멘트에서 고온 열처리로 구조가 약해져 있는 상태에서 공기 중의 H_2O 와 CO_2 로 인하여 $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$, Larnite($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), Hatruite ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), Brownmillerite, Lime(CaO)의 구조가 붕괴된 것으로 나타났다.

그림 3.2.47은 XRD를 이용하여 800 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 3일과 7일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

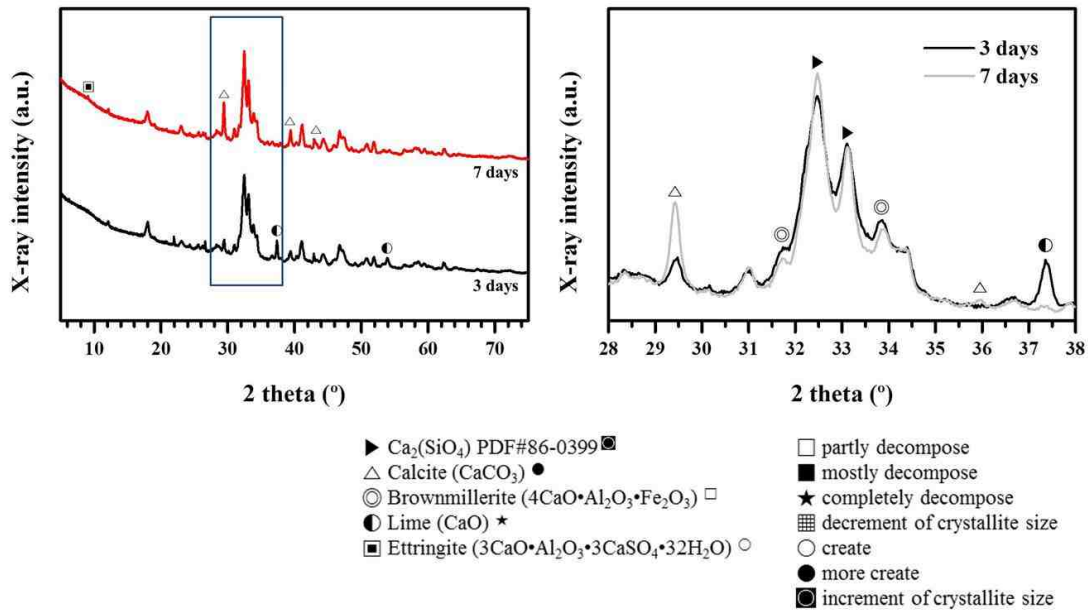


그림 3.2.47 800 °C로 열처리 후 3일과 7일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

시간이 경과하면서 Brownmillerite과 Lime(CaO)이 감소하였고, Calcite (CaCO_3)는 생성되는 것을 확인 할 수 있었다. 특히, Lime은 거의 사라졌다. $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ 는 초기에 급격한 구조 붕괴 후 천천히 안정화 되면서 결정화 과정을 거쳐 결정 크기(crystallite size)가 커진 것으로 나타났고, DEF 반응으로 Ettringite가 일시적으로 생성된 것을 확인할 수 있었다.

그림 3.2.48은 XRD를 이용하여 800 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 7일과 28일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 것이다. 그림 3.2.48에서 확인할 수 있는 바와 같이 7일에 비해 28일 동안 노출한 시멘트에서 공기 중의 H_2O 와 CO_2 로 인하여 Portladite($\text{Ca}(\text{OH})_2$), $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$, Larnite($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), Hatruite($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), Brownmillerite가 감소하였고, Calcite (CaCO_3)는 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 특히, Brownmillerite는 결정 크기(crystallite size)의 감소가 일어나고 Portlandite는 XRD 패턴 상으로 사라진 것으로 나타났다. 지속적인 수화로 인하여 일시적으로 생성된 Ettringite는 배위수 이상의 수분을 함유함에 따라 구조 붕괴로 사라진 것으로 나타났다.

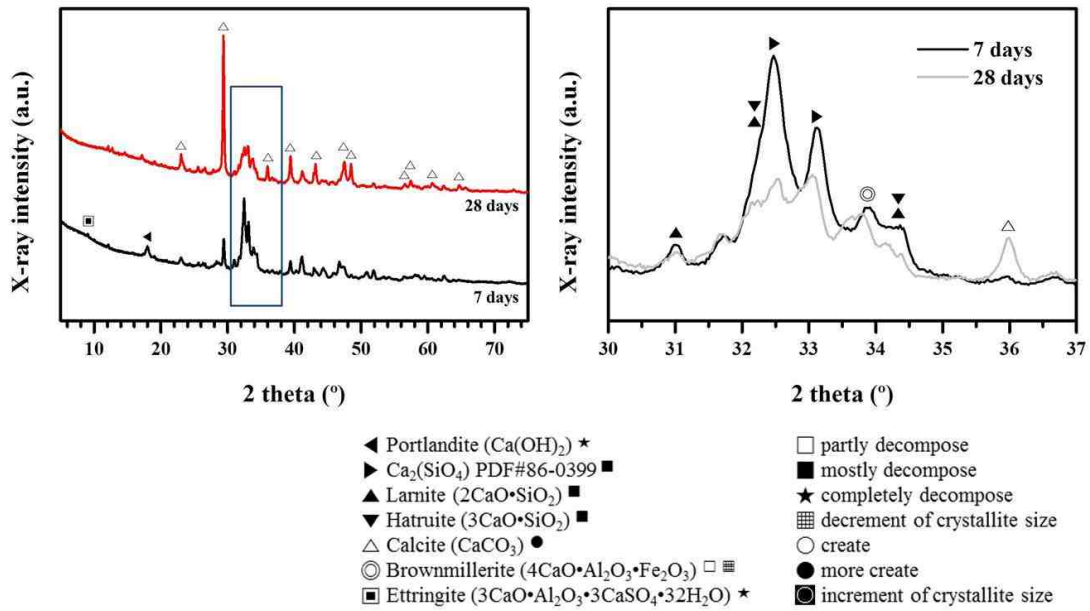


그림 3.2.48 800 °C로 열처리 후 7일과 28일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.49는 XRD를 이용하여 800 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 28일과 3개월 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

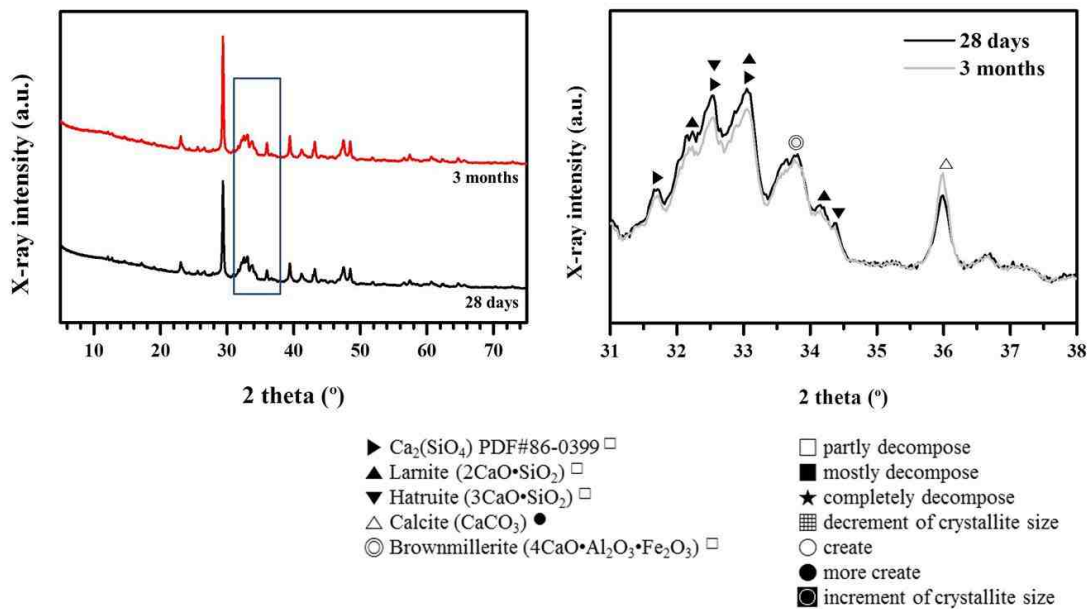


그림 3.2.49 800 °C로 열처리 후 28일과 3 개월동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.49에서 확인할 수 있는 바와 같이 28일에 비해 3개월 동안 노출한 시멘트에서 공기 중의 H_2O 와 CO_2 로 인하여 $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$, Larnite($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), Hatruite($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), Brownmillerite가 감소하였고, Calcite (CaCO_3)는 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

그림 3.2.50은 XRD를 이용하여 800 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 3개월과 6개월 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 것이다. 역시 $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$, Larnite($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), Brownmillerite가 감소하였고, Calcite (CaCO_3)는 증가하는 것을 확인할 수 있었다. $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ 는 피크 폭이 증가하는 것으로부터 결정 크기(crystallite size)가 감소하고 Larnite는 XRD 패턴이 거의 사라진 것으로부터 구조가 붕괴된 것을 판단할 수 있었다.

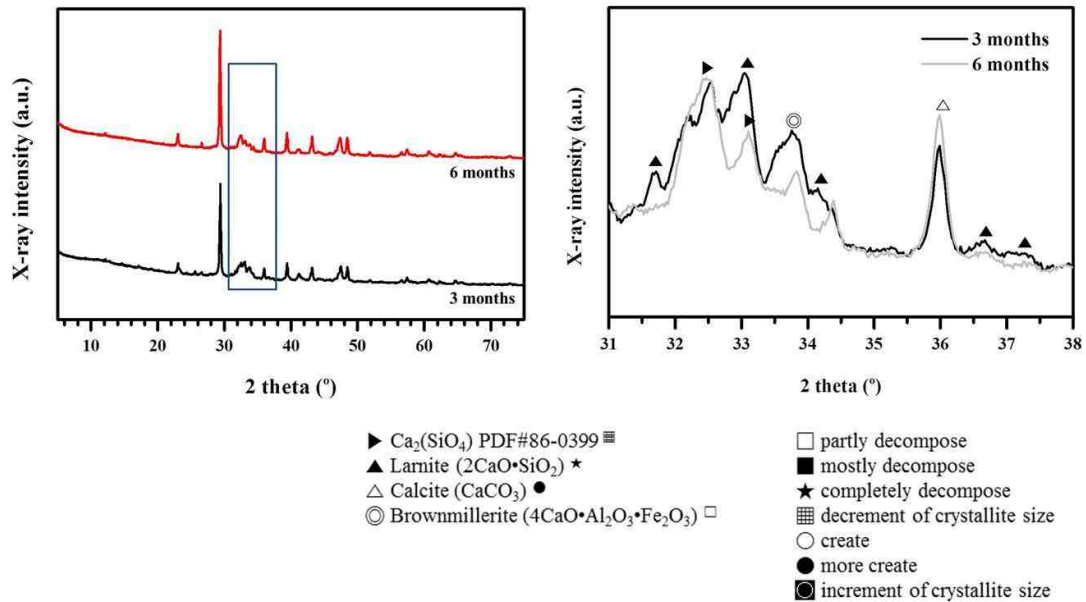


그림 3.2.50 800 °C로 열처리 후 3개월과 6개월 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.51은 XRD를 이용하여 900 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 1일과 3일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 것이다.

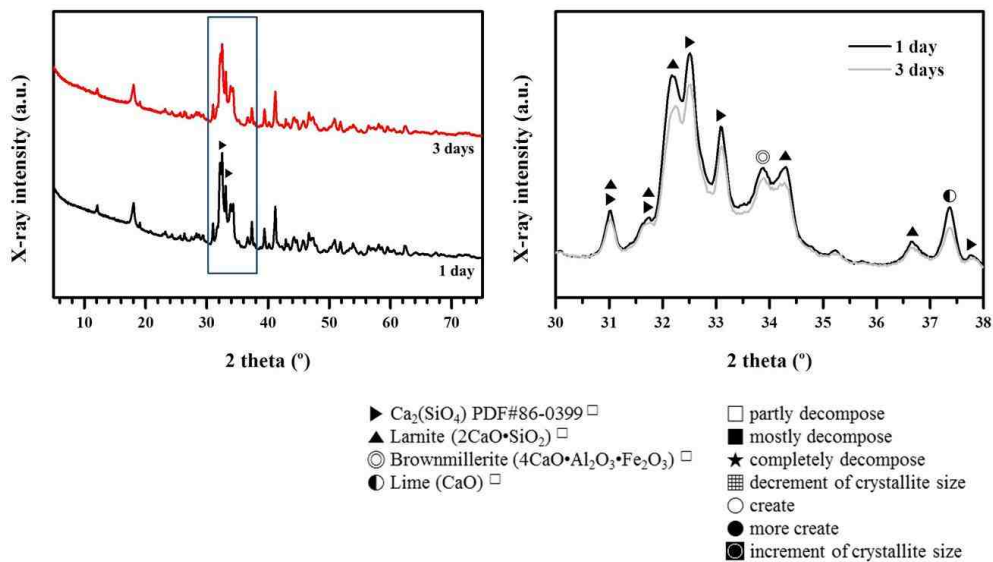


그림 3.2.51 900 °C로 열처리 후 1일과 3일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.51에서 확인할 수 있는 바와 같이 1일에 비해 3일 동안 노출한 시멘트에서 고온 열처리로 구조가 약해져 있는 상태에서 공기 중의 H₂O의 흡수로 Ca₂(SiO₄), Larnite(2CaO•SiO₂), Brownmillerite, Lime(CaO)의 구조가 붕괴된 것으로 나타났다.

그림 3.2.52는 XRD를 이용하여 900 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 3일과 7일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

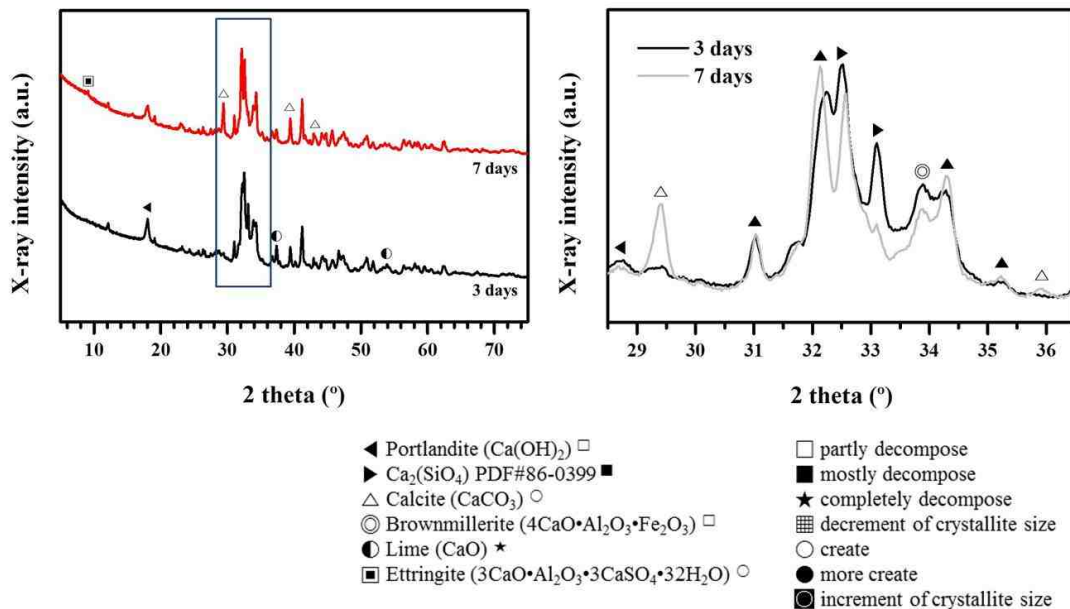


그림 3.2.52 900 °C로 열처리 후 3일과 7일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.52에서 확인할 수 있는 바와 같이 3일에 비해 7일 동안 노출한 시멘트에서 Portlandite(Ca(OH)₂), Ca₂(SiO₄), Brownmillerite과 Lime(CaO)이 감소하였고, Calcite(CaCO₃)는 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 또한, DEF 반응으로 Ettringite가 일시적으로 생성되는 것으로 나타났다.

그림 3.2.53은 XRD를 이용하여 900 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 7일과 28일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다. 그림 3.2.53에서 확인할 수 있는 바와 같이 7일에 비해 28일 동안 노출한 시멘트에서 Portlandite(Ca(OH)₂), Ca₂(SiO₄), Larnite(2CaO•SiO₂), Brownmillerite가 감소하였고, Calcite (CaCO₃)는 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. Portlandite와 Ca₂(SiO₄)는 XRD 패턴 상에서 사라진 것으로 나타났다. 지속적인 수화로 인하여 일시적으로 생성된 Ettringite 역시 배위수 이상의 수분을 함유함에 따라 구조 붕괴로 사라진 것을 확인할 수 있었다.

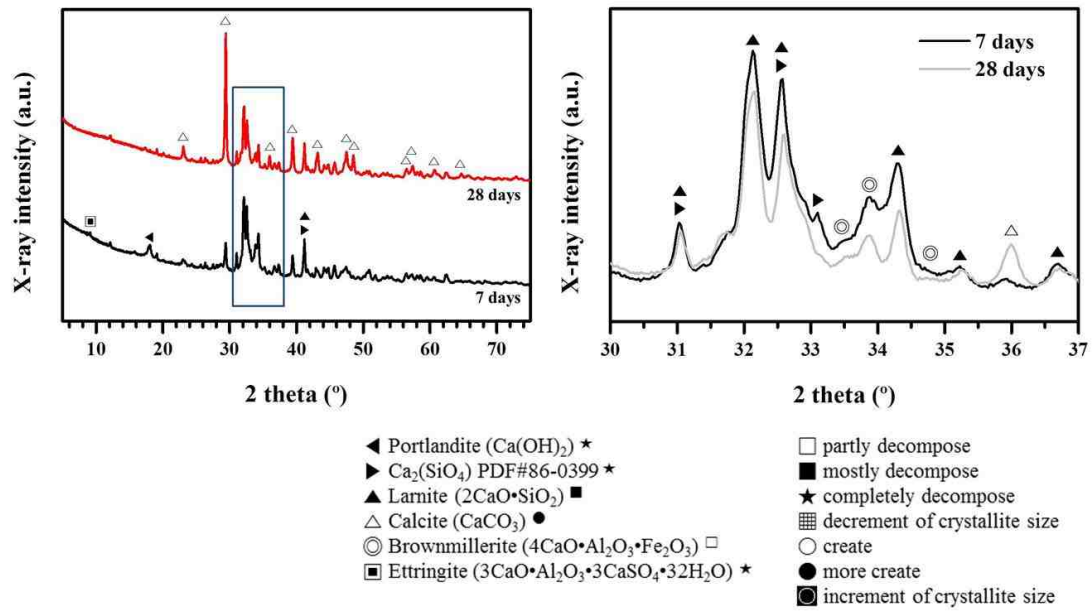


그림 3.2.53 900 °C로 열처리 후 7일과 28일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.54는 XRD를 이용하여 900 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 28일과 3개월 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

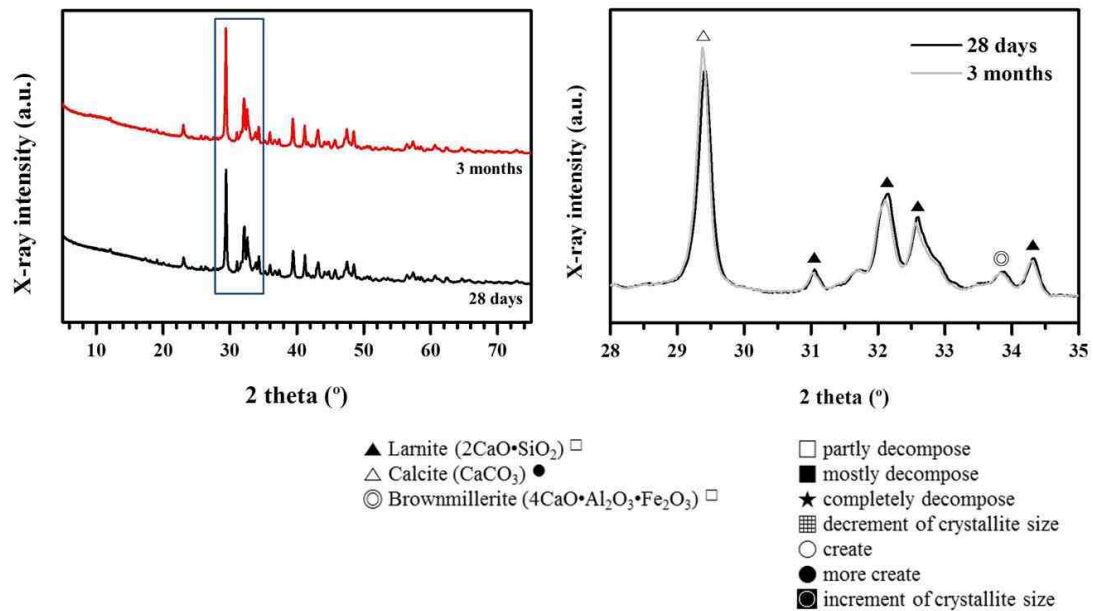


그림 3.2.54 900 °C로 열처리 후 28일과 3개월 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

시간경과에 따라 Larnite($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), Brownmillerite는 감소하였고, Calcite (CaCO_3)는 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

그림 3.2.55는 XRD를 이용하여 900 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 3개월과 6개월 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

역시 Larnite($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), Brownmillerite가 감소하였고, Calcite (CaCO_3)는 증가하였다. Larnite는 결정 크기(crystallite size)가 감소하였고, $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ 의 XRD 패턴 증가로부터 Larnite 구조 중 일부가 $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ 로 변형 된 것을 확인할 수 있었다.

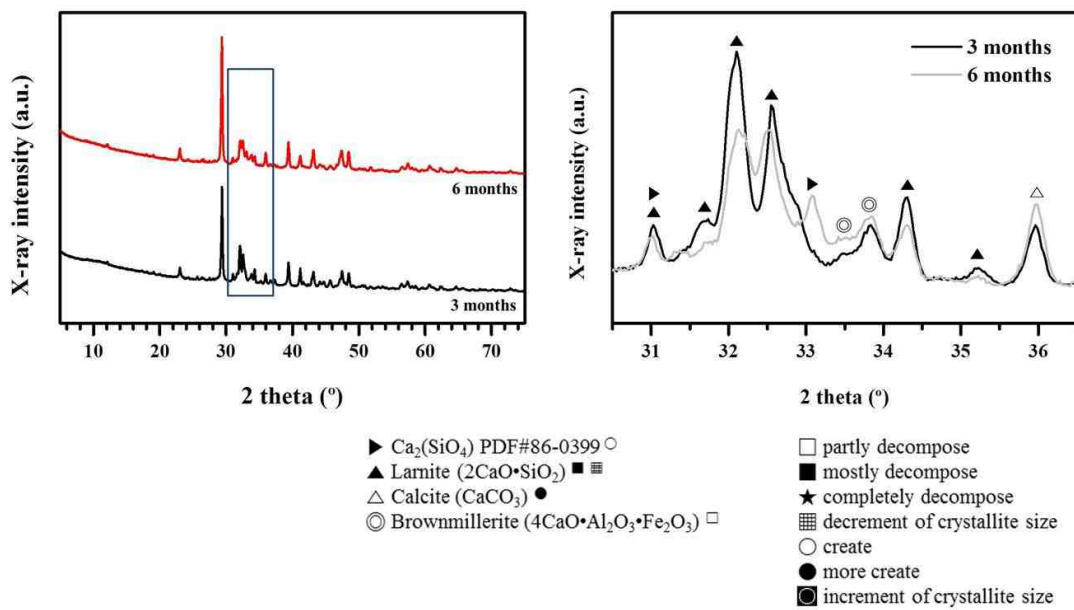


그림 3.2.55 900 °C로 열처리 후 3개월과 6개월 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.56은 XRD를 이용하여 1000 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 1일과 3일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 것이다.

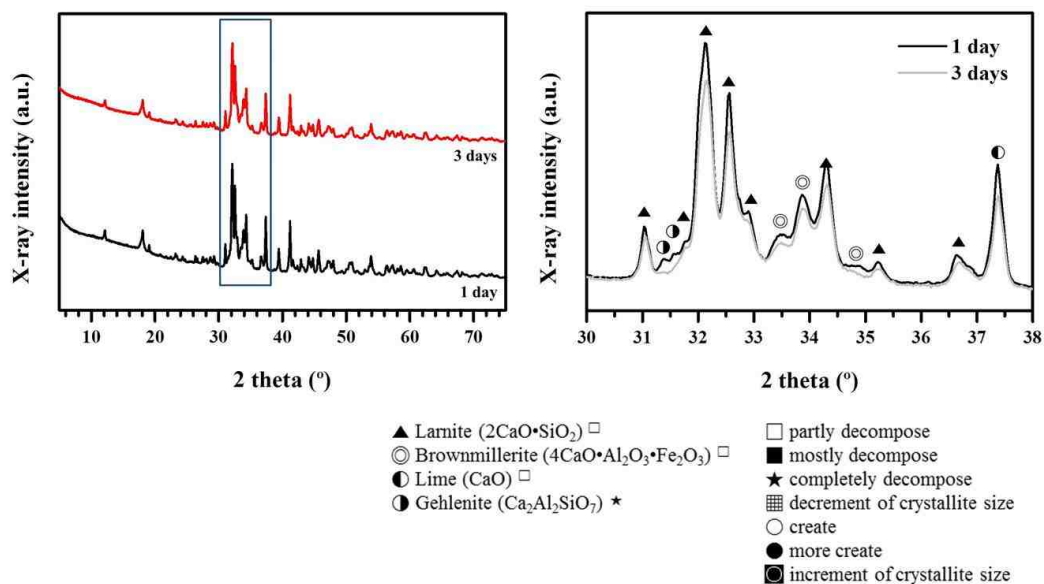


그림 3.2.56 1000 °C로 열처리 후 1일과 3일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.56에서 확인할 수 있는 바와 같이 1일에 비해 3일 동안 노출한 시멘트에서 고온 열처리로 구조가 약해져 있는 상태에서 공기 중의 H₂O의 흡수로 Larnite(2CaO•SiO₂), Brownmillerite, Lime(CaO), Gehlemite (Ca₂Al₂SiO₇)의 구조가 붕괴된 것으로 나타났다.

그림 3.2.57은 XRD를 이용하여 1000 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 3일과 7일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

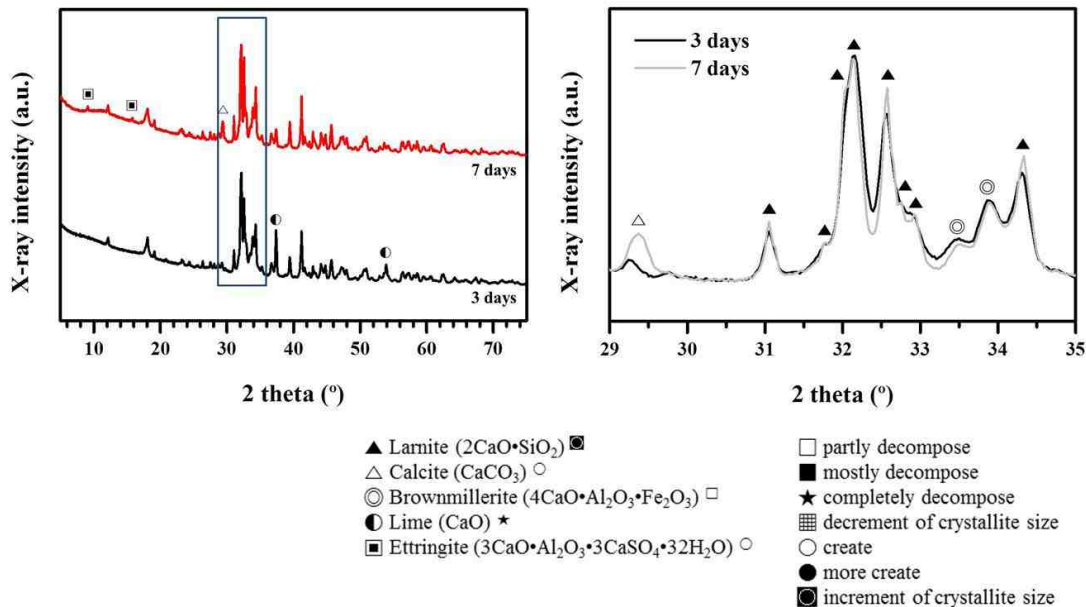


그림 3.2.57 1000 °C로 열처리 후 3일과 7일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.57에서 확인할 수 있는 바와 같이 시간경과에 따라 Brownmillerite과 Lime(CaO)이 감소하면서 Calcite(CaCO₃)가 생성되는 것을 확인 할 수 있었다. 특히, Lime은 거의 사라진 것을 확인할 수 있었으며, Larnite (2CaO•SiO₂)는 피크 폭이 좁아지는 것으로부터 초기에 급격한 구조 붕괴 후 천천히 안정화 되어서 결정 크기(crystallite size)가 커진 것을 확인할 수 있었다. DEF 반응에 기인하여 Ettringite가 일시적으로 생성된 것을 확인할 수 있었다.

그림 3.2.58은 XRD를 이용하여 1000 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 7일과 28일 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 결과를 나타낸 것이다.

7일에 비해 28일 동안 노출한 시멘트에서 Portladite (Ca(OH)₂), Larnite (2CaO•SiO₂), Brownmillerite가 감소하면서 Calcite(CaCO₃)가 생성되는 것을 확인 할 수 있었다. 특히, Portandite는 XRD 패턴 상으로 사라진 것으로 나타났다. Ettringite는 사라지는 것으로 나타났다.

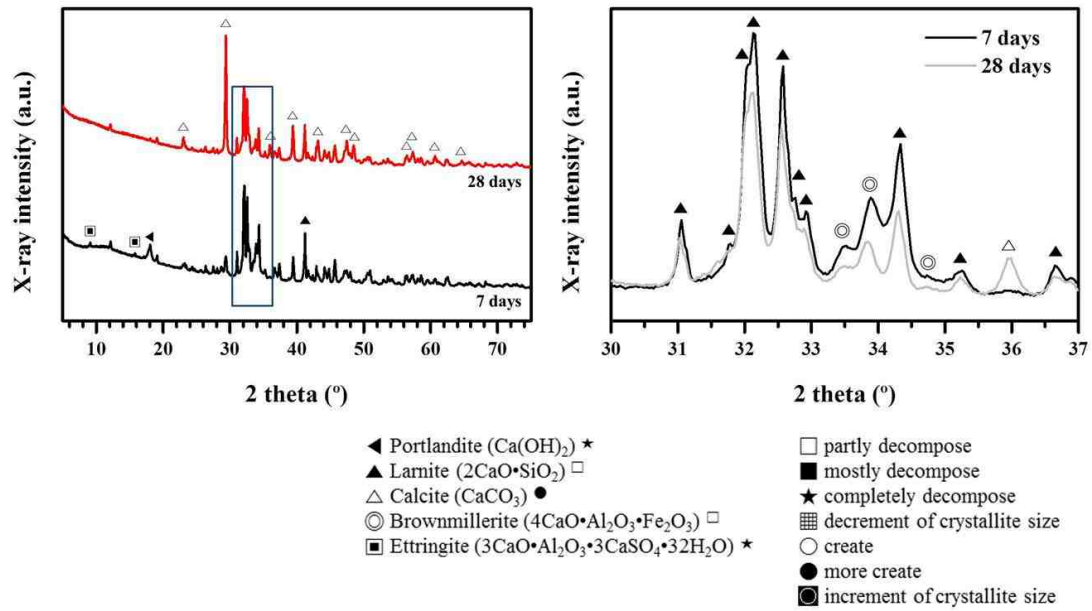


그림 3.2.58 1000 °C로 열처리 후 7일과 28일 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.59는 XRD를 이용하여 1000 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 28일과 3개월 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 것이다.

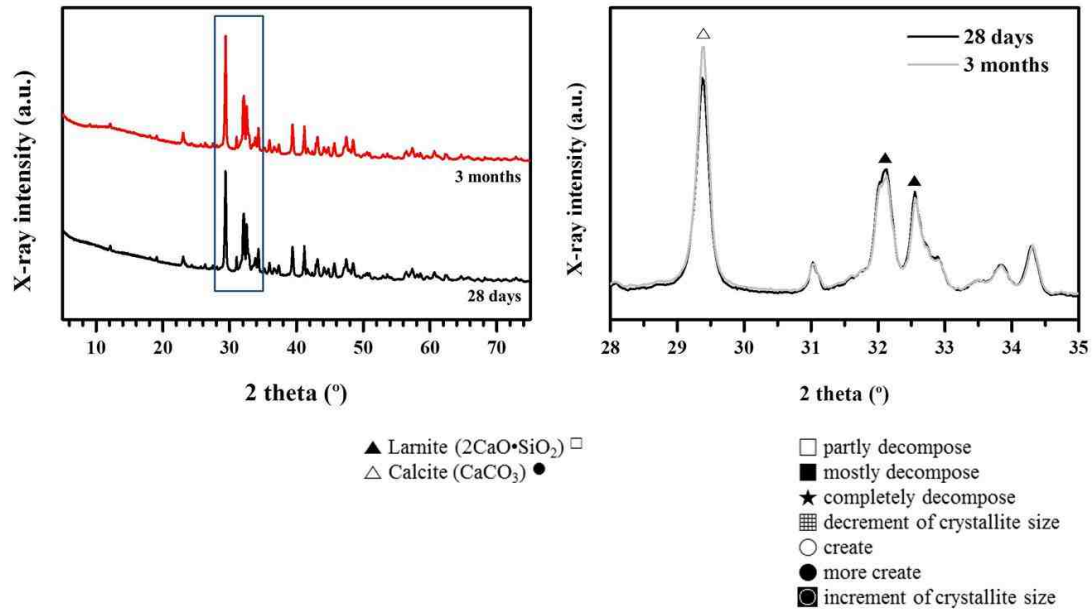


그림 3.2.59 1000 °C로 열처리 후 28일과 3개월 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

그림 3.2.59에서 확인할 수 있는 바와 같이 Larnite ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)가 감소하였고, Calcite (CaCO_3)는 생성되는 것으로 나타났다.

그림 3.2.60은 XRD를 이용하여 1000 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 3개월과 6개월 노출시킨 샘플간의 XRD 패턴을 비교한 것이다.

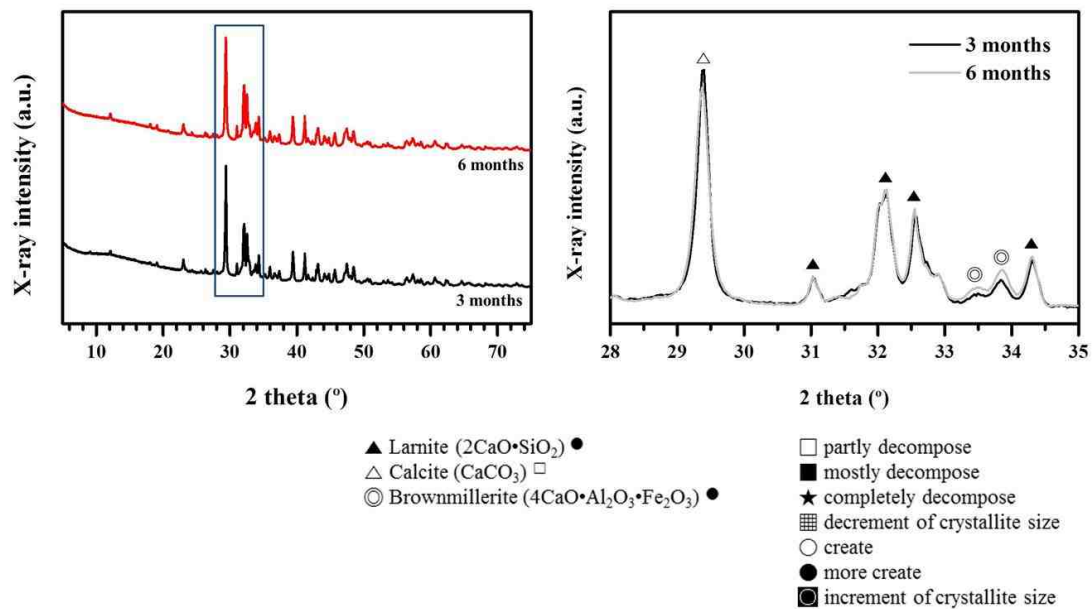


그림 3.2.60 1000 °C로 열처리 후 3개월과 6개월 동안 노출된 시멘트의 XRD 패턴 비교

시간이 경과함에 따라 Calcite (CaCO_3)의 XRD 패턴이 감소하였고, Larnite ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)와 Brownmillerite는 XRD 패턴이 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 이전에 생성된 Calcite (CaCO_3)가 안정화 되면서 다시 Larnite ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)와 Brownmillerite로 소량 변화 된 것에 기인한 것으로 판단된다.

2-3 XRF (X-ray fluorescence) 분석

가. 화재노출 후 초기재령에서의 화학적 특성 변화

그림 3.2.61은 시멘트 경화체를 1000 °C까지 100 °C 단위로 가열한 각각의 시멘트 샘플을 XRF 분석장비를 이용하여 시멘트 내의 Ca의 함량을 측정하여 온도별 변화량을 나타낸 것이다. XRF 분석장비는 원소에 대한 함량을 산화물을 기준으로 측정하기 때문에 Ca의 함량은 CaO로 표현 된다. 따라서 실제 시멘트에 CaO의 구조가 증가한 것은 아니지만, 화재피해온도를 예측하는데 필요한 정보를 줄 수 있을 것으로 판단된다.

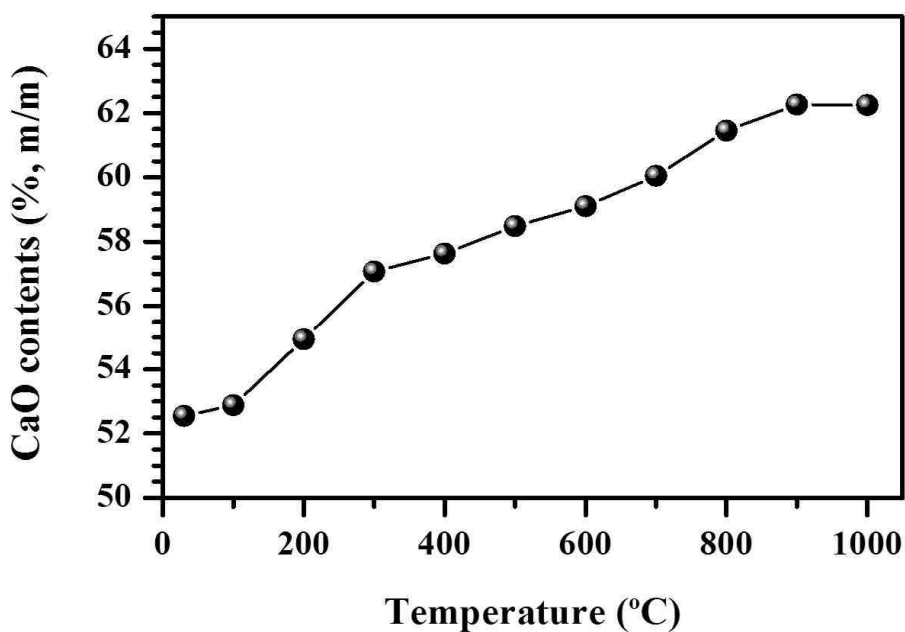


그림 3.2.61 XRF 분석법을 이용한 열처리 온도별 시멘트 내 CaO 함량 변화

즉, 그림 3.2.61에서 확인할 수 있는 바와 같이 열처리한 온도가 증가 할수록 시멘트 내의 CaO의 함량이 증가 하는 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 열처리를 통하여 Ca의 양이 증가한 것으로 표현되는데 실제적으로는 Ca의 양은 변화가 없고 열분해로 인하여 시멘트 전체의 무게가 줄어들면서 상대적으로 Ca의 양의 증가한 것처럼 나타난 것으로 분석된다.

나. 화재노출 후 시간 경과에 따른 후기재령에서의 화학적 특성 변화

그림 3.2.62는 시멘트 경화체를 1000 °C까지 100 °C 단위로 가열한 각각의 시멘트 샘플을 상온 하에서 대기 중에 3개월까지 노출시킨 후 Ca함량을 분석한 것이다.

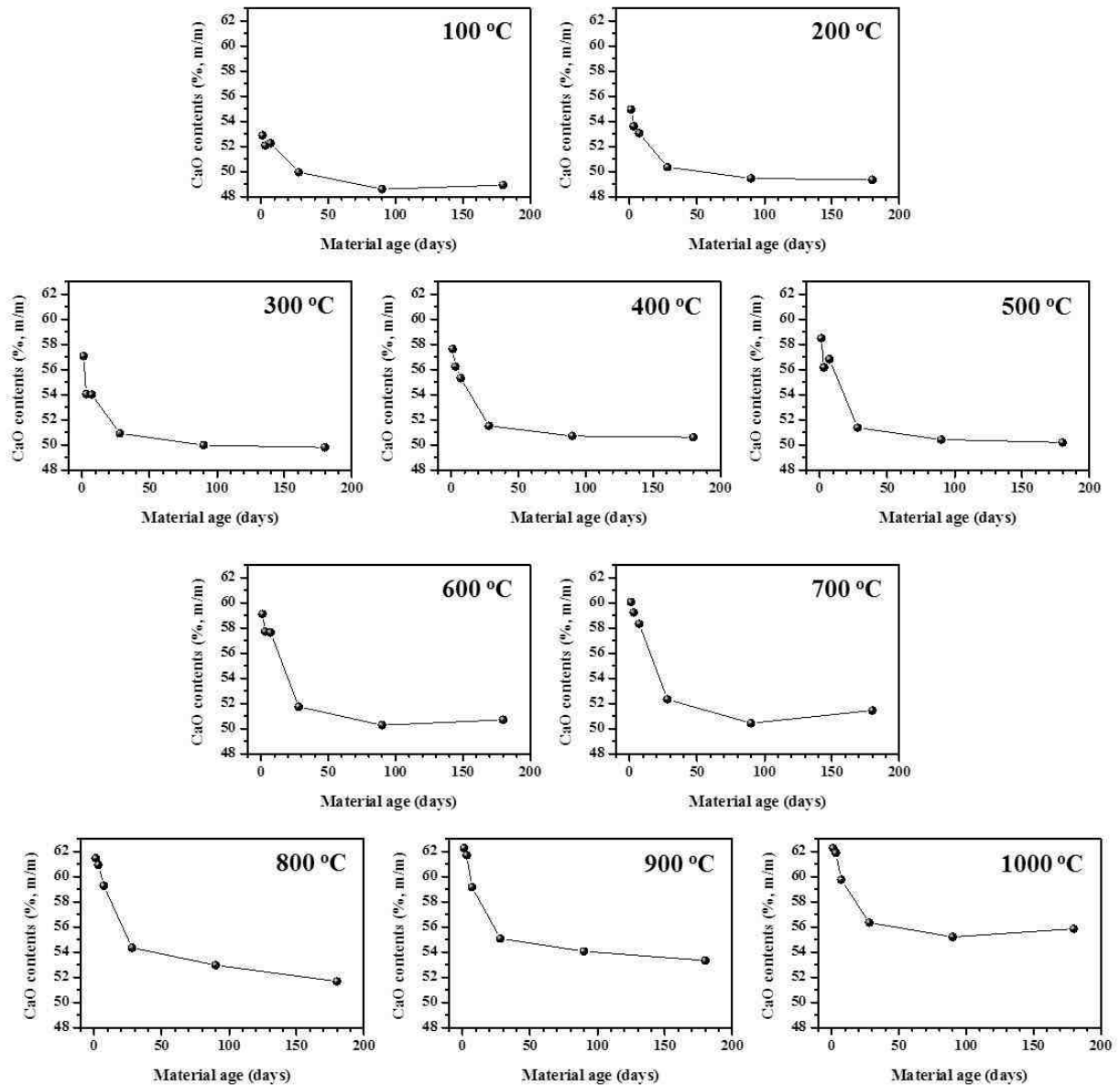


그림 3.2.62 XRF 분석법을 이용한 온도별 열처리 후 노출 후 시멘트 내 CaO 함량 변화

그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 모든 샘플이 노출 시간이 증가 할수록 CaO 함량이 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 대기 중, 상온 하에서 노출 시 주변에 존재하는 H_2O 와 CO_2 가 시간이 지남에 따라 흡수되면서 시멘트의 무게가 단위 부피당 증가하여 상대적으로 Ca의 양이 줄어들음에 따라 나타난 것으로 분석된다. 이러한 H_2O 와 CO_2 에 의한 반응이 진행되는 것은 앞 섹션에서 분석한 XRD 결과에서도 확인할 수 있었다.

또한, CaO의 함량 변화를 보면 모든 샘플이 전반적으로 28일 안에 큰 변화를 가지는 것을 확인할 수 있는데, 화재조사시 이를 참고하여 분석을 진행해야 될 것으로 판단된다.

2-4 NMR (Nuclear magnetic resonance) 분석

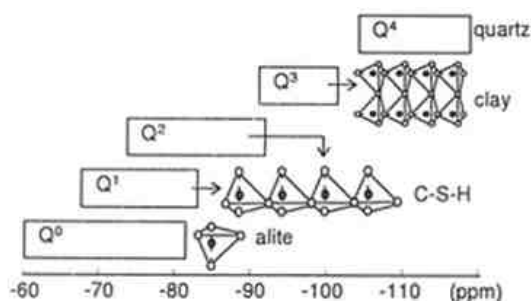
고온의 피해를 입은 시멘트 경화체를 대상으로 NMR 분석을 다소 생소한데, NMR의 측정원리 및 결과의 표현 및 의미를 살펴보면 다음과 같다.

● NMR 결과의 표현 방법

NMR의 측정결과는 통상적으로 Q^n 으로 표현한다. 여기서 Q는 silicon tetrahedron이 4개의 산소원자와 결합되어 있음을 의미하고, n은 또 다른 SiO_4 tetrahedron과 붙어있는 연결 수를 나타낸다. SiO_4 가 각각의 Si 센터와 연결돼 있는 숫자의 증가는 Si 주변의 평균 전자 밀도가 증가하는 것을 의미한다. 이때, tetramethylsilane (TMS)와 비교하여 chemical shift가 마이너스 방향으로 좀 더 이동하는 결과를 나타낸다.

※ tetramethylsilane (TMS)는 $Si(CH_3)_4$ 구조의 완전 대칭성 화합물로 모든 메틸기가 핵자기공명에서 1개의 흡수선을 나타내기 때문에 NMR 스펙트럼 상의 횡축 표준물질로서 사용한다. 즉, TMS의 위치를 0ppm으로 나타낸다. 따라서 Si를 포함한 물질을 분석할 경우 표준물질 대비 구조 변화에 따라 shift가 발생되므로 그 값을 비교분석하여 화학변화 정도를 확인할 수 있다.

● 실리케이트의 ^{29}Si chemical shift 범위



위 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 ^{29}Si MAS NMR 분석은 C-S(A)-H의 특징 (characterization of C-S-H or C-A-H)을 확인할 수 있으므로 시멘트 경화체의 화재 피해 조사에서 유용하게 활용될 수 있음

● 시멘트의 화학성분 분석을 위해 NMR 장비를 선택한 이유

- 시멘트 수화물 중 강도발현에 99% 역할을 수행하고 있는 C-S-H ($CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$)가 화재피해온도변화에 따라 어떤 거동특성을 나타내는지 규명할 수 있는 유일한 정밀 분석장비에 해당됨

● 본 연구에서 수행한 NMR 실험 방법

- NMR 장비는 Bruker Solid State 400MHz WB (Wide Bore) NMR Spectrometer, 7 mm probe (MAS=5kHz, 30도 pulse, 10 초 delay time, in KARA)를 사용하였음
- 샘플 준비: 샘플을 마노유발세트 등을 이용하여 분쇄한 후 Sieve를 이용하여 아주 고운 미분쇄 파우더 5g 준비): 150mesh/in sieve
- probe tube안에 전처리한 샘플을 넣어서 초전도체 중심에 삽입 (자기장 세기: 9.4 tesla)
- sample spinning: Magic angle spinning (MAS) 54.7도 자기장 방향과 기울여서 고속 회전함. 본실험에서는 초당 5000번 회전함. mas speed 5kHz
- Magnetic pulse (radio wave) on/off <-- relaxation time 10초 (spin의 방향성이 생기면서 90도 회전했다가 돌아오는데 걸리는 시간을 고려하여 결정, key 영향인자에 해당)
- 90도 펄스의 경우 T1 relaxation time의 5배 시간을 주어야 하나 실험시간을 고려하여 30도 펄스에 10초의 시간간격으로 실험함
 - ※ 핵 Spin: 랜덤 (in 대기 중) --> 자하발생, 즉 상하 두 분류로 나뉘어 정렬상태로 회전 (in 초전도체에 노출, 이때 각각의 핵의 spin 속도와 방향이 각각 다름) --> 벡터의 방향성이 발생하며 한 방향으로 이동 (in Magnetic pulse on, ²⁹Si의 경우는 약 79MHz (at 9.4 Tesla)에서 공명이 일어남, 모든 핵의 spin이 동일하게 일정함) --> 원상태로 돌아오면서 유도기전력, 즉 에너지 방출 (in Magnetic pulse off)
- Free induction decay (time domain) sec -> fourier transform (frequency domain) 그래프 결과 산출 (단위: Hz)
 - ※ 3D상태에선 나선형으로 하부에서 상부로 점점 좁아지는 형식으로 표현, 2D 상태에서는 옆에서 관찰 할 때 상하 진동하며 왼쪽에서 오른쪽으로 좁아지는 형식으로 표현
- Fourier transform 적용 (단위 Hz)--> frequency domain 그래프 결과 산출
 - ※ Frequency 값 Hz은 자장의 세기마다 달라지므로 이때 실험에 사용된 초전도자석에서 물질의 고유한 공명 주파수(larmor frequency)로 측정값을 나눠주면 자장의 세기에 상관없이 ppm 단위로 표시함. Si의 경우 약 100 ppm 범위에서 peak 발생
 - ※ Fourier transform된 결과 값의 peak가 broad하면 해당 물질의 자유도가 크다는 것을 의미하고, 반대로 narrow해지면 해당 물질의 결정도가 크고, 물을 많이 포함하고 있음을 의미함

가. 화재노출 후 초기재령에서의 화학적 특성 변화

그림 3.2.63~3.2.65는 고온에 노출된 시멘트 경화체를 대상으로 온도조건별 (상온~1000°C) NMR 실험결과를 나타낸 것이다.

먼저 그림 3.2.63은 시멘트 경화체를 곱게 분쇄하여 NMR 장비의 초전도체 중심부에 삽입한 후 초당 5,000번의 회전속도로 돌리는 과정 중 Magnetic pulse를 on/off 반복하면서 얻은 진동 에너지를 Fourier transform시켜 얻은 결과이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 노출된 온도조건에 따라 해당 ppm에서의 intensity가 큰 차이를 나타내었는데, 샘플에 가해진 온도가 증가할수록 높은 네가티브 ppm은 줄어들고, 낮은 네가티브 ppm은 증가하는 것으로 나타났다. 네가티브 ppm의 증가는 중심부 Si를 둘러싼 전자의 밀도가 그 만큼 증가하는 것을 의미한다.

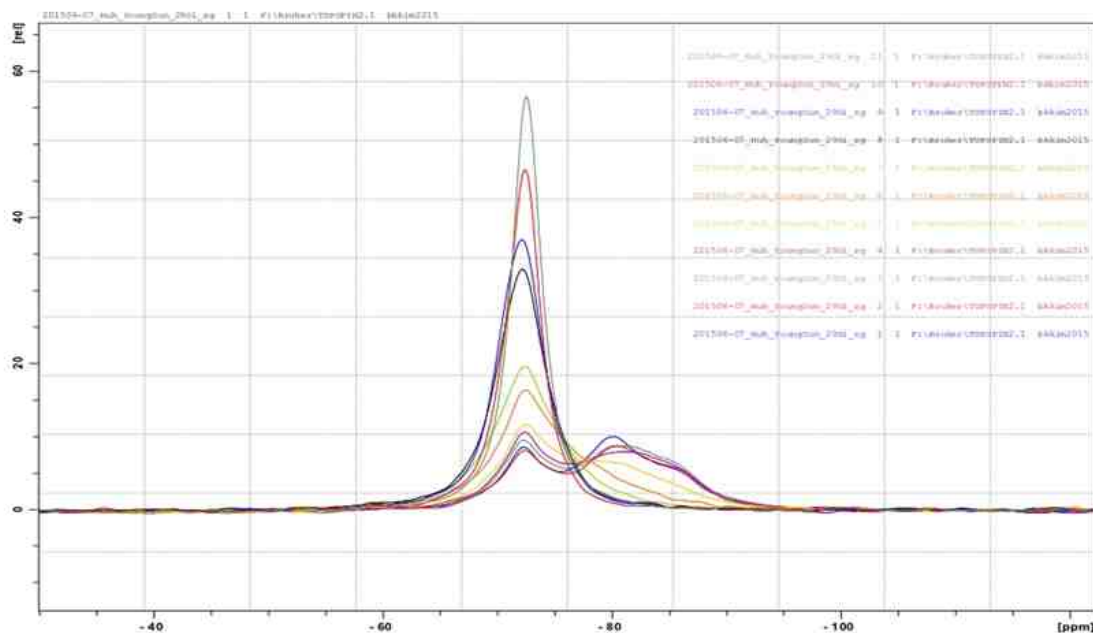


그림 3.2.63 온도조건 변화에 따른 NMR spectra

그림 3.2.64는 그림 3.2.63과 동일한 데이터를 가지고 Lorentzian distribution peak fitting을 통해 얻은 결과 값으로 $Q_0 \sim Q_4$ 에 걸쳐 분포되어 있는 각각의 center ppm의 면적을 %로 나타낸 것이다. 온도변화에 따른 ^{29}Si 의 chemical shift 현상을 좀 더 명확히 확인할 수 있다.

일반적으로 시멘트 생산 과정 중 Si는 물과 접촉되기 전 시멘트에 포함된 4대 클링커 광물에 다음과 같은 형태로 포함되어 있다.

- ① C_2S ($= 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)

- ② $C_3S (= 3CaO \cdot SiO_2)$
- ③ $C_3A (= 3CaO \cdot Al_2O_3)$
- ④ $C_4AF (= 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3)$

4대 클링커 광물은 석회석과 점토 등을 섞어서 고온에서 소성시키고 냉각시키는 과정에서 만들어지는데 C_2S 가 먼저 생성된 후 $1000^\circ C$ 이상의 더욱 높은 온도에서 그 중 일부가 C_3S 로 바뀌면서 2 가지 결합 형태로 상온에서 존재한다. 또한, 클링커 4대광물에서 확인할 수 있듯이 Si는 SiO_2 형태로 시멘트 분말가루에 포함되어 있다가 물과 반응하여 C-S-H 겔 상태로 콘크리트 속에 존재하면서 강도발현에 결정적인 역할을 수행한다.

그림 3.2.64에서 NMR Lorentzian distribution peak fitting 분석결과 Si는 결합 형태에 따라 아래와 같이 7가지 phase로 존재하는 것을 확인할 수 있다.

- ① -70 ppm (Q_0): C_2S type II
- ② -71 ppm (Q_0): C_2S type I
- ③ -74 ppm (Q_0): SiO_2
- ④ -78 ppm (Q_1): C-S-H (type II <-- low density)
- ⑤ -81 ppm (Q_2): C-A-H (단, Si가 Al에 의해 치환된 형태로 존재)
- ⑥ -84 ppm (Q_2): C-S-H (type I <-- high density)
- ⑦ -111 ppm (Q_4): Quartz

이러한 7가지 phase로 존재하는 Si 결합물은 그림 3.2.64에서 확인할 수 있듯이 온도 변화에 따라 구성비가 변하는데, C-S-H의 경우는 type I과 II 모두 contact point 감소로 결합력이 끊어지면서 $600^\circ C$ 에서 완전 소멸되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 C-S-H의 분해는 Si가 떨어져 나오면서 C_2S type II의 증가를 야기하였는데, C-S-H가 완전 소멸되는 $600^\circ C$ 에서 최고치를 기록하는 것으로 나타났고, 이후 점차 감소하면서 C_2S type I의 증가에 영향을 주었다. 실험종료 시점인 $1000^\circ C$ 에서 C_2S type I은 90% 이상의 면적 %를 기록하였다.

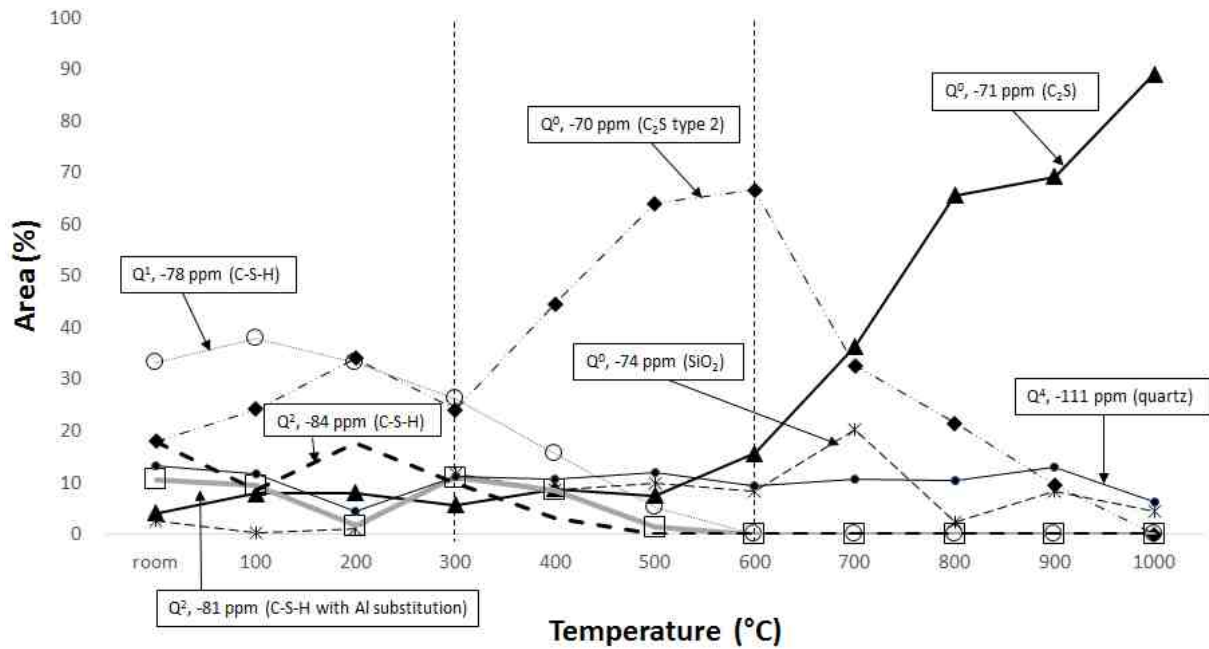


그림 3.2.64 온도변화에 따른 ^{29}Si chemical shift 결과
(Lorentzian distribution peak fitting을 적용)

그림 3.2.65는 그림 3.2.63과 그림 3.2.64와 동일한 데이터를 가지고 분석한 그래프로써 피해온도 조건별 ^{29}Si chemical shift에 의한 center ppm의 면적 % 변화를 한눈에 파악할 수 있도록 작업한 것이다. -78 ppm과 -71 ppm의 경향성이 가장 뚜렷하게 나타냈는데, 그림 3.2.65에서 분석한 바와 같이 -78 ppm의 경우 피해온도가 높을수록 면적 %가 점차 줄어드는 것으로 나타났고, -71 ppm의 경우는 반대로 점차 증가하는 경향을 나타냈다.

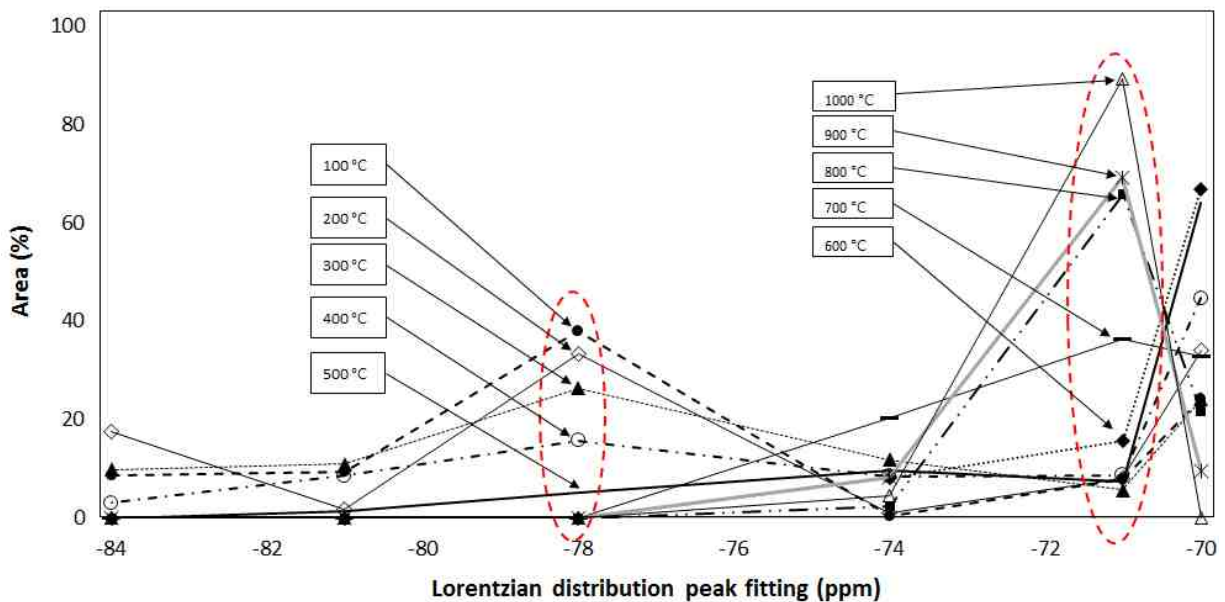


그림 3.2.65 피해온도 조건별 ^{29}Si chemical shift에 의한 center ppm 면적 측정 결과
(Lorentzian distribution peak fitting을 적용)

NMR 분석결과를 정리하면 다음과 같다.

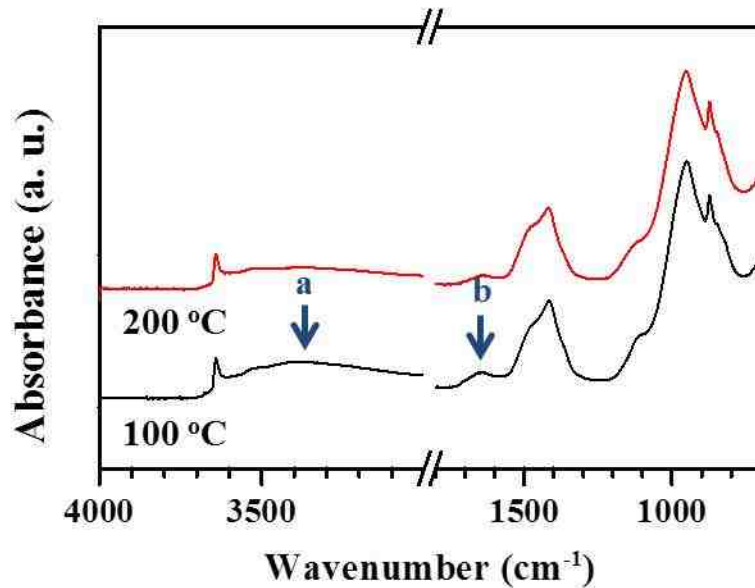
- 상온 ~ 200°C: 일정한 특징을 나타내지 않고 $Q_0 \sim Q_4$ 의 면적 %가 미소한 차이로 등락을 반복함
- 200°C ~ 300°C: Q_1 (-78 ppm)와 Q_2 (-84 ppm)의 C-S-H의 면적 %가 감소하기 시작함
- 300°C ~ 600°C: 200°C에서 시작한 C-S-H의 contact point 감소가 꾸준히 이어지면서 600°C에서 완전히 소멸되고, 여기서 떨어져 나온 Si는 C_2S type 2와 결합하여 Q_0 (-70 ppm)의 면적 %가 600°C에서 최고치를 기록하게 됨
- 600°C ~ 1000°C: Q_0 (-71 ppm), C_2S type 1은 꾸준히 상승하고, 나머지는 감소 추세를 이어가서 1000°C에 도달했을 때 C_2S type 1을 제외한 거의 대부분이 소멸됨

이상에서 확인할 수 있는 바와 같이 해당온도에서의 $Q_0 \sim Q_4$ 의 독특한 거동은 향후 화재 온도 추적용 분석 알고리즘 개발 과정에 결정적인 정보를 제공할 것으로 판단된다.

2-5 FT-IR (Fourier transformation infrared spectroscopy) 분석

가. 화재노출 후 초기재령에서의 화학적 특성 변화

그림 3.2.66은 시멘트 경화체를 100 °C 와 200 °C로 가열한 각각의 시멘트 샘플을 FT-IR 분석 장비를 이용하여 시멘트 내의 화합물의 작용기를 비교한 결과를 나타낸 것이다.



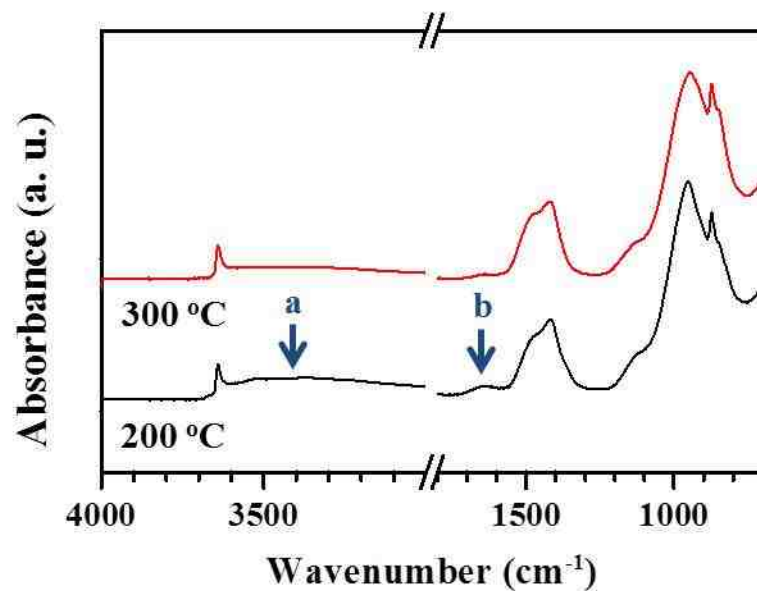
- a. The O-H stretching of H₂O ☐
b. The H-O-H bending vibration (ν_2) of H₂O ☐

- Increase
☐ Decrease
● Shift to higher wavenumber
○ Shift to lower wavenumber

그림 3.2.66 1일차 100 °C와 200 °C의 FT-IR 스펙트럼 비교

그림 3.2.66에서 확인할 수 있는 바와 같이 시멘트 내에 흡착된 물에서 나오는 진동 흡수 영역이 100 °C에 비해 고온인 200 °C의 열처리한 샘플에서 줄어드는 것을 확인 할 수 있었다. 이로부터 고온인 200 °C에서 흡착 된 수분이 더 제거 된 것을 확인할 수 있다.

그림 3.2.67은 시멘트 경화체를 200 °C 와 300 °C로 가열한 각각의 시멘트 샘플을 FT-IR 분석 장비를 이용하여 시멘트 내의 화합물의 작용기를 비교한 것이다.



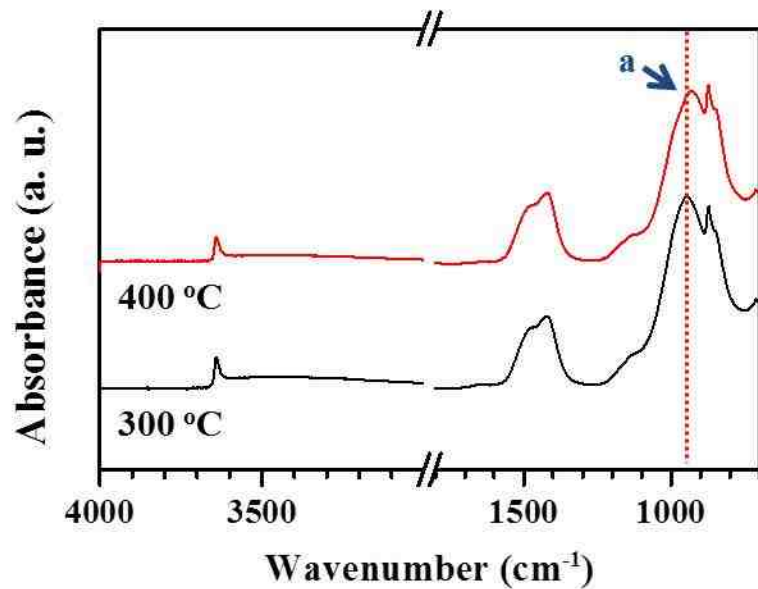
- a. The O-H stretching of H_2O ☐
 b. The H-O-H bending vibration (ν_2) of H_2O ☐

■ Increase
☐ Decrease
 ● Shift to higher wavenumber
 ○ Shift to lower wavenumber

그림 3.2.67 1일차 200 °C와 300 °C의 FT-IR 스펙트럼 비교

그림 3.2.67에서 확인할 수 있는 바와 같이 시멘트 내에 흡착된 물에서 나오는 진동 흡수 영역이 200 °C에 비해 고온인 300 °C의 열처리한 샘플에서 줄어드는 것을 확인 할 수 있었다. 이로부터 고온인 300 °C에서 흡착 된 수분이 더 제거 된 것을 확인할 수 있다.

그림 3.2.68은 시멘트 경화체를 300 °C 와 400 °C로 가열한 각각의 시멘트 샘플을 FT-IR 분석 장비를 이용하여 시멘트 내의 화합물의 작용기를 비교한 것이다.



a. The Si-O asymmetric stretching (ν_3) of SiO_4 unit □ ○

- Increase
- Decrease
- Shift to higher wavenumber
- Shift to lower wavenumber

그림 3.2.68 1일차 300 °C와 400 °C의 FT-IR 스펙트럼 비교

그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 시멘트 내에 SiO_4 unit에서 Si-O asymmetric stretching에 해당하는 진동 흡수 영역이 300 °C에 비해 고온인 400 °C의 열처리한 샘플에서 줄어드는 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 Quartz 내의 SiO_4 unit 구조의 변형으로 인하여 나타난 것으로 판단되며, 이러한 현상은 XRD 패턴 상에서도 관찰된 바 있다.

또한, SiO_4 unit에서 Si-O asymmetric stretching에 해당하는 진동 흡수 영역이 낮은 파수로 shift 한 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 SiO_4 unit의 Si-O가 주변의 Ca 과 비가교산소 형태로 변형 되면서 $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ 구조를 형성하기 때문인 것으로 판단된다.

그림 3.2.69는 시멘트 경화체를 400 °C 와 500 °C로 가열한 각각의 시멘트 샘플을 FT-IR 분석 장비를 이용하여 시멘트 내의 화합물의 작용기를 비교한 것이다.

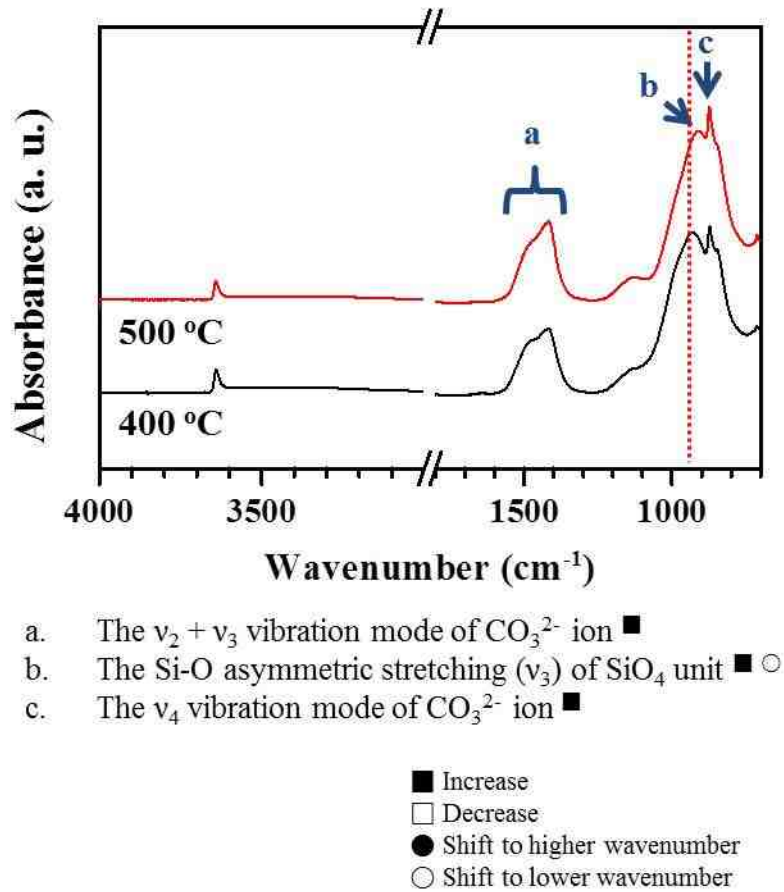


그림 3.2.69 1일차 400 °C와 500 °C의 FT-IR 스펙트럼 비교

그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 시멘트 내에 CO_3^{2-} 이온에서 나오는 다양한 진동 모드에 해당하는 영역이 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 주로 CaCO_3 에서 나타나는 것으로 Ca(OH)_2 가 열 분해시 공기 중에 CO_2 와 반응하여 CaCO_3 가 소량 증가한 것으로 분석된다.

또한, SiO_4 unit에서 Si-O asymmetric stretching에 해당하는 진동 흡수 영역은 증가와 동시에 낮은 파수로 shift 한 것을 확인 할 수 있었다. SiO_4 unit의 Si-O와 주변 Ca의 비가교 산소 형태로 변형 되면서 $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ 구조를 형성이 400 °C에 이어서 지속적으로 일어나는 것을 확인할 수 있었다.

그림 3.2.70은 시멘트 경화체를 500 °C 와 600 °C로 가열한 각각의 시멘트 샘플을 FT-IR 분석 장비를 이용하여 시멘트 내의 화합물의 작용기를 비교한 것이다.

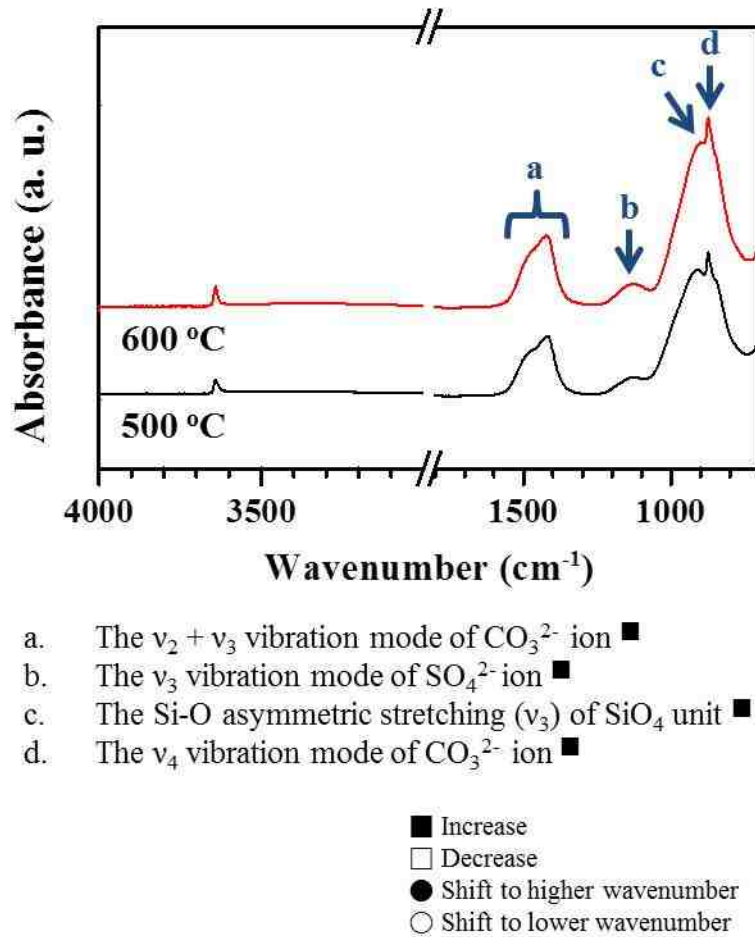
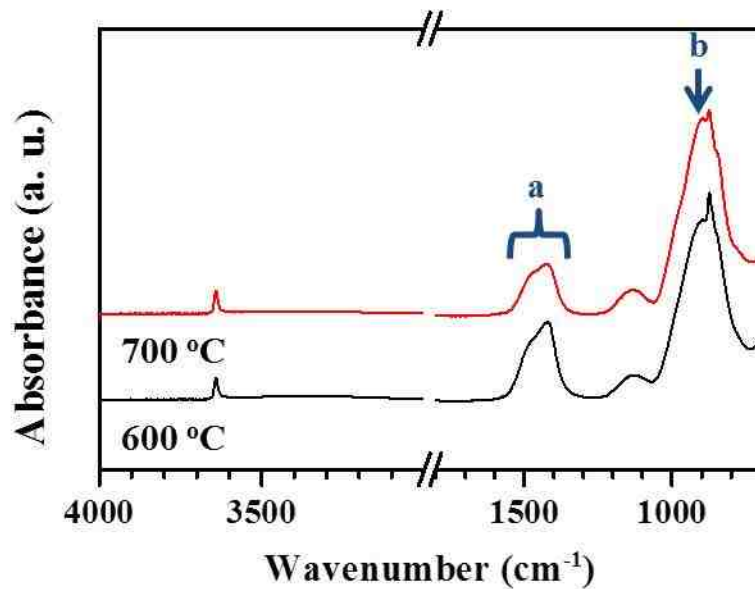


그림 3.2.70 1일차 500 °C와 600 °C의 FT-IR 스펙트럼 비교

그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 시멘트 내에 CO_3^{2-} 이온에서 나오는 다양한 진동 모드에 해당하는 영역이 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 주로 CaCO_3 에서 나타나는 것으로 Ca(OH)_2 가 열 분해시 공기 중에 CO_2 와 반응하여 CaCO_3 가 소량 증가한 것으로 예상된다.

또한, SiO_4 unit에서 Si-O asymmetric stretching에 해당하는 진동 흡수 영역은 증가한 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 SiO_4 unit의 Si-O가 주변의 Ca 과 비가교산소 형태로 변형되면서 $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ 구조가 지속적으로 형성되기 때문이라고 판단된다. SO_4^{2-} 에서 나타나는 진동 모드도 소량 증가한 것로부터 Ettringite와 Gypsum의 분해로 생성된 SO_4^{2-} 가 주변의 간섭 없이 있는 Free한 형태로 존재하는 것으로 분석된다.

그림 3.2.71은 시멘트 경화체를 600 °C 와 700 °C로 가열한 각각의 시멘트 샘플을 FT-IR 분석 장비를 이용하여 시멘트 내의 화합물의 작용기를 비교한 것이다.



- a. The $\nu_2 + \nu_3$ vibration mode of CO_3^{2-} ion □
 b. The Si-O asymmetric stretching (ν_3) of SiO_4 unit ■

- Increase
 □ Decrease
 ● Shift to higher wavenumber
 ○ Shift to lower wavenumber

그림 3.2.71 1일차 600 °C와 700 °C의 FT-IR 스펙트럼 비교

그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 시멘트 내에 CO_3^{2-} 이온에서 나오는 다양한 진동 모드에 해당하는 영역이 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 주로 CaCO_3 에서 나타나는 것으로 열 분해로 인하여 CO_3^{2-} 이온이 감소한 것으로 예상된다.

또한, SiO_4 unit에서 Si-O asymmetric stretching에 해당하는 진동 흡수 영역은 증가한 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 SiO_4 unit의 Si-O가 주변의 Ca 과 비가교산소 형태로 변형되면서 $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ 구조가 지속적으로 형성되기 때문이라고 예상된다.

그림 3.2.72는 시멘트 경화체를 700 °C 와 800 °C로 가열한 각각의 시멘트 샘플을 FT-IR 분석 장비를 이용하여 시멘트 내의 화합물의 작용기를 비교한 것이다.

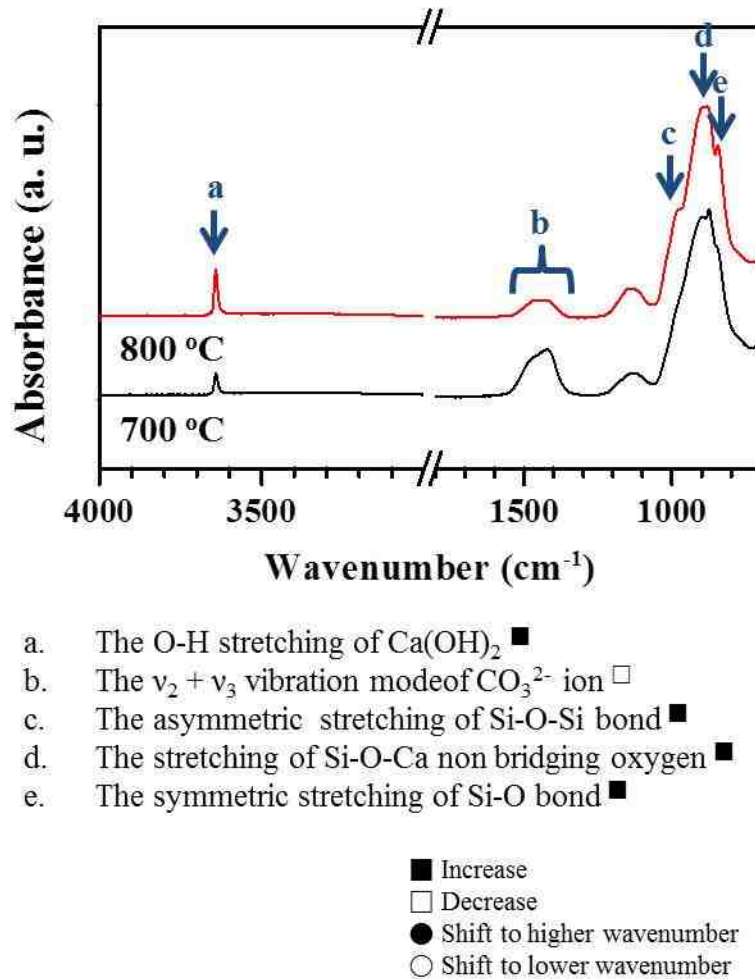


그림 3.2.72 1일차 700 °C와 800 °C의 FT-IR 스펙트럼 비교

그림 3.2.72에서 확인할 수 있는 바와 같이 시멘트 내에 CO_3^{2-} 이온에서 나오는 다양한 진동 모드에 해당하는 영역이 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 주로 CaCO_3 에서 나타나는 것으로 열 분해로 인하여 CO_3^{2-} 이온이 감소한 것으로 예상된다. SiO_4 unit에서 Si-O asymmetric stretching에 해당하는 진동 흡수 영역은 증가와 동시에 세가지 형태로 구분되어지는 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 SiO_4 unit의 Si-O가 주변의 Ca 과 비가교산소 형태로 변형 되면서 $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ 구조가 지속적으로 형성됨과 동시에 보다 안정한 구조인 Larnite구조로 변형되기 때문인 것으로 분석된다.

또한, Ca(OH)_2 의 격자 표면에 있는 OH stretching에 진동이 증가 하는 것을 같이 확인할 수 있었다. 이것은 Ca(OH)_2 가 열분해로 인하여 표면의 OH가 제거 되면서 서로 간의 간섭이 줄어들어서 보다 sharp하게 나타난 것으로 판단된다.

그림 3.2.73은 시멘트 경화체를 800 °C 와 900 °C로 가열한 각각의 시멘트 샘플을 FT-IR 분석 장비를 이용하여 시멘트 내의 화합물의 작용기를 비교한 것이다.

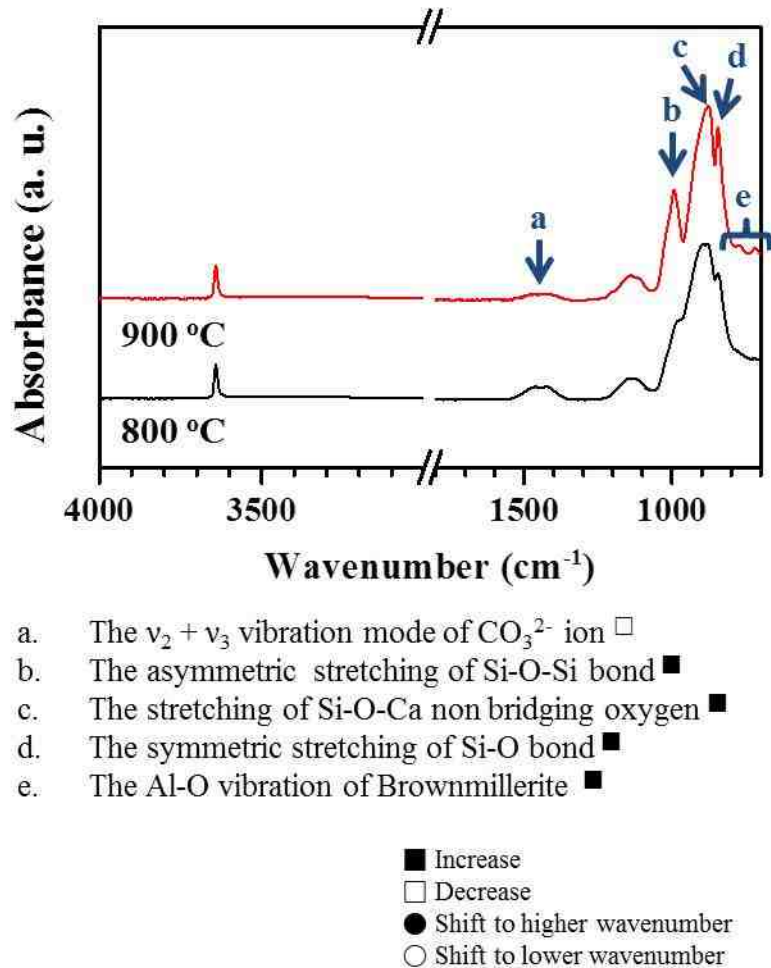
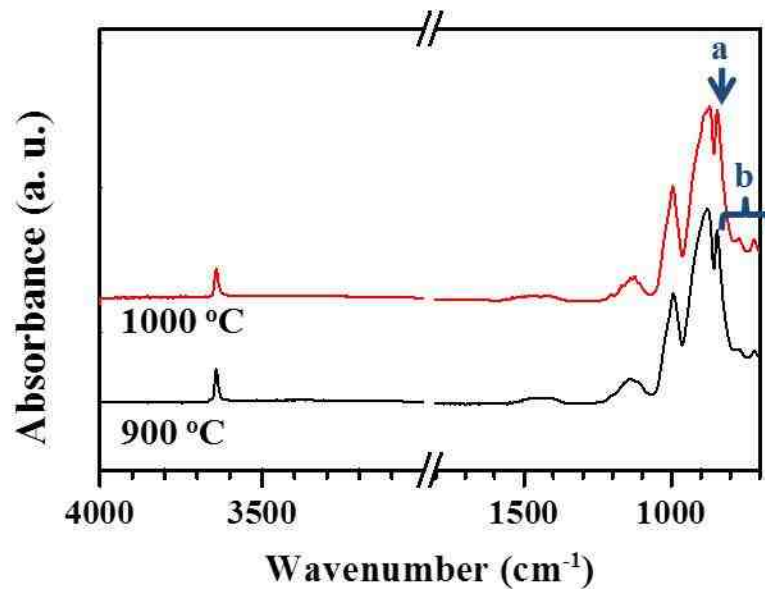


그림 3.2.73 1일차 800 °C와 900 °C의 FT-IR 스펙트럼 비교

그림 3.2.73에서 확인할 수 있는 바와 같이 시멘트 내에 CO_3^{2-} 이온에서 나오는 다양한 진동 모드에 해당하는 영역이 지속적으로 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. SiO_4 unit에서 Si-O asymmetric stretching에 해당하는 진동 흡수 영역은 증가와 동시에 구분된 세가지 형태가 보다 sharp해진 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ 구조가 지속적으로 안정한 구조인 Larnite구조로 변형됨과 동시에 Larnite구조의 격자 크기가 증가하기 때문이라고 예상된다.

또한, 추가적으로 Brownmillerite에서 나오는 것으로 예상되는 Al-O vibration이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 XRD 패턴에서도 유사하게 관찰된바 있다.

그림 3.2.74는 시멘트 경화체를 900 °C 와 1000 °C로 가열한 각각의 시멘트 샘플을 FT-IR 분석 장비를 이용하여 시멘트 내의 화합물의 작용기를 비교한 것이다.



- a. The symmetric stretching of Si-O bond ■
- b. The Al-O vibration of Brownmillerite ■

- Increase
- Decrease
- Shift to higher wavenumber
- Shift to lower wavenumber

그림 3.2.74 1일차 900 °C와 1000 °C의 FT-IR 스펙트럼 비교

그림 3.2.74에서 확인할 수 있는 바와 같이 시멘트 내에 Larnite구조의 증가로 인하여 Si-O의 symmetric stretching이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

또한, Brownmillerite의 결정 크기 증가로부터 Brownmillerite에서 나오는 것으로 예상되는 Al-O vibration이 증가하는 것과 동시에 보다 sharp해진 것을 확인할 수 있었다 이러한 현상 역시 XRD 패턴에서도 유사하게 관찰되었다.

나. 화재노출 후 후기재령에서의 화학적 특성 변화

그림 3.2.75는 FT-IR 분석 장비를 이용하여 100 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 노출시킨 샘플을 노출 기간 별로 시멘트 내의 화합물의 작용기를 비교하여 나타낸 것이다.

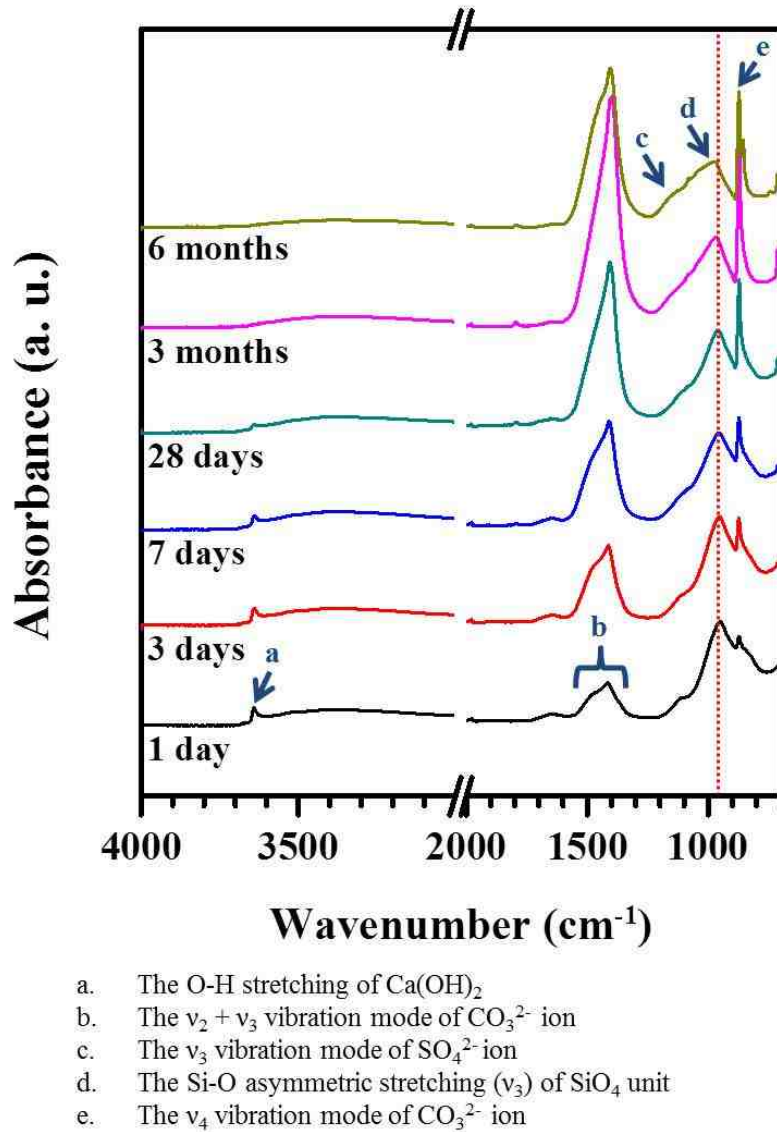


그림 3.2.75 100°C 열처리한 시멘트 경화체의 재령에 따른 FT-IR 스펙트럼 비교

그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 100 °C로 열처리한 시멘트 경화체는 대기 중 상온 하에서 노출됨에 따라 공기 중의 H_2O 와 CO_2 에 의해서 Ca(OH)_2 가 감소로 인한 Ca(OH)_2 의 O-H stretching이 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 특히, 3 개월 후로는 Ca(OH)_2 사라진 것으로 나타났는데, 이러한 현상은 XRD에서도 관찰된바 있다.

또한, CO_3^{2-} 이온의 두 개의 진동 모드 흡수로부터 CaCO_3 가 노출 기간이 증가할수록 증가

하는 것을 확인 할 수 있었다. 추가적으로 SO_4^{2-} 의 진동과 SiO_4 unit에서의 Si-O asymmetric stretching의 흡수 영역이 넓어지는 것으로부터 장기간 노출 할수록 구조의 결정도가 감소하는 것으로 나타났다.

그림 3.2.76는 FT-IR 분석 장비를 이용하여 200 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 노출시킨 샘플을 노출 기간 별로 시멘트 내의 화합물의 작용기를 비교한 것이다.

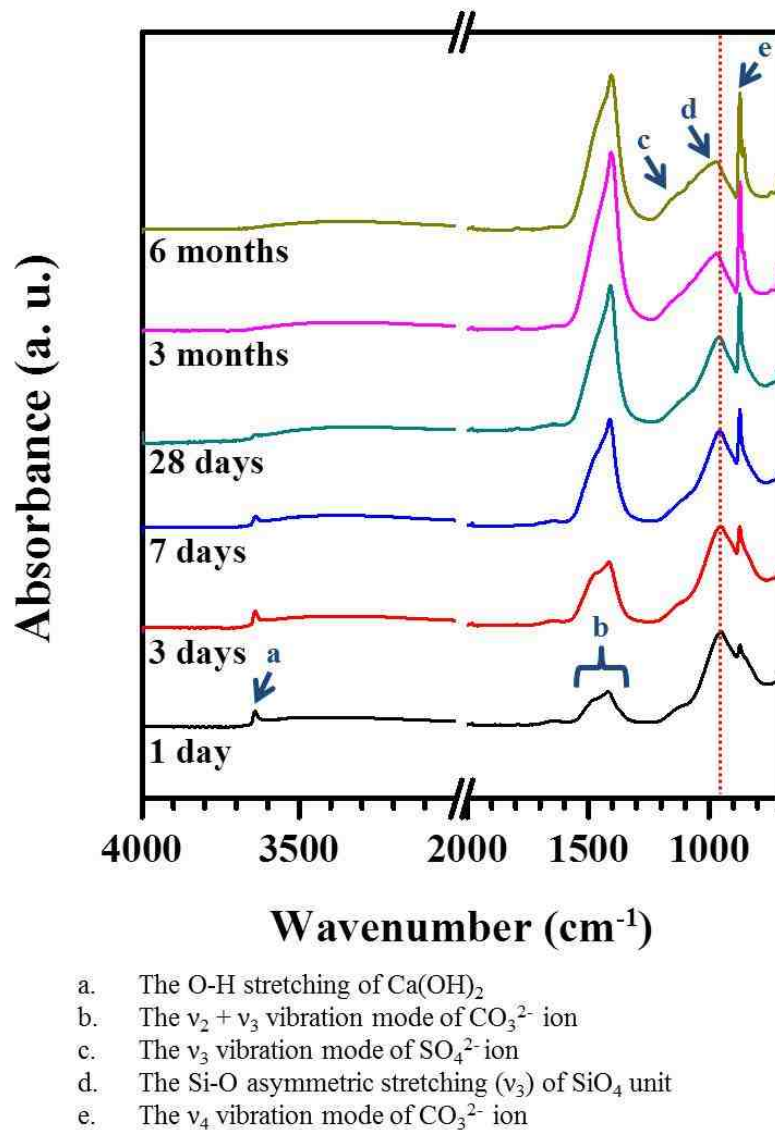


그림 3.2.76 200°C 열처리한 시멘트 경화체의 재령에 따른 FT-IR 스펙트럼 비교

그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 200 °C로 열처리한 시멘트 경화체는 대기 중 상온 하에서 노출됨에 따른 화학물의 작용기 변화는 100 °C로 열처리한 샘플과 유사한 경향을 나타내었다.

그림 3.2.77은 FT-IR 분석 장비를 이용하여 300 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 노출시킨 샘플을 노출 기간 별로 시멘트 내의 화합물의 작용기를 비교한 것이다.

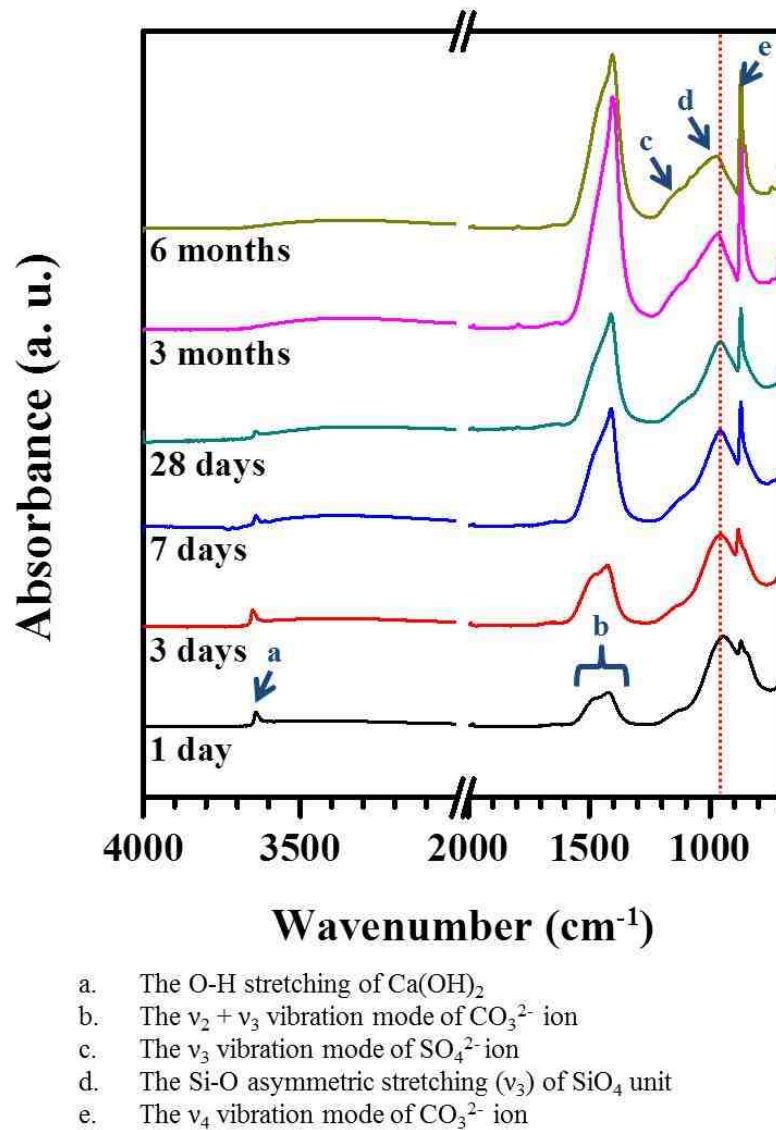


그림 3.2.77 300°C 열처리한 시멘트 경화체의 재령에 따른 FT-IR 스펙트럼 비교

그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 300°C로 열처리한 시멘트 경화체는 대기 중 상온 하에서 노출됨에 따른 화합물의 작용기 변화는 200°C로 열처리한 샘플과 유사한 경향을 나타내었다.

그림 3.2.78은 FT-IR 분석 장비를 이용하여 400 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 노출시킨 샘플을 노출 기간 별로 시멘트 내의 화합물의 작용기를 비교한 것이다.

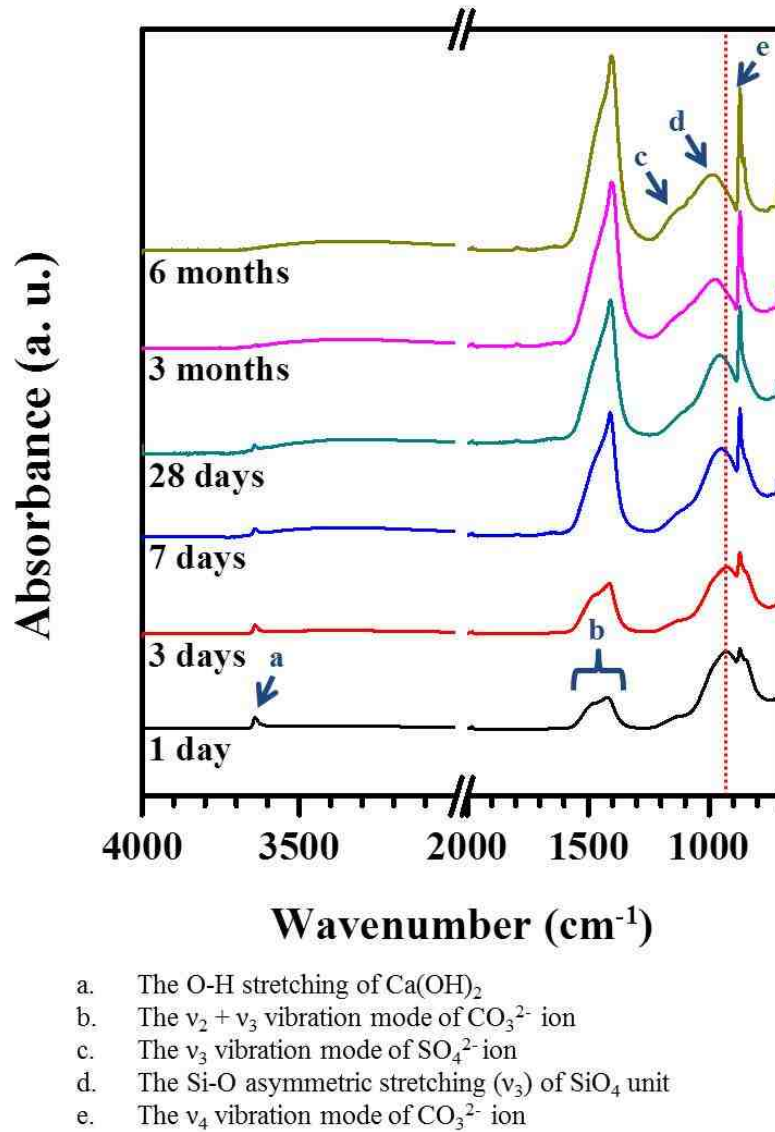


그림 3.2.78 400°C 열처리한 시멘트 경화체의 재령에 따른 FT-IR 스펙트럼 비교

400°C로 열처리한 시멘트 경화체 역시 300 °C로 열처리한 샘플과 유사한 경향을 나타내었는데, SiO_4 unit의 Si-O와 주변 Ca의 비가교산소 형태로 변형 되면서 $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ 구조를 형성으로 낮은 파수로 shift한 Si-O asymmetric stretching이 노출 기간이 증가하면서 구조가 붕괴 되어서 다시 높은 파수로 shift되는 것을 확인 할 수 있었다.

그림 3.2.79는 FT-IR 분석 장비를 이용하여 500 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 노출시킨 샘플을 노출 기간 별로 시멘트 내의 화합물의 작용기를 비교한 것이다.

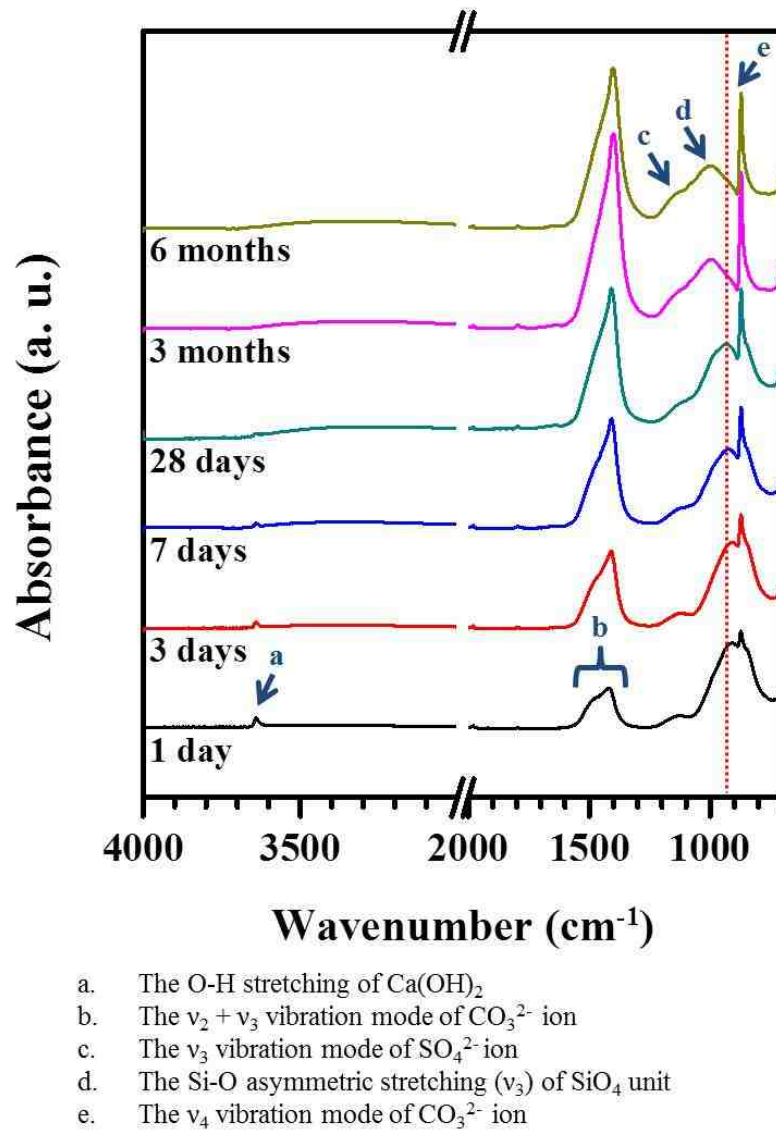


그림 3.2.79 500°C 열처리한 시멘트 경화체의 재령에 따른 FT-IR 스펙트럼 비교

그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 500 °C로 열처리한 시멘트 경화체의 경우도 400 °C로 열처리한 샘플과 유사한 경향을 나타냈었다.

그림 3.2.80은 FT-IR 분석 장비를 이용하여 600 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 노출시킨 샘플을 노출 기간 별로 시멘트 내의 화합물의 작용기를 비교한 것이다.

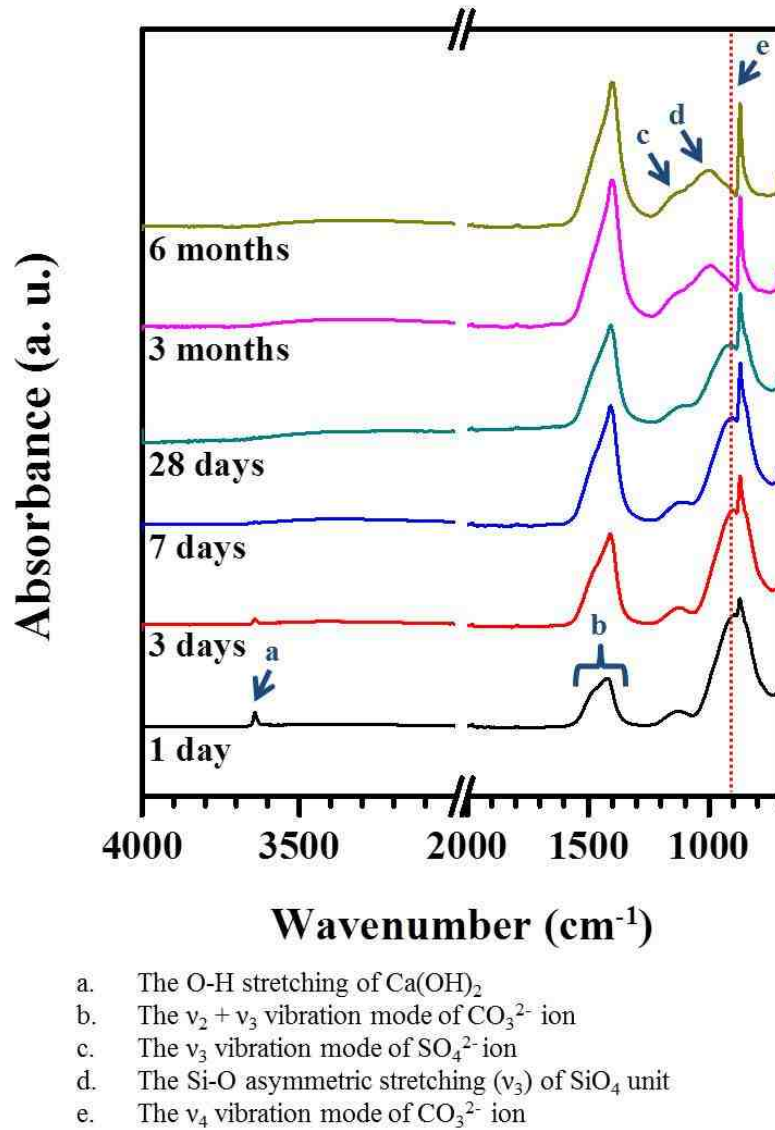


그림 3.2.80 600°C 열처리한 시멘트 경화체의 재령에 따른 FT-IR 스펙트럼 비교

그림 3.2.80에서 확인할 수 있는 바와 같이 600 °C로 열처리한 시멘트 경화체는 대기 중 상온 하에서 노출됨에 따른 화합물의 작용기 변화는 500 °C로 열처리한 샘플과 유사한 경향을 나타내었는데, Ca(OH)_2 는 28일부터 완전히 사라진 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 XRD에서도 유사하게 관찰된바 있다.

그림 3.2.81은 FT-IR 분석 장비를 이용하여 700 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 노출시킨 샘플을 노출 기간 별로 시멘트 내의 화합물의 작용기를 비교한 것이다.

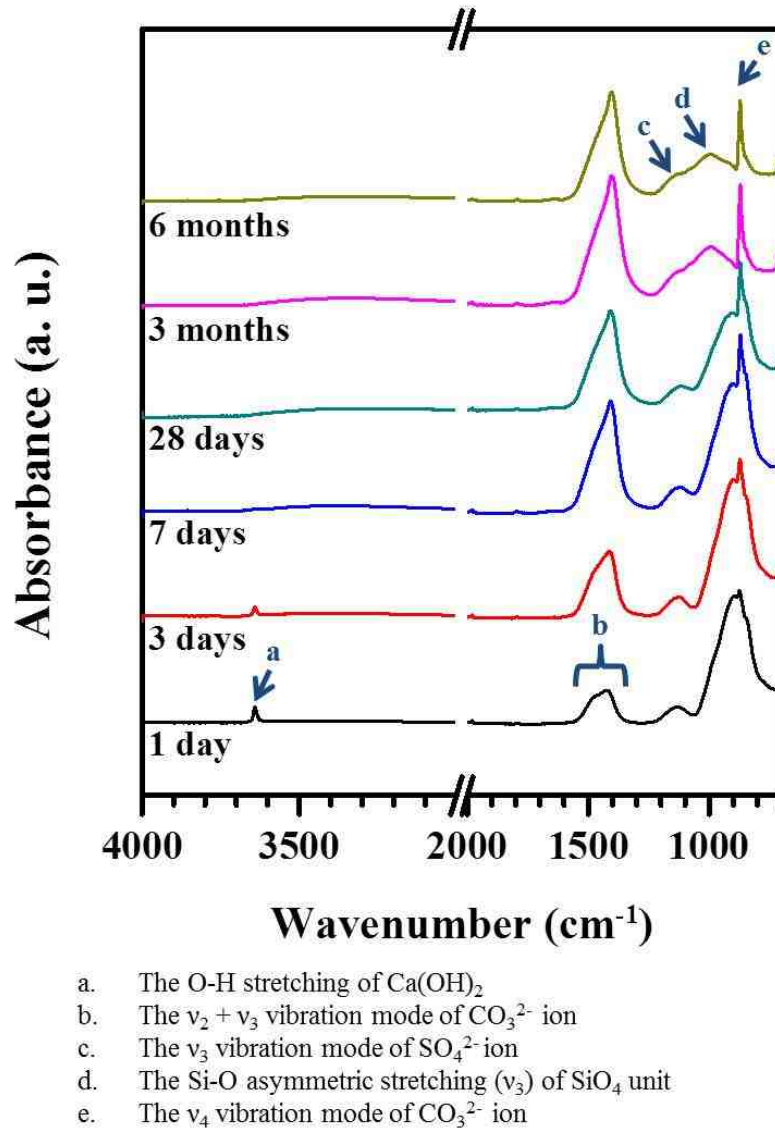
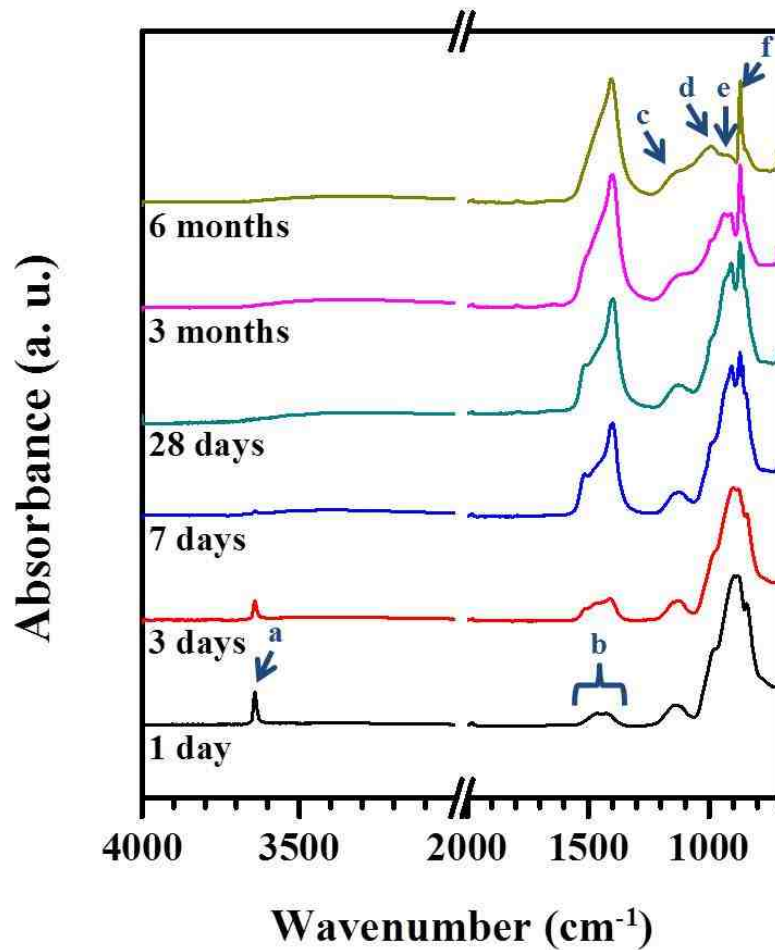


그림 3.2.81 700°C 열처리한 시멘트 경화체의 재령에 따른 FT-IR 스펙트럼 비교

그림 3.2.81에서 확인할 수 있는 바와 같이 700 °C로 열처리한 시멘트 경화체는 대기 중 상온 하에서 노출됨에 따른 화학물의 작용기 변화는 600 °C로 열처리한 샘플과 유사한 경향을 나타내었다.

그림 3.2.82은 FT-IR 분석 장비를 이용하여 800 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 노출시킨 샘플을 노출 기간 별로 시멘트 내의 화합물의 작용기를 비교한 것이다.



- a. The O-H stretching of Ca(OH)_2
- b. The $\nu_2 + \nu_3$ vibration mode of CO_3^{2-} ion
- c. The ν_3 vibration mode of SO_4^{2-} ion
- d. The asymmetric stretching of Si-O-Si bond
- e. The stretching of Si-O-Ca non bridging oxygen
- f. The ν_4 vibration mode of CO_3^{2-} ion

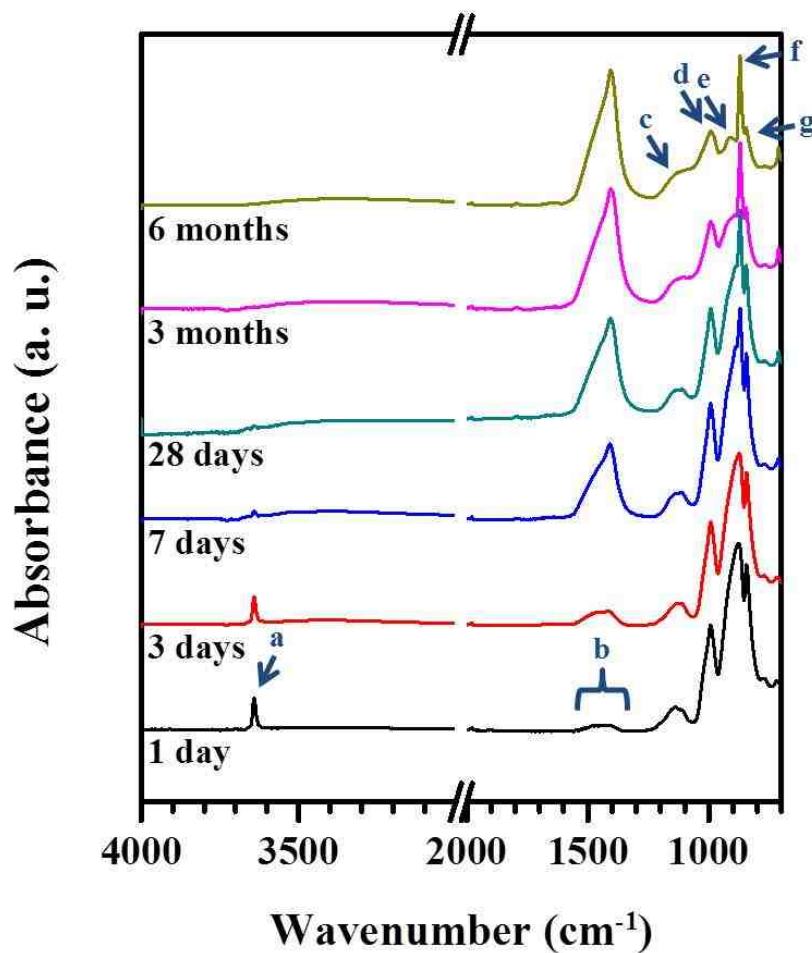
그림 3.2.82 800°C 열처리한 시멘트 경화체의 재령에 따른 FT-IR 스펙트럼 비교

800 °C로 열처리한 시멘트 경화체는 대기 중 상온 하에서 노출됨에 따라 공기 중의 H_2O 와 CO_2 에 의해서 Ca(OH)_2 가 감소로 인한 Ca(OH)_2 의 O-H stretching이 감소하는 것을 확인 할 수 있었다.

특히, 28일 후로는 Ca(OH)_2 가 사라지는 것으로 나타났는데, 이는 XRD 결과에서도 확인된 바 있다. 또한, CO_3^{2-} 이온의 진동 모드 흡수로부터 CaCO_3 가 노출 기간이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났고, Ca_2SiO_4 는 Larnite 구조로 변형되어 구분되어진 SiO_4 unit의 세가지

Si-O asymmetric stretching에 해당하는 진동 흡수 영역이 노출 기간이 증가 하여도 구분되어진 형태로 감소하였다. 이때, SiO_4 unit의 Si-O와 주변 Ca의 비가교산소 형태에서 나타나는 Si-O-Ca 진동 모드가 가장 크게 감소하는 것으로 보인다. 이것으로부터 Larnite 구조가 감소되는 것으로 예상되며, XRD에서도 이러한 현상을 확인할 수 있었다.

그림 3.2.83은 FT-IR 분석 장비를 이용하여 900 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 노출시킨 샘플을 노출 기간 별로 시멘트 내의 화합물의 작용기를 비교한 것이다.

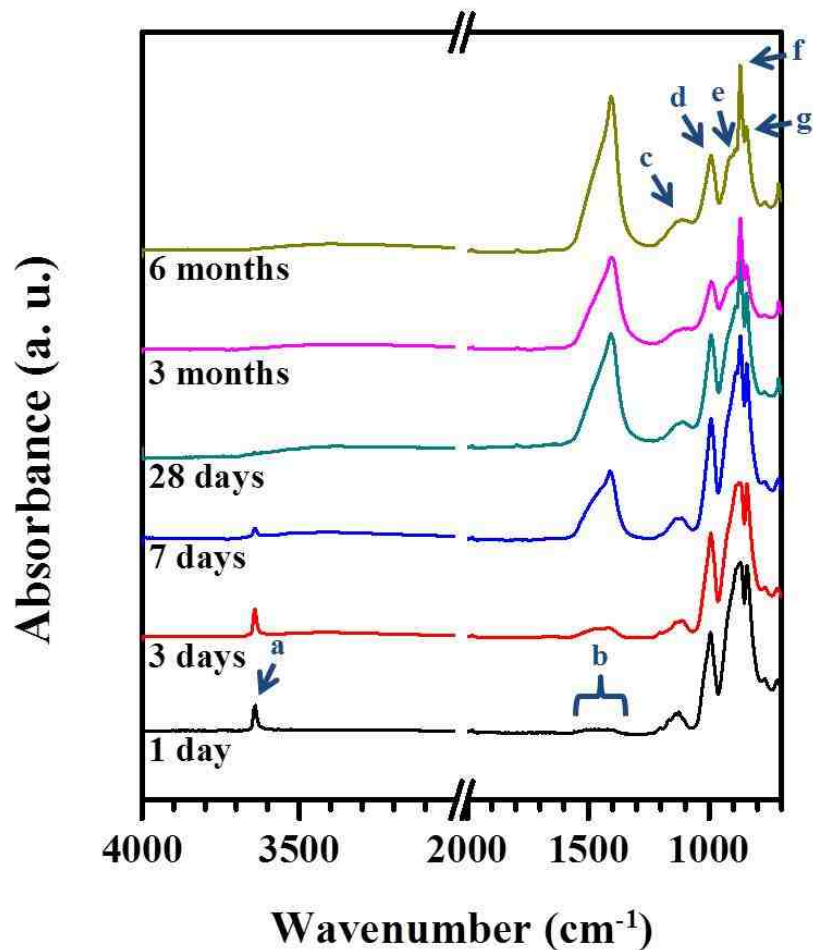


- a. The O-H stretching of Ca(OH)_2
- b. The $\nu_2 + \nu_3$ vibration mode of CO_3^{2-} ion
- c. The ν_3 vibration mode of SO_4^{2-} ion
- d. The asymmetric stretching of Si-O-Si bond
- e. The stretching of Si-O-Ca non bridging oxygen
- f. The ν_4 vibration mode of CO_3^{2-} ion
- g. The symmetric stretching of Si-O bond

그림 3.2.83 900°C 열처리한 시멘트 경화체의 재령에 따른 FT-IR 스펙트럼 비교

그림 3.2.83에서 확인할 수 있는 바와 같이 900 °C로 열처리한 시멘트 경화체는 대기 중 상온 하에서 노출됨에 따른 화학물의 작용기 변화는 800 °C로 열처리한 샘플과 유사한 경향을 나타내었다.

그림 3.2.84는 FT-IR 분석 장비를 이용하여 1000 °C로 열처리한 시멘트 경화체를 가열한 후 상온 하에서 대기 중에 노출시킨 샘플을 노출 기간 별로 시멘트 내의 화합물의 작용기를 비교한 것인데, 앞서 분석한 900 °C로 열처리한 샘플과 유사한 경향을 나타내었다.



- a. The O-H stretching of $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- b. The $\nu_2 + \nu_3$ vibration mode of CO_3^{2-} ion
- c. The ν_3 vibration mode of SO_4^{2-} ion
- d. The asymmetric stretching of Si-O-Si bond
- e. The stretching of Si-O-Ca non bridging oxygen
- f. The ν_4 vibration mode of CO_3^{2-} ion
- g. The symmetric stretching of Si-O bond

그림 3.2.84 1000°C 열처리한 시멘트 경화체의 재령에 따른 FT-IR 스펙트럼 비교

2-6 종합분석

지금까지의 여러 분석 장비를 이용하여 다양한 온도로 열처리 후 및 대기 중 상온 하에 노출에 따른 시멘트 경화체의 구조, 함량, 화합물 작용기 등을 분석한 결과 각 온도에 따른 화재 피해 시에 시멘트 경화체에 특징들이 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 이로부터 화재 피해를 받은 미지 시료의 각각의 분석을 통하여 미리 구축한 기초 자료와 비교하면 화재 피해 온도를 예측 할 수 있으며 나아가 화재피해 시멘트의 유지 보수를 진행 할 수 있는 기초 자료로 제공 될 수 있을 것으로 사료된다.

예를 들어 화재 피해를 받은 시멘트를 바로 샘플을 채취 후 XRD 측정 결과 Quartz low가 생성된 것을 확인하였으면 그것은 400 °C 피해에서 특징적으로 나타는 마커라고 할 수 있다. 하지만 Gypsum 만 제거 된 XRD 패턴을 얻었다면 300 °C와 500 °C에 구분할 수 없다. 이에 미지의 시료를 대기 중에 3일 노출 후에 다시 XRD를 측정한 결과 Vaterite와 Aragonite의 생성 유무에 따라 300 °C와 500 °C를 판단할 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 화재 피해 온도를 알고 있다면 XRD 측정 결과로부터 화재피해 후 노출 시간을 예상 할 수도 있다.

XRD뿐만 아니라 XRF를 이용한 Ca의 함량 분석을 통하여 화재 피해 후 Ca의 함량의 상승량에 따라 화재 피해 온도를 유추 할 수 있을 것으로 판단하고 있다. XRD와 다르게 XRF는 건 타입의 휴대형 장비를 이용하면 현장에서 바로 화재 피해를 판단할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이를 진행시키기 위해서는 피해 온도와 Ca의 함량 변화에 대한 보다 자세한 고찰이 필요한 것을 인지하고 있으며, 이를 개선 하기위한 연구를 앞으로 진행할 예정이다.

이외 에도 FT-IR 장비를 이용하여 앞의 결과에 보완적으로 사용할 수 있으며 300°C의 흡수된 물 제거와 800°C의 Si-O stretching band가 분할되는 것으로부터 대략적인 피해 온도 범위를 빠른 시간 안에 확인할 수 있다.

이와 같은 여러 분석 장비를 이용한 기초 분석 자료를 토대로 비교 분석하면 화재현장에서 미지의 피해를 받은 샘플을 분석하여 추적 조사한다면 시멘트 경화체의 화재피해온도를 신속하고 정확하게 예측 할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 고온에 노출된 시멘트 경화체의 공극구조 특성

3-1 개요

본 연구에서 화재 손상된 콘크리트 구조체의 피해규모를 예측하는 것은 매우 중요하다. 지금까지 앞 절에서는 이러한 피해규모 예측을 위해 반드시 선행되어야 할 ‘화재피해온도 예측 기술’을 개발하기 위해 다양한 화학장비를 이용하여 데이터 확보에 초점을 두고 실험을 진행하였다. 콘크리트 원재료인 시멘트와 골재의 열거동 특성을 검토하기 위해 고온 노출 전·중·후 2주에 걸쳐 샘플을 모니터링 하면서 후기 팽창 거동을 증명하였고, 이러한 2차 팽창 거동의 이유를 화학분석을 통해 규명하였다. 특히, 화학분석을 통해 시멘트 경화체에 존재하는 각종 수화물의 열분해 (dehydration, decomposition, decarbonation 등) 및 대기 중 상온에서의 재결합 반응 (rehydration, delayed ettringite formation 등)을 분석한 실험결과는 고온에 노출된 시멘트 경화체의 표준화디렉터리 구축을 위한 핵심 데이터로 사용되었고, 이를 이용함으로써 역으로 화재피해를 입은 콘크리트의 화재피해온도를 예측할 수 있게 되었다.

본 절에서는 해당 화재피해온도에서 나타나는 시멘트 경화체의 공극구조 특성과 시멘트 페이스트 및 콘크리트의 균열거동에 미치는 영향성을 분석하고자 하였는데, 고온 노출 전·중·후 해당 샘플을 이용하여 확인하고자 하는 연구수행 내용은 아래와 같다.

- 고온 노출 전·중·후 시멘트 경화체의 공극구조 특성 (pore distribution, cumulative intrusion) 변화 조사
- 앞서 화학 분석결과에서 확인된 고온 노출 전·중·후 시멘트 경화체의 열분해 및 재결합 반응이 마이크로 공극구조에 미치는 영향성 분석
- 고온 노출 전·중·후 화학특성 변화와 공극구조 특성 변화가 시멘트 경화체 및 콘크리트의 균열거동에 미치는 영향성 분석
- X-ray CT 촬영을 통해 고온 노출 전·중·후 시멘트 및 콘크리트의 균열거동 특성을 3D 이미지로 구현하여 균열 메커니즘 규명 시도

3-2 MIP (Mercury intrusion porosimetry) 장비를 이용한 공극구조 특성

① 온도조건에 따른 시멘트 경화체의 공극구조 특성

그림 3.3.1 ~ 그림 3.3.11 은 MIP (Mercury intrusion porosimetry) 테스트를 통해 수열온도조건 변화에 따른 시멘트 경화체의 공극분포를 분석한 것이다.

전반적으로 수열온도가 높을수록 Pore diameter가 증가하면서 그래프의 모양이 오른쪽 (Pore diameter가 큰 쪽)으로 shift되는 것을 확인할 수 있으며, 그 모양이 broad해 지는 형태를 나타내었다.

특히, 400°C까지는 공극분포 형태와 공극량의 증가폭이 유사하게 sharp한 형태를 유지하였으나, 500°C에 노출되면서 그 형태가 무너지면서 broad한 공극분포 형태를 나타내었다. 이후에는 broad한 공극분포 상태에서 그 양이 점점 증가하는 것을 확인할 수 있었는데, 이러한 500°C 기준점은 다른 장비에 의한 추가 분석과 함께 화재피해를 입은 콘크리트 구조물의 피해규모를 예측하는데 중요한 피해온도 시점에 해당될 수 있을 것으로 판단된다.

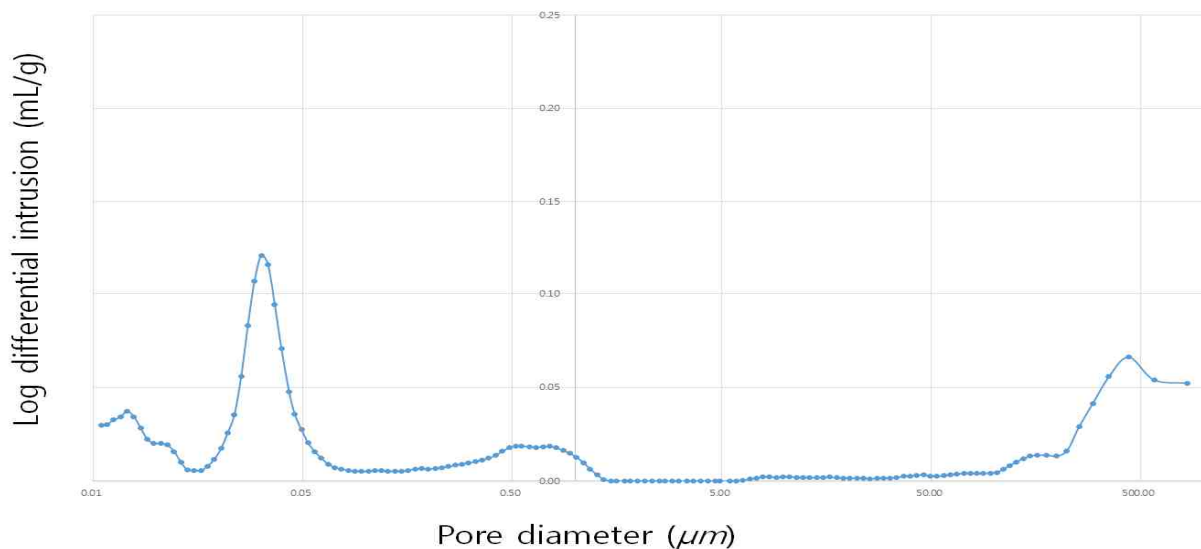


그림 3.3.1 MIP 분석 결과 (상온조건)

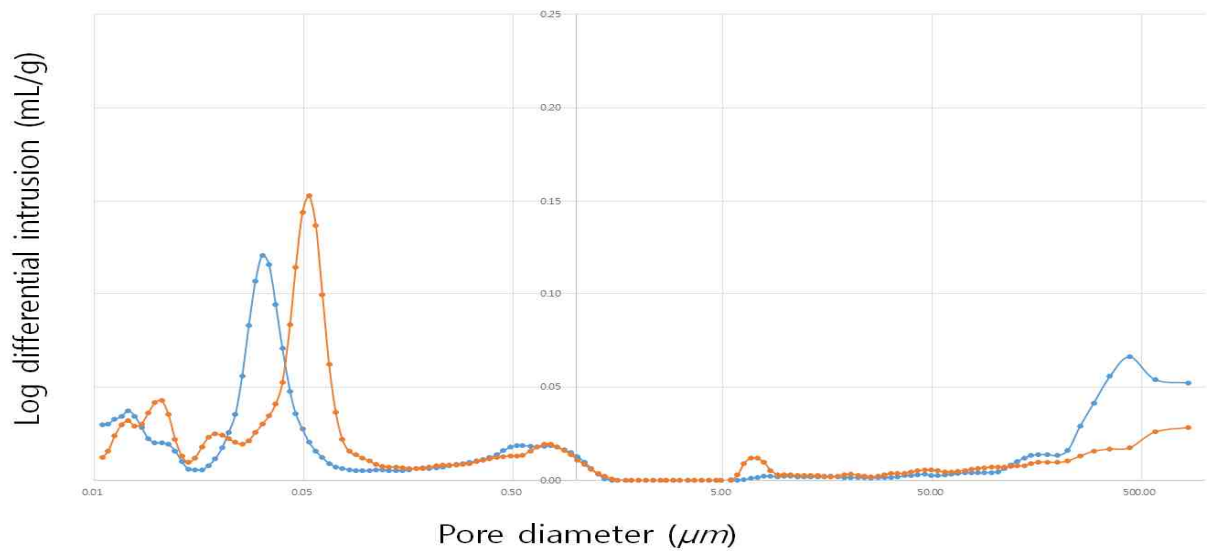


그림 3.3.2 MIP 분석 결과 (상온 ~ 100°C)

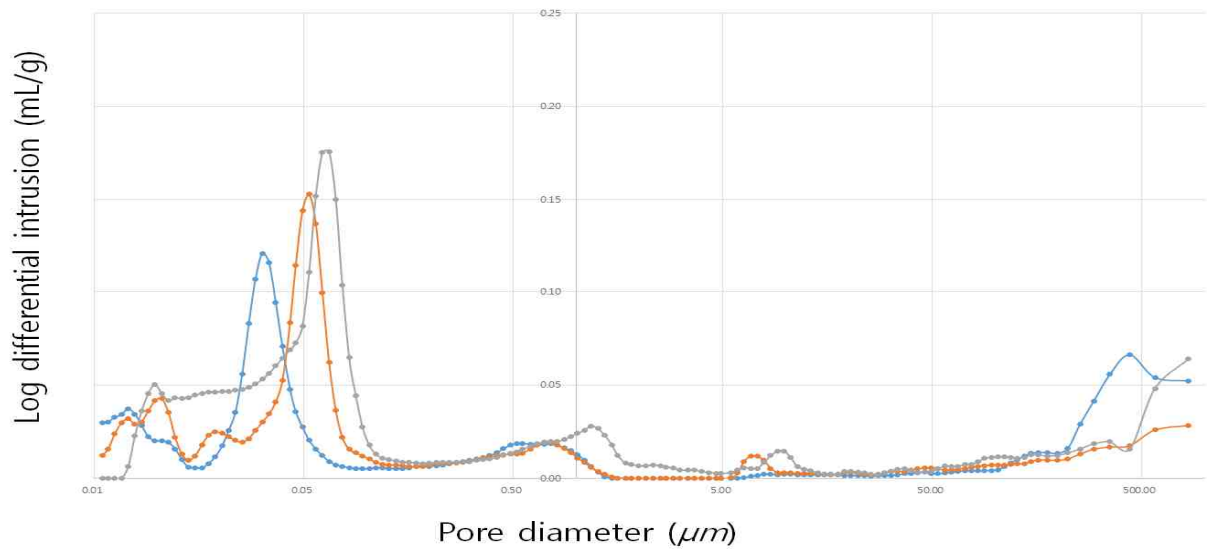


그림 3.3.3 MIP 분석 결과 (상온 ~ 200°C)

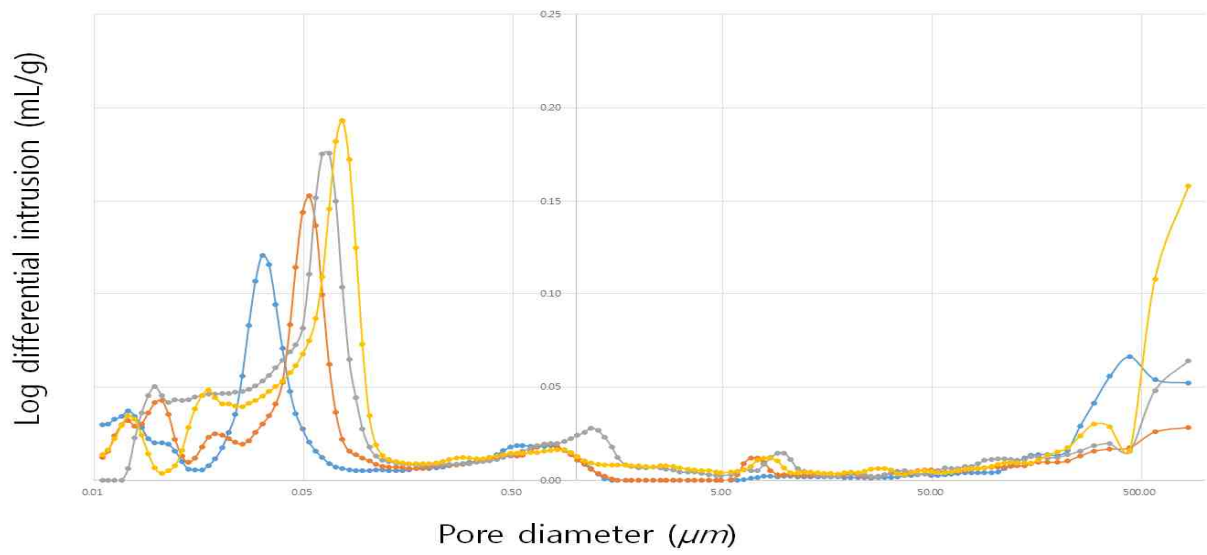


그림 3.3.4 MIP 분석 결과 (상온 ~ 300°C)

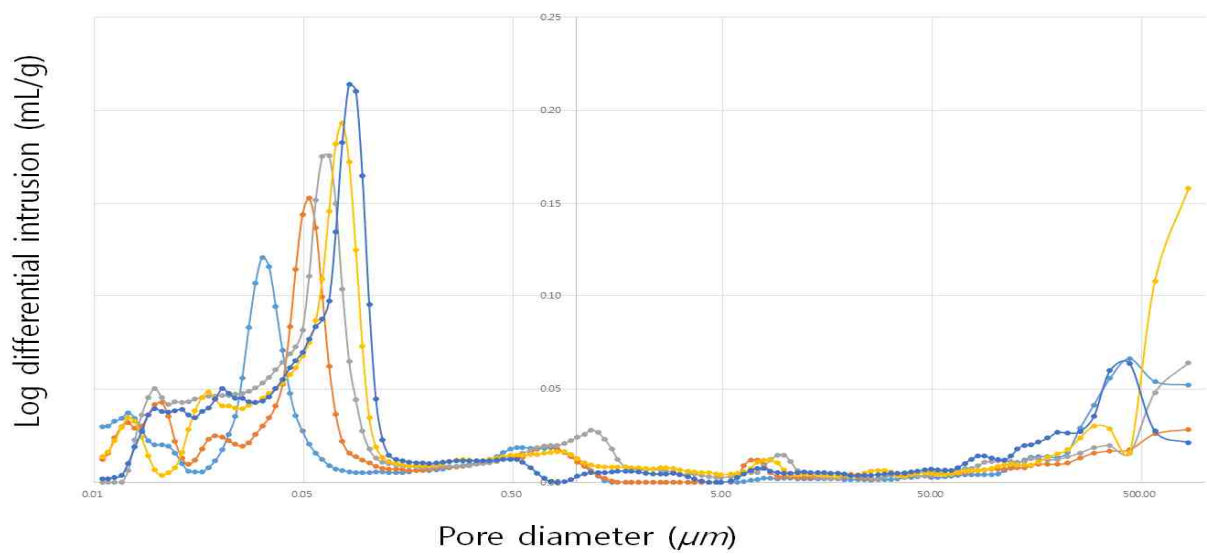


그림 3.3.5 MIP 분석 결과 (상온 ~ 400°C)

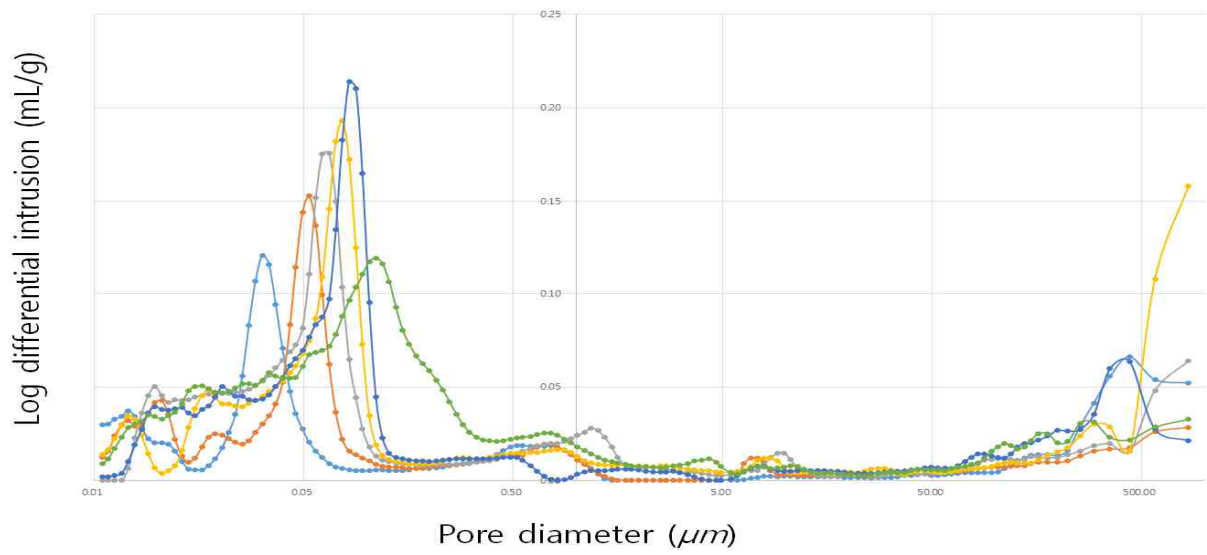


그림 3.3.6 MIP 분석 결과 (상온 ~ 500°C)

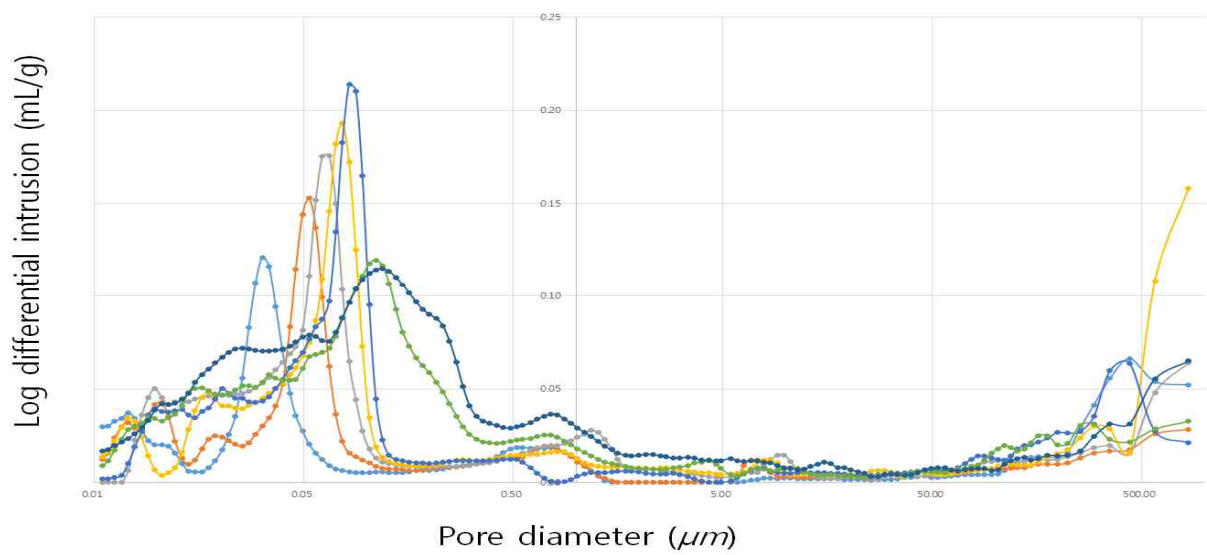


그림 3.3.7 MIP 분석 결과 (상온 ~ 600°C)

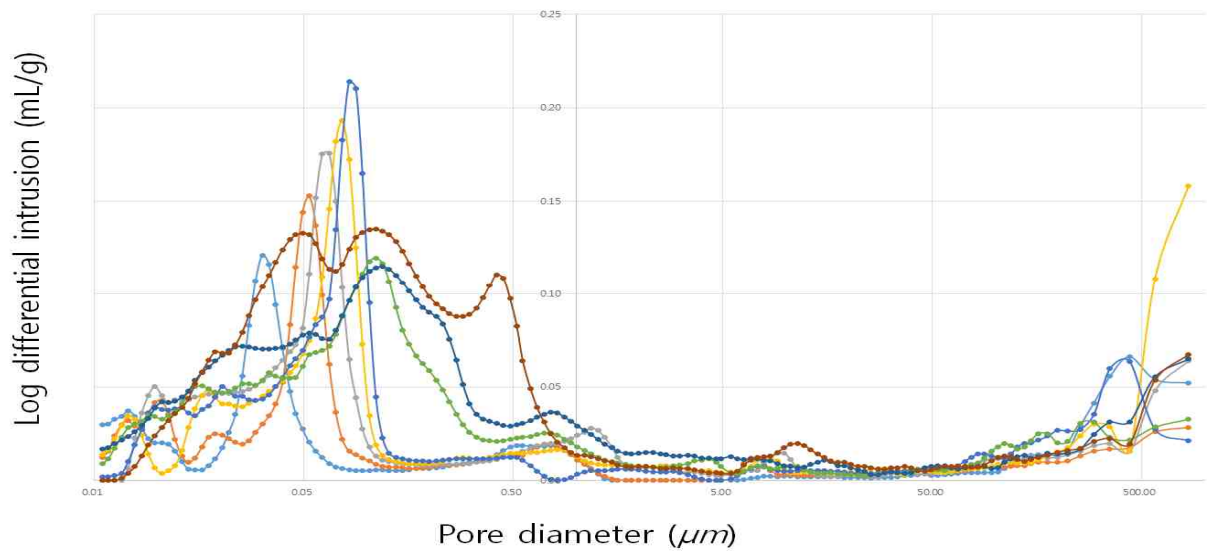


그림 3.3.8 MIP 분석 결과 (상온 ~ 700°C)

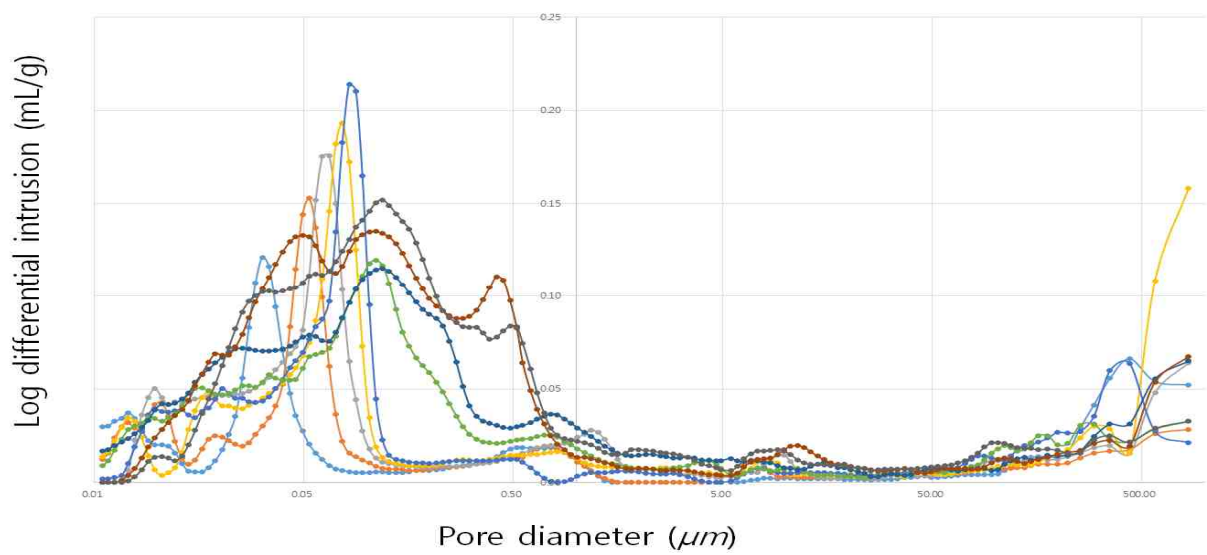


그림 3.3.9 MIP 분석 결과 (상온 ~ 800°C)

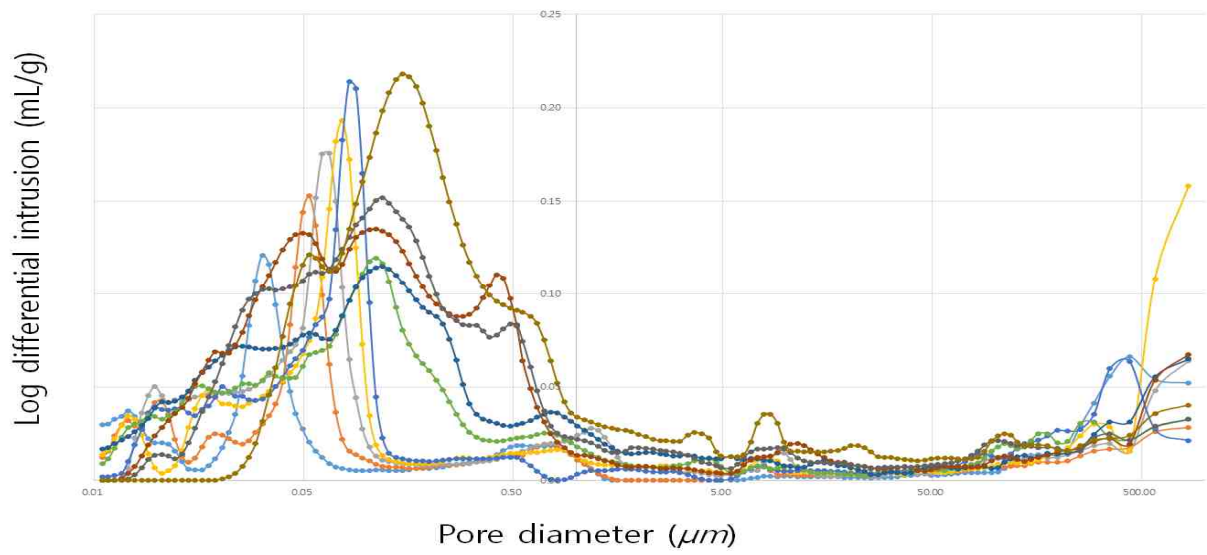


그림 3.3.10 MIP 분석 결과 (상온 ~ 900°C)

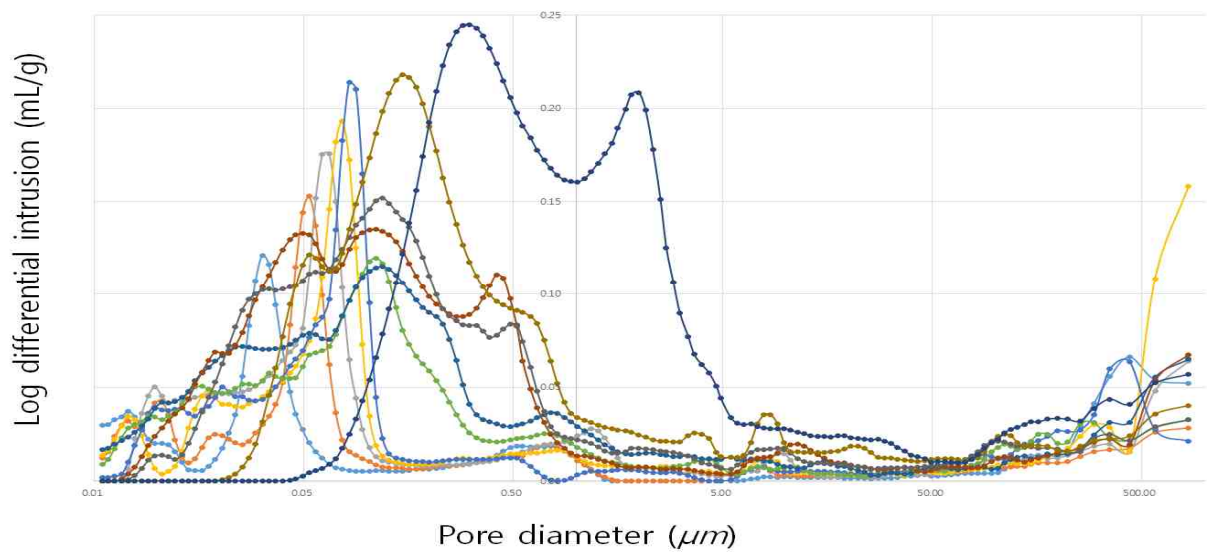


그림 3.3.11 MIP 분석 결과 (상온 ~ 1000°C)

② 시간 경과에 따른 후기재령에서의 공극구조 특성 변화

ㄱ. Cumulative intrusion

그림 3.3.12는 MIP (Mercury intrusion porosimetry) 테스트를 통해 열에 노출되지 않은 Control 샘플의 Cumulative intrusion을 분석한 것이다.

상기 결과에서 $0.05\ \mu\text{m}$ 이하의 Diameter of pores size가 대다수 분포하고 있으며, $0.05\ \mu\text{m}$ 이상 $500\ \mu\text{m}$ 이하의 pores가 일정한 분포를 보이는데 이는 시멘트 입자간 연결된 open pores인 것으로 분석된다.

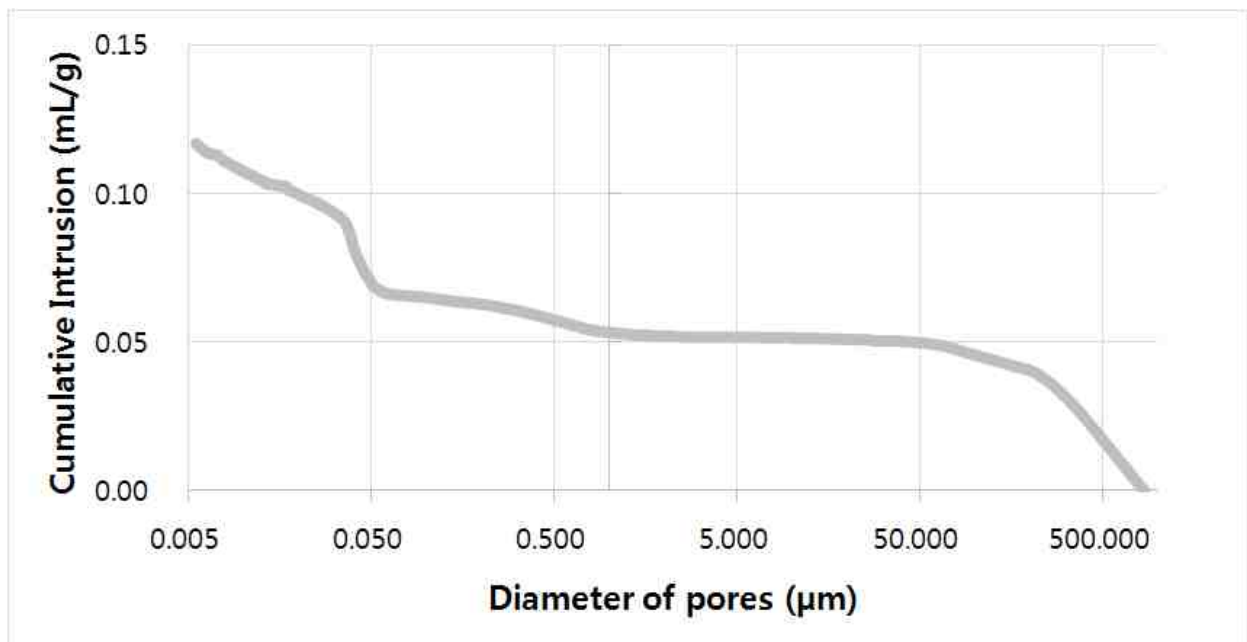


그림 3.3.12 Cumulative intrusion Control

그림 3.3.13 ~ 3.3.18은 MIP (Mercury intrusion porosimetry) 테스트를 통해 가열온도 100°C에 노출된 샘플의 재령별 Cumulative intrusion 분석 결과를 나타낸 것이다.

재령 1일에는 Control에 비해 0.05 μm 이상 500 μm 이하 pore diameter가 크게 감소하였으며, 0.05 μm 이하의 pores 역시 비슷한 규모로 감소하였다. 이는 시멘트 입자간 모세관 공극의 잉여수가 기화하여 공극이 감소한 것으로 보이며, 또한 0.05 μm 이하의 pores에 의해 침투된 수은의 총량은 큰 변화가 없다고 판단된다.

재령 3일에는 재령 1일에 비해 pore diameter의 변화가 크지 않은 것으로 나타났으나, 0.05 μm 미만 pores에서 극미세 pores의 양이 감소하였는데 이는 시멘트 분체의 수화에 의한 미세공극이 충전되어 치밀화 된 것으로 판단된다.

재령 7일에서 0.05 μm 이상의 pores가 0.1~0.2 μm 로 증가됨이 확인되었다. 이는 수화로 인한 미세공극 충전 후 팽창압에 의해 pores neck의 붕괴에 기인한 것으로 근접한 2~3개의 pores가 1개의 큰 pores로 변경 된 것으로 판단될 수 있다. 추가적으로 500 μm 이하 pores가 소량 증가 하였는데, 이는 내부 수화 팽창으로 인한 외부 open pores의 형성으로 판단된다.

재령 28일에는 재령 7일에서 충전된 0.1~0.2 μm 크기의 pores가 에트린자이트 및 수화 반응으로 부분 충전되어 0.05 μm 이하의 미세 공극으로 변화된 것에 기인한 것으로판단된다.

재령 90일에서 내부 0.05 μm 이하 pores에 대한 수화가 진행되고 있으나 시멘트 분말의 수화 반응기는 대부분 반응이 종료되어 그 진행 속도는 대단히 느리지는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 시료 내부에서 진행된 수화에 의한 pores내 팽창 치밀화로 외부와 연결된 neck ternal이 open 되어 0.05 μm 이상 500 μm 이하 pores의 수가 일정하게 생성되었다.

재령 180일 에서 0.05 μm 이하 및 0.05 μm 이상 500 μm 이하의 모든 pores에서 감소 현상이 보이고 있다. 이는 opened pores에 의해 유입된 CO₂와 H₂O의 공급으로 CaO가 탄산화 되어 CaCO₃로 변형되어 극미세 공극을 비롯하여 open pores의 주변에 형성되어 전체적인 pores의 크기를 감소시킨데 기인한 것으로 판단된다.

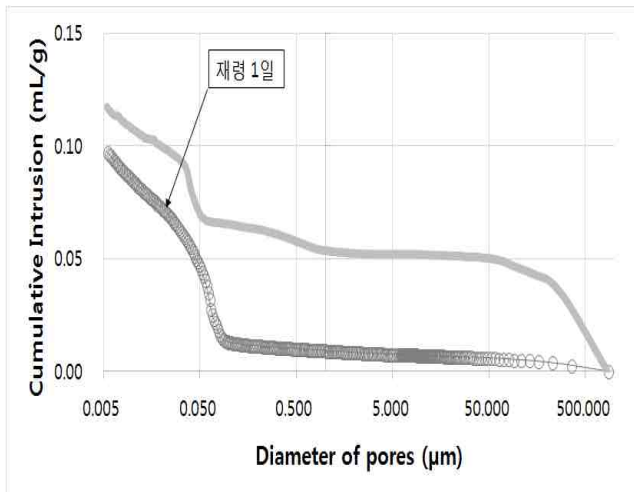


그림 3.3.13 Cumulative intrusion 100°C (재령 1일)

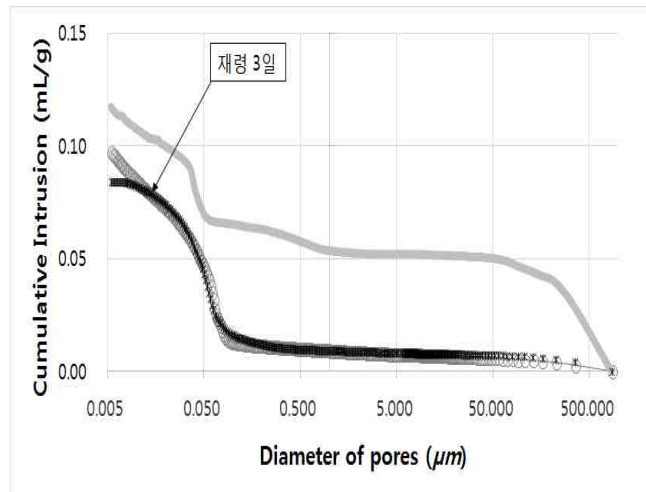


그림 3.3.14 Cumulative intrusion 100°C (재령 3일)

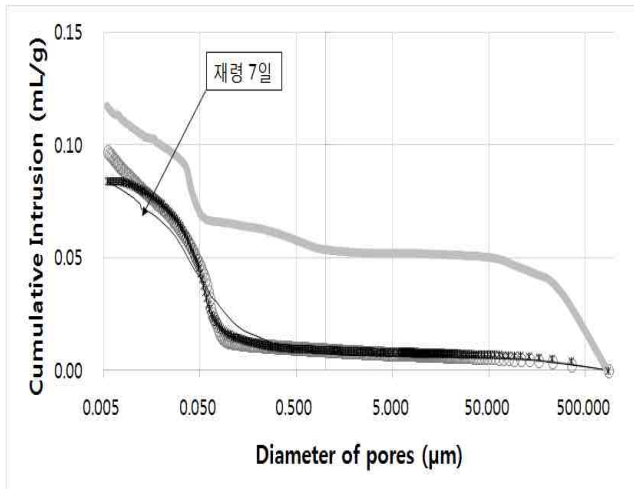


그림 3.3.15 Cumulative intrusion 100°C (재령 7일)

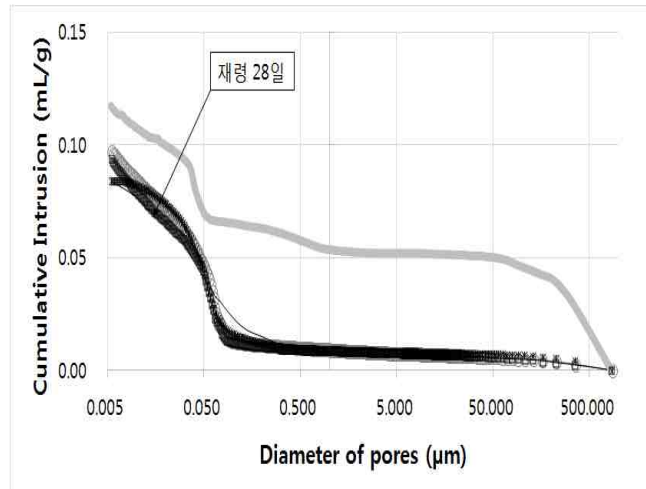


그림 3.3.16 Cumulative intrusion 100°C (재령 28일)

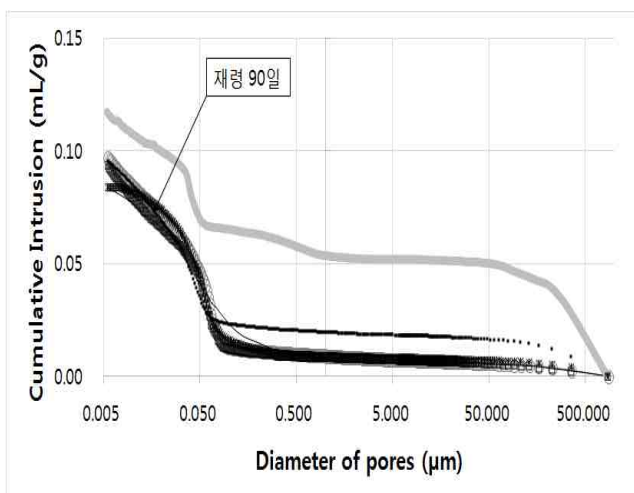


그림 3.3.17 Cumulative intrusion 100°C (재령 90일)

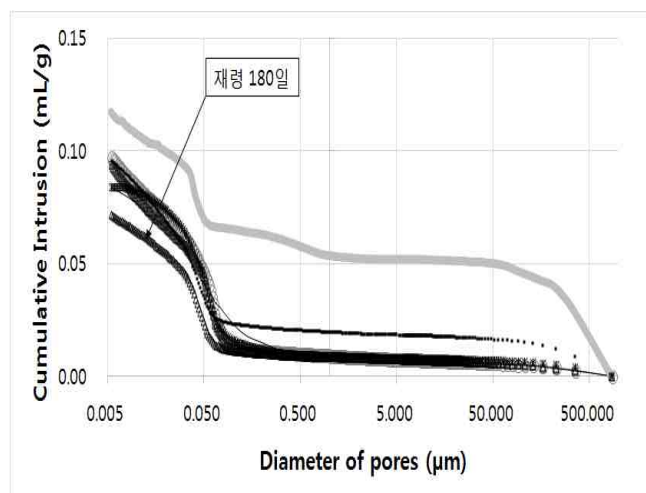


그림 3.3.18 Cumulative intrusion 100°C (재령 180일)

그림 3.3.19 ~ 3.3.30은 MIP (Mercury intrusion porosimetry) 테스트를 통해 가열온도 200~300°C에 노출된 샘플의 재령별 Cumulative intrusion 분석결과를 나타낸 것이다.

재령 1일에는 Control에 비해 0.05 μm 이상 500 μm 이하 pore diameter가 크게 감소하였으며, 0.05 μm 이하의 pores 역시 비슷한 규모로 감소하였다. 이는 시멘트 입자간 모세관 공극 및 겔 공극의 잉여수가 기화하여 공극이 감소한 것으로 보이며, 또한 0.05 μm 이하의 pores에 의해 침투된 수은의 총량은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 그러나 100°C에서 진행된 것에 비하여 전반적인 0.05 μm 이상 500 μm 이하의 pores는 증가하였는데, 이는 시멘트 분체 간에 neck을 형성하는데 필요한 화학적 결합수까지 기화되어 neck을 형성하지 못하고 open pores를 형성함으로 발생한 것으로 분석된다.

재령 3일에 재령 1일에 비해 pore diameter의 변화는 크지 않다. 그러나 0.05 μm 미만 pores에서 극미세 pores와 0.05 μm 이상 500 μm 이하의 pores의 양이 감소하였는데, 이는 시멘트 분체의 수화에 의한 미세공극 충전되어 치밀화 되었으며, 추가적으로 open neck 주변에서도 수화가 진행되어 close pores가 된 것으로 예상된다.

재령 7일에서 0.05 μm 이하의 pores가 0.1~5.0 μm 로 증가됨이 확인되었다. 이는 수화로 인한 미세공극 충전 후 팽창압에 의해 pores neck의 붕괴로 근접한 2~100개의 pores가 1개의 큰 pores로 변경됨에 따라 나타난 결과로 사료된다.

재령 28일에는 재령 7일에서 발생한 충전된 0.1~5.0 μm 크기의 pores가 에트린자이트 및 수화반응으로 부분 충전되어 0.05 μm 이하의 미세 공극으로 변화된 것으로 판단할 수 있다.

재령 90일에서 내부 0.05 μm 이하 pores에 대한 수화가 진행되고 있으나 시멘트 분말의 수화 반응기는 대부분 반응이 종료되어 그 진행 속도는 대단히 느리게 나타났다. 추가적으로 시료 내부에서 진행된 수화에 의한 pores내 팽창 치밀화로 외부와 연결된 neck ternal이 open 되어 0.05 μm 이상 500 μm 이하 pores의 수가 일정하게 생성되었다.

재령 180일에서 0.05 μm 이하 및 0.05 μm 이상 500 μm 이하의 모든 pores에서 감소 현상이 나타났다. 이는 open pores에 의해 유입된 CO_2 와 H_2O 의 공급으로 CaO가 탄산화되어 CaCO_3 로 변형되어 극미세 공극을 비롯하여 open pores 주변에 형성됨에 따라 전체적인 pores의 크기가 감소된 것으로 분석된다.

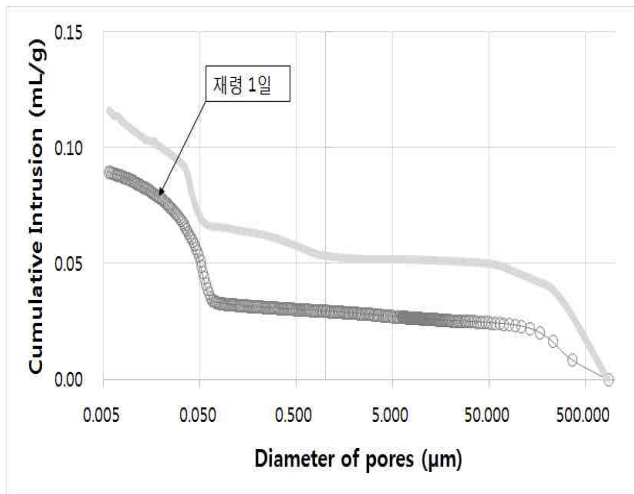


그림 3.3.19 Cumulative intrusion 200°C (재령 1일)

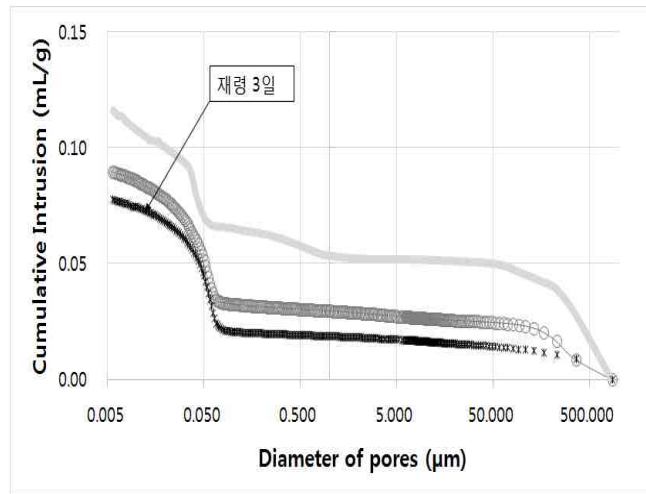


그림 3.3.20 Cumulative intrusion 200°C (재령 3일)

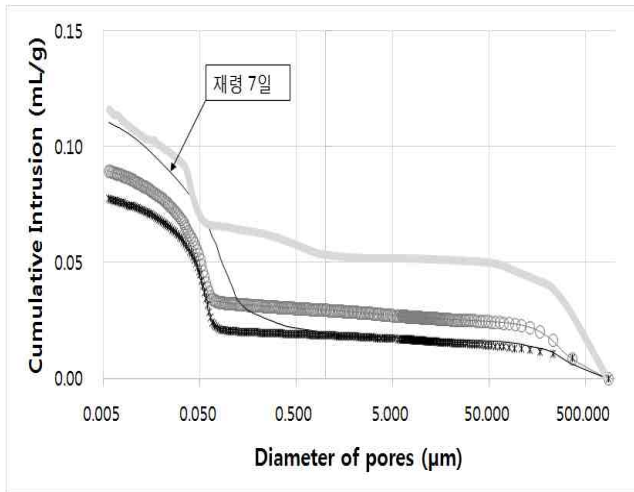


그림 3.3.21 Cumulative intrusion 200°C (재령 7일)

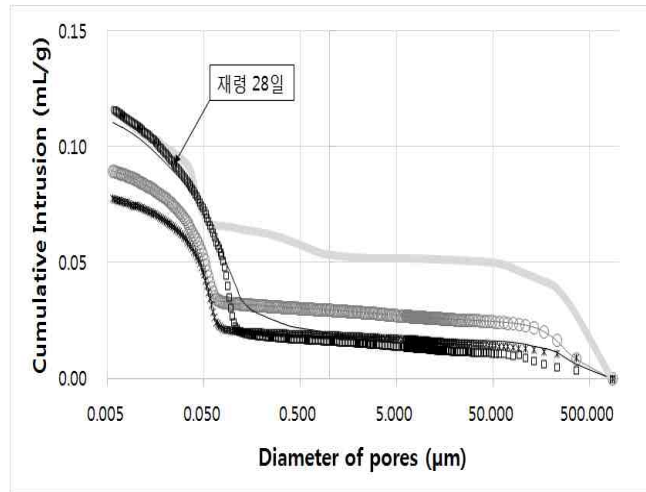


그림 3.3.22 Cumulative intrusion 200°C (재령 28일)

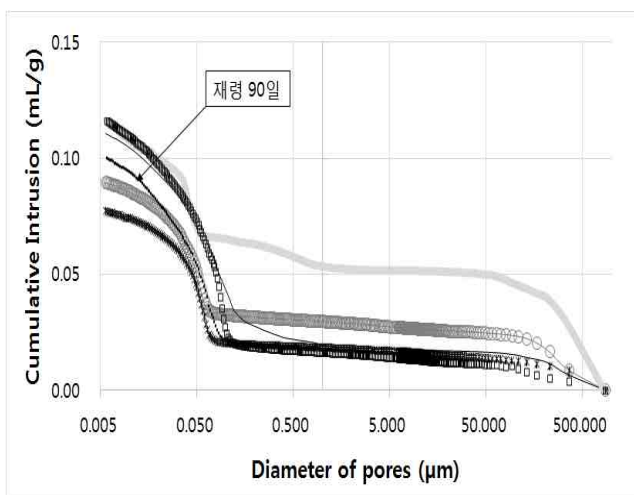


그림 3.3.23 Cumulative intrusion 200°C (재령 90일)

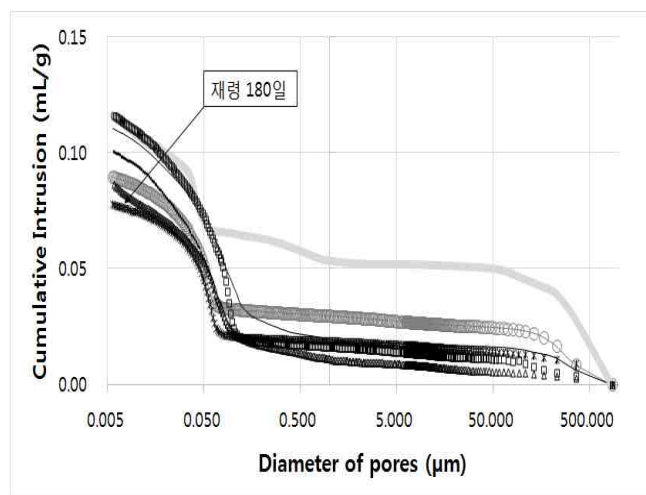


그림 3.3.24 Cumulative intrusion 200°C (재령 180일)

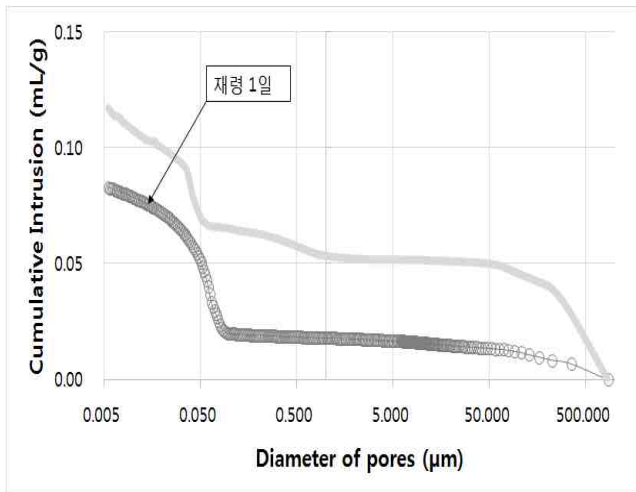


그림 3.3.25 Cumulative intrusion 300°C (재령 1일)

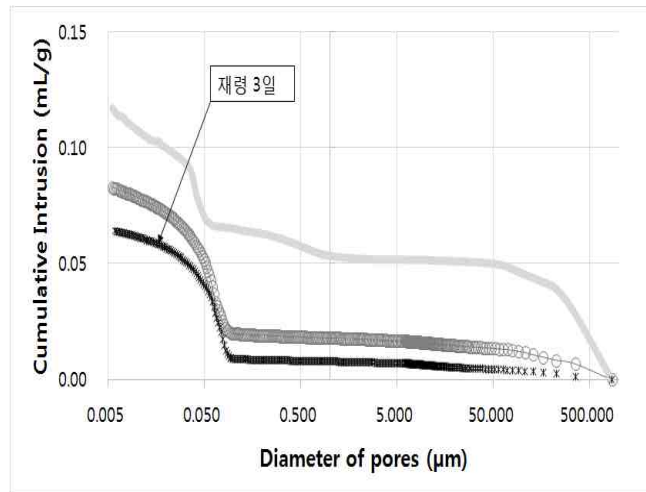


그림 3.3.26 Cumulative intrusion 300°C (재령 3일)

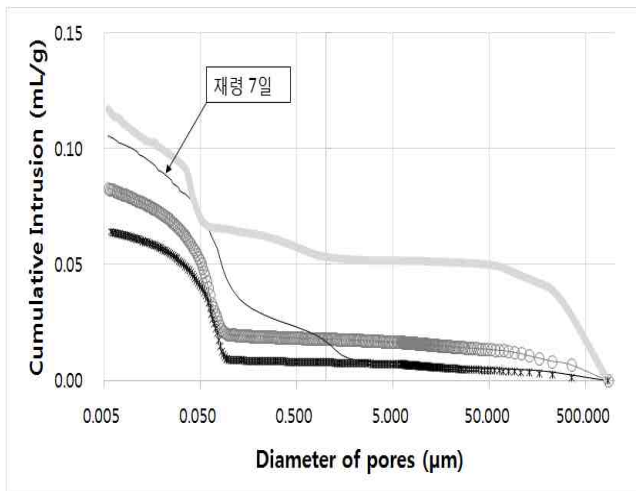


그림 3.3.27 Cumulative intrusion 300°C (재령 7일)

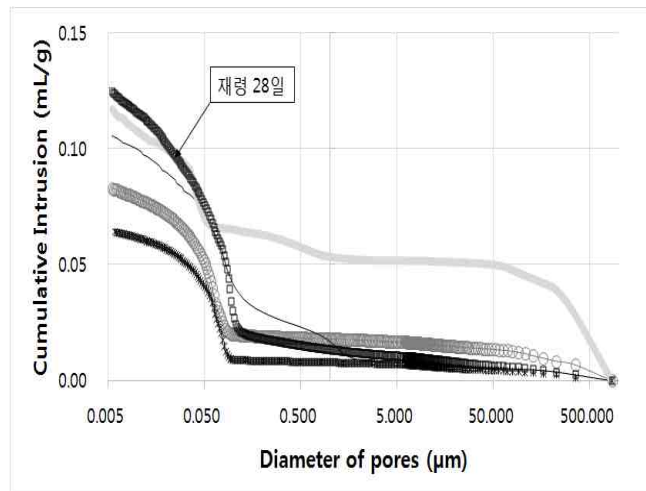


그림 3.3.28 Cumulative intrusion 300°C (재령 28일)

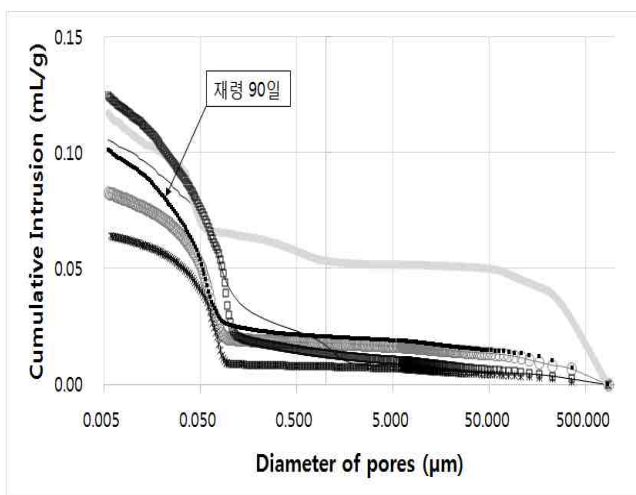


그림 3.3.29 Cumulative intrusion 300°C (재령 90일)

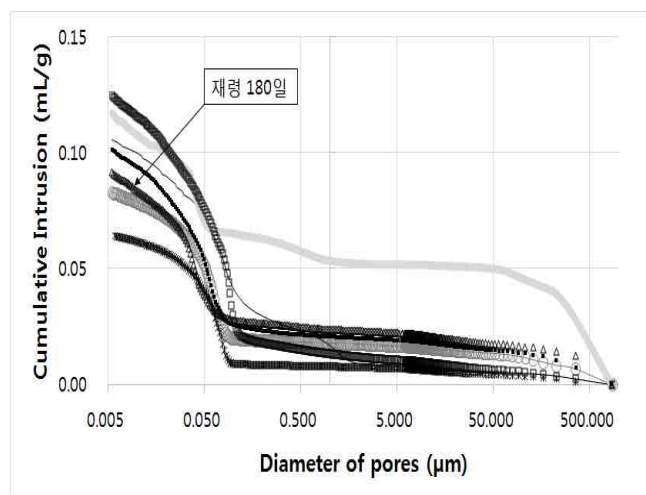


그림 3.3.30 Cumulative intrusion 300°C (재령 180일)

그림 3.3.31 ~ 3.3.48은 MIP (Mercury intrusion porosimetry) 테스트를 통해 가열온도 400~600°C에 노출된 샘플의 재령별 Cumulative intrusion 분석결과를 나타낸 것이다.

전반적으로 재령 1일에는 Control에 비해 pore diameter가 증가하였는데, 이는 400°C 이상에서 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)이 CaO 와 H_2O 로 분해되어 CaO 및 Na 가 SiO_2 와 반응하여 포타슘 유리 또는 칼슘 유리화 되어 시멘트 미립자 표면을 유리화 시키고, 유리화된 비정질 고상체에 O_2 및 화학결합수 증발 기체가 고립되어(Close pores) 1 μm 이하의 pores 양이 증가한 것으로 판단된다. 또한, 급격한 냉각에 의한 열충격으로 비정질 유리화된 표면(grain boundary)의 neck이 파괴되어 open pores가 형성되어 1~50 μm 의 pores가 다수 형성된 것에 기인한 것으로 판단된다.

재령 3일에 재령 1일에 비해 pore diameter가 감소하였으며, 0.1 μm 미만 pores에서 극 미세 pores와 0.1 μm 이상 50 μm 이하의 pores의 양이 감소하였는데, 이는 시멘트 분체의 수화에 의한 미세공극 충전되어 치밀화 되었으며, 추가적으로 open neck 주변에서도 수화가 진행되어 close pores가 된 것으로 예상된다.

재령 7일에서 0.1 μm 이하의 pores가 0.1~5.0 μm 로 증가됨이 확인된다. 이는 수화로 인한 미세공극 충전 후 팽창압에 의해 pores neck이 확대되어 open pores가 서로 연결되면서 외부로 연결되는 50 μm 이하의 pores로 확대되었다. 또한 5 μm 이하의 pores가 주변 neck의 붕괴로 근접한 2~100개의 pores가 1개의 큰 pores로 변경된 결과에 따라 나타난 것으로 분석된다.

28일에는 재령 7일에서 발생한 충전된 0.1~50 μm 크기의 pores가 에트린자이트 및 수화 반응으로 부분 충전되나 open pores의 공극을 매워 50 μm 이상의 pores를 3 μm 이하 다수의 pores로 변형됨을 판단할 수 있었다.

재령 90일에서 내부 0.05 μm 이하 pores에 대한 수화가 진행되고 있으나, 시멘트 분말의 수화 반응기는 대부분 반응이 종료된 것으로 나타났다. 그러나 고온에 의한 화학적 분해가 발생된 CaO , NaO 등이 opened pores를 통해 공급된 CO_2 및 H_2O 에 의해 쉽게 탄산화되어 CaCO_3 로 변형되어 미세 공극의 충전을 이끌어 내었다. 또한, 재령 180에서는 90일과 유사한 결과를 나타내었다.

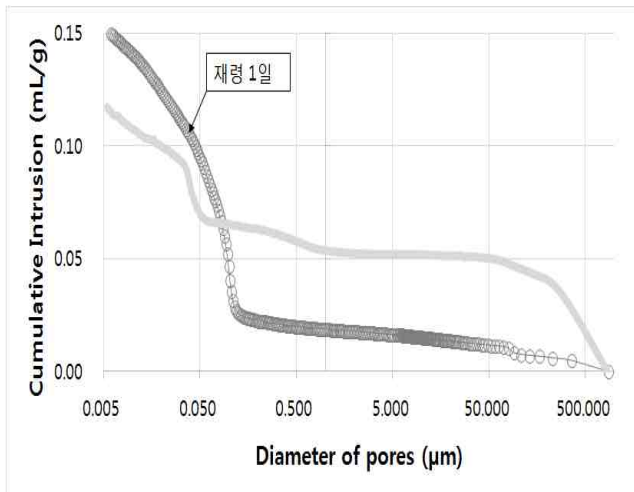


그림 3.3.31 Cumulative intrusion 400°C (재령 1일)

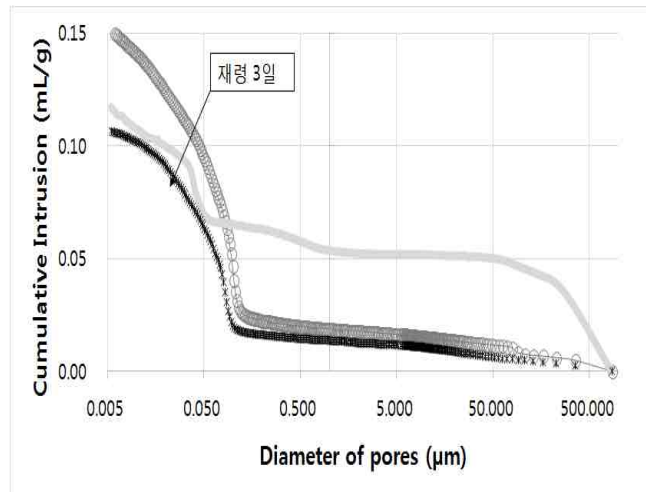


그림 3.3.32 Cumulative intrusion 400°C (재령 3일)

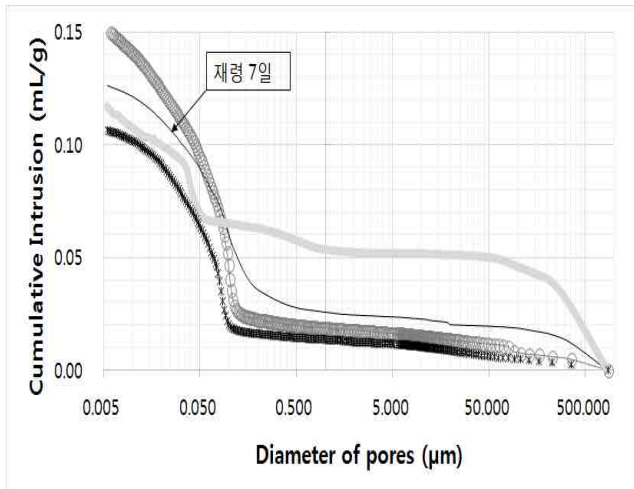


그림 3.3.33 Cumulative intrusion 400°C (재령 7일)

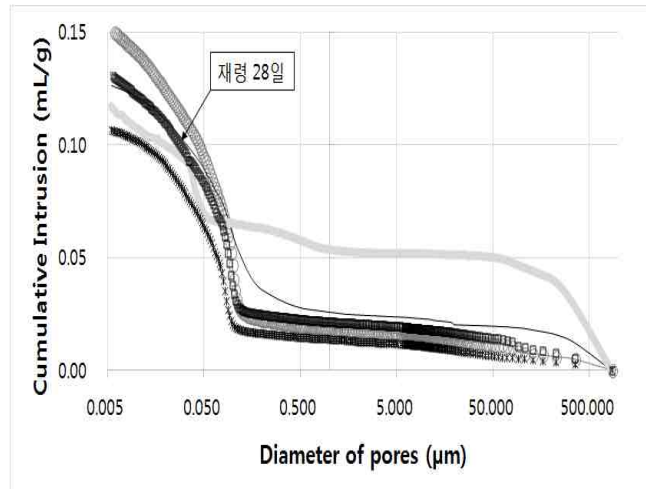


그림 3.3.34 Cumulative intrusion 400°C (재령 28일)

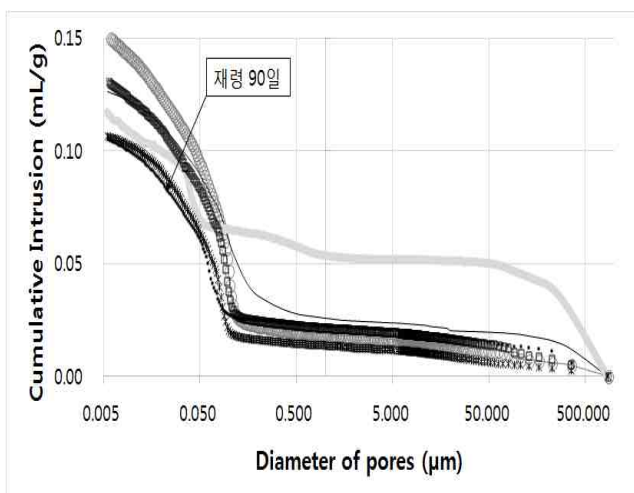


그림 3.3.35 Cumulative intrusion 400°C (재령 90일)

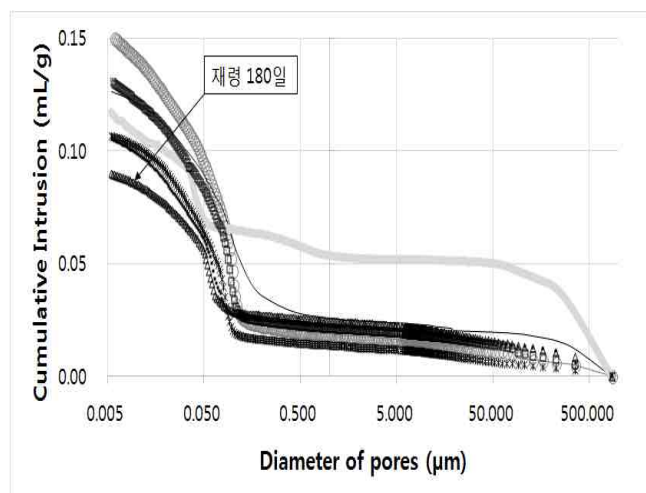


그림 3.3.36 Cumulative intrusion 400°C (재령 180일)

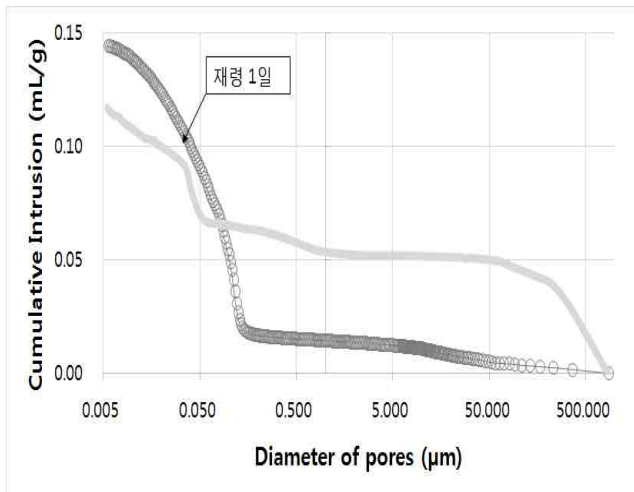


그림 3.3.37 Cumulative intrusion 500°C (재령 1일)

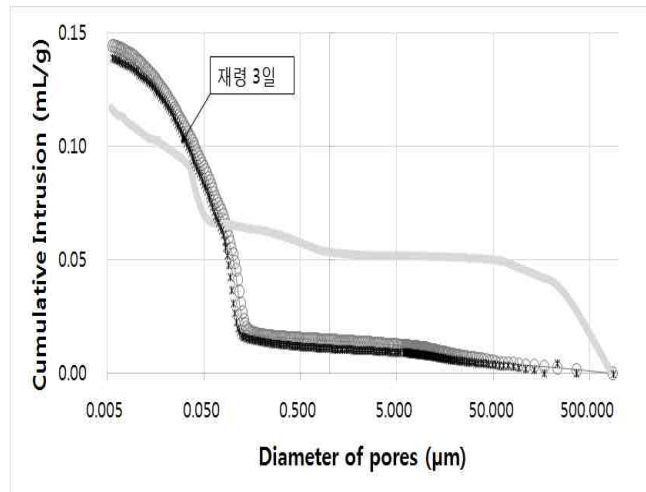


그림 3.3.38 Cumulative intrusion 500°C (재령 3일)

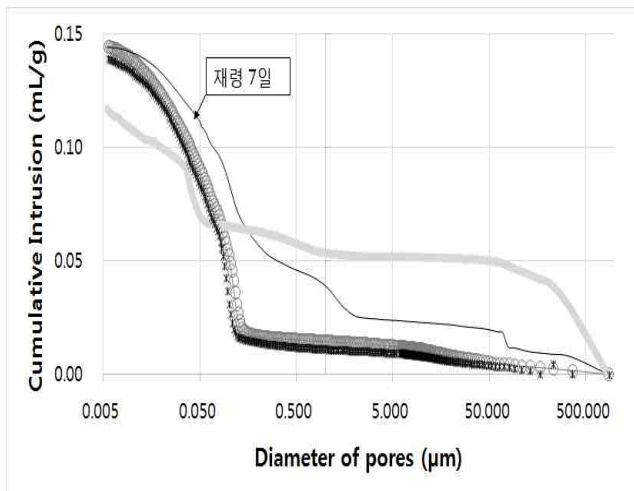


그림 3.3.39 Cumulative intrusion 500°C (재령 7일)

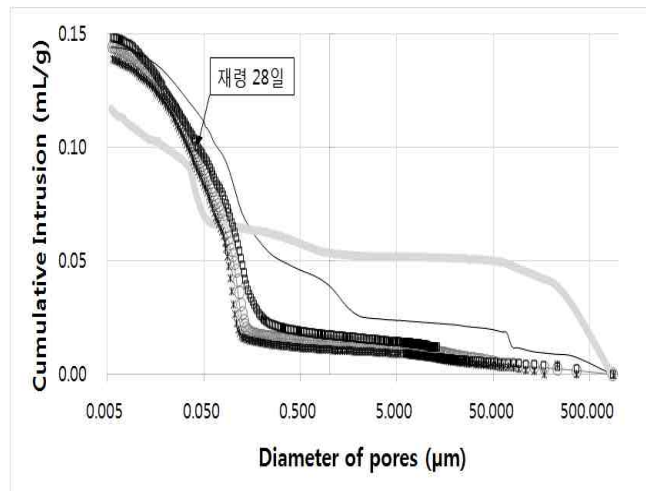


그림 3.3.40 Cumulative intrusion 500°C (재령 28일)

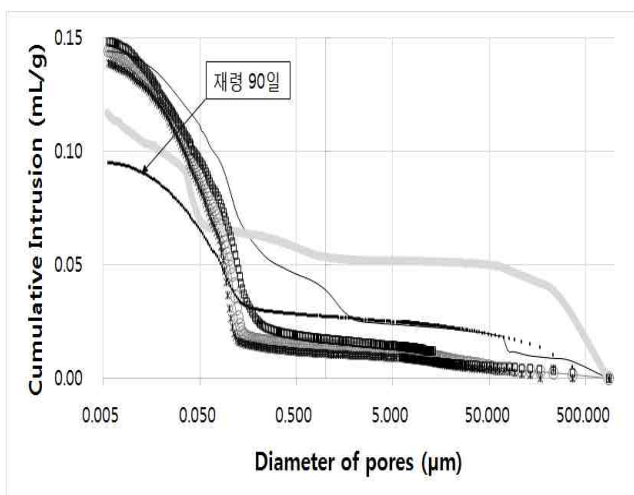


그림 3.3.41 Cumulative intrusion 500°C (재령 90일)

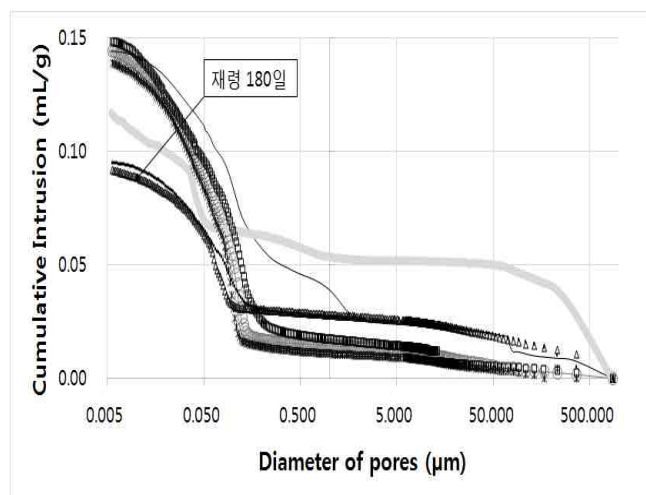


그림 3.3.42 Cumulative intrusion 500°C (재령 180일)

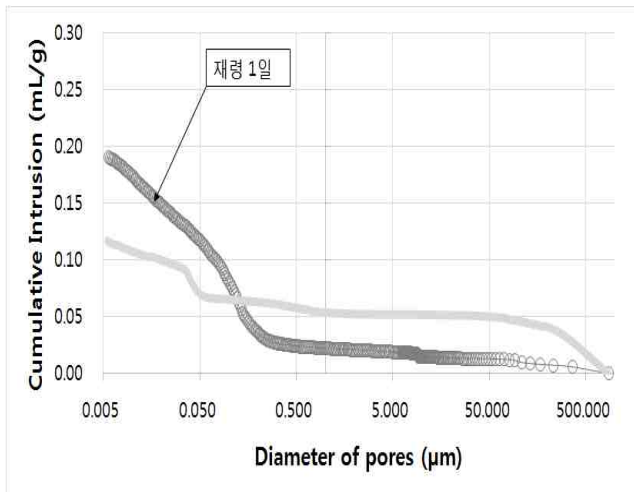


그림 3.3.43 Cumulative intrusion 600°C (재령 1일)

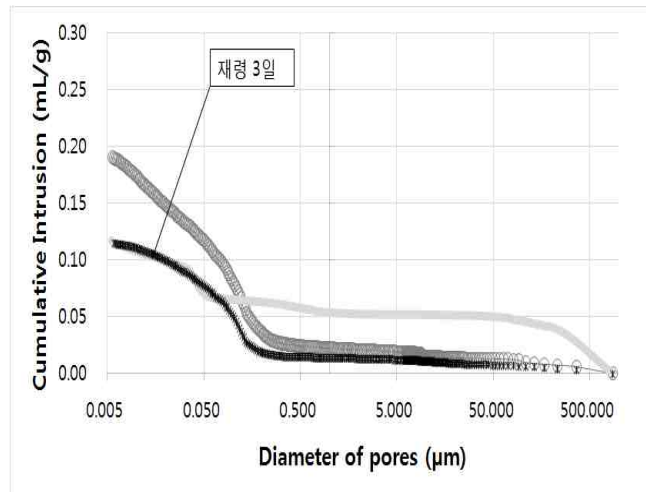


그림 3.3.44 Cumulative intrusion 600°C (재령 3일)

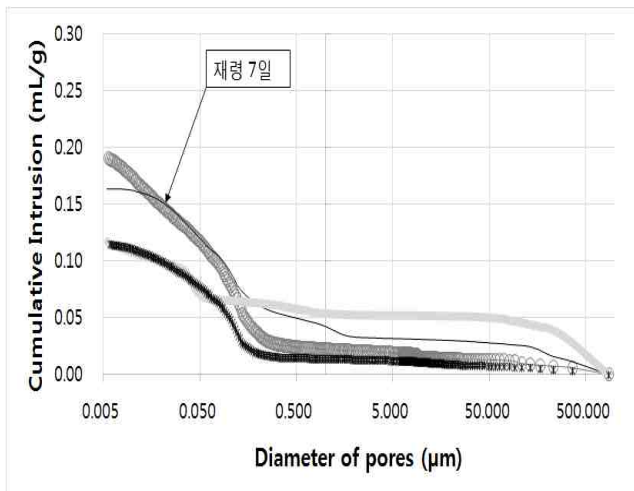


그림 3.3.45 Cumulative intrusion 600°C (재령 7일)

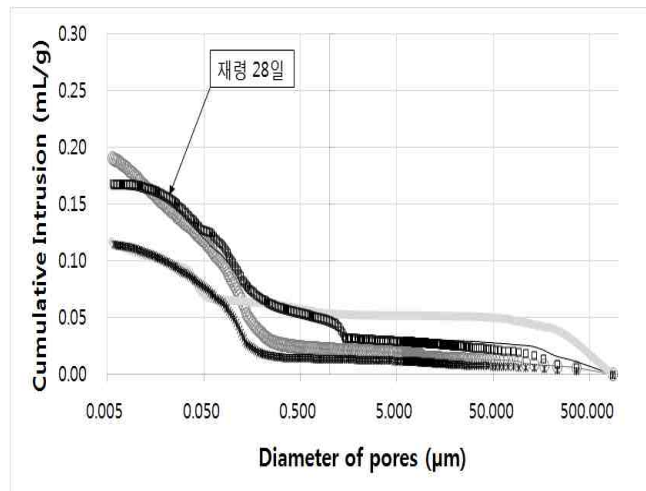


그림 3.3.46 Cumulative intrusion 600°C (재령 28일)

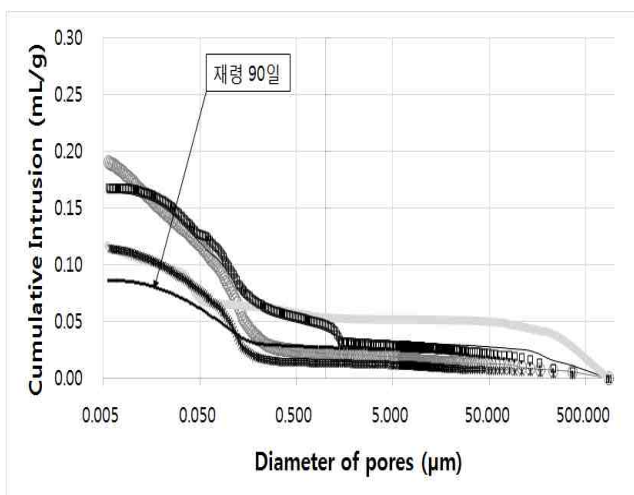


그림 3.3.47 Cumulative intrusion 600°C (재령 90일)

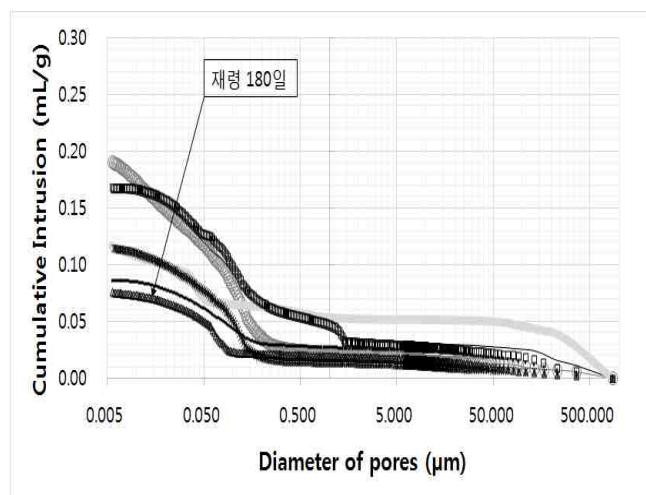


그림 3.3.48 Cumulative intrusion 600°C (재령 180일)

그림 3.3.49 ~ 3.4.72는 MIP (Mercury intrusion porosimetry) 테스트를 통해 가열온도 700~1000°C에 노출된 샘플의 Cumulative intrusion 분석결과를 나타낸 것이다.

전반적으로 재령 1일에는 Control에 비해 pore diameter가 증가하였는데, 이는 700~100°C 이상에서 시멘트 입자의 주된 성분인 탄산칼슘(CaCO_3)이 CaO 와 CO_2 로 분해되고 CaO 및 Na 가 SiO_2 와 반응하여 포타슘 유리 또는 칼슘 유리화 되어 SiO_2 와 반응함으로써 전체적으로 유리화가 진행되었다. 유리화된 비정질 고상체에 분해로 인해 발생한 O_2 기체가 고립되어 include gas가 다수 포집됨으로써 공극(Close pores) 및 grain 내에 포집된 5 μm 이하의 pores량이 증가한 것으로 판단된다. 또한 급격한 냉각에 의한 열충격으로 비정질 유리화된 표면(grain boundary)의 neck이 파괴되어 open pores가 형성되어 5~500의 pores가 다수 형성된 것으로 나타났다.

재령 3일에 grain에 존재하던 pores 주변에 과 농축된 CaO 는 급속한 수화물을 형성하여 급격한 pores를 충전/치밀화 시켰다. Grain neck을 통해 반응성 인자의 급속한 확산을 동반하여 open neck 및 open pores 주변에 대한 수화가 동시에 진행되어 0.2 μm 이상 5.0 μm 이하의 pores를 급속하게 수화 충전 시켰는데, 이러한 급속 수화는 0.05 μm 이하의 극미세 pores의 감소에 매우 큰 영향을 준 것으로 분석된다.

재령 3일에서 급속한 수화반응으로 표면 수화층이 형성되면 확산에 의한 내부 수화가 지연되었다. (Oxygen barrier effect). 따라서 재령 7일은 3일과 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다.

28일에는 재령 7일에서 발생한 Oxygen barrier를 확산 침투하여 내부 수화물질의 수화가 진행되는 것으로 나타났다. 초기 형성된 표면 수화층 및 유리화층이 박락 붕괴되고 함몰되어 전체적인 pores의 량이 증가함을 확인할 수 있었다.

재령 90일에는 박락되어 노출된 내부 수화물질의 수화가 진행되었고, 또한 추가적으로 CaO 는 CaCO_3 를 형성하여 체적 팽창을 야기하였으며, 이는 주변에 존재하는 미세공극(pores)를 충전시켜 전체적인 pores량의 감소를 야기하는 것으로 나타났다. 그러나 이때 발생한 CaCO_3 는 결합력에 기여하는 바가 적어 pores량 감소에 기여하더라도 전체적인 내구성(결합력)은 감소할 것으로 분석된다. 또한, 재령 180의 경우는 90일과 유사한 결과를 나타냈었다.

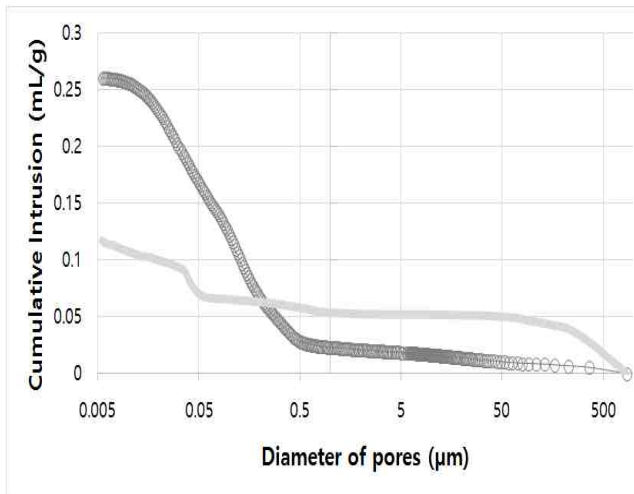


그림 3.3.49 Cumulative intrusion 700°C (재령 1일)

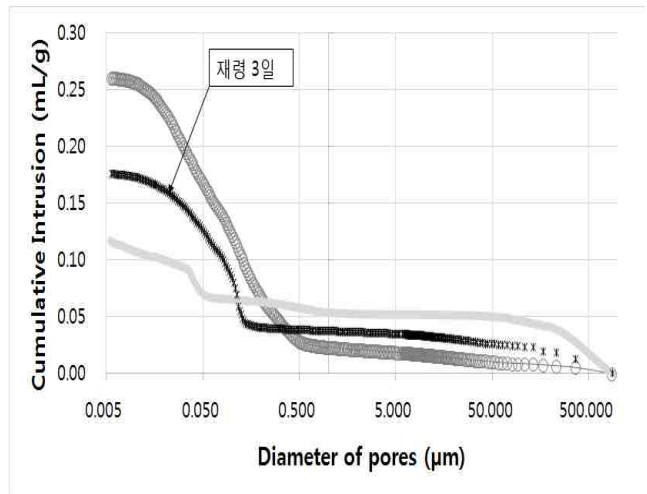


그림 3.3.50 Cumulative intrusion 700°C (재령 3일)

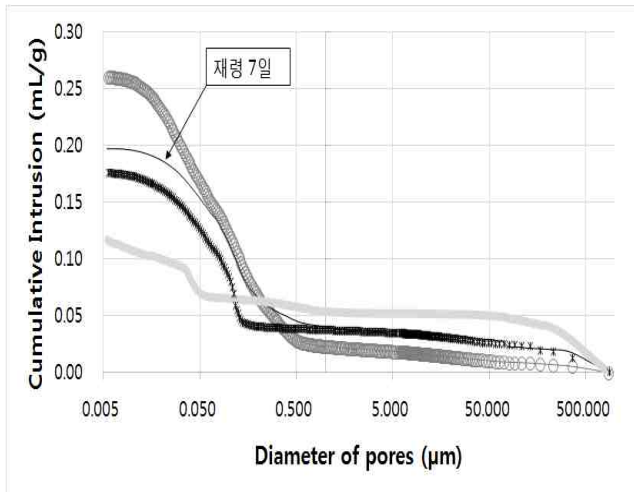


그림 3.3.51 Cumulative intrusion 700°C (재령 7일)

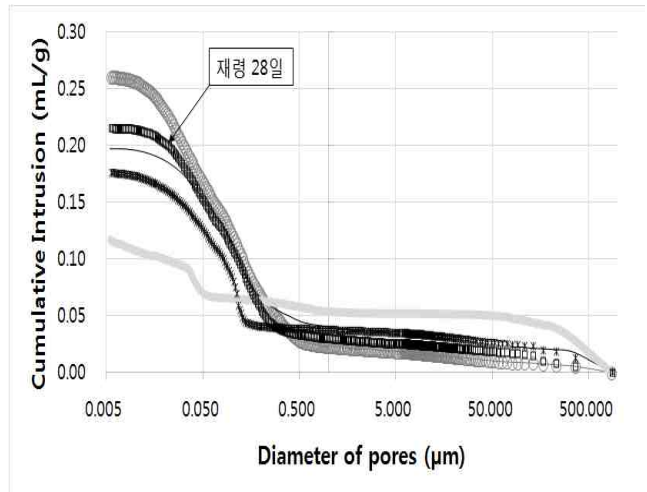


그림 3.3.52 Cumulative intrusion 700°C (재령 28일)

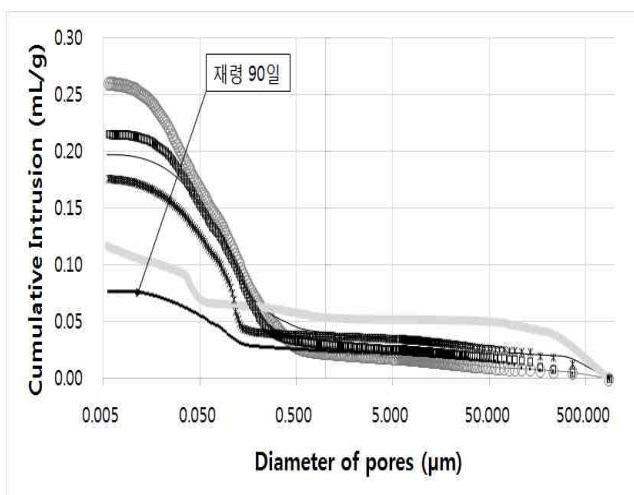


그림 3.3.53 Cumulative intrusion 700°C (재령 90일)

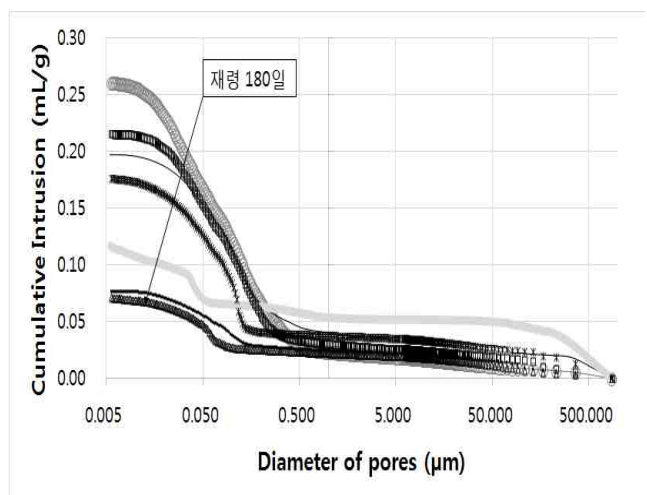


그림 3.3.54 Cumulative intrusion 700°C (재령 180일)

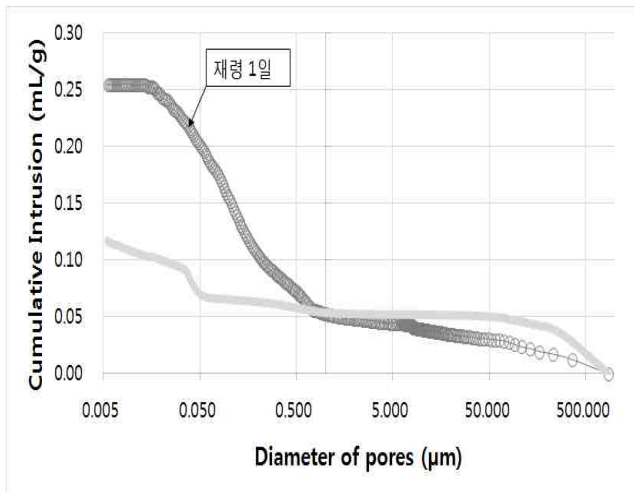


그림 3.3.55 Cumulative intrusion 800°C (재령 1일)

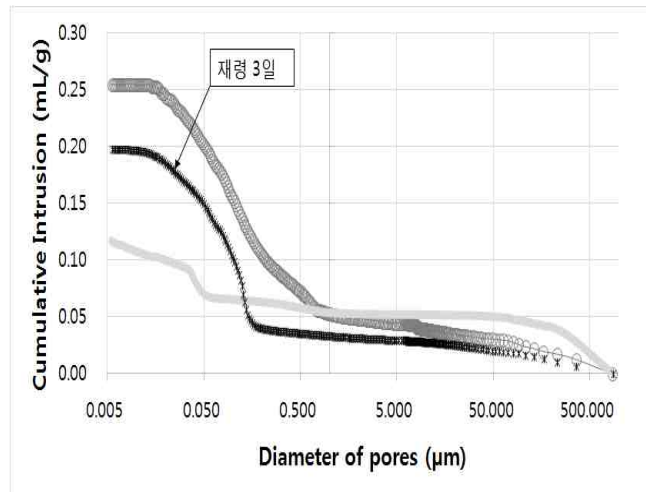


그림 3.3.56 Cumulative intrusion 800°C (재령 3일)

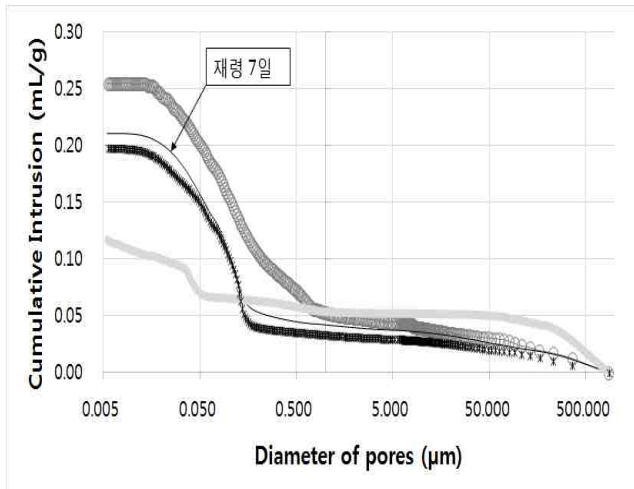


그림 3.3.57 Cumulative intrusion 800°C (재령 7일)

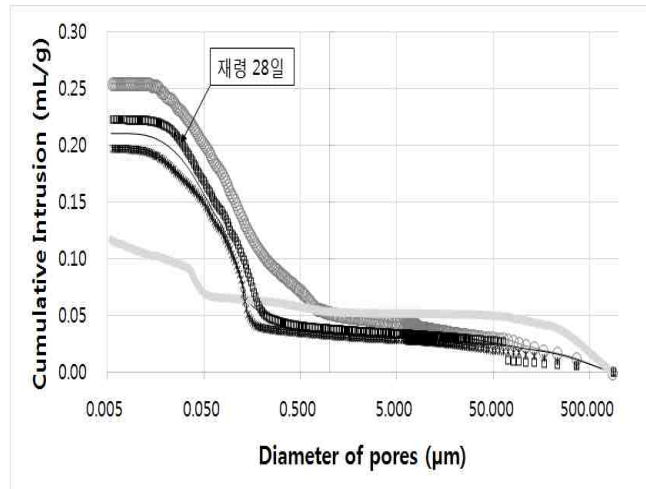


그림 3.3.58 Cumulative intrusion 800°C (재령 28일)

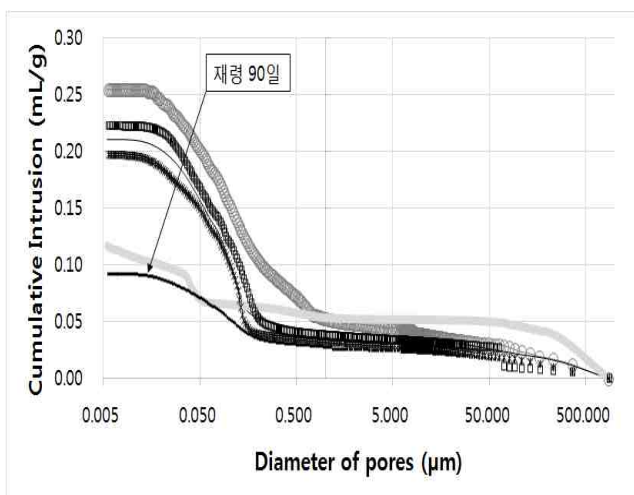


그림 3.3.59 Cumulative intrusion 800°C (재령 90일)

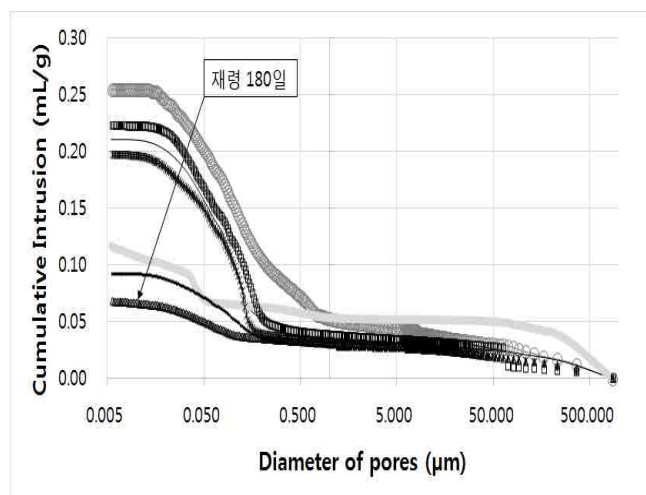


그림 3.3.60 Cumulative intrusion 800°C (재령 180일)

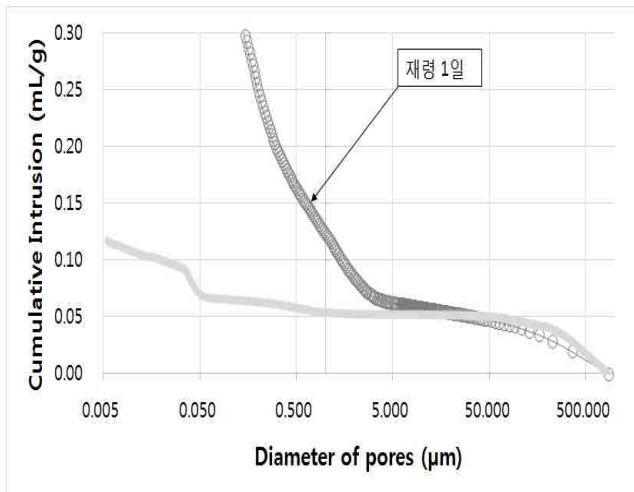


그림 3.3.61 Cumulative intrusion 900°C (재령 1일)

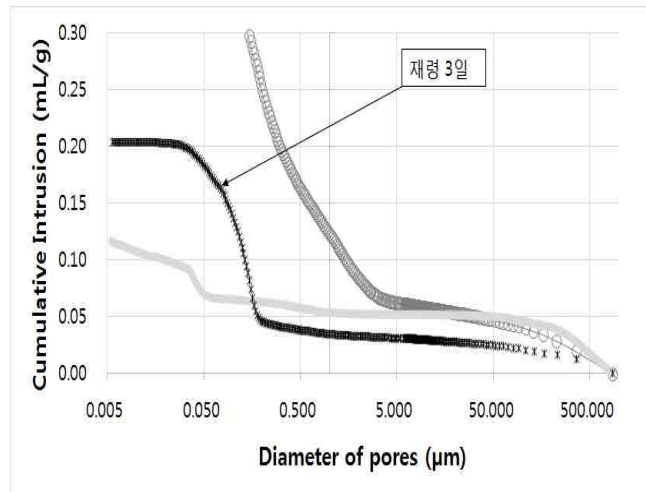


그림 3.3.62 Cumulative intrusion 900°C (재령 3일)

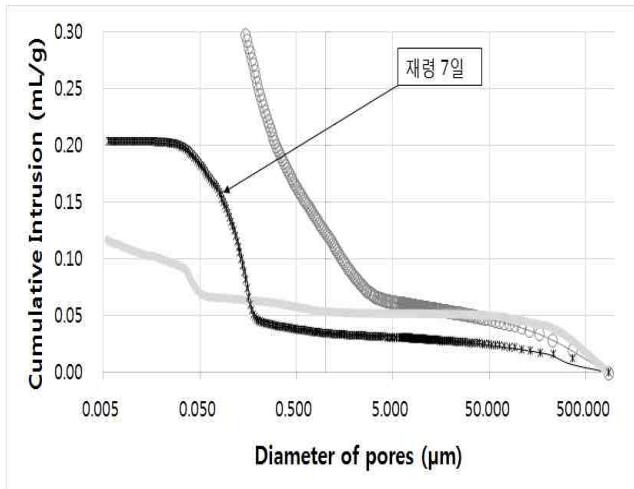


그림 3.3.63 Cumulative intrusion 900°C (재령 7일)

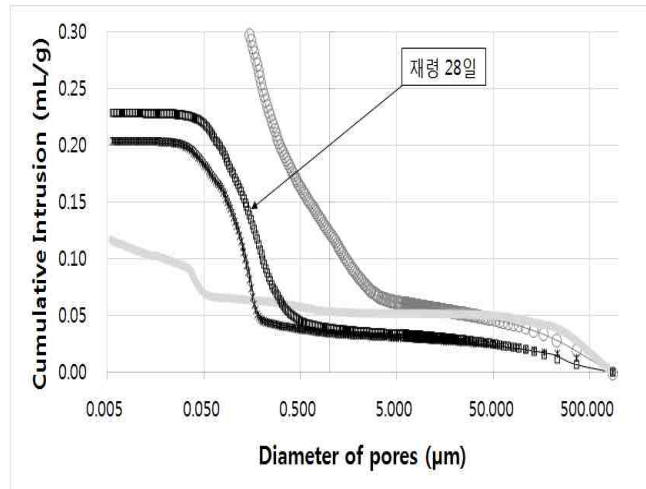


그림 3.3.64 Cumulative intrusion 900°C (재령 28일)

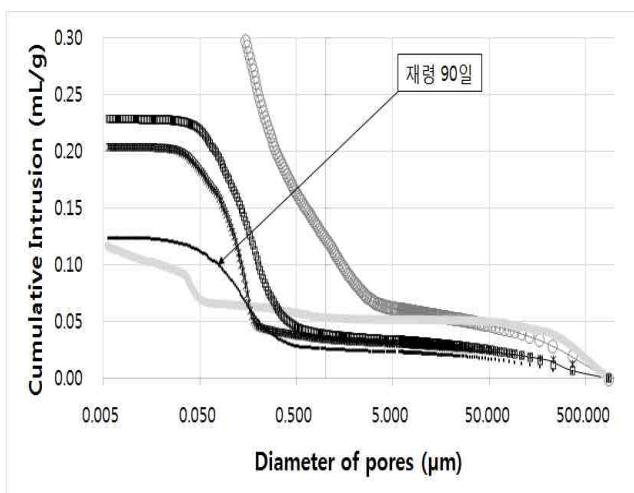


그림 3.3.65 Cumulative intrusion 900°C (재령 90일)

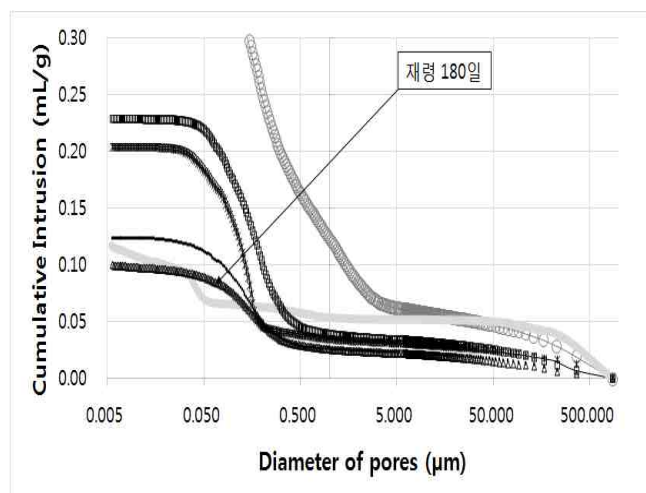


그림 3.3.66 Cumulative intrusion 900°C (재령 180일)

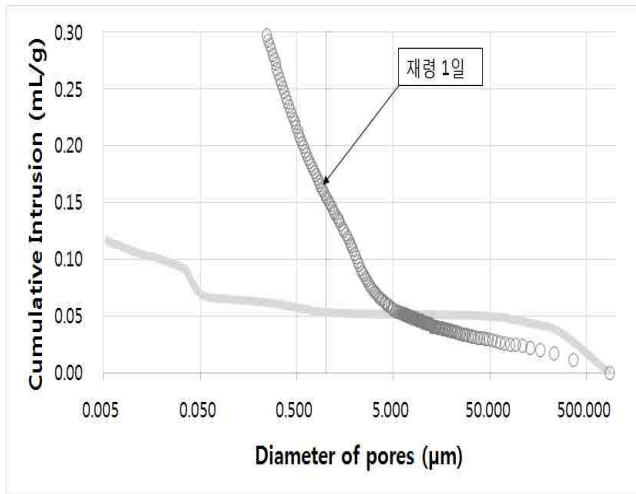


그림 3.3.67 Cumulative intrusion 1000°C (재령 1일)

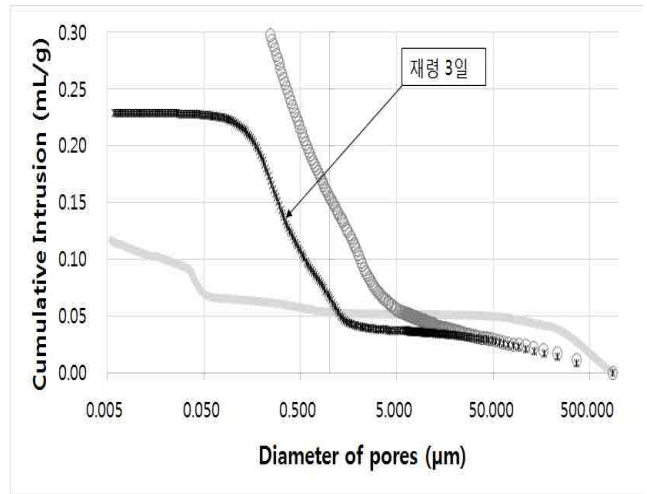


그림 3.3.68 Cumulative intrusion 1000°C (재령 3일)

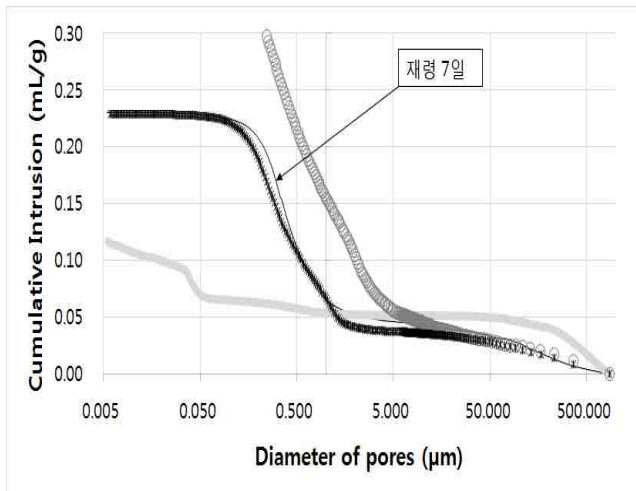


그림 3.3.69 Cumulative intrusion 1000°C (재령 7일)

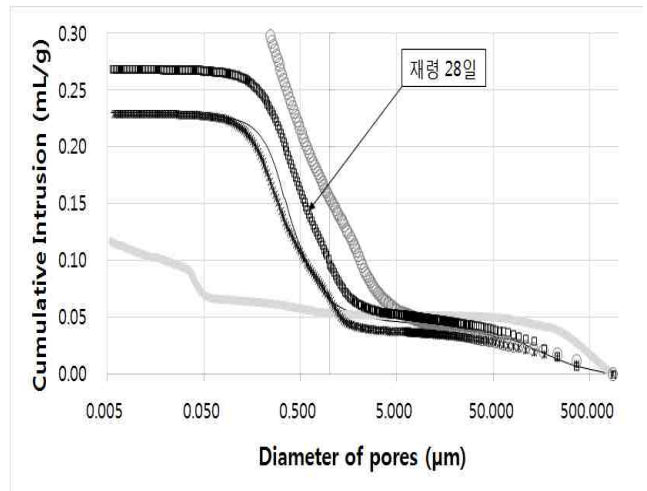


그림 3.3.70 Cumulative intrusion 1000°C (재령 28일)

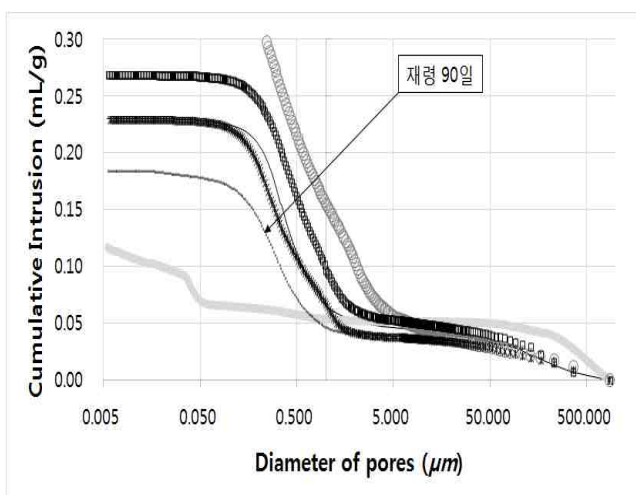


그림 3.3.71 Cumulative intrusion 1000°C (재령 90일)

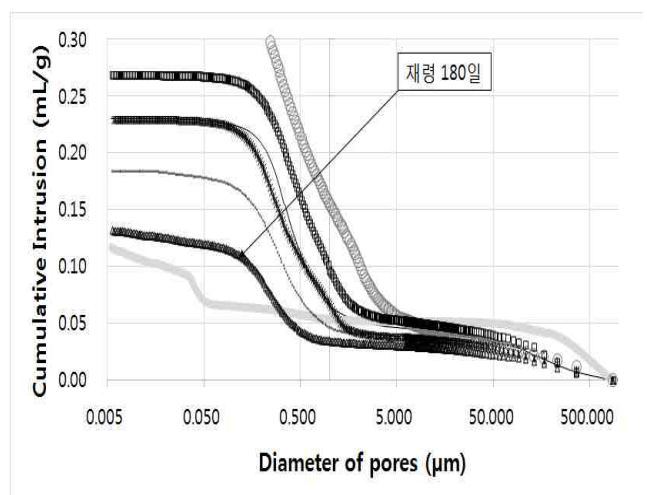


그림 3.3.72 Cumulative intrusion 1000°C (재령 180일)

ㄴ. Pore distribution

그림 3.3.73은 MIP (Mercury intrusion porosimetry) 테스트를 통해 고온에 노출되지 않은 Control 샘플의 Pore distribution을 분석한 것이다. 0.05 μm 이하의 pores size가 대다수 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다.

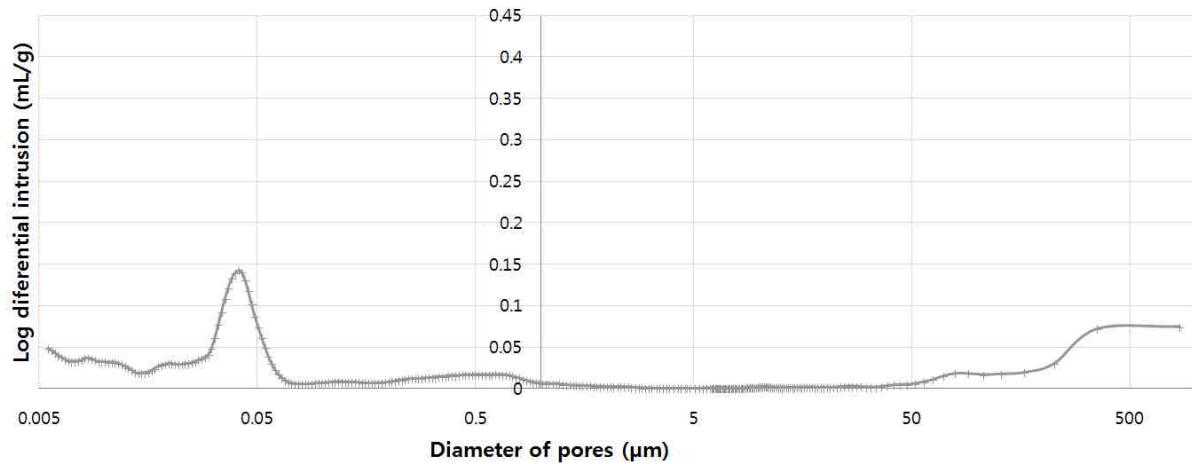


그림 3.3.73 Pore distribution Control

그림 3.3.74 ~ 3.3.79는 MIP (Mercury intrusion porosimetry) 테스트를 통해 가열온도 100°C에 노출된 샘플의 재령별 Pore distribution을 분석한 것이다.

재령 1일에는 Control에 비해 0.005 μm 이상 0.01 μm 이하 pore diameter가 증가하였으나, 50 μm 이상 500 μm 이하의 pores가 감소하였다. 이는 시멘트 입자간 모세관 공극의 잉여수가 기화하여 공극이 감소한 것으로 판단된다.

재령 3일에 재령 1일에 비해 pore diameter의 변화는 크지 않다. 그러나 0.05 μm 미만 pores에서 극미세 pores의 양이 감소하였는데 이는 시멘트 분체의 수화에 의한 미세공극 충전되어 치밀화에 기인한 것으로 분석된다.

재령 7일에서 0.05 μm 이상의 pores가 0.1~0.5 μm 로 증가됨이 확인되었는데, 이는 수화로 인한 미세공극 충전 후 팽창압에 의해 pores neck의 붕괴로 이어져 근접한 2~3개의 pores가 1개의 큰 pores로 변경됨에 따라 나타난 것으로 판단된다. 또한, 500 μm 이하 pores가 소량 증가 하였는데, 이는 내부 수화 팽창으로 인한 외부 open pores의 형성에 기인한 것으로 판단된다.

28일에는 재령 7일에서 발생/충전된 0.1~0.2 μm 크기의 pores가 에트린자이트 및 재수화 반응에 의해 부분 충전되어 0.05 μm 이하의 미세 공극으로 변화된 것으로 나타났다.

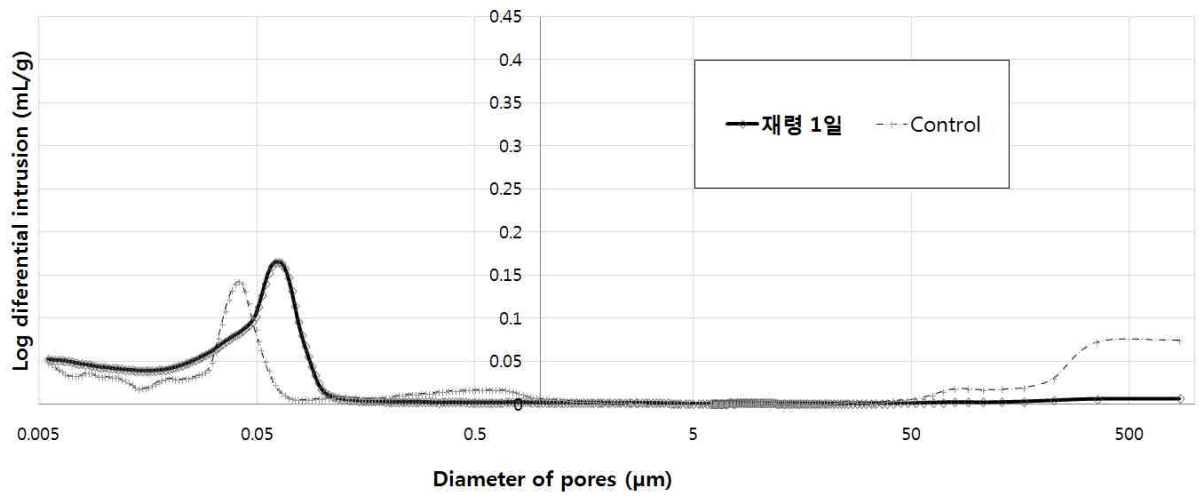


그림 3.3.74 Pore distribution 100°C (재령 1일)

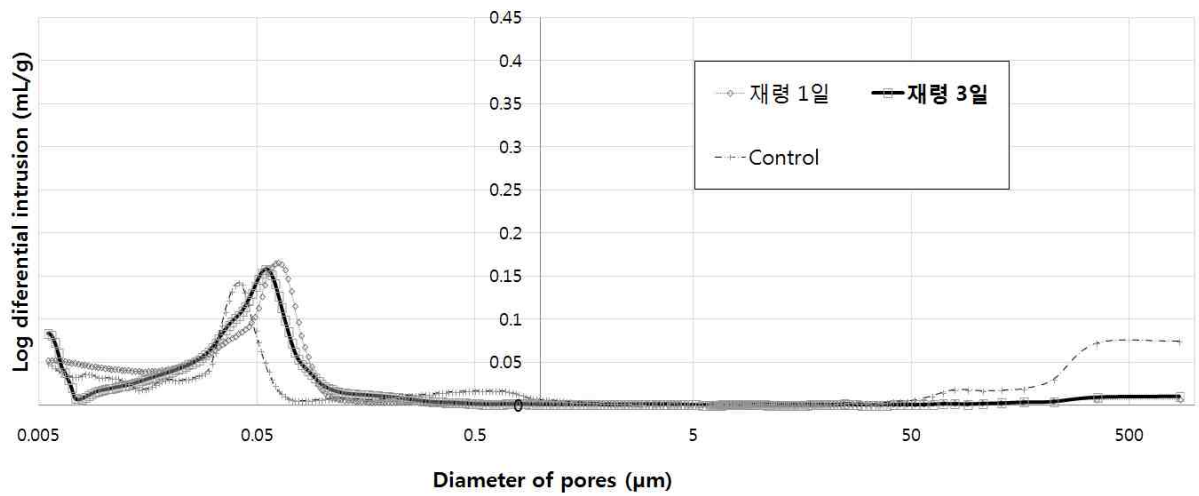


그림 3.3.75 Pore distribution 100°C (재령 3일)

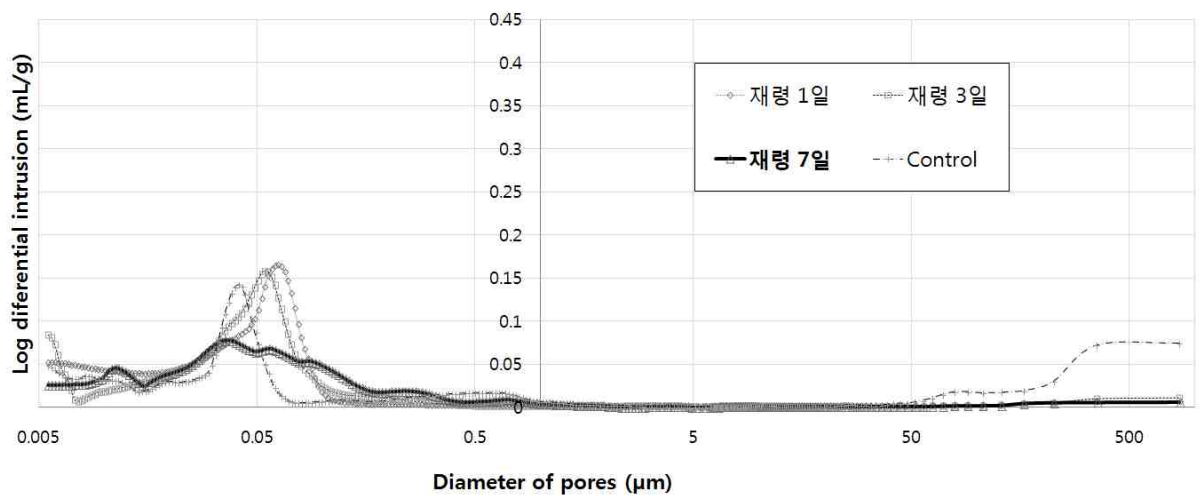


그림 3.3.76 Pore distribution 100°C (재령 7일)

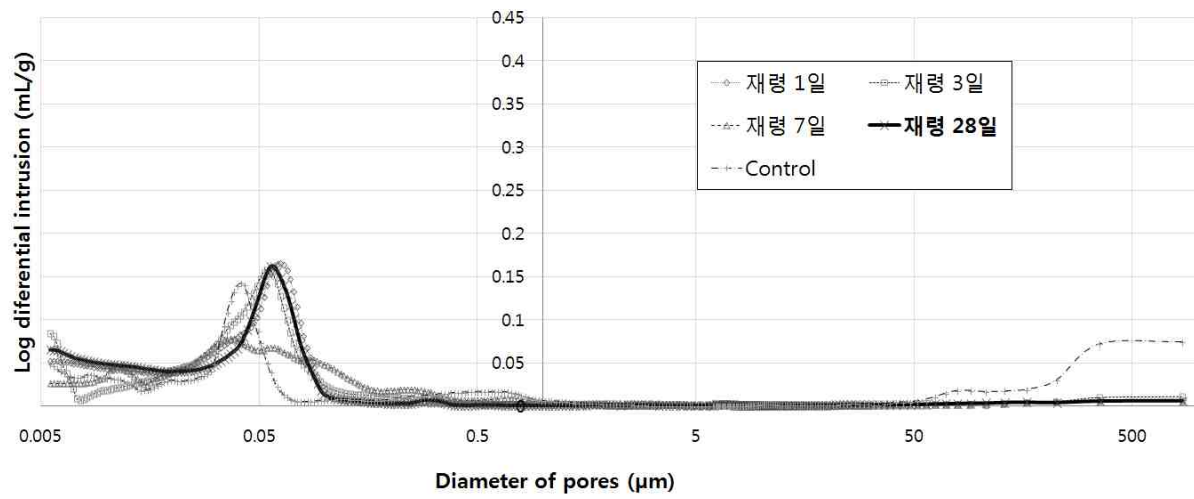


그림 3.3.77 Pore distribution 100°C (재령 28일)

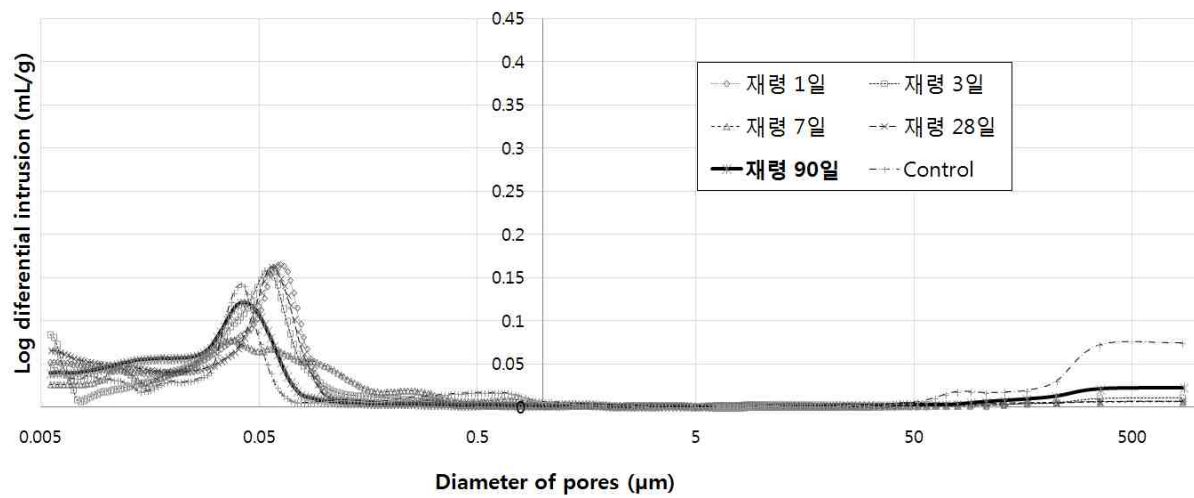


그림 3.3.78 Pore distribution 100°C (재령 90일)

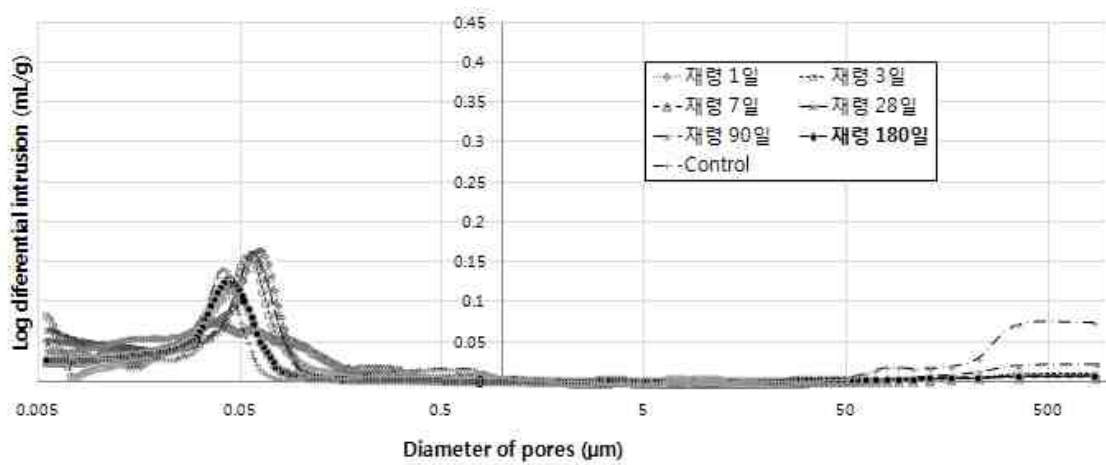


그림 3.3.79 Pore distribution 100°C (재령 180일)

그림 3.3.78에서 확인할 수 있는 바와 같이 재령 90일에서 내부 0.05 μm 이하 pores에 대한 수화가 진행되고 있으나, 시멘트 분말의 수화 반응기는 대부분 반응이 종료되어 그 진행 속도는 대단히 느려진 것으로 판단된다. 추가적으로 시료 내부에서 진행된 수화에 의한 pores내 팽창 치밀화로 외부와 연결된 neck ternal이 open 되어 50 μm 이상 500 μm 이하 pores의 수가 일정하게 생성되었다. 재령 180일 에서 0.05 μm 이하 및 0.05 μm 이상 500 μm 이하의 모든 pores에서 감소 현상이 보이고 있다. 이는 open pores에 의해 유입된 CO_2 와 H_2O 의 공급으로 CaO가 탄산화 되어 CaCO_3 로 변형되어 극미세 공극을 비롯하여 open pores의 주변에 형성되어 전체적인 pores의 크기를 감소시킨 것으로 보인다.

그림 3.3.80 ~ 3.3.91은 MIP (Mercury intrusion porosimetry) 테스트를 통해 가열온도 200~300°C에 노출된 샘플의 재령별 Pore distribution을 분석한 것이다.

재령 1일에는 Control에 비해 50 μm 이상 500 μm 이하 pore diameter가 크게 감소하였으며, 0.05 μm 이하의 pores 역시 비슷한 규모로 감소하였다. 이는 시멘트 입자간 모세관 공극 및 겔 공극의 잉여수가 기화하여 공극이 감소한 것으로 보이며, 또한 0.05 μm 이하의 pores에 의해 침투된 수분의 총량은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 그러나 100°C에 노출된 샘플과 비교하여 전반적으로 0.05 μm 이상 500 μm 이하의 pores는 증가하였는데, 이는 시멘트 분체 간에 neck을 형성하는데 필요한 화학적 결합수까지 기화되어 neck을 형성하지 못하고 open pores를 형성함으로 발생한 것으로 판단된다. 재령 3일의 경우는 재령 1일에 비해 pore diameter의 변화는 크지 않았다. 그러나 0.05 μm 미만 pores에서 극미세 pores와 50 μm 이상의 pores의 양이 감소하였는데, 이는 시멘트 분체의 수화에 의한 미세 공극 충전되어 치밀화 되었으며, 추가적으로 open neck 주변에서도 수화가 진행되어 close pores가 된 것으로 판단된다. 재령 7일에서는 0.05 μm 이하의 pores가 0.1~5 μm 로 증가됨이 확인되었는데, 이는 수화로 인한 미세공극 충전 후 팽창압에 의해 pores neck의 붕괴로 근접한 2~100개의 pores가 1개의 큰 pores로 변경됨에 따라 나타난 결과로 분석된다.

또한, 재령 28일에는 재령 7일에서 발생/충전된 0.1~5 μm 크기의 pores가 에트린자이트 및 수화반응으로 부분 충전되어 0.5 μm 이하의 미세 공극으로 변화된 것을 확인할 수 있었다. 재령 90일에서는 수화반응기는 대부분 반응이 종료되어 그 진행 속도가 느려지는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 시료 내부에서 진행된 수화에 의한 pores내 팽창 치밀화로 외부와 연결된 neck ternal이 open 되어 50 μm 이상 500 μm 이하 pores의 수가 일정하게 생성되었다. 재령 180일에서 0.05 μm 이하 및 100 μm 이상의 pores 수가 일정하게 생성되었지만, 전체적으로 pores량은 감소하였다. 이는 open pores에 의해 유입된 CO_2 와 H_2O 의 공급으로 CaO가 탄산화 되어 CaCO_3 로 변형되어 극미세 공극을 비롯하여 open pores 주변에 형성됨에 따라 전체적으로 pores의 크기가 감소된 것으로 나타났다.

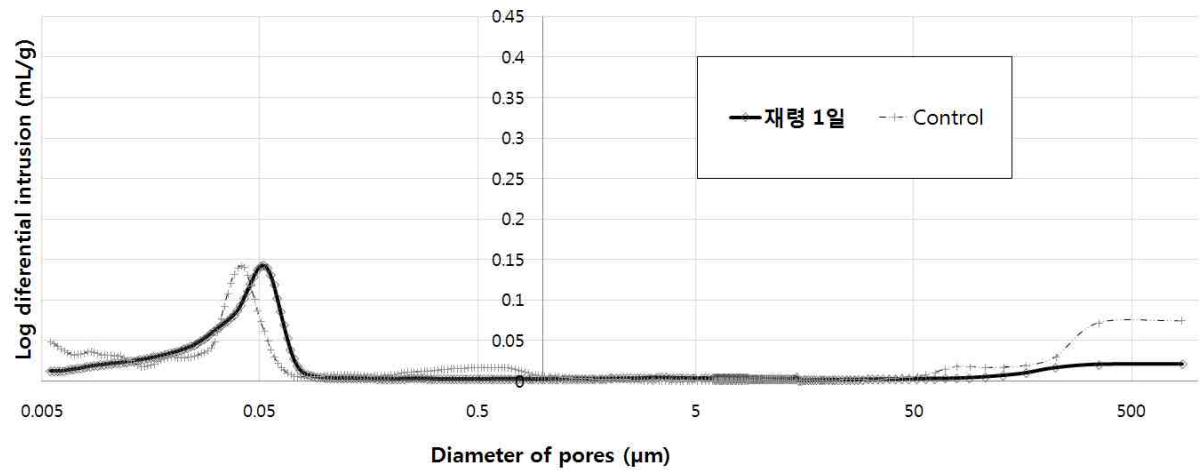


그림 3.3.80 Pore distribution 200°C (재령 1일)

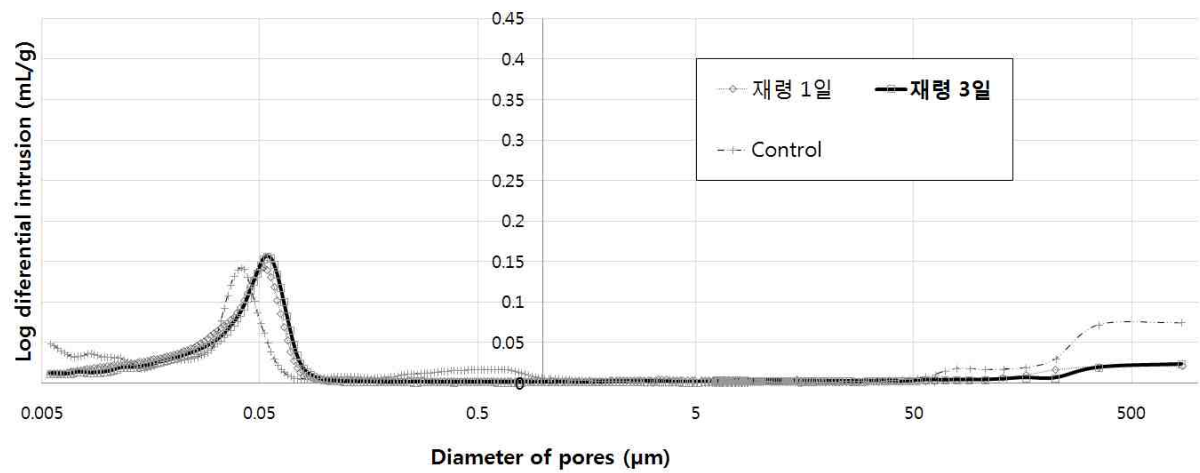


그림 3.3.81 Pore distribution 200°C (재령 3일)

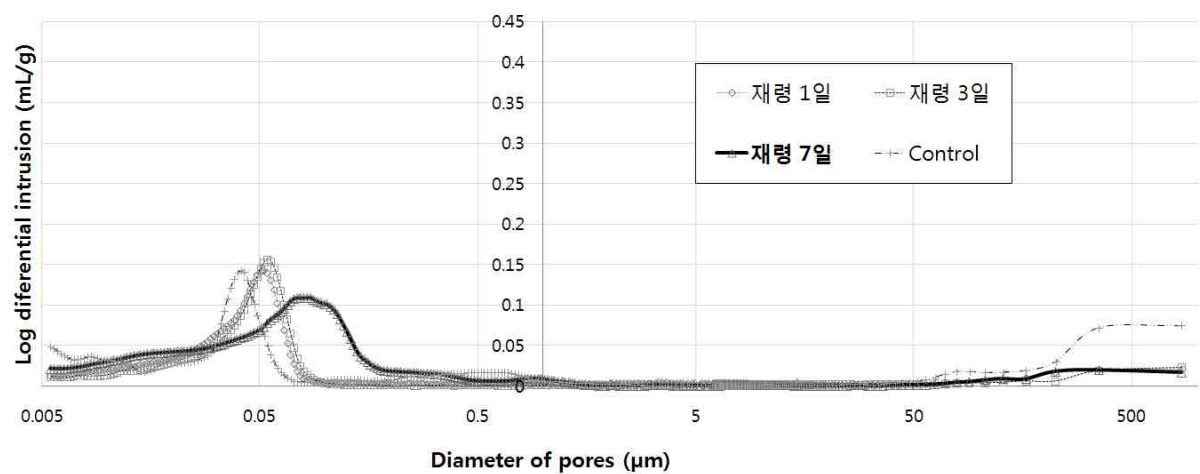


그림 3.3.82 Pore distribution 200°C (재령 7일)

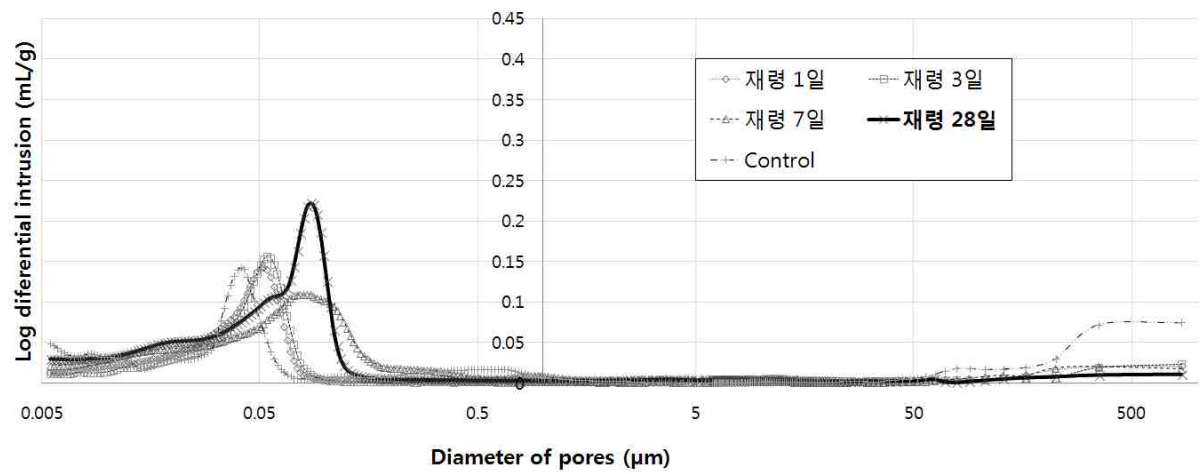


그림 3.3.83 Pore distribution 200°C (재령 28일)

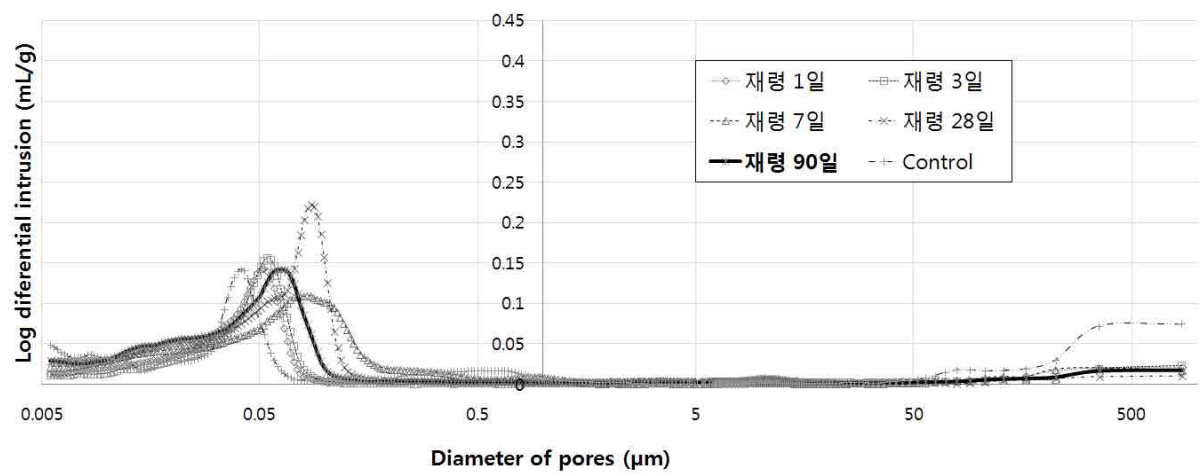


그림 3.3.84 Pore distribution 200°C (재령 90일)

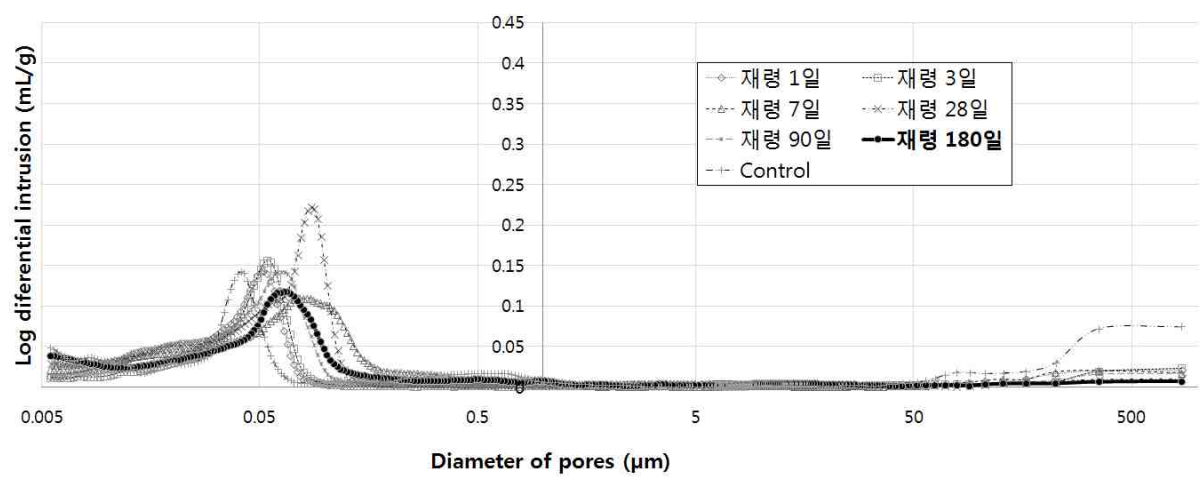


그림 3.3.85 Pore distribution 200°C (재령 180일)

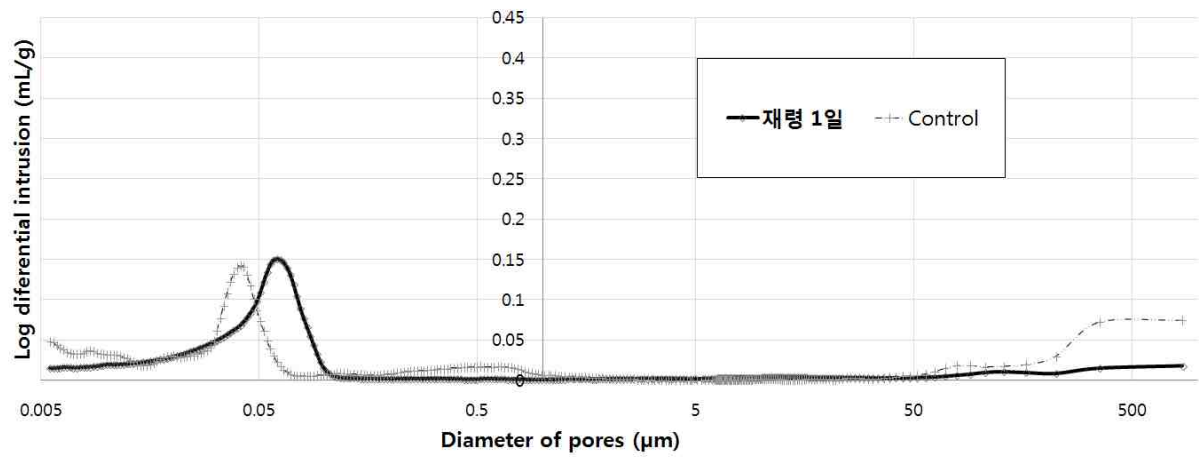


그림 3.3.86 Pore distribution 300°C (재령 1일)

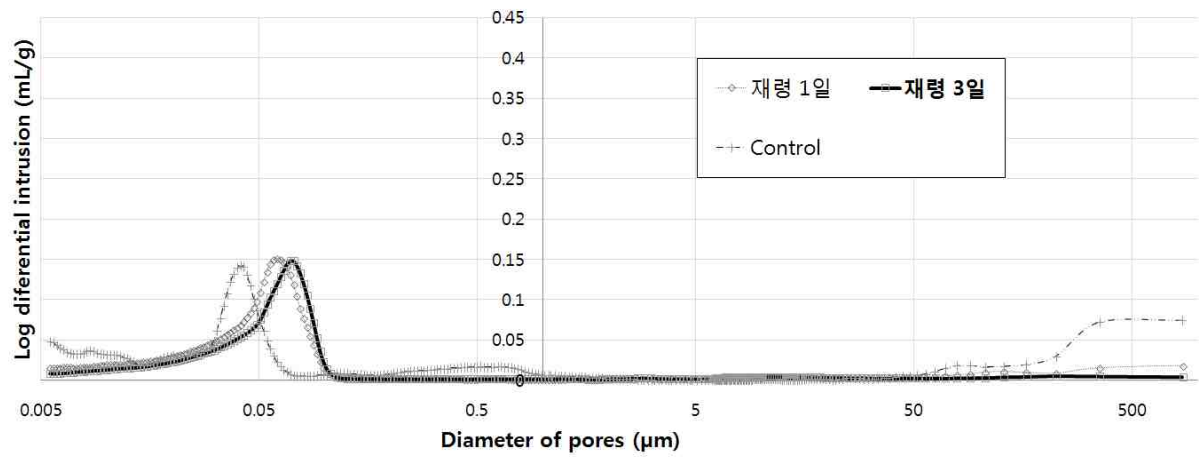


그림 3.3.87 Pore distribution 300°C (재령 3일)

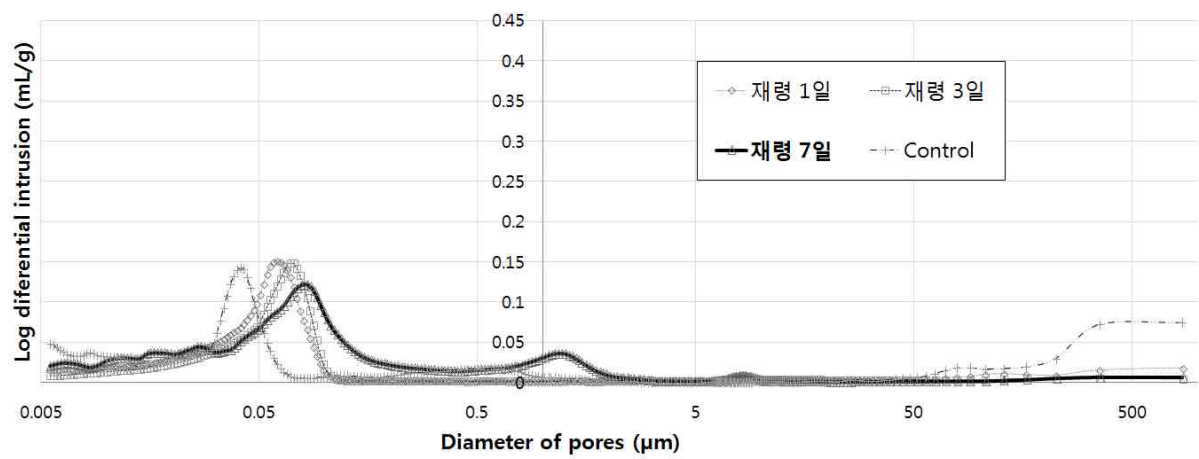


그림 3.3.88 Pore distribution 300°C (재령 7일)

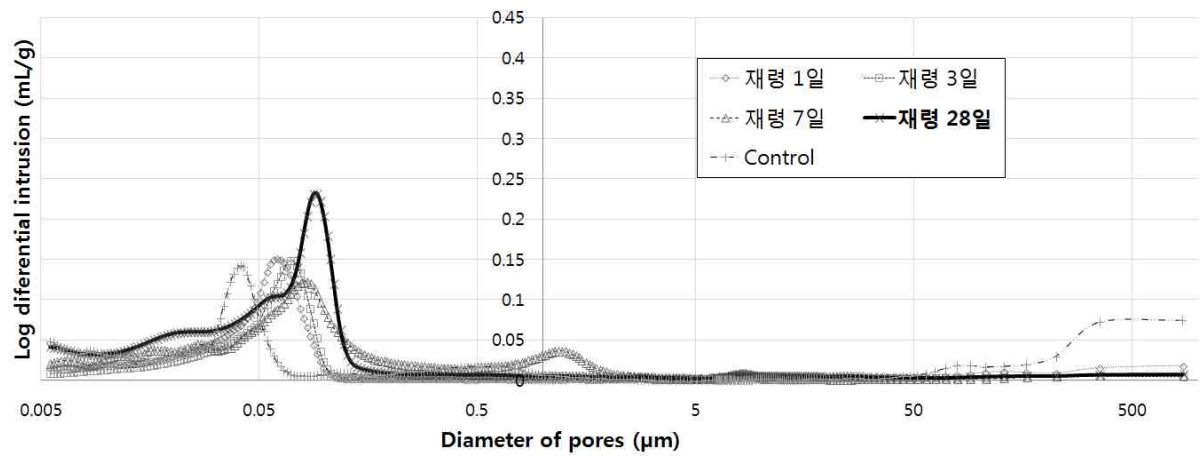


그림 3.3.89 Pore distribution 300°C (재령 28일)

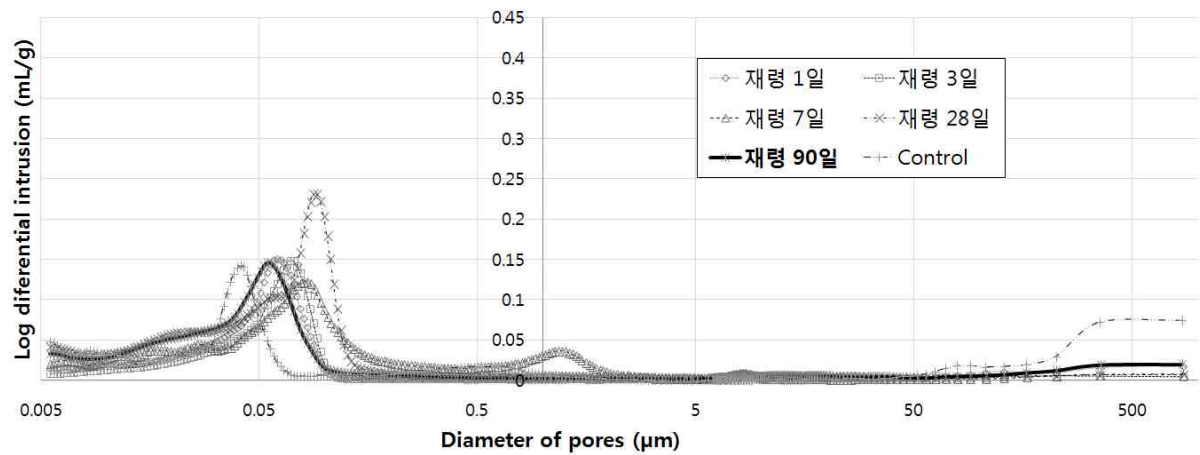


그림 3.3.90 Pore distribution 300°C (재령 90일)

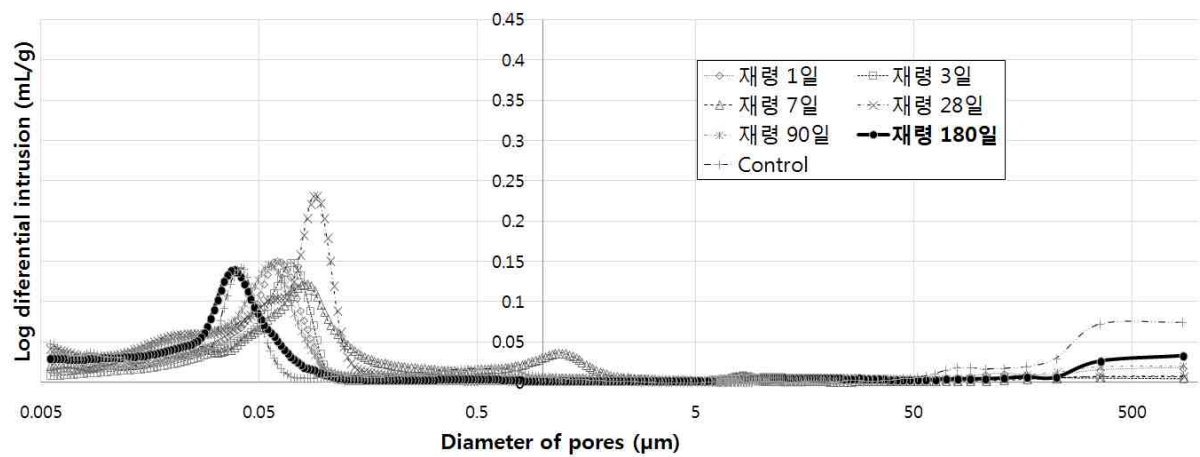


그림 3.3.91 Pore distribution 300°C (재령 180일)

그림 3.3.92 ~ 3.3.109는 MIP (Mercury intrusion porosimetry) 테스트를 통해 가열온도 400~600°C에 노출된 샘플의 재령별 Pore distribution을 분석한 것이다.

전반적으로 재령 1일에는 Control에 비해 pore diameter가 증가하였는데, 이는 400°C 이상에서 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)이 CaO 와 H_2O 로 분해되어 CaO 및 Na 가 SiO_2 와 반응하여 포타슘 유리 또는 칼슘 유리화 되어 시멘트 미립자 표면을 유리화 시키고, 유리화된 비정질 고상체에 O_2 및 화학결합수 증발 기체가 고립되어(Close pores) $0.1\ \mu\text{m}$ 이하의 pores 양이 증가한 것으로 판단된다. 또한, 급격한 냉각에 의한 열충격으로 비정질 유리화된 표면(grain boundary)의 neck이 파괴되어 open pores가 형성되어 $1\sim 50\ \mu\text{m}$ 의 pores가 다수 형성된 것으로 판단된다.

재령 3일에 재령 1일에 비해 pore diameter가 감소하였으며, $0.1\ \mu\text{m}$ 미만 pores에서 극 미세 pores와 $0.1\ \mu\text{m}$ 이상 $50\ \mu\text{m}$ 이하의 pores의 양이 감소하였는데, 이는 시멘트 분체의 수화에 의한 미세공극 충전되어 치밀화 되었으며, 추가적으로 open neck 주변에서도 수화가 진행되어 close pores가 된 것으로 분석된다.

재령 7일에서 $0.1\ \mu\text{m}$ 이하의 pores가 $0.1\sim 5.0\ \mu\text{m}$ 로 증가됨이 확인되었다. 이는 수화로 인한 미세공극 충전 후 팽창압에 의해 pores neck이 확대되어 open pores가 서로 연결되면서 외부로 연결되는 $50\ \mu\text{m}$ 이하의 pores로 확대된 것으로 판단된다. 또한 $5\ \mu\text{m}$ 이하의 pores가 주변 neck의 붕괴로 근접한 2~100개의 pores가 1개의 큰 pores로 변경 되어 $50\ \mu\text{m}$ 이상 pores가 증가한 것으로 나타났다.

재령 28일에는 재령 7일에서 발생/충전된 $0.1\sim 50\ \mu\text{m}$ 크기의 pores가 에트린자이트 및 수화반응으로 부분 충전되나 open pores의 공극을 매워 $50\ \mu\text{m}$ 이상의 pores를 $3\ \mu\text{m}$ 이하 다수의 pores로 변형된 것을 확인할 수 있었다.

재령 90일에서 내부 $0.05\ \mu\text{m}$ 이하 pores에 대한 수화가 느리게 진행되었으나, 고온에 의한 화학적 분해가 발생된 CaO , NaO 등이 opened pores를 통해 공급된 CO_2 및 H_2O 에 의해 쉽게 탄산화 되어 CaCO_3 로 변형되어 미세 공극이 충전되는 결과를 나타내었다. 재령 180의 경우는 90일과 유사한 결과를 나타내었다.

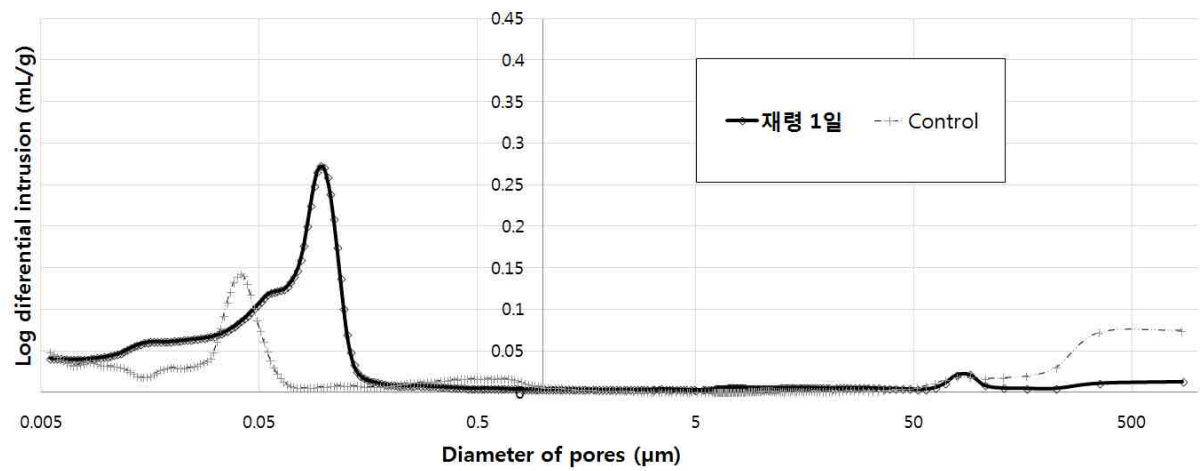


그림 3.3.92 Pore distribution 400°C (재령 1일)

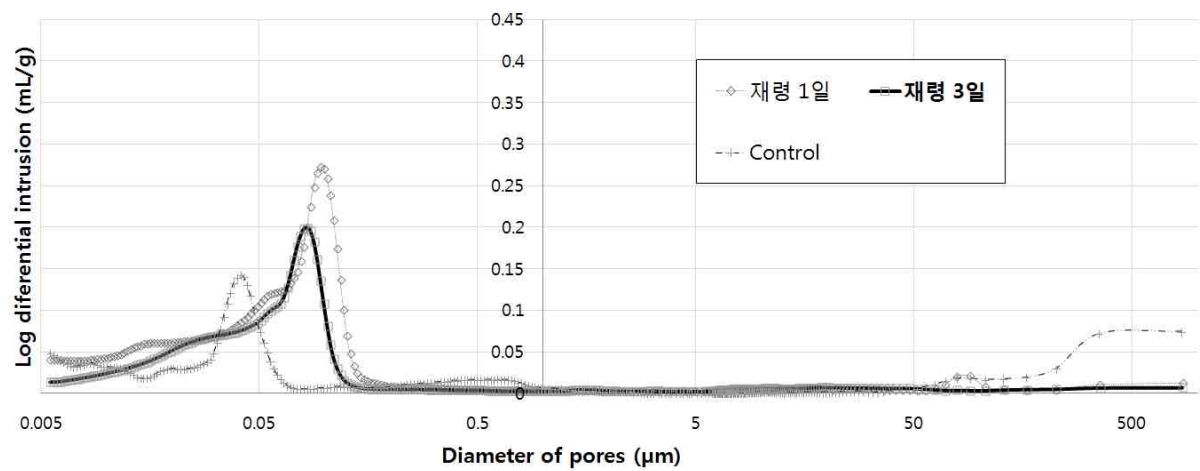


그림 3.3.93 Pore distribution 400°C (재령 3일)

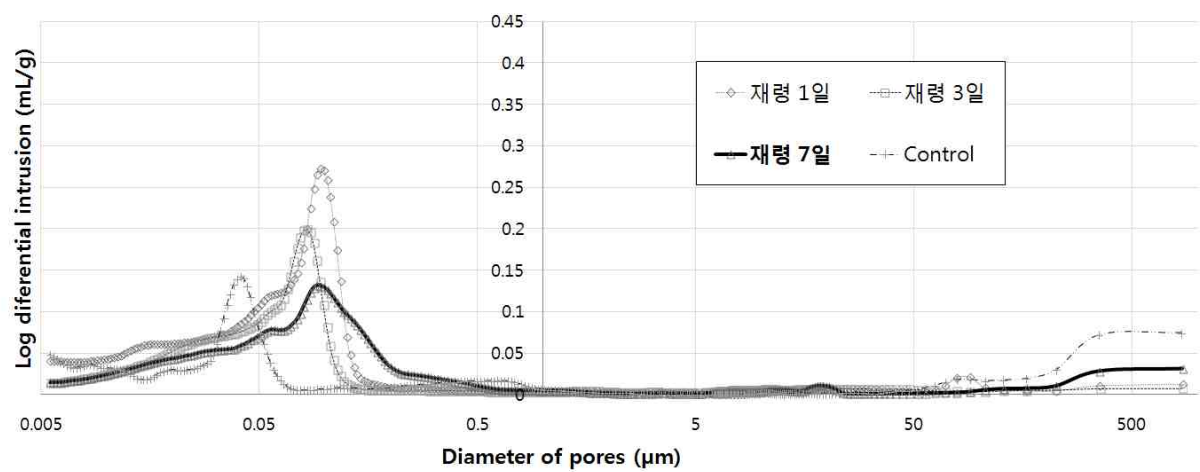


그림 3.3.94 Pore distribution 400°C (재령 7일)

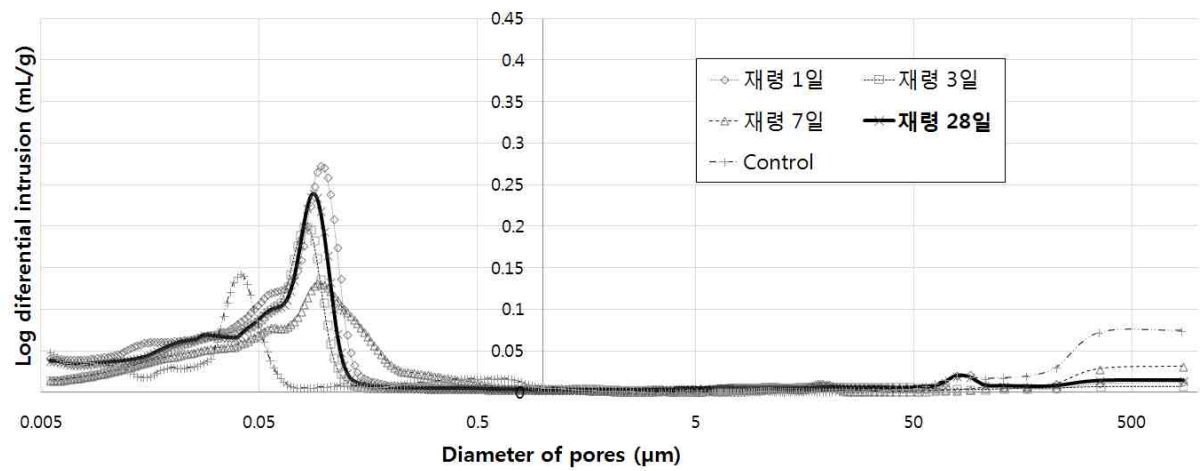


그림 3.3.95 Pore distribution 400°C (재령 28일)

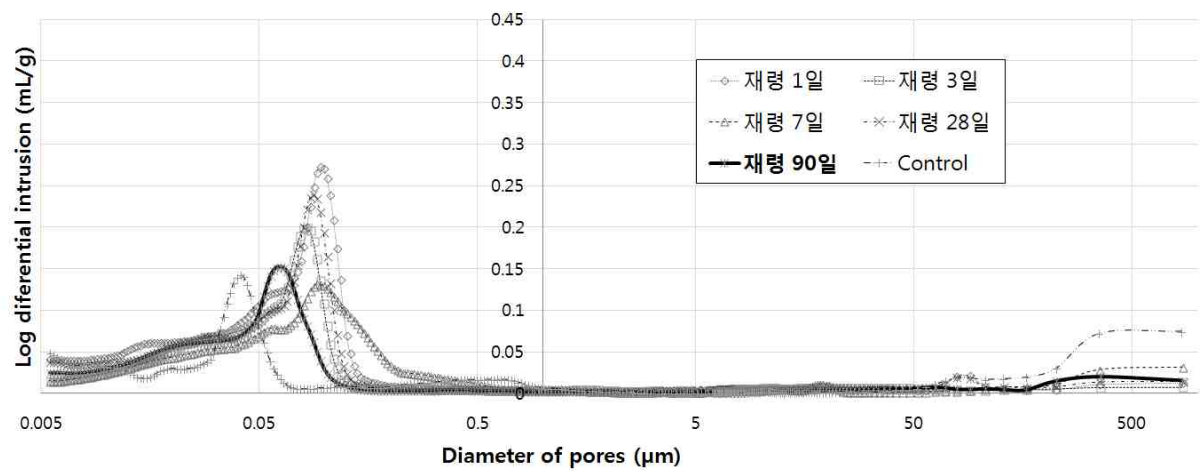


그림 3.3.96 Pore distribution 400°C (재령 90일)

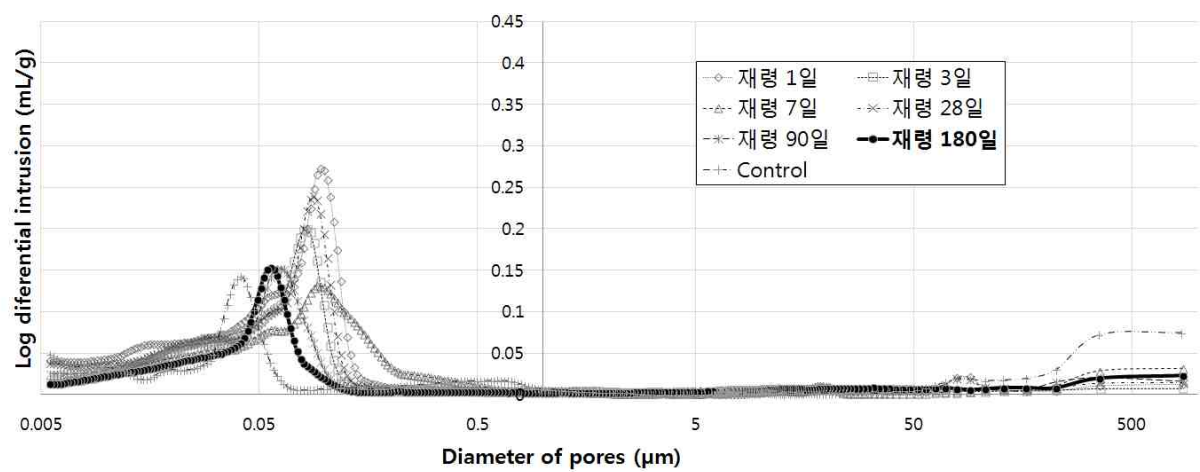


그림 3.3.97 Pore distribution 400°C (재령 180일)

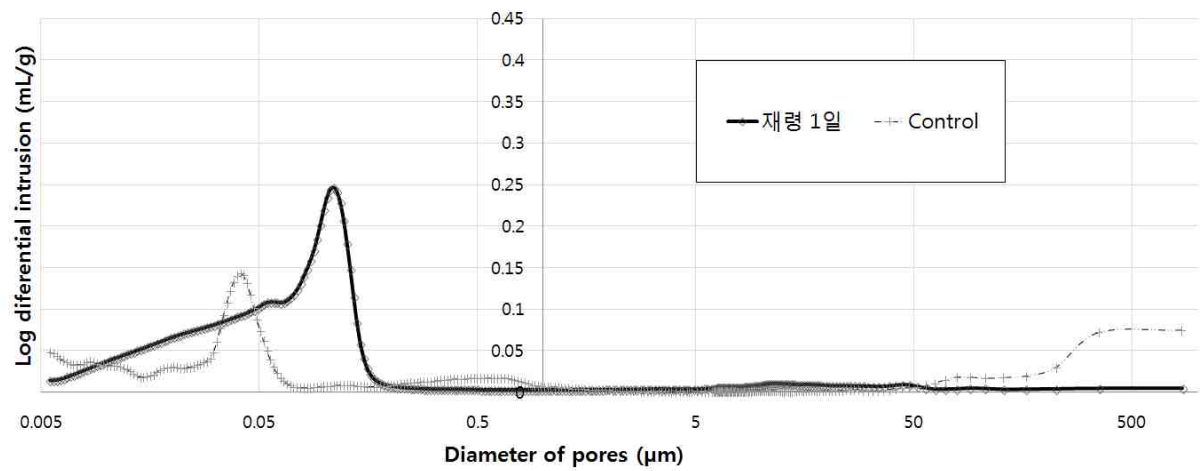


그림 3.3.98 Pore distribution 500°C (재령 1일)

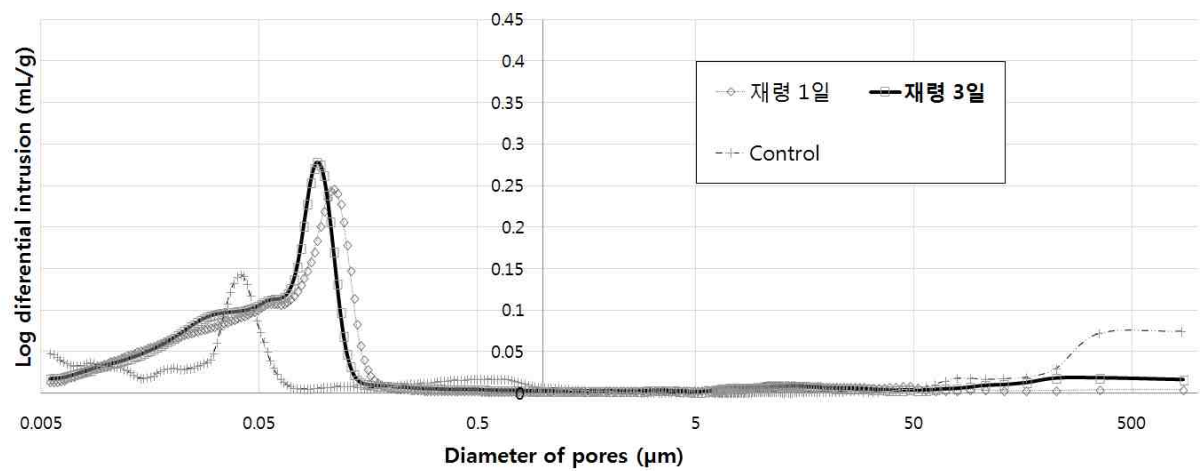


그림 3.3.99 Pore distribution 500°C (재령 3일)

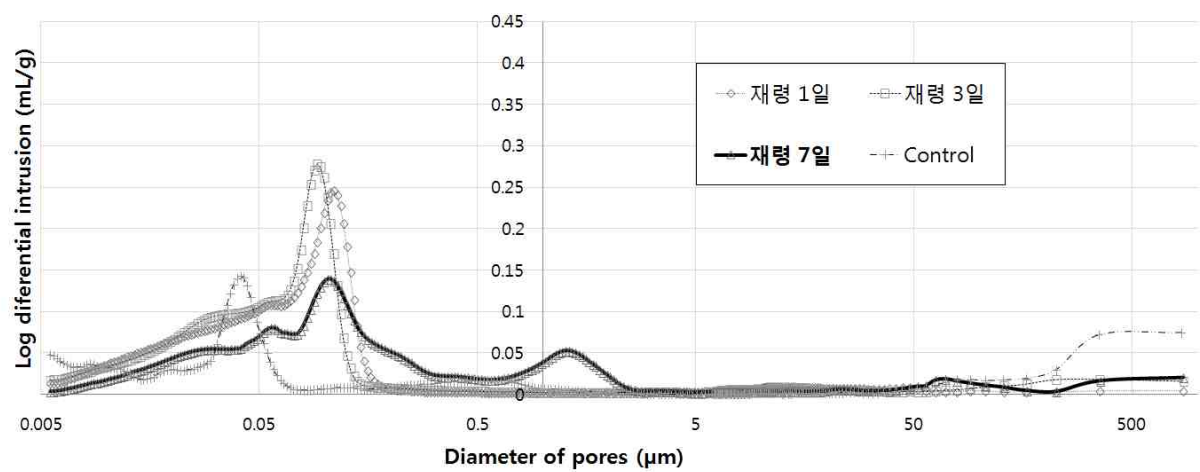


그림 3.3.100 Pore distribution 500°C (재령 7일)

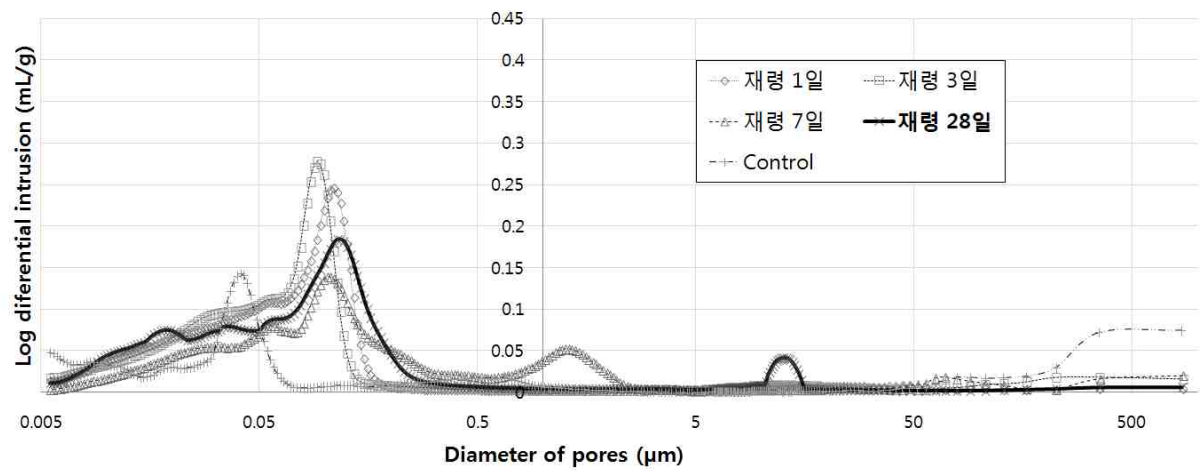


그림 3.3.101 Pore distribution 500°C (재령 28일)

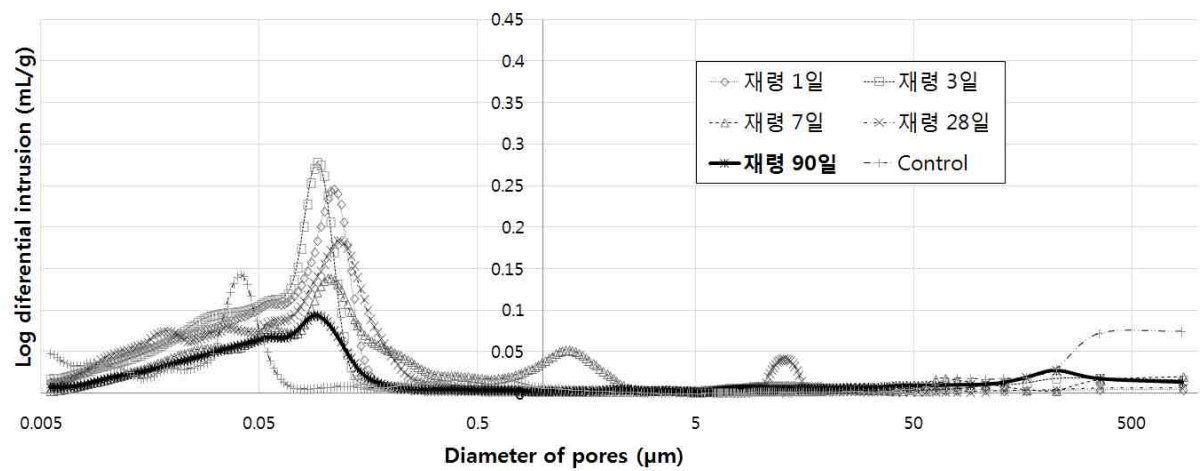


그림 3.3.102 Pore distribution 500°C (재령 90일)

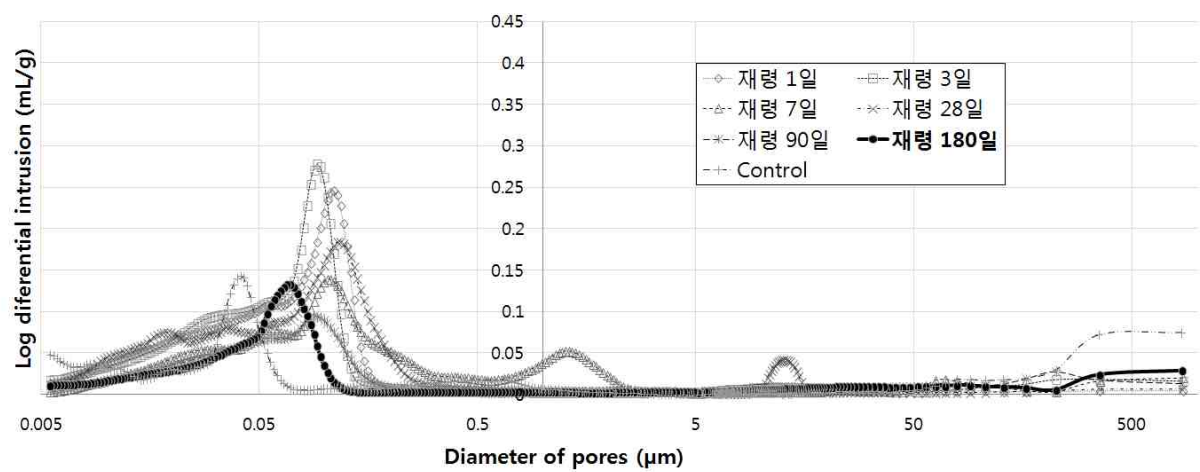


그림 3.3.103 Pore distribution 500°C (재령 180일)

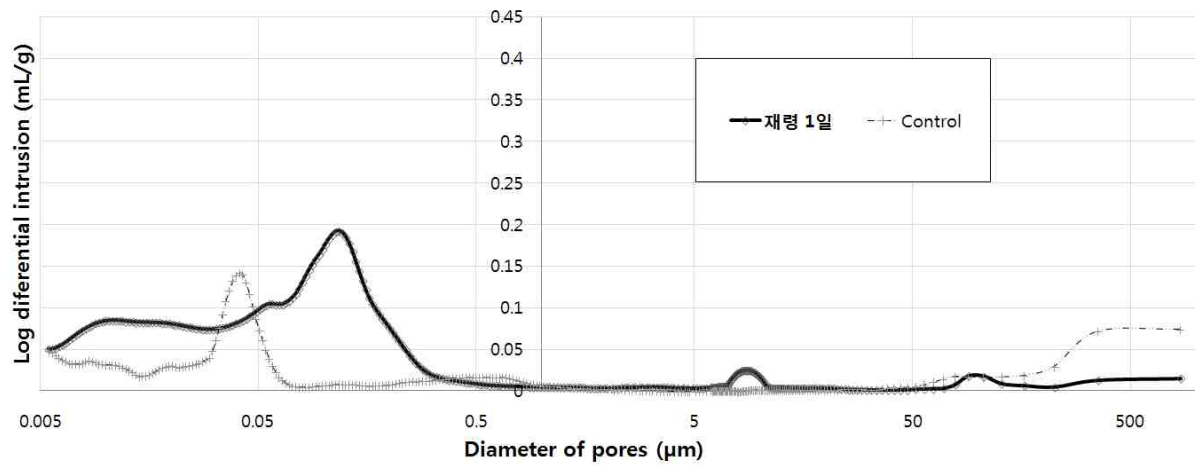


그림 3.3.104 Pore distribution 600°C (재령 1일)

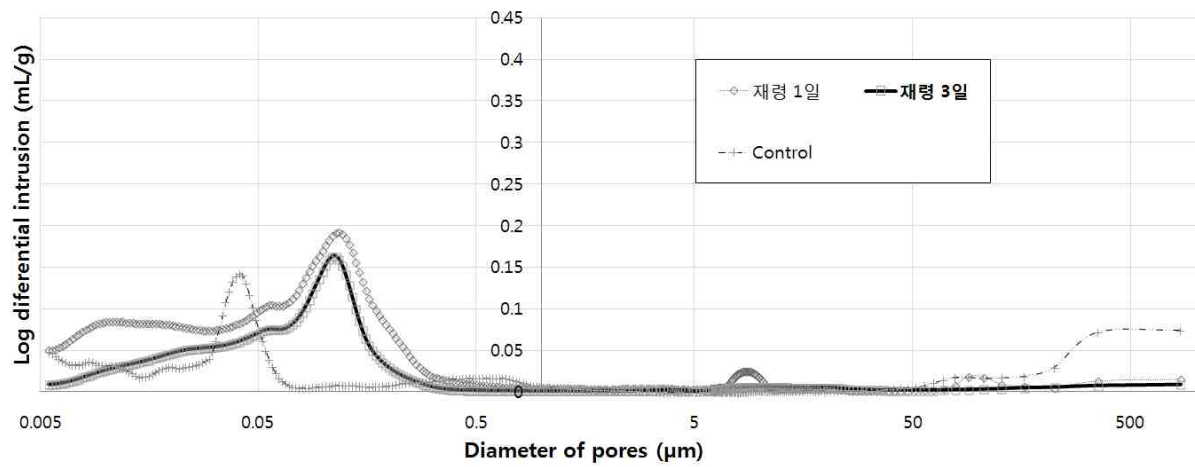


그림 3.3.105 Pore distribution 600°C (재령 3일)

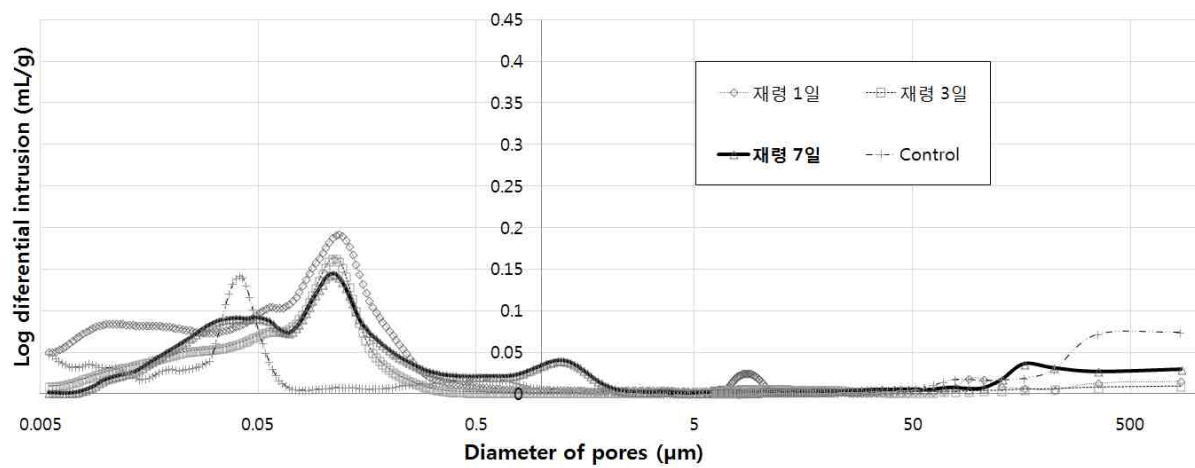


그림 3.3.106 Pore distribution 600°C (재령 7일)

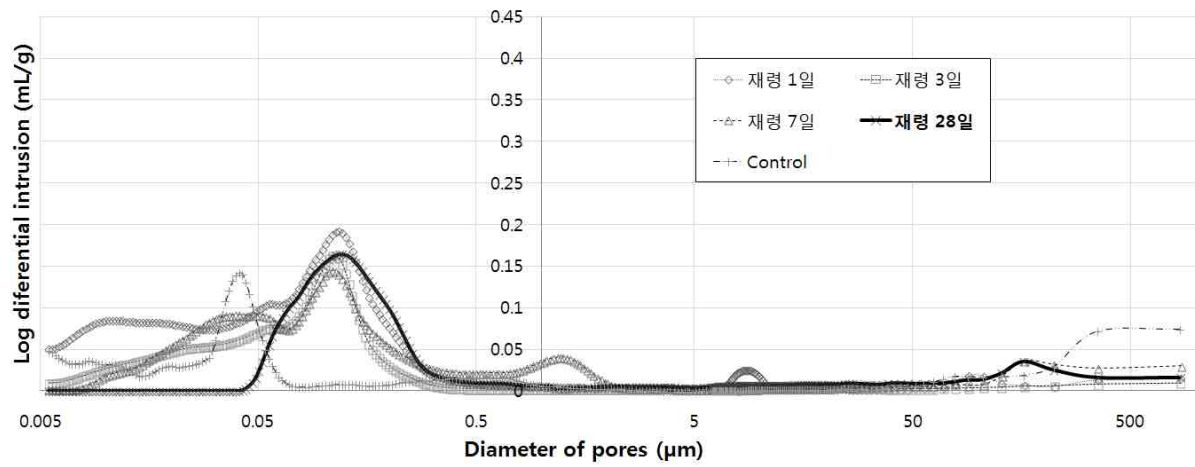


그림 3.3.107 Pore distribution 600°C (재령 28일)

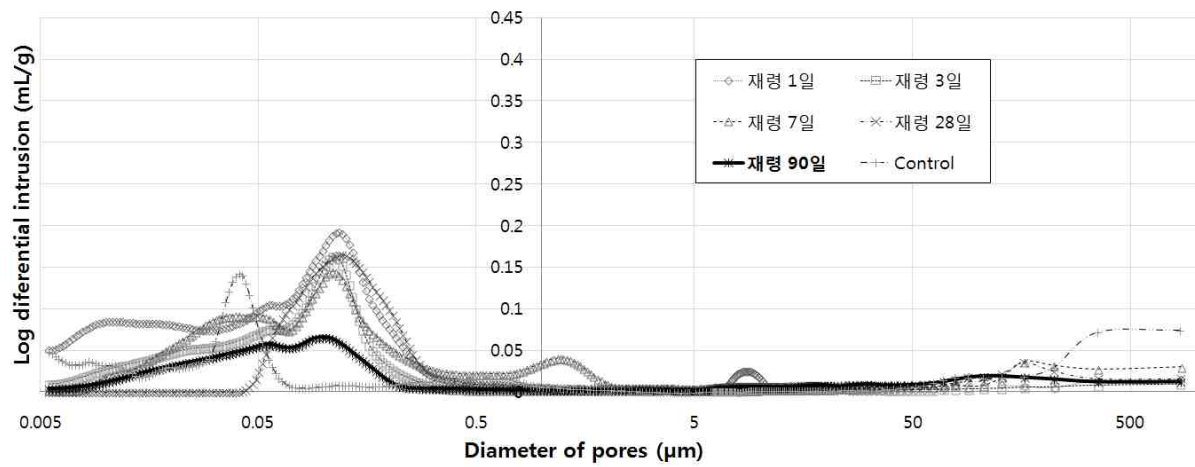


그림 3.3.108 Pore distribution 600°C (재령 90일)

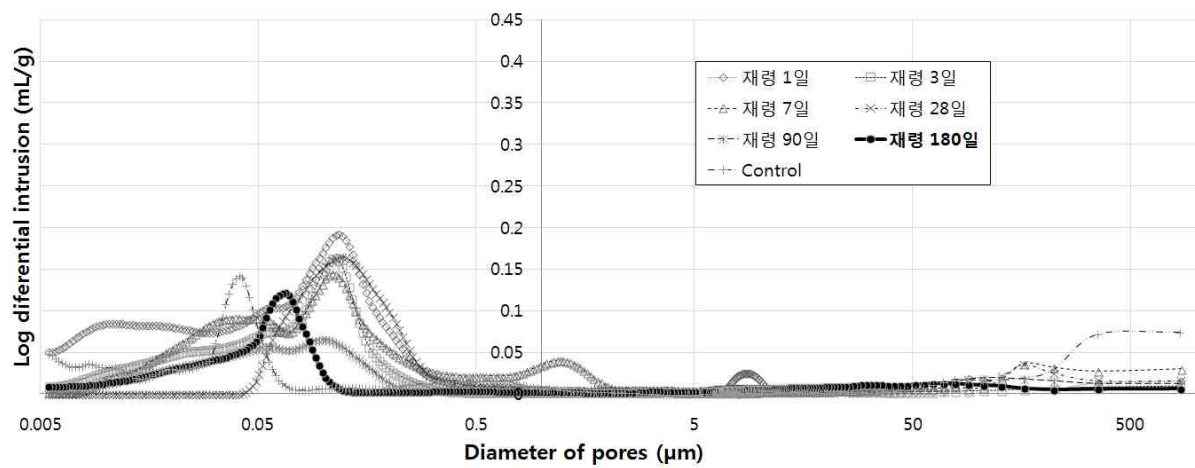


그림 3.3.109 Pore distribution 600°C (재령 180일)

그림 3.3.110 ~ 3.3.113은 MIP (Mercury intrusion porosimetry) 테스트를 통해 가열온도 700~1000°C에 노출된 샘플의 재령별 Pore distribution을 분석한 것이다.

전반적으로 재령 1일에는 Control에 비해 pore diameter가 증가하였는데, 이는 700~1000°C 이상에서 시멘트 입자의 주된 성분인 탄산칼슘(CaCO_3)이 CaO 와 CO_2 로 분해되고 CaO 및 Na 가 SiO_2 와 반응하여 포타슘 유리 또는 칼슘 유리화 되어 SiO_2 와 반응하고 전체적인 유리화가 진행되어 나타난 결과로 분석된다. 유리화된 비정질 고상체에 분해로 인해 발생한 O_2 기체가 고립되어 gas가 다수 포집됨에 따라 공극(Close pores) 및 grain 내에 포집된 5 μm 이하의 pores량이 증가한 것으로 판단된다. 또한 급격한 냉각에 의한 열충격으로 비정질 유리화된 표면(grain boundary)의 neck이 파괴되어 open pores가 형성되어 pores가 다수 형성된 것으로 나타났다.

재령 3일에 grain에 존재하던 pores 주변에 과 농축된 CaO 는 급속한 수화물을 형성하여 급격한 pores를 충전/치밀화 시킨다. grain neck을 통해 반응성 인자의 급속한 확산을 동반하여 open neck 및 open pores 주변에 대한 수화가 동시에 진행되어 0.2 μm 이상 5.0 μm 이하의 pores를 급속하게 수화 충전 시켰다. 이러한 급속 수화는 0.05 μm 이하의 극미세 pores의 감소에 매우 큰 영향을 준 것으로 분석되었다.

재령 3일에서 급속한 수화반응으로 표면 수화층이 형성되면서 확산에 의한 내부 수화가 지연되었다 (Oxygen barrier effect). 따라서 재령 7일은 3일과 큰 차이를 보이지 않았다.

재령 28일에는 재령 7일에서 발생한 Oxygen barrier를 확산 침투하여 내부 수화물질의 수화가 진행되었다. 초기 형성된 표면 수화층 및 유리화층이 박락 붕괴되고 함몰되어 전체적인 pores의 양이 증가한 것으로 나타났다.

재령 90일에는 박락되어 노출된 내부 수화물질의 수화가 진행되었다. 추가적으로 CaO 는 CaCO_3 를 형성하여 체적 팽창을 야기하였으며, 이는 주변에 존재하는 미세공극(pores)를 충전시켜 전체적인 pores량의 감소 시키는 것으로 나타났다. 그러나 이러한 공극충전은 결합력에 기여하는 바가 적어 pores량 감소에 기여하더라도 전체적인 내구성(결합력)은 감소할 것으로 판단된다. 또한, 재령 180일의 경우는 역시 90일과 유사한 결과를 나타내었다.

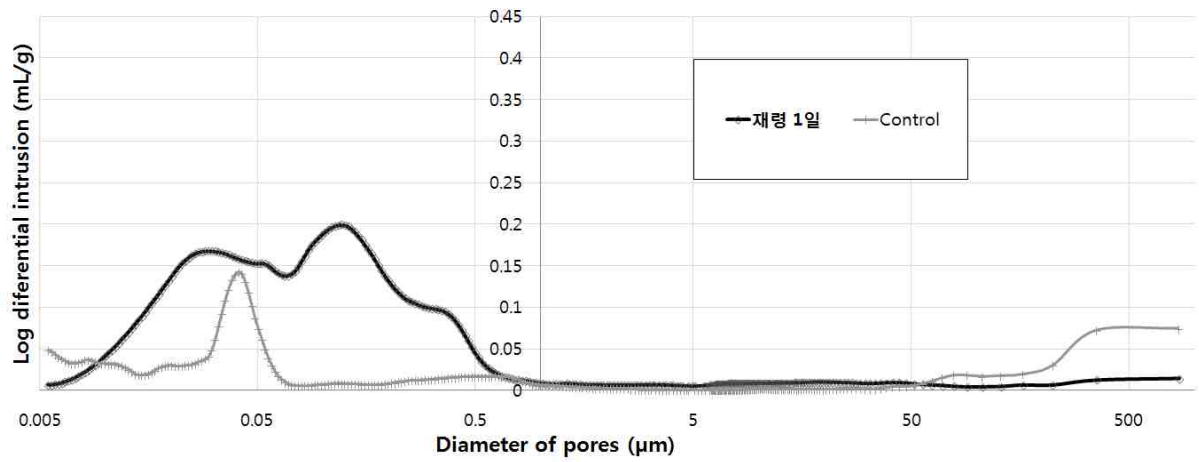


그림 3.3.110 Pore distribution 700°C (재령 1일)

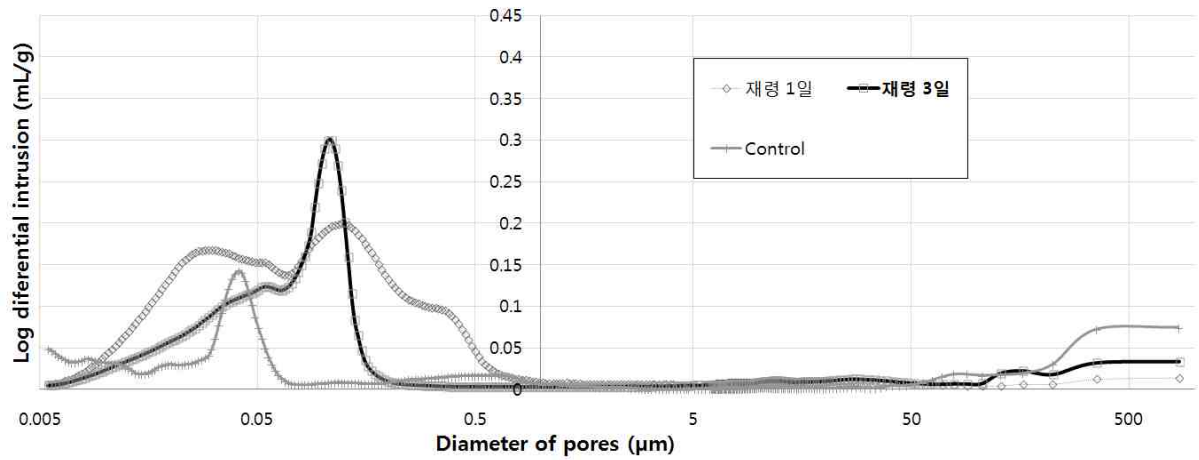


그림 3.3.111 Pore distribution 700°C (재령 3일)

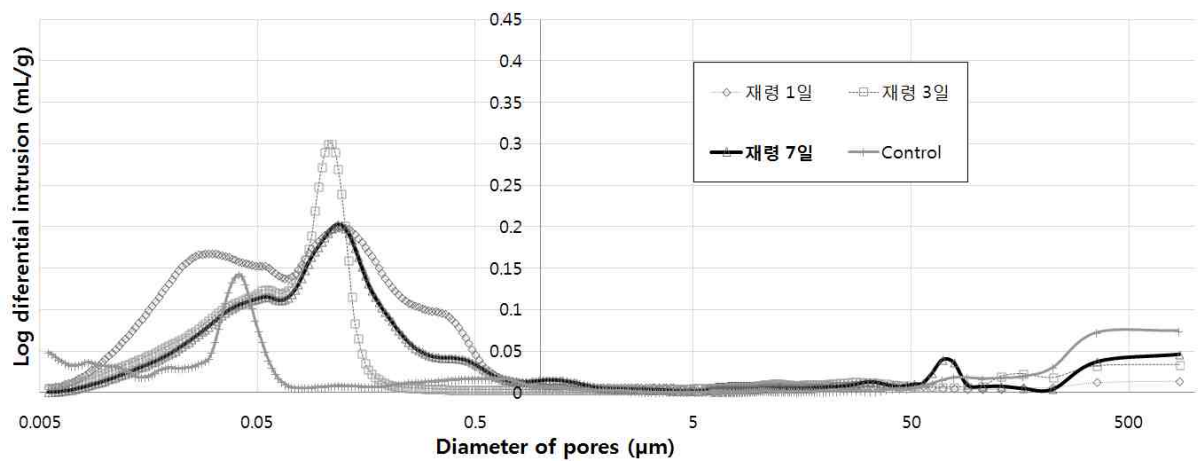


그림 3.3.112 Pore distribution 700°C (재령 7일)

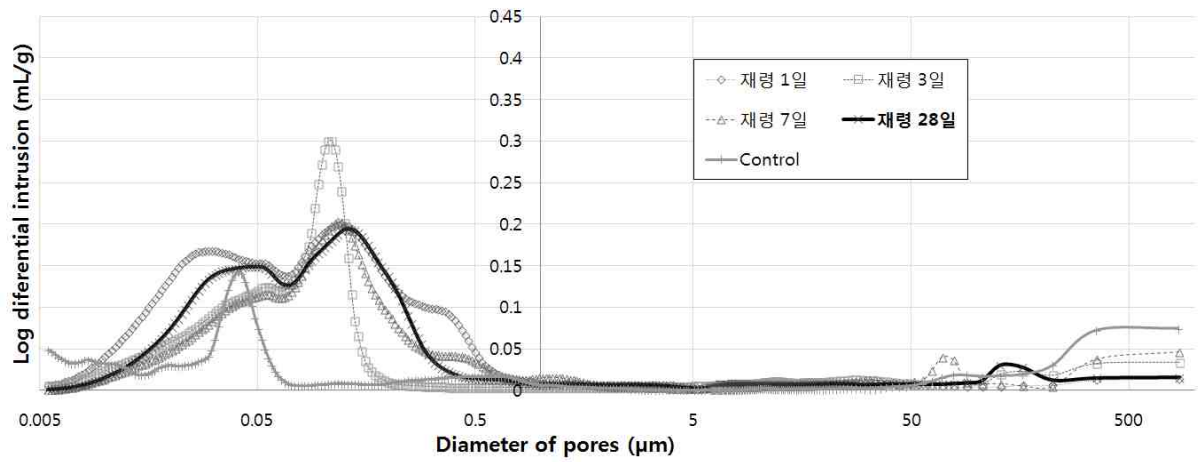


그림 3.3.113 Pore distribution 700°C (재령 28일)

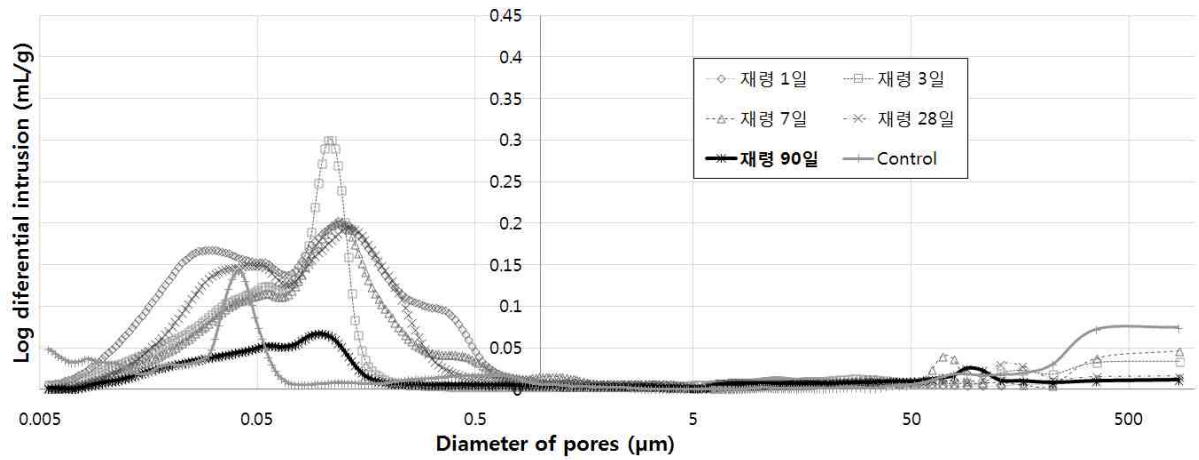


그림 3.3.114 Pore distribution 700°C (재령 90일)

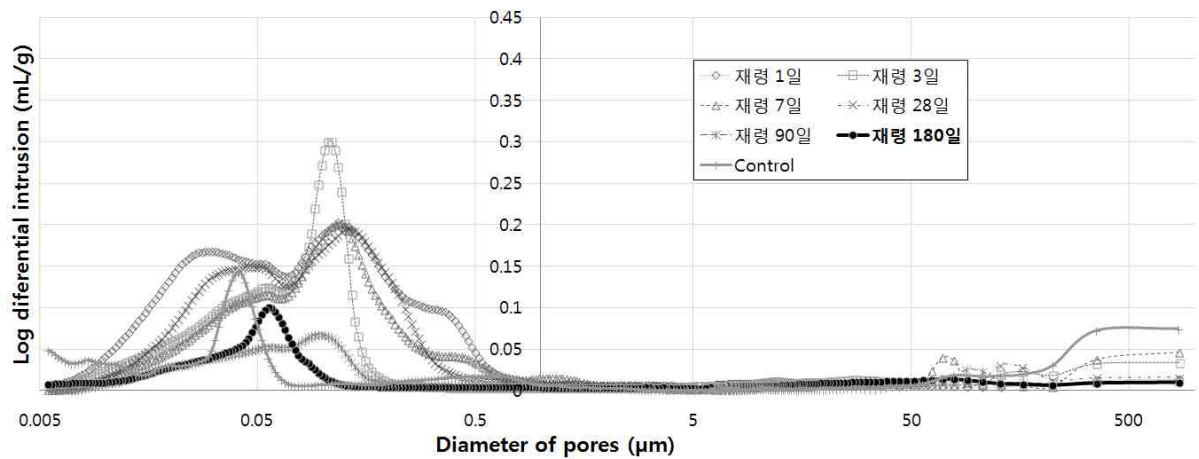


그림 3.3.115 Pore distribution 700°C (재령 180일)

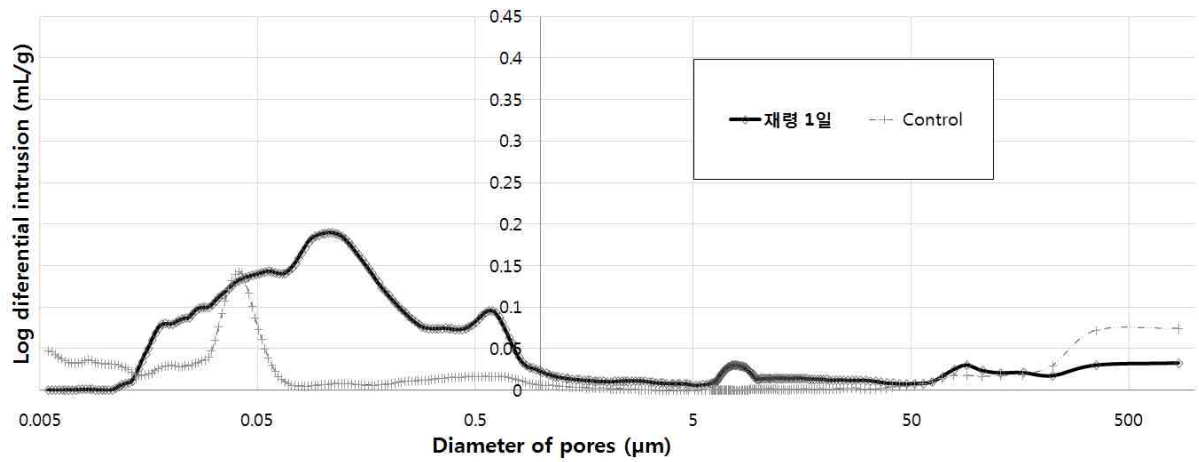


그림 3.3.116 Pore distribution 800°C (재령 1일)

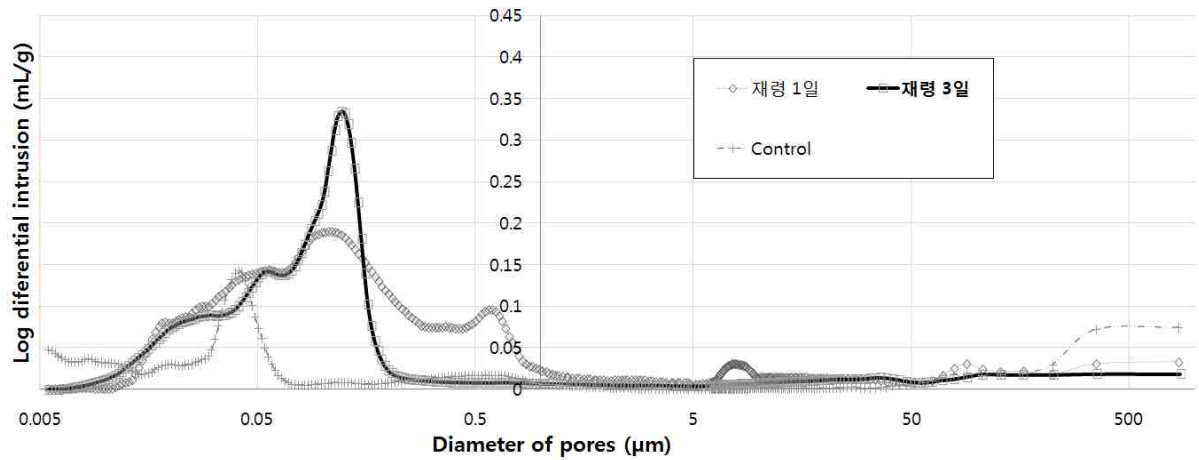


그림 3.3.117 Pore distribution 800°C (재령 3일)

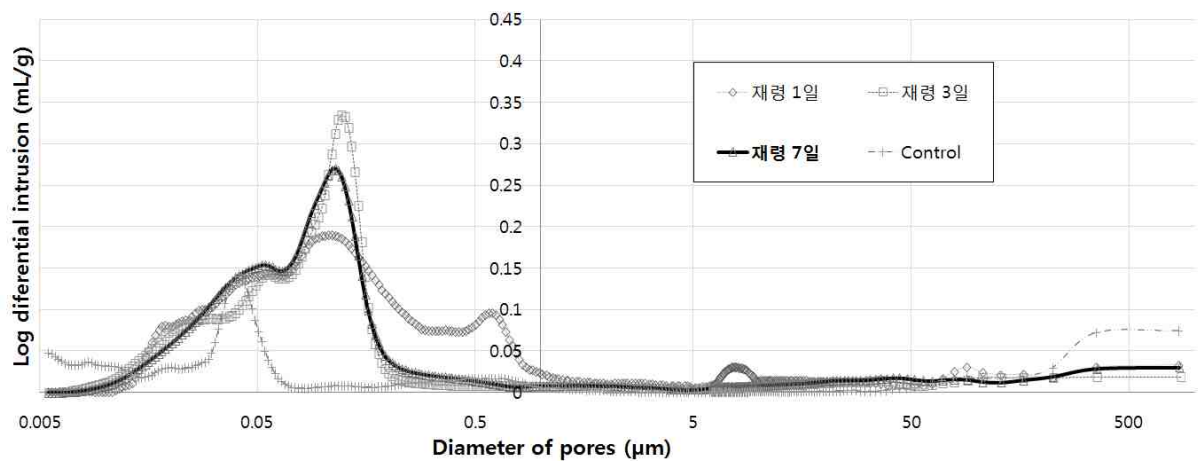


그림 3.3.118 Pore distribution 800°C (재령 7일)

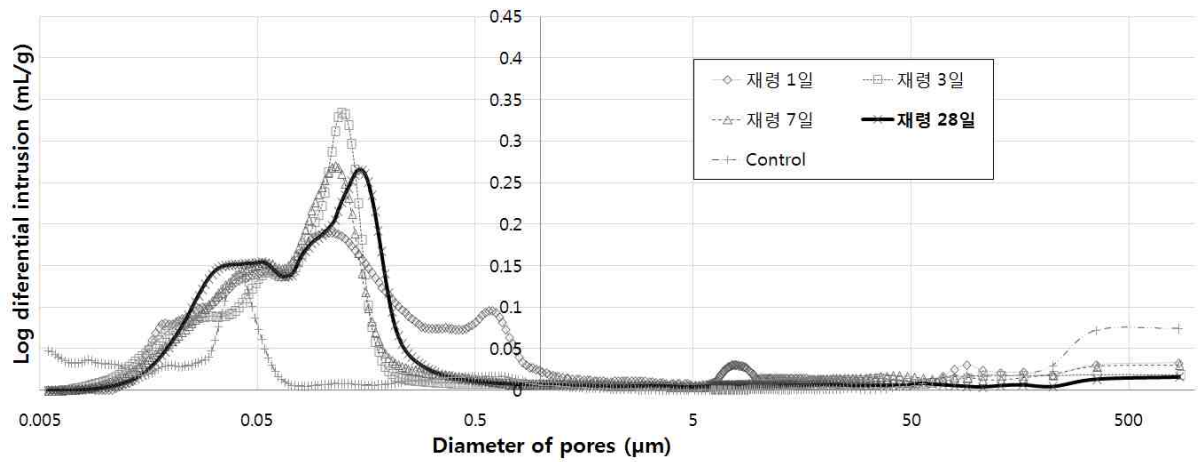


그림 3.3.119 Pore distribution 800°C (재령 28일)

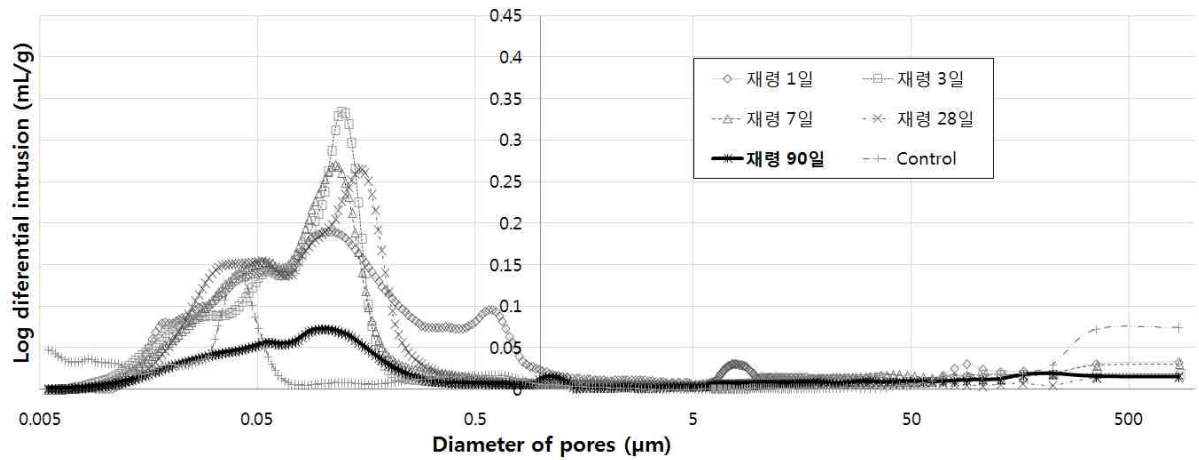


그림 3.3.120 Pore distribution 800°C (재령 90일)

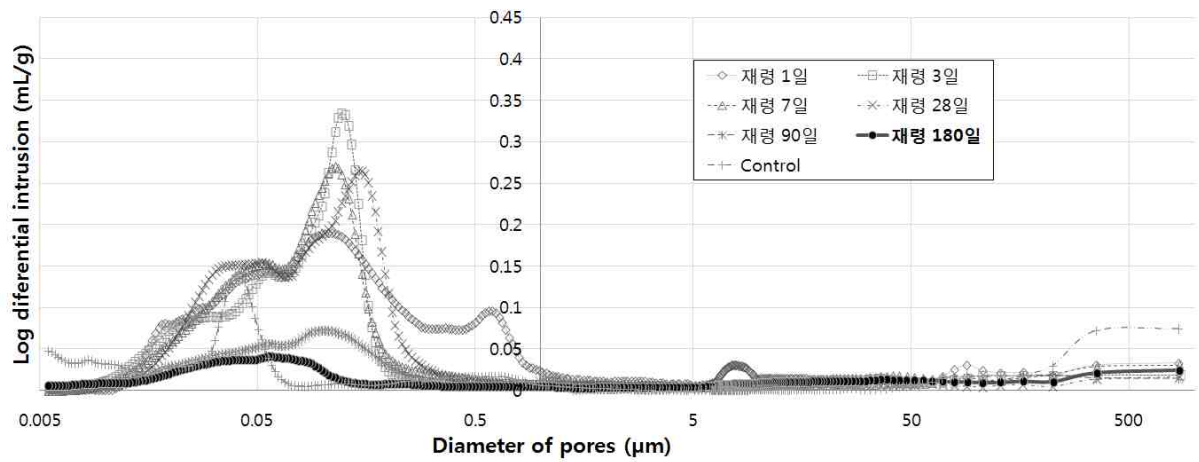


그림 3.3.121 Pore distribution 800°C (재령 180일)

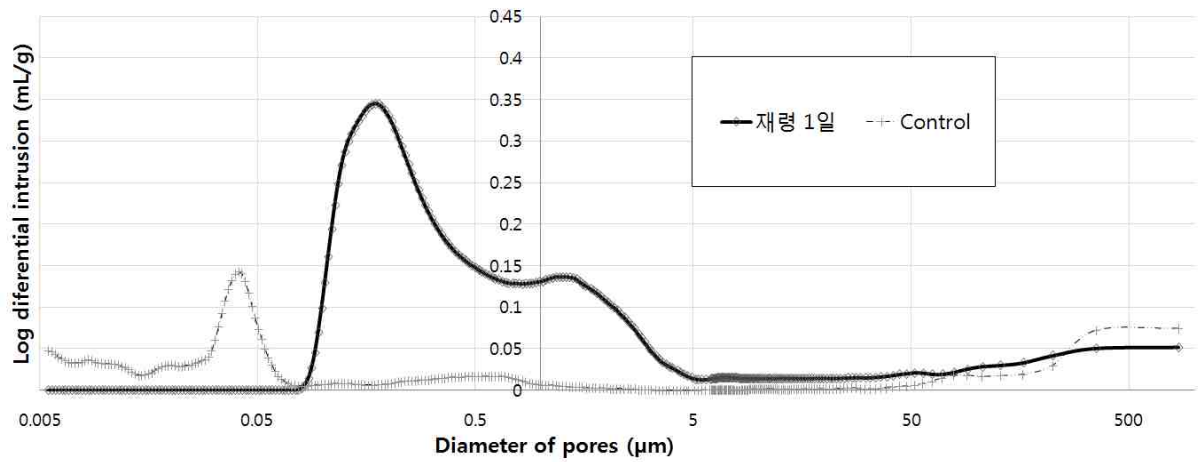


그림 3.3.122 Pore distribution 900°C (재령 1일)

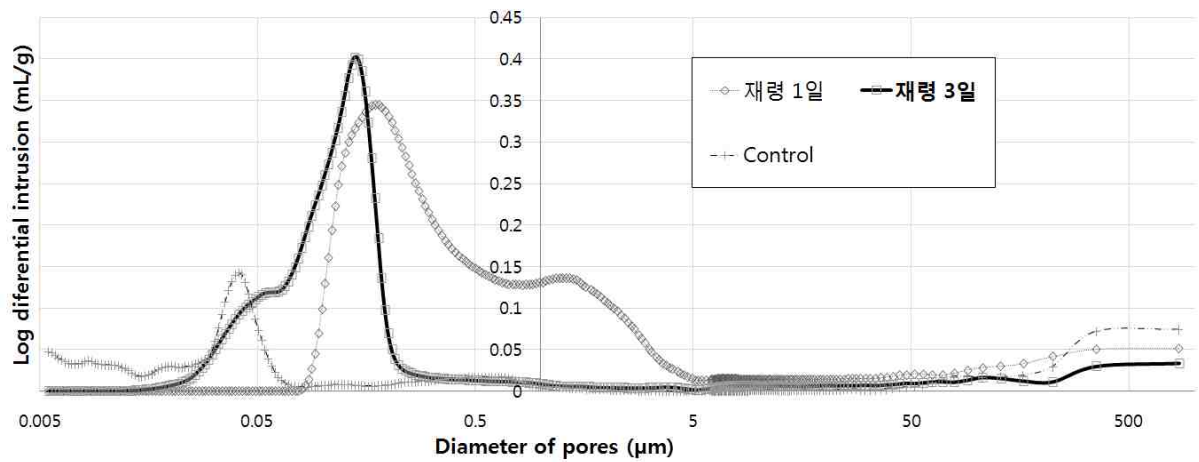


그림 3.3.123 Pore distribution 900°C (재령 3일)

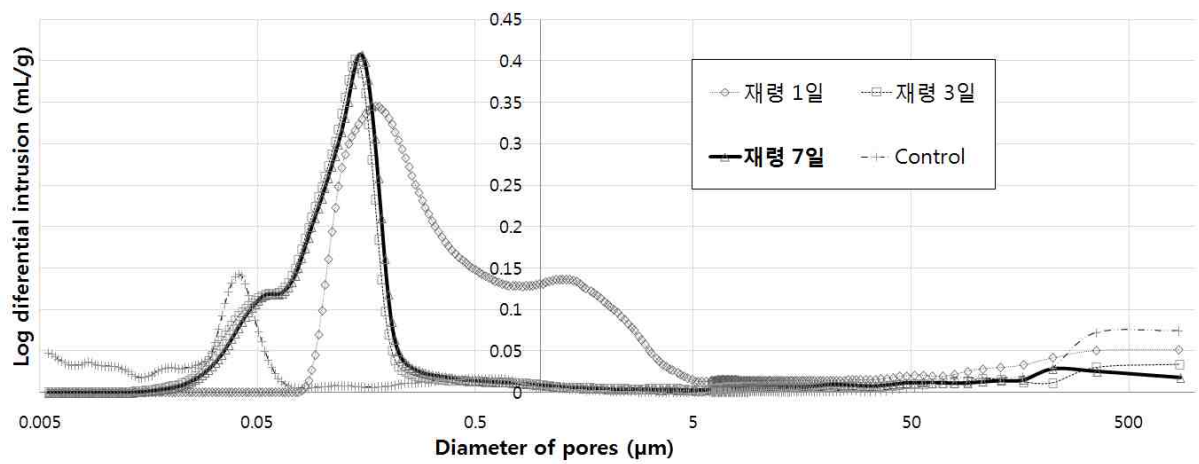


그림 3.3.124 Pore distribution 900°C (재령 7일)

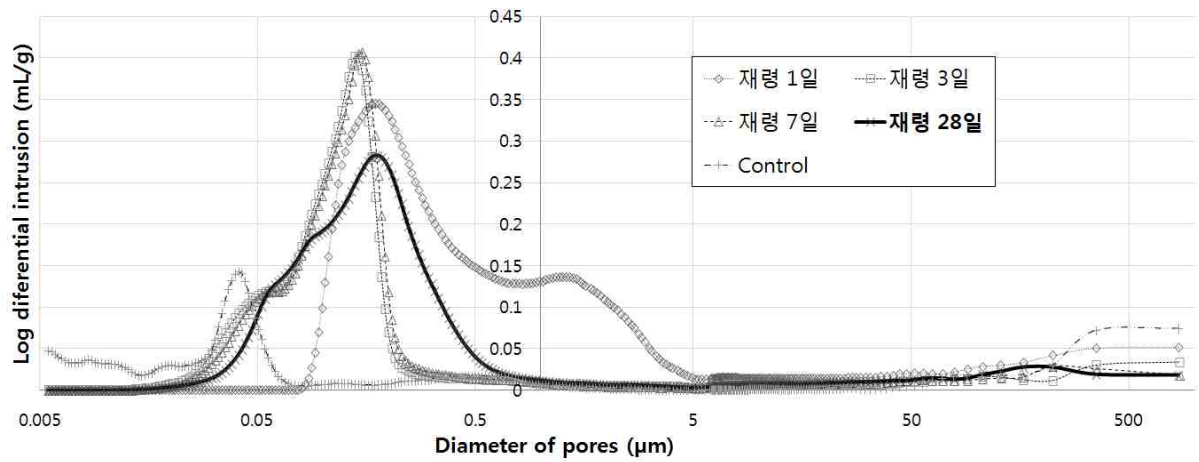


그림 3.3.125 Pore distribution 900°C (재령 28일)

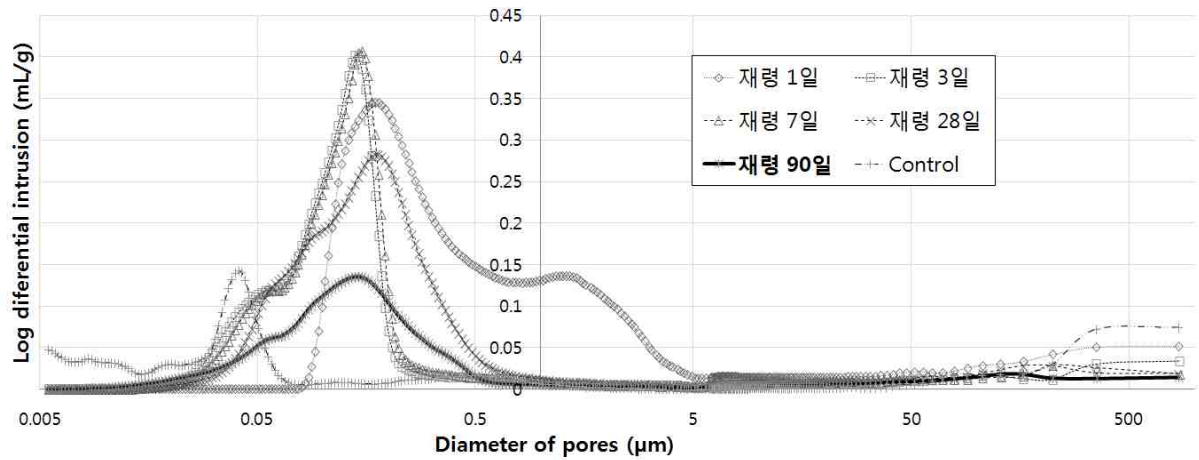


그림 3.3.126 Pore distribution 900°C (재령 90일)

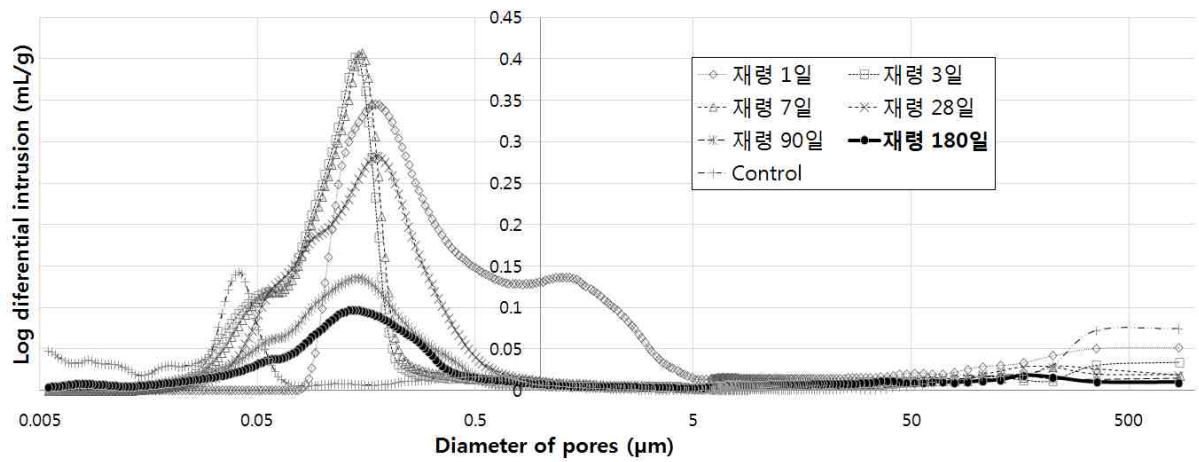


그림 3.3.127 Pore distribution 900°C (재령 180일)

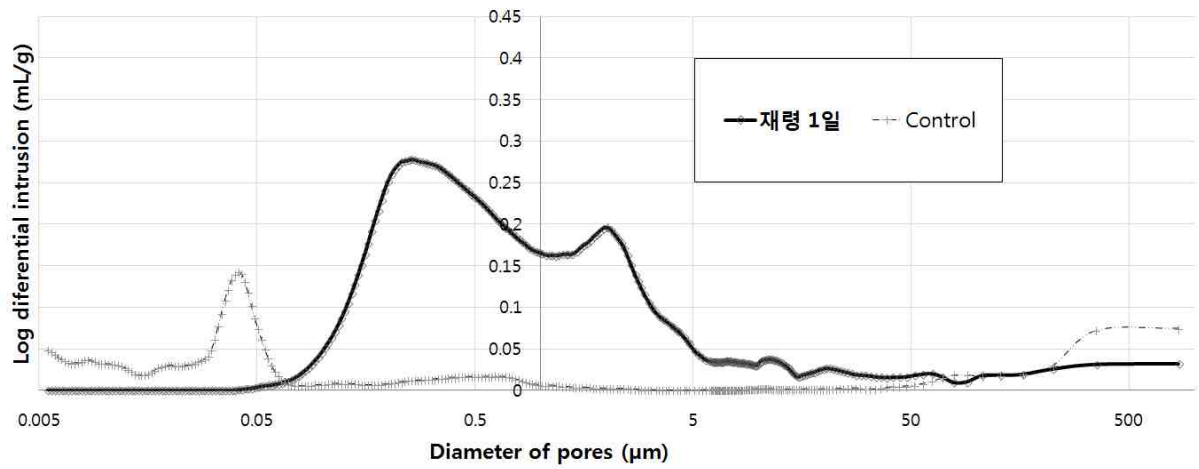


그림 3.3.128 Pore distribution 1000°C (재령 1일)

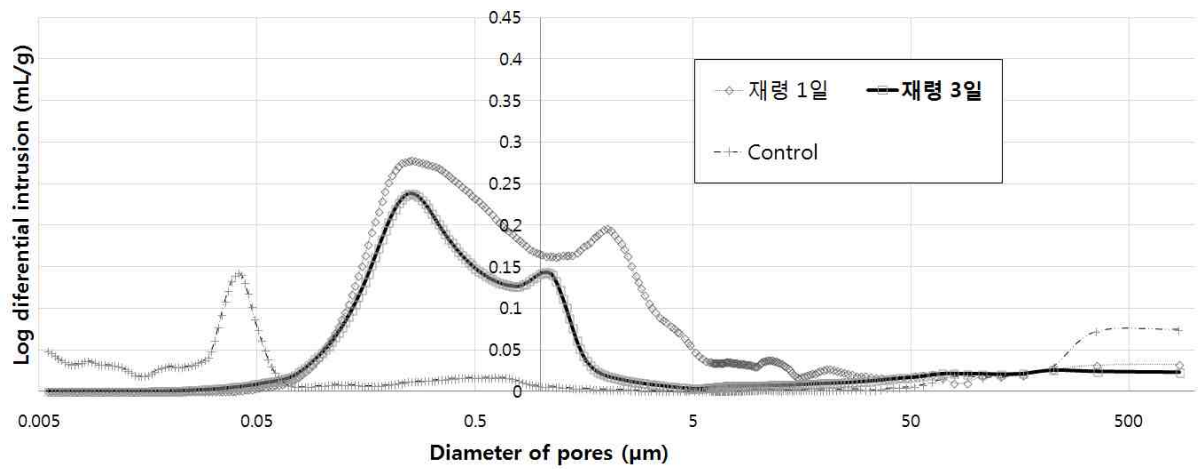


그림 3.3.129 Pore distribution 1000°C (재령 3일)

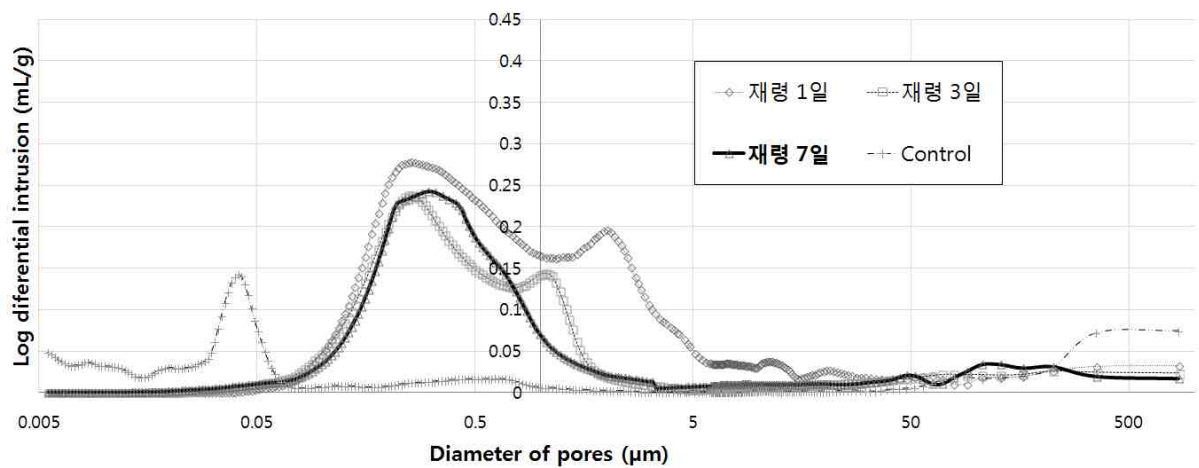


그림 3.3.130 Pore distribution 1000°C (재령 7일)

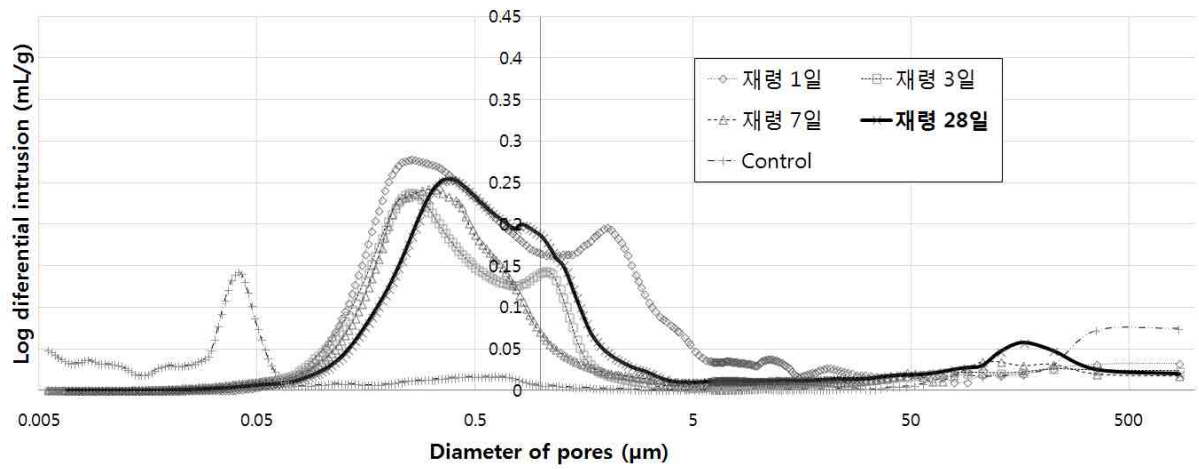


그림 3.3.131 Pore distribution 1000°C (재령 28일)

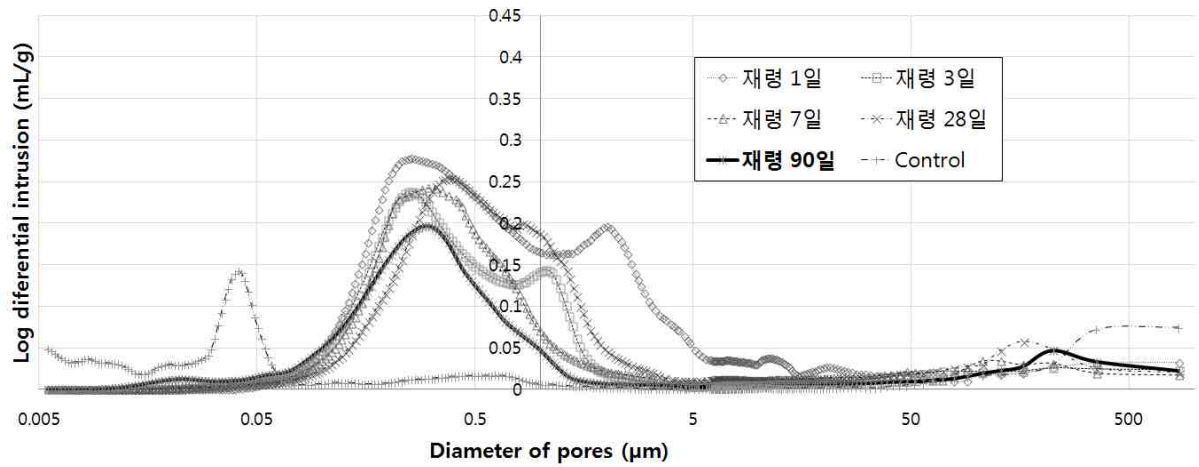


그림 3.3.132 Pore distribution 1000°C (재령 90일)

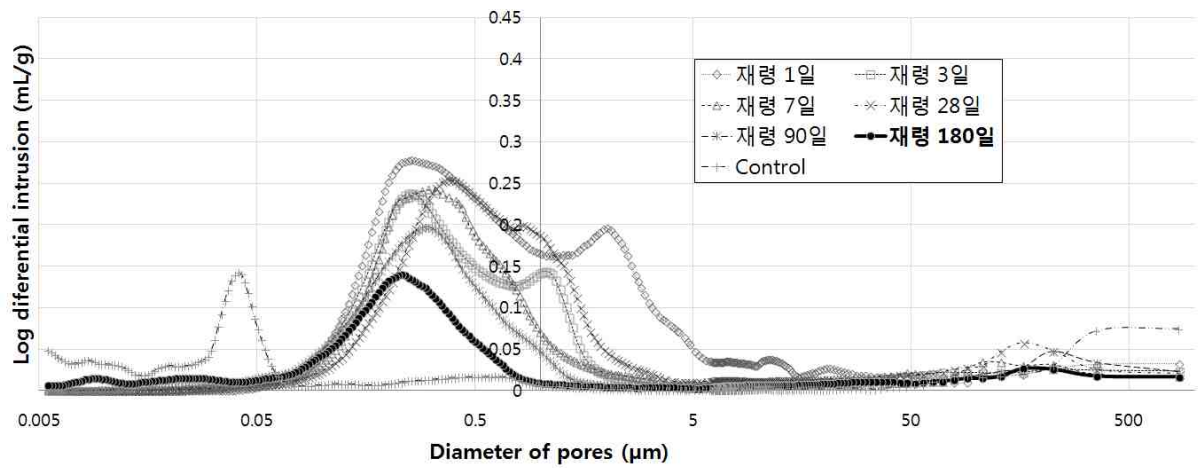


그림 3.3.133 Pore distribution 1000°C (재령 180일)

라. 국외 전문기관 의뢰 결과

① 시간 경과에 따른 후기재령에서의 공극구조 특성 변화

ㄱ. Cumulative intrusion

그림 3.3.134는 일본의 장비를 사용하여 MIP (Mercury intrusion porosimetry) 테스트를 통해 Control 샘플의 Cumulative intrusion을 분석한 것이다.

아래 그림에서 확인할 수 있듯이 $0.05\ \mu\text{m}$ 이하의 Diameter of pores size가 대다수 분포하고 있으며, $0.05\ \mu\text{m}$ 이상 $5\ \mu\text{m}$ 이하의 pores가 일정한 분포를 보이는데 이는 시멘트 입자간 연결된 open pores인 것으로 판단된다.

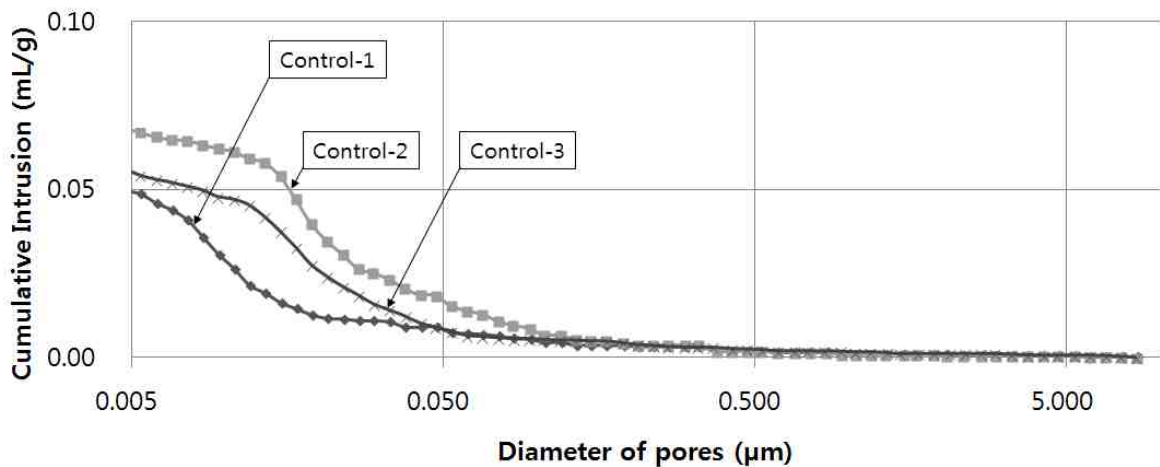


그림 3.3.134 Cumulative intrusion Control

그림 3.3.135 ~ 3.3.136은 일본의 장비를 사용하여 MIP (Mercury intrusion porosimetry) 테스트를 통해 가열온도 100°C 에 노출된 샘플의 재령별 Cumulative intrusion을 분석한 것이다.

재령 28일에는 Control에 비해 pores diameter이 증가하였다. 이는 모세관 공극의 잉여수가 기화한 요인과 미수화물의 수화로 인한 미세공극 충전 후 팽창압에 의해 pores neck의 붕괴로 근접한 2~3개의 pores가 1개의 큰 pores로 변경된 것으로 예상할 수 있다. 추가적으로 $500\ \mu\text{m}$ 이하 pores가 소량 증가하였는데 이는 내부 수화 팽창으로 인한 외부 open pores의 형성으로 판단된다.

재령 90에에서는 재령 28일에 비해 pores diameter이 감소하였다. 이는 opened pores에 의해 유입된 CO_2 와 H_2O 의 공급으로 CaO 가 탄산화 되어 CaCO_3 로 변형되어 극미세 공극을 비롯하여 open pores의 주변에 형성되어 전체적인 pores의 s크기를 감소시킨 것으로 보인다. 전반적으로 국내 결과와 유사한 것을 알 수 있다.

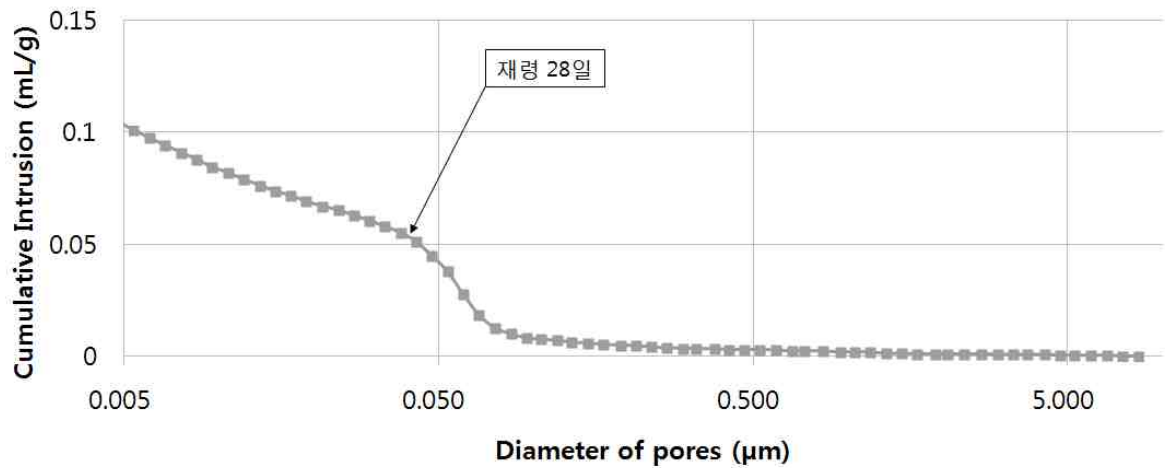


그림 3.3.135 Cumulative intrusion 100°C (재령 28일)

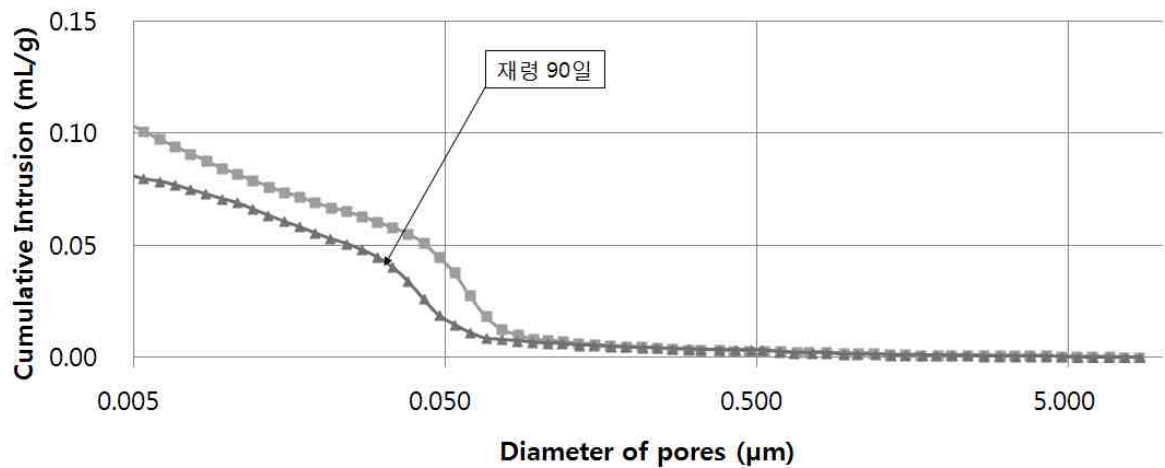


그림 3.3.136 Cumulative intrusion 100°C (재령 90일)

그림 3.3.137 ~ 3.3.142는 일본의 장비를 사용하여 MIP (Mercury intrusion porosimetry) 테스트를 통해 가열온도 200~300℃에 노출된 샘플의 재령별 Cumulative intrusion을 분석한 것이다.

재령 1일에는 Control에 비해 0.005 μm 이하의 pores는 감소하고 0.05 μm pores가 증가였는데, 이는 시멘트 입자간 모세관 공극 및 겔 공극의 잉여수와 화학결합수의 기화에 의한 것으로 판단된다.

재령 28일에는 Control에 비해 pores diameter이 증가하였다. 이는 시멘트 분체의 수화 반응에 의한 미세공극 충전 후 팽창압에 의해 pores neck의 붕괴로 근접한 2~100개의 pores가 1개의 큰 pores로 변경 된 것으로 예상할 수 있다.

재령 90에에서는 재령 28일에 비해 pores diameter이 감소하였다. 이는 opened pores에 의해 유입된 CO_2 와 H_2O 의 공급으로 CaO가 탄산화 되어 CaCO_3 로 변형되어 극미세 공극을 비롯하여 open pores의 주변에 형성되어 전체적인 pores의 s크기를 감소시킨 것으로 보인다. 전반적으로 국내 결과와 유사한 것을 알 수 있다.

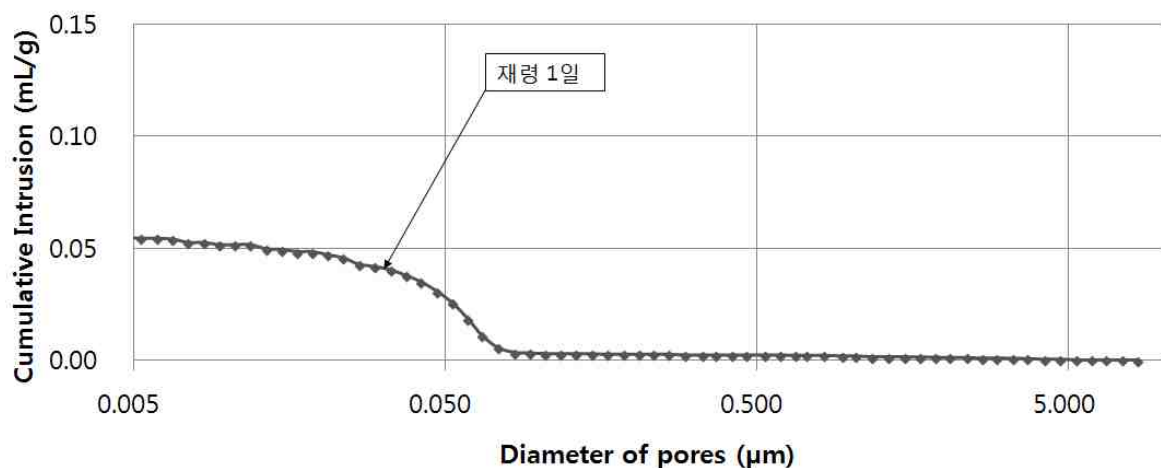


그림 3.3.137 Cumulative intrusion 200°C (재령 1일)

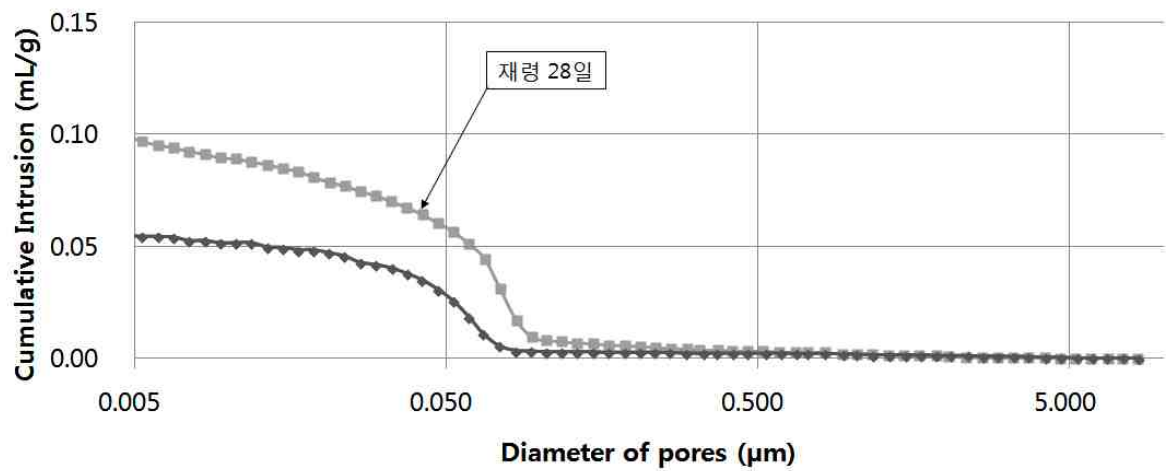


그림 3.3.138 Cumulative intrusion 200°C (재령 28일)

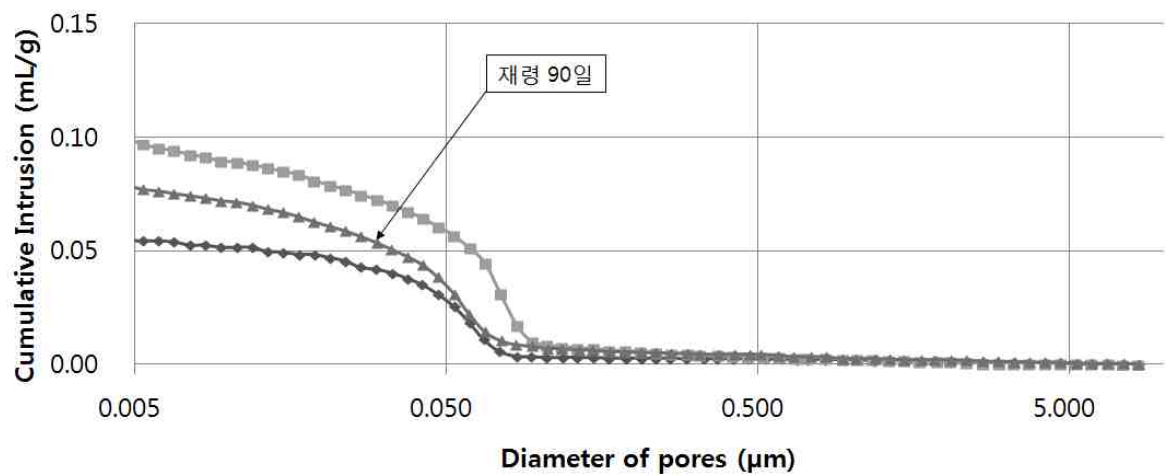


그림 3.3.139 Cumulative intrusion 200°C (재령 90일)

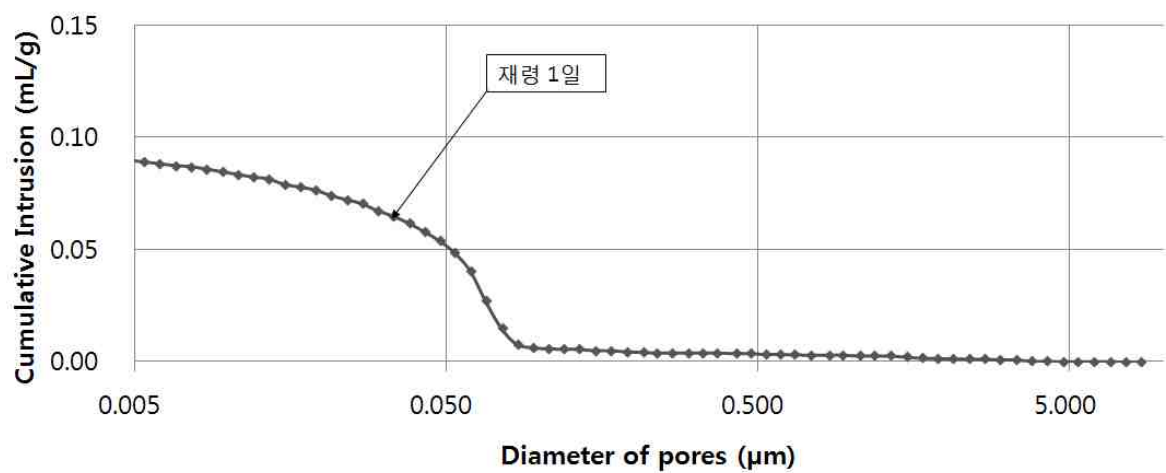


그림 3.3.140 Cumulative intrusion 300°C (재령 1일)

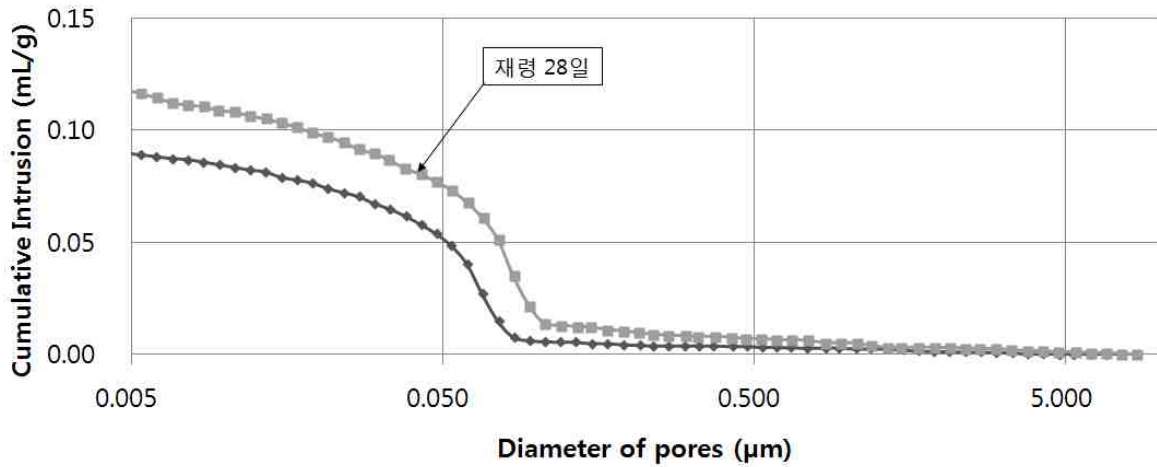


그림 3.3.141 Cumulative intrusion 300°C (재령 28일)

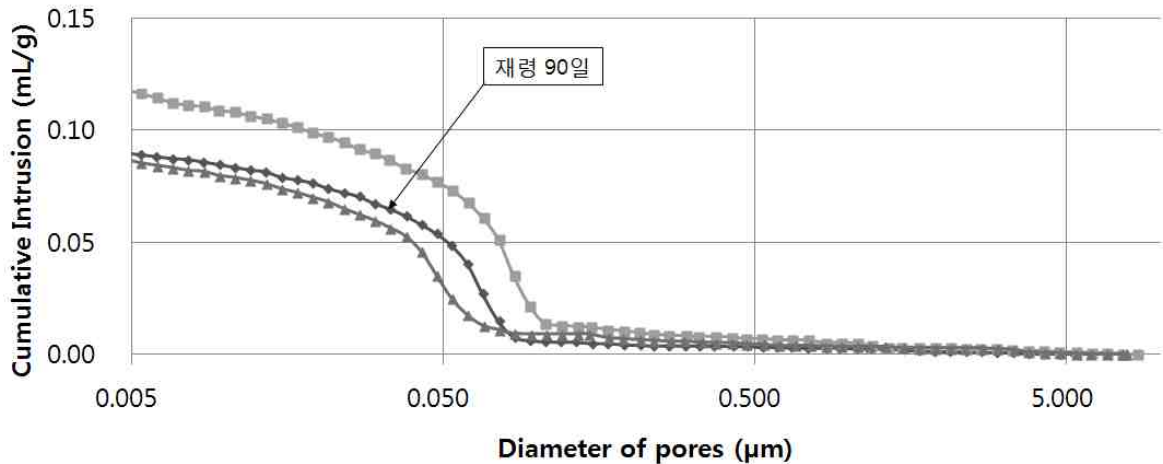


그림 3.3.142 Cumulative intrusion 300°C (재령 90일)

그림 3.3.143 ~ 3.3.151은 일본의 장비를 사용하여 MIP (Mercury intrusion porosimetry) 테스트를 통해 가열온도 400~600°C에 따른 재령 별 시멘트 경화체 Cumulative intrusion을 분석한 것이다.

전반적으로, 재령 1일에는 Control에 비해 pores diameter가 증가하였는데, 이는 400°C 이상에서 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)이 CaO 와 H_2O 로 분해되어 CaO 및 Na 가 SiO_2 와 반응하여 포타슘 유리 또는 칼슘 유리화 되어 시멘트 미립자 표면을 유리화 시키고, 유리화된 비정질 고상체에 O_2 및 화학결합수 증발 기체가 고립되어(Close pores) 0.1 μm 이하의 pores 량이 증가한 것으로 판단된다.

재령 28일에는 재령1일에 비해 pores diameter가 증가하였는데, 이는 시멘트 분체의 수

화 반응에 의한 미세공극 충전 후 팽창압에 의해 pores neck의 붕괴로 근접한 2~100개의 pores가 1개의 큰 pores로 변경되어 증가한 것으로 판단된다.

재령 90일에는 재령 28일에 비해 pores diameter가 감소하였는데, 이는 미수화물에 의한 수화반응으로 공극이 충전되고, 고열로 인해 증가된 opened pores에 의해 유입된 CO₂와 H₂O의 공급으로 CaO가 탄산화 진행으로 CaCO₃로 변형되어 극미세 공극을 비롯하여 open pores의 주변에 형성되어 전체적인 pores의 크기를 감소시킨 것으로 보인다. 전반적으로 국내 결과와 유사한 것을 알 수 있다.

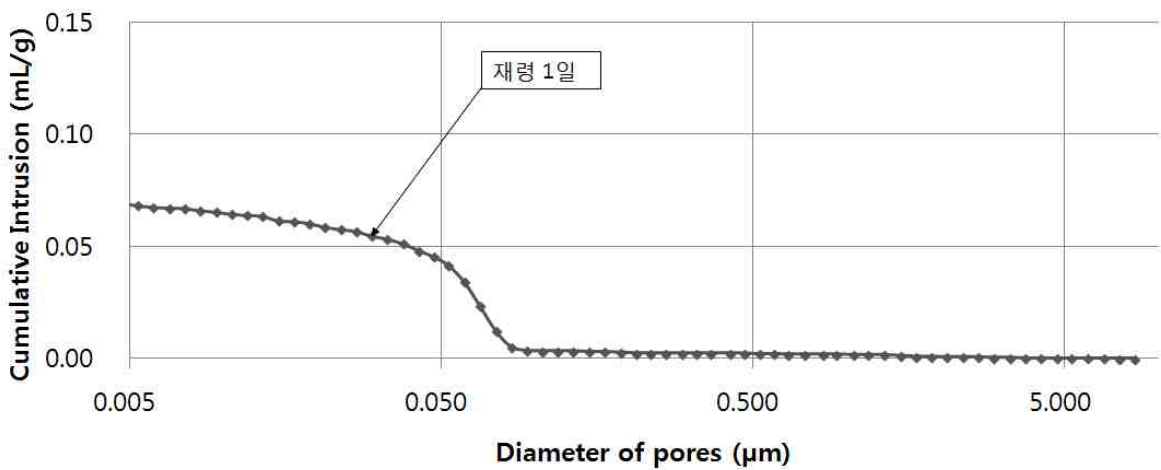


그림 3.3.143 Cumulative intrusion 400°C (재령 1일)

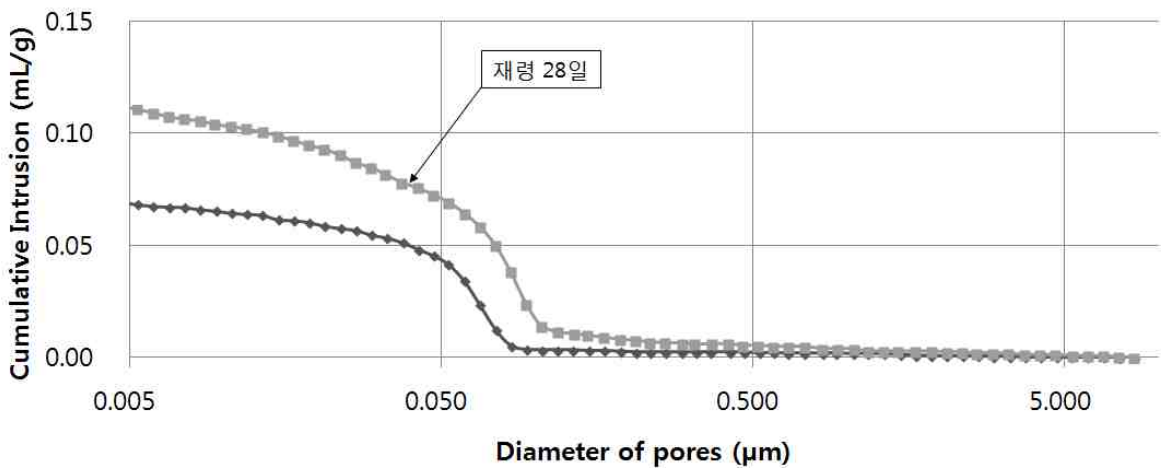


그림 3.3.144 Cumulative intrusion 400°C (재령 28일)

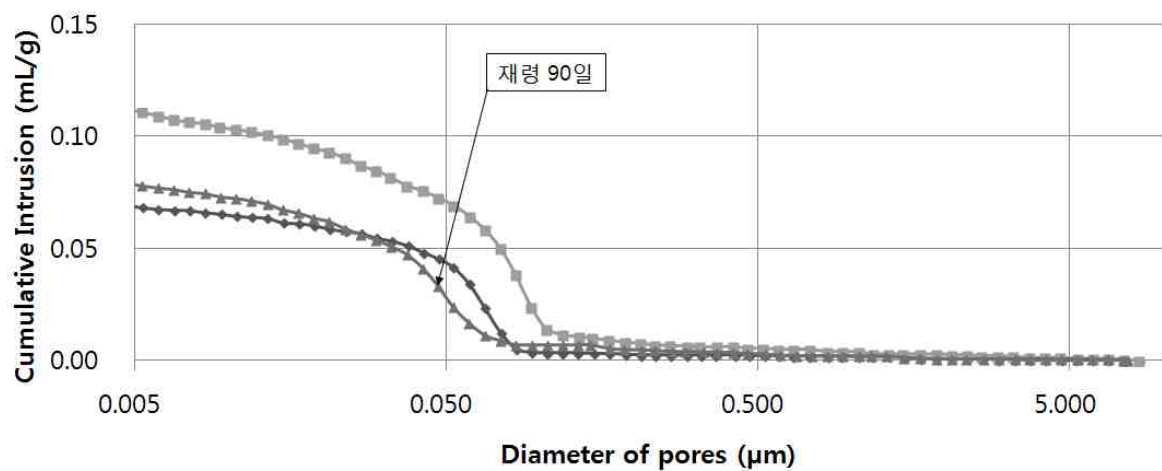


그림 3.3.145 Cumulative intrusion 400°C (재령 90일)

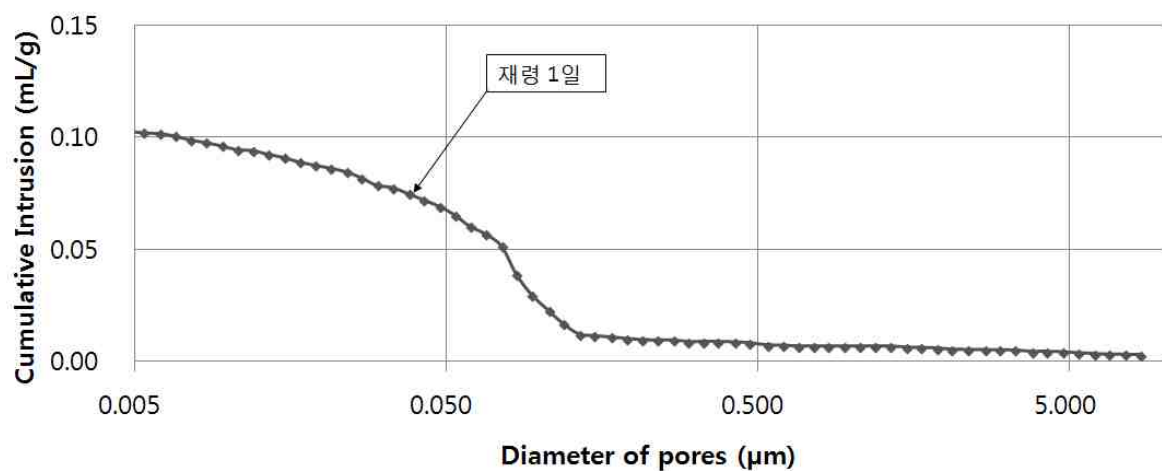


그림 3.3.146 Cumulative intrusion 500°C (재령 1일)

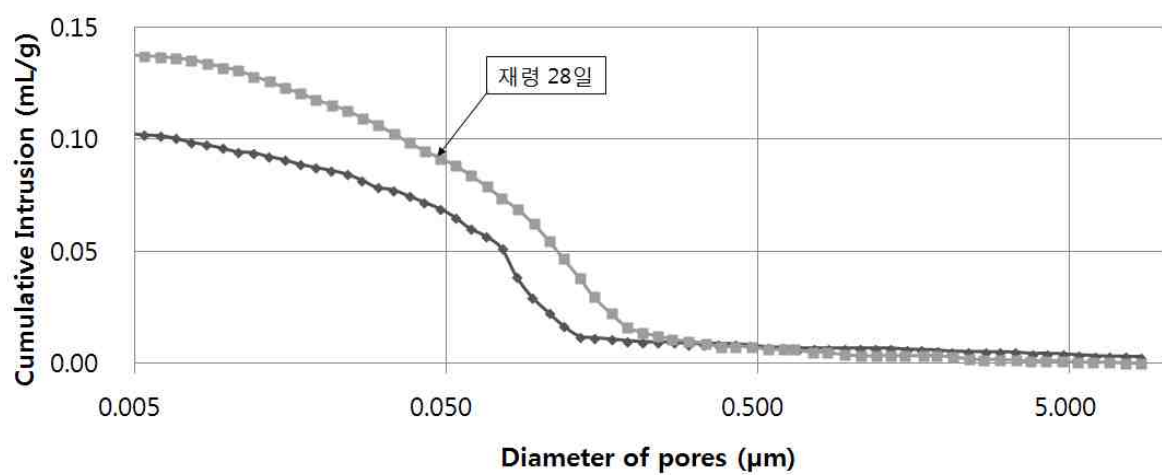


그림 3.3.147 Cumulative intrusion 500°C (재령 28일)

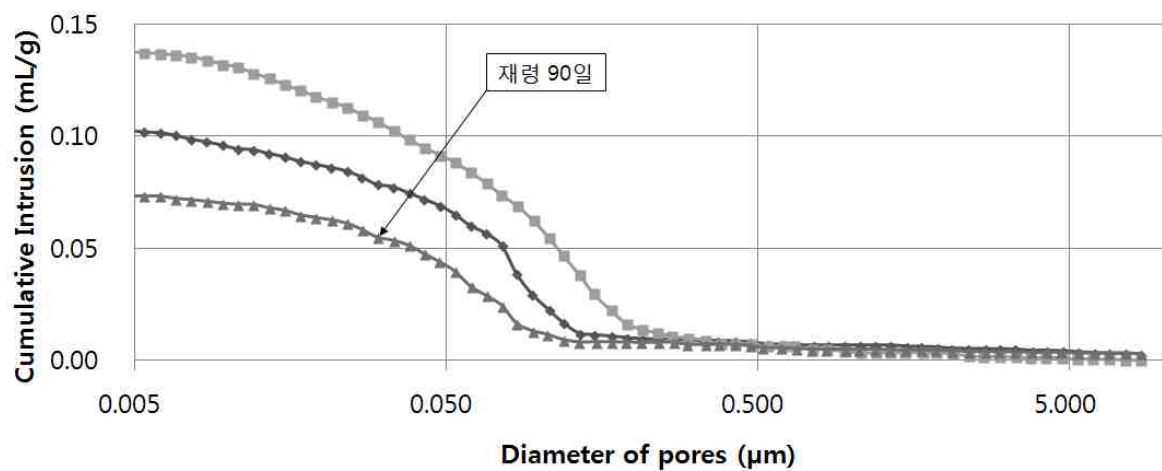


그림 3.3.148 Cumulative intrusion 500°C (재령 90일)

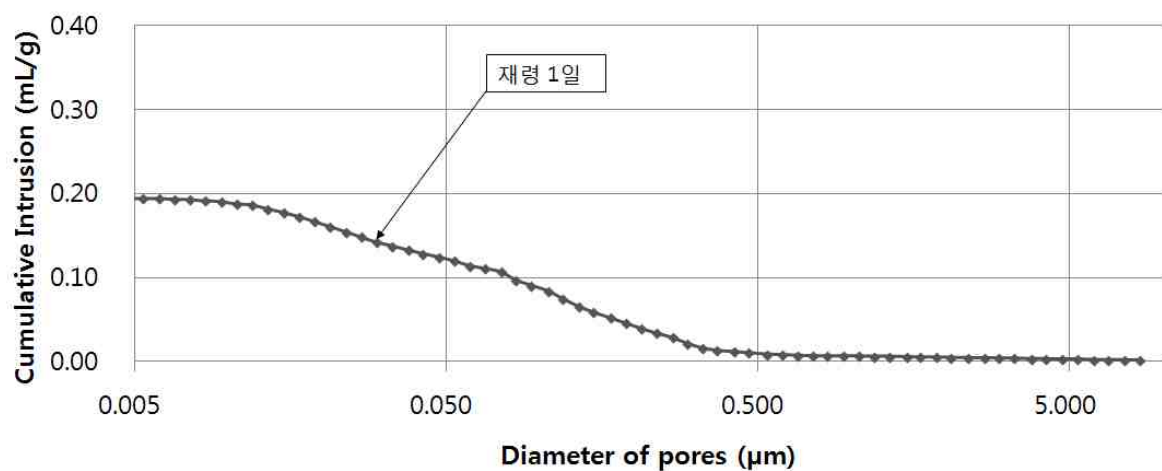


그림 3.3.149 Cumulative intrusion 600°C (재령 1일)

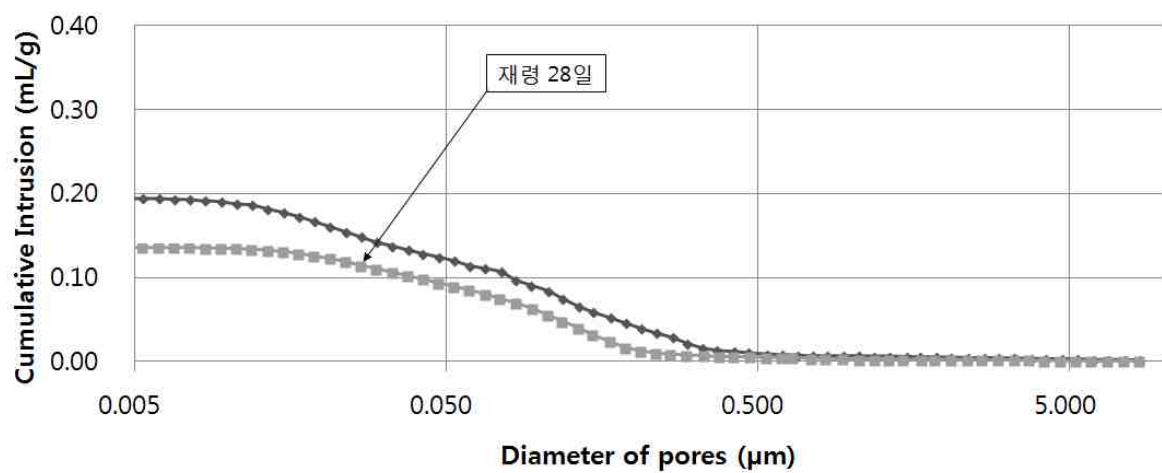


그림 3.3.150 Cumulative intrusion 600°C (재령 28일)

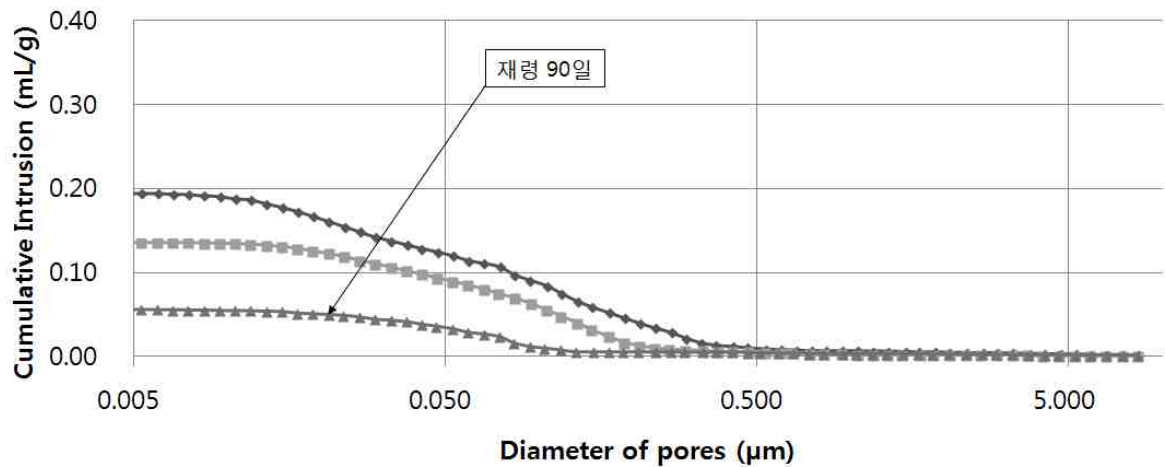


그림 3.3.151 Cumulative intrusion 600°C (재령 90일)

그림 3.3.152 ~ 3.3.161은 일본 장비를 사용하여 MIP (Mercury intrusion porosimetry) 테스트를 통해 가열온도 700~1000°C에 노출될 샘플의 재령별 Cumulative intrusion을 분석한 것이다.

전반적으로, 재령 1일에는 Control에 비해 pore diameter가 증가하였는데, 이는 700~100°C 이상에서 시멘트 입자의 주된 성분인 탄산칼슘(CaCO_3)이 CaO 와 CO_2 로 분해되고 CaO 및 Na 가 SiO_2 와 반응하여 포타슘 유리 또는 칼슘 유리화 되어 SiO_2 와 반응하고 전체적인 유리화가 진행된다. 유리화된 비정질 고상체에 분해로 인해 발생한 O_2 기체가 고립되어 gas가 다수 포집되어 공극(Close pores) 및 grain 내에 포집되어 5 μm 이하의 pores량이 증가한 것으로 판단된다.

재령 28일에는 재령1일에 비해 0.05 μm 이상의 pores가 증가하였는데, 이는 시멘트 분체의 수화 반응에 의한 미세공극 충전 후 팽창압에 의해 pores neck의 붕괴로 근접한 2~100개의 pores가 1개의 큰 pores로 변경되어 증가한 것으로 판단된다. 또한, 급속한 수화반응과 초기 형성된 표면 수화 층 및 유리화 층이 박락 붕괴되고 함몰되어 전체적인 porosity가 증가함을 볼 수 있다.

재령 90일에는 박락되어 노출된 내부 수화물질의 수화가 진행된다. 또한 추가적으로 고열에 의한 조직 붕괴가 일어나 외부의 인자가 내부로 유입되어 탄산화가 진행되어 CaO 는 CaCO_3 를 형성하여 체적 팽창을 하여 주변에 존재하는 미세공극(pores)를 충전시켜 전체적인 porosity의 감소를 야기하게 된다. 전반적으로 국내 결과와 유사한 것을 알 수 있다.

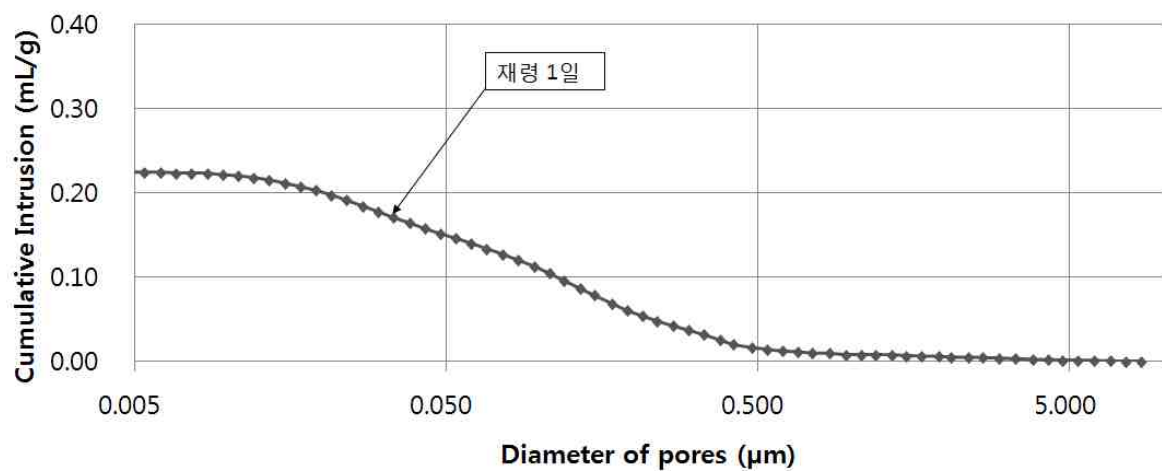


그림 3.3.152 Cumulative intrusion 700°C (재령 1일)

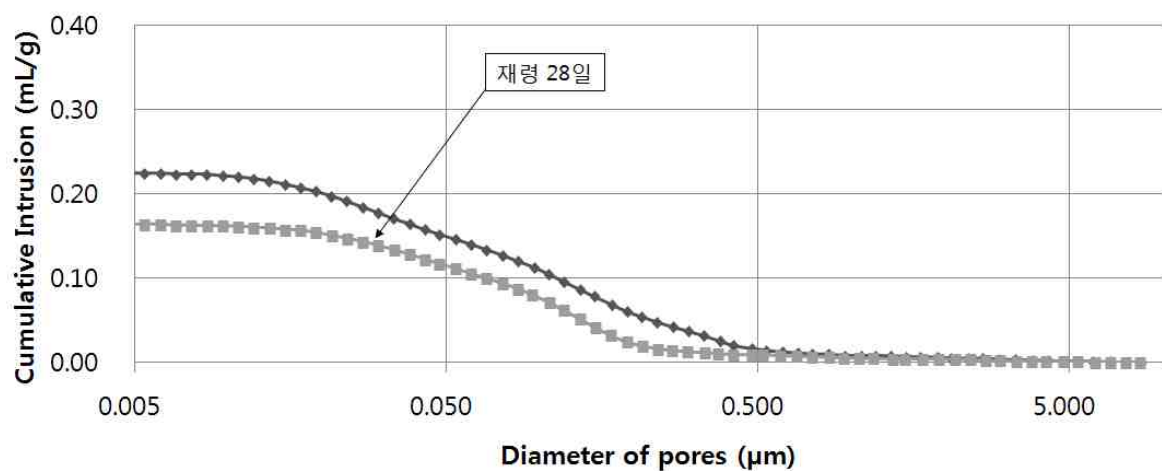


그림 3.3.153 Cumulative intrusion 700°C (재령 28일)

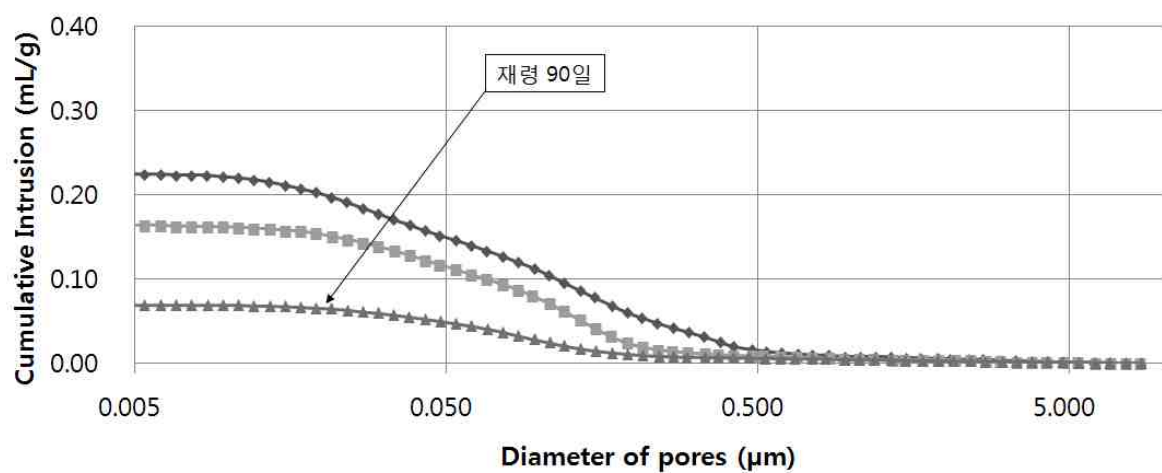


그림 3.3.154 Cumulative intrusion 700°C (재령 90일)

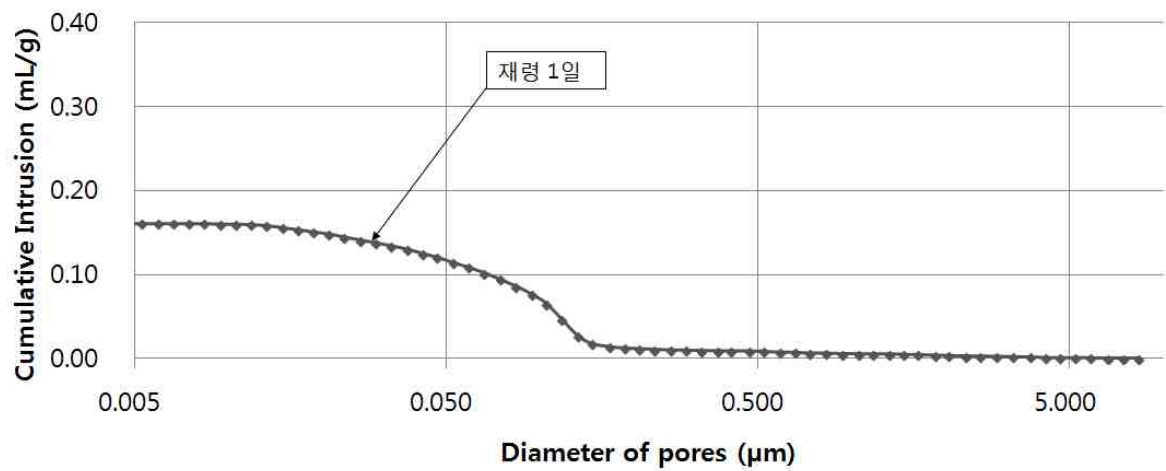


그림 3.3.155 Cumulative intrusion 800°C (재령 1일)

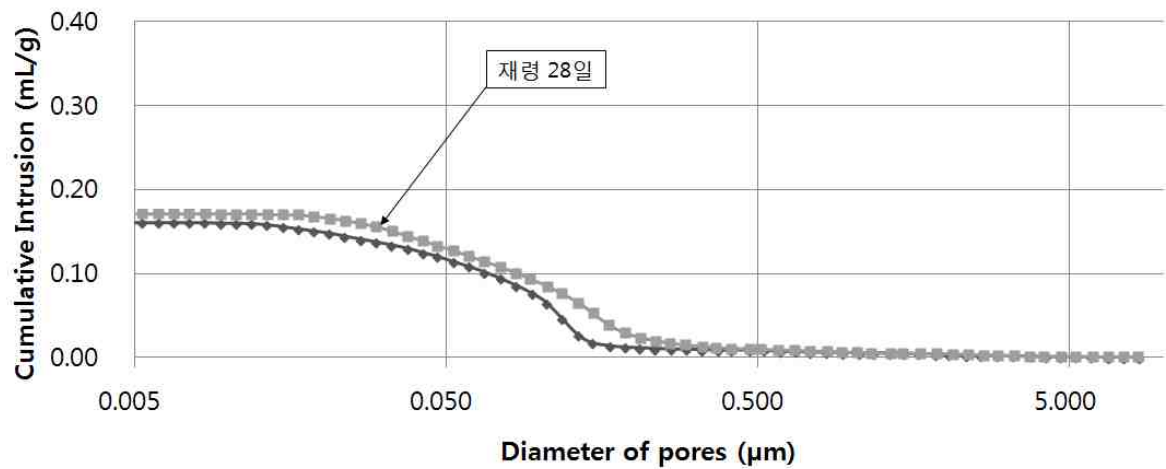


그림 3.3.156 Cumulative intrusion 800°C (재령 28일)

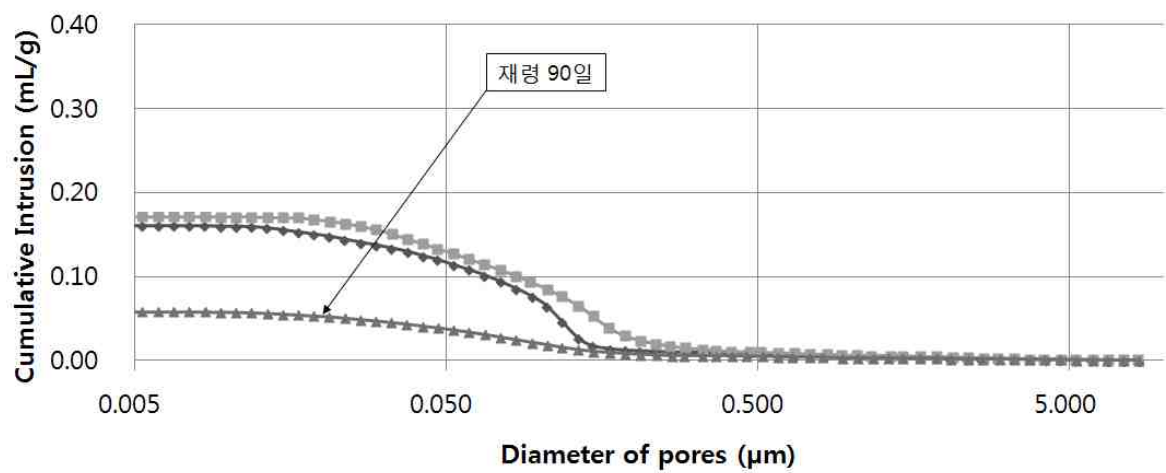


그림 3.3.157 Cumulative intrusion 800°C (재령 90일)

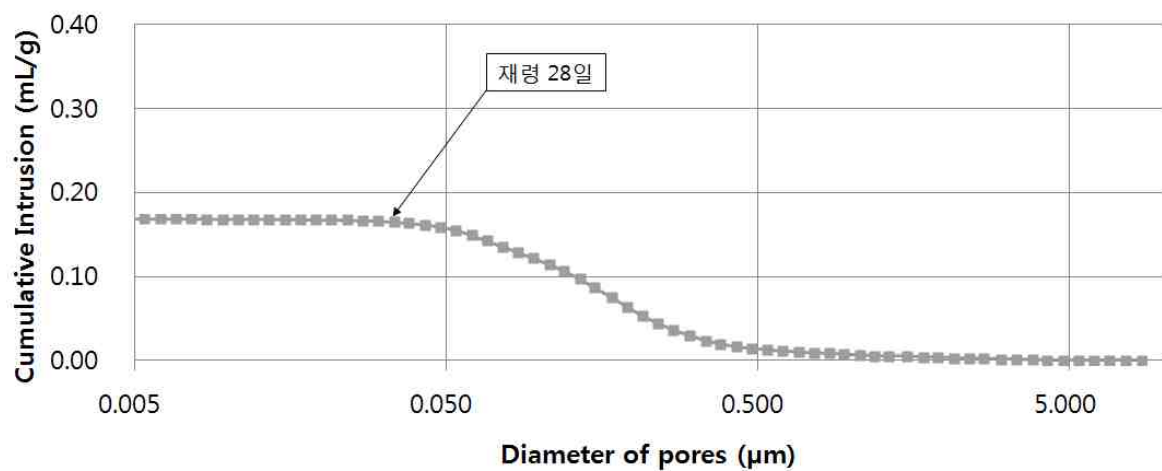


그림 3.3.158 Cumulative intrusion 900°C (재령 28일)

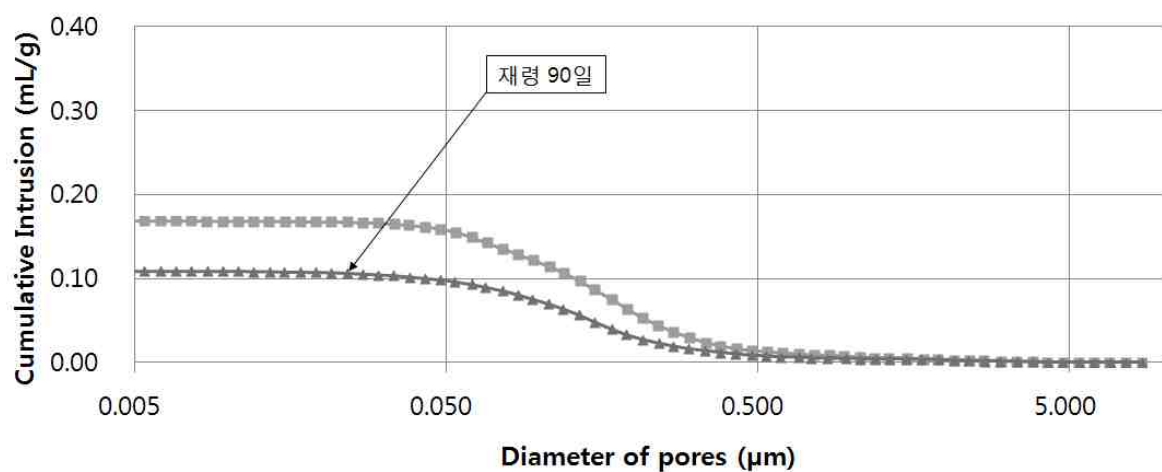


그림 3.3.159 Cumulative intrusion 900°C (재령 90일)

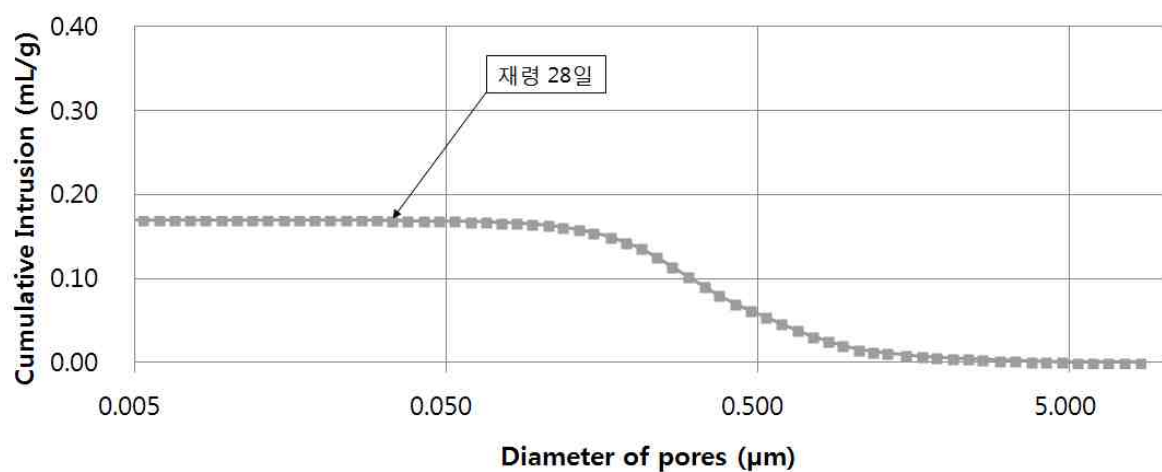


그림 3.3.160 Cumulative intrusion 1000°C (재령 28일)

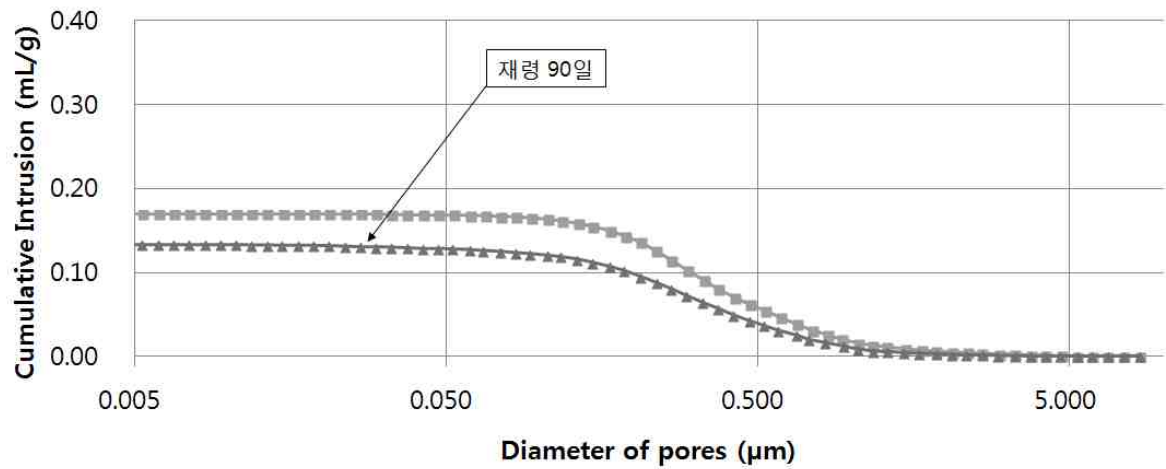


그림 3.3.161 Cumulative intrusion 1000°C (재령 90일)

ㄴ. Pore distribution

그림 3.3.162는 일본의 장비를 사용하여 MIP (Mercury intrusion porosimetry) 테스트를 통해 Control 시험체의 Pore distribution을 분석한 것이다.

대부분 0.05 μm 이하의 공극이 차지하고 있는 것을 확인할 수 있는데, 이는 국내의 결과와 같음을 알 수 있다.

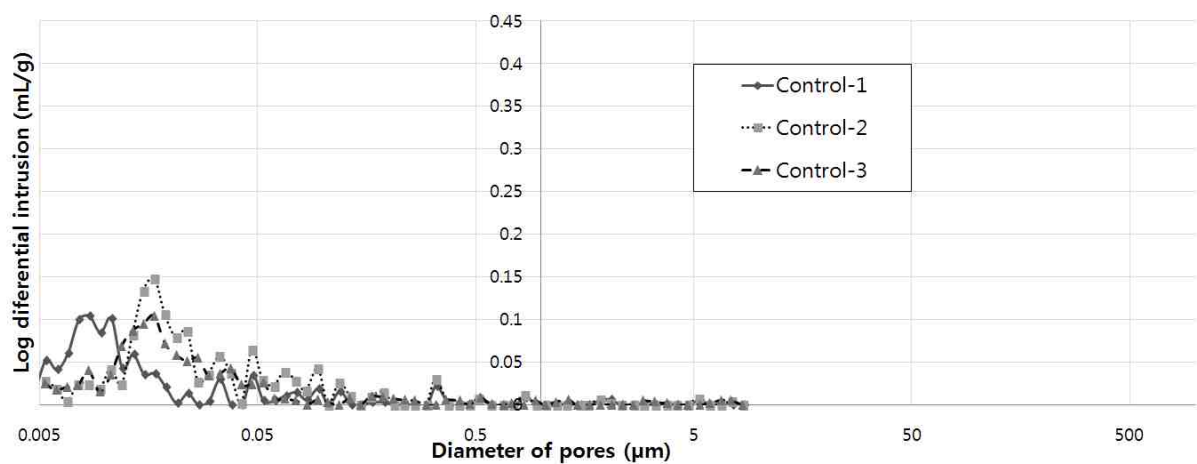


그림 3.3.162 Pore distribution control

그림 3.3.163 ~ 3.3.164는 일본 장비를 사용하여 MIP (Mercury intrusion porosimetry) 테스트를 통해 가열온도 100°C에 노출된 샘플의 재령별 Pore distribution을 분석한 것이다.

재령 28일에는 Control에 비해 0.05 μm 이상의 pores가 증가하였다. 이는 시멘트 분체의 수화에 의한 미세공극 충전 후 팽창압에 의해 pores neck의 붕괴로 근접한 2~3개의 pores가 1개의 큰 pores로 변경되어 증가한 것으로 판단된다.

재령 90일에는 0.05 μm 이상의 pores가 감소하고 0.05 μm 이하의 공극이 증가하였는데, 이는 미수화물에 의한 수화반응으로 공극이 충전되고, opened pores에 의해 유입된 CO_2 와 H_2O 의 공급으로 CaO가 탄산화 진행으로 CaCO_3 로 변형되어 극미세 공극을 비롯하여 open pores의 주변에 형성되어 전체적인 pores의 크기를 감소시킨 것으로 보인다. 전반적으로 국내 결과와 유사한 것을 알 수 있다.

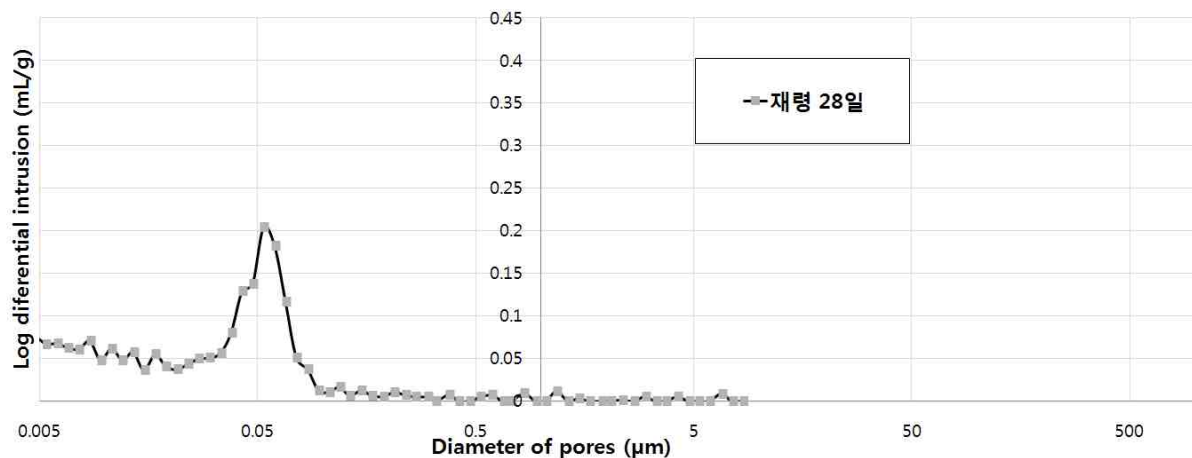


그림 3.3.163 Pore distribution 100°C (재령 28일)

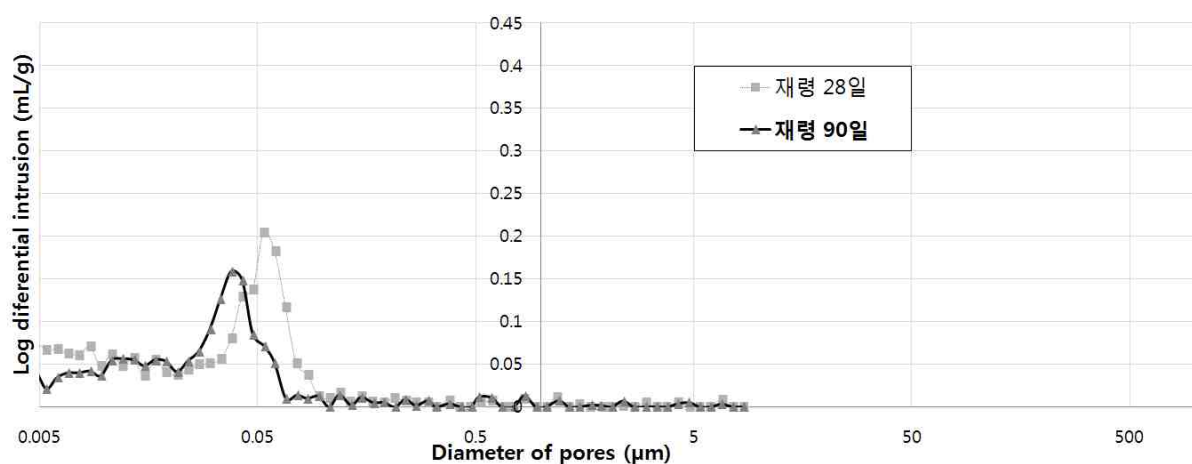


그림 3.3.164 Pore distribution 100°C (재령 90일)

그림 3.3.165 ~ 3.3.170은 일본 장비를 사용하여 MIP (Mercury intrusion porosimetry) 테스트를 통해 가열온도 200~300℃에 노출된 샘플의 재령별 Pore distribution을 분석한 것이다.

재령 1일에는 Control에 비해 0.005 μm 이하의 pores는 감소하고 0.05 μm pores가 증가였는데, 이는 시멘트 입자간 모세관 공극 및 겔 공극의 잉여수와 화학결합수의 기화에 의한 것으로 판단된다.

재령 28일에는 재령1일에 비해 0.005 μm 이하의 pores는 감소하고 0.05 μm pores가 증가하는데, 이는 시멘트 분체의 수화 반응에 의한 미세공극 충전 후 팽창압에 의해 pores neck의 붕괴로 근접한 2~100개의 pores가 1개의 큰 pores로 변경되어 증가한 것으로 판단된다.

재령 90일에는 0.05 μm 이상의 pores가 감소하고 0.05 μm 이하의 공극이 증가하였는데, 이는 미수화물에 의한 수화반응으로 공극이 충전되고, opened pores에 의해 유입된 CO_2 와 H_2O 의 공급으로 CaO가 탄산화 진행으로 CaCO_3 로 변형되어 극미세 공극을 비롯하여 open pores의 주변에 형성되어 전체적인 pores의 크기를 감소시킨 것으로 보인다. 전반적으로 국내 결과와 유사한 것을 알 수 있다.

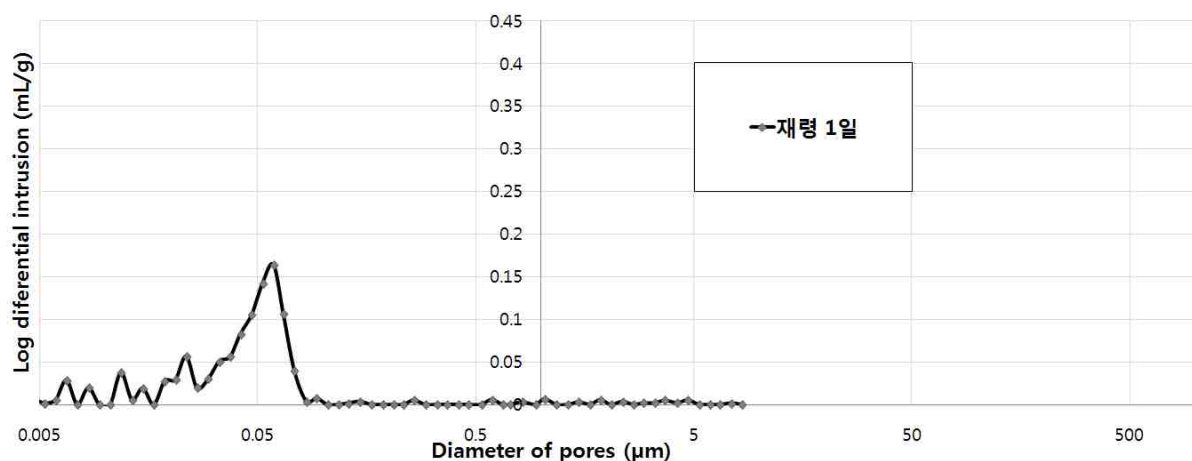


그림 3.3.165 Pore distribution 200℃ (재령 1일)

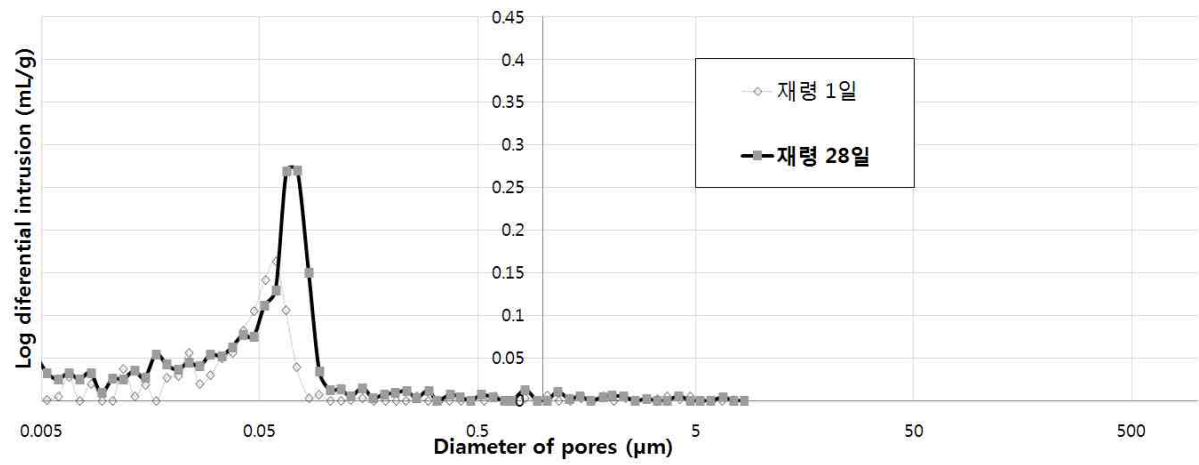


그림 3.3.166 Pore distribution 200°C (재령 28일)

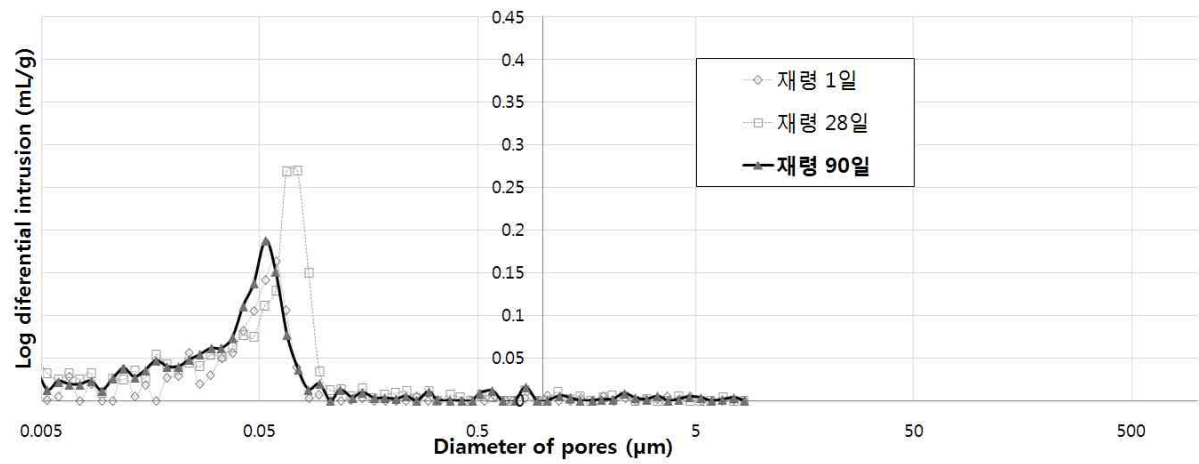


그림 3.3.167 Pore distribution 200°C (재령 90일)

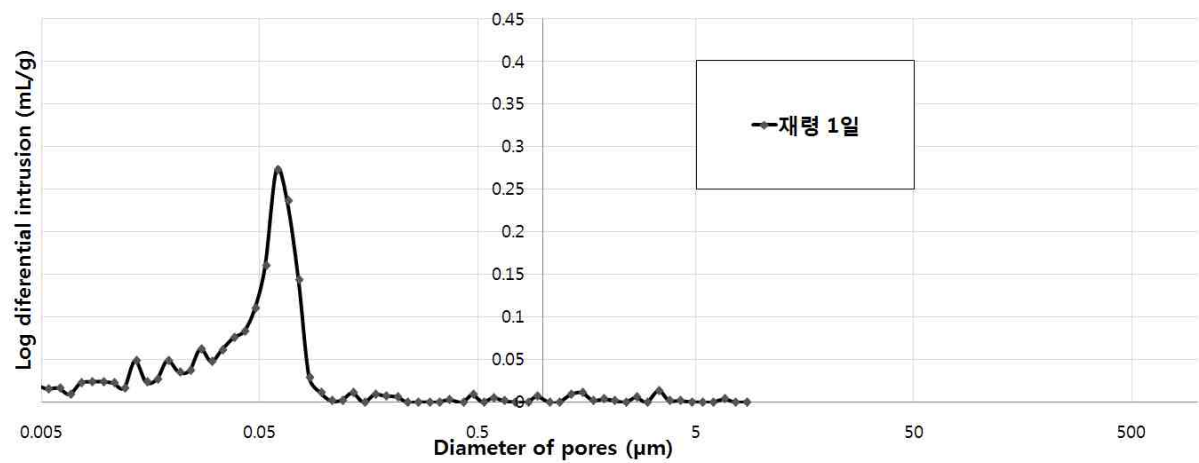


그림 3.3.168 Pore distribution 300°C (재령 1일)

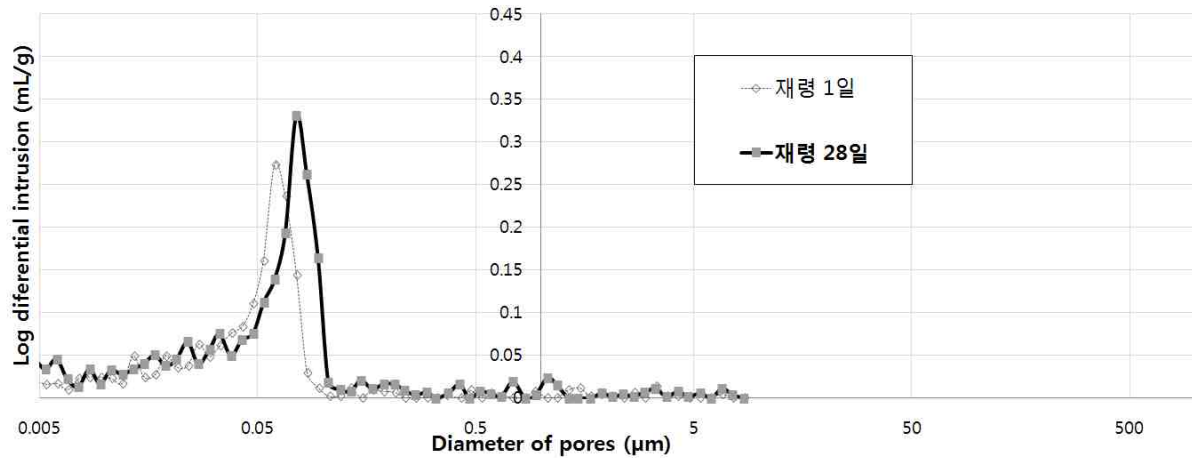


그림 3.3.169 Pore distribution 300°C (재령 28일)

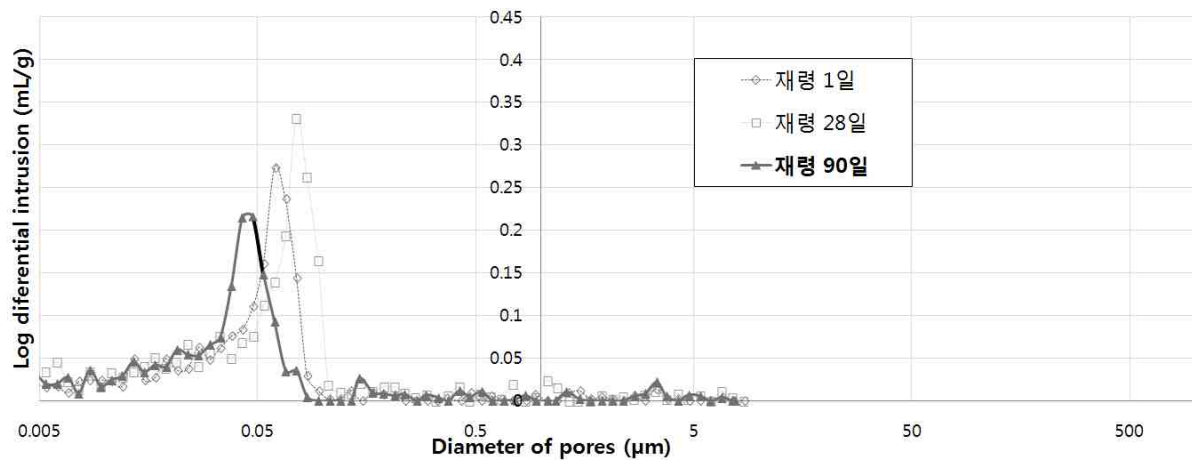


그림 3.3.170 Pore distribution 300°C (재령 90일)

그림 3.3.171 ~ 3.3.179는 일본 장비를 사용하여 MIP (Mercury intrusion porosimetry) 테스트를 통해 가열온도 400~600°C에 노출된 샘플의 재령별 Pore distribution을 분석한 것이다.

전반적으로, 재령 1일에는 Control에 비해 0.05 μm pores가 증가하였는데, 이는 400°C 이상에서 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)이 CaO 와 H_2O 로 분해되어 CaO 및 Na 가 SiO_2 와 반응하여 칼슘 유리 또는 칼슘 유리화되어 시멘트 미립자 표면을 유리화 시키고, 유리화된 비정질 고상체에 O_2 및 화학결합수 증발 기체가 고립되어 (Close pores) 0.1 μm 이하의 pores 량이 증가한 것으로 나타났다.

재령 28일에는 재령1일에 비해 0.05 μm 이상의 pores가 증가하였는데, 이는 시멘트 분체

의 수화 반응에 의한 미세공극 충전 후 팽창압에 의해 pores neck의 붕괴로 근접한 2~100 개의 pores가 1개의 큰 pores로 변경되어 증가한 것으로 판단된다.

재령 90일에는 0.05 μm 이상의 pores가 감소하고 0.05 μm 이하의 공극이 증가하였는데, 이는 미수화물에 의한 수화반응으로 공극이 충전되고, 고열로 인해 증가된 opened pores에 의해 유입된 CO_2 와 H_2O 의 공급으로 CaO 가 탄산화 진행으로 CaCO_3 로 변형되어 극미세 공극을 비롯하여 open pores의 주변에 형성되어 전체적인 pores의 크기를 감소시킨 것으로 보인다. 전반적으로 국내 결과와 유사한 것을 알 수 있다.

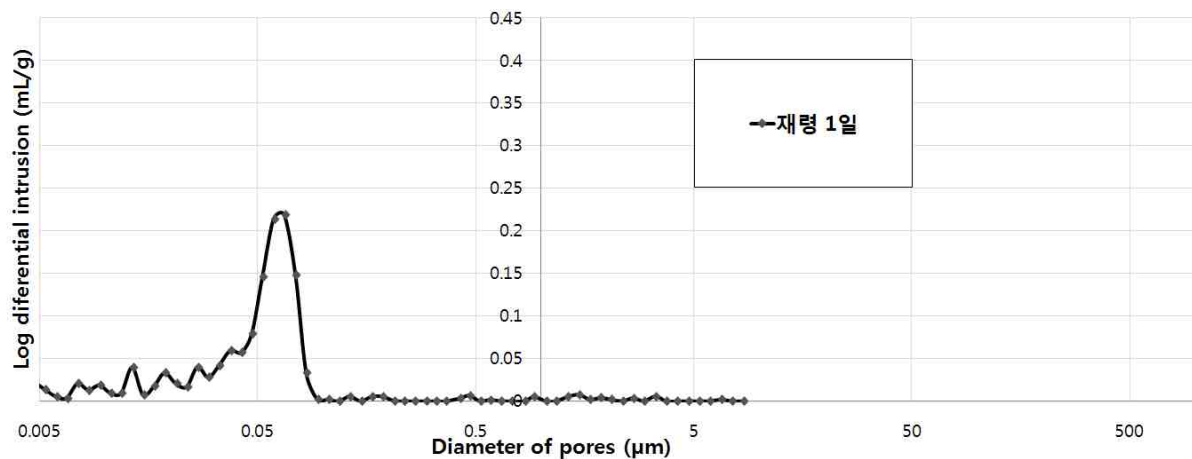


그림 3.3.171 Pore distribution 400°C (재령 1일)

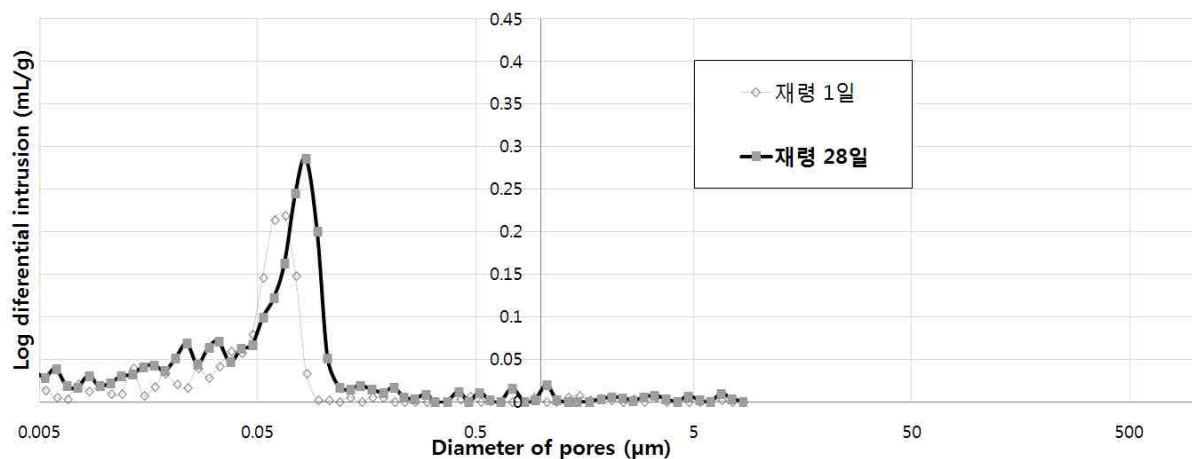


그림 3.3.172 Pore distribution 400°C (재령 28일)

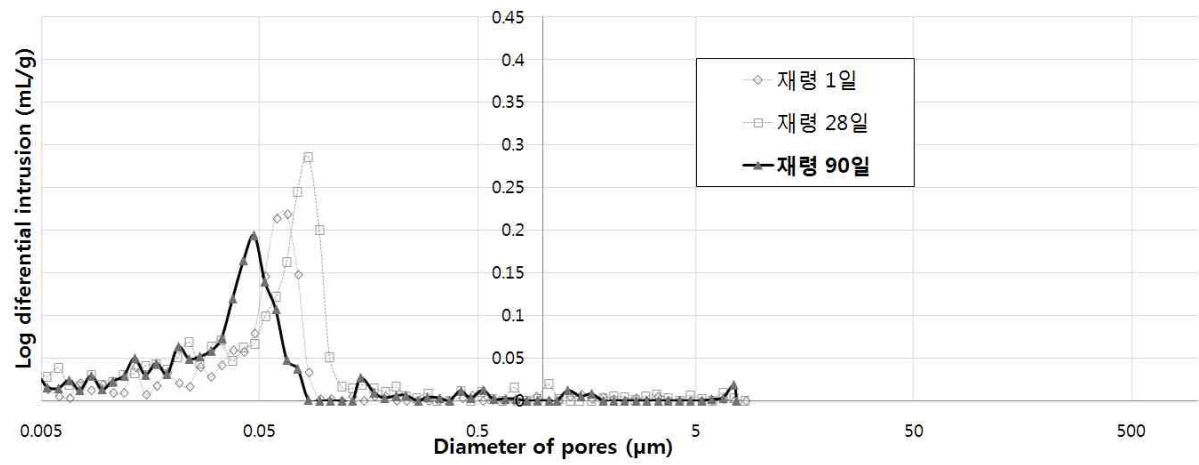


그림 3.3.173 Pore distribution 400°C (재령 90일)

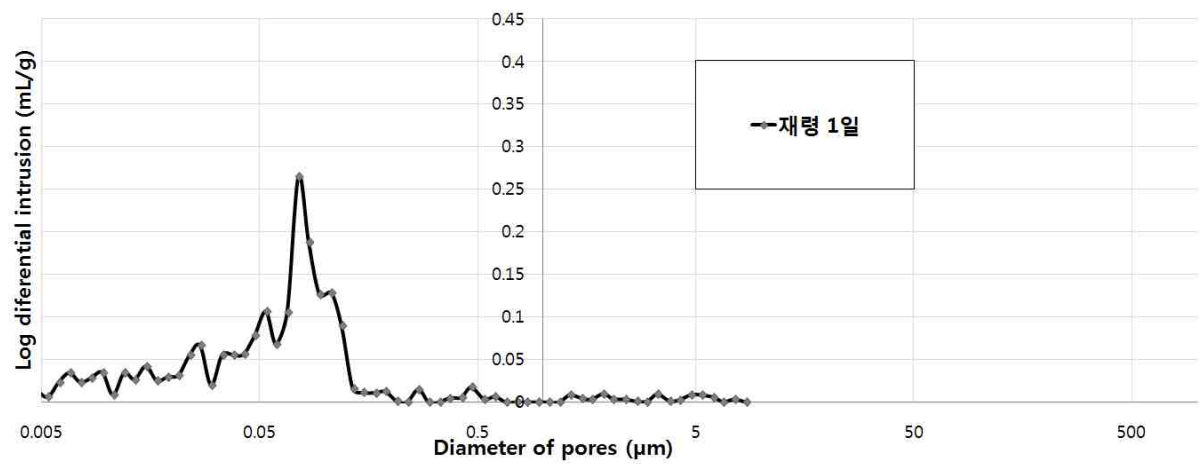


그림 3.3.174 Pore distribution 500°C (재령 1일)

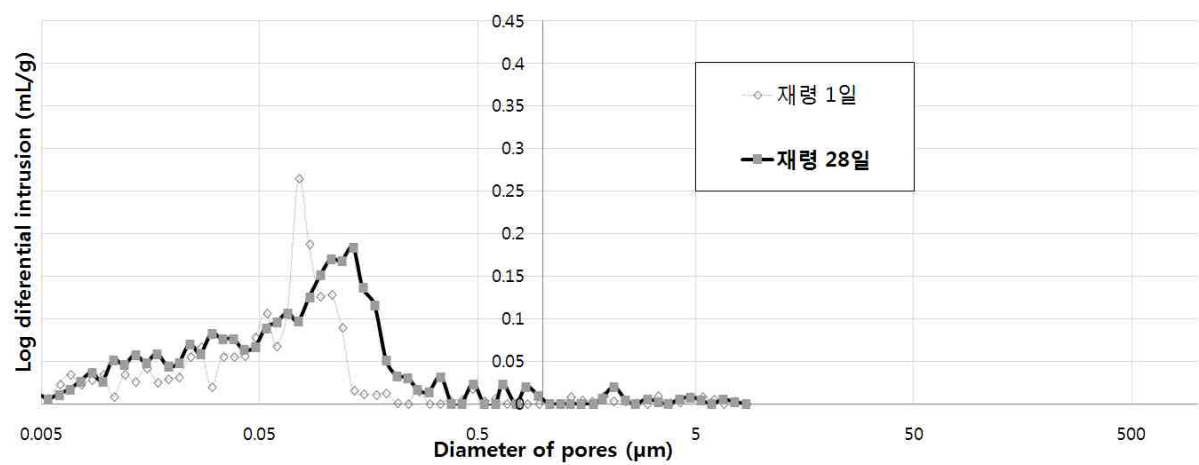


그림 3.3.175 Pore distribution 500°C (재령 28일)

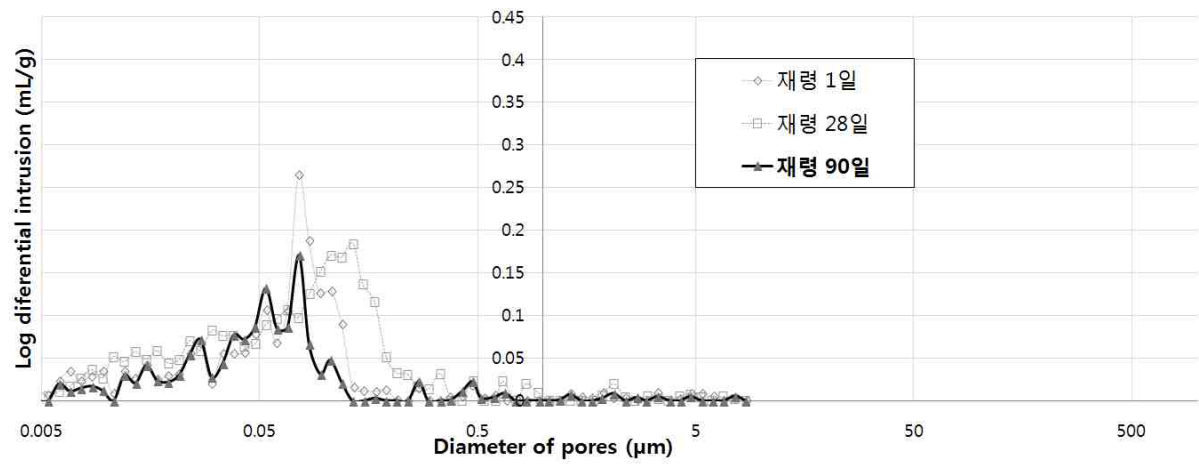


그림 3.3.176 Pore distribution 500°C (재령 90일)

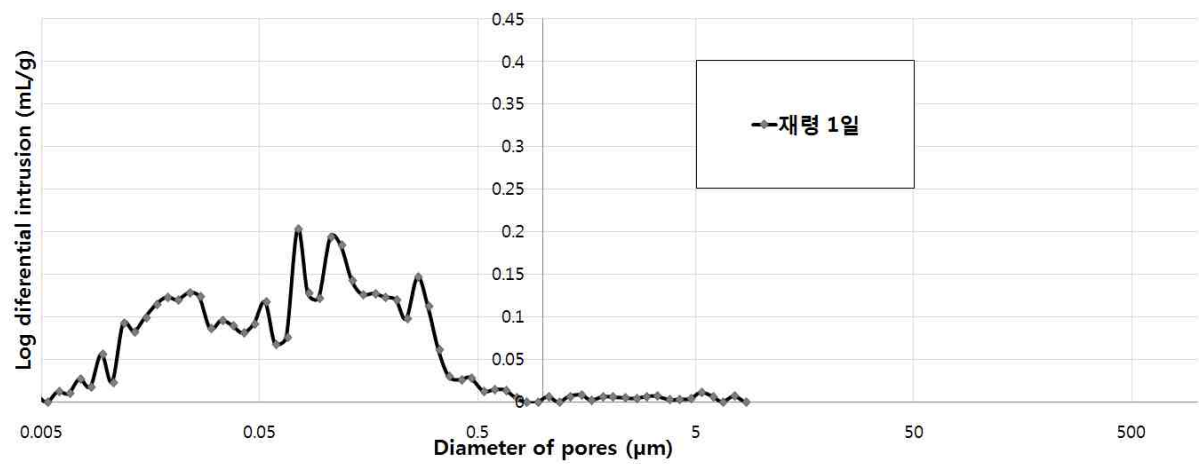


그림 3.3.177 Pore distribution 600°C (재령 1일)

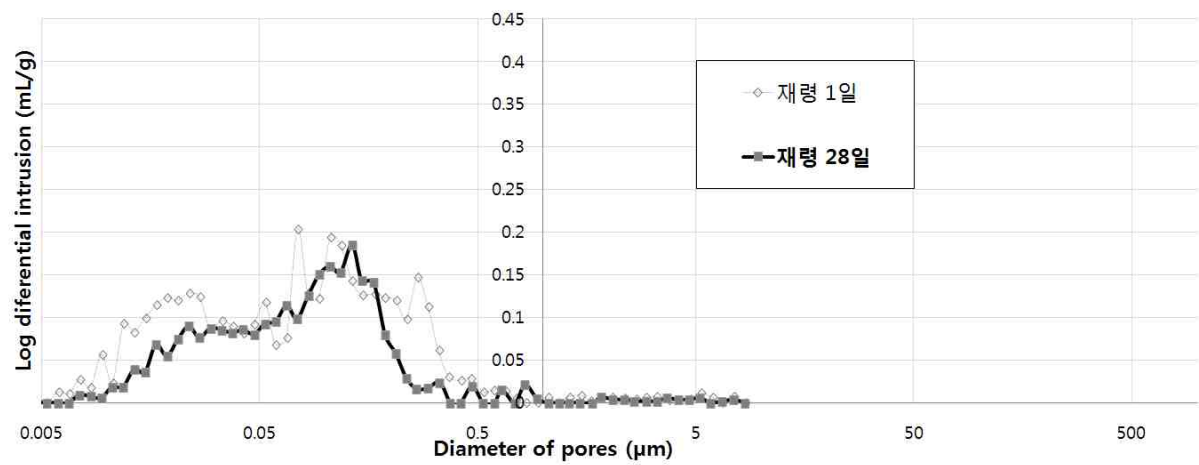


그림 3.3.178 Pore distribution 600°C (재령 28일)

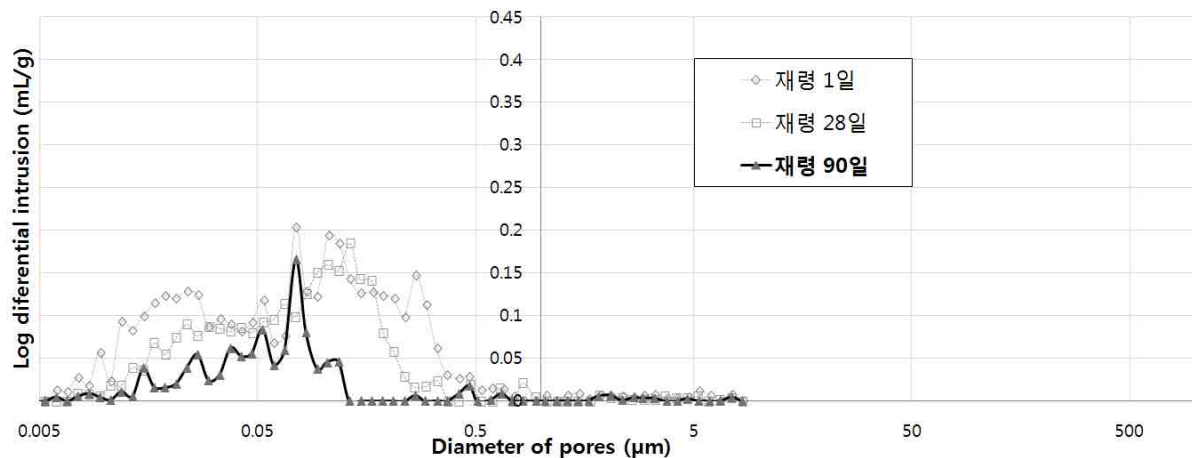


그림 3.3.179 Pore distribution 600°C (재령 90일)

그림 3.3.180 ~ 3.3.189는 일본 장비를 사용하여 MIP (Mercury intrusion porosimetry) 테스트를 통해 가열온도 700~1000°C에 노출된 샘플의 재령별 Pore distribution을 분석한 것이다.

전반적으로, 재령 1일에는 Control에 비해 pore diameter가 증가하였는데, 이는 700~1000°C 이상에서 시멘트 입자의 주된 성분인 탄산칼슘(CaCO_3)이 CaO 와 CO_2 로 분해되고 CaO 및 Na 가 SiO_2 와 반응하여 포타슘 유리 또는 칼슘 유리화 되어 SiO_2 와 반응하고 전체적인 유리화가 진행된다. 유리화된 비정질 고상체에 분해로 인해 발생한 O_2 기체가 고립되어 include gas가 다수 포집되어 입내 공극(Close pores) 및 grain 내에 포집되어 5 μm 이하의 pores량이 증가한 것으로 판단된다.

재령 28일에는 재령1일에 비해 0.05 μm 이상의 pores가 크게 증가하였는데, 이는 시멘트 분체의 수화 반응에 의한 미세공극 충전 후 팽창압에 의해 pores neck의 붕괴로 근접한 2~100개의 pores가 1개의 큰 pores로 변경되어 증가한 것으로 판단된다. 또한, 급속한 수화반응과 초기 형성된 표면 수화 층 및 유리화 층이 박락 붕괴되고 함몰되어 전체적인 porosity가 증가함을 볼 수 있다.

재령 90일에는 박락되어 노출된 내부 수화물질의 수화가 진행된다. 또한 추가적으로 고열에 의한 조직 붕괴가 일어나 외부의 인자가 내부로 유입되어 탄산화가 진행되어 CaO 는 CaCO_3 를 형성하여 체적 팽창을 하여 주변에 존재하는 미세공극(pores)를 충전시켜 전체적인 porosity의 감소를 야기하게 된다. 전반적으로 국내 결과와 유사한 것을 알 수 있다.

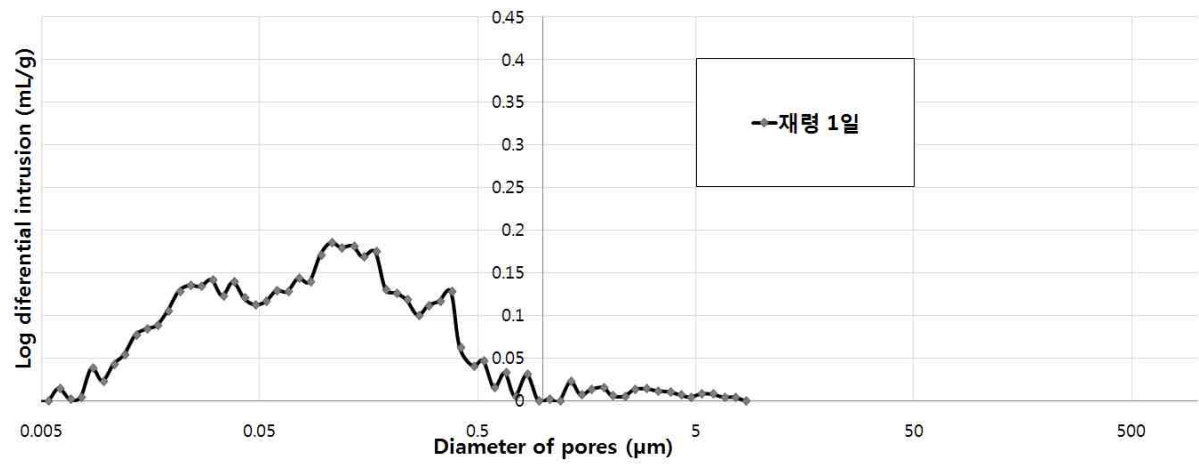


그림 3.3.180 Pore distribution 700°C (재령 1일)

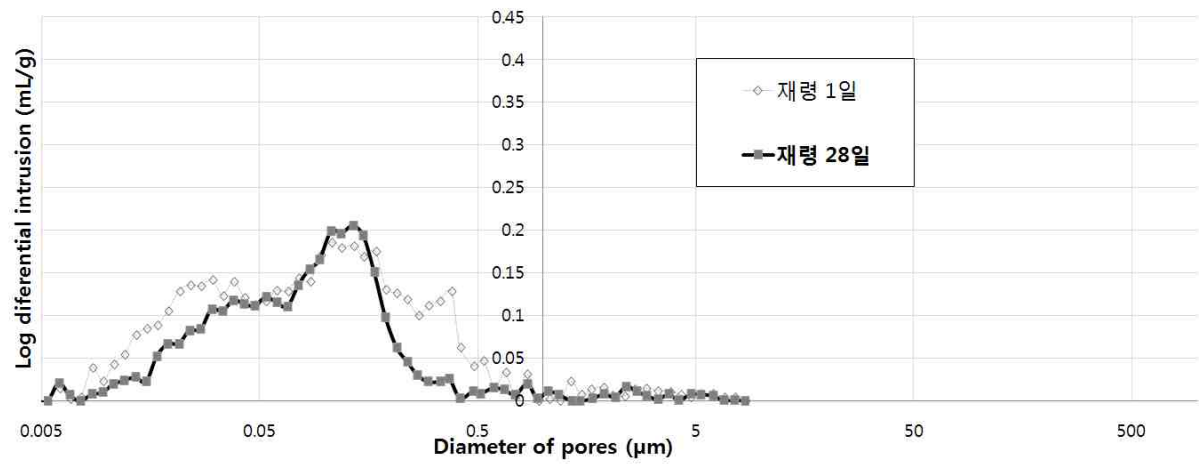


그림 3.3.181 Pore distribution 700°C (재령 28일)

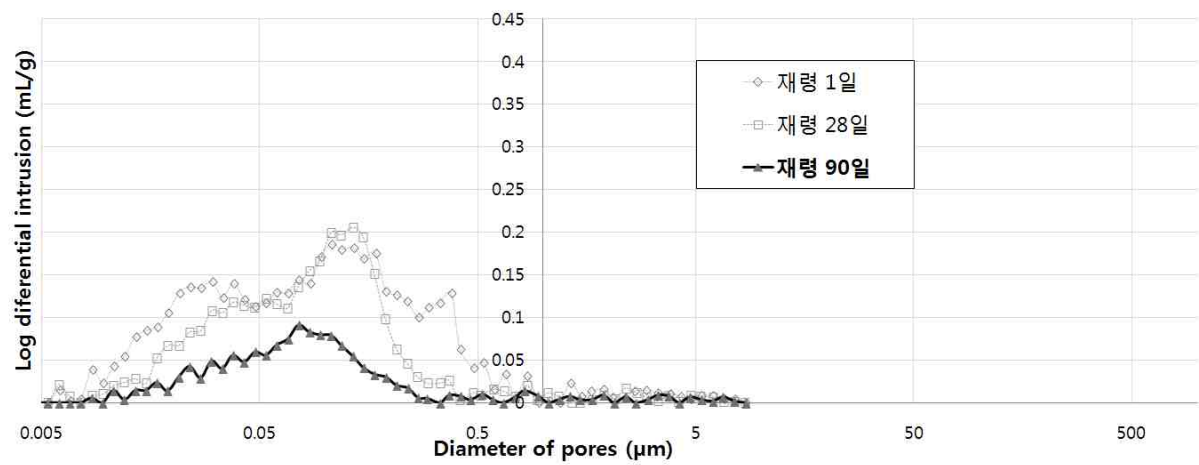


그림 3.3.182 Pore distribution 700°C (재령 90일)

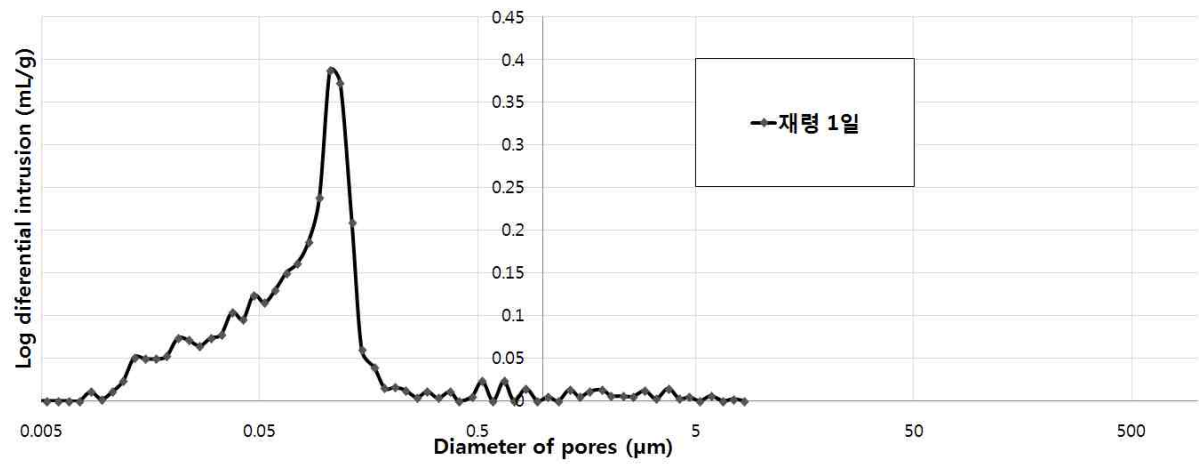


그림 3.3.183 Pore distribution 800°C (재령 1일)

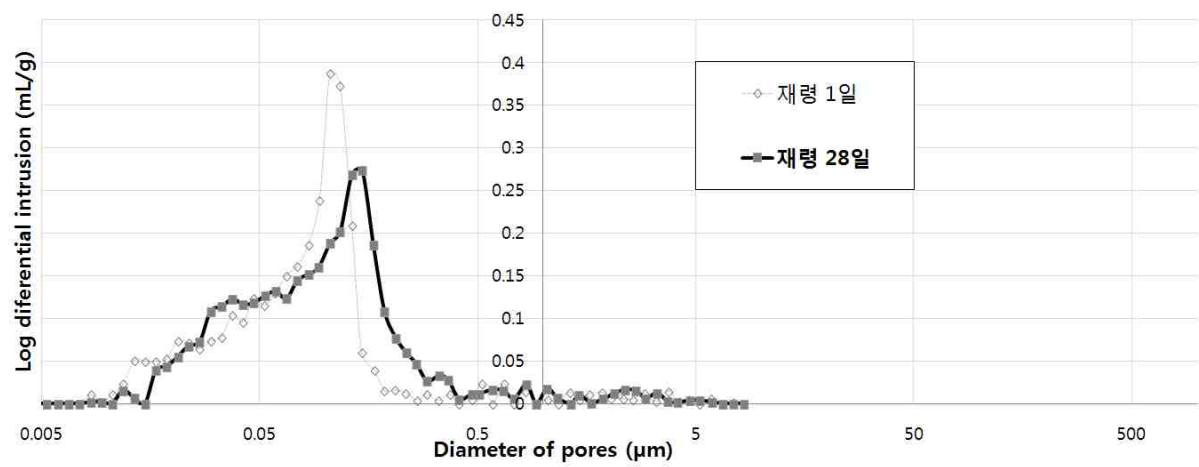


그림 3.3.184 Pore distribution 800°C (재령 28일)

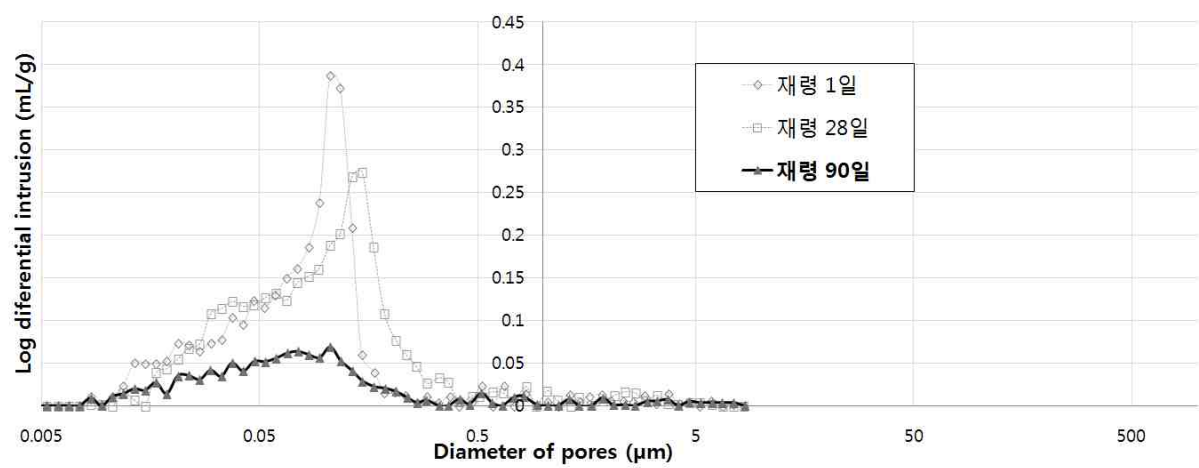


그림 3.3.185 Pore distribution 800°C (재령 90일)

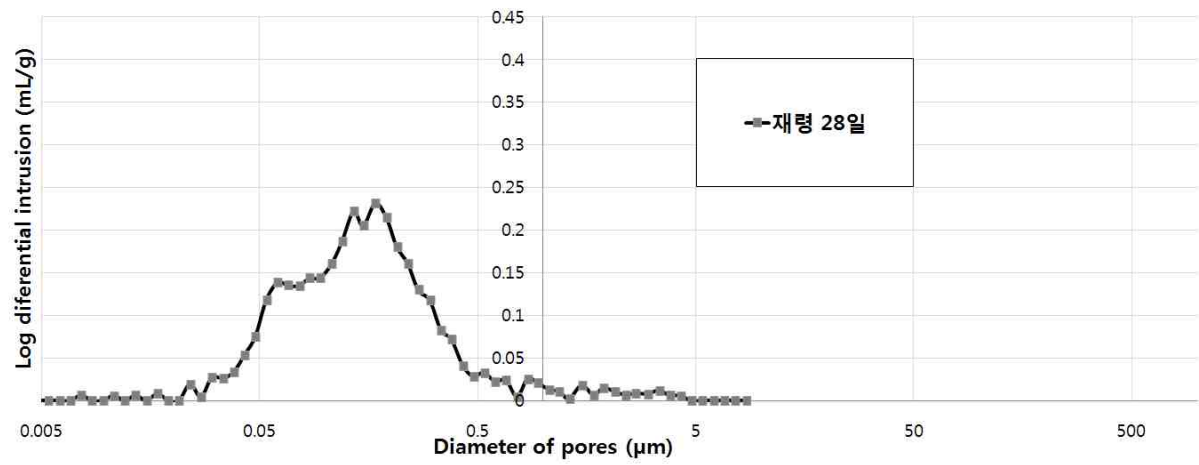


그림 3.3.186 Pore distribution 900°C (재령 28일)

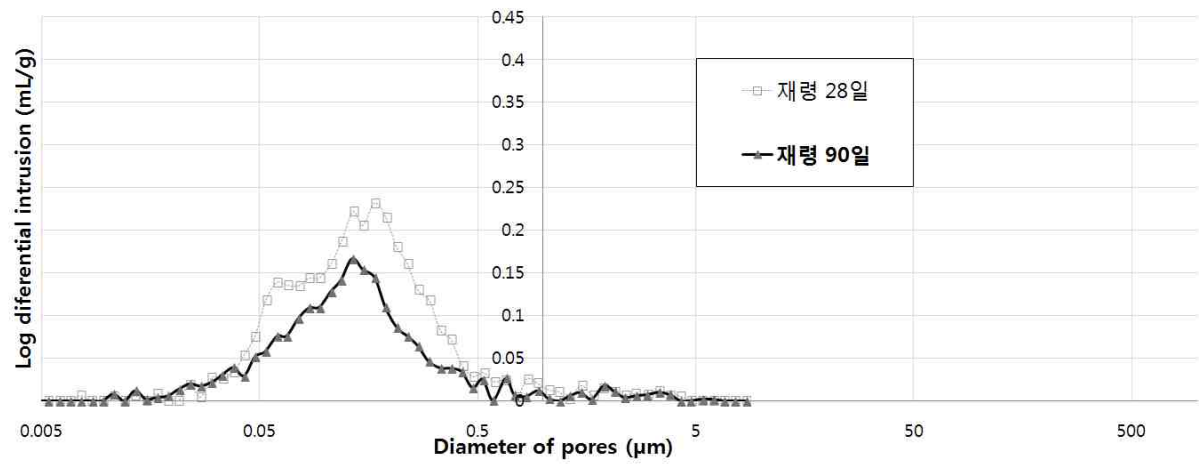


그림 3.3.187 Pore distribution 900°C (재령 90일)

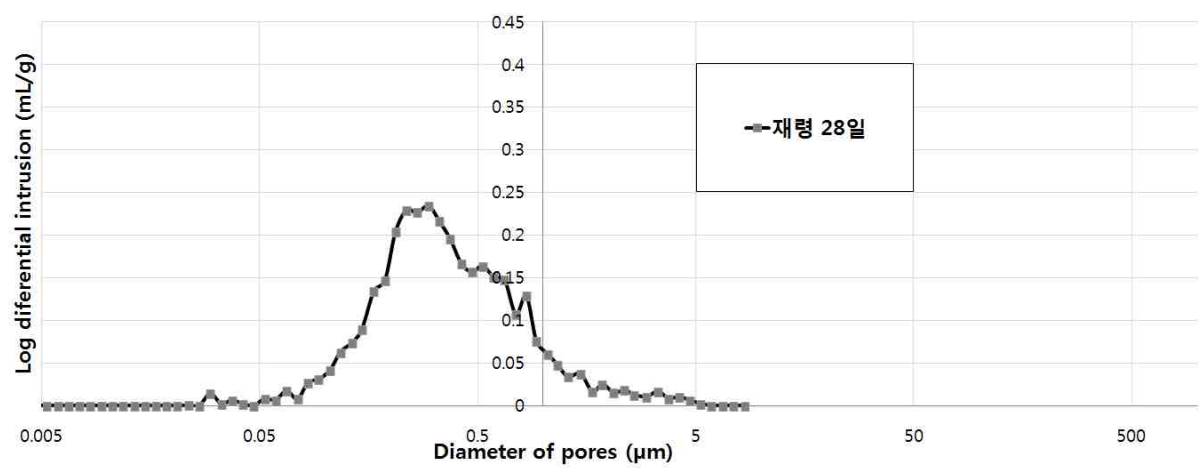


그림 3.3.188 Pore distribution 1000°C (재령 28일)

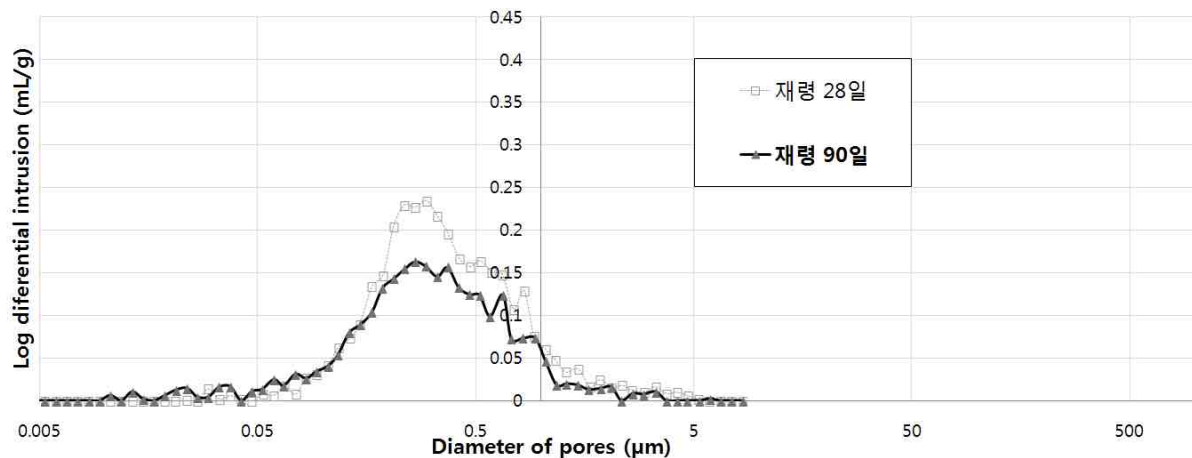


그림 3.3.189 Pore distribution 1000°C (재령 90일)

마. 종합분석

그림 3.3.190은 MIP (Mercury intrusion porosimetry) 테스트를 통해 종합적으로 수열온도에 따른 재령별 porosity를 분석한 것이다.

상기 결과에서 100~300°C에서 재령 1일에 Control에 비해 porosity가 감소하였으며, 이후 재령 3일까지 porosity가 감소하였다. 이는 시멘트 입자간 모세관 공극 및 겔 공극의 잉여수가 기화한 것과 시멘트 분체의 수화에 의한 미세공극의 충전으로 인해 공극이 감소한 것으로 보인다. 재령 7일~28일에는 Rehydration 반응으로 인해 미세공극 충전 후 팽창압에 의해 pore neck의 근접한 미세한 pores가 1개의 큰 pores로 변경 되어 공극이 증가한 것으로 판단된다. 재령 90일~180일에는 Rehydration 반응이 진행되고 있으나, 시멘트 분말의 수화 반응기는 대부분 종료되어 그 진행 속도는 대단히 느리다고 판단되고, open pores으로 유입되는 CO₂와 H₂O의 공급으로 CaO가 탄산화 진행으로 CaCO₃로 변형되어 극미세 공극을 비롯하여 open pores의 주변에 형성되어 전체적인 pores의 크기를 감소시킨 것으로 보인다.

400~600°C에서 재령 1일에는 Control에 비해 porosity가 증가하였는데, 이는 400°C 이상에서 수산화칼슘(Ca(OH)₂)이 CaO와 H₂O로 분해되어 CaO 및 Na가 SiO₂와 반응하여 포타슘 유리 또는 칼슘 유리화 되어 시멘트 미립자 표면을 유리화 시키고, 유리화된 비정질 고상체에 O₂ 및 화학결합수 증발 기체가 고립되어(Close pores) porosity가 증가한 것으로 판단된다. 재령 3일에는 재령 1일에 비해 porosity가 감소하였는데 이는 미수화 물에 의한 수화 진행에 따른 미세공극 충전으로 내부가 치밀화 된 것으로 판단한다. 재령 7일~28일에는 분해된 수산화칼슘(Ca(OH)₂)의 분해로 생성된 CaO와 미수화물의 Rehydration 반응으로 인해 미세공극 충전 후 팽창압에 의해 주변 neck의 붕괴로 근접한 2~100개의 pores가 1개의 큰 pores로

변경 된 것으로 판단된다. 재령 90일~180일에는 Rehydration은 진행되고 있으나 대단히 느리며, open pores로 유입되는 CO_2 및 H_2O 에 의해 쉽게 탄산화 진행으로 CaCO_3 로 변형되어 미세공극의 충전을 이끌어 낸다.

700~1000℃에서 재령 1일에는 Control에 비해 porosity가 크게 증가하였는데, 이는 700℃ 이상에서 시멘트 입자의 주된 성분인 탄산칼슘(CaCO_3)이 CaO 와 CO_2 로 분해되고 CaO 및 Na 가 SiO_2 와 반응하여 포타슘 유리 또는 칼슘 유리화 되어 SiO_2 와 반응하고 전체적인 유리화가 진행된다. 유리화된 비정질 고상체에 분해로 인해 발생한 O_2 기체가 고립되어 include gas가 다수 포집되어 입내 공극(Close pores) 및 grain 내에 포집되어 5 μm 이하의 pores량이 증가한 것으로 판단된다. 재령 3일에는 grain에 존재하던 pores 주변에 과 농축된 CaO 는 급속한 수화물을 형성하여 급격한 pores를 충전/치밀화 시킨다. grain neck을 통해 반응성 인자의 급속한 확산을 동반하여 open neck 및 open pores 주변에 대한 수화가 동시에 진행되어 극미세 pores의 감소에 매우 큰 영향을 준 것으로 판단된다. 재령 7일과 28일에는 급속한 수화반응과 초기 형성된 표면 수화층 및 유리화 층이 박락 붕괴되고 함몰되어 전체적인 porosity가 증가함을 볼 수 있다. 재령 90일~180일 에서는 박락되어 노출된 내부 수화물질의 수화가 진행된다. 또한, 추가적으로 CaO 는 CaCO_3 를 형성하여 체적 팽창을 야기하며, 이는 주변에 존재하는 미세공극(pores)를 충전시켜 전체적인 pores량의 감소를 야기한다. 그러나 이때 발생한 CaCO_3 는 결합력에 기여하는 바가 적어 pores량 감소에 기여하더라도 전체적인 내구성(결합력)은 감소한다.

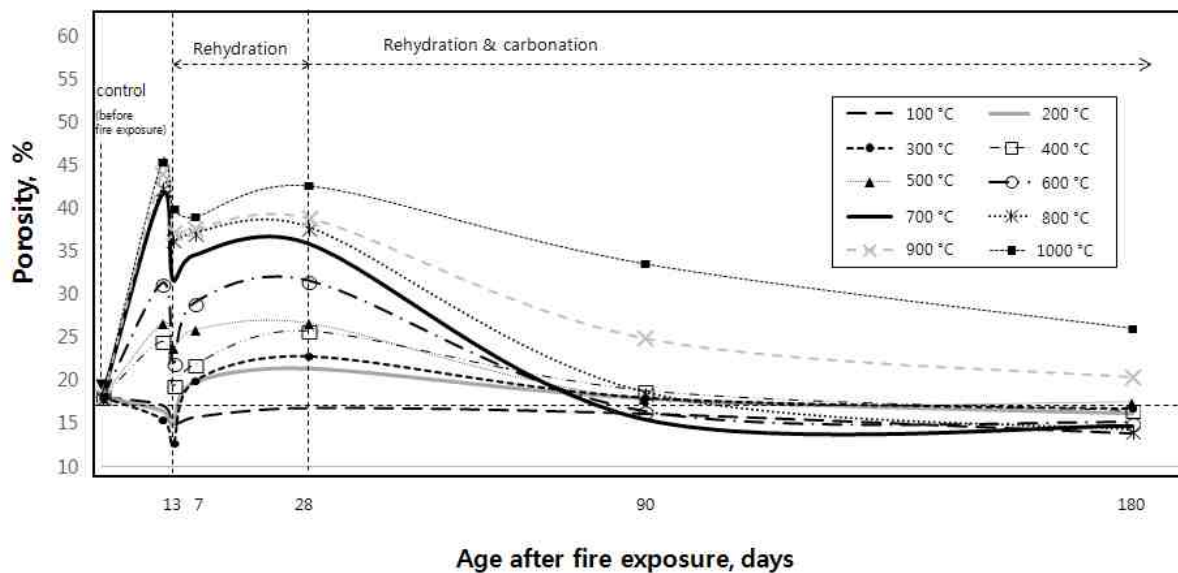


그림 3.3.190 age vs porosity

4. X-ray CT (Computational tomography) 장비를 이용하여 분석한 균열거동 특성

4-1 실험계획

표 3.4.1은 X-ray CT 분석을 통해 고온 피해를 입은 시멘트 경화체를 대상으로 내·외부 균열거동 특성을 분석하기 위해 준비한 실험계획이다. 총 8개의 시멘트 페이스트와 콘크리트를 제작하여 샘플에 미치는 온도, 승온속도, 대기 중에서의 2차 팽창거동, 골재의 유무 등 다양한 영향성을 조사하고자 하였다.

표 1. X-ray CT 분석 실험계획

Parameter	실험대상 샘플	화재 노출 후 측정재령	실험분석
온도	· 샘플 1 (100°C 노출, 콘크리트) · 샘플 2 (200°C 노출, 콘크리트) · 샘플 3 (300°C 노출, 콘크리트) · 샘플 4 (400°C 노출, 콘크리트)	1일	· CT 단층사진 · 3D 이미지 · Void fraction
승온속도	· 콘크리트 조건 - 샘플 4 (4.1°C/min) - 샘플 5 (10.0°C/min) · 시멘트 페이스트 조건 - 샘플 6 (2.8°C/min) - 샘플 7 (10.0°C/min)	1일	· CT 단층사진 · 3D 이미지 · Void fraction
재수화	· 샘플 5 · 샘플 8 · 샘플 6 · 샘플 7	1일 7일 28일	· CT 단층사진 · 3D 이미지 · Void fraction
골재유무	· 샘플 5 (콘크리트, 800°C 노출) · 샘플 7 (페이스트, 800°C 노출)	1일 7일 28일	· 동영상 캡처 이미지 · Apparent volume

※ note:

- 샘플 1 (concrete): 100도°C 노출, 일반가열조건 (4.1°C/min)
- 샘플 2 (concrete): 300도°C 노출, 일반가열조건 (4.1°C/min)
- 샘플 3 (concrete): 500도°C 노출, 일반가열조건 (4.1°C/min)
- 샘플 4 (concrete): 800도°C 노출, 일반가열조건 (4.1°C/min)
- 샘플 5 (concrete): 800도°C 노출, 급속가열조건 (10.0°C/min)
- 샘플 6 (paste): 800도°C 노출, 일반가열조건 (2.8°C/min)
- 샘플 7 (paste): 800도°C 노출, 급속가열조건 (10.0°C/min)
- 샘플 8 (concrete): 800도°C 노출, 최대급속가열조건 (15.0°C/min)

가. 샘플 준비

X-ray CT 분석용 샘플은 시멘트 페이스트 2개와 콘크리트 6개를 각각 구분해서 $\varnothing 50 \times 50$ mm 사이즈의 원주형 공시체를 제작하였는데, 먼저 시멘트 페이스트는 순수하게 물시멘트비 0.5의 비율로 AE제 등 혼화제를 첨가하지 않은 상태로 제작하였고, 콘크리트는 물시멘트 0.4로 아래 표 3.4.2의 조건으로 제작을 완료하였다. 골재는 화강암 부순골재를 사용하였는데, 골재의 밀도는 2610 kg/m^3 , 흡수율은 0.58%에 해당된다.

표 3.4.2 콘크리트 배합표 (AE제 첨가안함), 골재 밀도 = $2,610 \text{ kg/m}^3$

단위수량	시멘트	굵은골재	잔골재
180 kg/m^3	360 kg/m^3	895 kg/m^3	891 kg/m^3

시멘트 페이스트와 콘크리트의 물시멘트 결합비 차이는 가능한 유사한 매트릭스 환경을 만들어 주기위한 조치로써, 콘크리트의 경우 믹싱하는 과정 중 블리딩수에 의해 천이지대 영역(interfacial transition zones)의 물시멘트비가 높아지는데, 이러한 효과를 보상하여 시멘트 페이스트의 매트릭스 조건과 유사한 조건에서 상호 비교가 될 수 있도록 한 것이다. 화재 노출 시 콘크리트의 천이지대 영역은 골재의 팽창과 시멘트의 수축 현상이 동시에 일어나면서 독특한 균열거동이 일어날 수 있는 영역으로 알려진바 있다.

모르터 믹서 (시멘트페이스트 조건의 샘플)와 강제식 팬타입 믹서 (콘크리트 조건의 샘플)를 이용하여 성형을 마친 샘플은 1일 후 탈형을 실시하였고, 이 후에는 수중에서 28일 동안 양생을 진행하였으며, 고온 전처리 작업을 수행하기에 앞서 기중 상태에서 7일간 추가 건조시켰다.

나. 승온속도

준비 완료된 샘플은 본격적으로 X-ray CT 분석에 앞서 임의로 열을 가하여 화재손상을 입히는 작업을 수행하였는데, 이러한 전 처리 작업은 전기가열로를 이용하여 계획된 온도조건에서 실시하였다. 이때, 시멘트 경화체는 가열하는 과정 중 샘플의 표면과 중심부의 온도차이에 의해 온도구배 (thermal gradient) 현상이 발생할 수 있는데, 이러한 온도구배 현상은 표면과 중심부의 팽창 및 수축차이를 발생시켜 심각한 균열을 유발시킬 수 있다.

본 실험에서는 목표한 온도에서 샘플 전체가 대표성을 갖는 것이 중요하다. 즉, 순수한 온도피해에 의한 균열 거동을 모니터링하기 위해서는 thermal gradient의 외적 균열유발 영향요인을 제거해야 되는데, 유럽에서 제시한 RILEM TC 129-MHT “Test method for mechanical properties of concrete at high temperature”에서는 아래와 같이 승온속도식

을 제시하면서 샘플의 표면과 중심부의 온도가 20°C 이상 차이가 발생되지 않아야 한다고 규정하고 있다.

$$\Delta T = Rr^2/4D$$

where, ΔT = temperature difference between center and surface

R = heating rate (°C)

r = specimen radius (mm)

D = thermal diffusivity (mm²/min)

※ 시멘트 페이스트와 콘크리트의 D 값은 실험결과 각각 22.2, 32.0 mm²/min으로 하였음

본 실험에서 일반적인 샘플의 경우는 위의 RILEM에서 제시한 승온속도 규정에 따라 진행하는 것으로 하였고, 그 외에 승온속도의 영향성을 확인하기 위해서는 다음과 같이 3가지 방법으로 수행하는 것으로 계획하였다.

① RILEM 규정과 동일한 일반 조건 (목표온도 도달 후 유지시간: 2시간)

- cement paste: 2.8°C/min

- concrete: 4.1°C/min

② 급속가열 조건 (목표온도 도달 후 유지시간: 2시간)

- cement paste & concrete: 10.0°C/min

③ 최대급속가열 조건 (목표온도 도달 후 유지시간: 30분)

- concrete: 15°C/min

4-2 실험방법

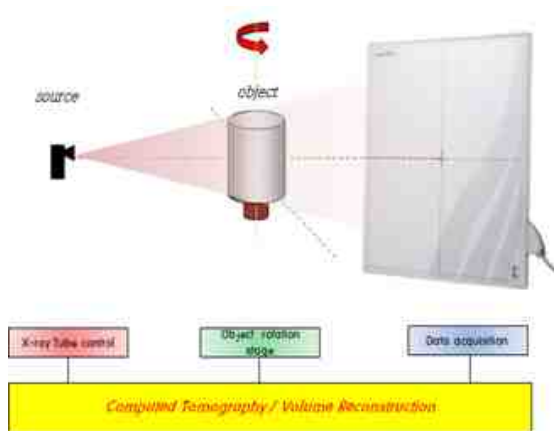
가. X-ray CT 개요

- 단층촬영 (CT; computed tomography): 물체의 내부 구조를 3차원으로 검사하는 비파괴 기술
- X-ray CT: 재료 고유의 X선에 대한 감쇄특성을 이용한 단층촬영 방법으로, 의학에서 많이 사용되어 왔으며 현재는 다른 산업분야에도 활발히 이용되고 있음
- X-ray CT 촬영장비 구성 (그림 3.4.1 참조):
 - X선을 발생시키는 발생장치 (tube)
 - 촬영대상물을 회전시키는 회전부 (rotation stage)

- 감쇄된 X선량을 측정하기 위한 영상센서 (detector)
- 취득된 영상으로부터 3차원 영상을 구성하는 재구성부 (reconstruction)

나. X-ray CT 장비

- 본 실험에 사용된 X-ray CT 장비는 한국건설기술연구원에서 보유하고 있는 산업용 멀티 튜브 X-ray CT에 해당됨
- 120 kV (초점크기 400 nm), 225 kV (6 μ m), 320 kV (0.4 mm)의 세 가지 X선 발생장치와 최상급의 영상 센서가 탑재되어 있음



a. X-ray CT 촬영 개념도



b. X-ray CT를 이용한 샘플 측정 모습

그림 3.4.1 X-ray CT 장비

다. X-ray CT 분석 방법

- 화재손상에 의한 균열거동 특성을 모니터링하기 위해 준비된 총 8개의 시험체는 강제적으로 열에 노출시켜 화재손상을 가하는 것으로 계획하였는데, X-ray CT 촬영은 이러한 전처리 과정이 진행되기 전에 1차적으로 먼저 실시한 다음 2차적으로 측정한 열처리 후의 샘플과 비교 분석하는 것으로 하였음 (단 일부 샘플 제외)
- 따라서 각각의 동일한 샘플은 1:1 상호비교가 가능해 질 수 있도록 setting 하였는데, 이때 ‘Structural similarity index analysis’ 방법을 이용하여 해당 위치의 이미지가 정확히 동일한 높이와 동일한 거리만큼 떨어져 있을 수 있도록 하는 조정 작업을 실시하였음 (예를 들어 그림 3.4.2에서 311번째에 찍힌 이미지를 300번 이미지로 이동시켜 matching 함으로써 해당위치의 높이를 동일화시킴)
- 또한, Cartesian coordinate에 의한 ‘Feature detection’ 방법을 통해 2개의 이미지 중 1

차적으로 측정된 이미지는 고정시키고, 2차적으로 측정된 다른 이미지를 회전 이동시켜 일치하는 지점을 찾아냄 (그림 3.4.3 참조)

- 해당 샘플의 공극과 균열의 크기는 adaptive and local segmentation 방법에 의한 Bradley 공법을 적용하여 정확히 측정하였음

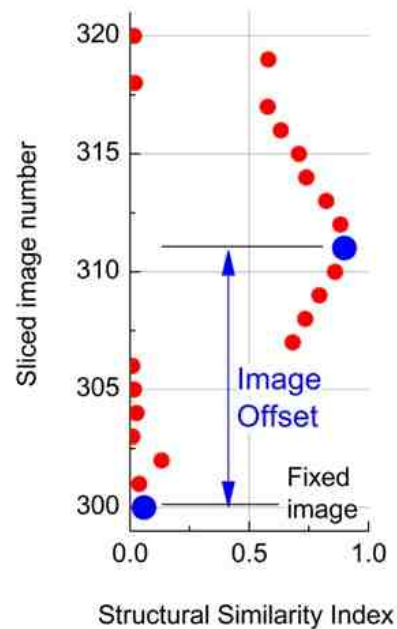


그림 3.4.2 Structural similarity index에 의한 높이와 거리 보정

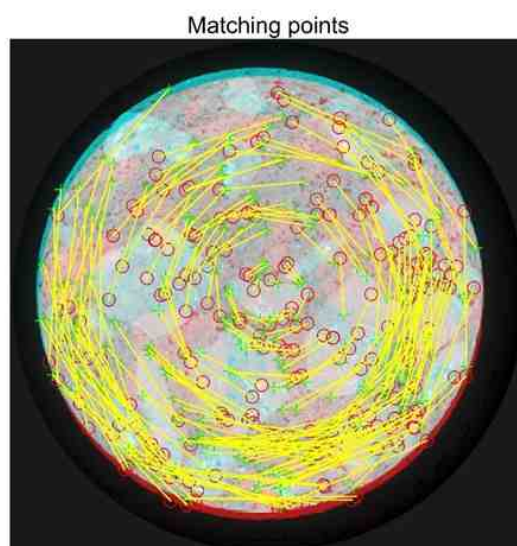


그림 3.4.3 Feature detection에 의한 위치를 보정

라. X-ray CT의 사이즈 측정 범위

- 시멘트 경화체에 존재하는 각종 수화물과 모세관 공극 등의 크기는 나노사이즈에 해당되기 때문에 X-ray CT 장비는 시멘트 경화체의 내부 마이크로 구조를 파악하는데 한계가 있음 (그림 3.4.4 참조)
- 다만, 본 실험에서 핵심으로 다루고 있는 화재손상 콘크리트에 발생한 균열은 거대 공극에 해당되므로 X-ray CT 분석이 가능하였음
- 앞서 분석된 MIP 결과를 참조함으로써 시멘트 경화체의 균열거동을 총체적으로 이해할 수 있었음

Type of Pore	Size of Pore	Measure Method
Pore by water	1nm ~ 100µm	Adsorption of N ₂ gas
- Gel pore	1nm ~ 10nm	MIP test
- Capillary Pore	10nm ~ 100µm	
Entrained air by AE	100µm ~ 1mm	Microscopy
- Small size entrapped air	100µm ~ 100µm	
- Big size entrapped Air	1mm ~ 10mm	X-ray CT

그림 3.4.4 X-ray CT 장비의 측정 범위

출처: Tae-ho Ahn, Michael Henry, Relationship between degradation and self-healing behavior in high strength mortar exposed to high temperature, Journal of Ceramic Processing Research 17 (2015) pp.156~161

4-3 X-ray CT 촬영 실험결과 및 분석

가. 노출 온도의 영향성

화재피해온도의 영향성은 100°C, 300°C, 500°C 및 800°C 에 노출된 콘크리트 샘플을 대상으로 열에 노출되지 않은 상온 샘플과 함께 비교·분석하였다. 승온속도는 일반적인 조건으로 앞서 기술한 바와 같이 4.1°C/min로 가열하였고, 해당 샘플이 목표한 온도에 도달할 경우 2시간 동안 온도를 유지시키는 것으로 하였다. X-ray CT 촬영은 화재에 노출된 후 재령 1 일차에 실시하였다. 여기서 다룰 화재피해온도의 영향성 분석 실험에서는 CT 촬영 분석과 Void fraction을 조사하였는데, 그 실험결과를 살펴보면 다음과 같다.

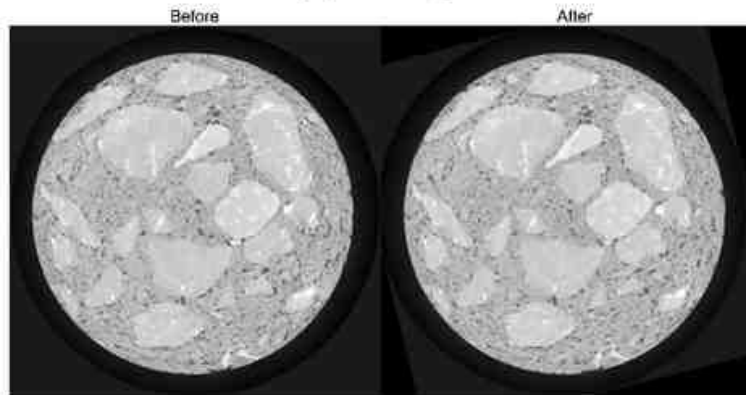
① CT Image 결과

그림 3.4.5는 X-ray CT 촬영을 통해 화재피해 전과 후의 이미지를 비교하여 나타낸 것이다. 먼저, 100°C ~ 500°C 노출 샘플의 경우 육안으로는 어떠한 균열도 관찰할 수 없었고, 800°C에 노출된 샘플의 경우 일부 구간에서 균열이 발생하는 것으로 관찰되었다.

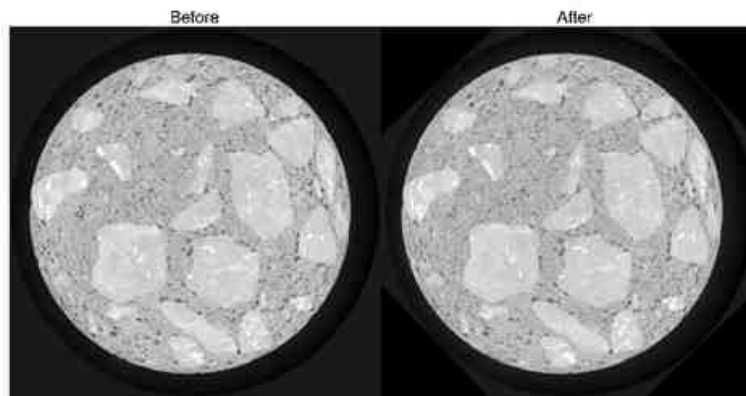
해당 이미지는 화재노출 후 재령 1일차에 측정한 것으로 예상과 달리 균열이 거의 관찰되지 않은 것으로 나타났다. 이는 실제 건설구조물과 비교하여 샘플의 크기가 작아 열응력이 적게 걸리고, 실제 화재와 달리 승온속도를 낮게 세팅 (해당온도의 대표성을 갖도록 하기 위해 강제적으로 세팅함)하여 천천히 가열함으로써 샘플의 표면과 중심부의 온도차가 작아 온도구배 (thermal gradient) 현상이 발생하지 않은데 기인한 것으로 판단된다. 그러나 이는 X-ray CT의 촬영 가능 범위가 1 mm 이상으로 비교적 큰 사이즈의 공극만 관찰이 가능함에 따른 것으로 시멘트 내부 마이크로 공극구조의 붕괴 및 수화물의 해리 현상 등은 300°C 이상부터는 발생했을 것으로 추정된다.

그림 3.4.6은 800°C에 노출된 샘플에서 발생한 균열을 X-ray CT 촬영하여 나타낸 것이다. 그림 3.4.5에서 확인한 500°C 까지 노출된 샘플과 달리 800°C에 노출된 샘플에서는 시멘트 매트릭스와 골재의 계면간 천이지대 영역 (Interfacial transition zones)에서 일부 균열이 관찰되었고, 화강암 골재 자체에서도 고열에 의한 균열이 발생한 것으로 나타났다. 특히, 천이지대 영역에서 발생한 균열은 앞서 콘크리트 원재료의 열적거동에서 논의된 바와 같이 콘크리트 샘플이 800°C의 고온에 노출되면서 시멘트는 수축거동을 일으키는 반면 골재는 팽창거동 하면서 계면간에 응력이 크게 걸려 균열이 유발됐을 것으로 판단된다. 또한, 일부구간에서는 이러한 천이지대 영역에서 발생된 균열이 시멘트 매트릭스 쪽으로 확대된 경우도 관찰되었다.

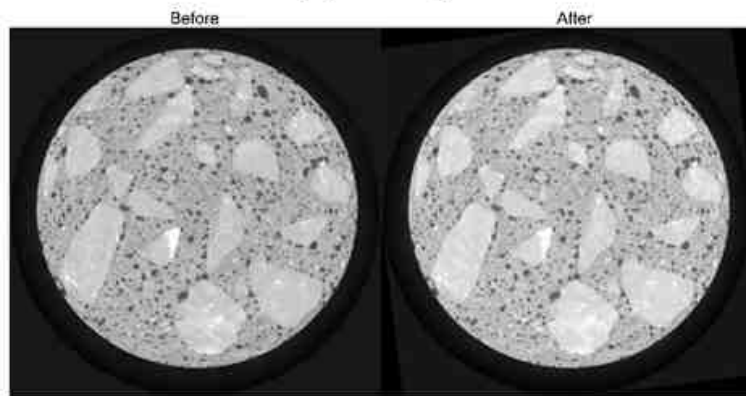
(a) 100 deg.



(b) 300 deg.



(c) 500 deg.



(d) 800 deg.

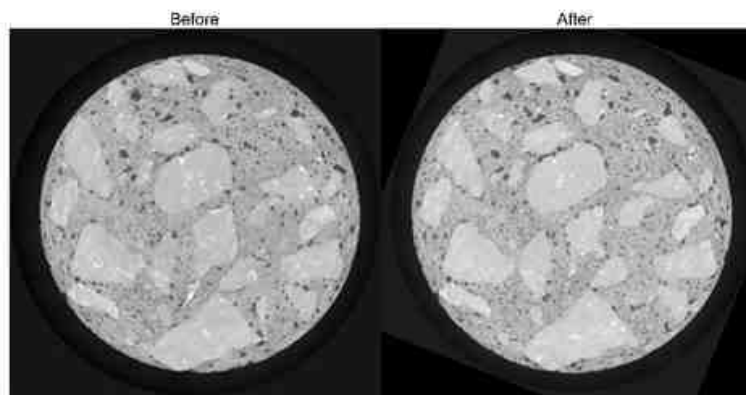


그림 3.4.5 화재피해 전·후 피해온도조건에 따른 단층 촬영 이미지

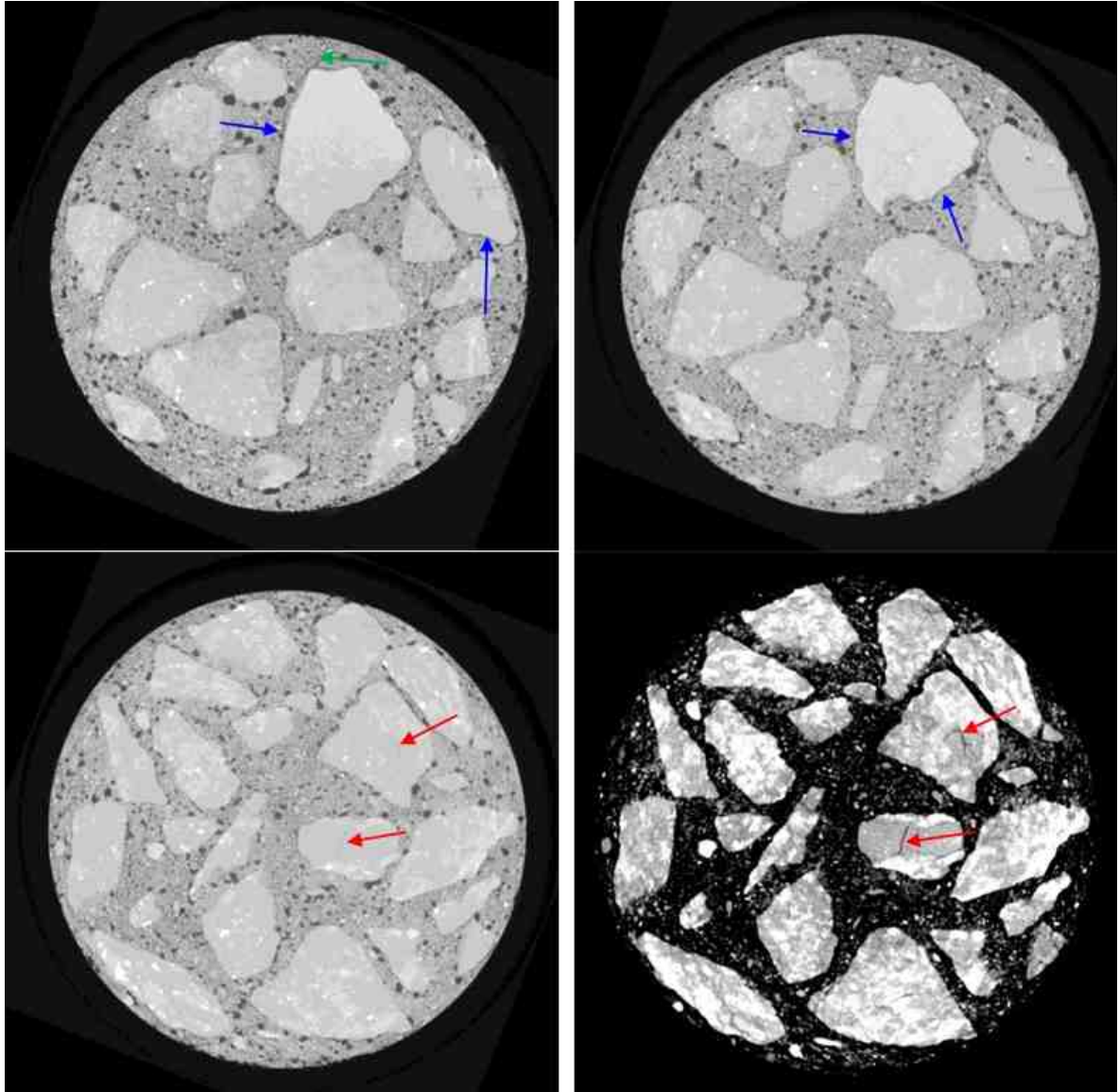


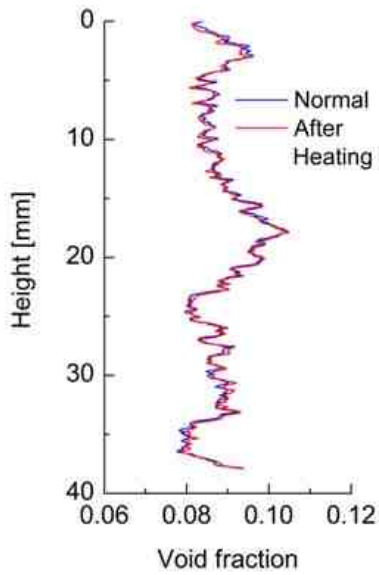
그림 3.4.6 800°C 노출 샘플의 균열발생 구간 촬영 이미지

② Void fraction 분석 결과

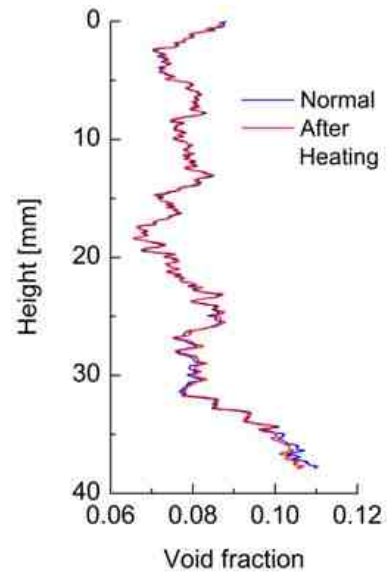
그림 3.4.7은 샘플의 높이별 공극분포를 화재피해온도별 상온 데이터와 비교하여 나타낸 것이다. 샘플의 종류는 앞서 그림 3.4.5와 3.4.6에서 분석한 것과 동일하다.

앞서 논의된 바와 같이 500°C 노출 샘플까지는 고온에 노출되지 않은 상온 조건의 데이터와 유사하게 나타났고, 800°C 노출 샘플의 경우는 균열발생의 영향으로 전체적으로 공극비율이 조금씩 증가한 것으로 나타났다. 온도변화에 따른 공극비율은 0.07 ~ 0.11 범위로 모든 샘플에서 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

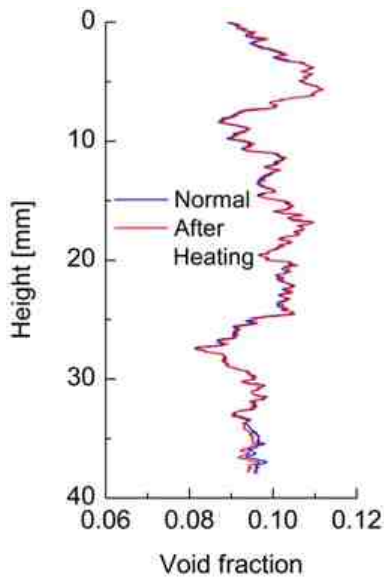
※ 단, X-ray CT 촬영을 통해 분석한 Void fraction은 일반적으로 시멘트 매트릭스에서 관찰되는 모세관 공극, 젤공극 등은 포함되지 않은 값으로 포함될 경우 통상 0.3~0.4 범위를 나타냄



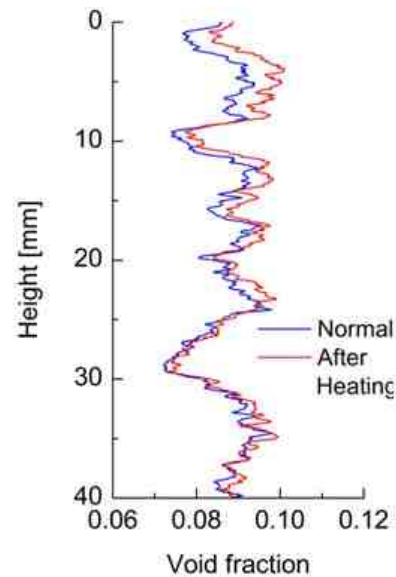
a. 100°C 노출 샘플



b. 300°C 노출 샘플



c. 500°C 노출 샘플



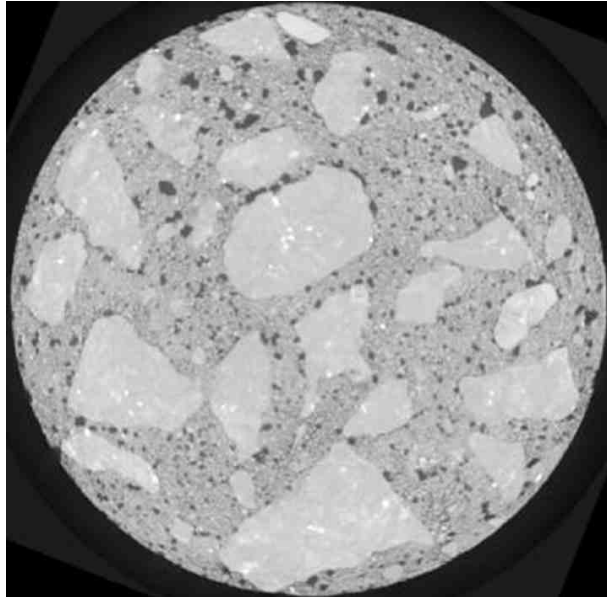
d. 800°C 노출 샘플

그림 3.4.7 화재피해온도에 따른 샘플의 구간별 Void fraction 분석 결과

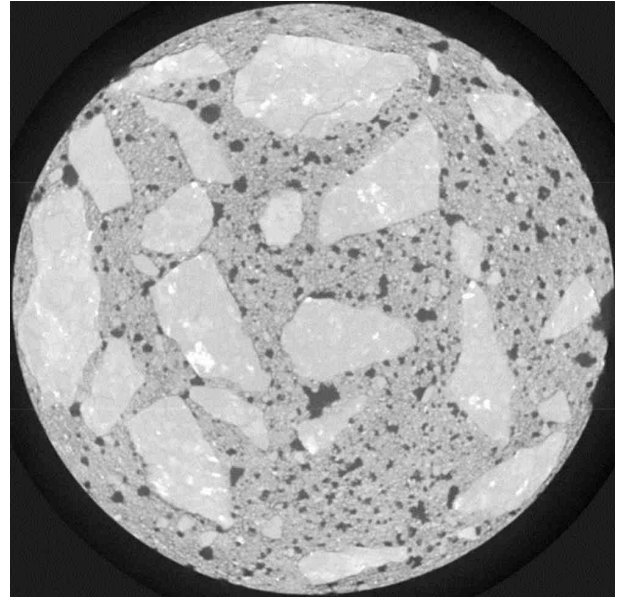
나. 승온속도의 영향성

승온속도의 영향성은 800°C 노출 샘플을 대상으로 콘크리트 조건과 시멘트 페이스트 조건으로 구분하여 비교·분석하였다. 승온속도는 일반적인 조건의 경우 4.1°C/min로 하였고, 급속가열 조건은 10.0°C/min로 진행하였다. 해당 샘플이 목표한 온도에 도달할 경우 역시 2시간 동안 온도를 유지시키는 것으로 하였다. X-ray CT 촬영은 화재에 노출 후 재령 1일이 경과하기 전 당일에 실시하는 것으로 하였다. 그 실험결과를 살펴보면 다음과 같다.

그림 3.4.8과 그림 3.4.9는 콘크리트와 시멘트 페이스트 조건에서 승온속도 차에 따른 영향성 분석을 위해 X-ray CT 촬영 후 대표적인 단층 이미지를 나타낸 것이다. 전반적으로 승온속도가 빠른 급속가열조건에 노출된 샘플에서 균열이 더 많이 발생하는 것으로 나타났다. 골재의 유무와 관련해서 그림 3.4.8의 콘크리트 조건보다 그림 3.4.9의 시멘트 페이스트 조건에서 더욱 많은 균열이 관찰되었다. 이러한 승온속도의 영향성은 재령이 경과하면서 더욱 큰 차이를 나타내는 것으로 관찰되었는데 이는 다음 섹션에서 논의하도록 하겠다.

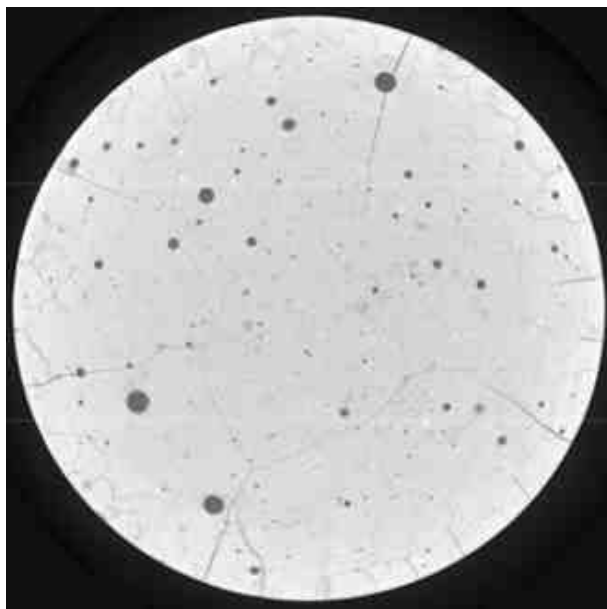


a. 일반가열조건

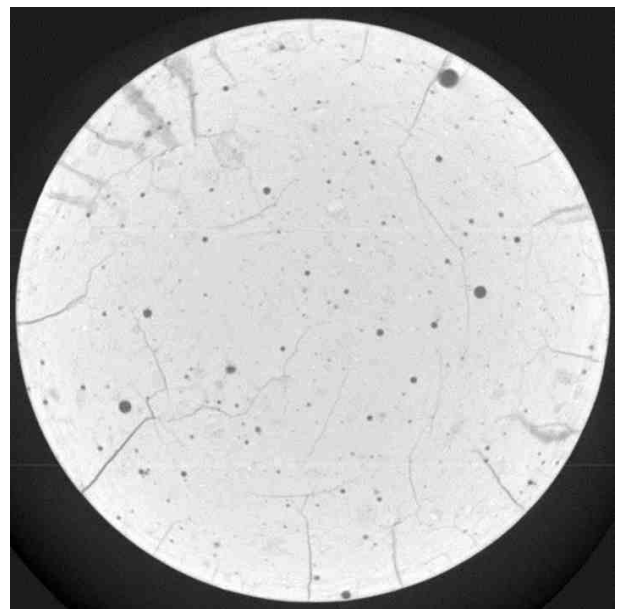


b. 급속가열조건

그림 3.4.8 승온속도 차에 따른 콘크리트 샘플의 단층 이미지 촬영 결과 (800°C 노출 샘플)



a. 일반가열조건



b. 급속가열조건

그림 3.4.9 승온속도 차에 따른 시멘트페이스트 샘플의 단층 이미지 촬영 결과 (800°C 노출 샘플)

다. 시간경과에 따른 대기 중 상온에서의 2차 팽창 거동의 영향성

시간경과에 따른 2차 팽창거동의 영향성은 콘크리트 샘플의 경우 급속가열 조건의 800°C 노출 샘플과 최대급속가열 조건의 1000°C 노출 샘플을 대상으로 비교·분석하였고, 시멘트 페이스트 조건의 경우에는 일반적인 조건과 급속가열 조건의 800°C 노출 샘플을 대상으로 비교·분석하였다. 승온속도는 일반적인 조건의 경우 4.1°C/min로 하였고, 급속가열 조건은 10.0°C/min, 최대급속가열조건은 15°C/min로 진행하였다.

X-ray CT 촬영은 화재에 노출 후 당일 촬영을 시작으로 3일 경과시점, 7일 경과시점 및 28일 경과시점에 각각 동일한 샘플을 이용하여 실시하였다. 재령이 경과함에 따라 특정한 위치에서의 균열거동을 모니터링하기 위해 샘플의 매칭은 앞서 기술한 바와 같이 Structural similarity index를 통해 상하 높이를 조절하고, Feature detection 방법으로 회전시켜 고정된 포인트를 일치시킴으로써 샘플의 동일화 작업을 거치도록 하였다. 시간경과에 따른 상온에서의 2차 팽창거동 분석은 CT image 분석, void fraction 분석 및 surface area 분석 등을 실시하였는데 각각의 실험결과를 살펴보면 다음과 같다.

① CT Image 결과

그림 3.4.10은 800°C의 급속가열 조건에서 열처리된 콘크리트 샘플을 대상으로 X-ray CT 장비를 이용하여 600장 가량의 단층 촬영을 실시한 후 대표적으로 5.83 mm 간격에서 촬영된 이미지만을 모아 정리한 것이다. Day 0 (고온 노출 당일 촬영)의 경우 거의 균열이 관찰되지 않았으나 Day 3을 경과하면서 천이지대 영역 (Interfacial transition zones)을 중심으로 굵은 균열이 관찰되기 시작했고, Day 7, Day 28로 이어지면서 이러한 균열은 이웃한 천이지대 영역으로 확산되거나 시멘트 매트릭스 쪽으로 이어지는 모습을 관찰할 수 있었다.

그림 3.4.11에서는 그림 3.4.10과 동일한 샘플을 3D 이미지 처리하여 나타낸 것인데, 균열이 발생되지 않은 부분은 회색처리하고, 균열이 발생된 부분은 빨간색으로 처리하여 육안관찰이 가능하도록 정리하였다. 재령이 경과하면서 균열의 양이 점점 많아지는 것을 확인할 수 있었다.

그림 3.4.12의 경우는 그림 3.4.11의 조건보다 가열속도를 빠르게 하였고, 목표온도를 200°C 상향된 1000°C까지 가열한 후 촬영된 이미지를 나타낸 것이다. Day 0의 경우에는 균열이 거의 관찰되지 않아 그림 3.4.11과 유사하게 나타났으나 재령이 3일째 촬영한 이미지에서는 천이지대 영역에서 비교적 굵은 균열들이 관찰되었고, 심지어 일부 구간에서는 미세한 조각들이 떨어져 나오는 모습을 관찰할 수 있었다.

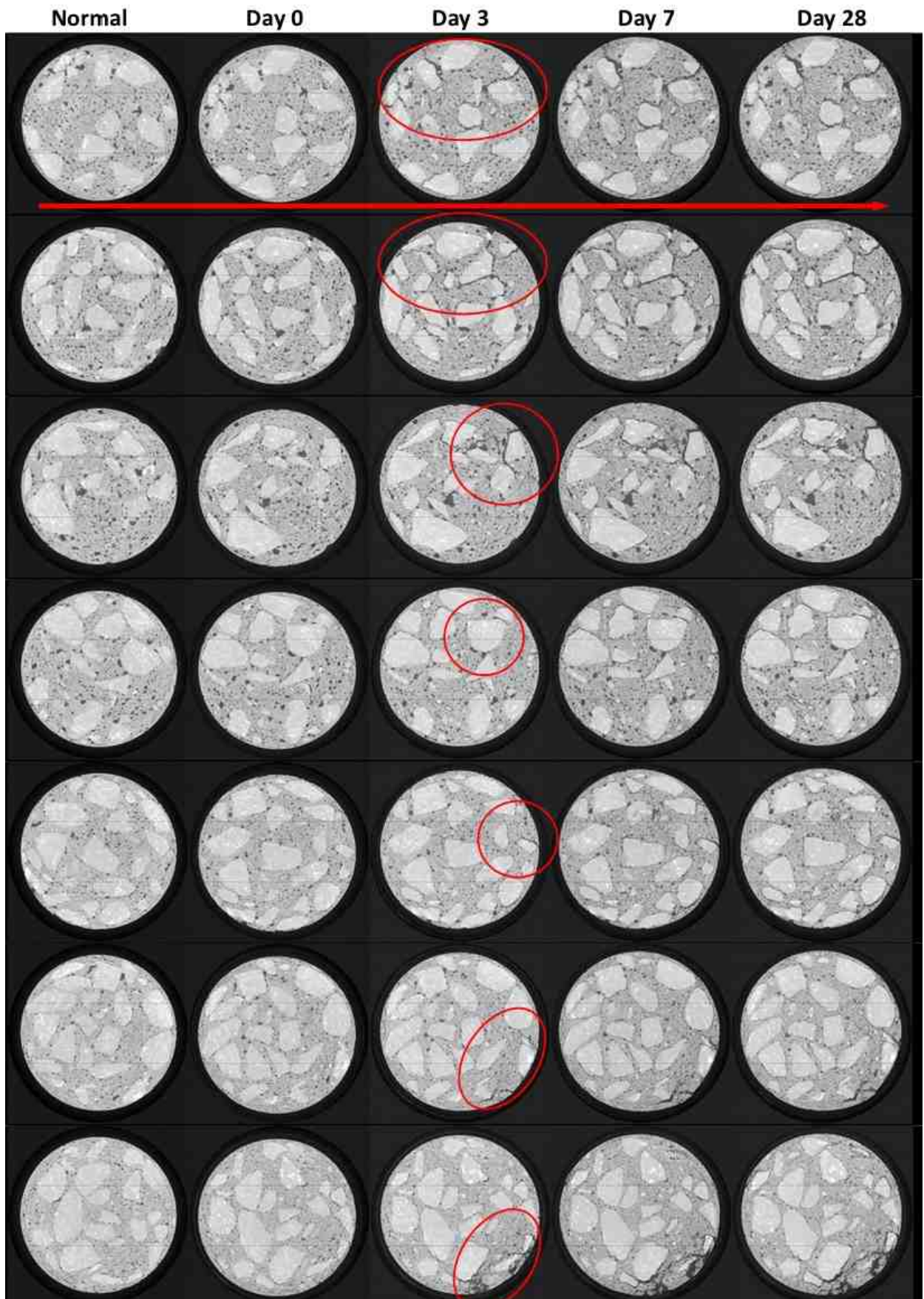


그림 3.4.10 급속가열조건으로 800°C에 노출된 콘크리트 샘플의 2차 팽창 균열 거동

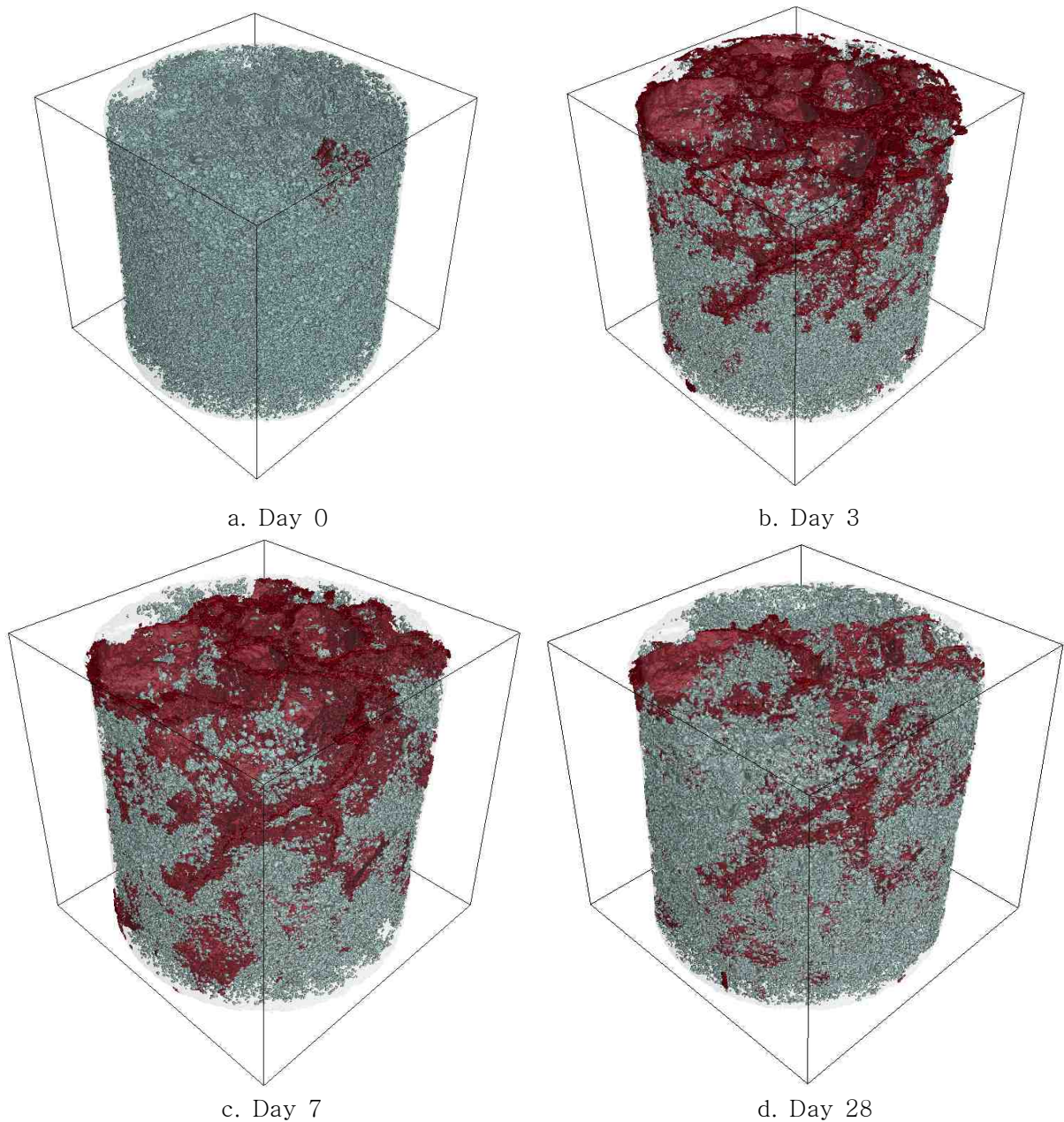


그림 3.4.11 급속가열조건으로 800°C에 노출된 콘크리트 샘플의 재령별 3D image

또한, 재령 7일차 되는 시점 (그림 12 계속)에서는 재령 3일차에서 발생된 균열이 이웃으로 퍼지면서 연결되는 현상이 관찰되었으며, 일부 구간의 경우에는 샘플 전체를 관통하는 균열도 확인할 수 있었다. 재령 28일차에는 이러한 관통 균열이 많은 구간에 걸쳐 관찰되었는데, 앞서 분석한 MIP (mercury intrusion porosimetry) 분석결과에서 확인했듯이 이러한 팽창거동은 28일차에서 최고치를 기록하는 것으로 나타나 X-ray CT 촬영 이미지에서 나타난 결과를 뒷받침하고 있다. 이러한 2차 팽창거동에 따른 균열 발생 결과는 시멘트페이스트 조건의 샘플에서 더욱 심각하게 나타났는데, 이에 대한 논의는 뒤에서 다시 하도록 하겠다.

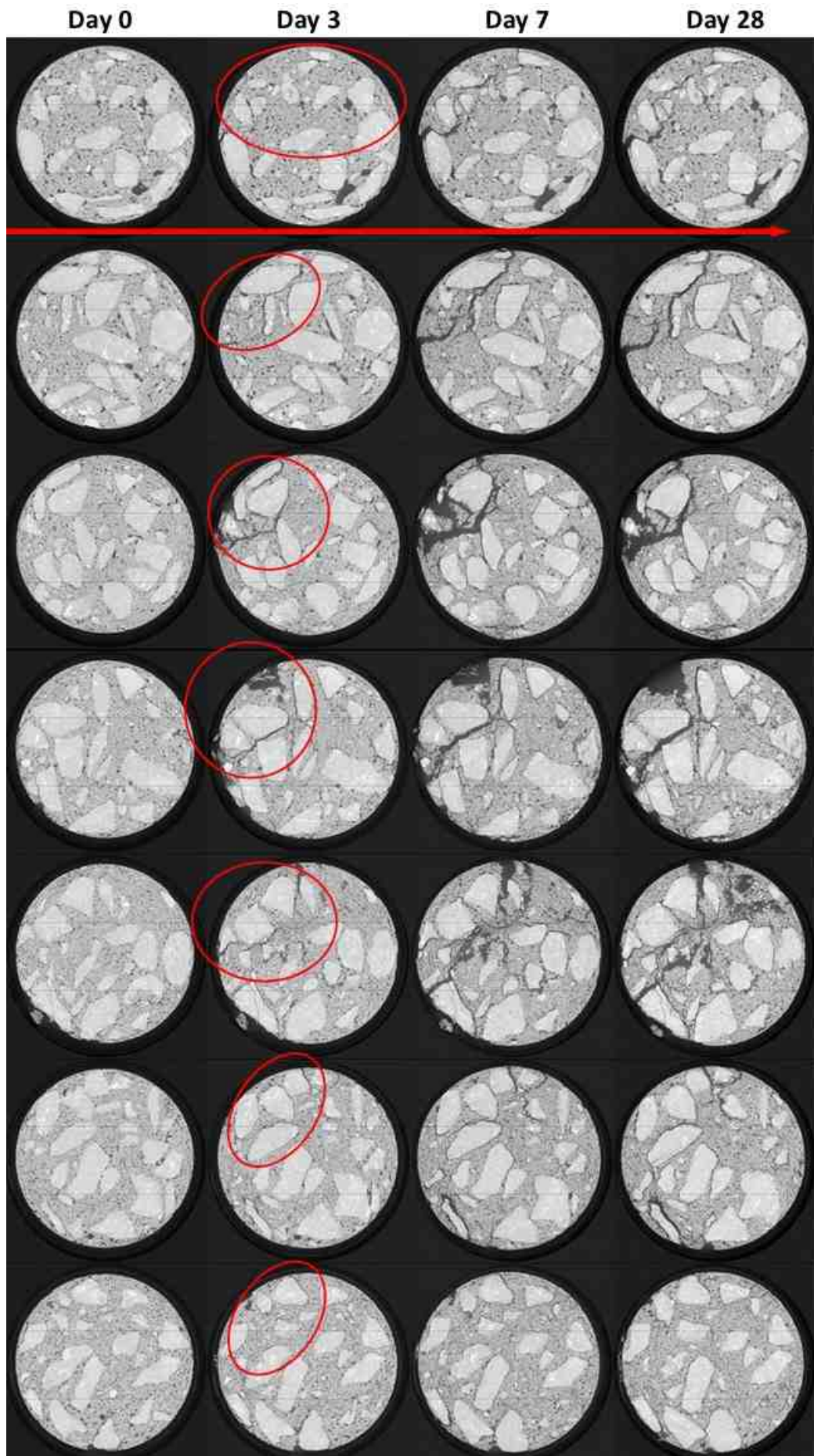


그림 3.4.12. 최대급속가열조건으로 1000°C에 노출된 콘크리트 샘플의 2차 팽창 균열 거동

그림 3.4.13은 그림 3.4.12와 동일한 샘플을 3D 이미지화 하여 균열의 거동 특성을 전체 이미지 안에서 관찰하기 위해 나타낸 것이다. 역시 균열이 발생되지 않은 부분은 회색 처리 하였고, 균열이 발생된 부분은 빨간색으로 처리하였다.

Day 0에서 아주 부분적으로 관찰되던 균열이 Day 3에는 샘플 중심부 구간에서 굵은 균열이 넓게 분포하기 시작하는 것을 확인할 수 있다. 이는 Day 7 그리고 Day 28일을 지나면서 점차 확대되어 부피감이 느껴질 정도의 아주 굵은 균열이 관통하듯이 샘플 중앙부위를 지나는 것을 확인할 수 있었다. 이렇듯 화재에 노출된 콘크리트의 균열 거동은 최초 균열이 발생된 취약 부위를 중심으로 그 주변부를 따라 랜덤하지만 일정한 방향으로 퍼져나가는 것을 확인할 수 있었다.

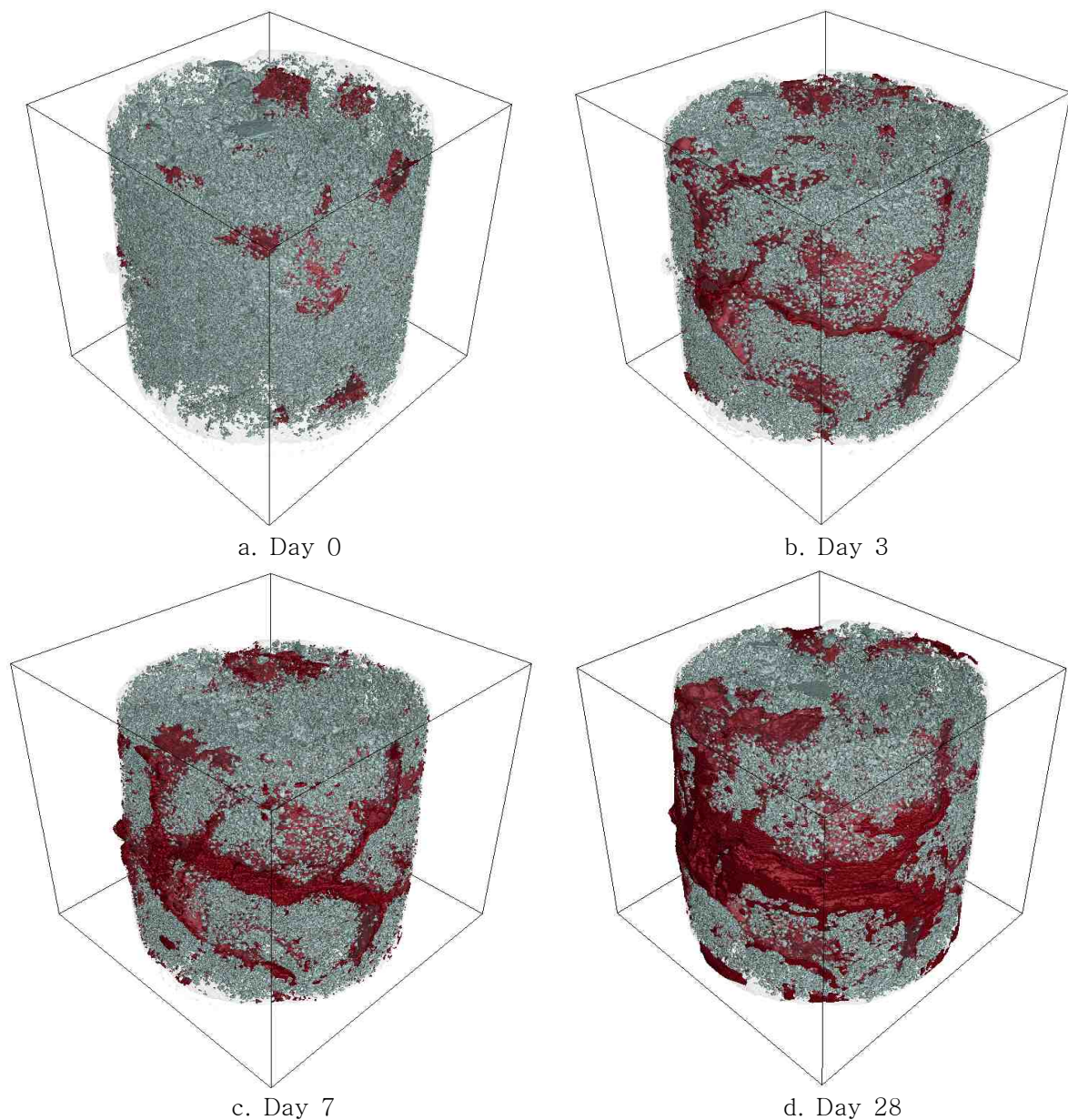


그림 3.4.13 최대급속가열조건으로 1000°C에 노출된 콘크리트 샘플의 재령별 3D image

그림 3.4.14~3.4.17은 앞서 분석한 콘크리트 대신 시멘트페이스트를 대상으로 800°C를 목표 온도로 정하고 일반가열조건 (그림 3.4.14, 3.4.15)과 급속가열조건 (그림 3.4.16, 3.4.17)에서 열처리한 샘플을 재령별로 촬영한 후 대표이미지를 정리하여 나타낸 것이다. 재령별 촬영시점은 앞서 콘크리트 분석과 동일하게 진행하였다.

먼저, 그림 3.4.14에서 확인할 수 있듯이 Day 0에서는 콘크리트에서는 발견되지 않았던 아주 미세한 균열이 샘플 표면 전체에 넓게 분포되어 있는 것으로 나타났는데, 이는 다량이 물이 빠져나가면서 급격한 수축이 일어난데 기인한 것으로 이에 대한 자세한 분석은 후술할 ‘골재 유무의 영향성 분석’에서 다시 논의하도록 하겠다.

Day 3이 경과하는 시점부터는 샘플의 중심부위에서부터 벌집모양의 굵은 균열이 넓게 발달되는 것을 확인할 수 있었는데, 이러한 벌집모양의 굵은 균열패턴은 콘크리트 조건에서는 관찰되지 않았던 시멘트 페이스트 조건에서 나타나는 독특한 균열 거동 특성에 해당된다. 또한, Day 7과 Day 28이 경과하는 시점에서는 최초 취약부위였던 중심부에서 발달된 벌집모양의 균열이 샘플의 표면으로 확대되면서 균열이 관통하는 모습을 확인할 수 있었다. 화재 노출 후 이미 7일이 경과하면서부터 시멘트 경화체 내부에는 엄청난 팽창압이 걸렸고, 재령 28일에는 육안으로 확연하게 구분될 정도의 아주 굵은 균열이 가름에 눈바닥 갈라지듯이 나타났다. 그림 3.4.15는 이를 3D 이미지 처리하여 나타낸 것으로 균열 발생이 초기재령에서부터 넓게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 3.4.16은 급속가열조건으로 그림 3.4.15와 동일한 샘플과 동일한 온도조건에 노출시킨 후 촬영한 결과를 나타낸 것이다. 그림 12에서 분석한 샘플과 매우 유사한 균열 거동 특성을 나타냈는데, 특이한 점은 Day 7을 경과하면서 급격한 붕괴가 일어나면서 시멘트페이스트 샘플 중심 표면부에서 약 1/2의 많은 양의 조각이 떨어져 나가는 것을 확인할 수 있다.

앞서 승온속도의 영향성 분석에서는 800°C에 노출된 동일한 시멘트 페이스트 샘플의 경우 Day 0에서는 큰 차이가 발생하지 않은 것으로 분석하였지만, 이렇듯 재령이 경과하면서부터는 그 차이가 더욱 커지는 것을 확인할 수 있었다. 특히 중심부에서 균열의 피해가 커지는 것은 많은 학자들에 의해 보고된 바와 같이 중심부에서 응력이 최대로 걸리면서 취약부위를 따라 균열발생이 집중된 것으로 판단된다. 그림 3.4.17은 그림 3.4.16에서 분석된 동일한 샘플을 3D 이미지 처리한 것으로 역시 샘플 전체에 많은 양의 균열이 재령 초기에서부터 넓게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다.

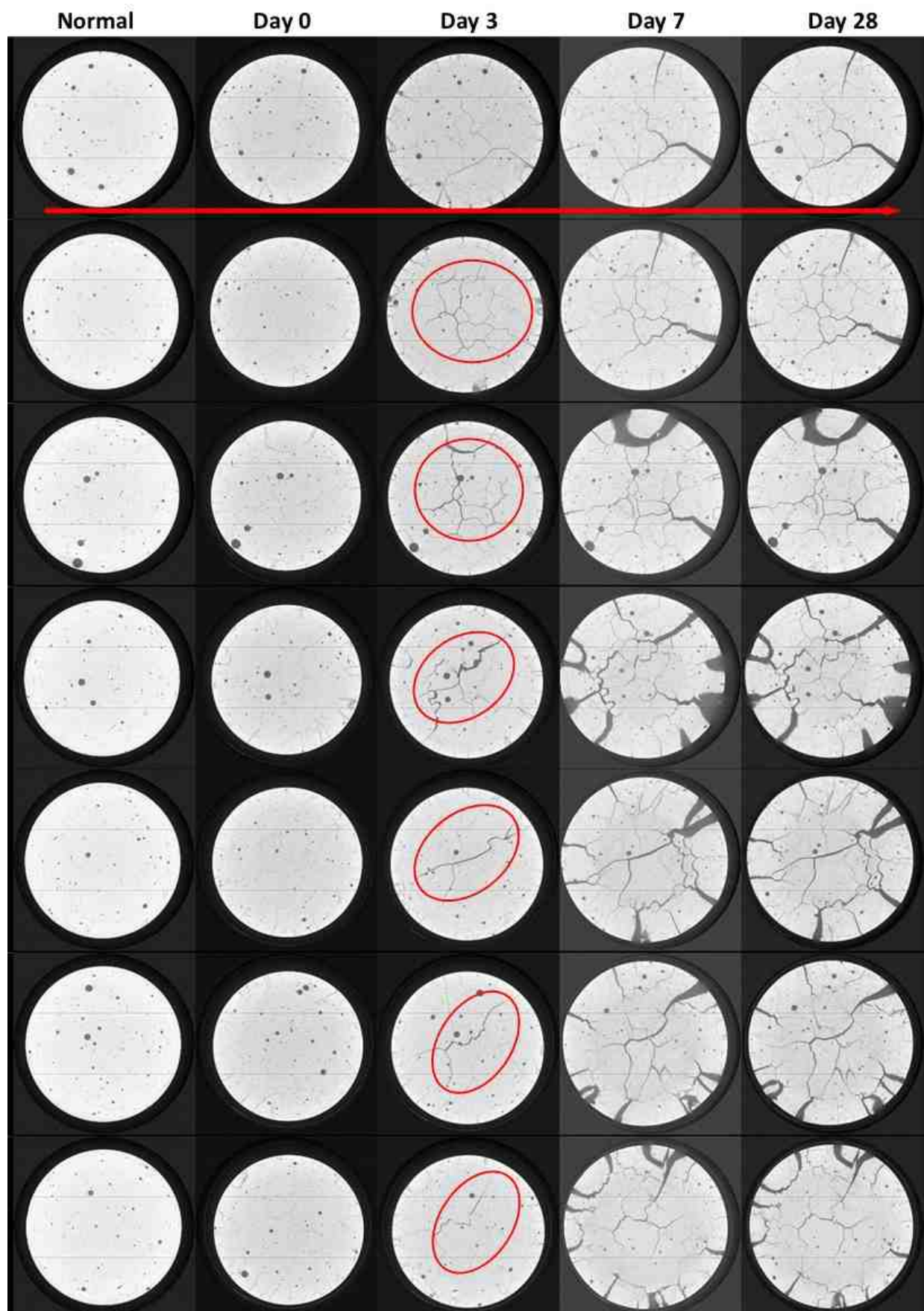
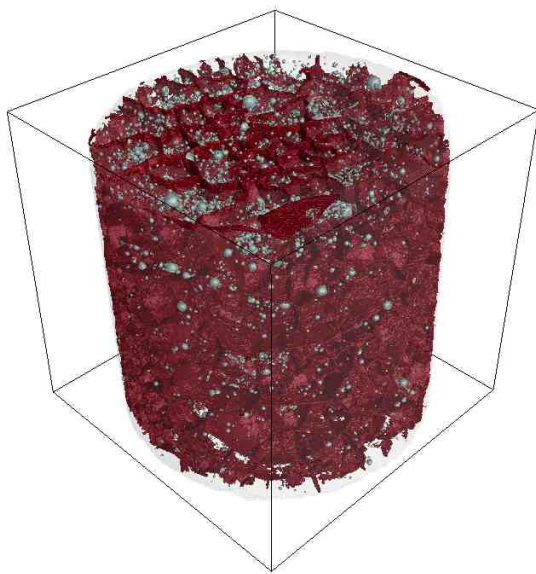
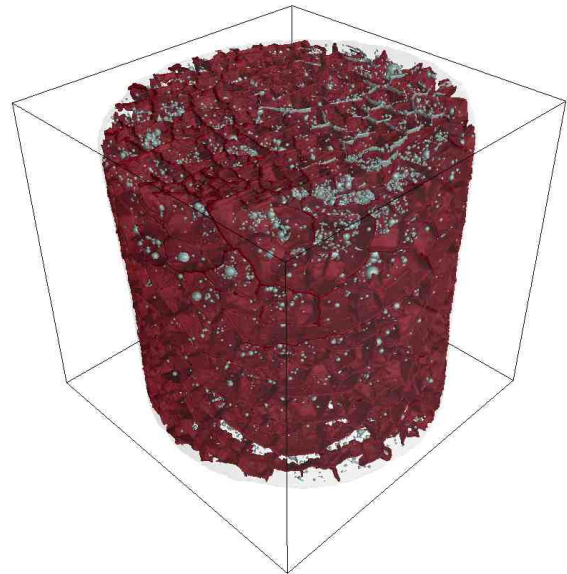


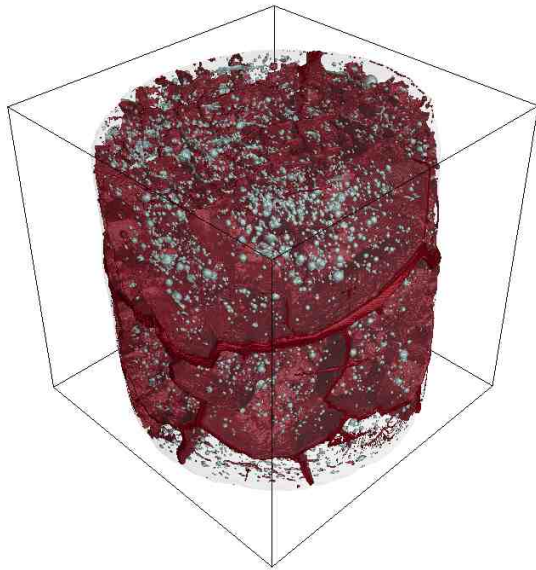
그림 3.4.14 일반가열조건으로 800℃에 노출된 시멘트페이스트 샘플의 2차 팽창 균열 거동



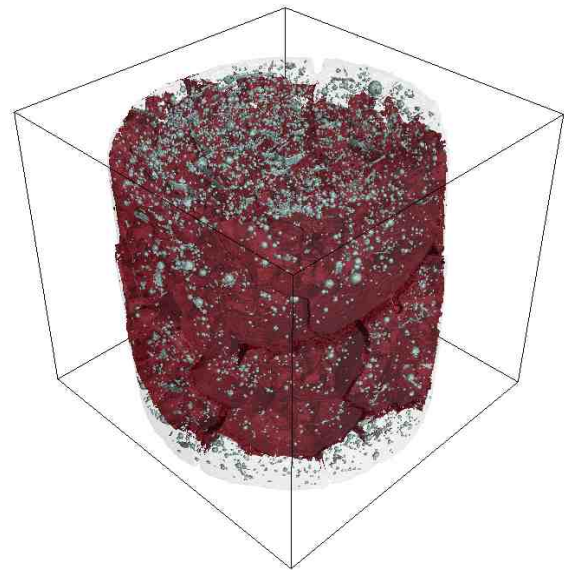
a. Day 0



b. Day 3



c. Day 7



d. Day 28

그림 3.4.15 일반가열조건으로 800°C에 노출된 시멘트페이스트 샘플의 재령별 3D image

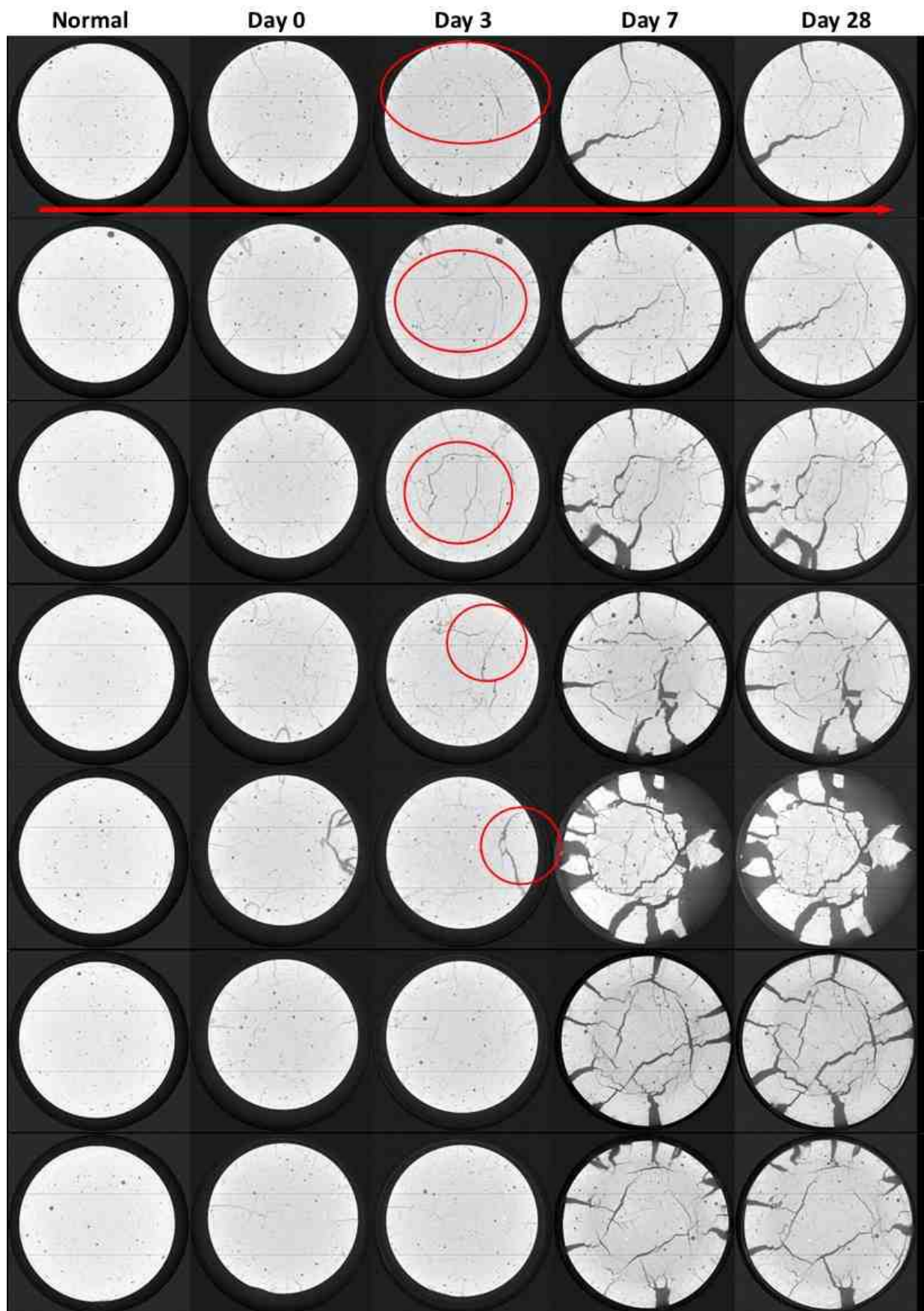
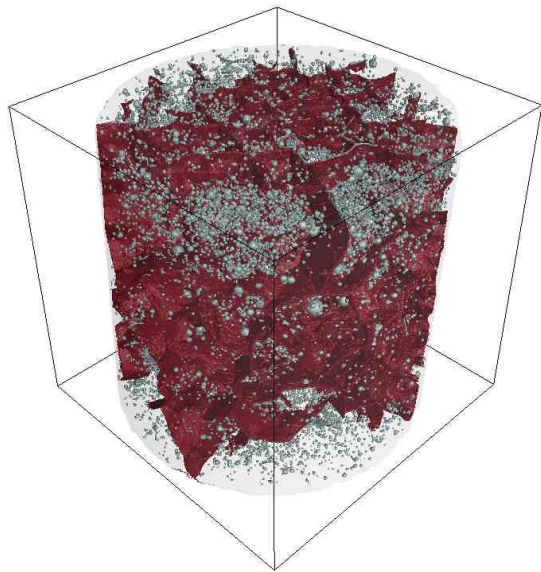
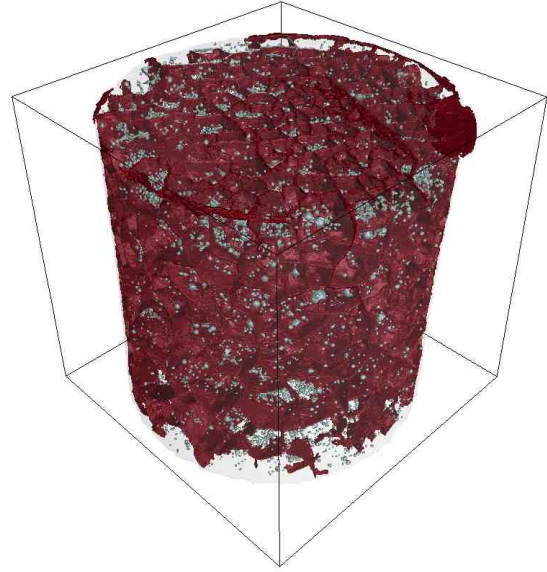


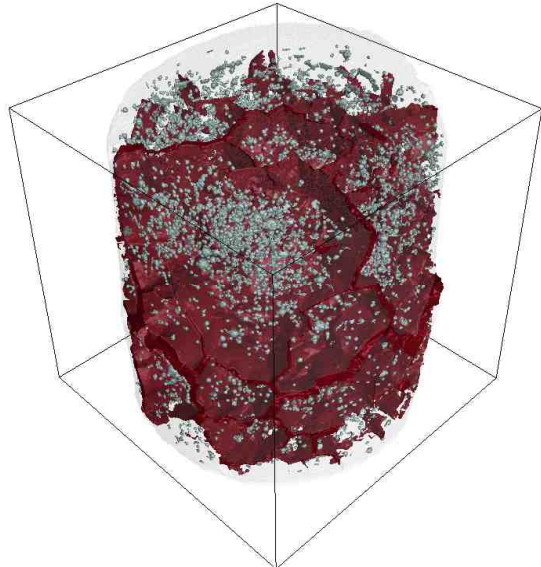
그림 3.4.16 급속가열조건으로 800°C에 노출된 시멘트페이스트 샘플의 2차 팽창 균열 거동



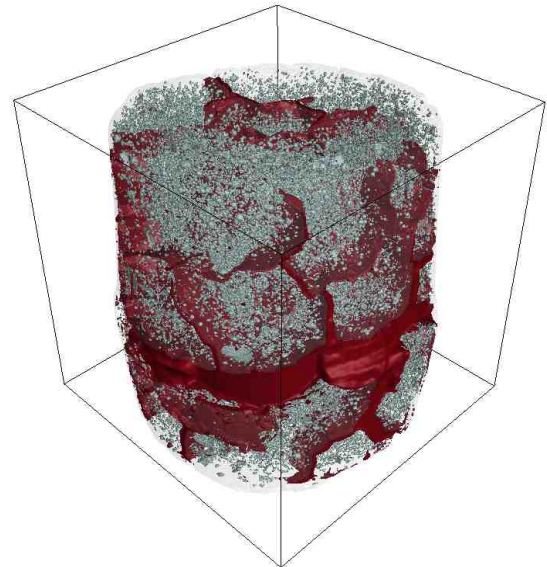
a. Day 0



b. Day 3



c. Day 7



d. Day 28

그림 3.4.17 급속가열조건으로 800°C에 노출된 시멘트페이스트 샘플의 재령별 3D image

② Void fraction

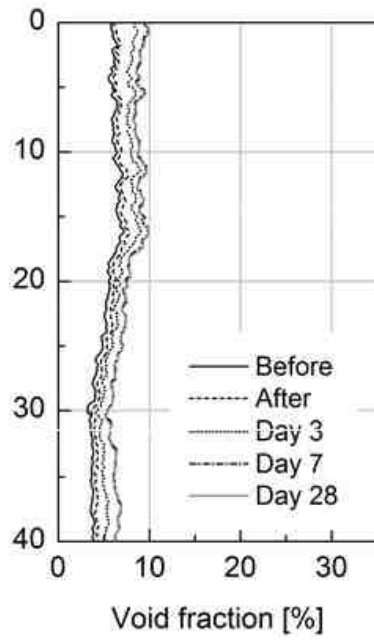
그림 3.4.18은 2차 팽창 거동의 영향성 분석을 위해 X-ray CT 이미지 분석을 완료한 모든 샘플의 Void fraction 분석 결과를 나타낸 것이다. 앞서 분석한 노출온도의 영향성 분석에서는 샘플 대부분의 공극 분포가 X-ray CT 장비가 분석할 수 있는 공극 사이즈에 해당되지 않아 비교·분석이 어려웠으나, 그림 18에서는 다량의 균열발생으로 X-ray CT 장비에 의해 균열 확인이 가능할 수 있었다.

그림 3.4.18a에서는 800°C 급속가열조건의 콘크리트 샘플을 분석한 것으로 재령 경과에 따라 공극비율 변화가 미미한 것으로 나타났으나, 그림 3.4.18b의 1000°C 최대급속가열조건의 콘크리트 샘플의 경우는 재령 7일과 재령 28일 샘플의 중앙부를 중심으로 공극비율이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 화재 노출 전 상온에서의 샘플과 비교하여 약 10%이상 증가한 수준에 해당되는 것으로 판단된다.

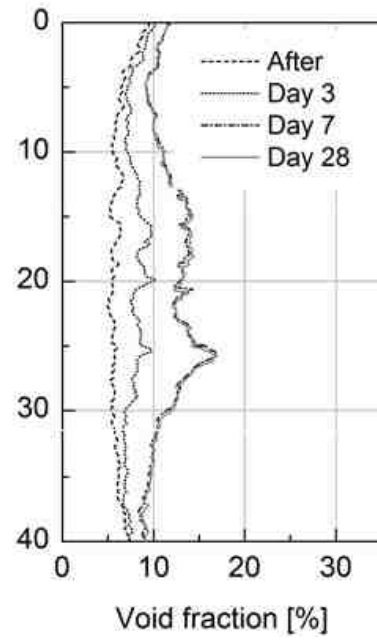
한편, 시멘트 페이스트의 경우는 이러한 재령경과에 따른 2차 팽창 거동으로 공극비율이 크게 증가하는 것으로 나타났는데, 그림 3.4.18c의 800°C 일반가열조건의 시멘트페이스트는 중심부에서 최대 약 28%의 공극비율을 나타냈고, 그림 3.4.18d의 샘플의 경우는 유사한 위치에서 33%의 공극비율을 나타냈다. 이는 화재피해를 입지 않은 상온에서의 샘플과 비교하여 각각 25%, 30% 증가한 수준에 해당된다.

화재피해를 입은 대부분의 모든 샘플은 대기 중에서 시간이 경과하면서 2차 팽창거동 특성을 나타내면서 공극비율이 증가하였으나 고온 피해를 입은 그림 3.4.18c와 그림 3.4.18d의 시멘트 페이스트 샘플은 재령 28일 보다 오히려 재령 7일차에서 더 높은 공극비율을 나타냈다. 이는 앞서 MIP (mercury intrusion porosimetry) 분석에서도 유사하게 나온 결과로 앞 절에서 화재피해를 입은 시멘트 페이스트를 대상으로 재령경과에 따라 화학분석을 실시한 결과로 설명할 수 있다.

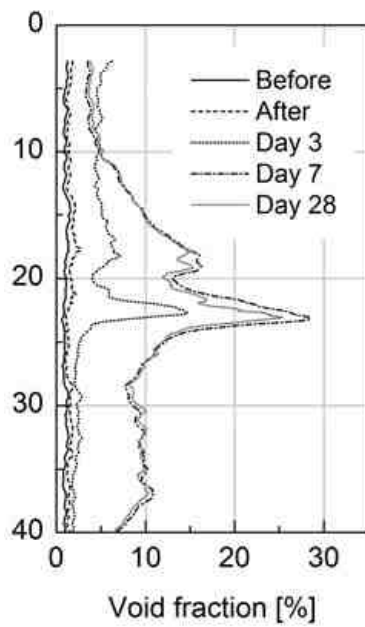
즉, 고온의 피해를 입은 시멘트 경화체는 대기 중에서 재수화 반응 (rehydration) 등 팽창성 화학반응으로 공극구조가 붕괴면서 공극비율이 커지는데, 후기 재령에서는 비대해진 공극으로 이산화탄소의 침투가 더욱 용이하게 됨에 따라 시멘트 경화체 표면부를 시작으로 탄산화 침투가 빠르게 진행된다. 이러한 탄산화 반응은 시멘트 경화체 내부에 탄산칼슘을 생성시키는데 이러한 생성물이 공극을 메움에 따라 나타난 결과로 분석된다.



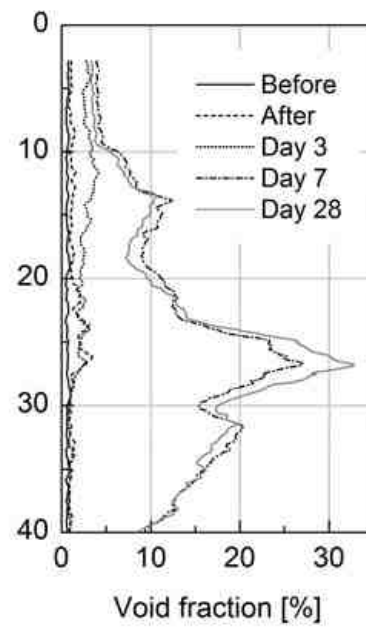
a. 800°C 급속가열조건의 콘크리트



b. 1000°C의 최대급속가열조건의 콘크리트



c. 800°C 일반가열조건의 시멘트페이스트



d. 800°C 급속가열조건의 시멘트페이스트

그림 3.4.18 화재 노출 후 대기 중에서의 2차 팽창거동에 따른 Void fraction 분석 결과

라. 골재유무의 영향성

골재유무의 영향성 분석은 앞서 ‘시간경과에 따른 대기 중 상온에서의 2차 팽창 거동의 영향성’에서 분석된 동일할 샘플을 대상으로 또 다른 각도에서 집중 분석함으로써 골재의 존재여부가 화재에 노출된 샘플에 어떻게 영향을 주는지 확인하고자 하였다.

앞서 분석된 결과에 따르면 시멘트 페이스트의 경우는 콘크리트 샘플과 비교하여 고온에 피해를 입은 후 초기재령에서는 아주 미세한 균열이 샘플 전체에 분포되어 있는 독특한 결과를 나타냈고, 후기재령에서 균열피해가 가장 크게 관찰되었던 시멘트 페이스트 샘플의 중앙부에서는 약 1/2에 해당되는 표면조각이 떨어져 나가는 현상이 관찰되었다. 그림 3.4.19는 시멘트 페이스트 샘플을 대상으로 avi 파일로 제작된 영상 중 일부를 캡처하여 나타낸 것으로 재령경과에 따라 독특한 honeycomb 모양의 균열이 샘플 전반에 걸쳐 두루 발달되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 동일한 조건의 콘크리트 샘플에서 극히 일부의 균열조각만이 떨어져 나간 결과와 비교할 경우 극심한 차이를 나타내고 있다.

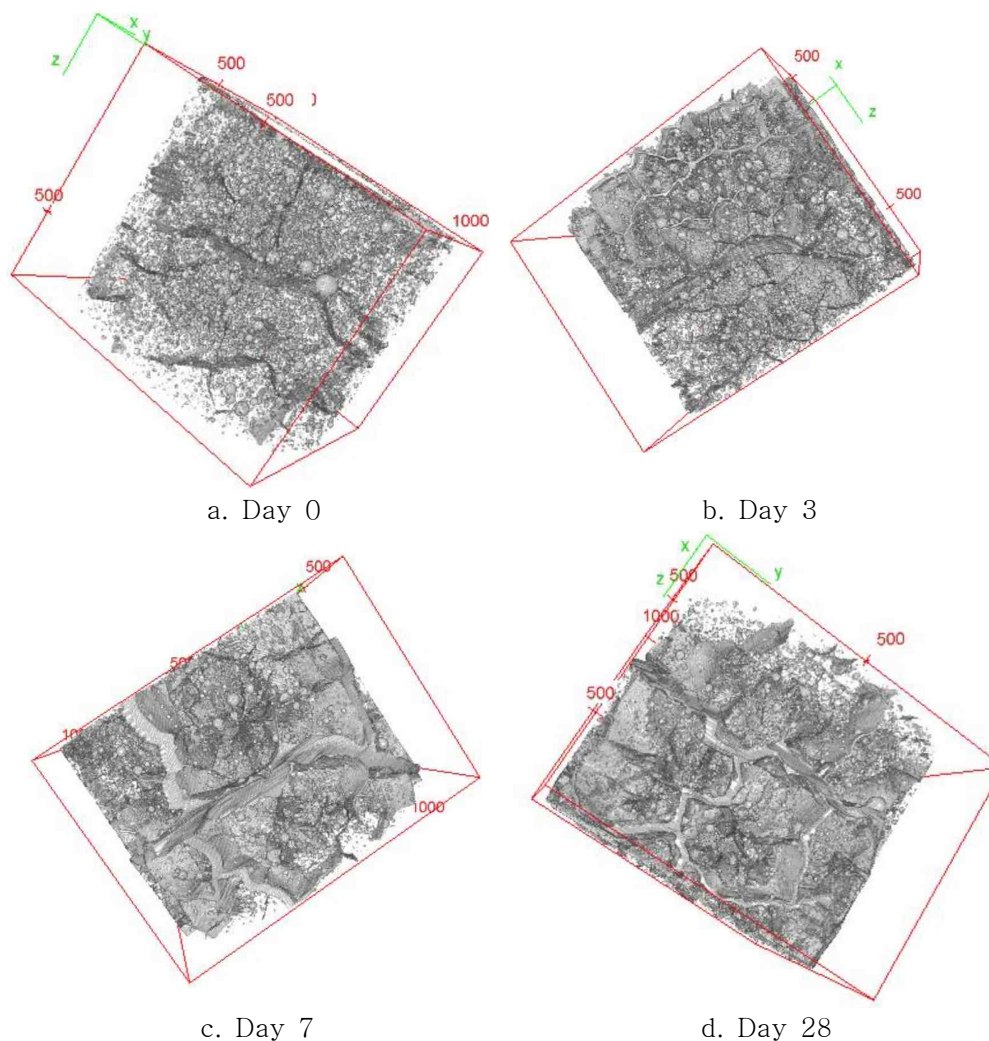


그림 3.4.19. 일반가열조건으로 800°C에 노출된 시멘트페이스트 샘플 균열거동

그림 3.4.20은 앞서 논의된 콘크리트와 시멘트 페이스트의 외형 부피변화를 재령변화에 따라 비교하여 나타낸 것이다. 먼저 콘크리트의 경우는 화재 노출 전과 후를 비교했을 경우 큰 폭으로 증가하지는 않았지만 대부분의 재령에서 연속적으로 팽창이 일어난 것을 확인할 수 있다. 그러나 시멘트 페이스트의 경우는 화재 노출 후 초기 재령에서는 수축이 일어나면서 전체 부피가 줄어드는 것으로 나타났고, 재령 3일차에는 다시 부피가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

콘크리트 샘플의 경우는 화재 노출 직후 재령 1일차에서 약 1.1%의 부피증가율을 나타냈고, 재령 3일차에서는 3.5% (재령 1일차와 비교), 재령 7일차에서는 4.7% (재령 3일차와 비교)를 나타냈다. 그러나 재령 28일차에는 반대로 1.7% (재령 7일차와 비교)의 부피가 감소한 것으로 나타났다. 재령 7일차에서 화재노출 전과 비교할 경우에는 약 9.6%의 부피가 전체적으로 증가하였고, 재령 28일차의 경우는 7.7%가 증가한 것으로 나타났다. 그러나 시멘트 페이스트의 경우는 화재 노출 직후 재령 1일차에 이미 10.8%의 부피가 급격히 수축되어 있는 것으로 나타났고, 재령 3일차에는 반대로 4.5%의 부피가 증가한 것으로 나타났다.

이렇듯 시멘트 페이스트에서 나타난 수축과 팽창 거동 (화재노출 중 수축, 화재노출 후 초기재령에서는 수축, 화재노출 후 후기재령에서는 다시 팽창하는 특성)은 앞서 ‘콘크리트 원재료의 열거동 분석’에서 논의된 실험결과와 매우 유사하게 나타난 것으로 상호 실험결과를 뒷받침 해주고 있다. 특히, 시멘트 페이스트조건에서 나타난 거대한 균열 발생은 샘플에 가해진 온도에 따라 수축과 팽창의 폭 (화재노출 전과 후의 부피 gap)이 엄청나게 커짐에 따라 내부조직이 이를 견디지 못하고 찢어지면서 나타난 결과로 판단된다.

그러나 콘크리트의 경우는 골재가 존재하면서 튼튼한 골격의 역할을 수행했기 때문에 전체 부피의 수축과 팽창비율이 콘크리트 재료가 견딜 수 있는 탄성범위에 존재하는 경우가 많았기 때문에 그 만큼 균열발생률이 적어진 것으로 분석된다. 이는 일상적인 현장에서도 확인할 수 있는데, 시멘트 페이스트, 모르타 및 콘크리트는 현장 타설 후 건조수축을 나타내는데 콘크리트와 비교하여 모르타는 2~3배, 시멘트 페이스트는 8~10배의 건축수축이 발생하는 것으로 나타나 골재의 유무가 얼마나 중요하게 영향을 끼칠 수 있는지 다시한번 확인할 수 있다.

한편, 콘크리트 샘플의 경우 후기재령에서 부피가 갑자기 줄어드는 현상은 탄산화에 의한 공극충전효과에 기인한 것으로 판단된다. (mercury intrusion porosimetry 결과 참조)

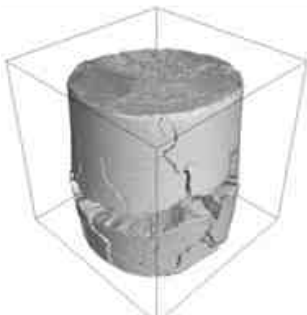
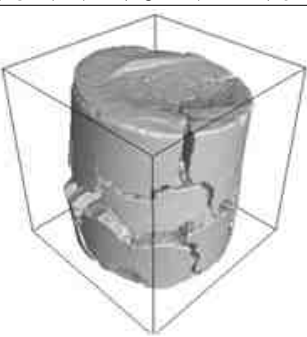
재령	콘크리트	시멘트 페이스트
상온		
	외형 부피: 104,822 mm ³	외형 부피: 105,023 mm ³
1일		
	외형 부피: 105,995 mm ³	외형 부피: 93,633 mm ³
3일		
	외형 부피: 109,714 mm ³	외형 부피: 97,856 mm ³
7일		
	외형 부피: 114,856 mm ³	외형 부피: 측정불가 (조직붕괴)
28일		
	외형 부피: 112,860 mm ³	외형 부피: 측정불가 (조직붕괴)

그림 3.4.20 재령경과에 따른 골재유무별 샘플의 외형 이미지와 외형 부피 변화

4-4 소결

본 절에서 소개한 X-ray CT 장비를 이용해 화재노출 초·중·후 시멘트 페이스트와 콘크리트 내·외부에 나타난 균열거동 분석을 통해 내놓은 결과는 본 연구를 통해 처음 소개된 것으로 그 의미가 크다. 특히 시멘트 페이스트 샘플에서 재령이 경과하면서 honeycomb 모양이 전체 면적에 걸쳐 발달되어 있는 모습을 촬영한 결과는 지금까지 해결하지 못한 균열거동 특성을 이해하는데 귀중한 자료로 활용될 전망이다. 단, 장비 특성상 모세관 공극 등에 의한 충전성 여부를 관찰하는 것은 기계의 한계치를 벗어나는 것으로 분석 대상에서 제외하였는데, 이 부분은 MIP (mercury intrusion porosimetry)를 이용한 공극특성에서 분석된 자료를 활용할 경우 충분히 보완할 수 있을 것으로 판단된다. 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

① 콘크리트 조건

- 고온에 노출될 경우 시멘트 경화체는 수축거동을 일으키고, 골재는 팽창거동을 하는데, 두 재료의 조합으로 이루어진 콘크리트에서는 시멘트 매트릭스와 골재 계면간의 천이지대 영역 (Interfacial transition zones)에서 응력이 집중되면서 균열이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.
- 이러한 균열은 시멘트페이스트와 달리 표면부와 가까운 부위에서 시작하여 골재를 따라 이웃 균열로 퍼져나가는 것을 확인할 수 있었다.
- 균열발생의 피해규모는 화재피해온도가 높고, 승온속도가 빠를수록 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 차이는 재령이 경과하면서 대기 중 상온에서 발생한 추가 균열의 피해규모에도 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- 균열 발생 면적은 시멘트 페이스트 조건보다 현저히 줄어드는 것으로 나타났는데, 이는 골재가 샘플의 골격과 같은 역할을 수행하면서 화재 노출 초·중·후기에 나타나는 수축과 팽창 비율을 최소화함으로써 응력발생을 줄이는 효과가 나타났기 때문인 것으로 판단된다.

② 시멘트 페이스트

- 시멘트 페이스트 샘플은 콘크리트 샘플과 달리 화재 노출 후 초기에는 아주 미세한 균열이 샘플 전체 면적에 퍼져있는 것으로 나타났고, 재령 3일차부터 비교적 큰 균열이 발생되는 것을 확인할 수 있었다.
- 콘크리트 조건과 달리 샘플 중앙부에서부터 벌집모양의 균열이 넓고 뚜렷하게 관측되었는데, 이러한 균열은 재령이 경과할수록 표면으로 확산되면서 관통균열을 일으키는 것으로 확인되었다.
- 샘플의 중간높이 부분에서 가장 큰 피해가 관찰되는데, 이 부위에서 조직이 통째로 무너지는 결과를 나타냈다.

5. 촉진 중성화 시험방법에 의한 고온 노출 콘크리트의 탄산화 특성

5-1 개요

화재 발생으로 손상을 입은 콘크리트 구조체의 피해규모를 예측하기 위해서 지금까지 화재 피해온도 예측 방법과 해당 피해온도에서의 공극구조 변화 및 균열거동 특성을 검토해 보았다. 이로써 고온에서 화재손상을 입은 콘크리트 구조체는 표면에 나타난 균열보다 오히려 육안으로는 검증하기 힘든 구조체 내부에 발생하는 균열이 더욱 심각한 것을 확인할 수 있었다. 또한, 이러한 균열은 시간이 경과함에 따라 시멘트 경화체 내부의 rehydration (재수화) 등 화학반응에 의해 일정기간 폭발적으로 증가하여 해당 샘플에 심각하게 영향을 끼치는 것을 확인할 수 있었다.

콘크리트 건설구조물의 구조적 수명은 대기 중에 존재하는 이산화탄소 등 해로운 이온의 침투 깊이에 따라 결정되는데, 화재시 콘크리트에 발생된 내·외부 균열은 경미할 지라도 이러한 해로운 이온의 침투를 더욱 손쉽게 할 수 있으므로 콘크리트 구조물의 수명에 큰 영향을 줄 수 있다. 그러므로 건설구조물에 대한 화재 조사 (fire investigation) 과정 중 구조적 안전진단 뿐만 아니라 구조물의 내구성이 얼마나 저하하였는지에 대한 검토가 반드시 필요한데, 현재까지 관련 원천기술의 부재로 이러한 검토가 이루어지지 못했다.

따라서 본 절에서는 현재까지 검토되지 못한 화재손상 구조물의 내구성 피해를 조사하기 위해 화재피해에 따른 균열발생과 탄산화 진행속도의 영향성 규명을 주요 sub 연구목표로 정하고, 아래와 같은 내용으로 연구수행을 진행하였다.

- 화재 손상을 입은 콘크리트의 온도 조건별 탄산화 피해 수준 조사
- 촉진 중성화 실험을 실시한 결과에 근거한 잔존 수명 평가 방법 제시 (문헌조사)
- 화재 손상을 입은 시멘트 경화체의 잔존 수명 평가

5-2 실험계획

본 절에서 화재손상을 입은 시멘트 경화체의 탄산화 피해를 조사하기 위한 목적으로 제작한 샘플은 총 6개로 각각 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C 및 600°C 조건에서 강제적 열손상을 입게 한 후 재령 1일이 경과하였을 때 본격적인 촉진 중성화 시험을 진행하는 것으로 계획하였다. 촉진 중성화 시험 시기는 1차는 중성화 챔버에서 7주 노출 시킨 후 실시하였고, 2차 시험은 동일한 챔버에서 25주 노출 시킨 후 시험을 진행하는 것으로 계획하였다.

5-3 실험방법

가. 실험체 준비

본 절에서 논의하고자 하는 탄산화 피해수준 조사용 샘플은 물시멘트비 0.5로 하였고, 화학 혼화재와 광물 혼화재 등 샘플에 영향을 줄 수 있는 첨가제 혹은 치환재 등은 사용하지 않는 것으로 하였다. 이는 앞서 실험을 진행했던 거의 대부분의 샘플과 동일한 조건이다. 시험체의 사이즈는 KS에서 제안한 축진중성화 시험용 사이즈 범위에 해당되는 $100 \times 100 \times 400$ mm로 제작하였다. 믹싱이 끝난 시험체는 성형 후 재령 1일에 탈형하여 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 에서 28일간 수중 양생을 실시하였고, 이후에는 기중 상태에서 7일간 자연 건조시킨 후 시험체 준비를 완료하는 것으로 계획하였다.

나. 열처리

성형 후 양생 완료된 샘플은 앞서 X-ray CT 분석용 샘플의 전처리 과정과 동일하게 진행하는 것으로 하였다. 즉, 전기가열로를 이용하여 계획된 온도조건에서 역시 온도구배 (thermal gradient) 현상이 발생되지 않도록 유럽에서 제시한 RILEM TC 129-MHT “Test method for mechanical properties of concrete at high temperature” 승온속도식을 적용하여 축진 중성화 시험용 샘플의 표면과 중심부의 온도가 20°C 이상 차이가 발생되지 않도록 하였다. 그 내용을 살펴보면 다음과 같다. (그림 3.5.1 참조)

$$\Delta T = Rr^2/4D$$

where, ΔT = temperature difference between center and surface

R = heating rate ($^\circ\text{C}$)

r = specimen radius (mm)

D = thermal diffusivity (mm^2/min)

※ 시멘트 경화체의 D 값은 $22.2 \text{ mm}^2/\text{min}$ 으로 하였음

따라서 본 절에서 탄산화 피해 수준 조사를 위해 진행한 샘플의 전 처리 승온속도는 다음과 같다.

- 승온속도 : $0.71^\circ\text{C}/\text{min}$ (목표온도 도달 후 유지시간: 2시간)



그림 3.5.1 탄산화 피해수준 조사용 샘플의 전 처리 모습

다. 중성화 시험

전 처리가 완료된 샘플을 대상으로 실시한 중성화 시험은 KS F 2584에 의거하여 진행하였다. 실험 진행에 앞서 알루미늄테이프를 사용하여 시험체의 윗면, 타설면 그리고 옆면 중 한 면으로 총 3면을 마감처리 하여 탄산화가 한 방향으로 진행될 수 있도록 처리하였다. 중성화 챔버 조건은 KS에서 규정한 온도 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$, 상대습도 $60\pm 5\%$, 이산화탄소 $5\pm 0.2\%$ 로 하였다.

중성화 깊이 측정은 KS F 2596에 의거하여 실시하였고, 측정시기는 촉진시험 개시 후 재령 6주에 한 차례, 25주에 한 차례 실시하여 총 두 번 실시하는 것으로 하였고, 측정방법은 $100 \times 100 \times 75\text{ mm}$ 로 절단하여 계획된 재령에서 페놀프탈레인 용액을 분무한 후 중성화된 표면을 버니어캘리퍼스로 측정하였다. 페놀프탈레인 용액은 KS M 8238에서 규정한 용액을 사용하였다. 단 화재피해를 입은 샘플의 경우는 대부분 수분이 존재하지 않기 때문에 페놀프탈레인 용액 분무후 탄산화 경계면이 불분명할 수 있는데, 이때에는 대기 중에서 일정시간 노출 시킨 후 재분무하여 탄산화 깊이를 측정하였다.

5-4 실험결과 및 분석

① 탄산화 피해 분석

그림 3.5.2는 각각 $100 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 에서 온도피해를 입은 샘플을 대상으로 7주 동안 중성화 챔버에서 이산화탄소에 노출 시킨 후 계획된 면을 절단하여 페놀프탈레인 용액을 분무한 후 사진 촬영한 모습을 나타낸 것이다.

페놀프탈레인 용액을 분무한 후 각 샘플에서 색깔이 변하지 않은 탄산화 깊이를 측정한 결과 100°C ~ 300°C에 노출된 경우에는 0 mm로 전혀 탄산화가 진행되지 않은 것을 확인할 수 있었다. 그러나 400°C 이상에서는 탄산화 진행 깊이가 점점 증가하는 것으로 나타났다는데, 400°C 노출 샘플의 경우는 3.29 mm로 나타났고, 500°C 노출 샘플은 5.52 mm, 600°C의 온도에 노출된 샘플은 7.15 mm의 탄산화가 각각 진행된 것으로 나타났다.

이상과 같이 300°C이하의 온도에 노출된 샘플에서 탄산화 침투가 전혀 일어나지 않은 이유는 샘플 내부에 물의 양이 극히 작았기 때문에 기인한 것으로 이산화탄소의 침투가 용이하지 않아 나타난 결과로 판단된다. 반면에 400°C 이상의 온도에 노출된 경우에는 샘플 내부에 물이 거의 없는 상태임에도 탄산화가 진행됐는데, 이는 외부 이산화탄소 침투에 의한 영향이라기보다는 고온에 노출된 샘플이 자기 열화에 의해 수화물 분해가 일어나면서 자체적으로 탄산화가 진행된 것으로 판단된다.

동일한 샘플에 대해 중성화 챔버에서 25주 동안 이산화탄소에 노출된 경우에는 그림 3에서와 같이 탄산화 침투 깊이가 그림 2의 결과와 비교하여 매우 높아진 것으로 나타났는데, 이는 100°C 노출 샘플의 경우라 할지라도 재령이 경과함에 따라 챔버 내부에 존재하는 수분을 흡수하여 이산화탄소의 침투가 가능해졌을 것으로 판단된다. 각 샘플의 탄산화 침투 깊이는 100°C의 경우 10.08 mm, 200°C에서 12.14 mm 300°C에서 8.17 mm, 400°C에서 10.67 mm, 500°C에서 14.79 mm, 600°C에서 25.61 mm로 각각 나타났다.

그림 3.5.3의 실험결과 300°C 노출 샘플의 경우 탄산화 깊이 유독 작게 나타났는데, 이는 직접적으로 뒷받침할만한 뚜렷한 증거는 없지만 앞 절에서 실시한 시멘트 경화체의 Dilatometer 실험결과에 의해 설명될 수 있다. 즉, 시멘트 경화체는 약 200°C까지는 팽창 거동을 일으키다가 이후 노출온도가 증가할수록 반대로 수축거동을 하게 되는데, 이 시점에서 일시적으로 공극의 크기가 200°C 노출 샘플 보다 작아질 수 있는 가능성이 충분히 있다.

400°C의 온도에 노출된 샘플에서는 탄산화 깊이가 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 비록 전체 부피는 수축이 일어났지만, 300°C 노출 샘플과 비교하여 수화물의 붕괴가 훨씬 커짐에 따라 전체 공극의 크기는 증가하는 쪽으로 나타났기 때문에 기인한 것으로 판단된다. 500°C와 600°C 노출 샘플 역시 400°C 노출 샘플과 동일한 이유로 탄산화 깊이가 증가한 것으로 사료된다.

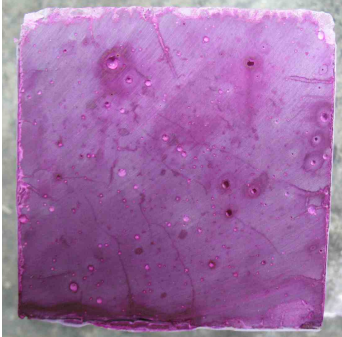
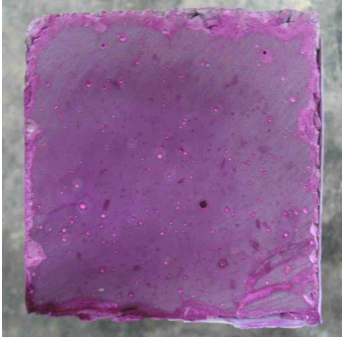
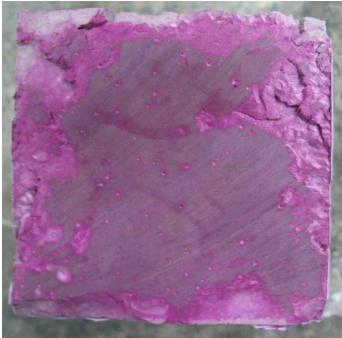
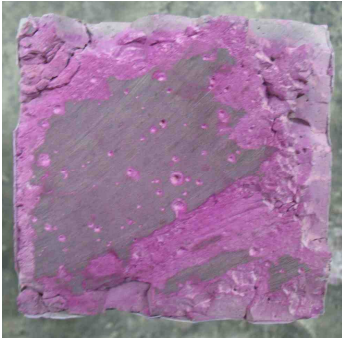
		
피해온도: 100°C 탄산화깊이: 0 mm	피해온도: 200°C 탄산화깊이: 0 mm	피해온도: 300°C 탄산화깊이: 0 mm
		
피해온도: 400°C 탄산화깊이: 3.29 mm	피해온도: 500°C 탄산화깊이: 5.72 mm	피해온도: 600°C 탄산화깊이: 7.15 mm

그림 3.5.2 중성화 챔버 7주 양생 샘플의 탄산화 피해

		
피해온도: 100°C 탄산화깊이: 10.08 mm	피해온도: 200°C 탄산화깊이: 12.14 mm	피해온도: 300°C 탄산화깊이: 8.17 mm
		
피해온도: 400°C 탄산화깊이: 10.67 mm	피해온도: 500°C 탄산화깊이: 14.79 mm	피해온도: 600°C 탄산화깊이: 25.61 mm

그림 3.5.3 중성화 챔버 25주 양생 샘플의 탄산화 피해

② 촉진중성화 시험에 근거한 잔존수명 평가 방법 제시

탄산화 진행에 의해 콘크리트 구조물의 잔존수명이 제로가 되는 시기는 콘크리트 내부 철근 부위까지 탄산화가 진행되었는지의 여부와 그 이후 철근이 녹슬기 시작하여 팽창파괴에 의해 구조적 기능을 완전히 상실할 때까지 두 가지 측면을 고려해 볼 수 있다.

- 1차 단계 (Initiation period): 콘크리트 구조물 내부 주근 철근의 표면까지 탄산화가 진행된 시기로 정의
- 2차 단계 (Propagation period): 탄산화 진행 후 주철근의 부동태 피막이 깨지면서 철근이 녹슬기 시작하는 단계부터 팽창파괴에 의해 철근의 기능과 콘크리트의 구조적 기능이 완전히 상실하는 단계까지로 정의함

여기서 논의하는 잔존수명 평가방법은 CEB bulletin 238 “new approach to durability design, an example for carbonation induced corrosion”에서 제시한 중성화 깊이 예측식에서 출발하여 LNEC E465 (carbonation resistance factor), EN-206-1 (environmental factor), Eurocode 0 (safety factor) 등에 근거한 문헌조사 결과를 통해 제시한 것이므로 본 연구에서 수행하여 얻은 실험결과와의 직접비교는 어려울 수 있다. 그러나 본 연구에서 제안하고 있는 화재피해온도 예측 및 잔존수명 평가 기술은 세계 최초로 정확하고 손쉬운 화재피해온도 예측 방법을 제안하는 것에 초점을 두고 연구를 진행하였고, 1차 기술이 개발되는 시점에는 2차적으로 기존에 연구된 잔존수명 평가 기술과 연계함으로써 목표기술을 완성하고자 한 것이다. 따라서 본 연구의 1차 화재피해온도예측기술에 접목할 내용으로 촉진중성화 실험결과 값에 근거하여 잔존수명을 평가할 수 있는 state of the art 식을 살펴보면 다음과 같다.

ㄱ. Initiation period

- 출발식

$$x(\text{carbonation depth}) = \sqrt{2 \frac{D}{a} \Delta t} \sqrt{k_o k_1 k_2} \left(\frac{t_0}{t} \right)^n \text{-----} \textcircled{1}$$

where, a = the amount of CO_2 that origins the carbonation of the concrete components in a concrete volume unit depending on type and amount of cement (kg/m^3)

D = the coefficient of diffusion of the CO_2 through the carbonated concrete in equilibrium with an environment of 65% RH and 20 °C (m^2/year)

ΔC = the difference between the external CO_2 concentration and one at the concrete carbonation front (kg/m³)

t = the time (year)

k_0 = constant (=3) testing method and condition

※ ref: LNEC E465, Concrete, Methodology for estimating the concrete performance properties allowing to comply with the design working life of the reinforced or pre-stressed concrete structures under environmental exposures XC and XS, Lisbon, LNEC, 2007

k_1 = constant: relative humidity

※ According to EN 206-1, and ' k_1 ' of XC3 is 0.77 (whereas, XC1: 1.0, XC2: 0.2, XC4: 0.41, 아래 표 참조)

Environmental exposure class (EN 206-1)	Refer to
XC3	Concrete inside buildings with moderate or high air humidity or external concrete sheltered from rain
XC4	Concrete surfaces subject to water contact or high humidity on a cyclic basis

k_2 = Constant: Cure (= 1: normal cure, = 0.25: 3 days cure)

t_0 = reference period (=1 year) (ref: LNEC)

n = wet/dry cycle

※ According to EN 206-1, XC3 refers to concrete inside buildings with moderate or high air humidity or external concrete sheltered from rain, and ' n ' of XC3 is 0.02 (XC1: 0.0, XC2: 0.183, XC4: 0.085)

$$R_{c65}(\text{carbonation resistance}) = \frac{a}{D} \text{-----} \text{②}$$

where, R_{c65} = carbonation resistance

※ ref: LNEC E465, Concrete, Methodology for estimating the concrete performance properties allowing to comply with the design working life of the reinforced or pre-stressed concrete structures under environmental exposures XC and XS, Lisbon, LNEC, 2007

Hence, eq ① is then written as follows

$$x = \sqrt{\frac{2 \times \Delta C}{R_{c65}}} t \sqrt{k_0 k_1 k_2} \left(\frac{t_0}{t}\right)^n \text{-----} \textcircled{3}$$

Since depassivation due to carbonation starts when a depth 'x' equals the concrete cover 'c' of the reinforcing steel, $2\Delta C = 1.4 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ [LNEC E465 Concrete, methodology for estimating the concrete performance properties allowing to comply with the design working life of the reinforced or pre-stressed concrete structures under environmental exposures XC and XS, Lisbon, LNEC 2007]. Therefore, 't' (in eq ③) become 't_i' and 'x' (in eq ③) become 'c'.

- Then expressed as (최종식):

$$t_i(\text{initiation period}) = \left[\frac{R_{c65} c^2}{1.4 \times 10^{-3} k_0 k_1 k_2 t_0^{2n}} \right]^{\frac{1}{1-2n}} \text{-----} \textcircled{4}$$

where, c = concrete cover (related to carbonation depth)

$$R_{c65} = \frac{2C_{\text{accel}} t_1}{x_1^2}$$

where, C_{accel} = Carbon dioxide concentration from accelerated test

(예: $90 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$)

t₁ = duration of test

X₁ = resulting carbonation depth

k₀ = constant (= 3) testing method and condition (eq 1 설명 참조)

k₁ = constant (= 0.77) relative humidity (eq 1 설명 참조)

k₂ = constant: cure (= 1: normal cure, = 0.25: 3 days cure)

t₀ = reference period (=1 year) (ref: LNEC)

n = wet/dry cycle(= 0.02, eq 1 설명 참조)

└. Propagation period

$$t_L(\text{design service life}) = \frac{t_i}{r} + t_p \text{ -----} \text{⑤}$$

where, γ = safety factor (= 2.3 year, 아래 표 참조)

Reliability class (Eurocode 0)	Safety factor, γ	Description	Examples
RC1	2.0	Low consequence for loss of human life, economic, social or environmental consequences small or negligible	Agricultural buildings where people do not normally enter (e.g. storage building, greenhouses)
RC2	2.3	Medium consequence for loss of human life, economic, social or environmental consequences considerable	Residential and office buildings, public buildings where consequences of failure are medium (e.g. an office building)
RC3	2.8	High consequence for loss of human life, economic, social or environmental consequences very great	Grandstands, public buildings where consequences of failure are high (e.g. a concert hall)

t_p = propagation period (= 45 years)

※ref: LNEC E465, Concrete, Methodology for estimating the concrete performance properties allowing to comply with the design working life of the reinforced or pre-stressed concrete structures under environmental exposures XC and XS, Lisbon, LNEC, 2007 (아래 표 참조)

	Minimum propagation periods, t_p estimated (years)			
	XC1	XC2	XC3	XC4
Target service life (50 years)	>100	10	45	15 (dry) 5 (humid)
Target service life (100 years)	>100	20	90	20 (dry) 10 (humid)

※ As it is, the deterministic calculus considers the characteristic value of the concrete cover in its equation. The initiation period results are then divided by a safety factor associated to a reliability level and added to the settled minimum propagation periods

③ 잔존수명 평가

그림 3.5.4는 본 연구의 탄산화 실험 데이터를 잔존수명 평가식에 대입하여 얻은 계산 값을 그래프로 나타낸 것이다. 여기서 이용한 데이터는 화재노출 후 중성화 챔버에서 25주 동안 고농도의 이산화탄소에 노출시켜 얻은 결과 값이고, 적용대상 구조물의 피복두께는 40 mm로 가정하였다. 최종적으로 계산한 잔존수명 (residual service life)은 철근 부식이 일어나기 시작하는 시점 (initiation period)과 부식이 진행되어 건물의 수명이 완전히 끝나가는 과정에 해당되는 기간 (propagation)을 모두 고려한 값이다.

먼저 그림 3.5.4a는 탄산화 깊이와 화재피해온도와의 관계를 나타낸 것이고, 그림 3.5.4b는 이때에 얻은 탄산화 깊이 결과 값을 이용하여 잔존수명을 계산한 것이다. 그림 3.5.4b에서 확인할 수 있듯이 화재피해온도가 높아질수록 잔존수명이 줄어드는 것으로 나타났는데, 100°C에 노출된 샘플의 경우 잔존수명이 57년으로 분석되었고, 200°C의 경우는 53년, 300°C는 63년, 400°C는 55년, 500°C는 50년, 600°C는 47년으로 평가되었다. 이는 앞에서 분석한 바와 같이 화재피해온도가 증가할수록 고열에 의해 수화물이 붕괴되면서 공극률과 공극사이즈가 커짐에 따라 이산화탄소 침투속도가 빠르게 증가했기 때문이다. 단, 300°C에서 나타난 일시적 증가현상은 앞서 사진촬영을 통해 탄산화 분석에서 논의된 바와 같이 향후 추가 분석이 필요할 것으로 판단된다.

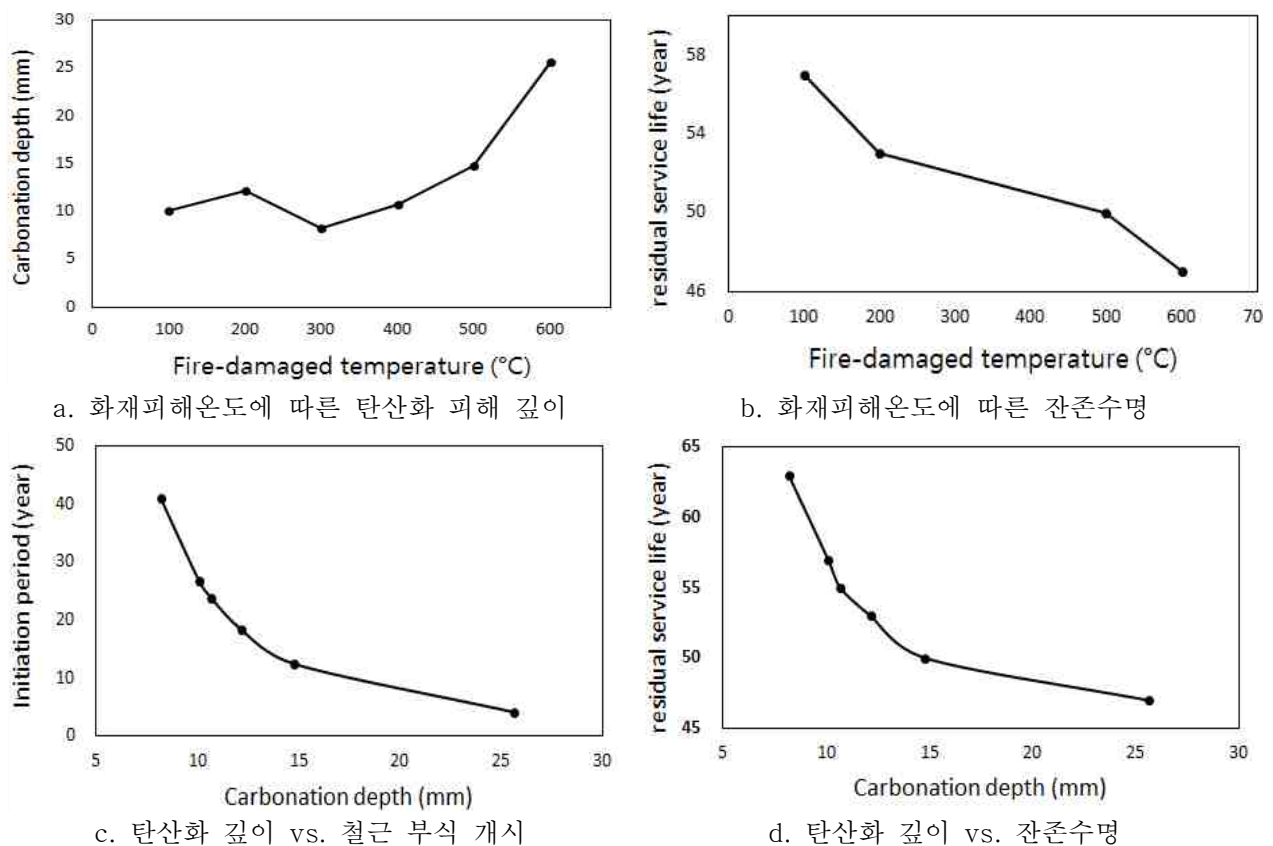


그림 3.5.4 잔존수명 평가식 적용

또한, 그림 3.5.4c는 탄산화 깊이와 철근 부식이 일어나는 시점 (initiation period)간의 상관관계를 나타낸 것이고, 그림 3.5.4d는 탄산화 깊이와 최종적으로 계산된 잔존수명간의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 탄산화 침투깊이의 증가는 시멘트 경화체의 내구성을 현저하게 떨어뜨리는 것으로 나타났다. 특히, 최종적으로 잔존 수명을 계산하는 과정 중에서 일정한 값을 동일하게 더해준 그림 3.5.4d의 결과 값과 달리 순수하게 탄산화 피해 데이터만으로 계산된 그림 3.5.4c의 경우는 100°C에 노출되었던 샘플과 비교하여 600°C에 노출되었던 샘플의 잔존수명이 약 75% 저감되는 것으로 나타났다.

5-5 소결

본 연구에서는 화재피해온도를 손쉽게, 정확하게 예측하는 것을 핵심으로 하였고, 잔존수명 평가는 예측된 온도에서의 탄산화 침투 깊이를 확인하여 기존에 학자들에 의해 연구된 정보와 연계시킴으로써 최종 기술을 완성하고자 하였다. 따라서 본 절에서 제시한 잔존수명 평가 방법은 축진 중성화 시험결과에 근거한 평가방법으로 문헌조사를 통해 유럽에서 이용되고 있는 관련 식을 찾아 적용하였다.

향후 구조물의 화재조사에 필요한 각종 이웃 기술의 개발과 함께 화재진압이 완료된 화재현장에 화재조사원으로 투입되어 공학적인 측면에서 A부터 Z까지의 시스템화된 기술을 이용하여 업무를 수행한다면 과학적인 화재조사가 가능할 것으로 기대된다. 그러므로 각 단계에서 수행될 해당 요소 기술들은 앞으로 확인하는 과정 중 실측값과의 비교를 통해 수정·보완시켜 발전시켜야 할 것으로 판단된다. 또한, 향후 연구에서 이러한 기술과 함께 화해를 입은 콘크리트의 잔존강도를 동시에 고려하여 평가한다면 더욱 유용한 정보를 줄 수 있을 것으로 기대된다.

6. 화재손상 콘크리트의 피해규모 조사 시스템 구축 및 개발 기술의 적용성 평가

6-1 개요

화재 관련 분야에 종사하고 있는 많은 사람들이 해마다 증가하고 있는 화재 발생 건수와 화재피해 규모를 저감시키기 위해 끊임없이 노력을 기울이고 있는데, 화재 현장에서 화재가 진압된 후 가장 먼저 수행되는 일은 화재조사 (Fire investigation) 업무다.

화재 조사는 화재발생의 원인을 규명하는 것으로 소방분야에 종사하는 화재조사관들은 화재의 직접적인 원인을 규명하여 유사 화재의 발생을 막고, 화재진압의 효율성을 높일 수 있는 방법을 고민하는데 주력하여 업무를 진행한다. 반면, 국립과학수사연구원에 종사하는 화재조사관은 화재의 원인을 규명하는 업무는 동일하게 진행하는데, 화재원인 조사의 목적은 소방분야의 화재조사관들과는 다르다. 그들이 수행하는 화재조사의 주목적은 화재를 일으킨 방화범을 찾는 것이다. 화재발생의 원인을 규명하여 이러한 목적을 달성한 국내 화재조사관들은 더 이상의 추가 조사를 진행하지 않는 것이 통례이다.

화재조사는 그림 3.6.1에서 정리해 놓은 바와 같이 화재발생의 직접적인 원인 규명 외에도 오히려 인명피해와 재산피해에 영향성이 큰 화염전파 경로를 규명하고, 화재손상 구조물의 피해를 조사하며, 보수보강 방법 제시 및 평가하는 업무를 모두 포함해야 한다. 이를 위해서는 건설 공학적인 접근이 필요한데, 현재까지 국내에는 관련 원천기술의 부재로 이러한 업무가 전혀 진행되지 않았다.

✓ Fire investigation from A to Z

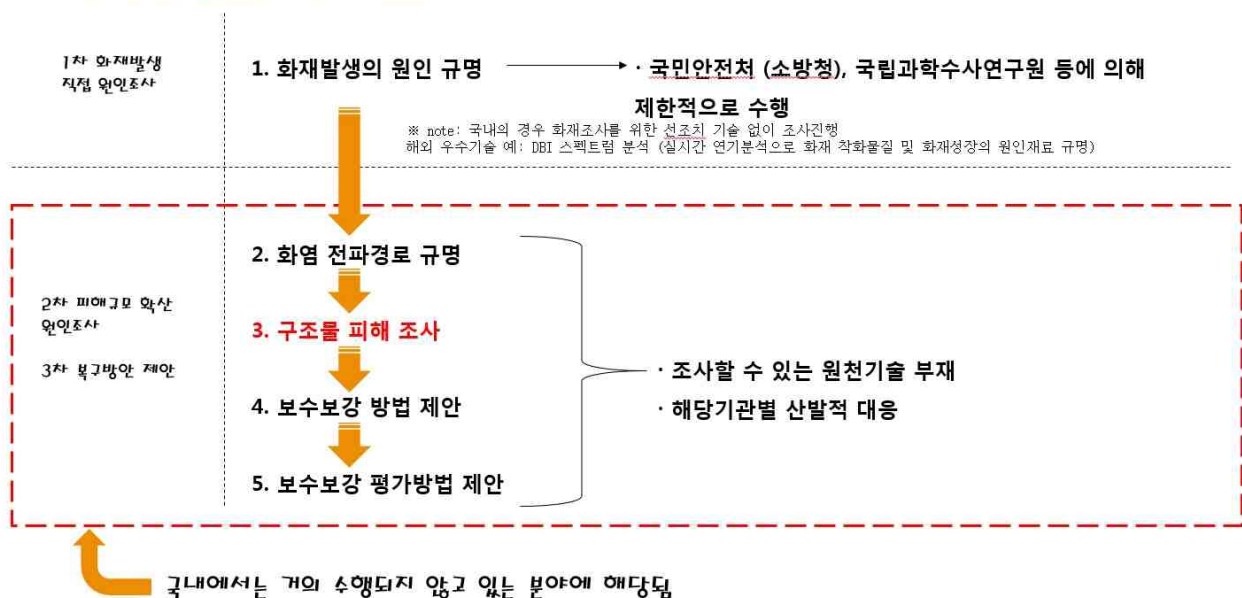


그림 3.6.1 화재조사 A부터 Z까지

본 연구에서는 이 중 건설 공학적인 접근을 시도하여 화재손상을 입은 구조물의 피해조사에 초점을 두고 관련 원천기술 개발을 목표로 프로젝트를 수행했는데, 이는 향후 이웃 단계에서 진행될 화재 조사업무에 기여가 있을 것으로 기대된다. 본 절에서는 화재피해규모조사 시스템 구축 논의와 구축된 기술의 평가를 진행하였는데, 세부 핵심 내용은 다음과 같다.

- ‘화재손상 콘크리트의 피해규모 조사 시스템 구축’을 위해 그 동안의 연구를 진행하면서 축적한 데이터의 활용 방법 제시 (표준화 디렉터리 구축)
- 개발 시스템의 예측 정밀성을 확인하기 위한 Bench 스케일 규모의 화재실험 진행
- 노출 온도 조건별 열전도도, 밀도, 공극률, 열용량 등을 고려한 열확산 시뮬레이션 구현
- 실측 값, 예측값, 시뮬레이션 구현 값의 비교분석 및 개발기술 평가

6-2 화재 피해규모 조사 시스템 구축

본 연구에서 구조물의 과학적 화재조사 (Fire forensic investigation of structures)를 목적으로 실험을 진행하여 축적한 데이터는 지금까지 각 절에서 논의되었던 핵심 연구수행 내용으로 다음과 같다.

- 피해온도에서의 화학특성 변화 분석 데이터 (= Standard directory 1)
- 피해온도에서의 공극구조 변화 분석 데이터 (= Standard directory 2)
- 피해온도에서의 탄산화 피해수준 조사 데이터 (= Standard directory 3)

이상에서 구축한 실험데이터는 표준화디렉터리 (Standard directory)라는 이름으로 데이터 베이스화하여 그림 3.6.2에서 확인할 수 있는 바와 같이 화재피해규모 조사 시스템에서 화재손상 콘크리트 구조체의 잔존수명을 평가하는데 핵심자료로 활용된다. 이를 자세히 살펴보면 다음과 같다.

- ① 화재진압이 끝난 현장에서 구간별로 10 mm 이하의 코어링을 실시하여 샘플 확보
 - ※ 벽, 기둥, 슬라브 등 건축부재별로 화재발생지 전체를 대표할 만한 위치에서 샘플링을 실시하는데, 이는 향후 시뮬레이션 구동을 통해 실스케일을 해석할 때 필요자료로도 활용됨
- ② 화재현장에서 채취한 코어링 샘플을 10 mm 간격으로 절단하여 4 등분으로 나눈 후, 각각의 샘플을 마노유발세트 등을 이용하여 미세하게 분쇄함
- ③ 분쇄된 샘플은 비닐 팩으로 각각 구분지어 포장한 후 정해진 시기에 화학분석 실시
- ④ 현장 샘플을 이용하여 화학분석이 완료된 실험결과 값을 표준화 디렉터리 1번과 매칭 분석 (matching analysis)하여 화재손상 구조체의 깊이별 화재피해온도 예측 실시

※ 이때 화학분석은 화재피해온도 예측의 확실성 수준에 따라 1개 또는 2개 이상의 화학분석용 장비를 이용하여 실시할 수 있음

⑤ 해당 피해온도 확인 후, 표준화 디렉터리 2, 표준화 디렉터리 3의 순서대로 데이터 매칭을 실시하여 예측된 화재피해온도 구간에서의 공극구조 상태를 파악하고, 탄산화 피해 수준을 확인함

⑥ 최종적으로 모든 데이터를 확보한 후 이를 재분석하여 잔존수명 평가 실시 (축진중성화 실험결과에 근거한 잔존수명 계산식 활용)

※ 화재현장 샘플 채취와 표준화 디렉터리를 통해 예측된 값은 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 화재발생으로 피해를 입은 공간을 full scale로 해석하는데 활용함으로써 화재발생지 전반에 걸친 화재조사가 이루어 질 수 있도록 진행 시킬 예정임 (본 연구에서 진행 중인 화재조사 시스템 구축 및 시뮬레이션 구현 작업은 정밀성을 높이기 위해 국제공동협력기관인 덴마크 DBI와 협력 논의 중에 있음)

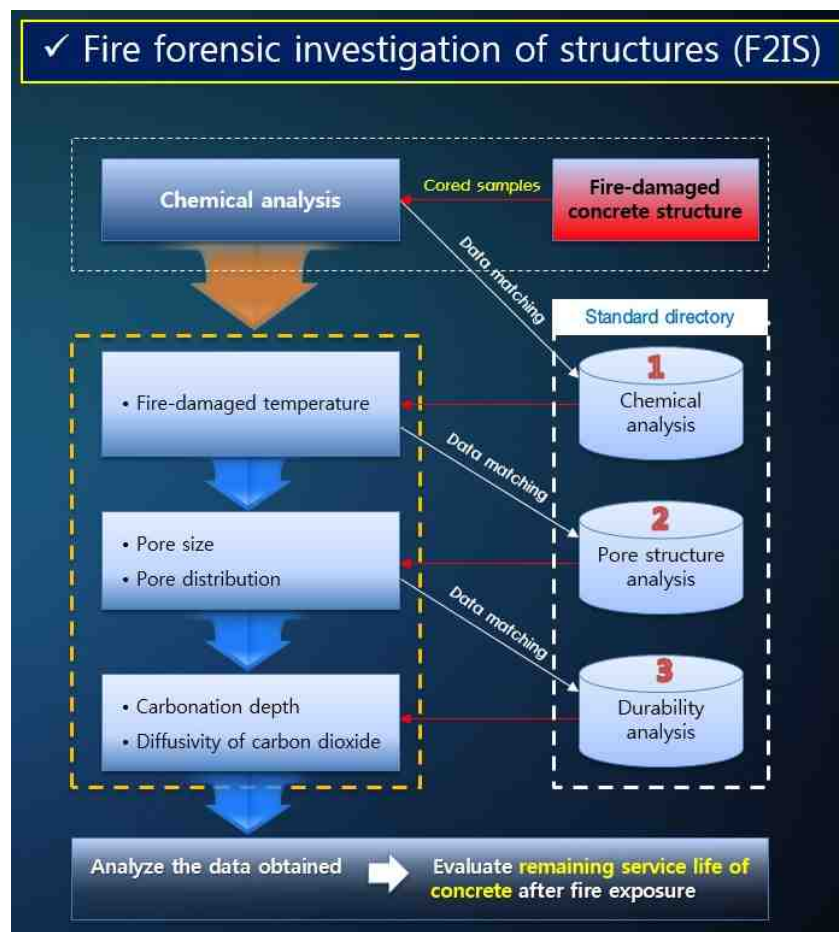


그림 3.6.2 화재 피해 규모 조사 시스템 구축도

6-3 개발 기술의 적용성 평가를 위한 실험계획 및 방법

가. 실험계획

표 3.6.1은 본 연구에서 핵심적으로 개발한 화재피해온도예측기술의 정확성을 검토하기 위해 계획한 실험내용을 정리하여 나타낸 것이다. 실험은 물시멘트비 0.5 (본 연구에서 수행한 시험체와 동일)의 시멘트 페이스트 조건으로 원주형 공시체를 제작하여 진행하였는데, 실제 화재에 노출된 슬라브 조건과 유사한 환경을 만들어 주기 위해 특수 제작한 가열로를 이용하여 가열 실험을 진행하였다.

가열로 내부의 온도는 각각 300°C와 500°C를 목표 온도로 설정한 후 100°C/h 승온속도로 가열하였는데, 내부 온도가 목표한 온도에 도달하였을 경우 3시간 동안 유지시키는 것으로 하였다. 이때 가열로 상부에는 슬라브를 모사한 원주형 공시체를 올려놓고 바닥면으로부터 0, 10, 20, 30 및 40 mm 위치에 설치한 열전대를 통해 실시간 시험체의 온도를 측정하는 것으로 계획하였다. 이후 화재시험이 종료된 시점에는 전기톱을 이용하여 온도 측정을 위해 열전대를 삽입했던 유사한 위치 (바닥면으로부터 10 mm 간격)를 선택하여 자르고 분쇄하여 화학분석용 샘플로 만들었다. 이렇게 준비된 샘플은 대표적으로 XRD (X-ray diffraction)와 NMR (Nuclear magnetic resonance) 장비를 이용하여 화학성분을 조사하였고, 시범적으로 열확산 시뮬레이션도 구현하는 것으로 계획하였다.

표 3.6.1 실험계획

실험 요인	실험 수준
물 시멘트비 (W/C)	0.5
시험체 ¹⁾ 사이즈	∅ 100 × 200 mm
가열온도 조건 (가열로의 온도)	· 300°C · 500°C
실측온도 측정위치	· 바닥면으로부터 0 mm · 바닥면으로부터 10 mm · 바닥면으로부터 20 mm · 바닥면으로부터 30 mm · 바닥면으로부터 40 mm
측정사항	· 온도이력 · XRD 분석 ²⁾ · NMR 분석 ²⁾ · 열확산 시뮬레이션 구현

¹⁾ 화재시험 진행 시 원형 철재몰드로 준비된 샘플외부를 강하게 결속시켜 슬라브 조건과 유사한 조건으로 세팅 실시

²⁾ 실험체 실제온도를 측정한 위치에서 화재시험 종료 후 샘플 채취

그림 3.6.3은 본 실험을 진행하기 위해 특수 제작한 가열로의 모습을 나타낸 것이고, 그림 3.6.4는 실험을 진행하고 있는 모습을 나타낸 것이다. 가열로는 앞서 기술한 바와 같이 가열로 상부에 구멍 뚫고 그 위에 제작된 원주형 공시체를 올려놓은 후 강한 철재 몰드를 이용하여 원주형 공시체 외부를 결속시켰다. 실제로 화재에 노출된 슬라브의 경우 한 층 아래 바닥에서 발생한 화염이 슬라브의 밑면 바닥을 뜨겁게 달구면서 열팽창 및 수축압이 걸리는데, 본 실험에서는 이러한 상황을 모사한 것이다.



a. 문을 닫은 모습
(정면)



b. 문 개방한 상태 모습
(정면)

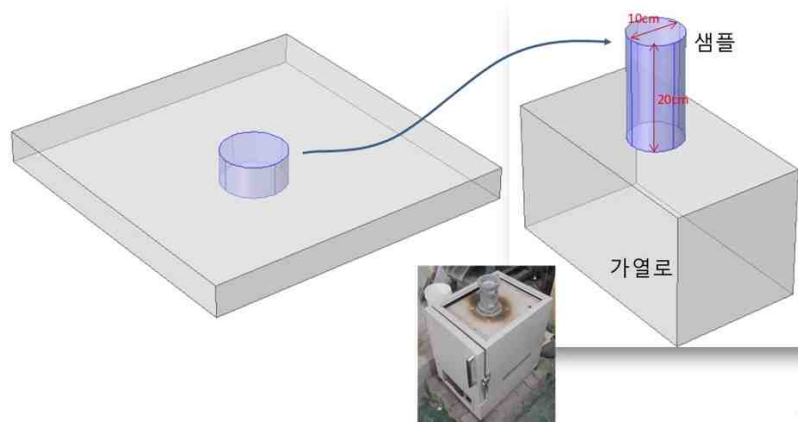


c. 강제 철재몰드가 설치된 모습
(가열로 상부)



d. 원주형 공시체를 철재몰드로 결속시킨 모습
(가열로 상부)

그림 3.6.3 슬라브 조건을 모사하기 위해 제작한 특수 가열로



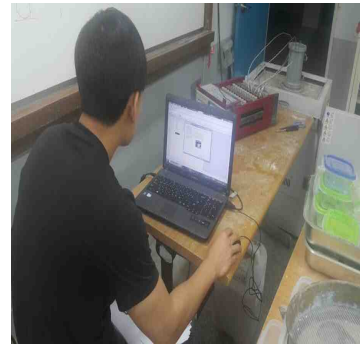
a. 슬라브를 모사한 가열시험의 컨셉 이미지



a. 데이터 로그 설치



b. 열전대 삽입



c. 온도데이터 확인

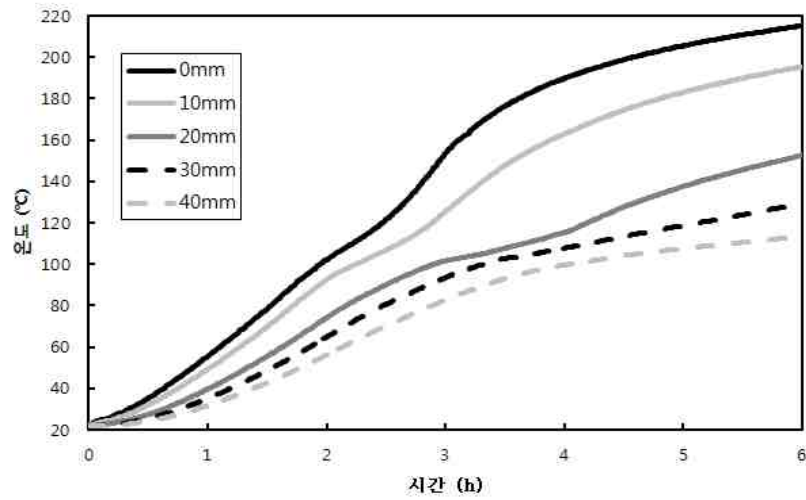
그림 3.6.4 실험진행 모습

5-4 평가실험 결과

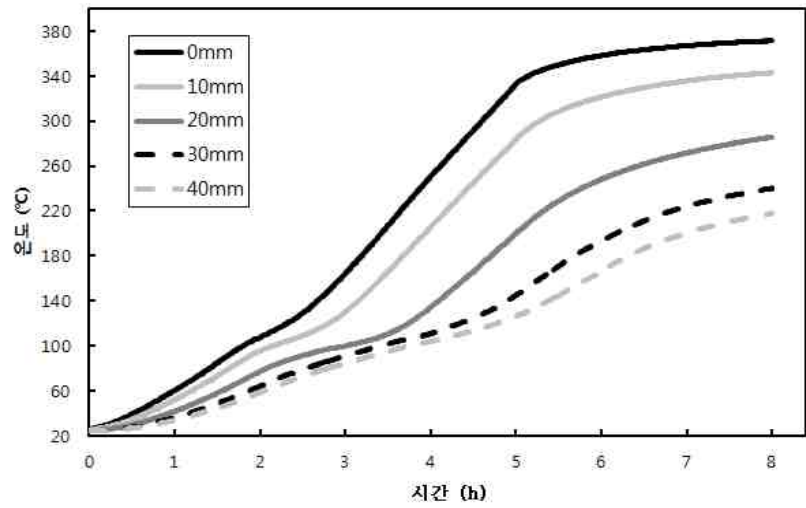
가. Bench 스케일 규모의 화재 실험 결과

그림 3.6.5는 가열시험이 진행되는 동안 샘플 내부에 열전대를 삽입하여 측정한 결과 값을 나타낸 것이다. 먼저 그림 3.6.5a의 가열로 내부의 목표 온도를 300°C 로 설정한 경우에 시멘트 경화체 샘플 최하단 밑면의 온도는 최대 215°C 까지 올라가는 것으로 나타났고, 바닥면으로부터 10 mm 떨어진 위치에서의 온도는 약 195°C 까지 올라가는 것으로 나타났다. 또한, 바닥면으로부터 20 mm, 30 mm, 40 mm 떨어진 위치에서의 온도는 각각 153°C , 130°C , 114°C 를 기록함으로써, 가열로의 온도가 300°C 로 3시간 동안 유지되었을 때 시멘트 경화체 내부의 열확산 속도가 얼마나 되는지 확인할 수 있었다.

또한, 그림 3.6.5b는 가열로 온도를 500°C 로 설정한 후 그림 3.6.5a와 동일한 조건의 샘플을 대상으로 동일한 위치에서 측정한 값을 나타낸 것이다. 샘플 밑면의 온도는 최고 371°C 까지 올라가는 것으로 나타났고, 바닥면으로부터 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm에서 측정한 온도는 각각 343°C , 289°C , 240°C , 218°C 를 기록하여 그림 3.6.5a의 결과 값과 비교하여 비교적 높은 온도를 나타내었다.



a. 300°C 노출 결과



b. 500°C 노출 결과

그림 3.6.5 열전대를 삽입하여 실제 측정한 시멘트 경화체의 내부 온도

나. 표준화디렉터리에 기반한 화재피해온도예측 기술 적용 결과 (개발 기술)

① XRD (X-ray diffraction)의 표준화 디렉터리와 매칭한 결과

그림 3.6.6은 온도를 300°C까지 올린 가열로에 노출된 시험체로부터 채취한 샘플을 이용하여 가열부로 부터의 거리별로 XRD 패턴을 분석한 결과를 나타낸 것으로 다음과 같은 특징이 관찰되었다.

- 0 ~10 mm 구간 샘플: Ettringite 소멸, Gypsum 소멸
- 10 ~20 mm 구간 샘플: Ettringite 소멸, Gypsum 소멸
- 20 ~30 mm 구간 샘플: Ettringite 소멸, Gypsum 소멸
- 30 ~40 mm 구간 샘플: Ettringite 소멸, Gypsum 소멸

이상에서 얻은 결과를 표준화디렉터리에서 확인한 결과 샘플의 모든 위치에서 300°C의 화재 피해를 받은 것으로 예측되었는데, 이를 실측한 온도 (그림 3.6.5a)와 비교해보면 표 3.6.2와 같다.

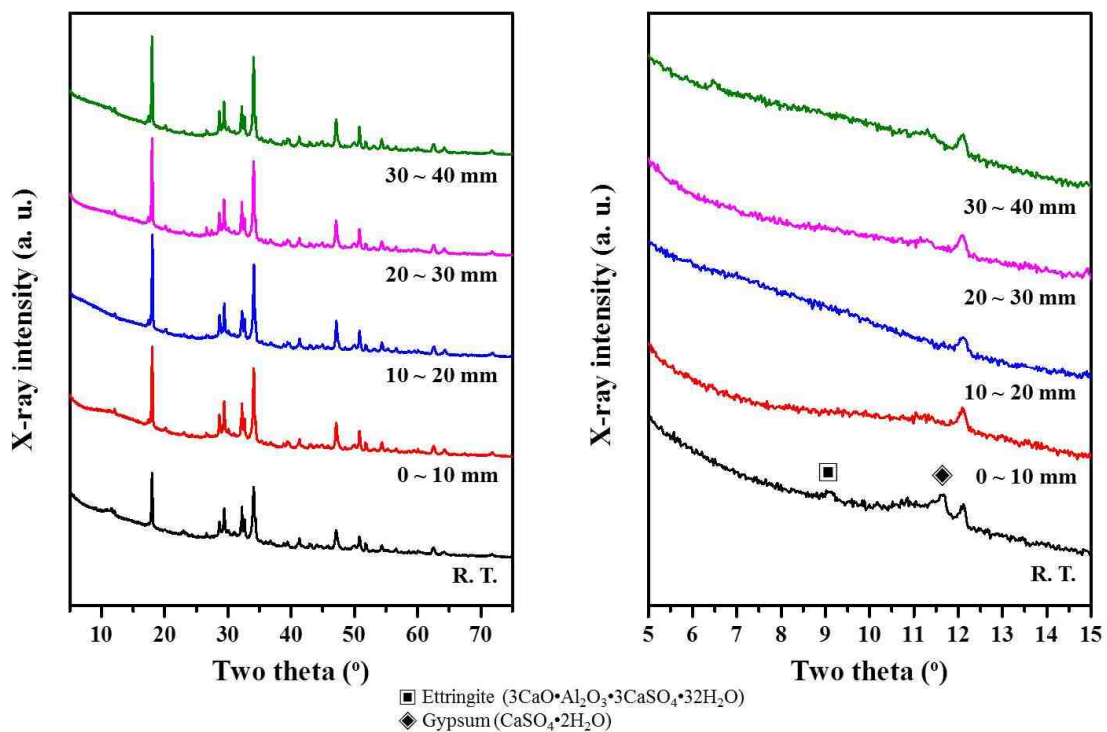


그림 3.6.6 300 °C 열처리 시멘트 경화체의 가열부로 부터의 거리별 XRD 패턴 비교

표 3.6.2 XRD 분석을 통한 화재피해 예상 온도와 실제 측정 온도 비교

바닥면으로부터 떨어진 거리 (mm)	표준화디렉터리 (°C)	실제 온도 (°C)
0 ~ 10	300	195.4 ~ 215.2
10 ~ 20	300	152.6 ~ 195.4
20 ~ 30	300	129.5 ~ 152.6
30 ~ 40	300	113.6 ~ 129.5

위의 표 3.6.2에서 확인할 수 있는 바와 같이 본 연구에서 개발한 표준화디렉터리에 기반한 ‘화재피해온도예측기술’로 예측한 화재 피해 온도와 실제 측정온도에서는 100 °C ~ 200 °C 범위의 오차가 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 고온에 노출된 각 샘플의 온도 유지시간의 차이로 발생한 것으로 판단되는데, 표준화디렉토리를 구축하기 위해 실시한 실험에서는 사전에 샘플을 미분쇄하여 고운 파우더 상태로 만든 후 실험을 진행하였고, 실험이 진행되는 동안에도 빠른 승온속도로 가열하여 목표한 온도에 도달했을 경우 20분간만 유지하였다. 그러나, Bench scale 규모의 화재실험에서는 서서히 온도를 가열하였고, 목표 온도에 도달하였을 경우 3시간 동안 유지하였다. 즉, 300 °C 화재 피해를 판단하는 Gypsum 구조와 Ettringite 구조는 모두 배워된 수분의 제거로 인하여 구조가 사라지는 것으로 알려져 있는데 이러한 수분이 날라 갈수 있는 110 °C 이상에서 오랜 시간 열처리를 통하여서도 충분히 제거 될 수 있다. 이것으로 인하여 예상 온도 보다 낮은 온도 이긴 하지만 오랜 시간 가열로 수분이 제거 돼서 300 °C의 마커인 Gypsum이 사라져 예상 온도와 실제 온도의 차이가 발생한 것으로 판단된다.

한편, 그림 3.6.7은 500 °C까지 온도를 올린 가열로에 노출된 시험체로부터 채취한 샘플을 이용하여 XRD 패턴을 분석한 결과를 나타낸 것으로 다음과 같은 특징이 관찰되었다.

- 0 ~10 mm 구간 샘플: Quartz low 생성, Ettringite 소멸, Gypsum 소멸
- 10 ~20 mm 구간 샘플: Ettringite 소멸, Gypsum 소멸
- 20 ~30 mm 구간 샘플: Ettringite 소멸, Gypsum 소멸
- 30 ~40 mm 구간 샘플: Ettringite 소멸, Gypsum 소멸

이상의 결과를 표준화디렉터리에서 확인한 결과 샘플의 최하단인 밑면의 경우는 400 °C의 화재 피해를 받았고, 나머지는 300 °C의 화재 피해를 받은 것으로 예측되는데, 이를 실측한 온도 (그림 3.6.5b)와 비교해보면 표 3.6.3과 같다.

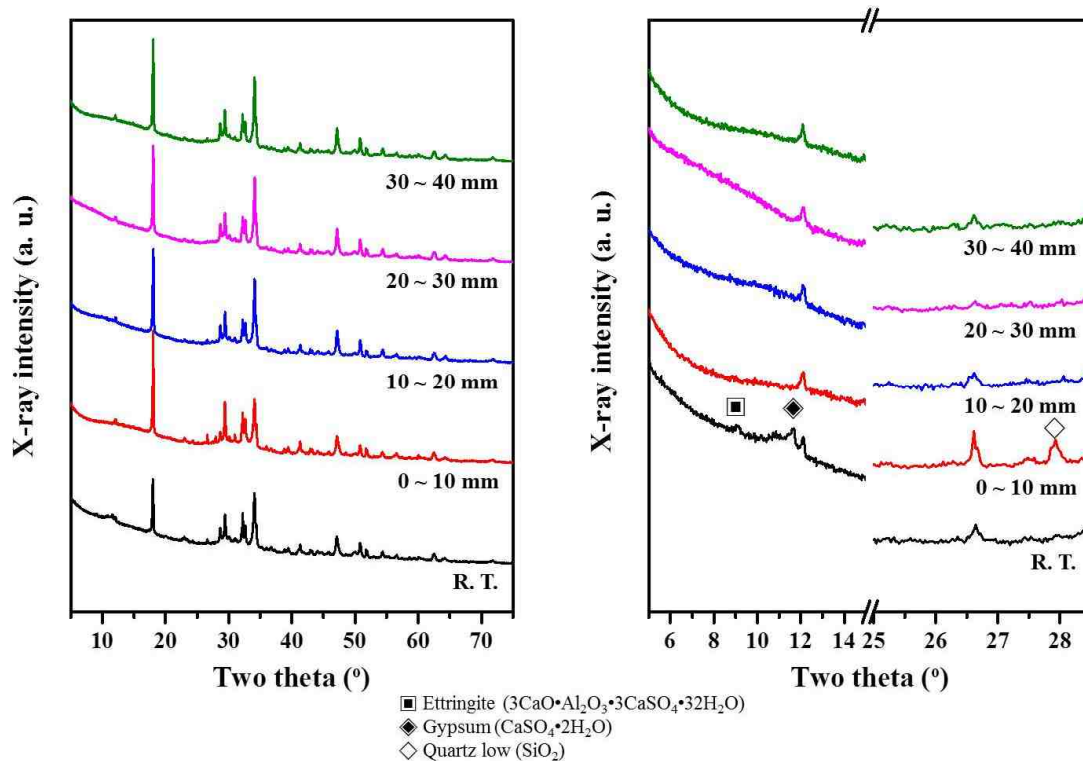


그림 3.6.7 500 °C 열처리 시멘트 경화체의 가열부로 부터의 거리별 XRD 패턴 비교

표 3.6.3 XRD 분석을 통한 화재피해 예상 온도와 실제 측정 온도 비교

바닥면으로부터 떨어진 거리 (mm)	표준화디렉터리 (°C)	실제 온도 (°C)
0 ~ 10	400	343.0 ~ 371.4
10 ~ 20	300	285.7 ~ 343.0
20 ~ 30	300	240.2 ~ 285.7
30 ~ 40	300	217.8 ~ 240.2

위의 표 3.6.3을 비교·분석해 본 결과 표준화디렉터리에 기반하여 예측한 온도와 실제측정온도는 72% ~ 93% 범위의 예측율을 기록하였는데, 저온보다는 고온에서 예측율이 높게 나타나는 특성을 확인하였다. 이러한 이유는 수분 증발이 다량으로 발생하는 저온 구간에서는 해당온도에서 얼마나 오랫동안 노출되었는지의 여부가 화학성분 분해에 영향을 미치기 때문인 것으로 분석된다. 본 연구에서 이런 저온 영역대에서 예측확률이 낮은 것은 표준화 디렉터리 구축시 목표온도 도달 후 온도유지시간을 20분으로 짧게 설정하였고, 실제 bench scale 규모의 화재실험에서는 3시간 이상 유지되었기 때문에 기인한 결과로 분석된다.

② NMR (Nuclear magnetic resonance)의 표준화 디렉터리와 매칭한 결과

그림 3.6.8 ~ 3.6.10은 NMR 분석을 통해 구축한 표준화디렉터리와 앞서 논의된 바와 같이 Bench scale 규모의 화재실험으로부터 실측한 온도결과를 비교하여 나타낸 것으로 본 연구를 통해 개발한 화재온도예측기술의 예측율을 검토하고자 하였다. 참고적으로 NMR 측정결과는 하나의 온도조건에서 6~7개의 Q_0 , Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 등이 반복되면서 그래프가 그려지는데, 표준화디렉터리에서 구축한 데이터와 실측해서 얻은 결과값이 동일하게 일치하기 위해서는 이상의 6~7개 그래프가 모두 부합되어야 하므로 그 만큼 높은 정밀성을 필요로 하는데, 여기서 논의되는 Lorentzian distribution peak fitting 그래프는 6~7개에 해당하는 그래프의 center ppm 값을 선택하여 fitting한 결과를 나타낸 것이다.

먼저, 그림 3.6.8에서는 상온 데이터를 비교하였는데, 6개의 center ppm구간에서 차지하는 면적이 표준화디렉터리 값과 비교하여 대부분 80%이상 일치하는 것으로 나타났다.

그림 3.6.9는 Bench scale 규모의 화재실험에서 가열로 내부 온도 300°C에 노출되었던 샘플의 바닥 위치 (샘플의 바닥면 0 mm ~10 mm 구간에서 채취한 샘플)에서 측정한 온도와 표준화디렉터리에서 구축한 데이터를 비교·분석하여 나타낸 것이다. $Q_0 \sim Q_4$ 총 7개의 그래프가 그려졌는데, 해당 center ppm 면적을 비교한 결과 대부분 80% 이상 일치하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 그림 3.6.10의 가열로 내부온도 500°C에 노출된 샘플의 경우도 유사하게 높은 비율로 일치하는 것으로 나타나 NMR을 이용한 표준화디렉터리 분석을 실시할 경우 높은 비율로 화재피해온도예측이 가능할 것으로 기대된다.

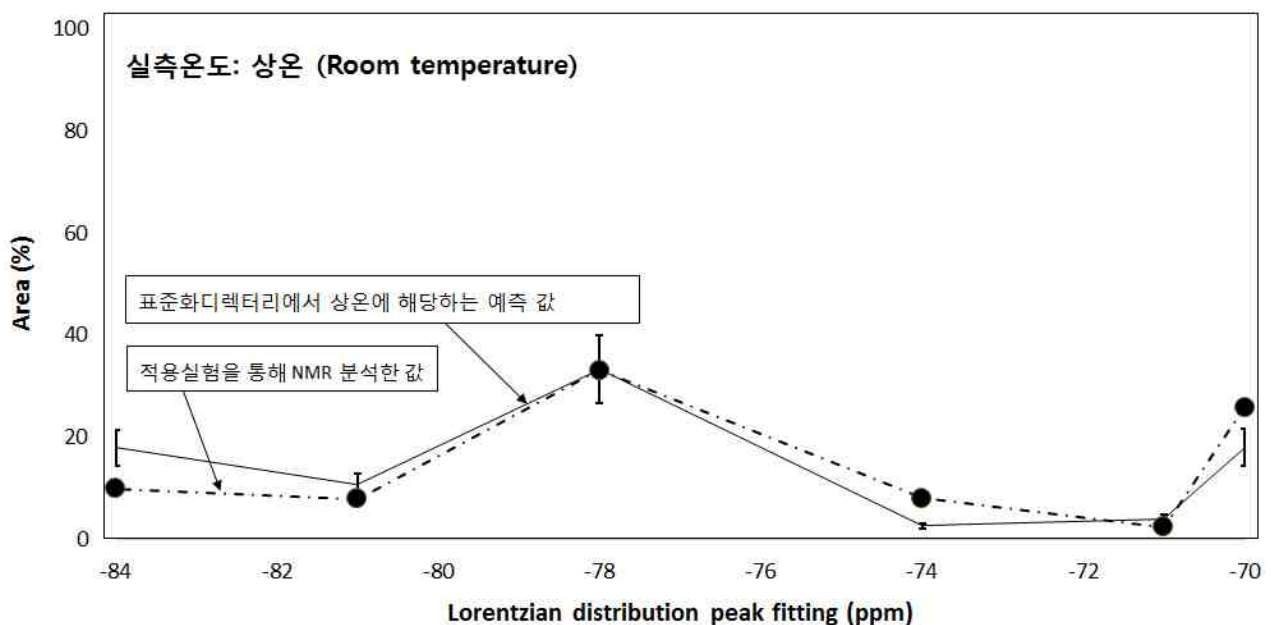


그림 3.6.8 상온 vs 표준화디렉터리 상온

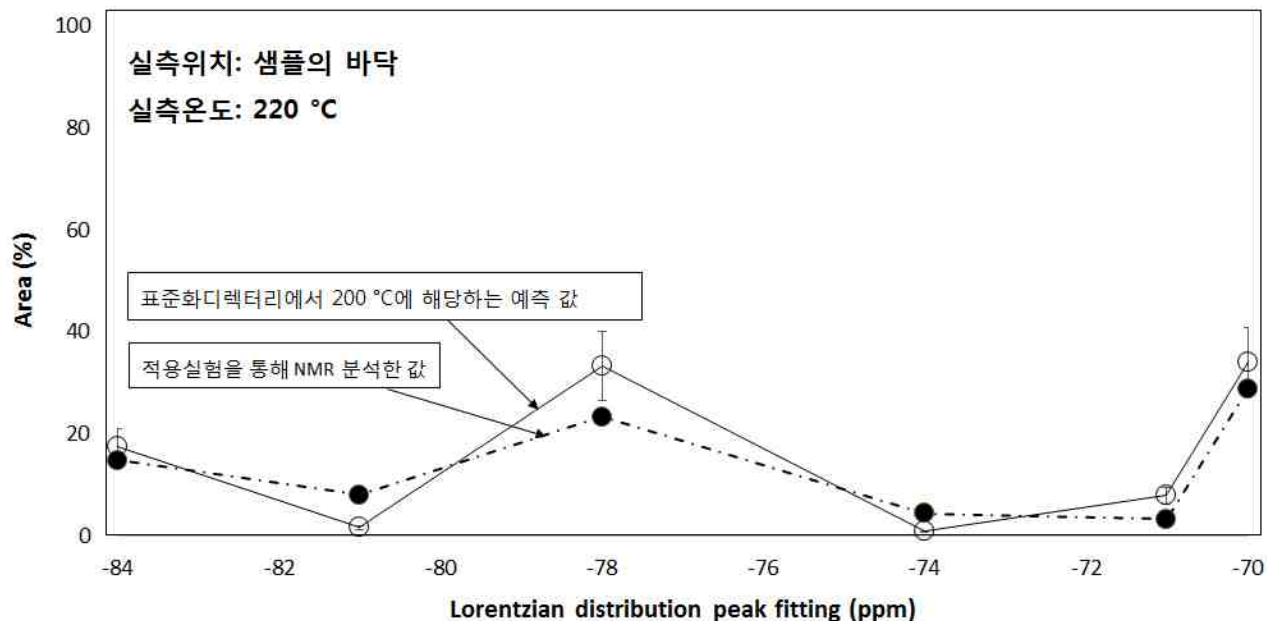


그림 3.6.9 실측온도 220°C vs. 표준화디렉터리 200°C

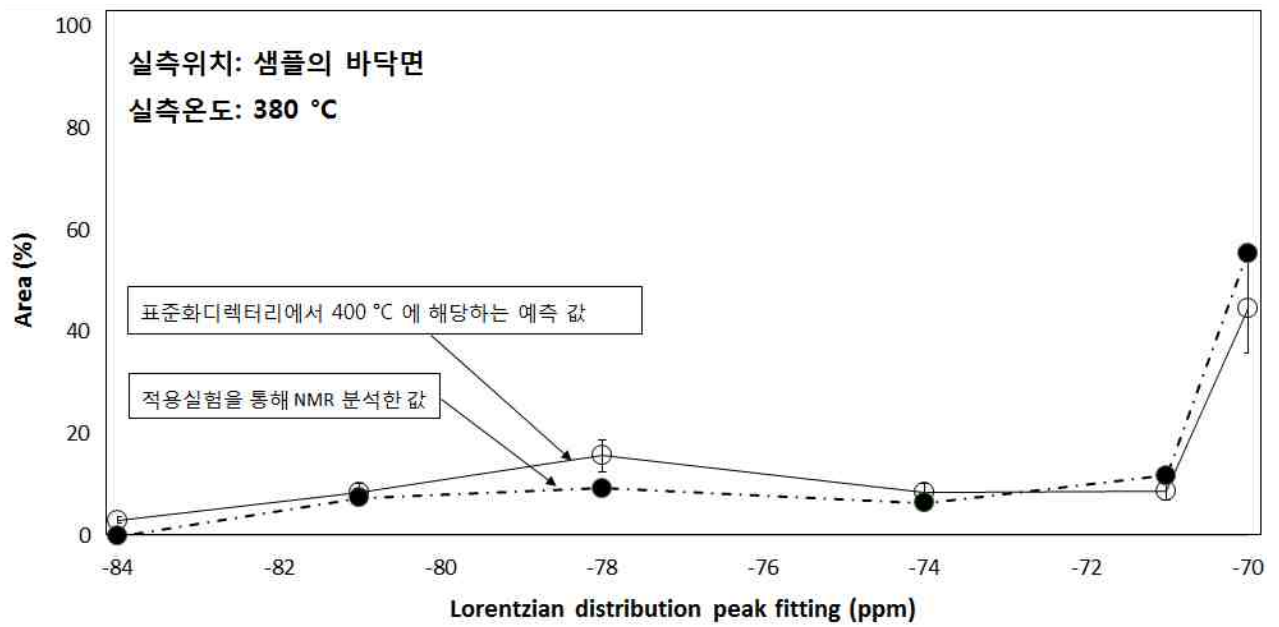
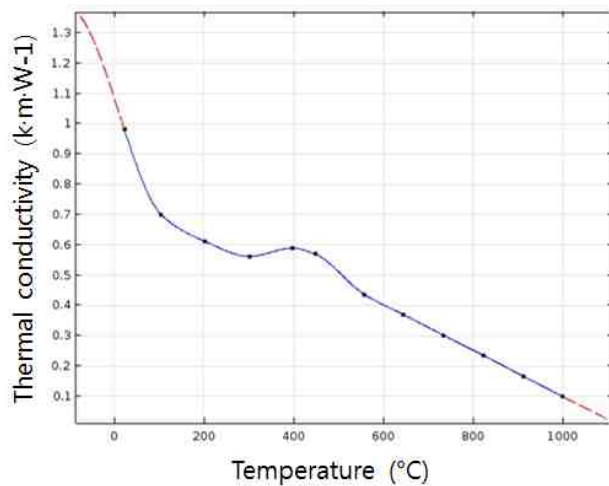


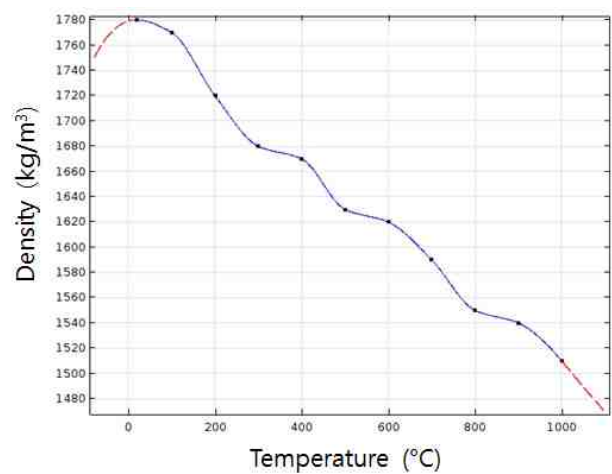
그림 3.6.10 실측온도 380°C vs. 표준화디렉터리 400°C

다. 시뮬레이션 구현

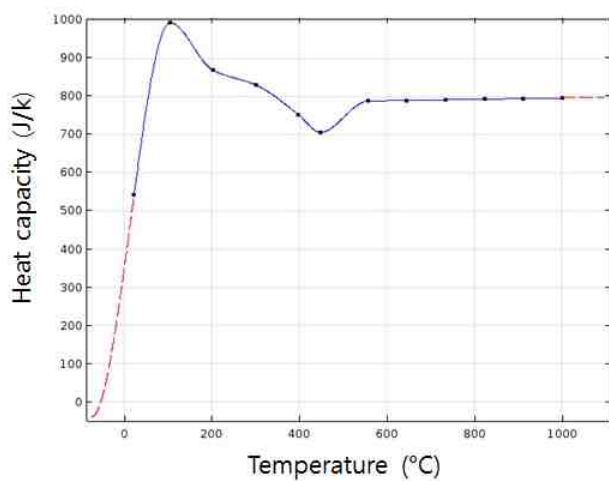
그림 3.6.11은 화재발생시 시멘트 페이스트 경화체 내의 온도분포를 시뮬레이션으로 구현하기 위해 사전실험을 통해 얻은 데이터를 그래프화하여 나타낸 것이다. 시멘트 경화체의 열전도도, 밀도, 열용량 및 공극률이 온도 변화에 따라 변화하는 것을 확인할 수 있다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 온도변화에 따라 각종 재료의 물성이 비례적으로 증가하거나 감소하지 않고, 특정온도에서 급격히 변하는 것은 시멘트 경화체의 고유한 특성으로 온도가 올라감에 따라 수분이 증발하고, 화학적 결합수가 떨어져 나오며, 공극이 붕괴되는 현상들이 다양하게 영향을 주는 것으로 분석된다.



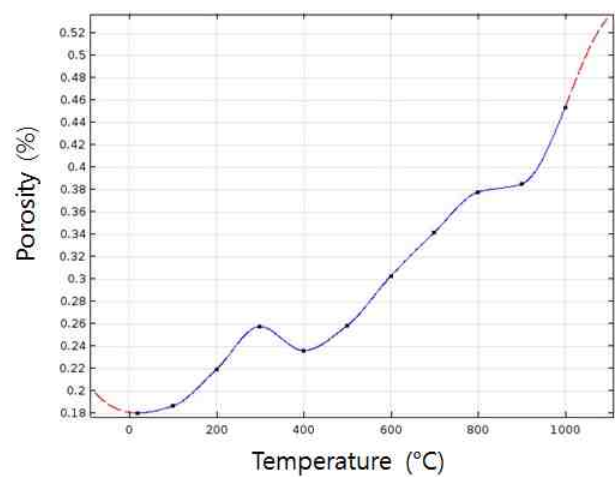
a. 열전도도, $k = f(T)$



b. 밀도, $\rho = f(T)$



c. 열용량, $C_p = f(T)$



d. 공극률, $\theta = f(T)$

그림 3.6.11 온도조건 변화에 따른 시멘트 경화체의 물성 테스트 결과 (실측 데이터)

시뮬레이션 구현을 위해 수분은 시멘트에 포함된 샘플을 기반으로 측정하였고, 해석 적용 시간은 앞서 Bench scale 규모의 화재실험에서 진행한 바와 유사하게 진행하였다. 다만, 앞서 화재실험에서는 가열로의 온도를 기준으로 실험이 진행되었으나, 해석에서는 시험체의 밑면의 온도를 기준으로 하여 목표온도 도달 후 3시간 유지하는 것으로 하였다.

해석조건은 다음과 같이 3가지 경계조건으로 진행하였다.

- 샘플 상단부 경계조건: Thermal insulation, Heat flux
- 샘플 측면부 경계조건: Thermal insulation
- 샘플 하단부 경계조건: Exposure to 100°C ~ 1000°C

Heat flux (샘플 상단):

$$h = \begin{cases} \frac{k}{L} 0.54 Ra_L^{1/4} & \text{if } 10^4 \leq Ra_L \leq 10^7 (Laminar) \\ \frac{k}{L} 0.15 Ra_L^{1/3} & \text{if } 10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11} (Turbulent) \end{cases}$$

$$Ra_L = \frac{g \alpha_p \rho^2 C_p |T - T_{ext}| L_3}{k \mu}$$

그림 3.6.12는 가열로 상단에 샘플을 설치한 후 Heat flux 고려 여부에 따른 해석 값을 비교하여 나타낸 것이다. 샘플 밑면의 온도가 증가할수록 heat flux 고려여부의 영향성은 점점 커지는 것을 확인할 수 있다. Bench scale 규모의 화재실험은 실제 화재현장의 슬라브 조건을 모사한 것이므로 시뮬레이션 구현시에도 heat flux를 고려하여 해석하는 것으로 하였다.

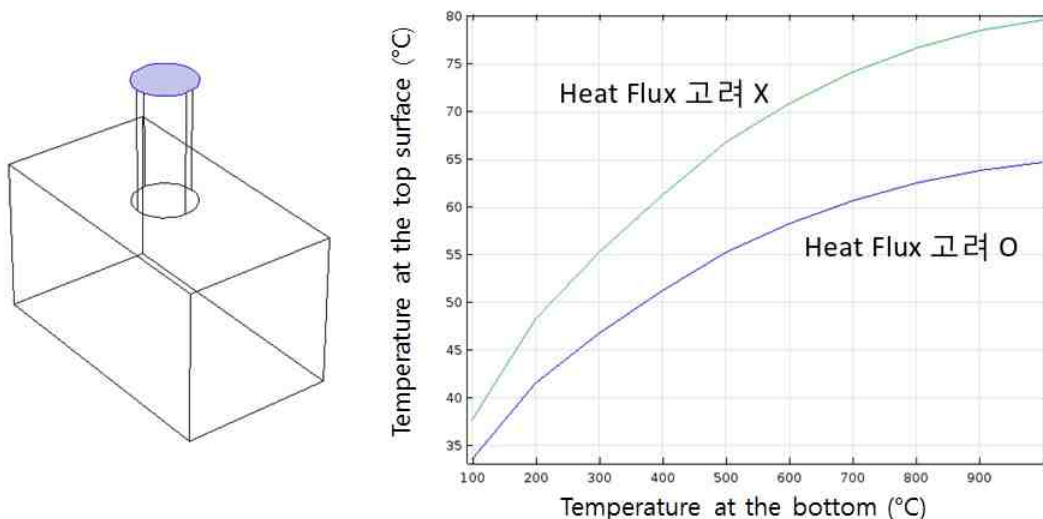


그림 3.6.12 Heat flux 고려여부에 따른 해석 값

그림 3.6.13 ~ 3.6.14는 해석결과를 나타낸 것이다. 먼저 그림 3.6.13은 샘플 밑면의 온도가 100°C ~ 1000°C 일 때의 온도분포 결과를 나타낸 것이다. 화재실험과 달리 샘플 전체에 대해서 해석을 실시하였는데, 샘플의 높이가 높아질수록 급격히 온도가 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.

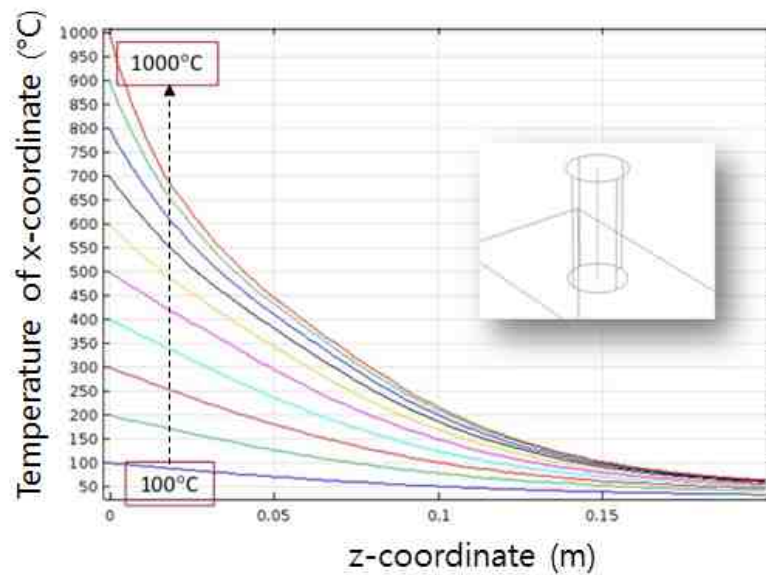


그림 3.6.13 온도조건별 열전도 해석 결과 (수직방향)

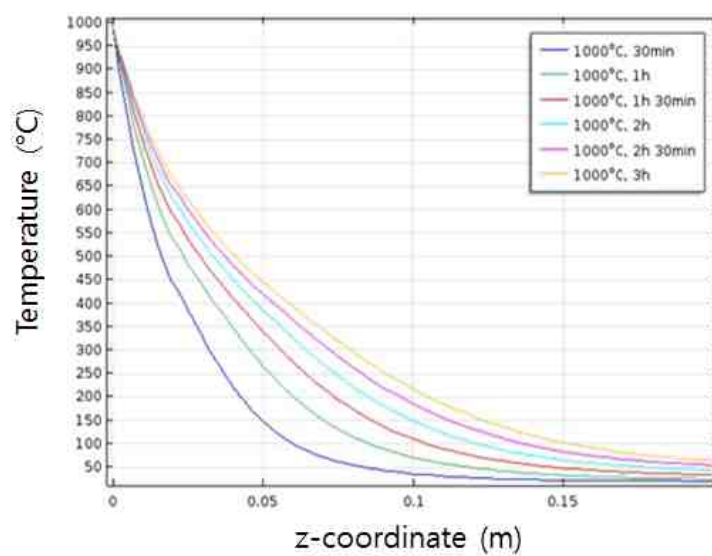


그림 3.6.14 노출 시간별 1000°C 조건에서의 열전도 해석 결과 (수직방향)

표 3.6.4는 Bench scale 규모의 화재실험에서 측정한 실측온도와 시뮬레이션 구현을 통한 해석온도 그리고 본 연구에서 개발한 표준화디렉터리 예측온도를 비교하여 나타낸 것이다. 표에서 확인할 수 있듯이 실측온도와 표준화디렉터리 예측온도는 일치하는 것으로 나타났고, 해석온도와는 예측율 80%이상의 높은 상관관계를 확인할 수 있었다.

표 3.6.4 실측값 vs. 해석값 vs. 표준화디렉터리 예측 온도 비교

실측 온도 (°C)	해석 온도 (°C)	표준화디렉터리 예측 온도 (°C)	비고
200 (가열로 500°C에 노출된 샘플의 바닥면으로부터 40 mm 위치)	250	200 (NMR)	예측율 80% 이상

5-5 소결

본 절에서는 화재손상 콘크리트 구조체의 피해규모 조사 시스템을 구축하기 위해 연구수행 중 확보한 표준화디렉터리의 활용방법을 제시하였고, 개발된 화재피해온도 예측기술의 예측 정확성을 검토하기 위해 Bench scale 규모의 화재실험을 진행하였으며, 화재에 노출된 슬라브를 모사한 시뮬레이션을 구현하여 실측값, 해석값, 예측값을 비교분석하였다.

화재피해온도를 예측하는 것은 화재손상을 입은 구조체의 잔존 성능을 진단하는데 필요한 핵심 기술로써 수많은 국내·외 연구자들에 의해 시도 되었으나, 아직까지 뚜렷한 성과를 이루어내지 못한 기술에 해당된다. 콘크리트의 원재료인 시멘트를 생산하는 과정과 현장에서 물과 믹싱하여 건설물을 시공하는 과정 중 다양한 화학성분들이 생성되는데, 본 연구에서 제안하고 있는 화재피해온도예측기술은 이를 역으로 추적함으로써, 시멘트 경화체 내부에 잔존하고 있는 수화물 (hydration product)과 소실된 각종 화학성분들의 조사함으로써 원하는 목적을 달성하고자한 새로운 기술이다.

본 연구에서 개발한 화재피해온도 예측기술을 검토해 본 결과 실측데이터와 비교하여 예측율 80%이상의 높은 상관성을 나타냈고, 시뮬레이션의 구현성도 높은 것으로 나타났다.

향후 화재현장에 투입될 경우에는 본 연구에서 개발한 화재피해온도 예측기술을 적용하여 1차적으로 샘플채취 구간의 온도를 예측한 후 이를 시뮬레이션 구현에 활용하여 잔존수명평가기술과 함께 화재현장을 Full scale로 조사할 수 있을 것으로 기대된다.

7. 결론

7-1 개요

화재의 발생으로 피해를 입은 건설 구조물을 대상으로 실시하는 과학적인 화재조사 (F2IS: Fire forensic investigation of structure)는 건설물 유지관리 측면에서 매우 중요한 분야에 해당되지만, 그 중요도에 비해 지금까지 조사가 제대로 이루어지지 않았다. 화재손상을 입은 구조체는 눈에 보이는 외부의 손상보다 내부의 공극구조 파괴가 잔존수명을 결정짓는 핵심 요소이므로 과거 슈미트 햄머 등 표면손상여부만 체크하여 화재진단하는 방법은 올바른 화재진단이라 할 수 없다. 또한, 기존의 중성화시험을 통해 화재피해온도를 예측하는 것은 피해온도가 500°C ~ 600°C 이상일 경우에만 확인이 가능하므로 이 역시 올바른 화재조사 방법에 해당되지 않는다.

국외 화재조사에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 다각도에서 연구가 진행되고 있는데, 해외사례에서 조차 화재 노출 후 시멘트 경화체 및 콘크리트 구조물의 2차 거동에 의한 팽창거동을 고려하지 못하고 있어 화재조사를 통한 구조물의 피해를 정확히 예측하지 못하고 있다. 물론, 시멘트 경화체의 2차 팽창거동은 문헌에서 일부 보고 되었고, 이를 현실적으로 제도에 반영하기 까지는 많은 시간이 소요될 것으로 판단되지만, 국내의 경우는 이를 고려하려는 움직임이 없기 때문에 향후 기술격차가 발생할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 위의 문제를 해결하기 위해 화재손상을 입은 콘크리트 구조물의 중·장기 2차 거동을 예측하고, 잔존 내구성을 평가할 수 있는 세계적인 수준의 원천기술 개발을 최종 연구목표로 설정하였다.

이를 달성하기 위해 콘크리트 원재료의 열거동을 분석하였고, 100°C ~ 1000°C에 노출된 시멘트 경화체의 화학분석을 실시하여 표준화디렉터리를 구축하였으며 1차 단계의 연구목표인 화재피해온도 예측기술을 개발하였다. 2차 단계에서는 해당온도에서의 잔존성능을 확인하기 위해 100°C ~ 1000°C에 노출된 시멘트 경화체의 공극구조 분석, 균열거동 규명, 촉진중성화 분석 등 해당 온도에서의 거동특성을 분석하여 데이터베이스를 구축하였으며, 3차 단계에서는 이를 기존에 연구자들에 의해 제안된 잔존수명 평가방법과 연계하여 최종적으로 기술을 완성하였다. 본 연구를 통해 구축한 표준화디렉터리는 앞서 기술한 바와 같이 100°C ~ 1000°C 범위에서의 화학적 특성 및 공극구조 특성 뿐만 아니라 대기 중 재령이 경과하면서 해당 표준샘플의 2차 팽창거동에 따른 영향성도 함께 포함하고 있는데 이상의 연구수행을 통해 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

7-2 결론

가. 화재손상 콘크리트 구조체의 화재피해온도 예측 기술 개발

화재손상규모를 올바르게 평가하기 위해서는 가장 첫 번째 단계로 화재피해온도를 정확히 예측할 수 있어야 하는데, 본 과제에서 개발한 기술은 손쉽고, 간단히 구조체 깊이별 100°C 단위의 정확성으로 피해온도 예측이 가능한 것으로 확인되었다. 다만, 저온에 노출된 400°C 이하에 노출된 경우에는 예측 오차가 발생하는 것으로 확인되었는데, 이는 표준화디렉터리 구축과정 중 세팅되었던 화재노출 조건과 실제로 적용실험에서 현장여건과 유사한 상황에서 의 조건이 달랐기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

그러나 본 연구를 수행하면서 사용한 화학분석 장비를 동시에 가동시켜 분석할 경우 이러한 예측 오차를 크게 줄일 수 있을 것으로 분석되었다. 물론 화재온도 노출 조건과 관련해서는 향후과제에서 추가 데이터를 구축할 경우 간단하게 해결할 수 있을 것으로 기대되는데, 본 연구에서의 실험결과만으로도 예측율 70~80%를 기록하였다. 본 연구에서 화재피해온도 예측용 표준화디렉터리를 구축하기 위해 사용한 화학 분석 장비는 다음과 같다.

- XRD (X-ray diffraction)
- XRF (X-ray fluorescence)
- NMR (Nuclear magnetic resonance)
- FT-IR (Fourier transform infrared spectroscopy)

나. 화재손상 콘크리트 구조체의 중·장기 2차 팽창 거동 규명

화재피해온도를 예측한 후 다음 단계에서는 해당온도에서의 피해규모를 평가하는 것이 필요한데, 본 연구에서는 시멘트 경화체의 마이크로 공극구조를 분석하였고, 균열거동 메커니즘을 규명하였다. 특히, 화재 노출 후 대기 중 상온에서의 2차 팽창거동을 검토하기 위해 재령별 공극구조 특성과 균열발생, 균열의 확산 등을 최대 6개월까지 지속적으로 모니터링 함으로써 학자들 사이에서 논란이 되어왔던 문제를 해결할 수 있는 결정적인 증빙자료를 제공할 수 있게 되었고, 세계 최초로 그 영향성을 건설 구조물의 화재조사시 반영할 수 있는 근간을 마련할 수 있게 되었다.

화재 노출 초·중·후기 시멘트 경화체의 마이크로 공극구조의 변화거동 특성을 모니터링 하기 위해서는 MIP (Mercury intrusion porosimetry) 분석을 진행하였는데, 일부 문헌에서 제기되었던 수은압입 과정 중 공극의 붕괴현상을 막기 위해 별도의 주의를 기울여 실험을 진행하였다. 한국에서 진행된 MIP의 분석결과를 검토하기 위해 동일한 조건에서 제작된 샘플

플을 일본 Tokyo 대학교 연구팀에 의뢰하여 그 실험결과를 비교하였는데, 두 연구기관에서 측정한 실험결과의 경향성이 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

또한, 화재노출 초·중·후기 시멘트 경화체의 균열거동 메커니즘을 규명하기 위해서 고해상도의 X-ray CT (Computed tomography) 장비를 이용하였다. 화재에 노출된 샘플의 단층 구조를 수백 장의 slide로 촬영하였고, 내부 전체 구조를 3D 이미지로 구현하여 재령별 균열의 발생, 확산, 붕괴를 육안으로 직접 관찰함으로써 목표한 연구 목적을 달성할 수 있었다.

다. 화재손상 콘크리트의 잔존수명 평가 기술 개발

화재에 의해 피해를 입은 콘크리트의 잔존수명 평가는 100 ~ 1000°C 구간 중 해당 화재 피해온도에 샘플을 노출시킨 후 촉진 중성화 시험을 통해 얻은 결과를 활용하였다. 콘크리트의 잔존수명과 관련한 연구는 이미 수십 년 동안 많은 학자들에 의해 연구되었기 때문에 본 연구에서는 화재피해온도 예측에 연구역량을 집중시켰고, 잔존수명 평가는 유럽에서 활용되고 있는 방법을 이용하였다. 이로써 본 연구를 통해 두 개의 학문영역으로 구분되었던 콘크리트의 내구성 분야와 화재분야를 연결시킬 수 있는 구심점 역할을 수행했다는 점에서 의미가 있고, 화재분야의 적용성 검토는 시간을 두고 현장여건 등을 고려하여 수정 및 보완해 나가야 할 것으로 판단된다.

7-3 향후 과제

화재 발생지에서 구조물에 대한 과학적인 화재조사 (F2IS)는 궁극적으로 구조물의 현 상태를 정확히 논리적인 근거에 입각하여 조사한 후 구조물 전체를 다시 지어야할지 아니면 보수보강을 통해 다시 사용할지를 결정하고, 보수보강을 한다면 그 적정수위를 판단하는데 필요한 정보를 얻기 위함이다. 따라서 F2IS가 완료된 후에는 적절한 보수보강 방법을 제안할 수 있어야 한다. 그러나 이 역시 원천기술의 부재로 국내 현자에 직접 적용에 어려움이 있으므로 이에 대한 검토가 필요하다.

즉, 병원에서 의사가 혈액검사를 통해 환자의 건강 상태를 파악하여 처방전을 써주듯이 화재피해를 입은 콘크리트 구조체의 표면에서 샘플 채취를 통해 간단하고, 빠르게 구조체의 잔존 내구성능을 예측한 후 올바른 보수보강 치료제를 처방하여 화재손상 구조물의 내구수명을 일반구조물의 수준으로 유지시키거나 증진시킬 수 있는 기술 개발이 필요하다.

향후 이상에서 제안한 기술이 완성될 경우에는 국민들에게 화재원인 규명부터 보수보강 방법 제안 및 평가까지 화재조사 패키지 기술 서비스를 제공할 수 있을 것으로 기대해본다.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

번호	세 부 연 구 목 표	달 성 내 용	달성도(%)
1	화재노출 초·중·후 콘크리트 원재료의 물리적 거동 특성 규명	· 콘크리트 원재료의 열거동 특성 규명 · 화재노출 후 대기 중에서의 2차 팽창거동 증명	95
2	고온에 노출된 시멘트 경화체의 중·장기 화학적 특성 규명	· 화재피해온도 예측을 위한 표준화 디렉터리 개발	90
3	고온에 노출된 시멘트 경화체의 중·장기 공극구조 및 균열 거동 특성	· 화재피해온도조건별 고유한 공극구조 변화 특성 규명 · 화재노출 후 재령변화에 따른 균열 거동 특성 규명	90
4	고온에 노출된 콘크리트의 탄산화 특성 및 잔존내구성 평가	화재피해온도조건별 잔존수명 평가 기술 개발	80
5	열확산 시뮬레이션 구동 및 화재조사 기술의 적용성 실험 평가	· 화재피해규모 예측·평가 시스템 개발	80

2. 관련 분야 기여도

2-1 과학·기술적 파급효과

본 연구의 성과물으로써 잔존내구성 평가기술은 화재피해를 입은 콘크리트 구조체의 2차 거동 분석 및 해석 기술을 포함하고 있는데, 이를 화재진단 매뉴얼에 포함시키게 된다면 보다 발전된 방법으로 구조물의 잔존내구성을 평가할 수 있게 된다.

잔존내구성 평가기술은 표준화 디렉터리 (화학성분, 온도이력, 공극구조, 잔존내력 및 내구성능과의 상호 관계를 정의)를 포함한 일련의 시스템으로 구성되어 있기 때문에 보다 간단하고, 빠르게 화재진단을 실시할 수 있는 세계최초 원천기술로써, 후속연구인 보수·보강 기술과 접목된다면 해외 기술수출도 기대할 수 있다.

2-2 경제·산업적 파급효과

화재피해를 입은 콘크리트 구조체의 잔존내구성 평가기술은 순수한 국내기술로써 국외 기술

을 대체하여 외화낭비를 줄일 수 있다 (외화낭비 예: 지난 2003년 대구 지하철 역사 화재 사건 ← 일본전문가를 초빙하여 화재진단 실시)

본 연구의 잔존내력평가기술을 이용한다면 화재피해를 입은 콘크리트 구조물의 변화된 라이프사이클을 예측할 수 있고, 이를 통해 부실한 보수·보강으로 발생할 수 있는 구조체의 수명 저하를 차단하여 조기 재건축비용을 절감할 수 있다

또한, 경우에 따라 보수·보강 비용을 너무 높게 요구할 경우에도 이를 사전에 예방하여 경제적 손해를 막을 수 있다.

2-3 국가·사회적 파급효과

화재손상 콘크리트 구조물에 대한 과학적 진단을 통해 구조물의 안전성을 확보할 수 있으므로 국민들의 거주에 대한 불안감을 해소할 수 있고, 궁극적으로 삶의 질을 향상시킬 수 있다.

화재피해를 입은 콘크리트의 잔존 수명을 예측하여 구조물의 경제적 가치를 환산하는데 중요한 자료로 활용될 수 있다.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 화재조사 분야 A부터 Z까지의 패키지 원천 기술 개발

제안 과제를 통해 도출된 성과물인 화재손상 콘크리트 구조물의 중·장기 2차 거동 예측 및 잔존 내구성을 30일안에 평가할 수 있는 세계최초 원천기술은 화재조사 분야에서 활용성 대단히 크다.

여기서 화재조사 분야는 아래와 같은 성격을 가지고 있다.

- 화재의 발생원인과 화재에 의한 피해 조사
- 화재 방지 및 피해 최소화와 관련한 분야 (화재안전설비 및 감리, 화재안전구조, 화재안전재료, 소방, 첨단화재안전기술, 컨설팅 등)에 기초지식 제공
- 화재관련 모든 연구의 출발선에 해당되며, 화재관련 전문지식의 종합 창구
- 즉, 단순히 화학분석, 물리분석 등에 의한 화재원인 규명만을 대상으로 하기보다는 화재공학, 전기공학, CFD (computational fluid dynamics)의 배경이론을 가지고 보다 전문적으로 화재확산 시뮬레이션 분석, 건축물의 공간분석, 실사이즈 재현실험 결과 분석, 건설 구조재료의 열적거동 분석 등이 함께 이루어짐
- 화재가 발생한 사건에 대해서 그 구조물의 피해를 과학적으로 조사함으로써 잔존성능을 평가하고 올바른 보수보강 방법까지 제안할 수 있어야 함

따라서 제안 과제를 통해 도출된 기술과의 접목은 화재조사 분야 A부터 Z까지의 패키지 원천 기술 개발을 가능케 함

※ 패키지 기술: 화재발생지 조사, 화재발생원인 조사, 화염전파경로 조사 (화재확산), 구조체 화재손상규모 조사, 보수보강 방법 조사, 보수보강의 적절성 평가

2. 화재조사 전문 기관인 DBI와 협력으로 국내 건설분야 과학적 화재조사 (Fire forensic investigation of structures) 신규업무 창출

국내의 경우 화재조사 (Fire investigation)분야는 소방관련 기관에서 화재를 제압한다는 측면에서 다루어 왔고, 국립과학수사연구원에서 사고 현장의 방화 범인을 찾기 위한 목적으로 수사를 진행하면서 일부 소개가 되었다. 그렇게 때문에 국내 화재조사의 기술수준은 해외 선진기관과 비교할 때 아쉬움이 남는다. 따라서 화재조사분야에 오랜 경험을 가지고 있는 유럽 화재조사 대표기관인 덴마크 DBI와의 협력을 추진하여 DBI의 과학적 화재조사 분야를 습득 후 국내 건설 분야 신규 업무 창출에 활용한다.

다음은 DBI의 화재 업무분야에 대한 특성이다.

- DBI's Fire investigation의 범위 (그림 5.1 참조)

DBI는 건설 산업과 관련된 거의 모든 분야에 대한 광범위한 조사를 실시하고 있으며, 콘크리트 구조물에서 발생한 화재의 원인, 방지 방법 그리고 화재안전설비에 관한 기준을 제시하고 있다. 또한 기차, 산업시설, 터널 등에서 발생한 화재 조사뿐만 아니라 선박, 해안구조물, 주거건축물, 쇼핑센터, 오피스, 빌라, 고층건축물, 영화관, 슈퍼탱크 및 자동차 화재조사도 이루어지고 있다.

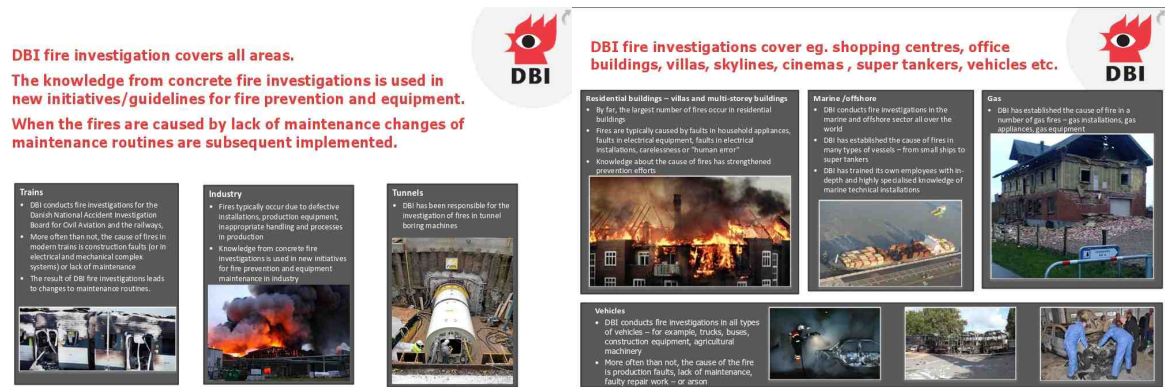


그림 5.1 DBI Fire investigation의 범위

● DBI's Fire investigation의 대표적 사례 (그림 5.2 참조)

DBI는 한 해 평균 700여개의 화재조사 업무를 수행하는데, 대표적인 사례는 1973년 Hafnia 호텔 화재 (35명 사망)와 1990년 Scandinavian star 선박 화재 (158명 사망, 324명 구조)가 있다.



그림 5.2 Hanfnia 호텔 및 Scandinavian star 선박 화재

● DBI's Fire investigation 분야의 위상 (그림 5.3 참조)

DBI는 덴마크 경찰 및 국가 기관을 대표하여 국내 및 해외 화재사건에 대한 화재조사를 실시 하고 있으며, 경찰, 보험회사 및 국가기관 담당자들에게 화재조사 교육 실시하고 있다.

DBI provide fire investigation for the Danish police and the National authorities ... and customers world wide

DBI provide fire investigation education and training for the Danish police, public authorities and insurance companies



DBI carry out investigations worldwide on behalf of:

- The police
- National authorities – for example, the Danish National Accident Investigation Board for Civil Aviation and the railways
- Private companies (e.g. Industry, shipping, offshore)



DBI provides fire investigation education and training to:

- The police
- Insurance companies
- Public authorities (Danish National Accident Investigation Board, national defence etc.)
- Private companies and individuals



그림 5.3 국가를 대표하는 화재조사 기관 DBI

● DBI's Fire investigation의 재현 실험 (그림 5.4 참조)

화재의 원인이 분명하지 않을 때 혹은 법정 등에서 확실한 증빙자료를 필요로 하는 경우에는 실제상황과 유사한 조건으로 세팅한 후 재현 실험을 실시하고 있다.

DBI provides reconstructions of fire cases - to be used in a legal context in the court



The objective of reconstructions in a legal context is to document the progress of a fire in relation to the sequence of events, the progress/spread of the fire and the damage picture.



그림 5.4 재현실험 예

● DBI's Fire investigation에 기초한 시뮬레이션 (그림 5.5 참조)

DBI의 Fire investigation의 경험과 노하우는 인접관련 분야에서 활용하기도 하는데, 예를 들어 화재진압이 조기에 이루어지지 않았을 경우의 상황을 시뮬레이션으로 재현하여 잠재적 위험성을 평가하는 것이다.

DBI provide fire spreading simulation.
What are the consequences of the fire in question would be if it had been discovered later, extinguished later or had not been discovered or extinguished? DBI has the answer.



그림 5.5 잠재적 화재위험성 평가 시뮬레이션 (Harzard declarations)

● DBI's Fire investigation의 교육 프로그램 (그림 5.6 참조)

DBI의 fire investigation관련 교육은 이론수업 (빌딩 코드의 이해, 전기설비의 이해 등을 포함)과 현장실습 (멘토와 함께 실제 현장조사 포함)으로 구성되어 있으며, 교육대상자에 따라 프로그램의 구성은 달라지는 것이 특징이다. 교육은 5개의 모듈로 (a) fire dynamics & fire chemistry, (b) Building fire engineering, (c) Firefighting conditions, (d) Technical installations, (e) Fire scene investigation로 구성되어 있다.

The DBI education of a fire investigator is based on both theoretical courses and practical training

Fire investigators have an educational background as electricians and engineering. DBI's training programmes are based on a combination of job training and internal and external courses. With a background in electricians or engineering the training takes 1/2 - 1 year

Theoretical:

- Certified course in fire investigation.
- Certified course in Danish building regulations fire codes.
- Legislation relating to electrical equipment
- Alarm systems

Practical:

- Introductory period
- Monitored period (monitored) by experienced fire investigators
- Release procedures

DBI provides customised training – both in Denmark and abroad

Example of course plan – Fire Specialist for the Danish National Police.

- Module 1 - Fire Dynamics and fire chemistry
Fire development and spread – terms of explosion – structures and fire (materials science) – fire chemistry – flame heights – spontaneous combustion – fire in solids – liquids – gases – toxicology – hazardous substances with special properties – simulation tools
- Module 2 - Building Fire Engineering
Construction and drawing comprehension – fire safety concepts – fire strategy – fire laws – fire compartmentalisation – building structures – fire performance of materials – typical errors and failures in fire protection – ventilation
- Module 3 - Firefighting theory
Extinguishing technique – firefighting conditions – flashover container – cooperation in the field of fire prevention/fire fighting in relation to efforts/tactical relationships
- Module 4 – Technical installations
Combustion plants (chimneys & bio) – basic electric theory – gas installations and appliances – electronic tracks – fire safety installations
- Module 5 – Fire scene investigation
The use of the scientific method for the fire scene surveys – interpretation of fire pattern/damage – protection of evidence – ignition sources including intentional/unintentional, technical, thermal, etc. – practical investigation of fire scenes








그림 5.6 Fire investigation을 위한 전문가 양성 교육프로그램

● DBI's Fire investigation의 미션 (그림 5.7 참조)

DBI에서 가장 중요하게 생각하는 첫 번째 미션은 국민의 안전과 재산보호로써, 경우에 따라 최상의 화재안전성을 확보하기 위해 우수한 건축재료 등을 추천한다. 두 번째 미션은 화재의 원인 조사 결과 방화범에 의한 인위적 화재로 결정이 나면 이에 대한 법적 책임의

수위를 결정하는데 과학적인 증빙자료를 제공하는 것이며, 마지막으로 세 번째 미션은 사고 발생의 책임과 그 범위 등에 대해 객관적이고 사실적인 자료를 제공하여 재산피해 규모에 따른 배상책임의 주체와 그 배상액 결정에 핵심적인 자료 제공하는 것이다.

Our mission is to save lives and values



그림 5.7 DBI Fire investigation팀에서 중요하게 생각하는 미션

3. 화재조사 분야 전문자격인증제도 개발 및 화재전문가 양성

DBI와의 국제 협력을 통해 화재조사분야의 전문적인 지식을 습득하고 이를 기반으로 하는 전문자격인증제도를 개발해 화재전문가를 양성한다. 이는 국내에 숙련된 화재조사팀을 구축할 수 있는 기반을 마련함과 동시에 낙후되어 있는 과학적 화재조사 분야를 발굴/개발할 수 있다.

4. 화재조사 패키지 기술을 화재안전감리 및 화재컨설팅 업무의 핵심기술로 활용

해외 우수기관 사례를 살펴보면 컨설팅 업무를 통해 국가의 화재안전 수준을 높이면서 적극적으로 비즈니스 활동을 하고 있다. 따라서 컨설팅 업무를 위해 꼭 필요한 화재조사분야 관련 배경지식을 습득할 수 있는 화재조사 패키지 기술을 화재안전감리 및 화재컨설팅 업무의 핵심기술로 활용하고자 한다.

5. 연구 개발성과의 시장 규모 및 추정 매출 계획

구 분		사 업 화 년 도				
		(2017 년)	(2018 년)	(2019 년)	(2020 년)	(2021 년)
		과 제 종 료 후 1년	과 제 종 료 후 2년	과 제 종 료 후 3년	과 제 종 료 후 4년	과 제 종 료 후 5년
국 내	국 내 시 장 규 모	200억원	250억원	300억원	350억원	340억원
	시 장 점 유 율 (%)	2%	4%	8%	10%	15%
	국내매출액	2.0억원	5.0억원	10.5억원	35.0억원	51억원
해 외	해 외 시 장 규 모	400억원	600억원	1000억원	1400억원	2,000억원
	시 장 점 유 율 (%)	-	-	-	1%	2%
	해외매출액	-	-	-	14.0억원	28.0억원
총계		2.0억원	5.0억원	10.5억원	49.0억원	79.0억원

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1. 화재조사 (화재원인)

DBI의 화재 원인을 밝히는 화재 조사는 다음과 같이 정리된다.

화재원인의 결정은 화재에 대한 책임을 묻는 관점에서 매우 중요한 부분이다. 이는 민사상의 범죄에 영향력을 발휘할 수 있다는 측면에서 보다 중요시된다. 화재 원인 결정을 위한 규칙은 조사 결과에 따른 통계나 기록을 통해 화재현장을 조사하는 것이다. 하지만 화재 원인을 결정할 목적으로 하는 화재조사를 위해서는 화재조사원이 화재가 발생한곳과 머문 곳에 대한 평가를 위해 화재패턴에 대한 해석을 할 수 있어야 한다. 이와 같은 평가를 위해서는 축적된 경험, 기술, 지식이 필요하다. 가장 중요한 지식은 화재 화학과 화재 역학에 대한 기본적인 이해이다. 또한 중요한 부분은 다양한 종류의 물질과 그 물질이 화재에 관련되었을 때에 대한 지식이다. 성공적으로 화재가 발생한 곳을 알기 위해서는 화재 화학과 화재 역학의 규칙 및 제한을 알고 가시적인 증거등을 평가할 수 있는 능력이 있어야 한다. 다음은 화재 원인을 밝히기 위한 분석들을 설명한다.

전술적 정보(Tactical information): 화재 발생 당시에 현장에 있었던 사람으로부터의 진술을 토대로 한 현장상황, 화재경보, ITV, 보안시스템등의 다른 시스템으로부터 얻을 수 있는 전자 정보등을 분석

화재 증거(fire Patterns): 화재가 남긴 흔적과 영향에 대한 분석

아크분석(Arc Mapping): 전기회로에 대한 문서와 손상을 야기한 전기적인 아크가 발생한 부분을 분석

화재역학(Fire Dynamics): 화재의 발생과 성장에 관한 물리/화학적인 부분과 화염과 건물 시스템간의 상호작용을 화재 동력학적으로 분석

과학적인 방법: 문제의 정의와 인식에 대한 지식의 체계적인 추적이 필요하다. 이는 관찰과 실험을 통한 데이터 획득이 기본으로, 데이터를 분석하고 가정을 형성하여 이를 평가 및 테스트를 실시 반복 한 후, 최종 가정을 선택한다. 이를 체계적으로 나타내면 아래와 같다.

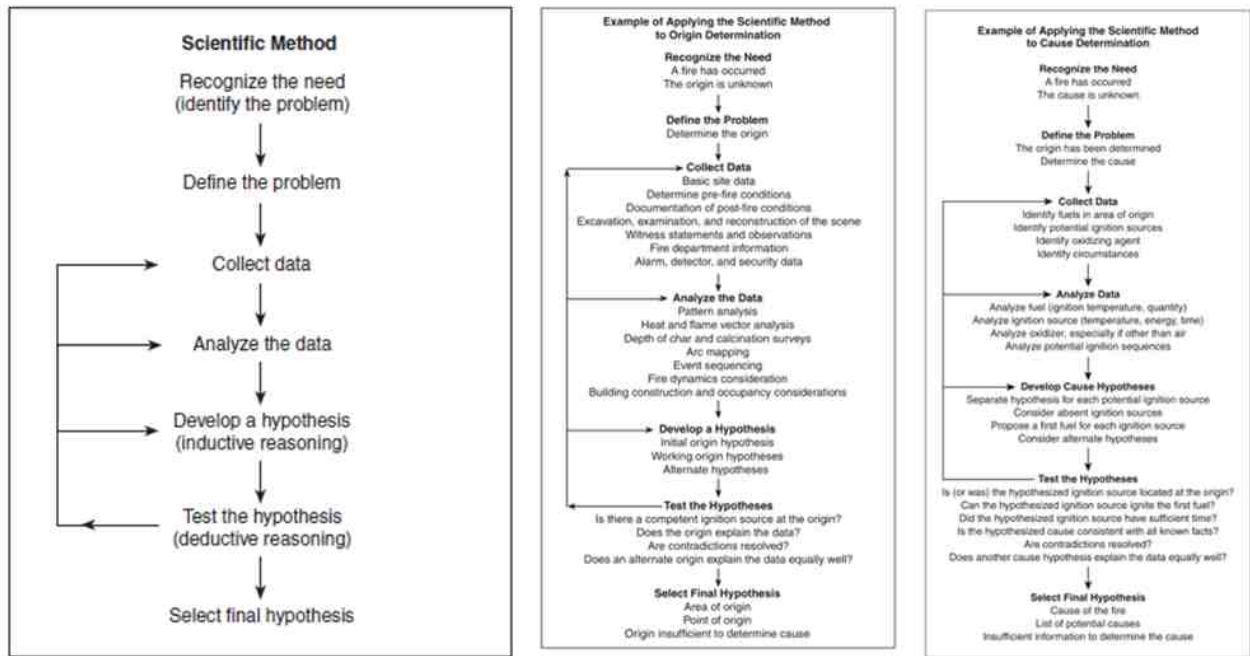


그림 3. DBI의 과학적 화재 원인 조사에 대한 흐름도

2. 화재조사 (화염경로 추적)

화재나 폭발을 일으킨 연료와 열소스가 있는 곳의 주변, 즉 물리적으로 화재가 발생한 부분과 화재가 발생한 곳의 지형이나 구조등을 가르키는 화재 발생 지역을 확보한 후 화염 경로 추적이 가능하다.

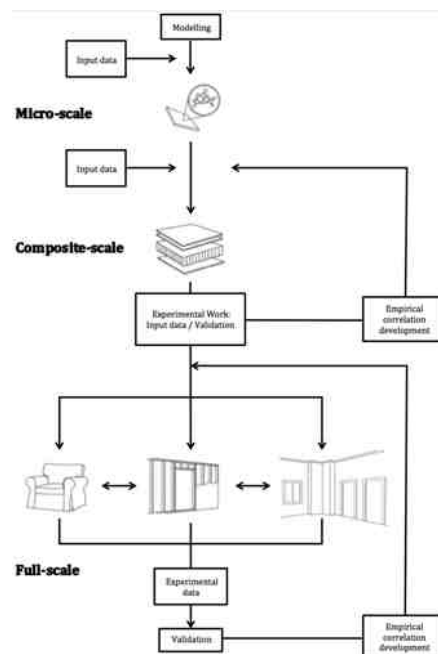


그림 4. DBI의 Firetool 과제를 통해 구현하는 스케일별 수치해석 과정

화염경로 추적은 수치해석을 통해 이루어진다. 화염경로 추적을 위한 수치해석은 크게 3가지의 스케일을 기준으로 구분을 한다. 첫 번째는 마이크로 스케일(Micro-scale)로 화재로 인한 물질의 상태변화를 분석하는 단계를 나타낸다. 두 번째는 소규모 스케일(Composite-scale)로 ISO 5660과 같은 실험실단위의 실험을 통해 얻은 결과를 수치해석으로 구현하는 단계이다. 마지막으로 실스케일(Full-scale)로 실물 화재를 수치해석으로 구현하는 단계이다. 이러한 3단계를 거치면 물질의 화재에 대한 상태 변화, 구조의 변화 및 화염의 성장 과정을 모두 구현할 수 있기 때문에 화염 경로 추적을 알 수 있다.

3. 화재안전 (ICT-Based fire safety technology)

건물에너지관리 시스템인 BEMS (Building & Energy Management System)는 건물의 에너지를 관리하여 불필요한 에너지 낭비를 막아 효율을 높이는 기술로 경제적인 효과를 창출하기때문에 일반인에게도 잘 알려져 있지만, ICT(Information and Communications Technology)기반의 긴급관리시스템 (예, 화재안전시스템)은 긴급 상황에만 사용이 되고 평소에는 작동을 하지 않아 설치비만 드는 불필요한 시스템이라는 인식이 있다. 하지만 이 두가지가 결합이 되면 큰 효과를 창출한다. 경제적으로 에너지를 관리하기 위해 설치되는 건물에너지관리 시스템에 저비용으로 긴급안전시스템을 구축하는 것이다. 평소에는 시스템이 건물의 에너지 관리를 위해 운용이 되지만 화재발생과 같은 긴급 상황이 발생하였을 경우 긴급안전시스템으로 전환이 되어 화재 진화, 확산방지, 피난을 위해 쓰이는 것이다. 이는 건물뿐만 아니라 소방서, 경찰서, 병원등과 연동을 통해 안전을 극대화 할 수 있다.

제7장. 연구개발성과의 보안등급

- 해당사항 없음

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

- 해당사항 없음

구 입 기 관	연 구 시 설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS 장 비 등 록 번호
-	-	-	-	-	-	-	-	-

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

한국건설기술연구원은 산업안전보건법과 연구실안전환경조성에 관한 법률 제 6조, 시행규칙 제2조에 의거하여 산업안전보건지침을 재·개정하여 안전조치 이행계획을 수행하고 있으며 근로자의 안전보건을 유지 증진하고, 연구원의 재산 보전을 도모하며, 쾌적한 연구환경을 조성하여 연구능률을 향상시킴을 그 목적으로 하고 있다.
--

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인 용 횟수 등)
1	특허	화재 손상 콘크리트 구조물의 잔존수명 예측 시스템 및 그 방법	한국건설기 술연구원		대 한민국		2015.09.1 4		
2	특허	화재 손상 콘크리트 구조물의 잔존수명 예측 시스템 및 그 방법	한국건설기 술연구원		대 한민국		2015.10.2 8		
3	논문	Effect of iron powder on inhibition of carbonation process in cementitious materials	한국건설기 술연구원		ISIJ International	0.96	2015		SCI
4	논문	Design of fire resistant concrete using combined fibers	한국건설기 술연구원		Journal of Ceramic Processing Research	0.36	2015		SCI
5	논문	Combined fiber technique for spalling protection of concrete column, slab and beam after fire	한국건설기 술연구원		Materials and Structures	2.453	2015		SCI
6	논문	Effect of elevated temperatures on chemical properties, microstructure and carbonation of cement paste	한국건설기 술연구원		Journal of Ceramic Processing Research	0.36	2016		SCI
7	논문	Experimental evaluation of sodium silicate-based nanosilica against chloride effects in offshore concrete	한국건설기 술연구원		The Scientific World Journal		2015		국제

제11장. 기타 사항

- 해당사항 없음

제12장. 참고 문헌

- [1] P.F. Marques, A. Costa, Service life of RC structures: Carbonation induced corrosion. Prescriptive vs. performance-based methodologies, *Construction and Building materials* 24 (2010), pp.258-265
- [2] A. Mendes, J.G. Sanjayan, W.P. Gates, F. Collins, The influence of water absorption and porosity on the deterioration of cement paste and concrete exposed to elevated temperatures, as in a fire event, *Cement & Concrete Composites* 34 (2012), pp.1067-1074
- [3] A. Mendes, J.G. Sanjayan, F. Collins, Effect of slag and cooling method on the progressive deterioration of concrete after exposure to elevated temperatures as in a fire event, *Material and structures*, 44 (2011), pp.709-718
- [4] A. Mendes, J.G. Sanjayan, F. Collins, Long-term progressive deterioration following fire exposure of OPC versus slag blended cement pastes, *Material and structures*, 42 (2009), pp.95-101
- [5] A. Mendes, W.P. Gates, J.G. Sanjayan, F. Collins, NMR, XRD, IR and synchrotron NEXAFS spectroscopic studies of OPC and OPC/slag cement paste hydrates, *Material and structures*, 44 (2011), pp.1773-1791
- [6] A. Mendes, J.G. Sanjayan, F. Collins, Phase transformations and mechanical strength of OPC/Slag pastes submitted to high temperatures, *Material and structures*, 41 (2008), pp.345-350
- [7] 임영진, 리트벨트법에 의한 혼합재 첨가 시멘트 중 C_3A 수화반응 해석, 석사학위논문 (2014), 군산대학교
- [8] E.A. Kerr, Damage mechanisms and repairability of high strength concrete exposed to elevated temperature, Ph.D. thesis, the University of Notre Dame
- [9] M.J. Dejoing, F-J. Ulm, The nanogranular behavior of C-S-H at elevated temperature (up to 700 °C), *Cement and Concrete Research*, 37 (2007), pp.1-12
- [10] D.A. Lange, H.M. Jennings, S.P. Shah, Image analysis techniques for characterization of pore structure of cement-based materials, *Cement and Concrete Research*, 24 (1994), pp.841-853
- [11] C-H. Chiang, C-C. Yang, Artificial neural networks in prediction of concrete strength reduction due to high temperature, *ACI Materials Journal*, 102 (2005), pp.93-102
- [12] V. Baroghel-Bouny, Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials Part1:Essential tool for analysis of hygral behaviour and its relation to pore stucture, *Cement and Concrete Research*, 37 (2007), pp.414-437
- [13] E. Gallucci, K. Scrivener, A. Groso, M. Stampanoni, G. Margaritondo, 3D experimental investigation of the microstructure of cement pastes using synchrotron X-ray microtomography (μ CT), *Cement and Concrete Research*, 37 (2007), pp.360-368
- [14] W. Vichit-Vadakan, E.A. Kerr, Transport properties of fire-exposed concrete, *Journal of advanced concrete technology*, 7 (2009), pp.393-401
- [15] K.Y. Kim, T.S. Yun, K.P. Park, Evaluation of pore structures and cracking in cement paste exposed to elevated temperature by X-ray computed tomography, *Cement and Concrete Research*, 50 (2013), pp.34-40
- [16] D.W.S. Ho, R.K. Lewis, Carbonation of concrete and its prediction, *Cement and Concrete Research*, 17 (1987), pp.489-504

- [17] Y. Fang, J. Chang, Microstructure changes of waste hydrated cement paste induced by accelerated carbonation, *Construction and Building Materials*, 76 (2015), pp.360-365
- [18] K.L. Scrivener, A.K. Crumbie, P. Laugesen, The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete, *Interface Science*, 12 (2004), pp.411-421
- [19] K. Nakarai, T. Ishida, T. Kishi, K. Maekawa, Enhanced thermodynamic analysis coupled with temperature-dependent microstructures of cement hydrates, *Cement and Concrete Research*, 37 (2007), pp.139-150
- [20] T. Ishida, K. Maekawa, T. Kishi, Enhanced modeling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history, *Cement and Concrete Research*, 37 (2007), pp.565-578
- [21] K. Cavanaugh, Guide to thermal properties of concrete and masonry systems, report by ACI committee 122, ACI 122R-02, (2002)
- [22] 정지은, 장유림, 김기욱, 허상철, 민지숙, X-ray diffraction과 X-ray fluorescence를 이용한 시멘트 비교 분석, *분석과학*, 26 (2013), pp.340-351
- [23] Y.S. Heo, Identification of fibre parameters for spalling protection of concrete in fire, PhD thesis, (2011), Monash University
- [24] Z. Pan, Mechanical properties of geopolymeric materials at elevated temperatures, PhD thesis,(2010), Monash University
- [25] R. Zhao, Performance of geopolymer concrete in fire, PhD thesis (2010), Monash University
- [26] J.H.M. Visser, Accelerated carbonation testing of mortar with supplementary cementing materials limitation of the acceleration due to drying, *HERON*, 57 (2012), pp.231-247
- [27] J. Marchand, D.P. Bentz, E. Samson, Y. Maltais, Influence of calcium hydroxide dissolution on the transport properties of hydrated cement systems, *Materials Science of Concrete*, (2001), pp.113-129
- [28] D.P. Bentz, E.J. Garboczi, Modelling the leaching of calcium hydroxide from cement paste: effects on pore space percolation and diffusivity, *Materials and Structures*, 25 (1992), pp.523-533
- [29] I.S. Yoon, O. Copuroglu, K.B. Park, Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete, *Atmospheric Environment*, 41 (2007), pp.7274-7285
- [30] LNEC E465, Concrete, Methodology for estimating the concrete performance properties allowing to comply with the design working life of the reinforced or pre-stressed concrete structures under environmental exposures XC and XS, Lisbon, LNEC, 2007
- [31] CEB bulletin 238 "new approach to durability design,an example for carbonation induced corrosion

주 의

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

비매품

