

2. 제출문

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

이 보고서를 "건설교통기술촉진연구사업"과제 (세부과제 "폐콘크리트를 원료 기반으로한 저탄소형 시멘트 개발에 관한 연구")의 보고서로 제출합니다.

2015. 06. 16.

주관연구기관명 : 한국해양대학교

주관연구책임자 : 박동천

연구원 : 조규환, 권은희, 이영준,
정재민, 임명현,

협동연구기관명 : 한국세라믹 기술원

협동연구책임자 : 송훈

연구원 : 이종규, 추용식, 신현욱

참여기업명 : 상지엔지니어링

연구원 : 김창수, 홍성욱, 고대준

참여기업명 : (주) 힐엔지니어링

연구원 : 우종렬, 이덕근, 유충근

3. 보고서 요약서

보고서 요약서

과제고유번호	12기술혁신 F02	해 당 단 계 연 구 기 간	2012.05.29. ~2015.05.28.	단 계 구 분	(3차년)/ (3차년)
연구사업명	건설교통기술촉진연구사업				
연구과제명	최 상 위 과 제 명	폐콘크리트를 원료기반으로 한 저탄소형 시멘트 개발 에 관한 연구			
	단위과제명	한국해양대학교 : 목표지향형 재생시멘트 활용 콘크리트 배합설계 한국세라믹기술원 :엔트로피 저감형 재생시멘트 생산 공정 및 품질관리안 구축			
연구책임자	박동천	총연구기간 참 여 연구원수	총 : 17 명 내부: 10 명 외부 : 명	총연구비	정부 : 593,000천원 기업 : 197,667천원 계 : 790,667천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	한국해양대학교 해양공간건축학과		참여기업명	상지엔지니어링 (주)힐엔지니어링	
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	137
폐콘크리트 미분말의 화학적 특성분석 및 수화성 회복 메카니즘 규명 - 전국 각지에서 생산되는 폐콘크리트 미분말을 채취하여 화학성분 분석한 결과 폐미분말속에는 시멘트 페이스트에 대하여 잔골재가 65%정도 포함된 것을 확인하였으며 소성에 의한 수화성 회복 가능성을 확인하였음 재생시멘트 원료배합 최적화 - C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF 및 LSD, SM, IM가 보통 포틀랜드시멘트의 관리 기준에 최대한 유사하도록 Excel Solver를 적용 하였으며 잔골재율의 변화에 따른 적정 값을 도출하였음 재생시멘트 수화반응 메카니즘 분석 - 고품질, 또는 중품질 수준의 재생시멘트를 생산하기 위해서는 잔골재 속의 Quartz결정의 소성성 저해 요인에 의해 잔골재 혼입이 30%미만에서 가능성을 확인함 재생시멘트 사용에 따른 온실가스 방출 감소량 산정 - 폐미분말을 시멘트 원료로 활용함으로써 CO₂배출을 상당히 감소시킬 수 있으며 잔골재 미분이 전혀 포함되지 않은 폐미분말(S0)의 경우 0.48 t CO₂/t Cement로 약 53% 수준까지 감소되는 것으로 분석되었음					

재생시멘트 이용 콘크리트의 내구성 예측 모델 구축

- 재생시멘트를 이용한 콘크리트의 염소이온 확산계수화 탄산화속도계수를 도출한 결과 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트에 비하여 잔골재 함량에 따라 10~20%정도의 내구성이 저하하는 것을 확인함으로써 내구설계에 반영 가능

색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	저탄소형 재생시멘트, 폐콘크리트, 재생프로세스, 수화성회복, 최적배합설계
	영 어	Low Carbon Recycle Cement, Concrete Waste, Recycle Process, Cement Hydration Recovery, Optimized Mix Design

4. 요약문

요 약 문

I. 제 목

폐콘크리트를 원료기반으로 하는 저탄소형 재생 시멘트 개발

II. 연구개발과제 개요(목적, 필요성, 범위 등을 기술)

- 폐기물의 약 30%는 건설업에서 배출되며 폐기물 처리관련 환경 문제는 각 분야에서 적절한 해답을 찾지 못한 채 심각한 사회적 문제로 대두됨
- 소비의 부산물은 재활용을 통하여 또 다른 생산을 위한 투입자원으로 인식이 절실히 필요함
- 단기적으로 생산단가를 상승시키고 이윤이 감소되는 것처럼 보이지만, 그것은 “지속가능한 개발(Sustainable Development)”을 위한 기본적인 접근이라 할 수 있음
- 이러한 사회적/기술적 배경으로 인하여 최근 건설폐기물의 80%를 차지하는 폐콘크리트의 순환골재 재생기술에 관한 많은 연구가 이루어져 실용화 단계에 이르고 있음
- 폐콘크리트 내부의 20% 이상을 차지하고 있는 **폐콘크리트 미분말에 대한 연구는 불충분**하며, 아직 대부분의 폐콘크리트 미분말이 폐기/매립되고 있는 실정임
- 본 연구의 목표는 **폐콘크리트 미분말을 이용하여 저탄소 녹색성장 대응형 지속가능한 재생시멘트로 개발/활용하기 위한 기술력을 확보**하는 것임
- 「저탄소형 재생시멘트」는 기존의 불활성 충전재로서의 재생재 활용에서 벗어나 폐기물의 화학적 특성을 기반으로 한 고부가가치형 개발로서 실용적 가치가 크며, 재생프로세스 및 수화반응 기작(메카니즘)의 모델을 규명하는 측면에서 학술적 가치와 연구의 독창성이 큼

III. 연구개발 수행내용 및 결과(연구수행과정, 연구수행결과 등을 기술)

(1) 폐콘크리트 미분말과 산업부산물을 이용하여 저탄소형 재생시멘트의 수화성 회복을 위한 최적 재생프로세스 개발

- 재생시멘트 생산을 위한 최적 배합과 분쇄에 대한 입도조정, 소성 등을 통하여 OPC에 준하는 시멘트 개발완료
- 재생시멘트의 압축강도 및 유동성은 보통 포틀랜드 시멘트 기준 80% 이상 확보
- 재생시멘트의 내구성은 중성화 저항성 및 확산계수 측면에서 90% 이상 확보가능

(2) 저탄소형 재생시멘트의 수화성 회복 및 수화반응의 메커니즘 규명

- 수화반응 메커니즘 규명을 통하여 재생시멘트의 수화특성 및 강도발현에 대한 성능검증

(3) 저탄소형 재생콘크리트의 유동특성, 강도특성 및 내구특성 평가

- 유동특성, 강도특성 및 내구특성을 플로어 시험, 레올로지 측정시험, 건조수축에 의한 길이변화 시험, 촉진탄산화 시험, 전기영동에 의한 염소이온 확산계수 산정을 통하여 보통포틀랜드 시멘트의 90%에 준하는 재생시멘트 생산기술 확보

(4) 저탄소형 재생시멘트의 CO2 저감효과 분석 및 CO2 저감형 친환경 콘크리트의 다목적 최적 배합모델 제시

- 저탄소형 재생시멘트의 CO2 배출 측면에서, 기존 보통 시멘트의 30% 이상 저감
- 상기 성능 확보가 가능한 다목적 최적화 방법을 이용한 최적 배합방법의 제시

IV. 최종 연구성과 및 적용실적

- (1) 폐콘크리트 미분말과 산업부산물을 이용하여 저탄소형 재생시멘트의 수화성 회복을 위한 최적 재생프로세스 개발을 완성함으로써 일반 포틀랜드 시멘트에 준하는 재생시멘트 개발 성공
- (2) 저탄소형 재생시멘트의 수화성 회복 및 수화반응의 메커니즘 규명과 동시에 유동특성 평가를 통한 시공성능 확보, 그리고 내구성에 대한 검증을 완료함으로써 실제 현장에 적용가능한 수준에 이르렀으며 기술이전을 실시하였으며 향후 국내양회 기술연구소에 기술협약을 통해 대량생산 체제를 구축하도록 추진예정임

V. 연구목표 달성 및 효과

(1) 친환경 건축기술 개발 요구의 대응 효과 극대화

- 건축재료 생산단계, 폐기물 최종 처분단계, 재생단계에서의 환경부하 저감이 가능한 기술
- 온실가스 저감형 친환경 재생시멘트의 생산으로 관련 업계의 국제적 기술집약적 주력상품 효과
- 탄소배출 거래권의 실시에 대비한 고탄소산업인 건설분야에서 선도적인 중점 기술로서 적용 가능

(2) 고부가가치형 기술로 인식 보급

- 폐기물의 화학적 성질을 고려한 최적의 재생프로세스의 개발
- 시멘트 및 콘크리트의 제반 성능과 친환경성을 목표로 하는 과학적인 최적 배합 프로그램의 개발
- 저탄소형 재생시멘트의 수화성 회복 및 재수화, 그리고 열화 메커니즘의 규명 및 모델화를 통한 과학적인 현장 품질관리 가능

(3) 건설재료 원자재 파동에 대비한 대체재료 개발

- 대체재료가 부족한 시멘트의 핵심원료인 석회석의 부족문제는 향후 국가의 경제·산업적 측면에서 중요
- 석회석의 대체 원료로서 폐콘크리트를 원료 기반으로 하고, 타산업 부산물을 석회석 및 점토 대체 원료로서 활용함에 따른 완전 순환형 시멘트의 개발 가능

(4) 환경기술의 시대를 대비한 온실가스 저감형 GREEN TECHNOLOGY의 개발

- 상기 원료 측면의 완전 순환과 함께, 시멘트의 전 생애 머티리얼 플로우 측면에서 환경부하 발생의 최소화

(5) 이상과 같은 연구목표 달성은 아래의 사회적 경제적 파급효과를 창출할 것으로 기대

- 친환경사회 구축에 대한 노력을 범국가적으로 경주하고 있는 현시점에서 건설업의 부정적 이미지 개선
- 온실가스 배출권의 범국가적 시행에 앞서, 온실가스 배출분야의 큰 부분을 차지하는 건설업계가 본 기술을 선점할 경우 경제적 파급효과
- 미래 저탄소 환경시대에 있어 국내외적으로 시장성이 우수한 분야
- 폐기물 및 산업부산물을 재생 활용함에 따른 재료 생산단가 감소 효과

VI. 연구성과 활용계획

- (1) 폐기물 처리업 및 산업부산물 발생 업계와 시멘트 업계의 연계로 인한 친환경적 자원순환 머티리얼 플로우의 생성
- (2) 건설업계에서 구조적 비구조적 재료로서 다량 활용되는 시멘트의 친환경적 보급 및 활용
- (3) 친환경 건축물의 기존 설비 중심적 탄소저감 효과와 함께 완전순환형 저탄소 친환경 소재의 사용으로 친환경성 극대화
- (3) 환경기술의 시대에 대비한 고급 전문인력 양성 및 사회 보급
- (4) 친환경 건설재료 활용기술의 기업체 기술이전 및 지도를 통한 건설업계 기술력 향상

5. 영문 요약서

SUMMARY

- About 30 percent of all waste in Korea is produced by the construction industry, and the environmental problems related with waste disposal have emerged as a serious industrial problem, with no appropriate solution.
- There is an urgent need to view the byproducts of consumption as resources for other production through recycling.
- While such an initiative may appear to increase production costs and reduce profits in the short term, it is essential for “Sustainable Development.”
- On this social/technical background, technologies to recycle aggregate waste concrete, which accounts for 80 percent of industrial waste, have been actively studied and reached the practical application level.
- **The cementitious powder** that represents more than 20 percent of waste concrete **has not yet been studied** sufficiently, and most of this currently falls into disuse or becomes landfill.
- The purpose of this study is **to secure technical skills in order to develop/use the cementitious powder as sustainable recycled cement, to enable low-carbon eco-friendly growth.**
- 「Recycled low-carbon cement」 has practical value as a high value-added resource based on the chemical characteristics of waste other than an inert filler, and also has academic value and high originality as a research subject to elucidate the recycling process and the mechanism of hydration reaction.

An analysis of the chemical properties of cementitious powder and clarification of the mechanism of the hydration recovery

- Cementitious powder produced all over Korea was collected and its chemical properties were analyzed. It was revealed that fine aggregate accounted for 65 percent of cementitious powder, and hydration recovery of cementitious powder could be achieved by sintering.

Optimal mix proportion of recycled cement

- Excel Solver was applied to make C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF and LSD, SM, IM most compliant with the OPC Management Criteria, and an appropriate value was derived according to the changes in the fine aggregate rate.

Analysis of the mechanism of hydration reaction

- In order to produce high-quality or middle-quality recycled cement, a maximum of 30 percent fine aggregate should be mixed due to the deteriorating factor of sintering of quartz crystals contained in fine aggregate.

Calculation of the reduced amount of greenhouse gas emissions according to recycled cement

- Using cementitious powder as one of raw materials of cement can considerably reduce

carbon dioxide emissions. It was analyzed that by using cementitious powder with no fine aggregate powder(S0), the carbon dioxide emission was reduced to 53 percent or 0.48 t CO₂/tCement.

Building a concrete durability expectation model using recycled cement

- In determining the diffusion coefficient for chloride ion and carbonation coefficient, it was found that when compared with OPC, the durability of recycled cement was deteriorated by 10 percent and 20 percent depending on the mix amount of fine aggregate, and this can be reflected in the durability design.

6. 영문 목차

CONTENTS

Chapter 1. Introduction of the study	11
Section 1. The purpose and need for research and development	11
Section 2. Research objectives and contents	16
Section 3. The trend of technology development	17
Chapter 2. Research Development Result	23
Section 1. Research achievement strategic and methods	23
Section 2. Research achievement process and content	25
Section 3. Research achievement result and verification method	27
Chapter 3. Achievement and Application Record	28
Section 1. Individual Achievement	28
Section 2. Main Achievement	42
Chapter 4. Achievement of Research purposes and Effects	46
Section 1. Achievement of Research purposes	46
Section 2. Technique-Effectiveness Analysis of Achievement	48
Section 3. Cost-Effectiveness Analysis of Achievement	50
Chapter 5. Plan for the Utilization of Research and Development	51
Section 1. Plan for the Utilization of Research and Development	51
Section 2. Content research and utilization measures	52

7. 목차

목 차

제1장. 연구개발과제 개요	11
1. 연구개발의 목적 및 필요성	11
2. 연구개발의 정의, 범위, 특징	16
3. 관련분야의 국내외 기술개발 현황	17
제 2장. 연구개발 수행 내용 및 결과	23
1. 연구수행 전략 및 방법론	23
2. 연구수행과정 및 내용	25
3. 연구수행결과 및 결과의 검증 방법 등	27
제 3장. 최종 연구성과 및 적용 실적	28
1. 개별 연구성과	28
2. 주요 연구성과	42
제 4장. 연구목표 달성 및 효과	46
1. 연구개발 최종목표 달성도	46
2. 연구개발 성과의 기술적 효과분석	48
3. 연구개발 성과의 경제적 효과분석	50
제 5장. 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성	51
1. 연구성과 향후 활용방안	51
2. 추가연구 필요성	52

제1장 연구개발과제 개요

- 연구개발의 목적 및 필요성

(1) 연구개발의 목적

- 폐콘크리트 미분말과 산업부산물을 이용하여 저탄소형 재생시멘트의 수화성 회복을 위한 최적 재생프로세스 개발
 - 수화성 회복된 재생시멘트의 압축강도 및 유동성은 보통 포틀랜드 시멘트 기준 80% 이상 확보
 - 수화성 회복된 재생시멘트의 내구성은 중성화 저항성 및 유체 확산계수 측면에서 70% 이상 확보
- 저탄소형 재생시멘트의 수화성 회복 및 수화반응의 메커니즘 규명
 - 수화반응 메커니즘의 규명은 재생시멘트의 수화특성 및 강도발현의 모델화하기 위해 제반 인자와 물성과의 상관관계 정량화 분석
- 저탄소형 재생시멘트를 이용한 재생콘크리트의 유동특성, 강도특성 및 내구특성 평가
 - 유동특성, 강도특성 및 내구특성은 정량화하여 상기 목표를 달성하며, 모델화가 가능한 인자로의 실험 수행
- 저탄소형 재생시멘트의 CO₂ 저감효과 분석 및 저탄소형 재생시멘트·콘크리트의 다목적 최적 배합모델 제시
 - 저탄소형 재생시멘트의 원료채취~제조단계의 CO₂ 배출 측면에서, 기존 보통 포틀랜드 시멘트의 30% 이상 저감
 - 상기 물성 확보를 위해 다목적 최적화 방법을 이용한 최적 배합방법의 제시
 - 이때 다목적 최적화 방법은 유전자 알고리즘 및 뉴런네트워크, 또는 통계적 수치해석법과 같은 논리적인 과학적 프로세스를 통해 수행
- 본 연구개발의 성과물의 성격
 - 기존의 불활성 충전재로서의 폐기물 활용단계에서 벗어나, 폐기물 및 부산물의 화학적 특성을 토대로 최적의 고부가가치형 재생기술의 개발이라는 과학적 접근과 함께,
 - 공정개발의 측면에서, 시멘트계 폐미분말의 수화성 회복을 도출하는 재생 과정을 저탄소화 프로세스로 최적화하고자 함
 - 또한, 시멘트 관련 재료가 사회 간접자본 및 도시의 근간을 이루는 재료임을 감안하여, 재료의 생산 및 장기 라이프사이클 측면에서의 물성 변화과정을 모델화하여 활용성 및 실용적 가치를 높이고자 함

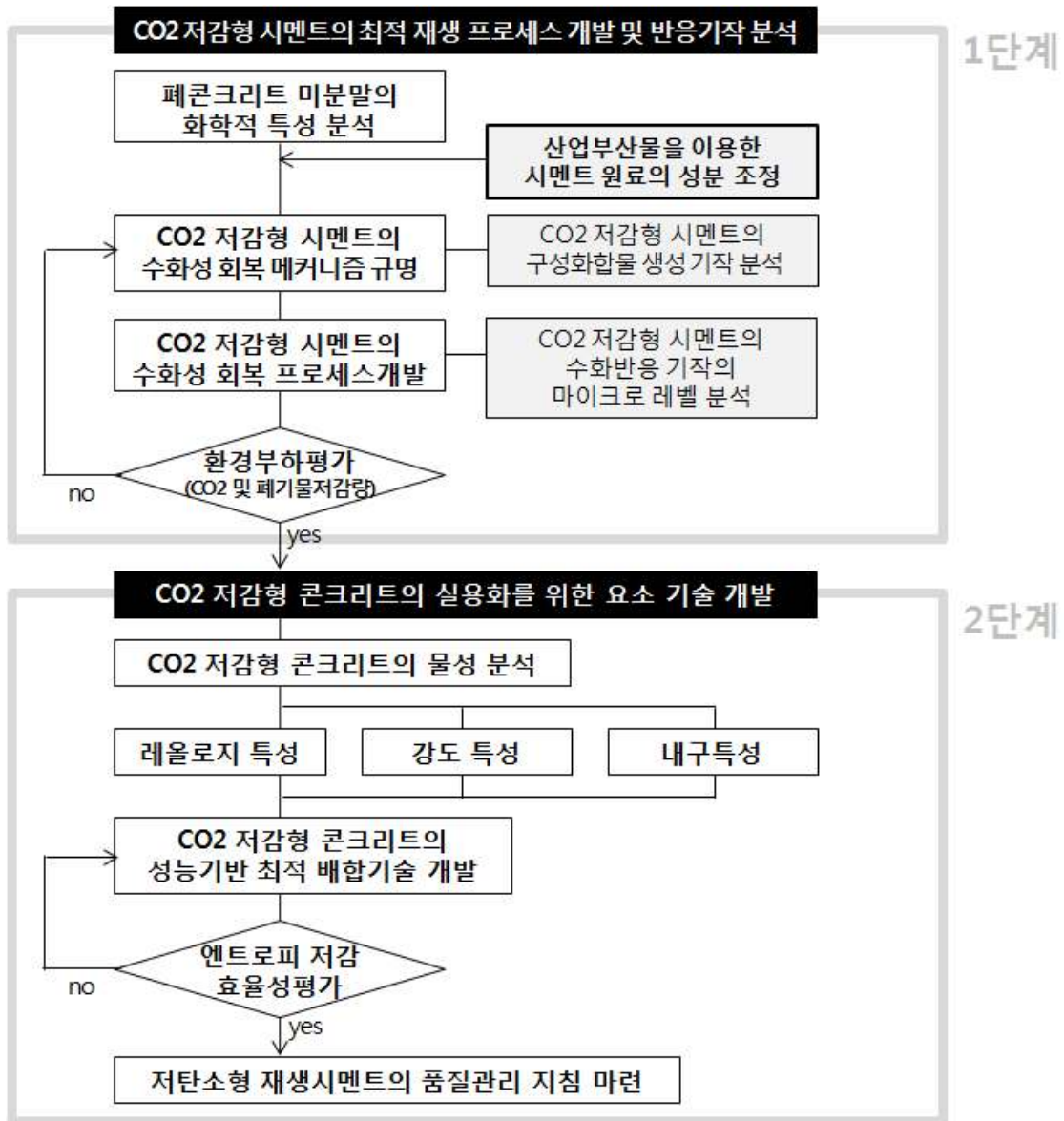


그림 1-1 연구의 흐름

(2) 연구개발의 필요성

● 콘크리트 구조물의 열화에 따른 건설폐기물의 급증

- 1970년대 이후 고도성장기에 건설된 콘크리트 구조물의 내구수명이 다함
- 건축물의 재개발 및 재건축로 인한 천문학적 규모의 건설폐기물 발생 예측
- 건설폐기물 발생량은 전체 산업폐기물 발생량의 34%, 건설폐기물량의 약 80%가 폐콘크리트 차지 (2000, 환경부)

● 신규 건축재료 생산에 따른 부존자원 및 에너지 소모

- 기후변화협약(UNFCC)에 따른 온실가스 감축 의무
- 건축 및 토목공사에서의 건축재료가 CO₂ 배출량의 약 25%를 차지
- 시멘트 생산에 따른 이산화탄소 배출규모는 전체 산업의 10% 차지
- 시멘트 : 0.8kg-CO₂/kg, 콘크리트 : 340kg-CO₂/ton의 온실가스 발생
- 시멘트 원료인 석회석의 가채광년수는 향후 30~40년으로 추정
(대한광업진흥공사)

● 재생재료의 고품질화 기술 개발의 필요성

- 복합폐기물로 인한 재생재료의 저품질화 → 실용화의 문제점(그림 3)
→ 저부가가치 용도로서 단순 이용
- 재생골재 표면의 모르타르 부착 및 재생시멘트 내부 골재 혼입 문제의 해결
- 복합폐기물의 단일소재화 분리기술의 필요 → 저에너지 · 고효율 분리기술
- 재생시멘트 원료 화학성분의 부조화 → 타산업 부산물의 화학적 특성 활용

● 저탄소 녹색성장 대응 콘크리트 기술 개발의 필요성

- 콘크리트의 효율 극대화를 위하여 생산과정의 환경파괴 축소 및 폐기시점의 재활용 기술 필요
- 일본, 유럽, 캐나다 : 15년 전부터 시급문제로 간주하여 연구개발 활발
일본 : 완전 순환형 콘크리트(Completely Recyclable Concrete)의 실용화 단계
- '지속가능한 재생콘크리트'개발이 절실
 - 콘크리트 생산 및 처리에 대한 전반적 문제해결 전략의 수립
 - 재생재료의 고품질화 : Down Cycling → Level Cycling
 - 한번 사용한 콘크리트의 전량 재사용
 - 재이용 콘크리트의 반복적 사용 가능 기술
 - 골재는 물론 시멘트 경화체 부분에 대한 연구가 시급
- 대체 자원의 개발로 국가적 부존자원의 대책 수립
- 친환경 건축재료 및 공법개발 기술의 기술력 확보 가능
- 국내 산업의 고부가가치화와 경쟁력 강화, 국가 경제 활성화의 효과

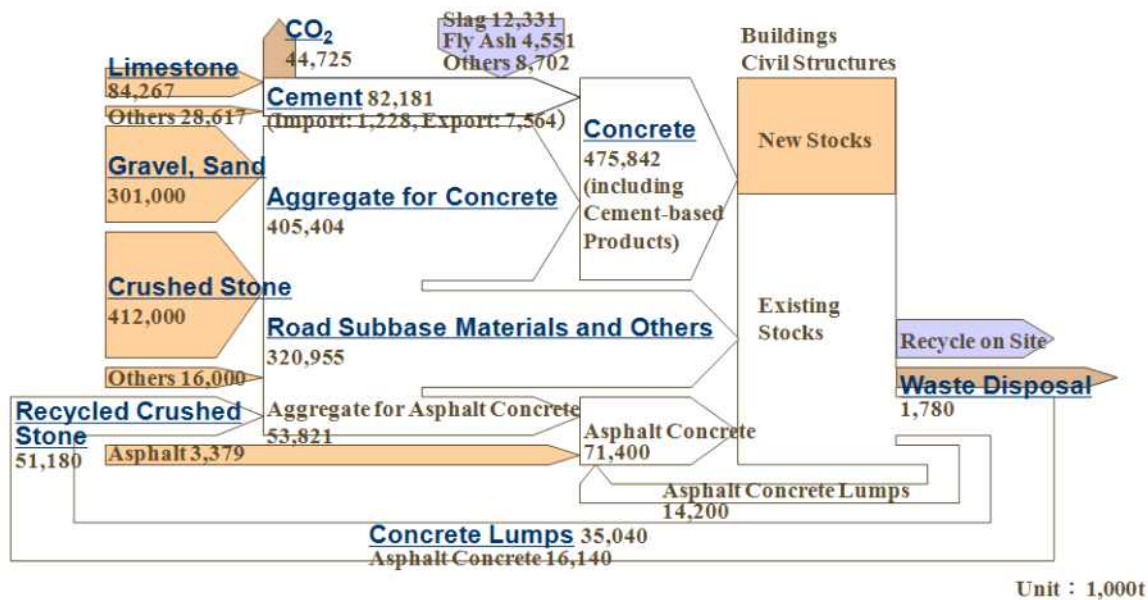


그림 1-2. 콘크리트의 천연자원 소비 및 폐기물 발생의 Materials Flow



그림 1-3. 콘크리트 구성재료의 계면분리 문제로 인한 재생재료의 저품질화

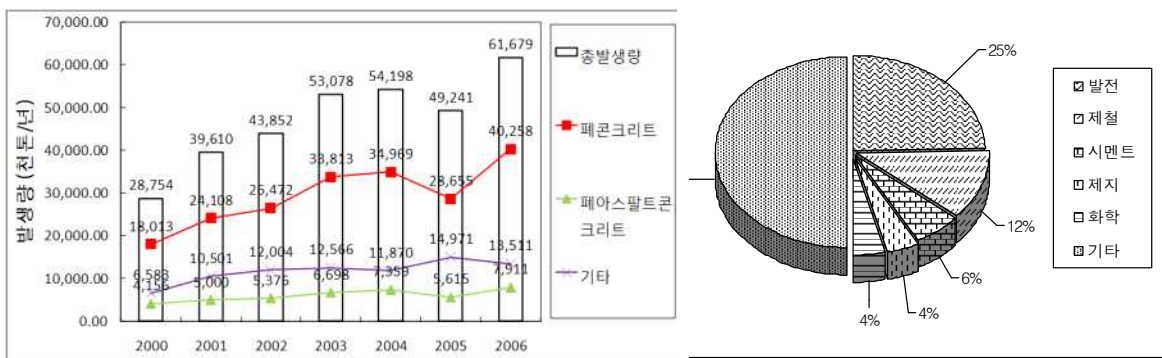


그림 1-4. 국내 건설폐기물 발생량

그림 1-5. 국내 산업별 CO2 배출량

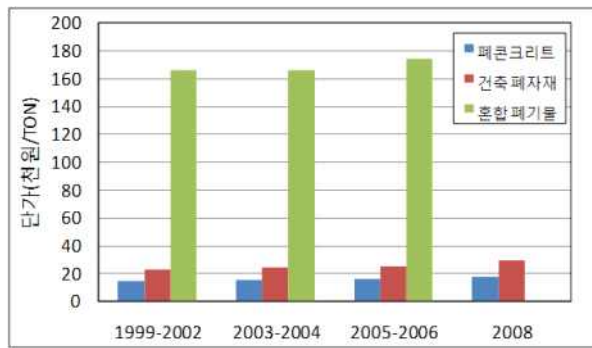


그림 1-6. 국내 석회석 생산량

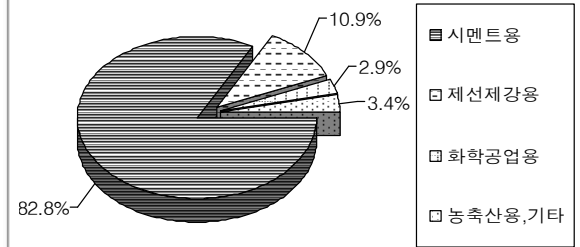


그림 1-7. 석회석 용도별 국내 수요비

- 연구개발의 정의, 범위, 특징

(1) 연구개발의 정의

폐콘크리트 미분말을 이용하여 저탄소 녹색성장 대응형 지속가능한 재생시멘트로 개발 · 활용하기 위한 기술력 확보

(2) 연구개발의 범위

- 폐콘크리트 미분말과 산업부산물을 이용하여 고품질 재생시멘트를 제조 · 생산할 수 있는 원료 전처리 및 원료 최적 배합방법, 그리고 수화성 회복을 위한 최적의 「저탄소형 재생 프로세스(Low Carbon Recycle Process)」를 개발
- 「저탄소형 재생시멘트」의 수화성 회복 및 반응기작(메카니즘) 규명 및 수화모델의 제안
- 「저탄소형 재생시멘트」를 이용한 콘크리트의 유동특성, 강도특성 및 내구특성의 규명과 최적 배합설계 방법의 제시

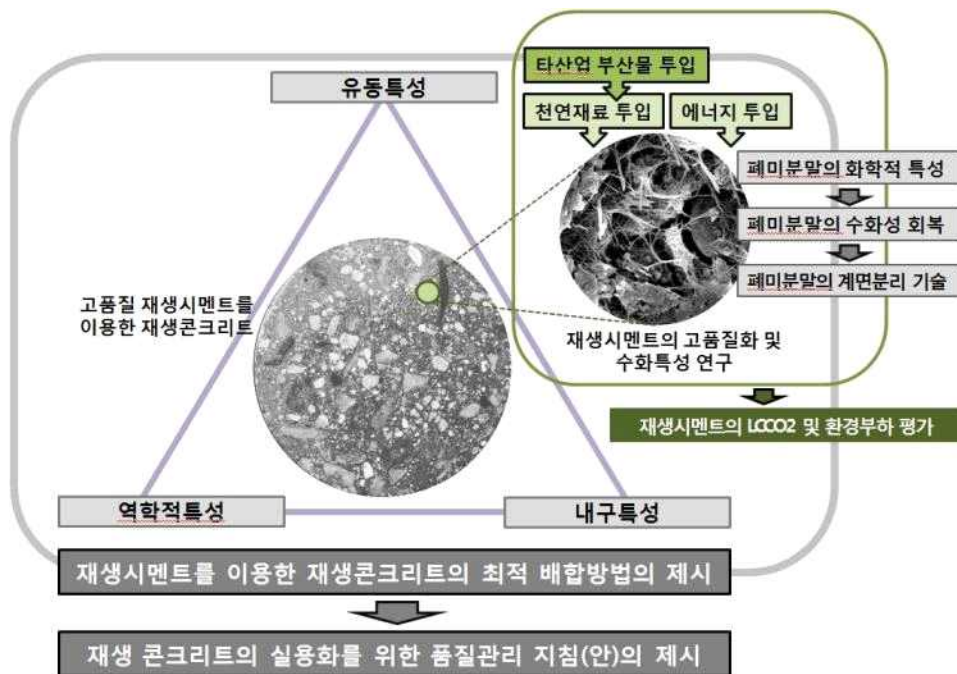


그림 1-8. 연구개발의 범위

(3) 연구개발의 특징

「저탄소형 재생시멘트」는 기존의 불활성 충전재로서의 재생재 활용에서 벗어나 폐기물의 화학적 특성을 기반으로 한 고부가가치형 개발로서 실용적 가치가 크며, 재생프로세스 및 수화반응 기작(메카니즘)의 모델을 규명하는 측면에서 학술적 가치와 연구의 독창성이 큼

- 관련분야의 국내외 기술개발 현황

(1) 국내외 기술동향

가. 국내 기술동향

● 시멘트 및 콘크리트 구성재료의 재생 기술 분야

- 폐기콘크리트를 활용한 재생 곶은골재의 제조기술 및 실용화 방안에 관한 연구개발 활발
- 자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률' 제정 (1994년) : 건설폐기물을 일정량 재활용 의무화
- 폐콘크리트계 미분말(폐콘크리트 20% 이상 차지)의 처리기술에 관한 연구는 전무한 상태

● 시멘트 및 콘크리트의 CO₂ 저감 기술 분야

- 시멘트 및 콘크리트의 제조 장치의 효율성 향상의 기술개발이 주를 이룸
- 콘크리트 제조시에 CO₂ 발생 원단위가 작은 고로슬래그 미분말 등을 혼입
- 구조물의 공용기간 중에 콘크리트의 탄산화 반응에 의해 공기 중의 CO₂를 대량 고정화시키는 방법

● CO₂ 저감형 Super Performance 콘크리트 기술

- 고성능 콘크리트 기술 개발에 의한 장수명화 도모를 통한 LCCO₂ 절감 효과
- RPC, ECC, SLC, PCMC 등의 개발에 관한 연구 진행 중(표 1)

나. 국외 기술동향

● 일본

- 일본은 1980년대 중반부터 환경문제가 사회적으로 대두되면서 법안마련과 연구를 체계화 하였음
- 건설폐기물 대책의 3가지 과제 : 부산물의 발생억제, 리사이클 추진, 부산물의 적정관리
- 일본 건설성의 「리사이클 플랜 21」 발표
 - 목표 리사이클율을 90%로 설정
 - 건설분야에서 재자원화의 더욱 적극적인 활용을 사회 각 분야에 요구
- 현재 콘크리트의 완전리사이클링화를 도모하는 연구 및 대책 프로젝트를 대학과 국가연구기관을 중심으로 실시 중

● 독일

- 유럽에서 건설폐기물 재활용이 가장 활발히 추진

- 1951년에 건설폐기물 재활용 추진대책을 마련하여 폐벽돌을 콘크리트용 골재로 재활용 하는데 기여

● 기타 유럽

- 네덜란드 : 1980년대부터 건설폐기물의 재활용에 따른 문제점 등을 부각시켜 해결방안을 모색
- 프랑스 : 1970년대 자동차 도로 기층재 및 노반재로 사용
이후 재생콘크리트의 역학적 성질과 물리·화학적 특성 연구

(2) 국내외 산업동향

가. 국내 산업동향

● 현재 국내에서는 폐콘크리트 미분말의 자원으로서 유상매각 및 재생재료에 관한 시장이 전무함

- 일부 시멘트 제조회사에서 연구용으로 적용 중 (p.5~8 연구동향 참조)
- 향후, 친환경건축 인증제 및 폐기물 처리에 대한 법적·조세적 측면의 우선제도가 생길 경우, 급속도로 관련 산업의 발전 및 성장이 예상됨

● 주요 관련 업체는 다음과 같음.

- 부산원료 생산자(공급자)로서 폐콘크리트 처리업 및 제철공장(고로슬래그)과 화력발전소 (플라이애쉬, 바텀애쉬)가 있음
- 재생재료 생산자로서 시멘트 제조회사가 있음
- 재생재료 소비자로서 건설회사 및 건자재 업체가 있음

나. 국외 산업 동향

● 미분혼합용 시멘트용 혼화재

- 기술적인 가능성도 크며, 대량이용 예상
- 품질의 한계로 인하여 저장도 시멘트라는 새로운 카테고리의 창출
- 환경부하 저감에 근거한 환경기준(KS, ISO 등)에 의한 규격화 필요

● 지반개량용 고화재

- 리사이클의 실적도 있으며, 대량이용 예상
- 사업성은 유통, 품질의 안정 및 가격에 의존
- 토목재료로서 육가크롬의 용출 등의 대책 필요

● 유동화 처리토

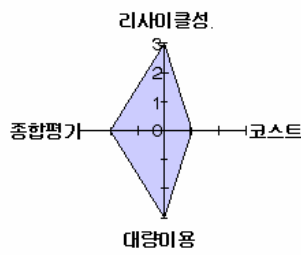
- 기술적 가능성이 높으며, 유가성 높음
- 생산지 주위에 30~40만^m³/년의 수요가 확보된다면 사업화 가능 (유가매각)

● **아스팔트 필러**

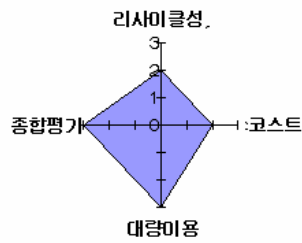
- 기술적으로 리사이클 가능, 시장 예상
- 일본에서는 3~4,000円/ton으로 유상매각
- 품질안정의 확보 및 미분용 설비(사일로 등) 투자부담의 문제

표 1-1. 폐콘크리트 부산 시멘트계 미분말의 종합 용도평가

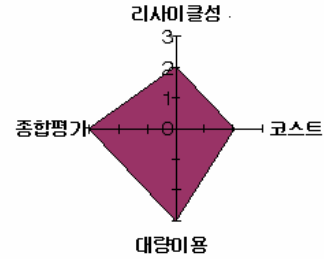
용 도		가능성 평가			
		리사이클	코스트	대량이용	종합평가
시멘트 원료		◎	△	◎	○
드라이모르터용 혼화재		△	△	△	△
시멘트용 혼합재	보통시멘트용	○	△	◎	○
	미분혼합시멘트용	○	○	◎	◎
콘크리트용 혼화재	보통시멘트용	○	○	◎	◎
	고유동콘크리트용	○	△	△	△
	뿔콘크리트용	○	△	△	△
	댐콘크리트용	○	△	△	△
	그라우트용	○	△	△	○
ALC원료		○	△	△	△
입상화 처리		○	○	△	○
미분소성골재		△	△	△	△
식재용 객토		○	△	△	△
토목건축 재료분야	지반개량 고화재	◎	○	◎	◎
	지반개량재	△	△	△	△
	토질재료 - 되메움재, 뒷채움재	△	△	◎	○
	토질재료 - 성토재	△	△	◎	△
	유동화 처리토	◎	◎	△	◎
	입상토	◎	△	△	△
	아스팔트 필러	△	○	○	◎



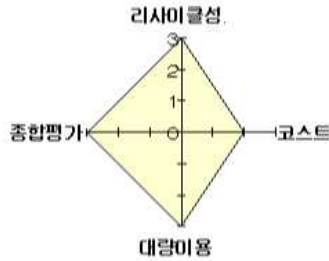
a) 시멘트 원료



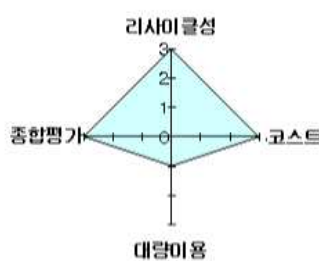
b) 미분혼합 시멘트용



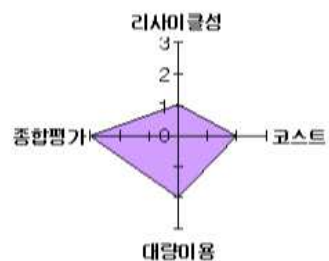
c) 보통콘크리트 혼화재



d) 지반개량용 고화재



e) 유동화처리토



f) 아스팔트필러

그림 1-9. 폐콘크리트 부산 미분말의 해외 사례 사업성 평가

(3) 특허 동향

- 현재, 국내 특허의 대부분은 순환골재(재생골재)의 개발이 주를 이루며, 표 3은 폐콘크리트 미분말의 재생기술에 관한 특허 동향을 나타낸 것임
- 폐콘크리트 미분말의 재생은 다음과 같이 대별된다.
 - 잔골재의 대체 재료로서의 불활성 충전재로서 사용
 - 재소성에 의한 수화성 회복을 이용한 수경성 재료로서 사용
- 현재, 국내 폐콘크리트 미분말의 재생기술의 대부분은 잔골재 성분 또는 가소성 부여용 충전재 등으로 사용되는 경우가 많으나, 이러한 기술은 폐미분말이 가지고 있는 화학적 특성 등을 고려하지 않은 저부가가치 기술로서 판단됨
- 재생시멘트의 경우, 아직 원료배합 단계에서 천연자원의 소비 및 탈탄산 반응으로 인한 온실가스 배출의 문제가 해결되지 못한 상태
- 500~800℃의 저온소성에 의한 재생시멘트 제조의 발명자는 현재 본 상시과제를 준비하고 있는 참여연구원으로서, 당시의 기술은 잔골재의 혼입으로 인한 시멘트 강도의 저품질화 문제가 있음

표 1-2. 폐콘크리트 미분말의 재생에 관한 특허 동향

특허명	출원번호	출원일자	비고
	특허번호	공개일자	
재활용 폐콘크리트미분을 활용한 가소성 주입 충전재	1020090081291	2009.08.31	잔골재 대체용 가소성 주입충진재
	1020110023418	2011.03.08	
폐콘크리트에서 얻어지는 폐콘크리트 미분말을 이용한 콘크리트 조성물	1020090102766	2009.10.28	잔골재(규사) 대체용
	100984211	2010.09.17	
활성고령토와 폐콘크리트슬러지를 이용한 콘크리트 경화체 제조방법	1020090064075	2009.07.14	폐콘크리트 슬러지와 활성고령토를 혼합 사용 알칼리성 자극제 이용한 강도발현 메커니즘
	100929309	2009.11.23	
폐콘크리트를 이용한 고기능성 건축자재의 제조방법	1020070061589	2007.06.22	폐콘크리트 미분슬러지와 순환 잔골재 이용한 시멘트 벽돌 제조
	100879247	2009.01.12	
폐콘크리트미분말을 이용한 인공경량골재 및 그 제조방법	1020070000148	2007.01.02	폐콘크리트 미분말과 흙을 혼합하여 소성한 경량골재
	-	-	
폐콘크리트 슬러지를 이용한 재생 시멘트 제조방법	1020080053978	2008.06.10	소성 폐미분말과 고로슬래그, 생석회를 혼합한 재생시멘트 800~1,000℃ 소성
	-	-	
폐콘크리트 슬러지를 이용한 건설용의 콘크리트 혼화제의 제조방법	1020050088223	2005.09.22	폐콘크리트 슬러지에 시멘트 및 메타카울린을 첨가하여 잠재수경성 유도
	100693950	2007.03.06	
재생 시멘트 제조방법	1020020024849	2002.05.06	폐콘크리트 미분말을 500~800℃ 소성
	100379697	2003.03.28	

- 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치(연구개발결과의 우수성 및 차별성을 중심으로) 등

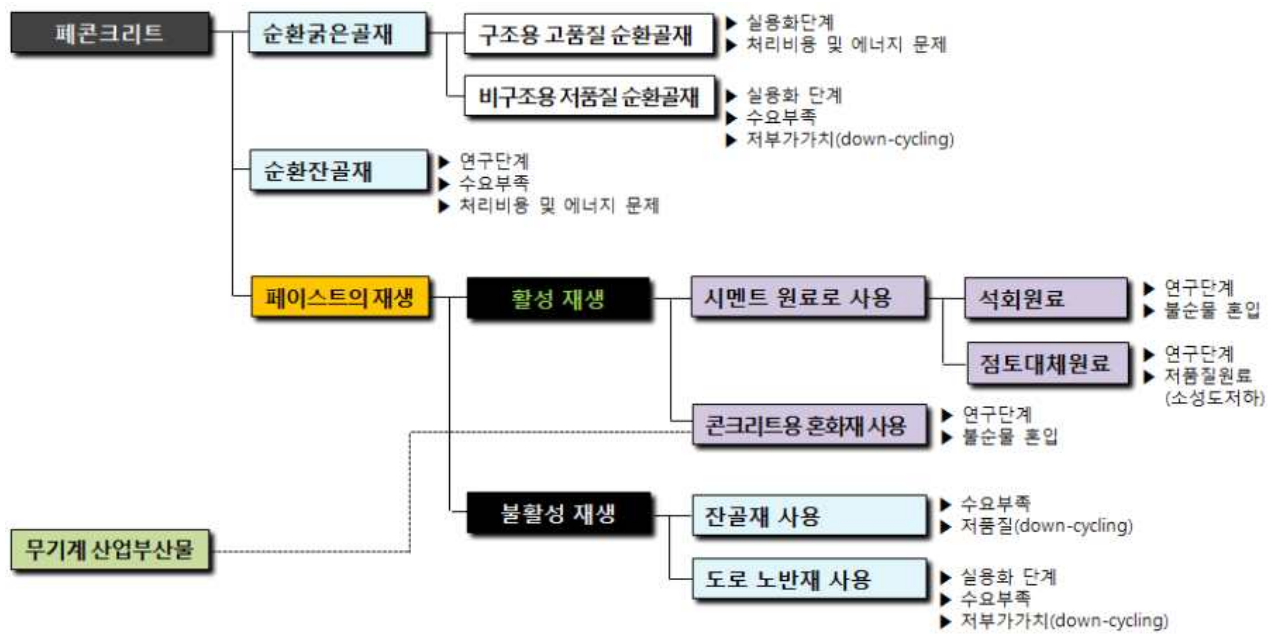


그림 1-10. 폐콘크리트 부산 미분말 및 재생시멘트에 관한 연구개발 현황

- 현재, 「폐콘크리트의 재활용에 관한 연구」 현황은 그림 9와 같으며, 본 연구에서 대상으로 하는 페이스트 부분의 「폐콘크리트 미분말의 재생」 방법은 소재의 화학적 성능을 활용한 고부가가치적 활용 방법인 「활성 재생방법」과 입자선별을 통한 저부가가치적 활용 방법인 「불활성 재생방법」이 있음
- 「활성 재생방법」은 내부 CaO 성분을 이용한 시멘트 원료로서의 활용이 본 연구진에 의해 일부 이루어졌으며, SiO₂ 및 Al₂O₃ 성분을 이용한 점토 대체재료로서 활용은 일부 실용화 단계에 있음

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

- 연구수행 전략 및 방법론

(1) 연구개발 추진체계

- 본 연구개발사업은 기존 기술의 문제점 분석 및 목표 기술 개발 및 선진화와 사업화의 부분으로 각 연구기관이 상호 유기적으로 협조하여 수행

- 주관기관인 「한국해양대학교 해양공간건축학부 박동천 교수 연구진」은 본 연구개발의 주요 메커니즘을 개발하고, 수화반응 관련 모델 구축, 내구성 확보를 위한 실험 및 시뮬레이션 등 제반 물성분석을 통하여 신기술 개발 프로세스의 전반적인 연구영역을 담당
- 국내 유일의 세라믹/무기재료 분야 정부출연기관인 「한국세라믹기술원」에서는 저탄소형 재생시멘트 원료 및 특성분석, 수화반응에서의 미세구조를 분석하는 협업체제를 이루며, 이를 통해 개발 대상품인 재생시멘트의 균일한 품질확보 및 실용화 가능성에 대한 연구영역을 담당
- 주요 성능테스트는 주관기관 주도하에, 건설감리사업을 수행하는 「상지ENG」와 「힐ENG」(참여기업)과 공동으로 기획 및 추진하여, 현장적용시 문제점과 기술개선 방향을 도출하는 피드백 시스템으로 진행

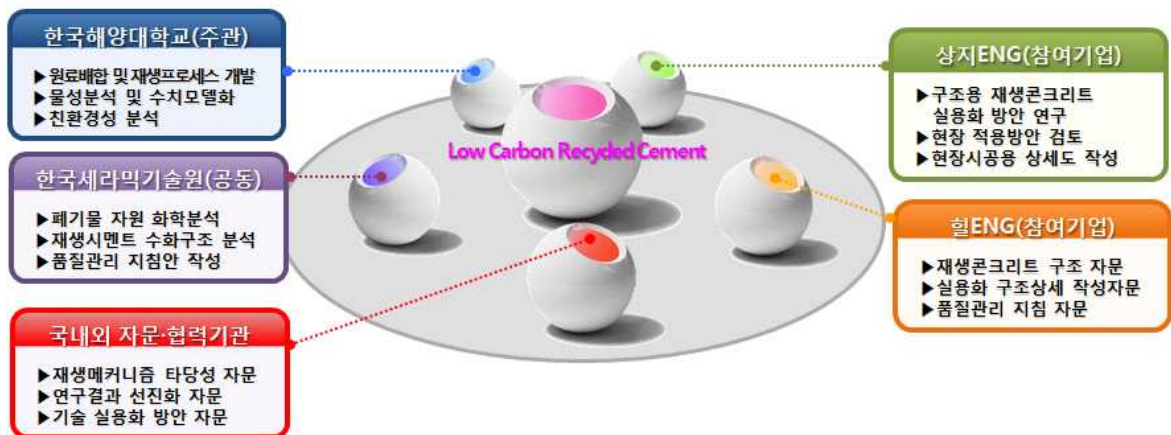


그림 2-1. 참여연구진의 역할 및 추진체계

- 또한, 참여기업은 요소기술의 시제품 성능 분석 및 실용화를 위한 평가 요소 도출에 관한 자문기구로서 역할
- 개발기술의 활용 및 실용화를 위하여, 「한국해양대학교」와 국책연구기관인 「한국세라믹기술원」, 그리고 참여기업이 공동으로 활용지침 및 매뉴얼을 작성하고, 일련의 연구결과를 학회 등에 논문으로 발표하여 사업의 확대화를 도모

- 해외 유명 대학 및 연구기관의 연구자를 중심으로 하는 자문단을 구성하여, 연구계획 및 결과의 타당성 검토, 그리고 기술개발의 선진화 전략 수립 등을 수행

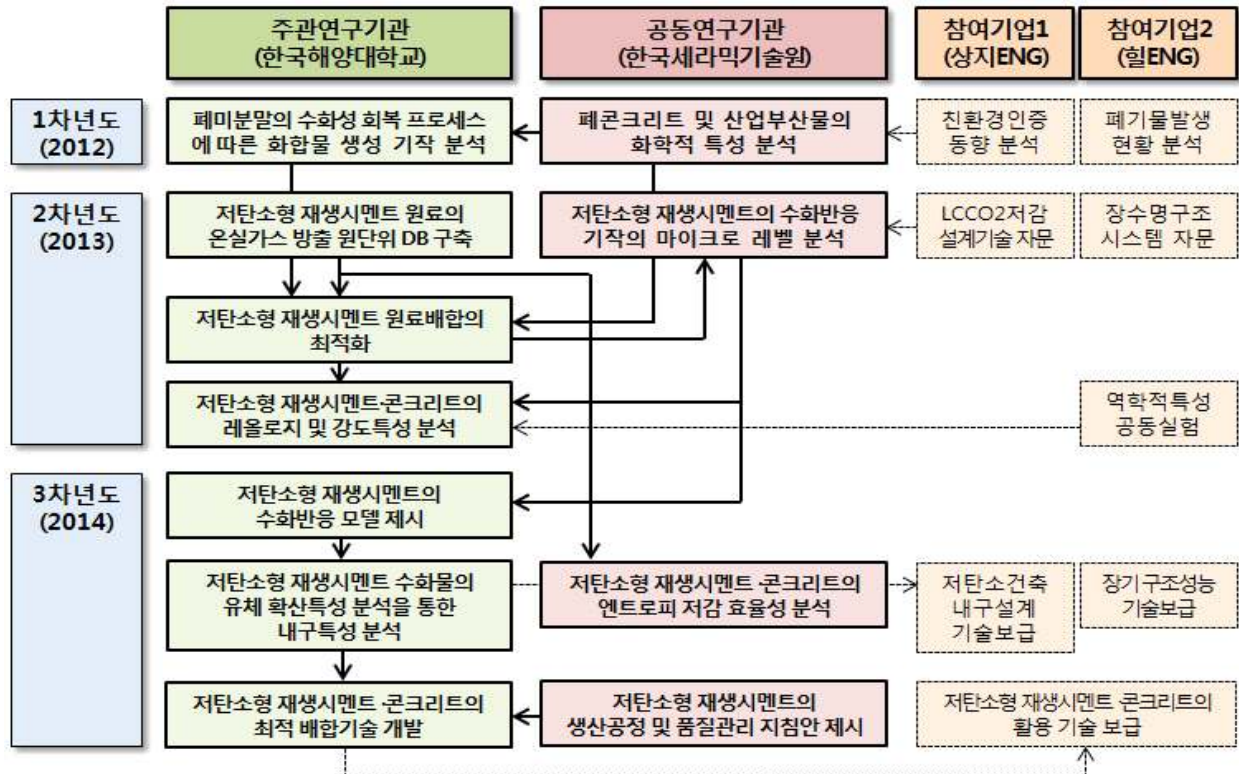


그림 2-2. 연구추진 전략도

- 연구수행과정 및 내용(이론적, 실험적)

연차	연구내용	세부추진 계획 및 방법
1차 년도	■ 기존 연구 및 문헌 조사 - 재생재료 개발 및 성능 고품질화를 위한 선진국의 연구 / 개발 현황 -건설폐재의 고품질 재활용을 위한 선진국 사례 조사 -폐콘크리트의 고품질 재활용을 위한 각국의 수집, 처리, 재생 시스템의 조사 -고품질 재생시멘트의 생산을 위한 폐콘크리트 리사이클 시스템 제시	▫ 친환경 도시 건설 및 재생재료 고품질화를 위한 선진국의 폐기물 관리실태 및 사례 조사 ▫ 폐콘크리트의 고품질 재활용을 위한 선진국의 폐기물 수집 및 처리, 재생 시스템 조사 ▫ 폐콘크리트 미분말을 이용한 재생시멘트의 고품질화를 위한 폐기물 관리 측면의 최적 리사이클 시스템 제시
	■ 폐콘크리트 미분말 및 산업부산물의 화학적 특성 분석 -폐콘크리트 미분말의 배합 및 재령에 따른 화학적 특성 분석 -폐콘크리트 내부 시멘트계 수화물의 광물학적 특성 분석 -타산업 무기계 부산물의 화학적 특성의 DB 구축	▫ 폐콘크리트 미분말의 배합 및 발생시스템을 통한 불순물 혼입여부와 단일 폐기물 배출을 위한 시스템 연구 ▫ 폐콘크리트 미분말의 발생시점(구조물 폐기시점)에 따른 구성 화학성분의 변화분석을 통한 최적 재생 목표 및 프로세스 설정 ▫ 고로슬래그, 플라이애쉬 등의 산업부산물을 비롯한 타산업 무기계 부산물의 화학적 특성의 DB 구축
	■ 폐미분말의 수화성 회복 프로세스에 따른 화합물 생성 기작(메카니즘) 분석 -폐콘크리트 미분말 및 산업부산물의 소성도 평가 -각 소성온도에서의 내부 구성화합물의 분해 및 변태 특성	▫ 폐콘크리트 미분말 및 함유 실리카물질의 소성도 분석 ▫ 폐콘크리트 미분말의 다양한 소성조건에 따른 수화성 회복 연구 ▫ 폐콘크리트 미분말을 이용한 재생시멘트의 구성화합물의 미시구조와 각 화합물의 수화반응 특성 ▫ 폐콘크리트 미분말의 소성조건과 폐기시점에 따른 품질오차 평가 및 검토 ▫ 폐기과정에서의 불순물질 혼입 및 미분말내 잔골재 성분 및 혼입량에 따른 유리석회량 분석 및 강도 영향 분석

연차	연구내용	세부추진 계획 및 방법
2차 년도	■저탄소형 재생시멘트 원료배합의 최적화 -원료물질의 각 온도 재생시 온실가스 방출량 원단위 산출 -원료물질의 화학적 특성 및 온실가스 방출량, 소성시 시멘트 화합물 생성량을 목적함수로 하는 다목적 최적화 알고리즘 구축	▫ 각 폐기 및 부산원료의 소성도를 고려한 저탄소형 재생시멘트 원료 배합의 최적화 ▫ 원료물질의 온실가스 배출 원단위와 소성프로세스의 에너지 소비량을 토대로 한 원료배합 및 재생프로세스의 최적화 연구
	■저탄소형 재생시멘트의 수화반응 기작(메카니즘)의 마이크로 레벨 분석 -저탄소형 재생시멘트의 재령에 따른 수화특성 분석 -저탄소형 재생시멘트의 수화생성물의 미시구조 분석	▫ 재생시멘트 수화물 미시구조의 물리·화학적 측면에서의 분석을 통하여 재생시멘트의 물성의 과학적 분석 ▫ 재생시멘트 수화물의 미시구조 분석을 통한 수화반응 기작의 분석 ▫ 재생시멘트의 미시구조적 특성과 제반물성(강도 및 내구성을 중심으로)의 상관성 분석과 이론식 제안
	■저탄소형 재생시멘트·콘크리트의 레올로지 특성 및 강도특성 분석 -저탄소형 재생시멘트의 원료 소성도에 따른 응결특성과 유동특성 분석 -저탄소형 재생시멘트의 초기강도 및 28일, 장기강도 특성 분석 -저탄소형 재생시멘트와 혼화재료를 이용한 고강도 재생콘크리트 개발 가능성 분석	▫ 고품질 재생시멘트를 이용한 재생콘크리트의 workability, consistency, pumpability, finishability 실험을 통한 시공성 및 현장적용성 평가 ▫ 재생콘크리트의 역학적 특성을 통한 구조재료 적용여부 평가 및 강도설계를 위한 W/RC 선정방법 연구 ▫ 재생콘크리트의 각종 인자에 따른 내구특성 분석을 통한 고내구화 방법 연구 ▫ 고성능 재생콘크리트 개발을 위한 재생시멘트와 콘크리트용 혼화재료의 화학반응기구 분석 및 영향 연구
	■ 폐콘크리트 미분말 및 타산업 부산물의 온실가스 방출 원단위 DB 구축 -원료물질의 각 온도 재생시 온실가스 방출량 원단위 DB 구축 -천연 시멘트 원료의 원료생산 및 시멘트 제조, 콘크리트 제조에 따른 온실가스 방출량의 원단위 DB 구축	▫ 저탄소형 재생시멘트 원료물질의 온실가스 방출 원단위 DB 구축 ▫ 보통포틀랜드시멘트 원료의 원료생산 및 제조프로세스에 따른 온실가스 방출 원단위 DB 구축

연차	연구내용	세부추진 계획 및 방법
3차 년도	■저탄소형 재생시멘트의 수화반응 모델 제시 -원료물질의 재령 및 종류와 성분비에 따른 수화반응 모델 규명 -저탄소형 재생시멘트의 수화반응 모델 제시 -저탄소형 재생시멘트의 재령에 따른 강도발현 및 열화 모델 제시	▫ 저탄소형 재생시멘트의 수화반응을 모델화 ▫ 저탄소형 재생시멘트의 수화초기, 각 재령에 따른 강도발현 모델 ▫ 장기 내구특성 평가 결과를 토대로 한 열화모델 분석
	■저탄소형 재생시멘트 수화물의 유체 확산특성 분석을 통한 철근콘크리트 구조물의 장기 내구특성 모델 -재생시멘트의 원료성분 및 수화재령에 따른 알칼리도 평가 -재생시멘트의 축진 탄산화에 의한 중성화 특성 분석 -재생시멘트 수화물의 유체 확산특성 분석	▫ 재생시멘트 수화물의 알칼리도 평가 ▫ 재생시멘트 수화물의 축진재령 중성화에 의한 알칼리도 변화과정 분석 및 메커니즘 규명 ▫ 재생시멘트 수화물의 배합특성에 따른 기체, 수분의 확산특성 분석
	■저탄소형 재생시멘트·콘크리트의 성능 기반 최적 배합기술 개발 -재생시멘트의 타입에 따른 물성값의 모델화 -구조재료 및 비구조재료를 목표로 하는 재생시멘트의 성능기반 최적 배합 알고리즘 제안	▫ 고품질 재생시멘트를 이용한 재생콘크리트의 물성을 바탕으로 최적 배합강도 산출식 도출 ▫ 재생콘크리트의 레올로지 특성분석에 의한 유동성 추정방법 및 품질관리 방법, 문제점 연구 ▫ 고품질 재생시멘트를 이용한 재생콘크리트의 유동성, 강도, 내구성을 고려한 합리적 배합 플로우 구축 ▫ 고품질 재생시멘트의 화학적 특성을 고려한 재생콘크리트의 강도발현과 양생법 및 적산온도에 따른 강도발현 특성 연구
	■저탄소형 재생시멘트·콘크리트의 엔트로피 저감 효율성 분석 -저탄소형 재생시멘트의 타입에 따른 온실가스 방출구조의 분석	▫ 저탄소형 재생시멘트의 비구조재 및 구조재 사용에 따른 철근콘크리트 구조물의 엔트로피 저감 효율성 분석

- 연구수행결과 및 결과의 검증 방법 등

학술지 및 학회발표에 게재된 논문과 평가제출 자료를 통해 확인가능

제3장 최종 연구성과 및 적용실적

- 개별연구성과

1. 폐미분말을 활용한 저탄소형 재생시멘트 제조

1.1 저탄소형 재생시멘트 제조과정

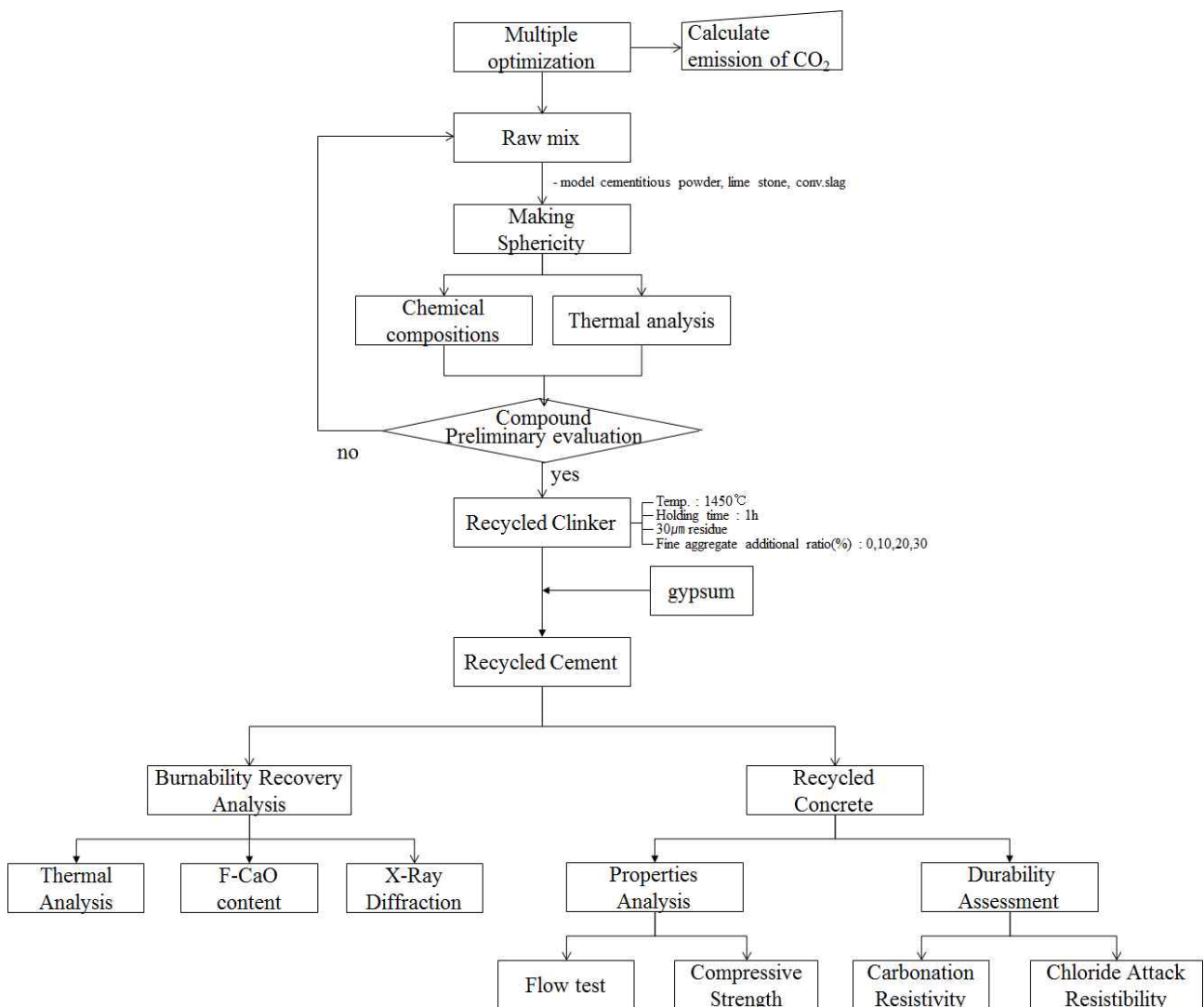


그림 1-1. 재생시멘트 연구 Flow Chart

폐콘크리트 미분말 내 잔골재미분의 함유율이 약 65%인 것과 잔골재 미분의 함유량이 재생시멘트 품질에 지대한 영향을 미치며 잔골재 미분의 혼입율이 30% 이상의 폐미분말은 활용도가 상당히 낮다는 결론을 바탕으로, 어느 정도의 잔골재 미분을 제거한다는 가정 하에 폐콘크리트 미분말 내 잔골재 미분(150μm미만)의 함유율을 0, 10, 20, 30%로 변화를 주며 폐콘크리트 미분말 모델을 제조하여 그림1과 같은 생산프로세스를 구축하는데 성공하였음

1. 2 저탄소형 재생시멘트 원료배합비 도출



그림 1-2. 다목적 최적화 수행과정

Bogue 계산값으로 OPC 관리기준에 준하는 LSD(lime saturation degree, 석회포화도; 90~100), SM(silica modulus, 규산율; 2.41~2.8), IM(iron modulus, 철율; 1.48~1.73)이므로 다목적 최적화 수행과정 그림 2와 같이 최적배합을 수행하여 그림1-3과 같은 원료배합비 및 비율 계수를 도출함

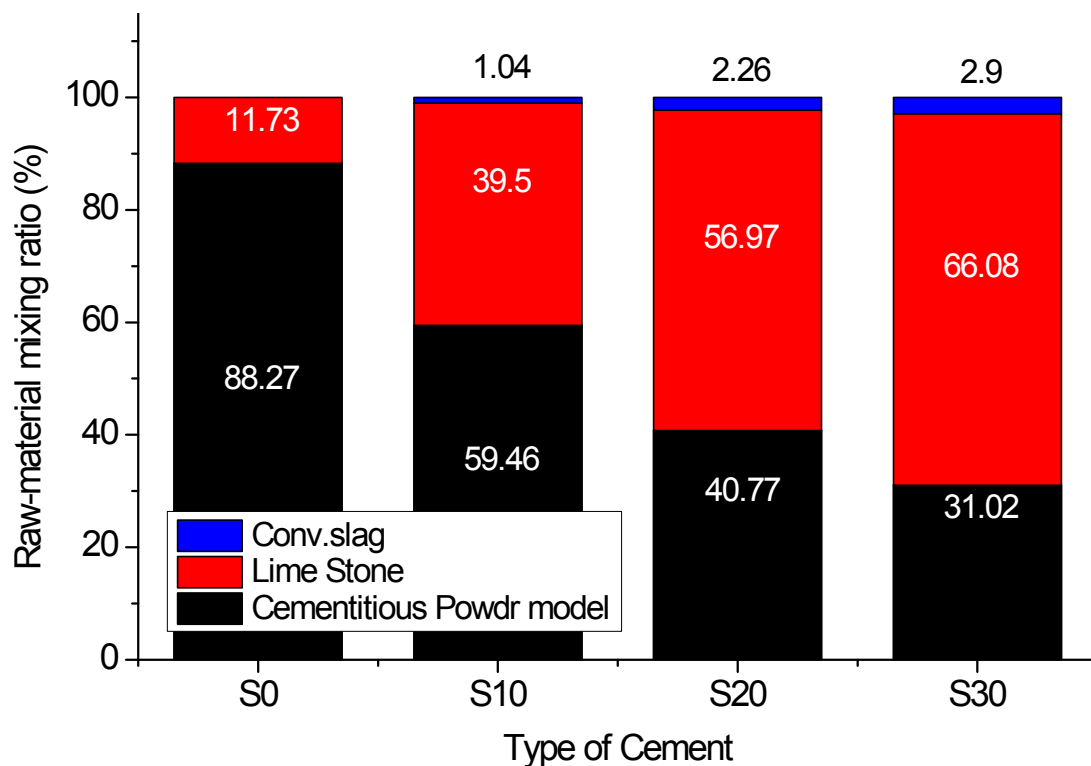


그림 1-3. 재생시멘트의 원료조합비

2. 저탄소형 재생시멘트의 수화반응 모델 제시

2.1 글리세린-에탄올법

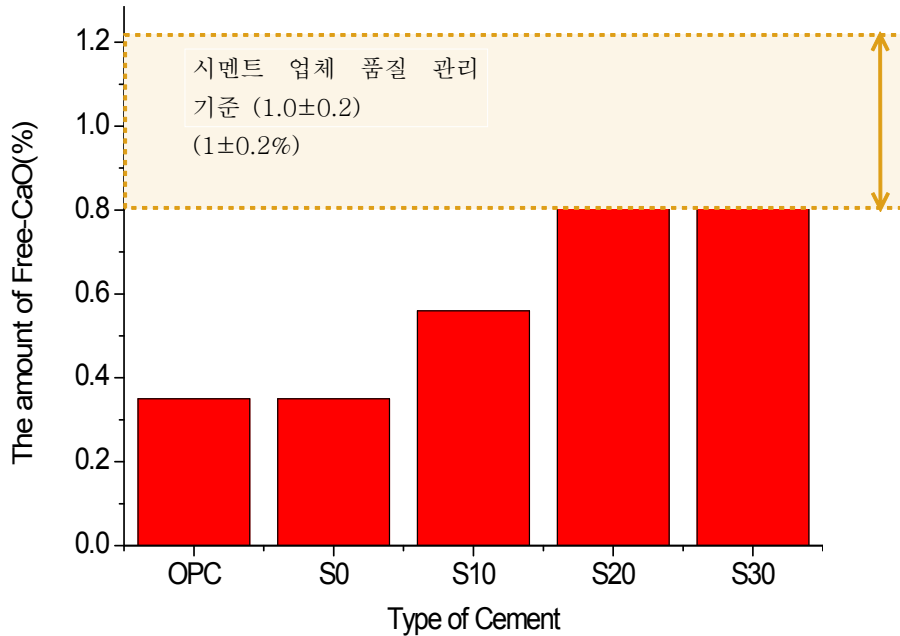


그림 2-1. OPC 및 재생시멘트의 Free-CaO

- OPC 및 폐미분말 잔골재 미분말 혼입을 별 재생 시멘트 클링커의 F-CaO 측정값은 모두 시멘트 업계의 클링커 품질 관리기준인 $1 \pm 0.2\%$ 내에 부합하는 것으로 나타남
- 폐미분말 내 잔골재 미분의 혼입율이 증가할수록 F-CaO량이 증가하다 특히, S30의 경우 시멘트 업계의 클링커 품질 관리기준 범위 내에 속하기는 하나 다소 높은 수준으로 나타남
- 이는 잔골재 혼입율이 증가함에 따라 잔골재에서 기인한 Quartz 결정형태로 다량 함유된 SiO_2 의 CaO와의 반응성이 떨어지기 때문, 즉 C2S, C3S의 클링커 주요 화합물로의 소성성이 떨어지기 때문인 것으로 추정됨
- 그러나 모든 타입의 유리 석회량은 OPC품질기준을 상회하는 결과로 상당히 우수한 소성성을 가진다고 평가할 수 있음

2.2 XRD

- 모든 배합에서 보통 포틀랜드시멘트 클링커 광물상인 C3S, C2S, C3A, C4AF가 검출 되는 것을 확인할 수 있었으며 잔골재 혼입율이 낮을수록 피크 값이 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수가 있음
- 잔골재 혼입율이 증가함에 따라 52° 부근에서 검출되는 C3S의 피크값이 점차 감소하는 경향을 보이는데 이는 잔골재 혼입율의 증가는 C3S의 합성에 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있음
- S30에서 37° 부근에서 CaO가 일부 검출되었는데 이는 잔골재 혼입율이 가장 높은 배합으로 Quartz성분의 SiO_2 가 다량 혼입되면서 CaO와의 합성이 완전히 이루어지지 않았기 때문인 것으로 추정됨
- OPC와 상당히 유사한 수준의 강도 및 형상을 나타내고 있기 때문에 여러 체반 물성 및 내구 특성 또한 OPC보다 다소 낮으나 상당히 유사할 것으로 예측됨

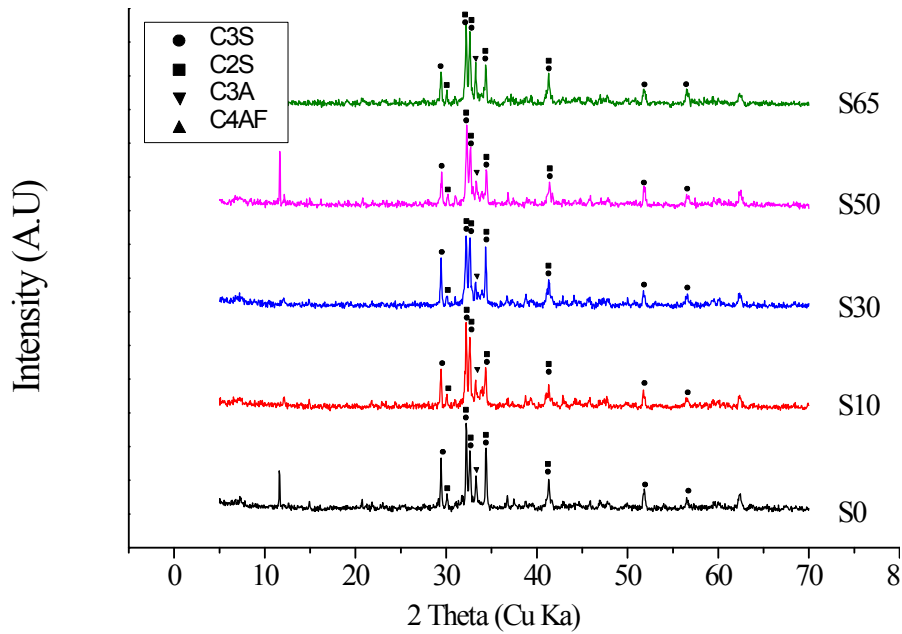


그림 2-2. OPC 및 재생시멘트의 XRD 곡선

2.3 TG/DTA

- 모든 배합에서 재령이 증가할수록 CH함유율은 증가하고 있으며, 폐미분말 내 잔골재 미분의 혼입율이 증가할수록 CH함유율 증가폭이 커지는 것으로 나타남
- 이는 다목적 최적화의 결과로 폐미분말 내 잔골재 혼입율의 증가에 따라 SM이 다소 커지면서 C3S 및 C3A의 함유량이 감소하고 C2S의 함유량이 증가하기 때문인 것으로 판단됨
- 또한 폐미분말 내 잔골재 미분말의 혼입율이 증가할수록 Ca(OH)_2 함유율, 즉 수화율이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 잔골재 내 함유되어 있는 낮은 소성성의 Quartz 결정형태의 SiO_2 의 증가에 의한 것으로 추정됨

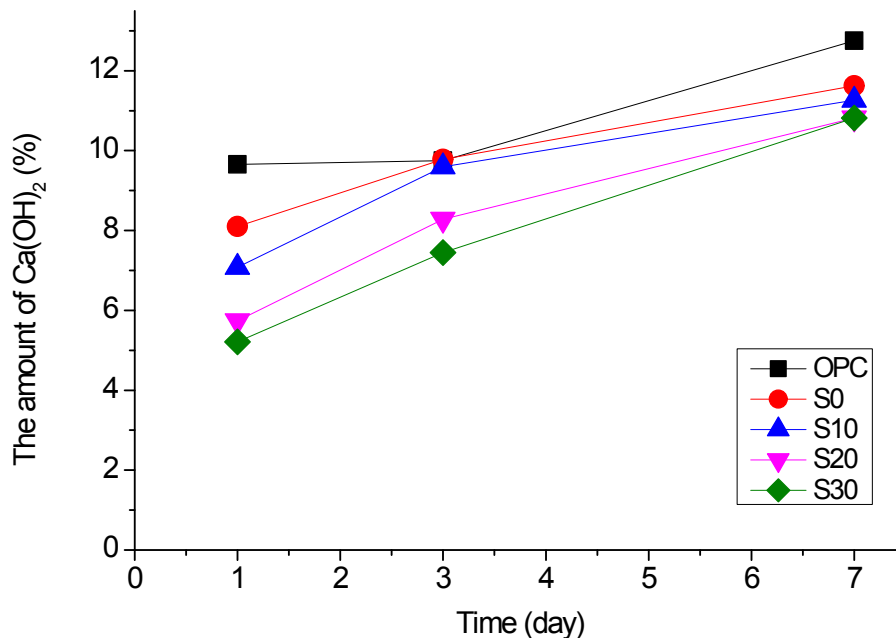


그림 2-3. 재생시멘트 타입별 Ca(OH)_2 함유율

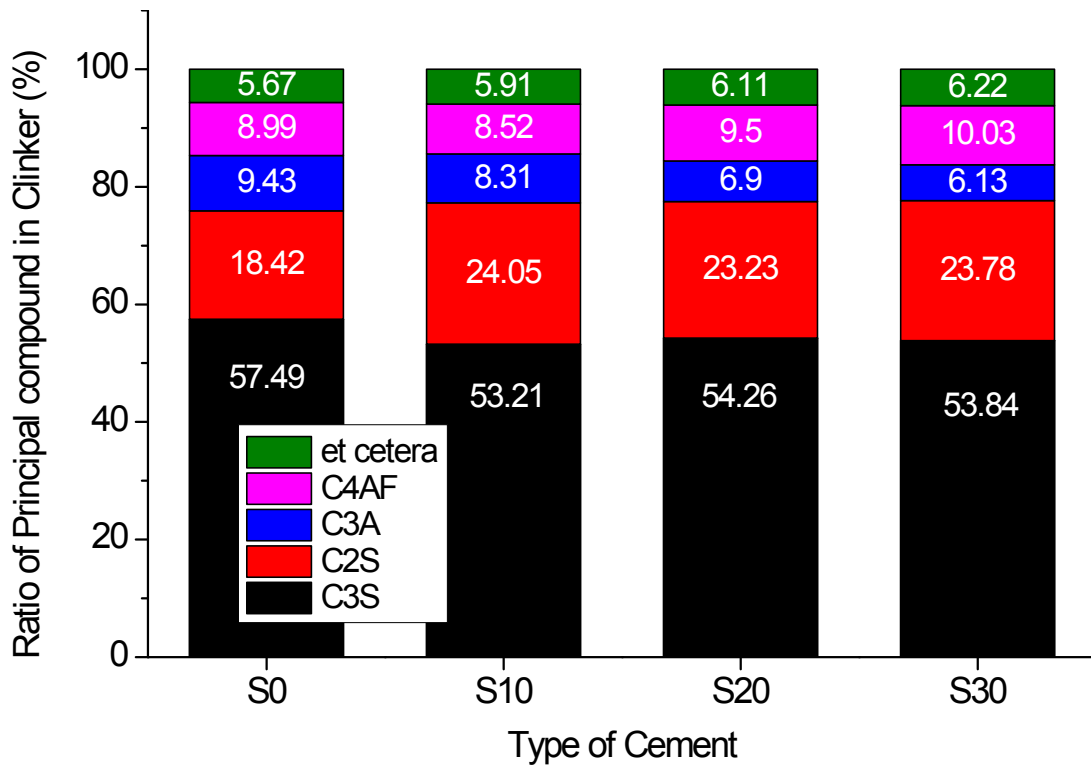


그림 2-4. 폐미분말 내 잔골재 혼입율에 따른 재생시멘트 주요 화합물량

3. 저탄소형 재생시멘트의 유동특성 및 강도특성 분석

3.1 저탄소형 재생시멘트의 유동특성 평가

① 시험체 제작

시험체는 KS F 2403:2014에 준하여 제작되었으며 배합설계는 표3-1과 같다.

표3-1. 저탄소형 재생시멘트 배합설계

slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	굵은골재 최대치수 (mm)	s/a (%)	W (kg/m ³)	단위용적 (l/m ³)			단위질량 (kg/m ³)		
						C	S	G	C	S	G
18	4.5	40	25	38.50	184	146.0	412.0	258.0	460.0	1092.0	670.7
		50		42.29	175	111.1	412.0	301.9	350.0	1092.0	784.9
		60		43.27	179	94.7	412.0	314.3	298.3	1092.0	817.2

② 슬럼프 플로우 시험

- S0 및 S10의 경우 OPC보다도 높은 유동특성을 가지는 것으로 나타났으나, S20 및 S30의 경우 급격히 플로우 값이 감소하는 것을 확인할 수 있음
- 이는 폐미분말 내 혼입되어 있는 잔골재에서 기인한 SiO₂(Quarz) 성분으로 인하여 재생시멘트 내 유리석회(水和)의 소화(消和) 반응시의 분화(粉化)현상에 의하여 유동성이 저하하는 것으로 판단됨
- 또한 OPC에 비해 W/C의 영향을 적게 받는 것으로 나타났으며 이는 강도 및 내구성 조정에 큰 이점으로 작용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 모든 타입의 재생시멘트가 시공성 관련

요구성능을 만족하며 가장 낮은 유동성을 나타낸 S30의 경우에도 OPC의 90%이상의 유동성을 나타냄

- 따라서 OPC 수준의 현장적용성이 가능할 것으로 판단됨

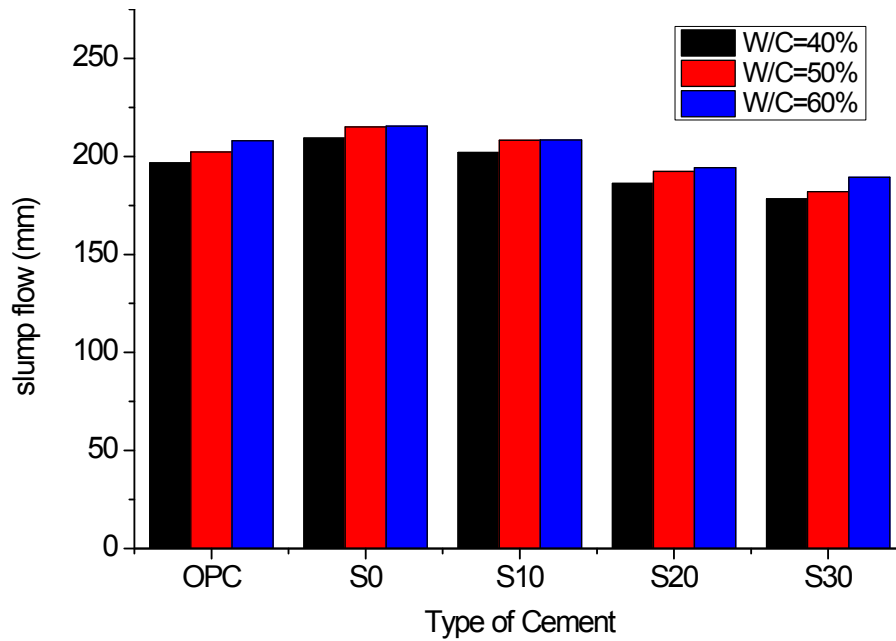


그림 3-1. OPC 및 재생시멘트 몰탈의 슬럼프 플로우 측정결과

③ 레올로지 시험

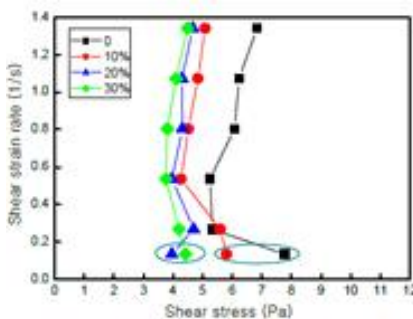


그림3-2 W/C: 40% 콘시스턴시

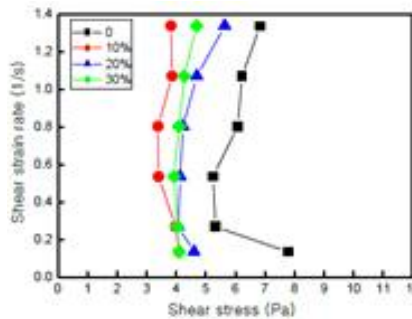


그림3-3 W/C: 50% 콘시스턴시

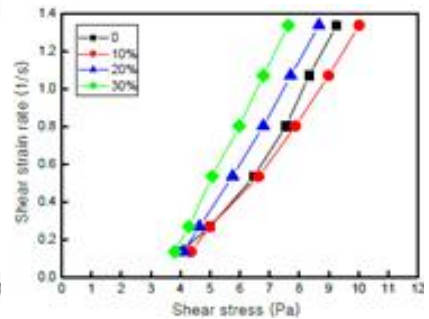
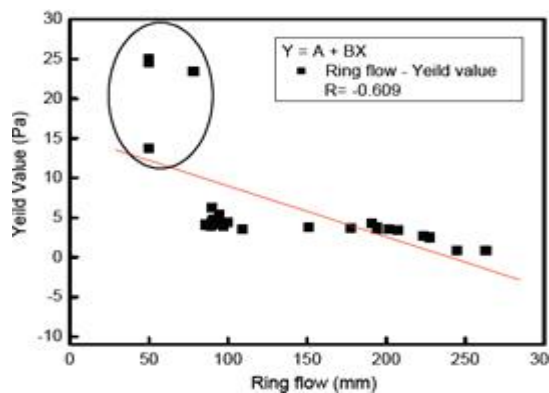
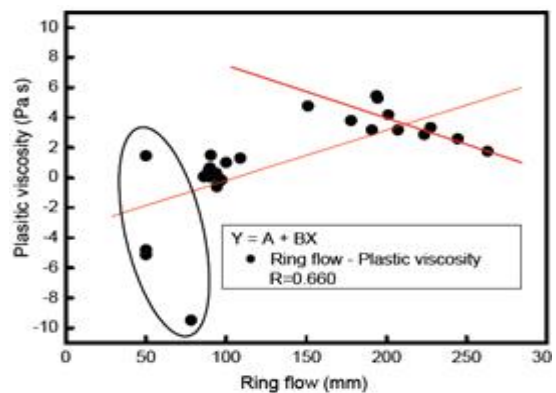


그림3-4 W/C: 60% 콘시스턴시



(a) 항복치



(b) 소성점도

그림 3-5 플로우와 레올로지 정수와의 상관관계

- 레올로지 특성분석을 수행한 결과 폐미분말 내 잔골재 미분의 함유량이 증가할수록 다소 항복치가 낮아지는 경향을 나타내고 있으며 특히, S0가 큰 차이로 높은 것으로 나타남
- 이는 재생시멘트 내 유리석회의 소화(消和) 반응시의 분화(粉化)현상에 의하여 잔골재 미분의 혼입이 증가할수록 유동성이 저하하기 때문인 것으로 생각되며 이러한 잔골재 미분이 혼입되지 않은 폐미분말을 시멘트 주원료로 사용한 S0의 경우에는 일어나지 않았기 때문인 것으로 판단됨
- 또한, W/C가 40%일 때 S0의 초기값에서 다소 불안정한 값을 나타내는 것을 확인할 수 있는데 이는 슬럼프 플로우 테스트와 동일한 이유로 유동성이 증가한 이유로 생각된다.
- 슬럼프 플로 값과 항복치의 관계는 반비례 관계를 나타내고 있으며, 유동성이 좋은 것으로 나타났던 S0 및 S10의 경우 비례관계를 나타내었으나, S20 및 S30의 경우 반비례관계를 나타냄

3.2 저탄소형 재생시멘트의 강도특성 평가

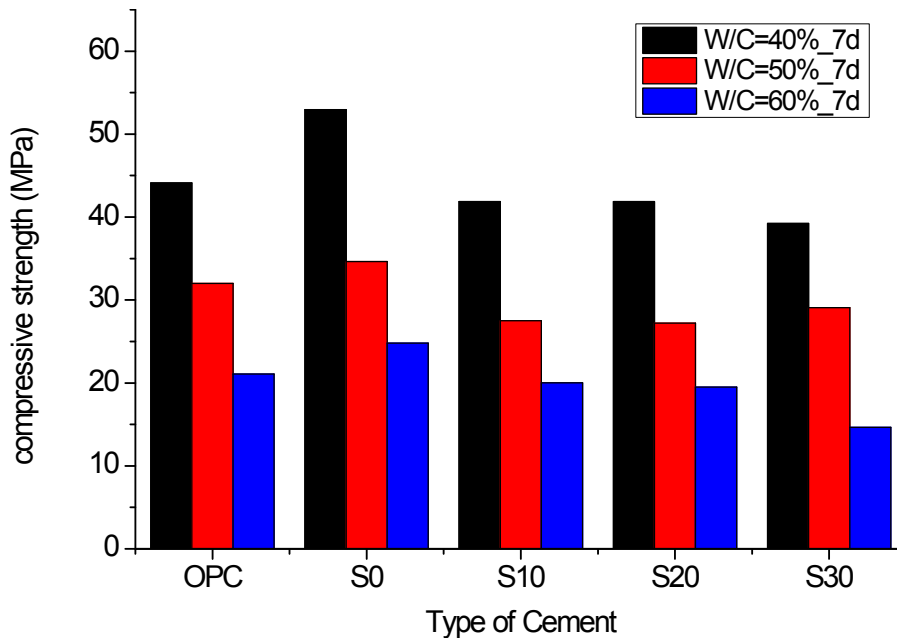


그림 3-6 재생시멘트 배합별 재령 7일 압축강도 시험

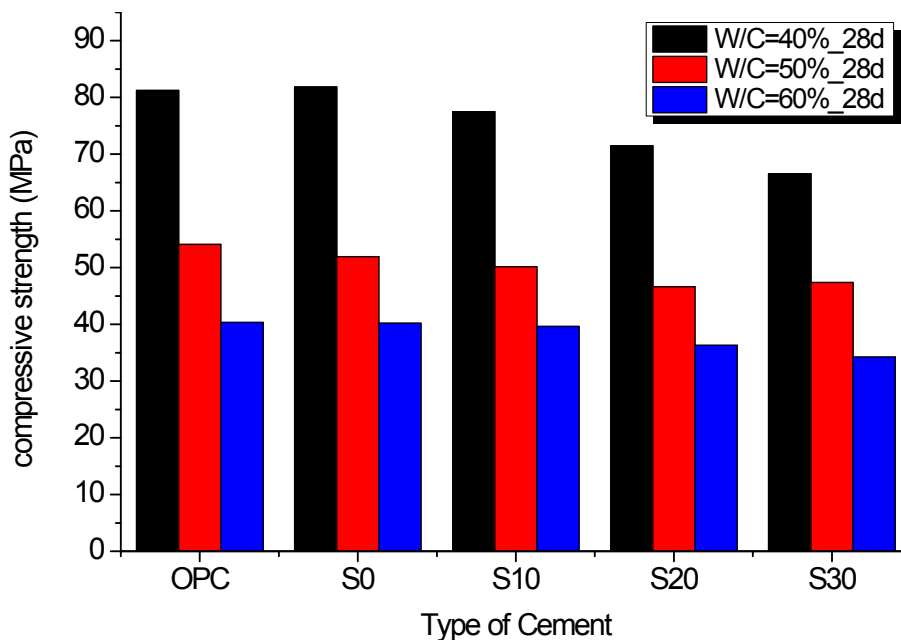


그림 3-7 재생시멘트 배합별 재령 28일 압축강도 시험

- OPC 및 저탄소형 재생시멘트의 압축강도를 측정해 본 결과 OPC 대비 75.40~100.74%에 상응하는 수준으로 높은 것으로 나타남
- 특히 S0의 W/C 40%의 재령 28일 압축강도의 경우 81.85MPa로 동일 조건에서의 OPC (81.25MPa) 보다도 높은 것으로 나타남
- 이는 소성성 향상을 위해 분말도를 4000으로 다소 높였기 때문에 수화반응이 활발히 일어날 수 있었기 때문인 것으로 생각됨

- 또한 다목적 최적화를 통한 화학적 성질을 토대로 시멘트 주요화합물 조성비를 미리 예측하여 조합원료의 최적배합비를 도출하였기 때문인 것으로 추정됨
- 그럼에도 불구하고 폐미분말 내 잔골재 혼입율이 증가할수록 압축강도가 다소 떨어지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 앞절에서 확인한 수화율과 관련하여 폐미분말 내 잔골재 미분에서 기인한 Quartz 결정형태의 SiO_2 의 낮은 소성성때문인 것으로 생각됨
- 그러나 S0 ~ S20은 보통 포틀랜드 시멘트의 수준에 상응하는 수준으로 실용화가 가능할 것으로 판단되며, S30의 경우 OPC의 약 75%의 압축강도이므로 OPC와의 혼합사용 및 비구조 재료의 실용화가 가능할 것으로 판단됨.

4. 저탄소형 재생시멘트·콘크리트의 엔트로피 저감 효율성 분석

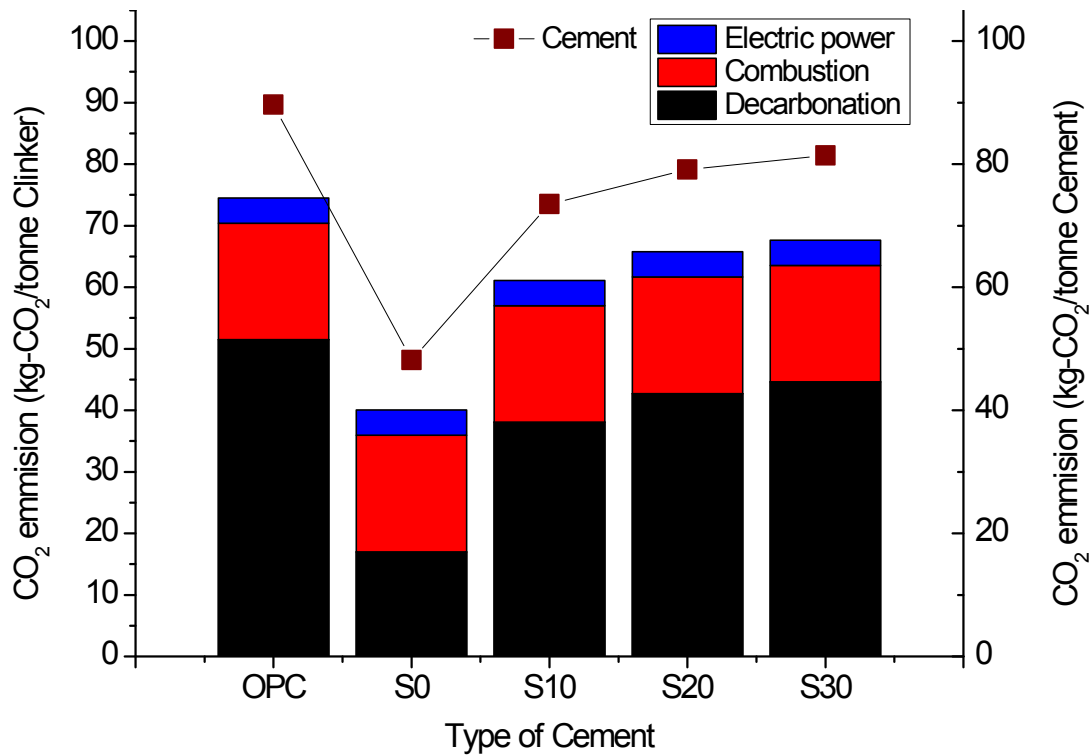


그림 4-1. OPC와 저탄소형 재생 클링커 및 시멘트 CO₂배출량

- 그림4-4를 통하여 폐미분말의 시멘트 주원료화가 시멘트 산업에서의 CO₂배출량 저감에 상당한 영향을 미치는 것을 확인할 있었으며 특히 잔골재 미분이 전혀 포함되지 않은 폐미분말의 경우 0.48 t CO₂/t Cement로 약 53% 수준까지 감소되는 것으로 분석되었음
- 이는 세계 CO₂배출량 약 19300Tg에서 시멘트 산업에 의한 약 5%의 CO₂ 배출량 965Tg 중 약 446.4Tg의 감소효과를 거둘 수 있다고 기대할 수 있음

5. 콘크리트의 건조수축

- OPC 콘크리트의 건조수축 측정값 및 극한 건조수축, 수정 건조수축값을 나타내었으며, 그림 5-5에 도식화하여 표현하였음.
- OPC 콘크리트의 극한 건조수축값은 787.24×10^{-6} in./in. 로 예측되었음
- 그림5-1에 재생시멘트(S10) 콘크리트의 건조수축 측정값 및 극한 건조수축, 수정 건조수축값을 나타내었으며 도식화하여 표현하였으며 그 값은 극한 건조수축값 766.60×10^{-6} in./in. 로 예측되었음.
- 재생시멘트(S10)을 이용한 콘크리트는 OPC 콘크리트에 비하여 약 20×10^{-6} 정도 더 높은값이 나타났음

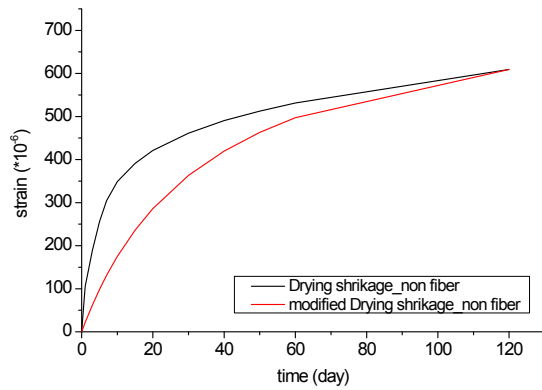


그림 5-1. OPC 콘크리트의 건조수축 및 수정 건조수축

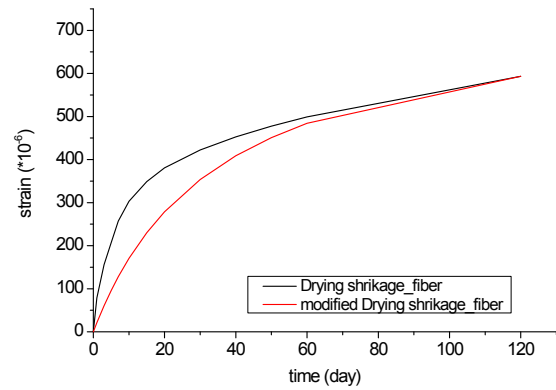


그림 5-2. 재생시멘트(S10) 콘크리트의 건조수축 및 수정 건조수축

6. 전기화학적 촉진 시험에 의한 콘크리트 중의 염소이온 확산 평가

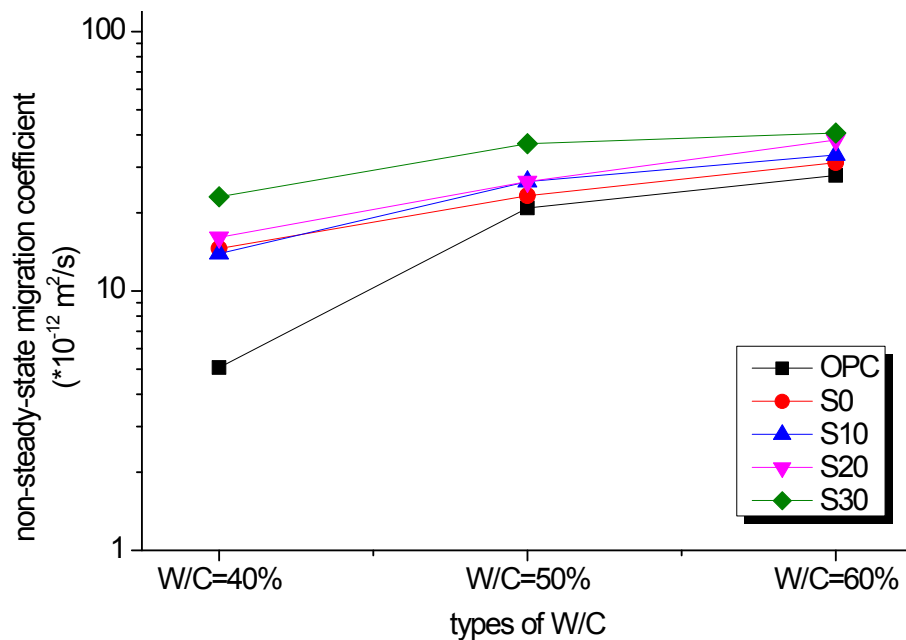


그림 6-1. OPC 및 재생시멘트를 이용한 콘크리트의 염소이온 확산계수

- 전기영동법에 의해 염소이온 확산계수를 산출한 결과 W/C=40%의 경우 $2.297 \sim 6.473$ ($\times 10^{-12}$ m²/sec)의 값이 도출되었으며 W/C=50%의 경우 $6.438 \sim 8.536$ ($\times 10^{-12}$ m²/sec), W/C=60%의 경우 $8.296 \sim 12.237$ ($\times 10^{-12}$ m²/sec)의 값이 산출되었음.
- 재생시멘트의 경우 다소 낮은 수화률 및 강도에 기인한 공극량의 증가로 염소이온 침투가 다소 용이한 것으로 나왔으며 페미립분에서 잔골재의 함유량이 많은 S30의 경우가 가장 확산계수가 컸고 잔골재 혼입률에 비례하여 낮아지는 경향을 나타내었음.

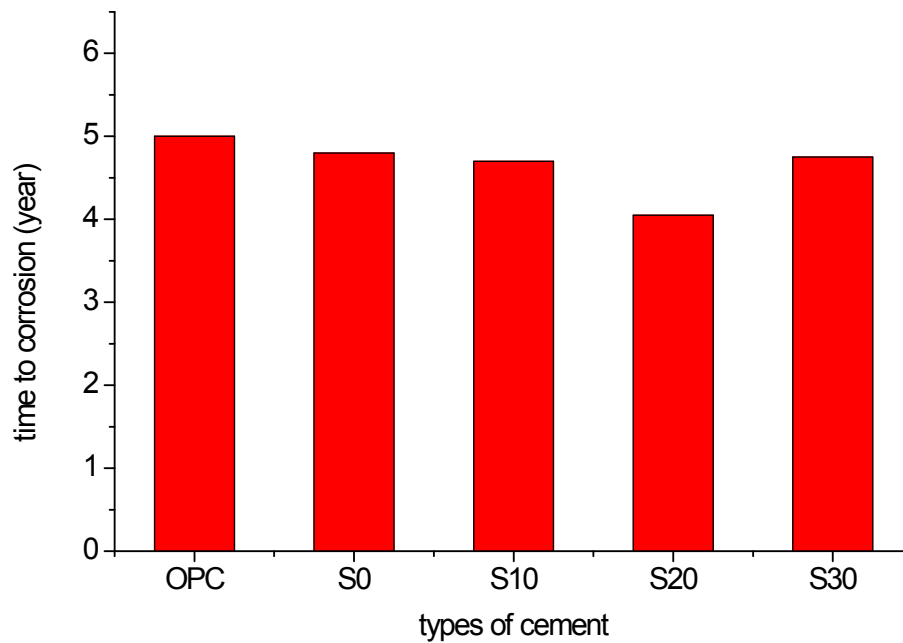


그림 6-2. 피복두께 3cm, W/C=50%의 조건에서 철근 발청시기 비교

- 그림6-15는 W/C=50%의 경우 각각의 시멘트를 이용하여 만든 콘크리트에서 피복두께 3cm의 위치에서 수명도달, 즉 강재의 발청 임계치에 도달(2.2kg/m^3)하는 시간을 비교한 것으로 OPC의 경우 5년으로 가장 높은 염해 내구성을 나타내었으며 재생시멘트의 경우 약 4년에서 4.8년에 이르는 결과가 도출되었음.
- 폐미분말에서 잔골재의 혼입률이 많아질수록(S0보다는 S30의 경우가) 다소 내구성이 저하하는 것을 알 수 있었으나 환경 및 시공오차 범위내에 있어 큰 차이가 발생한다고 보기는 무리가 있는 것으로 판단됨.

7. OPC 및 재생시멘트로 제작된 콘크리트의 촉진 탄산화 시험

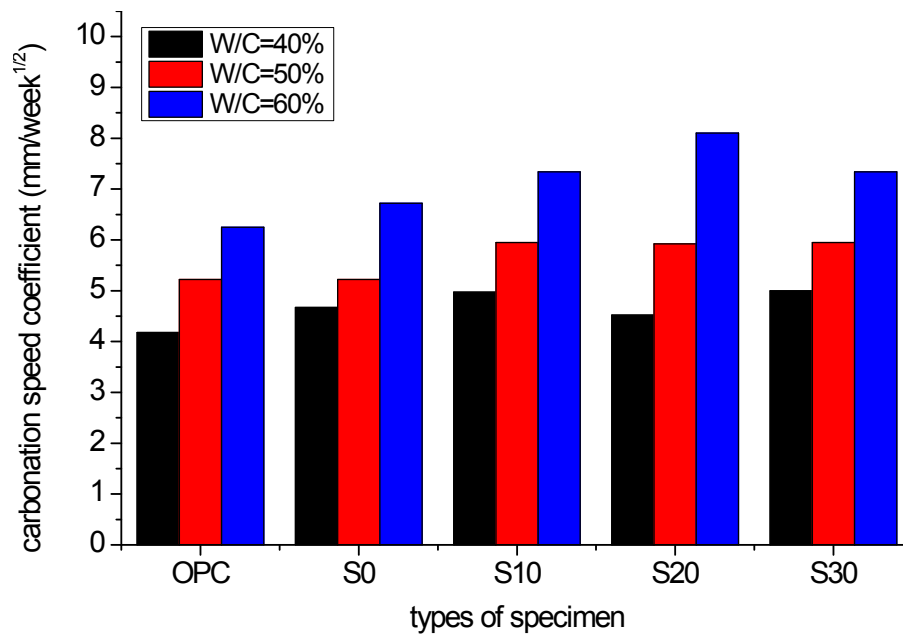


그림 7-1. OPC 및 재생시멘트를 이용한 시멘트 몰탈의 탄산화 속도계수

- 그림 7-1은 촉진탄산화 시험을 통하여 측정된 탄산화깊이를 회귀분석 하여 산출한 촉진탄산화 속도계수를 나타낸 것으로 이를 바탕으로 감도역해석을 실시하여 장기내구성을 산정한 결과 그림7-2와 같은 결과를 산출하였음

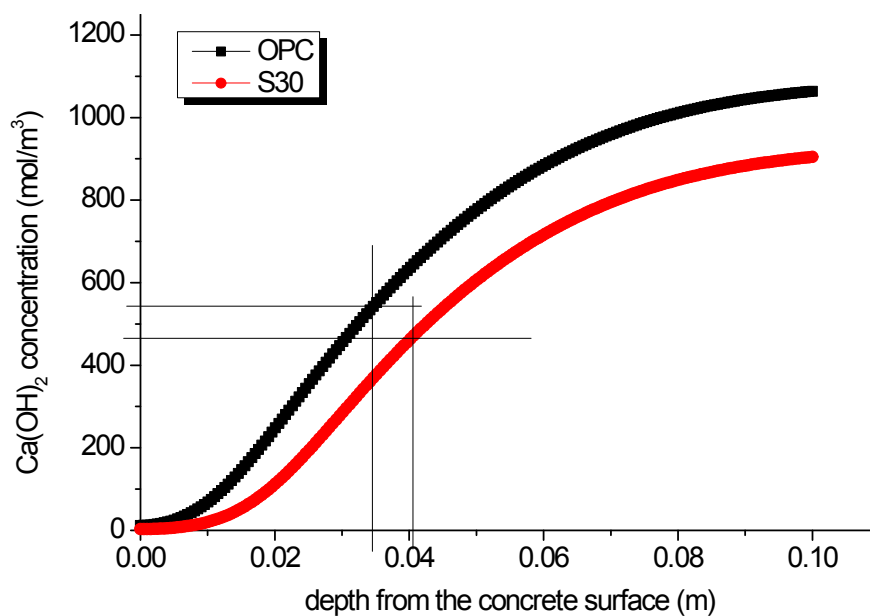


그림 7-2. OPC 및 S30의 장기 탄산화 깊이 예측 결과

- OPC 및 S30 재생시멘트를 이용한 콘크리트가 대기중, 즉 이산화탄소 농도 0.04%의 환경에서 폭로되었을 때 30년 경과시점에서의 탄산화 깊이를 비교한 결과임.
- 단위시멘트량에 의한 수화물과 수산화칼슘 생성량, 공극량, 상대습도가 반영되었으며, 수산화

칼슘의 농도가 절반이 되는 시점을 탄산화 깊이로 규정하고 결과를 분석한 결과 OPC의 경우 34.5mm, S30 재생시멘트를 이용한 콘크리트의 경우 40.5mm의 탄산화 깊이를 나타내었음.

- 재생시멘트의 경우 OPC에 비하여 다소 탄산화 깊이가 깊어지는 결과가 나왔지만 그 차이는 6mm정도로 잔골재의 함유량이 낮은 S0~S20의 재생시멘트의 경우 그 차이는 더 적을 것으로 기대됨
- 염해에 비하여 탄산화 내구성은 수화생성물의 생성과 확산, 반응에 의한 소모가 반복되는 가운데 그 차이가 미비한 것으로 판단됨

표 3-2. 학술대회 발표 성과

발표일	발표명	저자	학술대회명	국내외 구분
2012.1108	순환골재 생산공정에 따른 폐콘크리트 미분말의 화학성분 분석	송훈, 신현욱, 추용식, 이종규, 박동천	한국콘크리트학회 추계 발표대회	국내
2012.1116	폐콘크리트 미분말을 활용한 재생시멘트의 원료조합	권은희, 안재철, 박동천, 강병희	한국시공학회 추계학술 발표대회	국내
2012.1116	LCA CO2관점에서의 콘크리트 폐석분의 활용방안	송훈, 신현욱, 추용식, 이종규, 박동천	한국시공학회 추계학술 발표대회	국내
2013.1025	폐콘크리트 미분말을 활용한 재생시멘트의 화학적 분석	권은희, 박동천	대한건축학회 추계학술발표대회	국내
2013.1026	폐미분말과 산업부산물 활용 재생시멘트	박동천, 권은희	대한건축학회 지회연합회 추계학술 발표대회	국내
2013.1026	폐콘크리트 미분말의 석회석 대체원료화에 따른 CO2발생량 저감	권은희, 안재철, 황종욱, 박동천	대한건축학회 지회연합회 추계학술 발표대회	국내
2013.1026	폐콘크리트 미분말의 석회석 대체원료화 가능성 분석	권은희, 안재철, 황종욱, 박동천	대한건축학회 지회연합회 추계학술 발표대회	국내
2013.1115	재시멘트 활용에 따른 CO2배출량 저감효과	권은희, 안재철, 황종욱, 박동천	한국시공학회 추계학술 발표대회	국내
2013.1207	Analysis on Calcination of Cementitious powder of waste concrete for raw cement	Kwon Eun Hee, Lee Young Jun, Cho Gyu Hwan, Park Dong Cheon	CEBM 2013	국외
2014.0529	폐미분말을 원료로 한 저탄소형 재생시멘트의 CO2배출량 저감평가	권은희, 안재철, 박동천	한국시공학회 추계학술 발표대회	국내
2014.0529	폐콘크리트 미분말을 이용하여 제조한 저탄소형 클링커의 XRD 및 영상분석	신현욱, 송훈, 추용식, 이종규, 박동천	한국시공학회 추계학술 발표대회	국내
2014.1015	폐미분말의 석회석 대체원료화에 따른 재생시멘트의 물성평가	권은희, 조규환, 박동천	한국콘크리트학회 추계학술 발표대회	국내
2014.1121	폐콘크리트로부터 추출한 시멘트계 미분말의 소성성회복에 관한 연구	권은희, 이영준, 박동천	대한건축학회 지회연합회 추계학술 발표대회	국내
2014.1225	Analysis of the Recovery of Burnility Index and Reduction of CO2 for Cement Manufacturing Utilizing Waste Cementitious Powder as Alternative Raw Material of Limestone	Kwon Eunhee, Park Dongcheon, Jung Jamin	ICCCGE 2014 International Conference on Civil	국외

표 3-3. 논문 게재 성과

게재연도	논문명	저자			학술지명	Vol. (No.)	국내외 구분	SCI 구분
		주저자	교신저자	공동저자				
2013.03	폐콘크리트 미분말과 산업부산물을 이용한 저온 소성 재생시멘트의 물성	안재철	박동천		대한건축학회 구조계 논문집	Vol. 29, (No.3)	국내	
2014.02	Analysis on Calcination of Cementitious Powder of Waste Concrete for Raw Cement	Park, Dong- Cheon	Park, Dong- Cheon	Kwon, Eun-Hee Ahn, Jae-cheol	Journal of the Korea Institute of Building Construction	Vol. 14, (No.1)	국내	
2014.04	Study on effects of alternative raw material of waste cementitious powder for limestone on reduction effect of CO2	Park, Dong- Cheon	Park, Dong- Cheon	Kwon, Eun-Hee Ahn, Jae-cheol	Journal of the Korea Institute of Building Construction	Vol. 14, (No.2)	국내	
2015.03	A study on development of recycled cement made from waste cementitious powder	Kwon, Eun-Hee	Park, Dong- Cheon	Ahn, Jae-cheol Cho, Bongsuk	Construction and Building Materials	83	국외	SCI

표 3-4. 특허 성과

출원된 특허의 경우					등록된 특허의 경우				
출원연도	특허명	출원인	출원국	출원번호	등록연도	특허명	등록인	등록국	등록번호
2014	폐콘크리트 분말을 이용한 저탄소형 재생시멘트 제조방법	박동천 안재철 권은희 조규환 황종욱	대한민국	10-2014- 0025756					

가. 학술적 성과

- 친환경 건축기술 개발 요구의 대응효과 극대화
 - 건축재료 생산단계, 폐기물 최종 처분단계, 재생단계에서의 환경부하 저감이 가능한 기술 (그림 7-10)
 - 온실가스 저감형 친환경 재생시멘트의 생산으로 관련 업계의 국제적 기술집약적 주력 상품 효과
- 고부가가치형 기술로 인식 보급
 - 폐기물의 화학적 성질을 고려한 최적의 재생프로세스의 개발
 - 관련 업계는 고부가가치형 기술력을 보유하고 국제적으로도 경쟁력을 보유한 효과
- 건설재료 원자재 파동에 대비한 대체재료 개발
 - 대체재료가 부족한 시멘트의 핵심원료인 석회석의 부족문제는 향후 국가의 경제·산업적 측면에서 중요
- 미래 환경기술의 시대를 대비한 온실가스 저감형 GREEN TECHNOLOGY의 개발
 - 미래 저탄소 환경시대에 있어 국내외적으로 시장성이 우수한 분야

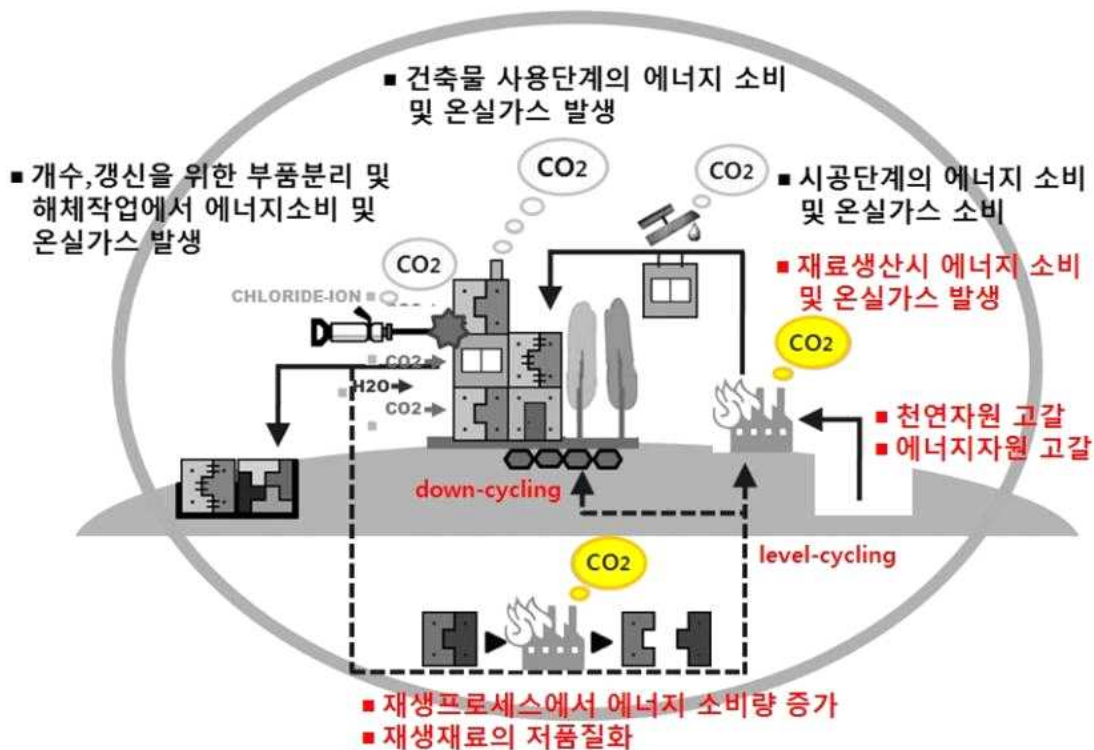


그림 3-22. 건축물 라이프사이클에 있어서 본 연구의 환경부하 감축대상

나. 기술적 성과

- 본 연구를 통하여 획득한 기술력은 국내 유일의 건축-토목-환경 분야의 융합된 연구 영역 개척이 가능
- 저탄소 녹색성장을 위한 신 건설기술로서 학문 발전과 관련산업에 직접적 기여가 가능
- 제한된 연구 목표 및 내용은 기존의 학문 영역 및 접근으로서는 달성이 불가능하며, 재료공학, 환경공학, 수치해석의 지식에 대한 통합된 이해와 지식이 요구되는 차세대 연구영역으로 이에 대하여 세계적 연구기술을 선도할 수 있을 것으로 기대함

제4장 연구목표 달성 및 효과

- 연구개발 최종목표 달성도

번호	세부연구목표	달성내용	달성도 (%)
1	폐 콘 크 리 트 미분말의 화학적 특성분석 및 수화성 회복 메카니즘 규명	전국 각지에서 생산되는 폐콘크리트 미분말을 채취하여 화학 성분 분석하였으며 이를 기반으로 재생시멘트의 원료로 활용 가능하도록 하였음 전국 10여곳으로부터 폐미분말을 확보하여 분석한 결과 폐미분말속에는 약 65%정도의 잔골재가 함유된 것으로 평가되어 졌음 폐미분말과 재생시멘트, 그리고 재생시멘트 수화물은 화학성 분 및 X선 회절분석을 통하여 수화성 회복 및 반응기구를 분석하고자 하였으며, 시공성 및 압축강도 등의 평가를 통하여 가능성을 확인하였음	100%
2	재 생 시 멘 트 원료배합 최적화	C3S, C2S, C3A, C4AF 및 LSD, SM, IM가 보통 포틀랜드시멘트의 관리 기준에 최대한 유사하도록 Excel Solver를 적용 하였으며 잔골재율의 변화에 따른 적정 값을 구하고자 하였 음	100%
3	재 생 시 멘 트 수화반응 메 카니즘 분석	XRD분석, Free CaO 측정, 열분석을 통해 소성성 회복을 분석해 본 결과 대체적인 화합물 생성을 확인할 수 있었고, 내구성에 영향을 주는 유리석회도 시멘트 품질기준내 충분히 포함되었으나 폐미분말 내 포함되는 잔골재 미분에 의한 Quartz 결정형태의 SiO ₂ 에 의한 소성성 감소로 C3S 및 C2S의 형성이 다소 부족한 것으로 나타났음 따라서 고품질, 또는 중품질 수준의 재생시멘트를 생산하기 위해서는 잔골재 미분의 혼입이 30%미만인 수준의 경우에 가능할 것으로 판단되며 향후 폐미분말로부터 잔골재 미분을 효율적으로 분리배출하는 기술의 개발이 이루어져야 할 것으로 생각 됨	100%
4	재 생 시 멘 트 사용에 따른 온실가스 방 출 감소량 산 정	클링커 제조 즉, 소성공정에서 배출된 CO ₂ 양을 기준으로 기존연구에 따른 시멘트 제조 공정에 따른 CO ₂ 배출비율에 따라 시멘트 제조 전공정에서의 총 CO ₂ 배출량을 산정해 본 결 과 본 연구에 사용된 석회석에 따른 CO ₂ 배출량은 0.897 t CO ₂ /t Cement 로 나타났으며 폐미분말을 사용함으로써 그 배출량이 줄어드는 것을 확인할 수 있었음 잔골재 미분이 전혀 포함되지 않은 폐미분말(S0)의 경우 0.48 t CO ₂ /t Cement로 약 53% 수준까지 감소되는 것으로 분석되었음	100%

5	재 생 시 멘 트 이용 콘크리 트의 내구성 예측 모델 구 축	재생시멘트를 이용한 콘크리트의 염소이온 확산계수와 탄산화속도계수를 도출한 결과 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트에 비하여 잔골재 함량에 따라 10~20%정도의 내구성이 저하하는 것을 알 수 있었음 이는 재생시멘트 속에 포함된 폐미분말 속 잔골재의 석영성분에 기인할 수 도 있으며 재생시멘트 품질확보와 소성성 확보를 위한 실험실 성능에 좌우되는 것으로 사료되며 향후 대안마련과 동시에 검토가 병행되어야 할 것으로 사료됨	
---	---	--	--

(1) 국가 상위계획과의 부합성

- 세계 각 나라들은 온실가스 문제에 대한 대응을 국정의 최우선 과제로 설정하고, 관련 정부 조직을 개편하고 관련 법령 및 정책의 제·개정을 적극적으로 추진하고 있음
- 우리나라에서 온실가스 문제를 해결하고, 녹색성장을 실현하기 위한 기본적인 법제도는 2010년 4월부터 시행되는 「저탄소녹색성장기본법」과 동시행령임
- 「저탄소녹색성장기본법」에서는 저탄소 녹색성장 정책의 기본원칙을 정하고 녹색기술·녹색산업에 대한 지원, 기후변화대응 및 에너지 목표관리, 녹색생활과 지속가능발전과 같은 정책의 큰 틀을 정함
- 「저탄소녹색성장기본법」은 기후변화·에너지·환경문제뿐만 아니라 녹색기술과 R&D, 녹색산업구조로의 전환과 발전, 녹색국토 도시 건물 교통 등 저탄소 녹색성장에 관한 내용을 포함
- 향후 우리나라가 국제적으로 녹색성장을 선도하는 역할을 하는 데 도움을 줄 수 있을 것으로 기대



그림 3-23. 온실가스 감축 기술개발의 시급성(동아일보 2011년 11월, 12월)

(2) 정부(국토해양부)지원의 필요성

- 장래 골재자원의 고갈현상이 예상되고 지속가능한 개발(ESSD) 이념에 따른 환경규제가 강화되어감에 따라 환경보전과 녹색성장을 위한 폐자원의 재 활용과 에너지화에 대한 필요성이 증대
- 현재, 개발된 폐콘크리트 재생기술은 노반재 또는 불활성 충전재(특허동향 및 중복과제 조사결과 참조)와 같은 저부가가치형 기술이 주를 이루고, 이에 따라 실용적 가치가 크게 낮은 것이 현실
- 이에 건설폐기물 발생현황과 처리실태를 면밀히 파악하고 그에 따라 폐콘크리트를 고부가가치의 건설재료로 활용하는 방안을 강구할 필요성 증대
- 또한, 1인당 시멘트 소비량 1위인 국내실정과, 최근 도시개발이 활발히 이루어지고 있는 아시아지역에서 CO₂ 저감형 건설기술 및 재료기술의 개발은 공공성 뿐만 아니라 전략 산업 육성의 측면에서 가치가 큼

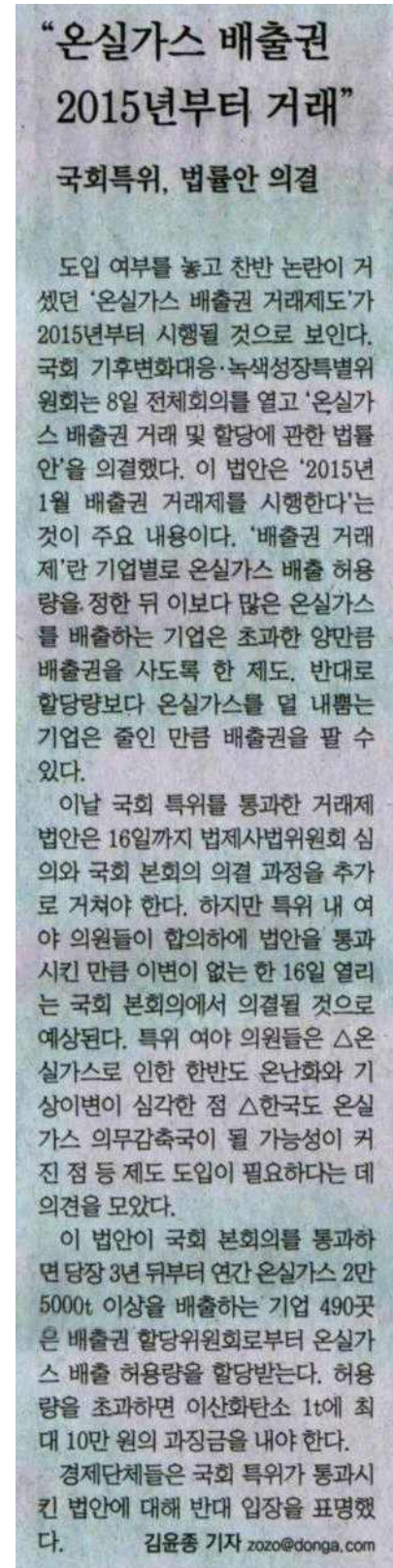


그림 3-23. (계속)

- 연구개발 성과의 경제적 효과분석

- 건설재료 원자재 파동에 대비한 대체재료 개발
- 친환경사회 구축에 대한 노력을 범국가적으로 경주하고 있는 현시점에서 건설업의 부정적 이미지 개선
- 온실가스 배출권의 범국가적 시행에 앞서, 온실가스 배출분야의 큰 부분을 차지하는 건설업계가 본 기술을 선점할 경우 경제적 과급효과
- 미래 저탄소 환경시대에 있어 국내외적으로 시장성이 우수한 분야
- 폐기물 및 산업부산물을 재생 활용함에 따른 재료 생산단가 감소 효과

제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

- 연구성과 향후 활용방안

- 폐기물 처리업과 시멘트 업계의 연계로 건축폐기물 발생단계부터 시멘트계 미분말을 분리하여 수급할 수 있는 시스템 구축을 통해 친환경적 자원순환 머리티얼 플로우를 생성할 수 있음
- 본 연구의 결과를 통해 저탄소형 재생시멘트의 품질이 OPC의 90%이상 발현된다는 것이 확인되었으며, 따라서 건설업계에서 구조적 비구조적 재료로 다량 활용될 수 있음이 증명되었음. 특허출원 및 실시계약이 완료된 상태로 현장적용을 위 사업화 추진에 대한 계획이 있음
- 대체재료가 부족한 시멘트의 핵심원료인 석회석 부족문제는 향후 국가의 경제 및 산업적 측면에서 중요하며 이를 대비한 대체재료로 활용가능.
- 그러나 현재는 경제적 측면에서 폐콘크리트에서 분리한 폐미분말을 시멘트 업체까지 운송하는 비용 때문에 석회석 대체원료 활용하기 곤란한 점이 있으나, 향후 70~80년 후 우리나라 석회석 고갈 예측 결과에 따라 활용도가 상당히 상승할 것으로 예측됨.
- 특히, 관련 시멘트산업, 레미콘산업, 콘크리트 2차 제품 등에 있어서 시장점유가 가능하며, 이를 통해 재생시멘트 및 재생시멘트 제조·생산기술의 고부가가치화 창출 가능
- 재생시멘트의 고품질화를 위해 개발된 전처리기술 및 분급공정 시스템은 현재까지 재생골재의 품질에 문제가 되어온 부착모르터의 제거에도 효과적일 것으로 판단되며, 이에 따라 재생골재의 고품질화 산업에 있어 핵심기술로 적용될 전망
- 완전 순환형 콘크리트 개발의 기초자료로 활용이 가능하며, 재료공학, 환경공학, 수치해석의 지식이 융합된 세계적 연구기술을 선도할 수 있는 연구영역으로써 환경기술의 시대에 대비한 고급 전문인력 양성 및 사회보급

- 추가연구 필요성

- 화학적 분석을 토대로 다목적최적화를 통한 원료배합이 이루어졌기 때문에 잔골재 미분의 혼입량 증가에 따른 미미한 품질저하는 있었지만, OPC대비 90% 이상의 성능을 발휘하는 것으로 나타남.
- 그러나 폐미분말 내 잔골재 미분의 혼입율이 증가할수록 석회석 대체원료로 활용할 수 있는 비율은 상당히 감소하기 때문에 폐미분말 내 잔골재 미분을 효율적으로 분리배출할 수 있는 기술에 대한 연구 및 개발이 필요함
- 특히, 본 연구의 1차년도 결과를 통해 폐콘크리트 미분말 내 잔골재 미분이 약 65% 포함된 것을 밝혀냈으나, 페이스트와 잔골재의 경도 차이에 의해 분쇄 후의 간단한 채거름만으로도 약 40%까지 저감이 가능하므로 ,분쇄와 채거름이 동시에 이루어질 수 있는 장비 또는 시스템에 대한 연구 및 구축이 필요함.

참고문헌(보고서 작성시 인용된 모든 참고 문헌을 열거)

[부 록]

1. 논문, 특허 등 정량적 성과와 정성적 성과(연구성과 전체 집계 현황, 연구성과 별 목록 등을 기술)
2. 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보
3. 기타사항(중요 연구 변경사항 등)

8. 본문

1. 폐미분말을 활용한 저탄소형 재생시멘트 제조

1차년도와 2차년도의 결과를 토대로 실제 폐콘크리트 미분말 내 잔골재미분의 함유율이 약 65%인 것과 잔골재 미분의 혼입율이 30% 이상의 폐미분말은 활용도가 상당히 낮다는 결론을 바탕으로, 어느 정도의 잔골재 미분을 제거한다는 가정 하에 폐콘크리트 미분말 내 잔골재 미분($150\mu\text{m}$ 미만)의 함유율을 0, 10, 20, 30%로 변화를 주며 폐콘크리트 미분말 모델을 제조하였다. 이렇게 제조된 폐콘크리트 미분말을 재생시멘트의 주원료인 석회석의 대체원료로 활용하였으며, 다목적최적화의 결과로 도출된 원료 배합비에 따라 폐미분말 모델, 석회석 및 전로슬래그를 배합하여 재생시멘트를 제조하였다. 전반적인 연구과정은 그림 1-1과 같다.

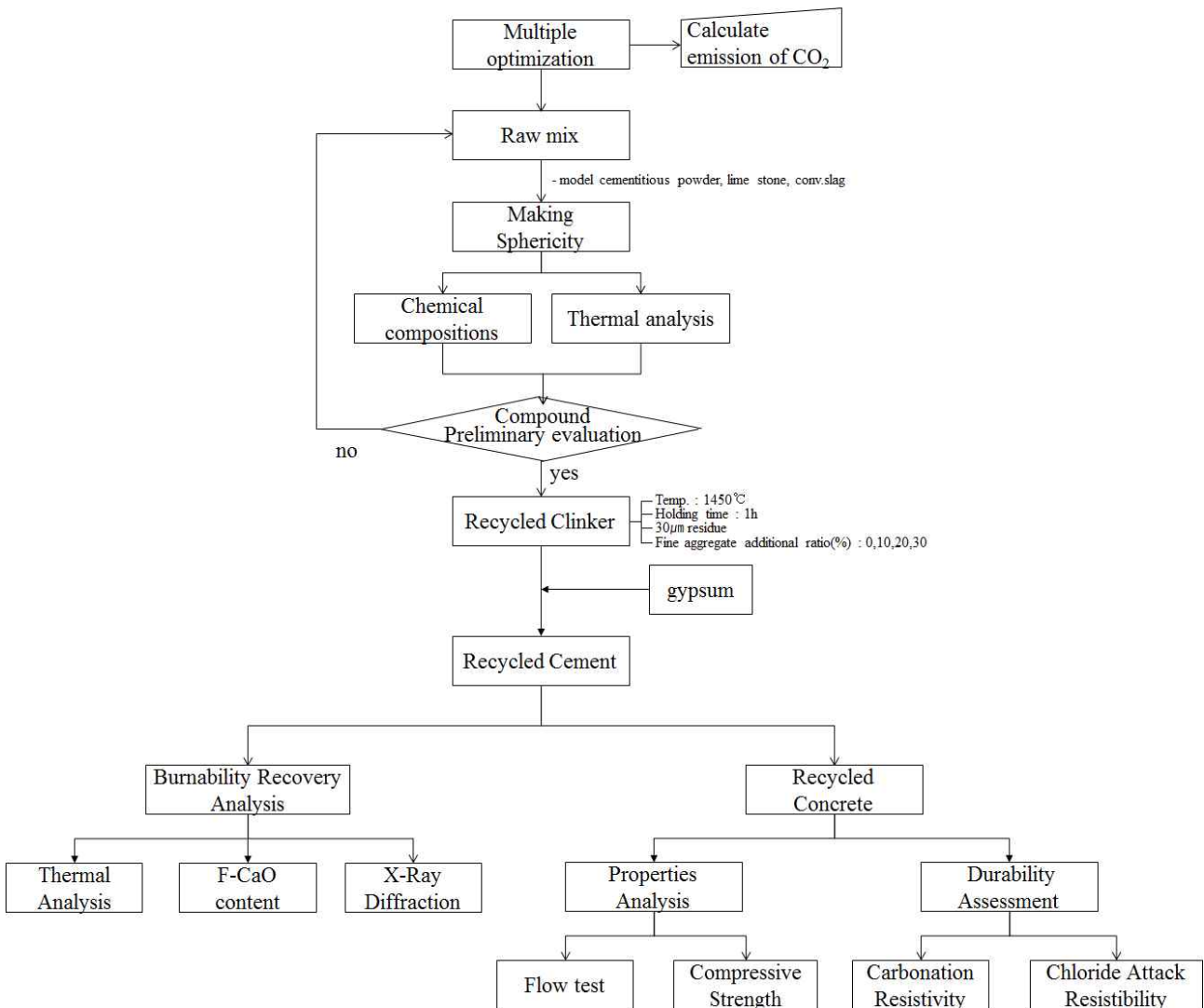


그림 1-1. 재생시멘트 연구 Flow Chart

1.1 사용원료

① 폐미분말 모델

실제 현장에서 채취한 폐미분말의 경우 배합 및 재령이 상이하여 폐미분말 모델을 제조하였으며, 이는 75 μ m미만으로 분쇄한 재령 6개월의 페이스트 미분말에 75 μ m미만으로 분쇄한 잔골재 미분말을 0, 10, 20, 30% 혼입 (이하, S0, S10, S20, S30이라 칭함.)하여 제조하였다. 각 원료 및 폐미분말 모델의 화학조성은 표1-1과 같다.

표1-1. 폐미분말 모델의 화학조성

구분	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
페이스트	49.90	16.70	4.22	2.29
잔골재	1.25	78.80	11.80	1.19
S0	49.90	16.70	4.22	2.29
S10	45.04	22.91	4.98	2.18
S20	40.17	29.12	5.74	2.07
S30	35.31	35.33	6.49	1.96

② 성분 조정재 (석회석, 전로슬래그)

성분 조정재로 시멘트의 주원료인 석회석과 산업부산물인 전로슬래그를 사용하였으며 각 원료의 화학조성은 표1-2와 같다.

표 1-2. 성분조정재의 화학조성

구분	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
석회석	48.20	6.00	1.42	0.82
전로슬래그	31.80	14.90	2.74	38.40

1. 2 저탄소형 재생시멘트 원료배합비 도출

① 원료배합비 도출방법

본 연구에서는 고품위 재생시멘트 개발을 위해 각 원료의 화학조성을 조합하여 미리 시멘트의 성질을 예측하여 제조하고자하였다. 이를 위해 각 원료의 성분분석을 실시하고 폐미분말 내 잔골재 미분의 함유율에 따른 각각의 원료배합비를 설정하였다. 원료배합비 설정은 NSGA-II (Non-dominated Sorted Genetic Algorithm-II) 알고리즘에 기반한 다목적최적화를 통해 이루어졌다. 여기서 NSGA-II 알고리즘은 비지배 정렬을 기반으로 하는 유전자 알고리즘으로써 여러 개의 서로 상충관계를 갖는 목적함수들에 적합한 변수들로 최적화하는 기술이다. 이는 식 1-1과 같이 정의되며 $f_1(X), f_2(X), \dots, f_k(X)$ 는 k개의 목적 함수를 나타내고, $x_1, x_2, \dots, x_n$ 는 n개의 최적화를 위한 변수들을 나타낸다.

$$\min/\max\{y\} = F(X) = (f_1(X), f_2(X), \dots, f_k(X))^T$$

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad (\text{식1-1})$$

본 연구에서의 $F(X)$ 는 석회석 사용량의 최소값이고, x_n 은 앞에서 제시한 주·부원료 내 주요 화학성분으로 시멘트 주요화합물을 생성하는 CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃이다. 또 $f_k(X)$ 는 Bogue 계산값으로 OPC 관리기준에 준하는 LSD(lime saturation degree, 석회포화도; 90~100), SM(silica modulus, 규산율; 2.41~2.8), IM(iron modulus, 철율; 1.48~1.73)이다. 다목적 최적화 수행과정은 그림 1-1과 같다. 이 때 $F(X)$ 를 석회석 사용량의 최소값으로 설정한 이유는 석회석의 탈탄산 반응에 의한 CO₂ 발생량 감소 및 자원고갈 지연 효과를 극대화하기 위해서 이다. 또한, $f_k(X)$ 를 Bogue 계산값으로 한 이유는 C₂S, C₃S, C₃A, C₄AF와 높은 상관관계를 가지기 때문에 미리 시멘트의 성질을 파악할 수 있기 때문이며 이는 일반 시멘트 제조 시 원료 조합 및 성분관리에 이용된다. Bogue 계산값은 식 식1-2 ~ 식1-4 과 같으며, Bogue 계산값과 화합물 조성의 상관관계는 표1-3과 같다.



그림 1-1. 다목적 최적화 수행과정

$$LSD = \frac{CaO - 0.7SO_3}{2.8 \times SiO_2 + 1.2 \times Al_2O_3 + 0.65 \times Fe_2O_3} \quad (\text{식1-2})$$

$$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (\text{식1-3})$$

$$IM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (\text{식1-4})$$

표1-3. 포틀랜드시멘트의 비율·계수와 Bogue 조성(%)

	LSD	SM	IM	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
보통시멘트	0.91	2.7	1.7	52	24	9	9
조강시멘트	0.96	2.7	1.9	62	14	9	8
중용열시멘트	0.87	3.0	1.1	47	32	4	11

② 저탄소형 재생시멘트의 원료배합비 도출결과

표1-4. 재생시멘트의 원료조합비 및 비율·계수와 Bogue 조성(%)

구분	S0	S10	S20	S30
페미분말 모델	88.27	59.46	40.77	31.02
석회석	11.73	39.50	56.97	66.08
전로슬래그	0.00	1.04	2.26	2.90
C3S	57.49	53.21	54.26	54.84
C2S	18.42	24.05	23.23	22.78
C3A	9.43	8.31	6.90	6.13
C4AF	8.99	8.52	9.50	10.03
LSD	93.75	91.00	91.00	91.00
SM	2.57	2.90	2.90	2.90
IM	1.84	1.76	1.47	1.34

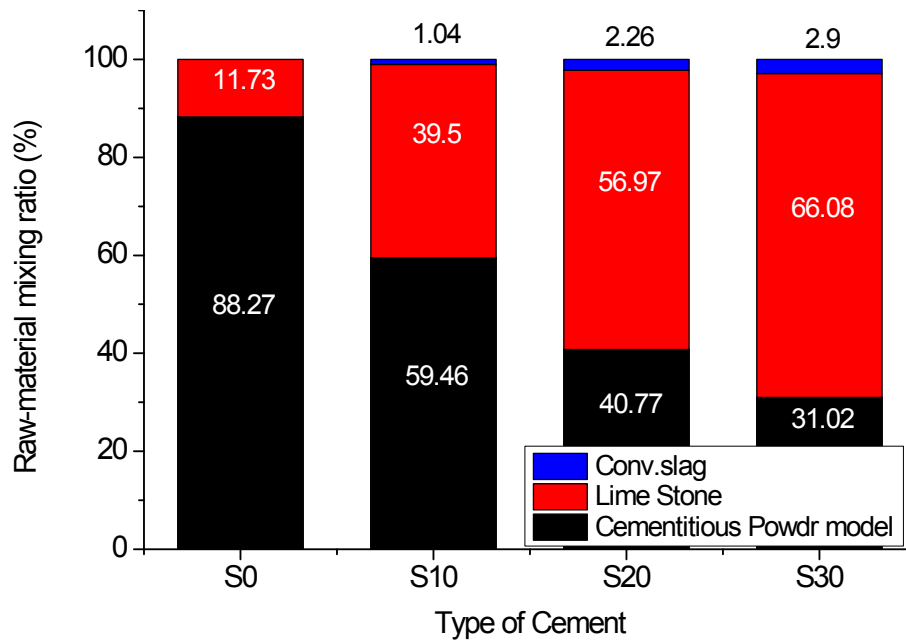


그림1-3. 재생시멘트의 원료조합비 및 비율·계수

- 표 3에 나타난 바와 같이 다목적 최적화를 통한 원료배합비 도출 결과 모든 배합인자에서 폐미분말의 원료화가 30%이상 가능한 것으로 나타났으며, 특히 잔골재 미분을 모두 제거했다고 가정한 S0의 경우 최대 88.27%까지 가능한 것으로 확인되었다. 따라서 OPC품질을 만족하는 폐미분말 기반의 재생시멘트 제조가 가능한 것으로 판단된다.
- 반면, 그림 3에서와 같이 S0를 제외한 나머지 폐미분말 모델의 경우 잔골재 혼입율이 증가할수록 C_3S 및 C_3A 생성비율이 감소하고 C_2S 생성비율이 증가하는 것으로 나타났으며 이로 인해 응결속도가 다소 지연될 것으로 추정된다.

1.3 재생시멘트 제조

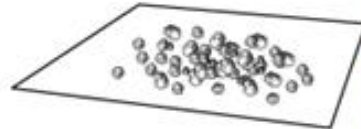
다목적최적화를 통해 도출한 원료조합비를 토대로 일반시멘트와 같은 공정으로 재생시멘트를 그림1-4와 같이 제조하였다.



① 원료배합과정



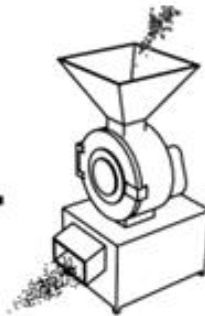
재령 6개월 페이스트



잔골재, 전로슬래그, 석회석



정밀분쇄기에 의한
3차 분쇄



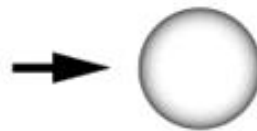
분쇄기에 의한 2차 분쇄



1차 파쇄



0.09mm 이하 체가름



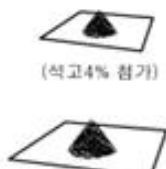
지름 10mm 성구제작

② 소성과정



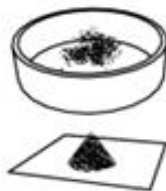
소성
(1450℃, 60분)

③ 마감과정



(석고4% 첨가)

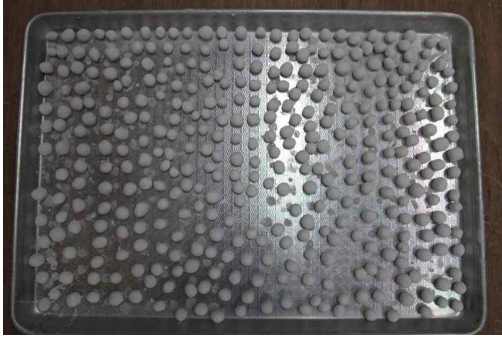
재생시멘트 제조



0.09mm 이하 체가름



생성된 클링커를
정밀분쇄기에 의한 분쇄



(a) 성구 제조



(b) 성구 건조



(c) 소성



(d) 클링커 제조 완료

그림1-4. 재생 시멘트 제조 프로세스

2. 저탄소형 재생시멘트의 수화반응 모델 제시

2.1 수화율 추정시험 개요

콘크리트의 경화불량, 강도부족 및 내구성 저하 등은 시멘트의 수화반응이 정상적으로 진행되지 않는 것이 주된 요인인 경우가 많기 때문에 시멘트의 수화율 추정을 통해 콘크리트의 물성을 추정하는데 중요한 요소가 된다. 이러한 수화율을 추정하는 방법은 미수화물량으로부터 추정하는 방법과 수화 생성물로부터 추정하는 방법으로 나누어진다. 미수화물량으로부터 수화율을 추정하는 방법은 수화전의 시멘트 질량을 C , 수화후의 수화물 중의 미수화 시멘트 질량을 C' 로 하면 시멘트의 수화율 A 는 식2-1과 같이 수해진다. 그러나 시멘트는 다양한 조성물의 혼합물이고, 각각의 수화속도가 다르기 때문에 현실적으로는 수화율 A' 은 수화 후의 각 미수화시멘트 조성 광물량을 측정하여 식2-2에 의해 구하는 것이 대부분이다.

$$A = \frac{C - C'}{C} \quad (\text{식 2-1})$$

$$A' = \frac{C - \sum(\text{수화후의 각 미수화시멘트의 조성광물})}{C} \quad (\text{식 2-2})$$

또, 수화 생성물로부터 추정하는 방법은 수화물의 생성량이나 그것들의 결정수량을 측정하여, 각 조성광물 단독의 화학양론식에 따라 수화율을 추정하는 방법이다. 그러나 시멘트의 수화반응은 그림2-1와 같이 단일반응이 아닌 복합반응으로 매우 복잡하다. 예를 들어 C_3S 와 C_2S 로부터 $C-S-H$ 및 $Ca(OH)_2$ 가 생성되고, AFt 와 AFm 은 C_3A 및 C_4AF 로부터 생성되기 때문에 정확한 수화율을 추정하기에 한계가 있다. 그럼에도 불구하고 특히, $Ca(OH)_2$ 량은 생성한 수화물 조성의 경시적인 변화에 따라 변화하기 때문에 C_3S 및 C_2S 등의 규산칼슘계 시멘트 조성광물의 수화율을 추정하기 위한 중요한 지표로써 많은 연구자들에 의해 활용되고 있다. 이를 측정하기 위한 방법은 용매 추출-적정법, X-선 회절법 및 시차열량법 등이 있다.

① 용매 추출-적정법

시약을 활용하여 $Ca(OH)_2$ 를 추출하여 측정하는 방법으로 흔히 Free- CaO 측정법이라 불리는 글리세린-에탄올법, 에틸렌글리콜에탄올법, 프란케법 및 트리브롬페노르법 등이 있으며 모든 방법은 근사 한 정량치를 나타내지만 트리브롬페노르법에서는 $Ca(OH)_2$ 량이 다소 많은 것으로 측정되는 경우가 있다.

② X-선 회절법

x-선을 수화 시료에 쏘아 나타나는 피크를 통해 $Ca(OH)_2$ 의 생성여부 및 X선의 단위길이당 적분 강도를 통해 생성량을 측정하는 방법으로 $Ca(OH)_2$ 의 강회절 X선 피크는 18° 부근에 나타나는 (001) 반사에 의한 것과 34° 부근에 나타나는(101) 반사에 의한 것이 있는데 주로 (101)이 많이 사용되며 추가로 AFt , AFm 및 조성광물 등도 함께 측정이 된다. X-선 회절법을 이용한 $Ca(OH)_2$ 의 정량분석법에 대한 내용은 표2-1와 같다.

표2-1. X-선 회절에 의한 정량분석법

방법	시료 중의 성분	표준 시료	내 용	측정조건 의 일례	작업 수준의 용이성	측정
직접비교법	2	J,S	J,S의 회절강도비와 밀도에 의한 질량비에 의해 환산한 R값에 의해 체적함유율을 구한다.	2성분계의 시료에 적용	○	△
흡수회절법	3<	J	측정시료 중의 Jdhk J의 순수 물질의 회절 강도비를 평균물질 흡수계수와 J의 물질 흡수계수의 비로 보정한다.		△	△
내부표준법	3<	J,S	J와 내부표준물질과의 혼합비율을 여러 가지로 변화시킨 혼합물을 만들고 Jdhk S의 회절선 강도비로부터 검량선을 작성한다.	측정시료의 수가 많은 경우	○	◎
표준 첨가법	3<	J	측정성분 J를 일정 첨가한 경우의 다른 성분 L과의 회절선 강도비의 관계로부터 질량비를 구한다.	측정시료의 수가 적은 경우	○	○
희석법	3<	J,S	질량과 회절선 강도가 비례하는 미량의 측정시료를 만들고, 필요한 검량선에 의해 구한다.	미량성분에 대하여 유효	○	△

작업수준의 용이성 ◎ : 비교적 용이, ○ : 보통, △ : 별로 용이하지 않음.

측정정도 상대오차 ◎ : 5% 이하, ○ : 10% 이하, △ : 10% 이상

J : 자체성분, S : 내부표준시료

③ 시차열량법

열분석법에는 시차열 분석(DTA), 시차주사 열량 측정(DSC), 열질량 분석(TG) 등이 있다. TGA는 가열에 따르는 질량변화를 시간 또는 온도에 대하여 기록하는 기법이고, DTA는 일정한 속도로 온도를 올리고 내리는 과정에서 시료와 기준물질과의 열거동의 차이에 따라 발생하는 온도차이를 시간 또는 온도에 대하여 기록하는 방법이다. 특히 TGA는 온도변화에 따른 고분자를 포함한 유기물질 및 무기물질의 무게변화를 측정하는 것으로써 온도-무게 변화량의 곡선으로부터 시료의 열에 의한 변화 상태를 보면서 정성 및 정량 분석을 할 수 있다. 이러한 온도-무게 변화량의 곡선은 다양한 조건에서의 사용한 물질의 구성비와 함께 시료의 열안정성과 난연성 등의 성질을 나타내고, 승온 중에 생긴 중간체의 열적 성질도 나타내 주며 가열이 끝났을 때 남은 화합물의 양도 알 수 있게 해준다. 용융, 결정화 같은 열변화와 같이 어떤 열변화는 물질의 무게를 변화시키지는 않는다. 즉 흡착과 탈착반응, 승화, 기화, 산화, 환원, 분해 등과 같은 열변화에 의하여 무게변화가 일어나는 것이다. 모든 열중량 분석에서 질량은 온도가 증가함에 따라 표시된다. 온도가 감소하는 상태에서는 정확한 측정이 어렵고 정보만을 준다. 물질의 무게변화의 성질은 실험조건에 매우 민감하게 변화한다. 시료의 무게, 부피, 물리적인 형태와 시료 장치방안의 대기상태와 압력, 승온속도 등이 온도-무게 변화량 곡선의 결과에 큰 영향을 미치게 된다. 그러므로 열무게 측정 분석에 대한 적정 조건을 세우려면 많은 사전 테스트가 필요하다. 특히 정확한 열중량 분석을 위해서는 실험조건이 기록되어야 하며 이 조건이

유지되면서 실험이 행해져야 한다. TG/DTA와 같이 많이 사용되는 DSC는 가열 및 냉각에 의해 조절하면서 온도차를 제로로 유지하는데 필요한 에너지를 시간 또는 온도에 대해 기록하는 방법이다. 수화생성물은 각각 C-S-H(100~300℃), Ca(OH)₂(300℃에서 서서히 흡열피크를 보이다 425~550℃에서 큰 피크를 나타냄), AFt(160~180℃), AFm(50~150℃)에서 흡열 및 발열 피크를 띄게 되며 Ca(OH)₂는 흡열피크를 나타낸다. 이때의 Ca(OH)₂량(Cp)은 소정의 온도역에서 흡열량 1692.8 J/g과 흡열피크(Ap)에 의해 식2-3에 의해 구할 수 있다.

$$C_p(\%) = \frac{A_p}{1692.8 \times 100} \quad (\text{식 2-3})$$

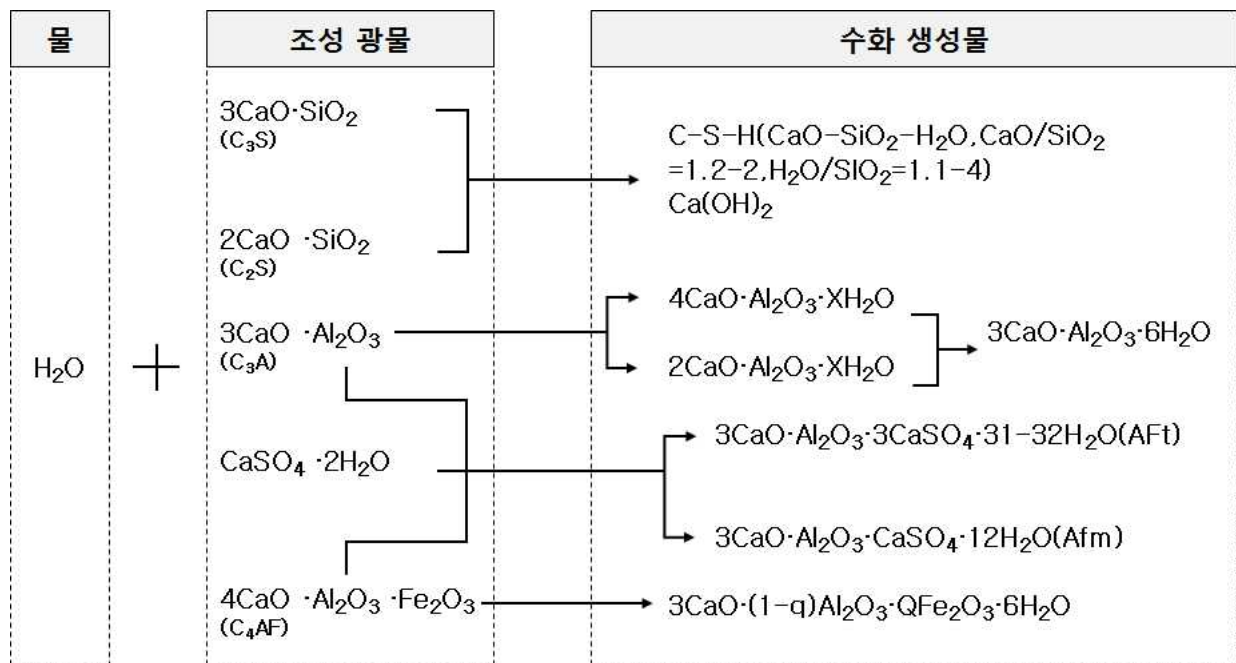


그림2-1. 시멘트의 수화반응 메카니즘

2.2 수화율 추정시험

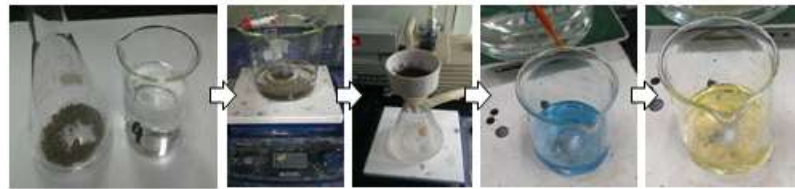
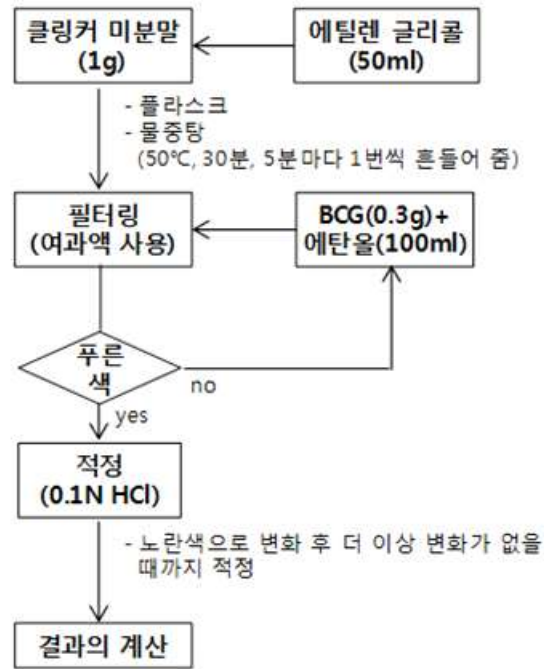
시멘트는 물과 반응하여 수화물을 생성하고, 미수화 시멘트 입자, 골재등을 결합하여 콘크리트로써의 제 물성을 발현한다. 강도가 재령과 함께 증가하듯이, 콘크리트의 제 물성은 수화과정, 수화도에 따라 변화한다. 시멘트의 수화생성물의 하나인 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 및 C-S-H는 콘크리트 물성에 크게 영향을 준다. 경화불량, 강도부족 등은 시멘트 수화반응의 원활하지 못한 진행에 의한 것이 주 요인인 경우가 많고, 내구성도 수화율과 밀접한 관련이 있다. 수화율 추정 방법은 크게 미수화물량으로부터 수화율을 추정하는 방법과 수화생성물로부터의 수화율 추정 방법으로 나눌 수 있는데, 이 중 수화생성물로부터의 수화율 추정방법이 그 재현성 및 신뢰성이 우수한 것으로 인정되고 있으며 특히 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 정량방법이 가장 실험 오차가 적은 것으로 알려져 있다. 따라서, 본 연구에서는 수화율을 추정하기 위해 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 정량하는 방법을 이용하였으며 용매 추출-적정법, X-선 회절법 및 시차열량법 모두 사용하였다. 여기서 용매 추출-적정법에서는 흔히 Free CaO측정법이라고도 불리는 글리세린-에탄올법을 사용하였고, X-선 회절법은 XRD(X-ray Diffraction)을 사용하였다. 또 시차열량법은 정속 승강온 과정에서 전압 피크와 중량변화를 확인할 수 있는 TG/DTA를 사용하였으며 실험인자 및 수준을 표2-2에 정리하여 나타내고 수화율 측정을 위한 실험항목을 표2-2에 나타내었다. 본 실험에 사용된 수화율 추정 방법 및 기기는 그림2-3과 같다.

표2-2. 실험인자 및 수준

인자	페미분말모델(%)	W/C	재생시멘트의 제조			
			소성온도	소성시간	조합원료	석고첨가량
수준	S/M 0 S/M 10 S/M 20 S/M 30	40 50 60	1450℃	60min	페미분말모델 석회석 전로슬래그	3%
EA	4	3	1	1	1	1

표2-3. 실험 항목

	분석방법	분석목적
수화율 측정	용매 추출-적정법 (글리세린-에탄올법)	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 정량화
	X-선 회절법 (XRD)	
	시차열량법 (TG/DTA)	



(a) Free-CaO 측정방법



(b) XRD 측정기기



(c) TG/DTA

그림2-2. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 정량화 방법 및 기기

① 글리세린-에탄올법

OPC 및 폐미분말 잔골재 미분말 혼입을 별 재생 시멘트 클링커의 F-CaO 측정값 분석 결과 F-CaO값은 모두 시멘트 업계의 클링커 품질 관리기준인 $1 \pm 0.2\%$ 내에 부합하는 것으로 나타났다. 특히 S0는 OPC와 동일한 수준으로 상당히 낮은 F-CaO량을 나타냈으며 S10또한 0.56으로 품질 관리기준 보다 훨씬 우수한 소성성을 가지는 것으로 나타났다. 반면 폐미분말 내 잔골재 미분의 혼입율이 증가할수록 F-CaO량이 증가하다 특히, S30의 경우 시멘트 업계의 클링커 품질 관리기준 범위 내에 속하기는 하나 다소 높은 수준으로 나타났다. 이는 잔골재 혼입율이 증가함에 따라 잔골재에서 기인한 Quartz 결정형태로 다량 함유된 SiO_2 의 CaO와의 반응성이 떨어지기 때문, 즉 C2S, C3S의 클링커 주요 화합물로의 소성성이 떨어지기 때문인 것으로 추정된다. 그러나 모든 타입의 유리 석회량은 OPC품질기준을 상회하는 결과로 상당히 우수한 소성성을 가진다고 평가할 수 있다.

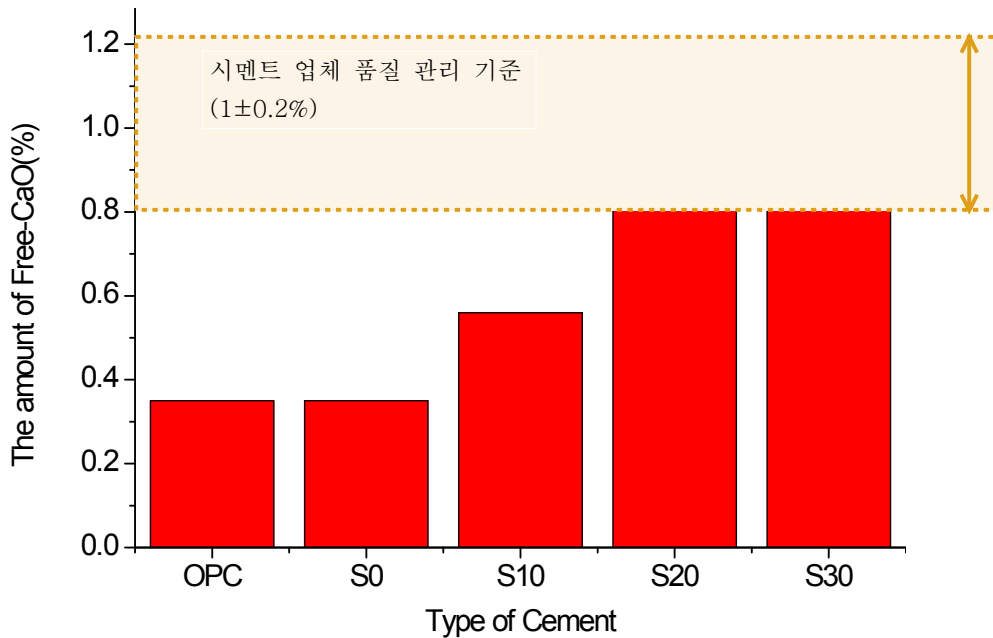


그림2-3. OPC 및 재생시멘트의 Free-CaO

② XRD

잔골재 혼입율에 따라 1450℃로 소성한 재생시멘트 클링커의 XRD 분석을 실시한 결과를 나타낸 것이다.

본 실험에서는 클링커를 구성하는 4종의 주요 화합물의 생성유무 여부로 판별을 실시하였으며 같은 회절각에서 중첩되는 화합물은 제외하였다.

실험결과 모든 배합에서 보통 포틀랜드시멘트 클링커 광물상인 C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF 가 검출되는 것을 확인할 수 있었으며 잔골재 혼입율이 낮을수록 피크 값이 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수가 있었다. 또한 잔골재 혼입율이 증가함에 따라 52°부근에서 검출되는 C_3S 의 피크값이 점차 감소하는 경향을 보이는데 이는 잔골재 혼입율의 증가는 C_3S 의 합성에 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다. S30에서 37°부근에서 CaO가 일부 검출되었는데 이는 잔골재 혼입율이 가장 높은 배합으로 Quartz성분의 SiO_2 가 다량 혼입되면서 CaO와의 합성이 완전히 이루어지지 않았기 때문인 것으로 추정된다. 그러나 이는 다목적 최적화를 통한 조합원료 최적 배합비를 도출 할 당시부터 인정 범위 내의 다소 적은 양의 C_3S 및 C_3A 이며 무시할 정도의 미미한 차이이고, 특히 OPC와 상당히 유사한 수준의 강도 및 형상을 나타내고 있기 때문에 여러 제반 물성 및 내구 특성 또한 OPC보다 다소 낮으나 상당히 유사할 것으로 예측된다.

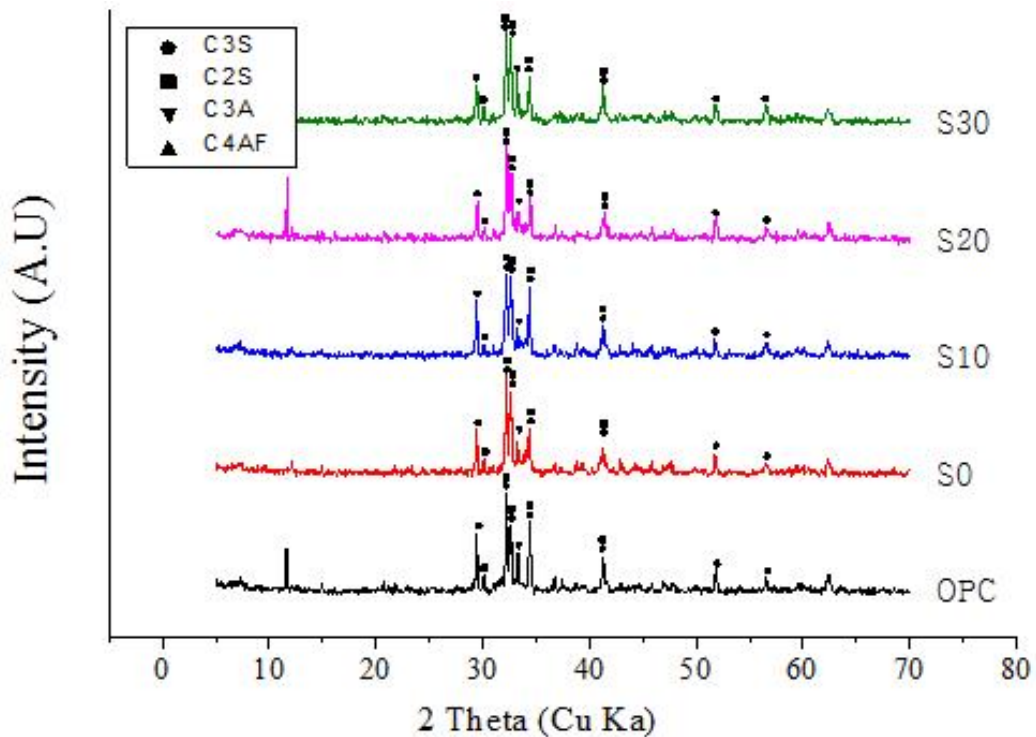


그림2-4. OPC 및 재생시멘트의 XRD 곡선

③ TG/DTA

본 연구에서는 재령에 따라 수중양생시멘 OPC, S0~30의 시료를 105℃에서 24시간 건조시킨 후 90 μ m체로 걸러 미분말 형태로 사용하였으며, 측정조건은 승온온도 10℃/min, 최고 570℃이다. 최고온도 설정 이유는 일반적으로 콘크리트가 온도 상승에 따라 100℃이상에서 콘크리트 내에 있는 공극수가 증발하기 시작하여 100~300℃에서 칼슘실리케이트 수화물, 에트린자이트, 모노설페이트, 알루미늄하이드록사이드 수화물 등이 탈수하는 현상을 보이며, 시멘트의 주요 구성성분인 CH가 425~550℃ 사이에 분해되기 때문이다(그림 2-5).

데이터 분석은 425~550℃에서 감소된 중량은 CH의 결합수가 탈수되어 증발되는 양으로 이 감소된 중량을 토대로 시료내 CH양을 계산할 수 있으며, DTA 그래프를 통한 Ca(OH)₂ 분해 구간 확인 후 TGA 결과값의 중량 감소율을 계산하였다. CH의 탈수 반응은 다음과 같이 식 2-4와 같이 표현될 수 있다.



이 때 각 성분의 분자량은 수산화 칼슘이 74.1, 산화칼슘이 56.1, 물이 18.0이다. 이 분자량을 토대로 계산하면 425~550℃ 사이에서 손실된 물 1g은 시료내의 CH 4.116g을 의미한다. 그러므로 식 2-5를 통하여 시료내의 CH의 함유율을 계산할 수 있게 된다.

$$W = 4.116L$$

$$CH = \frac{W}{W_C} \times 100 \quad (\text{식 2-5})$$

여기서, CH : 수산화칼슘의 함유율(%)

W : 수산화칼슘의 중량(g)

W_C : 시료의 중량(g)

L : 수산화칼슘의 탈수로 인하여 손실된 중량(g)

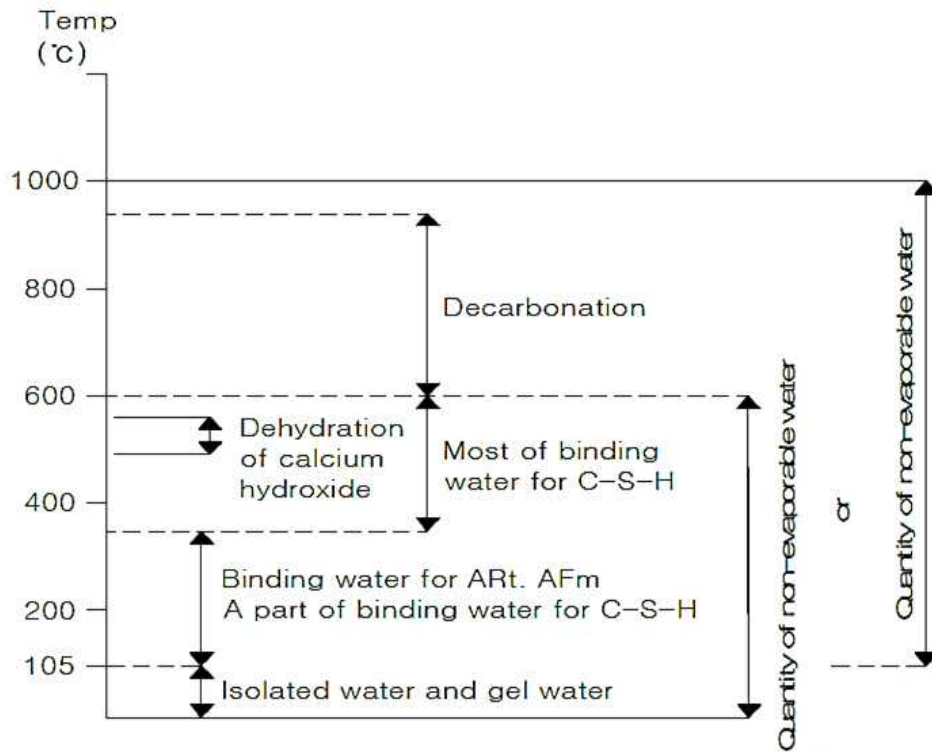
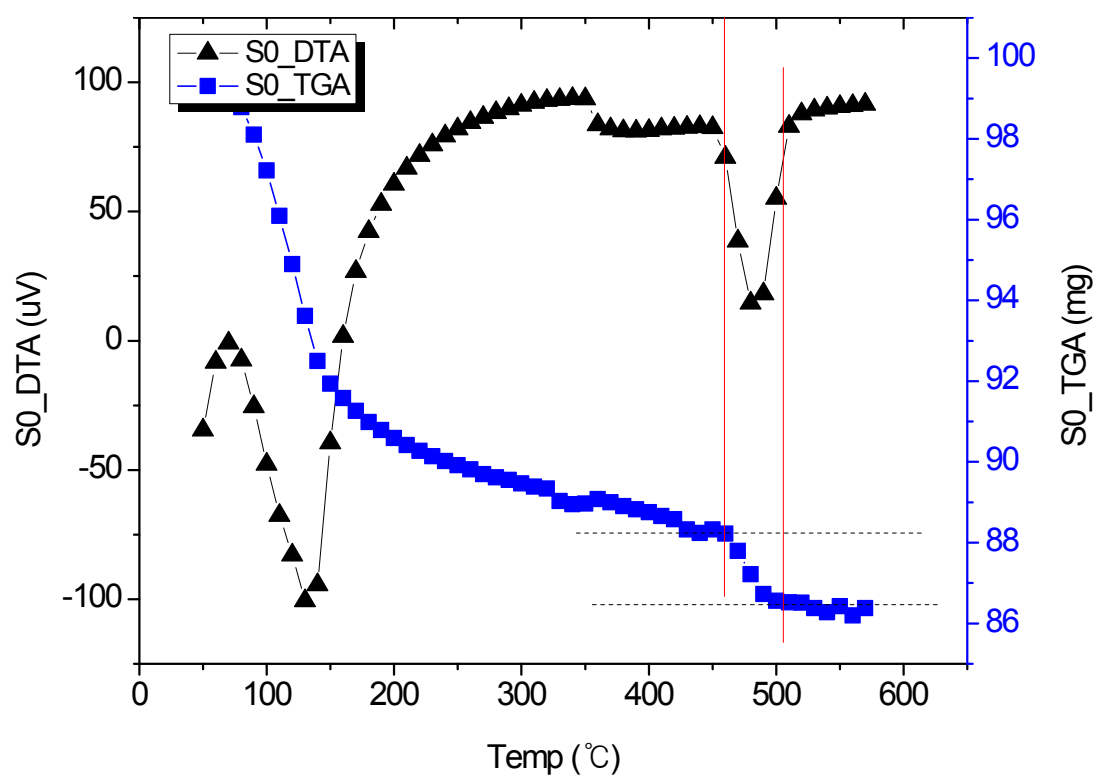
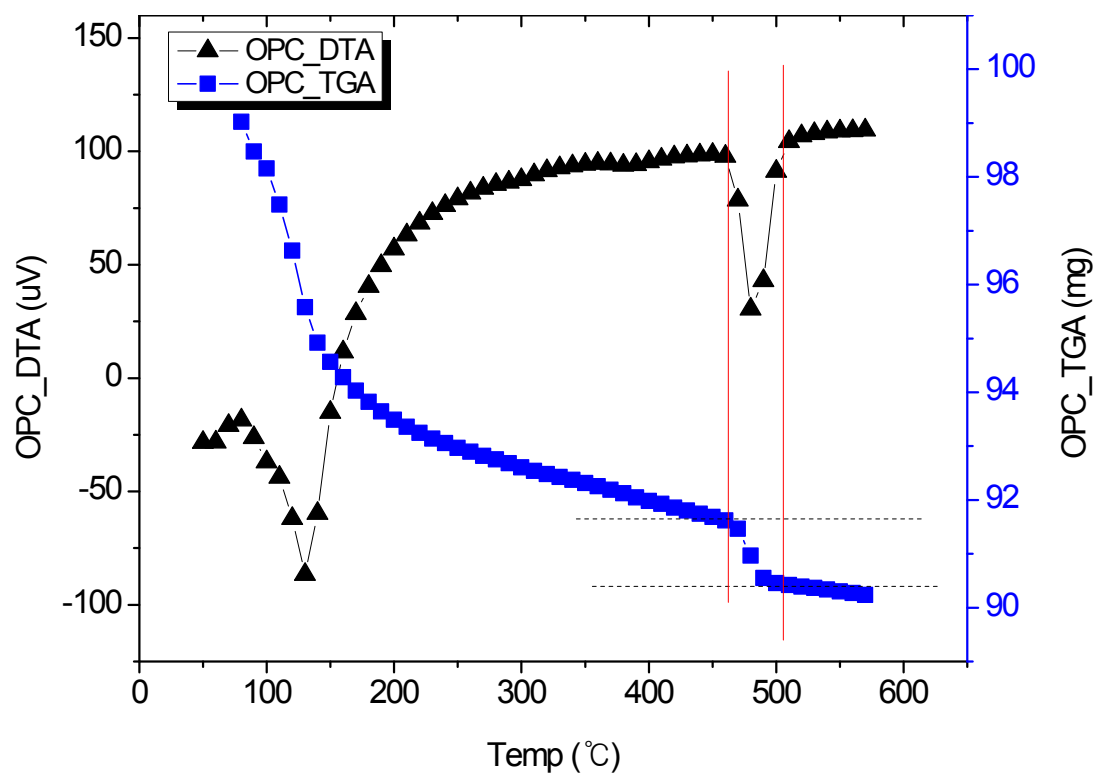
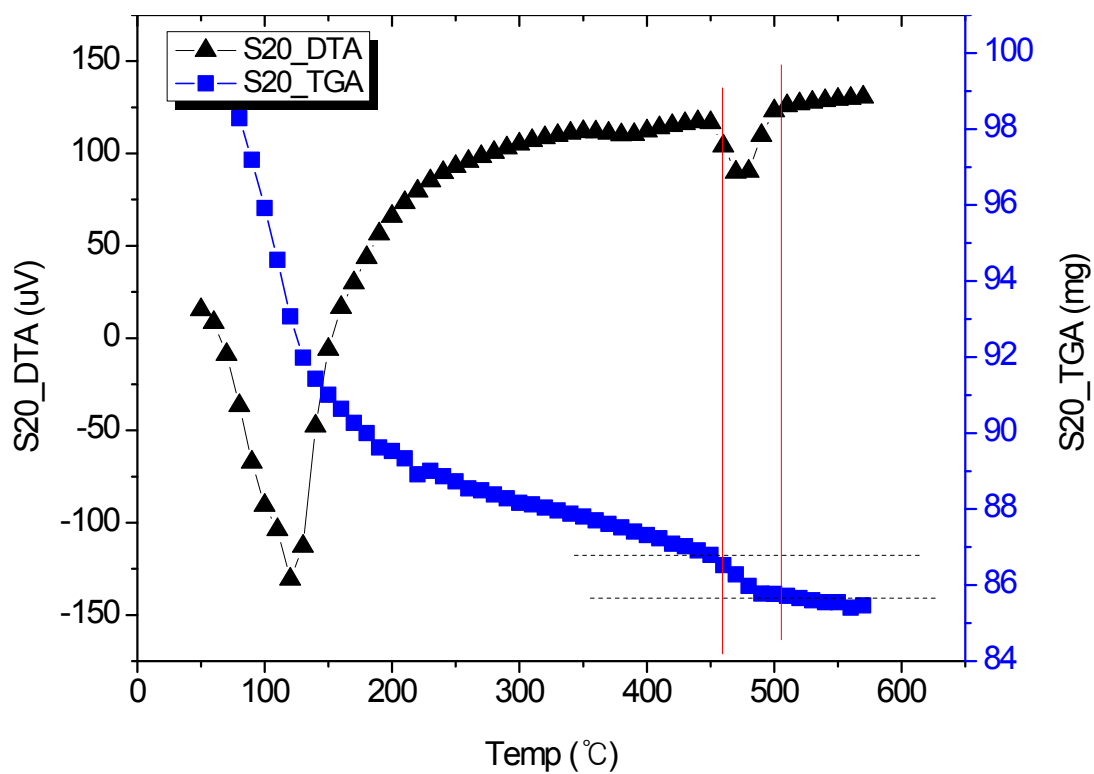
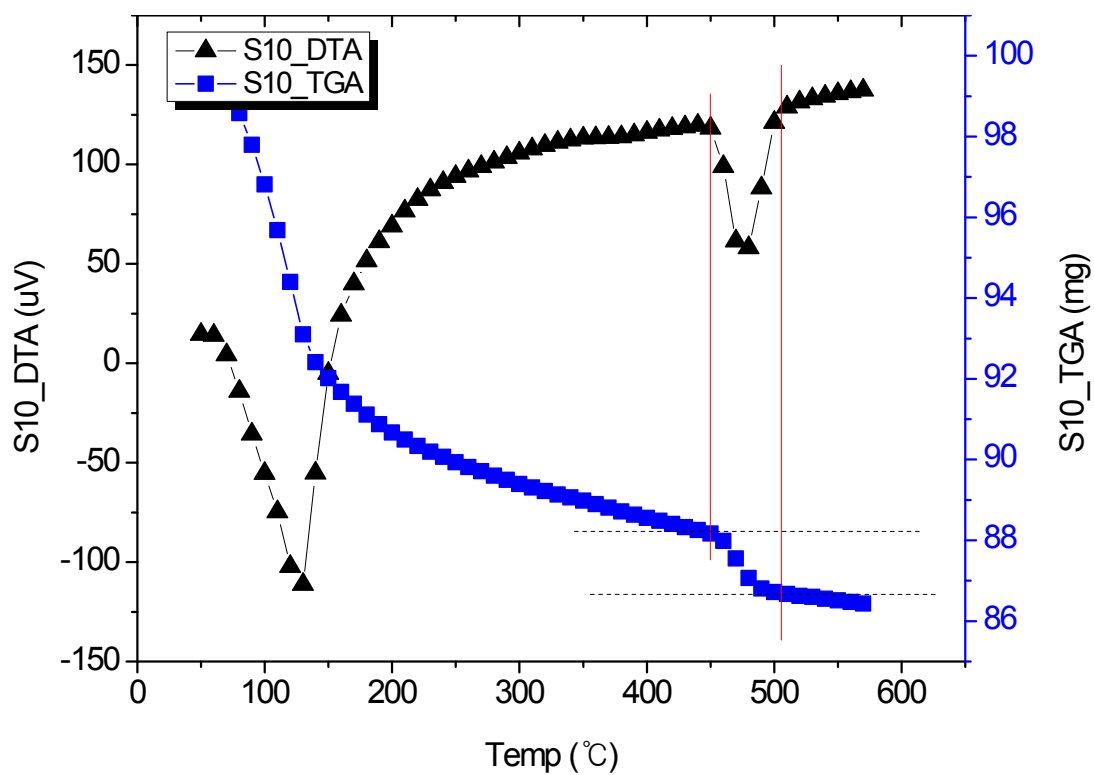


그림2-5. TG/DTA의 중량감소 과정





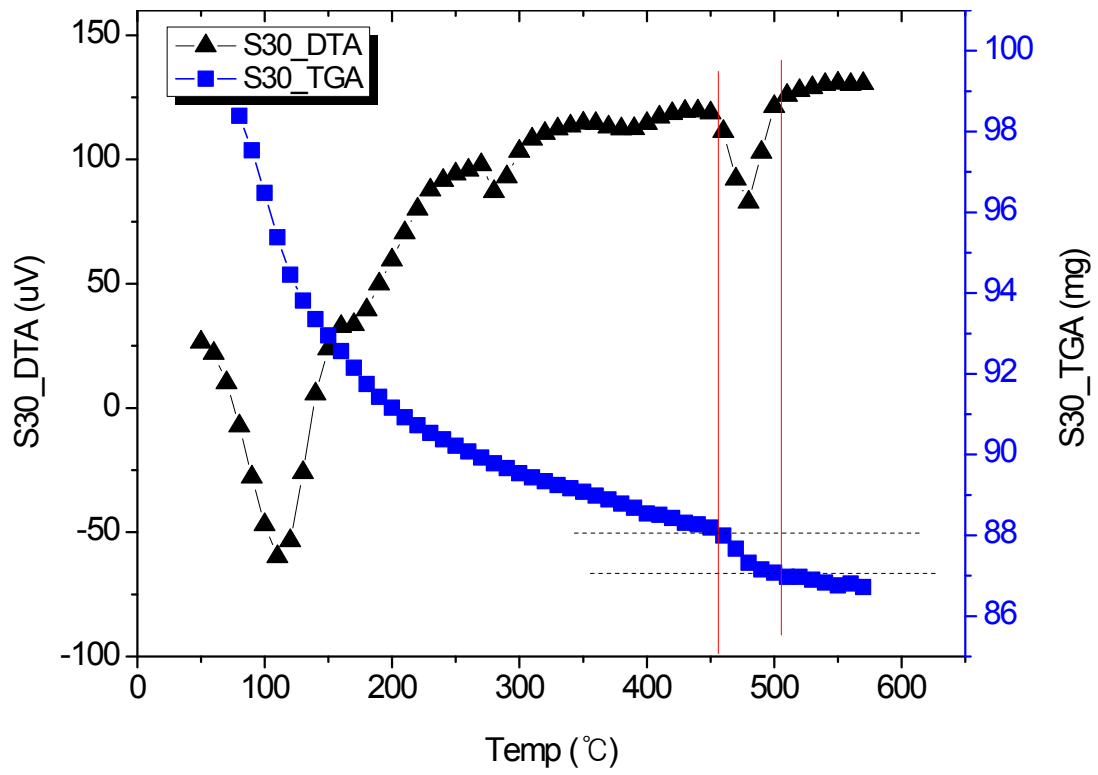
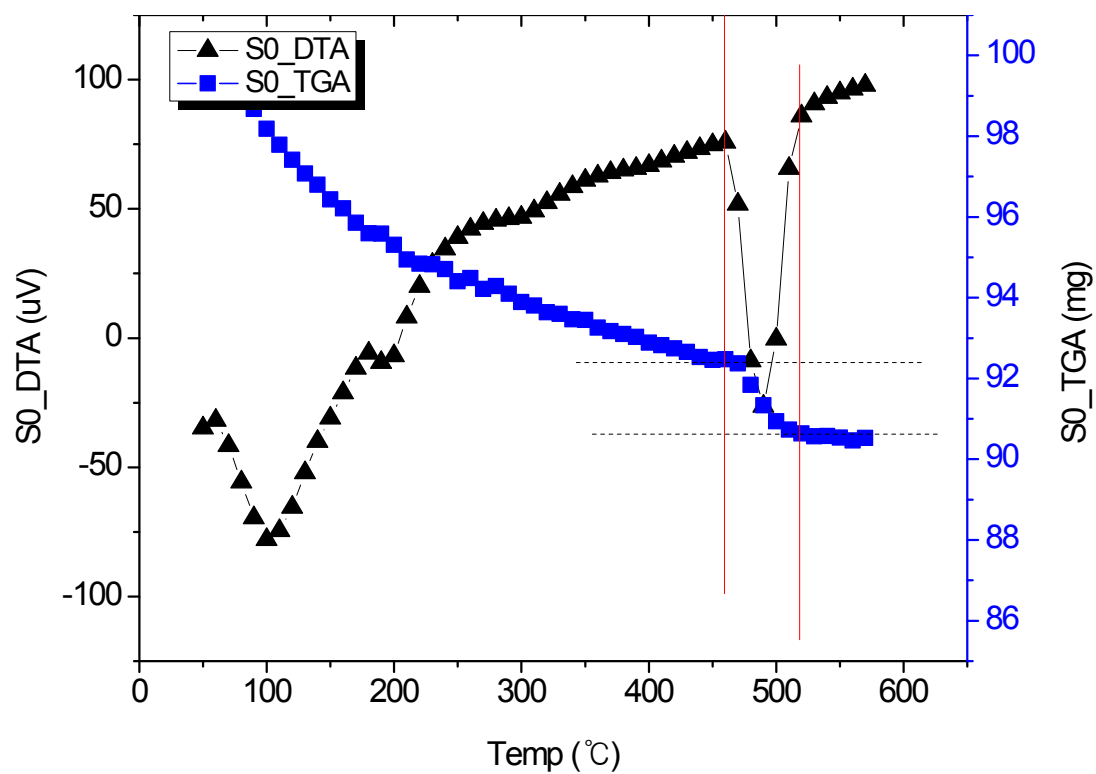
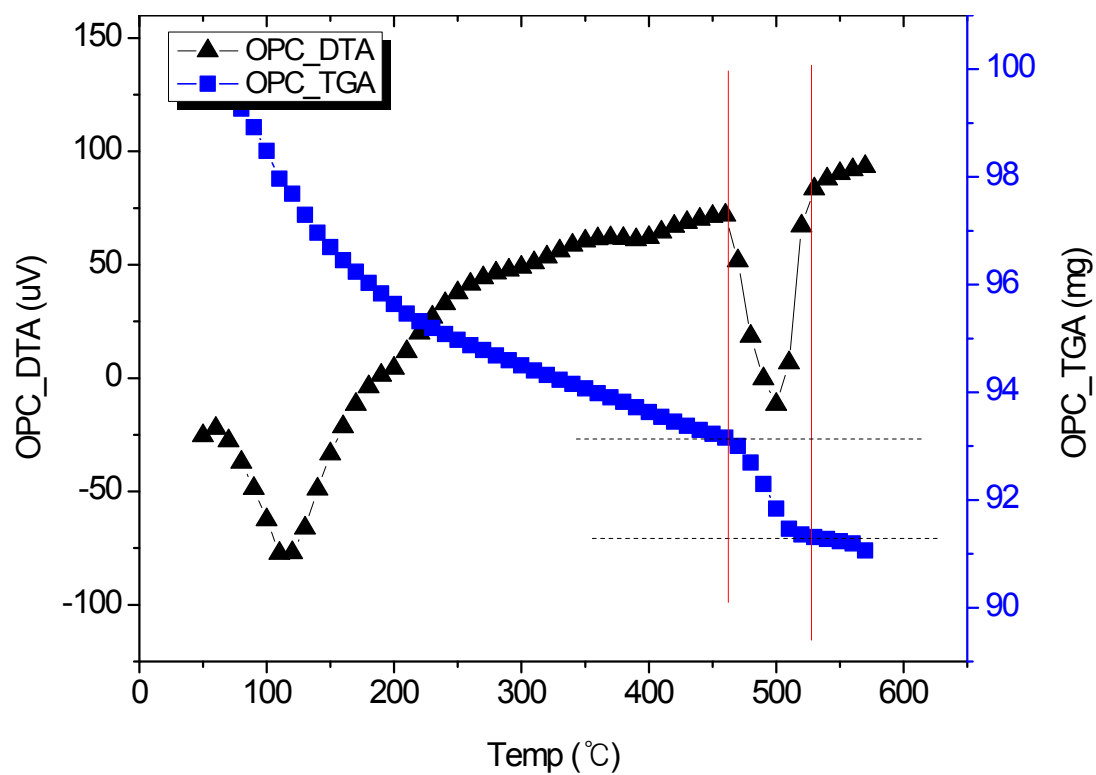
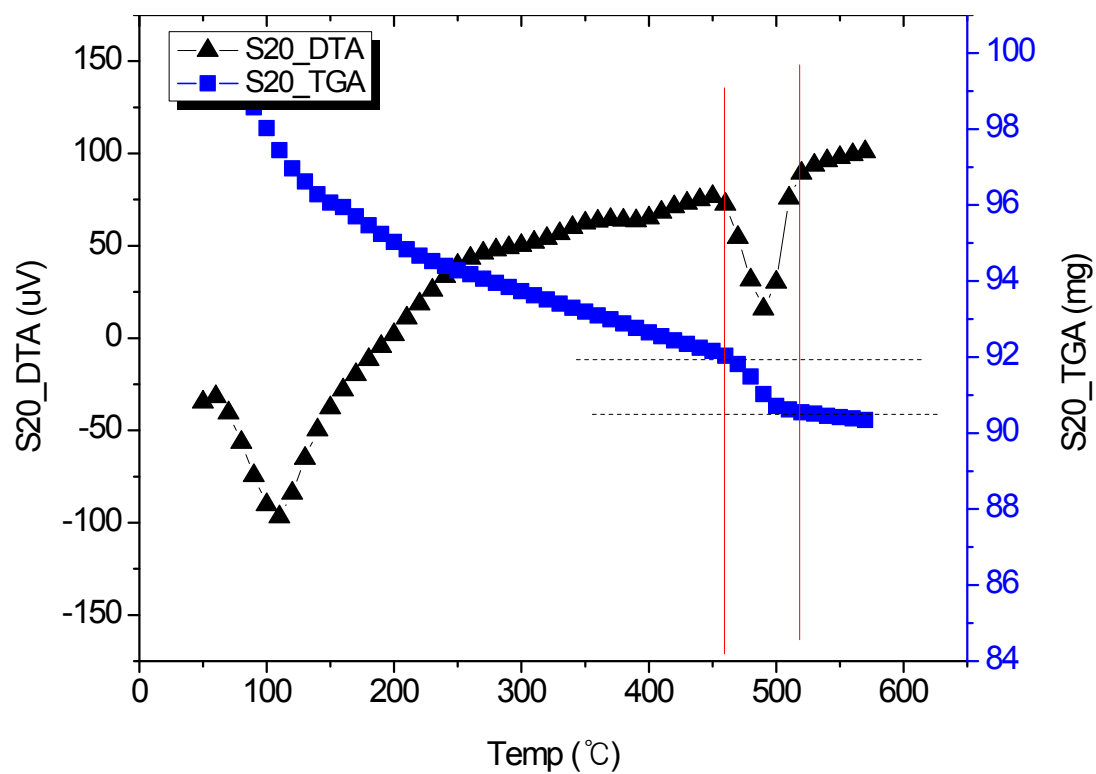
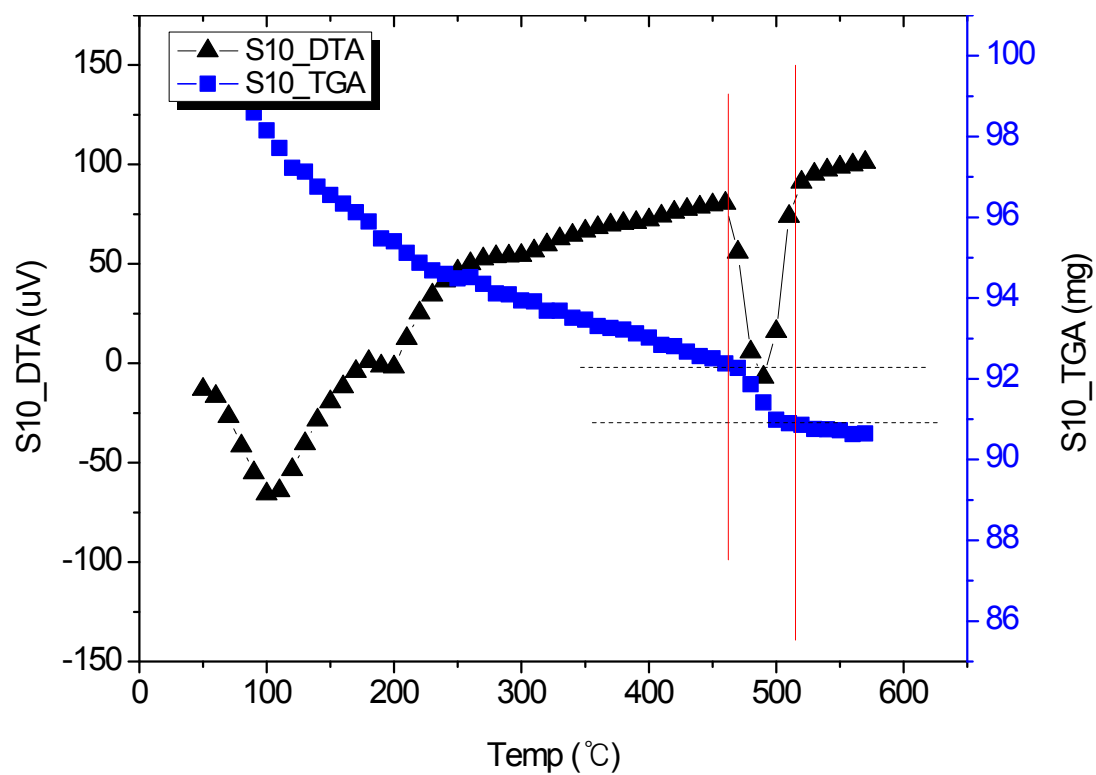


그림2-6. 재령 1일 재생시멘트 타입별 TG/DTA





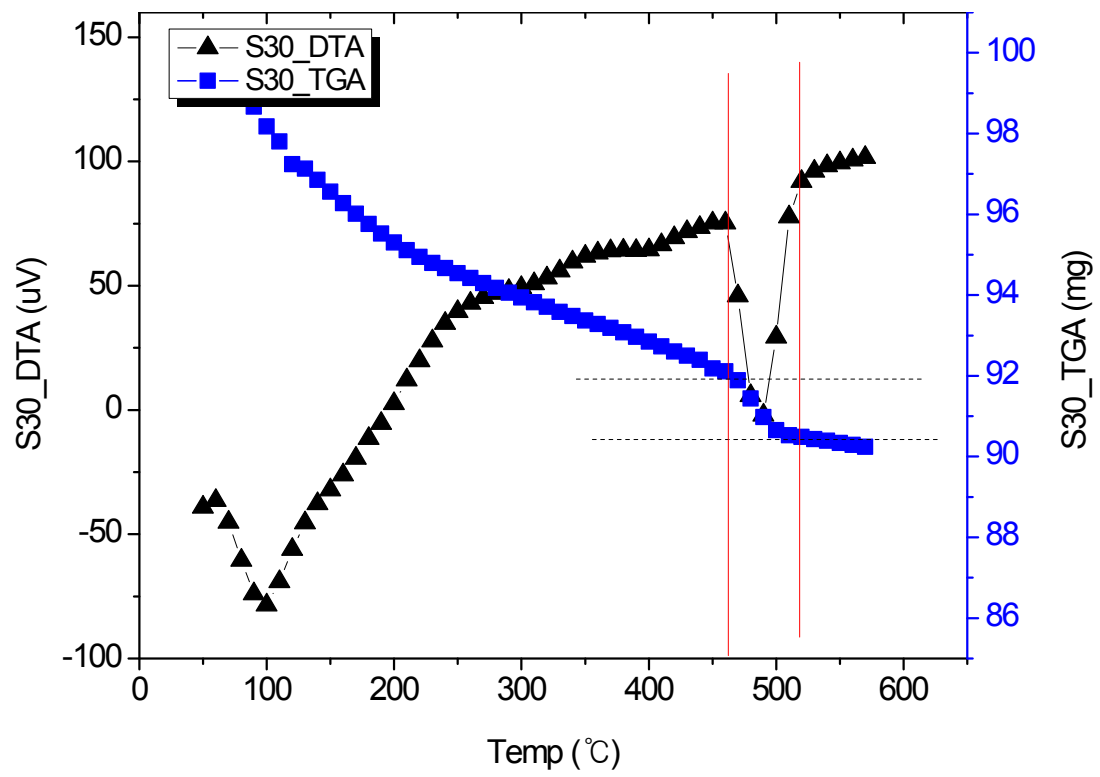
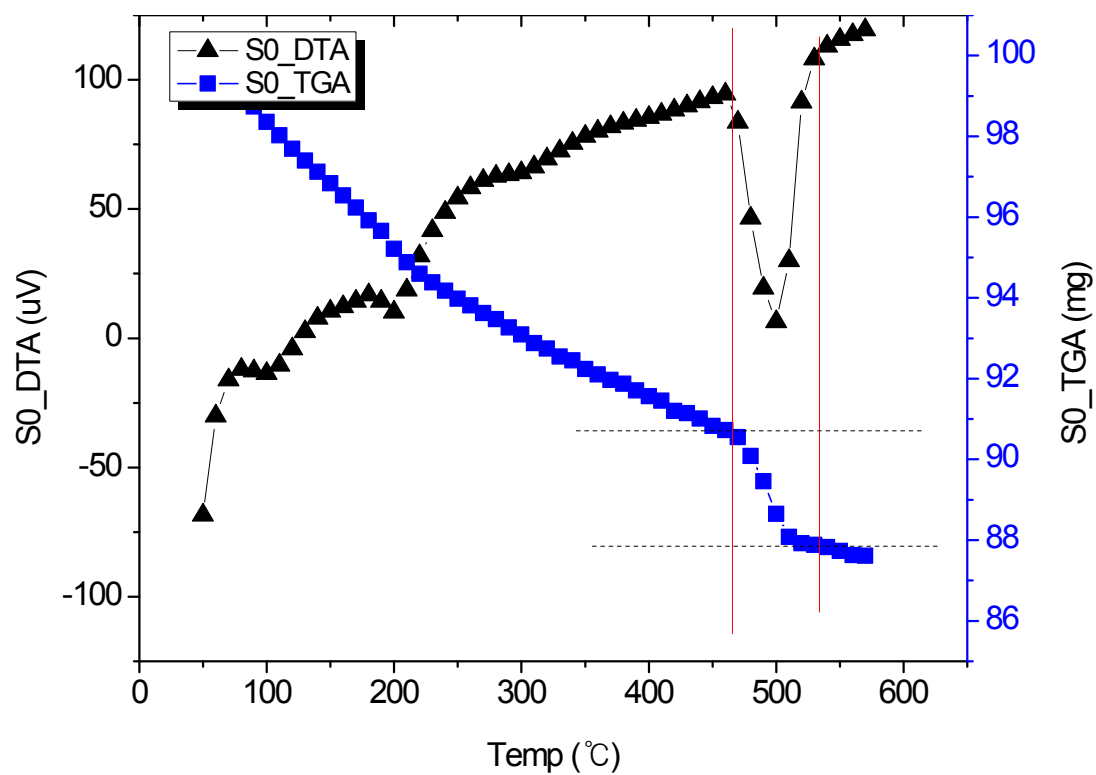
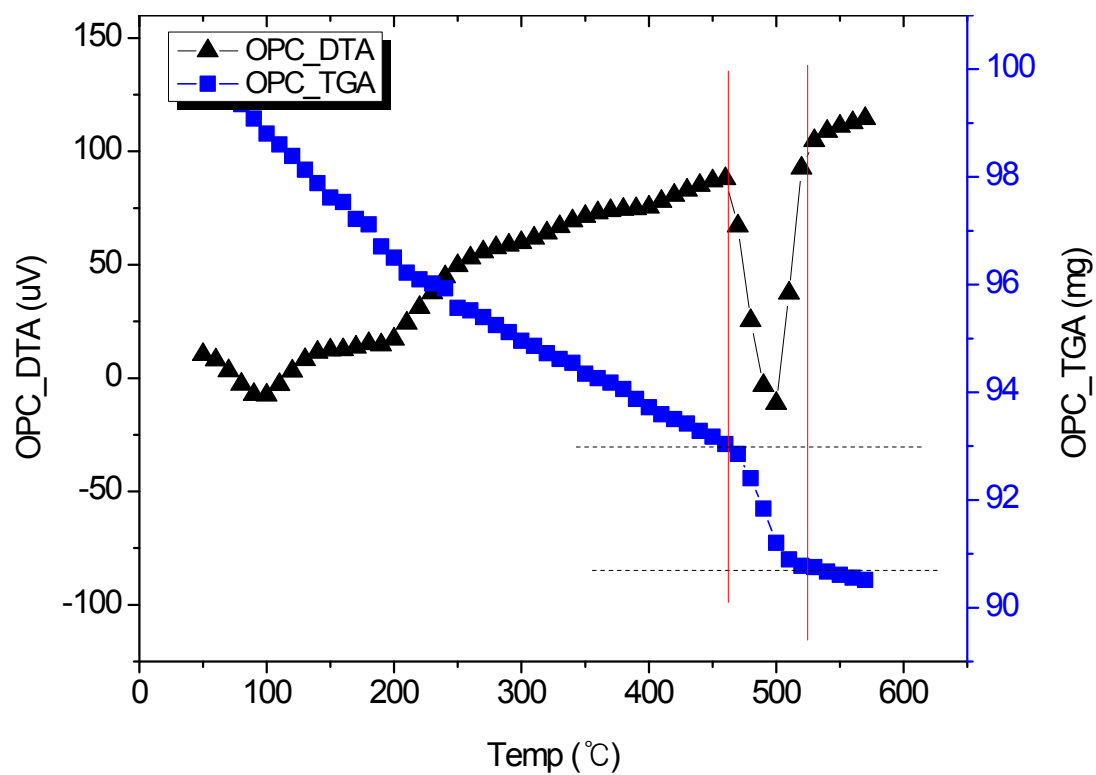
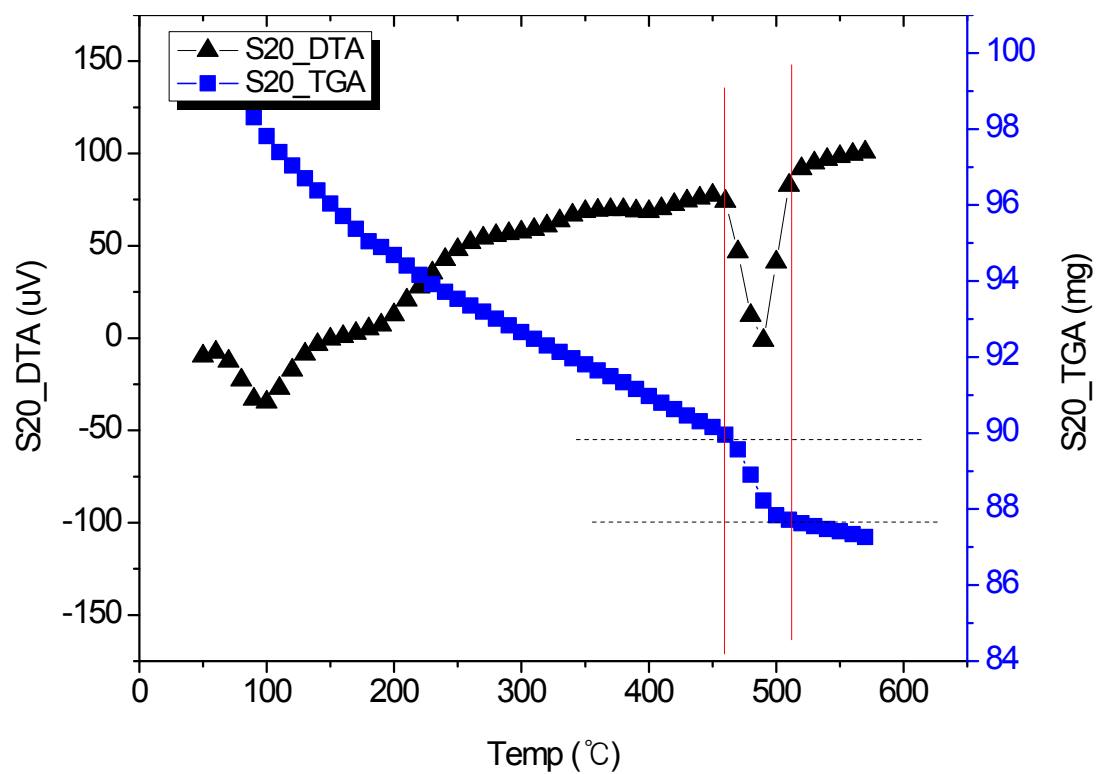
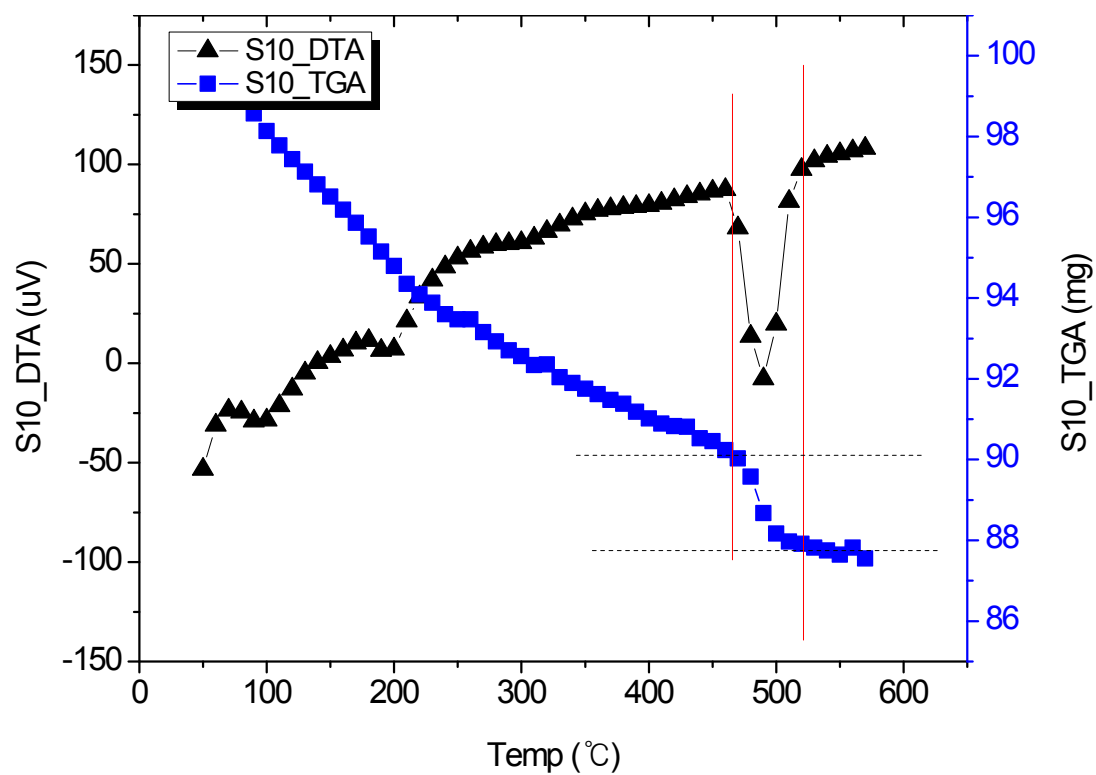


그림2-7. 재령 3일 재생시멘트 타입별 TG/DTA





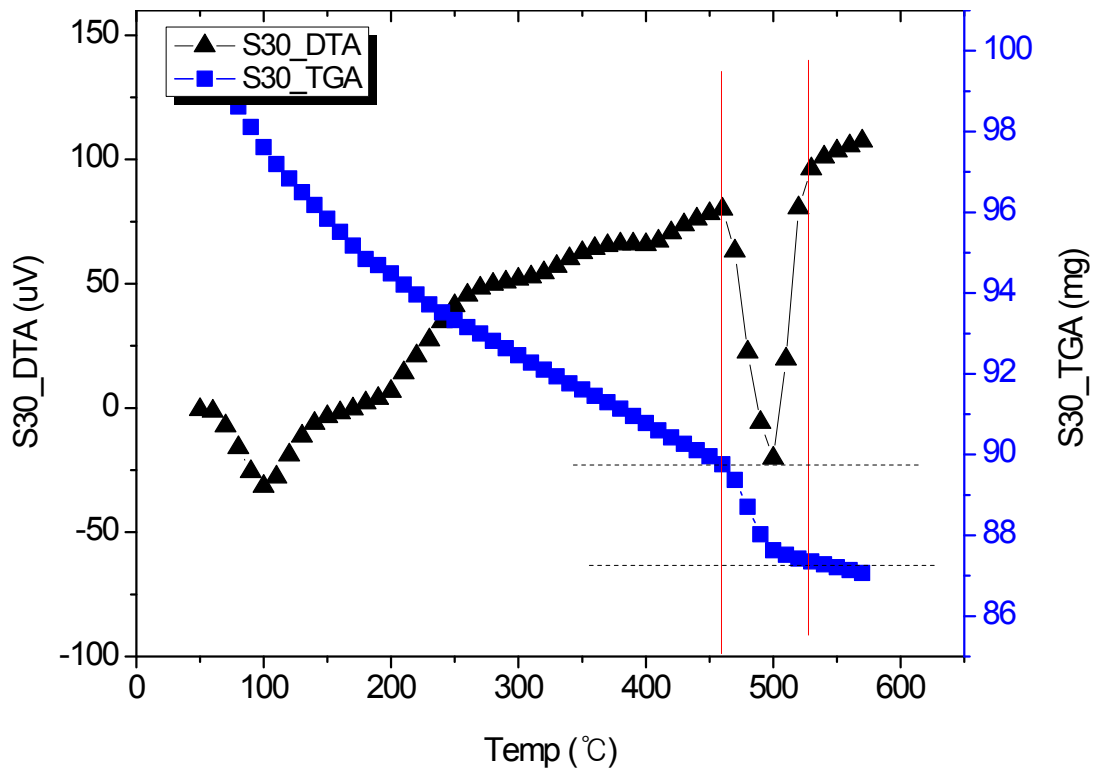


그림2-8. 재령 7일 재생시멘트 타입별 TG/DTA

식 2-5의 계산을 통해 얻어진 CH 함유율을 그림 2-9에 나타내었다.

모든 배합에서 재령이 증가할수록 CH함유율은 증가하고 있으며, 폐미분말 내 잔골재 미분의 혼입율이 증가할수록 CH함유율 증가폭이 커지는 것으로 나타났다. 이는 그림 2-10와 같이 다목적 최적화의 결과로 폐미분말 내 잔골재 혼입율의 증가에 따라 SM이 다소 커지면서 C_3S 및 C_3A 의 함유량이 감소하고 C_2S 의 함유량이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 폐미분말 내 잔골재 미분말의 혼입율이 증가할수록 $Ca(OH)_2$ 함유율, 즉 수화율이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 잔골재 내 함유되어 있는 낮은 소성성의 Quartz 결정형태의 SiO_2 의 증가에 의한 것으로 추정된다.

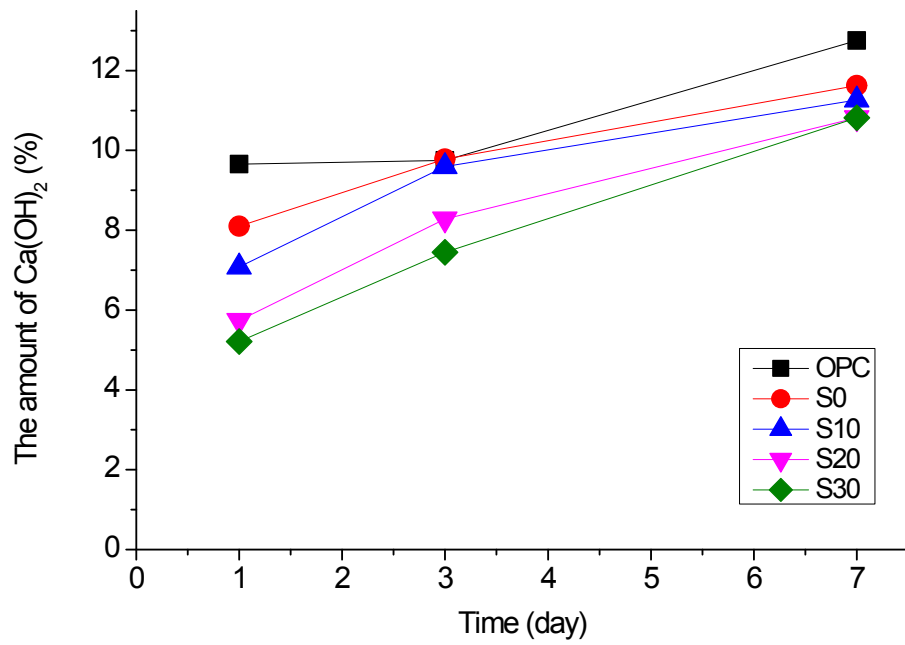


그림2-9. 재생시멘트 타입별 Ca(OH)_2 함유율

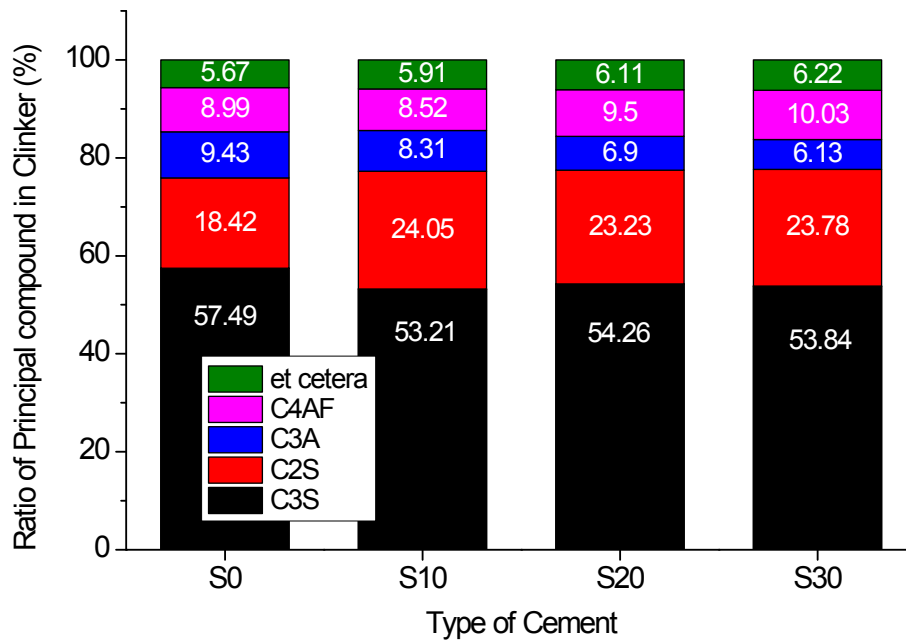


그림2-10. 폐미분말 내 잔골재 혼입율에 따른 재생시멘트 주요 화합물량

3. 저탄소형 재생시멘트의 유동특성 평가 및 강도특성 분석

3.1 유동특성 평가

① 개요

콘크리트는 액체와 고체로 이루어진 다성분계로 이루어진 하나의 복합체로써 연속상(시멘트페이스트)과 분산상(골재)로 이루어진 이상의 혼상유체이며, 그림3-1에 나타난 여러 요인들에 의해 복잡한 유동특성을 갖는다. 일반적으로 유동성은 유동곡선으로 나타내며, 점성을 가진 유체의 일반적인 유동곡선은 표3-1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 유동곡선은 전단응력이 작용했을 때 곧바로 전단속도가 발생하여 양자사이에 직선적인 관계가 나타나는 뉴턴운동과 전단응력이 소정의 값을 넘었을 때 전단속도가 발생하여 그 이후에 직선적인 관계가 성립하는 비뉴턴유동으로 나누어지며, 콘크리트를 비롯하여 시멘트계 혼합물의 유동은 일반적으로 비뉴턴유동과 유사하다. 비뉴턴유동 중에서 유동을 일으키기 위해 필요한 최소 전단응력(항복값)을 필요하는 경우를 소성유동(Bingham Flow)이라 한다. 소성유동에서 항복값 이상의 전단응력에서 직선관계가 성립되고 곡선의 기울기가 소성점도에 해당된다. 이러한 특징을 가지는 콘크리트의 유동성을 측정하는 방법은 표3-2와 같이 다양하나 본 연구에서는 가장 흔히 사용하는 슬럼프 플로우 시험과 점도계를 사용한 레올로지시험을 수행하였다. 또한 콘크리트의 유동성은 시멘트 페이스트의 유동특성에 크게 의존하므로 시멘트 페이스트의 유동성을 해명하는 것은 콘크리트의 유동특성을 이해하는 데에 매우 중요하기 때문에 슬럼프 플로우 시험은 모르타르, 레올로지 시험은 페이스트를 제작하여 수행하였으며, 콘크리트의 유동특성에 영향을 주는 다양한 인자들을 모두 동일하게 고정하고 폐미분말 내 잔골재 미분의 혼입율에 따른 S0, S10, S20, 30의 재료와 W/C(40, 50, 60%)의 인자만을 변화시키며 각각 수행하였다.

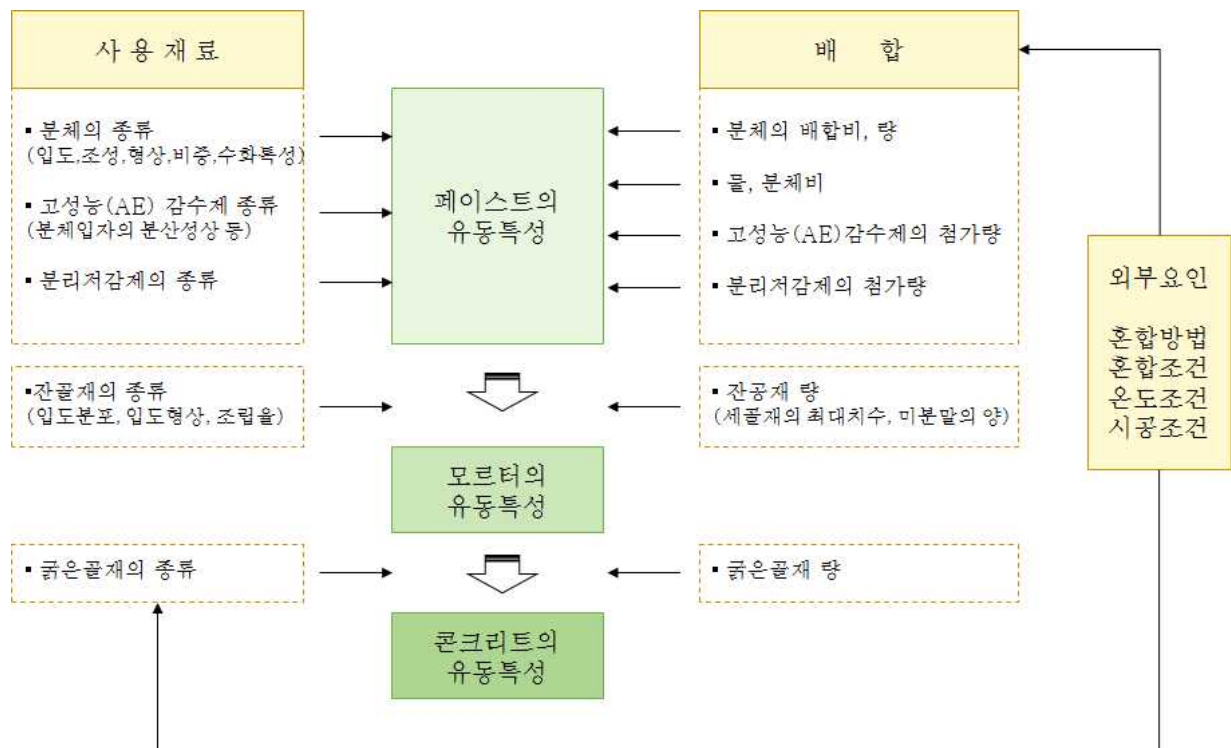
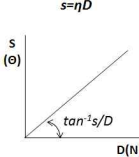
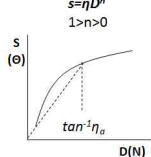
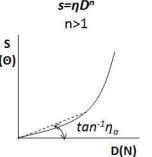
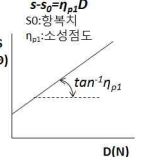
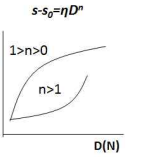
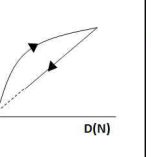
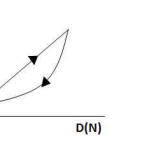


그림3-1. 콘크리트의 유동기구와 영향요인

표3-1. 유동곡선의 형식

뉴턴성 Newtonian	비뉴턴성 Non-Newtonian					
	의소성 pseudoplastic (구조점성)	다일레이턴트 dilatant	소성 plastic		시간의존성 time-dependent	
			빙함 Bingham	비빙함 Non-Bingham	틱소트로피 Thixotropy	레오펙시 rheopexy
						
-단분자액체 (물, 모타오일, 석유, 글리세린)	-고분자용액 -고무용액	-점토슬러리 -도료 -초콜릿	-마아가린 -각종 슬러리 -페이스트 -크림	-도료	-도료 -코코아 -크림 -구리스	-점토슬러리

s : 전단응력 (dyne/cm²) θ : 점도계지시치 D : 전단속도(s⁻¹)
 η : 뉴턴점성 η_a : 겔보기점도(비뉴턴성) n : 비뉴턴성 점성지수

표3-2. 유동특성 평가방법

시험종류	측정항목	측정목적
슬럼프시험	슬럼프치	일반적인 콘크리트시험에 해당하며 엄밀히 말하면 콘크리트의 변형 능력을 평가하는 세미레올로지시험이라고 말할 수 있다.
슬럼프플로우시험	슬럼프플로우치 슬럼프플로우속도	구속력이 없는 상태에서 콘크리트 자중으로 강판과의 마찰저항 및 콘크리트자체의 변형저항에 대해 콘크리트의 변형 능력을 판정하는 시험이다. 재료분리가 일어나지 않는 상태에서 변형능력이 클수록 좋다.
V-lot 시험	V-lot 통과시간	구속력이 없는 상태에서 콘크리트자중으로 강판과의 마찰저항 및 콘크리트자체의 변형저항에 대해 콘크리트의 변형 능력을 판정하는 시험이다. 재료분리가 일어나지 않는 상태에서 변형능력이 클수록 좋다.
VF 시험	VF 통과시간	VF시험기 하부에 진동을 가한 상태에서 VF시험기를 통과시간으로 콘크리트의 유동성을 시험
철근간통과시험	통과시간	콘크리트가 철근사이를 통과하는 경우를 생각하여 고안된 충전성시험의 일종으로 철근의 순간격은 67.5, 56.5, 48.5mm 세종류가 있다.
레올로지시험	(점도계를 사용) 소성점도 항복치	보통콘크리트에 비해 고유동콘크리트의 컨시스턴시와 워커빌리티는 차이가 있는데, 수치해석을 통해 유동거동을 이론적으로 해석하는 것을 목적으로 레올로지적인 물성치를 밝히는 시험
부착시험	(부착시험기) 부착하중을 측정	골재와 페이스트와의 부착력을 추정하고, 콘크리트와 거푸집과의 부착력을 추정하여 재료분리저항성 및 유동성을 이해하고자 행하는 실험

② 시험체 제작

시험체는 KS F 2403:2014에 준하여 제작되었으며 배합설계는 표3-3과 같다.

표3-3. 저탄소형 재생시멘트 배합설계

slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	굵은골재 최대치수 (mm)	s/a (%)	W (kg/m ³)	단위용적 (l/m ³)			단위질량 (kg/m ³)		
						C	S	G	C	S	G
18	4.5	40	25	38.50	184	146.0	412.0	258.0	460.0	1092.0	670.7
		50		42.29	175	111.1	412.0	301.9	350.0	1092.0	784.9
		60		43.27	179	94.7	412.0	314.3	298.3	1092.0	817.2

③ 슬럼프 플로우 시험

슬럼프 플로우 시험은 KS L 5111에 준하여 실시하였다. 측정결과를 그림3-2에 나타내었다.

S0 및 S10의 경우 OPC보다도 높은 유동특성을 가지는 것으로 나타났으나, S20 및 S30의 경우 급격히 플로우 값이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 폐미분말 내 혼입되어 잇는 잔골재에서 기인한 SiO₂(Quarz) 성분으로 인하여 재생시멘트 내 유리석회의 소화(消和) 반응시의 분화(粉化)현상에 의하여 유동성이 저하하는 것으로 판단된다. 또한 OPC에 비해 W/C의 영향을 적게 받는 것으로 나타났으며 이는 강도 및 내구성 조정에 큰 이점으로 작용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 모든 타입의 재생시멘트가 시공성 관련 요구성능을 만족하며 가장 낮은 유동성을 나타낸 S30의 경우에도 OPC의 90%이상의 유동성을 나타낸다. 따라서 OPC 수준의 현장적용성이 가능할 것으로 판단된다.

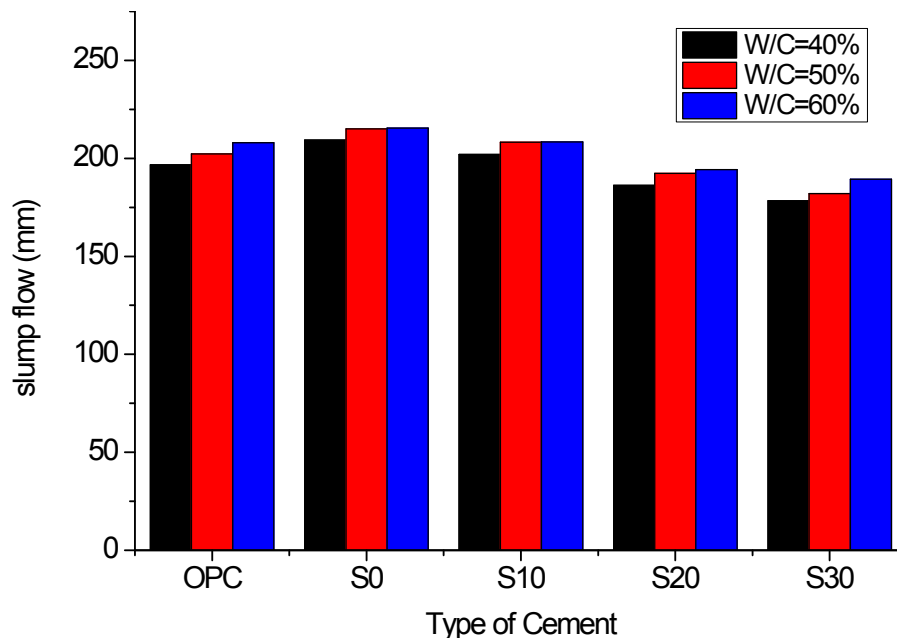


그림 3-2 OPC 및 재생시멘트 몰탈의 슬럼프 플로우 측정결과

④ 레올로지 시험

레올로지 특성분석을 수행한 결과 폐미분말 내 잔골재 미분의 함유량이 증가할수록 다소 항복치가 낮아지는 경향을 나타내고 있으며 특히, S0가 큰 차이로 높은 것으로 나타났다. 이는 재생시멘트 내 유리석회의 소화(消和) 반응시의 분화(粉化)현상에 의하여 잔골재 미분의 혼입이 증가할수록 유동성이 저하하기 때문인 것으로 생각되며 이러한 잔골재 미분이 혼입되지 않은 폐미분말을 시멘트 주원료로 사용한 S0의 경우에는 일어나지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 또한, W/C가 40%일 때 S0의 초기값에서 다소 불안정한 값을 나타내는 것을 확인할 수 있는데 이는 슬럼프 플로우 테스트와 동일한 이유로 유동성이 증가한 이유로 생각된다.

또한 회전점도계(비스코메타)를 통해 얻어진 데이터를 빙함모델로 근사시켜 구한 레올로지 정수와 슬럼프 플로우 결과값의 상관관계를 회귀분석을 통해 나타냈다. 그 결과 슬럼프 플로우 값과 항복치의 관계는 반비례 관계를 나타내고 있으며, 유동성이 좋은 것으로 나타났던 S0 및 S10의 경우 비례관계를 나타내었으나, S20 및 S30의 경우 반비례관계를 나타냈다.

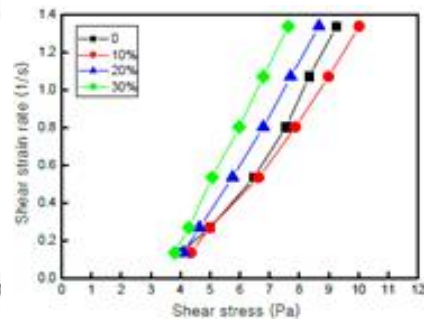
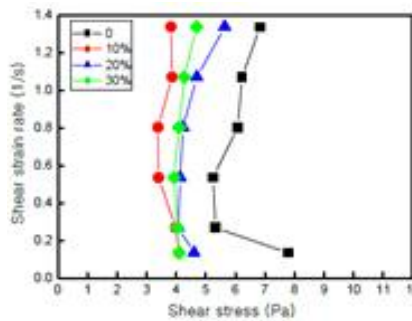
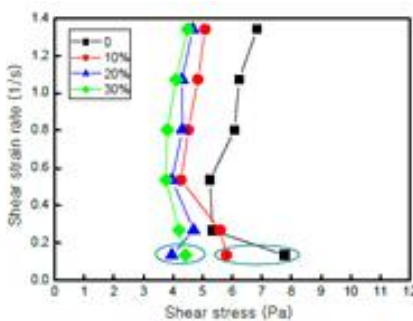
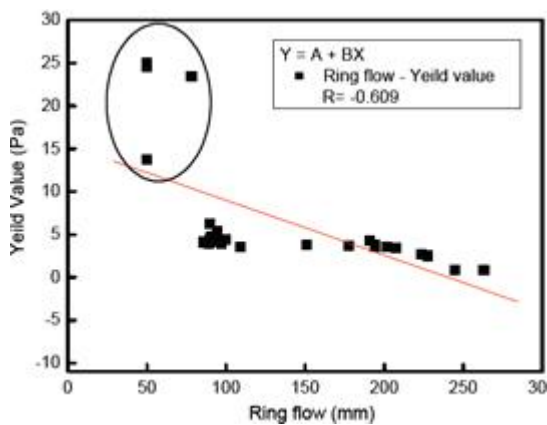


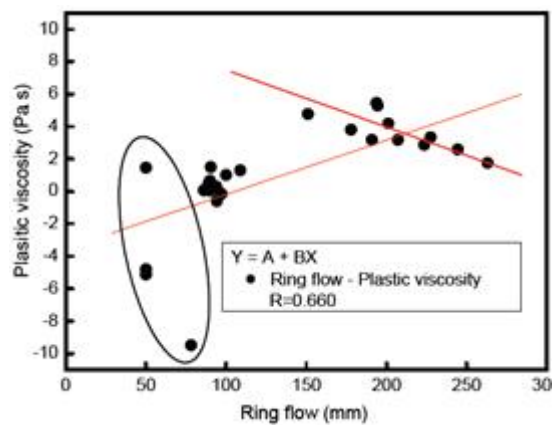
그림3-3 W/C: 40% 콘시스턴시

그림3-4 W/C: 50% 콘시스턴시

그림3-5 W/C: 60% 콘시스턴시



(a) 항복치



(b) 소성점도

그림3-6 플로우와 레올로지 정수와의 상관관계

3.2 강도특성 평가

KS F 2405:2010에 준하여 압축강도를 측정하였으며 그 결과는 그림 3-7, 8과 같다.

OPC 및 저탄소형 재생시멘트의 압축강도를 측정해 본 결과 OPC 대비 75.40~100.74%에 상응하는 수준으로 높은 것으로 나타났다. 특히 S0의 W/C 40%의 재령 28일 압축강도의 경우 81.85MPa로 동일 조건에서의 OPC (81.25MPa) 보다도 높은 것으로 나타났다. 이는 소성성 향상을 위해 분말도를 4000으로 다소 높였기 때문에 수화반응이 활발히 일어날 수 있었기 때문인 것으로 생각된다. 또한 다목적 최적화를 통한 화학적 성질을 토대로 시멘트 주요화합물 조성비를 미리 예측하여 조합원료의 최적배합비를 도출하였기 때문인 것으로 추정된다. 그럼에도 불구하고 폐미분말 내 잔골재 혼입율이 증가할수록 압축강도가 다소 떨어지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 앞절에서 확인한 수화율과 관련하여 폐미분말 내 잔골재 미분에서 기인한 Quartz 결정형태의 SiO_2 의 낮은 소성성때문인 것으로 생각된다. 그러나 S0 ~ S20은 보통 포틀랜드 시멘트의 수준에 상응하는 수준으로 실용화가 가능할 것으로 판단되며, S30의 경우 OPC의 약 75%의 압축강도이므로 OPC와의 혼합사용 및 비구조재료의 실용화가 가능할 것으로 판단된다.

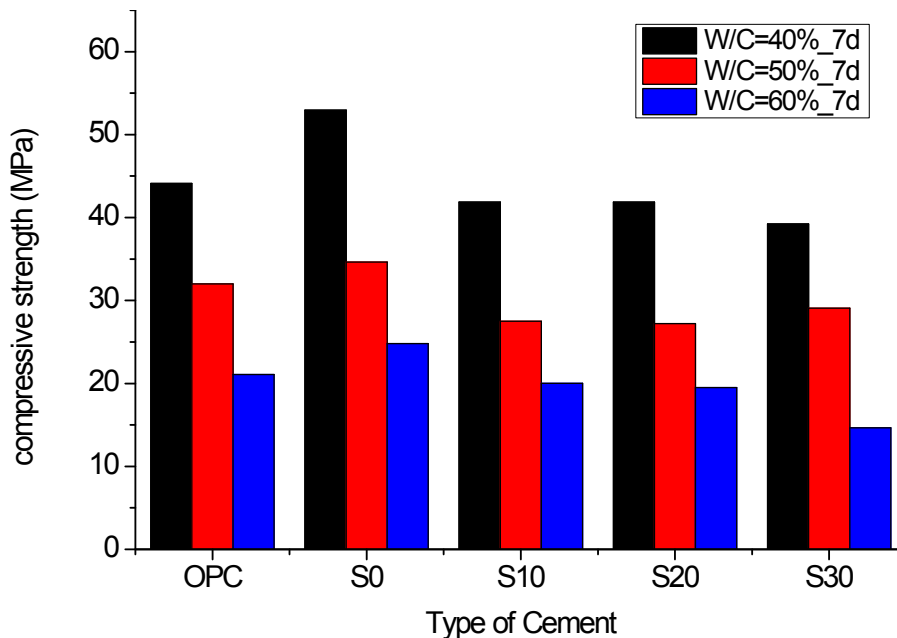


그림3-7 재생시멘트 배합별 재령 7일 압축강도 시험

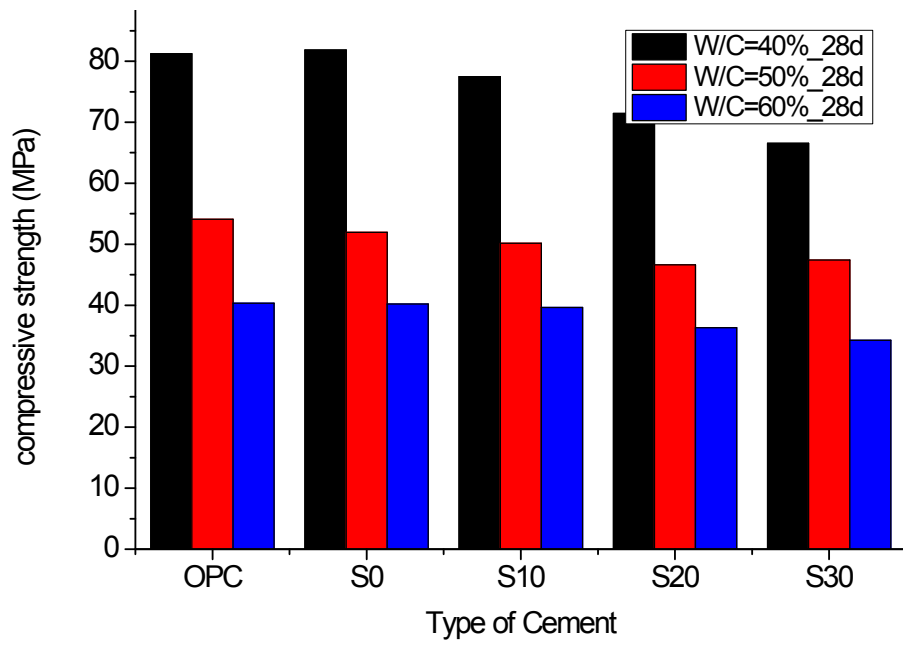


그림3-8 재생시멘트 배합별 재령 28일 압축강도 시험

4. 저탄소형 재생시멘트·콘크리트의 엔트로피 저감 효율성 분석

4.1 시멘트 산업에서의 엔트로피 저감에 대한 국내외 동향

온실가스 중 CO₂가 약 89%로 지구온난화에 가장 많은 영향을 미치는 것으로 밝혀지면서 온실가스 감축목표의 지표로 CO₂가 많이 거론되고 있다. 아래 나타낸 표4-1은 국가별 CO₂배출량을 나타낸 것이고 그림4-1에 나타낸 것과 같이 국제협약이 체결된 후에도 지속적으로 증가하고 있으며 경제성장이 멈춘 후에도 이미 발달해 있는 산업에서 많은 에너지가 요구되기 때문에 지속적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 2010년 세계 상위 CO₂배출량 9개 나라 기준으로 총 CO₂배출량이 190억 톤을 넘는 것으로 나타났다. 이 중 시멘트 산업이 차지하고 있는 부분은 총 5%로 약 9억 5천 톤/년으로 많은 양이 배출되고있어 시멘트 산업에서의 CO₂배출량 저감에 대한 연구 및 개발이 활발히 이루어지고 있다. 그 결과로 고로슬래그 및 플라이애쉬 등 산업 부산물을 활용하는 연구가 다수의 연구자에 의해 진행되었으며, 그 결과 이미 실용화 단계에 이르러 있음에도 불구하고 그림4-2에 나타나는 것과 같이 CO₂배출량은 지속적으로 증가하고 있다.

표4-1. 국가별 CO₂ 배출량

[단위 : Tg CO₂]

	1990	1995	2000	2005	2007	2008	2009	2010
중국	2,244	3,022	3,077	5,103	6,072	6,549	6,846	7,259
미국	4,869	5,139	5,698	5,772	5,763	5,587	5,185	5,369
인도	582	777	973	1,165	1,362	1,439	1,564	1,626
러시아	2,179	1,575	1,506	1,516	1,579	1,593	1,533	1,520
일본	1,064	1,148	1,148	1,221	1,242	1,154	1,093	1,143
독일	950	868	825	809	796	800	747	762
대한민국	229	359	438	469	490	502	516	563
캐나다	433	466	533	559	569	551	526	537
영국	549	517	524	533	523	466	466	484
합계	13,099	13,871	14,722	17,147	18,396	18,641	18,476	19,263

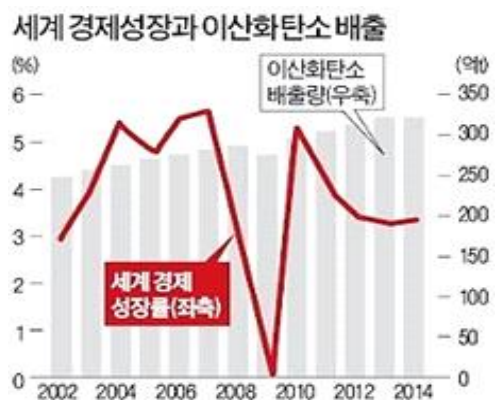


그림4-1. 세계경제성장률과 이산화탄소 배출량

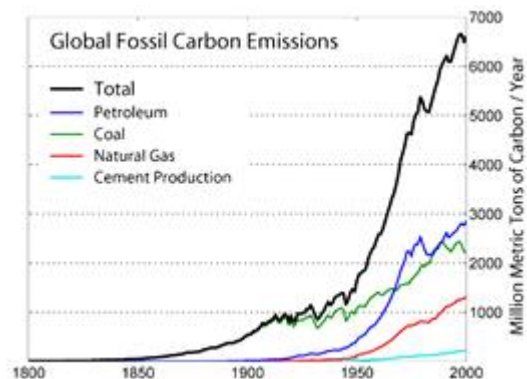


그림4-2. 세계 산업별 이산화탄소 배출량

4.2 건설재료 전과정 온실가스 배출량 평가방법

① 탄소성적표지제도

탄소성적표지제도는 환경부에서 시행하고 있으며 국내 모든 산업의 서비스 및 활동을 대상으로 전 과정에서 발생하는 온실가스 배출량을 평가하여 이를 CO₂ 배출량으로 환산하여 제품에 표시하는 제도이다. 평가대상의 종류에 따라 평가 범위 및 방법에 차이가 있으나, 공통적으로 제품의 생산, 수송, 사용, 폐기 등의 평가가능한 모든 범위를 고려한다. 제품에 따른 평가범위를 그림4-3에 나타냈으며, 콘크리트를 비롯한 건설재료의 경우 건축물 또는 구조물을 건설하기 위한 구조재료로서 생산재에 해당하여 탄소성적표지제도에서는 제품 제조단계까지를 평가범위로 한정하고 있다. 이를 콘크리트 전용의 공정별 전 과정 온실가스 배출량 평가범위로 세분화해 보면 세부 원료들을 수급하는 생산단계, 생산된 원료를 콘크리트 제조현장으로 운송하는 운송단계, 콘크리트 제조현장의 콘크리트 제품 제조단계로 나눌 수 있다. 본 연구를 통해 개발되는 저탄소형 재생시멘트의 경우 자원생산단계 및 1차 원료생산단계에서의 온실가스 배출량 저감이 가능하며 이때의 온실가스 배출원은

- 제품과 원자재의 제조 시 에너지사용에 의한 배출
- 발전에 의한 배출
- 공정상 화학반응에 의한 배출
- 냉매의 손실 및 타 휘발물질의 배출
- 폐기물에서 배출

등으로 나눌 수 있다. 각 온실가스 배출원별 CO₂배출비율과 저탄소형 재생시멘트 개발을 통해 배출량 감소 및 증가정도를 나타내 보면 표4-2와 같다. 따라서 원료생산, 분쇄, 소성, 혼합, 운송의 다섯 공정별로 나눈 결과 소성단계에서의 온실가스 배출량 저감이 가장 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이를 기반으로 본 연구에서는 클링커 및 시멘트 제조 공정에서의 온실가스 배출량을 산정하고 시멘트 산업에서의 온실가스 배출량 저감에 크게 기여할 수 있는 효율성을 분석하였다.



그림4-3. 탄소성적표지제도 평가범위

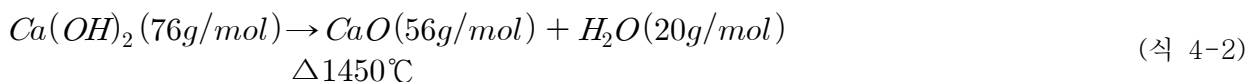
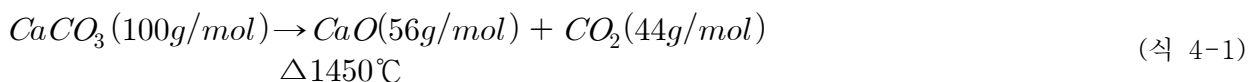
표4-2. OPC 제조공정에 따른 배출원별 CO₂배출비율 및
재생시멘트 개발에 따른 CO₂배출량 비교

	OPC (%)		저탄소형 재생시멘트
원료 생산	- 골재 : 1.2 - 석회석 : 0.3		- 골재 : 동일 - 석회석 : 최대 88%까지 저감 가능 (그러나, 페미분말 생산을 위한 추가 CO ₂ 배출)
분쇄	1.4		유사하거나 다소 낮음 (콘크리트의 배합에 따라 다소 차이가 있겠으나 보통콘크리트의 경우 페이스트(또는 모르타르)의 강도가 석회석의 강도보다 낮아 분쇄를 위해 배출되는 CO ₂ 량은 다소 낮음)
소성 (클링커 제조)	83.1	화학반응(탈탄산) : 67.5	- 화학반응 : 최대 88%까지 저감 가능 - 발전 및 에너지 : 동일 - 소성 전체 : 최대 53%까지 저감 가능 (페미분말 내 잔골재 미분의 혼입에 따른 차이 큼)
		발전(전력) : 26.7	
		에너지(설비) : 5.8	
혼합	5.4		- 동일
운송	4.3		현재 : 높음 (각 현장의 거리 및 수급의 차이로 인해 대량운반 불가능) 미래 : 낮음 (70~80년 후 석회석 고갈예측 → 선박 또는 항공 운송 필요)

② 시멘트 제조공정 중 CO₂배출량 산정방법

다목적 최적화를 통해 도출한 원료조합비를 바탕으로 CO₂배출량을 산정하였다. 클링커 내 CaO량에 대한 CO₂배출계수는 0.785 t CO₂/t CaO in clinker이다. 다목적 최적화의 결과로 도출되는 CaO량은 모두 석회석(CaCO₃)과 페미분말 내 Ca(OH)₂로부터 기인한 것으로 가정하고, 식4-1 및 식4-2에 따라 Ca(OH)₂는 CO₂배출에 영향을 미치지 않으므로 석회석에 의한 CaO 생성량으로 탈탄산 반응에 의한 CO₂ 배출량을 산정하였다. 여기서 연소 및 전력에 의한 CO₂ 배출은 페미분말의 석회석 대체원료화와 무관하므로 석회석 100% 사용 시 발생하는 탈탄산 반응에 의한 CO₂배출량에 상대 값으로 고정하였다. 각각의 CO₂ 배출량 산정에 사용된 식은 식 4-3 ~ 4-5와 같다.

또, 소성 공정에서 산정한 CO₂배출량을 기준으로 시멘트 제조 전공에서 발생하는 배출량을 산정한 결과는 식4-6과 같다.



$$C \times \frac{L}{L+W} \times 0.785 \quad (\text{t CO}_2 / \text{t CaO in clinker}) \quad (\text{식 4-3})$$

여기서, C : 클링커 내 CaO 함유량
 L : 석회석 내 CaO 함유량
 W : 폐미분말 내 CaO 함유량

$$\frac{D_c \times 0.267}{0.675} \text{ (t CO}_2 \text{ / t CaO in clinker)} \quad (\text{식 4-4})$$

여기서, D_c : 탈탄산 반응에 의한 CO₂ 배출량

$$\frac{D_c \times 0.058}{0.675} \text{ (t CO}_2 \text{ / t CaO in clinker)} \quad (\text{식 4-5})$$

$$\frac{A_c}{0.831} \text{ (t CO}_2 \text{ / t CaO in clinker)} \quad (\text{식 4-6})$$

여기서, A_c : 소성공정에서 배출되는 CO₂량

③ 시멘트 제조공정 중 CO₂ 배출량 산정결과

㉠ 폐미분말을 활용한 재생클링커 원료 조합비

CaCO₃ 및 Ca(OH)₂로부터 생성된 CaO량은 표4-3에 나타난 것과 같다. 잔골재 혼입율이 증가할수록 CaO생성량이 다소 감소하는 경향이 있으나, 다목적 최적화를 통해 화학조성을 맞춘 배합이기 때문에 모든 인자에서 오차율 0.5%이내로 63%의 유사한 값을 나타냈다.

표4-3. OPC 및 재생클링커의 원료배합비 및 CaO생성량

(단위 : %)

	OPC	S0	10	20	30
폐미분말 모델	-	65.92	23.50	13.61	9.82
석회석	100	34.08	76.30	85.25	89.09
전로슬래그	-	0.00	0.20	1.13	1.09
CaO 생성량	63.67	63.52	63.41	63.09	63.10

㉡ 재생클링커 및 시멘트 제조시 CO₂ 배출량

그림4-4는 CaO 생성량을 바탕으로 저탄소형 재생 클링커 및 시멘트의 CO₂배출량을 산정한 결과를 나타낸 그래프이다. 식4-3을 이용하여 구한 탈탄산 반응에 의한 CO₂배출량은 0.51 t CO₂/t CaO in clinker로 나타났으며, 이를 식4-4 및 식4-5를 이용하여 구한 clinker제조에 배출되는 총 CO₂량은 0.74 t CO₂/t clinker으로 나타났다. 폐미분말을 석회석 대체원료로 사용함에 따라 상당량의 CO₂배출량이 감소한 것으로 나타났으며, 특히 잔골재 미분이 90%이상 제거된 S0에서 0.4 t CO₂/t clinker로써 약 55%수준까지 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다.

또한, 클링커 제조 즉, 소성공정에서 배출된 CO₂양을 기준으로 기존연구에 따른 시멘트 제조 공정에 따른 CO₂ 배출비율에 따라 식4-6을 이용하여 시멘트 제조 전 공정에서의 총 CO₂배출량을 산정해 본 결과 본 연구에 사용된 석회석에 따른 CO₂배출량은 0.897 t CO₂/t Cement로 나타났다. 이를 통해 폐미분말의 시멘트 주원료화가 시멘트 산업에서의 CO₂배출량 저감에 상당한 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 특히 잔골재 미분이 전혀 포함되지 않은 폐미분말의 경우 0.48 t CO₂/t Cement로 약 53% 수준까지 감소되는 것으로 분석되었다. 이는 세계 CO₂배출량 약 19300Tg에서 시멘트 산업에 의한 약 5%의 CO₂ 배출량 965Tg 중 약 446.4Tg이 감소하는 것을 나타낸다. 따라서 폐기물 및 CO₂배출량을 줄여 환경부하를 줄이기 위해서 폐미분말을 활용한 재생시멘트를 사용하는 것이 필요하다고 판단되며 이를 위한 연구가 보다 활발해져야 할 것으로 생각된다.

한편, 실제 폐미분말 내 잔골재 혼입율이 65%인점을 감안할 때 약간의 CO₂배출량 감소효과가 있으나 그 사용효과가 아주 미미한 것으로 판단되므로 향후 잔골재 미분을 효율적으로 분리배출할 수 있는 기술 및 연구가 필요하다고 판단된다.

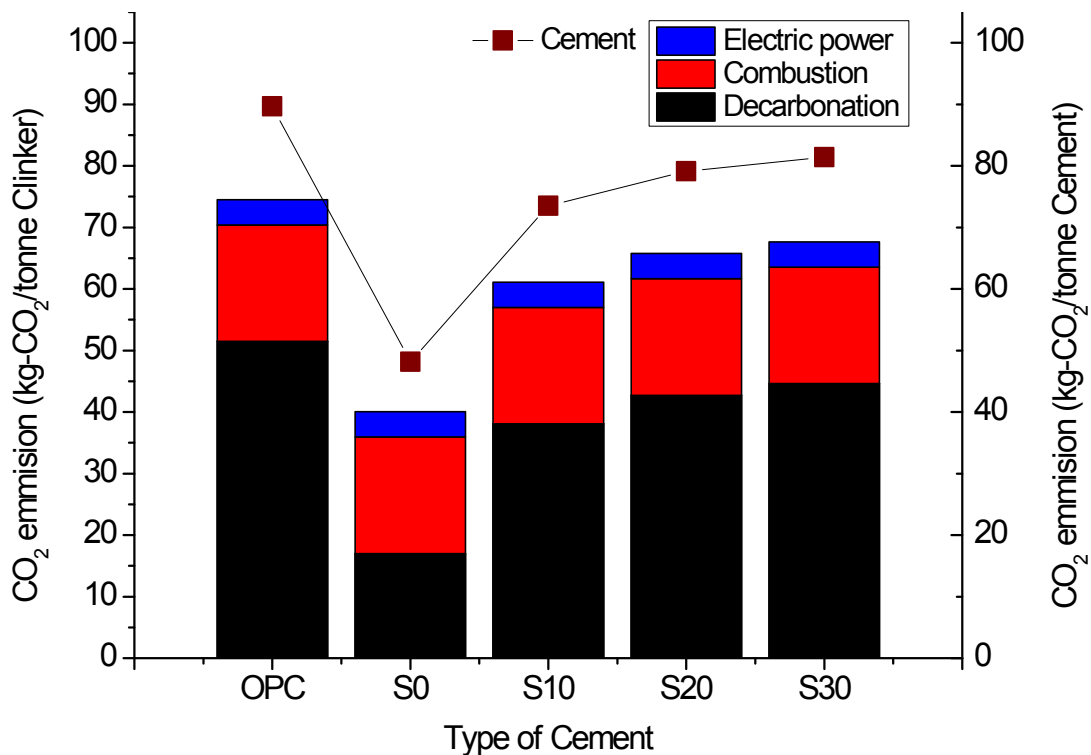


그림4-4. OPC와 저탄소형 재생 클링커 및 시멘트 CO₂배출량

5. 콘크리트의 건조수축

5.1 개요

콘크리트 재료적 성질 중 크리프, 건조수축 등의 시간 의존적 특성은 콘크리트 구조물의 역학적 특성에 영향을 미치게 된다. 이러한 콘크리트의 시간 의존적 특성은 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 첫째로는 시간이 지남에 따라 콘크리트 탄성계수가 증가하는 강성증가 현상이다. 둘째로는 일정한 응력의 증가가 없는 상태에서도 시간이 경과함에 따라 변형이 증가하는 크리프현상이 있다. 크리프 변형은 장기적으로 탄성변형의 2~3배에 이르게 된다. 셋째로는 하중 작용과는 무관하게 자연적으로 발생하는 건조수축이 있다. 일반적으로 콘크리트 구조물의 시간 의존적 성질인 크리프와 건조수축에 의한 변형률을 서로 독립적인 항으로 구분하고, 건조수축과 크리프 변형률을 중첩시켜 총변형률을 고려한다. 재령 일에 어떠한 일정한 하중이 재하 되었을 때, 일에서의 총변형률 는 그림5-1에 나타낸 각 변형률 성분의 합이며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}\varepsilon(t) &= \varepsilon^m(t_0) + \varepsilon_c(t, t_0) + \varepsilon_s(t, t_0) + \varepsilon_a(t, t_0) \\ &= \varepsilon^m(t_0) + \varepsilon^{nm}(t, t_0)\end{aligned}\quad (\text{식 5-1})$$

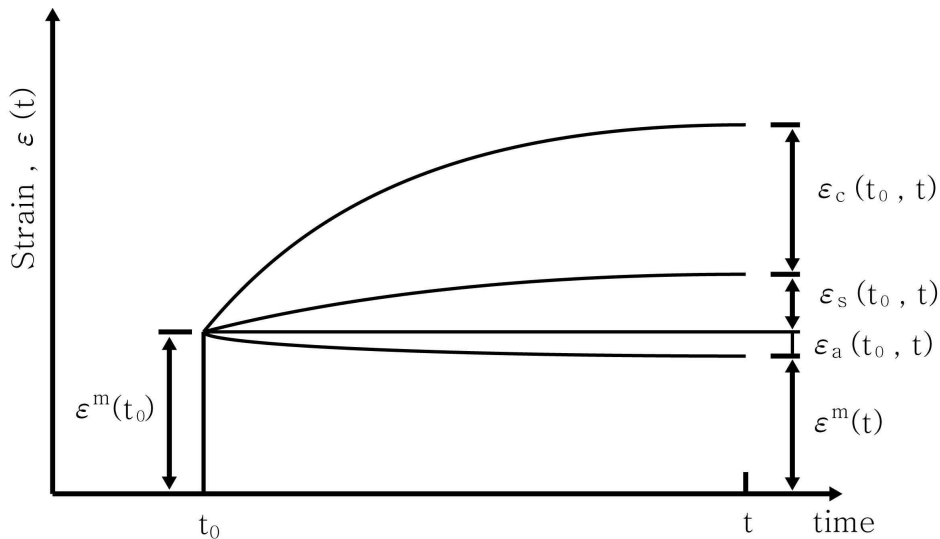


그림5-1. 콘크리트에 발생하는 변형률의 구성요소

여기서, $\varepsilon^m(t_0)$ 는 하중재하 즉시 발생하는 역학적 변형률

$\varepsilon^{nm}(t, t_0)$ 는 $t-t_0$ 일 동안 발생하는 비역학적 변형률

$\varepsilon_c(t, t_0)$ 는 $t-t_0$ 일 동안 크리프에 의해 발생하는 변형률

$\varepsilon_s(t, t_0)$ 는 $t-t_0$ 일 동안 건조수축에 의해 발생하는 변형률

$\varepsilon_a(t, t_0)$ 는 $t-t_0$ 일 동안 강도증가에 의해 발생하는 변형률

여기서, 하중 재하에 따른 즉시변형(instantaneous)은 응력이 작용되는 즉시 발생하며, 작용된 응력의 크기와 응력이 가해지는 비율, 그리고 콘크리트의 재령에 의해서 좌우된다. 하중 재하에 따른 즉시 발생하는 역학적 변형의 일부는 회복가능하며, 다른 일부는 회복불가능하다. 이렇게 낮은 응력 범위 내에서 하중 재하에 따른 즉시변형 중에서 비탄성 변형은 매우 작다고 할 수 있다. 따라서 사용하중 하의 콘크리트는 모두 탄성의 범위에 있다고 가정하여 해석하는 것이 타당하다. 즉시변형은 식5-2와 같이 표현할 수 있다.

$$\varepsilon_e(t) = \frac{f(t)}{E_c(t)} \quad (\text{식 5-2})$$

여기서, $\varepsilon_e(t)$ 는 즉시 탄성변형, $f(t)$ 는 응력, $E_c(t)$ 는 콘크리트의 탄성계수이다.

5.2 건조수축의 메카니즘

일정한 온도에서 하중이 작용하지 않아도 시간이 경과함에 따라 콘크리트의 부피가 감소하는 현상을 건조수축이라 한다. 건조수축은 건조되기 쉬운 표면으로부터 발생하여 점차 내부로 진행되며, 이로 인한 변형은 단면 내에서 일정하지 않으나 일반적으로 평균 건조수축변형률을 사용하여 부재단면 내에서 균일하게 발생한다고 가정한다. 따라서, 시간 t_0 부터 t 까지 발생한 건조수축에 의한 변형률 $\varepsilon_s(t, t_0)$ 는 다음식과 같이 최종건조수축계수 ε_{su} 와 시간의 함수 $f(t, t_0)$ 의 곱으로 나타낸다.

$$\varepsilon_s(t, t_0) = \varepsilon_{su} \cdot f(t, t_0) \quad (\text{식 5-3})$$

여기서, t 는 관측시점, t_0 는 건조수축 발생시점을 의미한다. 그리고 건조 수축의 현상을 재료적인 측면에서 살펴보면 아래와 같이 분류할 수 있다.

① 시험 목적 소성수축 (Plastic Shrinkage)

콘크리트 타설 직후부터 소성수축은 발생하지만, 표면의 증발속도가 내부의 증발 혹은 경화속도에 비해 훨씬 빠르기 때문에 소성수축에 의한 균열은 표면으로부터 내부의 콘크리트로까지 진전될 수 있으며, 블리딩이 주원인으로 알려져 있다. 특히 슬래브와 같이 비교적 넓고 두께가 얇은 구조물에서 발생하기 쉽다. 젖은 시트 등으로 구조물을 덮어줌으로써 소성 수축량을 줄일 수 있다.

② 자기건조수축 (Autogenous Shrinkage)

시멘트가 일정 시간 응결한 후 생기는 수축으로 말 그대로 재료적인 고유한 특성이다. 이것은 어느 정도 응결이 진행되어도 수화반응을 일으킨 시멘트 겔의 양이 시멘트와 물의 양보다 적기 때문에 생기는 것으로 알려져 있다. 단위 시멘트량이 많은 고강도 콘크리트와 매스콘크리트

등에서 주로 자주 발견할 수 있다. 만약 수중에서 양생된다면 겔 분자들은 충분한 수분을 흡수할 수 있다.

③ 건조수축 (Drying Shrinkage)

콘크리트 타설 후 어느 정도 시간이 지나면 수화반응을 하고 남은 수분이 공극과 작은 모세관에서 빠져나가는데 이러한 현상을 건조수축이라 말한다. 즉, 건조수축은 시멘트 겔 밖으로 수분이 빠져 나오는 현상을 말하며 이에 따라 체적의 변화와 더불어 길이의 변화가 생기는 것이다. 다시 일정량의 수분이 공급되면 일부는 회복되지만 일부는 회복되지 않는다. 일반적으로 물-시멘트비가 클수록 또한 표면적이 클수록, 그리고 골재-시멘트비가 작을수록 건조수축량이 커지는 것으로 알려져 있다.

콘크리트의 건조수축은 시멘트와의 수화 반응에는 관여하지 않았던 잉여수의 증발로 인한 것인데, 콘크리트 건조수축의 과정에서 콘크리트 내부에 어떠한 현상이 일어나고 있는지의 메카니즘에 관하여 표5-2에 나타내었다.

표5-2. 건조수축의 메카니즘 이론

종 류	원 리
모 세 관 장 력 설	모세관 공극안에 존재하는 수분이 메니스커스를 가로지르는 표면장력의 결과로 건조수축이 발생
분 리 압 설	근접한 고체표면에서의 상호작용은 물 분자의 이동을 발생시키며, 좁은 공극 틈에서 분리력을 발생시켜 건조수축이 발생
표 면 장 력 설	고체의 표면자유 에너지에 의해 건조수축이 발생
층 간 수 이 동 설	C-S-H의 원소층 사이의 공간으로부터 수분의 손실이 발생하여 건조수축이 발생

5.3 건조수축의 기존 연구 동향

콘크리트의 점성흐름(viscous flow)현상이 1905년 발표되면서부터 건조수축과 크리프 현상은 콘크리트의 장기거동의 영향인자로서 그 중요성이 매우 큰 것으로 알려졌다. 이후 많은 연구결과를 바탕으로 각종 설계기준 및 시방서 등에서 제안된 건조수축과 크리프 예측식으로는 미국의 Bazant와 Panla, Hansen 예측식(U.S. Nuclear Regulatory Commission), ACI-209 및 AASHTO가있고, 유럽의 CEB/ FIP와 최근에 개정된 일본의 토목학회 예측식등이 있으며, 국내에서는 1999년에 개정된 한국콘크리트 학회 콘크리트 구조설계 기준식이 있다.

Borst 는 초기재령 콘크리트의 소성, 크리프 및 열팽창, 건조수축 등의 온도 의존적인 재료특성들과 균열형성의 관계를 동시에 다룰 수 있는 알고리즘을 제안 하였으며, 이 후 초기재령 콘크리트의 변형거동을 지배하는 주요 비선형 현상으로 강도발현, 온도 변형률, 건조수축, 크리프 등을 고려하여 균열 모델에 의한 유한요소 해석을 수행하였다. 여기서, 건조수축, 크리프 해석을 위해 Power법칙에 대한 Taylor 급수를 사용하였다. 한편, 콘크리트의 시공상 문제가 되는 초기재령 콘크리트의 하중변화에 대해 탄성 및 탄소성 모델에 의한 거동해석이 수행되어 왔으나 Okamoto와 Endoh는 점탄성 유동학적 4요소 모델을 이용한 구성식을 제시하고 유한요소법을 이용, 초기재령에서의 콘크리트 거동해석을 수행하였다. 曾田 등이 무근 매스콘크리트 구조물에 대해 2차원 온도응력과 건조수축, 크리프 변형해석을 실시하여 균열발생확률과 균열폭을 구하는 방법을 제안하였고, 楊등은 수화열에 의한 신축과 자기수축 및 건조수축의 구속에 의해서 발생하는 초기재령 콘크리트의 변형과 균열 발생기구를 밝히기 위하여 무근 콘크리트의 일축방향 구속 실험을 실시하고 재령에 따라 구속조건을 변화시키면서 건조수축 및 물성의 변화를 고려하여 수치적으로 실험결과를 재현하였다. Guénot 등은 CEB/ FIP (90), Laplante 그리고 LeRoy의 세 가지 크리프 모델식을 이용하여 초기재령 콘크리트에 대한 온도응력해석에의 적용가능성을 보였는데, 이 중 CEB/ FIP (90)의 건조수축 예측모델식을 이용한 경우가 총 변형률을 가장 정확하게 예측한다고 보고하였다. Ayotte 등, 김영철도 초기재령 콘크리트에서 역학적 특성들이 변하는 것을 고려하여 수화열에 의한 온도 및 응력해석을 수행하였다.

5.4 ACI 209.2R-08 건조수축 예측모델

ACI 209.2R-08 예측모델은 건조수축량을 다음 식(2.4),(2.5)와 같이 예측하고 있다.

7일 동안 습윤양생된 콘크리트

$$(\varepsilon_{sh})_t = \frac{t}{35+t} (\varepsilon_{sh})_u \quad (\text{식 5-4})$$

1~3일 동안 증기양생된 콘크리트

$$(\varepsilon_{sh})_t = \frac{t}{55+t} (\varepsilon_{sh})_u \quad (\text{식 5-5})$$

또한 $(\varepsilon_{sh})_u$ 는 시간이 무한히 지났을 때의 건조수축량을 나타내며, 여러 가지 요인에 의해 그 크기가 변화하며, 다음 식(2.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(\varepsilon_{sh})_u = 780 \gamma_{sh} \times 10^{-6} \quad mm/mm \quad (\text{식 5-6})$$

여기서, γ_{sh} 는 다음 계수들의 곱으로 구한다.

① γ_{cp} : 초기 습윤 양생 기간에 따른 계수

양생기간에 대해 다음 표 2.3 에 주어진 값에 따라 보정한다

표5-3. 보정 계수 γ_{cp}

습윤양생기간(일)	1	3	7	14	28	90
보정 계수 γ_{cp}	1.2	1.1	1.0	0.93	0.86	0.75

② γ_{λ} : 상대습도 $\lambda(\%)$ 에 따른 계수

구조물이 높은 환경의 상대습도에 따라 콘크리트의 건조수축은 크게 변화하며 다음식 (2.7)와 같다.

$$\gamma_{\lambda} = \begin{cases} 1.40 - 0.0102\lambda & (40\% \leq \lambda \leq 80\% \text{일때}) \\ 3.00 - 0.030\lambda & (80\% \leq \lambda \leq 100\% \text{일때}) \end{cases} \quad (\text{식 5-7})$$

③ γ_h, γ_{vs} : 시험체의 크기 효과에 대한 계수

(γ_h 는 평균 두께 h에 계수, γ_{vs} 는 부피/표면적비(v/s)에 따른 계수)

- 평균 두께에 대해서는 $h < 150\text{mm}$ 일 경우 또는 부피/표면적비가 37.5mm 이하 일 때는 γ_h 는 표 2.4 와 같다.

- 평균 두께 $150\text{mm} < h$ 일 경우 또는 부피/표면적비가 최대 약 $300\text{mm} \sim 380\text{mm}$ 일 경우

- 건조 첫째 1년 동안

$$\begin{aligned}\gamma_h &= 1.23 - 0.0015h \\ \gamma_{vs} &= 1.23 - 0.006(v/s)\end{aligned}\quad (\text{식 5-8})$$

- 1년 후의 극한값

$$\begin{aligned}\gamma_h &= 1.17 - 0.00114h \\ \gamma_{vs} &= 1.17 - 0.00456(v/s)\end{aligned}\quad (\text{식 5-9})$$

- 부피/ 표면적비 방법일 경우 : 평균두께가 부피/표면적비의 4배($h=4v/s$)

$$\gamma_{vs} = 1.2e^{\{-0.00472(v/s)\}} \quad (\text{식 5-10})$$

표5-4. 평균 두께에 따른 보정계수 γ_h

부재의 평균 두께 h(mm)	부피/표면적비 V/S (mm)	건조수축계수 (γ_h)
51	12.5	1.35
76	19	1.25
102	25	1.17
127	31	1.08
152	37.5	1.00

④ γ_s : 슬럼프치 s(mm)에 따른 계수

$$\gamma_s = 0.89 + 0.00161s \quad (\text{식 5-11})$$

⑤ γ_ψ : 잔골재율 $\psi(\%)$ 에 따른 계수

$$\gamma_\psi = 0.30 + 0.014\psi \quad (\psi \leq 50\%) \quad (\text{식 5-12a})$$

$$\gamma_\psi = 0.90 + 0.002\psi \quad (\psi > 50\%) \quad (\text{식 5-12b})$$

⑥ γ_c : 단위시멘트량 $c(kg/m^3)$ 에 따른 계수

$$\gamma_c = 0.75 + 0.00061c \quad (\text{식 5-13})$$

⑦ γ_α : 공기량 $\alpha(\%)$ 에 따른 계수

$$\gamma_\alpha = 0.95 + 0.008\alpha \geq 1 \quad (\text{식 5-14})$$

5.5 건조수축

건조수축은 시험체 사이즈는 10*10*40 cm 각형 콘크리트로 측정하였다. 양생 및 측정조건은 20℃에 상대습도 60%의 상태로 진행되었으며, 측정은 그림5-3의 54mm 매립형 스트레인 게이지를 사용하였다. 재령은 1일 탈형 직후부터 120일까지 사용하였다.

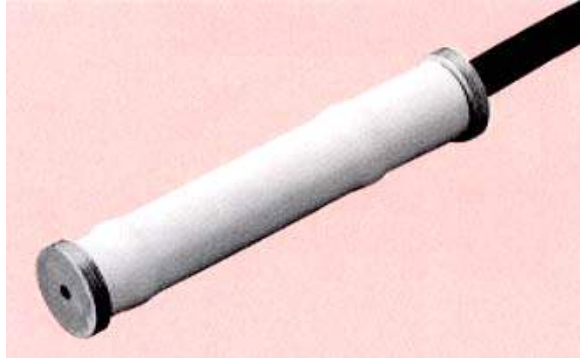


그림5-3. 매립형 스트레인 게이지



그림5-4. 매립형 스트레인 게이지로 측정되는 각형 시험체의 건조수축

그림5-4는 매립형 스트레인 게이지가 설치된 각형 시험체를 나타낸 것이다. 측정은 재령 1일에서 120일에 이르기까지 측정하였다.

5.6 실험결과

① OPC 이용 콘크리트건조수축

건조수축은 콘크리트의 경화 이후 시간에 따른 콘크리트의 체적감소를 말한다. 체적감소는 콘크리트의 수분함량의 변화에 의해 외부로부터 작용하는 응력과는 관계없이 일어나는 물리-화학적인 변화에 기인한다. 건조수축은 안정된 상대습도와 온도 조건하에서 무차원화된 변형도 (in./in. or mm/mm)로 간편하게 나타낼 수 있으며 다음과 같은 3요소로 이루어진다.

1. Drying Shrinkage : 콘크리트 내부의 수분감소에 의해 발생
2. Autogenous Shrinkage : 시멘트의 수화작용에 의해 발생
3. Carbonation Shrinkage : 시멘트의 수화물이 이산화탄소에 의해 탄화됨으로서 발생

크리프와 마찬가지로 건조수축의 경우도 콘크리트의 배합에 의해 큰 영향을 받으므로 실제 재료시험에 의한 극한 건조수축값을 구하는 것이 중요하다. 재료시험을 할 수 없는 초기단계에서는 슬럼프, 잔골재율, 공기량, 시멘트량을 변수로 하여 콘크리트의 배합에 따른 건조수축의 변화에 대한 ACI 209식을 사용한다.

일반적으로 극한건조수축값(콘크리트 타설후 시간이 무한대로 경과하였을 때 최종적으로 발생하는 변형량)은 $500 \times 10^{-6} \text{ in./in.} \sim 800 \times 10^{-6} \text{ in./in.}$ (참고, $1 \text{ in./in.} = 1 \text{ mm/mm}$)정도이며, ACI 209에서는 체적-표면적비가 $1.5 \text{ in. (or } 38 \text{ mm)}$, 상대습도가 40 %이며 규격에 맞는 골재가 사용된 표준상태의 경우 극한 건조수축값으로 $780 \mu\text{in./in.}$ 를 제시하고 있다. 이 값은 습윤 양생이든 증기양생이든 별 영향을 받지 않으며 다만 양생조건에 따라 건조수축의 진행속도가 달라진다. 콘크리트의 강도와 건조수축은 직접적인 상관관계가 없으나, 강도가 높을수록 물/시멘트비가 낮은 경향이 있으므로 건조수축이 작아지게 된다. 또한 골재의 형상은 콘크리트 시멘트 페이스트의 충량에 영향을 주기 때문에 건조수축과 크리프에 큰 영향을 준다.

콘크리트부재에서 건조수축 변형량은 크리프와 마찬가지로 체적-표면적비, 습도, 진행시간 그리고 철근비의 영향 등을 고려한 보정계수를 사용하여 식 5-1와 같이 계산된다.

$$\Delta_{SH} = \Sigma \varepsilon_{shu} \cdot SH_t \cdot SH_{v/s} \cdot SH_{RH} \cdot SH_{sr} \cdot h \quad (\text{식 5-1})$$

여기서 극한건조수축계수를 제외한 모든 값은 알 수 있으므로 시험에서 얻은 건조수축값을 체적-표면적비 보정계수(SH_t), 상대습도 보정계수(SH_{RH}), 진행시간 보정계수(SH_t) 등을 역으로 나누어서 극한 건조수축계수를 예측한다.

표5-5에는 OPC 콘크리트의 건조수축 측정값 및 극한 건조수축, 수정 건조수축값을 나타내었으며, 그림5-5에 도식화하여 표현하였다. 극한 건조수축값은 $787.2410^{-6} \text{ in./in.}$ 값이 예측되었다.

표5-5. OPC 콘크리트 건조수축 측정 결과 및 극한, 수정 건조수축

양생기간보정계수 :	1.00			
SHvs :	1.00			
SHrh :	1.00			
극한건조수축 :	787.24			
측정시점	측정변형값	극한건조수축	SHt	수정건조수축
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	105.22	2578.55	0.03	21.87
3.00	188.30	2119.13	0.08	62.15
5.01	256.40	2047.23	0.13	98.60
7.01	304.74	1826.04	0.17	131.38
10.01	348.82	1567.90	0.22	175.14
15.00	391.00	1303.61	0.30	236.12
20.00	421.33	1158.80	0.36	286.23
30.00	461.16	999.10	0.46	363.37
40.00	490.54	919.80	0.53	419.84
50.00	512.34	871.01	0.59	463.07
60.00	531.30	841.24	0.63	497.19
120.00	609.47	787.24	0.77	609.47

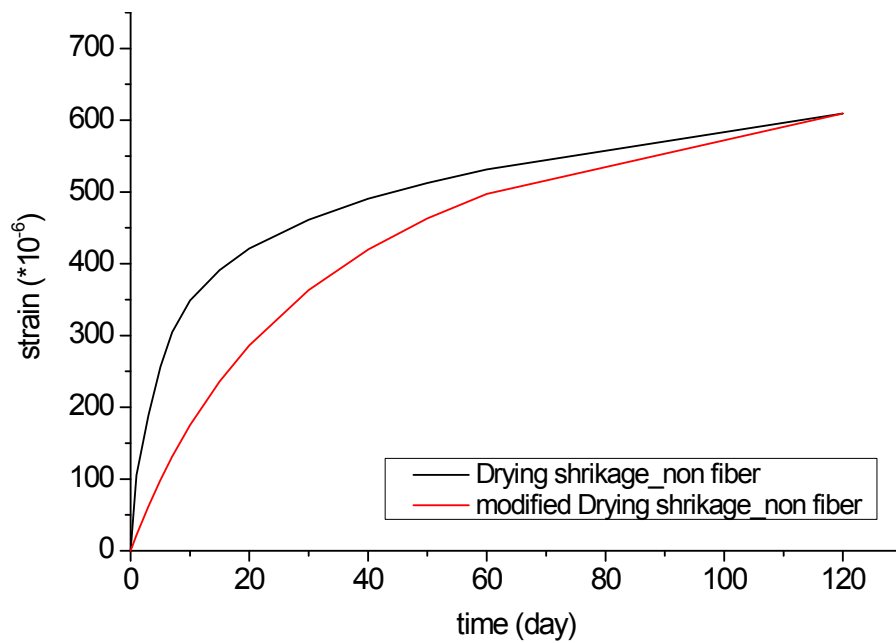


그림5-5. OPC 콘크리트의 건조수축 및 수정 건조수축

② 재생시멘트(S10) 이용 콘크리트의 건조수축

표5-6에 재생시멘트(S10) 콘크리트의 건조수축 측정값 및 극한 건조수축, 수정 건조수축 값을 나타내었으며 그림5-6에 도식화하여 표현하였다. 극한 건조수축값은 766.60×10^{-6} in./in.의 값이 예측되었다.

OPC 콘크리트와 같이 재생시멘트(S10) 콘크리트의 극한 건조수축값도 766.60×10^{-6} in./in.를 나타냈으므로 일반적인 콘크리트의 극한건조수축값 500×10^{-6} in./in. $\sim 800 \times 10^{-6}$ in./in.(참고, 1 in./in.= 1 mm/mm)을 만족하는 것으로 나타났다.

표5-6. 재생시멘트(S10) 콘크리트 건조수축 측정 결과 및 극한, 수정 건조수축

양생기간보정계수 :	1.00			
SHvs :	1.00			
SHrh :	1.00			
극한건조수축 :	766.60			
측정시점	측정변형값	극한건조수축	SHt	수정건조수축
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	78.50	1687.52	0.03	21.29
3.00	156.95	1392.75	0.08	60.52
5.01	207.58	1657.46	0.13	96.01
7.01	257.35	1542.05	0.17	127.94
10.01	303.32	1363.39	0.22	170.55
15.00	348.82	1162.97	0.30	229.93
20.00	380.57	1046.70	0.36	278.73
30.00	422.24	914.78	0.46	353.84
40.00	452.57	848.60	0.53	408.84
50.00	477.69	812.09	0.59	450.93
60.00	499.02	790.13	0.63	484.16
120.00	593.50	766.60	0.77	593.50

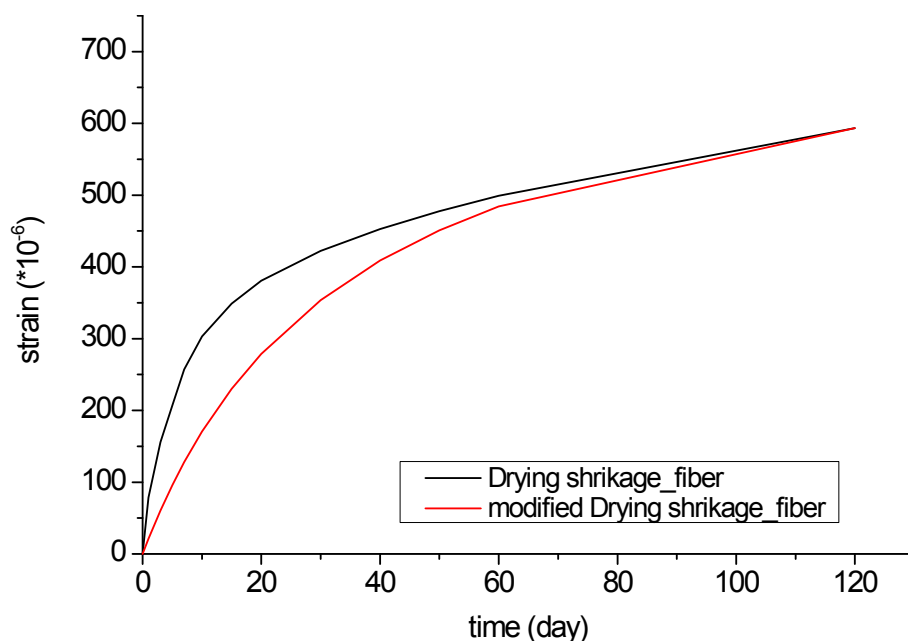


그림5-6. 재생시멘트(S10) 콘크리트의 건조수축 및 수정 건조수축

6. 전기화학적 촉진 시험에 의한 콘크리트 중의 염소이온 확산 평가

6.1 서론

해양환경 하에 건설되는 철근콘크리트 구조물의 경우, 염소이온과 같은 유해이온이 침투 확산되어 콘크리트 중의 철근을 부식시키므로 내구적인 콘크리트 구조물을 건설하기 위해서는 콘크리트 중의 염소이온과 같은 철근콘크리트 구조물에 대한 유해이온의 확산계수의 평가가 중요하다. 이 결과는 콘크리트 구조물의 내구성 확보를 위한 재료 및 배합의 선정뿐만 아니라 기존 구조물의 수명예측이나 적정 보수시기의 결정에 중요한 자료로 이용될 수 있다. 그러나 콘크리트 중의 염화물 침투 및 확산특성은 구조물이 위치한 환경에 따라 확산(diffusion), 침투(permeation) 및 흡수(absorption) 등과 같은 메커니즘이 복합적으로 작용할 뿐만 아니라 장기간의 시험시간이 소요되기 때문에 결과의 해석에 많은 어려움이 있다. 따라서 이러한 염화물의 이동현상을 단시간에 정량적으로 평가하기 위한 많은 연구가 진행되고 있는 실정이나, 표준화된 시험법은 아직 마련되어 있지 않다. 본 연구에서는 콘크리트의 재료 및 배합에 따른 염소이온의 확산특성을 비교적 단기간에 검토하기 위한 연구의 일환으로 비정상상태 및 정상상태의 염소이온 확산계수를 추정하기 위하여 기존에 보고된 시험방법을 비교, 검토하였으며, 이들 결과로부터 가장 타당한 방법, 즉 가장 보편적으로 사용되고 있는 NT BUILD 492법에 준한 전기영동 기법을 활용한 염소이온 침투평가로부터 확산계수를 산정하였다.

6.2 콘크리트 내부로의 물질이동 및 전위차에 의한 이온의 이동 메커니즘

① 콘크리트 내부로의 물질이동 메커니즘

물질이 외부로부터 콘크리트 내부로 침투하여 이동하는 메커니즘은 1) 농도차에 의한 확산(Diffusion) 2) 압력차에 의한 투과(Permeation) 3) 모세관력에 의한 흡수(Capillary suction)로 구분되며 이들 각각의 이동 메커니즘은 Table 4.1과 같이 분류할 수 있다.

콘크리트에 있어서 확산은 입자(또는 분자)나 이온이 높은 농도지역에서 낮은 농도지역으로 이동하는 현상을 말하며 확산에 영향을 크게 미치는 인자로는 물질의 농도, 거리, 시간, 온도 등이 있으며 물질의 확산이 정상흐름(steady state flow)일 경우 식 (4.1), 비정상흐름(non-steady state flow)일 경우 식 (4.2)로 나타낼 수 있다.

투과에 의한 물질의 이동은 압력차에 의한 용액이나 가스의 흐름으로서 콘크리트의 공극구조와 흐름체의 점성에 따라 층류 또는 난류가 되며, 공극구조를 가지는 고체상에서 모세관의 표면장력에 의한 물질의 이동은 용액의 성질인 점성(viscosity), 밀도 및 표면장력에 의해 영향을 받는다.

위와 같은 물질의 이동기구를 토대로 많은 연구가 진행되고 있으며, 특히 염해환경에서는 염소이온과 같은 유해이온이 외부로부터 콘크리트 중으로 침투, 확산하여 철근을 부식시킴으로써 구조물의 내구성을 크게 저하시키기 때문에 구조물의 내구성 평가 또는 설계시 중요한 고려사항이 된다.

콘크리트 중의 염소이온 확산계수를 추정하는 방법은 Fick의 제1법칙으로부터 유도되는 정상상태(steady state)에서의 확산계수 평가방법과 Fick의 제2법칙으로부터 유도되는 비정상상태

(non-steady state)에서의 확산계수 평가방법이 있다.

표6-1. 콘크리트에서 물질이동의 메카니즘

		Governing equation and laws	Type of mass
Diffusion		$J = -D \frac{dc}{dx}$ (Fick's first law) (4.1)	Irregular mobility of ions in solution
		$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D \frac{\partial c}{\partial x})$ (Fick's second law) (4.2)	
		J : flux(g/m ² s), D : diffusion coefficient(m ² /s), c : concentration(g/m ³), x : distance(m)	
Permeation	Gas	$K_g = \eta \frac{Ql}{tA} \cdot \frac{2p}{(p_1 - p_2)(p_1 + p_2)}$ (4.3) K_g : gas coefficient(m ²), η : viscosity(kg/ms), Q : volume of flowing(m ³), l : thickness(m), A : area(m ²), p : pressure(Pa), t : time(s) p_1, p_2 : pressures at entry and exit (Pa)	Gas flow by pressure difference
	Water	$K_w = \frac{Q}{t} \frac{l}{A} \frac{\eta}{\Delta p}$ (4.4) K_w : water coefficient(m ²), η : viscosity(Ns/m ²), t : time(s) Q : volume of flowing(m ³), l : thickness(m), Δp : difference of pressure(Pa), A : area(m ²).	Water flow by pressure difference
Capillary suction		$F_c = \frac{-k_p}{\eta} \frac{dp_w}{dx}$ (4.5) F_c : capillary flow(kg/m ² s), k_p : coefficient(kg/m), dp_w : slope of pressure(Pa).	Water flow in un-sat. condition

- 정상상태의 확산계수 평가

콘크리트 중의 농도차에 의한 확산계수는 정상상태와 비정상상태의 두 가지 조건에서 구할 수 있다. 정상상태에서 확산계수의 추정을 위한 절차는 소정의 두께를 갖는 콘크리트 시험편을 중심으로 양편에 확산 셀을 구성하여 한쪽 셀로부터 농도차에 의하여 이온이 이동하는 양을 반대쪽 셀에서 측정하여 Fick의 제1법칙으로부터 식6-1과 같이 구할 수 있다. 시간대별로 시험편을 통과한 염소이온의 농도를 측정하여 확산계수를 구하는 방식으로 염소이온 농도의 증가율이 직선인 구간을 찾아 다음 식에 의해 확산계수를 구한다.

$$D = \frac{V \Delta C_2}{A \Delta t} \times \frac{L}{(C_1 - C_2)} \quad (\text{식 6-1})$$

여기서, D : 확산계수, A : 시험편의 단면적, L : 시험편의 두께

C_1 :셀1의 이온의 농도, C_2 : 셀2의 평균이온 농도

위와 같은 시험 방법은 시험편의 두께나 사용된 시멘트에 따라 다를 뿐만 아니라 콘크리트의 경우 보통 수년 이상 소요된다.

- 비정상 상태의 확산계수 평가

비정상상태의 확산계수의 평가는 콘크리트 공시체를 일정농도의 용액 또는 염화물 환경에 노출시킨 후 깊이별로 염소이온의 농도를 측정하여 Fick의 제2법칙의 해인 식6-2를 이용하여 구한다. 이 방법 역시 수개월 또는 수년의 시간이 소요된다.

$$C = C_0 \times [1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{D \cdot t}}\right)] \quad (\text{식 6-2})$$

여기서, C : 거리 x 및 시간 t 에서의 농도, D : 확산계수

C_0 : $x=0$ 에서의 농도, $\operatorname{erf}()$: 오차함수

염화물 침투깊이를 측정하는 방법은 1970년 Collepardi가 처음 제안한 것으로서, Beer의 법칙과 Lambert의 법칙을 따르는 성질과 일정한 발색특성을 지닌 화합물(Fluorescein Sodium 0.1%; $C_2H_{10}O_5Na$)을 사용한 비색법을 사용하였다. 깊이별 염화물량을 분석하는 방법은 1982년 Browne에 의해 처음 제안되었고, 1990년 Poulsen에 의해 콘크리트 공시체를 일정한 간격으로 절단한 후 XRF (X-ray fluorescence spectroscopy)를 사용하여 염화물량을 분석하거나 AASHTO T 259-64 법에 따라 각 깊이에 대한 염화물 함유량을 구한 후 염화물의 프로파일(profile)로부터 계산하여 염화물 확산계수를 구한다.

② 전위차에 의한 이온의 이동 메카니즘

전술한 바와 같이 콘크리트 중에서의 염소이온 확산특성을 평가하는 데는 많은 노력과 시간이 소요되므로 최근의 연구는 주로 전위차에 의하여 이온의 전기적 이동을 유도함으로서 이온의 이동을 촉진시켜 전기화학적 이론으로 해석하려는 시도에 초점이 맞춰져 있다. 여기서 전기적 이동현상은 전위구배를 구동력으로 하여 물질이 이동하는 현상을 의미한다.

일반적으로 전해질용액 중의 이온이동은 Nernst-Planck 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$J = -D \frac{dC}{dx} - \frac{zF}{RT} DC \frac{dE}{dx} + Ve \quad (\text{식 6-3})$$

Flux = Diffusion + Migration + Convection

여기서, J : 플럭스(g/m²s), F : 패러데이 상수(J/Vmol),
 z : 이온의 원자가, E : 전위(V), R : 기체상수(J/molK),
 T : 절대온도(K), Ve : 이동속도(m/s)

이 식은 농도차에 의한 확산(diffusion), 전기장에 의한 전기적 이동(migration) 및 전해질용액 중의 대류(convection) 향으로써 전해질용액 중의 이온 이동량을 나타낸다.

③ 전위차에 의한 촉진 염소 이온 확산 시험방법에 대한 고찰

콘크리트 중의 염소이온 확산특성을 평가하기 위하여 현재까지 문헌에 보고된 여러 가지 전위차 촉진시험방법 가운데 대표적인 시험방법 여섯 가지를 선정하여 각 시험방법의 특징 및 조건 등에 대하여 고찰하였다.

본 논문에서 고찰한 촉진시험 방법은 Whiting 등이 제안한 급속 염소이온 침투저항성 시험방법에 근거하고 있는 ASTM C 1202 및 AASHTO T 277에 규정된 RCPT method를 비롯하여 Dhir 등, Andrade, Tang 등, Gjrv 등, Torii 등이 제시한 시험방법 및 모델이다.

각각의 시험방법별 염소이온의 확산계수를 구하기 위한 촉진시험법의 조건을 정리하여 나타낸 것이 표6-2 이다. 이 표에서 알 수 있듯이 시험방법에 따라 전해질 용액의 종류 및 농도, 시험편의 두께, 시험시간 및 측정항목 등이 상이하다.

표6-2. 염소이온 확산평가를 위한 촉진평가방법과 조건

Test methods	Thick-ness (mm)	Electrolyte		Electric Field (V/m)	Required Time	Measurement Factors
		Cell I (-)	Cell II (+)			
RCPT* method	50	3% NaCl	0.3M NaOH	1200	6 hours	Total passed charge
Dhir's method	30	5.0M NaCl	Sat. Ca(OH) ₂	333	1~2 weeks	Cl ⁻ ions concentration rate
Tang's method	50	0.5M NaCl	Sat. Ca(OH) ₂	600	8 hours	Penetration depth
Andrade's method	30	5.0M NaCl	0.3M NaOH	400	2~3 weeks	Passed current
Zhang's method	50	0.5M NaCl	Sat. Ca(OH) ₂	400	1~2 days	Cl ⁻ ions concentration rate
Torii's method	-	NaCl	Sat. Ca(OH) ₂	-	1~2 weeks	Cl ⁻ ions concentration rate

* RCPT : Rapid Chloride Permeability Test

- ASTM C 1202 test method

ASTM C 1202 시험법은 콘크리트 양단에 60V의 직류전압을 6시간 동안 가하여 염소이온의 이동을 촉진시키는 방법으로 Whiting이 제안하였으며, 이와 유사한 방법인 AASHTO T 277은 동일조건에서 30V의 전압을 인가하여 12시간 동안 전류를 측정하여 구한 총통과전하량으로부터 염소이온 침투 저항성을 평가한다.

시험방법은 콘크리트의 공극이 증류수로 포화된 시험편을 두께 50mm로 절단하여 양극셀에는 0.3M의 NaOH 수용액을, 음극셀에는 3%의 NaCl 수용액을 채우고 DC 60V의 전위차로 6시간 동안 통전시키면서 시간대별 전류값을 측정하여 통과전하량을 산정한다. 통과전하량은 측정된 전류값을 식6-4에 의하여 6시간 동안의 총통과전하량을 산정한다.

$$Q_{total} = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (\text{식 6-4})$$

여기서, Q_{total} = 총통과 전하량(coulomb), I_x : x 분에서의 전류값(A)

위의 식으로부터 계산된 총 통과전하량을 근거로 표6-3에 제시된 범위구간과 비교하여 염소이온에 대한 침투저항성을 판단한다.

표6-3. 총 통과전하에 따른 염소이온 침투의 조건

Total passed charge (coulomb)	Chloride ions permeability
> 4000	High
2000~4000	Midium
1000~2000	Low
100~1000	Very low
< 100	Negligible

이 방법은 콘크리트 중의 염소이온 확산계수를 구하는 것이 아니라 단순히 침투저항성을 정성적으로 평가하는 시험으로서, Berke 등은 ASTM C 1202 시험결과인 총 통과전하량과 농도차 확산시험 결과로부터 경험적으로 콘크리트의 확산계수를 식6-5와 같이 제안하였다.

$$D = 0.0103 \times 10^{-12} \times (Q_{total})^{0.84} \text{ (m/s)} \quad (\text{식 6-5})$$

- Dhir's method

이 시험법은 전위차에 의하여 염소이온의 이동을 촉진시켜 시편을 통과한 염소이온의 농도증가율로부터 확산계수를 추정하였으며 시험장치는 그림6-1과 같다.

그림6-1에서와 같이 확산셀을 구성하고 외부에는 5M의 NaCl 수용액을, 내부에는 증류수를 채우고 10V의 직류전압을 가하여 확산셀 내부로 침투한 염소이온 농도를 시간대별로 선택성 이온전극(ISE : Ion Selective Electrode)을 사용하여 측정한다.

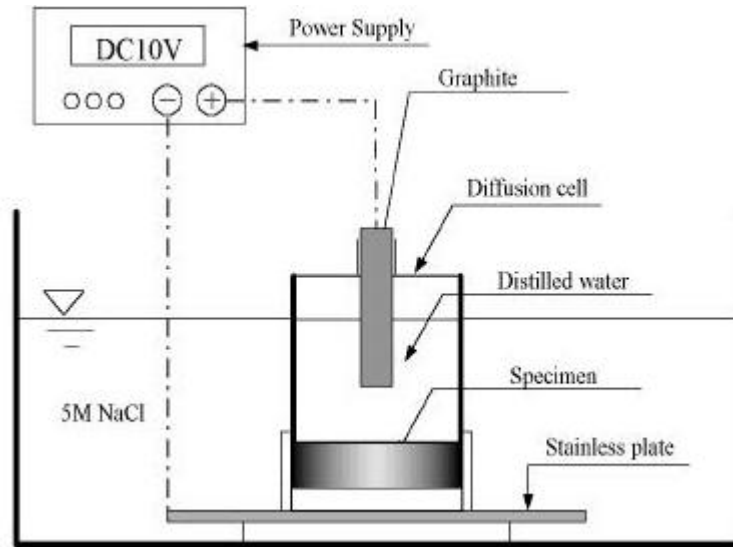


그림6-1. Dhir's 장치에 의한 확산셀의 상세도

Dhir는 시간에 따른 셀 내부의 염소이온 농도 증가율로부터 Fick의 제1법칙을 사용한 식을 제안하였다.

- Tang's method

전술한 두 가지 시험방법과는 달리 Tang 등은 확산과 전기이동을 동시에 고려하여 확산계수를 구하는방법을 제안하였으며, 시험장치는 그림6-2와 같다.

이 방법은 시편두께 50mm인 콘크리트 시편에 대하여 직류전압 30V를 8시간 동안 가한 후, 비색법(colorimetric method)을 사용하여, 염소이온의 침투깊이를 구하고 이를 수치해석적으로 구한 침투깊이와 확산계수의 관계식으로부터 콘크리트 중의 염소이온 확산계수를 추정한다. 이 시험방법의 특징은 확산과 전기적 이동을 동시에 고려함으로써 이론상으로는 가장 합리적이며, 비정상상태의 확산계수를 구할수 있다는 점이다.

Tang 등은 비정상상태에서 확산과 전기이동 효과를 고려하기 위하여 Fick의 제2법칙과 대류항을 무시한 Nernst-Planck 방정식을 연립하여 식6-6과 같이 나타내었다.

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{dJ}{dx} = D \left(\frac{d^2C}{dx^2} - \frac{zFE}{RT} \frac{dC}{dx} \right) \quad (\text{식 6-6})$$

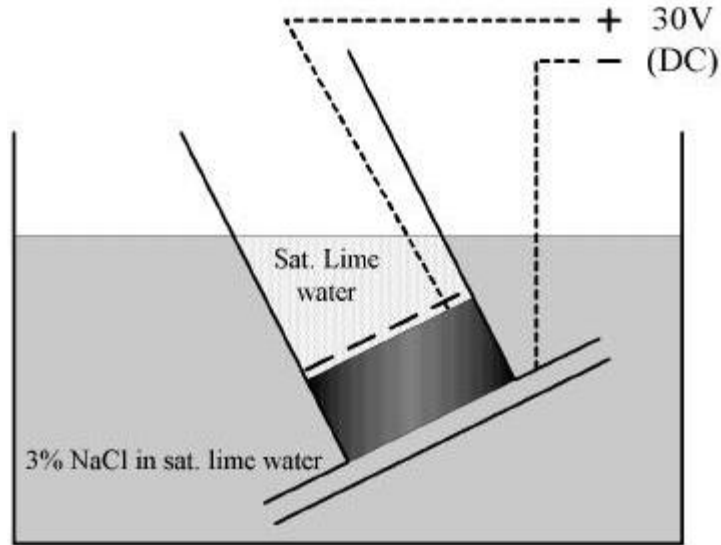


그림6-2. Tang's 장치 확산셀의 상세

초기 및 경계조건을 다음과 같이 가정하여 구한 해석해는 식 (4.16)으로 주어진다.

조건

- 1) 경계조건 : $C = C_0, x = 0, t > 0$
- 2) 초기조건 : $C = 0, x > 0, t = 0$
- 3) 무한대점조건 : $C = 0, x \rightarrow \infty, t = t_M$

$$C = \frac{C_0}{2} \left[e^{ax} \operatorname{erfc} \left(\frac{x + aDt}{2\sqrt{Dt}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{x - aDt}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (\text{식 6-7})$$

여기서, $a = \frac{zFE}{RT}$

식6-7에 의한 시간대별 침투깊이에 따른 염소이온 농도비를 그림6-3에 나타내었다. 그래프에서 변곡점 x_f 는 식6-8 및 식6-9과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_f = \frac{zFE}{RT} Dt \rightarrow D = \frac{RT}{zFE} \frac{x_f}{t} \quad (\text{식 6-8})$$

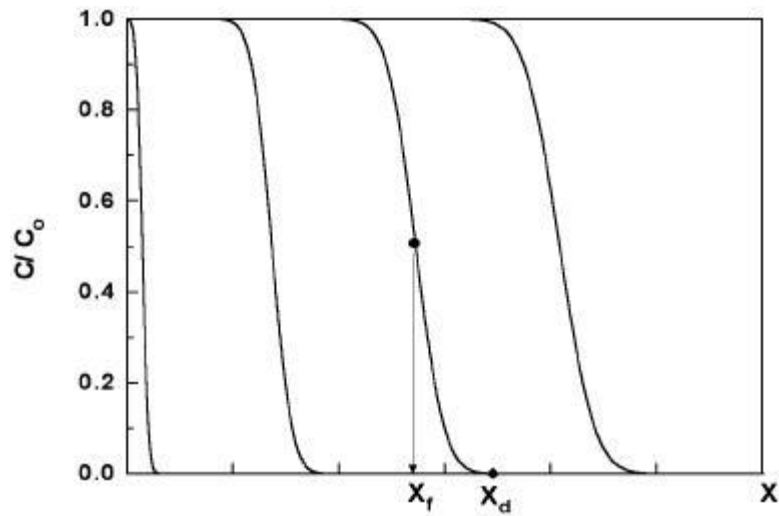


그림6-3. 이론적 농도 프로파일

그런데 현재까지 실험상으로 x_f 를 구하는 것은 매우 어려우므로 Tang은 침투깊이 x_d 를 이용하여 x_f 를 구하는 식을 제안하였다.

즉, $E = -600\text{V/m}$, $T = 298\text{K}$ 인 조건에서,

$$x_f = x_d - 1.061x_d^{0.589} \quad (\text{식 6-9})$$

식6-9를 식6-8에 대입하면,

$$D = 1.189 \times 10^{-11} \left(\frac{x_d - 1.061x_d^{0.589}}{t} \right) \quad (\text{식 6-10})$$

여기서 t 의 단위는 시간(hour)이다.

이와 같은 방법으로 염소이온의 침투깊이로부터 확산과 전기이동항을 동시에 고려하여 확산계수를 구하는 반경험식을 제안한 바 있으며, 식6-7에서 전기장이 충분히 크고 침투깊이가 충분하다는 가정하에서 식6-11과 같이 확산계수 추정식을 제시하였다.

$$D = \frac{RTL}{zFU} \frac{x_d - \alpha x_d^{0.5}}{t} \quad (\text{식 6-11})$$

6.3 실험

① 실험개요

NT BUILD 492는 Tang's method에 준한 기법으로 전기영동에 의한 이온의 침투에 의해 염소이온의 침투깊이를 측정하여 염소이온의 확산계수를 산정하는 기법이다. 대상 시험체는 OPC 및 재생시멘트를 이용하여 제작하였으며 W/C = 40%, 50%, 60%로 하였다. 재생시멘트는 시멘트 미분말 및 잔골재의 함유량에 따라 S0, S10, S20, S30을 사용하여 성분조정하여 제작된 재생시멘트를 사용하였다.

② 시험체 제작 및 평가방법

염화물 확산시험용 시험체는 그림6-4와 같이 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 원주형 공시체의 일정부위를 커터기를 사용하여 50mm 두께로 절단하여 제작하였다. 염화물 확산시험은 유럽의 시험규준인 NT BUILD 492에 준하여 그림6-5에 나타난 바와 같이 0.3N의 NaOH 수용액(대략 물 1ℓ에 NaOH 12g)을 양극으로, 10% NaCl 수용액(NaCl 100g+증류수 900g)을 음극으로 하여 30V의 전압을 가하였을 때의 전류값에 기초하여 적용 전압 수준 및 시험지속시간을 선정하여 시험을 진행하였다. 염화물 침투깊이는 시험이 종료한 후 시험편을 할렬하여 0.1N AgNO₃를 분무하였을 때 변색되는 부위를 버니어캘리퍼스를 사용하여 측정하였으며, 시험체 두께, 적용된 전압, 시험지속시간, 염화물 침투깊이 및 수용액의 온도 측정결과를 바탕으로 식6-12에 준하여 염화물 확산계수(Chloride Migration Coefficient)를 산출하였다. 한편, 그림6-6은 염화물 확산계수 평가시험의 진행과정을 나타낸 것이다.

표6-4. 콘크리트 배합설계

W/C	W	단위용적(ℓ/m ³)			단위질량(kg/m ³)		
		C	G	S	C	G	S
40	184	146.0	412.0	258.0	460.0	1092.0	670.7
50	175	111.1	412.0	301.9	350.0	1092.0	784.9
60	179	94.7	412.0	314.3	298.3	1092.0	817.2

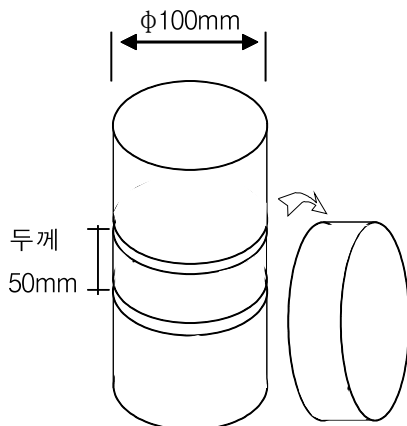


그림6-4. 염화물 확산 시험체

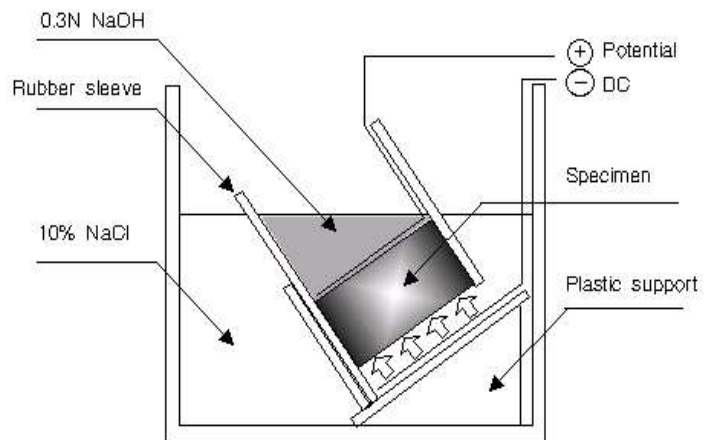


그림6-5. 염화물 촉진 시험세트 모식도



(1) 시험체 양생



(2) 시험체 슬라이스



(3) 두께측정



(4) 시험체 거치



(5) 시험체 고정



(6) 축진시험 실시



(7) 시험체 할렬



(8) 질산은 분무 후 침투깊이 측정

그림 6-6. 염화물 확산시험 과정

6.4 염소이온 확산계수 측정 결과

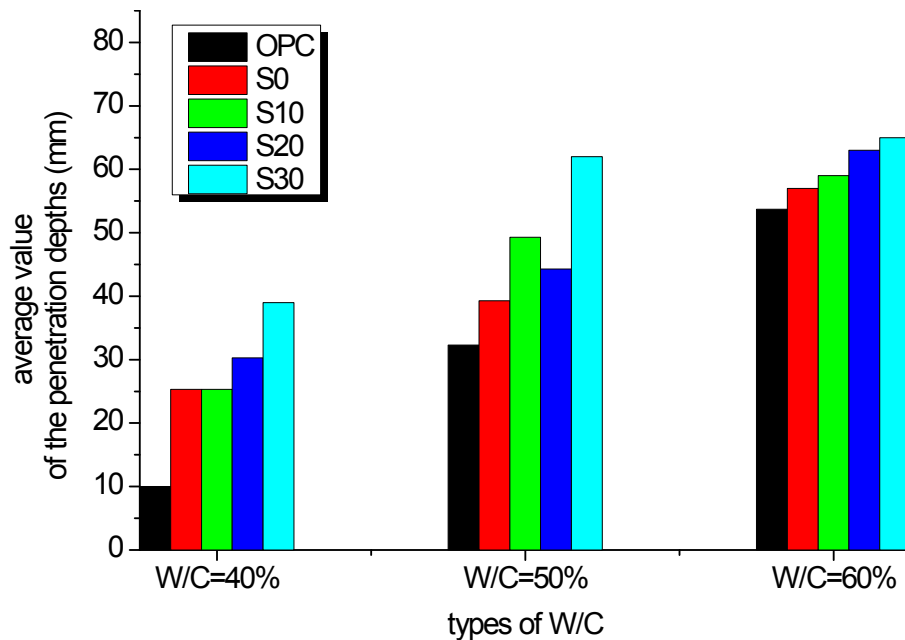


그림 6-7. 질산은 분무에 의해 측정된 염소이온 침투깊이

질산은 분무에 따라 염소이온 침투깊이를 측정한 결과를 그림6-8에 나타내었다. OPC에 비해 다소 침투깊이가 깊었으며 W/C=40%의 경우 3.62~8.53mm 정도의 범위였으며 W/C=50%은 8.49~10.87mm, W/C=60%의 경우 10.6~15.0mm의 범위로 측정되었다. 이상의 측정결과는 아래의 식6-12를 이용하여

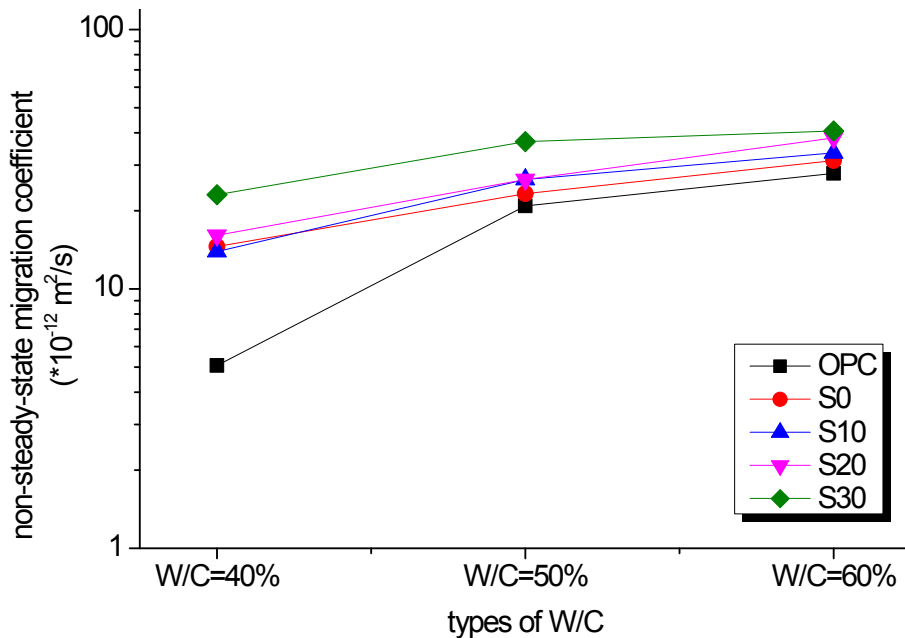


그림 6-8. OPC 및 재생시멘트를 이용한 콘크리트의 염소이온 확산계수

그림6-8에 OPC 및 재생시멘트를 이용하여 제작한 콘크리트의 염소이온 확산계수를 나타내었다. 염소이온 침투깊이에서 산정은 아래의 식에 준하여 실시하였다.

$$D = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (\text{식 6-12})$$

여기서, $\alpha = 2\sqrt{\frac{RTL}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2c_d}{c_0}\right)$, $E = \frac{U-2}{L}$

D : 비정상상태의 염화물 확산계수 (m²/sec)

z : 이온의 원자가 (염소이온의 경우 $z=1$)

F : 패러데이 상수 (96,481.04 J/Vmol)

U : 적용한 볼트의 절대 값 (V)

R : 기체상수 (8.314 J/Kmol)

T : 처음과 끝의 양극 용액의 평균 온도 (K)

L : 시편의 두께 (m)

x_d : 염소이온의 침투깊이 (m)

t : 실험 지속시간

erf : error function

c_d : 질산에 의해 변색된 부분의 염소이온 농도

c_0 : 음극쪽 셀의 염소이온 농도

그 결과 W/C=40%의 경우 2.297~6.473 (*10⁻¹² m²/sec)의 값이 도출되었으며 W/C=50%의 경우 6.438~8.536 (*10⁻¹² m²/sec), W/C=60%의 경우 8.296~12.237(*10⁻¹² m²/sec)의 값이 산출되었다. 재생시멘트의 경우 다소 낮은 수화률 및 강도에 기인한 공극량의 증가로 염소이온 침투가 다소 용이한 것으로 나왔다. 폐미립분에서 잔골재의 함유량이 많은 S30의 경우가 가장 확산계수가 컸으며 잔골재 혼입률에 비례하여 낮아지는 경향을 나타내었다. 물시멘트비의 영향도 비례적으로 작용하는 것으로 결과가 도출되었다.

6.5 수명산정 결과

열화 해석은 염화물 이온 확산 현상이다. 경계 조건은 표1에 나타난 것과 같으며, 해안 0m의 위치에 있어서의 비래(飛來) 염분의 추정치를 표면부의 연간 비래 염화물 이온량으로 환산시켜 이용했다. 환산식은 식(3)이다.

$$C_0 = \frac{a \cdot b \cdot C_y}{L} \quad (\text{식 6-13})$$

여기서, C_0 : 콘크리트 표면부의 염화물 이온량 (kg/m³)

C_y : 연간 비래 염화물 이온량(kg/m²/year)

a : 콘크리트에 침투하는 비율

b : 정상 상태의 할증(割増)

L : 폭로 개시 후 1년간으로의 염화물 이온 침투 깊이(m)

표면 피복재와 계면, 단면 수복재의 시간 경과 열화를 고려한 해석을 실시했다. 해석의 대상은 표면 피복재 없이 15년 경과한 콘크리트 구조이며, 해석 조건은 표6-5에 나타냈던 대로이다.

표6-5. 유한요소 해석의 경계조건

지역	해안으로부터 0m 위치의 비래염분량 (mg/dm ² /day)	콘크리트 표면의 염화물 이온량 (kg/m ³)
부산	10	4.44

① OPC 및 재생시멘트를 이용한 콘크리트 수명산정 결과

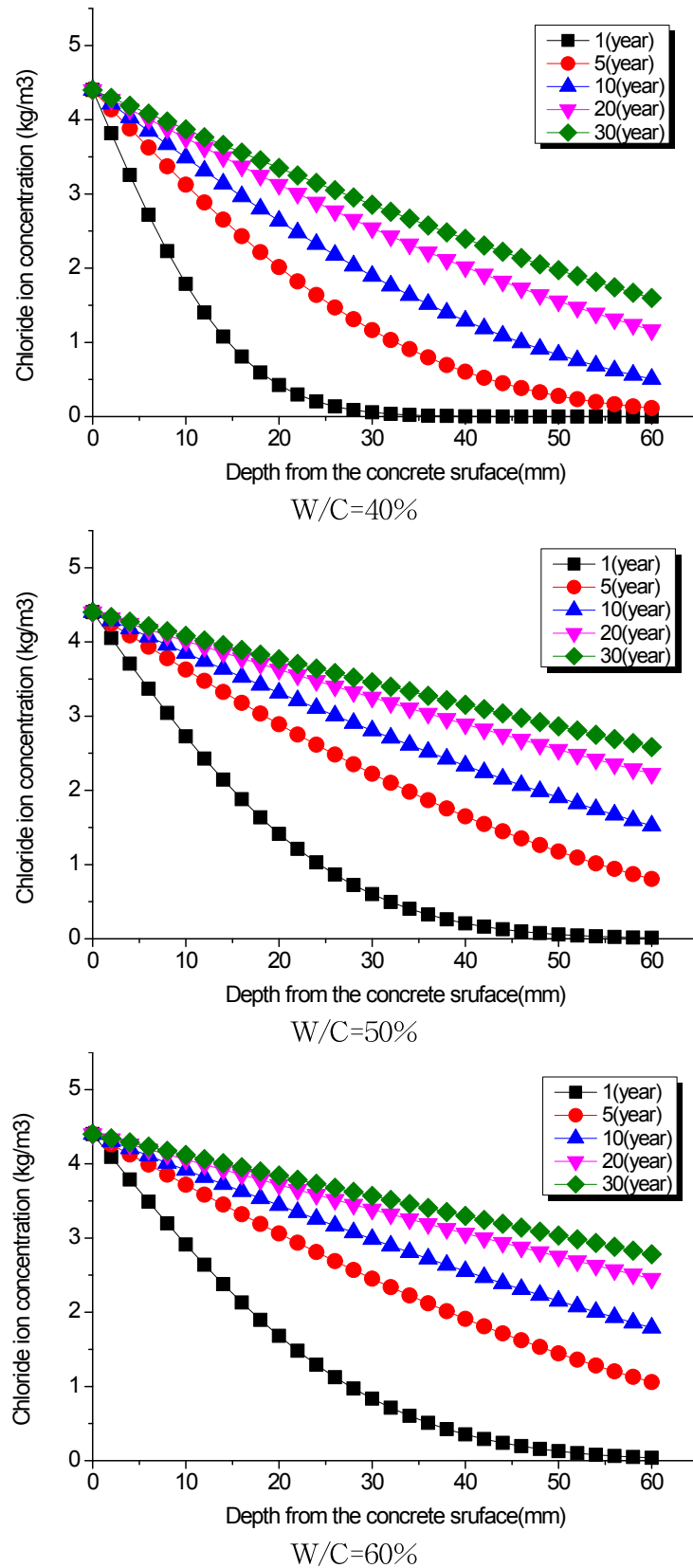
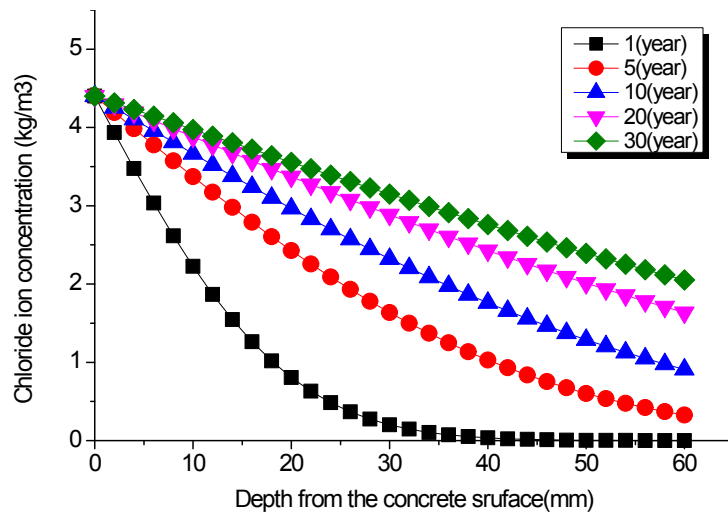
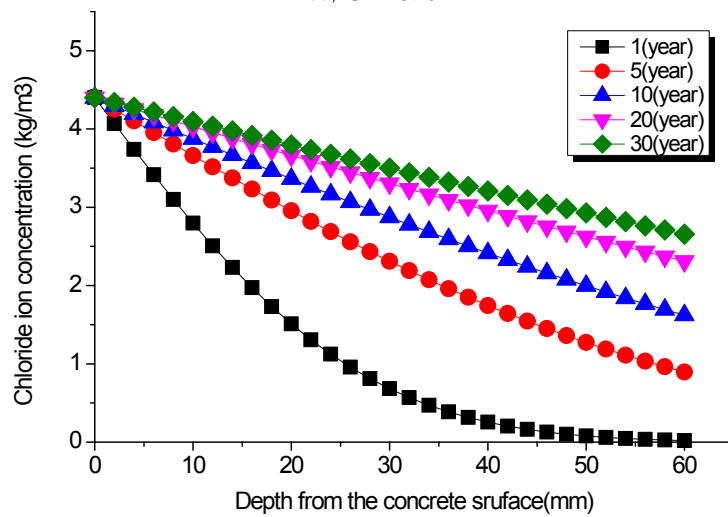


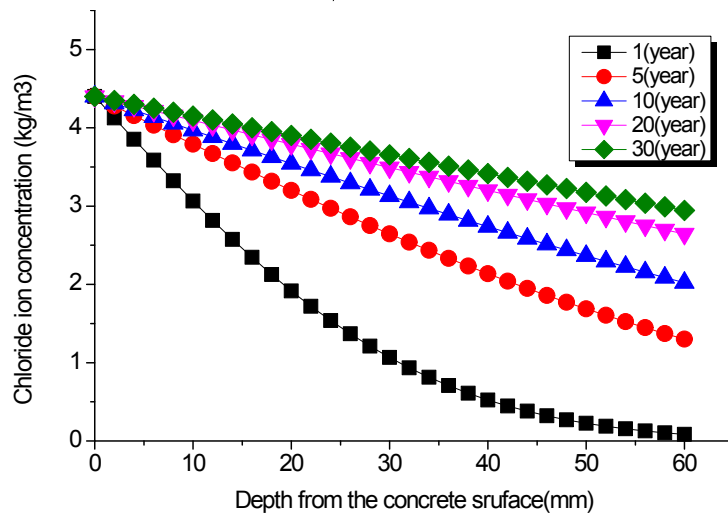
그림 6-9. OPC콘크리트의 염소이온 침투 경시변화



W/C=40%

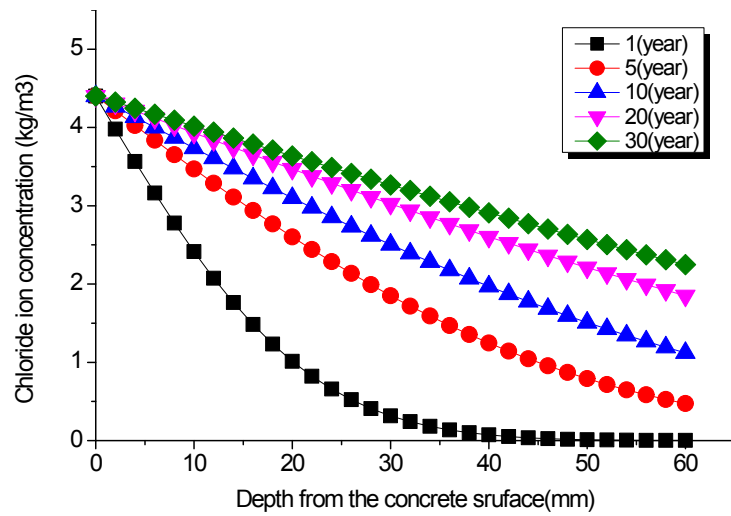


W/C=50%

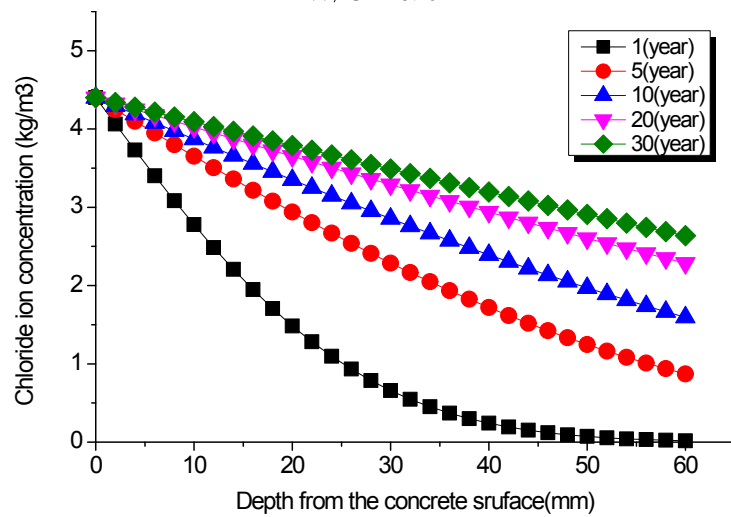


W/C=60%

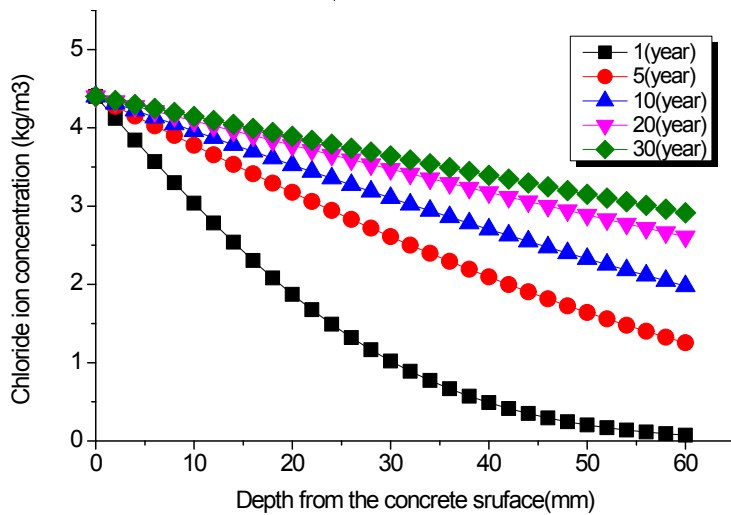
그림 6-10. S0 재생시멘트 콘크리트의 염소이온 침투 경시변화



W/C=40%

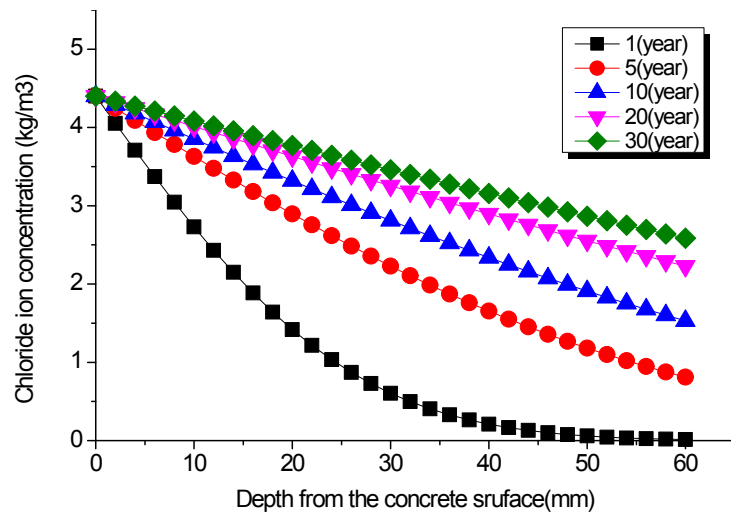


W/C=50%

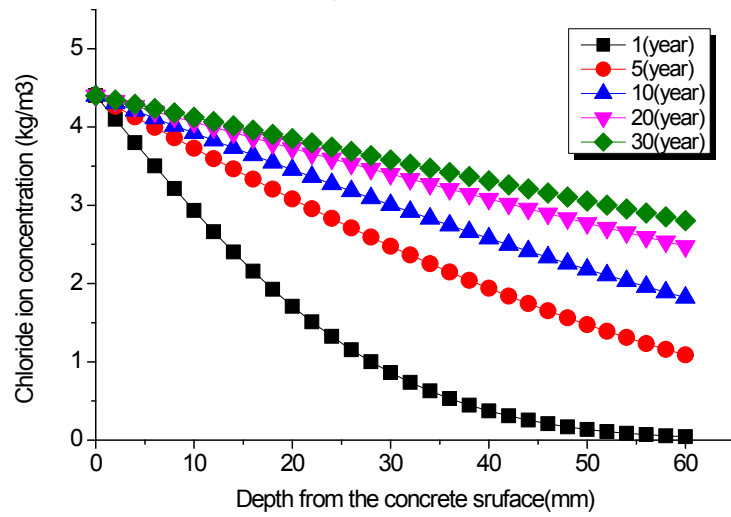


W/C=60%

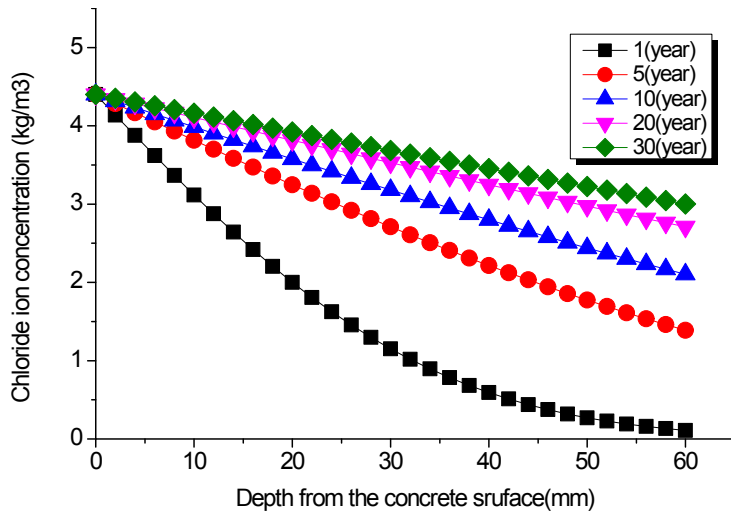
그림 6-11. S10 재생시멘트 콘크리트의 염소이온 침투 경시변화



W/C=40%

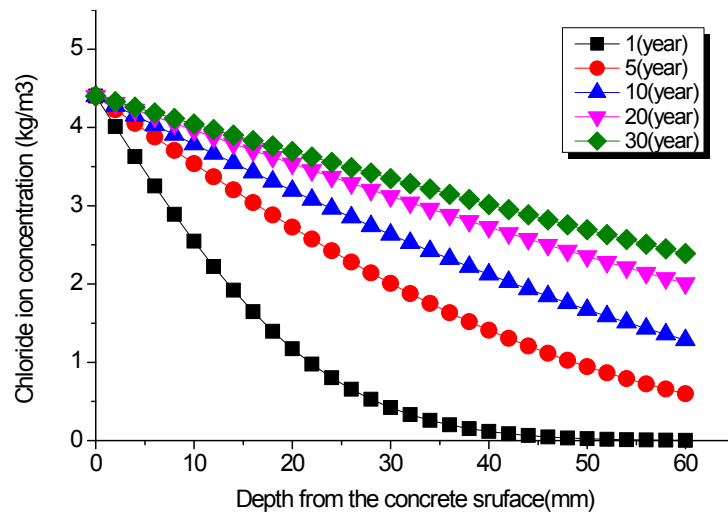


W/C=50%

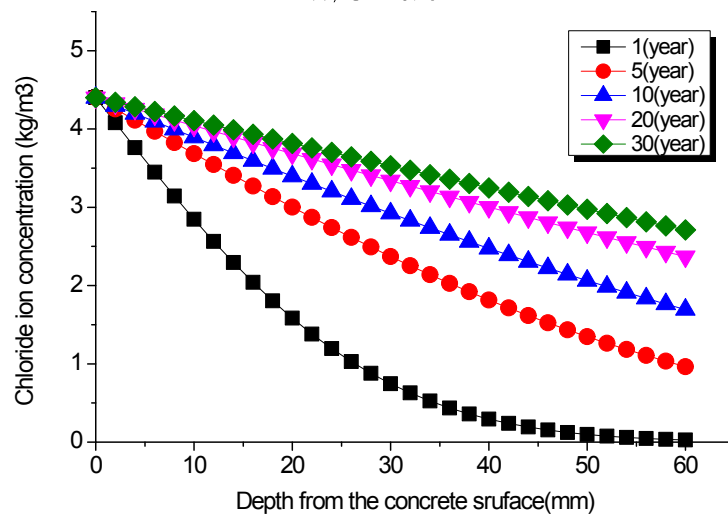


W/C=60%

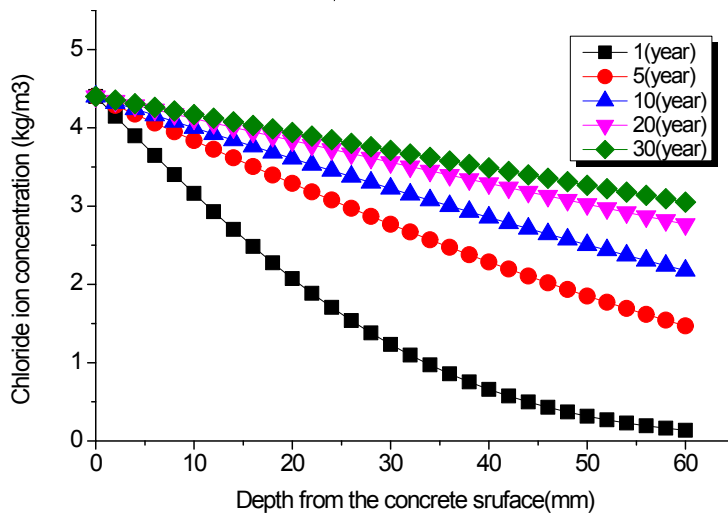
그림 6-12. S20 재생시멘트 콘크리트의 염소이온 침투 경시변화



W/C=40%



W/C=50%



W/C=60%

그림 6-13. S30 재생시멘트 콘크리트의 염소이온 침투 경시변화

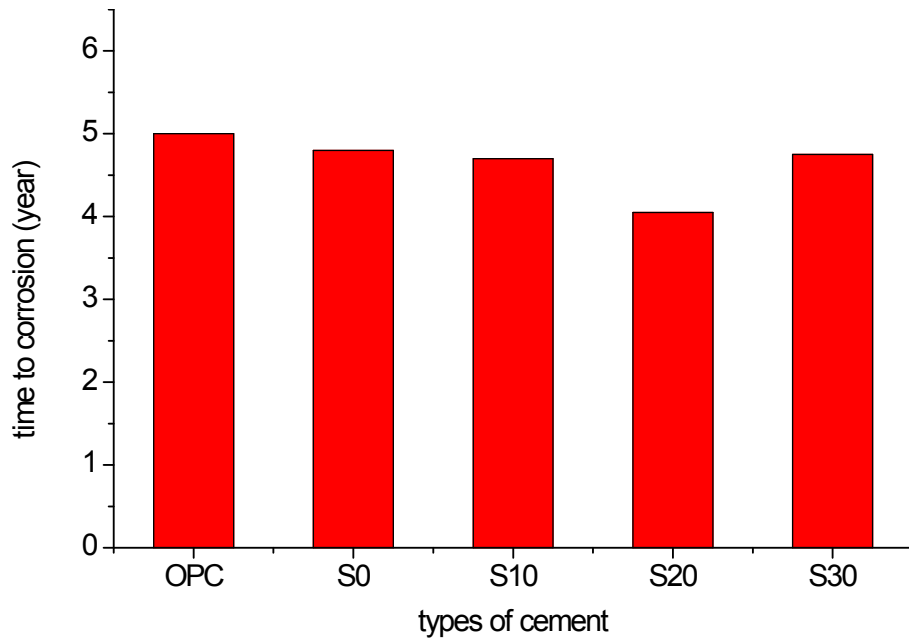


그림 6-14. 피복두께 3cm, W/C=50%의 조건에서 철근 발청시기 비교

그림6-9에서 그림6-13까지 OPC 및 재생시멘트를 이용한 콘크리트의 염소이온 확산의 경시변화를 나타낸 그림이다. 경계값은 표1에 나타낸 바와 같이 콘크리트 표면의 염화물 이온량 (kg/m^3) :4.44를 이용하였으며 확산계수는 전기영동에 의해 도출된 값을 이용하여 산정하였다. 그림6-14는 W/C=50%의 경우 각각의 시멘트를 이용하여 만든 콘크리트에서 피복두께 3cm의 위치에서 수명도달, 즉 강재의 발청임계치에 도달(2.2kg/m^3)하는 시간을 비교하여 나타내었다. OPC의 경우 5년으로 가장 높은 염해 내구성을 나타내었으며 재생시멘트의 경우 약 4년에서 4.8년에 이르는 결과가 도출되었다. 폐미분말에서 잔골재의 혼입률이 많아질수록(S0보다는 S30의 경우가) 다소 내구성이 저하하는 것을 알 수 있었으나 큰 차이가 발생한다고 보기에는 무리가 있는 것으로 사료된다. 수화률에 기인하는 강도저하와 공극률 증가가 원인으로 작용한 것으로 추정된다.

7. OPC 및 재생시멘트로 제작된 콘크리트의 촉진 탄산화 시험

7.1 개요

촉진탄산화 시험은 콘크리트 내구성 평가의 하나로 이산화탄소의 확산에 의한 수화생성물과의 반응에 의해 콘크리트 본연의 고알칼리성의 소실정도를 평가하는 방법이다. 일반적으로 대기중에서는 수년~수십년 소요되는 관계로 촉진탄산화, 즉 이산화탄소 농도를 $(5\pm0.2)\%$ 로 높게 책정하여 단시간에 내구성을 평가하는 방법을 주로 활용하고 있으며 결과는 촉진개시시부터의 기간(week)의 평방근으로 나눠 계산한 탄산화계수를 산출하여 비교하는 경우가 많다. 본 연구에서는 OPC 및 재생시멘트로 제작한 몰탈의 촉진 탄산화 시험을 통한 탄산화 깊이 측정과 탄산화 속도계수를 분석하였으며 수치해석을 통하여 철근 콘크리트 구조물의 수명을 비교하였다.

7.2 촉진 탄산화 실험

① 사용재료

대상 시험체는 OPC 및 재생시멘트를 이용하여 제작하였으며 $W/C = 40\%, 50\%, 60\%$ 로 하였다. 재생시멘트는 시멘트 미분말 및 잔골재의 함유량에 따라 S0, S10, S20, S30을 사용하여 성분조정하여 제작된 재생시멘트를 사용하였다.

표7-1. 콘크리트 배합설계

W/C	W	단위용적(l/m ³)			단위질량 (kg/m ³)		
		C	G	S	C	G	S
40	184	146.0	412.0	258.0	460.0	1092.0	670.7
50	175	111.1	412.0	301.9	350.0	1092.0	784.9
60	179	94.7	412.0	314.3	298.3	1092.0	817.2

② 시험체 제작

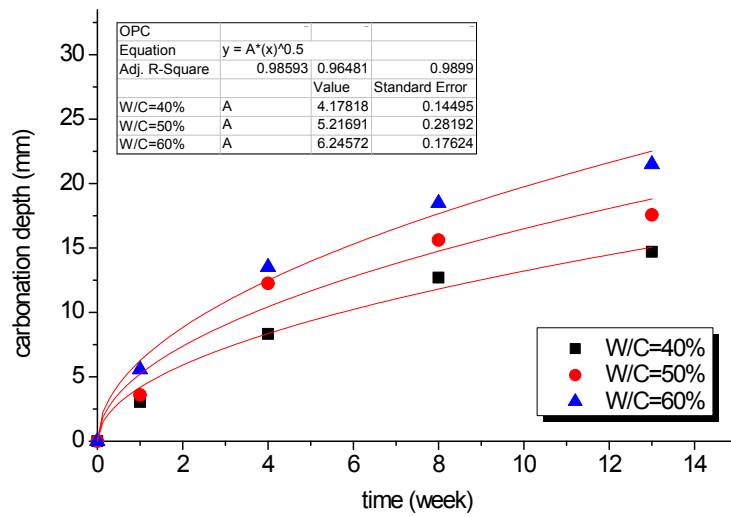
40*40*160 mm 크기의 시험체 3개 이용하였으며 제작방법은 KS F 2403에 준하여 제작하였다. 시험체 타설 후 2일이 경과한 시점에서 탈형하였으며 수중양생 ($20^{\circ}\text{C}\pm2^{\circ}\text{C}$)에서 4주간 실시한 후 상대습도 ($60\pm5\%$), 온도 ($20^{\circ}\text{C}\pm2^{\circ}\text{C}$)의 항온항습실에서 8주간 정치하였다. 사진??? 에 촉진 탄산화 시험장치를 나타내었다. 이산화탄소가 접하지 못하도록 에폭시 수지를 이용하여 나머지 면은 봉합하였다.

탄산화 촉진 조건은 온도 ($20^{\circ}\text{C}\pm2^{\circ}\text{C}$), 상대습도 ($60\pm5\%$), 이산화탄소 ($5\pm0.2\%$)로 하였다. 측정 시기는 1, 4, 8, 13주로 하였으며 탄산화 깊이 측정에는 페놀프탈렌 1%용액을 분무하여 적자색으로 변한 구간까지의 깊이를 표면으로부터 측정하여 평균값에 대하여 0.5mm 단위로 반올림하였다.

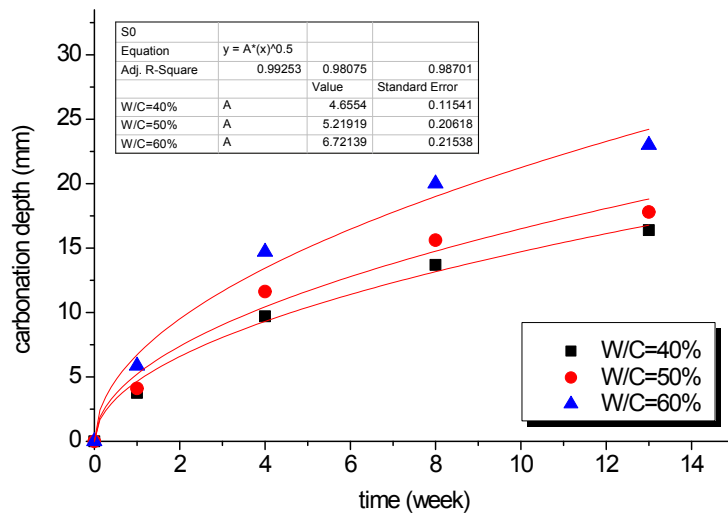


그림7-1. 촉진탄산화 시험장치

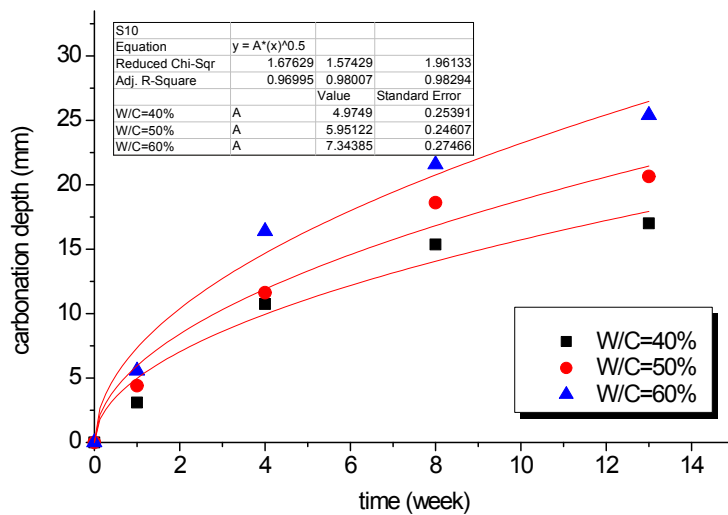
7.3 촉진 탄산화 깊이 측정 및 회귀분석 결과



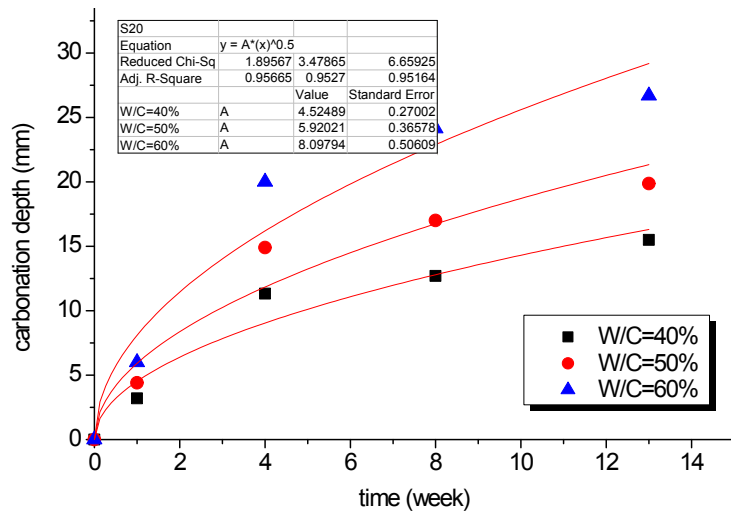
(a) OPC시멘트 이용 시멘트 몰탈의 탄산화 깊이



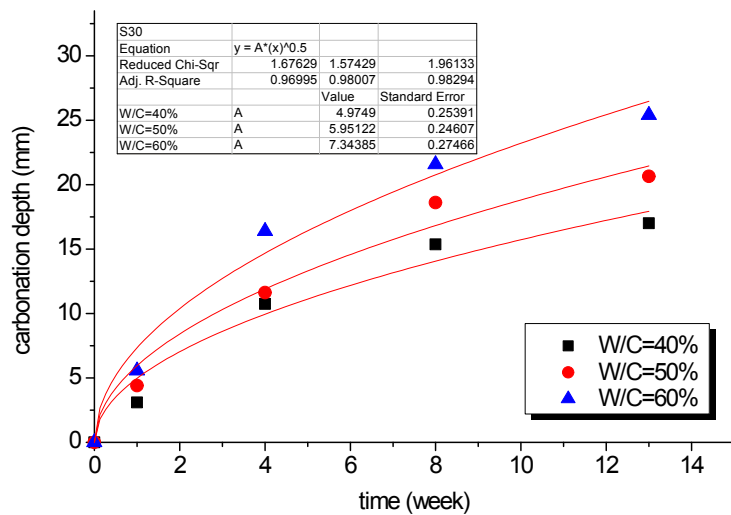
(b) S0 재생시멘트 이용 시멘트 몰탈의 탄산화 깊이



(c) S10 재생시멘트 이용 시멘트 몰탈의 탄산화 깊이



(d) S20 재생시멘트 이용 시멘트 몰탈의 탄산화 깊이



(e) S30 재생시멘트 이용 시멘트 몰탈의 탄산화 깊이

그림7-2. OPC 및 재생시멘트를 이용한 시멘트 몰탈의 탄산화 깊이 및 회귀분석 결과

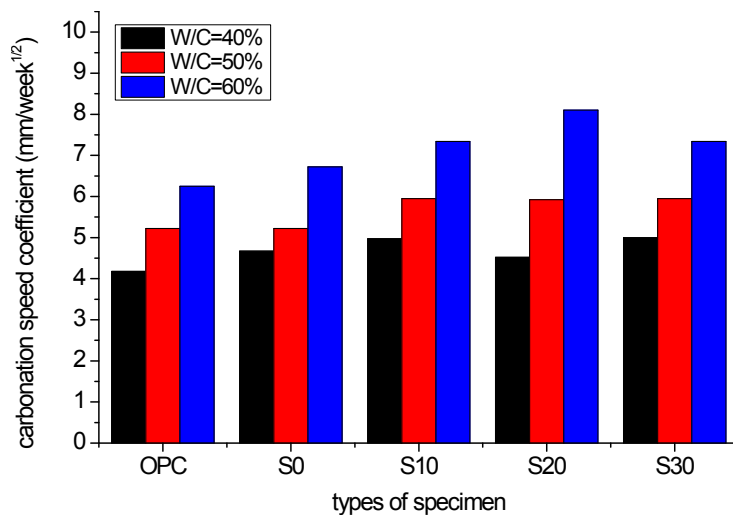


그림7-3. OPC 및 재생시멘트를 이용한 시멘트 몰탈의 탄산화 속도계수

7.4 탄산화해석 모델 구축 및 수명산정 비교

① 중성화에 관한 기존 연구

시멘트계 재료의 중성화는 대기 중의 이산화탄소가 세공으로 침입 확산하여 수산화칼슘과 수화 생성물인 $C-S-H$ 가 탄산칼슘으로 변화함으로써 pH가 저하하는 현상이다. 화학반응식으로 나타내면 식7-1과 식7-2로서 나타낼 수 있다. 철근은 고알칼리 환경 하에서 치밀하였던 부동태피막이 pH의 저하에 따라 파괴되기 시작하면 부식하기 쉬운 상태가 된다. 즉 시멘트계 재료가 본래 가지고 있던 방청효과가 부분적으로 없어진 상태가 된다. 이러한 이유로 인해 콘크리트 구조물의 내구성을 평가 할 때, 중성화 깊이는 중요한 지표로서 검토되어 진다.



중성화에 대한 기존 연구는 페놀프탈렌 1%를 분무하여 변색부분을 중성화깊이로 하여 시간 제곱근 $\sqrt{t}$ 에 근사 시키는 모델과 수치해석에 기초한 모델로 분류할 수 있다. 전자는 많은 실험 데이터에 기초하고 있으며, 간단히 적용할 수 있는 편리함이 있는 반면, 마감재 사용으로 인한 복합구조인 경우와 2차원 이상의 모델에 대해서는 적용하기 힘들며, 또 실험 실적이 없는 특이 환경에 대해서는 예측의 정확도가 떨어지거나 또는 적용이 곤란할 경우도 있다. 또 후자의 수치해석에 기초한 모델의 경우는 수분, 온도, 공극 구조 등의 조건을 고려한 해석이 가능하지만, 규명되지 않은 현상에 대해서는 많은 가정이 포함되어지며, 현재로서는 저농도에서 고농도까지의 이산화탄소에 대한 적용가능 모델이 구축되어 있지 않은 실정이다. 또 해석이 복잡하여 재현성과 보편성의 입장에서는 실험치에 근거한 전자에 비해 열악하다고 볼 수 있다. 이상의 두 모델을 간단히 정리해 보면 아래와 같다.

② $\sqrt{t}$ 에 기초한 모델4)

마감재가 없는 콘크리트만의 경우, 비시멘트계 마감재 또는 시멘트계 마감재가 있는 경우, 마감재의 열화가 고려된 경우로 나누어 아래와 같이 분류 할 수 있다.

- 마감재가 없는 콘크리트만의 중성화 반응

$$C = A\sqrt{t} \quad (\text{식 7-3})$$

- 함침재 등에 의해 콘크리트 표면이 치밀해졌을 때, 이산화탄소의 진행은 완만해지고 중성화 반응은 억제

$$C = A \cdot s\sqrt{t} \quad (\text{식 7-4})$$

- 시멘트 모르타르 등의 시멘트계 마감재 또는 폴리머 시멘트 모르타르로 마감했을 경우, 피복 두께를 증가시킨 것과 같은 효과가 얻어진다.

$$C = A(\sqrt{t} - R) \quad (\text{식 7-5})$$

- 비시멘트계의 마감재, 마감도료, 도장이 있을 경우, 이산화탄소의 침입을 막을 수 있고, 중성화 반응이 지연되지만, 마감재가 경시 열화하여 중성화 속도는 시간경과와 함께 콘크리트만 있는 경우와 비슷한 경향을 나타내게 된다.

$$C = A(\sqrt{t + R^2} - R) \quad (\text{식 7-6})$$

여기서, C : 중성화 깊이(mm), A : 중성화 속도 계수($\text{mm day}^{-1/2}$), s : 중성화 억제 효과의 계수, t : 시간 (day), R : 중성화 저항($\text{day}^{-1/2}$)

③ 수치해석에 기초한 모델

이산화탄소의 확산만을 고려한 경우, 수산화칼슘, $C-S-H$ 와 반응하는 경우, 온도, 습도의 영향을 고려하는 경우, 세공용액의 화학 평형을 고려한 경우, 공극분포의 변화를 고려한 경우로 나누어 아래와 같이 정리 할 수 있다.

- 길보기 확산계수를 이용한 모델5)

콘크리트 속에서 이산화탄소의 이동은 농도차를 구동력으로 하며, Fick의 법칙에서는 이산화탄소가 단위시간에 단위면적을 통해서 이동하는 량(유속, Flux)이 이산화탄소의 농도구배에 비례한다고 가정한 모델이다. 깊이 x 에서의 시간 t 에 존재하는 이산화탄소 농도는 Fick의 확산방정식으로부터 구해진다.

- 중성화 반응에 의한 소비 생성을 고려한 모델6)7)8)

Maeda는 중성화반응에 의해 탄산칼슘과 수분이 동시에 생성되기 때문에 습도이동 모델에 중성화반응에 의한 수분 생성항을 델타함수의 형태로 부여한 식을 지배방정식으로 했다. 그리고 수산화칼슘과 확산 침투한 이산화탄소가 1차 반응하는 것으로 가정하여 반응의 진행에 따라 수산화칼슘이 소비되어지고 탄산칼슘이 생성되는 지배방정식을 이용해 중성화 예측모델을 제안했다.

- 세공용액의 화학평형을 고려한 모델9)10)

세공용액에의 이산화탄소의 용해, 해리, 반응, 화학평형을 고려한 중성화반응 해석이다. Sasaki는 중성화반응에 의한 pH의 천이에 대해 각 화학종과 그것에 평형하는 물의 물질수지(mass balance), 프로톤 수지 방정식, 질량작용의 법칙에 근거해 정식화하여, 수산화알칼리를 고려한 pH 천이를 해석했다.

Nagada는 이산화탄소는 확산 중에 세공용액에 용해, 해리하여 수산화칼슘 및 $C-S-H$ 와 화학반응(불가역)을 하여, 생성된 H_2O , H_2CO_3 , $Ca(OH)_2$, $NaOH$, KOH 는 세공 용액중에서 화학평형(가역)상태로 있는 것으로 하여, 초기평형으로부터 화학종의 확산, 반응, 평형을 반복 계산함으로써 중성화를 예측하는 모델을 제안했다.

또 Matsumoto는 Nagada와 같은 개념하에 중성화 반응의 진행에 따라 칼슘이온 농도가 작아지고 pH가 저하하면 탄산칼슘이 재용해하는 현상을 고려해 중성화 시뮬레이션을 하였다.

- 세공경 분포를 고려한 모델

Isida11)는 세공용액의 화학평형과 콘크리트의 세공용적 분포밀도 함수식을 이용하여 공극구조 및 수분의 존재형태를 모델화하여 수증기의 확산에 관한 Simomura식12)을 응용한 이산화탄소 확산 계수식을 이용하여 해석하였다.

또, Lee3)는 Isida모델을 발전시켜 공극률만의 감소가 아니라 공극률의 감소와 함께 세공경의 축소가 고려된 모델로 수정하였다. 그리고 이산화탄소의 $C-S-H$ 과의 반응과 불포화공극내부의 이산화탄소확산을 적절히 고려하여 낮은 이산화탄소 농도로부터 높은 이산화탄소농도의 축진 환경까지 중성화 반응의 진행을 정도(精度) 높게 예측 가능하게 하였다.

시간 제곱근 $\sqrt{t}$ 에 근사시키는 실험식만으로는 전술(前述)한 듯이 한계가 있으며, 수치해석에 기초한 모델에서도 가능한 중성화 현상을 정확히 반영하고자 하는 과정에서 계수 설정의 복잡함에 어려움을 겪고 있다. 본 해석에서는 이러한 복잡한 현상을 이산화탄소의 확산과 수산화칼슘과의 반응을 1차 반응으로 가정하고, 환경 조건에 따라 달라지는 반응속도 정수와 수산화칼슘을 기존 실험치에 근거하는 감도(感度)해석으로 산출했다.

④ 중성화 예측을 위한 유한요소(FEM)해석

중성화는 대기중의 이산화탄소가 콘크리트 표면으로부터 내부로 침투하여 콘크리트 속의 수산화칼슘, C-S-H와 반응하여 탄산칼슘을 생성하는 현상으로 기본적으로 다음과 같은 가정을 전제로 해석을 실행하였다(13)14).

- 콘크리트는 반무한 고체이며, 이산화탄소의 확산은 한 방향으로 일어나는 것을 고려한다.
- 콘크리트 속에서 이산화탄소의 이동은 Fick 제1법칙에 따라 확산한다.
- 콘크리트속의 수산화칼슘과 이산화탄소의 반응은 1차 반응으로 한다.
- 콘크리트의 조직은 중성화에 의해 치밀화 되며, 확산계수는 감소한다.

기초미분방정식

콘크리트 속으로 확산한 이산화탄소의 약 절반정도는 수산화칼슘과 반응하고 나머지 절반이 C-S-H와 반응 한다는 것이 기존 연구(20)21)에서 명확히 되어 있으므로, 본 연구에서는 절반의 이산화탄소와 수산화칼슘이 반응하는 기초방정식에 준하여 해석하였다. 그리고 반응생성물인 탄산칼슘에 의해 감소하는 전공극량을 해석에 고려함으로써 C-S-H와 이산화탄소의 반응까지 고려되도록 하였다. 식7-7은 이산화탄소의 확산과 소비를, 식7-8은 수산화칼슘의 확산과 소비, 식7-9는 탄산칼슘의 생성을 나타낸 방정식이다. 수치해석은 유한요소법을 사용하였다.

표7-2. 보통 포틀랜드 시멘트의 광물조성과 수산화칼슘의 생성량4)

종류	광물조성(%)	각 광물의 단위량당의 수산화칼슘 생성량	수산화칼슘 생성량
C ₃ S	51	0.49	25.0
C ₂ S	25	0.21	5.3
합계	-	-	30.3

$$\frac{\partial C_{CO_2}}{\partial t} = D_{CO_2} \frac{\partial^2 C_{CO_2}}{\partial x^2} - K \left[\frac{C_{CO_2}}{2} \right] [C_{Ca(OH)_2}] \quad (\text{식 7-7})$$

$$\frac{\partial C_{Ca(OH)_2}}{\partial t} = D_{Ca(OH)_2} \frac{\partial^2 C_{Ca(OH)_2}}{\partial x^2} - K \left[\frac{C_{CO_2}}{2} \right] [C_{Ca(OH)_2}] \quad (\text{식 7-8})$$

$$\frac{\partial C_{CaCO_3}}{\partial t} = K \left[\frac{C_{CO_2}}{2} \right] [C_{Ca(OH)_2}] \quad (\text{식 7-9})$$

여기서, t :시간, x :콘크리트 표면으로부터의 거리, D_{CO_2} :이산화탄소 확산계수, $D_{Ca(OH)_2}$: 수산화칼슘 확산계수, C_{CO_2} :이산화탄소 농도, $C_{Ca(OH)_2}$: 수산화칼슘 농도, C_{CaCO_3} :탄산칼슘의 농도, K :반응속도 정수

초기조건

$$t=0$$

$$x>0: C_{CO_2}=0, C_{Ca(OH)_2}=C_{Ca(OH)_2-Init} \quad (\text{식 7-10})$$

시판중인 포틀랜드시멘트중의 C_3S 및 C_2S 비율의 평균은, 약 50% 및 26%이며, 보통 포틀랜드 시멘트 수화율 α 가 100%인 경우, 시멘트 질량의 약 30%의 수산화칼슘이 생성된다. 따라서 콘크리트에서의 수산화칼슘 몰농도는 단위 시멘트량 Q 와 수화율 α 에 의해 식(11)7)으로 표현된다.

$$Ca = \frac{0.3 \cdot Q \cdot \alpha}{74} \quad (\text{식 7-11})$$

경계조건

$$t>0$$

$$x=0: C_{Ca(OH)_2}=0, C_{CO_2}=\varepsilon \cdot C_{CO_2-Out} \quad (\text{식 7-12})$$

$$x \rightarrow +\infty: C_{Ca(OH)_2}=C_{Ca(OH)_2-Init}, C_{CO_2}=0 \quad (\text{식 7-13})$$

식7-10~식7-13는 해석의 초기조건 및 경계조건을 나타낸다. 콘크리트 표면의 이산화탄소 농도 C_{CO_2} 는 콘크리트의 공극률을 고려하여 결정할 수 있다. 예를 들어 콘크리트의 공극율이 20%의 경우, 주변기체중의 이산화탄소 농도 C_{CO_2-Out} 의 20%가 경계조건으로 사용될 수 있다. 주변기체의 이산화탄소의 기체농도를 5%라고하면, 콘크리트 표면의 이산화탄소의 체적농도는 1%가 되고, 이것을 몰농도로 나타내면 $0.4e-6(\text{mol}/\text{cm}^3)$ 이 된다. 옥외의 이산화탄소 농도 0.05%에 대해서는 $0.004464e-6(\text{mol}/\text{cm}^3)$ 이 된다.

이산화탄소 및 수산화칼슘의 확산계수

이산화탄소 확산계수의 측정은 촉진중성화 시험 장치를 이용해서는 상당히 구하기 어려운 물성치이다. 그 이유는 이산화탄소가 확산되어 감에 따라 시멘트 수화 생성물과 반응하여, 공극 구조가 변하기 때문이다. Papadakis et al.15)과 Wittmann et al.19)은 겔보기 기체 확산계수를 측정하기 위해 이산화탄소와 산소를 경계로 균일 조건으로 가정할 수 있도록 충분히 얇은 확산계수 측정용 디스크형 셀을 이용하여, 물시멘트비에 대치되는 공극률, 상대습도를 변수로 한

이산화탄소 확산계수 식을 제안하였다. 본 연구에서는 Papadakis et al.의 제안식(식(14))에 근거하여 해석하였다.

$$D_c = 1.64 \times 10^{-6} \varepsilon^{1.8} \left(1 - \frac{RH}{100}\right)^{2.2} \quad (\text{식 7-14})$$

여기서, D_c : 이산화탄소의 확산계수(m²/s), ε : 전공극량, RH : 상대습도(%)

콘크리트 내부에 있어서 수산화칼슘의 역확산계수 $D_{Ca(OH)_2}$ (cm²/s) 과 콘크리트의 함수율(%)은 식7-15와같이 지수함수 형태를 가진다고 Hukujima16)의 연구에 의해 밝혀졌다. 이러한 현상은 Saeki17)의 중성화된 시험체의 수중침지 또는 기중폭로 실험으로부터도 확인되었으며 수중침지와 기중폭로를 비교하면 수중침지를 행한 쪽이 중성화 감소효과가 큰 것으로 나타났으며 수산화칼슘의 역확산이 수분의 개재(介在)에 의한 것이라 추정되어진다. 본 연구에서는 개략적인 수산화칼슘의 범위는 식7-15에 근거하여 산출하여 실험치와의 감도(感度)해석을 통해 조정하였다.

$$D_{Ca(OH)_2} = \exp(0.0767528\omega - 25.1797) \quad (\text{식 7-15})$$

공극량의 감소

수산화칼슘과 이산화탄소의 반응에 의해 탄산칼슘으로 변화하는 과정에서 분자량의 변화에 따라 공극량은 줄어들게 된다(식7-16). 그러나 분자량의 계산에 따라 공극량의 변화를 고려할 수 없는 것은 이산화탄소는 수산화칼슘뿐만 아니라 약 50%의 이산화탄소가 C-S-H와도 반응을 일으켜 공극량 변화에 영향을 주는 것으로 연구되어 지고 있다3). 따라서 현재로서는 계산에 의한 공극량 변화의 산출 수준까지는 이르지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 기존실험 데이터에 근거한 회귀곡선을 작성(식7-17)하여 공극량 변화를 고려하였다.

$$\text{전공극량의 감소: } \varepsilon' = \alpha \cdot \varepsilon_0 \quad (\text{식 7-16})$$

여기서, ε' : 중성화후의 전공극량, α : 공극량 감소계수, ε_0 : 중성화전의 전공극량

$$\alpha = 0.92 - 3.95 \cdot 0.94^{WC} \quad (\text{식 7-17})$$

여기서, α : 공극량 저감계수, WC : 물시멘트비(%)

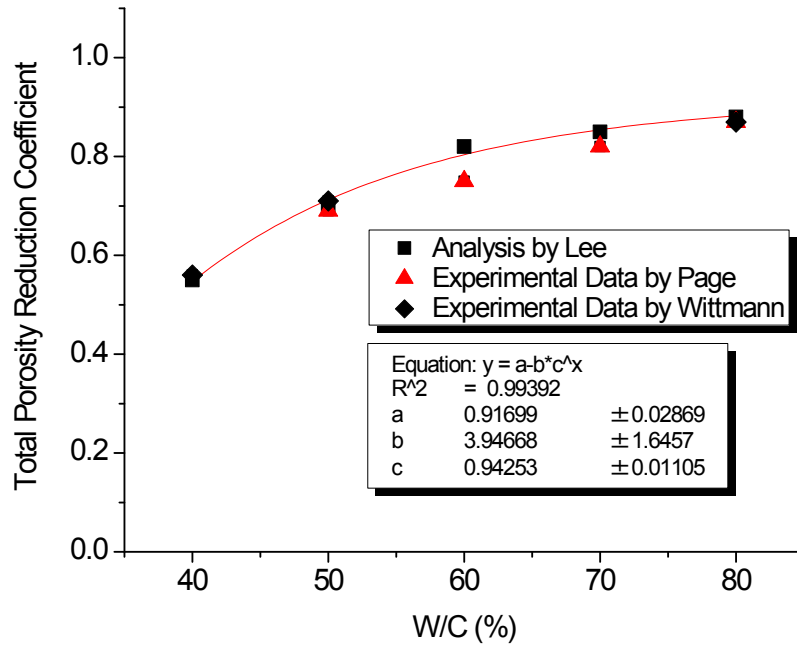


그림7-4. 중성화에 의한 공극량의 변화3)18)19)

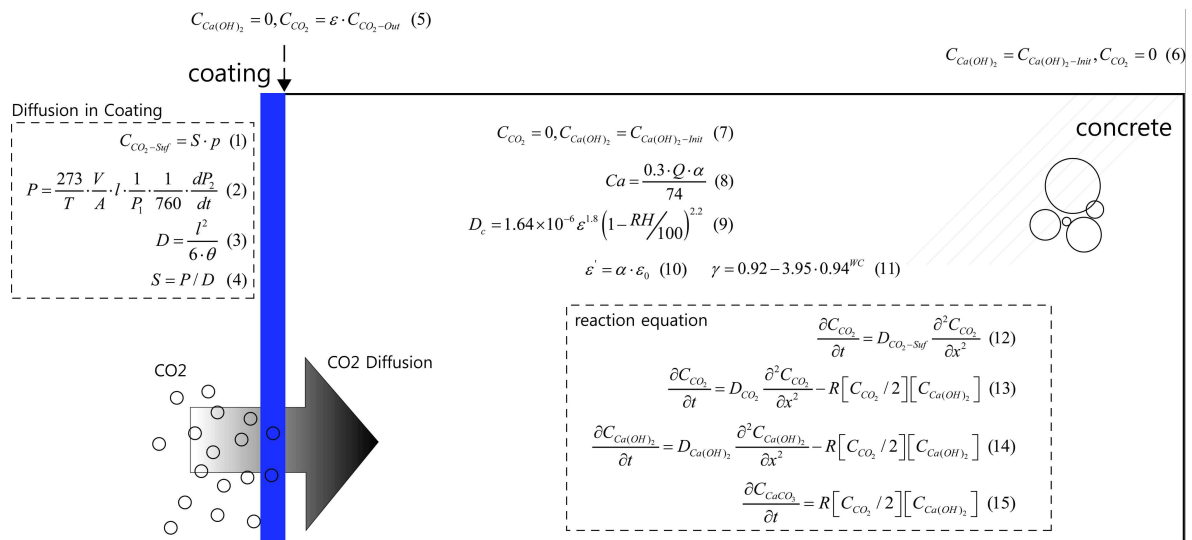


그림7-5. 이산화탄소 확산과 수산화칼슘과의 반응에 의한 소비를 정리한 지배방정식 및 초기, 경계조건

이상에서 언급한 반응기구를 정리하면 그림 7-5와 같이 정리 표현할 수 있다.

중성화의 판단 기준

본 연구에서는 외부로부터 확산된 이산화탄소와 콘크리트 중의 수산화칼슘이 1차 반응하여 탄산칼슘과 수분이 생성되는 것으로 중성화 반응을 가정하였다. 페놀프탈렌에 의한 중성화 깊

이의 판정되는 경계부위에서는 수산화칼슘과 탄산칼슘이 공존한다고 알려져 있으며, 중성화된 부위의 수산화칼슘의 잔존량에 대해서는 아직 명확히 규명되어 있지 않다. 본 연구에서는 기존의 실험결과²¹⁾에 근거하여 초기 수산화칼슘의 절반에 이른 지점을 중성화 영역의 경계로 가정하여 해석을 진행했다.

7.5 반응속도 정수 및 수산화칼슘의 확산계수 산출을 위한 유한요소법에 의한 감도 해석

이산화탄소의 확산계수를 구하는 연구에 비해 반응속도 정수, 수산화칼슘의 확산에 관한 연구에 관해서는 상당히 실적이 미비하다. 본 해석의 결과와 기존의 실험치과 비교함으로써 반응속도 정수와 수산화칼슘의 확산계수를 추정하기 위하여 저자의 기존 연구에서 감도해석을 실시했다.

그림7-6에서 8주와 16주의 측정결과와 해석결과를 비교하였다. 전체적으로 수산화칼슘의 확산계수가 $1e-11 \sim 1e-12(m^2/s)$, 반응속도 정수 $5e-4 \sim 5e-5(m^3/mol/s)$ 에서 상당히 높은 재현성을 나타냈었다.

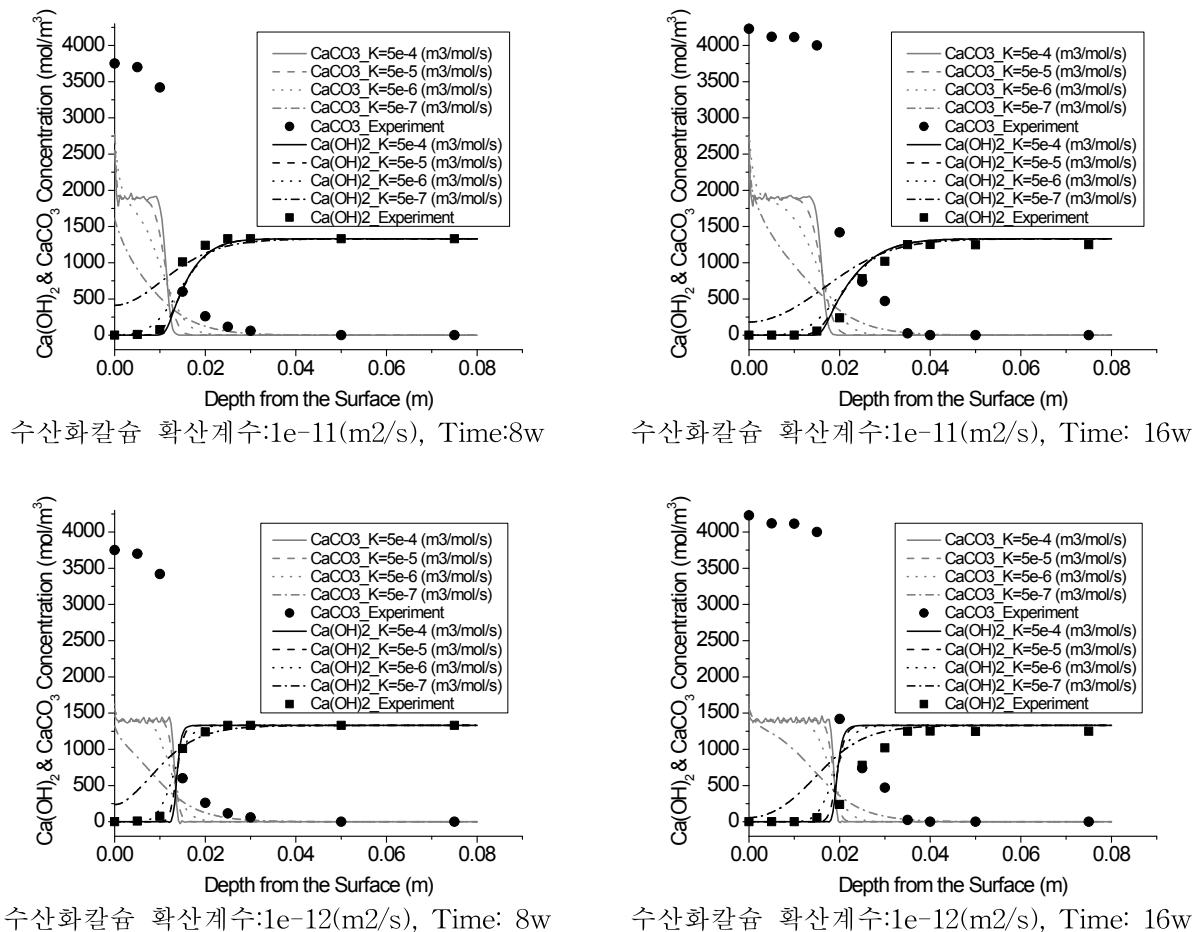


그림7-6. 수산화칼슘 확산계수와 반응속도 정수추정을 위한 실험값과 해석값 비교의 감도해석

그림7-7에서 장기중성화 예측에 적절한 수산화칼슘의 확산계수와 반응속도 계수를 구하기 위하여 시간 제곱근에 근거한 Kishitani식4)과 비교하는 감도 해석을 하였다. Kishitani식에서 중성화 속도 계수는 표7-3의 조건에 식7-18에 근거하여 구하였다. 유한요소 해석의 입력값도 표7-3에 근거하여 동일한 조건을 적용하였다.

$$A = m \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \quad (\text{식 7-18})$$

여기서, A:중성화 속도 계수

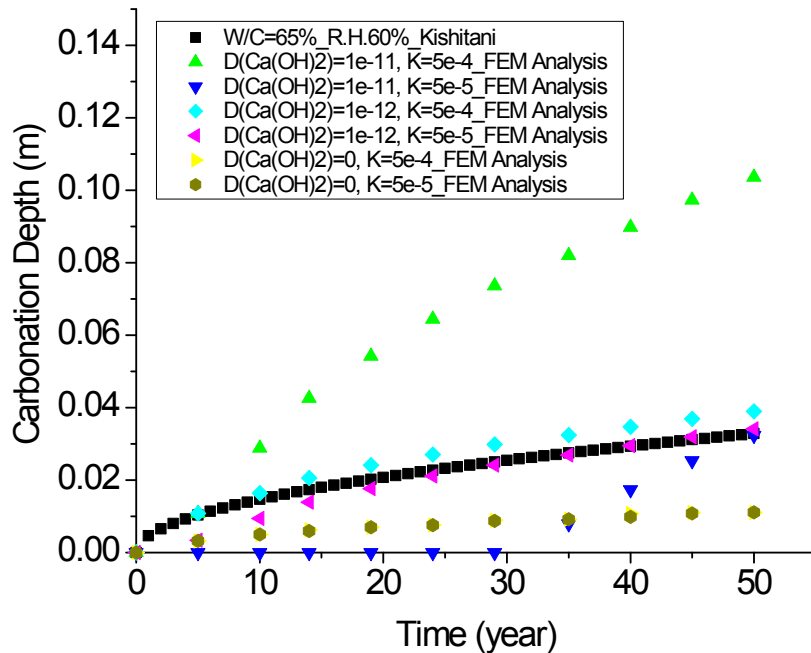


그림7-7 실험값과 해석값의 비교를 통한 감도해석

표7-3. 중성화 속도 계수4)

m	계 수	Kishitani식	1.72
α_1	콘크리트의 종류(골재의 종류)따른 계수	보통 콘크리트	1.0
α_2	시멘트 종류에 따른 계수	보통 포틀랜드 시멘트	1.0
α_3	배합(물시멘트비)에 따른 계수		$\alpha_3 = w/c - 0.38$ 여기서, w/c 는 물시멘트비
β_1	온도에 따른 계수		1.0(년평균1971-2000년:15.9도)
β_2	습도에 따른 계수	동경	1.0(년평균1971-2000년:63%)
β_3	이산화탄소 농도에 따른 계수	옥외(0.05%)	1.0

7.6 촉진탄산화 실험 결과를 이용한 이산화탄소 확산계수 산정

그림7-8에 촉진 탄산화 실험에 의한 탄산화 깊이 예측을 위한 수치해석 모델 시뮬레이션을 통한 확산계수 산정 결과를 나타내었다. 대상으로 한 시험체는 OPC 및 S30재생시멘트를 이용한 몰탈을 대상으로 하였다. 이산화탄소와 수산화칼슘이 반응하여 수산화칼슘의 농도가 절반이 되는 시점을 페놀프탈렌 지시약이 변색하는 깊이로 하여 탄산화깊이로 산정하였다. OPC시멘트를 이용한 몰탈은 21.5mm를, S30 재생시멘트를 이용한 몰탈은 28mm의 탄산화 깊이를 촉진탄산화 13주 측정결과에서 나타내었고 유한요소 수치해석에서도 같은 결과가 나오도록 역해석을 실시하여 이산화탄소 확산계수를 산정하였다. 여기서 산출된 이산화탄소 확산계수를 장기탄산화 해석에 이용하였다.

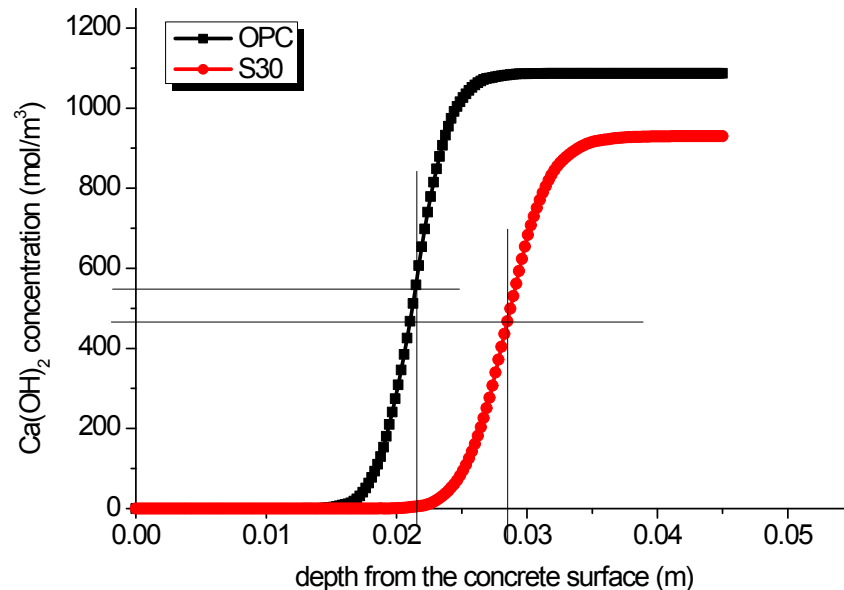


그림7-8. 촉진 탄산화 실험에 의한 탄산화 깊이 예측을 위한 수치해석 모델 시뮬레이션을 통한 확산계수 산정 결과

7.7 장기탄산화 예측결과

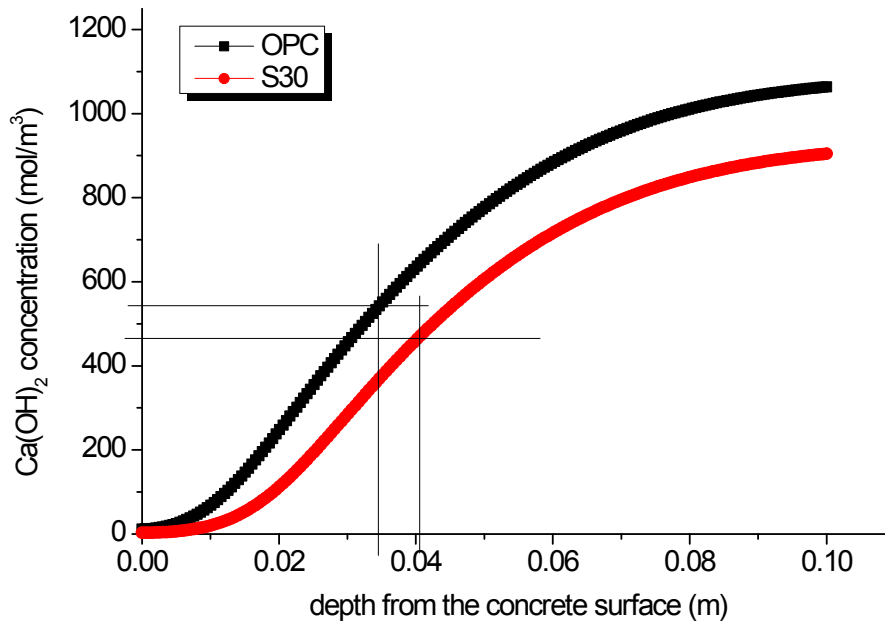


그림7-9. OPC 및 S30의 장기 탄산화 깊이 예측 결과

그림7-9는 OPC 및 S30 재생시멘트를 이용한 콘크리트가 대기중, 즉 이산화탄소 농도 0.04%의 환경에서 폭로되었을 때 30년 경과시점에서의 탄산화 깊이를 비교한 결과이다. 단위시멘트량에 의한 수화물과 수산화칼슘 생성량, 공극량, 상대습도가 반영되었으며, 수산화칼슘의 농도가 절반이 되는 시점을 탄산화 깊이로 규정하고 결과를 분석하였다.

OPC의 경우 34.5mm, S30 재생시멘트를 이용한 콘크리트의 경우 40.5mm의 탄산화 깊이를 나타내었다. 재생시멘트의 경우 OPC에 비하여 다소 탄산화 깊이가 깊어지는 결과가 나왔지만 그 차이는 6mm정도로 잔골재의 함유량이 낮은 S0~S20의 재생시멘트의 경우 그 차이는 더 적을 것으로 기대된다. 염해에 비하여 탄산화 내구성은 수화생성물의 생성과 확산, 반응에 의한 소모가 반복되는 가운데 그 차이가 미비한 것으로 판단된다.

참고논문

1. 岸谷孝一: 鐵筋コンクリートの耐久性, 鹿島建設技術研究所出版部, 1963
2. 和泉意登志: コンクリートの中性化速度にもとづく鐵筋コンクリート造建築物の耐久性設計手法に関する研究, 大阪大學學位論文, pp.216-262 1991
3. 李春鶴, 石田哲也: 微細空隙構造と物質平衡移動の強連成に立脚したセメント水和生成物の炭酸化反応モデル, コンクリート工學年次論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 701-706, 2006
4. 鐵筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)同解説, 日本建築學會
5. 伊代田岳史, 矢島哲司, 魚本健人: コンクリートのひび割れが中性化速度に及ぼす影響, コンクリート工學年次論文集, Vol. 20, No. 2, pp. 979-984, 1999
6. 前田孝一: コンクリートの中性化の數値計算に関する研究, 日本建築學會構造系論文報告集, 第402, pp. 11-19, 1989
7. 梶田佳寛, 棚野博之: コンクリートの中性化進行予測モデル, コンクリート工學論文集, Vol. 2, No. 1, pp. 125-133, 1991
8. 佐伯龍彦, 大賀宏行, 長瀧重義: コンクリートの中性化の機構解明と進行予測, 土木學會論文集, 第414, Vol.12, 1990.2
9. 佐伯木崇, 島袋出, 大下英吉, アルカリイオン濃度に基づくコンクリートの炭酸化によるpH遷移に関する解析的研究, コンクリート工學年次論文集, Vol. 25, No. 1, pp. 689-694, 2003
10. 長田光正, 植木博, 山崎之典, 村上正明: アルカリ成分に着目したコンクリート部材の炭酸化反応シミュレーション解析, コンクリート工學年次論文集, Vol.19, No.1, pp.793-798, 1997
11. 石田哲也, 前川宏一: 物質移動則と化學平衡論に基づく空隙水のpH評価モデル, 土木學會論文集, No. 648, Vol. 47, pp. 203-215, 2000
12. 下村匠, 前川宏一: 微視的機構に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル, 土木學會論文集, No.520, V.28, pp.35-45, 1995
13. Kwangryul HWANG, Takafumi NOGUCHI, Fuminori TOMOSAWA: Prediction Model of Carbonation Process Rate of Concrete Using Fly Ash, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No.541, pp.9-15, Mar., 2001
14. Yoshihiro MASUDA, Hiroyuki TANANO: Mathematical Model on Process of Carbonation of Concrete, Concrete Research and Technology, Vol.2, No.1, Jan. 1991
15. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., Fardis, M. N.: Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete, ACI Materials Journal, Vol.9, No.2, pp.186-196, 1991
16. 福島敏夫: コンクリートの中性化振興の理論的予測法と數値解析, 日本建築學會構造系論文集, 第428, pp.1-15, 1991
17. 佐伯龍彦, 大賀宏行, 長瀧重義: コンクリートの中性化の機構解明と進行予測, 土木學會論文集, 第414, Vol.12, 1990
18. V. T. Ngala and C. L. Page: EFFECTS OF CARBONATION ON PORE STRUCTURE AND DIFFUSIONAL PROPERTIES OF HYDRATED CEMENT PASTES, pp.995-1007, Vol. 27, No. 7, pp. 995-1007, 1997
19. Yves F. Houst and Folker H. Wittmann: Influence of porosity and water content on the diffusivity of CO₂ and O₂ through hydrated cement paste, Vol. 24, No. 6, pp. 1165-1176, 1994

20. Cheng-Feng Chang, Jing-Wen Chen: The experimental investigation of concrete carbonation depth, Cement and Concrete Research, 36, pp. 1760-1767, 2006
21. 白川敏夫, 島添洋治, 麻生實, 永松静也: セメントペースト硬化体を用いた炭酸化機構の検討, コンクリート工學年次論文集, Vol. 23, No. 2, pp. 493-498, 2001
22. 福島敏夫, 古崎芳郎, 友澤史紀, 高橋幸一: コンクリートの中性化深さ炭酸化フロント深さとの関係—促進中性化試験, 屋外暴露試験, 實態調査, 理論的解析の結果からの考察, 日本コンクリート工學年次論文報告書, Vol.19, No.1, 1997

9. 뒷면지

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 건설교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.