

도로포장의 신속한 시공 및 유지보수를 위한 산화마그네슘계열 세라믹 콘크리트 개발에 관한 연구 최종보고서

2015. 2. 25

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / 한양대학교
참여기업 / ㈜콘크리닉

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관 귀하

이 보고서를 "도로포장의 신속한 시공 및 유지보수를 위한 산화마그네슘계열 세라믹 콘크리트 개발에 관한 연구"과제의 보고서로 제출합니다.

2015. 2 . 24

주관연구기관명 : 한양대학교 에리카 산학협력단

주관연구책임자 : 심종성

연구원 : 안기용

" : 하지명

" : 권혁우

" : 허준

" : 김형민

" : 이용호

" : 최세환

" : 황준필

" : 김용재

" : 이현기

" : 성병길

" : 정지용

" : 김은경

보고서 요약서

과제고유번호	12기술혁신 F03	해 당 단 계 연 구 기 간	2013.11.16.~ 2014.11.15.	단 계 구 분	(2)/ (2)
연 구 사 업 명	건설기술혁신사업				
연 구 과 제 명	최 상 위 과 제 명	도로포장의 신속한 시공 및 유지보수를 위한 산화마그네슘계열 세라믹 콘크리트 개발			
	단위과제명				
연 구 책 임 자	심종성	총연구기간 참 여 연구원수	총 : 14명 내부 : 8명 외부 : 6명	총 연구비	정부:188,138천원 기업:20,000천원 계:208,138천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	한양대학교 에리카산학협력단		참여기업명	(주) 콘크리닉	
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	124
본 연구의 목적은 산화마그네슘 세라믹 결합재를 도로포장 시공/보수시 적용함으로써 조기강도발현과 급속 경화시간을 통한 신속한 교통개방을 유도하고, 기존 보수재료의 강도 및 내구성능에 대한 한계를 극복하여 공용성을 증진시킬 수 있는 도로 포장재 또는 보수재료의 개발이다. 이에 따라 다음과 같은 연구결과를 도출하였다. ☐ 산화마그네슘 결합재를 보수재료로의 활용을 위해 산화마그네슘 및 인산칼륨의 혼입을 및 기타 구성비에 따른 응결시간 특성 및 압축강도 특성 분석을 통한 최적배합비를 도출 ☐ 산화마그네슘 결합재를 보수재료로 활용하기 위한 물리적 성능(압축, 부착) 특성을 확인하였으며, 또한 내구성능(동결융해 저항성, 염소이온 침투 저항성) 검증을 실시하여 만족하는 결과를 확인 ☐ 또한 개발 재료에 대한 경제성 분석을 실시하였으며, 본 재료의 경우 초속경 재료로서 사용자비용을 고려하여 경제성 확보					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	콘크리트, 보수재료, 포장, 세라믹, 산화마그네슘			
	영 어	Concrete, Repair material, Pavement, Ceramic, Magnesium Oxide			

요 약 문

I. 제 목

도로포장의 신속한 시공 및 유지보수를 위한 산화마그네슘계열 세라믹 콘크리트 개발

II. 연구개발과제 개요

기존 도로 포장의 급속한 노후화함에 따라 최근 도로 포장의 유지보수와 확장포장공사가 크게 증가하고 있으며, 이런 증가추세에 따른 현장 시공시 차선 감소로 인해 사용자 비용도 크게 증가하는 추세이다. 이에 따라 도로 포장 및 보수 방법에 대한 연구가 진행되어지고 있으며, 기존의 보수방식은 도로의 차선을 수일동안 통제, 거푸집을 설치한 후 콘크리트를 타설, 양생하는 위험한 작업방식으로 인한 안정성의 문제와 강도 보완에만 중점을 두고 있어 내화학적 및 내구성 확보에는 고려되고 있지 않고 있는 실정이다. 또한 현재 사용되고 있는 보수재료는 기존재료와의 이질성으로 인한 역학적 거동 차이로 오히려 조기열화되는 현상을 나타내고 있다. 특히, 적설한랭지를 통과하는 고속도로의 경우 동결기 결빙에 의한 차량통행의 원활을 기하기 위해 동결방지제의 살포로 인하여 콘크리트의 복합열화가 가속화되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 산화마그네슘 결합재를 도로포장 시공/보수시 적용함으로써 조기강도발현과 급속 경화시간을 통한 신속한 교통개방을 유도하고, 기존 콘크리트 보수재료의 강도 및 내구성능에 대한 한계를 극복하여 공용성을 증진시킬 수 있는 도로 포장재 또는 보수재료의 개발을 하고자 한다.

국내 도로 포장 시공시 산화마그네슘 결합재의 적용성을 검토하기 위하여 먼저 산화마그네슘과 인산칼륨의 구성비, 물 바인더비와 지연제의 혼입율에 따른 초기강도발현성능 및 응결속도에 대한 평가하였으며, 이에 따라 개발 재료에 대한 최적배합비를 도출하였다. 도출된 개발재료의 보수보강 재료로의 성능을 확인하기 위해 강도(압축, 부착)와 내구성(동결융해 저항성, 염소이온침투 저항성, 공극분포 등) 시험을 통해 적용성을 판단한다. 그리고 강도 및 내구성능을 검증하고 기존 포장재 및 보수보강비용 대비 산화마그네슘의 사용에 따른 강도발현촉진 및 이에 따른 경제비용을 산정하였다.

III. 연구개발 수행내용 및 결과

□ 산화마그네슘 결합재의 응결시간 및 압축강도 특성 규명

· 본 연구에서의 산화마그네슘 결합재를 보수재료로의 활용을 위하여 먼저 산화마그네슘 및 인산칼륨 비율(M/P비), 물 바인더 비(W/B비), 지연제의 혼입율에 따른 응결시간 및 압축강도 특성을 확인

□ 산화마그네슘 결합재의 최적배합비 도출

· 산화마그네슘 결합재의 응결시간 및 압축강도 특성에 따라 조기 교통개방 및 작업성 등을 고려한 최적배합비를 도출

□ 산화마그네슘 결합재의 물리적 성능 검증

- 산화마그네슘 결합재를 보수재료로의 활용을 위한 물리적 성능(시간별 압축강도, 부착강도)성능을 확인하였으며, 기존 시멘트계 보수재료 대비 압축강도의 경우 약 300%의 강도를 확보하였으며, 부착성능은 약 180%의 성능을 확보

□ 산화마그네슘 결합재의 내구성능 검증

- 산화마그네슘 결합재를 보수재료로의 활용을 내구성능 시험을 수행하였으며, 염소이온 침투 시험과 동결융해 저항성 시험을 수행하여, 우수한 내구성능을 확보하였으며, 나아가 공극특성 확인을 통하여 연행공기가 충분히 확보됨을 확인

□ 산화마그네슘 결합재의 경제성 확보

- 산화마그네슘 결합재의 경우 일반적으로 재료적인 측면만을 고려할 경우 다소 높은 단가이지만 사용자비용에 대한 분석을 통해 교통단축 시간당 약 100만원 정도를 감축시킬 수 있어 충분한 경제성 확보가 가능함.

IV. 최종 연구성과 및 적용실적

본 연구의 최종 연구 성과는 산화마그네슘 결합재를 도로포장 시공/보수시 적용함으로써 조기강도발현과 급속 경화시간을 통한 신속한 교통개방을 유도하고, 기존 콘크리트 보수재료의 강도 및 내구성능에 대한 한계를 극복하여 공용성을 증진시킬 수 있는 도로 포장재 또는 보수재료의 개발이다. 이에 따라 본 개발 재료의 결합재 구성비에 따른 압축강도 및 응결시간을 규명하였으며, 이를 통한 최적배합비를 도출하였다. 또한 기존 시멘트계 재료와 비교하여 내구성능의 우수성을 검증하고, 사용자비용의 경제성 분석을 통한 시공시 교통통제에 대한 경제적 손실을 방지에 대한 분석을 하였다.

V. 연구목표 달성 및 효과

- 본 연구를 통하여 산화마그네슘 결합재에 대한 응결시간 및 강도 특성에 대한 기초 자료를 제공함에 따라 추후 관련 연구 진행시 활용도가 높을 것으로 예상
- 또한 산화마그네슘 결합재에 대한 최적 배합비 및 구성비를 제시함으로써 무시멘트 및 친환경재료로의 관련 연구로 확장이 가능
- 본 연구에서 개발된 재료를 도로포장 시공/보수시 적용함으로써 신속한 교통개방을 유도가 가능하며, 나아가 향후 추가 관련 연구시 세라믹 및 산화마그네슘 재료 관련 분야의 연구를 위한 기초자료로 활용도가 높을 것으로 예상

VI. 연구성과 활용계획

- 산화마그네슘 결합재는 현재 국내외적으로 일부 사용되고 있으나 토목/건축 구조물의

기초용 그라우팅제의 사용에 국한되고 있으나 구조부재 및 보수보강용 콘크리트 재료로 활용된 사례가 극히 드물어 본 기획과제의 연구결과는 세라믹 콘크리트 분야의 연구를 위한 기초자료로 활용도가 높을 것으로 판단

- 최적의 세라믹 콘크리트용 결합재의 화학적 조성비에 관한 연구는 국내외적으로 전무한 실정이며 다만 경험적 실험법에 의해 조성비 및 결합첨가재에 대한 정의가 있었으나 본 연구의 결과는 최적의 조성비를 제공함으로써 향후 세라믹 콘크리트의 사용 시 기초자료로 활용가능

- 산화마그네슘 결합재의 내구성능에 관한 본 연구의 자료는 도로공용 시 내구성능, 수명에 관한 직접적인 자료를 제시하며 열화환경에 노출되어 있는 타 토목구조물의 활용방안을 위한 기초자료로 활용성이 높고, 쾌속 도로포장 신규시공 이후 각종 물리화학적 열화(동해 및 염해)에 따른 내구성능 지표 제시

- 추후의 보수재료 개발할 경우 경제성 분석이 사용자 비용을 고려한 경제적 손실을 산정함으로서 관련 보수재료 및 개발 보수재료에 대한 비용 산정에 대한 지표 제시

SUMMARY

With the rapid deterioration of the existing road pavement, recently, maintenance and expansion pavement works for the road pavement have increased greatly, and due to the decrease of lanes in the site works according to this growing trend, user cost, too, tends to increase significantly. Accordingly, studies of road pavement and repair plans are carried out, and the existing repair method focuses only on the issues of stability and strength supplementation due to the dangerous method of work of controlling the lanes of the road for several days, installing a mold, and pouring and curing concrete, but does not consider securing chemical resistance and durability. Also, the repair materials currently used show a phenomenon of rather early deterioration with the difference in mechanical behavior because of the difference from the existing materials. Especially, in a highway passing through a snowy and cold area, the combined deterioration of concrete is accelerated due to the spraying of deicing agents to smooth vehicle traffic against freezing in the winter.

This study aims to develop a road pavement material or repair material that can promote the pavement performance, inducing rapid traffic opening through early strength development and fast setting time and overcoming limitations in of strength and durability of the existing concrete repair materials by applying the magnesium oxide bonding material in road pavement construction/repair.

To consider the applicability of a magnesium oxide repair material in the domestic road pavement works, first, the performance of early strength development and condensation setting time were evaluated, according to magnesium oxide to KH_2PO_4 ratio, water to binder ratio and percent of retarder, by which the optimal mixture ratio of the developed material was drawn. To check the performance of the developed material drawn as a repair and reinforcement material, through testing its strength (compressive strength and bonding strength) and durability (freezing and thawing resistance, resistance to chloride ion penetration and pore size distribution, etc.), its applicability was judged. Also, its strength and durability were verified, and the promotion of strength development, according to the use of magnesium oxide and the economic cost accordingly were estimated as compared to the existing repair materials and repair and reinforcement cost.

As a result, when the magnesium oxide bonding material was used, the condensation time was reduced by 80%, and the compressive strength was promoted by approximately 300% as compared to the existing cement-based repair materials. In addition, it was found that the durability showed an excellent performance that meets the regulations. Also, in an economic analysis, it was found that about \$1,000 could be reduced per hour when the user cost of traffic blocking in repair works was taken into account.

CONTENTS

Chapter 1 Executive Summary	10
Section 1 Object and Needs	10
Section 2 Definition, Scope and Characteristics	17
Section 3 Technology and Industry Trend of Domestic and Overseas	21
Chapter 2 Contents and Results	29
Section 1 Strategy and Methodology	29
Section 2 Process and Contents	31
Section 3 Results and Verification Methods of Results	60
Chapter 3 Contribution of Related fields and Goal Achievement	88
Section 1 Setting Time	88
Section 2 Characteristic of Strength	91
Section 3 Optimal Mixture Ratio	93
Section 4 Characteristic of Pore Distribution	95
Section 5 Repair Performance	99
Section 6 Economic Analysis	102
Chapter 4 Achievement and contribution	104
Section 1 Achievement of aims	104
Section 2 Analysis of the technical effect	105
Section 3 Analysis of the economical effect	105
Section 4 Analysis of the policy effect	105
Chapter 5 Application of research results and Needs of Additional Research	106
Section 1 Application of research results	106
Section 2 Needs of Additional Research	109

목 차

제1장 연구개발과제의 개요	10
제1절 연구개발의 목적 및 필요성	10
제2절 연구개발의 정의, 범위, 특징	17
제3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황	21
제2장 연구개발 수행 내용 및 결과	29
제1절 연구수행 전략 및 방법론	29
제2절 연구수행과정 및 내용(이론적, 실험적)	31
제3절 연구수행결과 및 결과의 검증방법 등	60
제3장 최종 연구성과 및 적용실적	88
제1절 개발재료의 응결시간	88
제2절 개발재료의 강도 특성	91
제3절 개발 재료의 최적구성비 도출	93
제4절 개발 재료의 공극 분포 특성	95
제5절 개발 재료에 대한 보수재료로의 성능	99
제6절 개발 재료에 대한 경제성	102
제4장 최종 연구목표 달성 및 효과	104
제1절 연구개발 최종목표 달성도	104
제1절 연구개발 성과의 기술적 효과분석	105
제1절 연구개발 성과의 경제적 효과분석	105
제1절 연구개발 성과의 정책적 효과분석	105
제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성	106
제1절 연구성과 향후 활용방안	106
제2절 추가연구 필요성 등	109

참고문헌

제1장 연구개발과제 개요

제1절 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

본 연구의 최종연구목표는 “MgO계 세라믹 콘크리트를 이용한 도로포장의 쾌속시공 및 유지관리 (보수보강) 방법 개발”

상기와 같은 목표달성을 위해 다음의 세부목표 및 연구내용을 포함. 이에 따라 연구의 흐름도와 최종 목표는 다음 그림 1.1과 같다.

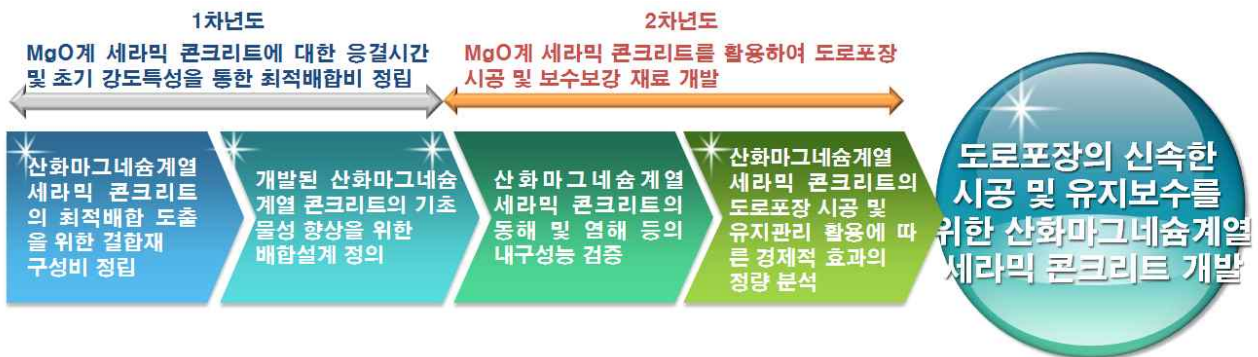


그림 1.1 최종 연구목표 및 연구개발 흐름도

그림에서 보는 바와 같이 본 연구개발 과제는 총 4단계의 과정에 따라 진행이 되며, 상기의 단계별 세부 연구목표는 다음과 같다.

1. MgO계 세라믹 콘크리트의 최적배합 도출을 위한 결합재 구성비 정립
2. 개발된 MgO계 콘크리트의 기초물성 (강도, 응결시간, 작업성)향상을 위한 배합설계 정의
3. MgO계 세라믹 콘크리트의 동해 (Frost damage; resistance to freeze and thaw) 및 염해 등의 내구성능
4. MgO계 세라믹 콘크리트의 도로포장 시공 및 유지관리 활용에 따른 경제적 효과의 정량 분석

2. 연구개발의 필요성

가. 연구개발의 배경

(1) 기존 콘크리트 포장의 급속한 노후화

- 현재 국내의 고속도로 콘크리트의 설계계산수명은 통상적으로 20년이며, 단순한 수치 측면에서는 설계수명의 한계에 이르고 있는 실정
- 따라서, 88고속도로와 호남 및 경부 고속도로 확장구간 등 주요고속도로의 콘크리트포장 구간이 설계수명 20년에 가까운 노후 콘크리트포장으로서 앞으로 고속도로의 노후 콘크리트포장의 연장은 급속도로 증가(그림 1.2, 1.3)

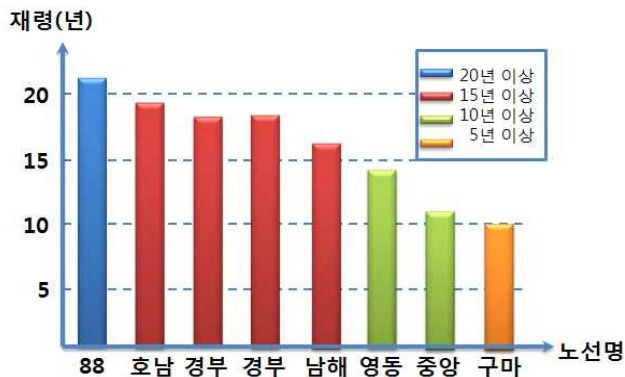


그림 1.2 2005년 주요고속도로 콘크리트포장 노후도
<출처 : 한국도로공사 (2004)>



그림 1.2 연도별 고속도로 노후콘크리트포장 증가추세
<출처 : 한국도로공사 (2004)>

(2) 고속도로 보수·보강의 필요성

- 동결기 결빙에 의한 교통통행의 원활을 기하기 위해 제설제인 염화나트륨(sodium chloride, NaCl)과 염화칼슘(calcium chloride, CaCl₂)살포 염해, 기후에 따른 동결융해에 의한 콘크리트 복합열화 (multi-deterioration)를 발생
- 제설제에 노출된 콘크리트는 염화물과 동결융해 환경에 직접적으로 노출되어 있어 콘크리트 표면의 일부가 박리(scaling)되는 현상과 염화물 이온의 침투로 인한 철근부식 등을 일으켜 손상의 가속화로 내구성이 급격히 저하되고 미관이 불량하게 됨. (그림 1.4)
- 현재 국내의 고속도로 콘크리트 포장의 설계계산수명(Analysis Period, 단면설계를 위한 교통량 산정 기간)은 통상적으로 20년으로 하고 있어, 수치적인 측면에서는 설계수명에 다다르고 있는 실정.



그림 1.4 콘크리트 포장 복합열화 메커니즘과 열화현황

(3) 콘크리트 포장의 유지보수와 포장공사의 증가

- 최근 콘크리트 포장의 유지보수와 확장포장공사가 크게 증가하고 있으며, 이런 증가추세에 따른 시공시 차선 감소로 인해 사용자 비용도 크게 증가하는 추세
- 다음 그림과 같이 국내의 고속도로 포장형식은 크게 콘크리트 포장과 아스팔트포장으로 구분되고 콘크리트 포장이 전체의 64.4% 차지(그림 1.5, 1.6)
- 최근 개통한 고속도로의 경우 콘크리트 포장의 비율이 70~90%.
- 지난 '09년 고속도로 포장유지비는 642억원이 사용되었으며, 고속도로 보수비용은 약 1,800만원/km(2009년 기준)인 것으로 나타났으며 또한 도로보수를 위한 채포장 건수는 140건, 보수길이만도 6,413km에 달한 것으로 나타남.

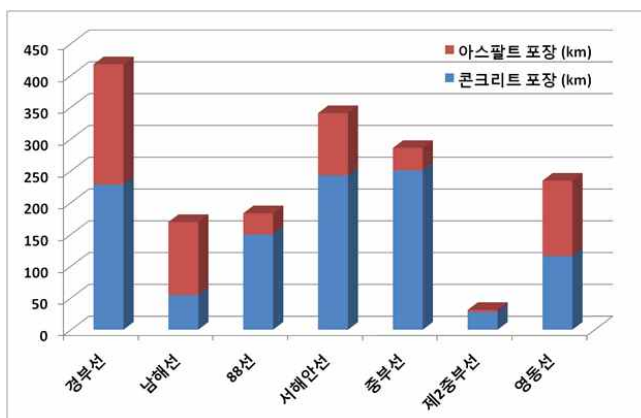


그림 1.5 주요 고속도로 포장 현황
<출처 : 국토해양부 (2008)>

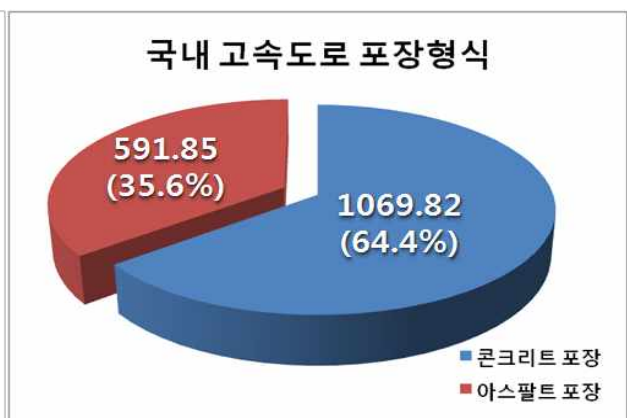


그림 1.6 국내 고속도로 포장 형식
<출처 : 국토해양부 (2008)>

- 또한 2002년 이후 중전(모래+염화칼슘) 방식에서 습염식 제설방식으로 변경 후염화물 살포량이 3~5배로 급증하게 되면서 이에 따라 그림과 같이 연평균 보수비용은 2004년 이후 바닥판의 경우 170%, 교대의 경우 133%로 증가(그림 1.7, 1.8)



그림 1.7 연간 평균 제설염화물 살포량 추이 <출처 : 도로교통연구원 (2008)>



그림 1.8 제설제 사용량 및 바닥판, 교대, 방호벽 열화 보수비용 현황
<출처 : 도로교통연구원 (2010)>

(4) 기존 도로 보수재료의 문제점

- 구조물 보수·보강의 경우 대부분이 새로운 보수·보강 재료에 대한 개발을 목적으로 연구되어지고 있으며 이와 신재료를 사용하여 보강하는 공법의 경우 보수재와 구콘크리트 간의 이질적인 거동으로 인한 조기 열화 및 2차 재파손의 문제가 발생.
- 또한 이와 같은 보수·보강 재료들은 주로 보수 작업시 도로의 차선 통제, 작업시 발생되는 위험한 작업방식 등의 문제를 해결하기 위한 조기강도 확보에만 치중되어 있어 장기강도 저하가 우려됨.

- 최근 개발된 LMC공법과 에폭시 모르타르 공법의 경우 또한 재료 자체가 고가이고, 콘크리트와 재료의 이질성으로 인한 프라이머층 코팅 시공단계가 요구되어지며, 구콘크리트 간의 접합성에 대한 문제점이 우려됨.
- 이와 같은 구조물 보수 보강시 사용되고 개발되어진 재료들에 대한 특성 및 문제점에 대해 다음 표 1.1과 같이 나타내었으며, 대부분의 보수 재료들은 외부 환경에 대한 의존성을 크게 나타냈으며, 장기 투수성 확보로 인한 강성 저하가 우려되고 재료 단가가 높아 경제성 확보의 문제가 야기됨.

표 1.1 기존 주요 보수재료의 특성

구분	재료특성				특징
	결합재	양생기간	압축강도 (kg/cm ²) (재령 28일)	탄성계수 (105kg/cm ²)	문제점
에폭시 모르타르	에폭시 수지	4시간 ~2일	843	1.5	- 프라이머층 코팅 시공단계로 인한 작업성이 떨어짐. - 외부 온도에 영향이 큼 - UV에 의한 열화 및 콘크리트와의 재료적 이질성으로 그 사용이 제한적
메틸메타 아크릴레이트 (MMA) 콘크리트	아크릴 수지	1 ~6시간	844	2.0	- 온도에 의존성이 높음 - 내충격성과 내열도가 낮음 - 장기 투수성으로 강성 저하 우려
시멘트 콘크리트	시멘트	습윤 7일	352	2.6	- 조기강도 확보 미흡으로 인한 교통 통제로 보수시 안정상의 문제 및 시공기간증가 - 내열도 및 내화학적 낮음
마이크로 실리카 개질 콘크리트	시멘트	습윤 7일	527	2.8	- 프라이머층 코팅 시공단계로 인한 작업성이 떨어짐. - 조기강도 확보용 시멘트에 치중 (장기강도 저하 우려)
라텍스 개질 콘크리트 (LMC)	시멘트	습윤 3일	422	1.7	- 장기투수성으로 강성 저하 - 재료 단가가 높아 경제성 저하
폴리머 콘크리트	시멘트	-	352	1.7	- 높은 점도로 인한 작업성이 떨어짐 - 높은 경화수축으로 인한 피착제에 대한 부착성 영향이 큼 - 온도 의존성이 높음

(5) 기존 고속도로 보수방식의 문제점

- 파손된 도로포장의 유지보수를 위하여 매년 막대한 국가예산(2008년말 현재 3415억원 : 국토해양부 통계자료)이 투입되고 있고, 더구나 보수작업으로 인하여 발생하는 교통체증과 교통사고는 이용객의 불편뿐만 아니라 국민수준 향상에도 악영향을 미치는 등 콘크리트 포장의 장점을 드러내지 못하고 있음.
- 기존의 보수방식은 화학적 환경에 노출된 콘크리트 구조물 보수 시 기존 시멘트계 보수재료를 사용하여 열화된 부위의 보수를 통해 콘크리트 구조물의 강도 보완에만 중점을 두고 있으며 콘크리트 구조물의 내화학적 확보에는 크게 고려하고 있지 않음.
- 또한 현재 사용되고 있는 보수재료는 기존재료와의 이질성으로 인한 역학적 거동 차이로 오히려 조기 열화되는 현상을 나타내고 있으며, 적설한랭지의 경우 동결기의 반복적인 동결융해 및 제설제의 사용으로 인한 콘크리트의 복합열화 가속화
- 또한 상기 기술한 스폐링, D-균열 등의 파손으로 인하여 보수작업을 하더라도 보수된 도로는 승차감 및 미관을 해치고 보수부위에 균열이 발생하는 등 2차적인 재파손이 발생되고 있는 실정

나. 연구개발의 중요성

- 이 연구는 경화시간이 짧은 MgO계 세라믹 콘크리트를 활용하여 구조물의 보수시 공사 기간을 단축하고 즉각적인 보수가 요구되는 많은 현장에서 적용될 수 있음.
- MgO계 세라믹 콘크리트의 경우 한 시간에 25.3MPa, 세 시간 안에 30.3MPa 강도에 도달하고 28일 재령 강도는 41.3MPa로 높은 조기강도를 보임
- 또한 상온에서 경화되며, 작업시간을 조절할 수 있으며 임의 조건의 현장과 환경에서도 일정한 품질을 유지할 수 있고, 수분이 잔존한 곳에서도 작업이 가능
- 1차 경화 후 강도와 부착 성능이 지속적으로 증가되며 상대 물질의 수축율에 따라 수축율이 변하며 계면이탈현상이 없다는 장점이 있고, 특히 일산화탄소에 강하고 차량통행이 많은 도로 보수 재료로 사용하는 경우 콘크리트의 중성화 현상을 방지
- 이와 같은 특성을 가진 신보수재료의 개발로 다음과 같은 기술, 경제, 사회적 측면에서 그 연구개발의 중요성이 부각됨.

(1) 기술적 측면

▪ 신개념의 세라믹 콘크리트의 개발에 따른 건설기술 발전

- 기존의 수경성 시멘트를 활용한 콘크리트가 아닌 세라믹계 콘크리트의 개발에 따른 건설재료의 다양성 확보
- 시공환경에 따른 건설재료의 다각화를 통한 우수한 사회인프라 구조물의 안전성 확보
- 환경 (온도, 습도, 계절)에 영향을 최소화할 수 있는 건설재료의 개발
- 고강도 및 고내구성을 확보함으로써 건설구조물의 수명증대 및 내구성능 증진에 따른 기술력 제고

(2) 경제적 측면

▪ 쾌속 도로포장 및 유지보수공법의 혁신에 따른 경제적 이익

- 기존의 도로포장 및 유지보수공법에 비해 경제적 비용의 절감에 따른 경제적이익 증대 효과
- 초속경형 세라믹 콘크리트의 적용에 따른 시공기간 단축에 따른 작업속도의 가속 및 원활한 시공 가능
- 쾌속시공 및 보수에 따른 교통차단시간 단축에 따른 사회적 비용 절감

(3) 사회적 측면

▪ MgO계 세라믹 콘크리트에 의한 쾌속 포장시공 및 보수로 사회비용 저감

- 쾌속 포장시공 및 보수보강 기간의 단축에 따른 사회비용 절감
- 포틀랜드시멘트계 콘크리트 대비 우수한 환경 영향성으로 추가적인 사회비용 지출의 절감
- 보수보강 이후 추가적인 유지관리비용의 불필요

▪ 세라믹 콘크리트의 범용적 사용확대에 따른 국가적 이익증대

- 세라믹계 콘크리트의 확대사용에 따른 국가기술력 제고
- 초속경형 MgO계 세라믹 콘크리트의 개발에 따른 관련 건설재료에 대한 지적재산권 확보 및 신기술 정립에 따른 국가이익 증대

제2절 연구개발의 정의, 범위, 특징

1. 연구개발의 정의

- 본 연구에서는 MgO계 세라믹 결합재의 다양한 측면에서 이점을 활용함으로써 도로 포장의 쾌속시공 및 유지관리가 가능한 보수재료를 개발하고자 함.
- 경화시간이 짧은 MgO계 세라믹 결합재를 활용하여 구조물 및 도로 포장의 보수시 공사기간을 단축하고 즉각적인 보수가 요구되는 많은 현장에서 적용이 가능.
- MgO계 세라믹 결합재의 경우 3시간 이내에 30MPa 이상의 강도발현이 가능하며, 기존 개발된 보수재료에 대한 품질 규정인 3시간에 21MPa보다 **높은 조기강도**를 나타냄.
- 또한 상온에서 경화되며, 임의 조건의 현장과 환경에서도 일정한 품질을 유지할 수 있어 **시공 환경과 관계없이 시공이 가능**함.
- 1차 경화 후 강도와 부착 성능이 **지속적으로 증가**되며 상대 물질의 수축율에 따라 수축율이 변하며 계면이탈현상이 없다는 장점이 있고, 특히 일산화탄소에 강하고 차량통행이 많은 도로 보수 재료로 사용하는 경우 콘크리트의 중성화 현상을 방지하는 등의 **내구성능이 우수**함.
- 이와 같이 MgO세라믹 계열 결합재의 다양한 측면에서의 이점을 그림 1.9와 같이 나타내며, 이러한 우수한 성능을 효율적으로 활용하기 위하여 **도로포장에서의 신보수재료로 개발 및 적용**하고자 함.



그림 1.9 MgO계 세라믹 결합재의 이점

2. 연구개발의 범위

- 본 연구의 목표는 도로포장의 쾌속시공 및 유지관리를 위해 국내 현장 적용이 가능한 MgO계 세라믹 결합재 개발로 이를 달성하기 위하여 기초물성시험을 기반으로 한 최적배합비 산정 및 내구성능 검증 등을 포함하여 그림 1.10과 같이 총 4단계로 연구가 진행되었으며, 세부 내용은 다음과 같음.

1. MgO계 세라믹 결합재의 구성비 정립

- MgO의 함량 및 결합재 중 첨가물(인산칼륨, 지연제(Borax))의 혼입율에 따른 응결시간 평가
- MgO의 함량 및 결합재 중 첨가물(인산칼륨, 지연제(Borax))의 혼입율에 따른 강도성능 평가

2. MgO계 세라믹 결합재의 최적배합설계

- MgO의 함량 및 결합재 중 첨가물(인산칼륨, 지연제(Borax))의 혼입율에 따른 응결시간 및 조기(시간별)강도 평가를 통한 작업시간, 조기교통개방을 동시에 만족시킬 수 있는 최적배합비 산정

3. MgO계 세라믹 결합재의 내구성능 검증

- MgO계 콘크리트의 동결융해 및 염소이온침투 저항성 평가와 공극분포의 정량적인 산정으로 내구성능을 검증

4. MgO계 세라믹 결합재 사용시 경제성 검토

- 기존 보수보강 재료 대비 MgO콘크리트 사용에 따른 경제성 비교·분석

5. MgO계 세라믹 결합재 도로포장 및 보수보강 적용시 품질관리 및 시공법 정립

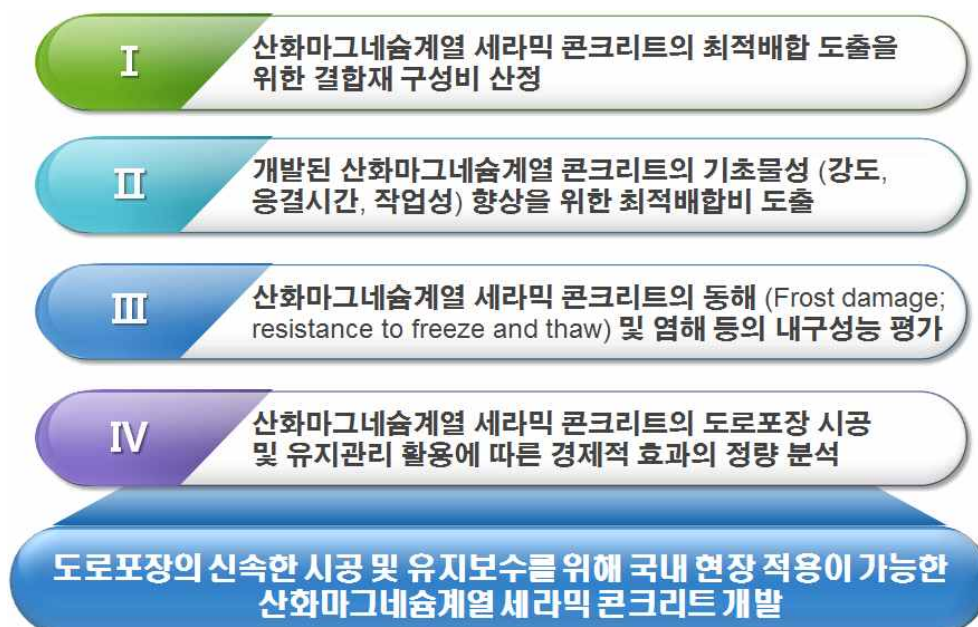


그림 1.10 최종목표를 위한 단계별 연구내용 및 범위

- 세부 연구목표에 따라 단계별 주요 연구내용을 살펴보면 다음 그림 1.11과 같으며 총 2년에 걸쳐 진행되었으며, 1차년도에서는 MgO계 세라믹 계열 결합재에 대한 응결 및 강도 특성에 따른 최적배합 선정을 목표로 하였고, 2차년도에서는 선정된 최적배합비를 활용하여 실제 보수재료로의 적용시 구콘크리트와의 부착성능 및 내구성능과 경제성 분석을 검토하고자 하였음.

	연구 목표	주요 연구 내용
1 차 년 도	산화마그네슘계열 세라믹 결합재의 구성비 정립	▪ MgO의 함량에 따른 초기강도 발현속도 특성 분석 ▪ 세라믹 결합재 중 첨가물 (플라이애쉬, 메타카올린, 실리카흄)의 조정에 따른 강도발현 특성 분석 ▪ 산화마그네슘계열 세라믹 콘크리트의 응결속도 조절을 위한 결합재 구성비와의 최적배합비 도출
	산화마그네슘계열 콘크리트의 최적 배합설계	▪ 산화마그네슘계열 콘크리트의 유동성, 응결시간 특성 분석 ▪ 산화마그네슘계열 콘크리트의 강도발현, 부착강도 (기존 콘크리트 및 아스팔트와의 접착력) 특성 분석
2 차 년 도	산화마그네슘계열 콘크리트의 내구 성능 검증	▪ 산화마그네슘계열 세라믹 콘크리트의 동결융해 저항성 평가 ▪ 산화마그네슘계열 세라믹 콘크리트의 염소이온 침투 저항 특성 평가 ▪ 산화마그네슘계열 세라믹 콘크리트의 공극분포의 정량적 산정
	산화마그네슘계열 콘크리트의 사용시 경제성 검토	▪ 기존 포장재 및 보수보강비용 대비 산화마그네슘계열 콘크리트 사용에 따른 경제성 분석 ▪ 개발된 산화마그네슘계열 콘크리트의 현장적용성 평가

그림 1.11 세부연구목표별 주요연구내용

3. 연구개발의 특징

- 본 연구는 조기강도 발현이 우수하고 경화속도가 빠른 MgO계 세라믹 결합재를 도로 포장 보수재료로 적용함으로써 보수공사 시공시 조기교통개방을 유도하고, 성능이 우수한 보수재료로 활용하고자 함.
- 이와 같이 조기강도 발현이 우수한 MgO계 세라믹 결합재를 실제 현장의 작업성 확보를 위하여 일정시간 이상의 응결시간이 요구되며, 이를 위해 MgO와 인산칼륨의 혼입 비율 및 기존 문헌을 통하여 지연제(Borax)를 사용하였으며, 다음 그림 1.12의 결합재 구성비에 따른 응결시간 특성에 대한 분석이 요구됨.
- 또한 조기강도 확보를 위하여 MgO계 세라믹 결합재에 대한 시간별 압축강도 특성을 분석하고, 조기교통개방을 위해 기존 개발 보수재료에 대한 규정인 채령 3시간 21MPa 과의 비교를 통하여 우수한 경화속도를 입증
- 이와 같은 조기강도 발현에 대한 검증을 위하여 미세구조 분석을 수행하였으며, 기존 OPC와 MgO계 세라믹 결합재의 공극구조를 비교·분석함으로써 강도 발현 및 내구성능을 보다 정량적으로 규명
- MgO계 세라믹 결합재를 보수재료로의 활용하기 위하여 부착성능이 입증되어야 하며, 구콘크리트(OPC)와 동일한 OPC와의 부착강도와 구콘크리트(OPC)와 MgO계 세라믹 결합재의 부착강도 및 부착계면의 미세구조 비교·분석을 통하여 MgO계 세라믹 결합재의 우수한 부착성능을 검증
- 또한 MgO계 세라믹 결합재를 현장에 적용하기 위해 환경인자(동결융해 및 염소이온 침투)에 대한 내구성능이 검증이 되어야 함.
- 상기와 같은 우수한 MgO계 세라믹 결합재를 실제 현장에 적용하기 위해서는 기존 개발된 보수재료와의 경제성이 확보되어야 하며, 기존 개발 재료와의 성능을 기반으로 한 경제성을 비교·분석함.



그림 1.12 MgO계 세라믹 결합재의 구성

제3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황

1. 국내 기술 및 산업 동향

가. 국내 관련 신기술 및 특허 현황

- 최근 연구개발 관련 기술은 다양하게 진행되어지고 있으며, 조기강도 확보에만 치중되어 있어 조기강도가 확보될 경우 기존 재료와의 이질적인 거동으로 인하여 2차 손상의 발생이 우려됨. 본 연구개발 재료의 경우 1차 경화 후 강도와 부착 성능이 지속적으로 증가되며 상대 물질의 수축율에 따라 수축율이 변하며 계면이탈현상이 없다는 이점이 있으며, 또한 별도의 프라이머층 시공이 필요하지 않아 시공성 및 경제성 부분에도 이점이 있고, 또한 경제성에 비하여 우수한 조기강도 및 내구성능 확보가 가능함.

신기술 번호	지정 년도	신기술명	한계
468	2005	노후화된 아스팔트 포장 유지보수를 위한 신속개방형 콘크리트 채우기(In-ray) 공법	▪ 조기강도 확보에만 치중되어 장기강도 저하 우려 ▪ 아스팔트와 재료의 이질적인 거동으로 조기열화우려
495	2006	무기계 혼화재료와 친수성 마이크로 폴리비닐알코올 섬유가 혼입된 콘크리트를 이용한 신설 교량용 교면포장 공법	▪ 프라이머층 코팅 시공단계로 인한 작업성이 떨어짐. ▪ 조기강도 확보에만 치중 ▪ 재료단가가 높아 경제성 저하
499	2006	보수성재료와 강도발현 증진재를 혼합한 시멘트페이스트를 이용한 보수성 반강성 포장 공법	▪ 조기강도 확보 미흡으로 인한 교통통제로 보수시 안정상의 문제 및 시공기간증가 ▪ 내열도 및 내화학적성 낮음
547	2007	전기로슬래그 골재와 상온 유화아스팔트 혼합물을 사용하여 공용중인 아스팔트콘크리트 포장 표면처리 시공 기술	▪ 아스팔트와 재료의 이질적인 거동으로 조기열화우려 ▪ 외부 환경에 의존성이 높음
562	2008	고탄성 아크릴콘을 이용한 교량 바닥판 보수 및 방수, 체류수 배수 포장보수공법	▪ 프라이머층 코팅 시공단계로 인한 작업성이 떨어짐. ▪ 재료단가가 높아 경제성 저하
607	2010	도로 콘크리트 포장 슬래브에 프리스트레스를 도입하고 갭슬래브 및 아모조인트를 이용한 포스트텐션 콘크리트 포장 공법	▪ 높은 점도로 인한 작업성이 떨어짐 ▪ 외부 환경에 의존성이 높음 ▪ 내충격성과 내열도가 낮음 ▪ 장기 투수성으로 강성 저하 우려
637	2011	MCBP를 이용하여 초속경 아크릴계 폴리머 개질콘크리트 제조와 이를 활용한 접착식 시멘트 콘크리트 덧씌우기 공법 (PROCON공법)	▪ 프라이머층 코팅 시공단계로 인한 작업성이 떨어짐. ▪ 높은 점도로 인한 작업성이 떨어짐 ▪ 높은 경화수축으로 인한 피착제에 대한 부착성 영향이 큼

나. 콘크리트 도로 포장 시공/유지 관리 공법 현황

- 콘크리트 포장 분야에서는 시멘트 대체 재료로서 폴리머를 적용하기 위한 연구가 많이 이루어지고 있음. 한국도로공사의 “스마트하이웨이 사업단”에서는 폴리머콘크리트를 교면 포장에 활용하는 연구를 추진 중에 있으며, 이와 관련한 시험 포장 등을 수행한 사례가 있음.
- 이병철 등은 관교 부근의 부체도로에 1995년 7월경에 RCCP(롤러전압 콘크리트포장)를 표층에 설치. 보통 고속도로의 부체도로, 농로 등 이설도로 포장은 시멘트 콘크리트 포장으로 인력 시공하므로 시공성의 문제와 공사비 증가의 원인이 되고 있어 롤러 전압 콘크리트 포장공법이 그 대안으로 연구됨.
- 안무연 등은 마그네시아 시멘트와 제1인산암모늄(Mono-ammonium phosphate, 이후 MAP)을 이용한 보수용 초속경 모르타르의 특성에 대한 연구가 진행되어짐.
- 신현관 등은 접착력과 내마모성이 강하고 조직이 치밀하여 내구성이 우수할 뿐만 아니라 수중작업에서도 접착 및 경화 특성을 갖는 세라믹 메탈제를 이용하여 노후화된 수중콘크리트 구조물에 보수재 및 보수공법의 적용성을 검토하였으나 수중불분리성콘크리트에 비하여 낮은 부착강도를 나타냄.

2. 국외 기술 및 산업 동향

가. 국외 관련 보수재료현황

- 국내외적으로 도로포장의 보수작업에 이용되고 있는 대표적인 보수재료들은 크게 시멘트 계열의 일반 시멘트 콘크리트와 폴리머 시멘트 콘크리트, 폴리머 계열의 폴리머 콘크리트와 라텍스 개질 콘크리트로 분류됨.
- **시멘트 계열의 일반 시멘트 콘크리트 (Ordinary Portland Cement Concrete)**는 활용하기에 가장 용이한 보수재료라고 할 수 있으나 대기온도 $4^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ 내에 타설이 이루어져야하며 도로포장 보수를 위해서는 타설 온도를 고려해야함은 물론 양생제를 살포해야하므로 현장의 작업성은 비효율적이고, 타설 후 장시간의 양생시간을 필요로 하는 한계점을 갖고 있어 신속한 도로포장의 단면복구에 부적합한 것으로 보임.
- **폴리머 시멘트 콘크리트 (Polymer Cement Concrete)**는 일반 시멘트 콘크리트에 폴리머를 결합한 복합체이며, $5^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ 의 온도 범위 내에서 타설 가능하며 최소 24 시간 동안 양생을 진행하고 양생 후 압축강도 21MPa 이상의 결과를 만족할 때 교통개방을 하지만 폴리머 재료의 특성상 직사광선에 노출된 상태로 대기온도가 30°C 이상의 경우 시공이 불가능하여 시공성 및 사용성 부분에서 제한적임. 또한 본 연구개발 재료와 양생시간 3시간과 비교하여 다소 긴 양생시간이 요구됨.
- 그와 더불어 폴리머 콘크리트 (Polymer Concrete)는 시멘트를 사용하지 않고 폴리머를 결합재로 사용하여 골재와의 결합력을 높여 수밀한 미세구조로 내약품성, 내마모성에 우수하지만 폴리머 재료 자체가 가연성의 성질을 갖고 있어 내화성 및 내열성에 취약한 단점.
- **라텍스 개질 콘크리트 (Latex Modified Concrete, LMC)**는 보통 콘크리트에 라텍스 resin을 혼합한 재료로 교면포장에 주로 사용되고 있으며, 라텍스 resin은 시멘트에 필름막을 형성하여 수밀성, 방수성을 높여 내구성에 뛰어난 반면 고가재료로 분류되며 타설 시 대기온도에 따라 재료의 물성 변화가 심해 시공관리에 결점을 가짐. 또한 라텍스 개질 콘크리트는 최소 14일 이상이라는 장기간의 양생시간이 요구되므로 긴급보수용으로 사용하기에는 문제가 있어 라텍스를 첨가함에 따라 재료의 내구성능은 확보하였지만 쾌속시공을 위한 현장적용에는 불리한 단점을 가짐.
- 이와 같이 국내외적으로 개발된 보수재료와 본 연구에서 개발된 보수재료에 대한 재령에 대한 강도를 그래프화하고 각각의 재료에 대하여 본 연구에서 개발된 재료와의 차별성을 그림 1.13과 같이 표현.

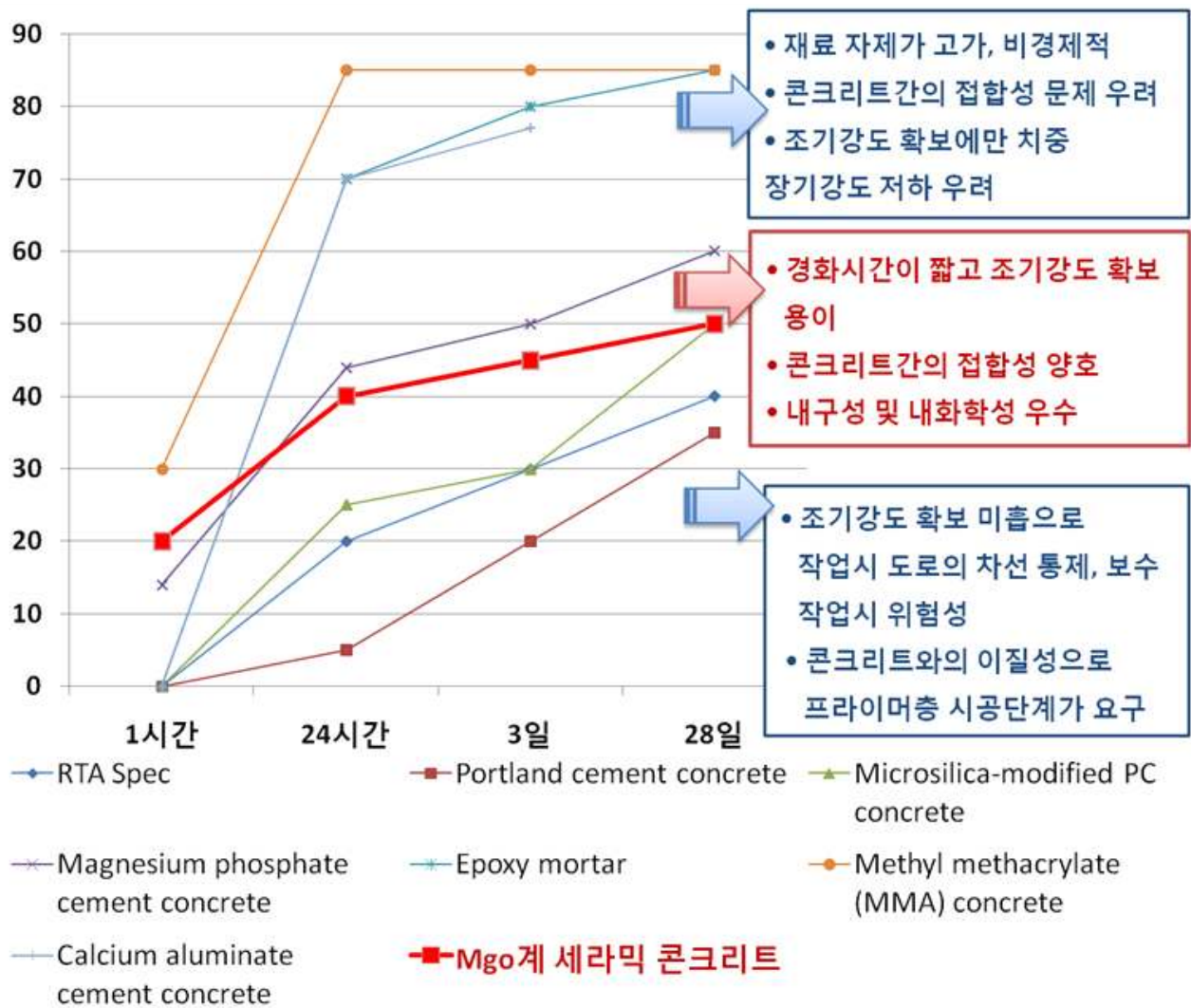


그림 1.13 국외 관련 보수재료와 MgO콘크리트와의 비교

나. 국외 관련 보수공법현황

- 국외의 보수공법은 크게 재시공, 새포장, 덧씌우기, 차선헌장 등 4가지 종류의 보수 공법을 적용하고 있으며, 이와 같은 공법은 수일의 시공기간이 소요되며 이에 따라 경제성이 저하됨

포장형태	시공두께	시멘트 종류	실란트	양생방법	지역
재시공	25~30cm	1종	Silicone	blankets, compounds	Shelby country
			Hot Pure	blankets	N/A north-C
			-	compounds	Friendswood
		3종	Silicone	blankets	Grandrapids
			Hot Pure	blankets	Northumberland
				blankets, compounds	Seattle
			-	blankets, compounds	Debar rapid Cedar rapid
				-	Kalamazoo wyoming
새포장	23~28cm	1종	Hot Pour	compounds, plastic	Denber
			Silicone	blankets, compounds	Glasgow
			-	compounds	Harris county
		3종	abrasive compress	compounds compounds	US Hwy 81 Rawling
덧씌우기	9~15cm	1종	-	-	Southfield
		2종	-	blankets	Northampton
		3종	다양	blankets, compounds	Route 110
			Hot Pour	compounds, poly-E	Coopercounty
			-	-	Dundee
차선헌장	23cm	3종	silicone	blankets	From creyts

3. 특허 동향

특허번호	지정년도	특허명
1020050107788	2005	초속경화형 도로 보수재(Fast Harden Type a Road Repair Material)
2020050003587	2005	도로균열 보수용 테이프(A Road Repairing Tape)
1020060111685	2006	아스팔트 도로 보수제 및 그 제조방법(The Asfalt road surface reforming compositoin and method thereof)
1020050133860	2006	상온 습기 경화형 폴리우레탄 바인더 조성물과 그를 이용한 도로보수용 아스팔트 보수제 및 그의 제조방법
1020080105806	2008	폴리머 시멘트 콘크리트 조성물 및 이를 이용한 콘크리트 포장 보수공법(Polymer cement concrete composite and repairing method for concrete pavement using the concrete composite)

- 최근 들어 우리나라는 도로 포장의 중요성을 인식하여 연구를 추진하기 시작함. 기술이 발전되기 위해서는 기본적으로 제도적 측면의 개선, 실무에서 기술을 실시하기 위한 국가 기준 및 지침 등 제정, 실무에서 실제로 업무를 추진하기 위한 인력들의 기술 수준 향상, 그리고 포장 업계의 기술 수준 향상 등이 동시에 이루어져야 함

4. 정부지원정책 현황

가. 관련법령, 정부 정책 및 담당기관

- 콘크리트 포장 분야에서는 시멘트 대체 재료로서 폴리머를 적용하기 위한 연구가 많이 이루어지고 있음. 한국도로공사의 “스마트하이웨이 사업단”에서는 폴리머콘크리트를 교면 포장에 활용하는 연구를 추진 중에 있으며, 이와 관련한 시험 포장 등을 수행한 사례가 있음.
- 이병철 등은 판교 부근의 부체도로에 1995년 7월경에 RCCP(롤러전압 콘크리트포장)를 표층에 설치. 보통 고속도로의 부체도로, 농로 등 이설도로 포장은 시멘트 콘크리트 포장으로 인력 시공하므로 시공성의 문제와 공사비의 증가의 원인이 되고 있어 롤러 전압 콘크리트 포장공법이 그 대안으로 연구됨.
- 안무연 등은 마그네시아 시멘트와 제1인산암모늄(Mono-ammonium phosphate, 이후 MAP)을 이용한 보수용 초속경 모르타르의 특성에 대한 연구가 진행되어짐.
- 신현관 등은 접착력과 내마모성이 강하고 조직이 치밀하여 내구성이 우수할 뿐만 아니라 수중작업에서도 접착 및 경화 특성을 갖는 세라믹 메탈제를 이용하여 노후화된 수중콘크리트 구조물에 보수제 및 보수공법의 적용성을 검토하였으나 수중불분리성콘크리트에 비하여 낮은 부착강도를 나타냄.

나. 정부지원 정책사업 종류와 현황

과제명	기간	주관	금액
폐콘크리트 분말을 흙도로포장 재료로 활용하기 위한 건설폐기물 재활용 촉진기술 개발	2003.12.30.~2004 .12.29.	한양대학교 문한영	1억9천
포장가속시험을 활용한 아스팔트포장 신재료 적용방안 연구(공용성 평가를 중심으로)	2004.07.20.~2006 .07.19.	한양대학교 산학협력단(안산)	3억9천
장수명 친환경 도로포장 및 설계시공기술 개발	2005.06.30.~2010 .09.7.	도로공사 도로교통 연구원	173억
아스팔트포장 종방향 파손의 최소단면 보수공법 개발	2006.12.20.~2009 .12.16.	(주)도화종합기술공사	11억8천
MMA수지를 이용한 보수 및 방수, 포장공법	2008.07.25.~2008 .10.24.	다길산업(주)	4천5백
산업부산물(슬래그 및 황목사)을 활용한(기능성) 깔라 반강성 자전거 도로 포장재의 개발	2009.12.30.~2011 .08.12.	(주)두영티앤에스	3억4천

5. 종합 결론

- 최근 들어 우리나라는 도로포장의 중요성을 인식하고 연구를 추진하기 시작하고, 도로 포장에 투자되는 국가 예산 비용이 연 2~3조 이상이 되며, 도로 포장으로 인한 이용자의 편의성 증대, 간접비용의 축소를 위한 노력으로 연구 활성화 분위기가 조성되고 있음.
- 이에 따라 정부는 스마트하이웨이 등 관련 연구를 통해 도로정보의 공유 및 신속한 전달을 추진하고 있으며, 이를 통한 이용자의 편의성을 최대한 증가시키고자 함. 그러나 신속한 보수 및 보강기술이 현재 미흡하므로 이에 따른 이용자의 편의성 증대는 한계적임.
- 정부가 기존 포장의 문제점을 개선하고 고기능성 및 안전성 제고 분야를 국가 전략사업으로 인식하고 육성을 추진하고 있어서, 본 기술은 이러한 국가 정책을 충족시키는 소요기술로 기여
- 다기능적이고 고성능의 신공법 및 신재료에 대한 연구개발로 도로 이용자들의 편의성 및 안정성을 제공하고, 고성능의 재료 사용으로 잦은 유지보수에 대해 경제적 손실을 방지
- 국외에서는 성공적으로 적용되고 있지만 국내에서는 아직 정착하지 않거나 추가 연구가 필요한 신공법, 신재료의 연구를 적용하고, 이를 통하여 이용자의 발전된 도로 기술에 대한 신뢰 회복
- 국내 도로 포장 유지 보수기술의 확보 및 안정화로 다양한 형태의 도로 포장 관련 기술 개발을 통해 도로 포장 관련된 선진국 내열에 합류 가능

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

제1절 연구수행 전략 및 방법론

1. 연구수행 전략 및 방법론

국내의 고속도로 콘크리트의 설계예상수명은 통상적으로 20년이며, 단순한 수치 측면에서는 주요 고속도로 설계수명의 한계에 이르고 있는 실정이다. 이에 따라 콘크리트 포장의 유지보수와 확장포장공사가 크게 증가하고 있으며, 이런 증가추세에 따른 시공시 차선 감소로 인한 사용자 비용도 크게 증가하고 있는 추세이다. 또한 최근 개발되어지고 있는 보수재료 및 보강공법의 경우 보수재와 구 콘크리트 간의 이질적인 거동으로 인한 조기 열화 및 2차 재 파손의 우려가 있으며, 보수 작업시 도로의 차선 통제, 작업시 발생하는 위험한 작업방식 등의 문제를 해결하기 위한 조기강도 확보에만 치중되어 있어 장기강도 저하가 발생되고 있는 실정이다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 완전 무기계인 산화마그네슘과 인산칼륨의 복합체를 활용하여 산화마그네슘 계열 세라믹 결합재를 개발하고자 한다. 이에 따라 기존 문헌 고찰을 통하여 사용 가능한 산화마그네슘의 순도 및 화학성분에 대한 고찰을 실시하고, 세라믹 계열의 결합재로 가능한 인산염의 종류에 대한 평가를 하였다. 또한 국내 보수재료로의 적용이 가능한 배합비를 설정하기 위해 국외 관련 연구에 대한 문헌 고찰을 통하여 배합비율의 범위를 결정하였다. 결정된 범위에 대한 조기교통개방을 위한 초기압축강도와 작업시간 확보를 위한 응결시간 특성을 분석하여 이를 기반으로 최적배합비를 산정하였으며, 이와 같은 경화특성에 대한 미세구조확인을 위하여 공극특성분석(MIP)을 실시하였다. 이와 같이 설정된 산화마그네슘계열 세라믹 시멘트에 대한 최적배합비를 이용하여 교통개방을 위한 3시간 압축강도를 측정하였으며, 현장에 적용이 가능한 보수공법에 적합한 재료로의 시험을 수행하였다. 기본적으로 구콘크리트간의 부착강도 시험을 수행하였으며, 산화마그네슘계열 세라믹 시멘트의 경우 표면처리 및 프라이머층의 시공이 요구되지 않으며 비교를 위하여 OPC와 비교·분석을 실시하였다. 또한 외기 환경인자에 대한 내구성능 검증을 위하여 염화물 확산계수 시험과 동결융해저항성 시험을 실시하였다. 또한 보수재료로의 적용성을 확인하기 위하여 마찰계수시험 및 경제성 분석을 수행하였으며, 경제성 분석의 경우 최근 개발되고 현재 현장에 주로 사용되고 있는 LMC재료와의 비교 분석을 하였다. 이와 같은 연구수행은 총 2년으로 구성되어있으며, 연도별 연구수행 범위는 다음 그림 2.1과 같다. 결론적으로 본 연구에서는 도로포장 보수재료로의 적용을 위한 산화마그네슘계열 세라믹 시멘트 모르타르의 특성을 일반 시멘트 모르타르와 비교분석하여 그 성능을 평가하였다. (1) 먼저 관련 기존 문헌고찰을 통한 산화마그네슘과 인산염 비, 물 바인더 비, 잔골재율을 기반으로 응결시간 및 강도 특성을 평가하여 최적배합비를 설정하고 (2) 최적배합비에 대한 응결 시간과 시간 별 압축강도 측정 및 그 결과에 따른 조기강도특성, (3) 염소이온 침투저항성과 급속 동결융해 저항성 실험을 진행하여 내구성능을 평가하였으며 (4) 경제성 분석을 통한 도로포장의 신속한 단면복구를 위한 보수재료의 적용성을 판단하였다.

산화마그네슘계열 시멘트의 보수재료로의 적용성 평가

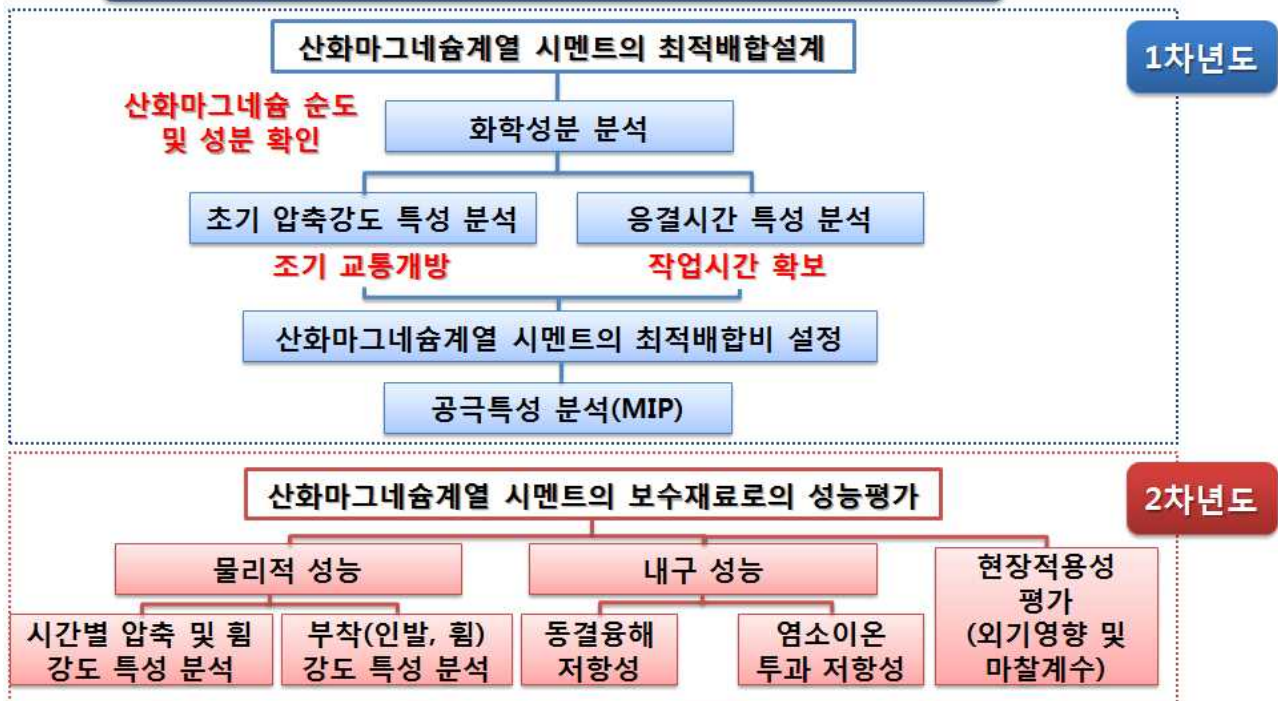


그림 2.1 연도별 연구수행 범위 및 구성

제2절 연구수행과정 및 내용(이론적, 실험적)

1. 관련 연구 문헌 조사

가. 국내외 관련 문헌 조사

국내외의 문헌 조사 결과, 산화마그네슘계열 세라믹 시멘트에 대한 연구는 짧은 응결시간과 더불어 조기강도발현에 대한 내용을 포함하고 있다. 이는 산화마그네슘 콘크리트 재료의 조기강도특성에 대한 비중이 크다는 것을 내포하고 있다. 이에 따라 콘크리트 구조물 또는 콘크리트 포장도로의 보수재료에 대한 연구문헌들을 조사·분석하였다. 그림 2.2와 같이 산화마그네슘계열 세라믹 시멘트의 물성에 가장 큰 영향을 미치는 인자로는 산화마그네슘과 인산염의 혼입율, 물 바인더(산화마그네슘, 인산염, 지연제 등)비, 지연제의 혼입율로 크게 세 가지로 나눌 수 있다.

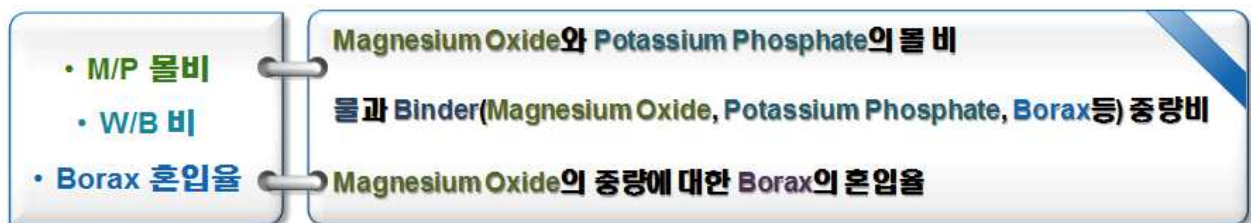


그림 2.2 산화마그네슘계열 세라믹 시멘트의 물성에 영향을 끼치는 주요 인자

안무영(2008)의 연구에 따르면 마그네시아 시멘트는 마그네사이드(탄산 마그네슘) 또는 해수의 수산화 마그네슘을 소성한 경소(輕燒) 마그네시아와 염화 마그네슘을 혼합하여 경화시킨다. 경화체로 하여 황산 마그네슘 및 산성 황산 마그네슘(황산 수소마그네슘)이 사용되고 있다. 이 시멘트는 응결경화가 빠르고 강도가 크며, 모체와의 부착성이 우수하나 내수성이 나쁜 단점이 있다. 또한 결로되기 쉽기 때문에 건설재료로의 이용은 목도 보드나, 인조석 등 극히 제한된 곳에 사용되고 있다. 또한 연료로의 내열재(내화물)로 제철소나 화력발전소에 이용되고 있다.

한편, 인산 시멘트는 인산과 각종 금속산화물 또는 규산염 등을 조합하여 쓰고 있으며 최근 칼슘염과 금속화합물과의 조합을 하여 파인 세라믹스의 용도로도 사용되고 있다.

시멘트 재료로 사용되고 있는 마그네시아는 광산바닥에서 채굴되는 마그네사이드를 소성한 것과 해수로부터 분리 회수하여 소성된 것(해수 마그네시아)이 있고, 현재 국내에서 생산되는 마그네시아의 경우 해수 마그네시아가 대부분이다. 또한 마그네시아의 소성온도는 경화속도에 크게 영향을 미치고, 소성온도로부터 800~900℃로 소성된 경소(輕燒) 마그네시아와 1,600℃이상에서 소성되는 경소(硬燒)마그네시아로 분류되고 있다. 마그네시아 시멘트에서는 저온에서 구운 경소(輕燒) 마그네시아가 쓰이고 있으며, 경소(硬燒)마그네시아는 염화마그네슘과의 반응이 아주 늦기 때문에 사용되지 않고 있다.

또한, 단단한 경소(硬燒) 마그네시아는 내화재료로 사용되어 왔고, 인산염과의 혼합에서 반응하고 부정형 내화재 보수재료 이용되고 있다. 그러나 인산액과의 조합에서는 급격하게 반응하여 성형이 곤란하여 인산액으로 축합 인산염을 사용하여 중성화에 가깝게 사용

하고 있다. 건축현장에서 사용하는 것은 분말이고, 시공현장에서는 물을 넣어 혼합하는 것이 바람직하다. 또 하나의 주성분인 인산염은 분말로 할 필요가 있다. 이런 마그네시아와 제1인산암모늄을 물에 넣으면 매우 빠른 급결성을 나타낸다. 그러나 이런 상태에서는 작업이 불가능하고, 시멘트로 이용할 수 없기 때문에 이 급결성을 지연시킬 수 있도록 사전에 응결 지연제를 첨가할 필요가 있다고 보고되고 있다. 여기서 사용가능한 응결 지연제의 종류는 붕사($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)와 TTP(Tri Poly Phosphate) 2종류의 지연제를 일반적으로 사용하고 있다고 보고되고 있다.

또한 산화마그네슘과 인산암모늄을 사용한 연구는 J. Paceagiu(2008)에 의해 보고된 바 있으며, 여기서는 산화마그네슘 및 인산염을 활용하여 모르타르의 특성에 대한 실험을 수행하였으며, 여기서 사용된 인산염의 종류는 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 및 $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ (1:9)로 두 가지의 결합재를 혼합하였으며 필러로는 플라이애쉬, 굵은 잔골재(0.1~1mm)와 미립 잔골재의 비표면적($3560\text{cm}^2/\text{g}$)가 사용되었다. 실험 종류는 재령 1, 3, 24, 48, 168, 672시간에 압축강도 특성을 측정하였다. 그 결과는 다음 그림 2.3과 같이 나타내었다. 산화마그네슘을 활용한 모르타르의 경우 결합재와 관계없이 두 가지 모두 3시간에 20MPa이상의 강도 발현을 나타내었으며 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 및 $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ (1:9)의 결합재가 높은 강도를 나타내었다. 필러 종류에 따른 강도 특성은 굵은 잔골재를 필러로 활용한 경우보다 미립 잔골재를 활용한 경우 높은 강도를 나타내었으며, 미립잔골재의 경우 플라이애쉬와 유사한 수준의 강도 특성을 나타내었다.

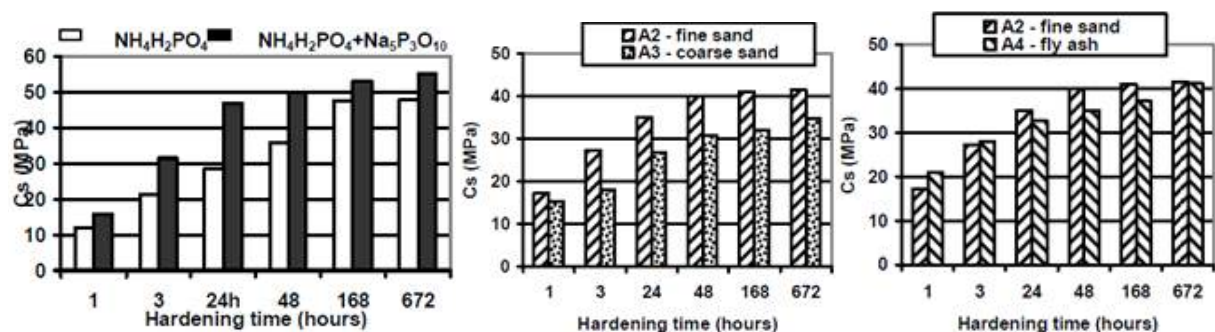


그림 2.3 산화마그네슘을 사용한 모르타르의 결합재 및 필러종류에 따른 압축강도 특성

Q. Yang(2000)의 연구에 의하면 산화마그네슘계열 세라믹 시멘트를 초속경 보수재료로 활용하고자 하였으며, 사용재료는 산화마그네슘(MgO), 인산암모늄($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), 플라이애쉬를 사용하였으며 지연제로는 붕사(Borax)를 사용하였다. 산화마그네슘과 인산염의 혼합 비율은 각각 화합물에 대한 분자량비인 몰비로 산정하였으며, 그 몰 비의 범위는 2~6까지 설정하고, 물 바인더(W/B)의 비는 0.09~0.12로 하였다. 또한 플라이애쉬를 0~15%까지 치환하여 시험을 수행하였다. 시험은 시간(재령)별 압축강도 측정을 하여 분석하였으며 그 결과는 다음 그림 2.4와 같다. M/P의 몰 비에서 MgO 의 혼합율이 높아질수록 높은 강도 발현을 하였으며, W/B비는 낮아질수록 높은 강도발현을 하였으며 그 차이가 0.01로 강도 발현 차이는 미미한 수준이다. 또한 플라이애쉬 치환율은 15%이상의 경우 강도가 낮아지는 경향을 나타내었다.

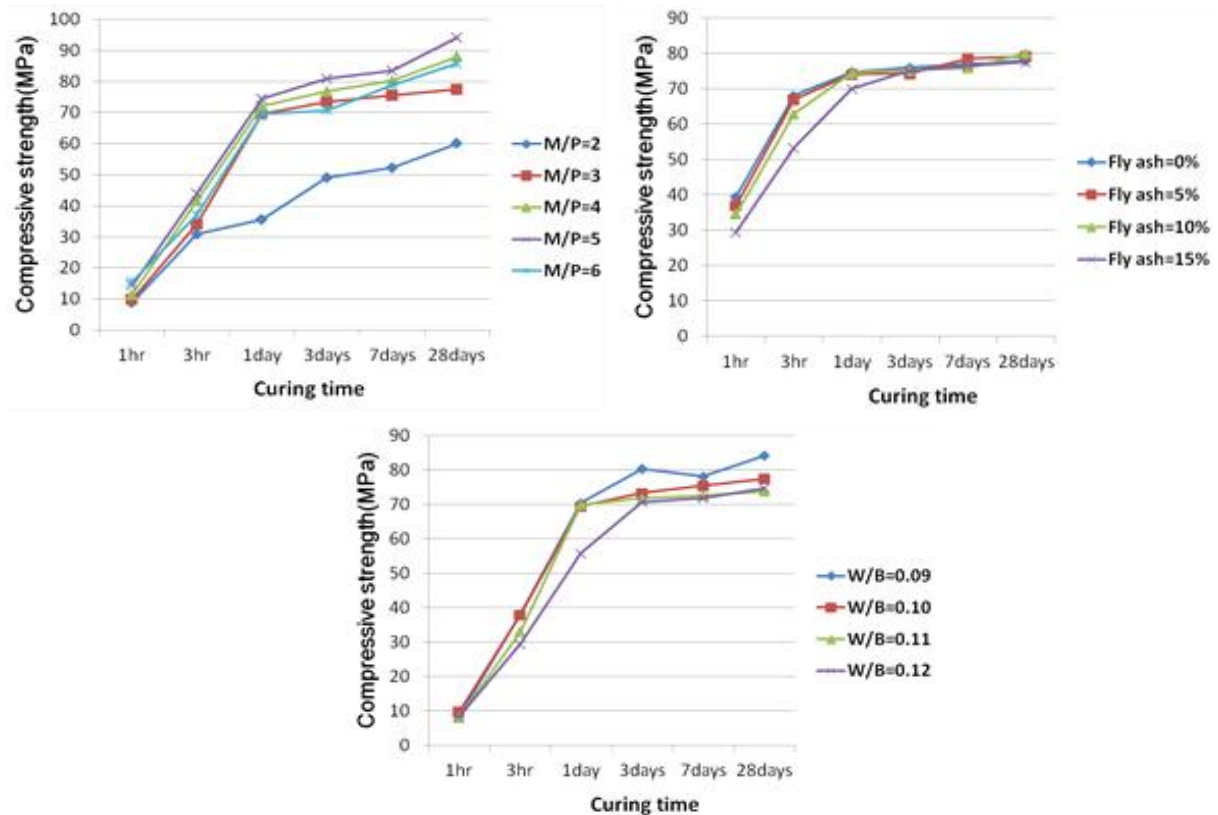


그림 2.4 M/P몰비, Fly ash 치환율, W/B비에 따른 재령별 압축강도 특성

F. Qiao와 연구자(2010)들은 산화마그네슘계열 세라믹 시멘트를 초속경 패치재료로 활용하기 위한 연구를 진행하였으며, 사용재료는 산화마그네슘(MgO), 인산칼륨(KH₂PO₄)를 사용하였으며 지연제로는 동일하게 붕사(Borax)를 사용하였다. 여기서는 인산염의 종류를 인산칼륨을 사용하였는데 이는 인산암모늄(NH₄H₂PO₄)를 사용할 경우 악취가 나는 등의 환경적 악영향을 제거하기 위한 것으로 보고된다. 변수로는 기본적으로 산화마그네슘과 인산염의 혼입비율은 각각 화합물에 대한 분자량비인 몰비로 산정하였으며, 범위는 6, 8, 10, 12의 혼입율에 따른 시험을 수행하였다. 이 연구에서는 패치 보수재료로 활용하기 위해 모르타르에 대한 실험을 하였으며, 잔골재율 또한 변수로 설정하였다. 잔골재율은 1, 1.5, 2를 변수로 하였으며, 시험은 압축강도, 휨 강도, 휨 부착강도, 인장부착강도 시험을 수행하였다. 휨 부착강도, 인장부착강도 시험에 대한 구성은 다음 그림 2.5와 같이 나타나며, JIS기준에 따라 시험을 수행하였다. 그 결과 잔골재비가 1.5인 경우 초기 압축강도 증진에 효과를 보임. 압축강도의 경우 M/P가 8이 가장 높게 측정이 되었으며, 휨 부착 강도의 경우 M/P가 8, 인장부착강도의 경우 M/P가 6인 경우 높은 부착강도를 나타내었다. 각 시험에 대한 결과를 다음 그림 ~ 에 나타내었다.

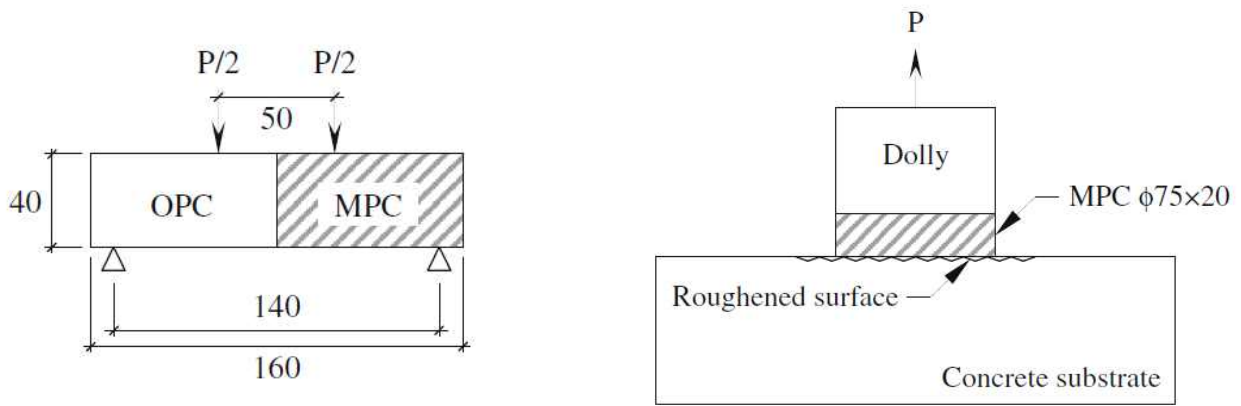


그림.

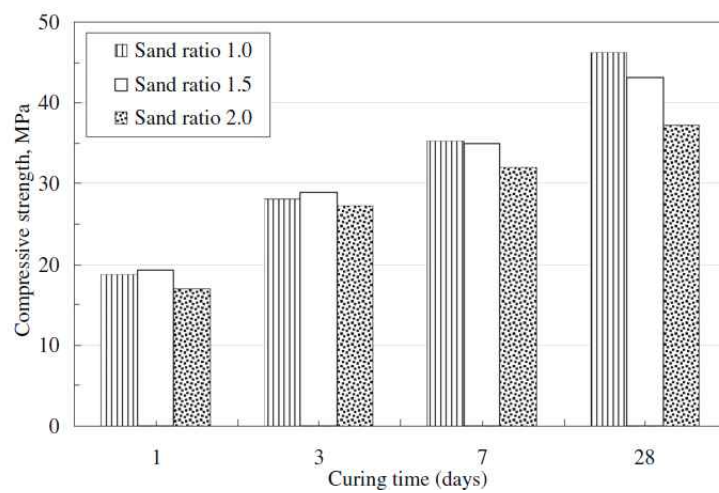


그림 2.5 잔골재율에 따른 압축강도 특성

또한 J. Li와의 연구자(2014)들의 보고에 의하면 응결시간의 결정은 산화마그네슘계열 세라믹 결합재는 지연제의 첨가비율에 따라 조절되어지며, 지연제(Borax) 혼입율에 따른 응결시간 측정 실험 진행 결과 지연제의 혼입율이 5%일 경우 타설 및 작업시간 등을 고려하였을 때 가장 적절한 시간이라는 결과가 보였으며 그 이상의 비율의 지연제를 첨가한 경우에는 오히려 응결시간이 감소하는 것으로 나타났다. 그 결과를 다음 그림 2.6 ~ 2.9에 나타내었다. 또한 J. Yang와의 연구자(2010)에 의하면 산화마그네슘계열 세라믹 결합재는 경화과정에서 응결시간을 조절하는 지연제를 5% 첨가하였을 시 압축강도와 휨 강도가 모두 10% ~ 12.5% 가량 증가하였고, 미세구조분석을 통해 지연제 혼입 여부에 따른 산화마그네슘 결합물의 결정이 다른 모양으로 형성되는 것이 원인이었음을 확인하였으며 이는 조기강도특성에도 영향을 주는 것으로 밝혀졌다. 산화마그네슘계열 세라믹 결합재의 경우 산화마그네슘의 순도에 따라 물성에 영향을 준다고 보고되고 있다.

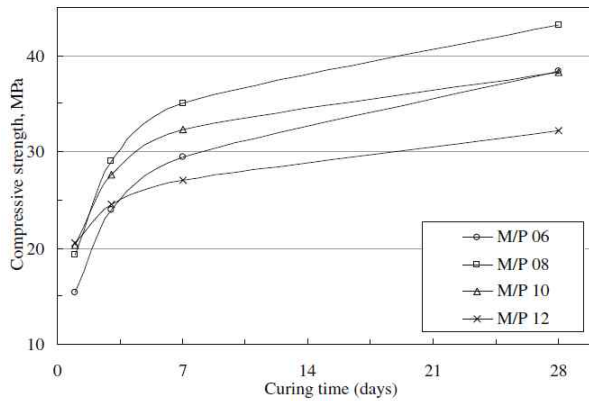


그림 2.6 M/P 물 비에 따른 압축강도 특성

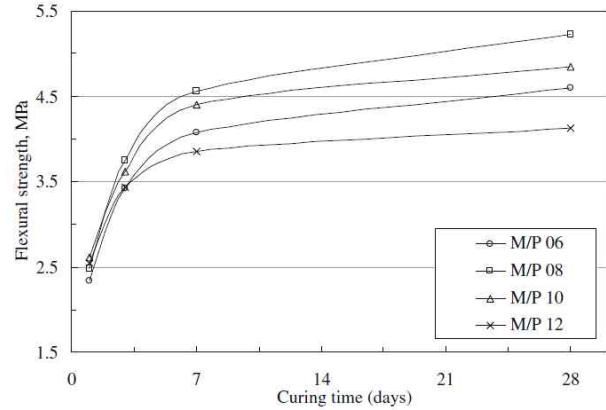


그림 2.7 M/P물 비에 따른 휨 강도 특성

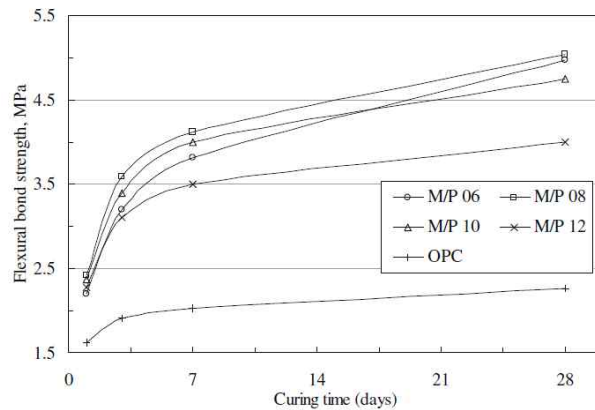


그림 2.8 M/P물 비에 따른 휨부착강도

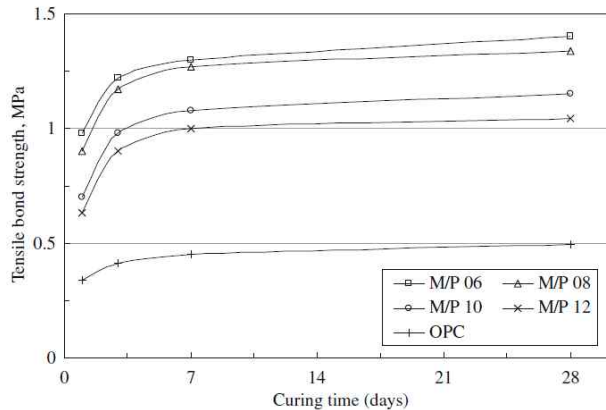


그림 2.9 M/P물 비에 따른 인장부착강도

F. Qiao와 연구자들(2010)의 연구에 따르면 산화마그네슘의 순도 및 플라이애쉬 혼입율을 변수로 하여 초기 압축강도 측정을 실시하였으며, 순도는 71.5, 89.5%로 설정하였다. 그 결과 다음 그림 2.10과 같이 나타내었으며, 플라이애쉬 혼입율 및 산화마그네슘의 순도가 증가할수록 강도 높은 것으로 확인되었다. 그리고 71.5%의 순도에서는 채령 1일 후에 20MPa 이상의 강도 발현을 하였으며, 또한 낮은 순도의 산화마그네슘의 경우 플라이애쉬를 혼용하여도 강도 저하가 낮은 것으로 확인되었다.

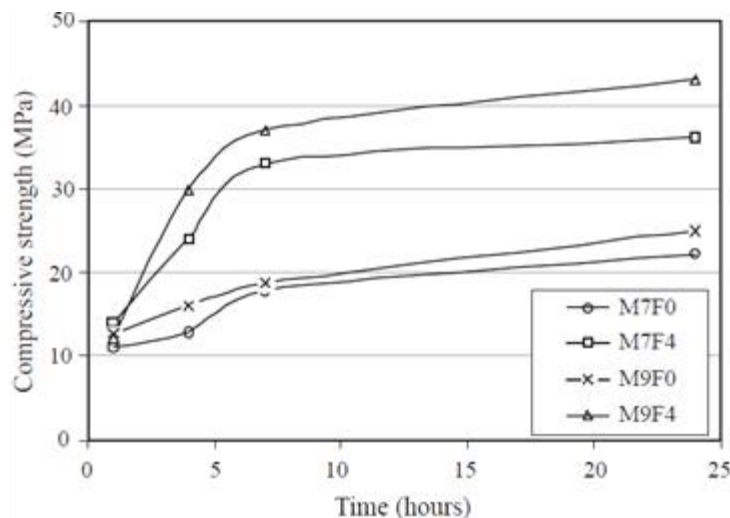


그림 2.10 산화마그네슘 순도 및 플라이애쉬 혼입율에 따른 시간별 압축강도 특성

나. 국내외 관련 문헌 조사 결론

- 산화마그네슘계열 세라믹 콘크리트의 경우 우수한 초기압축강도 특성을 보이고, 빠른 응결시간으로 보수재료로의 연구가 대부분
- 이와 같이 산화마그네슘 결합재의 경우 빠른 급결성을 가짐으로 응결 지연제의 사용이 요구되어지며, 일반적으로 붕사와 TTP가 사용되며, 결합재가 인산칼륨(KH_2PO_4)의 경우 붕사를 사용한 연구가 대부분
- 산화마그네슘 세라믹 콘크리트의 주요 구성성분은 MgO와 인산염이며, MgO의 경우 MgO의 순도에 따라 콘크리트의 물성에 큰 영향을 미치며, 최근 연구에 따르면 배합용기 부식 및 악취로 인한 환경적 악영향으로 인하여 인산칼륨을 주로 사용
- 또한 산화마그네슘 세라믹 콘크리트의 물성에 미치는 주요 인자로는 M/P물비가 가장 큰 영향을 미치며, W/B비, S/B비, Borax 혼입율 등이 있음.
- M/P물비의 경우 MgO의 비율이 증가할수록 우수한 성능을 나타내었으나, M/P물비가 8 이상이 될 경우 그 강도 증진율이 현저히 낮아지는 양상을 나타내며 부착강도의 경우 M/P 물비가 6~8에서 가장 우수한 성능을 나타냄.
- 기존 연구 문헌에 따르면, W/B비의 경우 0.15, S/B 비의 경우 1~1.5, 압축강도 발현을 위한 적정 치환율로 연구됨.
- 이와 같은 기존 문헌을 통하여 변수에 대한 범위를 설정하였으며, 국내 현장에서 적용하고 M/P의 물 비는 현장 실무자들의 이해와 활용도를 높이기 위하여 중량비로 치환하여 산정하였으며, 변수는 M/P비를 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, W/B비는 14, 16, 18, 20, 22%로 하고, 지연제의 혼입율은 0, 5, 7.5, 10%로 설정하여 최적배합비 도출을 위한 기초시험을 수행하였음. 또한 잔골재율은 경제성 부분을 고려하여 2.0으로 고정하였음.

2. 연구 내용

가. 실험개요

본 연구에서는 완전 무기계인 산화마그네슘과 인산칼륨의 복합체를 활용하여 산화마그네슘 계열 세라믹 결합재를 개발하고자 한다. 상기의 복합체는 다음 표 1과 같이 5단계 화학적 반응으로 진행되며, Magnesium phosphate ceramics는 1940년대에 처음으로 개발되었으며 이후 유럽과 미국에서 산화마그네슘과 phosphoric acid 또는 phosphorous pentoxide (P_2O_5)가 반응을 통해 형성되는 복합물에 대한 연구가 진행되어 왔다. 연구 결과 복합결과물의 특성은 아주 빠르게 경화되어 작업 가능시간의 부족으로 이어졌다. 또 물에 녹는 수용성의 성질을 갖고 있어 구조 재료의 적용에는 한계가 있는 것으로 나타났다. magnesium oxide와 다양한 phosphate acid의 결합에 대한 많은 실험적 연구가 진행되었는데 대표적으로 hydrogen (H), ammonium (NH_4), potassium (K) 종류의 결합에 대한 연구가 많이 진행되었다. 대표적인 결합 인자들의 화학반응은 다음 표 2.1과 같이 나타내었으며, 이 중에서도 이 전에는 암모늄과의 결합에 대한 연구가 더 각광받았으며 중점적인 주제였지만 산화마그네슘과 인산암모늄의 화학적인 반응 과정에서 많은 양의 암모니아가 방출되어 인간에 해로운 영향을 주는 것으로 보고되었다. 이에 따라 산화마그네슘과 인산암모늄의 결합을 대체할 수 있는 물질에 대한 연구가 이루어지던 중 인산칼륨의 이용이 제안되었으며, 산화마그네슘과 인산칼륨의 결합은 인산암모늄의 결합물과 같은 빠른 응결시간과 높은 강도를 나타낼 뿐 아니라 인체에도 유해하지 않은 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구에서는 phosphate acid 중 인산칼륨(KH_2PO_4)을 선정하여 시험을 진행하였다. 인산칼륨의 경우 다른 표 2.2와 같이 5단계에 걸쳐 반응이 이루어지게 된다.

표 2.1 MgO-Phosphate Ceramics의 대표적 화학반응

Principal Reaction	Reaction Product	Product Name
$MgO + Mg(H_2PO_4)_2 \cdot 2H_2O \rightarrow$	$2MgHPO_4 \cdot 3H_2O$	Newberyite
$MgO + (NH_4)_2HPO_4 + 5H_2O \rightarrow$	$MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O + NH_3 \uparrow$	Struvite
$MgO + (NH_4)_2H_2PO_4 + 5H_2O \rightarrow$	$MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$	Struvite
$MgO + KH_2PO_4 + 5H_2O \rightarrow$	$MgKPO_4 \cdot 6H_2O$	Magnesium potassium phosphate hexahydrate (MKP)

표 2.2 산화마그네슘계열 세라믹 결합재 단계별 화학 반응

Stage	Reactions
I	$KH_2PO_4 \rightarrow H_2PO_4^- + K^+$
II	$H_2PO_4^- + MgO + 7H_2O \rightarrow MgHPO_4 \cdot 7H_2O + OH^-$
III	$2MgHPO_4 \cdot 7H_2O + K^+ + OH^- \rightarrow Mg_2KH(PO_4)_2 \cdot 15H_2O$
IV	$2HPO_4^{2-} + 2MgO + K^+ + 16H_2O \rightarrow Mg_2KH(PO_4)_2 \cdot 15H_2O + 3OH^-$
V	$Mg_2KH(PO_4)_2 \cdot 15H_2O + K^+ + OH^- \rightarrow 2KMgPO_4 \cdot 6H_2O + 4H_2O$

위와 같은 반응식에 따라 다음 그림 2.11과 같이 단계별로 화학적 결정을 구성하게 되며, 다음 그림 2.12와 같은 결정 구조로 화학적 결합을 하게 된다.

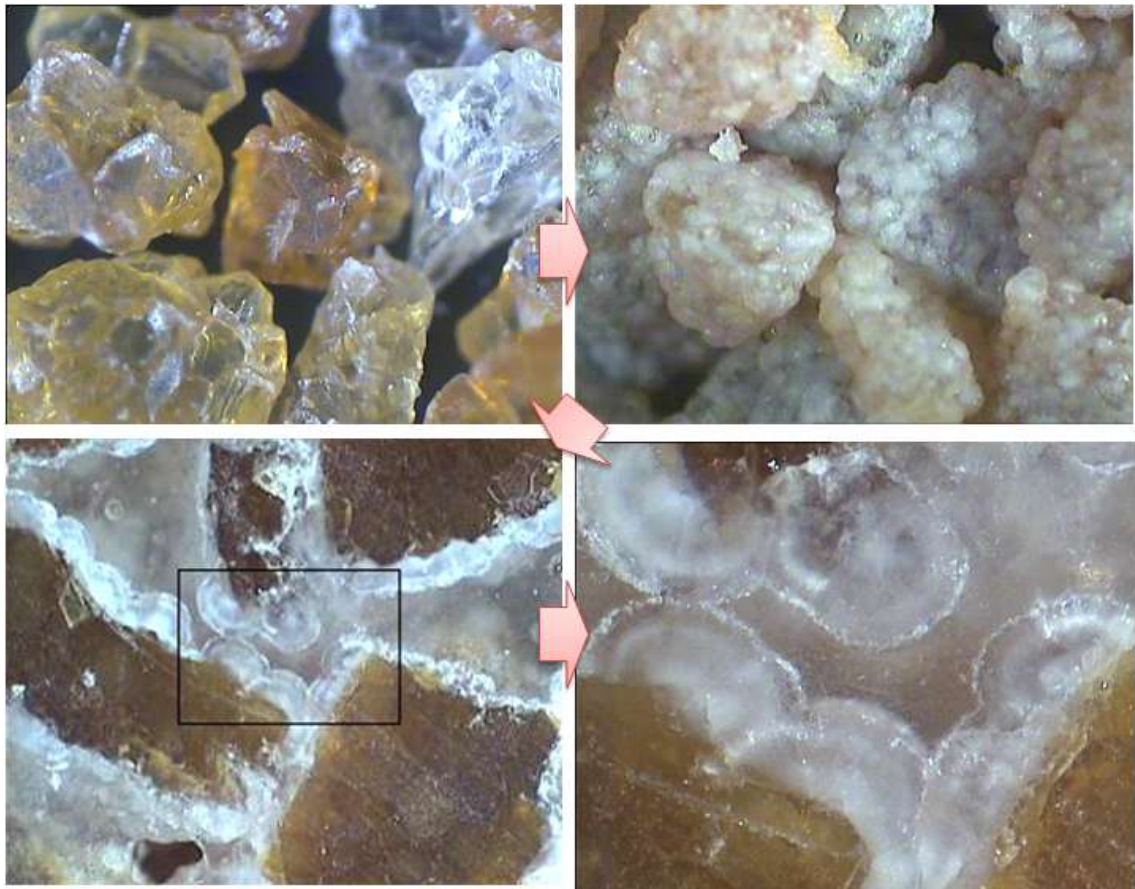


그림 2.11 $\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 의 화학반응으로 생성된 결정체

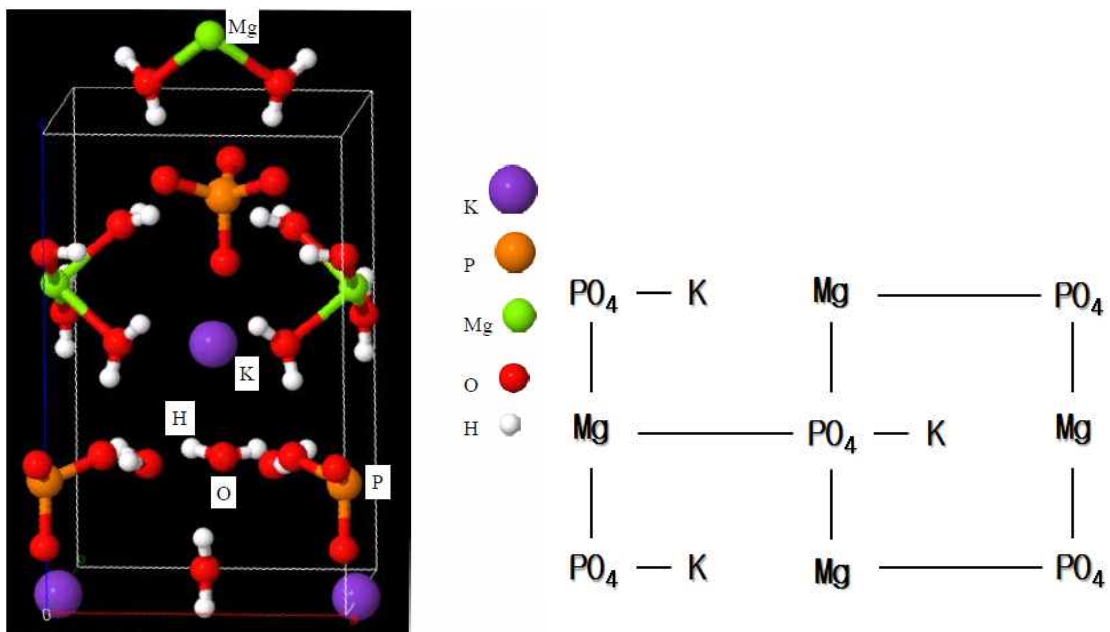


그림 2.12 $\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 의 결정 구조 (Graeser, et al. [2008])

이와 같은 산화마그네슘 계열 결합재의 경우 화학적 반응에서 산화마그네슘과 인산칼륨과의 몰비(Molar ratio)가 중요 인자로 작용이 되며, 배합시 중량비로의 치환하는 과정이 요구된다. M/P molar ratio에 대한 사용량을 중량으로 치환하기 위하여 Mg, O, K, H, P, O에 대한 몰랄농도를 조사하여 MgO, KH₂PO₄의 몰농도를 계산 후 몰비를 중량비로 치환하기 위해 다음과 같은 식(1)을 사용하게 된다.

$$M_{Phosphate} = \frac{m_{magnesia} \times MgO의\ 순도(\%)}{MgO\ 몰랄농도 \times M/P} (mol/L) \quad (1)$$

여기서, $m_{magnesia}$: 산화마그네슘의 질량(g)

MgO molality : 산화마그네슘의 몰랄농도 (Mg : 24g/mol, O : 16g/mol)

M/P : 산화마그네슘과 인산칼륨의 몰비

위의 식을 통하여 $M_{Phosphate}(mol/L)$ 를 구한 후 KH₂PO₄의 몰랄 농도(g/mol)를 이용하여 인산칼륨의 중량을 구하여 중량비로 치환할 수 있다. 또한 적절한 작업성을 가지기 위해 지연제(Borax)의 사용이 필수적이며, 화학식 Na₂B₄O₇·10H₂O으로 나타내며, 붕사라고 한다. Borax의 화학적 결정 구조는 다음 그림 2.13과 같다.

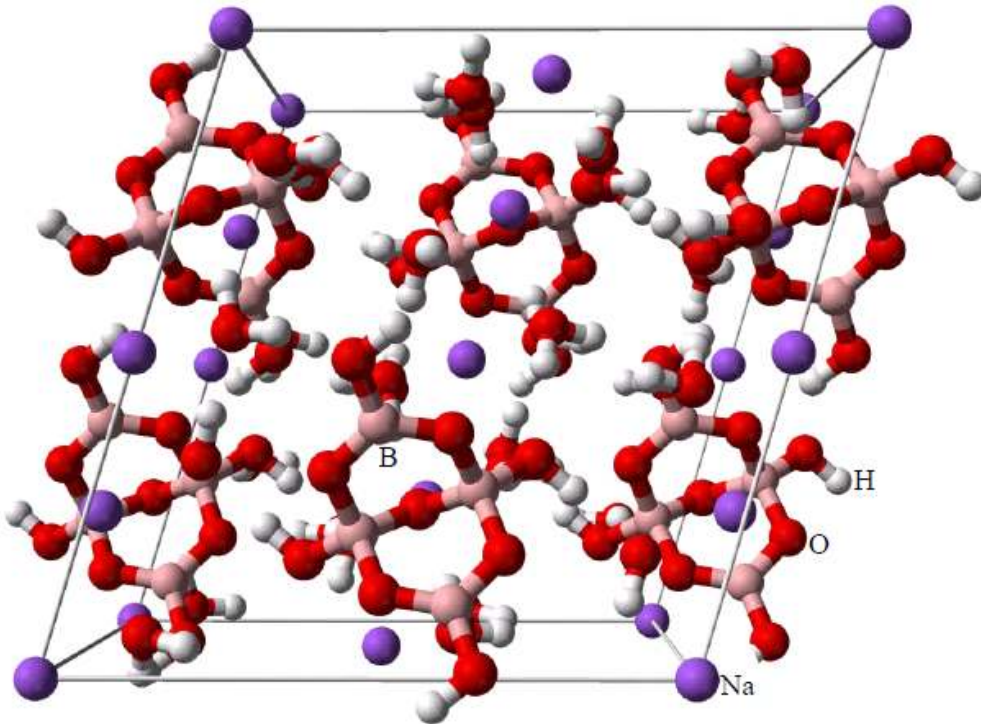


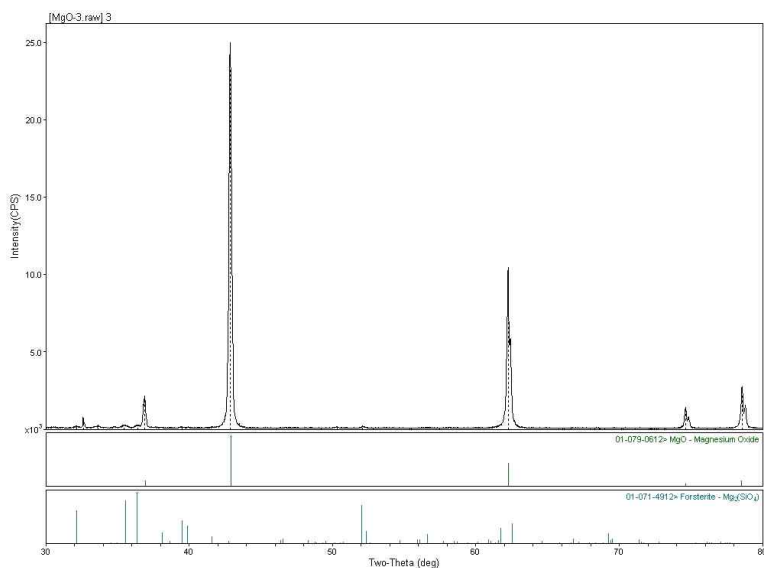
그림 2.13 지연제(Borax)의 결정 구조 (Fei Qiao [2010])

나. 실험내용

(1) 사용재료

(가) 산화마그네슘 (Magnesium Oxide, MgO)

여러 가지 세라믹 종류들 가운데서도 산화마그네슘 ceramics가 일반적으로 많이 사용되는데 이는 산화마그네슘의 solubility 때문이라고 할 수 있다. 산화마그네슘의 solubility는 calcium oxide와 같이 너무 높지 않으며 silica oxide 또는 iron oxide와 같이 너무 낮지도 않고 또한 물에서 산화마그네슘을 용해시킬 때 너무 많은 열을 발생시키지 않아 세라믹 형성하기 좋은 조건을 갖고 있다. 이와 같은 산화마그네슘계열 세라믹 결합재를 보수재료로의 적용을 위하여 초기 압축강도 및 응결시간이 확보되어야 하며, 이는 사용되는 재료(산화마그네슘)의 순도 및 산화마그네슘과 인산칼륨의 몰 비, 몰과 바인더(산화마그네슘, 인산칼륨 등)의 비, 지연제(Borax)의 혼입율에 따라 가장 큰 영향을 미치며, 이를 바탕으로 변수를 구성하였다. 또한 실험 계획을 구성하기 앞서 사용되는 재료의 XRD 및 XRF 분석을 통하여 사용되는 산화마그네슘의 순도 및 인산칼륨의 화학적 성분을 분석하였다. 그 결과는 다음 그림 2.14, 2.15와 같다. 그 결과, 사용되는 산화마그네슘의 경우 순도는 88.5%이며, SiO₂와 CaO는 각각 3.3, 4.1%으로 구성되어있다.



성분	함유량
MgO	88.501
Al ₂ O ₃	0.542
SiO ₂	3.341
P ₂ O ₅	0.986
SO ₃	0.038
K ₂ O	0.023
CaO	4.135
TiO ₂	0.056
Cr ₂ O ₃	0.027
MnO	0.151
Fe ₂ O ₃	2.178
LOI	0.014

그림 2.14 산화마그네슘의 XRD 및 XRF 분석결과

(나) 제 1 인산칼륨 (Potassium Dihydrogen Phosphate, KH_2PO_4)

산화마그네슘계열 세라믹 결합재에서 산화마그네슘은 P_2O_5 (phosphoric acid or phosphoric pentoxide)와 반응한다. P_2O_5 는 수경성의 물질로 급속한 경화가 진행 되게 하며 작업 가능 시간이 아주 짧아 실질적으로 작업효율이 떨어지게 된다.

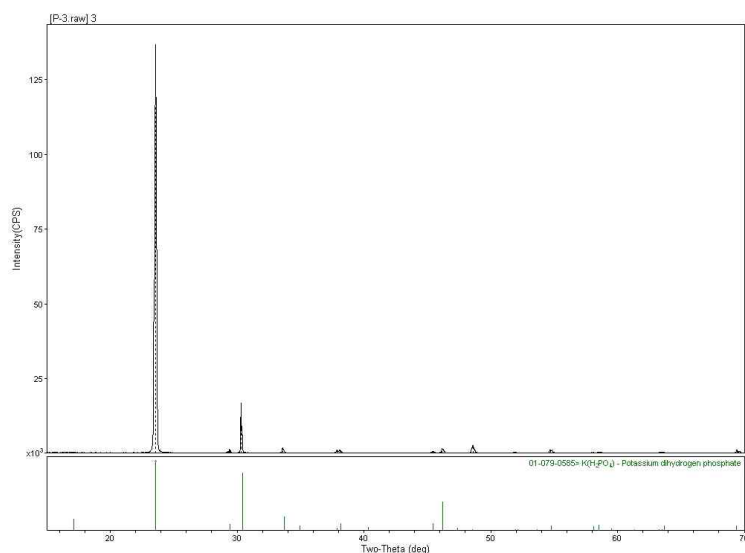
산화마그네슘계열 세라믹 결합재에 주로 이용되는 물질인 인산암모늄의 P_2O_5 함유량은 62%로 높은 편인데 비해 KH_2PO_4 의 P_2O_5 함유량은 불과 52%로 산화마그네슘과의 결합물질 중 가장 낮게 나타났다. 또한 산화마그네슘계열 세라믹 결합재를 형성함에 있어 인산염의 용해도의 역할이 주요하게 작용을 하는데 낮은 용해도일수록 조기 수화반응 비율과 반응열을 줄여주므로 보수재료로의 활용시 현장에서 작업가능 시간을 확보하기 용이해진다. XRD 및 XRF 분석을 통하여 인산칼륨의 화학적 성분 및 패턴을 다음 그림 2.15와 같다.

표 2.3 인산염의 P_2O_5 함유량

Phosphate	NaH_2PO_4	KH_2PO_4	$\text{AlH}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$
P_2O_5 (wt%)	59.2	52.2	59.7	61.7	54.8

표 2.4 인산염의 종류에 따른 용해도

용해도 (mol/100g H_2O)	NaH_2PO_4	KH_2PO_4	$(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$
grams	48.5	20	28.57
moles	0.4042	0.147	0.2484



성분	함유량
Na	0.795
Mg	0.012
Al	0.048
Si	0.007
P	32.346
S	0.234
Cl	0.786
K	65.539
Ca	0.209
Fe	0.009
Ni	0.015
As	—

그림 2.15 인산칼륨의 XRD 및 XRF 분석결과

(다) 지연제(붕사) (Borax, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)

Borax는 수용액상태에서 $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$ 와 Na^+ 로 나뉘게 되는데 이는 약알칼리성을 띄며, Borax 지연제 사용 시 산화마그네슘과 인산칼륨의 반응물인 KH_2PO_4 의 H^+ 와 borax의 $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$ 가 결합하여 붕산(boric acid, H_3BO_3)을 형성한다. Borax는 마그네슘 붕산염을 현성하게 하여 산화마그네슘 표면에 침전보호 필름막을 형성해 pH 값을 증가시키며 반응속도를 늦추고 반응열을 흡수하여 수화열을 줄여주는 효과도 있다. 또, 지연제는 산화마그네슘계열 세라믹 결합재의 강도와 경화과정에도 영향을 준다. 산화마그네슘계열 세라믹 결합재(MgKPO_4)의 결정은 사각형 모양의 결정으로 조밀한 미세구조를 보였으며 그에 따라 콘크리트 내부의 미세균열과 같은 손상이 적게 나타나며, 산화마그네슘 콘크리트는 조기 강도 발현의 우수함을 자랑하는 재료이지만 이 같은 빠른 수화반응은 많은 수화열을 발생시키고 그로 인해 콘크리트 (모르타르)의 균열을 발생시킬 수 있는 단점이 있다. 이를 방지하기 위해 지연제 (borax)를 첨가하여 수화반응과 응결시간의 조절이 요구된다. 이에 따라 본 연구에서는 사붕산나트륨 10수화물 (Deca-hydrate)인 백색결정의 붕사를 사용하였으며 비중 1.75, 경도 2.0~2.5로 수용액 상태에서는 알칼리성을 띤다. 산화마그네슘 모르타르 배합 시 지연제로서 결합재의 반응에 따라 적절한 응결시간의 조정을 위해 첨가하였다.

(라) 포틀랜드 시멘트 (Portland Cement)

일반 시멘트 모르타르 배합을 위한 재료로 ‘KS L 5201 포틀랜드 시멘트’ 규정에 적합한 국내 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 그에 대한 화학성분 및 재료특성은 다음 표 2.5, 2.6과 같다.

표 2.5 포틀랜드 시멘트의 화학적 성분

Chemical properties (%)		Compositions (%)		
SiO_2	21.0	C_3S	Tri-calcium silicate	55
Al_2O_3	5.9	C_2S	Di-calcium silicate	23
Fe_2O_3	3.2	C_3A	Tri-calcium Aluminate	10
CaO	62.5	C_4AF	Tetra-calcium Aluminiferite	9
SO_3	2.1			
MgO	3.4			

표 2.6 포틀랜드 시멘트의 물리적 특성

Blaine (cm^2/g)	Setting Time (hr)		Compressive Strength (MPa)		
	Initial	Final	3days	7days	28days
3,300	3.3	5.5	30	42	58

(마) 잔골재(Quartz Sand)

변수별 시험체 제작을 위한 모르타르 배합에 사용된 골재는 ISO 규격에 따라 비중 1.57, 0.3mm ~ 0.45mm의 입자 유효경 크기의 국내 주문진 표준사를 사용하였다.

(2) 실험방법

(가) 최적배합비 선정

산화마그네슘계열 세라믹 결합재를 도로포장 보수재료로 활용하기 위하여 강도 및 작업 시간을 위한 응결시간이 우선적으로 확보가 되어야 한다. 이에 따라 먼저 최적배합비 선정 을 위한 초기압축강도 및 응결시간 시험을 실시하였으며, 결합재의 가장 큰 영향 인자 인 M/P비, W/B비, 지연제(Borax) 혼입율에 따라 실험 변수를 구성하였으며, 시험변수에 대한 구성은 다음 표 2.7에 나타내었다. 이는 최적배합비 선정 을 위한 변수이며, 여기서 사용되는 M/P 비는 참고문헌에서 사용한 M/P의 물비로 구성을 한 후 식 (1)를 이용하여 중량비로 치환하여 사용하였다. 따라서, 물 비 4, 6, 8, 10, 12에 해당하는 중량비 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4로 환산하여 설정하였다. 또한 물-바인더의 비는 14, 16, 18, 20, 22%로 구성되 었으며, 지연제(Borax)의 혼입율은 0, 5, 7.5, 10%를 사용하였다.

표 2.7 산화마그네슘계열 세라믹 결합재 시험변수

M/P	W/B (%)	Borax (%)	M/P	W/B	Borax (%)	M/P	W/B	Borax (%)	M/P	W/B	Borax (%)	M/P	W/B	Borax (%)
0.6	14	0	0.8	14	0	1.0	14	0	1.2	14	0	1.4	14	0
		5.0			5.0			5.0			5.0			5.0
		7.5			7.5			7.5			7.5			7.5
		10.0			10.0			10.0			10.0			10.0
	16	0		16	0		16	0		16	0		16	0
		5.0			5.0			5.0			5.0			5.0
		7.5			7.5			7.5			7.5			7.5
		10.0			10.0			10.0			10.0			10.0
	18	0		18	0		18	0		18	0		18	0
		5.0			5.0			5.0			5.0			5.0
		7.5			7.5			7.5			7.5			7.5
		10.0			10.0			10.0			10.0			10.0
	20	0		20	0		20	0		20	0		20	0
		5.0			5.0			5.0			5.0			5.0
		7.5			7.5			7.5			7.5			7.5
		10.0			10.0			10.0			10.0			10.0
	22	0		22	0		22	0		22	0		22	0
		5.0			5.0			5.0			5.0			5.0
		7.5			7.5			7.5			7.5			7.5
		10.0			10.0			10.0			10.0			10.0

① 초기압축강도 특성

산화마그네슘계열 세라믹 결합재의 초기압축강도 특성을 확인하기 위하여 KS L ISO 679의 “시멘트의 강도 시험 방법”에 준하여 시험을 실시하였으며, 먼저 M/P비, W/B비, Borax 혼입율에 따른 초기압축강도 영향을 비교하기 위하여 1일(24시간) 강도를 측정하였으며, KS L ISO 679의 규준에 따라 잔골재는 표준사를 사용하였고, 잔골재율은 2으로 고정한 후 시험을 실시하였다. 시험 사진은 다음 그림 2.16과 같다.



그림 2.16 산화마그네슘 계열 결합재의 강도 시험

② 응결시간 특성

응결시간은 산화마그네슘계열 세라믹 결합재를 보수재료로의 활용 시 조기교통개방 및 현장 적용시 충분한 작업성 확보를 위한 주요한 시험 항목이다. 특히 산화마그네슘 계열 결합재의 경우 경화시간이 30분 내외로 보고되고 있어 작업시간 확보를 위하여 W/B비 및 지연제(Borax)를 활용하여 적절한 응결시간을 확보하고자 하였다. 이에 따라 응결시간 시험방법은 KS L 5103의 “길모어 침에 의한 시멘트의 응결 시간 시험 방법”에 의하여 시험을 실시하였으며, 측정 사진은 다음 그림 2.17과 같다.



그림 2.17 산화마그네슘 계열 결합재의 응결시간 시험

③ 공극분포 특성

콘크리트의 경우 수화반응 후 경화된 콘크리트는 여러 타입의 공극들이 존재한다. 이 공극들은 콘크리트의 특성에 영향을 미치는 중요한 인자이다. 따라서 초기 응결시간 특성을 가진 산화마그네슘계열 세라믹 결합재의 경우 급속한 반응 및 수화열에 따른 팽창 균열 또는 미세균열의 발생이 우려된다. 이에 따라 수은압입법을(MIP(Mercury Intrusion Porosimetry)) 이용하여 산화마그네슘계열 세라믹 결합재의 공극분포 특성을 확인하고자 한다. 공극 특성 분석은 산화마그네슘계열 세라믹 결합재의 경우 수화반응이 급격하게 일어나고 이와 같은 반응으로 인하여 높은 수화열을 발생하게 된다. 이러한 반응열로 인한 미세구조 특성 및 미세균열 발생 여부에 대한 분석이 요구되어진다. 또한 이를 통하여 산화마그네슘계열 세라믹 결합재에 대한 강도특성에 대한 검증과 더불어 내구성능에 대한 영향 또한 증명할 수 있을 것으로 판단된다.

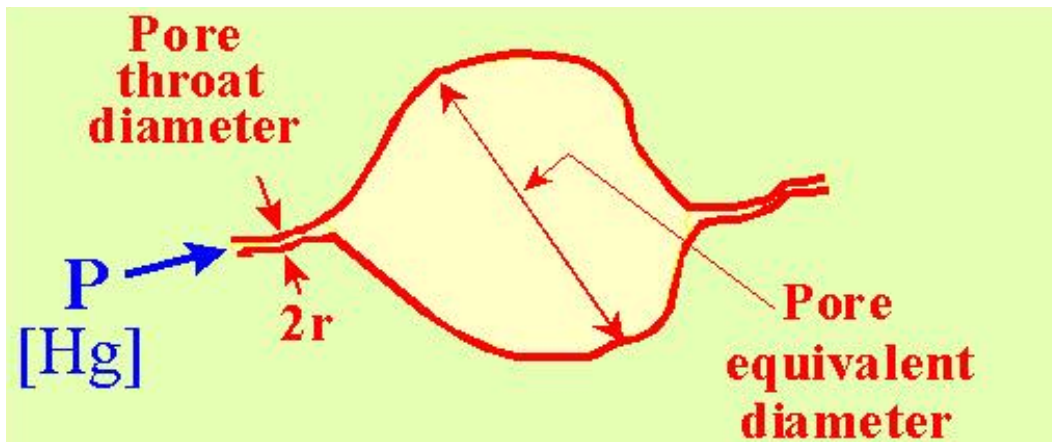


그림 2.18 수은압입법에 의한 공극 직경 및 분포 특성 분석 이론

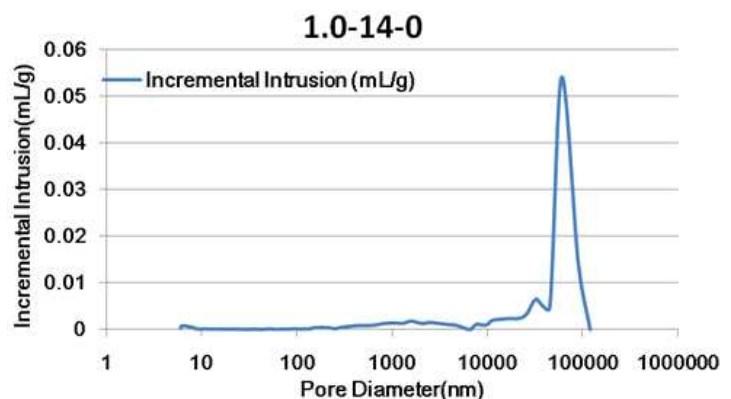


그림 2.19 산화마그네슘 계열 결합재의 공극분석

④ XRD 및 XRF 분석

상기와 같은 시험을 통한 공극분포 특성을 확인 후 산화마그네슘계열 세라믹 결합재의 경화 후 생성되는 화합물 및 경화체에 대한 성분 분석을 실시하였다. 본 연구의 경우 일반 시멘트의 수화반응과 상이한 화학 반응으로 경화되는 특성을 가지므로 XRD 및 XRF 분석으로 화학성분을 확인하였다.

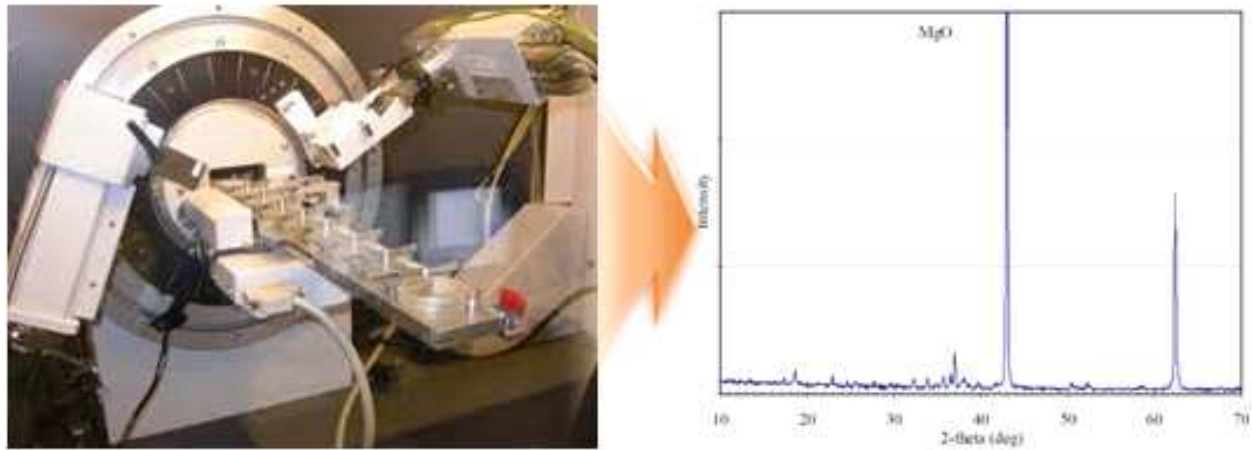


그림 2.20 산화마그네슘 계열 결합재의 XRD분석

(나) 보수재료로의 적용성

콘크리트 포장의 경우 온도와 같은 환경적인 요인과 더불어 차량통행에 따른 하중으로 인해 도로포장의 열화현상이 발생하여, 균열이 생기거나 포장표면이 탈리되는 포장파손으로 이어지게 된다. 다음 표 2.8과 같이 포장파손에는 균열, 노면결합과 줄눈부 파손 등으로 분류할 수 있으며, 이 중 가로균열과 스폐링의 발생빈도가 가장 잦은 것으로 나타났다.

표 2.8 콘크리트포장 파손 유형별 보수공법 (Korea Expressive Corporation, 1999)

파손구분	파손종류	보수공법
균열	가로균열	전단면 보수 부분단면 패칭
	세로균열	
	우각부균열	
노면결합	굵은골재 탈리	부분단면 패칭 덧씌우기
	스케일링	
	골재마모	
줄눈부 파손	줄눈재 파손	부분단면 패칭
	스폴링	줄눈재 재설치

상기의 표 에서 보듯이 파손을 보수하기 위해서 주로 단면 패칭 방식이 공통적으로 사용

되고 있으며, 산화마그네슘계열 세라믹 시멘트의 경우 급속한 경화속도로 인한 작업시간 확보에 대한 부분이 우려되어 보수재료 공법 중 부분 단면 패칭 공법에 대한 적용성을 검토하고자 하였다. 부분단면 패칭은 작은 면적에 걸쳐 파손 부분을 매우거나 채워 노면의 평탄성을 유지하는 공법이다. 패칭 재료로는 시멘트계, 아스팔트계와 수지계의 세 종류로 나눌 수 있으며, 패칭 두께에 따라 모르타르 또는 콘크리트 형태로 이용한다.

도로포장 보수의 패치이용을 위해 시멘트 외에 많은 재료들의 사용가능성에 대해 연구되고 실제 현장에 적용되고 있다. 대표적으로 내구성이 우수한 에폭시와 폴리머와 같은 수지계 패칭 재료들과 빠른 경화시간의 성질을 갖고 있어 신속한 보수를 가능하게 하는 일반 초속경 시멘트 콘크리트와 마그네슘 인산염 시멘트 콘크리트도 보수재료로 많이 이용되고 있다.

다음 표 2.9는 부분단면 패칭을 위한 다양한 재료들 가운데에서도 최근 본 연구 관련 유사개발 기술 적정 요구 기준을 나타낸 것이다. 국내의 규정과는 달리 미국은 국가 통합 규정이 아닌 각 state에서 발표한 규정을 사용하고 있다. 다음 표 2.10은 미국의 주요 도시의 도로국에서 규정하고 있는 부분단면 패치재료의 항목 별 기준을 정리하여 나타낸 것이다. 각 도시의 위치, 온도와 교통량 등 과 같은 주어진 다양한 환경에 따라 기준 항목의 규정이 다른 것을 알 수 있다.

표 2.9 본 연구관련 유사개발 기술 적정 요구 기준

평가항목			시험방법	규격	기준
물리적 성능	응결시간	초결	KS F 2436	분	25
		종결			-
	압축강도	교통개방 시 (3-4시간)	KS F 2405	MPa	21이상
		28일			30이상
	휨강도	교통개방 시	KS F 2407	MPa	4.5이상
		28일			
	부착강도		ASTM C 1404	MPa	1.4이상
내구성	염소이온투과저항성		ASTM C 1202	Coulombs	1000이하
	동결융해 저항성		KS F 2456	상대동탄성계수 %	80이상

표 2.10 시멘트계 부분단면 패치재료의 미국 주요 도시 별 기준 비교표

항 목	각 도시 별 기준			
	Washington	New York	Florida	California
압축강도 (시간)	20.7 MPa (3 hours)	17.2 MPa (1 hour)	13.8 MPa (3 hours)	20.7 MPa (3 hours)
인장강도 (시간)	-	10.3 MPa	12.4 MPa (7 days)	3.4 MPa (1 day)
교통개방 압축강도	17.2 MPa	21 MPa	15.1 MPa	-
부착강도 (시간)	6.9 MPa (1 day)	1.4 MPa (1 day)	2.8 MPa (1 day)	2.8 MPa (1 day)
스케일링 저항성	4.9 kg/m ² (25회)	-	-	-
동결융해 저항성	90% 이상	90% 이상	-	-
마모저항성	-	-	22 kΩ, zero (28 days)	28g 이하 (1 day)
열팽창계수	-	18~36×10 ⁻⁶ /℃ (7 days)	9~16.2×10 ⁻⁶ /℃ (7 days)	-
길이변화	0.15% 이하 (28 days)	0.4% (팽창) 0.05% (수축)	0.12% 이하 (28 days)	0.13% 이하 (4 days)

국내와 미국의 도로포장 패치를 위한 규정들을 살펴본 결과, 부분단면 패치재료 사용에 있어서 성능을 확인하는 시험대상 항목의 종류는 대부분 비슷하였다. 본 연구에서는 조기 강도 발현에 따른 조기교통개방과 내구성에 중점을 두어 확인하였다. 그 결과 미국에서는 각 도시 별 규정하고 있는 강도가 다르며 그 규정은 각 도시의 교통 통행량과 관련이 있을 것으로 파악된다. 표 2.10에서도 보듯이 워싱턴과 뉴욕은 미국에서도 중심지로 꼽히는 곳으로 다른 도시들에 비하여 보행자 뿐 아니라 차량통행량도 많아 높은 교통개방 강도를 규정하고 있다. 개방시간에서도 국내는 타설 후 4시간 이내, 미국의 경우에는 3시간 이내를 조기교통개방 목표가 상이한 것을 확인하였다. 내구특성 부분에도 차이점을 보였는데, 우리나라에서는 제설제와 제설염 살포에 따른 염소이온 침투 저항성에 대한 기준을 두고 있는 반면, 미국에서는 시험항목에 포함되지 않았다. 이는 미국에서 국내와는 다른 제설 방법을 사용하고 있어 그에 대한 기준은 고려하지 않는 것으로 파악된다. 그 외의 동결융해 저항성이나 길이변화에 대한 기준치는 비슷한 경향을 보인다.

본 연구의 주제인 산화마그네슘 모르타르의 부분단면 패치재료로의 사용적합성에 대해 살펴본다면, 앞서 언급한 산화마그네슘과 인산칼륨의 반응에 따른 빠른 경화과정과 그에 따른 조밀한 산화마그네슘계열 세라믹 시멘트의 결정 형성은 교통개방시간과 강도는 물론 내구성에서도 만족할만한 결과를 나타내는데 도움이 될 것으로 판단되며 그와 관련된 실험을 통해 증명해보이고자 한다.

(다) 개발 보수재료에 대한 실험개요

본 연구에서는 산화마그네슘 콘크리트의 도로포장 급속한 단면복구 및 보수작업에의 활용성을 판단하기 위해 물리적 특성과 내구성능을 확인하는 실험을 진행하였다. 일반 시멘트 모르타르 (OPC)와 산화마그네슘 모르타르 (MgO)를 실험변수로 설정하여 동일한 조건의 환경에서 시험체를 제작하였다. 산화마그네슘의 조기강도특성 파악하기 위한 응결시간과 재령 3시간, 24시간 압축강도를 측정하고 보수재료의 경우 휨 및 인장부착강도가 주요한 인자로 작용을 하며 이에 대한 시험도 수행하였다. 이와 같은 부착강도 특성을 보다 정량적으로 판단하고 특성을 규명하기 위하여 BSE이미지를 통한 부착계면에 대한 분석을 실시하였다. 내구성능을 확인하기 위해 염소이온 침투저항성, 동결융해저항성 실험을 통해 도로포장 보수의 적용성에 대해서도 판단하였다. 또한 개발된 재료를 도로 단면 복구재로 활용시 적용성을 확인하기 위하여 미끄럼 저항성 시험을 통하여 OPC와 비교·분석하였다. 본 연구에서 수행한 실험에 대한 개요에 대하여 다음 표 2.11에 정리하였다.

표 2.11 보수재료에 대한 시험 종류 및 규정

실험 개요			시험 방법 및 규정
성능	실험 종류		
물리적 성능	응결시간	초결	KS F 5108, KS F 2763
		종결	
	압축강도	3시간	KS F 2405
		24시간	
내구성능	염소이온 저항성 시험	쿨롱(Coulomb)	KS F 2711
	급속 동결융해 저항성 시험	내구성지수(DF)	KS F 2456
	미끄럼 저항성	BPN	-
공극특성	부착계면에서의 공극 특성 및 공극량		MIP (Mercury Intrusion Porosimetry)

(라) 최적배합비에 대한 실험방법

① 응결시간 정의

상기와 같이 기초 시험을 기반으로 결정된 산화마그네슘계열 세라믹 결합재의 최적배합비를 활용하여 일반 시멘트 모르타르와 보다 명확한 비교·분석을 위해 응결시간을 OPC와 비교하여 측정을 수행하였다. 응결시간에 대한 정확한 측정을 위해 ‘비카트 침에 의한 응결시간 측정 (KS L 5108)’에 따라 응결시간 (초결, 종결)을 측정하였다. 규정에 의하여 비카트 침이 모르타르의 25mm 침입 시 초결, 더 이상의 비카트 침의 흔적이 없을 시를 종결로 정하여 실험을 진행하였다. 또한 ‘KS F 2763 관입 저항 침에 의한 콘크리트 보수재의 응결시간 측정방법’에 따라 그 저항 값을 측정하여 0.5N/mm²(MPa), 3.5N/mm²(MPa)를 만족할 때를 각각 초결시간과 종결시간으로 결정하였다. 산화마그네슘계열 세라믹 결합재 모르타르와 일반 시멘트 모르타르를 비교하였다. 비카트 침에 의한 응결시간 측정을 모사한 그림과 시험 사진은 다음 그림 2.21과 같다.

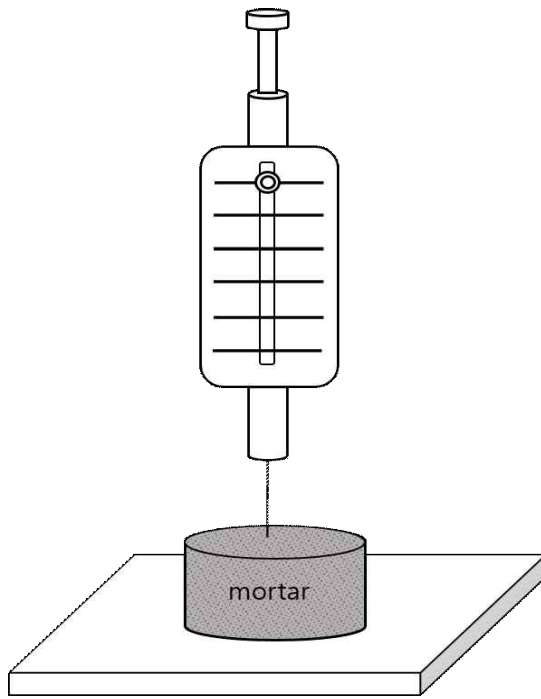


그림 2.21 응결시간 측정

② 시간별 초기강도 정의

또한 최적배합비를 활용한 산화마그네슘계열 세라믹 결합재의 압축 강도 측정은 시험체의 초기강도와 직결되는 실험이므로 각 시간별로 강도를 측정하였다. 500×500×500mm의 입방 시험체를 제작하여 1, 3(교통개방시간), 12시간, 1일(24시간), 28일의 시간별 압축강도를 측정하여 일반 시멘트와 산화마그네슘 세라믹 결합재의 초기강도발현에 대해 정량적으로 비교하고자 하였다. 나아가 유사 개발 보수재료와도 비교·분석을 실시하였다.

압축 강도는 시험 시 매초 (800±50)N 의 하중 속도로 재하 하여 최대 하중을 구하고, 다음 식 (2)를 통해 강도를 산출한다. 압축강도 측정 사진은 다음 그림 2.22와 같다.

$$\sigma_c = \frac{P}{1600} \quad (2)$$

σ_c : 압축강도(N/mm^2)

P : 최대하중(N)



그림 2.22 압축강도시험

③ 휨 부착강도 시험

휨 부착강도 시험은 KS F 4923에 따라 온도 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 와 습도 $50 \pm 5\%$ 의 표준조건 상태에서 시험재료 배합 후, 접착시킬 모르타르 사이에 시험재료를 붙여 넣는 접착 작업을 10분 이내에 완료하여 변수별로 각각 시험체를 준비하여 같은 조건에서 양생시켰다. 접착 강도 측정 시, 그림 2.23과 같이 1.5mm/min 또는 3,000N/min의 속도로 하중을 재하 하여 최대 하중을 구하고 접착 강도는 다음 식 (3)에 따라 산출된다.

$$F = \frac{120P}{bh^2} \quad (3)$$

F : 접착강도(N/mm^2)

P : 최대하중 (N)

b : 시험체의 너비 (mm)

h : 시험체의 높이 (mm)

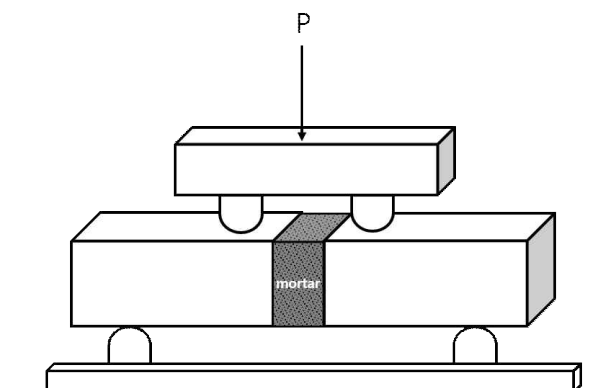


그림 2.23 휨 부착강도시험

④ 인장 부착강도 시험

부착 강도는 접착 강도와 달리 최대 인장하중을 구하는 시험이다. 시험은 KS F 4042에 따라 시험체는 인장 강도 시험과 같은 모르타르로 이루어진 40mm×40mm 크기의 밑판에 시험재료를 균일한 두께로 부착시켜 준비한다. 준비된 시험편을 상부 인장용 지그와 고정시켜 수직방향으로 인장력을 가한다. 이 때 하중 속도는 1,500 ~ 2,000 N/min를 유지하도록 하며 시험편 파단 시 시험을 종료한다. 부착 강도는 다음 식 (4)에 의해 계산되며 공시체 3개를 기준으로 하여 그 평균값을 이용한다.

$$\sigma_a = \frac{T}{1600} \quad (4)$$

σ_a : 부착 강도 (N/mm²)

T : 최대 인장 하중 (N)

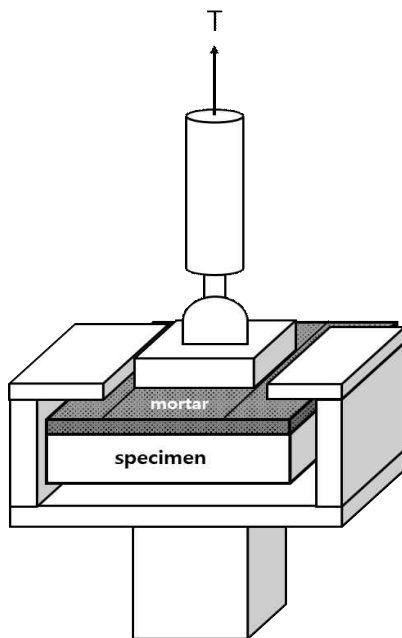


그림 2.24 인장 부착강도시험

⑤ 미세구조 시편제작 및 BSE이미지

본 연구에서의 산화마그네슘계열 세라믹 결합재와 일반 시멘트 모르타르의 부착강도에 대한 보다 명확한 비교·분석하기 위해 후방산란전자(backscattered electron; BSE)이미지 분석을 통한 미세구조 분석을 실시하였다. 후방산란전자(backscattered electron; BSE)이미지 분석은 시멘트 페이스트의 미세구조를 관찰하기 위하여 많이 이용되며, 수산화카슘, 미수화분말, 공극의 양을 산정하는데 사용된다. [zhao and Darwin 1992]. BSE이미지에서의 서로 다른 상들은 다양한 그레이스케일 단위로 표현된다.

BSE이미지는 콘크리트 내구성에 중요 요인 중의 하나인 시멘트 페이스트와 골재 사이의 계면에서 생성되는 시멘트 수화물의 정량적인 분석을 위해 널리 사용된다. 골재 계면에 일정거리마다 존재하는 서로 다른 상들을 측정하는 BSE이미지 분석법은 골재와 시멘트 페이스트 사이의 임계면(Interfacial transition zone; ITZ)을 조사하기 위해 Scrivener and Gartner [1988]가 처음으로 고안하였다. BSE이미지 분석을 통해 계면에 가까울수록 미수화 시멘트 분말과 수산화칼슘의 양이 감소하는 것이 관찰된 반면 공극의 양은 증가하는 것으로 나타났다 [Scrivener and Pratt 1996].

본 연구는 기존 OPC 콘크리트에 OPC 및 산화마그네슘계열 세라믹 결합재를 패칭하여 부착강도 실험을 진행하였으며, 산화마그네슘계열 세라믹 결합재를 패칭하였을 경우, OPC에 비하여 부착강도가 우수함을 알 수 있었다. 그러나 기존 콘크리트와 패칭된 콘크리트 계면에서의 공극 분포는 아직 보고된 바가 거의 없기 때문에 본 실험은 OPC 및 산화마그네슘계열 세라믹 결합재를 패칭 시 계면의 공극량을 정량화하기 위해 임계면에서의 공극량 분포의 정량적 분석을 진행하였다. 주사전자현미경(scanning electron microscope; SEM)을 이용해 기존 페이스트와 패칭된 페이스트의 계면을 촬영 후 공극 분포를 정량화를 위해 기존 페이스트 부분을 세그먼트하여 계면부의 공극 분포를 분석하였다.

㉔ 페이스트 시편

본 연구에서는 50×50×50 mm의 규격으로 기존 OPC 페이스트에 OPC 및 산화마그네슘계열 세라믹 결합재 페이스트를 패칭하여 시험체를 제작하였으며, BSE이미지 촬영을 위하여 계면부를 중심으로 약 15×15×15 mm의 시편을 추출하여 시료를 제작하였다. 그림 2.25는 BSE이미지 촬영을 위하여 제작된 시편이다. 시험에 사용된 시험체는 동일한 물-시멘트비의 OPC 및 산화마그네슘계열 세라믹 결합재로 패칭된 페이스트로 각각 3개의 시료에 대해 평균값으로 나타내었다.



그림 2.25 patching 시편

㉕ BSE이미지 촬영을 위한 시료제작

페이스트 시편은 BSE이미지 촬영을 위해 여러 단계의 손질과정을 거치게 되는데 절단, 건조, 진공상태에서의 에폭시수지에 포화 침지, 연마, 세척의 과정을 통해 BSE이미지 촬영용 시료를 제작하였다. 미세구조 분석을 위해 제작된 시료는 SEM 관찰을 위해 낮은 압력의 진공저장실에서 보관한다. 그림 2.26은 BSE이미지 촬영을 위해 페이스트로부터 전처리 및 연마된 시험체이다.



그림 2.26 전처리 후 시험체

㉔ BSE이미지 촬영

BSE이미지는 시멘트 계열 재료의 연구에 매우 유용한 도구이며, 시멘트 페이스트와 골재 사이의 계면과 같은 시멘트계 물질의 표면을 조사하기 위해 사용한다. BSE를 이용한 미세구조 분석 방법은 SEM에서 발생된 전자광선이 시료의 표면 방향으로 분사하고, 분사된 전자들이 시료표면의 다양한 전자들과의 상호작용을 일으켜 미립자와 전자가 방사되어 후방산란전자의 형태를 만든다. 후방산란전자가 SEM으로부터 이미지해석 시스템으로 이동될 때, 시편과 대응되는 지점으로부터 신호강도들을 표현하는 그레이 스케일의 화소들은 이미지 형태를 이루며, 시멘트 페이스트의 BSE 이미지를 이용하여 판별할 수 있는 공극, 미수화된 시멘트, 수산화칼슘의 상이 있으며, 이는 이미지 화소 데이터를 표현하는 그레이 스케일 히스토그램으로 표현할 수 있다. 그림 2.27은 이미지에서 구별된 상 및 히스토그램을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 OPC 및 산화마그네슘계열 세라믹 결합재로 패칭된 페이스트의 공극량을 중점적으로 분석하기 위하여 공극과 공극외 부분 (미수화물, 수산화칼슘)으로 이원화하여 공극량을 분석하였다.

그림 2.28의 SEM은 BSE이미지를 촬영하기 위해 사용된다. SEM을 이용하기 위한 장비 변수들은 가속전압, 작동거리, 점광선 크기, 렌즈전류 등이 있다. 본 연구에서는 페이스트 계면을 조사하기 위해 저배율부터 23배, 50배, 250배, 500배 배율로 점차적으로 측정한 결과, 공극량 분석에 적합한 500배 배율의 이미지를 사용하였다.

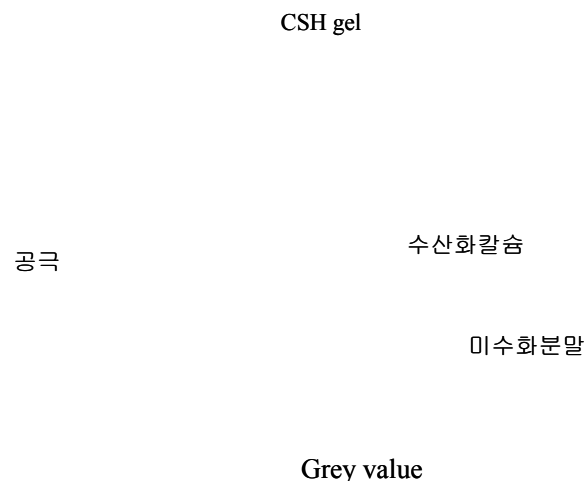


그림 2.27 BSE이미지의 그레이스케일에 따른 히스토그램

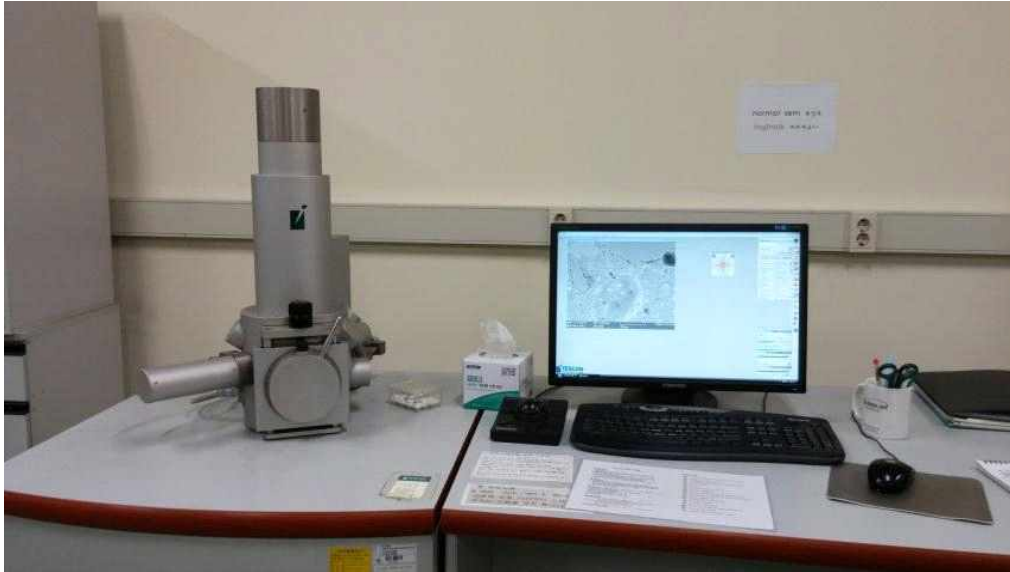


그림 2.28 SEM 분석 장비

⑥ 염소이온 침투저항성

염소이온 침투 저항성 시험은 ‘전기전도도에 의한 콘크리트의 염소이온 침투 저항성 시험 방법 (KS F 2711)’에 따라 그림 과 같이 지름 $\varnothing 100 \times 200\text{mm}$ 의 원주형 공시체를 콘크리트 시료절단기를 이용하여 공시체의 일정부위를 두께 $50 \pm 3\text{mm}$ 로 절단하고, 수분의 증발을 방지하기 위해 시편의 테두리에 콘크리트 보호용 도막제를 코팅하였다. 도막제 코팅 후 확산셀을 구성하여 시험을 실시하였다. 측정된 전압 값은 다음 식 (5)에 의해 전류 값으로 환산할 수 있으며, 다음의 식 (6)을 통해 총 통과 전하량 값을 계산할 수 있다.

시험시 전원은 60V의 직류를 $\pm 0.1\text{V}$ 로 안정적으로 공급할 수 있어야 하며, 전류는 저항체를 회로에 연결하여 전압을 측정함으로써 측정할 수 있다. 이 때 콘크리트 시편에 적용되는 전압에 영향이 적도록 하기 위해 저항기를 사용하는데 가능한 작은 저항을 사용하며, 이 시험에서는 0.2Ω 를 사용하였다.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V}{0.2} \quad (5)$$

여기서, I = 전류 (Amperes, A)

V = 전압 (Volts, V)

R = 저항 (Ohms, Ω)

$$Q = 900 (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (6)$$

Q : 통과 전하량 (Coulomb)

I_0 : 전압을 가한 직후의 전류 (amperes)

I_t : 전압을 가한 후 t 분 경과 후의 전류 (amperes)

표 2.12 전하량에 따른 염소이온 침투저항성

구분	통과전하량 (Coulomb)	염소이온 침투정도
I	< 100	고려하지 않음
II	100 ~ 1000	매우 낮음
III	1000 ~ 2000	낮음
IV	2000 ~ 4000	보통
V	> 4000	높음

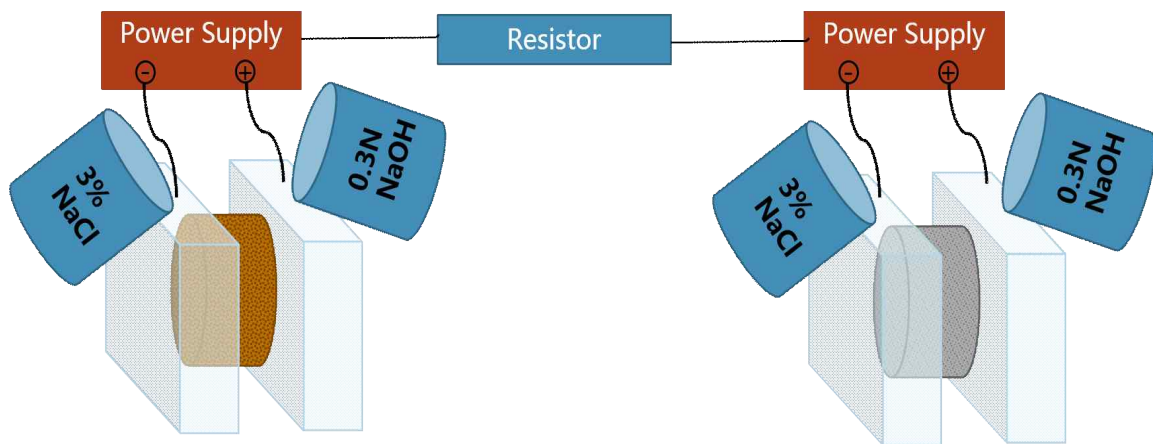


그림 2.29 염소이온 침투 저항성 실험 세트 모식도



그림 2.30 염소이온 침투저항성 실험 전경

⑦ 급속 동결융해 저항성

일반 시멘트 모르타르와 산화마그네슘 모르타르를 100×100×400mm의 규격으로 공시체를 제작하고 ‘급속 동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법 (KS F 2456)’ 중 수중 급속 동결 융해 시험방법 (시험법 A)에 따라 그 저항성을 평가하였다. 동결융해 시험기의 동결 시 4℃에서 -18℃, 다시 융해 시 -18℃에서 4℃를 1 사이클로 하여 총 300 사이클을 반복하였다. 매 10 사이클 마다 공명 진동수를 측정하여 식 (7)에 따라 상대동탄성 계수를 계산하였다. 급속동결융해 시험기 및 상대동탄성계수 측정 사진은 다음 그림 2.31과 같다.



그림 2.31 급속동결융해 시험기 및 상대동탄성계수 측정

$$P_c = \left(\frac{n_c^2}{n_0^2} \right) \times 100 \quad (7)$$

P_c : 동결 융해 C 사이클 후의 상대 동 탄성 계수 (%)

n_0 : 동결 융해 0 사이클에서의 변형 진동의 1차 공명 진동수 (Hz)

n_c : 동결 융해 C 사이클 후의 변형 진동의 1차 공명 진동수 (Hz)

식 (8)에 따른 상대 동 탄성 계수 값을 바탕으로 내구성 지수를 다음 식 (7)에 따라 산정하여 비교·분석 하였다.

$$DF = \frac{PN}{M} \quad (8)$$

DF : 시험용 공시체의 내구성 지수(%)

P : N 사이클에서의 상대 동 탄성 계수 (%)

N : 상대 동 탄성 계수가 60%가 되는 사이클 수 또는 동결 융해에의 노출이 끝나게 되는 순간의 사이클 수

M : 동결 융해에의 노출이 끝날 때의 사이클 수

⑧ 미끄럼 저항성 시험

도로 포장체의 미끄럼 저항성은 도로 이용자의 안전과 직결된 중요 인자이다. 특히, 강우로 인한 노면의 수막현상과 겨울철 결빙에 의한 포장면의 변화는 미끄럼 저항성의 약화를 초래한다. 이에 따라 보수재료 개발에 따라 현장에 적용시 미끄럼 저항성에 대한 평가는 필수 요건이라 할 수 있다.

일반적으로 미끄럼 저항성을 측정하는 방식은 측정기계의 특성에 따라 정적인 측정과 동적인 측정으로 나눌 수 있다. 동적 측정방법은 미끄럼 측정장치가 내장된 특수 차량(Pavement Friction Tester)을 이용하여 현장 도로 주행을 통한 측정 데이터(Skid Number)를 확보하는 방식으로 데이터의 신뢰도가 높은 반면, 특수 차량의 운행에 제약조건이 많다. 다음 그림 2.32는 본 연구에서 적용한 정적 미끄럼 저항성을 측정하는 사진을 보여주고 있으며, 측정값은 BPN(British Pendulum Number),으로 나타낼 수 있다.



그림 2.32 미끄럼 저항성 측정

(마) 보수재료로의 경제성 분석

현재 초속경시멘트를 사용하고 있는 급속 포장 보수공법들의 가장 큰 문제점 중에 하나는 초속경시멘트 등 재료의 가격이 높아 전체적으로 공사비가 증가함으로써 경제성을 악화시키는 단점이 있다. 따라서 이와 같은 경제성 문제를 해결함과 동시에 신속 교통 개방형 포장 보수 공법을 개발하는 것은 매우 시급한 문제로 대두되고 있다. 본 연구에서는 초속경시멘트를 사용하지 않고 산화마그네슘과 인산칼륨을 혼합한 조기강도 발현 특수 산화마그네슘 계열 세라믹 시멘트를 개발하였다. 특히 산화마그네슘 계열 세라믹 시멘트의 주요 장점 중에 하나가 부착성능이 우수하여 에폭시 및 폴리머계열과 달리 기존 콘크리트의 프라이머층 시공 등과 같은 별도의 처리가 요구되지 않고 많은 인력이 필요하지 않은 장점으로 인하여 시공성이 우수함에 따른 경제성 확보가 매우 용이하다. 따라서 시공비의 감소가 가능한 공법이면서 재료비의 감소를 추가적으로 확보할 수 있다. 본 연구에서는 재료가격 측면에서 경제성 분석을 실시하였다. 따라서 본 연구는 최근 개발되고 보수시 주로 이용되고 있는 라텍스 개질 콘크리트 공법과 재료적인 측면에서 비교·분석하였다.

제3절 연구수행결과 및 결과의 검증 방법 등

1. 최적배합비 선정

산화마그네슘계열 세라믹 결합재를 보수재료로 활용하기 위해 개발재료에 대한 최적배합비 선정이 요구되며, 최적배합비의 경우 조기교통개방을 위한 조기강도와 작업시간 확보를 위한 응결시간 분석을 통하여 선정하였다. 조기강도의 경우 재령 1일(24시간) 강도 30MPa를 기준으로 설정하였으며, 응결시간의 경우 40분 이상으로 설정하였다. 이와 같은 결과를 바탕으로 산화마그네슘계열 세라믹 결합재의 경화특성 확인을 위하여 공극구조 분석과 XRD 및 XRF분석을 실시하였다.

가. 초기압축강도 특성

산화마그네슘계열 세라믹 결합재에 대한 초기 압축강도 특성을 분석하기 위해 1일(24시간) 압축강도 측정을 선행하여 M/P비, W/B비, Borax 혼입에 따른 압축강도 양상을 분석하였다. 그 결과를 지연제의 혼입율에 따라 나누어 분석하였다.

(1) No Borax

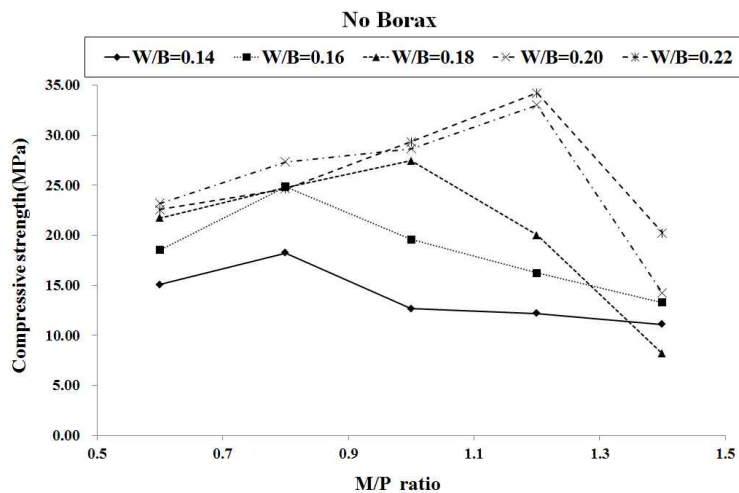


그림 2.33 W/B비 및 M/P비에 따른 1일 압축강도 결과(No-Borax)

지연제를 혼입하지 않은 시험체의 경우 W/B비가 낮을수록 낮은 M/P에서의 높은 강도 발현 양상을 나타내었으며, W/B비가 높아질수록 높은 M/P에서 높은 강도 양상을 나타내었다. 따라서 강도발현을 하기 위해서는 적정의 M/P비의 구성비에서는 혼입되는 W/B비 조절이 되어야 한다. 또한 일정 이상의 M/P의 구성비를 사용될 경우 강도가 급격히 저하하는 양상을 나타내었다.

지연제의 혼입이 없는 산화마그네슘계열 세라믹 결합재는 M/P비가 1.2, W/B비 0.22에서 가장 높은 강도 발현을 하였으며, 약 35MPa의 강도 발현을 나타내었다. 또한 지연제의 혼입이 없는 경우 W/B비가 높을수록 강도가 증가하는 양상을 나타내는데 이는 급격한 경화특성으로 작업성 확보가 어려워 W/B비가 높은 시험체가 높은 강도 특성을 나타낸 것으로 사료된다.

(2) Borax=5%

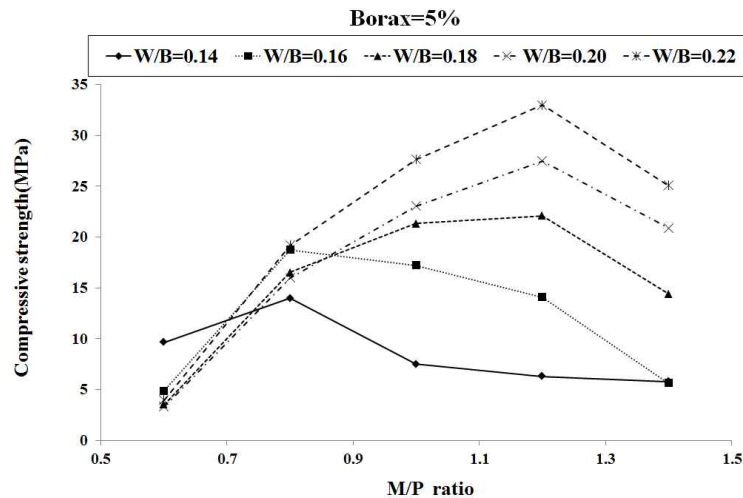


그림 2.34 W/B비 및 M/P비에 따른 1일 압축강도 결과(Borax=5%)

지연제를 5% 혼입하여 사용할 경우 지연제를 혼입하지 않은 시험체와 유사한 경향을 나타내었으며 W/B비가 높을수록 강도 발현이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 W/B비 0.14, 0.16의 경우 M/P비가 0.8에서 높은 강도 발현을 보였으며, 그 이상의 M/P비가 구성비로 사용될 경우 강도는 감소하는 특성을 나타내었다. 또한 나머지 W/B비가 0.18 이상이 될 경우 M/P비가 1.2에서 높은 강도 양상을 나타내었으며, 그 이상의 산화마그네슘의 혼입 증가될수록 오히려 감소하는 특성을 보였다.

(3) Borax=7.5%

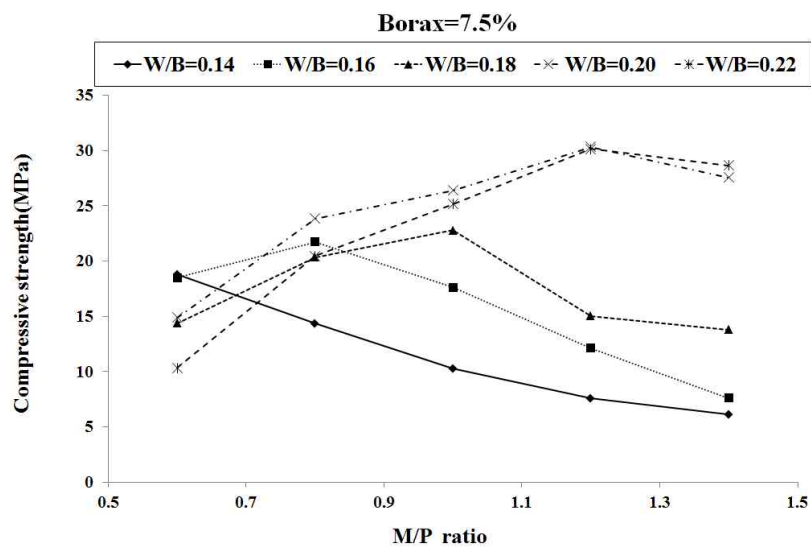


그림 2.35 W/B비 및 M/P비에 따른 1일 압축강도 결과(Borax=7.5%)

지연제를 7.5% 혼입하여 사용할 경우 W/B비가 0.14의 경우 가장 낮은 M/P에서 높은 강도 양상을 나타내었으며, 그 이상일 때 지속적으로 강도가 감소하는 경향을 나타내었다. W/B비가 0.16의 경우 M/P비가 0.8, W/B비가 0.18의 경우 1.0, W/B비가 0.20 이상이 될 경우 M/P비가 1.2에서 높은 강도 발현을 하였다. 이는 지연제의 혼입 유무와 관계없이 산화마그네슘, 인산칼륨, 물의 구성비에 따라 최적으로 화학적 반응이 진행되는 것으로 확인된다.

(4) Borax=10%

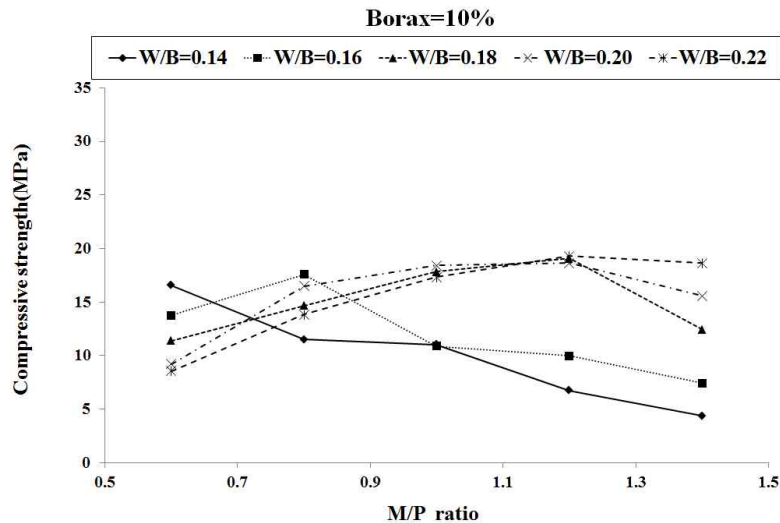


그림 2.36 W/B비 및 M/P비에 따른 1일 압축강도 결과(Borax=10%)

지연제를 10% 혼입한 경우 그 이하의 혼입율보다 다소 낮은 강도 양상을 나타내었으며, M/P비와 W/B에 대한 경향은 유사한 것으로 확인되었다. 지연제 혼입율 10%에서의 강도 저하는 지연제의 혼입율이 증가함에 따라 어느 정도의 지연효과를 보이지만 산화마그네슘계열 세라믹 결합재의 특성상 초기의 화학적 반응이 진행되므로 일정의 초기의 경화반응이 후에는 화학적 반응이 지속되지 않는 것으로 사료된다.

나. 응결시간 시간 분석

산화마그네슘계열 세라믹 결합재의 응결시간 특성 분석을 위해 지연제의 혼입율에 따라 구분하여 다음 그림 2.37~40과 같이 나타내었다. 보수재료로 활용하기 위해서는 응결시간 40~60분으로 설정하였다.

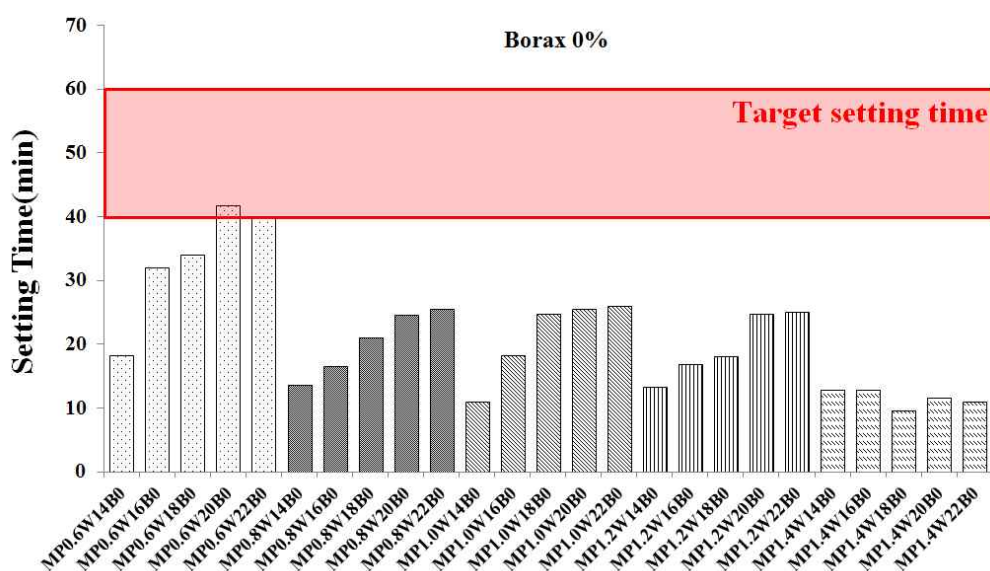


그림 2.37 W/B비 및 M/P비에 따른 응결시간 특성(Borax=0%)

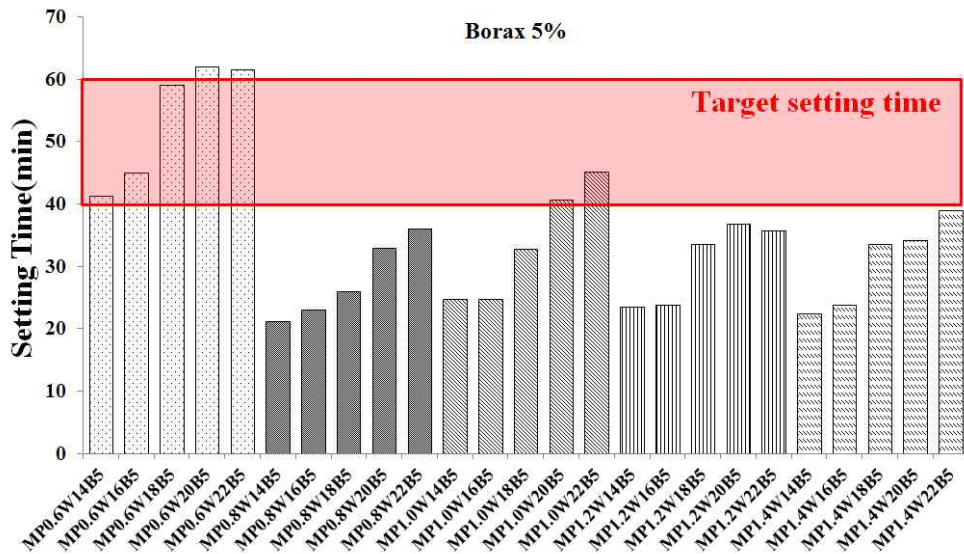


그림 2.38 W/B비 및 M/P비에 따른 응결시간 특성(Borax=5%)

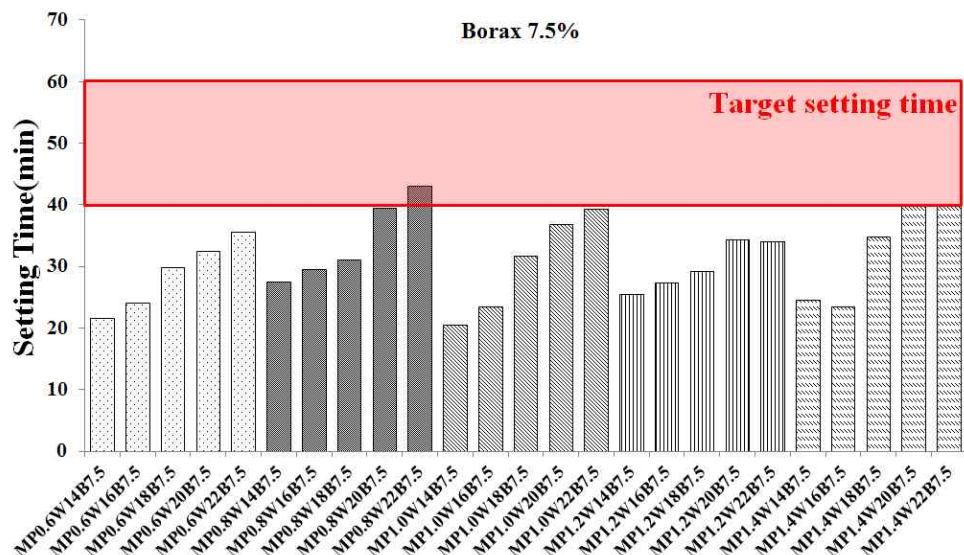


그림 2.39 W/B비 및 M/P비에 따른 응결시간 특성(Borax=7.5%)

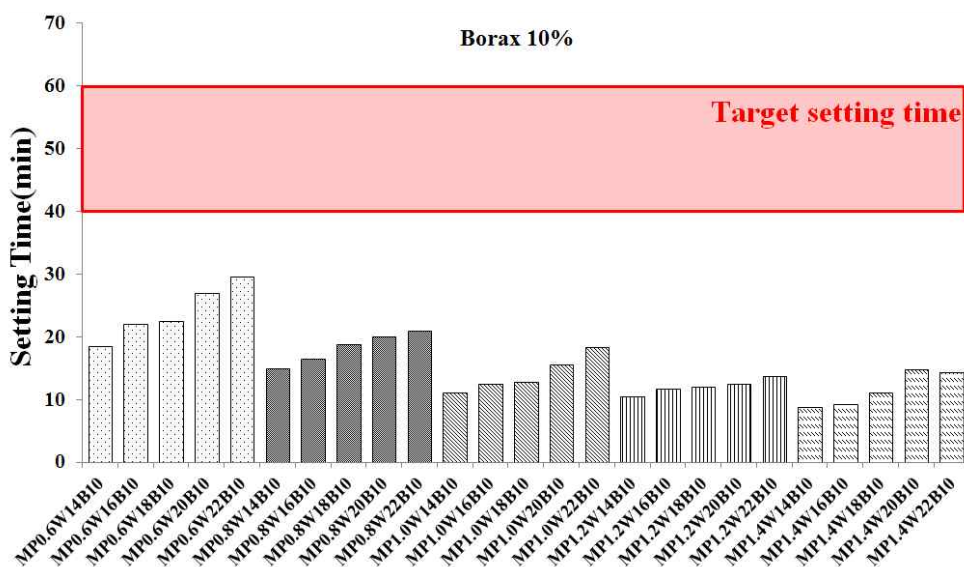


그림 2.40 W/B비 및 M/P비에 따른 응결시간 특성(Borax=10%)

산화마그네슘계열 세라믹 결합재의 응결시간 시험 결과, 지연제를 혼입하지 않은 시험체의 경우 20~40분 내외의 응결시간으로 측정되었으며, W/B가 증가할수록 응결시간이 증가하는 것으로 확인되었다. 또한 지연제를 5% 혼입한 경우 약 1시간 까지 지연시킬 수 있으며, 이로 인하여 작업성 확보가 가능할 것으로 판단된다. 하지만 5% 이상의 지연제를 혼입할 경우 지연효과가 급격히 감축되는 것으로 나타났으며, 다른 변수의 경우에도 W/B비의 증가로 응결시간 또한 증가되는 것으로 확인되었다.

(1) No Borax

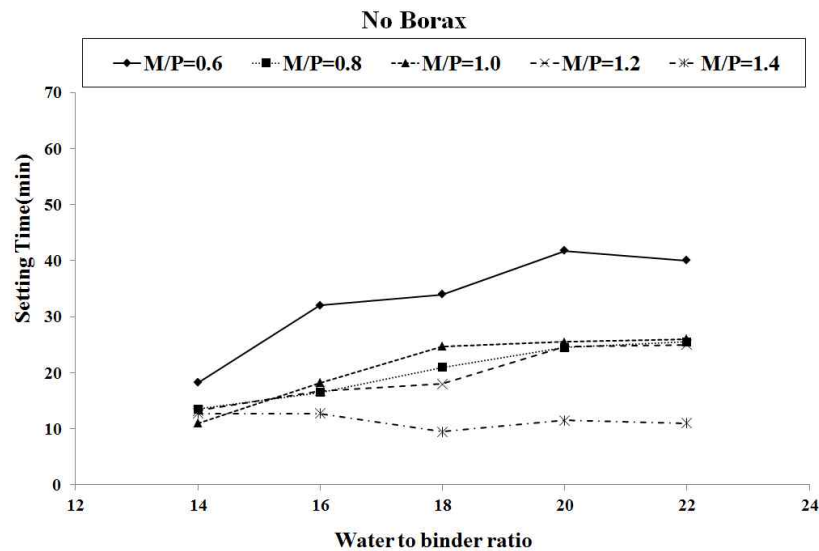


그림 2.41 W/B비 및 M/P비에 따른 응결시간 특성(No-Borax)

지연제(Borax)를 혼입하지 않은 경우 M/P비가 0.6의 시험체가 응결시간이 가장 늦은 것으로 나타났으며, M/P비가 증가할수록 응결시간이 감소되는 것으로 확인되었다. 그리고 M/P비가 1.4인 경우를 제외한 모든 시험체가 W/B비가 증가함에 따라 응결시간도 증가하는 것으로 나타났다.

(2) Borax=5%

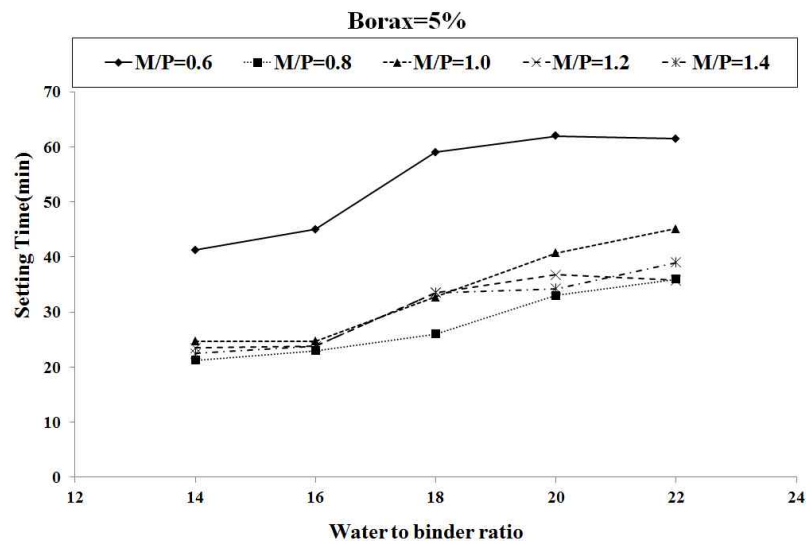


그림 2.42 W/B비 및 M/P비에 따른 응결시간 특성(Borax=5%)

지연제(Borax)를 5% 혼입한 경우 M/P비가 0.6에서 가장 높은 지연효과를 나타내었으며, 지연효과로 인하여 약 1시간 이상의 응결시간을 확인하였다. 또한 모든 시험체가 W/B비가 증가함에 따라 응결시간도 증가하는 양상을 나타내었다. M/P비가 0.8 이상의 시험체는 유사한 응결시간 특성을 보였다.

(3) Borax=7.5%

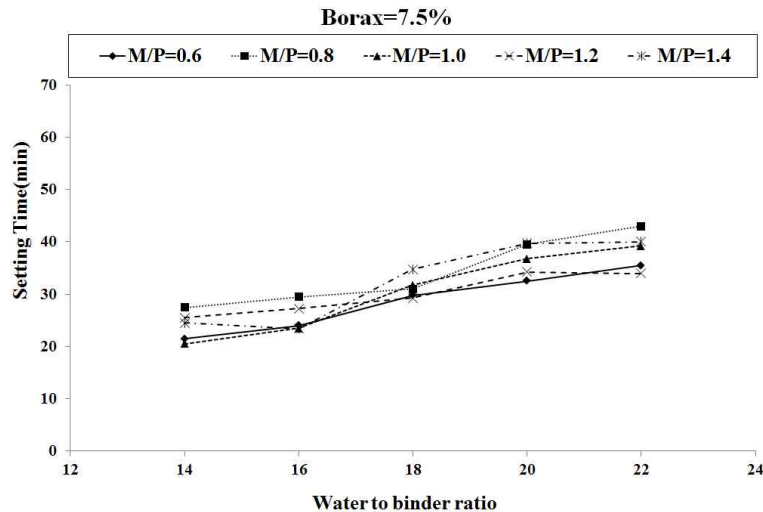


그림 2.43 W/B비 및 M/P비에 따른 응결시간 특성(Borax=7.5%)

지연제(Borax)를 7.5% 혼입한 경우 모든 시험체가 지연효과가 감축되는 양상을 나타내었으며, 응결시간은 20~40분으로 측정되었다. 또한 W/B비가 증가할수록 응결시간 또한 증가되었다.

(4) Borax=10%

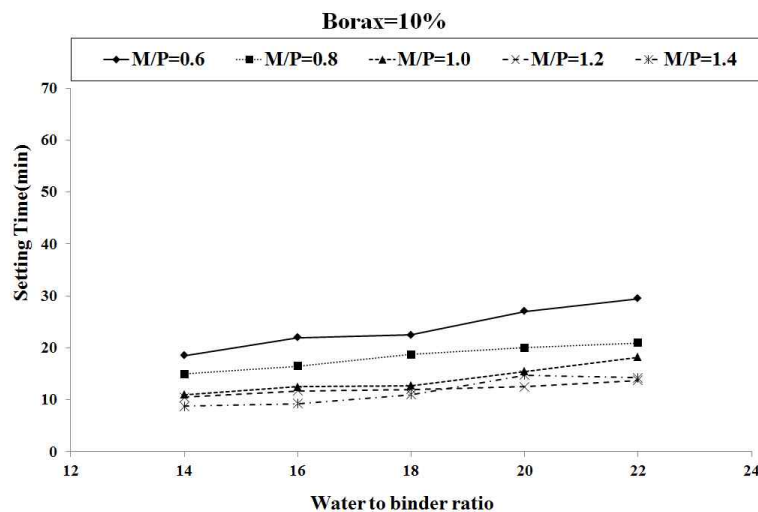


그림 2.44 W/B비 및 M/P비에 따른 응결시간 특성(Borax=10%)

지연제(Borax)를 10% 혼입한 경우 지연제를 혼입하지 않는 시험체와 유사한 응결시간을 나타내었으며, 지연제를 혼입하지 않은 경우와 비교하였을 때 응결시간이 감소하는 경우도 확인되었다. 이는 적정의 지연제를 사용할 경우 지연효과를 보이지만 적정 이상의 지

연제를 사용할 경우 지연제의 효과가 없는 것으로 판단된다.

다. 시간별 강도 발현 특성

산화마그네슘계열 세라믹 결합재 시간별 압축강도 특성을 확인하기 위하여 사전에 시험된 자료를 참고하여 가장 높은 강도 발현을 한 시편에 대해 시험 후 비교 분석하였다. 시험체는 M/P비는 10이며, W/B는 0.22, 지연제 5%를 고정으로 한 시편에 대하여 기존 신멘트 페이스트와 비교 분석하였다. 그 결과, 다음 그림 2.45와 같이 나타내었으며 지연제를 혼입하지 않은 경우 3시간에서 20MPa이상의 강도 발현을 하였고, 지연제를 5% 혼입한 시험체는 약 17MPa의 압축강도를 나타내었다. 그래프 상에서 확인한 결과 약 1-3시간의 경화시간에서 지연효과를 보이는 것으로 확인되었다.

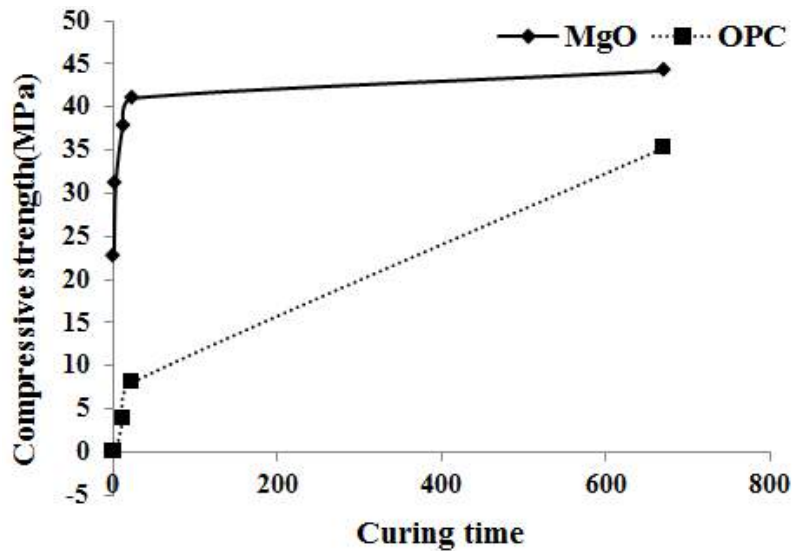


그림 2.45 M/P=10, W/B=0.22, Borax=5%의 시간별 압축강도 특성

라. 초기압축강도 및 응결시간 관계 분석

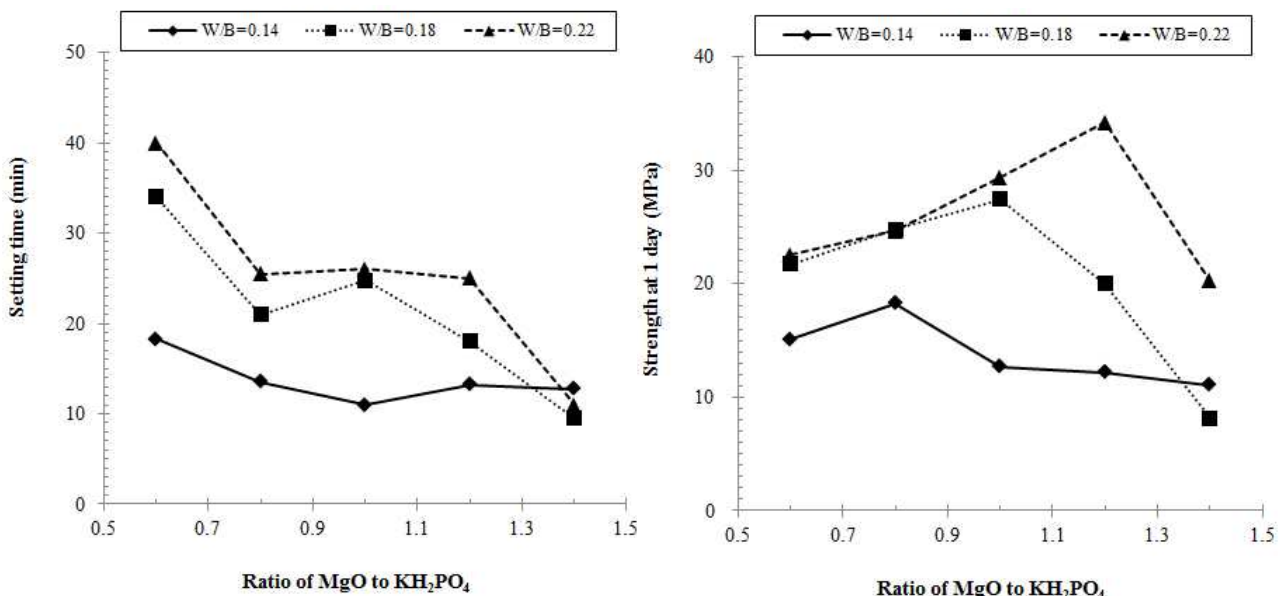


그림 2.46 산화마그네슘 계열 결합재의 응결시간 및 1일강도 특성(No-Borax)

초기 압축강도 특성은 변수별 재령 1일 강도를 비교 분석을 실시하였으며, 지연제를 사용하지 않는 경우를 비교하면 그 결과는 그림 2.46과 같다. 응결시간 시험의 경우 M/P비가 증가할수록 (산화마그네슘의 함유량이 증가할수록) 응결시간이 짧아지는 것으로 확인되었으며 W/B비의 영향을 보면 W/B비가 낮을수록 응결시간이 빨라지는 경향을 나타내었다. 1일 압축강도 특성을 확인한 결과, M/P비 및 W/B비에 따른 영향 인자로 W/B비가 0.22인 경우 M/P비가 1.2에서 가장 높은 강도 발현을 하였고, W/B비가 낮은 0.14에서는 M/P비가 0.8에서의 강도 발현이 가장 높은 것으로 확인되었다. 따라서 높은 강도 발현을 위해서는 W/B비가 높아질수록 높은 M/P비(높은 산화마그네슘 함유량)가 요구되며, W/B비가 낮아질수록 낮은 M/P비(낮은 산화마그네슘 함유량)에서 강도가 발현되는 것으로 확인된다. 이는 산화마그네슘계열 세라믹 결합재의 경우 반응이 되는 M/P비에 따라 적절한 W/B비가 요구되는 것으로 판단된다. 또한 지연제(Borax)의 혼입율에 따른 응결시간 및 압축강도 경향을 확인하기 위해 M/P비가 1에서의 지연제의 혼입율에 따른 경향을 확인하였다. 그 결과 다음 그림 2.47과 같다.

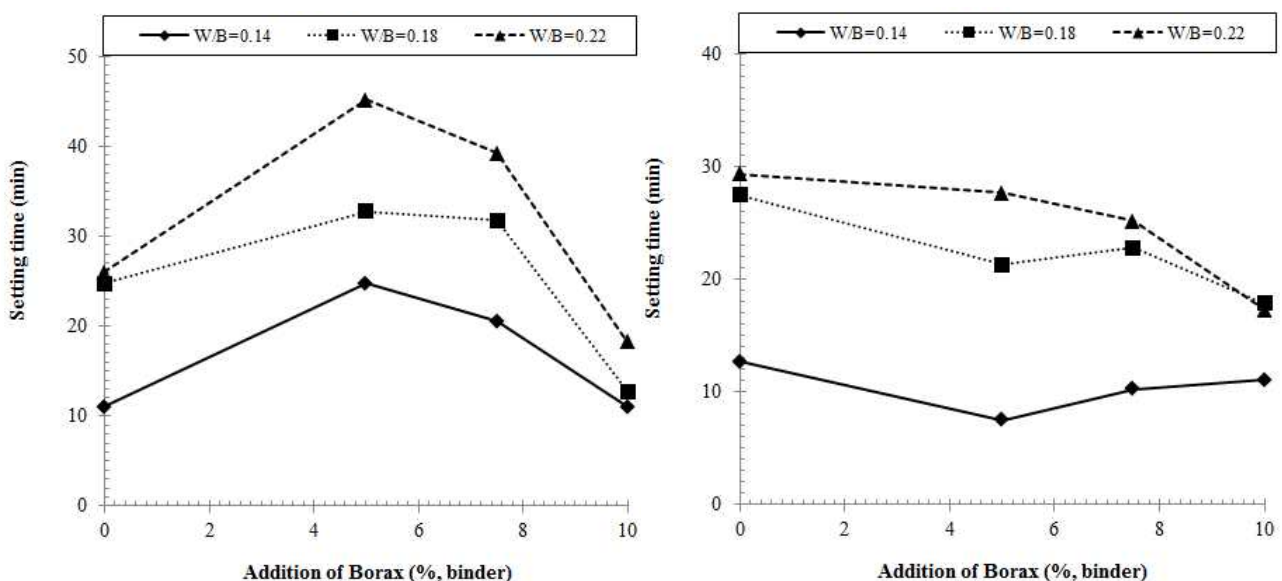


그림 2.47 산화마그네슘 계열 결합재의 응결시간 및 1일강도 특성(M/P=1)

M/P비가 1일 때 응결시간의 경우 지연제(Borax)혼입율이 5%까지 지연되는 양상을 나타내었지만 그 이상의 지연제가 혼입될 경우 지연효과가 감소되거나 경화시간이 짧아지는 것으로 확인되었다. 이에 따라 작업시간을 확보를 위한 지연효과를 초래하기 위한 지연제의 혼입율은 5%가 적절하다고 판단된다. 또한 지연제의 혼입율에 따른 강도발현 특성은 미미한 것으로 확인되었으며, 지연제의 혼입율이 7.5%이상이 되면 강도가 저하되는 것으로 나타내었다.

마. 공극특성 분석 결과

산화마그네슘계열 세라믹 결합재의 공극특성을 분석하기 위하여 결합재의 물성에 끼치는 영향 인자 별로 구분하여 시험을 진행하였다. 시험 결과는 M/P비, W/B비, 지연제의 혼입을 별로 구분하여 결과 정리를 하였으며 각각의 인자별로 분석하기 위하여 분석시 다른 인자들은 고정하여 정리하였다. 또한 압축강도와의 관계를 확인하기 위하여 압축강도 결과 같이 그래프에 표현하였다. 이에 따라 그 결과는 다음 2.48~2.50과 같이 나타내었다.

(1) M/P비에 따른 공극특성

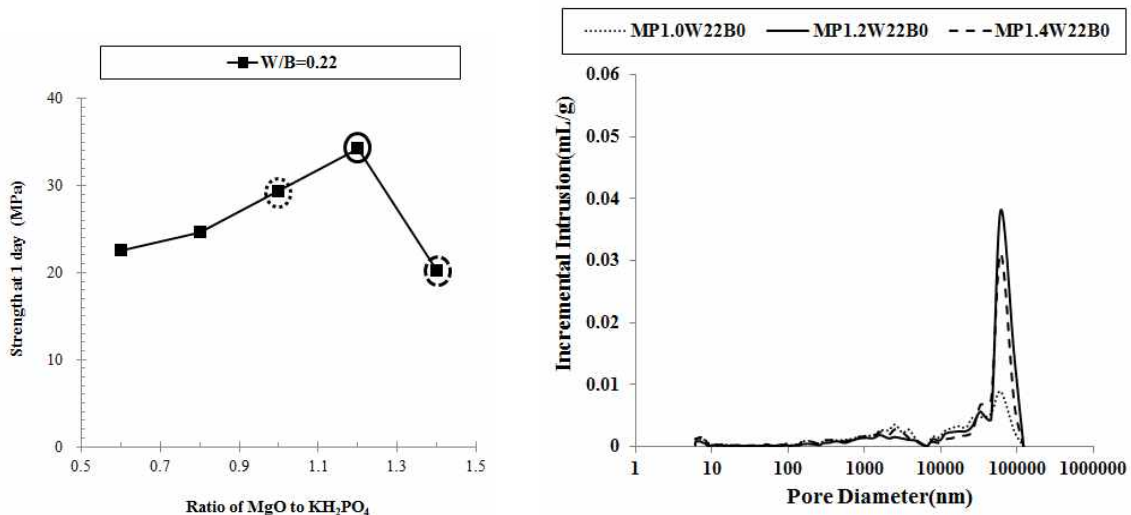


그림 2.48 M/P비에 따른 압축강도 및 공극분포 특성

산화마그네슘계열 세라믹 결합재의 공극분포 특성을 확인한 결과 공극직경 약 $10^4 \sim 10^5$ nm에서 분포를 나타내었으며, 이는 시멘트 모르타르 공극분포보다 다소 높은 공극직경 및 분포로 확인되었다. 이는 시멘트와 결합재의 특성이 상이하며, 세라믹 결합재 특성상 급속한 경화속도로 인한 것으로 판단된다. 또한 강도 변화에 따른 분포 양상은 나타나지 않았으며, 이는 강도발현은 결합재의 공극분포보다 화학적 반응에 기인하는 것으로 사료된다.

(2) W/B비에 따른 공극특성

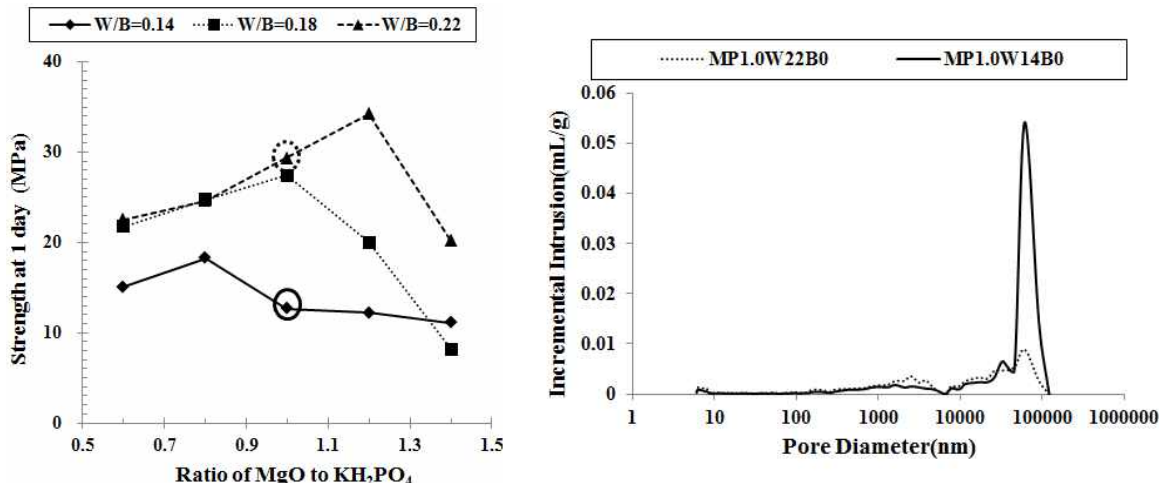


그림 2.49 W/B비에 따른 압축강도 및 공극분포 특성

다음은 W/B에 따른 압축강도 발현에 따른 공극분포 특성이다. W/B비 0.14와 0.22를 비교 분석하였으며, W/B비에 따른 압축강도와 공극분포 특성은 직경의 크기에 따른 강도 발현을 나타내었다. 공극직경 약 $10^4 \sim 10^5 \text{nm}$ 에서 분포를 나타내었고, 분포 특성은 유사하나 공극직경이 차이나는 것으로 확인된다. 이는 산화마그네슘과 인산칼륨의 반응시 일정 이상의 수분이 공급이 되어야 작업성 및 물성 특성 향상에 기인할 것으로 판단된다.

㉔ 지연제 혼입율에 따른 공극특성

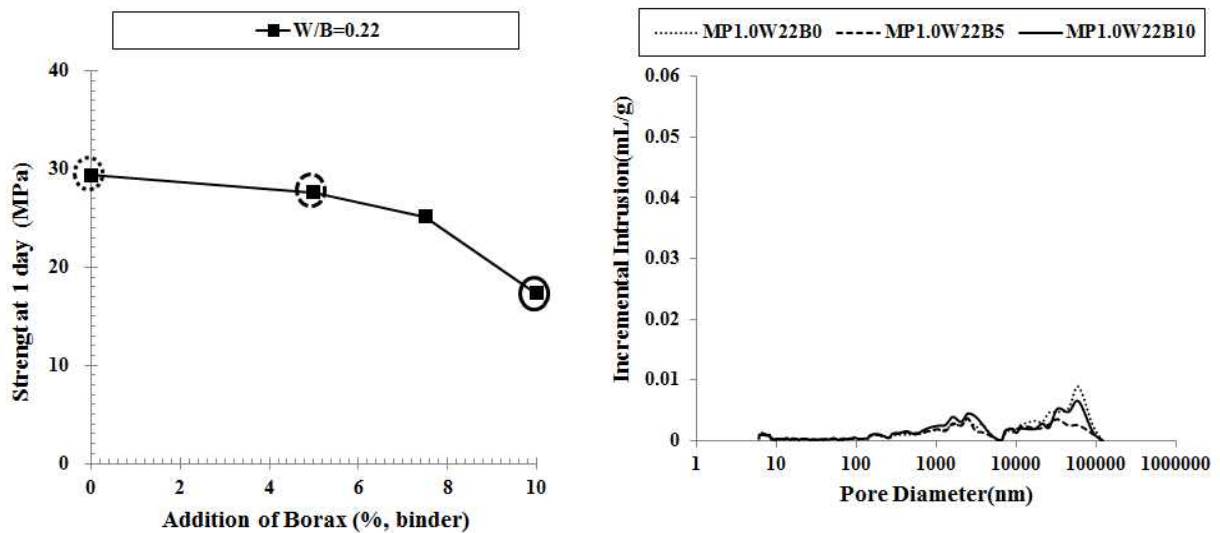


그림 2.50 Borax 혼입율에 따른 압축강도 및 공극분포 특성

다음은 지연제의 혼입율에 따른 공극분포 특성을 나타내었다. 그 결과 지연제의 혼입에 따라 상기의 응결시간 결과와 같이 지연제의 5% 혼입될 경우 가장 우수한 지연효과를 나타내었으며, 이는 위의 그림 2.50과 같이 다음 시편에 비교하여 공극직경에 따른 균일한 분포 특성을 가지며, 낮은 분포도를 측정되었다.

바. XRD 및 XRF 분석 결과

상기의 공극분포 시험결과에 따라 시멘트 모르타르에 비해 다소 높은 공극분포 특성을 나타내지만 높은 강도 발현의 원인 분석 및 성분 확인을 위해 XRD 및 XRF 분석을 실시하였으며, 그 결과 다음과 같다.

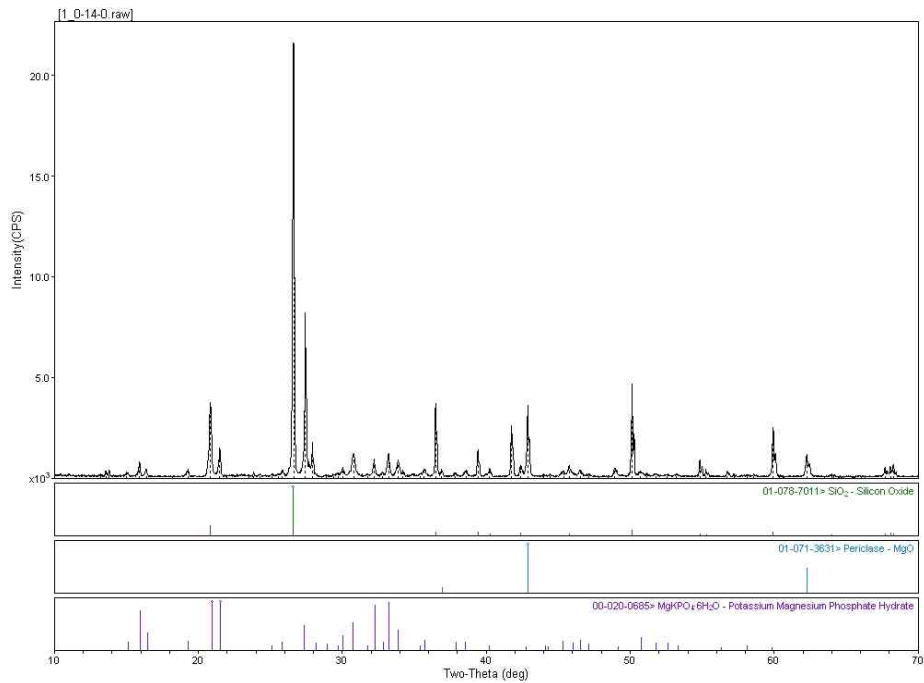


그림 2.51 M/P=1, W/B=0.14, No-Borax XRD 분석결과

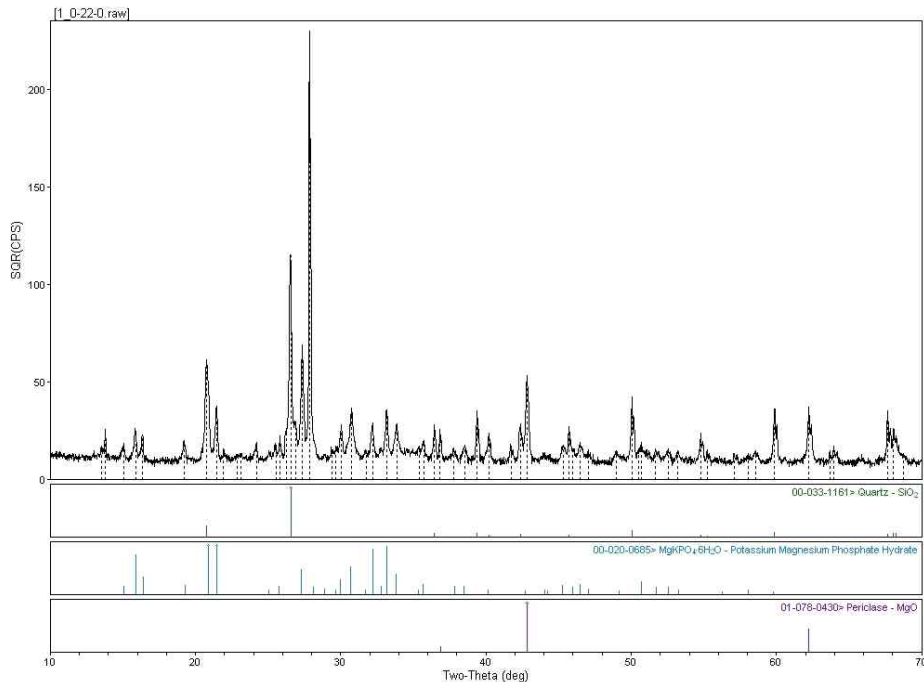


그림 2.52 M/P=1, W/B=0.22, No-Borax XRD 분석결과

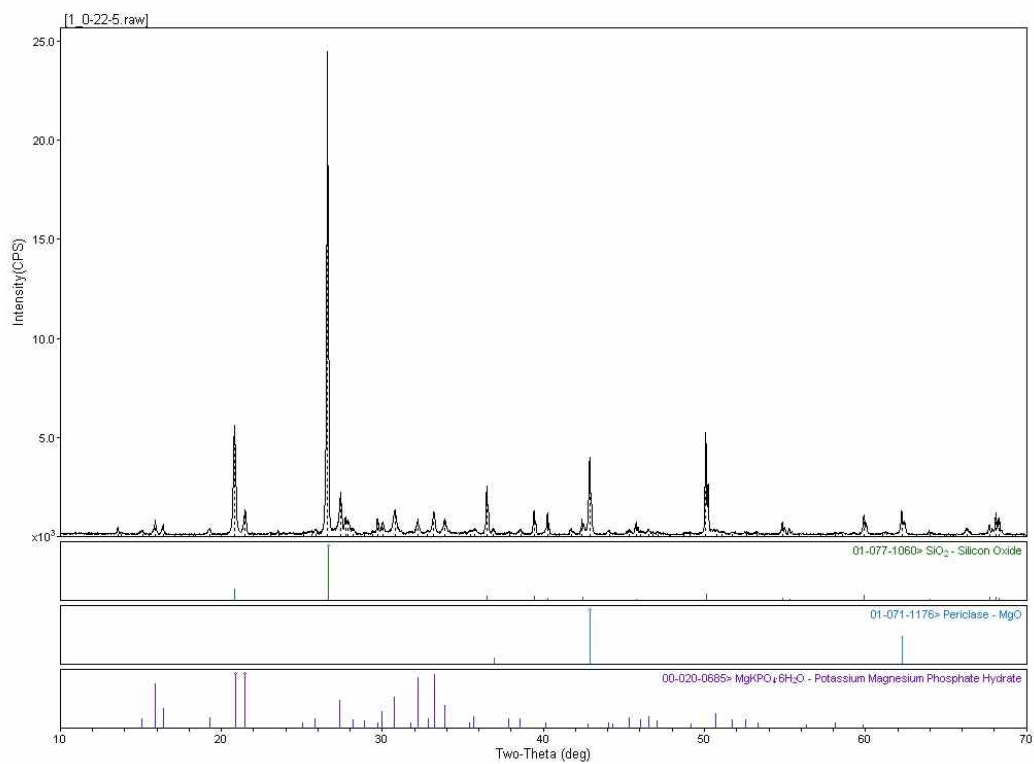


그림 2.53 M/P=1, W/B=0.22, Borax=5% XRD 분석결과

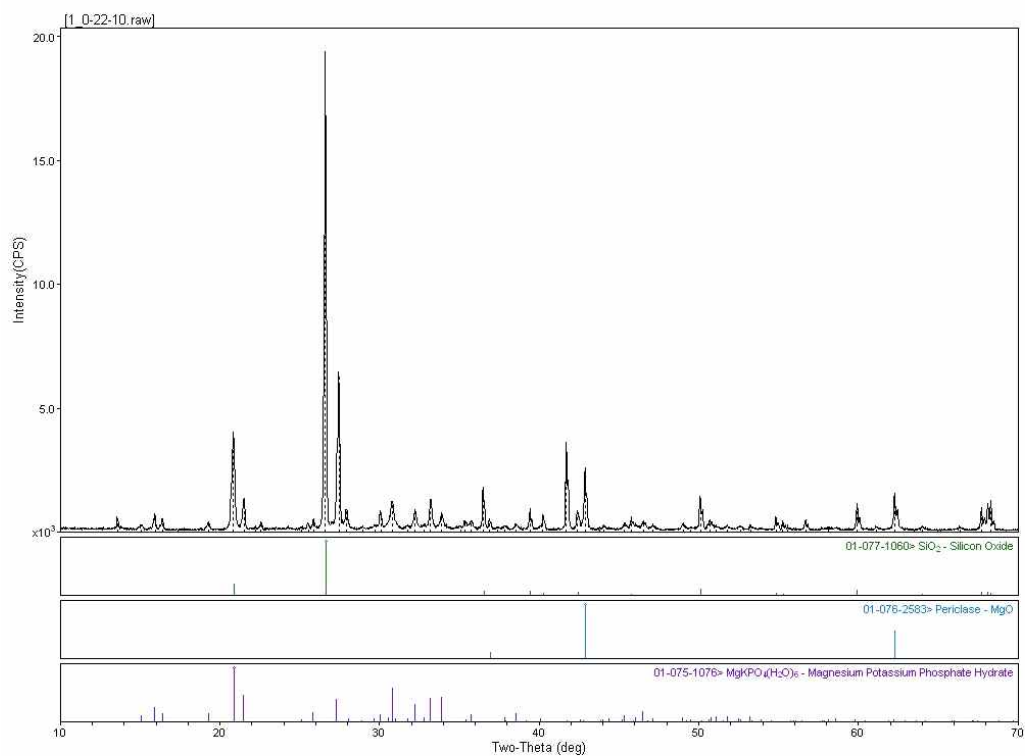


그림 2.54 M/P=1, W/B=0.22, Borax=10% XRD 분석결과

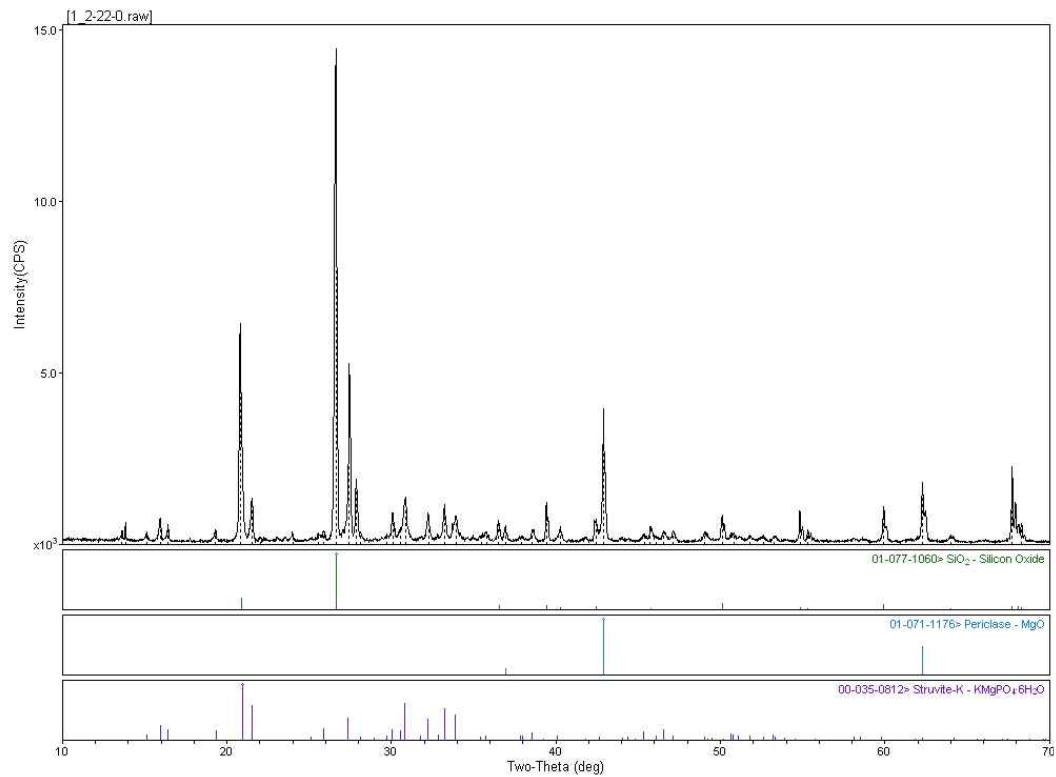


그림 2.55 M/P=1.2, W/B=0.22, No-Borax XRD 분석결과

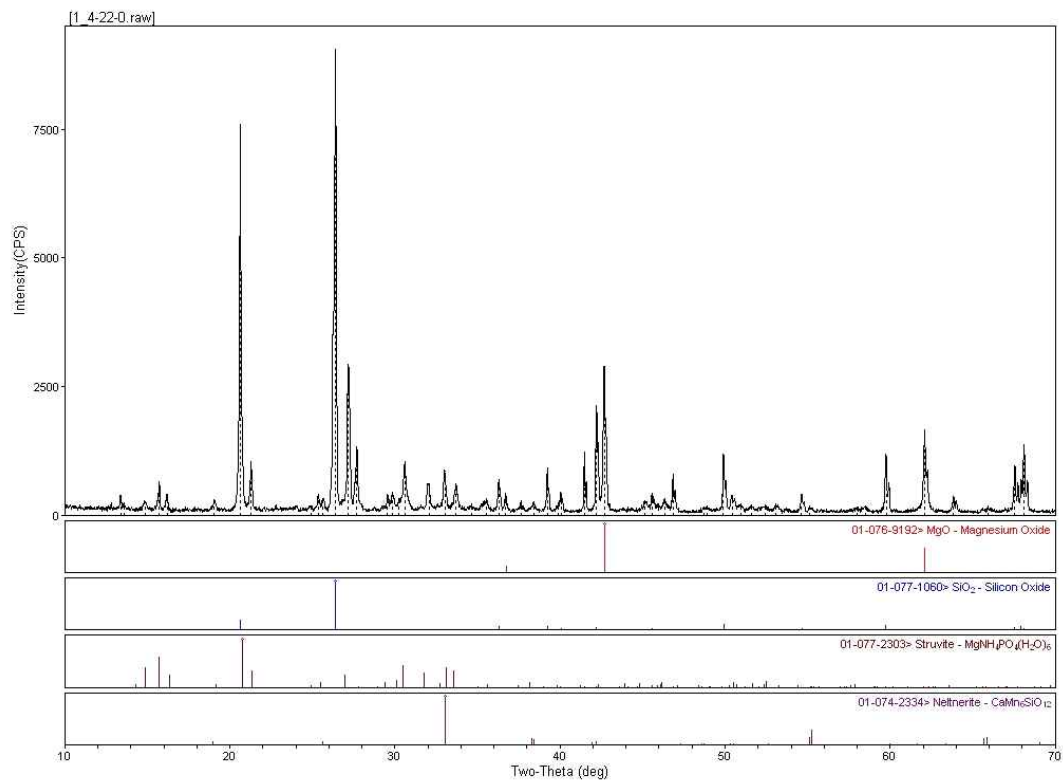


그림 2.56 M/P=1.4, W/B=0.22, No-Borax XRD 분석결과

2. 보수재료로의 적용성 평가

가. 모르타르 패칭

콘크리트 포장의 부분 파손을 보수하기 위해서 주로 단면 패칭 방식이 공통적으로 사용한다. 이에 따라 본 연구에서는 산화마그네슘계열 세라믹 결합재를 보수재료로 활용하기 위해서 단면복구재로 적용성을 확인하고자 한다. 부분단면 패칭은 작은 면적에 걸쳐 파손 부분을 메우거나 채워 노면의 평탄성을 유지하는 공법이다. 패칭 재료로는 시멘트계, 아스팔트계와 수지계의 세 종류로 나눌 수 있으며, 패칭 두께에 따라 모르타르 또는 콘크리트 형태로 이용한다. 따라서 본 장에서는 상기의 최적배합선택에 따른 산화마그네슘계열 세라믹 결합재를 모르타르로 제작하여 일반 시멘트 모르타르와 비교·분석하고자 한다.

나. 시험체 제작

(1) 일반 시멘트 모르타르 (Ordinary Portland Cement, OPC)

‘시멘트의 강도 시험방법 (KS L ISO 679)’ 규정에 따라 $W/C = 0.5$, $C/S = 0.33$ 로 배합비를 정하여 일반 시멘트 모르타르를 제작하였다. 모르타르 배합기를 이용하여 약 2분 30초 동안 혼합하고 그 후 약 10초 동안 진동다짐을 동시에 진행하면서 타설하였다. 실험실 내 $26\pm1^{\circ}\text{C}$ 의 온도 하에 24시간 양생 후 탈형하였으며 이후 일반 시멘트 모르타르는 같은 온도로 28일 동안 수중양생을 진행하였다.

표 2.13 일반 시멘트 모르타르 배합비

변 수 명	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)
OPC	225	450	1350

(2) 산화마그네슘계열 세라믹 시멘트 모르타르 (Magnesium-Potassium Cement, MPC)

일반 시멘트 모르타르와 같이 KS L ISO 679 ‘시멘트의 강도 시험방법’ 규정에 따라 산화마그네슘 모르타르를 약 3분 동안 혼합하였으며 약 20초 동안 진동다짐을 동시에 진행하면서 타설하였다. 실험실 내 $26\pm1^{\circ}\text{C}$ 의 온도 하에 24시간의 양생 후 탈형 하였으며 같은 온도에서 습윤 양생을 진행하였다.

본 실험재료의 배합비 결정에 있어서 지연제 (Borax)와 산화마그네슘의 비율이 5% 일 경우 요구되는 작업시간의 확보가 가능하며 최적의 응결시간의 결과가 나타나 동일한 비율로 결정하였다. 또한 M/P비는 중량비로 환산하여 1.2를 결정하였으며, W/B비는 22%로 설정하여 최적배합비로 설정하였다. 물/바인더비에서 바인더는 산화마그네슘, 인산칼륨과 붕사(Borax)를 포함한 값이다. 산화마그네슘계열 세라믹 결합재의 경우 일반적인 배합설계에 대한 규정이 없어 1m³에 대한 양으로 배합설계를 하였으며, 물 바인더에 대한 단위용적의 나머지를 잔골재로 계산하여 설계를 실시하였다. 산화마그네슘계열 세라믹 결합재의 모르타르 배합비는 다음 표와 같다.

표 2.14 산화마그네슘계열 세라믹 결합재의 모르타르 배합비

변 수 명	Water (kg/m ³)	Magnesia Cement (kg/m ³)	Potassium Phosphate (kg/m ³)	Borax (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)
MgO	210	471	393	24	1250

다음 표 3.4 는 일반 시멘트모르타르와 산화마그네슘계열 세라믹 결합재의 모르타르의 배합 환경 및 양생 조건에 대해 기술하였으며, 두 변수 동일한 환경에서 배합을 실시하였으며, 산화마그네슘계열 세라믹 결합재의 모르타르의 경우 양생시 주변 환경에 대한 영향이 적고 수중양생이 필요하지 않아 일반 실험실 환경에서 양생을 실시하였다.

표 2.15 일반 시멘트 모르타르와 산화마그네슘계열 세라믹 모르타르의 배합 및 양생조건

변 수 명	배합 시 실내온도	배합시간	다짐시간	양생조건
OPC	26±1 °C	3 minutes	20 sec	26±1 °C 수중양생
MgO	26±1 °C	3 minutes	20 sec	26±1 °C 습윤양생

다. 응결시간 측정 결과

상기의 응결시간 및 초기압축강도 시험결과에 따라 산화마그네슘계열 세라믹 결합재에 대한 최적 배합비를 선정하였으며, 선정된 산화마그네슘계열 세라믹 결합재에 대한 보통 포트랜드 시멘트 모르타르와 비교하여 응결시간을 재정의하였다. 응결시간 측정은 KS L 5108 의 시험법에 따른 Vicat Needle 시험을 통해 OPC와 산화마그네슘계열 세라믹 결합재의 응결시간을 측정한 결과는 다음 그림 2.57과 같다.

다음 그림 2.57과 같이 3시간 이상의 초결까지 시간이 소요되는 일반 시멘트 모르타르에 비해 산화마그네슘 세라믹 모르타르의 초결 시간은 약 6배 정도 빠른 결과를 보였다. 산화마그네슘 세라믹 모르타르의 경우, 종결이 1시간 이내에 완료되는 것을 확인할 수 있었으며, 신속한 단면복구를 위한 도로포장의 보수재로서 이용하기에는 적합한 것으로 나타났다. 실제 보수재를 현장 적용함에 있어서 너무 빠른 응결시간은 작업성이 떨어져 이용하기에 어려우므로 최소 30분 이상의 작업시간이 요구된다. 종결까지의 1시간 이내의 경화시간을 갖는 산화마그네슘 세라믹 모르타르는 현장에서의 신속한 시공 뿐 아니라 조기 교통 개방까지 가능할 것으로 판단된다. 하지만 산화마그네슘 세라믹 모르타르를 단면복구재외 보다 광범위한 덧씌우기 또는 교면재포장과 같은 대단면에 대한 보수공법으로의 적용을 위해서는 응결시간을 지연하여 시공시간이 확보되어야 한다. 이에 따라 지연효과를 보다 명확하고 유동적으로 조절이 가능하도록 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

구분	초결 (hr:min)	종결 (hr:min)
MgO	0:35	0:43
OPC	3:10	3:50

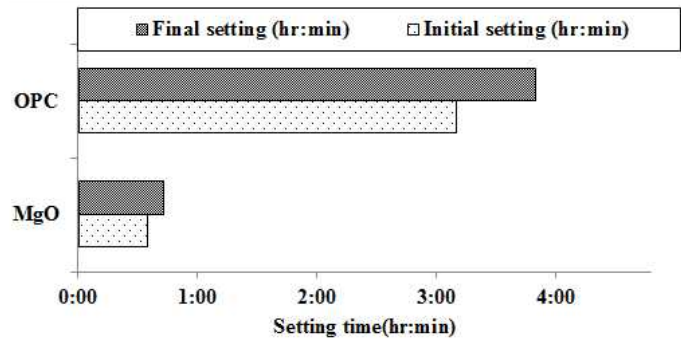


그림 2.57 일반 시멘트 모르타르와 산화마그네슘계열 세라믹 모르타르의 응결시간

라. 시간별 압축강도 측정 결과

또한 본 개발재료에 대한 조기강도확보에 대한 평가를 위해 시간별 압축강도 시험을 실시 하였으며, 일반 시멘트 모르타르와 산화마그네슘 세라믹 모르타르를 500×500×500mm의 시험체를 제작하여 KS F 4042에 따라 1, 3, 24 시간, 1, 28일 강도를 측정하였다. 변수별로 시험체 3개씩 강도를 측정하였으며 그 평균값을 이용하였다. 압축 강도 측정결과 일반 시멘트 모르타르의 경우 4.1절의 응결시간의 결과에 따라 초결이 3시간 이상 소요되어 3시간 강도 측정은 불가능 하였다. 그에 비해 1시간 이내에 종결이 완료되는 산화마그네슘 세라믹 모르타르의 경우 3시간 강도 측정 결과 31.1MPa로 3시간 이내에 30MPa이상의 강도를 확보하였으며, 이에 따라 산화마그네슘계열 세라믹 결합재에 대한 빠른 경화속도와 높은 조기강도 특성을 확인하였고, 재령 1일에도 OPC대비 약 5배 이상의 높은 강도 발현을 하였다. 재령 28일인 장기적인 측면에서도 44.2MPa로 높은 수준의 강도를 나타내었으며, 산화마그네슘 세라믹 모르타르의 경우 재령 28일을 기준으로 3시간 이내에 70%이상의 강도발현을 하는 것으로 확인되었다.

재령	시간(재령)별 압축강도(MPa)	
	MgO	OPC
1hr	22.8	0
3hrs	31.1	0
12hrs	37.9	3.8
1day	41.0	8.1
28days	44.2	35.3

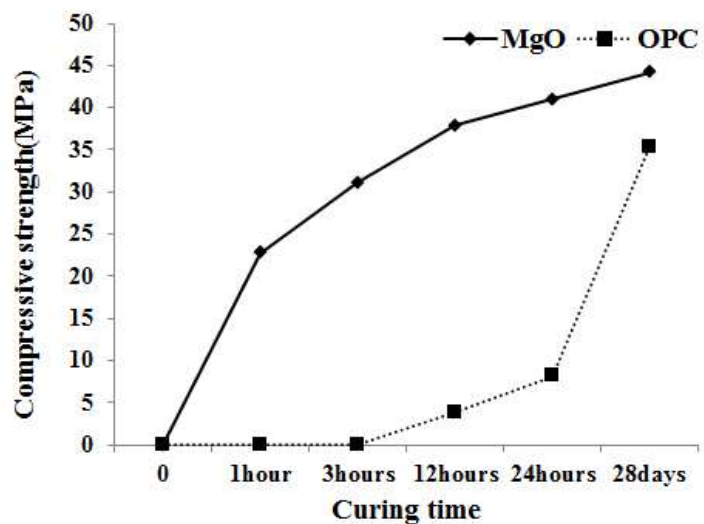


그림 2.58 일반 시멘트 모르타르와 산화마그네슘계열 세라믹 모르타르의 압축강도

마. 휨 부착강도 측정 결과

휨 부착강도의 경우에는 보수재료의 모르타르에 대한 성능은 규정하고 있지 않으며, 시멘트계 보수재료와의 비교를 위해 KS F 4923의 보수용 에폭시 수지에 대한 시험 규정에 입각하여 평가하였다. 휨 부착강도 시험은 KS F 4923에 따라 시험을 수행하였으며, 일반 시멘트 모르타르와 본 연구에서 개발된 산화마그네슘 세라믹 모르타르에 대하여 비교하였다. 각각 변수별 3회 시험을 수행하고 평균값을 측정하였다. 부착강도의 경우 보수재료로 활용시 기존 콘크리트와의 부착성능을 확인하는 데에 주요한 인자이며, 휨 부착과 인장 부착강도로 나눌 수 있다. 기존의 콘크리트의 경우 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 그 결과, KS에서 규정하고 있는 에폭시 수지와 비교하면 다소 낮은 휨 부착강도를 나타내었지만 보수재료로의 일반 시멘트 모르타르 경우 상이한 세라믹 계열 재료임에도 불구하고 시멘트계 모르타르에 비하여 높은 부착성능을 나타내었으며, 산화마그네슘 세라믹 모르타르의 경우 OPC에 비하여 약 2배의 높은 부착성능을 나타내었다. 또한 기존 콘크리트 부분의 다른 계열의 재료와 달리 프라이머 및 접착제의 시공 없이 측정된 성능으로 산화마그네슘 세라믹 모르타르가 부착성능에 대하여 우수한 것으로 판단된다. 이에 따라 인장 부착강도 성능은 KS F 4042 및 콘크리트 포장 단면 품질기준을 만족하고 기존 시멘트계 열 모르타르 보수재료보다 우수한 부착성능을 확인하여 에폭시 수지와 같은 균열 주입 등과 같은 특수한 환경이 아닌 도로포장 보수 및 단면복구재료의 활용은 충분할 것으로 판단된다.

구분	휨 부착강도 (MPa)			
	1	2	3	평균
MgO	1.8	1.7	1.7	1.73
OPC	0.8	0.8	0.9	0.83

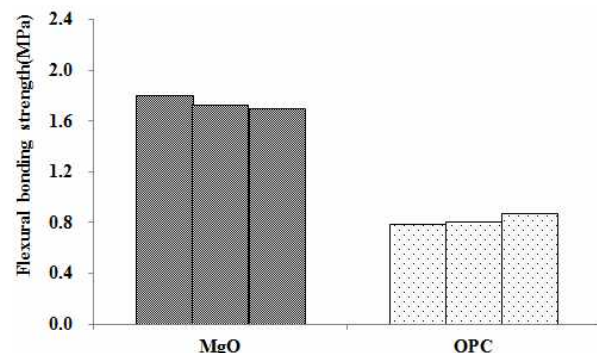


그림 2.59 일반 시멘트 모르타르와 산화마그네슘계열 세라믹 모르타르의 휨 부착강도

바. 인장 부착강도 측정 결과

인장 부착 강도는 휨 부착 강도(접착 강도)와 달리 최대 인장하중을 구하는 시험이다. 시험은 KS F 4042에 따라 시험체는 인장 강도 시험과 같은 모르타르로 이루어진 40×40mm 크기의 밀판에 시험재료를 균일한 두께로 부착시켜 준비하고, 수직방향으로 인장력을 가하여 그 강도를 측정하였다. 이 또한 각각 변수별 3회 시험을 수행하고 평균값을 도출하였다. 그 결과는 다음 그림 2.60과 같으며, 인장 부착강도도 휨 부착 강도와 유사하게 약 2배의 부착성능을 나타내었으며, 약 2MPa의 인장 부착강도를 나타내었다. 두 변수 모두 휨 부착강도보다 다소 높은 강도를 나타내었다. 이와 같이 산화마그네슘 세라믹 모르타르의 우수한 부착성능을 입증하기 위하여 기존 콘크리트와 산화마그네슘 세라믹 모르타르의 계면사이의 BSE이미지 분석을 통한 미세구조 분석을 실시하였다.

구분	인장 부착강도 (MPa)			
	1	2	3	평균
MgO	2.0	1.9	1.9	1.93
OPC	1.1	1.1	0.9	1.03

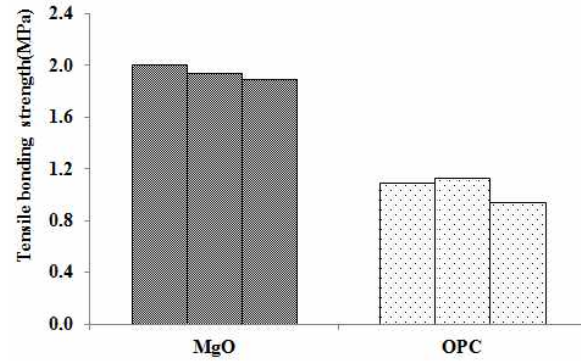


그림 2.60 일반 시멘트 모르타르와 산화마그네슘계열 세라믹 모르타르의 인장 부착강도

사. BSE이미지 분석 결과

그레이 스케일은 이미지의 밝기와 색상대비에서 다양한 값을 가지기 때문에 이미지의 한계는 각각 상들의 그레이 스케일 범위를 결정하기 위해 최대치 사이에서 선택한 최소값들에 의해 시각적으로 보여지는 것이다. 한번 그레이 스케일의 범위가 주어지면 각각의 상의 그레이 스케일은 모든 이미지에 적용된다. 그림 2.61은 본 연구에 사용된 산화마그네슘 세라믹 모르타르 패칭 모르타르 및 페이스트의 BSE이미지이다. 그레이 스케일에 따른 잔골재, 공극, 수산화칼슘, CSH 겔, 미수화 시멘트 분말을 도식화한 것으로, 본 연구의 목표에 부합하도록 경계면을 기준으로 기존 모르타르 및 페이스트, 공극, 패칭된 모르타르 및 페이스트로 구분하여 도식화하였다.

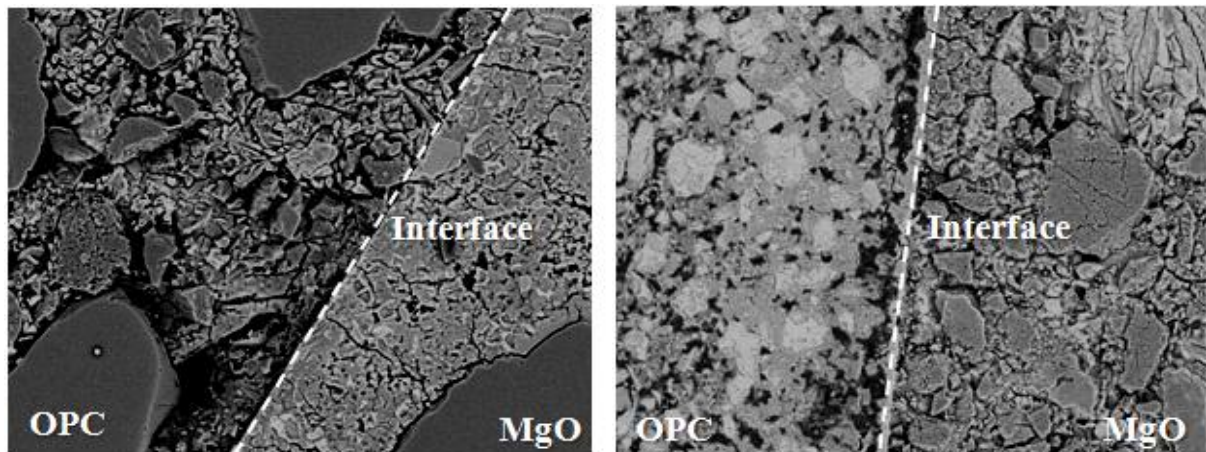
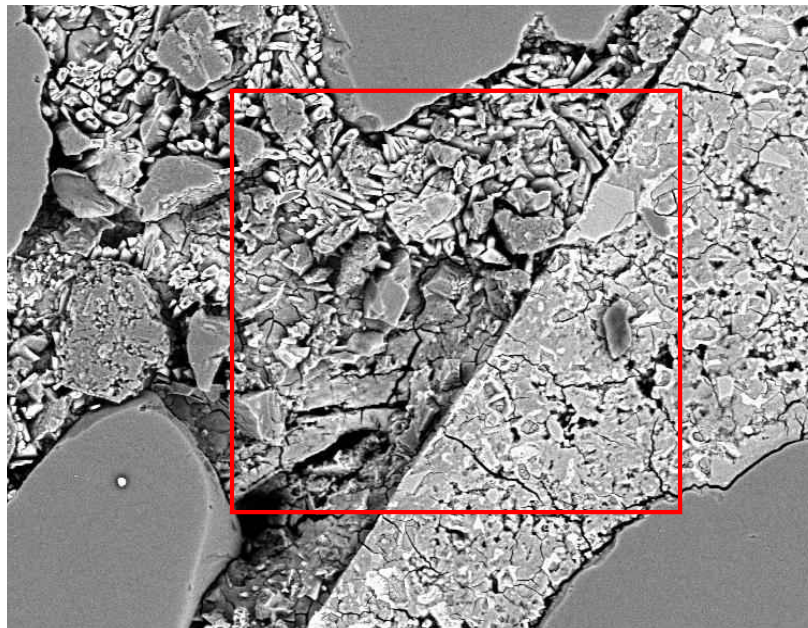


그림 2.61 그레이 스케일에 따른 BSE이미지 (왼쪽:모르타르, 오른쪽:페이스트)

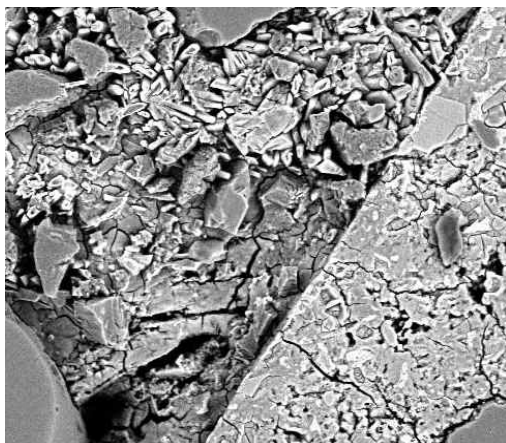
(1) 모르타르에 대한 공극률 분석

그레이 스케일에 따라 BSE이미지를 도식화 한 후 각각의 상을 판별하기 위해 이원화를 실시한다. 그림 2.62는 산화마그네슘 세라믹 모르타르로 패칭된 모르타르 이미지를 이원화한 것으로 기존 OPC 모르타르와 패칭된 산화마그네슘 세라믹 모르타르 모르타르로 구분하였으며, OPC 및 산화마그네슘 세라믹 모르타르의 공극률에 초점을 두어 이원화 하였다. 본 연구에서는 페이스트 부분의 공극률을 파악하기 위하여 원본이미지에서 골재의 영향성이 적은 부분을 추출하여 이원화하였으며 이를 바탕으로 산화마그네슘 세라믹 모르타르 및 OPC 모르타르의 공극률을 비교하였다.

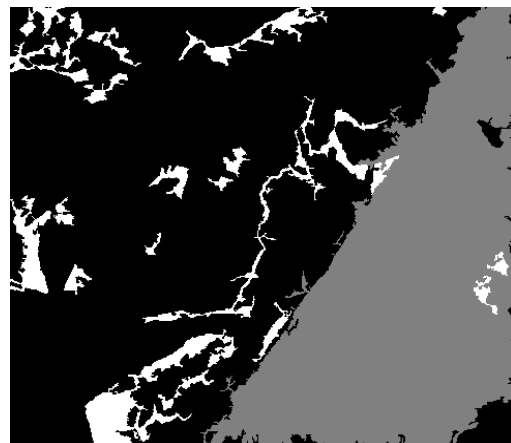
이원화된 이미지에서 흑백순은 공극 (흰색), 산화마그네슘 세라믹 모르타르 (회색), OPC 모르타르 (검정색)의 순으로 이루어진다. 공극, 산화마그네슘 세라믹 모르타르, OPC 모르타르의 픽셀 수는 9,113, 98,543, 55,335개로 전체 이미지에서의 공극률은 5.59%로 나타났다. 또한 OPC 모르타르 및 산화마그네슘 세라믹 모르타르에 함유된 공극의 양은 육안으로 식별이 가능할 정도로 OPC 모르타르 부분의 공극률이 월등히 많은 것으로 나타났다.



<Original image>



<Extraction image>

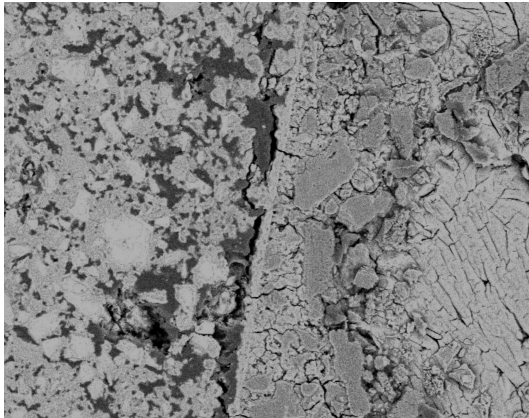


<Binary image>

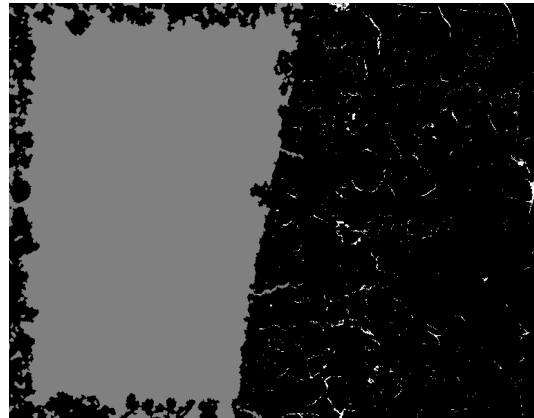
그림 2.62 산화마그네슘 세라믹 모르타르로 패칭된 모르타르의 BSE이미지

(2) 페이스트에 대한 공극률 분석

그레이 스케일에 따라 BSE이미지를 도식화 한 후 각각의 상을 판별하기 위해 이원화를 실시하였다. MgO 및 OPC로 패칭된 페이스트의 BSE이미지를 그림 2.63과 그림 2.64에 나타내었으며, 원본 이미지를 이원화하여 기존 페이스트, 공극, 패칭된 페이스트로 구분하였다. 본 연구에서는 이원화된 이미지에 나타는 공극부의 픽셀수를 산정하여 페이스트간 계면의 공극률을 정량화하였다.

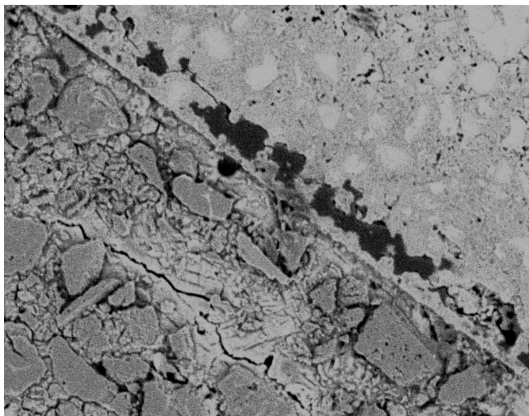


Original image

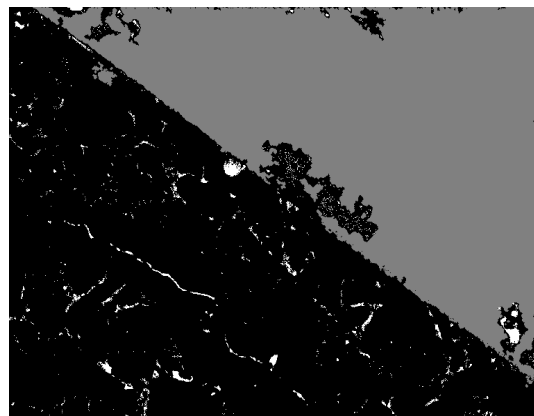


Binary image

산화마그네슘 세라믹 모르타르 patching 1

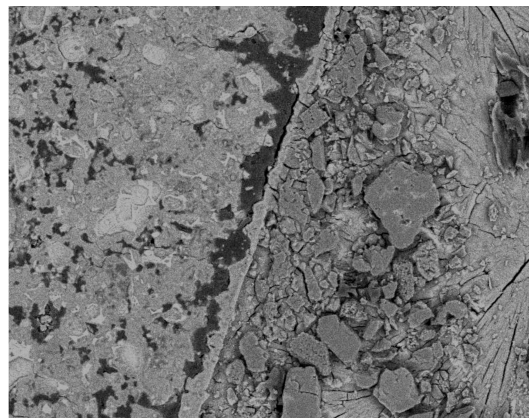


Original image

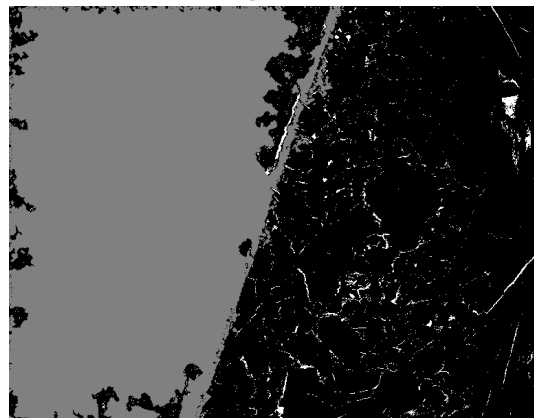


Binary image

산화마그네슘 세라믹 모르타르 patching 2



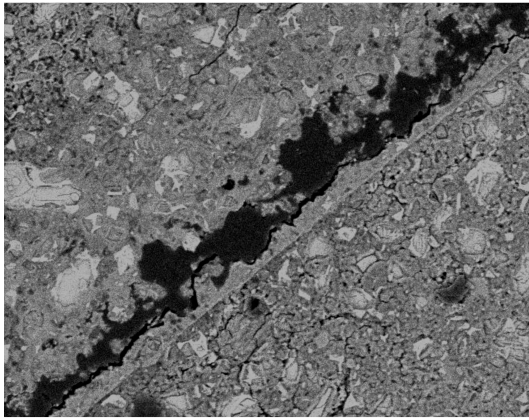
Original image



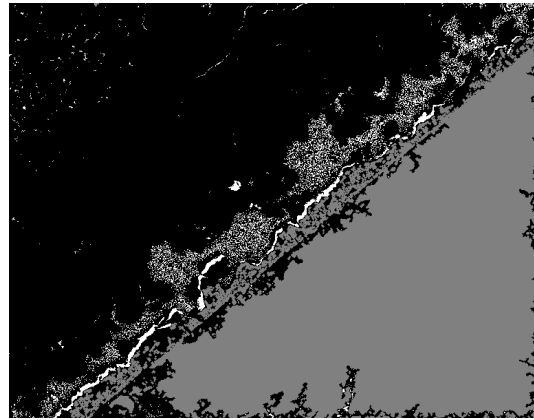
Binary image

산화마그네슘 세라믹 모르타르 patching 3

그림 2.63 산화마그네슘 세라믹로 패칭된 페이스트의 BSE이미지

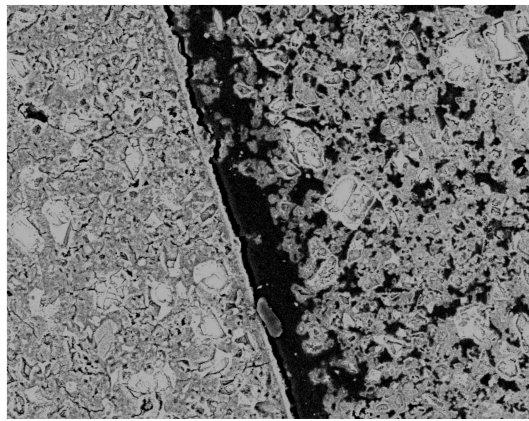


OPC patching 1

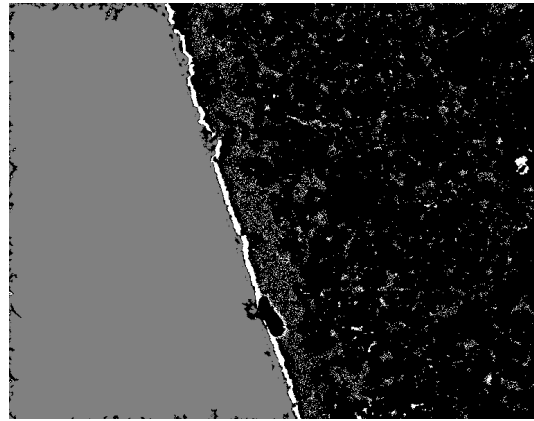


Binary image

OPC patching 1

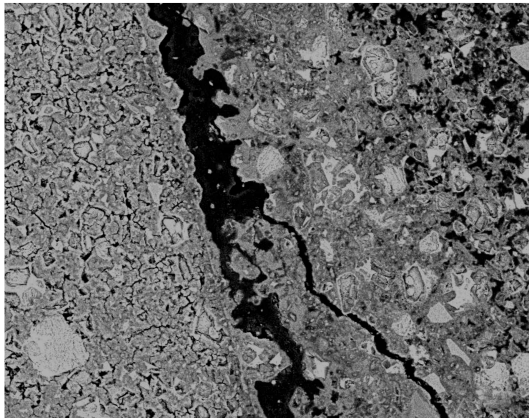


OPC patching 2

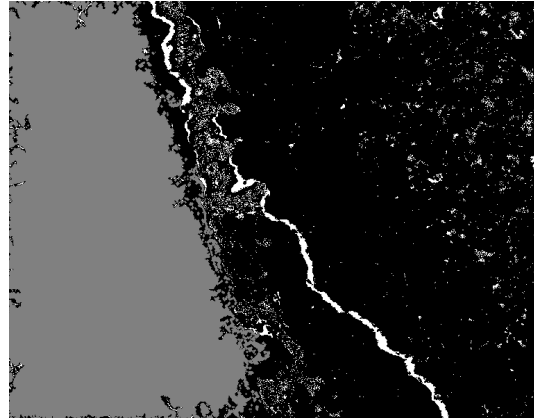


Binary image

OPC patching 2



OPC patching 3



Binary image

OPC patching 3

그림 2.64 OPC로 패칭된 페이스트의 BSE이미지

OPC 및 산화마그네슘 세라믹 결합재로 패칭된 페이스트에 대하여 BSE이미지의 상에 대한 분포를 표 2.16에 나타내었다. 기존 페이스트, 공극, 패칭 페이스트에 대한 픽셀 개수를 바탕으로 그에 상응하는 면적을 산출하였다. 여기서, 픽셀 하나에 대한 규격은 $1.69 \times 1.69 \mu\text{m}$ 로 면적은 $2.856 \mu\text{m}^2$ 이다.

표 2.16 BSE이미지의 상에 대한 분포

Type	픽셀 (개)				면적 (μm^2)				공극률 (%)
	기존 페이스트	공극	패칭 페이스트	합계	기존 페이스트	공극	패칭 페이스트	합계	
MgO1	252,841	2,775	186,752	442,368	722,139	7,926	533,382	1,263,447	0.63
MgO2	257,464	6,200	178,704	442,368	735,343	17,708	510,396	1,263,447	1.40
MgO3	236,631	6,314	199,423	442,368	675,842	18,033	569,572	1,263,447	1.43
OPC1	262,664	14,488	165,216	442,368	750,195	41,379	471,873	1,263,447	3.28
OPC2	246,680	14,414	181,274	442,368	704,543	41,168	517,737	1,263,447	3.26
OPC3	275,766	13,644	152,958	442,368	787,615	38,969	436,863	1,263,447	3.08

그림 2.65는 OPC 및 산화마그네슘 세라믹 결합재 패칭 시 계면에서의 공극률을 비교한 것으로 산화마그네슘 세라믹 결합재 패칭 시 공극률은 각각 0.63%, 1.40%, 1.43%로 평균적으로 1.15%로 측정되었다. OPC 패칭 시 공극률은 각각 3.28%, 3.26%, 3.08%로 평균적으로 3.21%로 측정되었다. 결과적으로 산화마그네슘 세라믹 결합재 패칭 시 공극량은 OPC와 비교하여 대략 35.9% 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 산화마그네슘 세라믹 결합재 패칭 시 OPC에 비해 상대적으로 적은 공극이 생성됨에 따라 부착강도 역시 향상되었다고 판단된다.

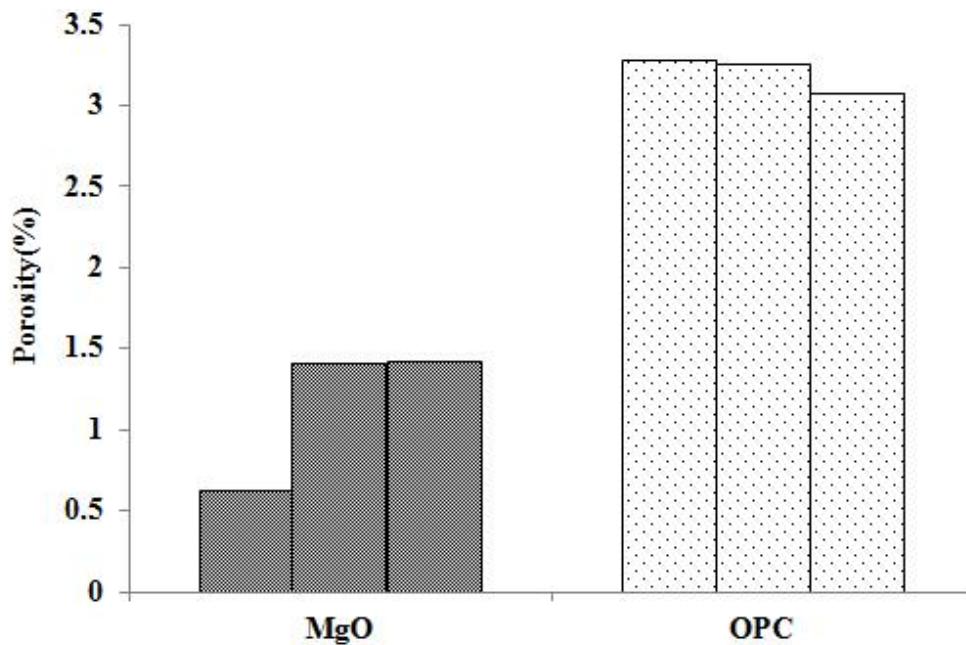


그림 2.65 패칭재료에 따른 계면의 공극률 (%)

아. 염소이온 저항성 시험 결과

산화마그네슘계열 세라믹 결합재에 대한 염소이온 침투저항성 결과는 다음 그림 2.66과 같다. 그 결과, 모르타르의 경우 OPC와 산화마그네슘계열 세라믹 결합재를 비교하면 전체적으로 다소 높은 전하량을 나타내었으며, 산화마그네슘계열 세라믹 모르타르의 경우 4644쿨롱을 나타내었으며, OPC 모르타르의 경우 5521쿨롱으로 높은 통과 전하량을 보였다. 산화마그네슘계열 세라믹 모르타르의 경우 견고한 재료로서 MIP 공극량에서 나타났듯이 전체적인 공극량은 OPC 모르타르에 비해 낮지만 초기의 경화속도로 인한 공극크기가 다소 크게 나타나 염소이온 투과 저항성의 차이는 크게 나타나지 않았다. 또한 콘크리트의 경우에도 산화마그네슘계열 세라믹 콘크리트의 경우 2804쿨롱이고, OPC 콘크리트는 2929쿨롱으로 유사한 수준의 통과 전하량을 나타내었다.

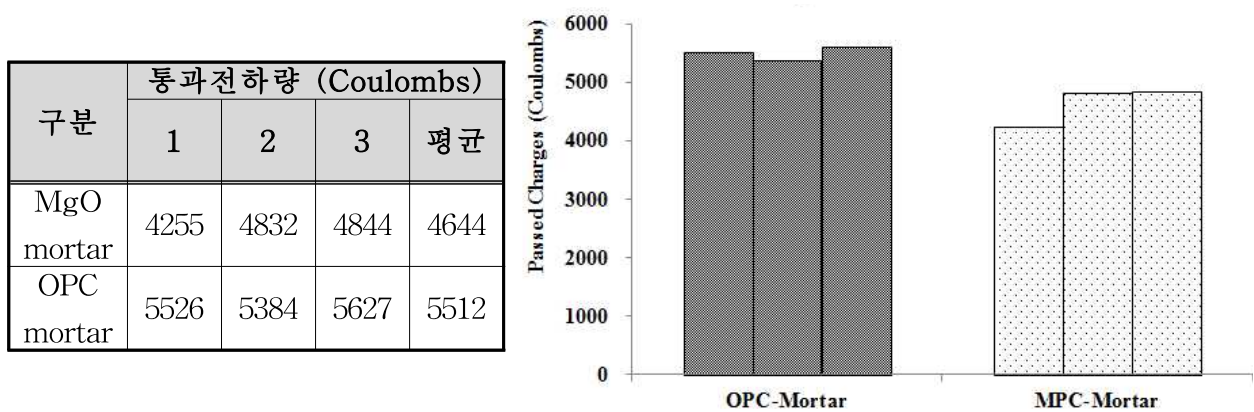


그림 2.66 일반 시멘트 모르타르와 산화마그네슘계열 세라믹 모르타르 염소이온 저항성

자. 급속동결융해 저항성 시험 결과

산화마그네슘계열 세라믹 결합재 및 일반 시멘트 모르타르에 대한 동결융해 저항성 시험 결과는 다음 그림 2.67과 같다. 동결융해 저항성에 대한 비교를 위하여 동탄성 계수를 측정하였으며, 0사이클의 100%를 기준으로 300사이클까지의 감소된 값으로 상대 비교를 하였다. 산화마그네슘계열 세라믹 모르타르의 경우 300사이클까지 최종 상대동탄성계수가 94.6%로 측정되어 우수한 내구성능을 나타내었다. 일반 시멘트 모르타르의 경우에도 92.8%로 우수한 저항성을 보였으며, 일반적으로 상대 동탄성계수는 80%이상일 때 저항성이 우수하다고 판정되어진다.

Cycle	상대동탄성계수(%)	
	MgO	OPC
0	100.0	100.0
50	99.7	99.2
100	98.8	98.4
150	97.2	96.6
200	96.3	95.4
250	95.1	93.4
300	94.6	92.8

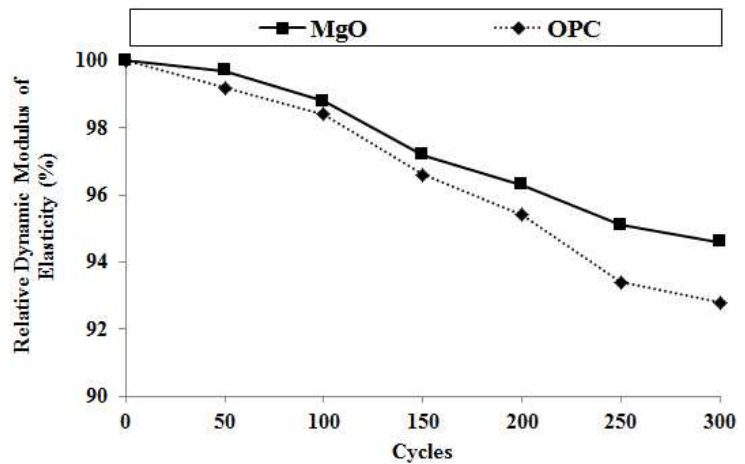


그림 2.67 일반 시멘트 모르타르와 산화마그네슘계열 세라믹 콘크리트 동결융해 저항성

차. 미끄럼 저항성 시험 결과

다음 그림 2.68과 표 2.17은 산화마그네슘계열 세라믹 모르타르와 OPC 모르타르에 대한 미끄럼 저항성 측정 장비로 측정된 결과와 국토해양부에서 기준으로 사용되고 있는 미끄럼 저항값의 기준을 보여주고 있다. 미끄럼 저항성의 경우 OPC 모르타르는 60BPN, 산화마그네슘계열 세라믹 모르타르는 58.3BPN으로 나타났다. 산화마그네슘계열 세라믹 모르타르가 다소 낮은 미끄럼 저항성을 나타내었으나 유사한 수준이며, 보수재료로 활용시 국토해양부 기준에 따라 마찰력확보가 매우 중요한 구간(S1) 및 중요한 구간(S2)에서도 활용이 가능할 것으로 판단된다.

표 2.17 국내 미끄럼 저항값 기준표 (국토해양부 기준)

구분	정의	최소요구 마찰계수			마찰계수의 종류
		위험도 1	위험도 2	위험도 3	
S1 (마찰력 확보가 매우 중요한 구간)	1) 설계 속도가 60km/hr 이상인 도로의 교통신호 또는 횡단보도 접근부	57	67	77	BPN
	2) 도시 지역도로의 교통신호, 횡단보도 또는 비슷한 위험개소의 접근부				
	3) 5%이상의 내리막 구간에서 곡선 반경이 “도로의 구조·시설 기준에 관한 규정”에서 정한 값보다 작게 설계된 곳	37	44	50	SN
	4) 고속도로로서 S2의 1), 2)항에 해당하는 구간				
S2 (마찰력 확보가 중요한 구간)	1) 5% 이상의 내리막 구배에서 곡선 반경이 “도로의 구조·시설 기준에 관한 규정”에서 정한 값보다 작게 설계된 곳	47	57	67	BPS
	2) 5%이상의 내리막 구배가 100m 이상인 곳				
	3) 고속도로 일반구간	31	37	44	SN
	4) 상업용 자동차 교통량이 250대/차로/일 이상인 도로의 주요 교차부 접근부				
S3 (평균 조건)	직선 또는 곡선 반경이 큰 구간으로서 다음에 해당되는 도로	32	47	57	BPN
	1) 주요 간선도로 또는 자동차 전용도로				
	2) 상업용 자동차 교통량이 250대/차로/일 이상인 일반도로	21	31	37	SN
S4 (마찰력이 중요하지 않은 구간)	교통량이 적은 도로의 일반 직선도로	32	42	47	BPS
		21	27	31	SN

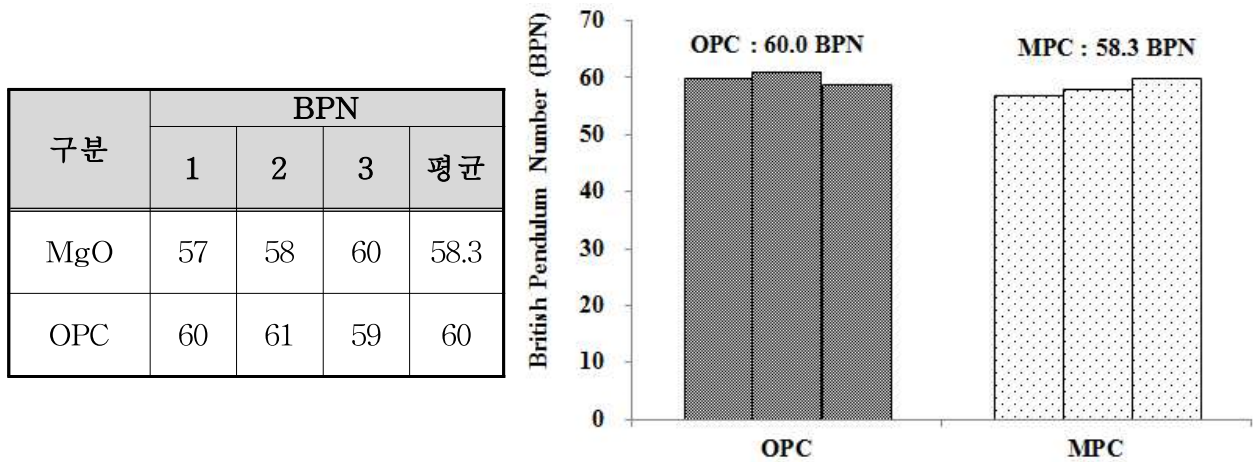


그림 2.68 일반 시멘트 모르타르와 산화마그네슘계열 세라믹 모르타르의 미끄럼 저항성

3. 경제성 분석 결과

본 연구에서 개발된 산화마그네슘계열 세라믹 모르타르를 기존의 보수재료와의 비교를 통하여 개발 보수재료의 경제성을 분석하고자 하였다. 기존 보수재료의 경우 각 관련업체마다 다양하게 개발되어지고 있으며, 이 중 주로 단면복구재로 활용되고 있는 단면복구용 폴리머 모르타르와의 재료 단가의 비교를 통하여 경제성을 확인하고자 하였다. 재료 단가의 경제성 분석결과는 다음 표 2.18과 같다. 다음 표와 같이 기존 단면복구용 폴리머 모르타르와 비교하여 약 61%의 재료 단가 절감효과를 나타내었다.

표 2.18 개발 재료 단가에 대한 경제성 분석 결과

단면복구용 모르타르	총 금액	비고
단면복구용 폴리머 모르타르 (M-PM)	약 2,400,000원/m ³	-
산화마그네슘 세라믹 모르타르	928,464원/m ³	약 61%절감

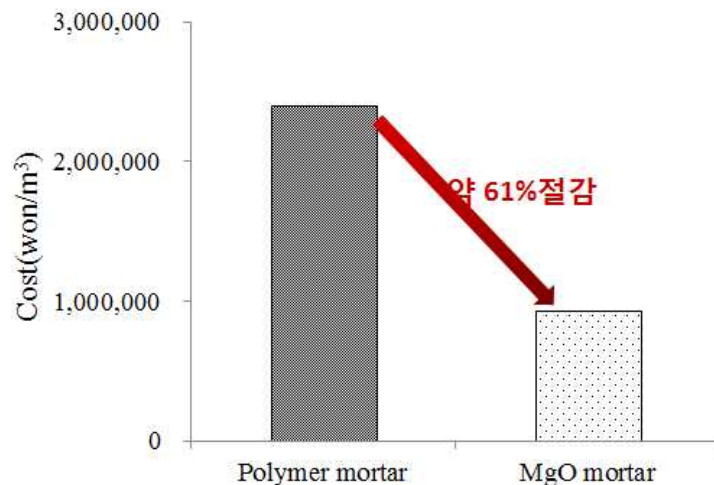


그림 2.69 개발 재료 단가 비교 결과

여기서, 산화마그네슘계열 세라믹 모르타르의 단가의 산출 근거는 상기 개발된 최적 배합비를 기반으로 산정하였으며, 단가 산출은 다음 표 2.19와 같이 나타내었다.

표 2.19 개발 재료의 단가 산출 근거

W	MgO	KH ₂ PO ₄	Borax	Sand	용적
215	471	393	24	1250	1m ³
* MgO : 342원/kg → 471×342=161,082원/m ³ * KH ₂ PO ₄ : 1,882원/kg → 393×1,882=739,626원/m ³ * Borax : 110원/kg → 24×110=2,640원/m ³ * Sand : 20원/kg → 1,250×20=25,000원/m ³					
-	161,082원/m ³	739,626원/m ³	2,640원/m ³	25,000원/m ³	928,464원/m ³

또한 추가적으로 본 연구에서 개발된 산화마그네슘계열 세라믹 모르타르를 적용함에 따른 경제성 분석을 수행하기 위해서는 시공시 차량통행 지체에 따른 사용자비용 또한 고려되어야 한다. 사용자 비용은 보수 공사로 인하여 다른 상태의 도로를 사용함으로써 발생하는 추가적인 비용을 말한다. 사용자 비용항목 중에 차량운행 비용은 보수공사로 인하여 차량의 속도변화로 인하여 발생하는 추가비용이며, 운행 지연비용은 도로의 보수공사시 발생하는 교통혼잡으로 인해 발생하는 손실시간분의 비용으로서 이를 화폐 단위화한 것이다. 따라서 본 장에서는 기존의 시공사례 분석을 통하여 공사시간을 감축함에 따른 사용자비용 저감율을 확인하고자 한다.

가. 사례분석

사례 분석 대상은 시험 시공된 순천-여수간 17호선 일반 국도이다. 시공시 지체거리 중 완화구간은 80m, 완충구간은 20m, 본 사례에서 진행된 단위구간, 1,000m 전체를 작업구간으로, 종결구간으로 30m설정하고, 비교적 차량 흐름에 방해가 되지 않는 사전 주의구간은 제외한 결과 차량운행비용 산정에 필요한 구간 길이(지체거리)는 1,130m로 선정되었다. 따라서 공사시 지체 시간은 지체속도 20km/hr, 평상속도 80km/hr으로 계산하면 0.04238시간이 된다.

다음 표 2.20은 대상구간의 교통량에서 각각의 공법별 적정 공사 시간때와 지체가 발생하여 해소될 때 까지의 지체시간, 지체발생 누적 교통량이다. 다음 표 2.21은 탑승자 시간비용으로 평균 탑승인원(명/대), 국민 1인의 시간가치(원/명·시간) 지체시간의 곱으로 산출되었고, 다음 표 2.22는 화물의 시간가치로 공사시 지체교통량(대/일), 평균 적재중량(t/대), 화물 시간가치(원/hr·t), 지체시간의 곱으로 산출되었다.

표 2.20 대상구간의 지체 교통량

	공사시간(시간)	공사시간대(시)	지체시간(시간)	지체교통량(PCU환산, 대)
단면보수	13	20~1일 7시	9	14,792

표 2.21 대상구간의 차종별 탑승자 시간비용

차종	평균탑승인원	탑승자 시간비용
승용차	2	4,314,585
소형버스	10	112,356
대형버스	15	1,779,196
소형트럭	1	772,848
중형트럭	1	60,348
대형트럭	1	418,044
합계		7,457,376

표 2.22 대상구간의 차종별 화물의 시간비용

차종	평균적재중량	화물의 시간비용
소형트럭	3	520,216
중형트럭	13	141,971
대형트럭	17	1,517,883
합계		2,210,069

대상구간의 공법별 교통량에 따른 사용자비용 산정 결과는 다음 표 2.23와 같다. 따라서 대상구간의 보수작업 기간에 대해 일당 사용자 비용을 곱하면 보수작업 기간동안 발생하는 총 사업자 비용을 산정할 수 있다. 이에 따라 지체되는 시간에 대한 사용자비용을 산출하였으며, 그 결과 보수공사 중 1시간 지체함에 따라서 약 1,066,241원의 사용자 비용이 발생되었다. 이에 따라 기존의 시멘트계열의 보수재료 공사시 13시간으로 추정하면 개발 재료의 경우 3시간에 보수공사가 완료가능하며 이에 따라 약 10시간에 이르는 사용자 비용을 감축시킬 수 있으며 이 금액은 약 10,662,410원 수준으로 재료단가를 고려하지 않더라도 시간에 대한 사용자비용 감소로 충분히 보완 가능한 금액으로 판단된다.

표 2.23 대상구간의 교통량에 따른 사용자비용

교통량	많음	보통	적음
단면보수	7,763,584	2,254,671	1,127,336

제3장 최종 연구성과 및 적용실적

제1절 개발 재료의 응결시간 특성

1. 개발 보수재료의 응결시간 정립 및 단축

본 연구 개발의 목적은 최근 콘크리트 포장에서의 열화 발생 빈도에 따라 콘크리트 유지보수와 확장포장공사가 크게 증가하고 있으며, 이런 증가 추세에 따라 보수 및 포장 공사 시 차선감소에 따라 사용자 비용도 크게 증가하고 있는 추세이다. 여기서 발생하는 사용자 비용을 최소화하기 위하여 급결성을 가진 산화마그네슘 계열 결합재를 활용하여 공사 시간을 단축함으로써 이와 같은 문제점 해결이 가능하다.

하지만 국외의 경우 몇몇 연구자들에 의해 개발 중이고, 지속적으로 연구되고 있는 반면 국내에서 이와 관련된 연구는 미미한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 산화마그네슘을 활용하여 국내의 산화마그네슘 및 인산칼륨을 활용하여 응결시간 확인 및 구성비에 따른 응결특성을 확인하였다. 산화마그네슘 결합재의 경우 급결성으로 인하여 초기 응결시간은 30분 이내까지 확보가 수월하지만 초기 신속한 경화속도로 인하여 지연제의 사용이 요구되며 국외 관련 기술 문헌을 참고하여 붕사를 지연제로 사용하였다. 지연제의 혼입율에 따라 지연속도를 조절할 수 있으며 일정이상의 지연제 혼입시 응결시간은 오히려 감소하는 효과를 나타내었다.

이에 따라서 산화마그네슘과 인산칼륨의 구성비에 따라 혼입율을 달리하여 실험을 수행하였으며, 이와 같은 결과를 활용하여 보수재료로의 적용이 가능한 구성비 및 산화마그네슘계열 결합재에 대한 응결시간을 정립하였다.

2. 핵심요소기술별 성과물

본 연구에서의 개발 보수재료는 결합재(산화마그네슘, 인산칼륨, 붕사)의 구성비 및 혼입율과 물 바인더비에 따라서 응결시간을 정의하였으며, 조기교통개방 및 작업성확보가 가능한 응결시간을 동시에 만족이 가능한 구성비를 정립하였다. 이에 따라 목표 응결시간은 40~60분으로 설정하였으며, 다음 그림 2.70와 같이 나타내었다. 상기와 같은 응결시간을 만족 위해서는 지연제의 혼입율의 경우 5%가 적정 혼입율로 확인된다. 응결시간만을 고려할 경우 모든 변수 중 10개의 변수만이 목표 응결시간을 만족하였다. 또한 물 바인더비의 증가에 따라 응결시간 또한 증가하는 경향을 나타내었지만 동일한 산화마그네슘과 인산칼륨의 구성비에서는 물 바인더비의 차이에 따라 약 10분정도의 차이를 보여 미미한 수준으로 보여진다. 또한 산화마그네슘의 혼입량이 감소할수록 응결시간은 증가하는 양상을 나타내었다. M/P비의 경우 목표 응결시간을 만족하기 위해서는 0.6~0.8이 적정 수준으로 확인되며, 물 바인더비의 경우 20~22%으로 판단된다. 하지만 응결시간의 지연 효과로 인한 초기의 압축강도 경향을 확인 및 분석이 요구되어진다.

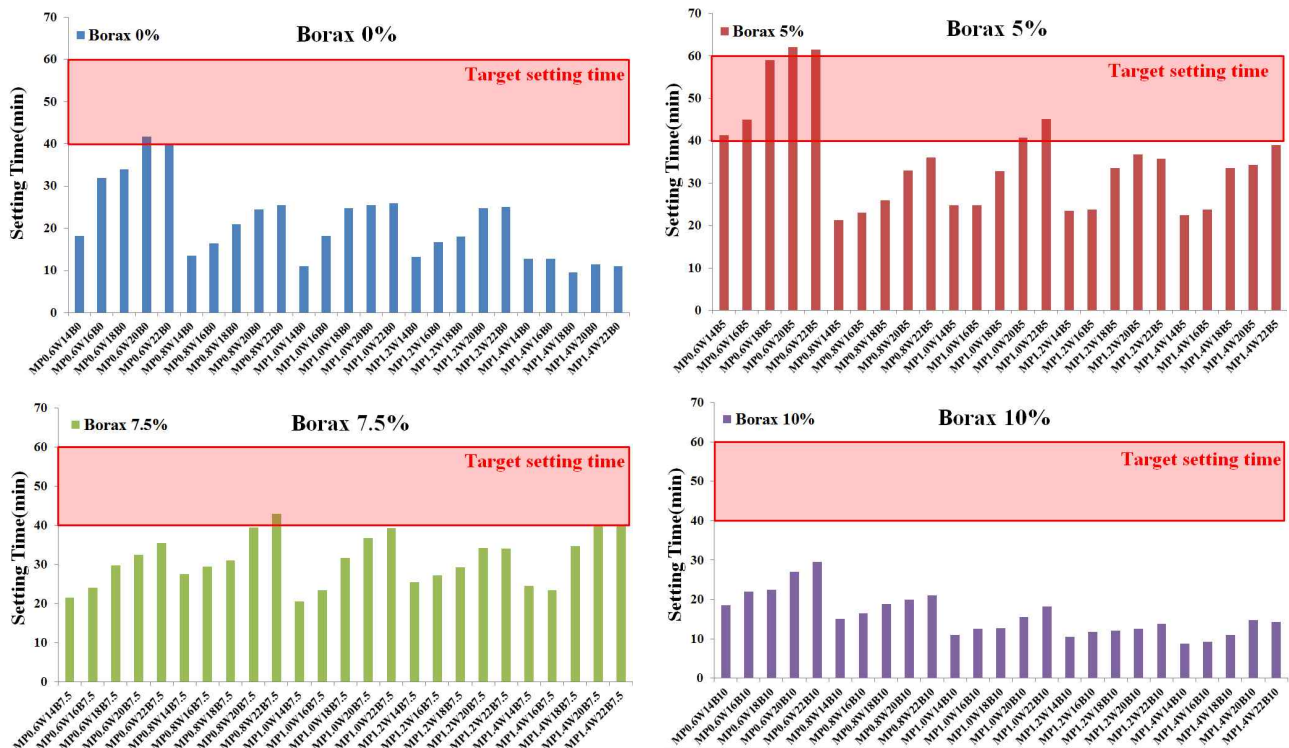


그림 2.70 산화마그네슘 결합재의 지연제(붕사)의 혼입율에 따른 응결시간 특성

3. 주요 연구성과

가. 학술적 성과

- 본 연구에서는 산화마그네슘(MgO)와 KH_2PO_4 의 결합재를 활용하여 이 두 가지의 화학적 반응을 확인하고 경화특성에 따라서 지연제인 붕사(Borax)를 활용하여 그림 2.71과 같이 두 가지 측면을 만족 가능한 지연 및 최적 지연제의 혼입율을 도출
- 또한 산화마그네슘(MgO)와 KH_2PO_4 의 결합재 및 물 바인더의 구성비와 지연제의 사용에 따른 응결시간 특성을 분석
- 이와 같이 본 연구를 통해 확인된 산화마그네슘과 인산칼륨의 구성비 및 물 바인더비와 지연제의 혼입율에 따른 응결시간 특성에 대하여 국내외 학술대회에 참가하여 발표

나. 기술적 성과

- 일반적으로 사용되는 국내의 보수재료의 경우 조기 교통개방을 위한 빠른 응결시간이 주요한 인자로 작용을 하지만 본 연구에서 개발된 재료의 경우 경화특성이 다른 시멘트계 재료에 비교하여 급속도로 이루어지며, 이에 따라서 작업성 확보가 우선되어야 함.
- 이와 같은 응결시간 특성에 대하여 적용 가능한 보수공법을 조사한 결과 콘크리트 포장에서의 스포링 및 스케일링과 같은 빈번히 발생하는 열화에 적용이 가능하며, 이와 같은 콘크리트 열화는 대체적으로 소규모로 발생되고 단면이 비교적 작아 짧은 응결시간에도

적용이 가능한 단면복구 공법으로 선정 및 적용성 평가

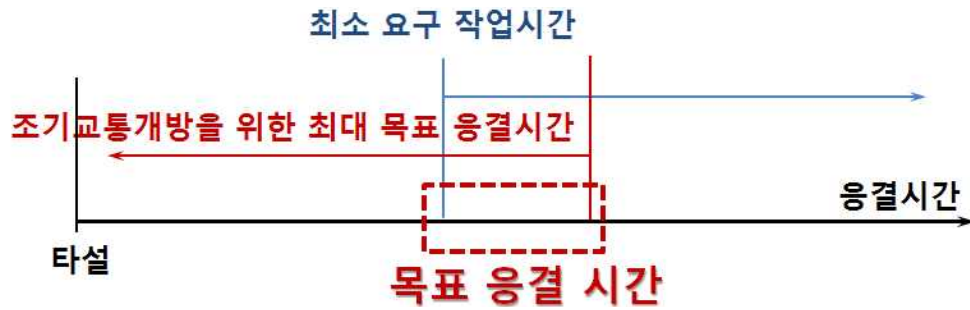


그림. 2.71 응결시간 및 압축강도를 통한 배합비 도출

4. 기술개발 성과의 국내외 시장 전망

- 개발 기술 재료의 응결시간을 활용함에 따라 기존 보수재료에 비하여 약 80% 공사시간을 단축이 가능함하고, 이에 따라 국내외 도로포장 보수공사 시 조기 교통개발을 통하여 사용자 및 사회적 비용을 최소화할 수 있음.
- 기존의 개발 및 개발 중인 다른 초속경 시멘트계 재료와 비교하여 급속한 경화 특성을 가지며, 이에 반해 낮은 경제성을 가지고 있어 보다 다양하게 적용 및 활용도가 높음.

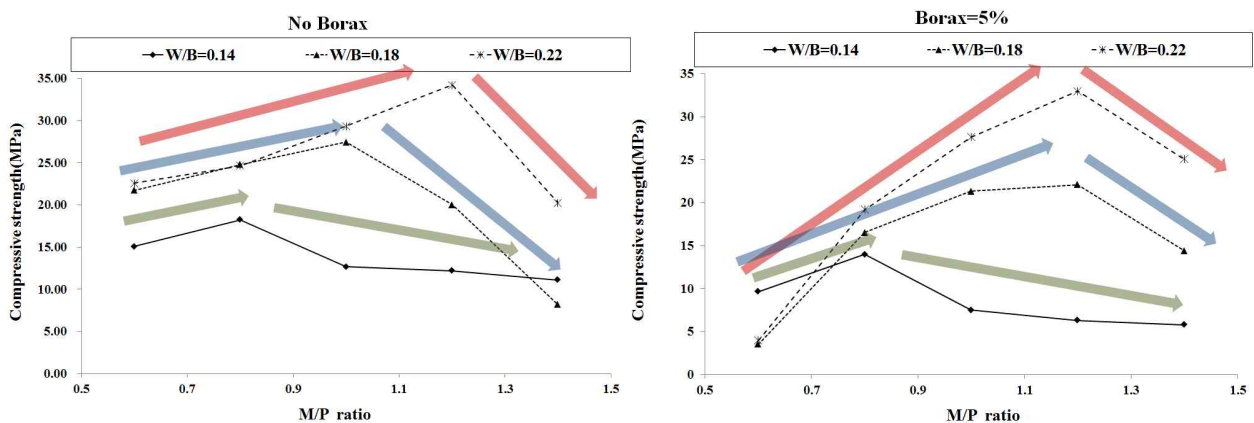
제2절 개발 재료의 압축 강도 특성

1. 개발 보수재료의 압축강도 특성 규명

상기의 산화마그네슘 결합재의 응결시간 특성 관련 성과를 바탕으로 조기 교통개방 및 보수재료의 성능 확보를 위하여 압축강도 특성 또한 규명되어야 한다. 이에 따라 산화마그네슘의 결합재의 구성비 및 물 바인더비 및 지연제의 혼입율에 따른 재령 24시간 압축강도 특성을 확인하고자 하였다. 압축강도 특성은 조기강도 확인뿐만 아니라 보수재료의 재파손 방지를 위해서도 필수적으로 평가되어야 하며, 산화마그네슘 및 인산칼륨에 대한 국내의 관련 연구는 전무한 실정이다. 산화마그네슘 및 인산칼륨의 구성비(M/P비)와 물 바인더비, 지연제의 혼입율에 따른 압축강도 특성을 규명하였다.

2. 핵심요소기술별 성과물

본 연구에서의 개발 보수재료는 결합재(산화마그네슘, 인산칼륨, 붕사)의 구성비 및 혼입율과 물 바인더비에 따라서 압축강도를 정의하였으며, 압축강도의 경우 산화마그네슘 결합재의 구성비에 따라 강도의 차이가 크게 발생되며, 이는 세라믹 결합재의 조기 경화특성에 따른 것으로 사료된다. 이에 따라 산화마그네슘 결합재의 물성의 가장 큰 비중을 차지하는 산화마그네슘 및 인산칼륨 구성비(M/P비)와 물 바인더비, 지연제의 혼입율에 따라 강도 특성을 표현하였으며, 산화마그네슘 결합재의 경우 가장 높은 압축강도는 재령 24시간에서 약 35MPa까지 발현이 가능하지만 최적배합비 도출을 위해서는 응결시간 특성 또한 고려되어야 한다. 압축강도 특성은 다음 그림 2.72와 같이 나타내었으며, 압축강도 특성이 보다 확연하게 표현하기 위하여 물 바인더비의 경우 0.04 단위로 보다 폭넓게 구성하여 나타내었다. 그 결과 지연제의 사용이 없는 경우와 5% 혼입시 강도 발현의 양상은 유사한 것으로 확인되었으며, 물 바인더비가 높아질수록 높은 산화마그네슘 및 인산칼륨의 구성비(M/P비)에서 높은 강도를 확보할 수 있는 것으로 판단된다. 지연제 사용의 7.5%의 경우 유사한 양상을 나타내었지만 10% 혼입율에서는 구성비 및 물 바인더비에 따른 강도 차이가 크지 않아 특성을 판단에는 다소 어려운 수준으로 나타내었다.



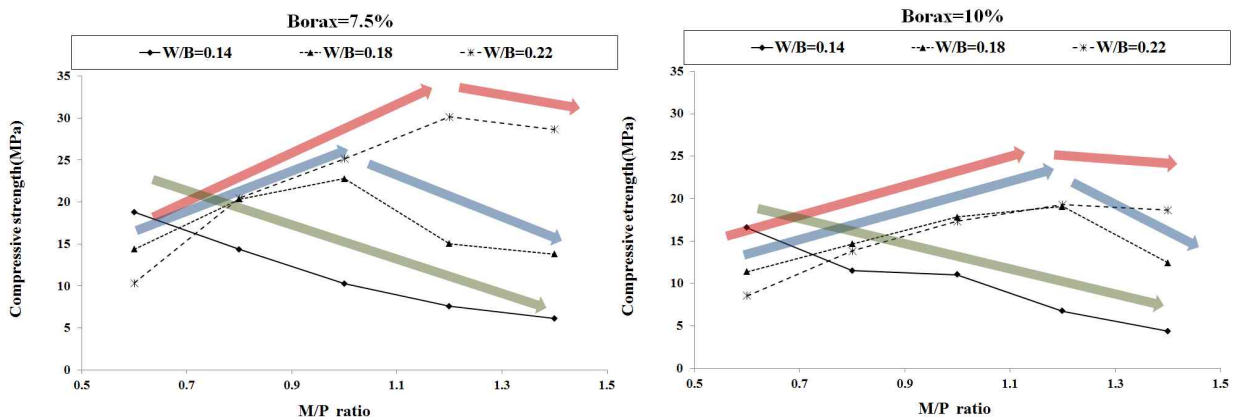


그림 2.72 산화마그네슘 결합재의 압축강도 특성

3. 주요 연구성과

가. 학술적 성과

- 본 연구에서는 산화마그네슘(MgO)와 KH_2PO_4 의 결합재를 활용하여 결합재의 구성비에 따른 압축강도 특성을 규명하고자 하였으며, 본 개발 재료의 경우 기존 사용되었던 시멘트계열의 재료 특성과 화학적인 반응 자체가 상이하며, 이에 따라 변수를 폭넓게 구성하여 특성을 확인
- 산화마그네슘 결합재의 경우 높은 강도를 만족하기 위해서는 M/P비에 따라서 물 바인더비의 조절이 요구되어지며, 이와 같은 특성에 따라 산화마그네슘 결합재의 적정 구성비를 도출할 수 있음. 또한 이와 같은 산화마그네슘 결합재의 적정 구성비를 기반으로 다른 혼화재 사용 및 재료의 혼입시 기반 데이터로 활용성이 충분

나. 기술적 성과

- 건설 기술 분야에서 기존의 수경성 시멘트를 활용한 결합재가 아닌 세라믹계열 산화마그네슘 결합재를 개발에 따른 건설재료의 다양성을 확보
- 세라믹계열 결합재와 같이 강성발현의 원리가 시멘트의 수화반응이 아닌 화학적 결정화에 의한 강성발현의 경우 콘크리트와는 다른 거동을 보일 수 있으며 이에 대한 구성비에 따른 강도 특성 기반자료를 제공함으로써 건설재료 분야에서 시멘트계열 뿐 아니라 세라믹 또는 기타 개발 재료에 대해서도 물성측정 범위를 확대할 수 있는 사례를 제공

4. 기술개발 성과의 국내외 시장 전망

- 본 성과의 응결시간 및 압축강도를 기반으로 한 자료를 활용하여 건설시장에서의 재료의 다양성확보가 가능하고 시멘트 계열뿐만 아니라 다른 재료에 대한 신뢰성을 제공함으로써 관련 재료 및 공법에 대한 연구범위 확대가 가능

제3절 개발 재료의 최적구성비 도출

1. 개발 보수재료의 최적구성비 도출

산화마그네슘 결합재의 응결시간 및 초기 압축강도 특성을 기반으로 분석을 하여 결합재의 구성비에 대한 최적 배합비를 도출하고자 하였다. 기존의 시멘트와 화학적 반응이 상이함으로 구성비의 결정을 위해 먼저 관련 문헌을 통하여 범위를 도출하였으며, 관련 문헌의 경우 대부분이 중량비가 아닌 몰비를 주로 사용하였다. 국내의 경우 현장에서 보다 실용적으로 적용이 가능하도록 몰비를 중량비로 치환하여 구성비를 산출하였으며, 범위는 M/P비의 경우 0.6~1.4의 범위로 설정하였으며, 물 바인더비의 경우 14~22%까지 적용을 하였다. 지연제인 붕사의 경우 0~10%까지 바인더 대비 혼입율로 조정하여 시험을 수행하고 이와 같은 범위 내에서 초기 강도와 작업시간 확보가 가능한 응결시간을 만족할 수 있는 최적배합비를 도출하였다.

2. 핵심요소기술별 성과물

산화마그네슘 결합재의 최적배합비 도출을 위해 먼저 응결시간 측정을 하여 목표 범위내의 만족하는 변수를 선별하였으며, 그 과정은 다음 그림 2.73와 같이 나타내었다. 그 결과 응결시간 시험 과정에서 도출한 변수는 총 11개의 변수이며, 압축강도 30MPa를 목표로 하여 도출한 변수는 단 1개에 불과하였다. 이와 같은 결과는 국내 도로 포장의 보수재료로의 최적 배합비 도출 관련한 구성비이지만 산화마그네슘 결합재의 경우 초기 경화로 인하여 재령 24시간에서는 약 60~70%의 강도발현을 이루어지므로 장기적인 거동을 고려하더라도 본 연구에서 도출한 최적 구성비는 다양하게 적용이 가능할 것으로 판단된다. 또한 본 연구재료의 경우 작업시간에 구애받지 않는 환경(프리캐스트 및 견배합 후 스프레이 살포)등의 보다 다양한 시공공법이 개발되어진다면 보다 다양하고 폭넓은 구성비에서 높은 성능 확보가 용이할 것으로 사료된다.

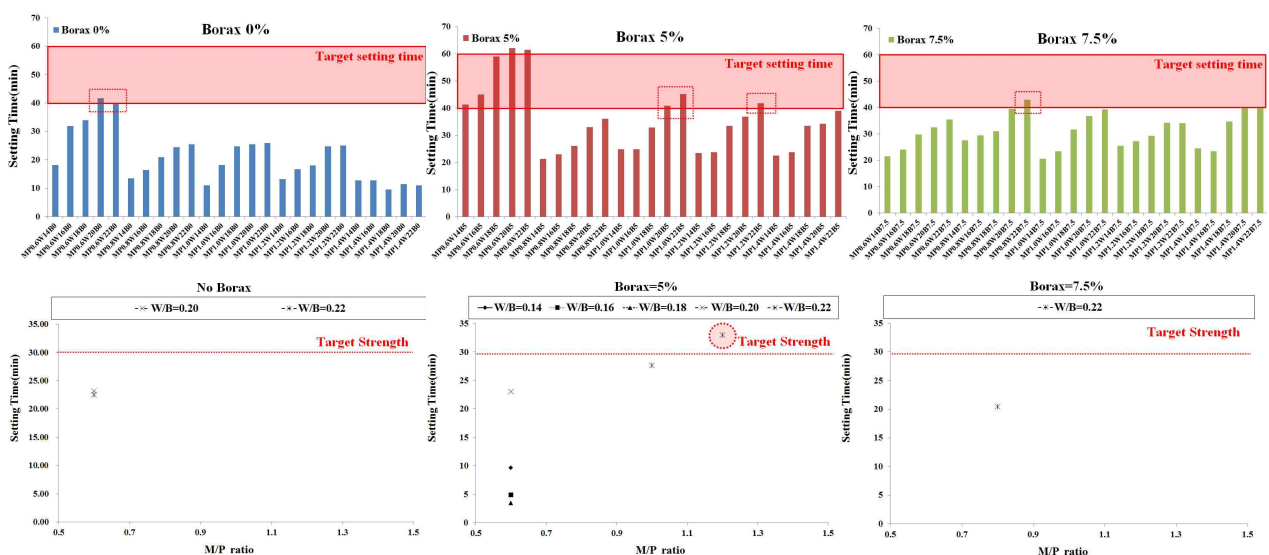


그림 2.73 최적배합비 도출을 위한 분석

3. 주요 연구성과

가. 학술적 성과

- 본 연구에서는 산화마그네슘(MgO)와 KH_2PO_4 의 결합재에 대한 최적배합비 도출을 위하여 응결시간과 압축강도 특성을 고려하여 분석을 실시
- 시멘트의 경우에는 응결시간이 짧지 않고 충분한 작업시간을 확보할 수 있으며, 이에 따라서 물 바인더비를 조정함으로서 다양한 압축강도를 확보가 가능하다. 하지만 본 연구에서 개발된 산화마그네슘 결합재의 경우 경화가 급속도로 이루어지므로 작업시간을 확보를 위한 응결시간이 동시에 고려되어야 함.
- 이에 따라 강도와 응결시간을 만족하는 결합재의 구성비는 1개의 변수로 도출하였으며, M/P비 1.2, 물 바인더비 22%, 지연제 혼입율의 경우 5%가 최적배합비로 확인

나. 기술적 성과

- 세라믹계열 산화마그네슘 결합재의 경우 급결성으로 인하여 최적배합비를 도출할 경우 그 범위의 제한이 있으며, 실용화하기 위해서는 산화마그네슘 및 인산칼륨과 지연제의 혼입율을 고정하여 제품화가 요구되어지며 이에 따라 현장에 적용이 가능한 제품 구성 시 본 연구에서의 최적배합비 도출 관련 자료로 활용도가 높을 것으로 예상

4. 기술개발 성과의 국내외 시장 전망

- 본 연구의 성과에서 도출된 산화마그네슘 결합재에 대한 최적배합비를 활용함으로서 본 개발 재료의 경우 국외에서는 이미 성능적 부분에서 검증을 확인한 바 있으며, 이에 따라 제품화로 결과로 도출된 구성비를 기반으로 다양한 제품 개발이 가능

제4절 개발 재료의 공극 분포 특성

1. 개발 보수재료의 공극분포 특성 규명

본 연구에서 개발된 산화마그네슘 결합재의 급속한 경화속도로 인하여 화학적 반응(팽창 및 반응열)에 의한 미세균열 발생이 우려되는 부분이다. 이에 따라 본 연구에서는 최적배합 도출에 따른 동일한 산화마그네슘 및 인산칼륨의 구성비 내에서의 물 바인더비 및 지연제의 혼입율에 따른 공극 특성을 분석하고, 기존의 일반 시멘트 페이스트와 비교하여 공극율 및 공극 특성을 확인하였다. 나아가 산화마그네슘 결합재를 보수재료로의 활용을 위해서 기존 일반 시멘트 페이스트에 실제 부착을 하여 그 부착계면에서의 공극 특성도 분석하였다.

2. 핵심요소기술별 성과물

본 연구에서 도출된 성과의 경우 산화마그네슘 결합재를 수은압입법(MIP)를 통하여 분석을 실시하였다. 일반적으로 시멘트 페이스트의 경우 강도의 경우 대부분이 공극 분포가 증가하게 되면 강도는 감소는 양상을 나타내며, 본 연구에서 개발된 재료의 경우 공극 분포에 따른 경향을 확인할 수 없으며, 이는 공극분포가 높게 형성이 되어도 결합재의 적절한 구성비에 따른 화학적 결합이 적절히 이루어지게 되면 강도를 증진시킬 수 있는 것으로 확인된다. 일반 시멘트 페이스트와 비교한 그림은 다음 그림 2.74과 같이 명확하게 표현하였다. 산화마그네슘 결합재의 경우 일반 시멘트 페이스트 보다 높은 공극 직경에서 분포하고 있지만 전체 공극율은 낮게 나타났다. 또한 일반 시멘트 페이스트의 경우 공극 분포 특성은 Capillary pore의 공극 분포가 두드러지는 반면 산화마그네슘 결합재의 경우 연행공기의 직경에서 대부분 분포된 것으로 확인되었다. Capillary의 공극 분포가 높아질 경우 이온의 투수성이 높아지고 연행 공기의 분포가 높게 되면 동결융해 저항성에 기인한다.

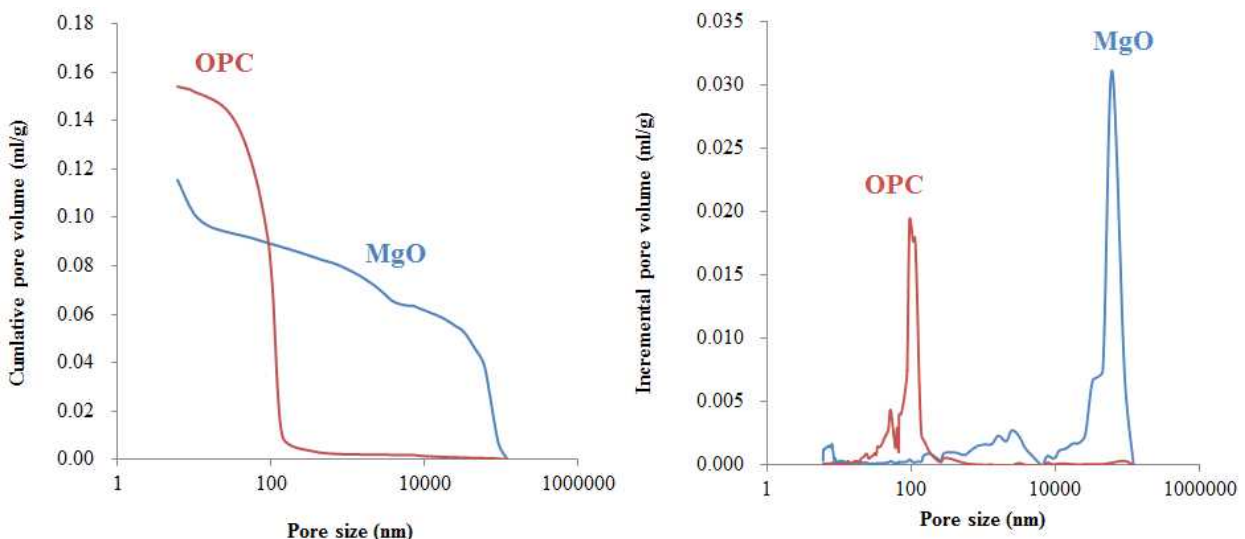


그림 2.74 산화마그네슘 결합재의 공극특성

또한 본 개발 재료를 보수재료로의 활용을 위하여 부착계면에서의 공극특성을 분석하였으며, 공극계면에서의 공극율을 확인함에 따라서 부착성능에 대한 원인 규명을 할 수 있다. 그리고 일반적으로 부착성능을 확인하기 위해서는 부착강도 실험을 통하여 성능을 확인하고 있지만 그 성능에 대한 규명에 대한 연구는 전무한 실정이며, 따라서 본 연구에서 수행된 실험법을 통하여 보수재료에 대한 부착성능을 규명할 수 있는 연구 자료로 활용이 충분할 것으로 판단된다. 이 장에서의 공극 분포 특성을 규명하기 위해서는 MIP법의 경우 수은 압입시 방향성에 따라 계면에서의 공극율을 확인하기는 어려우며, 따라서 다음 그림 2.75와 같이 기존 OPC에 산화마그네슘 결합재를 부착시킨 후 계면 부분을 샘플링하여 BSE이미지화하여 공극율을 분석하였다.

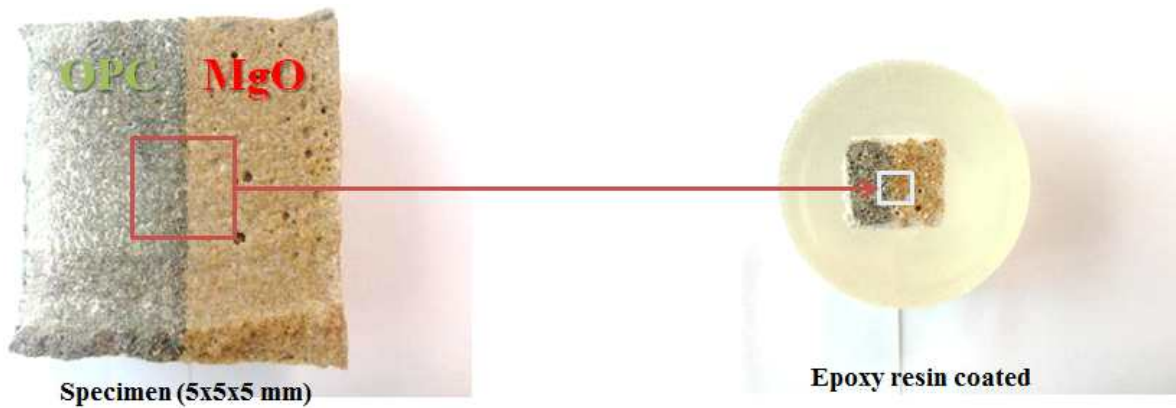


그림 2.75 부착계면에서의 공극분석을 위한 샘플링

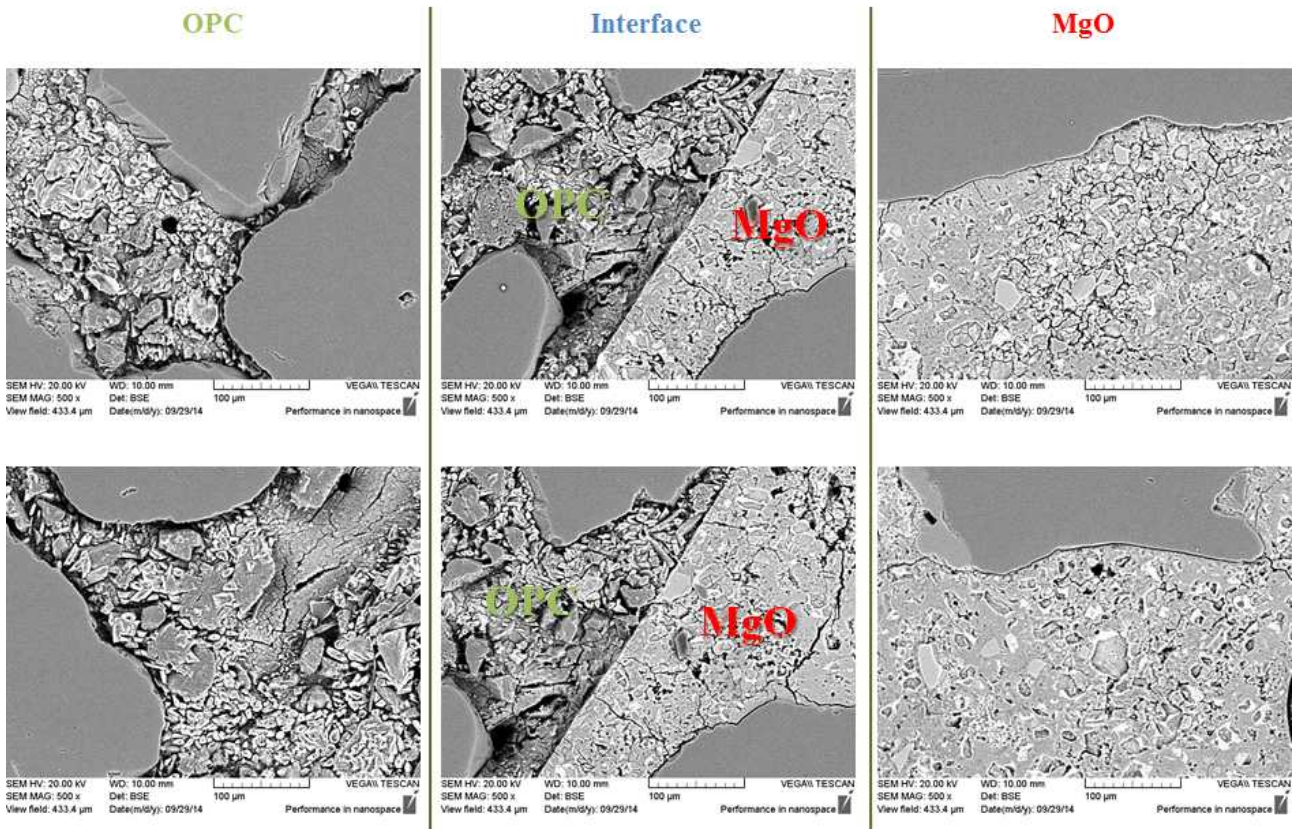


그림 2.76 부착계면에서의 공극특성

BSE 이미지 분석 결과, 일반 시멘트와 산화마그네슘 결합재에 대한 부착계면에서의 공극율은 육안으로 확인이 가능할 정도의 수준으로 공극분포가 적은 것으로 확인되었으며, BSE이미지의 상에 대한 분포를 통하여 공극율을 산정한 결과 산화마그네슘 결합재의 경우 공극률이 약 1/3 수준의 낮은 공극율을 나타내었다.

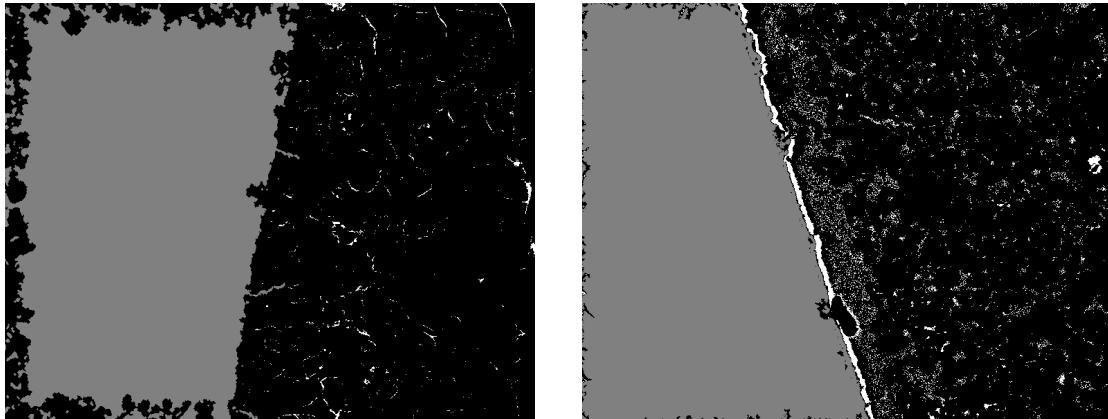


그림 2.77 부착계면에서의 BSE Image

3. 주요 연구성과

가. 학술적 성과

- 본 연구에서는 산화마그네슘 결합재의 공극 분포 특성을 통하여 시멘트 계열 재료 다소 상의한 결과를 확인하였고, 강도의 경우 공극 분포보다 구성비에 따른 결합성에 기인하는 것으로 확인됨.
- 또한 산화마그네슘 결합재의 경우 일반 시멘트 페이스트와 달리 주요 공극이 연행공기의 직경에서 분포가 되며, 이는 동결융해 저항성을 향상시키는 데에 기인을 하지만 투수성에 대한 검증이 요구됨,
- 부착성능의 경우 국내외 관련 연구는 일반적으로 강도를 통하여 성능 확인만이 이루어지고 있지만, 본 연구에서는 미세구조 분석을 통한 계면에서의 부착 성능 및 공극율을 확인할 수 있으며, 이에 따라 보수재료 개발시 부착계면에 대한 성능검증이 보다 구체적이고 학술적 근거자료로의 활용도가 높음.

나. 기술적 성과

- 본 연구 개발 재료의 경우에는 기존의 수경성 시멘트를 활용한 보수재료가 아닌 세라믹 계열의 재료로서 일반 시멘트와 화학적 반응과 같은 미세 구조 분야에서부터 성능까지 모든 물성의 차이가 상이하게 나타나며, 이와 같은 다양한 계열에서의 재료 개발이 이루어지기 위해서는 다방면으로의 성능 검증에 대한 기술이 요구되며 본 실험법을 기반으로 성능 검증에 대한 실험적 기술을 위한 기초 자료로 제공이 가능

4. 기술개발 성과의 국내외 시장 전망

- 본 연구의 성과는 기존의 시멘트 페이스트와 산화마그네슘 결합재에 대한 공극 특성을 규명함으로써 시멘트와 상이한 공극 특성을 나타내었으며, 이와 같은 공극 특성으로 동결융해 및 염해와 같은 환경에서 적용이 가능한 재료의 다양성을 부여
- 또한 개발 보수재료에 대한 부착성능 확인을 위한 부착계면에서의 공극율을 분석 및 산정하였으며, 이와 같은 연구는 국내외적으로 전무한 실정이며, 본 연구 성과를 기반으로 보수재료에 대한 다양한 실험적 기법이 개발될 것으로 전망

제5절 개발 재료에 대한 보수재료로의 성능

1. 개발 보수재료에 대한 보수재료로의 성능 검증

본 연구에서 개발된 산화마그네슘 결합재의 보수재료로 활용하기 위하여 기초 실험(초기 압축강도 및 응결시간)을 통하여 적용 가능한 보수공법을 선정하였다. 본 개발 재료의 경우 강도의 성능은 우수하지만 경화시간이 짧라 작업시간에 대한 신뢰성이 다소 부족한 실정이다. 따라서 비교적 보수 단면의 크기 작을 경우 적용이 되는 단면 복구재로서 적용성을 확인하고 하였다. 이에 따라 부착(휨 부착, 인장 부착)강도를 측정하고 일반 시멘트와 비교하였으며, 또한 내구성능 검증을 위하여 동결융해 및 염소이온 투과성 시험을 수행하였다. 또한 현장에서의 적용성을 확인하기 위해 미끄럼 저항성 시험도 수행하였다.

2. 핵심요소기술별 성과물

상기의 연구결과에서 도출된 산화마그네슘 결합재에 대한 최적 구성비를 활용하여 시험을 수행하였으며, 일반 시멘트 모르타르와 비교하였다. 먼저 본 개발재료에 대한 응결시간 및 시간별 압축강도를 다시 정의하였다. 또한 부착강도의 경우 동일한 환경에서의 성능 비교를 위하여 시편 표면에 대한 전 처리는 하지 않았으며, 산화마그네슘 결합재의 경우 재료적 이질성에도 불과하고 높은 부착강도를 나타내었다. 응결시간 및 압축강도와 부착강도에 대한 결과를 다음 그림 2.78과 같이 나타내었다. 응결시간 및 압축강도 결과 응결시간의 경우 약 4시간의 감축효과를 나타내었으며, 압축강도의 경우 산화마그네슘 결합재의 경우 일반적인 교통개방 강도 20MPa를 만족하는 결과를 나타내었다.

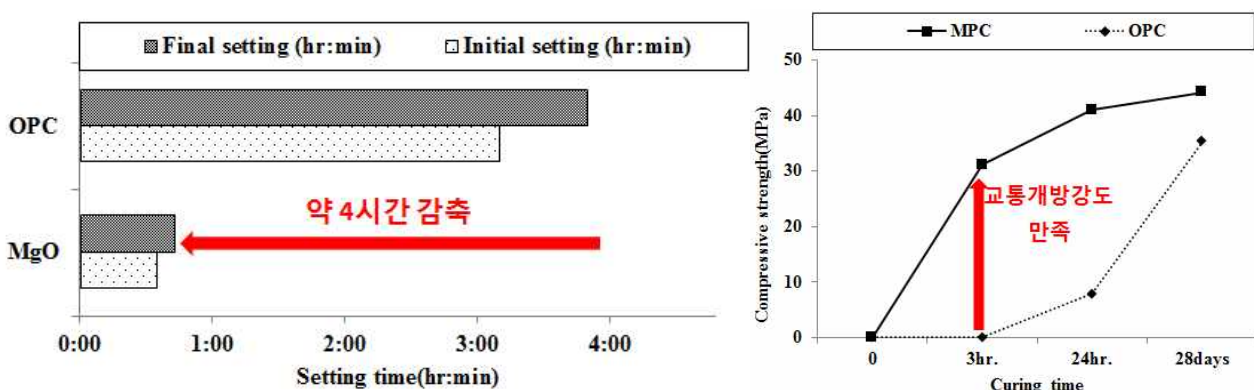


그림 2.78 개발 보수재료의 응결시간 및 압축강도 특성

부착강도의 결과 또한 일반 시멘트 재료에 비교하여 휨 부착강도의 경우 약 70~80% 증가되었으며, 인장 부착강도는 약 80~90% 정도 증가되었다. 이는 재료의 이질성을 가지는 재료임에도 표면의 전처리없이 부착성능의 우수성을 검증하였으며, 보수재료로 활용시 열화부위의 열화부위 제거에 대한 처리만으로 부착성능을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

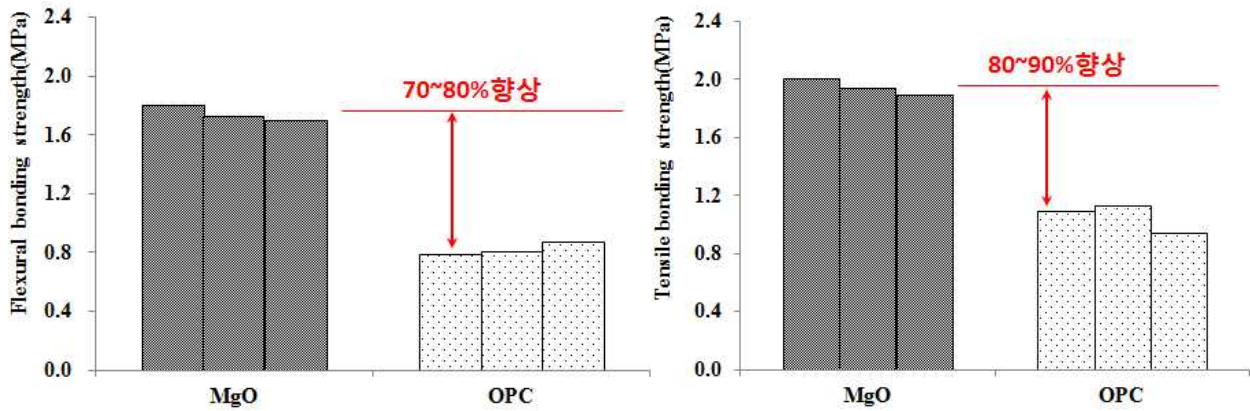


그림 2.79 개발 보수재료의 휨 및 인장 부착강도

내구성능의 경우 염소이온 투과 저항성 시험과 동결융해 저항성 시험을 통하여 각각의 쿨롱(Coulomb)과 내구성지수(DF) 및 상대 동탄성계수를 비교하였으며 그 결과 다음 그림 2.80와 같이 나타내었다. 염소이온 투과성의 경우 일반 시멘트와 비교하여 다소 큰 공극직경에 대한 분포를 확인하였지만 전체의 공극율에서 낮은 공극특성을 나타내어 일반 시멘트 보다 우수한 염소이온 저항성을 나타내었다. 동결융해 저항성 성능 또한 일반 시멘트 결합재에 비교하여 산화마그네슘 결합재의 경우 공극이 대부분 연행공기로 이루어져 있고, 일반 시멘트에 비하여 견고한 성능을 가지고 있어 동결융해 저항성 또한 우수한 것으로 확인되었다.

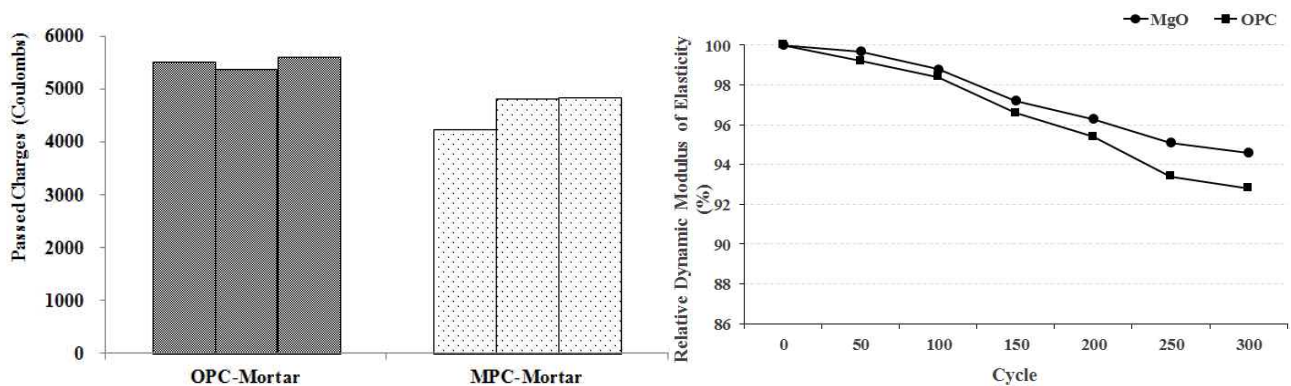


그림 2.80 개발 보수재료의 염소이온 및 동결융해 저항성

3. 주요 연구성과

가. 학술적 성과

- 본 연구에서 개발된 산화마그네슘 결합재에 대한 보수재료로의 성능을 실험을 통하여 검증하였으며, 일반 시멘트와 비교하여 모든 성능적인 부분에서 우수성을 나타내어 보수재료로의 활용성이 충분
- 이와 같이 산화마그네슘 결합재에 대한 보수재료로의 성능이 검증됨에 따라서 세라믹 계열을 건설분야에 적용이 가능하고, 세부적으로 보수재료의 다양성을 확보함에 따라 토

목/건축 분야에서의 재료분야의 연구 확대

나. 기술적 성과

- 본 연구 개발 재료의 경우에는 기존의 수경성 시멘트를 활용한 보수재료가 아닌 세라믹 계열의 재료로 보수재료 선정시 다양하게 접근이 가능하며, 시공환경에 따른 건설재료의 다각화를 통한 우수한 구조물의 안정성 확보
- 또한 세라믹 계열 재료의 경우 시공시 환경적 인자에 영향이 적어 환경(온도, 습도, 계정)에 영향을 최소화할 수 있는 건설재료의 확보가 가능

4. 기술개발 성과의 국내외 시장 전망

- 본 연구의 성과는 기점으로 건설재료 시장에 재료의 다양성을 부여하고 국내에서의 지속적인 연구로 신뢰성 확보가 가능하며 이를 통하여 고강도 및 고내구성을 확보함으로써 건설구조물의 수명증대 및 내구성능 증진에 따른 기술력 제공
- 이와 같이 초속경형 세라믹 계열 결합재의 개발을 통하여 시공기간 단축에 따른 작업속도의 가속 및 환경적 영향의 최소화를 통하여 원활한 시공이 가능하여 여러 분야에서 적용이 가능

제6절 개발 재료에 대한 경제성

1. 개발 보수재료에 대한 경제성 분석

본 연구에서 개발된 산화마그네슘 모르타르의 경제성 확인을 위하여 기존 보수재료 중 단면복구재로 주로 활용되고 있는 단면복구용 폴리머 모르타르와 재료 단가 비교 분석을 실시하였다. 또한 개발 재료 특성상 조기 경화 특성으로 인한 조기교통개방에 대한 경제성 부각을 위해서 사용자 비용에 대한 사례 분석을 통하여 교통 지연 및 지체에 따른 비용을 산정하였다. 일반적으로 단면복구재의 경우 단면 자체가 크지 않아 재료 단가의 차이는 크지 않으며, 이에 따라 도로 포장의 보수시 교통통제에 대한 사용자비용을 우선적으로 분석을 실시하였다. 사용자 비용의 항목에는 크게 차량운행 비용과 운행 지연 비용이 있으며, 도로의 보수공사시 교통혼잡으로 인해 발생하는 손실시간분의 비용으로서 이를 화폐 단위화한 것이다. 또한 최근 도로 포장의 사용자의 편의성 및 사용성에 대한 관심이 증대되고 있어 이에 대한 고려가 충분히 이루어져야 한다.

2. 핵심요소기술별 성과물

본 연구에서 개발된 재료 자체의 단가를 산출하기 위하여 본 연구에서 개발된 최적배합비를 기반으로 산정하였으며, 단면복구용 폴리머 모르타르와 재료 단가의 차이를 비교 분석하였다. 그 결과 약 61%의 절감효과를 나타내었으며, 비교한 결과는 다음 그림과 같다.

또한 본 연구에서 개발된 재료를 실용적인 측면에서의 활성화를 도모하기 위하여 추가적으로 교통지체에 대한 사용자 비용 산정 기법을 활용하여 교통지체 및 통제에 대한 사용자 비용을 산출하였으며, 이는 직접적으로 발생되고 있는 비용은 아니지만 국민수준의 향상에 기여하는 부분이다. 따라서 사례분석을 통하여 보수공사시 시간별 교통 통제 및 지체에 대한 사용자 비용을 산출하였다. 일반적으로 도로의 경우 교통량에 따라 금액이 상이하게 발생되지만 본 연구에서는 보통 수준의 교통량을 고려하여 선정하였으며, 그 결과 교통 통제 및 지체에 대한 시간별 발생하는 사용자 비용은 약 100만원 수준으로 책정되었다.

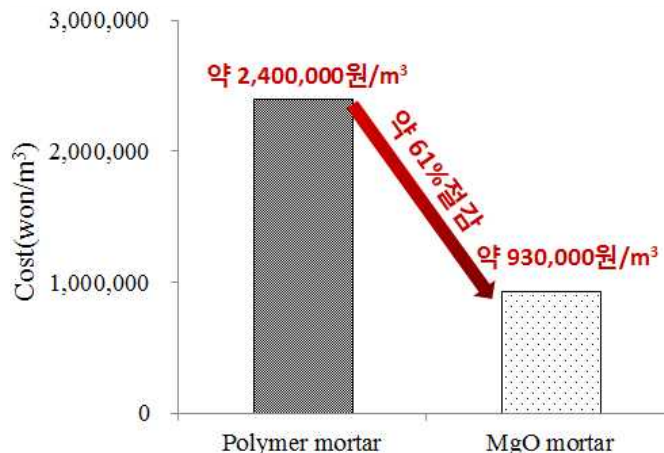


그림 2.81 개발 재료 단가의 경제성 비교·분석결과

3. 주요 연구성과

가. 학술적 성과

- 본 연구의 경제성 분석을 통하여 재료적인 측면의 비용뿐 아니라 사용자비용도 추가적으로 분석되어야 하며, 이와 같은 분석 기법으로 통하여 도로 포장 재료 분야에서 학술적으로 보다 다양하게 접근이 가능

나. 기술적 성과

- 사용자 비용 산정의 경우 기업적인 차원에서는 고려되지 않는 항목으로서 실용화 및 국민 수준의 향상을 위해서는 정부 차원에서의 지원이 요구되며, 본 연구에서의 성과를 기반으로 기업의 수준에서만 아닌 국가적인 차원에서의 경제성 분석 사례 제공

4. 기술개발 성과의 국내외 시장 전망

- 단면 복구재의 경우 일반적으로 열화 및 파손부위가 작아 재료적인 비용은 차이가 크지 않으며, 이에 따라 사용자비용이 보다 주요한 인자로 작용하여 재료의 활용도가 높음.

제4장 연구목표 달성 및 효과

제1절 연구개발 최종목표 달성도

본 연구의 최종년도의 각 주제별 연구목표, 연구내용 및 달성도를 다음 표에 정리하였다.

목 표	내 용	달성도 (%)
산화마그네슘 및 첨가물의 함유량에 따른 세라믹 결합재의 초기의 압축강도 측정	1일 압축강도 결과 15~20MPa에서 산화마그네슘계열 결합재의 경우 30MPa이상으로 기존 보수재료 대비 300% 이상 증진	100
산화마그네슘 및 첨가물비에 따른 응결 속도	응결시간 시험 결과 산화마그네슘계열 결합재의 경우 약 30분 이내로 측정되었으며, 기존 시멘트 보수재료 대비 70%이상 감축	100
산화마그네슘 결합재에 대한 최적배합비 정립	- 산화마그네슘 결합재의 최적배합비 도출을 위해 작업성을 위한 유동성 측정을 실시하였지만, 시멘트계열과 달리 재료특성 자체의 점착성으로 인하여 기존의 측정 방법 적용이 어려움 - 산화마그네슘 결합재의 최적배합비 정립을 위해 응결 시간 및 압축강도 특성을 통하여 강도 및 작업성 만족이 가능한 최적배합비 도출	90
산화마그네슘 결합재의 미세공극 분석	- 산화마그네슘 세라믹 결합재에 대한 공극특성을 분석하기 위하여 수은압입법을 통하여 공극직경에 대한 분포특성을 확인 - 기존 시멘트 보수재료 보다 다소 큰 직경에서의 분포를 보이지만 전체 공극률은 낮은 수준으로 확인.	100
산화마그네슘 결합재의 보수재료로의 물리적 (압축, 휨, 부착)성능 검증	- 산화마그네슘 세라믹 결합재의 시간별 압축강도 특성을 확인하였으며, 그 결과 3시간에 30MPa이상의 압축강도를 확인하였으며, 이에 따라 일반적으로 교통개방강도는 20MPa로 교통개방시간을 3시간 이내로 단축이 가능 - 휨 강도의 경우 보수재료로 활용을 위해 휨 부착성능으로 시험을 수행, 그 결과 모든 부착성능이 시멘트계 보수재료에 비교하여 170~190% 우수한 성능 확인	100
산화마그네슘 결합재의 보수재료로의 내구성능 검증	산화마그네슘 세라믹 결합재에 내구성능을 확인하기 위해 염소이온, 동결융해 및 미끄럼 저항성 시험을 수행하였으며, 모든 성능이 기존 시멘트계 보수재료 보다 우수한 성능으로 확인	100
산화마그네슘 결합재의 보수재료로의 경제성 분석	경제성 분석의 경우 사용자 비용을 고려하여 분석	95

제2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석

▪ 신개념의 세라믹 결합재의 개발에 따른 건설기술 발전

- 기존의 수경성 시멘트를 활용한 보수재료가 아닌 세라믹계 결합재의 개발에 따른 건설재료의 다양성 확보
- 시공환경에 따른 건설재료의 다각화를 통한 우수한 사회 인프라 구조물의 안전성 확보
- 환경 (온도, 습도, 계절)에 영향을 최소화할 수 있는 건설재료의 개발
- 고강도 및 고내구성을 확보함으로써 건설구조물의 수명증대 및 내구성능 증진에 따른 기술력 제고

제3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석(시장창출, 고용창출 등)

▪ 쾌속 도로포장 및 유지보수공법의 혁신에 따른 경제적 이익

- 기존의 도로포장 및 유지보수공법에 비해 경제적 비용의 절감에 따른 경제적 이익 증대 효과
- 초속경형 세라믹 산화마그네슘 결합재의 적용에 따른 시공기간 단축에 따른 작업속도의 가속 및 원활한 시공 가능
- 쾌속시공 및 보수에 따른 교통차단시간 단축에 따른 사회적 비용 절감

제4절 연구개발 성과의 정책적 효과분석

▪ 산화마그네슘 결합재에 의한 쾌속 포장시공 및 보수로 사회비용 저감

- 쾌속 포장시공 및 보수보강 기간의 단축에 따른 사회비용 절감
- 포틀랜드시멘트계 콘크리트 대비 우수한 환경 영향성으로 추가적인 사회비용 지출의 절감
- 보수보강 이후 추가적인 유지관리비용의 불필요

▪ 세라믹계열 보수재료의 범용적 사용확대에 따른 국가적 이익증대

- 세라믹계 콘크리트의 확대사용에 따른 국가기술력 제고
- 초속경형 산화마그네슘 결합재의 개발에 따른 관련 건설재료에 대한 지적재산권 확보 및 신기술 정립에 따른 국가이익 증대

제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

제1절 연구성과 향후 활용방안

□ 본 연구개발의 경우 최근 사회 인프라 구조물의 중요성이 대두됨에 따라 도로에 대한 관심도 또한 증대되고 있는 실정이며, 현재의 고속도로는 대부분이 콘크리트 포장으로 구성되어있고 설계수명의 한계 이르고 있어 보수 및 확장포장공사가 빈번히 이루어짐.

□ 신개념의 세라믹계열의 보수 재료의 가능성을 제공함과 동시에 건설시장에서의 재료의 다양성 확보

- 이에 따라 최근 이와 보수보강 공법 및 재료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 관련 연구에 대한 관심이 급증하고 있음. 본 연구에서 개발된 재료의 경우 기존 보수재료의 시멘트계 재료와 달리 친환경적이며, 급속한 경화속도 특성으로 다양하게 활용가능

□ 향후 추가연구 (연구단 또는 사업단 구성 시) 쾌속 도로포장 및 도로보수보강을 위한 산화마그네슘 결합재의 콘크리트 개발을 위한 기초연구자료로 활용

- 산화마그네슘 결합재 세라믹 콘크리트는 현재 국내외적으로 일부 사용되고 있으나 토목/건축 구조물의 기초용 그라우팅제의 사용에 국한되고 있으며 구조부재 및 보수보강용 콘크리트 재료로 활용된 사례가 극히 드물어 본 개발의 연구결과는 세라믹 콘크리트 분야의 연구를 위한 기초자료로 활용도가 높을 것으로 예상

- 또한 산화마그네슘 결합재의 경우 시멘트계와 달리 친환경적이며 인체에 무해하여 시공시 다양한 측면에서 적용이 가능하고 시공자의 안정성 제공

□ 산화마그네슘 결합재의 기초물성 확보를 위한 결합재 조성 제시하고 관련 기술에 대한 추가 연구시 기초자료로 활용가능

- 최적의 산화마그네슘 결합재의 화학적 조성비에 관한 연구는 국내외적으로 전무한 실정이며 다만 경험적 실험법에 의해 조성비 및 결합첨가재에 대한 정의가 있었으나 본 연구의 결과는 최적의 조성비를 제공함으로써 향후 세라믹 보수재료 및 나아가 콘크리트에서 사용 시 기초자료로 활용가능

□ 쾌속 도로포장 신규시공에 따른 구조용 부재로서의 기초강성 자료

- 신규 도로포장의 경우 세라믹 콘크리트의 구조용 부재로 활용 시 이에 대한 강성에 관한 자료가 전무한 실정이나 본 연구결과를 바탕으로 산화마그네슘 결합재의 강성특성을 파악함으로써 개발 재료에 대한 구조부재로서의 활용방안 및 한계점을 제시

□ 쾌속 도로포장 신규시공 이후 각종 물리화학적 열화 (동해 및 염해)에 따른 내구성 능 지표 제시

- 혹한기 포장도로는 동해 및 용빙제 사용에 따른 내구성 저하문제에 항상 노출되어 왔으며 이에 대한 직접적인 대비책은 현재로선 부재. 따라서 산화마그네슘 결합재의 내구 성능에 관한 본 연구의 자료는 도로공용 시 내구성능, 수명에 관한 직접적인 자료를 제시하며 열화환경에 노출되어 있는 타 토목구조물의 활용방안을 위한 기초자료로 활용성이 높음.
- 또한 동해 및 용빙제 사용에 따른 콘크리트 열화 문제가 지속적으로 거론이 되고 있어 본 개발 연구 결과를 기반으로 추가적으로 콘크리트 포장의 복합열화 및 보수재료 활용 시 재보수 및 재포장의 빈도를 줄이기 위한 연구 추진

□ 기존 콘크리트와 비교한 초속경형 산화마그네슘 결합재의 기초물성 실험법의 국내 기준 제정을 위한 활용

- 기존의 콘크리트와는 달리 초속경형 산화마그네슘 결합재의 경우 타설 1시간 전후한 초기강도 및 응결시간의 측정에 관한 국내기준의 부재. 본 연구에서는 기존의 측정방법 외에 발전된 측정방법을 제시함으로써 콘크리트 물성측정범위를 확대할 수 있는 사례를 제공

□ 산화마그네슘 결합재의 사용성을 위한 국내 지방기준 및 표준 제정을 위한 기반자 료로 활용

- 세라믹 콘크리트와 같이 강성발현의 원리가 시멘트의 수화반응이 아닌 화학적 결정화에 의한 강성발현의 경우 일반 시멘트와는 다른 거동을 보일 수 있으며 이에 대한 활용을 위한 국내의 기준 및 표준의 부재. 따라서 세라믹 콘크리트의 활용을 위해선 관련 지방기준 및 국내표준에 대한 제정이 선수되어야 하며 본 연구의 결과는 기준제정을 위한 기초자료로 활용가능

□ 산화마그네슘 결합재의 활용성에 관한 기획자료의 언론홍보

- 세라믹 콘크리트의 활용성과 공학적 우수성에 대한 본 연구결과를 바탕으로 이에 대한 홍보를 위해 각종 언론매체 (건설분야 신문, 학회보도자료 등)를 통해 이슈화함으로써 산화마그네슘 결합재 뿐 아니라 세라믹계열 재료에 대한 활용성 제고

□ 쾌속 도로포장 및 유지보수공법의 혁신에 따른 경제적 이익

- 기존의 도로포장 및 유지보수공법에 비해 경제적 비용의 절감에 따른 경제적이익 증대 효과
- 초속경형 세라믹 콘크리트의 적용에 따른 시공기간 단축에 따른 작업속도의 가속 및 원활한 시공 가능

- 쾌속시공 및 보수에 따른 교통차단시간 단축에 따른 사회적 비용 절감

□ 신개념의 세라믹 재료의 개발에 따른 건설기술 발전

- 기존의 수경성 시멘트를 활용한 콘크리트가 아닌 세라믹계 재료의 개발에 따른 건설재료의 다양성 확보
- 시공환경에 따른 건설재료의 다각화를 통한 우수한 사회인프라 구조물의 안전성 확보
- 환경 (온도, 습도, 계절)에 영향을 최소화할 수 있는 건설재료의 개발
- 고강도 및 고내구성을 확보함으로써 건설구조물의 수명증대 및 내구성능 증진에 따른 기술력 제고

□ 산화마그네슘 결합재에 의한 쾌속 포장시공 및 보수로 사회비용 저감

- 쾌속 포장시공 및 보수보강 기간의 단축에 따른 사회비용 절감
- 포틀랜드시멘트계 콘크리트 대비 우수한 환경 영향성으로 추가적인 사회비용 지출의 절감
- 보수보강 이후 추가적인 유지관리비용의 불필요

제2절 추가연구 필요성 등

- 도로 사용자들의 도로 환경 개선요구 증대 및 기능성을 강화한 포장 재료와 시공 기술의 필요성 대두되고 있으며, 최근 지속가능한 건설재료에 대한 관심이 부각되어 이에 따라 친환경적인 세라믹계열의 산화마그네슘 결합재 또는 관련 연구가 요구됨.
- 보수재료의 성능에 따라 잦은 유지보수로 인한 국내의 도로 포장 파손 상태 악화 및 국가 예산의 비효율적 집행 및 낭비되므로 이에 대한 대책(공법 개선 및 재료 개발)이 필요
- 최근 들어 우리나라는 도로포장의 중요성을 인식하고 연구를 추진하기 시작하고, 도로 포장에 투자되는 국가 예산 비용이 연 2~3조 이상이 되며, 도로 포장으로 인한 이용자의 편의성 증대, 간접비용의 축소를 위한 노력으로 연구 활성화 분위기가 조성되고 있음.
- 현재 국외에서는 성공적으로 적용되고 있지만 국내에서는 아직 정착하지 않거나 추가 연구가 필요한 신공법, 신재료의 연구를 적용하고, 이를 통하여 사용자의 발전된 도로 기술에 대한 신뢰 회복
- 본 연구개발의 경우 국내의 관련 연구는 전무한 실정이며, 따라서 본 연구를 시발점으로 산화마그네슘 결합재의 관련 연구가 다양하고 다방면으로 이루어져 도로 사용자 및 관련 연구자들의 신뢰성을 제공할 필요가 있음

참고문헌

1. A. F. Obregon-Salinas et al., "Grancrete for Flexural Strengthening of Concrete Structures", ste E-glass particles used in cementitious mixtures", ACI SP275-17, 2011.
2. Cement Concrete & Aggregates Australia , "Concrete Pavement Maintenance/Rapair", 2009.
3. Kathleen Hall et al., "Long-Life Concrete Pavements in Europe and Canada", FHWA-PL-07-027, FHWA, 2007.
4. L. Jiusi et al., "Laboratory Evaluation of Magnesium Phosphate Cement Paste and Mortar for Rapid Repair of Cement Concrete Pavement", Construction and Building Materials, 58, 2014.
5. O. F. Montesdeoca Solorzano, "Basic Characteristics of Grancrete HFR", North Carolina State University, 2008.
6. Q. Yang et al., "Characteristics and Durability Test of Magnesium Phosphate Cement-based Material for Rapid Repair of Concrete", Materials and Structure, Vol. 33, 2000.
7. Y. Li et al., "Experimental Study on Magnesia and M/P ratio influencing properties of Magnesium Phosphate Cement", Construction and Building Materials, 65, 2014.
8. Y. Li and C. Chen, "Factors that Affect the Properties of Magnesium Phosphate Cement", Construction and Building Materials, 47, 2013.
9. 강인석 등, "마그네시아 인산염 시멘트를 사용한 초속경 보수 모르타르의 수화특성 및 현장적용성에 관한 연구", 대한건축학회논문집, 제 24권, 제 2호, pp. 79~86, 2008.
10. 도로연구소, "폴리머 콘크리트를 이용한 시멘트 콘크리트 포장의 긴급보수 방안에 대한 연구", 1992년도 연구보고서, 한국도로공사, 1992.
11. 도로교통기술연구원, "열화구조물(L형측구) 사전조사, 결과도출 및 추적조사 검토결과", 한국도로공사, 2007.
12. 도로교통연구원, "제설방법에 따른 염화물이 콘크리트 구조물과 환경에 미치는 영향 및 대책", 2007년도 연구보고서, 한국도로공사, 2007.
13. 송훈 등, "친수성 콘크리트의 표면보호재의 탄산화 저항성", 한국콘크리트학회 2007년 가을학술발표대회 논문집, 2007.
14. 이경하 등, "노후콘크리트 포장 및 덧씌우기 보수구간의 파손사례", 도로포장공학회지, 제 5권, 제 1호, pp 3~9, 2003.
15. 안무영 등, "마그네시아 인산염 시멘트를 사용한 보수용 초속경 모르타르의 특성에 관한 실험적 연구", 한국건축시공학회 논문집, 제7권 4호, pp. 109~116, 2007.
16. 안무영, "마그네시아 인산염 시멘트를 이용한 초속경 모르타르 보수재의 특성", 단국대학교 대학원 박사학위 논문, 2008.
16. 안상혁 등, "초속경 건식 스프레이드 모르타르 보수재료 개발을 위한 기초연구", 2010 한국콘크리트학회 봄학술대회 논문집, 2010.
17. 전성일 등, "고분말도 플라이애시를 첨가한 급속경화 콘크리트 개발", 한국도로학회지, 제 12권, 제 3호, 2010.

18. 정해문 등, “제설제에 의해 발생한 콘크리트 표면 열화에 대한 방지대책에 관한 연구”, 2003 대한토목학회 정기학술대회, 2003.
19. 최돈화 등, “세라믹 코팅의 콘크리트 중앙분리대 환경하중 저항성에 관한 연구”, 한국도로학회 학술대회논문집, 제 12권, 2010.
20. 한국건설기술연구원, “한국형 포장설계법. 개발과 포장성능 개선방안 연구”, 1단계 3차년도 최종보고서, 건설교통부, 2004.
21. 한국도로공사, “포장 균열 및 노면 반사 균열 억제 방안 연구 (Ⅱ)”, 도로 교통 연구원, 중간보고서, PP 50-51, 1998.
22. 한국도로공사, “고속도로포장상태 조사 및 분석”, 최종보고서, 2004.
23. 한국도로공사, “조기교통개방 콘크리트 포장공법에 관한 실험적 연구”, 실용화 연구보고서, 1996.
24. 한국건설기술연구원, “한국형 포장설계법 개발과 포장 성능개선 방안 연구”, 1단계 3차년도 최종보고서, 건설교통부, 2004.
25. 한국건설교통기술평가원, “탄소중립형 도로기술개발 기획보고서”,
26. 한천구, “콘크리트의 조성 및 보수보강에서의 선팡창계수”, 레미콘·아스콘·골재, 제 119호, 2006.
27. 한국건설교통기술평가원, “마이크로-매크로 하이브리드 복합 섬유를 이용한 콘크리트 보수·보강 신재료개발”, 산학연공동연구개발사업 제1차년도 중간보고서, 건설교통부, 2004.
28. 한국과학기술원, 2003년 건설핵심기술연구개발사업 최종보고서, “건설핵심 기술연구개발사업 “고인성, 고내구성 신섬유복합 모르타르 및 구조물 보수/보강 신기술개발”, 2007.
29. 한국건설교통기술평가원, “고압살수 표면처리 및 콘크리트 자동화 장비를 이용한 경사구조물-관로 시스템 보수 · 보강 공법 개발 연구보고서”, 건설핵심기술연구개발사업 제2차년도 최종보고서, 국토해양부, 2009.
30. 한국건설교통기술평가원, 세라믹 메탈재를 적용한 수중콘크리트의 구조물의 보수·보강공법 개발, 2001년 건설핵심기술연구개발사업 최종보고서, 2004.

[부 록 1]

□ 국내 학술발표

- 산화마그네슘 결합재에 대한 응결시간 및 압축강도 특성 관련 연구

건설관리 및 시공

2013 대한토목학회 정기학술대회

산화마그네슘 계열 세라믹 시멘트의 응결 및 초기압축강도 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Development of MgO base Ceramic Cement for
Rapid Setting and Hardening of Concrete

이현기* · 정환봉** · 정지용*** · 안기용**** · 심종성*****

Lee, Hyeonggi · Jung, Hwanbong · Jeong, Jiyong · Ann, Kiyong · Sim, Jongsung

1. 서 론

기존 도로 포장의 급속한 노후화함에 따라 최근 도로 포장의 유지보수 및 확장포장 공사가 크게 증가하고 있으며, 이와 같은 증가 추세에 따라 현장 시공 시 차선 감소로 인한 사용자 비용 및 안전상의 문제도 증가하는 추세에 있다.

이에 따라 도로 포장 및 보수 방안에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 기존의 보수 방식은 도로의 차선을 수일동안 통제, 거푸집을 설치한 수 콘크리트를 타설, 양생하는 위험한 작업방식으로 인한 안정성의 문제와 더불어 강도 보완에만 중점을 두고 있어 내화학적 및 내구성 확보에는 고려되지 않는 실정이다. 또한 현재 사용되고 있는 보수 재료는 기존재료와의 이질성으로 인한 역학적 거동 차이로 오히려 조기 열화되는 현상을 보이고 있다. 따라서 본 연구는 우수한 내구특성 및 강도 특성을 가진 산화마그네슘 계열 시멘트의 보수재료로의 성능을 확인하기 위해 응결시간 및 재령 1일에서의 압축강도 시험을 수행하였으며, 산화마그네슘 계열 세라믹 시멘트의 초기강도 발현과 급속 경화시간 확인을 통하여 도로포장 시공 및 보수시 적용하여 신속한 교통개발을 유도하고자 한다.

2. 실험개요

본 연구는 알칼리 산화물인 산화마그네슘(MgO)과 인산염(KH_2PO_4)을 혼입하여 시멘트 대체재로 사용하였다. 산화마그네슘과 인산염의 혼합 비율(M/P)은 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4로 설정하였고 물과 결합재비(W/B)는 0.14, 0.18, 0.22로 설정하였다. 지연제로 사용된 Borax의 혼입율은 5.0%, 7.5%, 10%를 사용하였다.

응결시간은 관입저항침을 이용하여 측정하였으며, 동시에 50×50×50mm 모르타르 압축강도 시편을 제작하여 응결시간과 강도 사이의 관계를 확인하기 위해 재령 1일 압축강도를 측정하였다. 산화마그네슘의 성분분석 결과는 표 1에 나타내었으며, 산화마그네슘 순도는 88.5%로 확인되었다.

표 1. 산화마그네슘 성분 구성

	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	CaO	Fe_2O_3
% (by mass)	88.5	0.5	3.3	1.0	4.1	2.2

* 정회원 · 한양대학교 건설환경플랜트공학과 박사과정 · E-mail : lhk0228@hanyang.ac.kr - 발표자

** 정회원 · 한양대학교 건설환경플랜트공학과 석사과정 · E-mail : hwanbong256@hanmail.net

*** 정회원 · 한양대학교 건설환경플랜트공학과 석사과정 · E-mail : jy1212@hanyang.ac.kr

**** 정회원 · 한양대학교 건설환경플랜트공학과 조교수 · E-mail : kann@hanyang.ac.kr

***** 정회원 · 한양대학교 건설환경플랜트공학과 교수 · E-mail : jssim@hanyang.ac.kr

[부 록 2]

□ 국내 학술발표

- 산화마그네슘 결합재에 대한 지연제 사용에 따른 응결시간 관련 연구

산화마그네슘 계열 세라믹 시멘트의 지연제 사용에 따른 응결 시간 특성 분석

Analysis on Characteristic of Setting time of the Magnesium Oxide Ceramic Materials use of Retarder

이 현 기* 정 지 용** 김 은 경*** 김 용 재*** 박 철 우*** 심 중 성***
Lee, Hyeongi Jeong, Jiyong Kim, Eunkyung Kim, Yongjae Park, Cheolwoo Sim, Jongsung

ABSTRACT

This study has been performed to analyze the setting time of the magnesium oxide (MgO) ceramic cement use of retarder(Borax). The setting time is set to 40~50 minutes for securing enough working time and early traffic opening.

요 약

이 연구는 산화마그네슘 계열 세라믹 시멘트의 지연제(Borax) 사용에 따른 응결시간을 분석하고자 하였다. 응결시간은 충분한 작업시간 확보와 조기 교통 개방을 위하여 40~60분을 기준으로 설정하였다.

1. 서 론

최근 기존 도로 포장의 급속한 열화 및 노후화로 인하여 도로 포장의 유지보수 공사가 크게 증가하고 있다. 콘크리트 보수 공사의 경우 보수재료의 응결 및 경화 특성은 중요한 인자로 간주되고 있으며, 산화마그네슘 계열 세라믹 시멘트의 경우 보통 포틀랜드 시멘트와 달리 조기 경화 특성을 가진다. 이를 보수재료로 활용하기 위하여 시공시 작업시간 확보를 위한 응결시간 역시 고려되어야 한다. 따라서 본 연구는 산화마그네슘 계열 세라믹 시멘트의 지연제(Borax)를 활용하여 응결시간 특성을 분석하고자 하였다.

2. 실험계획

2.1 실험개요

본 연구에서는 앞서 기술한 바와 같이 산화마그네슘계열 세라믹 시멘트에 지연제(Borax, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)를 바인더 대비 0~10%까지 혼입하여 길모어 침에 의한 응결시간 실험을 수행하였다.

2.2 사용재료

본 연구는 알칼리 산화물인 산화마그네슘(MgO)과 인산염(KH_2PO_4)을 혼입하여 시멘트 대체재로 사용하였

-
- * 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정
 - ** 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 석사과정
 - *** 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사후과정
 - **** 정회원, 강원대학교 토목건설공학과 교수
 - ***** 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 교수

[부 록 3]

□ 국내 학술발표

- 산화마그네슘 결합재에 대한 최적배합비 도출 관련 연구

MgO계 세라믹 시멘트의 응결 및 압축강도를 통한 최적 배합설계 분석

Analysis on Optimized Mix Design of the Magnesium Oxide (MgO) Ceramic Cement Considering Setting and Compressive Strength

정지용* 이현기** 정환봉* 김은경* 안기용*** 심종성***
Jeong, Ji Yong Lee, Hyeon Gi Jung, Hwan Bong Kim Eun Kyung Ann, Ki Yong Sim, Jong Sung

ABSTRACT

This study has been performed to analyze the optimized mix design of the Magnesium Oxide (MgO) ceramic cement by verifying its early strength development and expediting setting time, which can be applied to construction of road pavements for early traffic opening.

요 약

본 연구는 산화마그네슘 계열 세라믹 시멘트의 조기강도 발현과 급속 경화시간의 확인을 통하여 도로포장 시공 및 보수시 적용하여 신속한 교통개방을 유도하고자 한다.

1. 서 론

현재 도로 포장의 유지보수 및 확장포장 공사가 크게 증가하고 있는 추세이며, 이에 따라 현장 시공 시 차선 감소로 인한 사용자 비용 및 안전상의 문제도 증가하는 실정이다. 따라서 본 연구는 신속한 교통개방 및 사회적 비용의 감소를 위한 세라믹 시멘트 보수재료의 개발을 목적으로 한다.

2. 재료 및 방법

본 실험을 위해 알칼리 산화물인 산화마그네슘(MgO)과 인산염(KH₂PO₄)을 혼입하여 사용하였으며, 산화마그네슘과 인산염의 혼합 비율(M/P)은 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4로 하였다. 물과 결합재비(W/B)는 0.22로 고정하였고 자연제로 사용된 Borax의 혼입율은 0%, 5%, 7.5%, 10%를 적용하였다. 응결시간 측정을 위해 관입저항침을 이용하였고, 이와 동시에 50×50×50 mm 시편을 제작하여 1일 압축강도를 측정 후 응결시간과 강도 사이의 관계를 확인하였다. 목표 1일 압축강도는 20 MPa 이상이며, 응결시간은 실제 작업성을 고려하여 최소 40분에서 최대 2시간으로 설정하였다.

* 정희원, 한양대학교, 건설환경플랜트공학과, 콘크리트구조 연구실, 석사과정
** 정희원, 한양대학교, 건설환경플랜트공학과, 콘크리트구조 연구실, 박사과정
*** 정희원, 한양대학교, 건설환경플랜트공학과, 교수

[부 록 4]

□ 국외 학술발표

- 산화마그네슘 결합재에 대한 응결시간 및 경화특성에 관한 연구

Instructions for Final manuscript

Proceeding of the 9th Japan -Korea Joint Seminar on Bridge Maintenance
July 24-27, 2013, Hokkaido Japan

DEVELOPMENT OF MgO BASE CERAMIC CEMENT FOR RAPID SETTING AND HARDENING OF CONCRETE

Jongsung SIM, Hyeon Gi LEE and Ki Yong ANN

Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Ansan 425-791, South Korea

Abstract

The present study concerns a development of ceramic cement to dramatically reduce the setting time of concrete, using MgO-based alkali oxide rather than Portland cement. To meet the development of strength, a phosphate was combined together with the oxide. The penetration resistance was monitored immediately after casting to determine the setting time and simultaneously the compressive strength was measured at 24 hours. As a result, it was found that an increase in the MgO in binder resulted in an increase in the strength, but a decrease in the setting time. At a very high level of MgO, the strength was adversely reduced, presumably due to further heat generation and thus thermal crack.

Keywords: ceramic cement, alkali oxide, setting, MgO, phosphate

1. INTRODUCTION

Rapid setting and hardening of fresh concrete is often required for urgent constructions, for example, a repair immediately after accident, in-use rehabilitation of motorway and sometimes extreme reduction of concrete curing. Accelerator, as a chemical admixture could be used to speed up hardening of fresh concrete, as reducing 2-3 hours of setting time, compared to normal fresh concrete, while ordinary Portland cement (OPC) concrete indicates 6-9 hours of the setting time of fresh concrete. However, there are limitations in use, arising from detrimental effect to concrete properties, such as potential risk of corrosion of steel, as the accelerator consists mainly of alkali salts: CaCl_2 , NaCl and KCl . Thus, these accelerators are not permitted to use/admix in concrete mix in many standards.

Ceramic cement can be applicable to dramatically speed up the setting and hardening of fresh concrete, together with securing concrete properties. For ceramic cement, the rate of fresh hardening is dependent on the ratio of alkali oxide, from several minutes to hours, with no adverse effect to concrete properties. In the present study, the MgO-based ceramic cement is developed to significantly reduce the setting and hardening of fresh concrete. Simultaneously, the rate of setting was modified by other additions encompassing the phosphate (i.e. KH_2PO_4 ; monopotassium phosphate) and chemical retarder ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$; Borax). Simultaneously, a development of the compressive strength was confirmed at a very early age (i.e. at 24 hours after casting).

[부 록 5]

□ 국외 학술발표

- 산화마그네슘 결합재의 최적배합비에 관한 연구

The 8th International Conference of Asian Concrete Federation



21-24 September, 2014, Seoul, Korea

OPTIMIZED MIX PROPORTION OF MAGNESIUM OXIDE CERAMIC CEMENT

Hyeonggi Lee[†], Jiyong Jung[†], Eunkyung Kim[†], Yongjae Kim[†], Kiyong Ann[†] and
Jongsung Sim[†]

[†] Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Korea

E-mail: lhk0228@hanyang.ac.kr

Abstract

Concrete structures may often suffer from an unexpected deterioration arising from a cold climate, encompassing frost damage and thus peeling-off of cover concrete. Moreover, internal cracking has still a potential risk of degradation of concrete properties, subsequently leading to structural failure. In particular, for concrete pavement and bridge decks, the rate of degradation of structural capacity may be accelerated by repetitive traffic loading, needing a rapid repair and restoration. The present study concerns a development of ceramic cement as a repair measure to dramatically reduce the setting time of concrete, using MgO-based alkali oxide rather than Portland cement. As a result, it is found that the MgO-based cement set in a very short time, accounting for about 50 minutes, of which the compressive strength is in the range of 35 MPa in the equivalent age. It implies that an emergent repair/restoration could be covered by a rapid-hardening cement to meet the traffic limitation (i.e. the traffic restriction is only several hours for repair treatment).

Keywords: Ceramic cement; Alkali oxide; Setting; Strength; MgO; Phosphate.

1. INTRODUCTION

Most of concrete pavements in Korea are subjected to a risk of frost damage and chloride-induced corrosion of steel embedment, due to cold climate and thus spreading-out of deicer, which may reduce the service life of the structure. Thus, regular repair and rehabilitation would be required to secure a performance of the structure and structural safety. However, unlike other civil infrastructures, the traffic restriction during the repair of pavement costs high; only a couple of hours are given for the repair treatment at night to avoid congestion of transportation. Additionally, the conventional repair materials (i.e. repair mortar) may face early degradation due to a debondment from the existing substrate, which may result in a wider use of polymeric mortar as a repair material for cover concrete.

A recent study reported that MgO-based ceramic cement can rapidly harden to gain the strength in

a short duration, ranging about several hours to the level of normal strength of concrete. Moreover, it was reported that the MgO-based cement was very durable to an external aggressive ions, due to a denser pore structure rather than Portland cement concrete.^[1, 2] Notwithstanding, the use of the ceramic cement is only limited to grouting material.

In this study, to verify the feasibility of the MgO-based ceramic cement as a repair mortar to concrete pavement, the setting time was measured by a monitoring of the penetration resistance to fresh mortar, and simultaneously a development of the strength was evaluated. Also, to avoid flash set of the MgO cement, potassium phosphate (KH_2PO_4) was admixed at a given ratio to the cement.

[부 록 6]

□ 시험성적서

- 사용된 산화마그네슘의 분말도



시험성적서

성적서번호 : KCTL-B-14-01619

페이지 (1) / (총 1)

주소: 경기도 안산시 상록구 안산테크길 35

전화: 031-283-1892 팩스: 031-419-1893

1. 접 수 번 호 : KCTL-14-01190
2. 기 관 명 : 한양대학교
3. 주 소 : 경기도 안산시 상록구 사동 한양대학교 콘크리트구조연구실
4. 시 료 명 : 산화마그네슘
5. 성 과 이 용 목 적 : 보고서 작성

6. 시 험 결 과 :

시 험 항 목	단 위	시험결과 값	시험방법	비 고
분말도	cm ² /g	5 089	KS L 5106 : 2009	-

-자재생산국: 중국

끝.

작성자 : 손 호 정

(서명)

승인자 : 유 성 룡

(서명)

※ 본 성적서의 시험결과는 고객이 제시한 시료에 대한 결과임.

2014 . 12 . 04 .

한 국 콘 크 리 트 시 험 원 장



[부 록 7]

□ 시험성적서

- 사용된 인산칼륨의 분말도



시험성적서

성적서번호 : KCTL-B-14-01620
 페이지 (1) / (총 1)
 주소: 경기도 안산시 상록구 안산테크길 35
 전화: 031-283-1892 팩스: 031-419-1893

1. 접수 번호 : KCTL-14-01191
2. 기관 명 : 한양대학교
3. 주 소 : 경기도 안산시 상록구 사동 한양대학교 콘크리트구조연구실
4. 시 료 명 : 인산칼륨
5. 성과 이용 목적 : 보고서 작성

6. 시험 결과 :

시 험 항 목	단 위	시험결과 값	시험방법	비 고
분말도	cm ² /g	1 999	KS L 5106 : 2009	-

-자재생산국: 중국

끝.

작성자 : 손 호 정

(서명)

승인자 : 유 성 룡

(서명)

※ 본 성적서의 시험결과는 고객이 제시한 시료에 대한 결과임.

2014 . 12 . 04 .

한 국 콘 크 리 트 시 험 원 장



[부 록 8]

□ 시험성적서

- 일반 시멘트 결합재의 보수재료로의 성능 검증 관련 성적서



4672-9977-8230-1448

시험성적서

- 성 적 서 번 호 : CT14-089386
- 의 의 자
 - 업 체 명 : 한양대학교 에리카산학협력단
 - 주 소 : 경기도 안산시 상록구 한양대학로 55 (사동, 한양대학교내학연산클러스터지원센터212호)
 - 의뢰일자 : 2014.08.26
 - 시험발급일 : 2014.12.31
- 시험성적서의 용도 : 품질관리
- 시 료 명 : 모르타르(Plain)
- 시험방법

(1) KS L 5108:2007	(2) KS F 4042:2012
(3) KS F 4923:2005	(4) KS F 2375:2001
(5) KS F 2711:2002	(6) KS F 2456:2013

확인	작성자 성 명	노상균	기술책임자 성 명	조재우
비고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다. 2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.				

한국건설생활환경시험연구원



에너지환경사업본부 : 363-883 충청북도 청주시 청원구 오창읍 양청3길 73 043-210-8990
 결과문의 : 건축환경재료센터 ☎ (043)210-8955

시험성적서

성적서번호 : CT14-089386

6. 시험결과

1) 모르타르(Plain)

시험항목	단위	시험방법	시험결과
응결시간(초결)	시:분	(1)	3:10
응결시간(종결)	시:분	(1)	3:50
압축강도(3시간)	N/mm ²	(2)	측정불가
압축강도(3시간)	N/mm ²	(2)	측정불가
압축강도(3시간)	N/mm ²	(2)	측정불가
압축강도(1일)	N/mm ²	(2)	7.8
압축강도(1일)	N/mm ²	(2)	8.1
압축강도(1일)	N/mm ²	(2)	7.7
부착강도(표준조건)	N/mm ²	(2)	0.9
부착강도(표준조건)	N/mm ²	(2)	1.1
부착강도(표준조건)	N/mm ²	(2)	1.1
접착강도(표준조건)	N/mm ²	(3)	0.8
접착강도(표준조건)	N/mm ²	(3)	0.9
접착강도(표준조건)	N/mm ²	(3)	0.8
미끄럼저항성	BPN	(4)	60
미끄럼저항성	BPN	(4)	61
미끄럼저항성	BPN	(4)	59
염소이온 침투저항성	Coulombs	(5)	5 526
염소이온 침투저항성	Coulombs	(5)	5 384
염소이온 침투저항성	Coulombs	(5)	5 627
동결융해 저항성 (상대동탄성계수, 300 Cycle, A법)	%	(6)	93
동결융해 저항성 (상대동탄성계수, 300 Cycle, A법)	%	(6)	94
동결융해 저항성 (상대동탄성계수, 300 Cycle, A법)	%	(6)	93

※ 응결시간 및 압축강도 배합비(질량비)

[시멘트 : 표준사 : 물 = 450 : 1 350 : 225]

※ 응결시간 및 압축강도 이외의 시험항목의 의뢰자가 제공한 시험체에 대한 시험결과임.

※ 압축강도(3시간)의 경우 시험체가 종결에 도달하지 않아 측정이 불가하였음.

----- 이 하 여 백 -----

[부 록 9]

□ 시험성적서

- 산화마그네슘 결합재의 보수재료로의 성능 검증 관련 성적서



8241-1357-9866-4427

시험성적서

- 성 적 서 번 호 : CT14-089387
- 의 의 자
 - 업 체 명 : 한양대학교 에리카산학협력단
 - 주 소 : 경기도 안산시 상록구 한양대학로 55 (사동, 한양대학교내학연산클러스터지원센터212호)
 - 의뢰일자 : 2014.08.26
 - 시험발급일 : 2014.12.31
- 시험성적서의 용도 : 품질관리
- 시 료 명 : 모르타르(Test)
- 시험방법

(1) KS L 5108:2007	(2) KS F 4042:2012
(3) KS F 4923:2005	(4) KS F 2375:2001
(5) KS F 2711:2002	(6) KS F 2456:2013

확인	작성자 성 명	노상균		기술책임자 성 명	조재우	
비고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다. 2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.						

한국건설생활환경시험연구원



에너지환경사업본부 : 363-883 충청북도 청주시 청원구 오창읍 양청3길 73 043-210-8990
 결과문의 : 건축환경재료센터 ☎ (043)210-8955

시험성적서

성적서번호 : CT14-089387

6. 시험결과

1) 모르타르(Test)

시험항목	단위	시험방법	시험결과
응결시간(초결)	시:분	(1)	0:35
응결시간(종결)	시:분	(1)	0:40
압축강도(3시간)	N/mm ²	(2)	31.3
압축강도(3시간)	N/mm ²	(2)	30.8
압축강도(3시간)	N/mm ²	(2)	31.2
압축강도(1일)	N/mm ²	(2)	40.0
압축강도(1일)	N/mm ²	(2)	41.2
압축강도(1일)	N/mm ²	(2)	41.8
부착강도(표준조건)	N/mm ²	(2)	1.9
부착강도(표준조건)	N/mm ²	(2)	1.9
부착강도(표준조건)	N/mm ²	(2)	1.6
접착강도(표준조건)	N/mm ²	(3)	1.6
접착강도(표준조건)	N/mm ²	(3)	1.7
접착강도(표준조건)	N/mm ²	(3)	1.7
미끄럼저항성	BPN	(4)	57
미끄럼저항성	BPN	(4)	58
미끄럼저항성	BPN	(4)	60
염소이온 침투저항성	Coulombs	(5)	4 255
염소이온 침투저항성	Coulombs	(5)	4 832
염소이온 침투저항성	Coulombs	(5)	4 844
동결융해 저항성 (상대동탄성계수, 300 Cycle, A법)	%	(6)	96
동결융해 저항성 (상대동탄성계수, 300 Cycle, A법)	%	(6)	95
동결융해 저항성 (상대동탄성계수, 300 Cycle, A법)	%	(6)	96

※ 응결시간 및 압축강도 배합비(질량비)

[MgO : P : Borax : 표준사 : 물 = 471 : 393 : 24 : 1 250 : 210]

※ 응결시간 및 압축강도 이외의 시험항목의 의뢰자가 제공한 시험체에 대한 시험결과임.

----- 이 하 여 백 -----

주 의

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