15TBIP-C092549-01-000000

국토교통기술사업 최종보고서 2017

국토교통부 국토교통과학기술진흥원

국토교통기술사업 R&D Report

보안 과제( ), 일반 과제(O) / 공개( ), 비공개(O)

국토교통기술사업 제2차 연도 최종 보고서

발간등록번호
11-1613000-001883-01

R&D / 15TBIP-C092549-01-000000

국토교통기술사업화지원사업 최종보고서

2017. 04. 26.

주관연구기관 / (주)실크로드시앤티

협동연구기관 / 두산건설(주)

롯데건설(주)

포스코건설 (주)

국토교통부

국토교통과학기술진흥원

2. 제출문

제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

'국토교통기술사업'(연구개발 기간 : 2015. 04. 27~ 2017. 04. 26) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2017. 04. 27.

주관연구기관명 :	(주)실크로드시앤티	차 칠 용	(인)
협동연구기관명 :	누산건설(주)	이 명 화	(인)
	롯데건설(주)	하 석 주	(인)
	포스코건설(주)	한 찬 건	(인)
참여기관명 :			(인)

주관연구기관책임자: 김 정 선
협동연구기관책임자: 박 희 곤
김 광 기
유 조 형
참여기관책임자:

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

3. 보고서 요약서

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>15TBIP-C092549-01-000000</td><td>해당 단계
연구 기간</td><td>2016.04.27~
2017.04.26</td><td>단계구분</td><td>(해당단계)/
(총단계)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">국토교통기술사업화 지원사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">중소기업 보유기술 및 아이디어 사업화 분야</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4">구조물의 장수명화를 위한 보급형 콘크리트용 복합기능 균열저감제 개발 및 사업화</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">김정선</td><td>해당단계
참여
연구원 수</td><td>총: 34명
내부: 16명
외부: 18명</td><td>해당단계
연구개발비</td><td>정부:298,000천원
기업:298,000천원
정부 외: - 천원
계:596,000천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간
참여
연구원 수</td><td>총: 34명
내부: 16명
외부: 18명</td><td>총 연구개발비</td><td>정부:598,000천
기업:598,000원
정부 외: - 천원
계: 119,600천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속 부서명</td><td colspan="3">실크로드시앤티 기술연구소</td><td colspan="2">참여기업명
실크로드시앤티, 두산건설,
롯데건설, 포스코건설</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명:</td><td colspan="2">상대국 연구기관명:</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명:</td><td colspan="2">연구책임자:</td></tr>
<tr><td colspan="4"></td><td colspan="2">보고서 면수 109</td></tr>
</table>

4. 국문 요약문

<table>
<tr><td>연구의
목적 및 내용</td><td>본 과제는 구조물의 장수명화를 위한 보급형 콘크리트용 복합기능 균열저감제 개발 및 사업화를 목적으로 한다.
화학소재 업체인 실크로드시앤티에서 균열저감 핵심소재를 Grace사 대비 판매가 30%이하, 수축저감율 20% 이상 개선된 수준으로 개발하였다. 건설업체인 두산건설, 롯데건설, 포스코건설에서 각 건설사의 특화된 구조물 분야 콘크리트 배합에 도입하여 개발제품에 대한 성능 검증과 최적배합을 도출하였다. 최종적으로 대형부재 시험과 실제현장에 적용하여 현장적용성을 입증하였다.</td></tr>
<tr><td>연구개발성과</td><td>1. 보급형 콘크리트용 복합기능 균열저감제의 시생산단계 완료 및 시제품 제작
1) Grace사 Eclipse® 대비 판매가 30% 이하
2) Grace사 Eclipse® 대비 수축저감율 20% 개선
3) 내구성 (동결융해저항성, 중성화시험, 방청성능) 동등
2. 성능검증을 위한 공인시험성적서 확보
1) 수축저감율
2) 유동성
3) 압축강도 (3, 7, 28일 재령)
4) 응결특성 (초결, 종결)
3. 내구성평가를 위한 공인시험성적서 확보 (동결융해저항성, 중성화시험, 방청성능)
4. 대형부재 시험 (3건)을 통한 개발제품의 적용성 검증 완료
5. 각 건설사(두산건설, 롯데건설, 포스코건설)의 현장적용을 통한 현장적용성 검증
6. 특허 3건 출원
1) 균열저감형 콘크리트 혼화제용 모노머 및 이를 포함한 균열저감형 콘크리트 혼화제 (2015.11.10, 15-157480)
2) 균열저감형 콘크리트 혼화제 (2016.03.11, 16-28299)
3) 콘크리트형성용 조성물 및 이로부터 제조된 콘크리트 (2016.12.30, 16-0184949)
7. 인력 양성
1) 신규 인력 8인 (박사2명, 석사6명)</td></tr>
<tr><td>연구개발성과의
활용계획
(기대효과)</td><td>본 과제는 사업화를 목표로 하고 있으므로 최종제품인 복합기능 균열저감제의 일차적 활용방안은 현장 적용에 있다. 참여 건설사에 의해 계획된 본 최종제품의 구체적인 현장적용 분야는 아래와 같다.
<table>
<tr><th rowspan="2">건설사</th><th colspan="2">대형 건설사 별 현장 적용처 및 활용분야</th></tr>
<tr><th>과제 수행 기간 내</th><th>과제 완료 후 확대 적용 분야</th></tr>
<tr><td>두산건설</td><td>주거용건물의 기초 또는 슬라브</td><td>아파트, 주상복합 및 초고층 건축 분야 확대</td></tr>
<tr><td>롯데건설</td><td>대형마트 또는 아울렛매장 바닥</td><td>물류센터 또는 대형마트 등 건축 분야 확대</td></tr>
<tr><td>POSCO건설</td><td>제철플랜트 구조물</td><td>초장대 교량, 해저터널 등의 토목
및 해양공업단지등의 플랜트 분야 확대</td></tr>
</table>
기술적 측면에서의 활용성을 판단한다면, 본 과제를 통해 확보된 복합기능 균열저감제의 일체형 기술은 후속연구를 통해 보유 기술인 방청 기술 또는 조강 기술 등과의 융합을 통해 명실 공히 기능 집약적 화학 혼화제 개발을 매개할 수 있다는 것이다. 이는 콘크리트용 화학 혼화제의 완성본으로서 경제성만 확보된다면 관련 시장을 와해시킴으로써 블루오션을 창출할 수 있는 무기가 될 수 있다.</td></tr>
<tr><td>핵심어
(5개 이내)</td><td>균열저감제</td><td>수축저감제</td><td>화학혼화제</td><td>장수명</td><td>보급형 기술</td></tr>
</table>

5. Summery

Purpose & Contents

The objective of this project is to develop and commercialize low-cost and a multi-function crack reducing agent for long life of structures.

Silkroad C&T, a chemical material maker, has developed a core material for crack reduction that has improved sales by less than 30% and shrinkage reduction compared to Grace.

Doosan E&C, LOTTE E&C, and POSCO E&C, a construction company, proved the performance of the developed products and derived the optimal concrete mix design about specific construction area of each construction company.

Finally we have proved applicability to the field by applying it to mock-up test and actual fields

Results

1. Completion of production step of low-cost complex function cracking agent and manufacture of prototype
   1) Less than 30% of Grace Eclipse® sales
   2) Prepared by Grace Eclipse®, shrinkage reduction rate improved by 20%
   3) Durability (Freeze-thaw resistance, Accelerated carbonation test, Anti-corrosive performance) equivalent
2. Acquisition of official test report for performance verification
   1) Shrinkage reduction rate 2) Fluidity
   3) Compressive strength (3, 7, 28day) 4) Setting property (initial, final set)
3. Acquisition of official test report for durability evaluation (Freeze-thaw resistance, Accelerated carbonation test, Anti-corrosive performance)
4. Verification of applicability of development products through large-scale member test (3 cases)
5. Verification of field applicability through field application of each construction company
6. Applied for 3 patents
   1) Monomer of crack-reduced concrete and crack-reducing concrete admixture containing the same (November 10, 2015, 15-157480)
   2) Crack-reducing admixture (March 11, 2016, 16-28299)
   3) Compositions for forming concrete and concrete produced therefrom (December 30, 2016, 16-0184949)
7. Manpower training
   1) 8 new employees (2 doctors, 6 masters)

Expected Contribution

This project is aimed at commercialization. Therefore, the primary application of the final product, multi-function cracking reducing agent, is applied in the field. Specific field application areas of final product planed by participating construction companies, are as follows

Division	Application field and application field by construction company	
	Within the project period	Extended application area after completion of project
DOOSAN C&E	Foundation or slab of residential building	Expansion of apartments, residential complexes and high-rise buildings
LOTTE C&E	Large mart or outlet store floor	Construction area such as logistics center or large mart
POSCO C&E	Steel plant structure	Expansion of plant areas such as civil engineering and marine insustrial complexes such as super long bridges and submarine tunnels

Judging from its technical applicability, the integrated technology of multi-function cracking agent obtained through this project can mediate the development of function-intensive chemical admixture through the fusion of anti-corrosive technology or early strength technology, which is possessed by subsequent research. This will be a weapon to create blue ocean by breaking down the related market if economy is secured as the finished chemical admixture for concrete.

Keywords					
Crack-reducing admixture	Shrinkage-reducing admixture	Chemical admixture	Long-life	Low-cost technology

6. 영문 목차

〈 Contents 〉

1. Outline of research and development project ····· 6
2. Status of domestic and overseas technology development ····· 8
3. Research performance and achievements ····· 11
4. Achievement goal and contribution to related field ····· 101
5. Plan to utilize R&D achievements ····· 102
6. In the course of research, Overseas science and technology information ·· ····· 103
7. Security grade of R&D achievement ····· 104
8. Research facilities and equipment registered in the national science and technology information system ····· 105
9. Performance of safety measures of laboratory according to the performance of research and development task ····· 106
10. Representative research results of R&D projects ····· 107
11. Others ····· 108
12. References ····· 109

7. 본문 목차

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 6
2. 국내외 기술 개발 현황 ····· 8
3. 연구 수행 내용 및 성과 ····· 11
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 101
5. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 102
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 103
7. 연구개발성과의 보안등급 ····· 104
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황 ····· 105
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ····· 106
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 ····· 107
11. 기타 사항 ····· 108
12. 참고 문헌 ····· 109

8. 본문

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

본 과제는 구조물의 장수명화를 위한 보급형 콘크리트용 복합기능 균열저감제 개발 및 사업화를 목적으로 한다.

2. 연구개발의 필요성

균열이란 인장을 받는 부재나 부재의 일부에 재료의 결함 또는 과도한 하중 등으로 인하여 원래 연결되어 있던 재료가 분리되어 발생하는 작은 틈을 말한다. 균열은 콘크리트 구조물의 열화의 원인임과 동시에 결과로서 구조물의 내구성 및 안정성에 가장 직접적인 인자이다. 이로 인한 유지/보수 비용의 발생은 막대한 경제적 손실을 끼치고 있는데, 실제로 국토교통부 2012년 현황 자료에 의하면 시설물의 보수/보강 총 비용은 연간 9,500억원 수준으로 조사된 바 있다.

한편 구조물의 초고층화, 초대형화 및 장대화 추세와 더불어 최근 아파트등과 같은 일반 공동주택의 경우에도 고내구성 및 안정성 확보를 통한 장수명화 요구는 더욱 중요한 사회적/경제적 이슈가 되고 있다. 따라서 이러한 문제에 대한 대응으로서 사후 고비용의 보수/보강보다는 균열저감을 위한 저비용의 예방 조치가 절실한 실정이다.

사용 환경 및 적합한 시공법이 결정되어 타설된 후 발생하는 콘크리트의 균열은 양생시간에 따른 콘크리트의 부피수축 현상 때문에 발생하게 된다. 콘크리트의 부피수축 현상에 의한 균열은 소성수축 균열, 자기수축 균열 및 건조수축 균열로 분류될 수 있는데 이들의 발생 원인 및 시기 그리고 각각에 대한 대책을 [표 1]에 정리하였다.

[표 1] 수축균열의 원인 및 대책

수축균열 종류	발생 원인	발생 시기	대책
소성수축 균열	• 타설 후 급격한 수분 증발 • 적절한 양생 미비 • 거푸집 누수	타설 2시간 ~ 약 1일	• 수축저감제 활용 • 타설 후 양생포 활용
자기수축 균열	• 시멘트 수화반응에 의한 자체 체적 감소 • 높은 단위시멘트량	응결종료 ~ 약 7일	• 수축저감제 활용 • 단위시멘트량 저감 배합
건조수축 균열	• 콘크리트 내부 잉여수 증발 • 단위수량 과대	경화 후 ~ 수십일 이상 (약 5년)	• 수축저감제 활용 • 단위수량 최소화 배합

[표 1]과 같이 콘크리트의 수축균열은 공극에 존재하는 수분의 증발과 밀접한 관계가 있으며 시판되고 있는 수축저감제를 통해 일정 수준 해소할 수 있음을 알 수 있다. 일반적으로 콘크리트의 균열을 보다 저감시키기 위해서는 수축저감제 사용량을 증가시키면 된다. 그러나 경제성 측면에서 볼 때, 시판되고 있는 수축저감제는 대부분 고가의 수입품이므로 사용량에 있어 한계를 가지고 있어 만족할 만한 수준의 균열저감 효과를 기대하기는 어려운 실정이다.

최근에는 콘크리트 제조 시 투입 공정의 단순화 및 저장조 관리의 효율성의 이유로 수축저감제와 고성능 AE감수제가 일체화된 제품이 개발 및 시판되고 있다. 그러나 이들 제품은 콘크리트 유동성 부여 기능을 주 기능으로 하고 수축저감 기능은 부가 기능으로 설계되어 만족할 만한 수준의 균열저감 효과를 발휘하지 못하는 것으로 파악되고 있을 뿐만 아니라 기존 제품 대비 가격 하락은 있지만 여전히 고가의 가격으로 판매되고 있다. 즉, 개발 시의 우수한 균열저감 성능이 출시된 제품에서는 원가 문제로 구현되지 못하는 것이다.

따라서 시장에서는 균열저감 요구 성능을 발휘하는 보급형 제품에 대한 니즈가 더욱 증폭되고 있다.본 과제가 목표로 하는 복합기능 균열저감제는 일체형 제품으로 극대화된 균열저감 성능 및 원가 경쟁력을 보유한 보급형 제품이다. 본 과제의 사업화 제품 기술의 성공적 연구를 통해 국내 건설 구조물의 장수명화를 보편화하는데 지대한 기여를 하고자 한다.

3. 연구개발 범위

본 과제는 보급형 콘크리트용 복합기능 균열저감제 개발 및 사업화이다. 화학소재업체인 실크로드시앤디에서 화학소재를 개발하고 대형건설사인 두산, 롯데, 포스코 건설에서 각 건설사의 특화된 구조물 분야 콘크리트 배합에 도입하여 개발제품에 대한 성능 검증 및 개선사항을 Feed-back하여 성능을 Upgrade한다. 최종적으로 대형부재시험과 현장적용 시험을 수행하여 개발제품이 사업화되는데 최적 조건을 확립하는 것을 본 과제수행기간 동안 수행한다.

제2장. 국내외 기술 개발 현황

본 과제를 통해 사업화하고자 하는 복합기능 균열저감제는 콘크리트 수축저감을 위한 액상 유기 계면활성제 포뮬레이션 기술 분야에 속한다. 이에 대한 기술 동향 파악을 위해 국내외 특허를 검토하였다.

[표 1-6] 및 [표 1-7]은 본 과제의 대상기술과 근접한 분야로 판단되는 것으로 각각 국내 및 해외 특허 목록이다. 본 과제와의 유사성 분석을 위해 기술 유형을 재료의 융합 형식과 계면활성제의 이온성으로 구분하였다. 유동성 기능 부분과 수축저감 기능 부분의 융합 형식에 있어 수축저감 기능으로만 이루어졌을 경우에는 단독형으로, 두 기능이 단순 혼합된 경우에는 혼합형으로, 그리고 두 기능이 하나의 재료로 구현될 경우에는 일체형으로 표기하였다. 참고로 단독형 특허는 기본적으로 혼합형까지 한정하고 있다. 한편 수축저감 기능을 위해 사용된 계면활성제의 이온성은 비이온성, 음이온성, 양이온성 또는 양쪽성인 경우 Zwitter로 표기하였다. 참고로 본 과제의 복합기능 균열저감제는 기술의 독창성에 대한 설명 시 언급한 바와 같이 유동성 기능 부분과 수축저감 기능 부분의 융합 형식은 일체형에 해당하며, 수축저감 기능을 위한 계면활성제는 결과적으로 음이온성으로 공극표면의 소수성 코팅을 위한 것이다.

[표 1-6] 수축저감 포뮬레이션 기술 관련 국내 특허

출원년도	특허번호	출원인	특허 명칭	기술 유형		선행특허
				Type	이온성	
2006	10-2008-0003533	POSCO건설 드라이포드 삼표	콘크리트용 액상형 수축저감제 조성물과 이를 이용한 콘크리트 조성물 (유분화규속-실리카 복합체, 지방족 고분자 화합물, 실산염 화합물, 글루코스 화합물 4종 화합물의 혼합 수축저감제	혼합형	비이온성	
2008	10-2008-0103650	트라이포드 POSCO건설	고강도 콘크리트용 자기수축 저감제 조성물 (카르복시메틸셀룰로오스나트륨, 글리콜에테르, 유플루오르화 규속염, 트리에탄올아민 4종 화합물의 혼합 수축저감제)	혼합형	비이온성	KR10200100078543 KR10200800133503 JP20051390533
2011	10 2011 0034257	삼표	에테르계 화합물 및 우레아를 포함하는 콘크리트용 수축저감제 조성물 (폴리옥시알킬렌 알킬에테르, 글리콜에테르, 우레아 3종 화합물의 혼합 수축저감제)	혼합형	비이온성	KR10201000441943 KR10199807028663 KR10200800733623
2011	10-2011-0039578	우진산업	수축저감형 시멘트 분산제 및 그 분산제를 포함하는 콘크리트 조성물 (알킬에테르계 PCA 분산제의 수축저감제로서의 용도)	일체형	비이온성	KR10199900068353 KR10200100742993 JP100534153

[표 1-6]에서 알 수 있듯이, 본 분야에 대한 국내 특허는 그 개수가 현지히 적은 것으로 파악되었다. 따라서 본 기술의 중요성 및 필요성을 고려할 때 기술 경쟁력을 높이기 위한 노력이 절실하다. 관련 국내 특허 중 우진산업의 10 2011 0039578은 일체형의 비이온성 기술로 이미 유사연구 검토에서 본 과제의 복합기능 균열저감제 기술과 큰 차이점이 있음에 대해 분석한 바 있다.

[표 1-7] 수축저감 포뮬레이션 기술 관련 해외 특허

출원년도	특허번호	출원인	특허 명칭	기술 유형		선행특허
				Type	이온성	
1985	US4,547,223	Nihon Cement	Cement shrinkage reducing agent and cement composition (Polyoxyalkyl ether)	단독형 혼합형	비이온성	US1,633,927 US3,498,921 US3,991,122
1996	US5,556,460	Grace	Drying shrinkage cement admixture (Triol)	단독형 혼합형	비이온성	US3,486,916 US4,946,904 US5,413,634
1997	US5,626,663	Grace	Composition and method for inhibiting drying shrinkage of concrete (Diol)	단독형 혼합형	비이온성	US4,027,059 US4,792,360 US5,181,961
1997	EP0,777,653B1	Grace	Shrinkage reduction cement composition (Diol)	단독형 혼합형	비이온성	EP-A-0,308,950 US A 5,181,961 US A 5,142,036
1997	US5,679,150	Grace	Drying shrinkage cement admixture (Zwitter)	단독형 혼합형	Zwitter	US3,663,251 US4,960,465 US5,275,654
1998	EP0,851,901B1	Grace	Drying shrinkage cement admixture (Triol)	단독형 혼합형	비이온성	EP-A-0,271,435 EP-A-0,556,061 US-A-5,142,036
2002	US6,384,141	Shokubai	Anti-Shrinkage agent for hydraulic material (Comb type copolymer both main and side chain consist of alkyl ether)	일체형	비이온성	US4,528,334 US5,556,460 US5,739,212
2002	US6,398,866B1	Sika	Method for the reduction of the degree of shrinkage of hydraulic binders (Secondary amine contained alcohol)	단독형 혼합형	비이온성	US1,930,845 US4,975,122 US5,948,157
2003	US6,548,589B2	Sika	Cement dispersing polymers for high flow, high strength and selfcompacting concrete (Amine contained PCA)	일체형	Zwitter	US5,925,184
2003	US6,642,320B2	Taiheiyo Cement	Multi-functional cement dispersant and hydraulic cement compostions (Allyl ether-maleic anhydride copolymer grafted polyoxyalkylene)	일체형	비이온성	US5,158,996 US5,391,632 US5,912,284
2008	EP1,149,808B1	Nippon Shokubai	Cement admixture and cement composition comprising this (Polyoxyalkylene/PCA composite)	단독형 혼합형	비이온성	EP-A-0,850,894
2012	EP1,911,731B1	Larfarge	Cement shrinkage reducing agent and method for obtaining cement based articles having reduced shrinkage (Hexylene glycol and fluorinated surfactant composition)	단독형 혼합형	비이온성	-
2012	EP2,522,642A1	Nippon Shokubai	Shrinkage reducing agent for hydraulic material (Polyoxyalkylene compounds)	단독형 혼합형	비이온성	-

[표 1-7]에서 알 수 있듯이, 전체적으로 볼 때 일체형 기술이 일부 있지만 단독형 또는 혼합형 기술이 대부분이며, 콘크리트면의 소수성 코팅을 위한 비이온성 계면활성제를 도입한 사례는 전무하다. 이러한 기존 기술에 있어서는 특히 Grace가 좀 더 체계화된 기술을 갖춘 모습이다.

따라서 본 과제를 통해 사업화하고자 하는 복합기능 균열저감제 기술은 기존 기술과는 독창성 및 차별성을 갖춘 기술임이 재확인되었다. 주관기관인 (주)실크로드시앤디는 이를 권리화하고자 추가적인 데이터를 확보하여 출원 진행 중에 있다.

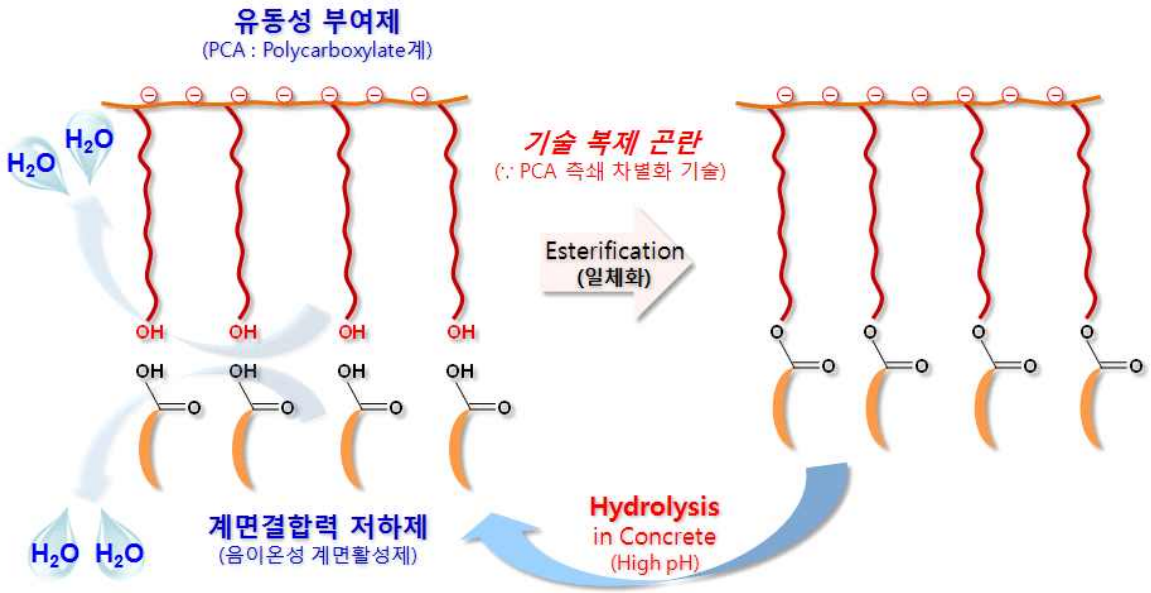
제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 1차년도 연구 수행 내용 및 성과

가. 계면결합력 저감 기능 및 유동성 기능 일체화 기술 개발

1) 개발 Concept

본 과제를 통해 개발하고자 하는 복합기능 균열저감제는 굳지 않은 콘크리트의 유동성 발현 기능과 굳은 콘크리트의 균열저감 기능을 동시에 보유한 제품이다. 또한 균열저감 기능에 있어서는 콘크리트 내부에 분포한 공극에서의 물의 계면결합력 및 응집력을 함께 저하시킴으로써 균열저감 성능을 극대화시키는 개념의 제품이다. 이를 위한 핵심기술은 콘크리트의 유동성 발현 기능 및 물의 계면결합력 저하 기능을 일체화시키는 것이다. 이에 대한 개념도를 [그림 3]에 나타냈다.



[그림 3] 일체형 복합기능 핵심원료 개념도

[그림 3]에서 알 수 있듯이, 콘크리트 유동성 발현 기능은 PCA 기술을 이용하고자 한다. 한편, 물과의 계면결합력 저감을 위한 가장 효과적인 방법은 친수성의 공극표면을 소수성으로 전환시켜주는 것이다. 이를 위해서 지방산계열의 음이온성 계면활성제가 적합하다. 왜냐하면 공극표면은 시멘트의 칼슘성분으로 인해 양이온성을 띄는데 여기에 효과적으로 흡착되기 위해서는 음이온성 물질이어야 하고 흡착된 표면의 소수성화를 위해서는 소수성기를 동시에 함유해야 하기 때문이다.

[그림 3]에 의하면 두 기능의 재료를 일체화시키는 것이 핵심기술인데 그 이유는 다음과 같다. 즉, 음이온성 계면활성제가 콘크리트 배합 시 감수제와 함께 혼입되면 양이온성 시멘트 표면에 경쟁 흡착을 하게 되는데 음이온성 계면활성제는 일반적으로 감수제에 비해 지분자량이므로 보다 빨리 흡착하게 된다. 결과적으로 음이온성 계면활성제는 시간이 지남에 따라 수화물에 묻혀 대부분 손실되어 성능 발휘 가능성이 원천적으로 봉쇄된다. 그러므로 [그림 3]에 나타낸 바와 같이 감수제와 함께 투입하되 그 기능이 필요한 시간만큼 지연되어 발휘될 수

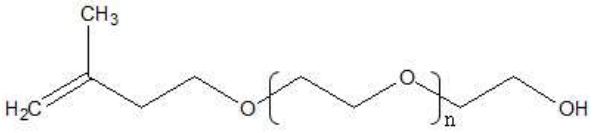
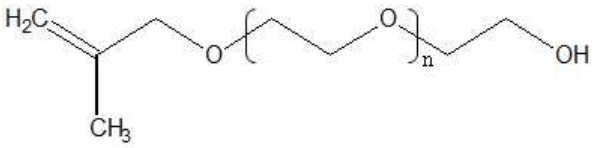
있는 재료적 장치인 일체화가 필요한 것이다. 즉 이는 PCA용 측쇄 단량체 말단에 지방산 불질을 축합반응시킴으로써 가능하다. 이에 대해서는 다음 절에서 구체적으로 기술하고자 한다.

2) 지방산이 도입된 측쇄 단량체 합성

가) 시작 원료

[그림 3]의 일체형 복합기능 핵심원료 합성을 위해서는 먼저 PCA용 측쇄 단량체에 지방산을 결합시켜야 한다. 이를 위해 사용될 수 있는 각각의 후보 원료는 [표 2] 및 [표 3]에 나타냈다.

[표 2] PCA용 측쇄 단량체 후보

명칭	화학식	물성 정보
APEG		M.W : 2,400g/mol 융점 : 60~62℃ - 용해도(물) ≤ 65 g/100ml
TPEG		M.W : 2,400g/mol 융점 : 60~62℃ 용해도(물) ≤ 62 g/100ml
VPEG		M.W : 2,400g/mol - 융점 : 60℃ - 용해도(물) ≤ 65 g/100ml

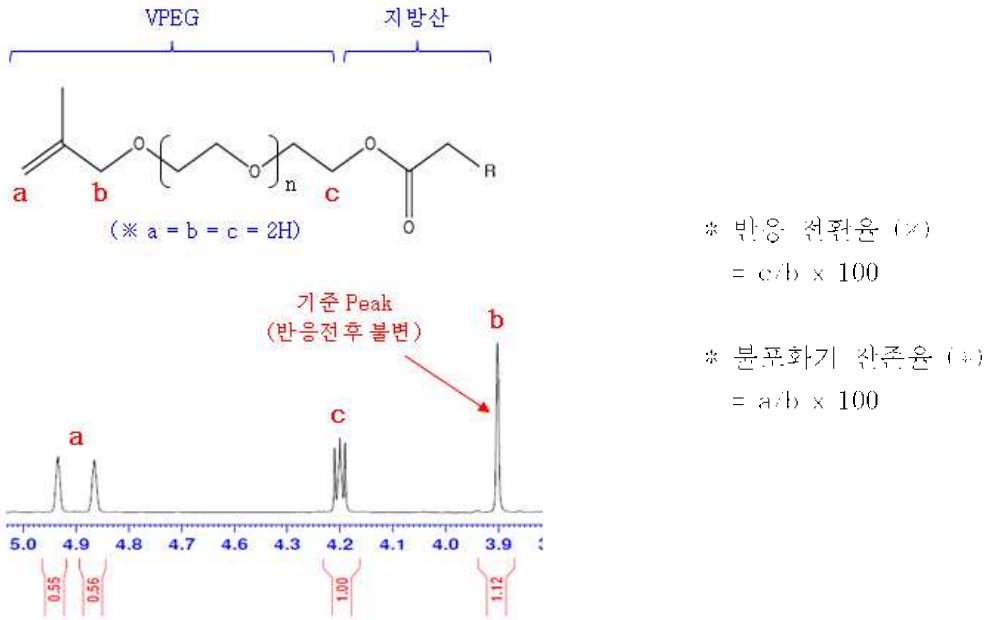
※ APEG : Allyl Polyethylene Glycol
TPEG : 3-Methyl-3-Butene-1-ol Polyethylene Glycol
VPEG : 2-Methyl-2-Propen-1-ol Polyethylene Glycol
M.W : 중량평균 분자량

[표 2]에서 알 수 있듯이 PCA용 측쇄 단량체 후보는 모두 고분자 중합이 가능한 불포화기를 보유하고 있고, 말단에 알코올기 (-OH)가 있어 지방산과의 반응이 용이한 구조를 가지고 있다. 또한 분자량, 융점 및 용해도 특성이 거의 동일하다. 이 중에서 국내에서 액상으로 유통되어 적용성이 좋은 측쇄 단량체는 APEG과 VPEG이다. 반면, 해외에서 수입해야 하는 TPEG은 플레이크 (Flake) 형태로 유통되므로 적용이 까다로운 단점이 있다. 한편, APEG은 구조적 특성 상 중합 반응성이 VPEG 대비 상대적으로 낮아 본 연구에서는 핵심원료 합성을 위한 측쇄 단량체를 VPEG으로 선정하였다.

[표 3] 지방산 및 지방산에스테르 화합물

화합물명		구조	특성
지방산계	VA (Valeric Acid)		M.W : 102.13g/mol 비점 : 185℃ 융점 : -20~-18℃
	HA (Heptanoic Acid)		M.W : 130.18g/mol 비점 : 223℃ 융점 : 10.5℃
	LA (Lauric Acid)		M.W : 200.32g/mol 비점 : 225℃ 융점 : 44~46℃
	SA (Stearic Acid)		M.W : 284.48g/mol 비점 : 361℃ 융점 : 67~72℃
지방산에스테르계	MV (Methyl Valerate)		M.W : 116.16g/mol 비점 : 128℃
	MH (Methyl Heptanoate)		M.W : 144.21g/mol 비점 : 172~173
	ML (Methyl Laurate)		M.W : 214.34g/mol 비점 : 262℃ 융점 : 4~5℃
	MS (Methyl Stearate)		M.W : 298.5g/mol 비점 : 181~182℃ 융점 : 37~41℃

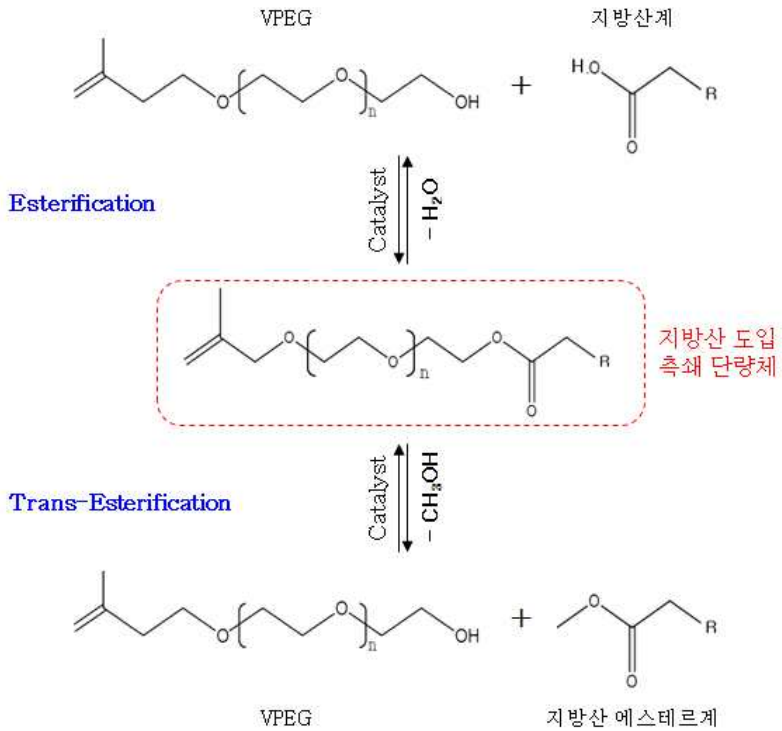
본 연구의 측쇄 단량체로 선정된 VPEG과 [표 3]에 나타낸 8종의 지방산계 화합물을 반응시켜 각각의 반응성을 확인함으로써 지방산계 화합물의 후보를 좁히기도 하였다. 반응성은 H NMR (Hydrogen Nuclear Magnetic Resonance) 분석을 통해 반응 전환율 및 불포화기 잔존율을 계산함으로써 확인하였다. [그림 4]에 H-NMR을 이용한 반응 전환율 및 불포화기 잔존율을 계산하는 방법을 도시하였다.



[그림 4] H-NMR을 이용한 반응 전환율 및 분포화기 잔존율 계산 방법

나) 화학 반응식 및 합성 방법

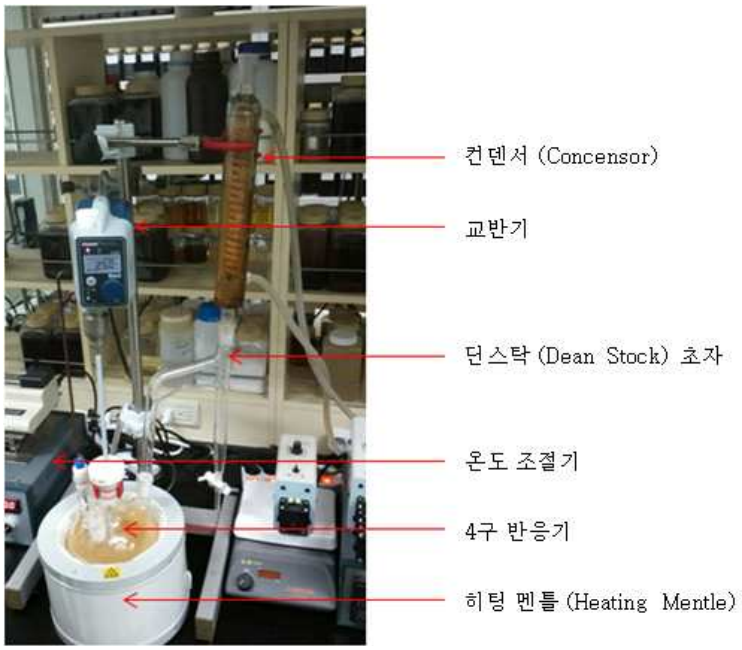
측쇄 단량체인 VPEG에 지방산을 도입하는 화학 반응식을 [그림 5]에 나타냈다.



[그림 5] 지방산 도입 측쇄 단량체 화학 반응식

[그림 5]의 반응식으로부터 알 수 있듯이, [표 3]의 지방산 및 지방산에스테르 화합물 후보는 각각 에스테르화 반응 (Esterification) 및 트랜스에스테르화 반응 (Trans-Esterification)에 의해 VPEG과 결합한다. 두 반응 모두 동일한 반응 시스템을 따른

수 있는데 [그림 6]에 이러한 반응 시스템을 나타냈다.



[그림 6] 지방산 도입 측쇄 단량체 화학반응 시스템

[그림 6]의 화학반응 시스템을 통해 VPEG과 [표 3]의 후보 물질의 화학반응에 있어서 그 합성 조건 변수 및 범위는 [표 4]와 같다.

[표 4] 지방산 도입 측쇄 단량체 합성 조건

구분		지방산계 (4종)	지방산 에스테르계 (4종)
촉매	Acid계	Cat PTSA (1.0, 2.0 wt%)	
		Cat MSA (1.0, 2.0 wt%)	
	Metal계	Cat-IS (3.0, 4.0 wt%)	-
		Cat IN (3.0, 4.0 wt%)	
	Alkali계	-	Cat-SH (0.5, 1.0 wt%)
		-	Cat-SOH (0.5, 1.0 wt%)
		-	Cat-IOH (0.5, 1.0 wt%)
반응 온도		110℃	120℃
반응 시간		10시간	

※ 각각의 합성 조건에 중합금지제 1,000ppm 투입

다) 지방산 도입 측쇄 단량체 합성 결과

[그림 6]의 화학반응 시스템과 [표 4]의 반응 조건을 통해 측쇄 단량체인 VPEG과 [표 3]의 후보 물질을 반응시켜 VPEG 말단에 지방산을 도입하는 실험을 수행하여 [표 5]와 [표 6]의 결과를 얻었다. 반응 전환율 및 불포화기 잔존율은 [그림 4]의 H NMR을 이용한 반응 전환율 및 불포화기 잔존율 계산 방법을 따랐다.

[표 5] 지방산계 후보와 VPEG의 합성 결과

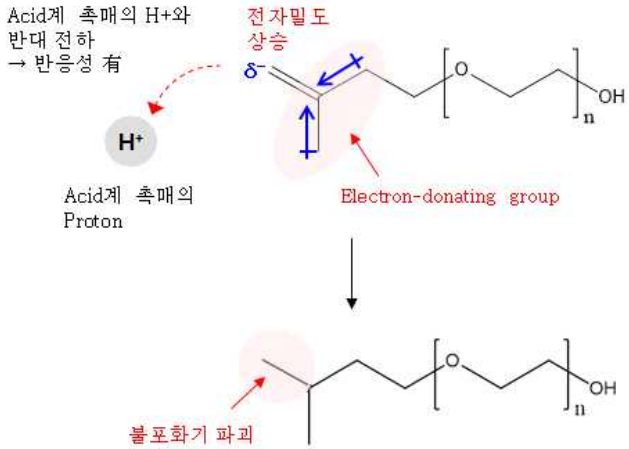
후보 물질	촉매계열 및 사용량			반응 전환율	불포화기 잔존율	판단
VA	Acid계	Cat-PTSA	1.0wt%	93%	0%	기각
			2.0wt%	95%	0%	기각
		Cat MSA	1.0wt%	93%	0%	기각
			2.0wt%	96%	0%	기각
	Metal계	Cat IS	3.0wt%	0%	100%	기각
			4.0wt%	0%	100%	기각
		Cat-IN	3.0wt%	0%	100%	기각
			4.0wt%	0%	100%	기각
HA	Acid계	Cat-PTSA	1.0wt%	93%	0%	기각
			2.0wt%	97%	0%	기각
		Cat MSA	1.0wt%	91%	0%	기각
			2.0wt%	95%	0%	기각
	Metal계	Cat IS	3.0wt%	0%	100%	기각
			Cat IN	0%	100%	기각
		Cat-IN	3.0wt%	0%	100%	기각
			4.0wt%	0%	100%	기각
LA	Acid계	Cat-PTSA	1.0wt%	95%	0%	기각
			2.0wt%	98%	0%	기각
		Cat-MSA	1.0wt%	96%	0%	기각
			2.0wt%	98%	0%	기각
	Metal계	Cat-IS	3.0wt%	0%	100%	기각
			4.0wt%	0%	100%	기각
		Cat IN	3.0wt%	0%	100%	기각
			4.0wt%	0%	100%	기각
SA	Acid계	Cat PTSA	1.0wt%	94%	0%	기각
			2.0wt%	97%	0%	기각
		Cat-MSA	1.0wt%	95%	0%	기각
			2.0wt%	97%	0%	기각
	Metal계	Cat-IS	3.0wt%	0%	100%	기각
			4.0wt%	0%	100%	기각
		Cat IN	3.0wt%	0%	100%	기각
			4.0wt%	0%	100%	기각

[표 6] 지방산 에스테르계 후보와 VPEG의 합성 결과

후보 물질	촉매계열 및 사용량			반응 전환율	불포화기 잔존율	판단
MV	Alkali계	Cat-SH	0.5wt%	0%	100%	기각
			1.0wt%	0%	100%	기각
		Cat SOH	0.5wt%	0%	100%	기각
			1.0wt%	0%	100%	기각
		Cat LOH	0.5wt%	43%	100%	기각
			1.0wt%	58%	100%	기각
MH	Alkali계	Cat-SH	0.5wt%	0%	100%	기각
			1.0wt%	0%	100%	기각
		Cat-SOH	0.5wt%	0%	100%	기각
			1.0wt%	0%	100%	기각
		Cat-LOH	0.5wt%	47%	100%	기각
			1.0wt%	56%	100%	기각
ML	Alkali계	Cat SH	0.5wt%	0%	100%	기각
			1.0wt%	0%	100%	기각
		Cat-SOH	0.5wt%	0%	100%	기각
			1.0wt%	0%	100%	기각
		Cat-LOH	0.5wt%	79%	100%	기각
			1.0wt%	89%	100%	채택
MS	Alkali계	Cat-SH	0.5wt%	0%	100%	기각
			1.0wt%	0%	100%	기각
		Cat-SOH	0.5wt%	0%	100%	기각
			1.0wt%	0%	100%	기각
		Cat LOH	0.5wt%	68%	100%	기각
			1.0wt%	81%	100%	채택

[표 5]에서 알 수 있듯이, 지방산계 후보 물질과 VPEG과의 화학 반응은 모든 합성 조건에 대해 만족할 만한 결과를 얻지 못 했다. Acid계 촉매를 사용하면 지방산계 후보 물질과 VPEG과의 에스테르화 반응은 순조롭게 진행되어 반응 전환율은 90% 이상으로 목표 수준인 80%를 크게 상회하였다. 그러나 불포화기가 모두 파괴되어 측쇄 단량체로서의 기능을 상실했다. 한편 Metal계 촉매를 사용할 경우에는 반응 전환율이 모두 0%이고 불포화기 잔존율은 100로 나타났다. 이는 Metal계 촉매는 본 합성에 사용된 지방산계 후보 물질과 VPEG과의 에스테르화 반응에 전혀 영향을 미치지 않음을 의미한다. 결과적으로 지방산계 후보 물질과 VPEG과의 에스테르화 반응을 통한 일체화 반응은 모두 기각되었다.

지방산계 후보 물질과 VPEG과의 에스테르화 반응에 있어서 Acid계 촉매의 불포화기 파괴 현상에 대해 별도로 메커니즘 (Mechanism)을 파악했고, 그 결과를 [그림 7]에 나타냈다. 즉, Acid계 촉매의 양성자 (Proton, H)가 전자밀도가 높은 불포화기를 공격함으로써 불포화기가 파괴됨을 의미한다.

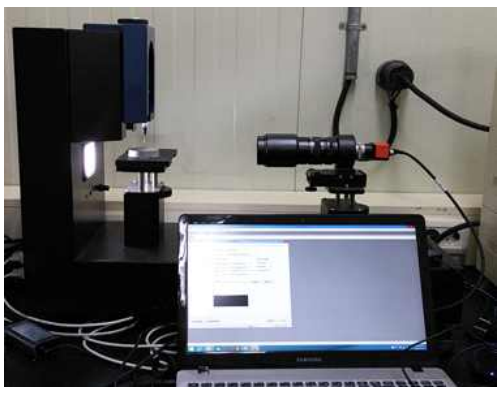


[그림 7] Acid계 촉매에 의한 VPEG의 불포화기 파괴 메커니즘

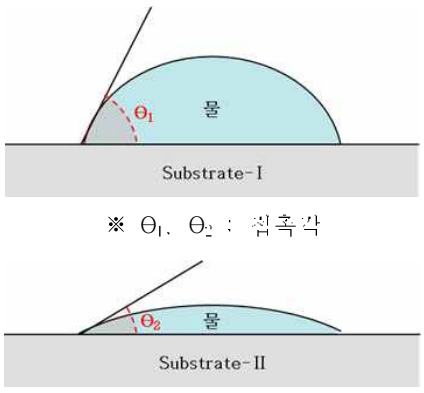
[표 6]에서 알 수 있듯이, Alkali계 촉매 중 Cat-LOH만이 지방산 에스테르계 후보 물질과 VPEG과의 트랜스 에스테르화 반응에 직접 관여함을 알 수 있었다. 특히 ML 및 MS의 경우 Cat LOH 사용량 1.0wt%에서 반응 전환율이 각각 89% 및 84%로서 목표 수준인 80%를 상회하는 결과를 얻을 수 있었다. 또한 Alkali 촉매는 VPEG의 불포화기를 공격할 수 있는 양성자가 없으므로 불포화기 잔존율은 모두 100%이다. 결과적으로 지방산 도입 측쇄 단량체를 2종 확보하였고, 각각 VPEG-ML 및 VPEG-MS로 명명하기로 한다.

라) 지방산 도입 측쇄 단량체 계면결합력 평가 및 선정

상기 실험을 통해 합성된 지방산 도입 측쇄 단량체인 VPEG-ML 및 VPEG-MS는 콘크리트 공극 표면과 물과의 계면결합력 저하 기능을 부여하기 위함이다. 이를 평가하기 위한 수단으로서 고체 기재 (Substrate) 표면 위에 물을 떨어뜨려 접촉각을 측정하는 방법이 효과적인데, [그림 8]에 접촉각 측정기 및 접촉각 측정 원리를 나타냈다.



(a) 접촉각 측정기 (PHOENIX-300 TOUCH)



(b) 접촉각 측정 원리

[그림 8] 접촉각 측정기 및 측정 원리

[그림 8]의 접촉각 측정기는 물과의 계면결합력이 클수록 물방울의 수위가 낮아져 접촉각이 작아지는 원리를 이용한 것이다. 즉, [그림 8]의 (b)에서 θ_1 (Substrate-I과 물의 접촉각)은 θ_2 (Substrate-II와 물의 접촉각)보다 큰 값을 가지는데, 이것은 물과의 계면결합력

이 Substrate I이 Substrate II보다 작은을 의미하는 것이다. 이러한 원리를 이용하여 [그림 9]와 같은 방법으로 지방산 도입 측쇄 단량체인 VPEG-ML 및 VPEG-MS를 각각 투입한 Substrate를 제작하여 각각의 물에 대한 접촉각을 측정하였다.

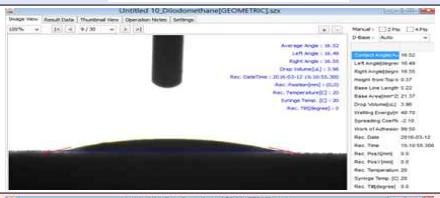
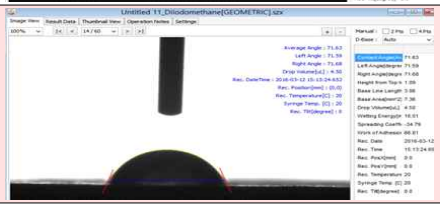


(a) 시멘트 페이스트 교반 (b) 제작된 시멘트 Substrate

[그림 9] 접촉각 측정을 위한 시멘트 Substrate 제작

[그림 9] (b)의 Plain은 시멘트 300g에 물 110g을 투입하여 교반한 페이스트를 원형 틀에 부어 24시간 양생하여 제작된 시료이다. 또한 Plain과 동일한 페이스트에 추가로 VPEG-ML 및 VPEG-MS를 각각 시멘트 중량의 1.0wt% 투입하여 제작된 Substrate를 각각 VPEG-ML 및 VPEG-MS로 명명하였다. 각각의 Substrate 시료에 대해 물에 대한 접촉각 측정 결과를 [표 7]에 나타냈다.

[표 7] 지방산 도입 측쇄 단량체 적용 Substrate의 물에 대한 접촉각 측정 결과

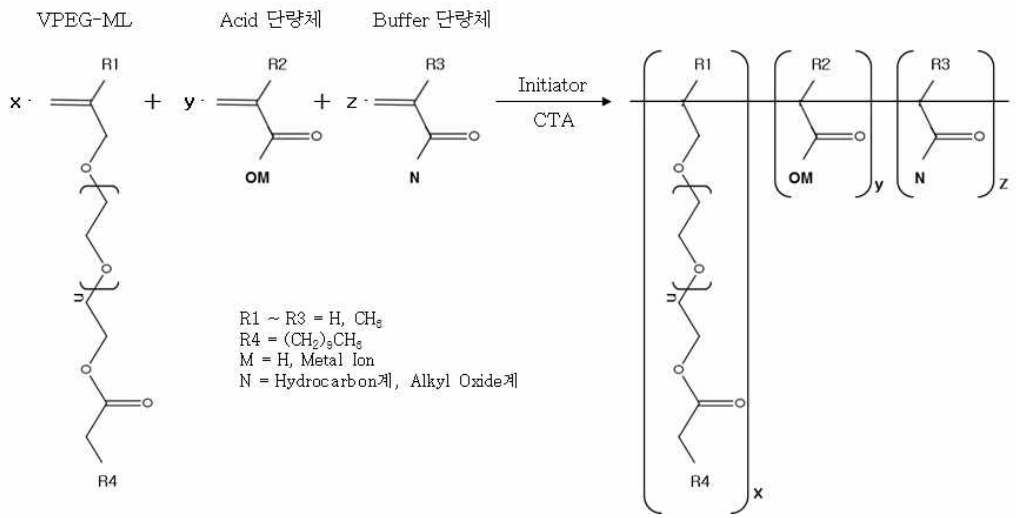
시료명	접촉각 측정 사진	접촉각	판단
Plain		15.52	-
VPEG ML		71.63	채택
VPEG-MS		40.23	기각

[표 7]로부터 알 수 있듯이 3종 Substrate 시료에 대해 측정된 접촉각은 Plain 15.52° < VPEG-MS 40.23° < VPEG-ML 71.63°의 순으로 나타났다. 따라서 시멘트 표면과의 계면결합력은 측쇄 단량체인 VPEG에 지방산이 도입됨으로써 큰 폭으로 저감됨을 확인할 수 있었다. 특히 VPEG-ML이 VPEG-MS보다 더욱 큰 저감 효과를 보여주었으므로 본 연구의 지방산 도입 측쇄 단량체는 최종적으로 VPEG-ML로 선정하였다.

3) VPEG ML 적용 PCA 중합

가) 화학 혼화제 제조를 위한 화학 반응식 및 중합 방법

최종 선정된 지방산 도입 측쇄 단량체인 VPEG-ML을 적용한 PCA 화학 혼화제를 제조하고자 한다. [그림 10]에 화학 반응식을 나타냈으며, 이를 실행하기 위한 중합 시스템은 [그림 11]과 같다.



[그림 10] PCA 중합을 위한 화학 반응식



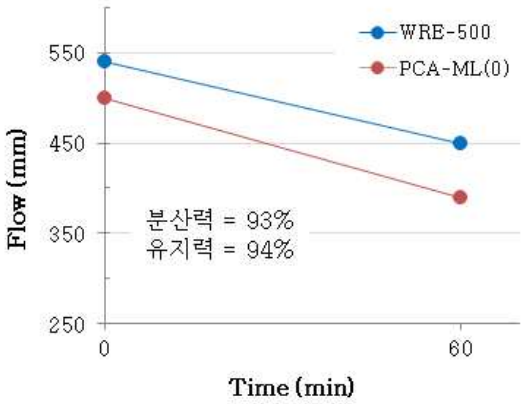
[그림 11] PCA 중합 시스템

[그림 10]의 PCA 중합 반응은 라디칼 중합 (Radical Polymerization)으로서 이를 위해서는 반응성을 갖는 라디칼을 형성시켜주는 라디칼 개시제 (Radical Initiator)와 반응 도중 라디칼을 이동시켜 분자량을 조절해주는 연쇄이동제 (CTA : Chain Transfer Agent)를 투입함으로써 진행된다.

제조된 PCA의 콘크리트 유동성능은 당사의 범용 PCA 제품인 WRE-500과 동등한 수준을 목표로 하였다. 따라서 WRE-500의 중합 포뮬레이션 (Formulation)을 그대로 적용한 VPEG-ML 적용 PCA의 유동성을 먼저 평가한 후 차이를 확인하였다. 이 때 콘크리트 유동성 평가는 [표 8]의 콘크리트 배합표에 따라 KS F 2594에 의거하여 수행했다. [그림 12]는 WRE-500의 중합 포뮬레이션 (Formulation)을 그대로 적용한 VPEG-ML 적용 PCA의 콘크리트 유동성 결과이다.

[표 8] 콘크리트 배합표 (25 40 500)

W/C	S/A	시멘트 (kg/m³)	잔골재 (kg/m³)	굵은골재 (kg/m³)	분 (kg/m³)	혼화제 (C×%)
44%	41%	400	761	1,092	176	0.9



(a) 콘크리트 유동성

$$\text{분산력 (\%)} = \frac{F_i}{F_{i0}} \times 100$$

$$\text{유지력 (\%)} = \frac{F_f / F_i}{F_{f0} / F_{i0}} \times 100$$

F_{i0} : 기준 시료 초기 Flow
F_{f0} : 기준 시료 나중 Flow
F_i : 평가 시료 초기 Flow
F_f : 평가 시료 나중 Flow

(b) 분산력 및 유지력 계산식

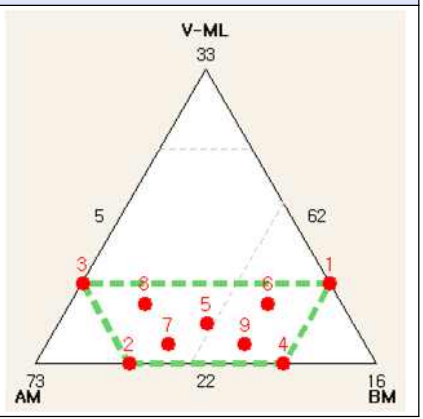
[그림 11] VPEG ML 적용 PCA의 콘크리트 유동성

[그림 11]에서 알 수 있듯이, WRE-500의 종합 포뮬레이션 (Formulation)을 그대로 적용한 VPEG-ML 적용 PCA인 PCA-ML(0)의 콘크리트 유동성은 분산력이 93%이고 유지력이 94% 수준으로 기준 PCA인 WRE-500 대비 분산력 및 유지력이 각각 7% 및 6% 수준 떨어지는 결과를 보였다. 따라서 이를 극복하기 위한 실험 내역을 다음 절에서 기술하고자 한다.

나) VPEG-ML 적용 PCA 유동성능 최적화

PCA의 콘크리트 유동성능은 측쇄 단량체, Acid 단량체 및 Buffer 단량체의 투입 비율에 직접적으로 영향을 받으므로 이들 비율을 변수로 하여 [그림 11]에서 확인된 유동성능 차이를 극복하기 위해 [표 9]와 같은 종합 실험계획을 수립하여 실행하였다. 이 때 비니탭의 3성분계 혼합물설계법을 이용했다.

[표 9] VPEG ML 적용 PCA 유동성능 최적화 실험계획 (미니탭 혼합물설계)

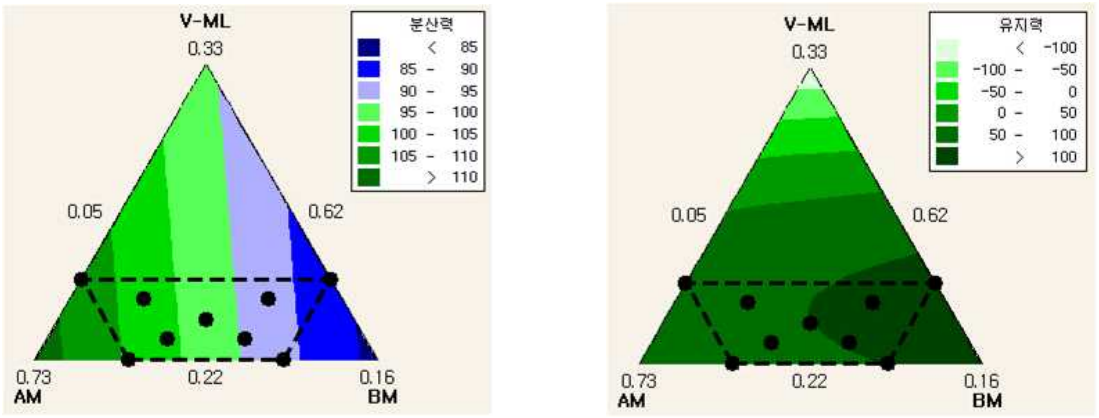
시료명	단량체 몰비 (%)			심플렉스 설계도 (3성분계)
	V-ML (VPEG-ML)	AM (Acid 단량체)	BM (Buffer 단량체)	
PCA-ML(1)	25.00	62.00	13.00	
PCA-ML(2)	22.00	70.00	8.00	
PCA-ML(3)	25.00	70.00	5.00	
PCA-ML(4)	22.00	65.00	13.00	
PCA-ML(5)	23.50	66.75	9.75	
PCA-ML(6)	24.25	64.38	11.38	
PCA-ML(7)	22.75	68.38	8.88	
PCA-ML(8)	24.25	68.38	7.38	
PCA-ML(9)	22.75	65.88	11.38	

※ 반응온도 : 85℃, 반응시간 : 10시간, Initiator : 0.35wt%, CTA : 0.42wt%

[표 9]에 따라 중합을 시도하여 9종의 PCA 시료를 확보한 후 [표 8]의 콘크리트 배합표에 따라 KS F 2594에 의거하여 콘크리트 유동성을 평가했다. [표 10]에 그 결과를 나타냈다. 또한 이 결과를 미니탭 분석에 의한 회귀기법을 이용하여 분산력 및 유지력에 대한 등고선도를 도출하여 [그림 12]에 나타냈다.

[표 10] 미니탭 혼합물설계점의 콘크리트 유동성능

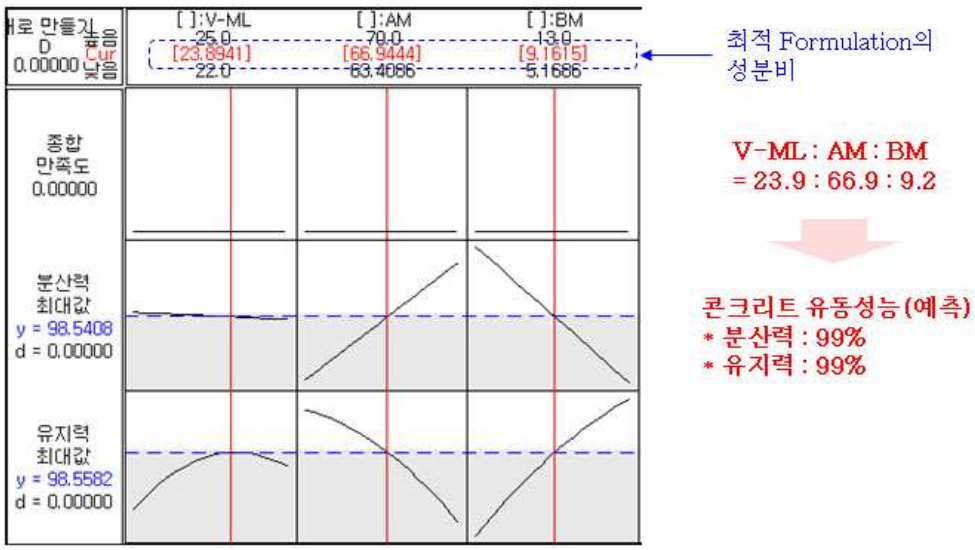
시료명	단량체 몰비 (%)			유동성능 (㎝, WRE-500 기준)	
	V-ML (VPEG-ML)	AM (Acid 단량체)	BM (Buffer 단량체)	분산력	유지력
PCA-ML(1)	25.00	62.00	13.00	87.3	113.3
PCA-ML(2)	22.00	70.00	8.00	107.3	75.8
PCA-ML(3)	25.00	70.00	5.00	107.3	82.0
PCA-ML(4)	22.00	65.00	13.00	89.1	101.1
PCA-ML(5)	23.50	66.75	9.75	95.5	100.2
PCA-ML(6)	24.25	64.38	11.38	94.5	108.1
PCA-ML(7)	22.75	68.38	8.88	100.0	95.6
PCA-ML(8)	24.25	68.38	7.38	101.8	88.5
PCA-ML(9)	22.75	65.88	11.38	95.5	99.0
WRE-500	-	-	-	100.0	100.0



(a) 분산력의 등고선도 (b) 유지력의 등고선도

[그림 12] 미니탭 회귀분석을 통한 분산력 및 유지력 등고선도

[그림 12]에서 알 수 있듯이 분산력은 AM (Acid 단량체) 성분에 따라 증가하는 경향이 있는 반면, 유지력은 BM (Buffer 단량체) 성분에 따라 증가하는 경향이 있다. 이는 분산력 및 유지력은 두 성분의 몰비에 의해 조절될 수 있음을 의미한다. 미니탭 최적화기법을 이용하여 분산력 및 유지력이 최적화된 포뮬레이션을 얻을 수 있는데 그 결과를 [그림 13]에 나타냈다.



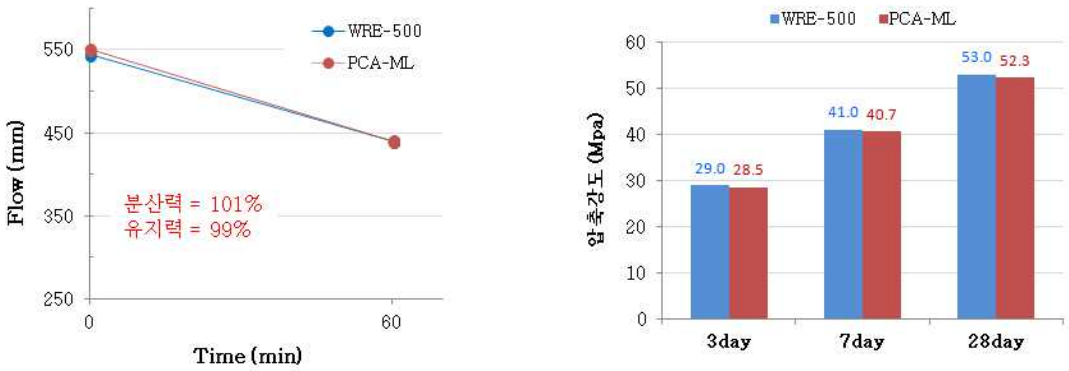
[그림 13] 미니탭 최적화기법에 의한 최적 포뮬레이션 도출

[그림 13]에 도출된 최적 포뮬레이션의 단량체 성분비는 각각 V-ML 23.9%, AM 66.9% 및 BM 9.2인을 확인했다. 본 최적 포뮬레이션을 PCA-ML로 명명하기로 한다. 미니탭 최적화기법에 의한 최적 포뮬레이션인 PCA-ML의 예측 유동성능은 분산력 및 유지력 모두 99% 수준으로 기준 PCA인 WRE-500과 동등 수준이다. 이 값은 예측값이므로 확인 평가가 반드시 필요하다. 이에 대해서는 다음 절에서 자세히 기술하고자 한다.

다) PCA-ML의 콘크리트 성능 검증

미니탭 최적화기법을 통해 도출된 최적 포뮬레이션에 따라 중합반응을 실행하여 PCA-ML 시료를 확보한 후 [표 8]의 콘크리트 배합표에 따라 KS F 2594에 의거하여 콘크리트

유동성과 KS F 2403 및 2405에 의거하여 압축강도를 평가했다. 압축강도용 시료 제작 시 공기량 (KS F 2421)은 WRE-500은 3.7%이고 PCA-ML은 3.4%였다. [그림 14]에 콘크리트 성능 결과를 나타냈다.



(a) 콘크리트 유동성능 (b) 재령별 압축강도

[그림 14] PCA-ML의 콘크리트 성능

[그림 14]에서 알 수 있듯이 최적 포뮬레이션인 PCA-ML의 콘크리트 유동성능은 기준 PCA인 WRE-500과 동등 수준임이 확인되었다. 즉 분산력과 유지력이 각각 기준 대비 101% 및 99% 수준의 결과를 얻었다. 또한 압축강도 역시 기준과 동등 수준의 결과를 얻었다. 이로써 고급형 복합기능 균열저감제 개발에 있어서 계면결합력 저하 기능과 유동성 기능이 일체화된 PCA 기술을 확보한 것이다.

라) PCA-ML의 수축저감 성능 평가

PCA-ML은 콘크리트 유동성 기능에 계면결합력 저감 기능을 일체화한 화학 혼화제이므로 그 자체로 콘크리트의 수축저감 성능이 일정 수준 부가된 것이다. 따라서 일반 PCA가 적용된 콘크리트 대비 PCA-ML이 적용된 콘크리트의 수축저감 성능이 어느 정도 향상되는지 파악할 필요가 있다. 이를 위한 콘크리트 배합표는 [표 11]과 같다. 이 때 기준 PCA는 WRE-500으로 하였고 혼화제 사용량은 0.7% 및 1.0%로 하여 비교하였다.

[표 11] 콘크리트 배합표 (25-24-150)

W/B	S/A	Binder (kg/m³)			잔골재 (kg/m³)		굵은골재 (kg/m³)	물 (kg/m³)	혼화제 (B×%)
		시멘트	S/P	F/A	미사	쇄사			
51.4%	48%	245	70	35	501	334	915	180	0.7 / 1.0

[표 11]에 따라 콘크리트를 제조하여 유동성 (KS F 2402), 공기량 (KS F 2421), 압축강도 (KS F 2403, 2405) 및 길이변화 시험을 통한 수축률 (KS F 2424)을 평가하였다. 수축률은 [그림 15] (a)와 같이 길이변화 몰드 (Mold)에 스트레인 게이지 (Strain Gauge)를 매립하고, (b)와 같이 데이터로거 (Data Logger)에 연결하여 항온항습실에서 양생하며 길이변화를 측정하여 평가한다. 콘크리트 유동성 및 압축강도 실험 결과를 [표 12]에 요약하였고 이를 [그림 16]에 그래프로 나타냈다. 또한 수축률 시험 결과는 [그림 17]에 나타냈다.



(a) 길이변화 본드

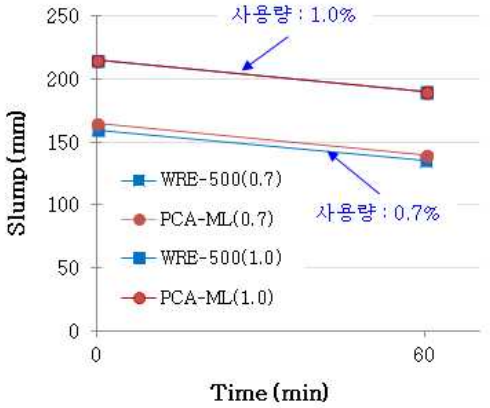


(b) 항온항습실 양생 및 수축률 측정

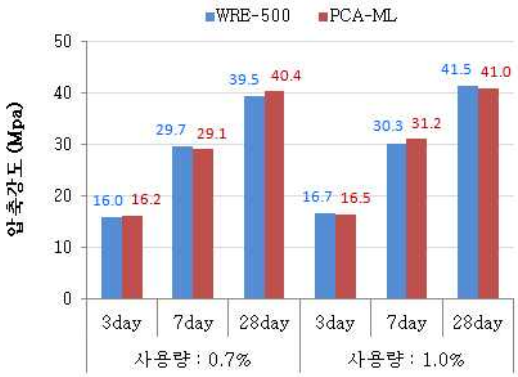
[그림 15] 수축률 평가방법

[표 12] PCA-ML의 콘크리트 유동성 및 압축강도 결과

시료명(※사용량)		Slump (mm)		공기량 (%)	재령별 압축강도 (MPa)		
		초기	60분		3일	7일	28일
1수준	WRE-500(0.7)	160	135	3.7	16.0	29.7	39.5
	PCA-ML(0.7)	165	140	3.4	16.2	29.1	40.4
2수준	WRE-500(1.0)	215	190	4.1	16.7	30.3	41.5
	PCA-ML(1.0)	215	190	3.5	16.5	31.2	41.0

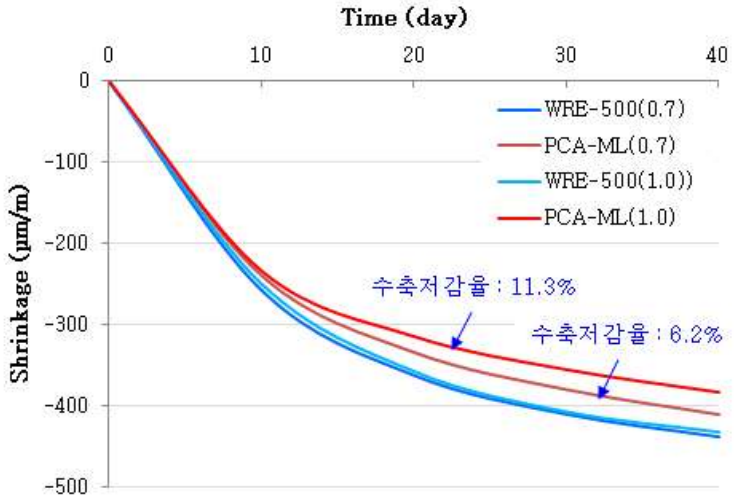


(a) 콘크리트 유동성



(b) 압축강도

[그림 16] 콘크리트 유동성 및 압축강도

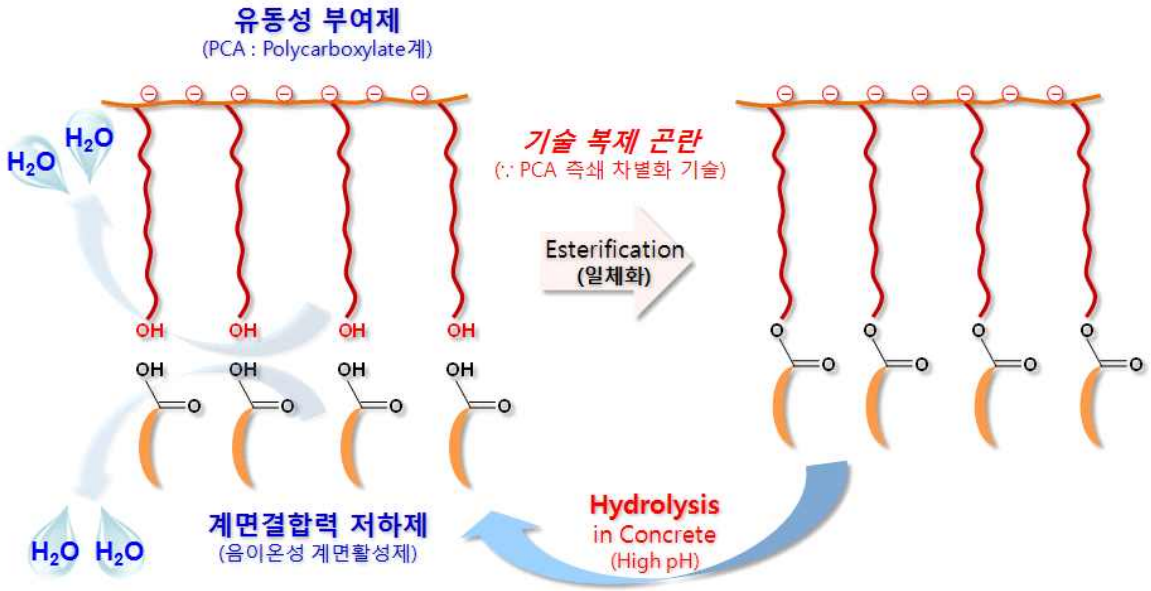


[그림 17] 수축률 시험 결과

[그림 16]에서 알 수 있듯이 동일 사용량에 대해 기존 PCA인 WRE-500과 PCA-ML의 콘크리트 유동성 및 압축강도는 동등 수준임을 확인하였다. 한편 [그림 17]의 수축률 시험 결과로부터 PCA ML 사용량이 증가할수록 수축저감율이 증가하는 경향을 알 수 있으며, 사용량 0.7% 및 1.0%에 대해 WRE 500 대비 PCA ML의 수축저감율은 각각 6.2% 및 11.3% 수준으로 나타났다. 따라서 PCA-ML의 계면결합력 저감 기능에 의한 수축저감 성능을 확인할 수 있었다.

4) 소결

가) 본 과제의 복합기능 균열저감제는 콘크리트의 유동성 발현 기능과 균열저감 기능을 동시에 보유한 제품이다. 특히 균열저감 성능을 극대화하기 위해 [그림 18]과 같은 일체형 복합기능 핵심원료 개념을 제시하였다. 이는 콘크리트 내부에 분포한 공극에서의 물의 계면결합력을 저감시키기 위해 PCA의 측쇄 단량체 말단에 지방산을 도입하여 중합하는 개념이다.



[그림 18] 일체형 복합기능 핵심원료 개념도

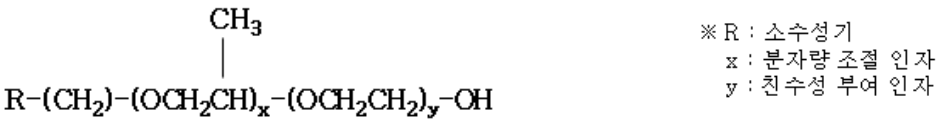
나) 지방산이 도입된 측쇄 단량체 합성을 위해 측쇄 단량체 VPEG에 8종의 지방산계 화합물을 각각 에스테르화 반응 또는 트랜스에스테르화 반응을 수행한 결과 반응 전환율이 89% (목표 ≥ 80%)이고 불포화기 잔존율이 100%인 일체화된 측쇄 단량체 (VPEG-Ⅶ.)를 확보할 수 있었다. 이는 Alkali계 촉매인 Cat-1.0H를 투입하여 VPEG과 Ⅶ.의 트랜스에스테르화 반응을 통해 얻어진 결과이다. 합성된 지방산 도입 측쇄 단량체인 VPEG-Ⅶ.을 적용하여 제작된 Substrate의 물에 대한 접촉각은 71.6° 로 접촉각이 15.5° 인 Plain 대비 계면결합력이 큰 폭으로 저감되었음을 확인하였다.

다) 지방산 도입 측쇄 단량체인 VPEG-Ⅶ.을 적용하여 PCA 화학 혼화제를 제조하였다. 기준 PCA인 WRE-500의 콘크리트 유동성능을 확보하기 위해 머니탭 혼합물 설계기법을 활용하여 최적 포뮬레이션인 PCA-Ⅶ.을 도출하였다. 결과적으로 콘크리트 유동성능 및 압축강도에 있어서 WRE-500과 동등한 결과를 확보하하였다. 또한 혼화제 사용량 0.7% 및 1.0%에 대해 WRE-500 대비 PCA-Ⅶ.의 수축저감율이 각각 6.2% 및 11.3% 수준임을 확인함으로써 PCA-Ⅶ.의 계면결합력 저감 기능에 의한 수축저감 성능을 확인할 수 있었다.

나. 응집력 저감제 기술 개발

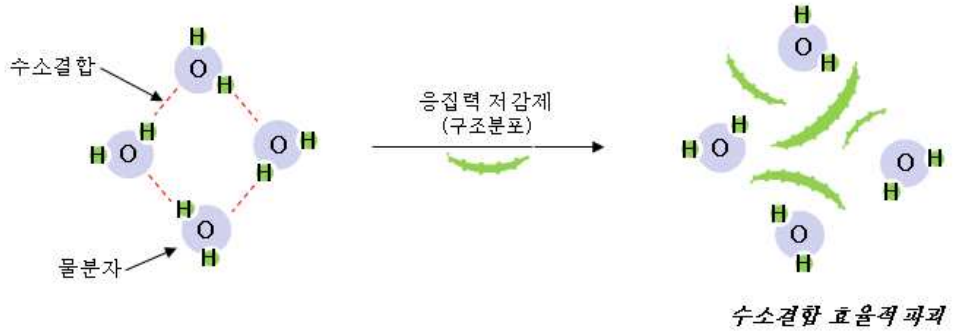
1) 개발 Concept

본 연구의 복합기능 균열저감제는 콘크리트 내부에 분포한 공극에서의 물의 계면결합력 및 응집력을 함께 저하시킴으로써 균열저감 성능을 극대화시키는 개념의 제품이다. 이를 위해 우선 상기 과정을 통해 콘크리트의 유동성 발현 기능 및 물의 계면결합력 저감 기능의 일체화 기술을 개발하였다. 본 절에서는 [그림 19]와 같은 알킬렌옥사이드계 계면활성제를 통해 물의 응집력을 저감시켜 수축저감 성능을 극대화시키는 기술을 개발하고자 한다.



[그림 19] 알킬렌옥사이드계 응집력 저감제 화학구조

물의 응집력은 극성이 강한 물 분자간 수소결합에 기인하는데 [그림 19]와 같은 알킬렌옥사이드계 계면활성제가 이를 효과적으로 상쇄시키는 역할을 하므로 수축저감제의 원료로 널리 사용되고 있는 것이다. 그러나 본 연구의 응집력 저하제는 기존과 같은 단일구조의 화합물이 아닌 구조분포가 부여된 화합물로서 물의 수소결합을 파괴하는데 있어 효율성을 더욱 높이고자 하였다. [그림 20]은 이와 같은 개념을 도식화한 것이다.



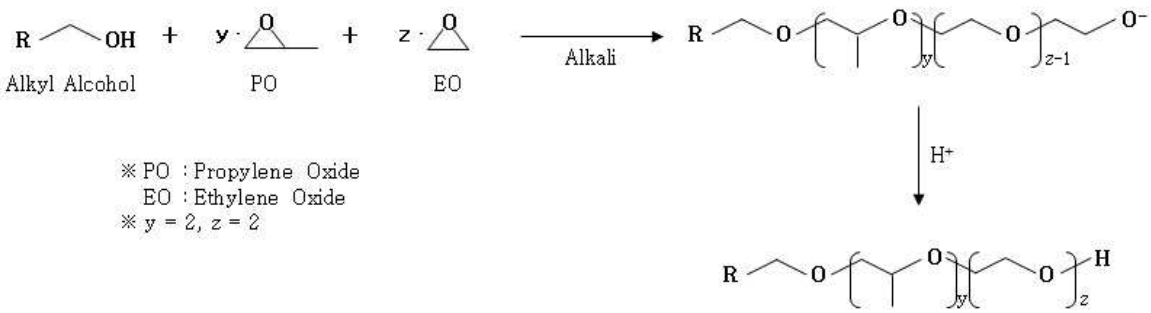
[그림 20] 본 연구의 응집력 저감제의 수소결합 파괴 메커니즘

[그림 19]의 화학구조와 [그림 20]의 개념에 맞는 응집력 저감제를 합성하기 위해서는 당사에서 취급하지 못 하는 특수설비를 필요로 하므로 아웃소싱 (Outsourcing)을 통해 국산화를 추진하였다. 그 결과는 다음 절에서 기술하고자 한다.

2) 응집력 저감제 합성

가) 화학 반응식 및 합성 방법

[그림 19]의 응집력 저감제 합성을 위한 화학 반응식은 [그림 21]에 나타냈다.



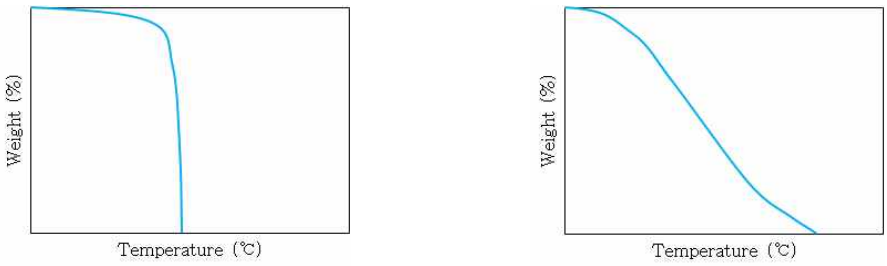
[그림 21] 응집력 저감제 합성 반응식

[그림 21]의 합성은 관련 특수설비 및 기술 역량을 갖춘 국내 A사와의 긴밀한 협력 (양산 후 5년간 독점 사용권이 포함된 비밀유지계약 체결)을 통해 추진할 수 있었다. 이로써 본 연구의 응집력 저감제의 국산화가 실현될 수 있었으며 결과적으로 보급형의 원가 수준에 도달할 수 있었다.

나) 응집력 저감제 성능 검증

[그림 21]의 합성을 통해 A사로부터 공급받은 응집력 저하제 (이하 MONOIN으로 명명)의 수축저감 성능을 평가하기에 앞서, TGA (Thermogravimetric Analysis) 분석을 통해 MONOIN

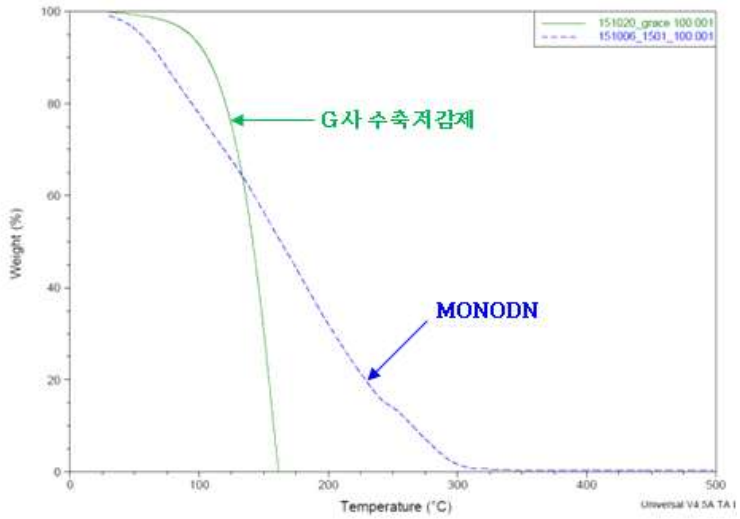
의 분자분포 특성을 확인해 보았다. 참고로 A사로부터 공급받은 MONODN은 5톤 규모로 제조된 것으로써 채취된 시료이다. TGA는 온도를 증가시킴에 따른 유기물 시료의 질량 감소율을 측정할 수 있는 분석방법이다. [그림 22]는 TGA로부터 얻어질 수 있는 사례를 보여준다.



(a) 단일구조의 화합물 (b) 구조분포를 갖는 화합물

[그림 22] 분자구조에 따른 TGA 곡선의 사례

[그림 22]에 나타낸 바와 같이, 단일 분자구조를 가진 화합물의 TGA 곡선은 특정 온도에서 급격한 질량감소를 보여주는 반면, 분자구조의 분포를 가지는 경우에는 넓은 온도 영역에서 완만한 질량감소를 보여준다. 이는 각각의 분자구조별 서로 다른 비점 (끓는점)에서 휘발되기 때문에 나타나는 현상이다. [그림 23]은 MONODN의 TGA 분석 결과를 보여 준다. 참고로 경쟁사인 G사의 수축저감제와 비교하였다.



[그림 23] MONODN의 TGA 분석 결과

[그림 23]에서 알 수 있듯이, G사 수축저감제는 [그림 22] (a)의 경향을 따르고 있는 반면, MONODN은 [그림 22] (b)의 경향을 따르고 있다. 이는 응집력 지하제의 개발 Concept에 따라 MONODN이 구조분포를 가진 화합물로 합성되었음을 의미한다.

MONODN은 응집력 지하제로서 수축저감 기능을 목적으로 한 화합물이므로 이를 검증하기 위해 콘크리트에 대한 수축률 평가를 수행했다. 이를 위한 콘크리트 배합표는 [표 13]과 같다. 이 때 PCA는 WRE 500을 바인더 대비 0.7% 사용했고, 수축저감제는 MONODN 및 G사를 각각 바인더 대비 1.0% 사용했다. WRE-500만 적용한 시료, WRE-500 및 G사 수축저감제를 적용한 시료, 그리고 WRE-500 및 MONODN을 적용한 시료를 각각 PCA, Control 및 MONODN으로 명명하기로 한다.

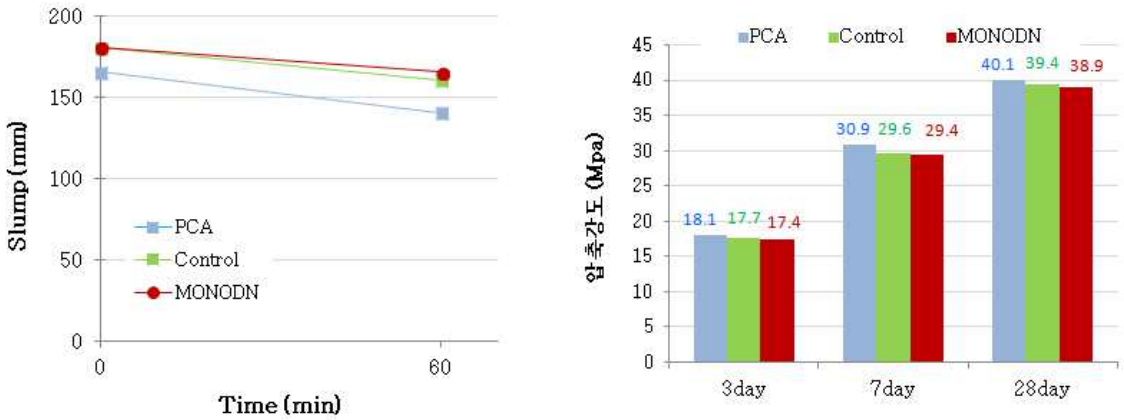
[표 13] 콘크리트 배합표 (25 24 150)

W/B	S/A	Binder (kg/m³)			잔골재 (kg/m³)		굵은골재 (kg/m³)	물 (kg/m³)	혼화제 (Px%)	
		시멘트	S/P	F/A	미사	세사			PCA	수축저감제
51.4%	48%	245	70	35	501	334	915	180	0.7	1.0

[표 13]에 따라 콘크리트를 제조하여 유동성 (KS F 2402), 공기량 (KS F 2421), 압축강도 (KS F 2403, 2405) 및 길이변화 시험을 통한 수축률 (KS F 2424)을 평가하였다. 수축률은 [그림 15]에서 설명한 바와 같이 길이변화 몰드 (Mold)에 스트레인 게이지 (Strain Gauge)를 배립하고, 데이터로거 (Data Logger)에 연결하여 항온항습실에서 양생하며 길이변화를 측정하여 평가했다. 콘크리트 유동성 및 압축강도 실험 결과를 [표 14]에 요약하였고 이를 [그림 24]에 그래프로 나타냈다. 또한 수축률 시험 결과는 [그림 25]에 나타냈다.

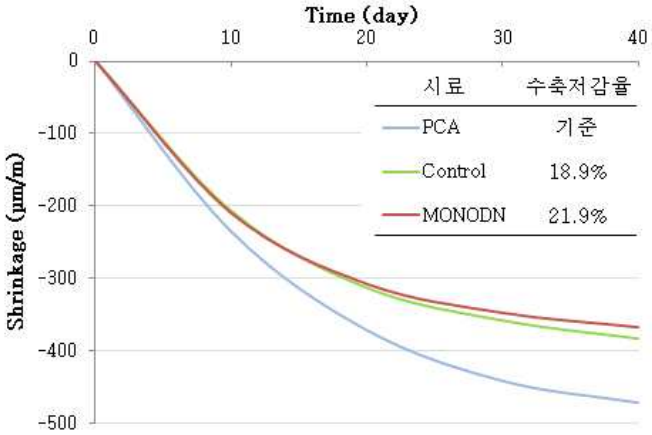
[표 14] 콘크리트 유동성 및 압축강도 결과

시료명(※사용량)	Slump (mm)		공기량 (%)	재령별 압축강도 (MPa)		
	초기	60분		3일	7일	28일
PCA	165	140	4.2	18.1	30.9	40.1
Control	180	160	4.4	17.7	29.6	39.4
MONODN	180	165	4.4	17.4	29.4	38.9



(a) 콘크리트 유동성 (b) 압축강도

[그림 24] 콘크리트 유동성 및 압축강도



[그림 25] 수축률 시험 결과

[그림 24] (a)의 콘크리트 유동성에 있어서 PCA 대비 계면활성제의 분산 기여 작용으로 인해 Control 및 MONODN의 Slump값이 20㎜ 수준 우위에 있음을 확인할 수 있었다. [그림 24] (b)의 압축강도에 있어서는 모든 시료가 동등한 수준을 보였다. 한편 [그림 25]에서 알 수 있듯이, Control 및 MONODN의 수축률은 기준인 PCA 대비 각각 18.9% 및 21.9%로 나타났다. 응집력 저감을 통한 수축저감 성능에 있어 MONODN이 Control 대비 소폭 우위에 있음을 확인할 수 있었다. 이로써 본 연구의 보급형 복합기능 균열저감제 제품을 구현할 수 있는 재료 기반이 모두 확보되었다.

3) 소결

가) 물의 수소결합을 효율적으로 파괴시켜 응집력을 저감시킴으로서 수축저감 성능을 극대화하는데 필요한 알킬렌옥사이드계 계면활성제 (MONODN)의 개발 Concept에 따라 관련 특수설비 및 기술 역량을 갖춘 국내 A사와의 긴밀한 협력 (양산 후 5년간 독점 사용권이 포함된 비밀유지계약 체결)을 통해 국산화에 성공하였다.

나) TGA를 통해 응집력 저감제인 MONODN은 단일 분자구조가 아닌 구조분포를 가진 화합물임을 확인하였다. 이는 물의 수소결합을 보다 효율적으로 파괴시키는 Concept에 근거한 것이다.

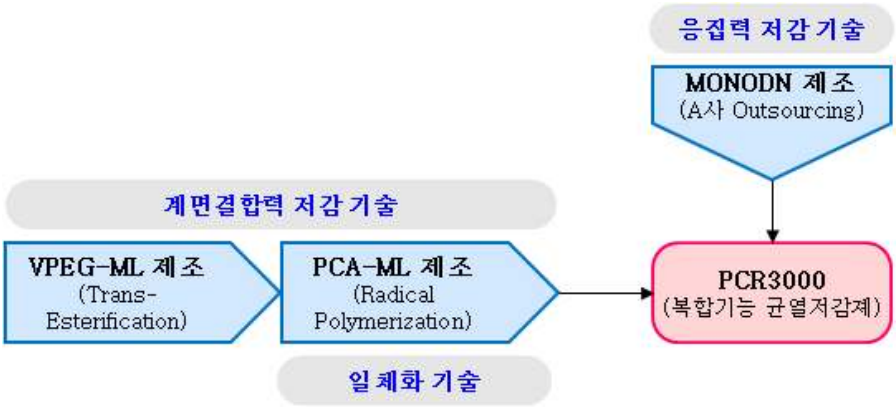
다) MONODN이 적용된 콘크리트의 유동성, 압축강도 및 수축률을 평가한 결과, 유동성에 있어서는 알킬렌옥사이드계 계면활성제가 적용된 시료인 Control과 MONODN이 PCA 대비 Slump 20㎜ 수준 높게 나타났으나 압축강도는 세 시료 모두 동등한 수준이었다. 한편 수축률에 있어서는 Control 및 MONODN의 수축률이 기준인 PCA 대비 각각 18.9% 및 21.9%로 나타나 응집력 저감을 통한 수축저감 성능에 있어 MONODN이 Control 대비 소폭 우위에 있음을 확인할 수 있었다. 이로써 본 연구의 보급형 복합기능 균열저감제 제품을 구현할 수 있는 재료 기반이 모두 확보되었다.

다. 복합기능 균열저감제 제품 개발

1) 개요

본 연구의 복합기능 균열저감제는 수축저감 기능에 유동성이 겸비된 제품이다. 지금까지 수축저감 성능을 극대화하기 위해 물의 계면결합력 및 응집력을 저감시키는 기술을 확보하였다. 특히 계면결합력 저감제인 PCA ML은 수축저감 기능에 PCA 화학 혼화제로서의 콘크리트 유동성능을 발현시키는 기능이 일체화된 재료이다. 그리고 응집력 저감제인 MONODN은 기존 알킬렌옥사이드 계면활성제와는 다른 접근법을 활용한 합성재료로서 A사와의 긴밀한 협력을 통해 국산화에 성공했음을 기술한 바 있다.

본 연구의 핵심 목표인 복합기능 균열저감제 개발은 본 연구를 통해 확보된 기술을 통해 합성된 2종의 핵심 재료인 PCA ML과 MONODN을 일액형화함으로써 완성된다. [그림 26]은 복합기능 균열저감제를 완성하는 공정도이다. 참고로 본 연구의 복합기능 균열저감제를 PCR3000으로 명명하기도 한다.



[그림 26] 복합기능 균열저감제 (PCR3000) 제조공정

[그림 26]의 공정에 따라 제조된 본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000의 성능을 검증함으로써 제품의 유효성을 확인하고자 한다. 이는 다음 절에서 구체적으로 기술하고자 한다.

2) PCR3000의 성능 검증

가) 제품 안정성 검증

본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000은 [그림 26]의 제조 공정에 따라 성질이 다른 두 물질이 일액형화되는 제품이므로 수축저감 성능을 검증하기에 앞서 제품의 안정성을 확인할 필요가 있다. 제품의 안정성 검증은 층분리, 침전물, 부유물 및 pH의 4가지 항목에 대해 수행되었고, 그 결과는 [표 15]에 나타냈다.

[표 15] PCR3000의 제품 안정성 검증 결과

성분비 (%)		측정 기간							변화 유/무			
PCA-ML	MONO-DN	초기	1주	2주	3주	4주	2개월	6개월	층분리	침전물	부유물	pH
30.0	70.0	 pH6.89	 pH6.85	 pH6.88	 pH6.89	 pH6.85	 pH6.88	 pH6.91	무	무	무	무
32.5	67.5	 pH6.93	 pH6.95	 pH6.95	 pH6.92	 pH6.93	 pH6.95	 pH6.91	무	무	무	무
35.0	65.0	 pH6.95	 pH6.93	 pH6.95	 pH6.95	 pH6.94	 pH6.91	 pH6.92	무	무	무	무
37.5	62.5	 pH6.97	 pH6.93	 pH6.91	 pH6.94	 pH6.98	 pH6.91	 pH6.97	무	무	무	무
40.0	60.0	 pH7.07	 pH7.01	 pH7.11	 pH6.99	 pH7.01	 pH7.05	 pH6.98	무	무	무	무

[표 15]에서 알 수 있듯이, PCA ML과 MONODN의 성분비가 30:70에서 40:60의 범위에서 층분리, 침전물, 부유물 및 pH의 변화를 관찰할 수 없었다. 결과적으로 PCR3000 제품은 일반적으로 적용 가능한 성분비에 대해 6개월 동안 안정한 것으로 파악되었다.

나) PCR3000 성능 검증

본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000의 성능 평가를 위해 [그림 26]의 제조 공정에 따라 PCR3000을 제조하였다. 이 때 PCA-ML과 MONODN의 성분비는 30:70으로 하여 반응기에 투입한 후, 균일성 확보를 위해 상온에서 45분 동안 교반함으로써 일액형 시료를 제조하였다. 이에 대해 [표 16]의 콘크리트 배합표에 따라 콘크리트 유동성, 압축강도 및 수축률을 평가하고자 하였다. 이 때 PCA는 WRE-500을 바인더 대비 0.7% 사용했고, Control (G사 수축저감제) 및 PCR3000은 바인더 대비 1.0% 사용했다.

[표 16] 콘크리트 배합표 (25-24-150)

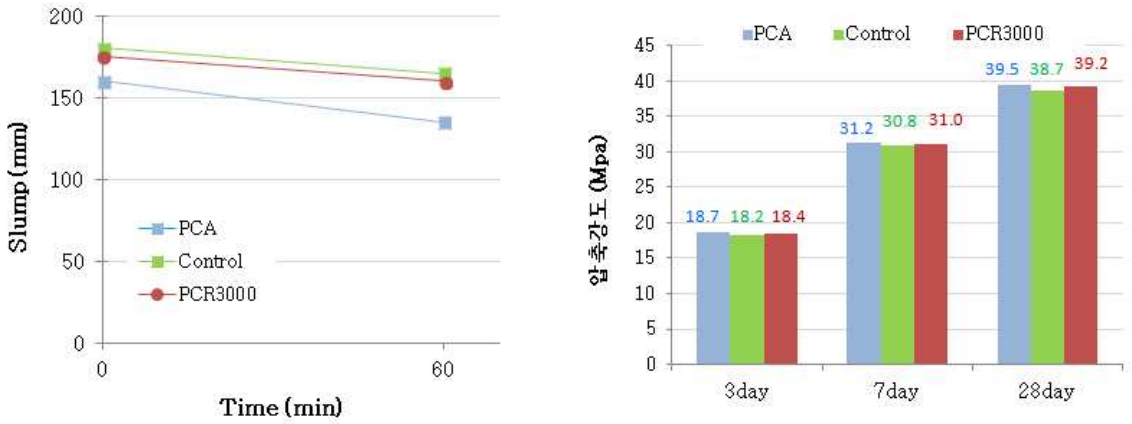
W/B	S/A	Binder (kg/m³)			잔골재 (kg/m³)		굵은골재 (kg/m³)	물 (kg/m³)	혼화제 (B×%)
		시멘트	S/P	F/A	미사	세사			
51.4%	48%	245	70	35	501	334	915	180	PCA:Control :PCR3000

※ 시료 및 사용량
PCA : WRE-500 0.7%, Control : WRE-500 0.7% 6사 수축저감제 1.0%, PCR3000 : 1.0%

[표 16]에 따라 콘크리트를 제조하여 유동성 (KS F 2402), 공기량 (KS F 2421), 압축강도 (KS F 2403, 2405) 및 길이변화 시험을 통한 수축률 (KS F 2424)을 평가하였다. 수축률은 [그림 15]에서 설명한 바와 같이 길이변화 몰드 (Mold)에 스트레인 게이지 (Strain Gauge)를 배립하고, 데이터로거 (Data Logger)에 연결하여 항온항습실에서 양생하며 길이변화를 측정하여 평가했다. 콘크리트 유동성 및 압축강도 실험 결과를 [표 17]에 요약하였고 이를 [그림 27]에 그래프로 나타냈다. 또한 수축률 시험 결과는 [그림 28]에 나타냈다.

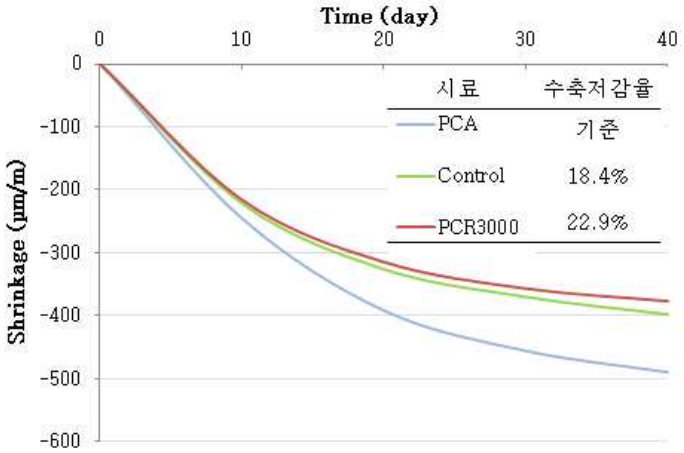
[표 17] 콘크리트 유동성 및 압축강도 결과

시료명(※ 사용량)	Slump (mm)		공기량 (%)	재령별 압축강도 (MPa)		
	초기	60분		3일	7일	28일
PCA	160	135	4.1	18.7	31.2	39.5
Control	180	165	3.9	18.2	30.8	38.7
PCR3000	175	160	3.8	18.4	31.0	39.2



(a) 콘크리트 유동성 (b) 압축강도

[그림 27] 콘크리트 유동성 및 압축강도



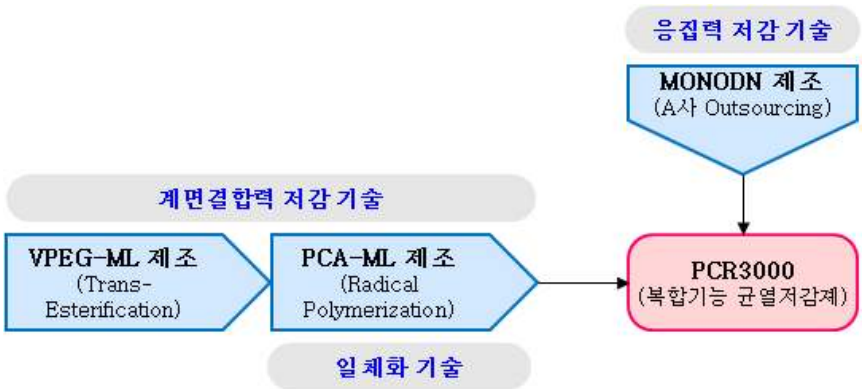
[그림 28] 수축률 시험 결과

[그림 27] (a)의 콘크리트 유동성에 있어서 PCA 대비 계면활성제의 분산 기여 작용으로 인해 Control 및 PCR3000의 Slump값이 20mm 수준 우위에 있음이 재확인되었다. [그림 27] (b)의 압축강도에 있어서는 모든 시료가 동등한 수준을 보였다. 한편 [그림 28]에서 알 수 있듯이, Control 및 PCR3000의 수축률은 기준인 PCA 대비 각각 18.4% 및 22.9%로 나타났다. 응집력 및 계면결합력 저감 기능을 갖춘 PCR3000의 수축저감 성능이 Control 대비 약 20% 수준 우위에 있음을 확인할 수 있었다.

지금까지 복합기능 균열저감제 (PCR3000) 개발에 있어 실험실 규모에서 계획된 모든 단계를 완료하였다. 결과적으로 본 연구가 목표로 하는 콘크리트 유동성, 압축강도 및 수축저감 성능을 달성했음을 확인하였다. 따라서 PCR3000의 양산성을 확인하기 위해 실험실 규모에서 검증되었던 물성 및 성능을 Pilot 규모에서 재현하고자 한다.

3) 소결

가) 본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000의 제조공정을 [그림 29]와 같이 확립하였다.



[그림 29] 복합기능 균열저감제 (PCR3000) 제조공정

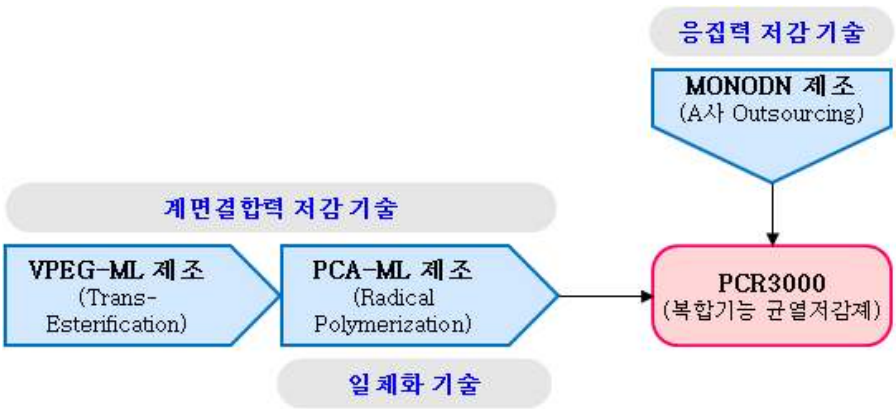
나) 확립된 제조공정에 따라 제조된 PCR3000의 제품 안정성을 평가하였다. 층분리, 침전물, 부유물 및 pH의 변화를 6개월 동안 관찰한 결과 4가지 항목 모두 변동 사항을 관찰할 수 없었다. 따라서 PCR3000 제품의 안정성은 문제가 없는 것으로 파악되었다.

다) PCR3000이 적용된 콘크리트의 유동성, 압축강도 및 수축률을 평가한 결과, 콘크리트 유동성에 있어서 PCA 대비 계면활성제의 분산 기여 작용으로 인해 Control 및 PCR3000의 Slump값이 20㎜ 수준 우위에 있음이 재확인되었다. 압축강도에 있어서는 모든 시료가 동등한 수준을 보였다. 한편 Control 및 PCR3000의 수축률은 기준인 PCA 대비 각각 18.4% 및 22.9%로 나타났다. 응집력 및 계면결합력 저감 기능을 갖춘 PCR3000의 수축저감 성능이 Control 대비 약 20% 수준 우위에 있음을 확인할 수 있었다. 이로써 복합기능 균열저감제 (PCR3000) 개발에 있어 실험실 규모에서 계획된 모든 단계를 완료하였다.

라. 복합기능 균열저감제 (PCR3000)의 양산성 검증 (200kg 규모 Pilot)

1) 개요

본 연구의 복합기능 균열저감제 (PCR3000)는 사업화를 전제로 개발된 제품이므로 양산성 검증은 필수 항목이다. 앞서 기술한 바와 같이, 본 연구의 복합기능 균열저감제 (PCR3000) 개발에 있어 실험실 규모에서 계획된 모든 단계는 완료되었다. 따라서 본 절에서는 실험실 규모의 100배 수준의 규모인 200kg의 Pilot 규모에서 PCR3000의 양산성을 확인하고자 한다. Pilot 규모에서의 PCR3000 제조공정 역시 [그림 30]을 따랐다.



[그림 30] 복합기능 균열저감제 (PCR3000) 제조공정

[그림 30]의 제조공정에 따라 단계별 양산성을 확인하고자 한다. 양산성 검증을 위한 실비는 2012년 5월에 자동제어 방식으로 개선 작업이 완료된 [그림 31]의 200kg 규모의 당사 Pilot 실비를 이용하였다.



[그림 31] 200kg 규모의 Pilot 반응 설비

2) VPEG ML 제조공정의 양산성 검증

VPEG ML은 PCA용 측쇄 단량체인 VPEG의 말단에 ML과의 트랜스에스테르화 반응을 통해 지방산을 도입한 본 과제의 핵심 물질이다. 실험실 규모에서 확보된 반응 조건인 [표 18]을 적용하여 200kg Pilot 규모로 양산성을 확인하는 것이 본 실의 목적이다.

[표 18] VPEG과 ML의 트랜스에스테르화 반응 조건 및 물성

반응온도	반응시간	중합금지제	촉매 및 사용량	반응 전환율	불포화기 잔존율
120℃	10시간	1,000ppm	Cat 1.0H 1.0wt%	89%	100%

본 합성 공정의 양산 안정성 검증을 위해 Pilot 합성을 5회 실시하였다. 각 시료에 대해 H-NMR 분석을 통해 반응 전환율 및 불포화기 잔존율을 계산하여 그 결과를 [표 19]에 나타냈다.

[표 19] VPEG과 ML의 트랜스에스테르화 반응 조건 및 물성

구분	Pilot 차수					Pilot 규모		실험실 규모
	1차	2차	3차	4차	5차	평균	표준편차	
반응 전환율	88.5%	88.7%	90.1%	89.2%	88.7%	89.0%	0.65%	89.0%
불포화기 잔존율	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0%	100%

[표 19]에서 알 수 있듯이, 5회에 걸친 Pilot 합성 결과 200kg 규모의 VPEG ML의 트랜스에스테르화 반응은 실험실과 동일한 반응 전환율과 불포화기 잔존율을 보였다. 즉 반응 전환율은 89.0%이고 불포화기 잔존율은 100%이다. 이는 일반 PCA 화학 혼화제 제품 개발 시에도

이와 유사한 합성 반응 (에스테르 반응)이 개입되는데 실험실 합성 조건이 200kg의 Pilot 규모에 변경 없이 적용되는 사례가 많은데 실험실 합성 조건이 양산 조건을 보사하는 방향으로 다년간 변경 실정되어진 결과로 판단된다. 이로써 VPEG-ML의 합성공정은 양산성이 있는 것으로 판단할 수 있으며, 본 Pilot 합성을 통해 PCA-ML 제조공정 (Radical Polymerization)에 투입될 Pilot 규모의 핵심 물질이 확보되었다.

3) PCA-ML 제조공정의 양산성 검증

PCA-ML은 지방산 도입 측쇄 단량체인 VPEG-ML을 적용하여 중합함으로써 계면결합력 저감제에 콘크리트 유동성 발현 기능을 일체화시킨 수축저감제이다. 실험실 규모에서 확보된 반응 조건인 [표 20]을 적용하여 200kg Pilot 규모로 양산성을 확인하는 것이 본 실의 목적이다.

[표 20] VPEG ML 적용 PCA ML 중합 조건

단량체 성분비 (mol%)			반응온도	반응시간	Initiator	CTA
VPEG-ML	AM	BM				
23.9	66.9	9.2	85℃	10시간	0.35wt%	0.42wt%

본 중합 공정의 양산 안정성 검증을 위해 Pilot 중합을 7회 실시하였다. 5회에 걸쳐 확보된 VPEG-ML Pilot 물량을 대부분 소진하는 차원에서 PCA-ML의 양산성을 검증하기 위함이다. PCA-ML은 기본적으로 콘크리트 유동성을 발현시키는 화학 혼화제이므로 [표 20]의 조건으로 중합된 Pilot 시료의 유효성은 실험실 규모로 중합된 시료와의 콘크리트 유동성 차이를 비교하는 것이 적합하다. 콘크리트 유동성 차이 비교 실험은 실험실 규모에서 적용했던 콘크리트 배합표인 [표 21]을 따랐다.

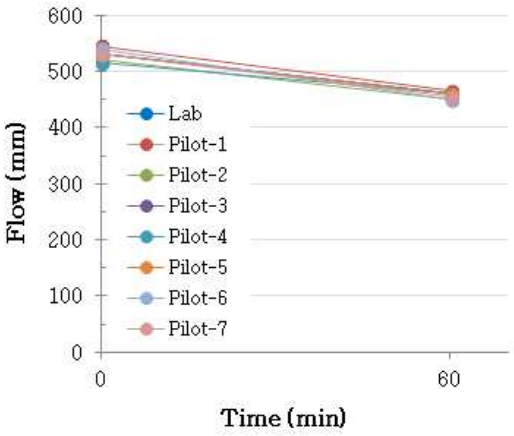
[표 21] 콘크리트 배합표 (25-40-500)

W/C	S/A	시멘트 (kg/m³)	잔골재 (kg/m³)	굵은골재 (kg/m³)	물 (kg/m³)	혼화제 (C×%)
44%	41%	400	761	1,092	176	0.9

7회 실시되어 확보된 Pilot 중합 시료에 대해 [표 21]의 콘크리트 배합표에 따라 유동성 평가를 수행한 결과를 [표 22]에 요약했으며 이를 [그림 32]에 그래프로 나타냈다.

[표 22] PCA-ML Pilot 시료의 콘크리트 유동성 평가 결과

시료 구분		Slump/Flow (mm)		유동성능 (기준 : Lab)	
		초기	60분	분산력	유지력
Lab		530	460	100%	100%
Pilot	1차	545	465	103%	98%
	2차	520	450	98%	100%
	3차	530	460	100%	100%
	4차	515	460	97%	103%
	5차	530	460	100%	100%
	6차	540	450	102%	96%
	7차	530	455	100%	99%
	평균	530	457	100%	99%
	표준편차	10	6	2%	2%



[그림 32] PCA-ML Pilot 시료의 콘크리트 유동성

[표 22] 및 [그림 32]에서 알 수 있듯이, 7회에 걸친 Pilot 시험 결과 200kg 규모의 PCA-ML의 중합 반응 역시 실험실과 동일한 조건에서 콘크리트 유동성능이 재현되었다. 즉, 7개 시료에 대한 유동성능의 평균은 실험실 시료 대비 분산력 100% 및 유지력 99% 수준으로 나타났으며, 표준편차는 분산력과 유지력 모두 2% 수준으로 나타나 실험실 시료와 거의 동일한 결과를 보여주었다. 결과적으로 VPEG-ML을 적용하여 PCA-ML을 중합하는 공정 역시 양산성이 있는 것으로 나타났다.

Pilot을 통해 제조된 PCA-ML은 본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000을 계면결합력 저감제이며 이는 응집력 저하제인 MONOLN과의 일액형화에 의해 PCR3000이 완성된다. 따라서 Pilot 제조된 PCA-ML과 A사로부터 제공받은 MONOLN을 일액형화함으로써 PCR3000을 제조하는 공정에 대한 양산성을 다음 절에서 검증하고자 한다.

4) PCR3000 제조공정의 양산성 검증

PCR3000은 본 연구가 목표로 하는 복합기능 균열지감제이며 이는 계면결합력 지감제인 PCA-M1과 응집력 지감제인 MONOIN의 일액형화 공정에 따라 제조되는 제품이다. 계면결합력 지감제인 PCA-M1은 당사에서 상기 Pilot 제조공정을 통해 확보되었고, 응집력 지하제인 MONOIN은 A사로부터 5톤 규모의 Pilot 설비를 통해 제조된 것을 제공받았다.

PCR3000의 제조공정에 대한 양산성 검증을 위해 실험실 규모와 동일한 일액형화 조건으로 3회에 걸쳐 Pilot 제조를 실시하였다. 즉, PCA-M1과 MONOIN의 성분비는 30:70으로 하여 반응기에 투입한 후, 균일성 확보를 위해 상온에서 45분 동안 교반함으로써 일액형 시료를 제조하였다. 이에 대해 [표 23]의 콘크리트 배합표에 따라 콘크리트 유동성, 압축강도 및 수축률을 평가하고자 하였다. PCR3000의 Pilot 시료를 실험실 시료와 비교하는데 있어 기준 시료인 PCA는 WRF-500을 바인더 대비 0.7% 사용했고, Control은 WRF-500 0.7%에 G사 수축저감제 1.0%를 함께 사용한 시료이다. PCR3000의 Pilot 및 실험실 시료는 각각 1.0% 사용했다.

[표 23] 콘크리트 배합표 (25-24-150)

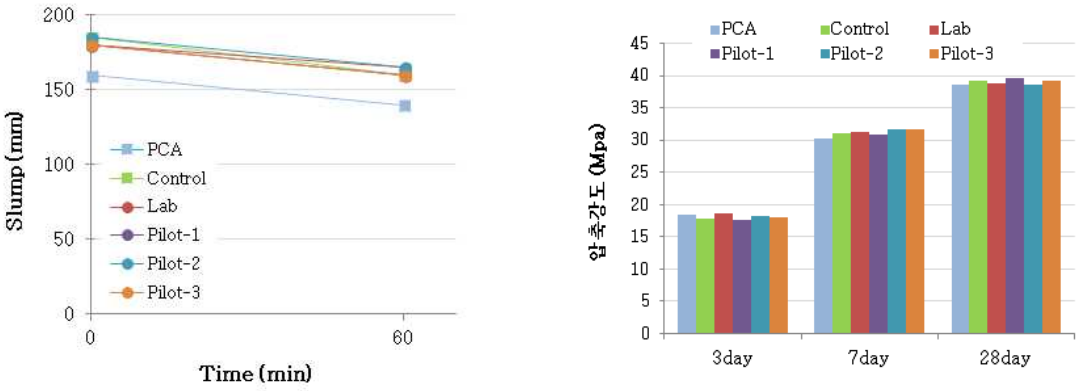
W/B	S/A	Binder (kg/m³)			잔골재 (kg/m³)		굵은골재 (kg/m³)	물 (kg/m³)	혼화제 (B×%)
		시멘트	S/P	F/A	미사	세사			
51.4%	48%	245	70	35	501	334	915	180	PCA:Control :Lab:Pilot

※ 시료 및 사용량
PCA : WRF-500 0.7%, Control : WRF-500 0.7% G사 수축저감제 1.0%,
Lab 및 Pilot-1,2,3 (PCR3000) : 각각 1.0%

[표 23]에 따라 콘크리트를 제조하여 유동성 (KS F 2402), 공기량 (KS F 2421), 압축강도 (KS F 2403, 2405) 및 길이변화 시험을 통한 수축률 (KS F 2424)을 평가하였다. 수축률은 [그림 15]에서 설명한 바와 같이 길이변화 몰드 (Mold)에 스트레인 게이지 (Strain Gauge)를 매립하고, 데이터로거 (Data Logger)에 연결하여 항온항습실에서 양생하며 길이변화를 측정하여 평가했다. 콘크리트 유동성 및 압축강도 실험 결과를 [표 24]에 요약하였고 이를 [그림 33]에 그래프로 나타냈다. 또한 수축률 시험 결과는 [그림 34]에 나타냈다.

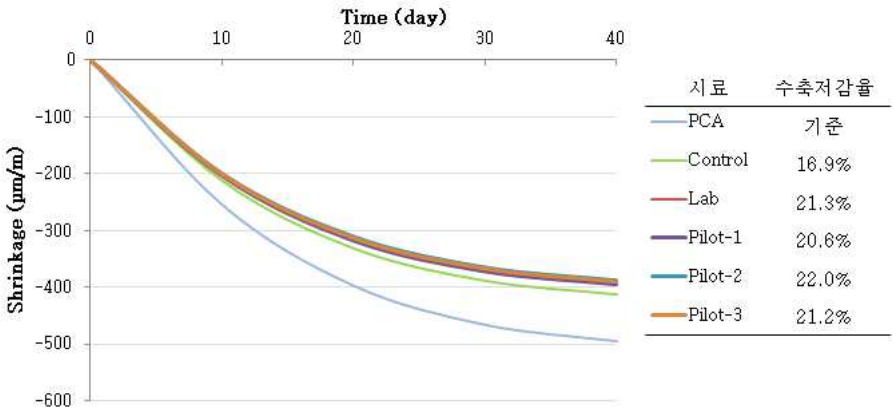
[표 24] 콘크리트 유동성 및 압축강도 결과

시료명(※사용량)		Slump (mm)		공기량 (%)	재령별 압축강도 (MPa)		
		초기	60분		3일	7일	28일
PCA		160	140	3.7	18.5	30.3	38.6
Control		185	160	4.2	17.9	31.1	39.2
Lab		180	165	3.5	18.7	31.3	38.8
Pilot	1차	180	160	3.8	17.7	30.8	39.6
	2차	185	165	4.0	18.2	31.6	38.6
	3차	180	160	3.8	18.1	31.6	39.1



(a) 콘크리트 유동성 (b) 압축강도

[그림 33] 콘크리트 유동성 및 압축강도



[그림 34] 수축률 시험 결과

[그림 33] (a)의 콘크리트 유동성에 있어서 Lab과 Pilot의 Slump값은 동등한 수준으로 나타났다. 또한 실험실 규모의 실험에서와 같이 PCA 대비 계면활성제의 분산 기여 작용으로 인해 Control 및 PCR3000의 Slump값이 여전히 20㎜ 수준 우위에 있음을 확인했다. [그림 33] (b)의 압축강도에 있어서도 Lab과 Pilot 시료는 모두 동등 수준을 보였을 뿐만 아니라 PCA 및 Control과도 동등 수준을 보였다. [그림 34]의 수축률 결과에서도 Lab 및 Pilot 시료는 PCA 대비 20.6%에서 22.0% 수준의 수축저감 성능을 보여 모두 동등 수준임이 확인되었다. PCA 대비 16.9%의 수축저감 성능을 보인 Control에 대해 22% 이상의 성능 향상을 보여 실험실 규모의 실험 결과와 유사한 경향을 보였다. 결과적으로 VPEG-M과 MONOIN을 일액화함으로써 본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000을 제조하는데 있어 양산성이 확보되었음을 확인하였다. 실제로 본 공정은 반응이 개입되지 않고 블렌딩 (Blending)을 통해 일액화하는 공정이므로 Scale-up에 있어서 큰 무리는 없었다.

지금까지 복합기능 균열저감제 (PCR3000) 개발에 있어 실험실 규모에서 설정된 제조공정을 실험실 대비 100배 규모인 200kg 수준의 Pilot 검증을 수행함으로써 양산성을 입증하였다. 사업화에 부합하는 실제 양산은 20톤 규모로 이루어질 계획이나 이는 2차년도에 수행하고자 한다. 1차년도에는 Pilot 시험을 통해 본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000의 양산성을 검증하고 Mock up 부재에 대한 PCR3000 (Pilot 시료)의 성능 검증을 수행함으로써 2차년도에 계획된 현장적용에 유용한 사전 데이터를 확보하고자 하였다. 이에 대해서는 하기에 구체적으로 기술하고자 한다.

5) 소결

가) 실험실 규모에서 확립된 본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000 제조공정의 양산성을 검증하는데 있어 첫 번째 단계인 VPEG-M의 합성공정이다. 이를 위해 200kg 규모의 Pilot 시험을 5회 수행하였고, 실험실 규모와 동일한 수준의 반응 전환율 및 불포화기 잔존율을 얻었다. 즉 Pilot 시료의 평균 반응 전환율은 89.0%이고 평균 불포화기 잔존율은 100%로 Lab (각각 89% 및 100%)과 동일하였다. 이로써 VPEG-M의 합성공정의 양산성이 입증되었다.

나) PCR3000 제조를 위한 두 번째 제조공정은 PCA-M 중합공정으로서 양산성 검증을 위해 200kg 규모의 Pilot 시험을 7회 수행하여 확보된 시료에 대해 콘크리트 유동성을 Lab과 비교 검증하였다. 결과적으로 7개의 Pilot 시료 모두 Lab과 동등한 콘크리트 유동성을 보였다. 즉 유동성능의 평균은 실험실 시료 대비 분산력 100% 및 유지력 99% 수준으로 나타났으며, 표준편차는 분산력과 유지력 모두 2% 수준으로 나타나 실험실 시료와 거의 동일하였다. 결과적으로 VPEG-M을 적용하여 PCA-M을 중합하는 공정 역시 양산성이 있는 것으로 나타났다.

다) 본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000 제조는 PCA-M과 MONOIN의 일액형화 공정에 의한다. 일액형화 공정의 양산성 검증을 위해 필요한 MONOIN은 A사로부터 5톤 규모의 Pilot 설비를 통해 제조된 것을 제공받았다. 실험실 규모와 동일한 제조조건에 따라 200kg 규모의 Pilot 시험을 3회 수행하였다. 확보된 Pilot 시료에 대해 콘크리트 유동성, 압축강도 및 수출률을 평가한 결과 Lab과 동등한 수준의 결과를 확인할 수 있었다. 특히 수축률 결과에 있어 Lab 및 Pilot 시료는 PCA 대비 20.6%에서 22.0% 수준의 수축저감 성능을 보여 모두 동등 수준임이 확인되었다. PCA 대비 16.9%의 수축저감 성능을 보인 Control에 대해 22% 이상의 성능 향상을 보여 실험실 규모의 실험 결과와 유사한 경향을 보였다. 결과적으로 VPEG-M과 MONOIN을 일액화함으로써 본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000을 제조하는데 있어 양산성이 확보되었음을 확인하였다.

마. PCR3000의 Mock-up 적용 평가

1) 개요

본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000은 사업화를 목적으로 함에 있어 현장 적용에 대한 사전 검토가 매우 중요하다. 현장 적용을 위한 사전 검토를 위해서는 현장을 모사하는 Mock-up 부재에 PCR3000을 적용하여 균열 성능을 평가하는 것이 요구된다. 따라서 먼저 균열저감에 대한 니즈가 큰 분야와 그 분야에 적합한 배합을 설정할 필요가 있다. PCR3000이 주요하게 적용될 수 있는 분야 및 그 배합 설정과 이를 모사한 Mock-up 평가에 있어서는 참여기관인 두산건설, 롯데건설 그리고 POSCO건설이 각각 주도적 역할을 수행하였다. [표 25]는 각 참여 건설사별 사업화 현장적용 분야 및 1차년도에 수행한 Mock up 평가 현장을 보여준다.

[표 25] 참여기관별 현장 적용 분야

참여기관	현장적용 분야 (사업화)	Mock-up 평가 현장
두산건설	주거용 건축물 기초 및 슬라브 (Slab)	서울 월계4구역 두산위브 현장, 지하주차장
롯데건설	대형 마트 또는 아웃렛 매장 바닥	부산 사직1구역 주택재개발 정비사업 신축 현장, 지하주차장
POSCO건설	플랜트 구조물 바닥	평택 창고공사 현장, 바닥

[표 25]의 Mock-up 평가에 앞서 각 참여 건설사별로 사전 예비실험 및 성능 검증을 수행하였고, 이를 토대로 Mock up 타설 및 평가를 진행하였다. 다음 절부터 각 건설사별로 수행된 성능 평가 실험 및 Mock up 검증 내역에 있어 핵심 부분을 요약하여 기술하고자 한다. 이때 복합기능 균열저감제인 PCR3000은 Pilot을 통해 확보된 시료를 사용하였다.

2) 주거용 건축물 기초 및 슬라브 분야 (두산건설)

가) 콘크리트 규격별 PCR3000 성능 검증

본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000의 콘크리트 성능 검증을 위해 [표 26]과 같이 주거용 건축물의 기초 및 슬라브에 적합한 3종의 최적 배합에 대해 규격별 PCR3000 혼입 및 미혼입 배합에 대해 평가를 진행하고자 하였다. 본 배합설계에 따라 제작된 콘크리트에 대해 슬럼프 (150±25mm), 공기량 (4.5±1.5%), 압축강도 및 건조수축 길이변화를 평가하였다.

[표 26] 규격별 평가 배합설계

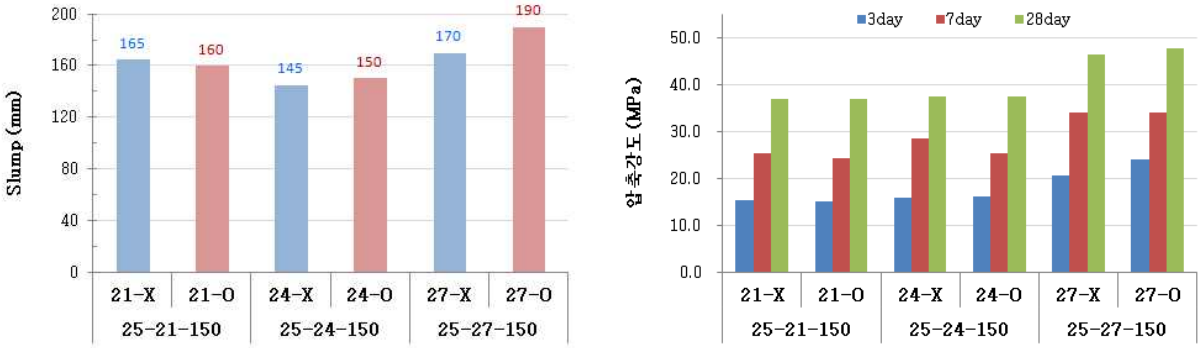
규격	시료	W/B (%)	S/a (%)	W (kg/m³)	Binder (kg/m³)		골재 (kg/m³)		AD (B×%)	
					C	FA	S	G	PCR3000	PCA
25-21-150	21-X	53.9	49.4	170	268	47	891	923		1.0
	21-0								1.0	-
25-24-150	24-X	51.1	48.0	170	283	50	858	941	-	1.0
	24-0								1.0	
25-27-150	27-X	43.7	47.8	170	331	58	831	918		1.0
	27-0								1.0	-

※ W : 물, C : 시멘트, FA : 플라이애시, S : 투습모래, G : 투습자갈, AD : 화학 혼화제

[표 26]에 따라 제작된 시료의 콘크리트 성능 결과 중 슬럼프, 공기량 및 압축강도를 [표 27]에 요약했고 이를 [그림 35]에 그래프로 나타냈다. 또한 건조수축 길이변화 결과는 [그림 36]에 나타냈다.

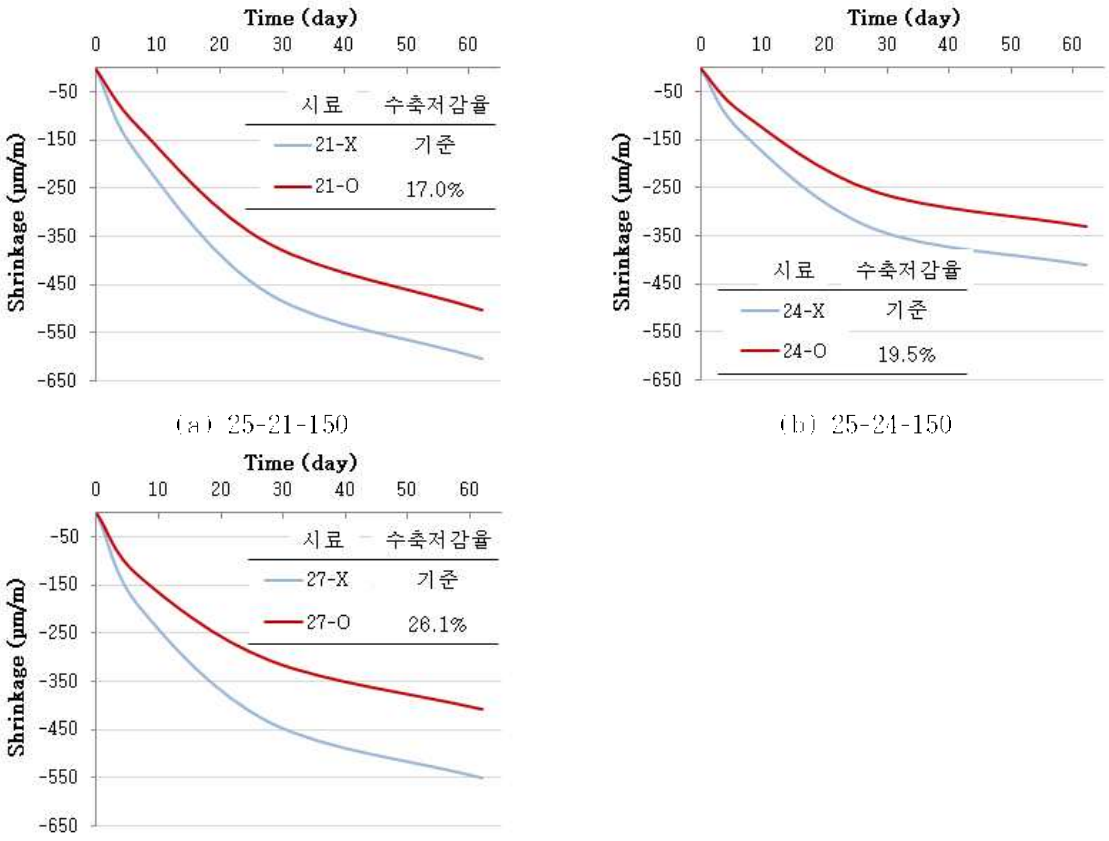
[표 27] 콘크리트 성능 평가 결과

구분		25 21 150		25 24 150		25 27 150	
		21-X	21-O	24-X	24-O	27-X	27-O
슬럼프 (mm)		165	160	145	150	170	190
공기량 (%)		5.0	6.0	4.3	4.3	4.0	5.7
압축강도 (MPa)	3일	15.4	15.2	15.9	16.2	20.7	24.1
	7일	25.3	24.2	28.4	25.3	34.0	34.1
	28일	36.8	37.0	37.5	37.4	46.3	47.8



(a) 콘크리트 유동성 (b) 압축강도

[그림 35] 콘크리트 유동성 및 압축강도



(a) 25-21-150 (b) 25-24-150

(c) 25-27-150

[그림 36] 건조수축 길이변화 측정 결과

[표 27] 및 [그림 35]의 (a)에서 알 수 있듯이, 모든 배합에서 목표 유동성을 만족하는 결과를 나타냈으며, PCR3000을 사용함에 따른 유동성 저하 현상은 발생하지 않았다. 한편, [그림 35]의 (b)로부터 재령 28일에 모든 규격에서 배합강도 이상을 발현하는 것으로 나타났다. 따라서 기본적인 콘크리트 성능에 있어서 PCR3000을 사용함에 따른 성능 저하 현상은 없는 것으로 파악됐다.

한편, [그림 36]에서 알 수 있듯이, 평가된 규격에 상관없이 PCR3000을 혼입함에 따라 건조수축 길이변화율이 현저히 감소하는 결과를 나타냈다. 규격별로 살펴보면, 25-21-150의 경우 약 17.0%, 25-24-150의 경우 약 19.5%, 그리고 25-27-150의 경우에는 약 26.0%의 수축저감율을 나타냈다.

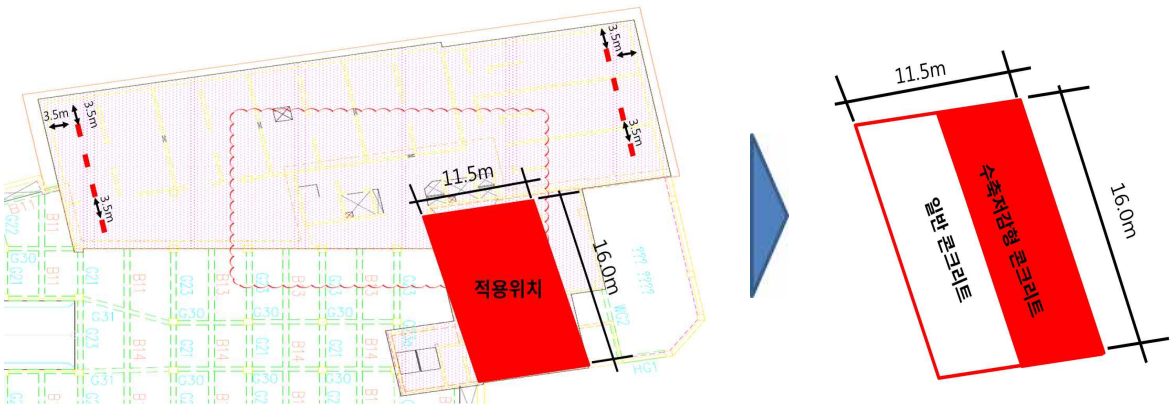
나) Mock-up 평가

(1) Mock-up 평가 부재 내역

앞서 실시한 최적배합에 대한 품질평가를 통해 본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000의 우수성을 확인할 수 있었다. 이에 Mock-up 평가를 통해 실제 레미콘 생산 및 현장 적용 시 발생할 수 있는 문제점 및 현장 적용성에 대한 평가를 선행하고자 하였다. 이를 위한 Mock-up 부재의 개요는 [표 28]과 같다. [그림 37]은 대상 부재의 적용 위치 및 타설 방법을 나타낸다.

[표 28] Mock-up 평가 부재 내역

구분	내역
대상 부재	서울 월계1구역 두산위브현장 110동 지하주차장
타설 물량	약 50m^3
적용 방법	적용위치 인접의 1~2 PCR3000 적용 후 비교 평가 실시



[그림 37] 대상 부재의 적용 위치 및 타설 방법

(2) Mock-up 평가

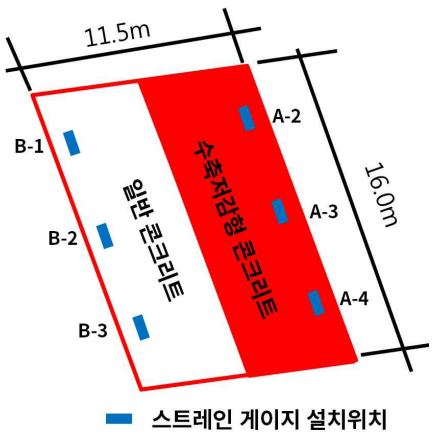
현장 적용성 평가를 위한 Mock-up 부재의 콘크리트 규격 및 배합설계는 [표 29]와 같다. 이는 상기 검증 실험에 적용된 배합과 달리 현장 여건에 따라 실정된 배합이다.

[표 29] Mock up 평가 배합

규격	시료	W/B (%)	S/a (%)	W (kg/m³)	Binder (kg/m³)			골재 (kg/m³)		AD (B×%)	
					C	FA	BS	S	G	PCR3000	일반
25-21-150	21-X	52.7	51.5	166	251	32	32	936	892	-	0.7
	21 0									1.0	

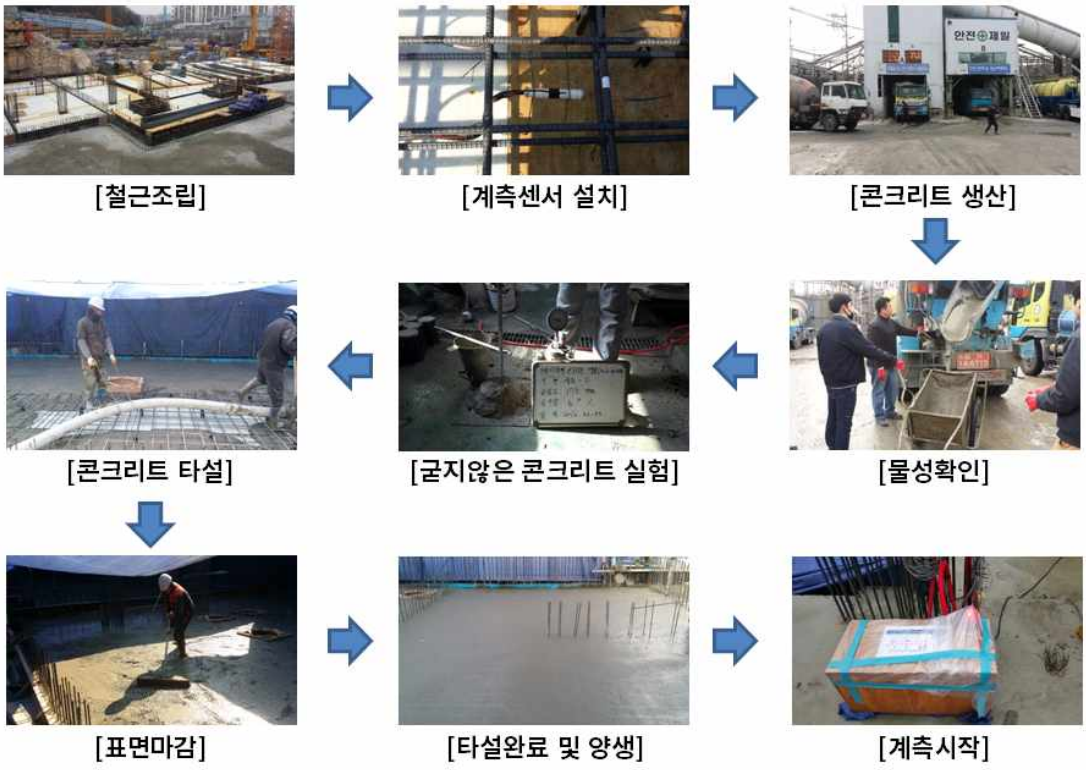
※ W : 물, C : 시멘트, FA : 플라이애시, BS : 고로슬래그미분말, S : 부순모래, G : 부순자갈, AD : 화학 혼화제

[표 29]에 따라 제조된 콘크리트에 대해 슬럼프, 공기량, 압축강도 및 건조수축 길이변화 시험을 실시했다. 특히 건조수축 길이변화 시험의 경우에는 실내 및 현장계측으로 구분하여 실시했다. [그림 38]은 현장계측을 위한 스트레인 게이지 설치 위치를 보여준다.



[그림 38] 현장계측 센서 설치 위치

[그림 39]는 Mock-up 부재 타설 과정을 보여준다.

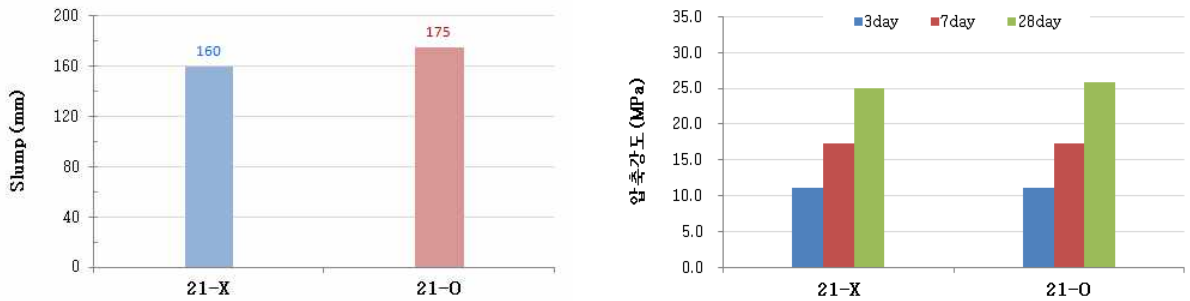


[그림 39] Mock-up 부재 타설 과정

상기 Mock-up 평가 계획에 따라 측정된 콘크리트 성능 결과를 [표 30], [그림 40] 및 [그림 41]에 각각 나타냈다. 특히 [그림 41]의 건조수축 길이변화 측정 결과는 실내 실험 결과이다.

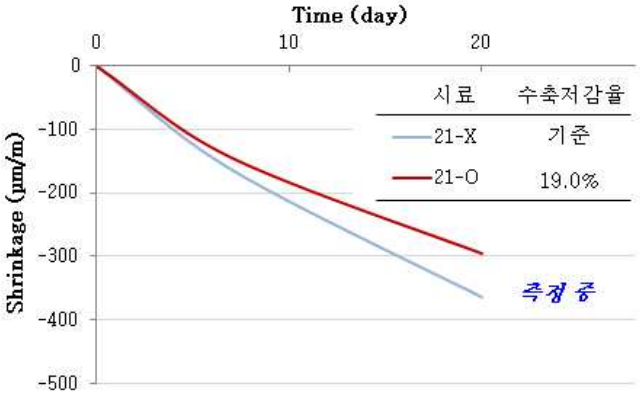
[표 30] 콘크리트 성능 평가 결과

구분	슬럼프 (mm)	공기량 (%)	압축강도 (MPa)		
			3일	7일	28일
21 X	160	3.8	11.1	17.4	25.0
21-0	175	5.2	11.2	17.4	25.8



(a) 콘크리트 유동성 (b) 압축강도

[그림 40] 콘크리트 유동성 및 압축강도

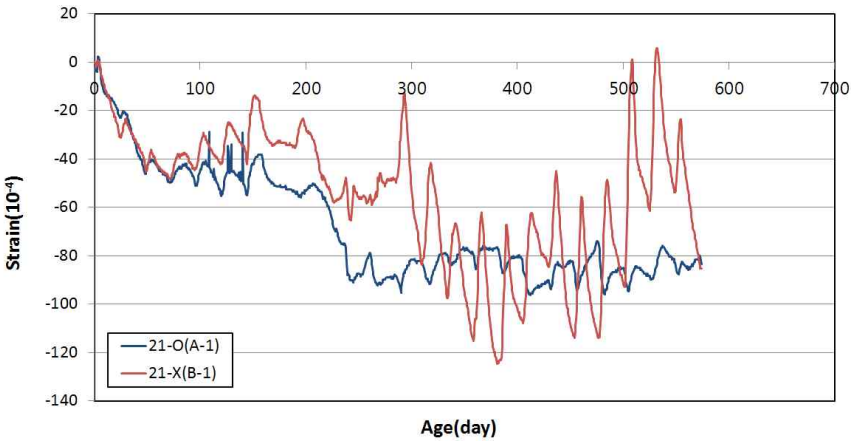


[그림 41] 건조수축 길이변화 측정 결과

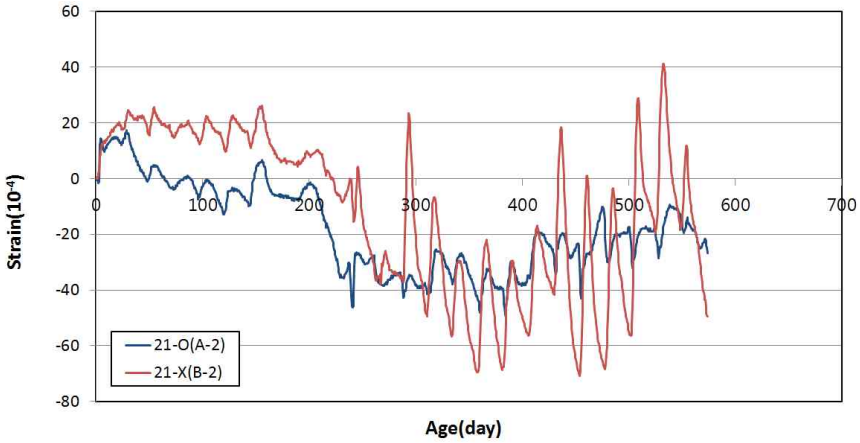
[표 30] 및 [그림 40]의 (a)에서 알 수 있듯이, 슬럼프 및 공기량 모두 목표범위를 만족하는 결과를 나타냈다. [그림 40]의 (b)의 재령별 압축강도 측정 결과, 배합조건에 관계없이 재령 28일에서의 압축강도는 설계기준강도인 21MPa 이상 발현되었고, PCR3000 혼입 여부에 따른 압축강도는 동등한 수준으로 나타났다.

[그림 41]의 건조수축 길이변화 실험은 Mock-up 타설을 위해 BP (Batch Plant)에서 생산된 콘크리트로 시험체를 제작하여 실내에서 측정한 것으로서 재령 20일까지의 결과이다. 결과적으로 PCR3000을 혼입한 콘크리트의 수축저감율은 기준 대비 19.0% 수준으로 나타났다. 향후 지속적인 측정을 통해 수축저감 성능을 파악할 예정이다.

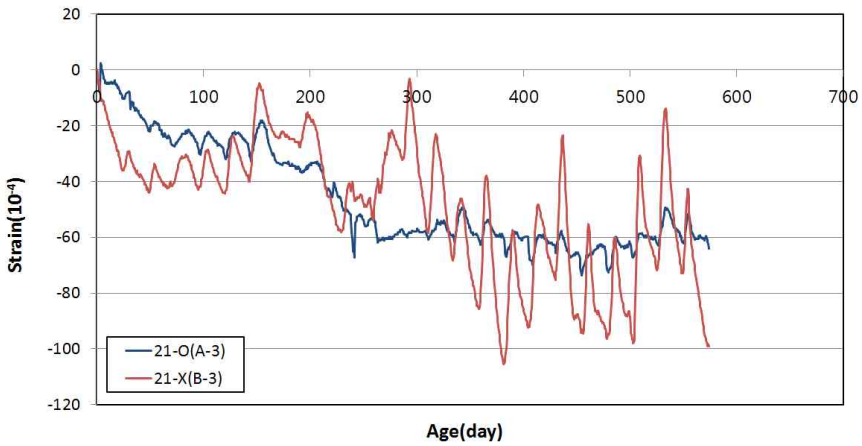
[그림 42]부터 [그림 44]까지는 현장계측을 통한 건조수축 길이변화 측정결과를 나타낸 것이다.



[그림 42] A-1 및 B-1 구역의 건조수축 길이변화 측정 결과

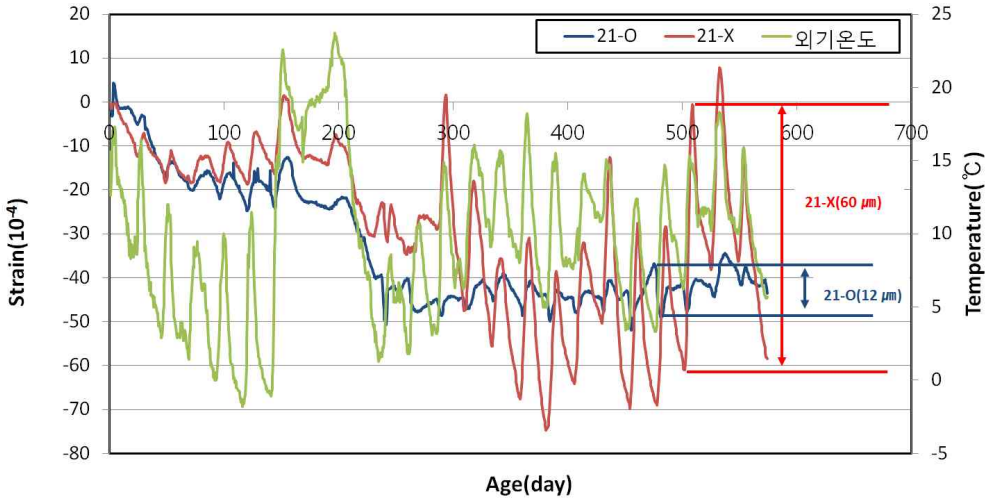


[그림 43] A 2 및 B 2 구역의 건조수축 길이변화 측정 결과



[그림 44] A 3 및 B 3 구역의 건조수축 길이변화 측정 결과

[그림 42]부터 [그림 44]까지의 결과에 있어서, 외기 온도 및 습도 등의 환경적인 영향으로 인하여 정량적인 건조수축량을 평가하는 것은 무의미할 수도 있다. 그러나 외기 환경조건에 따른 수축/팽창량을 살펴보면, 수축/팽창량이 큰 폭으로 거동하는 경향을 나타낸 일반 배합 대비 PCR3000이 혼입된 배합은 상대적으로 작은 변동폭을 보였다. 이들의 측정 결과에 대한 평균 거동을 [그림 45]에 나타냈다.



[그림 45] 계측값의 평균

[그림 45]에서 알 수 있듯이, 현재까지의 측정 결과를 바탕으로도 PCR3000 혼입 유무에 따른 수축/팽창량의 차이를 살펴보면, 일반 배합은 최대 약 60㎛의 수축/팽창의 변동폭을 보인 반면, PCR3000 혼입 배합은 최대 약 12㎛의 수축/팽창의 변동폭을 보임으로써 변형에 대한 안정성이 보다 효과적임을 암시해주었다.

다) 소결

(1) 3종의 최적 콘크리트 배합에 대한 PCR3000 성능 검증을 수행한 결과, 모든 배합에서 목표 유동성 및 압축강도를 만족하는 결과를 얻었다. 건조수축 길이변화 측정 결과에 있어서는 PCR3000 혼입에 따라 건조수축 길이변화율이 현저히 감소하는 결과를 나타냈으며, 결과적으로 최대 26% 이상의 수축저감 효과를 얻을 수 있었다.

(2) 서울 월계4구역 두산위브현장 지하주차장에 Mock-up 타설을 수행하였다. 유동성 및 압축강도 성능은 PCR3000 혼입 여부와 상관없이 모두 동등 수준이었다. 건조수축 길이변화의 실내 측정 결과 PCR3000 혼입 배합의 수축저감율은 기준 대비 약 19.0% 수준으로 나타났다. 한편 현장계측을 통한 건조수축 길이변화 측정 결과 환경 조건의 변화에 따라 수축/팽창의 변동폭이 PCR3000 혼입 배합의 경우 일반 배합 대비 현저히 적었다. 결과적으로 PCR3000 혼입 배합은 재료/환경적인 영향으로 인해 발생되는 건조수축 길이변화량을 현저히 감소시킴으로써 구조물의 내구성 개선이 가능할 것으로 판단된다.

3) 대형마트 또는 아웃렛 매장 바닥 분야 (롯데건설)

가) 개요

[그림 46]과 같이 소비 패턴의 변화에 따라 증가하고 있는 대형마트, 아웃렛 및 물류창고 등은 일반 슬라브 부재 (바닥)의 사용성이 다른 구조물에 비해 높은 성능, 균열수 및 폭에 대해 엄격하게 관리되고 있다. 이와 같은 슬라브에서 발생하는 균열을 억제하기 위한 방안

중 콘크리트의 수축을 저감시키는 방법에 관한 연구가 다양하게 수행되고 있다. 이 중 재료적 관점으로 수축균열 대책은 식회암 골재, 팽창재 및 수축저감제의 사용이 일반적인 방법으로 인지되고 있다. 식회암 골재에 관해서는 장거리 운송에 의한 비용 및 환경부하의 증대가 문제시되고 있으며, 팽창재에 관해서는 침가 시점에 의한 비빔 부족으로부터 발생하는 펌프아웃(Pump-out) 등의 위험성이 있다. 한편 수축저감제에 관해서는 고가로 판매되고 있어 비용 증가에 의해 사용실적이 매우 미미한 상황이다.



[그림 46] 연도별 창고형 대형구조물의 시공 실적

따라서 본 연구에서는 대형 마트, 아웃렛 및 물류창고에 적용되는 초평탄 또는 고평탄 바닥을 중심으로 본 연구에서 개발된 보급형 복합기능 균열저감제인 PCR3000을 사용하여 기존에 문제시되고 있는 수축저감제의 원가를 감소시키며 성능은 동등 이상으로 발현되는 수축저감형 콘크리트를 개발하여 현장에 적용하고자 한다.

나) 콘크리트 규격별 PCR3000 성능 검증

PCR3000의 현장 적용을 위한 사전 검증을 위해 대형 마트 및 물류센터의 초평탄 바닥에 주로 사용되는 2개의 콘크리트 규격을 선정하여 [표 31]과 같은 4종의 배합에 대해 성능을 검증하고자 했다.

[표 31] 규격별 콘크리트 평가 배합

규격	시료	W/B (%)	S/a (%)	단위중량 (kg/m³)					AD (C×%)	
				W	C	S1	S2	G	PCR3000	PCA
25-27-100	I-1	45	48	155	344	586	251	917	1.1	
	I-2	45	48	165	367	597	256	935	1.1	-
25-30-100	I-3	42	48	155	369	605	259	947	1.1	-
	I-4	42	48	155	369	605	259	947	-	1.0

※ W : 물, C : 시멘트, S1 : 시험사, S2 : 투슈모래, G : 굵은골재, AD : 화학 혼화제

[표 31]에 따라 제조된 콘크리트에 대해 슬럼프 (100±25mm), 공기량 (2.0% 이하), 압

측강도 및 길이변화율을 측정하였다. [그림 47]은 굳지않은 콘크리트 시험 전경을 보여준다.



(a) I-1 시험체 (b) I-2 시험체

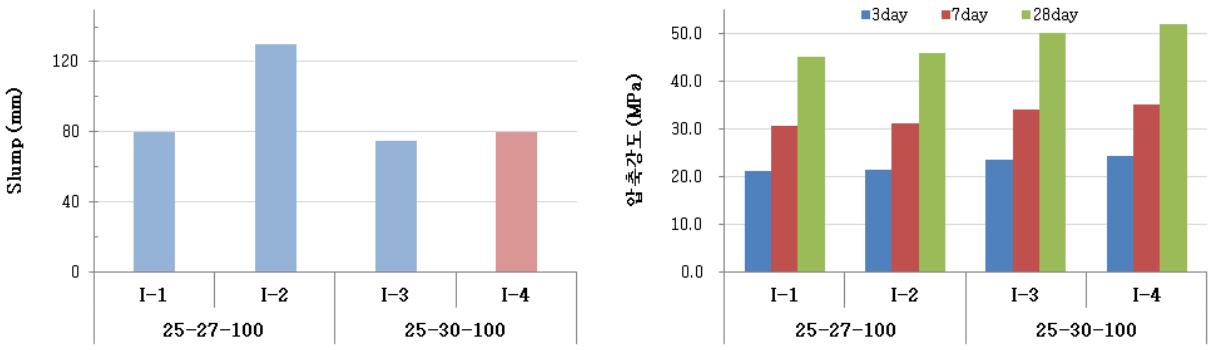
(c) I-3 시험체 (d) I-4 시험체

[그림 47] 굳지않은 콘크리트 시험 전경

실험을 통해 얻어진 결과 중 슬럼프, 공기량 및 압축강도는 [표 32]에 요약했고 이를 [그림 48]에 그래프로 나타냈다. 또한 변형률 평가 결과는 [그림 49]에 나타냈다.

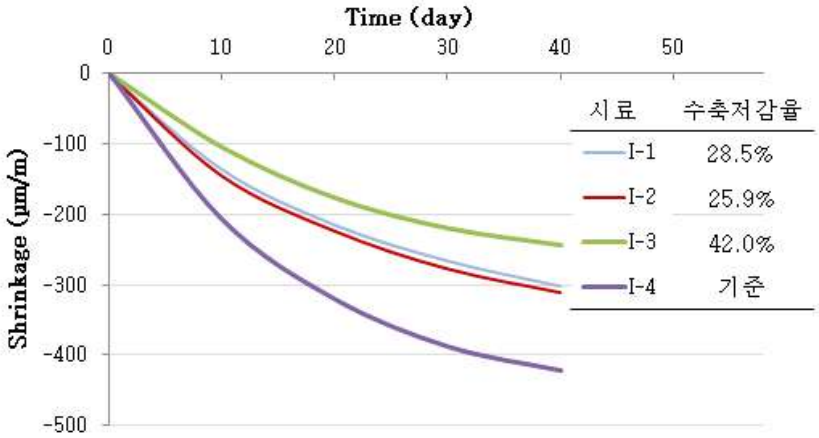
[표 32] 콘크리트 성능 평가 결과

구분	슬럼프 (mm)	공기량 (%)	압축강도 (MPa)		
			3일	7일	28일
I-1	80	1.9	21.2	30.7	45.1
I-2	130	1.8	21.5	31.2	45.8
I-3	75	2.0	23.6	34.1	50.2
I-4	80	1.9	24.4	35.2	51.9



(a) 콘크리트 유동성 (b) 압축강도

[그림 48] 콘크리트 유동성 및 압축강도



[그림 49] 변형률 평가 결과

[표 32] 및 [그림 48] (a)에서 알 수 있듯이, 비빔 직후 시험체의 슬럼프는 모두 목표 슬럼프에 근접하였다. 단지 I-1, I-3 및 I-4 시험체는 목표범위 하한 편향을 보이는 반면 I-2 시험체는 상한 편향을 보였다. 공기량의 경우 모든 시험체가 1.8~2.0%이 범위로 유사하게 나타났으며, 목표 공기량 2.0% 이하를 만족했다.

[표 32] 및 [그림 48] (b)에서 알 수 있듯이, 압축강도는 모든 시험체가 재령 3일에서 설계기준강도의 75% 이상, 재령 7일에서 110% 이상이었으며, 재령 28일에서는 설계기준강도의 165%를 초과하였다. 설계기준강도에 다소 높은 강도값을 나타내는 것은 매트 및 뭄류센터용 고펑탄 바닥의 경우 배합설계를 100% OPC 또는 플라이애시 10~20%를 치환하는 것으로 하며 W/B 값도 다소 낮게 설정하는 경향이 많기 때문이다.

단위수량 변동에 따라서는 압축강도가 유사하게 나타났으나, 재령별로 단위수량이 큰 I-2 시험체가 0.3~0.7MPa (설계기준강도의 1.1~2.6%에 해당) 큰 압축강도를 보였다. PCR3000 사용 유무에 따른 압축강도에 있어서는, PCR3000 사용 시험체인 I-3이 그렇지 않은 I-4 시험체 대비 설계기준강도에 있어 2.7~5.7% 수준 낮게 나타났다. 이는 수축저감제를 사용한 콘크리트에 관한 기존 연구 결과와 유사한 경향이나 기존 수축저감제의 압축강도 감소율에 비해 다소 작아 문제가 되지 않은 수준으로 판단된다.

[그림 49]의 변형률 평가 결과를 보면 PCR3000이 사용된 시험체군인 I-1, I-2 및 I-3가 그렇지 않은 I-4 시험체 대비 큰 폭의 수축저감 효과를 나타냈음을 알 수 있다. I-4 시험체의 변형률을 기준으로 할 경우 I-1, I-2 및 I-3의 수축저감율은 각각 28.5%, 25.9% 및 42.0%이다. 이는 본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000이 대형 매트 및 뭄류센터에 적용할 경우 유효성이 있음을 의미하는 것이다. 한편, PCR3000이 사용된 시험체에 있어서의 수축저감율의 차이로부터 알 수 있듯이, 수축저감 성능은 W/C (물/시멘트 비)가 낮을수록 향상(I-3 > I-1, I-2)되며, 같은 W/C인 경우에는 분체량보다 배합수에 의해 더욱 큰 영향을 받는 경향이 있어 배합수가 많을수록 수축저감 성능이 저하(I-1 > I-2)되었다.

다) Mock-up 평가

(1) Mock up 평가 부재 내역

앞서 실시한 품질평가를 통해 본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000의 수축저감 성능의 우수성을 확인할 수 있었다. 이에 Mock-up 평가를 통해 실제 레미콘 생산 및 현장 적

용 시 발생할 수 있는 문제점 및 현장 적용성에 대한 평가를 선행하고자 하였다. 이를 위한 Mock-up 부재의 개요는 [표 33]과 같다.

[표 33] Mock-up 평가 부재 내역

구분	내역
대상 부재	부산 사직1구역 주택재개발 정비사업 신축현장 지하주차장
타설 물량	약 70m^3
적용 방법	PCR3000 적용 부위와 일반 부위 동시 타설 후 비교 평가 실시

(2) Mock-up 평가

현장 적용성 평가를 위한 Mock-up 부재의 콘크리트 규격 및 배합설계는 [표 34]와 같다. 이는 상기 검증 실험에 적용된 배합과 달리 현장 여건에 따라 설정된 배합이다.

[표 34] Mock-up 평가 배합

규격	시료	W/B (%)	S/a (%)	단위중량 (kg/m^3)						AD (B×%)	
				W	C	FA	S1	S2	G	PCR3000	PCA
25-21-180	일반	53	51	170	289	32	419	512	918	-	0.9
	PCR 3000									1.5	-

※ W : 물, C : 시멘트, FA : 플라이애시, S1 : 세척사, S2 : 부순모래, G : 굵은골재, AD : 화학 혼화제

[표 34]에서 기존 실험과 크게 다른 부분은 PCR3000 사용량이 1.5%라는 점인데, 이는 균열 발생을 최대한 억제하려는 취지로 설정된 값이다. 일반적으로 수축저감제의 사용량을 증가시킴에 따라 균열저감 효과는 향상[21]되기 때문이다. [그림 50]은 Mock-up 부재 타설 과정을 보여준다.



(a) 타설 전경 (b) 기계미장 후 마감

(c) 쏘우컷팅 전경 (d) 변형률 측정기 부착

[그림 50] Mock-up 부재 타설 과정

[그림 51]은 재령 3개월 후 Mock up 현장의 균열 상태를 비교하기 위해 찍은 사진이다. 참고로 [그림 50]의 (d) 변형률 측정기를 부착함으로써 재령에 따른 수축률을 측정하고자 하였으나, 부착형 변형률 측정기의 한계 상 장기간 외부 노출이 불가피하므로 신뢰성 있는 측정 결과를 얻지 못했다.



(a) 일반 부위 (b) PCR3000 적용 부위

[그림 51] Mock-up 부재 균열 상태 비교 (재령 3개월)

[그림 51]의 사진은 본 연구의 복합기능 균열저감제의 우수성을 명확히 보여주는 결과이다. 즉, 일반 부위에서는 눈에 띄게 보이는 다수의 균열들이 PCR3000의 적용 부위에서는 전

혀 관찰할 수 없었다. 이는 균열 발생을 최대한 억제하려는 취지로 성능이 검증된 균열저감제인 PCR3000의 사용량을 증가시킨 점에 기인하는 것으로 판단된다.

라) 소결

(1) PCR3000의 현장 적용을 위한 사전 검증을 위해 대형 마트 및 물류센터의 초평탄 바닥에 주로 사용되는 2개의 콘크리트 규격에 대해 PCR3000을 적용한 것과 그렇지 않은 4종에 배합을 설계하여 콘크리트 성능을 측정하였다. 결과적으로 모든 배합에서 유동성 및 압축강도가 목표값으로부터 크게 벗어나지 않는 범위 내에 들어왔음을 확인하였다. 변형률 평가에 있어서는 PCR3000이 사용된 시험체가 그렇지 않은 시험체 대비 최소 28.5% 최대 42.0% 수준의 우수한 수축저감 성능을 보여주었다. 이로부터 초평탄/고평탄 및 고급형 바닥에 사용되는 고가의 기존 수축저감제를 충분히 대체할 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 부산 사직1구역 주택재개발 정비사업 신축현장 지하주차장에 Mock-up 타설을 수행하였다. 결과적으로 일반 부위에서는 눈에 띄게 보이는 다수의 균열들이 PCR3000의 적용 부위에서는 전혀 관찰할 수 없었다. 이는 본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000의 균열저감 성능의 우수성이 입증되었음을 의미한다.

4) 플랜트 구조물 바닥 분야 (POSCO건설)

가) 다양한 콘크리트 배합별 PCR3000 성능 검증

본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000의 현장 적용에 대한 사전 검토를 위해 단일 규격의 다양한 콘크리트 배합을 평가함으로써 주차장 바닥의 다양성에 대응할 수 있는 기반을 갖추고자 하였다. 이를 위해 콘크리트 규격은 25 24 180으로 설정했으며, 슬래그미분말 (0%, 20%, 30%, 40%), 슬래그시멘트, 3성분계 배합 등 결합재 구성에 따른 PCR3000의 성능 발현 정도를 평가하고자 했다. 본 실험을 위한 콘크리트 배합표를 [표 35]에 나타냈다.

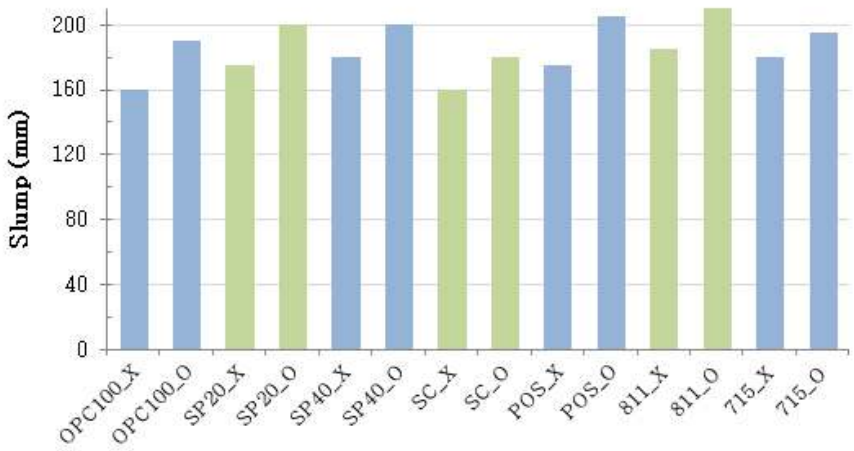
[표 35] 콘크리트 배합표

시료	W/B (%)	단위중량 (kg/m³)						AD (B×%)	
		W	B =330					PCR 3000	PCA
			OPC	SC	Pos Ment	BFS	FA		
OPC100_X	44.0	163	330	-	-	-	-	-	1.0
OPC100_0				-	-	-	-	1.0	-
SP20_X			264	-	-	66	-	-	1.0
SP20_0				-	-		-	1.0	-
SP40_X			231	-	-	99	-	-	1.0
SP40_0				-	-		-	1.0	-
SC_X				330					1.0
SC_0								1.0	
POS_X			-	-	330	-	-	-	1.0
POS_0			-	-		-	-	1.0	-
811_X			264			33	33		1.0
811_0				-	-			1.0	-
715_X			230	-	-	50	50	-	1.0
715_0								1.0	

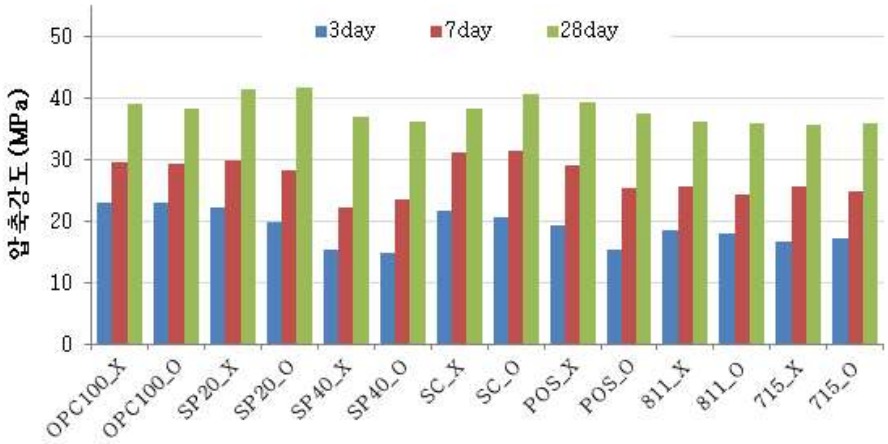
[표 35]에 따라 각 변수에 대한 배합별 콘크리트를 제조하고 콘크리트 유동성 (슬럼프 180±25mm 및 공기량 4.5±1.5%) 및 압축강도, 그리고 건조수축 길이변화를 측정하였다. 실험을 통해 얻어진 결과 중 슬럼프, 공기량 및 압축강도는 [표 36]에 요약했고, [그림 52] 및 [그림 53]에 각각 콘크리트 유동성 및 압축강도를 그래프로 나타냈다.

[표 36] 콘크리트 성능 평가 결과

구분	슬럼프 (mm)	공기량 (%)	압축강도 (MPa)		
			3일	7일	28일
OPC100_X	160	4.4	22.9	29.6	38.9
OPC100_O	190	5.5	23.0	29.3	38.2
SP20_X	175	4.5	22.2	29.7	41.3
SP20_O	200	5.0	19.8	28.3	41.6
SP40_X	180	4.5	15.2	22.1	36.8
SP40_O	200	4.7	14.9	23.4	36.1
SC_X	160	3.5	21.7	31.2	38.3
SC_O	180	3.8	20.5	31.3	40.5
POS_X	175	4.1	19.2	29.1	39.2
POS_O	205	6.0	15.3	25.3	37.4
811_X	185	5.0	18.4	25.7	36.2
811_O	215	6.0	18.0	24.2	35.9
715_X	180	4.8	16.6	25.7	35.7
715_O	195	4.0	17.2	24.8	35.9



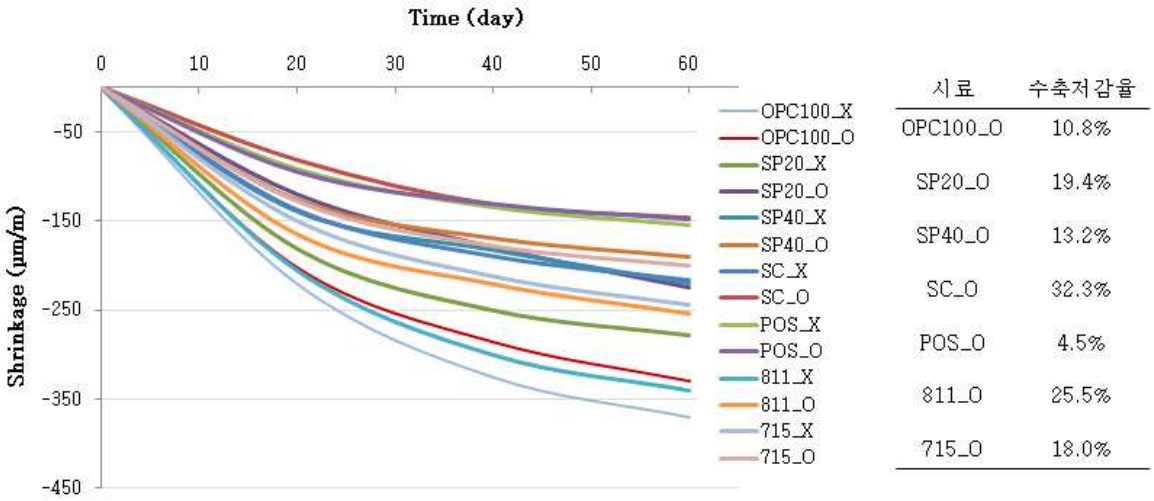
[그림 52] 콘크리트 유동성 결과



[그림 53] 콘크리트 압축강도 결과

[표 36] 및 [그림 52]에서 알 수 있듯이, 공기량에 있어서는 PCR3000의 혼입에 따라 슬럼프와 공기량이 증가하는 경향을 보였으나 모두 목표 범위 내에 부합했다. [그림 53]의 압축강도 결과에 있어서는 모든 시료가 28일 재령에서 설계기준강도인 24MPa를 크게 상회하였다. PCR3000 투입 유무에 따라서는 대체로 PCR3000 적용 콘크리트의 초기 강도가 상대적으로 낮게 평가되었으나 이는 공기량의 차이로 인해 발생하는 것으로서 콘크리트 배합 조성에 영향을 끼칠 만한 수준은 아니다.

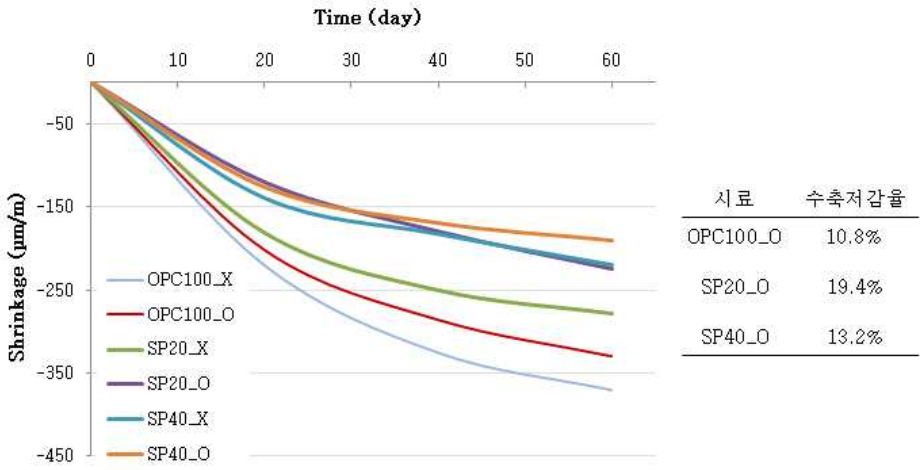
[그림 54]는 상기 배합별 건조수축 길이변화 측정 결과를 모두 나타낸 그래프이다. 배합별 성능의 차이는 있으나 PCR3000을 혼입한 배합이 그렇지 않은 배합에 비해 건조수축 길이 변화량이 저감되는 것으로 나타났다.



시료	수축저감율
OPC100_O	10.8%
SP20_O	19.4%
SP40_O	13.2%
SC_O	32.3%
POS_O	4.5%
811_O	25.5%
715_O	18.0%

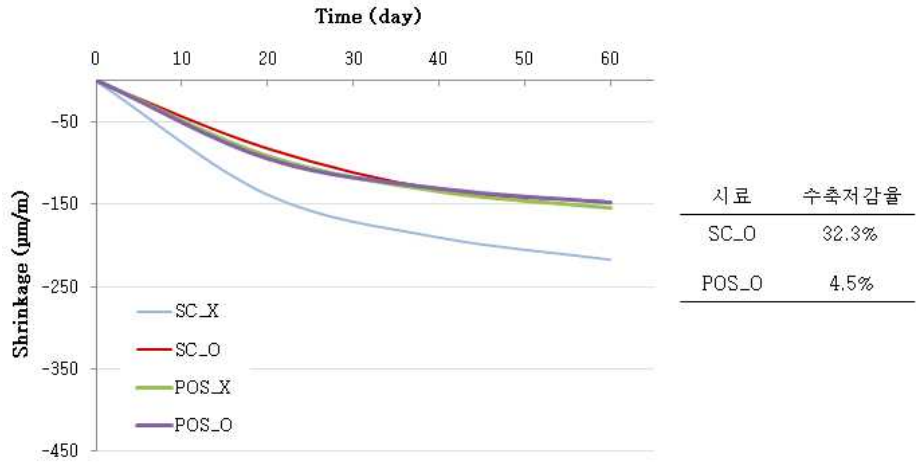
[그림 54] 건조수축 길이변화 측정 결과 종합

건조수축 길이변화 측정 결과를 실험 인자별로 [그림 55]부터 [그림 57]에 별도의 그래프로 나타냈다.



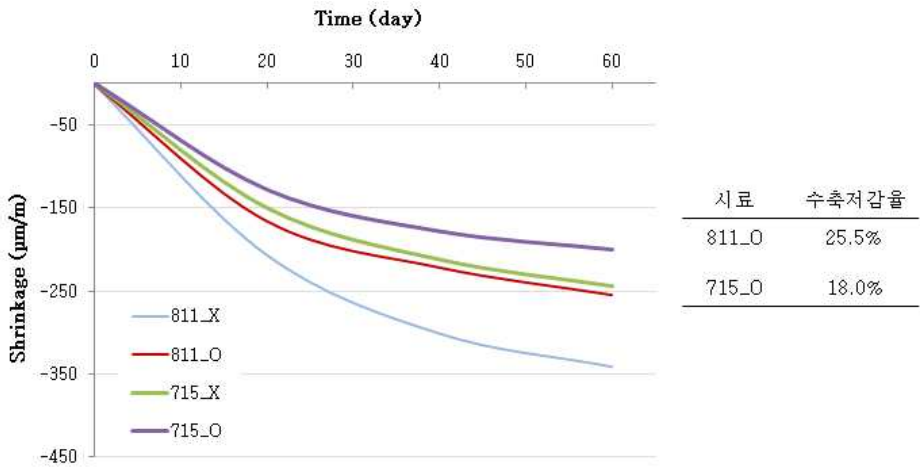
시료	수축저감율
OPC100_O	10.8%
SP20_O	19.4%
SP40_O	13.2%

[그림 55] 슬래그미분말 혼입에 따른 건조수축 길이변화 측정 결과



시료	수축저감율
SC_O	32.3%
POS_O	4.5%

[그림 56] 슬래그시멘트 및 PosMent 혼입에 따른 건조수축 길이변화 측정 결과



시료	수축저감율
811_O	25.5%
715_O	18.0%

[그림 57] 3성분계 콘크리트의 건조수축 길이변화 측정 결과

[그림 55]의 슬래그미분말 혼입 배합의 경우 혼입률이 증가할수록 수축저감율이 증가하는 것으로 나타났다. 슬래그미분말 0%, 20% 및 40%의 혼입률에 있어서 PCR3000 적용 배합은 미적용 배합 대비 수축저감율이 각각 10.8%, 19.4% 및 13.2%로 나타나 슬래그미분말 혼입 배합에 대해서 PCR3000의 수축저감률이 10% 이상의 성능이 발휘됨을 알 수 있었다. [그림 56]의

슬래그시멘트 배합의 경우, PCR3000의 적용에 따른 수축저감율이 32.3%로서 큰 폭의 성능 향상을 보였다. 반면 PosMent 배합의 경우에는 PCR3000의 적용에 따른 수축저감율은 4.5% 수준으로 낮게 평가되었다. 이는 PosMent의 조기강도 증진을 위해 첨가된 자극제등이 영향을 끼쳤기 때문인 것으로 판단된다. 끝으로 [그림 57]의 3성분계 콘크리트에 PCR3000을 적용한 배합인 811 0 및 715 0의 수축저감률은 각각 25.5% 및 18.0%로 나타났다.

길이변화 측정 시험 결과를 통해 사용 결합재에 관계없이 PCR3000을 적용할 경우, 적용된 콘크리트의 수축저감 성능이 대체로 우수하게 나타남을 확인하였다. 즉, 결합재의 종류에 따라 크게는 35% 수준의 수축저감률을 보이기도 하였다.

나) Mock-up 평가

(1) Mock-up 평가 부재 내역

앞서 실시한 평가를 통해 본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000의 수축저감 성능의 우수성을 확인할 수 있었다. 이에 Mock-up 평가를 통해 실제 레미콘 생산 및 현장 적용 시 발생할 수 있는 문제점 및 현장 적용성에 대한 평가를 선행하고자 하였다. 이를 위한 Mock up 부재의 개요는 [표 37]과 같다.

[표 37] Mock-up 평가 부재 내역

구분	내역
대상 부재	경기 평택 창고 공사 현장 바닥 슬라브
타설 물량	약 260㎥
적용 방법	PCR3000 적용 부위와 일반 부위 동시 타설 후 비교 평가 실시

(2) Mock-up 평가

현장 적용성 평가를 위한 Mock up 부재의 콘크리트 규격 및 배합설계는 [표 38]과 같다. 이는 상기 검증 실험에 적용된 배합과 달리 현장 여건에 따라 설정된 배합이다.

[표 34] Mock-up 평가 배합

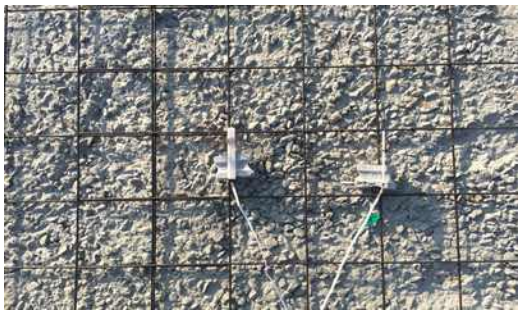
규격	시료	W/B (%)	S/a (%)	단위중량 (kg/m³)					AD (B×%)	
				W	C	FA	S	G	PCR3000	PCA
25-27-180	일반	38.2	45.8	151	336	59	798	974		0.9
	PCR 3000								0.9	-

※ W : 물, C : 시멘트, FA : 플라이애시, S : 잔골재, G : 굵은골재, AD : 화학 혼화제

Mock up 평가 배합의 콘크리트 유동성의 목표는 슬럼프 180±25㎜ 및 공기량 4.5±1.5%이다. [그림 58]은 Mock-up 부재 타설 과정을 보여준다.



(a) 거푸집 설치 전경



(b) 스트레인 게이지 설치



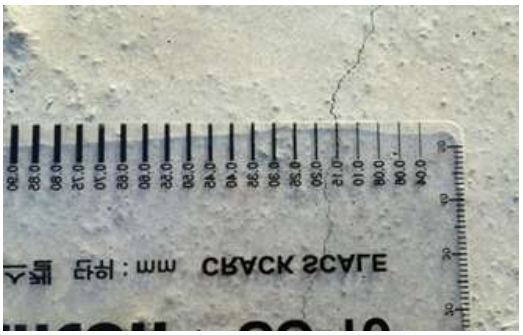
(c) 굳지않은 콘크리트 성능 평가



(d) 콘크리트 타설



(e) Mock-up 부재 제작 완료



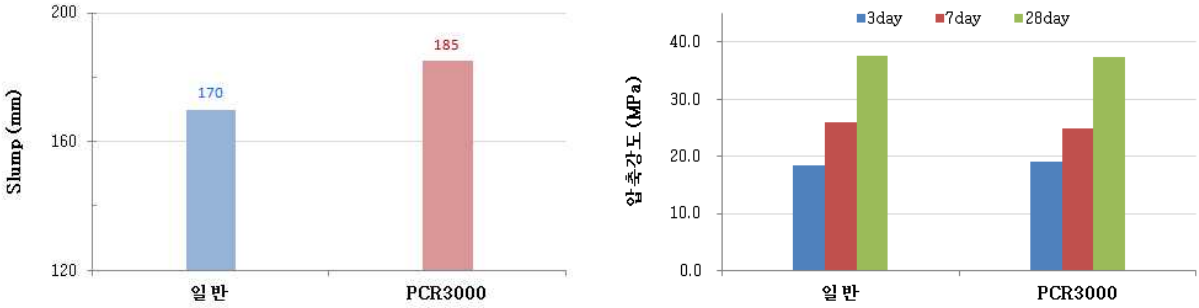
(f) 균열길이 및 폭 측정 전경

[그림 58] Mock-up 부재 제작 및 측정 전경

상기 Mock-up 타설 콘크리트의 유동성 및 압축강도 결과를 [표 35] 및 [그림 59]에 각각 나타냈다.

[표 35] 콘크리트 성능 평가 결과

구분	슬럼프 (㎜)	공기량 (%)	압축강도 (MPa)		
			3일	7일	28일
일반	170	4.6	18.4	26.0	37.5
PCR3000	185	5.3	19.0	24.9	37.4



(a) 콘크리트 유동성 (b) 압축강도

[그림 59] 콘크리트 유동성 및 압축강도

[표 35] 및 [그림 59]의 (a)에서 알 수 있듯이, 슬럼프 및 공기량 모두 목표범위를 만족하는 결과를 나타냈다. [그림 59]의 (b)의 재령별 압축강도 측정 결과로부터 알 수 있듯이, 재령 7일에서의 강도발현율은 설계기준강도의 88.1~96.2% 수준이고, 재령 28일에서도 설계기준강도를 상회하는 강도발현율을 보였다. 그리고 PCR3000 혼입 여부에 따른 압축강도는 동등한 수준으로 나타났다.

Mock-up 부재의 균열 상태는 소성수축균열 및 건조수축균열에 대한 육안 평가를 수행했다. 균열에 대한 육안 평가는 바닥판의 중심부 3m x 3m 영역에 발생한 균열의 길이 및 폭을 측정하는 것이다. 먼저 소성수축균열을 평가했는데, 재령 3일 이전에 발생한 균열을 소성수축균열로 구분하여 측정하였다. [표 36]은 이렇게 평가된 소성수축균열 측정 결과이고, [그림 60]은 소성수축균열의 양상을 보여준다.

[표 36] 소성수축균열 평가 결과

구분	균열길이 (mm)	균열폭 (mm)
일반 부위	1,050	0.15
PCR3000 적용 부위	760	0.10



(a) 일반 부위 (b) PCR3000 적용 부위

[그림 60] 소성수축균열 양상

[표 36]으로부터 알 수 있듯이, PCR3000 적용을 통해 소성수축에 의한 균열길이 및 균열폭 저감율은 각각 27.6% 및 33.3% 수준으로 우수한 결과를 보였다.

건조수축균열도 같은 방법으로 육안 평가에 의해 측정하였다. 1개월 이후에 발생한 균

열 중 소성수축균열을 제외한 나머지 균열을 건조수축균열로 구분하였다. 이와 같이 측정된 결과를 [표 37]에 나타냈고, [그림 61]은 건조수축균열의 양상을 보여준다.

[표 37] 건조수축균열 평가 결과

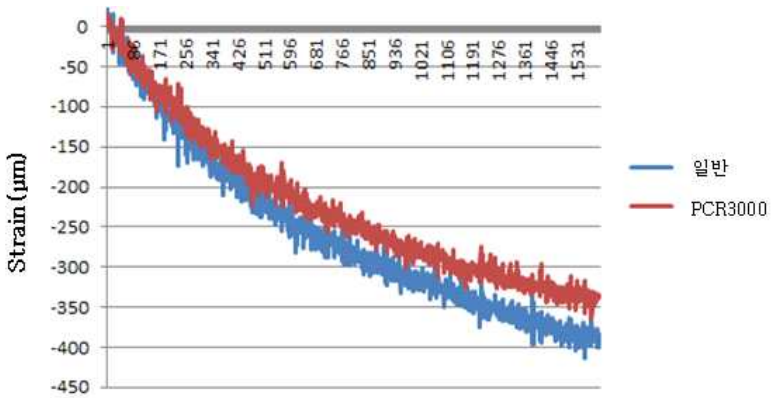
구분	균열길이 (mm)	균열폭 (mm)
일반 부위	3.530	0.25
PCR3000 적용 부위	2.270	0.15



(a) 일반 부위 (b) PCR3000 적용 부위

[그림 61] 건조수축균열 양상

[표 37]로부터 알 수 있듯이, PCR3000 적용을 통해 건조수축에 의한 균열길이 및 균열폭 저감율은 각각 35.7% 및 40.0% 수준으로 시간이 경과함에 따라 그 차이가 더욱 벌어지는 경향을 보여주었다. [그림 62]은 현장 배립된 스트레인 게이지에 의해 2개월 이상 측정된 건조수축 길이변화 결과이다.



[그림 62] 건조수축 길이변화 측정 결과

상기된 소성수축균열 및 건조수축균열의 육안 평가 결과 PCR3000 적용 부위의 균열 양상은 일반 부위 대비 상당히 양호하며 또한 시간 경과에 따라 그 차이가 더욱 명확히 드러남을 확인할 수 있었다. 이는 [그림 62]과 같이 현장 배립된 스트레인 게이지에 의해 2개월 이상 측정된 건조수축 길이변화 결과로부터 실명될 수 있다.

본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000이 적용된 Mock-up 평가를 통해 PCR3000은 우수한 수축저감 성능에 의한 균열저감 효과가 있음이 확인되었다. 따라서 본 Mock up 부재와

유사한 현장 분야로의 적용성 역시 확인되었다고 볼 수 있다.

다) 소결

(1) 본 연구의 복합기능 균열지감제인 PCR3000의 현장 적용에 대한 사전 검토를 수행했다. 주차장 바닥의 다양성에 대응할 수 있는 기반을 갖추고자 단일 규격의 다양한 콘크리트 배합을 평가한 결과 PCR3000을 적용함으로써 동등 수준의 콘크리트 유동성 및 압축강도에 대해 사용 결합재에 관계없이 콘크리트의 수축지감 성능이 대체로 우수하게 나타남을 확인하였다. 즉, 결합재의 종류에 따라 크게는 35% 수준이 수축지감률을 보였다.

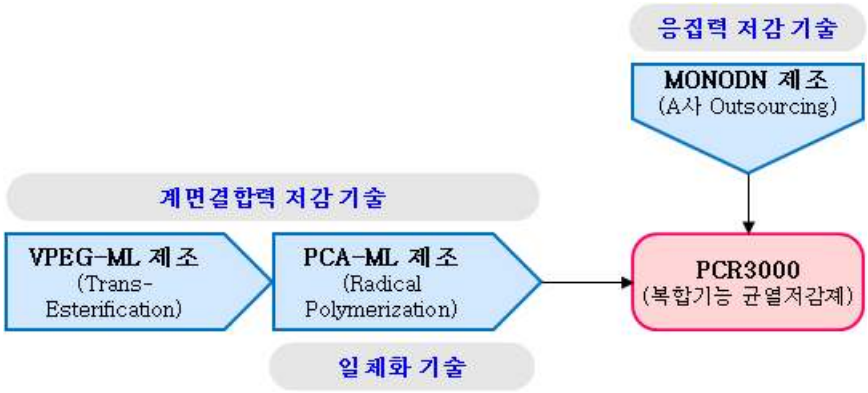
(2) 경기 평택 창고 공사 현장 바닥 슬라브에 Mock-up 타설을 수행하였다. 육안 평가에 의해 소성수축균열 및 건조수축균열을 측정한 결과 PCR3000 적용 부위의 균열 양상은 일반 부위 대비 상당히 양호하며 또한 시간 경과에 따라 그 차이가 더욱 명확히 드러남을 확인할 수 있었다. 본 Mock-up 평가를 통해 PCR3000은 우수한 수축지감 성능에 의한 균열지감 효과가 있음이 확인되었다. 따라서 본 Mock up 부재와 유사한 현장 분야로의 적용성 역시 확인되었다고 볼 수 있다.

3. 결론

본 사업화 과제에 있어서 1차년도에 수행해야 할 연구 내용은, 첫째 본격적인 사업화 실현이 가능한 보급형 복합기능 균열지감제 (PCR3000) 제품기술을 개발하고, 둘째 Pilot 검증을 통해 양산성을 확보하며, 셋째 양산성을 갖춘 Pilot 제품을 Mock-up 부재에 적용 및 성능 검증을 통해 현장 적용성을 확보하는 것이다. 결론적으로 1차년도 연구 수행을 통해 상기 목적을 모두 달성하여 2차년도에 계획된 현장 적용을 통한 사업화에 충분한 기반을 확보하였다. 상기 세 가지 항목에 대해 다음과 같이 결론을 요약하고자 한다.

가. 보급형 복합기능 균열저감제 (PCR3000) 제품기술

본 과제의 핵심기술인 보급형 복합기능 균열지감제 제품기술은 결론적으로 [그림 C-1]과 같은 연관 기술로부터 확립될 수 있었다.



[그림 C-1] 복합기능 균열저감제 제품 기술 연관도

PCR3000 제품의 핵심기술은 복합기능 균열저감제 기술이며 이를 구현하기 위한 기반기술은 계면결합력 저감 기술과 응집력 저감 기술이다. 계면결합력 저감 기술은 두 가지 합성기술 (트랜스에스테르화 합성 기술 및 라디칼 중합 기술)을 통해 구현될 수 있는데 이 부분의 핵심은 두 기능성 재료의 일체화 기술이다. 한편 응집력 저감 기술은 물의 수소결합을 효율적으로 파괴시키기 위한 컨셉을 갖는 기술로서 기존 기술과 달리 분자분포를 부여한 부분이 핵심이다. 특히 A사와의 긴밀한 협력을 통한 원재료 (MONODN) 국산화는 보급형 제품 실현에 기여한 바가 큰다.

나. 복합기능 균열저감제 (PCR3000) Pilot 검증을 통한 양산성 확보

본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000의 양산성 확보를 위한 Pilot 검증은 제조공정 단계별 각각 200kg 규모로 정해진 차수만큼 반복 수행됐다. 200kg의 Pilot 규모는 실험실 규모의 100배에 해당하므로 화학 혼화제와 같은 제품의 양산 규모에 대한 충분한 모사가 가능한 규모이다. PCR3000 제조의 첫 공정인 VPEG-ML의 합성공정에 대해서는 5회, 그리고 두 번째 공정인 PCA-ML의 중합공정에 대해서는 7회 반복 검증을 수행함으로써 양산 가능성을 확인했다. 끝으로 A사로부터 공급받은 MONODN과 PCA-ML의 일액형화 공정인 PCR3000 제조공정에 대한 Pilot 시험은 3회에 걸쳐 반복 평가함으로써 양산성을 확인했다. 이 때 MONODN은 A사에서 5톤 규모로 제조된 제품을 적용했다.

결론적으로 본 연구의 보급형 복합기능 균열저감제의 Pilot 시험을 통해 얻어진 성공적인 검증은 모든 공정에서의 양산성이 유효함을 보여주었다.

다. 복합기능 균열저감제 (PCR3000)의 Mock-up 평가를 통한 현장 적용성 확보

사업화를 목적으로 한 본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000의 현장 적용에 대한 사전 검토를 위해 Mock-up 부재 선정 및 평가를 수행했다. PCR3000이 주요하게 적용될 수 있는 분야 및 그 배합 설정과 이를 모사한 Mock-up 평가에 있어서는 참여기관인 두산건설, 롯데건설 그리고 POSCO건설 각각의 주도하에 주관기관과의 긴밀한 협업이 주효했다. [표 C-1]에 각 참여 건설사별 수행된 Mock-up 평가 현장을 나타냈다.

[표 C-1] 참여기관별 Mock-up 평가 현장

참여기관	Mock-up 평가 현장 (당해년도)	현장적용 분야 (사업화)
두산건설	서울 월계4구역 두산위브 현장, 지하주차장	주거용 건축물 기초 및 슬라브 (Slab)
롯데건설	부산 사직1구역 주택재개발 정비사업 신축 현장, 지하주차장	대형 마트 또는 아웃렛 매장 바닥
POSCO건설	평택 창고공사 현장, 바닥	플랜트 구조물 바닥

두산건설은 서울 월계4구역 두산위브현장 지하주차장에 Mock-up 타설을 수행하였다. PCR3000 적용 부재에 대해 실내 측정된 수축저감율은 기준 대비 약 19.0% 수준이었고, 현장계측을 통한 건조수축 길이변화 측정 결과 환경 조건의 변화에 따라 수축/팽창의 변동폭이 PCR3000 혼입 배합의 경우 일반 배합 대비 현저히 적었다. 결론적인 판단은 PCR3000 적용 시 재료/환경적인 영향으로 인해 발생되는 건조수축 길이변화량을 현저히 감소시킴으로써 구조물의 내구성 개선이 가능할 것이라는 점이다.

롯데건설은 부산 사직1구역 주택재개발 정비사업 신축현장 지하주차장에 Mock-up 타설을 수행했고, 재령 3개월 후 일반 부위에서는 눈에 띄게 보이는 다수의 균열들이 PCR3000의 적용 부위에서는 전혀 관찰할 수 없는 결과를 얻었다. 결론적으로 PCR3000의 우수한 균열저감 성능을 육안으로 확인할 수 있었다.

POSCO건설은 경기 평택 창고 공사 현장 바닥 슬라브에 Mock-up 타설을 수행하였다. 육안 평가에 의해 소성수축균열 및 건조수축균열을 측정한 결과 PCR3000 적용 부위의 균열 양상은 일반 부위 대비 상당히 양호하며 또한 시간 경과에 따라 그 차이가 더욱 명확히 드러남을 확인할 수 있었다. 즉, PCR3000의 우수한 수축저감 성능에 의한 균열저감 효과를 확인함으로써 결론적으로 본 Mock up 부재와 유사한 현장 분야로의 적용성을 확보했다.

참여 건설사별 Mock-up 부재를 통한 현장 적용성 검증을 수행한 결과, PCR3000은 균열저감 효과를 필요로 하는 사업화 현장에 적합한 제품이라는 결론을 내릴 수 있었다.

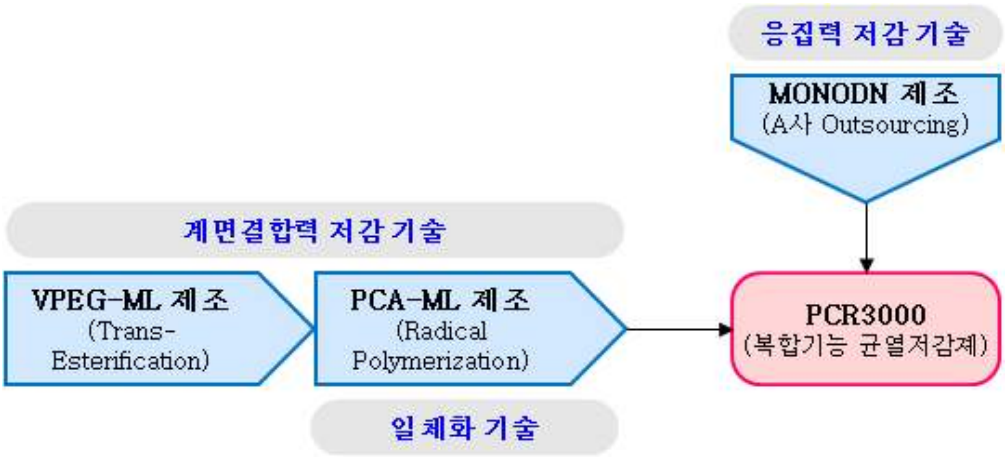
2. 2차년도 연구 수행 내용 및 성과

복합기능 균열저감제 (PCR3000)의 1차년도 성과는 제품 개발 및 양산성 검증 (200kg Pilot)과 Mock up 시험을 통한 성능 검증으로 개발 제품의 사업화를 위한 가장 기본적인 사항을 짚은 셈이다. 본 2차년도에서는 본 개발 제품의 사업화를 위한 더 심도있는 개발 과정을 수행하였다. 첫째, 당사의 생산시스템을 활용하여 6톤과 30톤 규모의 시험생산을 진행하여 양산 안정성을 검증하고 생산메뉴얼과 생산지시서 등의 생산기초자료를 확보하였고 둘째, 현장 적용 시 참고자료로 활용하기 위하여 OPC 100%의 일반강도배합에서 본 개발 제품의 핵심 성능인 수축저감율과 실제 균열과의 상관관계를 평가하였다. 셋째, 공동연구기관 (두산건설, 롯데건설, 포스코건설)등과 현장적용시험을 통해 현장적용성을 평가하고 개발제품 적용 시 발생할 수 있는 문제들을 미리 검토코자하였다. 또한 현장적용실적을 쌓아 사업화에 필요한 자료와 녹색인증자료로 활용하고자 하였다.

가. 복합기능 균열저감제 (PCR3000)의 양산성 검증 (6, 30톤 규모 시생산)

1) 개요

1차년도 Pilot (200kg) 수준의 양산성 검증이 완료되었다. 따라서 본 절에서는 Pilot 규모의 30, 150배 수준의 규모인 각 6톤과 30톤의 실제 양산 규모에서 PCR3000의 양산성을 확인하고자 한다. Pilot 규모에서의 PCR3000 제조공정인 [그림 63]을 따랐다.



[그림 63] 복합기능 균열저감제 (PCR3000) 제조공정

[그림 63]의 제조공정에 따라 단계별 양산성을 확인하였으며 [그림 64]와 같이 양산성 검증을 위한 설비는 GL반응기 (Glass 반응기, 6톤)과 SUS반응기 (Stainless steel 반응기, 30톤) 설비를 이용하였다.



6톤 GL반응기



30톤 SUS반응기

[그림 64] 6톤, 30톤 규모의 양산 설비

2) VPEG-MI 제조공정의 양산성 검증

VPEG-MI은 PCA용 측쇄 단량체인 VPEG의 말단과 MI의 트랜스에스테르화 반응을 통해 지방산을 VPEG에 일체화시킨 본 과제의 핵심 물질이다. Pilot 규모에서 확보된 반응 조건인 [표 38]을 적용하여 6톤, 30톤 규모로 양산성을 확인하는 것이 본 실의 목적이다.

[표 38] VPEG과 MI의 트랜스에스테르화 반응 조건 및 물성

반응온도	반응시간	중합금지제	촉매 및 사용량	반응 전환율	불포화기 잔존율
120℃	10시간	1,000ppm	Cat-LOH 1.0wt%	89%	100%

본 합성 공정의 양산 안정성 검증을 위해 6톤 규모로 3회, 15톤 규모로 3회 실시하였다. 30톤 규모가 아닌 15톤 규모로 양산성을 검증한 이유는 연속공정으로 중합공정을 진행하기 위함이며 이때 필요 측쇄단량체 양이 15톤이기 때문이다. 각 시료에 대해 H-NMR 분석을 통해 반응 전환율 및 불포화기 잔존율을 계산하여 그 결과를 [표 39]에 나타냈다.

[표 39] VPEG과 MI의 트랜스에스테르화 반응 조건 및 물성

구분	양산 차수						Pilot 규모		Pilot 규모
	6톤 규모			15톤 규모					
	1차	2차	3차	4차	5차	6차	평균	표준편차	
반응 전환율	89.6%	90.1%	90.2%	90.7%	90.3%	90.4%	90.2%	0.33%	89.0%
불포화기 잔존율	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0%	100%

[표 39]와 같이 시험양산 결과 200kg 규모의 VPEG-MI의 트랜스에스테르화 반응보다 소폭 (약 1%) 반응 전환율이 상승하였으나 거의 동등하다 하겠다. 불포화기 잔존율은 동일하였

다. 이는 일반 PCA 화학 혼화제 제품 개발 시에도 이와 유사한 합성 반응 (에스테르 반응)이 개입되는데 합성 규모가 증가하여도 변경 없이 적용되는 사례가 많은데 실험실 합성 조건이 양산 조건을 보사하는 방향으로 다년간 변경 실정되어진 결과로 판단된다. 이로써 VPEG-ML의 합성공정은 양산성이 있는 것으로 판단할 수 있으며, 본 시험양산을 통해 PCA-ML 제조공정(Radical Polymerization)에 투입될 Pilot 규모의 핵심 물질이 확보되었다.

3) PCA-ML 제조공정의 양산성 검증

PCA-ML은 지방산 도입 측쇄 단량체인 VPEG-ML을 적용하여 중합함으로써 계면결합력 저감제에 콘크리트 유동성 발현 기능을 일체화시킨 수축저감제이다. 실험실 및 파일럿 규모에서 확보된 반응 조건인 [표 40]을 적용하여 6톤, 30톤 규모로 양산성을 확인하는 것이 본 실의 목적이다.

[표 40] VPEG ML 적용 PCA ML 중합 조건

단량체 성분비 (mol%)			반응온도	반응시간	Initiator	CTA
VPEG-ML	AM	BM				
23.9	66.9	9.2	85℃	10시간	0.35wt%	0.42wt%

본 중합 공정의 양산 안정성 검증을 위해 6톤과 30톤 규모의 중합을 각각 3회 실시하였다. 6회에 걸쳐 확보된 VPEG-ML 시험양산 물량을 대부분 소진하는 차원에서 PCA-ML의 양산성을 검증하기 위함이다. PCA-ML은 기본적으로 콘크리트 유동성을 발현시키는 화학 혼화제이므로 [표 40]의 조건으로 중합된 양산 시료의 유효성은 Pilot 규모로 중합된 시료와의 콘크리트 유동성 차이를 비교하는 것이 적합하다. 콘크리트 유동성 차이 비교 실험은 실험실 규모에서 적용했던 콘크리트 배합표인 [표 41]을 따랐다.

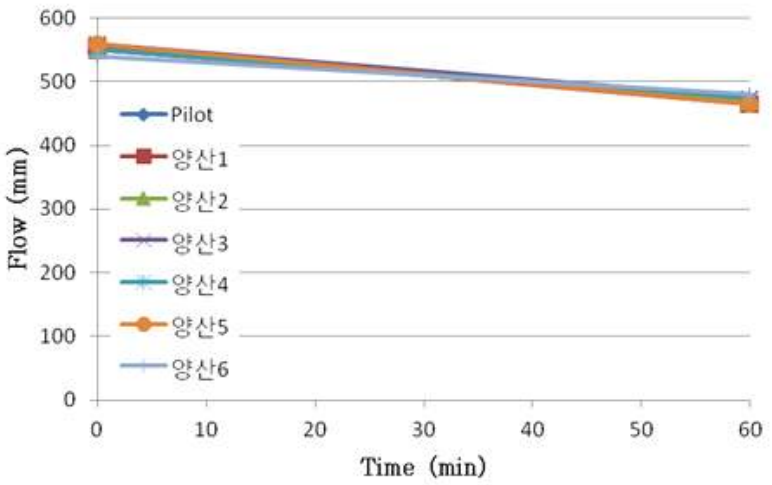
[표 41] 콘크리트 배합표 (25-40-500)

W/C	S/A	시멘트 (kg/m³)	잔골재 (kg/m³)	굵은골재 (kg/m³)	물 (kg/m³)	혼화제 (C×%)
44%	41%	400	761	1,092	176	0.9

6회 실시되어 확보된 시험양산 중합 시료에 대해 [표 41]의 콘크리트 배합표에 따라 유동성 평가를 수행한 결과를 [표 42]에 요약했으며 이를 [그림 65]에 그래프로 나타냈다.

[표 42] PCA-ML 양산 시료의 콘크리트 유동성 평가 결과

시료 구분			Slump/Flow (mm)		유동성능 (기준 : Lab)	
			초기	60분	분산력	유지력
Pilot			550	470	100%	100%
양산	6톤	1차	555	465	101%	98%
		2차	550	470	98%	100%
		3차	560	475	100%	100%
	30톤	4차	550	475	97%	103%
		5차	560	465	100%	100%
		6차	540	480	102%	96%
	평균		552	471	100%	99%
	표준편차		6.5	5.2	1.1%	2.1%



[그림 65] PCA-ML 양산 시료의 콘크리트 유동성

[표 42] 및 [그림 65]에서 알 수 있듯이, 6회에 걸친 시험양산 결과 양산 규모 (6톤, 30톤)의 PCA ML의 중합 반응 역시 실험실 또는 Pilot과 동일한 조건에서 콘크리트 유동성능이 재현되었다. 즉, 6개 시료에 대한 유동성능의 평균은 실험실 시료 대비 분산력 100% 및 유지력 99% 수준으로 나타났으며, 표준편차는 분산력과 유지력 모두 1~2% 수준으로 나타나 실험실 시료와 거의 동일한 결과를 보여주었다. 결과적으로 VPEG-ML을 적용하여 PCA-ML을 중합하는 공정 역시 양산에 문제가 없는 것으로 판단된다.

시험양산을 통해 제조된 PCA ML은 계면결합력 저감제이며, 응집력 저하제인 MONOLN과의 일액형화에 의해 PCR3000이 완성된다. 따라서 시험양산된 PCA ML과 A사로부터 제공받은 MONOLN을 일액형화함으로써 PCR3000을 제조하는 공정에 대한 양산성을 다음 절에서 검증하고자 한다.

4) PCR3000 제조공정의 양산성 검증

PCR3000은 본 연구가 목표로 하는 복합기능 균열지감제이며 이는 계면결합력 지감제인 PCA-M과 응집력 지감제인 MONOM의 일액형화 공정에 따라 제조되는 제품이다. 계면결합력 지감제인 PCA-M은 당사에서 상기 양산 공정을 통해 확보되었고, 응집력 지하제인 MONOM은 A사로부터 양산설비를 통해 제조된 것을 제공받았다.

PCR3000의 제조공정에 대한 양산성 검증을 위해 실험실 및 Pilot 규모와 동일한 일액형화 조건으로 3회에 걸쳐 시험양산을 실시하였다. 즉, PCA-M과 MONOM의 성분비는 30:70으로 하여 반응기에 투입한 후, 균일성 확보를 위해 상온에서 45분 동안 교반함으로써 일액형 시료를 제조하였다. 이에 대해 [표 43]의 콘크리트 배합표에 따라 콘크리트 유동성, 압축강도 및 수축률을 평가하고자 하였다. PCR3000의 양산 시료를 Pilot 시료와 비교하는데 있어 기준 시료인 PCA는 WRF-500을 바인더 대비 0.7% 사용했고, Control은 WRF-500 0.7%에 G사 수축저감제 1.0%를 함께 사용한 시료이다. PCR3000의 Pilot 및 실험실 시료는 각각 1.0% 사용했다.

[표 43] 콘크리트 배합표 (25-24-150)

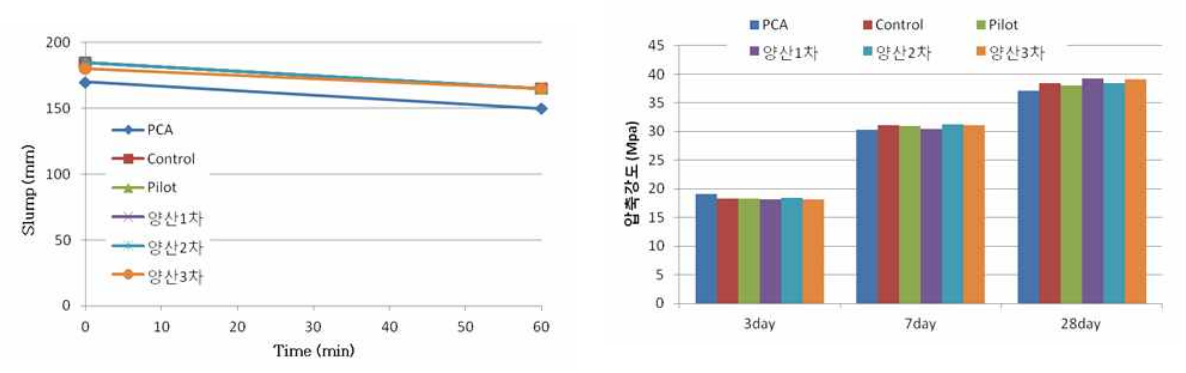
W/B	S/A	Binder (kg/m³)			잔골재 (kg/m³)		굵은골재 (kg/m³)	물 (kg/m³)	혼화제 (C×%)
		시멘트	S/P	F/A	미사	세사			
51.4%	48%	245	70	35	501	334	915	180	PCA-Control -Pilot/양산

※ 시료 및 사용량
PCA : WRF-500 0.7%, Control : WRF-500 0.7% + G사 수축저감제 1.0%,
Lab 및 Pilot-1,2,3 (PCR3000) : 각각 1.0%

[표 43]에 따라 콘크리트를 제조하여 유동성 (KS F 2402), 공기량 (KS F 2421), 압축강도 (KS F 2403, 2405) 및 길이변화 시험을 통한 수축률 (KS F 2424)을 평가하였다. 수축률은 [그림 15]에서 설명한 바와 같이 길이변화 몰드 (Mold)에 스트레인 게이지 (Strain Gauge)를 매립하고, 데이터로거 (Data Logger)에 연결하여 항온항습실에서 양생하며 길이변화를 측정하여 평가했다. 콘크리트 유동성 및 압축강도 실험 결과를 [표 44]에 요약하였고 이를 [그림 66]에 그래프로 나타냈다. 또한 수축률 시험 결과는 [그림 67]에 나타냈다.

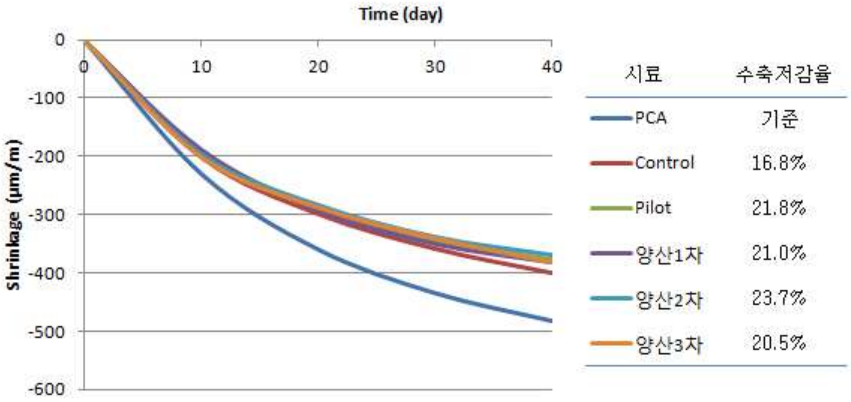
[표 44] 콘크리트 유동성 및 압축강도 결과

시료명(※사용량)		Slump (mm)		공기량 (%)	재령별 압축강도 (MPa)		
		초기	60분		3일	7일	28일
PCA		170	150	3.9	19.1	30.3	37.1
Control		185	165	4.3	18.3	31.1	38.5
Pilot		185	165	3.8	18.3	31.0	38.1
양산	1차	185	165	3.7	18.2	30.4	39.3
	2차	185	165	4.1	18.4	31.2	38.4
	3차	180	165	4.0	18.2	31.1	39.1



(a) 콘크리트 유동성 (b) 압축강도

[그림 66] 콘크리트 유동성 및 압축강도



[그림 67] 수축률 시험 결과

[그림 66] (a)의 콘크리트 유동성에 있어서 Pilot품과 양산품의 Slump값은 동등한 수준으로 나타났다. 또한 실험실과 Pilot 규모의 실험에서와 같이 PCA 대비 계면활성제의 분산기여 작용으로 인해 Control 및 PCR3000의 Slump값이 여전히 20㎜ 수준 우위에 있음을 확인했다. [그림 66] (b)의 압축강도에 있어서도 Pilot과 양산 시료는 모두 동등 수준을 보였을 뿐만 아니라 PCA 및 Control과도 동등 수준을 보였다. [그림 34]의 수축률 결과에서도 Pilot 및 양산 시료는 PCA 대비 23.7%에서 21.0% 수준의 수축저감 성능을 보여 모두 동등 수준임이 확인되었다. PCA 대비 16.8%의 수축저감 성능을 보인 Control에 대해 29% 이상의 성능 향상을 보여 Pilot 규모의 실험 결과보다 다소 상향된 경향을 보였다. 결과적으로 VPEG 4L과 MONOL을 일액화함으로써 본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000을 제조하는데 있어 양산성이 확보되었음을 확인하였다. 실제로 본 공정은 반응이 개입되지 않고 블렌딩 (Blending)을 통해 일액화하는 공정이므로 Scale-up에 있어서 큰 무리는 없었다.

지금까지 복합기능 균열저감제 (PCR3000) 개발에 있어 실험실 규모에서 설정된 제조공정을 부분적으로 Pilot 대비 30배인 6톤 규모와 150배 규모인 30톤 수준의 양산 검증을 수행함으로써 양산성을 입증하였다.

5) 소결

가) 실험실 및 Pilot 규모에서 확립된 본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000 제조공정의 양산성을 검증하는데 있어 첫 번째 단계인 VPEG-M.의 합성공정이다. 이를 위해 6톤과 15톤 규모의 시험양산을 각 3회 수행하였고, Pilot 규모와 동일한 수준의 반응 전환율 및 불포화기 잔존율을 얻었다. 즉 양산 시료의 평균 반응 전환율은 90.2%이고 평균 불포화기 잔존율은 100%로 Lab (각각 89% 및 100%)과 동일하였다. 이로써 VPEG-M.의 합성공정의 양산성이 입증되었다.

나) PCR3000 제조를 위한 두 번째 제조공정은 PCA-M. 중합공정으로서 양산성 검증을 위해 6톤과 30톤 규모의 시험양산을 6회 수행하여 확보된 시료에 대해 콘크리트 유동성을 Pilot과 비교 검증하였다. 결과적으로 6개의 양산 시료 모두 Pilot과 동등한 콘크리트 유동성을 보였다. 즉 유동성능의 평균은 실험실 시료 대비 분산력 100% 및 유지력 99% 수준으로 나타났으며, 표준편차는 분산력과 유지력 각각 1%와 2% 수준으로 나타나 실험실 시료와 거의 동일하였다. 결과적으로 VPEG-M.을 적용하여 PCA-M.을 중합하는 공정 역시 양산성이 있는 것으로 나타났다.

다) 본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000 제조는 PCA-M.과 MONOIN의 일액형화 공정에 의한다. 일액형화 공정의 양산성 검증을 위해 필요한 MONOIN은 A사로부터 양산 규모로 제조된 것을 제공받았다. Pilot 규모와 동일한 제조조건에 따라 30톤 규모의 시험양산을 3회 수행하였다. 확보된 양산 시료에 대해 콘크리트 유동성, 압축강도 및 수축률을 평가한 결과 Pilot과 동등한 수준의 결과를 확인할 수 있었다. 특히 수축률 결과에 있어 Pilot 및 양산 시료는 PCA 대비 21~24% 수준의 수축저감 성능을 보여 모두 동등 수준임이 확인되었다. PCA 대비 16.9%의 수축저감 성능을 보인 Control에 대해 29%의 성능 향상을 보여 실험실 규모의 실험 결과와 유사한 경향을 보였다. 결과적으로 VPEG-M.과 MONOIN을 일액화함으로써 본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000을 제조하는데 있어 양산성이 확보되었음을 확인하였다.

나. 복합기능 균열저감제 (PCR3000)의 수축율과 균열과의 관계 연구

1) 개요

1차년도 연구과제를 진행하는 동안 개발제품의 Formulation이나 함량에 따른 수축저감율을 다양한 콘크리트 배합에 따라 평가하였다. 하지만 수축저감율은 콘크리트의 균열 발생 가능성을 줄여 줄 수 있다는 점을 제외하면 균열을 발생시키는 수축율에 대한 정보는 얻을 수 없었다. 본 실에서 특정 콘크리트 배합에서 몇 가지 변수에 따라 콘크리트 수축율과 균열이 어떤 관계를 갖는지를 평가하였다.

2) 실험계획 및 방법

본 실의 실험계획은 [표 45]와 같다. 배합 사항으로는 OPC 100%의 24, 30MPa 강도 배합으로 실시하였다. 실제 현장에서 OPC 100% 배합은 사용하지 않으나 가장 기본적인 배합으로 결과를 도출하여 여러 응용된 콘크리트 배합의 결과를 예측할 수 있기 때문이다. 균열저감제인 PCR3000 사용량은 4수준 (0, 1.0, 1.5, 2.0%)으로 나누어 사용량 별 수축율과 균열발생 시기와 균열폭 등을 평가하고자하였다. 굳지않은 콘크리트 성능 (초기분산력, 공기량)과 굳은 콘크리트 성능 (압축강도)을 별도로 측정하였다. 이를 위한 콘크리트 배합은 [표 46]과 같다.

[표 45] 실험계획

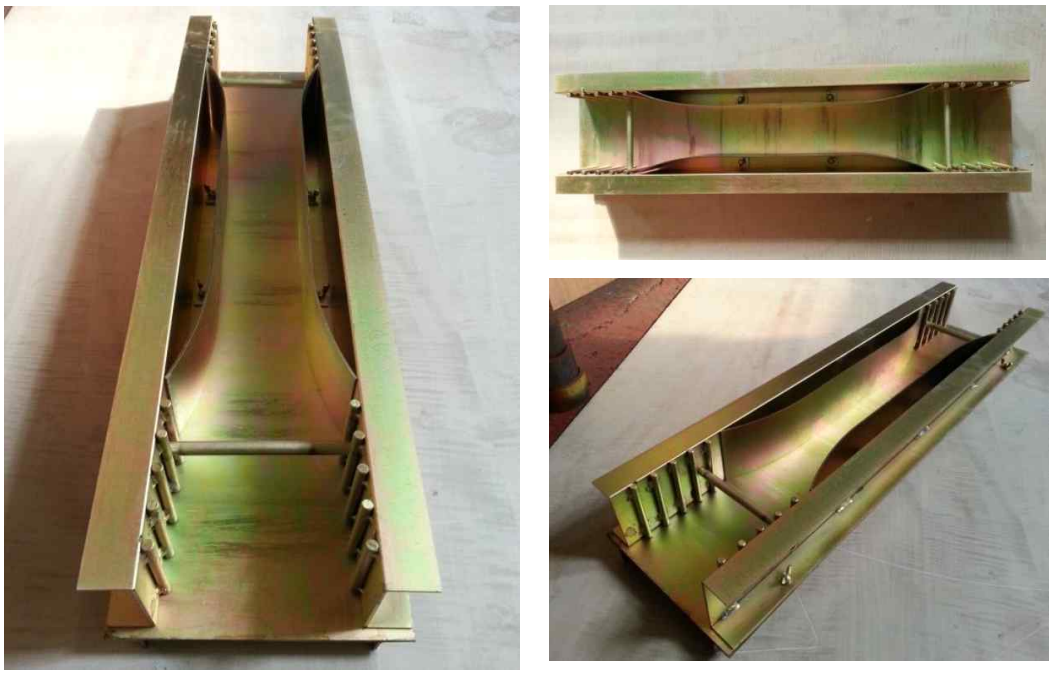
구분	항목	수준
배합	콘크리트 배합	① 25-24-150 ② 25-30-150
	PCR3000 사용량	① 사용량 0% ② 사용량 1.0% ③ 사용량 1.5% ④ 사용량 2.0%
측정항목	굳지 않은 콘크리트	① 초기분산력 ② 공기량 (%)
	굳은 콘크리트	① 콘크리트 압축강도 (MPa) (3일, 7일, 28일) ② 비구속체 길이변화율 (45일) ③ 구속체 길이변화율 (45일)

[표 46] 콘크리트 배합

구분	W/B(%)	S/a	Unit Weight(kg/m^3)					PCR3000E
			W	OPC	S1	S2	G	(B×%) kg/m^3
25 24 150	48.6	48	170	350	508	339	928	0
								1.0
								1.5
								2.0
25-30-150	44.2	49	170	385	510	340	896	0
								1.0
								1.5
								2.0

※ 시멘트 : 성신(포), S1 : 세척사, S2 : 쇄사

본 연구의 실험방법으로 콘크리트의 혼합은 강제식 팬타입믹서를 사용하였고, 유동성 (KS F 2402), 공기량 (KS F 2421), 압축강도 (KS F 2403, 2405) 및 길이변화 시험을 통한 수축률 (KS F 2424)을 평가하였다. 수축율은 [그림 15]에서 설명한 바와 같이 길이변화 몰드 (Mold)에 스트레인 게이지 (Strain Gauge)를 매립하고, 데이터로거 (Data Logger)에 연결하여 항온항습실에서 양생하며 길이변화를 측정하여 평가했다. 또한 [그림 68]과 같이 구속건조수축몰드 (KS F 2595)를 활용하여 균열발생시기와 균열 폭에 대한 실험을 진행하였다.



[그림 68] 구속건조수축 몰드

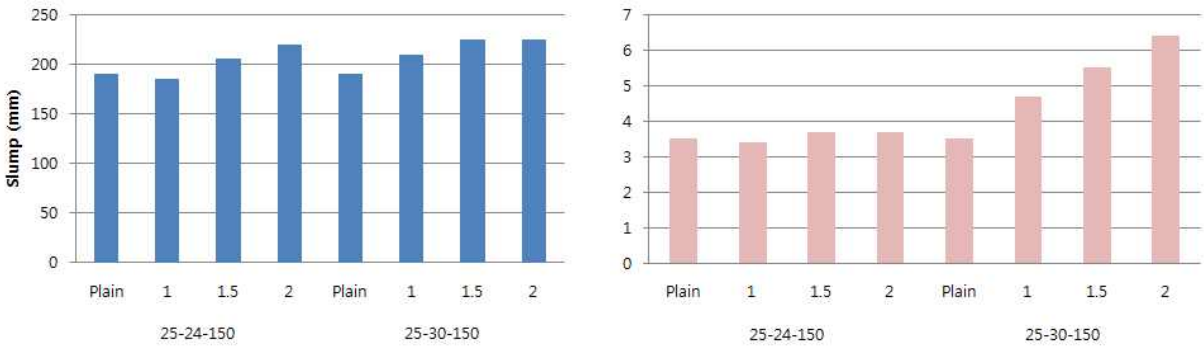
[그림 69] 실험과정



[그림 69]와 같이 굳지 않은 콘크리트로서 슬럼프와 공기량을 측정하였고, 굳은 콘크리트로서 압축강도 비구속 건조수축과 구속 건조수축을 측정하였다.

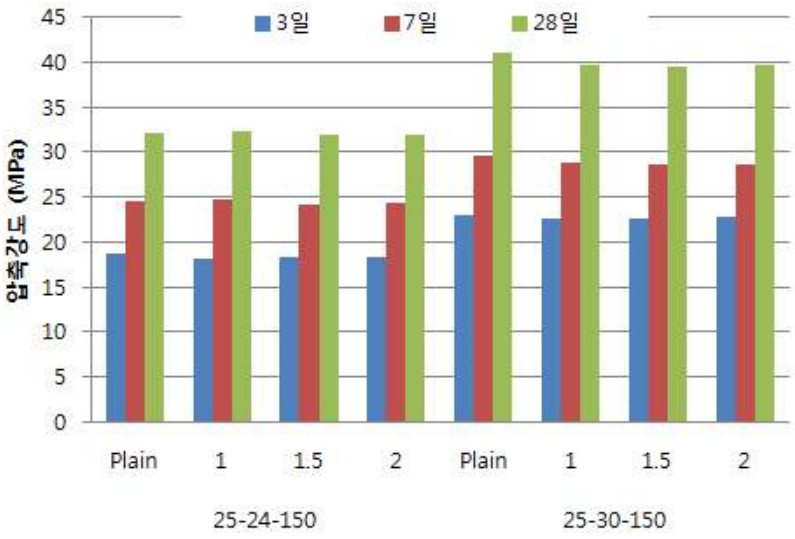
3) 실험결과

[그림 69]와 같이 굳지 않은 콘크리트 성질에서 Plain 대비 PCR3000 사용량이 많아짐에 따라 슬럼프가 향상되는 경향을 두 가지 콘크리트배합 (25-24-150, 25-30-150)에서 보였고 공기량은 목표공기량 4.5±1.5%를 만족하였다. [그림 70]과 같이 굳은 콘크리트 성능에서는 Plain 대비 재령일 3일, 7일, 28일에 대하여 거의 동등한 압축강도를 나타내었다.



슬럼프 (mm) 공기량 (%)

[그림 69] 굳지 않은 콘크리트 성질 (슬럼프, 공기량)

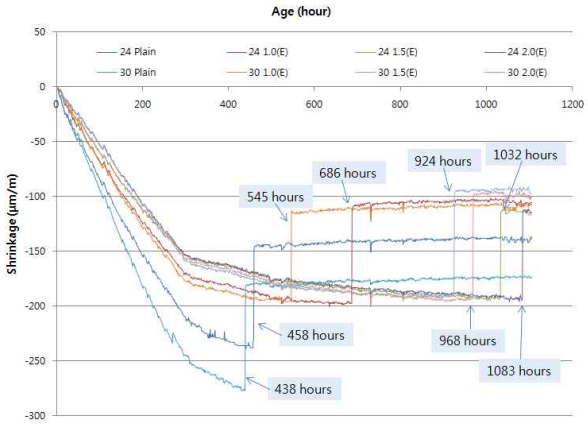


[그림 70] 굳은 콘크리트 성질 (압축강도)

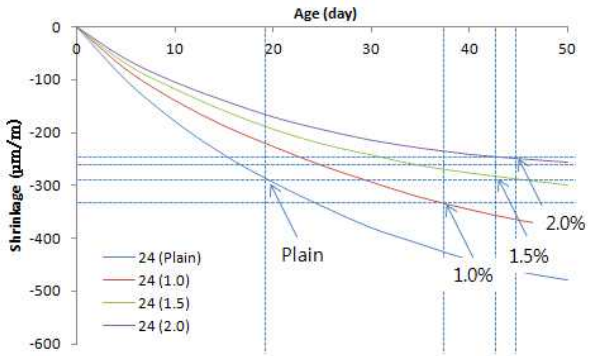
[그림 71]은 구속 건조수축 실험에서 굳은 콘크리트에 부착식 게이지를 부착하여 얻어진 결과이다. 콘크리트 부착식 게이지와 철판 부착식 게이지의 결과를 Cross-checking할 예정이었으나 구속건조수축 몰드의 철판에 부착한 게이지의 결과에 오류가 생겨 부득이 콘크리트 부착식 게이지 결과만을 기술하였다. [그림 71]에서 각 공시체의 균열발생 시기를 알 수 있다. 일단 25-30-150 배합이 25-24-150 배합보다 균열발생시기가 빨랐으며 PCR3000의 사용량이 증

가함에 따라 균열발생시기가 지연되었다.

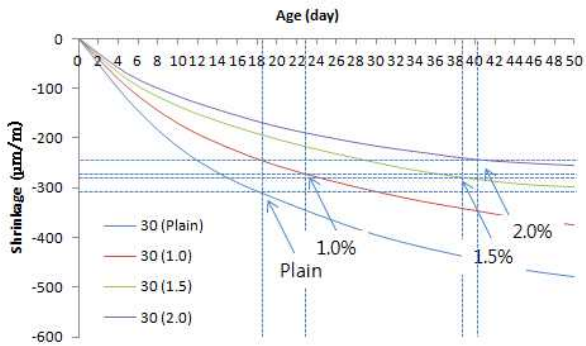
균열시기와 수축율과의 관계를 알아보기 위하여 [그림 72]와 같이 별도의 비구속 건조수축을 측정하였다. [표 47]과 같이 2종 콘크리트배합 (25-24-150, 25-30-150)에서 각 동일시료의 재령 50일 수축율 결과는 유사하나 초기 수축율 (0~20일)이 [표 48]과 같이 25-30-150 배합에서 상대적으로 컸으며 이 요인이 균열발생시기를 앞당긴 것으로 판단된다. 이것이 비구속 건조수축과 구속 건조수축에 따른 차이인지는 추가적인 검증실험이 필요할 것으로 보인다.



[그림 71] 구속건조수축 (부착식게이지) 실험결과



콘크리트 수축율과 균열시기 분석
(25-24-150)



콘크리트 수축율과 균열시기 분석
(25-30-150)

[그림 72] 비구속 건조수축 (매립식 게이지) 결과

[표 47] 콘크리트 수축저감율 (재령 50일)

샘플명	25-24-150				25-30-150			
	Plain	1.0%	1.5%	2.0%	Plain	1.0%	1.5%	2.0%
수축저감율(%)		20.8	37.5	46.5		21.8	37.7	46.9

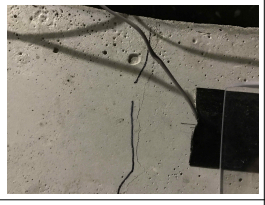
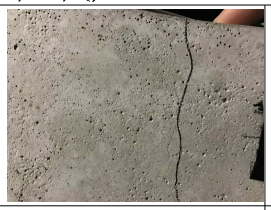
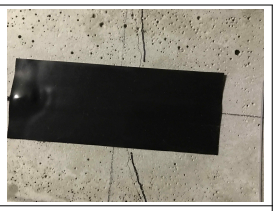
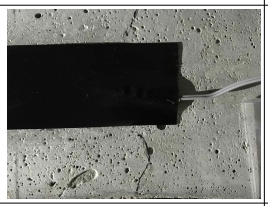
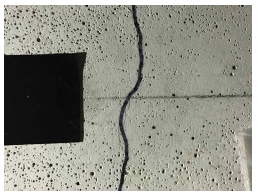
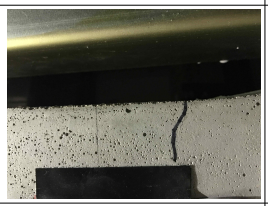
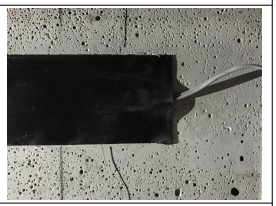
[표 48] 콘크리트 길이변화 (재령 20일)

샘플명	25-24-150				25-30-150			
	Plain	1.0%	1.5%	2.0%	Plain	1.0%	1.5%	2.0%
수축저감율(%)	-295	-226	-194	-171	-322	-241	-202	-176

[표 49]은 구속 건조수축실험에서 균열 폭을 측정한 결과이다. 균열의 위치에 따라 폭이 달라지기 때문에 가장 넓은 곳을 측정하였다. 균열 폭은 0.10㎜~0.17㎜로 균열 폭이 크지 않았다. 따라서 먼저 Plain의 균열 폭을 측정한 후 정확한 비교를 위해 동일 거리에서 사진을 찍고 그 사진을 동일 고배율로 확대하여 상대적인 비율을 산출하고 비율을 대입하여 결과를 도출하였다. PCR3000의 사용량이 많을수록 균열 폭이 줄어드는 것을 확인할 수 있었고 25-30-150 규격 콘크리트 배합보다 저강도 배합인 25-24-150 규격에서 균열 폭이 더 작았다.

결과적으로 균열발생시기와 균열 폭은 콘크리트의 실대적인 수축율과 인과관계를 찾을 수 없었고 상대적인 연관성이 있는 것으로 나타났다. 상기의 균열발생시기 결과와 균열 폭 측정 결과로 미루어 2종의 콘크리트 배합 모두 PCR3000 사용량 1.5% 이상을 사용하여야 큰 효과를 볼 수 있는 것으로 나타났다.

[표 49] 시료별 균열폭 측정

시료사진				
시료명	25 24 150 Plain	25 24 150 1.0%	25 24 150 1.5%	25 24 150 2.0%
상대적균열폭	0.16㎜	0.16㎜	0.12㎜	0.10㎜
시료사진				
시료명	25-30-150 Plain	25-30-150 1.0%	25-30-150 1.5%	25-30-150 2.0%
상대적균열폭	0.17㎜	0.16㎜	0.13㎜	0.12㎜

4) 소결

가) 콘크리트의 수축율과 균열과의 상관관계를 알아보기 위하여 2종의 콘크리트 배합(25 24 150, 25 30 150)에 대하여 PCR3000 사용량을 4수준 (0%, 1.0%, 1.5%, 2.0%)으로 나누어 굳지 않은 콘크리트 성질에 대해 슬럼프와 공기량을 측정하였다. 굳은 콘크리트 성질에 대해 압축강도와 비구속 건조수축 그리고 구속 건조수축을 측정하였다.

나) 굳지 않은 콘크리트 성질에서 슬럼프의 경우, PCR3000 사용량이 증가함에 따라 2종의 콘크리트배합 모두에서 슬럼프가 증가하였고 공기량은 4.5±1.5% 규격에 적합하였다. 굳은 콘크리트 성질에서 압축강도 (3, 7, 28일)는 2종 콘크리트배합 모두 Plain 대비 거의 동등한 성능인 것으로 나타났다.

다) 구속 건조수축 실험결과에서 균열발생시기는 PCR3000의 사용량이 증가함에 따라 늦추어졌고 2종의 콘크리트 배합의 경우 25-24-150 배합 콘크리트가 25-30-150 배합 콘크리트보다

균열발생시기가 느렸다. 25 24 150 콘크리트 배합의 경우 초기 (0~20일)에 콘크리트 길이변화가 작았고 이것은 분체량이 낮은 배합에서 상대적으로 자기수축현상이 적게 발현되었기 때문으로 추정된다.

라) 비구속 건조수축 실험 결과 수축저감율은 [표 47]과 같으며 구속 건조수축 실험에서 얻어진 균열발생시기와의 상관관계에서 콘크리트 길이변화 절대값보다는 상대적인 길이변화율과의 상관성이 높은 것으로 판단되었다. 또한 균열발생시기가 빠른 시료가 균열 폭 또한 컸다. 마지막으로 2종의 콘크리트 배합에서 PCR3000 사용량은 1.5% 이상이 되어야 효과적인 것으로 나타났다.

다. 복합기능 균열저감제 (PCR3000)의 현장적용

1) 개요

본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000은 사업화를 목적으로 함에 있어 현장 적용이 매우 중요하다. 현장 적용을 위한 사전 검토를 위하여 1차년도에 이미 현장을 모사하는 Mock-up 부재에 PCR3000을 적용하여 균열 성능을 평가하였다. PCR3000의 현장적용성 평가에는 공동연구기관인 두산건설, 롯데건설 그리고 POSCO건설이 각각 주도적 역할을 수행하였다. [표 50]는 각 참여 건설사 별 사업화 현장적용 분야와 실제 평가 현장을 나타내었다.

[표 50] 참여기관별 현장 적용 분야

참여기관	현장적용 분야 (사업화)	평가 현장
두산건설	주거용 건축물 기초 및 슬라브 (Slab)	광주 계림 5-2구역 주택재개발사업현장 지하주차장
롯데건설	대형 마트 또는 아웃렛 매장 바닥	산성역 복합 시설 신축공사 현장, 기계실바닥
		오류동 행복주택 (3월 타설 예정) 인공지반 상부 슬래브
POSCO건설	플랜트 구조물 바닥	LCT

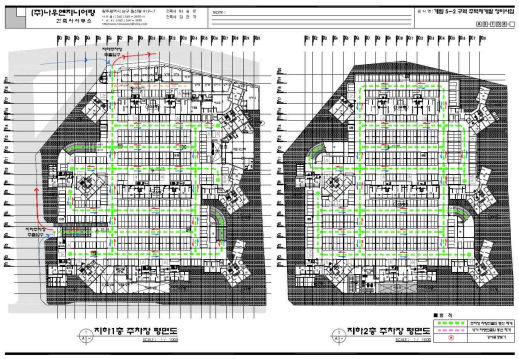
2) 두산건설 현장적용 (광주계림 5-2구역 주택재개발사업현장)

가) 현장적용 개요

[그림 73]은 현재 두산건설에서 진행 중인 계림 5-2구역 주택재개발사업 (이하 광주계림 두산위브)의 조감도 및 본 현장적용이 진행될 지하주차장 평면도를 나타낸 것이다. 이 현장은 광주 동구 계림동에 위치하고 있으며, 지하2층, 지상 15~20층 규모의 아파트 9동 및 부대복리시설이 건설될 예정이다.

평면도 상의 부위는 지하주차장 전 구간으로 균열에 의한 누수문제로 하자가 빈번히 발생되고 있어 본 현장적용에 주요부위이다. 총 타설 콘크리트 물량은 약10,000㎥이며 타설기간은 약 3개월이 소요될 것으로 계획하였다. 규격은 25 24 150이며 현장 주위의 4개 레미콘사(社)에 대한 배합실험 및 Mock-up Test를 진행하여 안정적인 현장적용을 진행하였다.





[그림 73] 현장 조감도 및 평면도

나) Mock up Test

① 실험계획

현장적용에 만전을 기하기 위하여 [표 51]과 같이 Mock-up Test를 계획하였다. 규격은 25-24-150으로 설정하였고 일반콘크리트와 균열저감콘크리트 2수준 (사용량 1.0, 1.5%)으로 구분하여 평가를 실시하였다. 실험항목으로 굳지 않은 콘크리트 성능 (슬럼프, 공기량)과 굳은 콘크리트 성능 (재령별 압축강도, 건조수축 길이변화)을 평가하였다. [그림 74]와 같이 Mock-up test 진행과 Mock-up 부재를 설치하였다.

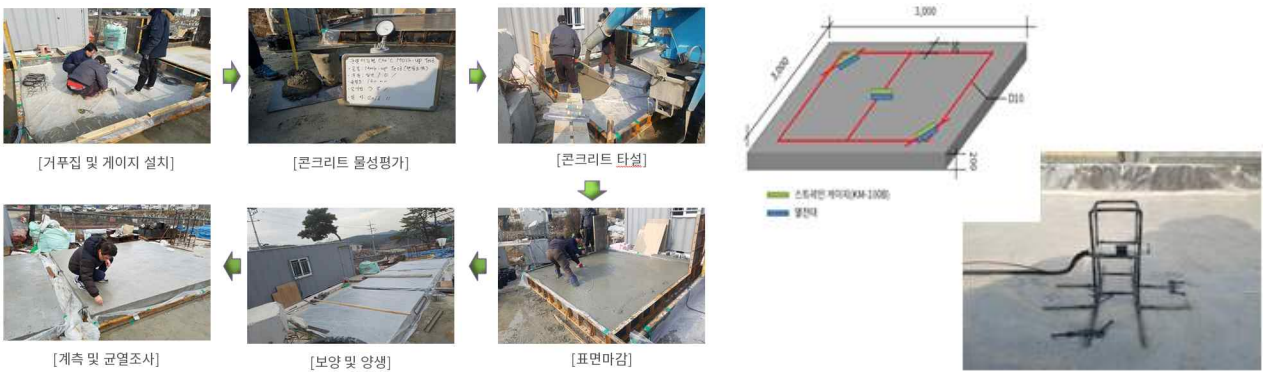
[표 51] Mock-up Test 계획

구분		내용
규격		■ 25-24-150
배합조건		■ 일반콘크리트(일반 혼화제) ■ 균열저감 콘크리트-Ⅰ(PCR3000 1.0 %) ■ 균열저감 콘크리트 Ⅱ(PCR3000 1.5 %)
실험항목	굳지않은 콘크리트	■ 슬럼프 및 공기량
	굳은 콘크리트	■ 압축강도(3, 7, 28일) ■ 건조수축 길이변화

[표 52] 배합표

구분	W/B (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/m³)1)			AD(%)	
			W	C	FA	PCR3000	일반
일반	52.7	51.5	160	266	67	-	1.0
균열저감-Ⅰ						1.0	-
균열저감 Ⅱ						1.5	

주 1) W : 물, C : 시멘트, FA : 플라이애시



[그림 74] Mock up Test 방법 및 Mock up 부재 전경

② 굳지 않은 콘크리트 성능

[표 53]은 배합조건별 슬럼프 및 공기량 시험결과를 나타낸 것이다. 배합조건에 관계없이 모든 배합에서 목표 수준을 만족하는 결과를 얻었고 PCR3000이 혼입된 균열저감형 콘크리트의 경우 공기량이 일반콘크리트에 비해 소폭 증가하였다.

[표 53] 슬럼프 및 공기량 실험결과

구분	일반-1.0%	균열저감 - 1.0 %	균열저감 - 1.5 %
슬럼프(mm)	160	150	170
공기량(%)	3.8	5.8	5.8

③ 굳은 콘크리트 성능

[표 54]은 압축강도 측정결과를 나타낸 것으로 모든 배합에서 설계기준강도인 24MPa 이상의 압축강도를 발현하였으며, 균열저감형 콘크리트와 일반 콘크리트의 압축강도 값은 유사하였다.

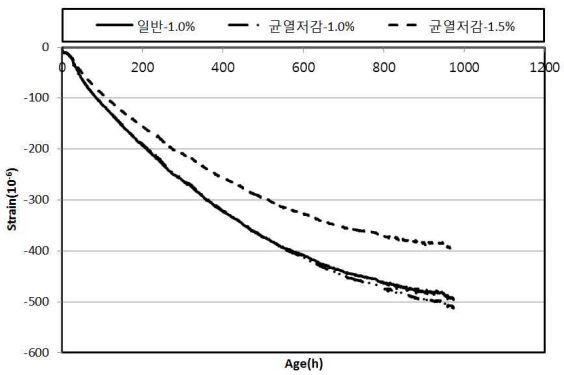
[표 54] 압축강도

구분	압축강도(MPa)		
	3일	7일	28일
일반 1.0%	6.80	18.6	30.1
균열저감-1.0%	11.6	21.3	32.2
균열저감 1.5%	8.66	17.6	28.9

[표 55]와 [그림 75]는 배합조건별 건조수축 길이변화 측정결과이다. 현재 계측이 진행되고 있으며 91일까지 측정할 예정이다. 일반콘크리트 배합과 PCR3000 1.0%를 사용한 균열저감형 콘크리트 배합에서 유사한 수준의 건조수축량을 보였으며 1차년도의 결과에서 PCR3000 1.0%에서도 상당한 수축저감효과를 보였던 것과 대조되는 결과로, B/P 제조시 약간의 문제가 있었던 것으로 보인다. PCR3000 1.5%를 사용한 콘크리트 배합의 경우 큰 폭으로 개선되는 결과 (24%)를 나타내었다. 재령일이 증가할수록 균열저감 콘크리트의 수축저감율은 상대적으로 더욱 증가할 것으로 판단된다.

[표 55] 건조수축 길이변화

구분	건조수축 길이변화(10^{-6})				
	3일	7일	28일	40일	91일
일반 1.0%	74	148	403	461	측정중
균열저감-1.0%	-85	-160	-412	-479	
균열저감-1.5%	-70	-126	-305	-349	



[그림 75] 건조수축 길이변화

다) 균열저감 콘크리트 현장적용

Mock-up Test 결과를 바탕으로 균열저감 콘크리트에 첨가되는 PCR3000의 사용량을 1.5%로 결정하였다. 또한 균열저감 콘크리트를 생산할 레미콘 제조사별 배합실험을 진행하여 적정 배합을 도출하였으며 도출된 배합을 검증하기 위한 생산 실험까지 완료한 후 균열저감 콘크리트의 현장적용을 실시하였다. [그림 76]은 광주계림 5-2구역 두산위브현장 전경이다.





[그림 76] 현장적용 전경

① 현장적용 계획

[표 56] 및 [표 57]은 현장적용 계획을 나타낸 것으로서, 균열저감 콘크리트의 현장적용에 따른 성능개선 여부 및 정도 파악을 위해 각 레미콘 제조사별로 기존에 생산되는 배합과 당 현장에 적용되는 균열저감 콘크리트 배합에 대해 건조수축 특성 평가를 실시하였다.

[표 56] 현장적용 계획

구분	내용
규격	25-24-150
배합조건	균열저감 콘크리트(PCR3000 1.5 %)
타설물량	약 10,000 m^3
타설 레미콘 업체	A사, B사, C사
실험항목	기존 배합 및 균열저감 콘크리트 배합의 건조수축 길이변화 측정

[표 57] 레미콘사별 배합표

구분		W/B (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/m^3)[1]				AD(%)	
				W	C	SC	FA	일반	PCR3000
A사	기존배합	51.9	47.8	173	283	-	50	0.7	-
	균열저감	48.0	49.5	160	266		67		1.5
B사	기존배합	48.3	48.3	167	138	173	35	0.7	-
	균열저감	48.0	50.0	160	266	-	67	-	1.5
C사	기존배합	51.1	50.0	173	136	170	34	0.7	-
	균열저감	48.0	50.0	160	266	-	67	-	1.5

주 1) W : 물, C : 시멘트, SC : 고로슬래그미분말 FA : 플라이애시

② 현장적용 결과

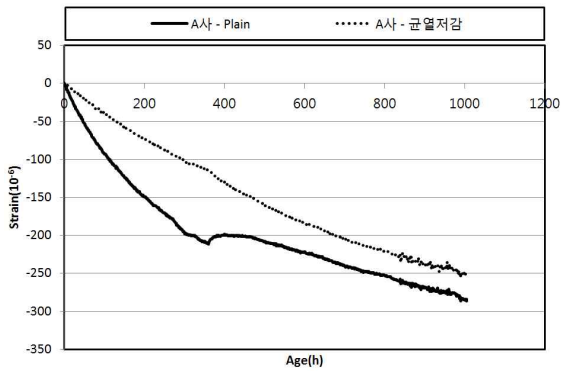
[표 58] 및 [그림 77]은 균열저감 콘크리트 제조사별 건조수축 길이변화 측정결과이

다. 균열저감 콘크리트 배합이 기존배합에 비해 수축량이 큰 쪽으로 저감되는 결과를 나타내었다. A사 시험체의 경우 측정 중 항온항습실의 문제로 인하여 온/습도 조건이 변화하면서, 약 350 시간 이후에 데이터가 흔들리는 경향을 나타내었으나, 균열저감 콘크리트가 길이변화량이 작은 것으로 나타났다. 또한, 기존배합 콘크리트의 경우 온습도 조건이 변화함으로 인해 급격하게 팽창하는 경향을 나타내고 있으나, 균열저감 콘크리트는 상대적으로 안정적인 결과를 나타내고 있어, PCR3000을 혼입함에 따라 콘크리트 내부 수분의 증발이 발생함에도 변형량이 크지 않은 것을 확인할 수 있다.

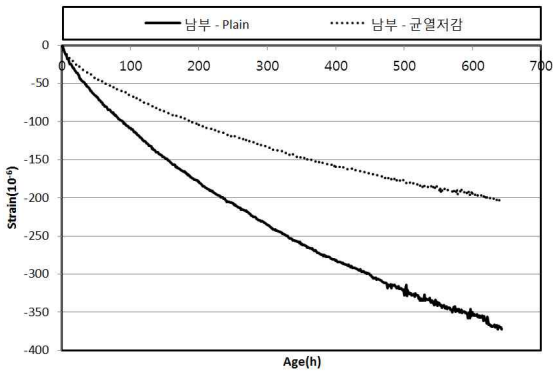
B사와 C사의 경우에서 균열저감 콘크리트 배합이 기존 배합에 비해 건조수축율이 약 50 % 정도 저감되는 경향을 나타내었다. 아직 측정 초기이지만, 현재까지의 경향으로 볼 때 장기재령에서의 건조수축 길이변화량의 차이는 더욱 커질 것으로 보인다.

[표 58] 건조수축 길이변화

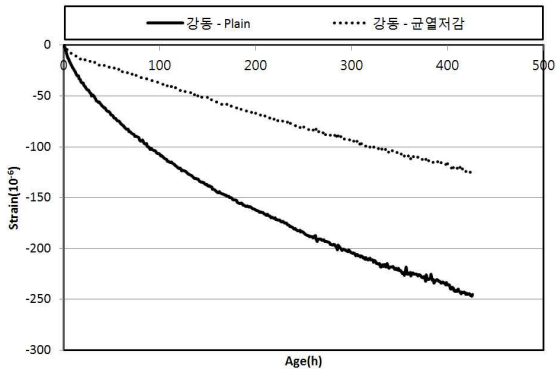
구분		건조수축 길이변화(10^{-6})					
		3일	7일	14일	28일	40일	91일
A사	기존배합	-72	-134	-206	-235	-271	측정중
	균열저감	29	64	110	198	242	
B사	기존배합	-88	-160	-254	-373	측정중	
	균열저감	-54	-92	-145	-205		
C사	기존배합	-88	-148	-218	측정중		
	균열저감	-29	-59	-106			



(a) A사



(b) B사



(c) C사

[그림 77] 레미콘사별 건조수축 길이변화



[그림 78] 현장 타설 사진



[그림 79] 현장 부위별 사진 (재령 약 30일)

[그림 78]과 [그림 79]는 광주계림 5-2구역 현장타설 및 타설 후 사진이다. slab의 기둥 주변 노출부위와 ramp 그리고 벽체부분은 균열발생 빈도가 상당히 높은 것으로 알려져 있으나 [그림 79]와 같이 거의 모든 부위에서 균열이 발생하지 않았다. [그림 77]의 건조수축 길이변화 결과와 일맥상통하는 것으로 보인다. 결과적으로 두산건설의 현장적용성 검증은 성공리에 마무리되었다.

부가적으로 [그림 80]과 같이 PCR3000의 현장적용 실적을 2016년 12월 28일 건설경제신문에 개재하였다. 광주 계림 5-2구역의 현장적용성 평가 결과는 콘크리트 균열을 고민하는 건설관계자들에게 문제를 해결할 수 있는 훌륭한 기회를 제공할 수 있을 것으로 본다.


콘크리트 균열 잡은 '토종 혼화제' 나왔다

[그림 80] 건설경제신문 개재

3) 롯데건설 현장적용 (삼성동 복합시설 신축공사, 오류동 행복주택 공사현장)

가) 현장적용 개요

롯데건설의 현장적용은 [그림 81]과 같이 삼성동 복합시설과 오류동 행복주택에서 진행하는 것으로 계획하였다. 삼성동 복합시설은 지하층 바닥 무근콘크리트와 외부 합벽 부위에 타설하였고 오류동 행복주택은 철토 위에 인공지반을 조성한 다음 슬라브 타설을 계획하였다.


삼성동 복합시설 조감도


오류동 행복주택 조감도

[그림 81] 롯데건설 현장적용 현장

나) 삼성동 복합시설 현장 타설

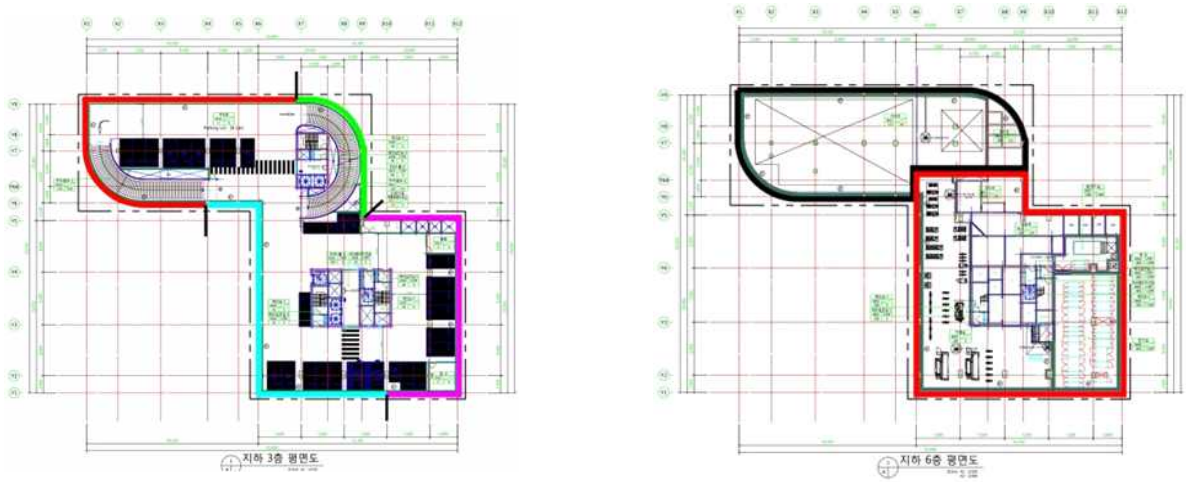
1차년도 Mock-up Test 결과를 바탕으로 균열저감 콘크리트에 첨가되는 PCR3000의 사용량을 1.5%로 결정하였다. 또한 균열저감 콘크리트를 생산할 레미콘 제조사별 배합실험을 진행하여 적정 배합을 도출하였으며 도출된 배합을 검증하기 위한 생산 실험까지 완료한 후 균열저감 콘크리트의 현장적용을 실시하였다. [그림 81]은 삼성동 복합시설 신축현장 조감도이다.

① 현장적용 계획

[표 59]는 삼성동 복합시설 신축공사 현장 배합이다. 2종의 콘크리트 규격(25-21-180, 25-40-210)을 각각 지하층 바닥과 외부 합벽에 적용하고자 하였고 총 물량은 1,000㎥이다. 레미콘사 2곳에서 각각 배합별 콘크리트를 제조하여 현장 타설을 진행하였다. [그림 82]는 삼성동 복합시설 신축현장 현장적용 부위의 도면이다.

[표 59] 현장적용 계획

구분	내용	
규격	25-21-180	지하층 바닥
	25-40-210	외부 합벽
배합조건	균열저감 콘크리트(PCR3000 1.5 %)	
타설물량	약 1,000 m^3	
타설 레미콘 업체	A사, B사	
실험항목	기존 배합 및 균열저감 콘크리트 배합의 건조수축 길이변화 측정	



[그림 82] 삼성동 복합시설 신축현장 타설 부위 도면

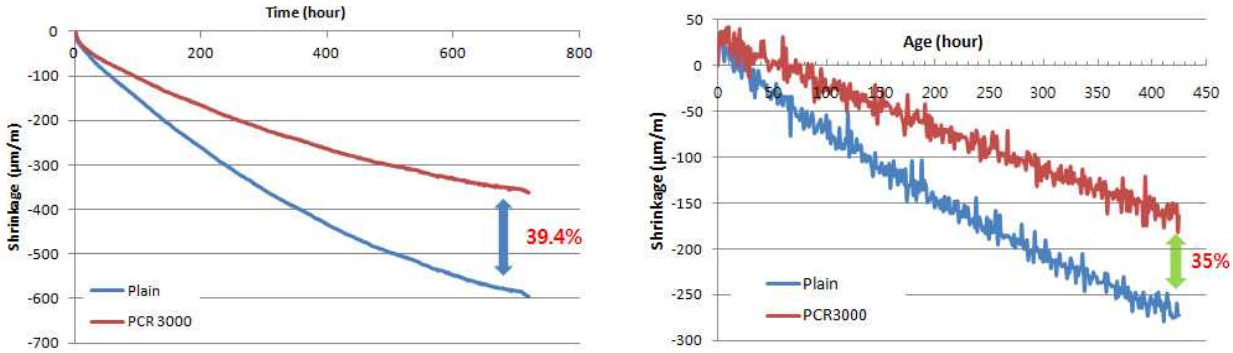
② 현장적용 결과

레미콘사 (A, B)에서 배합실험을 진행하였고 굳지 않은 콘크리트 성능에서는 슬럼프와 공기량을 측정하였고 모두 목표설계에 부합하였다. 굳은 콘크리트 성능에서는 압축강도를 측정하였고 모두 목표강도에 부합하였다. [그림 83]은 삼성동 복합시설 지하바닥 무근콘크리트 타설 광경이다. 삼성동 복합시설은 1층을 기준으로 상층부와 하층부를 동시에 타설하는 역타설공법을 사용하고 있다. 따라서 하층부의 콘크리트 타설 시 콘크리트 이송 배관을 연결하면서 작업을 해야하기 때문에 많은 시간이 소요되었고 콘크리트의 Fluidity-retention을 강화하

여 현장타설을 진행하였다. 현장 타설된 콘크리트의 수축율을 측정하기 위하여 BP에서 생산된 콘크리트가 현장에 도착했을 때 길이변화몰드를 제작하였다. [그림 84]는 배합별 콘크리트 건조수축 길이변화를 측정한 결과이다. 25-21-180 배합 (지하바닥)의 경우 재령 30일까지의 수축저감율이 39.4%였으며, 25-40-1-210 배합 (외부합벽)의 경우 재령 24일에서 35%의 상당히 양호한 수축저감율을 확인할 수 있었다.



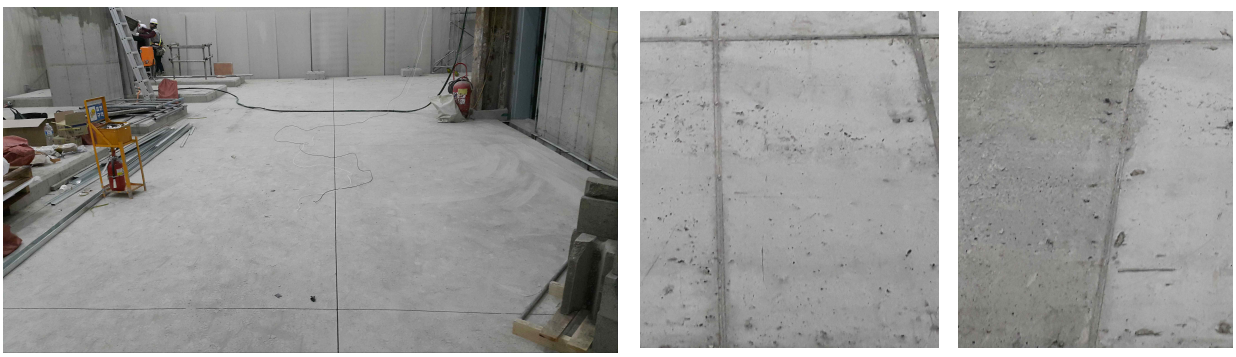
[그림 83] 삼성동 복합시설 타설현장



25-21-180 (재령 30일) 25-40-210 (재령 24일)

[그림 84] 배합별 건조수축 길이변화

[그림 85]는 타설 후 지하바닥 무근콘크리트와 지하 외부합벽 외관이다. 줄눈과 콘크리트 양생관리가 철저하기도 했지만 균열발생이 빈번한 구속체 무근 바닥에 균열을 관찰할 수 없었고 외부 합벽 또한 균열이 발생하지 않았다. 현장 공사담당자는 "추후 균열발생이 우려되는 구조물에 본 균열저감 콘크리트를 적용하겠다."며 개발제품에 큰 관심을 보였다.



지하바닥 외부합벽

[그림 85] 삼성동 복합시설 타설 후

다) 오류동 행복주택 인공지반 Slab 타설

"오류동 행복주택"은 철도부지와 도심 유휴부지를 활용해 지어지는 주택사업으로 정부는 2013년 5월 서울 서대문구 남가좌동(가좌역), 노원구 공릉동(경춘선 폐선 용지), 구로구 오류동(오류동역), 경기 안산시 단원구 고잔동(고잔역) 등 철도부지 4곳과 서울 양천구 목동, 송파구 가락동, 삼실동 등 총 7개의 시범지구를 선정했다. 이중 롯데건설(주)은 오류동 행복주택 건설공사를 2014년 11월부터 진행하고 있으며, 앞서 기술한 현장 개요(표 4 및 그림 81와 같이 오류동역 철도부지에 공동주택 890세대와 철도운행 선로 상부에 인공지반 구조물을 건설하는 공사이다.

인공지반 구조물은 [그림 86]과 같이 국철선로와 급행선, 화물선 등 총 11개의 선로 위에 설치되는 구조물로 안전관리 및 시공기술의 중요성이 강조됨에 따라 인공지반 슬라브에 균열을 최소화하기 위한 방안으로 균열저감제 사용을 결정하였으며, 본 현장의 인공지반 슬라브의 균열 저감에 관한 내용이 기술입찰에 제시되고 있으며, 이를 충족하는 기술로 본 연구의 균열저감제가 최종 확정된 점에 의의가 있다.



[그림 86] 인공지반 구조물 설치 부지

① 현장적용

현재 인공지반 슬라브에 균열저감제 적용에 관한 사항은 다음 절차에 의해 진행을 실시하였고 현장타설 또한 원활히 완료되었다.

[표 60] 현장적용 절차

절차	1) 배합설계 사전검토 실험	5) 현장 감독관 (감리) 승인
	2) 배합설계 제안 보고서 제출	6) LH공사 승인
	3) 검증 배합실험	7) 레미콘 B/P Test
	4) 검증 배합실험 결과보고서 제출	8) 공급원 승인서 제출

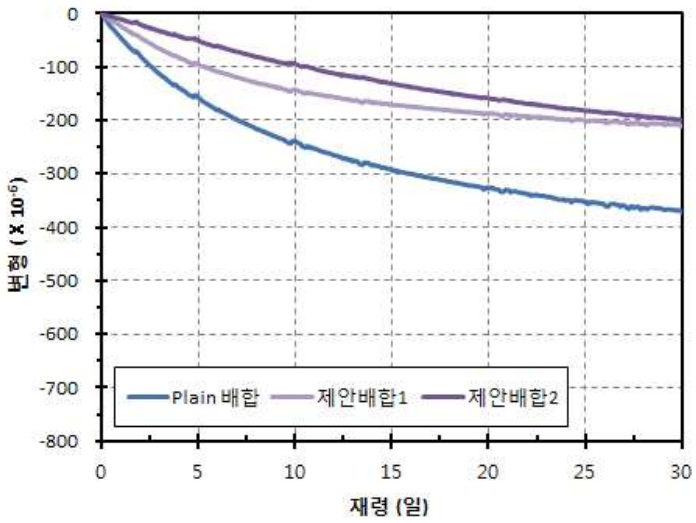
[표 61] 일반 골조배합 및 고내구성 균열저감형 제안 배합 비교 (25 27 150규격)

구 분 (25 27 150)	배합요인								
	W/B (%)	S/a (%)	단위수량 (kg/㎥)	결합재 (kg/㎥)	결합재 치환율 (%)			혼화제1	혼화제2[4]
					OPC[1]	BFS[2]	FA[3]		
일반 골조배합 (기준1)	47	48±2	170	362	70	20	10	PC형	
기술입찰 제안배합 (제안1)	44	48±2	165	375	50	40	10		1.5%
추가 제안배합(제안2)	44	48±2	165	375	80	0	20		1.5%

[1] OPC (Ordinary Portland Cement) : 1종 보통포틀랜드 시멘트
[2] BFS (Blast Furnace Slag) : 고로슬래그 미분말 3종
[3] FA (Fly Ash) : 플라이애시 2종
[4] 균열저감제 : PC형 고성능AE감수제와 수축저감제가 일체형으로 제작된 분말형 수축저감제 사용

[표 62] 굳지않은 콘크리트 특성 및 압축강도 시험결과

시험체 번호	굳지않은 콘크리트 물성		압축강도 (MPa)		
	슬럼프 (mm)	공기량 (%)	3일	7일	28일
기준1	160	5.3	13.9	31.4	46.0
제안1	170	5.5	13.5	30.6	49.7
제안2	150	5.2	21.7	40.6	53.2



[그림 87] 인공지반용 고내구성콘크리트 배합설계를 위한 건조수축길이변화 결과

[표 61~62] 및 [그림 87]은 현장적용 전 최종 실험결과이다. 현재 인공지반 공사현황은 [그림 88]과 같이 가도 보에 대한 다실이 진행되고 있으며, 균열저감제가 사용되는 인공지반 슬라브는 5월 15일을 시점으로 총 4회 분할 다실되었다.




[그림 88] 인공지반 공사 진행 현황

라) 기타 현장적용 추진

[그림 89]는 충북 증평 신선물류센터 공사 현장 전경이다. 현재 본 개발제품을 이 공사현장에 적용하기 위한 작업을 진행 중에 있다.



[그림 89] 롯데증평 신선물류센터 공사 전경

[표 63] 증평 신선물류센터 현장개요

· 대지위치 : 충북 증평군 노암면 노암리 0번지 · 규모 : 연면적 : 55,781㎡(16,873평) 지하1층~지상4층	· 용도 : 물류센터 · 공사기간 : 2016. 10 ~ 2017. 10 · 시공사 : 롯데쇼핑 ㈜ 롯데아트사업본부

4) 포스코건설 현장적용

가) 현장적용 개요

[그림 90]와 같이 부산광역시 해운대구 중1동의 해운대관광리조트 (온천센터) 도시개발 구역 내에 건설 예정인 포스코 엑시티 더샵은 총 2개 동으로 구성되며 최고층의 경우 101층으로 계획되어 있으며, 주요 부재는 철근콘크리트이다. 특히 각 층 슬래브의 경우 철근 콘크리트로 이루어져 있기 때문에 대기온도, 습도, 바람 등에 의해 수분증발로 인해 수축이 발

생하여 표면 균열이 쉽게 발생하는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 콘크리트 타설 시 섬유나 수축저감제를 첨가 또는 혼입하거나 철근 보강을 실시하여 균열을 최소화한다.

또한 슬래브 균열이 가장 우려되는 공동주택의 지하주차장 상부 슬래브에 대한 균열저감성능을 확인하기 위하여 전북 전주시에 시공 중인 전주 에코시티 디샵 3차 지하주차장 상부 슬래브 부위에 약 500㎥를 일괄 타설하여 시공성을 평가하고 균열 발생 여부를 검토하고자 하였다.




[그림 90] 해운대 L-City 및 전주 에코시티 디샵 3차 조감도

나) 해운대 L City 현장적용 개요

본 실에서는 바닥 슬래브에 타설되는 30MPa급 콘크리트를 대상으로 균열저감을 위한 본 개발제품인 PCR3000의 혼입 여부에 따른 굳지 않은 콘크리트 및 굳은 콘크리트 특성을 비교·검토하고 PCR3000이 혼입된 30MPa급 콘크리트를 현장에 실제로 타설하여 균열발생량을 측정함으로써 슬래브용 수축저감제의 현장적용 성능을 종합적으로 검토하고자한다.

① 실험방법

본 현장적용에서는 슬래브에 타설되는 30MPa급 콘크리트를 대상으로 균열저감을 위한 PCR3000 혼입 여부에 따른 굳지 않은 콘크리트 특성과 굳은 콘크리트 특성을 사전에 [표 64]와 같이 비교·검토하고 현장에서 균열발생량을 측정함으로써 현장적용성능을 종합적으로 검토하고자 하였으며 방법은 아래와 같다.

[표 64] 측정항목

구분		측정항목	비고
B/P Test	굳지 않은 콘크리트 특성	▪ 슬럼프 및 슬럼프손실 ▪ 공기량 ▪ 연화물량	-
	굳은 콘크리트 특성	▪ 압축강도 (3, 7, 28일)	
현장적용	굳은 콘크리트 특성	▪ 건조수축 길이변화 측정 (재령 28일)	

② 굳지 않은 콘크리트 특성

상기 배합설계를 바탕으로 성동레미콘에서 [표 65]와 같은 콘크리트 배합설계로 B/P로

콘크리트를 제작하였고 굳지 않은 콘크리트 성질인 슬럼프 플로우 및 공기량 실험을 콘크리트 배출 즉시 측정하였다. 또한 60분과 90분 슬럼프 손실을 측정하여 현장타설 적합성을 파악하였다.

[표 65] 콘크리트 배합

시편 종류	설계 강도 (MPa)	Slump Flow (mm)	W/B (%)	단위재료량(kg/m³)								
				W	OPC	S/C	FA	S_1	S_2	G	AD(%)	PCR3000
Plain	30	550	43.9	163	260	74	37	VAR			1.0	-
PCR3000	30	550	43.9	163	260	74	37	VAR			-	1.5

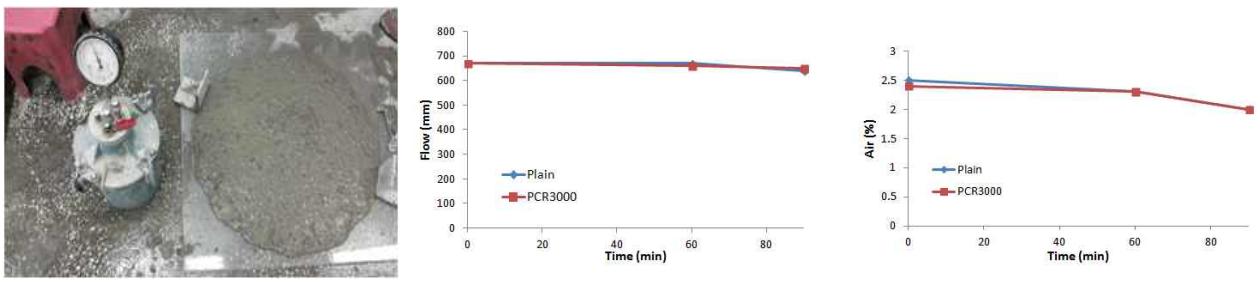
S1 : 세척사, S2 : 쇄사, G : 굵은골재

B/P 시험결과는 아래 [그림 91] 및 [표 66]와 같이 나타났다. 비빔 직후 슬럼프 플로우는 Plain과 PCR3000 모두 550 ± 100mm 범위를 만족하였으며 60분과 90분 슬럼프 플로우도 목표 슬럼프 플로우 범위를 만족하였다. 다시 말해 PCR3000이 도입된 콘크리트 유동성은 Plain과 거의 동등하였다. 염화물량은 Plain과 PCR3000 모두 0.085~0.093kg/m³범위에서 측정되어 KS F 4009 연화물 규준치인 0.3kg/m³를 만족하였다. 공기량의 경우 시간이 지남에 따라 손실이 발생하였으나 Plain과 PCR3000 모두 목표치를 만족하였다.

이상의 굳지 않은 콘크리트 시험결과로부터 Plain 대비 PCR3000이 도입된 콘크리트는 거의 동등한 물성을 발현하였다.

[표 66] 굳지 않은 콘크리트

생산방법	콘크리트 배합종류	경시변화	굳지 않은 콘크리트의 시험결과		
			슬럼프플로우 (mm)	공기량 (%)	염화물 (kg/m3)
B/P (강동레미콘)	Plain	초기	670	2.5	0.085
		60분	670	2.3	0.085
		90분	640	2.0	0.085
	PCR3000	초기	670	2.4	0.093
		60분	660	2.3	0.093
		90분	650	2.0	0.093



[그림 91] 콘크리트 굳지 않은 성질 평가

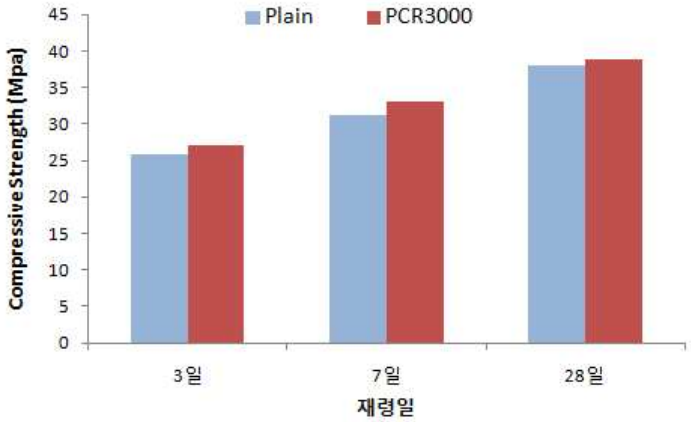
③ 굳은 콘크리트 특성

(1) 재령별 압축강도

굳은 콘크리트 성질인 재령별 압축강도는 [표 67] 및 [그림 92]와 같다. 두 배합 모두 재령 3일에서 25MPa를 상회하는 결과를 얻었고 조기재령에서 높은 압축강도 발현율을 확인하였다. 원인은 1종 조강시멘트를 적용하였기 때문인 것으로 보인다. 재령 7일에는 두 배합 모두 설계기준강도인 30MPa 이상이었고 거의 동등수준이었다.

[표 67] 재령별 압축강도

생산방법	콘크리트 배합종류	재령별 압축강도 (MPa)		
		3일	7일	28일
B/P (경동레미콘)	Plain	25.9	31.2	38.1
	PCR3000	27.0	33.1	38.9



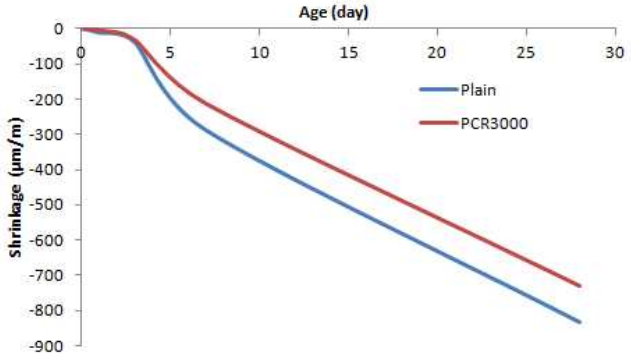
[그림 92] 재령별 압축강도

(2) 건조수축 길이변화 계측

균열 저감제의 슬래브 콘크리트 균열 저감효과를 알아보고자 균열 저감제를 첨가하지 않은 콘크리트와 균열 저감제를 첨가한 콘크리트에 대하여 수축발생량을 측정한 후 비교·평가 하였다. 이를 위해 실제 현장에서 타설을 계획하였으며 타설될 위치에 수축량 측정 센서를 매립하고 수축량 측정기(HANDHELD DATA LOGGER-TC 32k)를 이용하여 수축발생량을 측정하였다. 해운대 L City 현장의 지하 3층과 지하 4층의 슬래브부재이고 2016년 12월 15일에 콘크리트 타설 후 30일 동안 수축량 측정을 실시하였다. 온도 및 측정부위의 다양함에 대한 보정을 실시하여 측정한 결과, 7일에 26%, 28일에 13% 수축량이 저감되는 효과를 확인할 수 있었다.

[표 68] 건조수축 길이변화 측정결과

구분	수축발생량 (um)				비고
	1일	3일	7일	28일	
Plain	-12 (100%)	-39 (100%)	-288 (100%)	-831 (100%)	
PCR3000	-6 (50%)	-33 (77%)	-213 (74%)	-729 (87%)	



[그림 93] 건조수축 성능 실측비교

다) 전주 에코시티 3차

① Test-Bed 적용

주차장 상부슬래브에 타설되는 27MPa급 콘크리트를 대상으로 균열저감제 혼입 콘크리트에 대한 굳지 않은 콘크리트의 특성 및 굳은 콘크리트의 특성을 검토하고 현장에서 균열 발생여부를 측정함으로써 슬래브용 수축저감제의 현장적용성능을 종합적으로 검토하였다.

27 MPa급 콘크리트 배합설계(안)에 따라 균열 저감제를 혼입하지 않은 시편과 혼입한 시편을 바탕으로 레미콘 B/P에서 제조된 시료를 채취하여 굳지 않은 콘크리트의 특성을 검토하였다. 배합 즉시 배출된 시료들에 대하여 공기량, 염화물량, 슬럼프 test를 실시하여 굳지 않은 콘크리트의 특성을 검토하였으며 압축강도를 측정하여 굳은 콘크리트의 특성을 검토하였다.

[표 69] 배합설계표

시편 종류	설계 강도 (MPa)	Slump (mm)	W/B (%)	단위재료량(kg/m³)								
				W	OPC	S-C	FA	균열 저감제	S_1	S_2	G	AD (%)
PCR3000	24	150	45.28	163	72	252	36	1.5 %	VAR			-



[그림 94] 전주 에코시티 적용



[그림 95] 굳지않은 콘크리트 성능평가

② 현장적용성 평가 결과

굳지않은 콘크리트 성능평가 결과 슬럼프 160 ㎜, 공기량 4.0%로 측정되어 기준에 부합하였고 균열저감제 사용에 따른 굳지않은 콘크리트 성능은 양호하였다. 압축강도 시험결과는 28일 기준 설계기준강도를 상회하는 것으로 나타났다.

[표 70] 슬럼프 및 공기량 실험결과

구분	슬럼프 플로우 (mm)	공기량 (%)	염화물(kg/m^3)
Plain	155	4.3	0.075
PCR3000	160	4.0	0.083

[표 71] 압축강도 측정결과

구분	압축강도(MPa)			비고
	3일	7일	28일	
Plain	17.3	23.4	33.2	
PCR3000	18.4	24.1	34.5	

시공 후 균열에 대한 육안 평가 결과 보수가 요구되는 균열은 발생하지 않은 것으로 확인되어 상당한 균열저감효과를 입증하였다.

5) 소결

① 두산건설, 롯데건설, 그리고 포스코건설에서 총 5건의 현장적용성 검증을 완료하였다. 5건 현장적용 모두 복합기능 균열저감제에 대한 균열저감 성능과 안정성을 입증하였다.

② 두산건설의 광주계림 5-2구역 주택재개발사업현장은 대략 10,000m3의 현장타설을 진행하였고 수직부재 및 수평부재 모두 균열이 발생하지 않았다. 이 우수한 결과는 2016년 12월 28일 건설경제신문에 게재하여 홍보하였다.

③ 롯데건설은 삼성동 복합시설신축공사현장과 오류동 행복주택 인공지반 타설현장에 현장적용성을 검증하였고 균열저감성능과 안정성을 입증하였다.

④ 포스코건설은 부산 해운대 L City 현장과 전주 에코시티 더샵 3차 현장에 적용성을 건토하였다. 포스코건설에서는 슬래그가 다량 치환된 콘크리트 배합에 적용성을 검증하였고 두 현장에서 우수한 균열저감성능을 입증하였다.

라. 결론

본 사업화 과제에 있어서 2차년도에 수행해야 할 연구 내용은, 첫째 본격적인 사업화가 가능한 복합기능 균열저감제 (PCR3000) 제품의 양산 안정화 시험 및 양산체제를 갖추는 것이고, 둘째 복합기능 균열저감제 (PCR3000)의 수축율과 균열과의 관계 연구, 그리고 셋째 공동연구기관 (두산건설, 롯데건설, 포스코건설)과의 협업을 통해 현장적용성을 검증하는 것이다. 결론적으로 2차년도 연구 수행을 통해 상기 목적을 모두 달성하였고 아래와 같이 결론을 요약하고자 한다.

1) 복합기능 균열저감제 (PCR3000)의 양산성 검증

① 실험실 및 Pilot 규모에서 확립된 본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000 제조공정의 양산성을 검증하는데 있어 첫 번째 단계인 VPEG-ML의 합성공정이다. 이를 위해 6톤과 15톤 규모의 시험양산을 각 3회 수행하였고, Pilot 규모와 동일한 수준의 반응 전환율 및 불포화기 잔존율을 얻었다. 즉 양산 시료의 평균 반응 전환율은 90.2%이고 평균 불포화기 잔존율은 100%로 Lab (각각 89% 및 100%)과 동일하였다. 이로써 VPEG-ML의 합성공정의 양산성이 입증되었다.

② PCR3000 제조를 위한 두 번째 제조공정은 PCA-ML 중합공정으로서 양산성 검증을 위해 6톤과 30톤 규모의 시험양산을 6회 수행하여 확보된 시료에 대해 콘크리트 유동성을 Pilot과 비교 검증하였다. 결과적으로 6개의 양산 시료 모두 Pilot과 동등한 콘크리트 유동성을 보였다. 즉 유동성능의 평균은 실험실 시료 대비 분산력 100% 및 유지력 99% 수준으로 나타났으며, 표준편차는 분산력과 유지력 각각 1%와 2% 수준으로 나타나 실험실 시료와 거의 동일하였다. 결과적으로 VPEG-ML을 적용하여 PCA-ML을 중합하는 공정 역시 양산성이 있는 것으로 나타났다.

③ 본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000 제조는 PCA-ML과 MONOIN의 일액형화 공정에 의한다. 일액형화 공정의 양산성 검증을 위해 필요한 MONOIN은 A사로부터 양산 규모로 제조된 것을 제공받았다. Pilot 규모와 동일한 제조조건에 따라 30톤 규모의 시험양산을 3회 수행하였다. 확보된 양산 시료에 대해 콘크리트 유동성, 압축강도 및 수축률을 평가한 결과 Pilot과 동등한 수준의 결과를 확인할 수 있었다. 특히 수축률 결과에 있어 Pilot 및 양산 시료는 PCA 대비 21~24% 수준의 수축저감 성능을 보여 모두 동등 수준임이 확인되었다. PCA 대비 16.9%의 수축저감 성능을 보인 Control에 대해 29%의 성능 향상을 보여 실험실 규모의 실험 결과와 유사한 경향을 보였다. 결과적으로 VPEG-ML과 MONOIN을 일액화함으로써 본 연구의 복합기능 균열저감제인 PCR3000을 제조하는데 있어 양산성이 확보되었음을 확인하였다.

2) 복합기능 균열저감제 (PCR3000)의 수축율과 균열과의 관계 연구

① 콘크리트의 수축율과 균열과의 상관관계를 알아보기 위하여 2종의 콘크리트 배합(25-24-150, 25-30-150)에 대하여 PCR3000 사용량을 4수준 (0%, 1.0%, 1.5%, 2.0%)으로 나누어 굳지않은 콘크리트 성질에 대해 슬럼프와 공기량을 측정하였다. 굳은 콘크리트 성질에 대해 압축강도와 비구속 건조수축 그리고 구속 건조수축을 측정하였다.

② 굳지않은 콘크리트 성질에서 슬럼프의 경우, PCR3000 사용량이 증가함에 따라 2종의 콘크리트배합 모두에서 슬럼프가 증가하였고 공기량은 4.5±1.5% 규격에 적합하였다. 굳은 콘크리트 성질에서 압축강도 (3, 7, 28일)는 2종 콘크리트배합 모두 Plain 대비 거의 동등한 성능인 것으로 나타났다.

③ 구속 건조수축 실험결과에서 균열발생시기는 PCR3000의 사용량이 증가함에 따라 늦추어졌고 2종의 콘크리트 배합의 경우 25-24-150 배합 콘크리트가 25-30-150 배합 콘크리트보다 균열발생시기가 느렸다. 25-24-150 콘크리트 배합의 경우 초기 (0~20일)에 콘크리트 길이변화가 작았고 이것은 분체량이 낮은 배합에서 상대적으로 자기수축현상이 적게 발현되었기 때문으로 추정된다.

④ 비구속 건조수축 실험 결과 수축저감율은 [표 47]과 같으며 구속 건조수축 실험에서 얻어진 균열발생시기와의 상관관계에서 콘크리트 길이변화 절대값보다는 상대적인 길이변화율과의 상관성이 높은 것으로 판단되었다. 또한 균열발생시기가 빠른 시료가 균열폭 또한 컸다. 마지막으로 2종의 콘크리트 배합에서 PCR3000 사용량은 1.5% 이상이 되어야 효과적인 것으로 나타났다.

3) 복합기능 균열저감제 (PCR3000)의 현장적용

① 두산건설 (1건), 롯데건설 (2건), 그리고 포스코건설 (2건)에서 총 5건의 현장적용성 검증을 완료하였다. 5건의 현장적용 모두 복합기능 균열저감제에 대한 균열저감 성능과 안정성을 입증하였고 현장으로부터 호평을 얻었다.

② 두산건설의 광주계림 5-2구역 주택재개발사업현장은 대략 10,000㎥의 현장타설을 진행하였고 수직부재 및 수평부재 모두 균열이 발생하지 않아 현장관리자로부터 호평을 얻었다. 이 우수한 결과는 2016년 12월 28일 건설경제신문에 게재하여 홍보하였다.

③ 롯데건설은 산성동 복합시설신축공사현장과 오류동 행복주택 인공지반 타설현장에 현장 적용성을 검증하였고 타설 후 균열이 발생하지 않았다. 이 결과로 인해 증평 신선물류창고 현장에 PCR3000을 적용 추진 중이다.

④ 포스코건설은 부산 해운대 L City 현장과 전주 에코시티 더샵 3차 현장에 적용성을 검

도하였다. 포스코건설에서는 슬래그가 다량 치환된 콘크리트 배합에 적용성을 검증하였고 누 현장에서 우수한 균열저감성능을 입증하였다. 이 결과를 바탕으로 중이온가속기 현장에 PCR3000을 적용하기 위하여 배합실험까지 진행한 상태이다.

(7쪽 중 제6쪽)

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

본 과제의 목표 달성도는 아래 표와 같다. 핵심성과를 크게 복합기능 균열저감제 개발과 그것의 사업화로 구분하였다. 복합기능 균열저감제 개발에서 목표는 핵심원료 합성과 최적 포뮬레이션 확보이다. 세부 목표 중 전환율, 수축저감율, 그리고 유동성과 응결특성 모두 목표치 100%를 달성하였다. 또한 복합기능 균열저감제의 사업화의 모든 세부 목표를 충족하였다. 기타성과로 지적재산권 (특허) 출원 3건, 등록 2건, 논문 2편 투고, 공인시험성적서 그리고 녹색인증 1건을 신청하여 모든 목표를 달성하였다.

핵심성과 (Level1)	단위성과 (Level2)		최종 성과점검기준						해당 기관	비고
			점검 성과지표		목표치	달성도 주치	측정방법	검증방법	가중치	
복합기능 균열저감제 개발	핵심원료합성	①	전환율		85%↑	100% (↑ 80%)	NMR	도고사	2	신라대도시에너지
	최적 포뮬레이션	①	수축저감율		20%↑	100% (↑ 25%)	KSF2421	공인시험성적서	1	신라대도시에너지 부산대학교 동의대학교 POSCO 기술원
		②	유동성	슬럼프	동등	100% (동등)	KSF2402		2	
				슬럼프 손실	동등	100% (동등)				
		③	압축강도 (28d)		동등	100% (동등)	KSF2405		1	
		④	응결특성	초결	동등	100% (동등)	KSF2436		1	
				종결	동등	100% (동등)				
복합기능 균열저감제 사업화	실용성 확보	①	수축저감율		20%↑	100% (↑ 25%)	KSF2421	공인시험성적서	1	신라대도시에너지 부산대학교 동의대학교 POSCO 기술원
		②	유동성	슬럼프	동등	100% (동등)	KSF2402		1	
				슬럼프 손실	동등	100% (동등)				
		③	압축강도 (28d)		동등	100% (동등)	KSF2405		1	
		④	응결특성	초결	동등	100% (동등)	KSF2436		1	
				종결	동등	100% (동등)				
	경제성	①	취대가격		기존대비 30%↓		-	취대 확인서	1	신라대도시에너지 부산대학교 동의대학교 POSCO 기술원
	현장적용	①	적용신호		3건	100% (3건)	적용 건수	도고사	1	
		②	균열 모니터링		균일 0.3mm↓	균열발생 無	도고사	도고사	1	
기타성과	도출물	③	특허		2	100% (↑ 출원3, 등록2건)	건수		1	
			논문		2	100% (2)	건수		1	
			녹색인증		1건	50% (접수 1건)	건수	심결서	1	

2. 관련 분야 기여도

제5장. 연구개발성과의 활용계획

○ 본 과제는 사업화를 목표로 하고 있으므로 최종제품인 복합기능 균열지감제의 일차적 활용방안은 현장 적용에 있다. 참여 건설사에 의해 계획된 본 최종제품의 구체적인 현장적용 분야는 아래 표와 같다.

최종제품의 현장적용 분야

건설사	대형 건설사 별 현장 적용처 및 활용분야		
	과제 수행 기간 내	과제 완료 후 확대 적용 분야	추진 내용
두산건설	주거용 건물의 기초 또는 슬라브	아파트, 주상복합 및 초고층 건축 분야 확대	-
롯데건설	대형마트 또는 아울렛 매장 바닥	물류센터 또는 대형마트 등 건축 분야 확대	중형 신선물류센터 현장
POSCO건설	제철플랜트 구조물	초장대 교량, 해지터널 등의 토목 및 해양공업단지 등의 플랜트 분야 확대	대전 중이온가속기 현장

기술적 측면에서의 활용성을 판단한다면, 본 과제를 통해 확보된 복합기능 균열지감제의 일체형 기술은 후속연구를 통해 보유 기술인 방청 기술 또는 초강 기술 등과의 융합을 통해 멍실 공히 기능 집약적 화학 혼화제 개발을 배개할 수 있다는 것이다. 이는 콘크리트용 화학 혼화제의 완성본으로 경제성만 확보된다면 관련 시장을 와해시킨으로써 블루오션을 창출할 수 있는 무기가 될 수 있다.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

-

제7장. 연구개발성과의 보안등급

일반과제

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

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

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

구분	사진	위치	확보방법
비상샤워기 신규설치		실험실 내 배치	구매
안전보호구함 신규설치		실험실 내 배치 분석실 내 배치	구매
폐액용기 밀폐장치 신규 구비		실험실 내 배치	구매

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/특허 등록국가	영향력 지수	논문 게재일/특허 등록일	사사 여부 (단독사사 또는 중복사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용횟수 등)
1	특허	균일저감형 콘크리트 혼화제용 모노머 및 이를 포함한 균일저감형 콘크리트 혼화제	실크로드시앤티		대한민국	100	2017.05.08 (등록)		
2	특허	균일저감형 콘크리트 혼화제	실크로드시앤티		대한민국	100	2017.05.08 (등록)		
3	특허	콘크리트 형성용 조성물 및 이로부터 제조된 콘크리트	실크로드시앤티, 두산건설, 롯데건설, 포스코건설		대한민국	100	2016.12.30 (출원)		
4	논문	수축저감형 혼화제를 이용한 모르타르 및 콘크리트의 물리적 특성에 관한 기초적 연구	두산건설	-	대한민국 한국건축시공학회	100	2016.12	-	-
5	논문	콘크리트 배합조건에 따른 수축저감제의 건조수축 특성	롯데건설	-	대한민국 한국건축시공학회	100	2017.06 (게재예정)	-	-

제11장. 기타 사항

-

제12장. 참고 문헌

1) Polycarboxylate계 화학 혼화제로서 감수율이 30% 수준까지 향상된 3세대 화학 혼화제
2) 일본건축학회, "팽창재 및 수축저감제를 사용한 콘크리트에 관한 기술 현황", 2013. 3
3) 전용수 et al., "에테르계 수축저감제를 이용한 콘크리트 수축저감 특성", 한국콘크리트학회 2011년 봄 학술대회 논문집
4) 박종필 et al., "수축저감제 사용량 변화에 따른 콘크리트의 기초적 특성", 한국콘크리트학회 2015 봄 학술대회 논문집

9. 뒷면지

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술사업의 연구보고서입니다.

2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

210mm×297mm[백상지 80g/㎡ 또는 중질지 80g/㎡]