

발 간 등 록 번 호
11-1613000-002036-01

보안 과제(), 일반 과제() / 공개(), 비공개()
국토교통기술촉진연구사업 최종보고서

R&D / 15CTAP-C097483-01

매스콘크리트의 수축 및 균열예방을 위한
CO₂ 포집형 요소(Urea) 혼입 콘크리트 배합기술
최종보고서

2017. 09. 29.

주관연구기관 / 단국대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘매스콘크리트의 수축 및 균열예방을 위한 CO₂ 포집형 요소(Urea)혼입 콘크리트 배합기술’(연구개발 기간 : 2015.06. ~ 2017.09.) 과제의 최종보고서 5부를 제출합니다.

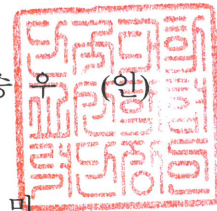
2017. 09. 29.

주관연구기관명 : 단국대학교 산학협력단 (대표자) 손 승 우 (인)

주관연구책임자 : 김 학 영

연구원 : 하 정 수 / 우 형 만

배 유 정 / 정 진 영



국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	15CTAP-C097483-01	해당 단계 연구 기간	2015.06.18.~ 2017.09.17.	단계구분	(2)/(2)
연구사업명	국토교통기술촉진연구사업				
연구과제명	매스콘크리트의 수축 및 균열예방을 위한 CO2 포집형 요소(Urea)혼입 콘크리트 배합기술				
연구책임자	김학영	해당단계 참여 연구원 수	총: 5 명 내부: 5 명 외부: 명	해당단계 연구개발비	정부: 95,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계: 95,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 5 명 내부: 5 명 외부: 명	총 연구개발비	정부: 95,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계: 95,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	단국대학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
요약				보고서 면수 92	

전 세계적으로 환경부하물질을 저감하기 위한 노력을 기하고 있는 가운데, 건설업계에서도 저탄소 구조재료와 에너지절감형 공법 등이 새로 개발되고 있다. 그러나 기존 연구들은 탄소배출재료의 사용량을 최소화하거나, 폐기물을 재사용하는 소극적형태의 친환경기법을 적용하였으며, 이를 넘어 CO₂ 등의 직접적 환경부하물질을 포집/저장하여 ‘활용’할 수 있는 적극적 친환경 기법에 대한 연구동향이 부각되고 있다.

연구에서는 이산화탄소(CO₂)와 암모니아(NH₃) 등 환경부하물질을 주원료로 하는 공업용 ‘요소(Urea)’를 연간 수요가 1억m³, 매출액은 3조원 이상에 달하는 콘크리트 산업에 적용하고자 하였다. 국내 뿐 아니라 전세계적으로 요소를 콘크리트 등의 건설재료로 적용된 실적은 전무하며, 특히 국내에서는 수요가 적어 대규모의 CO₂ 포집시설이 마련되지 않고 있다.

콘크리트 내 요소의 반응특성 중, 본 연구자가 제안하는 기대반응은 물과의 흡열반응성과 팽창반응성이다. 이는 콘크리트 균열의 주 원인인 높은 수화열과 건조수축으로 인한 체적감소를 상쇄할 수 있는 것으로 나타났으며, 이를 통해 1.5이상의 온도균열지수(Icr) 확보와 70% 이상의 수축저감성능, 65% 이상의 균열발생확률을 저감할 수 있었다.

연구 범위에서는 먼저 요소의 화학구성과 시멘트의 수화반응상 연계성을 분석하고, 이 후 요소혼입 콘크리트의 배합설계를 수행하였다. 설계된 콘크리트는 기존 저발열 및 저수축 배합기법과 비교한 성능실험 및 Mock-up 실험을 수행하였으며, 이에 최적 혼입량과 혼입방법 등을 결정하여 배합설계기법을 확립하는 것이 본 연구의 목표라 하겠다.

국문 요약문

연구의 목적 및 내용	전 세계적으로 환경부하물질을 저감하기 위한 노력을 기하고 있는 가운데, 건설업계에서도 저탄소 구조재료와 에너지절감형 공법 등이 제시되고 있다. 그러나 이는 탄소배출재료의 사용량을 제한하거나, 폐기물 등을 재사용하는 소극적형태의 친환경기법이라 할 수 있으며, 이를 넘어 CO₂ 등의 환경부하물질을 포집/저장하여 ‘활용’ 할 수 있는 적극적 친환경 기법이 요구되는 바이다. 본 연구에서는 이산화탄소와 암모니아 등 환경부하물질을 주원료로 하여 제조되는 공업용 요소(Urea)를 연간 수요가 1억m³, 매출액은 3조원 이상에 달하는 콘크리트 산업에 적용하고자 하였다. 국내에서는 미생물배양제나 농작물 성장발육제 등 용도가 극히 제한적이었던 요소는 콘크리트 등 건설재료로서의 적용 실적이 전무하며, 국내에서는 적은 수요로 인해 극히 적은 업체에서 생산하고 있는 실정이다. 콘크리트 내 요소의 반응특성 중, 본 연구자가 제안하는 기대반응식은 물과의 흡열반응성과 팽창성 반응특성이다. 이는 콘크리트 균열의 주 원인인 높은 수화열과 건조수축으로 인한 체적감소를 상쇄할 수 있을 것으로 기대되었으며, 결과적으로 1.5이상의 온도균열지수(I_{cr}) 확보와 70% 이상의 수축저감성능, 65% 이상의 균열발생확률을 저감할 수 있었다. 연구에서는 먼저 요소의 화학구성과 시멘트의 수화반응상 연계성을 분석하고, 이후 요소혼입 콘크리트의 배합설계를 수행하였다. 설계된 콘크리트는 기존 저발열 및 저수축 배합기법과 비교하여 성능의 발현여부를 검토하였으며, 이에 혼입량과 혼입방법 등을 결정하여 최적 배합설계기법을 확립하였다.				
연구개발성과	1) 친환경 및 내구성 증진 혼화재료 개발 : 콘크리트에 혼입되어 경화 후 내구성능을 향상시킬 수 있는 새로운 형태의 친환경 혼화재료를 개발함. - 이는 CO₂와 NH₃의 환경부하물질을 주 원료로 하고 있으며, - 콘크리트에 혼입 시 건조수축과 온도응력을 크게 저감시킬 수 있는 재료 2) 요소혼입 콘크리트의 최적 배합설계 : 개발된 친환경 혼화재료인 요소(Urea)를 콘크리트에 혼입하여 최적 성능구현이 가능한 설계 방법을 제시함. - 이는 슬럼프 등의 유동특성을 만족하며, - 탄산화 저항성 등 콘크리트가 가져야 하는 기본적 내구성능을 만족하고, - 강도 및 역학적 성능이 저하되지 않는 최적 시방배합표임.				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	- 본 개발기술은 건조수축 및 수화열에 의한 온도균열이 예상되는 건축 및 토목구조물 시공에 활용된다. 이에 다른 제품의 활용 대상은 다음과 같다. : 초고층건축물(매트기초, 고강도 콘크리트), 항만/댐/도로(매스콘크리트) 고온건조 환경의 구조물(매스콘크리트, 서중콘크리트), 기타 일반 건축물 - 이에 본 기술의 수요처는 다음과 같다. : 혼화제 판매사(콘크리트용 화학혼화제), 화학비료 제조 설비업체(생산), 레미콘사 및 공장, 건설사, 콘크리트 2차제품 제조사 등				
핵심어 (5개 이내)	요소	건조수축	온도응력	균열저감	

SUMMARY

Purpose & Contents	In the midst of all the efforts around the world trying to reduce environmental load substances, the construction industry is proposing that low carbon structural materials and construction methods for reducing energy consumption be used. However, the methods of limiting the usage of carbon yielding materials and recycling construction materials are passive eco-friendly solutions. More active eco-friendly solutions are required such as methods that can capture and store environmental load substances such as CO₂ and “use” them practically. This study aims to introduce industrial Urea, manufactured using environmental load substances such as carbon dioxide and ammonia, into the concrete industry, which has an annual concrete consumption volume of one hundred million m³ with annual sales of over three trillion won. The domestic use of Urea has been strictly limited to microorganism cultivation and crop growth fertilizers. Due to its unprecedented use for construction materials such as concrete and the low domestic demands, it is produced by extremely limited numbers of manufacturers. Among the reaction characteristics of Urea in concrete, the expected reactions dealt in this study are the endothermic and the expansive characteristics of Urea in reaction with water. These characteristics are expected to offset the immense hydration heat, which is a major cause of cracks in concrete, and the volume reduction caused by drying shrinkage. As a result, the crack index (I_{cr}) is expected to be greater than 1.5, shrinkage is expected to reduce by more than 70% and crack formation is expected to reduce by more than 65%. This study will first analyze the chemical composition of Urea and its relation with the hydration reaction of cement. Next, the mix design for concrete incorporating Urea will be established. The designed concrete will be compared with the concrete made using the existing low heat and low shrinkage mix method to confirm the improved performance. The main purpose of this study is to determine the mixing amount and the mixing method to establish the optimal mix design.				
Results	1) Creating an eco-friendly and a durability enhancing additive ingredient : Create a new form of eco-friendly concrete additive that enhances the durability after it hardens. - The additive is mainly comprised of environmental load substances - A substance that can greatly reduce the drying shrinkage and the temperature induced stresses when added to concrete 2) Design the optimum mix for concrete with added Urea :Suggest the concrete mix design incorporating the created eco-friendly mixing ingredient Urea for optimal performance - the mix will satisfy the flow characteristics, like the slump - satisfy the basic durability of concrete such as resistance to carbonation				
Expected Contribution	- This technology can be applied to architecture and civil structure constructions, which are prone to temperature-induced cracks from drying shrinkage and hydration heat. : Skyscraper structures (mat foundation, high-strength concrete); harbour, dams, roads (mass concrete); nuclear (hydropower) power plant (mass concrete, shielding concrete), soil structures; structures in high temperature environment (mass concrete, hot weather concrete; , other general structures				
Keywords	Urea	Dry shrinkage	Thermal stress	Crack reducing	

목 차

제1장. 연구개발과제의 개요	1
1. 연구개발의 필요성	1
2. 연구개발의 목적	12
3. 연구개발의 범위	14
제2장. 국내외 기술 개발 현황	16
1. 콘크리트의 건조수축 저감에 관한 선행연구 분석	16
2. 콘크리트의 수화열 저감에 관한 선행연구 분석	21
제3장. 연구 수행 내용 및 성과	23
1. 연구개발결과 요약	23
2. 연구개발 주요내용	24
3. 연구수행내용 및 결과분석	25
제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	75
1. 연구개발 목표의 달성도	75
2. 관련분야의 기여도	77
제5장. 연구개발성과의 활용 계획	80
1. 추가 연구의 필요성	80
2. 연구개발 결과의 활용 방안	80
제6장. 연구개발성과의 보안등급	80
제7장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	81
제8장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	82
제9장. 참고 문헌	83

Contents

Chapter 1. Research summary	1
1. Research necessity	1
2. Research purpose	12
3. Research scope	14
Chapter 2. Domestic/Overseas Technological Trends	16
1. Advanced research on the reduction of dry shrinkage	16
2. Advanced research on the reduction of hydration heat	21
Chapter 3. Contents and Results of the Research	23
1. Summary of Results	23
2. Contents of the Research	24
3. Experimental research contents and result analysis	25
Chapter 4. Accomplishment Level of Objectives and Contribution to the Related Field	75
1. Accomplishment Level of Objectives of Research	75
2. Contribution to Related Field	77
Chapter 5. Application Plan of Research Results	79
1. Necessity of Additional Research	79
2. Application Strategy of Research Results	79
Chapter 6. Security Grade of Research Results	80
Chapter 7. Safety Action Result of Laboratory	81
Chapter 8. Representative Record of Research	82
Chapter 9. Reference	83

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발의 필요성

가. 연구개발의 배경

(1) CO₂ 포집형 건설재료

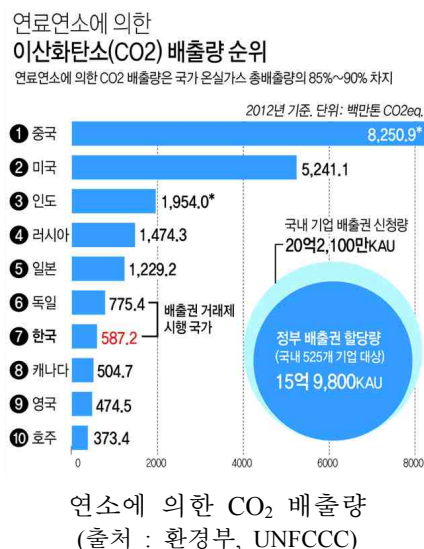
18세기 산업혁명 이후 세계적 에너지원인 화석연료의 사용량이 급격히 증가함에 따라 인위적으로 발생하는 온실가스의 양이 크게 증가, 지구의 온도가 상승하고 있다. 특히 온실가스 방출량 중 이산화탄소(CO₂)가 차지하는 비중은 56%이며, CO₂가 대기에 체류하는 기간은 50~200년으로 과거에 배출된 온실가스가 자연소멸하기 까지는 최장 200년이 소요될 것으로 예측되고 있다.

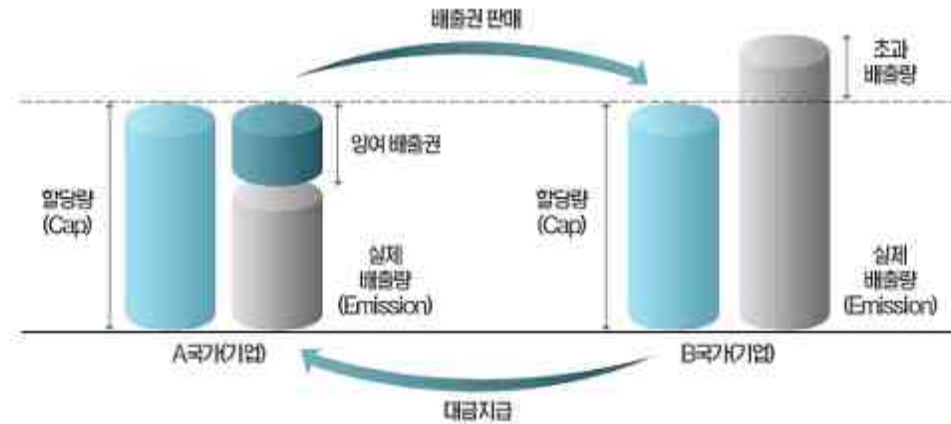


순위	국가	발생량 (100만ton)
1	중국	9,977
2	미국	5,233
3	인도	2,407
4	러시아	1,812
5	일본	1,246
6	독일	759
7	대한민국	616
8	이란	611
9	사우디	519
10	캐나다	503

CO₂ 배출량 국가별 비교 (출처 : Global Carbon Project, 2013)

유엔기후변화협약(UNFCCC) 보고서에 따르면 우리나라는 연간 6억톤 이상의 CO₂를 발생시키며, 전 세계 7위의 배출량을 나타내고 있다. 특히 온실가스 총배출량의 85~90%를 차지하는 천연연료에 의한 연소배기가스는 연간 5억8천만톤에 달하고 있다. 이에 정부에서는 저탄소기술 개발 촉진 등 신성장 동력 창출을 위해 2020년 배출량을 전망치(BAU) 대비 30% 감축한다는 목표 아래 올해부터 탄소 배출권 거래제(Emission trading)를 수행하고 있다. 탄소 배출권 거래제란, 온실가스를 배출하는 사업장을 대상으로 연 단위 배출권을 할당해 배출행위를 할 수 있도록 하고, 할당된 배출권 중 남는 부분에 대해 거래를 허용하는 제도를 말한다.



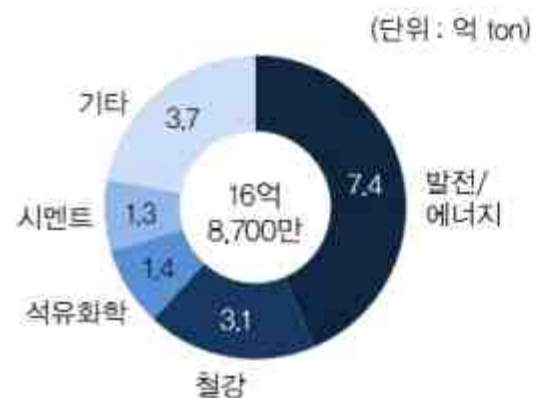


탄소배출권 기본개념

그러나 국내 기업들은 환경을 위한 제도 시행에는 찬성하나, 규제강도가 지나치게 높아 산업경쟁력이 악화될 것을 우려하고 있다. 실제로 외국기업이 국내 투자를 중단하는 사례가 속출하고 있으며, 공장의 신·증설 포기, 생산물량 해외 이전 등 알려진 투자 중단 규모만 1조원이 넘는 것으로 보고되고 있다.

이러한 사회적 요구에 따라 콘크리트를 비롯한 건설업계에서도 탄소저감형 구조재료와 에너지 절감형 공법, 폐기물의 재사용 등이 그 대안으로 제시되고 있다. 이 중 주된 기술은 기존 CO₂ 발생량이 가장 높은 시멘트의 사용량을 최소화하는 기법이며, 건설폐기물 등을 재활용하여 골재로 활용하는 기술 등이 있다.

그러나 건설업에서는 CO₂를 직접적으로 이용/흡수/저장하는 관련기술은 아직 미흡한 실정이며, 이러한 재료 및 설비의 도입에 대해서도 소극적 자세를 취하고 있다. 특히 콘크리트의 경우 새로운 혼화재료 등을 개발한 후 각종 물성과 역학 및 내구특성 등의 저하여부를 판별하는데 상당한 시간 및 비용이 소요되며, 이 과정에서 재료비 상승과 설비 도입에 의한 단가상승이 나타나 실제로 신기술 및 신재료가 도입되는 데에는 상당한 어려움이 있는 실정이다.



산업별 온실가스 배출 할당량

본 연구에서는 CO₂를 포집/저장하여 제조되는 요소를 연간 수요량이 1억m³, 매출액은 약 3조원 이상을 상회(출처: 한국레미콘공업협회, 2012)하는 콘크리트 산업에 적용하고자 한다. 이를 통해 건설·토목산업의 발전에 힘입어 CO₂ 포집량의 동반상승을 꾀하며, 향후 연료연소에 의해 배출되는 이산화탄소를 크게 저감시킬 수 있을 것으로 기대된다. 이를 위해 본 정부지원과제에서는 개발되는 재료의 역학적 장·단점뿐만 아니라 적용 시의 성능 저하여부, 콘크리트의 현장적용성 및 재료의 경제성 등을 두루 검토하여, 향후 기업활용을 위한 구체적 방안과 연구의 기술·사회적 가치를 부각시킬 필요가 있을 것으로 판단된다.

(2) 콘크리트 균열피해와 그 대책

한편 전 세계적으로 기후변화로 인한 홍수 및 가뭄피해가 급증하고 있는 가운데 국내에서도 이러한 피해를 미연에 방지하고 지역 균형발전과 녹색성장 기반을 구축하기 위한 4대강 정비사업을 추진한 바 있다.

그러나 현재 4대강에 완공된 콘크리트 구조물 곳곳에서 균열로 인한 누수현상이 심각하게 대두되고 있다. 대구 달성보와 합천 창녕보를 비롯한 6개의 보에서 물받이공 누수현상(2014.12 기준)이 나타났으며, 이는 모두 콘크리트의 균열에 의한 것으로 확인되고 있다. 이러한 대형구조물의 균열현상은 1·2차의 보수·보강으로 해결되기 어렵고 취약부위에서 끊임없는 사회적 비용을 초래할 뿐만 아니라 구조물의 수명감소로도 이어지고 있다.



4대강 보 누수현황
(출처 : 연합뉴스, 2014.12)

건축·토목의 대형구조물에 발생하는 균열의 경우 설계 및 시공상 유발되는 원인을 한가지로 특정할 수 없으나, 대체로 매스부재의 중심 및 표면부 온도차에 의한 응력균열로 판단할 수 있으며, 더불어 초기 보양 미흡과 배합설계 불량으로 인한 건조수축균열이 그 원인이라 할 수 있다.



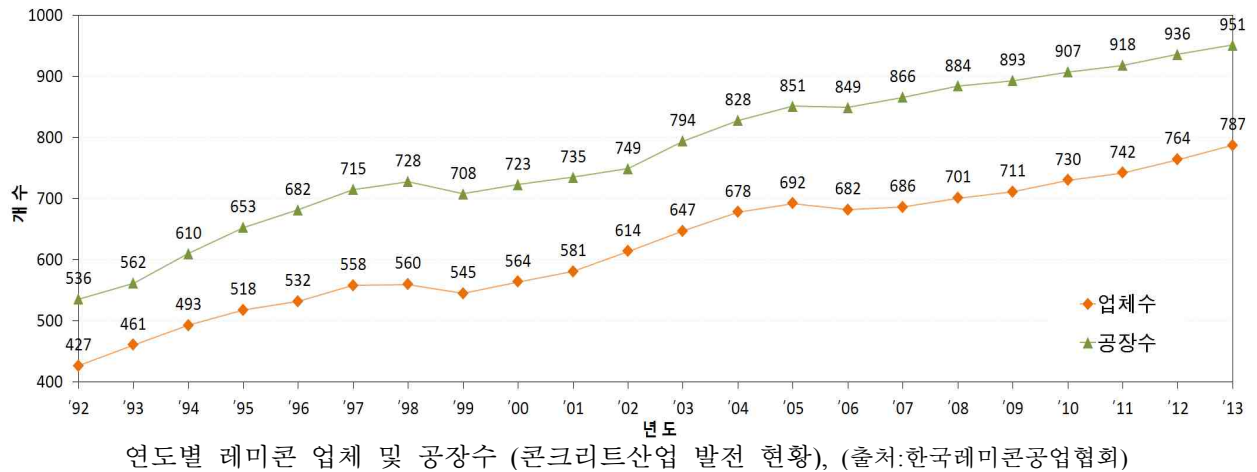
4대강 보 누수현황



건조수축에 의한 소성균열

습식공법인 콘크리트 부재에서 수분의 증발 및 건조에 의한 건조수축과 비교적 부재단면이 큰 매스구조물에서 발생하는 온도응력균열은 피복콘크리트의 표면소성균열과 관통균열에 관여하여 보수보강에 의한 경제성 문제 뿐만 아니라 구조안전성에도 악영향을 미치고 있다. 이에 연구자들은 콘크리트 균열을 최소화하기 위한 여러 신기술 및 공법을 개발·제시하고 있으나, 단가상승 등의 경제성 문제와 시공상 곤란함 등으로 콘크리트의 균열은 아직까지 미제의 문제로 남아있는 실정이다.

콘크리트의 생산과 품질을 담당하는 레미콘 공장의 경우 콘크리트 균열과 보수·보강 비용으로 연간 1천만원 이상이 소모되고 있다.(레미콘 R사, S사 내부자료) 2013년 기준 서울 경기 183개를 비롯하여 전국 951개의 레미콘 공장을 기준으로 볼 때 연간 약 100억원의 비용이 소모되고 있는 것이다. 또한 하자발생 시 동일한 구간에서 재하자가 나타날 확률은 통계적으로 약 20%를 웃도는 것으로 알려져 있으나 업계에서는 이보다 더 높을 것으로 예상하고 있다.



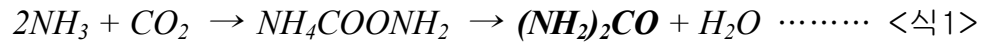
(3) CO₂ 등의 환경부하물질을 주원료로 제조되는 Urea

최근 Mitsubishi 중공업은 베트남의 석유화학 회사인 페트로베트남 화학비료공사의 요소(Urea) 비료 제조 플랜트 전용으로 CO₂ 회수 기술을 적용함으로써, 탄소배출저감 뿐 아니라 기존 비료 플랜트의 요소 증산을 도모할 수 있게 되었다. 이 기술의 CO₂ 회수 능력은 240톤/일 이며, 이는 특수 흡수액을 이용해 연소 배기가스로부터 순도 99%의 CO₂를 분리·회수하고, 암모니아와 합성하여 요소의 증산을 도모하는 기술이다. 배기가스로부터 CO₂ 집진율은 약 90%에 달하며 요소의 생산 및 소비가 가속화 될수록 CO₂ 흡수량이 늘어난다는 측면에서 매우 고무적인 기술이라 설명하고 있다.

본 기술은 미쓰비시 중공업과 페트로베트남(PVFCCo), 한국의 삼성 엔지니어링이 공동으로 참여하였다.

반면 국내에서는 기존 농작물의 성장발육제(비료)나 미생물배양제 등 극히 제한적인 용도를 제외하고는 수요가 미미한 실정이다. 이에 국내 요소의 제조 및 판매는 S화학에서 단독으로 하고 있으며, 연소배기가스로부터 집진하는 설비 등이 구축되지 않고 화학재료의 구성에 따라 제조하고 있는 실정이다.

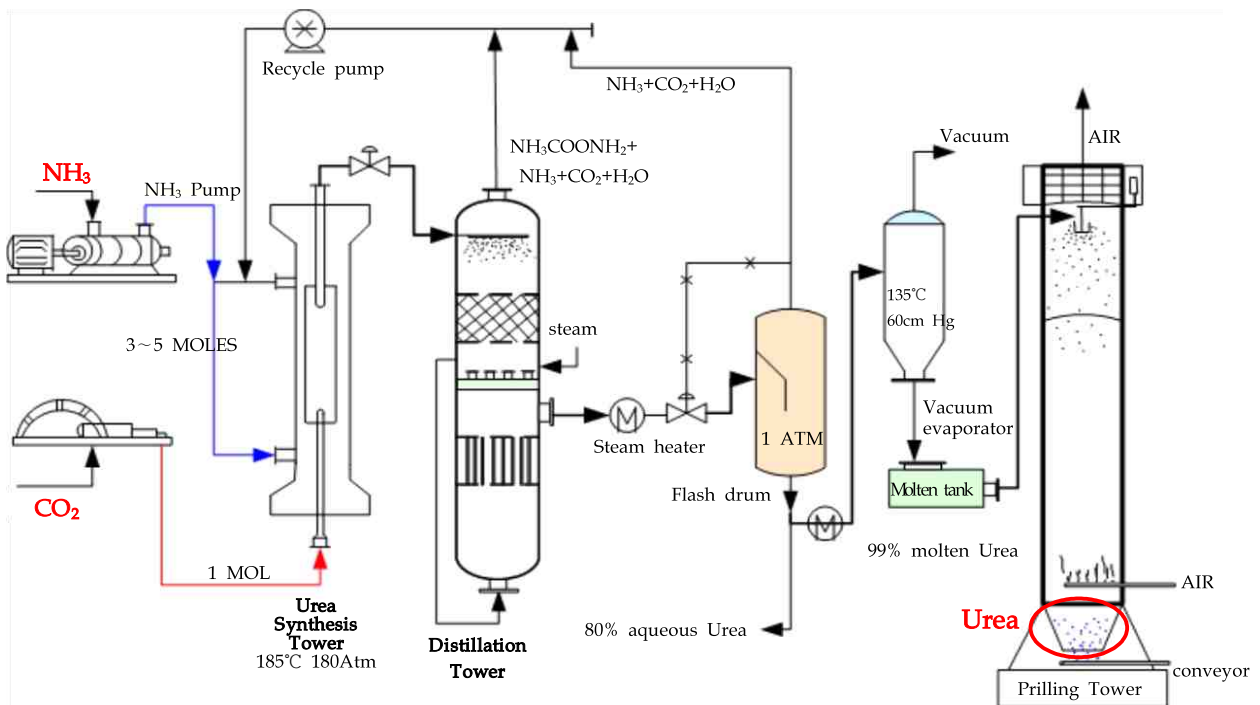
이산화탄소와 암모니아로부터 생산되는 요소의 화학적 제조식은 아래와 같다.



<식1>과 같이 요소는 액체 암모니아(NH₃)와 기체 이산화탄소(CO₂)의 결합으로 이루어진다. 이산화탄소 뿐만 아니라 암모니아의 경우도 환경부하물질로 지정되어 있어, 이는 충분히 친환경적 건설재료라 할 수 있을 것이다. 요소는 메탄올과 에탄올, 물에는 용해되지만 에테르, 벤젠에는 녹지 않으며, 녹는점 이상으로 가열하면 시아누르산(Cyanuric), 뷰렛(Biuret)으로 변형되는 특성을 갖고 있다. 아래의 그림 및 표에는 요소의 제조 공정과 제조 후 제품, 재료의 물리·화학적 특성을 각각 나타내었다.



연소배기가스 탈탄 장치(베트남)



요소(Urea)의 제조 공정

제조된 요소의 물리·화학적 특성

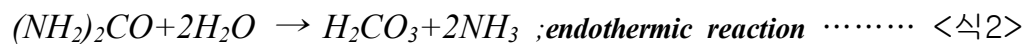
명 칭	화학식	분자량	비 중	녹는점(℃)	색 상
UREA	(NH ₂) ₂ CO	60.06	1.335	132.7	흰 색

(4) 콘크리트 수화열 저감 및 균열제어가 가능한 요소혼입 콘크리트 개발

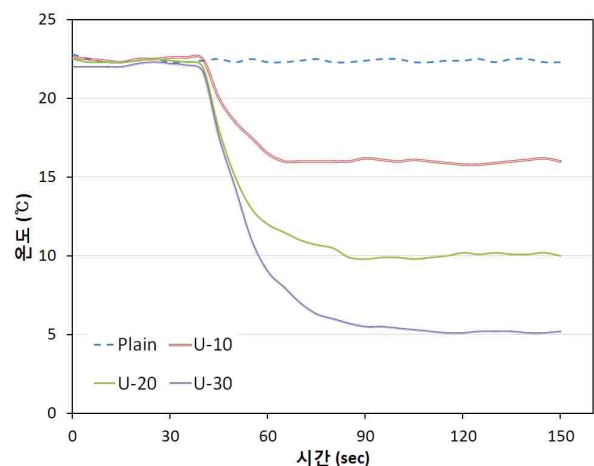
본 과제에서 수행하고자 하는 연구의 최종목표는 콘크리트의 균열저감이다. 일반적으로 콘크리트에 균열이 발생하는 원인은 다음의 두 가지로 대표되고 있다.

- ① **온도응력균열**: 한중 및 매스콘크리트의 높은 수화열로 인해 부재 내·외부의 상이한 온도응력이 발생. 높은 열에 의한 부재의 팽창은 외부구속과 맞물려 경화 후 표면 및 관통균열을 발생.
- ② **건조수축균열**: 배합당시 콘크리트 내 포함되어있던 수분(잉여수)이 경화 후 외부로 증발되어 빈 공간의 수축압력이 작용. 심할 경우 철근 침하와 표면 소성균열 등으로 나타남.

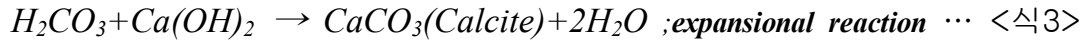
상기의 두 가지 쟁점은 콘크리트의 균열발생 원인 중 90% 이상을 차지하고 있어, 건설 신기술과 국가지원과제 등 콘크리트의 내구성 증진을 위한 연구에서는 대다수 이에 대한 해결방안을 다루고 있으며, 개발기술의 현장적용 또한 활발히 이루어지고 있다. 본 연구에서는 두 가지 쟁점을 동시에 해결하기 위한 콘크리트용 혼화재료로 요소를 제시한다. 요소는 콘크리트 내에 혼입되어 다음의 화학반응을 나타낼 것으로 기대되기 때문이다.



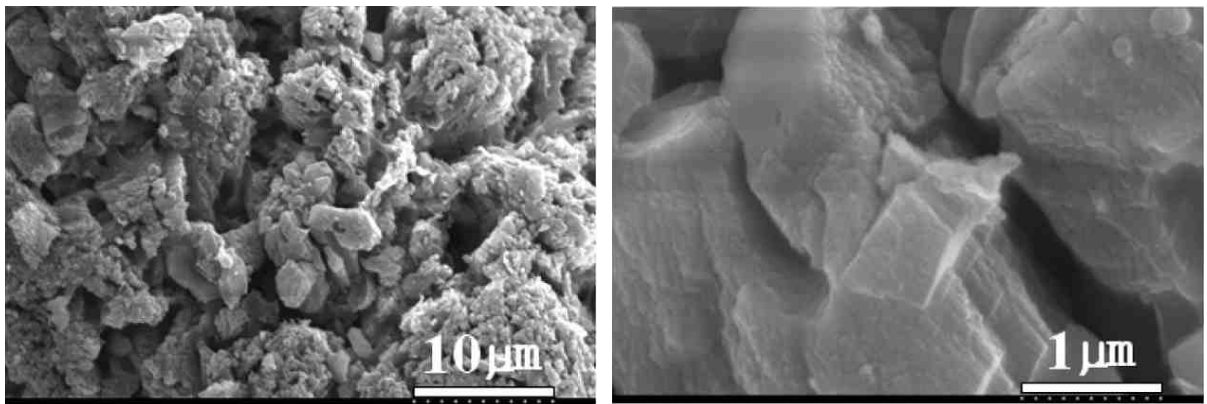
<식2>는 콘크리트 재료 중 하나인 물과 요소가 반응하는 식으로 흡열반응(Endothermic reaction)을 일으킨다. 이는 콘크리트 입자내 물(잉여수)이 존재하는 한 수화 이후에도 지속적 반응을 나타내어, 수화열을 대폭 저감할 수 있을 것으로 기대된다. 우측 그림은 물에 혼입량을 달리한 요소(용질)를 용해하여 시간에 따른 온도변화를 나타낸 것이다. 실험결과, 요소 용해 직후 온도가 급격히 하강하는 것을 확인하였으며, 대체로 80초 이내에 최저온도에 도달하였다. 용액의 농도별로는 10%는 5℃, 20 및 30%는 각각 10℃, 15℃의 온도저하를 나타내었다. 이를 통해 콘크리트 매스구조물 등의 중심부 최고온도 저감과 응결지연성능을 나타낼 수 있을 것으로 확인되었으며, 내·외부 응력제어와 균열지수 증가를 도모할 수 있는 혼화재료로 평가된다.



요소 용해 시 온도저하



두 번째로 <식3>은 $CaCO_3$ 생성에 기인한 팽창반응(Expansional reaction)이다. 본 반응식은 <식2>에서 생성되는 탄산(H_2CO_3)이 시멘트 수화 시 발생하는 수산화칼슘과 반응하는 것으로 수화 이후의 2차반응이라 할 수 있다. 여기서 생성되는 $CaCO_3$ 는 시멘트의 수화생성물이기도하며, $CaCO_3$ 의 증가로 콘크리트 강도증진을 예측하는 도구가 된다. 또한 최근 연구가 활발히 진행 중인 자가치유 콘크리트 혹은 미생물 콘크리트의 경우도 미세구조 내 $CaCO_3$ 생성메커니즘을 적용하여 공극 밀실화와 균열치유 등에 효과를 보고하고 있다. 그러나 본 연구에서는 혼화재료의 혼입량 조절을 통해 조직 밀실화를 넘어 수화과정에 팽창특성을 부여하고 이의 수축상쇄효과를 검토하고자 한다. 기존에 팽창특성이 보고된 혼화재료로서 혼입량과 혼입방법이 검증될 경우 높은 성능구현이 가능한 콘크리트용 혼화재료의 개발이 기대된다.



시멘트 내 방해석 석출 SEM image

(출처: 김화중 등, 미생물의 방해석 석출 작용을 이용한 자기보수 스마트 콘크리트 개발에 관한 연구, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 22(4), 2010)

요소혼입 콘크리트의 해결쟁점 또한 존재한다. 요소의 생산은 이산화탄소와 암모니아의 결합으로 이루어지며, 물과 반응하는 이른바 1차반응식에서 암모니아는 기화된다. 이에 콘크리트 믹싱과 이동, 타설 등의 일련의 시공과정을 통해 콘크리트 내부에 포함된 암모니아 기체는 대부분 소멸되나 공극 중에는 여전히 잔류할 수 있으며, 이는 이 후 거주자 및 사회적 환경 등에 좋지 않은 영향으로 작용될 우려가 있다. 이는 콘크리트 타설 후 암모니아 용출량과 수화 시의 화학분석 등으로 정량화할 필요가 있다.

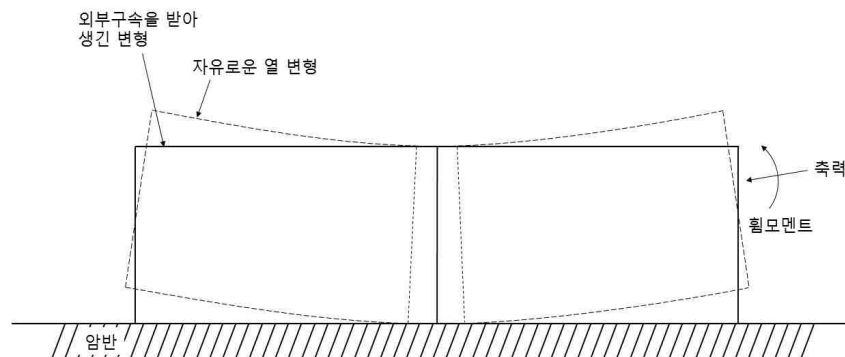
요소 혼입 시의 또 다른 특이사항은 굳지않은 콘크리트의 물성변화이다. 요소는 물에 쉽게 용해되어 물 100g에 545g의 용해도를 나타낸다.(유통업체 S화학 자체자료) 이에 콘크리트가 믹싱되는 사이 요소가 용해된 용액이 생성되며 그 부피가 현저히 늘어나게 된다. 기준배합과 동일한 단위수량을 설정하고 요소를 20%이상 다량 혼입될 시에는 재료분리의 위험성을 안고 있는 것이다. 이는 증점제를 추가 혼입하는 방식이나 단위수량을 적절히 치환하는 설계방법 등으로 그 해결방안을 모색해야 할 것으로 사료된다.

나. 연구개발의 중요성

(1) 기술적 측면

- ▶ '수화열 감소'와 '건조수축 제어'를 동시에 고려한 콘크리트 배합기술은 전무
- ▶ 방해석 석출작용을 통한 수축제어 성능은 향후 자가충전 콘크리트 관련기술과 연동하여 발전시킬 수 있을 것
- ▶ 일본 등의 해외 의존도가 높은 화학 및 재료관련 기술을 국산화하여 건설기술의 부가가치 창출

콘크리트 구조물에 발생하는 균열 중 건조수축과 온도응력에 기인해 발생하는 균열은 전체 발생량의 90% 이상을 차지하고 있으나, 해결방안에 관한 기술수준은 아직 미흡한 실정이다. 매스콘크리트의 수화열로 인한 온도응력과 수축변형은 구조 안전성에 높은 악영향을 미치며, 구조물 간의 부등변형을 유발[그림14]하고 구조물의 안전을 위협하는 위험한 상황까지 초래할 수 있다.



높은 수화열에 의한 구속응력

상기 언급된 두 가지 균열발생 원인은 하나만 선택적으로 나타나지 않으며, 여러 요인이 함께 발생하는 경우가 대부분이다. 따라서 건조수축과 온도응력을 모두 고려한 기술개발이 절실히 요구된다.

그러나 기존의 수화열 제어를 위한 재료 및 공법은 성능의 한계가 도출되고 있으며, 정확한 사용 가이드라인을 제시하지 못하는 문제점을 갖는다. 특히 공법을 통한 기법은 단가 상승 등의 곤란함과 작업자의 숙련도에 따라 큰 성능차이를 나타내고 있으며, 또한 재료에 의한 기법은 다른 열화가능성에 취약한 문제와 성능한계 등을 나타내는 실정이다. 이에 저단가 및 친환경을 갖춘 본 기술은 구조체 장수명화에 기여할 영향이 매우 클 것으로 기대된다.

[표3] 수화열제어의 기존 기술현황

항목		장 점	문 제 점
구 분	내 용		
재료적 고려	▶ 저발열 시멘트 사용 (2, 4종)	▶ 저감 성능양호	▶ 경제성 불리 ▶ 재료수급 곤란
	▶ 혼화재 치환	▶ 경제성 양호 ▶ 저감성능 양호	▶ 초기강도 저하 ▶ 치환량 증가에 따라 수축량 크게 증가 ▶ 탄산화 저항성 불리
	▶ G. Max 증가	▶ 경제성 양호	▶ 시공 번잡, 저감성능 취약
	▶ 비빔온도 낮춤	▶ 저감성능 양호	▶ 냉각설비 필요 ▶ 경제성 불리
공법적 고려 (구조,시공)	▶ 프리 쿨링 ▶ 파이프 쿨링	▶ 확실한 성능향상	▶ 철근량 증가 ▶ 고비용, 경제성에 매우 취약
	▶ 수평분할 타설	▶ 시공 용이	▶ 접합부 일체의 구조적 문제 ▶ 공기증가, 비용상승

한편 최근 이슈화되는 연구의 주제 중 자가치유(Self-healing)에 관한 연구가 진행되고 있다. 이는 경화 후 수분의 증발 및 이동으로 인해 발생하는 미세구조 내 공극을 자가 충전하여 수축과 변형응력에 대응하는 것이다. 본 연구의 방해석 석출작용과 경화 후 수분생성반응은 이와 유사한 메커니즘을 나타낼 것으로 사료되며, 상기 연구와 연동하여 기술적 시너지를 나타낼 것으로 판단된다.



자가충전 콘크리트 메커니즘

(출처: M. Roig-Flores, Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments, Construction and Building Materials, V.86(1), 2015)

또한 4대강 사업 등의 예에서 볼 수 있듯이 대형 구조물의 건조수축 및 수화열로 인한 균열 문제는 대형 구조물에서 콘크리트를 대체할 재료가 개발되기 전까진 계속해서 대두될 문제이며, 문제점 해결을 위해 현재로서는 국내보다는 외국 기술에 의존도가 높은 실정이다. 본 기술개발을 통해 외국기술에 의한 시장잠식 및 외화낭비를 방지하고 국내 건설기술의 부가가치를 창출하고자 한다.

(2) 경제·산업적 측면

- ▶ 건조수축 및 온도응력균열로 인해 연간 90억 가량의 비용이 소모
(한국레미콘공업협회 추산)
- ▶ 콘크리트의 연간 소비량은 국내만 1억^{m³}, 해외는 2억^{m³} 이상으로 추산
→ **우수한 경제성을 갖춘 혼화재료 요구**
적은 혼입량으로 높은 성능을 구현 할 **친환경 건설재료에 대한 수요 증가**

4대강 사업 등의 예에서 볼 수 있듯이 대형 구조물의 건조수축 및 수화열로 인한 균열 문제는 대형 구조물에서 콘크리트를 대체할 재료가 개발되기 전까진 계속해서 대두될 문제이며, 문제점 해결을 위해 현재로서는 국내보다는 외국 기술에 의존도가 높은 실정이다. 이에 취약부위의 재하자율이 증가될수록 관련 해외기술의 시장잠식과 외화낭비는 더해질 예정이며, 현재로서는 특별한 대응조치가 이루어지지 않고 있다.



수화열 균열 보수기법

또한 RC구조물의 수명을 50년으로 가정하여 LCC(Life cycle cost)비용을 분석한 결과, 운영 및 유지관리 비용이 건설비용 대비 5배 이상에 달하는 것으로 나타났다. 이는 전체 LCC비용에 4/5에 달하는 것으로 이를 줄이기 위해서는 구조물 설계 및 시공단계의 내구성 및 보수설계가 절실히 요구되고 있다.

또한 현장 시공성의 증대 및 콘크리트 품질 개선을 통해, 나아가 중동 및 아프리카, 동남아시아 등 공사시 열적 조건이 열악한 지역의 건설 활성화에 본 개발 기술을 적용한다면 새로운 공사기법의 소개와 제품 홍보를 통해 수출망 확보가 가속화 될 것으로 전망된다.

(3) 사회·문화적 측면

- ▷ 요소혼입 콘크리트의 소비가 가속화 될수록 **CO₂ 및 NH₃ 소모량 증가**
- ▷ 환경부하물질을 포집·재사용하는 관련연구 촉진 기대
 - 폐기물을 재사용하는 소극적 활용이 아닌 **환경부하물질을 직접 재사용**하는 적극적 기법이 개발

현재 국내에는 신국제공항, 고속철도, 대규모 해양구조물, LNG 지하저장탱크, 초고층 빌딩의 대형기초 및 4대강 사업에 건설되는 부수시설 등과 같이 초대형 구조물의 시공이 증가하고 있다. 이에 건축, 토목 등에 광범위하게 사용되는 레디믹스트 콘크리트는 사용량이 점점 대형화 되고 있으며, 콘크리트 균열 문제가 지속적으로 대두될 경우 향후 사회적 문제로 발전될 가능성이 있다.

본 기술은 CO₂를 포집·회수하고 회수된 CO₂를 소비하는 기술로서, 이를 수요가 충분한 건설(토목)재료에 적용하고자 하는 것이다. 따라서 요소의 생산 및 소비는 곧 CO₂ 및 NH₃ 저감과 직결되어, “저탄소 녹색성장”의 사회 정책과 부합되는 기술이라 할 수 있다. 본 과제를 계기로 건설재료의 개발연구에서도 환경부하물질을 포집·재사용하는 관련연구가 촉진될 것으로 기대된다. 폐기물 등을 재사용하는 소극적 활용이 아닌 환경부하물질을 주재료로 하는 새로운 재료의 개발 등이 요구되어진다.

(4) 종합 결론(SWOT)



연구의 중요성 SWOT 분석

2. 연구개발의 목적

가. 연구개발 최종목표

(1) 최종목표

과제 초기의 기술심화 수준은 재료·자재 유형 중 TRL.1(순수이론)단계에서 TRL.2(기술적응용, 아이디어 형성)단계로 발전되는 시기였으며, 현재 연구 종료 시에는 TRL.4(실험실 환경에서 샘플의 성능 및 신뢰성 평가)단계로서 모의부재 제작시험 등을 수행했다.

본 연구는 고온·건조한 기후 등 열적조건이 취약한 환경, 혹은 부재단면이 일정치를 초과하는 건축 및 토목의 매스구조물 등을 대상으로 콘크리트의 균열을 최소화할 목적으로 계획되었다. 이에 콘크리트 균열발생의 주원인으로 지적되는 2가지 쟁점(건조수축, 온도응력)을 동시에 해결할 수 있는 새로운 혼화재료를 개발하고자 하였으며, 이를 통해 달성할 수 있는 기술적 연구목표는 다음과 같다.

▶ 습식부재인 콘크리트에서 건조수축에 의한 변형과 균열은 끊이지 않는 사회적 이슈로 대두되고 있으며, 이를 시공단계의 재료적 측면에서 예방할 필요

① 동일 실험환경에서 콘크리트 길이변화율을 평가하여 Plain 대비 재령 28일 기준 50%, 재령 91일 기준 60% 이상의 변화율 저감 달성 [1차년도]

▶ SOC를 포함한 플랜트 및 초고층 및 장대교량 등 건축물에서는 부재단면이 80cm를 초과하는 매스콘크리트가 흔히 적용돼 내·외부 온도차에 의한 관통균열 등 구조적결함을 야기

② 중심부 수화발열을 제어하는 방식으로 1.5이상의 온도균열지수(Icr)를 확보하여 수화열로 인한 균열발생확률을 10% 이내로 제한 [1차년도]

▶ 요소와 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 반응에 기인한 방해석 석출작용은 건조수축을 상쇄할 뿐만 아니라 시멘트의 공극충진에도 기여할 것으로 기대

③ 위 ①, ②의 기준치를 만족함과 동시에 기존 콘크리트가 갖는 기초적 물리·역학 특성은 동등이상으로 유지할 수 있는 최적의 배합설계를 도출 (압축·인장강도, 탄성계수·프와송비, 내구성, 유동특성 등) [2차년도]

▶ 콘크리트의 현장적용과 실용화를 위한 단계로 B/P와 Mock-up 테스트를 수행

④ 모의부재의 균열평가로 Plain 대비 30% 이상의 균열(폭/개수)을 저감 [2차년도]

(2) 최종목표의 성격 및 설정근거

연구의 기술적 최종성과물은 ①, ②, ③을 포괄하는 요소혼입콘크리트 표준배합설계의 완성(TRL.3)이며, 나아가 대량생산 구축을 위한 적용성 평가로서 ④ B/P test와 Mock-up test(TRL.4)를 각각 완료하는 것이다. 또한 콘크리트가 필히 가져야하는 역학적 성능은 장기간의 검토와 관찰이 요구되어지므로 1차년도에 문헌연구와 물리적 관찰을 토대로 2차년도에 도출될 것으로 사료된다.

여기서 콘크리트의 표준배합설계는 전국의 레미콘사와 건설사 등에서 활용 가능한 콘크리트의 설계기술이며, 이는 기술수준 중 시작품 개발에 해당된다. 본 단계에서 설계 및 정립될 세부기술은 아래와 같다.

- ▶ **요소의 혼입 형태** : 혼화제(Agent) 혹은 혼화재(Admixture)
액상(Liquid) 혹은 분말(Powder)
- ▶ **요소의 치환 방법** : 결합재(Binder) 치환 설계
단위수량(Unit water content) 치환 설계
골재(Aggregate) 치환 설계
- ▶ **요소의 최적 혼입량** : 단위결합재량 및 W/B를 고려하여
중량대비 1~20% 이내로 설계
- ▶ **강도 및 역학적 성능의 저하여부 판별, 촉진 탄산화 등 내구도 평가**
- ▶ **최적의 수화열, 수축저감 성능을 고려한 혼입량 및 혼입형태를 결정
하고, 물리적 유동특성을 만족하는 최적 치환설계방법을 결정**
- ▶ 여기서 도출되는 최적 설계방법은 연구의 시작품에 해당됨.
특히 콘크리트가 기본적으로 가져야 하는 강도 및 역학적 성능, 수축저감 성능 등은 장기간의 관찰 및 검증이 필요하여, 2차년의 연구기간은 적절한 것으로 판단됨.
- ▶ 개발되는 시작품(요소혼입 콘크리트 배합설계)은 실험실 실험을 통해 도출되므로 반드시 Batch plant 물성평가와 Mock-up을 통한 적용성 평가가 동반되어야 할 것으로 판단됨.

(3) 정량적 성과목표 및 성과지표

연차	연차별 성과목표	성과지표	측정방법	목표치	가중치
1차년도	콘크리트의 고내구성 혼화재료 개발	국내 학술지 논문게재	국내 학술지 게재 논문건수 ×1	1건	20%
		국내 지적재산권 확보	특허 출원 건수 ×1	1건	20%
2차년도	요소혼입 콘크리트 최적 배합설계	국외 학술지 논문게재	국외 학술지 게재 논문건수 ×1	1건	40%
		국내 지적재산권 확보	특허 출원 건수 ×1	1건	20%
소 계					100%

3. 연구개발의 범위

가. 연구 수행 범위

(1) 선행연구 사례조사 및 연구방향 설정 <1차년도>

- 기존기술 및 연구동향을 통한 실험의 비교군 설정
- 연구목표 달성을 위한 전문가 회의 등

(2) 모르타르 등 시멘트복합체의 화학구성 및 미세구조 분석 <1차년도>

- XRD, XRF분석을 통한 경화체 내 화학변형 검토
- 흡열반응의 발열량 검증 및 세공분석을 통한 미세구조 관찰

(3) 콘크리트 최적 배합설계 수행 <1차년도>

- 요소의 적정 혼입량, 혼입방법 등 계획
- 요소의 비교군으로 기존 저발열결합재 등 수축저감 혼화재료 설정

(4) 요소혼입 콘크리트 최적 배합설계 도출 <1차년도>

- 요소의 적정 혼입량, 혼입방법 등 계획
- 요소의 비교군으로 기존 저발열결합재 등 수축저감 혼화재료 설정

(5) 요소혼입 콘크리트의 성능 검증 및 결과분석 <2차년도>

- 굳지않은 콘크리트의 슬럼프, 공기량, 경시변화 등 재료분리 가능성 대응
- 압축강도, 인장강도, 탄성계수 등 기초적 역학 특성의 장기 재령 관찰
- 촉진탄산화 등 기본 내구특성 검증
- 건조수축 및 수화열 저감성능 평가

(6) Mock-up test <2차년도>

- 실제의 매스콘크리트를 가정한 부재(Mock-up)제작
- 레미콘 배처플랜트(B/P)를 통한 대량생산 가능성 검토
- 단·장기재령의 수축 및 온도응력 특성 확인 및 균열의 폭/길이 정량적 파악

나. 연차별 연구목표에 따른 주요연구내용

연차	연구목표	주요연구내용
1차년도	▶ 요소의 시멘트 내 반응성고찰 - 반응특성 및 시멘트경화체 화학구성 관찰/확보 (특허출원 시 참조자료 활용) ▶ 수축저감 콘크리트의 제조 - 재령 91일 기준 Plain 대비 40% 수준의 수축율 달성 ▶ 매스콘크리트의 온도균열지수 (Icr) 1.5이상 확보 - 중심·표면 온도차 20℃ 이내 - 균열발생확률 10%이내 ▶ 콘크리트 물리·역학·내구특성 Plain대비 동등 이상 확보 ▶ 암모니아(NH₃) 배출 시 환경 영향성에 관한 고찰	▷ 시멘트경화체의 화학구성 및 미세구조분석 - SEM, XRD·XRF, 세공분석 ▷ 성능평가를 위한 실험실 시험수행 - 배합 : Plain, 요소 혼입 유무 및 혼입량, 기존 저발열결합재(슬래그, 플라이애시) - 실험 : 슬럼프, 응결시간 등 유동특성 압축강도 및 탄성계수 촉진 탄산화 및 동결융해 저항성 ▷ 수화열 저감성능 평가 - 단열온도상승실험을 통한 최고온도계수(K) 및 반응속도계수(α)의 도출 ▷ 건조수축 저감성능 평가 - 자유상태 건조수축 변형특성 평가 (소정 재령별 수축율 달성여부 검토) ▷ 내구성 저하여부 검증 - 개발재료의 촉진 탄산화저항성 평가 ▷ 암모니아 배출량 평가 - 경화 후 암모니아 용출특성 관찰
2차년도	▶ 건조수축·수화열 저감이 동시 가능한 최적 배합설계 도출 ▶ B/P 생산을 통한 적용성 평가 - 대량생산을 위한 배처플랜트 적용실험 검토 ▶ Mock-up(시작품) 제작 - 매스콘크리트 간이 제작 - Slab형 시제품 간이 제작	▷ 실험실 시험을 통해 최적 배합설계 자료 도출 - 1차년도 성능평가를 바탕으로 최적 설계 확보 ▷ Batch plant 적용 시 물성변화 및 강도 평가 - 대량생산 시의 요소 용해도 확인 - 슬럼프 등의 유동특성 및 경시변화 확인 ▷ Mock-up 제작·수화발열 수축상쇄 성능평가 - 중심·표면부 온도차 검토 - 수축응력 및 변형률 검토 - 균열발생의 정량적 평가(균열폭/발생개수)

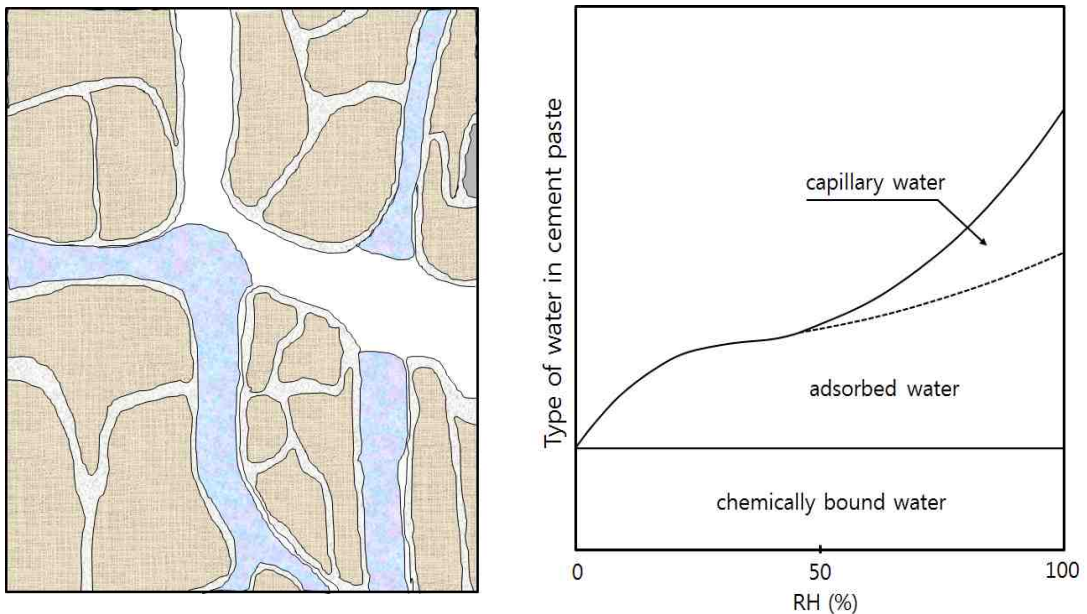
제2장. 국내·외 기술개발 현황

1. 콘크리트의 건조수축 저감에 관한 선행연구 분석

콘크리트 균열의 가장 대표적 원인은 건조수축과 온도응력으로 크게 분류된다. 각각의 균열원인은 발생메커니즘이나 제어기법에 차이가 있으나, 콘크리트의 심미적 및 구조적 문제를 야기한다는 점에서 공통된다. 본 장에서는 균열의 발생과정과 기존 연구에서 보고하는 제어대책 등을 기술한다.

가. 건조수축 기구

콘크리트 내부의 공극구조는 겔공극(Gel pore)과 수십 nm에서 μm 에 이르는 다양한 크기의 모세관공극(Capillary pore)으로 이루어져 있다. 일반적으로 겔공극 내의 결합수는 그 결합력이 강하여 대기습도 상태에서는 이동하지 않는다. 따라서 건조와 관련되는 수분은 모세관 공극 내 수분이며, 그 형태는 그림과 같다.

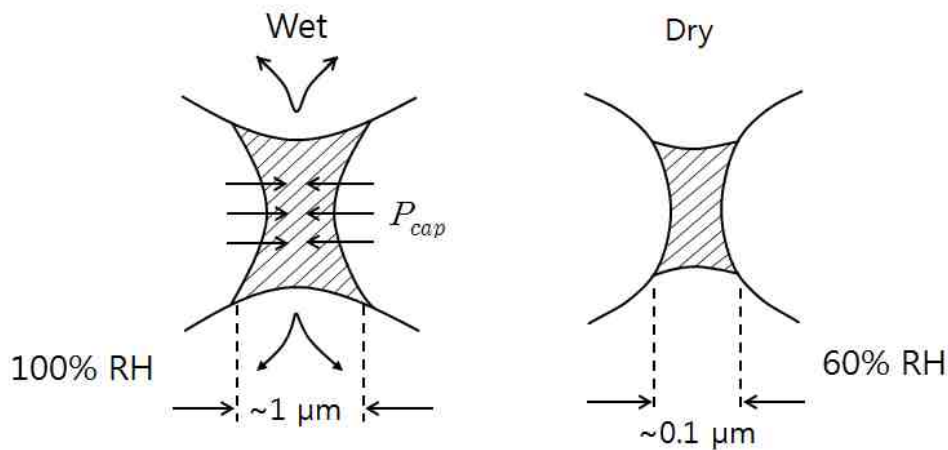


미세구조 내 수분분포와 흡착등온선

Acker, P.(2001)에 따르면 건조수축은 시멘트 수화물의 화학적 반응이나 광물의 성질에 의한 영향이 아닌 수분증발에 따른 물리적 거동으로서, 모세관장력과 표면장력기구, 분리응력기구 등의 물리적 이동형태로도 분류될 수 있으며, 각각의 현상에 대한 많은 이론적 연구가 진행되고 있다. 현재까지 보고된 콘크리트의 건조수축 메커니즘은 다음과 같다.

(1) 모세관장력(Capillary pressure) 기구

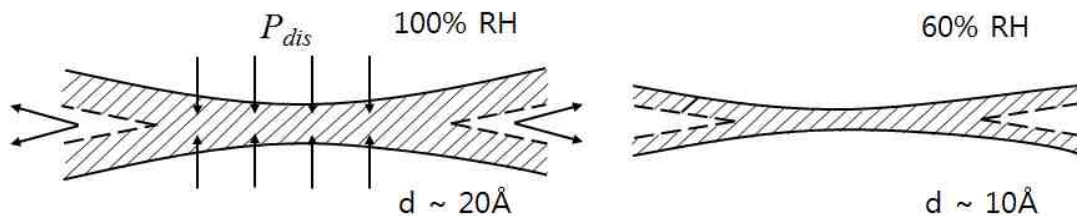
페이스트의 모세공극 내 존재하는 수분은 공극내벽 표면장력에 영향을 받게 된다. Slowik(2008), Beltzung(2005) 등은 작은 공극 내 존재하는 수분이 곡면을 형성하여 인접한 입자들을 끌어당기는 표면장력에 의해 인장력이 작용하는데, 이때 수분의 증발이 발생하게 되면 곡면의 크기가 작아지면서 입자들의 위치가 가까워져 외형적 건조수축이 발생하게 되는 것으로 보고하였다. 이러한 작용에 의한 수축은 건조가 더욱 진행되어 모세곡면을 형성하지 못할 때 인접 입자들의 거리가 멀어지면서 더 이상 수축력을 발휘하지 못하게 된다.



모세관장력에 의한 건조수축 메커니즘

(2) 분리응력(Disjoining pressure) 기구

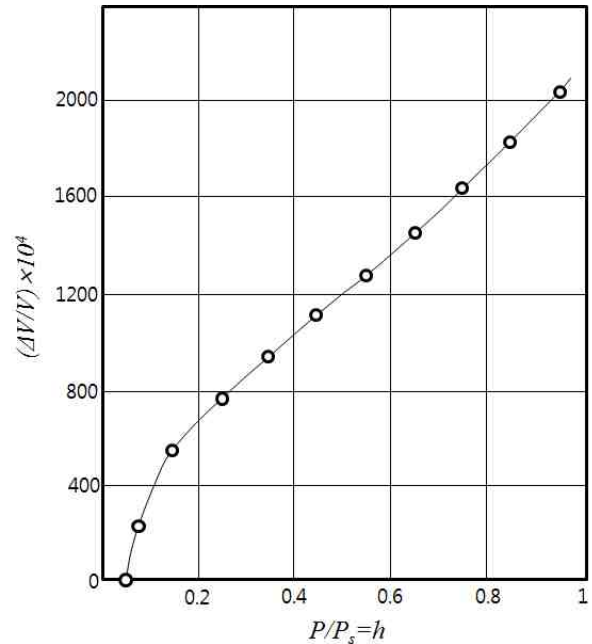
시멘트 수화과정에서 생성되는 C-S-H gel은 상대습도에 비례하여 표면에 수분이 흡착되는 특성을 갖는다. 이에 Beltzung F.(2005), Ferraris, C.F.(1987) 등은 콜로이드(Colloid) 상태인 C-S-H gel이 인접한 입자들끼리 끌어당기는 반데르발스 힘(Van der Waals force)이 작용하고 있는 동시에 친수성 물질로서 물분자를 끌어 들이는 것으로 보고하였다. 이때 인력 내 흡착된 수분은 이들의 입자를 밀어내는 역할을 하게 되는데, 이러한 힘을 분리응력이라 칭하였다. 분리응력은 겔의 친수성, 즉 물분자가 인력에 비례하게 되며, 각 입자의 인력이 서로 평형성을 이루는 상태에서 정지된다. 분리응력에 기여하는 물은 겔 공극수와 결정간극수, 표면흡착수 등이며, 분리응력에 의한 건조수축은 상대습도 10~45% 범위에서 주로 발생하는 것으로 보고하고 있다.



분리응력에 의한 건조수축 메커니즘

(3) 표면장력 기구(Surface tension energy)

Huinan W.(2017), Young, J.F.(1982) 등은 상대습도 10% 이하의 환경에서는 C-S-H gel 등 고체의 표면장력에 의한 추가 수축력이 작용되는 것으로 보고하였다. 특히 고체의 표면을 물분자가 둘러싸고 있는 경우, 입자의 표면에 액체의 표면장력이 작용하고 이 장력에 의해 입자와 같은 고체는 점차 수축력을 갖게 된다는 것이다. 또한 수분이 증발함에 따라 물분자의 층이 점차 얇아져 액체의 표면장력보다 고체의 표면장력이 더 크게 작용하게 되는데, 이 때에는 시멘트 입자의 수축이 더 활발히 나타나게 된다. 상대습도와 콘크리트 체적변화의 이론적 관계를 정립한 Powers T.C.(1968)에 따르면, 이들 사이에 수학적 관계는 열역학 이론에 기초하여 산출된 것으로서, 물분자와 고체분자 사이에 갖고 있는 흡착력의 크기를 상대습도의 함수로 나타낸 것이다. 또한 물분자가 갖고 있는 이러한 응력이 높은 비표면적을 갖는 시멘트 수화물과의 상호작용을 통해, 콘크리트 내에서의 수분 이동 및 체적의 수축과 팽창을 발생시키는 것으로 알려져 있다.



표면장력에 의한 고체의 팽창력

나. 건조수축 영향인자

콘크리트 건조수축에 영향을 미치는 주요 인자로는 페이스트 상 영향인자와 콘크리트 상 인자, 그리고 환경적 요인과 기타 요인 등으로 분류가 가능하며, 이 중 주요 인자로는 단위수량과 물-시멘트비, 양생조건, 골재용적 그리고 부재크기 등이 있다.

특히, 콘크리트의 건조수축은 부재가 노출된 환경요인 중 상대습도에 절대적 영향을 받는다. 건조한 상태는 건조속도와 건조량을 증가시키며, 외기온도와 상관없이 물분자의 운동에너지를 증대시키는 역할을 한다. 연구에서는 인위적 제어가 불가능한 외부 환경조건 등을 제외하고 콘크리트 재료 및 배합에 관계된 영향인자를 위주로 고찰하였다.

(1) 기본 배합설계의 영향

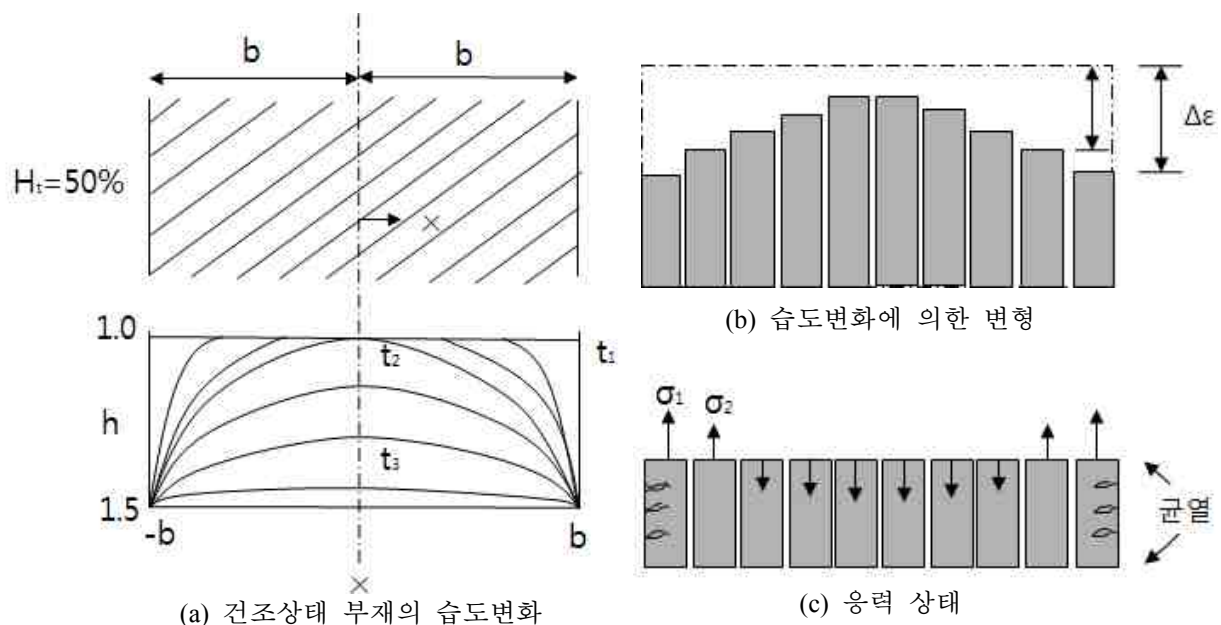
콘크리트 배합설계의 주요 요소가 되는 w/c와 단위수량 그리고 골재용적량 등은 건조수축에 가장 중요한 영향요인이 되고 있다. Brooks J.J.(1989)는 w/c가 20~60% 수준일 때 수화된 시멘트 페이스트의 건조수축량이 w/c에 비례하는 것으로 보고한 바 있으며, 단위수량 또한 이와 유사한 경향을 나타내는 것으로 알려져 있다. 특히, 콘크리트 내부의 수분량에 관여하는 단위수량과 w/c는 자유수 및 잉여수의 생성에 크게 기여하고 있으며, 세공량의 증가에도 영향을 미치고 있다.

또한, 골재의 경우는 건조수축을 줄이는 역할을 하여 수축에 큰 영향을 미치는 요소이기는 하나, 골재 자체의 수축량은 무시할 정도로 작다. 즉 골재의 탄성계수가 커질수록 콘크리트의 건조수축은 작아지고, 골재양이 많을수록 건조수축이 작아진다.

Pickett G.(1956)은 콘크리트의 전체 수축량과 시멘트 페이스트 수축량의 비가 콘크리트의 단위골재 부피량에 의존하는 것으로 보고하였다. 한편, Bazant Z.P.(1970)는 동일한 w/c와 수화도를 가진 시멘트 페이스트의 수축량으로부터 단위골재 부피량과 골재의 탄성계수를 이용해 콘크리트의 건조수축량을 추정할 수 있다고 보고하였다. 특히 골재의 최대치수와 입도는 큰 영향을 미치지 못하나 골재의 크기가 매우 커질 경우 증가 추세를 나타내는 것으로 보고되고 있다. 또한 골재의 강성과 흡수율 그리고 원석의 종류 등도 영향인자가 될 수 있는데, Lea, F.M.(1970)은 골재의 강성이 페이스트가 수축하려 할 때 작용응력에 비례하는 변형의 크기에 영향을 미치는 것으로 보고하였다. 이는 상기 기술된 탄성계수 특성과 유사한 관계를 보이고 있다.

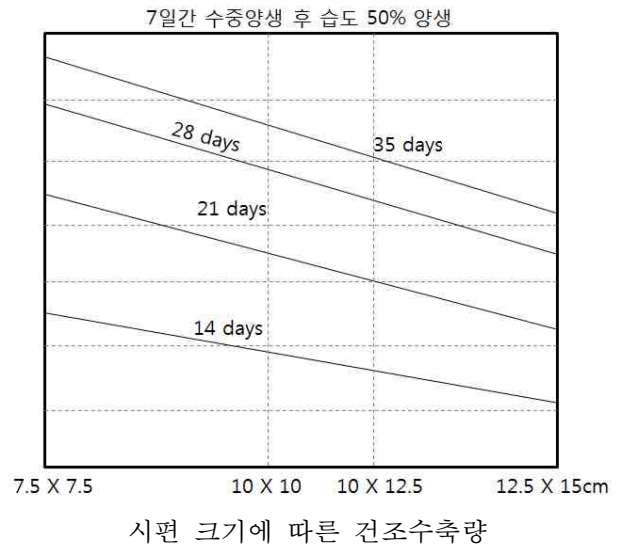
(2) 부재 크기의 영향

수축변형의 원인이 되는 부재의 구속응력은 골재와 철근보강 등의 내부 구속 뿐 아니라 콘크리트 부재 자체의 부동수축에 의해서도 발생한다. 콘크리트의 건조는 주로 표면부에서 발생되므로 중심부와의 수축변형 차이가 발생하는 것이다. 이에 표면부에는 인장력이, 중심부에는 압축력이 유발되는데 이러한 부동 수축에 의해 유발되는 응력은 시간의 경과에 따라 미세하게 발생되므로 크리프(Creep) 등에 의해 상쇄되기도 하나, 심한 경우 표면에 균열이 발생하게 된다. 그림은 벽의 두께에 비해 길이가 매우 긴 경우 균열이 발생하는 과정을 도식화한 것이다.



부재의 두께에 따른 불균등 수축(Calson R.W., 1937)

이와 유사한 연구로, Hansen, T.C.(1966)은 부재의 형상과 크기가 콘크리트의 건조수축과 크리프에 미치는 영향에 관한 연구한 결과, 건조수축과 크리프의 발생량과 그 진전 속도는 부재의 크기가 증가할수록 감소된다는 것을 보고하였다. 우측그림은 시편의 크기가 커질수록 수축량이 줄어듦을 나타내고 있는데, 12.5×15cm의 단면(187.5cm²) 부재가 7.5×7.5cm(56.25cm²)의 단면부재보다 약 50% 가량 낮은 건조수축량이 나타나, 정확한 측정값을 위해서는 동일한 시편을 사용해야 함이 나타났다.



(3) 혼화제의 영향

A.B. Eberhardt(2016)에 따르면 일반적으로 널리 활용되고 있는 AE제, 감수제, 경화촉진제, 지연제 등의 혼화재료 가운데 AE제는 독립된 작은 기포를 형성함으로써 공극량을 증가시켜 건조수축이 증대되는 단점이 발생된다. 그러나 기포의 함유로 인해 유동성의 감소 없이도 배합수량을 감소시킬 수 있어, 서로 상쇄되는 효과가 나타나고 있다. 또한 감수제는 유동성을 유지시키면서 콘크리트의 단위수량을 감소시키나, 건조수축 감소에는 효과가 없는 것으로 알려져 있다. 그러나 동일한 슬럼프를 유지한 일반콘크리트와 비교할 때 w/c가 줄어드는 효과로 인해 결과적으로 건조수축도 감소하게 되는 것이다.

경화촉진제의 경우 초기 급격한 수화로 인해 10μm이내의 세공이 증가되고, 이는 건조수축이 증대되는 결과를 가져온다. 경화촉진제 1%를 혼입한 콘크리트의 7일 건조수축은 무혼입 배합의 2배 이상 수축을 나타내는 것으로 알려져 있다. 이에 초기재령의 수화종료 후 수축에 대한 보상을 실시할 필요가 있으며, 경화지연제의 경우 건조수축에 별다른 영향을 주지 않는 것으로 알려져 있다.

콘크리트의 건조수축에 의해 발생하는 균열을 저감하기 위한 대표적 방법으로 단위수량을 저감하는 기법이 이용되고 있으나, 시공성 확보가 우선인 시공현장에서 사용성에 무리가 따르게 되면서, 최근에는 콘크리트 중 잔류하는 모세관수의 표면장력을 저하시키고 체적수축의 물리적 상쇄를 도모 하고자 수축저감제 및 팽창재를 병행 사용하는 방법이 제시되고 있다. 그럼에도 불구하고 콘크리트의 건조수축 저감 기술은 매우 미흡한 실정임으로 좀 더 나은 기술을 개발 하는데 많은 연구자들이 노력하고 있는 것이다. 따라서 본 연구에서 추진하는 건조수축 저감 기술개발은 기존 기술의 분석과 선행 연구자료의 이론적 고찰을 선행할 필요가 있다.

2. 콘크리트의 수화열 저감에 관한 선행연구 분석

시멘트의 각 성분들은 콘크리트 내에서 물과 반응하는 화학반응을 일으켜 새로운 수화물을 생성시킴으로서, 페이스트의 응결과 굳는 과정을 이끌게 된다. 이때의 화학반응 과정을 수화반응 혹은 수화(Hydration)라 하며, 시멘트의 제조과정에서 내부에 축적된 잠재열(Potential heat)이 외부로 도출되는 것을 수화열(Hydration heat) 발생이라 정의하고 있다. 시멘트의 수화발열량은 성분의 조성율과 제조법에 의해 달라질 수 있으며, 이러한 특성을 이용하여 저발열 혹은 초속경시멘트 등을 제조할 수 있게 된다. 콘크리트의 강도발현과 내구특성 등은 대부분 시멘트의 발열량에 관여되고 있으며, 따라서 설계할 때 콘크리트 온도관리의 중요성이 지적되고 있다.

(1) 수화열 저감 재료

미국에서는 벨라이트계 시멘트가 ASTM에서 제정된 후 1932년 Prin Canlron담과 1936년 Hoover담 건설을 시작으로 온도균열에 대한 관심이 대두되었다. 이는 국내 동향과 유사하게 GBS와 FA 등의 Pozzolanic 반응성 물질을 활용하거나 2종 및 4종 포틀랜드 시멘트를 적용한 연구가 대다수였으며, 단위결합재량이 높은 고강도 콘크리트를 대상으로도 수행된 바 있다.

Nehdi(2004) 등은 FA와 GBS를 치환한 3성분계 혼합시멘트를 적용해 콘크리트의 수화발열 특성과 강도발현에 대한 연구를 수행하였으며, Ravina(1986)는 FA를 다량 치환한 콘크리트(High-volume Fly-ash Concrete)의 수화열 저감 효과와 강도발현 특성을 분석하였다. 시멘트 치환결과 등에서는 35~50%를 치환한 경우 수화열의 저감과 더불어 응결지연량을 보고하였으며, 동일한 유동성을 확보하기 위해 단위수량을 5~10% 감소해야 함을 보고하였다. 또한 Hale(2008)과 Shi(1999)는 공통적으로 GBS와 FA의 기초적 물성과 3성분계 결합재의 강도특성, 수화열 저감 등에 대해 검토하였다. 그 결과 FA는 콘크리트의 수화열 저감에 영향을 나타냈으나 GBS는 영향이 미미한 것으로 보고하고 있으며, 혼화재 치환 배합은 OPC대비 초기강도가 낮지만 장기재령에서 이를 회복한다고 보고하고 있다.

반면, Frias(2000)은 모르타르를 이용해 실리카 흙과 메타카올린 등 GBS 및 FA 이외의 포졸란 재료에 대해 검토하였다. 이에 메타카올린은 10%이상, 실리카 흙은 30% 이상 치환 시 각각 수화열 감소효과를 보이는 것으로 보고하였으며, Sioulas(2000)은 매스콘크리트와 더불어 수화발열이 높은 고강도 콘크리트를 대상으로 혼화재를 치환·적용한 실험을 수행하였다. 연구에서는 목표강도 100MPa에서의 수화온도를 검토하였으며, 이에 적용된 혼화재는 높은 수화온도를 조절하는데 효과적이라 보고하였다. 또한 Mock-up Test를 실시해 적용성을 확인하고, 혼화재 혼입율이 증가할수록 온도상승의 구배가 감소하는 것으로 보고하였다.

(2) 수화열저감 공법

K. Roger(1983)는 간편한 설비로 사용가능한 액체질소를 이용해 프리쿨링 실험을 진행하였다. 그러나 단일사용은 효율성이 떨어지기 때문에 저발열시멘트, 분쇄한 얼음조각, 골재의 냉각과 병행해야 한다고 보고하고 있다. 一瀬(1986)과 中根(1987)는 액체질소를 이용해 재료를 프리쿨링하여 냉각율과 강도, 슬럼프에 미치는 영향을 검토하였다. 이에 냉각율 40~50%에서 슬럼프에 미치는 영향이 미미하며, 냉각하지 않은 콘크리트의 비해 3%에서 최대 22%의 강도증진이 나타난다고 보고하고 있다. 한편, 大池(1988)는 액체질소를 사용해 프리쿨링을 실시할 때 극저온에서 시멘트 입자가 풍화되는 것에 착안해 모르타르 미세구조를 검토하였다. 그 결과 냉각온도가 0℃에 근접할 때 구조물의 강도와 미세구조에는 악영향이 없다는 것을 보고하였다.

수화열과 온도균열을 저감시키기 위한 국내·외 연구동향을 살펴보면

- ▶ 고로슬래그, 플라이애시, PCM 등을 활용하는 혼화재료의 개발
- ▶ 파이프쿨링, 프리쿨링과 같은 공법적 개발
- ▶ 구조물의 온도응력과 이에 발생하는 온도균열에 대한 해석적 연구

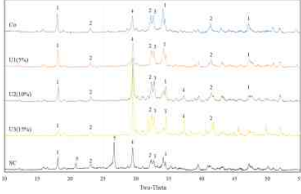
이 중 본 논문의 성격은 성능증진을 위한 재료 개발에 적합할 것으로 판단된다. 이상의 연구에서의 기존 혼화재료들은 탄산화 촉진과 타설 이후 초기수축균열 등이 단점으로 지적되며, PCM과 같은 혼화재료는 현장의 적용성 및 경제성 확보가 용이하지 못하다는 점이 단점으로 지적되고 있다. 이에 본 연구에서는 기존 혼화재료와 동등이상의 내구성과 수화열 저감 효과를 나타내며, 경제성과 적용성이 뛰어난 요소(Urea)를 콘크리트 혼화재료로서 검토하고자 한다. 본 연구는 매스콘크리트 구조물의 내구수명에 관한 성능개선과 Mock-up을 이용한 수화열 고찰을 수행함으로써 콘크리트 내구성 연구에 일조할 수 있을 것으로 기대된다. 특히 기존 농업용 성장발육제나 멜라민색소 등에 사용되던 요소를 콘크리트와 접목한 시도는 국내에서는 처음으로 시도되는 연구이며, 이를 통해 기존 저발열 배합기술의 선진화를 이룰 수 있을 것으로 기대된다.

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 연구개발결과 요약

구분	세부 연구목표	연구개발 수행내용	연구 결과
콘크리트 고내구성 혼화재료 개발	■ 요소의 반응성고찰 - 반응특성 및 시멘트 경화체 화학구성 관찰/확보 (특허출원 시 참조 자료 활용)	■ 시멘트경화체의 화학구성 및 미세구조분석 - SEM, XRD·XRF, 세공분석	□ 요소혼입 콘크리트 시험분석 완료 - XRF(F2):ZSX Primus (한국과학기술원 의뢰) - TGA 중량변화 분석 - 페이스트 pH측정 (KCL 의뢰)
요소혼입 콘크리트 최적 배합설계 및 성능검증	■ 콘크리트의 물리·역학 및 내구특성 - Plain 대비 동등 이상 확보	■ 요소혼입 콘크리트 배합설계 - 각 시험인자와 배합인자 설정 - 적정 W/B 및 단위수량, 목표 슬럼프 ■ 성능평가 위한 실험실 시험수행 - 배합 : Plain, 요소 혼입 유무 및 혼입량, 기존 저발열결합재 (2종, 4종시멘트 등) - 실험 : 슬럼프, 응결시간 등 압축·인장강도, 탄성계수 등 촉진 탄산화 저항성 등 ■ 내구성 저하여부 검증 - 기존 광물질결합재 등은 탄산화 저항성에 취약	□ 콘크리트 배합설계 - W/B 3개 인자 (45, 50, 55%) - 요소 혼입율 (0, 5, 10, 15%) - 혼입방법 (단위수량 치환, 골재 치환) - 기존 저발열결합재 (저열시멘트, 광물질혼화재 치환) → 총 21개 배합설정 □ 실험 항목 - 응결 및 경화특성 - 압축 및 인장강도 - 촉진 탄산화 저항성 - 간이단열온도상승 - 콘크리트 길이변화 → 각 배합의 성능발현 여부와 적정성 확인 □ 요소의 적정 혼입율 → 10% 이내
	■ 콘크리트의 온도균열 - 중심·표면 온도차 20℃ 이내 ■ 콘크리트의 건조수축 - Plain대비 40%수준의 수축량 달성	■ 성능평가 위한 실험실 시험수행 - 간이단열온도상승량 및 콘크리트 변형율(건조수축)	□ 간이단열온도 → 최고온도 약 7℃ 저하 → 응결지연 약 16시간 □ 길이변화율 → Plain대비 40~70% 수준(재령 7,28일)

2. 연구개발 주요내용

최종 목표	■ 콘크리트 고내구성 혼화재료 개발 ■ 요소혼입 콘크리트 최적 배합설계 및 성능검증	
절 차	내 용	주요산출물 및 이미지
사례조사 및 방향설정	□ 기존 기술 분석을 통한 실험의 비교군 설정 □ 연차별 목표달성을 위한 전문가 회의	-
시멘트 복합체 미세구조 분석	□ 요소혼입 시멘트 복합체 화학반응성 고찰 □ 수축 및 수화열 저감 메커니즘 규명 □ 세공분석 등 미세구조 분석	<국외 학술논문 1건> 
요소혼입 콘크리트 최적 배합설계 도출	□ 요소의 적정 혼입량 / 혼입기법 도출 □ 비교군으로 기존 저발열결합재 등 혼화재료 추가	<국내 학술발표 2건> 
성능검증 및 분석	□ 굳지않은 콘크리트 / 경화 콘크리트 물리·역학적 성능평가 수행 □ 건조수축 및 수화발열 저감성능 평가	<국내 학술논문 1건> 
모의부재 Mock-up test	□ 실제 부재를 가정한 Mock-up 부재 제작 □ 부재 제작을 위한 B/P test 및 물량생산 시도 □ 단·장기재령 부재 관찰	<국내 특허출원 1건> 

3. 연구수행내용 및 결과분석

본 과제에의 목적인 새로운 혼화재료 개발을 위해서는 재료 혼입 시 발생할 수 있는 여러 요인에 대한 신뢰성 높은 고찰이 요구된다. 콘크리트가 국내에서 상용화된 1900년대로부터 100여년에 걸쳐 활용될 수 있었던 것은 구조물의 안전성과 내구성에 대한 높은 신뢰에 기인하였을 것이다. 때문에 콘크리트에 새로운 재료를 투입할 시에는 혼입 목표가 되는 특정성능의 증가여부 뿐만 아니라, 기존 성능의 저하여부를 판별하는 것도 중요한 항목이 된다. 이에 본 연구에서는 콘크리트 균열저감용 혼화재료 개발을 위해, 여타의 유사한 연구 및 기존 제시된 혼화재료에 대한 동향분석과 함께 개발재료인 요소의 콘크리트 적용가능성에 대해 고찰한다. 이를 위해 먼저 요소와 콘크리트 각재료의 1차적 반응특성을 검토하였으며, 이 후 요소혼입 콘크리트의 배합설계를 수행하여 설정된 실험인자별 성능평가를 수행하였다. 실내 실험을 통해 도출된 최적의 설계배합은 실제의 건설현장 적용과 실 부재를 가정한 Mock-up test에 각각 적용되어 향후 현장적용 및 실용화 가능성을 검토하는 것을 목적으로 수행되었다.

본 연구를 비롯한 다수의 국내·외 유사연구에서 지적하고 있는 콘크리트 균열의 주원인은 건조수축에 의한 물리적 체적변화와 높은 수화열에 의한 역학적 응력변형이다. 콘크리트 내 발생 가능한 상기 2가지 메커니즘은 원인과 해결책 등이 크게 상이하여 이를 동시에 다루는 연구는 극히 드문 실정이다. 이에 기존 수화열 및 수축저감 연구 등에서는 2가지 메커니즘을 각각 분리해 분석하고 있으나, 본 연구에서는 결과적으로 이를 모두 제어하는데 목적을 두었다. 평가에서는 시멘트에 의한 수화발열을 검토와 발열량 감소로 인한 최고온도저감, 팽창특성으로 인한 건조수축 길이변화량을 각각 검토하여 기존 배합에 대비되는 성능증진여부를 중점으로 수행하였다.

가. Urea와 시멘트복합체의 기초반응특성 고찰

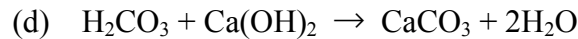
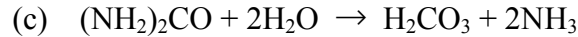
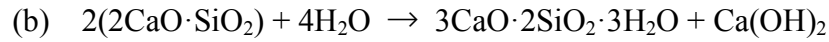
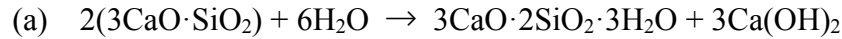
(1) 개 요

$(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ 의 화학식을 갖는 요소는 희미한 소금기가 있는 흰색의 입상 결정이며 알코올과 물에 쉽게 녹는 약염기성이다. 요소는 1773년 F.M. Rouelle에 의해 발견된 후 1828년 독일과 미국을 중심으로 석회질소(Lime nitrogen)의 가수 분해법에 의해 공업적 제조를 시작하였으며, 1935년 미국, 영국에서 암모니아와 이산화탄소로부터 직접 합성하는 것에 성공하여 오늘날에 이르고 있다. 아래 표에는 국내에서 시판되는 공업용요소의 물리·화학적 특성을 나타내었다.

요소의 재료적 특성

명 칭	화학식	분자량 (mol)	밀도 (g/cm^3)	용해도 (g) (25℃, 물100g)	색 상
요소(UREA)	$(\text{NH}_2)_2\text{CO}$	60.06	1.335	545	흰 색

콘크리트는 물과 시멘트의 화학반응에 기초하여 응결과 경화를 진행하기 때문에 새로운 혼화재료의 개발은 기존 반응과 별개로 정의할 수 없으며, 기존 수화반응 메커니즘과 연계하여 산출되어야 할 것이다. 아래의 (a), (b)에는 시멘트의 대표적 수화반응을 나타내었으며 (c), (d)에는 시멘트의 수화와 연계된 요소의 기대반응을 나타내었다.



먼저, (a)와 (b)는 시멘트의 대표적 수화반응식이다. 이는 알라이트(Alite)라 불리는 $\text{C}_3\text{S}(3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)$ 와 벨라이트(Belite)로 불리는 $\text{C}_2\text{S}(2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)$ 가 콘크리트의 배합수와 각각 반응하여 페이스트의 경화가 이루어지는 화학반응이며, 시멘트 수화물의 95% 이상을 차지하는 규산칼슘수화물(C-S-H, $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)을 형성하고 있다.

한편, (c)와 (d)에는 요소의 기대반응을 나타내고 있다. 먼저 (c)에서 요소($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$)는 콘크리트의 배합수 즉, 물과 반응하여 탄산(H_2CO_3)과 암모니아(NH_3)를 형성하고 있다. 이때의 암모니아는 기체의 형태로 반응 직후 기화되는 특성을 가지며, 이에 따라 용액의 온도가 그 즉시 저하되는 흡열반응(Endothermic reaction)을 일으키고 있다. 또한 (d)는 요소의 2차반응으로서 (c)에서 생성된 탄산과 시멘트의 수화과정에서 생성된 수산화칼슘의 결합으로 나타난다. 본 반응에서 생성되는 탄산칼슘과 물의 총량은 반응 전 단계의 탄산과 수산화칼슘에 비해 1.7배의 분자량을 나타내고 있다. 기존 연구 등에서는 이를 팽창반응(Expansional reaction)이라 보고하고 있으며, 시멘트 미세구조 내에서 부피의 팽창 및 공극 충전 등을 나타낼 것으로 예상된다.

요소가 콘크리트 내 혼입되어 가장 먼저 시작되는 반응은 배합수와의 용해반응이다. (c)에 나타난 바와 같이 요소는 물과 만나 암모니아(NH_3)를 기화시키는 흡열반응이 생성되고, 이는 용액의 온도저하로 나타난다. 실험에서는 용매인 요소를 물에 혼입하여 혼입량에 따른 용액의 온도변화를 시간에 따라 측정하는 것으로 요소의 흡열특성을 확인하였다. 이후 시멘트와 물이 혼합된 페이스트(Paste), 페이스트에 잔골재가 혼합된 모르타르(Mortar)의 순서로 기초적 반응특성을 고찰하였으며, 이를 통해 물의 온도저하량과 시멘트의 수화열 저감량, 모르타르의 슬럼프 및 강도저하량 등 요소로 인해 발생될 수 있는 콘크리트 내 여러 가능성을 두루 고찰하도록 계획하였다.

(2) 실험 계획

검토 재료	실험 내용
요소 + 물 (Solution)	▷ 요소 용해량에 따른 용액의 온도변화 (10, 20, 30, 40% Urea용액) ▷ 용액의 pH meter 측정
요소 + 물 + 시멘트 (Paste)	▷ 요소 혼입량에 따른 페이스트의 수화발열변화 (W/C 30% / Urea 5, 10, 15, 20 C.wt.×%a)) ▷ 요소 혼입에 따른 페이스트의 미소수화열량계 측정 (Three-point Conduction Calorimeter, MMC-5111) (W/C 30% / Urea 5, 10, 15, 20 C.wt.×%) ▷ 페이스트의 pH meter 측정 ▷ 페이스트의 화학구성 XRD 검토 ▷ 페이스트의 SEM imaging 관찰
요소 + 물 + 시멘트 + 잔골재 (Mortar)	▷ 요소혼입에 따른 모르타르의 플로우테이블 측정 ▷ 요소혼입에 따른 모르타르의 압축강도발현 검토 (W/C 50% / C : S = 1 : 2.5 / Urea 5, 10, 15, 20 C.wt.×%)

실험에 사용된 요소는 국내 A사에서 판매되는 공업용 요소를 사용하였다. 국내에서의 요소 판매는 농업용 비료요소를 제외한 공·상업 용도는 극히 드문 실정으로, 국내 판매사에서 일본, 독일 등으로부터 일부 수입에 의존하고 있다.

실험에 사용된 각 재료의 배합표를 아래에 나타내었다. 각 재료의 단위중량은 단위용적(m^3)에 맞추지 않고, 물의 중량을 100으로 설정한 후 이에 대한 비율로 나타내었다. 또한 각 실험인자별 명칭을 혼합재료와 요소의 혼입률로 나타내었으며, UW(U+Water), UP(U+Paste), UM(U+Mortar)로 각각 분류하였다. 시멘트가 포함되지 않은 UW를 제외하고는 모두 시멘트 중량비율로 요소를 혼입하였으며, 5%씩 차등을 두어 최대 20%까지 계획하였다.



공업용 요소

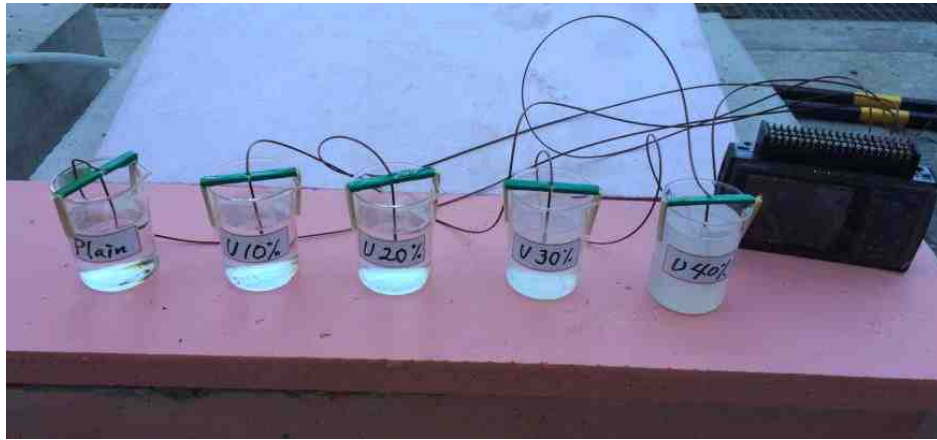
Type	구성재료	단위중량 (kg)				비고
		W	C	S	U	
UW-0	Urea + Water	100				
UW-10		100			10	
UW-20		100			20	
UW-30		100			30	
UW-40		100			40	
UP-0	Urea + Paste	100	333			
UP-5		100	333		16.5	
UP-10		100	333		33	
UP-15		100	333		49.5	
UP-20		100	333		66	
UM-0	Urea + Mortar	100	200	490		
UM-5		100	200	490	10	
UM-10		100	200	490	20	
UM-15		100	200	490	30	
UM-20		100	200	490	40	

※ C : 보통포틀랜드시멘트(Portland cement), S : 잔골재(Sand), U : 요소(Urea)

(3) 실험 방법

실험에서는 요소의 가장 기본적인 반응성을 확인하기 위해, 물과 요소를 용해할 시의 온도 저감량과 pH meter변화를 각각 검토하였다. 먼저 요소 용액의 온도변화는 콘크리트 내 요소의 1차적 반응성이라 가정한 흡열특성과 이에 기인한 수화열 저감성능을 확인하고자 하였다. 먼저 5개의 비커에 동일한 용량의 물을 채운 후 외기 온도와 평행이 될 때까지 약 1시간가량 노출시켰다. 이 후 요소를 10~40%까지 10%씩 차등을 두어 약 40초의 간격으로 각각 투입하였으며, 완전히 용해될 수 있도록 저은 후 자동기록장치를 이용해 물의 온도변화를 측정하였다. 아래에는 실험전경을 나타내었다. 시멘트 페이스트 시험은 상기 요소용액에 시멘트를 추가한 것으로, 물과 시멘트의 수화과정에서 발생하는 열과 이를 상쇄하는 요소의 흡열반응성을 검토한 것이다. 실험은 동일한 비커에 W/C 30%에 해당되는 시멘트를 추가 혼입한 후, 요소의 혼입률에 따른 시멘트의 수화온도변화를 각각 측정하였다.

또한 이보다 더 정량화된 실험결과를 위해 시멘트의 미소수화열 시험을 수행하였다. 본 시험은 아래에 나타난 열량분석계를 이용해 시멘트 수화열 등과 같이 재료에서 발생하는 열량을 kcal/g·h의 단위로 나타내는 것이며, 단순히 온도를 측정하는 기존 시험에 비해 외부의 환경요인을 차단하여 더 신뢰도 높은 기법으로 평가되고 있다. 실험에 사용된 열량계는 A사의 TAM-Air이며, Maximum calorie peak와 peak 도달시간, Accumulate calorie를 각각 검토하는 것으로 계획하였다.



요소용액 온도변화 시험 전경



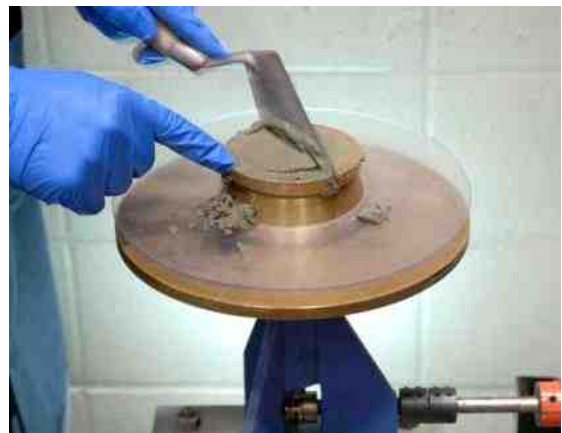
미소수화열량계



pH meter

모르타르의 유동특성은 KS L 5111에서 규정한 플로 테이블을 이용해 15초간 25회, 12.7mm의 높이로 낙하시켰으며, 4개의 밑지름을 측정하고 이를 평균하였다. 그림에는 시험에 사용된 플로 테이블을 나타내었다.

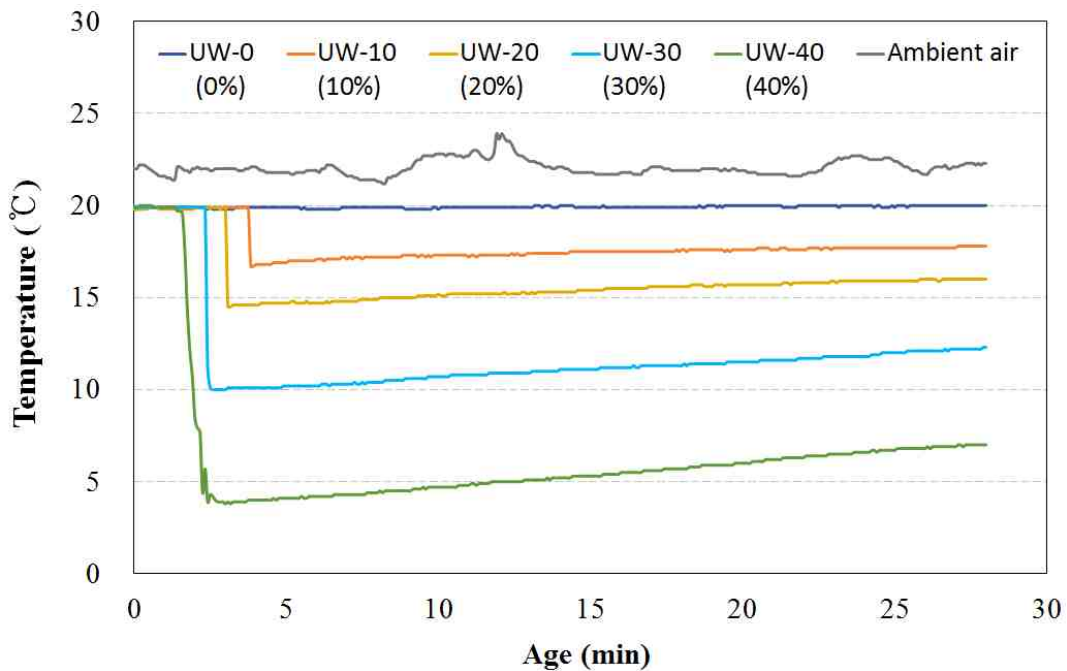
또한 모르타르의 압축강도 실험에서는 KS L 5105에 따라 $\square 50 \times 50 \times 50 \text{mm}$ 몰드를 활용해 제작하였으며, 소정 재령일까지 $21 \pm 2^\circ \text{C}$ 에서 표준 수중양생을 실시하였다. 이 후 100t급 U.T.M.을 활용해 모르타르 최대하중을 측정하고, 이를 공시체 단면적으로 나눠 압축강도를 산출하였다.



모르타르 플로 테이블

(4) 실험 결과 및 분석

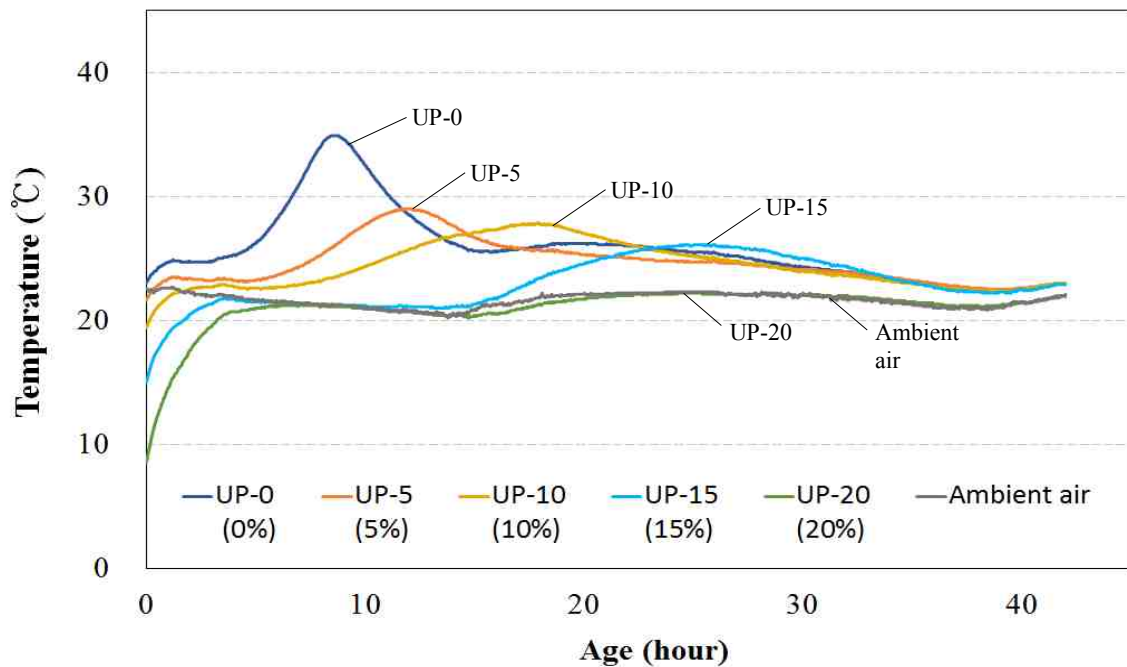
아래 그림에는 물과 요소를 혼입한 용액의 온도변화특성을 나타내었다. 요소용액 시험 결과 먼저 기존 가설과 같이 요소는 물과 혼입 시 즉각적인 흡열반응을 나타내었다. 무혼입 시료(UW-0)를 기준으로 UW-1(10%용액)에서 3.3℃의 온도저하를 나타냈으며, UW-2(20% 용액)에서 5.5℃, UW-3(30% 용액)에서 10.0℃, UW-4(40% 용액)에서는 16.2℃의 온도저하를 각각 나타냈다. 이는 혼입량이 증가될수록 흡열량이 증진되는 결과로 사료된다.



<요소 혼입 용액의 온도변화>

요소용액의 온도저감 평가와 더불어 시멘트의 수화열 저감성능을 검토하기 위한 시멘트 페이스트의 온도특성을 아래 그림에 나타내었다. 요소의 혼입률 증가에 따른 온도특성에서 가장 부각되는 수치는 타설온도로서, 혼입률 증가에 따라 5%(UP-5)에서는 무혼입 대비 1.4℃의 저하를 나타냈으며, 10%(UP-10)에서는 3.6℃, 15%(UP-15)에서는 8.0℃ 그리고 20%(UP-20)에서는 14.5℃의 저감을 나타냈다. 이는 요소용액의 급격한 흡열성능에 기인한 것으로 콘크리트의 초기 수화온도에 큰 영향인자가 될 것으로 사료된다.

요소의 혼입에 의한 영향은 시멘트의 수화최고온도를 저감시킬 뿐만 아니라 수화속도 즉, 최고온도의 도달시간을 크게 지연시키는 것으로 나타났다. 수화열에 의한 최고온도의 도달은 시멘트 경화반응이 정점에 달했다는 의미로, 도달시간이 증가되는 것은 경화지연성을 의미한다. 특히 혼입률이 증가함에 따라 3.2시간에서 최대 15.6시간의 지연특성을 나타내고 있어, 매스 및 서중콘크리트에 적용할 시 높은 수화지연효과를 가져올 수 있을 것으로 기대된다.



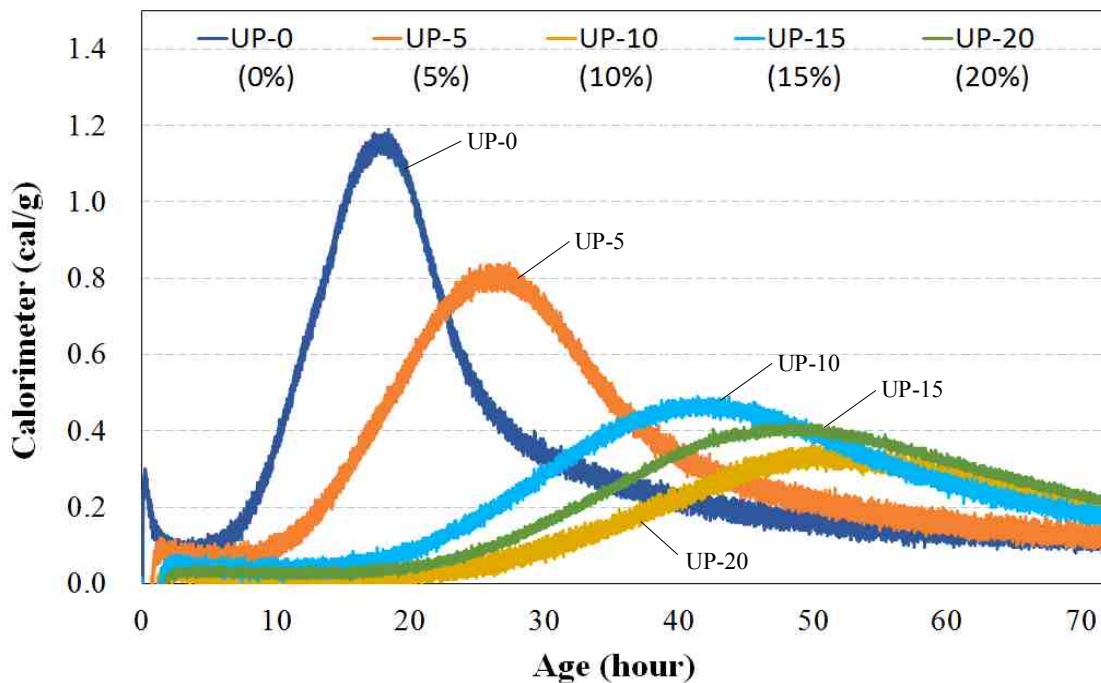
요소 혼입 페이스트의 수화온도변화

더불어 요소의 혼입으로 인한 수용액 및 페이스트의 pH변화특성을 아래 표에 나타내었다. 먼저 수용액의 실험결과 UW-1(10% 용액)에서는 8.2의 pH를 나타냈으며, UW-3(30%)에서는 8.8을 나타냈다. 요소는 강산성을 띄는 CO_2 를 원료로 제조되나, 강염기인 NH_3 의 영향으로 염기성을 띄는 것으로 나타났으며 콘크리트 제조 시 내구성 저해요인이 되지 않을 것으로 판단할 수 있다. 또한 이러한 현상은 시멘트를 혼입한 페이스트에도 영향을 미쳐 기존 pH 11.6 대비 0.6이 증가된 12.2의 강염기성을 띄는 것으로 나타났다. 알칼리상태의 시멘트 페이스트에 알칼리 재료를 추가 투입하는 본 기법은 부재의 탄산화 저항성을 크게 증진시킬 수 있을 것으로 기대된다.

구 분	Urea + Water (Solution)				
	UW-0	UW-1	UW-2	UW-3	UW-4
pH meter	7.0 (Neutral)	8.2	-	8.8	-

구 분	Urea + Water + Cement (Paste)				
	UP-0	UP-5	UP-10	UP-15	UP-20
pH meter	11.6	12.0	-	12.2	-

아래 그림에는 시멘트 수화발열의 정량적 검토를 위한 요소혼입 페이스트의 미소수화 열 결과를 나타내었다. 실험에서는 외부온도 등의 환경요인을 배제하고 재료의 자체 흡·발열특성을 확인하였다. 그 결과 요소 무혼입 페이스트(UP-0)에서는 시멘트 수화 시의 최대 발열을 나타내는 Second peak에서 1.17cal/g을 나타냈으며, 요소 혼입량이 증가될수록 29.1%에서 최대 69.2%까지 발열량이 감소되는 결과를 나타냈다. 또한 Second peak의 도달 시간에서 있어, 최소 8.5시간에서 최대 33시간까지 지연되는 결과를 나타내 외기에 노출된 페이스트에 비해 늦은 지연특성을 확인하였으나, 전체적 특성에서는 상기 페이스트의 온도특성과 매우 유사한 경향으로 나타났다.



요소 혼입 페이스트의 미소수화열(Calorimeter)

콘크리트의 제조와 배합설계를 위한 예비적 성격으로 요소혼입 모르타르 시험을 수행하였으며, 슬럼프 플로 및 측정 시 전경을 나타내었다.



(a) UM-0



(b) UM-5



(c) UM-15



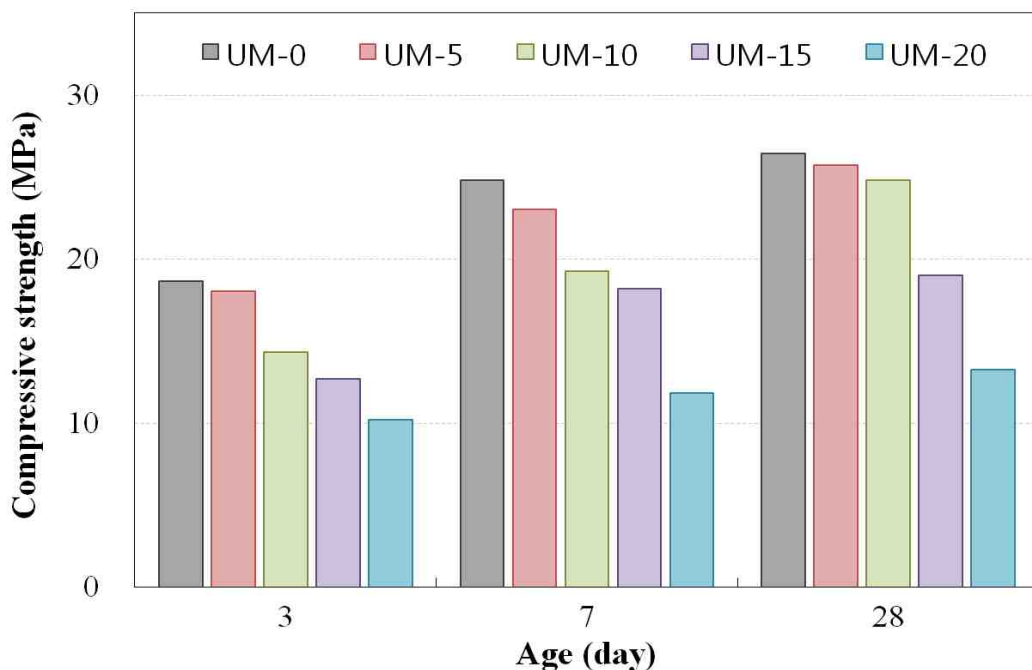
(d) UM-20

요소 혼입 페이스트의 슬럼프플로우

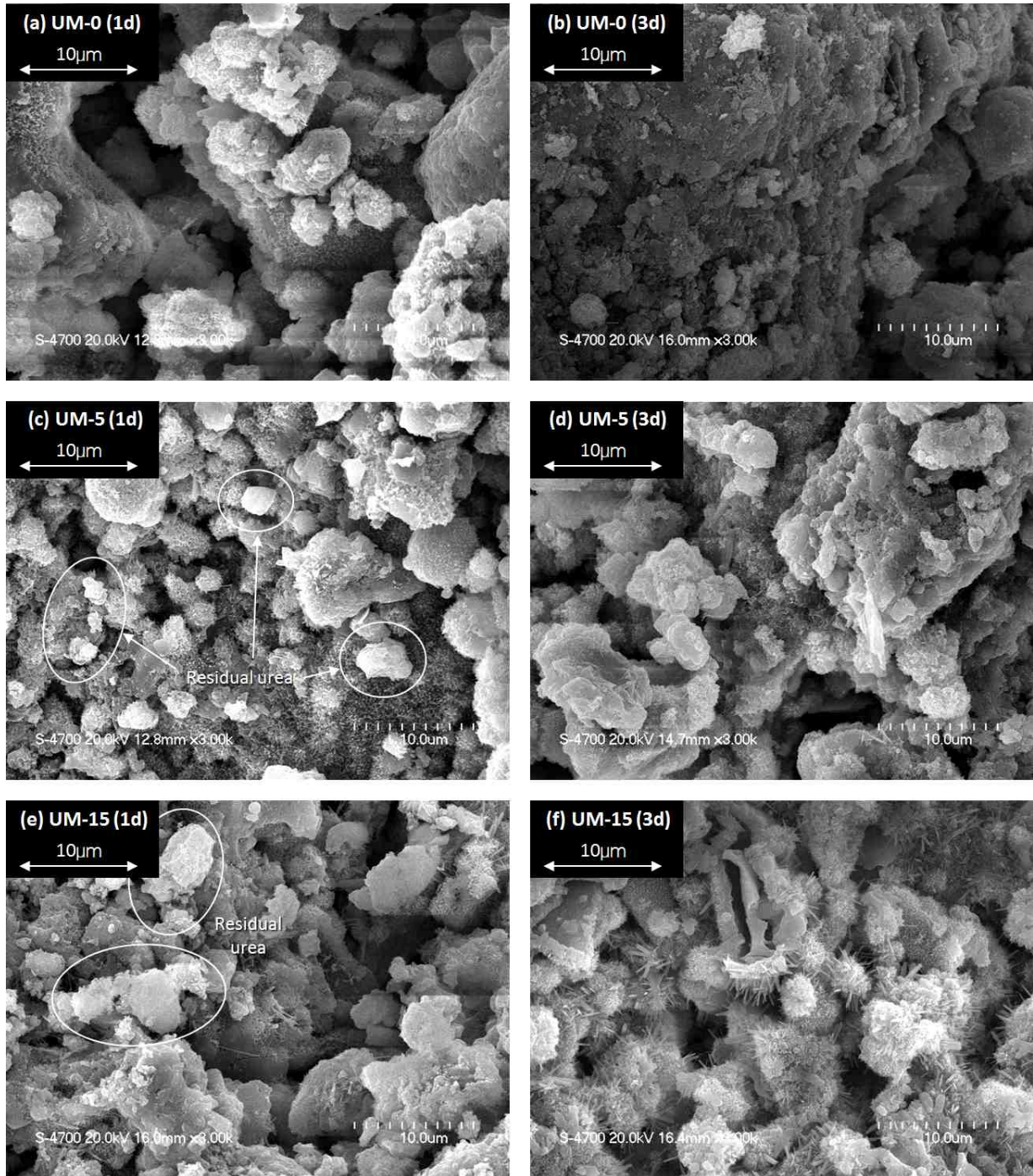
구 분	Urea + Water + Cement + Sand (Mortar)				
	UM-0	UM-5	UM-10	UM-15	UM-20
슬럼프 플로 (mm)	149.2	161.6	167.4	178.0	218.2

모르타르 내 혼입된 요소는 그 즉시 배합수와 용해되어 수량이 증가되는 현상을 나타낸다. 이는 이전 요소 용액 시험에서 확인된 결과로 콘크리트 혼입 시에 슬럼프 증가에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되었다. 실험 수행 결과, 요소는 그 혼입량이 증가될수록 슬럼프 플로의 기하급수적 증가를 나타냈다. 무혼입(UM-0)을 기준으로 시멘트 중량대비 5%로 혼입한 시료(UM-5)에서는 12.4mm, 10%(UM-10) 18.2mm, 15%(UM-15)에서는 28.8mm로 비교적 비례적 증가를 나타낸 데 반해, 혼입률 20%(UM-20)에서는 약 69mm의 증가를 나타냈다. 이는 정성적 수치이기는 하나, 요소를 과량 혼입할 시 블리딩 혹은 재료분리가 발생할 우려를 나타내고 있다.

또한 아래 그림의 모르타르 압축강도 특성 실험 결과, 요소의 혼입은 모든 재령에서 압축강도의 저하를 가져왔다. 특히 요소의 흡열반응이 급격히 나타나는 재령 초기에는 혼입량 증가에 따른 강도 저하가 매우 큰 것으로 나타났으며, 이는 모든 저발열 결합재의 공통적 특성으로 요소의 경우 혼입량에 따라 비례적 온도저하가 나타나 그 영향이 더 큰 것으로 사료된다. 또한, 요소 혼입 모르타르의 장기재령 강도특성은 무혼입에 근접하는 경향을 나타냈다. UM-5 및 UM-10에서는 무혼입 대비 94~97% 수준의 강도를 나타내, 초기의 낮은 온도에 불구 시멘트의 수화가 충분히 이루어지는 것으로 사료된다.

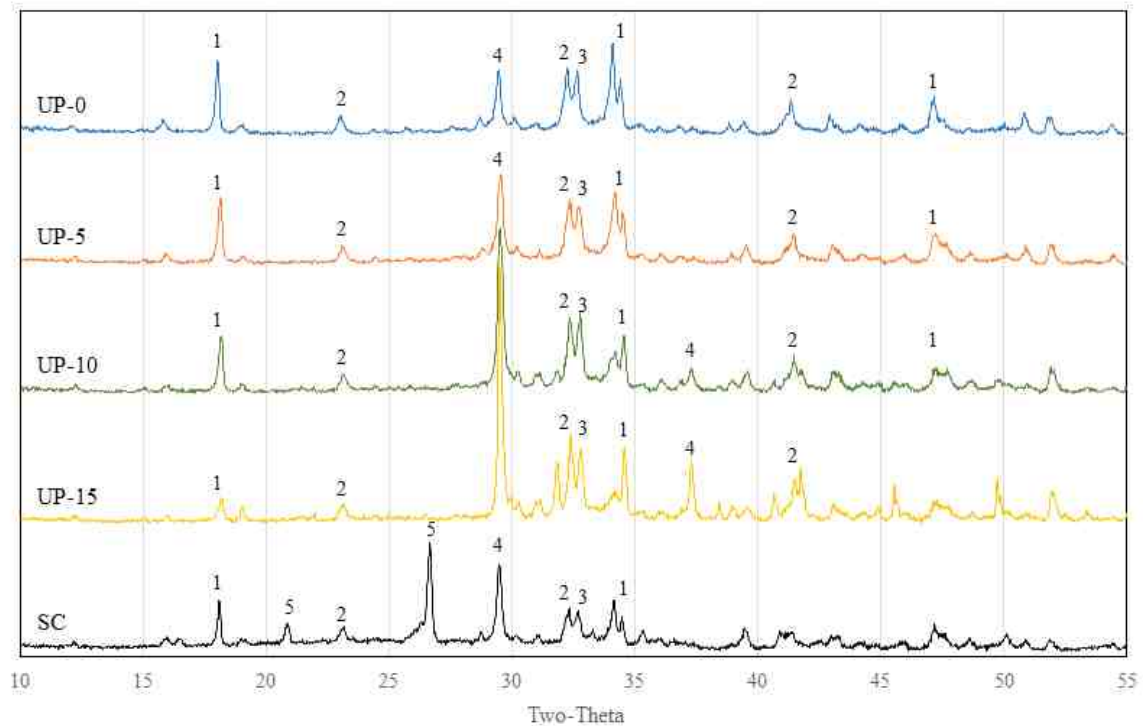


요소 혼입 모르타르의 압축강도



요소혼입 모르타르의 SEM imaging (×3k)

위 그림에는 SEM imaging를 통해 수행된 요소혼입 모르타르의 초기 화학반응성을 관찰한 결과이다. 요소혼입 모르타르의 재령 1일 결과(e)에서는 주로 수화에 관여하지 않은 잔여 요소가 관찰되었다. 굳기 전 페이스트 상태에서는 물에 용해되었던 요소가 경화 후에는 알갱이의 형태로 미세구조 내 잔재하고 있는 것이다. 이후 재령 3일에서는 시멘트의 수화반응이 진행됨으로서 탄산칼슘(CaCO_3)과 에트링자이트(ettringite) 그리고 수산화칼슘(CaOH_2)이 주로 생성되는 것이 관찰되었다.



요소혼입 페이스트의 XRD pattern

위 그림에는 요소혼입 페이스트에 대한 XRD analysis 결과를 나타내었다. 여기서 SC배합은 요소와의 비교를 위해 결합재의 비율을 (시멘트 : 고로슬래그 : 플라이애시 = 5 : 3 : 2)로 설정하고 w/b 등은 UP-0과 동일하게 설계한 배합을 말한다.

UP-0과 요소 혼입배합은 대체로 XRD 패턴이 유사하게 나타나고 있다. urea 혼입에 따른 가장 주요한 특징으로는 탄산칼슘(CaCO_3)의 높은 증가와 수산화칼슘(Ca(OH)_2)의 소폭 감소가 확인되었는데, 이는 위의 화학식 (c), (d)으로 설명이 가능하다.

(c)는 urea와 water의 반응식으로 암모니아와 탄산(acid)을 만들며 흡열을 통해 시멘트 복합체 내에서 cooling effect를 나타낸다. 여기서 암모니아 가스는 공기 중으로 빠르게 사라지나, 탄산은 미세구조 내에 남아 시멘트의 수화반응을 통해 생성된 수산화칼슘(Ca(OH)_2)과 반응(d)하게 되는 것이다. (c)를 통해 Fig.2와 같은 탄산칼슘 증가와 수산화칼슘 감소 패턴이 나타날 수 있으며, 이 중 시멘트 수화생성물의 하나인 탄산칼슘은 수화시에 충전재 역할을 하여 내부 공극을 밀실하게 하거나 내구성을 증진시키는 등의 결과를 가져오는 것으로도 알려져 있다.

요소와 시멘트복합체의 기초반응특성을 고찰한 본 단계에서는 요소가 배합수에 용해되어 시멘트 수화열을 저감할 수 있을만큼 충분한 흡열을 나타내는 것으로 확인하였으며, 이의 이론적 메커니즘과 역학적 성능저하 등이 동시에 검토되었다. 이론적 메커니즘의 확립은 연구의 전체적 수행에 가장 큰 비중을 차지하며, 본 결과물을 통해 국외 학술논문 (SCI-E) 1건을 게재한 바 있다.

나. 요소혼입 콘크리트의 배합설계 및 이의 물리·역학·내구 성능 검증

(1) 개 요

선행 기초실험에서는 요소의 기초적 반응 특성에 대한 예비실험을 수행하였다. 요소는 물과 반응해 용액의 온도를 크게 저하시키는 성능이 매우 우수한 것으로 확인 되었으며, 이 외에 시멘트 수화물과 팽창 특성을 통해 물리적 체적 수축에 대한 보상이 가능할 것으로 판단되었다. 따라서 이러한 특성을 콘크리트와 접목할 경우 상기 2가지 균열 원인을 동시에 접근할 수 있을 것으로 기대되었으며, 환경부하물질의 소비량도 크게 증진시킬 수 있을 것으로 사료되었다.

그러나 콘크리트 혼화재료로 개발하기 위해서는 요소가 혼입된 콘크리트 내에서 각종 내구성과 강도발현, 역학특성 뿐만 아니라 시멘트와 화학반응성에 기초한 각종 물성치의 변화 등을 정량적으로 검증할 필요가 있다. 본 실험에서는 요소혼입 콘크리트의 배합설계 기법부터 강도 및 내구성에 이르기까지 요소의 혼입율과 혼입 유무에 따른 콘크리트의 재료적 특성을 검토하였다. 더불어 최초로 제안되는 새로운 형태의 혼화재료인 만큼 적정 배합설계 기법과 최적 혼입율 등을 정량적으로 검증하여, 이를 향후 건설현장에 적용하기 위한 설계기법을 제안하고자 한다.

(2) 실험 계획

구 분				변수 조건	
배합조건	설계기준강도 (MPa)			3	21, 24, 27
	w/b (%)			3	45, 50, 55
	목표 슬럼프 (mm)			1	150 ± 30
	목표 공기량 (%)			1	4.5 ± 1.5
배합변수	요소 혼입률 (Binder × wt.%)			5	0, 5, 10, 15(V), 15(W)
	결합재 종류	1종 시멘트(OPC)		3	OPC 100%
		기존 저발열 결합재	Case.1		FA 20% ^{a)} + BS 30% ^{b)}
			Case.2		LHC ^{c)} + FA 20%

a) FA 20% : OPC기준 플라이애시(Fly-ash) 20% 치환

b) BS 30% : OPC기준 고로슬래그 미분말(Ground granulated Blast furnace Slag) 30% 치환

c) LHC : 4종 저열포틀랜드시멘트(Low-Heat Cement)

요소혼입 콘크리트 배합설계(시방배합표)

No.	배합명	w/b (%)	S/a (%)	Air (%)	W (kg/m ³)	단위중량 (kg/m ³)						SP ^{a)} (B×%)	VA ^{b)} (B×%)
						C	FA	BS	S	G	U		
1	45OPC	45	47.3	4.5	165	367	-	-	828	934	-	0.8	
2	45U5 ^{d)}				165	367	-	-	812	915	18.3	0.8	
3	45U10				165	367	-	-	795	896	36.7	0.8	
4	45U15(V)				165	367	-	-	778	877	55	0.8	0.3
5	45U15(W)				145	367	-	-	802	904	55	0.8	
6	45FA-BS ^{e)}				165	183	73	110	812	916	-	0.8	
7	45LHC-FA				165	(293) ^{e)}	73	-	819	922	-	0.8	
8	50OPC	50	47.7	4.5	165	330	-	-	850	943	-	0.8	
9	50U5				165	330	-	-	835	926	16.5	0.8	
10	50U10				165	330	-	-	819	909	33	0.8	
11	50U15(V)				165	330	-	-	804	892	49.5	0.8	0.3
12	50U15(W)				147	330	-	-	826	916	49.5	0.8	
13	50FA-BS				165	165	66	99	835	926	-	0.8	
14	50LHC-FA				165	(264) ^{e)}	66	-	841	933	-	0.8	
15	55OPC	55	48.2	4.5	165	300	-	-	871	947	-	0.8	
16	55U5				165	300	-	-	857	931	15	0.8	
17	55U10				165	300	-	-	843	916	30	0.8	
18	55U15(V)				165	300	-	-	829	901	45	0.8	0.3
19	55U15(W)				148	300	-	-	850	924	45	0.8	
20	55FA-BS				165	150	60	90	857	932	-	0.8	
21	55LHC-FA				165	(240) ^{e)}	60	-	862	938	-	0.8	

a) SP : 고성능감수제(Superplasticizer)

d) 45U5

e) 45FA-BS

b) VA : 증점제(Viscosity Agent)

c) () : 저열포틀랜드시멘트

— 요소 혼입률 (B×wt.%)
 — 요소 혼입유·무
 w/b (%)

— 결합재 종류
 w/b (%)

구분	평가 항목	
굳지 않은 콘크리트	유동성	▷ 슬럼프, 공기량
	응결특성	▷ 시멘트 응결시간 측정 (초결, 종결)
경화 콘크리트	강도(역학)특성	▷ 콘크리트 압축강도 (3, 7, 28, 56, 91일 재령)
	내구성	▷ 촉진 탄산화 저항성 (CO ₂ 촉진 7, 14, 28일 재령)
	수축특성	▷ 콘크리트 길이변화 (~56일 재령)
	수화발열특성	▷ 콘크리트 단열온도상승 (~7일 재령)

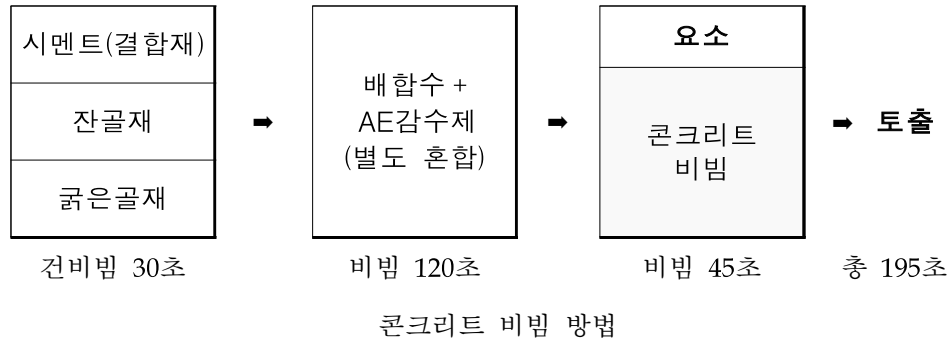
실험 변수는 크게 배합조건과 재료변수로 나뉘며, 실험인자로 w/b에 따른 설계기준 강도와 요소의 혼입률, 그리고 결합재의 종류 등이다. 먼저 w/b는 콘크리트의 역학 및 내구 특성을 잘 나타내기 위해 현장에서 활용성이 높은 w/b 50%를 기준으로 하였으며, 시멘트 량에 따른 영향을 확인하기 위해 $\pm 5\%$ 의 차로 45, 50, 55%의 3가지 w/b를 모두 계획하였다. 또한 실험에 가장 주요한 인자가 되는 요소의 혼입률은 제 3장의 실험 결과를 활용하여 결정하였다. 이전의 모르타르 및 페이스트 실험에서 시멘트 중량대비 20%로 요소를 혼입하였을 때에는 온도가 극히 낮아져 시멘트의 응결이 전혀 진행되지 못하는 결과를 나타내었다. 이에 콘크리트 배합설계에서는 0에서 최대 15%까지 총 4가지의 요소 혼입률을 계획하였다.

이와 더불어 요소 혼입률 15% 이상에서는 수량이 급격히 증가되어 슬럼프가 목표치를 초과하거나 혹은 재료분리가 나타날 것이 우려된 바, 본 실험에서는 이에 대한 대처방안으로 다음의 두 가지 배합설계 기법(U15(V), U15(W))을 설정하였다. 하나는 요소를 기존과 동일하게 혼입해 수량증가를 용인하되, 여기에 증점제(Viscosity agent)를 추가 투입하여, 굳지 않은 콘크리트의 재료분리를 방지하는 기법(시방배합표의 U15(V))이다. 이 기법은 기존 단위수량의 w/b를 그대로 유지할 수 있다는 장점은 있으나 재료의 추가 투입이라는 점에서 단가 상승의 단점을 안고 있다. 또 다른 기법은 수량 증가에 대비해 단위수량을 일부 감소시키는 방법(시방배합표의 U15(W))이다. 이는 요소를 단위수량에 치환하여 혼입하는 방식으로, 요소의 혼입률이 증가할 경우 단위수량의 용적을 그만큼 감소시키는 것이다. 이 기법은 기존 배합설계 내에서 해결이 가능하다는 장점은 있으나, 단위수량을 차감시키게 되어 결합재와 반응하는 배합수의 양이 변동될 수 있다는 단점을 갖는다. 따라서 실험에서는 상기 두 가지 기법을 모두 검토하여 콘크리트의 공학적 특성에 더 유리한 기법을 제시하고자 하였으며, 재료 각각의 세부 물량을 시방배합표에 나타내었다. 한편, 요소혼입의 주요 목적이 되는 수화열 저감성능을 확인하기 위해 결합재의 종류를 달리 계획하였다. 먼저 가장 수화발열이 높은 OPC에 요소를 혼입하여 요소의 열 저감성능을 검증하고자 하였으며, 요소와 비교를 위해 기존 매스콘크리트 적용배합인 저발열 결합재를 Case.1, 2로 구분하여 설정하였다. Case.1은 플라이애시(이하 FA)와 고로슬래그 미분말(이하 BS)을 각각 20, 30%로 치환한 3성분계 혼합시멘트(FA-BS)이며, Case.2는 OPC 대신 저열포틀랜드 시멘트를 사용하고 여기에 FA를 20% 치환 적용한 결합재이다. 2가지 혼합시멘트는 결합재 중 OPC의 비중을 낮추고 SiO_2 의 비율을 크게 증가시킨 것으로 매우 우수한 온도저감성능을 나타내는 것으로 알려져 있다.

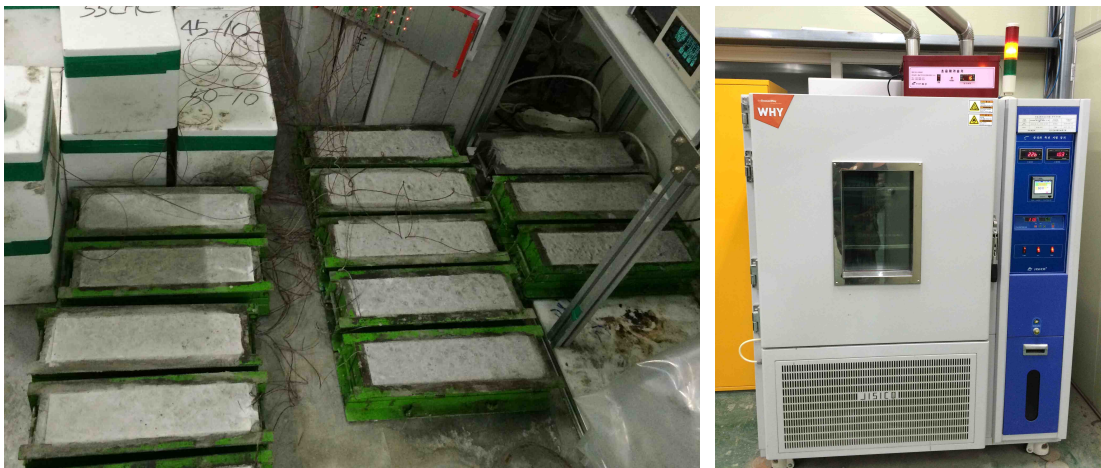
마지막으로 실험의 평가 항목으로는 굳지 않은 콘크리트의 유동 특성과 저발열 특성을 확인할 수 있는 시멘트 응결 성능을 검토하였다. 그리고 유동성 평가에서는 요소 혼입으로 인한 수량 증가와 이로 인한 슬럼프 수치를 평가하고자 하였으며, 요소 혼입률 15% 이상에서 재료분리에 대한 우려를 실험으로 검증하였다. 또한 굳은 콘크리트에서는 요소 혼입으로 인한 강도 발현의 저하 여부를 판단하고자 계획한 압축강도 실험과, 콘크리트 내 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 소비 여부와 요소의 원재료가 되는 CO_2 의 혼입으로 인한 탄산화 여부를 확인하고자한 촉진 탄산화 실험을 수행하였다. 마지막으로 요소의 주요 성능이 되는 콘크리트 수축 상쇄 특성과 시멘트 수화열 저감 성능을 평가하는 것으로 요소혼입 콘크리트의 성능 실험을 계획하였다.

(3) 실험 방법

실험실 시험을 수행하기 위한 콘크리트 비빔은 100ℓ 용량의 강제식 샤프트 믹서를 사용하였으며, 아래의 순서로 혼합하였다.



각 실험용 공시체 제작은 KS F 2403에 준하여 수행되었으며, 슬럼프와 공기량 그리고 응결시험 또한 각각의 규준에 의거 수행하였다. 한편, 내구성 평가를 위한 촉진 탄산화 실험 시편은 각형 공시체를 각 재령별로 등분하여 CO₂에 노출시켰다. 이 후 소정의 촉진 재령에 실험체를 쪼개서, 페놀프탈레인 1.0% 용액을 분사하여 각 실험체별 탄산화된 깊이를 측정하였다.



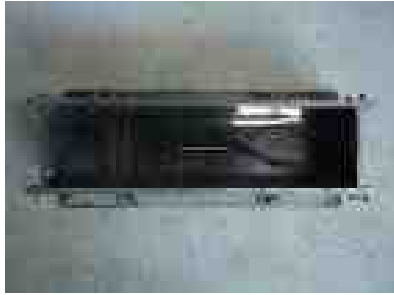
촉진 탄산화 시험 전경



등분된 공시체

탄산화깊이 측정 시료

건조수축으로 인한 콘크리트의 체적 변형률과 페이스트 내 요소의 팽창성능을 검토하기 위한 길이변화 실험은 몰드 중심부에 게이지를 매립하는 방식으로 수축률을 측정하였으며, 타설 후 30분 간격으로 데이터로거(Data-logger)를 통해 측정값을 기록하였다. 양생기간 중 온·습도에 의한 영향을 최소화하고자 항온항습실(온도 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$, 습도 $50\pm 2\%(\text{R.H.})$)에 실험 공시체를 거치하였다.



스트레인 게이지 매립

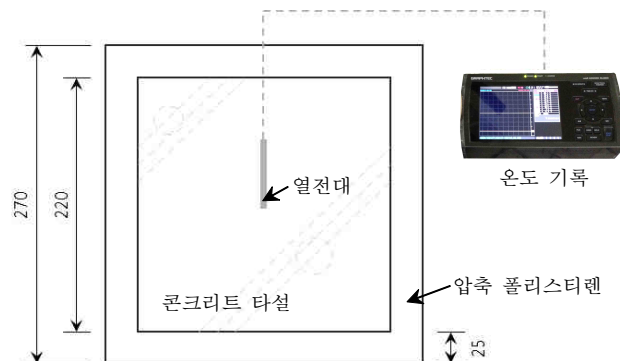


Data-logger



항온항습실 내부 전경

콘크리트 수화과정에서 발생하는 발열량과 이로 인한 온도변화량을 측정을 위해 간이 단열온도상승 실험을 실시하였다. 몰드는 단열유지를 위해 폴리스티렌($\square 220\times 220\times 230\text{mm}$, Thk.25mm)를 사용했으며, 타설 시 중심에 열전대(Thermal couple)를 매설하였다. 이 후 열전대를 온도 저장 장치에 연결하여 30분 간격으로 재령 7일까지 수화발열온도를 측정하였다.



간이 단열공시체 제작 모식도



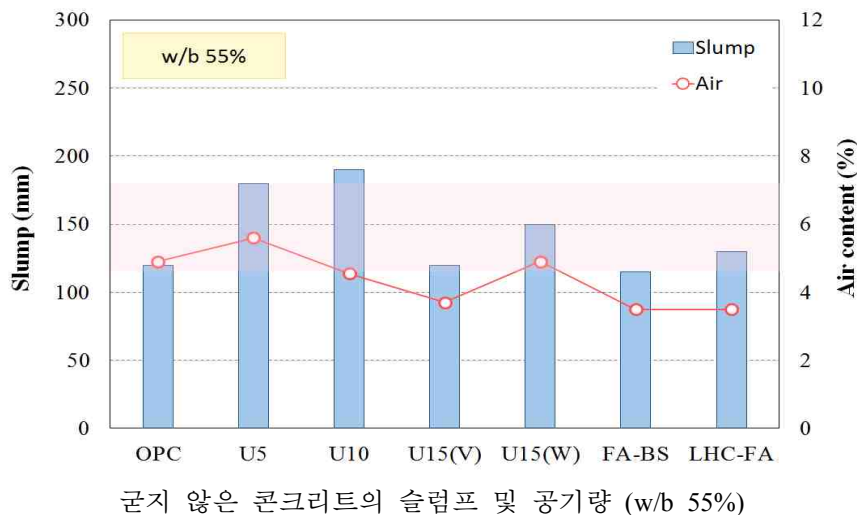
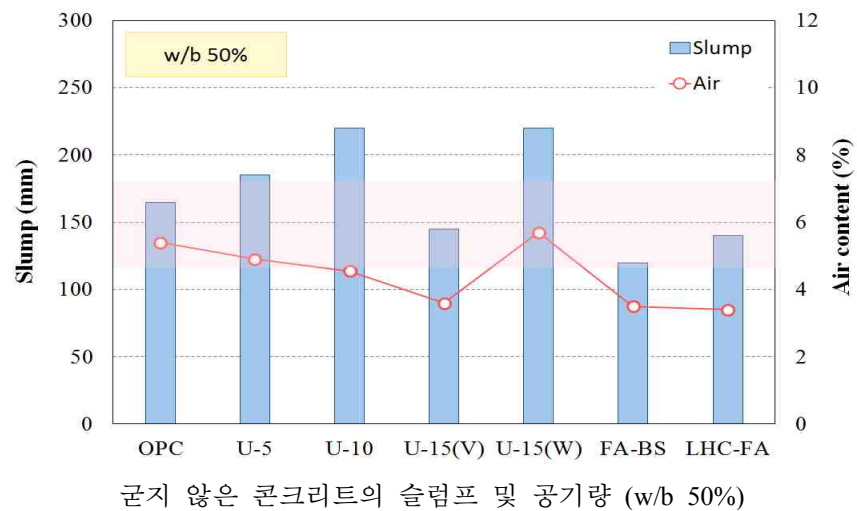
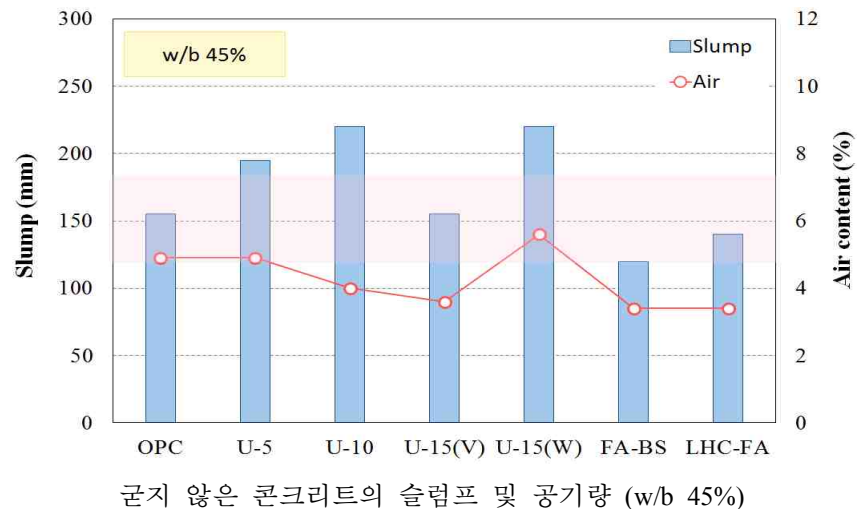
간이 단열공시체 양생



온도 기록 장치

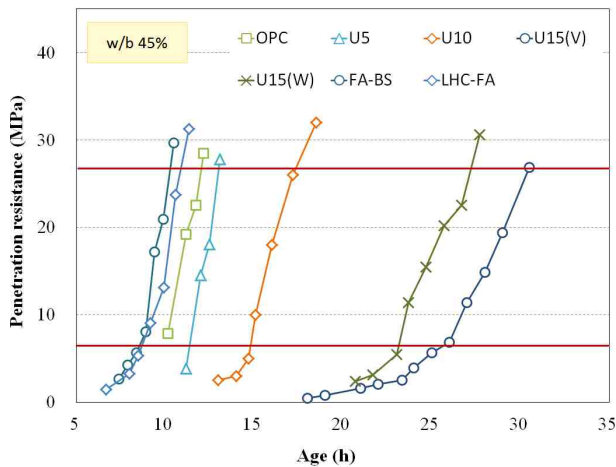
(4) 실험 결과 및 분석

실험에서는 고성능감수제의 혼입량에 따른 변수를 제외하고자 혼화제의 사용량을 결합재 중량 대비 0.8%로 고정하였다. 배합 구분은 시방배합표에 나타난 각 배합의 명칭과 같으며, 표시된 면적은 슬럼프의 목표구간($150 \pm 30\text{mm}$)을 나타내고 있다.

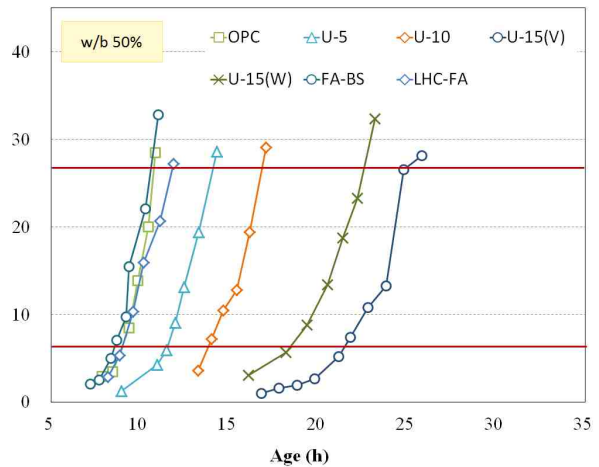


요소혼입 콘크리트에서는 요소 혼입량에 따라 슬럼프가 비례적으로 증가하는 경향이 모든 w/b에서 나타나고 있다. 이는 전술된 바와 같이 비빔 후 요소가 배합수와 용해되어 수량이 증가되었기 때문으로 판단되며, 모든 실험인자에서 동일한 경향이 나타남이 확인되었다. 이러한 현상은 대량 생산 시 관리소홀 등으로 과대 유동성이 나타날 우려가 있으며, 현장 적용 시에는 이에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다. 특히 혼입률이 가장 높은 15%에서 증점제를 혼입한 배합(U15(V))에서는 확연한 점성 증가가 나타나 요소 무혼입 배합(OPC)과 유사한 슬럼프를 나타내는 반면, 요소 혼입량 만큼 단위수량을 저감한 배합(U15(W))에서는 전체 수량이 U-10과 유사한 것으로 확인되었다. 제시된 배합설계 기법은 역학 및 내구성 평가를 두루 고려하여 최적 설계기법을 설정할 필요가 있을 것이다.

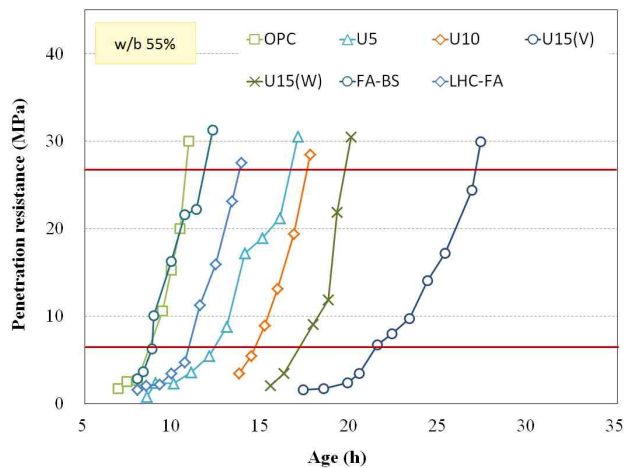
또한 시간의 경과에 따른 결합재별 응결시간을 검토하였다. 실험은 굵은골재를 제거하여 수행되었으며, KS에서 규정하는 초결(3.5MPa) 및 종결(28MPa)에 도달하는 시간을 비교하였다.



요소혼입 모르타르의 응결 시간 (w/b 45%)

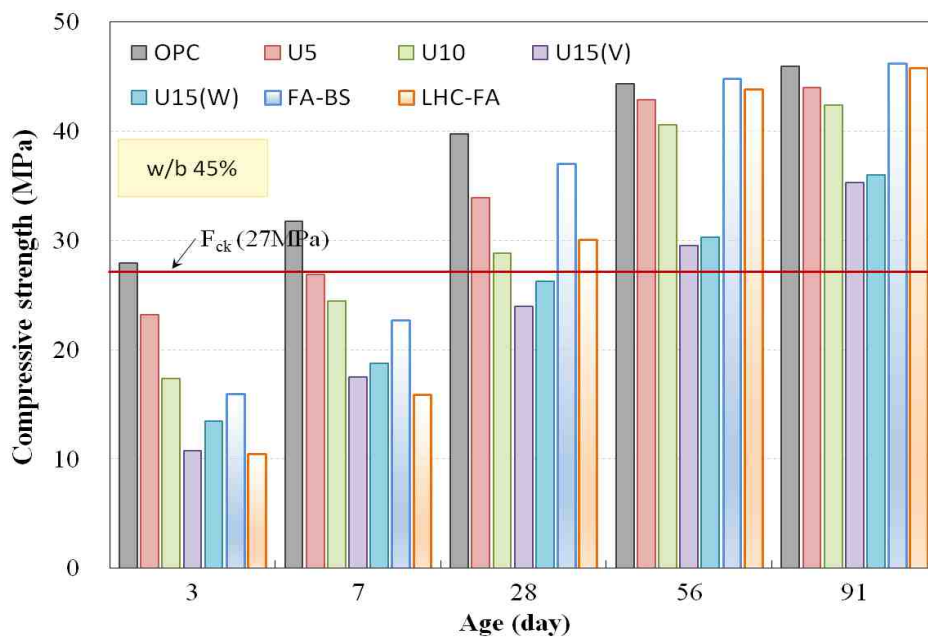


요소혼입 모르타르의 응결 시간 (w/b 50%)

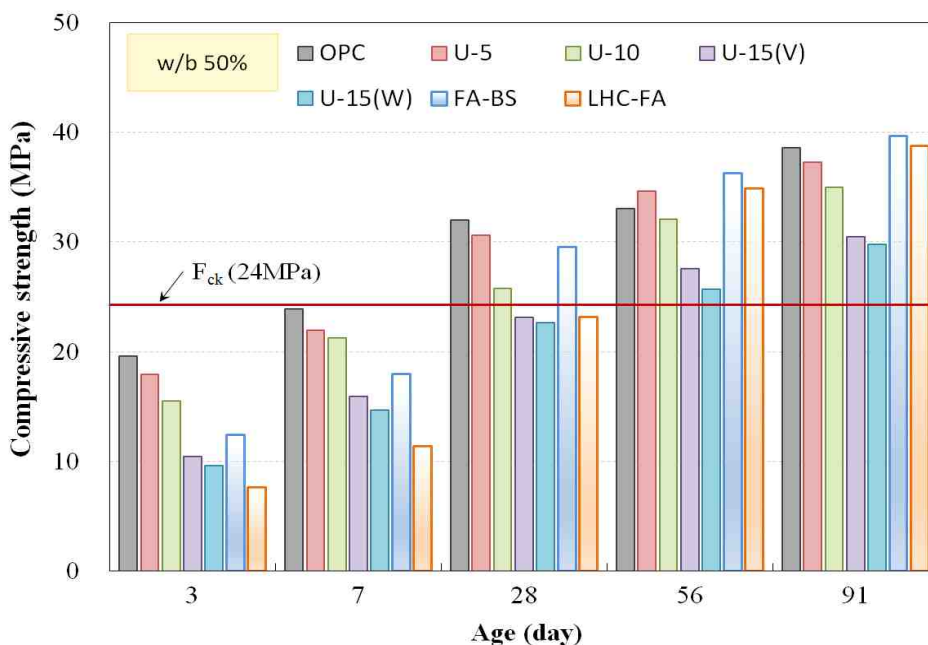


요소혼입 모르타르의 응결 시간 (w/b 55%)

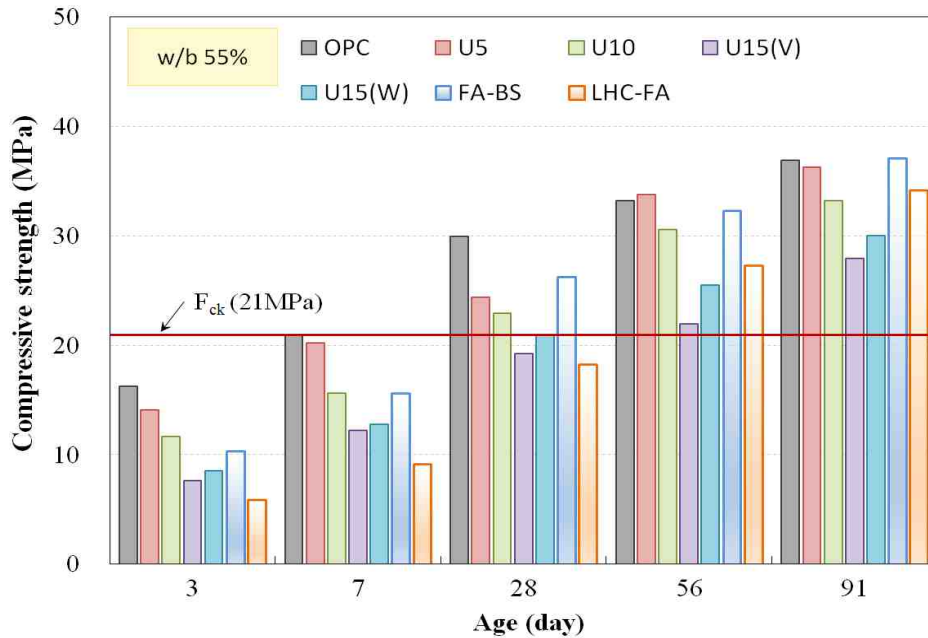
모르타르의 응결시간 실험 중 가장 주요한 특성은 요소혼입 배합의 응결지연성능이다. 거의 모든 배합이 초결부터 종결까지는 유사한 기율기를 나타내고 있는 반면, 타설 시점으로부터 초결까지는 큰 차이를 보인다. 일반적으로 응결지연형 혼화제를 사용할 경우 3시간에서 최대 8시간가량 지연되는 것으로 알려져 있으나, 요소혼입의 경우에는 최대 20시간 이상 지연되는 성능을 나타내고 있다. 이는 초기 타설온도가 급격히 낮아지는데 기인한 것으로 판단된다. 한편, FA-BS 및 LHC-FA 등의 기존 저발열배합은 무혼입 배합(OPC)과 거의 유사한 경향을 나타내며 초기 타설온도가 응결시간에 크게 영향을 미치며, 광물질 혼화제 등의 포졸란 반응성은 응결 이후에 작용되는 것으로 판단되었다.



요소혼입 콘크리트 압축강도 (w/b 45%)



요소혼입 콘크리트 압축강도 (w/b 50%)



요소혼입 콘크리트 압축강도 (w/b 55%)

요소혼입 콘크리트를 포함한 저발열 콘크리트의 강도발현을 평가하였다. 연구와 같이 저발열 배합은 초기의 강도발현이 낮아 기준강도의 측정 재령을 91일 까지 허용하고 있다. 실험에서는 최대 재령을 91일까지로 설정하여 장기재령의 강도발현을 확인하였다.

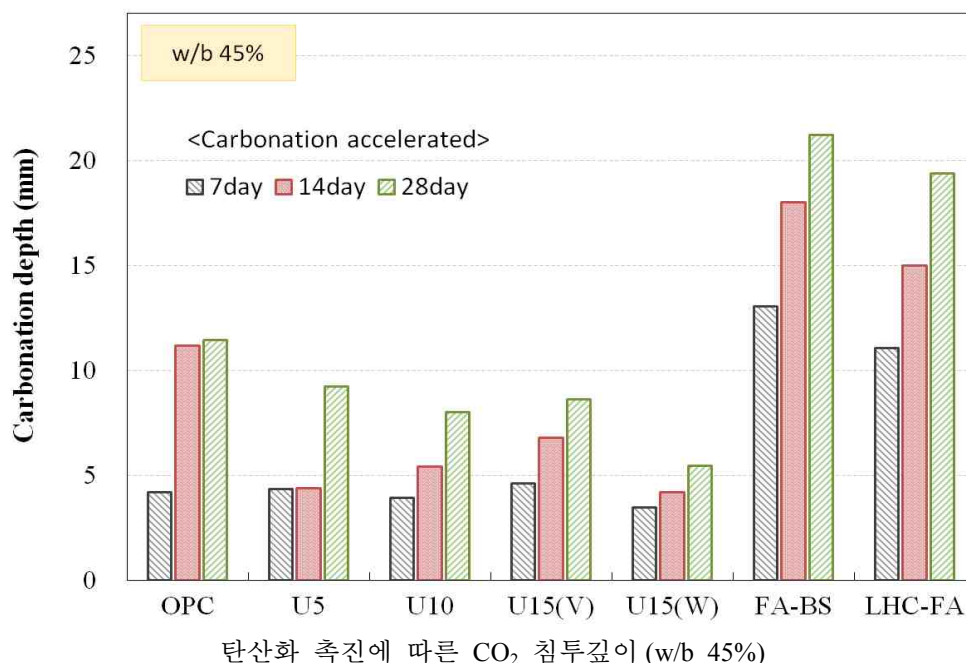
요소 무혼입 OPC 배합을 기준으로 하였을 때, 요소의 혼입은 재령 3, 7일 등의 초기재령에서 강도저하를 나타내고 있다. 온도가 급격히 낮아지는 초기재령에서 최대 60%이상 (w/b 45%)의 압축강도 저하가 나타났으며, 특히 혼입률의 단계별 증가에 따라 비례적인 강도 저하특성을 나타내고 있다. 이러한 초기재령의 강도 저하 원인 중 하나는 콘크리트 타설온도의 영향이며, FA-BS와 LHC-FA를 포함한 기존 저발열 배합의 경우 시멘트 수화 이후 포졸란 반응을 통해 초기 발열을 저하시키는데 반해, 요소의 혼입은 물과 용해되는 즉시 온도가 저하된다. 이는 응결의 지연과 더불어 굳는 시간의 지연을 초래하며, 초기재령의 강도저하로 나타나는 것이다. 또 다른 원인은 요소의 혼입으로 인한 수량의 증가로 사료된다. 배합수, 즉 단위수량의 증가는 잉여수에 의한 세공량을 증가시킬 뿐만 아니라 초기 블리딩으로 인한 표면수막을 형성하여 응결지연을 가져오게 된다. 요소혼입 콘크리트는 이러한 원인 등으로 인해 응결지연과 초기강도 저하를 초래하며, 이는 향후 현장타설 할 때 거푸집 및 동바리 제거시기를 결정하는데 크게 영향을 미칠 것으로 판단된다.

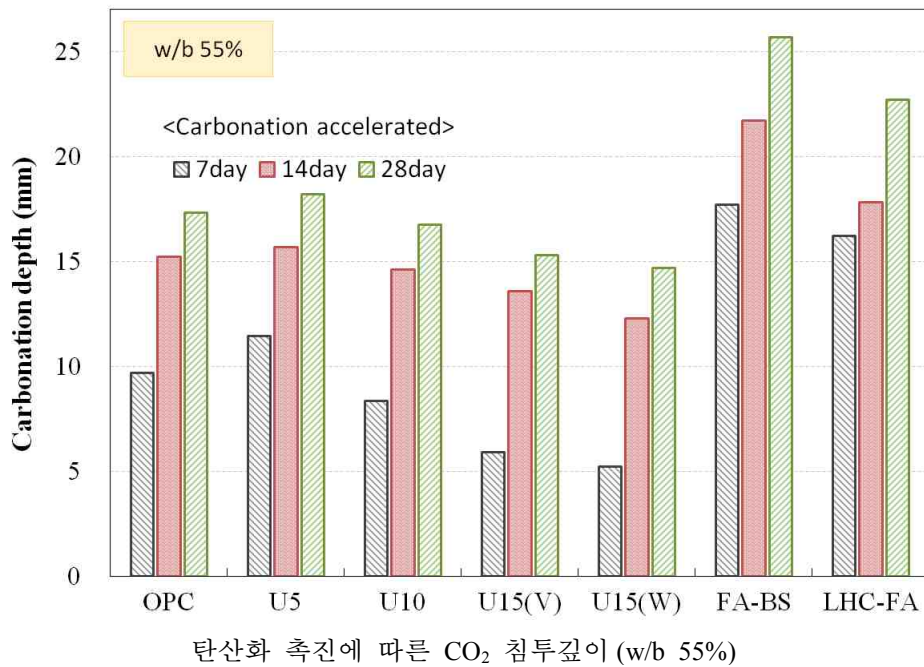
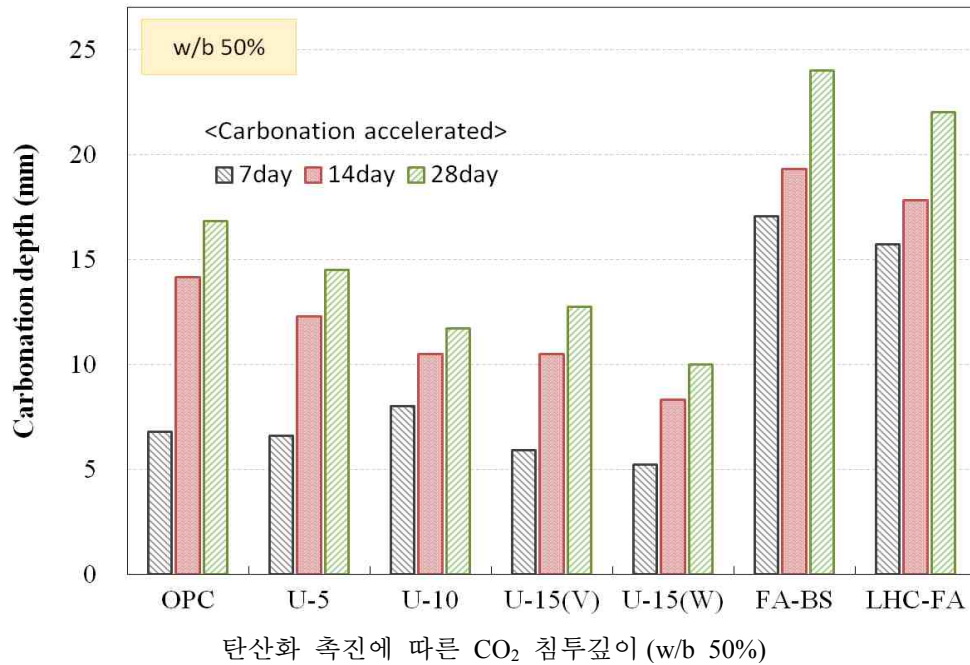
반면, 56일 이상의 장기재령에서는 요소혼입 배합이 무혼입(OPC) 배합 및 기존 저발열 배합(FA-BS, LHC-FA)과 거의 유사한 수준의 압축강도를 나타내고 있다. 이는 초기재령에서 충분히 수화되지 않은 시멘트 입자의 장기적 밀실화 특성이 나타난 결과로 분석되며, 포졸란 반응성의 FA-BS, LHC-FA 배합과도 유사한 강도특성을 나타내고 있다.

탄산화 촉진 실험은 타설 후 28일간 표준수중양생을 실시하여 강도를 충분히 발현한 시편을 CO₂ 농도 5%의 환경에 노출시킨 후 침투되는 깊이를 측정하였다. 따라서 동일한 환경에 노출된 실험체 중 탄산화 침투 깊이가 큰 것은 CO₂의 저항성이 상대적으로 낮다고 평가될 수 있으며, 향후 대기 중 CO₂에 의해 철근이 부식될 우려가 높음을 반증하고 있다.

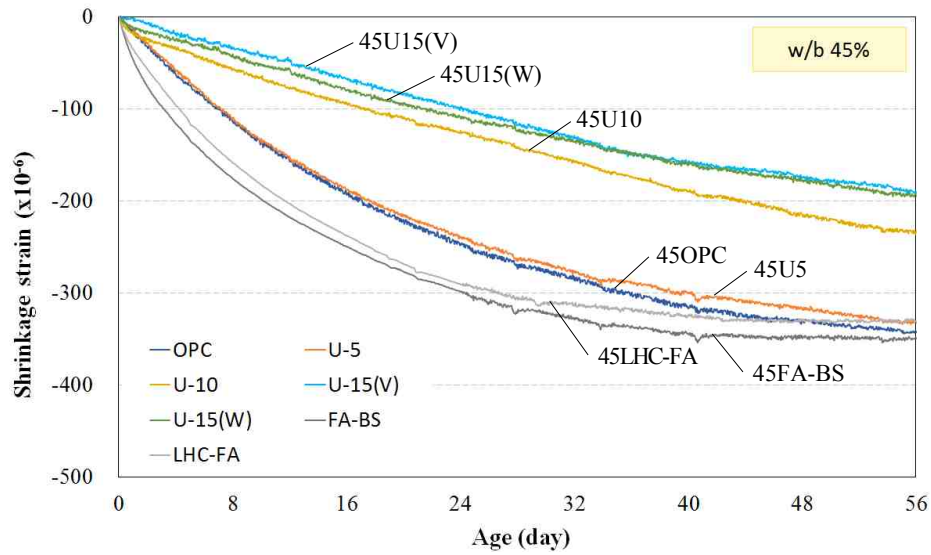
요소혼입 콘크리트의 탄산화 저항성은 요소 혼입률이 증가할수록 더 우수한 성능을 나타내고 있다. 이는 모든 w/b에서 동일한 경향으로 나타나며, 요소가 시멘트페이스트 내 존재하여 콘크리트의 알칼리성을 유지하는데 크게 기여하는 것으로 판단할 수 있다. 이는 기초반응특성 단계에서 모르타르의 pH meter를 측정한 결과를 반영하는 것으로 시멘트 페이스트(pH 11.6)에 혼입 할 때 더 높은 알칼리성(pH 12.2)을 나타나게 하는 요소는 혼입량이 증가될수록 콘크리트의 탄산화 저항에 더 유리한 것으로 사료된다. 요소혼입 콘크리트의 이러한 내구특성은 해안가 등에서 Cl 혹은 CO₂ 등에 자주 노출되는 해양콘크리트나, 해안가에 주로 위치하는 교각 및 댐콘크리트 등의 매스콘크리트 부재에 적용할 때 수화열 제어 성능과 더불어 높은 부가가치를 창출할 수 있을 것으로 기대된다.

요소혼입 콘크리트와 대비되는 결과는 FA-BS와 LHC-FA 등의 저발열 배합이다. 상기 2가지 배합은 모두 광물질 혼화재를 사용하여 결합재 중 SiO₂의 구성비율을 높게 하고, Ca(OH)₂와의 포졸란 반응성을 통해 강도발현을 나타내는 공통점을 갖고 있다. 그러나 이러한 포졸란 반응특성은 시멘트 내 알칼리 성분인 Ca(OH)₂를 소비한다는 점에서 탄산화에 매우 취약한 단점이 지적되고 있으며, 이와 관련한 대안이 제시되지 못하는 실정이다. 이에 시멘트의 수화발열을 낮추는 기존의 배합기술은 시멘트량을 낮출 수 있어 경제성에 뛰어난 장점이 있으나, 내구성에 관련된 해결 쟁점이 끊임없이 제시되어 해양 및 매스콘크리트 구조물 등에서 열화발생의 원인이 되고 있다. 이와 같은 내구성 관련 대안으로 요소혼입 콘크리트를 제시할 수 있다. 이는 수화열 저감이라는 주목적뿐만 아니라 재료 자체의 높은 pH로 콘크리트의 탄산화 저항에 일조할 수 있을 것으로 기대된다.

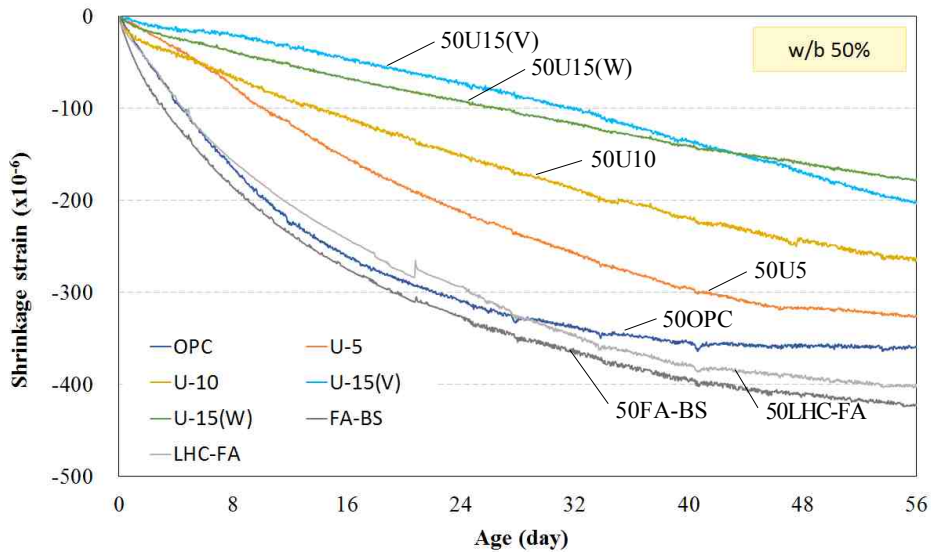




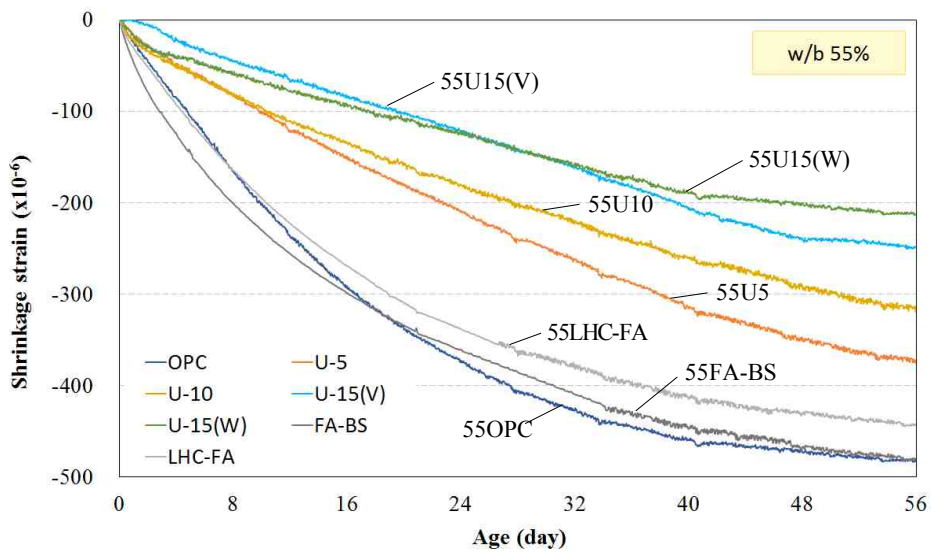
요소의 시멘트페이스트 내 팽창 특성과 이로 인한 건조 수축 상쇄 성능을 검토하기 위한 콘크리트 길이변화를 실험을 수행하였다. 그림에서 Shrinkage strain의 경우 수축응력에 따른 콘크리트의 길이변화율을 나타낸다. 이는 실험에 사용된 게이지의 고유한 Factor에 의한 변형률로 산출되며, 일반적으로 OPC를 결합재로 사용한 레디믹스트 콘크리트 등은 재령 91일 기준 $6.0 \sim 8.0 \times 10^{-4}$ 범위의 Strain을 나타내고 있다. 실험에서는 각 인자별 동일한 게이지를 사용하였으며, 정성적 경향을 중점으로 비교하였다.



콘크리트 길이변화곡선 (w/b 45%)



콘크리트 길이변화곡선 (w/b 50%)



콘크리트 길이변화곡선 (w/b 55%)

먼저 콘크리트 길이변화 특성에 w/b가 미치는 영향은 압축강도와 직결되는 것으로 나타났다. 일반적으로 콘크리트가 굳기 시작한 후 발생하는 건조수축은 주로 단위수량에 의해 결정된다. 그러나 본 실험에서는 모든 실험인자의 단위수량을 고정시킨 후 단위 시멘트 량에 의해 w/b를 결정하였기 때문에 위에 해당되지 않는다. 그럼에도 불구하고 각 w/b별로 OPC 재령 56일 기준 $1.24 \sim 1.40 \times 10^{-4}$ 가량의 변화율 차이를 보이고 있다. 이는 단위 시멘트 량의 증가로 인해 페이스트 내 공극이 감소되고, 강도 증가로 인해 수축 대응력이 증가되었기 때문으로 판단된다. 또한 상대적으로 압축강도가 낮은 w/b 55%에서는 실험인자별 변화율의 차이가 극명하게 나타났으며, 반대로 강도가 높은 w/b 45%에서는 배합요인별 변화율이 상대적으로 적은 것으로 나타났다.

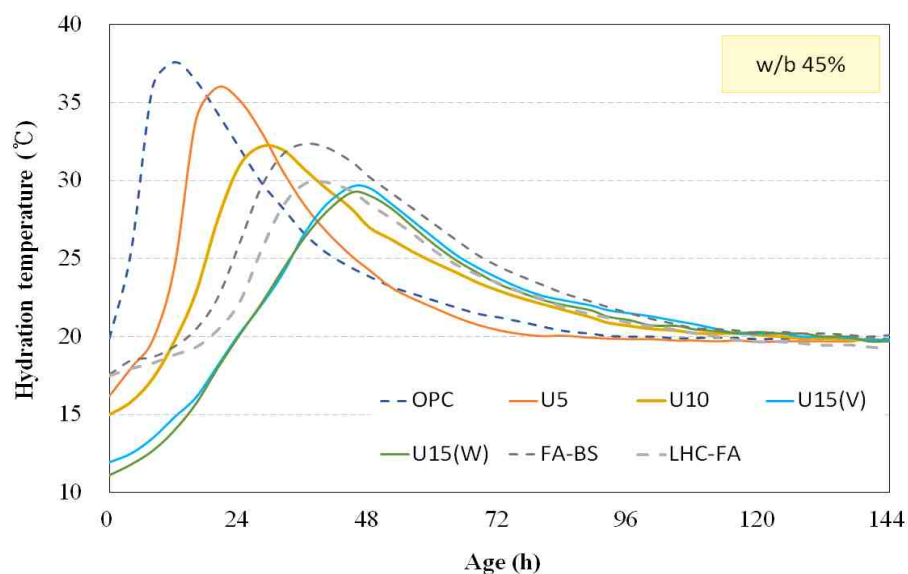
한편 OPC의 경우 모든 w/b를 막론하고 초기 재령에서 급격한 길이변화율을 나타내었으며, 약 21일 이후 완만한 경향을 보이며 약 40일 이후 안정되는 경향을 나타냈다. 이에 실험 최대재령인 56일에서는 각각 344.5(w/b 45%), 358.5(w/b 50%), 483.0×10^{-6} (w/b 55%)의 최대 변형률을 나타내고 있으며, 이는 일반적인 콘크리트의 수축률이라 할 수 있다. 이에 반해 요소혼입 콘크리트는 무혼입 대비 약 23~56% 가량 저감된 길이변화율을 나타냈다. 특히 동일 w/b 내에서 요소의 혼입량이 증가될수록 콘크리트의 수축저감은 더 큰 폭으로 나타났으며, U15(V) 및 U15(W)배합에서 가장 낮게 나타났다. 변화율이 가장 큰 폭으로 나타난 w/b 55%를 기준으로, U5는 OPC 대비 78.2%, U10은 65.3%, U15(V)는 51.6% 그리고 U15(W)는 44.4% 수준으로서 무혼입 대비 절반에 가까운 수축량을 나타내고 있다.

이 같은 요소혼입 콘크리트의 수축저감 특성은 페이스트 내 팽창특성에 의한 것으로 사료된다. 본 연구에서는 이를 CaCO_3 의 석출과정에서 나타나는 팽창특성이라 정의하였으며, 요소의 반응특성에서 생성되는 H_2CO_3 와 시멘트의 수화과정에서 생성되는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 결합에 의한 것으로 가정하였다. 실험 중 이러한 가설을 뒷받침하는 결과를 또한 발견하였는데, 이는 아래 그림에 나타난 요소의 용출(flow out)현상이다. 그림에 나타난 시료는 각각 45U15와 50U15의 콘크리트 공시체이며, 일정 재령 이후 표면에 마치 털이 난 것과 같은 현상이 발견되었다. 이러한 현상은 요소의 혼입율이 가장 높았던 15% 이상 배합에서만 나타났다. 강도발현이 일정 이상 종료된 재령 14일후에 나타났다. 본 연구자는 이를 페이스트 미세구조의 팽창 및 밀실화에 의한 요소의 용출현상이라 판단하였다. 가설로 제시된 요소의 1, 2차 반응과정을 통해 완전히 전환되지 못한 잔여 요소가 내부의 팽창압 증가로 인해 굳은 후 표면으로 용출된데 기인한 것으로 판단되었다.

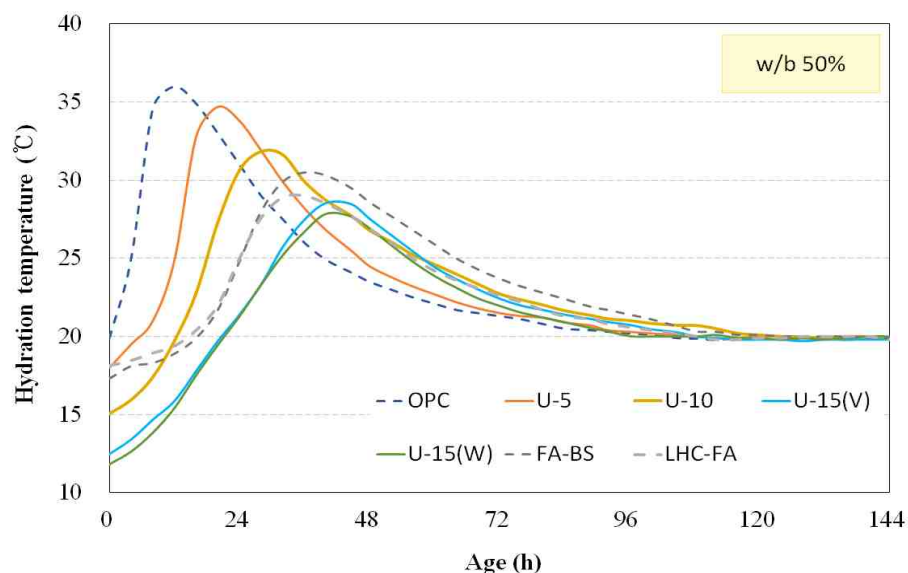


콘크리트 경화 후 요소의 용출(Flow out) 현상

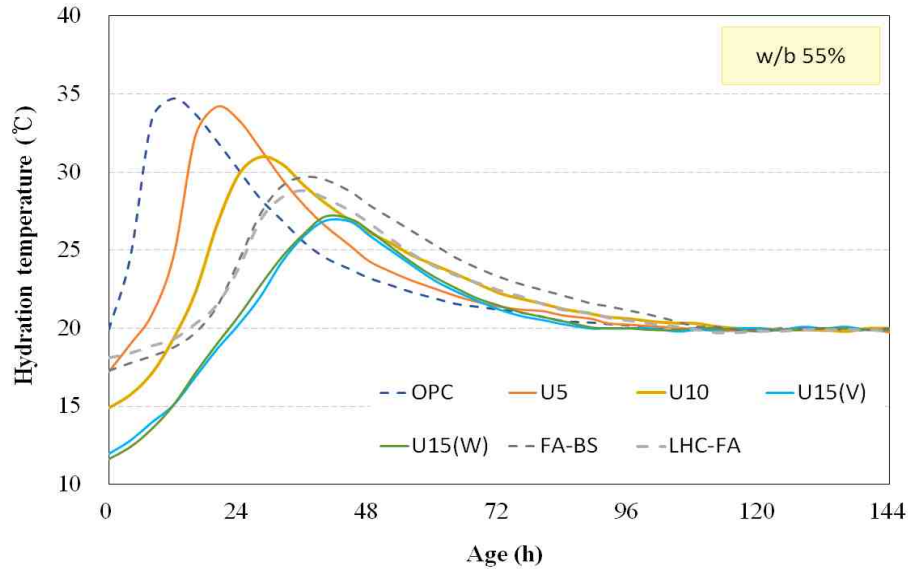
반면, 광물질 혼화재를 활용한 저발열 배합(FA-BS, LHC-FA)에서는 무혼입 OPC배합과 유사한 수준의 높은 길이변화율을 나타냈다. 상기와 같은 보통의 저발열 배합에서는 낮은 발열량에 기인해 초기 수화 진행이 더디고, 강도발현이 종료되기까지 오랜 기간이 소요된다. 때문에 타설 초기에는 수화에 기여하지 않는 잉여수의 잔류량이 높게 되고, 따라서 건조수축의 발생 확률이 높은 편이다. 이처럼 플라이애시나 고로슬래그 등의 광물질 혼화재의 사용은 산업부산물을 처리하여 경제성 및 환경성에 높은 이득을 취할 수 있으나, 탄산화와 건조수축 등의 내구성 측면에 취약한 특성을 나타낸다. 이에 초기의 수화발열을 제어하면서, 동시에 수축균열과 탄산화에 대응할 수 있는 콘크리트 배합기술이 요구되어지며, 이는 매스콘크리트를 비롯해 서중 및 해양콘크리트에서도 요구되는 사항이라 할 수 있다. 본 연구에서 제안하는 요소혼입 콘크리트가 이의 출발점이 될 것으로 기대된다.



요소혼입 콘크리트의 수화발열곡선 (w/b 45%)



요소혼입 콘크리트의 수화발열곡선 (w/b 50%)



요소혼입 콘크리트의 수화발열곡선 (w/b 55%)

위 그림에는 배합별 주요 온도특성을 나타냈다. 먼저, 콘크리트 수화온도에 w/b가 미치는 영향은 매우 미미한 것으로 나타났다. 특히 타설온도와 최고온도 발현시점 등에서는 모든 w/b에서 1°C 이내와 0.5hour 이내에서 거의 유사한 결과를 나타냈으며, 최고온도에서만 약 3°C 가량의 차이를 나타냈다. 이는 단위시멘트량의 증가가 콘크리트 수화온도에 큰 영향인자가 아님을 나타내는 결과로써, 단위결합재 양보다 종류와 요소의 혼입 등이 높은 영향인자인 것으로 나타났으며, 수화반응 시 최고온도의 경우 시멘트의 총량에 의해 결정되었으나, 여기에서는 각각 보통 포틀랜드시멘트의 사용량과 비례하는 것으로 나타났다.

한편, 요소가 혼입된 콘크리트에서는 요소의 혼입 유무와 혼입률에 따라 최고온도와 최고온도 발현시점, 온도상승곡선과 타설온도 등 모든 인자에 있어 높은 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 특히 가장 높은 최고온도를 나타낸 w/b 45%를 기준으로 요소의 혼입량 증가에 의해 각각 8.3(45U5), 16.7(45U10), 33.9시간(45U15)의 온도발현 지연이 나타났으며, 최고온도 또한 각각 1.2(45U5), 5.2(45U10), 7.9°C (45U15)의 온도저하량이 나타났다. 콘크리트 내 요소가 혼입됨에 따른 이러한 저발열 특성은 w/b는 물론이고 요소의 혼입량 증가에 의해 비례적으로 나타나며, 특히 혼입량이 동일한 U15(V)와 U15(W)배합에서는 모든 w/b에서 동일한 발열 특성을 나타내고 있다.

요소혼입 콘크리트의 최적 배합설계를 도출하기 위한 실험 결과 혼입율 15%에서는 슬럼프의 과잉증가와 압축강도 발현율의 저하 등이 나타나 적정 혼입율은 10% 이내인 것으로 나타났다. 특히 역학특성의 중요한 지표인 압축강도의 경우 기존대비 60% 수준의 결과를 나타내 사용성에 무리가 있는 것으로 판단되었다. 또한 10% 이내의 혼입율에서는 증점제나 단위수량 치환 등의 설계기법을 적용할 필요없이 목표로 한 유동특성 등을 모두 만족하여 별개의 설계기법은 요구되지 않은 것으로 사료된다.

다. 요소혼입 콘크리트의 모의부재(Mock-up) 평가

(1) 개 요

본 단계는 요소혼입 콘크리트의 모의부재 평가로써 앞에서 수행된 콘크리트 구성재료의 기초 실험결과와 최적 배합설계를 토대로 레미콘 배척플랜트에서 혼입, 믹싱, 생산 및 운반을 수행하여, 실제 건설현장의 환경조건에서 모의부재를 제작·평가함을 원칙으로 한다.

선행 연구 및 검증을 통해 콘크리트 내 혼입된 요소가 시멘트의 수화열을 효과적으로 제어할 뿐만 아니라 건조수축으로 인한 구조물의 체적변형을 충분히 상쇄할 수 있을 것으로 판단하였으며, 콘크리트의 압축강도와 내구특성, 유동성을 비롯한 기본성능 또한 충족할 수 있는 배합설계 기법을 검증하였다. 그러나 실내에서 수행되는 콘크리트 실험은 재료의 수급과 운반, 비빔, 타설, 양생 등의 환경요소가 현장 조건과는 매우 상이하다. 그 예로 실제 매스콘크리트의 수화온도 발현은 간이단열을 통해 제조된 실험몰드와 크게 다르다. 때문에 실험실에서 수행된 평가는 각 배합인자별 상대적 검증에 의의가 있으며, 이를 현장에 타설하기 위해서는 필히 대량생산을 동반한 현장의 적용성 평가가 요구되는 것이다.

이에 본 단계에서는 실내 실험에서 설계된 적정 배합을 실구조물에 적용하여 매스부재의 수화발열량을 검토하고, 건조수축으로 인한 균열현상을 확인 하고자 하였다. 또한 소량생산이 아닌 레디믹스트 설비를 통한 대량생산 가능성을 평가하기 위해 배척플랜트를 통한 레미콘 생산과 트럭 에지테이터를 이용한 운반과정 등을 두루 수행하였다. 이를 통해 요소혼입 콘크리트의 현장적용 가능성과 실내 실험에서 나타나지 않은 배합의 적정성 등을 확인하고자 하였으며, 구조물의 실질적 온도 데이터와 이로 인해 발생하는 균열의 폭, 개수 등을 요소의 혼입 유무에 따른 각각의 배합인자별로 관찰하였다.

(2) 실험 계획

본 실험에서는 요소혼입 콘크리트를 현장적용에 선행하여 구조물을 가정한 모의부재(Mock-up) 평가를 계획하였다. 모의부재는 총 2가지 종류로 계획하였는데 하나는 구조물에서의 기둥 또는 기초부재를 가정한 $\square 800 \times 800 \times 1,000\text{mm}$ 의 Mass type이며, 다른 하나는 바닥슬래브부재를 가정한 $\square 3,000 \times 3,000 \times 200\text{mm}$ 의 Slab type이다. 이 중 매스콘크리트 모의부재는 콘크리트 표준시방서(2009)에서 제시하는 매스부재의 최소기준인 두께 600mm를 상회하는 것으로 계획하였다. 이 중 Mass type은 부재의 두께를 크게 설정하여 중심부 및 표면부 수화발열량의 차이를 검토하기 위해 설정되었으며, Slab type의 경우 부재 상부를 넓게 하여 표면의 건조수축 균열을 평가하도록 설정하였다. 또한 콘크리트의 배합변수는 최적 설계된 w/b 50%(F_{ck} 24MPa)로 설정하여 50OPC 및 50FA-BS를 그대로 적용하였으며, 실험의 주된 인자인 요소혼입 콘크리트는 최적의 요소 혼입률이라고 판단된 50U10을 적용하였다.

굳지 않은 콘크리트에서는 B/P를 이용한 생산 가능 여부와 트럭 에지테이터를 이용한 운반 전·후의 물성변화를 확인하였으며, 이 외 압축강도와 수축특성, 수화발열을 측정하고 Slab type 모의부재의 균열발생량(폭, 개수)을 소정 재령에 따라 육안 관찰하였다.

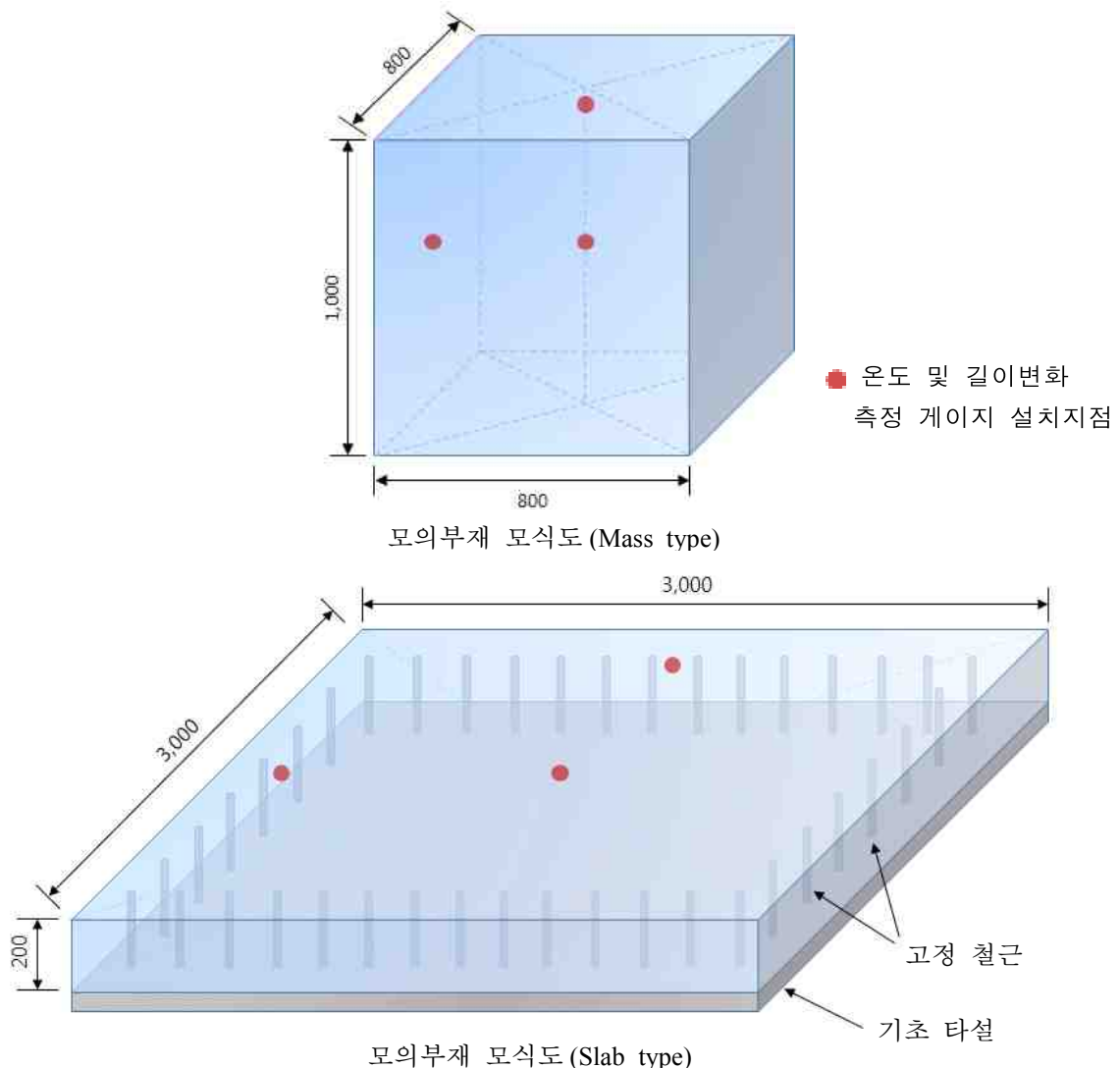
구 분			변수 조건	
실험조건	설계기준강도 (MPa)		1	24
	w/b (%)		1	50
	목표 슬럼프 (mm)		1	150 ± 30
	목표 공기량 (%)		1	4.5 ± 1.5
실험변수	모의부재 종류	Mass type	2	□800×800×1,000mm
		Slab type		□3,000×3,000×200mm
	콘크리트 배합	Case.1 (M.OPC) ^{a)}	3	OPC 100%
		Case.2 (M.FA-BS) ^{b)}		OPC 100% + U 10%
		Case.3 (M.U10) ^{c)}		OPC 50% + FA 20% + BS 30%

a)~c) : 콘크리트 시방배합표 중 각 배합명에 해당

구분	평가 항목	
굳지 않은 콘크리트	유동성	▷ 비빔 직후의 슬럼프, 공기량 ▷ 현장 도착 후의 슬럼프, 공기량
	타설온도	▷ 비빔 직후 및 현장 도착 후의 콘크리트 온도
굳은 콘크리트	강도특성	▷ 모의부재 코어 압축강도 실험 (7, 28, 56, 365일 재령) ▷ 관리용 공시체 압축강도 실험 (7, 28, 56일 재령)
	수축특성	▷ 모의부재 지점별 길이변화 실험 (~56일 재령)
	수화발열 특성	▷ 모의부재 지점별 온도상승 실험 (~7일 재령)
	균열평가	▷ 표면 균열의 폭, 개수 육안관찰 (7, 28, 56일 재령)
	탄산화 내구성	▷ 1년 이상 노출된 부재의 탄산화 침투 깊이

(3) 모의부재 제작 계획

Mass type은 콘크리트 표준시방서에서 제시하는 매스콘크리트 부재의 최소두께인 600mm를 초과하는 $\square 800 \times 800 \times 1,000\text{mm}$ 으로 제작되었다. 이는 부재 내부에서 발생하는 수화열이 외기와 맞닿지 않도록 중심부와 표면부의 거리를 높게 설정한 것이며, 이처럼 두 지점간의 온도차를 크게 유도하여 실험배합별 온도특성을 확인하는데 그 목적이 있다. 반면, 평판형상의 Slab type은 최소두께가 200mm로 설정되어 수화발열에 대한 검토는 제외하였으나, 평판의 넓이($\square 3,000 \times 3,000$)를 크게 하여 수축으로 인한 균열을 유도하였다. 일반적인 슬래브 등의 시공에서는 상부 블리딩수의 증발과 초기의 건조수축으로 인해 일방향의 균열형태가 발생된다. 이에 본 실험에서는 각 인자별 균열의 폭과 발생개수를 육안관찰하기 위해 콘크리트 타설 후 상부는 쇠풀손 마감처리 하였으며, 특히 4면의 가장자리에는 기 타설된 기초에 고정용 철근을 매입함으로서 모의부재의 체적변형을 구속하였다. 타설 후 외기에 노출되는 모의부재는 수분의 증발과 수화열 등에 기인하여 종·횡의 수축응력을 나타내나, 구속된 철물 및 기초부재에 의해 수축되지 못하게 되어, 결국 내부 인장응력의 초과로 균열발생을 유도하는 것이다. 아래 그림에는 모의부재의 제작 모식도를 나타냈으며, 거푸집 제작, 토출 및 현장 도착 후 물성시험, 콘크리트 타설 전경 등을 사진으로 나타내었다.

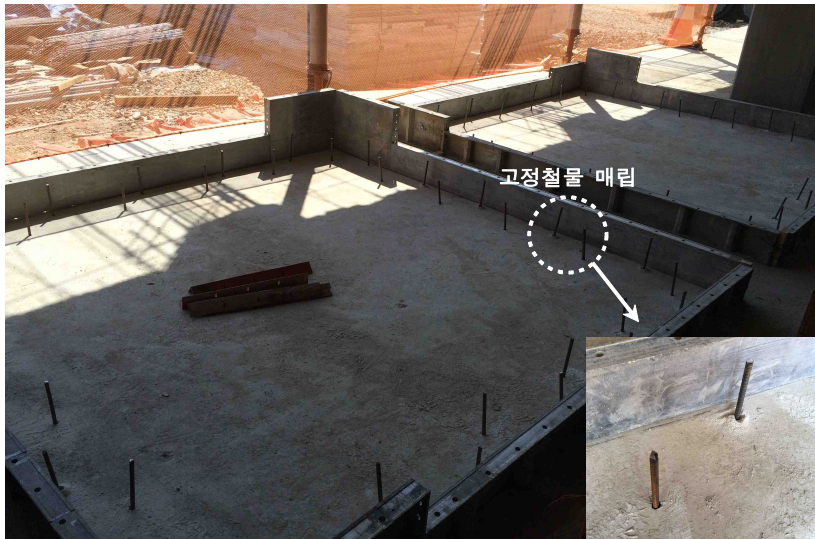




모의부재 제작 전경(Mass type) (1)



모의부재 제작 전경(Mass type) (2)



모의부재 제작 전경(Slab type) (1)



모의부재 제작 전경(Slab type) (2)



B/P 투입 요소



B/P 중앙 통제실



B/P 생산 직후 유동성 평가를 위한 토출



B/P 토출 후 물성 시험



콘크리트 현장 토출



콘크리트 현장 타설



모의부재 Slab type 타설 완료



모의부재 Mass type 타설 완료

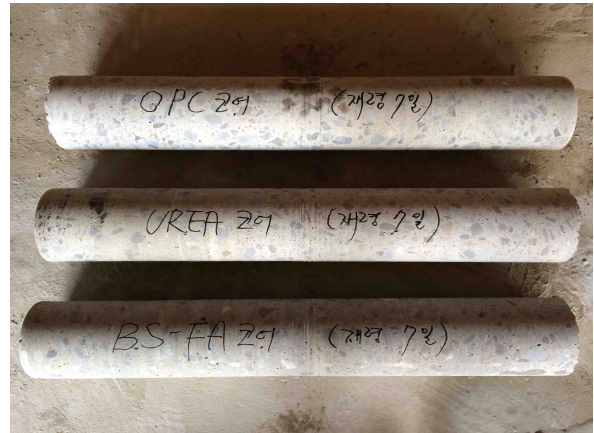
(4) 실험 방법

굳은 후 모의부재의 재령별 압축강도를 평가하기 위해 KS F 2422에 따라 코어 채취 및 압축강도 실험을 수행하였다. 모의부재의 강도평가는 부재의 수화열이 주요한 영향인자가 되므로 Mass type만을 대상으로 측정하였으며, 타설 후 재령 7, 28, 56일에 각각 $\varnothing$ 100mm의 코어를 채취하여, 200mm로 절단 후 압축강도를 측정하였다. 더불어 부재의 수화열에 의한 영향을 제외한 각 배합의 압축강도를 평가하기 위해 B/P를 통해 현장에 도착된 콘크리트를 관리용공시체로 제작하고, 현장대기양생을 통해 코어와 동일한 재령의 강도를 측정하고 비교를 수행하였다. 아래 사진에는 모의부재의 코어절취 전경을 나타내었다.

본 실험에서는 제작된 모의부재를 현장에서 1년간 보존하여 코어 압축강도 및 탄산화 침투깊이를 각각 측정하였다. 절취된 코어 공시체를 사용하였으며, 공시체를 쪼개어 상온에서 3시간 이상 건조한 후 단면에 페놀프탈레인(phenolphthalein) 1.0% 용액을 분무하고 변색되는 지점을 확인해 탄산화 침투깊이를 측정하였다.



압축강도용 코어 공시체 절취



절취된 코어 시료



1년경과 후 모의부재 코어절취



코어공시체 쪼갬

콘크리트의 표면 블리딩수 증발과 경화 후의 건조수축 및 체적변형에 기인한 부재의 균열발생량을 정성적으로 평가하였다. 일반적으로 구조물에 발생하는 균열은 건조수축과 수화발열 뿐만 아니라 알칼리 골재반응이나 화학적 열화 등 다양한 원인에 기인하고 있으나, 균열의 형상은 표면의 수축균열과 관통균열 등의 한정된 형태로 나타나고 있다. 이러한 균열의 형상 중 부재의 내력저하 등 구조적 성능저하를 가져오는 균열은 관통균열이 해당되며, 이는 주로 부재 내부에 발생되어 정확한 관측이 곤란하다. 그러나 표면의 수분증발 등으로 나타나는 표면균열은 미관을 저해하며 탄산화 등의 열화요인을 촉진시키는 결과를 초래할 수 있으나, 외부로 드러나는 지점에 발생되어 관측 및 검토가 가능하다는 특징이 있다.

실험에서는 육안관찰이 가능한 표면균열을 대상으로 모의부재의 균열저항성을 평가하였다. 부재에는 중·형의 응력발생을 위해 4면에 고정철물을 매립하였으며, 상부를 쇠흙손 마감하여 관찰을 용이하도록 하였다. 기간에 따른 균열발생확률을 검토하기 위해 타설 후 7, 28, 56일에 관찰 및 기록을 실시하였으며, 관찰 이전에는 그림과 같이 상부면의 미분을 제거하여 육안 관찰하였다. 이 후 시간경과에 따른 균열의 성장률을 확인하고 재령별 균열 형상을 도식화하여, 배합인자별 균열저항성을 검토하는 것으로 계획하였다.

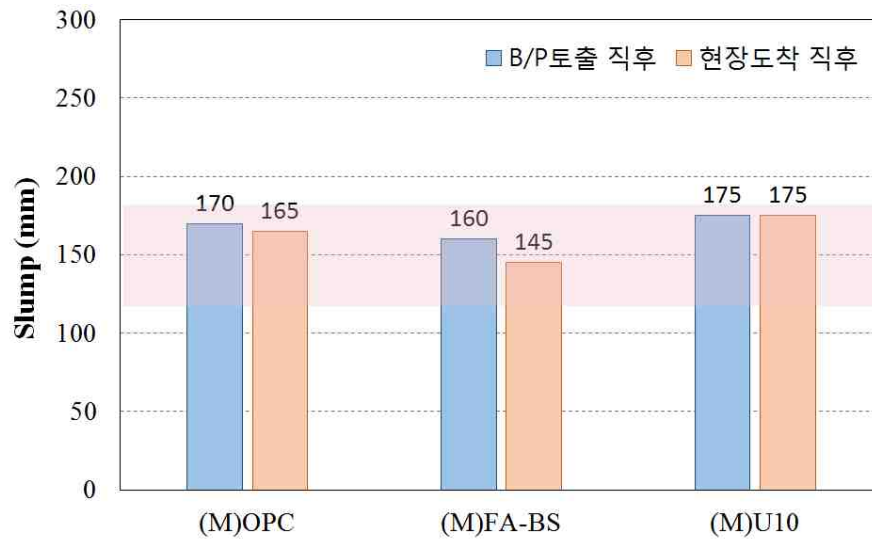


모의부재의 균열형상 관찰

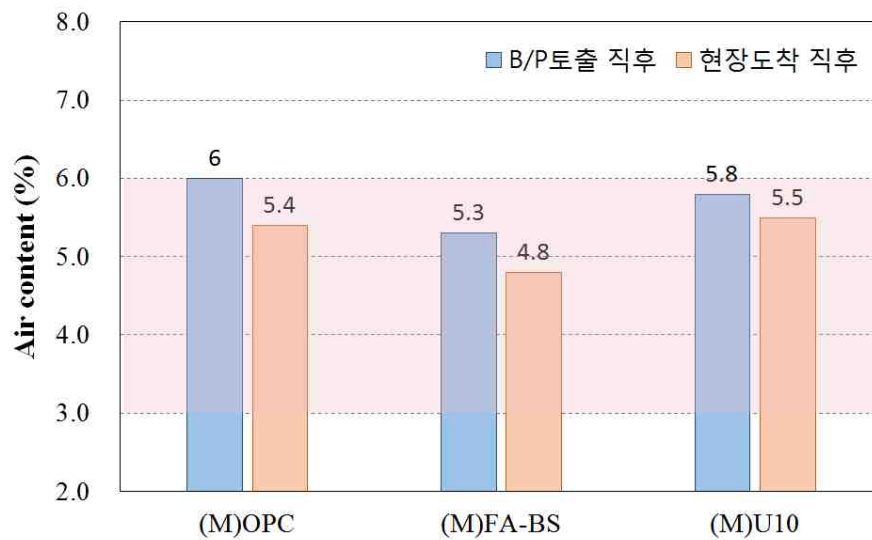
(5) 실험 결과 및 분석

가) 모의부재 유동특성 시험 결과

실내 실험과는 달리 B/P를 통한 대량생산의 경우, 1회의 비빔용적이 증가될 뿐만 아니라 비빔 후 운반과정을 거쳐야 한다. 따라서 온·습도가 적절히 유지된 실내 실험과는 전혀 다른 결과가 도출될 수 있다. 그림에는 B/P를 통해 생산된 레미콘의 유동 특성과 타설온도 등 굳지 않은 콘크리트의 물리적 특성을 나타내었으며, B/P토출 직후 및 현장 도착 후의 콘크리트 물성변화를 감안한 경시 변화 결과가 포함되었다. 실험이 수행된 공장과 타설 현장 간의 거리는 약 21km이며, 콘크리트 믹서차 기준 약 35분이 소요된다.



B/P를 통한 콘크리트의 슬럼프 및 경시변화



B/P를 통한 콘크리트의 공기량 및 경시변화

먼저 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 특성은 운반 전·후에서 모두 목표 슬럼프인 $150 \pm 30\text{mm}$ 이내의 결과를 나타냈다. 슬럼프와 공기량 등의 유동특성은 예비실험을 통해 $3 \sim 6\text{m}^3$ 로 사전비빔을 수행한 결과로, AE감수제의 적절한 혼입량을 계획하였기 때문으로 판단된다. 특히 슬럼프 특성에 있어 요소의 혼입은 이전 실내실험과 마찬가지로 수량증가에 의한 유동성 증가를 가져왔으나, 그 영향은 기대보다 미미한 것으로 나타났다. 이는 여러 원인을 생각할 수 있으나, 에지테이터 토출할 때 수량이 많이 포함된 윗부분이 아닌 아래쪽에서 토출시켜 밀도가 높은 골재와 시멘트가 다량 포함되었기 때문으로 사료된다. 일반적으로 트럭 에지테이터를 이용한 콘크리트의 운반은 슬럼프 로스(Loss)를 동반하게 된다. 이는 이동 중 배합수의 증발과 기전 골재의 수량흡수, 공기량의 저하 등으로 인해 슬럼프가 $5 \sim 20\text{mm}$ 가량 감소되는 현상으로, 본 실험 중 요소 무혼입 배합((M)OPC, (M)FA-BS)에서 이러한 경향이 나타나고 있다. 반면 요소를 혼입할 경우에는 높은 수량에 기인해 경시변화 후에도 동일한 슬럼프를 나타내고 있는데, 이는 B/P로부터 현장 도착까지 에지테이터의 지속적 비빔에 기인해 요소의 용해량이 증가되었기 때문으로 사료된다. 또한 운반으로 인한 시간경과에 따른 공기량의 변화는 각 배합인자에서 비교적 일정하게 나타나고 있으며, 이는 타설 현장까지의 소요시간을 감안할 때 일반적인 수치로 판단된다.

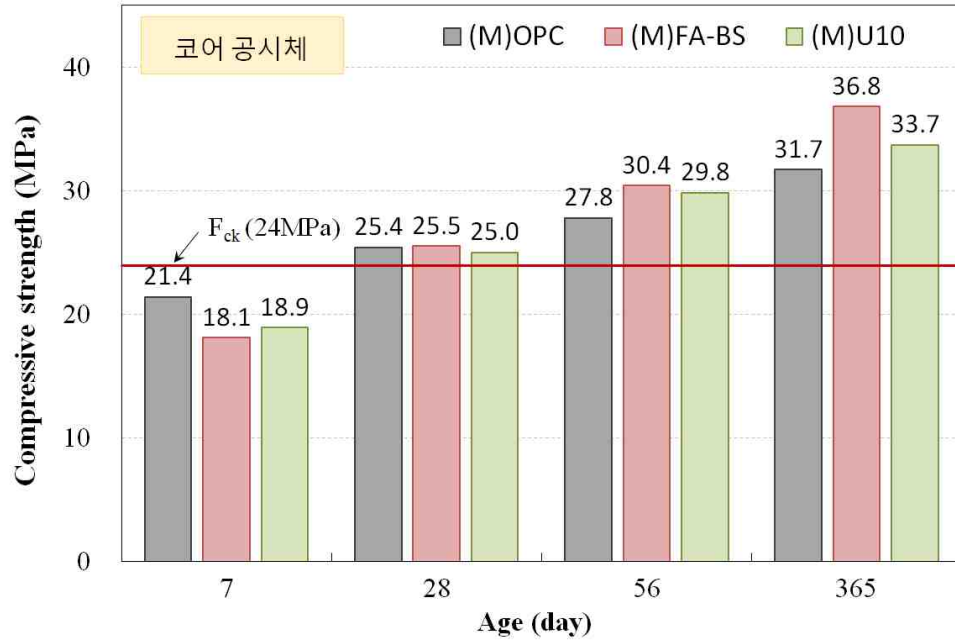
나) 모의부재 압축강도 시험 결과

아래 그림에는 모의부재의 코어 및 관리용 공시체의 압축강도 측정결과를 나타내었다. 먼저 재령별 코어공시체의 강도발현에서는 모든 배합에서 재령 28일 이내 설계기준강도 (24MPa)에 도달하였다. 상기 나. 절의 실내 실험에서 설계기준강도의 도달 재령이 56일 이상이었음을 감안할 때, 온·습도가 유지된 실내에 비해 강도발현 속도가 빠르게 나타난 것이다. 이는 대규모 매스콘크리트 부재 등에 개발기술이 적용되었을 시 기존의 저발열 기법 및 공법 등에 비해 초기 강도발현이 충분한 것을 반증하는 것으로 사료된다.

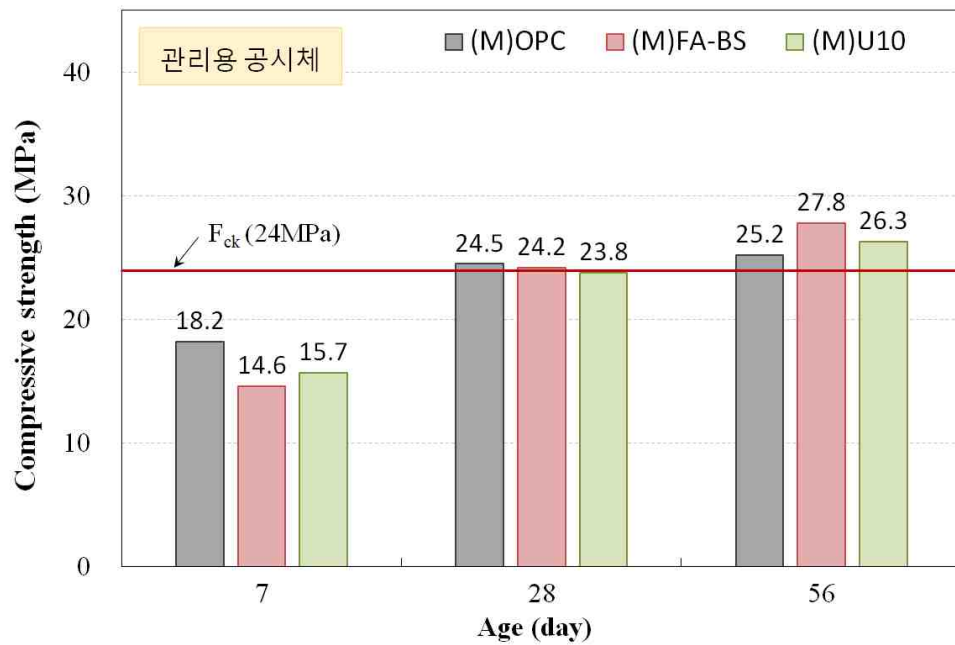
이러한 결과는 모의부재 타설 시의 외기조건과 실험실의 제어조건이 큰 차이를 나타냈기 때문으로 판단되며, 부재 제작 시기였던 6~8월에는 일최고기온이 $25 \sim 30^\circ\text{C}$ 내외로서 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 제어된 실내와는 상이한 강도발현을 나타낸 것으로 사료된다.

이처럼 높은 외기온도에 기인하여 초기 7일 재령을 제외하고는 배합별 강도발현이 매우 유사한 형태를 나타냈다. 초기재령에서 저발열배합인 (M)FA-BS와 (M)U10의 강도발현이 (M)OPC에 비해 $2.5 \sim 3.3\text{MPa}$ 가량 낮게 나타나고 있으나, 이는 재령 28일 이후 역전되어 56일에서는 $0.6 \sim 2.6\text{MPa}$ 가량 더 높은 강도를 나타내었으며, 재령 365일에는 (M)FA-BS 배합을 중심으로 이러한 경향이 더욱 뚜렷이 나타났다. 이는 초기 낮은 수화속도가 장기적 강도발현에 있어 더 유리한 요인이 될 수 있다는 기존 이론을 뒷받침하는 것으로, 콘크리트 내 요소의 혼입이 압축강도의 저해요인이 아님을 나타내고 있다.

또한 관리용공시체의 강도발현은 전체적으로 코어공시체보다 $1.1 \sim 3.2\text{MPa}$ 가량 낮게 나타났으나, 배합별 상대적 경향은 매우 유사한 것으로 나타났다. 관리용 공시체 역시 현장대기양생을 실시하여, 외기의 높은 온도로 인해 재령 28일에 설계기준강도를 만족하였다. 코어 공시체의 높은 강도발현은 부재의 자체 수화발열에 의한 것으로, 실내실험에서 요소혼입 콘크리트의 낮은 압축강도에 우려를 나타낸 것과 달리 현장 적용 시에는 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.



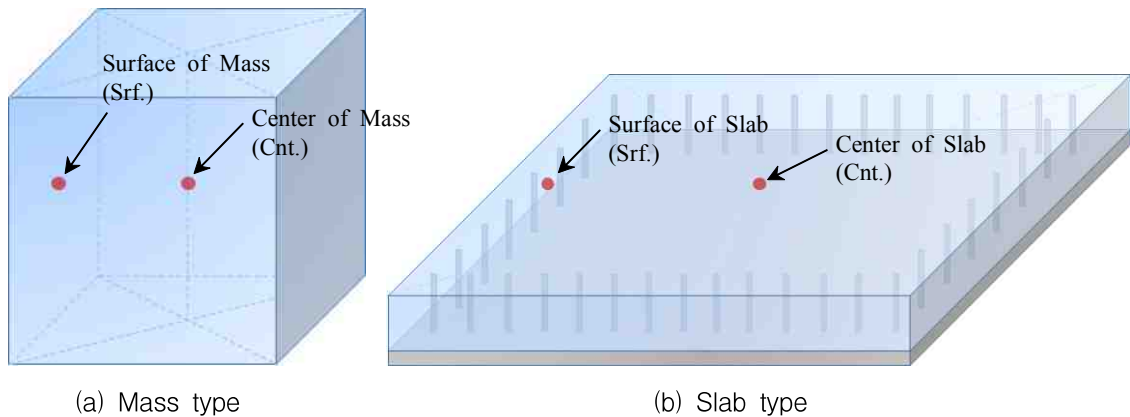
B/P를 통한 모의부재 코어공시체의 압축강도 특성



B/P를 통한 관리용공시체의 압축강도 특성

다) 모의부재 길이변화 시험 결과

수축에 의한 길이변형률은 수화열에 의한 열팽창과 건조수축에 의한 체적변형 그리고 요소의 수축상쇄성능 등을 비교하고자 함이며, 변형률이 낮을수록 수축에 대한 저항성이 높아 균열발생 확률이 낮을 것으로 예상할 수 있다. 그림에는 모의부재 내 길이변화를 측정지점을 도식화하여 나타냈으며, 각 지점의 해당명칭을 약어로 나타내었다.



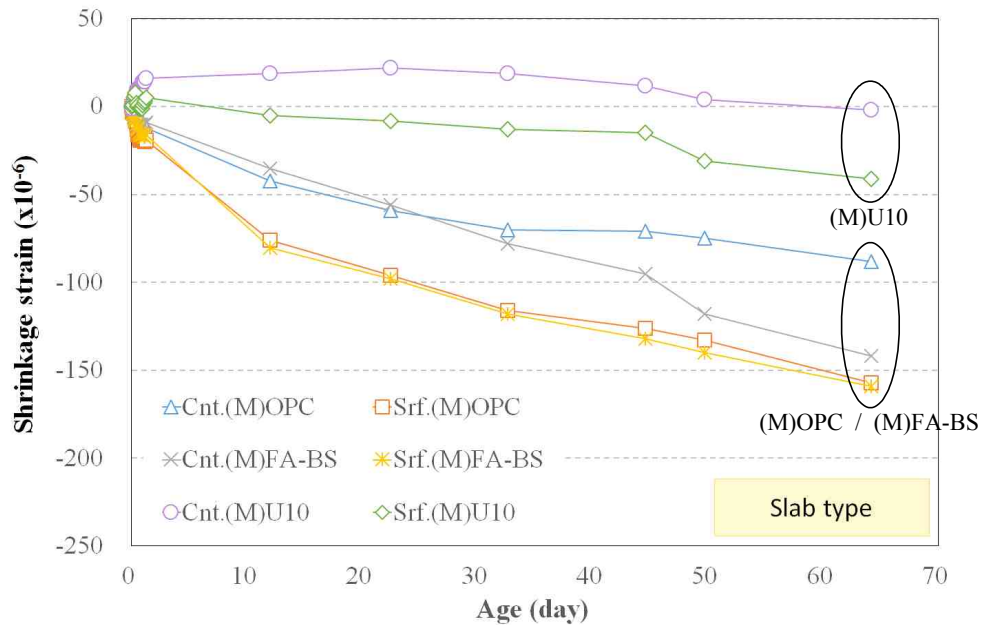
모의부재 수축변형률 측정 지점

상기에 나타난 측정지점은 Mass type과 Slab type에서 각각 중심부(Center)와 표면부(Surface)에 해당하는 4곳을 선정하여, 배합인자별로 총 12개 지점을 설정하였다. 특히 Mass type에서는 수화온도에 따른 팽창특성과 배합별 수축상쇄성능을 평가하기 위해 중심부와 표면부로 나누어 이를 측정하였으며, Slab type 또한 수축이 개시되는 표면부와 외부로부터 잠식되는 중심부의 변형특성을 각각 평가하였다. 측정기간은 타설일로부터 8주간 수행되었으며, 이는 콘크리트의 수화가 충분히 종료되어 시간경과에 따른 수축률이 완전한 형태를 이루게 되는 시점으로, 각 지점별 모니터링을 통해 실험종료일을 결정하였다.

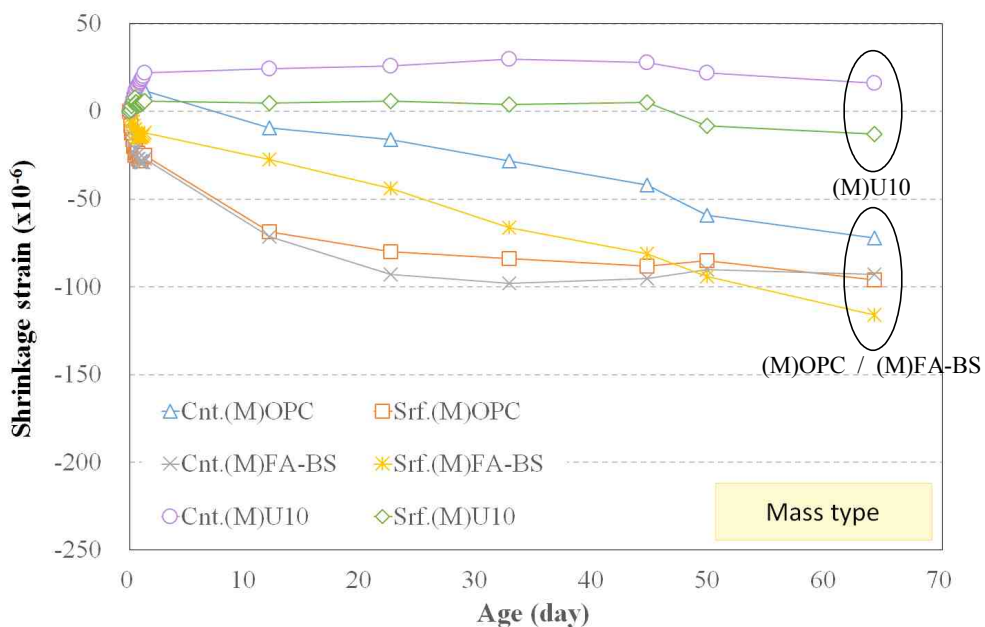
모의부재의 길이변화 측정 결과, 실내실험과 비교하여 약 50% 이하의 변형률을 나타내고 있다. 실내실험은 콘크리트 몰드를 통해 제작해 구속이 없는 자유수축 조건에서의 변형량을 나타낸 것이며, 본 실험의 경우 부재 자체의 구속력과 측면의 고정철물 등으로 인해 최대 159.0×10^{-6} 의 변형이 나타나고 있다. 또한 동일 배합조건에 있어 Mass 및 Slab type의 변형특성을 살펴보면, 두께가 비교적 얇고 종·횡이 넓게 설정된 Slab type에서 Mass type 대비 30~60%가량 더 높은 변형을 나타내고 있다. 이는 크게 2가지의 원인을 가정할 수 있는데, 하나는 비교적 얇은 단면에 의해 수축에 대응하는 인장응력이 낮아졌기 때문이며, 또 다른 원인은 상부의 넓은 표면적으로 인해 외부로의 수분증발이 증가되고, 자체의 건조수축이 가속된 데 따른 것으로 판단된다.

한편, 요소혼입 콘크리트를 포함한 배합인자에 따른 변형량은 부재 종류에 상관없이 유사한 경향을 나타냈으며, 측정지점에 따른 수치의 차이가 있을 뿐 상대적인 수축저항성은 매우 뚜렷이 나타났다. 먼저 요소를 시멘트 대비 10%로 혼입한 배합((M)U10)에서는 대부분의 재령에서 0에 가까운 변형률을 나타내고 있다. 특히 초기재령에서는 오히려 팽창

특성을 보이며, Mass의 중심부(Cnt.(M)U10)에서는 최종 변형률이 16.0×10^{-6} , Slab에서는 4.0×10^{-6} 으로 모두 0보다 높은 결과를 나타냈다. 이론상 콘크리트의 최종 길이변화량이 0라 함은 수축 및 균열에 대한 우려가 전혀 없다고 판단할 수 있으며, 특히 시멘트의 수화가 거의 종료된 재령 56일 이후에도 0보다 높은 수치를 나타내, 요소의 수축저감성능을 높게 평가할 수 있는 자료로 판단된다.



모의부재의 지점별 수축 변형률(Mass type)

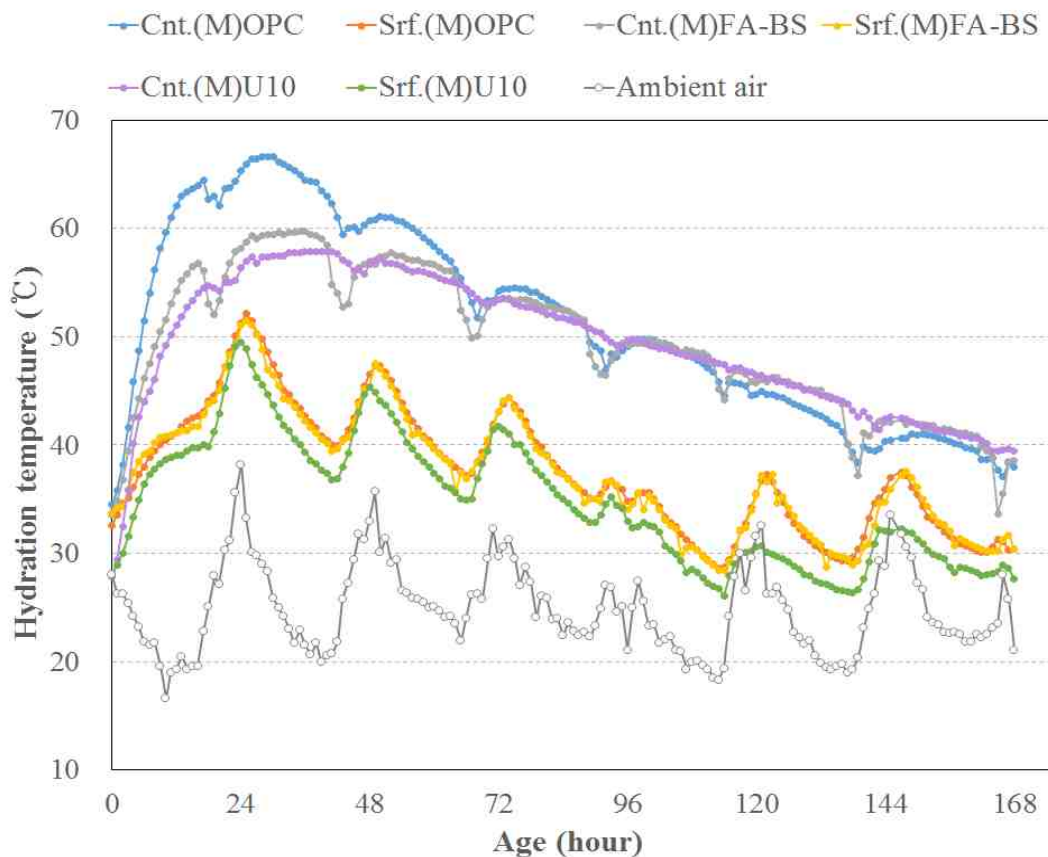


모의부재의 지점별 수축 변형률(Slab type)

라) 모의부재 수화온도 시험 결과

요소혼입 콘크리트를 포함한 배합인자의 수화발열 특성과 매스콘크리트의 지점별 온도경향을 아래 그림 및 표에 각각 나타내었다. 수화열의 측정은 모의부재 중 단면두께가 큰 Mass type을 대상으로 수행되었으며, 중심부와 표면부의 온도차를 측정하여 온도응력의 발생확률 등을 정성적으로 평가하였다.

먼저 중심부의 온도이력은 서중기의 높은 외기온도로 인해 (M)OPC에서 최대 66.4°C까지 나타나고 있으며, (M)FA-BS와 (M)U10은 각각 59.3°C와 57.3°C로 유사한 온도경향을 나타냈다. 이처럼 실내실험과 동일하게 1종 시멘트를 100% 혼입한 (M) OPC배합이 가장 높은 수화발열을 나타낸 반면, 시멘트 외 광물질 혼화재를 치환한 기존 저발열 배합 ((M)FA-BS)과 요소혼입 콘크리트((M)U10)에서는 무혼입 대비 각 7.1°C와 9.1°C의 최고온도 저하성능을 나타내었다. 특히 요소혼입 콘크리트(U10)의 수화발열 특성은 기존 실내실험과 유사하게 타설온도에서 타 배합대비 4.5~5.7°C가량 낮은 온도를 나타냈으며, 이러한 초기 온도차이가 전체의 수화발열량에 높은 영향을 미치는 것으로 나타났다.



Mass type 모의부재의 지점별 수화발열온도

또한 요소혼입 콘크리트는 기존 실험에서 최고온도의 도달시간이 크게 지연되는 것으로 확인되었으나, 본 실험에서는 3가지 배합이 모두 유사한 시간을 나타내고 있다. 기존 실내실험과 대비되는 이러한 결과는 서중기의 높은 외기온도에 의한 영향으로 판단된다.

초기 1일 이내의 외기온도가 최저 16.6℃로부터 최고 38.2℃까지 나타나, 표면으로부터의 급격한 열전달이 시멘트의 수화반응을 크게 촉진시킨 것으로 사료된다. 상기의 수화촉진 현상은 향후 요소혼입 콘크리트 현장적용 시의 고려사항으로 판단되며, 보통의 매스콘크리트에 비해 두께가 1.0m 이하로 작게 설정된 경우 외기온도에 의한 영향인자를 고려하여야 할 것으로 사료된다.

Mass type 모의부재의 수화발열 특성

구 분		(M)OPC	(M)FA-BS	(M)U10
Mass type 중심부 (Cnt.)	타설온도 (°C)	33.5	33.5	27.8
	최고온도 (°C)	66.4	59.3	57.3
	최고온도 도달시간 (hour)	26.0	26.0	26.0
Mass type 표면부 (Srf.)	타설온도 (°C)	33.5	33.5	27.8
	최고온도 (°C)	52.1	51.5	49.5
	최고온도 도달시간 (hour)	25.0	25.0	24.0
중심 및 표면 온도차 (°C)		14.3	7.8	7.8

한편, 매스콘크리트의 온도균열확률을 평가하는 도구로 중심 및 표면부의 온도차가 활용되고 있다. 지점별 온도차이에 의한 상이한 열팽창이 균열발생의 원인으로 지적되기 때문인데, 이에 매스콘크리트위원회 등에서는 단면 최소두께 0.6m 이상의 매스부재에서 중심 및 표면부의 온도차이가 15~25℃를 넘지 않도록 권고하고 있다. 이는 40MPa 이상의 일반적인 고강도 콘크리트의 경우와도 유사한 것으로서, 단위시멘트량이 많은 고강도 콘크리트의 경우 최고온도가 약 90℃까지 육박할 수 있다.

본 실험에서는 최고온도가 가장 높게 나타난 (M)OPC에서 14.3℃의 온도차가 나타났을 뿐, 저발열 배합에서는 모두 7.8℃로 양호한 차이를 나타내고 있다. 이는 본 실험이 실제의 구조물에서 측정된 것이 아닌 단면최소두께의 규정에 따른 모의부재를 대상으로 수행되어 온도결과가 다소 과소평가된 것으로 사료되며, 현장 적용을 위한 정성적 지표로 판단될 수 있을 것이다. 또한 일반강도 대비 9.1℃의 온도저감이 나타난 것에 미루어 이보다 최고온도가 높은 고강도 매스콘크리트에서도 동등이상의 수화열저감이 나타날 것으로 기대되는 바이다.

마) 모의부재 탄산화저항성 시험 결과

타설 후 1년간 현장에 노출된 모의부재를 대상으로 코어 공시체를 채취해 탄산화 침투 특성을 평가하였다. 그림에는 페놀프탈레인 용액을 분사하기 전 건조된 공시체를 나타냈으며, 분사 후 3개의 지점에서 측정된 탄산화 침투 깊이를 정량적으로 나타내었다. 코어 공시체는 총 4개를 절취 및 할렬하여 1개 단면을 실험에 적용하였다.



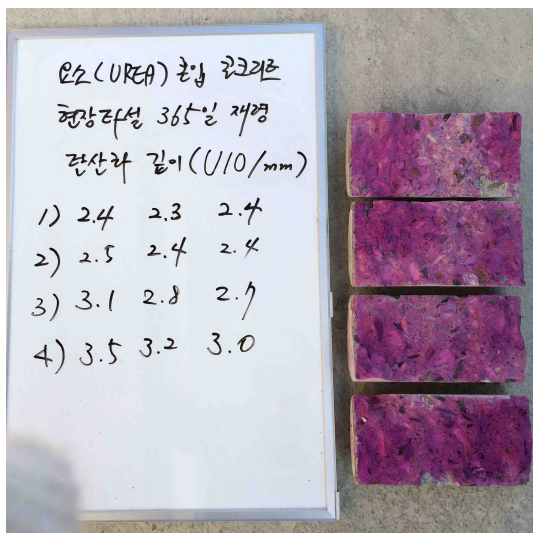
할렬 후 단면건조



(a) (M)OPC



(b) (M)FA-BS



(c) (M)U10

구 분	평균탄산화 침투 깊이 (1년 재령, mm)		
(M)OPC	7.2	8.2	Ave.
	4.7	4.8	6.2
(M)FA-BS	10.9	11.0	Ave.
	11.8	13.4	11.8
(M)U10	2.4	2.4	Ave.
	2.9	3.2	2.7

1년간 현장에 노출된 배합별 탄산화 침투깊이

실험 결과 (M)OPC는 평균 6.2mm의 탄산화 깊이를 나타낸 반면, 광물질 혼화재를 다량 치환한 (M)FA-BS의 경우는 11.8mm의 비교적 높은 침투깊이를 나타냈다. 이는 4.5.2.2 절의 탄산화 촉진시험 결과와 동일한 경향으로, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와의 반응성을 갖는 플라이애시 등의 규산질 혼화재와 잠재수경성의 고로슬래그 미분말이 콘크리트 내 알칼리성을 소비시켜 나타난 결과로 사료된다. 이는 본 연구의 초기단계에 지적된 바와 같이, 잠재수경성이나 포졸란 반응 등으로 발열량 저감 및 수화지연을 유도하는 기존 기술에 공통적으로 나타나는 단점으로, 이의 해결방안이 요구되고 있다.

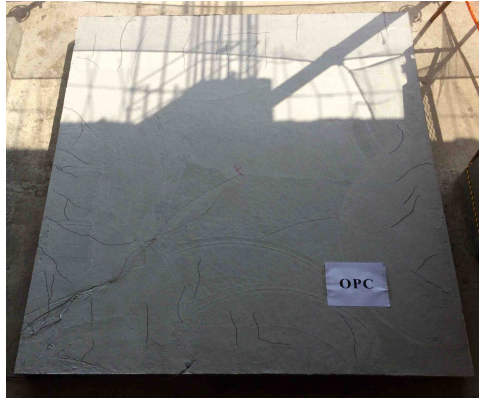
한편, 요소를 혼입한 (M)U10에서는 1년 재령의 탄산화 침투깊이가 평균 2.7mm로 매우 양호한 결과를 나타냈다. 요소의 콘크리트 내 기대반응으로 가정한 상기 포졸란 반응성과 동일하게 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 소비하는 특성을 나타낸다. 이는 콘크리트 내 알칼리성을 일부 상실하게 할 우려가 있으나, 오히려 (M)OPC에 비해서도 더 높은 탄산화 저항성을 나타내었다. 이는 크게 2가지의 원인으로 사료되며, 하나는 요소의 자체 pH가 약염기성(8.8, 30% 수용액 기준)을 띄어 요소혼입 콘크리트의 pH를 일부 상승시켰을 가능성에 따른 것이며, 다른 하나는 CaCO_3 의 생성으로 인한 팽창특성이 시멘트 미세구조의 밀실화를 가져온데 따른 것으로 판단된다. 요소의 이러한 내구특성은 기존 저발열 배합의 초기 발열량 저하와 응결지연으로 인해 발생하는 물리·화학적 단점을 크게 완화시킬 수 있을 것으로 기대되는 바이다.

바) 모의부재 균열저항성 시험 결과

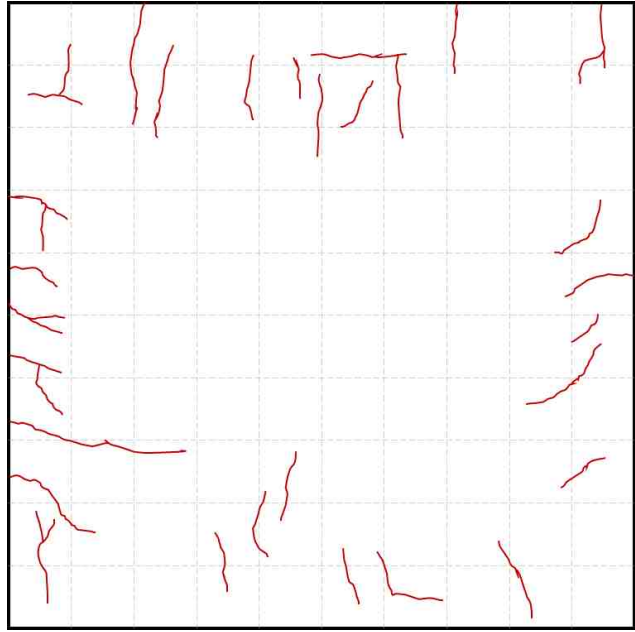
보통의 저발열 배합에서는 초기재령의 낮은 수화온도와 응결 및 경화의 지연으로 인해 블리딩수를 포함한 배합수의 증발이 나타난다. 이러한 현상은 강도가 충분히 발현되지 않은 초기재령에 나타나 건조수축으로 인한 균열을 유발시키고 있다. 이는 수분이 쉽게 증발되는 상부표면에서 주로 발생되며, 그 형태는 균열의 시작지점에 따라 달리 나타나는 특징이 있다.

실험에서는 온·습도의 환경조건이 동일한 3개의 모의부재를 대상으로, 상부표면에서 관찰 가능한 균열을 검토함으로서, 각 배합별 건조수축의 상쇄성능을 비교하였다. 평가도구는 재령의 증가에 따른 발생균열의 길이와 발생개수이며, 상부면의 용이한 관찰을 위해 Slab type의 모의부재를 대상으로 하였다. 아래 그림에는 모의부재의 재령 및 배합별 사진과 균열도를 모식화하여 나타내었다. 균열 모식도는 균열이 발생한 시점을 구분하여 재령 7, 28, 56일을 시작시점으로 설정하였다.

배합명	(M)OPC
측정 재령일	7일



(a) 균열 측정 사진



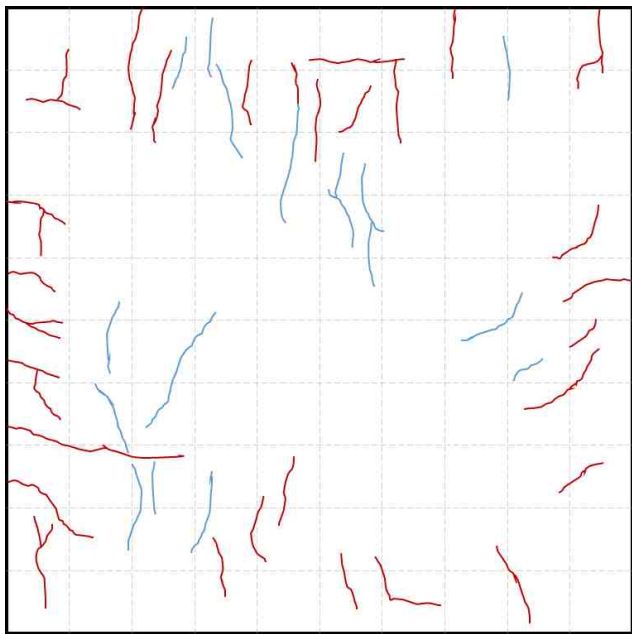
(b) 균열 모식도

Slab type 모의부재의 균열도 (OPC / 재령 7일)

배합명	(M)OPC
측정 재령일	28일



(a) 균열 측정 사진



(b) 균열 모식도

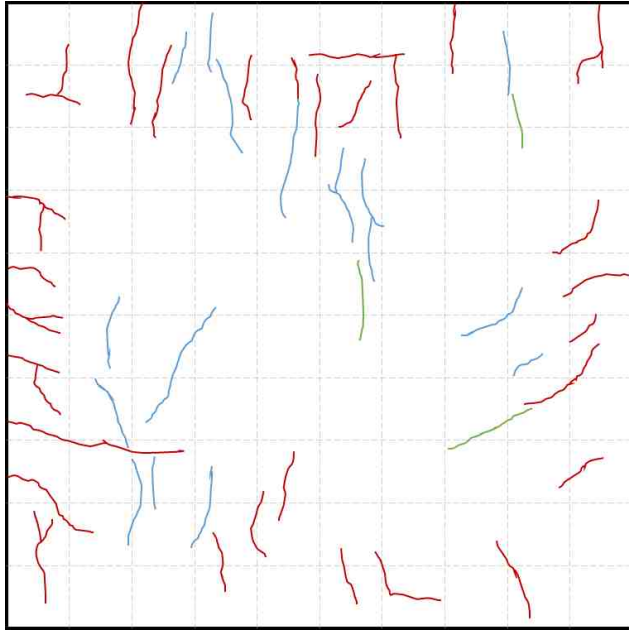
Slab type 모의부재의 균열도 (OPC / 재령 28일)

— : 재령 7일 발생, — : 재령 28일 발생, — : 재령 56일 발생

배합명	(M)OPC
측정 재령일	56일



(a) 균열 측정 사진



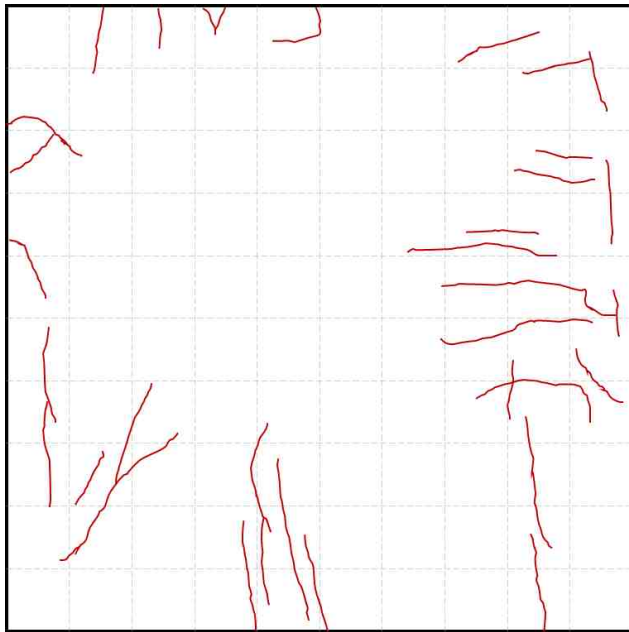
(b) 균열 모식도

Slab type 모의부재의 균열도 (OPC / 재령 56일)

배합명	(M)FA-BS
측정 재령일	7일



(a) 균열 측정 사진

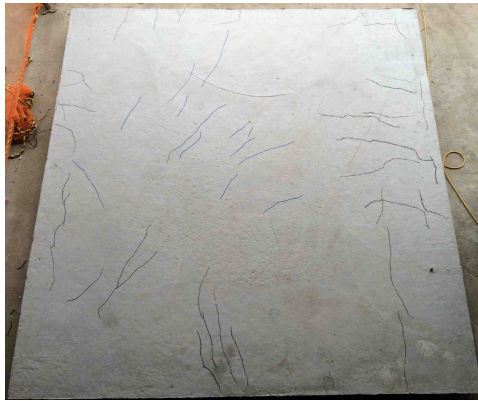


(b) 균열 모식도

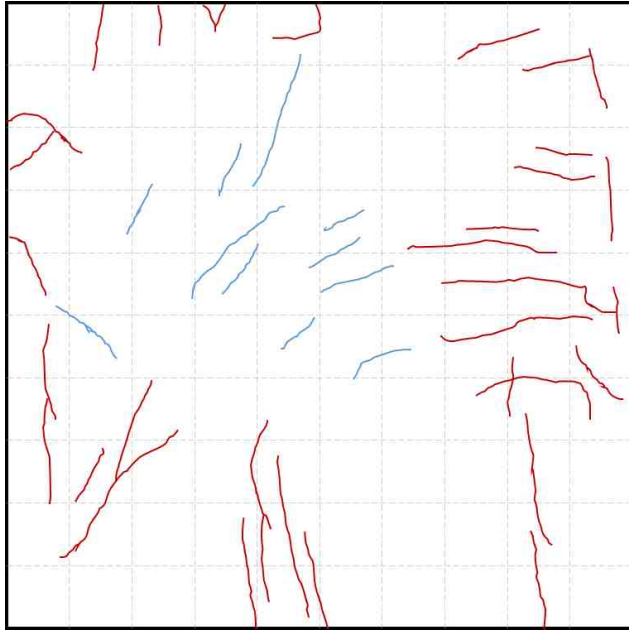
Slab type 모의부재의 균열도 (FA-BS / 재령 7일)

— : 재령 7일 발생, — : 재령 28일 발생, — : 재령 56일 발생

배합명	(M)FA-BS
측정 재령일	28일



(a) 균열 측정 사진



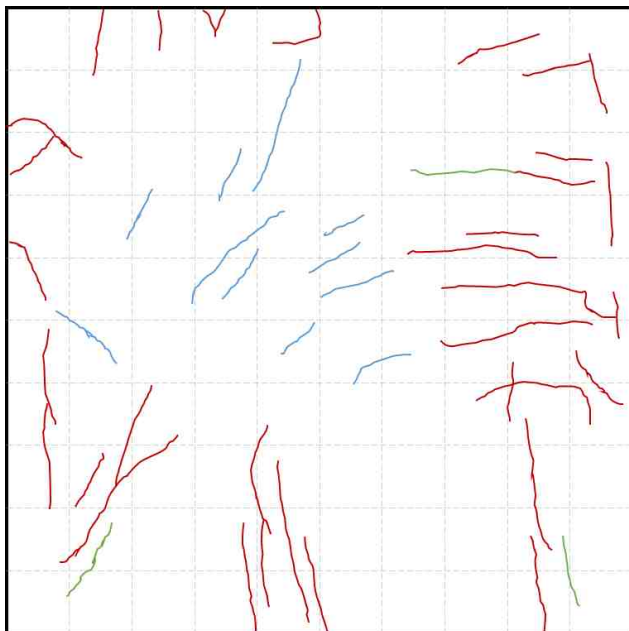
(b) 균열 모식도

Slab type 모의부재의 균열도 (FA-BS / 재령 28일)

배합명	(M)FA-BS
측정 재령일	56일



(a) 균열 측정 사진



(b) 균열 모식도

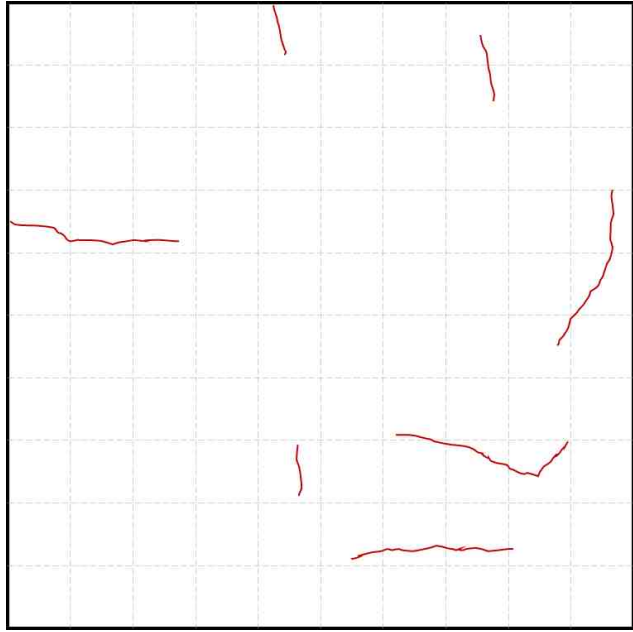
Slab type 모의부재의 균열도 (FA-BS / 재령 56일)

— : 재령 7일 발생, — : 재령 28일 발생, — : 재령 56일 발생

배합명	(M)U10
측정 재령일	7일



(a) 균열 측정 사진



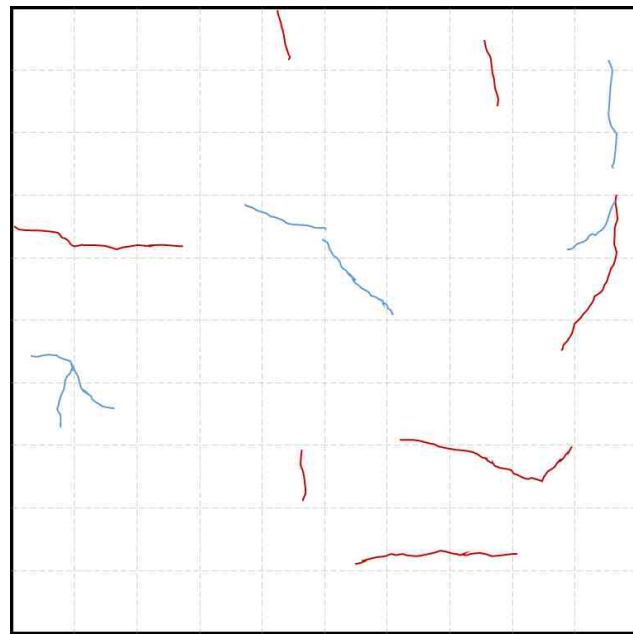
(b) 균열 모식도

Slab type 모의부재의 균열도 (U10 / 재령 7일)

배합명	(M)U10
측정 재령일	28일



(a) 균열 측정 사진



(b) 균열 모식도

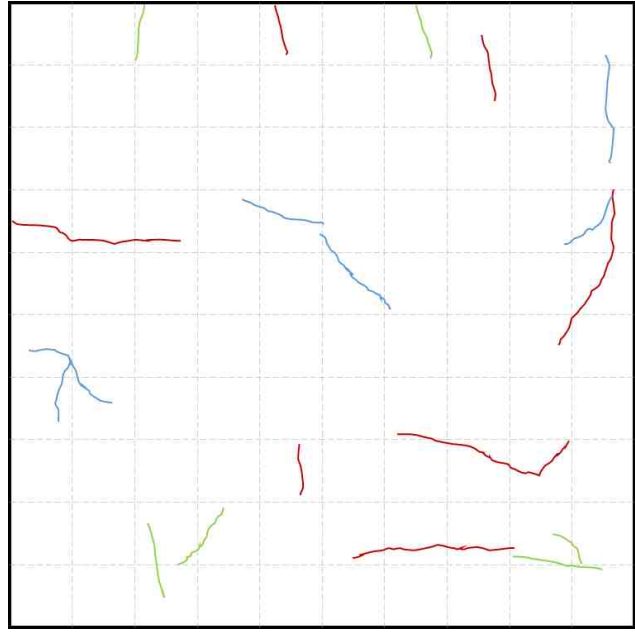
Slab type 모의부재의 균열도 (U10 / 재령 28일)

— : 재령 7일 발생, — : 재령 28일 발생, — : 재령 56일 발생

배합명	(M)U10
측정 재령일	56일



(a) 균열 측정 사진



(b) 균열 모식도

Slab type 모의부재의 균열도 (U10 / 재령 56일)

— : 재령 7일 발생, — : 재령 28일 발생, — : 재령 56일 발생

Slab type 모의부재의 재령별 균열특성

구 분		(M)OPC	(M)FA-BS	(M)U10
균열 발생 개수	재령 7일	31	25	7
	재령 28일	44 (+13)	36 (+11)	11 (+4)
	재령 56일	45 (+1)	38 (+2)	15 (+4)
균열 총 길이 (mm)	재령 7일	438	423	152
	재령 28일	669 (+231)	546 (+123)	241 (+89)
	재령 56일	703 (+34)	589 (+43)	303 (+62)

상기 표에는 모의부재에 발생하는 균열특성을 재령 및 시험배합별로 나타내었다. 각 재령별로 관찰된 균열의 발생개수와 그 길이를 합산하여 나타냈으며, 이전 재령에 비해 증가된 양을 별도로 나타내었다. 발생균열 중 동일한 시작점으로부터 파생된 균열은 발생개수에 추가하지 않고, 총 길이가 증가된 것으로 산정하였다.

전체적인 균열발생 패턴에 있어, 재령 28일에 총 균열의 약 90%이상이 관찰되는 결과로 나타났다. 이는 강도발현이 충분히 종료되지 않은 초기재령에 콘크리트의 균열발생확률이 매우 높게 나타나는 것을 반증하며, 이를 통해 타설과 양생, 거푸집 탈형 등에 이르는 초기시공이 매우 중요한 과정임을 알 수 있다. 특히 실험과 같이 부재의 측방향이 모두 고정된 상태에서는 체적변형에 의한 내부 응력이 불규칙한 형태로 나타나며, 이는 균열발생확률을 더욱 높이는 결과로 사료된다.

실험 배합별 균열특성 중 (M)OPC 및 (M)FA-BS에서는 높은 균열발생확률을 나타내었다. 두 배합은 실험오차 등으로 나타날 수 있는 매우 근소한 차이를 나타내며, 초기재령인 7일에서 약 4.2~4.3m에 달하는 균열 총길이가 관찰되었다. 반면, 요소를 10%로 혼입한 (M)U10배합에서는 재령 7일에서 약 1.5m의 균열이 관찰되었으며, 관찰 최대재령인 56일에서도 여타 배합의 7일 재령에도 미치지 못하는 약 3.0m의 균열량을 나타내었다. 또한 구조물의 균열 개시확률을 판단할 수 있는 발생개수에 있어서도, 초기 7일 재령에서는 7개, 56일 재령에서 15개가 관찰되어 (M)OPC 및 (M)FA-BS에 비해 약 25~36%의 수준으로 나타났다.

본 실험과 같은 Slab type 구조물의 균열형태는 온도에 의한 내외부 응력차이가 거의 발생되지 않아 건조 및 자기수축 등의 자체 체적변형에만 영향을 받게 된다. 따라서 상기 와 같은 결과는 요소의 미세구조 내 팽창특성에 의한 균열제어성능을 뒷받침하는 결과로 판단되며, 이에 콘크리트 내 혼입된 요소가 역학적 온도응력의 제어 뿐 아니라 물리적 체적변형에 대한 상쇄효과를 동시에 지니는 것으로 사료된다. 이는 실험실 실내실험과 현장의 모의부재 실험에서 동일한 결과로 나타났으며, 이에 실험결과에 대한 신뢰도가 매우 높은 수준이라 할 수 있다.

라. 요소혼입 콘크리트의 경제성 평가

(1) 재료적 비교

매스콘크리트의 수화열 저감을 위한 여러 재료 및 공법을 대상으로 요소혼입 콘크리트의 경제성 비교를 진행하였다. 현재 요소의 단가는 국내 시판되는 공업용 요소(Urea)를 기준으로 kg 당 390원(1ton/bag 기준)이며 일본산의 경우 운송비를 포함하여 466원이다.

2017년 물가정보를 기준으로 요소혼입 콘크리트에 적용된 콘크리트 시방배합의 원가 계산결과는 아래와 같다.

콘크리트 배합설계표

No.	배합명	w/b (%)	S/a (%)	W (kg/m ³)	단위중량 (kg/m ³)						재료비 (천원/m ³)
					C	FA	BS	S	G	U	
1	OPC	50	47.7	165	330	-	-	850	943	-	58.4
2	UREA			165	330	-	-	819	909	33	69.5
3	FA-BS			165	165	66	99	835	926	-	56.0
4	LHC-FA			165	(264)	66	-	841	933	-	89.0

UREA배합의 경우 OPC배합에 요소의 재료량을 더한 것으로 혼입되는 요소의 양에 따라 가격증가가 나타났다. 한편 실험에 사용된 저발열시멘트(4종)의 경우 국내 생산업체가 1~2곳에 불과하여 단가가 매우 높은 편이다.

연구에서 개발된 요소혼입 콘크리트의 경우 공업용 요소가 배합의 구성 재료로 추가 투입됨으로서 기존 3성분계(FA-BS) 배합에 단가상승이 나타난다. 그러나 다수의 대규모 현장에서는 매스콘크리트의 수화열을 큰 폭으로 저감하기 위해 파이프쿨링과 같은 공법적 기술을 적용하고 있으며, 이의 경제성 평가결과는 다음과 같다.

- 파이프쿨링 공법 (콘크리트 물량 1m³ 기준, 노무비 + 재료비 + 경비) : 98.0천원
- 프리쿨링 공법 (콘크리트 물량 1m³ 기준, 노무비 + 재료비 + 경비) : 84.0천원

적용공법과의 성능 및 단가를 직접적으로 비교하는 것은 곤란하나, 단순히 재료(요소)를 추가함으로서 공법적 효과와 유사한 성능을 나타내는 본 기술의 향후 활용가능성은 매우 우수한 것으로 자체 판단된다.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 연구개발 목표의 달성도

가. 연구개발 수행 진도율

구분	기 간 개발내용	연 구 개 발 기 간									진도(%)
		1차년도(분기별)				2차년도(분기별)					
		1	2	3	4	1	2	3	4	5	
콘크리트 고내구성 혼화재료 개발	시멘트 복합체 미세구조 분석										100
	urea 혼입 콘크리트 배합설계 수행										100
	실험실 믹싱 강도 등 역학특성 평가										100
요소혼입 콘크리트 최적 배합설계 및 성능검증	실험실 믹싱 탄산화 등 내구성 평가										100
	현장적용 유동특성 평가										100
	Mock-up 제작/평가										100
	Mock-up 장기재령 평가										100

..... 당초계획
..... 실적

나. 연구개발 수행 달성도

구분	목표	달성도 (%)	내 용
콘크리트 고내구성 혼화재료 개발	■ 요소의 반응성고찰 - 반응특성 및 시멘트 경화체 화학구성 관찰/확보	100	□ 요소혼입 콘크리트 시험분석 - XRF(F2):ZSX Primus - TGA 중량변화 분석 - 페이스트 pH측정
		100	□ 시멘트경화체의 화학구성 및 미세구조분석 - SEM, 총 세공량 분석
요소혼입 콘크리트 최적 배합설계 및 성능검증	■ 콘크리트의 물리·역학 및 내구특성 - Plain 대비 동등이상 확보 ■ 요소의 적정 혼입량 / 혼입기법 도출 ■ 비교군으로 기존 저발열 결합재 등 혼화재 추가	100	□ 콘크리트 배합설계 - W/B 3개 인자 (45, 50, 55%) - 요소 혼입율 (0, 5, 10, 15%) - 혼입방법 (단위수량 치환, 골재 치환) → 총 21개 배합설계
		100	□ 요소혼입 콘크리트 압축강도 → 초기재령 15~25%가량 강도저하 → 재령 56일 이후 회복, 저발열 배합을 감안할 시 적절한 것으로 판단
		100	□ 요소혼입 콘크리트 탄산화 저항성 → 요소의 자체 pH 8.8(30%수용액기준) → 페이스트에 요소 혼입 시 기존 pH 11.6에서 12.2로 증가 → 콘크리트의 촉진 CO₂ 저항성은 무혼입 대비 약 12% 증진됨
		100	□ 요소의 팽창특성과 CaCO₃ 석출반응 → 체적변형률에서 23~56% 수준 (무혼입 대비 70% 이상 수축상쇄)
		100	□ 요소와 배합수 반응에 의한 흡열특성 → 타설온도(≒8℃), 최고온도(≒5℃) 저하 → 약 16시간의 최고온도발현시점 지연
		100	□ 온도응력과 체적팽창을 동시에 상쇄하는 특성을 나타냄 → 균열저항성 콘크리트의 개발
모의부재 제작 및 성능평가	▶ B/P를 통한 적용성 평가 - 대량생산 적용실험 검토 ▶ Mock-up(시작품) 제작 - 매스 및 슬래브 형태 (표면 균열형태 관찰)	100	▶ B/P 적용 시 물성변화 및 강도 평가 - 대량생산 시의 요소 용해도 확인 - 슬럼프 등의 유동특성 및 경시변화 확인
		100	▶ Mock-up 제작·수화발열 수축상쇄 성능평가 - 중심·표면부 온도차 검토 - 수축응력 및 변형률 검토 - 균열발생의 정량적 평가(균열폭/발생개수) → 무혼입 대비 65% 이상 균열감소

2. 관련분야의 기여도

가. 타산업에 미치는 효과

콘크리트 구조물에 발생하는 균열 중 건조수축과 온도응력에 기인해 발생하는 균열은 전체 발생량의 90% 이상을 차지하고 있으나, 해결방안에 관한 기술수준은 아직 미흡한 실정이다. 매스콘크리트의 수화열로 인한 온도응력과 수축변형은 구조 안전성에 높은 악영향을 미치며, 구조물 간의 부등변형을 유발하고 구조물의 안전을 위협하는 위험한 상황까지 초래할 수 있다. 상기 두 가지 균열발생 원인은 하나만 선택적으로 나타나지 않으며, 여러 요인이 함께 발생하는 경우가 대부분이다. 따라서 건조수축과 온도응력을 모두 고려한 기술개발이 절실히 요구된다.

또한 4대강 사업 등의 예에서 볼 수 있듯이 대형 구조물의 건조수축 및 수화열로 인한 균열 문제는 대형 구조물에서 콘크리트를 대체할 재료가 개발되기 전까진 계속해서 대두될 문제이며, 문제점 해결을 위해 현재로서는 국내보다는 외국 기술에 의존도가 높은 실정이다. 본 기술개발을 통해 외국기술에 의한 시장잠식 및 외화낭비를 방지하고 국내 건설기술의 부가가치를 창출하고자 한다.

그러나 기존의 수화열 제어를 위한 재료 및 공법은 성능의 한계가 도출되고 있으며, 정확한 사용 가이드라인을 제시하지 못하는 문제점을 갖는다. 특히 공법을 통한 기법은 단가 상승 등의 곤란함과 작업자의 숙련도에 따라 큰 성능차이를 나타내고 있으며, 또한 재료에 의한 기법은 다른 열화가능성에 취약한 문제와 성능한계 등을 나타내는 실정이다. 이에 저단가 및 친환경을 갖춘 본 기술은 구조체 장수명화에 기여할 영향이 매우 클 것으로 사료된다. 또한 현장 시공성의 증대 및 콘크리트 품질 개선을 통해, 나아가 중동 및 아프리카, 동남아시아 등 공사시 열적 조건이 열악한 지역의 건설 활성화에 본 개발 기술을 적용한다면 새로운 공사기법의 소개와 제품 홍보를 통해 수출망 확보가 가속화 될 것으로 전망된다.

나. 정부정책과의 연계방안

현재 국내에는 신국제공항, 고속철도, 대규모 해양구조물, LNG 지하저장탱크, 초고층 빌딩의 대형기초 및 4대강 사업에 건설되는 부수시설 등과 같이 초대형 구조물의 시공이 증가하고 있다. 이에 건축, 토목 등에 광범위하게 사용되는 레디믹스트 콘크리트는 사용량이 점점 대형화 되고 있으며, 콘크리트 균열 문제가 지속적으로 대두될 경우 향후 사회적 문제로 발전될 가능성이 있다.

본 기술은 CO₂를 포집·회수하고 회수된 CO₂를 소비하는 기술로서, 이를 수요가 충분한 건설(토목)재료에 적용될 경우, 요소의 생산 및 소비가 가속화되며 이는 곧 CO₂ 및

NH₃ 저감과 직결되어, “저탄소 녹색성장”의 사회 정책과 부합된다.

본 과제를 계기로 건설재료의 개발연구에서도 환경부하물질을 포집·재사용하는 관련 연구가 촉진될 것으로 기대된다. 폐기물 등을 재사용하는 소극적 활용이 아닌 환경부하물질을 주재료로 하는 새로운 재료의 개발 등이 요구되어진다.

본 과제의 개발 단계(TRL.4)에서는 국제협력 및 타산업 연계가 곤란할 것으로 판단된다. 현재의 아이디어 단계에서 테스트용 샘플 제작 후 성능평가를 거치는 일련의 단계는 건축 재료적 평가와 적용성 평가로 이루어지기 때문이다.

그러나 이 후 TRL.8(시제품 설치 및 성능시험)과 TRL.9(현장적용/사업화)단계에서는 CO₂ 및 NH₃의 포집을 위한 설비의 구축 등이 요구된다. 전술한 바와 같이 국내에는 요소의 수요가 미미하여 1개 업체에서 단독으로 생산하고 있으며, 이에 연소배기가스에 의한 CO₂ 포집이 아닌 화학적 구성으로 제조하는 실정이다. 이에 수요과 공급이 충분한 콘크리트 산업에 적용 시 대량생산을 위한 설비 구축과 동시에 CO₂의 포집, 저장 및 전환기술을 위한 타산업과의 연계가 요구되는 바이다.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 추가 연구의 필요성

- (1) 요소혼입 콘크리트의 단가 경감과 원활한 재료수급을 위한 CO₂ 포집 및 저장에 관한 인프라 구축 관련 연구 필요
- (2) 파우더 형태의 공업용 요소 외에 요소수(디젤 차량용)를 혼입하는 기법에 대한 추가연구가 필요 (경제성 증진) 이 외에 요소를 트럭 에지테이터에 직접 혼입하여 B/P생산에 따른 단가 상승 저하 가능성 연구

2. 연구개발 결과의 활용 방안

본 개발기술은 건조수축 및 수화열에 의한 온도균열이 예상되는 건축 및 토목 구조물 시공에 활용이 가능하다.

그에 따른 본 기술 개발 제품의 활용 대상은 다음 표와 같다.

구조물 형태	콘크리트 종류
초고층 건축물	건축물 매트기초, 고강도 콘크리트(단위시멘트량 과다)
항만 / 댐 / 도로	매스콘크리트
원자력(수력) 발전소 및 지중구조물	매스콘크리트, 차폐용 콘크리트
기타 일반 건축물	서중콘크리트, 구조물 형태 및 규모별 건조수축 및 온도응력이 예상되는 경우

이에 따른 본 기술의 수요처는 다음과 같다.

: 혼화제 판매사(콘크리트용 화학 혼화제), 화학비료 제조 설비업체(요소생산), 레미콘사 및 공장, 건설사, 콘크리트 2차 제품 제조사 등

개발기술의 현장적용 등은 건설사의 매트기초 시공과 토목·해양구조물에 적용 가능하며, 적용 후의 현장적용 등이 추가로 진행될 예정이다. 현재 계획 중인 적용현장은 경기도 아파트건설현장의 매트기초 중 일부를 협의 중에 있으며, 구간단위 부재에 적용 후 결과에 따라 실용화를 추진할 계획을 갖고 있다.

제6장. 연구개발성과의 보안등급

1. 보안등급의 분류

보안	일반
	○

2. 결정사유

이 연구과제의 성과물은 참여기관 뿐만 아니라 관련 건설현장 전체에 두루 사용할 수 있는 기술로서, 기술개발 과정에서 관련 업체들로부터 기술수요 및 결과에 대한 피드백을 받은 바 있음. 일반등급으로 분류함.

제7장. 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

1. 연구실 안전조치 이행계획

가. 기술적 위험 요소 분석

이 연구과제는 기동 및 보-기동 접합부 실물실험을 포함하고 있지만, 실험은 전문 테크니션을 갖춘 전문기관에 의뢰하여 수행할 예정임. 따라서 연구실 자체에서는 실험과 관계된 위험요소는 거의 없음.

하지만 전문기관에서 실험체 제작, 게이지 부착, 실험체 셋팅, 실험 진행 등 실험 수행 및 참관 중에 낙상, 추락, 실험체 전도 등에 의한 신체적인 위험요소가 있으므로, 참여연구원의 안전 확보를 위하여 주관기관(단국대학교)에서 정하는 연구실 및 연구원 안전관리규정을 준수하여 다음과 같이 안전조치를 이행함.

나. 단국대학교 연구실·연구원 안전관리

- 일상점검 : 연구활동종사자가 육안으로 연구활동 시작전 매일 1회 실시
- 정기점검 : 외부 전문기관에 의뢰하여 안전점검기기를 이용 매년 1회 실시
- 정밀안전진단 실시 : 연구개발 활동에 유해화학물질 관리법 제2조 7호에 따른 유해화학물질을 취급하는 연구실, 산업안전보건법 제39조에 따른 유해인자를 취급하는 연구실, 독성가스를 취급하는 연구실 등을 대상으로 2년마다 1회 실시
- 연구실 안전관리규정 운영 : 2007년 이후 연구실안전관리규정 준수 중
- 보험가입 현황은 아래 표와 같으며, 매년 주관부서에서 갱신

보 험 명	보 상 내 용	대 상	주관부서
플러스연구활동 단체상해보험	상해사망, 후유장해 : 1억원 상해 의료실비 : 1천만원	대학원생 연구원	대학원교학과, 산학협력단
연구활동종사자 상해보험	상해사망, 후유장해 : 1억원 상해 의료실비 : 1천만원	학부생	학생과
교직원 단체상해보험	상해사망, 후유장해 : 1억원 질병사망, 후유장애 : 3천만원 암, 허혈성심질환, 뇌혈관질환 : 1천만원 입원 의료비 : 1천만원	전임교원 비전임교원 정규직원, 조교 계약직	총무과

다. 해당 연구실 안전조치

본 연구과제를 수행하는 연구실에서는 구조 실험동 및 각 실험실에 대해 연 1회 이상 정기점검을 실시함. 필요시 외부기관을 통해 본 연구실 특성에 맞는 정밀안전진단을 실시하고 있음. 또한 연구에 참여하는 연구원에 대해서는 대학차원의 보험가입을 통하여 불의의 사고에 대비하고 있으며, 직접 연구를 수행하는 각 연구실별로도 연구진행시 안전조치에 대한 기준을 확립하여 철저히 이행하고 있음.

제8장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	온도응력과 건조수축을 고려한 요소혼입 콘크리트의 품질특성에 관한 연구	단국대 학교	교신 저자	대한건축학 회 논문집(구 조계)	-	2015.07	단독 사사	KCI 학술지
2	논문	Urea additives for reduction of hydration heat in cement composites	단국대 학교	단독 저자	Construction and Building Materials	3.703	2017.10	단독 사사	SCI 학술지
3	특허	요소를 포함한 저발열 콘크리트 조성물	단국대 학교	발명 자	대한민국	-	2016.06	단독 사사	-
4	학술 발표	균열저항성 요소혼입 콘크리트의 모의부재 평가	단국대 학교	주저 자	한국콘크리 트학회 봄학술대회 논문집	-	2016.05	단독 사사	-
5	학술 발표	Urea 혼입 콘크리트 슬래브형 모의부재의 건조수축 균열 평가	단국대 학교	주저 자	한국콘크리 트학회 봄학술대회 논문집	-	2017.05	단독 사사	-

제9장. 참고문헌

- ▷ 한국콘크리트학회, 콘크리트표준시방서, 2009
- ▷ 유엔기후변화협약(UNFCCC), <http://unfccc.int/2860.php>
- ▷ 한국레미콘공업협회(KRMCIA), <http://www.krmcia.or.kr/>
- ▷ 4대강 새물결, <http://www.4river.go.kr>
- ▷ Mitsubishi 홈페이지, <http://www.mhi.co.jp>
- ▷ 산업통산자원부, 환경부, 국토교통부, 녹색성장위원회, 국가 CCS 종합 추진계획, 2010
- ▷ 김화중 등, 미생물의 방해석 석출 작용을 이용한 자기보수 스마트콘크리트 개발에 관한 연구, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 22(4), 2010
- ▷ 조한병, 요소 콘크리트의 개발 및 재료특성 연구, 단국대학교 박사학위논문, 2017
- ▷ Roig-Flores, M., et al. "Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments." Construction and Building Materials 86 (2015): 1-11.
- ▷ Shh, S. P., M. E. Krguller, and M. Sarigaphuti. "Effects of shrinkage-reducing admixtures on restrained shrinkage cracking of concrete." Materials Journal 89.3 (1992): 289-295.
- ▷ Bentz, Dale P., Mette Rica Geiker, and Kurt Kielsgaard Hansen. "Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars." Cement and concrete research 31.7 (2001): 1075-1085.
- ▷ Lea, Frederick Measham. "The chemistry of cement and concrete." (1970).
- ▷ Xu, Yunsheng, and D. D. L. Chung. "Reducing the drying shrinkage of cement paste by admixture surface treatments." Cement and Concrete Research 30.2 (2000): 241-245.
- ▷ Nagataki, S., and H. Gomi. "Expansive admixtures (mainly ettringite)." Cement and concrete composites 20.2-3 (1998): 163-170.
- ▷ Lafuma, H., Expansive Cements, Proceedings 3rd International Symposium on the Chemistry of Cement, (1954)
- ▷ Klein, Alexander, and G. E. Troxell. "Studies of calcium sulfoaluminate admixtures for expansive cements." Proceedings, American Society for Testing and Materials. Vol. 58. 1958.
- ▷ Sato, T., T. Goto, and K. Sakai. "Mechanism for reducing drying shrinkage of hardened cement by organic additives." CAJ Rev 5 (1983): 52-55.
- ▷ Tomita, R., K. Takeda, and T. Kidokoro. "Drying shrinkage of concrete using cement shrinkage reducing agent." CAJ Review (1983): 198-201.
- ▷ Powers, T. C. "The thermodynamics of volume change and creep." Materials and structures 1.6 (1968): 487-507.
- ▷ Brooks, J. J. "Influence of mix proportions, plasticizers and superplasticizers on creep and

- drying shrinkage of concrete." Magazine of concrete research 41.148 (1989): 145-153.
- ▷ Slowik, Volker, Markus Schmidt, and Roberto Fritzsche. "Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value." Cement and Concrete composites 30.7 (2008): 557-565.
 - ▷ Beltzung, Françoise, and Folker H. Wittmann. "Role of disjoining pressure in cement based materials." Cement and Concrete Research 35.12 (2005): 2364-2370.
 - ▷ Ferraris, C. F., and Folker H. Wittmann. "Shrinkage mechanisms of hardened cement paste." Cement and Concrete Research 17.3 (1987): 453-464.
 - ▷ A.B. Eberhardt, R.J. Flatt, 13 "Working mechanisms of shrinkage-reducing admixtures", Science and Technology of Concrete Admixtures, (2016): 305–320
 - ▷ Acker, Paul, and Franz-Josef Ulm. "Creep and shrinkage of concrete: physical origins and practical measurements." Nuclear Engineering and Design 203.2 (2001): 143-158.
 - ▷ Wei, Huinan, Youkai Wang, and Jianjun Luo. "Influence of magnetic water on early-age shrinkage cracking of concrete." Construction and Building Materials 147 (2017): 91-100.
 - ▷ Young, J.F., "The microstructure of hardened portland cement paste, Creep and Shrinkage in Concrete Structures", John Wiley & Sons Ltd, (1982): 3-22
 - ▷ Pickett, Gerald. "Effect of aggregate on shrinkage of concrete and a hypothesis concerning shrinkage." Journal Proceedings. Vol. 52. No. 1. 1956.
 - ▷ Bazant, Z.P., Wittmann, F.H., "Creep and shrinkage in concrete structure", John Wiley & Sons Ltd., (1982): 89-141
 - ▷ Carlson, Roy W. "Drying shrinkage of large concrete members." ACI Materials Journal Proceedings. Vol. 33. No. 1. 1937.
 - ▷ Hansen, Torben C., and Alan H. Mattock. "Influence of Size and Shape of Member on the Shrinkage and Creep of Concrete." Journal Proceedings. Vol. 63. No. 2. 1966.
 - ▷ Nehdi, M., M. Pardhan, and S. Koshowski. "Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements." Cement and Concrete Research 34.11 (2004): 2103-2112.
 - ▷ Ravina, Dan, and Povindar K. Mehta. "Properties of fresh concrete containing large amounts of fly ash." Cement and Concrete Research 16.2 (1986): 227-238.
 - ▷ Hale, W. Micah, et al. "Properties of concrete mixtures containing slag cement and fly ash for use in transportation structures." Construction and Building Materials 22.9 (2008): 1990-2000.
 - ▷ Shi, C., and R. L. Day. "Early strength development and hydration of alkali-activated blast furnace slag/fly ash blends." Advances in Cement Research 11.4 (1999): 189-196.
 - ▷ Frias, M., MI Sanchez De Rojas, and J. Cabrera. "The effect that the pozzolanic reaction of metakaolin has on the heat evolution in metakaolin-cement mortars." Cement and

Concrete Research 30.2 (2000): 209-216.

- ▷ Sanjayan, Jay G., and Bill Sioulas. "Strength of slag-cement concrete cured in place and in other conditions." Materials Journal 97.5 (2000): 603-611.
- ▷ Henriksen, K. "Avoidance of cracking at construction joints between solid concrete sections. cooling fresh concrete with liquid nitrogen." Nordisk Betong 27.N1983: 1 (1983).
- ▷ 一瀬賢一, 液体窒素によるコンクリートの冷却, セメント技術年報, (1986): 253-256.
- ▷ 中根淳, 液体窒素によるコンクリートクーリングの冷却効率に関する研究, コンクリート工學年次論文報告集, (1987): 67-72
- ▷ 大池武, 液體窒素によりクーリングしたセメント・コンクリートの強度發現性狀と微細構造に関する實驗的研究, コンクリート工學年次論文報告集, (1988): 293-298

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발 성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

