



해안 매립지 시공을 위한 고내구성 콘크리트(PHDC) 개발

Promoted High Durability Concrete for the Construction
of Coastal Reclaimed Land

김우재 Woo-Jae Kim
포스코건설(주) R&D Center
기술연구소 차장

유조형 Jo-Hyeong Yoo
포스코건설(주) R&D Center
기술연구소 대리

길배수 Bae-Su Khil
트라이포드(주) 대표이사

1. 머리말

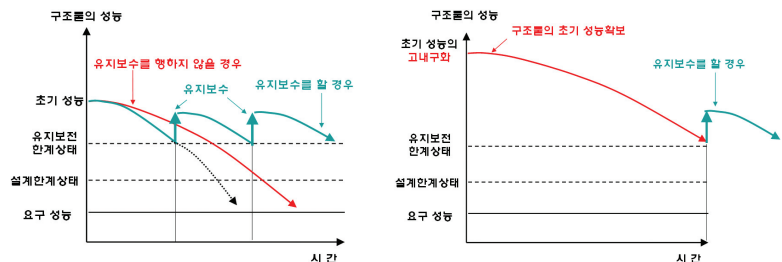
국내외 해안 매립지 신도시 개발 사업이 크게 증가함에 따라 대형 업무시설에 대한 건축공사뿐만 아니라 해안교량, 터널 등 토목구조물에 대한 건설공사가 활발히 추진되고 있다. 특히 콘크리트 구조체가 해안가에 위치하거나 해수환경에 접하는 해안 콘크리트 구조물 특성상 시공단계부터 염해 및 다습한 환경에 노출되어 염소이온, 황산염류 등의 부식인자에 콘크리트의 스케일링과 염소이온의 침투에 의한 철근 부식이 야기되어(사진 1) 균열 및 피복 탈락 등의 구조적 결함이 발생해 급속한 구조물의 열화가 초래 되는 현상이 발생한다.

이외에도 해안 콘크리트 구조물에 사용되는 콘크리트는 건조수축 등에 의한 균열발생 위험이 내재하여 염해 및 다습 환경에 노출된 가혹한 환경에서 부식인자 침입에 의한 염해손상과 철근부식 등이 촉진되는 경우가 있다. 특히, 해안에 인접한 매립지의 경우도 환경에 따라 다소 차이가 있으나 고농도의 Cl^- , SO_4^{2-} 이온이 토양 및 지하수에서 용출되는 것으로 조사 되었다.

이로 인해 콘크리트 구조물은 침투된 염소이온 및 해사 혼입 등의 내·외부요인에 의해 콘크리트내 철근 부식이 직접 연결 되므로 <그림 1>와 같이 유지보수에 의해 열화손상 이전 상태로의 완전회복이 어려울 뿐만 아니라 다른 열화요인에 비해 그 손상정도나 발생빈도 면에서 매우 심각한 것으로 알려지고 있어 해안 콘크리트 구조물의 열화요인 중 염해에 대한 내구성 증진 요구는 더욱 증대되고 있다. 따라서 콘크리트 열화의 출발점인 열화인자의 침입을 차단하고, 유해균



사진 1. 염해에 의한 철근 부식 및 콘크리트의 균열



(a) 일반 구조물 (b) 초기성능 확보 구조물
그림 1. 일반 구조물 및 초기성능 확보 구조물의 유지관리 비교

열의 억제 및 강력한 내염해성을 동시에 확보하는 것이 수압, 토압 외에 해수 유입에 따른 내염해성이 요구되는 해안 매립지 지하 구조물에 우선적으로 요구되는 특성이다. 이에 기존 고로슬래그 등 혼화재료의 적용기술을 개선하기 위하여 수축저감 및 내염해성을 동시에 향상시키고 현장적용이 용이한 실용적인 기술개발이 시급히 요구되고 있다.

2. 해안 매립지 시공을 위한 고내구성 콘크리트 (PHDC) 개발

본 PHDC(promoted high durability concrete)에 적용되는 혼화제(Hyper-HD)의 주요성분인 Si/Al 복합 무기염과 다환형 올리고머 축합물에 의한 콘크리트의 수축저감 및 내염해성 개선 메커니즘을 제시하면(그림 2)와 같다.

상기 메커니즘과 같이 Si/Al 복합 무기염을 시멘트에 첨가하면 시멘트 수화과정중에 Si 무기염에서 해리된 SiF_6^{2-} 이 산화된 철이온을 환원시키면서 철근표면에 FeF_2-SiO_2 복합조성의 불투과성 부식 보호층을 형성하

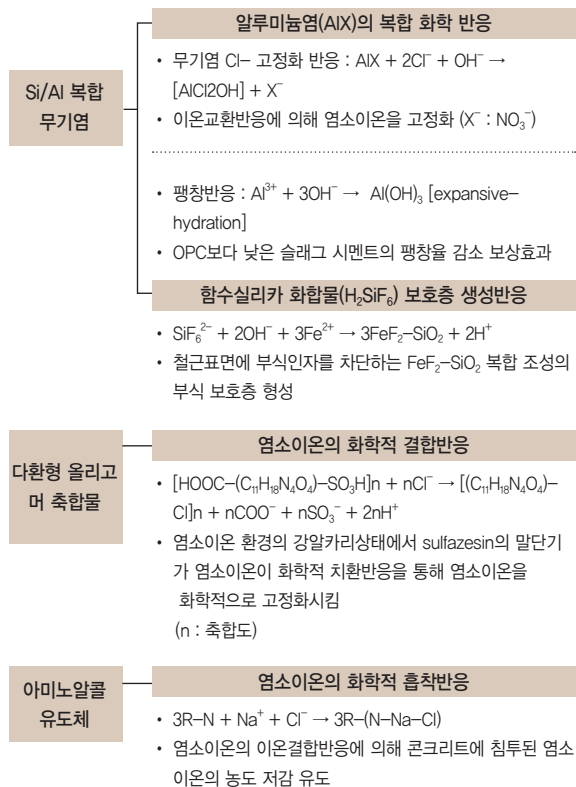


그림 2. PHDC의 적용된 반응 메커니즘

여 염소이온의 침입을 차단하여 철근방식 작용을 하게 되며, Al 무기염은 이온교환반응에 의해 염소이온을 화학적으로 고정화하고, 일부 미 반응상태로 해리된 알루미늄 이온은 시멘트의 수축을 보상할 정도의 팽창성 수화 화합물로서 $Al(OH)_3$ 의 생성을 유도하는 작용을 한다.

또한 PHDC에 적용된 다환형 올리고머 축합물은 축합도(degree of condensation)가 3~5, 1,500~2,000 범위의 분자량(M_w)을 지닌 올리고머형 화합물(sulfazecin, $C_{20}H_{20}N_4O_9S$)로서 시멘트와 같은 강알칼리상태에서 염소이온이 침투되면 화합물의 말단기인 sulfonite group($-SO_3H$)과 carboxyl group($-COOH$)이 주쇄(main chain)에서 분리되고 염소이온이 화학적으로 결합하게 된다. 이러한 염소이온의 화학적 결합 특성은 다환형 올리고머 축합물의 축합도(degree of condensation)에 비례하여 증가되는 특성을 나타낸다.

또한 다환형 올리고머 축합물의 염소이온 치환반응 후 해리된 sulfonite(SO_3^-) 및 carboxylic acid 음이온($-COO^-$)은 시멘트 입자에 흡착되어 콘크리트의 유동성을 향상시키는 부수적인 특성을 부여하게 되며, 기타 조성물로 함유된 아미노 알코올 유도체는 특성기인 Na^+ 이 콘크리트에 유입된 염소이온과의 결합 반응에 의해 강력히 고정화됨으로써 콘크리트에 침투된 염소이온의 농도를 저감하는 역할을 하게 된다. PHDC의 조성물(Hyper-HD)이 지닌 상기 효과를 바탕으로 수천~수만 ppm의 고농도로 염소이온이 함유된 매립지 지하수 환경에 시공된 철근콘크리트를 대상으로 기존 슬래그 콘크리트(S/C) 대비 개발된 고내구성 콘크리트(PHDC)의 수축저감 및 내염해성 효과를 모식적으로 비교하면(그림 3)과 같이 나타낼 수 있다.

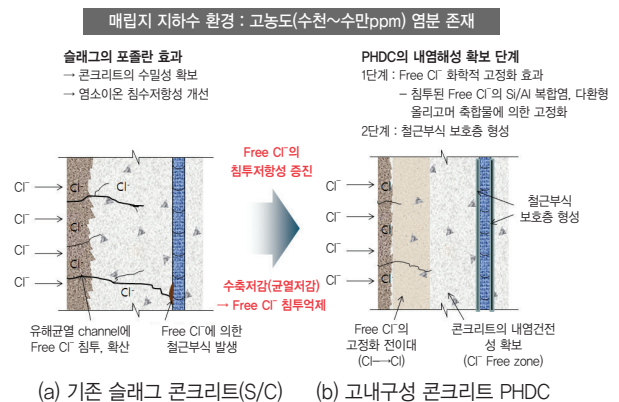


그림 3. PHDC의 내염해성 증진 효과 모식도

표 1. 수축 영향성 검토를 위한 콘크리트 배합

구분	W/B	단위수량 (kg/m ³)	Slag 대체율 (%)	(Hyper-HD) 첨가율 (%)	단위질량 (kg/m ³)			
					C	BFS	S	G
Plain	0.39	160	50	0.0	205	205	849	957
PHDC-0.6				0.6				

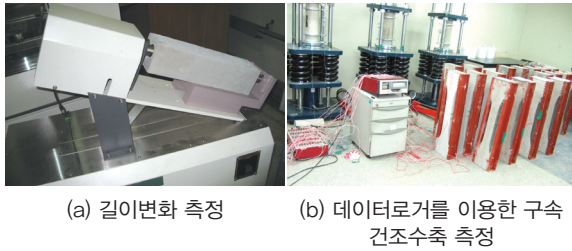


사진 2. 길이변화 및 건조수축 측정

3. PHDC 공법의 성능 평가

3.1 수축저항성 평가

3.1.1 시험계획 및 방법

콘크리트의 수축변화에 미치는 시험은 <표 1>과 같이 기존 슬래그 파우더(S/P) 사용한 콘크리트 배합과 PHDC의 적용된 조성을 적용한 배합을 구분하여 실시하였다. PHDC의 조성물의 첨가율은 B×0.6%로 고정하여 진행하였으며, 콘크리트의 수축에 대한 영향성 평가를 위해 길이변화는 KS F 2424 『모르타르 및 콘크리트의 길이변화 시험방법』 및 수축균열 특성은 KS F 2595 『콘크리트의 건조수축 균열 시험방법』에 따라 실시하였다(사진 2).

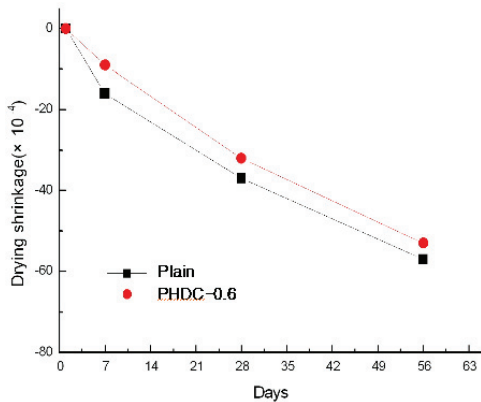


그림 4. 길이변화 시험결과

3.1.2 시험결과 및 분석

길이변화 시험결과 재령 7일, 28일, 56일별로 길이변화를 측정하고 결과 전 재령에서 <그림 4>와 같이 20% 이상이 수축에 의한 길이변화 저감현상이 나타나는 것을 알 수 있었다. 이는 PHDC의 적용된 Hyper-HD의 수축저감 효과에 의한 건조수축 등에 의한 균열 저감에도 효과적인 것으로 판단된다.

또한 구속건조수축 시험결과 온도 20±1℃, 습도 60±5% 양생조건에서 17×10×170cm 구속변형 시험물체를 사용하여 구속시험체의 건조수축에 의한 균열을 평가한 결과 Plain은 37일에 균열이 발생된 반면 PHDC의 적용된 Hyper-HD가 첨가된 PHDC-0.6은 54일에 최초 균열이 나타났으며, 특히 Plain의 경우 관통균열이 발생된 반면 PHDC-0.6은 54일에서도 관통균열로 진행되지 않는 것을 시험을 통해 알 수 있었다. 이는 PHDC의 적용된 Hyper-HD의 수축저감 및 이로 인해 유도되는 수축균열에 대한 저항성이 개선된다고 판단된다.

3.2 내염해성 평가

3.2.1 시험계획 및 방법

콘크리트의 내염해성 평가를 위해 <표 2>와 같이 기존 슬래그를 사용한 콘크리트 배합과 PHDC의 적용된 조성을 적용한 배합을 구분하여 실시하였으며, <사진 3>과 같이 내염해성 평가를 위한 염소이온 침투저항성 시험은 KS F 2711 『전기전도도에 의한 콘크리트의 염소이온 침투저항성 시험방법』, 철근부식저항성은 KS F 2561 『철근

표 2. 고농도(15%) 염수에서의 염소이온 침투저항성 배합

Case	W/C (%)	C (%)	BFS (%)	Hyper-HD (B×%)	W (g)	C (g)	BFS (g)	S (g)	Hyper-HD(g)
OPC	47	100	-	-	480	1020	-	2247	-
BFS		50	50	-					
Hyper-HD		-	-	0.6					

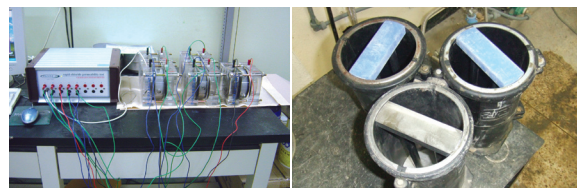


사진 3. 내염해성 평가 시험



(a) Plain(통과전하량 : 1,321C, 침투깊이 : 16.52mm) (b) PHDC-0.6(통과전하량 : 1,015C, 침투깊이 : 7.20mm)

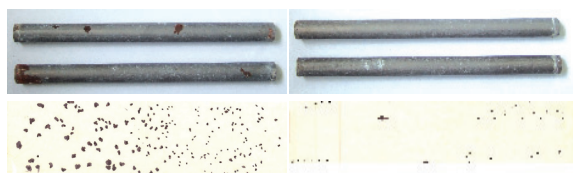
사진 4. 염소이온 침투저항성 평가 결과

콘크리트용 방청제」기준에 따라 실시하였다.

또한 염소이온의 침투를 가속화한 조건에서 염소이온 침투저항성을 평가하기 위해 15%의 고농도 염수(NaCl 수용액)를 조제하고 <표 2>와 같이 1종 OPC, 슬래그 배합(BFS) 시멘트 및 PHDC 조성물(Hyper-HD)을 적용한 모르타르 배합을 대상으로 재령에 따라 염수에 침지된 축진 상태에서 염소이온의 침투저항성을 비교하였다.

3.2.2 시험결과 및 분석

염소이온 침투저항성 평가 결과 재령 28일에서의 염소이온 통과전하량 및 침투깊이를 평가한 결과<사진 4> Plain에 비해 PHDC-0.6은 통과전하량의 경우 약 30%, 침투깊이는 약 56% 정도 감소하는 것으로 나타났으며, KS F 2561에 의한 철근 부식저항성을 평가한 결과 Plain의 부식면적에 비해 PHDC-0.6의 부식면적이 46% 감소되었으며<그림 5>, 철근부식에 대한 방청율은



(a) Plain-부식면적율 (방청율) : 5.0%(0.0%) (b) PHDC-0.6-부식면적율 (방청율) : 2.7%(45.9%)

그림 5. 철근부식저항성 평가 결과



(a) OPC (침투깊이 : 9.55mm) (b) BFS (침투깊이 : 7.51mm) (c) PHDC (침투깊이 : 6.06mm)

그림 6. 염수침지 축진시험평가 결과

Plain 대비 45.9%를 확보할 수 있었다.

또한 15% 고농도 염수상태에서 염소이온의 침투깊이를 측정할 결과 PHDC가 OPC 대비 36.5%, 슬래그 배합 대비 19.3% 침투깊이가 감소되는 것으로 나타났다<그림 6>.

따라서 기존 슬래그 배합 콘크리트 보다 PHDC를 적용한 콘크리트가 염소이온 침투저항성 및 철근부식저항성이 뛰어난 것을 시험을 통해 알 수 있었다.

4. 시공 구조물의 내구수명 평가

4.1 내구수명 평가 개요

본 평가는 인천지역에 위치한 송도내 매립지에 건설된 철근 콘크리트 구조물(RC조)의 지중 매립부재에 적용한 30MPa과 35MPa 슬래그 배합 콘크리트(이하 슬래그(40%)-30, 슬래그(40%)-35로 표기함) 및 27MPa 배합에 내염해성 개선효과를 지닌 Hyper-HD를 결합재(B) 질량의 0.6%를 혼입한 콘크리트(이하 PHDC로 표기함)의 염해 환경하의 염소이온 침투성상 및 내염해성 효과를 검증하기 위하여 내구수명을 평가하였다.

4.2 대상구조물 개요(송도 신도시 지중 매립부재)

대상 구조물에 대한 기본 조건은 다음 <표 3>과 같으며, 위치는 포스코건설에서 송도 신도시에 시공된 지중 매립부재로 하였으며, 27MPa 배합을 기준으로 슬래그 치환율(슬래그 40%, 슬래그 50%) 및 강도를 달리하여

표 3. 대상구조물의 콘크리트 배합

구분	W/B	단위재료량(kg/m³)						
		W	B	OPC	SP	잔골재	굵은골재	Hyper-HD
Slag(40%) -27	45	160	356	213.6	142.4	835	945	-
Slag(40%)+ PHDC-27	45	160	356	213.6	142.4	835	945	B×0.6%
Slag(50%) -27	45	160	356	178	178	835	945	-
Slag(50%)+ PHDC-27	45	160	356	178	178	835	945	B×0.6%
Slag(40%) -30	42	160	380	228	152	830	929	-
Slag(40%) -35	38	155	408	244.8	163.2	785	964	-

Life 365 Ver 2.0 프로그램을 사용하여 콘크리트 구조물의 수명평가를 실시하였다.

4.3 내구수명 해석 조건

지중에 매립된 기초부재의 해석을 위하여 입력된 변수의 값은 다음의 <표 4>와 같다. 이때의 온도조건은 기상청의 기상데이터를 참고로 하여 인천지역의 지중온도를 프로그램에 입력, 사용하였다.

4.4 내구수명 해석결과 및 분석

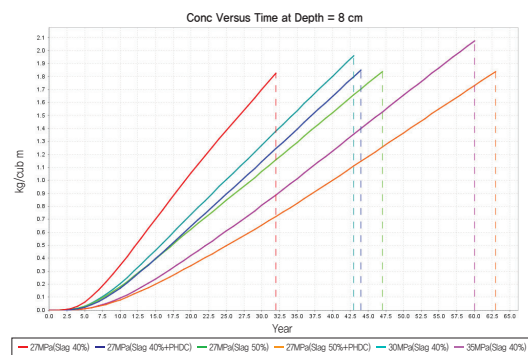
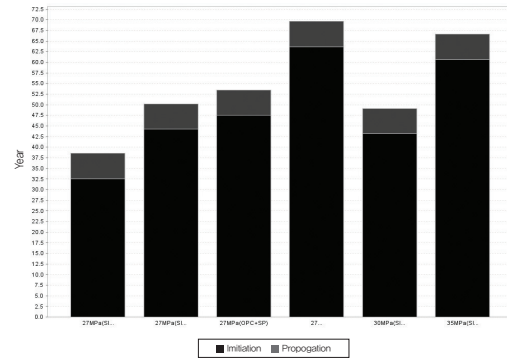
입력변수에 의한 염소이온의 확산계수는 의뢰한 배합에 따라 위 결과와 같이 예측되었으며, 이는 슬래그 치환율이 40%인 슬래그 시멘트를 사용한 경우와 슬래그 치환율이 50%인 경우, 이 재령 28일째에 염해에 노출되는 경우에 한하는 것으로 Hyper-HD가 첨가된 PHDC의 경우에는 제시된 염소이온 확산계수와 예측된 확산계수의 범위내에서 해석변수를 설정하여 산정하였다.

따라서 지중 기초부재가 해당 조건의 염해환경에 30년간 노출될 경우의 염해 내구수명 해석결과로 다음의 <그림 7>과 같다.

- 1) 지중 최고 염소이온농도인 16.094kg/m^3 에 노출되는 경우에는 30년의 내구수명을 기대하는 경우에는 슬래그(40%)–30, 35 콘크리트의 경우(슬래그(40%), 슬래그(50%)–27MPa)와 배합에 Hyper-

표 4. 구조물 해석 입력변수(지중 매립 경우)

구분	Concrete Type					
	슬래그 (40%)–27	슬래그 (40%)+PHDC–27	슬래그 (50%)–27	슬래그 (50%)+PHDC–27	슬래그 (40%)–30	슬래그 (40%)–35
확산계수 $\times 10^{-12}$ (m^2/s)	10.47	8.394	10.47	8.394	8.872	7.112
슬래그 치환율	슬래그(40%) (슬래그 치환율 40%) 슬래그(50%) (슬래그 치환율 50%)					
표면 염소이온농도	최소 1.134kg/m^3 ~ 최대 16.094kg/m^3					
온도 조건	<표 6> 참조					
피복 두께	80mm					
임계 염소이온 농도 (kg/m^3)	콘크리트 표준시방서(2009)기준 $C_{im} = 0.004 C_{bind}$ C_{bind} : 단위결합재량(kg/m^3)					
	1.424		1.52		1.632	
목표 내구수명	30년					



(b) Concrete vs Time at Depth=80mm

그림 7. 내구수명 예측 결과

HD를 첨가한 PHDC의 경우 모두 안전한 것으로 예측되었다.

- 2) 한편, 프로그램에 입력한 변수를 통하여 구한 확산계수를 사용하여 내구수명 30년을 기준으로 슬래그(40%)–35MPa 및 슬래그(50%)+PHDC 27MPa 인장근 위치에서의 각각 염소이온 누적량을 평가한 결과 0.806kg/m^3 및 0.654kg/m^3 달할 것으로 예측되어 두 배합 모두 임계염소이온 농도 각각 1.63kg/m^3 , 1.42kg/m^3 에 도달하지 않아 30년 후에도 안전한 것으로 나타났다.
- 3) 지중 매립부재를 대상으로 Life-365 Ver 2.0 프로그램으로 최대 염소이온일 때를 기준으로 내구수명을 예측한 결과 각각의 배합에 대하여 부식개시 시기는 다음 <표 5>과 같다.

표 5. 구조물 부식시기($C_0=16.094\text{kg/m}^3$)

구분	Slag (40%)–27	Slag (40%)+PHDC–27	Slag (50%)–27	Slag (50%)+PHDC–27	Slag (40%)–30	Slag (40%)–35
부식 개시시기	38.6년	50.2년	53.5년	69.7년	49.2년	66.6년

표 6. 송도 더샵 하버뷰

공사명	송도 더샵 하버뷰 신축공사
시공사	(주) 포스코건설
위치	인천 연수구 송도동 D14-1 Block
시공규모	기초부재 33,351m ³

표 7. 포항신항 CTS 반출부두

공사명	포항신항 CTS 반출부두 이전개축 및 안벽연장공사
발주처	(주)포스코건설
시공사	(주)포스코건설
위치	경상남도 포항시 남구 괴동동
시공규모	해상구조물(케이슨 등) 10,721m ³

5. 현장적용 사례

PHDC의 대표적인 현장적용 사례는 <표 6, 7>과 같다.

6. 맺음말

최근 국내에서는 인천 송도, 부산, 서산 등 해안 매립지에 대한 신도시 개발 사업이 증가하고 해안 공업단지, 장대교량, 항만 등 해안 토목공사의 물량이 증대되면서 해안 매립지에 대한 콘크리트 물량이 지속적으로 증가하고 있으며, 중동 및 남미지역의 대규모 해안 플랜트 건설 프로젝트 수주가 꾸준히 증가하고 있다.

이에 100년 동안 염해에 저항 가능한 내구성 콘크리트를 개발하기 위해 지속적으로 연구 중이며, 본 기술 개발을 발판으로 현장에 안정적 적용 및 품질관리가 가능하였고, 콘크리트 수명 예측 기법을 도입하여 시공 구조물의 내구수명에 대한 예측이 가능하게 되었다. 본 개발 기술은 신규성 및 기술의 구조적 안정 성능을 인정받아 2009년 10월 건설신기술(제 591호) 지정을 받았으며, 지속적인 성능개선을 통하여 물 환경, 해외 플랜트 분야에 기술을 적용해 나가고 있다. □

담당 편집위원 : 차수원(울산대학교) chasw@ulsan.ac.kr

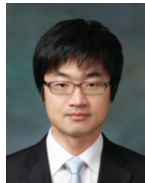
참고문헌

1. 김우재, 길배수, 'Si/Al 복합 무기염 및 다환형 올리고머 축합물을 적용한 모르타르의 내염해성과 황산염 저항성에 대한 실험적 연구', 한국콘크리트학회 가을 학술대회 논문집, Vol.21, No.2, 2009.
2. 김우재, 김도수, 홍석범, '고내구성 콘크리트(PHDC)의 현장적용 성능 및 장기 모니터링에 관한 연구', 한국콘크리트학회 봄 학술대회 논문집, Vol.22, No.1, 2010.
3. 日本材料學會, 콘크리트 혼화재료 핸드북, 2004. 4.



김우재 차장은 단국대학교 건축공학과에서 비탈형연구거푸집 개발에 관한 연구로 박사학위를 취득한 후 포스코건설(주) 기술연구소에서 10여년간 고성능 콘크리트 및 건설재료 분야의 현장 실용화를 위해 노력 중이며, 200MPa 초고강도 콘크리트 실용화 및 초고강도 콘크리트 내화성능 분야를 연구하여 포스코건설 현장에 적용하였다. 현재 다량치환 슬래그 콘크리트(HVSC) 개발 및 초고강도 콘크리트를 활용한 고성능 강화성(CFT) 구조 분야를 연구 중에 있다.

kimwj70@naver.com



유조형 대리는 한양대학교 건축공학과 지속가능 건축재료 및 시공 연구실에서 철근 콘크리트 구조물의 방식공법에 관한 연구로 박사학위를 취득하고 현재 포스코건설 R&D Center 기술연구소에 근무하고 있다. 주 관심분야는 슬래그를 이용한 친환경 콘크리트 및 철근 콘크리트 구조물의 염해 내구성 분야이다.

johyeong@poscoenc.com



길배수 박사는 충남대학교 건축공학과 건축구조연구소에서 수화열 제어에 의한 매스콘크리트 구조물의 온도균열 저감에 관한 연구로 박사학위를 취득하고, 현재 (주)트라이포드 대표이사로 10여년간 경영하고 있다. 주 관심 분야는 특수환경 콘크리트 및 친환경 바닥마감재 분야이다.

kbs@tripod2003.co.kr