

Si/Al 복합 무기염 및 다환형 올리고머 축합물을 이용한 해안 매립지 지하 구조물용 콘크리트(PHDC) 성능 향상 기술

- 건설 신기술 제591호 -

김 현 배 ((주)포스코건설 R&D 센터, 상무)
이 종 인 ((주)포스코건설 R&D 센터, 부장)
김 우 재 ((주)포스코건설 R&D 센터, 차장)
정 용 ((주)삼표 기술연구소, 부소장)
최 세 진 ((주)삼표 기술연구소, 차장)
길 배 수 ((주)트라이포드, 대표이사)
김 도 수 ((주)트라이포드, 총괄이사)

1. 서 론

최근 송도 신도시 개발사업, S프로젝트, J프로젝트 등 국내의 해안 매립지 신도시 개발사업에 따라 주상복합 아파트 등의 공동주거시설 및 오피스텔 등의 대형 업무시설에 대한 건축공사는 물론 해안교량, 해안터널 및 해안 공업단지, CTS 반출부두 등 토목구조물에 대한 건설공사도 활발히 추진되고 있는 실정이다. 그러나 구조물 자체가 항만 또는 해안가에 위치하거나 해수환경에 접하는 해안 콘크리트 구조물의 특성상 시공단계부터 염해 및 다습한 환경에 노출되어 염소이온, 황산염류 및 수분 등의 부식인자에 콘크리트의 스케일링(Scaling)과 염소이온

의 침투에 의한 철근부식이 야기되어 미관 저하부터 구조적 결함에 이르기까지 콘크리트 구조물의 급속한 열화가 초래되어 성능저하(Deterioration) 초래 현상이 심각하다. 이외에도 해안 콘크리트 구조물에 사용되는 콘크리트는 건조수축 등에 의한 균열발생 위험이 내재하여, 염해 및 다습한 환경에 노출된 가혹한 환경에서 부식인자 침입에 의한 염해손상과 철근부식 등이 촉진되는 경우가 있다.

일본의 경우 일본 건설성에서 “콘크리트의 내구성 향상기술의 발전”이라는 프로젝트를 통해 해안으로부터 500m 부근에 위치한 상부 및 하부 콘크리트 구조물의 열화 실태 및 성능저하 원인을 분석한 결과 <표-1>과 같이 500m 이내의 경우 상부 구조

〈표-1〉 콘크리트 구조물의 성능저하 원인(일본)

부위	환경	원인					
		염해	피복부족	콘크리트의 수축열화	하중, 기초 조건 불량	알카리골재반응	원인 불명
상부 구조	500m 이내	24.0 (62/258)	7.8 (20/258)	1.9 (5/258)	1.6 (4/258)	0 (0/258)	1.9 (5/258)
	500m 초과	0 (0/1045)	2.8 (29/1045)	1.1 (12/1045)	4.6 (48/1045)	0 (0/1045)	2.3 (24/1045)
하부 구조	500m 이내	3.7 (16/427)	2.6 (11/427)	8.4 (36/427)	1.2 (5/427)	1.6 (7/427)	4.0 (17/427)
	500m 초과	0 (0/2743)	3.8 (105/2743)	8.7 (239/2743)	1.7 (46/2743)	0 (0/2743)	2.6 (72/2743)

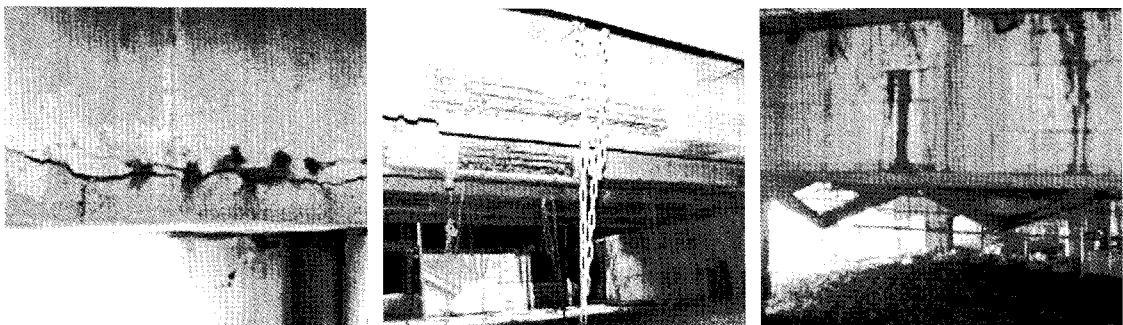
물이 염해에 의한 피해가 가장 큰 반면 하부 구조물에서는 수축열화에 의해 성능저하가 가장 두드러지게 나타났다.

특히, 해안에 인접한 매립지의 경우 환경에 따라 다소 차이가 있으나 송도 신도시 공사현장의 125블럭 및 36블럭의 지하수를 채취하여 조사한 결과 〈표-2〉와 같이 Cl⁻ 농도는 최대 16,094ppm, SO₄²⁻는 최대 14,180ppm으로 대부분 기준을 크게 초과하는 것으로 분석되었다. 따라서 콘크리트 구조체에 영향을 줄 수 있는 염화물 및 황산염의 농도가 매우 높기 때문에 콘크리트의 부식열화가 매우 가속화될 수 있는 환경이므로 시공되는 콘크리트의 열화를 억제할 수 있는 적절한 대책수립이 반드시 선행되어야 한다.

이와 같이 해안에 인접한 콘크리트는 염해를 중심

으로 중성화, 동해 및 화학적 침식과 같은 복합열화에 의해 콘크리트의 내구성 및 사용수명의 현저한 저하를 초래하며 이들 구조물의 손실피해가 매년 2조원 이상을 초과하고 있는 실정이다.

이중에서도 특히 염해에 의한 콘크리트 구조물의 손상은 외부로 침투된 염소이온 및 해사 혼입 등의 내-외부요인에 의해 매입 철근의 부식으로 직접 연결되므로 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 개선 요구가 더욱 증대되고 있다. 따라서 콘크리트 열화의 출발점인 열화인자의 침입을 차단하는 유해균열의 억제 및 강력한 내염해성을 동시에 확보하는 것이 수압, 토압 외에 해수 유입에 따른 내염해



〈그림-1〉 염해에 의한 콘크리트의 열화 및 부식

〈표-2〉 송도 신도시 공사현장의 채취 지하수 조사 결과

구 분	125B	36B	비 고
pH	7.2 ~ 11.7 (평균: 7.9)	7.2 ~ 8.7 (평균: 6.0)	-
Cl ⁻ (ppm)	355 ~ 16,094 (평균: 5,927)	1,134 ~ 14,180 (평균: 6,041)	기준 300ppm
SO ₄ ²⁻ (ppm)	390 ~ 5,426 (평균: 2,186)	478 ~ 14,180 (평균: 3,252)	기준 1,500ppm

성이 요구되는 해안 매립지 지하 구조물의 경우 우선적으로 요구되는 특성이다. 이에 기존 고로슬래그 등 혼화재료의 적용기술을 개선하기 위하여 수축저감 및 내염해성을 동시에 향상시키고 현장 적용성이 용이한 실용적인 기술개발의 필요성이 매우 시급히 요구되고 있다.

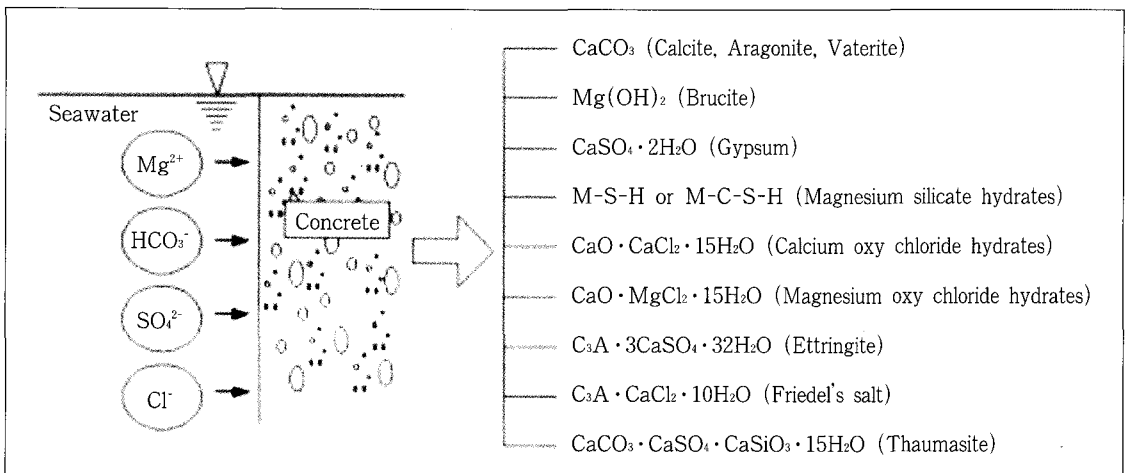
2. 신기술의 원리 및 시공방법

가. 신기술의 원리

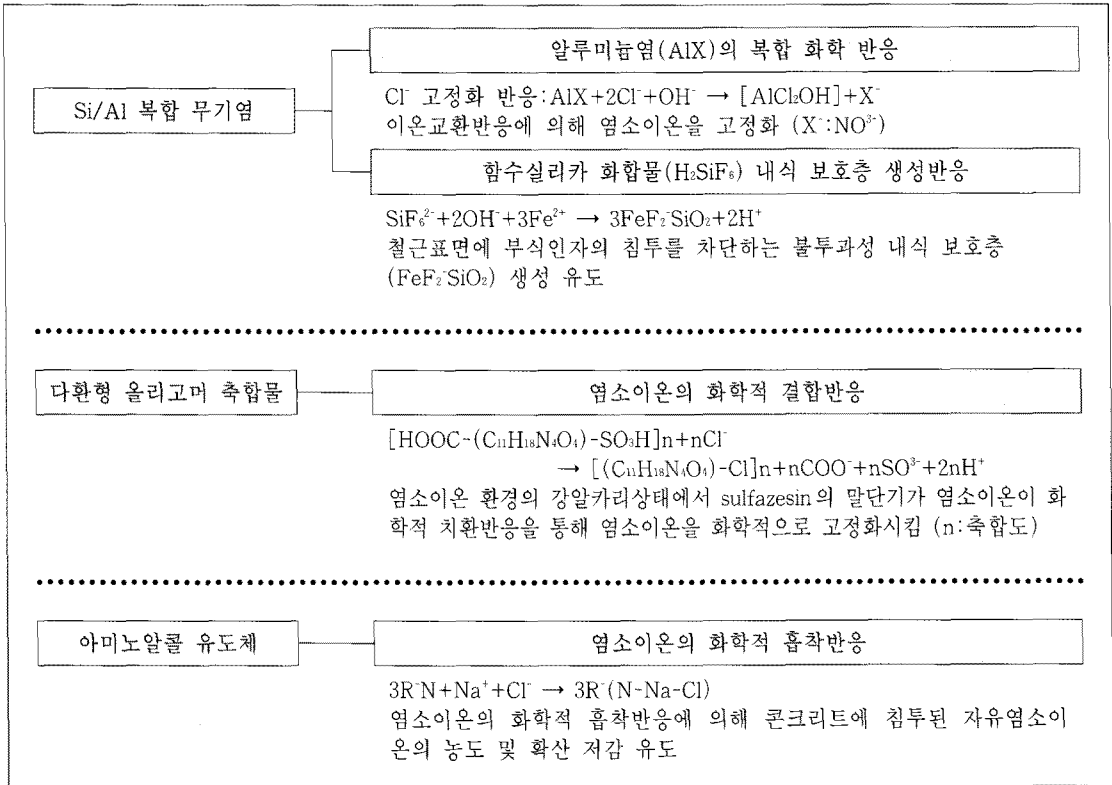
(1) 해안 매립지 환경에 접한 콘크리트 구조물의 성능저하 메카니즘

해안 매립지가 새로이 건설부지로 활용되고 있는 현재, 콘크리트 등의 건설자재가 매립지 지하에 건

설되는 경우에는 지반환경 및 염소이온, 황산염류 등의 지하수에 함유된 유해 부식인자의 영향으로 해안 매립지의 지하에 시공되는 콘크리트 구조물의 부식열화는 피할 수 없는 환경에 처해 있다. 이와 같이 해안 매립지 환경에 콘크리트가 접할 경우 해수의 유입과 함께 유해 이온들이 시멘트 경화체의 공극을 통하여 내부로 침투하게 되며, 매립지의 지하수에 유입되는 해수의 염화물 함유량은 보통 약 4% 정도이고, 이중 약 90%가 NaCl 및 MgCl₂와 같은 염화물이며 나머지 10%가 MgSO₄, CaSO₄ 및 Na₂SO₄와 같은 황산염으로 구성되어 있다. 따라서 해안 매립지에 시공되는 콘크리트는 해수에 접한 경우와 같이 여러 유해이온들의 공존에 의한 복합적인 열화작용을 받게 되며, 이러한 유해이온들이 〈그림-2〉와 같이 시멘트 경화체에 침투하여 비정상적인 반응 생



〈그림-2〉 지하 매립지 지하수 중의 유해이온과 시멘트 반응생성물



〈그림-3〉 신기술 조성물의 반응 메카니즘

성물을 형성하는 과정에 의한 콘크리트 구조물은 크게 침식을 받게 된다.

(2) 신기술 조성물의 수축저감 및 내염해성 성능 개선 메카니즘

신기술 조성물의 주요 성분인 Si/Al 복합 무기염과 다환형 올리고머 축합물을 이용하여 해안 지하 구조물에 시공되는 고내구성 콘크리트(이하, PHDC)의 균열을 제어하기 위한 수축 저감 및 내염해성이 개선되는 메카니즘은 〈그림-3〉과 같다.

이와 같이 신기술 조성물(Hyper-HD)이 갖는 효과를 바탕으로 수천~수만 ppm의 고농도로 염소이온이 함유된 매립지 지하수 환경에 시공된 철근 콘크리트를 대상으로 기존 해안 매립지 구조물에 시공되어온 슬래그 콘크리트(SC) 대비 PHDC의 수축

저감 및 내염해성 적용 효과를 모식적으로 비교하면 〈그림-4〉와 같다.

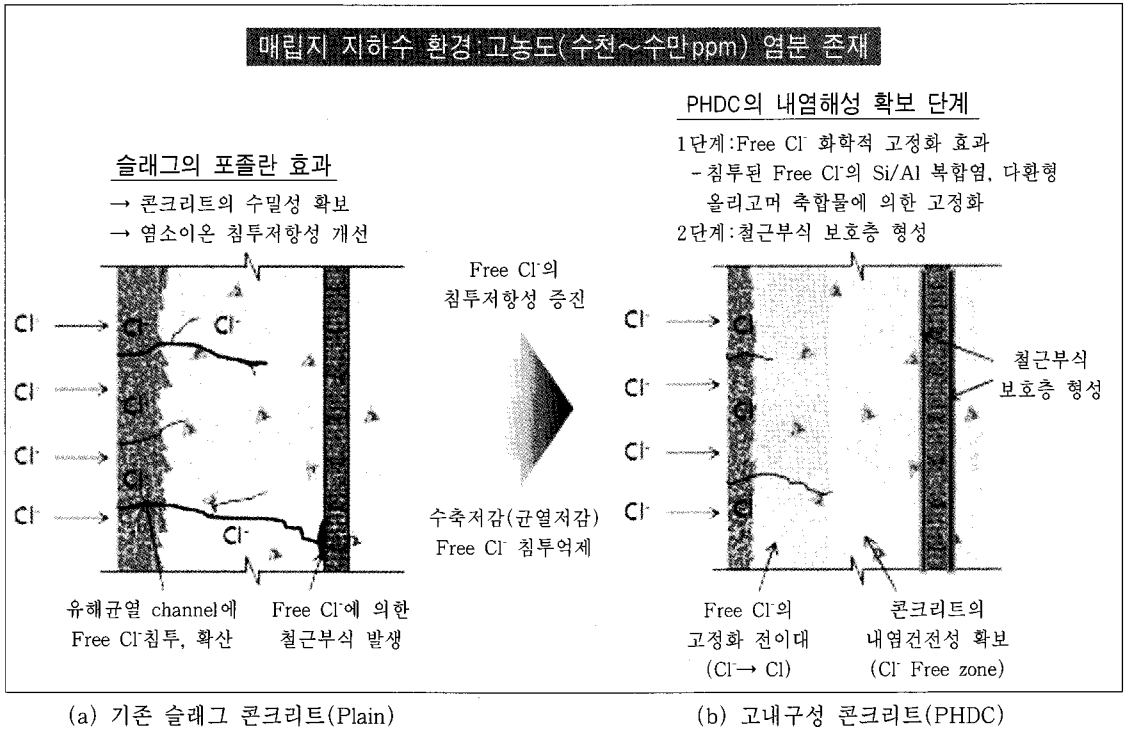
나. 신기술의 시공방법

신기술 조성물, PHDC 제조 및 시공, 관리 등의 전반적인 시공방법은 〈그림 5〉와 같다.

3. 신기술의 기술적·경제적 파급효과

가. 기술적 파급효과

기존 해안가에 시공되는 콘크리트의 내염해 대책은 슬래그 배합 콘크리트를 시공하는 것이 보편적이며, 기타 내염도장, 표면강화제 도포, 폴리머 함침,



〈그림-4〉 신청기술 콘크리트(PHDC)의 내염해성 증진 효과 모식도

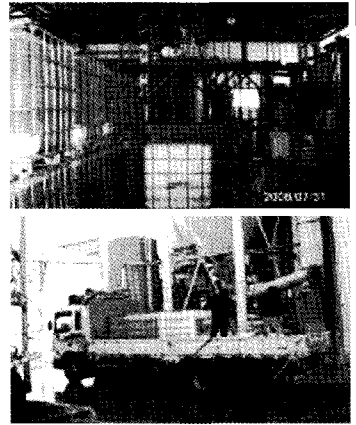
전기방식, 탈염공법 등의 기술이 적용되고 있으나 과도한 시공비(전기방식 시공단가 60~65만원/m², 탈염공법 70만원/m² 소요) 및 잦은 보수에 따른 유지관리비의 상승, 품질관리 부담 가중, 구조물 체적 증가 등을 초래하는 문제점이 제기되고 있는 상황이다. 그러나 본 신기술 적용으로 인하여 종전의 빈번한 보수시공 및 내염해성 확보를 위한 복잡한 시공 기술 적용으로 인한 공기 지연 등의 우려없이 보다 안정적이고, 효율적으로 해안 매립지 콘크리트 공사가 진행될 것으로 기대되며, 이러한 특징에 의해 국내 건설분야에서의 관련 시장확보도 매우 용이할 것으로 판단된다. 또한, 해안 매립지 구조물에 시공되는 콘크리트에 수축 저감의 효율성을 증대하는 동시에 향후 해안 매립지는 물론 국내의 해안 콘크리트 건설분야에서 시장창출 효과가 매우 클 것으로 기대된다.

해안 매립지 대형 시공 구조물에 있어서 콘크리트

를 열화시키는 유해인자의 침투억제 및 콘크리트 구조체의 내염해성을 확보할 수 있는 특화된 콘크리트로서 본 기술의 고내구성 콘크리트(PHDC)를 적용함으로써 수축저감 효과에 의한 균열을 예방하고, 기존 해안 매립지 구조물에 시공되어온 슬래그 콘크리트(Plain)의 내염해성능을 강화시키는 동시에 현장 접근성이 용이한 특성을 통해 향후 건설현장에서도 지속적인 적용 가능성을 타진함으로써 국내 건설현장에서의 활용 확대가 가능할 것으로 기대되고 있다. 또한, 국내 건설업체의 해외 건설이 증가되고 있는 환경을 고려할 때, 본 기술이 국내에서의 시장 활성화와 적용 확대가 재개되어 2차건설 붐에 의해 해안 매립지 및 해안가에 시공되는 초고층 건축물과 대형 콘크리트 구조물의 건설 확대로 해안 콘크리트 구조물의 적용 증가가 예상되며, 해안 플랜트 공사를 활발히 추진하는 개발도상국을 중심으로 해외수출 가능성도 매우 밝을 것으로 전망된다.

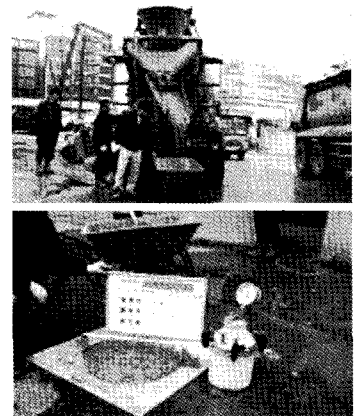
신기술 조성물 제조 및 시험

- 시공환경 및 대상 구조물을 고려한 신기술 조성물 (품명:Hyper-HD)의 제조기술 수립 및 품질 평가
 - Si/Al 복합 무기염 조성, 고형분 농도 등
 - 물리화학적 특성을 통한 품질 평가
- 신기술 조성물의 품질특성 평가 및 레미콘 공장에서의 반입
 - 신기술 조성물 저장 및 취급 지침 수립
 - PHDC 제조를 위한 관리기준 제시
- 신기술 조성물을 적용한 콘크리트(PHDC)의 품질관리기준 충족여부 평가
 - 기초물성, 수축 및 내염해성 등
 - 공인시험을 통한 신뢰성 확보



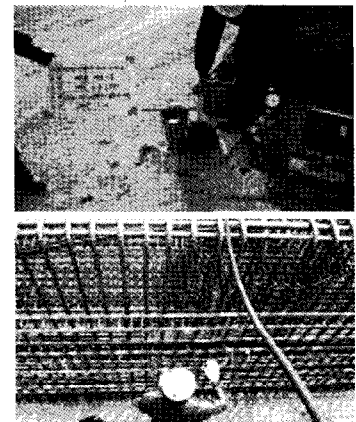
PHDC 제조

- 기존 레미콘 생산방식과 동일하게 PHDC 제조
 - 신기술 조성물 현장 사용범위: B × 0.3~1.0%
 - 혼화제(유동화제)와의 혼용성 검토
 - 기존 콘크리트와 동일한 혼합조건 및 시간에 제조하므로 공사시간 및 현장 적용 프로세스에 차이가 없음
- 신기술 조성물의 레미콘 적정 사용량 점검
 - 레미콘 계량오차 점검표 확인
- 레미콘 B/P 시험을 통한 신기술 조성물을 적용한 배합검토 및 PHDC 성능 평가
 - 시공성 및 설계 기준강도가 충족여부 평가



PHDC 시공 및 관리

- PHDC의 현장 품질시험 및 시공
 - 현장 도착 PHDC의 품질시험 평가
- PHDC를 적용한 구조물의 장기성능 검증 모니터링 계획 수립 및 실시
 - 해안 매립지 지하수 환경 농도 평가
 - 매립지 구조물의 폭로조건 검토
 - 시공 구조물 매입 철근의 부식전위 측정 등
- 매립지 지하 콘크리트 부재의 사용수명 예측
 - 기존 슬래그 콘크리트(Plain) 및 PHDC의 실험데이터를 바탕으로 염해에 대한 구조물의 수명평가 비교



<그림-5> 신기술의 시공방법

〈표-3〉 설계 단가

품 명	규 격	단 위	수 량	금액(원)
■ 콘크리트 타설				
1) 콘크리트 타설(PHDC)	무근구조물	m ³	1	87,202
2) 콘크리트 타설(PHDC)	철근구조물	m ³	1	89,843

나. 경제적 파급효과

(1) 설계단가

〈표-3〉 참조.

(2) 공사비

〈표-4〉 참조.

※ 재료비 산출기준(산출근거: 한국물가정보 2009년 5월호, 일본건설물가 2008년 12월호)

- 신기술 조성물(Hyper-HD) 6,500원/kg (B×0.6% 첨가 기준)
- 일본 유사제품(ヒビガード) 1,000엔/kg (B×2.0% 첨가 기준)

※ 공사비는 철근 콘크리트 구조물 1,000m³ 타설량 기준 산정

(3) 공사기간

〈표-5〉 참조.

※ 실제 송도 하버 뷰 신축현장 기초부재현장에서 의 공사기간으로 일반 콘크리트를 시공하는 경우처럼 본 기술은 공사기간의 지연없이 콘크리트 구체에 타설하여 수축저감 및 내염해성을 확보하는 것이 가능하였다.

(4) 유지관리비

※ 침지매체: 고농도 염수(3% NaCl soln.)

※ 침지재령: 28일 양생 후 7일, 56일 침지재령별로 염소이온 침투깊이 측정

〈표-6〉 참조.

신기술 PHDC 공법의 경우 기존 재료기술 중 슬래그 시멘트 배합에 비해서는 약 22% 가격이 상승하지만 일본의 유사제품 적용기술에 비해서는 공사비의 절감효과가 매우 큰 것으로 확인되었다. 또한 PHDC는 레미콘 공장에서 일반 콘크리트와 동일한 혼합조건 및 시간에 생산할 수 있으며, 현장 타설 시 별도 추가공정 없이 일반 콘크리트처럼 동일하게 타설할 수 있어 전체 공사기간 및 프로세스에는 영향을 미치지 않는다.

(5) 환경부하 저감, 시장확대, 고용창출, 타산업 활성화 등 간접효과

〈표-7〉 참조.

콘크리트에서 용출되는 중금속(Cr, Sn, Pb 등) 분석결과 PHDC의 유해 중금속 용출특성이 Plain과 유사하며, 유해중금속 농도가 환경기준보다 매우 낮은 ppb 농도로 검출되어 PHDC의 환경영향성이 없는 것으로 확인되었다.

〈표-4〉 공 사 비

계 상 항 목	단 위	슬래그 배합 콘크리트	일본 유사기술 (제품명: 히비ガード)	신청기술 (PHDC)
콘크리트 재료비	천원/m ³	47.5	155.3	63.4
노무비(시공비)		24.5	24.5	24.5
기타 경비		1.4	4.6	1.9
공사비	백만원	734(100%)	1,844(251%)	898(122%)

〈표-5〉 공사 기간

구분	공사기간(주)						소요기간(일)	
	1	2	3	4	5	6		
PHDC 공법	1) 콘크리트 배합 설계	■	■	■			39	
	2) 타설계획, 거푸집 및 철근 조립			■	■			
	3) 레미콘 B/P 생산				■			
	4) 콘크리트(PHDC) 타설					■		
	5) 양생 및 타설 품질 점검					■		■
	6) 거푸집 해체 및 균열 점검							■

4. 국내·외 건설공사 활용현황 및 전망 나. 향후 활용가능분야 및 활용전망

가. 활용실적

2007년부터 2009년까지 국내 활용실적은 〈표-8〉과 같다.

국내에서 해안 콘크리트 시공규모는 송도 국제신도시 개발과 같이 해안 매립지를 대상으로 구축되는 신도시 개발공사 및 해안주거단지, 해상 신도시 건설 등의 증가와 함께 꾸준히 그 규모는 증가될 것으로

〈표-6〉 유지관리비

항목	해석조건		인용근거
철근 피복두께	80mm		-
목표 내구수명	30년		-
표면 염화물량	16,094kg/m ³		2004 Chemical Test
임계 염화물량	1,2kg/m ³		콘크리트 표준시방서
염소이온농도	Min. 1,134~Max. 16,094ppm		2004 Chemical Test
염소이온 확산계수	Plain	5.88 × 10 ⁻¹² m ² /s	56일 확산계수 데이터 적용
	PHDC	3.44 × 10 ⁻¹² m ² /s	
수명예측 결과	<ul style="list-style-type: none"> Plain과 PHDC의 내구수명을 비교 결과 <ul style="list-style-type: none"> - Plain: 85.7년(실험을 통한 Plain의 확산계수 이용 산출시) - PHDC: 151.4년 기존 슬래그 배합 콘크리트인 Plain에 비해 PHDC가 약 2배의 내구수명을 확보할 것으로 예측됨 - 장수명화 콘크리트 구조물에 주요할 것으로 판단 		

〈표-7〉 환경부하 저감, 시장확대, 고용창출, 타산업 활성화 등 간접효과

(단위:ppb)

		Cr	Ni	Cu	Zn	Sn	Pb
3일	Plain	90	8	19	7	-	-
	PHDC	63	8	9	6	-	-
7일	Plain	37	6	15	6	-	-
	PHDC	47	6	8	5	-	-
14일	Plain	20	6	9	5	-	-
	PHDC	21	6	8	5	-	-
28일	Plain	15	5	8	3	-	-
	PHDC	12	5	8	3	-	-
56일	Plain	12	4	4	2	-	-
	PHDC	10	4	4	2	-	-

〈표-8〉 국내 활용 실적

연 도	적 용 현 장 명	시 공 규 모	시 공 기 간
2007	송도 센트럴파크 I 신축현장	RCD 18,900m ³ 기초부재 1,300m ³	2007년 6~11월(RCD), 2008년 5~6월(기초부재)
2008	부산 센트럴스타 신축현장	기초부재 6,828m ³	2008년 5월
	송도 근린상가 현장	기초부재 27,660m ³	2008년 7~10월
	송도 하버뷰 신축현장	기초부재 33,351m ³	2008년 9월~2009년 2월
	송도 센트로드 신축현장	슬러리월 1,870m ³	2008년 12월~2009년 1월
2009	송도 센트럴파크 II 신축현장	기초부재 5,169m ³	2009년 1~2월
	여수국가산단 진입도로 개설공사 현장(제4공구)	케이슨 765m ³	2009년 4월
	포항신항 CTS 반출부두 이전개축 현장	교각기초 10,721m ³	2009년 1~4월

로 예상되며, 최근 각종 언론매체를 통해 보도되고 있는 자료에 따르면 최근 국내 건설사의 해외 건설 수주액이 급증하고 있어 국내건설 기술력이 세계적으로 크게 인정받고 있다.

따라서 열화인자의 침입을 억제하는 수축에 의한 균열저감 유도 및 내염해성 관리가 필요한 해안 콘

크리트 구조물의 시공은 중장기적인 측면에서 지속적으로 이루어질 것으로 판단된다.

특히 국내 대형시공사의 중국, 베트남, 멕시코 등 해외 건설의 수주액이 급속히 증가됨에 따라 해안 플랜트 분야에서의 적용도 향후 크게 증대될 것으로 예상되고 있다. ▲