

## 특집기사

# 포스코건설 울릉도 사동항 케이슨 구조물 PHDC(Promoted High Durability Concrete)공법 적용 Filed Application of PHDC(Promoted High Durability Concrete) in Ulleung Do Sadong Port Caisson Structure



유 조 형<sup>1)\*</sup>

Yoo, Jo Hyeong



김 우 재<sup>2)</sup>

Kim, Woo Jae



길 배 수<sup>3)</sup>

Kil, Bae Soo

### 1. 개요

최근 국내의 해안 매립지 신도시 개발 사업이 크게 증가함에 해안교량, 해안터널 및 해안 공업단지, CTS 반출부두 등의 토목구조물에 대한 건설공사가 활발히 추진되고 있다. 그러나 구조물 차체가 항만 또는 해안가에 위치하거나 해수환경에 접하는 해안 콘크리트 구조물 특성상 시공 단계부터 염해 및 다습한 환경에 노출되어 염소이온, 황산염류 및 수분 등의 부식이자에 콘크리트의 스케일링과 염소이온의 침투에 의한 철근 부식이 야기되어 균열 및 피복 탈락 등의 구조적 결함이 발생하여 구조물의 급속한 열화가 초래되어 성능저하 현상이 발생한다. 이중에서도 특히 염해에 의한 콘크리트 구조물의 손상은 침투된 염소이온 및 해사 혼입 등의 내·외부요인에 의해 콘크리트내 철근의 부식으로 직접연결 되므로 유지보수에 의해 열화손상이전 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.

특히, Fig. 1과 같이 울릉도 사동항 케이슨 구조물은 염해에 대해서 100년 이상의 내구성 확보가 필요한 구조물

이므로, 염해에 대한 특별한 대책이 필요한 구조물 이다.

### 2. 고내구성 콘크리트 (PHDC)

본 고내구성 콘크리트(Promoted High Durability Concrete; 이하 PHDC)의 적용되는 혼화제(Hyper-HD)의 주요성분인 Si/Al 복합 무기염과 다환영 올리고머 축합물에 의한 콘크리트의 균열을 제어하기 위한 수축저감 및 내염해성 개선 메커니즘을 제시하면 다음 Fig. 2와 같다. 상기 메커니즘과 같이 Si/Al 복합 무기염을 시멘트에 첨가하면 시멘트 수화과정중에 Si 무기염에서 해리된  $\text{SiF}_6^{2-}$ 이온이 산화된 철이온을 환원시키면서 SEM 및 EDX 분석을 통해 확인할 결과, 철근표면에  $\text{FeF}_2\text{-SiO}_2$  복합조성의 불투과성



Fig. 1 울릉도 사동항 케이슨 구조물

1) 포스코건설 R&D Center 건축연구그룹 과장, 공학박사

2) 포스코건설 R&D Center 건축연구그룹 부장, 공학박사

3) 트라이포드 대표이사, 공학박사

\* E-mail : johyeong@poscoenc.com

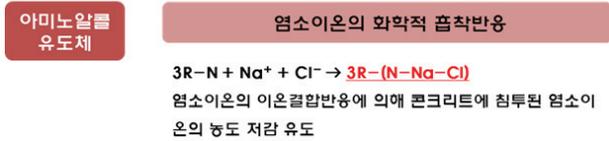
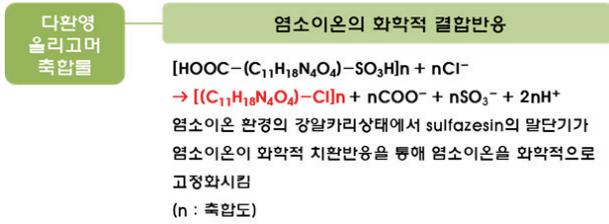
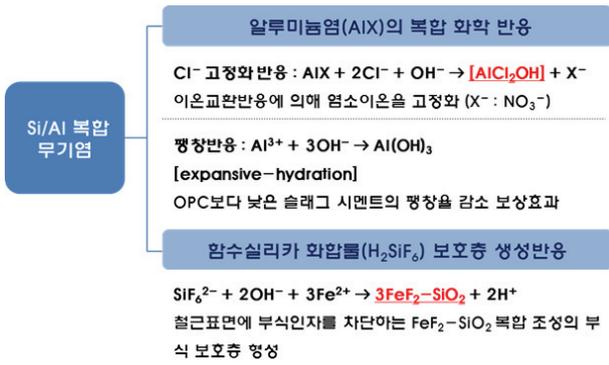


Fig. 2 PHDC의 적용된 반응 메커니즘

부식 보호층을 형성하여 염소이온의 침입을 차단하여 철근 방식 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 PHDC의 적용된 다환형 올리고머 축합물은 축합도가 3~5, 1,500~2,000 범위의 분자량(Mw)을 지닌 올리고머형 화합물(sulfazecin,  $C_{20}H_{20}N_4O_9S$ )로서 시멘트와 같은 강알칼리 상태에서 염소이온이 침투되면 화합물의 말단기인 Sulfonite Group( $-SO_3H$ )와 carboxyl group( $-COOH$ )가 주쇄(main chain)에서 분리되고, 염소이온이 화학적으로 결합하게 된다. 이러한 염소이온의 화학적 결합특성은 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 알콜 유도체는 특성기인  $Na^+$ 가 콘크리트에 유입된 염소이온과의 결합 반응에 의해 강력히 고정화함으로써

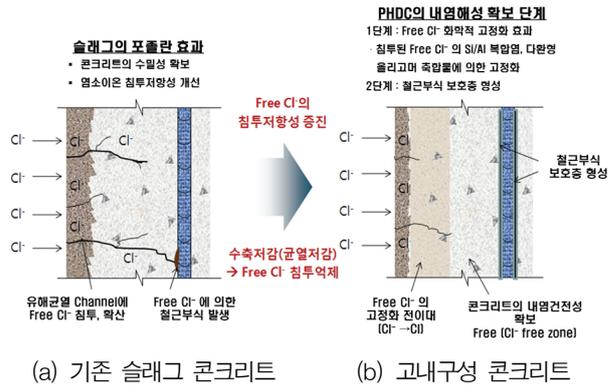


Fig. 3 PHDC의 내염해성 증진 효과 모식도

콘크리트에 침투된 염소이온의 농도를 저감하는 역할을 하게 된다.

PHDC의 조성물(Hyper-HD)이 지닌 상기 효과를 바탕으로 바닷물과 접해있는 케이슨구조물의 철근 콘크리트를 대상으로 기존 슬래그 콘크리트(SC) 대비 신기술 조성물이 적용된 콘크리트(PHDC)의 수축저감 및 내염해성 효과를 모식적으로 비교하면 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다.

### 3. 케이슨 구조물 내구수명 해석

#### 3.1 염해내구성 설계의 기본 원리

염해에 의한 성능저하 예측은 잠복기, 진전기, 가속기 및 성능저하기의 길이를 예측하는 것을 기본으로 하고, 염화물 이온의 확산과 강재부식의 진행을 대상으로 한다. 성능저하 예측은 점검결과를 기초로 하는 것을 원칙으로 하나, 점검결과가 없는 경우는 콘크리트의 품질과 구조물이 사용

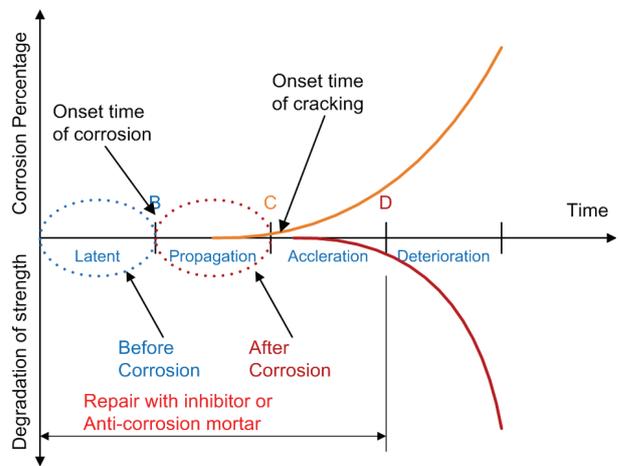


Fig. 4 염해 내구수명 산정기법

Table 1 해석 배합표

구분	W/B (%)	단위재료량(kg/m <sup>3</sup> )							비고
		Water	Total Binder	OPC	S/P	F/A	잔골재	굵은골재	
Plain	38.0	153	403	202	161	40	752	969	-
PHDC									B*0.9%

되는 환경조건을 적절히 평가하고, 적절한 안전도를 고려하여 행하는 것으로 한다.

### 3.2 Life- 365 프로그램 개요

이 프로그램에 의한 해석은 크게 아래와 같이 4단계로 나눌 수 있다.

- 부식의 개시시기로 ‘잠복기, ti’
- 철근의 부식이 용인할 수 없을 정도로 진행된 시기로 ‘가속기, tp’ [최초 보수시기 tr을 알기 위해서는 이 두 시기를 합한다.: I.e. tr=ti+tp]
- 재보수주기 예측
- 초기 콘크리트 구조물(염해 방지 대책을 포함한) 비용과 장래 보수비용을 고려한 LCC 추정

### 3.3 대상 구조물 개요

대상 구조물에 대한 기본 조건은 다음 Table 2와 같으며, 울릉도 사동항 동방파제 케이슨 구조물을 크게 두 부위(케이슨 후면벽 슬릿부, 케이슨 벽체부) 대상으로 다음 Table 1과 같이 기존 5:4:1 배합을 기준으로 Hyper-HD를 사용한 배합을 사용하여 내구수명 해석을 실시하였다.

### 3.4 해석결과

#### 3.4.1 내구수명 측정 결과

2방향 후면부 슬릿부 내구수명 측정결과 Plain 35와 PHDC 공법을 적요한 내구수명 예측결과 Plain 35 같은 경우 Fig. 6과 같이 목표내구수명인 100년을 만족하지 못하는 결과를 나타내었지만 PHDC 공법을 적용할 경우 목표내구수명 100년을 상회하는 것으로 예측되었다.

1방향 벽체부 내구수명 측정결과 Plain 35와 PHDC 공법을 적요한 내구수명 예측결과 Plain 35 같은 경우 Fig. 7과 같이 목표내구수명인 100년을 만족하지 못하는 결과를 나타내었지만 PHDC 공법을 적용할 경우 목표내구수명 100년을 상회하는 것으로 예측되었다.

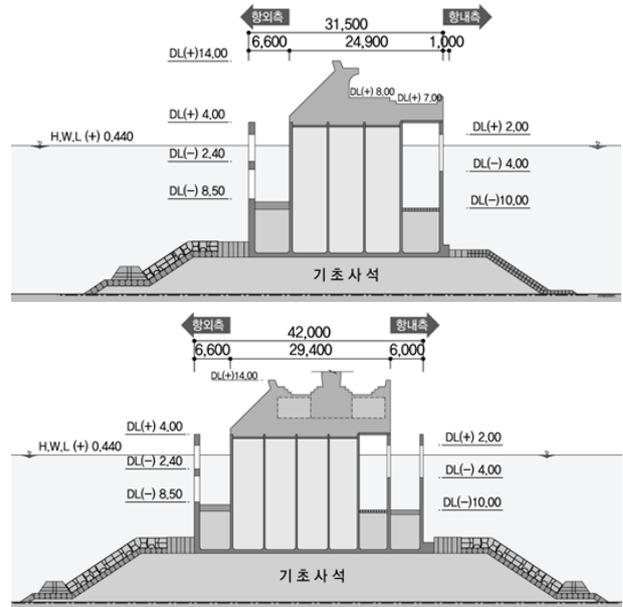


Fig. 5 대상구조물 개요

Table 2 구조물 해석조건

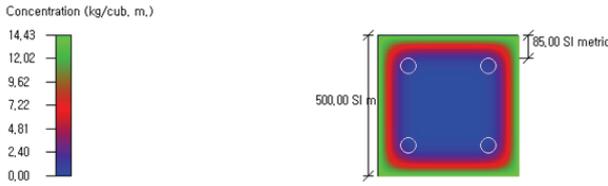
구분	Concrete Type	
	Plain	PHDC
확산계수(m <sup>2</sup> /s)	7.1121×10 <sup>-12</sup>	5.6896×10 <sup>-12</sup>
결합계 치환율	(OPC50% : S/P40% : F/A10%)	
온도조건	Table 3 참조	
피복두께	85mm	
임계 염화물량(kg/m <sup>3</sup> )	콘크리트 표준시방서(2009)기준 C <sub>lim</sub> = 0.004 C <sub>bind</sub> C <sub>bind</sub> : 단위결합재량(kg/m <sup>3</sup> )	
	1.612	3.036
목표내구수명	100년	

Table 3 울릉도 지역 연간 평균온도(°C)

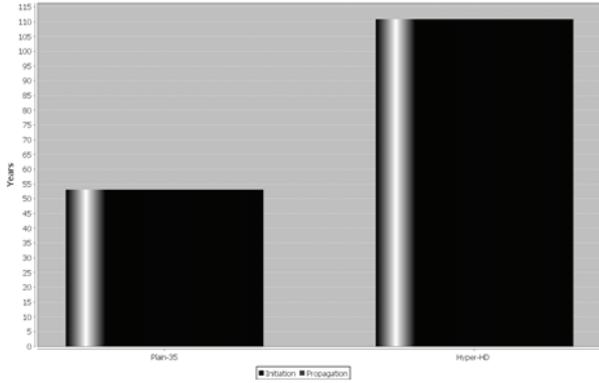
월	1	2	3	4	5	6
온도	0.5	1.2	6.2	9.1	15.7	19.6
월	7	8	9	10	11	12
온도	24.7	26.6	20.7	16.1	8.9	3.4

#### 3.4.2 내구수명 측정 분석

염해환경 하에 노출된 울릉도 사동항 방파제 축조공사의 콘크리트 구조물에 대하여 콘크리트 표준시방서(2009)

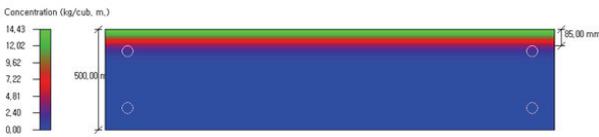


(a) 2방향 내구수명 예측 결과

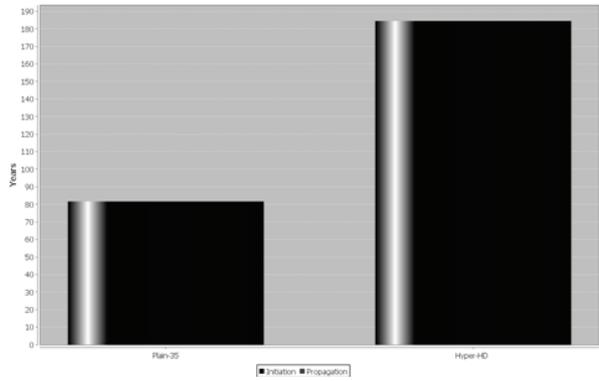


(b) 내구수명 평가 결과

Fig. 6 2방향 후면부 해석 결과



(a) 1방향 벽체부 내구수명 예측 결과



(b) 내구수명 평가 결과

Fig. 7 1방향 벽체부 해석 결과

Table 4 내구수명 예측결과

구분		내구수명	비고
2방향 후면부슬릿부	Plain	53.0	N.G
	PHDC	110.8	OK
1방향 벽체부	Plain	81.5	N.G
	PHDC	184.4	OK

Table 5 내구수명 예측결과 정리

구분	2방향 후면벽	1방향 벽체부	비고
적용 순피복 (mm)	85	85	Hyper-HD
표면염화물량 (kg/m <sup>3</sup> )	14.43	14.43	
임계염화물량 (kg/m <sup>3</sup> )	2.634	2.634	
철근위치에서의 염화물 이온농도 (kg/m <sup>3</sup> )	2.63<2.64	1.34<2.64	
염해 내구수명 (years)	110.8	184.4	

및 Life 365 Ver.2.0 내구수명 예측 프로그램을 이용하여 염소이온 침투 해석을 진행하였으며, 염해피해가 우려되는 대표 단면으로 케이스 슬릿부와 벽체부에 대해서 각 콘크리트 배합별로 염해내구성을 검토하여 당사에서 개발한 내구성 개선제(Hyper HD)를 혼입에 대한 결과 Table 5에 나타내었다.

#### 4. 결론

당사에서 개발한 PHDC기술을 적용하여 Life-365 프로그램을 사용하여 내구수명 예측 해석을 실시한 결과 케이스 구조물 (후면부 슬릿부(2-D), 벽체부(1-D)) 모두 목표 내구수명 100년 이상 확보하는 것으로 예측되어 울릉도 사동항 동방파제 케이스 구조물이 요구하는 내구연한 확보가 가능할 것으로 판단되어, 현재 울릉도 사동항 현장에 적용 중에 있다.

담당 편집위원: 유조형  
(포스코건설 R&D Center)  
johyeong@poscoenc.com