

## 다양한 해양환경에 장기 노출된 OPC 콘크리트의 강도 및 탄산화 특성

이현우<sup>1</sup>, 신금채<sup>1</sup>, 권성준<sup>2\*</sup>

### Strength and Carbonation Characteristics in OPC Concrete under Long-Term Exposure Conditions in Various Sea Environments

Hyeon-Woo Lee<sup>1</sup>, Geum-Chae Shin<sup>1</sup>, Seung-Jun Kwon<sup>2\*</sup>

**Abstract:** Compressive strength in concrete has many affecting parameters and varies with exposure conditions. Although the concrete has same mix proportions, its properties are different with exposure conditions, and sea-environment can be classified into three groups such as tidal, atmospheric, and sea submerged region particularly. In this study, compressive strength was evaluated on 7-year-cured concrete and the results from previous equations (KDS, ACI, CEB, and JSCE) were compared with them. Furthermore the strength and carbonation progress were evaluated on concrete cured for 7 years exposed to three different sea environment. Three levels of w/c (water to cement) ratio (0.37, 0.42, and 0.47) and three different exposure conditions (tidal, atmospheric, and submerged) were considered. The results from wet-cured condition are all higher than those from the previously proposed equations, and the results from different sea exposure conditions (tidal, atmospheric, and submerged region) were lower than those from wet-cured condition. A reduction of strength was evaluated with increasing w/c ratio and the minimum strength was evaluated in the sea-submerged conditions. Several experimental constants applicable to the previous equations were obtained from regression analysis since the strength change with w/c ratios were not considered in those equations. Regarding carbonation depth with different exposure conditions, higher carbonation depth clearly was observed with increasing w/c ratios, and evaluated in the order of atmospheric, submerged, and tidal region. Considerable carbonation depth was observed in submerged and tidal region due to sulfate ion and dissolved carbon dioxide as well.

**Keywords:** Compressive strength, Curing, Atmospheric, Tidal, Carbonation, Sea environment

## 1. 서 론

콘크리트의 장기강도는 구조물의 하중을 지지하기 위한 가장 기본적인 필요 성능이며, 오랫동안 연구되어왔다. 널리 알려진 대로 강도에 대한 영향인자는 물-시멘트비, 골재, 시멘트의 종류, 양생 조건 등 매우 다양하며, 실험식 이외에도 다양한 수화발열 모델과 열역학적 연성 모델들도 제안되고 있다 (Neville, 2011; Yang et al., 2007; Tomas and Matthews, 2004; Mun et al., 2014). 일반적인 수중 양생환경에서 콘크리트 강도는 재령에 따라 지속적으로 증가하지만 배합조건 및 양생 조건에 따라 그 편차는 매우 크다. 많은 연구에서 장기재령 결과에 대한 강도 예측식을 제안하고 있으며, 일반적으로 기준 재령(28일)에 대한 지수 함수식의 비선형 강도 증가함수를 제

안하고 있다(KCI, 2022; CEB, 2010; JSCE, 2010; ACI, 2008). 이러한 식들은 시멘트의 종류 및 양생조건에 대한 간단한 상수를 고려하여 강도 증가를 고려하고 있는데, 장기 실험 결과에서도 일반 시멘트를 사용한 콘크리트와 고로슬래그 미분말과 같은 혼화재료를 사용한 콘크리트의 강도 차이는 2~3배 이상 차이 나는 것으로 평가되었으며, 최근 들어 국내에서도 15년 이상 장기 노출된 콘크리트의 강도 특성을 연구한 사례가 있다(Lee and Lee 2023).

해안가에 노출된 콘크리트의 경우, 염화물의 직접 또는 간접적인 유입으로 인한 철근부식으로 인해 많은 피해가 발생하고 있다(Song et al., 2005; Broomfield, 1997). 많은 연구에서 염해에 대한 연구가 진행 중이지만, 해안가의 경우도 수중부, 조석대, 간만대와 같이 노출환경이 다르고 이에 따라 양생 조건이 다르게 되며, 이에 따라 염화물 거동이 다르게 평가된다(Jang et al., 2017; Yoon and Kwon, 2022). 또한 도심지에서 주로 발생하는 탄산화 역시, 해안가에서도 발생한다. 탄산화는 지하구조물 및 도심지에서 발생하는 대표적인 열화기구인데, 외부로부터 유입된 이산화탄소가 내부의 수산화칼슘 및 수화물(Calcium Silicate Hydrates) 등과 반응하여 내부 공극수

<sup>1</sup>학생회원, 한남대학교 건설시스템공학과 석사과정

<sup>2</sup>정회원, 한남대학교 건설시스템공학과 교수, 교신저자

\*Corresponding author: jjuni98@hannam.ac.kr

Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2024년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2024년 4월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

의 pH를 감소시키는 열화현상을 의미한다. 이러한 탄산화 진행은 콘크리트 구체에 대해서는 OPC를 사용한 콘크리트에 대해서는 어느 정도 강도 및 표면의 경도가 증가하는 현상을 야기하는 것으로 알려져 있다(Song and Kwon, 2007; Saeki, 1991). 해안가 조건에서도 이산화탄소의 농도가 낮지만 탄산화는 진행하며, 해수 침지조건에서도 탄산화는 진행되고 있다(Lee and Yoon, 2003; Ganjian and Pouya, 2009; Zhu et al., 2016). 해안가에 노출된 구조물의 경우, 일반 환경보다 탄산화 속도는 증가하게 되는데, 이는 염화물의 침투로 인한 내부 공극수의 pH 저감과 수화물의 생성변화가 주원인으로 평가된다(Ganjian and Pouya, 2009). 이로 인해 염화물이 있는 경우 탄산화 속도는 증가하게 되며, 염화물 분포 역시 고정된 염화물의 해리(dissociation)를 통하여 내부로 더욱 이동하게 되는데, 이러한 현상은 복합열화의 대표적인 현상으로 보고되고 있다(Zhu et al., 2016; Kwon et al., 2007; Chindaprasirt et al., 2008). 또한 탄산화의 경우 습도가 높을 경우 이산화탄소 확산계수의 저감으로, 습도가 낮을 경우 탄산화 반응물의 저하로 인해 일정 영역(60~80%) 수준에서 가장 빠른 탄산화 속도를 나타내는데, 해안가의 비말대 영역은 습도면에서 탄산화 진행이 커질 수 있는 환경이다(Ganjian and Pouya, 2009; Chindaprasirt et al., 2008).

본 연구에서는 3가지 물-시멘트비를 가진 보통포틀랜드 시멘트(OPC: Ordinary Portland Cement)를 대상으로 습윤 양생된 시편의 7년간 강도 특성을 분석하였다. 또한 재령 7년을 조건에서 서로 다른 해양환경인 비말대, 간만대, 침지대에서 존치된 콘크리트의 강도 및 탄산화 특성을 분석하였다.

도출된 결과는 해안가 콘크리트의 장기강도 발현모델의 개발 및 탄산화 모델의 기초자료로 사용될 수 있다.

## 2. 해안환경의 노출 조건

본 연구를 위하여 KS D ISO 11306에 따라 조성된 옥외폭로 시험장에서 장기 폭로시험을 수행하였다. 7년간 노출되었

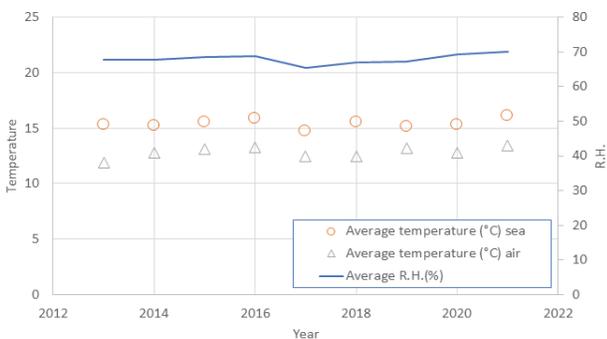


Fig. 1 Temperature and relative humidity variation for 10 years

던 시편에 대하여 강도 및 탄산화 특성을 분석하였는데, 각 조건은 다음과 같다. 침지대의 경우 해수에 의한 완전 침지상태를 고려하였으며, 간만대의 경우 물이 비산되며 조수간만의 주기가 적도록 설계된 설정된 곳에 해수의 상승 및 하강만이 고려된 조건으로 고려되었다. 비말대의 경우 해풍의 영향을 직접 받을 수 있게 설정하였으며 육지로부터의 바람이 차단된 곳에 노출하였다(Jang et al., 2017; Yoon and Kwon, 2022). 옥외폭로 시험장에서 측정한 해수의 염화물 농도는 약 3.0~3.3% 범위를, 대기 중 염화물 농도는 25~82 psu (practical salinity unit)로 조사되었다. 또한 기존의 환경조사 자료를 조사하여 최근 10년 동안의 온도 및 습도 정보를 분석하였으며, 그 결과를 Fig. 1에 도시하였다(KMA, 2023).

또한 이산화탄소의 농도 및 해수의 pH 정보도 조사되었는데, 400~420 ppm 수준의 대기의 이산화탄소의 농도가 평가되었으며, 해수 중에서는 340~470  $\mu\text{atm}$  수준의 이산화탄소 농도가 평가되었다. 해수의 pH는 큰 변화 없이 8.0~8.1 수준의 환경을 나타내었다(KMA, 2023). Fig. 2에서는 2015년 4월부터 2018년 10월까지 총 10회에 걸친 pH 및 이산화탄소의 농도 조사 자료를 도시하였으며, 옥외폭로장의 사진을 Fig. 3에 도시하였다.

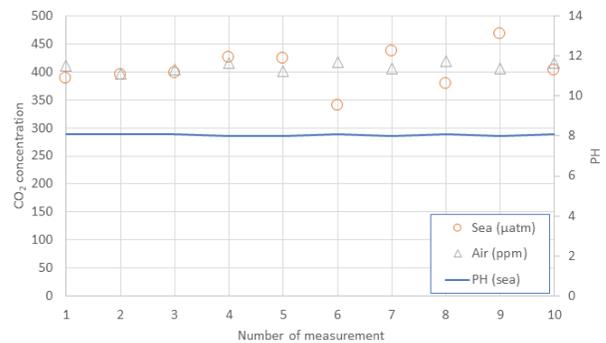


Fig. 2 CO<sub>2</sub> concentration and pH variation in the site

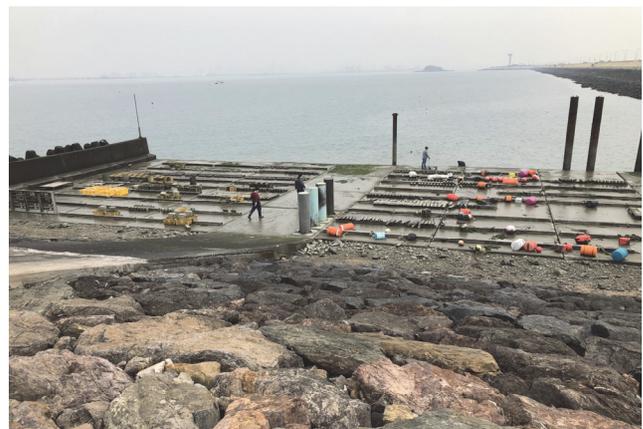


Fig. 3 Photo of exposure site

### 3. 장기폭로 실험을 위한 배합조건

#### 3.1 재료 및 콘크리트 배합

총 3개의 배합을 고려하였으며, 이를 Table 1에 정리하였다. Table 2에서는 사용된 바인더의 화학적 조성을, Table 3에서는 사용된 잔골재 및 굵은골재의 물리적 특성을 나타내었다. 기술된 배합표는 이전 선행연구와 동일한 배합이다(Jang et al., 2017; Yoon and Kwon, 2022).

#### 3.2 실험방법

7년까지의 재령에 따른 압축강도는 KS F 2405: 콘크리트의 압축강도 시험방법을, 탄산화 깊이 측정 방법은 KS F 2596: 콘크리트 탄산화 깊이 측정 방법을 준용하여 수행하였다. Fig. 4에서는 압축강도 실험에 대한 사진을 나타내었으며, Fig. 5에서는 대표배합에 대하여 탄산화 깊이 측정 결과를 나타내었다.

**Table 1** Mix proportions for test

Type	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )				S.P (%)
	Water	Cement	Fine Agg.	Coarse Agg.	
OPC-37	168	454	767	952	1.10
OPC-42	168	400	787	976	1.00
OPC-47	168	357	838	960	0.95

W/C : Water to Cement ratio, W : Water, C : Cement, S.P : Super Plasticizer

**Table 2** Chemical properties of OPC

Items Types	Chemical composition (mass %)							Physical properties	
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Ig. loss	Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)
OPC	21.96	5.27	3.44	63.41	2.13	1.96	0.79	3.16	3,214

**Table 3** Physical properties of aggregates

Types	Items	G <sub>max</sub> (mm)	Specific gravity	Absorption (%)	F.M.*
Fine aggregate	-	-	2.58	1.01	2.90
Coarse aggregate	25	25	2.64	0.82	6.87

\*: Fineness Modulus

### 4. 콘크리트 배합조건에 따른 강도 및 탄산화 거동

#### 4.1 재령기간에 따른 압축강도 모델식 분석

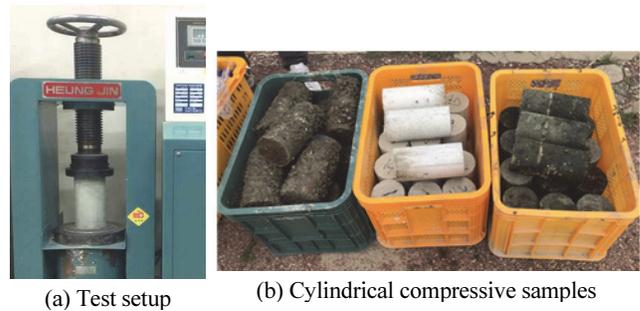
본 절에서는 콘크리트를 대상으로 강도 특성을 분석하기 위해 국내외에서 사용되는 압축강도 모델식을 실험값과 같이 비교하였다. 조사된 압축강도 모델식은 국내식(KDS 14 20 01), ACI, CEB, JSCE 등의 학회식을 조사하였다. 각 식들은 기준강도를 이용하여 재령에 따른 비선형적인 함수식을 제안하고 있으며, 혼화재 치환 콘크리트를 고려하지 못하는 한계점이 존재한다. Table 4에서는 각 제안식과 실험상수를 요약하였으며 이를 OPC 대상 28일 강도를 기준으로 Fig. 6에 도시하였다.

OPC 배합에서는 KDS식 대비 ACI경우 재령 28일까지 경우 최대 0.7% 증가율을 확인하였지만 49일 이후로 최대 14.0% 감소율을 확인하였다. 또한 CEB에서는 8.5%의 감소율을, JSCE의 경우 최대 14.5%의 감소율이 평가되었다. 또한 장기재령이 될수록 감소율은 줄어들었다. ACI식 과 JSCE식은 거의 유사한 결과를 나타내었으며, 모든 부분에서 KDS식을 적용한 값이 다른 평가식에 비하여 상대적으로 높은 값을 나타내었다.

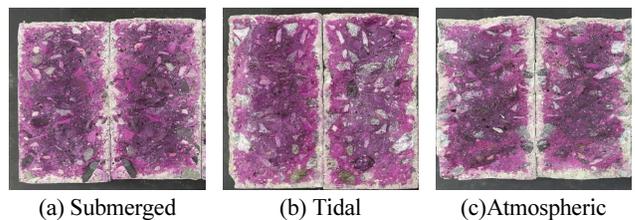
#### 4.2 배합조건에 따른 강도 특성

##### 4.2.1 배합조건에 따른 노출환경별 강도특성

OPC 배합 콘크리트를 대상으로 콘크리트 배합조건에 따른 강도 특성을 분석하기 위해 재령 7년까지 강도평가 결과를 도



**Fig. 4** Photo for compressive strength



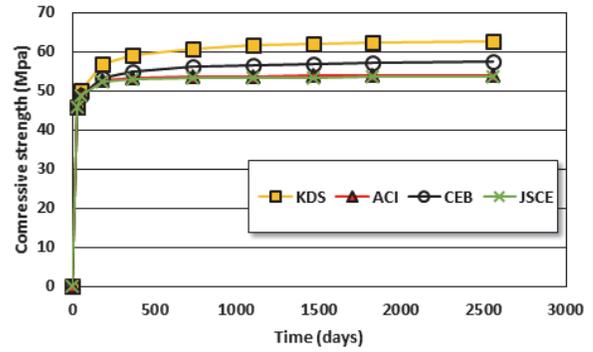
**Fig. 5** Carbonation depth measurement at different conditions

**Table 4** Experimental constants in International Codes

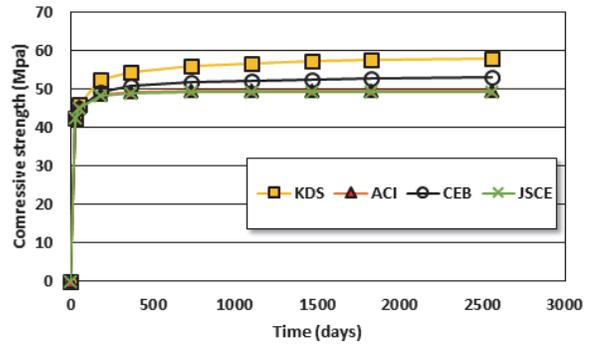
KDS 14 20 10	$f_{cu} = \beta_{cc} f_{28}, \beta_{cc}(t) = \exp\left[\beta_{sc}\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right]$			
Type of cement	$\beta_{sc}$			
	Wet condition		Steam condition	
Ordinary Portland Cement	0.35		0.15	
High Eary Strength Portland Cement	0.25		0.12	
Moderate Heat Portland Cement	0.4			
$\beta_{sc} = 0.35$ (Ordinary Portland Cement, Wet Condition)				
ACI(2008)	$(f'_c)_t = \frac{t}{a+bt}(f'_c)_{28}$			
Type of cement	Moist-cured concrete		Steam-cured concrete	
	a	b	a	b
Ordinary Portland Cement	4.0	0.85	1.0	0.95
High Eary Strength Portland Cement	2.3	0.92	0.7	0.98
CEB(2010)	$f'_c = \beta_{cc}(f'_c)_{28}, \beta_{cc} = \exp\left\{s\left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{0.5}\right]\right\}$			
Strength class of cement	32.5 N	32.5 R, 42.5 N	42.5 R, 52.5 N, 52.5 R	
	S	0.38	0.25	0.20
$s = 0.25$ (Ordinary Portland Cement)				
JSCE (2010)	$f'_c(t) = \frac{t}{a+bt}d(28)f'_{28}$			
Type of cement	a	b	d(28)	
Ordinary Portland Cement	4.5	0.95	1.11	
Moderate Heat Portland Cement	6.2	0.93	1.15	
High Eary Strength Portland Cement	2.9	0.97	1.07	

**Table 5** Comparison of experimental constants of compressive strength

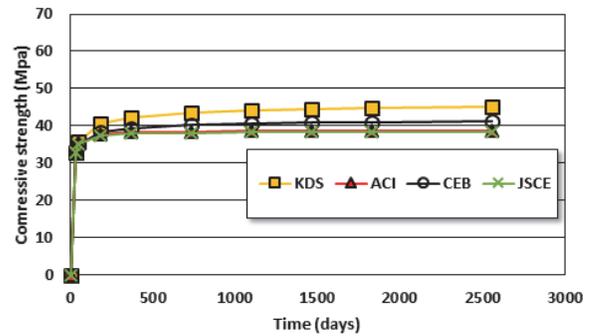
Mix type	KDS $\beta_{sc}: 0.35$		ACI a: 4, b:0.85		$R^2$
	$\beta_{sc}$	COV	a	b	
OPC-37	0.452	5.968	8.485	0.683	0.998
OPC-42	0.477	6.812	10.133	0.666	0.996
OPC-47	0.598	7.646	15.788	0.588	0.982



(a) OPC-37

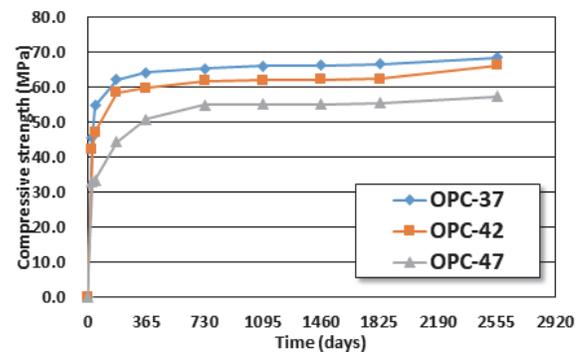


(b) OPC-42



(c) OPC-47

**Fig. 6** Result of compressive strength by prediction model



**Fig. 7** The analysis result of compressive strength

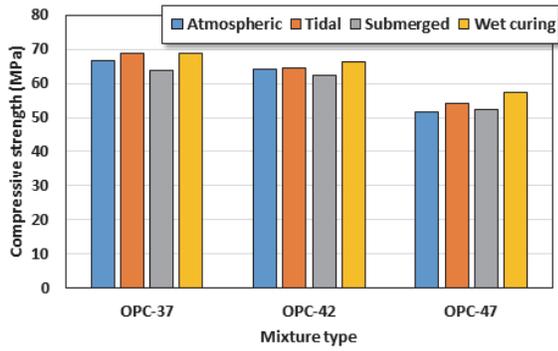
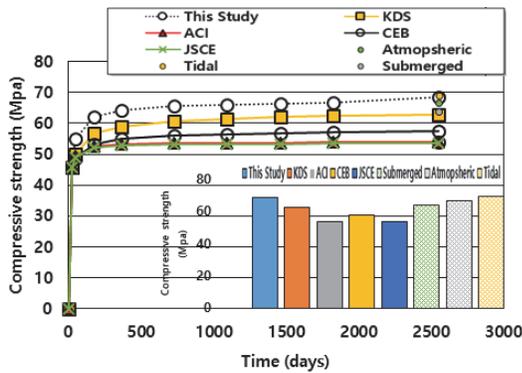
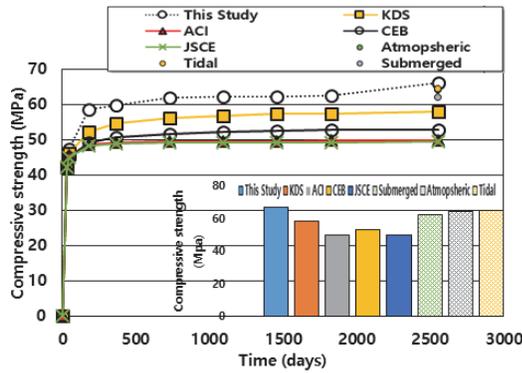


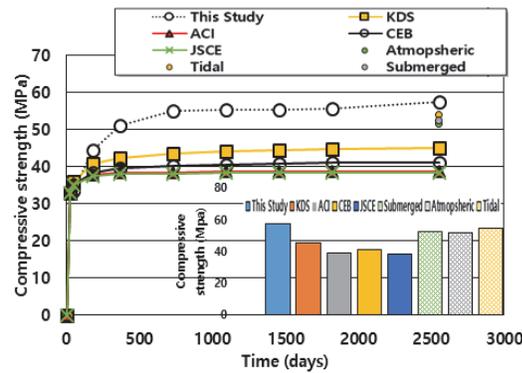
Fig. 8 Compressive strength in different environments (after 7 years)



(a) OPC-37



(b) OPC-42



(c) OPC-47

Fig. 9 Comparison of compressive strength with different exposure conditions

시하였다. Fig. 7에 배합별 재령 기간에 따른 압축강도 결과를 나타내었으며, Fig. 8에 7년 옥외폭로 시험 후 압축강도를 나타내었다.

강도평가 결과, 물-시멘트비 감소 및 재령의 증가에 따라 강도증가가 뚜렷하게 평가되었다. 정량적인 비교를 위하여 재령 28일 대비 7년 강도 비율을 분석하면, 물-시멘트비가 높은 배합에서 상대적으로 강도 증가 비율이 높게 평가되었다. OPC37에서는 149.7%, OPC42에서는 156.6%, 그리고 OPC47에서는 174.5%를 나타내었다.

또한 습윤양생이 아닌 세 가지 노출환경에서의 재령 7년 값의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 노출환경에 따라 뚜렷한 강도 비교는 나타나지 않았으나, 해수 침지조건인 경우 수화반응 이외에 모래 및 유수의 이동으로 인해 물리적 손상이 발생하며, 이로 인해 강도 저하가 발생한다고 알려져 있다(Yoon and Kwon, 2022). 전반적으로 습윤양생의 경우보다 낮은 강도가 평가되었으며, 비말대와 간만대에서는 큰 차이가 발생하지 않았다. 물-시멘트비가 높을수록 강도 저하가 크게 발생하였는데, OPC-37의 경우 96.9~100.3%, OPC-42의 경우, 93.8~97.5% 수준의 비율을 나타내었지만, OPC-47의 경우 89.7~91.3%의 강도비가 발생하였다. Table 1에 제안된 식들이 OPC를 대상으로 하고 있으므로 OPC 기준 기존식들과 노출환경별 실험값과의 비교는 Fig. 9에 나타내었다.

결과에서 알 수 있듯이 옥외폭로(비말대, 침지대, 간만대)의 결과는 동일 재령 습윤상태 강도값 보다 낮게 평가되었으며, 국내의 예측식(ACI, JSCE, CEB, KDS) 대부분은 실험값 보다 낮게 평가되었다. 이는 기존의 연구에서도 보고되었는데, 실제 장기 압축강도를 보수적으로 나타내고 있다(Lee and Lee, 2023; Al-Khaiat and Fattuhi, 2001).

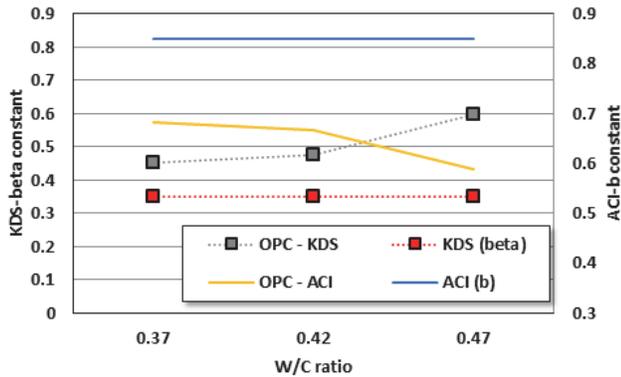
#### 4.2.2 기존식과의 상관성 분석

4.1절에서 분석된 것과 같이, 각 제안식들은 보수적인 값을 제안하고 있으며, 물-시멘트비에 따른 변화를 고려하지 않는다. 본 절에서는 지수함수로 모델링된 KDS 식과 분수함수로 제안된 ACI 식을 실험값과 비교하도록 한다. KDS식에서는 시간의 제곱근식을 유지하여,  $\beta_{sc}$  값의 변화를 비교하였으며, ACI식에서는  $a, b$  상수를 비교하였다. Table 5에서는 각 실험 상수 값의 비교를 나타내었으며, ACI식에 대한 비교를 Fig. 10에 나타내었다.

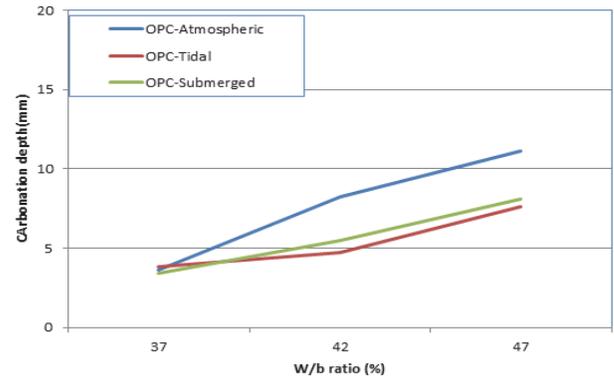
물-시멘트비가 증가할수록 장기강도의 발현이 크게 되어, KDS식에서는 0.452~0.598의 지수가 분석되었고, ACI식에도 실험 상수  $b$ 에서 기준의 0.85보다 모든 배합에서 낮은 값들이 도출되었다. ACI식의 경우 재령에 해당하는 강도값을 대상으로 하였으므로 회귀분석식에 따른 결정계수값이 도출되었다. 그리고 KDS식의 경우  $\sqrt{t}$ 에 대한 선형회귀분석을 사용하였

**Table 6** Carbonation depth and velocity with different conditions

Type	Carbonation depth(mm) (after 7 years)			Carbonation velocity(mm/year <sup>0.5</sup> )		
	Atmospheric	Tidal	Submerged	Atmospheric	Tidal	Submerged
OPC-37	3.6	3.8	3.4	1.36	1.44	1.29
OPC-42	8.2	4.7	5.5	3.10	1.78	2.08
OPC-47	11.1	7.6	8.1	4.20	2.87	3.06



**Fig. 10** Constant variation with mix proportions



**Fig. 11** Carbonation depth with Various exposure conditions

으므로, 180일에서 2555일까지 7개의 강도에 대한 평균 및 표준편차를 구하여 변동성을 나타내었다. 물-시멘트비의 증가에 따른 실험상수의 제안은 합리적인 장기 강도 예측을 위해 필요하다. 또한 모든 배합조건에서 결정계수는 0.98 이상으로 높은 상관성을 나타내었다. 물-시멘트비의 변화에 따른  $\beta_{sc}$  및 b값의 변화를 Fig. 10에 나타내었다.

#### 4.3 배합조건 및 노출환경에 따른 탄산화 특성

2장의 환경조건 분석에도 알 수 있듯이 해수중에도 이산화탄소의 농도가 있으며, 황산염이 있으므로 탄산화는 증가하게 된다. 기존의 문헌에서도 해수중의 탄산화 및 중성화는 보고되고 있는데, Table 6에서는 7년 경과후의 탄산화 깊이 및 속도계수를 나타내었다.

시편의 개수가 제한적이었으나 물-시멘트비의 증가에 따라 높은 탄산화 깊이가 평가되었으며, 최대 탄산화 깊이는 11.1 mm로 평가되었다. 물시멘트비가 높은 경우 (0.47), 비말대에서 높은 탄산화깊이(11.1 mm)가 최대로 평가되었는데, 이는 간만대 및 침지대보다 건조하므로 이산화탄소 확산계수가 크기 때문이다. 또한 해수 중에서도 상당한 탄산화 깊이가 평가되었는데, 이는 해수중의 황산염과 이산화탄소에 따른 중성화가 진행된 것으로 판단된다. Fig. 11에서는 노출환경에 따른 탄산화 깊이를 물-시멘트비를 고려하여 도시하였는데, 전반적으로 비교적 건조한 비말대, 황산염과 이산화탄소의 노출에 따른 침지대, 그리고 간만대 순으로 탄산화 깊이의 증가가 발생하였다.

침지대 및 간만대의 경우, 이산화탄소 확산이 감소하게 되지만, 해수중 황산염에 의해 콘크리트 내부의 에트린자이트가 분해된다. 이로 인해 용출된 황산이온(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)은 농도확산에 의해 다시 내부로 이동하여 비중성화된 콘크리트에서 다시 C<sub>3</sub>A와 반응하게 되며, 그 결과 에트린자이트가 재생성되어 중성화 진행되는 것으로 알려져 있다(Lee and Yoon, 2003).

#### 5. 결론

본 연구에서는 OPC 콘크리트를 대상으로 콘크리트를 대상으로 7년간의 강도 평가를 수행하였으며, 재령 7년에 비말대, 간만대, 침지대에 도출된 시편을 대상으로 강도를 비교하였다. 또한 기존의 강도평가식과의 비교 뿐 아니라, 노출환경에 따른 탄산화 깊이를 평가하였다. 다만 시편의 개수가 매우 제한적이어서 강도 및 탄산화 특성에 대한 통계자료의 구축이 필요하며, 실태조사를 통한 장기 조사 자료와의 비교가 제안된다면 더욱 유용한 연구결과가 될 것으로 판단된다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 7년간의 습윤상태의 압축강도를 평가한 결과 KDS식은 국외의 식(ACI, CEB, JSCE) 보다 값을 크게 평가하고 있었으며, 모든 식들이 실험값에 비하여 보수적인 압축강도를 제안하고 있었다.
- 2) 비말대, 간만대, 침지대에서 7년간 노출된 시편들은 습윤양생된 시편보다 낮은 값을 나타내고 있었다. 물-시멘

트비가 높을 경우 강도 저하가 크게 발생하였는데, OPC 배합의 경우, 물-시멘트비가 37%일 때, 96.9~100.3%, 42% 일 때, 93.8~97.5%, 47% 일 때, 89.7~91.3%의 강도 비가 발생하였다. 또한 KDS 및 ACI 식에 대하여 습윤양생된 실험값을 기준으로 회귀분석한 결과, 제안된 실험상수보다 높은 실험상수들이 도출되었다.

- 3) 3개의 노출환경에 대한 탄산화 거동은 재령 7년차라 최대 11.1 mm의 탄산화 깊이를 나타내었으며, 물-시멘트비의 증가에 따른 뚜렷한 탄산화 증가를 나타내었다. 또한 해수중에서도 황산염 및 이산화탄소에 따른 중성화(탄산화)가 진행되어 물-시멘트비가 높을수록 비말대와 같이 큰 탄산화 깊이가 평가되었다. 전체적인 탄산화 깊이는 비말대, 침지대, 간만대 순으로 탄산화 진행이 발생하였다.

## 감사의 글

본 연구는 정부의 지원으로 한국연구재단 중견연구자지원사업의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다(NRF-2020R1A2C2009462).

## References

1. ACI Committee 209 (2008), Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete (ACI 209.2R-08), Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
2. Al-Khaiat, H., and Fattuhi, N. (2001), Long-term strength development of concrete in arid conditions, *Cement and Concrete Composites*, 23(4-5), 363-373.
3. Broomfield, J. P. (1997), Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair, London, E&FN, 1-15.
4. CEB FIB (2010), Lausanne, Switzerland; International Federation for Structural Concrete (fib), Comite Euro-International du Beton.
5. Chindapasirt, P., Rukzon, S., and Sirivatnanon, V. (2008), Effect of carbon dioxide on chloride penetration and chloride ion diffusion coefficient of blended Portland cement mortar, *Construction and Building Materials*, 22(8), 1701-1707.
6. Escalante, J. I., Gomez, L. Y., Johal, K. K., Mendoza, G., Mancha, H., and Mendez, J. (2001), Reactivity of blast-furnace slag in Portland cement blends hydrated under different conditions, *Cement and Concrete Research*, 31(10), 1403-1409.
7. Ganjian, E., and Pouya, H. S. (2009), The effect of Persian Gulf tidal zone exposure on durability of mixes containing silica fume and blast furnace slag, *Construction and Building Materials*, 23(2), 644-652.
8. Jang, S. Y., Karthick, S., and Kwon, S. J. (2017), Investigation on durability performance in early aged high-performance concrete containing GGBFS and FA, *Advances in Materials Science and Engineering*.
9. JSCE (2010), Standard Specifications for Concrete Structures - 2007 design, Dokyō, Japan: Japan society of Civil Engineers (JSCE).
10. KCI (2022), KDS 14 20 01 General Standards for Concrete Structure Design (Strength Design Method)Sejong, Korea: Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT).
11. Korea Meteorological Administration, <https://data.kma.go.kr/stcs/gr>
12. Kwon, S. J., Song, H. W., and Byun, K. J. (2007), A Study on analysis technique for chloride penetration in cracked concrete under combined deterioration, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 19(3), 359-366.
13. Lee, B. N., and Lee, J. S. (2023), Review of Compressive Strength Development Models by W/C Ratio Involving Concrete Specimens Exposed to a Seaside Environment for 15 Years, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 35(4), 389-395.
14. Lee, C. S., and Yoon, I. S. (2003), Prediction of deterioration process for concrete considering combined deterioration of carbonation and chlorides Ion, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 15(6), 902-912.
15. Mun, J. S., Yang, K. H., and Jeon, Y. S. (2014), Maturity-Based Model for Concrete Compressive Strength with Different Supplementary Cementitious Materials, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 18(6), 82-89.
16. Neithalath, N. (2008), Quantifying the effects of hydration enhancement and dilution in cement pastes containing coarse glass powder, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 6(3), 397-408.
17. Neville, A. M. (2011), Properties of concrete 5th edition, London, England.
18. Saeki, T. (1991), Mechanism of carbonation and prediction of carbonation process of concrete, *Concrete Library International of JSCE*, 17, 23-36.
19. Song, H. W., Kim, H. J., Kwon, S. J., Lee, C. H., Byun, K. J., and Park, C. K. (2005), Prediction of service life in cracked reinforced concrete structures subjected to chloride attack and carbonation, In *Cement Combinations for Durable Concrete: Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK*, 767-775.
20. Song, H. W., and Kwon, S. J. (2007), Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure, *Cement and Concrete Research*, 37(6), 909-915.
21. Thomas, M. D. A., and Matthews, J. D. (2004), Performance of pfa concrete in a marine environment 10-year results, *Cement and Concrete Composites*, 26(1), 5-20.
22. Yang, K. H., Hwang, H. Z., Kim, S. Y., and Song, J. K. (2007), Development of a cementless mortar using hwangtoh binder, *Building and Environment*, 42(10), 3717-3725.
23. Yang, K. H., Mun, J. H., and Yoon, Y. S. (2018), Effects of loading conditions and cold joint on service life against chloride ingress, *Computers and Concrete, An International Journal*, 22(3), 319-326.
24. Yoon, Y. S., and Kwon, S. J. (2019), Evaluation of apparent chloride diffusion coefficient and surface chloride contents of FA concrete exposed splash zone considering crack width, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 23(6), 18-25.

25. Yoon, Y. S., and Kwon, S. J. (2022), Behavior of apparent chloride diffusion coefficient of fly ash concrete under long-term marine exposure, Available at SSRN 4051149.
26. Zhu, X., Zi, G., Cao, Z., and Cheng, X. (2016), Combined effect of carbonation and chloride ingress in concrete, *Construction and Building Materials*, 110, 369-380.

Received : 12/14/2023

Revised : 01/08/2024

Accepted : 01/10/2024

---

**요 지 :** 콘크리트의 압축강도는 다양한 영향인자가 있으며, 노출환경에 따라 변화한다. 동일한 배합을 가진 콘크리트라도 노출환경에 따라 콘크리트 특성은 변화하며, 특히 해수의 영향을 받는 지역은 간만대, 비말대, 해수중과 같이 세가지 영역으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 7년 동안 습윤양생된 OPC 콘크리트를 대상으로 강도 변화를 분석하였으며, 기존의 이론식(KDS, CEB, ACI, JSCE)과의 비교를 수행하였다. 또한 7년동안 비말대, 간만대, 해수중에 장기 폭로된 시편을 대상으로 강도 특성 및 탄산화 특성을 평가하였다. 콘크리트의 배합은 3수준의 물-시멘트비(0.37, 0.42, 0.47)를 가지고 있으며, 환경조사를 수행하여 침지대, 간만대, 비말대 3 수준의 해양환경을 고려하였다. 7년동안 습윤양생된 시편의 경우 기존의 제안식들에 비하여 높은 강도를 가지고 있었으며, 옥외 폭로된 시편(간만대, 비말대, 해수중)의 강도는 습윤양생한 시편의 강도보다 낮게 평가되었다. 또한 물-시멘트비가 증가할수록 뚜렷한 강도저하가 발생하였으며, 해수중에서 가장 낮은 강도가 평가되었다. 기존의 강도 제안식에서는 물-시멘트비에 따른 변화를 고려하지 못하므로 기존 이론식에 적용할 수 있는 실험상수를 회귀분석을 통하여 도출하였다. 탄산화 평가결과, 물-시멘트비의 증가에 따라 높은 탄산화 깊이가 평가되었으며, 비말대, 침지대, 간만대 순서로 탄산화 진행이 발생하였는데, 침지대 및 간만대에서도 황산염 및 용존 이산화탄소 영향으로 상당한 중성화 깊이가 발생하였다.

**핵심용어 :** 압축강도, 양생, 비말대, 간만대, 탄산화, 해양환경

---