



해양환경 폭로에 의한 슬래그 치환 콘크리트 및 슬래그 콘크리트의 염화물 이온 침투 저항성

이보경¹⁾ · 김규용^{1)*} · 김경태¹⁾ · 신경수¹⁾ · 남정수¹⁾

¹⁾충남대학교 건축공학과

Chloride Ion Penetration Resistance of Slag-replaced Concrete and Cementless Slag Concrete by Marine Environmental Exposure

Bo-Kyeong Lee,¹⁾ Gyu-Yong Kim,^{1)*} Gyeong-Tae Kim,¹⁾ Kyoung-Su Shin,¹⁾ and Jeong-Soo Nam¹⁾

¹⁾Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, DaeJeon 34134, Rep. of Korea

ABSTRACT In this research, it was examined chloride ion penetration resistance of slag-replaced concrete and cementless slag concrete considering marine environmental exposure conditions of splash zone, tidal zone and immersion zone. In the design strength of grade 24 MPa, the specimens were tested to determine their compressive strength, scanning electron microscopy images and chloride migration coefficient. Further, chloride ion penetration depth and carbonation depth of specimens exposed to marine environment were measured. Experimental results confirm that chloride migration coefficient of specimens tended to decrease with increasing the replacement ratio of ground granulated blast-furnace slag in accelerated laboratory test. In addition, the specimens exposed to the tidal zone were found to be the greatest chloride ion penetration depth compared to splash zone and immersion zone. On the other hand, the chloride ion penetration depth of the specimens exposed to splash zone tended to increase with increasing the replacement ratio of ground granulated blast-furnace slag in contrast with the results for the tidal zone and immersion zone.

Keywords : marine environment, slag-replaced concrete, cementless slag concrete, chloride ion penetration, bound chloride

1. 서 론

해양환경에 노출된 철근 콘크리트 구조물은 내구성 설계, 내구수명 예측 평가, 그에 따른 적절한 열화를 방지하기 위한 대책을 수립하고 적절한 유지관리를 시행하는 것이 구조물의 목표 내구수명을 확보하는데 필수적인 요소라 할 수 있다. 이를 위해서는 성능저하 요인을 분석하고 각 요인들에 의한 장기적인 성능저하가 어떻게 진행될 것인가를 사전에 예측하는 것이 매우 중요하다.

콘크리트의 내구성 향상을 위해서는 내구성능 평가 및 내구수명 예측 기법의 확립, 내구성 확보 방안 수립이 매우 중요하며 이를 위해서는 해양환경 하에 있는 콘크리트 구조물의 성능저하 현상을 조사·분석하여 얻어지는 지식과 경험을 바탕으로 현장실험 또는 축진실험 결과와 더불어 실제 해양환경 하에서의 평가를 통한 검증이 필요하다.

해양환경에 노출된 콘크리트 구조물은 해수에 존재하는 염화물이 콘크리트에 접촉하여 염해에 의한 열화가 발생한다. 일반적으로 해양환경은 해수의 접촉정도에 따라 비말대(Splash zone), 간만대(Tidal zone), 침지대(Immersion zone)로 구분할 수 있으며, 콘크리트의 염화물 이온 침투 저항성을 평가하기 위해서는 각각의 해양환경 폭로 조건을 고려해야 할 필요가 있다.

한편, 해양환경에 노출된 콘크리트 구조물에 고로슬래그 미분말을 혼화재료로 사용할 경우 콘크리트에 침투하는 염화물 이온을 고정화시키기 때문에 염화물 이온 침투 저항성이 향상된다고 보고되고 있다.¹⁻⁴⁾

콘크리트 표준시방서에서는 제빙 화학제에 노출된 콘크리트 최대 혼화재 비율에 대해서 고로슬래그 미분말의 경우 50%까지만 치환해 사용하도록 규정하고 있으며, 실무에서는 제빙 화학제에 노출된 경우와 해양환경에 노출된 경우를 동일시하여 해양 콘크리트 구조물에서도 고로슬래그 미분말을 50%까지만 보통포틀랜드시멘트 대신 치환하도록 배합설계가 되는 경우가 많다. 그러나 보통포틀랜드시멘트 대신 고로슬래그 미분말을 60~80%까지 치환할 경우 염화물 이온 침투 저항성 향상의 효과를 극대화시킬 수 있다고 보

*Corresponding author E-mail : gyuyongkim@cnu.ac.kr

Received February 10, 2017, Revised March 23, 2017,

Accepted April 17, 2017

©2017 by Korea Concrete Institute

고³⁾되고 있음에도 불구하고 고로슬래그 미분말을 다량 치환한 콘크리트나 보통포틀랜드시멘트를 사용하지 않고 고로슬래그 미분말만을 사용한 콘크리트의 경우 해양환경에 폭로한 조건에서 염화물 이온 침투 저항성을 검토한 사례는 많지 않다.

따라서 본 연구에서는 설계기준강도 24 MPa의 고로슬래그 미분말을 40, 70%치환한 슬래그 치환 콘크리트(slag-replaced concrete)와 보통포틀랜드시멘트를 사용하지 않고 고로슬래그 미분말만을 사용한 슬래그 콘크리트(Cementless slag concrete)를 제조하여 비말대, 간만대, 침지대의 조건에서 해양환경 폭로 실험을 수행한 후 염화물 이온 침투 저항성을 비교·검토하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 사용재료

Table 1에 본 실험에서 사용한 재료의 화학·물리적 특성을 나타내었다. 보통포틀랜드시멘트, 고로슬래그 미분말, 탈황슬래그, 무수석고의 밀도는 각각 3.15, 2.91, 2.83, 2.90 g/cm³이고, 비표면적은 각각 3,500, 4,500, 4,000, 3,550 cm²/g이다. 또한 Table 2에 본 실험에서 사용한 골재를 나타내었으며, 밀도 2.56 g/cm³, 최대치수 5 mm, 흡수율 1.01%의 잔골재, 밀도 2.67 g/cm³, 최대치수 25 mm, 흡수율 1.39%의 굵은골재를 사용하였다.

한편, 탈황슬래그는 제철공정에서 발생하는 산업부산물로써, 용선에 생석회 투입 후 황과 생성회의 반응에 의해 얻어진 것을 파쇄, 자력선별, 분쇄의 과정을 거쳐 얻을 수 있

Table 1 Chemical compositions and physical properties of the used materials

Materials ¹⁾	Chemical compositions (%)									Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI		
C	20.70	6.20	3.10	62.20	2.80	0.10	0.84	2.10	1.96	3.12	3,500
GGBS	32.75	15.61	0.50	43.51	4.41	0.25	0.49	0.04	2.44	2.91	4,500
DS	15.35	1.21	2.40	69.71	1.52	0.10	-	4.20	5.51	2.83	4,000
AG	0.73	0.17	0.16	41.57	-	0.02	0.03	55.50	1.82	2.90	3,550

1) C: ordinary portland cement, GGBS: ground granulated blast-furnace slag, DS: desulfurization slag, AG: anhydrous gypsum

Table 2 Physical properties of aggregate

Materials	Physical properties
Fine aggregate	maximum size: 5 mm, Density: 2.56 g/cm ³ , Absorption ratio: 1.01%
Coarse aggregate	maximum size: 25 mm, Density: 2.67 g/cm ³ , Absorption ratio: 1.39%

Table 3 Experimental plan

Experimental variables	Experimental level	Evaluation items
Type of concrete with replacement ratio of GGBS	<ul style="list-style-type: none"> Cement concrete (CC100) Slag-replaced concrete (SC40, SC70)¹⁾ Cementless slag concrete (SC100) 	<ul style="list-style-type: none"> Compressive strength Scanning electron microscopy images Accelerated laboratory test <ul style="list-style-type: none"> - Chloride migration coefficient Marine environmental exposure test <ul style="list-style-type: none"> - Chloride ion penetration depth - Carbonation depth
Marine environmental exposure conditions	<ul style="list-style-type: none"> Splash zone Tidal zone Immersion zone 	

1) SC40: Slag-replaced concrete with replacement ratio of GGBS 40%, SC70: Slag-replaced concrete with replacement ratio of GGBS 70%

Table 4 Concrete composition

Specimens	Rep. ratio of GGBS (%)	f_{ck} (MPa)	Slump (mm)	Air (%)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)						
							W	C	GGBS	DS	AG	S	G
CC100	-	24	180 ± 30	4.0 ± 1.0	60	49	202	337	-	-	-	816	880
SC40	40				60	49	202	202	128	7	-	812	874
SC70	70				53	49	179	101	225	11	-	838	902
SC100	100				45	49	180	-	312	60	28	804	866

다.^{6,8)} 탈황슬래그는 수산화칼슘, 황산칼슘 등의 성분으로 구성되어 있으며 무수석고와 함께 사용할 경우 고로슬래그 미분말의 수화반응에 필요한 알칼리 및 황산염 성분이 자극제 역할을 하게 된다. 수화반응이 진행되면 수산화칼슘과 황산칼슘은 칼슘이온, 황산이온, 수산화이온으로 해리되며 이러한 이온이 고로슬래그 미분말의 부동태 피막을 파괴한 후 고로슬래그 미분말 입자와 반응하여 C-S-H 및 C-A-H 수화물의 생성을 촉진한다. 한편, 황산이온은 에트링가이트의 생성에 영향을 미치며 장기강도 발현에 기여하게 된다.^{8,9)} 따라서, 본 연구에서도 슬래그 치환 콘크리트와 슬래그 콘크리트의 압축강도를 향상시키기 위해 탈황슬래그를 자극제로 사용하였다.⁸⁾

2.2 실험계획

Table 3에 실험계획을 나타내었다. 고로슬래그 미분말의 치환율은 0, 40, 70, 100%로 설정하여 슬래그 치환 콘크리트와 슬래그 콘크리트를 제조하였다. 또한, 해양환경 폭로 조건인 경우 비레염분에 의한 재료의 열화상태 조건의 비말대, 조수간만에 따른 바닷물의 건습반복 환경에서 재료의 열화상태 조건의 간만대, 바다 속에 항상 잠겨 있는 환경에서 재료의 열화상태 조건의 침지대로 구분하여 해양환경 폭로 실험을 진행하였다. 평가항목으로써 재령별 압축강도와 주사전자현미경에 의한 미세구조의 관찰, 실내 촉진실험에 의한 비정상상태의 염화물 이동계수를 평가하였으며, 해양환경 폭로 실험에 의한 콘크리트의 염화물 이온 침투 깊이를 측정하고, 탄산화가 염화물 이온 침투에 미치는 영향을 검토하기

위해 탄산화 깊이를 측정하였다.

Table 4에 콘크리트 배합을 나타내었다. 콘크리트의 내구성은 압축강도와 밀접한 관계가 있기 때문에 슬래그 치환 콘크리트 및 슬래그 콘크리트의 설계기준강도를 24 MPa로 설정하고 물결합재비를 조절하여, 유사한 수준의 강도 영역에서 염화물 이온 침투 저항성을 평가하였다. 목표슬럼프는 180 ± 30 mm, 목표공기량은 $4.0 \pm 1.0\%$ 로 동일하게 설정하여 고성능감수제와 AE제를 활용하여 목표치를 만족시켰다. 설계기준강도 24 MPa의 콘크리트를 제조하기 위해 탈황슬래그와 무수석고를 자극제로 함께 활용할 경우 설계기준강도 이상의 강도가 발현되기 때문에 고로슬래그 미분말을 40, 70%치환한 슬래그 치환 콘크리트는 탈황슬래그를 자극제로 활용하였으며, 보통포틀랜드시멘트를 사용하지 않고 고로슬래그 미분말만을 사용한 슬래그 콘크리트는 탈황슬래그와 무수석고를 자극제로 활용하여 콘크리트를 제조하였다.^{8,10)}

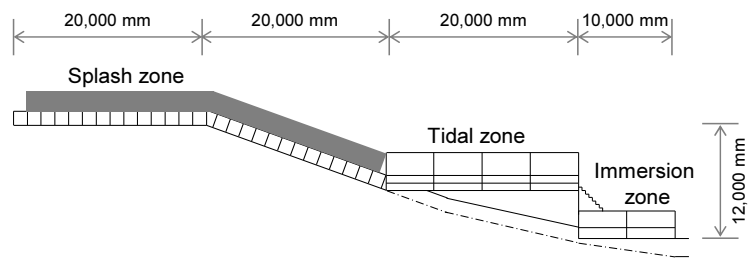
2.3 해양환경 폭로 실험의 개요

해양환경 폭로 실험은 2012년 6월 시험체를 제작하여 표준수중양생한 후 2012년 10월부터 폭로 실험을 진행하였다. 또한, Fig. 1에 나타난 바와 같이 한국건설생활환경시험연구원이 경기도 안산시 시화방조제 배수갑문 도류제 상부에 조성하여 운영하고 있는 해양환경 폭로 실험장에서 해양환경 폭로 실험을 실시했다.

해양환경 폭로 실험을 위해 제작한 시험체는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 설치하였으며, 간만대와 침지대에 폭로한 시



(a) Marine environmental exposure test site



(b) Marine environmental exposure conditions

Fig. 1 Marine environmental exposure test site and conditions



(a) Splash zone



(b) Tidal zone



(c) Immersion zone

Fig. 2 Setup of specimens for marine environmental exposure test

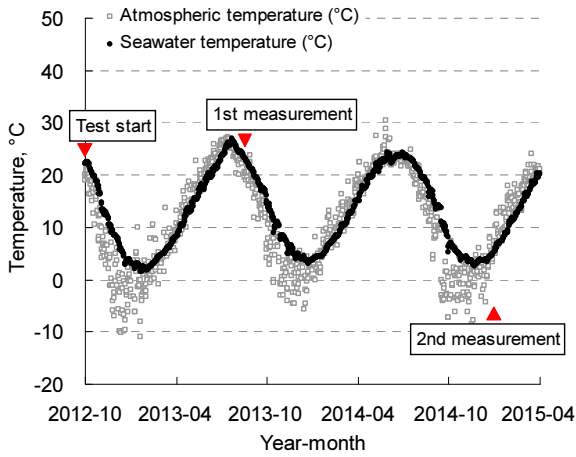


Fig. 3 Weather conditions of marine environmental exposure test

험체는 해수에 의해 시험체가 유실되지 않도록 거치대에 고정시켜 실험을 진행하였다.

해양환경 폭로 실험시의 기상조건은 Fig. 3에 나타내었다. 대기와 해수의 최대온도는 큰 차이가 없으나 최저온도는 약 10°C 이상의 차이를 보였다. 연평균온도 -5~29°C, 습도 61~82%, 해수온도 1.1~15.4°C, 비레염분 27~80 psu (실용염분단위, practical salinity unit) 정도의 해양인자를 나타내었다.¹¹⁾

2.4 실험방법

콘크리트의 압축강도 시험은 KS F 2405 「콘크리트의 압축강도 시험방법」에 준하여 실시하였다. 압축강도 시험은 $\varnothing 100 \times 200$ mm의 원주형 시험체를 제작하여 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 에서 표준수중양생을 실시한 후 재령 3, 7, 28, 56, 91, 365, 910일에 만능재료시험기(Universal Testing Machine)를 이용하여 측정하였다. 또한, 시험체의 미세구조 분석은 주사전자현미경(Scanning electron microscopy, SEM)을 활용하여 샘플을 백금으로 코팅한 후 가속전압 15 kV에서 관찰하였다. 실내 축진실험에 의한 비정상상태의 염화물 이동계수는 NT BUILD 492에 준하여 재령 56, 91, 365일에 측정하였다. 치수 $\varnothing 100 \times 200$ mm의 원주형 시험체의 중앙부를 50 mm 두께로 절단하여, 음극부분에는 10% 염화나트륨(NaCl) 용액을 넣고, 양극부분에는 0.3N 수산화나트륨(NaOH) 용액을 넣어 염화물 이온을 침투 시킨 후, 시험체를 절단하고 0.1 N 질산은(AgNO_3)을 분무하여 변색된 부위까지 염화물 이온 침투 깊이를 측정하여 비정상상태의 염화물 이동계수를 도출하였다.

해양환경 폭로 실험에 의한 염화물 이온 침투 깊이 측정을 위한 시험체는 치수 $100 \times 100 \times 100$ mm의 각형으로 제작하였다. 또한 폭로면을 제외한 5개면에 에폭시를 코팅하여 염화물 이온의 일방향 침투를 유도한 후, 폭로 재령 365, 910일에 시험체를 절단하고 0.1 N 질산은(AgNO_3)을 분무하여 변색된 부위까지 염화물 이온 침투 깊이를 측정하였다. 해양환경 폭로 실험 후 탄산화 깊이 측정을 위한 시험체는 $100 \times 100 \times 100$ mm의 각형으로 제작하였으며 폭로 재령 910일에 폐놀

프탈레인 1%의 에탄올 용액을 분무하여 변색된 부분을 측정하였다. 또한, 해양환경 폭로 조건에 따른 콘크리트의 건전도를 평가하기 위해 치수 $\varnothing 100 \times 200$ mm의 원주형 시험체 비말대, 간판대, 침지대에 각각 폭로시켜 폭로 재령 910일에서 시험체의 모습을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축강도 및 미세구조

Fig. 4는 슬래그 치환 콘크리트 및 슬래그 콘크리트의 압축강도 측정 결과를 나타내었다. CC100, SC40, SC70, SC100 시험체의 재령 28일 압축강도는 각각 27.3, 26.0, 24.0, 21.2 MPa로 측정되어 SC100 시험체를 제외하고 24 MPa의 설계기준

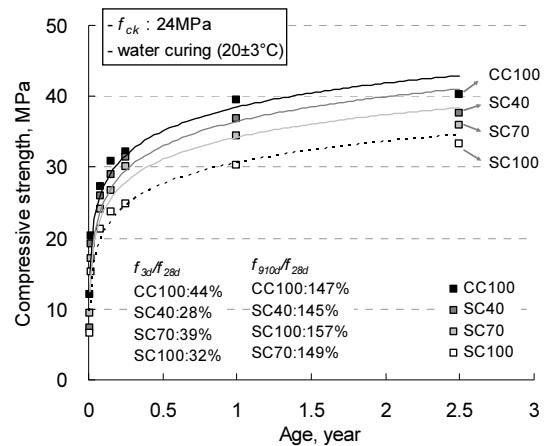
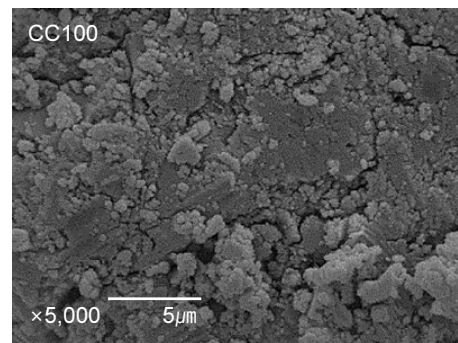
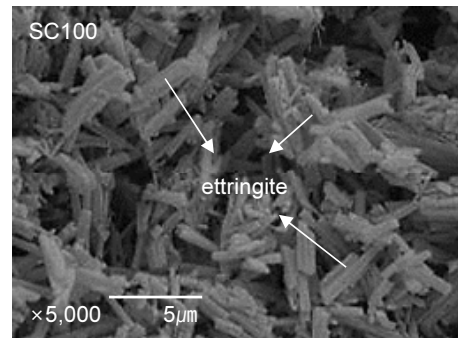


Fig. 4 Compressive strength



(a) CC100



(b) SC100

Fig. 5 SEM images (910 d)

강도를 만족하는 것으로 나타났다. 또한, 각 시험체의 재령 28일 압축강도를 기준으로 초기 재령에서의 압축강도 발현율은 CC100에 비해 SC40, SC70, SC100이 감소하는 경향을 보였다. 그러나 각 시험체의 재령 28일 압축강도를 기준으로 재령 910일에서의 압축강도 발현율의 경우 CC100, SC40, SC70, SC100 각각 147, 145, 157, 149%로, 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가했음에도 불구하고 장기 재령에서도 지속적으로 압축강도가 발현되는 것을 확인했다. 특히, 보통포틀랜드시멘트를 사용하지 않고 고로슬래그 미분말만을 사용한 슬래그 콘크리트의 경우 탈황슬래그와 무수석고의 혼입에 의해 장기재령에서도 강도발현이 유효한 것을 확인하였다.

한편, 재령 910일까지 표준수중양생한 CC100, SC100 시험체의 주사전자현미경 관찰 결과를 나타낸 Fig. 5에 의하면, 슬래그 콘크리트는 보통포틀랜드시멘트 콘크리트와는 다르게 장기 재령에서 굵은 침상형의 에트링가이트가 지속적으로 관찰되고, 광범위하게 분포하고 있기 때문에 보통포틀랜드시멘트 콘크리트에 비해 미세구조가 치밀하지 않을 것으로 판단된다.

3.2 비정상상태의 염화물 이동계수

Fig. 6에 표준수중양생한 시험체의 비정상상태의 염화물 이동계수 측정 결과를 나타내었다. CC100에 비해 SC40, SC70, SC100의 비정상상태의 염화물 이동계수는 현저하게 저하되는 경향을 확인하였으며, 특히 SC100의 비정상상태의 염화물 이동계수는 CC100의 약 3%수준으로 보통포틀랜드시멘트를 사용하지 않고 고로슬래그 미분말만을 사용한 슬래그 콘크리트의 염화물 이온 침투 억제효과를 명확하게 확인할 수 있었다.

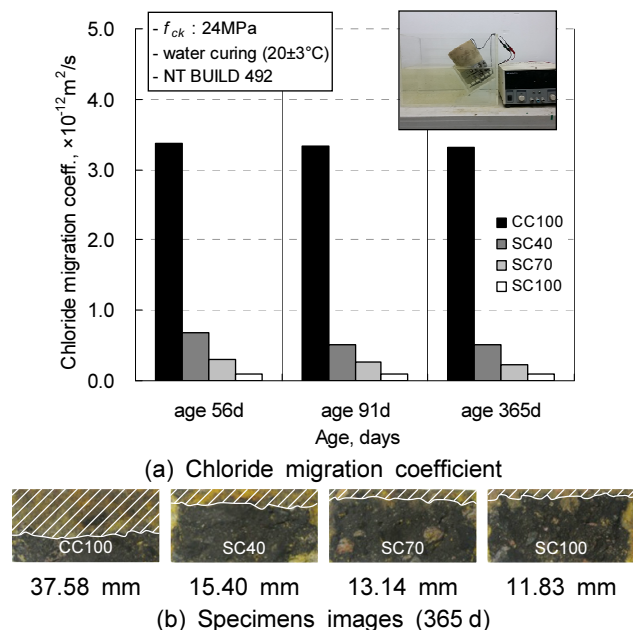


Fig. 6 Chloride migration coefficient and specimens images (365 d)

일반적으로 콘크리트에 존재하는 염화물은 염화물 이온과 고정염화물(bound chloride)로 구분된다. 기존의 연구에 의하면 고로슬래그 미분말을 65~70%치환한 조건에서 고정염화물의 생성에 의한 염화물 고정 능력이 가장 큰 것으로 보고되고 있다.¹²⁻¹⁴⁾

한편 고정염화물은 프리델염(C₃A · CaCl₂ · 10H₂O)과 같은 고체 상태 염화물(solid-phase chloride)과 미세공극 벽이나 수화생성물 층간에 흡착된 염화물(adsorbed chloride)로 구분된다.¹⁴⁻¹⁶⁾ Tetsuya Ishida 등의 연구⁵⁾에서는 고로슬래그 미분말을 40%치환할 경우 프리델염과 같은 고체 상태 염화물의 생성량이 많게 되고, 고로슬래그 미분말의 치환율을 80%치환할 경우 미세공극 벽이나 수화생성물 층간에 흡착된 염화물의 생성량이 증가하는 결과를 제시하고 있다. 따라서 이러한 고정염화물의 생성에 의해 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 염화물 이온 침투 저항성이 향상되는 것으로 판단된다. 그러나 보통포틀랜드시멘트를 사용하지 않은 슬래그 콘크리트의 고정염화물의 생성 메커니즘에 대해서는 추가적인 검토가 필요할 것으로 사료된다.

3.3 해양환경 폭로에 의한 염화물 이온 침투 깊이

Figs. 7과 8은 해양환경에 폭로된 시험체의 염화물 이온 침투 깊이 측정결과를 나타낸 것이다. 해양환경에 910일간 폭로된 시험체를 관찰한 결과, 비말대에 폭로된 시험체는 간만대와, 침지대에 폭로된 시험체에 비해 비교적 건전한 상태를 유지하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 간만대와 침지대에 폭로된 시험체는 해수의 침식에 의해 표면 스케일링이 발생하였으며, 어패류가 부착되어 있는 특징을 보였다.

염화물 이온 침투 깊이는 비말대, 침지대, 간만대의 순서로 증가하는 경향을 보였다. 침지대의 경우 항상 해수에 의해 잠겨있기 때문에 비말대나 간만대에 비해 염화물 이온의 침투가 촉진될 가능성이 높을 것으로 생각되지만, 간만대에 폭로된 시험체의 염화물 이온 침투 깊이가 가장 큰 원인은 조수간만에 의한 해수의 건습작용이 반복되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한 비말대는 간만대와 침지대에 비해 해수의 접촉이 크지 않으며, 비래염분의 영향을 받는 부분이기 때문에 다른 조건에 비해 염화물 이온의 침투 깊이가 작은 것으로 판단된다. 한편, 표준수중양생한 후 NT BUILD 492의 방법으로 실내 촉진실험을 진행한 시험체는 보통포틀랜드시멘트 콘크리트에 비해 고로슬래그 미분말의 치환 유무에 따라 슬래그 치환 콘크리트 및 슬래그 콘크리트의 염화물 이온 침투 깊이가 뚜렷한 차이를 보인 반면, 간만대 및 침지대의 해양환경에 폭로 실험한 시험체는 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 콘크리트의 염화물 이온 침투 깊이가 단계적으로 저감되는 경향을 보였다. 이러한 경향은 해양환경에 노출된 콘크리트는 염화물 이온의 침투뿐만 아니라 외부 환경에 의한 복합적인 열화가 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

간만대와 침지대에서는 고로슬래그 미분말의 치환율이

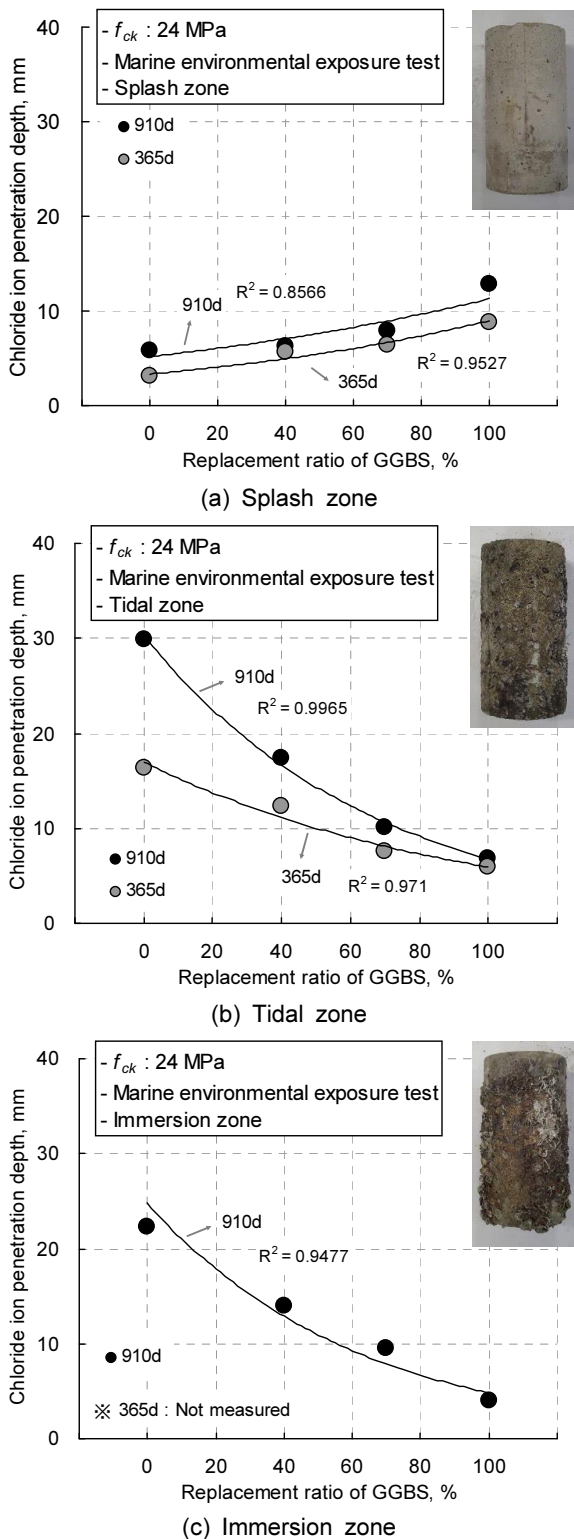


Fig. 7 Chloride ion penetration depth exposed to marine environment and specimens image (910 d)

증가할수록 해수작용에 의한 염화물 이온 침투 깊이가 저하하는 경향을 보이지만, 비말대에서는 다른 폭로 조건과는 달리 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 염화물 이온 침투 깊이는 증가하는 경향을 보였다. 기존의 연구에 의하면, 프리텔염의 안정성은 pH에 의존하기 때문에 탄산화에 의해 pH가 감소할 경우 고정염화물인 프리텔염으로부터 염

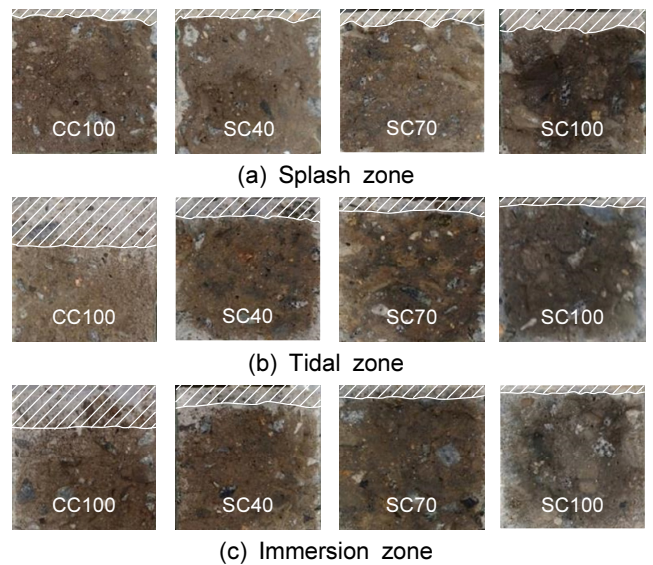


Fig. 8 Chloride ion penetration depth measurement results (910 d)

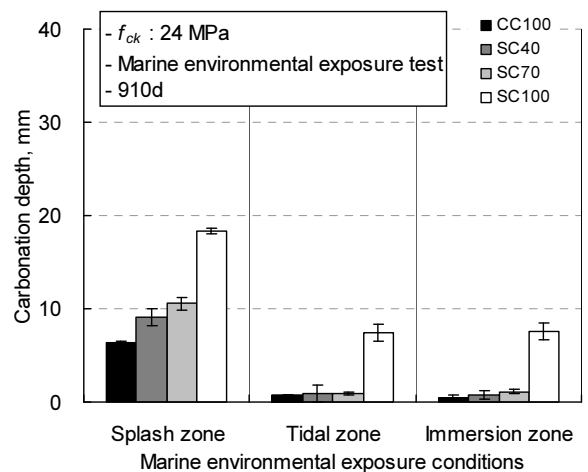


Fig. 9 Carbonation depth exposed to marine environment (910 d)

화물 이온이 해리된다고 보고하고 있으며, 또한, 수화생성물 층간에 흡착된 고정염화물에서도 염화물 이온도 해리되어 콘크리트에 재 침투하는 것으로 보고되고 있다.^{17,18)} 고정염화물로부터 해리된 염화물 이온은 탄산화 영역과 비탄산화 영역사이에서 염화물 이온의 농도 구배가 커지기 때문에 비탄산화 영역인 콘크리트 내부로 염화물 이온의 이동이 촉진되는 것으로 확인된다.¹⁹⁾

본 실험에서 해양환경에 폭로한 시험체의 탄산화 깊이를 측정된 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 비말대에 폭로한 시험체는 항상 대기 중에 노출되어 있는 반면, 간만대에 폭로한 시험체는 조수간만에 의해 대기 중에 노출되어 있는 기간이 비말대에 비해 짧으며, 침지대는 항상 해수에 잠겨 있기 때문에 대기 중에 노출될 가능성이 상대적으로 적다. 이러한 이유로 시험체의 탄산화 깊이는 간만대와 침지대에 비해 비말대에서 큰 것을 확인할 수 있었다.

전술한 바와 같이 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할

수록 염화물 이온의 침투에 의해 생성된 고정염화물이 증가하게 되어 염화물 이온 침투 저항성이 향상되지만, 비말대에서와 같이 탄산화에 의한 열화가 크게 발생할 경우 프리텔염과 수화생성물 층간에 흡착된 고정염화물에서 염화물 이온이 해리되는 현상이 발생하기 때문에, 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 염화물 이온 침투 깊이가 증가하는 것으로 판단된다.

한편, 슬래그 콘크리트의 경우 다른 시험체에 비해 간만대와 침지대에서도 탄산화 깊이가 큰 것으로 나타났다. 일반적으로 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 pH는 낮아지게 되며 재령이 지남에 따른 탄산화 속도도 증가하게 된다. 이러한 이유로 슬래그 콘크리트는 다른 시험체에 비해 비교적 pH가 낮은 상태에서 해양환경 폭로 실험이 진행된 것으로 판단되며, 이 때문에 간만대와 침지대에서 탄산화 깊이가 비교적 큰 값으로 측정된 것으로 보인다. 즉, 비말대 조건에서는 해양환경 폭로에 의한 탄산화 작용이 아닌 고로슬래그 미분말의 치환율 증가에 따른 pH 감소 효과 때문에 간만대와 침지대 조건에서 탄산화 깊이가 증가한 것으로 판단되며, 비말대에서와 같이 탄산화 작용에 의한 고정염화물의 해리 현상이 발생할 가능성이 크지 않을 것으로 사료된다.

다만, 고로슬래그 미분말의 치환율에 따른 슬래그 치환 콘크리트와 슬래그 콘크리트에 있어서 프리텔염과 같은 고체 상태의 고정염화물과 미세공극 벽이나 수화생성물 층간에 흡착된 고정염화물의 생성량을 비교함으로써 고정염화물의 생성 분포를 추가적으로 검토해야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 비말대, 간만대, 침지대의 해양환경 폭로에 의한 슬래그 치환 콘크리트 및 슬래그 콘크리트의 염화물 이온 침투 저항성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 슬래그 치환 콘크리트 및 슬래그 콘크리트의 염화물 이온 침투 깊이는 실내 촉진실험에서는 보통포틀랜드 시멘트 콘크리트의 약 31~45%수준으로 고로슬래그 미분말의 치환유무에 따라 뚜렷한 차이를 보인 반면, 해양환경 폭로 실험에서는 비말대를 제외하고 간만대와 침지대에서 보통포틀랜드시멘트 콘크리트의 18~76% 수준으로 염화물 이온 침투 깊이가 단계적으로 저감되는 결과를 확인할 수 있었다.
- 2) 비말대에서는 간만대, 침지대에서 다르게 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 염화물 이온 침투 깊이가 증가하는 경향을 보였다. 이러한 현상은 고로슬래그 치환율이 증가할수록 고정염화물의 발생량이 증가하고, 간만대와 침지대에 비해 비말대에서 탄산화가 촉진되어 고정염화물로부터 염화물 이온이 해리되는 기존의 연구결과로 설명할 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 간만대와 침지대의 경우 해수작용에 의해 높은 함수상태가 지속되기 때문에 탄산화가 진행되지 않은 상태로 상정할 경우 염화물 이온 침투 억제 효과는 고로슬래

그 미분말의 치환율과 상관성이 높으며, 특히, 슬래그 콘크리트가 슬래그 치환 콘크리트보다 해수작용에 의한 염화물 이온 침투 저항성에 큰 효과가 있음을 확인하였다.

- 4) 슬래그 콘크리트는 비말대뿐만 아니라 간만대와 침지대에서도 슬래그 치환 콘크리트에 비해 탄산화 깊이가 비교적 큰 것으로 나타났다. 간만대와 침지대의 경우 해수작용에 의해 콘크리트의 함수율이 높거나, 포수 상태이기 때문에 비말대에서와 같이 탄산화가 진행되기 어려운 조건이지만, 탄산화 깊이가 비교적 큰 원인은 고로슬래그 미분말의 치환율 증가에 따른 pH 감소 효과에 의한 것으로 사료된다. 따라서 간만대와 침지대 조건에서 슬래그 콘크리트는 비말대 조건에서 발생하는 탄산화에 의한 고정염화물의 해리 가능성은 높지 않을 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2015-R1A2A2A01007705).

References

1. Kouloumbi, N., Batis, G., and Malami, Ch., "The Anticorrosive Effect of Fly Ash, Slag and a Greek Pozzolan in Reinforced Concrete", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 16, No. 4, 1994, pp. 253-260.
2. Dhir, R. K., Jones, M. R., and McCarthy, M. J., "PFA Concrete: Chloride-induced Reinforcement Corrosion", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 46, No. 169, 1994, pp. 269-277.
3. Glass, G. K., Hassanein, N. M., and Buenfeld, N. R., "Neural Network Modelling of Chloride Binding", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 49, No. 181, 1997, pp. 323-335.
4. Geiseler, J., Kollo, H., and Lang, E., "Influence of Blast Furnace Cements on Durability of Concrete Structures", *ACI Materials Journal*, Vol. 92, No. 3, 1995, pp. 252-257.
5. Ishida, T., Miyahara, S., and Maruya, T., "Chloride Binding Capacity of Mortars Made with Various Portland Cement and Mineral Admixture", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 6, No. 2, 2008, pp. 287-301.
6. Kuo, W. T., Wang, H. Y., and Shu, C. Y., "Engineering Properties of Cementless Concrete Produced from GGBFS and Recycled Desulfurization Slag", *Construction and Building Materials*, Vol. 63, 2014, pp. 189-196.
7. Kuo, W. T., & Hou, T. C., "Engineering Properties of Alkali-activated Binders by Use of Desulfurization Slag and GGBFS", *Construction and Building Materials*, Vol. 66, 2014, pp. 229-234.
8. Lee, B., Kim, G., Nam, J., Cho, B., Hama, Y., and Kim, R.,

- “Compressive Strength, Resistance to Chloride-ion Penetration and Freezing/thawing of Slag-replaced Concrete and Cement-less Slag Concrete Containing Desulfurization Slag Activator”, *Construction and Building Materials*, Vol. 128, 2016, pp. 341-348.
9. Lee, B. K., Kim, G. Y., Koo, K. M., and Shin, K. S., “Properties of Compressive Strength of Mortar Based on High-activated Blast Furnace Slag using the Slag by-product as an Activator”, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol. 14, No. 1, 2014, pp. 37-44.
 10. Kim, R. H., Kim, G. Y., Lee, B. K., Shin, K. S., and Song, G. Y., “Effects of Micropores on the Freezing-Thawing Resistance of High Volume Slag Concrete”, *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, Vol. 19, No. 4, 2015, pp. 67-74.
 11. Jo, Y. J., Choi, B. W., Choi, J. S., and Jung, Y. W., “A Study on Durability of Concrete According to Mix Condition by Marine Environment Exposure Experiment”, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 14, No. 9, 2013, pp. 4542-4551.
 12. Arya, C., and Xu, Y., “Effect of Cement Type on Chloride Binding and Corrosion of Steel in Concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 4, 1995, pp. 893-902.
 13. Arya, C., and Newman. J. B., “An Assessment of Four Methods of Determining the Free Chloride Content of Concrete”, *Materials and Structures*, Vol. 23, No. 4, 1990, pp. 319-330.
 14. Dhir, R. K., El-Mohr, M. A. K., and Dyer, T. D., “Chloride Binding in GGBS Concrete”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 12, 1996, pp. 1767-1773.
 15. Maruya, T., Tangtermsirikul, S., and Matsuoka, Y., “Modeling of Movement of Chloride Ions in Concrete Surface Layer”, *Journal of Materials, Concrete Structures and Pavement*, Vol. 38, No. 585, 1998, pp. 79-95.
 16. Song, H. W., Kwon, S. J., Lee, S. W., and Byun, K. J., “A Study on Resistance of Chloride Ion Penetration in Ground Granulated Blast-Furnace Slag Concrete”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 15, No. 3, 2003, pp. 400-408.
 17. Maruya, T., Matsuoka, Y., and Tangtermsirikul, S., “Modeling of Chloride Ion Movement at the Surface Layer of Hardened Concrete”, *Proceedings-Japan Society of Civil Engineers, Doboku Gakkai Ronbunshu*, Vol. 1998, No. 585, 1998, pp. 79-95.
 18. Suryavanshi, A. K., and Swamy, R. N., “Stability of Friedel’s Salt in Carbonated Concrete Structural Elements”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 5, 1996, pp. 729-741.
 19. Oh, B. H., Lee, S. K., Lee, M. K., and Jung, S. H., “Influence of Carbanation on the Chloride Diffusion in Concrete”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 15, No. 6, 2003, pp. 829-839.

요 약 본 연구에서는 비말대, 간만대, 침지대의 해양환경 폭로에 의한 슬래그 치환 콘크리트와 슬래그 콘크리트의 염화물 이온 침투 저항성을 검토하였다. 설계기준강도 24 MPa의 슬래그 치환 콘크리트의 슬래그 콘크리트를 제조하여, 압축강도, 주사 전자현미경에 의한 미세구조의 관찰, 실내 축진실험을 통한 비정상상태의 염화물 이동계수, 해양환경 폭로 조건에 따른 염화물 이온 침투 깊이, 탄산화 깊이를 평가하였다. 실험결과, 실내 축진실험과는 다르게 간만대, 침지대에 폭로한 시험체의 염화물 이온 침투 깊이가 단계적으로 감소되는 것을 확인하였다. 또한, 간만대에 폭로한 시험체가 조수간만에 의한 해수의 건습작용에 의해 염화물 이온 침투 깊이가 가장 큰 것으로 나타났다. 한편, 비말대에서는 간만대와 침지대와는 다르게 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 염화물 이온 침투 깊이가 증가하는 경향을 보였다.

핵심용어 : 해양환경, 슬래그 치환 콘크리트, 슬래그 콘크리트, 염화물 이온 침투, 고정염화물