

해양환경폭로실험을 통한 배합조건별 콘크리트의 내구성에 관한 연구

조영진^{1*}, 최병욱¹, 최재석¹, 정용욱²

¹한국건설생활환경시험연구원, ²계명대학교 첨단건설재료시험센터

A Study on Durability of Concrete According to Mix Condition by Marine Environment Exposure Experiment

Young-Jin Jo^{1*}, Byung-Wook Choi¹, Jae-Seok Choi¹ and Yong-Wook Jung²

¹Korea Conformity Laboratories

²Advanced Construction Materials Testing Center, Keimyung University

요약 최근 해양환경에 노출된 콘크리트의 내구성에 관한 연구와 산업부산물을 재활용 하면서 해양생태계를 보호할 수 있는 친환경 콘크리트 재료에 관한 연구가 주목 받고 있다. 본 연구는 해양설치용 콘크리트 제품의 최적배합비를 적용한 4종류의 콘크리트 공시체(Control, Marine, Porous, New slag)에 대하여 해양환경폭로실험을 통한 해수저항성과 가혹한 열화환경 조건을 고려한 동결융해저항성과 염소이온침투 저항성을 통한 콘크리트의 내구성을 평가하였다. 본 연구에서는 양생조건을 표준(담수), 해양환경을 고려한 간만대, 침지대 그리고 인공해수로 구분하여 양생하였으며, 소정의 양생일(7/28/56)마다 압축강도를 측정하여 평가한 해수저항성은 표준(담수)양생보다 해양환경폭로 양생 조건에서 압축강도비가 낮게 나타났다. 또한, 해양생태계 보호를 위해 친환경 재료(CO₂ 저감형 시멘트, 슬래그 골재 등)를 사용한 New slag는 상대적으로 압축강도가 작아 조강성 및 강도발현을 위한 추가적인 연구가 요구된다. 그리고 동결융해저항성은 모두 우수하였으며, 다공성을 고려한 Porous와 친환경 재료를 사용한 New slag가 상대적으로 낮게 나타났다. 염소이온침투 저항성은 양생조건(표준(담수), 침지대)에 따른 차이는 나타나지 않았으며, Marine보다 New slag가 상대적으로 우수하다는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract Recently, much attention has focused on the study of eco-friendly concrete using recycled by-products for protecting marine ecosystem and durability of concrete exposed to marine condition. This study evaluated the durabilities of 4 different type of concrete mixtures(Control, Marine, Porous, New slag) with the seawater resistance by marine environment exposure experiment and freeze-thaw resistance, resistance to chloride ion penetration considering severe deterioration environment. In this study, we conducted seawater resistance using compressive strength according to the age(7/28/56 days) of specimen and curing conditions(standard(fresh water), tidal, immersion, artificial seawater). The results show that compressive strength of concrete exposed to marine environment exposure condition was lower than those of the standard curing condition. Also, compressive strength of New slag using eco-friendly materials for protecting marine ecosystem was lower than those of other concretes, there is need to improve the performance of New slag. The results for freeze-thaw resistance showed that all mixtures have excellent, but the Porous and New slag were lower than others. Also, the more improved resistance to chloride ion penetration than those of the Marine was measured in the New slag regardless of curing condition.

Key Words : Freeze-Thaw Resistance, Marine Environment Experiment, Resistance to Chloride Ion Penetration, Slag Aggregate, Seawater Resistance

본 연구는 국토교통부가 주관하고 국토교통과학기술진흥원이 시행하는 2012년도 지역기술혁신사업(12지역기술혁신B01)의 지원을 받아 수행된 연구임.

*Corresponding Author : Young-Jin Jo(Korea Conformity Laboratories)

Tel: +82-53-557-9001 email: yjjo4u@kcl.re.kr

Received July 1, 2013

Revised (1st August 16, 2013, 2nd August 30, 2013)

Accepted September 6, 2013

1. 서론

국토의 효율적인 활용을 위하여 해안 및 항만, 연안해양 등 해양환경 조건하에서 해양설치용 콘크리트 구조물 시공은 증가하고 있다. 특히 해양환경폭로 조건에 노출된 콘크리트 구조물은 물리·화학적 요인으로 내구성이 크게 저하되고 있으며 이러한 원인에 대한 근본적인 대책 방안에 대한 연구가 진행되고 있다. 또한, 해양환경에 노출된 콘크리트의 내구성 연구와 산업부산물의 재활용을 통한 친환경 재료 개발에 대한 연구가 최근 주목 받고 있으며, 철강산업 부산물을 활용하여 해양목장 조성용 다공질 콘크리트 적용성[1], 해양환경을 고려한 다성분계 시멘트 콘크리트의 황산염 및 동결융해 저항 특성[5], 해수의 영향을 받은 콘크리트의 동결융해 특성[2] 등 해양환경을 고려한 다양한 연구가 진행되어 왔다[3,4]. 그러나 실제 해수와 인공해수를 배합수로 사용한 콘크리트 시험체에 대한 실험실 내구성능 평가 수준으로 실험해 해양환경폭로실험을 통한 내구성능 평가에 관한 연구는 많지 않다. 이러한 연구개발을 통해 친환경 콘크리트 재료와 이를 적용한 해양설치용 친환경 인공리프 블록 등 해중 콘크리트 구조물의 생산 및 시공이 활발하게 이루어진다면, 해안침식 방지는 물론 해양환경 조건하 친환경 콘크리트의 내구성 확보를 통해 연안해역의 해양생태계 오염을 최소화하여 친환경 생활공간으로서 수변공간(Water Front)개발에 기여할 수 있다. 한편, 기상이변으로 인한 이상 고파랑과 해양생태계 오염이 사회적 이슈로 대두되면서, 해양생태계 오염을 초래하지 않고 높은 파도에 따른 해안피해를 최소화하기 위한 대책공법의 선정, 친환경 재료개발 및 친환경성 평가에 대한 관심이 증가하고 있다. 따라서, 해양구조물의 사용수명 연장을 위한 내구성 확보와 해양생태계에 적합한 친환경 재료개발 등 해양환경 조건하에서의 효과적인 해결 방안 제시가 요구되고 있다. 특히, 해수면에 항상 잠겨있는 콘크리트 구조물은 물리·화학적 요인으로 해양환경 조건에 단기 및 장기적으로 노출되어 내구성이 저하되는 문제가 발생한다. 또한, 표준(담수), 인공해수 및 실험해수 등 다양한 양생조건에 따른 콘크리트의 내구성 평가에 관한 연구는 많지 않다. 본 연구의 목적은 해양환경폭로실험을 통해 각 배합조건에 따른 콘크리트의 내구성 검토이며, 향후 해양환경 조건하 해양설치용 콘크리트의 내구성 정립을 위한 기초적 자료로 활용하고자 하는데 그 목적이 있다.

2. 실험계획

2.1 해양환경폭로실험

해양환경에 노출된 콘크리트 구조물의 내구성을 평가하기 위해 한국건설생활환경시험연구원이 시화방조제 배수갑문 도류제 상부에 조성하여 운영하고 있는 해양환경폭로시험장을 활용하였다. 해양환경폭로실험장소(Fig. 1)의 기상환경은 연평균 온도 (-5~29)℃와 습도 (61~82)%, 해수온도 (1.1~15.4)℃, 비레염분 (27~80)psu, 해수의 pH는 (7.7~7.9) 정도의 해양양자를 나타내고 있다. 표준환경 등 비교실험은 연평균 온도 (-4~31)℃와 습도 (53~74)%의 대구지역에서 진행하였다.



(a) Marine environment exposure testing site location



(b) Marine environment exposure test

[Fig. 1] Photo for marine environment experiment

해양환경폭로시험장의 시험영역별 규모는 Table 1에 나타내었다. 해양의 기상인자 중 비례염분에 의한 재료의 열화상태 조건의 발달대, 조수간만에 따른 바닷물의 건습 반복 환경에서 재료의 열화상태 조건의 간만대, 바다 속에 항상 잠겨 있는 환경에서 재료의 열화상태 조건의 침지대 영역의 실험이 가능하다. 인공어초 및 인공리프 등 해양설치용 구조물로서 사용되고 있는 콘크리트의 해양 환경 조건하에서 내구성을 실험하고 평가할 수 있다.

[Table 1] Introduction of the marine environment exposure testing site(Ansan)

Item	Scale(m)	Area(m ²)
Splash zone	20 × 45	900
Tidal zone	24 × 45	1 080
Immersion zone	12 × 45	540
Etc.	14 × 45	630
Evaluation	Testing under marine environment	

2.2 사용재료 및 배합설계

배합설계에 사용한 골재는 경상북도 경산에서 채취한 강모래와 화강암을 분쇄한 부순 골재를 사용하였다. 잔골재는 밀도 2.64(g/cm³), 조립률 2.1인 강모래와 입도조정을 위해 조립률 3.4의 부순 잔골재를 혼합사용 하였으며, 부순 굵은 골재의 최대치수 25 mm와 다공성 콘크리트에는 최대치수 13 mm를 사용하였다. 골재의 물리적 특성은 Table 2와 같다. 또한, 본 연구에서는 이산화탄소 및 pH 저감, 산업부산물 재활용 등 친환경 재료(CO₂ 저감형 결합재, 슬래그 골재 등)를 사용한 슬래그 콘크리트 시편을 제작하였다. 사용한 슬래그 골재(KS F 4571)는 분쇄 입경에 따라 굵은 골재(5~25) mm와 잔골재 (1.2~5) mm를 구분하여 배합설계를 진행하였다.

[Table 2] Physical properties of aggregates

Item		Gmax	Density	Absorption	F.M
Types		(mm)	(g/cm ³)	(%)	(%)
Fine agg.	crushed	-	2.64	1.3	3.4
	sand	-	2.58	1.1	2.1
	mixed sand	-	2.61	1.2	2.8
Coarse agg.		25	2.64	1.0	6.7
		13	2.64	1.2	6.7

본 연구에서 수행한 배합설계에 사용한 슬래그 골재의 물리적 특성은 Table 3과 같다.

[Table 3] Physical properties of slag coarse aggregates

Item	Gmax	Specific gravity	Absorption
Types	(mm)		(%)
Fine agg.	5.0 ~ 1.2	3.04	1.5
Coarse agg.	25.0 ~ 5.0	3.06	1.6

기존 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)의 비율을 크게 감소 시키고(30%) 슬래그 미분말(SP)과 개질자극제(알칼리 저감형) 등을 사용한 CO₂ 저감형 결합재(연구개발 초기단계)의 물리적 특성은 Table 4에 나타내었다.

[Table 4] Properties of binder

Item	Specific gravity	Absorption	Fineness
Types		(%)	(cm ² /g)
OPC	3.04	1.5	3,300
SP	3.06	1.6	4,379
CSA(modified activator)	2.81	-	-

한편, 실험역 해양환경폭로실험과 병행하여 인공해수 양생조건을 고려하기 위해 인공해수를 ASTM D 1141에 준하여 Table 5와 같이 인공해수를 제조하여 사용하였다.

[Table 5] Chemical composite of artificial seawater

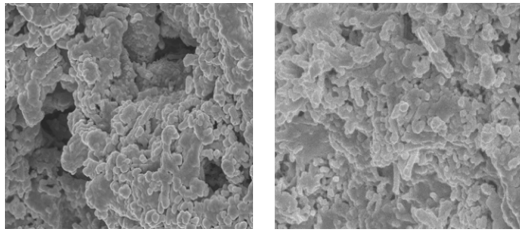
Item	NaCl	MgCl ₂ · 6H ₂ O	Na ₂ SO ₄	CaCl ₂	KCl
Composition (g/L)	24.53	5.20	4.09	1.16	0.695

본 연구에서 해양환경폭로실험을 진행하기 위해 사용된 배합은 총 4가지 배합이며, 배합종류는 Table 6에 나타내었다. 배합내용으로 콘크리트 구조물에 보편적으로 사용되고 있는 호칭강도 24 MPa인 일반콘크리트(Control) 제품과 이보다 상대적으로 압축강도가 큰 35 MPa인 해양콘크리트(Marine) 제품의 2배합과 콘크리트 표면의 다공성을 고려한 24 MPa인 투수 콘크리트(Porous) 제품, 친환경 재료(CO₂ 저감형 결합재, 슬래그 골재 등)를 사용한 24 MPa인 슬래그 콘크리트(New slag) 제품의 2배합 총 4배합을 실시하였다. 배합설계를 통해 제작한 콘크리트 공시체는 해수저항성 및 동결융해저항성 평가용으로 구분하여 제조하였으며 각 제품의 형상 및 크기는 (φ 100 × 200) mm 원주형(cylinder), (75 × 100 × 400) mm 각주형(prism)을 사용하였다.

[Table 6] Mix proportion of concretes

Symbol	Gmax	Slump	Air content	W/B	Unit mass(kg/m ³)					
	(mm)	(mm)	(%)	(%)	W	B		S	G	AE
						OPC	SP			
Control(24MPa)	25	150	4.2	50	171	204	136	928	899	2.04
Marine(35MPa)	25	150	4.3	37	167	267	178	844	906	4.45
Porous(24MPa)	13	-	-	34	43	75	50	50	450	-
New slag(24MPa)	25	150	4.3	50	165	¹⁾ 100	¹⁾ 230	²⁾ 800	³⁾ 1096	1.98

※ ¹⁾B(Binder) : OPC 30%, Slag Powder & CSA(Modified) 70% , ²⁾Crushed Slag : (1.2~5) mm , ³⁾Crushed Slag : (5~25) mm



(a) New slag(24MPa) concrete (b) Marine(35MPa) concrete

[Fig. 2] SEM image of concrete specimen

Fig. 2는 최적배합비를 적용하여 제조한 콘크리트 공시체 New slag(24MPa)와 Marine(35MPa)에 대한 전자현미경 사진(SEM)으로 슬래그 골재를 사용한 경우보다 콘크리트용 부순골재를 사용한 콘크리트(Marine)가 상대적으로 치밀한 구조를 보이고 있다. 콘크리트 공시체는 표준(담수), 인공해수 그리고 해양환경(간만대, 침지대) 양생조건으로 구분하여 양생을 진행하였다.

2.3 실험방법 및 내구성 평가

2.3.1 해수저항성

해양환경의 조건은 내륙환경보다 가혹한 물리·화학적 작용에 의해 콘크리트의 내구성을 저하시킨다. 본 연구에서는 해양설치용 콘크리트 구조물인 인공어초와 인공리프 블록에 사용되는 기존 콘크리트 및 친환경 콘크리트 재질이 적용된 시료를 사용하여 해양환경폭로실험을 통한 소정의 양생일마다 공시체 강도를 측정하여 해수저항성을 평가하였다. 해수저항성은 항상 해수에 잠겨있는 침지대와 조수간만에 따른 해수의 건습반복 환경에 노출되는 간만대 영역에서의 양생조건을 고려하였다.

배합설계를 통해 제조한 콘크리트 공시체는 탈형 후 표준 양생(담수) 및 인공해수 양생 그리고 해양환경폭로 시험장을 활용한 실험해수 양생을 실시하였다. 인공해수 및 해양환경폭로 시험장에 거치한 콘크리트 시료는 Fig. 3에서 보는 바와 같다.



(a) Splash zone

(b) Tidal zone



(c) Immersion zone

(d) Artificial seawater zone

[Fig. 3] Photos for concrete specimens

공시체를 탈형한 후 표준(담수), 인공해수 그리고 해양환경폭로(침지대, 간만대) 조건에서 양생을 실시한 후 KS F 2405에 준하여 압축강도를 측정하였다. 양생조건에 따른 압축강도 변화를 분석하기 위해 비교 기준 양생조건에서의 압축강도 대비 각 양생조건에서의 압축강도에 대한 상대적 변화율은 식 (1)과 같이 계산하였다.

$$CSR_{SW\ resistance} = \frac{(C_a - C_b)}{C_b} \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서,

$CSR_{SW\ resistance}$: Compressive Strength Ratio

C_a : Comp. Strength (Curing condition)

C_b : Comp. Strength (Criteria for comparison)

2.3.2 동결융해 및 염소이온침투 저항성

본 연구에서 콘크리트 표면에 형성된 다공성의 영향 및 대기환경으로 인한 동결융해를 받는 콘크리트 구조물의 동결융해저항성에 대한 내구성을 평가하고자 하였다. 동결융해저항성 실험은 KS F 2456의 B방법에 준하여 실시하였으며, 콘크리트 시료 중심부의 온도가 4℃에서 -18℃를 거쳐 다시 4℃로 상승하는 과정을 1사이클(Cycle)로 하여 300사이클을 진행하였다. 동결융해 반복작용을 받기 전과 후의 동탄성계수를 식 (2)와 같이 상대동탄성계수로 나타내었다.

$$P_C = \frac{(n_c^2)}{(n_0^2)} \times 100(\%), \quad DF = \frac{PN}{M} \quad (2)$$

여기서,

P_C : Relative dyn. modulus of elasticity at c cycle

n_c : 1th frequency (Hz) at c cycle

n_0 : 1th frequency (Hz) at 0 cycle

DF : Durability factor

P : Relative dyn. modulus of elasticity at N cycle

N : Number of cycle for P at 60% or ending cycle

M : Number of cycle at ending point

또한, 콘크리트 단체표준 및 환경표지인증표준에서는 동결융해 과정을 통한 콘크리트 2차 제품의 내구성 기준을 정해 품질관리 및 제품의 내구성 확보에 노력하고 있다.

단체표준 등에서 규정하고 있는 콘크리트의 동결융해 실험은 공시체를 탈형 후 2주 양생을 실시한 후 동결융해 100사이클 후 KS F 2405에 준하여 압축강도를 측정하여 내구성을 확인하고 있다. 동결융해 반복작용에 의한 콘크리트의 압축강도 변화율 계산식은 식 (3)과 같다.

$$CSR_{FT\ resistance} = \frac{C_{FT}}{C_S} \times 100(\%) \quad (3)$$

여기서,

$CSR_{FT\ resistance}$: Compressive Strength Ratio

C_{FT} : Comp. Strength at freeze-thaw action

C_S : Comp. Strength at standard curing condition

한편, 콘크리트 호안블록 등 콘크리트 2차 제품은 동결융해 전후의 압축강도 및 압축강도 변화율에 대한 기

준을 정하고 있으며, 품질기준은 Table 7과 같다.

[Table 7] Freeze-thaw resistance

Item	Standard	SPS (KCIC0001-0703)	
		EL245 porous	2grade porous
Compressive strength(MPa)		11.76 over	21 over 13 over
Rate of change(comp. strength)(%)		20 under	- -
Compressive strength subjected to F-T action(MPa)		-	21 over 13 over

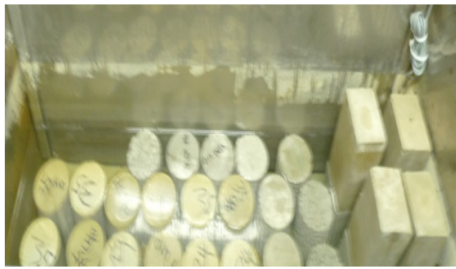
또한, KS F 2711은 전기전도도에 의한 통과 전하량을 측정하여 염소이온침투에 대한 저항성을 5단계의 등급으로 구분하여 규정하고 있으며 저항성에 대한 구체적인 내용은 Table 8과 같다.

[Table 8] Chloride ion penetration according to charge

Charge passed	Chloride ion penetration
> 4,000	High
2,000 ~ 4,000	Normal
1,000 ~ 2,000	Low
100 ~ 1,000	Very low
<100	Ignorable

염해저항성 판정에 일반적으로 많이 사용되고 있는 시험방법으로 북유럽 표준인 NT BUILD 492 방법이 있지만, 실험수에서 이미 황산염, 염화나트륨, 염화마그네슘 등의 용해성 염에 어느 정도 포화된 콘크리트 공시체에 대한 염소이온 침투성을 빠른 시간에 측정하여 양생조건에 따른 염소이온 침투성을 Table 8에서 규정하고 있는 범위와 비교하고자 본 논문에서는 KS F 2711 시험방법을 사용하였다.

동결융해 및 염소이온침투 저항성에 대한 본 연구의 진행을 위해 사용한 시험장비는 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다.

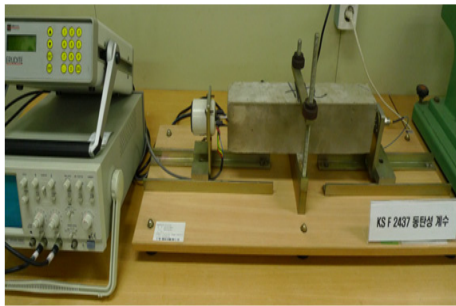


(a) Freezing and thawing

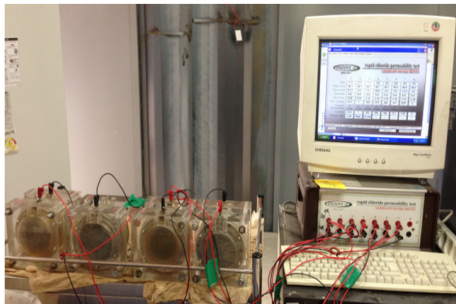


(b) Compressive strength

[Fig. 4] Photos for concrete specimens



(a) Relative dynamic modulus of elasticity



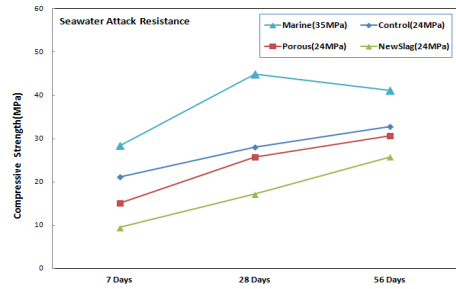
(b) Resistance to chloride ion penetration

[Fig. 5] Photos for concrete specimens

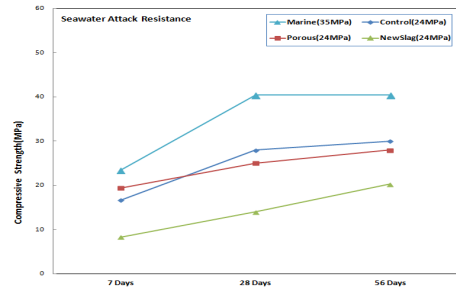
3. 실험결과 및 고찰

3.1 해수저항성

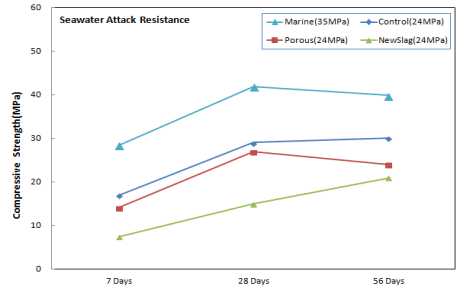
최적배합비를 적용하여 제조한 콘크리트 공시체의 양생조건과 양생일 대비 압축강도 및 압축강도비에 대한 결과는 Fig. 6 ~ Fig. 7에 나타내었다.



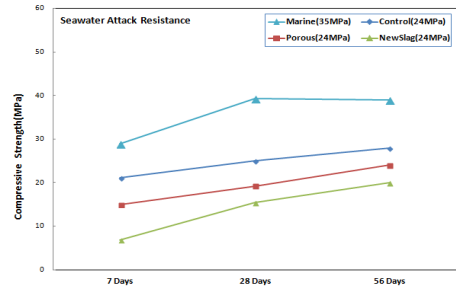
(a) Standard curing condition



(b) Immersion zone curing condition



(c) Tidal zone curing condition



(d) Artificial seawater curing condition

[Fig. 6] Results for compressive strength

표준(담수), 실험수 그리고 인공해수 양생 조건에 대한 각 배합조건에 따른 콘크리트 공시체의 양생일(7일, 28일, 56일)별 압축강도를 살펴보면, 전반적으로 양생일이 증가함에 따라 압축강도는 유사한 패턴을 보이며 증가하고 있다. 하지만, 양생일 7일 압축강도 대비 28일 양생 콘크리트 압축강도에 대한 증가율이 인공해수 양생조건에서 New slag가 최대 126.5%까지 나타났으며, Marine이 가장 작은 증가율을 보였다. 또한, 양생일 28일을 지나 양생일 56일까지 각 배합조건에 따른 콘크리트 공시체는 New slag를 제외하고 대부분 압축강도 증가율이 크게 감소하는 경향을 나타내었다. 특히, 초기 강도 발현이 상대적으로 빠르게 진행되어 양생일 28일까지 가장 큰 압축강도 증가율을 나타내었던 Marine 콘크리트 공시체는 오히려 28일보다 양생일 56일 압축강도가 낮게 나타났다. 이는 다양한 양생조건을 고려하기 위해 많은 양의 배합조건별 콘크리트 공시체 제작으로 각 공시체 골재배합 구성비의 균일성 및 동일한 다짐에너지 확보 등의 문제로 인한 영향으로 판단된다.

특히, 친환경 재료(CO₂ 저감형 시멘트, 슬래그 골재 등)를 사용한 New slag는 양생조건에 상관없이 상대적으로 압축강도 감소폭이 낮게 나타났다. 하지만, 상대적으로 골재의 밀도가 큰 슬래그 골재를 사용하여 콘크리트를 제조하였음에도 불구하고 New slag(24MPa)는 양생일 대비 압축강도 발현이 상대적으로 낮게 나타났다. 이에 친환경 재료의 적용에 있어 압축강도 발현을 위한 추가적인 연구가 지속적으로 요구됨을 알 수 있었다.

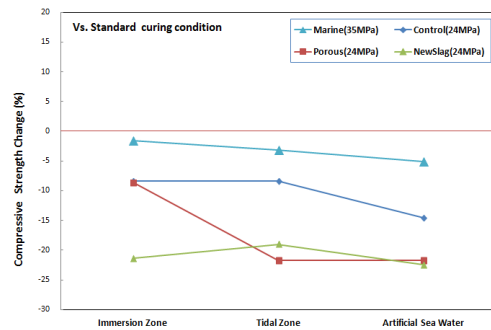
[Table 9] Compressive strength ratio with different curing periods

Specimens	Exposed Period	Age(days)		
		28(Vs.7)	56(Vs.7)	56(Vs.28)
S	Marine	58.5	44.7	-8.7
	Control	32.1	54.5	17.0
	Porous	70.9	103.0	18.8
	New slag	81.1	171.6	50.0
I	Marine	72.6	72.9	0.1
	Control	67.7	79.6	7.1
	Porous	28.9	44.3	12.0
	New slag	68.7	144.6	45.0
T	Marine	47.5	40.1	-5.0
	Control	71.6	77.5	3.4
	Porous	90.8	70.2	-10.8
	New slag	102.7	182.4	39.3
A	Marine	36.0	34.9	-0.8
	Control	18.5	32.7	12.0
	Porous	28.9	61.1	25.0
	New slag	126.5	194.1	29.9

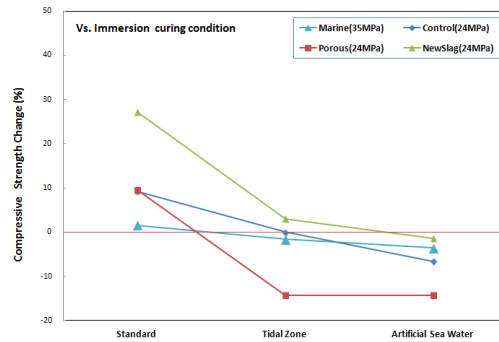
※ Curing condition : S(Standard-fresh water),

I(Immersion zone), T(Tidal zone), A(Artificial seawater)

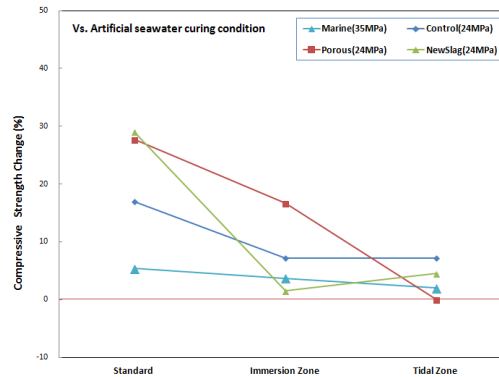
Table 9는 양생조건에 따른 각 콘크리트 공시체의 양생일별 압축강도에 대한 변화율을 나타낸 것으로 양생조건 대비 압축강도 변화율은 특정한 변화 경향을 나타내지 않았다.



(a) Strength ratio(Vs. Standard condition)



(b) Strength ratio(Vs. Immersion condition)



(c) Strength ratio(Vs. Artificial seawater condition)

[Fig. 7] Results for compressive strength(at 56 days)

Fig. 7은 56일 양생일 압축강도를 사용하여 양생조건에 따른 압축강도비를 나타낸 것이다.

Fig. 7의 (a)는 표준(담수) 양생조건에서의 압축강도

대비 침지대, 간만대 그리고 인공해수 양생조건에서의 각 콘크리트 공시체에 대한 압축강도비를 나타낸 것으로 인공해수를 포함한 가혹한 열화환경인 해양환경 조건에서 상대적으로 낮은 압축강도비를 나타내었다. 표준(답수) 양생조건 대비 간만대에서 Porous 압축강도 변화율을 제외한다면, New slag가 모든 양생조건에서 압축강도 변화율 폭이 가장 크게 나타났다. 바다 속에 항상 잠겨 있는 침지대 양생조건보다 조수간만에 따른 바닷물의 건습반복 환경인 간만대 양생조건에서 콘크리트의 압축강도 변화율 폭이 상대적으로 낮게 나타남을 확인할 수 있었다. 또한, 인공해수 양생조건에서 압축강도 변화율 폭이 상대적으로 가장 크게 나타났다. Fig. 7의 (b)와 (c)는 비교 기준 양생조건에서의 압축강도 대비 표준(답수), 간만대, 침지대 그리고 인공해수 양생조건에서의 콘크리트 공시체에 대한 압축강도비를 나타낸 것으로 인공해수 양생조건이 콘크리트 재료의 가장 가혹한 열화환경임을 알 수 있다. 특히, Porous는 간만대 양생조건에서 상대적으로 압축강도 변화율 폭이 크게 나타나 다공성이 간만대 양생 조건에서 상대적으로 가혹한 열화환경으로 나타났다.

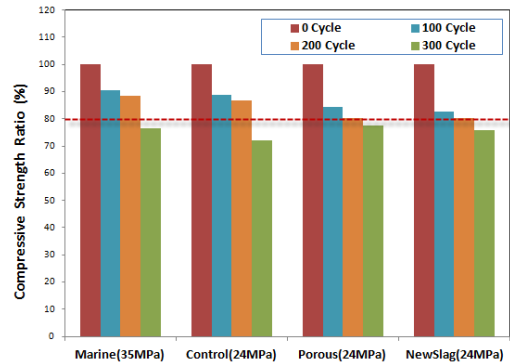
3.2 동결융해 및 염소이온침투 저항성

최적배합비를 적용하여 각 배합조건에 따른 공시체의 동결융해저항성 및 염소이온침투 저항성을 분석하였다. Table 10은 동결융해저항성을 평가하기 위해 각 사이클에 따른 공시체 압축강도와 동일 재령동안 표준(답수) 양생한 공시체의 압축강도의 비를 나타내었다.

[Table 10] Compressive strength ratio

Condition Specimens	Number of freeze-thaw action cycles			
	0	100	200	300
Control	100	90.7	88.4	76.7
Marine	100	88.9	86.6	71.9
Porous	100	84.5	80.4	77.6
New slag	100	82.6	80.1	75.9

Fig. 8은 각 배합조건에 따른 압축강도 감소율을 나타낸 것으로 동결융해 반복작용 사이클이 증가함에 따라 전반적으로 압축강도가 감소하는 경향을 보여주고 있다.



[Fig. 8] Compressive strength ratio of concretes subjected to freeze-thaw action

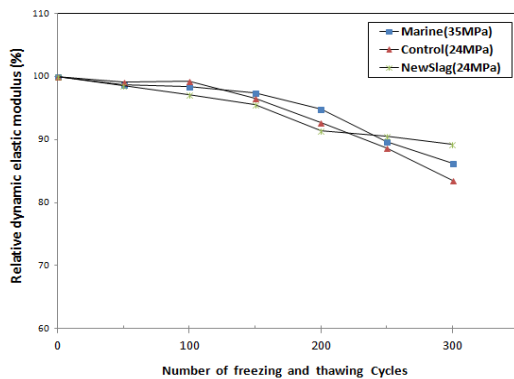
동결융해 반복 작용 후 압축강도비의 변화는 8% ~ 28% 이하로 우수한 동결융해 저항성을 갖는 것으로 나타났다. 콘크리트의 배합강도, 골재의 최대치수 및 시멘트 사용함량 비율에 따른 결합재의 결합력 등으로 콘크리트 공시체 구조의 치밀함 등에 따른 결과로 판단된다. 골재 최대치수가 작고 약간의 다공성을 가지고 있어 조직이 치밀하지 못한 Porous와 해양생태계를 고려하기 위한 친환경 재료(CO₂ 저감형 시멘트, 슬래그 골재, 자극제 등)를 사용하여 제조한 New slag 콘크리트 공시체가 동결융해 반복 작용 후 압축강도 감소폭이 상대적으로 높게 나타났다. 초기 동결융해저항성 시험하기 전의 각 콘크리트 공시체에 대한 압축강도를 Table 11에 나타내었다.

[Table 11] Compressive strength of concrete at 14 days(MPa)

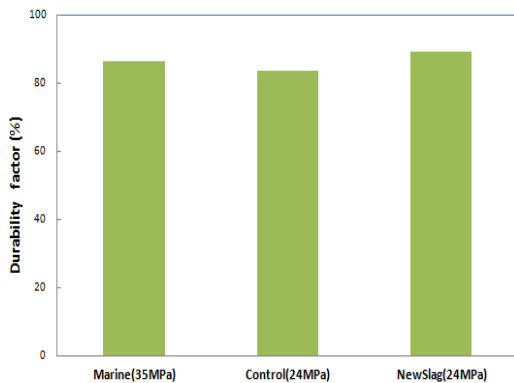
Control	Marine	Porous	New slag
25.7	37.3	21.9	14.1

Fig. 9는 동결융해 반복 작용을 받는 각 콘크리트 공시체에 대한 소정의 동결융해 사이클마다 동탄성계수를 측정하여 상대동탄성계수 및 내구성 지수로 나타낸 것이다.

다공성을 가지는 Porous를 제외한 나머지 콘크리트 공시체에 대한 상대동탄성계수는 동결융해 반복 작용 300 사이클까지 모든 콘크리트 공시체가 80% 이상으로 동결융해에 대한 저항성이 우수한 것으로 나타났다. 콘크리트 공시체 Marine과 Control과 다르게 New slag는 200사이클을 지나면서 상대적으로 상대동탄성계수 감소율이 작게 나타났다. 이는 슬래그 골재의 제조 시 흡수율 및 공극부피의 감소차 등으로 인해 동결작용에 따른 팽창압이 상이하기 때문이라고 판단된다.



(a) Relative dynamic elastic modulus



(b) Durability factor

[Fig. 9] Relative dynamic elastic modulus and durability factor at freeze-thaw action

본 연구에서는 추가적으로 최적배합비를 적용하여 제조한 콘크리트 공시체 중에서 일반 콘크리트용 부순골재와 시멘트(OPC)를 사용한 Marine과 친환경 재료(CO₂ 저감형 시멘트, 슬래그 골재, 자극제 등)를 사용한 New slag에 대한 염소이온침투 저항성을 측정하였다. 콘크리트 공시체는 표준(담수) 및 실향수 침지대 양생조건에서 28일 동안 양생한 Marine과 New slag 콘크리트 공시체를 사용하였으며 통과전하량 측정을 통한 염소이온 침투성에 대한 결과는 Table 12와 같다.

[Table 12] Resistance to chloride ion penetration in concrete

Specimens	Curing condition	
	Standard	Immersion zone
Marine	1,411(C)	1,281(C)
New slag	471(C)	326(C)

콘크리트 공시체의 염소이온침투 저항성은 양생조건에 따른 확연한 차이가 나타나지 않았으며, 재료의 구성조각이 치밀한 Marine의 통과 전하량이 상대적으로 취약한 구조인 New slag보다 한 등급 높은 통과전하량이 나타나 염소이온침투성이 상대적으로 높게 나타났다. 콘크리트 공시체 모두 염소이온침투 저항성이 비교적 크게 나타났지만, 친환경 재료를 사용하여 제조한 콘크리트 공시체인 New slag가 상대적으로 염소이온침투 저항성이 우수한 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구는 해양환경폭로실험을 통한 배합조건에 따른 해양설치용 콘크리트의 내구성 정립을 위한 기초 연구로서 일반(Control, 24MPa), 해양(Marine, 35MPa), 다공성 고려한 투수(Porous, 24MPa) 그리고 친환경 재료를 사용한 슬래그(New slag, 24MPa) 콘크리트에 대한 내구성을 평가한 것으로 연구의 결론은 다음과 같다.

각 배합조건별 콘크리트 공시체는 전반적으로 압축강도가 증가하였으며, 친환경 재료를 사용한 New slag 공시체는 양생일 대비 압축강도비가 가장 큰 증가율을 나타내었다. 초기 압축강도가 상대적으로 작아 초기강도 증진 및 강도 발현을 위한 추가적인 연구가 요구된다. 그리고 양생조건에 따른 압축강도는 해양환경에 노출된 콘크리트의 경우 재료 열화속진으로 표준(담수) 양생조건보다 인공해수와 해양환경폭로 조건에서 양생한 콘크리트가 전반적으로 압축강도 증가율이 낮게 나타나 해수저항성이 상대적으로 낮게 나타났다. 또한, 동결융해 반복 작용 전·후의 콘크리트의 압축강도비와 상대동탄성계수는 모든 콘크리트 공시체에서 동결융해저항성에 대한 압축강도비는 8% ~ 28% 이하의 감소율을 나타내었으며, 상대동탄성계수는 80% 이상으로 높게 나타나 동결융해에 대한 저항성이 우수한 것으로 나타났다.

References

[1] Lee, B. J., Jang, Y. I., Kim, Y. Y., "Engineering Performance and Applicability of Environmental Friendly Porous Concrete for a Marine Ranch Using Steel Industry By-products", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 25, No.1, pp. 115 ~ 123, February, 2013.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2013.25.1.115>

- [2] Kim, M. S., Kang, J. H., and Beak, D. I., "Sulfate and Freez-thaw Resistance Characteristic of Multi-component Cement Concrete Considering Marine Environment", Journal of the Korea Society of Ocean Engineers, Vol. 26, No.3, pp. 26 ~ 32, June, 2012.
- [3] Kwon, S. J., Park, S. S., and Lho, B. C., "Durability Evaluation of Inorganic-Impregnated Concrete Exposed to Long-Term Chloride Exposure Test", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 20, No.3, pp. 283 ~ 290, June, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2008.20.3.283>
- [4] Ryu, D. W., Kim, W. J., Yang, W. H., You, J. H., and Ko, J. W., "An Experimental Study on the Freezing-Thawing and Chloride Resistance of Concrete Using High Volumes of GGBS", Journal of the Korea Institute of Building Construction, Vol. 12, No.3, pp. 315 ~ 322, March, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5345/JKIBC.2012.12.3.315>
- [5] Park, K. P., Kim, S. S., Lee, S. T., Kim, J. P., and Jung, H. S., "Properties on the Freeze-Thaw of Concrete Subjected to Seawater Attack", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 23, No.1, pp. 23 ~ 30, February, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2011.23.1.023>
- [6] KS F 2405, "Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete", KS Standard, 2010.
- [7] KS F 2456, "Testing method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing", KS Standard, 2008.
- [8] KS F 2711, "Testing method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration", KS Standard, 2002.
- [9] NT Build 492, "Concrete, Mortar and Cement-Based repair materials ; Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments", Nordtest, 1999.

조 영 진(Young-Jin Jo)

[정회원]



- 2003년 2월 : 경북대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2011년 2월 : 경북대학교 토목공학과 (박사수료)
- 2003년 10월 ~ 현재 : 한국건설생활환경시험연구원 선임연구원

<관심분야>

콘크리트 친환경성 평가, 친환경 건설재료,

최 병 옥(Byung-Wook Choi)

[정회원]



- 2005년 2월 : 경북대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 12월 ~ 현재 : 한국건설생활환경시험연구원 책임연구원

<관심분야>

콘크리트, 친환경 건설재료

최 재 석(Jae-Seok Choi)

[정회원]



- 1997년 2월 : 인하대학교 자원공학과 (공학석사)
- 2010년 8월 : 인하대학교 자원공학과 (공학박사)
- 1997년 4월 ~ 현재 : 한국건설생활환경시험연구원 책임연구원

<관심분야>

산업부산물 재활용, 광물자원 건설자재화

정 용 옥(Yong-Wook Jung)

[정회원]



- 1999년 2월 : 계명대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2004년 8월 : 계명대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2004년 12월 ~ 2011년 8월 : 계명대학교 첨단건설재료실험센터 책임연구원
- 2011년 9월 ~ 현재 : 계명대학교 첨단건설재료실험센터 조교수

<관심분야>

콘크리트, 친환경 건설재료