



철강산업 부산물을 활용한 해양목장 조성용 친환경 다공질 콘크리트의 공학적 성능 및 적용성

이병재¹⁾ · 장영일²⁾ · 김윤용^{1)*}

¹⁾충남대학교 토목공학과 ²⁾충남대학교 건설공학교육과

Engineering Performance and Applicability of Environmental Friendly Porous Concrete for a Marine Ranch Using Steel Industry By-products

Byung-Jae Lee,¹⁾ Young-Il Jang,²⁾ and Yun-Yong Kim^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

²⁾Dept. of Construction Engineering Education, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

ABSTRACT The steel industry, a representative industry that significantly consumes raw materials and energy, produces steel as well as a large amount of by-product steel slag through the production process. The vast habitat foundation of marine life has been destroyed due to recent reckless marine development and environment pollution, resulting in intensification of the decline of marine resources, and a solution to this issue is imperative. In order to propose a method to recycle large amounts of by-product slag into a material that can serve as an alternative to natural aggregate, the engineering properties and applicability for each mixing factor of environment friendly porous concrete as a material for the composition of marine ranches were evaluated in this study. The test results for percentage of voids per mixing ratio revealed that the margin of error for all conditions was within 2.5%. The compressive strength test results showed that the most outstanding environmental friendly porous concrete can be manufactured when mixing 30% slag aggregate and 10% specially treated granular fertilizer for the optimum volume fraction. As concrete for marine applications, the best seawater resistance was obtained with mixing conditions for high compression strength. An assessment of the ability to provide a marine life habitat foundation of environmentally friendly porous concrete showed that a greater percentage of voids facilitated implantation and inhabitation of marine life, and the mixing of specially treated granular fertilizer led to active initial implantation and activation of inhabitation. The evaluation of harmfulness to marine life depending on the mixture of slag aggregate and specially treated granular fertilizer revealed that the stability of fish is secured.

Keywords : slag aggregate, specially treated granular fertilizer, restoring coastal ocean, environmentally friendly porous concrete

1. 서 론

현재 정부에서는 녹색성장과 자원순환형 사회구축 등의 새로운 패러다임을 제시하고 최근 발생량이 증가하고 있는 산업부산물의 자원화를 통해 정책적으로 재활용비율을 선진국 수준으로 끌어올리기 위한 노력을 경주하고 있으나, 아직까지 산업부산물의 재활용에 대한 부정적 인식과 관심 부족으로 인하여 재활용실적이 미진한 실정이다. 그 대표적인 예로서 국내 철강 생산능력은 꾸준히 증가하여 2011년에 6852만톤에 이르고 있으며, 철강생산

으로 인하여 부산되는 철강슬래그 역시 계속적으로 증가하여 2010년에는 2036만톤에 이르고 있다.^{1,2)} 그러나, 부산된 철강슬래그의 재활용률은 약 70%정도이며, 그 중 품질이 양호한 고로슬래그 정도만 콘크리트 혼화재료로 국한되어 활용되고 있다. 나머지 부산물들은 활용기술 개발의 미비로 인하여 약 80% 이상이 성토재와 매립재와 같은 단순 재활용이 주를 이루고 있어 산업부산물의 유효활용을 통한 자원순환형 사회 구축 및 천연자원의 고갈방지를 위해서는 다양한 활용기술 개발이 절실히 요구되고 있다.^{3,4)}

한편, 우리나라는 3면이 바다로 둘러싸여 있어 해양자원이 풍부하지만 무분별한 개발 및 해양 환경오염 등으로 광대한 해양생물의 서식기반이 소실되어 수산자원의 감소현상이 심화되고 있는 실정이다. 따라서 정부에서는

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

Received October 22, 2012, Revised December 11, 2012,

Accepted December 12, 2012

©2013 by Korea Concrete Institute

훼손된 연안해역의 생태계 복원과 어족자원의 확보를 위하여 해양목장을 조성할 계획에 있다. 하지만 기존의 해양목장 구조물은 90% 이상이 일반콘크리트로 구성되어 있어 내부구조가 밀실하고 표면이 매끄럽고 영양분의 공급이 단절되어 해양생물의 서식이 곤란한 문제점 등이 제기되고 있다.⁵⁾

또한, 건설산업의 주요 재료중 하나인 콘크리트는 현대 문명사회를 구성하는 사회간접시설 및 각종 개발사업의 필수 건설재료로 사용되어 국가경제와 문화발전에 크게 공헌하여 왔다. 그러나 종래의 콘크리트는 대부분 자연과 직접 대치하여 사용되고, 대량으로 사용되기 때문에 환경문제에 있어서 콘크리트가 부정적으로 보여지는 직접적인 원인이 되고 있다. 따라서 이를 해결하기 위한 방안으로 주변 자연환경의 부하를 저감시키는 콘크리트, 인류와 생물의 조화 그리고 새로운 관계를 창조하는 콘크리트 즉 친환경 콘크리트의 개념 도입 및 개발의 필요성이 대두되고 있다.⁶⁾

따라서, 이 연구에서는 철강산업 부산물인 슬래그의 유효활용 방안의 하나인 친환경 다공질 콘크리트의 해양목장 조성용 소재로서의 적용성을 검증하기 위하여 슬래그골재를 활용한 친환경 다공질 콘크리트의 배합요인별 공학적 특성 및 해양생물에 대한 유해성 분석과 서식기반 제공능력 평가 연구를 수행하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

이 연구에서는 친환경 다공질 콘크리트의 성능향상재료 혼입에 따른 물리·역학적 특성, 유해성 및 현장 적용성을 구명하기 위하여 Table 1에 나타낸 시험조건 및 배합변수로 실험을 수행하였으며, 여기서 혼화제량은 시멘트 페이스트의 일정한 유동성을 확보하기 위하여 사전에 흐름시험을 수행하여 혼입량을 결정하였다.

Table 1 Experimental variables

W/B (%)	25	
Target void ratio (%)	15, 20, 25	
Target flow (%)	180	
Slag aggregate (%)	0, 30, 50, 100	
Specially treated granular fertilizer (%)	0, 5, 10, 20	
PVA fiber (Vol.%)	0.05	
Test items	Physical & mechanical properties	- Void ratio test - Compressive strength test - Seawater resistance test
	Marine applicable test	- Seaweed adhesion test - Fish toxicity test

2.1 사용재료

2.1.1 시멘트

이 연구에 사용된 시멘트는 콘크리트로 제조시 pH를 낮출 수 있도록 국내 S사에서 생산되는 밀도 3.02 g/cm³의 고로슬래그시멘트를 사용하였다.

2.1.2 골재

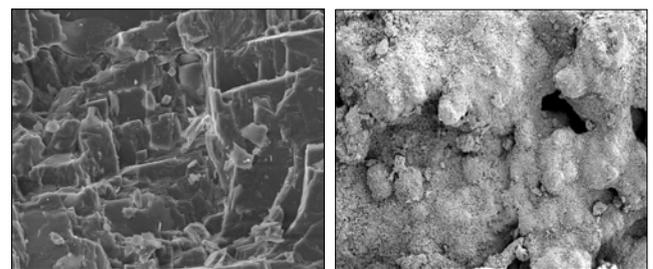
이 연구에 사용된 골재는 강원 영월군 J사에서 생산된 부순골재와 경북 포항시 P사에서 부산되고 D사에서 고로슬래그 및 제강슬래그를 혼합하여 생산된 복합슬래그골재를 사용하였으며, 골재의 입도는 13~20mm의 것을 사용하였다. Table 2는 사용골재의 물리적 성질을 나타내었으며, 부순골재 및 복합슬래그골재 SEM 촬영사진은 Fig. 1과 같다. 전자주사현미경을 통한 골재의 표면 분석 결과, 복합슬래그골재는 냉각과정에서 기포가 발생되어 골재 내부에 공극을 형성하고 있어 부순골재에 비하여 치밀하지 못한 것으로 나타났다.

2.1.3 특수처리입상비료

해양목장 조성시 해양생물의 조기 착상 및 서식에 필요한 영양분을 원활히 공급해줄 필요가 있다. 따라서 이 연구에서는 육상식물을 시비 하는것에 착안하여, 질소(N)계 및 인(P)계의 입상비료를 친환경 다공질 콘크리트의 해양생물 부착성능 향상요소로 사용하였다. 그러나 일반 시중의 입상비료는 자체 경도가 작고 쉽게 용해되기 때문에 콘크리트 혼합시 비료가 파괴되며 영양성분의 지속적인 용출이 이루어지지 않는 문제가 발생된다. 이러한 문제를 해결하고자 특수 환형기를 이용하여 시멘트 페이스트로 입상비료를 코팅처

Table 2 Physical properties of aggregate

Items	Gradation (mm)	Density (g/cm ³)	Water absorption (%)	Absolute volume (%)	Unit weight (kg/m ³)
Crushed aggregate	13~20	2.79	0.74	59.6	1661
Slag aggregate	13~20	3.15	3.57	60.6	1846



(a) Crushed aggregate

(b) Slag aggregate

Fig. 1 SEM analysis of coarse aggregate

리 하여 사용하였다. Fig. 2의 (a)는 특수처리입상비료의 사진이며 (b)는 콘크리트에 혼입된 특수처리입상비료의 사진이다. Table 3은 특수처리입상비료의 물리적 성질이다.

2.1.4 보강용 PVA섬유

친환경 다공질 콘크리트의 균열저감 및 충격흡수로 인한 구조적 성능을 향상시키기 위하여 일본 K사의 PVA섬유 (poly vinyl alcohol fiber)를 사용하였으며, 물리적 성질은 Table 4와 같다.

2.1.5 혼화제

시멘트 분산작용에 의해 콘크리트의 성질을 개선시키는 혼화제로서, 국내 S사제품의 폴리카본산계 고성능 AE감수제를 사용하였으며, 물리적 성질은 Table 5와 같다.



(a) Grains of fertilizer (b) Sectional image in concrete

Fig. 2 Specially treated granular fertilizer

Table 3 Physical properties of specially treated granular fertilizer

Item	Grading (mm)	Density (g/cm ³)	Coating thickness (mm)	Absorption (%)
GF	3.0~5.0	1.30	1.0	7.28

Table 4 Physical properties of fiber

Item	Length (mm)	Diameter (μm)	Density (g/cm ³)	Tensile strength (GPa)	Elongation (%)
PVA fiber	12	40.0	1.30	1.56	6.5

Table 5 Physical properties of admixture

Admixture	Appearance	Density (g/cm ³)	pH	Mass contents (%)
High-range water reducing agent	Light brown liquid	1.06	6.5	41~45

2.2 실험방법

2.2.1 공극률 시험방법

친환경 다공질 콘크리트의 공극률시험은 일본 에코콘크리트연구위원회의 『다공질 콘크리트의 공극률시험방법(안)』⁷⁾중 용적법에 의하여 측정하였으며, 다음 식 (1)에 의하여 계산하였다.

$$A(\%) = \{1 - (W_2 - W_1) / V\} \times 100 \quad (1)$$

여기서, A : Total void ratio of concrete

W₁ : Weight of the specimen under water

W₂ : Weight of the specimen following 24 hour exposure to the air

V : Volume of the specimen

2.2.2 압축강도 시험방법

친환경 다공질 콘크리트의 압축강도 시험은 φ100×200 mm의 공시체를 제작하여 KS F 2405 『콘크리트의 압축강도 시험방법』에 준하여 유압식 만능시험기를 사용하여 측정하였다.

2.2.3 해수저항성 시험방법

일반적으로 해양환경의 조건은 내륙환경보다 가혹한 물리·화학적 작용에 의해 콘크리트의 성능을 저하시키는 것으로 알려져 있다. 따라서 이 연구에서는 연안해역의 해양생태계 복원을 위한 콘크리트 구조물 및 제품으로서 친환경 다공질 콘크리트의 적용성을 분석하기 위하여 φ100×200 mm의 원주형 공시체를 제작하여 채령28일 후 ASTM D 1141에 의해 제조한 인공해수와 증류수에서 각각 120일 동안 침지시켜 소정의 기간마다 공시체의 강도를 측정하여 해수저항성을 평가하였다. 인공해수의 화학적 조성은 Table 6과 같다.

2.2.4 해양생물 서식기반 제공능력 평가방법

복합슬래그골재를 활용한 친환경 다공질 콘크리트의 해양생물의 서식기반 제공능력을 평가하기 위하여 배합 조건별로 제작한 500×500×100 mm의 패널형 친환경 다공질 콘크리트 공시체를 남해안 창선도 연안에 침지·설치하고, 일정기간 후에 공시체를 인양하여 표면에 부착된 해양생물의 부착정도를 촬영하고 화상해석프로그램을 이용하여 해양생물의 부착면적 비율을 측정하였다. 해양생물 서식기반 제공능력 측정방법 및 분석방법은 Fig. 3과 같다.

Table 6 Chemical composition of artificial seawater

Item	NaCl	MgCl ₂ · 6H ₂ O	Na ₂ SO ₄	CaCl ₂	KCl
Chemical composition (g/l)	24.530	11.110	4.090	1.160	0.695

2.2.5 어독성 시험방법

친환경 다공질 콘크리트의 제조시 혼입되는 복합슬래그골재 및 특수처리입상비료로 인하여 발생될 수 있는 해양생물에 대한 유해성을 평가하기 위하여 어독성 시험을 수행하였다. 어독성 시험은 KS I 3217에 제시되어 있는 공시어로서 잉어과의 붕어를 시험종으로 선택하였다. 이 연구에 사용된 붕어는 체장이 20~40 mm인 치어로 어류 공급업체에서 구입하여 일주일동안 수조에서 순치 후 외관상 질병의 증세가 나타나지 않는 개체를 선별하여 실험을 수행하였다.

어류에 대한 독성 평가는 노출기간에 따라 급성독성시험과 만성독성시험으로 분류하고 있으며, 이 연구에서는



Fig. 3 Measuring method on adhesion degree of marine organism

친환경 다공질 콘크리트의 배합조건별 시험체(180×150×70 mm)에 어류를 단기간 동안 노출시켜 시험물질에 대한 독성을 평가하는 것으로 어류 개체의 치사율로서 어독성을 평가하였다. 실험용 수조는 300×170×220 mm의 크기로 제작하고, 수온 25℃의 물을 6L정도 채워 수조당 15마리의 붕어를 수용하여 실험을 수행하였다.

2.3 배합

친환경 다공질 콘크리트의 배합요인에 따른 물리·역학적 특성을 분석하기 위하여 사전 실험을 통하여 물-결합재비 25%, 친환경 다공질 콘크리트의 적정 워커빌리티를 확보할 수 있는 결합재의 흐름값을 180%로 선정하였으며, 배합설계시 콘크리트 내부에 일정량의 공극을 확보하기 위하여 목표공극률을 15, 20, 25%로 선정하였다. 또한, 부순골재에 대한 복합슬래그골재의 대체비율(0, 30, 50, 100%) 및 특수처리입상비료의 혼입률(0, 5, 10, 20%)을 변화시켜 배합을 실시하였으며, 배합표는 Table 7과 같다. 또한 믹싱은 시멘트 페이스트의 분산성을 향상시키기 위해 30ℓ의 옴니 믹서를 사용하여 먼저 시멘트, 골

Table 7 Mix proportions of environmentally friendly porous concrete

Mix. no.	W/B (%)	Target void ratio (%)	SA ⁽¹⁾ content (%)	GF ⁽²⁾ content (%)	PVA ⁽³⁾ content (Vol.%)	Unit weight (kg/m ³)						
						C	W	CA ⁽⁴⁾	SA ⁽¹⁾	GF ⁽²⁾	PVA ⁽³⁾	Ad. ⁽⁵⁾
I-1(P ⁽⁶⁾)	25	15	-	-	0.05	438	110	1661	-	-	0.65	3.55
I-2			30	-	0.05	438	110	1163	563	-	0.65	3.55
I-3			50	-	0.05	438	110	831	938	-	0.65	3.55
I-4			100	-	0.05	438	110	-	1875	-	0.65	3.55
I-5			30	5	0.05	438	110	1163	563	22	0.65	3.55
I-6			30	10	0.05	438	110	1163	563	44	0.65	3.55
I-7			30	20	0.05	438	110	1163	563	88	0.65	3.55
II-1(P ⁽⁶⁾)		20	-	-	0.05	352	88	1661	-	-	0.65	2.76
II-2			30	-	0.05	352	88	1163	563	-	0.65	2.76
II-3			50	-	0.05	352	88	831	938	-	0.65	2.76
II-4			100	-	0.05	352	88	-	1875	-	0.65	2.76
II-5			30	5	0.05	352	88	1163	563	18	0.65	2.76
II-6			30	10	0.05	352	88	1163	563	35	0.65	2.76
II-7			30	20	0.05	352	88	1163	563	70	0.65	2.76
III-1(P ⁽⁶⁾)	25	25	-	-	0.05	266	67	1661	-	-	0.65	2.00
III-2			30	-	0.05	266	67	1163	563	-	0.65	2.00
III-3			50	-	0.05	266	67	831	938	-	0.65	2.00
III-4			100	-	0.05	266	67	-	1875	-	0.65	2.00
III-5			30	5	0.05	266	67	1163	563	13	0.65	2.00
III-6			30	10	0.05	266	67	1163	563	27	0.65	2.00
III-7			30	20	0.05	266	67	1163	563	53	0.65	2.00

SA⁽¹⁾: slag aggregate, GF⁽²⁾: specially treated granular fertilizer, PVA⁽³⁾: polyvinyl alcohol fiber, CA⁽⁴⁾: crushed aggregate, Ad⁽⁵⁾: admixture, P⁽⁶⁾: plain

재, 혼화재료를 투입하고 200 rpm으로 60초 동안 혼합한 후 혼합수를 투입한 후 다시 180초 동안 혼합하고, 마지막으로 특수처리입상비료를 투입하여 30초간 혼합하는 분할투입방법으로 배합 하였다.

2.4 공시체의 제작

공시체의 제작은 일본 에코콘크리트연구위원회의 다공질 콘크리트용 공시체의 제작방법⁷⁾을 참조하여 믹싱을 끝낸 친환경 다공질 콘크리트를 각 소요의 몰드에 1/2씩 채운 후 각 층마다 진동테이블을 이용하여 진동다짐을 실시하여 제작하였다. 친환경 다공질 콘크리트가 타설된 공시체는 24시간 기건양생 후에 탈형하고 소요의 재령(28일)까지 20±3℃의 수중에서 표준양생을 실시하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 공극률

친환경 다공질 콘크리트의 배합조건에 따른 공극률 측정 결과는 Fig. 4와 같다. 이를 고찰하여보면 모든 배합조건에서 실측 공극률과 목표공극률이 최대 2.5% 정도의 차이만을 나타내 이 연구에서 적용한 친환경 다공질 콘크리트의 배합설계 및 혼입방법과 다짐방법 등이 적절했던 것으로 판단된다. 복합슬래그골재의 혼입에 따른 영향은 혼입률이 증가함에 따라 실측 공극률이 증가하는 경향을 나타냈으며, 복합슬래그골재 대체율 100%에서는 Plain에 비하여 약 6.8~15.21%정도까지 공극률이 증가되는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 1의 복합슬래그골재 SEM 분석 사진에서 나타난 바와 같이 복합슬래그 냉각과정에서 다량의 기포가 발생되어 골재 내부에 공극을 형성하기 때문에 실측 공극률이 증가한 것으로 판단된다.

특수처리입상비료의 혼입률에 따른 실험을 수행한 결과, 특수처리입상비료의 혼입률이 증가함에 따라 공극률은 감소하는 것으로 나타났으며, 혼입률 20% 이상에서는

특수처리입상비료를 혼입하지 않은 SA30 배합에 비하여 최대 2.88% 정도까지 실측 공극률이 감소하여 다소 많은 차이를 나타냈다. 이는 특수처리입상비료를 혼입함에 따라 시멘트 페이스트로 피복된 골재와 골재사이의 공극을 특수처리입상비료가 충전시켜 공극이 감소하여 실측공극률이 감소된 것으로 판단된다.

3.2 압축강도

목표공극률, 복합슬래그골재의 혼입률 및 특수처리입상비료의 혼입률 등 매트릭스 요인별 배합조건이 친환경 다공질 콘크리트의 강도발현에 미치는 영향을 검토하기 위하여 변수마다 5개의 계측값의 평균을 구해 재령 28일에 압축강도 시험을 수행하였으며, Fig. 5에 나타내었다.

압축강도 특성을 고찰하여 보면 목표공극률이 증가함에 따라 압축강도는 감소하는 것으로 나타났으며, 동일 목표공극률에서 복합슬래그골재의 혼입률이 증가함에 따라 강도는 감소하는 경향을 나타내 복합슬래그골재 대체율 100%에서는 부순골재만을 사용한 경우에 비하여 약 30.6~33.4%의 강도 감소를 나타냈다. 이러한 원인은 목표공극률이 증가함에 따라 단위 골재량에 대한 시멘트 페이스트량이 감소하여 강도가 저하되었으며, 복합슬래그골재를 혼입한 경우에는 복합슬래그골재의 입형이 불량하고 골재자체의 경도가 부순골재에 비하여 약하기 때문인 것으로 판단된다.

특수처리입상비료 혼입률의 영향은 혼입률 5%까지는 강도차이가 SA30 배합과 비교하여 미미한 것으로 나타났으나 혼입률 10%에서는 SA30 배합에 비하여 강도가 4.4~5.5%까지 증가하였으며, 그 이상의 혼입률에서는 압축강도가 10%혼입시 보다 낮은 강도를 나타내었다. 이는 적정량의 특수처리입상비료를 혼입함으로써, 시멘트 코팅된 입상비료가 골재와 골재사이의 공극을 막고, 페이스트 사이의 접점(points of contact, 接點)역할을 함으로써 강도향상을 나타낸 반면, 과도한 입상비료의 혼입시 골재를 피복해야 할 페이스트가 입상비료를 다시 한번 코

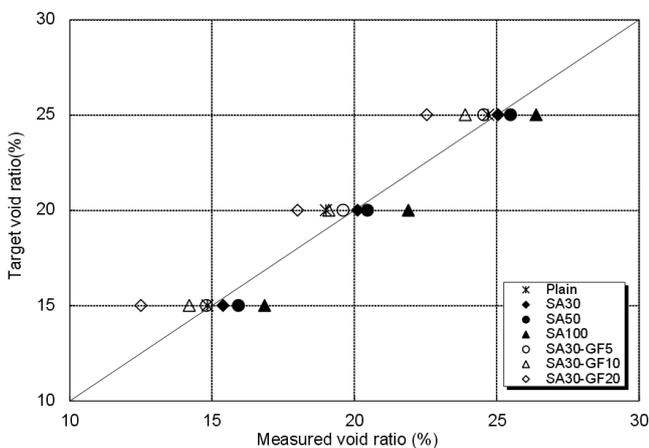


Fig. 4 Correlations between target and measured void ratio

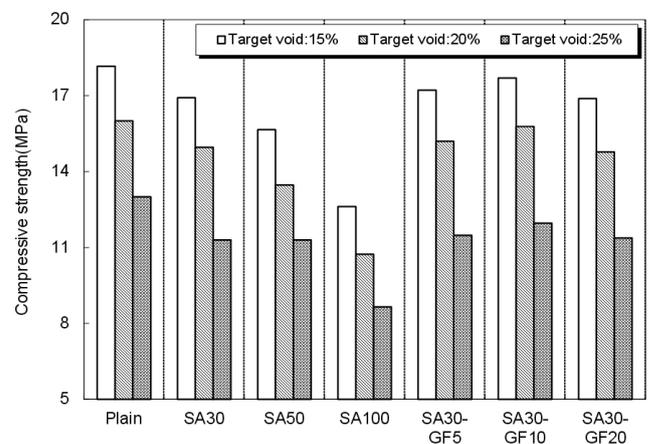


Fig. 5 Average compressive strength measured at 28 days

팅함으로서 상대적으로 골재와 골재사이에 형성되는 접점영역에서의 페이스트양이 감소하였기 때문에 판단된다.⁸⁾ 이상의 결과로부터 친환경 다공질 콘크리트의 공극률과 압축강도 등 품질특성에 악영향을 미치지 않는 특수처리입상비료의 혼입률은 10% 정도인 것으로 나타났다.

또한, 복합슬래그 골재의 혼입으로 인한 강도 감소경향은 특수처리 입상비료의 혼입에 따라 상쇄될 수 있는 것으로 나타나, 복합슬래그골재를 30%까지 대체하더라도 특수처리입상비료를 10% 혼입하면 부순골재만을 사용한 경우의 98.99%까지 압축강도를 발현하는 것으로 나타났다.

한편, 친환경 다공질 콘크리트는 콘크리트 내부에 투수 및 투기가 가능한 공극을 가짐으로서 강도가 일반 콘크리트에 비해 낮은 특징을 가지고 있으며, 공극이 클수록 강도가 낮아지는 경향을 나타낸다. Fig. 6은 친환경 다공질 콘크리트의 공극률과 압축강도의 관계를 회귀 분석한 결과로서, 공극률이 증가함에 따라 강도는 식 (2)의 함수로 직선적으로 감소하는 경향을 보였으며, 상관계수 0.77의 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

$$f_c = -1.37V + 39.1, (R^2 = 0.77) \quad (2)$$

여기서, f_c : Compressive strength (MPa)

V : Void ratio (%)

3.3 해수저항성

일반적으로 해수는 황산염, 염화나트륨, 염화마그네슘 등의 용해성 염을 포함하고 있다. 이러한 용해성 염은 콘크리트 수화직 후 C₃A 입자 표면에 형성되는 에트르라이트의 결정화를 연장함으로써 콘크리트의 강도에 영향을 미치게 된다.^{9,10)} 따라서 해양목장 조성을 위한 소재로서 친환경 다공질 콘크리트의 적용을 위해서는 내해수성에 대한 검토가 요구되며, 이에 이 연구에서는 친환경 다공질 콘크리트의 해수저항성을 평가하기 위하여 목표공극

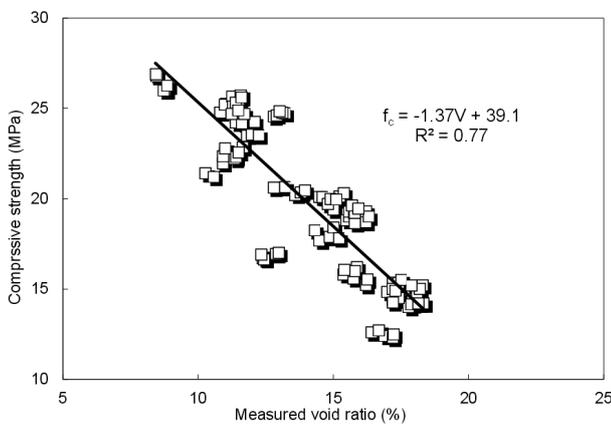
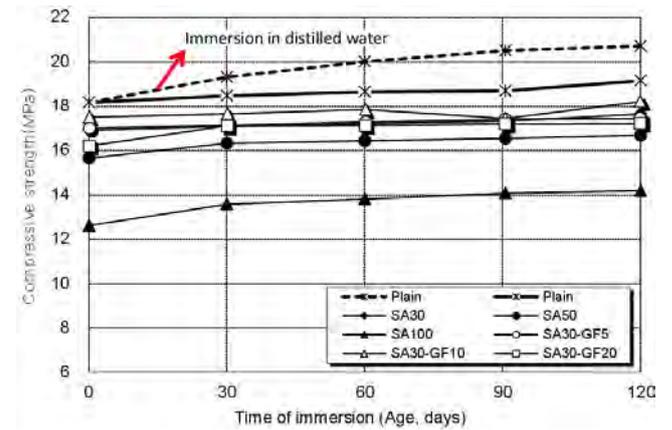


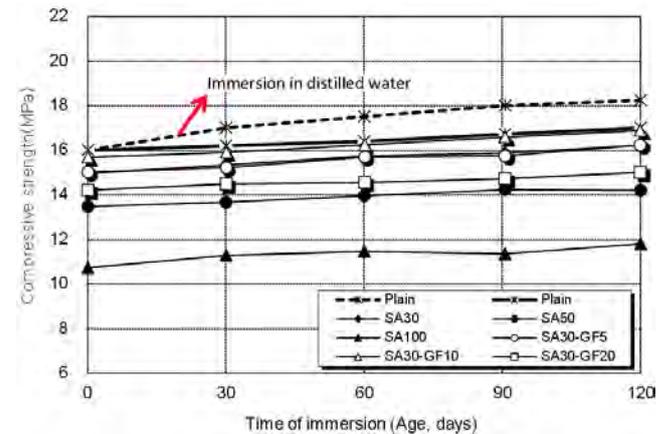
Fig. 6 Relationship between measured void ratio and compressive strength

률, 복합슬래그골재 혼입률, 특수처리입상비료의 혼입에 따른 공시체를 제조하여 28일간 양생한 후 인공해수와 증류수에 30, 60, 90, 120일 동안 침지시켜 콘크리트의 압축강도를 측정함으로써 내해수성을 평가하였으며, 결과는 Fig. 7과 같다.

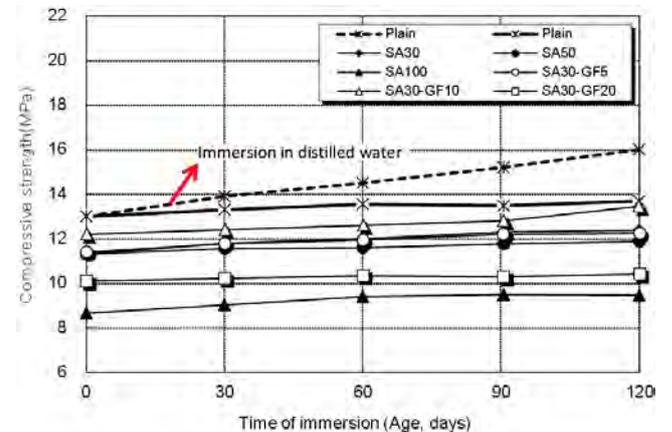
이를 고찰하여 보면 증류수에 침지한 경우에는 침지일수가 증가함에 따라 압축강도는 증가하여 침지 120일에서는 초기 압축강도에 비하여 12.3~13.8%의 강도증가를



(a) Target void ratio of 15%



(b) Target void ratio of 20%



(c) Target void ratio of 25%

Fig. 7 Compressive strength measured after immersion in artificial seawater

나타냈으나, 해수에 침지한 경우에는 강도 증가가 둔화되어 침지 120일에서 약 2.5~11.1%의 강도증가를 나타내었다. 이러한 연구 경향은 기존 연구^{11,12)}와 비교적 잘 일치하는 것으로서, 인공해수 중의 염화물 이온이 콘크리트 중에 침투하여 시멘트 수화시 생성된 섬유상의 규산칼슘 수화물(C-S-H gel)로부터 칼슘성분을 석출시켜 기공을 형성시킨다. 그리고, 석출된 기공에는 마그네슘이 침투하여 수경성이 없는 규산마그네슘 수화물(M-S-H)로 전환되어 수화반응을 방해하고 표면조직을 연화시켰기 때문에 인공해수에 침지된 콘크리트 공시체의 강도 증가 경향이 둔화된 것으로 판단된다.

목표공극률에 따른 영향은 공극률이 증가함에 따라 해수저항성은 저하되는 것으로 나타났으며, 침지 120일에서 증류수에 비하여 해수침지시 공극률 15%의 경우 92.5%의 강도발현을 나타냈지만, 공극률 25%의 경우 85.6%의 낮은 강도발현을 나타내었다.

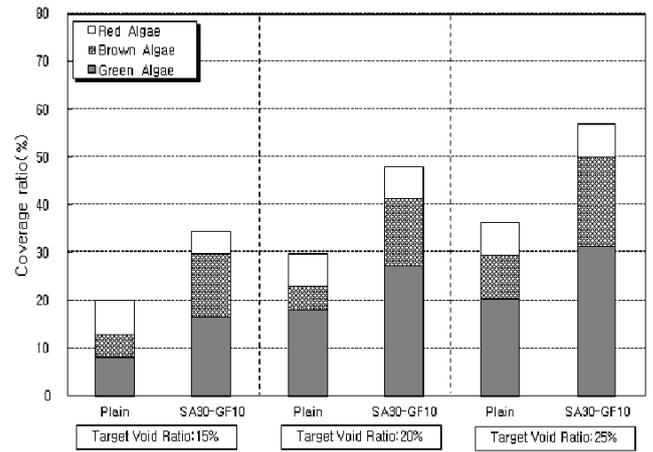
복합슬래그골재 혼입에 따른 영향은 혼입률이 증가함에 따라 내해수성은 저하되었다. 또한, 특수처리입상비료 10%혼입한 배합(SA30-GF10)조건이 혼입하지 않은 경우(SA30)에 비하여 강도측정 값이 증가되어, 부순골재를 혼입한 Plain과 유사한 내해수성을 나타내었다. 이러한 결과는 3.2절의 압축강도 분석 결과와 동일 경향으로서, 친환경 다공질 콘크리트의 강도특성이 해수저항성과의 상관성이 있는 것으로 나타났다.

3.4 해양생물 서식기반 제공 능력 평가

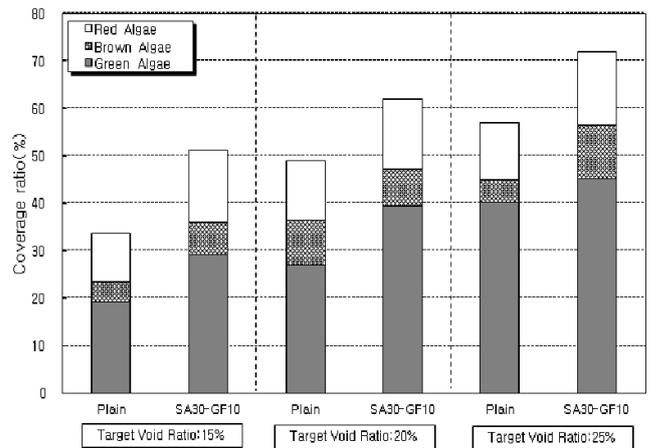
친환경 다공질 콘크리트의 해양생물 서식기반 제공능력을 평가하기 위하여 식물의 착상 및 서식 공간제공이 가능하도록 13~20 mm 골재입도, 15, 20, 25% 목표공극률의 친환경 다공질 콘크리트를 제조하여 침지기간에 따른 해양생물의 부착정도를 측정하였으며, 시험 결과는 Fig. 8 및 Table 8과 같다.

이를 고찰하여 보면 목표공극률 및 특수처리입상비료 사용 유무 등 모든 조건에서 해수 침지기간이 경과됨에 따라 해양생물의 피복비율은 증가되는 것으로 나타났으며, 특수처리입상비료의 혼입유무와 상관없이 해수침지 10개월에서는 약 54.1%의 피복률을 나타내어 친환경 다공질 콘크리트의 우수한 해양생물 부착능력을 확인하였다. 공극률에 따른 영향은 동일 조건에서 공극률이 증가함에 따라 해양생물의 피복율도 증가하여 공극률 15%에 비하여 공극률 20%에서는 10.7%(침지 10개월 후), 공극률 25%에서는 20.8%(침지 10개월 후)의 부착력 향상을 나타내었다. 이러한 경향은 공극률이 증가할수록 해양생물의 포자가 착상·서식할 수 있는 면적의 증대와 식물 뿌리가 안정적으로 생육할 수 있는 공간이 증가되었기 때문으로 판단된다. 또한 침지 10개월 후 공극률 25% 이상에서는 특수처리입상비료를 혼입하지 않더라도 해양생물의 피복면적 비율이 전체 시험체 면적의 50% 이상을

나타내 우수한 해양생물의 서식기반 제공능력을 나타냈다. 특수처리입상비료의 혼입이 해양생물 서식에 미치는 영향은 입상비료를 혼입하지 않은 Plain에 비하여 10%혼입하였을 경우 침지 5개월에서는 58~73%, 침지 10개월에서는 26~52%의 착상 및 서식능력의 향상을 나타내었다. 침지 초기에는 특수처리입상비료에서 영양염이 충분히 용출되어 해양생물의 착상 및 서식에 우수한 성능을 나타내었지만, 침지 10개월에서는 특수처리입상비료의



(a) Immersion time of 5 month



(b) Immersion time of 10 month

Fig. 8 Seaweed adhesion of environmentally friendly porous concrete

Table 8 Photo of marine organism inhabitation according to mixing with specially treated granular fertilizer

Immersion time	Plain	VR15-GF10	VR20-GF10	VR25-GF10
5 month				
10 month				

영양염 용출에 따른 영향보다는 기존에 착상된 생물의 성장여부와 주변환경에 대한 영향이 더 많이 작용한 것으로 판단된다. 친환경 다공질 콘크리트에 부착 및 서식하고 있는 해양생물의 종별 분포특성을 살펴보면 침지 5개월 및 10개월 모두에서 파래와 청각 등의 녹조류가 가장 많이 서식하고 있는 것으로 나타났으며, 침지 후 5개월 후인 7월경에는 지충이, 모자반과 같은 갈조류가 우뚝가사리와 돌가사리와 같은 홍조류에 비하여 다소 많은 서식분포를 나타냈다. 침지 후 10개월(12월 경)에서는 파래의 서식면적 비율이 약 23~40% 정도를 차지하였으며 그 다음으로 홍조류와 갈조류의 순이었으나 녹조류를 제외한 나머지 식물군에서는 큰 차이를 나타내지 않았다. 이는 우리나라 남해 연안해역에서는 녹조류의 분포가 가장 많으며 여름철에는 갈조류가 겨울철에는 홍조류의 서식이 많은 계절별 분포와 유사한 것으로 나타났다.

3.5 어독성 시험

어독성 시험의 시험체 제작은 대조군으로서 III-1(plain)과 앞절에서 가장 우수한 배합조건(III-6)인 복합슬래그골재 대체율 30%, 특수처리입상비료 혼입률 10% 및 목표공극률 25%의 배합으로 제작하였으며, 공시체 제작 후 3개월간 양생을 통하여 콘크리트의 높은 알칼리성을 중성화하여 평가하였다.

실험은 Fig. 9와 같이 동일한 조건의 두 개의 수조(300×170×220 mm)에 붓어 15마리씩 수용하여 수온 25℃를 유지하면서 1개월간 붓어의 치사율을 분석하였다.

어독성 평가 결과 복합슬래그골재 및 특수처리입상비료의 혼입조건과 상관없이 붓어의 치사율이 0%로 나타나 유해성분은 용출되지 않는 것으로 나타났다. 따라서



Fig. 9 Fish toxicity test

해양목장 조성용 소재로서 복합슬래그골재 및 특수처리입상비료를 친환경 다공질 콘크리트의 소재로 적용하여도 안전할 것으로 판단된다.

4. 결 론

이 연구에서는 철강산업 부산물인 복합슬래그골재 및 특수처리입상비료를 활용한 해양목장 조성용 친환경 다공질 콘크리트의 배합요인별 공학적 특성 및 해양생물에 대한 유해성 분석과 서식기반 제공능력을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 친환경 다공질 콘크리트의 공극률 측정 결과, 모든 배합조건에서 오차범위인 2.5% 이내의 결과를 나타내었으며, 복합슬래그골재 혼입률이 높을수록 공극률은 높아지고, 특수처리입상비료의 혼입시 친환경 다공질 콘크리트의 공극을 채워 실측공극률이 낮아지는 경향을 나타내었다.
- 2) 압축강도 시험 결과는 부순골재를 대체하여 혼입된 복합슬래그골재의 혼입률 30%까지는 Plain과 유사한 경향을 나타내었으나 50%이상에서는 강도가 급격히 저하되는 경향을 나타내어 최적 혼입률은 복합슬래그골재 30%, 특수처리입상비료 10%정도인 것으로 나타났다.
- 3) 해양목장 조성용 친환경 다공질 콘크리트의 내구성능을 평가하기 위하여 해수저항성 시험을 인공해수에 침지한 공시체의 강도측정으로 수행한 결과, 특수처리입상비료를 10%혼입하면 복합슬래그골재를 30%치환하더라도 부순골재를 혼입한 다공질 콘크리트 공시체와 유사한 강도 측정값을 나타내었다. 이는 적정량의 특수처리입상비료를 혼입함으로써, 특수처리 입상비료가 골재사이의 공극을 막고, 페이스트 사이의 접점역할을 하여 강도가 향상되었기 때문인 것으로 판단된다.
- 4) 친환경 다공질 콘크리트의 해양생물 서식기반 제공능력평가 결과, 공극률이 증가 할수록 해양생물의 착상 및 서식할 수 있는 공간이 증대되어 우수한 성능을 나타내고 특수처리입상비료 10%혼입시 해수침지 5개월에 58~73%의 성능향상효과를 나타내었다.
- 5) 복합슬래그골재 및 특수처리입상비료의 해양생물에 대한 유해성 평가를 수행한 결과, 어류에 대한 유해물질은 용출되지 않는 것으로 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 355-2011-1-D00067)으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Korea Iron & Steel Association, Statistical Data, <http://www.kosa.or.kr>, Accessed on October 5, 2012.
2. Choi, S. W., Kim, V., Chang, W. S., and Kim, E. Y., "The Present Situation of Production and Utilization of Steel Slag in Korea and Other Countries," *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 19, No. 6, 2007, pp. 28-33.
3. Ministry of Environment, Environment-Statistical-Portal, "Waste Generation and Disposal of the Nationwide in 2010," <http://stat.me.go.kr>, Accessed on October 10, 2012.
4. Korea Waste Association, *A Study on Improvement of Iron Slag Recycling System*, Ministry of Environment, 2011, pp. 1-130.
5. Kim, H. S., Lee, J. W., Kim, J. R., and Yoon, H. S., "Estimation of Countermeasures and Efficient Use of Volume of Artificial Reefs Deployed in Fishing Grounds," *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 12, No. 3, 2009, pp. 181-187.
6. Park, K. B. and Noguchi, T., "Environmental Concern Concrete and Reinforced Concrete Construction for Low Carbon Green Growth," *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 4, 2009, 2009, pp. 44-49.
7. Japan Concrete Institute, *ECO Concrete Technical Committee Report*, Japan Concrete Institute, 1995, pp. 56-58.
8. Korea Concrete Institute, *Special Concrete Engineering*, Kimoondang Publishing Company, Seoul, Korea, 2004, pp. 243-281.
9. Korea Concrete Institute, *New Concrete Engineering*, Kimoondang Publishing Company, Seoul, Korea, 2011, 932 pp.
10. Sidney Mindess, J. Francis Young, and David Darwin, *Concrete*, Pearson, 2003, pp. 57-92.
11. Park, S. B., "Development and Applications of Multiple Performance Concrete for Kelp Foorest Regeneration Using Recycled Aggregate of Waste Concrete," Ministry of Construction and Transportation, 2007, pp. 356-362.
12. Duan, P., Shui, Z., Chen, W., and Shen, C., "Influence of Metakaolin on Pore Structure-Related Properties and Thermodynamic Stability of Hydrate Phases of Concrete in Seawater Environment," *Construction and Building Materials*, Vol. 36, 2012, pp. 947-953. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.073>)

요 약 철강산업은 다량의 원료와 다량의 에너지를 소비하는 대표적인 업종으로 생산 공정을 거치면서 철강생산과 더불어 부산물인 철강슬래그를 다량 발생시킨다. 또한, 근래 무분별한 해양개발 및 환경오염 등으로 광대한 해양생물의 서식기반이 소실되어 수산자원의 감소현상이 심화되고 있어 이에 대한 대책이 시급한 실정이다. 따라서 이 연구에서는 다량 부산되는 복합슬래그를 천연골재 대체재료로 재활용하는 방안 제시와 해양목장 조성용 소재로서의 친환경 다공질 콘크리트의 배합요인별 공학적 특성 및 적용성 검토연구를 수행하였다. 배합요인별 공극률 시험결과 모든 조건에서 오차범위 2.5%이내의 결과를 나타내었다. 압축강도 시험 결과 최적 혼입률은 복합슬래그골재 30%, 특수처리입상비료 10% 혼입시 가장 우수한 친환경 다공질 콘크리트 제조가 가능하였다. 해양 적용 콘크리트로서 해수저항성 역시 압축강도가 높은 배합조건이 가장 우수한 성능을 나타냈다. 친환경 다공질 콘크리트의 해양생물 서식기반 제공능력평가 결과, 공극률이 증가할수록 해양생물의 착상 및 서식이 용이하였으며, 특수처리입상비료 혼입시 초기 착상 및 서식활성화가 활발히 이루어짐을 확인하였다. 복합슬래그골재 및 특수처리입상비료의 혼입에 따른 해양생물에 대한 유해성 검토 결과 어류에 대한 안정성은 확보되는 것으로 확인하였다.

핵심용어 : 복합슬래그골재, 특수처리입상비료, 연안해역 복원, 친환경 다공질 콘크리트