

# 전기로 슬래그를 활용한 인공리프용 친환경콘크리트의 공학적 성능 및 적용성

조영진\* · 최세휴\*\*

Jo, Young-jin\*, Choi, Se-hyu\*\*

## Engineering Performance and Applicability of Eco-Friendly Concrete for Artificial Reefs Using Electric Arc Furnace Slags

### ABSTRACT

Unlike the concrete structure built on land, that exposed to the marine environment is greatly degraded in durability due to the exposure to not only the physical action caused by sea wind, tide, and wave, but also the harsh conditions, including the chemical erosion and freeze-thaw which result from  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Mg}^{2+}$  ions in seawater. In the process of the large scaled construction of submerged concrete structures, of course environmental hazardous substance, such as alkaline (pH) and heavy metals, may be leached. Thus, this issue needs to be adequately reviewed and studied. Therefore, this study attempted to develop a CSA (Calcium Sulfo Aluminate) activator using electric arc furnace reducing slags, as well as the eco-friendly concrete for artificial reefs using electric arc furnace oxidizing slag as aggregate for concrete. The strength properties of the eco-friendly concrete exposed to the marine environment were lower than those of the normal concrete by curing 28 days. This suggest that additional studies are needed to improve the early strength of the eco-friendly concrete. With respect to seawater resistance of the eco-friendly concrete, the average strength loss against 1 year of curing days reached 8-9%. the eco-friendly concrete using high volume of ground granulated blast furnace slags and high specific gravity of electronic arc furnace oxidizing slag demonstrated the sufficient usability as a freeze-thaw resistant material. With respect to heavy metal leaching properties of the eco-friendly concrete, heavy metal substances were immobilized by chemical bonding in the curing process through the hydration of concrete. Thus, heavy metal substances were neither identified at or below environmental hazard criteria nor detected, suggesting that the eco-friendly concrete is safe in terms of leaching of hazardous substances.

**Key words** : EAF-reducing slag, EAF-oxidizing slag, Eco-friendly concrete, Marine environment exposure test

### 초 록

해양환경에 노출된 콘크리트는 육상에서 건설되는 콘크리트와 달리 해풍, 조력, 파도, 파랑 등에 의한 물리적 작용과 해수의  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  및  $\text{Mg}^{2+}$  이온 등에 의한 화학적 침식작용 및 동결융해 등 가혹한 환경에 노출되어 콘크리트의 내구성을 크게 저하시킨다. 해중 콘크리트의 대규모 시공은 콘크리트의 강도손실은 물론 알칼리(pH) 및 중금속 등 환경유해물질이 용출될 수 있어 이에 대한 충분한 검토와 연구가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 전기로 환원슬래그로부터 CSA 자극제를 개발하고 전기로 산화슬래그를 콘크리트용 골재로 활용하여 인공리프용 친환경콘크리트를 개발하였다. 초기강도는 Normal concrete보다 낮게 나타나 친환경콘크리트의 초기강도 품질향상을 위한 추가적인 연구가 필요하였으며, 친환경콘크리트의 해수저항성은 양생일 1년 대비 평균 강도손실이 8~9% 발생하였다. 고함량 고로슬래그 미분말과 고비중 전기로 산화슬래그 골재를 사용한 친환경콘크리트를 동결융해저항성 재료로써 충분히 활용할 수 있는 가능성을 확인하였다. 친환경콘크리트의 중금속 용출특성은 콘크리트의 수화반응을 통한 경화과정에서 중금속 성분은 화학적 결합을 통해 고정화되기 때문에 환경유해성 기준 이하이거나 검출되지 않아 유해물질 용출에 안전하다는 것을 확인하였다.

**검색어** : 전기로 환원슬래그, 전기로 산화슬래그, 친환경콘크리트, 해양환경폭로시험

\* 정회원 · 한국건설생활환경시험연구원 선임연구원 (Korea Conformity Laboratories · yjjo4u@kcl.re.kr)

\*\* 정회원 · 교신저자 · 경북대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Kyungpook National University · shchoi@knu.ac.kr)

Received September 29, 2014/ revised February 2, 2015/ accepted May 16, 2015

## 1. 서론

국토의 효율적인 활용을 위하여 해안 및 항만, 연안해역 등 해양환경 조건하에서 해양설치용 콘크리트 구조물 시공은 매년 증가하고 있지만, 파도와 조수의 이동으로 인한 해안침식과 태풍 등의 자연재해로 인한 해안 및 항만구조물의 파괴가 빈번히 발생하고 있다. 해양환경폭로 조건에 노출된 콘크리트 구조물은 육상에서 건설되는 콘크리트 구조물과 달리 해풍, 조력, 파도, 파랑 등에 의한 물리적 작용과 해수 중의  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$  및  $Mg^{2+}$  이온 등에 의한 화학적 침식작용 및 동결융해의 반복 작용과 같은 가혹한 환경조건의 영향을 받아 콘크리트 구조물의 내구성은 크게 저하된다고 하였다(Park et al., 2011). 또한 충분한 내구성을 확보하지 못한 콘크리트를 사용하거나 해중 콘크리트 구조물을 대규모로 시공할 경우 연안 해역의 해양 환경오염 등에 영향을 줄 수 있으며, 이러한 원인에 대한 근본적인 해결방안을 위한 연구가 충분히 이루어지지 않고 있다. 그러나 최근에 해양환경조건에 노출된 콘크리트의 강도발현 연구와 더불어 최근 철강 산업부산물인 슬래그를 활용한 해양설치용 친환경콘크리트 개발에 관한 연구가 주목을 받고 있다. 국내의 조강생산 능력은 2008년에는 약 5,332만 톤에 이르러 세계 6위의 조강생산국이 되었으며(Korea Iron & Steel Association, 2012), ‘2014년 2월 세계 조강생산량 통계’에 따르면 한국은 지난해 2월 대비 6.2% 많은 529만천 톤을 달성하며 3개월 연속 전년 대비 증가하고 있다(World Steel Association, 2014). 철강슬래그에 대한 기존 연구동향은 콘크리트용 혼화재료의 고로 슬래그 미분말(Ground granulated blast furnace, GGBFS)을 제외한 대부분 저부가가치 형태의 보조기층에 관한 연구와 천연골재 대체를 위한 콘크리트용 골재 연구라고 할 수 있다. 철강슬래그는 철강 생산 공정에 따라 각기 다른 화학적 조성과 물리적 특성을 나타내고 있으며, 이러한 물성을 활용하여 새로운 고부가가치 용도로의 개발이 가능하다. 철강슬래그 중  $11CaO \cdot 7Al_2O_3 \cdot CaF_2$ ,  $2CaO \cdot SiO_2$  등의 잠재수경성을 가진 전기로 환원슬래그를 활용하여 CSA(Calcium Sulfo Aluminate) 자극제의 파일럿 규모의 생산과 품질 검토를 통해 실용화에 대한 연구가 필요한 시점이라고 할 수 있다. 한편 국내 인구 1인당 콘크리트 사용량은 매년  $2.5m^3$  정도 사용하고 있으며, 콘크리트 결합재로 보편적으로 사용하고 있는 보통 포틀랜드 시멘트(Ordinary portland cement, OPC)의 제조과정에서 이산화탄소는 900kg/t 정도 배출한다고 알려져 있다(Park et al., 2012). 이와 관련하여 최근 기후변화 대응을 위한 정부의 환경정책의 변화가 시도되고 있으며 콘크리트 제조에 따른 이산화탄소 감축을 위해 기존 보통 포틀랜드 시멘트의 사용량을 줄이고 혼화제 대량사용을 위한 철강 산업부산물 활용 및 콘크리트 초기강도 개선을 위한 자극제 등 성능개선 목적의 연구가 진행되고

있다. 환경부하를 저감할 수 있는 친환경콘크리트의 개발 및 이를 통한 탄소배출의 최소화 연구가 필요하며 이를 해결하기 위한 방안으로 인류와 생물의 조화로운 관계를 창조할 수 있는 친환경콘크리트(Eco-friendly concrete, EFC)의 개념 도입 및 개발이 필요하다. 친환경콘크리트는 크게 환경부하 저감형과 생물 대응형으로 구분하고 있으며, 특히 해양설치용 콘크리트인 테트라포드(Tetrapod, TTP), 인공리프(Artificial reefs) 등은 내해수성, 장기강도 및 낮은 pH 그리고 환경유해성에 대한 안전성 등을 필요로 하는 친환경적인 활용이 절실히 필요하다. 본 연구에서는 해양설치용 수중구조물로써 인공리프용 친환경콘크리트를 개발하여 현장 적용하고자 전기로 슬래그를 활용하였다. 전기로 슬래그는 콘크리트 결합재인 보통 포틀랜드 시멘트의 사용량을 최소화하고 고로슬래그 미분말의 사용량을 증가시킴으로써 발생하는 콘크리트의 초기강도 저하문제를 해결하기 위하여 전기로 환원슬래그(Electric arc furnace reducing slag)로부터 제조한 CSA 자극제와 리사이클링 공정을 거친 콘크리트 구조용 골재로써 자연골재 대비 상대적으로 고비중인 전기로 산화슬래그(Electric arc furnace oxidizing slag)를 친환경콘크리트의 구성 재료로 사용하였다. 따라서 본 연구는 철강 산업부산물인 전기로 슬래그의 유효활용 방안의 하나인 친환경콘크리트의 인공리프용 재료로서의 해수저항성 및 동결융해저항성 등 콘크리트로서의 내구성과 해양생물과의 친환경성을 통해 조화로운 해양환경을 구현하고자 환경 유해물질에 대한 용출특성을 분석하고 평가하였다.

## 2. 사용재료 및 실험방법

### 2.1 사용재료

#### 2.1.1 결합재

본 연구에서 사용한 보통 포틀랜드 시멘트, 고로슬래그 미분말 혼화재(GGBFS) 그리고 콘크리트의 초기강도 향상을 위한 첨가제로서 CSA 자극제를 배합설계의 사용재료로 사용하였으며, 콘크리트 결합재에 대한 물리·화학적 특성을 Table 1에 나타내었다.

#### 2.1.2 콘크리트 구조용 골재

제철소에서 배출되는 전기로 산화슬래그를 본 연구의 사용 목적에 적합하도록 전기로 산화슬래그 골재자원화 공정과정을 거친

Table 1. Properties of Binder

Item Types	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Chemical composition (%)					
			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>
OPC	3.15	3,300	22.9	5.6	3.3	64.1	2.6	0.6
GGBFS	2.90	4,379	33.5	13.6	-	41.8	0.5	-
AE	1.18	-	water reducing agent, liquid type					

Table 2. Chemical Composition and Physical Properties

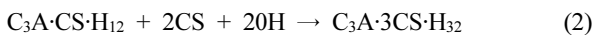
Item	EFG	EFS	Fine agg.	Coarse agg.
Chemical component	CaO(%)	22.3	-	-
	MgO(%)	4.3	-	-
	FeO(%)	41.8	-	-
	Basicity	1.5 (CaO/SiO <sub>2</sub> )	-	-
Density(g/cm <sup>3</sup> )	3.06	3.04	2.61	2.64
Absorption(%)	1.6	1.5	1.2	1.0~1.2
Unit weight (kg/L)	2.00	2.20	1.60	1.58
Gmax(mm)	25~5	5~1.2	10~0	13~25

후 소요의 분쇄 입정에 따라 굵은 골재(EFG, Electric arc furnace oxidizing slag gravel) 5~25mm와 잔골재(EFS, Electric arc furnace oxidizing slag sand) 1.2~5mm로 구분하여 인공리프용 친환경콘크리트의 콘크리트용 골재로서 사용하였다. 또한, 인공리프용 친환경콘크리트와의 상대적인 비교를 위한 기존 해양철치용 콘크리트 제품에 사용하고 있는 천연골재를 파쇄한 부순 골재를 사용하였다.

콘크리트용 골재에 대한 물리적 특성은 Table 2와 같다.

### 2.1.3 CSA 자극제 제조

전기로 환원슬래그를 이용한 CSA 자극제의 수화반응 이론을 살펴보면, 전기로 환원슬래그 미분말에 존재하는 주요 성분 중 칼슘플루오르알루미네이트( $11\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaF}_2$ )는 가장 활성이 크기 때문에 물과 접촉하면 용해되어 칼슘실리케이트상( $\text{C}_3\text{S}$  ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ),  $\text{C}_2\text{S}$  ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ))에서 용해된 수산화칼슘( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), 무수석고( $\text{CaSO}_4$ ) 및 탄산나트륨( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 등과 반응하여  $\text{Al}(\text{OH})_2\text{F}$ ,  $\text{CAH}_{10}$ ,  $\text{C}_2\text{AH}_8$ ,  $\text{C}_3\text{AH}_6$ ,  $\text{C}_4\text{AH}_{19}$  등 칼슘알루미네이트 수화물을 생성한다. 이 수화물은 별도로 용해된  $\text{CaSO}_4$ 과 반응하여 칼슘알루미늄 모노설페이트(Calcium aluminum monosulfate) 수화물 ( $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CS} \cdot \text{H}_{12}$ )이나, 에트링가이트( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ )를 생성하여 미소공극을 충전시켜 조적을 치밀화시켜 급속히 경화가 시작되고 초기에 높은 강도를 발현한다(Lee, 2006). 후기 강도는 C-S-H 수화물이 생성되어 안정적으로 증진하며, 이러한 화학반응은 아래와 같은 화학식으로 나타낼 수 있다.



그리고 칼슘실리케이트(calcium silicate)상의 수화반응에 의해 에트링가이트 수화물의 골격사이에 C-S-H수화물이 생성되어 지속

Table 3. Chemical and Mineral Compositions

Chemical composition (wt.%)					Mineral composition (wt.%)			
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	CSA	C <sub>2</sub> S	C <sub>4</sub> AF	CaSO <sub>4</sub>
13.9	24.3	3.8	45.9	7.4	43.5	39.5	11.5	2.9

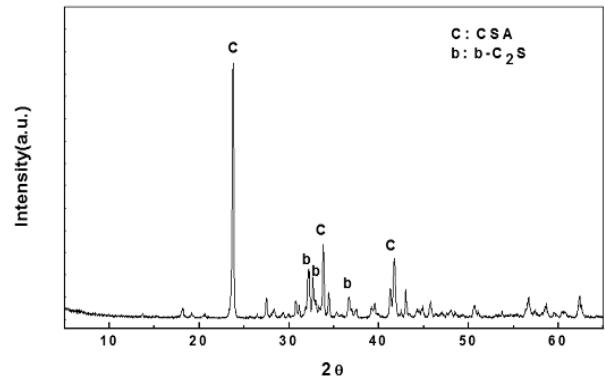


Fig. 1. XRD Pattern of CSA Clinker

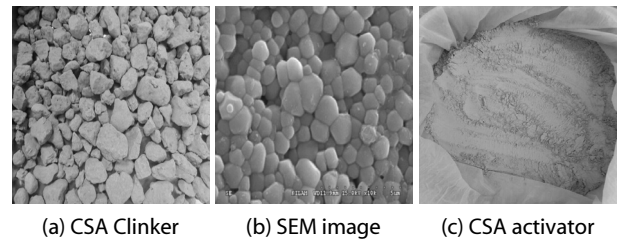


Fig. 2. CSA Clinker and Activator

적으로 장기강도가 증진된다. 이러한 수화반응이 일어나는 시기는  $\text{CaSO}_4$ 농도 및 용해속도와 밀접한 관련이 있기 때문에 시료의 강도발현속도를 적절히 조절하고 팽창 등의 이상현상이 발생하지 않도록 하기 위해서  $\text{CaSO}_4/\text{Al}_2\text{O}_3$ 가 최적의 몰(mole)비가 되도록 석고를 첨가해야 한다.

전기로 환원슬래그를 이용한 CSA 자극제 제조는 제품화를 위해 한국석회석신소재연구소에서 운영중인 시험생산용 Rotary kiln 설비를 이용하였다. 소성시스템을 통해 제조한 시험생산용(Scale-up) CSA계 클링커 소성물질을 표면 온도 200°C 이하로 서냉 후 배출시켜 화학성분 및 광물조성을 분석한 결과를 Table 3에 나타내었다.

CSA계 클링커를 소성하기 위하여 전기로 환원슬래그, 플라이애시 및 석고를 혼합비율에 따라 소성한 결과 CSA 광물성분이 43.5% 생성되었음을 확인하였다.

CSA 클링커 소성물질을 X선 회절 분석한 결과, 저온소성클링커 메인 광물상인 CSA 상과  $\text{C}_2\text{S}$ 상 등이 생성되었음을 확인하였다. 최적의 강도발현 및 자극효과를 위하여 CaO,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  및  $\text{SO}_3$ 가 각각 4 : 3 : 1의 화학양론적인 몰비로 결합되어 반응이 일어날

수 있도록 이수석고를 CSA 클링커 대비 80% 첨가하여 CSA 자극제를 제조하였으며 Fig. 2에 나타내었다.

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 CSA 자극제

전기로 환원슬래그를 이용하여 소성 제조한 CSA 자극제의 자극 효과 및 강도발현 특성을 분석하기 위하여 KS L 5201 및 KS F 2563 표준의 품질을 만족하는 OPC(1종), GGBFS(3종)를 사용하였으며, 상용 자극제인 NaOH, CaOH<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>을 사용하였다. KS L ISO 679 표준에 따라 실험배합을 진행하였으며, Table 4는 OPC, SLAG, 자극제의 조합을 나타내었다. 자극제는 OPC와 GGBFS를 모두 고려한 결합제 사용량을 기준으로 하였다.

Table 4에서 나타난 재료의 배합비율에 따라 Fig. 3의 시험공시체(Mortar)를 제조하여 압축강도 및 휨강도 실험을 하였다.

### 2.2.2 해양환경폭로실험을 통한 해수저항성

Fig. 4와 같이 수중구조물로써 실험수의 물리·화학적 침식에 의한 강도손실을 검토하고자 해양환경폭로시험장을 이용하여 소정의 양생일마다 KS F 2405에 준하여 콘크리트 공시체(φ100mm × 200mm, Cylinder)의 압축강도를 측정하여 해수저항성을 평가하였다.

그리고 동결융해저항성은 KS F 2456의 B방법에 준하여 실시하

여 콘크리트 공시체(75mm×100mm×400mm, Prism)의 동탄성계수를 측정하였다. 또한, 인공해수 양생조건에서의 강도 변화를 검토하기 위하여 ASTM D 1141에 준하여 인공해수를 제조하였으며 인공해수 표준 사양을 Table 4에 나타내었다.

### 2.2.3 콘크리트의 pH 및 중금속 용출실험

본 연구는 콘크리트 재료를 용출시료로 사용하여 Fig. 5에 따라 국내 및 국외의 용출방법에 따라 용출실험을 진행하였다. 일반적으로 콘크리트 재료를 용출시료로 사용되는 용출방법이 없기 때문에 폐기물 재료의 환경유해성 검토 시험방법을 준용하여 pH 및 중금속 용출실험을 하고 있다. 용출시료가 고휘폐기물이며 입상(Granular) 또는 단일체(Monolithic) 물질로 구분하고 있다. 본 연구에서는 콘크리트 재료를 크게 입상과 단일체로 구분하고 입상재료는 다시 분말(Powder)과 골재(Aggregate)로 단일체는 콘크리트 공시체(Cylinder)로 세분화하였다. 그리고 용출시료는 기건양생 28일,



Fig. 4. Seawater Resistance by Compressive Strength

Table 4. Cement Mortar Combinations

Materials		Binder(%)		
		OPC	GGBFS	Activator
OPC		100	0	0
SLAG(CSA 0)	I	30	70	0
SLAG(CSA 5)	II	30	70	5
SLAG(CSA 7)	III	30	70	7
SLAG(CSA 9)	IV	30	70	9
SLAG		40	60	0
SLAG(CSA)	V	40	60	7
SLAG(NaOH)	VI	40	60	7
SLAG(CaOH <sub>2</sub> )	VII	40	60	7
SLAG(Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	VIII	40	60	7



Fig. 3. CSA Activator and Mortar Specimens

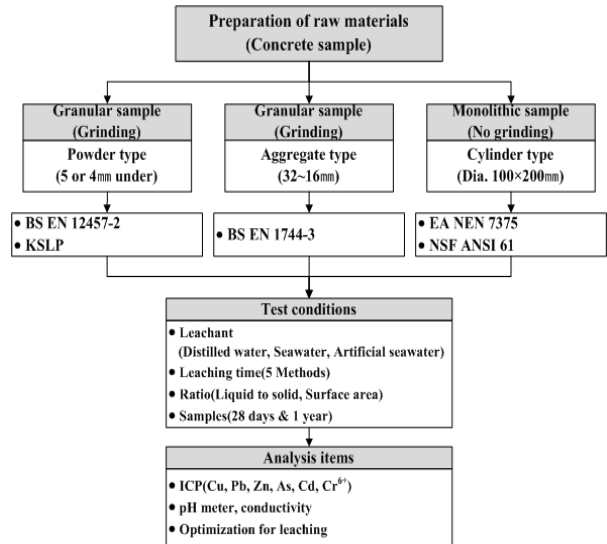


Fig. 5. Flowchart for Leaching Procedure

Table 5. Chemical Composite of Artificial Seawater(g/L)

Item	NaCl	MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CaCl <sub>2</sub>	KCl
Composition	24.53	5.20	4.09	1.16	0.695

Table 6. pH Leaching Tests

Method Condition	KSLP(W)	KSLP(S)	EN 12457-2	EN 1744-3	EN 19528	EA NEN 7375
Specimen amount	≥ 10 g (powder)	≥ 5 g (powder)	≥ 100 g (powder)	≥ 2000 g (aggregate)	≥ 2000 g (aggregate)	φ100×200 (cylinder)
Distilled water amount	25 mL	25 mL	1,000 mL	20,000 mL	-	(2~5)Vp
Liquid Solid Ratio(LS) in mass proportion	2.5	5	10	10	percolation (Bottom up)	-
Elution time	30 min	60 min	24 h	24 h	24 h	24 h

※ KSLP(W) : Waste official test, KSLP(S) : Soil pollution official test

LSRatio : Liquid Solid Ratio in mass proportion, Leachant : Distilled water, Seawater, Artificial seawater

Table 7. Heavy Metal Leaching Tests

Method Condition	KSLP	EN 12457-2	EN 1744-3	EA NEN 7375	NSF ANSI 61
Sample	Powder		Aggregate	Cylinder	
	5mm under	4mm under	(32~16)mm	(φ 100 × 200)mm	
Leachant	D.W	D.W	D.W	D.W	D.W
LSR	10	10	10	(2~5) Vp	(50 cm <sup>3</sup> ) As
Leaching time	6 hr	24 hr	24 hr	64 days(8 stage)	24 hr(5D stage)
Leaching condition	shaking(200rpm)	shaking(200rpm)	propeller(500rpm)	diffusion	diffusion
Filtration	0.45μm or 3000rpm, 20min				

Table 8. Mix Proportion of Concretes

Symbol	Gmax	Slump	Air content	W/B	Unit mass(kg/m <sup>3</sup> )						
	(mm)	(mm)	(%)	(%)	W	B		S	G	Additives	
						OPC	GGBFS			AE	CSA
EFC	25	150	4.3	50	170	136 <sup>1)</sup>	204 <sup>1)</sup>	800 <sup>2)</sup>	1096 <sup>2)</sup>	1.86	21.7 <sup>3)</sup>
Normal concrete	25	150	4.2	50	170	170	170	928	899	1.86	-

1) B(Binder) : OPC 40%, GGBFS 60%

2) Crushed Slag(EFS) : (1.2~5)mm , Crushed Slag(EFG) : (5~25)mm

3) CSA activator(B×7%)

365일 그리고 실험수 침지대에서 365일 양생을 진행한 시험공시체 (Cylinder)를 용출조건에 적합한 용출시료로 제조하여 다양한 용출 조건을 고려한 용출실험을 진행하였다. 용출방법은 Tables 6 and 7에 나타내었다.

콘크리트 재료를 용출시료로 사용한 pH 및 중금속 용출방법은 용출시료, 액고비(LSR), 용출시간 등 다양한 용출조건을 가지고 있다.

국내 및 국외의 용출방법에 따라 채취한 용출용액에 대한 pH 및 중금속 용출함량을 분석하기 위하여 pH meter, ICP(Inductively coupled plasma spectrometer) 그리고 IC(Ion chromatography) 분석기를 사용하여 분석하였다.

### 2.3 친환경콘크리트 배합설계

콘크리트 2차 제품으로 생산되는 전기로 슬래그를 활용한 인공 리프용 친환경콘크리트와 기존 해양설치용으로 생산되는 콘크리트 2차 제품과의 상대적인 품질성능을 비교하기 위하여 2종류의 배합 설계를 진행하였으며 최적 배합설계 결과를 Table 8에 나타내었다.

콘크리트 배합설계로 설계기준강도는 24MPa, 굵은 골재 최대치수 25mm, 슬럼프 150±25mm, 공기량 4.5±1.5%를 기준으로 적용하였다.

배합설계를 통해 제작한 콘크리트 공시체는 양생조건 및 동결융해저항성 실험으로 구분하여 제조하였으며 각 콘크리트 공시체의 형상 및 크기는 φ100mm × 200mm 원주형(Cylinder)과 75mm×



Fig. 6. Concrete Cylinders

100mm×400mm 각주형(Prism)을 사용하였다. 콘크리트 배합은 50리터 강제식 믹서를 사용하여 잔골재와 굵은 골재를 30초간 건비빔 한 후 시멘트와 CSA 자극제를 투입하고 30초간 믹싱을 하였다. 그 후 혼합수와 혼화제를 투입하여 60초간 혼합하여 배출하여 Fig. 6과 같이  $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ 의 압축강도 공시체,  $76\text{mm} \times 76\text{mm} \times 406\text{mm}$ 의 동결융해 시험용 공시체 등으로 구분하여 배합 조건에 따라 콘크리트 공시체를 제작하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 CSA 자극제의 자극효과 및 강도

보통 포틀랜드 시멘트, 고로슬래그 미분말 그리고 자극제를 Table 4의 배합비율에 따라 자극효과 및 최적화를 통한 강도 특성을

분석하기 위하여 KS L ISO 679 표준에 따라 시멘트 몰탈(Mortar) 공시체를 사용한 실험배합 하였다. 휨강도 및 압축강도 그리고 기존 상용 자극제와 상대 비교한 실험 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

전기로 환원슬래그를 이용한 CSA 자극제 첨가비율에 따른 모르타르의 휨강도 및 압축강도를 1일, 3일, 7일, 28일 동안 양생한 후의 강도특성을 OPC 30%를 사용하고 CSA 자극제를 사용하지 않은 시험공시체 I를 기준으로 분석하였다.

CSA 자극제 첨가비율 5%와 7%는 휨강도가 점진적으로 증가하여 양생일 28일에서 최대 21.7%를 나타내었으며, 첨가비율 9%의 휨강도는 오히려 감소하여 상대적으로 7.2%의 낮은 증가율을 보였다. CSA 자극제 첨가비율 7%의 휨강도보다 상대적으로 낮게 나타나 양생일 7일에서 15.9%, 양생일 28일에서 14.5% 감소하는 경향을 나타내었다. 압축강도는 양생일 1일 대비 자극제 첨가비율이 7%까지는 시험공시체 I 보다 40% 증가하였으나 첨가비율이 9%에서는 상대적으로 20% 감소한 증가비율을 나타내었다. CSA 자극제 첨가비율에 따른 압축강도는 휨강도와 유사한 경향을 나타내었다. 그러나 CSA 자극제 사용량이 많으면 오히려 강도발현이 저하되는 것을 실험을 통해 확인하였으며 이는 선행 연구의 결과들 처럼 자극제, 슬래그 및 시멘트의 화학반응에서 생성되는 침상형 결정인 에트링가이트가 지속적으로 생성되어 수화 생성물의 미소 구조 공극을 채워주는 역할을 넘어 팽창효과를 일으키는 것으로 판단된다.

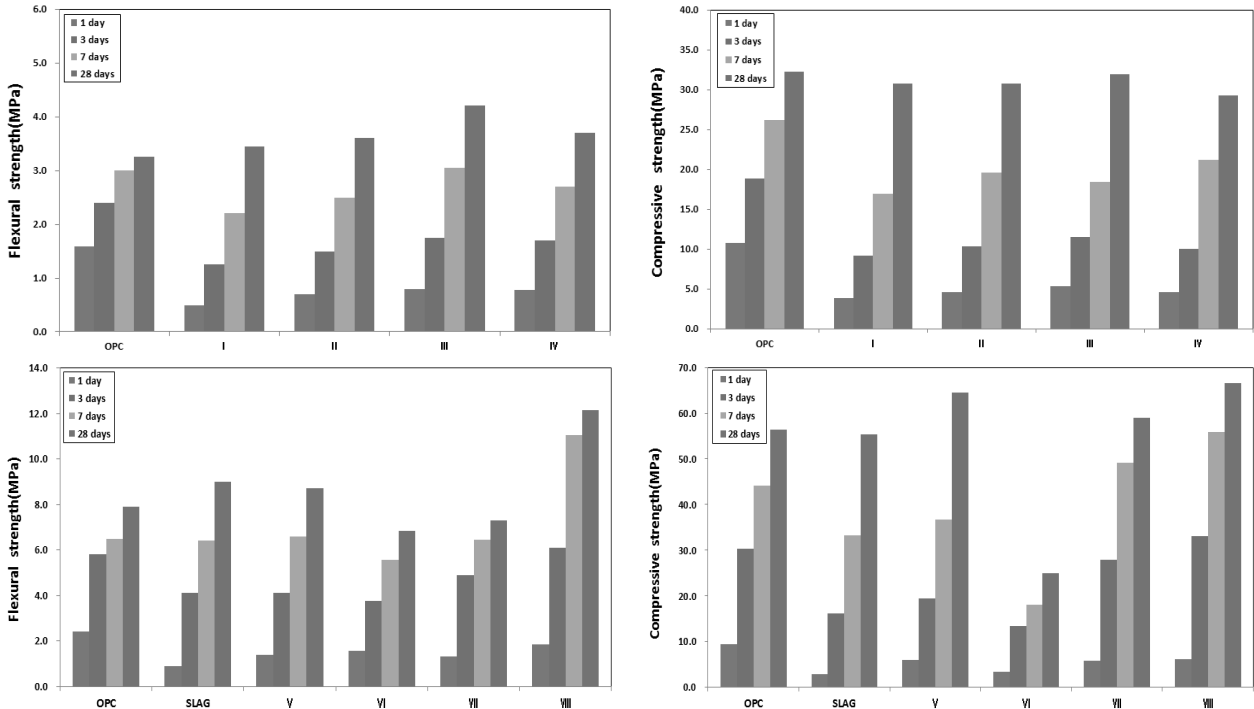


Fig. 7. Results for Flexural and Compressive Strength

전기로 환원슬래그를 이용한 CSA 자극제는 주 수화 생성물이 C-S-H gel 및 에트린جا이트이기 때문에 수화반응 촉진을 통한 강도발현에 가장 적합한 첨가비율은 결합재 사용함량의 7% 범위가 최적인 것으로 나타났다.

또한 Table 4의 자극제 종류에 따른 시험공시체(Mortar)의 강도 특성을 자극제를 사용하지 않은 SLAG 시험공시체와 상대 비교하였다. 휨강도는 자극제를 첨가함에 따라 양생일 1일 대비 초기 강도의 증진효과가 크게 나타났으며, 32.1~51.0%로 초기강도 증가율  $\text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{NaOH} > \text{CSA} > \text{CaOH}_2$  순으로 나타났다. 압축강도는 16.8~52.6%로 초기강도 증가율에 대한 자극제 품질성능은  $\text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{CSA} > \text{CaOH}_2 > \text{NaOH}$  순으로 콘크리트 초기강도에 대한 품질을 향상시키는 것으로 나타났다. 또한 자극제를 사용하지 않은 SLAG 대비 양생일 3일과 7일에 대한 압축강도 증가율은 CSA 17.4~9.3%,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  51.4~40.3%,  $\text{CaOH}_2$  42.3~32.2% 증가시키는 것으로 나타났다. 전기로 환원슬래그를 이용한 CSA 자극제를 사용함으로써 고로슬래그 결합재의 초기 및 장기강도 발현을 위한 촉진효과를 확인하였다. 따라서 콘크리트의 초기강도 품질 향상이 중요한 해양설치용 수중구조물로서의 인공리튬 친환경콘크리트에 충분히 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.2 친환경콘크리트의 강도특성

#### 3.2.1 해수저항성

친환경콘크리트(EFC)의 양생조건 및 양생기간에 따른 압축강도 변화를 Figs. 8~10에 나타내었다.

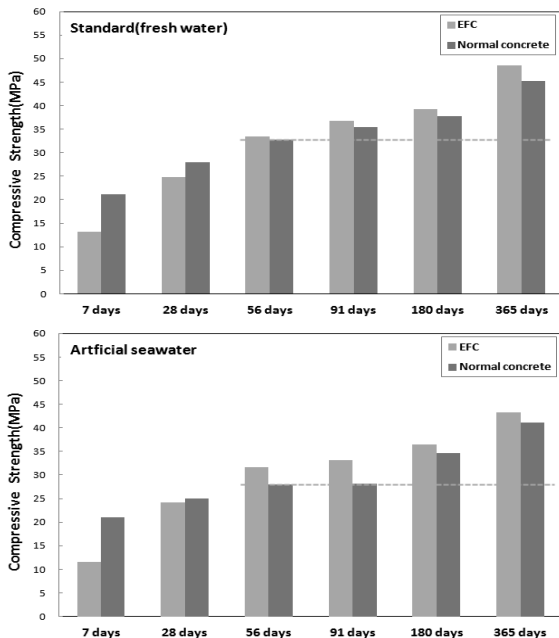


Fig. 8. Compressive Strength in Concrete

Fig. 8에서와 같이 표준양생(담수) 대비 양생일 경과에 따른 콘크리트의 압축강도는 모두 증가하였다. EFC는 Normal concrete 보다 양생일 7일 대비 60.6% 낮은 강도가 나타났으며, 인공해수양생에서도 81.9% 낮게 압축강도가 나타났다. EFC의 양생일 28일 대비 양생일 7일에 대한 초기강도는 표준양생(담수)에서 53.2%, 인공해수양생에서 47.9%의 강도가 나타났다. EFC 초기강도 품질 저하에 대한 문제점을 개선하기 위하여 CSA 자극제를 사용하였지만 60%의 고품량 고로슬래그 미분말의 영향으로 초기강도가 충분히 발현되지 않았다. 표준양생에서 22.5%, 인공해수양생에서 36.5% 낮은 압축강도를 나타내었으며, 내해수성 및 장기강도 향상을 위해 다량의 슬래그 혼화재를 사용하는 콘크리트 구조물인 인공리튬용 친환경콘크리트 EFC의 초기강도 품질개선을 위한 지속적인 연구가 필요함을 확인하였다.

CSA 자극제가 적용된 EFC는 골재로써 고비중의 전기로 산화슬래그 골재를 사용함에 따라 양생일 56일 기준 Normal concrete의 압축강도 대비 표준양생(담수)에서 2.2%, 인공해수양생에서 11.78%

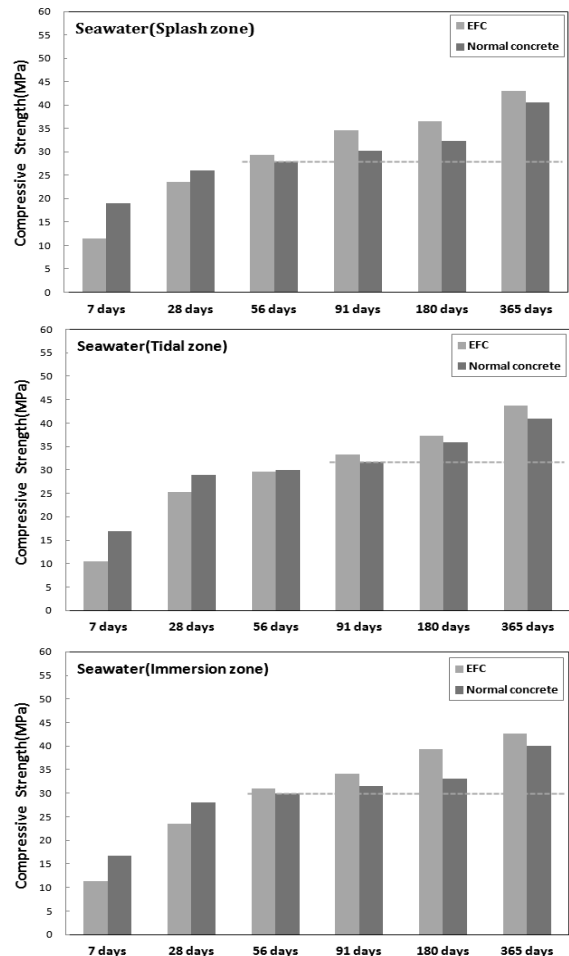


Fig. 9. Compressive Strength in Concrete

더 높게 나타났다. 양생일 365일의 표준양생(담수)에서 6.8%, 인공 해수양생에서 4.6% 더 크게 나타났다. 양생일 56일이 경과하면서 지속적으로 압축강도가 증가하여 장기강도 발현에 슬래그 혼화재 및 전기로 산화슬래그 골재의 사용이 효과적임을 알 수 있었다.

Fig. 9는 해양환경에 노출된 양생조건을 고려한 것으로 비말대, 간판대 및 침지대에서의 양생일 경과에 따른 압축강도를 나타낸 것으로 표준양생(담수) 및 인공해수양생 조건과 유사한 강도변화를 나타내었다. 해양환경에 노출되어 해풍, 조력, 파도, 파랑 등에 의한 물리적 작용과 해수 중의  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$  및  $Mg^{2+}$  이온 등에 의한 화학적 침식작용 및 동결융해의 반복 작용과 같은 가혹한 환경조건의 영향으로 EFC는 양생일 28일 압축강도 대비 초기강도 증가율은 양생일 7일에 비말대 48.7%, 간판대 41.5%, 침지대 48.1%를 나타내었다. EFC는 침지대 양생일 7일에서의 압축강도 발현이 normal concrete보다 47.8% 낮게 나타나 해저구조물로서의 EFC 적용을 위하여 초기강도 증진을 위한 추가적인 연구가 필요함을 확인하였다.

Fig. 10은 표준양생(담수) 대비 해양환경에 노출된 양생조건별 압축강도 비율인 해수저항성을 나타내었다. 표준양생(담수) 대비 해양환경에 노출된 양생조건에서의 해수저항성은 특별한 경향성은 없이 상대적으로 낮게 나타났다. 인공해수양생을 포함한 해양환경 조건을 고려한 콘크리트의 해수저항성은 물리·화학적으로 가혹한 열화환경으로 상대적으로 낮게 나타남을 확인하였다.

표준양생(담수) 대비 양생일 7일에서 365일까지 EFC의 평균 해수저항성은 인공해수양생 8%, 비말대 9%, 간판대 9%, 침지대 8%의 강도손실이 발생하였다. 동일한 양생조건과 양생기간을 고려한다면 normal concrete보다 해수저항성이 평균 2% 높게 나타났다.

전기로 슬래그를 활용한 인공리프용 EFC의 표준양생 대비 해양 환경조건을 고려한 해수저항성은 평균 8~10% 범위의 강도손실을 나타내었다. 해양환경에 노출된 콘크리트 구조물은 육상에서 건설 되는 콘크리트 구조물과 달리 해풍, 조력, 파도, 파랑 등에 의한 물리적 작용과 해수 중의  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$  및  $Mg^{2+}$  이온 등에 의한 화학적 침식작용 및 동결융해의 반복 작용과 같은 가혹한 환경조건의 영향으로 콘크리트 구조물의 내구성은 크게 저하된다는 기존 연구결과와 유사하게 나타남을 확인하였다.

### 3.2.2 동결융해저항성

Fig. 11은 EFC의 동결융해저항성을 나타낸 것으로 동결융해 반복작용 100사이클 후 압축강도비는 88.7%, normal concrete는 88.9%로 동결융해에 대한 높은 저항성을 나타내었다.

또한 동결융해 반복 작용 200 사이클에서도 EFC와 normal concrete 모두 20% 이내의 압축강도비를 나타내고 있어 동결융해에 대한 저항성이 높다는 것을 알 수 있다. 동결융해 반복 작용이 300 사이클 이상 진행되면서 EFC가 normal concrete보다 2.7% 높은 동결융해저항성을 나타냈으며, 400 사이클에서는 4.4% 더

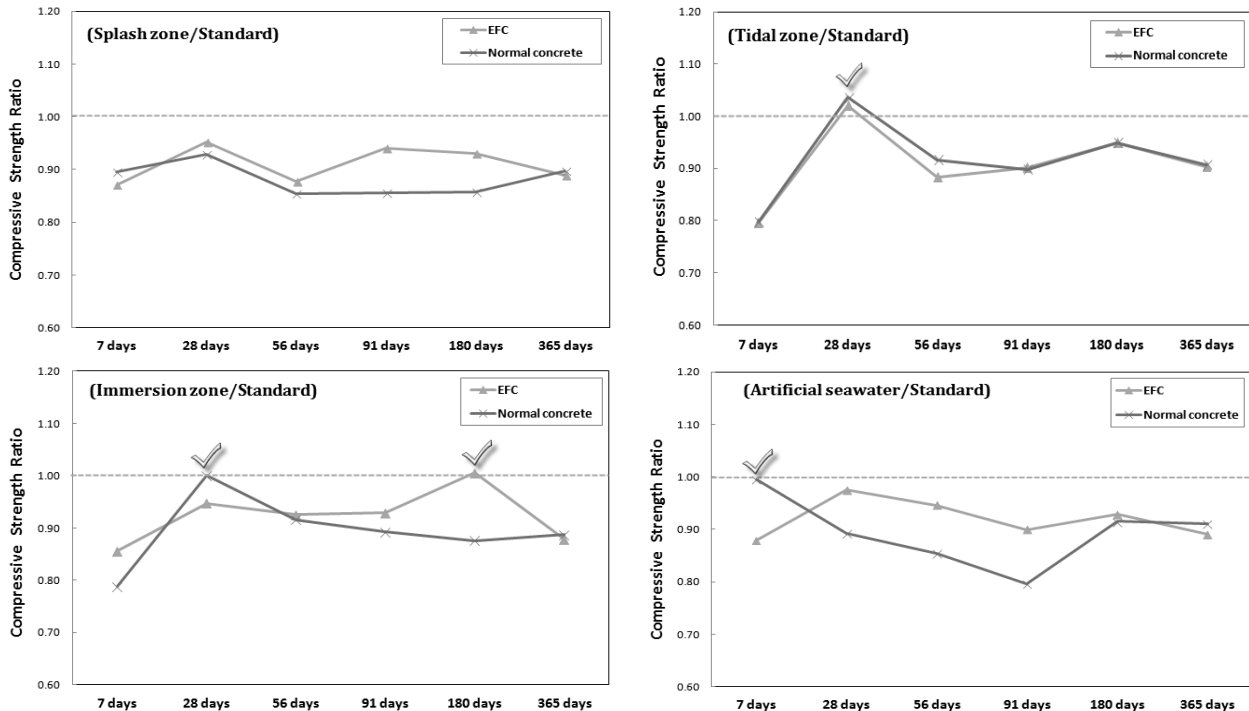


Fig. 10. Compressive Strength Ratio



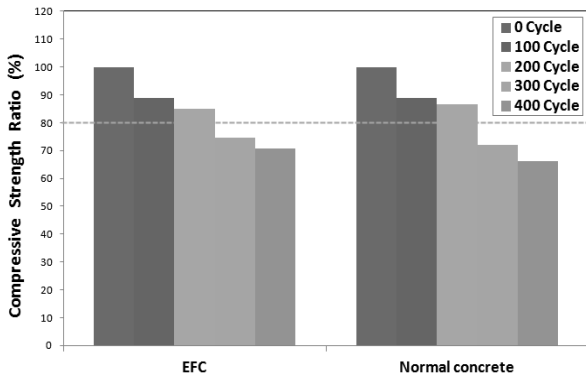
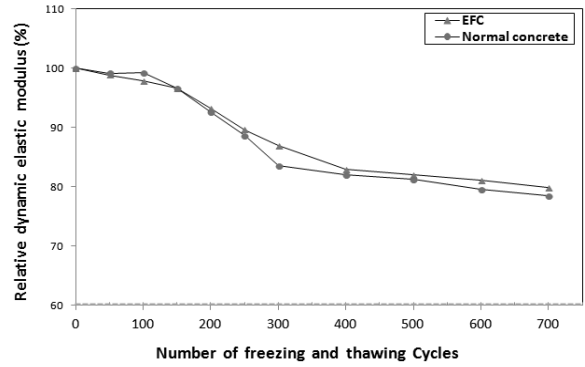


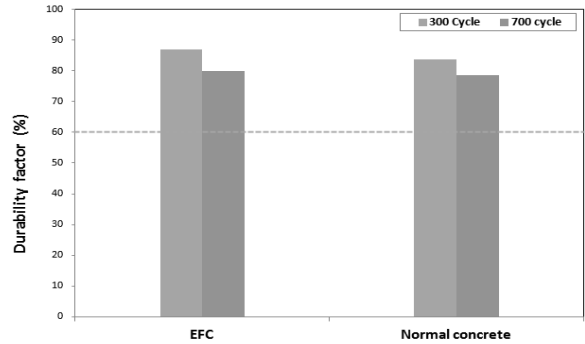
Fig. 11. Freezing and Thawing Resistance Ratio

높은 결과를 나타내어 상대적으로 고품량 고로슬래그 미분말과 고비중 전기로 산화슬래그 골재를 사용하는 EFC가 동결융해저항성이 높게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 12의 상대동탄성계수는 동결융해 반복 작용 300사이클까지 80% 이상의 동결융해저항성을 나타내었다. EFC의 상대동탄성계수는 300사이클 87%, 700사이클에서 80% 수준으로 normal concrete보다 300 사이클 기준 3.3% 700 사이클 기준 1.5% 높게 나타났다. 또한, EFC의 내구성지수는 300사이클 87%, 700사이클 80%를 나타내었으며, normal concrete보다 3.3~1.5% 높게 나타났다. 철강 산업부산물인 전기로 슬래그를 CSA 자극제와 콘크리트용 골재로써 활용한 인공리프용 친환경콘크리트는 기존 콘크리트의 품질수준 동등 이상의 동결융해저항성을 나타내고 있음을 알 수 있었으며, 동결융해저항성 재료로 전기로 슬래그를 인공리프용 친환경콘크리트 EFC의 활용이 가능함을 확인하였다.



(a) Relative Dynamic Elastic Modulus



(b) Durability Factor

Fig. 12. Dynamic Elastic Modulus Test

### 3.3 친환경콘크리트의 용출특성

#### 3.3.1 pH 용출특성

Table 6의 용출방법에 따라 용출방법, 용출용매, 용출시료의 입경 등 다양한 용출조건을 고려한 친환경콘크리트(EFC)의 pH

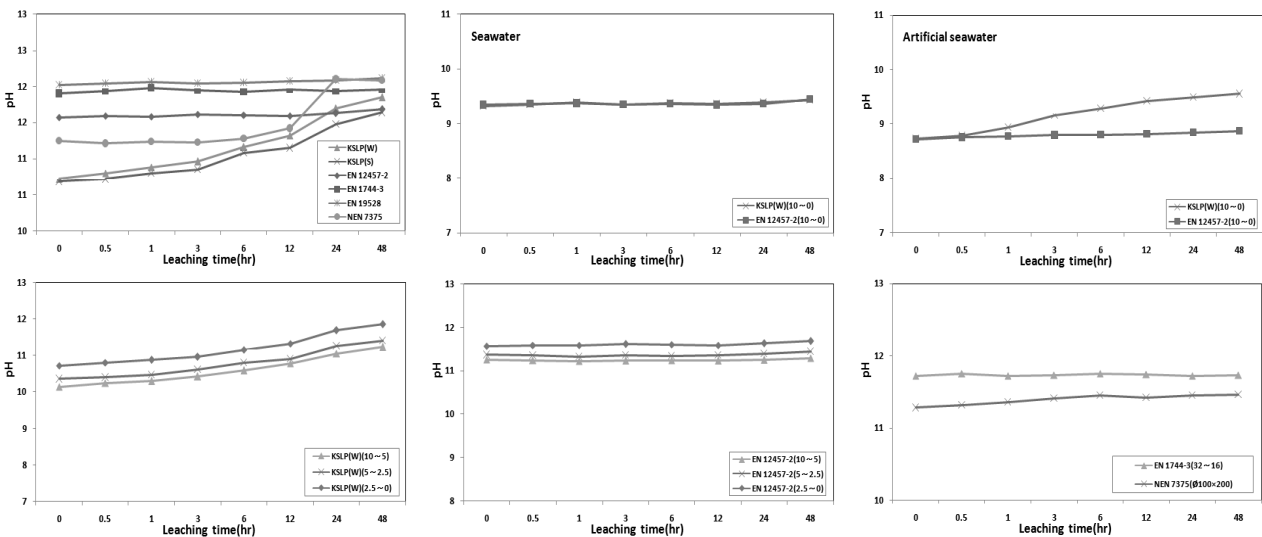


Fig. 13. Result of pH Leaching (Test Methods, Leachant, Particle Size of Specimens)

용출결과를 Fig. 13에 나타내었다. 국외의 용출방법보다 상대적으로 용출시간이 짧고 액고비(Liquid solid ratio)가 낮은 국내의 용출방법(KSLP)이 낮게 나타났다. 용출시료의 입경이 작을수록 pH 용출 결과가 높게 나타났지만 상대적으로 입경이 큰 용출시료를 사용하는 BS 1744-3 용출방법의 pH가 높은 것은 강제 교반조건(500rpm)에 따른 용출효과로 판단된다. 용출시간이 상대적으로 긴 국외의 용출방법이 pH가 높게 나타났지만 용출시간이 24시간-48시간 경과하면서 유사한 결과를 나타냈다.

EA NEN 7375 용출방법은 교반조건이 없고 분자 확산에 의한 용출이므로 상대적으로 농도변화가 서서히 진행되어 동일한 시간 대비 pH가 낮게 나타났으나 용출시간 48시간이 경과하면서 EFC의 알칼리성분 농도가 일정하게 유지되는 시점에서 pH가 11.5~12.3

범위를 나타내었다. 또한 용출시료의 입경에 따른 pH 용출결과는 입경이 작을수록 강알칼리성분을 함유하고 있는 결합제의 영향으로 상대적으로 pH 용출효과가 크게 나타났다. 실험수와 인공해수를 용출용매로 사용한 경우는 탈이온수보다 상대적으로 낮게 나타났다. 용출용매에 따른 EFC의 pH 용출결과는 탈이온수와 달리 실험수와 인공해수는 이미 다량의 알칼리성 이온성분이 용해되어 있기 때문에 이온성분으로 인한 완충작용으로 pH가 8~10 범위로 탈이온수를 사용한 경우보다 상대적으로 낮은 pH를 나타내었다. EFC에 대한 알칼리성분 용출특성을 분석하기 위한 pH 측정은 탈이온수를 용출용매로 사용하는 것이 용출실험에 효과적임을 알 수 있었다.

Table 9. Heavy Metal from EFC at 28 Days by Distilled Water (Unit : mg/L, mS/cm)

Method Item	KSLP	EN 12457-2	EN 1744-3	EA NEN 7375	NSF ANSI 61
Cu	0.027	0.008	0.013	N/D	N/D
Pb	0.017	N/D	N/D	N/D	N/D
Zn	0.153	N/D	N/D	N/D	N/D
As	0.039	N/D	N/D	N/D	0.001
Cd	N/D	0.002	0.005	N/D	N/D
Cr <sup>6+</sup>	0.152	0.281	0.092	N/D	0.001
Ca	15.484	17.044	17.312	460.1	3.992
Cl	24846	4075	62083	28.1	30
SO <sub>4</sub>	2993	505	5723	26.8	9
pH	12.67	12.24	11.90	10.31	11.14
Conductivity	7.62	3.30	0.995	0.407	0.256

Table 10. Heavy Metal from EFC at 28 Days by Seawater (Unit : mg/L, mS/cm)

Method Item	KSLP	EN 12457-2	EA NEN 7375	NSF ANSI 61
Cu	0.054	0.021	N/D	N/D
Pb	0.079	N/D	N/D	0.012
Zn	0.456	N/D	N/D	0.001
As	0.122	N/D	N/D	0.065
Cd	0.001	0.004	N/D	N/D
Cr <sup>6+</sup>	0.479	0.831	N/D	0.001
Ca	12.666	12.347	3149	333
Cl	35454	47445	131412	22384
SO <sub>4</sub>	3820	4808	N/D	2477
pH	10.788	11.94	9.891	9.184
Conductivity	47.1	49.3	47.7	47.2

### 3.3.2 중금속 용출특성

EFC의 중금속 용출실험을 위한 용출시료의 양생조건은 콘크리트 2차 제품의 제조과정으로 건식 배합과 증기양생 또는 기건 상태의 양생을 통해 제작하는 현장 상황을 고려하여 기건 상태에서 28일, 365일 그리고 실험수 침지대에서 365일 동안 양생을 진행한 시험공시체를 사용하였다. 용출용매는 탈이온수와 실험수 및 인공해수를 사용하였으며 다양한 용출조건에 따른 EFC의 중금속 용출결과를 Tables 9~13에 나타내었다.

용출시간이 4단계 및 8단계로 구성되어 비교적 장기용출을 고려하고 있는 NEN 7375와 ANSI 61 용출방법에 의한 EFC의 중금속 용출결과는 최초 시험공시체(Cylinder)에 함유하고 있는 중금속 함량(정량분석) 대비 아주 미소한 용출함량을 나타내었다. 탈이온수를 용출용매로 사용한 국내의 KSLP 방법이 용출효과가 상대적으로 크게 나타났으며 용출시료 조건으로 시험공시체 형태는 분말 및 골재 형태보다 중금속 용출효과가 상대적으로 낮게 나타났다. 실험수를 사용한 중금속 용출결과는 KSLP와 BS 12457-2의 용출

Table 11. Heavy Metal Leached from EFC at 28 Days by Artificial Seawater (Unit : mg/L, mS/cm)

Method Item	KSLP	EN 12457-2	EA NEN 7375	NSF ANSI 61
Cu	0.017	0.012	N/D	N/D
Pb	0.035	N/D	N/D	0.003
Zn	N/D	N/D	N/D	0.009
As	N/D	N/D	N/D	0.023
Cd	0.006	0.002	N/D	N/D
Cr <sup>6+</sup>	0.639	0.137	N/D	0.001
Ca	14.0	14.5	3648	389.5
Cl	56506	24128	129929	22532
SO <sub>4</sub>	5486	2903	N/D	2656
pH	12.22	10.692	10.062	9.567
Conductivity	51.7	48.9	48.1	48.5

**Table 12. Heavy Metal Leached from EFC at 365 Days in Air Dry Condition (Unit : mg/L, mS/cm)**

Method Item	KSLP	EN 12457-2	EN 1744-3	NSF ANSI 61
Cu	0.003	N/D	0.002	0.003
Pb	0.129	N/D	0.002	N/D
Zn	0.003	N/D	N/D	N/D
As	0.013	N/D	N/D	N/D
Cd	N/D	N/D	0.004	0.002
Cr <sup>6+</sup>	0.04	0.009	N/D	N/D
Ca	166.7	107.0	17.899	8.742
Cl	5577	88655	9175	44796
SO <sub>4</sub>	1061	9370	966	4193
pH	11.85	12.06	12.07	9.84
Conductivity	1.129	1.665	7.037	0.0545

**Table 13. Heavy Metal Leached from EFC at 365 Days in Immersion Zone (Unit : mg/L, mS/cm)**

Method Item	KSLP	EN 12457-2	EN 1744-3	NSF ANSI 61
Cu	0.005	0.016	0.002	0.001
Pb	N/D	0.126	0.037	0.019
Zn	N/D	N/D	0.001	N/D
As	N/D	N/D	0.009	0.005
Cd	0.001	N/D	N/D	N/D
Cr <sup>6+</sup>	0.057	0.076	N/D	N/D
Ca	17.265	15.784	3.713	1.463
Cl	36277	60874	23.426	2.16
SO <sub>4</sub>	3752	6957	6.355	1.351
pH	11.92	12.58	11.25	9.57
Conductivity	1.654	7.92	0.562	0.0697

효과가 높게 나타났으며, 시험공시체(Cylinder)를 사용한 경우는 용출용매로 탈이온수를 사용한 경우보다 오히려 중금속 용출효과가 높게 나타남을 알 수 있었다. 인공해수를 사용한 용출방법은 실험수를 사용한 경우와 유사한 중금속 용출효과를 나타내었다.

국내 및 국외의 중금속 용출방법은 단기용출에 의한 특성을 분석하는 것으로 물리·화학적 용출환경 변화에 따른 장기용출특성을 예측하기 어려운 한계성을 고려하여 기건 상태에서 365일, 해양환경폭로시험장의 실험수 침지대에서 365일 동안 양생한 시험공시체(Cylinder)를 다양한 용출방법에 적합한 용출시료를 제조하여 용출실험을 진행하였으며, 용출용매로 탈이온수를 사용한 EFC의 용출결과를 Table 12 and 13에 나타내었다.

기건 및 실험수에서 365일 동안 장기 양생한 EFC의 중금속

용출실험 결과는 장기간 양생을 통해 중금속이 용출되어 더 이상 검출되지 않을 것으로 예상과 달리 28일 양생조건보다 상대적으로 용출함량이 낮지만 여전히 미소하게 검출되고 있음을 확인하였다.

EFC의 용출함량이 너무 미소하다보니 용출조건에 따른 특정 경향을 분석하기에는 한계성이 있었다. 다양한 용출방법에 따른 EFC의 용출특성을 분석한 결과는 모두 검출되지 않거나 검출되었다고 미소한 양으로서 유해 폐기물 관련 환경기준을 충분히 만족하는 결과를 나타내었다. 국내 폐기물관리법에서 정하고 있는 중금속 성분이 검출되지 않거나 용출기준 이하로 미소하게 검출되어 단기 및 장기용출을 통한 중금속 용출함량이 환경유해성에 미치는 영향이 낮게 나타남을 확인하였다. 이는 EFC의 결합제인 보통 포틀랜드 시멘트와 고로슬래그 미분말의 수화반응을 통해 중금속 성분이 화학적인 결합으로 고정화되어 다양한 용출방법을 통해서도 중금속 용출함량은 상대적으로 미미하게 용출되는 것으로 판단되며 기존 연구와 유사한 결과를 나타내었다.

#### 4. 결론

본 연구는 전기로 슬래그를 활용한 인공리프용 친환경콘크리트 (EFC) 개발에 관한 것으로 해양환경에 노출된 양생조건별 해수저항성과 동결융해저항성 등 콘크리트 구조물로서의 강도특성과 해양생물과의 친환경성을 고려한 환경유해성 등 친환경콘크리트로써의 용출특성에 대한 연구를 수행하였으며 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 전기로 환원슬래그를 이용한 CSA 자극제의 최적 혼합비율은 보통 포틀랜드 시멘트 사용량을 최소화하고 고함량 고로슬래그 미분말 혼화제 사용에 따른 초기강도 개선을 위하여 결합제의 7% 범위로 나타났다. 또한, 콘크리트 초기강도 개선효과는 기존 상용 자극제의 품질수준 이상의 자극효과가 있음을 확인하였다.
- (2) 해양환경에 노출된 EFC의 강도특성은 양생일 28일까지의 초기강도는 normal concrete보다 낮게 나타나 EFC의 초기강도 품질향상을 위한 추가적인 연구가 필요하였으며, EFC의 해수저항성은 양생일 1년 대비 평균 강도손실이 8~9% 발생하였다. 향후 실험수와 인공해수를 이용한 장기양생 강도 및 실내 축진내후성 실험이 이루어진다면 EFC의 해수저항성에 대한 높은 신뢰성이 확보될 것으로 기대된다. 또한 EFC의 동결융해저항성은 동결융해 300사이클에서 normal concrete보다 2.7% 크게 나타났으며, 동결융해 700사이클까지도 상대동탄성계수가 80% 수준의 높은 내구성지수를 나타내었다. 고함량 고로슬래그 미분말과 고비중 전기로 산화슬래그 골재를

사용한 EFC를 동결융해저항성 재료로써 충분히 활용할 수 있는 가능성을 확인하였다.

- (3) EFC의 pH 용출특성은 용출방법에 따라 pH가 8~13 범위로 다양하게 나타났으며, 용출시간이 48시간이 경과한 후에는 용출조건에 상관없이 pH가 일정하게 유지되었다. 용출시료가 분말일수록 액고비가 작을수록 그리고 용출용매로 실험수 및 인공해수보다 탈이온수를 사용한 경우가 상대적으로 높은 pH를 나타내었다. 그리고 EFC의 중금속 용출특성은 콘크리트의 수화반응을 통한 경화과정에서 중금속 성분은 화학적 결합을 통해 고정화되기 때문에 환경유해성 기준 이하이거나 검출되지 않아 유해물질 용출에 안전하다는 것을 확인하였다. 또한 실제 해수의 영향을 받는 해중에 시공된 인공리프용 친환경콘크리트 EFC는 거의 무한대에 가까운 액고비가 적용되기 때문에 알칼리(pH) 및 중금속 용출성분은 해수에 분산 및 이동으로 희석되어 해양생물과의 친환경성으로써의 환경유해성에 충분히 안전하다고 할 수 있다. 따라서 친환경콘크리트 EFC 재료 자체의 환경유해성보다는 해저구조물로써 침지조건으로 시공되는 친환경성 콘크리트재료에 대하여 단위 표면적당 중금속 용출함량을 분석하여 동일 시공조건으로 다른 재료를 사용하는 콘크리트와의 상대적인 비교 및 분석이 더 의미 있음을 알 수 있었다.

## References

- BS EN 12457-2 (2003). *Characterization of waste-leaching-compliance test for leaching of granular waste materials and sludges, part 2 : One-stage Batch Test at a Liquid to Solids Ratio of 10 L/kg for Materials with a Particle Size Below 4 mm(with or without size reduction)*.
- BS EN 1744-3 (2002). *Tests for chemical properties of aggregates, part 3 : Preparation of Eluates by Leaching of Aggregates*.
- DIN 19528 (2009). *Leaching of solid materials-percolation method for the joint examination of the leaching behaviour of inorganic and organic substances*.
- EA NEN 7375 (2004). *Leaching characteristics of moulded or monolithic building and waste materials, determination of leaching of inorganic components with the diffusion test, 'The Tank Test'*.
- Korea Iron & Steel Association (2012). *Statistical Data*, Available at: <http://www.kosa.or.kr> (Accessed: October 5, 2012).
- Lee S. H. (2006). "Properties of blast furnace slag cement modified with electric arc furnace slag." *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol. 43, No. 7, pp. 408-414, 2006.
- NSF ANSI 61 (2007). *Drinking water system components health effects*.
- Park, C. B., Ryu, D. H. and Seo, C. H. (2012). "Hydration of high volume mineral admixtures binder with kind of activators." *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 28, No. 10, pp. 89-96.
- Park, K. P., Kim, S. S., Lee, S. T., Kim, J. P. and Jung, H. S. (2011). "Properties on the freeze-thaw of concrete subjected to seawater attack." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 1, pp. 23-30.
- World Steel Association (2014). *Statistical Data*, Available at: <http://www.worldsteel.org>, (Accessed: February, 2014).