

Research Paper

# 전기분해 알칼리수를 배합수로 사용한 고로슬래그 미분말 혼입 콘크리트의 내구성 Evaluating the Durability of Concrete Combined with Ground Granulated Blast Furnace Slag using Electrolysis Alkaline Aqueous as Mixing Water

정수미<sup>1</sup> · 김주성<sup>1</sup> · 박선규<sup>2\*</sup>

Jeong, Su-Mi<sup>1</sup> · Kim, Ju-Sung<sup>1</sup> · Park, Sun-Gyu<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Master's Course, Department of Architectural, Mokwon University, Seo-Gu, Daejeon, 35349, Korea

<sup>2</sup>Professor, Department of Architectural Engineering, Mokwon University, Seo-Gu, Daejeon, 35349, Korea

\*Corresponding author

Park, Sun-Gyu

Tel : 82-42-829-7712

E-mail : psg@mokwon.ac.kr

Received : June 14, 2023

Revised : June 30, 2023

Accepted : July 7, 2023

ABSTRACT

This research aimed to enhance the initial strength of concrete that is mixed with ground granulated blast furnace slag, as well as to fortify its resistance to carbonation and chloride ion permeation. To achieve this, alkaline aqueous, produced through the electrolysis of potassium carbonate, was employed as the mixing water in the preparation of concrete. To substantiate the increment in initial strength, compressive strength measurements of the concrete were executed. Additionally, an accelerated carbonation test and a chloride ion permeation resistance test were undertaken. The results confirmed that the initial strength of the concrete, which utilized electrolysis alkaline aqueous as mixing water, exhibited an improvement in comparison to concrete mixed with conventional water. It was also verified that both carbonation resistance and chloride ion permeation resistance showed enhancements.

**Keywords** : ground granulated blast furnace slag, electrolysis alkaline aqueous, hydration react, carbonation resistance, chloride ion penetration resistance

## 1. 서론

### 1.1 연구의 목적

최근 지구온난화의 원인으로 지목되는 이산화탄소 저감을 위한 정책들이 발의되고 있으며, 건설산업에서도 시멘트 생산 시 배출되는 이산화탄소를 저감시키기 위해 많은 노력이 지속되고 있다. 시멘트는 건설산업에서 가장 많이 사용하는 재료로, 원재료인 석회석을 소성하는 과정에서 발생하는 이산화탄소가 건설산업에서 배출하는 온실가스의 주된 원인으로 지목되고 있다[1-3]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 시멘트의 일부를 산업부산물로 대체하는 연구가 진행되어왔으며, 산업부산물 중 대표적으로 플라이애시와 고로슬래그가 사용되어왔다. 그중 고로슬래그는 선철 제조시 발생하는 부산물을 급냉 및 미분쇄한 것으로 시멘트와 유사한 구성성분을 지니고 있으며, 고로슬래그를 시멘트 대체재로 활용할 경우 장기강도 증진, 내화학적 증대와 같은 장점을 지니고 있다[4,5]. 이러한 특징으로 인해 통상적으로 환경오염의 요인과 더불어 고내구성을 요구하는 환경의 콘크리트의 경우 배합시 보통 포트랜드 시멘트만 사용하기보다 고로슬래그 같은 혼화재를 시멘트 대체재로 일부분 치환하여 혼입하는 경우가 많다. 하지만 고로슬래그는 생성과정 중 급냉으로 인해 고로슬래그 표면에 유리질 피막이 형성된다. 이로 인해 물과 직접 반응하지 않으며, 알칼리 성분의 자극을 통해 수화반응을 일으켜 경화하는 성질을 가지



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

고 있다[6,7]. 이러한 반응을 잠재수경성이라고 하며, 잠재수경성으로 인해 초기강도가 낮다는 문제점을 지니고 있다. 또한, 콘크리트 내부의 수산화칼슘을 소비하여 수화반응을 하기 때문에 초기 중성화 저항성이 낮다는 단점을 지니고 있다.

이를 해결하기 위해 선행연구에서는 배합과정에서 NaOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>와 같은 알칼리 자극제를 사용하여 콘크리트의 초기 강도를 증진시키는 연구를 진행하였다[8-11]. 하지만 알칼리 자극제의 경우 강알칼리성 물질로 사용 시 인체에 유해하며, 비용 또한 고가이기 때문에 실제 현장 사용성은 현저히 부족한 실정이다[12].

본 연구에서는 고로슬래그 미분말 사용 시 발생하는 초기강도 저하 문제와 알칼리 자극제의 문제점의 개선을 위해 탄산 칼륨(K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)을 전해질로 활용하여 전기분해한 알칼리 수용액을 배합수로 사용하였다. 즉, 고로슬래그 미분말을 시멘트 대체재로 사용한 콘크리트의 초기강도를 확보하고, 중성화 저항성과 염소이온 침투 저항성의 증가 여부를 확인하기 위한 실험을 진행하였다.

## 2. 실험계획

### 2.1 실험계획

본 실험의 실험계획은 Table 1에 나타난 바와 같다. 실험에서 사용한 콘크리트의 물 결합재 비는 40%로 설정하였다. 고로 슬래그 미분말의 치환율은 치환율의 차이에 따른 수화반응성을 확인하기 위해 0, 25, 50%로 설정하였다. 재령 7, 28일의 압축강도 측정을 진행하여 전기분해 알칼리수의 혼입 여부에 따른 강도발현을 확인하였다. 재령 7, 28일 시험체의 주사전자현 미경(Scanning Electron Microscope, SEM) 분석을 진행하여 공시체 내부의 수화물 생성 차이를 확인하고자 하였다. 촉진 탄산화시험(Accelerated carbonation test)을 통해 전기분해 알칼리수의 혼입 여부에 따른 탄산화 저항성의 증가 여부를 확인하였으며, 급속 염화물 이온 침투 시험(Resist Chloride Ion Penetration Test, RCPT)을 통해 전기분해 알칼리수의 혼입 여부에 따른 염소이온 침투 저항성의 증가 여부를 확인하였다.

**Table 1.** Experimental strategy

Factors	Levels
Water/Binder ratio(%)	- 40
Binder	- Ordinary Portland Cement - Ground Granulated Blast Furnace Slag
Ground Granulated Blast Furnace Slag replacement ratio(%)	- 0 - 25 - 50
Type of binding water	- Water - Electrolysis alkaline aqueous
Test item	- Compressive strength(7, 28 days) - Scanning Electron Microscope(SEM) - Accelerated carbonation test - Resist Chloride Ion Penetration Test(RCPT)

### 2.2 사용재료

본 실험에서는 국내에서 판매되는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 시멘트 대체재로 국내에서 생산되는 고로슬래그 미분말을 사용하였다. 시멘트와 고로슬래그 미분말의 물리적 특성은 Table 2에 나타난 바와 같으며, 화학적 특성은 Table

3에 나타난 바와 같다. 잔골재와 굵은골재의 물리적 특성은 Table 4에 나타난 바와 같다. 배합수로 사용한 전기분해 알칼리수는 탄산칼륨( $K_2CO_3$ )을 전기분해하여 pH 12.0 ~ 12.5의 수치를 가진 것을 사용하였다. 실험에서 배합수로 사용한 전기분해 알칼리수는 Table 5에 나타난 재원을 가지고 있는 알칼리수 생성 장치를 사용하여 제작하였다.

**Table 2.** Physical properties of cement and blast furnace slag

	Specific gravity( $g/cm^3$ )	Fineness( $cm^2/g$ )
Cement	3.15	3,750
Blast Furnace Slag	2.73	3,600

**Table 3.** Chemical characteristics of cement and ground granulated blast furnace slag

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Cement	22.1	5.0	63.8	1.6	2.0	3.0
Ground Granulated Blast Furnace Slag	34.2	14.4	42.5	5.2	1.9	0.6

**Table 4.** Physical properties of sand and gravel

	Density( $g/cm^3$ )	Fineness modulus	Absorption(%)
River sand	2.56	2.57	0.94
Crushed gravel	2.63	7.531	0.8

**Table 5.** Specifications of the alkaline aqueous solution generator

Factors	Category	
Model	AT-3000 A	
Water supply method	Fixed way	
Power consumption	Rated voltage	400W
	Standard generating voltage	300W
Amount of water produced	Acid	1.5L/min
	Alkali	1.5L/min
pH range	Acid	More than 2.3
	Alkali	More than 11.0

## 2.3 전기분해 알칼리수

본 실험에서는 기존에 사용되던 알칼리 자극제의 대체재로 전기분해 알칼리수를 사용하였다. 전기분해는 양극에서는 산화반응이 일어나고 음극에서는 환원반응이 일어나는 전기화학적 반응의 일종이다[13]. 순수한 상태의 물의 경우 전기분해가 일어나지 않으므로 탄산칼륨( $K_2CO_3$ )을 전해질로 활용하여 실험에 사용한 pH 12.0 ~ 12.5의 전기분해 알칼리수를 생성하였다. 탄산칼륨 수용액의 전극별 반응식은 아래 식 (1), (2)에 나타난 바와 같다.



Figure 1은 일반 배합수와 전기분해 알칼리수를 배합수로 사용했을 경우의 고로슬래그 초기 수화반응 과정을 나타낸 것이다. 일반 배합수를 사용할 경우 물과 고로슬래그가 만나 수화반응 초기에 불투성 피막이 생성되고, 이로 인해 고로슬래그 내부의 반응성 물질이 용출되지 못해 수화반응이 느리게 일어난다. 또한, 전기분해 알칼리수를 배합수로 사용할 경우 일반 배합수를 사용했을 경우와 동일하게 초기에 불투성 피막이 생성된다. 그러나 전기분해 알칼리수 내부의 OH<sup>-</sup> 이온이 고로슬래그 표면의 불투성 피막을 파괴하고 이를 통해 내부의 반응성 물질이 용출되어 기존보다 빠른 수화반응이 일어날 것으로 판단된다.

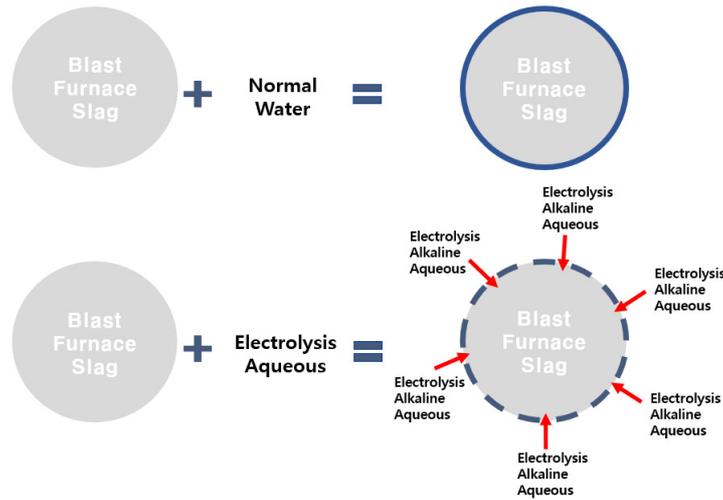


Figure 1. Early hydration of blast furnace slag using normal water and electrolysis alkaline aqueous

## 2.4 실험방법

본 실험에서는 Table 6에 나타난 배합표를 사용하여 시험체를 제작하였다. 압축강도 공시체의 경우 KS F 2403에 의거하여 100×200mm 원주형 공시체로 제작하였다[14]. 제작한 압축강도 시험체는 20±2°C의 온도에서 7, 28일 동안 수중양생을 진행한 뒤 KS F 2405에 의거하여 압축강도 측정을 진행하였다[15]. SEM 분석에 사용한 시료는 압축강도를 측정된 시험체를 분쇄하여 제작하였다. 제작한 시료는 아세톤에 침지하고, 진공챔버에서 24시간 동안 수분을 증발시키는 과정을 통해 수화정지 후 측정하였다.

Table 6. Concrete mix proportions

Type of concrete	W/B(%)	Air(%)	S/a(%)	W(kg/m <sup>3</sup> )	Unit volume(l/m <sup>3</sup> )				Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )			
					C	BFS	S	G	C	BFS	S	G
OPC <sup>a</sup>					1339	0	293	344	438	0	743	893
GBFS25 <sup>b</sup>					104	40	290	341	328	109	737	886
GBFS50 <sup>c</sup>	40	5	46	175	69	80	288	338	219	219	731	878
AGBFS25 <sup>d</sup>					104	40	290	341	328	109	737	886
AGBFS50 <sup>e</sup>					69	80	288	338	219	219	731	878

a: Ordinary Portland Cement; OPC:GGBFS = 100:0(normal water)

b: Ground Granulated Blast Furnace Slag; OPC:GGBFS = 75:25(normal water)

c: Ground Granulated Blast Furnace Slag; OPC:GGBFS = 50:50(normal water)

d: Ground Granulated Blast Furnace Slag; OPC:GGBFS = 75:25(electrolysis alkaline aqueous)

e: Ground Granulated Blast Furnace Slag; OPC:GGBFS = 50:50(electrolysis alkaline aqueous)

촉진탄산화시험체는 100×100×400mm의 각주형 몰드를 사용하여 제작하였으며, 28일간 온도 20±2°C, 상대습도 60±5%의 조건에서 항온항습을 거친 후 촉진탄산화시험을 진행하였다. 촉진탄산화시험은 KS F 2584에 의거하여 온도 20±2°C, 상대습도 60±5%, 이산화탄소 농도 5±0.2%의 환경에서 진행하였으며, KS F 2596에 의거하여 1주 간격으로 탄산화 깊이를 측정하였다[16].

급속 염화물 이온 침투 시험은 KS F 2711에 의거하여 절단한 공시체를 3시간 동안 진공상태로 유지한 후 18시간 동안 증류수에 침지하여 시험체가 완전히 포화 되도록 하였다[17]. Figure 2와 같이 시험체를 시험셀에 고정시킨 뒤, 시험셀의 음극에 3.0%의 염화나트륨(NaCl) 수용액을 채우고, 양극에 0.3N의 수산화나트륨(NaOH) 수용액을 채운 후 6시간 동안 60V의 전압을 인가하였다.

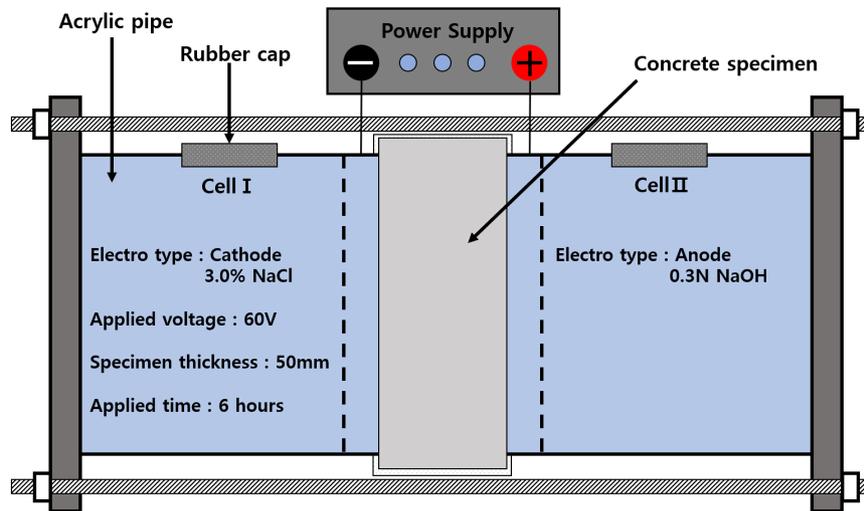


Figure 2. Test diagram and conditions for RCPT method

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 압축강도

Figure 3은 재령 7, 28일의 압축강도 실험결과를 나타낸 것이다. OPC의 압축강도 측정결과 재령 7, 28일 순으로 26.9MPa, 35.8MPa로 나타났다. GBFS25, GBFS50의 경우 각각 18.8MPa, 28.2MPa과 15.1MPa, 25.7MPa의 강도발현을 보였다. AGBFS25의 압축강도는 23.4MPa, 33.7MPa로 나타났으며, AGBFS50은 17.2MPa, 27.6MPa로 나타났다. 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트가 배합수의 종류와 관계없이 OPC에 비해 낮은 압축강도 발현을 보였으며, 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트의 경우 전기분해 알칼리수를 배합수로 사용한 콘크리트가 일반 배합수를 사용한 콘크리트보다 재령일에 상관없이 높은 강도발현을 하였다.

이는 배합수로 사용한 전기분해 알칼리수가 고로슬래그 미분말 표면의 불투성 피막을 초기에 파괴하고, 물과 고로슬래그 미분말이 접촉하여 수화반응이 원활하게 이루어진 결과로 판단된다. 전기분해 알칼리수로 인해 초기에 파괴된 불투성 피막을 통해 고로슬래그 미분말의 반응성 물질이 용출되어 칼슘실리케이트 수화물(Calcium Silicate Hydrate, C-S-H)과 칼슘알루미나 수화물(Calcium Aluminate Hydrate, C-A-H) 등의 수화물이 생성되어 콘크리트 내부 공극을 밀실하게 채워 나타난 결과라고 판단된다.

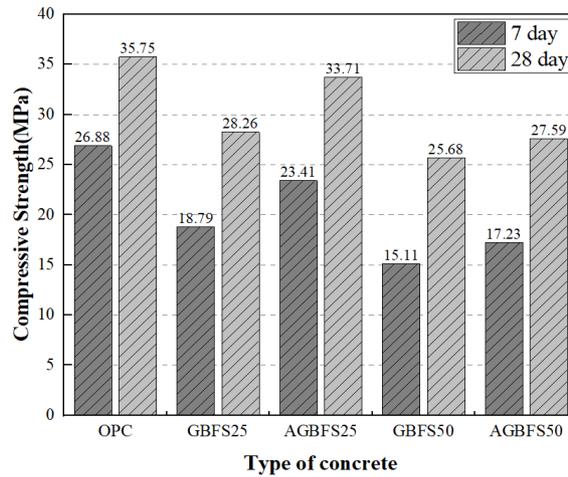


Figure 3. Results of concrete compressive strength tests(MPa)

### 3.2 주사전자현미경(SEM)

Figure 4는 고로슬래그 미분말 25% 치환 콘크리트의 SEM 촬영결과를 나타낸 것이며, Figure 5는 고로슬래그 미분말 50% 치환 콘크리트의 SEM 촬영결과를 나타낸 것이다.

SEM 촬영결과 압축강도 증진과 연관성이 있음을 확인하였다. Figure 4와 Figure 5에 나타낸 바와 같이 전기분해 알칼리수를 배합수로 사용한 콘크리트가 고로슬래그 미분말의 치환율에 관계없이 더 많은 수화물이 생성된 것을 확인하였다. 이를 통해 생성된 수화물이 콘크리트의 내부 공극을 밀실하게 채워 압축강도 실험에서 확인한 바와 같이 전기분해 알칼리수를 배합수로 사용할 경우 초기강도 발현에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

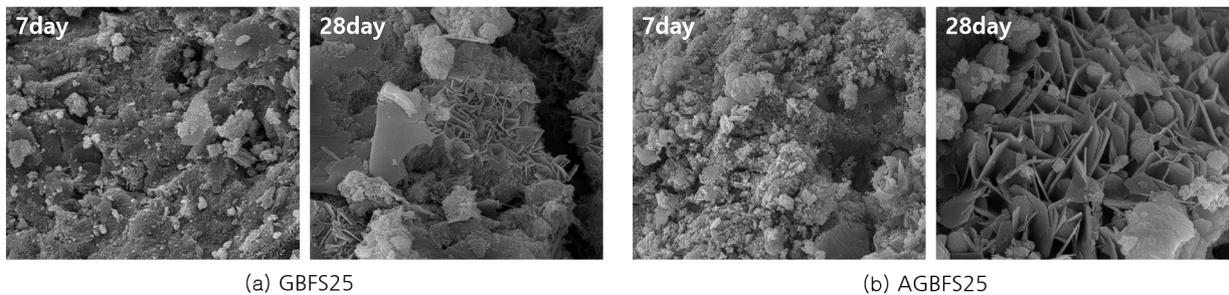


Figure 4. SEM results for 25% blast furnace slag replacement concrete

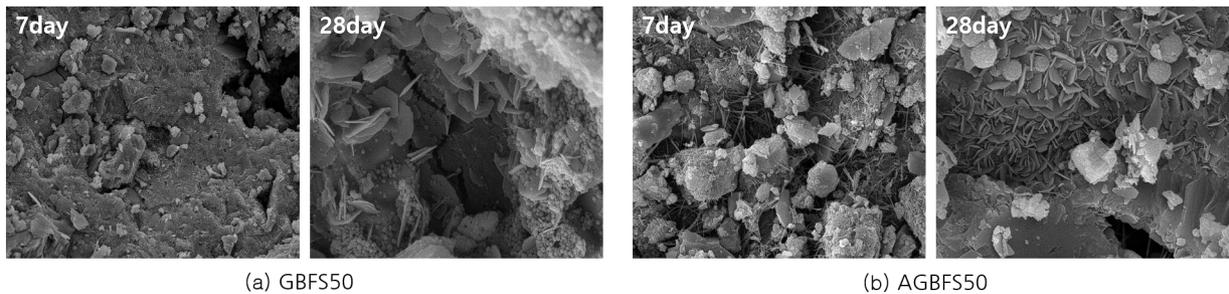


Figure 5. SEM results for 50% blast furnace slag replacement concrete

### 3.3 촉진탄산화시험(Accelerated carbonation test)

Figure 6은 탄산화 깊이 측정결과를 나타낸 것이다. 탄산화 깊이 측정결과 전체적으로 일반 배합수를 사용한 콘크리트가 전기분해 알칼리수를 사용한 콘크리트에 비해 탄산화 진행속도가 빠른 것을 확인할 수 있었다. 또한, 동일한 재령에서 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 탄산화 깊이 또한 증가하였으며, 고로슬래그 미분말의 치환율이 높을수록 탄산화 저항성의 차이가 확실하게 나타남을 확인하였다.

이는 SEM 분석결과를 바탕으로 전기분해 알칼리수를 배합수로 사용한 콘크리트의 내부가 초기에 알칼리 환경을 조성해 더 많은 수화물이 생성되었으며, 이로 인해 콘크리트 내부가 밀실해져 탄산가스의 투과 속도에 영향을 미친 것으로 판단된다.

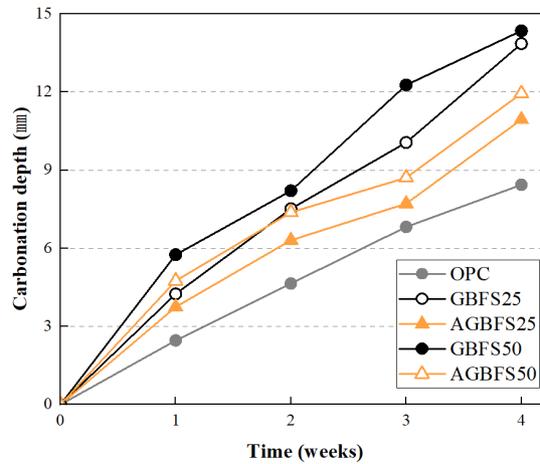


Figure 6. Carbonation depth measurement results

### 3.4 급속 염화물 이온 침투 시험(Resist Chloride Ion Penetration Test, RCPT)

Figure 7은 RCPT 결과를 나타낸 것이다. 실험결과 전압을 인가하는 동안 30분 간격마다 통과 전류 값을 측정한 뒤 아래 Equation 3을 통해 재령 28, 56일의 통과 전하량을 산출하였다. Table 7은 ASTM C 1202에서 통과 전하량으로 콘크리트의 염화물 확산 저항성 평가 기준을 나타낸 것이다[18].

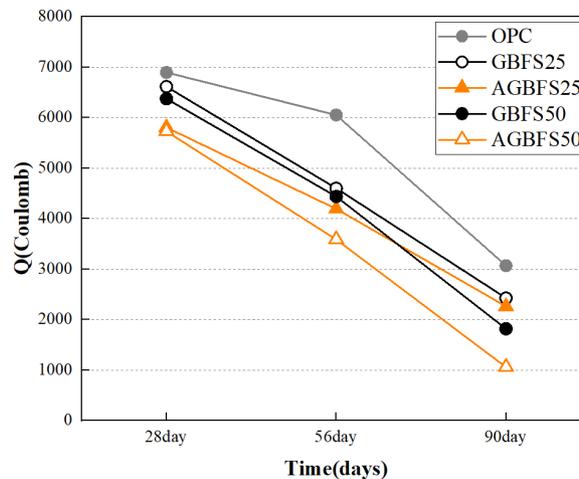


Figure 7. Chloride ion penetration resistance results

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + 2I_{360}) \quad (3)$$

식 (3)에서 Q는 통과 전하량(Coulomb)를 나타내며,  $I_x$ 는 x분에서의 전류값(A)을 나타낸다.

**Table 7.** Evaluation standards of RCPT(ASTM C 1202)

Total passed charge(Coulomb)	Chloride ions permeability
> 4,000	High
2,000 ~ 4,000	Moderate
1,000 ~ 2,000	Low
100 ~ 1,000	Very low
< 100	Negligible

RCPT 실험결과 고로슬래그 미분말의 치환율이 높을수록 낮은 통과 전하량을 나타냈으며, 전기분해 알칼리수를 배합수로 사용한 콘크리트가 일반 배합수를 사용한 콘크리트보다 낮은 통과 전하량을 나타냈다.

이는 SEM 분석 결과를 바탕으로 전기분해 알칼리수를 배합수로 사용한 콘크리트가 일반 배합수를 사용한 콘크리트에 비해 내부 공극이 수화물로 인해 밀실하게 채워졌기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 고로슬래그 미분말을 시멘트 대체재로 사용할 경우 염소이온 침투 저항성이 향상된다는 선행연구의 결과와 동일한 경향을 보였다[19].

## 4. 결론

본 연구에서는 고로슬래그 미분말 혼입 콘크리트의 초기강도 증진 및 탄산화, 염소이온 침투 저항성 증가 여부를 확인하기 위한 실험을 진행하였다. 이를 위해 전기분해 알칼리수를 제작하여 배합수로 활용하였으며, 본 연구의 범위 내에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고로슬래그 미분말을 치환한 콘크리트의 경우 전기분해 알칼리수를 배합수로 사용한 콘크리트가 일반 배합수를 사용한 콘크리트에 비해 높은 강도 증진을 보였다. 이는 전기분해 알칼리수를 사용함에 따라 초기부터 콘크리트 내부가 알칼리 환경으로 조성되고, 고로슬래그 미분말의 표면에 존재하는 불투성 피막이 빠르게 파괴되어 수화반응성이 향상됨에 따른 결과로 판단된다.
- 2) SEM 분석 결과 전기분해 알칼리수를 배합수로 사용한 콘크리트의 내부에 더 많은 수화생성물이 생성됨을 확인하였다. 이는 전기분해 알칼리수를 통해 고로슬래그 미분말의 피막이 파괴되고, 반응성 물질이 용출된 결과로 판단된다.
- 3) 촉진탄산화시험 결과 전기분해 알칼리수를 배합수로 사용한 콘크리트의 경우 일반 배합수를 사용한 콘크리트보다 탄산화 저항성이 높은 것을 확인하였다. 이는 전기분해 알칼리수를 배합수로 사용한 공시체의 내부 공극이 밀실해져 탄산가스 투과 속도에 영향을 미친 것으로 판단된다.
- 4) RCPT 결과 전기분해 알칼리수를 배합수로 사용한 콘크리트가 일반 배합수를 사용한 콘크리트보다 저항성이 높은 것을 확인하였다. 이는 전기분해 알칼리수를 배합수로 사용한 공시체의 내부 공극이 밀실해져 염소이온 투과 속도에 영향을 미친 것으로 판단된다.

따라서, 고로슬래그 미분말을 치환한 콘크리트에 전기분해 알칼리수를 배합수로 사용할 경우 초기 수화반응성 향상에 영향을 미치는 것으로 판단되며, 탄산화 저항성과 염소이온 침투 저항성에 효과적일 것으로 판단된다.

추후 연구를 통해 전기분해 알칼리수를 배합수로 사용할 경우 더 많은 재령일과 여러 배합을 통해 염소이온 침투 저항성 평가기준에 적합한지 확인해야 할 것으로 판단된다.

## 요약

본 연구에서는 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트의 초기강도를 증진시키고, 탄산화 저항성과 염해 저항성을 향상시키기 위해 탄산칼륨을 전기분해하여 생성된 알칼리수를 배합수로 사용하여 콘크리트를 제작하였다. 초기강도 증진을 확인하기 위해 압축강도 측정을 진행하였으며, 촉진 탄산화 시험과 염소이온 침투저항성 시험을 진행하였다. 실험결과 일반 배합수를 사용한 콘크리트에 비해 전기분해 알칼리수를 배합수로 활용한 콘크리트의 초기강도가 증진된 것을 확인하였으며, 탄산화 저항성과 염소이온 침투저항성 또한 향상된 것을 확인하였다.

키워드 : 고로슬래그 미분말, 전기분해 알칼리수, 수화특성, 탄산화 저항성, 염소이온 침투저항성

## Funding

Not applicable

## Acknowledgement

This research was funded by the National Research Foundation of Korea(NRF), grant funded by the South Korean government(MSIT)(No. NRF-2020R1A2C1011957).

## ORCID

Su-Mi Jeong,  <http://orcid.org/0000-0003-2091-0514>

Ju-Sung Kim,  <https://orcid.org/0000-0002-4928-3043>

Sun-Gyu Park,  <http://orcid.org/0000-0002-7618-1544>

## References

1. Park PJ, Lee KM. Evaluation of global warming impacts of portland cement manufacturing process using life cycle assessment. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*. 2003 Apr;25(6):688-93.
2. Kim RH, Current state of carbon dioxide emission in cement industry and proposal for the environment load reducing cement used inorganic construction wastes. *Magazine of RCR*. 2019 Mar;14(1):22-8.
3. Park SG, Treatment of Ash from power plant by-product using plasma and arc discharge. *Magazine of RCR*. 2020 Apr;15(4):43-7.
4. Choi SW, Kim V, Chang WS, Kim EY. The present situation of production and utilization of steel slag in Korea and other countries. *Magazine of the Korea Concrete Institute*. 2007 Nov;19(6):28-33.
5. Seo H, Kim DH. Development of reinforcement grout materials using reinforcing fiber and blast furnace slag powder. *Journal of the Korean Geosynthetics Society*. 2019 Sep;18(3):101-12. <https://doi.org/10.12814/jkgss.2019.18.3.101>
6. Park SG, Kwon SJ, Kim YM, Lee SS. Reaction properties of non-cement mortar using ground granulated blast furnace slag. *The Journal of the Korea Contents Association*. 2013 Sep;13(9):392-9. <https://doi.org/10.5392/JKCA.2013.13.09.392>
7. Lee SH, Kim WK, Kang SH. Hydration mechanism of ground granulated blast furnace slag. *Magazine of the Korea Concrete*

- Institute. 2012 Nov;24(6):31-4.
8. Moon HY, Shin DG. Effect alkali activators on early compressive strength of blast furnace slag mortar. *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*. 2005 Jul;9(3):120-8.
  9. Kim RH, Kim GY, Kim JH, Lee BK, Cho BS. Effect of types and replacement ratio of alkali activator on compressive strength of ground granulated blast furnace slag mortar. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*. 2014 Dec;2(4):360-6. <https://doi.org/10.5392/10.14190/JRCR.2014.2.4.360>
  10. Kim HJ, Yang JK. Shrinkage behavior of geopolymer mortar with expansive additive. *Journal an academic conference of Concrete society*. 2017 Nov;29(2):597-8.
  11. Song JK, Song KI, Yang KH. Importance and characteristics of geopolymer concrete technology. *Magazine of RCR*. 2017 Mar;12(1):8-15.
  12. Kim SA, Park SG. Hydration properties of high volume cement matrix using blast furnace slag and alkaline aqueous by electrolysis. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*. 2017 Mar;5(1):8-13. <https://doi.org/10.14190/JRCR.2017.5.1.008>
  13. Hwang GJ, Choi HS. Hydrogen production systems through water electrolysis. *Membrane Journal*. 2017 Dec;27(6):477-86.
  14. KS F 2403. In *Standard Test Method for Making and Curing Concrete Specimens*. Seoul (Korea): Korean Agency for Technology and Standards; 2014. 14 p.
  15. KS F 2405. *Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete*. Seoul (Korea): Korean Standard; 2017. 12 p.
  16. KS F 2596. In *Method for Measuring Carbonation Depth of Concrete*. Seoul (Korea): Korean Standards & Certification Information Center; 2004. 7 p.
  17. KS F 2711. *Testing method for resistance of concrete to chloride ion penetration by electrical conductance*. Seoul (Korea): Korean Standard; 2022. 24 p.
  18. ASTM C 1202. *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2005. 8 p.
  19. Shi C, Stegemann J, Caldwell R. Effect of supplementary cementing materials on the rapid chloride permeability test (AASHTOT 277 and ASTM C 1202) results. *Materials Journal*. 1998 Jul;95(4):389-94. <https://doi.org/10.14359/381>