

# 전기분해 알칼리수 및 고로슬래그를 활용한 콘크리트 암거 개발

## Development of concrete culverts using alkaline aqueous by electrolysis and blast furnace



**박선규 Sun-Gyu Park**  
목원대학교  
공과대학 건축학부 교수  
E-mail : psg@mokwon.ac.kr



**정기현 Ki-Hyeon Chung**  
(유)유수산업  
대표이사  
E-mail : kkpc@hanmail.net



**임흥희 Hong-Hee Im**  
(유)유수산업  
전무이사  
E-mail : 2614347@naver.com

### 1. 서론

최근 전 세계적으로 이상기후가 발생하고 있으며, 이는 이산화탄소 등의 온실가스에 의한 지구온난화가 가장 큰 원인으로 지목되고 있다. 따라서 이러한 온실가스 배출을 줄이기 위한 노력이 건설업을 포함한 모든 산업 분야에서 이루어지고 있다. 건설업의 경우, 다량의 온실가스를 배출하는 산업으로, 특히 건설산업의 주요 재료인 시멘트는 다량의 온실가스를 배출하는 것으로 알려져 있다. 한국시멘트협회의 '2020 한국의 시멘트 산업 통계'를 보면, 2020년 기준 국내 시멘트 생산량은 47,518천 톤이며, 2019년 시멘트 산업의 온실가스 배출량은 약 4,254만 톤 CO<sub>2</sub>eq으로 철강산업과 석유화학산업에 이어 세 번째로 온실가스를 많이 배출하고 있다. 시멘트 산업은 원료와 연료 모두 온실가스 배출 요인이 된다. 주원료가 되는 석회석은 탄소와 수소 등으로 구성되어 공정 과정에서 이산화탄소를 배출하며, 주연료가 되는 유연탄도 연소되어 이산화탄소를 배출한다. 산업연구원에 따르면, 시멘트 산업의 온실가스 배출 비율은 공정배출이 총배출량의 약 67%를 차지하고, 직접배출이 약 27%, 간접배출이 약 6%를 차지한다.

따라서 온실가스 배출량을 줄이기 위해 시멘트의 사용량을 저감하는 방안에 관한 연구를 지속적으로 진행되고 있다. 특히 시멘트의 대체재로서 산업부산물물 다량으로 치환하는 방안이 연구되고 있다. 고로슬래그는 선철을 하는 과정에서 얻어지는 부산물을 급냉 및 미분쇄 한 것으로 콘크리트용 혼화재료로 널리 이용되고 있는 대표적인 산업부산물이다. 고로슬래그는 표면에 얇은 유리질의 박막이 형성되어 있기 때문에 초기재령에서 물과 직접적으로 반응하지 못하며, Ca(OH)<sub>2</sub>가 존재하면 반응을 시작한다. 이러한 고로슬래그를 잠재수경성 물질이라 하며, 잠재수경성을 가진 물질은 강알칼리성 환경에서 피막이 제거되며 화학반응을 일으킨다. 최근에 고로슬래그의 이러한 성질을 이용하고, NaOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>와 같은 물질을 알칼리 자극제로 사용한 지오폴리머 콘크리트에 대



그림 1. 본 기술이 적용될 콘크리트 암거

한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 알칼리 자극제는 고가의 재료이며 아직까지 건설현장에는 적용하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 알칼리 자극제를 대체할 수 있으며, 고로슬래그를 사용한 콘크리트의 초기재령에 있어서 강도를 확보하기 위한 연구가 필요한 실정이다.

목원대학교 건축재료 연구팀은 전기분해 알칼리수 (Alkaline Aqueous by Electrolysis, 이하 AAE로 칭함)를 이용하여 기존의 알칼리 자극제를 대신하고 고로슬래그 미분말 (Blast Furnace Slag, 이하 BFS로 칭함)을 사용한 콘크리트의 초기재령에 있어서 강도를 확보하기 위한 연구를 수행하였다. 본 연구에서 사용한 AAE는  $K_2CO_3$ 을 전해질로 이용하여 순수한 물을 전기분해하여 얻은 것이다. 이러한 알칼리 수용액을 사용하여 시험체를 제작하고 그에 대한 강도 및 내구 특성에 대한 연구를 수행한 후, 이러한 연구결과를 바탕으로 <그림 1>에 나타난 바와 같은 콘크리트 암거에 적용하기 위한 구조체 실물 강도 시험을 실시하였다.

## 2. 전기분해 알칼리수 생성원리

본 연구팀은 기존에 지오폴리머 콘크리트에 사용되어 오던 알칼리 자극제를 대체하기 위해 자체 제작한 장치를 이용하여 전기분해 알칼리수를 사용하였다. 전기분해 알칼리수를 사용

하기 위해 사용한 방법인 전기분해는 양극에서는 산화반응, 음극에서는 환원반응이 일어나는 전기화학적 반응의 일종이다. 이때, 전기분해는 순수한 물에서는 일어나지 않으므로  $K_2CO_3$ 을 전해질로 활용하여 알칼리수를 제조하였다. 본 연구에서 사용된  $K_2CO_3$  수용액의 전극별 반응식은 아래 식 1, 2에 나타낸 바와 같다.

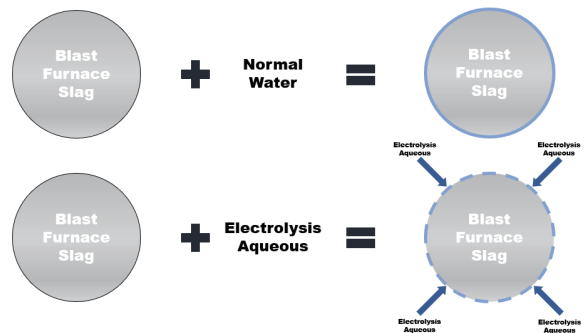
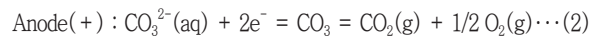
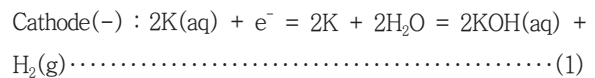


그림 2. 일반 배합수와 AAE를 사용한 경우의 고로슬래그 초기 수화반응 과정

### 3. 전기분해 알칼리수를 사용한 고로슬래그의 반응 모델

<그림 2>는 일반 배합수와 전기분해 알칼리수를 사용한 경우의 고로슬래그 초기 수화반응 과정을 나타낸 것이다. 일반 배합수의 경우 물과 고로슬래그가 만나 초기에 불투성 피막이 생성되고, 이로 인해 내부의 반응성 물질이 용출되지 못해 수화반응이 느리게 일어난다. 반면에 AAE를 배합수로 활용할 경우 초기에 불투성 피막이 생성되지만, AAE 내부에 존재하던 OH<sup>-</sup> 이온이 고로슬래그 표면의 불투성 피막을 파괴하고 이를 통해 내부의 반응성 물질이 용출되어 기존보다 빠른 수화반응이 일어날 것으로 판단된다.

### 4. 전기분해 알칼리수 및 고로슬래그를 사용한 콘크리트의 특성

#### 4.1 압축강도 특성

<그림 3>은 물결합재비 65%에 있어서 AAE를 배합수로 사용한 시험체(ABFS)와 일반 배합수(BFS)를 사용한 시험체의 압축강도를 나타낸 것으로, AAE를 사용한 시험체가 일반 배합수를 사용한 시험체 보다 높은 압축강도를 발현하는 것을 알 수 있었다.

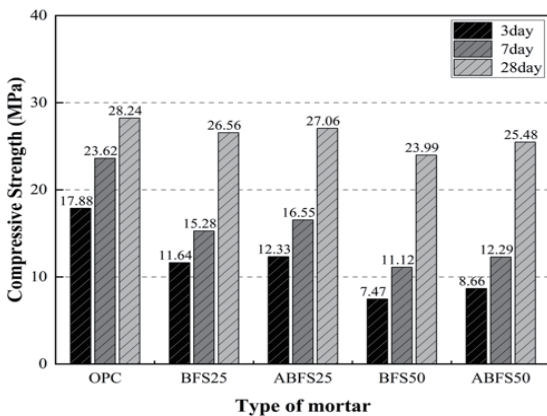


그림 3. AAE와 일반수를 사용한 시험체의 압축강도 측정 결과

이는 배합수로 활용한 AAE가 고로슬래그 표면의 불투성 피막을 파괴하여 물과 고로슬래그가 접촉해 수화반응이 원활하게 일어난 결과로 판단된다. 파괴된 불투성 피막을 통해 고로슬래그 내부에 있던 반응성 물질이 용출되어 칼슘실리케이트 수화물(Calcium Silicate Hydrate, C-S-H)과 칼슘알루미나 수화물(Calcium Aluminate Hydrate, C-A-H) 등의 수화물이 생성되어 구조체 내부의 공극을 밀실하게 채워져 나타난 결과라고 판단된다.

#### 4.2 SEM(Scanning Electron Microscope) 촬영 결과

<그림 4>와 <그림 5>는 전기분해 알칼리수 및 일반배합수를 사용한 시험체의 SEM 촬영결과를 나타낸 것으로, 압축강도 측정결과와 동일한 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 즉, AAE를 배합수로 활용한 모르타르가 고로슬래그 치환율에 관계없이 일반배합수를 사용한 모르타르 보다 내부에 C-S-H와 C-A-H 수화물이 다량 생성되어 내부 공극을 밀실하게 채우고 있는 모습을 확인할 수 있었다. 이를 통해 압축강도 실험에서 확인한 바와 같이 AAE를 배합수로 활용할 경우 초기강도 발현에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

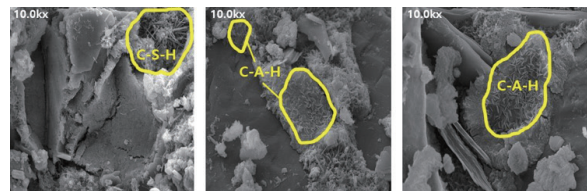


그림 4. 일반 배합수를 사용한 공시체 SEM 촬영결과(W/B 65%, BFS 25%)

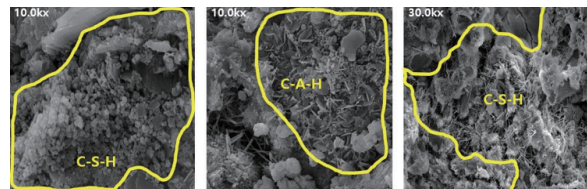


그림 5. AAE를 사용한 공시체 SEM 촬영결과(W/B 65%, BFS 25%)

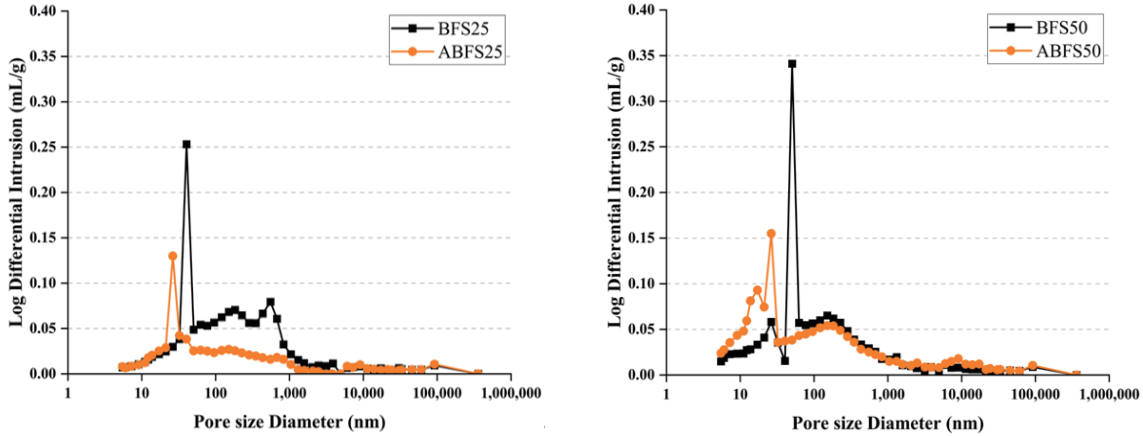


그림 6. AAE와 일반배합수를 사용한 시험체의 MIP 측정 결과

### 4.3 MIP(Mercury Intrusion Porosimetry) 측정결과

일반적으로 시멘트 경화체 내부의 공극은 크기 50  $\mu\text{m}$  이상의 매크로 공극과 10 nm에서 50  $\mu\text{m}$  이하의 크기를 가지는 마이크로 공극으로 나뉜다. <그림 6>은 본 연구에 있어서 물 결합재비 65 %에 있어서 전기분해 알칼리 수와 일반배합수를 사용하여 제조한 시험체의 공극분석 결과를 나타낸 것으로, 일반 배합수를 사용한 시험체에서 공극 생성량이 가장 많은 것으로 나타났다. 특히 시험체 내의 공극 분포 확인 결과, 일반 배합수를 사용한 시험체(BFS)가 매크로공극 영역에서 가장 많은 공극을 갖는 것으로 나타났다. 반면 전기분해 알칼리 수를 배합수로 사용한 시험체(ABFS)의 경우, 고로슬래그를 대체하지 않은 시멘트 시험체와 유사한 공극 분포 및 공극량을 갖는 것을 확인하였다. 이는 일반 배합수를 사용한 경우, 고로슬래그의 수화 반응성이 저하되어 내부 반응성 수화물이 충분히 생성되지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 또한, AAE를 사용한 구조체의 경우 수화 반응성 촉진에 따른 내부 수화물 생성량 증가로 공극 영역이 밀실하게 채워져 나타난 결과로 판단된다.

### 4.4 촉진 중성화 시험 결과

<그림 7>은 AAE를 사용한 시험체(ABFS)와 일반 배합수

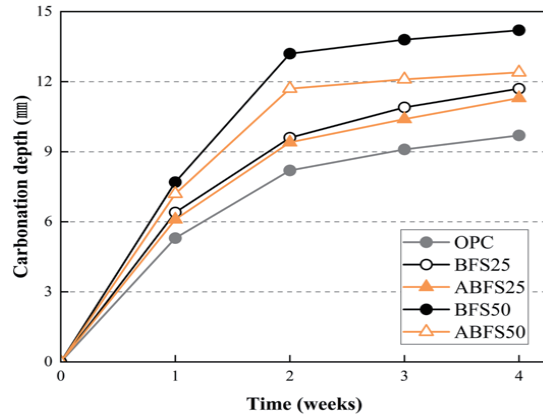


그림 7. AAE와 일반배합수를 사용한 시험체의 촉진 중성화 시험 결과

를 사용한 시험체(BFS)의 촉진 중성화 시험결과를 나타낸 것으로, AAE를 사용한 시험체 보다 일반 배합수를 사용한 시험체가 탄산화 속도가 더 느린 것으로 나타났다. 또한 동일한 재령에서 고로슬래그의 치환율이 증가할수록 탄산화 깊이가 증가하고, 고로슬래그 치환율이 높을수록 탄산화 저항성의 차이가 확실하게 나타남을 확인하였다. 이는 SEM 시험 결과에서도 알 수 있는 바와 같이 AAE를 배합수로 활용한 공시체의 내부에 더 많은 수화생성물이 생성되었으며, 이로 인해 내부가 밀실하게 채워져 탄산가스의 투과에 영향을 미쳐 탄산화 진행이 느려진 것으로 판단된다.

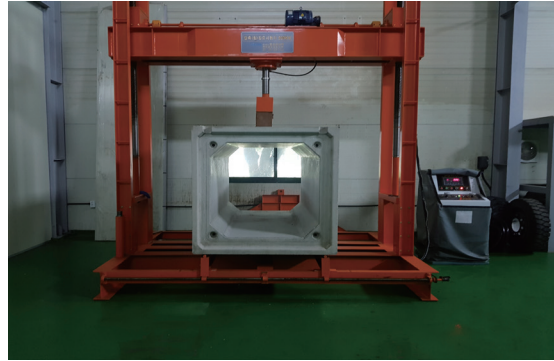
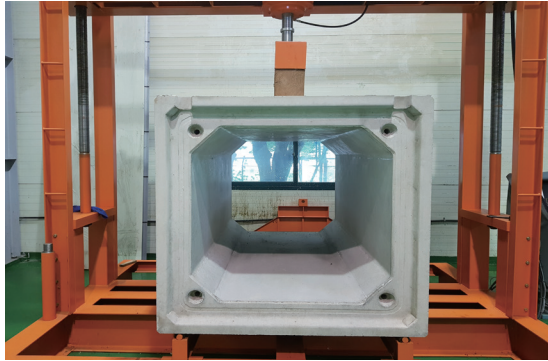


그림 8. 전기분해 알칼리수를 사용한 암거의 외압강도 시험

#### 4.5 구조체 실물 외압 강도 시험

이상에서 설명한 바와 같이 전기분해 알칼리 수를 사용하면 고로슬래그의 수화반응이 촉진되며 압축강도가 향상된다는 것을 알 수 있으며, 내구성이 향상된다는 결론을 얻었다. <그림 8>은 전기분해 알칼리 수와 고로슬래그를 사용한 콘크리트 암거의 외압강도 시험 장면을 나타낸 것이다. 물결합재 비 35% 고로슬래그를 40% 대체하여 제조한 콘크리트 암거의 외압강도는 70.5 kN/m로서, 단체표준규격(2020)의 외압강도 허용값인 58.8 kN/m을 초과하여 조립식 암거의 외압강도 성능을 확보하는 것이 가능함을 확인하였다.

#### 5. 맺음말

이상으로 전기분해 알칼리수와 고로슬래그 미분말을 사용하여 콘크리트 암거를 개발하는 과정에 대하여 설명하였다. 전기분해 알칼리수는 기존의 고로슬래그 미분말의 자극제로 사용하였던 알칼리 자극제를 대신하여 사용하는 것이 가능할 것으로 판단되며, 이러한 전기분해 알칼리 수를 산업부산물인 고로슬래그와 같이 사용하는 것은 친환경 특히 해수 저항성이 높은 콘크리트 암거를 개발하는데 있어서 중요한 기술적 요소로 작용할 것이 기대된다.

#### 참고문헌

1. 정영선 외 2명, 건설부문의 온실가스 배출량 산정 및 배출 특성 연구, Journal of Climate Change Research, Vol.12, No.4, 2021
2. 정용훈, 목원대학교 석사학위 논문, 2021
3. 박선규 외 1명, 전기분해수를 배합수로 활용한 모르타르의 탄산화 저항 특성, 한국건설순환자원학회 논문집, Vol.10, No.3, 2022
4. 박선규 외 2명, 전기분해 알칼리 수 및 고로슬래그 미분말 혼입 시멘트 경화체의 수화 특성, 한국건설순환자원학회 논문집, Vol.9 No.2, 2021
5. Jeong S, Kim J, Kim H, Park S. Carbonation Resistance of Mortar Mixed with Electrolysis Alkaline Aqueous Solution and Blast Furnace Slag, Applied Sciences, 2023; 13(2):900. <https://doi.org/10.3390/app13020900>
6. 박선규 외 1명, 고로슬래그 및 전기분해한 알칼리 수용액을 사용한 하이블룸 시멘트 경화체의수화특성, 한국건설순환자원학회 논문집, Vol.5, No.1, 2017
7. 박필주, 이건모, 전과정평가를 이용한 포틀랜드 시멘트 제조공정의 지구온난화에 미치는 영향평가, 대한환경공학회지, Vol.25, No.6, 2003
8. 최상원 외 3명, 국내외 철강슬래그의 발생 및 이용 현황, 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 19 No. 6, 2007
9. 김래환 외 4명, 알칼리 자극제의 종류 및 치환율이 고로슬래그 미분말 모르타르의 압축강도에 미치는 영향, 한국건설순환자원학회논문집, Vol. 2 No. 4, 2014
10. 박선규 외 3명, 고로슬래그 미분말을 사용한 무시멘트 경화체의 반응 특성, 한국콘텐츠학회논문집, Vol. 13 No. 9, 2013
11. 이승현 외 2명, 고로(수쇄)슬래그의 수화반응 메커니즘, 한국콘크리트학회지, Vol. 24 No. 6, 2012

담당 편집위원 : 이재하(한국해양대학교)