

전기화학적 기법을 통한 시멘트페이스트의 수중노출에 따른 알칼리이온 침출저감 효과: Part 1- 알칼리이온의 침출능

The Effect of Electrochemical Treatment in Lowering Alkali Leaching from Cement Paste to an Aquatic Environment: Part 1- Leachability of Alkali Ions

윤범희¹ · 안기용^{2*}

Bum-Hee Youn¹ · Ki-Yong Ann^{2*}

(Received April 25, 2023 / Revised May 14, 2023 / Accepted May 15, 2023)

In this study, the effect of electrochemical treatment in mitigating alkali leaching into an aquatic environment was investigated. To modify the surface of cement paste, 1000 mA/m² of the direct current was passed through anodic graphite to the external mesh for 4 weeks. Then, the cement paste specimen was exposed to still water in air-tight condition to prevent natural healing of alkali leaching in the water. For 100 days of monitoring in water, the pH value was marginally increased at the electrochemical treatment, while control specimen ranked to the even higher pH accounting for 13.2 in the pH. Moreover, after the pH monitoring, the pH profile for the paste specimen indicated that the electrochemical treatment was effective in securing the higher alkalinity of cement matrix. The water obtained from alkali leaching process, was used to ecological test for *Daphnia magna*. It was evident that the electrochemical treatment had minimal adverse effect on ecological impact, while control specimen mostly immobilized the standard *Daphnia magna*.

키워드 : 전기화학적 처리, 알칼리침출수, 시멘트페이스트, pH 프로파일, 다프니아 마그나

Keywords : Electrochemical treatment, Alkali leaching, Cement paste, pH profile, *Daphnia magna*

1. 서론

콘크리트 구조물의 수서 환경에서 알칼리이온 침출에 관해서 알칼리이온의 해리로 인한 시멘트 수화물의 분해와 콘크리트 강성 및 알칼리도 저하에 따른 물성의 저하에 기인한 연구는 상당 부분 진행되어 온 것은 주지의 사실이다. 특히 대표적인 시멘트수화물인 C-S-H gel, Ca(OH)₂ 등의 해리는 콘크리트 물성에 매우 치명적이며 화학적 안정성에 지대한 영향을 미친다(Adenot and Buil 1992; Faucon et al. 1996; Duchesne and Bertron 2013). 알칼리이온의 침출은 콘크리트 구조물의 성능저하(Van Der Sloot 2002; Gougar et al. 1996)와 같은 공학적 영향뿐만 아니라 노출된 수서 환경의 생태학적으로도 문제를 야기시킬 수 있음은 여러 미디어를

통해 제시된 바 있다. 그러나 실제로 알칼리이온의 침출량, 침출속도 및 침출능에 대한 연구는 매우 제한적으로 이루어져 오고 있다. 예로써, 콘크리트에서의 알칼리이온의 침출은 공극수 내에 존재하는 알칼리이온과 금속계 양이온 간의 상평형 상태를 유지하므로 Na₂O, K₂O의 농도를 측정하는 방법에 대해 제시하고(BS EN 480-12 2005), 또는 수서환경을 조성한 뒤 침출된 알칼리이온의 양을 모니터링하는 방법을 사용하기도 한다(NEN 7341 1994; DEV S4 DIN 38414 S4 1984; EN 196-1 2014; NEN 7345 1994). 다만 상기의 방법 모두 자연정화 조건을 배제하기 위해 공기와의 접촉을 차단하여 실시하게 하였다. 또한 콘크리트 중의 알칼리이온 침출은 단순히 수산화이온(OH⁻) 만이 아니라 노출환경의 알칼리도, 침출 진행정도에 따라 금속계 이온의 침출이 수반됨을 확인하였다

* Corresponding author E-mail: kann@hanyang.ac.kr

¹한양대학교 건설환경공학과 박사과정 (Department of Civil & Environment Engineering, Hanyang University, Gyeonggi-do, 15588, Korea)

²한양대학교 건설환경공학과 교수 (Department of Civil & Environment Engineering, Hanyang University, Gyeonggi-do, 15588, Korea)

(Rozière and Loukili 2011; Wan et al. 2013; Faucon et al. 1996), 즉, pH 8.5 이하 구간에서는 주로 수산화이온의 침출이 발생하지만, pH 9.0~9.5 에서는 Ca^{2+} , Fe^{2+} 이 주로 침출되며, pH 10.8~11.2 에서는 Na^{+} , K^{+} 이 침출된다(Mullauer et al. 2015).

알칼리이온의 침출 억제를 위해 제안된 방법으로는 Membrane coating, 표면도장(Surface treatment), 중성화선처리(Pre-carbonation) 법이 제시되고 있다. 그러나 각각의 방법론은 현장에서 적용된 사례는 없으며 기술적, 연구 차원에서 대두되었으며 적용상의 적합성 문제로 한계가 내포하고 있다. Membrane coating의 경우 콘크리트 내에 이온상으로 존재하는 화합물이 콘크리트 표면에서 외부 이온과의 척력을 유지시킴으로써 이온의 상호교환(침출 및 침투)을 억제하도록 하였다. Pre-carbonation법 역시 알칼리이온 침출 방지를 위한 대책으로 연구중에 있다. 즉 콘크리트 표면에 약 3~5 mm 정도 인위적으로 중성화를 유도하는 방법으로 중성화를 통해 콘크리트 표면에서의 공극수 내에 존재하는 알칼리이온을 침전시킴으로써 침출 자체를 방지하는 방법이다(Duong et al. 2013). 그러나, 알칼리이온 침출억제를 위해 콘크리트 구조물의 중성화는 성능저하, 철근부식의 우려 등의 공학적 성능에 대한 문제를 야기할 수 있다. 표면도장의 경우 콘크리트 구조물의 내구성 확보를 위해 사용하는 경우가 많으나 일정수명이 임계할 경우, 알칼리이온 침출이 발생하므로 실효적 효과에 한계가 있다(KAIA 2013).

본 연구는 기존의 콘크리트 중의 철근부식 방지를 위하여 사용하고 있는 전기화학적 방식법을 변형하여 콘크리트의 성능에 대한 적합성을 확보하고 동시에 알칼리이온 침출을 억제하는 방법론에 대한 실험적 연구를 정량적으로 실시하였다. 전기방식의 경우 10~20 mA/m²의 저전류 범위에서 지속적으로 적용하나, 알칼리이온 침출을 방지하기 위해 1,000 mA/m² 고전류를 4주간의 단기간만을 적용하여 시멘트계 내에서 시멘트수화물의 안정성을 확보하고 해리된 이온의 침전을 촉진시킴으로써 콘크리트 표면부에서 이온의 이동을 억제하는 원리이다. 이에 대한 정량평가로서 수중에서의 pH 모니터링, 알칼리이온 침출량에 대한 정의, 전기화학적 기법 적용 후의 시멘트계의 알칼리도 및 채취된 수서환경에서의 생태학적 영향성을 평가하여 알칼리이온 침출저감 효과를 검증했다.

2. 실험개요

2.1 사용재료 및 시편제작

골재의 영향성을 배제함으로써 알칼리이온 침출 영향성을 극대화하기 위해 시멘트페이스트 시편을 사용하였다. 또한 수중노출면

적을 상부를 제외한 5면에서 침출할 수 있도록 제작하였다. 사용한 시멘트의 화학적 조성은 Table 1에 제시하였다. 시멘트페이스트 시편의 두께는 20 mm로 하였으며 시편 내부에는 전기화학적 기법 적용을 위해 사전에 음극적용을 위해 Graphite Bar 3개를 측면 2개소 및 바닥면 1개소에 배치하였다. 또한 시멘트페이스트 타설 전, 시편면 안쪽에 양극적용으로 Titanium mesh를 5면 모두에 배치하였다.

시멘트페이스트의 W/C는 0.45로 하였으며 타설 시 유동성 확보를 위해 고성능감수제(Superplasticizer)를 시멘트 중량 대비 0.5 %를 배합수에 혼합하여 사용하였다. 시멘트페이스트 타설 직후 30초간의 전동바이브레이션을 거쳐 20 ± 2 °C에서 1일간 기건양생 후 노출 된 외면 전체를 에폭시 코팅을 실시하였다. 이후 시편의 상부면까지 비닐랩으로 도포하여 동일한 온도 조건에서 추가적으로 28일간 양생을 실시하였다. 양생 후, 상부면에는 아크릴 플레이트 및 pH 측정용을 위한 통로를 제외하고 다시 비닐랩으로 감싸 알칼리이온 침출 시험을 실시하기 전까지 외부 공기의 침투를 최소화하였다.

알칼리이온 침출 시험 시에는 시편 상부에 있는 pH 홀에 있는 비닐랩 일부를 제거하고 증류수를 시편 내부에 공급한 뒤 측정하도록 하였다. 증류수 공급 전 증류수의 pH는 pH meter를 통해 확인하였으며 7.0 ± 0.5일 때 사용하였다. 증류수 공급 직후 다시 비닐랩을 덮어 추가적인 외부공기접촉을 차단함으로써 알칼리침출 및 자연정화 효과를 근원적으로 차단토록 유도하였다. 실험을 위한 상세한 모식도는 Fig. 1에 나타내었다.

Table 1. Oxide composition of ordinary Portland cement (%)

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
64.7	20.7	4.6	3.0	1.0	0.13	0.65	3.0

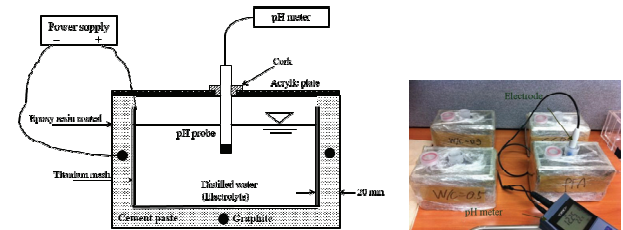


Fig. 1. Schematic of experimental set-up for alkali leaching from cement paste specimen exposed to an aquatic environment under electrochemical treatment with 1000 mA/m² for 4 weeks

2.2 전기화학적 기법의 구성 및 알칼리침출 측정

시멘트페이스트 시편의 알칼리침출을 억제하기 위해 전기화학적 기법을 적용함에 있어 양극으로 Graphite, 음극으로 Titanium mesh를 선택하였으며 통전전류는 1,000 mA/m²로 4주간 지속하였다. 통전기간 동안 통전 전하는 20 Volts 이하로 유지하였으며 대부분 10~12 Volts 영역으로 나타내었다. 또한 전기화학적 기법 적용 시, 시멘트 페이스트의 비저항의 변화에도 통전 전류량은 항상 동일하게 유지하는 Quasi-static type의 전기화학적 기법을 사용함으로 시편 외표부에 일정한 수화물 분포형성을 유도하였다. 이와 같은 전기화학적 기법의 사양은 방식전류범위에 포함된 범주로 콘크리트 물성에 있어 Ca(OH)₂의 침전, 공극구조의 치밀화와 같은 긍정적 효과가 있는 것으로 보고되고 있다.

알칼리이온 침출에 따른 증류수의 pH 변화에 대한 모니터링은 전기화학적 기법 적용 시부터 실시하였다. Control의 경우 전기화학적 기법을 적용하지 않은 시편으로 증류수 투입 직후 이외에 매 4일마다 pH의 변화를 4주간 측정하였다. 전기화학적 기법의 적용 후 시편 내부를 증류수로 세척한 후 다시 증류수로 채워 다시 pH의 변화를 매 5일 간격으로 100일 동안 모니터링 하였다. 모니터링 한 pH 값은 침출된 알칼리이온 농도 및 침출속도로 환산하였으며 침출능에 대한 평가에 사용하였다. 상기의 침출수는 이후 생태학적 영향성 평가에 다시 사용하였다.

침출수를 제거한 후 뜨거운 티슈로 시편 내부의 증류수를 완전히 제거한 후 30분 이내에 시편에서 시멘트페이스트 분말을 채취함으로써 알칼리이온의 이동성을 제한하였다. 다이아몬드 그릿이 있는 그라인더를 이용하여 시멘트페이스트 시편 내부에서부터 2.0 mm 깊이 간격으로 14.0 mm까지 분말을 채취하여 각 깊이별 pH를 측정하였다. 채취된 분말은 3.0 g을 50 ml 증류수에 혼입하여 마그네틱 혼입기에서 30초간 혼입 후 2분간 Standing 상태로 유지하여 안정화 상태를 확보한 뒤 pH meter로 Suspension 상태의 pH를 측정하였다. pH 측정 전, pH meter는 4.0, 7.0, 10.0의 농도에서 pH calibration을 실시함으로써 측정오차를 최소화하였다.

2.3 생태학적 영향성 평가

알칼리이온 침출에 따른 생태학적 평가 및 전기화학적 기법에 따른 효과를 검증하기 위해 전기화학적 기법 이후 100일간의 증류수 노출 이후의 증류수(이하 침출수)를 채취하여 생태학적 평가를 실시하였다. 생태학적 평가는 왕물벼룩(Daphnia magna)을 표본 동물로 선정하여 선행적으로 사육하였다. 사육수는 Table 2에 나타난 화학조성을 구성으로 하여 사전에 구성하였으며 사육수로

Table 2. Chemical composition for broth to feed Daphnia magna (%)

Chemicals for broth (mg/L)			
KCl	MgSO ₄	CaSO ₄ · 2H ₂ O	NaHCO ₃
8	120	120	192

Note: the pH is sustained 7.6~8.0 at all the time.

사용하기 24시간 전에 통기한 후 희석하여 사용하였다.

초기 사육수에서 배양된 왕물벼룩은 침출수에서 24시간 동안 활동성(Mobilization)을 확인한 후 침출수:사육수를 1:1로 희석하여 활동량을 확인하였다. 이를 침출수:사육수의 비율이 1:2, 1:4, 1:8 까지 활동량을 확인하였다. 활동성은 육안으로 조사하였으며 쉽게 판별가능하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 알칼리이온 침출저감 효과

전기화학적 기법의 적용 시 시멘트페이스트에서의 알칼리이온 침출저감 효과를 Fig. 2에서 pH 모니터링을 통해 나타내었다. 시멘트페이스트 시편이 공기와의 접촉이 차단 된 상태에서 증류수에 노출된 상태에서 pH의 변화는 초기 11.0 이상의 높은 값을 나타내었다. 이는 증류수를 투입함과 동시에 알칼리이온이 즉각적으로 침출됨을 확인할 수 있었다. Control 시편의 경우 매 4일 간격으로

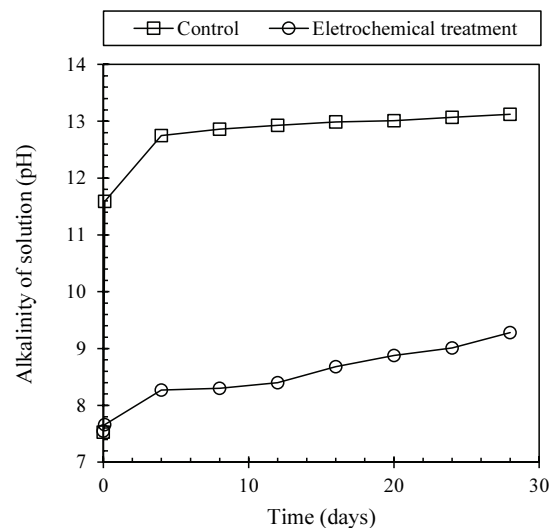


Fig. 2. Change in the pH for the electrolytic solution during the electrochemical treatment in the air-tight condition (Note: there was no electric charge for Control, whilst the electrochemical treatment was applied with 1000 mA/m² for 4 weeks)

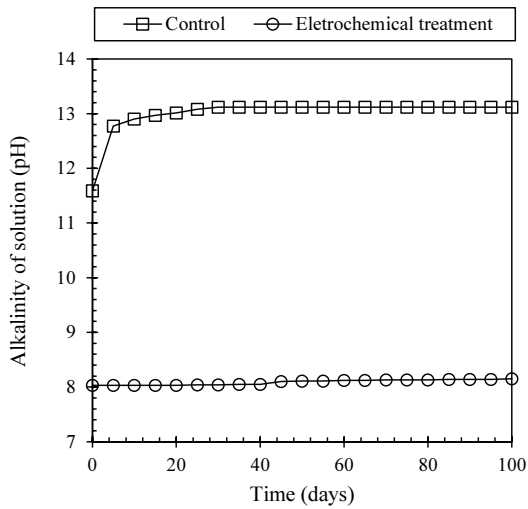


Fig. 3. Change in the pH of distilled water monitored every 5 days immediately after the completion of the electrochemical treatment in the air-tight condition

pH 측정에 따라 pH 값이 점차적으로 증가함을 확인할 수 있었다. 특히 4주간의 전기화학적 기법이 적용되는 기간 동안 최종적으로 pH는 13.12로 매우 높은 값을 나타내었다. 반면, 전기화학적 기법을 적용한 경우 초기 높은 pH 값이 7.55로 증류수보다 약간 상화하였으며 4일째부터 점차적으로 증가하였으나 전기화학적 기법 적용기간 동안에도 최대 pH 9.28로 상대적으로 매우 낮은 알칼리이온의 침출을 확인하였다.

전기화학적 기법 적용 이후, 증류수를 다시 투입했을 때의 pH 모니터링의 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 시멘트페이스트 시편은 모두 1차적으로 알칼리이온이 28일간 침출이 된 이후로서 pH 모니터링은 공기차단을 유지함으로써 자연정화 효과는 차단하였다. 결과로서 Control 시편의 경우, 초기 pH 값이 11.6을 나타내고 이후 12.6 이상의 높은 값을 나타내었으며 시간에 따라 완만히 증가함을 확인하였다. 특히 모니터링 30일 이후에는 pH 13.12로 항상 동일한 알칼리 상태를 유지하였다. 전기화학적 기법을 적용한 시멘트페이스트의 경우 초기 pH 8.03으로 매우 낮은 값을 나타냈으며 시간에 따라 점차적으로 증가하였으나 100일간 모니터링에도 최대 pH 8.15로 낮은 알칼리이온 침출을 유지하였다. 이는 전기화학적 기법을 통해 시멘트페이스트 표면부에서 알칼리이온과 칼슘이온 간의 침전효과(Precipitation)를 증진시킴으로써 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 형성되어 공극률 자체가 낮아지는 효과를 나타낼 수 있을 것으로 판단된다. 또한, C-S-H gel의 경우 외부에서 물분자가 침투될 경우 해리를 통한 이온화 과정을 거쳐 알칼리이온의 침출이 발생할 수 있다(Kamali et al., 2008; Mullauer et al., 2015), 그러나 전기화

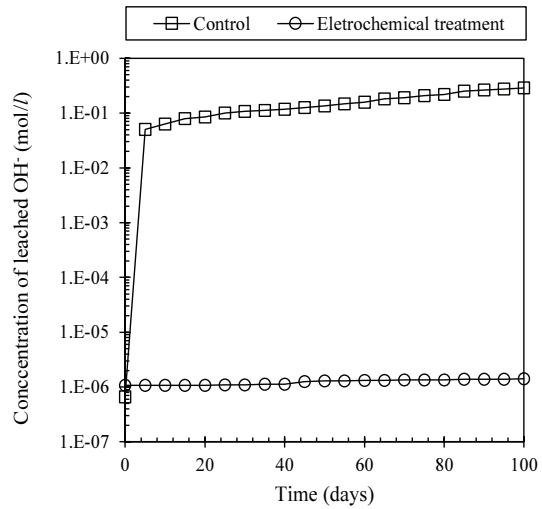


Fig. 4. Concentration of leached OH^- ions from the cement paste specimen into distilled water after the completion of the electrochemical treatment

학적 기법을 거칠 경우 동일한 과정을 통해 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 침전효과를 통해 알칼리이온 침출을 실제로 방지할 수 있다. 전기화학적 기법을 통한 알칼리이온 침출억제 효과를 극대화하기 위해서는 전기량, 통전기간, 통전전압과 같은 최적의 전기화학적 상태를 도출해야 하며 그렇지 못할 경우 이온화된 수화물의 침전효과 및 공극 치밀화 효과를 얻는데 한계가 있을 수 있다(Han et al., 2014).

상기와 같이 pH변화를 모니터링 한 결과를 이용하여 실제 침출된 알칼리이온의 양을 정량적으로 시간에 따라 산출하여 Fig. 4에 나타내었다. 실제로 OH^- 외에 알칼리금속계 이온도 존재하지만, 상대적으로 시멘트 산화물 내의 비중이 매우 낮기 때문에 본 연구에서는 OH^- 만 알칼리이온 침출에 기여한다는 가정으로 정의하였다. 전기화학적 기법을 적용한 시멘트페이스트 시편의 경우 알칼리이온의 침출은 실제로 초기 침출된 1.10×10^{-7} mol/l 이후 100일 동안 1.40×10^{-7} mol/l로 증가함으로써 실제로 거의 침출되지 않음을 확인할 수 있었다. 그러나 Control 시편의 경우 6.61×10^{-7} mol/l의 알칼리이온 농도에서 5일 만에 5.01×10^{-2} mol/l로 급격히 증가하였는데 이는 초기에 알칼리이온의 침출이 상당 부분 발생함을 알 수 있다. 이후 100일 이후에는 2.89×10^{-1} mol/l로 매우 높은 알칼리이온 침출이 발생하였으며 실제로 매우 높은 범위의 알칼리이온 침출농도가 발생함을 알 수 있었다.

알칼리이온의 침출속도는 침출농도의 시간대별 분포만으로 확인하기에는 불가능하므로 시간에 따른 알칼리이온 침출량에 대해 정의함으로써 알칼리이온 침출속도의 특징에 대한 고찰을 실시하여 Fig. 5에 나타내었다. 전기화학적 기법을 적용한 시멘트페이스트

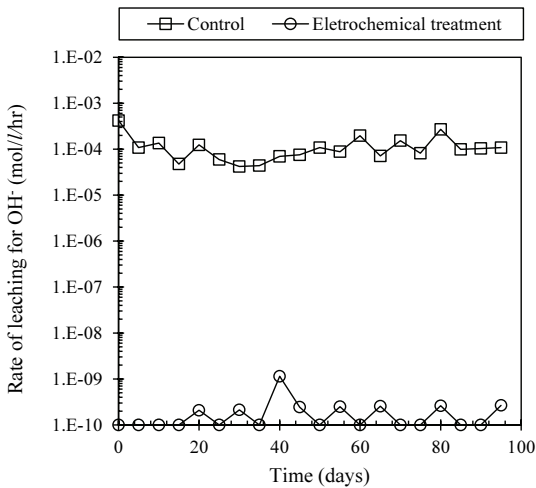


Fig. 5. Rate of OH⁻ ions leaching with time into distilled water after the completion of the electrochemical treatment

트 시편의 경우 알칼리이온의 침출 속도는 100일간 $1.00 \times 10^{-10} \sim 11.4 \times 10^{-10}$ mol/lsec로 일정 범위에서 지속적으로 나타내었다. 이는 알칼리이온의 침출이 시간에 따라 변화하지 않고 항상 일정한 속도로 발생하고 있으며 pH의 변화는 알칼리이온의 농도에 따라 초기에는 상대적으로 큰 변화를 나타내었지만 이후에는 낮은 범위에서 변화를 나타냄을 알 수 있다. 이와 같은 특성은 Control 시편에서 더욱 뚜렷하게 나타나는데 알칼리이온의 침출속도는 $4.73 \times 10^{-5} \sim 4.18 \times 10^{-5}$ mol/lsec의 범위 내에서 항상 일정한 알칼리이온의 침출이 발생하며 이에 따라 초기에는 급격한 pH의 상승이 수반되나 이후에는 pH 상승폭이 상대적으로 미미하게 발생함을 확인하였다. 즉, 시편의 성상에 관계없이 알칼리이온의 침출속도는 일정하게 유지되며 실제로 침출속도에 미치는 영향인자는 시편 표면에서의 공극률, 시멘트수화물의 조성, 이온화 상태 등과 같은 물리-화학적 요소에 의해 지배되는 것으로 판단된다 (Nguyen et al. 2007; El-Dakrouy et al. 2011).

3.2 알칼리이온 침출깊이

시멘트페이스트 시편의 전기화학적 기법 적용에 따른 100일간의 알칼리이온 수중침출 이후 시멘트페이스트 내의 알칼리도 상태를 측정하였다. 시편 표면에서부터의 알칼리 상태는 채취된 분말로 생성된 Suspension의 pH로 각 깊이별로 Fig. 6에 나타내었다. 전기화학적 기법의 적용여부에 관계없이 시멘트페이스트 표면부에서는 pH가 매우 낮은 범위로 나타내고 있다. 특히 표면부는 pH 7.68~7.89로 동일한 범위에서 낮은 알칼리도를 나타내는데 이는 수서환경에 직접적인 노출됨에 따른 이온의 상평에 따른 것으로

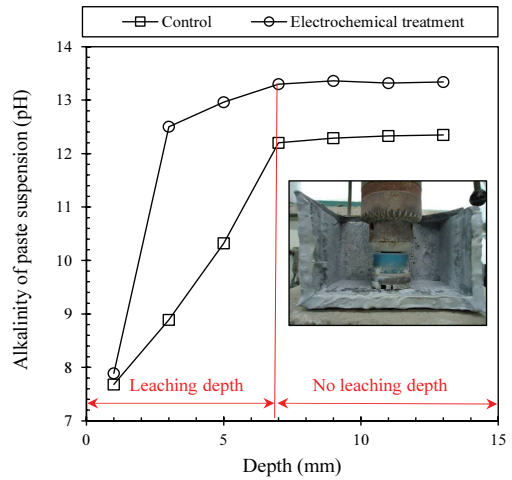


Fig. 6. Profile of the pH for cement paste after the completion of the electrochemical treatment and exposure to distilled water

판단된다. 그러나 시편의 깊이 증가에 따라 pH는 급격히 증가하는데 특히 전기화학적 기법을 적용한 경우 3.0 mm 이후 pH 12.5 이상의 매우 높은 알칼리 상태를 나타낸다. Control의 경우 동일 조건에서 pH 8.89로 상대적으로 낮은 범위를 나타내고 있는데 7.0 mm 이후 pH 12.3 정도의 알칼리 상태를 유지하고 있다. 이는 깊이 7.0 mm까지 알칼리이온 침출이 영향을 미치는 범위로 판단된다. 그러나 전기화학적 기법을 적용한 경우 3.0 mm 이후 높은 알칼리도를 나타내나, 7.0 mm 이상의 깊이에서는 pH 13.3 이상의 매우 높은 알칼리 상태를 유지함을 확인하였다. 이는 전기화학적 기법을 통해 시편 내부에서는 Re-alkalization 효과를 얻음으로써 시멘트페이스트의 높은 알칼리 상태를 유지하고 있는 반면, 표면부에서는 상평형 상태로 알칼리도가 상대적으로 현저히 낮게 나타났다. 그러나 내부에서는 Ca(OH)₂ 침전 효과로(Wan et al. 2013) pH 12.3의 알칼리 상태를 나타냄으로써 시멘트페이스트의 알칼리 상태를 유지하였다.

3.3 생태독성의 영향

시멘트페이스트 시편을 전기화학적 기법을 거쳐 수중에 100일간 노출된 이후 채취한 물에 대한 생태독성 시험 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 초기 채취된 물에서의 활동성에 대한 제고로 채취된 물과 배양액을 혼합하여 표본 동물의 활동성을 측정하여 생태독성에 대한 평가 결과로써 Control 시편에서 채취할 경우 배양액을 혼합하지 않거나 배양액의 혼합비율이 87.5 % (채취수 기준 12.5 %)까지 활동성이 24시간 이내에 모두 정지함을 확인하였다. 93.75

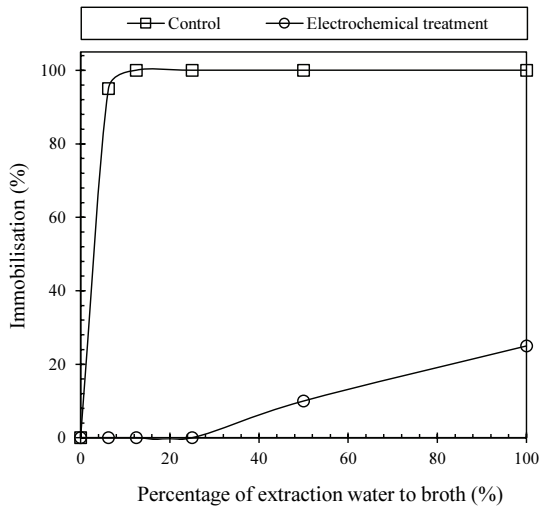


Fig. 7. Rate of OH⁻ ions leaching with time into distilled water after the completion of the electrochemical treatment

%의 배양액(채취수 기준 6.25 %)에도 활동성은 5 % 밖에 되지 않으며 나머지 95 %의 개체는 비활동성(Immobilization) 상태로 나타내었다. 이는 시멘트페이스트에서 침출되는 알칼리이온에 의한 독성이 생태에 매우 치명적이며 특히 자연상태의 정화가 즉각적으로 발생하지 않을 경우 중대한 문제가 발생할 수 있음을 시사한다. 반면에 전기화학적 기법을 적용한 시편에서 채취한 채취수에서의 표본동물의 활동성은 배양액을 전혀 혼입하지 않은 경우에도 75 %로 매우 높게 나타났으며 75 % 이상 배양액을 혼입한 경우 100 %의 활동을 유지함을 확인하였다. 이는 전기화학적 기법이 알칼리이온의 침출억제 효과가 생태학적으로 매우 우수하게 작용하는 것으로 판단되며 실제로 식생에서 자연정화와 같은 환경이나 대규모의 수중환경에서는 콘크리트 중의 알칼리이온 및 독성물질 침출에 따른 생태학적 파괴를 효과적으로 제어할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 시멘트페이스트에서 수서환경에 노출될 경우 알칼리이온의 침출을 억제하기 위해 전기화학적 기법을 적용함으로써 이에 따른 수서환경에서의 알칼리이온 침출 저감, 시멘트 페이스트 내의 알칼리도 및 수서환경의 식생 상태에 대한 생태독성을 검증하였다. 실험적 연구에 대한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 시멘트페이스트 시편이 수중환경에 노출될 경우 알칼리이온의

침출로 수중의 pH가 급격히 증가함으로써 4일 이내에 pH 12.75 까지 도달하며 이후 비슷한 알칼리도를 유지하였다. 반면, 전기화학적 기법을 적용한 경우, 적용기간 4주간 알칼리이온의 침출이 일정하게 증가하며 최대 pH 9.28까지 나타내었다.

- 전기화학적 기법 적용 이후 증류수를 교체함으로써 전기화학적 기법에 따른 알칼리이온의 침출상태는 매우 낮아 100일간의 모니터링 기간 동안 pH 8.15를 최대로 나타내었다. 그러나 Control 시편의 경우 초기 5일 내에 pH가 급격히 증가하여 100일 후 pH 13.12를 나타내었다. 상기 기간 내의 침출된 알칼리이온의 농도는 Control의 경우 2.89×10^{-1} mol/l, 전기화학적 기법을 적용한 경우 1.40×10^{-7} mol/l로 전기화학적 기법의 효과를 극명하게 나타내었다. 그러나 알칼리이온의 침출속도는 침출량에 따라 차이는 나지만 100일간의 모니터링 기간 동안 일정범위에서 두 시편 모두 일정하게 유지됨을 확인하였다.
- 시멘트페이스트 시편의 수중환경 100일 노출 후, 시편 내부의 알칼리도 상태 검증 결과 시편 표면부는 수중환경과 시멘트페이스트와의 상평형 상태 유지를 위해 pH 7.89 정도의 알칼리 상태를 유지한 반면, 시편 내부에서는 급격히 pH가 증가함을 확인할 수 있었다. 특히 전기화학적 기법을 적용한 경우 3.0 mm 깊이에서부터 pH 12.5 이상으로 높게 나타났으며 7.0 mm 이후에서는 pH 13.3 이상의 매우 높은 알칼리 상태를 유지함을 확인하였다.
- 전기화학적 기법을 적용한 경우 생태독성 시험 결과 채취수와 배양액과의 혼입하지 않더라도 표본생물이 75 % 활동성이 유지되었으며 배양액이 75 % 이상 혼입되면 활동성 100 % 유지되었다. 반면, Control의 경우 배양액을 87.5 %까지 혼입하더라도 활동성이 전혀 없었으며 배양액을 증가시키더라도 실제로 활동성의 증가는 미미한 정도로 전기화학적 기법이 생태학적으로 매우 우수함을 확인하였다.

Conflicts of interest

None.

References

- Adenot, F., Buil, M. (1992). Modelling of the corrosion of the cement paste by deionized water, *Cement and Concrete Research*, **22(2-3)**, 489-496.
- BS EN 480-12 (2005). Admixtures for Concrete, Mortar and Grout - Test Methods, Part 12 : Determination of the Alkali Content of

- Admixtures, British Standard, DEV S4 DIN 38414 S4 (1984), German Standard Procedure for Water, Waste Water and Sediment Testing—Group S (sludge and sediment); Determination Of Leachability (S4), Institut für Normung, Berlin, DE.
- Duchesne, J., Bertron, A. (2013). Leaching of cementitious materials by pure water and strong acids (HCl and HNO₃), Performance of Cement-Based Materials in Aggressive Aqueous Environments, Springer, **2013**, 91–112.
- Duong, V. B., Sahamitmongkol, R., Tangtermsirikul, S. (2013). Effect of leaching on carbonation resistance and steel corrosion of cement-based materials, Construction and Building Materials **40**, 1066–1075.
- El-Dakrouy, A., Ibrahim, I.S., Iyob, I.E. (2011). Assessment of changes in physical characteristics due to leaching of hydration products from concrete, Advances in Cement Research, **23(2)**, 61–67.
- EN 196–1 (2014). Test Methods for Cement, CEN TC 51, UK.
- Faucon, P., Le Bescop, P., Adenot F., Bonville, P., Jacquino, J.F., Pineau, F., Felix, B. (1996). Leaching of cement: study of the surface layer, Cement and Concrete Research, **26(11)**, 1707–1715.
- Gougar, M.L.D., Scheetz, B.E., Roy, D.M. (1996). Ettringite and C–S–H Portland cement phases for waste ion immobilization: a review, Waste Management, **16(4)**, 295–303.
- Han, F., Liu, R., Yan, P. (2014). Effect of fresh water leaching on the microstructure of hardened composite binder pastes, Construction and Building Materials, **68**, 630–636.
- KAIA. (2013). Environmental Assessment of Concrete Structures using the Environmental-Friendly Chemical Treatment, Infrastructure R&D Report.
- Kamali, S., Moranville, M., Leclercq, S. (2008). Material and environmental parameter effects on the leaching of cement pastes: experiments and modelling, Cement and Concrete Research, **38(4)**, 575–585.
- Müllauer, W., Beddoe, R.E., Heinz, D. (2015). Leaching behaviour of major and trace elements from concrete: effect of fly ash and GGBS, Cement and Concrete Composites, **58**, 129–139.
- NEN 7341 (1994). Determination of the Availability for Leaching from Granular and Monolithic Construction Materials and Waste Materials, NL.
- NEN 7345 (1994). Determination of Leaching from Monolithic Construction Materials and Waste Materials by Means of a Diffusion Test, NL.
- Nguyen, V.H., Colina, H., Torrenti, J.M., Boulay, C., Nedjar, B. (2007). Chemo-mechanical coupling behaviour of leached concrete Part 1: experimental results, Nuclear Engineering and Design, **237(20-21)**, 2083–2089.
- Rozière, E., Loukili, A. (2011). Performance-based assessment of concrete resistance to leaching, Cement and Concrete Composites, **33(4)**, 451–456.
- Van Der Sloot H.A. (2002). Characterization of the leaching behaviour of concrete mortars and of cement-stabilized wastes with different waste loading for long term environmental assessment, Waste Management, **22(2)**, 181–186
- Wan, K., Li, Y., Sun, W. (2013). Experimental and modelling research of the accelerated calcium leaching of cement paste in ammonium nitrate solution, Construction and Building Materials, **40**, 832–846.

전기화학적 기법을 통한 시멘트페이스트의 수중노출에 따른 알칼리이온 침출저감 효과: Part 1 - 알칼리이온의 침출능

본 연구에서는 알칼리 침출수의 수서환경 완화를 위한 전기화학적 처리에 대한 효과를 평가하였다. 시멘트 페이스트의 표면을 개질하기 위해 1,000 mA/m²의 직류를 양극 graphite를 통해 외부 매쉬로 4주 동안 통전한 후, 물 속의 알칼리 침출이 자연적으로 치유되는 것을 방지하기 위해 시멘트 페이스트 시편을 밀폐된 상태의 정지된 물에 침지시켰다. 물 속에서 100일간의 모니터링 한 결과, 전기화학적 처리를 한 시편의 pH 값은 약간 증가한 반면, control 시편의 pH의 경우 13.2를 나타내어 훨씬 더 높은 pH값을 나타내었다. 또한, pH 모니터링 이후 시멘트 페이스트 시료에 대한 pH 프로파일은 전기화학적 처리가 시멘트 매트릭스의 높은 알칼리도 확보에 효과적임을 알 수 있었다. 알칼리 침출 공정에서 얻은 알칼리침출수는 다프니아 마그나의 생태학적 테스트에 사용되었다. Control 시편은 표준 Daphnia Magna를 대부분 고정시킨 반면, 전기화학적 처리 기법의 경우 생태학적으로 매우 우수하다는 것을 확인하였다.