시멘트 경화체의 알칼리이온 침출성능 및 침출속도

Leaching Capacity and Rate of Alkali Ions from Hardened Cement Paste

심 현 보¹⁾ 황 준 필²⁾ 안 기 용^{3)*}
Hyun-Bo Shim Jun-Pil Hwang Ki-Yong Ann

Abstract

The present study concerns the leachability of alkali ions from hardened cement paste in terms of an increase in the pH together with the rate of alkali leaching. To evaluate the influence of mix design on the leaching capacity and rate of alkali, different water-cement ratios (W/C) and binders were used to manufacture paste specimens. The cement paste was made in the form of rectangular bucket where deionised water was subsequently supplied as solvent media. Then the specimen was wrapped in polythene film to avoid contact to atmospheric conditions, which may affect the water chemistry in the bucket. The pH of media was monitored until no further change in the pH value was observed, of which value then used to calculate the leaching capacity and rate.

The influence of binder on the pH of solvent is more dominant than that of water to cement ratio: OPC paste produced the highest level of alkali leaching, whilst 30% PFA and 60% GGBS pastes imposed lower level of alkali leaching. After the monitoring of the pH, the inner bucket was ground with an increment of 1.0 mm to measure the leaching influence using the suspension consisting of paste powder and deionised water. It was found that the impact zone for OPC was about 7-8 mm, whilst 30% PFA and 60% GGBS had deeper impact depth of the alkali leaching.

Keywords : Leaching, Alkalinity, Hydroxide ions, Calcium hydroxide, Calcium silicate hydroxide, pH

1. 서 론

콘크리트 구조물은 건설된 위치에 따라 해수, 하천 및 우수 등의 다양한 형태로 물과 접촉하게 된다. 콘크리트의 양생 동안에는 물과 접촉하는 것이 시멘트의 수화작용에 이롭게 작용한다. 그러나 콘크리트에 접촉된 물은 다양한 유해성분을 함유하고 있어 수중생태로 유입 시 생태환경에 유해한 변화를 일으킬 수 있다. 콘크리트의 물 접촉으로 인한 알칼리 이온의 침출은 구조물의 공학적 성능을 저하시킬 뿐만 아니라 알칼리도를 상승시킴으로 생물체에도 유해할 수 있다 (Despand et al., 2010). 일반적으로 pH 7.0~8.5가 수중생물체의 환경으로 적합한 것으로 알려져 있으며, 고알칼리는 생물체의 피부, 아가미, 눈에 직접적인 손상을 야기할 수 있다.

침출작용은 고체물질에서 용해성을 가진 용매에 의해 특정 이온 물질이 추출되는 것으로 정의할 수 있다 (Geankoplis, 2003). 콘크리트의 생산에 주로 사용되는 포틀랜드 시멘트는 산화칼슘 (CaO)이 주성분이다. 산화칼슘이 수화작용 동안에 물과 접촉하여, 규산화칼슘 ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)과 수산화칼슘 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)이 생성된다 (Eglinton, 1987; Mehta, 2004; Hong and Rahman, 1999). 석회라고도 불리는 규산화칼슘과 수산화칼슘의 주요 특성은 견고한 접착성이다. 이로 인해 콘크리트는 골재들을 구속시켜 경화된다. 또한 규산화칼슘은 콘크리트의 강도 특성에 큰 영향을 미친다. 수화작용 동안에 생성된 수산화칼슘은 콘크리트의 공극수의 알칼리도를 약 12.5로 유지한다 (Taylor, 1990; Duchesne and Reardon, 1995; Lloyd et al., 2010).

1) 정회원, 한국콘크리트학회 선임연구원, 공학박사
2) 정회원, 한양대학교 연구교수, 공학박사
3) 정회원, 한양대학교 교수, 공학박사, 교신저자

* Corresponding author : kann@hanyang.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2014년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

침출작용에 영향을 미치는 주된 인자는 단위 시멘트량, 콘크리트의 물 접촉 면적, 물-콘크리트 체적비, 물 접촉 시간, 물 접촉시의 콘크리트 재령이다 (Saeki and Monteiro, 2005). Geankoplis는 콘크리트의 접촉면적과 침출량과의 직접적인 연관성에 관한 연구에서 접촉면적이 클수록 침출량도 크게 증가한다고 하였다. 그러나 콘크리트의 체적이 일정하지 않았기 때문에 용매에 접촉하는 표면적 변화에 의한 침출량의 증가라 하기 어렵다. 체적 변화는 알칼리이온이 침출되는 경로의 길이와 연관이 있기 때문에 침출이 일어나는 기간에 영향을 미칠 수 있다. Schiopu 등은 물에 노출되는 시점에서의 콘크리트의 재령에 따라 최고 pH에 도달하는 시점이 지연될 수 있다고 하였다 (Schiopu et al., 2009). Kamali 등은 온도가 상승할수록 침출작용이 활발하게 일어나는 것을 밝혀냈으며, 또한 물-시멘트 비가 증가하면 공극도와 이온 확산이 증가하기 때문에 침출작용이 활발해진다고 하였다 (Kamali et al., 2008). 침출에 관한 다양한 연구에도 불구하고 대부분이 침출현상에 따른 콘크리트의 열화 및 내구성 저하와 관련된 연구이고, 침출된 알칼리이온에 의한 오염에 대한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 콘크리트의 침출속도 및 침출성능에 대한 평가를 위해 수조 형상의 시멘트 경화체를 제작하여 접촉한 증류수의 pH 변화를 측정하여 알칼리이온 침출에 관한 연구를 수행하였다.

2. 실험방법

2.1 시험체 제작

물과 접촉한 콘크리트의 알칼리이온 침출 특성을 규명하기 위해 보통 포틀랜드 시멘트 (Ordinary Portland cement;

OPC)와 포졸란 물질이 사용되었다. 골재는 수화과정 중 반응하는 물질이 아니며, 또한 침출과정에도 관여하지 않는 것으로 가정하여 시멘트 경화체로 수조를 제작하였다.

플라이애시 (Pulverised fuel ash; PFA) 치환율 30%인 시멘트 경화체와 고로슬래그 (Ground granulated blast furnace slag; GGBS) 치환율 60%인 시멘트 경화체로 제작된 시험체도 제작하여 포졸란 물질의 알칼리 침출 특성에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 물-시멘트 비를 각각 0.3, 0.4, 0.5으로 하여 시험체를 제작하였다.

알칼리이온의 침출을 최대화하기 위해 시험체는 수조형태로 제작하였다. 수조 시험체의 내부 치수는 150×90×95 mm이며, 벽체 및 바닥의 두께는 10.0 mm로 하였다. 시험체 성형을 위해 Fig. 1과 같이 8.0 mm 두께의 아크릴 몰드를 이용하였다. 내부에 물을 저장할 공간을 확보하기 위해 아크릴 몰드에 브릿지를 설치하여 스티로폼을 고정하였다. 시멘트 페이스트 타설 후 24시간 경과 후 탈형을 한 다음, 폴리에틸렌 필름으로 수분증발을 차단하여 7일 동안 양생하였다. 양생 후에는 수조의 외부표면을 에폭시 도장처리한 후 측정구가 있는 덮개를 씌워 Fig. 2와 같이 제작하였다.

Fig. 1 Set-up of mould for cement paste bucket for pH monitoring

Fig. 2 Concentrations Cement paste bucket

Table 1 Mix proportion

No.	W/C	Water (per m ³)	Binder			
			Total (per m ³)	OPC (per m ³)	PFA (per m ³)	GGBS (per m ³)
1	0.3	1.2 kg (105)	4 kg (350)	4 kg (350)	—	—
2 (Ctrl)	0.4	1.6 kg (140)	4 kg (350)	4 kg (350)	—	—
3	0.5	2 kg (175)	4 kg (350)	4 kg (350)	—	—
4	0.4	1.6 kg (140)	4 kg (350)	1.6 kg (140)	—	2.4 kg (210)
5	0.4	1.6 kg (140)	4 kg (350)	2.8 kg (245)	1.2 kg (105)	—

Fig. 3 Set-up of measuring the pH of the water in cement paste specimen

2.2 실험방법

결합재 공기접촉에 의한 영향을 최소화하기 위해 아크릴 덮개의 마개를 닫은 채 유지하였으며, 측정 시에만 측정 구멍을 통해 전극을 삽입하였다. 알칼리도 측정장비는 WTW pH 3110 SET2를 사용하였다. 온도계를 이용하여 수온을 측정 후 이에 대응하는 알칼리도를 소수점 2번째 자리까지 기록하였다.

측정방법은 우선 증류수의 수온 및 알칼리도를 측정하여 기록한 후, 증류수 800 mL를 수조 시험체에 채웠다. 초기 10분 동안은 매 10초 간격으로 측정을 하고 그 이후에는 매 30분 간격으로 측정하였다. 30분 간격의 측정 알칼리도값의 변화가 ± 0.1 미만인 경우에는 매 2시간 간격으로 측정하였다. pH값이 최고값으로 수렴된 때에는 증류수를 교체하여 같은 방식으로 재측정하여 기록하였다. 마지막으로 수조 시험체의 물을 제거한 후 시험체를 24시간 동안 $101 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 온도에서 건조시켰다. 건조된 시험체의 인쪽면에서 1.0 mm 간격 깊이로 3.0 g의 시료를 채취하였다. 채취한 시료에 40 mL의 증류수를 가하여 현탁시킨다. 자기 교반기를 이용하여 현탁액을 10분 동안 교반한 후 용액의 pH를 측정하였다. 이러한 방식으로 침출이 완료된 시험체의 깊이별 알칼리도 분포를 나타내었다.

3. 실험결과

3.1 제작시간 경과에 따른 pH 변화

물-시멘트 비에 따른 시멘트 경화체 수조 내 용액의 pH

Fig. 4 Increase in the pH of water in cement paste bucket with time depending on W/C

Fig. 5 Increase in the pH of water in cement paste bucket with time depending on binder

변화를 Fig. 4에 나타내었다. 모니터링 하는 시간은 로그는 금간격으로 나타내었다. 물-시멘트 비가 각각 0.3, 0.4, 0.5인 경우 공통적으로 용매의 pH에 따라 계단식으로 증가하는 양상을 나타냈다. 초기에 급격하게 pH 9 정도까지 급격하게 증가된 후 완만하게 증가하다가 다시 급격하게 증가하여 pH 12 정도에 이르는 것으로 나타났다. 그러나 물-시멘트 비가 커질수록 pH값 상승이 지연되다가 최고값은 약 pH 12.8까지 증가함이 확인되었다.

포졸란 물질로 치환한 경우에는 Fig. 5와 같이 OPC를 사용한 경우에 비해 최종 수렴하는 구간에서의 pH가 전반적으

Fig. 6 Increase in the pH of water in cement paste bucket with time depending on the number of solvent substitution

로 낮은 수준을 유지했다. 이는 단위 시멘트 사용량의 감소에 기인한 것으로 판단된다. 또한 포졸란 물질을 치환하여 사용한 경우에도 앞서 설명한 것과 같은 특정 pH 환경에서 급격하게 증가하다 완만해짐을 반복하는 계단식 상승 양상을 보였다. 그러나 30% PFA 경우에는 pH가 약 11.4에 도달할 때까지 선형적으로 상승한 후 상승폭이 완화되어 약 pH 12.5에서 수렴하였다. 60% GGBS 시험체의 경우에는 약 pH 8.7까지 1차적으로 증가한 후 단기간 동안에 급격하게 pH 12.2까지 증가한 후 상승폭이 완화되었으며, 약 pH 12.6에서 수렴하였다.

pH가 수렴한 이후에는 용매를 교체하고 다시 pH가 일정 값에 수렴할 때까지를 반복적으로 측정하였다. Fig. 6은 각각 용매를 교체할 때마다의 pH를 측정 결과를 나타낸 것이다. 첫 번째의 증류수 (pH 7.23)에서는 pH가 최고 12.8까지 상승하였으며, 물을 교체할수록 최고 pH가 소폭으로 감소하는 경향을 나타냈다.

3.2 수산화이온 농도

Fig. 7은 pH 모니터링 결과를 이용하여 시간경과에 따른 침출된 수산화이온의 농도 변화를 나타낸 것이다. 침출되는 수산화이온의 농도는 0.083 mol/L로 물-시멘트 비가 0.4인 경우 가장 큰 것으로 나타났다. 이는 800 mL의 물에 약 1.13 g의 수산화이온이 함유되어 있는 것이다. 물-시멘트 비가 다른 경우에 최종 농도는 다소 차이가 있으나 최종 농도에 도

Fig. 7 Cumulative concentration of hydroxyl ions with time depending on W/C

Fig. 8 Cumulative concentration of hydroxyl ions with time depending on W/C

달하는데 걸린 시간은 거의 일정한 것으로 나타났다. 이는 접촉된 용액의 pH에 영향을 미치는 침출 이온량은 차이가 있을지라도 이러한 이온이 이동하는데 걸리는 시간은 큰 차이가 없기 때문이라 보여진다.

OPC와는 달리 포졸란계 혼화재를 사용한 시멘트 경화체의 경우는 pH의 변화가 상이하고 이에 따른 알칼리이온의 침출성능의 차이가 있음을 Fig. 8에서 보여주고 있다. 침출되는 수산화이온의 농도는 OPC의 경우에 가장 높게 나타났

Fig. 9 Profile of the pH of suspension containing cement paste bucket after the alkali leaching test depending on W/C

으며, 60% GGBS와 30% PFA의 경우에는 현저하게 낮았다. 포졸란 물질을 사용한 경우 총 침출량의 절반에 못 미치는 양의 수산화이온이 침출되었다. 또한 최고 pH값에 이르는 데 걸리는 시간도 차이가 있었다.

3.2 수산화이온 농도시험체의 깊이별 pH

Fig. 9는 각각의 물-시멘트 비에 대한 OPC시험체로부터 깊이별로 채취한 분말의 현탁액의 pH를 측정한 결과이다. 물-시멘트 비가 0.3인 경우에 7-8 mm깊이 이후에 일정한 양이 유지된다. 이와 같이 알칼리이온의 침출 실험 종료 후 시멘트 경화체 내부의 pH-프로파일링을 통한 알칼리이온의 침출 영향범위는 결합재의 종류에 따라서도 Fig. 10에서와 같이 매우 상이하게 나타난다.

본 연구에서 사용한 OPC의 경우 침출 영역이 표면에서부터 약 7-8 mm로 국한되어 있는 반면에 포졸란계열의 혼화재인 30% PFA, 60% GGBS의 경우 침출에 영향을 받는 깊이가 10 mm 이상으로 OPC에 비해 깊어지는 것을 알 수 있다.

4. 고 찰

4.1 알칼리이온의 침출특성

물과 콘크리트 수조 시험체 내 증류수의 시간 경과에 따른 변화는 앞서 실험 결과와 같이 계단식으로 증가하는 양상을

Fig. 10 Profile of the pH of suspension containing cement paste bucket after the alkali leaching test depending on binder

나타냈다. 이는 콘크리트 내부 공극수의 pH는 12.6에서 수산화칼슘의 용해에 의해 영향을 받고, pH 12.6-10에서 규산칼슘의 용해에 의해 영향을 받는다는 기존의 연구로 해석이 가능하다. Fig. 4에서와 같이 pH 7-10 환경에서는 알루미늄 (Al), 철 (Fe)가 pH의 상승을 주도하고, 그 이후 pH 10-12 환경에서는 규산칼슘의 용해로, pH 12 이상의 환경에서는 수산화칼슘의 용해로 인해 pH가 상승되는 것으로 사료된다.

포졸란 물질을 사용한 시험체의 경우에는 결합재의 종류, 즉, 수화물의 종류에 따라 특정 pH에서 pH 상승이 정체되는 것으로 판단되고, 이는 결합재의 종류에 따른 수화물이 pH 변화에 대해 완충작용을 하는 것으로 볼 수 있다.

시험체 내의 증류수를 교체하는 횟수가 증가함에 따라 최고 pH가 소폭으로 낮아지고, pH 증가가 지연되는 것은 이미 용매를 통해 pH를 상승시킬 수 있는 알칼리이온의 침출이 한정적이기 때문이라 생각된다. 그러나 Fig. 7에서 초기에는 오히려 용매를 교체하고 난 뒤 pH가 급격하게 상승하였다. 이는 시멘트 경화체가 용매에 닿기 전, 오히려 용매가 대류 현상에 의해 시편 내부로 흡수되고 화학적 평형상태에 이른 후 알칼리 이온이 침출될 때까지 시간이 소요되었기 때문이라고 볼 수 있다. 이에 상대적으로 2, 3회 용매를 교체한 경우에는 이미 용매와 시편 내부 사이에 물에 의한 상평형 상태를 유지하고 있으므로 초기 pH가 빠른 속도로 상승했을 것이라 판단된다.

Fig. 11은 증류수 교체에 따른 최고 pH 변화를 나타낸 것

Fig. 11 The pH at peak value with the number of solvent substitution

Fig. 12 Time to peak pH value with the number of solvent substitution

이다. 공통적으로 증류수 교체 횟수가 증가할수록 최고 pH가 낮아지는 경향을 나타냈으며, 결합재에 따라서는 OPC > 30% PFA > 60% GGBS의 순으로 최고 pH값이 높게 나타났다. 뿐만 아니라 세 가지 경우 모두에서 증류수 교체 횟수의 증가에 따라 pH 저하폭도 상대적으로 낮아지는 것을 알 수 있었다. 침출되어 용액의 알칼리도에 영향을 미치는 화합물이 특정 깊이 내에서는 증류수 교체에 따라 소모되기 때문인 것으로 판단된다. 그래프에서 OPC의 경우 1회 증류수 교체 시 최고 pH 감소 폭이 큰 것은 공극구조와 관련하여, OPC의 경우가 상대적으로 이온이 이동하기 수월했기 때문에 최초의 증류수 접촉 시 많은 수산화이온이 소모되어 다음 증류수 교체 시 침출량이 감소되었기 때문이라 생각된다.

Fig. 12는 최고 pH에 도달하는데 소요된 시간을 그래프로 나타낸 것이다. 30% PFA의 경우가 비교된 경우 중 최고 pH에 도달하는 시간이 가장 짧은 것으로 나타났으며, 60% GGBS의 경우가 최고 pH에 도달하는 시간이 가장 긴 것으로 나타났다. 또한 물 교체 횟수가 증가할수록 최고 pH에 도달하는 시간이 지연되었다. 침출에 관여를 하는 시험체의 특정 깊이에서의 수산화이온의 양이 제한적이기 때문에 최고 pH에 도달하기 위해 침출되는 수산화이온의 양도 상대적으로 적었을 것이라 판단된다. 따라서 최고 pH 도달하는 시간이 지연되었을 것이라 사료된다.

4.2 알칼리이온의 침출속도

각각의 pH에서 수산화이온의 침출속도를 pH모니터링 결

Fig. 13 Leaching rate against the pH depending on W/C

과를 이용하여 Fig. 13, 14에 나타내었다. 물-시멘트 비에 대해 약 pH 12 정도에서 유사하게 최대 침출속도를 갖는 것으로 나타난다. 또한 물-시멘트 비가 낮은 경우에 그 속도 또한 높게 나타났다. 물-시멘트 비가 0.3인 경우에 0.4인 경우와 비교하여 침출속도가 약 2배 정도 빠른 것으로 측정되었다. 단위시멘트량의 상대적인 증가로 물-시멘트 비가 낮은 경우에 침출속도가 높아졌다고 판단된다. 또한 pH 12에서 이온화되어 침출에 큰 영향을 미치는 수산화칼슘양의 증가와도 연관이 있다.

시간 경과에 따른 수산화이온 침출량의 변화는 접촉한 용액의 pH 변화에 영향을 미치는 성분 및 양의 차에 기인한

Fig. 14 Leaching rate against the pH depending on W/C

것으로 판단되는데 수화물 중 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 상대적으로 적은 60% GGBS의 경우 침출되는 수산화이온의 양이 가장 작았다. 또한 pH에 따른 침출속도에 있어서도 OPC의 경우에는 앞서 언급한 것과 같이 pH 12에서 침출속도가 최고였으나, 포졸란 물질을 치환한 경우에는 약 pH 11.4에서 침출속도가 최고였다. OPC의 경우에는 pH 12에서 수산화칼슘의 용해로 인한 침출속도가 가장 빠르며, 포졸란 물질을 치환한 경우에는 pH 11.4 정도에서 규산칼슘의 용해로 인한 침출속도가 가장 빠른 것으로 사료된다.

4.3 침출 유효깊이

Fig. 9, 10에서와 같이 시험체의 깊이별 수산화이온 농도 분포로부터 일정 깊이까지는 침출되어 용액의 pH에 영향을 미치지만 더 깊은 곳에서는 영향을 미치지 않았다고 볼 수 있다. 이는 Fig. 9에서 물-시멘트 비가 0.3인 경우에 7-8 mm 깊이 이후에 pH 값이 일정하게 유지되므로 해당 깊이 전까지의 수산화이온이 침출되는 유효깊이라 판단할 수 있다. 다시 말해 수산화이온이 침출되어 용액의 pH에 영향을 미치는 깊이를 침출 유효깊이라 정의할 수 있다. 물-시멘트 비가 증가할수록 유효깊이가 깊어지는 양상을 나타냈다. 다시 말해 물-시멘트 비가 높을수록 더 깊은 곳으로부터 수산화이온이 침출되며 그 침출속도도 빠르다고 할 수 있다. 물-시멘트 비가 클수록 알칼리이온이 침출 가능한 유효깊이가 깊어지고 따라서 총 침출량도 증가한다고 할 수 있다. 그러나 최고 pH에 있어서는 차이가 거의 없었다. 따라서 침출 유효깊이는 물-시멘트 비가 큰 경우 이온의 이동경로가 길어지지만 실제

로 침출되는 양에는 큰 차이가 없는 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 콘크리트의 침출성능 특성을 규명하기 위해 수조형태의 시멘트 경화체를 이용하여 시험체에 저장된 증류수의 pH 변화를 시간 경과에 따라 관찰하였다. 증류수의 pH 측정이 완료된 후에는 시험체의 깊이별 pH 분포를 나타내었다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 수조 시험체 내 증류수의 pH 변화는 공통적으로 계단식으로 상승하는 양상을 나타낸다. 이는 각각의 pH 환경에서 이온이 침출되어 pH에 영향을 미치는 화합물이 다르기 때문으로 물-시멘트 비보다는 결합재의 종류에 따라 상이하게 작용하기 때문이라 판단된다.
- (2) 시멘트 경화체에서의 알칼리이온의 침출속도는 물-시멘트 비가 증가함에 따라 최고 침출속도는 낮아지는 경향을 나타낸다. 포졸란 물질을 치환한 경우에는 더 낮은 pH환경에서 최고 침출속도에 이르는 것으로 나타났다. 또한 용매의 교체 횟수가 증가할수록 알칼리이온 침출량의 감소뿐만 아니라 침출이 지연되었다.
- (3) 시험체의 깊이별 pH 분포는 물-시멘트 비가 작을수록 알칼리이온 침출의 영향을 받은 유효깊이가 작아지는 것으로 나타났다. 물-시멘트 비가 증가할수록 침출이 일어나는 유효깊이는 깊어지지만 상대적으로 침출 시간은 지연되었다. 또한 포졸란계 혼화재를 사용할 경우 알칼리이온의 침출량이 적으나 침출로 인한 유효깊이는 더 깊어지는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 “친환경 화학처리기술을 통한 콘크리트 구조물의 환경오염 저감 및 환경영향성 평가 (과제번호: 10기술혁신E02)”의 지원으로 수행되었다.

References

1. Adenot, F., and Buil, M. (1992), Modelling of the corrosion of the cement paste by deionized water, *Cement and Concrete Research*, 22, 489-496.
2. Despard, L. M., Clark, M. W., Aragno, M., and Vancov, T. (2010), Minimising alkalinity and pH spikes from Portland cement-bound bauxsol (seawater-neutralized red mud) pellets

- for pH circum-neutral waters, *Environmental Science Technology*, 44, 2119-2125.
3. Duchesne, J., and Reardon, E. J. (1995), Measurement and prediction of portlandite solubility in alkali solutions, *Cement and Concrete Research*, 25, 1043-1053.
 4. Eglinton, M. S. (1987), Concrete and its chemical behavior, Telford, London.
 5. Faucon, P., Adenot, F., Jacquinet, J. F., Petit, J. C., Cabrillac, R., and Jorda, M. (1998), Long-term behavior of cement pastes used for nuclear waste disposal: review of physico-chemical mechanisms of water degradation, *Cement and Concrete Research*, 28, 847-857.
 6. Geankoplis, C. (2003), Transport processes and separation process principles, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
 7. Glasser, F. P., and Atkins, M. (1994), Cements in radioactive waste disposal, Materials Research Society Bulletin, 12, 33-39.
 8. Hong, S. Y., and Rahman, A. A. (1999), Alkali binding in cement pastes Part I. The C-S-H phase, *Cement and Concrete Research*, 29, 1893-1903.
 9. Kamali, S., Moranville, M., and Leclercq, S. (2008), Materials and environmental parameter effects on the leaching of cement pastes: experiments and modeling, *Cement and Concrete Research*, 38, 575-585.
 10. Lloyd, R. R., Provis, J. L., and van Deventer, J. S. J. (2010), Pore solution composition and alkali diffusion in inorganic polymer cement, *Cement and Concrete Research*, 40, 1386-1392.
 11. Lovera, P., Adenot, F., Jorda, M., and Cabrillac, R. (1997), Physico-chemical transformation of sulfated compounds during the leaching of highly sulfated cemented wastes, *Cement and Concrete Research*, 27, 1523-1532.
 12. Mehta, P. K. (2004), Concrete: microstructure, properties and materials (3rd edition), Mc Graw Hill, New York.
 13. Saeki, T., and Monteiro, P. J. M. (2005), A model to predict the amount of calcium hydroxide in concrete containing mineral admixtures, *Cement and Concrete Research*, 35, 1914-1921.
 14. Schiopu, N., Tiruta-Barna L., Jayr, E., Mehu J., and Moszkowicz, P. (2009), Modelling and simulation of concrete leaching under outdoor exposure conditions, *Science of the Total Environment*, 11(27), 1613-1630.
 15. Taylor, H. F. W. (1990), Cement Chemistry, Academic Press, London.

Received : 05/09/2013

Revised : 07/22/2013

Accepted : 07/25/2013

요 지

본 연구는 시멘트 경화체로부터의 알칼리 침출에 의한 pH 증가와 알칼리 침출속도에 관하여 수행되었다. 배합, 물-시멘트 비, 결합재에 따른 영향을 평가하기 위해 각각을 변수로 하여 시험체를 제작하였다. 시험체는 정사각형 수조형태로 내부에 물을 저장하여 이온이 해리되어 침출될 수 있도록 하였다. 또한 시험체 내부 용액의 대기접촉으로 인한 예기치 못한 화학적 반응을 방지하기 위해 폴리에틸렌 수지로 포장했다. 침투능과 침투속도를 결정하기 위해 용액의 pH는 더 이상 변화가 없을 때까지 시간 경과에 따라 측정하였다. 알칼리 침출에 의한 용액의 pH 변화에 있어서 물-시멘트 비의 영향은 거의 없는 것으로 나타났으며, 반면에 결합재에 따른 영향은 큰 것으로 나타났다. 결합재로 OPC 만을 사용한 경우에 알칼리 침출이 높았으며, 30% PFA와 60% GGBS의 경우에 알칼리 침출이 낮았다. pH 측정이 종료된 후, 시험체 내부 표면으로부터 깊이 1.0 mm 간격으로 채취한 시료를 증류수로 현탁시켜 현탁액의 pH를 측정하였다. OPC의 경우에는 약 7-8 mm 깊이까지 침출의 영향을 받고, 30% PFA와 60% GGBS의 경우에는 침출 영향을 받는 깊이가 더 깊어짐을 알 수 있었다.

핵심 용어 : 침출, 알칼리도, 수산화이온, 수산화칼슘, 규산칼슘, pH