

광물질 혼화재를 혼합한 콘크리트의 칼슘용출 저항 특성

최소영¹, 최윤석², 양은익^{3*}

Characteristics of Calcium Leaching Resistance for Concrete Mixed with Mineral Admixture

So-Yeong Choi¹, Yoon-Suk Choi², Eun-Ik Yang^{3*}

Abstract: Concrete is a very useful construction material for the sealing disposal of hazardous substances. In general, mass concrete is applied to these structures. And, the mineral admixtures are recommended for the long term performance. Calcium leaching could be happened due to the contact with pure water in underground structures. Thus, it is needed to evaluate the resistance of calcium leaching for concrete mixed with mineral admixtures. From the test results, the mineral admixtures are effective to the improvement of long term compressive strength and chloride diffusion coefficient in concrete members. When calcium leaching is happened, however, the reduction of compressive strength and chloride penetration resistance is severe than OPC case, the micro pore distribution is adversely affected. Consequently, when the mineral admixtures are applied to underground structures which is exposed to calcium leaching environment, it is desirable to reduce water-to-binder ratio, to expose after the sufficient pozzolanic reaction, and to use BFS than FA.

Keywords: Calcium leaching resistance, Mineral admixtures, Compressive strength, Chloride diffusion coefficient, Micro pore structures

1. 서 론

콘크리트는 쉽게 구할 수 있으면서 내구성이 좋은 건설재료로서 그 활용범위는 무한하다고 할 수 있다. 이러한 우수한 성능을 활용하는 방안의 일환으로 장기 내구성을 보유하면서 다양한 종류의 산업폐자원을 비롯하여 원자력 에너지 사용이후 발생하는 폐기물을 봉인할 수 있기 때문에 방사성 폐기물 처분장에 적용하기 위한 시도가 여러 분야에서 진행되고 있다(Kim et al., 2005; Sheen, 2002; Kari and Puttonen, 2014; Kim et al., 2013; Turick and Berry, 2016). 이러한 방사성 폐기물 처분장은 도시 공간 또는 일상 생활환경으로부터 격리시키기 위한 목적으로 바닷가 인근 및 해수면에서 수십미터 지하에 설치하는 경우가 대부분이며, 특히 장기간의 성능확보를 위해 매우 두꺼운 단면을 사용하는 경우가 많다. 또한, 이와 같은 시설물에 사용하는 콘크리트는 지하수 환경에 노출

되게 되며 반응성이 있는 순수(pure water)에 의한 칼슘 용출 가능성이 존재하게 된다.

기존 연구에 따르면 순수에 의한 칼슘 용출은 콘크리트 외부의 이온교환수와 내부 공극수 사이에 농도구배가 발생하면서 상대적으로 농도가 높은 공극수의 수화생성물이 이온 분리되어 낮은 농도의 지하수로 용출되는 일련의 과정을 말한다(Choi and Yang, 2011; Choi and Yang, 2013; Choi et al., 2014). 한편, 언급한 바와 같이 장기간의 보관과 안정성을 위해 대단면이 요구되므로 콘크리트 자체의 수화열 저감 및 내구성 증대를 위해 광물질 혼화재료의 사용 가능성을 검토할 필요가 있다(Hauyan et al., 2013; Yang et al., 2011; Bae and Pakr, 2010; Min, 2011).

광물질 혼화재료는 시멘트 대체 재료로 사용되므로 시멘트 수화반응을 저감하게 되지만, 결과적으로 시멘트 단위량을 감소시키므로 콘크리트 내부의 절대 칼슘 성분을 감소시키게 된다. 따라서 칼슘용출이 발생하기 전의 수화열 및 내구성 조건만을 고려하면 광물질 혼화재료의 사용이 매우 효과적으로 판단되지만, 칼슘용출 현상의 발생에 따른 혼화재 혼합 콘크리트의 물성 변화에 대하여는 많은 검토가 필요한 실정이다.

그러나 장기간의 검토가 필요한 칼슘용출에 대한 연구는

¹정회원, 강릉원주대학교 토목공학과 박사과정

²정회원, 한국건설생활환경시험연구원 선임연구원, 공학박사

³정회원, 강릉원주대학교 토목공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: eiyang@gwnu.ac.kr

Professor, Dept. of Civil Eng., Gangneung-Wonju National University

•본 논문에 대한 토의를 2016년 8월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

아직까지 많이 이루어지지 않은 상태이며, 특히 광물질 혼화제의 칼슘용출 저항특성에 대한 연구는 미진하다고 판단된다.

따라서 본 논문에서는 콘크리트 장기 내구성 향상 및 수화열 저감을 위해 사용되는 광물질 혼화재료가 콘크리트의 칼슘용출 저항특성에 미치는 영향을 검토하고자 하였으며, 이를 위해 광물질 혼화재 종류와 대체 비율 및 물-결합재비를 변수로 하여 칼슘용출에 따른 역학적 특성과 내구특성을 정량적으로 비교, 평가하고자 하였다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 사용재료 및 실험 변수

2.1.1 사용재료

시험체 제작에 사용된 시멘트는 KS L 5201에 규정된 1종 보통 포틀랜드 시멘트이며, 본 연구에서 사용된 플라이애쉬(이하, FA)와 고로슬래그 미분말(이하, BFS)의 물리적 조성 과 화학적 조성을 Table 1에 함께 나타내었다. 사용된 잔골재는 비중과 조립률이 각각 2.6, 2.79인 강모래이며, 굵은 골재는 최대치수가 25 mm인 쇄석으로 비중과 조립률은 각각 2.54, 6.83이다.

2.1.2 실험변수

본 연구에서는 실험변수로 물-결합재비(W/B)를 40%, 50%로, 광물질 혼화재료는 FA와 BFS를 선정하였다. 또한 FA 경우에는 대체비율을 시멘트중량의 10%, 20%로 하였으며, BFS 경우에는 시멘트 중량의 30%, 50%를 대체비율로 정하였다. 한편, 광물질 혼화재료는 포졸란 반응 또는 잠재 수경성에 의해 장기 성능이 개선되는 특성이 있으므로 이것을 고려하기

Table 1 Physical and chemical composition of binder

Properties	Material	OPC	FA	BFS
		Specific gravity	3.15	2.25
Physical	Blaine(cm ² /g)	3,200	3,400	4,300
	SiO ₂	21.36	49.89	33.54
Chemical (%)	Al ₂ O ₃	5.03	29.99	15.22
	Fe ₂ O ₃	3.31	7.42	0.51
	CaO	63.18	5.01	43.88
	MgO	2.89	0.98	2.62
	SO ₃	2.30	-	2.54
	LOI	1.40	4.31	0.01

위하여 용출에 노출되는 시기를 재령 28일과 재령 91일로 구분하였으며, 용출 기간은 용출 개시 시기로부터 6개월(180일)과 1년(365일)으로 고정하였다. 이러한 실험 변수를 정리하여 나타내면 Table 2와 같다.

2.2 시험체 제작 및 칼슘용출 방법

2.2.1 콘크리트 시험체 제작 방법

실험에 사용하기 위한 모든 콘크리트 시험체는 KS F 2405에 따라 제작하였다. 이때, 칼슘 용출에 따른 콘크리트의 역학적 특성은 압축강도 변화를 통해 평가하고자 하였으며, 이를 위해 Ø100×200 mm 원주형 공시체를 동일 조건에 대해 3개씩 제작하였다. 또한, 칼슘용출에 따른 콘크리트 내구 특성 변화를 검토하기 위하여 용출 재령에 따른 염화물 확산계수 및 미세공극구조를 비교, 평가하고자 하였다. 염화물 확산계수를 측정하고자 Ø100×50 mm 원주형 공시체를 각 조건별로 3

Table 2 Test variables

Item	Contents
W/B	40, 50(%)
Mineral additives	Fly Ash(FA)
	Blast Furnace Slag(BFS)
Substitution ratio	FA 10, 20(%)
	BFS 30, 50(%)
Leaching method	Immersion NH ₄ NO ₃ solution(6M)
Initial time of leaching	28, 91 days
Duration of leaching	180, 365 days
Phenolphthalein method	Degraded thickness
Mercury intrusion porosimetry	Micropore-size-distribution
Compression test	Sound con'c, Ca ²⁺ leached con'c

Table 3 Concrete mix proportions

Type	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m ³)					
			W	C	S	G	FA	BFS
40OPC	40	43	170	425	721	934	-	-
50OPC	50	45	173	345	782	933	-	-
40FA10	40	43	170	383	715	926	42	-
40FA20	40	43	170	340	709	918	85	-
50FA10	50	45	173	311	776	927	35	-
50FA20	50	45	173	276	771	921	69	-
40BFS30	40	43	170	298	717	929	-	127
40BFS50	40	43	170	213	714	925	-	212
50BFS30	50	45	173	242	778	929	-	104
50BFS50	50	45	173	173	776	926	-	173

개씩 제작하였으며, 미세공극구조 평가는 $\varnothing 100 \times 200$ mm 원주형 공시체를 제작하여 $\varnothing 100 \times 10$ mm 크기로 절단한 후 10 ± 2 g 무게의 시료를 채취하여 사용하였다. 한편, 시험체 제작을 위해 사용된 콘크리트 배합표는 Table 3에 나타내었다.

2.2.2 콘크리트의 칼슘 용출방법

일반적으로 콘크리트의 공극수에는 시멘트의 수화 반응에 의해 생성되는 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)과 C-S-H 등의 여러 수화물이 녹아 있으며 이러한 수화물들은 골재들을 묶어주는 바인더 역할과 장기적으로 콘크리트의 강도 발현에 기여한다. 그러나 이온교환이 가능한 순수(pure water)에 의해 공극수 간의 농도 평형 상태에 이탈이 생기고 결국 콘크리트의 강도가 점차적으로 저하되는 칼슘용출 현상이 발생한다(Choi and Yang, 2011).

한편, 장기간에 걸쳐 진행되는 칼슘용출 열화현상을 단기간으로 규명하기 위해 많은 연구가 진행되어 왔다. 그 결과, 이온교환수에 의한 화학적 방법 및 전극을 이용한 전기적 방법은 질산암모늄($\text{NH}_4(\text{NO}_3)$) 침지에 의한 급속 화학적 방법과 칼슘이 용출되는 속도의 차이는 있으나 공극률이 증가하거나, 강도 감소에는 큰 영향을 나타내지 않는 것으로 밝혀졌다(Carde et al., 1997; Haga et al., 2005; Saito and Deguchi, 2000; Skoczylas et al., 2007; Torrenti et al., 2007). 따라서 본 연구에서는 콘크리트의 칼슘용출을 촉진 발생시키기 위하여 Carde에 의해 제안된 질산암모늄수용액(6M)을 이용한 화학적 방법을 사용하였으며, 칼슘용출 후에는 페놀프탈레인법을 사용하여 손상된 깊이를 측정하였다. 또한, 일정 수준 이상의 칼슘 용출이 진행된 후, 2차 농도평형에 의한 농도 수렴 조건이 형성됨에 따라, 칼슘 용출 현상이 저하할 것을 고려하여 반복적으로 질산암모늄 수용액을 교환하여 농도 평형에 의한 칼슘 용출의 수렴 현상을 방지하고자 하였다.

2.3 실험 방법

시험체의 열화 두께를 측정하기 위해 칼슘이 용출된 콘크리트 내부의 변화된 pH를 고려하여 페놀프탈레인 지시약을

분무한 후, 변색이 발생하지 않은 부분을 칼슘이 용출된 두께(mm)로 하여 측정하였다. 또한, 압축강도 측정은 KS F 2405에 따라 측정하였으며, 강도발현 특성을 검토하기 위해 28, 91, 180, 365일 재령까지 고려하였다.

칼슘용출에 따른 특성 변화를 검토하기 위하여 용출 개시 후 180, 365일 재령의 압축강도를 측정하였다. 한편, 칼슘용출에 따른 내구성 평가를 위해 실시하는 염화물 확산계수 측정은 Tang&Nilsson이 제안한 전기적 촉진 시험방법(RCPT)을 참조하여 0.3M의 NaOH 수용액을 양극으로, 3% NaCl 수용액을 음극으로 하여 30V의 전압을 8시간동안 가하여 실험하였다. 또한, 내부 미세공극분포(Micropore size distribution) 특성을 분석하기 위하여 5 nm~10 μm 의 모세관공극을 ASTM D 4284에 의거하여 수은압입법(Mercury Intrusion Porosimetry)으로 분석하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 칼슘용출에 따른 콘크리트의 열화두께

Table 4에는 2.3절에서 언급한 바와 같이 칼슘 용출에 따른 콘크리트의 열화두께를 나타내었다. 이를 살펴보면, 용출 개시시기 및 물-결합재비, 광물질 혼화재 혼입률 등의 모든 변수에 상관없이 칼슘 용출 시간이 증가함에 따라 칼슘이 용출된 두께가 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 용출 개시시기가 느린 경우(재령 91일), 물-결합재비가 낮은 경우와 광물질 혼화재 혼입률이 증가한 경우에는 열화두께가 감소하는 것으로 나타났으나, 광물질 혼화재의 혼입률 증감에 따른 비례적인 경향은 나타나지 않았다. 또한, 모든 변수에 관계없이 용출 재령 180일에 비해 용출 재령 365일에는 열화두께 증가량이 감소하는 것으로 나타나, 일정 수준의 용출이 진행되면, 용출 두께의 증가속도는 둔화하는 것으로 판단된다. 따라서 콘크리트에 존재하는 칼슘 용출 현상은 일정량의 용출이 진행된 이후에는 느린 속도로 진행되는 것으로 사료된다.

Table 4 Degraded thickness due to calcium leaching

Exposure	Ages	40OPC	50OPC	40FA10	40FA20	50FA10	50FA20	40BFS30	40BFS50	50BFS30	50BFS50
28 days	28+180	11.3	19.3	14.3	13.3	23.3	21.3	12.3	10.5	24.3	25.3
	28+365	18.3	26.3	19.3	18	31.3	29.3	18.3	16.3	32.3	30.3
91 days	91+180	10.5	16.3	14.3	12.5	24.5	20.3	11.3	9.3	22.3	24.3
	91+365	16.5	24.5	18.4	16.3	29.3	25.3	19	15.3	28.3	30.3

3.2 칼슘용출에 따른 압축강도 특성

칼슘용출이 압축강도에 미치는 영향을 검토하기 전에, 기준이 되는 수중양생 콘크리트의 압축강도 특성을 파악하기 위하여 각 배합에 대하여 수중양생 상태에서의 재령별 강도 발현을 비교하고자 하였다. 이를 위해 각 배합에 대한 강도발현을 정리하여 Table 5에 나타내었다. Table 5에 나타난 값들은 각 경우의 압축강도 결과(MPa)를 나타내며 함께 나타낸 괄호 속의 값은 각 경우의 재령 28일을 기준으로 하는 압축강도 비율(%)을 나타내고 있다.

Table 5의 결과를 살펴보면, 모든 배합에서 재령의 경과에 따라 압축강도가 상승하였으며, 보통시멘트만을 사용한 OPC 경우에 비하여 FA를 혼합한 경우에는 재령 28일의 초기 강도 발현은 혼합비율이 증가할수록 낮으나, 장기강도 발현비율은 혼합비율이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 또한 BFS를 혼합한 경우에는 재령 28일의 초기 강도발현이 상대적으로 우수하게 나타났으며, 장기강도 발현 비율은 FA 경우보다는 적지만 OPC 경우에 비해서는 장기강도 발현이 우수한 것으로 나타났다. 이러한 결과를 종합하여 평가하면, 광물질 혼화제를 혼합하면 장기강도 발현이 개선되며 혼합비율이 증가

할수록 개선비율도 증가하였다. 그러나 FA의 경우에는 재령 28일의 초기강도가 OPC에 비해 저하하므로 이에 대하여 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

광물질 혼화제가 혼합된 콘크리트의 칼슘용출 저항성을 비교 평가하기 위하여 Table 3에 언급된 배합의 콘크리트에 대하여 칼슘용출을 시행하였으며, 이때 광물질 혼화제의 압축강도 발현특성을 고려하여 칼슘용출에 노출되는 시기를 재령 28일과 재령 91일로 구별하였고, 언급한 바와 같이 칼슘용출 기간은 각 경우에 대하여 180일, 365일간 실시하였다. 그 결과를 정리하여 나타내면 Fig. 1~Fig. 3 및 Table 6과 같다. 또한, 표에 나타난 결과들은 비교가 용이하도록 용출 개시 재령의 강도를 기준으로 강도저하 상태를 함께 표시하였다.

Fig. 1~Fig. 3 및 Table 6의 결과를 비교하면, OPC의 경우 용출 노출시기의 영향은 크지 않았으나, 물-결합재비에 따른 차이가 크게 발생하였다. 즉, 40OPC의 경우에는 용출 365일 이후의 잔류강도가 70% 이상을 나타내었으나, 50OPC의 경우에는 잔류강도가 50% 이하로 현저히 저하하는 것으로 나타났다. 이에 비해, FA를 사용한 경우를 살펴보면, 노출 시기 및 물-결합재비의 영향을 모두 크게 받는 것으로 나타났다. 즉, 용출

Table 5 Results of compressive strength during water curing

Ages	40OPC	50OPC	40FA10	40FA20	50FA10	50FA20	40BFS30	40BFS50	50BFS30	50BFS50
28 days	38.5 (100)	29.6 (100)	35.9 (100)	32.5 (100)	24.3 (100)	23.0 (100)	41.3 (100)	37.0 (100)	31.7 (100)	30.7 (100)
91 days	48.3 (125.4)	35.7 (120.5)	52.1 (145.0)	49.8 (153.1)	36.3 (149.3)	35.1 (152.4)	51.3 (124.2)	47.1 (127.3)	38.5 (121.4)	41.4 (134.9)
180 days	50.7 (131.6)	38.1 (128.6)	54.1 (150.5)	52.1 (159.9)	37.1 (152.9)	36.7 (159.2)	52.4 (126.8)	50.1 (135.4)	41.8 (131.9)	45.3 (147.6)
365 days	52.1 (135.2)	40.1 (135.5)	55.9 (155.5)	54.2 (166.4)	40.1 (164.9)	39.6 (171.8)	56.1 (135.8)	54.1 (146.2)	46.1 (145.4)	46.7 (152.1)

Table 6 Reduction of compressive strength due to calcium leaching

Exposure	Ages	40OPC	50OPC	40FA10	40FA20	50FA10	50FA20	40BFS30	40BFS50	50BFS30	50BFS50
28 days	28	38.5 (100)	29.6 (100)	35.9 (100)	32.5 (100)	24.3 (100)	23.0 (100)	41.3 (100)	37.0 (100)	31.7 (100)	30.7 (100)
	28+180	34.3 (88.9)	18.7 (63.2)	18.7 (521)	25.3 (77.9)	14.3 (58.8)	16.2 (70.2)	30.2 (73.2)	28.7 (77.6)	20.1 (63.4)	16.3 (53.0)
	28+365	30.7 (79.8)	13.1 (44.3)	13.1 (36.5)	14.7 (45.3)	10.2 (41.9)	8.4 (36.4)	27.3 (66.0)	24.7 (66.7)	13.1 (41.3)	10.7 (34.8)
91 days	91	48.3 (100)	35.7 (100)	52.1 (100)	49.8 (100)	36.3 (100)	35.1 (100)	51.3 (100)	47.1 (100)	38.5 (100)	41.4 (100)
	91+180	38.3 (79.3)	20.1 (56.4)	33.7 (66.5)	31.8 (63.9)	18.6 (51.2)	16.1 (45.7)	31.2 (60.8)	30.3 (64.4)	26.4 (68.5)	24.8 (59.9)
	91+365	33.7 (69.8)	16.4 (46.1)	28.3 (54.3)	26.1 (52.3)	14.1 (38.8)	11.9 (33.8)	30.7 (59.9)	27.1 (57.8)	20.4 (52.9)	18.4 (44.4)

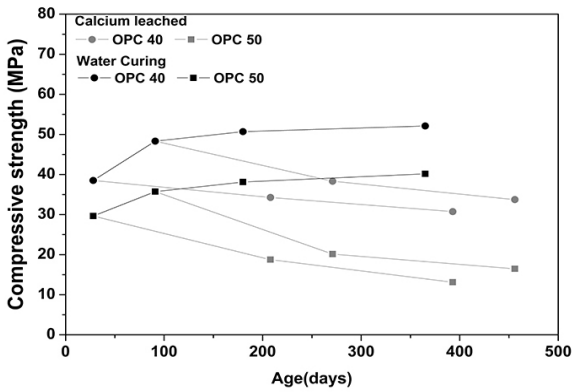


Fig. 1 Results of compressive strength(OPC cases)

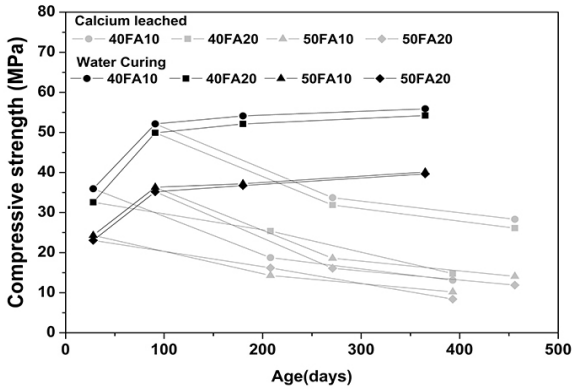


Fig. 2 Results of compressive strength(FA cases)

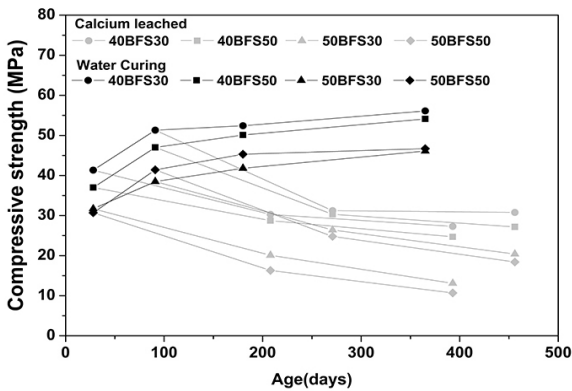


Fig. 3 Results of compressive strength(BFS cases)

개시 365일 이후의 잔류강도가 50%를 상회하기 위해서는 W/B 40%, 노출 시기가 재령 91일인 조건에서 만족하였으며, 노출 시기가 빠르거나 물-결합재비가 높은 경우에는 잔류강도가 35~45% 범위로 나타났다. 한편, BFS를 사용한 경우에는, FA 경우와는 달리 용출 개시시기의 영향은 적었으나 물-결합재비의 영향은 OPC경우와 마찬가지로 크게 나타났다. 즉, BFS의 경우에는 물-결합재비가 낮으면 용출 개시시기에 관계없이 1년 후의 잔류강도가 60%를 상회할 수 있을 것으로 판단되므로 FA 보다는 칼슘용출저항 특성이 우수한 것으로 판단된다.

이러한 결과들을 종합하여 판단하면, 칼슘 용출 저항성은 초기 콘크리트에 포함되어 있는 칼슘량에 의해 크게 영향 받으며, 용출에 노출되기 전에 콘크리트의 양생을 충분히 실시할 필요가 있는 것으로 판단된다. 또한 장기재령에 유리한 광물질 혼화재를 혼합할 경우에는 포졸란 반응 또는 잠재수 경성 반응이 충분히 발생한 이후에 용출에 노출시켜야 하고, 물-결합재비를 저감시킬 필요가 있으며, FA 보다는 BFS를 사용하는 것이 유리한 것으로 판단된다.

3.3 칼슘용출에 따른 염화물 확산계수 특성

콘크리트를 구성하는 칼슘이 용출되면 콘크리트 내부에는 공극이 발생하게 되고 이로 인해 콘크리트의 내구성은 치명적으로 저하할 것으로 예상된다. 이러한 내구성 저하를 평가하기 위한 방법으로 칼슘용출에 따른 염화물 확산계수를 비교 평가하고자 하였다. 이를 위해 각 배합에 대한 기준으로써 수중 양생한 시험체의 염화물 확산계수를 평가하였다(Table 7). 이때, 재령 28일에 대한 상대비율을 함께 나타내었다. Table 7의 결과를 살펴보면, 재령 경과에 따라 염화물 확산계수는 저하하였으나, 비례적으로 감소하지는 않았다. 한편, 물-결합재비가 낮을수록 그리고 광물질 혼화재를 다량 사용 할수록 염화물 확산계수가 크게 감소하였으며, 특히 BFS를 사용한 경우에 염화물 확산계수가 효과적으로 개선되는 특징을 보였다. 한편, 칼슘이 용출됨에 따른 염화물 확산계수의 변화를 검토하였으며, 그 결과를 Table 8 및 Fig. 4, 5, 6에 각각 나타내었

Table 7 Chloride Diffusion Coefficient during Water Curing

Ages	40OPC	50OPC	40FA10	40FA20	50FA10	50FA20	40BFS30	40BFS50	50BFS30	50BFS50
28 days	12.6	17.9	9.4	8.3	19.1	16.7	3.4	1.0	19.1	8.1
91 days	5.8	15.0	6.8	4.5	10.1	8.1	3.2	0.9	10.1	4.2
180 days	5.0	13.7	4.9	4.0	9.1	7.5	3.0	0.8	9.1	2.1
365 days	4.8	12.6	4.0	3.9	6.1	5.1	2.9	0.7	6.1	1.6

Table 8 Change of Chloride Diffusion Coefficient due to Leaching

Exposure	Ages	40OPC	50OPC	40FA10	40FA20	50FA10	50FA20	40BFS30	40BFS50	50BFS30	50BFS50
28 days	28	12.6	17.9	9.4	8.3	19.1	16.7	3.4	1.0	19.1	8.1
	28+180	14.4	20.8	18.8	17.8	26.1	25.3	15.1	14.8	26.7	24.4
	28+365	16.8	24.3	19.5	19.8	28.3	27.1	17.4	16.2	28.4	27.3
91 days	91	5.8	15.0	6.8	4.5	10.1	8.1	3.2	0.9	10.1	4.2
	91+180	13.1	20.7	17.1	16.8	22.7	21.8	14.1	13.2	19.4	20.1
	91+365	15.2	23.0	19.1	18.7	24.8	23.9	17	16	22.1	23.4

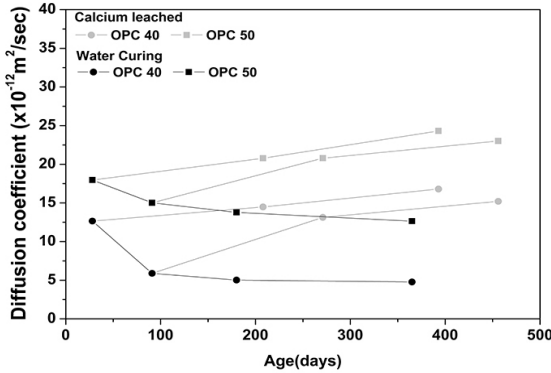


Fig. 4 Diffusion coefficient change(OPC cases)

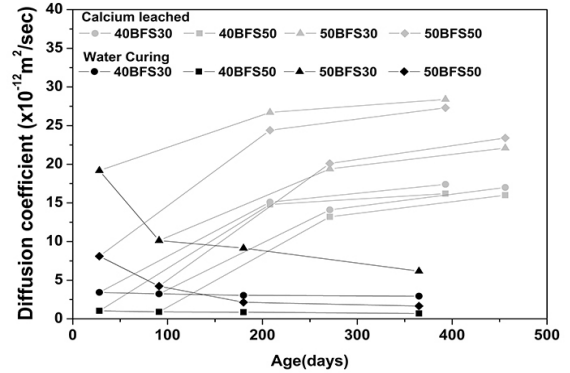


Fig. 6 Diffusion coefficient change(BFS cases)

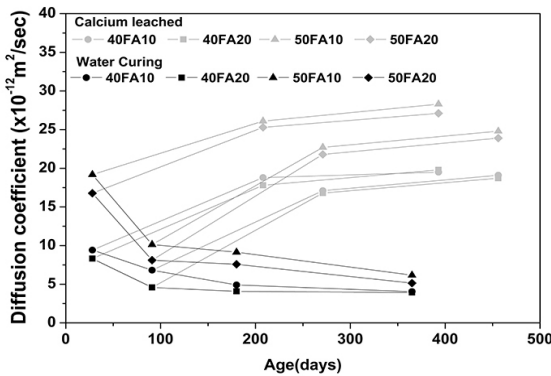


Fig. 5 Diffusion coefficient change(FA cases)

다. 나타난 결과를 비교하여 보면, 물-결합재비가 낮을수록 칼슘용출에 따른 염화물 확산계수의 변화가 작은 것을 알 수 있다. 즉, 물-결합재비가 낮을수록 단위시멘트량이 증가하므로 칼슘 용출 저항성이 증가한 것으로 판단된다. 그러나 FA의 경우를 살펴보면 칼슘용출이 발생하기 전에는 일반 OPC에 비해 매우 우수한 염화물 확산계수를 보였으나, 칼슘 용출 후에는 용출에 대한 노출재령에 관계없이 급격히 확산계수가 증가하였으며 오히려 OPC보다 열화 하는 것으로 나타났다. 한편, BFS의 경우에는 FA의 경우와 마찬가지로 칼슘용출 전에는 매우 우수한 염화물 저항성을 나타내지만 칼슘용출 개시

에 따라서 염화물 확산계수가 커지는 것으로 나타났다. 그러나 FA의 경우와는 달리 물-결합재비를 낮추거나 노출재령 시기를 충분히 확보하면 OPC 정도의 저항성은 유지하는 것으로 판단된다. 특히 칼슘용출 개시 후에는 BFS 대체율에 의한 영향이 크지 않은 것으로 나타났다.

3.4 칼슘용출에 따른 미세공극구조 특성

콘크리트 수화물을 구성하는 성분 중에서 칼슘이 용출하게 되면 내부의 공극분포가 변화하게 된다. 이러한 공극분포의 변화를 평가하기 위하여 5 nm~10 μm 범위의 미세공극을 비교, 평가하였다. 그 결과 중에서 Fig. 7에는 수중 양생한 시험체의 결과를 나타내었으며, Fig. 8에는 칼슘 용출개시시기를 각각 재령 28일과 91일로 변화시켜 칼슘 용출시킨 결과를 나타내었다. Fig. 7의 결과를 살펴보면, 예상되는 것처럼 양생재령이 경과함에 따라 큰 공극이 수화물로 채워져서 공극크기가 작아져 미세공극이 개선되는 것을 보이고 있다. 특히 광물질 혼화재를 사용하는 경우에는 공극개선이 특히 효과적인 것을 나타내었다. 이때, FA를 사용하는 경우에는 재령 365일 이후에 확연한 개선효과를 나타낸 반면, BFS를 사용한 경우에는 초기재령에서부터 공극분포 개선이 이루어지는 것으로 판단된다. 한편, Fig. 8의 결과를 비교하여 보면, OPC의 경우

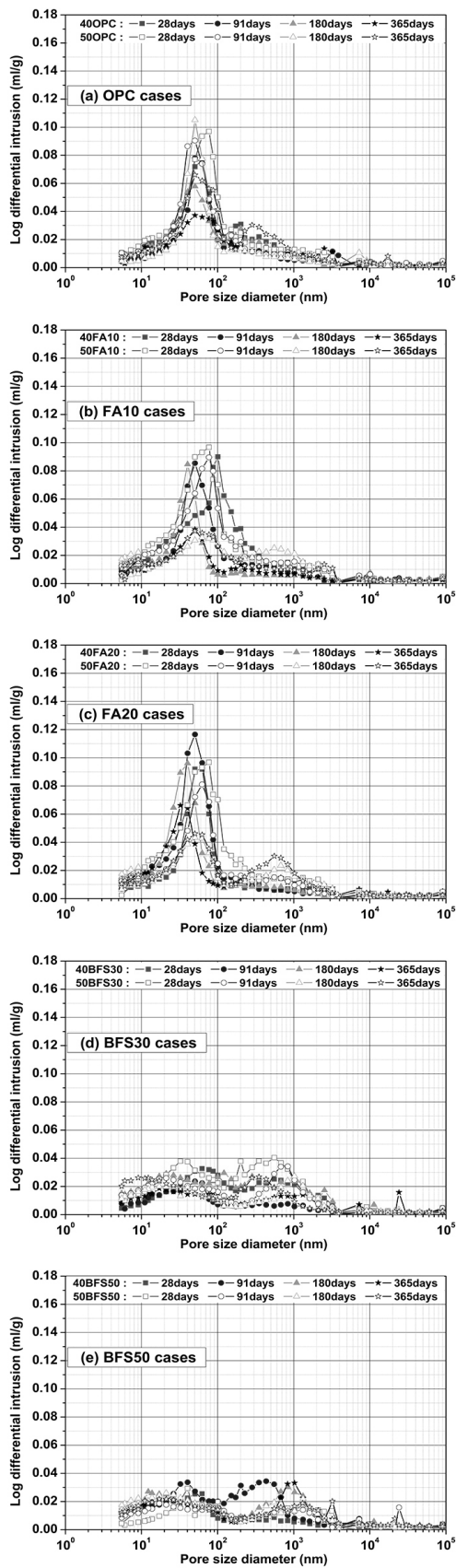


Fig. 7 Results of mercury intrusion porosimetry change (Water curing)

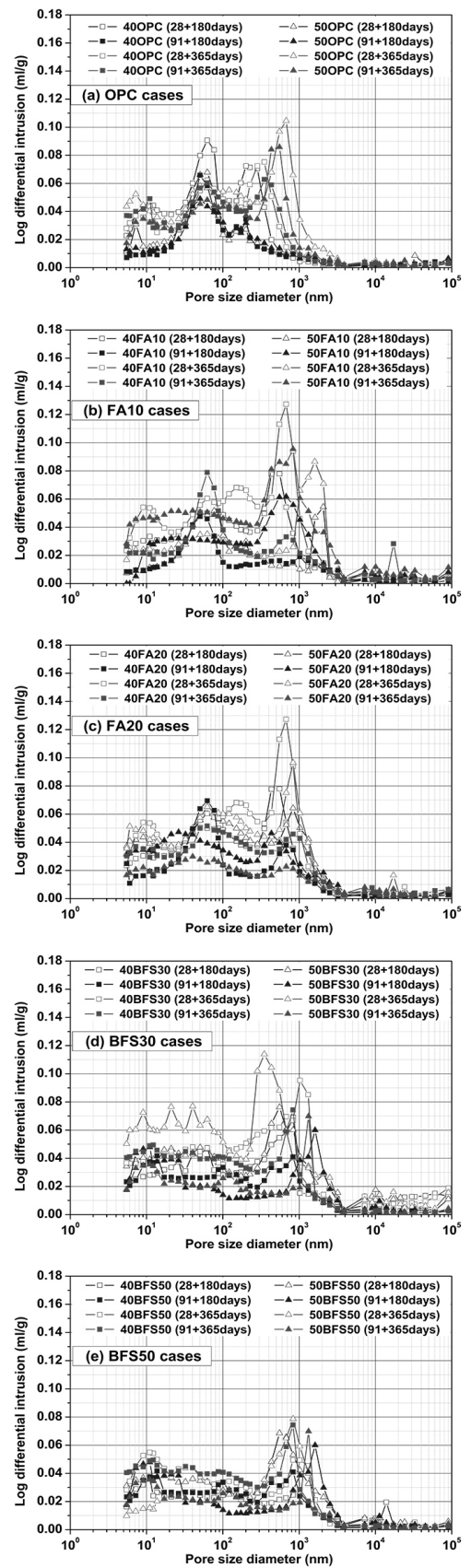


Fig. 8 Results of mercury intrusion porosimetry change (Calcium leaching)

용출기간이 증가함에 따라 5 nm~30 nm, 100 nm~10 μm 영역의 공극이 크게 증가하였으며 압축강도 저하 및 염화물 확산 계수 증가의 원인이 되는 것으로 판단된다. 또한 물-결합재비가 높을수록 공극이 크게 증가하지만, 노출 시기는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 이에 비해, FA의 경우에는 5 nm~30 nm 영역은 물론 10 μm 이상의 공극도 크게 증가하여 내구성이 크게 감소할 것으로 예상된다. 특히 용출 개시시기가 빠르고 물-결합재비가 높은 경우에는 공극이 더욱 크게 발달하는 것으로 판단된다. 한편, 공극분포형태가 다르게 나타나는 BFS의 경우에도 용출재령 증가에 따라 공극이 커지고 있지만 FA에 비하여 공극의 증가가 심하지 않으며 물-결합재비가 낮고 용출 노출시기가 늦은 경우에는 상대적으로 공극의 증가가 지연되는 것으로 판단된다.

따라서 지금까지의 결과를 종합적으로 판단할 때, 칼슘용출이 예상되는 콘크리트 부재에 광물질 혼화재를 사용할 경우, 칼슘용출 전의 공극분포는 매우 우수하게 개선되지만, 칼슘용출이 시작되면 OPC 경우에 비해 공극이 빠르게 증가하고 물-결합재비의 영향을 크게 받는 것으로 나타났으며, 포졸란 반응 또는 잠재수경성 반응을 위한 충분한 재령을 확보해야 하고 OPC 배합과 동등 수준을 확보하기 위해서는 FA 보다는 BFS를 사용하는 것이 효과적인 것으로 판단된다. 또한 혼화재료는 본 실험 범위의 대체비율에서는 칼슘용출 저항 특성에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 나타났다.

4. 결 론

광물질 혼화재료가 칼슘용출 저항성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 실시한 연구로부터 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 광물질 혼화재를 혼합한 콘크리트의 압축강도는 장기강도 발현이 우수하지만, 칼슘용출이 진행함에 따라 압축강도는 저하한다. 특히, 압축강도 저하는 용출 전 콘크리트의 수화생성물에 포함되어 있는 칼슘성분에 의해 크게 영향 받는 것으로 판단된다.
- 2) 광물질 혼화재를 혼합한 콘크리트는 매우 우수한 염화물 확산 저항성을 나타내지만 칼슘용출이 발생함에 따라 염화물 확산계수가 급격하게 증가하여 염화물 확산 저항성이 크게 감소하는 것으로 나타났으나, BFS의 경우에는 물-결합재비가 낮고 충분한 재령(91일 이상)을 확보하면

OPC 배합과 유사한 성능을 확보하는 것으로 나타났다.

- 3) 광물질 혼화재를 사용할 경우, 칼슘용출 전의 공극분포는 매우 우수하게 개선되지만, 칼슘용출이 시작되면 OPC 경우에 비해 공극이 빠르게 증가하고 물-결합재비의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.
- 4) 결론적으로, 장기재령에 유리한 광물질 혼화재를 혼합할 경우에는 칼슘용출에 의한 피해가 OPC에 비해 증가하므로, 물-결합재비를 저감시킬 필요가 있으며, 충분한 포졸란 반응 또는 잠재수경성 반응 이후에 용출에 노출시켜야 하고, FA보다는 BFS를 사용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이다(No. 2015R1D1A1A09057625).

References

ASTM D 4284 (2007), Standard Test Method for Determining Pore Volume Distribution of Catalysts by Mercury Intrusion Porosimetry, 2007.

Bae, J. S., and Park, G. J. (2010), The Diffusion Property of Chloride Ion into Concrete by Electrically Accelerated Method, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 14(3), 138-143(in Korean).

Carde, C., Escadeillas, G., and Francois, R. (1997), Use of Ammonium Nitrate Solution to Simulate and Accelerate the Leaching of Cement Pastes due to Deionized Water, *Magazine of Concrete Research*, 49(181), 295-301.

Chio, Y. S., Jang, Y. H., Choi, S. Y., Kim, I. S., and Yang, E. I. (2014), Analytical Study on Structural Behavior of Surface Damaged Concrete Member by Calcium Leaching Degradation *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 18(4), 22-32 (in Korean).

Choi, Y. S., and Yang, E. I. (2013), Effect of Calcium Leaching on the Pore Structure, Strength, and Chloride Penetration Resistance in Concrete Specimens, *Nuclear Engineering and Design*, 237, 126-136.

Haga, K., Sutou, S., and Hironaga, M. (2005), Effect of Porosity on Leaching of Ca from Hardened Ordinary Portland Cement Paste, *Cement and Concrete Research*, 35(9), 1764-1775.

Hauyan, M., Hongfa, Y., and Wei, S. (2013), Freezing-thawing Durability and its Improvement of High Strength Shrinkage Compensation Concrete with High Volume Mineral Admixtures, *Construction and Building Materials*, 39, 124-128.

- Kari, O. P., and Puttonen J. (2014), Simulation of Concrete Deterioration in Finnish Rock Cavern Conditions for Final Disposal of Nuclear Waste, *Annals of Nuclear Energy*, 72, 20-30.
- Kim, J. Y., Kim, J. Y., Jung, H. R., and Kim, E. H. (2013), Gas Threshold Pressure and Gas Permeability of Silo Concrete Specimens for a low- and Intermediate-Level Waste Disposal Facility in Korea, *Annals of Nuclear Energy*, 55, 1-8.
- Kim, Y. K., Lee, B. S., and Lee, Y. H. (2005), A Study on the Methodology to Ensure Long-Term Durability of Low and Intermediate Level Radwaste Disposal Concrete Structure, *Proceedings of the Korean Radioactive Waste Society Conference The Korean Radioactive Waste Society*, 212-220(in Korean).
- Min, J. W. (2011), The Statistical Hypothesis Verification to Influence of Addition of Metakaolin and Silica Fume on Compressive Strength and Chloride Ion Penetration of High Strength Concrete, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 15(1), 215-225(in Korean).
- Saito, H., and Deguchi, A. (2000), Leaching Tests on Different Mortars Using Accelerated Electrochemical Method, *Cement and Concrete Research*, 30(11), 1815-1825.
- Sheen, J. J. (2002), A Study on the Radiation Shielding Analysis for LILW Vitrification Facility, Department of Nuclear Engineering, 1-3(in Korean).
- Skoczylas, F., Agostini, F., and Lafhaj, Z. (2007), Experimental Study of Accelerated Leaching on Hollow Cylinders of Mortar, *Cement and Concrete Research*, 37(1), 71-78.
- Tang, L., and Nilsson, L. O. (1992), Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field, *ACI Material Journal*, 89(1), 49-53.
- Torrenti, J. M., Nguyen, V. H. and Colina, H. (2007), Chemo-Mechanical Coupling Behaviour of Leached Concrete PartI: Experimental Results, *Nuclear Engineering and Design*, 237, 2083-2089.
- Turick, C. E., and Berry, C. J. (2016), Review of Concrete Biodeterioration in Relation to Nuclear Waste, *Journal of Environmental Radioactivity*, 151, 12-21.
- Yang, E. I., Jin, S. H., Kim, M. Y., and Choi, Y. S. (2011), Effect of Initial Flexural Crack on Resistance to Chloride Penetration into Reinforced Concrete Members, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 15(2), 79-87(in Korean).
- Yang, E. I., and Choi, Y. S. (2011), Characteristics of Pore Structures and Compressive Strength in Calcium Leached Concrete Specimens, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 23(5), 647-656(in Korean).

Received : 02/26/2016

Revised : 04/01/2016

Accepted : 04/04/2016

요 지 : 콘크리트는 유해물질을 봉합처리하기 위한 매우 유용한 건설재료이다. 일반적으로 이러한 시설물에는 매스콘크리트가 적용되며, 장기간 성능이 요구되므로 광물질 혼화제를 사용하는 것이 바람직하다. 지하구조물에서는 순수와의 접촉으로 칼슘용출이 발생할 수 있으므로 광물질 혼화제를 포함하고 있는 콘크리트의 칼슘용출 저항성을 평가할 필요가 있다. 실험결과에 따르면, 광물질 혼화제는 콘크리트 부재의 장기압축강도 및 염화물 확산계수 개선에 효과적이지만, 칼슘용출이 발생하면 압축강도 및 염화물 확산 저항성 저하가 OPC에 비해 심하고, 미세공극분포도 영향을 받는다. 따라서 칼슘용출환경에 노출되는 지하구조물에 광물질 혼화제가 적용될 경우에는, 물-결합재비를 저감시키며, 충분한 포졸란 반응 이후에 노출해야 하고, FA 보다는 BFS를 사용하는 것이 바람직하다.

핵심용어 : 칼슘용출 저항성, 광물질 혼화제, 압축강도, 염화물 확산계수, 미세공극구조
