

플라이애시를 혼입한 콘크리트의 전위차 적정법과 XRF를 이용한 염화물 침투 분석

서은아¹, 김지현², 이호재^{3*}

Chloride Penetration Analysis of Fly Ash Concrete using Potentiometric Titration and XRF

Eun-A Seo¹, Ji-Hyun Kim², Ho-Jae Lee^{3*}

Abstract: In this study, a salt water immersion test was performed on concrete specimens simulating the concrete mix design of the nuclear power plant, and the correlation between the amount of chloride and the XRF component according to the depth of the concrete was analyzed. The amount of chloride on the surface of the nuclear power plant concrete increased slightly with increasing immersion time in salt water, but the amount of chloride in the depth of 5.5 mm or more showed a clear tendency to increase with increasing immersion time in salt water. As a result of analyzing the correlation between the amount of chloride in concrete and the XRF component, the concrete with 20% FA substitution compared with the OPC concrete showed a very high correlation between the composition ratio of Cl ions and the evaluation result of salt damage resistance by XRF component analysis. Accordingly, it was confirmed that chlorine ion analysis and salt damage resistance performance evaluation by XRF component analysis were possible through repeated data accumulation in the nuclear power plant concrete mix with 20% fly ash replacement.

Keywords: Nuclear power plant, Concrete, Durability, Chloride amount, XRF

1. 서 론

해안가에 위치한 콘크리트 구조물은 해수내에 포함되어 있는 염화물의 침투로 인한 철근부식의 위험성에 노출되어 있다. 해수 중 또는 공기 중의 염화물은 흡수, 대류, 증발, 확산 등 다양한 원인과 방식으로 콘크리트 중의 공극을 통해 침투한다. 콘크리트 내부로 침투한 염화물이 철근 부위에 도달하게 되고 일정농도 이상의 염화물이 철근 주변에 누적되면 철근부식을 야기한다(Choinska et al., 2007; Shakouri et al., 2017; Wang et al., 2016). 염화물은 콘크리트 구조물의 내구성에 영향을 주는 주요인자로 시설물의 정밀안전점검 과 정밀안전진단의 재료 시험의 과업으로 지정되어 있으며 특히 정밀안전진단 시에는 기본과업으로 지정되어 있을 정도로 높은 중요도를 갖는다(MOLIT, 2021).

원자력 발전소는 원자로의 냉각수로 해수를 사용하기 위하여 해안가에 건설됨에 따라 염해에 가장 큰 영향을 받는 대표적인 콘크리트 구조물이다. 국내 원전은 원전단지 내에 다수의 원전이 인접해 있어 원전 밀집도가 전세계에서 가장 높으

며, 국토면적 대비 원전 수가 일본의 2배, 미국의 25배 이상의 원전이 분포되어있는 특징이 있다. 이에 원전 콘크리트 구조물의 안전을 위해 내구성능 분석 및 성능향상에 대한 연구가 1990년대부터 지속적으로 수행되어 현재까지도 활발하게 이루어지고 있다. 또한 고리 1호기를 비롯한 국내 원전은 40년 이상 가동되고 있어 구조물의 장기 내구성 확보를 위하여 시공 시에는 콘크리트 배합설계의 개선이 이루어지고 있으며, 가동 중 원전은 규정된 열화관리 절차에 따라 관리하여 내구수명 향상을 위한 노력을 하고 있다(Moon et al., 2010).

콘크리트 내구성평가를 위해서 시설물의 안전진단, 원전 콘크리트 구조물의 염화물량은 전위차 적정법을 기반으로 한 염화물 함유량 시험방법을 통해 분석하고 있다(KS F 2713, 2022; KS F 2714, 2022; KS F 2715, 2022). 현재 제시되고 있는 시험방법은 염화물 적정 시약을 사용해 시료로부터 염화물을 용해시켜 추출하는 방식을 이용하여 정확한 염화물량을 측정할 수 있지만 분석을 위해서는 분석자의 안전을 위한 특수한 실험시설이 필요하다는 단점이 있다. 이에 Table 1과 같이 염소이온을 분석하기 위해 다양한 분석기법들이 검토되고 있는데 대부분의 경우 전문적인 기술이 필요한데 반해 콘크리트의 X-선 형광 분석(X-Ray Fluorescence Spectrometer, XRF) 방법은 간단하면서도 분석이 편리한 장점이 있다(Jeong et al., 2013; Kang et al., 2020). 따라서 이 연구에서는 현재 원전 콘크리트 구조물에 사용된 콘크리트 배합설계를 이용하여 원전 콘크리트의 염해

¹정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 전임연구원

²정회원, 부경대학교 공학연구원 융복합인프라기술연구소 전임연구교수

³정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원, 교신저자

*Corresponding author: h.lee@kict.re.kr

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Daehwa-Dong, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 10223, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2023년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Table 1 Analytical methods comparison (Park, 2021)

Classification	XRF	SEM-EDS	EPMA	ICP-MS
Sensitivity	100 ppm	1000 ppm	100 ppm	< 1 ppm
Precision	good	low	normal	excellent
Accuracy*	QL, QQT	QL	QQT	QT
Specimen shape	Solid	Solid	Solid	Liquid
Depth	~100 μm	~5 μm	< 1 μm	~80 μm
Measured velocity	fast	slow	slow	slow
Convenience	simple	-	technician	-
Discrimination	good	low	normal	excellent

*QQT: Quasi-quantitative analysis, QL: Qualitative analysis, QT: Quantitative analysis

저항성능을 평가하였으며, XRF 성분분석법을 간편하게 활용하기 위해 염화물 적정 성능의 상관관계를 분석하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 사용재료 및 적용배합

이 연구에서는 원전 구조물을 대상으로 염화물량 측정 시 XRF를 적용성을 검토하고자 기존연구에서 사용한 원전 콘크리트 배합을 참고하여 플라이애시(FLY Ash, FA)혼합 사용한 3개 배합을 선정하였다(Yoon and Kwon, 2019; Lee and Seo, 2022; Ukpatha et al, 2022). 동일 체적비를 갖는 1종 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement, OPC)를 결합재로 사용한 콘크리트 배합을 비교군으로 선정하여 결과를 상호 비교하였다(Shin et al., 2011; Lee, 2019; Kim and Shin, 2021). 원전 콘크리트를 모사하기 위해 결합재는 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 2종 플라이애시를 사용하였으며, 본 연구에서 사용한 결합재의 물리화학적 특성은 Table 2와 같이 분석됐다. 굵은골재는 골재 최대치수 20, 25 mm 쇄석을 사용하였으며 잔골재는 국내산 중사를 사용하였다.

2.2 페이스트 시험체 활용 XRF 성분 분석

OPC와 FA를 혼입한 콘크리트의 재령에 따른 성분변화를 분석하기 위해 페이스트 시험체를 제작하였다. 콘크리트를 이용한 염화물 침투실험은 시험체를 염수에 장기간 침지해야 하는데 염수 침지 시점인 재령 28일 이후에도 콘크리트는 지속적으로 수화반응을 일으킨다. 이 연구의 목적 중 하나는 XRF를 이용한 콘크리트의 염화물량 분석이므로 결합재의 재령에 따른 수화도 변화가 XRF 분석 결과에 미치는 영향 검토가 필요하다. 따라서 이 연구에서는 결합재와 배합수만을 이용한 페이스트를 제작하여 배합 직후부터 1, 7, 28, 56, 91일 수중양생 후 XRF를 이용하여 성분분석을 수행했다. 사용재료

Table 2 Properties of binder

Binder	Density (g/m ³)	Blaine (cm ² /g)	Chemical composition						
			CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Ig.loss
OPC	3.13	3,542	62.4	21.5	5.2	3.2	2.7	3.0	0.79
FA	2.25	3,232	2.7	60.0	25.76	5.0	1.4	0.5	3.0

로 결합재와 배합비는 콘크리트와 동일하게 OPC 100%를 사용한 배합과 OPC 80% 와 FA 20% 혼입하여 사용했으며, 물-결합재비는 콘크리트와 동일하게 0.4를 사용하였다.

2.3 염소이온 침투 평가용 콘크리트 시험체 제작

FA를 혼입한 콘크리트의 염화물 침투특성 분석을 위해 콘크리트 시험체 4종을 제작하였다. 콘크리트 시험체는 OPC를 100% 사용한 콘크리트 1종과 FA를 20% 치환하여 사용한 콘크리트 3종을 제작하였다. 염소이온의 침투특성을 분석하기 위해서 FA를 치환한 콘크리트 배합의 실험변수로 굵은골재 크기, 단위결합재량, 잔골재율로 설정하였다(Table 3). 배합명은 결합재로 OPC를 100% 사용한 배합은 Control, 동일 배합비에 결합재만을 조정하여 FA를 20% 치환한 배합을 FA20B로, FA20B배합 기준으로 단위결합재량을 9% 감소시킨 배합을 FA20S로, 굵은골재 최대치수 20 mm를 사용한 배합을 FA20C로 명명하였다. 콘크리트 염화물 침투특성 평가를 위한 침지 시험체는 100×100×100 mm의 정육면체 형상으로 제작하였다. 시험체는 염수의 1면 침투를 유도하여 콘크리트 표면으로부터 깊이별 염화물 침투량을 측정하기 위해 침투유도면을 제외한 5개면에 에폭시 도포하여 염화물 침투를 방지하였다(Fig. 1). 제작한 시험체는 콘크리트의 염화물 침투 시 확산을 제외한 다른 방식으로 침투되는 현상을 방지하기 위해 염수 침지 전 28일간 수중양생을 실시하였다.

2.4 콘크리트 염수 침지 실험 방법

염화물 침투 실험을 위해 염수는 순도 99%의 분말형 NaCl을 이용하여 해수와 동일한 염분 농도인 3.4%로 제조하였다. 모든 염수침지 시험체의 노출면은 염수에 잔존하는 침전물

Table 3 Mix proportion

Mix	W/B	Unit weight (kg/m ³)					
		Water	OPC	FA	Fine aggregate	Coarse aggregate	
						20 mm	25 mm
Control		158	400	-	718	-	1006
FA20B	0.4	157	316	79	710	-	995
FA20S		145	287	72	802	-	982
FA20C		169	339	85	668	979	-

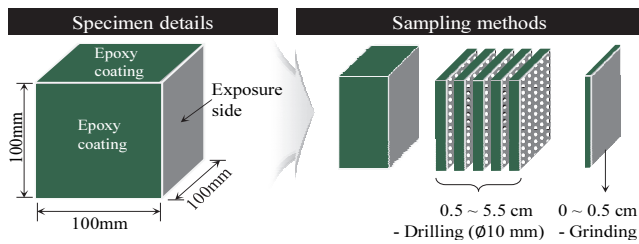


Fig. 1 Details of test method and sample preparation

등의 영향을 최소화하기 위하여 측면을 바라보도록 노출시켰다. 콘크리트로의 염화물 침투로 인한 염수농도의 담화를 방지하기 위해 1개월마다 새로운 염수를 교체하였다.

2.5 콘크리트 시험체를 이용한 염화물 적정

염화물 측정용 침지 시험체는 28, 56, 91일의 염수 침지 후에 24시간동안 상온 조건의 양생챔버에서 건조시켰다. 건조된 시험체는 표면부터 깊이별로 콘크리트 분말을 채취하였다. 표면 염화물량 측정을 위한 시료는 표면부터 0.5 mm 깊이 까지 그라인딩 방법으로 채취하였다. 깊이 0.5 mm 이상의 구간부터는 직경 10 mm의 천공드릴을 이용하여 10 mm 간격으로 최대 50 mm까지의 시료를 수집하였다(Fig. 1). 콘크리트의 염화물량은 고정염화물과 자유염화물로 나누어 XRF로 분석한 염소이온량과 비교 분석하기 위해 KS F 2713에 따라 산가용성 염화물의 추출방법과 수용성염화물의 추출 방법을 모두 적용하여 측정하였다(KS F 2713, 2022).

2.6 페이스트와 콘크리트의 XRF 성분 분석

페이스트와 콘크리트 분석에 사용한 XRF 장비는 4 kW Rh-Ka X-ray Tube를 장착한 장비를 사용하였다. XRF를 통한 시료의 분석은 standard calibration이 되어 있는 장비를 활용하여 정성 분석을 수행하였다. 수집된 페이스트와 콘크리트 시료는 KS A 5101에 따른 200번체(체눈의 크기 74 μm)를 사용하여 분급함으로써 분석결과와 신뢰도를 향상시켰다. 제조된 분말과 Boric acid를 1:1로 혼합 후 15 ton 압축프레스를 이용하여 XRF용 펠렛을 제작하였다. 염화물 침투 특성 분석을 위해 염수에 침지시킨 콘크리트의 분말시료를 XRF 분석방법으로 검출한 염소이온량을 염화물 측정방법을 통해 측정된 염화물량 농도와 비교분석하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 페이스트 XRF 분석결과

페이스트 시험체를 재령 1, 7, 28, 56, 91일에 XRF 분석법을 이용해 성분을 산화물 방식으로 분석한 결과는 Fig. 2에 나타

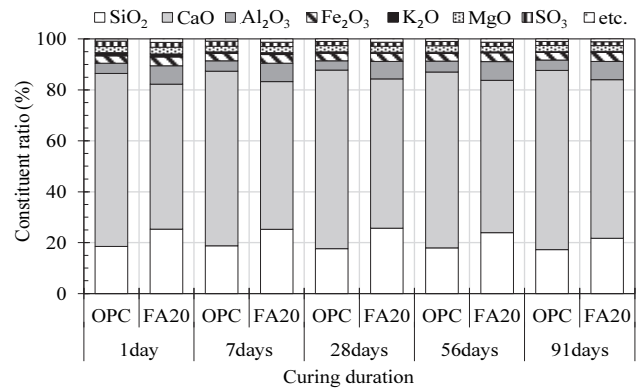


Fig. 2 XRF results of paste samples after curing time

났다. 동일한 배합에서 각 재령의 페이스트 시험체 성분분석 결과는 큰 차이는 거의 없었으며, 페이스트 시험체 성분에 대한 재령증가의 영향도는 미미한 것으로 나타났다. 다만 FA를 20% 치환한 배합의 경우, OPC 배합과 비교하여 CaO 성분이 약 10% 작게 나타났으며, SiO₂ 성분은 약 7% 정도 높은 것으로 분석됐다. 이는 Table 2에 나타난 FA의 원재료 분석결과와 같이 FA 재료 자체의 SiO₂ 함량이 높기 때문으로 판단된다.

XRF 결과에서 결정상을 확인할 수 없으므로 Fig. 2에서 확인한 CaO 성분이 결정상 또는 C-S-H gel 형태에서 비롯된 결과인지는 확인할 수 없어 염화물 고정화 능력과 직접적인 상관성을 확인할 수는 없다. 하지만 이를 통하여 결합재의 수화반응으로 인한 수화물의 XRF 결과는 염소이온의 함량분석에 영향을 주지 않는 것으로 유추할 수 있다.

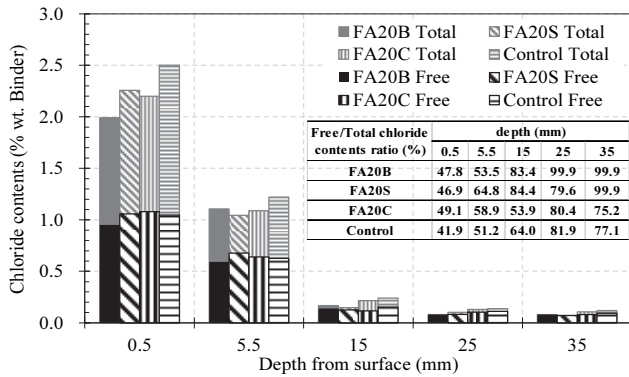
3.2 염수 침지 기간에 따른 깊이별 염화물량 분석

염수 침지에 기간에 따른 콘크리트의 염화물량 분석을 위하여 염화물 전위차 측정법을 이용하여 적절한 산가용성 염화물량과 수용성 염화물량을 분석하여 Fig. 3에 나타냈다. 산가용성 염화물량은 전염화물량, 수용성 염화물량은 자유염화물량으로 표기하였으며, 전염화물량과 자유염화물량의 차이를 고정염화물량으로 표기하였다. 콘크리트 시험체 제작 후 재령 28일까지 수중에서 양생시킨 시험체를 28, 56, 91일 염수에 침지시킨 후 침지기간에 따라 콘크리트 표면으로부터 깊이별 염화물을 측정하였다. 측정된 염화물량은 콘크리트 배합에 사용된 단위결합재량의 중량대비 백분율로 환산하여 나타냈다.

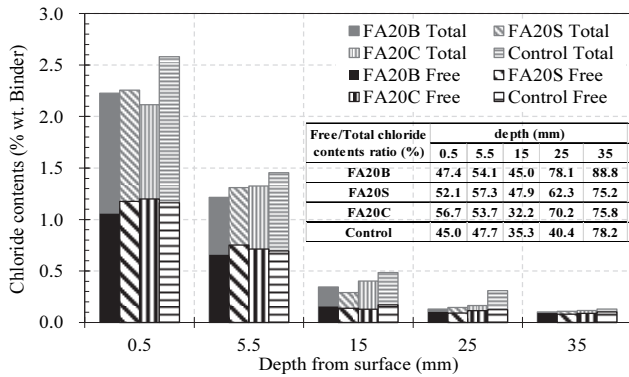
실험결과, 28일간 염수에 침지시킨 시험체의 경우 콘크리트 표면에서부터 깊이 0.5 mm까지의 전염화물량(표면염화물량)이 전 배합에서 결합재대비 2% 이상으로 나타났다. 다만 자유염화물량은 약 1% 수준으로 나타나 고정염화물량의 비율이 자유염화물량에 비해 더 높게 나타났다.

침지 28일차 표면부로부터 깊이 1~10 mm 구간의 전염화물량은 표면염화물량과 비교하여 대부분 절반수준으로 감소된 것

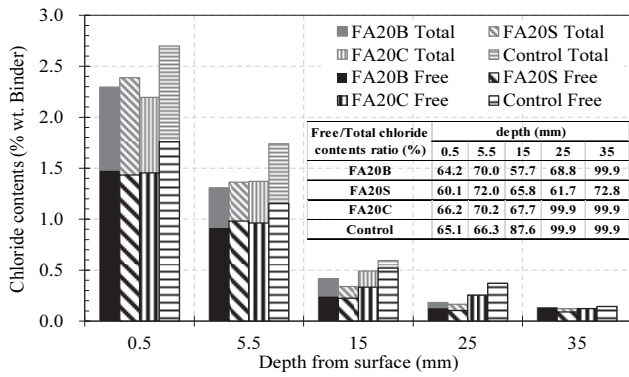
으로 나타났다. 깊이 10~20 mm 구간의 전염화물량은 가장 높게 나타난 Control 배합도 약 0.25% 수준으로 나타나 염소이온은 콘크리트 표면으로부터 10 mm 이상 침투가 원활히 이뤄지지 않은 것으로 나타났다. 다만 표면으로부터 침투깊이가 깊어질수록 전염화물량과 자유염화물량의 차이가 점차적으로 작아진 것으로 나타났다. 침지 28, 56, 91일 측정결과를 통해 동일 깊이에서의 전염화물 농도, 자유염화물 농도는 지속적으로 증가되었다. 이는 침지시간이 길어질수록 표면에서 내부로 침투하는 염화물량이 증가했기 때문으로 판단되며, Control 배합의 경우 침지 28일과 비교하여 침지 91일에 표면부로부터 깊이 1~10 mm 구간의 전염화물량 증가폭이 가장 큰 것으로 나타났다.



(a) 28 days



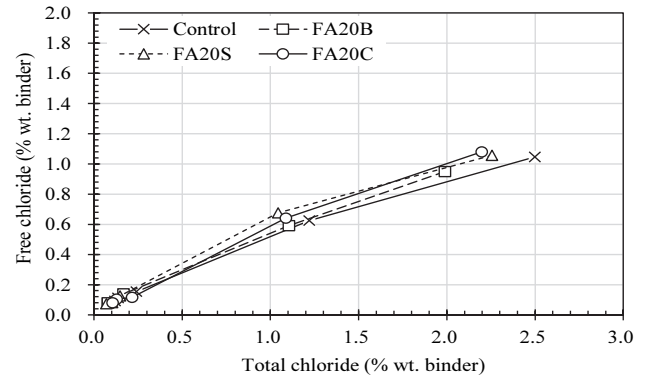
(b) 56 days



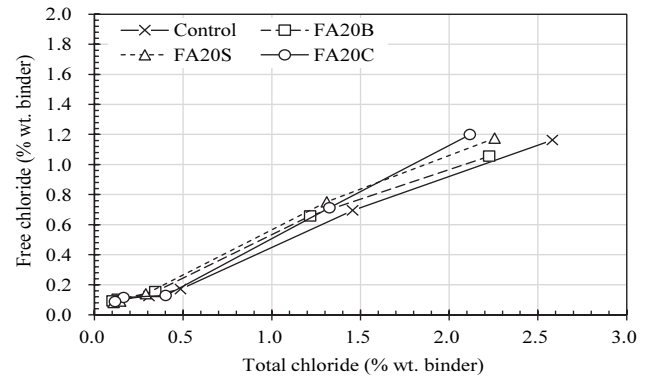
(c) 91 days

Fig. 3 Titration results after immersion time

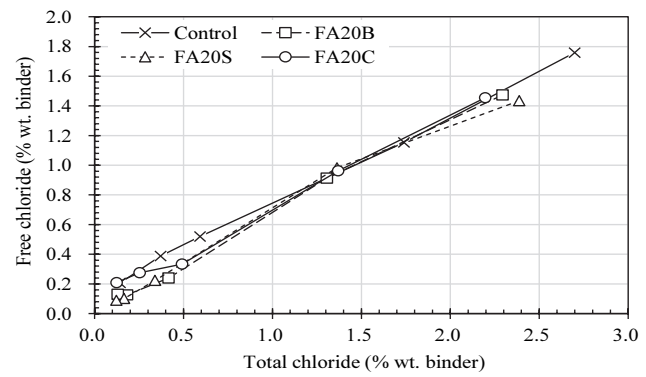
결합재 대비 전염화물량과 자유염화물량은 표면에서의 깊이 증가에 따라 감소되는 경향이 나타났지만 전염화물량 대비 자유염화물량의 비율은 재령이 증가함에 따라 비례하여 증가하는 경향이 모든 배합에서 유사하게 나타났다. 그러나 상대적으로 전염화물량 대비 자유염화물량의 비율은 증가되어 고정염화물의 비율이 낮아졌는데 Control 배합을 검토했을 때, 표면부의 자유염화물량 비율은 재령 28일에는 41.9%, 56일에는 45.0%, 91일에는 65.1%로 재령에 따라 지속적으로 증가하여 고정염화물량의 양과 비율이 점차적으로 감소했다.



(a) 28 days



(b) 56 days



(c) 91 days

Fig. 4 Correlation comparison between total and free chloride

3.3 염화물 고정화 능력 분석

앞서 Fig. 3의 결과를 동일한 시료에서 측정된 전염화물량과 자유염화물량결과의 상관관계를 분석하여 재령별로 Fig. 4에 나타냈다. 전염화물량과 자유염화물량은 모든 재령에서의 측정결과를 측정 깊이와 무관하게 나열한 것으로 전염화물량이 높게 나타난 지점은 대체적으로 표면부의 결과를 나타낸다. 콘크리트의 염화물 고정화 능력은 깊이와 무관하게 동일하므로 전염화물량과 자유염화물량의 비를 통해 배합별 염화물 고정화 능력의 차이를 비교 분석하기 위해 측정결과를 Fig. 4와 같이 표현하였다.

전염화물량대비 자유염화물량이 낮게 나타날수록 상대적으로 고정화능력이 높은 것으로 해석할 수 있다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이, 모든 재령에서 결합재로 FA를 20% 치환한 배합 3종은 전염화물량이 Control 배합과 비교하여 낮게 나타나서 염화물 침투 저항성은 높게 나타났다. 다만 Control 배합과 비교하여 전염화물량대비 자유염화물량이 높게 나타나 염화물 고정화 능력에서는 Control 배합이 상대적으로 우수한 것으로 나타났다. 이는 OPC 사용량이 많은 Control 배합의 다량의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 성분으로 인해 염화물을 고정화 능력이 향상됐기 때문으로 해석된다(Kim and Park, 2014; Koh and Kwon, 2019).

3.4 염화물 측정결과와 XRF 염소이온 분석 결과 비교

염화물 침투실험을 진행한 콘크리트 시험체의 XRF 성분분석결과를 Fig. 5에 나타냈다. 염수침지 시점으로부터 28, 56, 91일 침지된 콘크리트 염화물 적정과 동일한 시료를 XRF 분석을 수행했으며 침지기간 및 측정 깊이와 무관하게 유사한 경향을 나타냈다.

시료의 XRF 결과는 동일배합에 대해 침지기간에 따라 3종(28, 56, 91일), 깊이별 5단계로 총 15개의 데이터를 수집했으며, 분석결과 간 차이가 미미하여 15개의 XRF 분석결과를 산

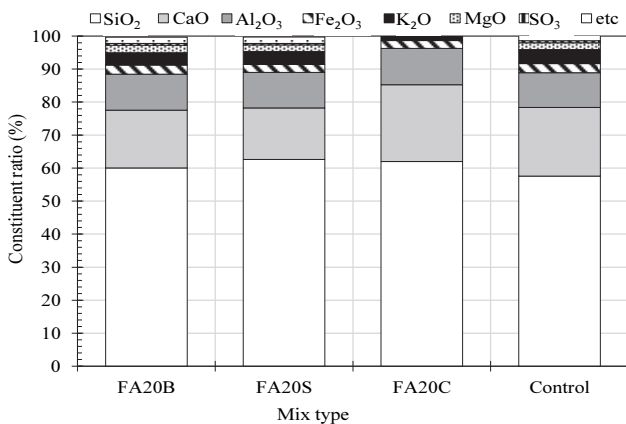


Fig. 5 XRF results of concrete samples

술평균값을 Fig. 5에 나타냈다. 각 결과의 표준편차는 모든 배합에서 SiO_2 1.9~2.0, CaO 1.7~2.0의 범위로 나타나 침지기간은 콘크리트 시료의 XRF 분석결과에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 염소이온의 농도는 XRF결과 상 최소 0.18%에서 최대 0.66%로 나타나 전체 성분분석결과 그래프에서는 영향이 미미하게 나타났다.

각 배합에 따른 콘크리트 시험체에 대하여 전위차 적정법으로 측정된 염화물량과 XRF로 분석한 염소이온량을 Fig. 6에 나타냈다. 그래프의 가로축은 염화물 적정법으로 분석한 염화물량으로 콘크리트의 중량대비 백분율로 표현하였고, 세로축은 XRF 분석결과로 전체 시료량에서 염소이온량을 백분

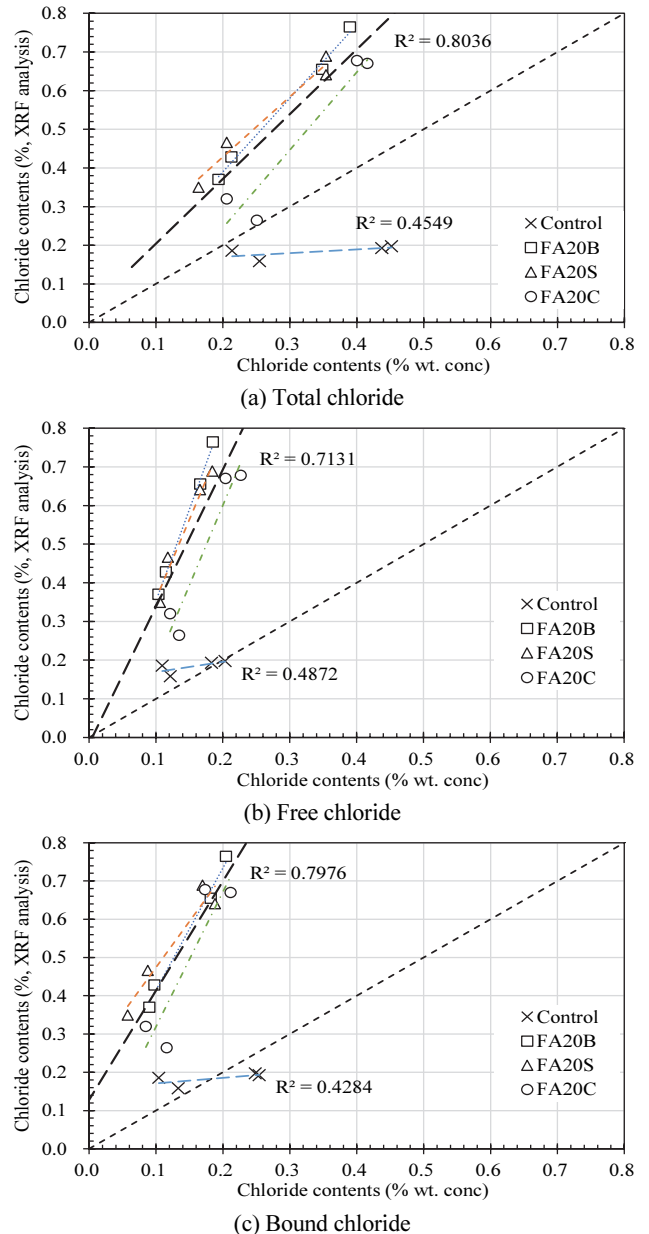


Fig. 6 Correlation comparison between titration and XRF

율로 표현하였다. XRF로 분석한 콘크리트의 염소이온량은 적정법을 이용하여 분석한 전염화물량, 자유염화물량, 고정염화물량으로 각각 나누어 그래프로 나타냈다.

XRF 분석을 통해 측정된 최소 염소이온량은 Control 배합에서 0.18% 수준으로 나타났는데, 이는 전위차 적정법 전염화물량 기준으로 0.26% 로 측정됐다. 반면, 전위차 적정법으로 측정된 최소 전염화물량은 FA20S 배합에서 0.16% 수준으로 나타났으며 XRF 결과로는 약 0.35% 수준으로 나타났다. 본 연구에서 XRF로 측정 가능한 최소 염소이온량은 0.18% 수준으로 나타났으며 전염화물량 기준으로 0.16% 수준까지 XRF를 이용하여 분석이 가능한 것으로 판단된다.

FA 20% 치환배합과 Control 배합을 상호 비교하였을 때, FA를 20% 치환한 배합 3종은 XRF로 분석한 염소이온량과 적정법으로 분석한 염화물량이 서로 비례관계로 나타났으며 Control 배합보다 높은 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

4. 결론

이 연구는 원전 콘크리트 배합을 이용하여 염수침지실험을 통해 염화물 침투특성을 분석하고 전염화물량과 자유염화물량을 전위차 적정법을 이용하여 분석함으로써 원전 콘크리트 배합의 고정화능력을 분석하였다. 또한 염화물이 침투된 콘크리트의 XRF 성분분석과 전위차 적정법을 비교 분석하여 XRF를 이용한 염분침투량 산출방법에 대해 검토하였다.

- 1) FA를 20% 치환한 원전 콘크리트 배합 간 염화물 침투저항성은 골재체적의 증가, 최대골재치수의 변화와 큰 상관성을 나타내지 않았으나, 결합재로 OPC만을 사용한 배합은 상대적으로 염화물 침투저항성이 낮게 나타났는데 이는 FA의 상대적으로 높은 비표면적으로 인해 공극 구조가 치밀해졌기 때문으로 판단된다.
- 2) 염수침지 시간을 달리하여 측정된 전염화물량과 자유염화물량의 측정결과를 통해 Control 배합이 FA를 20% 치환한 원전배합 3종에 비해 염화물 고정화능력이 높게 나타났으며, OPC 사용량이 많은 Control 배합에서 다량의 CaO 성분으로 인해 Ca(OH)₂, C-S-H gel의 증가를 일으켜 물리적, 화학적 고정화 능력이 향상됐기 때문으로 판단된다.
- 3) 전염화물량 분석결과는 자유염화물과 고정염화물 결과와 비교하여 가장 높은 상관성을 나타냈다. 그러나 Control 배합은 전위차 적정법 XRF 분석결과 간 R²값이 0.428 ~ 0.487 수준으로 나타나 FA 20% 배합의 R²값이 0.713 ~ 0.804 수준인 것과 비교해 낮은 상관관계를 보였다. 다만 본 연구가 FA를 20% 치환한 원전콘크리트 구조물 배합을 대상으로 수행되었기 때문에 추가적인 연

구를 통해 분석데이터 확보 시 실제 현장 활용가능성이 향상될 것으로 판단된다.

- 4) 페이스트와 콘크리트의 XRF 분석결과를 통해 양생재령에 따른 수화도의 변화는 성분분석결과에 영향을 주지 않으므로 염소이온의 농도 분석에 대한 신뢰도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 다만 XRF 분석은 적은 시료만을 사용하여 분석하므로 시료의 채취 위치, 시료의 보관방법 등에 대한 정량적 절차화 방법 마련에 대한 연구가 필요하다. 또한 동일 시험체로부터 채취한 시료를 다량 사용하여 반복적인 분석을 통해 시료 수에 대한 통계적 분석이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다(No. 2203025).

References

1. Choinska, M., Khelidj, A., Chatzigeorgiou, G., and Pijaudier-Cabot, G. (2007), Effects and interactions of temperature and stress-level related damage on permeability of concrete, *Cement and Concrete Research*, 37(1), 79-88.
2. Jeong, J. E., Jang, Y. R., Kim, G. U., Heo, S. C., and Min, J. S. (2013), The analytical application for cement using X-Ray diffraction and X-Ray fluorescence spectrometer, *Analytical Science and Technology*, 26(5), 340-351 (in Korean).
3. Kang, H., Kang, S. H., Jeong, Y., and Moon, J. (2020), Quantitative Analysis of Hydration Reaction of GGBFS Using X-ray Diffraction Methods, *Journal of Korea Concrete Institute*, 32(3), 241-250 (in Korean).
4. Kim, C. Y., and Shin, M. S. (2021), Seismic Performance Assessment on Containment Structure Considering the Change in Structural Behavior Due to Material Degradation. *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, 33(2), 721-722 (in Korean).
5. Kim, N. D., and Park, S. J., (2014), Effects of Mineral Admixtures on Chloride Binding of Offshore Concrete, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 30(6), 67-74 (in Korean).
6. Koh, T. H., and Kwon S. J. (2019), Changes in Cement Hydrate Characteristics and Chloride Diffusivity in High Performance Concrete with Ages, *Journal of Korea Institute of Structural Maintenance and Inspection*, 23(6), 9-17 (in Korean).
7. KS F 2713 (2022), Standard test method for analysis of chloride in concrete and concrete raw materials (in Korean).
8. KS F 2714 (2022), Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete (in Korean).
9. KS F 2715 (2022), Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete (in Korean).

10. Lee, C. M. (2019), Study on the prediction concrete service life for nuclear power plant, Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering Graduate School, Daejin University (in Korean).
11. Lee, H. J., and Seo, E. A. (2022), Experimental Study for Evaluation of Chloride Ion Diffusion Characteristics of Concrete Mix for Nuclear Power Plant Water Distribution Structures, *Journal of Korea Institute of Structural Maintenance and Inspection*, 26(5), 112-118 (in Korean).
12. Park, W. J. (2021), Analysis of Chloride Penetration in Mortar Sections using Laser Induced Breakdown Spectroscopy, *Journal of The Korea Institute of Building Construction*, 21(6), 583-591 (in Korean).
13. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2021). Detailed Guidelines for the Safety and Maintenance of Facilities (Part of Safety Inspection and Precise Safety Diagnosis). Jinju: Korea Authority of Land & Infrastructure Safety (in Korean).
14. Moon, I. H., Kim, T. Y., and Jeong, J. A. (2010), Design and Durability of Concrete Structure in Nuclear Power Plant, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 22(6), 44-49 (in Korean).
15. Shakouri, M., and Trejo, D. (2017), A time-variant model of surface chloride build-up for improved service life predictions, *Cement and Concrete Composites*, 84, 99-110.
16. Shin, H. S., Hong, J. K., Kim, J. S., Chung, Y. K., Jhung, M. J., Chung, H. D., and Choi, Y. H. (2011), Development of Regulation on the Integrated Materials Aging Management for Nuclear Facilities, *Transactions of the Korean Society of Pressure Vessels and Piping*, 7(4), 12-18 (in Korean).
17. Ukpata, J. O., Ogirigbo, O. R., and Black, L. (2022), Resistance of Concretes to External Chlorides in the Presence and Absence of Sulphates: A Review, *Applied Sciences*, 13(1), 182.
18. Wang, J., Basheer, P. A. M., and Nanukuttan, S. V. (2016), Influence of service loading and the resulting micro-cracks on chloride resistance of concrete, *Construction and Building Materials*, 108, 56-66 (in Korean).
19. Yoon, Y. S., and Kwon, S. J. (2019). Evaluation of Apparent Chloride Diffusion Coefficient and Surface Chloride Contents of FA concrete Exposed Splash zone Considering Crack Width, *Journal of Korea Institute of Structural Maintenance and Inspection*, 23(6), 18-25 (in Korean).

Received : 08/16/2023

Revised : 09/08/2023

Accepted : 09/11/2023

요 지 : 이 연구는 원전 콘크리트 배합설계를 모사한 콘크리트 시험체에 대하여 염수침지 실험을 수행하였으며, 시험체 깊이에 따른 염화물량과 XRF 성분의 상관관계를 분석하였다. 원전 콘크리트의 표면부의 염화물량은 염수 침지시간이 증가함에 따라 소폭 증가하였으나, 깊이 5.5 mm 이상의 콘크리트 시험체 내부 염화물량은 염수 침지시간이 증가함에 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 콘크리트의 염화물량과 XRF 성분의 상관관계 분석결과, OPC 배합과 비교하여 FA가 20% 치환된 배합은 XRF 성분분석을 통한 Cl 이온의 구성비율과 염해저항성 평가결과의 상관관계가 매우 높게 나타났다. 이에 따라 FA가 20% 치환된 원전 콘크리트 배합에서는 반복적인 데이터 누적을 통해 XRF 성분분석을 통하여 염소이온분석 및 염해저항성능 평가가 가능함을 확인하였다.

핵심용어 : 원자력발전소, 콘크리트, 내구성, 염화물량, X-선형광분석
