Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection
Vol. 23, No. 6, November 2019, pp.18-25
https://doi.org/10.11112/jksmi.2019.23.6.18
pISSN 2234-6937
eISSN 2287-6979

비말 지역에 노출된 FA 콘크리트의 균열을 고려한 겉보기 염화물 확산계수 및 표면 염화물량 평가

윤용식[1], 권성준[2*]

Evaluation of Apparent Chloride Diffusion Coefficient and Surface Chloride Contents of FA concrete Exposed Splash zone Considering Crack Width

Yong-Sik Yoon[1], Seung-Jun Kwon[2*]

Abstract: The cracks occurred during service life of concrete structure should be considered in durability design, because of the concrete's material property which is weak in tensile strength. In this study, the fly ash concrete mixtures considering 2 levels of strength is designed and outdoor exposure tests are conducted for those concrete specimens. The exposure environment is set to a splash zone, and in order to evaluate the effect of crack width on the behavior of chloride diffusion, the crack width of up to 1.0 mm is generated at intervals of 0.1 mm at each concrete mixture. After that, apparent chloride diffusion coefficient and surface chloride contents are deducted considering 3 levels of exposure periods(180 days, 365 days, 730 days). The diffusion coefficients of two types of mixture increase with the increase of crack width, and the diffusion coefficients decrease with the increase of exposure periods. In addition, the effect of the crack width on the diffusion coefficient is reduced as the exposure periods increase, which is attributed to the extra hydrate by chloride ion reducing the diffusivity of concrete. The behavior of the surface chloride contents does not significantly change by the increase in crack width, compared to the behavior of apparent chloride diffusion coefficient. Also, In the high strength FA concrete mixture, the surface chloride contents are 78.9 % ~ 90.7 % than the normal FA strength concrete mixture. Thus, Surface chloride contents have correlation with the strength of concrete.

Keywords: Chloride attack, Outdoor exposure, Apparent chloride diffusion coefficient, Surface chloride contents

1. 서 론

콘크리트는 고내구성이며 뛰어난 경제성을 갖고 있어 전 세계적으로 가장 많이 사용되는 건설재료이다(Metha and Monteiro, 2009). 대부분의 콘크리트 구조물은 인장력에 취약한 콘크리트의 재료적 특성 때문에 내부에 철근 기반 보강재를 사용하여 철근콘크리트(RC: Reinforced Concrete) 구조 및 PSC(Pre-Stressed Concrete) 구조로 이루어져 있다. 우리나라의 경우 4계절이 뚜렷하고 삼면이 바다에 둘러싸여 있어 콘크리트 구조물의 내구성에 불리한 환경적 특성을 갖고 있다(Moon et al., 2000). 특히 염소 이온(Cl^-)에 의한 내부 철근의 부식에 취약한 환경이며(Park and Kim, 2013; Yoon et al., 2018), 우리나라에서는 연간 24조 원의 유지-보수비용이 지출되고 있는데 그중 약 10 % 정도가 철근 부식에 관련된 보수비용으로 지출되고 있는 실정이다(Korea Expressway Corporation, 2002). 이러한 경향은 우리나라뿐만 아니라 해외 역시 마찬가지이며 일본의 경우 콘크리트 내부 철근 부식에 의한 손실액이 연간 GNP의 1.8 %에 이른다고 보고되고 있다(JSCE, 2007). 특히 해양 환경의 콘크리트 구조물에서는 노출 조건(침지, 간만, 비말, 해상 대기 중)에 따라 구조물의 열화 정도가 달라진다고 알려져 있다(Park and Kim, 2013; Lee et al., 2017).

이러한 열화 현상을 제어하고자 임계 염화물량을 높이는 에폭시 코팅 철근의 개발, 염화물 확산을 저감시키는 혼화재료 개발 등 다양한 연구가 진행되어왔다(Ryu et al., 2018; Kim et al., 2015; Nath and Sarker, 2011). 또한, 인장력에 취약한 콘크리트의 특성 때문에 사용 기간 중 콘크리트 구조물에 발생하는 균열은 피할 수 없으며, 이에 따른 염소 이온 확산 거동에 관한 연구도 진행되어 왔다(Yang et al., 2018a; Yang et al., 2018b; Jeong et al., 2017). 그중에서도 시멘트를 혼화재료로 치환하여 사용하는 방법이 염해 열화 제어에 효과적으로 알려져 있으며, 대표적인 콘크리트 혼화 재료로서 플라이애시(FA: Fly Ash), 고로슬래그(GGBFS: Ground Granulated Blast

[1] 정회원, 한남대학교 건설시스템공학과 박사과정
[2] 정회원, 한남대학교 건설시스템 공학과 부교수
***Corresponding author:** jjuni98@hannam.ac.kr
Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea
•본 논문에 대한 토의를 2019년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2020년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Copyright ⓒ 2019 by The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Furnace Slag), 실리카 품(SF: Silica Fume)등이 있다(Yang et al., 2018b; Kwon et al., 2014).

플라이애시는 화력 발전소에서 석탄을 연소시킬 때 발생하는 특정 입도 범위(1μm ~ 100 μm)의 입장 잔사이며(KS L 5405, 2016), 플라이애시를 콘크리트에 혼입하여 사용하면 플라이애시의 포졸란 반응에 의해 내부 공극 구조가 치밀해져 장기 강도 등의 역학적 성질이 개선될 뿐만 아니라 염해 저항성능이 개선된다(Nath and Sarker, 2011). 또한, 굳지 않은 콘크리트 상태에서는 부배합 효과에 의한 워커빌리티 개선, 구형의 입형으로 인한 블리딩 개선 등을 기대할 수 있으며, 시멘트 사용량이 줄어듬에 따른 수화열 저감 효과도 플라이애시의 주요 장점 중 하나이다(Bilodeau et al., 1998; Lee et al., 2008).

콘크리트 구조물의 염화물 확산 거동 평가 시에는 일반적으로 Fick's 2nd law를 기반으로 한 지배방정식이 활용되고 있다. 짧게는 수개월의 염수 침지가 수행된 콘크리트 시편의 깊이별 염화물 프로파일을 이 지배방정식에 의해 해석하게 되면 지배방정식의 해로서 겉보기 염화물 확산계수와 표면 염화물량을 얻을 수 있다. 이러한 방법으로 염화물 확산 거동을 해석하는 경우 포화상태를 가정하기 때문에 노출 환경에 따라 해석 값에 차이가 발생하게 된다(Kim et al., 2016). 표면 염화물량의 경우 노출 기간의 평방근에 비례하며, 노출이 시작되고 10 ~ 12년 동안은 증가하나 그 이후로는 일정하다고 알려져있다(Thomas and Bentz, 2002). 또한, 고로 슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트에서는 OPC(Ordinary Portland Cement)를 사용한 콘크리트보다 높은 표면 염화물량을 갖게 되는데 이는 고로 슬래그 미분말 기반 CSH 겔의 높은 염소 이온 흡착 능력에 기인한다(Kouloumbi et al., 1994). 겉보기 염화물 확산계수는 노출 기간의 증가에 따라 수화의 증가로 인해 시간의 존적으로 감소하는 경향을 나타내는 것으로 알려져 있으며, 고로슬래그 미분말과 플라이애시와 같은 혼화재료 혼입 시에는 추가적으로 생성되는 수화물에 의한 확산성 저감으로 인해 더 큰 감소율을 나타내는 것으로 알려져 있다(Thomas and Bamfoth, 1999).

본 연구에서는 비말 지역에서 균열 폭 및 노출 기간에 따른 겉보기 염화물 확산계수와 표면 염화물량 거동을 평가하고자 2가지 수준의 강도를 갖는 플라이애시 콘크리트 배합을 설계 및 제작하였다. 노출 기간은 180일, 365일, 730일 총 3수준으로 설정하였으며, 균열 폭은 0.05 mm부터 약 0.1 mm 간격으로 최대 1.0 mm까지 고려하여 실험을 수행하였다. 배합의 강도 특성, 균열 폭, 노출 기간에 따라 변화하는 겉보기 염화물 확산계수와 표면 염화물량의 거동을 비교 분석하였다.

2. 사용 재료 및 평가 방법

2.1 사용 재료 및 고성능 플라이애시 콘크리트 배합

본 연구에서는 보통 강도 범위에 속하는 28 MPa(A type)과 고강도 범위에 속하는 41 MPa(B type)의 설계 강도(f_{ck})를 갖는 두 가지 플라이애시 치환 배합을 설정하였다. Table 1에는 본 연구의 배합표를, Table 2에는 사용된 OPC(Ordinary Portland Cement) 및 플라이애시의 물성을, Table 3에는 배합에 사용된 골재의 물리적 특성을 나타내었다. 콘크리트 배합 시 배치 플랜트를 활용하여 재료 계량을 한 후 믹서기를 활용하여 실시하였다. 배합 후 24 시간 경과 후 탈형을 실시하였으며, 일 방향 침투를 유도하기 위해 에폭시로 시편의 측면과 하단부를 코팅하였다. 20 ± 2 ℃에서 수중 양생을 수행하였으며, 재령 56일에 균열을 야기한 뒤 옥외 환경에 노출시켰다.

Table 1 Mix proportions for 2 types of Fly Ash concrete

Type	W/B (%)	f_{ck} (MPa)	S/a	Unit weight(kg/m^3)				
				W	C	FA	S	G
A	40	41	44.4	162.75	325.50	81.38	748.89	938.77
B	50	28	46.7	162.75	260.64	64.86	822..01	938.77

W/B : Water to Binder ratio, W : Water, C : Cement,
FA : Fly Ash, S : Sand, G : Gravel

Table 2 Properties of OPC and FA

	Physical properties		Chemical composition (%)						
	Specific gravity (g/cm^3)	Blaine (cm^2/g)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Ig. loss
OPC	3.16	3,214	21.96	5.27	3.44	63.41	2.13	1.96	0.79
FA	2.19	3,621	55.66	27.76	7.04	2.70	1.14	0.49	4.3

Table 3 Properties of sand and gravel

Type	G_{max} (max)	Specific gravity (g/cm^3)	Absorption (%)	F.M.
Sand	-	2.58	1.01	2.90
Gravel	25	2.64	0.82	6.87

F.M. : Fineness Modulus

2.2 균열을 고려한 FA 콘크리트의 겉보기 염화물 확산계수 및 표면 염화물량 평가 방법

2.2.1 균열 인가 방법

시편의 크기는 직경 100 mm, 높이 200 mm의 원주형 공시체로 설정하였으며, 재령 56일에 UTM(Universal Test Machine)을 활

용하여 쪼갬인장시험을 통해 균열을 야기하였다. 수 회의 실험을 통해 균열을 야기하였으며, 약 0.1 mm 간격으로 최대 1.0 mm까지 균열 폭을 야기하였다. 시편의 균열 방향에 수직을 이루도록 시편의 표면에 Crack gauge를 부착하였으며, 그 후 하중을 목표 균열 폭이 발생할 때까지 증가시킨 후 제하하였다. 하중을 제하한 후 균열 폭이 일부 감소하였기 때문에 일정 시간 후 균열 폭을 재 측정하여 최종 균열 폭으로 판단하였다. 시편에 균열을 인가하는 전경을 Fig. 1에 나타내었다.

2.2.2 자연환경 모사 시험의 노출 조건

본 연구에서는 경기도 안산시 시화 방조제 인근의 해양 옥외 폭로 시험장의 비말 지역에 시편을 존치시켜 각 배합의 염화물 거동을 평가하였다. 비말 지역에서는 파도의 영향을 직접 받고 육풍을 차단하여 해풍의 영향만을 받을 수 있도록 하였다. 모든 조건의 시편을 최대 2년까지 노출시켰다. 본 시험

Fig. 1 Inducing crack to fly ash concrete specimens

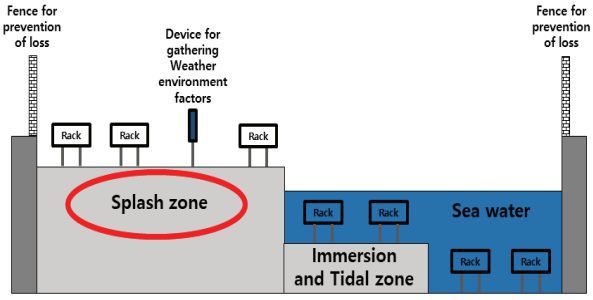


Fig. 2 Mimetic diagram of outdoor exposure test for this study

Fig. 3 Photos of outdoor exposure test site

장의 모식도를 Fig. 2에, 시험장 전경을 Fig. 3에 나타내었다.

2.2.3 겉보기 염화물 확산계수 및 표면 염화물량 도출 방법

균열 폭을 고려하여 비말 지역에 노출된 두 가지 배합의 플라이애시 콘크리트 시편의 겉보기 염화물 확산계수 및 표면 염화물량을 평가하고자 산가용성 시험 방법(KS F 2714)으로 시편의 깊이별 염화물량을 측정하였다. 일반적으로 수경성 시멘트 조직 내에 있는 산-가용성 염화물량은 시멘트 조직 내의 총 염화물량과 같다고 알려져 있기 때문에 본 방법을 채택하였다 Fig. 4에는 염화물 프로파일 측정 전경을 나타내었다. 측정한 염화물 프로파일을 Fick's 2nd law에 적용시켜 선형회귀분석 방법으로 겉보기 염화물 확산계수 및 표면 염화물량을 도출하였다. 도출 과정을 Fig. 5에 나타내었으며, $0 \le z \le \sqrt{3}$ 범위 에서는 $erfc(z) = 1 - erf(z)$ 로 가정할 수 있어 선형회귀분석 방법으로 비교적 간단하게 겉보기 염화물 확산계수를 도출할 수 있다(Glasser et al., 2008).

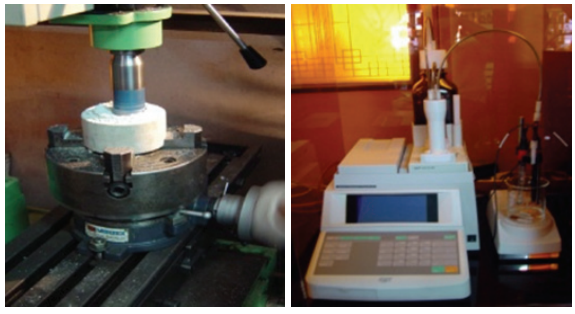


Fig. 4 Process of getting chloride profile

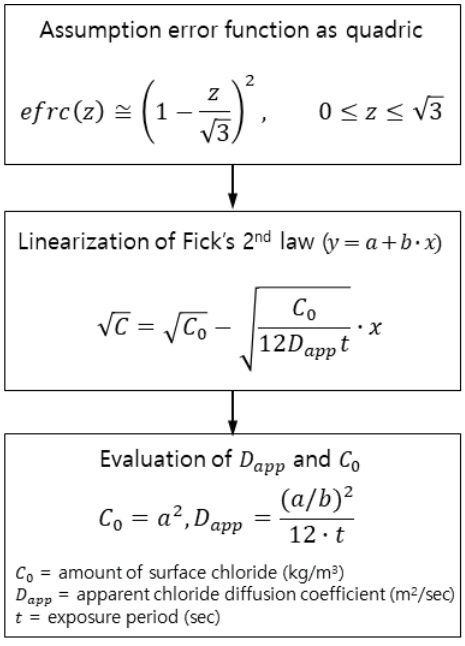


Fig. 5 Procedure of drawing apparent chloride diffusion coefficient and surface chloride contents

3. 균열 폭에 따른 겉보기 염화물 확산계수 및 표면 염화물량 평가 결과

3.1 균열 폭을 고려한 겉보기 염화물 확산계수 평가 결과

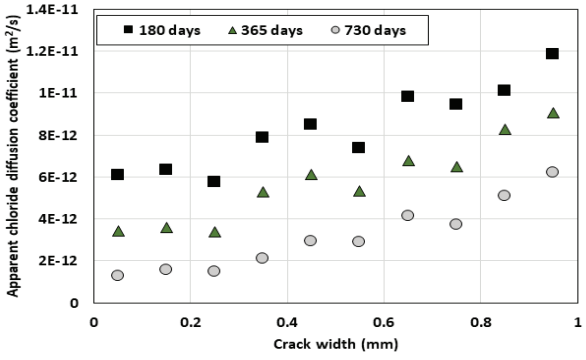
비말 지역 노출 기간 180일, 365일, 730일에서 균열 및 배합 특성을 고려한 겉보기 염화물 확산계수 평가 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

모든 배합에서 균열 폭이 증가할수록 겉보기 염화물 확산계수가 증가하는 경향을 나타내었다. 보통 강도(28 MPa) 배합인 B 배합에서는 염화물 확산계수가 비교적 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었으며, 고강도(41 MPa) 배합인 A 배합에서는 염화물 확산계수가 비선형적으로 증가하였다. A 배합의 경우 균열 폭이 0.05 mm인 경우를 기준으로 균열 효과를 고려하면 노출기간 180일에서는 94.3 % ~ 194.3 %, 노출기간 365일에서는 99.2 % ~ 265.0 %, 노출기간 730일에서는 117.1 % ~ 487.4 %의 겉보기 염화물 확산계수 증가율을 나타내었다. B 배합의 경우에는 노출기간 180일에서 126.9 % ~ 294.3 %, 노출기간 365일에서 108.5 % ~374.1 %, 노출기간 730일에서 136.2 % ~ 462.5 %의 증가율을 나타내었다. 강도가 높은 콘크리트일수록 염화물 확산 시 균열의 영향을 적게 받는 것으로 보인다. 또한 고강도 배합인 A 배합에서는 B 배합 대비 27.9 % ~ 58.5 %의 감소율을 나타내었으며, 이는 상대적으로 적은 물-결합재 비로 인해 확보된 결합재의 양에 의해 내부구조의 치밀화가 원인으로 보인다. 일반적으로 균열 폭 안으로 염화물 이온이 침투하게 되면 염화물 기반 수화물을 생성하게 되어 균열 폭 감소 효과가 나타나게 되는데(Song et al., 2008), 이러한 균열 치유 효과에 기인하여 노출 기간의 증가에 따라 균열 폭이 확산계수에 미치는 영향이 감소한 것으로 보인다.Table 4에 선형회귀분석을 통하여 각 노출 기간에서의 균열의 영향을 분석한 결과를 나타내

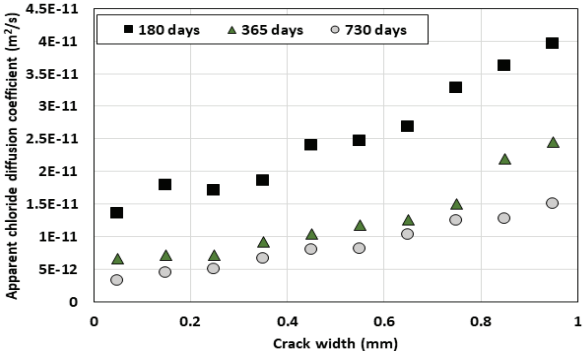
Table 4 Results of linear regression analysis to evaluate crack effect

Exposed days	Mixture type	
	A type	B type
180 days	$D=10^{12}(6.152x+5.237)$ (R^2 : 0.8714)	$D=10^{12}(28.335x+10.921)$ (R^2 : 0.958)
365 days	$D=10^{12}(6.227x+2.663)$ (R^2 : 0.912)	$D=10^{12}(19.141x+3.050)$ (R^2 : 0.866)
730 days	$D=10^{12}(5.221x+0.526)$ (R^2 : 0.923)	$D=10^{12}(12.831x+2.140)$ (R^2 : 0.980)

D : Apparent chloride diffusion coefficient (m^2/s)
x : Crack width (mm)

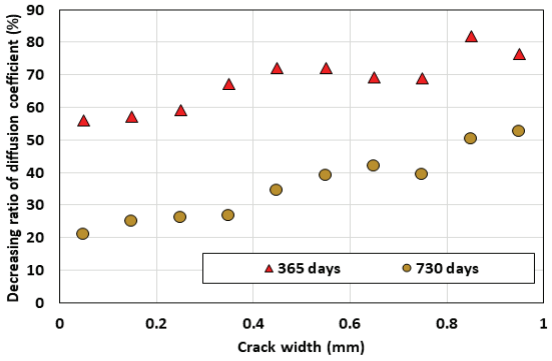


(a) A type mixture

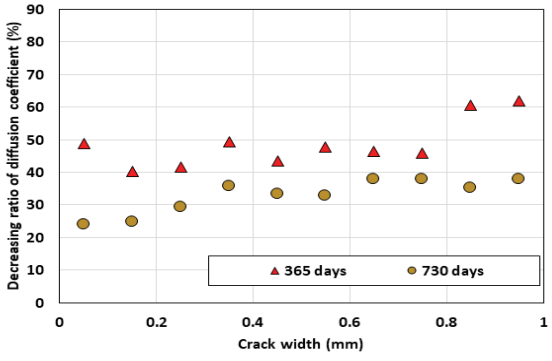


(b) B type mixture

Fig. 6 Apparent chloride diffusion coefficient in 2 types of FA concrete

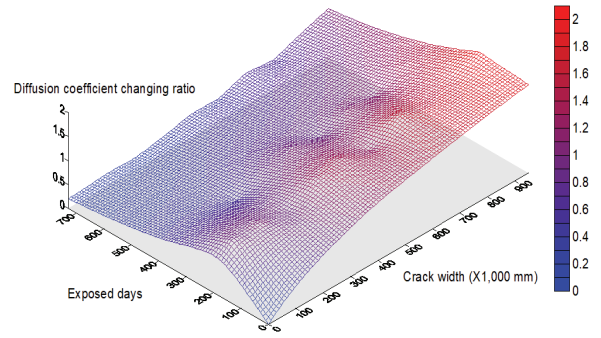


(a) A type mixture

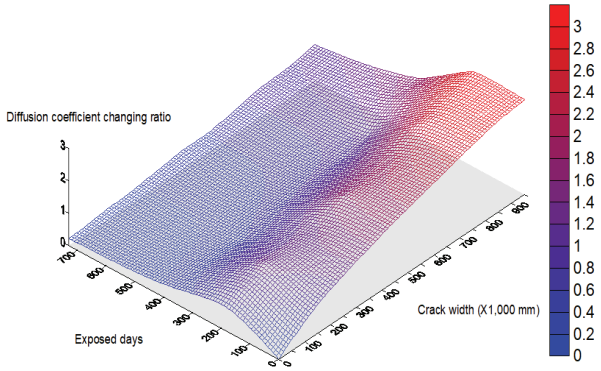


(b) B type mixture

Fig. 7 Changing ratio of Apparent chloride diffusion coefficient in 2 types of FA concrete

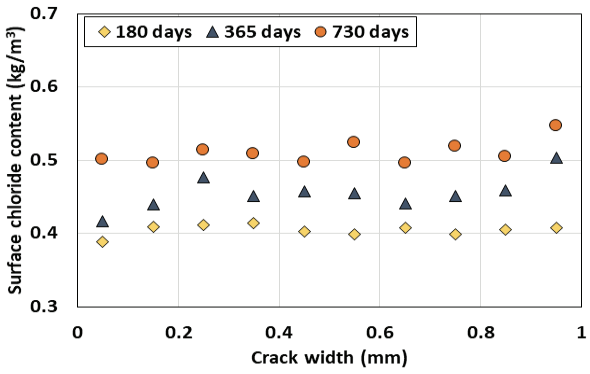


(a) A type mixture

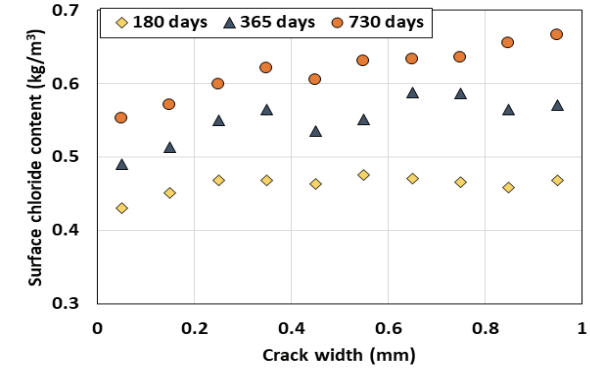


(b) B type mixture

Fig. 8 Contour for Changing ratio of apparent chloride diffusion coefficient by exposure period and crack width



(a) A type mixture



(b) B type mixture

Fig. 9 Surface chloride content in 2 types of FA concrete

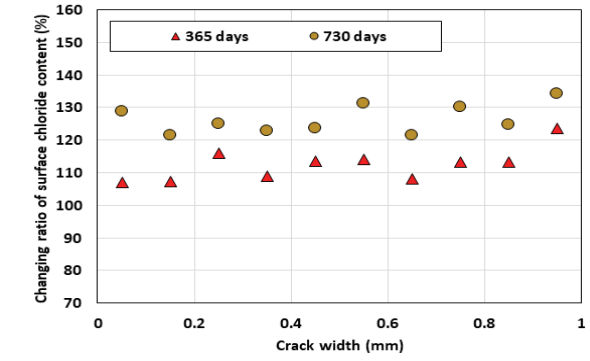
었다. 선형회귀분석 시 기울기 값이 높을수록 균열의 영향이 큰 것으로 판단될 수 있다.

노출기간 180일을 기준으로 노출기간의 증가에 따른 각 균열 폭에서의 확산계수 변화율을 평가하였으며 이를 Fig. 7에 나타내었다.

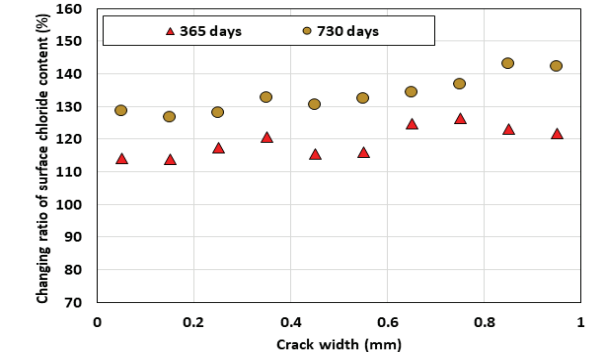
보통 강도를 갖는 B 배합에서는 노출기간의 증가에 따라 비선형적인 감소율을 고강도 배합인 A 배합에서는 균열 폭에 따라 비교적 선형적으로 증가하는 감소율을 나타내었다. 보통 강도 배합에서는 균열 폭의 증가가 노출기간의 증가에 따른 확산계수 감소에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 보인다. Fig. 8에서는 노출 기간 180일의 균열 폭 0.05 mm의 확산계수를 기준으로 균열 폭 및 노출 기간에 따라 변화하는 확산계수 변화 거동을 컨투어로 나타내었다.

3.2 균열 폭을 고려한 표면 염화물량 평가 결과

본 절에서는 3가지 수준의 비말 지역 노출 기간(180일, 365일, 730일) 및 균열 폭을 고려한 두 가지 강도 수준의 플라이애시 콘크리트의 표면 염화물량을 평가한 결과를 다루고자 하며, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

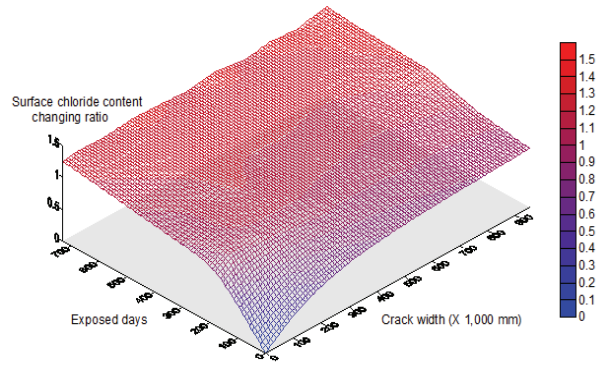


(a) A type mixture

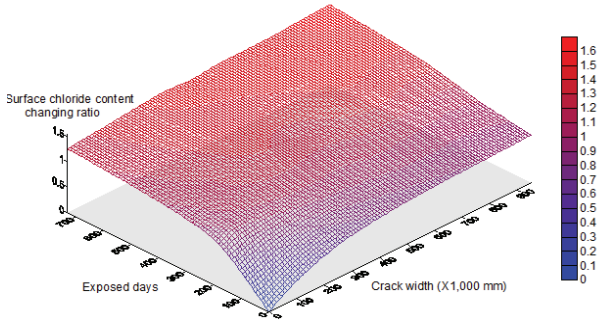


(b) B type mixture

Fig. 10 Surface chloride content of 2 types of FA concrete



(a) A type mixture



(b) B type mixture

Fig. 11 Contour for Changing ratio of surface chloride contents by exposure period and crack width

두 배합의 표면 염화물량 거동은 3.1절의 겉보기 염화물 확산계수 거동 대비 균열 폭에 의한 영향이 미비한 것으로 보인다. 고강도 배합인 A 배합에서는 B 배합 대비 74.9 % ~ 90.7 %의 염화물량을 나타내어 표면 염화물량은 강도와의 상관관계를 갖고 있는 것으로 보이며 이는 기존의 연구에서 증명되었다(Thomas and Bamforth, 1999). 노출 기간 180일을 기준으로 노출 기간의 증가에 따른 각 균열 폭에서의 표면 염화물량의 변화율 Fig. 10에 나타내었다.

노출 기간에 따른 표면 염화물 증가율 역시 균열 폭에 의해 뚜렷한 거동이 발생하지 않았으며, 보통 강도를 갖는 B 배합에서 고강도 배합인 A 배합 대비 큰 변동성을 나타내었다. 노출 기간의 증가에 따라 노출 기간 180일 기준 노출 기간 730일에서 A 배합의 경우 최대 134.2 %, B 배합의 경우 최대 142.9 %의 표면 염화물량 증가율을 나타내었다. Fig. 11에서는 Fig. 8과 마찬가지로 노출 기간 180일의 균열 폭 0.05 mm의 표면 염화물량을 기준으로 균열 폭 및 노출 기간에 따른 표면 염화물량 변화 비를 나타내었다.

3.3 압축강도 평가 결과

본 연구에서는 수중 양생 730일을 거친 두 배합의 압축강도를

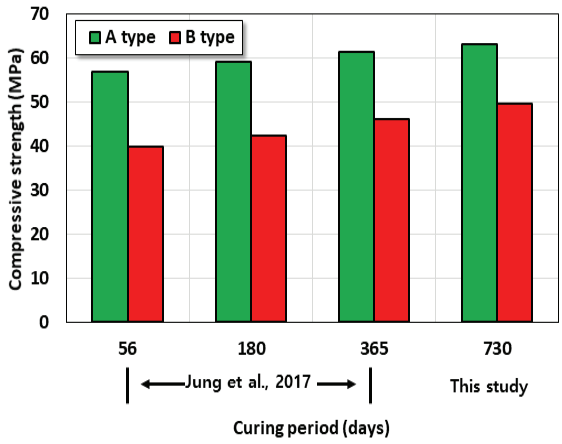


Fig. 12 Compressive strength in 2 types of FA concrete

평가하였다. 이전 재령일에 대한 압축강도결과는 기존의 연구에서 인용하였으며(Jeong et al., 2017), 재령일의 증가에 따라 변화하는 압축강도 거동을 분석하였다. 재령 56일, 180일, 365일, 730일의 압축강도 평가 결과를 Fig. 12에 나타내었다.

압축강도 평가 결과 A 배합은 B 배합 대비 132.7 % ~ 142.9 %의 강도를 나타내었다. 두 배합은 재령 56일에 설계 강도 대비 약 140 %의 강도를 나타내었다. 재령 56일 대비 730일에서의 강도 증진률을 평가하면 A 배합의 경우 111.3 %, B 배합의 경우 124.9 %로 B 배합에서 다소 높게 평가되었으며, 재령 56일 이후의 강도 증진율은 비교적 적은 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 2가지 수준의 강도 특성을 갖는 FA 콘크리트를 대상으로 균열 폭과 노출 기간을 고려하여 겉보기 염화물 확산계수 및 표면 염화물량을 평가하였다. 노출 조건은 비말 지역으로 설정하였으며 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1) 2가지 배합 모두 균열 폭의 증가에 따라 염화물 확산계수가 증가하였으며 노출기간이 증가함에 따라 확산계수가 감소하였다. 또한 고강도 배합인 A 배합에서 보통강도 배합인 B 배합 대비 27.9 % ~ 58.5 %의 확산계수 감소율을 나타내었다. 또한 노출 기간이 증가할수록 균열에 의한 확산계수 증가율이 낮아졌는데 이는 염소 이온 기반 수화물의 추가적인 생성이 원인으로 보이며 이러한 균열 치유 효과는 B 배합에서 A 배합 대비 더 뚜렷하게 나타났다.
2) 균열 폭 및 노출 기간을 고려하여 표면 염화물량을 평가한 결과, 겉보기 염화물 확산계수 거동 대비 균열의 영향을 받지 않는 것으로 사료된다. 고 강도 배합인 A 배합에

서 B 배합 대비 78.9 %~90.7 %의 표면 염화물량을 나타내어 기존의 연구와 마찬가지로 강도와의 상관관계를 나타내었다. 또한 노출 기간이 2년으로 증가함에 따라 180일 대비 A 배합의 경우 최대 134.2 %, B 배합의 경우 최대 142.9 %의 표면 염화물량 증가율을 나타내었다.

3) 2가지 배합의 압축강도 평가 결과, 고강도 배합인 A 배합에서는 보통 강도 배합인 B 배합 대비 약 132.7 % ~ 142.9 %의 강도를 나타내었다. 재령 56일 대비 730일에서의 강도 증진률을 평가하면 A 배합에서는 약 111.3 %, B 배합에서는 약 124.9 %로 나타났으며 수중 양생 56일 이후 높은 강도 증진률이 발생하지는 않았다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1A5A1037548).

References

1. Metha, P. K., and Monteiro, P. M. (1993), Concrete-Structure, properties, and materials, 2nd edition, prentice Hall, New-Jersey, 1-7.
2. Moon, H. Y., Lee, S. T., Kim, H. S., and Kim, J. C. (2000), Resistance to Sulfate and Seawater Attack of Cement Mortars, *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, 20(3A), 473-482.
3. Park, S. S., and Kim, M. W. (2013), Evaluate the Concrete mix by Type Accelerated Corrosion Test and Chloride Penetration Analysis with Artificial Seawater Cyclic Wet and Dry Condition, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 1(3), 211-218.
4. Yoon, Y.S ., Ryu, H. S., Lim, H. S., Koh, K. T., Kim, J. S., and Kwon, S. J. (2018) Effect of grout conditions and tendon location on corrosion pattern in PS tendon in grout, *Construction and Building Materials*, 186, 1005-1015.
5. Korea Expressway Corporation. (2002), Establishment of Management and Maintenance of Concrete Structure for Durability.
6. JSCE, (2007), Survey of corrosion cost in japan, Committee on Cost of Corrosion in Japan.
7. Lee, B. K., Kim, G. Y., Kim, G. T., Shin, K. S,. and Nam, J. S. (2017), Chloride Ion Penetration Resistance of Slag-replaced Concrete and Cementless Slag Concrete by Marine Environmental Exposure, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 29(3), 299-306.
8. Ryu, H. S., Park, K. T., Yoon, Y. S., and Kwon, S. J. (2018), Resistance to Chloride Attack of FRP Hybrid Bar After Freezing and Thawing Action, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 6(1), 59-65.
9. Kim, J. H., Jeong, J. Y., Jang, S. Y., Jeong, S. H., and Kim, S. I. (2015), Strength Development and Durability of High-Strength High-Volume GGBFS Concrete, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 3(3), 261-267.
10. Nath, P., and Sarker, P. (2011), Effect of Fly Ash on the Durability Properties of High Strength Concrete, *Procedia Engineering*, 14(2011), 1149-1156.
11. Yang, K. H., Mun, J. H., Yoon, Y. S., and Kwon, S. J. (2018a), Effects of loading conditions and cold joint on service life against chloride ingress, *Computers and Concrete*, 22(3), 319-326.
12. Yang, H. M., Lee, H. S., Yang, K. H., Ismail, M. A., and Kwon, S. J. (2018b), Time and cold joint effect on chloride diffusion in concrete containing GGBFS under various loading conditions, *Construction and Building Materials*, 167, 739-748.
13. Kwon, S. O., Bae, S. H., Lee, H. J., and Jung, S. H. (2014), Characteristics for Reinforcement Corrosion and Chloride Ion Diffusion of High Volume Fly Ash Concrete, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 2(1), 34-39.
14. KS L 5405. (2018), Fly Ash, KSSN, 1-8.
15. Bilodeau, A., Malhotra, V. M., and Golden, D. M. (1998), Mechanical Properties and Durability of Structural Lightweight Concrete Incorporating High-Volumes of Fly Ash, *ACI International*, 178, 449-474.
16. Lee, S. S., Rho, H. N., and Song, H. Y. (2008), An Experimental Study on the Quality Properties of Mortar Using High Volume Fly-ash, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 24(8), 171-178.
17. Kim, J., McCarter, W. J., Suryanto, B., Nanukuttan, S., Basheer, P. A. M., and Chrisp, T. M. (2016), Chloride ingress into marine exposed concrete: A comparison of empirical-and physically-based models, *Cement and Concrete Composites*, 72, 133-145.
18. Thomas, M. D, A., and Bentz, E. C. (2002), Computer Program for Predicting the Service Life and Life-cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides(Life365 Manual), SFA.
19. Kouloumbi, N., Batis, G., and Malami, C. H. (1994), The anticorrosive effect of fly ash, slag and a Greek pozzolan in reinforced concrete, *Cement and Concrete Composites*, 16(4), 253-260.
20. Thomas, M. D. A., and Bamforth, P. B. (1999), Modelling chloride diffusion in concrete: Effect of fly ash and slag, *Cement and Concrete Research*, 29(4), 487-495.
21. Glasser, F. P., Marchand, J., and Samson, E. (2008), Durability of concrete—degradation phenomena involving detrimental chemical reactions, *Cement and Concrete Research*, 38(2), 226-246.
22. Song, H. W., Lee, C. H., and Lee, K. C. (2008), A Study on Chloride Binding Capacity of Various Blended Concretes at Early Age, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 12(5), 133-142.
23. Jung, S. H., Ryu, H. S., Karthick, S., and Kwon, S. J. (2018), Time and Crack Effect on Chloride Diffusion for Concrete with Fly Ash, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(1), 1-10.

Received : 04/09/2019
Revised : 08/20/2019
Accepted : 10/29/2019

요　　지 : 콘크리트는 인장력에 취약한 재료적 특징을 갖기 때문에 콘크리트 구조물의 사용기간 중에 발생하는 균열은 내구성능 평가 시 필히 고려되어야 한다. 본 연구에서는 두 수준의 강도를 고려한 플라이애시 콘크리트를 배합하여 옥외 폭로 시험을 실시하였다. 노출 환경은 비말 조건으로 설정하였으며, 균열 폭이 콘크리트의 염화물 확산 거동에 미치는 영향을 평가하고자 각 배합의 시편에 0.1 mm 간격으로 최대 1.0 mm 까지의 균열 폭을 야기하였다. 그 후 3가지 수준의 노출기간(180일, 365일, 730일)을 고려하여 겉보기 염화물 확산계수 및 표면 염화물량을 산출하였다. 균열 폭의 증가에 따라 두 배합 모두 확산계수가 증가하였으며, 노출기간이 증가함에 따라 확산계수는 감소하였다. 또한 노출 기간이 증가함에 따라 균열 폭이 확산계수에 미치는 영향이 감소하였는데, 이는 염소 이온 기반 수화물이 콘크리트의 확산성을 저감시키기 때문으로 사료된다. 표면 염화물량 거동은 겉보기 염화물 확산계수 거동 대비 균열 폭의 증가에 따른 뚜렷한 변화 거동이 발생하지 않았으며, 고강도 배합에서 보통 강도 배합 대비 78.9 % ~ 90.7 %의 표면 염화물량을 나타내어 강도와의 상관관계를 갖는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 염해, 옥외 노출, 겉보기 염화물 확산계수, 표면 염화물량