



해상교량 주탑용 고성능 콘크리트의 기준재령 염소이온 확산계수

윤철수¹⁾ · 김기현²⁾ · 양우용³⁾ · 차수원^{4)*}

¹⁾현대건설 ²⁾UC버클리 ³⁾대림산업 ⁴⁾울산대학교 건설환경공학부

Chloride Diffusion Coefficient at Reference Time for High Performance Concrete for Bridge Pylons in Marine Environment

Chul-Soo Yoon,¹⁾ Ki-Hyun Kim,²⁾ Woo-Yong Yang,³⁾ and Soo-Won Cha^{4)*}

¹⁾Hyundai Engineering and Construction Co. Ltd., Seoul 110-920, Korea

²⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, USA

³⁾Daelim Industrial Co. Ltd., Seoul 110-732, Korea

⁴⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

ABSTRACT High performance concrete mixes are selected and corresponding test specimens are made for the study of chloride diffusion coefficient at reference time. The concrete mixes were same designs as those used in construction of bridges located in a marine environment. Mix design variables included binder type, water-to-binder ratio, mineral admixtures to total binder weight substitution ratio, fine aggregate source, chemical water reducer admixture type for high strength and high flowability, and target slump or slump flow. The test results showed that the diffusion coefficients at reference time varied significantly according to the type of mineral admixtures and their substitution ratios. A model for diffusion coefficient at reference time considering the type of mineral admixture and the substitution ratio was developed. Diffusion coefficients from the developed model were compared with those from literature review, a previous model, and additional test results. All of the comparisons verified that the developed model can reasonably predict diffusion coefficients and the application of the model to the durability design against chloride penetration is appropriate.

Keywords : high performance concrete, chloride diffusion coefficient at reference time, mineral admixtures

1. 서 론

해양환경에 존재하는 콘크리트 구조물의 가장 중요한 내구성 저하 인자는 염소이온 침투에 의한 철근 부식이다.^{1,2)} 염소이온 침투에 대한 내구성 설계를 위하여 콘크리트의 염소이온 침투 메커니즘 규명을 위한 연구와^{3,5)} 신뢰도 기반 내구성 설계에 대한 연구^{6,7)} 등이 수행된 바 있다. 특히 해양환경에 건설되는 교량이 최근 증가되면서 주탑과 교각, 바닥판 등 콘크리트 부재의 내구수명 확보가 해상교량 건설을 위한 중요한 설계요소가 되었다.

표면 염소이온 농도, 임계 염소이온 농도 및 염소이온 확산계수가 내구수명 예측에서 주요 인자이다. 이 가운데 염소이온 확산계수는 콘크리트 품질 및 환경조건에 큰 영향을 받으며 확산계수에 의해 내구수명이 크게 달라지기 때문에 내구수명을 예측하는 데 가장 중요한 인

자로 평가되고 있다.⁸⁾ 해양환경 콘크리트 구조물 설계를 위하여 확산계수 평가를 위한 연구^{9,11)}가 수행되고 있으나 국내자료의 부족으로 인하여 내구수명 예측에 해외자료를 주로 사용하고 있는 실정이다. 따라서 해상교량 내구성 설계를 위한 국내자료 확보가 절실하다.

이에 이 연구에서는 실험을 통하여 국내 해상교량용 콘크리트의 염소이온 확산계수 모델을 제시하고자 한다. 이를 위하여 이순신대교 콘크리트 주탑에 적용한 바 있는 고성능 콘크리트 배합을 기본으로 하여 해상교량 콘크리트 부재에 적용가능한 여러 배합을 선정하고 이들에 대하여 기준재령에서 염소이온 확산계수를 측정하였다. 염소이온 확산계수는 여러 인자에 영향을 받는데 이 연구에서는 결합재 종류, 물-결합재비, 혼화재 치환율, 골재 종류, 화학혼화제 종류, 목표 슬럼프 또는 슬럼프 플로우 등 다양한 인자를 고려한 배합을 선정하였다. 해양환경과 같은 열악한 환경에 대응하고 소요의 고강도를 확보할 수 있도록 물-결합재비는 비교적 낮은 범위로 한정하였고 혼화제는 슬래그와 플라이애쉬를 사용하였다.

기준재령 염소이온 확산계수 측정 결과로부터 확산계

*Corresponding author E-mail: chasw@ulsan.ac.kr

Received February 27, 2012, Revised April 24, 2012,

Accepted May 2, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

수는 골재 종류와 화학혼화제의 영향을 받으며, 특히 물-결합재비, 혼화제 종류와 그 치환율에 따라 큰 차이를 보이고 있음을 확인하였다. 이에 따라 이 연구에서는 실험 결과를 바탕으로 물-결합재비, 혼화제 종류와 그 치환율을 변수로 하는 회귀분석을 실시하여 해상교량용 고성능 콘크리트 배합에 대한 기준재령 확산계수 모델을 제시하고자 한다.

2. 실험 개요

2.1 사용 재료

시멘트는 D사의 보통 포틀랜드 시멘트, 슬래그 함량 38%의 고로슬래그 시멘트, 슬래그와 플라이애쉬 함량이

Table 1 Physical properties of cements

Cement	Density (g/cm ³)	Setting time (min)		Finess (m ² /kg)	Compressive strength (MPa)		
		Initial	Final		3 days	7 days	28 days
OPC	3.15	232	260	347.8	28.3	46.8	66.6
Slag cement	3.06	285	370	388.1	19.4	29.9	56.2
Low heat cement	2.82	260	490	398.3	12.3	17.9	37.7

Table 2 Physical properties of fine aggregate

Fine aggregate	Density (g/cm ³)	Absorption (%)	Unit weight (kg/m ³)	Weight of passing No. 200 sieve (%)	FM
S1	2.61	0.99	1,453	2.24	2.69
S2	2.56	1.45	1,534	1.9	2.54

Table 3 Physical properties of coarse aggregate

Coarse aggregate	Gmax (mm)	Density (g/cm ³)	Absorption (%)	Unit weight (kg/m ³)	FM
Crushed rock	19	2.68	1.73	1,533	6.63

Table 4 Physical properties of mineral admixtures

Admixture	Specific gravity	Finess (m ² /kg)
OPC	3.15	347.8
SC	3.06	388.1
FA	2.19	360.7

Table 5 Properties of superplasticizer

Super-plasticizer	Specific gravity	pH	Quantity (%) (by weight of cement)	Main component
SP1	1.036	6.4	0.3~4.0	Polycarboxylate
SP2	1.050	6.4	0.7~3.0	Polycarboxylate

각각 40%와 20%인 3성분계 저발열 시멘트를 사용하였으며 물리적 성질은 Table 1과 같다. 잔골재는 의령(S1)과 진월(S2)에서 생산된 하천사를, 굵은 골재는 부순돌을 사용하였으며 이들의 물리적 성질은 Tables 2 및 3과 같다. 다양한 해상교량용 고성능 콘크리트를 제조하기 위하여 플라이애쉬(FA)을 이용하였으며 그 물리적 성질은 Table 4와 같다. 콘크리트를 고주탑에 펌프로 압송하기 위한 유동성 확보를 목적으로 폴리카르본산계 고성능 감수제(SP1, SP2)를 사용하였으며 그 품질특성은 Table 5와 같다. 실제 현장에서 혼화제 함량이 다소 변동될 수 있으므로 비슷한 성분의 두 종류의 혼화제를 사용하였다.

2.2 실험 방법

2.2.1 시편 제작

해상교량용 고성능 콘크리트의 염소이온 확산계수 모델 개발을 위하여 Table 6과 같은 배합비를 결정하였다. 해양환경과 같은 열악한 환경에서 소요의 고강도를 확보할 수 있도록 물-결합재비는 0.32에서 0.395의 비교적 낮은 범위로 한정하였고 혼화제는 슬래그와 플라이애쉬를 사용하였다. 잔골재 종류, 혼화제 종류, 목표 슬럼프 또는 슬럼프 플로우에 따라 다양한 물-결합재비를 선정하였으며, 보통 포틀랜드 시멘트와 슬래그 시멘트를 중량비 일대일로 혼합하여 슬래그 치환율 19%와 38%로 두 가지의 슬래그 치환율을 고려하였다. 최근 내염설계를 위하여 70%에 이르는 고함량의 슬래그를 사용한 연구도 이루어지고 있으나, 이 연구에서는 주탑 슬럼프 공법 적용에 따른 초기재령 강도확보를 위하여 슬래그 함량을 줄였으며 이 배합은 실제로 주탑 대기부에 적용된 바 있다. 슬래그와 플라이애쉬를 혼합한 3성분계 시멘트의 영향을 분석하기 위하여 슬래그 시멘트에 플라이애쉬를 치환한 배합 및 3성분계 저발열 시멘트 배합을 변수로 선정하였다. 현수교와 같이 높은 주탑의 해상교량에는 펌프압송으로 콘크리트를 타설하는 경우가 많으므로 슬럼프 및 슬럼프 플로우를 실험변수로 정하였다. 주탑의 일체 건설을 위한 슬럼프 공법 적용시 콘크리트의 응결시간 조절을 위하여 플라이애쉬 치환율을 고려하였다.

각 배합비에 따라 KS F 2403(콘크리트 강도 시험용 공시체 제작 방법)에 따라 $\phi 100 \times 200$ mm의 원주형 공시체를 3개씩 제작하였다. 공시체 제작 후 24시간 경과하여 탈형하고 4주간 수중양생하였다.

2.2.2 염소이온 확산계수 측정

혼화제의 영향을 고려한 기준재령 확산계수 모델을 개발하기 위하여 북유럽에서 공인된 NT BUILD 492¹²⁾ 방법으로 28일 재령 염소이온 확산계수를 측정하였다. 이 방법은 Fig. 1과 같은 영동시험장치에 두께 50 mm의 시편을 설치하고 30 V의 전기장을 걸어 24시간 동안 염소이온을 침투시킨다. 침투가 끝난 후 시편을 할렬하고 할렬면에 질산은 용액을 분무하면 염소이온 침투에 의해

Table 6 Mix proportions of concrete

Sand	Super-plasticizer	Slump or slump flow (mm)	w/b (%)	S/a (%)	Cement type ⁽¹⁾	Unit weight (kg/m ³)						SP (B×%)	Average diffusion coefficient (× 10 ⁻¹² m ² /s)	
						W	Binder ⁽²⁾				S			G
							OPC	SC	FA	LHC				
S1	SP1	150	36.0	47.0	OPC	168	467				805	918	5.14	15.35
			36.0	47.0	SG19	168	234	234			805	918	4.67	9.04
			36.0	47.0	SG38	168		467			805	918	3.74	5.17
			35.5	46.5	SG36FA05	166		444	23		795	926	3.74	10.60
			35.0	46.5	SG34FA10	166		427	47		789	918	3.79	11.17
			33.8	46.0	SG32FA15	165		415	73		772	917	3.90	12.61
			34.0	46.5	SG40FA20	166				488	800	931	3.90	8.14
		200	35.4	46.0	OPC	168	475				760	935	5.70	14.70
			35.4	46.0	SG19	168	238	238			760	935	5.23	5.70
			35.4	46.0	SG38	168		475			760	935	4.75	6.90
			35.0	46.0	SG36FA05	166		451	24		772	916	4.75	9.23
			34.0	45.5	SG34FA10	164		434	48		759	920	4.82	8.74
			33.0	45.0	SG32FA15	163		420	74		744	919	4.94	8.62
			600	32.0	47.5	SG19	163	255	255			806	901	6.12
32.0	47.5	SG32FA15		163		433	76		791	884	5.10	7.43		
S2	SP1	150	37.5	48.0	OPC	169	451				805	910	5.41	15.89
			37.5	48.0	SG19	169	226	226			805	910	4.96	10.04
			37.5	48.0	SG38	169		451			805	910	4.51	6.02
			37.0	47.5	SG36FA05	167		429	23		817	914	4.52	10.78
			36.0	47.0	SG34FA10	165		413	46		805	918	4.59	11.69
			35.0	46.5	SG32FA15	164		398	70		790	920	4.68	11.40
			34.0	47.0	SG40FA20	165				485	774	913	4.37	5.82
		200	35.4	47.0	OPC	169	477				787	929	5.72	13.85
			35.4	47.0	SG19	169	239	239			787	929	5.25	5.40
			35.4	47.0	SG38	169		477			787	929	4.29	5.53
			35.0	46.5	SG36FA05	165		448	24		782	911	4.25	8.96
			34.1	46.5	SG34FA10	165		436	48		774	932	4.36	12.11
			33.5	45.5	SG32FA15	162		411	73		757	949	4.36	4.47
		600	32.0	47.5	SG19	163	255	255			806	901	6.12	7.63
32.0	47.5		SG32FA15	163		433	76		791	884	5.10	4.29		
S2	SP2	150	39.5	48.0	OPC	164	415				833	938	3.32	15.32
			39.5	48.0	SG19	164	208	208			830	935	3.32	10.20
			39.5	48.0	SG38	164		415			827	932	3.32	4.64
			39.5	48.0	SG36FA05	164		394	21		824	928	3.32	8.84
			39.5	48.0	SG34FA10	164		374	42		821	925	3.32	8.34
			39.5	48.0	SG32FA15	164		353	62		818	921	3.32	9.45
			39.5	48.0	SG40FA20	164				415	820	924	3.32	7.29
		200	37.5	48.0	OPC	169	451				813	915	4.51	13.37
			37.5	48.0	SG19	169	225	225			810	912	4.51	9.54
			37.5	48.0	SG38	169		451			807	909	4.51	7.68
			37.5	48.0	SG36FA05	169		428	23		803	905	4.51	8.36
			37.5	48.0	SG34FA10	169		406	45		800	901	4.51	8.96
			37.5	48.0	SG32FA15	169		383	68		796	897	4.51	9.71
		600	32.0	45.5	OPC	170	531				739	920	5.58	8.78
32.0	45.5		SG19	170	266	266			736	916	5.58	5.97		
32.0	45.5		SG38	170		531			733	912	5.58	5.83		
32.0	45.5		SG32FA15	170		452	80		721	898	5.58	5.27		

⁽¹⁾OPC = ordinary portland cement, SG19 = OPC 50% + slag cement 50%
 SG38 = slag cement 100%, SG36FA05 = slag cement 95% + fly ash 5%
 SG40FA20 = ternary low-heat cement

⁽²⁾OPC = the weight of ordinary cement, SC = the weight of slag cement
 FA = the weight of fly ash, LHC = the weight of ternary low-heat cement (OPC:SG:FA=40:40:20)

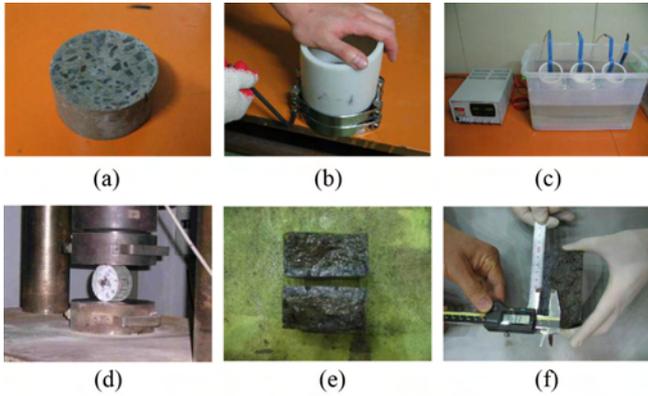


Fig. 1 Procedure for NT BUILD 492

색변화가 관찰되는데, 이로부터 염소이온 침투깊이를 측정하여 다음 식으로 확산계수를 계산하였다.

$$D = \frac{RT x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{zFE t} \quad (1)$$

여기서,

$$E = \frac{U-2}{L}$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right)$$

D : 염소이온 확산계수 (m^2/s)

z : 이온의 원자가 (염소이온은 $z=1$)

F : 패러데이 상수 ($= 96,480 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{V})$)

U : 확산셀의 전압차 (V)

R : 기체상수 ($= 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)

T : 용액 온도 (K)

L : 시편두께 (m)

x_d : 염소이온 침투깊이 (m)

t : 시간 (s)

erf^{-1} : 오차함수의 역함수

c_d : 비색법에 의한 반응농도 (N)

c_0 : 음극셀의 염소이온농도 (N)

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 2는 결합재 종류에 대한 기준재령 확산계수 평균 값을 나타낸 것으로, 사용골재와 화학혼화제에 따라 구분하였으며 해당배합의 물-결합재비를 함께 나타내었다.

물-결합재비를 감소시켜 슬럼프 150 mm와 200 mm의 배합을 정하였으며 Fig. 2에서 이러한 경우는 총 18가지이다. 이 중 물-결합재비 감소에 대하여 확산계수가 증가하는 것은 4가지 경우로서 Fig. 2(a)의 SG38, Fig. 2(b)의 SG34FA10, Fig. 2(c)의 SG34FA10와 SG32FA15와 같다. 이들을 제외한 14가지 경우에 대하여, 물-결합재비 단위 비율 감소에 대한 확산계수 감소율 평균값을 구하면 OPC, SG19, SG38, SG36FA05, SG34FA10, SG32FA15에 대하여 각각 6.5, 28.9, 16.9, 12.3, 21.8, 40%이다. 따라서 전

반적으로 물-결합재비가 낮아질수록 기준재령 확산계수는 감소하는 경향을 보인다고 할 수 있다. 또 각 그림에서 OPC, SG19, SG38의 슬래그 치환 시리즈를 비교하면 동일 물-결합재비에서 슬래그 치환율이 증가할수록 기준재령 확산계수는 감소하는 경향이다.

Fig. 2(c)와 같이 비교적 높은 물-결합재비에서 플라이애쉬를 15%까지 치환한 경우 기준재령 확산계수는 약간 증가하는 경향으로서 SG19와 SG38 사이에 해당한다. 따라서 필요에 따라 플라이애쉬 치환으로 응결시간 조절이 가능할 것으로 판단된다. Fig. 2(a)와 (b)에서 플라이애쉬 치환율이 늘어나는 경우 물-결합재비는 감소하는데 기준재령 확산계수는 증가하는 경향이다. 플라이애쉬는 장기재령에서의 포졸란 반응으로 공학적 성질이 개선되는데, 28일 기준재령 확산계수 측정 시점에서 아직 충분한 포졸란 반응을 하지 않았기 때문인 것으로 보인다.

플라이애쉬가 늘어날수록 전반적으로 기준재령 확산계수가 증가하는데, 플라이애쉬가 들어간 경우는 OPC에서 SG치환 시리즈에 비하여 경향성이 뚜렷하지 않다. 플라이애쉬 치환 배합, 즉 SG36FA05, SG34FA10, SG32FA15의 경우 공장제작 상품으로 나오는 슬래그 시멘트에 플라이애쉬를 치환한 것이다. 실험에 사용된 플라이애쉬는 공장 제작한 슬래그 시멘트에 비하여 상대적으로 비균질했던 것으로 보이며 이에 따라 플라이애쉬 비율이 높아질수록, 특히 SG32FA15의 경우 기준재령 확산계수의 뚜렷한 경향 분석이 어려웠다. 다음 장의 기준재령 확산계수 모델 개발을 위한 회귀분석에서는 슬래그 및 플라이애쉬를 치환한 배합의 측정 결과 중에서 경향성을 벗어나는 실험 결과를 찾고 그 실험 결과를 제외하고 회귀분석을 수행하였다.

이에 비해 3성분계 저발열 시멘트는 수화열 저감을 주목적으로 하여 보통 포틀랜드 시멘트, 슬래그, 플라이애쉬가 40:40:20의 비율로 프리믹스된 3성분계 시멘트로서 주탑 하부 매스 콘크리트에 적용되었다. 플라이애쉬 치환율이 크지만 슬래그 시멘트에 플라이애쉬를 치환한 다른 배합보다 평균 70% 수준의 낮은 확산계수값을 보였다. 일반적으로 3성분계 저발열 시멘트 제조시 수화열 저감효과를 얻으면서 높은 강도발현성을 목적으로 비표면적이 더 큰 포졸란을 사용한다. 따라서 더욱 작게 미분쇄한 포졸란의 반응으로 페이스트의 공극구조가 더욱 치밀해졌기 때문에 3성분계 저발열 시멘트의 확산계수가 다른 경우보다 작은 것으로 판단된다. 3성분계 저발열 시멘트에 대한 기준재령 확산계수도 전체 배합과의 경향이 다르므로, 다음 장의 기준재령 확산계수 모델 개발을 위한 회귀분석에서 이 결과를 제외하였다.

SG38시리즈에서 물-결합재비 0.32에서 0.395 범위에서는 물-결합재비의 영향에 의한 경향성을 관찰하기 어려운데, 이는 슬래그 치환율이 늘어날수록 물-결합재비의 영향보다는 골재나 화학혼화제 종류에 따라 수화 정도가 영향을 받아 변동성이 크게 나타났기 때문인 것으로 생각된다.

OPC, SG19, SG38의 슬래그 치환 시리즈를 보면, 슬럼프

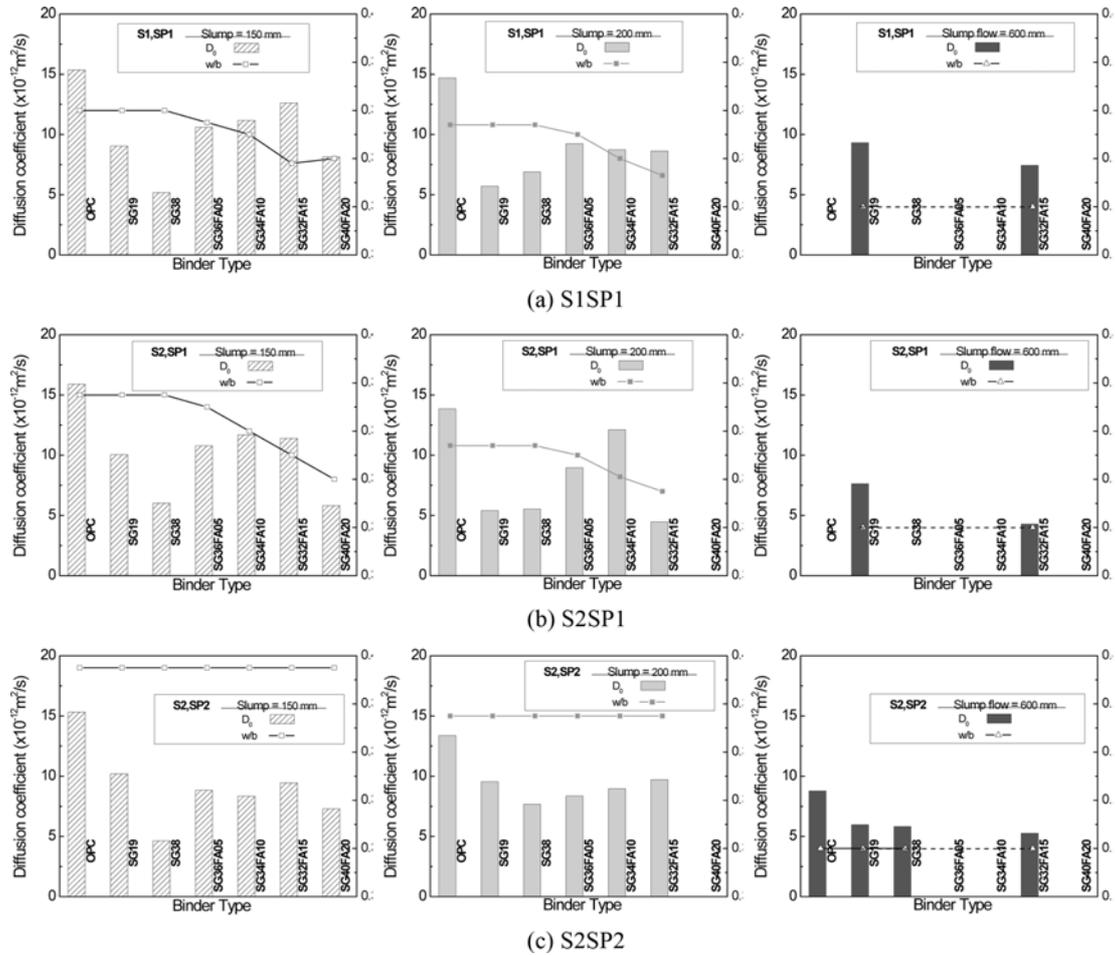


Fig. 2 Average diffusion coefficient at reference time

프 150 mm인 경우 물-결합재비가 (c), (b), (a) 순으로 줄어드는데 기준재령 확산계수는 비슷한 수준이다. 또 슬럼프 200 mm인 경우를 보면, (a)와 (b)의 물-결합재비는 같은데 (a)의 확산계수가 크고, (c)의 물-결합재비가 큰데 확산계수는 (b)와 (c)가 비슷하다. (a)와 (b)의 비교에서는 골재 S2가 유리함을 알 수 있는데, 골재의 종류에 따라 확산계수가 달라지는 것은 골재의 분급상태, 함수량 등의 차이 때문인 것으로 생각된다. 한편, (b)는 (c)에 비하여 물-결합재비가 낮아서 목표슬럼프를 만족시키기 위하여 더 많은 혼화제를 사용하였다. 혼화제 사용량이 증가할수록 유동성은 증가되지만 배합의 변동성이 증가되어 확산계수가 증가된 것으로 보인다. 강도조건을 만족하는 범위라면 물-결합재비를 증가시키고 혼화제 사용량을 줄여도 소요의 확산계수 조건을 만족하는 배합이 가능할 것으로 판단된다. 이상에서 골재종류와 화학혼화제 사용량이 기준재령 확산계수에 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있었다.

이는 슬럼프 플로우 600 mm인 경우에서도 확인할 수 있다. 슬럼프 플로우 600 mm의 경우, (a)와 (b)에서는 0.32의 낮은 물-결합재비, 즉 많은 결합재량에 비해 확산계수 감소효과는 그리 크지 않다. (c)에서는 확산계수 감소효과가 두드러지는데 따라서 골재종류와 화학혼화제에 따라 기준재령 확산계수가 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 펌프 압송과 같이 충분한 유동성을 확보해야 하는

경우에도 물-결합재비, 골재종류, 화학혼화제 등을 조절하여 소요의 확산계수를 만족하는 배합을 설계할 수 있을 것으로 생각된다.

4. 혼화제를 고려한 기준재령 확산계수 모델

4.1 고성능 콘크리트 기준재령 확산계수 특성

기준재령 염소이온 확산계수는 Fig. 2의 결과로부터 결합재 종류에 의해 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 이는 Life-365 모델¹³⁾과는 다른 접근을 통하여 해상교량 고성능 콘크리트에 대한 확산계수 모델을 개발해야 함을 말해준다. 북미에서 개발되어 내구성 설계에 자주 사용되고 있는 Life-365의 염소이온 확산계수 모델은 다음과 같다.

$$D(t) = D_{28} \cdot \left(\frac{t_{28}}{t}\right)^m \quad (2)$$

$$D_{28} = 1 \times 10^{(-12.06 + 2.40W/CM)} \quad (3)$$

$$m = 0.2 + 0.4(\%FA/50 + \%SG/70) \leq 0.6 \quad (4)$$

여기서,

D_{28} : 기준재령 염소이온 확산계수(m^2/s)

- t_{28} : 기준재령(= 28 days in Life-365)
- W/CM : 물-결합재비(-)
- $\%FA$: 플라이애쉬 치환율(%)
- $\%SG$: 슬래그 치환율(%)
- m : 재령계수(-)

Life-365 모델에서는 식 (3)과 같이 혼화재 치환율에 무관하게 물-결합재비만으로 기준재령 확산계수를 표현하고, 혼화재의 영향은 확산계수와 시간의 관계를 멱법칙으로 표현하여 재령계수로 반영하고 있다. Life-365 모델의 확산계수는 0.3~0.7의 비교적 넓은 범위의 물-결합재비에 대한 과거의 실험자료를 바탕으로 만들어졌으므로, 낮은 물-결합재비의 고성능 콘크리트를 사용하는 최근의 해상교량 콘크리트의 내구성 설계에 적용하기에는 한계가 있을 것으로 판단된다. 따라서 Life-365 모델과 같이 확산계수에 대한 혼화재의 영향을 재령계수에만 반영하기보다는, 기준재령 확산계수와 재령효과에 혼화재 영향을 모두 반영한 확산계수 모델을 개발해야 할 필요가 있다.

4.2 기준재령 확산계수 모델 개발

4.2.1 고성능 콘크리트 확산계수 모델 형태

확산계수는 다양한 인자에 의해 영향을 받으나 확산계수의 변동계수가 비교적 크기 때문에 모든 인자를 고려하는 것의 이점이 별로 없다. 따라서 이 연구에서는 가능한 최소한의 인자만 고려하여 확산계수 모델을 정의하였다.

혼화재의 영향은 보통 포틀랜드 시멘트에서 치환율의 함수로 표현하였다. Fig. 3은 각 물-결합재비에서의 OPC 기준재령 확산계수의 평균값으로 SG19와 SG38의 실험 결과를 표준화하여 물-결합재비별로 나타낸 것이다. 보통 포틀랜드 시멘트로부터 슬래그 치환율이 증가할수록 기준재령 확산계수가 감소한다. 플라이애쉬의 경우도 슬래그와 같이 보통 포틀랜드 시멘트에서 치환율의 함수로 그 영향을 표현하였다. 물-결합재비의 영향과 슬래그 및 플라이애쉬 치환율의 영향을 분리하여 확산계수 모델의 형태를 정할 수 있으며 최종적으로 고성능 콘크리트에 대하여 식 (5)와 같은 염소이온 확산계수 모델을 정의하였다. 기준재령 확산계수는 식 (6)에 해당한다.

$$D = D_0 \times f_T \quad (5)$$

$$D_0 = f_{AD} \times D_{0,w/b} \quad (6)$$

여기서,

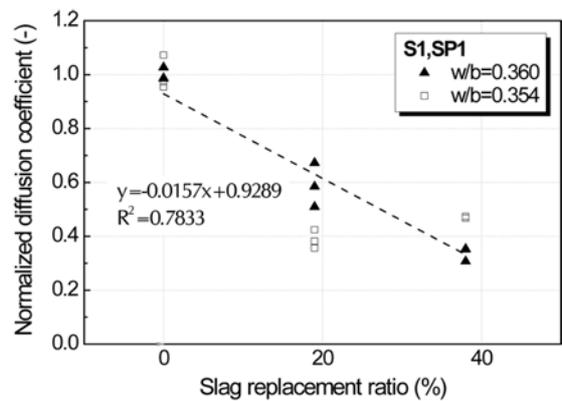
- D : 염소이온 확산계수(m^2/s)
 - D_0 : 기준재령 염소이온 확산계수(m^2/s)
 - $D_{0,w/b}$: 기준재령에서 물-결합재비에 따른 염소이온 확산계수(m^2/s)
 - f_{AD} : 기준재령에서의 혼화재 영향계수(-)
 - f_T : 재령 영향계수(-)
- 이 연구에서는 실험 결과로부터 슬래그와 플라이애쉬

를 치환한 경우에 대하여 기준재령 확산계수 모델을 먼저 개발하고, 재령 영향계수는 후속연구에서 계속하고자 한다.

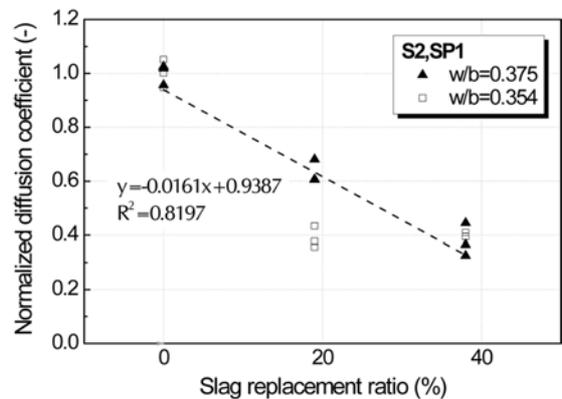
4.2.2 회귀분석을 통한 기준재령 확산계수 모델

물-결합재비의 영향은 기존의 JCI 확산계수 모델¹⁴⁾이나 북미의 Life-365 모델¹³⁾에서와 같이 10의 거듭제곱으로 정의하였고 혼화재의 영향은 직선 또는 곡선을 함께 표현할 수 있도록 하였다.

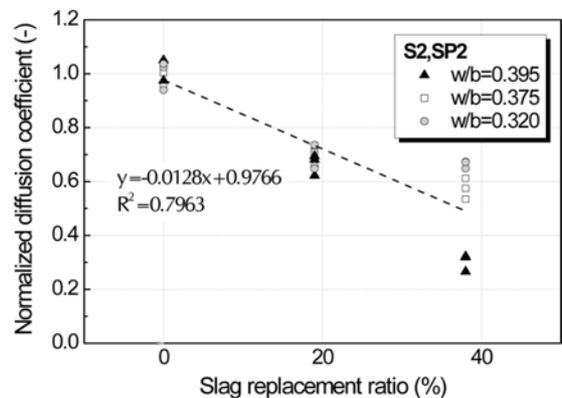
$$D_0 = (1 - \gamma SG^s - \delta FA^t) \times 10^{(\alpha + \beta \cdot w/b)} + e \quad (7)$$



(a) S1 and SP1



(b) S2 and SP1



(c) S2 and SP2

Fig. 3 Normalized diffusion coefficient with respect to that of OPC

여기서,

w/b : 물-결합재비(-)

SG : 슬래그 치환율(-)

s, t : 상수(-)

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$: 회귀분석으로 구해지는 상수(-)

e : 오차항

골재와 화학혼화제 종류에 따른 실험 결과의 정량적 평가를 위해 식 (7)에서 $s=t=1$ 인 경우에 대하여 회귀 분석한 결과를 Table 7에 나타내었으며 이 때 회귀모형은 식 (8)과 같다. 설명변수의 개수가 늘어날수록 결정계수는 증가하여 모형의 설명력을 과대평가 할 수 있으므로, 설명변수의 개수와 샘플 크기를 고려한 수정결정계수를 함께 나타내었다.

$$D_0 = (1 - 1.35SG + 1.29FA) \times 10^{(-11.61 + 2.00 \cdot w/b)} \quad (8)$$

(Adjusted $R^2=0.49$)

경향성을 벗어난 실험값에 의해 일부 배합에서 수정결정계수가 낮게 계산되었으며 경향을 벗어난 측정 결과를 제외하고 다시 회귀분석한 결과를 Table 8과 식 (9)에 나타내었다. 각 조건에 대하여 제외된 배합은 Table 9와 같다.

$$D_0 = (1 - 1.32SG + 1.47FA) \times 10^{(-11.38 + 1.42 \cdot w/b)} \quad (9)$$

(Adjusted $R^2=0.63$)

Table 8에서 각 조건별로는 Life-365 모형의 기준재령 확산계수 이상의 수정결정계수를 가지지만 모든 배합을 사용하여 최종적으로 얻은 회귀모형의 수정결정계수가 63.42%로 비교적 낮다. 회귀모형의 설명력을 높이기 위하여 s와 t를 변경하면서 회귀분석을 수행하여 $s=0.5$, $t=0.3$ 인 경우 식 (10)과 같이 수정결정계수 70.04%를 얻을 수 있었다. 최종 회귀모형인 식 (10)의 F검정통계량은 86.7로서 기준값 $F(3,107;0.05)=2.689$ 보다 크므로 유의한 모형이다.

$$D_0 = (1 - 0.86SG^{0.5} + 0.39FA^{0.3}) \times 10^{(-11.28 + 1.19 \cdot w/b)} \quad (10)$$

(Adjusted $R^2=0.70$)

Table 7 Preliminary regression analysis with the linear effect of mineral admixture substitution on diffusion coefficient at reference time ($s=t=1$)

Scope		Coefficient of regression				Adjusted R^2 (%)
Sand	Super-plasticizer	α	β	γ	δ	
S1	SP1	-12.6481	5.0343	1.4863	-3.1083	60.19
S2	SP1	-13.2224	6.4704	1.4052	-2.9340	52.14
S2	SP2	-11.9184	2.7513	1.3520	-0.7912	81.23
S1,S2	SP1,SP2	-11.6093	2.0045	1.3471	-1.2944	48.82

Fig. 4는 식 (8), (9) 및 (10)에 대하여 실험값과 예측값을 40% 오차범위에서 도시한 것으로, 최종 회귀모형 식 (10)이 확산계수를 가장 적절히 예측하고 있다. Fig. 5는 회귀모형 식 (10)에서의 혼화제 영향계수를 나타낸 것이다. 슬래그 치환율 38%와 플라이애쉬 치환율 15%에 해당하는 영향계수는 약 0.47과 1.22로서, 슬래그 치환에 의한 기준재령 확산계수 감소 효과가 더 크다. 따라서 슬래그와 플라이애쉬의 치환율을 적절히 조합하면 기준재령 확산계수의 증가 없이 목표 슬럼프나 응결시간 조절이 용이할 것으로 생각된다.

4.3 개발된 기준재령 확산계수 모델 평가

4.3.1 기존 실험 결과와 비교

해양 구조물 적용을 목적으로 한 고성능 배합에 대한 문헌의 확산계수 실험 결과를 이 연구에서 개발된 확산계수 모델 식 (10)의 예측값과 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 이 연구의 확산계수 모델이 기존의 결과를 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다.

4.3.2 Life-365 모델과 비교

Life-365 확산계수 모델은 NT BUILD 443¹⁵⁾ 방법에 의해 측정된 확산계수를 사용하여 만들어졌다. 유럽의 CHLORTEST 프로젝트에서는 NT BUILD 443 방법과 NT BUILD 492 방법의 상관관계를 식 (11)과 같이 제시한 바 있다.¹⁶⁾

$$D_{492} = 1.16D_{443} + 0.32 \times 10^{-12} \quad (R^2=0.96) \quad (11)$$

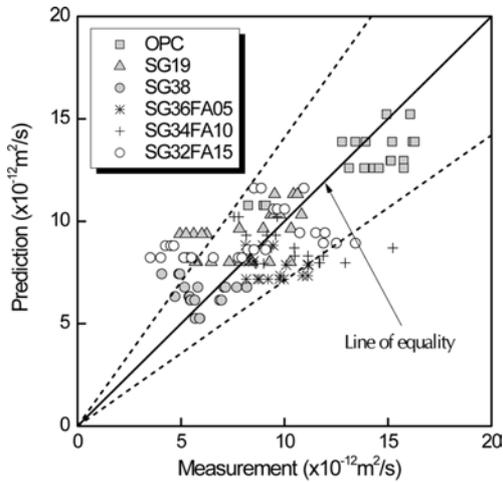
Table 8 Regression analysis with the linear effect of mineral admixture substitution on diffusion coefficient at reference time with the exception of out-of-trend results from diffusion coefficient tests ($s=t=1$)

Scope		Coefficient of regression				Adjusted R^2 (%)
Sand	Super-plasticizer	α	β	γ	δ	
S1	SP1	-12.3640	4.2983	1.4356	-2.3655	71.93
S2	SP1	-11.9463	3.0397	1.4849	-2.9592	82.68
S2	SP2	-11.9205	2.7413	1.1541	-0.4083	85.78
S1,S2	SP1,SP2	-11.3835	1.4152	1.3237	-1.4718	63.42

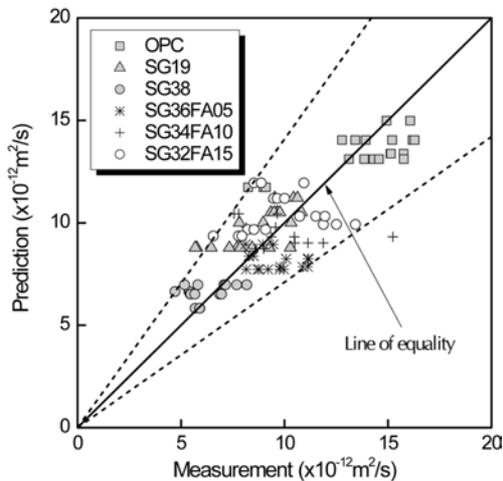
Table 9 Mix conditions showing out-of-trend experimental results

Sand	Superplasticizer	Mix conditions
S1	SP1	SG19(200 ⁽¹⁾)
S2	SP1	SG19(200), SG34FA10(200) SG32FA15(200), SG32FA15(600)
S2	SP2	SG38(150), SG32FA15(600)

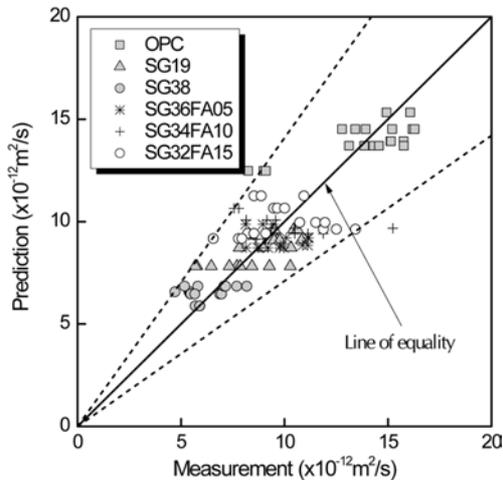
⁽¹⁾Slump or slump flow in mm



(a) Prediction from Eq. (7)



(b) Prediction from Eq. (8)



(c) Prediction from Eq. (9)

Fig. 4 Measured and predicted diffusion coefficients

여기서,

D_{492} : NT BUILD 492에 의한 확산계수(m^2/s)

D_{443} : NT BUILD 443에 의한 확산계수(m^2/s)

Life-365의 재령계수는 식 (4)에 나타낸 것과 같이 혼화재 치환율에 따라 0.2에서 0.6의 범위를 가지는데 보통 25년 정도의 장기재령에서는 확산계수가 일정해지는 것으로 가정한다. Life-365 모델의 기준재령 확산계수를 식

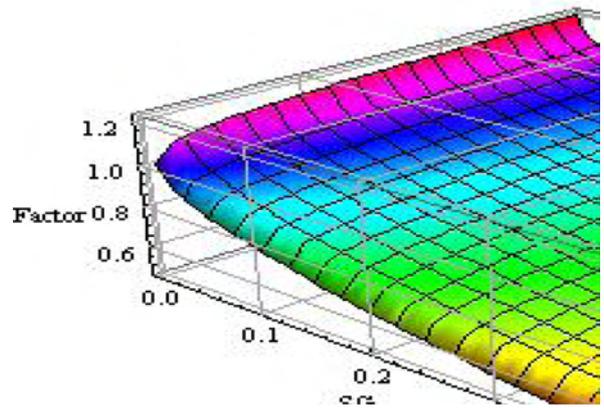


Fig. 5 The effect of mineral admixtures on diffusion coefficient at reference time

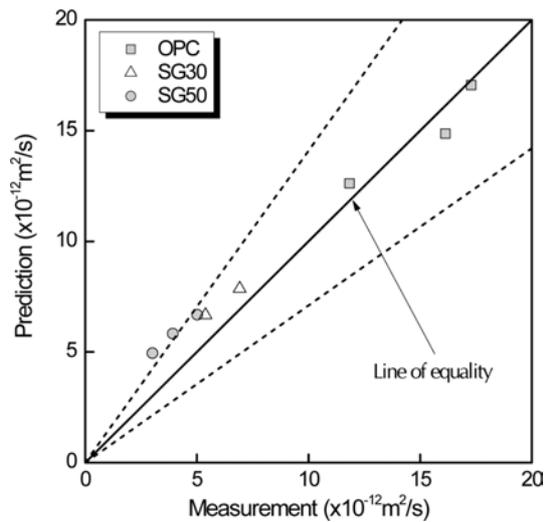


Fig. 6 Experiment data from literature¹⁰⁾ and predicted values

(11)에 따라 NT BUILD 492 방법의 확산계수로 변환한 후 재령계수의 상한과 하한에 대하여 시간에 따른 확산계수의 변화를 Fig. 7에 나타내었고, 이 연구에서 개발된 식 (10)에 의한 기준재령 확산계수를 함께 도시하였다. 개발된 기준재령 확산계수 모델은 고 내구수명을 요구하는 해상교량 콘크리트의 전 생애에 걸친 확산계수를 모델링하기에 적절한 범위인 것으로 판단된다.

4.3.3 추가 실험 결과와 비교

주탑 시공단계에서 기준재령 확산계수를 확인하기 위하여 슬래그 시멘트, 즉 SG38에 대한 시험체 36개를 제작하여 기준재령 확산계수를 측정하였다. 실험값의 평균은 $5.44 \times 10^{-12} m^2/s$ 이며 모델 예측값 $6.50 \times 10^{-12} m^2/s$ 의 84% 수준이다. Fig. 8에서 대부분의 측정값은 확산계수 모델 식 (10)에 의한 예측값보다 작은 범위에 존재하는데, 이는 모델 개발을 위한 배합보다 실제 주탑에 사용된 콘크리트의 품질관리가 더 잘 된 것이기 때문으로 생각된다. 개발된 기준재령 확산계수 모델은 시공단계 배합보다 확산계수를 안전측으로 예측하고 있으므로 향후 유사한 배합의 해양환경 콘크리트 구조물의 내구성 설계 단

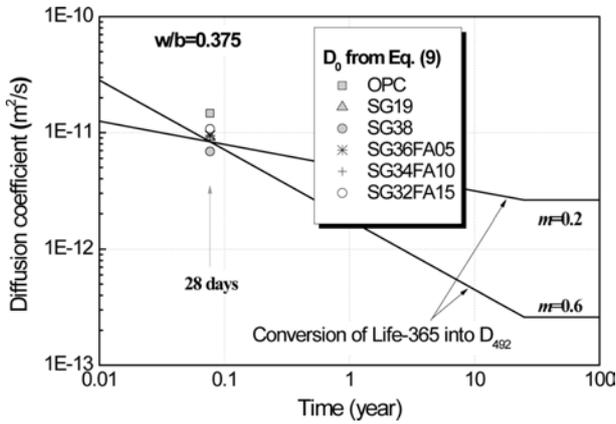


Fig. 7 Diffusion coefficients for various mixes from the developed model and the diffusion coefficient over time from the conversion of Life-365 model into D_{492}

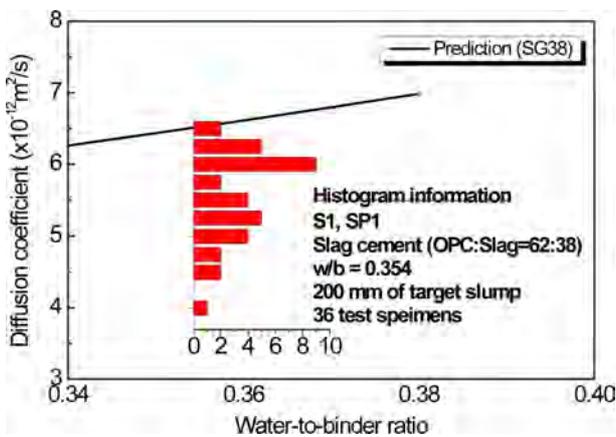


Fig. 8 Predicted diffusion coefficient from the developed model and experimental distribution from additional tests

계에서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

확산계수는 골재 및 화학혼화제 등 다양한 인자에 의해 영향을 받는다. 실제 현장에서는 이러한 인자들은 다소 변동이 가능하므로 이 연구에서는 이상의 인자들을 모두 포함하기보다는 확산계수에 영향을 미치는 주요 인자로 물-결합재비, 슬래그와 플라이애쉬 치환율을 선정하여 기준재령 확산계수 모델을 개발하였다. 또한 이 연구는 기준재령 확산계수 모델에 대한 연구로서, 최종적으로 다양한 재령에 대한 확산계수 예측 모델을 개발을 위하여 여러 재령에서의 염소이온 측정시험을 진행 중에 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 물-결합재비가 비교적 낮은 해상교량용 고성능 콘크리트에 대한 기준재령에서의 염소이온 확산계수 모델을 제시하였다. 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 결합재 종류, 물-결합재비, 혼화제 치환율, 골재 종류, 화학혼화제 종류, 목표 슬럼프 또는 슬럼프 플로우 등 다양한 인자를 고려하여 해상교량에 적용

가능한 여러 배합을 선정하고, 각 배합에 대하여 기준재령 확산계수 측정시험을 수행하였다. 측정 결과로부터 확산계수는 골재 종류와 화학혼화제의 영향을 받으며, 특히 물-결합재비, 혼화제 종류와 그 치환율에 따라 큰 차이를 보이고 있음을 확인하였다.

- 2) 기준재령 확산계수는 슬래그 치환율이 증가할수록 감소하였으며 플라이애쉬에 대해서는 반대의 경향을 보였다. 장기재령에서의 추가반응을 일으키는 플라이애쉬가 기준재령 확산계수 측정시점에서는 아직 충분한 반응을 하지 않았기 때문인 것으로 보인다. 장기재령에서 플라이애쉬의 영향은 추가연구에서 재령효과에 반영할 예정이다.
- 3) 실험 결과를 바탕으로 물-결합재비, 혼화제 종류 및 치환율을 변수로 하는 회귀분석을 실시하여 해상교량용 고성능 콘크리트 배합에 대한 기준재령 확산계수 모델을 제시하였다.
- 4) 개발된 모델에 의하면 슬래그 치환에 의한 기준재령 확산계수 감소가 플라이애쉬 치환에 의한 확산계수 증가보다 더 크므로, 슬래그와 플라이애쉬의 적절한 조합으로 기준재령 확산계수의 증가 없이 목표 슬럼프나 응결시간 조절이 가능하다.
- 5) 시공단계의 콘크리트 배합에 대한 시험결과에 의하면 이 연구에서 개발된 모델이 기준재령 확산계수를 안전측으로 예측하고 있으므로, 향후 염소이온 침투에 의한 내구수명 예측에 응용될 수 있을 것이다.

최근 해상교량과 같이 해양환경에 건설되는 대형 구조물에 대하여 염소이온 침투에 의한 철근부식이 중요한 설계항목으로 대두되고 있다. 따라서 염소이온 침투에 대한 내구성 설계를 위해 환경조건과 재료특성에 대한 정량적인 자료를 축적하기 위한 많은 노력이 필요하다. 강도와 내구성 확보를 위해 해상교량용 콘크리트에는 슬래그 및 플라이애쉬와 같은 혼화제가 자주 사용되므로, 이 연구에서는 먼저 기준재령 확산계수에 대한 혼화제의 영향 중심으로 실험자료를 분석하고 모델을 개발하였다. 추가 연구에서는 계속된 실험수행 결과를 바탕으로 장기재령 확산계수 특성을 분석하고자 한다. 이 연구에서 개발된 기준재령 확산계수 모델이 해상교량 콘크리트의 염소이온 침투에 대한 내구성 설계에 유용하게 사용될 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2010년 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M., *Concrete, Microstructure, Properties, and Materials*, McGraw Hill, New York, 2006, pp. 176~183.
2. Neville, A. M., *Properties of Concrete*, Prentice Hall, Essex, England, 1995, pp. 482~536.

3. 김기현, 차수원, 장승엽, 장승필, “환경조건을 고려한 염소이온 침투해석 프로그램 개발,” 대한토목학회 논문집, 28권, 5A호, 2008, pp. 709~718.
4. 구현본, 김의태, 이광명, “철근콘크리트구조물의 염소이온 침투 모델,” 콘크리트학회 논문집, 15권, 6호, 2003, pp. 25~34.
5. Thomas, M. D. A. and Bamforth, P. B., “Modeling Chloride Diffusion in Concrete - Effect of Fly Ash and Slag,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 4, 1999, pp. 487~495.
6. 김기현, 차수원, “신뢰성 이론에 기반한 해양환경 콘크리트의 내구수명 평가,” 콘크리트학회 논문집, 22권, 4호, 2010, pp. 595~603.
7. 김지상, 정상화, 김주형, 이광명, 배수호, “염해를 받는 콘크리트 구조물의 확률론적 내구성 해석,” 콘크리트학회 논문집, 18권, 2호, 2006, pp. 239~248.
8. 배수호, 이광명, 김지상, 정상화, “콘크리트의 염소이온 확산특성에 미치는 물-시멘트비 및 양생조건의 영향,” 대한토목학회 논문집, 26권, 4A호, 2006, pp. 753~759.
9. 문한영, 김홍삼, 최두선, “콘크리트 종류별 모세관공극 특성과 전위차 염소이온 확산계수,” 대한토목학회 논문집, 23권, 5A호, 2003, pp. 969~976.
10. 배수호, 박재임, 이광명, 최성, “광물질 혼화재가 콘크리트 염소이온의 확산계수에 미치는 영향,” 대한토목학회 논문집, 29권, 4A호, 2009, pp. 347~353.
11. 김기현, 차수원, “염소이온 노출개시시기를 고려한 기존 확산계수 모델 수정제안,” 콘크리트학회 논문집, 21권, 3호, pp. 377~386.
12. Nordtest Method, NT BUILD 492, Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments, UDC 691.32/691.53/691.54, Approved 1999-11, pp. 1~8.
13. Bentz, E. C. and Thomas, M. D. A., Life-365 Service Life Prediction Model and Computer Programme for Predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides, 2008, 67 pp.
14. 일본콘크리트공학협회, 내구성설계지침(안), 일본콘크리트공학협회, 1991, 76 pp.
15. Nordtest Method, NT BUILD 443, Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration, UDC 622.43, Approved 1995-11, pp. 1~5.
16. Rob B. Polder, Gert van der Wegen, and Michel Boutz, “Performance Based Guideline for Service Life Design of Concrete for Civil Engineering Structures - A Proposal Discussed in the Netherlands,” *International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability*, Madrid, Spain, 2006, 10 pp.

요 약 기준재령 염소이온 확산계수를 측정하기 위하여 고성능 콘크리트 배합을 선정하고 공시체를 제작하였다. 배합은 해양환경에 건설되는 교량에 적합하도록 선정되었으며 배합설계 변수는 결합재 종류, 물-결합재비, 광물질 혼화재 치환율, 잔골재 종류, 고강도 및 고유동성을 얻기 위한 화학 혼화재 종류, 목표 슬럼프 또는 슬럼프 플로우이다. 시험 결과로부터 기준재령 염소이온 확산계수는 결합재 종류와 그 치환율에 따라 크게 차이를 확인하고, 결합재 종류와 치환율을 고려한 기준재령 확산계수 모델을 개발하였다. 개발된 모델의 확산계수를 기존 모델의 확산계수 및 추가 확산계수 측정시험 결과 비교하여 개발된 모델의 타당성을 확인하였다.

핵심어 : 고성능 콘크리트, 기준재령 염소이온 확산계수, 광물질 혼화재