

남해안 해상 콘크리트 교량의 표면염화물이온농도 및 내구성 평가

정대진* · 최익창**†

* 목포해양대학교 대학원, ** 목포해양대학교 해양·플랜트건설공학과

The Estimation of Surface Chloride Content and Durability of the Marine Concrete Bridges in South Coast

Dae-Jin Jung* · Ik-Chang Choi**†

* Graduate School of Mokpo National Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

** Department of Ocean · Plant Construction Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

요약 : 본 연구에서는 남해안에 건설된 사용기간이 5~34년의 해상 콘크리트 교량의 염화물이온농도에 대한 실측데이터로부터 표면 염화물이온농도를 추정하고, 기존에 제시된 시방서와 타 연구결과에서 제시한 값들의 타당성을 평가하였다. 그리고 해상 콘크리트 교량의 염해방지도장의 유무, 염화물이온농도, 탄산화 깊이 및 콘크리트 압축강도의 상관관계를 도출하여 상호 작용을 평가하였다. 연구 결과에 의하면, 표면염화물이온농도는 간만대에서 KCI 2009, 물보라지역과 해상대기중에서 Cheong et al.(2005)의 제안한 값이 타당한 것으로 판단된다. 또한, 해상 콘크리트 교량의 염해방지도장은 염화물이온의 침투, 탄산화 깊이 및 압축강도 저하 대한 방지효과가 있음을 알 수 있었다. 콘크리트의 압축 강도는 탄산화 깊이와 염화물이온농도의 증가에 따라 감소하였다.

핵심용어 : 해상 콘크리트 교량, 표면염화물이온농도, 염화물이온 침투해석, 해수접촉부위, 콘크리트 탄산화

Abstract : In this study, chloride content of marine concrete bridge at the south coast in 5~34years was calculated based on the measured data and the validity of the proposed value was evaluated. Also, correlation of existence of salt injury prevention coating, chloride content, carbonation depth and the compressive strength of marine concrete bridges were derived and relationship of the four was evaluated. According to the research results, surface chloride content value in the tidal zone proposed form KCI 2009 and value in the splash zone and atmospheric zone proposed form Cheong et al.(2005) was the most valid. Also, salt injury prevention coating of marine concrete bridges had the outstanding effect of preventing chloride content penetration, carbonation depth and reduction in the compressive strength. Compressive strength of concrete was reduced by the increase of carbonation depth and chloride content.

Key Words : Marine concrete bridges, Surface chloride content, Penetration simulation of chloride content, Contacted region of seawater, Carbonated concrete

1. 서론

최근 들어 해상 콘크리트 교량 등 많은 국가기반시설이 해양환경에서 건설됨에 따라 콘크리트 구조물의 구조적 성능뿐만 아니라 장기적인 내구성에 대한 관심이 증가하고 있다(Choi and Choi, 2009).

콘크리트는 경제적이며 내구성이 우수한 건설재료이지만, 열악한 환경에 노출된 콘크리트 구조물은 사용기간의 증가

에 따라서 내구성 저하를 보이게 된다. 특히 염해가 지배적인 환경에서는 염화물이온의 침투에 따라 철근의 부식이 발생하여 구조물의 내력에 직접적인 영향을 미치므로 이에 대한 대처가 필요하다(Kwon et al., 2007).

염화물이온의 침투 등과 같이 해양 콘크리트 구조물의 장기내구성의 열화는 장시간에 걸쳐 이루어지기 때문에 수십 년간의 장기 폭로 실험을 실시하여 평가하는 것이 가장 좋은 방법이나 실험에는 많은 시간과 노력이 필요하다.

이와 같은 실험의 어려움 때문에 국내에서 해양환경하의 콘크리트 구조물의 장기내구성에 대한 연구 보고는 실험실에서의 촉진 실험과 수치해석에 의한 염화물이온의 침투해

* First Author : jdj2689@mmu.ac.kr, 061-240-7340

† Corresponding Author : choi@mmu.ac.kr, 061-240-7309

석이 대부분이며(Song et al., 2007; Choi and Choi, 2009; Kwon et al., 2007), 실제 건설되어 장기간 사용되고 있는 해양 콘크리트 구조물의 장기내구성에 대한 평가를 실시한 연구 보고는 거의 없는 실정이다(Lee, 2006).

해양환경하의 콘크리트 구조물은 내구성 설계 및 유지관리시 염해에 의한 열화를 예측하여 목표수명 및 잔존수명을 추정한다. 이 때 염화물이온의 공급정도를 나타내는 표면염화물이온농도는 매우 중요한 요소이다.

콘크리트표준시방서(2003)는 일본토목학회 콘크리트표준시방서(1999)를 인용하여 해수접촉부위별로 표면염화물이온농도가 제시되었다. 그러나 우리나라의 서해안과 남해안은 조수간만의 차가 매우 큰 특징이 있어 일본토목학회 콘크리트 표준시방서(1999)의 표면염화물이온농도를 그대로 적용하기에는 문제점이 있었다. 최근에 이러한 문제점을 보완하여 간만대, 물보라지역, 해상대기중으로 구분하여 표면염화물이온농도를 제시하고 있다.

Cheong et al.(2005)은 서남해안 고속도로교량에서 간만대, 물보라지역, 해상대기중의 표면염화물의 평균값으로 제안하였다. 그러나 우리나라에서 측정된 표면염화물이온농도의 분포에 관한 자료가 거의 없기 때문에 적절한 표면염화물이온농도의 평균값과 표준편차를 규정하기가 매우 어려운 상황이다(KCI-203, 2010).

따라서 본 연구에서는 남해안에 건설된 사용기간이 5~34년의 해상 콘크리트 교량의 염화물이온농도에 대한 실측데이터로부터 염화물이온농도를 추정하여 콘크리트 표준시방서(2009), 일본토목학회 콘크리트표준시방서(1999), Cheong et al.(2005)이 제시한 값들의 타당성을 평가한다.

또한, 해상 콘크리트 교량의 염해방지도장 유무에 따른 염화물이온농도, 탄산화 및 콘크리트 압축강도의 상관관계를 도출하여 상호 미치는 영향을 평가한다.

2. 콘크리트의 내구성 평가 방법

2.1 염화물이온의 확산예측

콘크리트중 염화물이온의 이동은 확산에 기초하므로 염화물이온의 확산예측에는 식(1)에 나타나있는 Fick의 제 2법칙으로서 알려져 있는 확산방정식을 이용한다.

식(2)는 식(1)을 환경조건에 상당한 표면에서 염화물이온농도를 고려하여 변환한 가장 일반적인 식이다(JSCE, 2001).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$C(x, t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 \sqrt{D \cdot t}} \right) \right\} \dots\dots\dots (2)$$

여기서, $C(x, t)$: 깊이 $x(\text{cm})$, 시각 $t(\text{year})$ 에서의 염화물이온농도(kg/m^3)
 C_0 : 표면에서의 염화물이온농도(kg/m^3)
 D : 염화물이온의 확산계수(cm^2/year)
 erf : 오차함수

식(2)에서 확산계수(D)는 일본 토목학회의 콘크리트 표준시방서[유지관리편]에서 식(3), 식(4)과 같이 제시하고 있다(JSCE, 2001).

- (a) 보통 포트랜드 시멘트를 사용하는 경우
 $\log D = [4.5(W/C)^2 + 0.14(W/C) - 8.47] + \log(3.15 \times 10^7)$

- (b) 고로슬래그 시멘트를 사용하는 경우
 $\log D = [19.5(W/C)^2 + 13.8(W/C) - 5.74] + \log(3.15 \times 10^7)$

여기서, D 는 염화물이온의 확산계수(cm^2/year)
 W/C : 물 - 시멘트비

식(2)에서 표면염화물이온농도(C_0)는 해양환경 및 해수접촉부위별로 구분하여 제시되었다.

2.2 해수접촉부위 구분

우리나라 해양환경 특성을 고려하여 서해안과 남해안의 해상 콘크리트 교량 해수접촉부위는 Fig. 1처럼 해수중, 간만대(평균간조위~평균만조위), 물보라지역(평균만조위~파고), 해상대기중 등 4가지 영역으로 구분하고 있다(KCI, 2009).

Table 1은 간만대와 물보라지역, 해상대기중의 염화물이온농도를 나타낸 것으로 일본토목학회 콘크리트표준시방서(JSCE 1999)에서는 간만대를 구분하지 않고 물보라지역으로 염화물이온농도를 $13.0 \text{ kg}/\text{m}^3$ 을 제시하였으며, Cheong et al.(2005)은 간만대와 물보라지역을 구분하여 간만대에서 $20.0 \text{ kg}/\text{m}^3$, 물보라지역에서 $5.0 \text{ kg}/\text{m}^3$ 을 제시하였고, 콘크리트 표준시방서(KCI 2009)는 간만대에서 $18.0 \text{ kg}/\text{m}^3$, 물보라지역에서 $7.5 \text{ kg}/\text{m}^3$ 을 제시하였다.

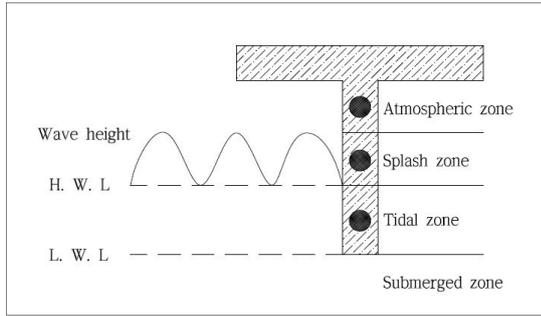


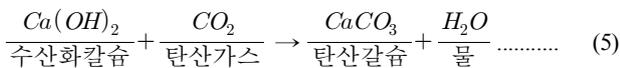
Fig. 1. Contacted region of seawater and measurement locations of chloride content.

Table 1. Surface chloride content(kg/m³)

Division	Splash zone		Atmospheric zone (coastline)
	Tidal zone	Splash zone	
JSCE 1999	13.0		9.0
Cheong et al.(2005)	20.0	5.0	2.5
KCI 2009	18.0	7.5	5

2.3 탄산화의 진행예측

시멘트의 수화반응에서 pH 12~13정도의 수산화칼슘이 생성된다. 수산화칼슘은 대기 중에 포함하고 있는 약 산성의 탄산가스와 접촉하여 식(5)와 같은 반응에 의하여 탄산칼슘과 물로 변한다.



위의 반응에서 탄산칼슘으로 변화한 부분의 pH가 8.5~10 정도로 낮아지는 것을 탄산화라고 한다.

탄산화 진행속도는 콘크리트 표면으로부터 탄산화부분과 비탄산화 부분의 경계면까지의 길이와 경과한 시간의 함수로 나타낸다. 탄산화 깊이와 경과년수의 관계는 일반적으로 식(6)과 같이 나타내며 상수 A는 실험에 의하여 구할 수 있다(Kim and Kim, 2010).

$$y = A\sqrt{t} \dots\dots\dots (6)$$

여기서, y : 탄산화 깊이(mm)
 A : 탄산화 속도계수
 t : 재령(year)

탄산화 속도계수 A는 기존 해상 콘크리트 교량의 사용년수에 따른 탄산화깊이와 선형회귀분석을 통하여 제시된 값 A = 5.1을 사용하였다(Lee et al., 2003).

3. 남해안 해상 콘크리트 교량의 염화물이온농도

3.1 본 연구 대상 콘크리트 교량

본 연구에서는 남해안에 위치한 사용기간이 5~34년 된 총 8개의 해상 콘크리트 교량을 대상으로 하였다.

Table 2에 나타난 것처럼 염해방지도장(coating)여부에 따라 A그룹과 B그룹으로 구분하였다.

A그룹(GJ교, BS교, WD교), B그룹(NH교, SA교, JD교)은 염화물이온농도, 탄산화 깊이, 압축강도 등을 측정하였고 C그룹(GH교, SJ교)은 염화물이온농도만 측정하였다.

Table 2. Overview of the marine concrete bridges

Division	Group A			Group B (coating)			Group C	
	GJ	BS	WD	NH	SA	JD	GH	SJ
Bridge name	GJ	BS	WD	NH	SA	JD	GH	SJ
Used period (year)	34	24	15	34	16	5	10	10

Table 3은 해상 콘크리트 교량을 염해방지도장 유무에 따라 구분된 A그룹과 B그룹에 대한 염화물이온농도, 탄산화깊이 및 압축강도의 실측값과 계산값을 나타낸 것이다.

콘크리트 염화물이온농도 측정은 KS F 2713에 의해 수행하였으며 해상 콘크리트 교량의 각 부위에서 채취한 코어시편을 분쇄하여 시료를 만들어, 질산은 적정법을 이용하여 산가용성 염화물이온농도를 측정하였다.

콘크리트 탄산화는 채취된 코어에 페놀프탈레인 1% 알코올 용액을 분무하여 표면으로부터 적자색으로 변한 지점까지의 깊이를 측정된 값이다.

콘크리트 압축강도는 채취된 코어시편을 KS F 2405에 의해 시험한 값이다.

Table 3의 염화물이온농도의 실측값은 콘크리트 표면으로부터 깊이 0~20 mm 위치의 값이며, 계산값은 실측값의 평균깊이인 10 mm 위치에서의 염화물이온농도이며, 식(2)와 식(3)을 이용하여 산출한 값이다.

남해안 해상 콘크리트 교량의 표면염화물이온농도 및 내구성 평가

Table 3. Overview of the marine concrete bridges and test results of the durability

Division	Bridge name (year)	Site	Chloride content (kg/m^3)		Carbonation depth (cm)		Compressive strength (kg/cm^2)		
			C-V	M-V	C-V	M-V	D-S	M-V	
			Group A	GJ (34)	GJ-1	4.63	2.86	2.97	3
GJ-2	1.73	3			292				
GJ-3	6.94	3.34			3.2	247			
BS (24)	BS-1	16.40		10.34	2.50	40	180	259	
	BS-2	6.83		3.88		3.88		233	
	BS-3	4.56		2.21		30		227	
	BS-4	4.56		1.15		26		191	
WD (15)	WD-1	6.66		3.48	1.98	16	210	280	
	WD-2	4.44		1.86		12		255	
Group B (coating)	NH (34)	NH-1		6.94	0.31	2.97	1	240	355
		NH-2		4.63	0.10		1.1		342
	SA (16)	SA-1		6.68	0.22	2.04	1.17	240	349
		SA-2	4.46	0.15	1.24		326		
	JD (5)	JD-1	4.03	0.09	1.14	0.4	240	393	
		JD-2		0.09		0.2		458	

C-V : Calculated Value, M-V : Measured Value
D-S : Designed Strength, M-S : Measured Strength

3.2 해수접촉부위별 표면염화물이온농도

해양 콘크리트 구조물의 장기내구성 설계에서 표면염화물이온농도는 매우 중요한 요소이다. 그래서 본 절에서는 실측값을 이용하여 Table 1에서 제시된 해수접촉부위별 표면염화물농도의 타당성을 평가하고자 한다.

Table 4는 실험 대상 교량 중 염해방지도장을 실시하지 않은 A그룹과 C그룹에 대해 콘크리트 표면으로부터 깊이에 따른 염화물이온농도의 실측값을 나타낸 것이며, 콘크리트 표면으로부터 깊이 0~20 mm, 20~40 mm, 40~60 mm, 60~80 mm, 80~100 mm 위치의 염화물이온농도 값이다. 해수접촉부위는 간만대, 물보라지역 및 해상대기중 구분하여 나타내었다.

Table 4의 콘크리트 표면염화물이온농도는 콘크리트 표면으로부터 깊이 0~20 mm 위치에서의 실측한 염화물이온농도를 이용하여 산출한 것이다. 산출방법은 실측한 염화물이온농도를 식(2)와 식(3)에 적용하여 산출하였다.

Fig. 2~Fig. 4는 해상 콘크리트 교량의 사용기간에 따른 해수접촉부위별 표면염화물이온농도를 나타낸 것이다. 실선으로 나타낸 것은 Table 1의 JSCE 1999, Cheong et al.(2005) 및 KCI 2009에서 제시한 표면염화물이온농도를 나타낸 것이며, 점으로 나타낸 것은 Table 4에 나타난 실측값으로부터 산출한 표면염화물농도를 나타낸 것이다.

Table 4. Chloride content on contacted region of seawater

Division	Bridge name (year)	Concrete depth(mm) on chloride content(kg/m^3)					
		Surface	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
Tidal zone	BS(24)	(11.2)	10.34	9.24	8.84	5.85	
	GH(10)	(18.1)	15.66	6.19	3.28	1.37	0.76
		(18.1)	15.62	7.30	3.47	2.50	1.64
	SJ(10)	(8)	6.88	4.46	2.14	1.30	0.88
(8.5)		7.29	5.44	2.30	1.61	1.22	
Splash zone	GJ(34)	(3.6)	3.34	2.77	2.30		
	BS(24)	(4.3)	3.88	2.49	2.21	1.30	
	WD(15)	(4)	3.48	3.01	2.04	1.76	1.48
	GH(10)	(1.6)	1.35	0.60	0.34	0.41	0.33
		(1.6)	1.35	2.75	1.34	0.72	0.44
	SJ(10)	(1.4)	1.21	0.63	0.33	0.25	0.27
(1.7)		1.45	1.50	0.64	0.36	0.30	
Atmospheric zone	GJ(34)	(3.1)	2.86	2.23	2.00		
		(1.9)	1.73	1.28	0.75		
	BS(24)	(2.5)	2.21	1.55	1.51	1.00	0.81
		(1.3)	1.15	1.03	0.86	0.83	0.61
	WD(15)	(2)	1.86	1.08	0.61	0.35	0.24
	GH(10)	(0.5)	0.39	0.49	0.41	0.44	0.41
		(0.5)	0.41	0.28	0.28	0.28	0.31
	SJ(10)	(0.5)	0.39	0.34	0.07	0.07	0.20
		(0.7)	0.60	0.65	0.59	0.57	0.70

Fig. 2는 간만대에서의 표면염화물이온농도를 나타낸 것이며, 실측값으로부터 산출한 표면염화물농도의 최대값은 사용기간이 10년 된 교량에서 $18.1 kg/m^3$ 이고, 나머지는 $11.2 kg/m^3$ 이하 값을 보였다. 이때의 표면염화물이온농도는 안전측을 고려한 최대값을 기준으로 한다면 KCI 2009가 제시된 값이 적합한 것으로 판단된다. 또한 사용기간에 따른 간만대에서의 염화물이온농도는 특별한 연관관계를 보이지는 않았다.

Fig. 3는 물보라지역에서의 표면염화물이온농도를 나타낸 것이며, 실측값으로부터 산출한 표면염화물농도의 최대값은 $4.3 kg/m^3$ 으로 나타내고 있다. 이때의 표면염화물이온농도는 안전측을 고려한 최대값을 기준으로 한다면 Cheong et al.(2005)이 제안한 값이 적합한 것으로 판단된다. 또한 사용기간에 따른 물보라지역에서의 염화물이온농도는 약간 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 4는 해상대기중에서의 표면염화물이온농도를 나타낸 것이며, 실측값으로부터 산출한 표면염화물농도의 최대값은 $3.1 kg/m^3$ 으로 나타내고 있다. 이때의 표면염화물이온농도는 안전측을 고려한 최대값을 기준으로 한다면 Cheong et

al.(2005)이 제안한 값이 적합한 것으로 판단된다. 또한 사용기간에 따른 물보라지역에서의 염화물이온농도는 약간 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 3과 Fig. 4에서 사용기간에 따라 표면염화물이온농도가 증가하는 것은 실측값이 콘크리트 표면으로부터 깊이 0~20 mm 위치에서 측정값을 이용하여 산출한 것이기 때문으로 판단된다.

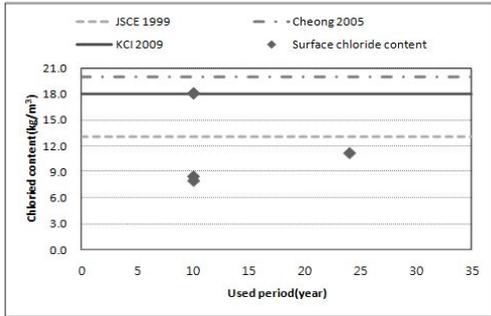


Fig. 2. Surface chloride content of tidal zone on used period.

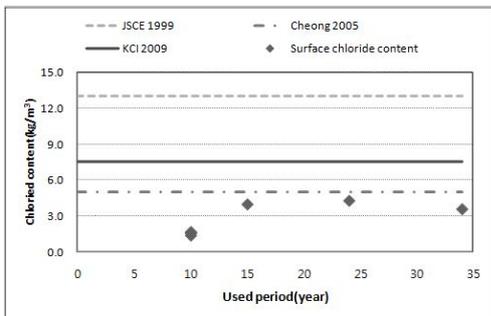


Fig. 3. Surface chloride content of splash zone on used period.

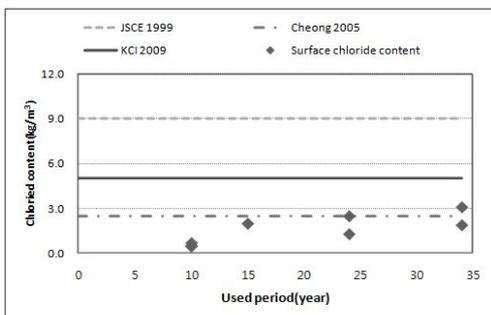


Fig. 4. Surface chloride content of atmospheric zone on used period.

3.3 콘크리트의 깊이에 따른 염화물이온농도

Table 1에서 제시된 해수접촉부위별로 사용기간에 따른 염화물이온 침투해석을 실시하여 실측값과 비교·분석 하였다.

Fig. 5는 사용기간이 10년 된 교량(GH교, SJ교)와 24년 된 교량(BS교)의 간만대에서 콘크리트 깊이별 염화물이온농도를 나타내고 있다.

Fig. 5에 나타난 것처럼, 콘크리트 표면으로부터 깊이 60~80 mm 위치의 염화물이온농도는 $1.30 \sim 5.85 \text{ kg/m}^3$ 이다. 철근 부식의 임계 염화물이온농도가 1.2 kg/m^3 을 고려하면, 깊이 60~80 mm에 배근된 철근은 부식이 발생했음을 알 수 있다.

Fig. 6-Fig. 11은 콘크리트 표면으로부터 깊이에 따른 염화물이온농도를 나타낸 것이다. 실선으로 나타낸 것은 Table 1에 제시된 값을 이용한 염화물이온의 침투해석 결과이며, 점으로 나타낸 것은 실측값이다.

Fig. 6는 사용기간이 10년 된 해상 콘크리트 교량의 간만대에서 콘크리트 깊이에 따른 염화물이온농도의 침투해석 결과와 실측값을 나타낸 것이다.

Fig. 6에 나타난 것처럼, 콘크리트 깊이 10 mm에서 실측한 염화물이온농도 중 큰 값은 15.62 kg/m^3 와 15.66 kg/m^3 으로 KCI 2009와 밀접한 값을 보이고 있으나, 나머지 실측값은 JSCE 1999이하의 값을 보이고 있다.

Fig. 7는 사용기간이 24년 된 해상 콘크리트 교량의 간만대에서 콘크리트 깊이에 따른 염화물이온농도의 침투해석 결과와 실측값을 나타낸 것이다. 깊이별 염화물이온농도의 실측값은 JSCE 1999 유사한 값을 보이고 있다.

Fig. 8는 사용기간이 10년 된 해상 콘크리트 교량의 물보라지역에서 콘크리트 깊이에 따른 염화물이온농도의 침투해석 결과와 실측값을 나타낸 것이다.

Fig. 9는 사용기간이 24년 된 해상 콘크리트 교량의 물보라지역에서 콘크리트 깊이에 따른 염화물이온농도의 침투해석 결과와 실측값을 나타낸 것이다.

Fig. 8과 Fig. 9에 나타난 것처럼, 물보라지역에서는 사용기간이 10년과 24년에 대한 해상 콘크리트 교량은 깊이별 염화물이온농도의 실측값은 Cheong et al.(2005)의 제안값이 가장 타당성 있는 것으로 판단된다.

Fig. 10는 사용기간이 10년 된 해상 콘크리트 교량의 해상 대기중에서 콘크리트 깊이에 따른 염화물이온농도의 침투해석 결과와 실측값을 나타낸 것이다.

Fig. 11는 사용기간이 24년 된 해상 콘크리트 교량의 해상 대기중에서 콘크리트 깊이에 따른 염화물이온농도의 침투해석 결과와 실측값을 나타낸 것이다.

Fig. 10과 Fig. 11에 나타난 것처럼, 해상대기중에서는 사용기간이 10년과 24년에 대한 해상 콘크리트 교량은 깊이별 염화물이온농도의 실측값은 안전측을 고려하면 KCI 2009값이 가장 타당성 있는 것으로 판단된다.

남해안 해상 콘크리트 교량의 표면염화물이온농도 및 내구성 평가

Fig. 5 ~ Fig. 11에서 나타난 결과처럼, 실측값이 Table 1에 제시된 표면염화물이온농도를 이용한 염화물이온 침투 해석 결과와 해수접촉부위별 다른 결과를 보인다. 즉, 간만대에서는 KCI 2009, 물보라지역과 해상대기중에서는 Cheong이 제시한 값이 타당한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 남해안 해상 콘크리트 교량의 21개소의 실측값을 이용하여 해석결과와 비교한 것으로 앞으로 많은 연구를 통하여 우리나라 해양환경조건에 맞는 콘크리트 염해에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

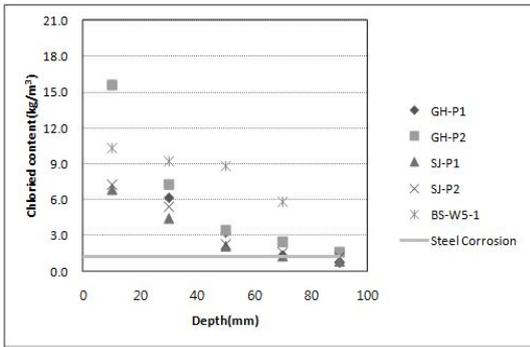


Fig. 5. Steel corrosion on chloride content of tidal zone.

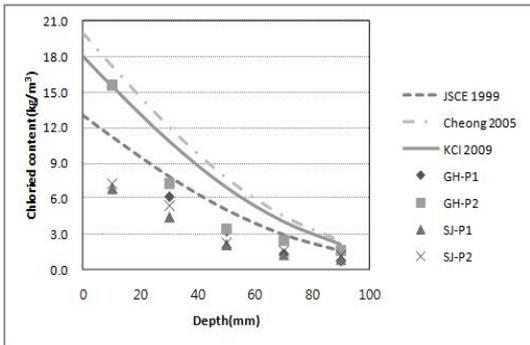


Fig. 6. Chloride content of tidal zone on depth(10 year).

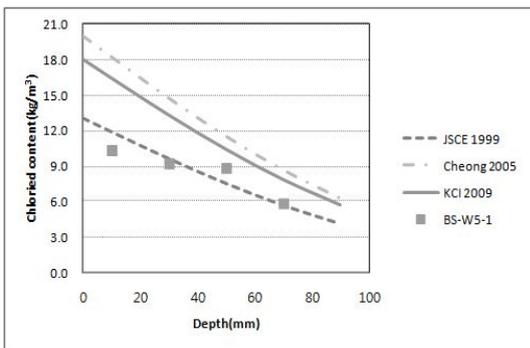


Fig. 7. Chloride content of tidal zone on depth(24 year).

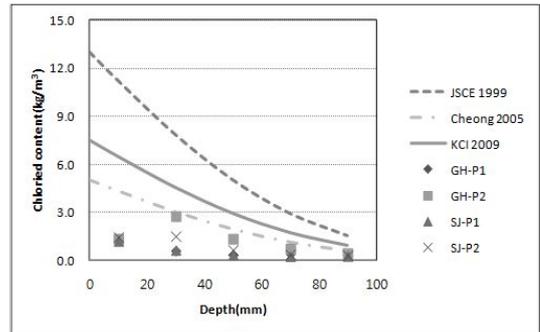


Fig. 8. Chloride content of splash zone on depth(10 year).

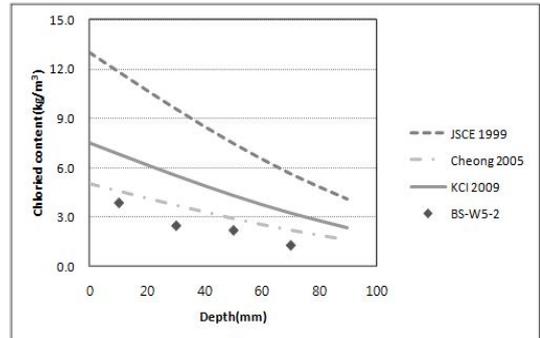


Fig. 9. Chloride content of splash zone on depth(24 year).

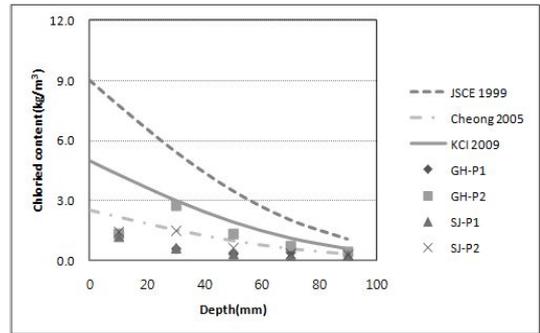


Fig. 10. Chloride content of atmospheric zone on depth(10 year).

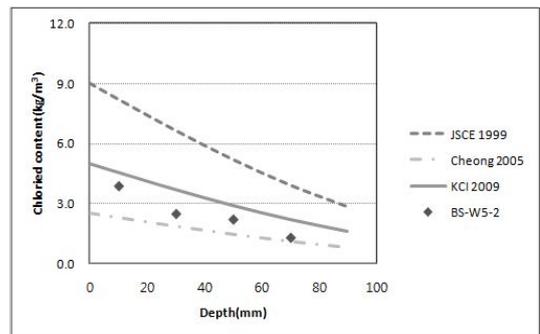


Fig. 11. Chloride content of atmospheric zone on depth(24 year).

4. 해양 콘크리트의 내구성 평가

4.1 콘크리트 염화물이온농도

Fig. 12은 콘크리트 표면으로부터 깊이 10 mm 위치의 염화물이온농도의 실측값과 계산값을 나타낸 것이다.

Fig. 12에 나타낸 것처럼, 염해방지도장 유무에 따라 염화물이온농도의 실측값은 매우 큰 차이를 보이고 있다. A그룹은 $1.15 \sim 10.34 \text{ kg/m}^3$, B그룹은 $0.09 \sim 0.31 \text{ kg/m}^3$ 로 나타내고 있으며, 염해방지도장을 실시한 교량의 염화물이온농도가 1/10정도로 낮게 측정 되었다.

이것은 콘크리트 표면에 염해방지도장을 실시하는 것이 염화물이온 침투억제에 효과적인 방법임을 알 수 있다.

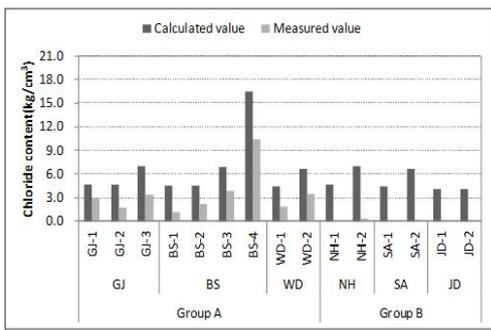


Fig. 12. Chloride content of concrete.

4.2 콘크리트의 탄산화

Fig. 13는 염해방지도장 유무가 탄산화 깊이에 미치는 영향을 알아보기 위해 A그룹(GJ교, BS교, WD교)과 B그룹(NH교, SA교, JD교)에 대해 콘크리트 표면으로부터 탄산화 깊이의 실측값과 계산값을 나타낸 것이며, 계산값은 식 (6)에 의하여 산출한 값이다.

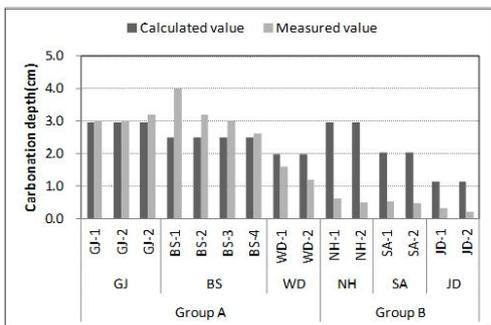


Fig. 13. Carbonation depth of concrete.

Fig. 13에 나타낸 것처럼, 염해방지도장을 실시한 B그룹(NH교, SA교, JD교)의 실측값은 계산값에 비해 17~29%를 나

타내고, 염해방지도장을 실시하지 않은 A그룹(GJ교, BS교, WD교)의 실측값은 계산값의 61~160%로 나타났다.

특히, BS교의 탄산화 깊이는 계산값의 104~160% 정도로 높게 나타났다. 이것은 BS교가 대도시에 위치하고 있어 자동차의 배기가스(CO2)등의 영향으로 탄산화 깊이가 깊은 것으로 판단된다.

4.3 콘크리트의 염화물이온농도, 탄산화 깊이 및 압축강도의 상관관계

Fig. 14은 염화물이온농도, 탄산화 깊이 및 압축강도를 나타낸 것이며, 각 교량의 설계강도가 다르기 때문에 설계강도 대비 압축강도를 백분율(%)로 나타냈다.

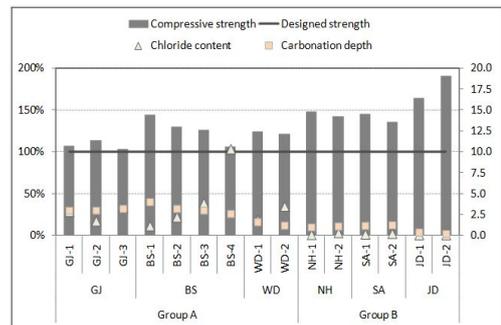


Fig. 14. Compressive strength of concrete.

Fig. 14의 우측 축은 염화물이온농도와 탄산화 깊이를 나타낸 것이며, 좌측 축은 압축강도의 백분율을 나타낸 것이다. 막대는 설계강도 대비 압축강도, 점들은 염화물이온농도와 탄산화 깊이를 나타낸 것이다.

Fig. 14에 나타낸 것처럼, B그룹이 A그룹에 비해 압축강도가 설계강도 대비 큰 값을 보이고 있으며, 설계강도의 136~191% 강도 증진을 나타내고 있다. 이것은 염해방지도장이 염화물이온의 침투와 탄산화를 억제하여 사용기간에 관계없이 높은 압축강도를 나타내고 있는 것으로 판단된다. 그러나, 염해방지도장을 실시하지 않은 A그룹 압축강도는 설계강도 대비 낮은 강도증진을 나타내고 있다.

특히, BS교에서 압축강도는 설계강도의 144%까지 증진되었는데, 이것은 교량이 대도시지역에 위치하여 탄산화가 선행되면서 발생하는 콘크리트 밀실화가 염화물이온의 침투를 억제하고, 압축강도증진에 영향을 미친 것으로 판단된다.

Fig. 14을 통해서 염화물이온농도와 탄산화 깊이에 의해 압축강도가 상대적으로 저하됨을 알 수 있다. 이것은 염화물이온의 침투와 탄산화가 콘크리트 조직을 와해시켜 압축강도를 저하시킨 것으로 판단된다.

이를 종합하면, 염해방지도장을 실시한 해상 콘크리트 교

량은 염화물이온농도, 탄산화 깊이 및 압축강도 부분에서 염해방지도장을 하지 않은 교량에 비해 내구성이 우수하며 염화물이온의 침투와 탄산화가 압축강도를 저하시킴을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 남해안에 건설된 사용기간이 5~34년의 해상 콘크리트 교량의 염화물이온농도에 대한 실측데이터로부터 표면염화물이온농도를 추정하여 콘크리트 표준시방서(2009), 일본토목학회 콘크리트표준시방서(1999), Cheong et al.(2005)이 제시한 값들의 타당성을 평가하였다.

또한, 해상 콘크리트 교량의 염해방지도장 유무에 따른 염화물이온농도, 탄산화 및 콘크리트 압축강도의 상관관계를 도출하여 상호 미치는 영향을 평가하였다.

본 연구에서 도출한 결론은 다음과 같다.

1. 표면염화물이온농도에 대한 평가결과, 간만대에서는 KCI 2009, 물보라지역과 해상대기중에서는 Cheong et al.(2005)의 제안값이 타당한 것으로 판단된다.

2. 사용기간이 10년 된(GH교, SJ교)와 24년 된(BS교)의 간만대에서 콘크리트 표면으로부터 깊이 60~80 mm에 배근된 철근은 부식이 발생했음을 알 수 있다.

3. 해상 콘크리트 교량의 염해방지도장은 염화물이온의 침투 억제 능력, 콘크리트의 탄산화 및 압축강도에서 내구성 저하에 대한 방지효과가 있음을 알 수 있었다.

4. 염화물이온농도가 높아지고, 탄산화 깊이가 깊어질수록 압축강도가 저하됨을 알 수 있었다. 이것은 염화물이온의 침투와 탄산화가 콘크리트 조직을 와해시켜 압축강도를 저하시킨 것으로 판단된다.

5. 남해안 해상 콘크리트 교량 21개소의 실측값을 이용한 해석결과가 KCI 2009에서 제시한 해수침투부위별 표면염화물이온농도와 다르게 나타났다. 앞으로 우리나라 해양환경에 적합한 염해 대한 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

References

[1] Cheong, H. M., T. S. Ahn, and B. D. Lee(2005), "Surface Chloride Content of Concrete in Domestic West and South

Coast, Proceedings of the Korea Concrete Institute, Vol.17, No.1, pp. 173-176.

[2] Choi, D. S. and J. J. Choi(2009), "Relationship between Chloride Diffusivity and the Fundamental Properties of Concrete", Journal of the Korea Society of Hazard Mitigation, Vol. 9, No. 1, pp. 15-20.

[3] Japan Society of Civil Engineers concrete(2001), "Concrete Standard Specification(Maintenance section)", pp.104-106.

[4] Korea Concrete Institute, "Concrete Standard Specification 2009", pp. 337-352.

[5] Korea Concrete Institute-203, "durability and design on chloride content in marine concrete 2010", pp. 69-73.

[6] Kim, H. K. and S. B. Kim(2010), "Service Life Prediction and Carbonation of Bridge Structures according to Environmental Conditions", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, Vol. 14, No. 4, pp. 126-132.

[7] Kwon, S. J., H. W. Son, K. J. Byun and C. K. Park(2007), "Analysis of Chloride Penetration in Concrete with Mineral Admixtures using Neural Network Algorithm and Micro Modelling", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol.27, No.1, pp. 117-129.

[8] Lee, Y. J., Y. H. Kim and Y. Y. Lee(2003), "Current Status on the Chloride Content and Carbonation of Train Structures in the East", Journal of Korea institute for Structural Maintenance Inspection, Vol. 7, No. 1, pp. 259-255.

[9] Song, H. W., S. W. Pack and K. Y. Ann(2007), "Time Dependent Chloride Transport Evaluation of Concrete Structures Exposed to Marine Environment", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 19, No. 5, pp. 585-593.

Received : 2014. 09. 26.

Revised : 2014. 11. 30. (1st)

: 2014. 12. 18. (2nd)

Accepted : 2014. 12. 26.