

탄산화 현상이 콘크리트 중의 염소이온 확산에 미치는 영향 연구

오병환¹⁾ · 이성규²⁾ · 이명규^{3)*} · 정상화³⁾

¹⁾ 서울대학교 토목공학과 ²⁾ 원자력안전기술원 ³⁾ 전주대학교 토목환경공학과

(2003년 5월 23일 원고접수, 2003년 10월 30일 심사완료)

Influence of Carbonation on the Chloride Diffusion in Concrete

Byung-Hwan Oh¹⁾, Sung-Kyu Lee²⁾, Myung-Kue Lee^{3)*}, and Sang-Hwa Jung³⁾

¹⁾ Dept. of Civil Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742 Korea

²⁾ Korea Institute of Nuclear Safety, Yuseong Daejeon, 305-338 Korea

³⁾ Dept. of Civil Engineering, Jeonju University, Jeonju, 560-759 Korea

(Received May 23, 2003, Accepted October 30, 2003)

ABSTRACT

Recently, the corrosion of reinforced concrete structures has received great attention related with the deterioration of sea-side structures, such as new airport, bridges, and nuclear power plants. In this regards, many studies have been done on the chloride attack in concrete structures. However, those studies were confined mostly to the single deterioration due to chloride only, although actual environment is rather of combined type. The purpose of the present study is, therefore, to explore the influences of carbonation to chloride attack in concrete structures. The test results indicate that the chloride penetration is more pronounced than the case of single chloride attack when the carbonation process is combined with the chloride attack. It is supposed that the chloride ion concentration of carbonation region is higher than the sound region because of the separation of fixed salts. Though the use of fly ash pronounces the chloride ion concentration in surface, amounts of chloride ion penetration into deep region decreases with the use of fly ash. The present study allows more realistic assessment of durability for such concrete structures which are subjected to combined attacks of both chlorides and carbonation but the future studies for combined environment will assure the precise assessment.

Keywords : chloride ion diffusion, carbonation, chloride profile, surface chloride content, fly ash

1. 서 론

콘크리트는 건설재료로서 탁월한 내구성능을 지니고 있으므로 대부분 사람들의 주거 및 활동, 산업 생산시설을 보호하는 공간을 구성하는 기반구조물에 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 콘크리트 구조물의 경우에도 가설직후부터 구조물의 특성 및 노출환경 등에 따라 물리·화학적 으로 유해한 환경조건으로부터 성능저하(deterioration) 현상이 발생한다.^{1,2)}

이와 관련하여 1960년대 이후 여러 나라에서 콘크리트 자체의 성능저하나 철근부식과 같은 요인에 의한 철근콘크리트 구조물의 수명저하 현상이 보고되었으며, 이에 따라 철근콘크리트 구조물의 내구수명을 정량적으로 보장하기 위한 연구의 필요성이 대두되었고 1980년대와 1990년

대를 거치면서 활발한 연구활동이 수행되고 있다.³⁻⁵⁾

우리나라의 경우에도 1990년대 초반부터 해상 장대교량이나 지하구조물과 같이 열악한 환경에 노출된 구조물의 장기적인 내구성 확보에 대한 필요성에 따라, 염해나 탄산화, 황산염침투 등에 의한 성능저하에 대하여 일부 연구자들에 의하여 기초적인 연구가 수행되어왔다.^{6,7)}

한편, 실제 구조물의 경우 단일요인에 의한 성능저하보다는 2가지 이상에 의한 복합적인 성능저하가 발생할 가능성이 더욱 크기 때문에 최근에 이르러서는 동결융해와 염해의 복합작용시 염소이온 침투에 관한 연구, 염해와 탄산화의 복합열화 예측을 위한 수화물의 화학반응에 대한 연구 및 염해 및 탄산화가 동시에 작용하는 환경에서의 염소이온 침투깊이와 탄산화 깊이에 관한 연구 등이 선진국을 중심으로 활발하게 시도되고 있다.⁸⁻¹¹⁾

원전 콘크리트 구조물은 해안에 위치하고 있기 때문에 이들 여러 가지 성능저하과정 중에서도 염소이온의 침투에 의한 철근부식 현상이 가장 큰 성능저하 요인이 될 것

* Corresponding author

Tel : 063-220-2721 Fax : 063-220-2669

E-mail : concrete@jeonju.ac.kr

으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 염소이온 확산에 의한 내구성 저하과정을 분석하기 위해 기존 원전 콘크리트 구조물에 사용된 재료를 이용한 염소이온 침투실험을 실시하였으며, 특히 단일환경하의 염소이온 확산특성과 함께 콘크리트가 탄산화된 경우에 대한 염소이온확산 특성의 변화를 검토하여 건습반복 및 탄산화 및 염해가 복합된 환경하에서 콘크리트 내부로의 염소이온 침투 경향을 밝히기 위한 실험연구를 수행하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료 및 실험변수

본 연구는 국내 S사에서 생산된 1종 및 5종 시멘트(비중 : 3.15)와 보령화력에서 생산된 플라이애쉬(비중 : 2.1)를 사용하여 시멘트 종류(1종, 5종, 플라이애쉬 20% 혼입) 및 물-시멘트비(38%, 42%)를 주요 실험변수로 실험을 수행하였다. 본 연구에서 5종 시멘트에 대한 실험을 중점적으로 수행한 이유는 현재 우리 나라 원자력발전소 등에 사용되고 있기 때문이며, 플라이애쉬의 경우는 이미 국내 레미콘의 경우 상당량 실용화되어 있기 때문에 전체 시멘트량의 20%를 5종 시멘트에 혼입하여 실험을 수행하였다. 한편, 골재는 비중 2.63, 조립률 6.7의 쇠석 굵은골재 및 비중 2.55, 조립률 2.6의 강사를 사용하였다. Table 1에는 사용된 시멘트 및 플라이애쉬의 화학조성이 나타나있다. Table 2 에는 본 연구에서 사용한 실험변수와 배합설계 내용이 요약되어 있다. 또한, 본 배합의 목표 슬럼프는 15±2.5cm 목표 공기량은 4.5±1.5%로서 이를 위해 단위시멘트량의 0.15%에 해당하는 AE감수제를 사용하였다.

2.2 실험방법

본 연구는 콘크리트 중의 염소이온 확산성에 미치는 탄산화의 영향을 알아보기 위해 1주간 25℃로 유지된 5% 염화나트륨(NaCl) 용액에 대한 침지와 1주간 CO₂ 농도 10%, 온도 40℃, 상대습도 60% 조건에서의 촉진탄산화 실험을 반복하여 실시한 후 침지시간(5주, 15주, 30주, 56주) 및 표면으로부터의 깊이에 따른 산 가용성 및 수용성 염소이온 침투량을 ASTM C1152-97 및 ASTM C1218-97에 제시된 방법에 따라 분석하였다.^{12,13)} 또한, 상기 실험결과와의 비교를 위해 1주간 5% 염화나트륨 용액침지와 1주간 공기 중 노출을 반복한 후 동일한 방법으로 염소이온 침투량을 분석하였다. 단, 분석은 침지시작 후 각각 4주, 12주, 28주 및 52주가 지난 시점에서 실시하여 두 실험사이의 분석시점이 다소 차이가 생겼다.

염소이온 확산에 대한 탄산화 영향 실험은 모든 실험시편을 28일간 수중양생 후 수행하였으며, 표준 시편으로는

Table 1 Chemical components of cement (%)

Cement type	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
Type 1	21.01	6.40	3.12	61.33	3.02
Type 5	22.37	3.87	4.67	62.77	2.54
Fly ash	61.75	23.97	4.81	3.41	0.82
Cement type	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	F-CaO	Ig.loss
Type 1	0.12	0.78	2.14	1.12	1.61
Type 5	0.09	0.54	1.75	0.57	1.40
Fly ash	0.50	1.11	0.66	-	2.97
Cement type	C ₃ S	C ₂ S	C ₄ AF	C ₃ A	
Type 1	42	28	9	12	
Type 5	53	24	14	2	

Table 2 Mixture proportions for test series

Test series	Cement Type	W/B (%)	Cement kg/m ³	Fly ash kg/m ³	Water kg/m ³	Fine agg. kg/m ³	Coarse agg. kg/m ³
H1 FA00	I	38	450	-	171	621	1034
H5 FA00	V	38	450	-	171	621	1034
H5 FA20	V	38	360	90	171	609	1014
N5 FA00	V	42	405	-	170	636	1058

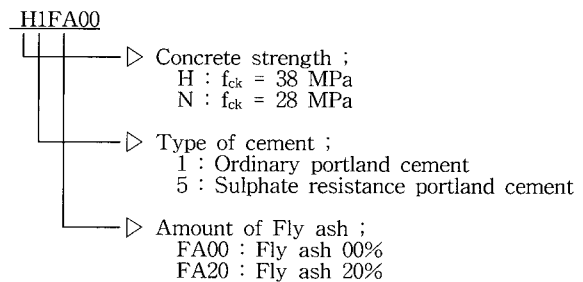


Fig. 1 Test series identification

길이 10cm, 직경 10cm의 원주형 시편을 사용한 후 염소이온의 일 방향 침투를 보장하기 위해 표준 시편의 측면을 불투수성 에폭시로 코팅하였다.

2.3 침지실험에 의한 염소이온 확산계수 측정방법

콘크리트 중으로의 염소이온 침투실험을 통해 침지시간 및 표면으로부터의 거리에 따른 염소이온 농도를 구한 후 각각의 시점에서의 겉보기 확산계수 및 표면 염소이온 농도는 Fick의 확산방정식의 해 식(1)을 이용한 linear curve fitting법을 사용하여 구하였다.

$$C(x, t) = C_i + (C_0 - C_i) \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \quad (1)$$

식(1)에서 C₀, C_i 및 C(x,t)는 각각 콘크리트 표면의 염소

이온 농도, 콘크리트 내부의 염소이온농도 및 시간 t , 거리 x 에서의 염소이온농도를 나타내며, $erfc$ 는 $erfc(z) = 1 - erf(z)$ 로 정의되는 “complementary error function”을 나타낸다. 일반적으로 $0 \leq z \leq \sqrt{3}$ 인 범위에서는 “complementary error function”은 다음과 같은 2차 곡선으로 근사화 할 수 있다.¹⁴⁾

$$erfc(z) = \left(1 - \frac{z}{\sqrt{3}}\right)^2 \quad (2)$$

식(2)를 식(1)에 대입한 후 정리하면,

$$\sqrt{C(x, t) - C_i} = \sqrt{C_0 - C_i} - x \sqrt{\frac{C_0 - C_i}{12Dt}} \quad (3)$$

식(3)은 $y = a + \beta x$ 의 직선식으로 표현가능하며, 이 경우 $a = \sqrt{C_0 - C_i}$, $\beta = -\frac{\alpha}{\sqrt{12Dt}}$ 를 나타낸다. 그러므로, α 및 β 를 깊이별 염소이온 농도로부터 구하면 식(4) 및 식(5)로부터 표면 염소이온농도(C_0) 및 염소이온 확산계수(D)를 각각 구할 수 있다.

$$C_0 = a^2 + C_i \quad (4), \quad D = \frac{(\alpha/\beta)^2}{12t} \quad (5)$$

3 실험결과 및 고찰

3.1 압축강도 측정실험

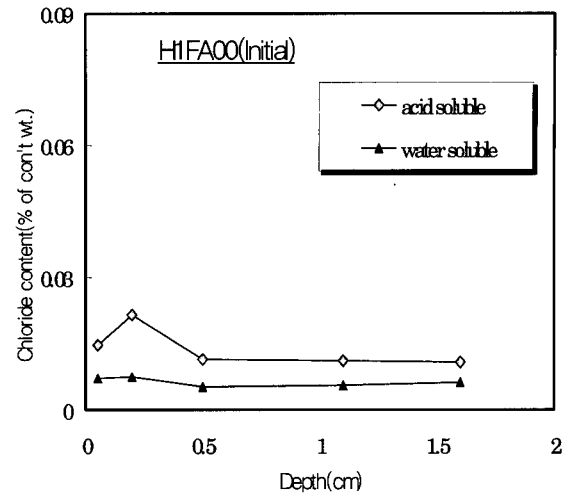
각 실험 변수의 재령별 압축강도 실험결과를 정리하면 table 3과 같으며, 모든 배합에서 설계기준강도(H series : 38 MPa, N series : 28 MPa)를 만족하였다.

3.2 초기 염소이온 함유량

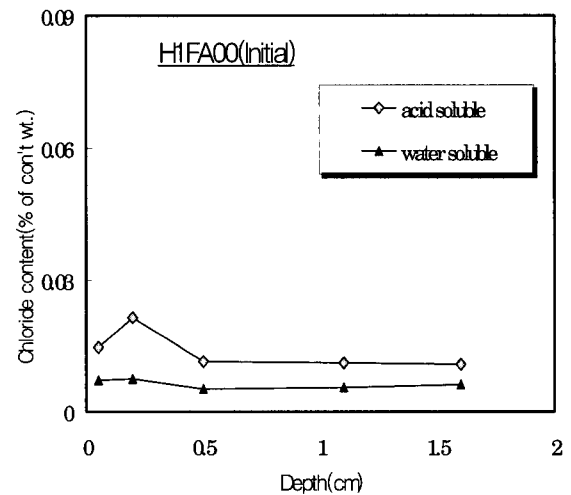
Fig. 2에는 표준양생 시편에 대한 깊이별 초기 염소이온 농도가 나타나있다. 이에 따르면 대부분의 시편에서 초기 염소이온농도는 콘크리트 중량대비 0.01% 정도로 나타나고 있으며 이것은 대략적으로 0.25 kg/m^3 정도의 염소이온농도로 설계기준에서 제시하고 있는 허용기준치 0.3 kg/m^3 이하를 만족하고 있다.

Table 3 Test results of compressive strength

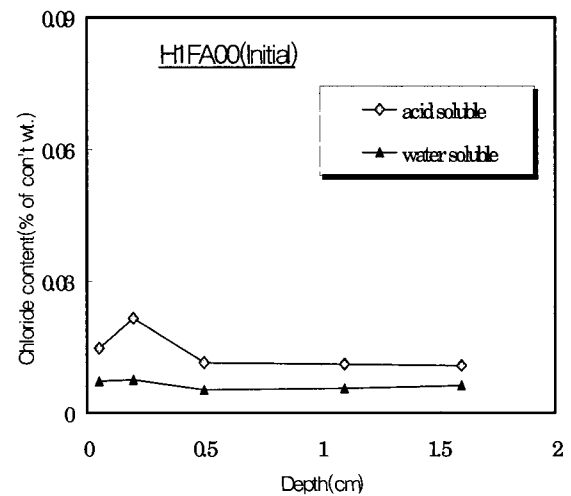
Series	Compressive strength (MPa)	
	28 days	90 days
H1FA00	44	61
H5FA00	51	61
H5FA20	52	65
N5FA00	39	48



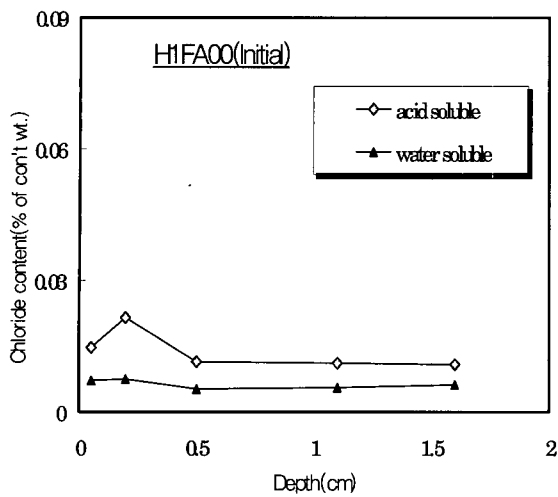
(a) H1FA00



(b) H5FA00



(c) H5FA20

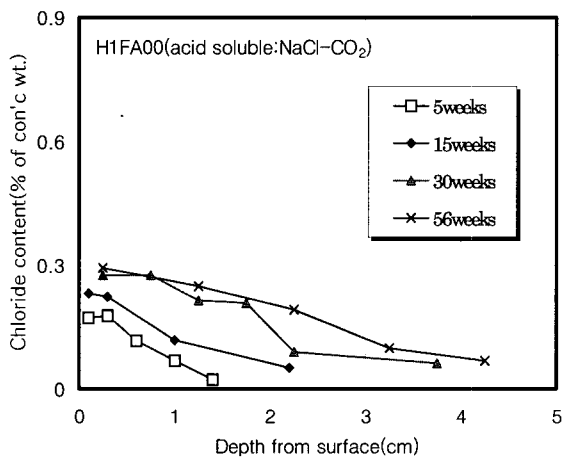


(d) N5FA00

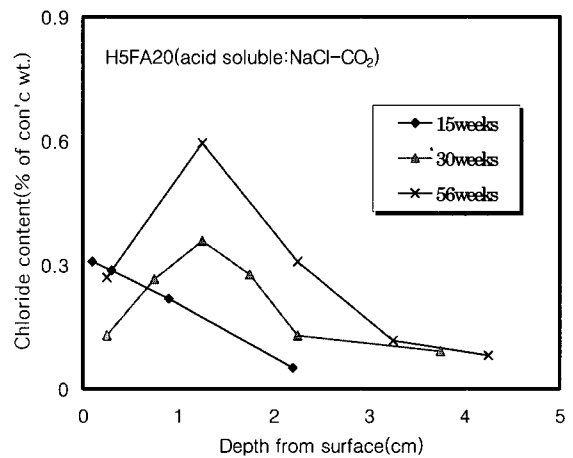
Fig. 2 Initial chloride profiles for various mixtures

3.3 깊이에 따른 염소이온 침투량

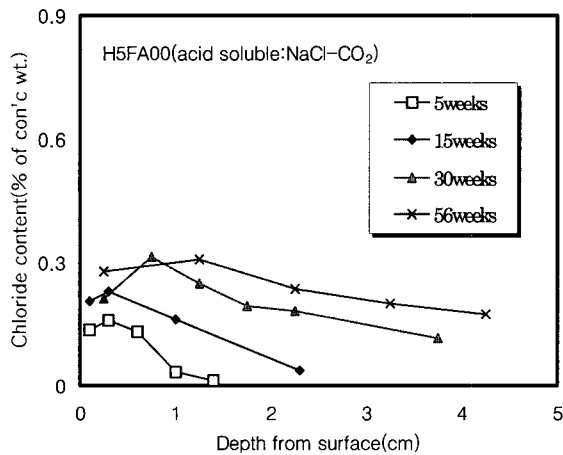
Fig. 3에는 5% 염화나트륨 용액 침지와 CO₂ 농도 10% 촉진 탄산화를 1주씩 반복한 경우에 대한 시간에 따른 산가용성 염소이온 침투 정도가 나타나있으며 Fig. 4에는 동일한 시편에 대한 수용성 염소이온 침투 정도가 나타나 있다. 이 경우 침지시간의 증가에 따른 염소이온 침투량은 전반적으로 증가하였으며, 침투경향은 산가용성 및 수용성 염소이온에 대한 실험에서 모두 유사하게 나타났다. Fig. 3 및 Fig. 4에 의하면 콘크리트 중으로의 염소이온 침투량은 H1FA00 배합의 경우가 시간의 경과 및 깊이에 따른 침투량 및 변화정도가 가장 작게 나타나고 있으며, H5FA00 배합의 경우는 H1FA00 배합의 경우에 비해 시간이 지남에 따라 2cm 이상의 깊이에 대한 염소이온 침투량이 커지고 있는 것을 알 수 있다. N5FA00 배합은 H1FA00 및 H5FA00 배합에 비해 시간에 따른 염소이온



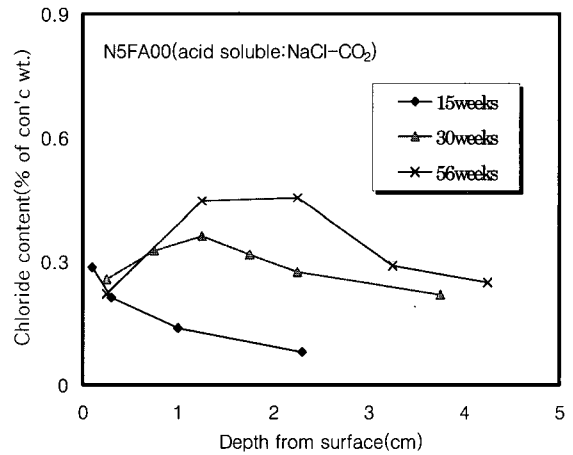
(a) Type I, w/c 38%, fly ash 0%



(c) Type V, w/c 38%, fly ash 20%



(b) Type V, w/c 38%, fly ash 0%



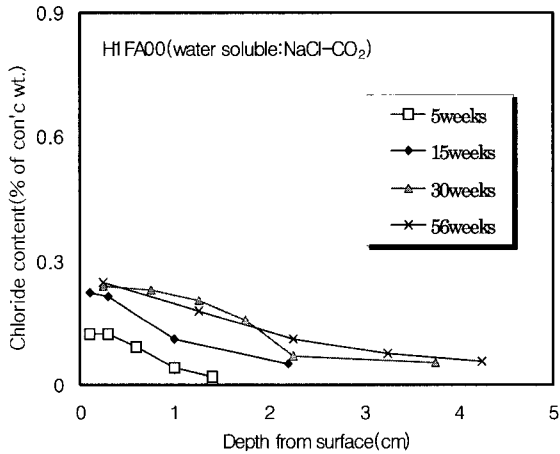
(d) Type V, w/c 42%, fly ash 0%

Fig. 3 Chloride profiles for various mixtures under cyclic one-week in chloride solution and one-week in carbonation (case of acid soluble)

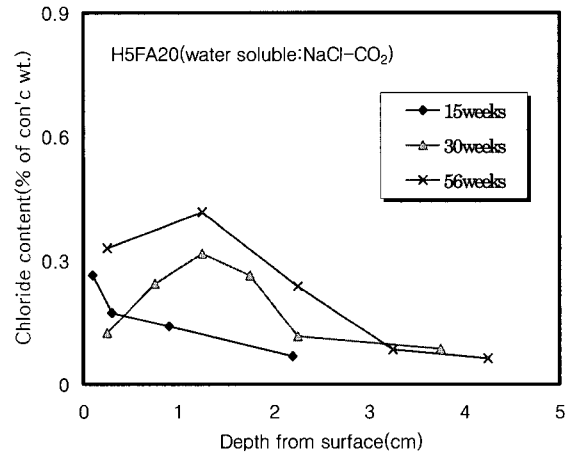
침투량이 매우 큰 것을 알 수 있으며, 이러한 경향은 이들 배합 사이의 물-시멘트비 차이는 그다지 크지 않지만 설계기준강도의 차이가 크기 때문에 콘크리트의 조직구조가 다소 큰 차이를 보이기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 플라이애쉬를 혼입한 H1FA20 및 H5FA20 배합의 경우는 플라이애쉬를 혼입하지 않은 경우와 비교하여 매우 다른 염소이온 침투 경향을 보이고 있는데, N5FA00의 경우와 유사하게 시간이 지남에 따라 표면에서 1cm 이내의 염소이온 침투량이 표면에서 1~2cm 부분의 염소이온 양에 비해 작게 나타나고 있으며 표면으로부터 2cm 이상 떨어진 부분의 염소이온 침투량은 플라이애쉬를 혼입하지 않은 경우에 비해 급격히 작아지고 있음을 알 수 있다. 이것은 플라이애쉬를 혼입한 경우에는 콘크리트 조직구조 및 탄산화에 따른 특성이 혼입하지 않은 경우와 비교하여 다소 달라지는 것을 나타내고 있다고 판단된다.

Fig. 5 및 Fig. 6에는 건습반복작용을 받은 경우의 침투 깊이별 염소이온 농도와 1주 염화나트륨 용액침지와 1주 촉진탄산화를 반복한 경우의 침투깊이별 염소이온 농도를 비교한 결과가 나타나있다.

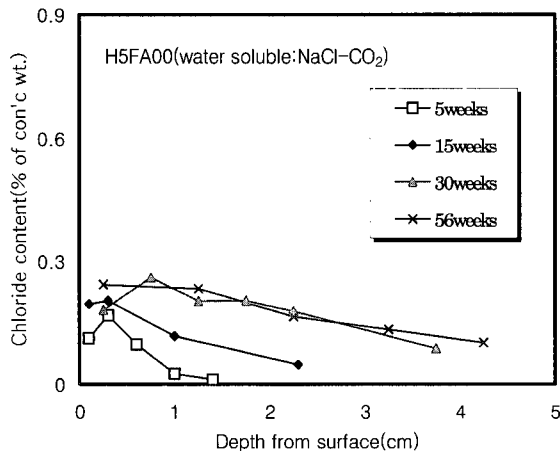
Fig. 5 및 Fig. 6를 보면 촉진탄산화를 시행한 시편의 경우가 단순 건습반복을 받은 경우보다 시간경과에 따라 콘크리트 내부로 침투된 염소이온이 많은 것을 알 수 있다. 또한, H5FA00 시편의 경우 30주 이상 실험을 실시한 경우 깊이에 따른 염소이온 침투량의 변화가 완만하여 표면으로부터 1cm 이내의 경우에는 건습반복을 받은 시편의 경우에 비해 염소이온 양이 작은 것을 알 수 있다. 이것은 콘크리트의 탄산화가 진행되는 경우 시멘트 수화물에 프리델 염 등으로 고정된 염화물 이온이 새공용액 중에 유리되어 염화물 이온 농도가 높아진다는 기존의 연구결과와 유사한 결과를 보이는 것으로 판단된다.¹⁾



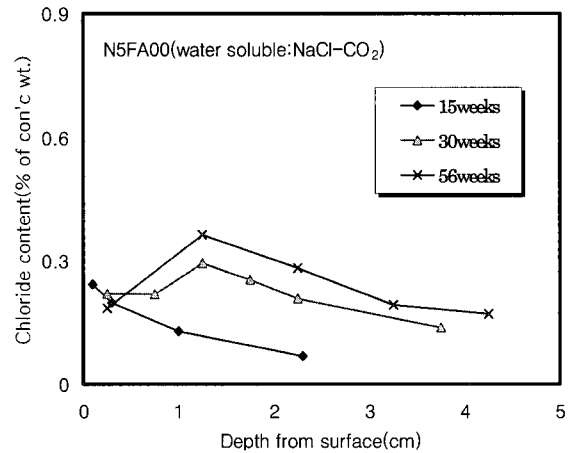
(a) Type I, w/c 38%, fly ash 0%



(c) Type V, w/c 38%, fly ash 20%

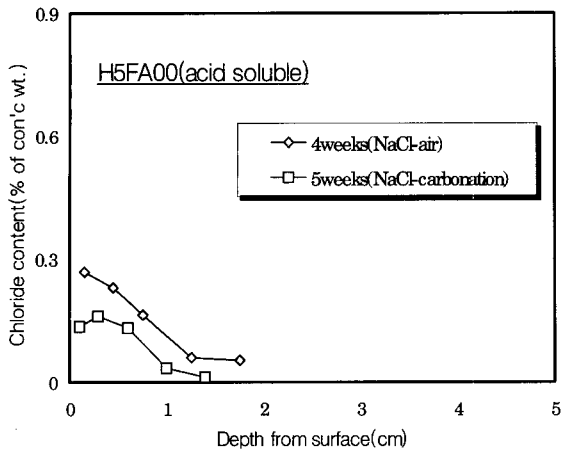


(b) Type V, w/c 38%, fly ash 0%

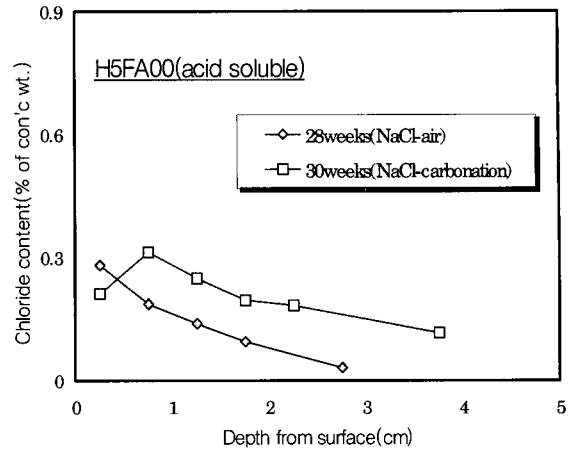


(d) Type V, w/c 42%, fly ash 0%

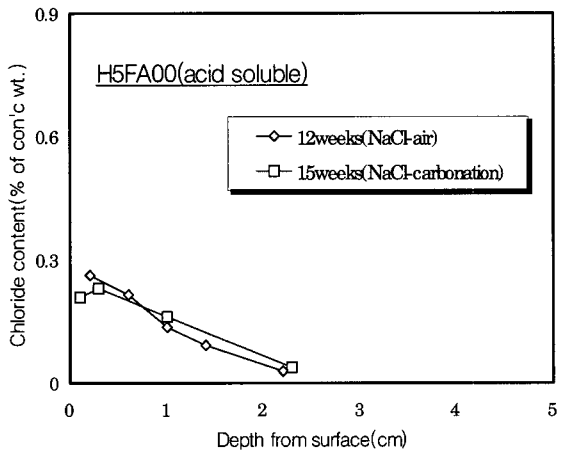
Fig. 4 Chloride profiles for various mixtures under cyclic one-week in chloride solution and one-week in carbonation (case of water soluble)



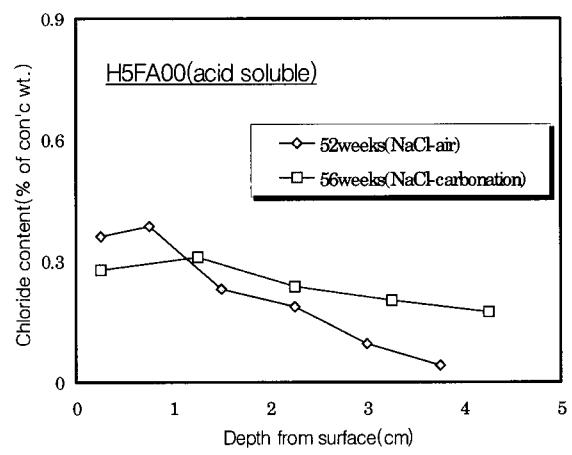
(a) Type V, w/c 38%, fly ash 0% (5weeks)



(c) Type V, w/c 38%, fly ash 0% (30weeks)

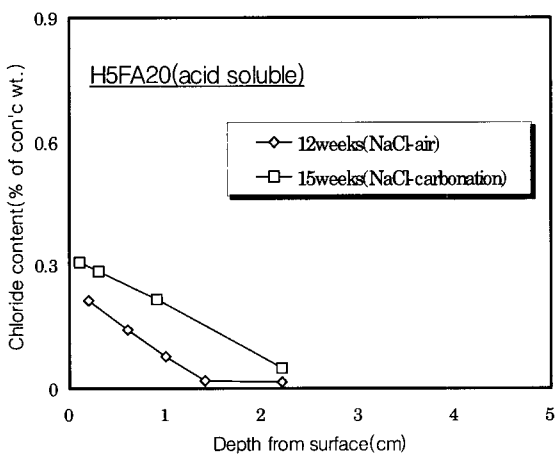


(b) Type V, w/c 38%, fly ash 0% (15weeks)

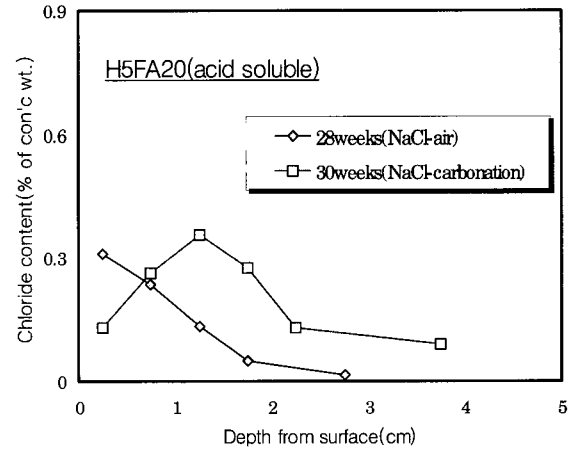


(d) Type V, w/c 38%, fly ash 0% (56weeks)

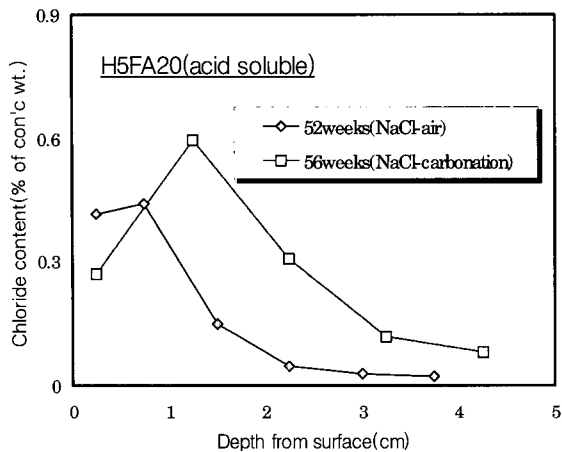
Fig. 5 Comparison of chloride profiles under cyclic one-week in chloride solution and one-week in carbonation with chloride profiles under cyclic one-week in chloride solution and one-week in dry condition (case of acid soluble)



(a) Type V, w/c 38%, fly ash 0% (15weeks)



(b) Type V, w/c 38%, fly ash 0% (30weeks)



(c) Type V, w/c 38 %, fly ash 0 % (56weeks)

Fig. 6 Comparison of chloride profiles under cyclic one-week in chloride solution and one-week carbonation with chloride profiles under cyclic one-week in chloride solution and one-week in dry condition (case of acid soluble, using fly ash)

즉, 탄산화의 진행에 따라 탄산화된 영역의 세공용액 중 자유염소이온 농도가 높아지는 경우에는 탄산화 영역과 비탄산화 영역 사이의 자유염소이온 농도구배가 커지기 때문에 염소이온의 비탄산화 영역으로의 이동이 촉진되어 비탄산화 부분의 염소 이온 농도가 오히려 탄산화 부분에 비해 커지게 되는 경향이 나타나게 된 것으로 판단된다.

한편, 플라이애쉬를 혼입한 Fig. 6의 경우를 살펴보면 촉진탄산화 시행여부에 따른 염소이온 침투 경향이 다양하게 변화함을 알 수 있다.

- 1) 단순 건습반복 실험의 경우 : 30주까지는 플라이애쉬 혼입에 따른 염소이온 침투 경향 변화가 크지 않지만 50주가 넘는 경우 표면에서부터 1cm 까지의 영역의 염소이온 농도는 매우 높고 표면에서부터 2cm가 지난 영역의 염소이온 농도는 플라이애쉬를 혼입하지 않은 경우에 비해 매우 낮다.
- 2) 탄산화 촉진실험 실험을 병행한 경우 : 초기에는 단순 건습반복 실험의 경우와 큰 차이를 보이지 않으나 30주 이상 염화나트륨 용액 침지와 촉진탄산화를 수행하는 경우 염소이온 침투 경향이 플라이애쉬를 혼입한 경우 큰 변화를 나타낸다.
- ① 플라이애쉬 혼입 여부에 관계없이 촉진탄산화 실험을 병행한 경우에는 단순 건습반복 실험의 경우에 비해 내부로 침투되는 염소이온 양이 증가한다.
- ② 플라이애쉬를 혼입한 경우에는 촉진탄산화 실험을 장기간 병행한 경우 내부로 침투되는 염소이온 양이 크게 증가하여 56주의 경우 대략 표면으로부터 1cm~3

cm 사이의 염소이온 농도가 단순 건습반복 및 플라이애쉬를 혼입하지 않은 경우에 비해 매우 높게 나타난다.

- ② 플라이애쉬를 혼입한 경우에는 장기간 촉진탄산화 실험을 병행한 경우 표면으로부터 1cm 정도 깊이의 염소이온 농도가 다음 영역에서의 염소이온 농도보다 작은 경향이 매우 뚜렷하게 나타난다.
- ③ 플라이애쉬를 혼입한 경우에는 염화나트륨 용액에 대한 단순 건습반복 실험의 경우 미혼입한 경우에 비해 콘크리트 내부의 염소이온 농도가 매우 낮게 나타나며, 탄산화 촉진실험을 병행한 경우에는 염소이온 농도가 매우 높은 영역을 지난 부분에서 염소이온 농도가 급격히 낮아지지만 플라이애쉬를 미혼입한 경우와 비교한 염소이온 농도는 유사한 것을 알 수 있다.

이상의 실험결과로부터 탄산화 과정 및 플라이애쉬의 혼입이 콘크리트 중의 염소이온 확산에 미치는 영향을 추론할 수 있다.

- 1) 콘크리트가 탄산화 되는 경우 고정된 프리켈 염 등의 유리로 인한 농도구배의 상승으로 인해 내부로의 염소이온 확산이 증가하며, 표면의 탄산화 부분의 염소이온 농도는 상대적으로 낮다.
- 2) 플라이애쉬를 혼입한 콘크리트의 경우 장기재령시 조직의 밀실화로 인해 내부로 침투하는 염소이온이 급격히 감소한다. 그러나, 탄산화에 의한 영향이 있는 경우 이에 따른 내부로의 염소이온 확산 증가 경향이 더욱 뚜렷이 나타나며 이로 인해 탄산화 영역에 인접한 부분의 염소이온 농도는 급격히 증가한다. 다만, 염소이온 농도가 급격히 증가하는 영역을 지나면 침투된 염소이온 양은 플라이애쉬를 혼입하지 않은 경우와 비교하여 크지 않다.

한편 Table 4에는 페놀프탈레인 분무에 의한 각 배합별 탄산화 깊이 측정결과가 나타나있으며 여기에 표시된 시간은 염수침지 기간을 제외한 순수 탄산화 촉진실험 기간을 의미한다. 이에 따르면 H5FA20배합의 경우가 시간에 따른 탄산화 깊이가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한, H1FA00배합 및 H5FA00배합의 경우에는 탄산화가 표면부에서만 진행되고 있는 것을 알 수 있으며, 이것은 이들 배합이 탄산화가 진행되는 경우 내부로의 염소이온침투가 단순 건습반복의 경우에 비해 다소 촉진되기는 하

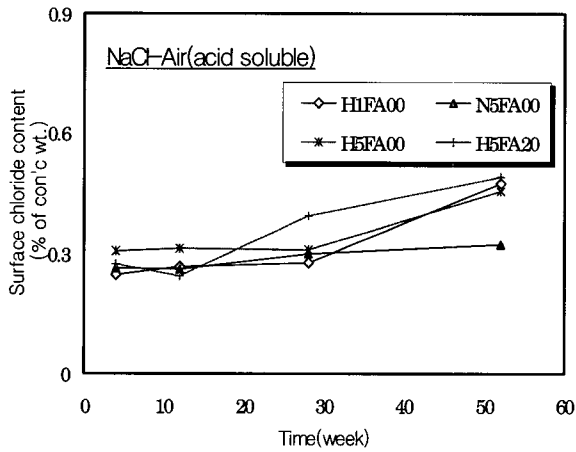
Table 4 Carbonation depth at test duration(mm)

Specimen	3 weeks	8 weeks	23 weeks
H1FA00	surface	surface	surface
N5FA00	0.3	1.8	2.6
H5FA00	surface	surface	surface
H5FA20	1.7	2.7	4.0

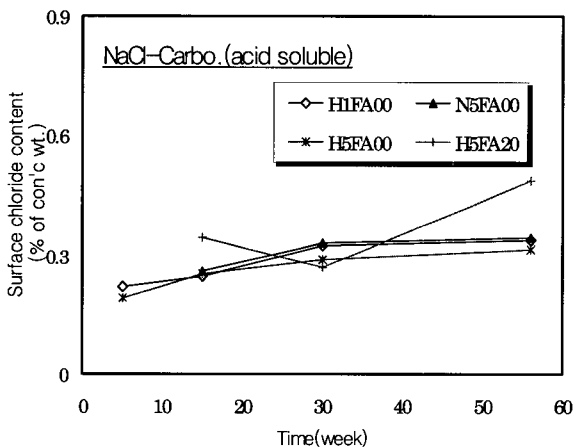
지만 상대적으로 다른 배합에 비해 탄산화에 따른 염소이온 침투 경향 변화가 뚜렷하게 나타나지 않는 이유인 것으로 판단된다.

3.4 표면염소이온 농도

Fig. 7은 2.3절에 제시한 방법을 이용하여 구한 단일 염화나트륨 용액침지 건습반복시 및 1주간 5% 염화나트륨 용액 침지 및 CO₂ 농도 10% 촉진 탄산화를 1주씩 반복한 경우에 대한 시간에 따른 표면염소이온 농도를 나타내고 있다. 이 그래프를 통해 표면염소이온의 농도는 시간에 따라 점차로 증가하며 N배합에 비해 H배합이, 플라이애쉬를 혼입한 배합이 혼입하지 않은 배합에 비해 표면염소이온 농도가 다소 큰 경향이 나타나는 것을 알 수 있다.



(a) One-week in chloride solution and one-week in dry condition



(b) One-week in chloride solution and one-week in carbonation

Fig. 7 Surface chloride content for various mixtures (case of acid soluble)

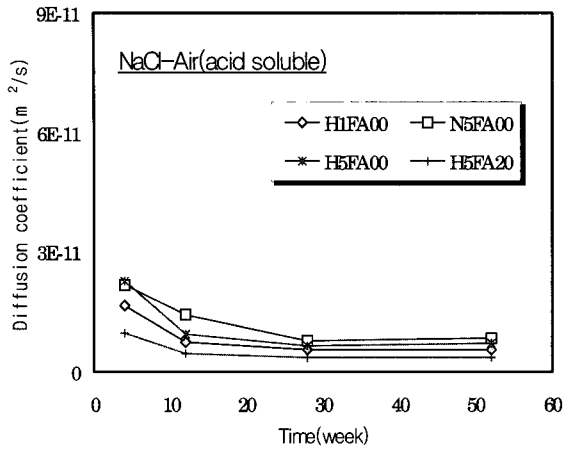
한편, 촉진탄산화를 병행한 경우의 표면염소이온 농도는 단순 건습반복의 경우에 비해 낮게 나타나고 있으며, 이것은 탄산화에 따른 염소이온의 내부 이동 촉진 현상을 반영하고 있다고 판단된다.

3.5 시간에 따른 염소이온 확산계수 변화

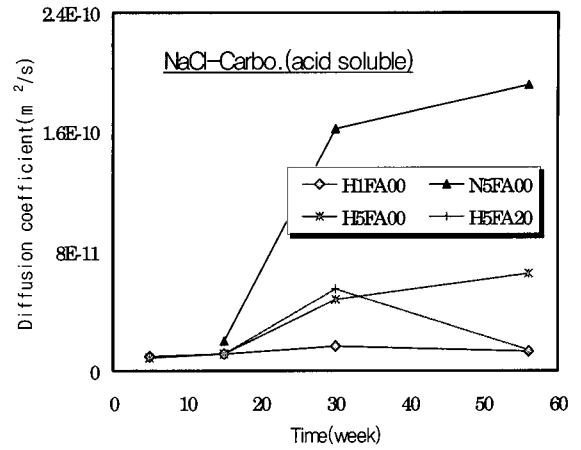
Fig. 8 ~ Fig. 10에는 2.3절의 방법을 이용하여 구한 시간에 따른 염소이온 확산계수의 변화가 나타나있다. Fig. 8을 보면 단순 건습반복의 경우 염소이온 확산계수는 시간에 따라 감소하는 것을 알 수 있으며 모든 배합에 대해 확산계수는 침지 초기에는 급격히 감소하나 시간이 지날수록 점차로 완만해져서 28주 이후에는 거의 일정하게 나타난다. 이것은 재령초기에는 콘크리트 공극 구조가 치밀하지 못하지만 재령이 증가할수록 수화반응에 따른 공극 구조가 치밀해지는 영향이 가장 큰 것으로 판단된다. 한편, Fig. 9 및 Fig. 10으로부터 촉진탄산화 실험을 병행한 경우 시간에 따른 염소이온 확산계수 변화는 단순 건습반복 실험과는 다른 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 즉, 단순 건습반복의 경우 침지시간이 길어짐에 따라 염소이온 확산계수가 감소하는데 비해 촉진탄산화 실험을 병행한 경우는 30주까지는 모든 배합에 대해 염소이온 확산계수가 증가하는 결과를 보인다. 그러나, 물-시멘트비가 38%인 경우 H5FA00배합의 산가용성 염화물에 대한 결과를 제외하고는 30주를 기점으로 염소이온 확산계수가 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이로부터 콘크리트의 탄산화에 의해 초기에는 내부로의 염소이온 확산성이 커지지만 시간이 경과하여 탄산화 속도가 매우 작아지는 시점부터는 염소이온의 확산속도도 작아질 것이라고 예측할 수 있다. 결국 외부로부터의 염소이온 침투에 따른 철근 부식 속도를 예측하고자 하는 경우 초기에 탄산화에 따른 염소이온 확산계수가 증가되는 현상을 고려하는 것이 좀더 합리적인 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 또한, Fig. 9(c)로부터 탄산화 현상이 예측되는 경우에도 장기적으로는 플라이애쉬의 사용이 염소이온 확산성을 감소시키는데 도움이 될 것이라고 판단된다.

4. 결 론

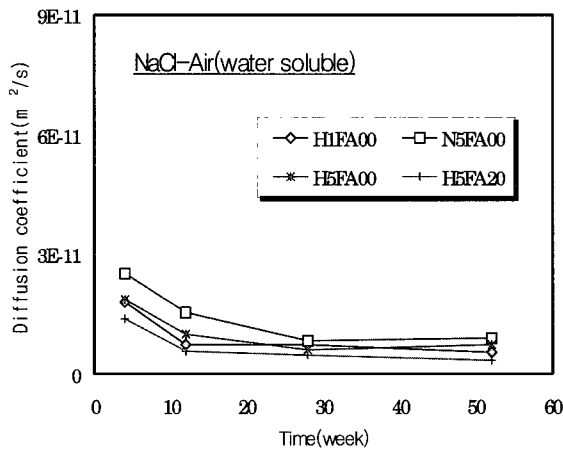
본 연구는 원전 구조물 콘크리트의 염소이온 침투특성을 규명하기 위해 시멘트 종류, 플라이애쉬 혼입여부 및 물-시멘트비를 주요 실험변수로 하여 5% 염화나트륨 용액에 대한 침지실험을 수행하였으며, 특히 탄산화가 복합적으로 작용한 경우에 대한 실험을 실시하여 이들 영향요인에 따른 복합열화와 관련된 기초적인 실험자료를 확보하였다. 본 연구로부터 도출된 주요 연구결과를 요약하여 기술하면 다음과 같다.



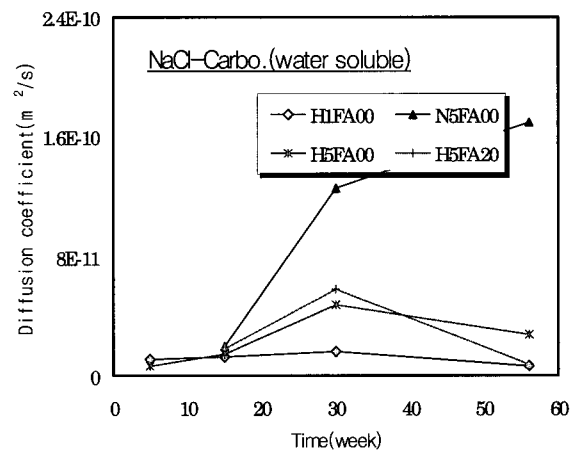
(a) Case of acid soluble



(a) Case of acid soluble



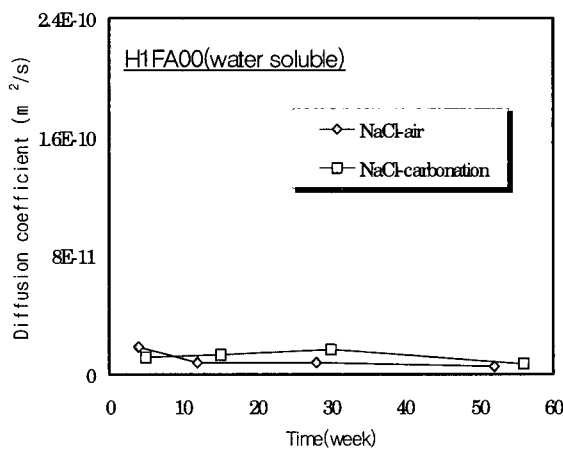
(b) Case of water soluble



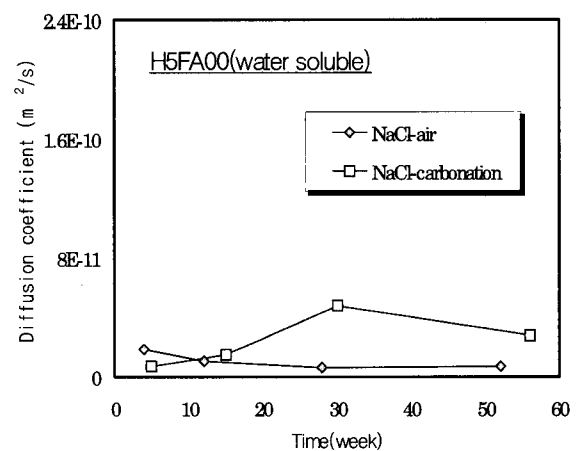
(b) Case of water soluble

Fig. 8 Chloride diffusion coefficient for various mixtures under simple cyclic condition

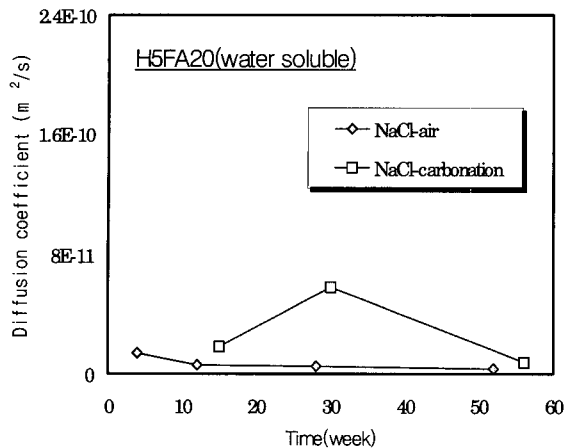
Fig. 9 Chloride diffusion coefficient for various mixtures under combined cyclic condition



(a) Type I, w/c 38 %, fly ash 0 %



(b) Type V, w/c 38 %, fly ash 0 %



(c) Type V, w/c 38 %, fly ash 20 %

Fig. 10 Comparison of chloride diffusion coefficient under cyclic one-week in chloride solution and one-week in carbonation with chloride profiles under cyclic one-week in chloride solution and one-week in dry condition (case of water soluble)

- 탄산화가 복합적으로 작용하는 경우 콘크리트 내부로의 염소이온 침투는 가속된다. 이것은 탄산화 된 부분의 프리텔 염이 유리되어 염소이온의 농도 구배가 커지기 때문에 염소 이온의 확산성이 커지는 것으로 판단되며 이 경우 표면으로부터 1cm이내의 영역의 염소이온 농도는 동일 조건의 비탄산화 시편보다 낮아지는 경향을 보인다.
- 플라이애쉬를 혼입하는 경우 단일조건에서의 염소이온 침투억제에 매우 효과적이다. 다만, 탄산화가 복합적으로 작용하는 경우 일정 깊이까지의 염소이온 농도는 매우 높은 경향을 나타내지만 특정한 한계깊이 이상의 영역에서는 침투된 염소이온 농도가 급격히 낮아지므로 탄산화가 복합된 경우에도 플라이애쉬 혼입에 따른 철근부식 증가 영향은 적을 것으로 판단된다.

참고문헌

- Bakker R. F. M., "Corrosion of steel in concrete," Report of the Technical Committee 60-CSC, RILEM, London, 1988, pp.47~54.

- Kdroff, J. and Hilsdorf, H. K., "Performance criteria for concrete durability," Rilem report 12, E & FN Spon, London, 1995, pp.97~133.
- Clifton, J. R. and Knab, L., I., "Service life of concrete," NISTIR 89-4086, National Bureau of Standards U.S. Department of Commerce, Washington, 1989, pp.1~87.
- Clifton, J. R., "Predicting the remaining service life of concrete," NISTIR 4712, National Bureau of Standards U.S. Department of Commerce, Washington, 1991, pp.1~58.
- Schiessl, P. et al., "New Approach to Durability Design," CEB Bulltin d'Information No238, Lausanne, 1997, pp.16~78.
- 김은겸, "콘크리트 구조물의 염화물 이온 침투 거동 해석," 콘크리트학회 논문집, 9권 6호, 1997, pp.233~241.
- 문한영 외, "해수 침식을 받은 콘크리트의 성능저하 원인 규명," 대한토목학회 논문집, 22권 1A호, 2002, pp.171~179.
- 竹田宣典, 十河茂幸, "동해와 염해의 복합열화 작용이 콘크리트의 내구성에 미치는 영향," 일본콘크리트공학협회 연차논문집, Vol.23, No.2, 2001, pp.427~432.
- 植木聰, "염해와 중성화의 복합열화에 관한 반응모델의 기초적 검토," 일본콘크리트공학협회 연차논문집, Vol.23, No.2, 2001, pp.433~438.
- 佐伯電彦, "혼화제가 염해 및 중성화의 복합 열화에 미치는 영향," 일본콘크리트공학협회 연차논문집, Vol.24, No.1, 2001, pp.729~734.
- Tumidajski, P. J. and Chan, G. W., "Effect of sulfate and carbon dioxide on chloride diffusivity," *Cement and Concrete Research*, Vol.26, No.4, pp. 551~556.
- ASTM C1152-97, "Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete," 1997.
- ASTM C1218-97, "Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete," 1997.
- Abramowitz, M. and Stegun, I. A., "Handbook of Mathematical Functions," Dover Publications, Inc, New York, 1970.

요 약

최근 원전 구조물을 비롯한 해양에 인접한 콘크리트 구조물의 경우 외부의 염소이온 확산에 의한 철근 부식과 관련한 문제가 콘크리트의 내구성과 관련된 중요한 요인으로 인식되고 있으며, 이와 관련된 다양한 연구들이 국·내외 적으로 수행되고 있다. 그러나, 탄산화를 비롯한 복합열화 환경에서의 염소이온 확산에 대한 연구결과는 아직까지 미흡한 실정으로 본 연구에서는 이와 관련하여 탄산화 작용이 콘크리트 중의 염소이온 확산에 미치는 영향에 대한 실험적인 연구를 수행하였다. 본 연구에서 수행한 5% 염화나트륨 용액 침지 및 10% CO₂ 촉진탄산화 반복실험 결과 콘크리트의 탄산화는 콘크리트 내부로의 염소이온 확산 정도를 증가시키는 것으로 나타났으며, 이것은 탄산화 영역에서 고정된 염소이온의 유리에 따른 염소이온 농도 구배의 증가 때문인 것으로 판단된다. 한편, 플라이애쉬를 혼입한 콘크리트의 경우 표면부에서 일정한 깊이까지는 촉진탄산화의 영향에 의한 높은 염소이온 침투량을 나타내지만 경계를 넘어선 영역에서는 플라이애쉬를 혼입하지 않은 경우와 거의 유사한 정도의 염소이온 침투량을 보였다. 본 연구를 통해 탄산화 작용이 콘크리트 내부로의 염소이온 침투에 미치는 영향과 관련한 기초적인 실험자료를 축적하였으며 향후 추가적인 연구를 통해 콘크리트 구조물의 내구수명을 산출하는데 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 염소이온 확산, 탄산화, 동결융해, 염소이온 농도분포, 표면 염소이온농도, 플라이애쉬
