

탄산화 복합환경시 염소이온 확산에 관한 연구

오병환¹⁾ · 이성규²⁾ · 이명규^{3)*} · 정상화³⁾

¹⁾ 서울대학교 토목공학과 ²⁾ 원자력안전기술원 ³⁾ 전주대학교 토목환경공학과

(2003년 9월 19일 원고접수, 2005년 3월 15일 심사완료)

Influence of Carbonation for 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, Daejeon, 305-338, Korea

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

(Received September 19, 2003, Accepted March 15, 2005)

ABSTRACT

Corrosion of steel due to chloride attack is a major concern in reinforced concrete structures which are located in the marine environments. In this case, Fick's 2nd law has been used for the prediction of chloride diffusion related with service life of 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 and to investigate the validity of Fick's law to chloride attack combined carbonation. The test results indicate that the chloride ion profiles from Fick's law using the diffusion coefficient of immersion tests is not reflected the effect of separation of chloride ions in carbonation region but valid in sound region in case of combined action. On the other hand, the chloride ion profiles from Fick's law using the diffusion coefficient of Tang and Nilsson's method coincide with test results under dry-wet condition but not under combined condition. The results of present study may imply that the new method for the measurement of diffusion coefficient is required to predict the chloride ion profiles in case of combined action at early.

Keywords : chloride ion diffusion, carbonation, diffusion law, diffusion coefficient

1. 서 론

철근콘크리트 구조물의 성능저하 현상은 물리적인 원인과 화학적인 원인에 따라 동결융해, 마모, 알칼리-골재 반응, 황산염 침투에 따른 콘크리트의 팽창, 산에 의한 침식 등 다양하게 나타나며 그 중에서도 외부의 염소이온 및 이산화탄소가 침투하여 발생하는 철근의 부식 현상은 가장 빈번하게 발생하는 성능저하 현상으로 콘크리트 구조물의 강도저하와 함께 전체적인 내구성능의 저하를 초래하기 때문에 염해 및 탄산화에 대한 개별적인 연구는 다양하게 수행되어왔다¹⁻⁷⁾. 하지만, 실제 구조물의 경우 한 가지 원인에 따른 성능저하 보다는 여러 가지 요인이 복합된 성능저하가 발생할 가능성이 높으며 이 경우 구조물의 내구수명은 각각의 성능저하 현상에 대한 연구결과에 기초하여 예측된 수명과는 매우 다르게 나타날 가능성이

많다. 이에 따라 본 연구에서는 탄산화가 복합적으로 진행되는 경우 콘크리트 구조물 내부의 철근부식을 유발하는 염소이온의 확산과정에 대한 실험을 수행하여 일반적인 경우와 비교·분석하였다.

특히 염해에 의한 열화과정 예측을 위해 일반적으로 사용되고 있는 Fick의 확산법칙 및 전기적인 염소이온 확산계수 산정방법의 복합열화 과정에 대한 타당성 검토를 수행하였으며, 이를 위해 본 논문에서는 침투시간에 따른 염소이온 확산계수와 전기적인 방법으로 구한 염소이온 확산계수를 사용하여 시간에 따른 염소이온 침투량을 예측한 후 이를 실험값과 비교하였다.

2. 실험개요

2.1 시간 및 깊이에 따른 염소이온 농도변화 측정

본 연구에서는 콘크리트 중의 염소이온 확산성에 미치는 탄산화의 영향을 알아보기 위해 1주간 25 °C로 유지된

* Corresponding author

E-mail : concrete@jeonju.ac.kr

©2005 by Korea Concrete Institute

5% 염화나트륨(NaCl) 용액에 대한 침지와 1주간 CO₂농도 10%(온도 40℃, 상대습도 60%) 조건에서의 축진탄산화 실험을 반복하여 실시한 후 반복시간(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^{8,9)}.

또한, 상기 실험결과와의 비교를 위해 1주간 5% 염화나트륨 용액침지와 1주간 공기 중 노출을 반복한 후 동일한 방법으로 염소이온 침투량을 분석하였다. 단, 건습반복 실험에 대한 분석은 건습 반복실험 시작 후 각각 4주, 12주, 28주 및 52주 시점에서 실시하였다. 염소이온 확산에 대한 탄산화 영향 실험은 모든 실험시편을 28일간 수증양생 후 수행하였으며, 표준 시편으로는 길이 100mm, 직경 100mm의 원주형 시편을 제작한 후 염소이온의 일방향 침투를 보장하기 위해 표준 시편의 측면을 불투수성 에폭시 코팅하였다.

한편, 콘크리트 시료는 독일에서 제작한 rotary impact drilling 장치를 이용하여 표면으로부터 2mm 단위의 정밀도로 채취하였다.

2.2 침지실험에 의한 염소이온 확산계수 측정

콘크리트 중으로의 염소이온 침투실험을 통해 침지시간 및 표면으로부터의 거리에 따른 염소이온 농도를 구한 후 각 시점에서의 유효확산계수 및 표면 염소이온 농도는 Fick의 확산방정식의 해 식(1)을 이용하여 구할 수 있다.¹⁰⁾ 이 경우 식(1)을 이용하여 표면 염소이온농도 및 겉보기 확산계수를 구하는 방법은 그래프를 이용한 추정방법 및 curve fitting에 의한 방법으로 나눌 수 있으며, 본 논문에서는 linear curve fitting법을 사용하였다.

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

식(1)에서 C₀, C_i 및 C(x, t)는 각각 시간 t에서 콘크리트 표면의 염소이온 농도, 콘크리트 내부의 초기염소이온농도 및 시간 t, 거리 x에서의 염소이온농도를 나타내며, erfc는 erfc(z) = 1 - erf(z)로 정의되는 “complementary error function”을 나타낸다.

일반적으로 0 ≤ z ≤ √3인 범위에서는 “complementary error function”은 다음과 같은 2차 곡선으로 근사화 할 수 있다¹¹⁾.

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

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 + bx의 직선식으로 표현가능하며, 이 경우 a = √(C₀ - C_i), b = -a/√(12Dt)를 나타낸다. 그러므로, a 및 b를 깊이별 염소이온 농도로부터 구하면 식(4) 및 식(5)로부터 표면 염소이온농도(C₀) 및 염소이온 확산계수(D)를 각각 구할 수 있다.

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

2.3 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 (0.38, 0.42)를 주요 실험변수로 실험을 수행하였다. 한편, 골재는 비중 2.63, 조립률 6.7의 쇄석 굵은 골재 및 비중 2.55, 조립률 2.6의 강사를 사용하였다. Table 1에는 사용된 시멘트 및 플라이애쉬의 화학조성이 나타나있다.

Table 2에는 본 연구에서 사용한 실험변수와 배합설계 내용이 요약되어 있다. 또한, 본 배합의 목표 슬럼프는 150 ± 25 mm 목표 공기량은 4.5 ± 1.5%로서 이를 위해 시험배합을 통해 AE감수제를 적절히 혼입하였다.

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

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

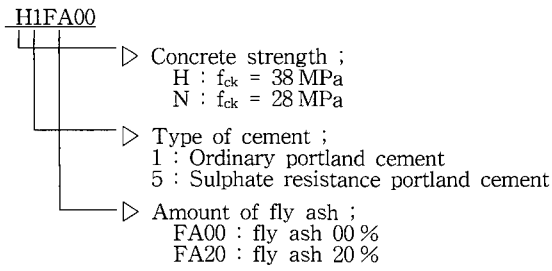


Fig. 1 Test series identification

3. 실험결과 및 고찰

3.1 침지시점별 깊이에 따른 염소이온농도

3.1.1 건습반복실험

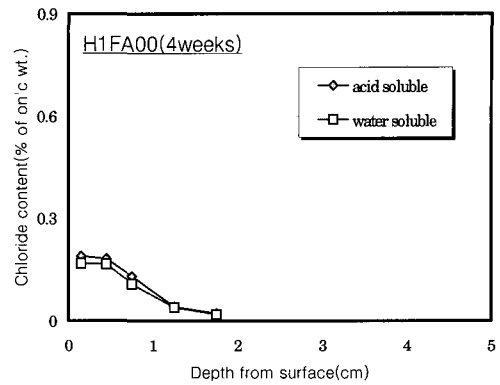
Figs. 2, 3에는 H1FA00 및 H5FA00시편의 경우 침지시간에 따른 산가용성 염소이온농도 및 수용성 염소이온농도가 나타나있다. 이에 따르면 침지초기에는 산가용성 염소이온 농도와 수용성 염소이온농도가 큰 차이를 보이지 않으나, 침지시간이 많이 경과한 후에는 두 가지 염소이온 추출방법에 따른 염소이온농도 차이가 크게 나타나고 있다. 즉, Figs. 2, 3을 보면 5% 염화나트륨 용액에 대한 침지시간이 12주 이내에서는 수용성 염소이온농도의 산가용성 염소이온농도에 대한 비율이 약 90% 정도로 나타나고 있는데 반하여 침지 28주에서는 약 70%, 침지 52주에서는 55~65% 사이의 비율을 보이고 있다. 이것으로부터 외부에서 침투한 염소이온이 프리텔염 등의 형태로 고정화하는 기간이 본 연구의 실험조건 하에서는 최소한 50주 이상 필요하다는 것을 알 수 있다.

각 침지시점별 추정된 외부 염소이온 침투깊이는 4주시점에서는 표면으로부터 8mm 정도이며, 12주시점에서는 10mm, 28주에서는 13mm, 52주에서는 25~30mm 내외이다.

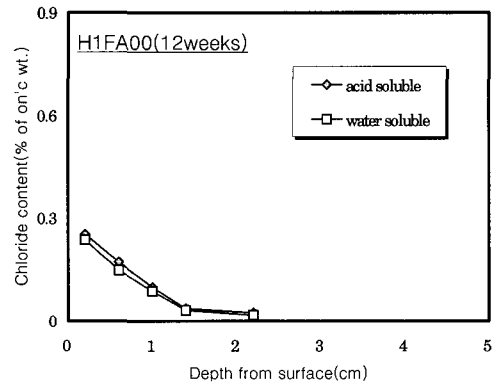
Figs. 4~6에는 5% 염화나트륨 용액에 1주일 침지 및 10%이산화탄소 상태에서 1주일 축진탄산화를 반복한 경우 침지시간에 따른 5종 시멘트에 대한 배합별 산가용성 염소이온농도 및 수용성 염소이온농도가 나타나있다.

3.1.2 탄산화복합실험

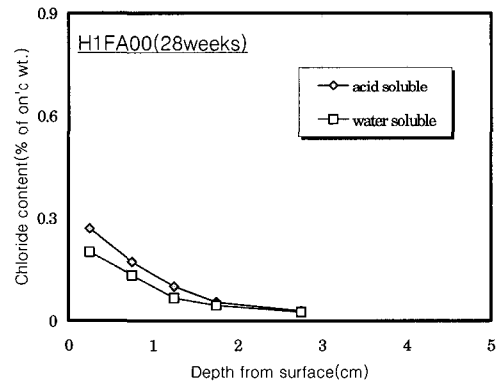
각 침지시간별 산가용성 염소이온농도에 대한 수용성 염소이온농도 비율을 살펴보면 H5FA00배합의 경우 30주까지 약 80~90%, 56주시점에서 70~75%를 나타내고 있으며(Fig. 4 참조), N5FA00배합은 15주 85~93%, 30주 70~80% 및 56주 62~70%를 나타내고 있다(Fig. 5 참조). 이와 같은 현상은 건습반복 실험의 경우와 마찬가지로 외부에서 침투되는 염소이온이 시간의 경과에 따라 프리텔염 등의 형태로 고정화되는 현상을 나타내고 있다고 판단되며, 다만 탄산화가 진행되는 경우 외부에서 침투한 염소이온이 콘크리트 내부에 고정되는 기간이 단순 건습반복



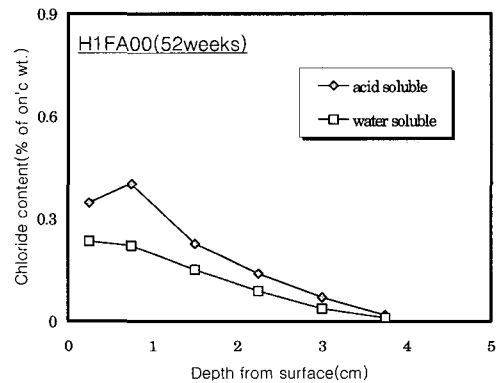
(a) Test duration of 4 weeks



(b) Test duration of 12 weeks

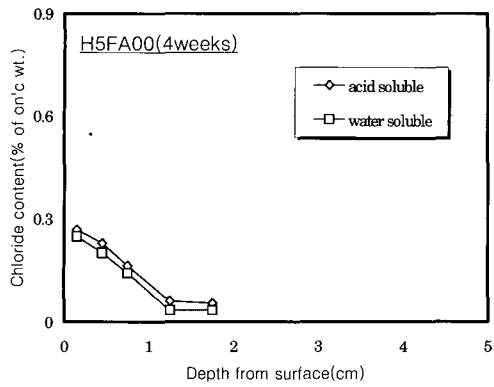


(c) Test duration of 28 weeks

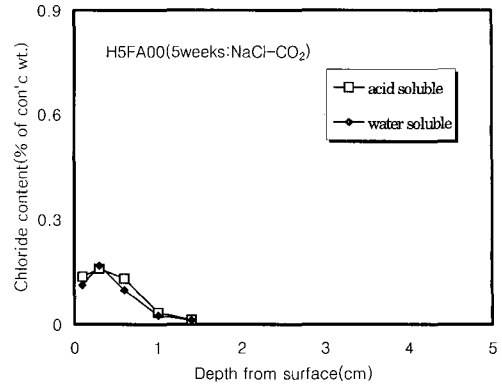


(d) Test duration of 52 weeks

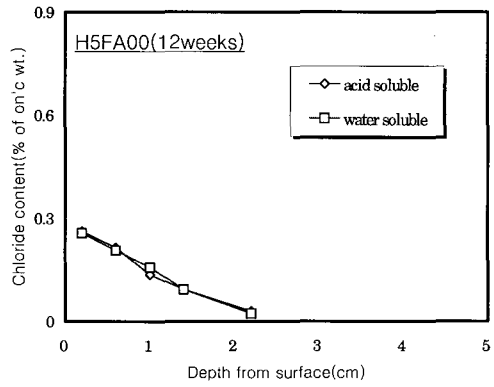
Fig. 2 Chloride ion concentration according to penetration depth (w/c 38 %, type I)



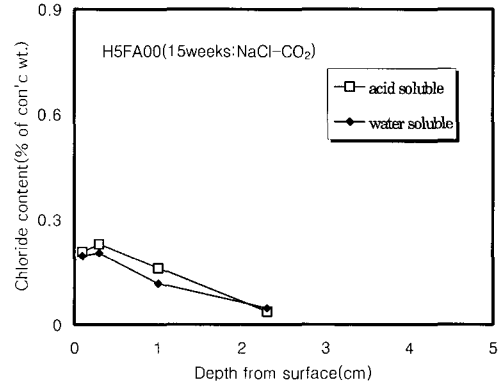
(a) Test duration of 4 weeks



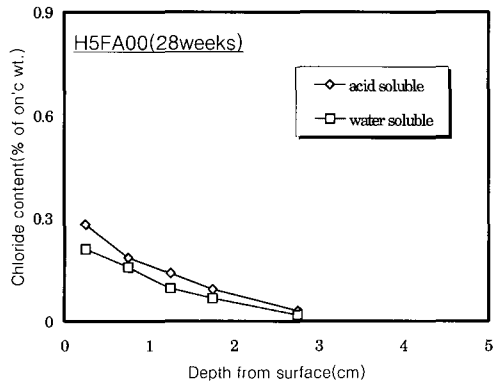
(a) Test duration of 5 weeks



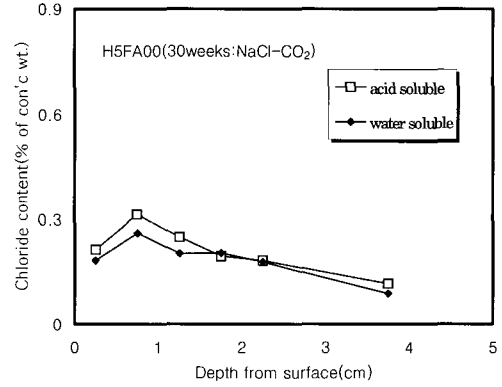
(b) Test duration of 12 weeks



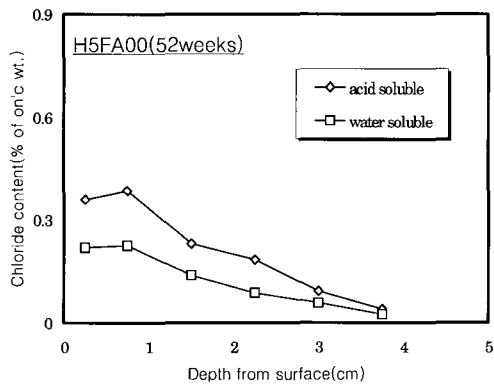
(b) Test duration of 15 weeks



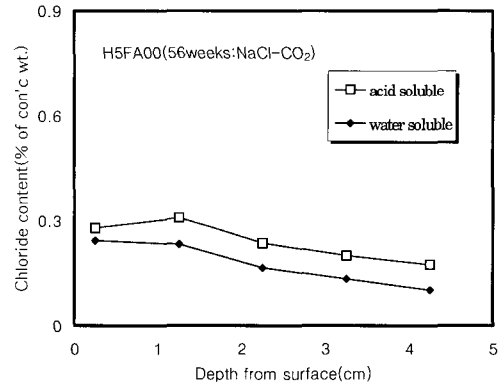
(c) Test duration of 28 weeks



(c) Test duration of 30 weeks



(d) Test duration of 52 weeks



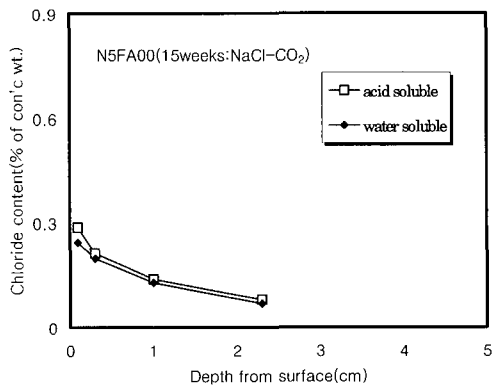
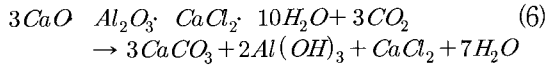
(d) Test duration of 56 weeks

Fig. 3 Chloride ion concentration according to penetration depth (w/c 38 %, type V)

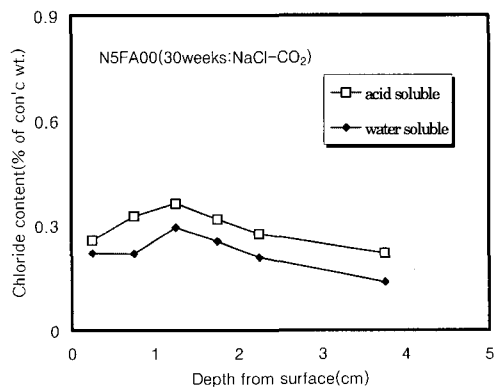
Fig. 4 Chloride ion concentration according to penetration depth (w/c 38%, type V, carbonation)

의 경우와 비교해 다소 길다는 것을 알 수 있다.

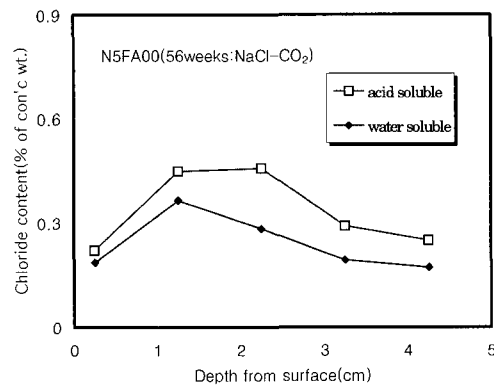
이와 같이 촉진 탄산화 과정이 병행된 경우 고정되는 염소이온농도의 비율이 단순 건습반복시에 비해 낮은 것은 탄산화에 따라 콘크리트 중에 프리텔염으로 고정된 염소이온이 식(6)과 같이 세공용액 중에 해리되기 때문인 것으로 판단된다¹²⁾.



(a) Test duration of 15 weeks



(b) Test duration of 30 weeks

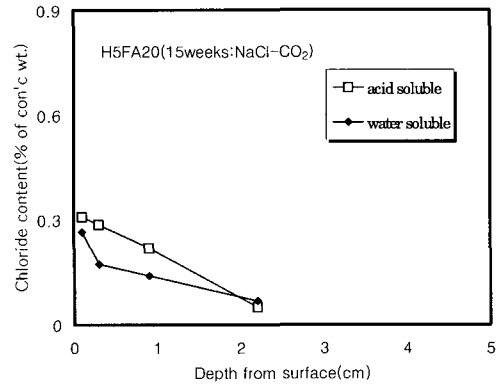


(c) Test duration of 56 weeks

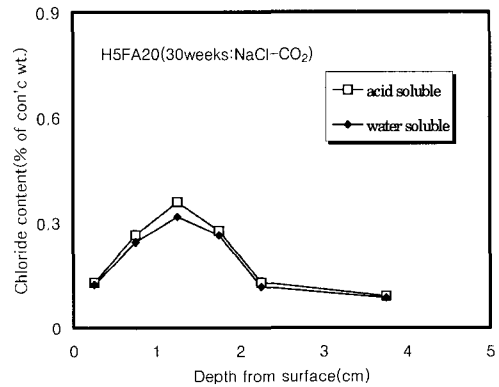
Fig. 5 Chloride ion concentration according to penetration depth (w/c 42%, type V, carbonation)

또한, 콘크리트의 탄산화에 따라 식(6)과 같이 고정된 염소이온이 해리되면 탄산화된 영역에서의 자유 염소이온 농도가 높아지며 농도차에 의한 확산에 의해 탄산화 되지 않은 부분으로 자유염소이온이 이동하여 농축되는 현상이 발생한다¹³⁾.

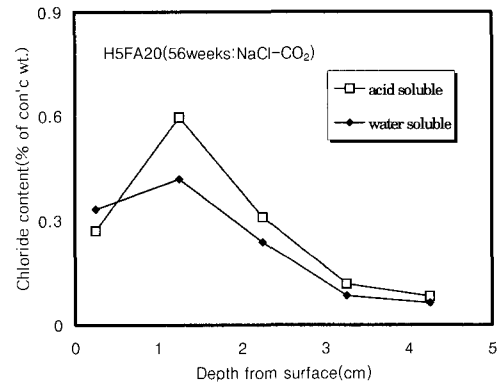
Figs. 5, 6에서 N5FA00배합 및 H5FA20 배합의 경우에 단순건습반복 실험에 의한 결과와 다르게 표면으로부터 10~20mm 깊이인 지점의 염소이온농도가 높은 현상은 이러한 이유로 인해 나타나는 것으로 판단된다.



(a) Test duration of 15 weeks



(b) Test duration of 30 weeks



(c) Test duration of 56 weeks

Fig. 6 Chloride ion concentration according to penetration depth (w/c 38%, type V, fly ash 20%, carbonation)

Table 3 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

특히, 플라이애쉬를 혼입한 경우인 H5FA20배합의 경우에 이러한 현상이 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 6의 경우 30주시점에서의 수용성/산가용성 염소이온 농도의 비율이 90~95%로 15주에 비해 높아졌다가 56주에 다시 낮아지는 현상은 플라이애쉬를 혼입한 경우에는 탄산화 작용이 더욱 활발하기 때문인 것으로 판단된다. 이와 관련하여 Table 3에는 각 배합별 탄산화 깊이 측정결과가 나타나있으며 여기에 표시된 시간은 염소침지 시간을 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 거의 진행되지 않은

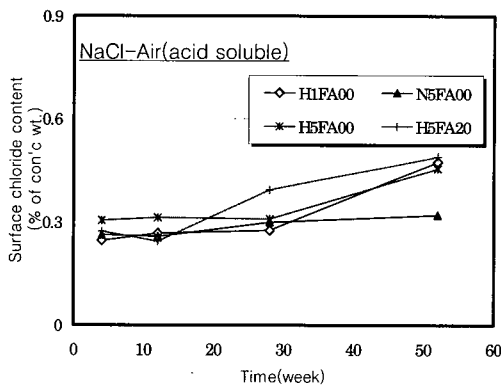
결과를 보이고 있으며, 이것이 탄산화가 진행되는 경우 내부로의 염소이온 침투가 단순 건습반복의 경우에 비해 촉진되기는 하지만 염소이온의 농축 현상이 다른 배합에 비해 뚜렷하게 나타나지 않는 이유인 것으로 판단된다.

3.2 확산계수 측정결과

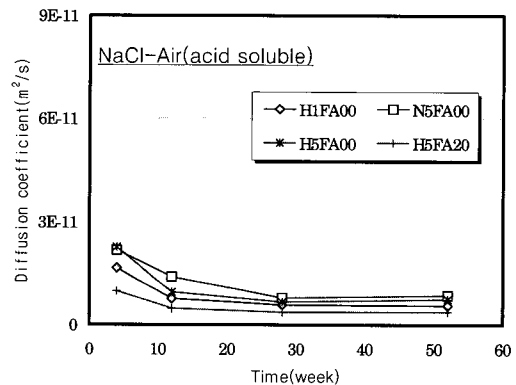
3.2.1 침지실험에 의한 확산계수 측정

Figs. 7, 8에는 2.2항에 제시된 방법을 통해 건습반복 및 탄산화 복합 경우의 각 분석시점에서 침투깊이별 산가용성 염소이온 농도로부터 구한 시간에 따른 표면 염소이온 농도 및 확산계수가 나타나있다.

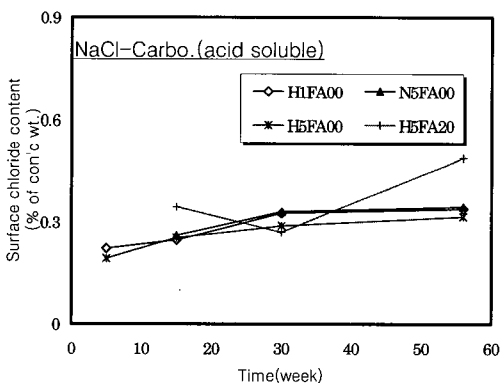
Fig. 7(a)에 제시된 결과는 표면의 염소이온이 용액으로 유출되는 리칭 현상을 고려하지 않은 경우의 표면염소이온 농도를 나타내며 배합에 따라 시편의 간극조직이 치밀하여 콘크리트 내부로의 염소이온 침투가 어려울수록 표면염소이온 농도가 증가하는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 한편, Fig. 7(a), (b)를 비교해보면 탄산화 복합을 병행한 경우의 표면염소이온 농도는 단순 건습반복의 경우에 비해



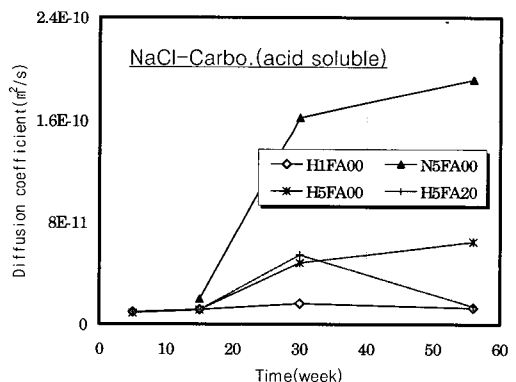
(a) One-week in chloride solution and one-week in dry condition



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



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



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

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

Fig. 8 Cl diffusion coefficient for various mixtures (acid soluble)

낮게 나타나고 있으며, 이것은 탄산화에 따른 염소이온의 내부 이동 촉진 현상을 반영하고 있다고 판단된다.

Fig. 8(a)에서 단순 건습반복의 경우 염소이온 확산계수가 침지 초기에는 급격히 감소하나 시간이 지날수록 점차로 완만해져서 28주 이후에는 거의 일정하게 나타나는 것을 알 수 있다. 반면에 Fig. 8(b)에 제시된 탄산화 복합시 시간에 따른 염소이온 확산계수 변화는 건습반복 실험과는 다른 경향을 보인다. 즉, 탄산화 복합의 경우는 30주까지 모든 배합에 대해 염소이온 확산계수가 증가하다가 이후 H1FA00 및 H5FA20배합의 염소이온 확산계수가 감소하고 나머지 배합은 확산계수의 증가기울기가 완만하게 나타났다. 이로부터 표면부 콘크리트의 탄산화에 의해 내부로의 염소이온 확산성이 일정시점까지는 증가한다는 것을 알 수 있다.

3.2.2 Tang과 Nilsson 방법에 의한 확산계수 측정

Table 4에는 28일간 수중양생 후 Tang & Nilsson에 의해 제안된 촉진 방법에 의한 염소이온 확산계수 측정결과가 제시되어 있다^{14,15)}. 전기적 촉진시험 방법인 Tang 과 Nilsson의 방법은 콘크리트를 통한 염소이온의 유효확산계수를 전기적인 방법으로 촉진하여 구할 후 있는 여러가지 방법 중의 하나로 확산 셀을 이용한 자연 상태하의 유효확산계수 측정값과 동일한 결과를 나타내지는 않지만 빠른 시간 안에 측정할 수 있으므로 현재 많이 사용되고 있는 방법이다.

3.3 확산식에 의한 예측값 및 실험값의 비교

3.3.1 건습반복실험

Figs. 9, 10에는 건습반복의 경우 12주 및 52주 침지 후 실험변수별 산가용성 염소이온 농도 측정결과와 3.2절에 제시된 표면염소이온 농도 및 염소이온 확산계수를 사용하여 식(1)로부터 예측된 깊이에 따른 산가용성 염소이온 농도가 나타내었다. 이들로부터 단순 건습반복의 경우 Fick의 확산법칙에 의한 이론식이 실험결과와 예측에 적합한 것을 알 수 있다. 또한, Figs. 9, 10에는 침지실험에 따른 염소이온 확산계수 대신 Table 4에 제시된 Tang과 Nilsson 방법에 의한 염소이온 확산계수를 사용하여 계산된 깊이별 산가용성 염소이온 농도를 제시하였다. 이를 통해 52주 침지한 경우 H1FA00 및 N5FA00 배합의 경우는 다소 실측값과 차이가 있지만 전체적으로는 비교적 실험

결과와 유사한 것을 알 수 있다. 이로부터 단일 열화 환경에서는 염소이온 확산이 일어나는 경우 장기 침지실험으로부터 구한 시간에 따른 염소이온 확산계수를 사용하여 염소이온 침투량을 예측하는 것이 실측값과 더욱 일치 하지만 Tang과 Nilsson 방법에 의해 얻어진 염소이온 확산 계수를 사용하는 경우에도 비교적 합리적인 예측결과를 나타내고 있다고 판단된다. 단, 이 경우 본 논문에서는 실측된 데이터로부터 추정된 표면염소이온 농도를 사용하였기 때문에 전체적으로 적절한 해석결과를 보인 것으로 판단되며 장기침지 실험을 통하지 않고 전기적인 촉진실험을 통한 염소이온 확산계수를 사용하여 콘크리트 내부로의 염소이온 확산과정을 예측하는 경우에는 표면염소이온 농도를 적절히 예측하는 것이 필수적인 사항으로 판단된다.

3.3.2 탄산화복합실험

Figs. 11 ~ 12에는 탄산화 및 염수침지가 반복되는 경우 실험변수 및 침지시간에 따른 염소이온 침투깊이 해석결과가 실측결과와 비교되어 있다. 이 경우 56주시점에서는 H1FA00 배합을 제외하고는 실험결과와 해석결과가 많은 차이를 보이고 있는 것을 알 수 있으며, 특히, Tang과 Nilsson 방법에 의한 염소이온 확산계수를 사용하여 염소이온 농도변화를 예측하는 경우에는 실측자료로부터 구한 표면 염소이온 농도를 사용했음에도 장기 침지한 경우는 실측자료와 큰 차이를 나타내고 있다.

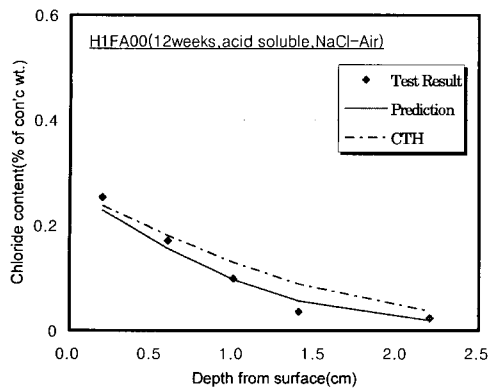
이로부터 콘크리트의 탄산화가 진행되는 경우에는 단순한 전기촉진법에 의해 구한 염소이온 확산계수를 사용하여 침투량을 예측하는 것은 합리적이지 않은 결과를 초래할 것으로 판단된다.

그리고 침지시간에 따라 실측된 자료로부터 구한 시간에 따른 염소이온 확산계수를 사용하여 염소이온 침투정도를 해석한 결과는 해석에 사용한 에러함수의 특성 등으로 인해 탄산화에 따른 염소이온의 침투량이 증가하여 탄산화 경계면에 농축되는 현상을 예측하지는 못하지만 좀 더 깊은 영역의 염소이온 농도는 예측이 가능한 것으로 나타났다. 이것은 적절한 염소이온 확산계수의 사용을 통해 철근위치에서의 염소이온 농도는 예측하는 것이 가능하다는 사실을 나타내고 있다고 판단된다. 단, 이 경우 본 논문에서 사용된 장기침지에 따라 염소이온 확산계수를 구하는 방법은 사용된 배합 및 환경에 따라 큰 영향을 받기 때문에 일반화하기에 어려운 점이 있으며, 모든 구조물에 대해 적용하기에는 실험기간이 과도하게 요구되는 단점이 있으므로 콘크리트 구조물의 사용수명을 예측하기 위해 이러한 방법을 일반적으로 활용하는 것은 쉽지 않을 것으로 판단된다.

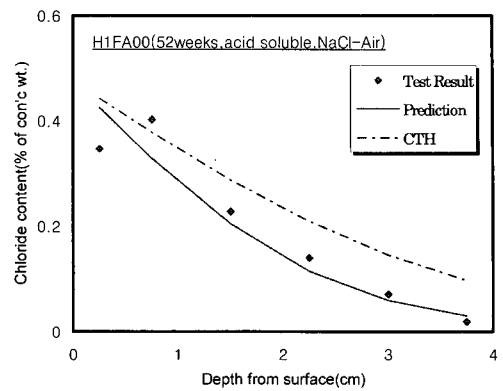
그러므로, 탄산화가 복합된 경우 염소이온 확산계수를 적절히 구하는 것은 앞으로도 많은 연구가 필요한 분야로 판단된다.

Table 4 Chloride diffusion coefficient by Tang and Nilsson's Method

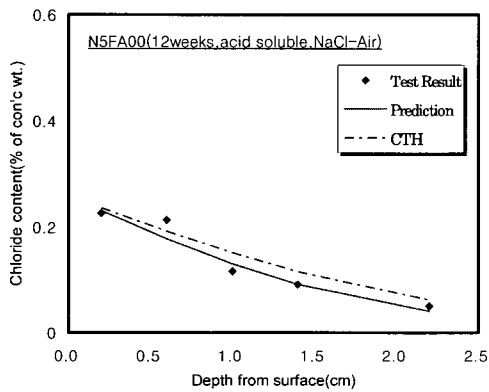
Series	Diffusivity (D_{nssm})	
	m^2/s	$mm^2/year$
H1-FA00	12.8×10^{-12}	404.51
N5-FA00	21.2×10^{-12}	669.88
H5-FA00	15.6×10^{-12}	491.664
H5-FA20	4.82×10^{-12}	152.13



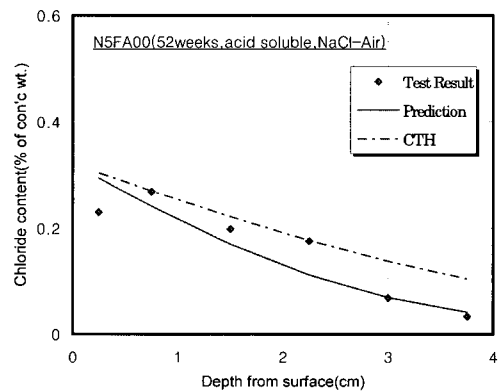
(a) w/c 38 %, type I



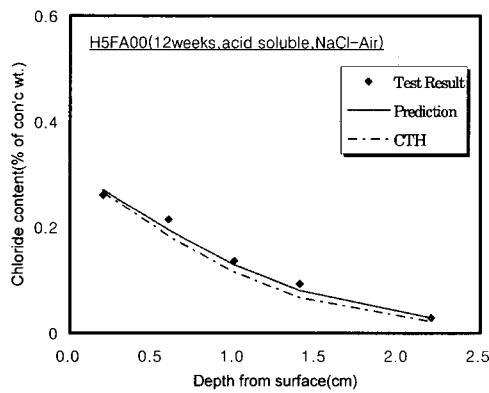
(a) w/c 38 %, type I



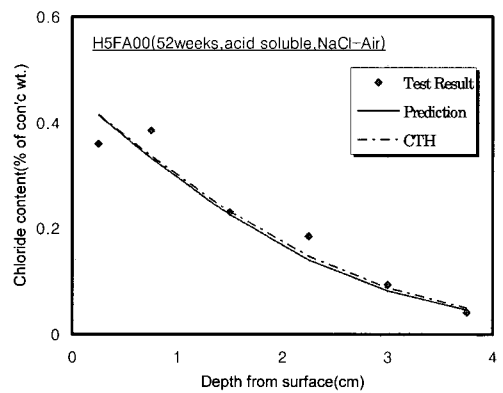
(b) w/c 42 %, type V



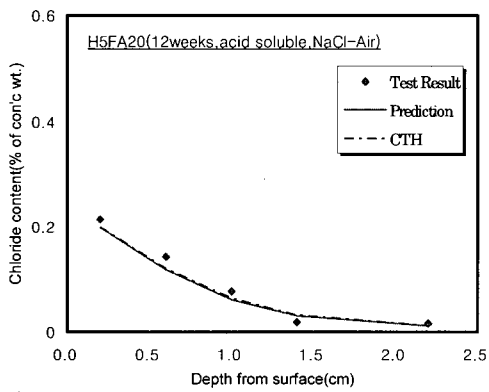
(b) w/c 42 %, type V



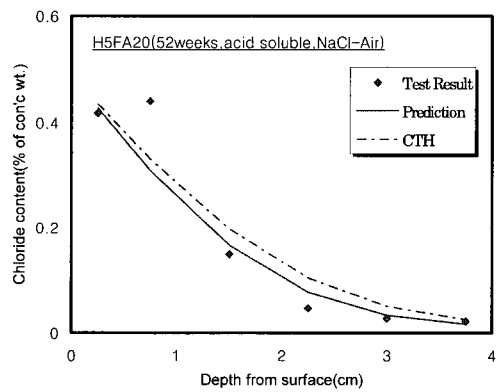
(c) w/c 38 %, type V



(c) w/c 38 %, type V



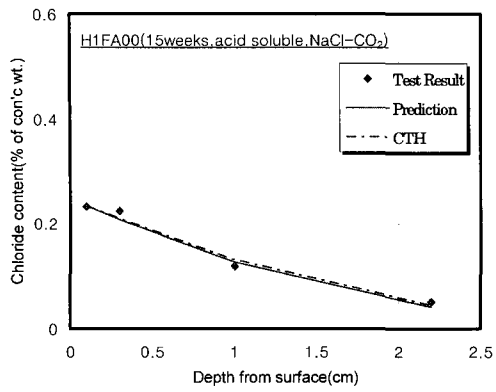
(d) w/c 38 %, type V, fly ash 20 %



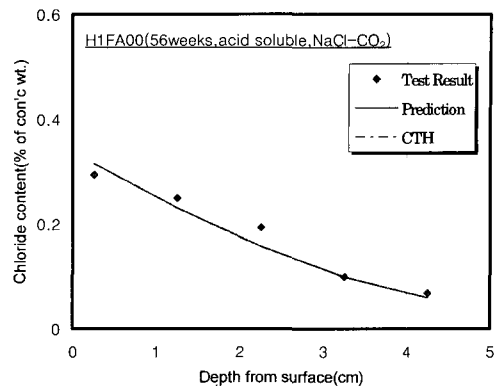
(d) w/c 38 %, type V, fly ash 20 %

Fig. 9 Comparison of test results with analysis data (dry and wet condition, duration of 12 weeks)

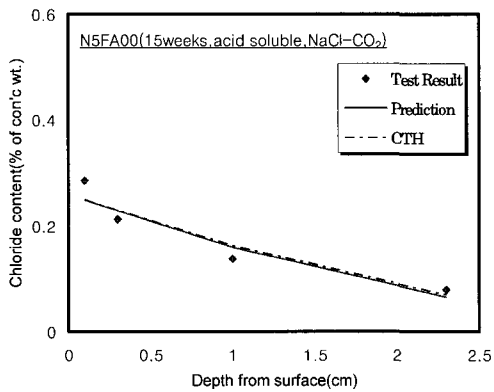
Fig. 10 Comparison of test results with analysis data (dry and wet condition, duration of 52 weeks)



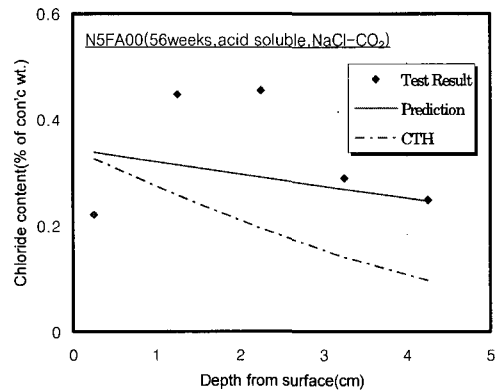
(a) w/c 38 %, type I



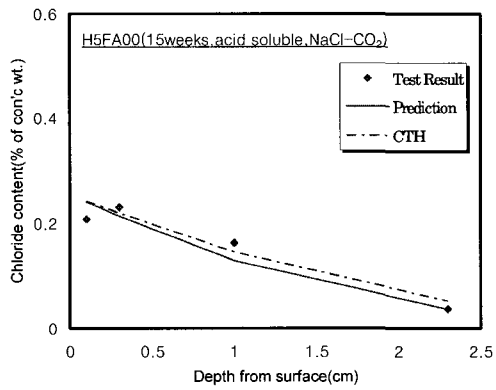
(a) w/c 38 %, type I



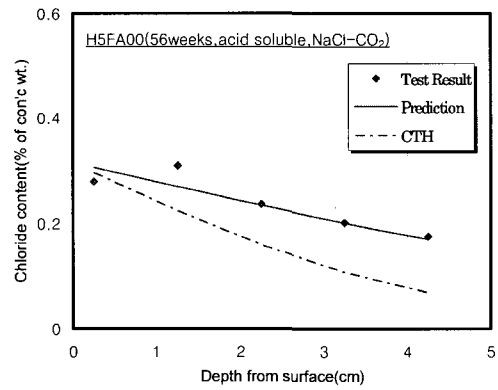
(b) w/c 42 %, type V



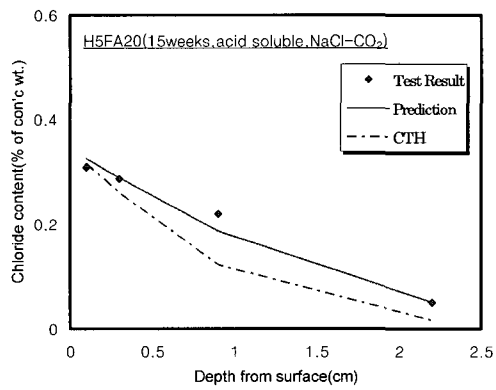
(b) w/c 42 %, type V



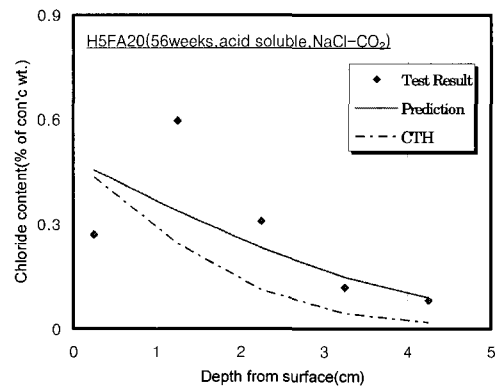
(c) w/c 38 %, type V



(c) w/c 38 %, type V



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



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

Fig. 11 Comparison of test results with analysis data (carbonation condition, duration of 15 weeks)

Fig. 12 Comparison of test results with analysis data (carbonation condition, duration of 56 weeks)

한편, Figs. 11, 12를 통해 위에서 언급한 사항은 동일한 조건하에서 배합에 따라 탄산화 영향을 크게 받을수록 뚜렷이 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 조직구조가 치밀하지 못한 N5FA00 배합 및 플라이애쉬 혼입으로 인해 탄산화에 취약한 H5FA20배합의 경우 Tang과 Nilsson 방법에 의한 염소이온 확산계수를 사용한 해석결과가 실측결과와 제일 큰 차이를 나타내고 있는 것을 알 수 있으며, 유사한 실험결과를 보이는 H1FA00배합과 H5FA00배합의 경우에도 Tang과 Nilsson 방법에 의한 염소이온 확산계수를 사용한 염소이온 해석결과와 실측결과는 H5FA00 배합이 다소 다르게 나타나고 있는 것으로부터 5종 시멘트의 경우가 1종 시멘트에 비해 탄산화 복합에 따른 영향을 다소 크게 받고 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구로부터 도출된 주요 연구결과를 요약하여 기술하면 다음과 같다.

- 1) 건습반복 실험결과 산가용성 염소이온량과 수용성 염소이온량은 단기재령에서는 큰 차이를 보이지 않았으며, 30주 이상의 재령에서 상당한 차이를 나타내었다. 특히, 52주 시점에서 수용성 염소이온량은 산가용성 염소이온량의 60% 정도로 나타나 외부에서 침투한 염소이온이 콘크리트와 반응하여 정상상태에 도달하기 위해서는 상당한 기간이 필요하다고 판단된다.
- 2) 탄산화 복합의 경우 콘크리트 내부로의 염소이온 침투는 가속된다. 이것은 탄산화 된 부분의 프리켈염이 유리되어 염소이온의 농도 구배가 커지기 때문에 염소이온의 확산성이 커지는 것으로 판단되며 이 경우 표면으로부터 10mm 이내 영역의 염소이온농도는 동일 조건의 비탄산화 시편보다 낮아지는 경향을 보인다.
- 3) 건습반복 실험의 경우 침지실험으로부터 추정된 염소이온 확산계수와 Tang과 Nilsson 방법에 의한 염소이온 확산계수를 이용하여 시간에 따른 염소이온 침투량을 예측한 결과 예측값은 실험값과 유사하게 나타났다.
- 4) 탄산화 복합의 경우 Tang과 Nilsson 방법에 의한 염소이온 확산계수를 이용한 염소이온 침투량 예측값은 실험값과 다르게 나타났으며, 침지실험결과로부터 추정된 염소이온 확산계수를 사용하여 예측한 경우 탄산화 영역에서의 염소이온 침투량은 차이를 나타내지만 탄산화 영역을 부분에서의 염소이온 침투량은 적절하게 예측하였다.

참고문헌

1. 김은겸, "콘크리트 구조물의 염화물 이온 침투 거동 해석", 콘크리트학회 논문집, 9권 6호, 1997. 12, pp.233~241.
2. 문한영 외, "해수 침식을 받은 콘크리트의 성능저하 원인 규명", 대한토목학회 논문집, 22권 1A호, 2002. 1, pp.171~179.
3. Sandberg, P., Tang, L., and Andersen, A., "Recent studies of chloride ingress in uncracked marine concrete at various exposure times and elevations," *Cement and Concrete Research*, Vol.28, No.10, 1998, pp.1489~1503.
4. Thomas, M., "Chloride thresholds in marine concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol.26, No.4, 1996, pp.513~519.
5. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., and Fardis, M. N., "A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation," *AIChE Journal*, Vol.35, No.10, Oct. 1989, pp.1639~1650.
6. CEB Task Groups, *New approach to durability design*, CEB Bulltin d'Information, Lausanne, No.238, May 1997.
7. Clifton, J. R. and Knab, L. I., *Service life of concrete*, NISTIR 89-4086, National Bureau of Standards U.S. Department of Commerce, USA, 1989, pp.29~47.
8. ASTM C1152-97, *Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete*, ASTM, Philadelphia, 1997.
9. ASTM C1218-97, *Standard test method for water-soluble chloride in mortar and concrete*, ASTM, Philadelphia, 1997.
10. Kdroff, J. and Hilsdorf, H. K., *Performance Criteria for Concrete Durability*, RILEM report 12, E & FN Spon, London, 1995, pp.4~7.
11. Abramowitz, M. and Stegun, I. A., *Handbook of Mathematical Functions*, Dover Publications, Inc, New York, 1970.
12. 한국콘크리트학회, "콘크리트진단 및 유지관리", 기문당, 2002. pp.96~105.
13. Bakker, R. F. M., *Corrosion of steel in concrete*, Report of the Technical Committee 60-CSC, RILEM, 1988, pp.47~54.
14. Tang, L. and Nilsson, L. O., "Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field," *ACI Material Journal*, 1992, pp.49~53.
15. Tang, L. and Nilsson, L. O., "A Discussion of the Paper-Calculation of Chloride Diffusivity in Concrete from migration Experiment in Non-steady state Condition," *Cement and Concrete Research*, Vol.25, No.5, 1995, pp.1133~1137.

요 약

철근콘크리트 구조물의 성능저하와 관련되어 외부염소이온의 침투에 따른 철근부식은 가장 빈번하게 발생하는 현상으로 이에 따른 사용수명의 예측을 위해서는 Fick의 확산법칙을 이용한 염소이온 확산해석 방법에 대해 많은 연구가 수행되어왔다. 그러나, 탄산화가 복합적으로 작용하는 경우에 대한 연구는 최근에 이르러 수행되고 있는 실정이며 이에 따라 본 연구에서는 탄산화가 복합적으로 작용하는 경우 외부염소이온 침투에 대한 실험결과와 Fick의 확산방정식에 따른 예측결과를 비교하여 이의 타당성을 검토하였다. 이 경우 Fick의 확산방정식에 따른 깊이별 염소이온농도 예측결과는 탄산화 영역에서의 염소이온 해리에 따른 염소이온 침투촉진 현상을 적절히 반영하지 못하고 있는 것으로 나타났다. 그러나, 침지실험으로부터 구한 표면염소이온 농도 및 염소이온 확산계수를 사용하는 경우 탄산화 영역보다 깊은 영역에서의 염소이온농도는 실험결과와 비교적 일치하였다. 한편, 전기적인 촉진법에 의해 구한 염소이온 확산계수를 Fick의 확산방정식에 사용하는 경우 단순 건습반복 실험에 따른 깊이별 염소이온농도는 적절히 예측할 수 있지만 탄산화가 복합적으로 작용하는 경우에 예측된 염소이온농도는 실험결과와 많은 차이를 나타내었다. 이로부터 탄산화가 복합적으로 작용하는 경우 외부염소이온 침투정도를 조기에 예측하기 위해서는 콘크리트의 염소이온 확산계수를 적절히 측정하기 위한 새로운 방법이 요구되는 것을 알 수 있다.

핵심용어 : 염소이온 확산, 탄산화, 확산법칙, 확산계수
