

콘크리트 구조물의 단일 및 복합열화 환경하에서의 염소이온 확산특성

오병환^{1)*} · 강의영¹⁾ · 인광진¹⁾ · 이성규²⁾ · 서정문³⁾

¹⁾ 서울대토목공학과 ²⁾ 원자력안전기술원 ³⁾ 한국원자력연구소

(2002년 4월 9일 원고접수, 2002년 7월 10일 심사완료)

Diffusion Characteristics of Chloride Ion under Single and Combined Attacks in Concrete Structures

Byung-Hwan Oh^{1)*}, Yi-Rong Jiang¹⁾, Kwang-Jin In¹⁾, Sung-Kyu Lee²⁾, and Jeong-Moon Seo³⁾

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

²⁾ Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon, Korea

³⁾ KAERI, Daejeon, 305-353, Korea

(Received April 9, 2002, Accepted July 10, 2002)

ABSTRACT

Durability is a major concern in the design and construction of concrete structures which are located in the sea environments. In particular, the combined action of chlorides, sulfates, and carbonation may influence greatly the deterioration behavior of concrete structures. The purpose of the present study is to explore the diffusion characteristics of chloride ions in concrete structures under combined deterioration conditions. The present test results indicate that the chloride penetration into concrete structures is more pronounced under combined attacks of chlorides, sulfates and carbonation. The diffusion coefficients and surface chloride contents were found to increase under combined multiple deterioration conditions. The present study provides quantitatively the penetration and diffusion characteristics of chloride ions in concrete structures under various deterioration conditions. The results of present study may be efficiently used for the realistic design of concrete structures under combined deterioration conditions.

Keywords : combined deterioration, chloride, sulfate, carbonation, surface chloride content, diffusion coefficient

1. 서 론

구조재료로서의 콘크리트의 중요성이 커지면서 콘크리트를 재료로 한 많은 구조물들이 건설되고 있다. 특히 근래에는 지하구조물이나 해양구조물, 하수처리구조물과 같이 열악한 환경에 노출되는 구조물의 건설이 점점 증가하고 있는 실정이다. 이러한 구조물들은 물리·화학적 요인 등에 의해서 시간이 경과함에 따라 성능저하 현상이 일어나게 되어 설계수명기간 동안 시설물 본래의 목적인 안전성과 기능성이 확보되기 어렵다^{1~4)}. 특히 해양콘크리트 구조물의 경우 항상 염분과 접하고 있어 염해로 인한 성능저하가 우려되어 설계, 시공 및 유지관리의 각 단계에서 구조물의 내구성을 고려한 적절한 대응조치가 취해져야 한다.

이러한 이유로 인해 기존의 콘크리트 구조물의 설계에

있어서 설계자들은 대부분 재료의 강도특성에 주의를 기울여 왔으나 최근 들어 구조물의 수명예측을 위한 재료의 내구성에도 많은 연구가 수행되고 있으며 이러한 내구성을 고려해 설계된 콘크리트 구조물은 성능저하 현상에 대하여 저항력을 가지게 되어 내구성이 구조물 설계에 있어서 하나의 중요한 인자로 대두되고 있는 실정이다^{5~12)}.

콘크리트 내부로 침투하는 염소이온에 의한 철근의 부식은 구조물의 성능저하를 유발하는 가장 중요한 요인으로 인식되면서 많은 연구자들에 의해 콘크리트 내부로의 염소이온 확산에 관한 연구가 이루어졌다^{13~25)}. 그 중에서도 단일염소이온의 침투기구 및 철근의 부식임계농도와 관련된 실험 및 이론적인 연구에서는 많은 성과가 나타나고 있다. 그러나 현존하는 콘크리트 구조물의 경우 염화물뿐만 아니라 황산염과 중성화 등이 복합적으로 작용하는 경우가 대부분이며 이러한 콘크리트 구조물의 성능저하를 예측하기 위해서는 이들의 상호작용에 의한 영향을 고려해야만 한다^{11,14)}.

그러므로 본 연구의 목적은 염해, 황산염, 중성화가 복

* Corresponding author

Tel : 02-880-7350 Fax : 02-887-0349
E-mail : civilcon@gong.snu.ac.kr

합된 환경하에서 열화실험을 통해 콘크리트 내부로의 염소이온의 확산과정을 비교·분석하여 콘크리트 구조물의 복합열화 특성을 구명하는데 있다.

2. 염해와 황산염 및 중성화 3종 복합열화 실험

2.1 실험변수 및 배합

본 연구에서는 원자력발전소 등의 건설에 사용되는 콘크리트 강도로서 압축강도 380 kgf/cm²을 기준으로 하였으며 부가적으로 보통강도 280 kgf/cm²의 경우를 실험에 포함하였다. 또한 플라이애쉬의 염소이온 확산특성을 분석하기 위해 플라이애쉬를 0% 및 20% 혼입한 실험변수를 포함하였다. 또한, 황산염 환경하에서의 내황산염 시멘트인 5종 시멘트의 효과를 고려하기 위해 1종 및 5종 시멘트를 사용하여 각각에 대한 침지실험을 수행하였다. Table 1에는 실험에서 사용된 실험변수 및 상세배합이 나타나 있다.

2.2 실험방법

염소이온 및 황산염 이온이 복합적으로 작용하는 경우의 염소이온 확산특성을 구명하기 위해 염수 단일용액과 염수와 황산염 복합용액 침지실험을 실시하였다. 또한 중성화가 복합되었을 경우의 염소이온 확산특성도 비교하기 위해 염수와 황산염 복합용액 침지와 중성화를 반복하는 실험도 함께 실시하였다.

표준 침지시편으로는 길이 10 cm, 직경 10 cm의 원주형 시편을 사용하였으며, 염소 이온의 일방향 침투가 일어나도록 시편의 측면을 불투수성 에폭시로 코팅하였다. 이들 시편중 염수단일용액과 염수와 황산염 복합용액 침지시편은 기준구조물의 견습이 반복되는 효과를 고려하기 위하여 1주일 용액침지와 1주일 기증노출을 반복하였고, 중성화의 경우는 1주일 염수와 황산염 복합용액 침지와 1주일 중성화를 반복하였다. 용액의 농도는 5%염화나트륨 단일 용액 및 5%염화나트륨+10%황산나트륨 복합용액을 사용하였으며, 중성화는 온도 30 °C, 상대습도 60%, CO₂농도 10%의 조건에서 촉진중성화시험을 실시하였다.

침지시간(4주, 12주, 28주, 52주) 및 표면으로부터의 깊이에 따른 산가용성 및 수용성 염소이온 침투량을 분석하였으며, 기존의 염소이온 확산모델식 중 가장 널리 사용되는 1차원 염소이온 확산방정식인 식 (1)과 실험결과를 비교하기 위해서 Tang & Nilsson에 의해 제안된 촉진 CTH 방법(CTH rapid method)으로 각 배합에 대하여 염

소이온 확산계수와 초기염소이온 농도를 측정하였다.

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

여기서, C_s : 콘크리트 표면의 시간에 따른 염소이온 농도

C_i : 콘크리트 내부의 초기 염소이온농도

$C(x, t)$: 시간 t , 거리 x 에서의 염소이온농도

D : 염소이온 확산계수 (diffusion coefficient)

erf : 에러함수 (error function)

한편 채취된 시료로부터 산가용성 및 수용성 염화물을 추출하기 위해 ASTM C1152에 제시된 방법에 의해 수행하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 단일염소이온 확산실험

3.1.1 염소이온 프로파일

다음의 Fig. 2는 단일 염수침지 1주간 견습반복의 실험을 통해 얻은 각 배합별 4주, 12주, 28주, 52주에 측정된 산가용성 염소이온 침투량이다.

콘크리트 침지기간이 증가할수록 콘크리트 속으로 침투

Table 1 Mixture proportions for test series
(unit : kg/m³)

Test series	Cement Type	W/B	Cement	Fly ash	Water	Fine agg.	Coarse agg.
H1 FA00	Type I	0.38	450	-	171	621	1034
H5 FA00			450	-	171	621	1034
H5 FA20		0.42	360	90	171	609	1014
N5 FA00		0.42	405	-	170	636	1058

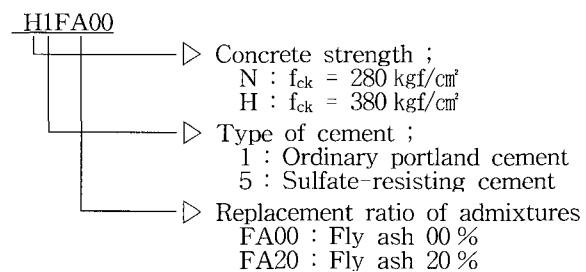


Fig. 1 Test series identification

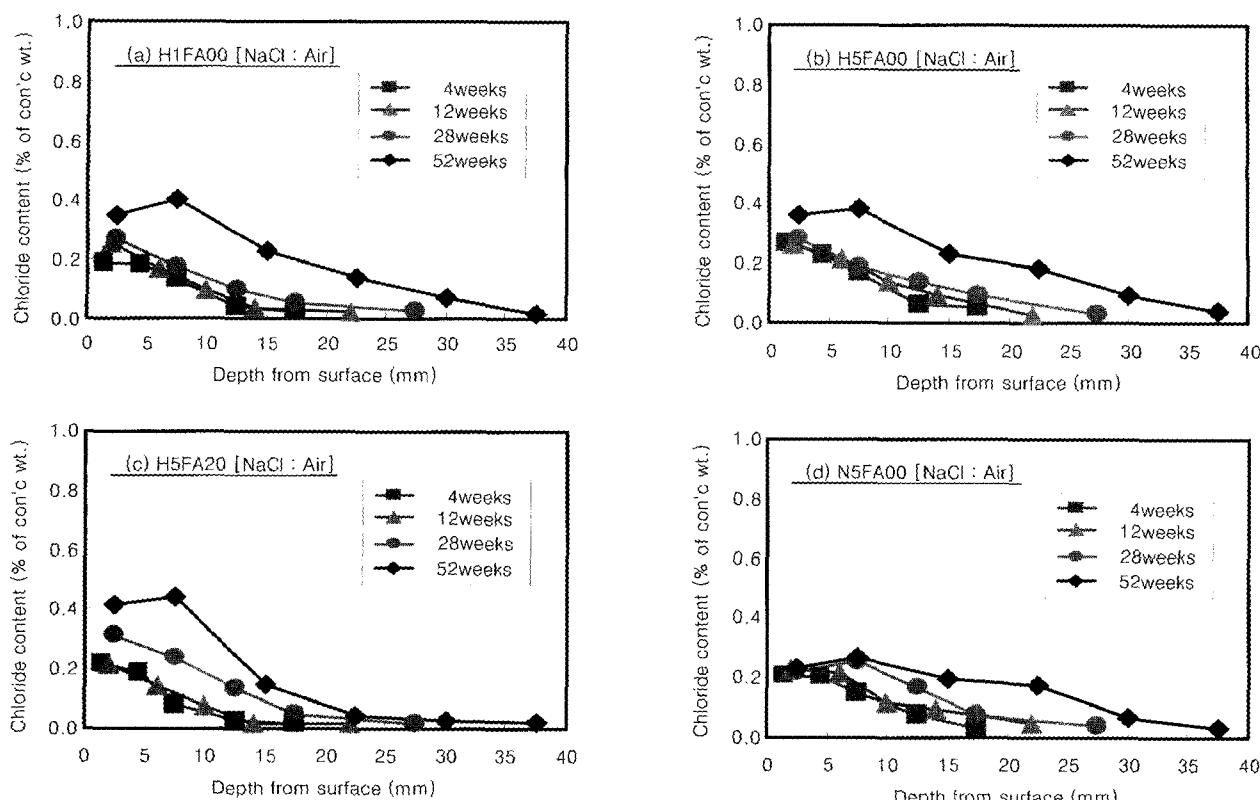


Fig. 2 Chloride profiles for various mixtures under cyclic one-week in chloride solution and one-week in dry condition

된 염소이온의 농도가 크게 나타났고, 반면에 깊이가 증가 할수록 침투된 염소이온의 농도가 적은 것으로 나타났다.

H1FA00과 H5FA00의 염소이온 침투경향이 매우 비슷 하였으며, 이것은 염수 단일침지 견습반복시 강도가 비교적 높은 경우 염소이온 침투가 시멘트 종류에 큰 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 또한 H5FA20의 경우 H1FA00과 비교하여 얇은 콘크리트 깊이에서는 염소이온 침투량의 차이가 작았으나 깊이가 증가할수록 침투량이 현저히 감소하였다. 즉, 플라이애쉬 혼입으로 염소이온의 침투를 줄일 수 있는 것으로 나타나고 있다.

3.1.2 표면염소이온농도

Fig. 3은 앞에 제시된 염소이온 프로파일로부터 염소이온 확산모델식인 식 (1)을 이용한 선형회기분석을 통하여 구한 단일 염수침지 1주간 견습반복시의 표면염소이온농도이다.

이 그래프를 통하여 표면염소이온의 농도는 시간에 따라 점차로 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. N5FA00의 경우가 표면염소이온농도의 증가율이 가장 완만했으며, H5FA00의 증가율이 가장 크게 나타났다.

3.1.3 염소이온의 확산계수

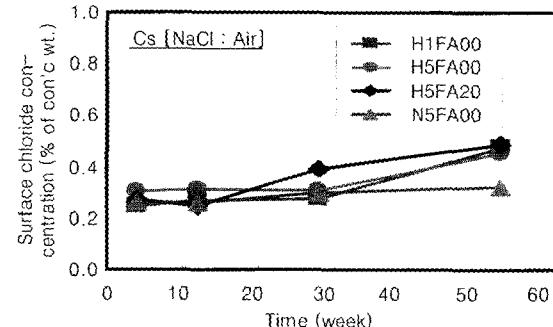


Fig. 3 Surface chloride contents for various mixtures under cyclic one-week in chloride solution and one-week in dry condition

Fig. 4는 역시 염소이온 프로파일로부터 염소이온 확산 모델식인 식 (1)을 이용한 선형회기분석을 통하여 구한 단일 염수침지 1주간 견습반복시의 염소이온의 확산계수이다.

이 그래프를 통하여 염소이온의 확산계수는 시간에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 확산계수는 침지 초기에는 급격히 감소하나 시간이 지날수록 점차로 완만해져서 28주 이후에는 거의 일정한 것을 알 수 있다. 이것은 재령 초기에는 콘크리트 강도의 미발현으로 인해 염소이온의 확산이 빠르게 이루어지나 강도가 충분히 발현되는 장기

재령쪽으로 갈수록 확산계수는 점차 감소하여 일정하게 유지되는 것으로 생각된다.

또한 그 경향도 확인해 구분되는데, 플라이애쉬를 첨가한 H5FA20의 경우의 확산계수가 가장 작게 나타났으며 보통강도인 N5FA00의 경우가 가장 크게 나타났다. 시멘트 종류별로 살펴보면 보통포틀랜트 시멘트를 사용한 H1FA00에 비해 내황산염 시멘트를 사용한 H5FA00의 확산계수가 다소 크게 나타났다.

3.2 황산염 작용시 염소이온 확산영향에 관한 실험

3.2.1 염소이온 프로파일

다음의 Fig. 5는 염수와 황산염 복합용액 침지 1주간 건습반복의 실험을 통해 얻은 각 배합별 4주, 12주, 28주, 52주에 추정된 산가용성 염소이온 침투량이다.

단일 염수침지시의 경우와 마찬가지로 콘크리트 침지기간이 증가할수록 콘크리트 속으로 침투된 염소이온의 농도가 크게 나타났고, 반면에 깊이가 증가할수록 침투된 염소이온의 농도가 적은 것으로 나타났다. 그러나 단일 염수침지의 경우 28주까지 염소이온 침투량이 크게 증가하지 않았으나 황산염 복합침지의 경우 염소이온 침투량의 증가가 두드러졌다. 또한 전체적인 프로파일을 비교해 보더라도 단일 염수침지에 비해 많은 침투량을 나타내었다.

H1FA00과 H5FA00의 염소이온 침투경향이 매우 비슷하였으며, N5FA00의 경우 52주 염소이온 침투량이 상당히 크게 나타났다. 또한 H5FA20의 경우 H5FA00과 비교하여 얇은 콘크리트 깊이에서는 염소이온 침투량이 다소 크게 나타났으나 깊이가 증가할수록 침투량이 현저히 감소하여 깊이 15 mm 이상에서는 H5FA00보다 더 작은 값을 나타내 플라이애쉬의 효과가 큰 것으로 나타났다.

3.2.2 표면염소이온농도

Fig. 6은 앞에 제시된 염소이온 프로파일로부터 염소이온 확산모델식인 식 (1)을 이용한 선형회기분석을 통하여

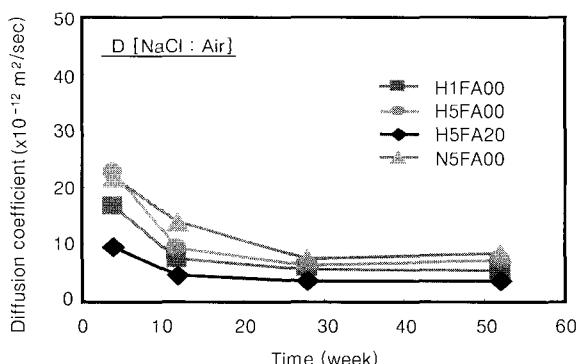


Fig. 4 Chloride diffusion coefficient under cyclic one-week in chloride solution and one week in dry condition

구한 염수와 황산염 복합용액 침지 1주간 건습반복시의 표면염소이온농도이다.

이 그래프를 통하여 표면염소이온의 농도는 시간에 따라 점차로 증가하는 경향을 나타낼 수 있다. 단일

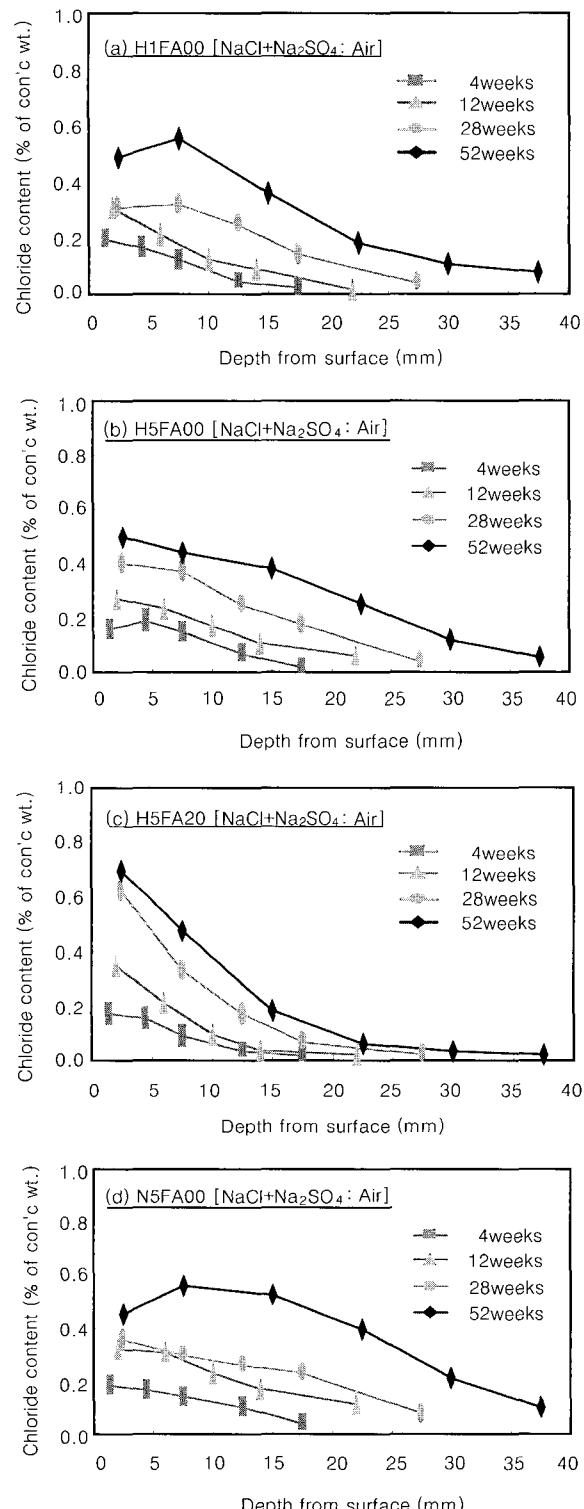


Fig. 5 Chloride profiles for various mixtures under cyclic one-week in (chloride+sulfate) solution and one-week in dry condition

염수침지의 경우(Fig. 3)와 비교해 보면 염수 및 황산염 복합용액 침지시(Fig. 6)의 시간에 따른 표면염소이온의 증가정도가 단일 염수침지의 경우에 비해 비교적 크게 나타났다.

이것은 황산염이 콘크리트 수화물인 C_3A 와 반응하는 과정에서 에트린가이트와 같은 팽창성 산물을 생성하여 부피팽창에 의한 콘크리트 표면의 열화가 염소이온의 침투를 촉진한 것으로 보인다. 실제로 실험을 하는 과정에서 황산염 복합용액 침지의 경우 28주정도 경과하면서 표면박리가 발생하는 것이 관찰되었다.

H1FA00과 N5FA00의 경우 표면염소이온농도가 상당히 비슷한 경향을 보였으며, H1FA00과 H5FA00의 차이가 적은 것으로 나타나 고강도 콘크리트의 경우 시멘트의 종류에 따라 표면염소이온의 농도는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

3.2.3 염소이온의 확산계수

Fig. 7은 염소이온 프로파일로부터 염소이온 확산모델식인 식 (1)을 이용한 선형회기분석을 통하여 구한 염수와 황산염 복합용액 침지 1주간 건습반복시의 염소이온의 확산계수이다.

이 그래프를 통하여 단일 염수침지에서와 마찬가지로 염수와 황산염 복합용액 침지에서도 염소이온의 확산계수는 시간에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 확산계수는 시간이 지날수록 점차로 완만해져서 28주 이후에는 거의 일정한 것을 알 수 있다. 단일 염수침지(Fig. 4)와 비교해 볼 때 복합열화(Fig. 7)의 경우 확산계수의 값들이 대체적으로 크게 나타났다.

염수단일 침지와 마찬가지로 H5FA20, H1FA00, H5FA00, N5FA00의 순서로 확산계수가 크게 나타나며, H1FA00과 H5FA00의 경우 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이것은 콘크리트의 강도가 높은 경우 시멘트의 영향이 적은 것으로 평가할 수 있다.

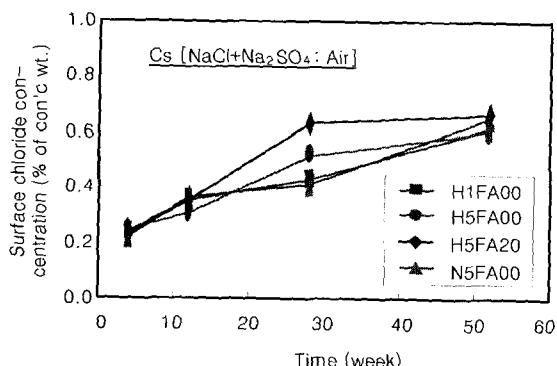


Fig. 6 Surface chloride content for various mixtures under cyclic one-week in (chloride+sulfate) solution and one-week in dry condition

3.3 염해와 황산염 및 중성화 복합작용시 염소이온 확산영향에 관한 실험결과 분석

3.3.1 염소이온 프로파일

다음의 Fig. 8은 염수와 황산염 복합용액 침지 1주간 중성화 반복의 실험을 통해 얻은 각 배합별 4주, 12주, 28주, 52주에 측정된 산가용성 염소이온 침투량이다.

앞의 두 경우와 마찬가지로 콘크리트 침지기간이 증가 할수록 콘크리트 속으로 침투된 염소이온의 농도가 크게 나타났고, 콘크리트 표면으로부터의 깊이가 증가할수록 침투된 염소이온의 농도가 적은 것으로 나타났다. 단일 염수침지시와 비교하여 모든 배합에서 대체적으로 염소이온의 침투량이 많은 것으로 나타났고, 염수 및 황산염 1주간 건습반복의 경우와 비교하면 플라이애쉬를 첨가하지 않은 H1FA00, N5FA00, H5FA00의 경우의 침투량은 작게 나타났고, 플라이애쉬를 첨가한 H5FA20의 경우는 더 크게 측정되었다. 앞의 세가지 배합의 경우 중성화 되었음에도 불구하고 더 작은 침투량을 보인 이유는, 실험실에서의 촉진중성화 실험은 오히려 콘크리트의 강도를 향상시키는 결과를 보인다는 연구보고와 관계가 있다고 생각된다.

또한 플라이애쉬를 첨가하지 않은 세가지 배합의 경우 침투경향이 비슷하였으며, H5FA20의 경우 시간이 지남에 따라 급격히 증가하여 52주 염소이온 침투량이 15 mm에서 0.5%를 넘어서는 결과를 나타냈다. 따라서 염해와 중성화를 동시에 받는 콘크리트 구조물의 경우 플라이애쉬의 사용은 많은 주의를 요하는 것으로 판단된다.

3.3.2 표면염소이온농도

Fig. 9는 앞에 제시된 염소이온 프로파일로부터 염소이온 확산모델식인 식 (1)을 이용한 선형회기분석을 통하여 구한 염수와 황산염 복합용액 침지 1주간 중성화 반복시의 표면염소이온농도이다.

이 그래프를 통하여 표면염소이온의 농도는 시간에 따라

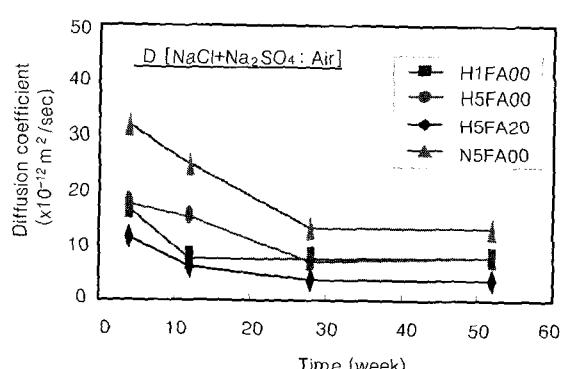


Fig. 7 Chloride diffusion coefficient for various mixture under cyclic one-week in (chloride+sulfate) solution and one-week in dry condition

이 그래프를 통하여 표면염소이온의 농도는 시간에 따라 점차로 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 단일 염수침지의 경우와 비교해 보면 전체적으로 크게 나타났고, 염수 및 황산염 복합침지의 경우와 비교해 보면 플라

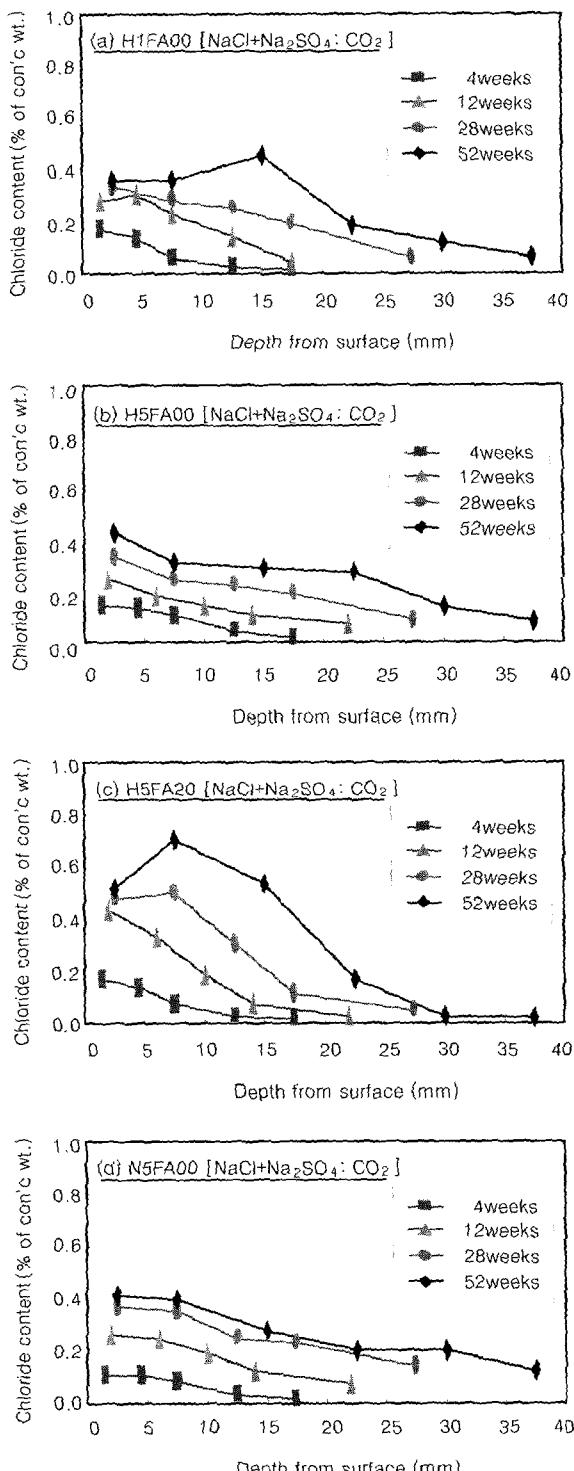


Fig. 8 Chloride profiles for various mixtures under cyclic one-week in (chloride + sulfate) combined solution and one-week carbonation

이애쉬를 첨가하지 않은 세가지 배합의 경우의 표면염소이온농도는 작게 측정된 반면에 플라이애쉬를 혼입한 H5FA20의 경우의 표면염소이온농도는 더 크게 나타났다.

H1FA00, N5FA00, H5FA00의 경우 표면염소이온농도가 매우 비슷한 경향을 보였으며, H5FA00의 경우가 H1FA00의 경우보다 작은 것으로 보아 5종시멘트의 사용이 염수와 황산염 및 중성화 복합의 경우에 약간의 효과가 있는 것으로 보인다.

3.3.3 염소이온의 확산계수

Fig. 10은 염소이온 프로파일로부터 염소이온 확산모델식인 식 (1)을 이용한 선형회기분석을 통하여 구한 염수와 황산염 복합용액 침지 1주간 중성화 반복시의 염소이온의 확산계수이다.

이 그래프를 통하여 볼 때 중성화가 복합된 경우의 확산계수는 시간에 따라 감소하는 경향이 뚜렷하지 않았으며, 침지초기에는 단일 염수침지와 염수 및 황산염 복합침지시 보다 염소이온의 확산계수가 작게 측정되었으나, 시간이 지날수록 오히려 확산계수가 더 크게 나타나는 결과를 보였다.

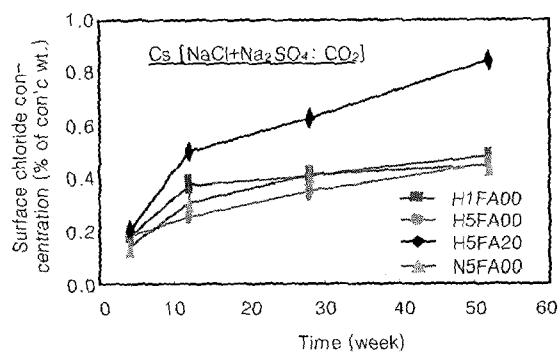


Fig. 9 Surface chloride contents for various mixture under cyclic one-week in (chloride + sulfate) combined solution and one-week carbonation

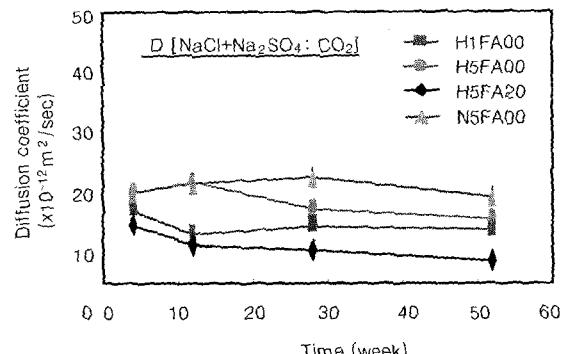


Fig. 10 Chloride diffusion coefficient for various mixtures under cyclic one-week in (chloride + sulfate) combined solution and one-week carbonation

이것은 중성화가 염소이온의 확산을 가속시키는 결과를 말해주는 것으로, 황산염이 콘크리트 표면에 영향을 주는 반면, 중성화는 콘크리트 내부까지 어느 정도 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

앞의 두가지 침지실험 결과와 마찬가지로 H5FA20, H1FA00, H5FA00, N5FA00의 순서로 크게 나타났으며, 표면염소이온농도의 경우 H5FA00과 N5FA00이 큰 차이를 보이지 않은 반면에 확산계수에서는 차이를 보이는 것은 보통강도의 콘크리트의 경우 표면에서 같은 양의 염소이온이 침투해도 고강도의 콘크리트 보다 내부로의 확산은 더 빠르게 일어남을 알 수 있다.

3.4 배합에 따른 각 복합열화 조건에서의 표면염소이온농도와 확산계수 특성비교

3.4.1 표면염소이온농도

Fig. 11은 각 배합에 따라 세가지 열화조건별로 비교한 표면염소이온농도이다.

초기에는 표면염소이온이 단일 염수침지의 경우가 제일 컸지만 시간에 지남에 따라 복합용액 침지의 경우가 더 크게 나타났다. 또한 배합에 따라서는 단일 염수침지시와 2중복합의 경우에는 거의 변화가 없었으나 3중복합의 경우 H5FA00의 경우에는 H1FA00 및 N5FA00과 비교하여 작게, H5FA20의 경우에는 크게 나타났다. 이것으로 보아 3중복합의 경우 5종시멘트의 사용은 효과적인데 반해 플라이애쉬의 사용은 표면에서의 염소이온 침투량을 증가시키는 결과를 가져오는 것으로 판단된다.

또한 3중복합의 경우 N5FA00과 H1FA00가 별 차이가 없는 것은 5종 시멘트 사용으로 인한 감소효과와 보통강도 콘크리트 사용으로 인한 증가효과가 복합된 것으로 생각된다.

3.4.2 염소이온의 확산계수

Fig. 12는 각 배합에 따라 세가지 열화조건별로 비교한 염소이온 확산계수이다.

모든 배합에서 염수단일 침지보다 2중복합이 그리고 2중 복합보다 3중복합이 더 크게 나타났다. 플라이애쉬를 혼입한 H5FA20의 확산계수가 가장 작은 반면, 보통강도이며 플라이애쉬의 혼입이 없는 N5FA00의 확산계수가 가장 크게 나타났다.

종합적으로 볼 때 플라이애쉬 혼입과 함께 콘크리트의 강도가 높은 H5FA20의 확산계수가 제일 작고, 그 다음이 H1FA00, H5FA00, 그리고 N5FA00 순으로 나타났다.

여기서 비교를 위해 CTH 방법에 의해 측정한 각 배합별 확산계수가 Table 2에 요약되어 있다. Table 2와 Fig. 12를 비교할 때 CTH 법에 의한 확산계수는 가장 작게 나타

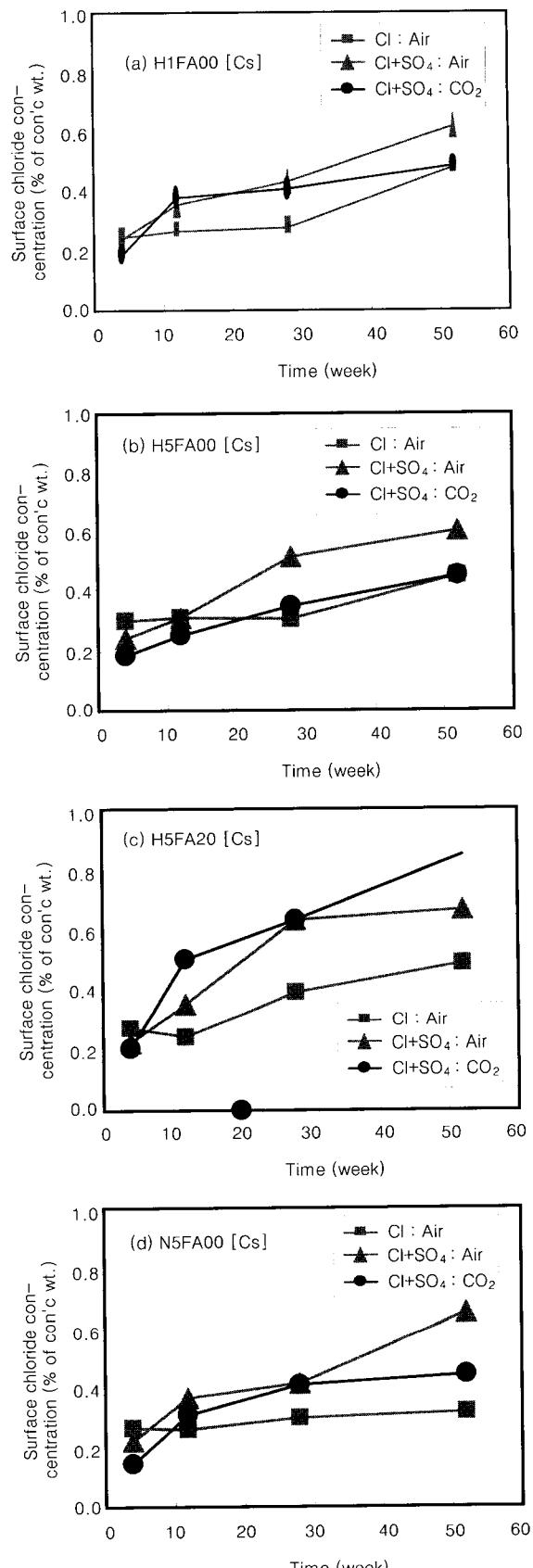


Fig. 11 Variation of surface chloride contents for various exposure conditions

나고 있어 2중 또는 3중 복합염화에 의한 영향을 제대로 나타내지 못하는 것을 보여주고 있다.

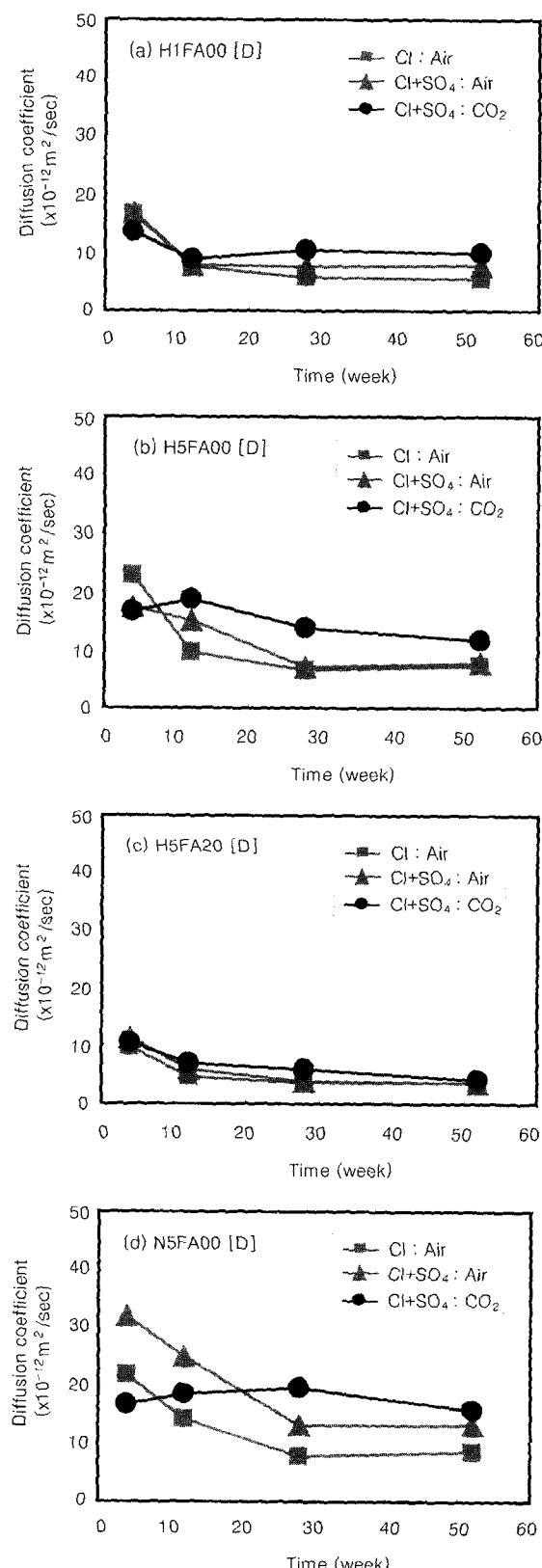


Fig. 12 Variation of chloride diffusion coefficients under various exposure conditions.

Table 2 Chloride diffusion coefficients and initial internal chloride contents by CTH method

Test series	Diff. coef. ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$)	Initial Int. chloride contents (%, by concrete wt.)	
		Acid-soluble	Water-soluble
H1FA00	5.2445	0.01058922	0.00686834
H5FA00	5.1465	0.01257033	0.00683434
H5FA20	1.6051	0.01581358	0.00919732
N5FA00	7.4280	0.01099603	0.00686511

4. 결 론

최근들어 해안 등 콘크리트 구조물이 열악한 환경에 노출되어 심각한 내구성 문제를 유발하고 있다. 특히 염해와 황산염 그리고 중성화 등이 복합되어 일어나고 있어 이를 복합작용에 대한 연구 구멍이 무엇보다 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 염소이온뿐만 아니라 황산염과 중성화가 동시에 작용하는 경우에 대하여 연구하였다.

이를 위해 포괄적인 실험이 수행되었으며 실제구조물의 견습이 반복되는 효과를 고려하기 위하여 1주일 견습과 중성화를 반복실험하였다. 본 연구로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 본 연구에서 수행된 실험에 의하면 염화나트륨과 황산나트륨 복합용액에 침지한 경우와 염화나트륨과 황산나트륨 침지 및 중성화를 반복한 경우 내부로 침투되는 염소이온량은 염화나트륨 단일용액에 침지한 경우보다 다소 큰 것으로 나타나 복합작용에 의해 영향이 큰 것으로 나타났다.

2) 표면염소이온의 농도는 시간에 따라 증가하는 것으로 나타났으며, 2중 복합염화 상태에서 표면염소이온 농도가 더욱 증가하고, 여기 중성화 작용이 추가되었을 때는 다소 감소하는 것으로 나타났다.

3) 염소이온 확산계수는 시간에 따라 감소하나 단일 염수침지 보다는 황산염과 복합된 경우 확산계수가 커지며, 중성화 작용에 의해 더욱 증가하는 것으로 나타났다.

4) 이들을 종합해 볼 때 염소이온에 의한 단일염화보다는 염소이온에 황산염 또는 중성화가 복합된 복합염화시의 콘크리트 열화가 빠르게 나타났으며, 중성화의 경우 표면염소이온 농도에는 영향이 적으나 내부로의 염소이온 확산은 가속시키는 것으로 나타났다.

5) 플라이에쉬를 혼입한 경우 내부로의 염소이온 침투량이 크게 감소되는 것으로 나타났다.

6) 본 연구결과는 해안구조물과 같이 염해와 황산염 그리고 중성화가 함께 작용하는 경우 유용한 자료가 될 것으로 사료되며, 앞으로 복합염화와 관련하여 더욱 많은 연구결과가 축적되어 복합된 노출환경하에서의 콘크리트 구조물의 내구성 평가가 좀 더 정확하게 가능할 것으로 사료

된다.

참고문헌

1. 오병환 외, “고함량 플라이애쉬 콘크리트의 개발 및 실용화 연구,” 서울대학교 기초전력공학공동연구소, 1997. 12.
2. 박영식, 서진국, 이재훈, 신영식, “황산염의 침해를 받는 고강도 콘크리트의 강도특성과 물성변화,” 콘크리트학회 논문집, 제10권 5호, 1998. 10, pp.117~128.
3. 오병환 외, “해수의 영향을 받는 콘크리트 구조물의 수명증가에 따른 영향 연구(II),” 한국원자력안전기술원, 1999. 2.
4. 오병환 외, “원전격납건물 구조재료의 열화실험 및 열화모델개발,” 한국원자력연구소, 2001. 3.
5. James R. Clifton and Lawrence I. Knab, “Service Life of Concrete,” NISTIR 89-4086, National Bureau of Standards U.S. Department of Commerce, 1989.
6. James R. Clifton, “Predicting the Remaining Service Life of Concrete,” NISTIR 4712, National Bureau of Standards U.S. Department of Commerce, 1991.
7. Haque, M. N. and Kawamura, M. “Carbonation and Chloride-Induced Corrosion of Reinforcement in Fly Ash Concretes,” ACI Materials Journal, 1992, pp.41~48.
8. Tang, L. P. and Nilsson, L. O., “Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field,” ACI Materials Journal, 1992, pp.49~53.
9. Tikalsky, P. J. and Carrasquillo, R. L., “Influence of Fly Ash on the Sulfate Resistance of Concrete,” ACI Materials Journal, 1992, pp.69~75.
10. Liam, K. C., Roy, S. K., and Northwood, D. O., “Chloride Ingress Measurements and Corrosion Potential Mapping Study of A 24-Year-Old Reinforced Concrete Jetty Structure in A Tropical Marine Environment,” Magazine of Concrete Research, 1992, 44, No 160, September, pp.205~215.
11. Omar Saeed Baghabra Al-Amoudi, Mohammed Maslehuddin, “Role of Chloride Ions on Expansion and Strength Reduction in Plain and Blended Cements in Sulfate Environments,” Construction and Building Materials, Vol. 9, No. 1, 1995, pp.25~33.
12. Kdross, J. and Hilsdorf, H. K., “Performance Criteria for Concrete Durability,” Rilem Report 12, E & FN Spon, London, 1995.
13. Thomas, M., “Chloride Thresholds in Marine Concrete,” Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 4, 1996, pp.513~519.
14. Tumidajski, P. J. and Chan, G. W., “Effect of Sulfate and Carbon Dioxide on Chloride Diffusivity,” Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 4, 1996, pp.551~556.
15. Sarja, A. and Vesikari, E., “Durability Design of Concrete Structures,” E & FN SPON, 1996.
16. ASTM C1152-97 “Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete,” 1997.
17. Alkhaiat, H. and Haque, M. N., “Carbonation of Some Coastal Concrete Structures in Kuwait,” ACI Materials Journal, 1997, pp.60 2~607.
18. Ngala, V. T. and Page, C. L. “Effects of Carbonation on Pore Structure and Diffusional Properties of Hydrated Cement Pastes,” Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 7, 1997, pp.995~1007.
19. Khatri, R. P., Sirivivatnanon, V., and Yang, J. L., “Role of Permeability in Sulphate Attack,” Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 8, 1997, pp.1179~1189.
20. Oh, B. H, Chang, B. S., Cha, S. W., and Chung, W. K., “An Experimental Study on the Properties of High-Performance Concrete,” High Performance Concrete : Design and Materials and Recent Advances in Concrete Technology, Supplementary Papers, ACI International Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 1997, pp.335~342.
21. Guide to Durable Concrete-ACI 201.2R-92, ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, 1998.
22. Konin, A., Francois, R., and Arliguie, G. “Penetration of Chlorides in Relation to the Microcracking State Into Reinforced Ordinary and High Strength Concrete,” Materials and Structures, Vol. 31, 1998. 6, pp.310~316.
23. Sandberg, P., Tang, L., and Andersen, A., “Recurrent 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.
24. Costa, A. and Appleton, J., “Chloride Penetration Into Concrete in Marine Environment -Part I : Main Parameters Affecting Chloride Penetration,” Materials and Structures, Vol. 32, May 1999,

- pp.252~259.
25. Costa, A. and Appleton, J., "Chloride Penetration Into Concrete in Marine Environment

-Part II : Prediction of Long Term Chloride Penetration," *Materials and Structures*, Vol. 32, June 1999, pp.354~359.

요 약

해안 등 열악한 환경에 노출되는 구조물들의 건설이 증가되면서 구조물의 내구성 문제가 심각해지고 있다. 특히, 염해만이 아니라 염해와 황산염 그리고 중성화 등 복합작용에 의한 열화문제는 아직도 연구된 바가 거의 없는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 염해와 황산염 및 중성화가 복합된 환경하에서 콘크리트 구조물의 성능저하 현상을 살피고 이들의 상호작용과 영향을 실험적으로 규명하는데 그 목적을 두고 있다. 이를 위해서 단일 및 복합열화 실험을 포괄적으로 수행하였다.

본 연구결과, 염소이온 단일열화시 보다 황산염 또는 황산염과 중성화가 복합되었을 경우의 열화현상이 더 두드러졌으며, 모든 열화조건에서 표면염소이온의 농도는 시간에 따라 증가하고 반면에 확산계수는 시간에 따라 감소하는 경향을 나타냈다. 표면염소이온 농도는 복합열화에서 더 증가하며 특히 염소이온 확산계수는 염해와 황산염 2중 복합열화시 더 커지고 여기에 중성화가 복합될 경우 더욱 커지는 것으로 나타났다. 따라서, 해안 구조물과 같이 염해와 황산염 및 중성화가 복합될 경우 염소이온의 침투가 더욱 커져 이들의 합리적인 고려가 필요한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 복합열화, 염해, 황산염, 중성화, 표면염소이온농도, 염소이온확산계수