

복합열화에 노출된 균열부 콘크리트 내의 염화물 침투 해석 기법에 대한 연구

권성준^{1)*} · 송하원²⁾ · 변근주²⁾

¹⁾비엔티엔지니어링(주) ²⁾연세대학교

A Study on Analysis Technique for Chloride Penetration in Cracked Concrete under Combined Deterioration

Seung-Jun Kwon^{1)*}, Ha-Won Song²⁾, and Keun-Joo Byun²⁾

¹⁾B&T Engineering Co. Ltd. Kyunggi-do 431-070, Korea

²⁾Dept. of Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

ABSTRACT Recently, analysis researches on durability are focused on chloride attack and carbonation due to increased social and engineering significance. Generally, chloride penetration and carbonation occur simultaneously except for in submerged condition and chloride behavior in carbonated concrete is evaluated to be different from that in normal concrete. Furthermore, if unavoidable crack occurs in concrete, it influences not only single attack but also coupled deterioration more severely. This is a study on analysis technique with system dynamics for chloride penetration in concrete structures exposed to coupled chloride attack and carbonation through chloride diffusion, permeation, and carbonation reaction. For the purpose, a modeling for chloride behavior considering diffusion and permeation is performed through previous models for early-aged concrete such as MCHHM (multi component hydration heat model) and MPSFM (micro pore structure formation). Then model for combined deterioration is developed considering changed characteristics such as pore distribution, saturation and dissociation of bound chloride content under carbonation. The developed model is verified through comparison with previous experimental data. Additionally, simulation for combined deterioration in cracked concrete is carried out through utilizing previously developed models for chloride penetration and carbonation in cracked concrete. From the simulated results, CCTZ (chloride-carbonation transition zone) for evaluating combined deterioration is proposed. It is numerically verified that concrete with slag has better resistance to combined deterioration than concrete with OPC in sound and cracked concrete.

Keywords : chloride attack, carbonation, crack, combined deterioration, chloride-carbonation transition zone

1. 서 론

콘크리트 내부로 침투되는 염화물 이온은 매립된 강재의 부식을 야기하고 그 전파 속도가 다른 유해 이온에 비하여 빠르므로 매우 중요한 열화 인자이다. 내구성에 대한 관심이 증가되면서 콘크리트의 염화물 침투에 대한 많은 연구가 진행되고 있으며 기존의 경화된 콘크리트 내에서 이동하는 염화물 모델링에서 수화 발열, 수분 이동, 공극 특성 등의 초기재령의 거동을 고려한 모델링으로 많은 진전이 이루어지고 있다¹⁻³⁾. 한편 재료 분야에서도 OPC 콘크리트 뿐 아니라 혼화재료를 사용한 콘크리트의 다양한 염화물 이동 모델링을 제안되고 있으며⁴⁾, 전전부 뿐 아니라 균열부의 염화물침투 모델링을 제안하는 연구가 진행되고 있다^{5,6)}. 한편 일반적인 비말대 조건에서는 주기적인 온도·습도의 반복 뿐 아니라 이산화탄소에 침

투에 따른 탄산화가 발생하게 되는데, 탄산화면에서의 염화물 거동은 수중에서 포화된 콘크리트 내의 염화물 거동과 다르게 평가된다. 탄산화면에서의 수분이동의 변화, 고정화 염화물의 해리 등이 주된 원인이 되고 있으며, 이에따라 염화물 이동은 단일 염해일 경우보다 콘크리트 내부로 빠르게 진전되므로 국내외의 지방서 및 지침에서 엄격하게 평가하도록 하고 있다⁷⁻⁹⁾. 현재의 연구에서는 실태 조사를 통하여 탄산화 영역의 염화물 거동을 분석하는 연구가 주를 이루고 있으며¹⁰⁾, 실내 실험에 의해서도 복합열화에 대한 연구가 부분적으로 진행되고 있다¹¹⁾. 한편 해석적인 기법에서는 겉보기 확산계수를 이용하여 염화물 분포를 예측하는 기법이 많이 수행되고 있는데, 이는 확산 및 침투에 대한 염화물 이동 모델링이 시간 및 공간에서 연성적으로 해석이 수행되어야 하는 어려움을 가지고 있기 때문이다. 그러나 겉보기 확산계수 및 Fick의 2법칙을 이용한 복합열화 해석에서는 탄산화면을 따로 계산하여야 하며, 실태 조사 결과를 기본으로 하고 있으므로 그 적용 범위가 한정되어 있다¹²⁾. 일반

*Corresponding author E-mail : jjuni@cmme.yonsei.ac.kr
Received January 30, 2007, Accepted March 31, 2007
©2007 by Korea Concrete Institute

적으로 사용되는 염화물 해석 프로그램들의 적용이 수중 구조물에 국한되는 것도 이런 이유이다. 최근 들어 열화 해석이 마이크로 모델링을 고려한 열역학적 연성 해석 기법으로 발전하고 있지만 주로 다양한 혼화재료를 가진 건전부 콘크리트의 염화물 해석에 국한되고 있으며 균열 부의 복합열화에 대한 연구는 희박한 실정이다.

본 연구에서는 초기재령 콘크리트의 거동, 즉 수화 발열 모델 (MCHHM; multi component hydration heat model), 공극 분포 및 수분이동 모델 (MPSFM; micro pore structure formation model)을 기본으로, 복합열화에 노출된 콘크리트의 염화물 거동을 평가하였으며, OPC 및 슬래그를 사용한 콘크리트를 대상으로 복합열화 저항성을 해석적으로 평가하였다.

2. 복합열화 환경에서의 염화물 이동

2.1 콘크리트 탄산화 영역에서의 물리적, 화학적 특성 변화

콘크리트의 공극은 시간적 반응인 수화에 따라서 변화하며 외부 습도와외의 조건에 따라 포화도가 결정된다. 한편 탄산화 영역에서는 내부 수화물이 이산화탄소의 해리에 따른 탄산 (H_2CO_3)의 영향으로 공극률의 감소, 표면장력의 변화 및 일련의 포화도의 감소가 발생하게 된다. 특히 내부의 고정화 염분의 해리가 발생하여 내부에 염화물의 구배가 새롭게 생성되는데 이로 인해 비교적 농도가 낮은 콘크리트 내부로 염화물의 추가적인 진전이 발생하게 되는 것이다. 본 논문에서는 초기재령 콘크리트의 거동 모델링인 다상 수화 복합 발열 모델 (MCHHM)을 이용하여 탄산화 영역에서의 공극 구조, 수분이동 그리고 염화물 이동에 대하여 모델링을 수행하도록 한다. 염화물 이동에 대해서는 초기재령 콘크리트 거동을 고려하고 부분 포화된 영역에서 침투 및 확산을 고려한 염화물 해석 모델을 이용하였으며⁴⁾, 탄산화 모델에 대해서는 이산화탄소와 수화반응물인 수산화칼슘 ($Ca(OH)_2$)과의 반응을 고려한 열역학적 연성 모델을 이용하였다^{13,14)}. 이러한 열화 해석의 기본이 되는 초기재령 콘크리트 거동 모델링에 대한 연구는 기존의 연구 결과를 참고하는 것이 바람직하다¹⁵⁾.

미세 공극 구조 형성 모델에서는 수화 발열 모델에서 도출된 내부 생성물 및 외부 생성물을 동시에 다룬 다공질 매체에서의 공극 구조를 공극 분포 밀도함수로 나타내고 있는데, 공극 i 에 대해서 공극경 분포 함수를 식 (1)과 같이 정의하였다^{15,16)}.

$$V_i = 1 - \exp(-B_i r), \quad (0 \leq V_i(r) \leq 1) \quad (1)$$

$$dV_i = B_i r \exp(-B_i r) d \ln r$$

여기서, B_i 는 함수 형상을 결정하는 변수인데 수학적으로 풀기가 어렵기 때문에 많은 수치해석 결과에 의해 구

한 B 를 S/ϕ (포화도/공극률)의 함수로서 다른 관계를 실제의 수치 계산에 이용한다. 한편 임계 공극 반경 (r_c , 내부가 완전히 포화되는 최소 공극) 및 포화도 (S^c)는 Kelvin equation을 고려하여¹⁶⁾, 식 (2) 및 (3)으로 정의할 수 있다.

$$r_s^c = \frac{2\gamma_c M}{\rho RT} \frac{1}{\ln(h)} \quad (2)$$

$$S^c = \int_0^{r_s^c} dV = \exp(-B \cdot r_s^c) \quad (3)$$

여기서 M 은 물의 물질량, R 은 기체상수, T 는 절대온도, h 는 상대습도, ρ 는 물의 밀도, γ_c 는 일정 온도 하의 표면장력, r_s^c 는 탄산화 영역에서의 임계 공극 반경, S^c 는 탄산화 영역에서의 포화도를 나타낸다. 식 (2) 및 (3)에서 사용되는 임계 공극 반경 및 포화도는 기존의 연구에 이미 제시되어 있으나¹⁶⁾, 본 연구에서는 탄산화 영역에서 적용하기 위해 표면장력의 변화를 고려하도록 하였다.

기존의 연구에 의하면¹⁷⁾ 탄산화된 콘크리트 내의 공극수 표면장력 (0.034 N/m)은 콘크리트 내부에 수산화칼슘이 없으므로 친수성 (hydrophilic)이 되지 못하며 일반 콘크리트의 공극수 표면장력 (0.072 N/m)에 비하여 상당히 낮은 값을 가지게 된다. 이러한 관계를 식 (1) 및 (2)에 고려하면 Fig. 1과 같은 결과를 얻을 수 있다.

Fig. 1에서의 탄산화 영역 및 비탄산화 영역에서의 포화도를 구하기 위해 도출된 각각의 임계 공극 반경 (탄산화영역 : $1.146 \times 10^{-9}m$, 비탄산화 영역 : $2.424 \times 10^{-9}m$)을 식 (3)에 고려하면 전체 포화도를 도출할 수 있으며, 비슷한 배합인 기존의 실험 결과와¹⁹⁾ 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 전체적으로 실험값에 근접한 결과를 도출할 수 있었으며, 이러한 경향은 물-시멘트비의 변화에 크게 변화하지 않음을 시뮬레이션 결과 알 수 있었다.

2.2 고정화 염분의 해리

콘크리트 내부의 염화물량은 철근부식에 직접적으로 관여하는 자유 염화물이온과 고정 염화물이온으로 분류

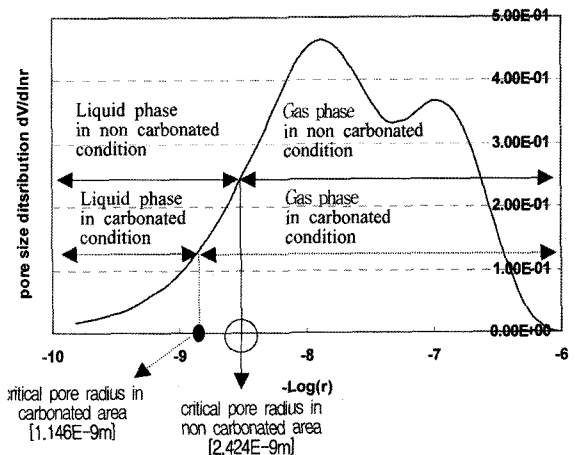


Fig. 1 Critical pore radius of carbonated and non-carbonated concrete (W/C 47%)

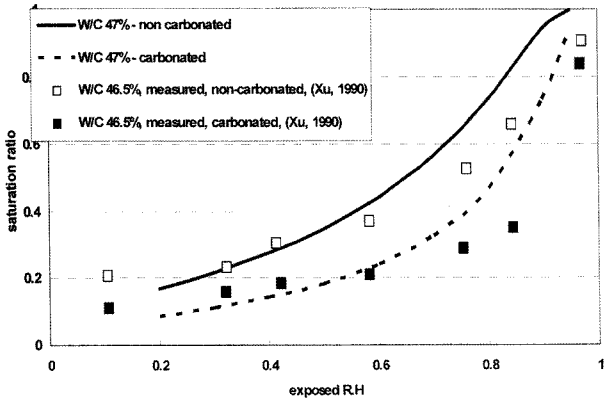


Fig. 2 Saturation in carbonated and non-carbonated area (W/C 47%)

할 수 있는데, 두 이온은 상평형을 이루며 공극내에 존재하게 된다. 이중 고정화 염분은 일반적인 환경에서는 해리되지 않으므로 철근의 부식에 관여하지 않는다고 알려져 있지만 탄산화와 같이 화학적 영향을 받는 영역에서는 고정화 염분의 해리가 발생하게 된다¹⁸⁾. 내부의 고정화 염분은 해리하여 자유 염화물이온으로 변하게 되는데, 혼화재 종류에 따른 염화-알루미늄염 (chloro-aluminates) 및 탄산화에 따른 pH의 영향을 받는 것으로 알려져 있다¹⁾. 본 연구에서는 탄산화 영역에서 고정화 염분량은 비교적 소량이므로, 계산의 간편화를 위하여 고정화 염화물이 모두 해리되는 것으로 가정하여 모델링하였다.

Fig. 3에서는 탄산화에 노출된 콘크리트의 수분이동 및 염화물 이동 개요도를 나타내고 있다.

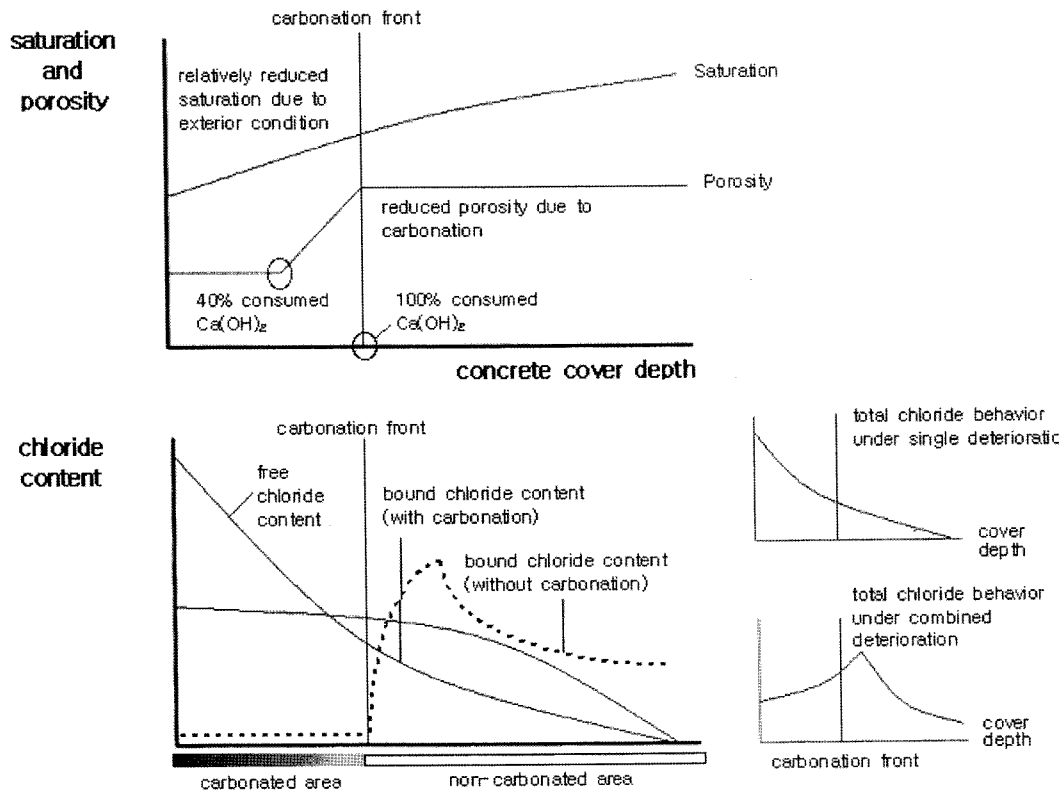


Fig. 3 Change in saturation, porosity and chloride content under carbonation

3. 복합열화를 고려한 염화물 이동 모델링

비말대의 복합열화 모델링은 확산 및 모세관 흡수를 고려한 염화물 침투 해석 및 탄산화 해석을 기초로 하고 있으며 식 (4)에서는 염화물 침투 및 확산을 고려한 질량 보전식을 나타내고 있다.

$$\alpha_i \frac{\partial C_{cl}}{\partial t} + \text{div}(J_{cl}) + Q_{cl} = 0 \quad (4)$$

여기서, α_{cl} 은 염화물의 비용량 (ϕS)을 나타내고, 첫번째 항을 포텐셜 항 (potential term)이라고 한다. 두번째 항 $\text{div}(J_{cl})$ 은 확산항 (flux term)을 나타내는데 식 (5)와 같이 침투 및 확산을 동시에 고려하도록 한다. 한편 ϕ 및 S 는 각각 공극률 및 포화도를 나타낸다^{5,6)}.

$$J_{cl} = - \left\{ q_s + \phi \frac{S}{\Omega} D_{cl} \frac{\partial C_{cl}}{\partial x} \right\} \quad (5)$$

여기서, q_s 는 1차원 침투 유속 (m/s)을, Ω 는 굴곡도 ($=\pi^2/4$)이다. D_{cl} 은 염화물 확산계수 (m^2/sec)를 나타낸다. 한편 부분포화된 영역에서의 염화물 해석이므로 확산에 대한 온도 및 습도 변화는 식 (6) 및 (7)과 같이 기존의 연구 결과를 참고하여^{20,21)} 노출 환경의 영향을 고려하였다.

$$f(T) = \exp \left[\frac{U}{R} \cdot \frac{(T - T_0)}{TT_0} \right] \quad (6)$$

$$f(h) = \left[1 + \frac{(1-h)^4}{(1-h_c)} \right]^{-1} \quad (7)$$

여기서 T_0 는 기준 온도 (293K), T 는 해당 시점에서의 온도(K), U 는 활성화 에너지 (KJ/mol), h 는 외기습도, h_c 는 임계습도 (0.75)이며 미세 공극 구조 모델링을 통하여 도출된 포화도 (S)가 습도로 고려되어 사용된다. 한편 식 (4)에서의 마지막항은 Q_{cl} 은 소멸항 (sink term)으로서 단위시간에 고착화되는 염화물량을 나타내고 있는데 본 연구에서는 Q_{cl} (mol/l sec)을 식 (8)과 같이 모델링하였다¹⁾.

$$Q_{cl} = -\frac{C_{bound}^{n+1} - C_{bound}^n}{(t_{n+1} - t_n)M_{cl}} Q_{cl}^{cb} \quad (8)$$

여기서 C_{bound} (kg/m^3)는 구속 염분량으로서, Freundlich isotherm²²⁾을 고려하여 도출된 염분량, M_{cl} 은 염화물이온의 물분자량, Q_{cl}^{cb} 는 탄산화 영역에서의 구속된 탄산화 진행에 따라 감소된 염화물량이며 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{cl}^{cb} = -\frac{C_{bound}^{n+1} - C_{bound}^n}{(t_{n+1} - t_n)M_{cl}} \left(\frac{W_{used}}{W_{initial}} \right) \quad (9)$$

여기서 $W_{initial}$ 은 탄산화 개시 전의 수산화칼슘량, W_{used} 는 전체 수화물량에서 탄산화 반응에 따라 소모된 수화물량을 나타낸다.

비말대 해석이나 탄산화와 연계된 복합열화와 열화현상을 열역학적 모델을 이용하여 접근하기 위해서는 시·공간상에 연성 해석이 수행되어야 하는데 고려되는 전체 물리량 (온도, 수압, 염화물이온, 이산화탄소 농도)에 대한 지배방정식은 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \alpha_i(X_i)}{\partial t} + \text{div } J_i(X_i, \Delta X_i) - Q_i(X_i) = 0 \quad (10)$$

여기서 α_i 는 비용량 (specific capacity), X_i 는 자유도 i 의 물리량 (T, P, C_{cb}, C_{CO_2}), Q_i 는 생성·발산항 (sink term)이

며 각 자유도를 도출하기 위한 에너지 보존식의 구성은 Table 1과 같다. Table 1에서 ρc 는 열용량, K_H 는 열전도 계수, K 는 액상수 이동계수, K_v 는 수증기 이동계수, P 는 발생된 기상 및 액상 압력, q_s 는 유속항, Q_H 는 다상 복합 수화 발열 모델로 구한 열에너지의 생성항, Q_{hyd} 는 다상 복합 수화 발열 모델로 구한 수화에 의한 수분 소비량, Q_{cl} 은 시간에 따른 염화물이온의 구속항, K_{CO_2} 는 액상 및 기상의 상평형계수, Q_{CO_2} 는 탄산화 반응에 따른 이산화탄소의 소비량을 나타낸다. 전체 해석 시스템의 유한 요소해석기법, 염화물 해석에서 사용되는 확산계수 및 고정화율, 그리고 탄산화에 대한 공극률 변화 및 확산계수 변화는 기존에 발표된 연구 결과에 상세하게 수록되어 있다^{1,13-15)}. Fig. 4에서는 비말대의 염화물 해석 및 복합 열화 해석을 위한 해석의 개요도를 나타낸다.

4. 건전부 및 균열부 콘크리트의 복합열화 거동

4.1 복합열화에 노출된 건전부 콘크리트의 염화물 거동 분석

복합열화 환경에 있는 구조물의 열화 상태와 배합 그리고 노출 환경을 정량적으로 구하기는 매우 어려운 일이다. 해석 결과시 인용한 실험 자료에서는 단위 시멘트량 $350 kg/m^3$, 공용 기간 10년인 콘크리트 구조물로서 해안가에 노출되어 있으며, 탄산화 깊이는 2.2 mm로 보고되고 있다²⁾. 실태 조사 결과에서는 전형적으로 탄산화면 이후에 염화물의 증가를 보이고 있었으며, 최대 염화물량은 0.3~0.35% (콘크리트 중량비)로 보고되었다. Table 2에서는 해석을 위한 가정된 일반 배합을 나타내고 있으며, Table 3에서는 복합열화 해석을 위한 경계 조건 및 해석 조건을 나타내고 있다.

Fig. 5에서는 해석 결과를 실태 조사 결과와 같이 도

Table 1 Variables of mass-energy conservation

Variables	Capacity α_i	Flux J_i	Sink Q_i
T	ρc [Kcal/K.m ³] - Constant	$-K_H \nabla T$ [Kcal/m ² .s] - Constant	Q_H [Kcal/m ³ .s] - Multi component heat of hydration model of cement
P	$\phi \rho \partial S / \partial P$ [kg/Pa.m ³] - Path dependent moisture isotherms	$-(K_l + K_v) \nabla P$ [kg/m ² .s] - Random geometry of pores and Knudsen vapor diffusion	$-Q_{hyd} - \partial$ [$\rho S \phi / \partial t$] [kg/m ³ .s] - Water combined due to hydration; bulk porosity change effect
C_{Cl}	ϕS [mol.l/mol.m ³] - Path dependent chloride ion transport	$(-D_{Cl} \nabla C_{Cl} + q_s C_{Cl})$ [mol/m ² .s] - Diffusion and capillary suction - Consideration for temperature and humidity	Q_{Cl} or $Q_{cl} - Q_{cb}$ [mol/m ³ .s] - Bound chloride ion with Freundlich isotherm - Consideration for combined deterioration
C_0	$\phi(1-S) \cdot K_{CO_2} + \phi S$ [mol.l/mol.m ³] - Equilibrium of gaseous and liquid state of CO ₂ - Henry's Law and Dalton's Law	$D_{CO_2} \nabla C_0$ [mol/m ² .s] - Entire flux of CO ₂ in gaseous and liquid state - Consideration for temperature and humidity - Knudsen effect and vapor diffusion	Q_{CO_2} [mol/m ³ .s] - Consumption of CO ₂ in unit time - Constant reaction rate

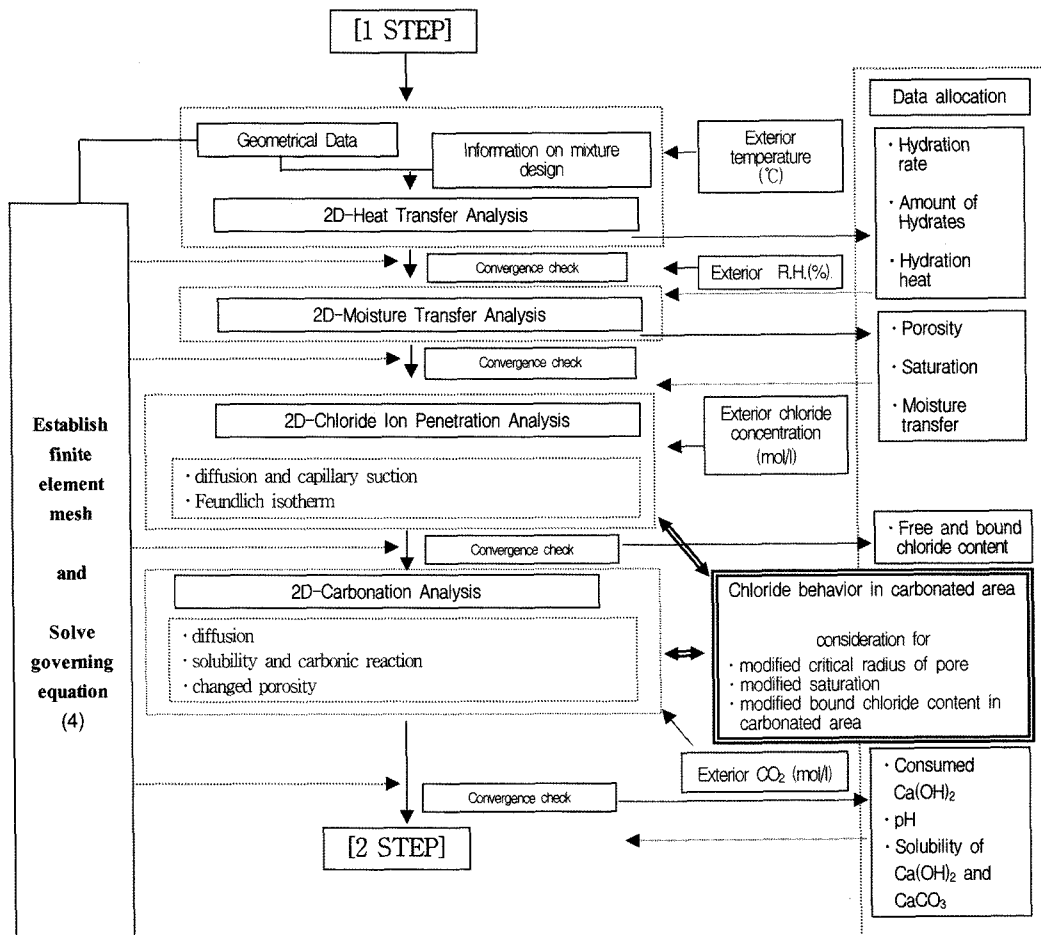


Fig. 4 Scheme for analysis of coupled deterioration

Table 2 Mix proportion for coupled deterioration analysis

W/C	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Aggregate (kg/m ³)	Slump (cm)
50%	352	653	1,173	12

시하였는데, 탄산화 깊이는 2.8 mm로 실태 조사 값에 비하여 약간 크게 평가되었다²⁾.

이는 해안가에서 강우 및 해수에 노출된 구조물에서는 표면의 습도가 높으므로 탄산화 진전이 매우 느리기 때문이다. Fig. 5의 (b)에서는 탄산화가 진전된 영역에서는 고정화 염분이 해리되어 감소하고 이에 따라 자유 염화물량이 증가함을 알 수 있으며, Fig. 5(c)에서는 노출 기간인 10년 동안 탄산화 깊이의 증가를 나타내고 있다. 실태 조사 결과와의 비교시, 탄산화면이 약간 과다하게 예측되어 탄산화면 이후에 발생하는 최대 염화물량이 콘크리트 내부로 이동한 것으로 예상되었으며 전반적으로 실태 조사값과 같이 탄산화면 이후의 염화물량 변화를

잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

4.2 시뮬레이션을 통한 균열부 콘크리트의 복합열화 분석

본 절에서는 개발된 해석 기법을 통하여 OPC 및 슬래그를 사용한 콘크리트에 대하여 복합열화 시뮬레이션을 수행하였다. 균열부의 복합열화에 대한 실태 조사 자료는 너무 희박하여 입수할 수가 없었으므로 기존의 실험을 통하여 도출된 확산계수 및 배합 정보를 이용하여 균열부의 복합열화에 대한 염화물 거동을 모사하도록 한다. 복합열화에 대한 해석 방법 이외의 균열부에 작용하는 염화물 이온의 확산 및 투수의 증가, 그리고 균열부 콘크리트의 탄산화 거동에 대한 해석 흐름도는 Fig. 6에 요약되어 있다. 균열부의 염화물 및 이산화탄소 확산에 대한 연구는 이미 기존에 개발된 모델을 사용하였는데, 단일균열을 가정하여 평균화 기법을 고려한 것이다. 각 모델에 대한 자세한 정보는 기존의 연구 성과를 참고하는

Table 3 Input variables and conditions for analysis

Exterior R.H.	Cl ⁻ concentration	Curing condition	CO ₂ concentration (after 28days)	
60~80% (6month, period)	0.81 mol/l	28day submerged condition	340 ppm	
Exposed period	Temp.	D _c (28day) m ² /sec	decrease factor for time (m)	λ CO ₂ reaction factor for low concentration
10years	18°C	3.255 × 10 ⁻¹¹	0.25	17

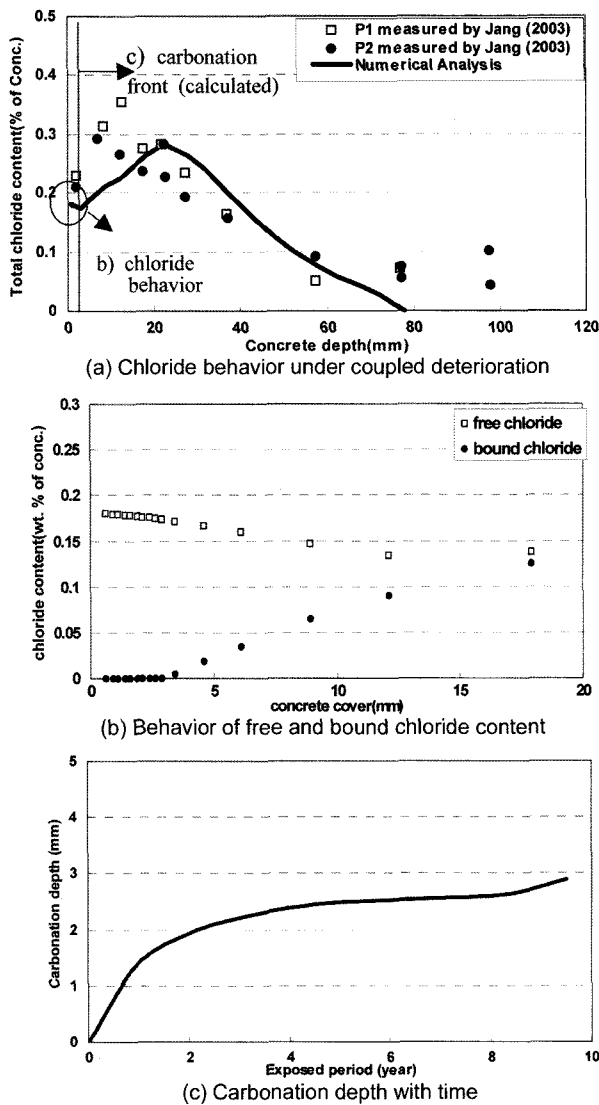


Fig. 5 Analysis of coupled deterioration

것이 바람직하다^{5,6,13,14}).

Tables 4 및 5에는 시뮬레이션에 사용되는 배합 및 해석 조건을 나타내고 있는데, 배합표 및 28일 확산계수는 기존의 연구 결과를⁴⁾ 이용한 것이다. OPC 콘크리트와 슬래그 콘크리트의 해석 결과는 각각 Figs. 7 및 8에 도시하였다. 탄산화 속도는 일반적으로 OPC 콘크리트인 경우가 혼화제를 사용한 콘크리트보다 유리하다고 알려져 있으나²³⁾, 최근에는 양생이 잘된 콘크리트의 경우, 확산계수의 감소에 따라 OPC 콘크리트와 동등 이상의 탄산화 저항성을 가진다고 알려져 있다²⁴⁾. 탄산화 해석의 경우 두가지 배합에 대하여 큰 차이는 평가되지 않았다.

탄산화 초기에 염화물 농도가 높으며 탄산화 깊이가

Table 4 Mix proportion for analysis of combined deterioration

Items	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)						B×%	
			W	B			S	G	Admixture	
				C	Slag	FA			SP	AE
OPC100-37	37	45	168	454	-	-	767	952	1.0	0.017
S30O70-37	37	45	168	318	136	-	762	946	0.8	0.018

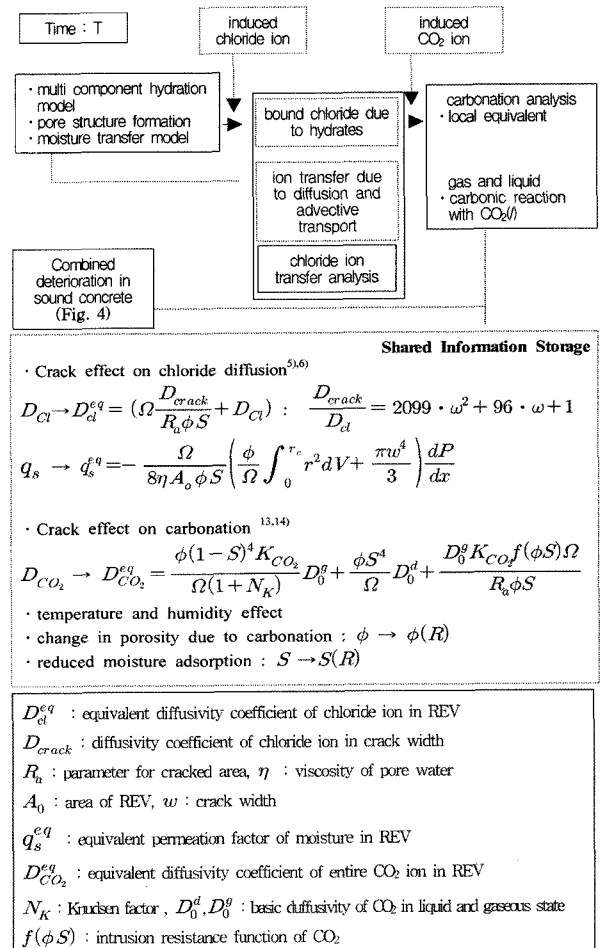


Fig. 6 Scheme for combined deterioration in cracked concrete

작은 경우, OPC 콘크리트 보다 혼화재료를 사용한 콘크리트에서 최대 염화물 증가가 발생하였는데, 실내 실험에서도 이러한 경향은 명확하게 발견되고 있다¹¹⁾. 그 이유는 슬래그와 같은 혼화재료를 사용한 콘크리트에서는 구속되는 염화물량이 OPC 콘크리트보다 높으며 이에 따라 표면염화물량도 약간 증가하기 때문이다. Figs. 7 및 8에서 알 수 있듯이, 복합열화의 경우, OPC 콘크리트 및

Table 5 Input variables and conditions for analysis of combined deterioration

Exterior R.H.	Cl ⁻ concentration	Curing condition	CO ₂ concentration
65%	0.81 mol/l	28day-submerged	640 ppm
Temp.	D_{Cl} (28day)m ² /sec		λ
20°C	OPC100-37	1.3 × 10 ⁻¹¹	17
	S30O70-37	0.63 × 10 ⁻¹¹	

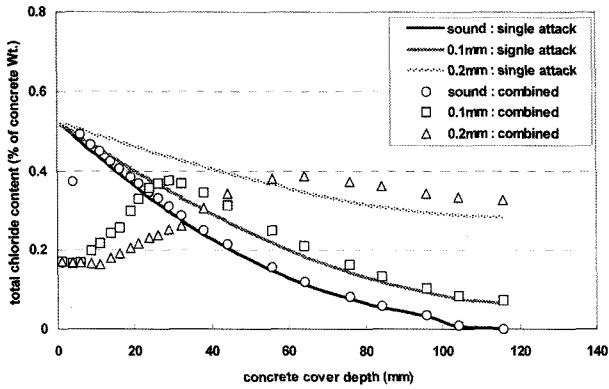


Fig. 7 Chloride behavior in combined deterioration in cracked concrete (after 5 years, OPC)

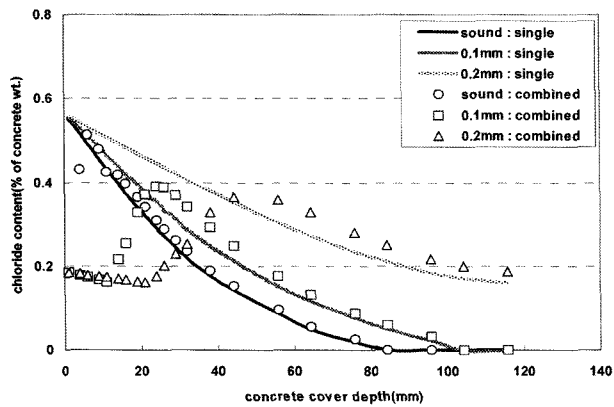


Fig. 8 Chloride behavior in combined deterioration in cracked concrete (after 5 years, slag 30%)

슬래그 콘크리트 모두 단일 염해보다 염화물 진전이 빠르며, 균열폭이 클수록 이러한 영향은 뚜렷하게 나타나고 있다. Fig. 9에서는 OPC 콘크리트 및 슬래그를 사용한 콘크리트의 복합염화 거동을 비교하였다. 균열폭이 증가할수록 탄산화 깊이의 진전 및 염화물의 증가가 평가되고 있으며, OPC 콘크리트의 경우, 혼화재를 사용한 콘크리트에 비하여 복합염화에 따른 염화물 거동이 매우 불리하게 작용하고 있음을 알 수 있다.

탄산화는 콘크리트 내부의 화학반응에 의하여 점진적으로 진행되기 때문에 pH에 대한 천이영역이 발생한다²⁵⁾.

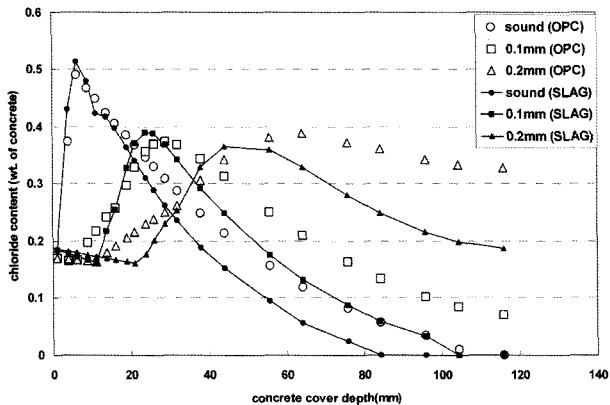


Fig. 9 Comparison of chloride behavior under combined deterioration with OPC and slag concrete (after 5 years)

이러한 탄산화 천이 영역과 다르지만 복합염화에 따른 염화물 분포에서 탄산화 깊이와 최대염화물량이 예측되는 깊이의 차이를 복합염화 천이 영역 (chloride-carbonation transition zone : CCTZ)으로 정의하면 염화물 거동을 비교하려는 배합 사이에서 복합염화 특성을 파악할 수 있다. 복합염화인 경우, 최대 염화물량은 탄산화면 이후에 발생하게 되므로 CCTZ가 증가할수록 내부에 매립된 철근에 가까이 이동하게 되기 때문이다. Fig. 10에서는 균열폭에 따른 CCTZ를 비교하였는데, OPC 콘크리트가 슬래그 콘크리트보다 큰 CCTZ를 가지고 있었으며, 이러한 경향은 균열폭이 증가할수록 더욱 뚜렷하게 나타났다.

결론

복합염화에 노출된 균열부 콘크리트 내의 염화물 침투 해석 기법에 대한 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 초기재령 콘크리트의 거동 특성인 다상 수화 복합 발열 모델과 미세 공극 구조 모델링을 기반으로 하여, 염화물 해석 및 탄산화를 고려한 복합염화 거동을 평가할 수 있는 해석 기법을 개발하였다. 개발된 해석 기법은 기존의 실태 조사 결과와의 비교를 통하여 적용성을 검증하였으며, 탄산화면 이후에 증가하는 염화물 거동을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.
- 2) 건전부 및 균열부에 진행되는 복합염화 거동을 모사하여, 복합염화 저항성을 평가할 수 있는 복합염화 천이 영역 (CCTZ)를 제안하였으며, 시뮬레이션 결과 OPC 콘크리트보다 혼화재를 사용한 콘크리트가 더욱 유리함을 알 수 있었다.
- 3) 개발된 해석 기법은 온도에 따른 염화물 농축 현상 및 주기적인 습도 변화에 따른 표면 염화물량의 변화 등에 대하여 추가적인 연구가 진행된다면 다양한 노출 환경에 있는 콘크리트 구조물의 시간·공간적인 염화 거동을 더욱 합리적으로 예측할 수 있을 것으로 예상된다.

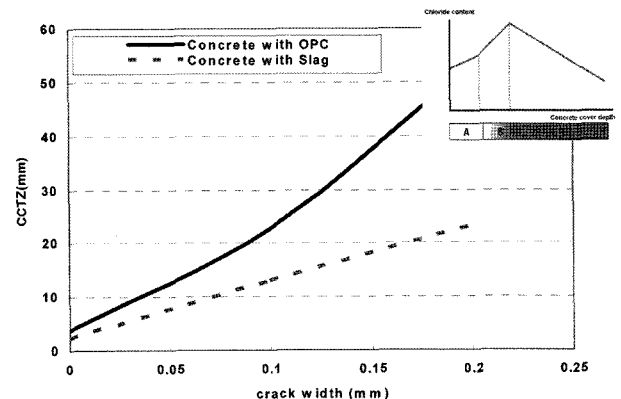


Fig. 10 Relationship with crack width and CCTZ

참고문헌

- Ishida, T. and Maekawa, K., "Modeling of Durability Performance of Cementitious Materials and Structures Based on Thermo-hygro Physics", *Rilem Proceeding PRO 29, Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures*, 2003, pp.39-49.
- Jang, S.Y, *Modeling of Chloride Transport and Carbonation in Concrete and Prediction of Service Life of Concrete Structures Considering Corrosion of Steel Reinforcement*, Ph. D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University, Korea, 2003.
- 송하원, 권성준, 이석원, 변근주, "고로슬래그 미분말 콘크리트의 염화물 침투 저항성에 관한 연구", 콘크리트학회 논문집, 15권, 3호, 2003, pp.400~408.
- 송하원, 권성준, 변근주, 박찬규, "혼화재를 사용한 고성능 콘크리트의 배합특성을 고려한 염화물 확산 해석기법에 관한 연구". 대한토목학회 논문집, 25권, 1A호. 2005, pp.213~223.
- 박상순, 송하원, 변근주, "균열을 갖는 콘크리트의 염화물 확산 및 투수모델", 대한토목학회 논문집, 21권, 6-A호, 2001, pp.915~924.
- 송하원, 박상순, 변근주, "초기재령에서 균열을 갖는 콘크리트의 염화물 침투 해석", 대한토목학회 논문집, 21권, 6-A호, 2001, pp.925~936.
- 日本土木學會, "コンクリート標準示方書 [施工編]-耐久性照査型-改訂資料-", 콘크리트라이브러리, 第99, 2001.
- 한국콘크리트학회, 콘크리트 표준시방서-내구성편, 건설교통부, 2004.
- CEB, *Durable Concrete Structures-Design Guide*, 2nd Edition, Thomas Telford, London, 1992.
- Minoru Obi and Fumio Taguchi, "Investigation of the Chloride Ion Amount of Seashore Concrete Structures Deteriorated by Frost Damage", *CONSEC-04*, Seoul, Korea, 2004, pp.409~416.
- 오병환, 이성규, 이명규, 정상화, "탄산화 복합환경시 염소이온 확산에 관한 연구", 콘크리트학회 논문집, 17권 2호, 2005, pp.179~189.
- 이창수, 윤인석, "중성화와 염해를 고려한 콘크리트의 복합열화 예측", 콘크리트학회 논문집, 15권 6호, 2003, pp.902~912.
- 권성준, 송하원, 변근주, 이승훈, "균열을 가진 초기재령 콘크리트의 탄산화 해석", 대한토목학회논문집, 24권, 5-A호, 2004, pp.1011~1022.
- Ha-Won Song, Seung-Jun Kwon, Keun-Joo Byun, and Chan-Kyu Park, "Predicting Carbonation in Early-Aged Concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.36, Issue5, 2006, pp.979~989.
- Maekawa, K., Chaube, R., and Kishi, T., *Modeling of Concrete Performance: Hydration, Microstructure Formation and Mass Transport*, Routledge, London and New York, 1999.
- Ishida, T., Chaube, R., P., and Maekawa, K., "Modeling of Pore Content in Concrete under Generic Drying Wetting Conditions", *Concrete Library of JSCE*, Vol.18, No.1, 1996, pp.113~118.
- Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., and Fardis, M. N. "Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete", *ACI Materials Journal*, Vol.8, No.2, 1991, pp.186~196.
- Xu, K., *Structure of Hardened Cement-Fly Ash Systems and Their Related Properties*, Licentiate Thesis, Publication P-92:7, Division of Building Materials, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 1990.
- 小林一輔, 白木亮司, 河合研至, "炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の鹽化物, 硫黄化合物及アルカリ化合物の移動と濃縮", *コンクリート工學論文集*, 1990, pp.69~82.
- Xi, Y. and Bazant, Z. P., "Modeling Chloride Penetration in Saturated Concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol.11, No.1, 1999, pp.58~65.
- Mangat, P. S. and Gurusamy, K., "Chloride Diffusion in Steel Fiber Reinforced Concrete Containing PFA", *Cement and Concrete Research*, Vol.17, No.4, 1987, pp.640~650.
- Tang, L., *Chloride Transport in Concrete*, Publication P-96: 6. Division of Building Materials, Chalmers University of Technology, Sweden, 1996.
- 和泉意登志, 喜多達夫, 前田熙信, 中性化, 技報堂出版, 1986.
- Ishida, T., Soltani, M., and Maekawa, K., "Influential Parameters on the Theoretical Prediction of Concrete Carbonation Process", *Proceedings 4th International Conference on Concrete Under Severe Conditions*, Seoul, Korea, 2004, pp.205~212.
- RILEM, *Durability Design of Concrete Structures*, Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, E&FN SPON, 1994.

요약 최근들어 내구성에 대한 사회적, 공학적 중요성이 부각됨에 따라, 염해 및 탄산화에 대한 연구가 집중되고 있다. 일반적으로 침투된 구조물의 경우를 제외하고는 염해와 탄산화는 동시에 발생하게 되는데, 탄산화 영역에서는 염화물 거동이 일반콘크리트에서의 염화물 거동과 다르게 평가된다. 그리고 콘크리트 구조에 발생된 균열은 단일열화 뿐 아니라 복합열화의 진전에도 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구의 목적은 염화물 확산과 침투 그리고 이산화탄소 유입에 따른 탄산화 거동을 고려하여, 복합열화에 노출된 건전부 및 균열부 콘크리트 구조물의 열화 해석을 수행하는데 있다. 먼저 초기재령 콘크리트의 다상 수화 발열 모델 및 공극 구조 형성 모델을 도입한 염화물 확산 및 침투를 고려한 염화물 이동 모델을 이용하였다. 이후 탄산화 해석을 통하여 탄산화 영역 진전에 따라 변화하는 공극 분포, 포화도 및 고정화 염화물의 해리를 모델링하여 복합 열화 모델을 개발하였으며 개발된 모델은 기존의 실태 조사 결과 및 실험 결과와 비교하여 그 적용성을 검증하였다. 한편 선행된 연구 결과인 균열부의 염화물 및 탄산화 거동을 고려하여, 보통포틀랜드 시멘트 (OPC; ordinary portland cement) 및 혼화재 (슬래그)를 사용한 콘크리트에 대한 복합열화 거동을 시뮬레이션 하였다. 그 결과 건전부 및 균열부에 대하여 복합열화 저항성을 평가할 수 있는 복합열화 전이 영역 (CCTZ)를 제안하였으며, 혼화재를 사용한 콘크리트가 OPC를 사용한 콘크리트에 비하여 복합열화 저항성이 우수함을 해석적으로 구명하였다.

핵심용어 : 염해, 탄산화, 균열, 복합열화, 복합열화 전이 영역