

# 콘크리트의 탄산화를 고려한 내구성설계 계수

## Service Life Parameters of Carbonated Concrete



윤인석\*

\*인덕대학교 건설정보과 교수

### 1. 서론

우리나라는 국토의 균등발전과 활용을 극대화하기 위하여 영종도 신공항, 서해대교, 인천대교, 광안대교 및 서해안 고속도로와 같은 대규모의 해양 사회기반 시설물이 꾸준히 증가하였으나, 자체의 체계적인 기술 발전의 정립없이 설계, 계획 및 시공 단계에서 무분별한 외국기술을 도입하였다. 또한 선진 외국에 비하여 건설된 시설물의 유지관리에 는 상대적으로 소홀했던 점이 있다. 그 결과로 최근에 대형 구조물이 붕괴하여 시설물 안전관리에 대한 사회적 관심이 고조되어 오고 있으며 그 영향으로 인해 구조물의 유지 관리 비용이 급증하였다.

구조물의 유지관리는 열화 메커니즘 구명 및 예측에서부터 시작한다. 대부분 연구에서는 염해 및 탄산화 각각에 대하여 개별적으로 연구가 추진되었다. 그러나 콘크리트의 다양한 수분함량이나 공극직경을 고려하여 볼 때 콘크리트 내부로 활성물질의 침투는 단일한 매커니즘에 의한 것이 아닌 동시에 복합적으로 일어나는 것이 보편적이다. 콘크리트 내부로 침투특성에 대한 실험적 연구는 침투과정을 이론적으로 모델화하기 위하여 단일한 침투 기구를 콘크리트에 적용하는 것이 일반적이지만 콘크리트는 불균질하고 동일한 공극을 갖는 물질이 아니기 때문에 이러한 고찰은 제한적으로 이용된다. 결과적으로 콘크리트의 물리적인 조직

특성이 다변하기 때문에 실험기간 동안 화학적인 흡착이 발생할 수 있으므로 복합적인 메커니즘이 발생할 수 있다.<sup>1)</sup>

염해와 탄산화의 복합열화의 경우, 침지대 조건을 제외한 모든 구조물은 탄산화가 진행되며, 이는 염소이온 침투에 커다란 영향을 미칠 수 있다. 그러나 탄산화된 콘크리트의 염소이온 침투에 대한 연구가 극히 부족한 실정이다.

그래서 내구성 설계에 정량적으로 반영하기 위하여 탄산화의 영향으로 인한 투수계수, 염소이온 확산계수, 염소고정화의 변화에 대한 이해가 필요하다.

한편, 콘크리트의 통합적인 내구성 설계 시스템을 개발하기 위해서 염소이온의 침투에 영향을 미치는 재료 매개변수를 정립하는 것은 반드시 필요하며 이는 멀티스케일 측면에서 수행되어야 한다(그림 1). 따라서, 내구성 설계 매개변수는 시멘트 및 콘크리트 재료 과학적 지식 기반에 기인하여 합리적으로 정의되어야 만 한다. 이들 재료 매개변수는 시멘트계 재료의 수화반응으로 인한 시멘트 경화체의 공극 구조 특성, 골재의 존재효과, 이온의 물질이동 현상 등에 기인하여 해석되어야 한다.

그래서 본 연구에서는 콘크리트의 염해 재료 매개변수의 재료 모델을 구성하고, 탄산화가 염해 재료 매개변수 즉, 염소이온 확산계수, 투수(기)계수, 염소 흡착, 임계 염소이온량 등에 미치는 영향을 해석적 차원에서 고찰하였다.

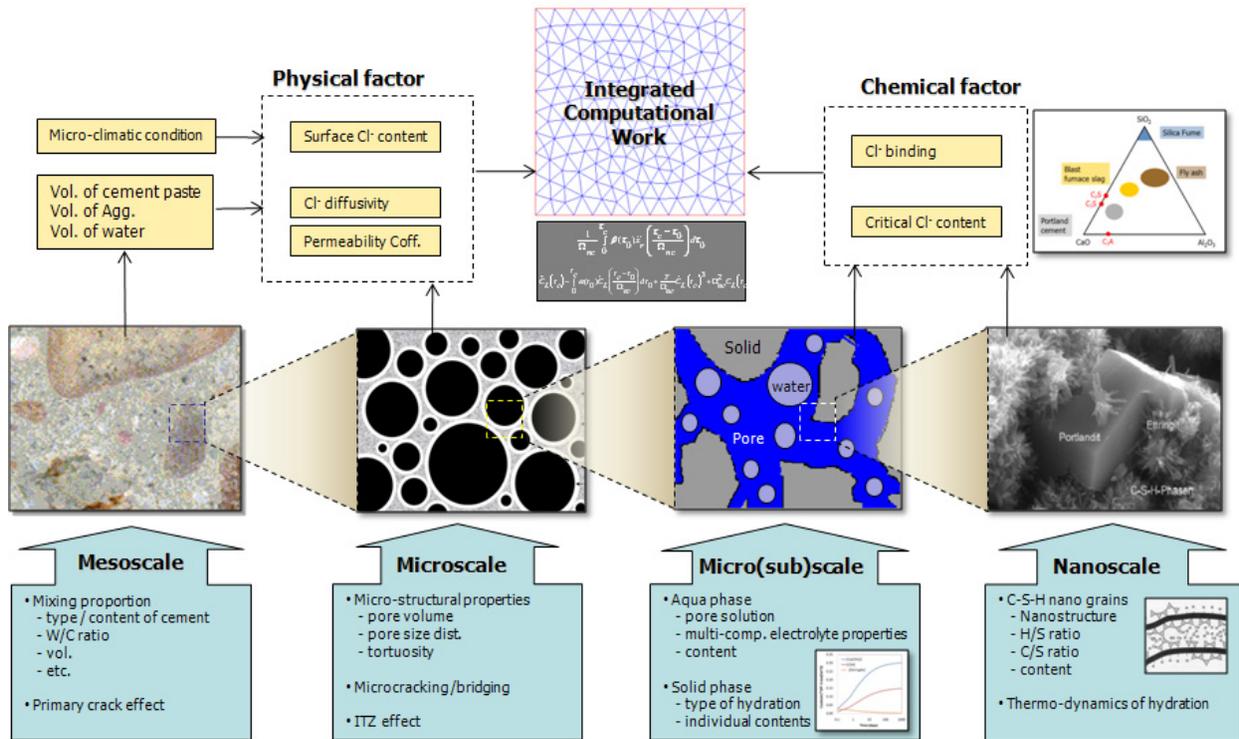


그림 1 Multi-scaling approach for computation on service life prediction of concrete structures

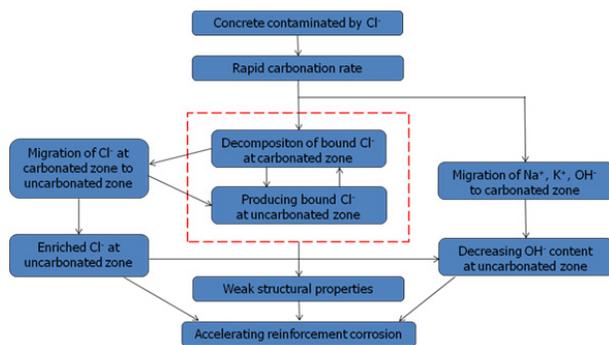


그림 2 Interaction between CO<sub>2</sub> and Cl<sup>-</sup> in concrete

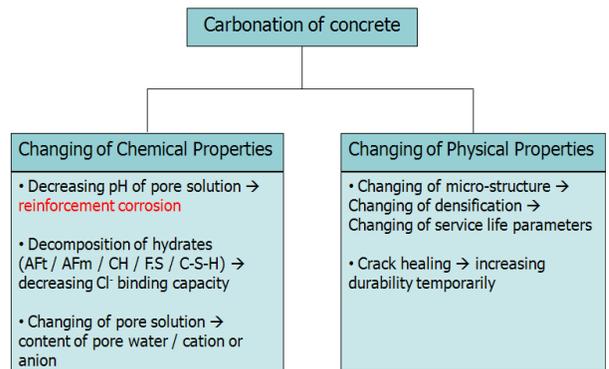


그림 3 Effect of carbonation

## 2. 탄산화가 재료매개변수에 미치는 영향

### 2.1 탄산화의 효과

#### 2.1.1 공극량의 변화

콘크리트의 탄산화는 물리, 화학적 변화 측면에서 논해야 한다. 그림 2와 같이 탄산화는 염소이온 침투와 상호 간섭효과를 갖으며 그림 3과 같이 시멘트계 재료의 물리 화학적 변화를 초래한다. 화학적 측면에서는 탄산화는 수산화칼슘을 탄산칼슘으로 전환시키며 물리적 측면에서는 공극구조의 변화를 초래한다. 이에 대한 원인은 수산화칼

슘이 탄산칼슘으로 변화되면서 물분자 무게의 증가 및 시멘트 페이스트 체적팽창으로 공극량의 감소를 초래하며 수산화칼슘의 중성화 과정에서 방출되는 수분으로 시멘트의 수화가 더욱 촉진되기 때문이다.<sup>2),3),4)</sup>

탄산화가 콘크리트의 성능을 평가하기 위해서 시멘트 내의 클링커 광물학적 조성물에 대한 각각의 수화 반응물량을 계산할 수 있으며, 탄산화될 수 있는 수화물 Ca(OH)<sub>2</sub>와 C-S-H의 농도를 토대로 물체적비율을 고려하여 탄산화로 인한 감소된 공극량을 구할 수 있다. 이를 토대로 탄산화된 콘크리트의 공극크기 분포 특성을 단순화하여 염소이온 확산계수 및 투수(기)계수에 반영하였다.

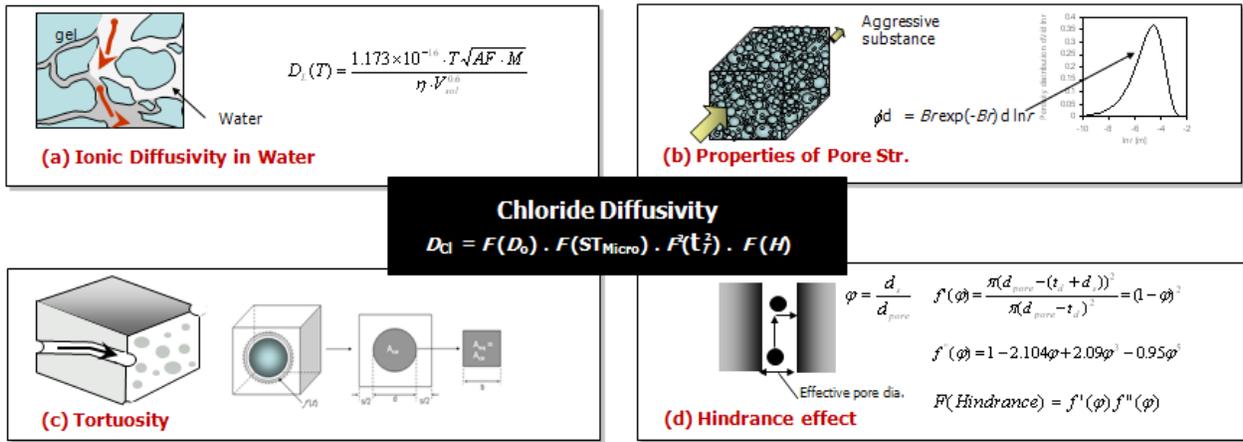


그림 4 Multi-factor function on chloride diffusivity

2.1.2 수화물의 변화

콘크리트의 탄산화는 대기 중의 이산화탄소가 시멘트 경화체 내부로 확산되어 수산화칼슘이 탄산칼슘과 그 외의 물질로 분해 소실되는 연속적인 현상이다. 탄산화가 되면 수산화칼슘 및 C-S-H, 기타 수화물도 탄산화 반응으로 인하여 탄산칼슘이 생성된다.

2.2 염소이온 확산계수

염소이온 확산계수는 (a) 액상에서 이온의 확산계수, (b) 시멘트 경화체의 공극량 및 공극구조, (c) 공극의 연결로 인한 굴곡특성, (d) 확산지연효과 등의 지배를 받으며 이는 간단히 멀티 요소함수로 표현할 수 있다(그림 4).

(a) 공극수 내에서 염소이온의 확산계수를 의미한다. 즉, 시멘트 경화체 내에서 공극수를 통한 염소이온의 흐름은 액상에서의 확산 이론을 기초로 시멘트 경화체의 재료 특성이다. 액상에서 확산계수는 온도에 의해 영향을 받는다.

(b)시멘트 경화체의 공극구조 : 시멘트 경화체의 공극분포 특성은 공극량( $\phi$ ) 및 공극크기 분포로 대별된다. 공극량은 시멘트의 수화단계별 수화도의 함수로 표현되며 이로부터 공극크기 분포 및 공극량의 함수를 이용해 공극크기 분포가 추정된다.

(c) 공극에 의한 굴곡특성 : 단위체적 당 존재하는 시멘트 수화물을 하나의 셀로 간주하고, 시멘트 코어를 정사각형으로 가정한 후, 원형과 정사각형의 형상함수를 고려함으로써 계산한 바 있다. 본 연구에서는 투수에 의한 수분유입의 굴곡특성에 이 방법을 이용하였다.

(d) 시멘트 경화체의 공극수분량 : 시멘트계 재료의 공극구조는 공기가 차지하는 체적량과 배합수에 의한 내부 포화도에 의하여 모세공극 내 수분량으로 구성되며 각각이

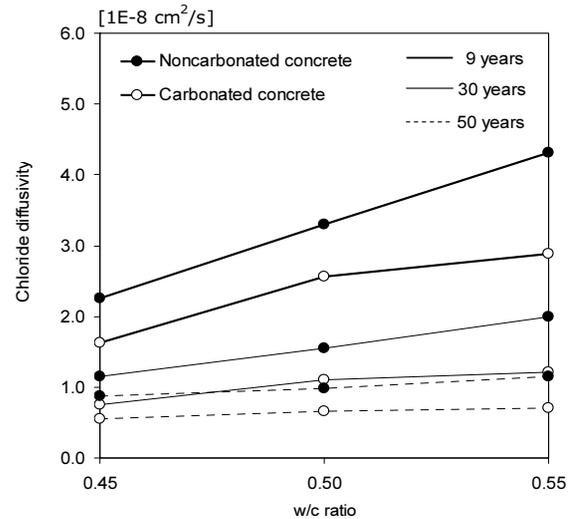


그림 5 Effect of carbonation on chloride diffusivity

염소이온 입자의 충돌 및 좁은 공극벽으로 확산현상의 지연이 초래된다. 이상의 결과를 토대로 골재와 시멘트 각각의 확산계수로부터 콘크리트의 확산계수가 계산되었다.

그림 5는 탄산화된 콘크리트의 염소이온 확산계수에 대한 계산결과를 비탄산화된 콘크리트의 염소이온 확산계수에 대한 계산결과와 비교한 것이다. 탄산화로 인하여 감소된 공극은 그림 4에서 (a) 액체에서 이온의 확산계수에만 영향을 미치지 않을 뿐, (b) 시멘트 경화체의 공극량 및 공극구조, (c) 공극의 연결로 인한 굴곡특성, (d) 확산지연효과 등에 영향을 미친다. 즉, 감소된 공극은 이온의 유입경로의 굴곡성을 한층 복잡하게 할 뿐만 아니라, 좁아진 공극으로 인하여 확산지연 효과도 더욱 커지게 된다. 따라서, 이는 전체적으로 염소이온 확산계수를 감소하는 결과를 초래하게 된다. 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트는 확산계수가 감소하지만, 고로 슬래그 혼입 콘크리트는 탄산화가 되

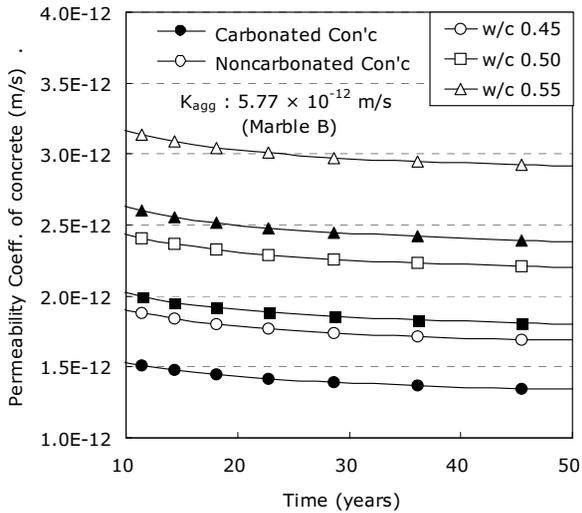


그림 6 Effect of carbonation on water permeability coefficient

면 큰폭으로 확산계수가 오히려 상승하며, 플라이 애시가 혼입된 콘크리트는 치환량에 따라 상승, 혹은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 문헌적 보고에서 고로슬래그 혼입 콘크리트는 탄산화가 되면 더욱 다공화되는 것에서 원인을 찾을 수 있다.

### 2.3 투수(기)계수

#### 2.3.1 액체의 투수계수

콘크리트 내부로의 유해물질의 침투성은 기본적으로 미세구조에 영향을 미치는 공극 특성에 의존한다. 탄산화된 콘크리트의 공극 감소량을 토대로 공극내 공극량, 공극 크기분포, 유체의 굴곡특성계수, 포화도 등을 고려하여 콘크리트의 투수계수를 산정하였다. 이때, 공극내 수분으로 채워진 부분을 고려하면 투수계수, 기체로 채워진 부분을 고려하면 투기계수로 따로 구분하여 산정하였다. 이때, Darcy의 법칙에 의하여 유체의 흐름에 대한 굴곡 특성계수를 고려하여 다공질성 재료의 투수계수를 구하였다.

그림 6은 탄산화된 콘크리트의 투수계수에 대한 해석내용을 보인 것이다. 이는 시멘트 페이스트가 경화된 후에도 지속적으로 미세조직이 발현되어 수분 침투 제어효과가 증진될 뿐 아니라 안정성이 떨어지는 알칼리성 수화생성물이 칼슘 실리케이트 수화물로 전환되기 때문에 기인된 현상으로 생각된다. 본 해석기법에서는 이러한 현상이 탄산화로 인한 공극감소로 수분유입의 통로가 감소되었을 뿐 아니라, 유입경로의 굴곡성도 한층 복잡하여 투수계수가 감소하는 결과를 보였다.

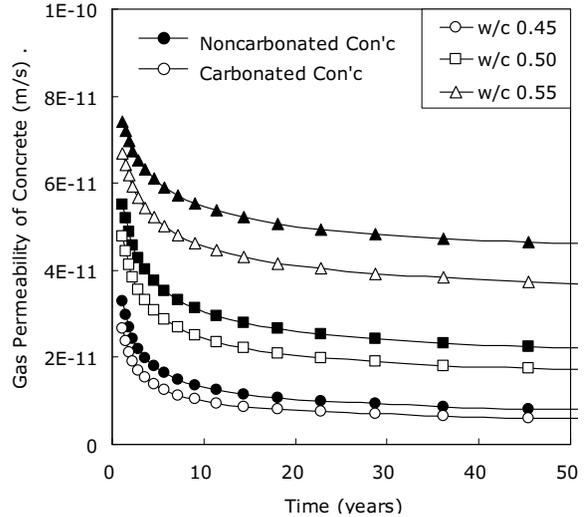


그림 7 Effect of carbonation on Gas permeability coefficient of carbonated concrete

#### 2.3.2 기체의 투기계수

그림 7은 탄산화된 콘크리트의 투기계수에 대한 해석내용을 실험결과와 비교하여 보인 것이다. 예상했듯이, 탄산화로 인한 공극 감소는 투기계수의 감소도 초래하였다. 주목할 만한 것은 콘크리트의 기체 투기계수가 감소하였지만, 그 감소의 폭이 물-시멘트비가 큰 시멘트 콘크리트에서 더 크다는 점이다. 이는 물-시멘트비가 높은 콘크리트에서 탄산화로 인한 흡수율이 더 큰 폭으로 감소한다는 기존의 연구결과와 상응하는 것으로, 본 해석기법이 적절하게 이러한 현상을 반영하여 해석할 수 있음을 확인할 수 있다.

#### 2.3.3 Klinkenberg 효과

기체 투기계수와 액체 투수계수는 공통적으로 공극내 수분과 공극 직경에 의해 지배된다. 즉, 다공질성 재료가 완전히 건조되어 있다면 식 (1)과 같고 일정부분의 수분이 있다면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$K_g (RH = 0) \approx K_w \quad (1)$$

$$K_g (RH > 0) < K_w \quad (2)$$

시멘트 경화체에서의 양 계수를 비교하면, 통상적으로 투기계수가 투수계수보다 큰 값을 갖는데, Klinkenberg은 슬립흐름도(slip flow)로서 설명을 하였다. 이는 기체와 액체의 흐름은 공극벽 표면에 대하여 다른 저항성의 차이로 설명할 수 있다. 즉, 물질 분자의 농도가 기체보다 액체에서 매우 높으므로, 액체의 흐름에 대한 저항성도 높기 때문에 기인한 현상으로 사료된다. 이 저항은 공극이 작을수록

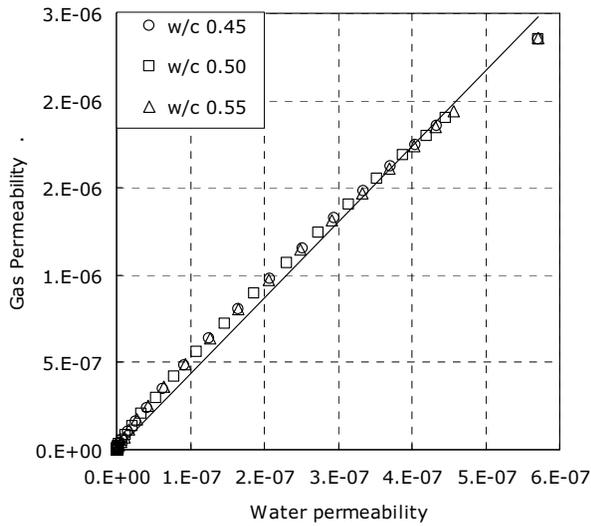


그림 8 Relationship between gas permeability coeff. and water permeability coeff. for cement paste

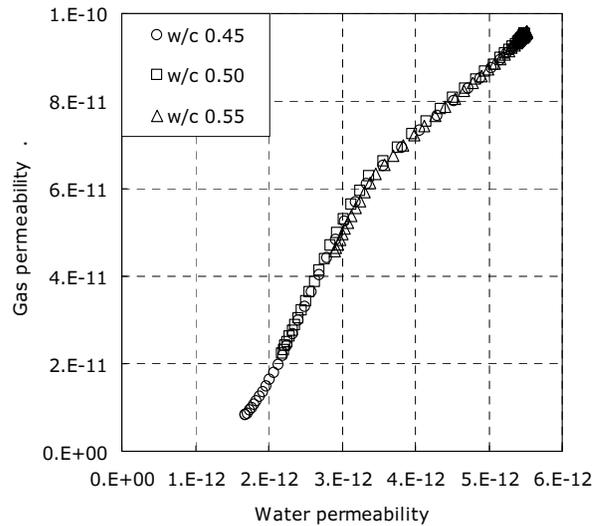


그림 9 Relationship between gas permeability coeff. and water permeability coeff. for concrete

더욱 커지게 되는데 식 (1), (2)과 같이 공극직경의 크기에 의존된다.

그림 8에 의하면 시멘트 페이스트에서 물-시멘트비와 무관하게 투수계수와 투기계수의 관계는 선형관계가 성립된 것을 확인할 수 있는데 Klinkenberg의 선형식과 같은 결과를 보인 것이다.

그림 9는 콘크리트에서 양계수를 비교한 결과이다. 그림 8과 상이하게 Klinkenberg 효과가 성립되지 않았다. 즉, 시멘트 페이스트의 경우처럼 투기계수가 투수계수보다 큰 경향을 보인 것은 동일하나 양계수의 상관관계는 로그함수의 형태를 보였다.

#### 2.4 임계 염화물량

콘크리트의 탄산화는 임계 염소이온량 값에도 크게 영향을 미친다. 그러나 탄산화가 진행된 조건에서 임계 염소이온량 값을 제안한 연구는 극히 드문 상황이다. 그림 10은 임계 염소이온량의 도식적 그림이다. 비탄산화된 콘크리트의 경우 평균적으로 약 0.40%(시멘트 중량대비) 수준의 임계 염소이온량을 갖지만, 탄산화가 진행되면 크게 감소함을 볼 수 있다. 이는 탄산화가 되면 시멘트 페이스트의 알칼리 성질에 의하여 생성된 철근표면의 부동태피막이 파괴되어서 작은 염소 이온량에도 쉽게 철근이 부식되는 것으로 생각할 수 있다. 일반적으로 콘크리트내 공극수의 pH는 13~14내외의 값을 갖으나 탄산화가 진행되면 pH 11.5내외에서 철근의 부식이 시작된다. 본 연구에서는 pH 11.5까지를 탄산화된 콘크리트의 공극수의 pH로 간주하였으며

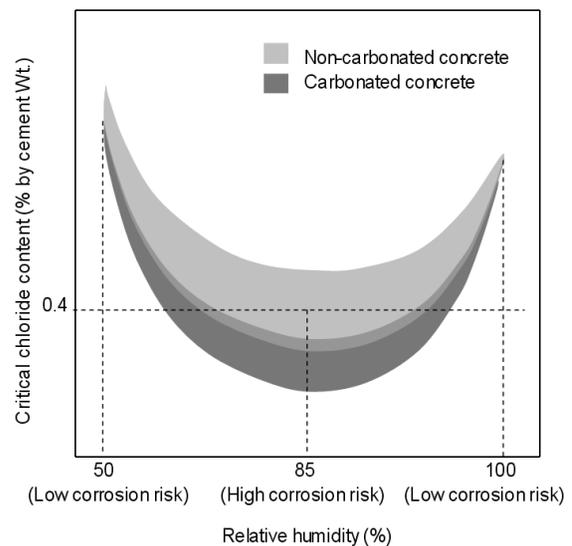


그림 10 Critical chloride content of (non)carbonated concrete[5]

다양한 pH값의 감소에 따른 OH농도가 반영하였다

경년 10년 이상이 되면서 탄산화로 인한 pH의 감소를 변수로, 탄산화된 콘크리트의 임계 염소이온량을 계산하여 보인 결과가 그림 11이다. 여기서, 탄산화된 콘크리트도 비탄산화된 콘크리트와 마찬가지로 시간에 따라 임계 염소이온량이 상승하는 경향을 보였다. 또한, 탄산화로 인하여 pH가 13.0정도로 미세히 감소하여도 임계 염소이온량은 큰폭으로 감소하는 추이를 보였다. 이는 pH가 13.0이하면 OH농도는 큰 폭으로 감소하기 때문이다. 특히, pH가 11.5로 저하되면 임계 염소이온량은 0에 가까운, 극단적으로 낮은 값을 갖는데, 이는 염소이온에 의한 철근부식과 관계없이 탄

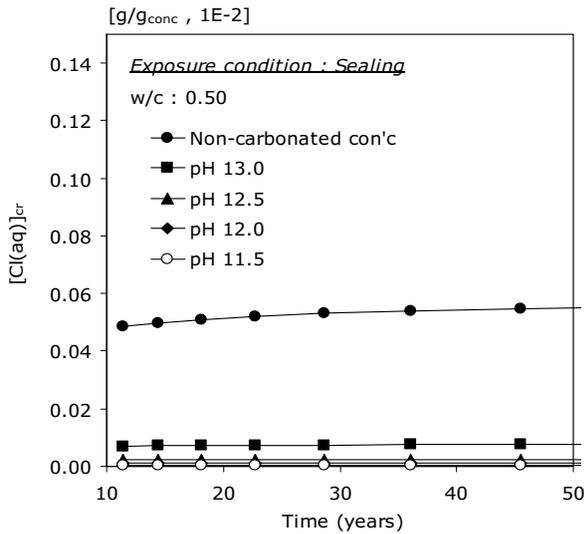


그림 11 Effect of carbonation on critical chloride content(w/c 0.50)

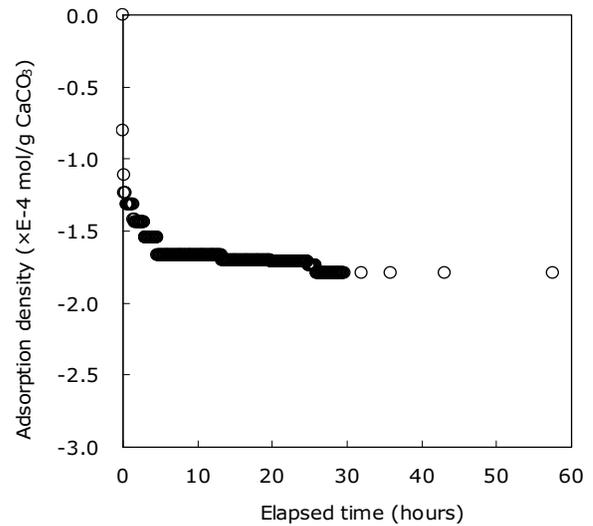


그림 12 Adsorption density of CaCO<sub>3</sub> with elapsed time

산화로 인하여 철근표면의 부동태 피막이 이미 파괴되었기 때문이다. 즉, 탄산화된 콘크리트는 이미 탈부동태화되었기 때문에 임계 염소이온량은 더이상 철근부식 유무를 판단할 수 있는 지표가 되지 못하므로 복합열화에 따른 철근부식 속도의 관점에서 열화에 대한 연구가 다루어져야 할 것으로 생각된다.

한편, 물-시멘트비가 높은 콘크리트보다, 물-시멘트비가 낮은 콘크리트에서 탄산화로 인하여 임계 염소이온량이 큰 폭으로 감소하는 추세가 더욱 뚜렷하였다. 이는 물-시멘트비가 낮은 콘크리트가 높은 시멘트량이 이용되어 OH이온량이 많이 생성되었으나, 물-시멘트비가 적은 콘크리트보다 탄산화로 인하여 pH 및 OH 값이 감소되는 폭이 상대적으로 컸기 때문이다. 그러나 비탄산화된 콘크리트와 같이, 탄산화된 콘크리트의 임계 염소이온량도 물-시멘트비가 높은 콘크리트에서 높은 추이를 보였다.

### 2.5 염소이온의 흡착(고정화)

해양콘크리트 중의 염소이온은 시멘트 내부의 수화물과 화학적 이온 교환 및 조직구조 표면과의 물리적 상호작용력에 의하여 일부 흡착된다. 그런데 콘크리트가 탄산화되면, 흡착된 콘크리트는 탈착된다. 염소이온의 흡착은 C-S-H와 AFm에 의한 것이 주요하므로, 시멘트 수화물별 염소이온의 흡/탈착량도 결정되어야만 한다.

탄산칼슘의 염화나트륨 수용액 내에서 염소이온 흡착 거동을 측정한 결과, 이를 흡착 밀도를 계산하여 보인 것이 그림 12이다. 흡착 실험 초기에 염소이온의 농도가 빠르게 상승하였고 5시간 경과하면서는 일정수준에 도달하면서 천

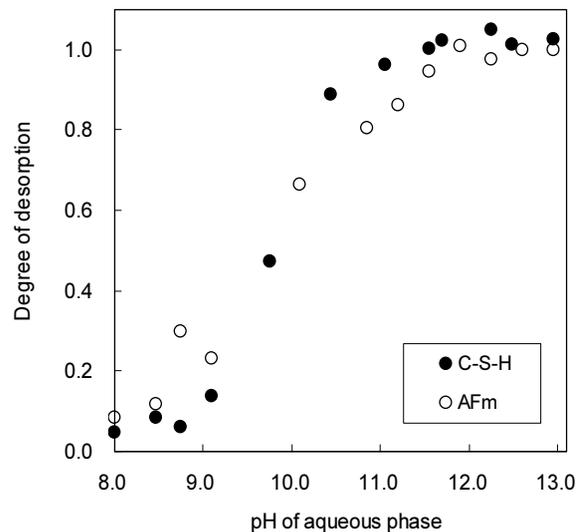


그림 13 Desorption degree of chlorides due to carbonation

천히 염소농도 상승율을 보였다.

그림 13은 다양한 pH값을 갖는 인공 공극수와 인공적으로 화학적으로 합성한 규산칼슘 수화물 및 모노설페이트를 토대로 염소이온 흡착 및 탄산화로 인한 탈착 실험을 한 결과이다. 염소이온의 탈착량은 공극수의 pH값에 크게 의존하였다. 그런데 규산칼슘 수화물에 의한 흡착이 모노설페이트에 의한 흡착보다 pH값에 더욱 민감하였으며, 둘 다 공극수의 pH값에 대응한 탈착량이 흡착량에 대비하여 높았다.

또한, 염소이온 탈착량은 공극수가 탄산화되면서 pH 11.5를 경계영역으로 급격히 감소하였다. 이 실험결과는 향후 시멘트 수화모델과 결합하여 배합조건, 시간단계, 환경

영향요소 등을 변수로 하여 다양한 흡착 및 탈착 시나리오를 창출할 수 있는 열역학적 해석기법 개발의 모듈로 활용될 계획이다.

### 3. 결 론

내구성 설계 매개변수는 콘크리트의 내구성을 이해하고 유지관리 전략을 수립하는데 매우 중요한 재료 변수이다. 지난 수십 년간, 해양성 콘크리트 구조물의 내구성 설계에 대한 많은 연구가 이루어졌으나 그 결과는 서로 상이하다. 그래서 시멘트 및 콘크리트 재료 과학적 지식 기반에 기인하여 합리적으로 정의되어야만 한다. 또한, 탄산화는 대부분의 콘크리트에 발생하는 자연적 현상으로, 탄산화된 콘크리트의 내구성 설계 매개변수를 다룬 연구가 필요하다.

본 연구는 탄산화된 콘크리트의 미세구조 변화와 화학적 물성 변화에 기인한 내구성 설계 매개변수의 변화를 고찰하고자 하였다. 향후, 본 연구에서 제안한 탄산화된 콘크리트의 임계 염소이온량의 해석방법은 탄산화와 염소이온의 복합열화에 의한 화학반응 메커니즘에 기인하여, 내구수명 예측기법의 개발 및 다양한 시나리오의 구축에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

향후, 탄산화된 콘크리트의 장기 투수계수의 산정을 더욱 정확히 추정하기 위하여 탄산화로 인한 공극 크기별 분포감소량을 예측할 수 있는 정확한 모델링 기법과 탄산화

과정에 따른 시멘트 조직체의 화학적 특성의 변화 이력을 다룬 연구가 필요할 것으로 생각된다.

### 참 고 문 헌

1. 小林一輔, 宇野祐一(1990) 콘크리트의炭酸化のメカニズム, 콘크리트工學論文集, Vol.1, No. 1, pp.138-149.
2. Ngala, V. T., and Page, C. L.(1997) Effect of Carbonation on Pore Structure and Diffusion Properties of Hydrated Cement Pastes, *Cement and Concrete Research*, Vol.27, No.7, pp.995-1007.
3. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., and Fardis, M. N.(1991) Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation, *ACI Material Journal*, Vol.88, No.4, July-August, pp.363-373.
4. De, Ceukelaire L., and Van, Nieuwenburg, D.(1993) Accelerated Carbonation of Blast-furnace Cement Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, pp.442-452
5. CEB(1992) Durable Concrete Structures: Design Guide, 2<sup>nd</sup> Edition, ThomasTelford, London. 

[담당 : 강현구 편집위원]