인덕대학교 건설정보공학과 **윤인석** 교수
전경련 중소기업협력센터 **이종열** 경영자문위원

콘크리트의 미세구조와 내구성능

연 · 재 · 순 · 서

1회
콘크리트의 염해 평가 실험 방법의 현황
2회
콘크리트 미세구조와 내구성능
3회
탄산화와 염해에 의한 콘크리트의 복합 열화
4회
콘크리트의 내구성능 향상을 위한 표면 도장 공법

들어가며

정량적 내구성 평가를 위해서는 성능저하 메커니즘에 대한 이해의 증진, 환경조건의 특성화, 재료에 관한 데이터 확보, 합리적인 모델의 개발 등이 요구된다. 기존 콘크리트 구조물의 상태 및 성능 평가를 합리적으로 수행하기 위해서는 내구성능 예측을 위한 정량적 기준 및 방법의 정립이 필수적이다.

콘크리트 내구성의 정량화 방법은 콘크리트의 상태 결정, 성능저하 요인 규명, 내용 연수 종료를 구성하는 조건 결정 등의 일반적 절차를 포함한다. 때로는 이 방법들이 실험을 통해 현재 콘크리트 상태로부터 내용연수 종료시 콘크리트 상태의 시간 외삽법 등과 같은 논리성 부족을 드러내기도 하는데 이는 콘크리트의 미세구조의 발현특성을 이해하면 과학적으로 해석할 수 있다.

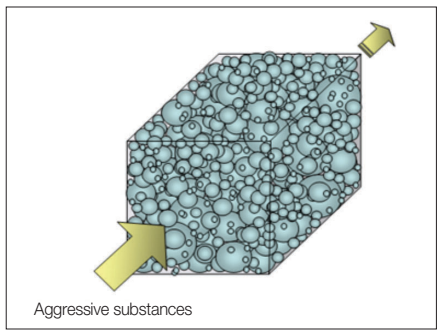
콘크리트 내부로 물이나 이온 혹은 가스의 유입은 시멘트 페이스트 매트릭스 내 공극을 통하여 발생하는데 이러한 물질들은 전해질 농도차, 콘크리트의 조직구조, 균열, 공극직경, 공극의 수분함량 및 온도 등에 의해 지배되고 다양한 물리 · 화학적 메커니즘에 의해 이동하게 된다. 콘크리트 사회기반시설물의 정량적인 내구특성을 이해하고 내구수명에 반영하기 위해서는 유해물질에 대한 정량적 침투계수를 획득해야만 한다. 그래서 콘크리트의 침투계수, 즉 염소이온 확산계수, 투수 계수, 투기 계수 등에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔고, 콘크리트의 복잡한 재료적 특성으로 인한 영향요인들이 규명되었다.

이에 이번 호에는 콘크리트의 미세구조 특성과 내구성능을 주제로 다루고자 한다. 이들 재료 매개변수는 시멘트의 수화반응으로 인한 시멘트 페이스트의 공극구조 특성, 골재의 존재효과 등이 고려되어야 한다. 이러한 접근방법은 향후 시멘트의 물리화학적 재료 특성에서부터 콘크리트의 공학적 특성까지, 마이크로 스케일에서 메소 단위의 스케일까지 고려한 멀티스케일 모델링 기법을 정립하고 다양한 콘크리트 성능평가 시스템을 개발하는 데 유용하게 활용될 수 있다.

시멘트 페이스트의 미세공극

시멘트 경화체의 공극량 및 공극 크기 분포

〈그림 1〉 미세공극과 내구성

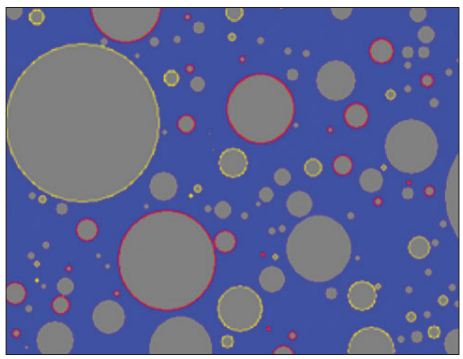


염소이온이 콘크리트에 침투하는 속도는 실질적으로 콘크리트의 내구성능에 직결되는 중요한 요소이다.(그림 1 참조) 이때 염소이온이 콘크리트에 침투하는 구동력은 모세관 흡수, 확산, 투수, 3가지로 대별된다.

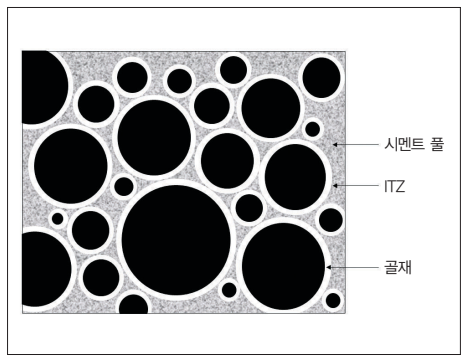
〈그림 2〉와 같이 시멘트 풀은 배합수량에 따라 경화 후 다양한 크기의 공극이 형성되며, 〈그림 3〉과 같이 콘크리트는 시멘트 풀, 골재, 두 재료 간 경계영역(Interfacial Transition Zone, ITZ)으로 구성된다.

시멘트 경화체의 공극량은 배합조건에 따른 수화도의 함수인데 무작위로 다양한 크기의 공극이 존재한다. 대부분 콘크리트의 성능저하는 수분, 이온, 가스와 같은 물질이 공극을 통해 내부로 침투하면서 발생되기 때문에 콘크리트의 내구성을 결정짓는 요소는 콘크리트의 투과성(Permeability)이라 할 수 있다. 따라서 콘크리트의 투과성을 정량적으로 판단하는 것은 전반적인 내구성능을 평가하는 기본적인 방법이라 간주할 수 있다.

〈그림 2〉 시멘트 풀의 미세공극

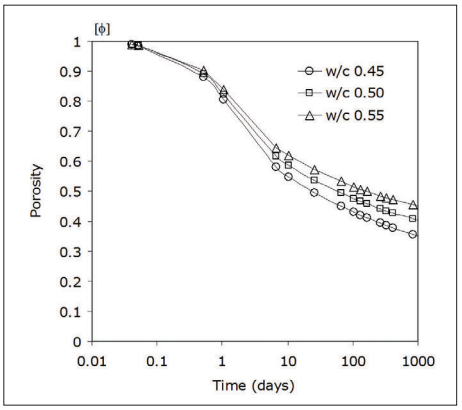


〈그림 3〉 배합수 내 시멘트 입자

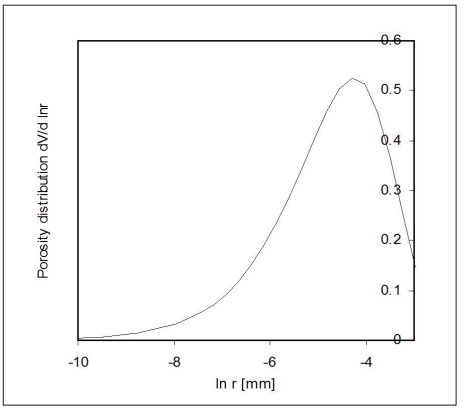


한편 콘크리트의 투과성을 결정하는 요소에는 콘크리트의 공극량(그림 4), 공극 크기 분포 및 미세구조(그림 5) 등에 의해 결정되는 재료 자체의 투과성, 수분 분포 등의 재료요소가 있다. 콘크리트의 미세구조는 시멘트 풀 경화체, 골재, 그리고 골재와 시멘트 풀 간의 경계영역(ITZ)으로 나눌 수 있다. 모세공극량이 커짐에 따라 콘크리트의 투과성도 급격히 커지게 된다. 공극량뿐만 아니라 공극분포도 투과성에 영향을 미치는 데 상대적으로 큰 공극량이 많을수록, 서로 연결된 공극량이 많을수록 투과성은 커진다.

〈그림 4〉 시멘트 풀 내 공극량



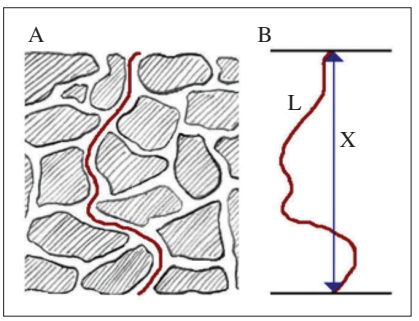
〈그림 5〉 시멘트 풀의 공극 크기 분포



유체 흐름의 굴곡 특성

다공질성 재료의 굴곡 특성계수(τ_T, Tortuosity)는 유체의 침투 경로에 대한 최단거리(X)와 유효거리(L)의 비율로 가장 큰 요인은 공극량으로 보고된 바 있다(그림 6). 유체의 굴곡 특성은 염소이온 확산계수, 투수계수 및 투기계수 등의 침투계수를 수학적으로 모델링하는 데 반드시 고려되어야 할 영향요소이다.

〈그림 6〉 콘크리트의 유체 굴곡특성

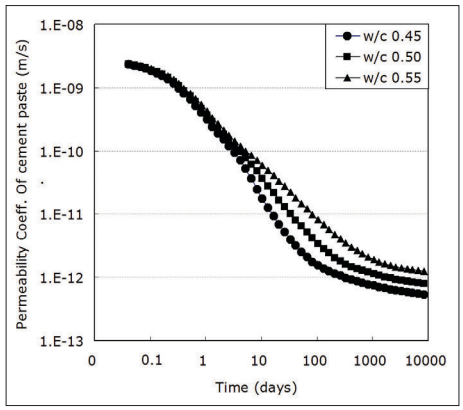


콘크리트의 내구성능

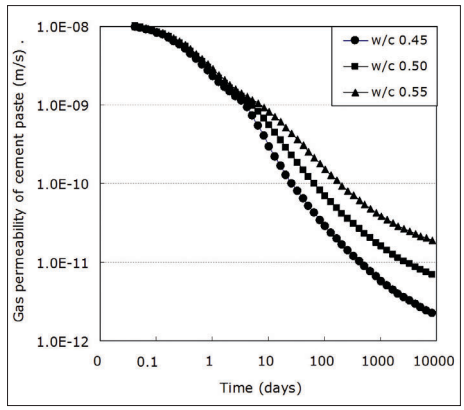
콘크리트 구조물의 내구성 설계에 영향을 미치는 침투계수에 대해서는 시멘트 페이스트 및 콘크리트의 공극구조 특성과 재료 매개변수와의 상관성을 규명하는 연구가 경험적 방법에서부터 공극구조 모델링에 의한 이미지 해석 방법까지 다양한 접근 방법으로 진행되었다. 여기서는 앞서 설명한 공극구조 특성에 기초한 시멘트 및 콘크리트의 침투계수 산정결과를 살펴본다.

〈그림 7〉은 물–시멘트 비를 변수로 시간경과에 따른 시멘트 페이스트의 투수계수의 변화율을 계산한 결과이다. 시간의 경과에 따라 투수계수가 초기에는 매우 가파르게 감소하는 추세를 보이지만, 재령 100일이 경과하면서 변화율이 비교적 완만하지만 꾸준히 감소추세를 보이는 것을 알 수 있다. 초기단계에서 콘크리트의 투수계수는 물–시멘트 비와 무관하게 일정하지만, 재령이 경과함에 따라 물–시멘트 비에 따라 뚜렷한 차이는 보였다. 이는 경화 초기단계에서 콘크리트의 투수계수가 시멘트 페이스트의 품질에 대한 영향이 적지만 시멘트의 수화반응이 진행됨에 따라 물–시멘트 비에 따른 공극구조의 발현이 차이를 보이기 때문이다.

〈그림 7〉 시멘트 경화체의 투수계수



〈그림 8〉 시멘트 경화체의 투기계수



〈그림 8〉은 물–시멘트 비를 변수로 시간경과에 따른 시멘트 페이스트의 기체 투기계수의 변화율을 계산한 결과이다. 물–시멘트 비에 따라 뚜렷한 추이를 보였으며, 시멘트의 수화가 진행됨에 따라 재령 초기부터 꾸준히 가파르게 감소하는 추세를 보였다. 그러나 시간이 경과함에 따라 투기계수도 감소율이 다소 완화되고 있는 것을 확인할 수 있다. 그런데 재령 4일까지는 물–시멘트 비의 변화에 따른 추이가 뚜렷하지 않았는데 이는 초기재령에서는 물–시멘트 비에 따른 뚜렷한 차이를 보일 정도로 미세구조의 발현이 이루어지지 않아 미숙한 공극 시스템이 형성되어 기체가 빠르게 통과하기 때문이다.

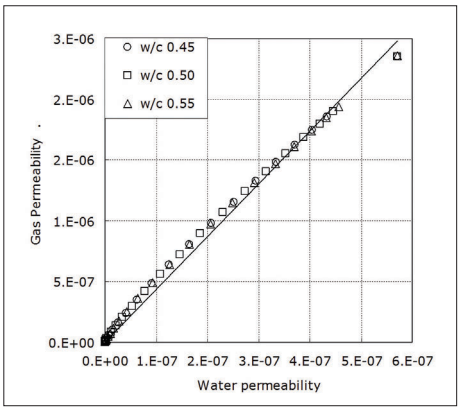
그러나 재령 4일이 경과하면서는 공극구조가 뚜렷하게 차이를 보임에 따라 투기계수에도 커다란 영향을 보이고 있음을 알 수 있다. 시간경과에 따른 기체 투기계수는 시간이 경과하면서 꾸준히 감소추세를 보이는 것을 알 수 있다.

〈그림 9〉에 의하면 시멘트 페이스트에서 물–시멘트 비와 무관하게 투수계수와 투기계수의 관계는 선형관계가 성립된 것을 확인할 수 있는데, 이는 액체와 기체의 점성 및 마찰 비율로 투수와 투기계수의 선형 상관관계를 설명하는 Klinkenberg 효과가 잘 부합됨을 증명하고 있다.

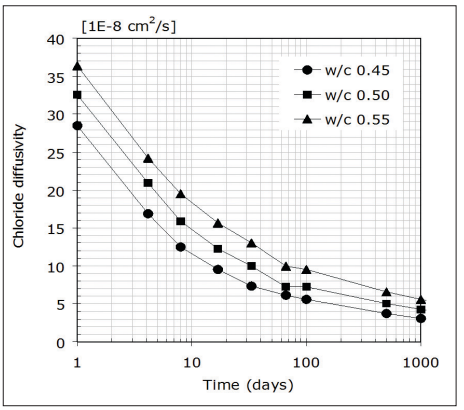
〈그림 10〉은 물–시멘트 비를 변수로 시간경과에 따른 염소이온 확산계수의 변화를 계산한 결과이다. 콘크리트의 재령 28일까지 염소이온 확산계수가 가파르게 감소하는 추세를 보이고 있다.

즉 물–시멘트 비 50%인 콘크리트의 경우 초기재령에 비교하여 재령 28일이 되면서는 약 1/4.7 배 이하로 감소하였다. 이후에는 그 감소추세가 현저히 감소하지만 완만하게 꾸준히 진행되었다. 따라서 해양성 콘크리트 구조물의 신설시, 시공 초기단계에서 일정기간까지는 콘크리트가 해수에 접하는 것이 매우 유해하며 이 기간 동안 침투성을 제어할 수 있도록 각별한 주의 및 이를 제어할 수 있는 공법이 필요하다고 생각된다.

〈그림 9〉 투수계수와 투기계수의 상관성



〈그림 10〉 콘크리트의 염소이온 확산계수



맺음말

국내외에서 콘크리트의 유지관리에 대한 관심이 지속적으로 증대되고 있는 현실에서 콘크리트의 미세구조에 근거한 열화과정에 대한 폭넓은 이해 및 합리적 평가 분석은 콘크리트 구조물의 합리적인 중장기 성능평가에 활용될 수 있다. 또한 콘크리트 구조물에 대한 과학적인 건전도 평가를 위한 실내외 실험을 수행하고 있으면서도, 그 계측결과를 어떻게 분석하고 평가할 것인가에 대한 방향 설정에도 활용될 수 있다.

콘크리트의 미세구조의 이해는 표준화된 내구성능 평가 기법을 적용한 기존 구조물의 상태평가 및 이를 고려한 잔존수명 예측기법의 개발에 반드시 필요한 침투계수를 정량화하기 위한 시작이다. 이 글이 시멘트 및 콘크리트 기술자들이 올바른 내구성능 평가 기술에 대한 이해 및 아이디어를 제공하는 데 조금이나마 도움이 되길 바란다.

참고문헌

1. J. Kropp, and H. K. Hilsdorf (eds.), Performance Criteria for Concrete Durability, RILEM Report 12, E & FN SPON, 1998.
2. K. K. Aligizaki, Pore Structure of Cement-Based Materials, Taylor & Francis, 2006.