

02

내부양생을 활용한 자기수축 제어

Control of Autogenous Shrinkage using Internal Curing

이광명 Kwang Myong, Lee
성균관대학교
건축토목공학부 교수

최슬우 Seul Woo, Choi
자기치유친환경콘크리트연구센터
박사후연구원

김주형 Joo Hyung, Kim
한국건설생활환경시험연구원
첨단건설재료센터 선임연구원

1. 머리말

콘크리트는 경제적이고 다양한 형상으로 시공이 가능한 우수한 건설재료이지만, 타설 직후부터 수반되는 체적 변화로 인해 균열 발생이 빈번한 단점이 있다. 이러한 균열은 콘크리트 구조물의 내구성 및 사용성을 저하하기 때문에 초기재령부터 균열 제어 및 방지 대책이 요구된다. 특히 낮은 물-결합재 비를 가진 고강도 콘크리트는 초기 재령부터 자기건조(self-desiccation) 현상에 따른 자기수축(autogenous shrinkage)이 크게 발생하기 때문에 많은 연구자 및 기술자들에 의해 다양한 자기수축 저감 방법이 개발되어 현장에서 적용되고 있다. 최근에는 자기수축에 따른 균열 저항성뿐만 아니라 내구성을 증진할 수 있는 내부 양생 기술을 적용하여 콘크리트 구조물의 사용수명을 증대시키고자 하는 시도가 이루어지고 있다. 국외에서는 2013년 내부 양생용 경량골재의 품질 관리를 위한 ASTM C1761¹⁾이 제정되고 미국콘크리트학회(ACI)에서 경량골재를 이용한 내부양생 관련 보고서²⁾가 발간되는 등 관련 기준이 마련되어 점차 내부양생 기술의 현장적용이 증가하는 추세이다. 본 특집에서는 콘크리트의 수축제어 기술로 주목받고 있는 내부양생의 적용방법과 효과를 소개하고자 한다.

2. 내부양생의 정의

경량골재를 사용한 내부양생에 대한 개념은 1991년 Robert Philleo가 “자기건조를 감소시킬 수 있도록 포틀랜드 시멘트의 기본 성질이 변화되거나 고강도 콘크리트 부재 내부 안에서 양생수를 얻을 방법을 찾아야 한다. 후자의 경우 수분을 함유한 경량골재의 사용을 통해 가능하다. 하지만 고강도를 위해 경량골재를 사용하는 것에 적극적이지 않다. 일부 잔골재를 경량 잔골재로 대체하는 것을 해결책으로 제시할 수 있다.”라고 제안한 것에 기초한다³⁾.

내부양생은 <그림 1>과 같이 흡수율이 높은 재료를 저

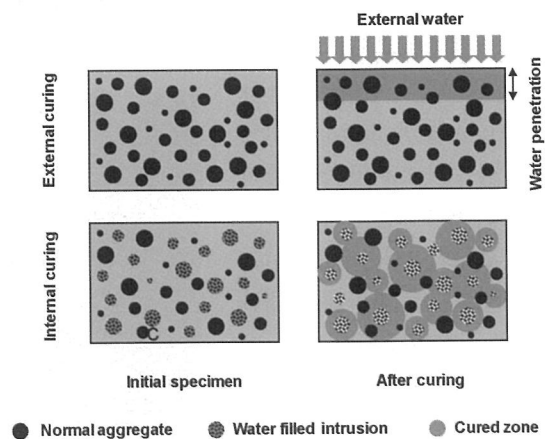


그림 1. 내부양생의 개념도⁴⁾

장소로 하여, 콘크리트 내부에서 양생에 필요한 수분을 공급하는 기술이다. 물-결합재 비가 낮은 콘크리트에서 외부양생(external curing)은 외부의 수분이 콘크리트의 표면에서 수 밀리미터 침투하는데 그치지만 내부양생(internal curing)은 콘크리트 내부에서 수분을 함유한 경량골재가 콘크리트 단면에 균등하게 수분을 제공할 수 있다는 장점이 있다.

미국콘크리트학회(ACI)는 2010년 전문용어로서 ‘내부양생’을 “수분을 포함한 경량골재를 저장소로 이용하여 수화에 필요한 수분의 방출을 유도 또는 발산 혹은 자기건조로 인한 수분 상실을 보상하여 타설된 시멘트에 지속적인 수분을 공급하는 것”이라고 정의하였다⁵⁾. 이는 내부양생의 목표가 수화반응으로 인한 콘크리트 내부의 자기건조 현상을 최소화하는 것과 동시에 시멘트의 수화반응을 향상하는 것임을 의미한다.

3. 콘크리트의 내부양생

3.1 내부양생의 적용 방법

국외에서는 내부양생의 개념이 제안된 1990년대 이후 많은 연구자가 인공경량골재(artificial lightweight aggregate), 부석(pumice), 제올라이트(zeolite) 등 다양한 종류의 경량골재를 사용하여 내부양생에 대한 활발한 연구를 진행하였으며, 2000년대 이후 고흡수성 수지(super absorbent polymers, SAP), 나무 섬유(wood fibers) 등과 같이 흡수율이 높은 다양한 재료로 확대되었다. 국내에서는 2010년 이후 내부양생에 대한 연구가 시작되었으며, 주로 경량골재를 사용하여 내부 양생 효과 검증을 위한 실험적 연구가 진행되었다⁶⁾.

경량골재를 사용한 내부양생은 경량골재의 치환율, 수분포화 정도에 따라 수축저감 효과가 달라지는데, 일반적으로 경량골재의 치환율 및 골재의 수분포화도가 높을수록 수축저감 효과가 증대된다. 또한, 경량골재의 입도가 작을수록 수분을 공급할 수 있는 시멘트 페이스트와의 접촉 면적이 증가하여 내부양생 효과가 크게 나타난다. 경량골재를 사용한 내부양생을 콘크리트에 적용할 때 시멘트 페이스트의 화학수축에 따른 경량골재 사용량과 골재 수분포화 정도를 고려해야 하며 일반 골재와의 밀도 차이에 따라 경량골재를 부피 치환해야 한다.

3.2 내부양생의 효과

〈그림 2〉와 같이 내부양생을 통해 추가로 공급한 수분은 배합과정에서 방출되지 않고 저장소 역할을 하는 경량골재에 존재하며, 이후 수화과정에 의해 콘크리트 내부 습도가 감소하면서 시멘트 페이스트로

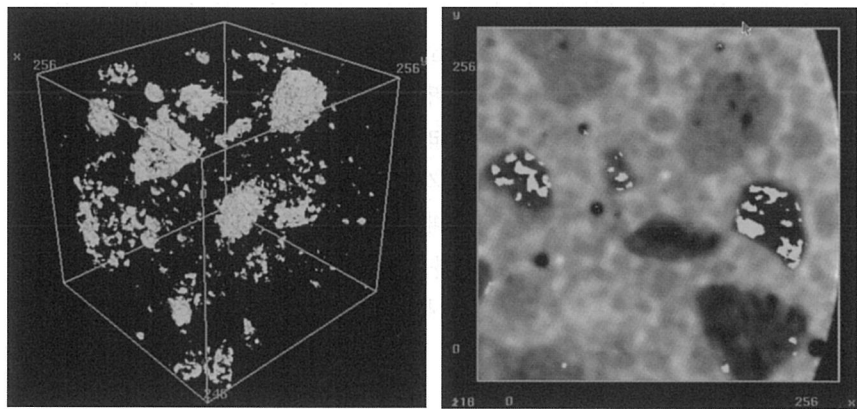
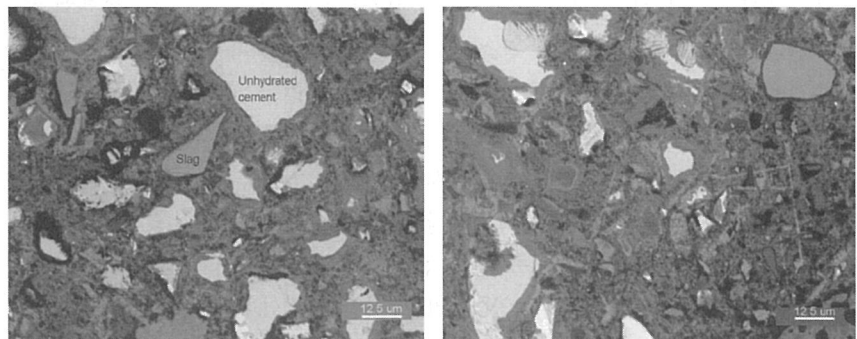


그림 2. 재령 1일에서 내부양생이 적용된 모르타르 시편의 내부 수분 분포⁷⁾



(a) 일반양생 모르타르 (b) 내부양생이 적용된 모르타르

그림 3. 내부양생 적용에 따른 미수화 시멘트의 감소⁸⁾

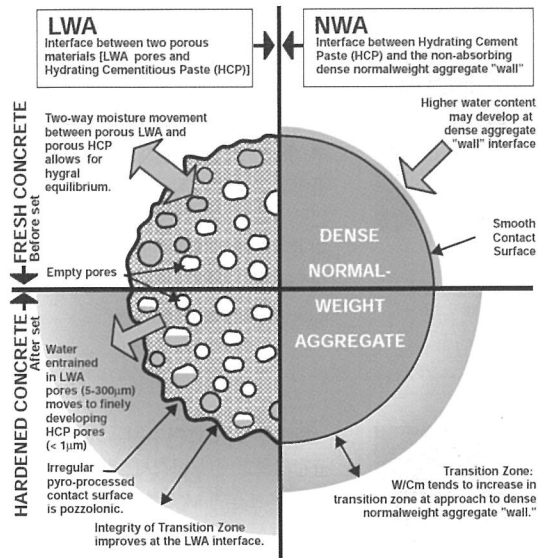


그림 4. 경량골재를 이용한 내부양생 효과⁹⁾

방출된다. 이렇게 경량골재가 수분의 공급원이 되기 때문에 콘크리트 내부 자기 건조 현상이 감소하며, 이를 통해 자기수축 및 건조수축이 감소하고 균열저항성이 증대된다. 또한, 지속적인 수분공급을 통해 <그림 3>과 같이 미수화 시멘트가 감소하기 때문에 시멘트의 수화도가 높아지는 효과를 얻을 수 있다. 이러한 수화도의 증가는 콘크리트의 압축강도를 크게 하고 이온확산 저항성을 높인다. <그림 4>는 경량골재와 시멘트 페이스트 사이의 수분 이동 특성 및 내부양생 효과를 일반 골재의 경우와 비교하여 나타낸 것이다.

미국에서는 2010년 이후 내부양생 기술을 다양한 콘크리트 배합에 접목하여 교량 바닥판, 포장, 물탱크 등에 적용하였다. <그림 5>는 2010년 미국의 Bloomington에서 내부양생을 계획한 콘크리트로 교량 바닥판을 시공하는 장면이다. 타설 후 7일 동안 플라스틱 판으로 표면을 덮어 수분의 증발을 보호하였으며, 이후 18개월까지 모니터링한 결과 일반 콘크리트로 시공한 바닥판에서는 3개의 큰 균열이 발생하였지만 내부양생이 적용된 바닥판에서는 균열이 관찰되지 않았다. 최근 보고에 의하면 내부양생을 적용하지 않은 고성능 콘크리트와 내부양생을 적용한 고성능 콘크리트로 제작된 교량 바닥판의 기대 내구



그림 5. 내부양생이 적용된 콘크리트의 시공 현장(Bloomington, USA)¹⁰⁾

수명은 각각 40, 63년으로 내부양생을 적용한 콘크리트의 내구수명이 일반콘크리트와 비교하여 150% 이상 높게 평가되었다¹¹⁾.

4. 맺음말

이 글에서는 최근 주목받고 있는 내부양생을 통한 콘크리트의 수축제어 기술을 소개하였다. 콘크리트 구조물의 균열저항성 향상뿐만 아니라 내구수명 증가 등 내부양생을 통한 최상의 효과를 얻기 위해서는 내부양생 재료의 선정 및 배합 계획 등이 적절하게 선행되어야 한다. 또한, 콘크리트 내부에 양생에 필요한 수분이 존재하기 때문에 외부에서 공급하는 추가적인 수분에 대해서는 엄격한 관리가 이루어져야 한다.

한편 외국에서는 내부양생 기술과 관련하여 품질 기준 및 가이드라인이 제정되어 실용화 단계를 넘어 확산 단계에 다다른 지금 국내에서도 내부양생 연구 및 기술 개발을 통해 기술 격차 감소 노력이 필요하다. 내부양생 기술을 통해 콘크리트의 내구수명 제고로 최근 대두하고 있는 구조물의 내구수명 및 유지관리 측면에서 우리 건설 산업이 지속 가능한 발전을 도모할 수 있을 것으로 기대된다. □

담당 편집위원 : 신경준(충남대학교) kjshin@cnu.ac.kr

참고문헌

1. ASTM International, ASTM C1761/C1761M-13b:Standard Specification for Lightweight Aggregate for Internal Curing of Concrete, West Conshohocken:ASTM International, 2013b.
2. American Concrete Institute, ACI(308-213) R-13:Report on Internally Cured Concrete Using Prewetted Absorptive Lightweight Aggregate, American Concrete Institute, 2013.
3. Bentz, D.P., & Weiss, W.J., Internal Curing: A 2010 State-of-the-Art Review, NIST Interagency/Internal Report 7765, 2011.
4. Castro, J., De la Varga, I., Goliás, M., & Weiss, W., Extending Internal Curing Concepts to Mixtures Containing High Volumes of Fly Ash, International Bridge Conference, 2010.
5. American Concrete Institute., ACI Concrete Terminology. Retrieved November, 2010, <http://www.concrete.org/Technical/CCT/ACI-Terminology.aspx>
6. 한국건설생활환경시험연구원 외, 전력산업융합원천기술 개발사업, 'HVCCPs활용 그란 건설재료 및 실용화 기술' 연구보고서.
7. Bentz, D., Halleck, P., Grader, A., & Roberts, J., Four-Dimensional X-ray Microtomography Study of Water Movement during Internal Curing. Proceedings of the International RILEM Conference, 2006, pp. 11~20.
8. Bentz, D., & Stutzman, P., Internal Curing and Microstructure of High Performance Mortars, ACI SP-256:Internal Curing of High Performance Concretes: Laboratory and Field Experiences, 2008, pp. 81~90.
9. Expanded Shale, Clay & Slate Institute, Internal Curing : Using Expanded Shale, Clay and Slate Lightweight Aggregate, Pulication # 4362, 2006.
10. Di Bella, C., Schlitter, J., & Weiss, W., Construction Documentation of Bloomington, 2010.
11. Cusson, D., Lounis, Z., & Daigle, L., Benefits of Internal Curing on Service Life and Life-Cycle Cost of High-Performance Concrete Bridge Decks-A Case Study, Cement and Concrete Composites, Vol. 32, No. 5, 2010, pp. 339~350.



이광명 교수는 미국 MIT 토목환경 공학과에서 고강도 콘크리트의 파괴거동에 관한 연구로 박사학위를 취득한 후 1994년부터 성균관대학교 건설환경 공학부 교수로 재직하고 있다. 주 관심 연구 분야는 자기치유 콘크리트, 친환경 콘크리트, 내구성이며, 우리 학회 부회장을 맡고 있다.

leekm79@skku.edu



최슬우 박사후연구원은 2015년 성균관대학교 건설환경시스템공학과에서 저온 소성한 MgO를 함유한 콘크리트의 팽창 특성에 관한 연구로 박사학위를 취득한 후 성균관대학교 자기치유 친환경 콘크리트 연구센터(SHGC)에서 박사후연구원으로 재직하고 있다. 관심 연구 분야는 친환경 콘크리트 및 콘크리트의 수축/팽창 특성 등이다.

sinope16@skku.edu



김주형 선임연구원은 2007년 성균관대학교 건설환경시스템공학과에서 염해환경 철근콘크리트 구조물의 확률론적인 내구성 해석 및 신뢰성 평가에 관한 연구로 석사학위를 취득한 후 박사과정을 수료하고 한국건설생활환경 시험연구원 첨단건설재료센터 선임연구원으로 재직하고 있다. 관심 연구 분야는 첨단 건설재료 개발 및 내구성 평가 등이다.

kjhmole@kcl.re.kr