



01

콘크리트 건조수축과 자기수축의 이해

Understanding of Drying Shrinkage and Autogeneous Shrinkage in Concrete

권승희 Seung Hee, Kwon
 명지대학교 토목환경공학과
 부교수

김진근 Jin Keun, Kim
 KAIST 건설 및 환경공학과
 교수

1. 머리말

콘크리트는 강재와 더불어 가장 널리 사용되는 건설재료이지만 강재와 대비되는 많은 단점을 갖고 있다. 그 중 대표적인 것이 수축이라 하겠다. 사용성과 내구성에 직접 연관되는 균열의 주요 원인이며, 시간에 따라 지속해서 변형을 유발함으로써 구조물에 예기치 못한 문제를 일으키는 경우가 많다. <그림 1>은 콘크리트 수축의 종류에 따른 발생 시기와 기간을 나타낸 것이다^{1,2)}. 소성수축은 콘크리트 타설 초기 경화가 완전히 이루어지지 않은 소성상태에서 블리딩 수를 포함한 표면 수가 건조되면서 콘크리트가 수축하는 현상이다. 탄화수축은 건조수축에 의해 국부적으로 압축응력을 받는 부분의 수산화칼슘(Ca(OH)₂)이 수분에 용해된 후 이산화탄소(CO₂)와 반응하여 생성된 탄산칼슘(CaCO₃)이 응력을 받지 않은 영역으로 이동하여 침전하면서 발생하는 것으로 추정하고 있다.

건조수축은 내부의 수분이 외부로 빠져나가면서 발생하게 되며, 초기재령부터 매우 장기간에 걸쳐 일어난다. 일반적으로 다른 수축에 비해 발생량이 매우 커 실제 구조물의 사용성 및 내구성에 상당한 영향을 미치게 된다.

자기수축은 물/시멘트비가 낮은(42% 이하) 상황에서 미수화 시멘트의 지속적인 수화로 인해 발생한 내부 수분 손실(자체건조, self-dessication)이 원인이며, 최근 고강도 콘크리트의 사용이 보편화하면서 중요성이 크게 대두되고 있다.

이번 기사에서는 상대적으로 중요성이 높고 구조물에 미치는 영향이 큰 건조수축과 자기수축에 대해 기본적인 메커니즘, 영향인자와 예측모델, 구조물에 미치는 영향에 대해 간략히 정리하였다. 지면의 한계로 자세한 내용을 다룰 수는 없지만, 건조수축과 자기수축에 대한 전반적인 이해에 도움이 되고자 한다. 구체적인 내용에 대해서는 본문에 인용된 문헌을 참고하기 바란다.

2. 메커니즘

2.1 건조수축

건조수축은 내부의 수분이 밖으로 빠져나가면서 수축이 일어나는 현상이다. 콘크리트 내부는 다양한 크기

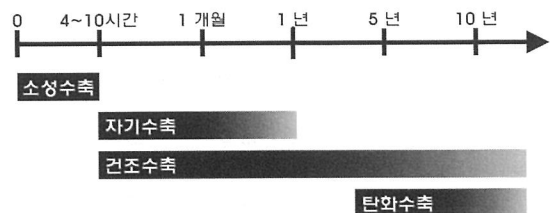
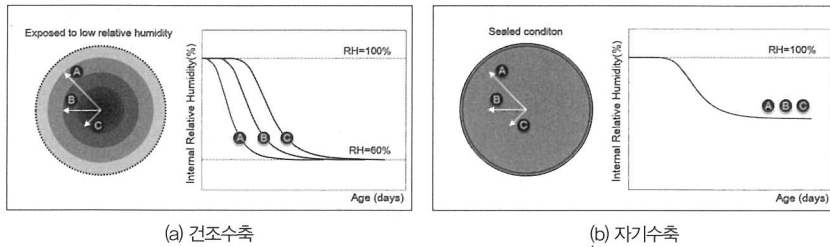
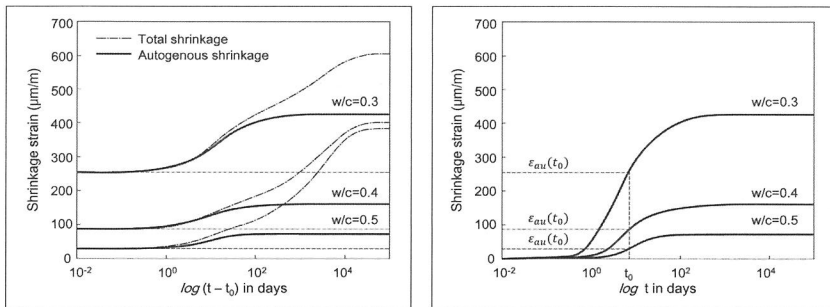


그림 1. 콘크리트 수축의 종류에 따른 발생 시기와 기간

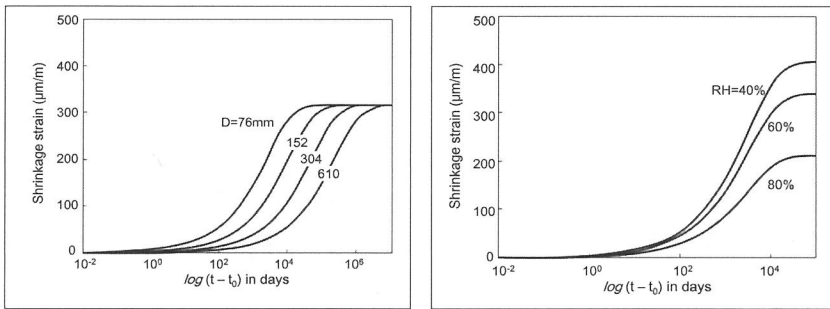


(a) 건조수축 (b) 자기수축
그림 2. 내부 위치별 습도의 시간에 따른 변화



(a) 재령 t_0 시점에 건조 대기에 노출된 후 전체 수축량과 자기수축량 (b) 재령 t_0 이전의 수축량을 포함한 자기수축량

그림 3. 내부 위치별 습도의 시간에 따른 변화



(a) 부재크기에 따른 건조수축 변형률 (b) 외부 상대습도에 따른 건조수축 변형률

그림 4. 부재크기와 외부 상대습도에 따른 건조수축⁴⁾

의 공극이 있으며, 초기에는 이 공극을 수분이 채우고 있다. 표면부에서부터 외부로 수분의 확산이 일어나면서, 모세관압력(capillary pressure), 분리압(disjoining pressure), 표면장력(surface tension)의 변화가 발생하여 수축을 유발하는 것이다²⁾. <그림 2(a)>에서 보듯이 표면부에서 먼저 습도가 감소하기 시작하며, 중심부로 갈수록 수분이 밖으로 빠져나가 외부 습도와 평형을 이루기까지 더 많은 시간이 필요하다. 실제 크기 부재의 경우 전단 면이 습도 평형에 이르기까지 수년에서 수십 년에 이르기도 한다. 단면 내 수분분포의 불균형으로 인해 표면부가 더 많이 수축하려 하고, 외부구속이 없더라도 표면부에 인장응력이 발생한다.

2.2 자기수축

물/시멘트비가 낮을수록 경화 초기에 수화되지 않은 시멘트 입자의 양이 증가하게 된다. 이러한 미수화 시멘트 입자들은 콘크리트 내부의 수분을 소진하면서 수화반응을 점진적으로 일으키게 한다. 이를 자체건조(self desiccation)라 부르며, 이러한 지연된 수화반응을 통한 내부 수분 손실로 수축이 발생하게 된다²⁾. <그림 2(b)>에서 보듯이, 자기수축의 경우 건조수축과 달리 전단면에서 일정한 수분손실이 일어나며 수축 변형률도 모든 위치에서 같은 것으로 볼 수 있다.

실제 구조물에서 콘크리트는 건조수축과 자기수축을 동시에 경험하게 된다. <그림 3(a)>는 콘크리트가 재령 t_0 에 건조한 대기에 노출될 경우 물/시멘트비에 따른 전체 수축량과 자기수축량을 비교한 것이다. 노출 시 재령 t_0 이전에도 자기수축은 진행되고 있었기 때문에, t_0 시점의 자기수축량을 초기값으로 나타낸 것이다³⁾.

<그림 3(b)>는 타설 초기부터 발생하는 자기수축이다. 물/시멘트비가 적을수록 전체 수축량 대비 자기수축량이 증가하며, 매우 낮은 물/시멘트비에서는 건조수축보다 자기수축이 크게 일어날 수도 있다³⁾.

3. 영향인자 및 예측모델

3.1 영향인자

콘크리트 배합을 구성하는 모든 요소가 영향인자로 볼 수 있다. 일반적으로 건조수축은 강도가 높을수록 물/시멘트비가 낮을수록 작아지는 경향을 보이

며, 자기수축은 이와 반대의 경향을 보인다. 건조수축의 경우 재료 외적인 요인이 매우 크게 영향을 미친다. 대표적으로 부재의 크기와 외부 상대습도를 들 수 있다⁴⁾. <그림 4(a)>는 부재 크기에 따른 건조수축 변형률을 나타낸 것이다. 건조수축의 최종 발생량은 같지만 부재의 크기가 커질수록 건조수축의 발현속도가 많이 감소하는 것을 알 수 있다. 실내 실험에서 측정되는 건조수축에 비해 실제 부재의 건조수축은 매우 느리게 발생하게 된다는 것을 알 수 있으며, 부재 크기에 따라 건조수축 발생곡선이 수평으로 이동하게 된다⁴⁾.

<그림 4(b)>는 외부 상대습도에 대한 영향을 나타낸 것이다. 상대습도가 낮을수록 건조수축 최종 발생량이 증가하는 것을 알 수 있으며, 건조수축 발현곡선이 상대습도에 따라 수직 방향으로 이동하게 된다.

자기수축은 부재 크기 및 외부 습도에 영향을 받지 않으며, 재료적인 원인에 크게 영향을 받는다. 자기수축은 시멘트 수화와 관련되기 때문에 물/시멘트비와 골재 사용량이 주요 영향인자로 볼 수 있다^{3,5,6)}.

3.2 예측 모델식

콘크리트 건조수축에 대한 여러 예측 모델식이 제안되어 있다. ACI 모델⁷⁾, CEB-FIP 1990 모델⁸⁾, B3 모델⁹⁾, GL 2000 모델¹⁰⁾, JSCE 모델⁵⁾, MC2010 모델⁶⁾ 등이 널리 사용되고 있다. 각 모델식은 콘크리트 배합 특성을 고려한 영향인자와 상대습도, 부재 크기, 온도 등의 외부 조건을 고려할 수 있다. 일반적으로, 부재 크기에 따라 건조수축 발현곡선을 수평으로 이동하는 방식, 즉 건조수축 발현 속도를 조절하고, 외부 습도와 여러 재료적 영향인자에 대해서는 최종 건조수축 발생량을 조절할 수 있게 되어 있다<그림 5>. <그림 6>은 우리 학회 장기거동위원회에서 구축한 데이터베이스¹¹⁾로 분석한 건조수축 모델식 예측값과 실험 측정값을 비교한 결과이다. 건조수축에 대한 많은 연구를 통해 예측 모델식을 지속해서 개선했지만, 예측 정확성을 충분히 확보하지 못하고 있다.

최근 제안된 B4 모델³⁾, MC 2010 모델⁶⁾, JSCE 모델⁵⁾은 자기수축 모델식을 포함하고 있으며, 건조수축에 더하여 전체 수축량을 예측할 수 있도록 하고 있

다. 각 모델식별로 고려하고 있는 영향인자에 다소 차이가 있으나, 물/시멘트비를 통해 최종 자기수축량과 발생속도를 결정하고 있다. 모델에 따라 온도, 시멘트 대비 골재량 등을 추가로 고려하고 있다. 우리나라 콘크리트 구조기준은 CEB-FIP 1990 모델⁸⁾을 차용하여 건조수축 모델식만을 제시하고 있다. 국내에서도 고강도 콘크리트가 널리 사용되고 있어 향후 자기수축에 대한 모델식이 추가될 필요가 있다.

4. 구조물에 미치는 영향

4.1 건조수축

수축은 장기적인 변형으로 일반적으로 크리프 또는 릴렉сей션과 동시에 발생하게 되며, 구조물에 미치는 영향으로 내·외부 구속에 의한 균열, 프리스트레스트 부재에서의 장기적인 긴장력 손실, 초고층 건물

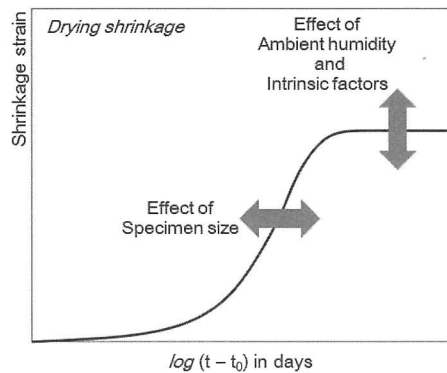


그림 5. 건조수축 예측 모델식의 일반 형태

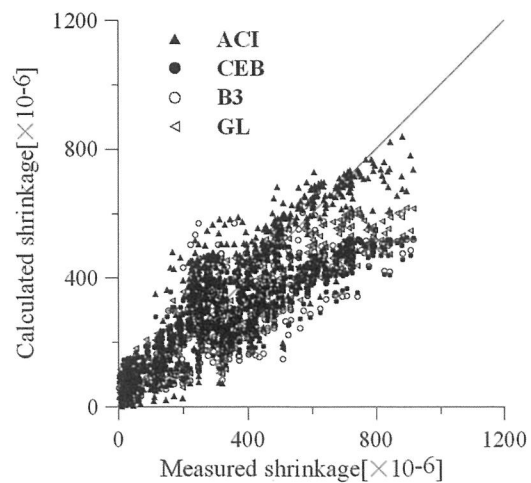


그림 6. 건조수축 측정값과 예측값 비교¹¹⁾

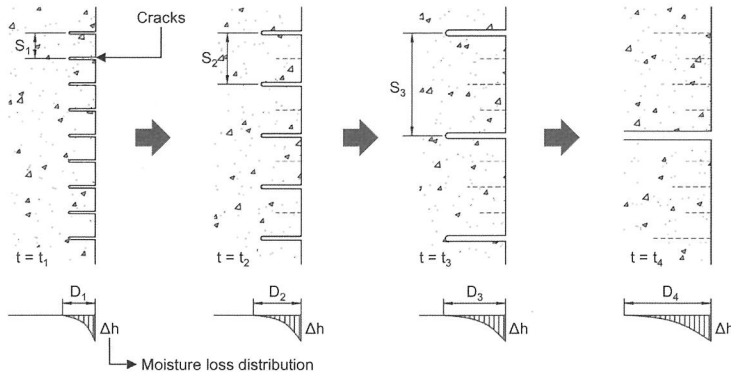


그림 7. 건조수축에 의한 표면 균열 발생 형태¹²⁾

기둥의 부등 축소량, 보와 슬래브의 처짐 등이 있다. 이들 중 가장 대표적인 균열에 대해 간단히 언급하고자 한다⁴⁾.

건조수축은 표면부 수분이 먼저 외부로 빠져나가면서 발생하게 되며, 내부구속으로 인해 표면부에 인장응력이 작용하게 된다. 내부구속만으로도 표면부에 다수의 미세균열이 발생하게 되고, 내부수분의 지속적인 확산으로 균열의 진전이 이루어진다. <그림 7>은 전형적인 건조수축 균열의 발생형태를 나타낸 것이다¹²⁾. 건조 초기에 다수의 미세균열이 일정 간격(S1)으로 발생하며, 시간이 지남에 따라 균열 간격이 증가하고(S1→S2→S3), 증가한 균열 간격 사이의 균열들은 성장을 멈추게 된다. 실제 구조부재의 경우 내부구속과 외부구속이 동시에 작용하는 것이 일반적이며, 이러한 구속으로 일정 균열 폭을 갖고 진전하던 미세균열 중 하나가 눈에 보일 만큼 큰 균열(macro crack) 성장하게 된다. 이러한 균열은 균열 자체가 사용성에 문제를 일으킬 수 있으며, 장기적으로 콘크리트 내구성을 크게 저하하는 요인이 된다.

4.2 자기수축

자기수축에 의한 균열은 건조수축과 다른 형태로 발생하게 된다. 건조수축에 의한 균열이 주로 표면에서부터 발생하여 진전한다면, 자기수축은 모든 위치에서 같은 수축변형률을 나타내기 때문에 부재 내부에라도 철근과 같이 변형을 구속하는 요소가 있을 때 균열이 발생할 수 있다. <그림 8>은 자기수축 때문에 철근 주변에 발생하는 균열을 나타낸 것이다¹³⁾. 특히, 자

기수축이 큰 경우 내부로부터 시작된 균열이 표면까지 이어지면서, 균열이 전단면을 통과하는 관통균열이 발생할 수 있는 여지가 있어 각별한 주의가 요구된다.

5. 맷음말

콘크리트의 건조수축과 자기수축은 연제나 크리프와 동시에 고려되어야 한다.

콘크리트가 수축할 경우 내부 또는 외부 구속으로 응력이 발생하며, 이 응력은 다시 크리프를 유발하기 때문이다. 특히 인장응력이 작용할 경우 크리프로 인한 응력이완(relaxation)으로 균열 발생이 지연 또는 방지된다. 외부에서 작용하는 하중에 의해 압축응력을 받을 때도 수축과 크리프는 동시에 발생하게 되며, 이럴 때 건조크리프(drying creep, Pickett effect)라 불리는 크리프 증가 현상이 나타난다^{14,15)}.

구조물에서 수축과 크리프를 고려한 장기거동 해석이 필요한 경우 기존의 예측 모델식을 사용하게 되면, 앞서 언급했듯이 정확성을 확보하는 데 어려움이 많다. 구조물에 실제 사용된 콘크리트에 대한 수축 및 크리프 실험을 실내에서 수행하고, 그 결과로부터 모델식을 교정(calibration)하여 해석에 적용하는 것이 바람직하다^{16,17)}.

우리나라 콘크리트 구조기준의 크리프와 건조수축 모델은 유럽의 CEB-FIP 1990 Model Code⁸⁾에서 차용한 것이다. 고강도 콘크리트 사용 증가를 고려할 때 자기수축에 대한 모델식이 추가될 필요가 있으며, 앞

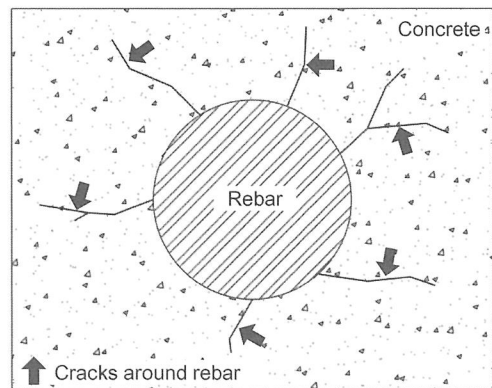



그림 8. 자기수축에 의해 발생하는 철근 주변 균열¹³⁾

으로 크리프 모델 또한 그 메커니즘을 반영하여 기본 크리프와 건조크리프를 구별하는 형태로의 개선이 필요하다. 현재 우리 학회 장기거동위원회를 중심으로 국내에서 수행된 수축 및 크리프 측정결과에 대한 데이터베이스¹¹⁾를 구축하고, 국내 실정에 맞는 모델식 개발을 준비하고 있다. 

담당 편집위원 : 신경준(충남대학교) kjshin@cnu.ac.kr

참고문헌

1. A.M. Neville, "Properties of Concrete", Final Edition, Prentice Hall, 2002.
2. S. Mindess, J.F. Young, and D. Darwin, "Concrete", Second Edition, Prentice Hall, 2002.
3. Z.P. Bazant, M.H. Hubler, and R. Wendner, "Model B4 for creep, drying shrinkage and autogenous shrinkage of normal and high-strength concretes with multidecade applicability. TC-242-MDC multidecade creep and shrinkage of concrete: material model and structural analysis," RILEM Materials and Structures. 2014.
4. Z.P. Bazant and F.H. Wittmann, "Creep and Shrinkage in Concrete Structures," John Wiley & Sons, 1982.
5. JSCE Concrete Committee, "Standard specifications for concrete structure - Design Volume," Japanese Society of Civil Engineer, 2007, pp. 50 ~ 55.
6. FIB, "Model Code 2010," Fédération internationale de béton, Lausanne, 2010.
7. ACI Committee 209(2008) Guide for modeling and calculating shrinkage and creep in hardened concrete. ACI Report 209.2R-08, Farmington Hills.
8. CEB, "CEB-FIP Model Code 1990," Bulletin d'Information No. 213/214, Comité Euro-International du Béton, Lausanne, Switzerland, 1993.
9. Z.P. Bazant, and S. Baweja, "Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: model B3(RILEM recommendation)," Materials and Structures, 28(6):357-365 Errata, 29, pp. 126.
10. N. J. Gardner, and M. J. Lockman. "Design provisions for drying shrinkage and creep of normal-strength concrete," ACI Materials Journal, Vol. 98, No. 2, 2001, pp. 159 ~ 167.
11. S.H. Kwon, G. Zi, and N.Y. Kim, "KCI Database of Test Data for Creep and Shrinkage of Concrete," Proceedings of 2013 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics(ASEM 13), 2013, pp. 2148 ~ 2154.

12. Z.P. Bazant, and W.J. Raftshol, "Effect of Cracking in Drying and Shrinkage Specimens," Cement and Concrete Research, 1982, Vol. 12, pp. 209 ~ 226.
13. M. Sule and K. van Breugel, "The Effect of Reinforcement on Early-Age Cracking due to Autogeneous Shrinkage and Thermal Effects," Cement and Concrete Composites, 26(5), 2004, pp. 581 ~ 587.
14. S.H. Kwon and S.P. Shah, "Prediction of Early-Age Cracking of Fiber-Reinforced Concrete due to Restrained Shrinkage," ACI Materials Journal, 10(4), 2008, pp. 381 ~ 389.
15. Kim, J. K., and Lee, C. S., "Prediction of Differential Drying Shrinkage in Concrete," Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 7, 1998, pp. 985 ~ 994.
16. Kwon, S. H.; Kim, Y. Y.; and Kim, J. K., "Long-Term Behaviour under Axial Service Loads of Circular Columns Made from Concrete Filled Steel Tubes," Magazine of Concrete Research, Vol. 57, No. 2, 2005, pp. 87 ~ 99.
17. K. P. Jang, J. K. Son, and S. H. Kwon, "Prediction of Interfacial Cracking due to Differential Drying Shrinkage of Concrete in Precast Shell Pier Cap," Computers, Materials & Continua, 2013, 38(3), pp. 155 ~ 173.



권승희 교수는 KAIST 건설 및 환경공학과에서 다축압 상태의 콘크리트 크리프 연구로 박사학위를 취득하였으며, 미국 노스웨스턴대학 ACBM 센터의 박사후연구원을 거쳐 현재 명지대학교 토목환경공학과에 재직 중이다. 최근에는 콘크리트 레올로지 및 시공성능 예측분야에 대한 연구를 수행하고 있다.
kwon08@mju.ac.kr



김진근 교수는 미국 노스웨스턴대학교에서 콘크리트의 비탄성 거동에 관한 연구로 박사학위를 1985년 취득하였으며, 1985년 이후 KAIST 건설 및 환경공학과 교수로 재직 중이다. 주로 콘크리트 재료 역학 분야 연구를 수행하고 있다. 우리 학회의 이사, 감사, 부회장 그리고 11대 회장을 역임하였다.
kimjinkeun@kaist.ac.kr