

# 시멘트 경화체의 건조수축

이 승 헌 (군산대학교 재료·화학공학부 교수)

콘크리트 구조물의 내구성을 지배하는 큰 원인의 하나는 콘크리트 구조물에 발생하는 건조수축, 즉 부피변화로 인한 균열이다. 콘크리트와 같은 시멘트 경화체는 여러가지 요인에 의해 부피변화를 일으킨다. 시멘트 자신의 수화에 의한 부피변화, 철근 부식에 의한 부피변화, 탄산화에 의한 부피변화, Creep으로 인한 부피변화 등 여러가지가 있다. 건조에 의한 부피변화도 이중의 하나이다. 부피변화는 균열을 발생시키는 원인이 되어 경화체를 노화시키는 큰 인자의 하나이다. 여기서는 건조에 의해 시멘트 경화체에서 발생하는 현상에 대해 알아보자.

## 1. 건조수축 현상

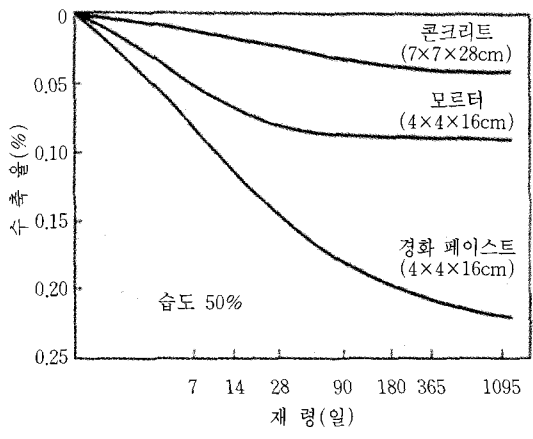
일반적으로 건조수축은 건조조건, 수분분포 등에 의해 크게 달라진다. 예로서 큰 형상의 점토를 완전히 건조한다고 했을 때, 하루만에 건조시킨다면 길이변화는 3% 정도를 나타내지만 균열이 발생된다. 그러나 1주일 내지 10일에 걸쳐 천천히 건조시키면 길이변화는 7~8%에 이르지만 균열은 발생하지 않는다. 이러한 것은 건조과정에서 점토덩어리의 수분분포가 매우 중요하다는 것을 의미한다. 시멘트 경화체도 마찬가지로 점토와 같은 현상이 발생한다.

시멘트 경화체를 건조시키면 특히 모세관수의 증발과 더불어 수축한다. 따라서 물/시멘트 비가 큰 시멘트 경화체일수록 큰 수축을 보이지만 골재가 함유된 몰탈, 콘크리트는 골재가 건조수축의 완화 역

할을 수행하여 페이스트보다 건조수축이 작다. <그림-1>에서 보듯이 일반적으로 골재의 양이 많은 콘크리트가 건조수축율이 가장 작아, 콘크리트의 건조수축은 골재가 첨가되지 않은 페이스트의 약 1/4 정도이다.

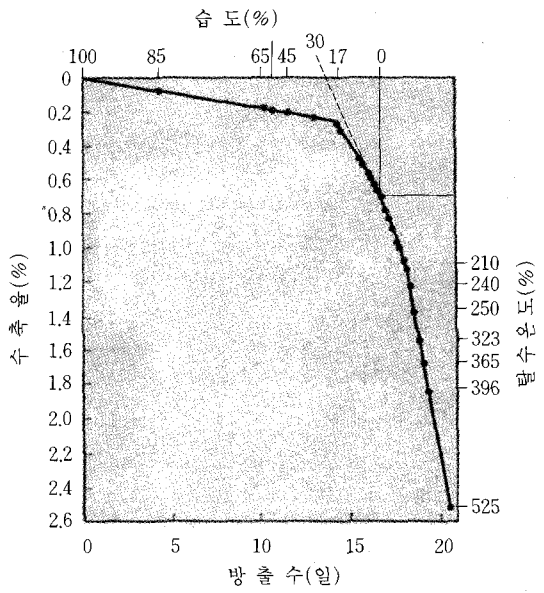
물/시멘트=0.30으로 반죽한 페이스트를 24시간 습한 공기중에서 양생한 후 여러가지 습도에서 가열 탈수시킨 시멘트 페이스트의 전형적인 건조수축곡선을 <그림-2>에 나타냈다. 상대습도 100~30%까지는 수분의 방출량이 많지만 수축율은 0.2%로 적었고, 상대습도 30% 이하에서는 수분의 방출량은 매우 적지만 수축율은 2.2%로 매우 컸다. 이러한 것으로부터 습도 100~30%에서는 방출하는 수분은 비교적 큰 모세관 기공에 존재하는 부착수나 흡착수이고, 습도 30% 이하에서는 방출되는 수분은 미세한 겔 기공에 들어있는 흡착수 및 시멘트 수화물의 결정수 일부가 날아간 것이다.

시멘트가 완전히 수화했다고 가정하면, 습도 30% 이하에서 건조수축의 40%는 C-S-H 겔, 40%는 Monosulfate, 나머지 20%는  $C_4AH_13$ 의 탈수에 기인된다. Ettringite는 습도 30%에서 결정수 32몰 중 10몰이 탈수되지만, 제올라이트 수이기 때문에 수축에는 거의 영향을 주지 않는다. 콘크리트의 수축은 기본적으로는 단위수량과 관계가 있다. 단위수량이 같으면 물/시멘트비, 단위시멘트량에 관계없이 수축은 거의 비슷하다. 시멘트 성분으로서는  $C_3A$ 와 석고량이 수축에 영향을 미치고, Monosulfate의 양



〈그림-1〉 경화 페이스트, 몰탈 및 콘크리트의 건조수축  
이 많을수록 수축은 크다. 중용열 시멘트는, C<sub>3</sub>A가 적으므로 수축은 비교적 적다.

건조수축은 다시 습윤상태로 돌려놓으면 어느 정도 팽창하여 길이가 팽창한다. 그러나 회복은 완전하지 않으며, 어느 정도는 영구수축이 남는다. 즉 수축에는 가역수축과 불가역수축이 있다. 가역수축은 기공량의 합과 관계가 있고, 불가역수축은 기공량의



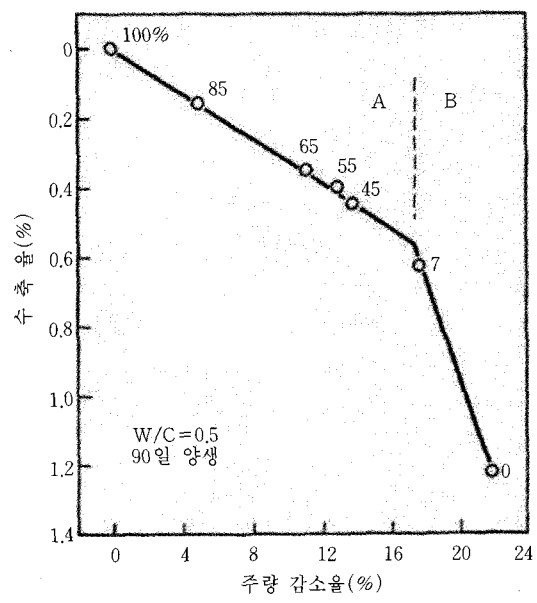
〈그림-2〉 시멘트 페이스트의 건조수축율

합과는 관계가 없으며 평형습도에 도달하는 시간, 평형습도에서 노출되는 시간 등에 의해 영향을 받는다.

## 2. 건조수축의 기구

시멘트 페이스트의 건조에 의한 중량변화와 수축율과의 전형적인 관계를 〈그림-3〉에 나타냈다. 그림에서 건조초기의 중량변화에 따른 수축율이 적은 시기를 A영역, 중량변화에 따른 수축율이 큰 시기를 B영역으로 구분할 수 있다. 시멘트 경화체의 건조수축은 여러가지 요인이 복합적으로 나타내기 때문에 그 기구 모두를 규명할 수는 없다. 그러나 수분이 중요한 역할을 한다는 것은 많은 연구자에 의해 확인되었고, 수축의 원동력은 모세관장력 및 수화물 층간수의 탈수에 의한 것으로 규명되었다.

액체중에 가는 관을 세우면 액면은 올라가든지 아니면 내려간다. 이것은 액체의 표면장력과 액체-고체 표면과의 부착력에 의해 높이가 결정되는데, 액면이 올라가는 경우 모세관 벽에는 액체를 그 높이까지 올릴 수 있는 힘이 작용하게 된다. 이 힘을 표



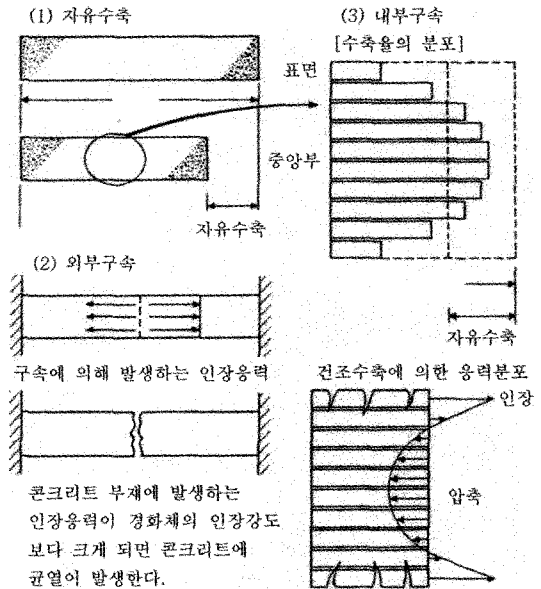
〈그림-3〉 페이스트 경화체의 수축율과 중량변화와의 관계

면장력이라 한다. 표면장력은 기공 반경이 작아지면 작아질수록 커진다. 따라서 경화체 중의 큰 기공부터 수분이 제거되고, 점차 작은 기공이 비게 된다. Bentur 등은 기공구조와 건조수축과의 관계를 고찰할 때, 단지 기공분포만을 생각할게 아니라, 기공반경과 표면장력을 동시에 고려하여야 한다고 보고하였다.

건조가 더욱더 진행되면 모세관 건조 뿐만 아니라, 미세한 수화물간의 공격, 즉 겔 기공, 또는 수화물의 층간수축 건조한다. 물이 빠진 층간은 서서히 단혀서 수화물의 부피는 감소한다. 겔 기공의 건조에 의한 수축은 모세관력 뿐만 아니라 Van Der Waals 힘에 응집력도 작용한다. 겔 기공의 건조와 층간수의 탈수에 의한 수축은 <그림-3>의 B 영역에 해당되고 증량변화는 적음에도 불구하고 수축율이 크다. 최근 모세관장력은 기공구조 및 용액의 표면장력에 의해 영향을 받기 때문에 건조수축을 저감하기 위하여 표면장력을 저하시키는 계면활성제의 개발이 이루어지고 있다.

콘크리트 부재에 발생하는 건조수축 기구를 <그림-4>에 나타냈다. <그림-4>의 자유수축의 경우에는 어떠한 건조조건에서도 수축되는 양상을 나타낸다. 외부로부터 구속을 받는 경우, 콘크리트의 부재는 자유롭게 수축할 수 없기 때문에 자유수축에 해당되는 만큼의 인장응력분포가 형성되고, 이 응력분포가 콘크리트 부재가 갖는 인장응력보다 크면 균열이 발생한다.

한편 내부구속은 콘크리트 부재 자체 내부에 생기는 구속을 말하는 것으로, 콘크리트 내부의 건조정도에 의해 달라진다. <그림-3>의 내부구속을 보면, 표면은 건조가 빠르고 내부는 건조속도가 늦기 때문에 각각의 건조정도에 따라 수축율에 차이가 난다. 그림에서는 각 부분의 수축율 분포가 표시되어 있지만 콘크리트 부재는 실질적으로 일체가 되어 수축하므로, 표면은 인장응력, 내부는 압축응력을 받게 된다. 이 내부구속은 특히 콘크리트의 초기재령에서는 매우 중요하다. 그 이유는 부재내의 건조정도는 수



<그림-4> 건조수축에 의한 균열발생과정

화반응에도 영향을 미치므로, 재령은 동일하여도 콘크리트 부재 내부에서는 다른 특성을 갖는 경화체가 만들어진다. 콘크리트가 받는 구속에는 외부구속과 내부구속이 있고 이 양자에 의한 응력분포를 정확히 추정할 수 있으면 균열발생의 예측도 가능하다고 생각된다.

### 3. 건조수축에 영향을 미치는 인자

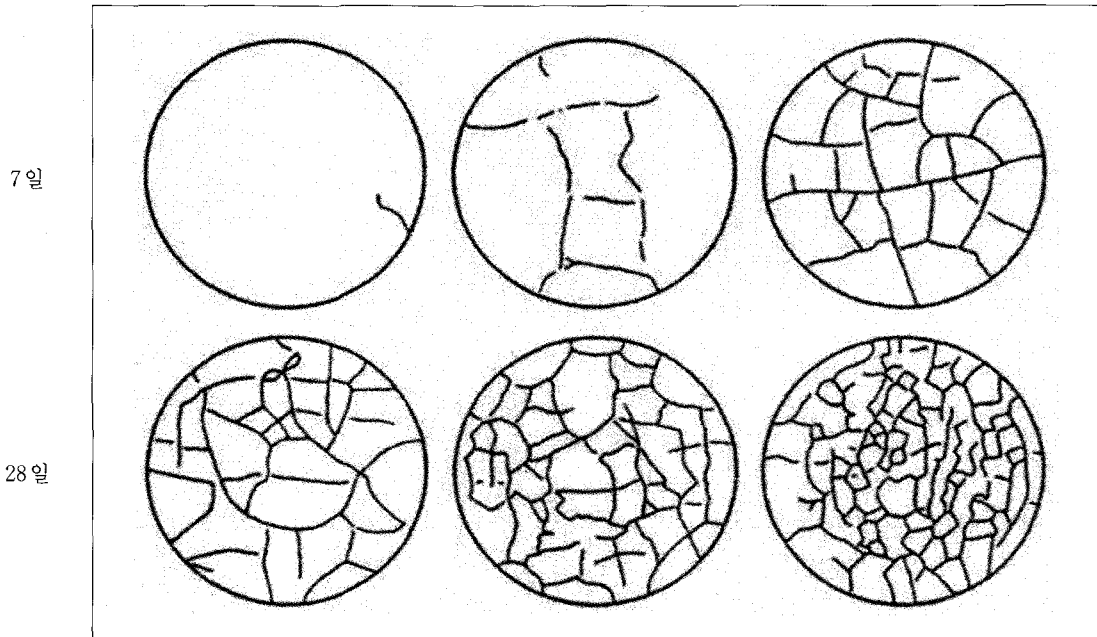
경화체의 건조수축은 건조조건, 수화물의 성질, 특히 기공구조에 의한 것이 크며, 골재가 존재하는 경우에는 종류, 크기, 형태에도 영향을 받는다. 여기서는 페이스트 경화체의 건조수축에 영향을 주는 몇 개의 요인에 대해서 알아보자.

수화율의 영향에 대해서 Young 등은 <그림-3>의 A 영역에서 시멘트의 수화가 진행됨에 따라 수축율이 작으나, B 영역에서는 수화반응이 진행됨에 따라 수축율이 크게 나타나는 것으로 보고하였다. 따라서 첨가물이 없는 페이스트 경화체는 수화반응을 60~80%에서 수축이 최대가 되며, 수화반응율이 같다면

포틀랜드 시멘트

고로슬래그 시멘트

실리카흙 혼합 시멘트



〈그림-5〉 건조수축에 의한 균열의 예

양생온도가 높을수록 수축율은 작아진다고 하였다.

건조수축은 첨가물에 의해 영향을 받는다. Feldman 등은 칼슘리그노설페이트를 첨가했을 때의 영향을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 첨가하지 않을 때 수축율은 0.4% 정도로, 이중 불가역수축은 0.16%이었다. 반면 칼슘리그노설페이트를 첨가하면 수축율은 약 0.9%이었고, 이중 불가역수축은 0.6%라고 보고였다. 이와 같이 불가역수축은 첨가물에 의해 크게 변화한다.

경화체가 건조되면 경화체 자체에 수분분포가 생긴다. 같은 건조조건이라도 기공구조나 기공용액의 성질에 의해 수분분포가 달라진다. 건조하기 쉬운 경화체는 표면과 내부의 농도차가 거의없는 상태로 건조되나, 기공구조가 작고 수분이 이동하기 어려운 경화체는 표면과 내부에 수분의 농도차가 발생된다. 이렇게 되면 표면에는 인장응력, 내부에는 압축응력이 형성되어, 이 응력이 경화체의 강도보다 높게 되

면 균열이 발생된다.

페이스트 경화체의 건조에 의한 균열의 예를 〈그림-5〉에 나타냈다. 수은압입법으로 측정한 결과 기공구조가 작을수록 균열이 발생하기 쉽다는 것을 알았다. 이 균열은 또한 건조속도에 의해 영향을 받으며 균열이 있으면 물질 이동은 쉬워진다. Powers는 건조한 페이스트와 건조하지 않은 페이스트의 투수율을 측정한 결과, 건조한 페이스트는 건조하지 않은 페이스트에 비해 70배의 투수율을 갖는다고 보고하였다. 이러한 현상은 건조에 의해 얼마만큼 균열이 생성되는가를 보여주는 한 예이다.

#### 4. 건조수축량

경화체는 수중양생 기간이 길수록 건조수축율은 크다. 양생일수가 길수록 수축율이 큰 것은 수화반응이 진행됨에 따라 겉보기 확산계수가 작아져서 표

면과 내부의 수분의 차가 생기기 때문이다. 그러나 초기재령에서는 확산계수가 크므로 표면과 내부에 존재하는 수축율이 작은 큰 기공이 동시에 건조하기 때문에 초기의 수축율은 작다.

포트랜드 시멘트 페이스트(물/시멘트=0.3)의 상대습도 35%, 50%, 70%에서 수축율의 차이를 보면, 20시간 이후에는 큰 수축율의 변화가 없고, 100시간 후에 습도별 수축율은 각각 0.33%, 0.25%, 0.09%이다. 이러한 것으로 볼 때 상대습도가 낮으면 수축율은 커진다. 건조가 시작되면 우선 표면의 기공부터 물이 증발하게 되고, 내부의 기공으로부터 표면으로 물의 이동이 시작된다. 동시에 표면의 미세한 기공에서도 건조가 시작된다. 그러나 표면으로의 물의 이동이 쉽다면, 미세한 기공에서 발생하는 물의 건조는 억제할 수 있다. 수증양생 기간이 긴 것이 보다 큰 수축을 일으키는 것은 물의 이동이 어려워져서, 내부수가 표면에 도달하기 전에 표면건조가 발생하기 때문이다. 실리카 흙을 첨가한 것이 수축

율이 큰 것도 물의 이동이 어렵기 때문이다.

균열발생을 관찰한 결과, 시멘트 페이스트에서 수화가 진행될수록, 물/시멘트비가 작을수록 균열이 많았고, 슬래그, 실리카흙을 첨가한 페이스트가 균열이 많았다.

## 5. 맺는 말

지금까지 시멘트 경화체에서 건조수축이 발생하는 원인과 건조수축에 영향을 미치는 인자에 대해서 알아보았다.

건조수축은 대단히 복잡한 현상이기 때문에 한 가지 요인만 가지고 건조수축을 해석하기에는 어려움이 많다. 그러나 콘크리트 구조물에 생기는 건조수축 균열은 건설재료 관련 기술자는 한번 정도는 곤란을 겪는 문제이기 때문에 발생 원인에 대해서는 차근차근 짚고 넘어가야 한다. ▲

## 시사 용어 해설

### ▶ 추가순자산비율(Price Book Value Ratio)

주가를 1주당 순자산액으로 나눈 것으로 주가를 p, 1주당 순자산액을 b, 추가순자산비율을 PBR이라고 하면  $PBR = p/b$ 가 된다. p는 어떤 한 시점의 주가를 이용하며 b는 직전 결산기의 1주당 순자산액을 이용하는 것이 보통이다. 여기서 말하는 순자산이란 대차대조표 상의 자산에서 부채를 뺀 것으로 대부분의 경우 자기자본액과 같다. 그러나 차변에 이월결손금이 있을 때는 그 금액을 빼야 되며 부채항목에 내부 축적성이 높은 충당금이 있을 경우에는 가산시키는 것이 바람직하다. 일반적으로 기업의 순자산이 많은 것은 재무내용의 양호함을 나타내므로 추가순자산비율은 재무내용에 비해 주가가 어느 정도인가를 나타내는 것이라고 볼 수 있다. 따라서 이 수치가 낮을수록 주가는 상대적으로 낮다고 볼 수 있다. 그러나 원가주의회계가 일반적인 현상 하에서는 자산장부가로부터 계산된 순자산액은 별 의미가 없다.