

## 건조 수축의 메카니즘과 물의 역할

한 만 업\*

### 1. 서론

콘크리트의 건조수축은 수분의 증발로 인하여 시멘트의 체적이 줄어드는 현상으로서 크립과 더불어 콘크리트 특유의 문제로 콘크리트의 물성중에서는 강도 다음으로 중요한 성질의 하나로 인식되어 왔다. 그러나, 때에 따라서는 이 건조수축 특성이 콘크리트의 내구성을 결정 짓는 가장 중요한 요인이 되는 경우도 있다. 상대적으로 비표면적이 큰 콘크리트 포장이나 슬라브의 경우는 양생 초기에 건조수축에 의하여 형성된 균열의 양상이 그 구조물의 내구성에 커다란 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

따라서 콘크리트가 본격적으로 사용되기 시작한 이후 건조수축에 관한 수많은 연구가 행하여져 왔다. 이러한 연구는 크게 두 분야로 구분되는데, 현상적 관찰에 기반을 둔 주요 요인의 분석과 실험적 개발을 주목적으로 하는 분야와, 미시적 관점에서 고체 표면에서의 물의 물리적 성질과 시멘트의 수화 반응에 의하여 형성된 calcium-silicate-hydrate gel(이하 시멘트겔)의 미세 구조의 특성을 연구 분석하는 분야로 나눌 수 있다.

이 글에서는 미시적 관점에서의 건조수축에 관련된 이론과 모델등 지금까지의 연구 내용을 요약, 정리 하였다.

### 2. 물의 성질

물 분자는 두개의 수소 원자와 한개의 산소 원자로

구성되는데 산소 원자핵을 중심으로 정사면체의 꼭지점에 위치해 있는 산소의 잉여 전자와 두개의 수소 원자가 결합한 형태를 이루고 있다. 산소 원자가 사면체의 중심에 있고 수소 원자가 잉여의 두 꼭지점을 차지하고 있다면 수소 원자는 103.1°의 각을 이루어야 하나 수소 원자간의 반발력으로 인하여 실제로는 이보다 약간 더 벌어진 105° 정도의 각을 이루고 있다. 이러한 비대칭성 구조로 인하여 물 분자는 극성을 갖게 되고 이로 인하여 물 분자들끼리 서로 끌어당기는 Hydrogen Bonding이라는 강력한 결합력을 갖게 된다.

상온에서 이 결합력의 크기는 물 분자를 분리시키려는 운동 에너지의 힘보다는 크지만, 외력에 저항하여 자기의 형태를 유지할 수 있는 정도, 즉 분자들간에 일정한 배열을 유지할 수 있는 힘보다는 작다. 따라서 분자들끼리 일정한 배열을 이루지는 못하지만 서로의 영향권 내에 머물러 있는 유동적인 상태, 즉 액체의 상태를 유지하게 된다. 그러나 이런 성질들은 물이 상당한 크기의 덩어리를 이룰때의 성질이 지 물 분자들이 극성을 갖는 고체의 표면에 근접하여 그 영향권 내에 들게 되면 규칙적인 배열을 갖는 층을 형성하게 되고 이 영향권 내에서는—얼음과는 다른 의미의—고체에 가까운 성질을 띠게 된다. 그림 1은 물 분자들이 고체 표면의 영향권 내에서 어떻게 배열되어 있는가를 개념적으로 보여준다. 처음 몇개의 층에서는 규칙적으로 흡착 배열된 물 분자들을 볼 수 있고 거리가 멀어짐에 따라 점점 더 불규칙하게 흐트러지는 보통의 물 분자들의 배열을 보여 준다.

이런 규칙적인 배열 상태하에서는 물의 밀도가 1.40

\* 아주대학교 토목공학과 조교수

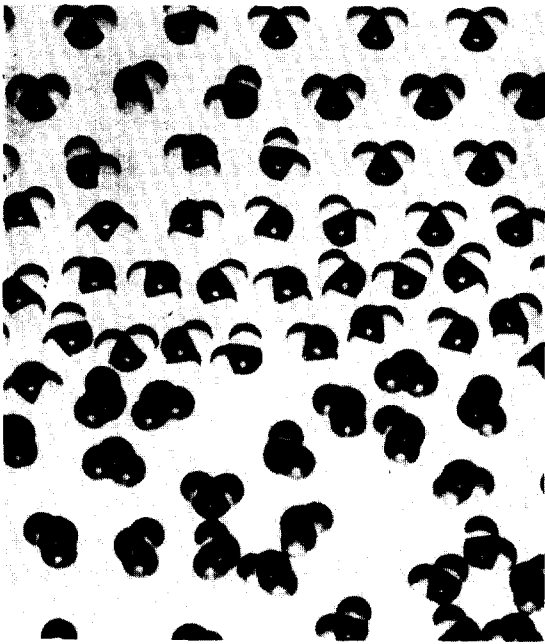


그림 1. 고체의 표면 영향권 내의 물 분자들의 규칙적인 배열

g/cm<sup>3</sup>까지 올라가게 되며, 그 최대 밀도도 4°C가 아닌 0°C 이하의 온도에서 온도 강하에 비례하여 증가하게 되고, 빙점은 -50°C 이하로 비등점은 200°C 이상으로 올라가게 된다. 또한 점성도 보통 물의 15배 이상으로 증가함으로써 이 영향의 비중이 커지는 미세 모세관의 경우 물의 이동을 어렵게 만들고, 보통 Washburn의 식을 사용하여 계산한 모세관의 음압보다 몇배나 더 큰 또는 작은 음압-즉 Hysterisis-를 발생시키는 요인이 되기도 한다. 즉 표면에 흡착된 물은 보통의 물과는 전혀 다른 성질을 나타내는 것이다.

물을 흡착한 표면을 공기 중에 노출시켜도 표면에 흡착된 몇개의 층은 증발을 하지 않으며 그 흡착된 층의 두께는 공기의 상대 습도에 비례한다. 길 것으로 보이는 통계적인 두께는 일정하게 유지가 되지만 부분적인 흡착된 층의 두께는 고정된 것이 아니고 끊임없이 물 분자들이 흡착됐다 떨어졌다 하는 것을 반복하는 것이다. 표 1에서는 노출된 공기의 상대 습도에 따른 흡착된 물 분자의 평균 두께를 보여 주는데 최대 13Å 까지 될 수 있으며 이는 약 5개 층의 물 분자에 해당하는 두께이다. 아울러 이

표에서는 상대 습도 40% 이하에서도 상당량의 흡착된 물이 증발하지 않고 있음을 보여준다.

표 1. 상대습도와 시멘트 페이스트에 흡착된 물분자 층의 평균 두께와의 관계

상대습도 (%)	평균 두께	
	(Å)	물분자 층수*
5	2.00	0.76
10	2.45	0.95
15	2.80	1.06
20	3.05	1.16
30	3.40	1.30
40	4.25	1.62
50	5.15	1.96
100	13.00	5.00

\* 흡착된 물분자 한개의 직경=2.63Å

### 3. 시멘트수화물의 미세구조

시멘트의 수화 반응에 의한 주산물은 시멘트겔로서 콘크리트의 강도와 건조수축동 제반 특성을 좌우하는 가장 중요한 물질이다. 시멘트겔은 거의 비결정질 물질로서 화학성분이 약간 유동적이어서, 시간, 온도, 수량등의 조건에 따라 조금씩의 변이가 있다. 반면에 전체 수화물의 약 1/5을 차지하고 있는 수산화 칼슘은 화학 조성비가 일정한 결정질 물질로서 주로 시멘트 입자 사이의 빈 공간에 결정을 형성해 나간다. 그러나 빈 공간을 찾아 결정이 성장하기 때문에 주변의 물질들에 팽창압을 가하는 성질은 없다. 아울러 비표면적이 상대적으로 작기 때문에 건조수축을 구속하는 효과를 기대할 수 있으나 이들의 크기와 형태가 건조수축에 미치는 영향에 관한 연구에서 뚜렷한 상관관계를 발견해내지는 못하였다.

그림 2는 수화된 시멘트 입자의 단면으로서 내부의 수화되지 않은 시멘트 입자를 둘러싸고 있는 시멘트겔의 모습을 보여주고 있다. 솜털처럼 보이는 시멘트겔은 시멘트 입자로 부터 방사상으로 자라나와 시멘트 입자를 둘러싸는데 이 시멘트겔 사이에 형성된 빈 공간인 겔공극율은 수화율에 상관없이 26%로 항상 일정한 값을 유지한다. 시멘트의 입자는 보통 Blaine's 공기 투과 장치로 비표면적을 측정했을때 약 3200cm<sup>2</sup>/g 정도의 값을 갖으며, 이는 입자 모양이 구형일 경우 직경이 약 10μm 정도인 작은



그림 2. 부분적으로 수화된 시멘트 입자의 전자 현미경 사진

입자임을 의미한다. 그러나 시멘트겔은 이보다 훨씬 작은 콜로이드 크기의 입자를 형성함으로써 시멘트의 약 1000배( $\approx 250 \text{ m}^2/\text{g}$ )에 달하는 비표면적을 갖게 된다. 따라서 시멘트겔은 단위 체적당 훨씬 더 많은 물분자를 표면에 흡착할 수 있고, 이 물들의 증발은 콘크리트의 건조수축에 직접적인 영향을 미치게 된다.

그림 3은 그림 2에서 숨털처럼 보이는 시멘트겔을 확대한 것으로서 불규칙하게 구불어진 납작한 모양의 시멘트겔의 단면을 개념적으로 그린 것이다. 이 그림에서는 시멘트겔에 존재하는 네 종류의 물을 보여 주는데, 시멘트겔 내부에 화학적으로 결합된 물(결정수)과 세 종류의 시멘트겔 표면에 흡착된 물(겔공극수)을 보여준다. 결정수는 증발하지 않기 때문에 건조수축과는 무관하지만, 노출된 시멘트겔 표면에 흡착된 물(겔표면수)과 결정간극에 존재하는 물(겔간극수)과 결정공극에 존재하는 물(겔공극수)은 증발시 각각 다른 메카니즘에 의하여 건조수축을

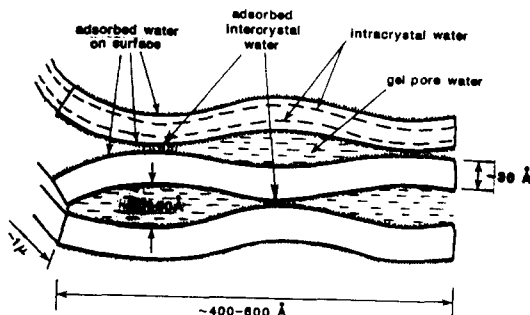


그림 3. 구불어진 판지 모양의 시멘트겔의 개념도

일으킨다.

겔표면수는 상대습도의 변화에 따라 표면장력이 변함으로써 건조수축을 일으키고, 겔간극수는 시멘트겔에 팽창압을 가함으로써 입자들 사이를 이완 시켰다가 나중에 수분이 증발할때 시멘트겔이 제자리로 돌아오는 복원력(응축응력)에 의하여 건조수축이 일어나게 된다. 겔공극수는 직경이  $30 \text{ \AA}$  이상인 공극에 존재하는 물로서 이 정도에 위치한 물들은 표면 흡착력의 영향권 밖이므로 거의 일반 물들과 같은 성질을 갖게 되어 meniscus 형성에 의한 건조수축을 일으킨다.

시멘트겔의 외부에 존재하는 모세공극은 시멘트 입자 사이에 시멘트겔이 형성되지 못한 부분이 빈 공간으로 남아 있으므로 해서 모세공극이 되는 경우가 대부분이라 할 수 있다. 따라서 모세공극은 수화된 시멘트입자 사이의 빈 공간의 모양과 거의 일치하는 불규칙한 별모양의 형상을 하고 있다. 겔공극과 모세공극의 또 다른 차이는 그 크기에 있는데 직경  $100 \text{ \AA}$ 을 기준으로 구분하고 있다. 아울러 겔공극은 항상 일정한 값을 유지하는데 비하여 모세공극은 사용수량과 수화율, 다짐 정도에 따라 변화한다. 이 모세공극에 존재하는 물은 증발시 meniscus의 곡률이 변함으로써 인접한 고체입자들을 당기는 힘(모세응력)을 발생시키고 이 힘에 의하여 건조수축이 일어난다.

#### 4. 건조 수축의 메카니즘

시멘트 페이스트의 건조수축을 일으키는 힘은 표면장력( $P_{\text{surf}}$ ), 응축응력( $P_{\text{dis}}$ ), 모세응력( $P_{\text{cap}}$ )의 세가지로 집약할 수 있다. 이 힘들은 상대 습도에 따라 그 작용 범위가 어느 정도 정해져 있으나 완전히 분리되어 작용하는 것은 아니다. 이 힘들이 작용하는 공통적인 원리는 시멘트겔이 갖고 있는 기하학인 형상에 기인하는 것으로서: 시멘트겔의 높은 비표면적과 높은 겔공극율, 그리고 시멘트겔 덩어리 사이에 불규칙한 모양으로 존재하는 모세공극등에 그 원인이 있다.

##### 4-1 표면장력에 의한 물 방울의 수축

먼저 표면 장력에 의한 물방울의 체적 변화의 효과를 살펴 보도록 하자. 반경이  $r$ 인 구형의 물방울에 표면장력

$\gamma$ 가 작용하면 내부에 압축응력  $\Delta P_{src}$ 이 발생할 것이고 그 크기는  $\Delta P_{src} = 2\gamma/r$ 이 된다. 또한 물의 압축율을  $\alpha$ 라 하면 물의 체적변화는  $-dV/V = \alpha \cdot dP_{src}$ 와 같이 표현할 수 있다. 이 두개의 식을 결합하면  $-\Delta V/V = 2\alpha \cdot \gamma/r$ 와 같은 관계식을 유도할 수 있고 이 식에 상온에서의 물의 압축율  $\alpha = 40 \times 10^{-12} \text{cm}^3/\text{dyn}$ 과 표면장력  $\gamma = 72 \text{dyn/cm}$ 을 대입하면  $-\Delta V/V = 5.8 \times 10^{-4}/r$ 가 된다. 몇개의  $r$ 값에 대한 이 식의 값을 계산해보면:

$$r = 10^{-2} \text{cm} (0.1 \text{mm}) \text{일때는 } \Delta V/V = -0.58 \times 10^{-6}$$

$$r = 10^{-4} \text{cm} (1 \mu\text{m}) \text{일때는 } \Delta V/V = -5.8 \times 10^{-6}$$

$$r = 10^{-6} \text{cm} (100 \text{\AA}) \text{일때는 } \Delta V/V = -5.8 \times 10^{-6}$$

이 숫자들이 의미하는 바는 물방울이 mm단위의 크기 일때는 수축량이 무시할 수 있는 정도이지만 크기가  $\mu\text{m}$  단위나 그 보다 작은 물방울이 형성될때는 부피가 0.58%까지 수축할 수 있음을 보여준다. 이 정도의 수축은 물이 보통 비압축성 물질로 간주된다는 사실을 생각하면 상당히 큰 체적 변화라 아니할 수 없고, 보통 측정되는 콘크리트의 극한 건조수축과 비교해도 작은 값이 아니다.

#### 4-2 표면장력에 의한 고체의 수축

고체도 표면장력을 갖고 있으므로 내부는 유체와 마찬가지로 압축응력을 받는 상태에 놓여 있다. 고체의 입자가 큰 경우는 이 압축력이 무시할 수 있을 정도이나 콜로이드 크기의 시멘트겔에서는 그 영향이 증가하게 된다. 이 표면장력에 의하여 발생한 내부 압축응력은 물방울의 경우와 같은 식으로 계산할 수 있는데 고체의 경우는 대개 구형이 아닌 경우가 많으므로 반경 대신 비표면적을 포함한 식  $\Delta P_{src} = 2S \cdot \gamma_s/3$ 을 사용한다. 여기서 S는 고체의 비표면적으로 구형인 경우는 물방울의 식과 같은 식으로 환원 된다. 압축응력을 받는 고체의 표면에 물분자가 흡착이 되면 표면장력이 이완되는 현상을 보이게 되고, 따라서 고체 입자가 팽창을 일으키게 된다. 반대로 물분자를 잃을때는 표면장력이 복원되어 수축을 일으키게 된다. 이 표면장력의 변화에 의한 체적 변화는 첫번째 층의 물 분자를 흡착할때 가장 크게 일어나고 그 이후의 추가적인 흡착에 의한 체적 변화는 점차 줄어든다. T.C. Powers가 유도한 고체의 표면장력의 변화에 의한 체적

변화를 계산하는 식은 다음과 같다.

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{2}{3} \alpha \frac{RT}{M} \int_{h_1}^{h_2} \frac{W_a}{V_s} d \ln h$$

$\alpha$ 는 고체의 압축율이고, R, T, M 등은 Kelvin 식에 나오는 상수들이다. 이 식은 고체입자의 함수량과 상대습도와의 관계를 나타내는 Sorption Isotherm이 있어야 적분이 가능한데, Sorption Isotherm에 관한 설명은 뒤에서 다시 하기로 한다. 유리입자의 경우 BET 이론을 이용하여 가정한 Sorption Isotherm으로 수축량을 계산한 결과가 그림 4에 나와 있다. 상대습도 20% 이하에서 수축이 약간 높은 증가율을 보이고 그 이후에는 거의 일정한 증가율을 보임을 알 수 있다. 시멘트겔의 경우 입자가 작은 넓고 평평한 형상을 하고 있어 높은 비표면적을 갖고 있고, 표면장력도 큼으로 해서 입자의 압축율이 물의 압축율보다 작은데도 불구하고 이 표면장력의 변화에 의한 체적변화가 같은 크기의 물방울의 체적변화와 비슷한 크기를 나타낸다.

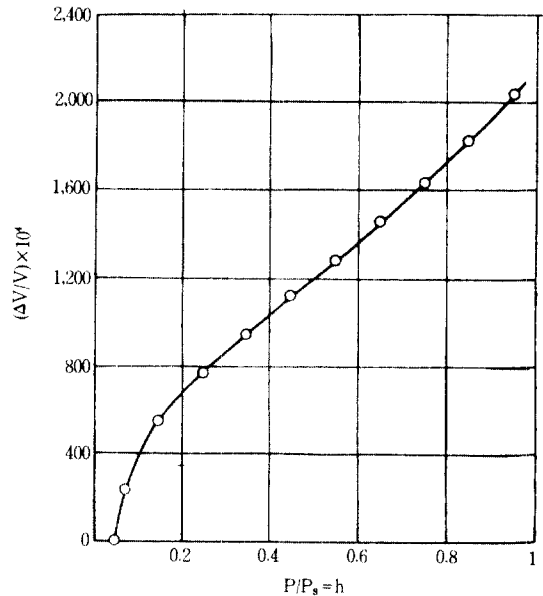


그림 4. 표면장력의 변화에 의한 유리 구슬 팽창력의 계산 결과

#### 4-3 응축응력에 의한 수축

서로 접근해가는 두개의 고체는 표면에 흡착되어 있는 물분자의 층으로 인하여 방해를 받는다. 이들이 서로의

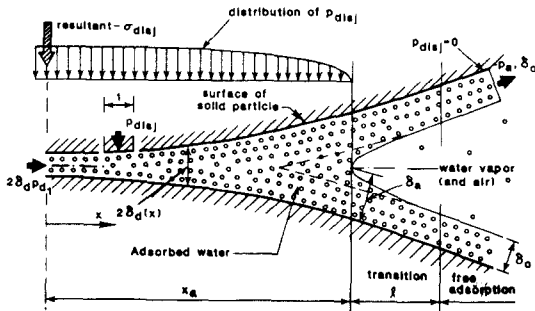


그림 5. 인접한 고체표면에 흡착된 물분자와 여기에 작용하는 응축 응력의 분포

영향권 이내로 가까워지기 위해서는 이 물분자들을 밖으로 밀어낼 수 있는 크기의 힘이 가해져야지만 가능하다. 반대로 서로의 영향권 이내로 가까이 있는 고체에 수분이 공급되면 물분자를 일정한 두께까지 흡착하려는 힘에 의하여 고체분자를 밖으로 떠미는 힘이 작용하게 된다. 이렇게 유발된 힘은 수분을 공기중에 잃어버리면 다시 제자리로 돌아오려는 복원력—시멘트겔 사이에서는 van der Waals' force(응축응력)—에 의하여 수축을 일으킨다.

그림 5에서 보는바와 같이 두개의 분리된 고체의 표면에는 물분자의 층이 형성되는데 간격이 좁은  $X_a$  구간에서는 이 물 분자의 층 형성이 방해가 되기 때문에 밖으로 밀어내어 공간을 확보하려는 힘이 작용하게 되고 이 힘과 같은 크기의 고체들을 내부로 끌어 당기는 힘이 발생하게 된다. 이 응축응력의 크기는 가해진 힘의 크기에 비례하므로 고체 사이의 간격의 함수이며 간격이 제일 좁은 부분의 힘이 최대값이 되고 간격이 넓은 곳에 이르면 그 응력은 더 이상 존재하지 않게 되는 분포를 갖게 된다. 아울러 포화된 상태에서 최대값을 갖게 되고 건조할수록 그 값은 줄어 들며, 그 크기는 상대습도에 비례한다. 따라서 이 응력의 크기는 Kelvin의 식  $\Delta P_d = RT/MV_w \cdot \ln(h)$ 으로 부터 계산할 수 있고, 이로부터 체적 변화를 계산하는 식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\left\{ \frac{\Delta V}{V} \right\}_d = \beta f(W_a) \frac{RT}{MV_w} \ln h$$

그런데 상대 습도가 변화하게 되면 표면장력과 응축응력이 동시에 영향을 받게 되므로 두개의 식을 더하여

정리하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\frac{\Delta V}{V} = \lambda \int_0^h \frac{W_a}{V_s} d \ln h$$

$\lambda$ 는 고체의 압축계수로서 탄성계수의 역수에 해당하는데 시멘트겔의 경우  $18 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{dyn}$  정도의 값을 갖는다. 이 식도 Sorption Isotherm이 있어야 적분이 가능한 형태의 식이기 때문에 이의 실측이나 이를 추정할 수 있는 BET나 Gardner의 식과 같은 적절한 모델의 개발이 필요하다.

#### 4-4 모세응력에 의한 수축

모세관내의 물은 모세관의 크기에 따라 상대습도가 높은 곳에서부터 증발하기 시작하여 약 50% RH 근처에서는 더 이상 수분이 남아있지 못하게 된다. 수분은 직경이 큰 모세관부터 비기 시작해서는 차츰 작은 모세관을 비우게 되고, 한 모세관 내에서는 가운데 부분이 먼저 증발하고 차츰 가장자리가 증발을 하게 된다. 앞에서 보인 그림 5는 물이 상당히 증발한 상태에서 모세관의 한쪽 구석과 유사한 모양의 물분자들의 배치를 보여 주는데, 두 고체 표면의 사이에 점선으로 표시한 삼각형 부분에는 흡착되어 층을 이룬 물분자들과는 다른 종류의 물이 존재한다. 이 부분의 물은 양쪽 고체 표면으로 부터의 영향력이 소멸되는 지점에 있으므로 물의 meniscus 형성에 의한 음압이 상대습도와 평형을 이루는 상태하에 놓이게 된다.

이런 상태하에서 발생된 음압의 크기는  $\Delta P_{cap} = \gamma(1/r_1 + 1/r_2)$  식으로 표현할 수 있다. 여기서  $r_1$ 과  $r_2$ 는 그림에 보이는 곡률의 반경과 이에 수직인 방향의 곡률로서 이 두개의 값이 같을 경우에는 모세관내의 음압을 계산하는 식과 같은식이 된다. 물이 공기중에 노출돼 있을 때의 표면장력은 상대습도의 함수로서 모세관에 의하여 형성될 수 있는 meniscus에 의한 최대 음압보다 커지면 모세관속의 물은 증발하게 된다. 즉 모세관속의 물의 증발과 응축은 상대습도에 따라 좌우된다. 온도가 25°C이고 상대습도가 50%일때 물의 표면장력은 963 atm이고, 이는 반경이 10Å인 모세관에 물을 응축시킬 수 있는 장력에 해당 된다. 10Å은 시멘트겔 표면의 영향권 이내이므로 상대습도가 50% 이하로 내려갈때 시멘트에 존재하는

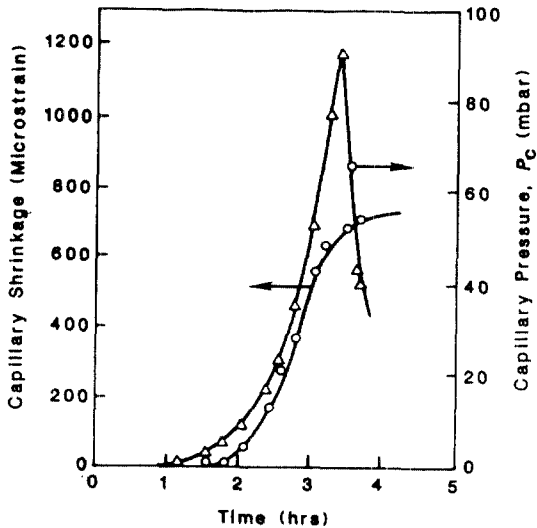


그림 6. 모세응력의 시간에 따른 변화와 이에 의한 건조수축의 변화

물은 더 이상 meniscus를 형성하는 물이 아닌 겔표면수나 겔공극수만이 존재하게 된다. 그림 6은 시멘트겔에서 측정된 자료로서 시간에 따른 모세응력의 증가와 이에 의한 수축율의 증가를 보여준다. 모세응력의 갑작스런 저하는 meniscus의 재배치 또는 소멸에 기인한 것이다.

#### 4-5 상대습도와 건조수축과의 관계

콘크리트내에서 수분의 변화가 흩날 위에 열기한 것과 같은 메카니즘에 의하여 체적변화가 일어나는데 이 함수량의 변화는 주변의 상대습도에 의하여 좌우된다. 온도가 일정할때 물체내에 존재하는 수분의 양은 주변의 상대습도와 평형을 이루게 되는데 이때의 상대습도와 함수량과의 관계를 Sorption Isotherm이라 한다. 이 평형상태가 함수량이 증가하면서 도달했을때는 Adsorption Isotherm이라 하고, 반면에 감소하면서 도달할때는 Desorption Isotherm이라 한다. 일반적으로 콘크리트의 함수량은 같은 상대습도 하에서 Adsorption Isotherm에서 보다 Desorption Isotherm일때 크다. 이는 콘크리트가 건조이력(Hysteresis)을 갖고 있음을 나타내는 것으로서, 첫 건조수축 이후에는 그 차이가 상당히 줄어들어는 성질이 있다. 대개의 건조수축은 함수량이 감소하는 실험이므로

Desorption Isotherm이 주 연구대상으로 다루어진다.

그림 7은 Desorption Isotherm의 예로서 상대습도의 전 범위에 걸쳐서 평형함수량과 극한 건조수축량을 보여 주고 있는데, 이 두개의 곡선은 거의 일치하는 모습을 보이고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 약 50% RH를 기준으로 하여 그 이상에서는 주로 모세응력에 의하여 수축이 일어나고, 그 이하에서는 다른 두가지의 응력에 의하여 수축이 발생한다. 그러나 뚜렷한 경계가 나타나지 않는 것은 이 메카니즘들이 복합적으로 작용하는 구간이 있음을 의미한다.

상대습도가 50% 이하로 내려갈 때는 모세공극의 물이 모두 증발하고 겔공극에 존재하는 물에 의한 건조수축이 발생한다고 했다. 그런데 시멘트겔의 공극율은 수화율이나 다짐 정도에 상관없이 일정하므로—이런 요인들에 영향을 받는것은 모세공극율이다—일정한 건조수축을 나타내며, 상대습도가 50% 이상인 구간에서만 Sorption Isotherm이 변화한다. 아울러 이 그림에서는 상대 습도가 20%에서 50%로 변하는 구간에서는 평형 함수량과 극한 건조수축량이 거의 일정한 값을 나타내는 특성이 있음을

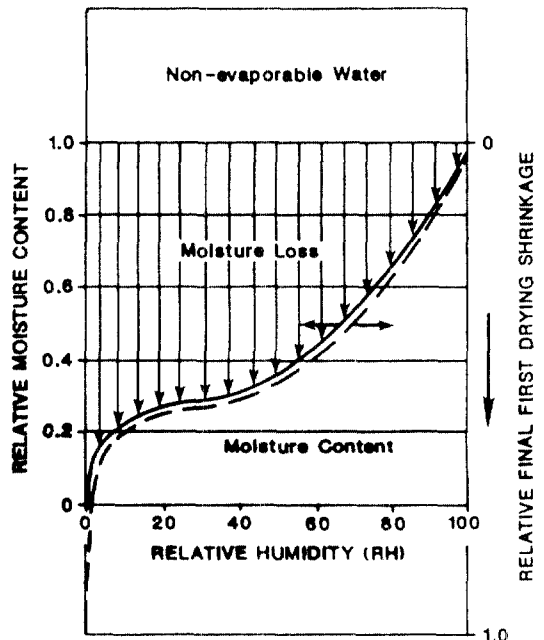


그림 7. 시멘트 페이스트의 Desorption Isotherm과 극한 건조수축

알 수 있다. 이는 표면장력에 의한 팽창이 첫번째 층이 흡착될때 가장 큰 변화가 일어나며 그 이후 층의 흡착때는 작은 변화를 나타내기 때문이며, 응축응력에 의한 수축도 초기에 가장 큰 변화를 가져오기 때문이다.

## 5. 결론

이 글에서는 시멘트 페이스트에서 일어나는 건조수축을 되돌이킬 수 있는 메카니즘에 대한 설명을 하였으나 첫번째 건조수축 이후 되돌아가지 않는 부분에 관한 메카니즘은 아직 명확히 밝혀지지 않은 상태이다. 일부분이나마 건조수축의 미시적 세계에서 일어나는 메카니즘에 대한 이론을 요약 설명하되 가능한한 구체적인 힘과 변형의 크기등에 대한 개념을 제공하려 하였다. 콜로이드 크기의 미소 세계에서 일어나는 힘과 변형과의 관계도 거시 세계의 물리 법칙을 따르나 그 크기는 지수가 다른 크기를 보이고 있기에 아주 작은 물방울의 힘이 거대한 구조물들을 떠받치는 콘크리트를 변형시키고, 때로는 균열을 발생시키는 것이다.

여기에 인용된 식들을 실제 건조수축의 계산에 사용하는데는 식에 사용된 시멘트겔에 관한 여러가지 물리적인 상수들을 측정하는 것이 쉽지 않다는 문제점이 있다. 시멘트겔의 압축율과 각 메카니즘들이 건조수축에 기여하는 기여도등의 측정이 어렵기 때문에 아직은 일관성있는 결과를 보여 주지 못하기 때문이다. 아울러 식에 포함된 적분을 하기 위해서 적절한 Sorption Isotherm의 모델 개발이나 측정이 이러한 이론의 계속적인 발달에 필수적이라 아니 할 수 없다.

## 6. 참고 문헌

1. Kirkham & Powers, "Advanced Soil Physics", Wiley - Interscience, 1972
2. Drost-Hansen W., "Structure of Water Near Solid Interfaces" Industrial and Engineering Chemistry, Vol 61, No 11, pp.10-47, Nov. 1969
3. T.C. Powers, "Mechanisms of shrinkage and reversible creep of hardened cement paste", Proceedings, International Conference on the Structure of Concrete, London, Cem. Concr. Assoc, pp.319-344, 1965
4. T.C. Powers, "The thermodynamics of volume change and creep", Materiaux et Constructions, Vol 1, No 6, pp.487-507, 1968
5. J.F. Young, "The Microstructure of Hardened Portland Cement Paste", Creep and Shrinkage in Concrete Structures, editor Z.P. Bazant and F.H. Wittmann, John Wiley & Sons Ltd, pp.3-22, 1982
6. O. Ishai, "The time-dependent deformational behaviour of cement paste, mortar and concrete", Proceedings, International Conference on the Structure of Concrete, London, Cem. Concr. Assoc, pp.345-364, 1965
7. S.E. Pihlajavaara, "Estimation of Drying of Concrete at Different Relative Humidities and Temperatures of Ambient Air with Special Discussion about Fundamental Features of Drying and Shrinkage", Creep and Shrinkage in Concrete Structures, editor Z.P. Bazant and F.H. Wittmann, John Wiley & Sons Ltd, pp.87-107, 1982
8. F.H. Wittmann, "Creep and shrinkage Mechanisms", Creep and Shrinkage in Concrete Structures, editor Z.P. Bazant and F.H. Wittmann, John Wiley & Snnns Ltd, pp.129-161, 1982