

## 콘크리트 체적변화의 중요성과 대책

### Volumetric Stability and its Significance in Concrete



김은겸\*  
Eun-Kyum Kim



최연왕\*\*  
Yun-Wang Choi



차수원\*\*\*  
Soo-Won Cha



문대중\*\*\*\*  
Dae-Joong Moon

### 1. 머리말

콘크리트는 주위환경과의 상호작용으로 복잡한 물리, 화학적 체적변화를 유발하는 독특한 재료이다. 콘크리트의 수화작용과 미세구조의 변화는 노화(aging), 크리프 및 수축(creep and shrinkage)과 같은 시간종속적 거동을 지배한다.

콘크리트 구조물의 타설 후 수일간의 물리, 화학적 체적 변화로 인한 초기재령의 결함은 구조물 사용기간 동안 지속적인 영향을 주게 된다. 일반적으로 구조물은 다양한 형태의 구속작용을 받게 되므로, 이러한 체적의 불안정(volumetric instability)은 콘크리트 구조물의 성능과 내구성에 악영향을 미치는 요인이 된다. 이러한 구속응력이 콘크리트의 인장강도를 초과하게 되면 균열을 유발하게 되고, 구조물의 내구성과 사용성에 영향을 미치게 된다. 손상의 가능성은 콘크리트 배합특성, 양생 조건, 재령 및 하중 조건 등에 따라 변화한다.

초기재령 콘크리트는 시멘트의 수화반응과정에서 단면 내 온도 및 습도상태에 따라 상당한 체적변화를 유발한다. 타설 후 수일 내의 거동은 콘크리트의 사용수명 중 가장 중요한 기간이며, 이 시기에 콘크리트는 자기수축, 건조수축 및 온도변형과 같은 복잡한 체적변화를 수반하여 빠른 속도로 인장응력을 유발하나, 상대적으로 낮은 강도 및 강성을 가지므로 균열을 유발하게 된다. 체적변화에 의한 균열은 온도응력(thermal stress)에 의한 것과 수축응력(shrinkage stress)에 의한 것으로 나눌 수 있고, 주로 하중이 재하 되기 전에 발생한다.<sup>1)</sup>

〈그림 1〉에서와 같이 체적변화에 의한 수축응력의 크기는 구속된 수축변형과 탄성계수의 곱으로 결정되고, 구속응력이 인

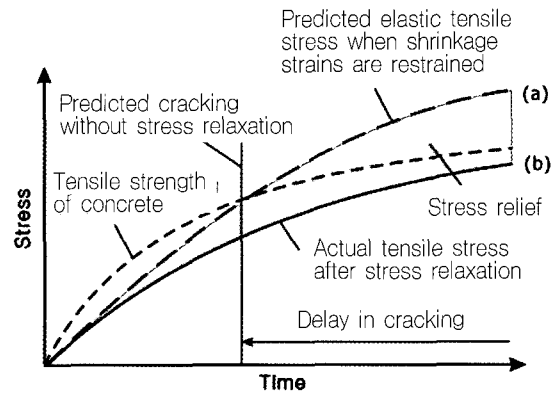


그림 1. 체적변화에 따른 수축 균열과 크리프 영향

장강도에 도달하면 〈그림 1〉의 곡선(a)와 같이 균열이 발생한다. 그러나 〈그림 1〉의 곡선(b)와 같이 실제적인 경우 구속응력은 크리프에 의한 응력이완으로 탄성 구속응력보다 작은 값을 가지므로, 정확한 구속응력의 평가와 균열 예측을 위하여 크리프 특성의 고려는 매우 중요한 역할을 하게 된다.

최근 들어 구조물의 노후화에 따른 콘크리트의 내구성에 대한 관심이 고조되고 있고, 이러한 초기재령에서 발생하는 균열은 구조물의 내구성 및 사용성과 같은 장기적인 성능(long-term performance)에 큰 영향을 미친다. 초기재령 균열은 철근 부식, 중성화 및 알칼리 골재반응 등을 촉진시키고, 장기적인 성능저하를 가속화한다. 내구성능을 향상시킬 목적으로 사용되는 고강도 및 고성능 콘크리트(high strength and high performance concrete)와 같은 고품질의 콘크리트는 수화과정에서 일반 콘크리트에 비해 매우 큰 자기건조(self-desiccation)에 의한 자기수축(autogenous shrinkage)을 필연적으로 동반한다. 수축응력은 수화과정에 의해 제어되는 자기수축과 외부 환경에 의해 제어되는 건조수축 응력으로 구분되고, 물-시멘트비가 낮은 고강도 및 고성능 콘크리트의 수분 거동은 건조수축(drying shrinkage)에 의한 것보다 오히려

\* 정희원, 서울산업대학교 토목공학과 교수  
ke6507@snu.ac.kr

\*\* 정희원, 세명대학교 토목공학과 부교수

\*\*\* 정희원, 서울대학교 토목공학과 계약교수

\*\*\*\* 정희원, (주)NECT 연구개발부 기술이사

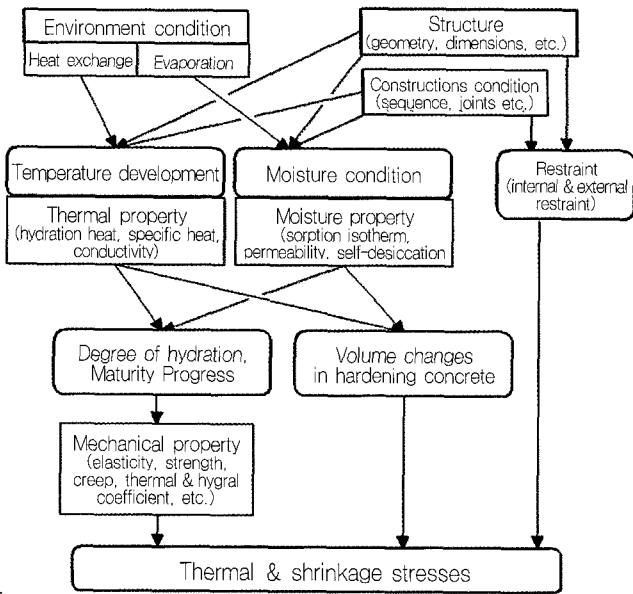


그림 2. 콘크리트 체적변화에 영향을 미치는 요인

## 2. 구속응력 발생 기구

### 2.1 개요

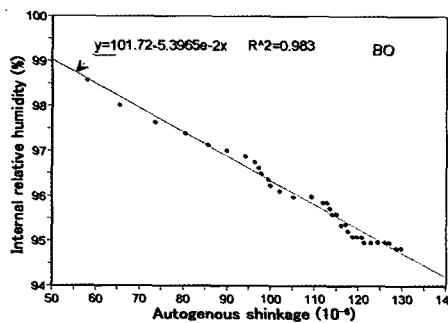
콘크리트는 인장강도가 압축강도에 비해 매우 낮은 재료이므로, 수화열에 의한 온도상승으로 발생하는 팽창보다는 온도하강에 의한 수축변형이 더욱 중요하다. 이는 온도하강에 의한 온도수축이나 건조 및 자기수축 변형이 구속되면 단면에 인장응력을 유발하기 때문이다. 예를 들어 콘크리트의 열팽창계수가  $\alpha = 10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 이고 수화열에 의한 온도상승이 대기온도보다  $15^\circ\text{C}$  상승했다면 시간이 경과하여 발생하는 온도수축량은  $\alpha \Delta T = 150 \times 10^{-6}$ 이 된다. 콘크리트의 탄성계수가  $E_c = 2.1 \times 10^4 \text{ MPa}$ 이고 부재가 양단이 완전구속된 상태 ( $K_r = 1$ )라면 온도수축에 의한 구속 인장응력  $\sigma_t$ 는 다음 식(1)로 표현될 수 있다.

$$\sigma = E_c(\epsilon - \epsilon_T) \tag{1}$$

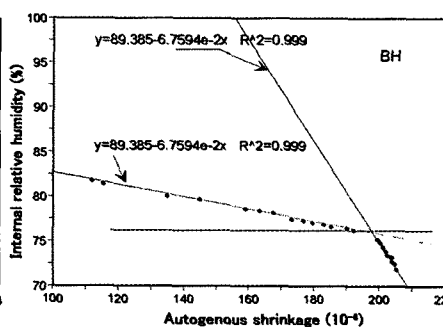
식(1)에서  $\epsilon$ 은 전체 변형률로서 구조물의 완전구속되어 있으므로,  $\epsilon = 0$ 이다. 또한  $\epsilon_T$ 는 자유롭게 변형되는 조건에서의 온도변형률로서  $\epsilon_T = \alpha \Delta T = 150 \times 10^{-6}$ 이다. 따라서 구조물에 발생하는 구속인장응력은 3.15 MPa로, 이는 일반적인 콘크리트의 인장강도를 초과하므로 균열을 유발하게 된다. 또한 <그림 3>과 같이 보통강도 및 고강도 콘크리트의 자기수축 및 건조수축은 모두 내부습도와 다음 식(2)와 같은 선형관계를 가지는 것을 알 수 있다. 또한 <그림 3>에서 보인 바와 같이 식(2)에서의 수축 계수  $\alpha_{sh}$ 는  $1.5 \sim 1.8 \times 10^{-3}$ 의 범위를 가진다.<sup>4,5)</sup>

내부 습도 변화( $\Delta\phi$ )에 의한 수축 변형률 변화( $\epsilon_{sh}$ )는 식(2)와 같이 수축 계수 ( $\alpha_{sh}$ )를 도입함으로써 표현할 수 있다.

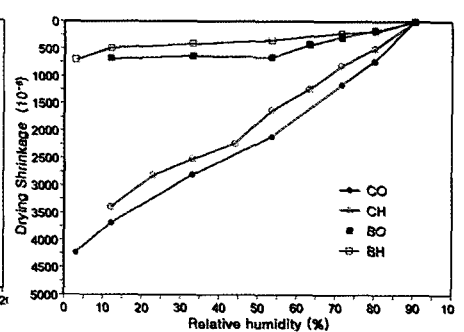
$$\epsilon_{sh} = \alpha_{sh} \Delta\phi \tag{2}$$



a. 보통강도 콘크리트의 자기수축



b. 고강도 콘크리트의 자기수축



c. 보통 및 고강도 콘크리트의 건조수축

그림 3. 콘크리트 내부습도와 건조수축과의 관계

자기수축에 의한 것이 지배적이다.<sup>2)</sup>

많은 기술자들이 초기재령 콘크리트의 체적변화에 의한 응력 및 균열문제를 심도 깊게 다루지 않는 데는 장기적인 내구성과 사용성에 대한 인식이 부족하고, 경화가 진행되는 콘크리트의 체적변화는 <그림 2>에서 보인 바와 같이 매우 복잡한 영향인자를 고려해야 되기 때문이다<sup>1)</sup>. 또한, 콘크리트 구조물에서 온도 및 수분이동과 관련된 문제를 고려하지 않고 실제 응력 (realistic stresses)을 구하고, 이를 통해 균열을 예측하기는 불가능하다.<sup>3)</sup>

따라서 본고에서는 콘크리트 체적변화에 의해 구속응력이 유발되고, 잔류하는 기구를 검토하고, 크리프 특성이 구속응력에 미치는 영향을 설명하고자 한다. 본고에서는 대표적인 체적변화를 온도의 의한 체적변화와 습도에 의한 건조수축 및 자기수축으로 나누어 이에 미치는 영향 요인을 분석하고, 이로부터 체적변화를 최소화하고 온도 및 수축균열을 제어하는 대책을 소개하고자 한다.

따라서 자기건조 또는 주위환경에 의한 건조에 따라 콘크리트의 내부상대습도는 감소하게 되고 식(2)와 같이 내부습도변화에 따른 수축변형률을 산정할 수 있다. 수축변형률이 산정되면 온도수축과 동일한 기구로 구속응력이 산정될 수 있다.

상술한 구조물은 일방향 거동이 지배적인 가장 단순한 형태의 수축응력 발생기구에 대한 내용이나 단면내의 온도구배나 습도구배를 고려하는 경우 단면의 응력 분포는 다음의 두 가지 구속응력 발생기구로 이해할 수 있다.

### 2.2 내부구속에 의한 응력

내부구속에 의한 균열은 콘크리트의 내부와 표면과의 온도구배 또는 습도구배에 의해 발생한다. <그림 4>에서와 같이 콘크리트의 수화열에 의해 콘크리트의 내부는 온도가 상승하지만 표면은 대기공기에 의해 온도가 낮아지고, 또한 타설후 콘크리트 내부습도는 100%이고 대기습도는 이보다 낮으므로, 이 온도차와 습도차에 의해 균열이 발생한다. 즉, 상대적으로 온도 및 습도가 낮은 부분의 콘크리트는 수축하려는 것을 상대적으로 온도 및 습도가 높은 내부의 콘크리트가 구속하여 표면에 인장응력이 작용하고, 이 응력이 동일재형에서의 인장강도를 초과하면 균열이 발생한다. 표면과 내부의 온도차는 재령 1~5일 정도에서 콘크리트 내부온도가 최고점에 도달할 때 최대가 되는 경우가 많으며, 균열은 콘크리트 온도가 최대가 되는 시점 또는 거푸집 제거 직후에 생기기 쉬우며, 균열은 0.1~0.3mm 정도의 폭을 가지고 그 발생양상은 규칙성이 없으며, 또 단면을 관통하지는 않는다. 그러나 내부구속에 의해 표면에 발생한 균열은 건조수축이나 외부구속에 의해 커다란 관통균열로 진전하기도 하므로 주의가 요망된다. 또한 포장과 같은 슬래브 구조의 경우는 매스콘크리트와는 달리 습도변화에 의한 수축균열 가능성이 크고, 수분이동은 온도에 비하여 확산계수가 낮아 대기습

도에 평형을 이루는 기간이 매우 오래 소요된다. <그림 4>에서 일반적으로 내외부 습도차가 최대가 되는 시점은 10~100일이고, 온도균열과 동일한 기구로 수축균열이 발생한다.

### 2.3 외부구속에 의한 응력

외부구속에 의한 균열은 타설된 콘크리트의 온도변형 또는 수축변형이 지반 또는 기타설한 콘크리트에 의해 구속되어 발생한다. <그림 5>에 나타난 바와 같이 타설된 콘크리트는 온도가 최고점에 도달한 후에 최종적으로 외기온도와 같을 때까지 온도가 하강하고, 습도측면에서 타설 직후 내부습도가 100%에서 대기 습도와 평형을 이루는 시점까지 하강한다. 이 온도 및 습도강하에 의해 콘크리트의 체적은 수축하지만, 이것이 하층의 콘크리트 또는 지반에 의해 구속되어, 외부구속 균열이 발생하는 것이다. 실제의 온도 및 수축균열제어 대책으로는 이러한 외부구속 균열을 어떻게 제어하는가가 중요한 과제가 된다.

외부구속에 의한 균열은 균열폭이 0.2~0.5mm, 혹은 그 이상이 되는 경우가 많고, 세로로 곧장 뻗은 관통 균열이 되기도 한다. 콘크리트 내부의 온도차에 의해 발생하는 응력보다 타설블럭의 크기와 구속도의 영향을 더 크게 받아 내부의 온도 응력이 외부구속응력의 크기에 지배받는 경우에는 구조물 내부의 응력이 초기에는 단면전체에 걸쳐서 압축응력을 나타내다가 재령이 경과함에 따라 단면전체가 인장응력으로 바뀌게 된다. 따라서 균열발생시 주로 구속면에 대하여 직각방향으로 발생하며 구조물을 관통하는 경우가 많으면 구조물의 내력에도 커다란 영향을 미치게 된다.

### 2.4 구속응력과 크리프와의 관계

콘크리트의 손상과 성능을 보다 정확히 평가하기 위하여 크

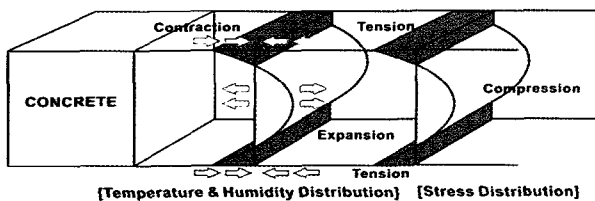
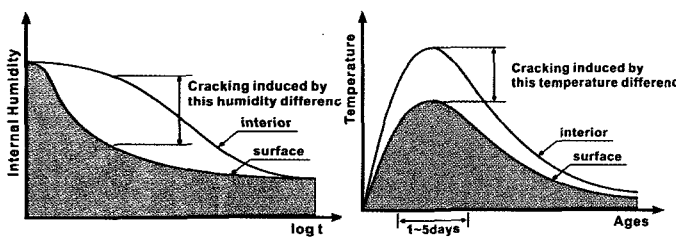


그림 4. 내부구속응력의 발생기구

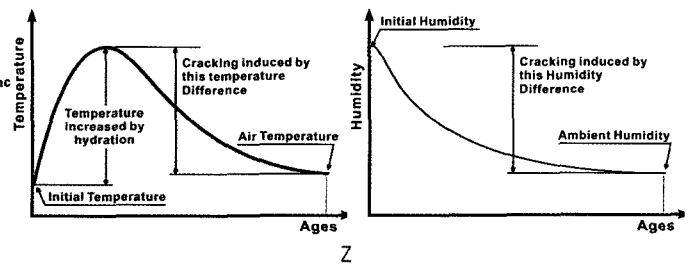


그림 5. 외부구속응력의 발생기구

표 1. 하중 및 경계조건이 건조수축 및 크리프에 미치는 영향

작용 기구	기본크리프 (basic creep)	응력이완 (stress relaxation)	건조수축 (비구속상태)	건조수축 (구속상태)	건조수축 (일정한 변형률을 유지한 경우)	건조수축 + 응력이완 (구속상태)	건조수축 + 응력이완 (일정한 변형률을 유지한 경우)
도식도							
변형률-시간곡선							
응력-시간곡선							
비고	-콘크리트내 수분이동이 없는 경우 -일정한 응력상태 유지	-일정한 변형률을 유지한 상태	-부재가 구속되지 않은 상태 -응력이 발생하지 않음	-인장응력 단조 증가	-일정한 변형률을 유지한 상태	-전체 변형률 성분 = 탄성변형 + 기본 크리프 + 건조수축 + 건조크리프	-응력이완으로 건조수축응력 감소 -응력이완으로 건조수축응력 증가

리프 및 수축 메커니즘을 고려하는 것은 필수적이다. 온도수축 및 건조수축에 의한 구속응력과 이에 의한 균열을 평가하기 위하여 크리프에 의한 응력이완을 반드시 고려하여야 한다. 수축과 크리프거동은 동시에 유발되고, <표 1>은 다양한 하중조건, 경계 및 구속조건, 습도상태의 조합에 의한 응력 및 변형률 이력 특성을 보여주고 있다.

크리프는 일정한 응력상태에서의 변형률 응답을 의미하고, 응력이완은 일정한 변형률상태에서의 응력 응답을 나타낸다. 이는 물리적으로 동일한 현상을 표현하는 것으로, 응력 해석시 크리프 및 응력이완은 수개의 체인(chain)-스프링과 댐퍼의 조합으로 표현되고, 이는 수치적으로 체인을 직렬 또는 병렬 연결하는 차이만을 가진다.

크리프는 수분이동이 없는 상태에서 발생하는 기본 크리프(basic creep)와 건조환경에서 추가로 발생하는 건조 크리프(drying creep)로 나눌 수 있고, 매스콘크리트의 경우 주로 기본 크리프만을 다루게 된다.

2.1절에서 설명한 것과 같이 구속되지 않은 자유수축(free shrinkage)은 응력을 유발하지 않지만, 경계조건에 의해 자유수축이 구속되는 변형만큼 응력을 유발하게 된다.

2.5 건조수축 및 크리프의 회복가능성(Reversibility)

<그림 6>은 건습이 반복될 때 건조수축을, <그림 7>은 하중이 재하 또는 제거될 때 크리프 변형을 보여주고 있다. <그림 6>과 <그림 7>에서와 같이 건조수축과 크리프의 일부는 회복되지 않고 이를 비회복 건조수축(irreversible shrinkage) 또는 비회복 크리프(irreversible creep)라고 한다.

<그림 6>에서와 같이 처음 건조가 시작되어 시간이 경과한 후 높은 습도상태가 되더라도 원래의 체적으로 회복되지는 않고, 이는 건조가 진행되어 C-S-H 구조의 화학적 결합력이 증가하기 때문이다.

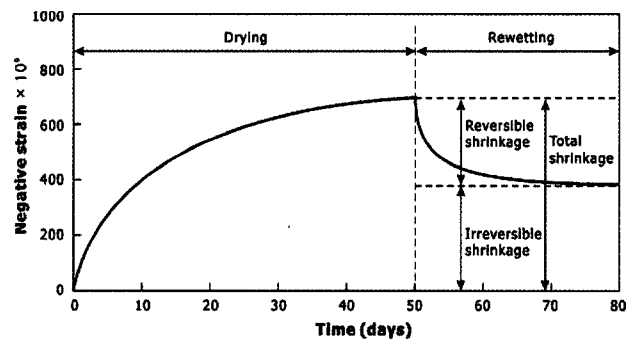


그림 6. 건습반복에 따른 건조수축의 회복가능성

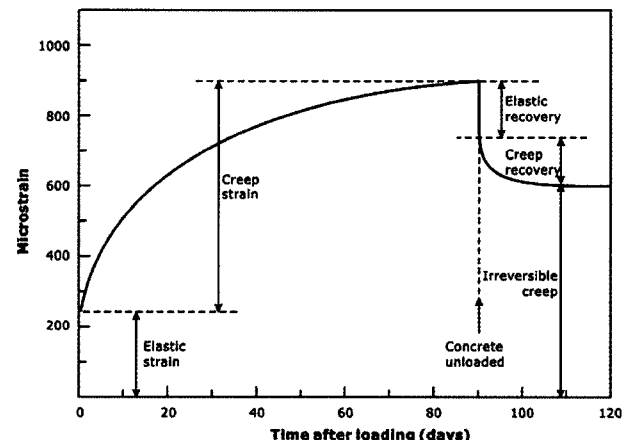


그림 7. 하중재하 및 제거에 따른 크리프의 회복가능성

### 3. 콘크리트의 체적변화 발생 기구 및 이에 영향을 미치는 요인

#### 3.1 수화열에 의한 온도응력

##### 3.1.1 수화열에 의한 온도응력 발생기구

양 시간이 고정된 콘크리트 구조물을 타설한 시점에서 시간에 따른 온도 변화는 <그림 8>과 같고, 온도의 상승기에는 콘크리트가 팽창하여 단면내에는 압축응력이 도입되나 온도의 하강기에는 다시 수축하게 되고 이때 단면은 인장응력을 받는다 <그림 8>. 온도의 하강량이 클수록 인장응력의 크기는 크고, 이 값이 콘크리트의 인장강도를 초과하는 경우 부재의 균열이 발생한다. <그림 9>는 외부구속에 의해 시공 중 온도균열이 발생한 지하철 구조물의 예를 나타낸 것으로 이러한 균열은 시공 초기에 발생하고 콘크리트의 강도가 충분히 발휘되지 않은 시점에서 발생하므로 구조물의 내력 및 장기적인 내구성에 치명적인 영향을 미칠 수 있으므로 이에 대한 대책이 요구된다.

##### 3.1.2 수화열에 영향을 미치는 요인

콘크리트의 단열온도상승량에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 시멘트 종류, 단위시멘트량, 타설온도 등을 들 수 있고, 이 중 단위시멘트량은 콘크리트의 온도상승량에 가장 큰 영향을 미쳐 결과적으로는 구조체내의 온도응력 및 온도균열지수에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 매스 콘크리트 시공시에는 소요의 품질을 확보할 수 있는 범위 내에서 이에 대한 적극적인 검토가 필요하다. 콘크리트 타설계획 수립시 단위시멘트량을 조절하는 것은 균열제어면에서 볼 때 매우 효과가 있어 10 kg/m<sup>3</sup>의 단위시멘트량으로는 중앙부의 온도상승량을 대략 0.7~1.1°C 정도 조절할 수가 있고, 내외부의 온도차는 0.3~0.4°C 정도 조절이 가능하다. 또한 저열시멘트나 플라이애쉬 등의 혼화재를 이용하여 콘크리트의 내부 발열량을 저감시킬 수 있다.

배합이나 시공조건을 조절하여 발열량을 저감시켜 수화열로 인한 온도균열을 방지할 수 있다면 좋지만, 여러 가지의 시공 조건 때문에 적용이 곤란한 경우에는 사전냉각(precooling) 방법으로 인위적으로 타설시의 콘크리트 온도를 낮추는 방법이 효과적이다. 콘크리트의 타설시 온도는 타설후의 온도상승속도, 최고온도, 온도강하속도 등에 큰 영향을 미치고 이러한 것이 균열 발생의 유무, 균열폭 등에 직접 영향을 미치게 되므로 가능한 비빔 온도를 낮게 유지하는 것이 바람직하다.

#### 3.2 수화반응에 의한 자기수축

##### 3.2.1 자기수축 발생기구

수화반응동안 화학적으로 결합되어 있는 물의 비부피(specific

volume)는 감소하게 되므로 시멘트 페이스트는 부피변화를 하게 될 것이다. 만약 부피의 수축이 제한되어 있고 추가적인 수분의 공급이 없다면 가장 큰 공극에서부터 점차로 공극은 비게 될 것이다. 따라서 수증기압은 감소할 것이며 상대습도도 감소할 것이다. 이러한 현상을 자기건조(self-desiccation)라고 한다. 시멘트 페이스트, 모르타르, 콘크리트에서의 자기건조는 물-시멘트비, 시멘트의 종류, 혼화재료, 양생온도와 같은 다양한

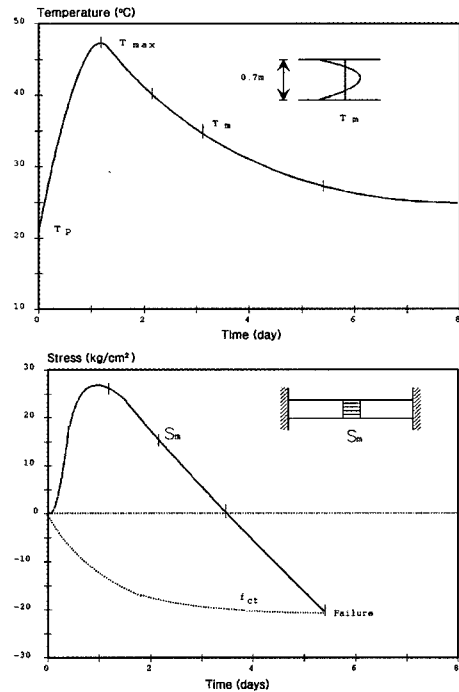


그림 8. 양단 고정된 구조물에 대한 단면의 평균 온도 이력 및 응력이력

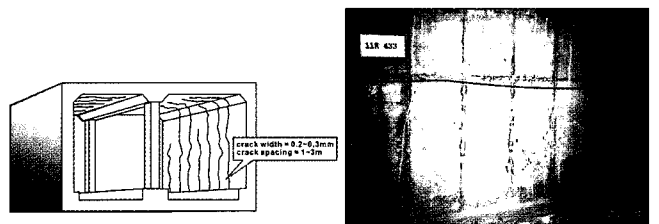


그림 9. 외부구속작용에 의한 지하철 벽체에 발생한 온도균열

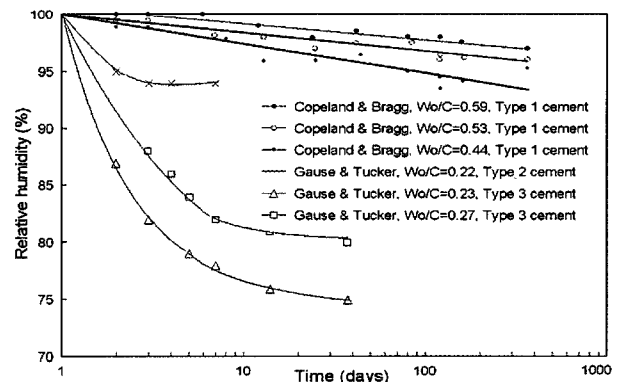


그림 10. 시멘트 페이스트에서의 자기건조

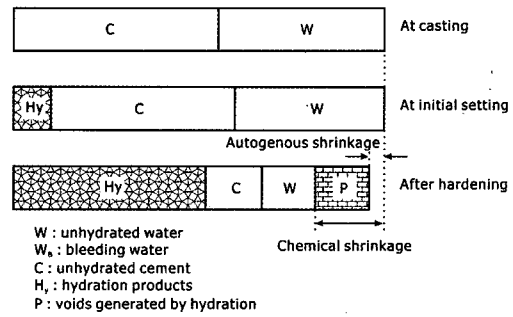
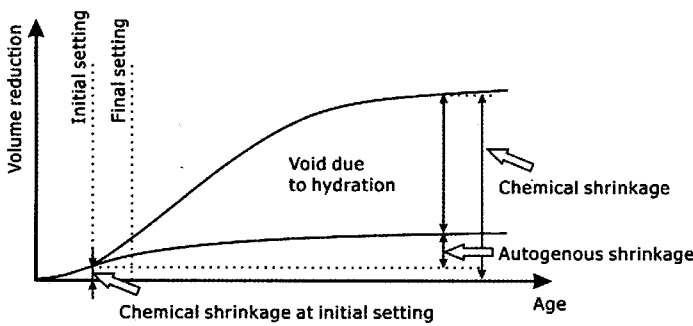


그림 11. 수화반응에 의한 화학수축 및 자기수축과의 관계

인자들의 영향을 받는다. <그림 10>은 자기건조에 가장 큰 역할을 미치는 물-시멘트비의 영향을 나타낸다.

콘크리트 내부습도의 측면에서 발생하는 자기건조는 변형의 관점에서 수축현상을 발생시킨다. 미수화시멘트가 물과 반응하면 생성된 수화물의 체적은 원래 체적보다 작아지게 되며, 이러한 현상을 자기수축이라고 한다. <그림 11>과 같이 자기수축은 수화에 의한 화학수축(chemical shrinkage)의 일부이며, 화학수축은 클링커 광물 및 수화물의 비중을 정확히 측정하여 구할 수 있으며<sup>6)</sup>, 보통강도 콘크리트 보다는 물-시멘트비가 작은 고강도콘크리트에서 자기수축이 크게 발생할 수 있다.

자기수축 발생 메커니즘은 수화생성물의 체적이 반응전의 시멘트와 물의 체적을 합한 것보다 작기 때문에 수화수축이 발생하여 외부에서 물이 공급되지 않으면 공극이 발생하며, 이러한 자기건조에 의해 공극수에 메니스커스가 형성되어 모세관장력이 발생하기 때문이라고 설명하고 있다<sup>7)</sup>. 즉, 콘크리트의 자기수축은 일반적으로 30 MPa 정도의 강도를 갖는 콘크리트에서는 문제점이 적지만, 고강도콘크리트에서는 단위시멘트량이 많아서 커지게 된다. 또한, 고강도콘크리트의 건조수축이 보통강도 콘크리트와 비교하여 작은 것은 물-시멘트비가 작기 때문에 수화반응 후에 잔류하는 공극수가 적으며, 자기건조에 의해 콘크리트 내부와 습도차가 작으므로 수분이 증발하지 않기 때문으로 알려져 있다.<sup>8)</sup>

그러므로 건조시키지 않은 콘크리트 표면에 미세하게 발생하는 균열, 예상외로 폭이 큰 균열등도 자기수축에 의한 영향이 많으므로 시멘트의 선택 및 배합설계에 주의가 필요하다.

3.2.2 자기수축 발생에 영향을 미치는 요인

(1) 물-시멘트비

보통강도 콘크리트에서는 자기수축에 비하여 건조수축이 커지므로 건조조건하에서 발생하는 수축의 대부분은 건조수축이다. 따라서 보통강도 콘크리트의 건조수축은 단위수량의 증가에 따라 커진다. 즉, 건조수축은 물-시멘트비가 작을수록 작아지지만, 자기수축은 <그림 12>와 같이 물-시멘트비가 작을수록

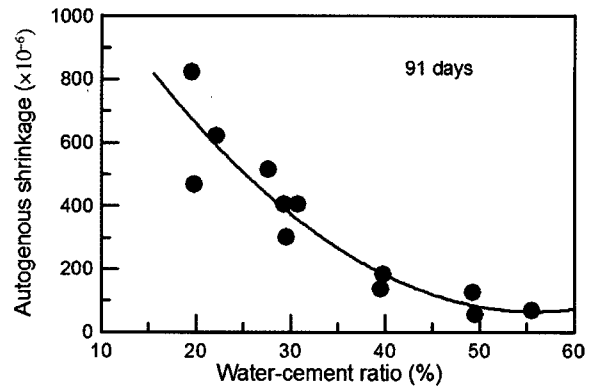


그림 12. 물-시멘트비와 자기수축과의 관계

커진다<sup>9)</sup>. 그 결과 고강도로 될수록 수축에 미치는 자기수축의 비율이 커진다.

(2) 시멘트 종류

田澤 등<sup>10)</sup>은 물-시멘트비 30%의 시멘트페이스트에 의한 응결개시에서 자기수축 변형량에 대해서 시멘트 조성광물 및 수화물로 식(3)과 같이 정략적으로 구할 수 있다고 한다. 식(3)에 따르면 시멘트 페이스트의 자기수축 변형량은 C<sub>3</sub>A 및 C<sub>4</sub>AF량이 클수록 C<sub>2</sub>S량이 적을수록 시멘트페이스트의 자기수축 변형량이 커지게 된다.

$$\epsilon_{as}(t) = -0.012 \cdot \alpha_{C_3S}(t) \cdot (C_3S\%) \quad \text{식(3)}$$

$$-0.070 \cdot \alpha_{C_2S}(t) \cdot (C_2S\%)$$

$$+ 2.256 \cdot \alpha_{C_3A}(t) \cdot (C_3A\%)$$

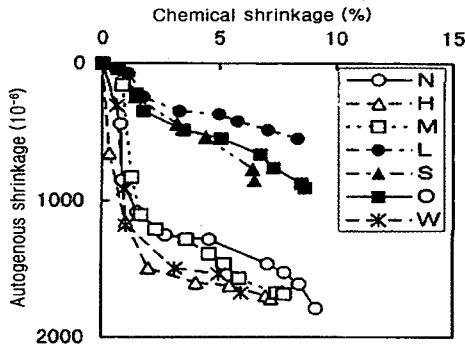
$$+ 0.070 \cdot \alpha_{C_4AF}(t) \cdot (C_4AF\%)$$

여기서,  $\epsilon_{as}(t)$  : 재령에 따른 시멘트페이스트의 자기수축변형률

$\alpha_i(t)$  : 광물  $i$ 의 재령  $t$ 에 따른 반응률(%)

$(i\%)$  : 광물  $i$ 의 함유율(%)

시멘트 종류에 따른 자기수축량은 <그림 13>에 나타내었다.



Type of cement	Mineral compound (%)			
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
N : Ordinary cement	51.5	22.9	8.9	8.8
H : High-early strength cement	62.8	11.8	8.0	8.5
M : Moderate heat cement	42.9	35.9	3.2	11.9
L : Low heat cement	22.9	58.8	2.5	9.4
S : Sulfate resisting cement	61.0	16.9	1.7	14.6
O : Oil well cement	57.6	20.5	2.2	13.7
W : White cement	61.1	16.5	12.1	0.6

그림 13. 시멘트 종류에 따른 화학수축 및 자기수축

### 3.3 건조수축에 의한 체적변화

#### 3.3.1 건조수축 기구

수화과정에서 콘크리트의 공극구조는 겔공극(gel pore)과 수십 Å에서 수십 μm의 다양한 크기를 가지는 모세공극(capillary pore)으로 나눌 수 있고, 겔공극 내의 물리적 결합수는 그 결합력이 강하여 일반적인 대기 습도상태에서 이동하지 않는다. 따라서 건조와 관련되는 수분은 모세공극 내의 물이다. <그림 14>는 세공조직내의 물의 상태를 보여주고 있다.

건조수축은 시멘트 수화물의 화학, 광물적 성질의 변화에 의한 원인이 아니라 수분증발에 따른 물리적인 거동으로, 건조수축 기구는 모세관장력기구, 표면장력기구, 분리압기구 및 층간수의 이동기구로 분류될 수 있다.

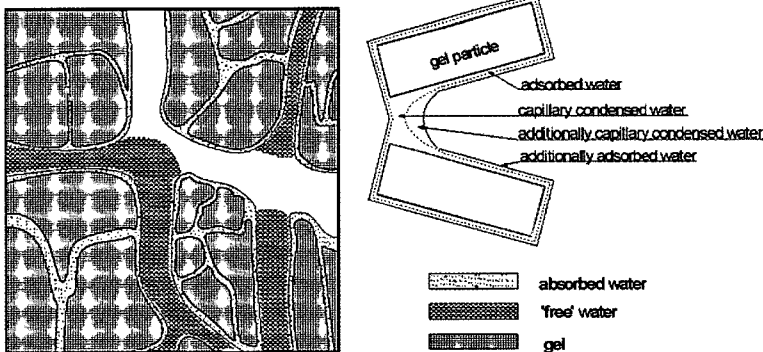


그림 14. 공극구조 내의 물의 상태와 흡착등온선

#### (1) 모세관장력기구

모세관장력은 건조에 따른 메커니즘의 형성에 의해 모세관수 중에 인장응력이 발생하며, 이것이 경화체에 탄성적인 체적감소를 발생시키는 것이다. 이러한 기구는 가역적이며, 중 및 고 습도의 조건에서 작용한다고 생각되고 있다.

Powers는<sup>11)</sup> 물리화학적인 접근에 있어 모세관에 작용하는 힘을 식(4)로 표현하였으며, 상대습도의 관계로서 설명하였다.

$$1/r_1 + 1/r_2 = -RT/\gamma MV_f \cdot \ln(p/p_s) \quad \text{식(4)}$$

여기서,  $r_1, r_2$ 는 액체면의 주곡률반경,  $\gamma$ 는 액체의 표면장력,  $M$ 은 액체의 분자량,  $V_f$ 는 액체의 용적비,  $R$ 은 가스상수,  $T$ 는 절대온도,  $p$ 는 증기압,  $p_s$ 는 포화증기압이다.

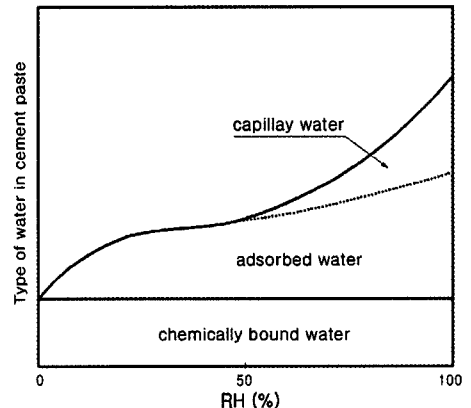
또한, Hansen<sup>12)</sup>은 열역학과 탄성론에 기초한 모세관장력의 효과를 설명하였다. 近藤<sup>13)</sup>은 잔류수분에 의해서 모세관장력이 이동하여 수축하며, 상대습도 20 ~ 100 %에서는 이 장력은 모세관수가 존재하는 범위에서 작용한다고 설명하였다.

#### (2) 표면장력기구

이 기구는 흡착되는 수량의 변화에 의해 일어나는 겔입자의 표면장력의 변화가 용적변화의 원인으로 본다. 고습도영역에서 증발하는 모세관수의 양이 변화하여도 표면장력에는 영향이 없지만, 표면장력은 상대습도가 40 % 이하에 있어서만 유효하다.

#### (3) 분리압기구

어떤 습도에 있어서는 흡착수의 층 두께는 주위의 증기압에 의해서 결정된다. 그러나 입자간의 거리가 비교적 작으면, 흡착수의 층 두께는 거리가 비교적 작아지고, 흡착수의 층 두께는



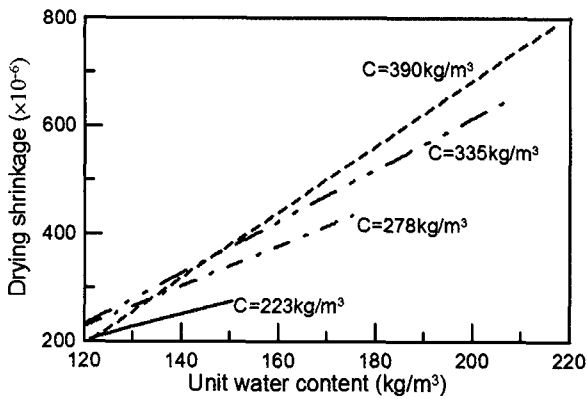


그림 15. 단위수량과 건조수축과의 관계

주위의 습도가 아니라 거리에 의해 결정되는 것이다. 이러한 흡착이 저해되는 부분은 팽창압 또는 분리압이 작용하여 겔입자를 끌어서 분리한다. 건조시에는 그 압력이 일부가 해방되며, 겔입자간 거리가 감소하여 경화체는 수축한다.

(4) 층간수의 이동기구

C-S-H의 가역적인 물의 출입은 용적변화를 발생시킨다. Feldman과 Serda는<sup>14)</sup> 채습시킨 경우, 팽창의 약 80%는 층간수가 채침투하여 있기 때문이라고 하였다. 또한 内川은 매우 작은 습도영역에서 이러한 기구가 발생한다고 하였다.

현 단계에서는 저습도 영역에 걸쳐, 페이스트, 콘크리트 비회복성을 포함한 수축거동을 충분히 설명할 수 있는 이론은 없으나, 일반적으로 복합 메커니즘이 동시에 작용하고 있는 것으로 건조수축기구를 이해한다. 고습도 영역에서는 모세관 장력기구와 분리압기구가 저습도 영역에서는 표면장력기구와 층간수 이동기구가 유력하다고 한다.

3.3.2 건조수축 발생에 영향을 미치는 요인

(1) 콘크리트의 단위수량

콘크리트의 건조수축에 가장 크게 영향을 미치는 요인 중 하나가 단위수량이다. 단위수량이 커질수록 건조에 의해 증발하는 콘크리트중의 자유수가 많아지며, 건조수축은 커진다(그림 15)<sup>15)</sup>. 단위수량과 콘크리트의 건조수축률과의 관계를 나타낸 것으로, 건조수축이 단위수량에 크게 지배되고 있는 것을 나타내고 있다.

(2) 시멘트의 종류 및 분말도

건조수축은 시멘트의 종류에 따라 다르며, 중용열포틀랜드시멘트의 건조수축률이 작고 고로시멘트는 커진다. 보통포틀랜드시멘트는 앞의 두 종류 시멘트의 중간정도이다. 건조수축률의 크기가 시멘트의 종류에 따라 다른 것은 각각의 시멘트를 구성

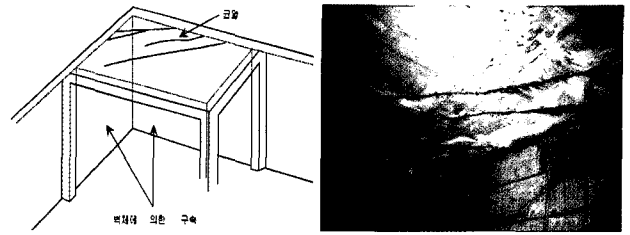


그림 16. 건물 슬래브 하부에 발생한 균열

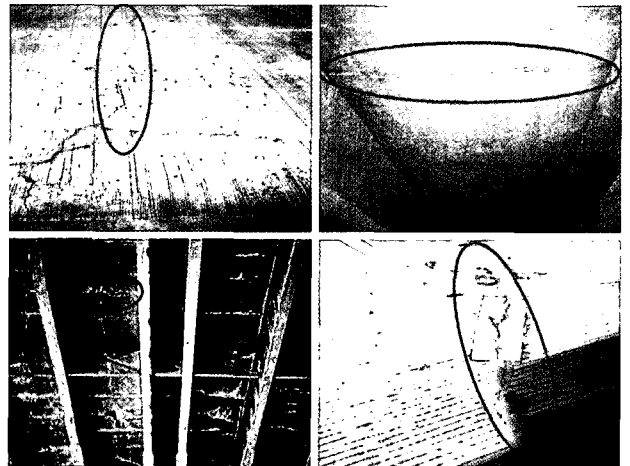


그림 17. 합성형교량 바닥판의 온도와 수축에 의한 균열

하고 있는 화합물의 비율이 다르기 때문이다.

시멘트의 화학성분으로서는 C<sub>3</sub>A 함유량이 많을수록 건조수축은 커지게 된다. 또한, 시멘트에 함유되어 있는 석고양도 관계가 있으며, 석고가 많아질수록 건조수축이 감소한다. 또한 시멘트의 분말도가 커질수록 건조수축은 커진다.

(3) 골재의 성질 및 량

콘크리트의 건조수축은 시멘트페이스트의 수축이 주원인이지만, 콘크리트 전체로서 생각하면 골재의 종류 및 성질이 콘크리트의 건조수축에 영향을 미친다<sup>16)</sup>. 즉, 골재의 탄성계수가 커질수록 콘크리트의 건조수축은 작아지며, 골재의 건조수축이 클수록 콘크리트의 건조수축은 커진다. 또한, 골재양이 많을수록 콘크리트의 건조수축은 작아진다. 단지, 보통골재의 건조수축량은 무시할 정도로 작다.

(4) 습도, 건조기간 및 부재 두께

건조상태로 있는 콘크리트의 수축 속도는 초기재령에서 크며, 시간이 경과함에 따라 점차 작아지지만, 외기 습도 및 평형에 달할 때까지 계속된다. 일반적으로 습도가 높을수록, 건조기간이 짧을수록, 부재두께가 두꺼울수록 콘크리트 건조수축은 작아진다.

<그림 16>은 양단 벽체에 의한 강한 구속으로 슬래브의 하단



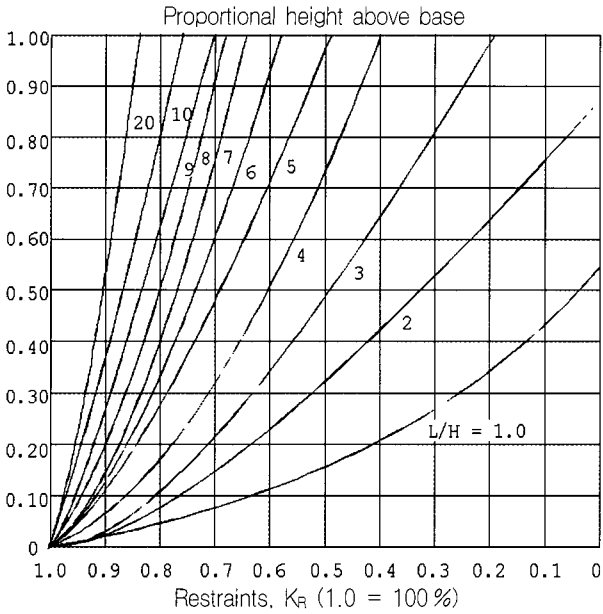
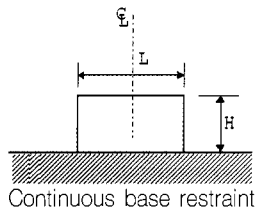


그림 18. L/H비와 부재높이에 따른 중앙선의 구속도

에서 발생한 것으로 추정되는 건조수축 균열의 예를 나타낸 것이다. <그림 17>은 합성형 교량에서 온도 및 건조수축의 복합 작용으로 발생한 바닥판의 횡방향 균열을 보여주고 있다.

3.4 온도 및 수축응력에 영향을 미치는 요인

3.4.1 온도 및 수축 변형량

3.1 ~ 3.3절에서 서술한 것과 같이 동일한 구조물에서 체적 변화에 의한 응력에 영향을 미치는 가장 큰 원인은 체적변화량

이다. 따라서 균열을 최소화하기 위하여 온도 및 수축변형량의 저감을 시도하는 것이 가장 근본적인 대책일 수 있다.

3.4.2 구속도

콘크리트의 온도 및 습도변화는 구조물 자체의 체적변화를 일으키며, 이러한 체적변화가 구속됨으로써 구속응력이 발생하게 된다. 이와 같은 구속은 콘크리트 구조물의 온도 및 수축응력 발생에 큰 영향을 미치는 요인이며, 구속정도에 따라 온도 및 수축 응력의 크기가 결정된다. 구속조건은 이미 언급한 바와 같이 내외부 온도 및 습도구배에 의한 내부구속과 이미 타설된 구조물에 의한 외부구속이 있으며, 일반적으로 콘크리트 구조물은 이 두 가지 구속조건이 복합적으로 영향을 미치게 된다. 외부구속은 타설된 콘크리트와 기존 지반과의 접촉에 의해 발생하고, 두 부재의 탄성계수, 피구속체의 치수 및 접촉면적 등이 주요한 영향인자로 작용한다. 외부구속이 큰 구조물로 <그림 18>과 같은 벽체구조물을 들 수 있고, 이때 벽체의 길이/높이비(L/H 비)가 클수록, 기초면에서 가까울수록 외부구속도는 증가함을 알 수 있다. 이러한 외부구속도를 이용하여 체적변화로 인한 구속응력은 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$f = K_R \cdot \Delta_C \cdot E_C \tag{5}$$

여기서,  $\Delta_C$  : 구속이 없을 때의 체적변화량

$E_C$  : 콘크리트의 탄성계수

구속도는 블록의 L/H비의 영향이 크므로 타설높이가 일정한 경우 길이를 작게 할수록 구속이 완화되는 것을 알 수 있다. <그림 19>는 동일한 벽체구조물을 일체 타설하는 경우와 이음부를 1개소 두는 경우에 대한 구속도의 차이를 보여줌으로써

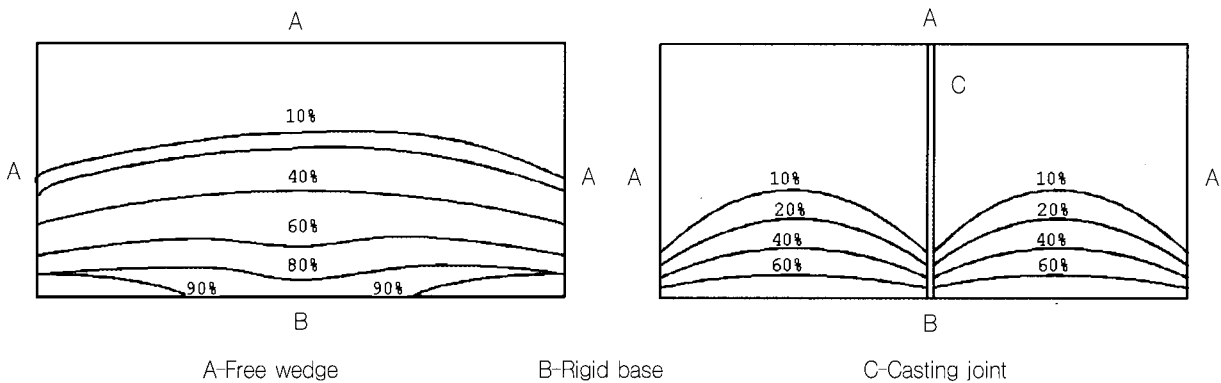


그림 19. 분할에 의한 구속도의 완화

이음부의 설계가 구속조건을 완화시키는데 중요한 역할을 하는 것을 보여주고 있다.

### 3.4.3 콘크리트의 역학적 특성

체적변화에 의한 응력은 콘크리트가 강성을 가지면서 시점부터 유발되고, 응력의 크기를 결정하는데 재령에 따른 탄성계수, 압축강도 및 인장강도 증진 역학적 특성 변화가 고려되어야 한다. 또한 보다 정확한 온도 및 수축응력을 산출하고 균열가능성을 평가하기 위하여 수화가 급격히 진행되는 초기재령 크리프 특성 역시 고려되어야 한다.

## 4. 콘크리트의 체적변화 제어 대책

### 4.1 수화열 제어 대책

#### 4.1.1 재료의 온도를 낮추는 방법

콘크리트의 배합온도를 낮추어 최대온도상승량을 낮추는 방법은 수화열에 의한 균열을 제어하는 데 효과적이다. 따라서 가능한 한 저온의 배합수를 이용하고, 저온의 배합수가 공급되지 않을 경우에는 액체질소나 얼음을 사용하여 수온을 하강시키거나 살수나 강제환풍으로 골재의 온도를 낮추는 방법이 사용될 수 있다. 또한 액체질소를 굳지 않은 콘크리트에 분사하여 콘크리트의 온도를 낮추는 것도 효과적이다. 그러나 액체질소 등을 사용하여 강제적으로 재료의 온도를 낮추는 것은 대규모의 설비투자 및 제반 비용이 따르므로 이러한 방법의 사용은 경제성을 충분히 고려하여 결정하여야 한다. 또한, 배합수의 온도를 낮추기 위해 얼음을 사용할 경우에는 얼음덩어리가 콘크리트내에 남아있지 않도록 주의해야만 한다.

#### 4.1.2 시멘트의 영향

단위시멘트량은 콘크리트의 온도상승량에 가장 큰 영향을 미치므로 배합을 결정할 때 단위시멘트량을 최소화하려는 노력을 하여야 한다. 또한 저열시멘트나 플라이애쉬 등의 혼화제를 이용하여 콘크리트의 내부 발열량을 저감시킬 수 있다.

#### 4.1.3 골재의 영향

콘크리트의 열팽창계수도 수화열에 의한 균열 발생에 큰 영향을 미치며, 열팽창계수가 클 경우 온도균열이 발생하기 쉽다. 이 경우 콘크리트의 구성성분중 골재의 열팽창계수는 시멘트 페이스트의 1/2 정도이며, 콘크리트의 전체 구성비율은 굵은골재가 전체의 70% 정도를 차지하고 있기 때문에 굵은골재는 전체 콘크리트의 열팽창계수를 저감시키는 데 중요한 요소로 작용한다. 따라서 열팽창계수가 작은 종류의 골재를 사용

하는 것이 수화열에 의한 균열을 억제하는 데 효과적이고, 굵은골재의 최대치수는 가능한 한 크게 하는 것이 좋다.

### 4.1.4 적절한 혼화제의 사용

단위수량을 적게 하기위해서 AE감수제, 지연제, 유동화제 등의 혼화제를 사용하는 것은 수화 발열속도의 제어에 유효하므로 수화열을 낮추기 위해 이들을 사용하는 것은 바람직하다. 콘크리트에 압축응력을 도입하기 위해서 팽창제를 사용하는 방법도 고려할 수 있으나, 온도상승량이 높다는 단점이 있으므로 주의하여 사용하여야 한다.

### 4.1.5 파이프 냉각 방법(pipe cooling)

댐과 같은 매스콘크리트의 경우에 수화열에 의한 균열을 방지하기 위한 방법으로 파이프쿨링(pipe cooling)을 통한 사후 냉각 방식이 종종 실시된다. 파이프 쿨링 시스템 설계시에 리프트의 높이, 파이프 간격, 물의 온도, 흐름의 속도, 온도강하 속도의 허용치, 대략적인 냉각기간 등이 고려되어야만 한다. 일반적으로 냉각기간 및 쿨링에 의해 제거되는 열은 구조물에서 발생하는 2차적인 내부온도의 상승이 초기온도상승(primary rise)을 초과하지 않도록 충분히 고려되어야만 한다. 또한, 콘크리트의 급격한 온도변화도 균열을 초래할 수 있으므로 온도의 강하속도를 적절히 제한해야만 한다.

### 4.2 자기수축 제어 대책

자기수축량에 가장 큰 영향을 주는 요인은 물-시멘트비이며 이를 증가시키면 자기 수축을 감소시킬 수 있다. 그러나 물-시멘트비는 강도와 내구성을 충족시켜야 하므로 자기수축량을 조절할 목적으로 물-시멘트비를 높이는 데는 한계가 있다.

자기수축량은 사용 시멘트의 광물 조성에 따라 변화하고,  $C_2S$ 의 함량이 큰 저열 또는 중용열시멘트를 사용하거나,  $C_3A$ 와  $C_4AF$ 의 함량이 낮은 시멘트를 사용하면 자기수축량을 감소시킬 수 있다. 자기충전콘크리트에서 시멘트의 30%를 플라이애쉬로 대체한 경우 자기수축의 상당량을 감소시킨 경우도 있다.

또한 팽창제를 사용하여 건조수축과 자기수축량을 함께 저감시킬 수 있으며, 건조수축 저감제의 혼입은 모세관수의 표면장력을 줄임으로써 자기수축변형을 감소시킬 수 있다. 건조수축 저감제와 팽창제를 함께 사용하여 보다 효율적으로 자기수축을 제어할 수 있다.

이 밖에도 모세관수의 접촉각을 크게 하는 발수성 혼화제를 사용하거나, 높은 탄성계수를 가지는 섬유를 혼입함으로써 자기수축량을 감소시키는 데 기여하는 것으로 알려져 있다.

### 4.3 건조수축 저감 대책

3.3.2절에서 서술한 건조수축 영향요인 분석에서와 같이 건조수축 제어대책은 크게 콘크리트의 배합을 조절하는 방법과 시공적 대책으로 나눌 수 있으며, 이를 정리하면 다음과 같다.

- ① 단위수량을 가능한 적게 한다.
- ② 수축이 작은 시멘트를 사용한다.
- ③ 밀도, 흡수율, 밀도 등이 소요의 품질을 가지며, 골재자체의 건조수축률이 작은 것을 사용한다.
- ④ 수축저감제 및 팽창재 등을 적절히 사용하여 건조수축량을 작게 한다.
- ⑤ 시공결함을 발생하지 않도록 균일한 콘크리트를 타설한다.
- ⑥ 타설 후는 습윤양생을 실시하여 급격한 온도변화가 발생하지 않도록 하며, 직사광선 및 바람이 직접 닿지 않도록 충분히 양생한다.
- ⑦ 거푸집은 가능한 오랫동안 존치한다.

## 5. 맺음말

본고에서는 콘크리트의 타설 후 수일간 급격한 체적변화를 일으키는 요인으로 온도변형, 자기수축 및 건조수축을 대상으로 체적변화 발생 기구 및 영향을 미치는 요인에 대하여 검토하고 이러한 체적변화를 최소화하기 위한 대책에 대하여 기술하였다.

콘크리트의 물성이 급격하게 변화하는 초기재령 콘크리트는 자기수축, 건조수축 및 온도변형과 같은 복잡한 체적변화를 수반하여 빠른 속도로 인장응력을 유발하나, 상대적으로 낮은 강도 및 강성을 가지므로 균열 유발하게 된다. 콘크리트 구조물의 초기균열은 내하력, 내구성, 수밀성 및 미관 등의 성능을 저하시켜 구조물의 사용수명을 단축시키는 가장 큰 원인이 되고 있기 때문에 콘크리트 제조 및 타설시 이러한 요인에 대한 검토가 반드시 필요하다. 따라서 새로운 고성능 및 고기능성 콘크리트를 적용한 콘크리트 구조물의 안전성 및 사용성을 확보하기 위해서는 콘크리트의 체적변화가 발생하는 메커니즘의 정확한 구명 및 이를 통한 균열발생 예측 기술을 지속적으로 개발하여 체적변화를 최소화 할 수 있는 합리적인 방안이 우선적으로 수립되어야 한다. □

## 참고문헌

1. Cha, S. W., "Modeling of Hydration Process and Analysis

of Thermal and Hygral Stresses in Hardening Concrete," PhD dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea, 1999.

2. Tazawa, E. and Miyazawa, S., "Autogenous shrinkage of concrete and its importance in concrete technology," 5th International RILEM Symposium on Creep and Shrinkage of Concrete, Edited by Bazant, Z. P. and Carol, I., Barcelona, Chapman and Hall, 1993, pp.159~168.
3. Bazant, Z. P., "Current Status and Advances in the Theory of Creep and Interaction with Fracture," 5th International RILEM Symposium on Creep and Shrinkage of Concrete, Barcelona, 1993, pp.291~308.
4. Baroghel - Bouny, V., "Characterization of Cement Pastes and Concretes - Methods, Analysis, Interpretations," PhD dissertation, Laboratoire Central des Fonts et Chaussees, France, 1994(in French).
5. Alvaredo, A. M., "Drying Shrinkage and Crack Formation," PhD dissertation, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Swiss, 1994.
6. 笠正哲朗, 田澤榮一, "硬化收縮の測定によるセメントの水和度の簡易推定法", 廣島大學工學研究報告, Vol.37, No.1, 1988, pp.23~29.
7. 田澤榮一, 宮澤伸吾, "セメント系材料の自己收縮に及ぼす結合材および配合の影響", 土木學會論文集, No.502, Vol.24, 1994, pp.43~52.
8. Dilger, W.H., C. Wang, "Shrinkage and Creep of High-Performance Concrete(HPC)-A Critical Review," Adam Neville Symposium Honoring, 1995, pp.59~84.
9. 宮澤伸吾, 田澤榮一, "コンクリートの自己收縮の豫測式に関する研究", 第51回セメント技術大會講演要旨, 1997, pp.286~287.
10. 田澤榮一, 宮澤伸吾, 佐藤 剛, "自己收縮に及ぼすセメントの化學組成の影響", セメント・コンクリート論文集, No.47, 1993, 12, pp.528~533.
11. Powers, T. C., "Physical Properties of Cement Paste," Proc. Symp. Chem. Cement, Washington, 2, 1960, pp.577~613.
12. Hansen, T. C., "Drying Shrinkage of Concrete due to Capillary Action, RILEM Symposium on Physical and Chemical Causes of Creep and Shrinkage of Concrete," SESSION 3, Munich, 1968, 4, pp.7~9.
13. 近藤實, "硬化コンクリート中の水の3形態と乾燥收縮, 強さ, 動弾性係數の關係", セメント技術年報, No.11, 1957, pp.247~255.
14. Feldman, R. F. and Sereda, P. J., "A New Model for Hydrated Portland Cement and Its Practical Implication," Eng. J., 53, No.8/9, 1970, pp.53~59.
15. 近藤泰夫譯, "コンクリートマニュアル", ホーム社, 1966年版.
16. 馬場明生譯, "コンクリートの收縮に對する骨材の拘束の影響", コンクリート工學, Vol.13, 1975.