

## 콘크리트 구조물의 건조수축과 크리프 예측기술

Estimation Method of Drying Shrinkage and Creep in Concrete Structures



김성욱\*  
Sung-Wook Kim



고경택\*\*  
Kyoung-Taek Koh



송영철\*\*\*  
Young-Chul Song



박효선\*\*\*\*  
Hyo-Seon Park

### 1. 머리말

외력작용이 없는 상태에서의 콘크리트 경화체의 수축형태는 크게 자기수축(autogeneous shrinkage), 건조수축(drying shrinkage) 및 탄산화에 의한 수축(carbonated shrinkage) 등이 있다. 이 중에서 보통콘크리트의 체적변화에 가장 크게 영향을 미치는 것은 건조수축 현상이다. 반면 최근 고성능 및 초고성능 콘크리트가 등장하면서 자기수축에 따른 콘크리트의 체적 변화가 콘크리트 구조물의 역학적 거동에 많은 영향을 미치는 것으로 알려지면서 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

한편, 외력 작용에 의한 콘크리트 체적변화의 대표적인 현상으로 크리프(creep)를 들 수 있다. 크리프란 지속하중을 받는 재료 및 부재가 재하 시 탄성변형 발생 이후에도 추가하중의 작용 없이 시간이 경과하면서 변형률이 증가하는 물리적 현상을 말한다. 공극이 적고 균질한 재료로 구성된 철, 플라스틱, 암석 등과 같은 재료도 크리프 현상을 보이지만 그 발생량은 작다. 그러나 콘크리트는 시멘트, 골재, 물, 혼화재료 등, 여러 구성 재료로 이루어진 복합체이며 필연적으로 여러 가지 크기와 형태의 공극을 지니기 때문에 크리프의 양과 특성의 변화가 다양하게 나타난다.

크리프는 콘크리트의 장기거동을 대표적으로 나타내는 인자로서, 과거에는 구조물의 규모가 작고 부재의 단면적이 크며 비교적 형상이 단순했기 때문에 크리프의 영향에 따른 구조물의 거동을 고려하지 않더라도 안전성이나 사용성에 별 문제가 없었다. 그러나 점차 콘크리트 구조물이 대형화 되고 단면이 복잡해지며 다양한 시공법이 시도되면서 시간 의존 변형(time-defendant deformation)이 콘크리트 구조물의 시공관리 및

구조계의 변화예측이 중요한 요소가 되었다.

본고에서는 콘크리트 구조물의 시간 의존적 변형의 가장 대표적인 건조수축 및 크리프의 발생 메커니즘과 각국의 표준식을 소개하고, 국내에서 최근에 수행된 크리프와 관련된 연구를 통하여 제안된 예측 모델을 소개하며, 단기 실험값을 근거로 표준식의 적용성을 검토한 예제를 수록하여 콘크리트의 건조수축과 크리프에 관한 이해를 돕고자 한다.

### 2. 건조수축 및 크리프 발생 기구

굳은 콘크리트의 구성 형태는 결합재인 시멘트와 혼화재가 물과 반응하여 생성된 경화 페이스트, 충전재인 골재 및 기타 공극으로 분류할 수 있다. 이 중에서 건조수축 및 크리프 현상과 가장 높은 관련을 가지는 것은 시멘트페이스트 수화물과 공극구조라고 할 수 있다. 경화된 포틀랜드시멘트 페이스트의 상세구조는 매우 복잡하다. 이것은 본질적으로 하나이지만 실제로는 이질 구조의 여러 성질과 특성을 지닌 복합체이다. 이 경화 시멘트의 특성을 알기 위해서는 각각의 구성요소에 대하여 먼저 조직의 특성을 파악하는 것이 중요하다.

규산칼슘수화물의 조직구조는 여러 학자들에 의하여 다양한 모델이 제시되어 있다. 그러나 이 모델들은 시멘트겔이 구겨진 모양의 박판이 겹쳐져 있는 형상이고 공극률(porosity)이 28% 정도이며, 공극의 평균 직경이 15Å 정도인 견고한 물질이라는 것에는 대체로 동의하고 있다. 규산칼슘수화물의 구조와 공극을 포함하는 콘크리트 경화체의 구조가 건조수축 및 크리프에 미치는 영향을 살펴보면 다음과 같다.

#### 2.1 수화물의 조직구조

##### 2.1.1 Powers의 모델<sup>1)</sup>

Powers와 Brownyard에 의해 제시된 Powers 모델은 시멘트페이스트의 미세구조에 대해 증기흡착등온선법을 이용하여

\* 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 수석연구원  
swkim@kict.re.kr

\*\* 정회원, 한국건설기술연구원 구조연구부 선임연구원

\*\*\* 정회원, 한국전력공사전력연구원 구조연구실 책임연구원

\*\*\*\* 정회원, 연세대학교 건축공학과 부교수

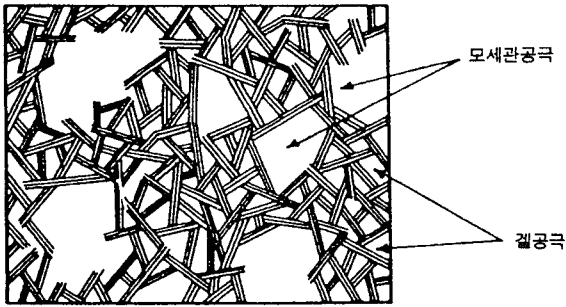


그림 1. Powers 모델의 시멘트겔 구조

제안된 최초의 모델이다. Powers 모델의 시멘트겔 구조에 대한 개략도는 <그림 1>과 같다.

Powers 모델에 의하면 시멘트겔은 콜로이드상의 입자로서 공극률이 약 28%이며, 이 공극은 겔공극(gel pore)이라 부르며 평균직경은 15Å 정도이다. 또한 겔입자와 겔입자간에는 겔공극보다 큰 공극이 존재하며 이를 모세관공극이라 부른다. 수화한 시멘트겔에는 수화하여 고체의 일부분이 된 화학적 결합수(chemically-bond water)가 존재하며 이는 결합수(combined water) 또는 비증발수(non-evaporable water)로도 불린다. 또한 겔입자 표면의 표면력에 의해 흡착된 겔수(gel water)와 표면력의 범위를 넘어서 모세관공극 중에 존재하는 자유수인 모세관수(capillary water)를 증발수(evaporable water)로 구분한다.

이 모델에서는 건조수축과 크리프에 큰 영향을 미치는 것은 모세관공극으로서 비교적 공극이 크고 공극의 체적이 크다. 한편 겔 공극은 건조수축에는 영향을 미치지 않지만 크리프와는 어느 정도 연관을 가지는 것으로 설정하고 있다.

### 2.1.2 Ishai의 모델<sup>2)</sup>

Ishai의 모델은 페이스트의 건조수축 또는 팽창과 크리프를 설명하기 위해 고안된 것으로 Powers의 모델을 기초로 하고 있으나 겔 입자의 상세한 형태를 제시하였으며 굳은 페이스트 내부의 물을 네 가지로 분류하였다. Ishai 모델의 개념도는 <그림 2>와 같다.

Ishai 모델에서 제시하는 증발수의 4가지 유형은, ① 고체의 표면으로부터 10~20Å 이상 떨어져 있어 표면력이 미치지 않는 거리에 있는 겔 및 모세관공극 내의 공극수 ② 결정표면으로부터 4~8Å 이내인 1~2 분자층 두께의 흡착수 ③ 인접한 결정의 거리가 8Å 이내인 좁은 공간에 갇혀 있는 결정간수 ④ 규산칼슘수화물 결정층 내에 있는 결정내수 등이다.

### 2.1.3 Feldman과 Sereda의 모델<sup>3)</sup>

Feldman과 Sereda의 모델은 겔입자 내부의 충전수에 대한 중요성을 강조했으며 겔입자의 형태는 2~4 분자층 두께의 뒤

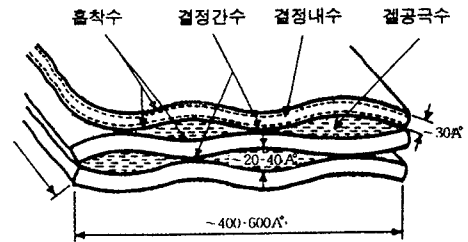


그림 2. Ishai 모델의 시멘트겔 구조

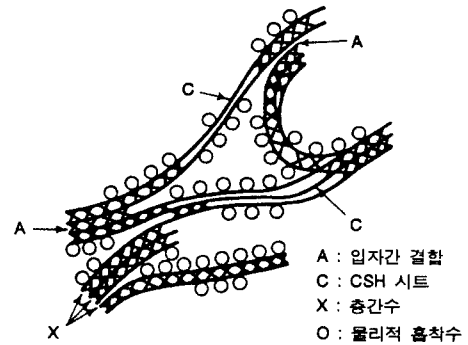


그림 3. Feldman과 Sereda 모델의 시멘트겔 구조

섞인 시트모양이라 하였다. 제안된 시멘트겔의 미세구조는 <그림 3>과 같다.

이 모델에 의하면 시멘트겔에는 CSH 시트 사이의 충전수와 겔표면에 흡착되어 있는 물리적 흡착수가 있으며 겔입자간의 공극에는 온도 및 증기압의 상태에 따라 물의 존재 유무가 정해진다.

## 2.2 모세관공극

모세관공극은 직경이 26Å보다 큰 공극을 일컬으며 모세관공극에 들어 있는 물은 오목 또는 볼록한 형태의 표면을 지니며 모세효과를 발휘한다. IUPAC의 분류<sup>4)</sup>에 따르면 직경이 26Å~500Å인 메소공극(meso-pores)과 500Å보다 큰 매크로공극(macropores)으로 분류된다. 모세관에서 매니스커스(meniscus)의 발생으로 인한 수리 정역학적 응력은 압력의 정도가 직경의 크기에 반비례하기 때문에 메소공극의 작은 직경을 갖는 정도에 따라 결정된다.

이들 공극 중에서 비교적 큰 메소공극과 매크로공극은 콘크리트의 크리프와 건조수축에는 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 알려지고 있다. 모세관공극은 콘크리트의 건조수축과 긴밀한 연관이 있으며, 모세관공극 속에 있는 모세관수의 증발에 따라 콘크리트의 수축현상은 가속화된다.

## 2.3 건조수축 및 크리프 발생 이론

콘크리트에서 건조수축과 크리프의 발생은 현상학적으로 한 가지 이상의 요인으로 구성된 복합현상으로 볼 수 있으며 그 현상에 관련된 이론은 아래와 같다.

### 2.3.1 역학적 변형 이론 (Mechanical Deformation Theory)

Freyssinet<sup>5)</sup>는 콘크리트에서 하중재하에 의하여 내부응력이 발생하고 이에 따라 콘크리트가 거동하는 것은 시멘트페이스트의 모세관 구조 변화의 결과라고 주장했다. 그는 압축응력 하에서 모세관의 형상이 변화하고 모세관수의 매니스커스는 모세관의 직경이 큰 곳을 향하여 바깥으로 이동하며 그로 인하여 모세관수 내부의 인력이 감소한다고 가정했다. 이것은 모세관공극 내에서 일정한 응력을 지니고 있던 모세관수가 외력으로 인해 직경이 큰 모세관으로 옮겨감으로써 모세관수의 응력이 감소하여 모세관수가 감당하던 응력이 페이스트 내의 고체상(solid phase)에 재분배되어 콘크리트에 변형이 발생하며 하중재하 시 곧바로 발생하는 것이 아니라 서서히 시간차를 두고 발생한다고 주장했다.

위와 같은 변형은 습도 차에 의한 증발이 이루어지는 동안 모세관수에는 인장력이 발생하고 고체상에서의 압축응력은 증가하여 변형이 발생한다. 이 변화과정은 장기간에 걸쳐 일어나며 이와 같은 변형을 크리프라고 하며 실제로 이것은 지연된 탄성변형의 한 현상이라고 Freyssinet는 주장했다.

### 2.3.2 소성이론 (Plastic Theories)

크리프의 소성이론은 Vogt<sup>6)</sup>에 의하여 주장되었는데 그에 따르면 콘크리트에서 크리프는 시멘트 화합물들이 시간이 경과하면서 결정층(crystal lattice)을 형성하고 하중이 재하될 때 이 평면을 따라 미끄러져 가는 결과이다. 초기재령에서는 결정층 사이의 유동성이 높아 크리프 발생량이 많고 장기재령으로 갈수록 유동성은 감소하고 층과 층사이의 마찰력이 증가하여 크리프 발생량이 줄어들게 된다. 이것은 금속의 소성흐름(plastic flow)과 유사하며 콘크리트의 변형 모드는 주철 또는 취성이 높은 철과 유사하다는 것을 관찰했다. 또한 소성변형은 결정층에서 최대 전단응력 면을 따라 미끄러짐이 발생한 결과이다. 그러나 그러한 환경 하에서는 체적의 변화가 일어나지 않는다. 이 이론의 부적합성이 바로 이점에 있다. 즉 실제로 크리프가 일어나면 체적이 감소하는 변화가 분명히 현상적으로 발생하기 때문이다.

### 2.3.3 점성 및 점탄성 흐름이론(Viscous and Viscoelastic Flow Theories)

크리프 기구로서 점성흐름(viscous flow)은 Thomas<sup>7)</sup>에 의해서 처음으로 주장되었다. 그는 콘크리트는 접착력이 있는 부분(cementitious)과 접착력이 없는 골재의 두 부분으로 구성되었다고 가정했으며 접착력이 있는 부분은 하중이 가해지면 점성적 형태로 거동을 하고 골재부분은 하중이 가해져도 어떠한 흐름을 보이지 않는다고 주장했다.

콘크리트에 하중이 가해지면 시멘트페이스트의 흐름은 골재로 인하여 저항을 받는다. 그리고 저항의 결과로 골재는 응력이 증가하고 상대적으로 시멘트페이스트는 응력이 감소하게 된다. 이러한 응력의 전이과정은 초기에는 상대적으로 빠르게 진행되다가 시간이 경과하면서 서서히 진행되기 때문에 크리프의 증가율은 점차 감소하게 된다. 만약 흐름이 점성적이라면 수화된 페이스트 내에서 겔이 공극 속으로 이동할 것이다. 이 겔의 이동이 모세관공극으로 흐르는 지 겔공극률 자체의 감소인 지는 분명히 증명된 바 없으나 겔공극의 감소라는 견해가 지배적이다.

### 2.3.4 지연 탄성이론<sup>8)</sup> (Delayed Elasticity Theories)

이 이론에서는 경화된 콘크리트를 골재와 탄성적인 골격구조, 점성유체로 구성된 겔 체계로 분류 고려하였다. 이 경우 겔입자가 고체의 골격구조에 상당하고 겔수 또는 모세관수가 점성 유체가 된다. 따라서 물체에 지속하중이 가해지면 점성유체가 먼저 그 하중을 흡수하고 서서히 겔의 골격 구조로 하중이 이동된다. 즉 골격 구조의 탄성변형이 그 공극에 존재한 점성유체에 의하여 지연될 수 있다. 이와 같이 하중이 가해지고 난 뒤 지연되어 나타난 변형을 크리프변형이라고 하는데 이것을 지연 탄성변형이라고 한다.

### 2.3.5 미세균열 변형 이론(Micro-cracking Deformation Theories)

콘크리트의 응력변형 관계는 저응력 상태에서도 비선형성을 나타내고 있는데 이것은 회복 불가능한 크리프에 기인한 것으로 여겨진다. 콘크리트에 지속하중이 가해져 콘크리트 중의 가장 약한 부분, 즉 골재와 시멘트 페이스트와의 경계면에 발생한 미세한 점착균열(bond crack)에 의한 비가역적인 변형을 크리프로 생각하는 것이 이 이론의 주된 내용으로서 점착균열이 직접적인 파괴 원인이 되지는 않으나 지속하중이 큰 경우에는 이 균열이 발달하여 모르타르 균열로 되어 전체의 파괴에 도달하는데 이것을 크리프파괴라고 한다.

Mayers<sup>9)</sup>에 의하면 크리프에서 이 미세균열에 의한 변형이 차지하는 경우는 10 ~ 20% 정도이다. 그러나 시멘트페이스트만으로 된 것에서도 하중을 재하하면 크리프가 발생하는 것으로 보아 이 이론으로 전체의 크리프를 설명하는 것은 곤란하다.

2.3.6 삼출 이론 (Seepage Theory)

시멘트겔 내에 존재하는 겔수가 콘크리트에 재하시킨 지속하중에 의해 압축되고, 또 외기와외 습도조건에 의해 증발됨에 따라 시멘트겔이 수축하게 되어 변형을 일으키게 되는데, 이는 크리프와 건조수축에 의한 것이고, 이 이론을 'Seepage Theory' 또는 'Gel Theory'라고 한다. 삼출 이론에 의하면 콘크리트의 건조수축과 크리프는 다른 원인에 의한 동일한 현상으로 간주된다. 그래서 콘크리트에 지속하중이 재하되면 탄성적인 골조 중의 겔공극으로부터 점성유체(gel water)가 압출되고 그것에 의하여 공극 내의 지지압력이 감소하고 부피 변화가 일어난다.

공극으로부터 압출된 겔수는 콘크리트를 관통하고 있는 모세관을 통하여 외부로 확산한다. 이 겔수의 외부로의 확산량은 모세관에 물이 흐를 때의 마찰저항에 좌우된다. 따라서 조건이 동일하다면 전 마찰저항은 콘크리트 내부와 외부와의 습도 차이에 의해 좌우되고, 그 차이가 큰 경우 물은 모세관을 흘러가게 된다. 그러므로 콘크리트의 크리프 크기는 지속하중의 크기와 모세관에 물이 흐를 때의 마찰저항(습도 높이차)과의 함수로 표시할 수 있다. 삼출 효과에 기인한 크리프는 지속하중이 제거되어도 비회복성이 존재하기 때문에 완전히 회복되지는 않는다. 이러한 비회복성이 존재하는 이유를 Jordaan<sup>10)</sup>은 "시멘트겔의 위치에너지가 지속하중의 재하와 같은 활성화 에너지를 받음에 따라, 여러 값의 에너지 장벽(energy barrier)을 넘게 되어 겔수가 압출되고 콘크리트는 크리프를 일으킨다"고 설명했다. 그리고 이 삼출 이론은 압축 크리프를 설명하기 위해서는 지극히 유력한 것으로 고려되고 있다.

3. 크리프 및 건조수축 예측 표준식

콘크리트 구조물에서 건조수축과 크리프는 구조물의 시간의존적인 장기거동을 예측하기 위한 중요한 지수(index)가 된다. 실제 콘크리트 구조물에서 발생하는 건조수축량과 크리프량을 모두 시험에 의하여 구하기는 어렵다. 따라서 각국에서는 선행 실험 연구결과를 바탕으로 하는 건조수축 및 크리프 예측 표준식을 적용하고 있다. 이들 표준식 중에서 대표적인 것으로 ACI-209식, CEB-FIP식, AASHTO LRFD Design 식 등을 들 수 있으며, 국내 콘크리트 구조설계기준(이하, KCI식)에서는 콘크리트의 크리프 예측식을 CEB-FIP 1990년 Model Code 규정을 따르고 있다. 이는 현재 국내에서 주로 크리프를 고려하여 설계하고 있는 교량구조물의 대부분이 CEB-FIP 설계 기준을 따르고 있기 때문이다. 한편 시공 단계별 축소 현상(shortening)을 고려하는 건축구조물에서는 일부 ACI 318-95

를 근간으로 하는 규정을 따라 크리프를 고려하기도 한다.

콘크리트 구조물의 건조수축 및 크리프 특성을 예측하는 대표적인 표준식과 그 적용상 특징을 간략히 소개하면 다음과 같으며, 본고에서는 지면 상 각 표준식의 전체 기호에 대한 자세한 설명은 생략하고 예측식과 중요한 기호에 대한 개략적인 설명만 하기로 한다.

3.1 CEB-FIP Model Code 90<sup>11)</sup>

CEB-FIP 크리프 예측식은 Rüschi의 연구성과를 바탕으로 구성된 것으로 크리프를 회복성 크리프(recoverable)와 비회복성(irrecoverable flow)으로 나누어 고려하였다. 1970년 처음 제정된 이후 1978, 1990년 개정되어 사용하고 있다.

CEB-FIP 예측식은 다른 예측식들과 달리 콘크리트의 재령에 따른 강도변화를 28일 재령 값을 기준으로 시간에 따른 변화 함수로 표현하여 크리프의 예측인자로 적용하고 있다. 따라서 이 예측식은 재하시 재령의 변화에 따른 크리프 변동률의 적응성이 뛰어나다.

크리프계수는 다음식에 의해 계산된다.

$$\phi(t, t') = \phi_o \cdot \beta_c(t - t') \tag{1}$$

여기서,  $\phi_o$  : 기준 크리프계수

$\beta_c$  : 크리프의 경시 변화를 나타내는 계수

$$\phi_o = \phi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t') \tag{2}$$

여기서,  $\phi_{RH}$  : 환경의 습도 및 부재의 평균두께

( $h_{th} = 2A_c/u$ )에 따라 결정되는 계수

$\beta(f_{cm})$  : 콘크리트의 28일 압축강도  $f_{cm}$  (MPa)

$\beta(t')$  : 재하시 재령에 의해 결정되는 계수

$$\beta(t-t') = \left[ \frac{(t-t')}{\beta_H + (t-t')} \right]^{0.3} \tag{3}$$

여기서,  $\beta_H$ 는 습도 및 평균두께( $h_{th}$ )에 의해 결정되는 계수, 시멘트의 종류가 다르다면 같은 재령이라도 수화도가 다르다. 이런 영향을 고려해서 재하시재령  $t'$ 를 아래와 같이 보정한다.

$$t' = t_e \cdot T \left[ \frac{9}{2 + t_e \cdot T^{1.2}} + 1 \right]^a \geq 0.5(\text{일}) \tag{4}$$

여기서,  $t_e \cdot T$ : 식(4)에 표현되는 유효재령 (일)

$a$ : 시멘트 종류 계수(0(1종, 5종), -1(2종), 1(3종))

$$t_e \cdot T = \sum \exp \left[ - \left( \frac{4,000}{273 + T(\Delta t)} \cdot 13.65 \right) \Delta t \right] \quad \text{식(5)}$$

여기서,  $\Delta t$ 는 온도가  $T(\Delta t)$ (°C)로 있는 기간의 일수

### 3.2 ACI-209 (92)<sup>12)</sup>

Branson의 연구결과를 토대로 1978년 제정되었다가 추가적인 실험 연구 결과를 바탕으로 최근 1997년 개정된 예측식을 적용하고 있다. 이 예측식은 극한크리프계수와 극한건조수축 변형률을 설정하고 콘크리트 구성재료 및 구조물 조건에 따라 보정계수를 곱하고 이를 재하시 재령과 재하기간에 대한 시간함수로 크리프계수 및 건조수축량을 예측한다. 한편, ACI 크리프 예측식은 극한크리프(ultimate creep)를 미리 낮은 값으로 설정하고 보정계수를 각각의 영향인자별로 기본값 '1'에서 가감하는 함수로 이루어져 있다. 따라서 예측되는 크리프 값은 다소 낮게 평가되는 경향이 있다.

크리프계수는 식(6)으로 나타내며 건조수축은 양생 조건 별로 식(7)과 식(8)로 나타낸다.

$$v_t = \frac{t^{0.60}}{10 + t^{0.60}} v_u \quad \text{식(6)}$$

$$(\epsilon_{sh})_t = \frac{t}{35 + t} (\epsilon_{sh})_u \quad (7\text{일간 습윤양생한 콘크리트}) \quad \text{식(7)}$$

$$(\epsilon_{sh})_t = \frac{t}{55 + t} (\epsilon_{sh})_u \quad (1\sim 3\text{일간 증기 양생한 콘크리트}) \quad \text{식(8)}$$

여기서,  $v_u = 2.35 r_c$ : 극한크리프계수

$(\epsilon_{sh})_u = 780 r_{sh} \times 10^{-6} \text{in./in. (m/m)}$ : 극한건조수축 변형률

$$\gamma_c = \gamma_{ia} \cdot \gamma_\lambda \cdot (\gamma_h \text{ 또는 } \gamma_{vs}) \cdot \gamma_s \cdot \gamma_\phi \cdot \gamma_\alpha \quad \text{식(9)}$$

여기서,  $\gamma_c$ : 크리프 보정계수

$\gamma_{ia}$ : 재하시 재령에 따른 보정계수

$\gamma_\lambda$ : 환경의 습도조건에 따른 보정계수

$\gamma_h$ : 공시체의 평균 부재 두께에 따른 보정계수

$\gamma_{vs}$ : 공시체의 체적/표면적비에 따른 보정계수

$\gamma_s$ : 슬럼프에 따른 보정계수

$\gamma_\phi$ : 잔골재율에 따른 보정계수

$\gamma_\alpha$ : 공기량에 따른 보정계수

건조수축 보정계수( $\gamma_{sh}$ )는 크리프 보정계수에서 크리프 관련 보정계수를 제외하고 일부가 적용되며, 각 보정계수에 관련된 수식은 ACI-209R에 수록되어 있다.

### 3.3 AASHTO LRFD Bridge Design Specification<sup>13)</sup>

이 규준식은 ACI-209를 기본으로 하며 개략적으로 사용하던 극한크리프계수값(2~3)을 사용환경 및 시간변화에 대한 매개변수를 도입하여 크리프의 변화를 표현하는 예측식이다.

$$\phi(t, t_i) = 3.5 k_c k_f (1.58 - \frac{H}{120}) t_i^{-0.118} \frac{(t - t_i)^{0.6}}{10.0 + (t - t_i)^{0.6}} \quad \text{식(10)}$$

여기서,  $\phi(t, t_i)$ : 크리프계수

$H$ : 상대습도(%)

$k_c$ : 콘크리트 체적과 표면적의 비에 따른 보정계수

$k_f$ : 콘크리트 강도에 따른 보정계수

$$= 629 / (426 + \sigma_{ck})$$

$t$ : 콘크리트 재령(일)

이 예측식은  $k_c, k_f$  보정계수를 실험적으로 구성한 차트를 이용하여 해당 보정계수를 찾으려 되어 있는 특징이 있다. 따라서 이 예측식을 이용하여 수치해석적 장기거동 해석을 수행하기는 무리가 있다. 한편, 건조수축 예측식은 식(11)과 같다.

$$\epsilon_{sh} = -k_s k_h \left( \frac{t}{35.0 + t} \right) 0.51 \times 10^{-3} \quad \text{식(11)}$$

여기서,  $t$ : drying time(일)

$k_s$ : size factor

$k_h$ : humidity factor

AASHTO Specification에 의한 각 보정계수는 미국 현지

조건에 적합하게 도표로 구성되어 있어서 국내 콘크리트에 적용하기는 다소 무리가 있는 것으로 판단된다.

### 3.4 JSCE 예측식<sup>14)</sup>

1996년 일본의 콘크리트 표준시방서에 규정된 크리프 예측식으로 크리프를 기본 크리프와 건조 크리프로 나누어 적용하며 각각의 영향인자를 지수의 곱의 함수로써 극한 기본 크리프 및 극한 건조 크리프로 표현한다. 기본 크리프와 건조 크리프를 합한 총 크리프를 시간에 따른 함수로 나타내어 크리프를 예측하고 있다.

크리프 변형률은 기본 크리프와 건조 크리프로 나누고 다음과 같이 나타냈다.

$$\epsilon'_{cc}(t, t', t_o) = \epsilon'_{cr} \cdot [1 - \exp\{-0.09(t - t')^{0.6}\}]$$

식(12)

$$\epsilon'_{cr} = \epsilon'_{bc} + \epsilon'_{dc}$$

식(13)

$$\epsilon'_{bc} = 15(c + w)^2(w/c)^{2.4}(\ln t')^{-0.67}$$

식(14)

$$\epsilon'_{dc} = 4,500(w/c)^{4.2}(c + w)^{1.4}(\ln(V/S)/10)^{-2.2} (1 - RH/100)^{0.36}(t_o)^{-0.3}$$

식(15)

여기서,  $\epsilon'_{cc}(t, t', t_o)$  : 단위응력당 크리프 변형률 ( $\times 10^{-10}/(N/mm^2)$ )

$\epsilon'_{cr}$  : 단위응력당 극한 크리프( $\times 10^{-10}/(N/mm^2)$ )

$\epsilon'_{bc}$  : 단위응력당 극한 기본 크리프 ( $\times 10^{-10}/(N/mm^2)$ )

$\epsilon'_{dc}$  : 단위응력당 극한 건조 크리프 ( $\times 10^{-10}/(N/mm^2)$ )

### 3.5 크리프 표준식의 비교 평가

ACI, CEB-FIP, AASHTO 및 JSCE의 표준식에 의한 예측값들을 간략히 비교하면 <그림 4>와 같다. 적용한 콘크리트의 강도 수준은 약 40 MPa 정도이며,  $w/c$ 는 약 0.35 ~ 0.40 이다.

<그림 4>에서 보는 바와 같이 동일한 콘크리트에 대하여 예측된 크리프계수 값은 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 각

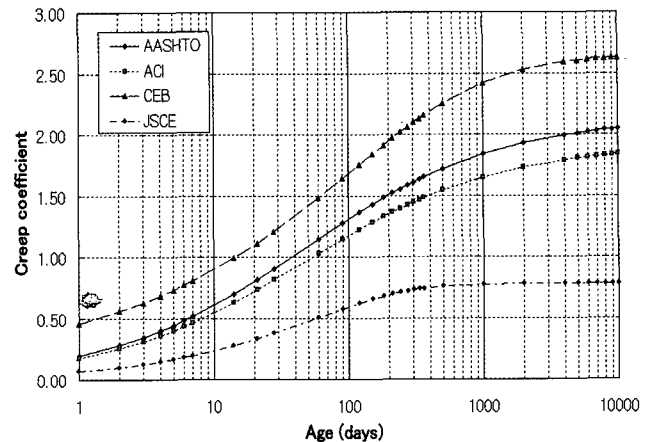


그림 4. 각 표준식의 크리프계수 예측 비교

표준식의 예측치에 대한 비교는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) CEB-FIP 예측값은 비교적 높게 나타나며 이 예측식은 콘크리트의 경시변화에 따른 역학적 특성치인 강도 및 탄성계수값의 변화를 충분히 반영하는 예측식이다.
- (2) JSCE 표준식은 크리프계수 예측값의 변동은 적지만 현저하게 낮은 예측값을 나타낸다.
- (3) ACI식을 근거로 하는 AASHTO 예측식은 ACI와 유사한 값을 나타낸다.
- (4) 유사한 배합조건을 갖는 콘크리트에 대한 크리프계수 예측은 각 표준식 별로 상당한 차이가 있다.

한편, 필자가 크리프 실험을 수행한 경험에 의하면 KCI식에서 인용한 CEB-FIP Model Code에 제시된 크리프 예측식이 국내에서 제조된 콘크리트의 크리프 특성을 근사하게 표현하는 것으로 판단된다.

### 4. 단기시험에 의한 수정 크리프 예측 제안식

콘크리트의 크리프는 KCI식과 기타 외국의 표준식이 제시되어 있으나 이 표준식이 현장 콘크리트의 크리프 특성을 정확히 반영한다고 하기는 어렵다. 보다 정확한 예측을 위해서는 1년 이상의 장기 실험을 수행하는 것이 바람직하나 실제 콘크리트 공사현장에서 실험을 통하여 콘크리트의 크리프를 예측하기는 공정 상 무리가 따른다. 기존 콘크리트구조설계기준에서 제시한 크리프 예측식을 보완하기 위하여 28일간의 단기 실험으로 크리프 예측에 대한 정확성 높이는 방안이 시도되었다. 이를 간단히 소개하면 다음과 같다.

크리프 예측모델인 식(16)의 전 변형률( $\epsilon_{cr}$ )은 식(17)과 같이 순간 탄성 변형률과 크리프 변형률의 합으로 나타낼 수 있으며, 크리프 변형률은 변수( $C$ )와 그에 대한 시간함수로 나눌 수 있다.

$$\epsilon_{cr}(t, t') = f_c(t') \left[ \frac{1}{E_{ci}(t')} + \frac{\phi(t, t')}{E_{ci}} \right] \quad \text{식(16)}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{cr}(t, t') &= \left\{ \frac{f_c(t')}{E_{ci}(t')} \right\} + \left\{ \phi(t, t') \frac{f_c(t')}{E_{ci}} \right\} \\ &= \left\{ \frac{f_c(t')}{E_{ci}(t')} \right\} + \left\{ \phi_0 \beta_c(t-t') \frac{f_c(t')}{E_{ci}} \right\} \\ &= \epsilon_0 + \left\{ \phi_{RH} \beta(f_{cu}) \beta(t') \frac{f_c(t')}{E_{ci}} \beta_c(t-t') \right\} \\ &= \epsilon_0 + C \beta_c(t-t') \end{aligned} \quad \text{식(17)}$$

여기서,  $\epsilon_0$  : 순간 탄성 변형률,  
 $\beta_c(t-t')$  : 크리프 시간 함수,  
 $C$  : 재하시 재령  
 $t'$  : 습도 및 형상, 재료에 의존하는 크리프 변형률 변수

KCI식에서 시간함수  $\beta_c(t-t')$ 는  $t$ 와  $t'$  이외에 상대습도 및 시편의 형상에 관한 함수이기 때문에 콘크리트의 배합차이에 상관없이 일정하다. 따라서 재하 후 28일 이내의 단기재령 크리프 시험으로부터 크리프 변형률 변수  $C$ 를 구하고, 이를 시간함수  $\beta_c(t-t')$ 와 결합하면 예측모델을 수정할 수 있다. 이 때 크리프 변형률 변수  $C$ 를 구성하고 있는  $f_c(t')$ ,  $\beta(t')$ ,  $\phi_{RH}$ ,  $E_{ci}$ 는 KCI 크리프 예측모델에서 제시하고 있는 식을 사용하고, 설계기준강도 이외의 예측모델에서 고려치 못하는 배합설계의 차이에 따른 변동을 고려하기 위해  $\beta(f_{cu})$ 만을 회귀분석을 통하여 재산정하여 수정된  $\beta^r(f_{cu})$ 을 사용함으로써 수정된 크리프 예측 모델을 완성할 수 있다. KCI 예측식에 대한 수정과정을 정리하면 <그림 5>와 같이 나타낼 수 있다. 이 수정된 예측식은 단기 시험결과를 반영한 예측식이므로 해당 콘크리트의 물리적 특성을 반영할 수 있다. KCI식과 단기시험에 의한 수정식을 각 항별로 비교하면 <표 1>과 같다.

### 5. 단기시험에 의한 건축물 기둥 수축량 예측 평가 예제

콘크리트 구조물의 크리프를 예측함에 있어서 기존 표준식을 적용하고 약 120일 가량의 단기시험을 실시하고 이를 이용하

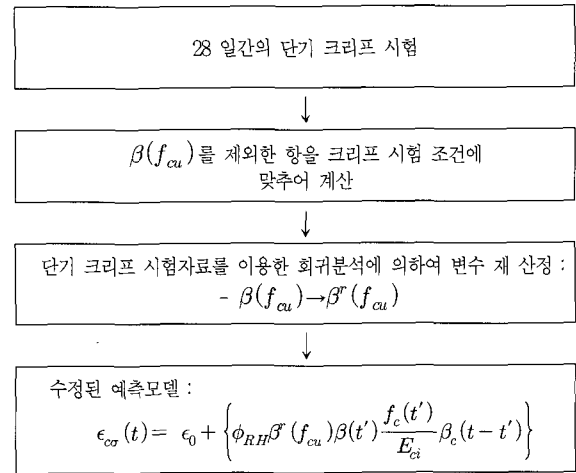


그림 5. 단기시험에 의한 KCI 크리프 예측식의 수정과정

표 1. KCI 크리프 예측식의 수정항

	KCI-예측식 (99)	수정 예측식
순간 변형률	$\epsilon_0 = \frac{f_c(t')}{E_{ci}(t')}$	동일
크리프 변형률 변수	$C = \phi_0 \frac{f_c(t')}{E_{ci}} = \phi_{RH} \beta(f_{cu}) \beta(t') \frac{f_c(t')}{E_{ci}}$	$\beta(f_{cu})$ 를 수정 ( $\beta^r(f_{cu})$ )
크리프 시간 함수	$\beta_c(t-t') = \left[ \frac{(t-t')}{\beta_{RH} + (t-t')} \right]^{0.3}$	동일

여 해당 콘크리트의 크리프 특성을 파악한 후 보정을 통하여 크리프를 포함한 콘크리트 장기변형 특성을 구조물 수축예측에 반영할 수 있다. 본고에서는 120일 정도의 크리프 시험값을 ACI-209 크리프 예측식에 반영하여 건축물의 장기 수축량을 검토한 사례를 수록하고자 한다. <표 2>는 재하 후 120일 동안 측정된 압축 크리프 시험값이다.

<표 2>에서 ⑤는 실험값에 근거한 극한 크리프 값이고 ⑥은 재령에 따른 크리프 계수이며 ⑦은 추정 극한 크리프에 크리프 계수(CRt)를 곱하여 구한 수정 크리프이다. 시험에 의한 크리프 변형은 재하 후 120일이 경과한 시점에서 892 $\mu\epsilon$ 를 가지며, 이는 외부환경과 콘크리트의 조건을 고려한 ACI 기준 예측값 1436 $\mu\epsilon$ 의 62%에 해당하는 값이다. 크리프 변형은 단위응력에 대한 변형률인 비크리프(specific creep)으로 비교할 수도 있다. 일반적으로 극한 크리프가 발생했을 경우 비크리프의 범위는  $3/f_c' \sim 5/f_c'$  ( $\mu\text{in/in/psi}$ )이며, 이는 압축강도가 53.7 MPa인 본 실험조건에서는 0.393 ~ 0.655 ( $\mu\text{in/in/psi}$ )에 해당하는 값이다. 가력 후 120일 경과시점에서 얻은 크리프 변형이 892 $\mu\epsilon$ 를 비크리프로 치환하면 0.292 ( $\mu\text{in/in/psi}$ )이며 이는

표 2. 크리프시험 실측치 예제

	재하하중	3055 psi	재하시 재령	28일				
	압축강도	7638 psi	재령 보정계수	$1.000 = 2.3/Ta^{0.25}$				
	시험체	공시체 평균	평균	1677.224				
	온도, 습도	표준상태	CH <sub>RH</sub>	0.9				
	탄성변형	640.00 ( $\times 10^{-6}$ )	극한 크리프	1551.880				
			표준편차	183.542				
	Specific creep			0.508				
재하시간 (일)	공시체 건조수축	시험결과 전체변형	탄성변형	탄성변형 +크리프	크리프	극한 크리프	CRt $t^a/(b+t^a)$	수정 크리프
0.00	0	640	640	640	0			0
0.25	0	734		734	94	2504	0.04	58
1.00	5	822		817	177	2164	0.09	127
2.00	13	872		859	219	1849	0.13	184
3.00	19	921		893	253	1735	0.16	226
4.00	23	950		927	287	1707	0.19	261
5.00	27	984		957	317	1693	0.21	290
6.00	33	1027		994	354	1736	0.23	316
7.00	39	1055		1016	376	1718	0.24	340
14.00	79	1171		1092	452	1533	0.33	457
21.00	103	1267		1164	524	1519	0.38	535
28.00	125	1337		1212	572	1496	0.42	593
60.00	191	1566		1375	735	1517	0.54	752
90.00	222	1714		1492	852	1583	0.60	835
120.00	230	1762		1532	892	1552	0.64	892
	②	①		③	④	⑤	⑥	⑦

일반적인 비크리프 하한치의 74.3%에 해당하는 값이다. 따라서 향후에도 상당량의 크리프 변형이 발생할 것으로 예상된다.

이 예제의 최종 목표는 기둥 축소량 해석을 위한 콘크리트의 비크리프량을 구하는데 있다. 크리프 값은 장기간의 실험을 통해 구하는 것이 그 콘크리트의 장기수축 특성을 정확히 반영할 수 있지만 콘크리트 공사 현장의 공정 일정상 1년 이상의 장기 실험결과를 기다려 콘크리트의 장기거동을 평가하기는 현실적으로 불가능하다. 따라서 이 실험 예제에서 보는 바와 같이 단기 실험데이터만으로 크리프 특성을 예측하는 것이 현실적인 방안이다. 즉, 약 3~4개월 정도의 실험결과를 기존 크리프 예측 규준식에 특성값을 대입하거나 또는 규준식과 비교 검토하여 해당 배합의 콘크리트 특성을 부분적으로 반영하는 것이 합리적인 방안이다.

이 예제의 실험결과를 분석해보면 설계강도 5,500 psi인 콘크리트의 비크리프는  $0.508(\mu\text{in}/\text{in}/\text{psi})$ 로서 PCA방식에서 제안한 비크리프  $0.393 \sim 0.655(\mu\text{in}/\text{in}/\text{psi})(3/f'_c \sim 5/f'_c)$ 의 범위를 만족하고 있다. 이와 같이 단기실험을 통하여 해당 콘크리트가 규준식에서 정한 크리프량의 허용범위에 있다는 것을 확인하였고 또한 이 실험결과를 활용하여 콘크리트 기둥의 축소량을 합리적으로 예측할 수 있다.

## 6. 맺음말

본고에서 건조수축과 크리프의 발생 메커니즘에 대한 기본 이론과 크리프를 중심으로 한 콘크리트의 장기특성치의 예측에 대하여 기술하였다. 한국콘크리트학회 제정의 콘크리트 구조설 계기준에서 제시한 크리프 예측식을 비롯하여 CEB-FIP, ACI, ASCE 등 각국의 크리프 예측 규준식들의 구성 특성과 단기 실험을 통한 크리프 예측이 가능한 수정 예측식을 소개하였으며, 이를 활용한 건물의 수축량을 평가하는 방안의 검토 예제를 또한 제시하였다.

콘크리트 공사에 들어가기 전에 미리 콘크리트 배합을 결정 하고 그 배합으로 제작된 시험체를 갖고 재하 시 재령을 달리 하여 ASTM 또는 KS 규격을 준수한 시험을 실시함으로써 해당 콘크리트의 장기특성을 대표하는 건조수축과 크리프 등을 정확하게 평가할 수 있다. 그러나 현실적으로 공사 현장에서 그러한 사전 준비작업을 모두 수행하기는 어려워 대부분 규준 식을 준용하여 건조수축이나 크리프에 따른 콘크리트의 장기 수축량을 평가한다. 이 경우 각 규준식에 적용된 조건변수를 충분히 반영하기는 어렵고 실제 제작될 콘크리트는 조건변수 이외의 다른 특성의 영향을 받기 때문에 예측식으로 추정된 장 기 수축량을 정확히 반영한다고 보기 어렵다.



따라서 본고에서 제시한 바와 같이 3~4개월 정도의 단기 시험을 통하여 규준식에서 제시한 콘크리트 장기거동 특성이 해당 콘크리트에 적용이 가능한 지를 검토하는 것이 콘크리트 구조물의 장기거동을 합리적으로 반영할 수 있는 방안이 될 것으로 사료된다. □

### 참고문헌

1. Powers, T. C., "Physical Properties of Cement Paste," Proc. Symp. Chem. Cement, Washington, 2, 1960, pp.577~613.
2. Ishai, O., "The Time-Dependent Deformation Behaviour of Cement Paste, Mortar and Concrete," Proc. Conf. The Structure of Concrete and its Behaviour under Load, Cement and Concrete Association, London, 1968, pp.345~364.
3. 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.
4. IUPAC, "Manual of symbols and terminology. Appendix2," Part1, Colloid and surface chemistry, Pure appl., Chem., 31, 1972, p.578.
5. Freyssinet, E., "The Deformation of Concrete," Magazine of Concrete Research, 3, No.8, 1951, pp.49~56.
6. Vogt, F., "On the Flow and Extensibility of Concrete," Norges Tekniske Holes, 1935, pp.348~374.
7. Thomas, F. G., "Creep of Concrete under Load," International Association of Testing Materials, London Congress, April 1937, pp.292~294.
8. Maney, G. A., "Concrete Under Sustained Working Loads Evidence that Shrinkage Dominates Time Yield," Proc. ASTM, 41, 1941, pp.1021~1030.
9. Mayers, S. L., "Thermal Expansion Characteristics of Hardened Cement Paste and Concrete," Proc. Highway. Res. Bd., 30, 1950, pp.193~203.
10. Jordaan, I. J. and Illston, J. M., "Time-Dependent Strains in Sealed Concrete under Systems of Variable Multi-Axial Stress," Magazine of Concrete Research, 23, No.75~76, 1971, pp.79~88.
11. CEB-FIP Model Code, Comite Euro-International du Beton, 1990.
12. ACI Committee 209, Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, ACI 209R-92, ACI Manual of Concrete Practice, 2004.
13. AASHTO, AASHTO LRFD Bridge Design Specification, 2004.
14. 日本土木學會, 콘크리트標準方書 (平成 8年版), 設計編, 1996, pp.26~32.

### 도서소개

## 철근콘크리트 구조물의 내화특성

#### ◆ 소개

... 이 시리즈는 그간 각 분야별로 학회지 특집기사에 참여한 전문가들의 경험과 축적된 연구결과 및 국내외에서 개발된 각종 기술 등에 대하여 체계적이고 깊이 있는 내용을 수록하고 있어 관련분야에 종사하는 실무자들이나 학생들에게 매우 유익한 도서가 될 것이다.

- 저 자: 한국콘크리트학회
- 출판사: 기문당
- 발행일: 2004년 12월 30일
- 정 가: 12,000원(회 원: 10,000원)
- ISBN: 89-7086-634-5
- 총쪽수: 205쪽(판형: B5)

