

# 콘크리트의 건조수축과 크리이프

김 상 식  
인하대 건축과

## 1. 머리말

최근 콘크리트 구조물의 장대화와 고층화에 따라 콘크리트의 건조수축과 크리이프에 의한 응력과 변형이 구조설계에서 주요한 고려의 대상이 되고 있다. 1950년대까지만 해도 콘크리트의 크리이프는 소성변형 또는 소성 흐름 등으로 언급되면서 높은 응력 상태의 단면에서 응력을 해소시켜 낮은 응력상태의 단면으로 응력을 이완시켜 주는 구조체에 오히려 이로온 시간 증속 변형으로 이해되었고, 건조에 의한 콘크리트의 수축은 콘크리트의 사용자가 일상적으로 받아 들일 수 밖에 없는 필요악으로 생각하였다. 그러나 1960년대 이후 고강도 재료의 개발로 허용응력도가 높아지고 구조체의 단면이 점차 세장(細長)하여지면서 안전율이 감소하며 비탄성(非彈性) 체적 변형으로 인한 응력에 대한 설계 허용한도가 줄어들어, 이제는 건조수축과 크리이프가 장대 스파의 교량이나 고층 건물에서는 반드시 고려하여야 하는 주요 구조설계 요인이 되었고, 이에 대한 설계방법을 미국콘크리트학회(ACI)나 유럽콘크리트위원회(CEB)의 기준에도 반영되고 있다.

건조수축과 크리이프는 시간에 따른 체적 변형이라는 데에는 같으나, 건조수축은 구조체에 응력을 유발시키고 크리이프는 응력을 이완시키는 차이를 가지고 있다. 그러나, 일반적으로 건조수축과 크리이프는 모두 수화된 시

멘트 풀에서 연유하는 것과 변형율-시간 곡선이 매우 유사한 점, 구조설계에서 무시할 수 없는  $4\sim 20 \times 10^{-4}$  정도의 변형율을 일으키는 점 및 둘 다 부분적으로 복원이 가능한 점 등에서 공통점이 많아 구조설계에서는 매우 유사한 방법으로 다루어지고 있다.

1960년대 이래 세계의 여러 나라에서 콘크리트의 건조수축과 크리이프에 대한 연구가 실험과 이론적인 해석을 통하여 활발하게 이루어져 왔고, 그 결과들이 콘크리트 구조물의 설계 기준에 반영되고 있으나 우리나라에서는 이에 대한 연구가 극히 초보적인 상태에 머물고 있어 콘크리트의 재료와 구조 거동에 관련하여 건조수축과 크리이프의 일반적인 현상들을 이해하고, 구조설계의 양대 주류를 이루고 있는 ACI와 CEB 기준의 크리이프 및 건조수축에 관련된 설계식들을 고찰하는 것은 이 분야의 연구를 위하여 가치 있는 일이 될 것이다.

## 2. 건조수축에 영향을 끼치는 요인

콘크리트의 건조수축(drying shrinkage)은 수화된 시멘트에 흡착되었던 수분이 증발하여 콘크리트에 생기는 체적변형을 말한다. 이러한 현상은 주로 콘크리트와 주위의 상대습도의 차이에서 기인하는 것으로 경화가 시작된 초기에 많이 생기며 시간의 경과에 따라 서서히 줄어든다. 20여년간 건조수축현상을 관찰한 연

구발표에 의하면, 첫 두 주 사이에 20년간 수축변형의 14~34 퍼센트가 일어났으며, 3개월 간에 40~80퍼센트, 1년간에 66~85퍼센트가 일어난 것으로 보고되고 있다.

콘크리트의 건조구축에 가장 크게 영향을 끼치는 것은 골재의 함량과 성질이다. 시멘트 풀은 높은 수축 잠재성을 가지고 있으나 배합 시 골재가 시멘트 풀에 들어가 경화되면서 골재의 높은 탄성계수로 시멘트 풀의 수축을 억제하여 감소시키는 효과를 가지고 있다. 골재의 함량에 따른 콘크리트의 수축률은 대략 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$S_c = S_p(1 - g)^n \quad (1)$$

이 식에서  $S_c$ 는 콘크리트의 수축률,  $S_p$ 는 시멘트 풀의 수축률,  $g$ 는 콘크리트에 대한 골재의 체적비를 나타내며  $n$ 은 1.2~1.7의 값을 가진다.

골재의 성질에 관련하여 흡수율이 큰 골재로 된 콘크리트의 수축율이 흡수율이 적은 골재의 콘크리트보다 크며, 골재의 비중은 수축에 영향을 거의 끼치지 않는다. 50퍼센트 상대습도하에서 골재의 종류에 따른 콘크리트의 수축률은 표 1과 같다. 대체로 석영, 장식, 석회석, 화강암 등의 골재는 낮은 수축률의 골재이고, 사암, 점판암, 이판암, 현무암 등은 높은 수축률의 골재에 속한다. 경량콘크리트용 골재는 일반 골재보다 수축율이 높는데 그 이유는 경량골재의 탄성계수가 낮아 시멘트 풀의 잠

표 1. 골재에 따른 콘크리트의 건조수축

골재	비중	흡수율 (%)	1년간 수축율 (%)
사 암	2.47	5.0	0.12
점판암	2.75	1.2	0.07
화강암	2.67	0.5	0.05
석회석	2.74	0.2	0.04
석 영	2.65	0.3	0.03

재적인 수축성향을 효율적으로 억제하지 못하기 때문인 것으로 추측된다. 콘크리트 중의 물의 함량은 콘크리트의 수축율과 거의 선형으로 비례한다. 따라서 물 시멘트비가 낮을수록 수축률이 적으며, 시공연도가 낮은 콘크리트는 물 시멘트비가 낮거나 같은 물 시멘트비에서 골재의 함량이 많은 경우이므로 수축을 작게 일으킨다. 그림 1은 물 시멘트비와 콘크리트중 골재 체적비에 대한 수축률의 관계를 나타낸 것이다.

시멘트의 성분과 분말도는 시멘트의 수화작용에는 영향을 끼치나 체적변형에는 거의 영향을 끼치지 않으며 콘크리트에 연행된 공기도 수축에는 영향이 없는 것으로 알려져 있다.

콘크리트 주위의 습도가 증가하면 내부에서 바깥표면으로 이동하는 수분의 흐름이 늦어지기 때문에 공기의 상대습도는 콘크리트의 수축에 크게 영향을 끼친다. 그림 2는 상이한 상대습도 상태에서 관찰된 수축률을 나타낸 것으로 상대습도에 따른 수축률의 차이가 현저하게 보이며, 상대습도 100퍼센트에서 콘크리트의 부풀음(swelling)은 70퍼센트 상대습도에서의 수축에 비하여 1/6 정도밖에 되지 않음을 알 수 있다.

콘크리트의 양생은 조직을 치밀하게 하고 강도는 증진시키는 데에는 매우 효율적이거나 콘

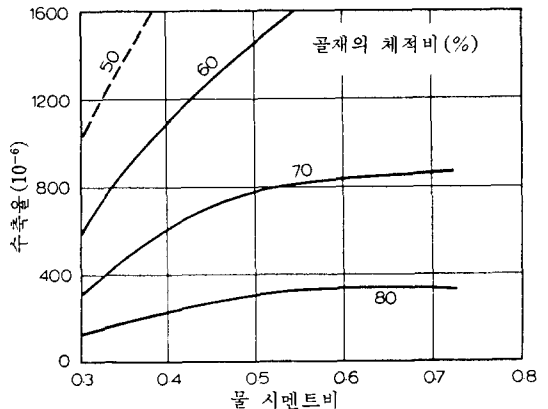


그림 1. 수축에 대한 골재와 물 시멘트의 영향(골재의 체적비(%))

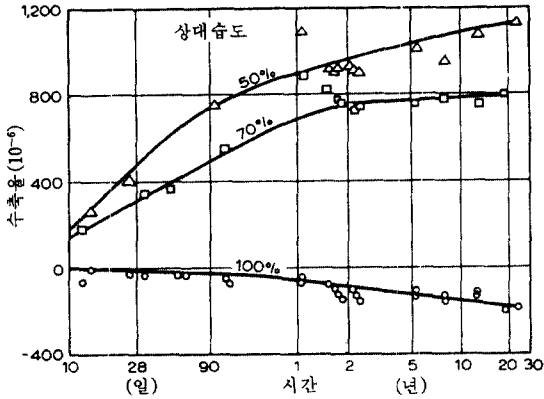


그림 2. 상대습도에 따른 콘크리트의 수축

크리트의 수축에는 반대의 효과를 가져, 잘 양생된 콘크리트가 더 빨리 수축한다. 그러나 잘 양생된 콘크리트는 높은 강도를 가지므로 수축균열은 일으키지 않는다.

### 3. 크리이프에 영향을 끼치는 요인

콘크리트의 크리이프(creep)는 경화된 콘크리트에 지속 하중이 작용할 때 생기는 시간 종속적인 변형율의 증가로 정의된다. 이러한 크리이프에 의한 변형율은 어떠한 구조체에 하중이 작용하여 일정한 시간이 경과했을 때 측정된 전체변형율에서 하중 작용시 측정된 순간 변형율(instantaneous strain)을 빼면 얻을 수 있다. 콘크리트의 크리이프는 기본 크리이프(basic creep)와 건조 크리이프(drying creep)로 나뉘는데, 기본 크리이프는 콘크리트와 주위와의 수분 이동을 차단시킨 상태에서 일어나는 시간종속 변형율이며, 건조 크리이프는 기본 크리이프에 건조에 의한 크리이프를 추가한 것이다.

콘크리트 크리이프에 영향을 끼치는 요인들은 콘크리트의 강도, 재령, 골재, 온도, 상대습도 등으로 대별하여 생각할 수 있다. 콘크리트의 강도는 크리이프가 지속하중을 받는 상태에서 생기는 비선형 변형율임을 감안하면, 콘크리트의 크리이프에 가장 크게 영향을 끼치

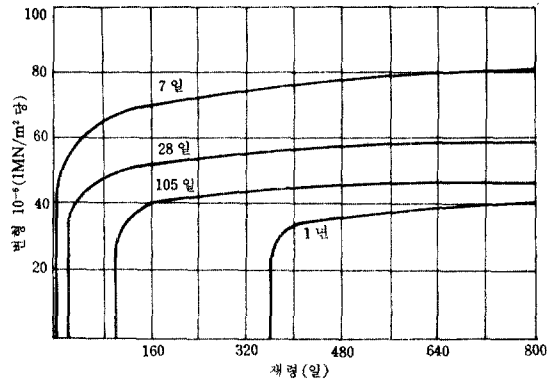


그림 3. 재하시 콘크리트 재형과 크리이프 변형

는 요인이 된다. 탄성계수가 큰 콘크리트에는 순간적인 탄성변형이나 크리이프 변형이 작게 생기며, 일반적으로 콘크리트의 탄성 계수는 강도의 제곱근에 비례하므로 콘크리트의 강도는 크리이프를 감소시키는 효과를 가지고 있다.

콘크리트의 재령(材齡)이 크리이프에 대한 효과도 강도와 관련하여 생각할 수 있다. 콘크리트는 시간의 경과와 더불어 수화작용이 진행되어 강도와 또한 탄성계수가 증가하기 때문에 재령이 많을수록 순간 변형과 크리이프 변형이 작게 일어난다.

골재는 건조수축에서와 같이 크리이프에도 많은 영향을 준다. 콘크리트의 크리이프는 본질적으로 시멘트 풀의 시간 종속 변형에서 연유하는 것이며 골재는 거의 크리이프를 일으키지 않는다. 따라서 골재는 콘크리트의 크리이프를 감소시키는 효과를 가지나, 그 관계는 선형은 아니다. 네빌(A.M, Neville)은 콘크리트의 크리이프( $C_c$ )와 시멘트 풀의 크리이프( $C_p$ ), 골재의 체적비( $g$ ) 및 수화되지 않은 시멘트의 체적비( $u$ )의 관계를

$$\log \frac{C_p}{C_c} = \alpha \log \frac{1}{1-g-u} \quad (2)$$

의 방정식으로 나타내고 있는데, 잘 양생된 콘

크리트에서  $u$ 의 값을 무시하면

$$\frac{C_c}{C_c} = (1-g)^\alpha \quad (3)$$

와 같이 되어 건조수축의 (1)식과 유사하게 된다. 이 식에서  $\alpha$ 는 골재와 콘크리트의 탄성계수와 포아슨 비에 관련된 계수이다.

크리이프에 대한 온도의 영향은 최근 원자력발전소의 건설과 관련하여 높은 관심사가 되고 있다. 온도에 따른 크리이프율은 그림 4에서 보는 바와 같이 70°C까지는 상승하나 70°C에서 110°C까지는 하강하였다가 그보다 더 높은 온도에서 다시 상승한다.

콘크리트를 둘러싸고 있는 공기의 상대습도는 가장 중요한 요인 중 하나이다. 콘크리트의 크리이프는 상대습도가 낮을수록 증가한다. 이러한 현상은 하중이 작용하는 동안 건조하는 것은 기본 크리이프에 추가하여 건조 크리이프를 유발시키기 때문이며, 재령이 적은 콘크리트일수록 현저하게 나타난다. 레르밀(R. L' Hermite)은 크리이프에 대한 건조의 영향을 다음과 같은 식으로 나타내고 있다.

$$C = C_c(1 + QS) \quad (4)$$

이 식에서  $C_c$ 는 기본 크리이프,  $S$ 는 상대습도,  $Q$ 는 콘크리트에 따른 상수이다. 위의 식에 나타난 바와 같이 높은 수축율을 가진 콘크리

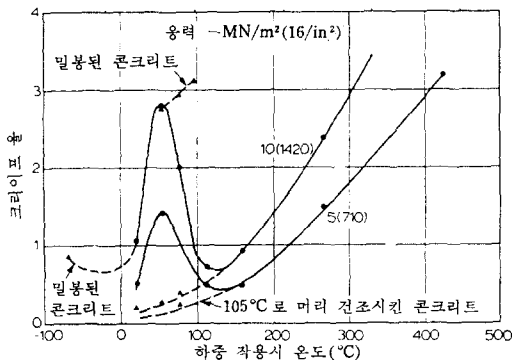


그림 4. 크리이프율에 대한 온도의 영향

트는 일반적으로 높은 크리이프율을 보인다.

#### 4. CEB 규준에 의한 크리이프와 수축의 예측

CEB 방법에 의한 크리이프 예측은 크리이프 변형율은 작용하는 응력에 비례하고 재령 28일의 탄성계수에 반비례한다는 기본 가정에 크리이프 계수  $\psi(t, t_0)$ 를 사용하여 다음과 같이 나타내고 있다.

$$\epsilon_c(t, t_0) = \frac{\sigma_0}{E_{c28}} \psi(t, t_0) \quad (5)$$

이 식에서  $\epsilon_c$ 는 크리이프 변형율이고  $(t, t_0)$ 의  $t_0$ 는 응력이 작용하기 시작했을 때의 시간,  $t$ 는 크리이프를 측정했을 때의 시간이며,  $E_{c28}$ 은 재령 28일 콘크리트의 탄성계수이다. 전체 변형율  $\epsilon_{tot}(t, t_0)$ 는 하중 작용시 순간 탄성변형율과 크리이프 변형율  $\epsilon_c(t, t_0)$ 를 포함하므로

$$\epsilon_{tot} = \sigma_0 \left( \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\psi(t, t_0)}{E_{c28}} \right) \quad (6)$$

이 되며,  $E_c(t_0)$ 는 하중 작용시에 탄성계수이다.

크리이프 변형율을 나타내는 데에는 단위 응력에 대한 크리이프 변형율인 크리이프 함수(creep function)를 사용하는데, (6)식으로부터 크리이프 함수는

$$\psi(t, t_0) = \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\psi(t, t_0)}{E_{c28}} \quad (7)$$

이 된다.

크리이프는 주위의 습도, 부재의 크기, 콘크리트의 구성, 주위 온도, 콘크리트의 경화율 등의 함수가 되므로 크리이프 계수는 이러한 변수들을 포함하여

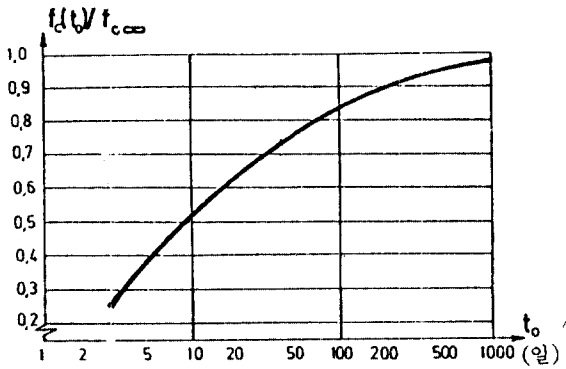


그림 5. 재령에 따른 콘크리트 강도의 변화

$$\psi(t, t_0) = \beta_a(t_0) + \psi_a \beta_a(t-t_0) + \psi_i [\beta_i(t) - \beta_i(t_0)] \quad (8)$$

$$\beta_a(t_0) = 0.8 \left( 1 - \frac{f_c(t_0)}{f_{c\infty}} \right) \quad (9)$$

으로 나타내고 있다. 여기에서  $\beta_a(t_0)$ 는 하중이 가해진 다음 수일간 일어나는 변형중 복원되지 않는 부분에 관련된 계수로  $f_c(t_0)$ 는 하중 작용시 강도,  $f_{c\infty}$ 는 최종 강도이며 재령에 따른  $f_c(t_0)/f_{c\infty}$ 의 변화는 그림 5와 같다.

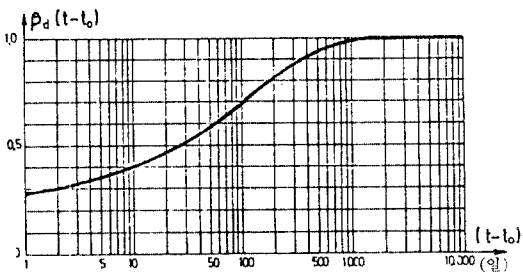


그림 6. 시간 경과에 따른 탄성 변형률

(8) 식의 둘째 항은 시간의 경과에 따른 탄성 변형의 복원 가능한 부분에 관련된 것으로,  $\psi_a$ 는 이때의 탄성계수비로 보통 0.4의 값을 가지며  $\beta_a(t-t_0)$ 는 시간경과에 따른 탄성 변형의 발생을 나타낸 것으로 그림 6과 같다.

셋째 항은 시간에 따른 소성흐름에 관련된 것으로 재령에 많은 영향을 받는다. 여기에서  $\psi_i$ 는 흐름계수(flow coefficient)로 주위 환경의 습도에 관련된 계수  $\psi_{i1}$ 과 부재의 등가 두께에 관련된 계수  $\psi_{i2}$ 의 곱으로 표시되며,  $\beta_i$ 는 등가 두께  $h_0$ 에 따라 발생하는 소성 변형에 대응하

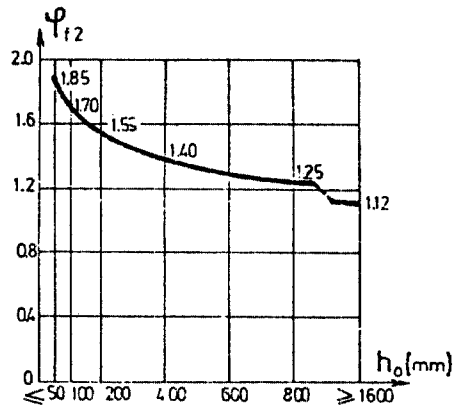


그림 7. 크리프에 대한 등가 두께의 영향

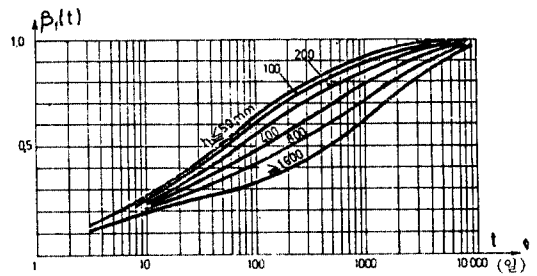


그림 8. 시간 경과에 따른 조성 변형률

표 2. CEB 크리이프 및 수축계수

주위조건	상대습도 $\psi_{r1}$	크리이프계수 $\epsilon_{s1}$	수축계수	계수 $\lambda$
수중(水中)		0.8	+0.00010	30
다습한 상태	90%	1.0	-0.00013	5
일반상태	70%	2.0	-0.00032	1.5
건조한 상태	40%	3.0	-0.00052	1

$$\psi(t, t_0) = 0.4 + \psi_r[\beta_r(t) - \beta_r(t_0)] \quad (11)$$

콘크리트의 건조수축에 의한 변형율은 다음의 식으로 계산된다.

$$\epsilon_s(t, t_0) = \epsilon_{s0}[\beta_s(t) - \beta_s(t_0)] \quad (12a)$$

이 식에서  $\epsilon_{s0}$ 는 기본 수축계수로 주위 환경 계수  $\epsilon_{s1}$ 과 등가 두께  $h_0$ 에 의한 계수  $\epsilon_{s2}$ 의 곱이며,  $\beta_s$ 는 시간에 따른 수축율의 변화를 나타내는 함수로  $\epsilon_{s1}$ ,  $\epsilon_{s2}$ ,  $\beta_s$ 는 각각 표 2, 그림 9 및 그림 10과 같다. 또한,  $t_0$ 는 콘크리트의 수축이 시작될 때의 시간이고  $t$ 는 콘크리트의 재령이다. 그러나 콘크리트의 수축은 경화중 온도의 영향을 받고 시멘트의 종류에 따라 다르기 때문에 이러한 영향을 고려하여

$$t = \frac{\alpha}{30} \sum_{t_0}^{t_m} \{ [T(t_m) + 10] \Delta t_m \} \quad (12b)$$

으로 보정하고 있다. 여기에서  $\alpha$ 는 시멘트에 관련된 계수로 일반 시멘트의 경우는 1, 조강(早強)시멘트는 2, 조강 고강도 시멘트는 3의 값을 가지며,  $T$ 는 하루의 평균 섭씨온도,  $\Delta t_m$ 은 날자의 수를 나타낸다.

CEB 방법에 의하면, 건조수축과 크리이프의 영향을 고려한 콘크리트의 전체 변형율은 중첩원리를 적용하여 구한다.

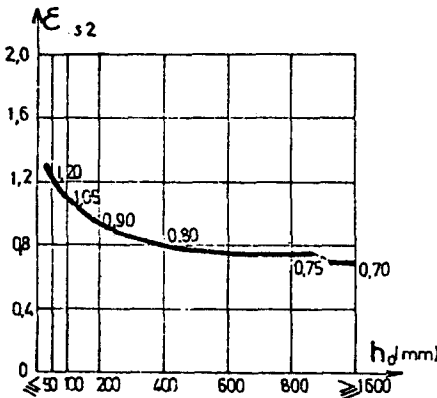


그림 9. 수축에 대한 등가 두께의 영향은 함수이다.

CEB에서 정의되는 등가 두께(notional thickness)는 부재의 크기와 형태를 단일 계수로 나타내기 위하여 정의된 것으로

$$h_0 = \lambda \frac{2A_c}{u} \quad (10)$$

으로 표시된다. 여기에서  $\lambda$ 는 상대습도에 따른 계수이며,  $A_c$ 는 콘크리트의 단면적,  $u$ 는 외기와 접하는 주변의 길이이다. (9), (10)식의 계수들은 표 2 및 그림 7, 8과 같다.

(8) 식에 의한 크리이프 계수는 이론적인 근거를 가지고 있으나 실제 설계에 적용하는 데에는 다소 복잡하여 3개월 이상의 시간에 대한 크리이프 효과를 예측하는 데에는 다음의 약산식이 쓰이고 있다.

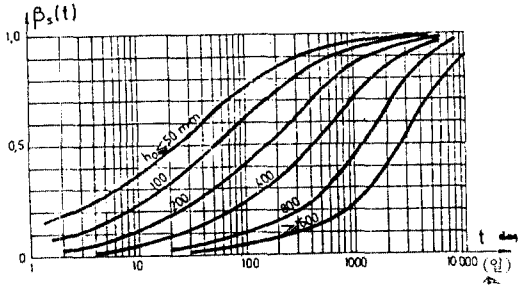


그림 10. 시간 경과에 따른 콘크리트 수축

#### 4. ACI에 의한 크리이프와 수축의 예측

ACI에서는 위원회 209를 조직하여 연구 결과들을 근거로 “콘크리트 구조체에 있어서 크리이프, 수축 및 온도 효과의 예측(Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures)”이라는 보고서를 작성하여 설계에 적용하고 있다. 1986년 개정된 이 보고서에 의하면 콘크리트의 크리이프와 건조 수축은 다음 식으로 예측하고 있다.

$$\nu_t = \frac{t^4}{d + \psi} \nu_u \quad (13)$$

$$(\epsilon_{sh})_t = \frac{t^\alpha}{f - t^\alpha} (\epsilon_{sh})_u \quad (14)$$

이 식에서 초기 변형율에 대한 크리이프 변형율의 비를 나타내는 크리이프 계수이고,  $\epsilon_{sh}$ 는 수축 변형율이며, 점차  $t$ 와  $u$ 는 각각 재령과 극한치를 나타낸다.  $\psi$ ,  $d$ ,  $\nu_u$ ,  $\alpha$ ,  $f$  및  $(\epsilon_{sh})_u$ 의 값은 ASTM C-512 규정에 의한 실험치에서 얻은 값들로 대략

$$\psi = 0.4 \sim 0.8, d = 6 \sim 30 \text{ 일},$$

$$\nu_u = 1.30 \sim 4.15, \alpha = 0.9 \sim 1.10,$$

$$f = 20 \sim 130 \text{ 일}, (\epsilon_{sh})_u = 415 \times 10^{-6} \sim 1070$$

$\times 10^{-6} \text{ m/m}$ 의 범위내에 있다. 예를 들어 습윤 양생을 하였거나 1-3일 증기양생한 콘크리트에 재령 7일부터 하중을 가한 경우의 크리이프에서는  $\psi=0.60$ ,  $d=10$ , 습윤양생하여 재령 7일 이후의 수축에서는  $\psi=1$ ,  $f=35$ , 증기양생을 하여 재령 1-3일 이후부터의 수축에서는  $\psi=1$ ,  $f=55$ 의 값을 가지며, 이 값들은 실제 설계에서 널리 쓰이고 있다.

극한 크리이프계수와 극한 수축 변형율은 여러가지 조건에 따라 달라지기 때문에 다음과 같이 나타내고 있다.

$$\nu_u = 2.35 r_c \quad (15)$$

$$(\epsilon_{sh})_u = 780 r_{sh} \times 10^{-6} \text{ m/m} \quad (16)$$

이 식에서  $r_c$ 와  $r_{sh}$ 는 각각 크리이프 및 수축에 관련된 보정계수로 재하(載荷)시기, 양생, 상대습도, 부재의 두께와 체적표면적의 비, 시멘트와 공기의 함량, 세골재율, 슬럼프 등에 따라 달리 계산된다. 이 중에서도 가장 크게 영향을 끼치는 것이 상대습도로 이에 대한 보정 계수는 다음과 같다.

$$\text{크리이프 } r_c = 0.0067 \lambda, \quad \lambda > 40 \text{의 경우} \quad (17)$$

$$\text{수축 } r_s = 1.40 - 0.010 \lambda, \quad 40 \leq \lambda \leq 80 \text{의 경우} \quad (18a)$$

$$= 3.00 - 0.030 \lambda, \quad 80 \leq \lambda \leq 100 \text{의 경우} \quad (18b)$$

이 식에서  $\lambda$ 는 상대습도를 퍼센트로 나타낸 것이며,  $\lambda=40$  퍼센트일 때  $r_s$ 는 단위값을 가지게 된다.

일반적으로 ACI 방법은 경험적인 방정식이 많이 채택되고 있어 사용하기에 간단하나, 극한 건조 변형율과 극한 크리이프계수의 계산을 적절한 값을 선택하는 것은 용이하지 않다.

## 5. 맺음말

이제까지 콘크리트의 크리이프 변형과 건조 수축에 영향을 끼치는 요인들을 고찰하고 이에 대한 예측 방법을 콘크리트 설계의 두 큰 흐름인 CEB 규준과 ACI 209 보고서를 중심으로 검토하였다.

콘크리트의 크리이프와 건조수축은 콘크리트를 이루고 있는 내적 요인들과 콘크리트를 감싸고 있는 외적 요인에 모두 관계를 가지고 있어 매우 복잡한 거동을 보이며, 이를 수치화하여 설계식으로 만드는 일은 각 나라의 지역적 특성과 시공습씨등을 아울러 반영하여야 하기 때문에 쉬운 일이 아니다. 우리나라에서는 특히 이 분야의 연구에 낙후성을 보이고 있으나, 콘크리트 구조물의 장대화, 고층화가 현실로 다가왔고 원자력발전소 등 특수 콘크리트 구조물들도 많이 구축되고 있기 때문에 이 분야에 대한 연구와 우리나라의 특수성을

잘 나타낼 수 있는 설계규준을 만드는 일이 절실하게 요구되고 있다.

## 참 고 문 헌

1. ACI, Designing for Creep and Shrinkage in Concrete Structures, SP-76, 1983.
2. Bazant, Z. P. , Osman, E. , Thonguthai, W. "Practical Formulation of Shrinkage and Creep of Concrete", Material and Structures(RILEM, Paris), Vol. 9, No. 5, 1976.
3. CEB-FIP Model Code for Concrete Structures, Comite Euro-International du Beton, Paris, France, 1978.
4. Mehta, P. K. , Concrete Structures, Properties and Materials, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J. , 1986.
5. Neville, A. M. , Properties of Concrete, Pitman, Marshfield, 1981.