

# 콘크리트의 크리이프와 건조수축

金 鎮 根

〈韓國科學技術院 土木工學科 助教授·工學博士〉

## 〈목 차〉

- I. 서 언
- II. 용어의 정의 및 설명
- III. 장기변형에 영향을 주는 요인들
- IV. 크리이프와 건조수축에 대한 수치적 model
- V. 구조물 해석법
- VI. 결 언

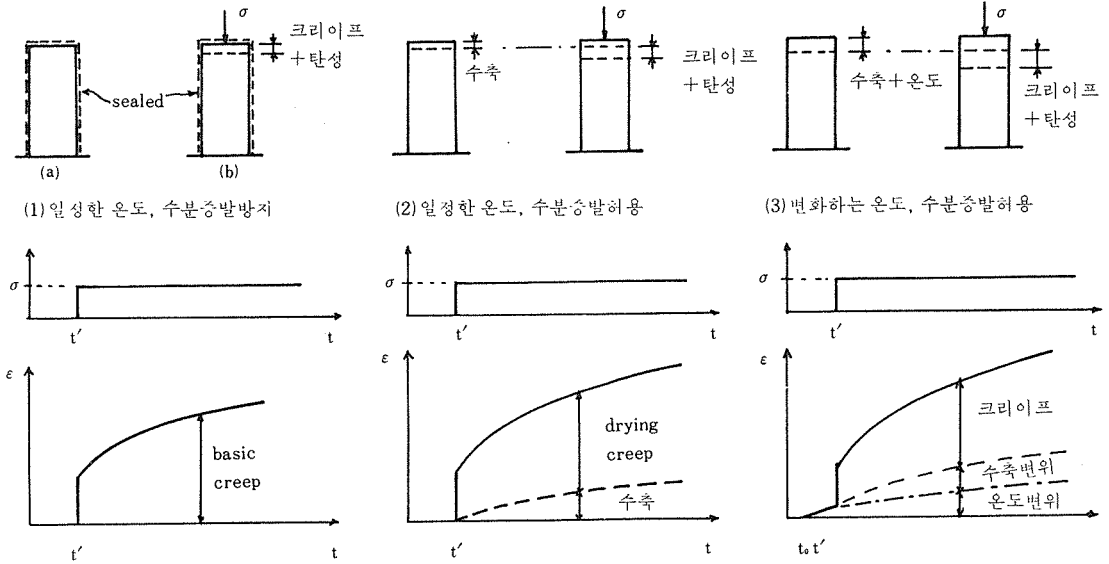
조수축에 주는 콘크리트 재료의 각 요소들의 영향에 대한 정성적 및 정량적 분석이 모자라 정확한 판단을 할 수 없기 때문이다. 따라서 이 글에서는 크리이프와 수축에 관한 주요한 용어에 대한 설명에 이어, 장기변형에 영향을 주는 요인들에 관해 설명하고, 현재 세계 각국에서 사용하는 주요 model들을 소개하고, 간단한 해석법에 관해 간략히 논술하고자 한다. 또한 이 글은 크리이프와 수축에 관한 소개에 그치며 보다 깊은 지식은 논문과 참고서로부터 얻을 수 있겠다.

## II. 용어의 정의 및 설명

콘크리트가 지속적인 하중을 받을 때 초기변형 (instantaneous deformation)에 더불어 시간에 따른 계속적인 변형이 일어난다. 이러한 현상은 1907년 Ratt에 의해 최초로 밝혀졌으며, 이제 크리이프로 널리 알려져 있다. 또한 콘크리트는 작용하중이 없어도 상당한 양의 변형을 일으키는데 이러한 것으로 건조수축 (shrinkage), 확장 (swelling)과 열팽창 (thermal dilation) 등이 있다. 이러한 여러가지 현상에 대해 [그림 1]에 도시하고 있다.

## I. 서 언

우리는 실제 콘크리트 구조물에서 크리이프와 건조수축 현상이 나타남을 잘 알고 있다. 그러나 이러한 콘크리트 재료의 특징을 실제 구조물 해석시 고려하는 경우는 드물며, 설사 고려한다해도 그 예측의 정확도에 큰 의문을 갖는다. 그 이유는 크리이프와 건조수축에 대한 적절한 model을 선택하지 못하는 것과 해석법을 알지 못하는 것을 들 수 있으며, 크리이프와 건



[그림 1] 크리이프, 수축, 온도 및 탄성변형

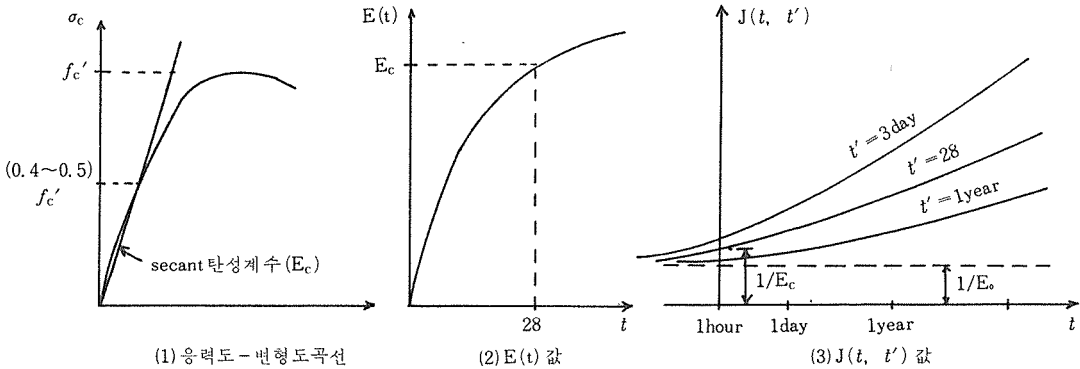
### II-1 크리이프 변형

크리이프 변형을 나타내는데 현재 널리 사용되는 용어는 Neville에 의해 제시된 기본크리이프(basic creep)와 건조크리이프(drying creep)를 들 수 있다. [그림 1] (1)에서 보듯이 기본크리이프란 일정한 온도하에서 수분의 증발을 막고서 재하하여 얻어진 변형을 일컬으며, 건조크리이프란 [그림 1] (2)에서와 같이 일정한 온도하에서 외기에 접하도록, 즉 건조가 일어날 수 있는 상태에서 측정한 변형이다. 이 건조크리이프를 Pickett효과라고도 한다. [그림 1]의 (1) (2) 및 (3)의 경우에서 (크리이프+탄성) 변형의 크기가 각각 다르다. 즉 (2)의 (크리이프+탄성) 변형에는 하중에 의한 건조수축(load-induced shrinkage)의 증가를 예상할 수 있다. 그리고 (3)의 경우는 열팽창뿐만 아니라 열에 의한 크리이프 증가도 동시에 일어난다.

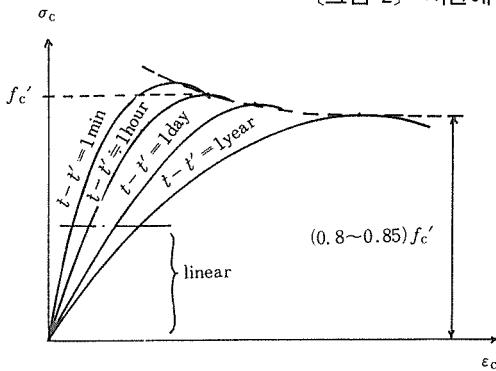
또 한가지는 순수크리이프 변형을 총변형에서 구분하는데 큰 어려움이 있다. 왜냐하면 잘 알려져 있듯이 콘크리트의 탄성계수는 시간에 따른 함수이고([그림 2]), 재하속도에 따라 상

당한 크기의 변화를 나타내기 때문이다. 보통 콘크리트의 정탄성계수는 28일 재령의 콘크리트에 0.5~3시간의 재하기간동안 극한 강도의 0.4~0.5에 이르는 secant탄성계수를 취한다. 재하 최초시간  $t'$ 에 따른 탄성계수의 변화를 [그림 2]의 (2) 및 (3)에서 볼 수 있다. 또한 재하기간에 따른 응력도-변형도 곡선을 크리이프 isochrones라고 하는데 [그림 3]에 나타나 있다. 재하기간이 매우 길면 극한압축강도는 표준극한압축강도  $f'c$ 의 0.8~0.85 $f'c$  정도이다. 이와 같은 이유로 ACI Code에서는 기둥의 극한응력도로 0.85 $f'c$ 을 취하고 있음을 우리는 익히 알고 있다. 이와같이 여러가지 탄성계수로 인해서 서로 상이한 순수크리이프 변형이 정의되므로 보통 크리이프 계산시에는 정탄성계수로는  $(t - t')$ 를 1시간 혹은 0.1day로, 동탄성계수로는 10<sup>-7</sup>day로 취하는 것이 제시되고 있다.

앞에서 언급되었듯이 이제까지는 크리이프 변형이 외부환경의 조건에 의해 정의되어 왔으나, 최근에는 시간에 따른 콘크리트 내부상태의 변화에 따라 다음과 같이 구분되기도 한다.



[그림 2] 시간에 따른 탄성계수의 변화



[그림 3] 크리이프 isochrones

- 1) Transition Hygral Creep : 콘크리트내의 수분함량의 변화에 따른 크리이프.
- 2) Transition Thermal Creep : 콘크리트내의 온도 변화에 따른 크리이프.
- 3) Transition Chemical Creep : 콘크리트 내의 화학적 변화에 따른 것으로 수화, 탄화, 혹은 외부로부터 화학물질의 침투에 의한 화학반응에 의한 크리이프.

또 크리이프에서 가장 중요한 용어로는 [그림 2]의 (3)에서 나타나는 강성계수의 역수와 같은 의미인  $J(t, t')$ 과 탄성변위에 대한 크리이프 변위의 비를 나타내는  $\phi(t, t')$ 이다.

$J(t, t')$  : 크리이프 함수(creep function, 혹은 compliance function)로 알려져 있는 이 값은 시간  $t'$ 에서 단위응력을 가하여 시간  $t$ 에서의 변형도로 정의된다. 정확한 구조해석을 위해서는 이  $J(t, t')$ 의 정확한 예측, 즉

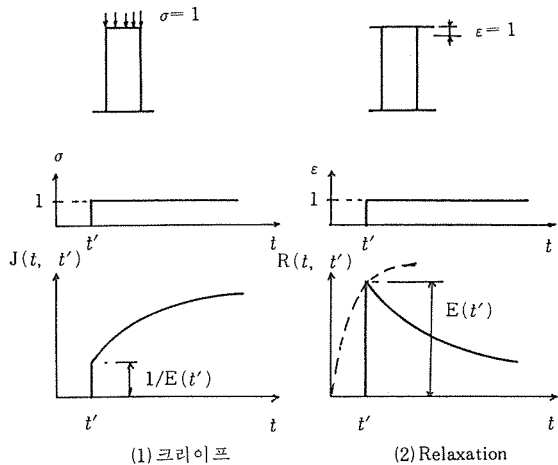
model이 매우 중요하다.

$\phi(t, t')$  : 크리이프 계수(creep coefficient)로 탄성변형에 대한 크리이프만의 변형의 비를 말하며 보통 이 값은 1~6정도이며 주로 2.5정도로 사용하는 경우도 있다.

이 두계수의 단계식은,

$$J(t, t') = \frac{1}{E(t')} + \frac{\phi(t, t')}{E(t')} \quad \dots\dots (2, 1)$$

이며, 여기서  $E(t')$ 은 하중을 가하는 시간  $t'$ 에서의 콘크리트 탄성계수이고, 식 (2, 1)에서 오른쪽의 첫번째항은 단위 하중에 대한 탄성변형을,



(1) 크리이프 (2) Relaxation

[그림 4] 크리이프와 Relaxation

둘째항은 순수크리이프변형을 말하며  $C(t, t')$  이라고 보통 나타내고 이를 Specific 크리이프라고 부른다. 또  $J(t, t')$ 은 총변형을 의미한다.

또한 내부적으로는 크리이프와 같으나, 외부적으로 나타나는 현상이 다른 relaxation에 대해 [그림 4]에서 나타내고 있다. Relaxation  $R(t, t')$ 이란 시간  $t'$ 에서 단위변형도를 일으켜 일정하게 두었을 때 시간  $t$ 에서의 응력도를 말한다.

### II-2 수축변형 (Shrinkage)

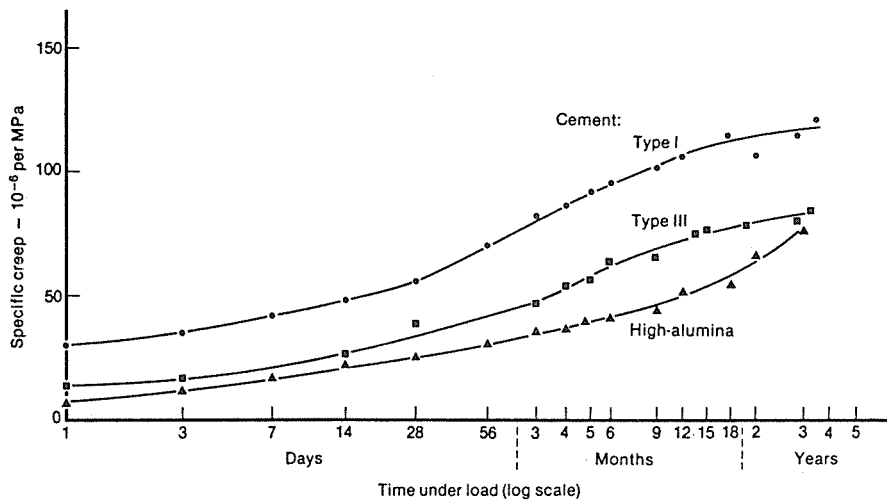
수축변형에도 여러가지 종류로 분류되나, 크게 건조수축 (drying shrinkage)과 수화수축 (hydration, autogenous 혹은 chemical shrinkage)으로 나눌 수 있다. 건조수축은 콘크리트내의 수분의 이동 및 증발에 의해 일어나는 변형으로 총수축변형의 95%정도이다. 물론 다시 수분을 충분히 흡수한다 하더라도 본래만큼 완전히 회복되지는 않는다. 수화수축은 비록 수분의 이동을 허용하지 않아도 수화작용에 의한 자동적인 체적변화에 의해 일어나는 수축변형으로 총수축변형의 약 5%정도이다. 이 자동적인 체적변화는 고온하에서, 부배합에서 증가하는 경향을 보인다.

### III. 장기변형에 영향을 주는 요인들

크리이프와 수축현상에 영향을 주는 요인은 무수히 많이 있으며, 크게 다음 2가지 즉 유전요인 (intrinsic factor)과 환경요인 (extensive factor)으로 나눌 수 있다.

유전요인이란 콘크리트가 타설되면서 정해지는 재료적 특성으로, 설계강도, 골재의 탄성계수, 골재의 비율, 최대골재크기, 시멘트 종류, 구조물의 크기 등을 들 수 있으며, 환경요인이란 콘크리트가 타설된 후에 영향을 주는 요인으로 온도, 습도 및 재하시의 재령 등이 될 수 있다.

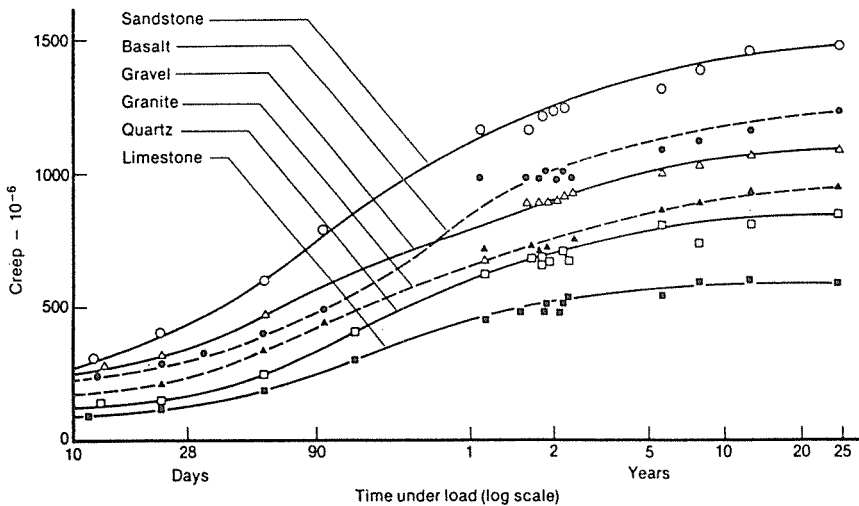
시멘트 종류가 장기변형에 미치는 영향은 총 변형에서 차지하는 비율이 매우 큰 것은 아니나, 중요한 요인에는 틀림없다. [그림 5]에서 시멘트 종류에 따라 달라짐을 알 수 있다. 또한 혼화제의 사용에 따라 변형의 증가를 가져온다는 실험결과가 나오므로 특히 장기거동에 대한 검토가 있어야 할 것이다. 왜냐하면 강도는 고강도화하는데 크리이프, 수축변형은 더욱 증가하면 과도한 변형으로 인한 이용성의 문제가 생기기 때문이다. 그러나 아직 고강도콘크리트에 대한 체계적인 실험은 없으며, 실험치도 부족한 편이다.



[그림 5] 시멘트 종류에 따른 크리이프

[표 1] 수축현상에 미치는 여러요인들

| Factor                                     | Max. effect (%) |
|--|-----------------|
| Coarse aggregate source effect             | 100             |
| Fine aggregate source effect               | 20              |
| Total aggregate source effect              | 150             |
| Washing out minus No. 200 mesh             | 15              |
| 2½ vs. ¾ in. max. aggregate size           | 25              |
| Fine aggregate grading from coarse to fine | 0               |
| Cement source                              | 15              |
| Cement factor                              | 10              |
| Slump                                      | 5               |
| Curing: 7 days vs. 3 days                  | 5               |



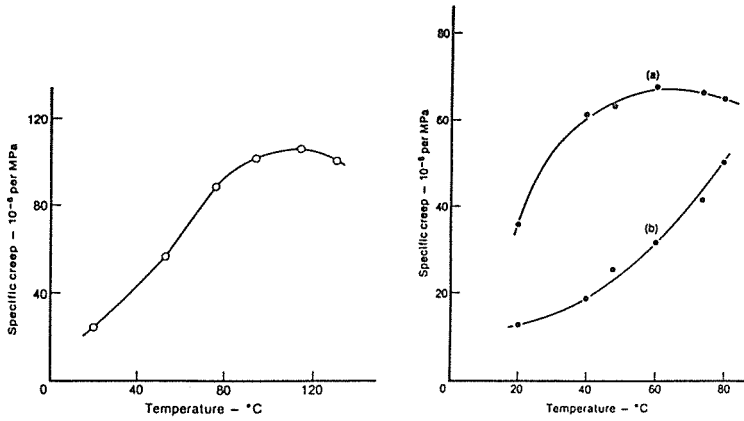
[그림 6] 골재의 종류에 따른 콘크리트 크리이프

골재의 크기가 크리이프 및 건조수축에 주는 영향은 지대하다. 특히 골재가 수축현상에 주는 영향이 매우 큼을 Meininger는 보고하고 있다. ([표 1] 참조). 또한 골재의 종류가 장기변형에 영향을 미친다는 것도 널리 알려진 사실이다. ([그림 6] 참조)

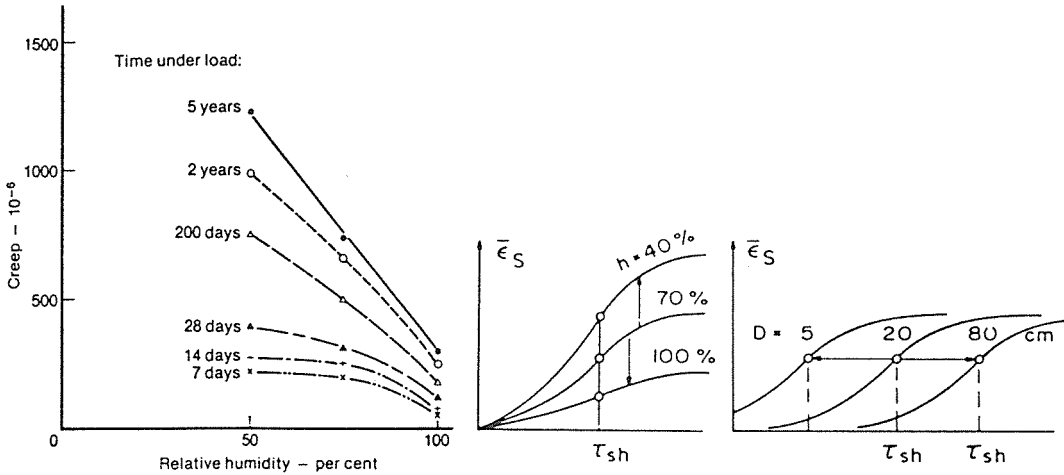
온도가 크리이프에 미치는 영향에 대해서는 많은 연구자들에 의해 실험이 행해졌으나, 서로 상이한 결과를 나타내고 있다. 그러나 대개 -20°C에서 80°C까지는 온도가 증가함에 따라 크리이프도 증가하는 경향을 [그림 7]의 (1)에서 볼 수 있다. [그림 7]의 (2)에 의하면, 하중을 가하기 전에 먼저 콘크리트에 열을 가하는 경우

(a)와 하중이 가해지고 난 후에 온도가 올라가는 경우 (b)가 서로 다름을 보이고 있다. 또 온도가 올라갔다가 다시 내려올 때 크리이프변형이 거의 회복되지 않음도 일부 실험에서 나타나고 있다.

크리이프와 건조수축에 가장 큰 영향을 주는 것이 상대습도이다. 이 상대습도가 장기변형에 주는 요인에는 몇가지가 있는데 [그림 8]의 (1)에서 보이듯이 1)하중이 가해진 재령, 2)습도 양, 3)구조체의 크기를 들 수 있다. CEB(1970) ACI(1978), CS(1978)규준은 습도의 영향이 구조체의 크기에 영향을 받지 않는 것으로 보았으며, CEB-FIP(1978), BIP model은 기본크



[그림 7] 온도 변화에 따른 크리이프

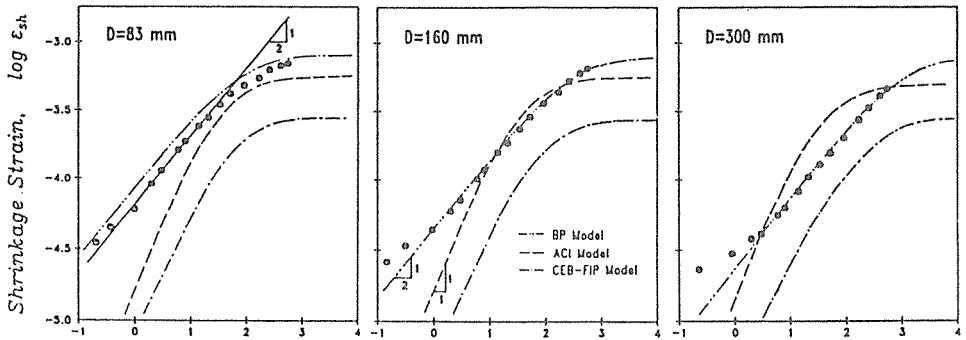


[그림 8] 습도 및 공시체 크기의 영향

리이프에는 영향을 주지 않으나, 총변형에는 영향을 주는 것으로 보았다. Bazant는 BP model에서 상대습도가 건조수축에는  $(1-h_e^3)$ , 크리이프에는  $(1-h_e^{1.5})$ 의 관계의 영향을 미친다고 보았다.

마지막으로 공시체 크기가 크리이프에 주는 영향에 대해 언급하겠다. 공시체의 크기가 크리이프에 주는 영향에 대한 실험도 상호모순되는 결과를 보이고 있으나 대개 공시체가 커지면 크리이프가 줄어든다고 보고되고 있으며, 특히 재하초기에 크리이프율의 차이가 크고, 장기간 후에는 영향이 없음을 보이고 있다.

그러나 건조수축에 대한 공시체 크기의 영향은 거의 절대적이다. diffusion이론에 의하면 같은 양의 건조수축에 이르기 위해 크기가  $D_1$ 인 공시체는  $D_2$ 인 공시체의  $(D_1/D_2)^2$ 배만큼 시간이 걸린다. 즉 두께가 2배이면 같은 건조수축에 이르는 시간이 4배가 된다는 것이다. 이러한 현상을 [그림 8]의 (c)에서 볼 수 있다. 실험치는 이 이론에 잘 일치함을 [그림 9]에서 볼 수 있으며, BP model이 ACI, CEB-FIP model보다 보다 이론적이고 나은 결과를 보임을 [그림 9]에서 알 수



[그림 9] Diffusion이론과 각 model들

있다.

#### IV. 크리이프와 건조수축에 대한 수치적 model

이 장에서는 구조물 해석을 위한 크리이프와 건조수축에 대한 현존의 수치적 model들에 관해서술하고자 한다. 콘크리트는 Polymer와는 달리 재하시간( $t-t'$ )에만 좌우되는 것이 아니라 재하하는 재령  $t'$ 의 함수이기도 하다.

콘크리트는 타설된 직후에 재하될 때는 크리이프가 크게 일어나고, 그 재하되는 재령이 늦어질수록 급격하게 떨어지는 경향을 보이나 ([그림 10]의 (2)에서 수직이동), 오래된 콘크리트에 하중을 가하면 polymer에서와 마찬가지로 재령  $t'$ 에 관계없이 재하시간 ( $t-t'$ )만의 함

수로 되는 경향을 보인다 ([그림 10]의 (2)에서 수평이동).

시간  $t'$ 에 일정한 응력  $\sigma$ 를 가했을 때 시간  $t$ 에서의 총 변형도  $\epsilon(t)$ 는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

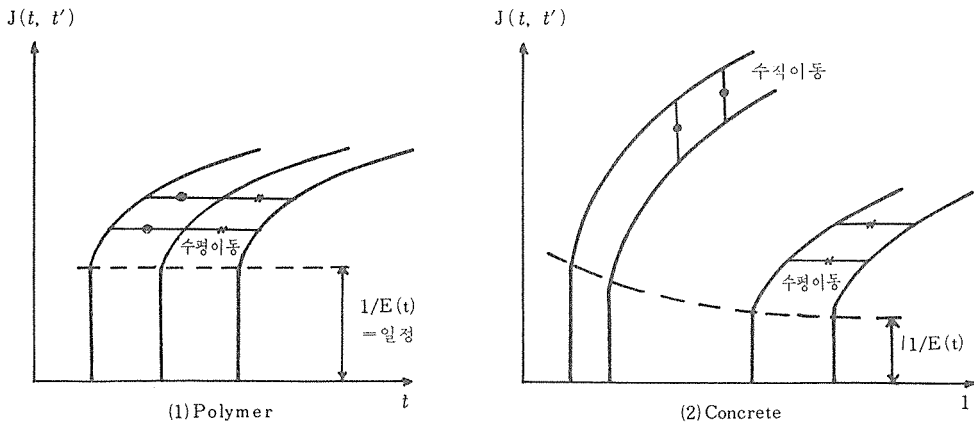
$$\epsilon(t) = T \cdot J(t, t') + \epsilon^\circ(t) \quad \dots\dots (4, 1)$$

$$J(t, t') = \frac{1}{E(t')} + C(t, t')$$

$$= \frac{1}{E(t')} [1 + \phi(t, t')] \quad \dots\dots (4, 2)$$

$$\epsilon^\circ(t) = \epsilon_{sh}(t, t') + \epsilon_r(t, t') \quad \dots\dots (4, 3)$$

여기서  $C(t, t')$ 은 “Specific 크리이프”라고 불려지는데 단위응력도 (psi. 혹은 MPa)에 의한 크리이프 변형도를 나타내고,  $\epsilon^\circ(t)$ 는 응력도에는 관계없는 변형도로 건조수축 변형도  $\epsilon_{sh}$ 와 열팽창변형도  $\epsilon_r$ 로 나눌 수 있다.



[그림 10] Polymer와 콘크리트의 비교

세계 각국의 규준들은 위 식에서의 크리이프 함수  $J(t, t')$  (혹은  $\phi(t, t')$ )와 건조수축 변형도  $\epsilon_{sh}(t, t')$ 을 각각 다른 수치적 model을 제시하고 있다. 이 장에서는 ACI 규준, CEB-FIP 규준의 model에 더불어 가장 이론에 근거하여 만들어진 BP (Bazant-Panula) model (NONSAP)에도 BP model을 사용)에 관해 간략히 서술하겠다.

#### IV-1 ACI model

ACI model은 Branson 등에 의한 연구결과를 model화한 것으로 ACI Committee 209는 다음과 같은 model을 제시하고 있다.

- 크리이프

$$J(t, t') = \frac{1}{E(t')} \left[ 1 + \frac{(t-t')^{0.6}}{10 + (t-t')^{0.6}} Cu \right] \quad \dots\dots (4, 5)$$

$$Cu = 2.35 K_r K_H K_T K_S K_F K_A \quad \dots (4, 6)$$

여기서 계수  $K_r$ 는 양생방법,  $K_H$ 는 상대습도,  $K_T$ 는 부재의 두께,  $K_S$ 는 슬럼프치,  $K_F$ 는 세골재비,  $K_A$ 는 AE제 함량에 따른 계수이다.

- 건조수축

$$\epsilon_{sh}(t) = \frac{(t-t_0)}{a + (t-t_0)} (\epsilon_{sh})_u \quad \dots\dots (4, 7)$$

$$(\epsilon_{sh})_u = 780 \times 10^{-6} \times F_H \cdot F_T \cdot F_S \cdot F_C \cdot F_F \cdot F_A \quad \dots\dots (4, 8)$$

여기서 습윤양생이면  $a=35$ 이고, 증기양생이면  $a=55$ 이다. 계수들은 앞의 크리이프 에서와 마찬가지로 각 요인들에 의해 좌우된다.

#### IV-2 CEB-FIP model

CEB-FIP model의 특징은 변형후 회복되는 부분과 회복되지 않고 영구변형으로 남는 부분으로 구분되어 있다는 것이다.

- 크리이프

$$J(t, t') = \frac{1}{E(t')} + \frac{\phi(t, t')}{E_{2s}} \quad \dots\dots (4, 9)$$

$$\phi(t, t') = \beta_a(t') + \varphi_a \beta_a(t-t') + \varphi_r [\beta_r(t) - \beta_r(t')] \quad \dots\dots (4, 10)$$

식 (4, 10)에서  $\beta_a$ 는 지연탄성변형 (delayedelastic creep)을 의미하고  $\beta_r$ 는 회복되지 않는 부분의 값이다. 이러한 값은 규준에 도표화되어

있다.

- 건조수축

$$\epsilon_{sh}(t) = \epsilon_{s0} [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)] \quad \dots\dots (4, 11)$$

$$\epsilon_{s0} = \epsilon_{s1} \cdot \epsilon_{s2} \quad \dots\dots (4, 12)$$

여기서  $\epsilon_{s1}$ 은 외기 습도상태에 따른 계수이고  $\epsilon_{s2}$ 는 공시체 두께에 따른 계수이다.  $\epsilon_{s2}$ 와  $\beta_s$ 의 값은 표를 이용해 구할 수 있다.

#### IV-3 Bazant-Panula (BP) model

개발되어 있는 model중 가장 이론에 근거하고 정확성이 있는 것 중의 하나이다. 따라서 복잡하며, 특징은 기본크리이프에 대해, drying크리이프와 온도변화에 따른 크리이프를 추가하는 방식을 취하는 것이다. 물론 온도효과는 식의 형태는 같으나 계수들을 조정하며, 특히 건조수축과 drying크리이프에 대해서는 diffusion 이론에 근거하여 유도되었다.

- 크리이프

- 1) 기본크리이프

$$J(t, t') = \frac{1}{E_0} + \frac{\varphi_1}{E_0} (t'^{-m} + \alpha) (t-t')^n \quad \dots\dots (4, 13)$$

- 2) drying 크리이프

$$J(t, t') = \frac{1}{E_0} + C_o(t, t') + C_a(t, t', t_0) - C_p(t, t', t_0) \quad \dots\dots (4, 14)$$

$$C_o(t, t') = \frac{\varphi_1}{E_0} (t'^{-m} + \alpha) (t-t')^n \quad \dots\dots (4, 15)$$

(기본 크리이프에서와 동일함)

$$C_a(t, t', t_0) = \frac{\varphi_a'}{E_0} t'^{-\frac{m}{n}} K_h' \epsilon_{sh\infty} S_a(t, t') \quad \dots\dots (4, 16)$$

$$C_p(t, t', t_0) = 0.83 K_h'' S_p(t, t_0) C_o(t, t') \quad \dots\dots (4, 17)$$

- 3) 온도의 영향

$$J(t, t') = \frac{1}{E_0} + \frac{\varphi_r}{E_0} (t_e^{-m} + \alpha) (t-t')^{nr} \quad \dots\dots (4, 18)$$

- 건조수축

$$\epsilon_{sh}(t) = \epsilon_{sh\infty} K_h S(t-t_0) \quad \dots\dots (4, 19)$$



## V. 구조물 해석법

크리이프와 건조수축은 콘크리트 구조물의 거동에 중요한 역할을 한다. 구조물의 장기처짐은 보통 탄성처짐보다 훨씬 크며, 설계자는 중요구조물에 대해서 특히 그 안전성과 이용성을 확보하기 위해 크리이프와 수축효과를 고려하여 해석해야 한다. 가끔 이러한 장기변형은 그 처짐량을 증가시키지만 응력에 있어서는 안전측으로 되는 경우도 있다. 그러나 대부분의 구조물, 특히 쉘과 같이 얇은 구조물은 장기처짐에 의한 과도한 변위로 인해 파괴에 이르기까지도 하고, 긴 콘크리트 기둥은 크리이프 좌굴에 의해 좌굴하중이 탄성좌굴하중보다 훨씬 작아 파괴에 이르기까지도 한다. 또한 대부분의 교량 구조물은 과도한 처짐으로 인해 균열폭의 증가로 그 사용연동안 이용성을 확보하지 못해 보수를 해야될 경우가 자주 일어난다.

이러한 효과를 고려한 구조해석법으로는 컴퓨터에 의한 step-by-step법과 약산 방법으로 유효탄성계수법(EMM, Effective Modulus Method) 재령효과를 고려한 유효탄성계수법(AEMM, Age-Adjusted Effective Modulus Method), Rate-of-Creep(RCM)법 및 Rate-of-Flow(RFM)법 등이 있다. 여기서는 위에 언급한 약산방법에 대해 간단히 설명하고자 한다.

### V-1 유효탄성계수법(EMM)

이 방법은 가장 오래되고 간단한 방법으로 AEMM과 RFM이 나타나기 전 RCM과 더불어 널리 사용되었다. 이 방법의 기본식은 식(5, 1)과 같다.

$$\underline{\varepsilon}(t) = \underline{B} \frac{1}{E_{eff}} \underline{\sigma}(t) + \underline{\varepsilon}^o(t) \quad \dots\dots (5, 1)$$

여기서,  $\underline{B} = \begin{matrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1+\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1+\nu \end{matrix} \quad \dots (5, 2)$

$$E_{eff}(t, t') = \frac{1}{J(t, t')} = \frac{E(t')}{1 + \phi(t, t')} \quad \dots\dots (5, 3)$$

이며, 이  $E_{eff}$ 를 유효탄성계수라고 부르며, 시간  $t'$ 에서 일정한 응력이 작용하여 시간  $t$ 까지 계속된다면 이 방법에 의한 오차는 없으나, 만약 응력이 시간에 따라 증가하면 식(5, 1)에 의한 변형도는 과다평가되고, 응력이 감소하면 과소평가되는 경향이 있다.

### V-2 재령효과를 고려한 유효탄성계수법(AEMM)

1967년 Trost에 의해 제시되고 1972년 Bazant에 의해 정리된 방법으로 TB Method라고도 불려진다. 이 방법은 EMM에 재령에 따른 효과를 고려하여 수정한 것으로 식(5, 4)와 같이 나타난다.

$$\underline{\Delta \varepsilon}(t) = \frac{1}{E''(t, t')} \underline{B} \underline{\Delta \sigma}(t) + \underline{\Delta \varepsilon}''(t)$$

여기서  $E''(t, t') = \frac{E(t')}{1 + x(t, t')\phi(t, t')} \quad \dots\dots (5, 5)$

$$\underline{\Delta \varepsilon}''(t) = \frac{\phi(t, t')}{E(t')} \underline{B} \underline{\sigma}(t') + \underline{\Delta \varepsilon}^o(t) \quad \dots\dots (5, 6)$$

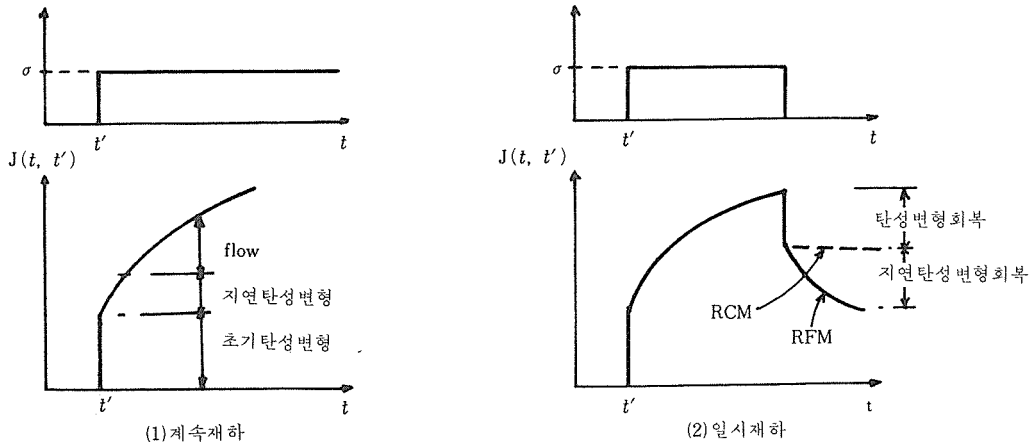
이며,  $x(t, t')$ 은 재령계수(aging coefficient)로서 다음과 같은 관계로 나타낼 수 있다고 Bazant는 제시하고 있다.

$$x(t, t') = \frac{E(t')}{E(t') - R(t, t')} - \frac{1}{\phi(t, t')} \quad \dots\dots (5, 7)$$

대부분  $x(t, t')$ 의 값은 0.5~1정도이며, 보통 0.8정도로 취해도 좋으며,  $x=1$ 이면 이 AEMM은 EMM과 동일하게 된다.

### V-3 Rate-of-Creep법(RCM)과 Rate-of-Flow법(RFM)

1937년 Dischinger에 의해 제안된 RCM에서는 변형도의 변화량이 미분방정식의 형태로 나타난다



[그림 11] RCM과 RFM에서 Unloading

$$d\tilde{\varepsilon}(t) = \frac{1}{E(t')} \underline{B} \underline{\sigma}(t) d\phi + \frac{1}{E(t)} \underline{B} d\tilde{\sigma}(t) + d\tilde{\varepsilon}^{\circ}(t) \quad \dots\dots (5, 8)$$

그러나, 이 미분방정식을 풀기 위해서는  $J(t, t')$ 을 단순화해야 할 필요가 있으며 보통  $E(t)$ 을 시간에 따른 함수로서가 아니라  $E_{\sigma}$  혹은  $E(t')$ 값과  $E(t)$ 값의 평균값으로 기도취하 한다. 이 방법에 의하면 EMM에서와는 반대 현상이 일어나, 응력이 시간에 따라 증가하면 식(5, 8)에 의한 변형도는 과소평가되고, 응력이 감소하면 과대평가되는 경향이 있다([그림 11]의(2) 참조).

RFM의 기본개념은 변형도중에서 회복 되지 않는 부분(Flow)과 회복되는 부분(delayed elastic strain)으로 구분된다는 것이다. [그림 11]의 (1)은 계속재하시의 RFM에 의한 변형도를 나타내며, (2)는 일정기간 후에 하중을 없앴을 때 RCM과 RFM의 차이점을 나타내고 있다.

$$d\tilde{\varepsilon}(t) = \frac{1}{E(t)} \underline{B} d\tilde{\sigma}(t) + \frac{1}{E(t')} \underline{B} \underline{\sigma}(t) d\phi_r + d\tilde{\varepsilon}_a + d\tilde{\varepsilon}^{\circ}(t) \quad \dots\dots (5, 9)$$

여기서  $\phi_r$ 는 Flow 계수로 도표등에서 얻을 수 있으며,  $\varepsilon_a$ 는 delayed 탄성변형도를 말한다.

이 RFM은 수정보완된 RCM으로 볼 수 있

며 유럽지역 국가에서 선호하는 방법이며, EMM과 AEMM은 미국에서 선호하는 방법이다.

특히 우리가 장기변형을 고려하여 해석, 설계해야 구조물로는 포장, 교량, 쉘, 상자형보, 합성보, P.S 구조물 및 원자력 발전소 등과 같은 주요구조물 등을 들 수 있다.

## VI. 결 언

앞에서 크리이프와 건조수축에 관하여 간단히 논술했다. 지난 10여년간 이러한 현상을 설명하기 위해 많은 연구가 이루어졌으며, 특히 model 개발에 많은 노력이 있었다. 그러나 불행히도 아직 정확한 거동을 예측할 수 있는 model은 없으며, 따라서 콘크리트 구조물의 장기거동을 정확히 예측할 수는 없다. 그래서 현재는 이러한 불확실성을 통계적 해석법(Probabilistic Analysis)에 의할려는 시도가 진행 중이며, 보다 나은 model 개발에도 더욱 많은 연구가 진행 중이다. 이 짧은 글이 독자들에게 크리이프와 건조수축을 이해하는데 조그마한 도움이라도 되었으면 하는 생각이며, 많은 오류가 있을 것을 두려워하며, 마지막으로 우리나라에서도 이 분야에 더 많은 연구가 진행되었으면 하는 것이 필자의 희망이다. \*