

---

# 단기 크리프 시험 결과를 이용한 콘크리트의 크리프 예측식의 수정

Modification of Creep-Prediction Equation of Concrete  
utilizing Short-term Creep Test



송영철\*

Song, Young-Chul



송하원\*\*

Song, Ha-Won



변근주\*\*\*

Byun, Keun-Joo

---

## ABSTRACT

Creep of concrete is the most dominating factor affecting time-dependent deformations of concrete structures. Especially, creep deformation for design and construction in prestressed concrete structures should be predicted accurately because of its close relation with the loss in prestress of prestressed concrete structures. Existing creep-prediction models for special applications contain several impractical factors such as the lack of accuracy, the requirement of long-term test, and the lack of versatility for change in material properties, etc., which should be improved. In order to improve those drawbacks, a methodology to modify the creep-prediction equation specified in current Korean concrete structures design standard (KCI-99), which underestimates creep of concrete and does not consider change of condition in mixture design, is proposed.

In this study, short-term creep tests were carried out for early-age concrete within 28 days after loading and their test results on influencing factors in the equation are analysed. Then, the prediction equation was modified by using the early-age creep test results. The modified prediction equation was verified by comparing their results with results obtained from long-term creep test.

Keywords : creep of concrete, early-age concrete, modification of creep-prediction equation, short-term creep test

---

\* 정회원, 한국전력공사 전력연구원 책임연구원  
\*\* 정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수  
\*\*\* 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

· 본 논문에 대한 토의를 2000년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2001년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

크리프(Creep)란 지속하중을 받는 재료 및 부재가 재하순간 변형이 발생한 후에도 추가하중의 작용없이 시간이 경과하면서 변형률이 증가하는 물리적 현상을 말한다. 콘크리트는 시멘트, 골재, 물, 혼화재료 등 여러 구성재료로 이루어진 복합체이기 때문에 금속재료보다는 크리프 변형이 크고 변화가 다양하게 나타난다. 콘크리트의 크리프는 수분의 이동, 화학반응 및 젤 입자의 변형 등 여러 가지 요인에 기인한 것으로 단기 크리프(short-term creep)는 경화된 시멘트 페이스트 내의 혼합수의 재분포에 의해 발생되고, 이후의 장기크리프(long-term creep)는 재하상태 하에서 겔입자(gel particles)의 변형에 의해 발생되는 것으로 알려져 있다<sup>(1)</sup>. 따라서 크리프는 시간의존성 변형으로 인한 부재의 길이 변화에 영향을 미치기 때문에 구조측면에서 중요하게 다루어야 한다. 특히 프리스트레스트 콘크리트 구조물(prestressed concrete structures)의 설계와 해석에 있어 크리프는 강선의 긴장력 손실과 깊은 관련이 있는 대단히 중요한 요소이다. 그러나 크리프 예측 모델의 정확성 결여로 인해 우리가 이용하고 있는 크리프 변형 예측값이 합리적인지의 여부는 확신하기 어렵다. 한편 장기 시험은 최소 2년 이상이 소요되기 때문에 동시에 다수의 건설사업이 진행되거나 공사 진행중 콘크리트 재료원 변경등의 요인이 발생할 경우에는 시험빈도가 대폭 증가되어 시험수행에 어려움이 따른다. 이같이 장기시험은 시간이 많이 요구되며 비효율적 측면이 있기 때문에 단기간의 시험결과를 활용하여 장기 크리프를 예측함이 보다 더 현실적이며 효율적이다.<sup>(2)</sup>

이에 따라, 본 연구의 목적은 재하후 28일간의 단기 크리프 시험 결과를 이용하여 최근 제정된 콘크리트 구조설계기준의 크리프 예측식<sup>(3)</sup>(이하 KCI-99)을 수정하고 이를 통해 28일 이후의 장기 크리프를 예측하고자 한다. 이를 위해 ASTM C 512<sup>(4)</sup> 규정에 따른 기준 크리프 시험은  $\phi 15 \times 30\text{cm}$  원주공시체에서 재하 후 28일 이내의 단기시험을 수행하였으며, 그 결과를 이용하여 설계기준의 크리프 예측모델식을 수정하여

새로운 수정예측모델식을 제안하였고 제안된 예측식에 의한 크리프 변형값과 28일 이후 장기시험 값을 비교, 분석하여 본 연구에서 제안한 방법을 검증하였다.

## 2. 기존 크리프 예측식의 특성

크리프 예측모델에는 실험에 의한 경험적 방법과 수학적 모델에 의한 해석적 방법이 있다. 실험적 접근방법의 시간함수는 수많은 실험의 회귀분석에 의해서 결정되며, 해석적 접근방법의 시간함수는 크리프의 거동특성을 고려한 구성식을 풀어 얻을 수 있다. 두 가지의 접근법에 따라 기존의 예측모델을 분류하면 Table 1과 같다.

Table 1 Classification of creep-prediction equations

Creep-prediction equations	
Empirical approach	KCI-99, CEB/FIP-90 <sup>(10)</sup> , ACI-92 <sup>(6)</sup> , JSCE-96 <sup>(7)</sup> , BP-78 <sup>(8)</sup>
Analytical approach	BP-KX <sup>(9)</sup>

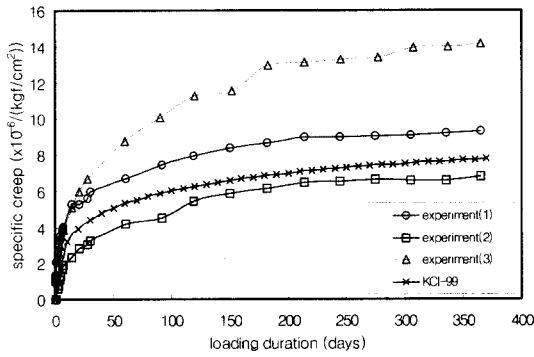
우리가 일반적으로 실무에 적용하고 있는 예측식에 의한 크리프 예측값은 대부분 실험에 의한 경험공식으로 물시멘트비, 재하시 재령, 응력 강도비 등 많은 영향인자가 있기 때문에 상당한 오차가 발생하게 된다.<sup>(10)</sup> 이와 같이 예측모델의 오차에도 불구하고 설계자들은 이를 그대로 이용하고 있는 실정이다.

일반적으로 콘크리트의 크리프에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 재하시 재령과 응력강도비로 알려져 있다. Table 2는 기존 크리프 예측모델식이 고려하고 있는 영향인자를 정리한 것으로 크게 콘크리트 재료구성의 영향에 관련된 내적요소와 양생 및 재하시 재령에 관련된 외적요소로 나눌 수 있다. 우리가 현재 활용하고 있는 콘크리트 구조설계기준의 크리프 예측식은 CEB/FIP-90 예측식을 채택한 것으로, 내적요소의 영향인자로 압축강도와 시멘트 종류만을 고려하고 있으며, 1종 시멘트와 5종 시멘트에 따른 크리프는 차이가 없는 것으로 하고 있다. Fig. 1은 동일한 압축강도를 가지나 3가지 각기 다른 배합으로 제작

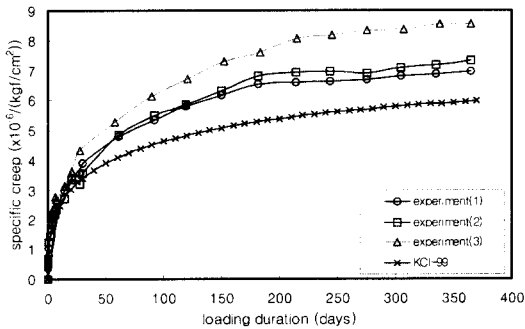
Table 2 Creep influencing factors

	Influencing factor	KCI (99)	ACI-209 (92)	JSCE (96)	BP-KX (96)
i n t e r n a l	unit cement		○	○	○
	unit water			○	
	W/C			○	○
	unit weight		○		○
	compressive strength	○			○
	S/A				○
	slump		○		
	air content		○		
	cement type	○			○
	V/S		○	○	○
	notional size	○	○	○	
	e x t e r n a l	curing duration		○	
curing method		○	○		○
curing temperature		○			○
relative humidity		○	○	○	○
age at loading		○	○	○	○

된  $\phi 15 \times 30\text{cm}$  원주공시체를 기준 온도( $20^\circ\text{C}$ )와 기준 습도(50%)가 유지되는 항온 항습실에서 동일한 방법으로 실시된 각각 재령 7일과 28일의 크리프 시험결과와 콘크리트구조설계기준(KCI-99)의 크리프 예측식에 의한 비크리프를 비교한 것이다. 그림과 같이 KCI-99 크리프 예측식은 실험 결과보다 크리프 변화량을 낮게 예측하고 있으며, 특히 재하시 재령 28일의 예측값은 현저하게 낮게 예측됨을 알 수 있다. 또한 실험결과는 동일압축강도를 가지더라도 물시멘트비, 단위시멘트량, 잔골재율등의 배합설계가 다름에 따라 크리프 변화량이 각기 다르며 KCI-99 크리프 예측식은 이러한 배합설계의 차이를 고려하지 못하고 있음을 알 수 있다. 즉, KCI-99 크리프 예측식은 배합조건의 변동을 고려하지 못하고 있을 뿐 아니라 크리프 값을 적게 예측하고 있다는 점에서 단기크리프 시험의 합리적 활용의 필요성과 함께 크리프 예측식의 수정방법의 도출이 필요하다.



(a) Age at loading : 7 days



(b) Age at loading : 28 days

Fig. 1 Evaluation of KCI-99 prediction equation

### 3. 크리프 시험

본 연구에서는 1, 3, 7, 28일의 재하시 재령을 가지는 콘크리트의 단기시험(재하후 28일)을 통해 크리프 발생량을 변형요소별로 분리하여 크리프 시험자료를 축적하고 기본 크리프 시험값을 이용하여 초기재령 콘크리트의 영향인자를 분석하였다. 또 한편으로는 크리프 예측모델 수정방법을 검증하기 위해 7, 28일의 재하시 재령을 가지는 콘크리트에 대해 장기시험(재하후 1년)을 수행하였다.

시험은 제작 후 24시간동안 항온 항습실에서 기중 양생 후 탈형하였다. 시험의 변형률은 콘크리트 매립게이지(PML-60)와 수직변위 측정기(LVDT) 및 휘트모어 게이지를 이용하여, 측정시 오차를 최소화 하였으며, 매립게이지와 수직변위 측정기의 측정값 처리를 위해 데이터 로그를 이용하였다. 크리프 시험용 시험 이외에 자기수축, 건조수축 등 크리프 이외의 수축량을 보정하기 위해서 동일조건하에 제작된 무재하의 공시체에 대해 동일 항온 항습실내에서 변형률을 측정하였다. 자기수축 및 기본 크리프 측정용 시험은 재하전 파라핀으로 밀봉시켜 외부로의 수분전달

Table 3 Classification of concrete deformations according to test conditions

Conditions		Components		Elastic strain	Autogenous shrinkage + Thermal strain	Drying shrinkage strain	Basic creep strain	Drying creep strain
with loading	Air-dried	①	○	○	○	○	○	○
	Sealed	②	○	○	○	○	○	
without loading	Air-dried	③			○	○		
	Sealed	④			○			
Elastic test		⑤	○					

을 차단한다. 각각의 시험 경우에서 측정된 변형 성분은 Table 3과 같으며, Fig. 2는 이상과 같은 시험장치를 나타낸 것이다. 본 연구에서 이용된 기준배합은 Table 4와 같으며, 시편형상과 양생온도 및 외부습도 등의 시험조건은 Table 5와 같이 ASTM C 512에 명시된 조건을 이용하였다. Table 6은 본 연구에서 실시한 시험의 총 경우로 재하시 재령, 재하시 응력 강도비, 시멘트 종류, 물시멘트비, 잔골재율에 대한 영향인자 분석과 크리프 예측모델 수정방법의 검증에 위한 장기 크리프 시험으로 구성되어 있다.

Table 3과 같이 각각의 시험으로부터 얻은 각종 변형률은 Table 7과 같은 계산법에 의해 기본크리프, 건조크리프, 건조수축, 자기수축 및 온도변형 등 각각의 변형요소별로 분리할 수 있는데, Fig. 3은 이러한 요소별 분리에 의해 도출된 각종 변형률을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 이중 내부영향인자의 영향만을 받는 기본크리프의 결과를 이용하여 영향인자별 분석을 실시하였다.

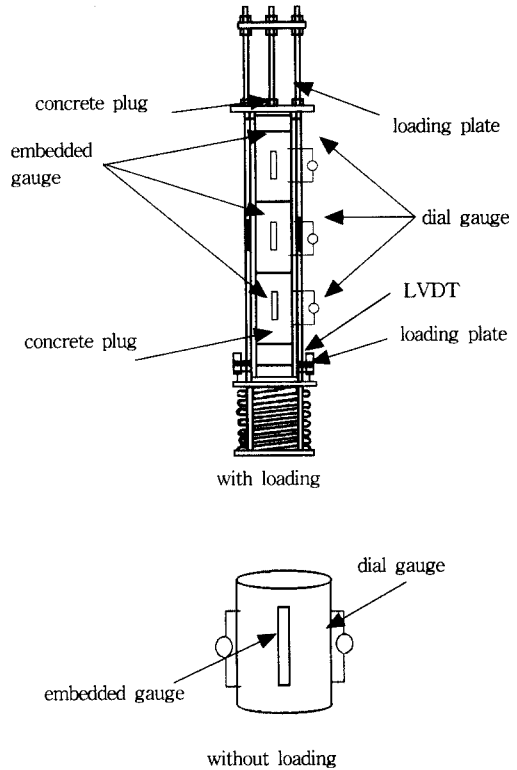


Fig. 2 Test set-up for measure creep test

Table 4 Mix design

Slump (cm)	W/C (%)	S/A (%)	Quantities (kg)				Admixtures (ml)	
			W	C	S	G	AEA	WRA
10	44.5	44.5	179	407	788	983	17	1951

Table 5 Test conditions

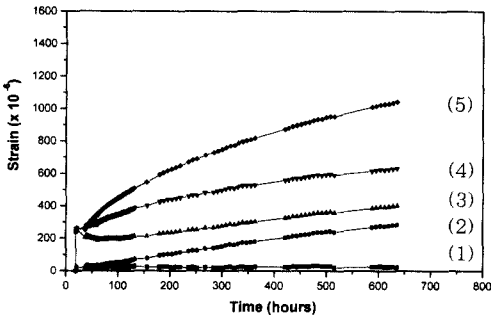
Temperature in curing	Humidity	Temperature	Correction of loading
23±2°C	50±4%	23±2°C	2 %

Table 6 Test cases

CASE	Cement Type	Age at loading (dav)	stress/strength (%)	W/C (%)	S/A (%)	Remark
1	1	1	40	44.5	44.5	Short-term test of 28 days
2	1	1	40	44.5	38	
3	1	3	40	44.5	44.5	
4	1	7	40	44.5	44.5	Long-term test of 1 year
5	1	28	40	44.5	44.5	
6	5	1	40	44.5	44.5	Short-term test of 28 days
7	5	1	20	44.5	44.5	
8	5	1	60	44.5	44.5	
9	5	3	40	55	44.5	
10	5	3	40	44.5	44.5	

Table 7 Derivation of creep strains

Deformation elements	Calculation process
Elastic strain	⑤
Autogenous shrinkage + Thermal strain	④
Drying shrinkage strain	③ - ④
Basic creep strain	② - (④ + ⑤)
Drying creep strain	① - ② - (③ - ④)



(1): Autogenous shrinkage + Thermal strain
(2): (1) + Drying shrinkage strain
(3): (2) + Elastic strain
(4): (3) + Basic creep strain
(5): (4) + Drying creep strain

Fig. 3 Classification of concrete deformations

### 3.1 재하시 재령

재하시 재령이 증가함에 따라 크리프 발생량이 감소하며 이는 콘크리트의 수화도와 관련한다. Fig. 4는 동일한 응력 강도비(40%)인 경우 (CASE 1, 3, 4, 5)에 대해 재하시 재령에 따른 크리프 발생량을 비교한 그래프이다. 본 연구에서 실시한 크리프 시험에서도 재하시 재령이 1일, 3일, 7일, 28일로 증가함에 따라 크리프 발생량이 감소함을 알 수 있다.

### 3.2 재하시 응력 강도 비

일반적으로 콘크리트의 크리프는 응력 강도비의 30~50%까지는 선형으로 비례한다고 알려져

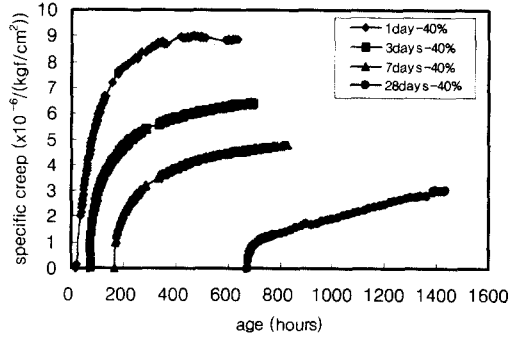


Fig. 4 Specific creep for different loading ages (CASE1, CASE3, CASE4, CASE5)

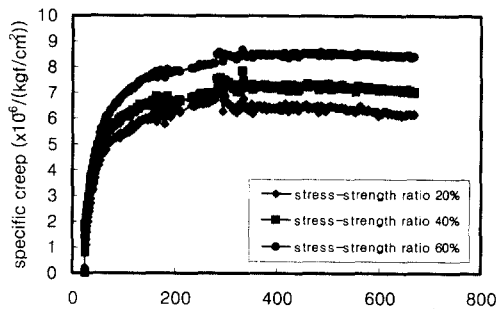


Fig. 5 Specific creep for different stress-strength ratios (CASE6, CASE7, CASE8)

있다<sup>(1)</sup>. Fig. 5는 재하시 응력 강도비 20%와 40%, 60% (CASE 6, 7, 8)의 변화를 비교하고 있다. 응력 강도비가 20%와 40%의 경우 비크리프가 크게 차이가 생기지 않는 반면에, 60%의 경우 변화량이 탄성한계 내에 있는 경우보다 작용응력에 대한 변형률이 더 크게 발생하기 때문에 비크리프의 경우 20%와 40%에 비해 더 크게 나타남을 알 수 있다.

### 3.3 시멘트 종류

Fig. 6은 재하시 재령이 1일인 경우 1종 시멘트와 5종 시멘트의 크리프 변화량을 비교한 것으로 CEB/FIP-90 모델에서 시멘트의 종류를 고려하지 않은 것처럼 실제 시험에서도 별 차이가 발생하지 않음을 알 수 있다.

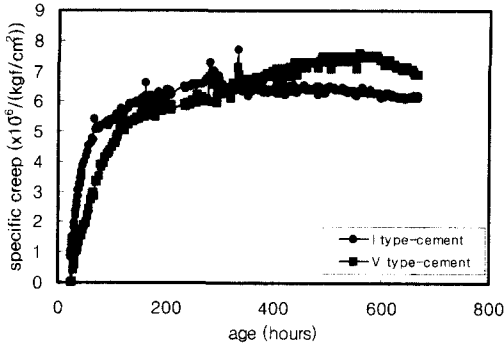


Fig. 6 Specific creep for different cement types (CASE1, CASE6)

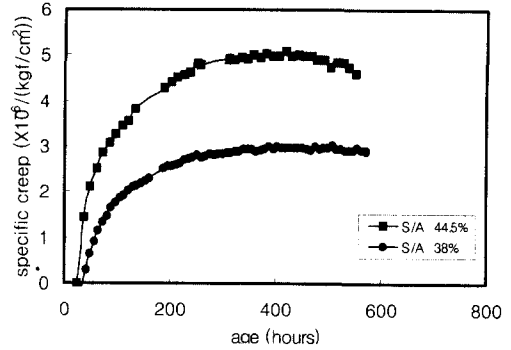


Fig. 8 Specific creep for different S/A (CASE1, CASE2)

### 3.4 물-시멘트 비

물-시멘트비(W/C)는 압축강도에 큰 영향을 미치며, 일반적으로 물-시멘트비가 감소하면 압축강도가 증가하고 크리프 변화량이 감소한다.

Fig.7은 물-시멘트비가 각각 44.5% ( $f_{cu} = 310\text{kgf/cm}^2$ ), 55% ( $f_{cu} = 185\text{kgf/cm}^2$ )인 경우의 크리프 시험 결과이며, 물시멘트비가 클수록 더 큰 크리프 변화량을 보인다.

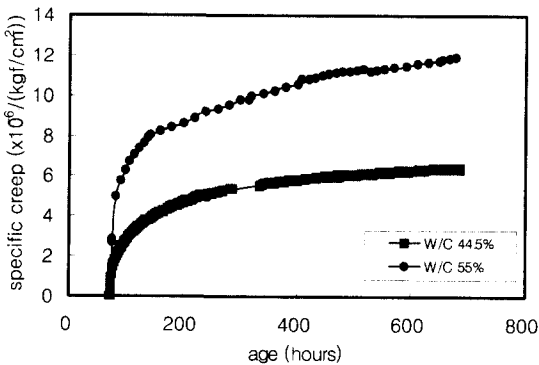


Fig. 7 Specific creep for different W/C (CASE9, CASE10)

### 3.5 잔골재율

일반적으로 잔골재율(S/A)이 증가할수록 크리프 변화량도 증가하는 것으로 알려져 있다<sup>(1)</sup>. 본 연구에서 잔골재율 38%와 44.5%에 대한 크리프 시험을 실시하였으며, 잔골재율이 44.5%인 경우에 38%인 경우보다 더 큰 크리프 변형이 발

생하였다. Fig. 8은 이러한 결과를 보여주고 있다.

이상과 같이 초기재령 콘크리트의 영향인자별 크리프의 변화량을 시험적 연구를 통해 비교해 보았다. 단기재령 크리프 시험의 결과도 장기재령 크리프가 갖고 있는 크리프 영향인자에 따른 크리프 변형특성을 그대로 유지하고 있음을 알 수 있으므로 초기재령 콘크리트에 대한 단기크리프 시험결과로부터 장기크리프 예측이 가능하다는 것을 알았다. 이에 따라 다음에서 단기간의 초기재령 크리프 시험 자료를 이용하여 장기재령 크리프 시험예측을 위한 기존 크리프 예측모델의 수정방법을 제시하고자 한다.

## 4. 단기크리프 시험에 의한 예측모델의 수정방법

### 4.1 콘크리트 구조설계기준의 크리프 예측식

시간  $t'$ 에서의 작용응력  $f_c(t')$ 에 의한 콘크리트의 순간 변형 및 크리프 변형을 함께 고려한 전체 변형률  $\epsilon_{ca}(t, t')$ 은 식(1)과 같이 구할 수 있다.

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

여기서,  $E_{ci}$ 는 식(2)에 의해,  $E_{ci}(t')$ 는 식(3)에 의해서 구할 수 있다.

$$E_{ci} = 2.15 \times 10^5 \cdot \sqrt[3]{f_{cu}/100} \quad (2)$$

$$E_{ci}(t) = \sqrt{\beta_{cc}(t)} E_{ci} \quad (3)$$

여기서,  $f_{cu}$ 는 28일 평균압축강도로 식(4)와 같이 구할 수 있고  $\beta_{cc}(t)$ 는 식(5)에 의해 구할 수 있다.

$$f_{cu} = f_{ck} + 80 \quad (4)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left[\beta_{sc}\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right] \quad (5)$$

여기서,

$$\beta_{sc} = \begin{cases} 0.20 : 3종 시멘트 \\ 0.25 : 1종, 5종 시멘트 \\ 0.38 : 2종 시멘트 \end{cases}$$

크리프 계수  $\phi(t, t')$ 는 양생온도가 20℃이고, 하중이 작용하는 동안의 기온도 20℃인 경우를 기준으로 한 것으로서 다음 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$\phi(t, t') = \phi_0 \beta_c(t - t') \quad (6)$$

여기서,

$$\phi_0 = \phi_{RH} \beta(f_{cu}) \beta(t') \quad (7)$$

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - 0.01RH}{0.214 \sqrt[3]{h}} \quad (8)$$

$$\beta(f_{cu}) = \frac{53}{\sqrt{f_{cu}}} \quad (9)$$

$$\beta(t') = \frac{1}{0.1 + (t')^{0.2}} \quad (10)$$

$$\beta_c(t - t') = \left[ \frac{(t - t')}{\beta_H + (t - t')} \right]^{0.3} \quad (11)$$

$$\beta_H = 15[1 + (0.012RH)^{18}]h + 250 \leq 1500 \quad (12)$$

여기서,  $RH$ 는 상대습도(%)이며,  $h$ 는 부재의 개념치수(notional size : cm)이다.

## 4.2 단기시험에 의한 수정 예측모델의 제안

KCI-99 크리프 예측모델인 식(1)의 전체 변형률  $\epsilon_{cs}$ 은 식(13)과 같이 순간 탄성변형률과 크리프 변형률의 합으로 나타낼 수 있으며, 크리프 변형률은 크리프 변형률 변수( $C$ )와 그에 대한 시간함수로 나눌 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{cs}(t, t') &= \left\{ \frac{f_c(t')}{E_{ci}(t')} \right\} + \left\{ \phi(t, t') \frac{f_c(t')}{E_{ci}} \right\} \\ &= \left\{ \frac{f_c(t')}{E_{ci}(t')} \right\} + \left\{ \phi_0 \beta_c(t - t') \frac{f_c(t')}{E_{ci}} \right\} \\ &= \epsilon_0 + \left\{ \phi_{RH} \beta(f_{cu}) \beta(t') \frac{f_c(t')}{E_{ci}} \beta_c(t - t') \right\} \\ &= \epsilon_0 + C \beta_c(t - t') \end{aligned} \quad (13)$$

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

KCI-99 예측식에서 시간함수  $\beta_c(t - t')$ 는  $t$ 와  $t'$  이외에 상대습도 및 시편의 형상에 관한 함수이기 때문에 콘크리트의 배합차에 상관없이 일정하다. 따라서, 재하후 28일 이내의 단기재령 크리프시험으로부터 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-99 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  $\beta'(f_{cu})$ 를 사용함으로써 최종 수정된 예측모델식을 완성하게 된다. 상기의 수정방법을 정리하면 Fig. 9와 같다.

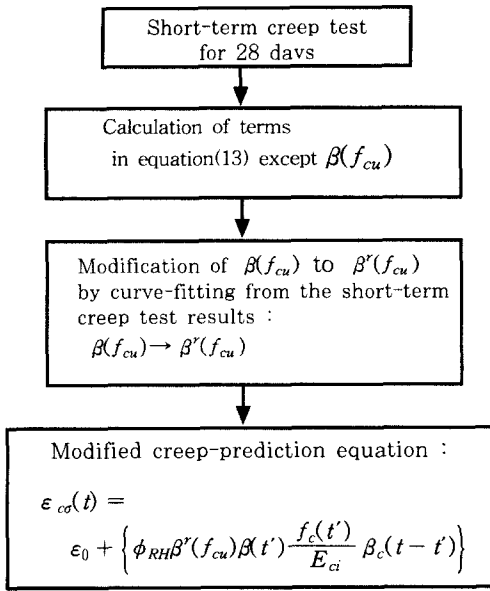


Fig. 9 Procedure for modification of creep-prediction equation

Table 8은 이러한 관점에서 KCI-모델식을 분리한 것이다.

Table 8 Modification of KCI creep-prediction equation

Terms	Components	Modification
Instant strain	$\epsilon_0 = \frac{f_c(t')}{E_{ci}(t')}$	none
Creep strain parameter	$C = \phi_0 \frac{f_c(t')}{E_{ci}}$ $= \phi_{RH} \beta(f_{cu}) \beta(t) \frac{f_c(t')}{E_{ci}}$	Modification of $\beta(f_{cu})$ ( $\beta'(f_{cu})$ )
Creep time function	$\beta_c(t-t') = \left[ \frac{(t-t')}{\beta_H + (t-t')} \right]^{0.3}$	none

Table 9 Case of Long-term creep test (compressive strength = 385 kgf/cm<sup>2</sup>)

CASE	Age at loading (day)	RH (%)	Temp. (°C)	W/C (%)	S/a (%)	Quantities (kg)				Admixtures (ml)	
						W	C	S	G	AEA	WRA
1	7	50	23	44.5	44.5	179	407	788	983	17	1951
2	28										
3	7			40.8	37.0	172	421	627	1068	12	1204
4	28										
5	7			44.5	38.0	172	386	655	1069	12	1203
6	28										

## 5. 수정 예측모델식의 검증

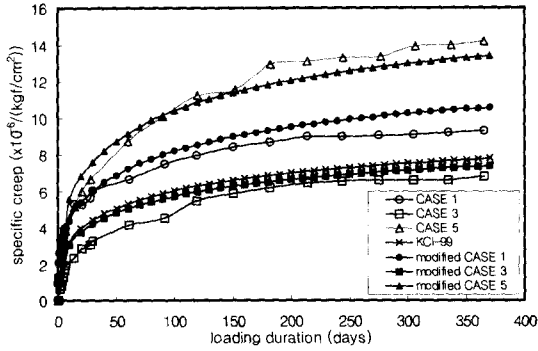
수정된 모델을 검증하기 위해서, 본연구 이외 국내 원자력 발전소 및 국외연구자에 의해 수행된 크리프 시험값을 이용하였다. 특히, 측정값의 신뢰성과 적용성을 고려하여 재하재령 1, 3일의 경우를 제외한 7~28일의 시험값을 이용하여 수정된 크리프 예측모델식과 비교하였다.

한편, 기존 연구에 따르면 장기 크리프를 예측하기 위한 28일간의 단기 크리프 시험값의 회귀 분석은 시험값의 선택에 따라 그 예측정도가 다를 수 있다는 사실을 고려하여<sup>(11)</sup>, 재하후 7일과 28일 사이의 모든 시험값을 이용하였다. Table 9는 본 연구에서 예측모델 수정방법의 타당성 검증을 위해 사용된 동일한 설계기준 강도(385 kgf/cm<sup>2</sup>)에 대한 상이한 3가지 배합의 콘크리트에 대해 재하재령 7일과 28일에 실시한 총 6가지 경우의 시험을 나타낸 것으로서 case 1, 2는 본 연구에서 수행한 시험조건이며 나머지는 국내 원자력 발전소의 건설에 사용한 콘크리트의 크리프 시험조건을 기술한 것이다. Table 10은 본 연구의 수정방법에 의해 수정된 각 변수의 값을 나타낸 것이다.

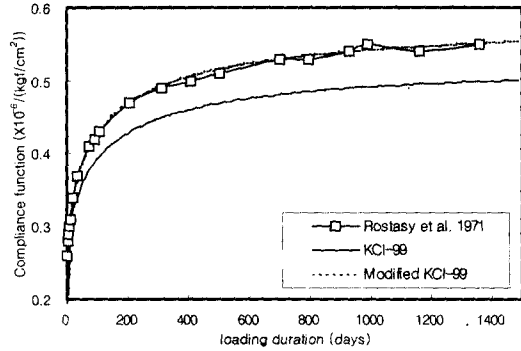
Fig. 10은 이러한 방법에 의해 수정된 예측모델과 28일 이후까지 포함한 1년까지의 시험값을 비교한 것으로 KCI-99 모델이 동일한 압축강도를 사용하는 경우 시험결과와 다르게 동일한 크리프량을 예측하는데 반하여 수정된 예측식은 강도이외의 배합설계의 차이를 고려할 수 있음을 보여준다.

Fig. 11은 Rostacy et al.와 Lambotte and Mommens에 의해 Table 11과 같은 시험조건으로 수행된 4년이상의 장기시험결과<sup>(9)</sup>

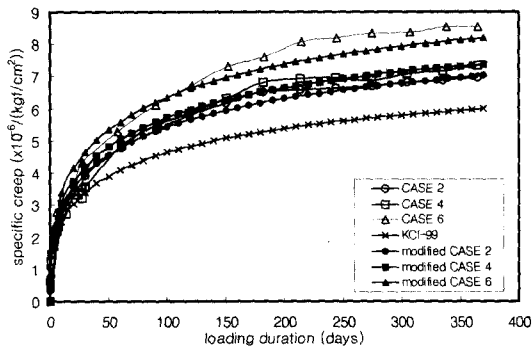




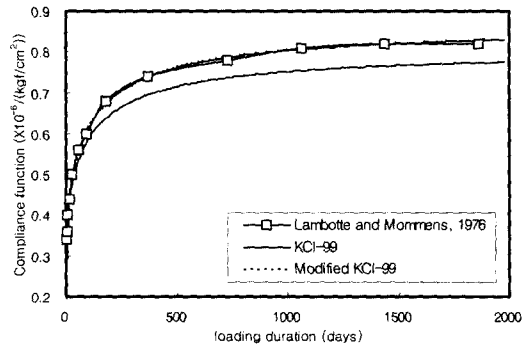
(a) Age at loading : 7 days



(a) Rostacy et al. (1971)



(b) Age at loading : 28 days



(b) Lambotte and Mommens(1976)

Fig. 10 Evaluation of modified KCI-99 creep-prediction

Fig. 11 Verification of modified KCI-99 creep equation

를 이용하여 수정예측방법의 타당성을 검증한 결과를 보여주고 있다. KCI-99 예측모델을 그대로 적용하는 경우보다 수정된 예측모델이 더 우수한 예측정도를 보여주고 있음을 알 수 있다.

Table 10  $\beta(f_{cu})$  and  $\beta^r(f_{cu})$

CASE	$\beta(f_{cu})$	$\beta^r(f_{cu})$	
1	2.458	2.878	
2			
3		3.033	
4			
5			3.365
6			

Table 11 Long-term creep test data

CASE	Age at loading (day)	28 day Compressive strength (kgf/cm)	RH (%)	Notional size (cm)
Rostacy et al.	28	498	65	10
Lambotte and Mommens	18	300	60	7.5

## 6. 결론

본 연구에 의해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 28일간의 단기간 크리프 시험으로부터 얻어진 영향인자의 분석을 통하여 장기 크리프에서의 특징이 단기크리프를 통해서도 나타남을 확인했으며, 단기간 시험에 의해서도 그 영향인자에 따른 크리프를 합리적으로 예측할 수 있음을 밝혔다.
- 2) 콘크리트 구조설계기준의 크리프 예측식은 내부영향인자 중 콘크리트의 28일 압축강도만을 이용하여 극한 크리프를 예측하며, 이는 동일한 압축강도에서 상이한 배합의 경우 그 크리프 변화의 차이를 적절하게 고려할 수 없다. 본 연구에서는 단기간 크리프 시험을 통해 28일 압축강도만으로 결정하

는 내부영향인자에 관한 변수  $\beta(f_{cu})$ 를 재산정하여 강도이외의 배합설계의 차이를 고려하여 크리프 예측의 신뢰도를 높였다.

- 3) 재하 후 28일간의 단기간 시험결과를 반영하는 크리프 수정 예측식은 기존의 콘크리트 구조 설계기준 크리프 예측식 보다 재하재령 28일 이후의 크리프 예측을 우수하게 함을 규명하였다.

### 참고문헌

1. Bazant, Z. P., "Creep and Shrinkage of Concrete:Mathematical Modeling," 4th RILEM International Symposium, Northwestern Undid., 1988.
2. 송하원, 정원섭, 변근주, 송영철, "원자로 격납구조 콘크리트의 크리프 특성에 관한 연구," 한국콘크리트 학회지, 제 9권, 4호, pp. 155-164.
3. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조설계기준," 건설교통부, 1999.
4. ASTM Committee C-9, "Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression, Annual Book of ASTM Sandards," Vol. 04. 02., C-512-82, 1983.
5. CEP/FIP, "Model Code 1990. Comite Euro-International du Beton," 1990.
6. ACI Committe 209, "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structure," ACI-SP-76, 1982.
7. 日本土木學會編, "コンクリート標準示方書(平成8年制定),"1996.
8. Bazant, Z. P. and Wittmann, F. H., "Creep and Shrinkage in Concrete Structures," John Wiley & Sons, NewYork, 1982.
9. Bazant, Z. P., Kim, Joong-Koo and Panula, L., "Improved Prediction Model for Time Dependent Deformation of Concrete : Part 3-Creep at Drying" Materials and Structures, V. 25, 1991, pp. 21-28.
10. 김생빈, 김성욱, "실용 고강도 콘크리트의 크리프에 관한 실험적 연구," 한국콘크리트 학회지, 제 9권 6호, pp. 147-156.
11. Rasko P. Ojdrovic and Mehdi S.Zarghamee, "Concrete Creep and Shrinkage Prediction from Short-Term Tests,"ACI Materials Journal, Vol. 93, No. 2, March-April 1996 , pp. 169-177.

### 요 약

콘크리트 크리프는 부재의 시간 종속성 변형특성 중 가장 크게 영향을 미치는 요소이다. 특히 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 설계와 해석에 있어서 크리프는 강선의 긴장력 손실과 깊은 관련이 있기 때문에 이를 보다 더 신뢰성 있게 예측하여 설계와 시공에 반영함은 대단히 중요하다. 그러나 기존 크리프 예측모델은 때로 특정 프로젝트에 사용시 정확성 결여, 시험기간의 장기간 소요(재하후 365일), 콘크리트 재료원 변경시의 신속한 대처가 어려운 점등의 비현실적 측면이 있다. 현행 "콘크리트 구조 설계기준"에 제시되어 있는 크리프 예측식(KCI-99)도 배합조건의 변동을 적절히 고려하지 못하고 있을 뿐 아니라 동일조건하에서 실제의 크리프 값보다 낮게 예측하고 있다는 점에서 크리프 시험에 따른 수정방법의 도출이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 재하후 28일 이내의 정밀한 단기 크리프 시험을 실시하여 수정이 필요한 영향인자를 분석하였고, 배합의 압축강도만을 고려한 내적요소인자  $\beta(f_{cu})$ 를 배합조건의 변동을 적절히 고려할 수 있도록 단기 크리프 시험자료를 이용한 회귀분석에 의하여 재산정함으로써 보다 현실적이며 신뢰성 있는 크리프 예측방법을 제안하였다. 또한 이를 이용한 크리프 예측결과를 장기 크리프 시험 결과와 비교하여 타당성을 입증하였다.

(접수일자 : 2000. 4. 13)