

# RC 기둥과 SRC 기둥의 장기거동에 관한 실험적 연구

## Experimental Study on Long-term Behavior of RC and SRC Columns

권 승 희\*  
Kwon, Seung Hee

김 진 근\*\*  
Kim, Jin Keun

정 한 옥\*\*\*  
Jung, Han Wook

### ABSTRACT

This paper presents experimental study on long-term behavior of RC and SRC columns. Shrinkage and creep tests were performed for two types of concrete used in manufacturing RC and SRC column specimens. Also, long-term tests under sustained load were carried out for RC and SRC column specimens. Shrinkage functions and creep coefficients to optimally fit the corresponding data were obtained from regression analysis and the regression results, ACI and CEB-FIP 90 model were applied to analyse long-term behavior of RC and SRC column specimens.

Creep coefficients calculated from test data were lower than those predicted by ACI and CEB-FIP 90 models. Long-term analysis results for RC and SRC column specimens using the regression results were relatively more accurate than those obtained using the existing models.

### 1. 서론

콘크리트는 건조수축과 크리프 같은 시간의존적 변형특성을 갖는다. 따라서 콘크리트 구조물은 외부의 하중이 증가하지 않아도 시간에 따라 변형이 증가하며, 이로 인하여 구조물의 사용성에 심각한 문제를 일으킬 수 있다. 특히 고층건물의 경우 기둥 상호간의 부등 축소량은 구조물의 뒤틀림 현상이나 예기치 못한 응력집중을 발생시킬 수 있으며, 따라서 설계 또는 시공시 이에 대한 예측과 보완이 필요하다. 하지만 콘크리트 구조물의 장기거동 해석을 수행하더라도 해석결과와 실제 구조물의 거동은 많은 차이를 나타낼 수 있다. 이는 콘크리트의 역학적 성질을 예측함에 있어 많은 불확실성을 갖고 있으며, 콘크리트의 건조수축과 크리프에 대해 제안된 각종 모델식들은<sup>1),2),3)</sup> 현장에서 타설되는 콘크리트의 다양한 배합 특성을 정확히 고려하고 있지 못하기 때문이다. 따라서 장기거동 해석으로부터 실제의 거동을 보다 정확히 예측하기 위해서는 대상 구조물에 사용된 콘크리트 재료에 대한 장기거동 실험과 구조물을 구성하는 기둥 부재에 대해 장기 지속하중 하에서 실험을 실시하고, 실험결과를 구조물의 해석에 반영하는 것이 합리적일 것으로 사료된다. 본 연구는 이와 같은 취지에서 수행되었으며, 대상 구조물은 서울 여의도에 위치한 주상복합 구조물이다. 현장에서 타설되는 콘크리트에 대해 건조수축 및 크리프 실험과 구조물을 구성하는 RC 기둥과 SRC 기둥의 축소 모형 실험체에 대해 각각 장기거동 실험을 실시하였다. 실험결과는 구조물의 장기거동 해석에 반영될 것이다. 본 논문에서는 실험결과에 대한 분석과 기둥 실험체에 대한 해석이 수행되었다.

### 2. 실험 변수 및 방법

실험에 사용된 콘크리트의 배합은 두 가지로 표 1과 같다.

\* 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정  
\*\* 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 교수  
\*\*\* 정희원, 금호건설 과장

CI 콘크리트와 CII 콘크리트는 각각 RC 기둥과 SRC 기둥의 제작에 사용된다.

표 1 콘크리트 배합

Type	water-agent ratio(%)	fine aggregate ratio (%)	unit weight(kgf/m <sup>3</sup> )						
			water	cement	fly ash	slag	fine aggregate	coarse aggregate	plasticizer
CI	38.0	48.0	148	273	78	39	836	923	5.46
CII	33.9	43.0	161	403	48	24	720	976	6.65

CI 콘크리트와 CII 콘크리트에 대해 건조수축 실험을 수행하였다. 실험변수는 표 2와 같다. 각 변수에 대해 2개의 10×10×40 cm 실험체를 제작하였으며, 실험체의 중앙에 매립게이지를 설치하였다. 타설 후 재령 10일까지 습윤양생하였으며, 그 후 상대습도 60%의 외부 대기에 노출시켰다. 일정한 습도와 온도를 유지하기 위해 항온항습조에서 실험하였으며, 유지온도는 20℃이다.

표 2 건조수축 실험 변수

변수	콘크리트 배합	상대습도(%)
D-CI-60	CI	60
D-CII-60	CII	60

CI와 CII 콘크리트에 대한 크리프 실험도 수행하였다. 실험변수는 표 3과 같고 외부 대기에 노출시킨 상태에서의 크리프 실험을 수행하였다. 각 실험변수에 대해  $\phi 15 \times 30$  cm 실험체를 2개씩 제작하였다. 건조수축 실험체와 같이 타설 후 재령 10일까지 습윤양생하였으며, 그 후 상대습도 60%의 외부 대기에 노출시켜 건조수축에 의한 변형률을 측정하였고, 재령 28일에 가압하여 크리프 실험을 실시하였다. 모든 실험체는 가압 후 57일 동안 변형률을 측정하였으며, 20℃로 일정하게 유지되는 항온실에서 실험하였다.

표 3 크리프 실험 변수

변수	콘크리트 배합	노출 조건
DC-CI	CI	drying(상대습도 60%)
DC-CII	CII	drying(상대습도 60%)

RC 기둥에 대한 장기거동 실험의 변수는 표 4와 같다. 그림 1은 RC 기둥 실험체의 형상 및 게이지의 설치 모습이다. 각 변수에 대해 2개의 실험체를 제작하였다. RC 기둥 실험체는 재령 10일까지 습윤양생하였으며, 그 후 재령 28일까지 상대습도 60%의 외부 대기에 노출시켰다. 재령 28일에 지속하중을 가하여 장기거동 실험을 수행하였으며, 실험시 유지온도는 20℃였다. SRC 기둥에 대한 실험변수는 표 5와 같고 그림 2는 SRC 기둥 실험체의 형상 및 게이지의 설치 모습이다. 각 변수에 대해 2개의 실험체를 제작하였으며, SRC 기둥의 실험조건 및 방법은 RC 기둥과 동일하다.

표 4 RC 기둥의 실험변수

변수	철근비(%)	콘크리트 배합	상대습도(%)
RC-I	6.14	CI	60
RC-II	3.64	CI	60

표 5 SRC 기둥의 실험변수

변수	철근비(%)	콘크리트 배합	상대습도(%)
SRC-I	8.38	CII	60
SRC-II	5.19	CII	60

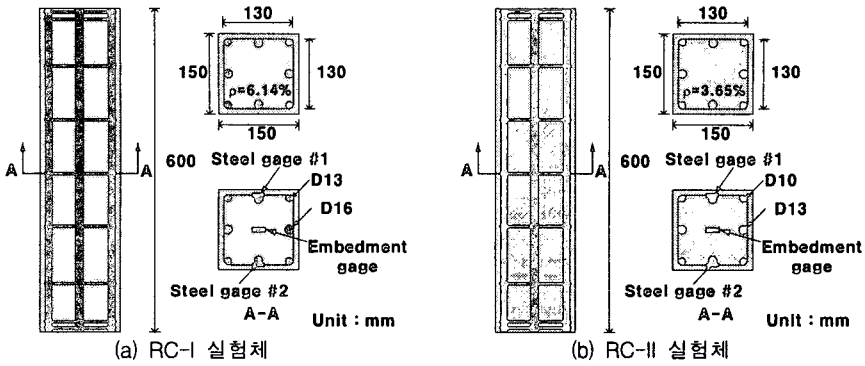


그림 1 RC 기둥 실험체의 형상

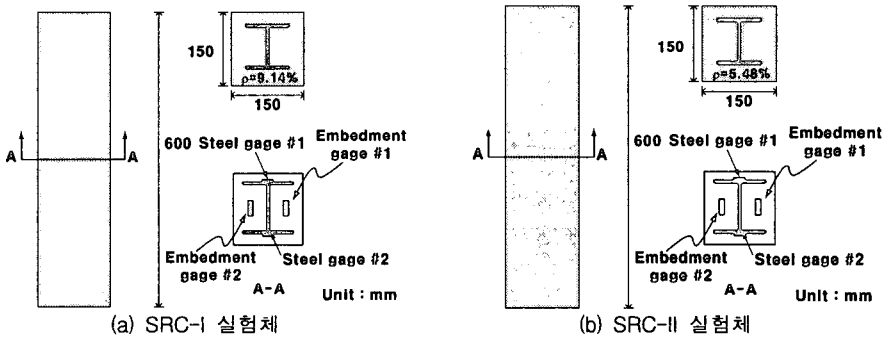


그림 2 SRC 기둥 실험체의 형상

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 건조수축 실험

실험결과에 대해 ACI 모델식과 형태가 같은 식(1)과 CEB-FIP 90 모델식과 같은 형태의 식(2)로 회귀분석을 실시하였다.

$$\epsilon_{sh} = \epsilon_{\infty} \frac{(t - t_0)}{\alpha + (t - t_0)} \quad (1)$$

$$\epsilon_{sh} = \epsilon_{sho} \sqrt{\frac{(t - t_0)}{\beta + (t - t_0)}} \quad (2)$$

여기서,  $\epsilon_{sh}$ 는 시간에 따른 건조수축 변형률,  $t_0$ 는 외부 대기에 노출될 때의 콘크리트 재령,  $t$ 는 건조수축량을 구하고자 하는 시점의 재령을 의미한다. 식(1)과 (2)에서  $\epsilon_{\infty}$ 과  $\epsilon_{sho}$ 는 각각 무한한 시간이 지났을 때의 건조수축 변형률을 의미한다. 습윤양생된 콘크리트에 대해 ACI 모델에서 제시하고 있는  $\alpha$ 는 35이고, CEB-FIP 90 모델에서 제시된 식으로부터 계산된  $\beta$ 는 87.5이며, 회귀분석을 수행함에 있어 이 값들을 사용하였다. 회귀분석결과와 ACI, CEB-FIP 90 모델의 예측값을 비교해 보았으며, 그림 3과 같다.

그림 3에서는 실험결과와 장기간의 예측결과를 비교하기 위해 100년까지 log-scale로 나타내었다. 각 그림에서는 각 변수에 대해 2개의 실험체로부터 측정된 결과를 평균하여 나타내었다. 회귀분석결과와 모델식에 의해 계산된 극한 건조수축량은 표 6에 정리하였다. 그림 3(a)에서 식(1)을 이용한 회귀분석 결과와 ACI 모델의 예측값은 초기에는 실험결과보다 작은 값을 나타냈으며, 시간이 증가할수록 회귀분석결과는 실험결과를 초과하여 가장 큰 값을 나타내었고, 예측값은 가장 작은 값을 보였다. 식(2)와 CEB-FIP 90 모

델의 예측값은 실험결과를 초기부터 정확히 모사하고 있으며, 100년 후 건조수축량의 차이도 미미한 것으로 나타났다. 그림 3(b)에서 식(1)과 ACI 모델의 예측값은 그림 3(a)와 같은 경향을 보였으며, 식(2)의 분석결과와 CEB-FIP 90 모델의 예측값은 초기의 실험결과를 정확히 모사하고 있으나 시간이 지남에 따라 변형률이 다소 차이를 보였다. 이 변수의 경우는 식(2)의 회귀분석결과가 실험결과를 가장 정확히 모사하고 있으며, 다른 경우와 비교했을 때 극한건조수축 변형률도 중간정도의 값으로 나타나 합리적인 것으로 판단된다.

### 3.2 크리프 실험

DC-CI과 DC-CII 실험체에서 측정된 변형률에는 건조수축에 의한 변형률도 포함되며, 위의 건조수축 실험결과로부터 이를 보정하여 나타내었다. 크리프 실험결과로부터 ACI 모델과 같은 형태의 식(3)과 CEB-FIP 90 모델과 같은 형태의 식(4)를 이용하여 크리프 계수에 대한 회귀분석을 수행하였다.

$$\phi(t, t') = \phi_u \frac{(t-t')^\gamma}{\delta + (t-t')^\gamma} \quad (3)$$

$$\phi(t, t') = \phi_o \left[ \frac{(t-t')}{\eta + (t-t')} \right]^\chi \quad (4)$$

여기서,  $t$ 와  $t'$ 은 크리프 변형을 구하고자 하는 시점의 재령과 가압시의 재령을 의미한다.  $\phi$ 는 크리프 계수이고  $\phi_u$ 와  $\phi_o$ 는 무한한 시간 후의 크리프 계수이다. 상수  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\chi$ ,  $\eta$ 는 함수의 형태를 결정하는 상수이다. 회귀분석을 수행함에 있어  $\delta$ 와  $\eta$ 는 각각 ACI와 CEB-FIP 90 모델에서 제시하고 있는 값인 10과 363으로 정하였고, 실험결과를 최적으로 모사하는  $\phi_u$ ,  $\phi_o$ ,  $\gamma$ ,  $\chi$ 의 값을 구하였다. ACI 모델과 CEB-FIP 90 모델은 서로 고려하는 탄성계수가 다르며, 이를 고려하여 회귀분석을 하였다. 재령 28일에서 측정된 CI과 CII 콘크리트의 활선 탄성계수는 각각 203000 kgf/cm<sup>2</sup>, 240000 kgf/cm<sup>2</sup>였으며, 강도는 316 kgf/cm<sup>2</sup>, 430 kgf/cm<sup>2</sup>이었다. 회귀분석으로부터 얻은 결과와 ACI와 CEB-FIP 90 모델에 의해 계산된 극한 크리프 계수는 표 7에 정리하였다. 크리프 계수의 실험결과와 회귀분석 결과 및 모델식의 예측결과에 대해 그림 4에 나타내었다. 예측 모델식은 실험결과와 회귀분석결과보다 크게 나타났으며, 플라이 애쉬와 슬래그의 시멘트 대체율이 높은 DC-CI에서 그 차이가 더 크게 나타났다. 플라이 애쉬와 슬래그는 크리프 발생량을 감소시킨다는 연구결과가 몇몇 연구자들에 의해 보고된 바 있으며, 실험결과와 회귀분석결과가 예측 모델식보다 작은 값을 갖는 것은 배합의 특성에 의한 것으로 볼 수 있다. 식 (3)을 이용한 회귀분석 결과는 측정값과 보다 정확히 일치하고 있는 것으로 나타났다.

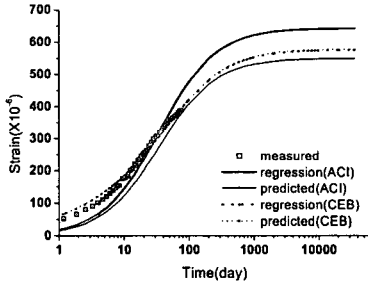
### 3.3 RC 기둥과 SRC 기둥의 장기거동 실험

RC-I 실험체와 RC-II 실험체에 가해진 지속하중은 각각 25 tonf와 28 tonf이다. CI 콘크리트의 건조수축 실험결과에 대해 식(2)로 회귀분석하여 얻은 결과와 식(3)으로 크리프 실험결과를 회귀분석하여 얻은 결과를 이용하여 AEMM<sup>9)</sup>으로 해석을 수행하였다. 또한 실제 모델식을 적용한 해석결과와 비교해 보기 위해 ACI 모델과 CEB-FIP 90 모델을 적용한 해석도 수행하였다. 그림 5는 해석결과들과 실험체에서 측정된 콘크리트의 변형률을 나타낸 것이다. 측정 변형률은 두 개의 실험체에서 측정된 값을 평균하여 나타내었다. 콘크리트 재료 실험의 회귀분석 결과를 사용한 해석결과는 실험결과를 매우 정확히 예측하였으며, 모델식을 사용한 해석결과들은 실험결과를 과대평가 하고 있다. 이는 장기거동 해석을 수행함에 있어 재료 실험의 결과를 해석에 적용하는 것이 해석의 정확성을 높이는데 있어 매우 합리적임을 보여주고 있다.

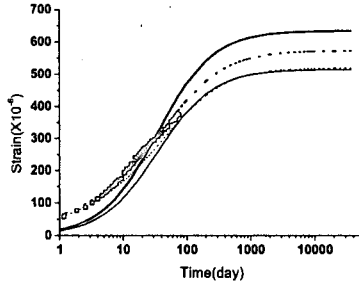
SRC 기둥 실험체에 대해서도 RC 기둥과 같이 해석을 수행하였으며, 그림 6은 실험결과와 해석결과를 나타낸 것이다. SRC-I과 SRC-II에 가해진 장기 지속하중은 25 tonf이다. SRC 기둥에 대해서도 CII 콘크리트의 건조수축 실험과 크리프 실험으로부터 얻은 회귀분석 결과를 사용한 해석결과가 실험결과에 가장

표 6 건조수축 실험결과와 회귀분석 결과

변수	식(1)	ACI 모델	식(2)	CEB-FIP 90 모델
	$\epsilon_{\infty}$	$\epsilon_{\infty}$	$\epsilon_{sho}$	$\epsilon_{sho}$
D-CI-60	643	550	576	579
D-CII-60	635	515	574	520



(a) D-CI-60

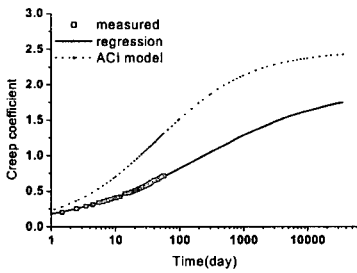


(b) D-CII-60

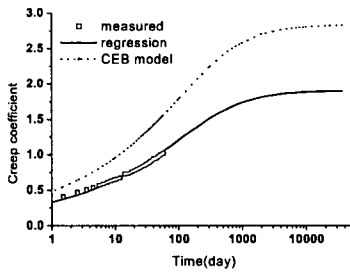
그림 3 건조수축 실험결과 및 회귀분석결과와 예측 모델식과의 비교

표 7 크리프 계수에 대한 회귀분석 결과 및 모델식의 예측 결과

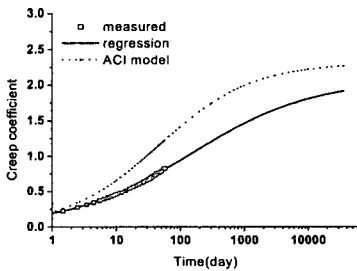
변수	식(3)		ACI 모델	식(4)		CEB-FIP 90 모델
	$\phi_u$	$\gamma$	$\phi_u$	$\phi_o$	$\chi$	$\phi_o$
DC-CI	1.94	0.43	2.47	1.91	0.30	2.84
DC-CII	2.07	0.46	2.31	2.29	0.30	2.44



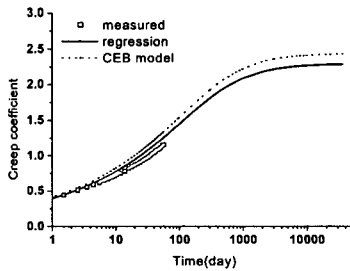
(a) DC-CI 크리프 계수(ACI)



(b) DC-CI 크리프 계수(CEB-FIP 90)



(c) DC-CII 크리프 계수(ACI)



(d) DC-CII 크리프 계수(CEB-FIP 90)

그림 4 RC 기둥과 SRC 기둥의 실험결과 및 해석결과

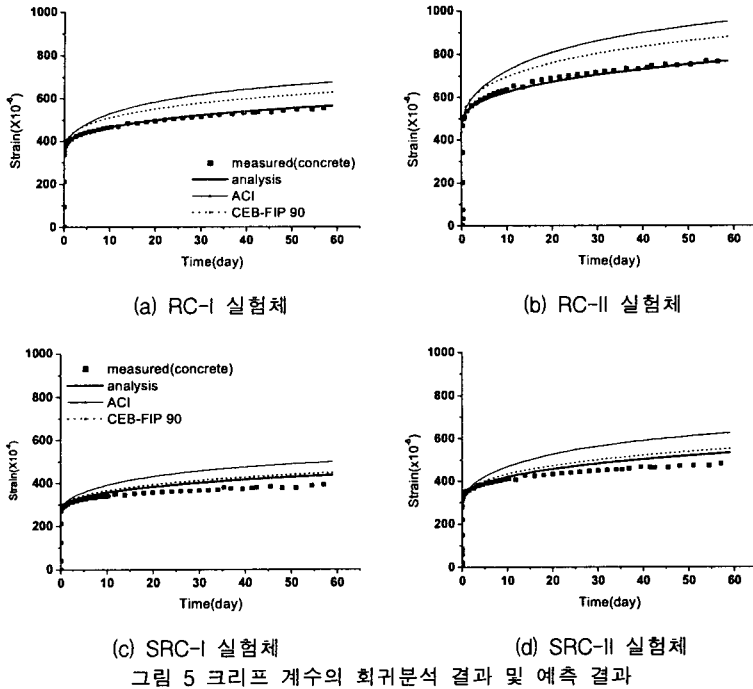


그림 5 크리프 계수의 회귀분석 결과 및 예측 결과

근접하였으며, ACI 모델을 사용한 해석결과는 매우 큰 값을 나타내었다. CEB-FIP 90 모델을 사용한 해석결과는 회귀분석 결과를 적용한 해석결과와 측정 기간 내에서 다소 큰 값으로 근소한 차이를 보였다. 하지만 표 7에서 보는 바와 같이 회귀분석으로부터 얻은 개념크리프계수는 CEB-FIP 90의 예측값과 큰 차이를 보이며, 측정기간 이후 오랜 시간 경과 후에는 두 해석결과사이의 차이가 커질 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서 수행한 실험의 결과와 분석결과를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 상대습도 60%에서 CI과 CII 콘크리트에 대해 수행한 건조수축 실험에 대한 식(2)를 이용한 회귀분석결과는 합리적인 것으로 판단되며, 구조물 또는 부재의 해석에 있어 CEB-FIP 90 모델의 제안사항 대로 부재의 크기 및 온도에 대해 보정하여 회귀분석 결과를 사용하는 것이 타당한 것으로 사료된다.
- 2) 건조조건에서의 크리프 실험결과와 이에 대한 회귀분석 결과는 예측 모델식에 비해 작은 것으로 나타났으며, 이는 플라이 애쉬와 슬래그를 사용한 콘크리트 배합 특성에 기인하는 것으로 판단된다.
- 3) 회귀분석결과를 사용한 RC 기둥과 SRC 기둥의 해석결과는 실험결과를 정확히 모사하였으며, 기존 모델식이 적용된 해석결과는 많은 오차를 나타내었다.

#### 참고문헌

1. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures".
2. Comite Euro-International Du Beton, "CEB-FIP Model Code 1990".
3. Bazant, Z.P., "Creep and Shrinkage Prediction model - B3", Materials and Structures, Vol. 28, 1995. pp. 357-365.
4. Bazant, Z.P., "Prediction of Concrete Creep Effects Using Age-Adjusted Effective Modulus Method", ACI Journal, No.69-20, p.212-217.