

고강도 콘크리트 부재의 크리프 및 건조수축 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Creep and Shrinkage Behavior of High-Strength Concrete Members

오병환* · 엄주용** · 유승운*** · 차수원**** · 임동환**

Oh, Byung Hwan · Um, Joo Yong · You, Seung Un · Cha, Soo Won · Lim, Dong Hwan

Abstract

Many researchers have performed extensive studies on the creep and shrinkage of concrete. Mechanism of creep and shrinkage however is not quite well-known, especially for high strength concrete. Therefore, the purpose of this study is to explore the shrinkage and creep characteristics of high strength concrete. The main variables investigated include condition of drying, reinforcement and duration of load. The effects of drying and reinforcements are clarified and compared with various existing models. The present study provides useful data for the design and analysis of high strength concrete structures.

요 지

콘크리트가 구조용 재료로서 활용되기 시작한 이래 크리프와 건조수축의 특성 규명을 위한 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되어 왔다. 그러나 그 거동은 아직도 명확히 규명된 것은 아니며 이는 고강도 콘크리트의 경우 더욱 그러하다. 따라서 본 연구는 현재 국내에서 그 사용이 늘어나고 있는 고강도 콘크리트의 크리프 및 건조수축특성에 대한 기본적인 자료를 제공하기 위해 수행되었다. 본 연구의 주된 변수는 고강도 콘크리트, 배근유무, 철근비, 건조조건, 재하재령 등이며, 이들의 영향에 대한 크리프 및 건조수축특성을 규명하였다. 이것은 앞으로 고강도콘크리트구조물 설계에 중요한 자료가 될 것으로 사료된다.

1. 서 론

콘크리트의 크리프와 건조수축은 구조물 제작후에 발생하여 콘크리트에 균열이나 내구성 저하등을 유

발하므로, 일단 발생한 후에는 그에 대한 제어가 어렵다는 점때문에, 이의 사전 예측과 방지에 대한 연구가 광 범위하게 진행되어 왔다. 그러나 이러한 크리프와 건조수축의 메카니즘은 현 시점에서 완벽하게 밝혀져 있지는 않다. 그 이유로는 이에 영향을 미치는 인자로 콘크리트의 조성 뿐만 아니라 주위 환경, 구조물의 성격, 구조물의 형태까지 고려해야 한다는 점을 들 수 있다. 특히 최근 들어 사용이

* 정회원 · 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 정회원 · 서울대학교 공과대학 토목공학과 박사과정수료

*** 정회원 · 삼성종합건설 기술연구소 선임연구원

**** 정회원 · 서울대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

급증하고 있는 고강도 콘크리트의 경우 그 발생정도는 상대적으로 적은 편이나 일단 발생한 경우에는 상당한 문제를 유발하는 것으로 알려져있어 이에 대한 주의가 요망된다.

크리프와 건조수축은 프리스트레스트구조물에 많은 영향을 미치며, 건조수축 및 크리프로 인한 프리스트레스의 손실뿐 아니라, 장기처짐에도 큰 영향을 미치므로 이에 대한 충분한 고려를 하여야 한다. 특히, 종래와 다른 고강도 콘크리트 사용의 경우에는 이러한 프리스트레스 손실에 대한 정확한 이해가 요구되며 이를 통해서만이 안전한 구조물 제작이 가능하다.

본 연구의 목적은 최근들어 그 사용이 증가추세에 있는 성능이 우수한 고강도콘크리트의 크리프 및 건조수축특성을 규명하고 실제구조물설계에 중요한 기초를 제공하는데 있다. 그동안의 크리프 및 건조수축연구는 철근이 없는 무근콘크리트에 국한되어 왔으나, 실제구조물은 철근이 배근되므로 배근효과가 명확히 규명되어야 한다.

2. 실험 개요 및 방법

2.1 실험 목적

본 실험은 고강도 콘크리트의 크리프 및 건조수축 특성을 파악하고 철근의 구속효과를 규명하는데 그 목적이 있다.

실험에 사용된 시편은 배근에 의한 크리프 및 건조수축 억제 효과를 고려하여 무근과 배근된 경우를 나누어 제작하였고 그 크기는 15×30cm인 원형 공시체이다. 배근된 경우에도 철근비의 효과를 관찰하기 위해 그림 1에서 보인 바와 같이 D6, D10 이형철근을 배근한 경우로 나누었고 이때의 철근비는 0.64%, 1.78%이다. 온습도의 영향을 최소화하기 위해 상대습도 50%, 온도 23°C로 유지되는 항온항습실에서 실험을 수행하였다. 동시에 크리프 및 건조수축 시편 외부에 파라핀으로 도포하여, 시편의 내·외부의 수분 이동이 배제된 경우의 크리프 및 건조수축 변형도를 측정하는 실험을 병행하였다.

크리프 실험시의 재하 하중은 극한 압축 강도에 따라 결정되는 변수인데 압축강도를 시험한 결과 460kg/cm²의 평균 압축강도를 얻었다. 이 결과에

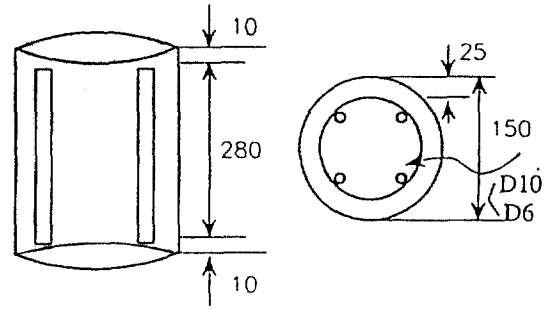


그림 1. Reinforcement arrangements of test specimens

표 1. Variables and classifications of creep and shrinkage test specimens

Specimen	Condition of drying (%)	Reinforcement ratio	Applied stress (f_c/f'_c)
C30A-U	unsealed	0.0	0.3
C30A-S	sealed	0.0	0.3
C30B-U	unsealed	0.64	0.3
C30B-S	sealed	0.64	0.3
C30C-U	unsealed	1.78	0.3
C30C-S	sealed	1.78	0.3
SA-U	unsealed	0.0	0.0
SA-S	sealed	0.0	0.0
SB-U	unsealed	0.64	0.0
SB-S	sealed	0.64	0.0
SC-U	unsealed	1.78	0.0
SC-S	sealed	1.78	0.0

근거하여 크리프 실험을 위한 재하 강도비를 각각 극한강도의 30%로 두고 이에 해당하는 138kg/cm² (24.4ton)를 재하하였다.

지금까지 보인 바 철근비, 파라핀 도포 유무, 재하 하중을 실험 변수로 정하여 크리프 시편 10개와 건조수축 시편 6개를 제작하였고, 각 실험 변수에 따른 시편 분류는 표 1과 같다.

2.2 실험재료 및 방법

(1) 실험 재료

시멘트는 제3종 조강 시멘트를, 조골재는 단양산

표 2. Mix Design

W/C (%)	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	Admixture (kg/m ³)
38	196	516	612	1082	7.740

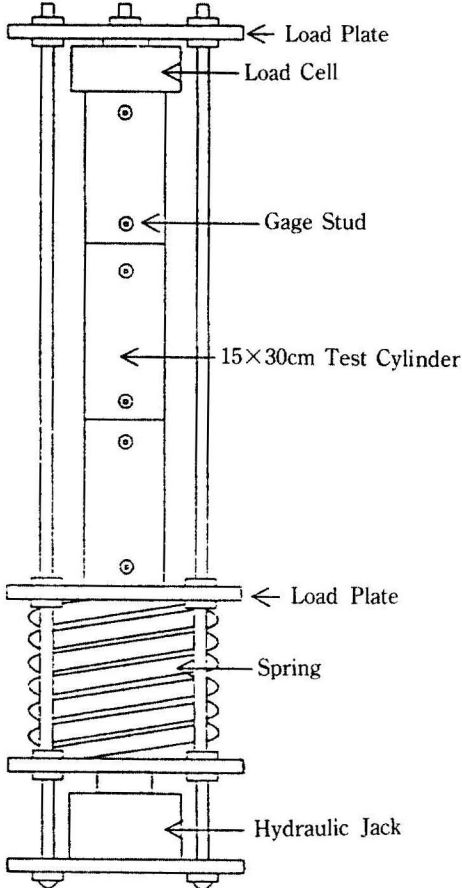


그림 2. Test frame.

의 19mm 쇠석을, 세골재는 한탄강산을, 혼화제로는 고유동화제 Mighty 150을 각각 사용하였다.

위와 같은 재료를 사용하여 제작한 콘크리트의 배합 설계표는 표 2와 같고, 혼화제는 시멘트 중량 비로 1.5% (7.740 kg/m³)를 투입하였다.

(2) 실험 방법

크리프의 공시체 제작 및 실험 방법은 KS F 2453 (콘크리트의 크리프 시험방법)과 ASTM C512-82

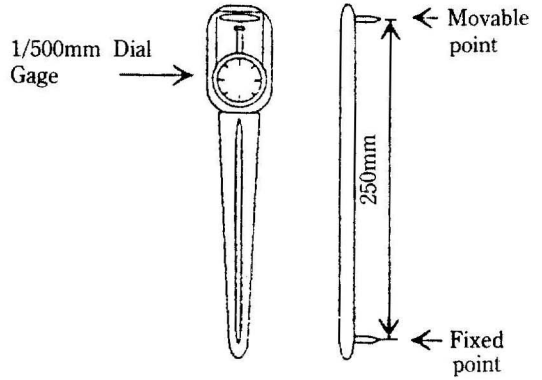


그림 3. Whitmore strain gage.

(Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression)에 의거하여 실험을 수행하였고, 공시체는 28일 수중 양생 후 하중재하 직전에 양면을 깎평을 하였다. 기본 크리프를 측정하기 위하여 시편 표면을 파라핀으로 도포하여 내부 수분의 손실을 방지하였다. 재하 하중의 측정은 50ton용량의 Load Cell을 그림 2와 같이 시험기에 장착하여 행하였고, 변형을 측정하기 전에 하중을 측정하여 그 하중이 재하 하중의 2%이상 변할 때는 하중을 보정하였다.

크리프와 건조수축 변형도를 측정하기 위해서 ASTM C341-79(Standard Test Method for Length Change of Drilled Specimens of Cement Mortar and Concrete)의 규정에 따라 그림 3과 같이 게이지 길이가 250mm이고 1/500mm 까지 측정가능한 힛트 모아식 스트레인 게이지를 사용하였다. 시편의 길이 방향으로 게이지 스테드를 250mm간격으로 한 시편당 2개씩 대칭으로 장착하였다.

2.3 실험 수행

하중을 재하하기 전에 시편의 게이지 길이를 측정하고, 재하한 직후 변형량을 측정하여 하중에 의한 탄성 변형도를 산정하였다. 크리프는 하중 재하 초기에 발생량이 많으므로 처음 1일은 2회, 처음 1주일간은 매일, 처음 1개월간은 매주, 그 이후로는 15일 또는 30일 간격으로 변형을 측정하였다. 건조수축 시편의 경우도 크리프와 동일한 시간 간격으로 길이 변화를 측정하였고 크리프와 건조수축 공히 현재 150일간의 변형량 측정치를 얻었다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 시간경과에 따른 크리프 및 건조수축의 변화

150일간 하중을 재하하여 발생한 각 시편의 크리프와 건조수축 변형은 표 3,4와 같다.

위의 표에 보인 크리프 실험결과는 그림 4에, 건조수축의 경우는 그림 5에 도시하였다.

여기서 알 수 있는 바와 같이 시간의 경과에 따른 총 변형량-크리프변형과 건조수축변형-은 파라핀 도포한 경우와 철근비가 증가할수록 상대적으로 감소한다.

3.2 기본크리프 및 건조크리프의 특성

크리프를 유발하는 근본 원인은 장기간 지속되는 하중이지만 하중이 재하되는 기간의 주위환경, 즉 온도와 진습 역시 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 본 실험의 경우 이러한 효과를 관찰하기 위해 동일한 시편에 대해 각각 파라핀을 도포한 경우와 그렇지 않은 경우를 나누어 실험하였다.

물론 이 경우 파라핀 도포가 콘크리트 내부의 수분 방출을 완전히 차단한다고 보기는 어려우나 습윤상태를 유지할 수 있으며 본 실험결과에 보인 바와 같이 배근 유무와 철근비 정도에 관계없이 파라핀을 도포한 경우의 시간경과에 따른 전체적인

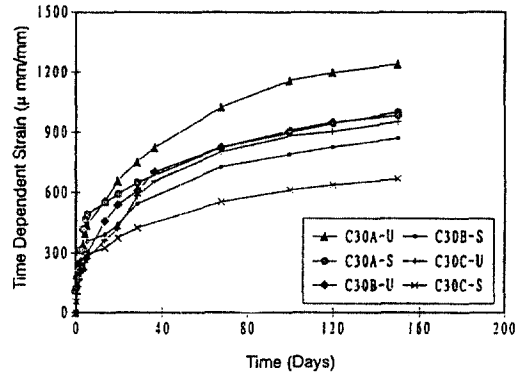


그림 4. Total time dependent strain vs. time curve.

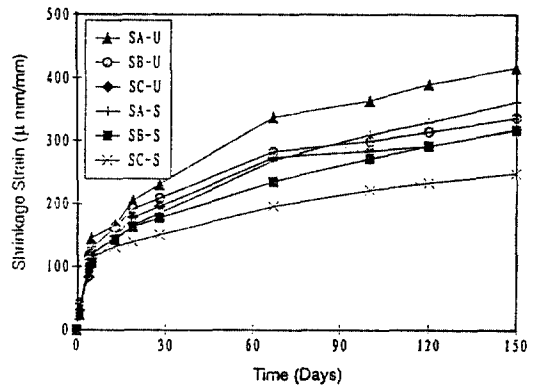


그림 5. Shrinkage strain vs. time curve.

표 3. Creep test results (150 days)

Specimen No.	Time Dependent Strain (μmm/mm)	Creep Strain (μmm/mm)	Specific Creep (10 ⁻⁶ /MPa)
C30A-U	1,238	822	60.89
C30A-S	998	637	47.19
C30B-U	982	646	47.85
C30B-S	869	553	40.96
C30C-U	951	633	46.89
C30C-S	667	419	31.04

표 4. Shrinkage test results (150 days)

No.	SA-U	SA-S	SB-U	SB-S	SC-U	SC-S
Strain (μmm/mm)	416	361	336	316	318	248

표 5. Creep strains for various loading duration

Duration time	Creep strain (μmm/mm)			Basic creep strain (μmm/mm)		
	C30A-U	C30B-U	C30C-U	C30A-S	C30B-S	C30C-S
0	0	0	0	0	0	0
2	190	126	100		102	122
4	219	105	134	316	155	157
5	263	146	150	356	197	179
6	294	169	155	365	248	170
14	391	296	215	407	249	194
20	451	346	244	426	279	234
30	520	398	386	464	366	274
70	687	544	527	554	491	357
100	792	609	598	589	518	390
120	807	635	613	614	535	403
150	822	646	633	637	553	419

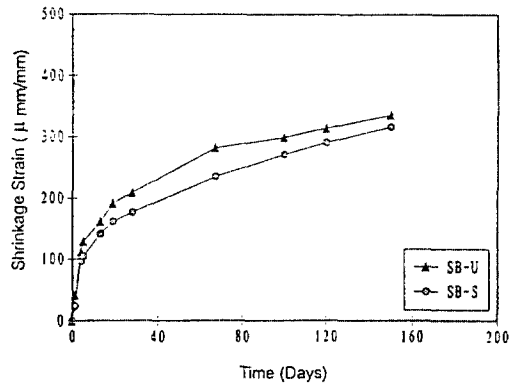
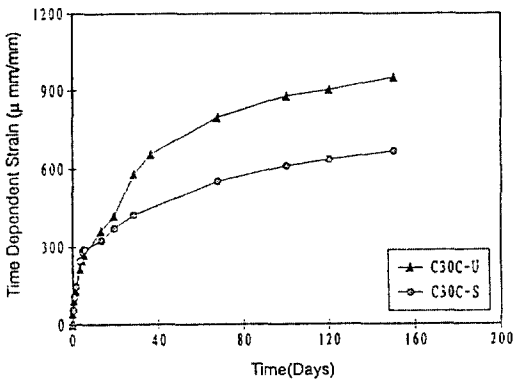
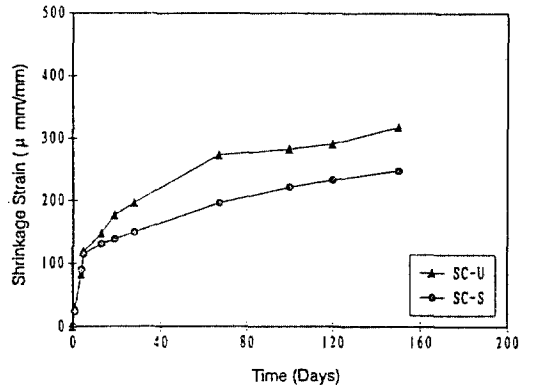
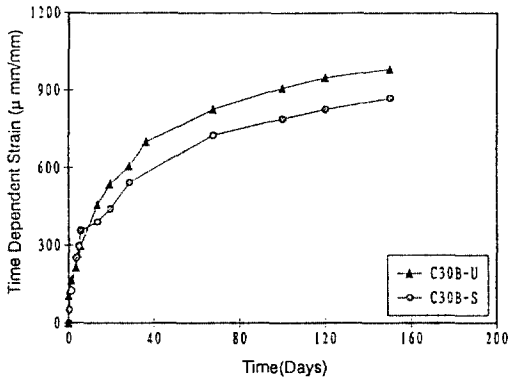
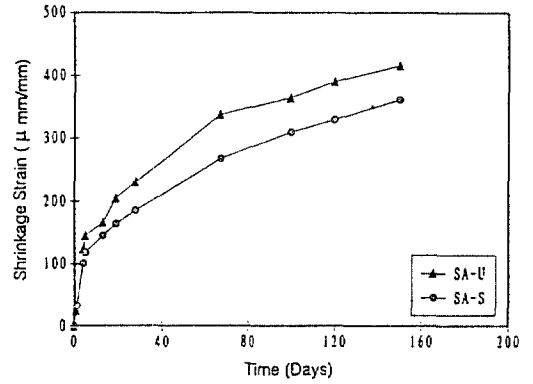
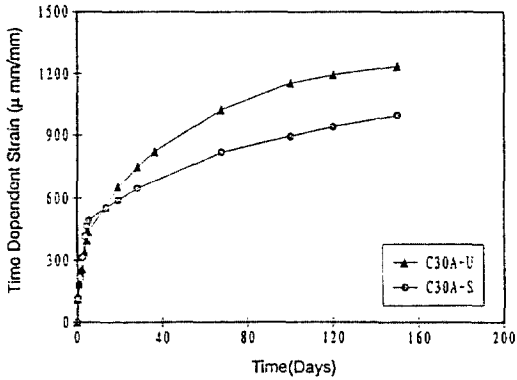


그림 6. Comparison of time dependent strains (Sealing effect).

그림 7. Comparison of shrinkage strains (Sealing effect).

변형량이 작음을 알 수 있다. 이를 도시하면 아래 그림 6,7과 같다.

표 5에서의 변형도는 전체 변형량에서 탄성변형량과 건조수축변형량을 배제하여 얻은 재령별 크리프 변형량이며 표 6은 파라핀을 도포하지 않은 경우의 크리프 변형도를 100으로 두었을때 파라핀을

도포한 경우의 변형을 비율로 나타낸 것이다.

표로부터 알 수 있는바와 같이 재령이 상당히 경과 - 70일 이상 - 했을때 도포시편과 비도포시편의 변형도비는 거의 일정한 값으로 안정되고 있는데 이로부터 건조에 의한 크리프 발생요소는 재하재령이 어느정도 경과한 이후에는 거의 발생하지 않음을

표 6. Basic creep strain/total creep strain ratio(%)

Duration Time	10	30	70	100	120	150
C30A-S	104	89	80	78	79	81
C30B-S	85	92	90	87	87	88
C30C-S	90	71	67	69	70	70

표 7. Reduction of creep strains due to reinforcements

Duration Time	Unsealed Specimen			Sealed Specimen		
	C30A-U	C30B-U	C30C-U	C30A-S	C30B-S	C30C-S
14	100	76	55	100	61	48
30	100	77	54	100	79	59
70	100	79	77	100	89	64
100	100	77	76	100	88	66
150	100	79	77	100	87	66

알 수 있다.

3.3 철근비에 따른 크리프 및 건조수축의 변화

크리프와 건조수축은 실제에 있어서 콘크리트에서만 관찰되는 재료특성이라 할 수 있다. 그러나, 실제 구조물은 철근으로 보강되어 있고 그 배근된 철근은 크리프와 건조수축에 의한 변형을 구속하는 작용을 하게 된다. 이러한 철근의 구속효과를 관찰하기 위해 철근비 0.64%, 1.78%로 달리하여 배근한 시편을 제작하였다. 그림 8,9는 무근과 철근을 배근한 경우의 크리프와 건조수축을 비교한 것이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 앞서 도포효과를 관찰한 결과와는 달리 초기재령에서부터 최종값까지 그 변형량이 무근-철근비 0.64%-철근비 1.78% 순으로 감소하였다. 무근인 경우의 변형량을 100으로 두고 외부조건 -도포와 비도포-을 동일하게 취한 상태에서 철근비 변화에 따른 변형구속효과를 표 7에 보였다.

위 결과를 통해 보면 시편을 도포하지 않은 경우의 변형량은 배근 유무에 크게 영향을 받았고

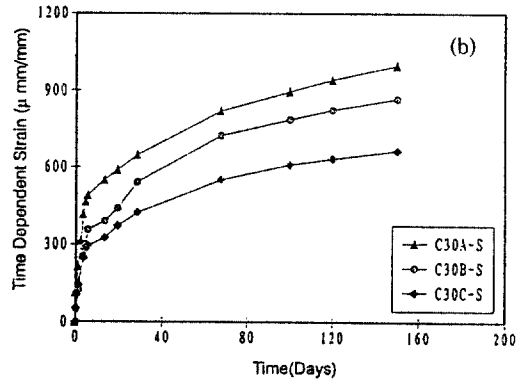
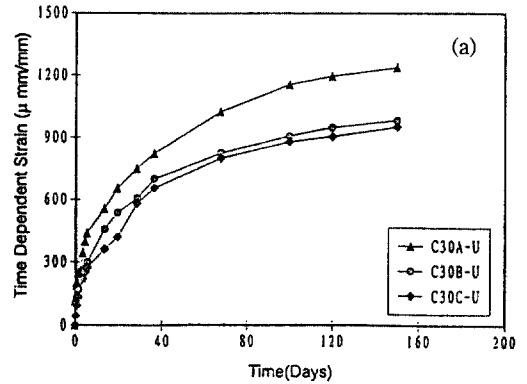


그림 8. Total time dependent strain according to reinforcement ratio.

표 8. Reduction of shrinkage strains due to reinforcements

Duration Time	Unsealed Specimen			Sealed Specimen		
	SA-U	SB-U	SC-U	SA-S	SB-S	SC-S
14	100	98	89	100	98	90
30	100	90	85	100	96	81
70	100	84	81	100	88	73
100	100	82	78	100	88	72
150	100	81	76	100	88	69

철근비의 영향은 두드러지지 않았다. 반면 시편을 도포한 경우는 철근비의 영향이 상당히 뚜렷하게 나타났다. 이와 같은 경향은 건조수축의 경우에도 나타나는데 표 8과 같다. 이와 같은 차이는 시편을

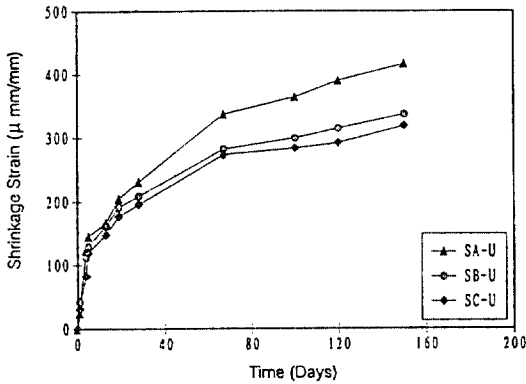


그림 9. Shrinkage strain according to reinforcement ratio.

도포하지 않은 경우의 총 변형량이 전반적으로 도포한 경우보다 크기때문에 철근비의 영향이 어느정도 상쇄되기 때문인 것으로 사료된다.

4. 실험결과와 이론모델의 비교 검토

크리프와 건조수축의 거동에 대한 모델들은 오랜 기간의 실험자료와 검증은 바탕으로 하고 있지만 현 시점에서 이러한 크리프와 건조수축의 명확한 거동은 여전히 연구 과제로 남아있고, 이는 기본적으로 콘크리트의 불균질성에 기인하는데 이러한 점을 고려하여 선진 각 국은 그 지역의 재료의 성질, 주위 환경 등을 감안하여 자국의 실험결과를 토대로 가장 적절한 모델을 선정하고 있다. 국내의 경우 이러한 방향의 연구는 거의 없는 실정이므로 국내 여건에 부합되는 모델 선정과 이에 대한 심도있는 연구는 상당한 가치를 가진다고 말할수 있다.

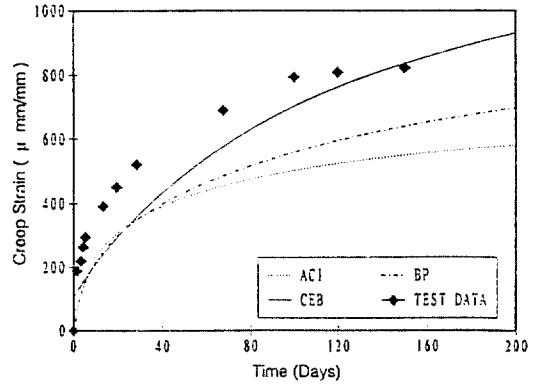


그림 10. Comparison of existing creep models with present test data.

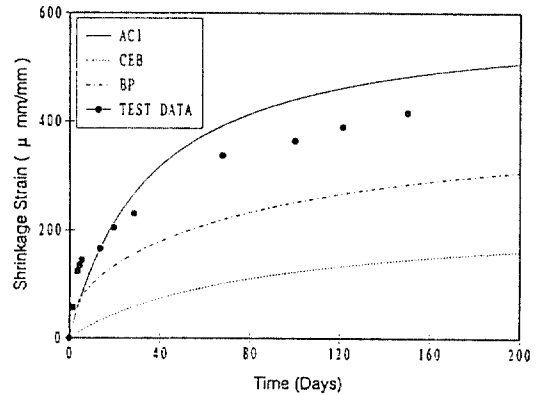


그림 11. Comparison of existing shrinkage models with present test data.

4.1 예측 모델과의 비교 검토

본 실험의 변수를 기존의 크리프 및 건조수축 거동 예측 모델에 적용하여 얻은 결과를 본 실험 자료와 비교하여 그림 10과 11에 보였고 본 실험 결과와 가장 유사한 모델을 실선으로 나타내었다. 여기에 적용된 시편은 비도포 무근 콘크리트의 경우이며, 예측 모델로는 ACI, BP, CEB-FIP를 선정하였는데 그 이유는 이 모델들이 결과치에 있어 서로 상당한 차이를 보이지만 비교적 많은 경우 원용되는 모델이기 때문이다.

그림 10에서 알 수 있는 바와 같이 최종 실측치인 재령 150일의 크리프 변형량은 CEB모델에서 산출된 값에 접근하고, 실제 양상은 BP모델과 유사하였다. 건조수축의 경우는 각 모델간의 예측곡선이 상당한 차이를 보이고, 변형량의 증가 양상은 BP모델과

유사하였고 그 값은 ACI모델에 가깝게 나타났다.

4.2 콘크리트의 크리프와 건조수축을 고려한 구조물의 해석 기법

- EMM에 의한 해석결과와의 비교 검토

앞 절에서 언급한 바와 같이 크리프나 건조수축 거동을 실제 구조물에 적용하기 위해서는 배근효과의 고려가 반드시 필요하고 또 이 때문에 여러 해석기법들이 제안되어 있다. 이러한 해석기법들 역시 앞서 예측모델들과 마찬가지로 동일한 조건에 대해 상당히 다른 결과를 보이기는 하지만 그 이론적 배경은 유사한 개념에서 출발하고 있으며 앞으로 더 나은 기법의 개발이 기대되는 부분이기도 하다. 이러한 해석기법으로는 EMM (Effective Modulus Method, FABER, 1927), AEMM (Aged-adjusted Effective Modulus Method, BAZANT, 1972), RCM (Rate of Creep Method, GLANVILLE, 1930, DISCHINGER, 1937), IDM (Improved Dischinger Method, NIELSEN, 1970), SSM (Step-by-Step Method, GHALI, 1967) 등이 있다. 콘크리트의 응력이 시간에 따라 변한다면 크리프 변형도의 결정은 다소 어렵게 되고 응력의 이력(history)과 재령 효과가 포함되어야 한다. 그러나, 본 실험은 일정한 압축력을 받는 시편이 그 대상이므로 일정한 응력/이력을 가지는 철근배근의 효과를 고려하기 위한 해석기법으로 EMM을 선택하였다.

만일 응력이 시간에 따라 일정하다면 콘크리트의 전체적인 변형도는 다음과 같이 둘 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon(t, \tau) &= \epsilon_e(t, \tau) + \epsilon_c(t, \tau) + \epsilon_{sh}(t) \\ &= \frac{\sigma}{E_c(\tau)} + \frac{\sigma}{E_c(\tau)} \phi(t, \tau) + \epsilon_{sh}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 ϵ_e : 순간 변형도

ϵ_{sh} : 건조 수축 변형도

ϵ_c : 크리프 변형도

ϕ : 크리프 계수

t : 시간

τ : 재하시 콘크리트 재령

식 (1)로 부터, 변형도는

$$\epsilon(t, \tau) = \frac{\sigma}{E_c(\tau)} [1 + \phi(t, \tau)] + \epsilon_{sh}(t)$$

표 9. Reduction of creep strain due to reinforcement by EMM(%)

Specimen type	C30B-U	C30C-U
Model type		
ACI Model	12	30
CEB-FIP Model	12	27
BP Model	11	27

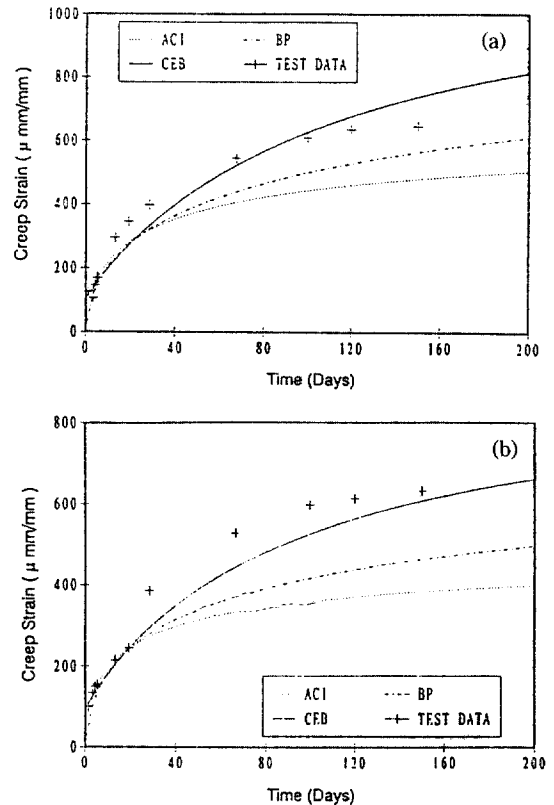


그림 12. Comparison of creep strains with EMM for ;

(a) reinforcement ratio $\rho = 0.64\%$

(b) reinforcement ratio $\rho = 1.78\%$

$$= \frac{\sigma}{E_c(t, \tau)} + \epsilon_{sh} \quad (2)$$

가 되며, 여기서 콘크리트의 유효계수(Effective Modulus)는 다음식과 같다.

$$E_c(t, \tau) = \frac{E_c(\tau)}{1 + \phi(t, \tau)} \quad (3)$$

이상과 같이 EMM은 크리프를 지체된 탄성변형도로 취급하고 콘크리트 탄성계수의 감소 즉 유효계수로 단순화 하고 있다. 또한 EMM은 순간적으로 일정한 응력 σ 에만 관련되어 앞선 이력(history)이나 콘크리트의 재령은 고려하지 않으므로 응력 이력이 증가할 경우 크리프를 과다 평가하고 그 반대 경우에는 이를 과소평가한다. 그러나 앞서 언급한 여러 해석기법들 역시 장단점이 있으므로 본 연구와 같이 시편을 통해 일정한 응력이력을 가지는 경우 별 무리가 없다고 사료된다. 위 기법상 크리프 계수는 동일한 실험변수를 각 예측모델에 적용하여 얻은 것이므로 예측모델별로 배근효과에 대한 결과는 달라지는데 이를 아래 표 9에 보였다. 재령 150일에서 각 모델별 철근비 변화에 따른 크리프 감소량은 표 9와 같다.

위 표로부터 알 수 있는 바와 같이 철근비 0.64%로 배근한 시편의 경우는 무근 경우에 비해 약 12%, 1.78%로 배근한 시편은 27-30%정도의 크리프 변형량 감소를 보여 철근에 의한 구속효과가 나타났다. 그림 12는 EMM해석결과와 크리프 측정값을 비교한 것으로서, 철근비 0.64%로 보강된 시편의 경우는 무근 콘크리트와 기존의 예측모델을 비교한 그림과 비슷한 양상을 보이거나 철근비 1.78%로 보강된 시편의 경우는 EMM해석 결과가 실제보다 크리프구속효과를 과대평가함을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 앞으로 증가추세에 있는 고강도 콘크리트 구조물에 있어서의 크리프와 건조수축 특성을 규명하기 위해 일련의 연구가 수행되었으며 실제 시공중인 구조물에서와 동일한 변수를 원용하여 실험을 수행하였고 실험의 精度를 제고하기위해 항온항습실과 정밀한 실험기기를 활용하였다. 이로부터 배근 유무, 배근 정도, 건조 조건등의 항목에 대해 고강도 콘크리트의 크리프와 건조수축거동을 관찰하였고 이를 통해 각 재령별 변형량을 포함한 포괄적인 연구 결과를 얻었다. 이를 요약하면 다음과 같다.

1) 시간의 경과에 따른 총 변형량 -크리프변형량과 건조수축변형-은 파라핀을 도포한 경우와 철근비가 증가할수록 상대적으로 감소하였다.

2) 시편을 파라핀으로 도포하지 않은 경우의 변형량은 배근유무에 따라 철근비의 영향은 상대적으로 크지 않으나, 시편을 도포한 경우는 철근비의 영향이 두드러졌다. 본 연구에서는 철근비에 따른 장기변형의 구속정도를 정량적으로 도출하여 제시하였다.

3) 본 실험변수를 기존 모델 -ACI, CEB-FIP, BP-과 비교한 결과 상당히 양호하게 부합함을 알 수 있었다. 크리프변형량은 CEB-FIP 모델에 근접하였고, 건조수축의 경우에는 그 양상이 BP 모델과 유사하였고 변형량은 ACI모델에 근접하였다.

4) 본 실험결과를 토대로 배근된 상태의 크리프 및 건조수축 특성을 해석모델을 통해 계산하였으며, 이 결과 CEB모델이 비교적 실험결과에 근접함을 밝혀내었다.

5) 본 연구에서는 최근들어 증가하고 있는 고강도 콘크리트의 장기거동을 예측하기 위하여 포괄적인 실험을 수행하였으며, 특히 지금까지 연구된바 없는 철근비의 영향을 규명하였다. 앞으로 이러한 자료를 바탕으로 우리나라 실정에 부합하는 크리프 및 건조수축모델의 연구 개발이 계속되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Neville, A. M., "Property of Concrete," Pitman : London and Marshfield, Mass., 1981, pp. 359-432.
2. Young, J. F. and Mindess, S., "Concrete," Prentice Hall, 1981, pp. 473-520.
3. Smerda, Z. and Kristek, Y., "Creep and Shrinkage of Concrete Elements and Structures," Elsevier, 1988, pp. 11-125.
4. Gilbert, R. L., "Time Effects in Concrete Structures," Elsevier, 1988, pp. 24-47, 59-90.
5. Freudenthal, A. M., Frederic, and Roll, "Creep and Creep Recovery of Concrete Under High Compressive Stress," *ACI Journal, Proceedings Vol. 54, No. 12, June 1958*, pp. 1111-1142.
6. Hansen, T. C., and Nielsen, K. E. C., "Influence of Aggregate Properties on Concrete Shrinkage," *ACI Journal, Proceedings Vol. 62, No. 7, July 1965*, pp. 783-794.

7. Hansen, T. C. and Mattock, A. H., "Influence of Size and Shape of Member on the Shrinkage and Creep of Concrete," *ACI Journal, Proceedings Vol. 63, No. 2*, February 1966, pp. 267-289.
8. Neville, A. M. and Staunton, A. A., "Method of Estimating Creep of Concrete When the Stress-Strength Ratio Varies With Time," *ACI Journal, Proceedings Vol. 62, No. 10*, October 1965, pp. 1293-1311.
9. Ngab, A. S., Nilson, A.H., and Slate, F. O., "Microcracking and Time-Dependent Strain in High-Strength Concrete," *ACI Journal, Proceedings Vol. 78, No. 4*, July-August 1981, pp. 262-268.
10. Ngab, A. S., Nilson, A. H., and Slate, F. O., "Shrinkage and Creep of High Strength Concrete," *ACI Journal, Proceedings Vol. 78, No. 4*, July-August 1981, pp. 255-261.
11. Neville, A. M., Dilger, W. H., and Brooks, J. J., "Creep of Plain and Structural Concrete," Construction Press: London and New York, 1983.
12. Collins, T. M., "Proportioning High-Strength Concrete to Control Creep and Shrinkage," *ACI Materials Journal, Vol. 86, No. 6*, November-December 1989, pp. 576-581.
13. Chern, J. C. and Wu, Y. G., "Long Term Behavior of a Composite Prestressed Concrete Railway Bridge : Part I-Experiment," ACI SP-129, Computer Analysis of the Effects of Creep, Shrinkage, and Temperature Changes on Concrete Structures, ACI, Detroit, 1991, pp. 1-18.
14. Ngab, A. S., Nilson, A. H., and Slate, F. O., "Shrinkage and Creep of High Strength Concrete," *J. of ACI, Vol. 78, No. 4*, 1981, pp. 255-261.
15. Smadi, M. M., Nilson, A. H., and Slate, F. O., "Shrinkage and Creep of High-, Medium-, Low-Strength Concrete," *J. of ACI, Vol. 84*, 1987, pp. 224-234.
16. Ross, A. D., "Concrete Creep Data," *The Structural Engineer, Vol. 15, No. 8*, 1937, pp. 314-26.
17. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures," Designing for Effects of Creep, Shrinkage and Temperature in Concrete Structures, SP-27, ACI, Detroit, 1971, pp. 51-93.
18. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures," (ACI 209R-82), ACI, Detroit, 1982, 108 pp.
19. CEB-FIP Code for Concrete Structures, 3rd Edition, Comit Euro-International du Beton/Fédération Internationale de la Précontrainte, Paris, 1978, 348 pp.
20. Bazant, Z. P., "Prediction of Concrete Creep Effects Using Age-Adjusted Effective Modulus Method," *J. of ACI, Vol. 69*, 1972, pp. 212-217.
21. Bazant, Z. P. and Osman, E., "Double Power Law for Basic Creep of Concrete," *Materials and Structures (RILEM, Paris), Vol. 9, No. 49*, 1976, pp. 3-11.
22. Bazant, Z. P. and Panula, L., "Simplified Prediction of Concrete Creep and Shrinkage from Strength and Mix," *Structural Engineering Report No. 78-10/6405*, Department of Civil Engineering, Northwestern University, Evanston, Illinois, Oct. 1978, 24pp.
23. Bazant, Z. P. and Panula, L., "New Models for Practical Prediction of Concrete Creep and Shrinkage," in Designing for Creep and Shrinkage in Concrete Structure, (Proc. of A. Pauw Symposium held in Houston, 1978) ACI SP-76, Detroit, 1982, pp. 7-23.

(接受：1992. 11. 24)