

# Creep 및 Shrinkage제어를 위한 고강도 콘크리트 배합비

중앙대 건설대 토목공학과  
정 영 수

Prestressed Concrete의 발달과 함께 시작된 고강도 콘크리트에 관한 연구는 최근에는 고층빌딩에 까지 그 영역을 급속히 확대해 왔으며 이와함께 고강도 콘크리트의 크립 및 건조수축에 의한 변위 특히 고층건물의 Column Shortening에 주요한 원인이 되는 이들 크립 및 건조수축에 의한 변위들의 paste량, 골재크기, 초고성능감수제 등의 사용량에 따른 변이(Variations)에 관한 연구 즉 적절한 고강도 콘크리트의 배합비에 관한 연구가 수행되어지고 있다.

본 연구에서는 ACI Materials Journal(Nov-Dec/1989)에 게재된 미국의 Ms. Collins의 고강도 콘크리트의 크립 및 건조수축에 관한 실험적 연구결과를 소개하고자 한다.

## 1.0 서 론

최근의 고층건물의 뼈대(frame)구조물에 고강도 콘크리트의 사용과 함께 크립 및 건조수축에 의한 변위의 크기는 중요한 관심사가 되어왔으며 특히 100~150층 정도의 매우 높은 건물에서는 크립에 의한 영향은 층의 수평도(floor levelness) 및 외벽의 이동(exterior skin movement)등으로 인하여 콘크리트의 강도만큼 중요하게 되었다. 그러나 고강도 콘크리트

의 크립 및 건조수축에 의한 변위에 관한 기술적 자료는 너무나 미흡하며 입수가 가능한 자료 또한 서로 상반되는 결과를 가지고 있는 실정이다. 이러한 자료부족은 고층건물의 고강도 콘크리트사용에 관한 정확한 결론과 설계 기준을 만드는 것을 거의 불가능하게 하였다. 이로 인하여 콘크리트 기술자들은 강도요구를 만족시키면서 가장 바람직한 크립 및 건조수축 특성을 가진 콘크리트의 설계문제에 당면하게 된 것이다.

크립(creep)이란 지속하중에 의하여 변형이 계속적으로 진행되는 것으로 정의할 수 있으며 이는 시멘트 paste의 gel구조와 관련된 변형이다. 그리고 콘크리트의 건조수축 및 팽창은 작용외력과 건조에 의하여 gel 내부의 물의 이동에 의하여 일어나는 것이다. 그리고 크립은 배합비, 골재종류, 하중시 재령 등에 의하여 영향을 받으나 건조수축은 물-시멘트비, 배합비, 골재종류 및 양생조건등에 의하여 직접적으로 관련이 있다.

많은 콘크리트 연구가들은 크립 및 건조수축은 서로 밀접한 관련이 있다고 믿는다. 건조수축이 콘크리트 내외부의 습기의 차이 및 대기중의 습도 변화에 관련이 있는 반면 크립은 외력 및 이로 인한 gel water 이동에 더 관련이 있다. 건조수축은 일반적으로 저질의 콘크

리트를 만드나 크립은 어떤 경우에는 바람직한 것으로 고려되기도 한다. 크립을 정확히 예측하여 직접 설계에 반영한다면 그 결과는 R. C. 콘크리트구조의 더 나은 응력의 분포가 될 것이다. 그러나 설계에 반영치 않은 크립에 의한 변위나 처짐이 과되할 경우에는 그 결과는 값비싼 수리 또는 P.S. 콘크리트에서는 Prestress의 손실을 일으킬 수도 있다.

고강도 콘크리트의 크립(creep)에 관한 자료는 수적으로 제한되어 있지만 보통 강도의 콘크리트에 관한 크립의 자료는 쉽게 입수할 수 있다. 그러나 고강도 콘크리트 구조물과 보통 강도 콘크리트 구조물은 현저히 다르므로 이들 자료의 고강도 콘크리트에 직접적인 이용은 무의미한 것이다. 고강도 콘크리트의 크립은 수화작용의 정도와 직접적으로 관련이 있으므로 (즉 시멘트의 수화작용이 증가하면 콘크리트 크립은 감소한다.) 크립의 측정은 장시간에 걸쳐서 측정되어야 한다. 그러나 현재까지 수행된 대다수의 크립 실험은 짧은시간 (약 90일 미만)에 걸쳐서 수행되어 졌으므로 이는 시멘트가 빠른 속도로 수화작용을 할 때에만 유용한 것이다. 이들 자료는 시멘트가 완전히 수화작용을 수행하는 장시간에(약 1년 이상) 걸쳐서 측정된 크립 실험치보다 당연히 부정확한 자료인 것이다. 고강도 콘크리트에서 크립과 paste량의 관계는 오랜 동안 관심이 되어왔다. 적은 paste량은 작은 크립에 의한 변위를 일으키고 또한 콘크리트의 크립에 의한 변위는 물-시멘트 비가 감소시 작아진다고 알려져 있다.

작은 크립 및 건조수축을 위해서는 치밀하고 흡수율이 적으며 단단한 골재 즉 dolomitic limestone이 바람직하다. 그리고 최대 골재크기가 증가할 때 일반적으로 크립 및 건조수축은 감소된다. 일반적으로 콘크리트 배합시 적은 물-시멘트 비, 큰 골재의 사용, 적은 paste량 사용은 더 바람직한 크립 및 건조수축의 특징을 갖는 콘크리트를 생산할 것이다. 여기에 소개한 실험은 5 콘크리트 mix design에 대한 강

도, 탄성계수, 크립 및 건조수축에 관한 실험을 행하였다.

## 2.0 실험재료

실험에 사용된 재료는 다음과 같다.

\* 포오트랜드 시멘트(Portland Cement) : ASTM C150을 만족시키는 Regular Type I Portland Cement 특히 고층건물 시공시 시멘트 생산회사 및 종류의 선택은 고강도 콘크리트를 위한 재료선택에 가장 중요한 과정이다. 시멘트 성분의 변이(Variation)는 다른 어떤 재료보다 콘크리트의 압축강도에 가장 큰 영향을 미치는 요인이다.

본 실험에 사용된 시멘트는 북미지역 유명 시멘트 공장중에서 좋은 Quality를 생산하는 상위 5%안에 드는 업자이다.

\* 플라이 애쉬(Fly Ash) : Class C

\* 세골재(Fine Aggregate) :

두 종류의 세골재를 사용하였으며 세골재 #1은 분말계수(Fineness Modulus) 2.6의 자연사이며 세골재 #2는 분말계수 약 2.8의 광산의 골재 적치장에서 채취하였다.

\* 조골재(Coarse Aggregate) :

분쇄된 돌로미틱(Dolomitic) 조골재를 사용하였으며 Chicago 그리고 Dallas지역에서 고강도 콘크리트에 사용된 것들과 유사한 종류의 것을 현지의 두 지역으로 부터 채취하였다.

실험을 위한 고강도 콘크리트의 최대 골재크기는 1.5“(3.81cm)이었으며 1.5” 골재는 MN/DOT CA3 조립물과 ASTM C33 Size #67을 만족시키는 Dolomitic Limestone과의 혼합물이었다. 즉 조골재는 CA3 30%와 #67 70%에 해당되는 혼합골재이었다.

\* 화학 첨가물(Chemical Admixtures) :

첨가물은 콘크리트의 지속적인 고강도 유지를 위해서 중요한 역할을 함으로 콘크리트는 Type A 감수제를 위한 ASTM C494를 만족하는 두 종류의 혼화제를 사용하였으며 또한 Type F 혼화제를 위한 ASTM C494를 만족하

는 고성능감수제도 사용하였다.

### 3.0 실험내용

실험에 사용된 배합설계는 현장경험에 기초하였다. 즉 콘크리트 배합비 선택은 콘크리트 생산공장의 자료중 기대치와 유사한 적어도 30개 이상의 계속적인 강도실험 기록을 갖고 있는 배합비를 조사하였으며 이들 기록을 검토한 후 8000 psi(55 MPa)의 공칭압축강도,  $f'_c$ , 이상 약 9000psi(62 MPa)의 평균 설계강도를 갖는 배합비를 선택하였다.

St. Paul-Minneapolis 지역의 고강도 콘크리트 들은 물-시멘트비+플라이 애쉬비는 0.33에서

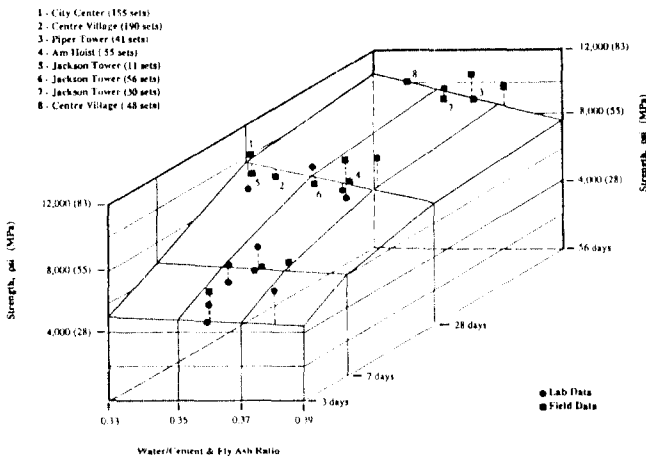


Fig. 1 Historical data

0.40 정도를 사용하였었다. 그림 1은 이들 자료들을 도시화하였으며 이 그림은 0.36의 물-시멘트비+플라이 애쉬비는 재령 56일에 약 9000 psi(62 MPa)의 평균 압축강도를 나타낸다.

실험용 5개의 배합설계는 0.36의 물-시멘트비+플라이 애쉬비를 사용하였으며 Mix #1은 재령 56일에 9019 psi의 평균강도를 갖는 통상의 고강도 콘크리트이었으며 Mix #2, #3 그리고 #4는 작은 paste성분을 갖는 그러나 0.

36의 물-시멘트비+플라이 애쉬비를 갖는다.

Mix #2는 type F 혼화제를 위한 ASTM C494를 만족하는 고성능 감수제를 사용하였으며 Mix #3는 큰 크기의 조골재를 사용하였고 Mix #4는 고성능 감수제와 큰 크기의 조골재를 혼합하여 사용하였다. Mix #5는 쇄석의 Dolomitic Limestone의 사용을 제외하고는 Mix #1과 유사하다. 각 배합설계의 배합성분들은 표 1에 요약하였다.

표 1 Concrete mix proportions

Mix number	1	2	3	4	5
Cementitious material					
Type I portland, lb	700	630	680	620	700
Fly ash, Class C, lb	120	110	120	110	120
Total	820	740	800	720	820
Fine aggregate, lb					
1 1/2 to 3/4 in.			555	555	
3/4 in. - #4	1760	1760	1295	1295	1750
Total	1760	1760	1850	1850	1750
Admixture, oz					
Water reducer	33		32		29
HRWR		90		85	
Water, net lb	295	265	280	250	295
Water/cement + fly ash ratio	0.36	0.36	0.35	0.35	0.36

1 lb=0.4536kg ; 1 oz=29.57cm<sup>3</sup>.

### 3.1 콘크리트 배합

5개의 콘크리트 실험 batch들은 2개소의 ready-mix 콘크리트 공장에서 준비되었으며 콘크리트는 2yd<sup>3</sup>로 batch되었다. 슬럼프치, 공기포함도(Air Content), 단위중량, 각 실험배합의 온도등을 기록하였으며 표 2에 요약하였다. 각 배합마다 압축강도 실험을 위하여 40개의 6×12“(15.2×30.5cm) 표준실린더를 만들었으며 공시체는 철제 mold로서 만들어졌다. 크립 및 건조수축 실험을 위하여 18개의 6×12“(15.2×30.5cm) 표준실린더를 만들었다. 콘크리트 공시체들을 실험실로 수송이전에 하루동

**표 2 Plastic concrete test results**

Mix number	1	2	3	4	5
Slump, in.	3 <sup>1/2</sup>	4 <sup>3/4</sup>	3 <sup>3/4</sup>	2 <sup>3/4</sup>	4 <sup>1/4</sup>
Cement factor, sx/yd <sup>3</sup>	817.8	742.6	789.6	714.4	808.4
Air content, percent	1.8	1.1	1.6	1.8	1.7
Unit weight, lb/ft <sup>3</sup>	149.7	152.9	151.4	151.0	149.3

1 in.=2.54cm ; 1yd<sup>3</sup>=0.765m<sup>3</sup> ; 1 lb/ft<sup>3</sup>=0.0624kg/m<sup>3</sup>.

안 콘크리트 생산공장에 보관시키었으며 실린더들을 습윤양생(즉 73°F(23°C), 100% 상대습도 상태하의 양생) 시키었다.

압축강도 실험은 3일, 7일, 28일, 56일 그리고 180일 양생후에 각기 수행하였으며 탄성계수 실험은 28일 양생후에 실시하였다.

### 3.2 크립 및 건조수축 실험

크립 및 건조수축 실험은 University of Texas at Arlington에서 ASTM C512 “Standard Test Method of Creep of Concrete in compression”에 따라 수행하였다. 실험은 70°F(20°C)와 50% 상대습도를 유지하는 실내에서 수행되었으며 건조수축실험은 7일 및 28일 습윤양생한 콘크리트 공시체들에 실시한 반면 크립실험은 28일 습윤양생한 공시체에만 실시하였다. Gage points들은 공시체에 90°로 부착하였으며 크립과 건조수축에 의한 종방향 변위는 10“(2.54cm) Mechanical Strain Indicator를 사용하여 측정하였다. 그리고 각 조의 크립 및 건조수축실험의 공시체들을 위하여 Electric

cal Strain Gauge를 각 실험조의 한 공시체에 설치하였다.

각 크립 실험대에 3개의 공시체들이 올려졌으며 전체 20개의 실험대가 사용되어졌다. 0.2f<sub>c</sub>, 0.3f<sub>c</sub>, 그리고 0.4f<sub>c</sub>의 크립하중은 28일 양생한 Unsealed 공시체에 작용하였으며 28일 양생의 Sealed 공시체의 한 set에도 0.3f<sub>c</sub>의 크립하중으로 실험하였다. 탄성변형은 하중작용 즉시 측정되었으며 크립변형은 표 3과 같이 변형율에 비례하는 간격으로 측정되었다.

## 4.0 실험 결과

### 4.1 압축강도실험

Mix #1과 #5의 압축강도는 나머지 3개 배합의 압축강도 보다 더 큰 값을 얻었으며 28일 강도는 Mix #4는 8050 psi(56MPa) 그리고 Mix #5는 9280 psi(64 MPa)정도를 나타내었다. 56일 강도는 Mix #3는 8650 psi(60MPa) 그리고 Mix #1는 9290 psi(64 MPa) 정도로 기록되었으며 5개 배합들의 압축강도 실험결과는 표 4에 요약되었다.

### 4.2 건조수축실험

7일 습윤양생 공시체의 건조수축에 의한 변형은 28일 습윤양생 공시체보다 더 큰 변형을 나타내었으며 즉 Mix #1의 90일 후에 건조수축 변형율은 7일 양생 공시체에는 431μ-in/in 그리고 28일 양생 공시체에는 280μ-in/in 이었다.

**표 3 Summary—Creep loads and elastic strain of creep specimens**

Mix number	1	2	3	4	5
Stress-strength ratio $f_c/f'_c$	0.4 0.3 0.3* 0.2	0.4 0.3 0.3* 0.2	0.4 0.3 0.3* 0.2	0.4 0.3 0.3* 0.2	0.4 0.3 0.3* 0.2
Applied stress $f'_c$ psi	3514 2635 2635 1757	3294 2470 2470 1647	3422 2566 2566 1711	3218 2414 2414 1609	3712 2784 2784 1856
Elastic strain, 10-6 in./in.	808 644 572 405	593 488 509 287	801 553 570 416	750 545 538 409	814 636 639 364

1 psi=(1.45E-04)Pa ; 1 in.=2.54cm. \*Sealed specimen.

표 4

Compressive strength results

Mix number	1	2	3	4	5
3-day compressive strength, psi					
Cylinder #1	5130	4450	4320	5010	5400
Cylinder #2	5200	4320	4480	5130	5310
Average	5170	4390	4400	5070	5360
7-day compressive strength, psi					
Cylinder #1	6580	6190	6320	6160	6360
Cylinder #2	6070	6180	6370	6010	6470
Average	6330	6190	6350	6090	6420
28-day compressive strength, psi					
Cylinder #1	8760	8300	8560	7880	9140
Cylinder #2	8810	8170	8550	8210	9420
Average	8790	8240	8550	8050	9280
56-day compressive strength, psi					
Cylinder #1	9360	8940	8300	8850	9230
Cylinder #2	9210	9200	8590	9010	9310
Average	9290	9070	8450	8930	9270
108-day compressive strength, psi					
Cylinder #1	10,520	10,310	9970	10,100	10,980
Cylinder #2	10,350	10,240	9750	10,000	10,750
Average	10,440	10,280	9860	10,050	10,870

1 psi = (1.45E-04)Pa : 1 in. = 2.54cm.

Mix #5는 가장 큰 건조수축 변형율을 보인 반면 Mix #3는 가장 적은 건조 수축 변형율을 보였다. 즉 90일 후에 28일 습윤양생 공시체의 건조수축 변형율은 Mix #5는 344 $\mu$ -in/in 그리고 Mix #3는 258 $\mu$ -in/in이었다. 그림 2는 Mix #1의 경과 시간에 따른 건조수축 변형율을 보여주고 있으며 표 5는 건조수축 변형에 관한 실험결과를 요약하였다.

### 4. 3 크립실험

응력의 증가는 크립 변형율을 증가시켰으며 90일 후에 Mix #5의 크립 변형율은 0.4f'의 크립하중에 1482 $\mu$ -in/in, 0.3f'에 1031 $\mu$ -in/in, 그리고 0.2f'의 크립하중에는 614 $\mu$ -in/in이었다.

이 값들은 5개의 배합중 가장 큰 크립변형율을 나타내었으며 Mix #2는 가장 적은 크립 변형율을 나타내었다. 즉 90일 후에 Mix #2의 크립 변형율은 0.4f'의 크립하중에 975 $\mu$ -in/in, 0.3f'에 880 $\mu$ -in/in 그리고 0.2f'의 크립하중에

539 $\mu$ -in/in를 나타내었다. 실험결과와 표 6에 요약되었다.

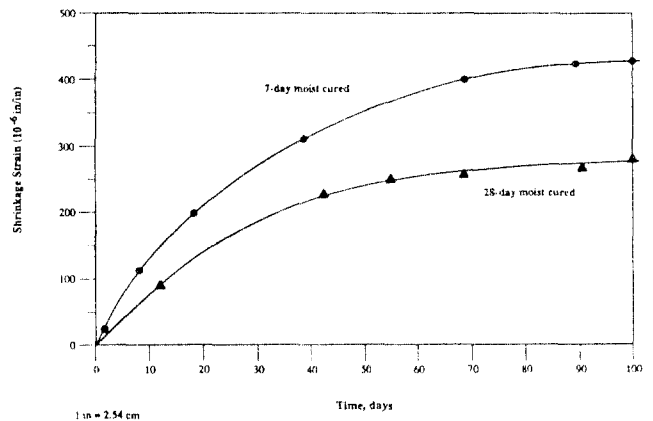


그림 2 Shrinkage strain versus time curves : Mix #1

### 5. 0 결 언

상기와 같이 수행된 실험을 토대로 다음과 같은 결론을 맺고자 한다.

\* 실험결과 즉 압축강도, 크립 및 건조수축의

표 5

Shrinkage strain data, 10-6 in./in.

Mix number	1			2		3		4		5	
	28U*	7U	28S*	28U	28S	28U	28S	28U	28S	28U	28S
1	12	30	9	16	16	15	17	10	12	19	12
3	37	79	26	29	28	21	30	24	25	23	24
7	55	114	48	57	60	50	56	48	46	61	59
29	170	277	175	169	178	156	161	182	169	182	214
56	262	389	262	266	267	230	241	262	253	269	306
90	280	431	291	289	295	258	273	318	304	344	383

1 in.=2.54cm. \*U=Unsealed. \*S=Sealed.

표 6

Creep strain at various stress-strength ratios, 10-6 in./in.

Mix number	1			2			3			4			5		
	0.4	0.3	0.2	0.4	0.3	0.2	0.4	0.3	0.2	0.4	0.3	0.2	0.4	0.3	0.2
1	263	167	88	172	133	89	244	166	132	182	131	114	291	196	141
3	336	192	141	249	218	173	337	234	206	332	208	176	405	289	183
7	497	285	178	329	297	182	443	293	230	445	264	237	576	412	244
29	867	516	335	572	486	300	740	502	372	805	483	376	968	664	388
56	1139	705	478	797	704	449	978	647	480	1095	658	507	1261	872	499
90	1391	872	590	975	880	539	1155	810	558	1310	812	585	1482	1031	614

1 in.=2.54cm.

특징들을 검토한 결과 Mix #1과 Mix #3는 강도요구를 만족시키면서 가장 바람직한 크립 및 건조수축 특징을 갖는 적절한 배합비로 판단된다.

- \* 건조수축 변형율은 습윤양생 시간에 역으로 비례한다. 즉 습윤양생 시간이 길면 건조수축 변형율은 작아진다. Mix #1에서 7일 습윤양생 공시체의 건조수축은 28일 습윤양생 공시체의 건조수축보다 개략적으로 50% 이상 크다.
- \* 크립 변형율은 작용된 응력의 크기에 직접적으로 관계가 있다. 5개의 배합 공히 0.3f'의 크립하중에서 평균 크립변형율은 0.2f'때 보다 약 50% 크기 0.4f'의 크립하중때는 0.2f'때 보다 약 125% 더 크다.
- \* 크립 및 건조수축 변형율은 Mix #1보다 Mix #3때 더 작으나 배합성분은 Mix #3가 더 큰 최대 조골재 규격과 적은 paste량을 갖는 것을 제외하고는 거의 유사하다.

이는 다시말하면 큰 최대 조골재 규격, 1.5“(3.81cm)과 적은 paste량 사용은 더 바람직한 크립 및 건조수축 특징을 갖는 배합이 되리라고 생각된다.

- \* 고성능 감수제의 사용은 크립 및 건조수축 변형에 큰 영향을 미치지 않았다.
- \* 적은 paste량 및 조골재 크기를 크게 함으로써 바람직한 크립 및 건조수축 특징을 갖는 고강도 콘크리트를 생산할 수 있다. 그러나 작용응력의 감소가 크립 및 건조수축 변형에 더 큰 효과를 나타낼 수 있었다. 작용응력에 의한 영향을 감소시키기 위해서는 고강도 및 더 치밀한 콘크리트를 개발해야 한다.
- \* 바람직한 크립 및 건조수축 변형을 갖는 고강도 콘크리트 개발을 위해서는 차후 Silica Fume 및 Chemical Admixture 사용에 관한 연구가 필요하리라 사료된다.