

고온에서의 콘크리트 비정상상태 변형률

Transient Strain of Concrete at High Temperature

박찬규^{*} 김규용^{**} 이승훈^{*} 박주현^{***} 김영선^{****}
Park, Chan Kyu Kim, Gyu Yong Lee, Seung Hoon Park, Ju Heon Kim, Young Sun

ABSTRACT

An experimental investigation was carried out to evaluate the transient strain of concrete at high temperature. Two level of W/B ratio were selected as 46% and 32%. Four level of preload were adopted as 0, 15, 30, 45% of compressive strength. The entire temperature range was between room temperature and 700°C.

Based on the test results, transient strain of concrete at high temperature was affected by the compressive strength as well as the preload level.

1. 서론

고온에서의 콘크리트 기둥의 변형은 하중, 열 팽창 및 크리프 등 여러 가지 요인에 영향을 받는다. 기둥의 초기 변형은 주로 콘크리트와 철근의 열팽창에 기인한 것이고, 중간 단계의 변형은 하중과 열 팽창에 의해 주로 영향을 받으며, 기둥의 온도가 매우 높은 상태인 나중의 상태에서는 고온에서의 크리프가 변형에 큰 영향을 미친다¹⁾. 그 결과 고온에서의 콘크리트 크리프 평가는 화재 시 기둥의 거동을 예측하는데 반드시 필요한 특성 중의 하나이다. 고온에서의 콘크리트 크리프 시험방법에는 정상상태 크리프 시험(steady state creep test)과 비정상상태 크리프 시험(transient creep test)이 있으며, 고온에서 콘크리트 총 변형에 정상상태 크리프 변형과 비정상상태 크리프 변형 모두가 포함된다.

이에 본 연구에서는 고온을 받는 콘크리트의 비정상상태에서의 변형률을 실험적으로 규명하여, 화재 시 콘크리트 부재의 거동을 예측할 수 있는 기본 자료를 제공하고자 한다.

2. 고온에서의 비정상상태 변형률 실험

2.1 실험 계획

고온에서의 콘크리트 비정상상태 변형률을 실험적으로 규명하기 위하여 표 1에 나타난 바와 같은 실험계획을 수립하였다.

2.2 공시체 제작

W/B에 따른 콘크리트 배합비는 표 2에 나타난 바와 같다. W/B 46%에는 일반 감수제, W/B 32%에는 나프탈렌계 고성능 감수제가 사용되었다. 그리고 W/B 32% 경우에 가열 시 콘크리트의 폭열 방

* 정회원, 삼성물산(주) 건설부문 기술본부 기술연구소 수석연구원

** 정회원, 충남대학교 건축공학과 조교수

*** 정회원, 삼성물산(주) 건설부문 기술본부 기술연구소 연구원

**** 정회원, 충남대학교 건축공학과 대학원 박사과정

지를 위하여 직경 약 40 μ m, 길이 6mm PP 섬유를 0.15vol.% 혼입하였다.

사용된 시험체의 크기는 $\phi 100 \times 200$ mm이며, 시험체의 온도 측정을 위하여 공시체의 중심부에 3개의 열전대를 하부 면에서부터 25mm, 100mm, 175mm되는 지점에 설치를 하고 콘크리트를 타설하였다.

콘크리트를 타설한 후 재령 7일까지는 습윤 양생을 실시하고, 그 이후에는 시험 시까지 온도 23 $^{\circ}$ C, 습도 50%의 항온 항습실에서 양생을 실시하였다. 또한 압축강도 측정용 공시체를 제작하여 항온 항습실과 수조에서 양생하였다.

2.3 시험 과정

가열 시험 전에 항온항습실에서 양생시킨 공시체와 수중에서 양생시킨 공시체에 대하여 압축강도를 측정하였으며, 측정 재령과 압축강도는 표 3에 나타난 바와 같다. 그리고 가열 시험체의 측면 표면에 약 5~7mm의 구멍을 뚫어 3개의 열전대를 더 설치를 하였으며, 위치는 하부 면에서 10mm, 100mm 및 190mm 되는 지점이고, 따라서 시험체 1개의 총 6개의 열전대가 설치되었다.

이와 같이 준비된 시험체를 그림 1에 나타난 바와 같은 가열 장치에 설치하고, 표 3에 나타난 바와 같은 하중을 가한 다음 열을 가하였으며, 하중은 시험 종료까지 일정한 값으로 유지를 시켰다. 시험체에 열을 가할 때는 1 $^{\circ}$ C/1.3min.의 속도로 열을 가하였으며, 50 $^{\circ}$ C 온도상승시마다 30분, 100 $^{\circ}$ C 온도상승시마다 60분의 온도 유지시간을 갖도록 하였다.

시험체의 팽창 및 수축 변형 값은 그림 1에 나타난 바와 같이 시험체에 접한 석영관이 strain gage 변위계를 움직이게 하고 이 값을 데이터 로그로 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 하중이 가해지지 않은 경우

그림 2는 하중이 없는 경우에 상온에서 700 $^{\circ}$ C까지의 콘크리트 비정상상태 변형률 이력을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 온도 200 $^{\circ}$ C까지는 W/B비에 관계없이 거의 같은 변형률 이력을 나타냈지만, 온도 200 $^{\circ}$ C 이상에서는 W/B 32%의 경우가 W/B 45%의 경우보다 변형률이 동일한 온도에서 약간 작게 나타났다. W/B에 관계없이 550~600 $^{\circ}$ C에서 갑작스럽게 변형률이 증가하는 것으로 나타났으며, 600 $^{\circ}$ C 이상에서는 변형률이 증가 또는 거의 증가하지 않는 경우 모두 관측되었다.

표 1 실험 계획

W/B 비	하중 수준(%)	온도 범위
46%	압축강도의 0, 15, 30, 45	상온 ~ 700 $^{\circ}$ C
32%		

표 2 콘크리트 배합비

W/B (%)	S/a (%)	unit weight(kg/m ³)					감수계 (%)
		W	C	FA	S	G	
46	46.4	176	344	38	800	927	0.6
32	40.0	170	452	80	648	994	1.4

표 3 콘크리트 압축강도

No.	W/B (%)	하중 수준(%)	압축강도(MPa)		재령 (일)
			수중양생	기중양생	
46-1	46	0	49	40	126~ 135
46-2		0			
46-3		15			
46-4		15	47	42	130~ 140
46-5		30			
46-6		30			
46-7		45			
32-1	32	0	80	80	177
32-2		0			
32-3		15	79	76	133~ 147
32-4		30			
32-5		45			

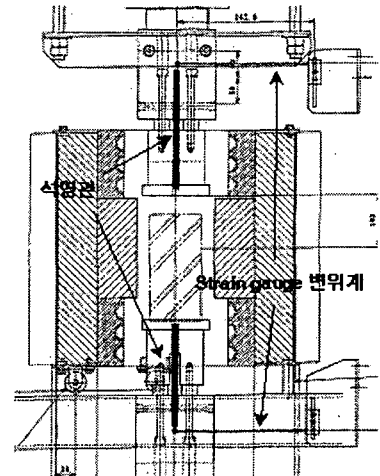


그림 1 시험장치 개요도

그림 3은 고온에서의 비정상상태 변형률 값과 기존 모델식과의 비교를 나타낸 것이다. 실제로 비정상상태 변형률은 건조수축 변형률을 포함하고 있지만, 고온에서 수분 손실에 따른 수축량을 평가하기 어렵기 때문에 비정상상태 변형률을 열 변형률(thermal strain)로 가정한다. 사용된 모델식은 Eurocode 식2)과 Kodur와 Sultan3)의 제안식이며, 각각 식 (1)과 식 (2)에 나타낸 바와 같다.

Eurocode :

$$\alpha = -1.8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6} \cdot T + 2.3 \times 10^{-11} \cdot T^3 \text{ for } 20^\circ\text{C} \leq T \leq 700^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$\alpha = 14 \times 10^{-3} \text{ for } 700^\circ\text{C} < T \leq 1200^\circ\text{C}$$

Kodur and Sultan :

$$\alpha = -0.0002 + 0.000011 \cdot T \text{ for } 0^\circ\text{C} < T \leq 450^\circ\text{C}$$

$$\alpha = -0.0115 + 0.000036 \cdot T \text{ for } 450^\circ\text{C} < T \leq 650^\circ\text{C} \quad (2)$$

$$\alpha = 0.0119 \text{ for } 650^\circ\text{C} < T \leq 1,000^\circ\text{C}$$

그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 두 모델식은 대체적으로 콘크리트의 열 변형률을 잘 예측하는 것으로 나타났지만, Kodur와 Sultan이 제안한 모델식이 실험결과와 보다 더 잘 맞는 것으로 나타났으며, 특히 600°C 이상에서 Eurocode 식은 실험결과보다 열 변형률을 크게 예측하는 것으로 나타났다.

3.2 하중이 가해진 경우

그림 4와 그림 5에 나타낸 바와 같이 W/B 32%, 하중 수준(R) 45%의 경우를 제외하고는 온도 550~600°C 범위에서 큰 변형률 증가율이 하중수준(R) 0인 경우와 같이 나타났다. 그리고 그림에서 알 수 있는 바와 같이 W/B에 관계없이 하중 수준이 증가를 하면, 변형률이 값이 줄어드는 것으로 나타났다, 특히 온도 400°C까지는 대체로 선형적인 값을 나타내다가 그 이후에는 급격하게 비선형적인 값을 나타내었다. 이와 같이 400°C 이후에 급격한 비선형성을 나타낸 것은 콘크리트 내부 조직이 많이 파괴되어 균열이 많이 발생하였기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 대체적으로 하중 수준이 15% 이상인 경우 약 700°C 근처에서 콘크리트가 급격하게 수축하여 파괴에 이르는 것으로 나타났다.

그리고 비정상상태 변형률은 압축강도 수준에 영향을 받는 것으로 나타났는데, 그림 4에서 W/B 32%, R 15% 시험체와 W/B 46%, R 30% 시험체를 비교해보면, 하중 크기가 비슷하기 때문에 400°C까지는 거의 비슷한 변형률 이력을 나타내었다. 그러나 400°C 이상에서는 하중 수준 R 값이 30%인 W/B 46%의 시험체가 더 팽창하지 못하고 수축하는 경향을 나타내었다. 이는 동일한 하중을 받아도 콘크리트의 강도가 커지면 보다 탄성적인 영역에서 거동을 하므로 미소균열이 적게 유발되기 때문으로 판단된다. 이러한 현상은 그림 5에서 W/B 32%, R 30% 시험체와 W/B 46%, R 45% 시험체와의 비교에서도 나타남을 알 수 있다, 그 결과 고온에서 콘크리트의 비정상상태 변형률은 하중 수준 뿐만 아니라 압축강도의 함수임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 W/B 46%와 32%에 대하여 하중 수준 45%까지 비정상상태 변형률 실험값을 제시하였다. 비정상상태 변형률은 하중 수준뿐만 아니라, 압축강도의 함수인 것으로 나타났다. 특히 비슷한 하중이 가해지면 400°C 이전에는 압축강도 수준에 관계없이 비슷한 변형률을 나타낸 반면, 400°C 이상에서는 압축강도에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

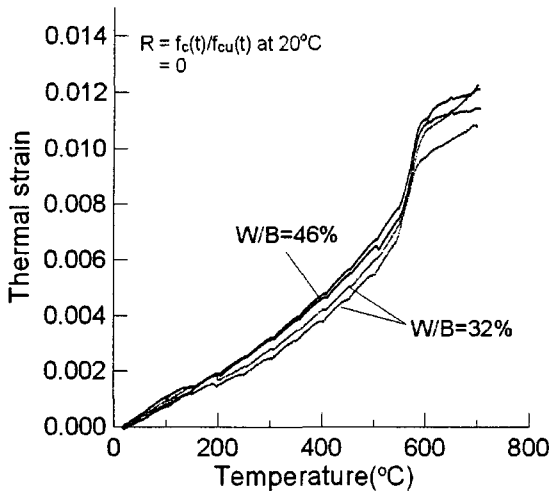


그림 2 하중수준 0일 때 변형률 이력

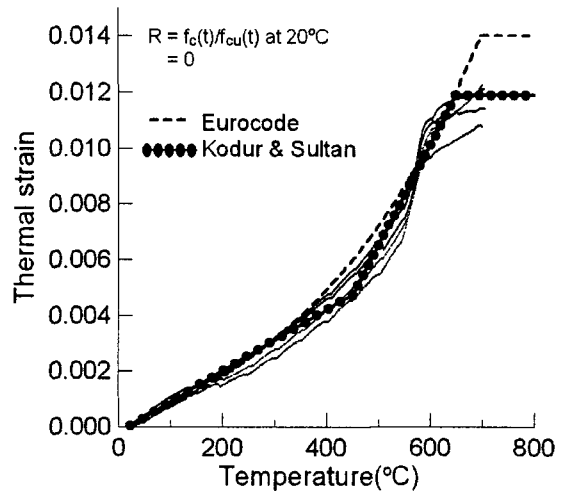


그림 3 하중수준 0일 때 측정값 및 모델식의 비교

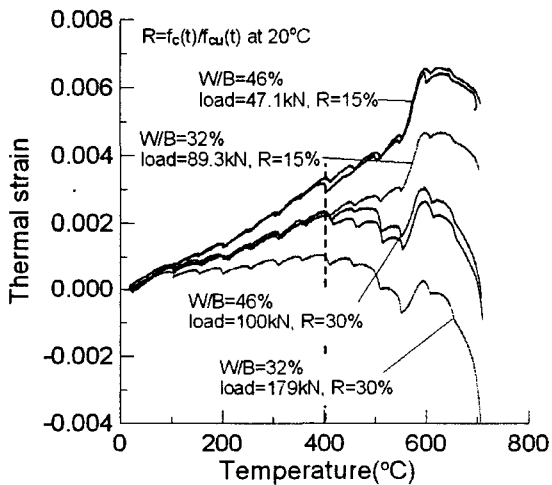


그림 4 하중 수준 15% 및 30%의 비교

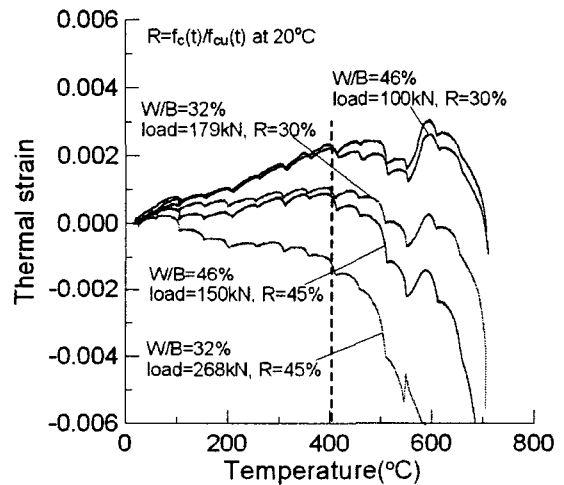


그림 5 하중 수준 30% 및 45%의 비교

참고문헌

1. Kodur, V.K.R., Cheng, F.P., Wang, T.C, and Sultan, M.A., "Effect of strength and fiber reinforcement on fire resistance of high-strength concrete columns," NRCC-45005, National Research Council, Canada, 2003.
2. Eurocode 2: Design of concrete structures-Part 1-2: General rules-Structural fire design, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2004.
3. Kodur, V.K.R., and Sultan, M.A., "Effect of temperature on thermal properties of high-strength Concrete," Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 15, No. 2, 2003, pp. 101-107.