

## 초고강도 콘크리트의 고온 변형 특성을 고려한 변형모델 상수 검토

황의철<sup>1</sup>, 김규용<sup>2\*</sup>, 최경철<sup>3</sup>, 윤민호<sup>3</sup>, 이보경<sup>3</sup>

### Examination of Strain Model Constants considering Strain Properties at High Temperature of Ultra-high-strength Concrete

Eui-Chul Hwang<sup>1</sup>, Gyu-Yong Kim<sup>2\*</sup>, Gyeong-Cheol Choe<sup>3</sup>, Min-Ho Yoon<sup>3</sup>, Bo-Kyeong Lee<sup>3</sup>

**Abstract:** Evaluation on the test of actual concrete member to confirm the fire resistance of the concrete member using ultra-high strength concrete is required. However, test equipment which has large loading capacity is needed to the actual member experiment. So, many researchers evaluated the fire performance through analytical studies using the material models. This study experimentally evaluated strain properties on ultra-high-strength concrete of 80, 130 and 180 MPa with heating and examined to apply the existing strain model about ultra-high-strength concrete. As a results, constants are drawn by method of least squares applying experimental values and calculated values by the existing strain model, it proposed strain model that can be applied to ultra-high-strength concrete.

**Keywords:** Concrete strain model, Thermal strain, Stress-strain, Creep strain, Transient strain

## 1. 서론

초고강도 콘크리트는 일반강도 콘크리트에 비해 결합재 양이 매우 많고, 콘크리트 내부조직구조가 치밀하며, 화재 시 폭렬 및 급격한 내력 저하가 발생할 가능성이 높다. 따라서, 초고강도 콘크리트를 이용한 콘크리트 부재는 실제부재 실험을 실시하여 내화 성능을 확인할 필요가 있다(Kalifa et al., 2000).

그러나 초고강도 콘크리트를 이용한 부재 실험에는 재하 능력이 큰 실험 장비가 필요하기 때문에 이에 관한 연구보고가 매우 적은 실정이다. 이에 선행 연구들은 축소 모형에 의한 실험 결과를 이용하여 초고강도 콘크리트의 내화 성능을 해석적으로 평가하고 있다.

특히, Anderberg들은 네 가지 변형 구성 요소 모델을 식(1)과 같이 제시하고 있으며, 지금까지 가장 이상적인 모델로서 사용되고 있다(Anderberg et al., 1976).

$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{th} + \varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_{cr} + \varepsilon_{tr} \quad (1)$$

where,  $\varepsilon_{tot}$  : total strain

$\varepsilon_{th}$  : thermal strain

$\varepsilon_{\sigma}$  : stress-strain

$\varepsilon_{cr}$  : creep strain

$\varepsilon_{tr}$  : transient strain

한편, 이러한 모델은 Anderberg 및 Thelandersson의 이론적 연구와 Lin, Ellingwood 및 Piet의 실험 결과를 적용한 것이며(Anderberg et al., 1976; Lin et al., 1879), 현 단계에서 사용량이 증가하고 있는 100MPa 이상의 초고강도 콘크리트의 고온 변형 특성에 대한 적용 가능성을 검토할 필요가 있다(Hideki et al., 2007; Yamamoto et al., 2011).

따라서 본 연구에서는 압축 강도 80, 130 및 180 MPa의 초고강도 콘크리트에 대하여 Anderberg의 모델(Anderberg et al., 1976)에서 사용하는 네 가지 변형 특성을 실험적으로 평가했다. 또한 이 실험 값을 이용하여 각각의 변형 모델에 적용할 수 있는 상수를 검토하고, 초고강도 콘크리트를 이용한 구조 부재의 변형 분석에 사용할 수 있는 기초 자료를 제시하는 것을 목적으로 했다.

<sup>1</sup>학생회원, 충남대학교 건축공학과 석사과정

<sup>2</sup>정회원, 충남대학교 건축공학과 교수, 공학박사, 교신저자

<sup>3</sup>정회원, 충남대학교 건축공학과 박사과정

\*Corresponding author: gyuyongkim@cnu.ac.kr

Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University 99 Daehakro, Yuseong-gu, Daejeon 34430, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2016년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 2. 실험 계획 및 방법

### 2.1 실험계획 및 콘크리트 배합

본 연구의 실험 계획을 Table 1에, 사용 재료의 물리적 특성을 Table 2에, 콘크리트의 배합을 Table 3에 나타냈다. 실험은 W/B 20.0, 14.5, 12.5%의 초고강도 콘크리트를 사용하였고, 가열 시의 하중 재하 조건은 비 재하 및 콘크리트의 최대 압축 응력의 0.25배(0.25 fcu) 및 최대 압축 응력의 0.40배(0.40 fcu)의 3가지로 설정했다. 목표 가열 온도는 20, 100, 200, 300, 500, 700°C로 설정했다. 평가 항목은 열팽창 변형, 응력-변형, 크리프 변형, 과도 변형 및 전체 변형이며, 측정된 값을 Table 4의 콘크리트 변형 모델과 비교·검토했다.

**Table 1** Experimental plan

Fck	Heating Method (°C/min)	Load (X · fcu)	Heating temp. (°C)	Test item
80	1	0	20	<ul style="list-style-type: none"> <li>Stress-strain</li> <li>Creep strain</li> <li>Thermal strain</li> <li>Transient creep strain</li> <li>Total strain</li> </ul>
130			100	
			200	
			300	
			500	
180			700	

**Table 2** Physical properties of used material

Material	Physical properties
Cement	OPC (density: 3.15 g/cm <sup>3</sup> , specific surface area: 3,200 cm <sup>2</sup> /g)
Blast furnace slag powder	Density: 2.9 g/cm <sup>3</sup> , specific surface area: 6,000 cm <sup>2</sup> /g
Silica fume	Density: 2.5 g/cm <sup>3</sup> , specific surface area: 200,000 cm <sup>2</sup> /g
Fly ash	Density: 2.2 g/cm <sup>3</sup> , specific surface area: 3,000 cm <sup>2</sup> /g
Gypsum	Density: 2.9 g/cm <sup>3</sup> , specific surface area: 3,550 cm <sup>2</sup> /g
Coarse agg.	Crushed granitic aggregate (size: 13 mm, density: 2.7 g/cm <sup>3</sup> , absorption: 0.9%)
Fine agg.	Sea sand (density: 2.65 g/cm <sup>3</sup> , absorption: 1.0%)
Super plasticizer	Polycarboxylic-based super plasticizer

**Table 3** Concrete mix proportion

Fck	W/B (%)	Slump -flow (mm)	Air (%)	S/a (%)	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )									
					W	C	BFS	FA	SF	Gy	S	G		
80	20.0	750		43	150	525	0	150	75	0	644	870		
120	14.5	±	2±1	35	150	652	207	0	124	52	448	848		
180	12.5	100		35	150	660	240	0	240	60	389	736		

### 2.2 시험체의 제작 및 양생방법

고온 변형 특성을 평가한 시험체는 「KS F 2403 콘크리트의 강도시험용 시험체 제작방법」에 준하여 Ø100×200 mm의 원주형 시험체로 제작했다. 시험체의 양생은 콘크리트 재령 24시간에서 탈형하고 28일 표준 수중 양생을 실시한 후, 온도 20±2°C, 상대 습도 60±5%의 항온 항습실에서 재령 300일까지 기건 양생을 실시했다. 가열 전의 콘크리트 시험체의 함수율은 2.5~3.0% 수준이었다.

### 2.3 실험방법

#### 2.3.1 가열장치 및 방법

본 실험에서 사용한 시험 장치를 Fig. 1에 나타냈다. 시험 장치는 2000 kN 급 재하 장치에 전기 가열로를 설치하여 재하 및 가열을 동시에 진행할 수 있도록 하였다. 또한 가열 중 시험체의 변형은 위·아래 가력 지그의 중심에 설치한 Ø10 mm의 석영관과 외부에 설치한 변위계를 이용하여 측정했다.

가열 방법은 Fig. 2에 나타난 것처럼 위·아래의 가력 지그를 RILEM에서 제안하고 있는 1°C/min의 속도로 가열하여 시험체에 열을 전달하는 간접 가열 방식을 채용했다. 이는 가열 중 시험체 내·외부의 온도차를 5°C이하로 유지시키며 시험체의 온도를 상승시키기 위함이다.

**Table 4** Strain model of concrete

Thermal strain	$\epsilon_{th} = a + b \times T + c \times T^2 + d \times T^3$	$20 \leq T \leq 650$	(2)
	$\epsilon_{th} = e$	$650 \leq T$	
a, b, c, d, e : constant			
$\sigma = \sigma_{u,T} \times \frac{\epsilon_{\sigma}}{\epsilon_{cl}} \times \frac{n}{n - 1 + (\frac{\epsilon_{\sigma}}{\epsilon_{cl}})^n}$			
Stress	$\sigma$	: calculated stress (MPa)	(3)
strain	$\epsilon_{\sigma}$	: measured stress (MPa)	
	$\sigma_{u,T}$	: ultimate stress at current Temp.(T)(MPa)	
	$\epsilon_{cl}$	: peak strain at ultimate stress at Temp.	
	n	: constant that determines gradient of curve	
$\epsilon_{cr} = f \times (\frac{t}{180})^g$			
Creep strain	f	: creep strain at 180min.	(4)
	g	: constant	
	t	: time (min.)	
$\epsilon_{tr} = -k \times \frac{\sigma}{\sigma_{u,20^{\circ}C}} \times \epsilon_{th}$			
Transient strain	$\sigma$	: stress (MPa)	(5)
	$\sigma_{u,20^{\circ}C}$	: stress at room Temp.(MPa)	
	k	: constant	

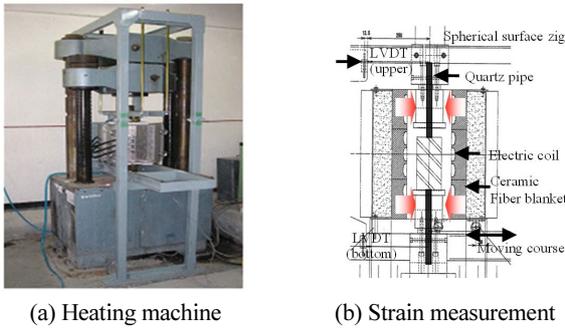


Fig. 1 Heating machine and method of strain measurement

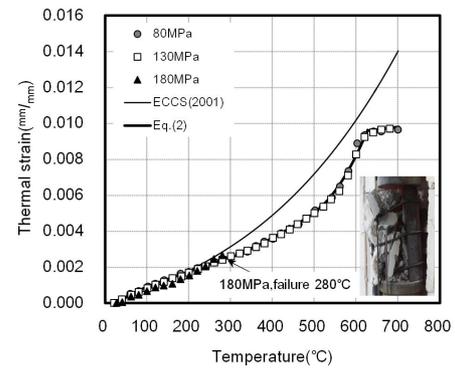


Fig. 4 Thermal strain of Ultra high strength concrete

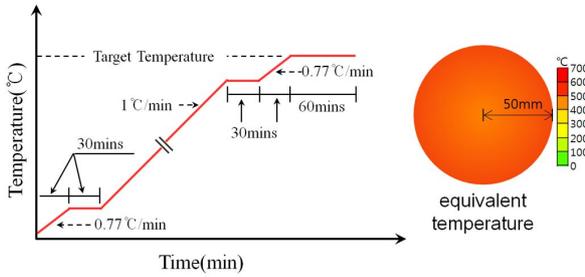


Fig. 2 Heating method and temperature of concrete

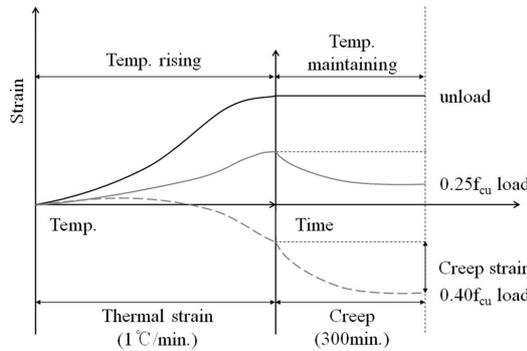


Fig. 3 Evaluation method of strain properties of concrete

### 2.1.2 변형평가방법

Fig. 3에 가열·재하 시 콘크리트의 변형 거동의 개요도를 나타냈다. 열팽창 변형은 비 재하·가열 상태에서 발생하는 변형, 전체 변형은 재하·가열 상태에서 발생하는 변형, 크리프 변형은 하중 재하 후 목표 온도까지 가열하고, 목표 온도 도달 시간부터 300분 동안의 변형이라고 평가했다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 열팽창 변형

Fig. 4에 초고강도 콘크리트의 열팽창 변형을 나타냈다. 콘크리트의 압축 강도에 관계없이 650°C까지 가열 온도가 높아

Table 5 Constant used in thermal strain model

constant	a	b	c	d	e
this study	$7 \times 10^{-11}$	$-5 \times 10^{-8}$	$2 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-4}$	$97 \times 10^{-4}$
ECCS	$-1.8 \times 10^{-4}$	0	$9 \times 10^{-6}$	$2.3 \times 10^{-11}$	$14 \times 10^{-3}$

질수록 열팽창 변형이 증가하는 경향이 나타났다. 가열 온도 650°C이상에서 팽창 변형하는 경향이 작아졌으며, 700°C에서 열팽창 변형은 0.0097을 나타냈다.

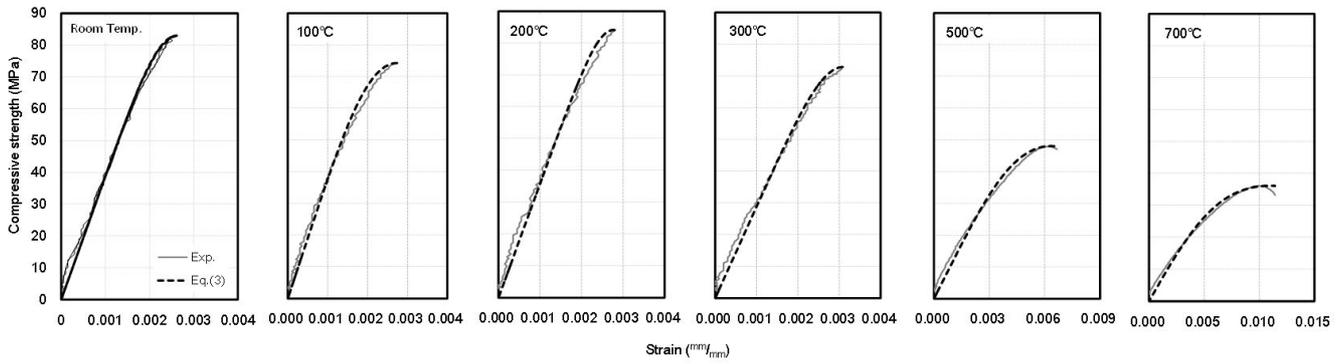
이러한 경향은 ECCS(ECCS-Technical Committee 3, 2001)의 결과와 유사한 경향이지만, 본 실험에서 얻어진 값은 ECCS에서 나타내는 700°C의 변형인 0.014의 값보다 작은 결과를 나타냈다. 이는 초고강도 콘크리트의 경우 고온에서 수축하는 결합재의 양이 매우 많기 때문에 열팽창 변형이 작게 발생하는 것으로 생각된다.

또한, 본 실험에서 검토 한 초고강도 콘크리트의 경우 압축 강도에 관계없이 동일한 열팽창 변형 거동을 나타내며, 이는 콘크리트의 열팽창 변형에 가장 큰 영향을 미치는 굵은 골재를 모두 같은 것을 사용한 것이 원인으로 생각된다. 한편, 180 MPa의 초고강도 콘크리트는 가열 온도 280°C에서 시험체가 폭발 파괴되어 이후 열팽창 변형을 측정 할 수 없었다.

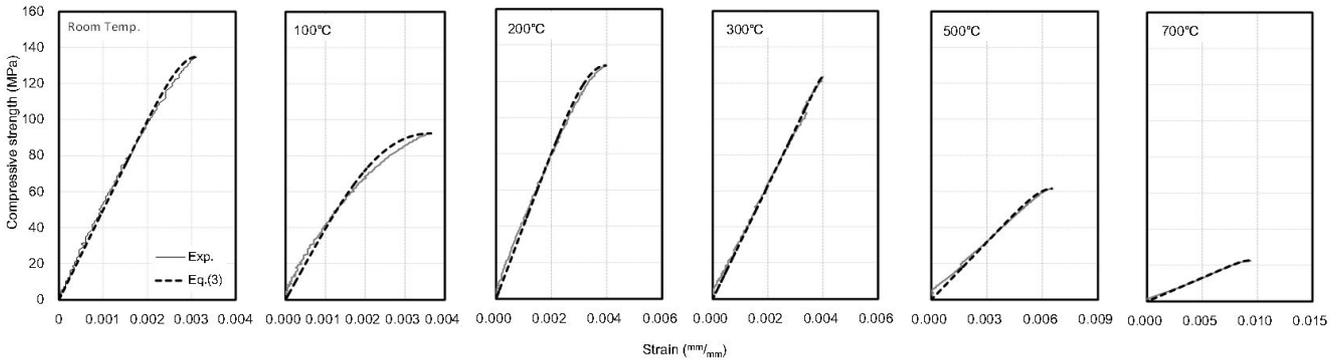
열팽창 변형 모델은 ECCS의 보통 강도 콘크리트의 모델인 식 (2)를 이용하여 초고강도 콘크리트의 열팽창 변형 거동을 반영하고 상수를 수정했다. ECCS 모델의 상수와 본 실험에서 수정 된 상수를 Table 5에 나타냈다.

### 3.2 응력-변형

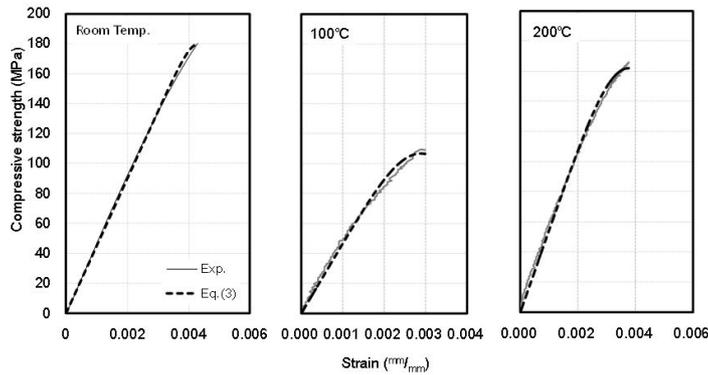
초고강도 콘크리트의 응력-변형 곡선을 Fig. 5에 나타냈다. 80, 130 MPa의 초고강도 콘크리트 시험체는 상온~300°C의 온도 범위에서 응력-변형 곡선 기울기가 크고 파괴 시 취성적인 거동을 나타냈다. 또한 500°C에서 기울기는 작아지며, 700°C에서 파괴 시 변형이 크게 증가하고 있음을 확인할 수 있었다.



(a) 80 MPa



(b) 130 MPa



(c) 180 MPa

Fig. 5 Stress-strain curve of Ultra high strength concrete

180 MPa의 초고강도 콘크리트 시험체는 200°C이하의 온도 범위에서 상온의 응력-변형 곡선과 유사한 거동을 나타냈지만, 280°C에서 폭발 파괴되어 300°C이상의 온도 범위에서는 응력-변형 곡선을 평가할 수 없었다.

한편, Castillo들의 연구에서는(Castillo et al., 1990) 고강도 콘크리트의 응력-변형 곡선은 보통강도 콘크리트에 비해 급격히 최대 응력에 도달한 후, 취성적인 파괴 거동을 나타낸다고 보고하고 있다. 특히, 보통강도 콘크리트의 경우 100°C까지 탄성 재료 특성을, 200°C에서 소성 재료 특성을 보이지만,

고강도 콘크리트의 경우 200°C까지 탄성 재료 특성을 나타낸다고 보고하고 있다.

반면에, 본 실험의 범위에서 검토한 초고강도 콘크리트는 300°C까지 탄성 재료 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 본 실험에서 사용한 초고강도 콘크리트의 응력-변형 곡선의 모델은 Eurocode에서도 채용되고 있는 Popovics의 식 (3)을 적용하여(Koji et al., 2010) 응력-변형 곡선에서의 최대 응력 값을 압축 강도로 하여, 상온에 대한 고온 압축 강도 비 및 압축 강도 실험시의 변형 값을 사용하여 계산했다. 실험값과

계산 값의 누적 오차가 가장 작아지도록 n 값을 도출하여 Table 6에 나타냈다.

### 3.3 크리프 변형

초고강도 콘크리트의 크리프 변형을 Fig. 6에 나타냈다. 초고강도 콘크리트의 크리프 변형은 압축강도에 관계없이 가열 온도가 높아질수록 증가하는 경향을 보였다.

가열 온도 500°C까지의 크리프 변형은 0.002 이하의 값을 나타냈지만, 700°C에서는 크게 증가하여 500°C 크리프 변형의 3배 이상의 값을 나타냈다. 크리프 변형 거동은 하중 재하량이 커질수록 비례적으로 증가하는 경향을 나타냈다.

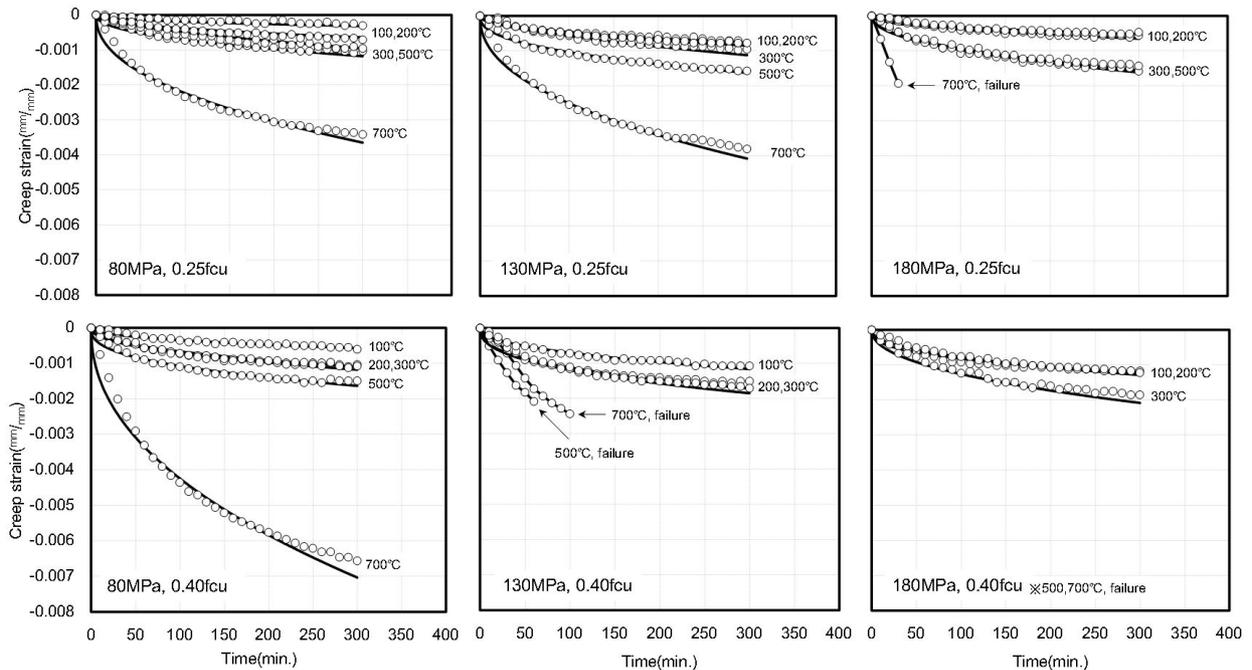
한편, 130 MPa의 초고강도 콘크리트 시험체의 경우에는 0.40 f<sub>cu</sub>의 하중재하 시 가열 온도 500°C 이상, 180 MPa의 초

**Table 6** Constant used in stress-strain model

f <sub>ck</sub>	Temp.(°C)	$\sigma_{u,T}/\sigma_{u,20^\circ C}$	$\epsilon_{cl}(\times 10^{-6})$	n
80	20	1.00	0.0026	5.45
	100	0.90	0.0027	3.48
	200	1.01	0.0028	6.75
	300	0.88	0.0031	5.43
	500	0.58	0.0064	2.89
	700	0.44	0.0110	2.19
130	20	1.00	0.0031	7.46
	100	0.69	0.0036	2.71
	200	0.95	0.0040	5.07
	300	0.92	0.0040	46.95
	500	0.46	0.0065	8.97
	700	0.17	0.0093	15.10
180	20	1.00	0.0043	13.82
	100	0.59	0.0029	4.82
	200	0.90	0.0038	4.83

**Table 7** Constant used in creep strain model

f <sub>ck</sub>	Temp.(°C)	Stressed condition				
		0.25 f <sub>cu</sub>		0.40 f <sub>cu</sub>		
		a	b	a	b	
80	100	0.00025	0.46	0.00045	0.46	
	200	0.00051	0.46	0.00087	0.46	
	300	0.00071	0.60	0.00134	0.38	
	500	0.00093	0.46	0.00093	0.46	
	700	0.00290	0.45	0.00556	0.46	
	130	100	0.00060	0.46	0.00140	0.46
130	200	0.00067	0.46	0.00092	0.46	
	300	0.00082	0.60	0.00151	0.60	
	500	0.00132	0.41	-	-	
	700	0.00324	0.45	-	-	
	180	100	0.00051	0.46	0.00102	0.46
	180	200	0.00041	0.46	0.00102	0.46
300		0.00123	0.46	0.00165	0.60	
500		0.00128	0.46	-	-	



**Fig. 6** Creep strain of Ultra high strength concrete

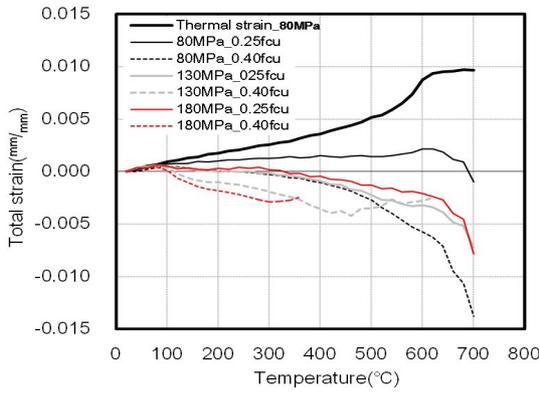


Fig. 7 Total strain of Ultra high strength concrete

고강도 콘크리트 시험체의 경우 0.25 fcu의 하중재하시 가열 온도 500°C 이상의 범위에서 크리프 시험 중 파괴가 발생했다. 따라서, 초고강도 콘크리트의 경우 고온 및 지속 하중에 의한 파괴 현상에 대해 검토가 필요하다고 판단된다.

초고강도 콘크리트의 크리프 변형 모델은 본 실험에서 얻어진 크리프 변형 값과 시간에 의한 경화 법칙을 적용하여 Anderberg가 제시한 식 (4)를 이용 하였다. 상수 a, b의 값은 Table 7에 나타내었다.

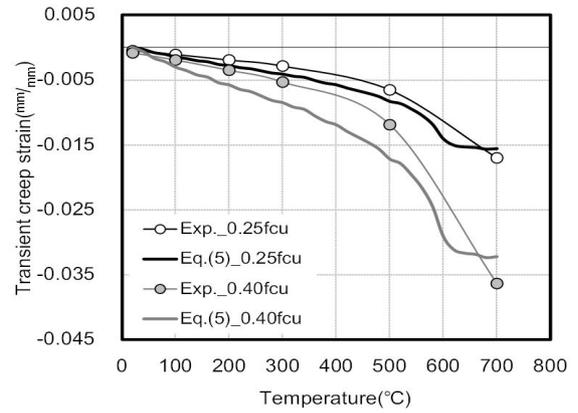
### 3.4 과도 변형

압축 응력 하에서 온도가 상승 할 때 발생하는 콘크리트의 변형은 열팽창 변형 및 응력에 의한 탄성 변형, 크리프 변형으로 구별된다. 그러나 실제로 하중과 고온을 동시에 받은 콘크리트의 변형은 전술 한 변형 성분보다 큰 변형을 보이게 되며, 이를 과도 변형이라고 정의한다. Fig. 7의 전체 변형에서 열팽창 변형, 응력-변형 관계, 크리프 변형을 제외하고 계산하는 식 (6)을 이용하여 과도 변형을 산출하고, 그 결과를 Fig. 8에 나타냈다.

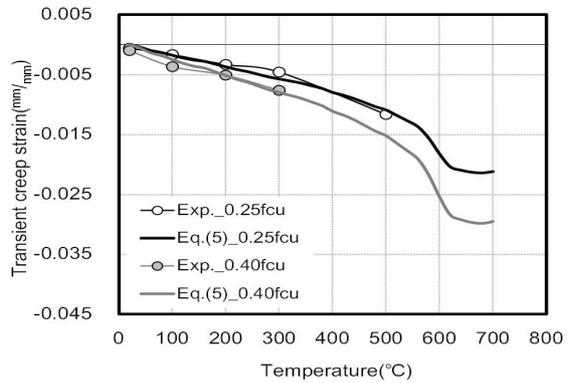
$$\epsilon_{tr} = \epsilon_{tot} - \epsilon_{th} - \epsilon_{\sigma} - \epsilon_{cr} \quad (6)$$

초고강도 콘크리트의 과도 변형은 크리프 변형과 유사한 경향으로 가열 온도가 높아질수록 커졌다. 또한, 같은 압축 강도 수준에서는 재하 하중이 클수록 과도 변형이 커지고, 같은 재하 하중 수준에서는 압축 강도가 클수록 과도 변형이 커지는 경향을 보였다.

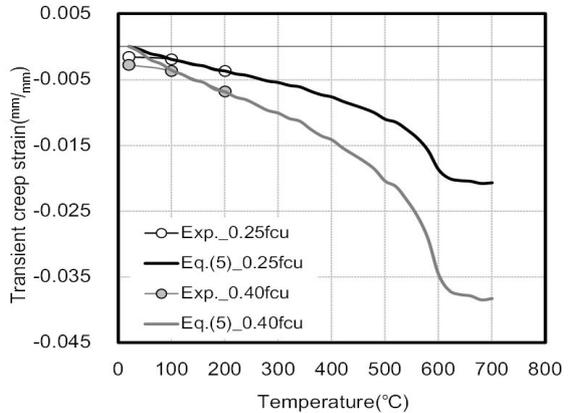
일반적으로 콘크리트의 과도 변형은 500°C이상의 온도 범위에서 급격히 증가한다. 이는 Ca(OH)<sub>2</sub>의 분해에 의해 시멘트 페이스트의 붕괴와 굵은 골재의 팽창 변형에 의해 콘크리트 내부에 균열이 발생하기 때문이다. 따라서, 700°C이상의 온도 조건에서 재하 하중을 받는 콘크리트의 경우 골재 종류에 관계없이 파괴의 위험성이 큰 것으로 보고되고 있다(Tao et al., 2013).



(a) 80 MPa



(b) 130 MPa



(c) 180 MPa

Fig. 8 Transient strain of Ultra high strength concrete

Table 8 Constant used in transient strain model

f <sub>ck</sub>	k	
	Stressed condition	
	0.25 f <sub>cu</sub>	0.40 f <sub>cu</sub>
80	6.47	8.35
130	8.85	7.70
180	8.59	9.93

본 실험의 범위에서 검토한 초고강도 콘크리트는 일반강도 및 고강도 콘크리트에 비해 비교적 낮은 온도인 300°C 이상에서도 수축 파괴 현상이 보였다. 이것은 굵은 골재의 최대 치수가 작고, 결합재량이 많은 초고강도 콘크리트가 재하 하중과 고온을 동시에 받는 경우, 콘크리트 매트릭스의 결속력이 약해져 수축 변형이 갑자기 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

초고강도 콘크리트의 과도 변형 모델은 Anderberg가 제시한 식 (5)를 이용하여 콘크리트의 압축 강도와 하중 재하 조건에 따른 상수 k 값을 Table 8에 나타냈다.

## 4. 결론

초고강도 콘크리트의 고온 변형 특성의 평가를 통해 기존 변형 모델을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 고온을 받은 초고강도 콘크리트의 열팽창 변형, 응력-변형, 크리프 변형 및 과도 변형을 평가 한 결과, 보통 강도 콘크리트와 다른 변형 특성이 나타나는 것을 확인했다.
- 2) 초고강도 콘크리트는 매우 낮은 가열 속도 조건에서도 폭렬에 의한 파괴 현상이 발생 할 수 있으므로, 내화 성능 확보에 관한 대책이 필요하다고 생각된다.
- 3) 초고강도 콘크리트의 변형 값과 기존의 변형 모델에서 제안된 값을 비교하여 누적 오차가 가장 작은 상수 값을 도출하여 초고강도 콘크리트를 이용한 부재의 변형 해석에 필요한 고온 변형 특성 모델의 상수 값을 제시했다.

## 감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2015R1A2A2A01007705).

## References

- Anderberg, Y., and Thelandersson, S. (1976), Stress and Deformation Characteristics of Concrete, 2-Experimental Investigation and Material Behavior Model, Bulletin 54, University of Lund, Sweden.
- Castillo, C., and Durrani, A. J. (1990), Effect of Transient High Temperature on High-strength Concrete, *ACI Materials Journal*, 81(1), 47-53.
- ECCS-Technical Committee 3 (2001), Model Code on Fire Engineering, European Convention for Constructional Steel Work, First Edition, 47.
- Eurocode2 (2004), Design of Concrete Structures, Part 1-2, General rules-structural fire design, The European Standard EN1992-1-2.
- Hideki, K., Yuji, I., Atsushi, K., and Hiroto, T. (2007), Seismic Behavior of 200 MPa Ultra High Strength Steel Fiber Reinforced Concrete Columns under Varying Axial Load, *Journal of advanced concrete technology*, 5(2), 193-200.
- Kalifa, P., Menneteau, F. D., and Quenard, D. (2000), Spalling and Pore Pressure in HPC at High Temperatures, *Cement and Concrete Research*, 30, 1915-1927.
- Koji, T., Heisuke, Y., Masatoshi, T., Takeo, H., and Hideki, U. (2010), Experimental Study on Transient Strain of 100 N/mm<sup>2</sup> High Strength Concrete exposed to Fire.
- Lin, T. D., Ellingwood, B., and Piet, O. (1988), Flexural and Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams during Fire Tests, PCA R&D Serial No. 1879.
- RILEM TC 129-MHT (1995), Part 3-Compressive Strength for Service and Accident Conditions, *Material and structures*, 28, 410-414.
- Tao, J., Liu, X., Yuan, Y., and Taerwe, L. (2013), Transient Strain of Self-compacting Concrete Loaded in Compression Heated to 700°C, *Materials and Structures*, 191-201.
- Yamamoto, K., Watanabe, T. S., and Shimizu, Y. (2011), High-rise Building Operations using Ultra High Strength Concrete with a Design Strength of 200 MPa, *Concrete Journal*, 49(8), 37-42.

Received : 09/08/2016

Revised : 09/22/2016

Accepted : 10/06/2016

**요 지 :** 초고강도 콘크리트를 이용한 부재의 내화 성능을 검토하기 위해서는 실제부재 단위의 시험에 의한 평가가 요구되고 있다. 그러나 실제부재 실험을 하기 위해서는 재하 능력이 큰 시험 장비가 필요하기 때문에, 재료 모델을 이용한 해석적 연구를 통해 내화 성능을 평가하고 있다. 본 연구에서는 80, 130 및 180 MPa의 초고강도 콘크리트를 대상으로 고온 가열시의 변형 특성을 실험적으로 평가하고 초고강도 콘크리트에 대한 기존 변형 모델의 적용을 검토했다. 그 후, 최소 제곱법에 의해 실험 값과 기존의 변형 모델을 적용한 계산 값의 누적 오차가 가장 작은 상수 값을 도출하고 초고강도 콘크리트에 적용 할 수 있는 변형 모델을 제시했다.

**핵심용어 :** 콘크리트 변형모델, 열팽창 변형, 응력-변형, 크리프 변형, 과도 변형