



# 60 MPa급 고강도 콘크리트의 굵은골재 종류와 고온상태에 따른 변형특성 평가

윤민호<sup>1)</sup> · 최경철<sup>1)</sup> · 이태규<sup>2)</sup> · 김규용<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>충남대학교 건축공학과    <sup>2)</sup>대우조선해양건설 건축기술팀

## Evaluation on Strain Properties of 60 MPa Class High Strength Concrete according to the Coarse Aggregate Type and Elevated Temperature Condition

Min-Ho Yoon,<sup>1)</sup> Gyeong-Cheol Choe,<sup>1)</sup> Tae-Gyu Lee,<sup>2)</sup> and Gyu-Yong Kim<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-742, Korea

<sup>2)</sup>DSME Construction, Seoul 135-829, Korea

**ABSTRACT** Strain properties of concrete member which acts as an important factor in the stability of the concrete structure in the event of fire, significantly affected the characteristics of the coarse aggregate, which accounts for most of the volume. For this reason, there are many studies on concrete using artificial lightweight aggregate which has smaller thermal expansion deformation than granite coarse aggregate. But the research is mostly limited on concrete using clay-based lightweight aggregate. Therefore, in this study, the high temperature compressive strength and elastic modulus, thermal strain and total strain, high temperature creep strain of concrete was evaluated. As a result, remaining rate of high-temperature strength of concrete using lightweight aggregate is higher than concrete with general aggregate and it is determined to be advantageous in terms of structural safety and ensuring high-temperature strength from the result of the total strain by loading and strain of thermal expansion. In addition, in the case of high-temperature creep, concrete shrinkage is increased by rising loading and temperature regardless of the type of aggregate, and concrete using lightweight aggregate shows bigger shrinkage than concrete with a granite-based aggregate. From this result, it is determined to require additional consideration on a high temperature creep strain in case of maintaining high temperature like as duration of a fire although concrete using light weight aggregate is an advantage in reducing the thermal expansion strain of the fire.

**Keywords :** artificial lightweight aggregate, aggregate density, ISO-834 standard fire curve, thermal strain, steady state creep

### 1. 서 론

콘크리트의 구성재료 중 시멘트 페이스트는 가열을 받아 온도가 증가할수록 수축을 하지만 굵은골재는 팽창하는 경향을 보인다. 이러한 사용재료의 열팽창계수 차이에 의해 콘크리트는 내부에 균열이 발생하여 강도가 저하하게 되고 기둥과 같은 수직부재의 경우에는 강도가 저하된 상태에서 보와 슬래브 등의 수평부재의 팽창에 의해 큰 모멘트하중을 받아 전단파괴가 발생할 수 있다.<sup>1)</sup> 이러한 전단 파괴로 인해 구조물이 붕괴된 사례는 우리나라와 미국, 일본 등의 화재 사례에서도 여러 차례 보고되고 있다.<sup>2)</sup>

따라서 화재 시 콘크리트 구조물의 거동에 대해 많은 연구가 Fig. 1과 같은 실제 화재조건을 고려한 여러 화재 곡선들을 사용하여 수행되었다. 이러한 화재곡선들은 초기에 급격히 온도가 상승하는 구간과 화재가 진압되지 않은 경우 고온이 유지되는 구간으로 구분할 수 있으며 온도상승구간에서 발생하는 고온특성 및 폭렬특성에 관해서는 많은 연구자들에 의해서 연구가 이루어지고 있지만 고온이 유지되는 구간에서 발생할 수 있는 고온 크리프 변형의 경우는 상대적으로 연구가 미진한 상태이다.

하지만 화재 시의 고온에 약 120~180분간 노출된 철근 콘크리트 구조부재가 상온에서 20~30년간 발생한 것과 유사한 크리프변형을 보여 구조물의 안정성에 심각한 악영향을 미친다는 연구 결과가 보고되고 있다.<sup>9)</sup> 따라서 화재시나 화재 후에 구조물을 재사용하는 경우 안전성을 평가하기 위해서는 이러한 온도가 유지되는 영역에 대한 고려도 필요할 것이라고 판단되었다.

또한, 고온을 받는 콘크리트 구조물의 안정성에는 체

\*Corresponding author E-mail : gyuyongkim@cnu.ac.kr  
 Received September 30, 2013, Revised December 14, 2013,  
 Accepted January 5, 2014  
 ©2014 by Korea Concrete Institute

적의 대부분을 차지하는 굵은골재의 변형특성이 큰 영향을 미친다.<sup>3)</sup> 따라서 일반적으로 콘크리트에 쓰이고 있는 화강암계 굵은골재 대신에 Fig. 2에 나타난 것처럼 상대적으로 열팽창계수가 작은 인공경량골재를 사용한 경량 콘크리트에 대한 연구가 Neville,<sup>4)</sup> Kong et al.<sup>5)</sup>과 Abeles and Bardhan-Roy,<sup>6)</sup> Turker et al.<sup>7)</sup> 등 여러 연구자들에 의해 이루어지고 있다.

따라서 이 연구에서는 화강암계 일반골재와 일반적으

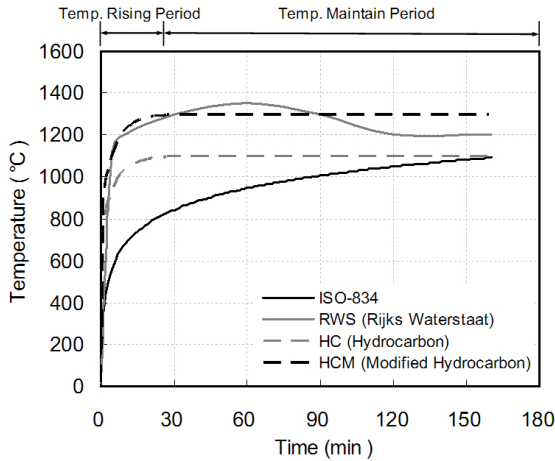


Fig. 1 Fire curves used in fire test

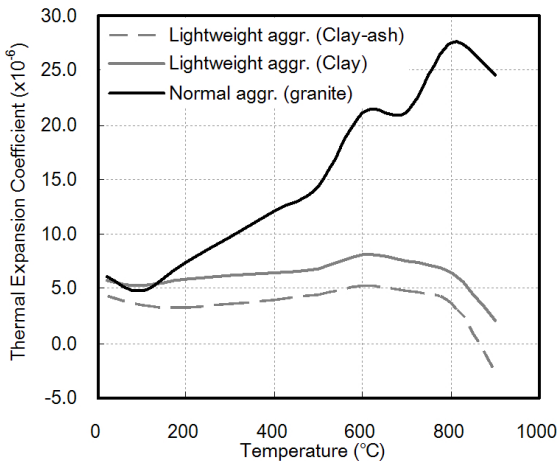


Fig. 2 Coefficient of thermal expansion of several coarse aggregate

로 많이 사용되는 경량골재인 Clay계, 이를 개선한 Clay-ash 계 세 종류의 굵은골재를 사용한 콘크리트의 화재의 상태에 따른 고온 역학적 특성을 평가하여 고강도 콘크리트를 사용한 구조물의 내화성능설계에 활용될 수 있도록 하였다.

## 2. 실험계획

### 2.1 실험계획 및 콘크리트 배합

Table 1에 이 연구에 사용된 콘크리트 배합과 실험계획을 나타냈다. 경량골재를 사용한 콘크리트의 경우 일반골재를 사용한 콘크리트에 비하여 낮은 압축강도를 보이기 때문에 실리카폼을 첨가하여 동일한 강도를 낼 수 있도록 콘크리트 배합을 설정하였다.

또한 W/B는 일반골재 콘크리트의 경우 35%, 경량골재를 사용한 콘크리트의 경우는 33%로 하였으며 잔골재율을 40%로 고정하였다.

또한 비재하 및 압축강도의 20, 40%를 재하하고 목표 온도를 20, 100, 200, 300, 500, 700°C로 설정하여 목표 온도에서의 고온압축강도와 탄성계수를 측정하였고, 가열 중의 열팽창변형과 온도유지구간에서의 고온 크리프 변형을 측정 하였다.

### 2.2 사용재료

이 연구에서 사용한 재료의 물리적 성질을 Table 2에 나타냈고 굵은골재의 화학조성을 Table 3, 열팽창계수를 Table 4에 나타냈다. 결합재로 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고 경량골재를 사용한 콘크리트에는 일반골재를 사용한 콘크리트와 동일한 강도를 발현시키기 위하여 실리카폼을 시멘트 대비 8% 치환하였다.

또한 중요한 실험요인으로 설정한 굵은골재는 최대치수 20 mm, 밀도 2.65 g/cm<sup>3</sup>, 흡수율 0.8%의 화강암계 부순자갈을 일반골재로 사용했고 경량골재로는 최대치수 13 mm, 밀도 1.79 g/cm<sup>3</sup>, 흡수율 17.4%의 Clay계와 여기에 coal-ash를 첨가하여 강도와 흡수율 등의 문제점을 개선한 최대치수 13 mm, 밀도 1.68 g/cm<sup>3</sup>, 흡수율 15.3%의

Table 1 Experimental plan and concrete mix proportion

ID	W/B (%)	f <sub>ck</sub> (MPa)	Slump -flow (mm)	Air (%)	S/a (%)	Loading (×f <sub>ck</sub> )	Target temp. (°C)	Aggregate type	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )					Test item
									W	C	SF	S	G	
NW	35	63	650 ± 100	4±2	40	0.0 0.2 0.4	20, 100 200, 300 500, 700	Granite	165	470	-	692	1075	<ul style="list-style-type: none"> <li>Spalling properties</li> <li>High temperature compr. strength</li> <li>High temperature elastic modulus</li> <li>Thermal expansion</li> <li>High temp. creep</li> </ul>
CL	33	55						Lightweight (Clay)	155	432	38	687	720	
CA	33	59						Lightweight (Clay-ash)	155	432	38	687	676	

**Table 2** Mechanical properties of used materials

Material	Physical properties
Cement	OPC (density: 3.15 g/cm <sup>3</sup> , fineness: 3630 cm <sup>2</sup> /g)
Sand	Washed sand (density: 2.64 g/cm <sup>3</sup> , absorption: 1.03%)
Coarse aggr.	NW Crushed granite aggr. (size: 20 mm, density: 2.65 g/cm <sup>3</sup> , absorption: 1.0%)
	CL Clay lightweight aggr. (size: 13 mm, density: 1.79 g/cm <sup>3</sup> , absorption: 17.4%)
	CA Clay-ash lightweight aggr. (size: 13 mm, density: 1.68 g/cm <sup>3</sup> , absorption: 15.3%)
Silica fume	density: 2.2 g/cm <sup>3</sup> , fineness: 200000 cm <sup>2</sup> /g
Super plasticizer	Polycarboxylic-based super plasticizer

**Table 3** Chemical composition of coarse aggregate

Type	Chemical composition						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
Granite	72.0	15.5	1.8	2.3	0.1	4.4	3.1
Clay	69.2	16.7	7.5	0.7	1.4	0.9	1.8
Clay-ash	72.8	13.6	3.1	1.5	0.7	1.5	1.2

**Table 4** Coefficient of thermal expansion of coarse aggregate ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )

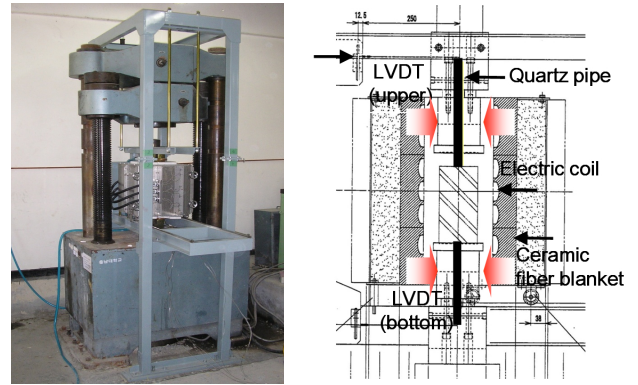
Type	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )							
	20	100	200	300	400	500	600	700
Granite	6.1	4.8	7.4	9.8	12.2	14.5	21.1	21.1
Clay	5.7	5.2	5.8	6.2	6.5	6.8	8.1	7.5
Clay-ash	4.0	4.0	3.2	3.5	3.9	4.3	5.2	4.9

Clay-ash계 두 종류를 사용했다.<sup>8)</sup>

일반 및 경량골재를 사용한 모든 콘크리트 배합에는 목표 슬럼프 플로우 및 시공성을 만족시키기 위하여 폴리카르본산계 고성능 감수제를 사용하였다.

### 2.3 시험체 제작 및 양생

시험체의 제작은 KS F 2403 「콘크리트의 강도시험용 시험체 제작방법」에 준하여  $\phi 100 \times 200$  mm의 원주형 공시체를 제작하고 24시간 후 탈형하였다. 압축강도 측정용 시험체는 28일간  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 의 수중에서 양생하여 압축강도를 측정하였고 가열실험용 시험체는 7일간 수중양생한 후  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ , R.H.  $50 \pm 5\%$ 의 항온항습실에서 180일간 기건양생하였다. 압축강도시험과 가열시험 전에는 연마기를 사용하여 시험체의 상·하면을 평탄하게 연마하였다.



**Fig. 3** Equipment of heating under loading condition and details

## 2.4 시험방법

### 2.4.1 시험장치 및 가열방법

이 연구에서 사용된 실험장치를 Fig. 3에 나타냈다. 재하와 가열을 동시에 하기 위하여 2000 kN급 재하장치에  $1000^{\circ}\text{C}$ 까지 가열이 가능한 전기가열로를 설치하였다. 또한 가열 중에 시험체의 변형을 평가하기 위하여 상·하부 가력지그의 중심을 지나는  $\phi 10$  mm의 석영관을 통해 외부의 변위계에 변형을 전달하여 가열 중 변형을 측정했다.

가열은 시험체 내·외부의 온도가 유사한 수준으로 상승되도록 상·하부의 가력지그를 가열하여 시험체에 열을 전달하는 간접가열방식을 사용하였고 가열속도는 Rilem에서 제안하고 있는  $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 로 가열하였으며 상온에서부터  $50^{\circ}\text{C}$ , 목표온도  $50^{\circ}\text{C}$  전에서 목표온도까지의 구간은  $0.77^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 속도로 가열하여 시험체 내·외부의 온도 차이가  $5^{\circ}\text{C}$  이내로 되게 하였다.

또한 고온 크리프 변형은  $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 속도로 목표온도까지 가열한 다음 300분간 유지하여 변형을 측정하였다.

### 2.4.2 압축강도 시험

콘크리트의 상온압축강도는 시험체를 고정하기 위하여 0.2 kN 가력하고 KS F 2405 「콘크리트 압축강도 시험방법」에 준하여 측정하였고 고온압축강도의 측정은 가열 전에 비재하 및 상온압축강도의 20% 및 40%를 재하한 후 목표온도까지 가열하고 압축강도를 측정하였다.

### 2.4.3 변형측정 개요

이 연구에서의 콘크리트의 열팽창변형, 전체변형, 고온 크리프 변형의 시험방법은 RILEM에서 추천하는 시험방법으로 그 개요를 Fig. 4에 나타냈다.<sup>10)</sup> 가열 중 콘크리트의 변형은 비재하 시험의 경우 시험체 고정을 목적으로 0.2 kN 가력하고 측정하였으며, 재하시험의 경우는 압축강도의 20% 및 40%를 사전에 재하하여 실험을 진행하였다.

열팽창변형은 비재하시 열에 의해 발생하는 콘크리트의 변형을 측정하였다. 전체변형은 하중을 재하하고 목

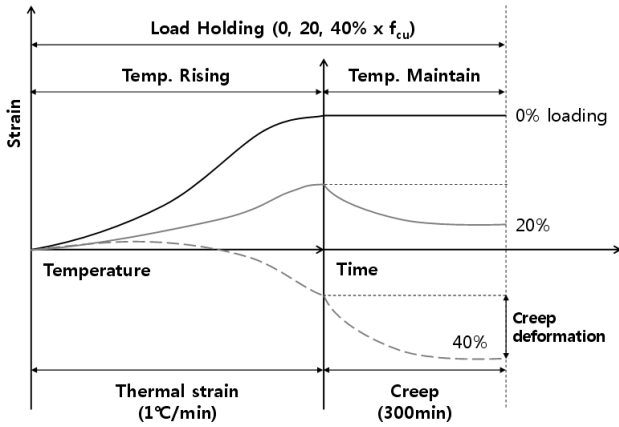


Fig. 4 Strain measurement overview

표온도까지 가열을 실시하는 경우에 발생하는 콘크리트의 변형을 측정하였으며, 고온 크리프 변형은 상온압축강도의 20% 및 40%를 가열 시작 전에 미리 재하한 후 시험 종료까지 유지하며 목표온도까지 가열하고 300분간 온도를 유지하면서 이때 발생하는 변형을 크리프로 산정하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 고온압축강도 및 탄성계수

Fig. 5에 골재종류별 콘크리트의 상온대비 고온에서의 압축강도를 나타냈다. NW의 경우 기존의 연구 결과와 유사하게 100°C에서 상온압축강도의 약 65% 수준까지 압축강도가 저하하였으며 300°C에서 상온압축강도의 약 90% 수준으로 압축강도가 상승하였다.<sup>11-13)</sup>

또한 300°C 이전의 온도영역에서는 재하에 의한 영향이 크지 않으나 500, 700°C에서는 재하량이 증가할수록 고온압축강도가 증가하는 경향을 보였다. 이는 고온에 의한 콘크리트의 팽창변형이 재하에 의한 수축변형으로 상쇄되어 콘크리트 조직 내부의 미세균열 발생이 억제되었기 때문으로 판단된다.<sup>14)</sup>

하지만 40%를 재하한 시험체를 700°C까지 가열한 경우 재하를 하지 않은 시험체보다 더 낮은 압축강도잔존율을 나타내었다. 이는 20%를 재하한 경우는 재하에 의한 수축변형이 팽창변형을 상쇄시켜 내부균열이 억제되어 강도가 증가하지만 재하량이 일정수준 이상으로 증가할 경우에는 수축변형의 영향으로 강도가 저하하는 것으로 판단된다.

CL 및 CA의 경우 NW보다 콘크리트의 강도가 저하되는 100°C에서 CL은 약 5%, CA는 약 15% 높은 강도잔존율을 보였으며 300°C 이상의 온도에서도 강도저하량이 작아 700°C에서 약 50% 이상의 강도잔존율을 보였다. 특히 CA의 경우 비재하시 약 63%, 재하시에 약 85%의 강도잔존율을 보여 고온에서 높은 강도유지성능을 나타냈다. 이는 인공경량골재의 제조과정 중 발생하는 골재 내

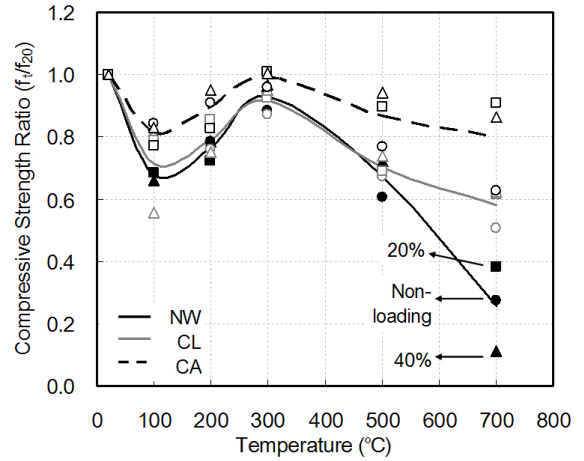


Fig. 5 High temperature compressive strength according to the coarse aggregate type

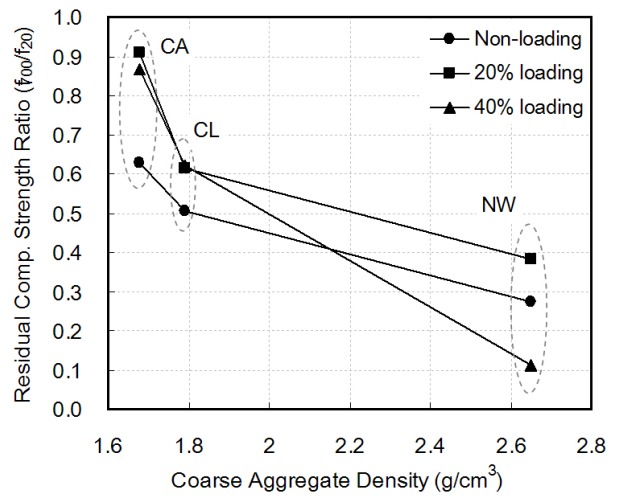


Fig. 6 Ratio of high temperature compressive strength according to the coarse aggregate density

부의 공극으로 인해 열에 의한 팽창이 크지 않아 고온에서 콘크리트 강도저하의 주된 원인으로 알려진 골재와 모르타르 사이의 ITZ(interfacial transition zone)에서 열팽창 차이에 의한 균열발생이 적었기 때문으로 판단된다.<sup>15)</sup>

특히 CA의 강도잔존율이 높은 것은 coal-ash 성분을 첨가한 Clay-ash계 골재가 Clay계 골재보다 골재표면 유리질 피막의 형성에 관여하는 K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O 성분이 균형 있게 존재하여 골재를 구성하는 물질이 용융되어 생성되는 피막 형성에 유리해 골재 내부에 공극이 다수 형성되었기 때문으로 판단된다.<sup>8)</sup>

따라서 콘크리트의 고온압축강도를 사용된 굵은골재의 밀도와 비교하여 Fig. 6에 나타냈다. 상술한 바와 같이 굵은골재의 밀도가 작을수록 고온에서 높은 강도잔존율을 보였으며 재하에 의해 그 값이 상승하였다. NW는 재하량에 의해 강도잔존률에 차이가 있으나 CL과 CA는 재하량에 의한 차이가 거의 발생하지 않았다.

또한 골재 종류에 따른 콘크리트의 고온탄성계수를 Fig. 7에 나타냈고 Fig. 8에 굵은골재의 밀도와 고온에서

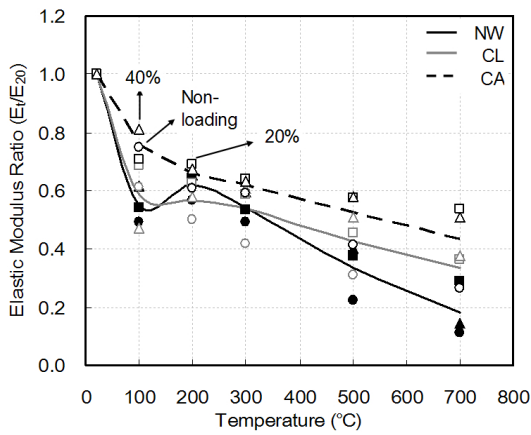


Fig. 7 High temperature elastic modulus according to the coarse aggregate type

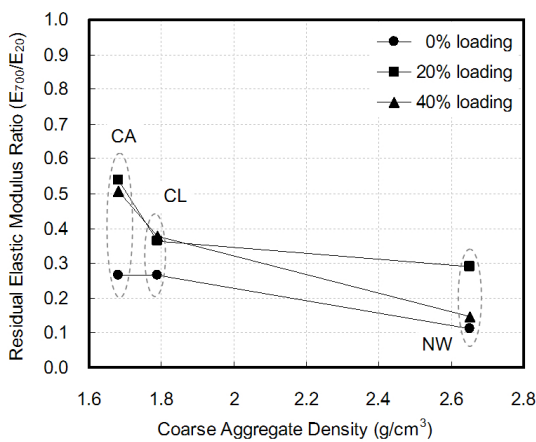


Fig. 8 Ratio of high temperature elastic modulus according to the coarse aggregate density

의 탄성계수 잔존률과의 관계를 나타냈다. 경량골재를 사용한 CL, CA 모두 NW보다 높은 탄성계수 잔존률을 나타냈으며 그 크기는 CA>CL>NW의 순으로 나타났다. 또한 재하에 의해 탄성계수의 잔존률이 상승하였으며 이는 고온압축강도와 마찬가지로 앞에서 설명한 골재 자체의 재료특성에 의한 것으로 판단된다.

하지만 압축강도의 경향과는 다르게 온도가 증가할수록 탄성계수는 지속적으로 감소하는 경향을 보이기 때문에 앞서 설명한 강도 상승구간에 대한 원인으로 기존 연구들에서 제시하고 있는 고온·고압의 수증기에 의한 미수화물질의 재수화반응과 열응력이 축하중에 대한 반력으로 작용하여 강도가 상승한다는 두 가지 이론 중 열응력이 더 큰 요인으로 작용한다고 판단된다.

### 3.2 콘크리트의 열팽창변형 및 전체변형

CL과 CA가 NW보다 고온에서의 더 높은 압축강도와 탄성계수 잔존율을 나타내는 원인으로 제시한 굵은골재 종류별 콘크리트의 열팽창변형을 측정하여 Fig. 9에 나타냈다.<sup>11-14)</sup> NW의 열팽창변형은 온도가 증가할수록 변형의

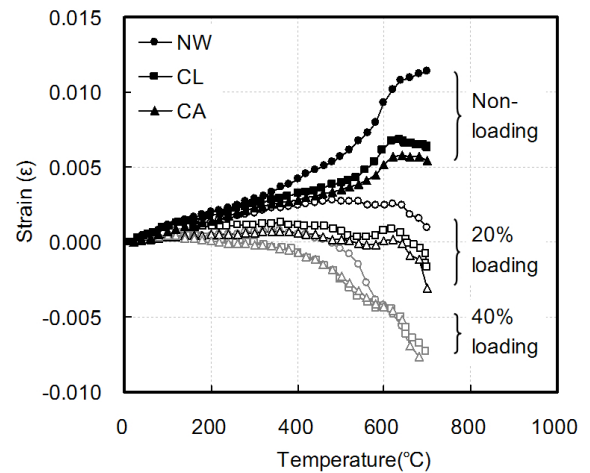


Fig. 9 Thermal and total strain according to the coarse aggregate type

증가율이 크고 500~600°C 부근에서 급격한 열팽창변형의 증가를 보이는데 이는 굵은골재로 사용된 화강암의 주요 조암광물인 α-석영이 573°C에서 β-석영으로 전이하면서 약 1% 이상의 부피팽창을 하기 때문으로 판단된다.<sup>16)</sup>

CL과 CA는 모두 NW보다 낮은 열팽창변형을 나타냈으며 CA의 열팽창변형이 CL보다 작았다. 이는 Clay-ash 계 골재가 Clay계 골재보다 유리질 피막이 견고하고 내부공극이 많아 골재의 열팽창저항성이 크기 때문으로 판단된다.

상온압축강도의 20%를 재하한 경우 NW는 가열이 진행됨에 따라 변형이 증가하여 500°C 부근에서 약 0.0028의 최고 변형률을 나타낸 뒤 서서히 감소하여 700°C에서 최종적으로 약 0.0015의 변형률을 보였다. CL 및 CA의 경우 NW보다 낮은 변형증가속도와 변형률을 보이며 비슷한 경향으로 거동했지만 CL은 약 0.012, CA는 약 0.007의 최고 변형률을 보여 CA가 CL보다 열팽창량이 작은 것을 알 수 있었다. 이는 앞서 설명한 제조과정 중 달라지는 골재 자체의 재료적 특성에 기인한 것으로 판단된다.

상온압축강도의 40%를 재하한 경우에는 전체적인 변형량은 작았지만 일반골재는 약 400°C, 경량골재는 약 350°C까지 20%를 재하한 경우와 동일한 경향의 변형거동을 나타냈다. 하지만 이후의 온도에서는 급격하게 수축하는 경향을 보였는데 이는 균형을 이루던 재하에 의한 수축변형과 가열에 의한 팽창변형이 온도증가에 의한 화학적 변화와 미세균열의 발생으로 인해 콘크리트조직의 강도가 약해져 수축변형의 영향이 커졌기 때문으로 판단된다.

### 3.3 고온크리프

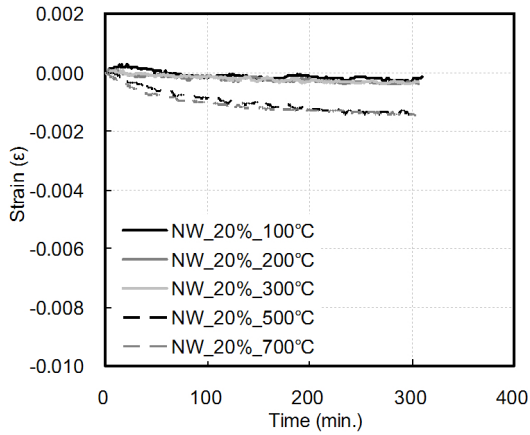
화재시 구조물의 안정성에 큰 영향을 미치는 부재의 변형특성을 평가하기 위해서는 온도상승구간에서 발생하는 열팽창변형과 함께 온도유지구간에서 발생하는 고온

크리프변형 또한 평가할 필요가 있기 때문에 재하량 및 굽은골재 종류에 따른 고온크리프변형을 Fig. 10, 11에 나타냈다.

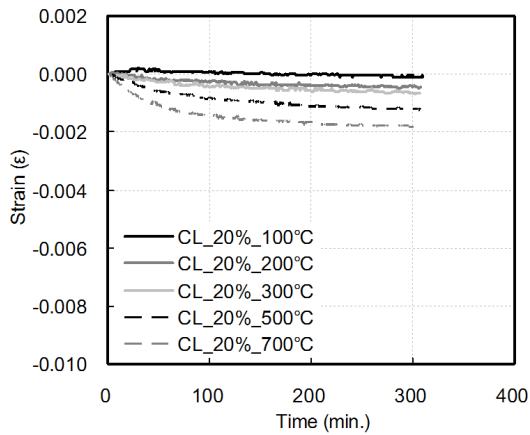
20%를 재하한 경우 NW는 100, 200, 300°C에서는 거의 동일한 수축량을 보이며 약  $3.0 \times 10^{-4}$ 의 변형률에 수렴했다. 500°C에서는 초기 100분까지 전체 크리프변형의 약 70%에 해당하는 수축변형이 발생하였고 이후 증가량이 감소하여 약  $1.4 \times 10^{-3}$ 의 변형률에 수렴하였다. CL과 CA

는 500°C까지는 온도가 증가할수록 유사한 경향으로 수축량이 증가하였으나 700°C에서 CL은 최종적으로 약  $1.8 \times 10^{-3}$ 의 변형률에 수렴하였고 CA는 측정 시작부터 변형률이 급격히 증가하여 최종적으로 약  $4.0 \times 10^{-3}$ 의 변형률을 나타냈다.

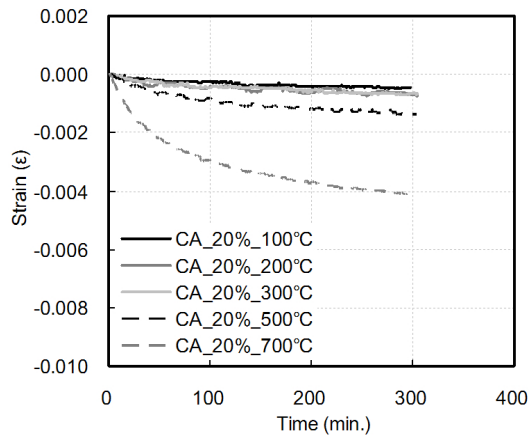
CA의 수축량이 상대적으로 크게 나타나는 이유는 굽은골재 성인으로 인한 열적특성 차이에 의한 것으로 상대적으로 내부의 공극이 많을수록 온도상승구간에서 팽



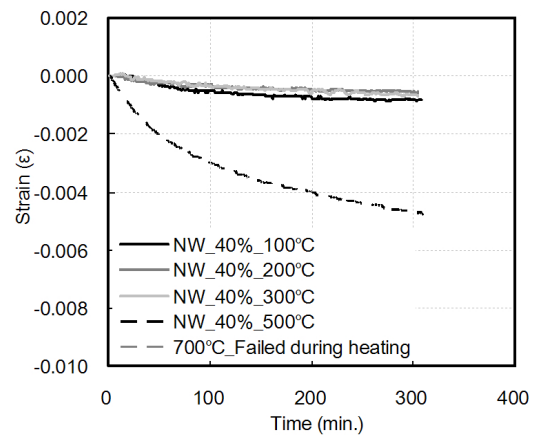
(a) Normal aggregate (granite)



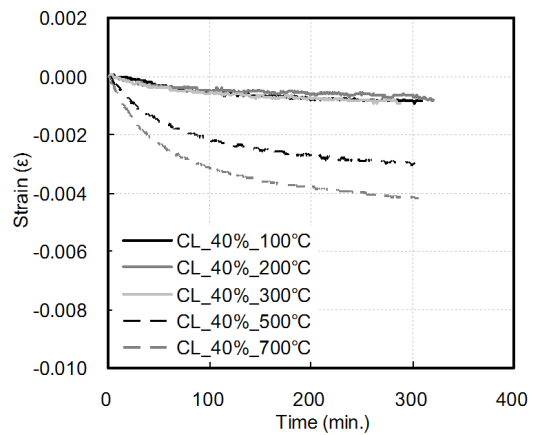
(b) Light weight aggregate (Clay)



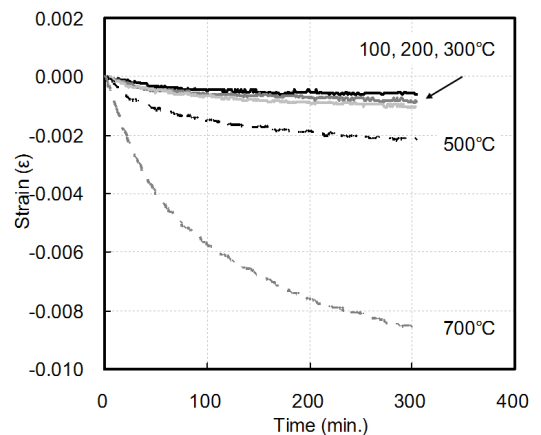
(c) Light weight aggregate (Clay-ash)



(a) Normal aggregate (granite)



(b) Light weight aggregate (Clay)



(c) Light weight aggregate (Clay-ash)

**Fig. 10** High temperature creep of 20% of room temperature compressive strength loading specimen

**Fig. 11** High temperature creep of 40% of room temperature compressive strength loading specimen

창변형을 흡수하여 저감시키는 것에는 유리하나 고온크리프변형에서는 더 큰 수축량이 발생하기 때문에 판단된다.

40%를 재하한 경우 20%를 재하한 경우보다 전체적으로 수축량이 증가하였으며 세 시험체 모두 100, 200, 300°C에서 거의 동일한 수축량을 보였다. 500°C로 가열한 NW는 측정초기부터 변형이 증가하여 최종적으로 약  $-4.8 \times 10^{-3}$ 의 변형률을 보였으며 700°C 시험체의 경우 크리프변형을 측정하기 전 약 560°C에서 파괴되어 측정이 불가능하였다.

### 3.4 열팽창변형과 고온크리프변형의 관계

측정된 크리프변형을 열팽창변형과 비교하여 Fig. 12에 나타냈다. 20% 재하 NW는 크리프변형과 열팽창변형의 비인  $\epsilon_{cr}/\epsilon_{th}$ 가 0.1~0.2, CL은 0.1~0.3, CA는 0.3~0.7의 값을 나타내 세 시험체 중 NW가 가장 큰 값을 나타냈고 CL, CA의 순으로 나타났다. 이는 굵은골재 내부의 공극이 온도증가에 의한 변형을 흡수하여 팽창응력의 저감에는 효과적이거나 크리프 변형의 경우 재하에 의한 수축변

형이 공극에 의해 증대되어 더 큰 변형이 발생한 것으로 판단된다.

40% 재하 시험체의 경우 세 종류의 시험체 모두 20% 재하 시험체와 비교하여 동일한 열팽창변형의 값에서 더 큰 크리프 변형을 보이는 것으로 나타났다.  $\epsilon_{cr}/\epsilon_{th}$ 는 NW 0.2~0.7, CL 0.4~0.9, CA 0.4~1.4의 값을 나타냈지만 NW 500°C 시험체의 경우 100~300°C 시험체의 경향과는 다르게  $-4.6 \times 10^{-3}$ 의 큰 변형률을 보였다. 이는 NW의 열팽창변형은 CL이나 CA보다 크기 때문에 500°C 부근에서 열팽창에 의한 내부균열의 증가로 인해 내력이 저하되어 급격하게 크리프변형이 증가한 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

고온을 받은 콘크리트의 골재 종류에 따른 변형특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

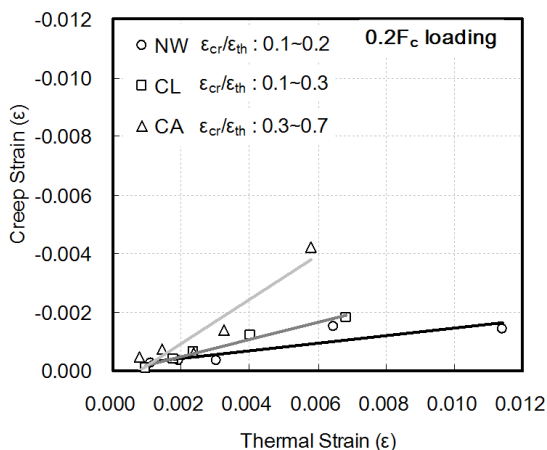
- 1) 고온압축강도와 탄성계수는 굵은골재의 밀도가 증가할수록 잔존률이 크게 저하했지만 재하하중이 증가할수록 잔존률이 상승하였다. 그러나 상온압축강도의 40%를 재하한 700°C NW 시험체는 비재하의 경우보다 낮은 강도잔존률을 보이기 때문에 구조물의 내화성능설계 시에 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.
- 2) 온도상승구간에서는 상대적으로 온도변화에 의한 열팽창변형의 영향이 크기 때문에 골재의 재료적 특성으로 인하여 경량골재를 사용한 콘크리트가 일반골재 콘크리트보다 더 낮은 변형률을 보였다. 따라서 온도상승구간에서의 고온강도 확보와 구조적 안정성 측면에서는 경량골재 콘크리트가 유리할 것으로 판단되었다.
- 3) 상대적으로 하중의 영향이 커지는 온도유지구간에서의 고온크리프의 경우 골재종류와 관계없이 온도와 재하량이 증가할수록 수축량이 증가하였으며 경량골재를 사용한 콘크리트가 일반골재를 사용한 콘크리트보다 큰 수축량을 보였다. 이를 통해 경량골재를 사용한 콘크리트는 화재 시 열팽창변형의 저감에는 유리하나 화재가 지속되는 등 고온이 유지되는 경우에는 고온크리프변형이 크게 발생하여 구조물의 내화성능설계 시에 이에 대한 추가적인 고려가 필요할 것으로 판단되었다.

## 감사의 글

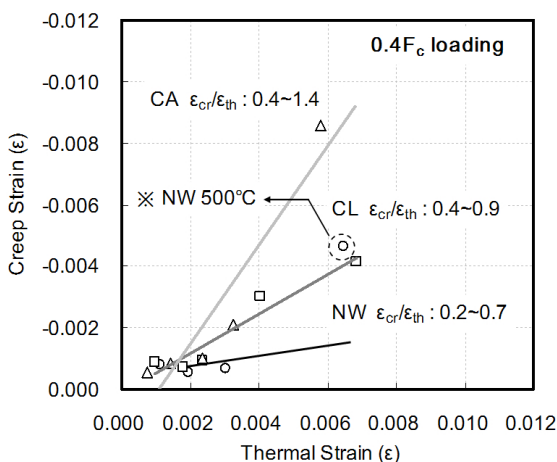
이 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업(2012H1B8A2025606)으로 수행된 연구 결과이다.

## References

1. Culver, C. G. and Crist, R. A., "Fire Performance of



(a) 20% loading specimen



(b) 40% loading specimen

Fig. 12 Relation of thermal strain and creep according to the coarse aggregate density

- Military Record Center,” *ACI Journal*, 1975.
2. Oh, C. H., “A Study on Damage and Repair of Concrete Buildings after a Fire,” *Doctoral Dissertation of Tokyo Institute of Technology*, 1985, pp. 3-22.
  3. Kim, G. Y., Kim, Y. S., Choe, G. C., Park, H. G., and Lee, T. G., “Evaluation on Mechanical Properties of High Strength Light-Weight Concrete with Elevated Temperature and loading,” *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 6, 2011, pp. 723-730.
  4. Neville, A. M., *Properties of Concrete*, 4th ed. Longman, 1995, pp. 108-475.
  5. Kong, F. K., Evans, R. H., Cohen, E., and Roll, F., *Handbook of Structural Concrete*, Pitman Books Limited, 1983, pp. 215-578.
  6. Abeles, P. W. and Bardhan-Roy, B. K., *Prestressed Concrete Designer’s Handbook*, In: Cement and Concrete Association, Wexham Springs, A Viewpoint Publication, 1981, pp. 20-41.
  7. Turker, P., Erdogdu, K., and Erdogan, B., “Investigation of the Various Type of Aggregate Mortar Exposed to Fire,” *Journal of Cement Concrete World*, 2001, Vol. 6, Issue 31, pp. 52-69.
  8. Lim, J. H., “The Experimental Study of High-Strength Lightweight Concrete for the Enhancement of its Compressive Strength,” Master’s Thesis of Kyonggi University, 2010, pp. 4-13.
  9. Wu, B., Lam, S. S., Liu, Q., Chung, Y. M., and Ho, L. F. Y., “Creep Behavior of High-Strength Concrete with Polypropylene Fibers at Elevated Temperatures,” *ACI Materials Journal*, Vol. 107, No. 2, 2010, pp. 176-184.
  10. RILEM TC 129-MHT, “Test Methods for Mechanical Properties of Concrete at High Temperatures: Part 8 Steady-State Creep and Creep Recovery for Service and Accident Conditions,” *Materials and Structures*, Vol. 33, 2000, pp. 6-13.
  11. Harada, T., Takeda, J., Yamane, S., and Furumura, F., *Strength, Elasticity and Thermal Properties of Concrete Subjected to Elevated Temperatures*, ACI American Concrete Institute, Special Publication, 1972, SP-34, pp. 377-406.
  12. Hammer, T. A., “High-Strength Concrete Phase 3, Compressive Strength and E-Modulus at Elevated Temperatures, Fire Resistance,” Report 6.1, SINTEF Structures and Concrete, STF 70 A95023, 1995, pp. 18-57.
  13. Sullivan, P. J. E., et. al., “Performance of Concrete at Elevated Temperatures (as Measured by the Reduction in Compressive Strength),” *Fire Technology*, Vol. 28, No. 3, 1992, pp. 351-359.
  14. Hertz, K. D., “Concrete Strength for Fire Safety Design,” *Magazine of Concrete Research*, Vol. 57, No. 8, 2005, pp. 445-453.
  15. Andic-Cakır, O. and Hızal, S., “Influence of Elevated Temperatures on the Mechanical Properties and Microstructure of Self Consolidating Lightweight Aggregate Concrete,” *Construction and Building Materials*, Vol. 34, 2012, pp. 575-583.
  16. Yeo, I. W. and John, Y. W., “A Study on the Behaviors of Granites Subjected to Thermal Stress,” *Journal of the Korean Institute of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 29, No. 5, 1992, pp. 263-275.

**요 약** 화재시 콘크리트 구조물은 구성재료의 상이한 열적특성으로 인해 강도가 저하하고 동시에 수직부재는 수평부재의 팽창에 의한 모멘트하중을 받아 전단파괴가 발생한다. 따라서 여러 가지 화재곡선을 사용한 콘크리트 구조물의 화재시 거동에 대한 연구가 많이 이루어졌지만 주로 온도상승구간에서 발생하는 폭렬특성과 열팽창변형에 관한 연구가 대부분이다. 하지만 고온이 유지될 경우 발생할 수 있는 크리프변형은 화재시 구조물의 안정성에 큰 영향을 미치지만 상대적으로 연구가 미진한 상태이다. 또한 이러한 고온을 받는 콘크리트의 안정성에는 채적의 대부분을 차지하는 굽은골재의 열적특성이 큰 영향을 미치기 때문에 이 연구에서는 화강암계, clay계, clay-ash계 세 종류의 굽은골재를 사용한 콘크리트의 고온 역학적 특성을 평가했다. 그 결과 굽은골재의 성인으로 인한 내부공극 때문에 경량골재를 사용한 콘크리트가 일반골재를 사용한 콘크리트보다 높은 고온강도 및 탄성계수를 나타냈고 열팽창변형과 전체변형의 경우 더 낮은 변형률을 나타내어 온도상승구간에서의 구조적 안정성 측면에서 유리한 것으로 판단되었다. 그러나 고온크리프의 경우 내부공극으로 인해 더 큰 수축량이 발생하기 때문에 내화성능설계시에 이에 대한 추가적인 고려가 필요할 것으로 판단되었다.

**핵심용어** : 인공경량골재, 골재밀도, ISO-834 표준가열곡선, 열팽창변형, 고온크리프