

# 고온 및 냉각조건에 따른 콘크리트의 역학적특성에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on the Mechanical Properties of Concrete with High Temperatures and Cooling Conditions

김 규 용      강 연 우\*      이 태 규      최 경 철      윤 민 호

Kim, Gyu-Yong    Kang, Yeoun-Woo    Lee, Tae-Gyu    Choe, Gyeong-Cheol    Yoon, Min-Ho

Department of Architectural of Engineering, Chungnam National University, Yuseung-Gu, Daejeon, 305-764, Korea

### Abstract

Since the 1970s, the mechanical properties of concrete at high temperature, such as compressive strength, elastic modulus, thermal strain, etc. have been investigated. Internal and external factors should be effect to concrete elevated temperature. In particular, the thermal properties of aggregate and cooling conditions are most important to estimate residual mechanical properties. This study evaluates the mechanical properties of concrete with aggregate type and cooling methods. We use normal and light aggregate for different thermal properties, and also test mechanical properties to use  $\varnothing 100 \times 200$  mm cylinder specimen according to target temperature, slow cooling and water cooling. We found that normal aggregate concrete that uses is more highly influenced by cooling conditions than concrete that uses light aggregate concrete. In addition, the residual mechanical properties of concrete increase as cooling velocity lowers.

Keywords : numerical model, thermal properties, aggregate type, cooling method, residual mechanical properties

### 1. 서 론

고온을 받는 콘크리트의 역학적 특성에 관한 연구는 1970년대 초기에 시작되기 시작하여, 압축강도, 탄성계수, 열팽창 변형 등의 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히, 유럽, 미국 및 일본 등의 경우는 다양한 시험방법에 의하여 평가된 실험결과를 바탕으로 고온 시 콘크리트의 역학적 특성을 체계적으로 정리하고 있으며, 내화지침(안) 및 code로서 제안하고 있다[1,2,3,4,5,6,7].

콘크리트의 고온 역학적 특성에 직접적으로 영향을 주는 요인으로서는 각 구성 재료 즉 골재, 시멘트페이스트 등의 열적특성으로 제시할 수 있으며, 간접적인 요인으로서는 재하조건, 가열조건, 시험방법, 냉각조건 등으로 다

양하게 존재할 수 있다. 콘크리트를 구성하는 재료적 요인은 지역적 특성이 강하기 때문에 이를 예측하는 것은 실험을 통하여 다수의 데이터를 확보함으로써 통계적인 접근으로 이루어질 수 있다.[8, 9,10,11,12,13,14]

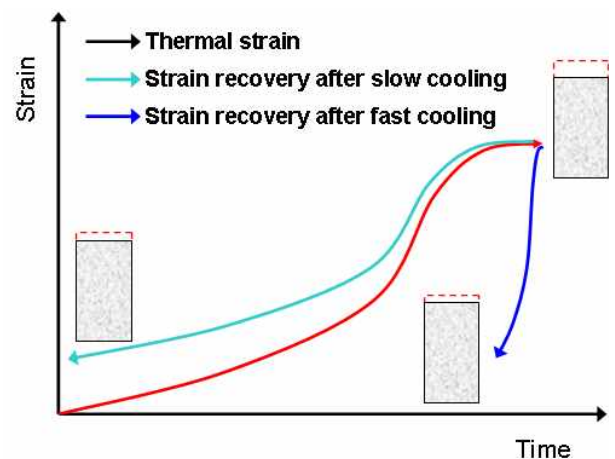


Figure 1. Strain-temperature curve of concrete according to cooling conditions[1]

Received : February 2, 2012

Revision received : April 7, 2012

Accepted : April 20, 2012

\* Corresponding author : Kang, Yeoun-Woo

[Tel: 82-2-750-8433 E-mail : kyw688@lycos.co.kr]

©2012 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

Table 1. Experimental plan and Mix proportion

Specimen symbol	W/C (%)	f <sub>cu</sub> (MPa)	Cooling conditions (X · f <sub>ck</sub> )	Target temperature (°C)	Slump flow (mm)	Air (%)	s/a (%)	Unit water (kg/m <sup>3</sup> )	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				Evaluation items
									C	SF	S	G	
NW <sup>1)</sup>	35	60	high temperature <sup>2)</sup>	20, 100	650 ± 100	4±2	40	165	470	-	692	1075	· residual compressive strength · residual elastic modulus · stress-strain · strain at maximum load
LW	33		slow cooling fast cooling	200, 300 500, 700					432	38	687	676	

1) NW : normal aggregate concrete, LW : light weight aggregate concrete

2) high temperature : evaluating at target temperature, slow cooling : 24hr natural cooling (constant temperature and humidity condition), fast cooling : 12hr natural cooling after 12hr water cooling

Table 2. Physical properties of used material

Materials	Physical properties
Cement	Type 1 Portland cement (density : 3.15 g/cm <sup>3</sup> , fineness : 3,630 cm <sup>2</sup> /g)
Coarse aggregate	Crushed granite type (density : 2.65 g/cm <sup>3</sup> , max size : 20 mm, absorption : 0.8%)
	Clay+Ash type (density : 1.68g/cm <sup>3</sup> , max size : 13 mm, absorption 15.3 %)
Natural fine aggregate	Washed sand (density : 2.64 g/cm <sup>3</sup> , absorption : 1.03%)
Silica fume	Density : 2.2 g/cm <sup>3</sup> , specific surface area : 200,000 cm <sup>2</sup> /g
Admixture	Poly-carboxylic acids type AE superplasticizer

Table 3. Coefficient of thermal expansion (×10<sup>-6</sup>/°C)

Aggregate type	Heating temperature (°C)							
	20	100	200	300	400	500	600	700
Normal aggregate	6.1	4.8	7.4	9.8	12.2	14.5	21.1	21.2
Light weight aggregate	4.0	4.0	3.2	3.5	3.9	4.3	5.2	4.9

한편 콘크리트는 고온에 강한 재료로 인식되고 있으나 콘크리트내부의 온도상승시에 물리적, 화학적으로 변화하게 된다. 또한 Figure 1에 나타난 바와 같이 고온을 받을 경우 콘크리트의 열팽창변형이 크게 증가되게 되는데 이는 내력저하를 초래할 수 있을 수 있으며, 냉각 시에도 그 속도에 따라 상이한 거동을 보일 수 있다.

Yamazaki[15], Tokoyoda[16] 등의 연구보고에 의하면 가열 및 냉각후의 콘크리트의 열팽창변형, 건조수축, 기계적 수축, 탄성수축 등과 같은 요인을 더하여 전체변형(Total strain)등을 측정함으로써 자유팽창 변형(Free thermal strain)을 산출하였으나 주로 일반골재에 관한 연구가 대부분으로 굵은 골재의 영향성을 규명한 정도이다. 따라서 화재 전·후를 고려하여 골재의 열팽창변형과 역학적 특성의 관계성을 명확히 규명하기 위해서는 골재의 열팽창계수의 차이가 큰 골재를 대상으로 관계성을 규명할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 국내에서 생산되는 Clay+ash계 경량골재와 화강암 골재에 관한 비교를 통하여 열팽창변형이 콘크리트의 잔존역학적 특성에 미치는 영향을 검토하고자 하였다. 또한 화재 후에 고온을 받은 콘크리트의 냉각 시에 발생할 수 있는 역학적 특성의 변화에 대해서 검토하였다.

## 2. 실험 계획 및 방법

### 2.1 실험계획 및 콘크리트배합

Table 1에 본 연구의 실험계획 및 콘크리트 배합을 나타냈다. 예비실험을 통하여 일반 및 경량 골재를 활용하여 배합 60 MPa를 만족하도록 설정하였고, W/C는 일반 골재콘크리트의 경우 35 %, 경량 골재의 경우 33 %로 하였다. 또한 골재의 영향만을 고려하기위하여 잔골재율을 40 %로 고정하였으며, 경량 골재 콘크리트의 경우 일반 골재 콘크리트에 비하여 압축강도 발현률이 저하하기 때문에 실리카흄을 시멘트 대비 8% 첨가하였다.

냉각조건에 있어서는 목표 온도를 100, 200, 300, 500,

700 °C까지 가열 후 고온시의 역학적 특성을 기준으로 설정하고 24시간 항온 항습실에서 서냉, 12시간 수중양생 후 12시간 서냉으로 설정하였다. 평가항 목으로는 잔존압축강도, 잔존탄성계수, 응력-변형 곡선, 최대하중에서의 변형을 측정하였으며, 각 수준당 공시체 3개의 평균값으로 산출하였다.

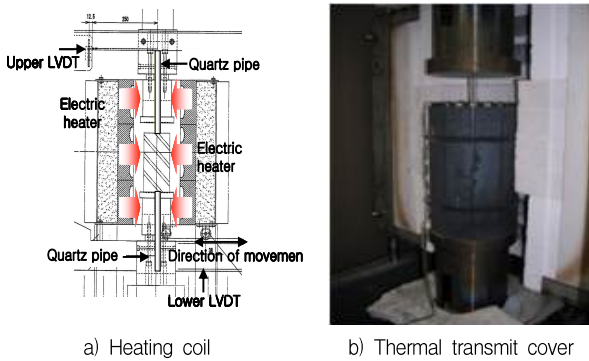


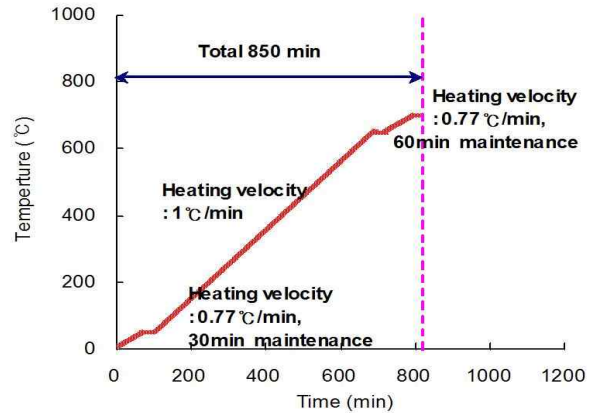
Figure 2. Heating equipment

## 2.2 사용재료

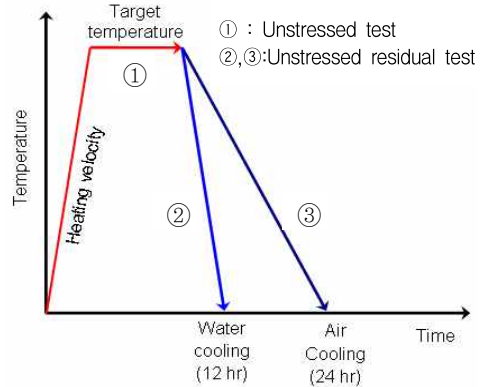
본 연구에서 사용한 재료는 Table 2에서 나타난 바와 같이 시멘트는 분말도  $3,630 \text{ cm}^2/\text{g}$  및 밀도  $3,15 \text{ g}/\text{cm}^3$ 의 1종보통 포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 굵은 골재로서 일반 골재는 밀도  $2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$ , 흡수율 0.8% 및 최대치수 20 mm의 화강암류 부순자갈을 사용하였으며, 경량골재는 밀도  $1,68 \text{ g}/\text{cm}^3$ , 흡수율 15.3% 및 사용된 경량골재는 국내 S사의 Clay+Ash계 팽창골재로서 최대치수 13 mm의 Clay+Ash계를 사용하였다. 사용된 일반 및 경량골재의 열팽창계수는 DIL 402 CD장비를 활용하여 평가하였으며 Table 3에 나타난 바와 같다. 경량골재는 일반 골재에 비하여 열팽창계수가 1/4정도이다. 또한 잔골재는 밀도  $2,64 \text{ g}/\text{cm}^3$ , 흡수율 1.03%의 세척사를 사용하였으며, 혼화제는 목표슬럼프를 만족시키기 위하여 폴리카르보산계 고성능 AE감수제를 사용하였다.

## 2.3 시험체 제작 및 양생 방법

시험체의 제작은 KS F 2403 「콘크리트의 강도시험용 시험체 제작방법」에 준하여  $\text{Ø}100 \times 200 \text{ mm}$  크기로 제작하였으며, 시험체는 탈형 후 7일간 수중 양생 후,  $20 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ , R.H.  $50 \pm 5 \%$ 의 항온항습실내에서 재령 300일까지 기건 양생을 실시하여 충분히 강도가 발현되도록 고려하였다.



a) Heating curve



b) Cooling method after target temperature  
Figure 3. Heating curve and cooling method

## 2.4 시험방법

### 2.4.1 가열장치

시험체의 가열장치는 Figure 2와 같은 2000 kN 급 UTM 재하 장치에 전기 가열로를 설치하고, 상하부 지그를 가열하는 방식으로 열전달 효율성을 높이기 위해 열전달 커버를 활용하여 고온에서의 역학적 특성의 평가가 가능하도록 고려하였다.

시험체의 변형은 고온에서 변형이 작은 석영관을 이용하였다. 석영관은 가력판 상·하부 지그 중심에  $\text{Ø}15\text{mm}$ 의 공간을 천공함으로써 설치하였고 석영관 끝의 막대형 Strain Gauge(변위계)를 통하여 콘크리트 시험체의 변형을 측정하였다. 변위계의 용량은 최대 5mm이며, 시험전 긴장(Prestress)을 주어 시험체의 팽창 및 수축의 기록이 가능하도록 하였다.

### 2.4.2 가열곡선 및 냉각방법

콘크리트 시험체의 가열은 Figure 3에 나타난 바와 같이

시험체 내부의 온도를 균일하게 유지하기 위하여 상온(20℃)~50℃ 및 목표온도 도달전의 50℃구간은 0.77℃/min, 이외의 구간은 1℃/min의 가열속도로 가열하였으며, 60분의 유지시간을 설정하여 내외부의 온도차가 5℃ 이내로 되도록 확인하였다.[14] 냉각방식은 냉각속도의 영향을 고려하여 고온(unstressed test, 비재하가열시험), 급냉, 서냉 조건(unstressed residual test, 비재하가열 잔존강도 시험)으로 설정하였으며, 장기간의 냉각은 콘크리트의 물성에 영향을 줄 수 있기 때문에 24시간 이내로 설정하였다.

### 2.4.3 역학적 특성의 평가 방법

일반 및 경량골재를 사용한 콘크리트의 열팽창변형은 가열시점부터 목표온도까지의 시간동안 측정하는 방법으로 RILEM TC 129-MHT 「Part 6 - Thermal strain」에 준하여 변형특성을 측정하여 화재 시 콘크리트의 열적거동을 분석하였다.[17]

또한 역학적 특성의 평가는 목표온도 도달 후 1시간의 유지시간을 두어 시험체 내외부의 온도가 균일하도록 한 상태에서 RILEM TC 129-MHT 「Part 3 - Compressive strength for service and accident conditions」에 준하여 측정하였다.[18]

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 응력변형 곡선

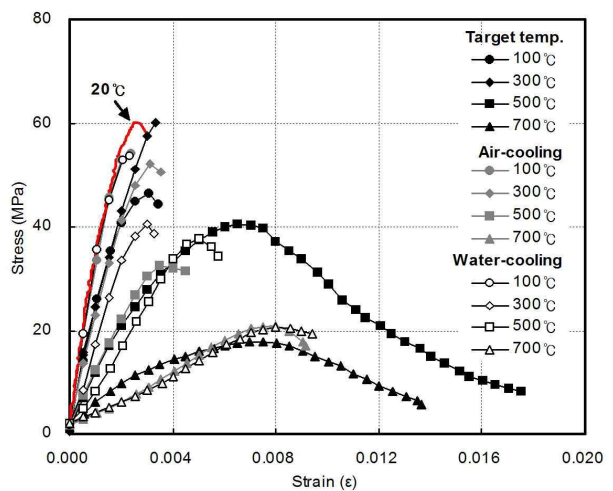
Figure 4는 냉각조건에 따른 일반 및 경량골재 콘크리트의 응력-변형 곡선을 나타낸 것이다. 전반적인 응력-변형의 거동은 고온에 따라 응력-변형의 기울기가 저하하며 500℃이후에서 그 경향이 뚜렷하게 나타나는 것으로 볼 수 있다.

일반골재 콘크리트의 시험체의 경우 100℃의 경우를 제외하고 각각의 온도에서 고온시의 응력-변형곡선의 기울기가 높고, 평균적으로 고온>서냉>급냉의 순으로 나타났다. 또한 500℃ 이후의 온도에서 고온에서의 응력변형 곡선은 소성변형을 나타내고 있으나, 서냉 및 급냉의 경우에는 취성적인 경향을 보였다.

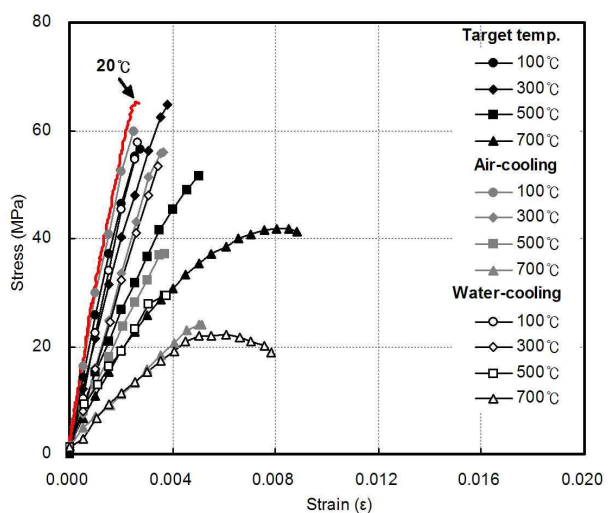
경량골재 콘크리트 시험체는 일반골재 콘크리트와 동일하게 온도에 따라 응력-변형 기울기가 저하하지만 그 차가 크지 않고, 냉각여부에 관계없이 취성적인 형태를 나타

냈다. 또한 고온시의 경량콘크리트 시험체는 700℃에서 응력-변형 곡선의 기울기가 크게 저하하지 않는 반면 서냉 및 급냉시험체의 경우는 고온시에 비해 크게 저하하는 경향을 확인하였다.

Schneider[4], Matsudo[19]등은 고온후 냉각시에 발생하는 응력-변형곡선의 저하현상을 모르타르와 굵은 골재의 열팽창변형의 차이에 있고, 응력-변형의 초기 기울기는 골재에 따라 달라지며, 시험체 내부의 균열이 크게 발생한 결과에 의해 초래된다고 추정하였다.



a) Normal aggregate concrete



b) Light weight aggregate concrete

Figure 4. Stress-strain curve of concrete according to cooling conditions

또한 400℃ 이전의 온도에서는 직선적으로 증가하는 탄성변형의 형태를 유지하지만 그 이후의 온도에서는 소성형

태의 응력-변형곡선이 이루어지는 것으로 보고하였다. Matsudo의 연구보고와 유사하게 본 연구의 범위에서 응력-변형의 기울기는 일반골재를 사용한 콘크리트에 비해 열팽창변형이 작은 경량골재의 경우가 탄성적인 거동을 보이고 있으며, 그 영향은 굵은 골재의 영향이 지배적으로 작용하기 때문이다.[15,16] 단 냉각방식에 있어서 일반 골재의 경우는 그 차가 크지 않는 것으로 나타났으나 경량 골재의 경우는 500 ℃이후의 고온에서 차이가 크게 발생되는 것으로 확인되었다. 이는 골재의 열팽창 변형이 작아 골재와 모르타르의 균열이 적게 발생되지만 냉각 시에는 계면의 균열이 증가하여 내력저하가 발생할 수 있음을 충분히 고려해야 할 것으로 판단되었다.

### 3.2 고온 압축강도

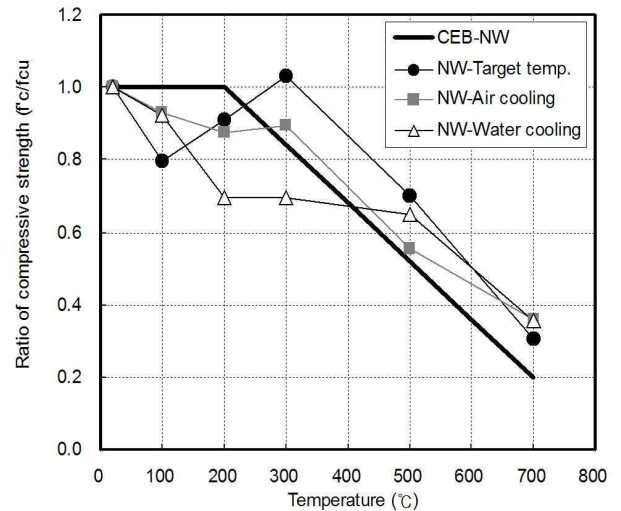
Figure 5는 냉각조건에 따른 일반 및 경량골재 콘크리트의 잔존 압축강도를 나타낸 것으로 CEB code와 비교하여 분석하였다. CEB code는 비재해 잔존강도 시험을 바탕으로 규정한 것으로서 고온 후 서냉하여 평가한 것이다.

일반 골재를 사용한 콘크리트 시험체에 있어서 고온시의 잔존압축강도는 200℃에서 저하하는 것을 제외하고 전반적으로 CEB code에 비하여 상회하는 것으로 나타났다. 또한 24시간 서냉 조건에서의 잔존 강도율은 CEB code와 동일한 시험방법이기 때문에 유사한 결과를 확인할 수 있다. 급냉 조건에서의 콘크리트 시험체의 경우 100 ℃ 이후에 잔존 강도율이 급격히 저하하였으며, 200~500 ℃까지는 유지, 500 ℃ 이상의 조건에서는 급격히 저하하는 것으로 확인되었다.

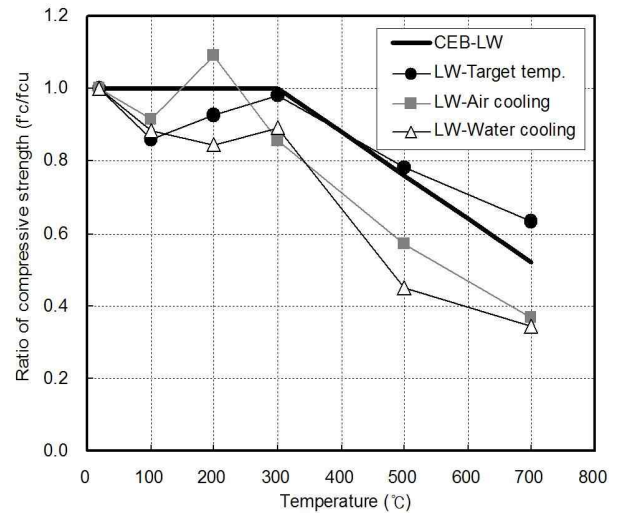
일반 골재 콘크리트의 냉각방식에 따른 차이는 100~500 ℃의 온도 범위에서 확인하였으며, 이는 콘크리트의 화학적 변화와 냉각에 의한 물리적 변화가 복합적으로 작용하여 발생한 것으로 말할 수 있다. 고온시 콘크리트의 경우 100 ℃ 이상에서 자유수가 탈수되면서 강도가 저하하게 되는데 서냉 또는 급냉 조건의 경우 탈수된 콘크리트 내부의 수분이 냉각되는 동안에 회복이 되기 때문에 강도저하가 적은 것으로 생각할 수 있다.[1,12,20]

200~300 ℃에서 고온시 강도가 회복되는 원인으로는 확실한 메커니즘이 명확히 규명되지는 않았지만 고온고압에 의한 미수화된 수화물이 재수화되는 현상과 열팽창 응력의 복합작용에 의하여 발생된다고 제시하고 있다.[1,21,22] 이러한 복합작용에 의해 압축강도의 상승이 발생된 시점에서

급격한 냉각을 받을 경우 고온시의 압축강도에 비하여 약 30 % 정도의 강도가 저하하는 것으로 나타났기 때문에 강도상승의 영향은 골재와 모르타르 계면이 유지된 상태에서 재수화에 비해 열팽창응력에 의한 영향이 더 큰 것으로 추측할 수 있다.



a) Normal aggregate concrete



b) Light weight aggregate concrete

Figure 5. Residual compressive strength of concrete according to cooling conditions

300 ℃ 이상의 온도에서는 모세관수, 흡착수, 자유수 등이 모두 손실되기 때문에 강도저하가 급격히 일어나며 급냉 조건의 경우는 직접적으로 수분이 공급되기 때문에 강도가 유지되는 것으로 분석되었다.[1]

경량골재 콘크리트의 경우에는 고온시의 잔존 압축강도율

은 CEB code와 유사한 경향을 나타냈으나 냉각을 행한 경우에는 크게 하회하는 경향을 보였다. 경량골재의 경우 골재의 구성 재료에 따라 열적 특성이 크게 변화하고, CEB code의 경우 팽창점토를 활용하였기 때문에 본 연구에서 사용한 Clay+Ash 계의 특성과는 다소 상이할 수 있다.

냉각방식에 있어서도 전반적으로 일반 골재와 동일한 패턴으로써 고온>서냉>급냉의 순으로 잔존강도를

이 높게 나타나는 경향을 보였다. 하지만 서냉 조건의 경우 200 °C에서 상온강도에 비해 약 9 % 정도 압축강도가 상승하는 것으로 나타났다. 서냉 시 강도가 상승하는 원인에 대해서는 기존 연구에서도 명확히 규명되어 있지는 않으나 본 연구의 범위에서는 서냉 시 경량 골재와 모르타르의 계면의 부착이 강화된 것으로 추정된다.

300 °C이후의 온도에서는 고온 시에 비하여 서냉 및 급냉의 경우 잔존압축강도율의 저하가 확연한 차이를 보였다. 냉각시 잔존 압축강도율은 일반 골재 콘크리트와 유사한 값으로써 고온시의 경우에 비해 전반적으로 20 % 낮은 값으로서 상온압축강도의 60 % 에 해당한다. 경량골재 콘크리트에서 이렇게 확연하게 차이가 발생하는 것은 시멘트 페이스트와 경량골재의 수축률이 차이가 발생하기 때문이다. 경량골재의 경우 팽창형 골재이기 때문에 고온에서 급격히 냉각하여도 그 팽창성을 유지하게 되는데 시멘트 페이스트의 경우에는 수축속도가 경량골재에 비해 빠르기 때문에 그 계면에 균열발생량이 증가하여 잔존 압축강도율이 저하하는 것으로 판단할 수 있다.

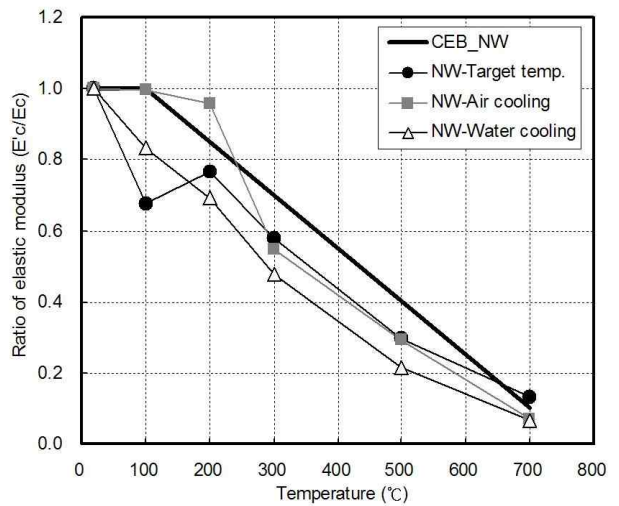
### 3.3 잔존 탄성계수

Figure 6은 냉각조건에 따른 일반 및 경량골재 콘크리트의 잔존 탄성계수를 나타낸 것이다. 일반 골재 콘크리트의 잔존탄성계수는 잔존압축강도의 경향과는 달리 잔존탄성계수는 300 °C 이전의 온도조건을 제외하고 냉각조건에 관계없이 유사한 거동을 나타냈다.

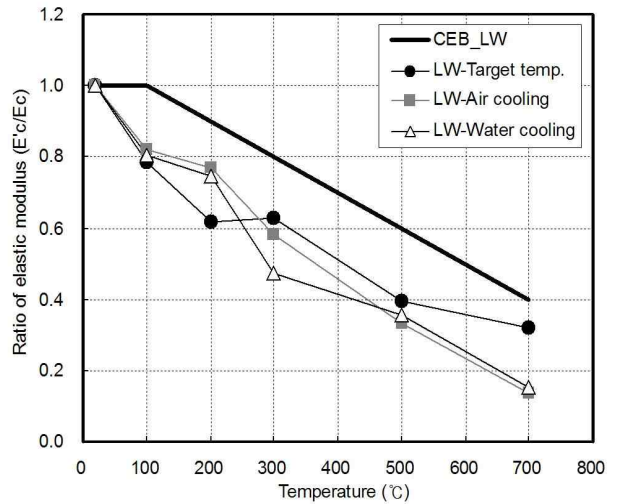
300 °C이전의 온도 조건에서는 서냉>고온>냉각의 순서로 잔존탄성계수비가 높게 나타나며, 냉각시에 압축강도의 저하율보다는 수축에 의해 열팽창변형이 회복되어 잔존탄성계수의 저하가 적은 것으로 확인되었다. 또한 200~300 °C에서 강도가 상승하였지만 탄성계수가 저하하는 것을 고려하여 보면, 강도상승의 현상에 있어서 재수화 보다는 열팽창응력의 영향이 크다는 것을 확인할 수 있었다.

경량골재 콘크리트의 경우에 있어서는 냉각조건에 따라서

200 °C이하의 온도에서는 잔존탄성계수의 저하폭이 적은 것으로 나타났으며 300 °C이상의 온도에서는 고온시의 경우가 다소 높게 나타났다. 따라서 경량골재 콘크리트의 경우 200 °C이전의 온도에서는 냉각조건에 따라서 열팽창변형의 회복이 빠르지만 300 °C 이상이 되면 골재의 열팽창변형의 회복속도가 모르타르에 비하여 적게되어 내력저하가 크게 발생되며 이는 탄성계수에도 영향이 크다고 말할 수 있다. 따라서 경량골재 콘크리트의 경우 골재의 팽창력을 제어하거나 빠른 회복을 시킬 수 있다면 고온에서의 탄성계수저하는 크지 않을 것으로 판단된다.

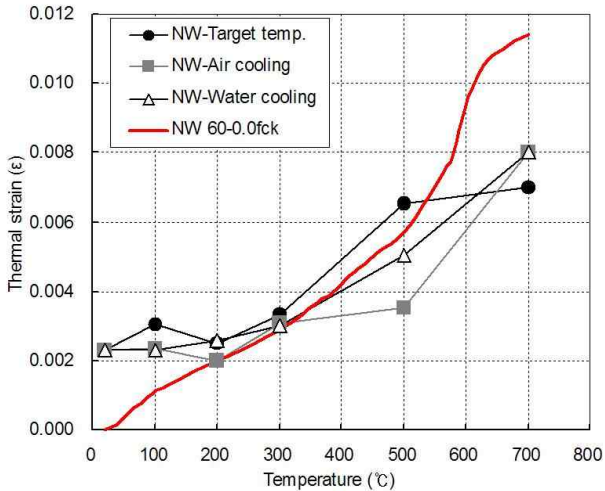


a) Normal aggregate concrete

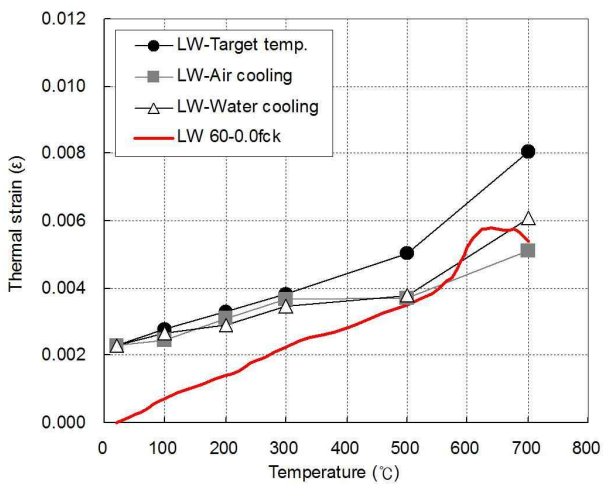


b) Light weight aggregate concrete

Figure 6 Residual elastic modulus of concrete according to the cooling conditions

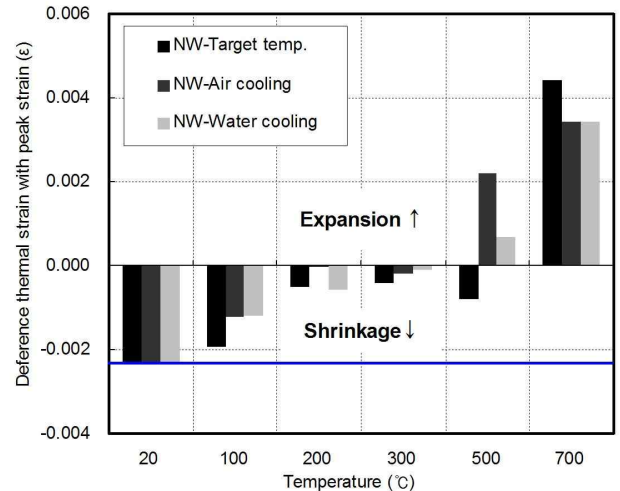


a) Normal aggregate concrete

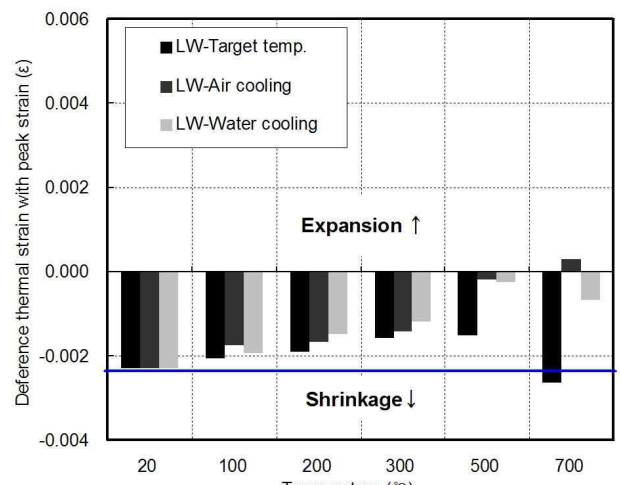


b) Light weight aggregate concrete

Figure 7. Strain at the highest stress of concrete according to the cooling conditions



a) Normal aggregate concrete



b) Light weight aggregate concrete

Figure 8. Calculation between strain at the peak stress and thermal strain of concrete. ( $\epsilon_{th} - \epsilon_{peak}$ )

### 3.4 열팽창 및 최대응력에서의 변형의 관계

본 연구의 범위에 콘크리트의 열팽창변형은 콘크리트의 잔존압축강도 및 탄성계수에 큰 영향을 주는 것으로 확인되었다. 따라서 콘크리트의 열팽창변형이 콘크리트의 내력저하에 미치는 영향성을 분석하면 다음과 같이 분류할 수 있다.

①  $\epsilon_{th} < \epsilon_{peak}$

②  $\epsilon_{th} = \epsilon_{peak}$

③  $\epsilon_{th} > \epsilon_{peak}$

여기에서,  $\epsilon_{th}$  : 가열중 콘크리트의 열팽창변형

$\epsilon_{peak}$  : 최대 응력에서의 변형(응력평가시)

①, ②의 경우에는 고온 시에 열팽창응력에 따라 잔존압축강도의 저하가 적고, 열팽창변형이 발생하더라도 콘크리트 수축변형에 의해 탄성변형을 유지하는 것이 가능하다. ③의 경우에는 열팽창변형 및 응력이 크게 작용하지만 변형이 크게 진행되어 콘크리트의 수축에 의한 파괴보다는 팽창이 진행된 상태로서 골재와 모르타르의 결합력이 크게 저하함을 의미한다.

Figure 7은 냉각조건에 따른 일반 및 경량골재 콘크리트의 최대응력에서의 변형을 나타낸 것이다. 일반 골재의 경우 300 °C 이상의 고온이 되게 되면 열팽창변형이 최대응력에서의 변형보다 커지게 되어 압축강도 및 탄성계수의 저하가 크게 발생하는 것으로 분석할 수 있다. 또한 경량골재 콘

크리트의 경우에도 고온시의 경우를 제외하고 300 ℃이상의 온도에서 냉각 시에 열팽창변형이 최대응력에서의 변형에 비하여 크게 작용됨을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 열팽창변형과 최대응력에서의 변형의 차이를 계산하면 Figure 8과 같다. 일반 골재 콘크리트의 경우 500 ℃ 이상의 온도에서 팽창변형의 영향이 크게 작용하여 최종적으로는 콘크리트가 팽창된 형태로 파괴됨을 확인할 수 있다. 또한 냉각조건에 따라 큰 차이는 500 ℃이상의 온도조건에서는 큰 차이가 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

경량 골재 콘크리트의 경우에는 500 ℃까지 수축된 상태에서 파괴가 발생되기 때문에 일반 골재에 비하여 탄성력이 저하되는 것이 적은 것으로 확인되었다. 단 700 ℃에서는 서냉 시를 제외하고 수축변형이 진행된 상태에서 파괴가 발생하고 있지만 냉각 시에 내력저하는 크게 저하함을 알 수 있다.

따라서 골재의 열팽창변형은 콘크리트의 파괴변형률인 0.0025~0.003 을 초과하게 되면 그 시점부터 내력저하가 크게 발생하게 되며, 냉각조건을 고려하게 되면 그 저하 폭은 골재 조건에 관계없이 크게 발생할 수 있다.

#### 4. 결 론

고온 및 냉각조건에 따른 콘크리트의 역학적 특성 평가에 관한 연구의 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 일반 및 경량골재 콘크리트의 경우, 냉각조건에 따라 <고온> <서냉> 급냉의 순으로 응력-변형곡선의 기울기가 높게 나타나며, 경량골재 콘크리트가 일반 콘크리트에 비하여 취성적인 경향이 크다. 또한 고온 후 냉각조건이 고려될 경우 취성적인 경향이 크게 발생되며 굽은 골재의 열팽창변형이 작을수록 영향이 크게 나타났다.
- 2) CEB code는 기존 연구결과를 바탕으로 제시된 규정으로써, 일반 골재 콘크리트의 경우는 유사하였지만, 경량골재는 구성 재료의 열적 특성의 차이로 차이가 발생된다. 또한 잔존 압축강도율은 일반 골재 콘크리트의 경우가 경량골재 콘크리트에 비해 100~500 ℃의 온도 범위에서 냉각조건에 따른 영향을 크게 받을 수 있다.

- 3) 일반 골재 콘크리트의 잔존탄성계수는 냉각시에 압축강도의 저하율보다는 수축에 의해 열팽창변형이 회복되어 잔존탄성계수의 저하가 적은 경향을 보였다. 또한 열팽창변형이 작은 경량 골재 콘크리트의 경우 급격한 냉각을 받을 경우 골재의 열팽창이 모르타르에 비하여 수축이 적게 되어 탄성계수의 저하율이 클 수 있다.
- 4) 열팽창변형이 최대응력에서의 변형보다 커지게 되면 압축강도 및 탄성계수 등의 역학적 성능의 저하가 크게 발생될 수 있다. 또한 골재의 열팽창변형은 콘크리트의 파괴변형률인 0.0025~0.003 을 초과하게 되면 그 시점부터 내력저하가 크게 발생하게 되며, 냉각조건이 수반될 경우 그 저하 폭은 골재 조건에 관계없이 크게 발생할 수 있다.

#### 요 약

1970년대부터 고온을 받은 콘크리트의 압축강도, 탄성계수, 열응력 등 콘크리트에 영향을 미칠 수 있는 내적, 외적 인자들의 역학적 특성은 조사되어 왔다. 특히, 골재의 열적 특성이나 냉각 방법은 잔존 역학적 특성을 평가하는데 가장 중요하다. 본 연구에서는, 골재 종류와 냉각 방식에 따른 콘크리트의 역학적 특성에 대해 평가했다. 본 연구에서는 열적특성이 다른 일반 골재와 경량골재를 사용했다. 또한, Ø100×200mm 원주형 공시체를 사용하여 목표 온도, 서냉 및 급냉조건 후에 역학적 특성을 평가하였다. 결과적으로, 보통 골재를 사용한 콘크리트는 경량골재를 사용한 콘크리트보다 냉각조건이 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 그리고 냉각 속도가 빠르지 않을수록 콘크리트의 잔존 역학적 특성이 크게 나타났다.

**키워드** : 수치모델, 열적특성, 골재종류, 냉각방법, 잔존 역학적 특성

#### Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF- No.2010 - 0014723) grant funded and Brain Korea 2th (BK21) by the



## References

1. AIJ. [Fire resistance of structural materials guidebook]. Tokyo (Japan): Architectural Institute of Japan; 2009. p. 150–65. Japanese.
2. ACI Committee 363. State-of-the Art Report on High-Strength Concrete. Farmington Hills (MI): American Concrete Institute; 1992;363R–92
3. Schneider U. Behaviour of concrete at high temperatures. Deutscher Ausschus fur Stahlbeton, 1982;Heft 337.
4. Schneider U. Properties of materials at high temperatures–Concrete, RILEM–Committee 44–PHT. 1985 June.
5. CEB. Fire Design of Concrete Structures–in accordance with CEB/FIP Model Code 90 (Final Draft), Comites Euro–International Du Beton: CEB Bulletin D'Information No. 208; 1991 July.
6. Comite Europeen de Normalisation (CEN), Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures. Part 1–2: General Rules–Structural Fire Design, CEN ENV; 1994.
7. Comite Europeen de Normalisation (CEN), prENV 1992–1–2: Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1–2: Structural Fire Design, CEN/TC 250/SC 2; 1993.
8. Abrams MS. Compressive strength of concrete at temperature to 1600F, America, American concrete Institute SP25;1971.
9. Diederichs U, Jumppanen UM, Penttala V. Material properties of high strength concrete at elevated temperatures, transaction, IABSE 13th Congress, Helsinki, Finland, 1988 June;489–494
10. Kodur VKR, Sultan MA. Effect of temperature on Thermal properties of high–strength Concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2003;15(2) ;101–7.
11. Cheng FP, Kodur VKR, Wang TC. Stress–strain curves for high strength concrete at elevated temperatures, Journal of Materials in Civil Engineering. 2004;16(1);84–90.
12. Hertz KD. Concrete strength for fire safety design, Magazine of Concrete Research. 2005;57(8);445–53.
13. Hirashima T, Toyoda K, Yamashita H, Tokoyoda M, Uesugi H. Compression tests of high–strength concrete cylinders at elevated temperature, International workshop fib 2007;Nov; University of Coimbra, Coimbra(Portugal): CEB–FIB;2007;39–47.
14. Kim GY, Kim YS, Lee TG, Yoon MK. Evaluation for Mechanical Properties of High Strength Concrete at High Temperature by Stressed Test and Unstressed Tes, Journal of the Korea Concrete Institute, 2008 Oct;20(5);583–92.
15. Yamazaki N, Thermal Deformation of concrete in High Temperature(20~700℃), Academic lectures of the Conference of Architectural Institute of Japan; 1991 Sep.; Tohoku (Japan). Tokyo (Japan): Architectural Institute of Japan; 1991. p. 1159–60.
16. Tokoyoda M. An Experimental Study on the transient strain for Concrete with limestone aggregates, International workshop fib 2007; 2007 Nov; University of Coimbra, Coimbra (Portugal): CEB–FIB; 2007. p. 27–34.
17. RILEM TC 129–MHT Recommendation : Part 6– Thermal strain, Materials and Structures, 1997. p. 17–21.
18. RILEM TC 12–MHT. Compressive strength for service and accident conditions, Materials and Structures, 1995. p. 410–4.
19. Matsudo M. Mechanical Properties of High Strength and Non–shrinkage Mortar Which is cooling after Heating. Summaries of technical papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan; 2007 Aug.; Kyushu (Japan). Tokyo (Japan): Architectural Institute of Japan; 2007. p. 19–20.
20. KCI. [Fire–proof Properties of Reinforced Concrete]. Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2005. p. 50–75. Korean.
21. Ave T, Ohtsuka T, Kobayashi Y, Michikoshi S. Mechanical Properties of Normal Strength Concrete at High temperature. Collection of dissertations of the Department of Construct of Architectural Institute of Japan, 2007;615;7–13.
22. Tanaka H. After Heating Properties of hardened concrete and Rehydration. Tokyu (Japan): Architectural Institute of Japan; 1982. p. 45–8. Cement Technical Report 36.