



고온가열 및 하중재하에 따른 80, 130, 180 MPa 초고강도콘크리트의 역학적특성평가

최경철¹⁾ · 윤민호¹⁾ · 이태규¹⁾ · 이승훈²⁾ · 김규용^{1)*}

¹⁾충남대학교 건축공학과 ²⁾삼성물산(주) 건설부문

Evaluation of Properties of 80, 130, 180 MPa High Strength Concrete at High Temperature with Heating and Loading

Gyeong-Cheol Choe,¹⁾ Min-Ho Yoon,¹⁾ Tae-Gyu Lee,¹⁾ Seong-Hun Lee,²⁾ and Gyu-Yong Kim^{1)*}

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

²⁾Samsung C&T Corporation, Seoul 135-769, Korea

ABSTRACT Concrete has been recognized as a material which is resistant to high temperatures, but chemophysical property of concrete is changed by the high temperature. So, mechanical properties of concrete may be reduced. Because of this, standards and researches on the degradation of the mechanical properties of concrete at high temperatures have been presented. However, research data about the state that considering the loading condition and high-strength concrete is not much. Therefore, this study evaluated the high-temperature properties of high-strength concrete by loading condition and elevated temperature. The stress-strain, strain at peak stress, compressive strength, elastic modulus, thermal strain and the transient creep are evaluated under the non-loading and $0.25f_{cu}$ loading conditions on high strength concrete of W/B 12.5%, 14.5% and 20%. Result of the experiment, decrease in compressive strength due to high temperature becomes larger as the compressive strength increases, and residual rate of elastic modulus and compressive strength is high by the shrinkage caused by loading and thermal expansion due to high temperature are offset from each other, at a temperature above 500°C.

Keywords : high strength concrete, residual compressive strength, residual elastic modulus, thermal strain, transient creep

1. 서 론

철근콘크리트 구조는 열전도율이 낮은 콘크리트가 서서히 가열되면서 고열에 취약한 철근을 보호하는 효과에 의해 화재에 강한 구조로 인식되어 왔다.¹⁾ 그러나 고강도 콘크리트를 사용할 경우 내부의 조직구조가 치밀하기 때문에 폭발현상이 발생할 수 있고 이에 따른 부재의 단면 감소나 철근의 노출 등으로 인해 구조내력이 급격히 저하될 우려가 있다.²⁾ 이에, 우리나라에서는 50 MPa 이상의 고강도 콘크리트를 사용할 경우에 가열 시 내부철근의 온도상승을 기준으로 철근콘크리트 구조의 내화성능을 평가하고 있다.³⁾ 이러한 내화기준을 만족하기 위해서는 폭발방지와 일정두께 이상의 피복두께를 확보하는 것이 중요한 문제이다. 이에 많은 연구자들은 고강도 콘크리트의 폭발을 제어하는 연구를 수행하였으며, 섬유를 혼입하여 폭발을 방지하는 방법이 널리 사용되고 설계단계부터 적용되고 있다.⁴⁻⁸⁾

그러나, 콘크리트는 폭발이 제어되더라도 고온에 의해 내부조직의 물리·화학적 변화가 발생하고, 이러한 변화에 의해 고온 시 콘크리트의 역학적 특성이 저하된다. 국외에서는 Fig. 1^{9,10)}과 같이 화재시 콘크리트 구조물의 잔존내력을 예측하기 위한 고온압축강도모델을 도출하기 위해 다양한 재료를 사용한 콘크리트의 고온에서의 압축강도 특성이 제시되고 있으며, 이는 Kodur and Sultan,¹¹⁾ Lie,¹²⁾ Sullivan¹³⁾ 등의 연구자들의 연구 결과에 기초하고 있다.

이러한 콘크리트의 고온재료특성을 평가하기 위한 방법으로는 주로 비재하시험방법(unstressed test), 비재하 잔존강도 시험방법(unstressed residual test)이 사용되고 있다. 비재하 시험방법이 주로 사용되는 것은 충분한 안전율을 고려하기 때문이지만 실제의 구조물은 설계하중이 존재하기 때문에 하중재하 조건에 따라 콘크리트의 열적

*Corresponding author E-mail : gyuyongkim@cnu.ac.kr

Received May 2, 2013, Revised September 9, 2013,

Accepted September 23, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

거동이 달라질 수 있다. 실제로 Fig. 2에 나타난 바와 같이 굵은 골재는 온도상승에 따라 지속적으로 팽창을 하고, 시멘트페이스트의 경우에는 100~200°C까지는 팽창, 200°C 이후에서는 수축의 경향을 보인다. 콘크리트의 열 팽창변형은 온도가 증가함에 따라 구성재료의 종합적인 거동으로 팽창의 경향이 강하며, 이는 굵은 골재의 영향이 크게 작용한 결과이다. 이때, 하중이 작용할 경우 열 팽창변형이 억제되는 현상이 발생하며 콘크리트의 내부

균열을 억제하는 요인이 될 수 있다.

이에 하중조건에 따른 콘크리트의 열적특성에 관한 관심이 증대되고 있고, Hetz,¹⁴⁾ Phan,¹⁵⁾ Anderberg¹⁶⁾ 등의 연구자에 의하여 하중재하 시 발생하는 단기고온크리프 (Transient creep)에 관한 연구도 보고되고 있다.

이러한 기준 및 연구데이터는 실무재의 내화성능 설계 시 콘크리트재료의 열적특성에 관한 수치적 해석에 응용되어 구조물의 열적 거동 및 잔존내력의 예측에 이용될 수 있다. 그러나 이러한 연구데이터는 국내에서는 보고 사례가 적고, 국외경우에도 일반강도영역 및 압축강도 100 MPa이하의 고강도 콘크리트를 대상으로 하고 있다.

이 연구에서는 W/B 20, 14.5, 12.5%의 초고강도 콘크리트를 대상으로 콘크리트의 설계강도에 대한 하중조건을 적용하고 이에 따른 고온에서의 역학적 특성을 평가함으로써 고온에 따른 상태변화와 재하조건을 고려한 콘크리트의 열적거동 및 잔존내력예측을 위한 기초데이터를 확보하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획 및 콘크리트 배합

이 연구에서는 Table 1에 나타난 바와 같이 W/B 20, 14.5, 12.5%의 초고강도 콘크리트를 사용하였다. 시험체의 크기는 $\varnothing 100 \times 200$ mm의 원형공시체를 사용하였으며, 비재하 및 상온압축강도의 25%의 하중을 재하한 조건에서 20, 100, 200, 300, 500, 700°C의 목표온도까지 가열을 실시하였다. 평가항목으로는 재하와 가열을 동시에 받는 상태에서의 응력-변형, 최대하중에서의 변형, 고온압축강도, 고온탄성계수, 열팽창변형 및 단기고온크리프를 평가하였다.

2.2 사용재료

이 연구에서 사용한 재료는 Table 2에 나타난 바와 같이 시멘트는 분말도 3200 cm^2/g 및 밀도 3.15 g/cm^3 의 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 혼화제는 폴리카르

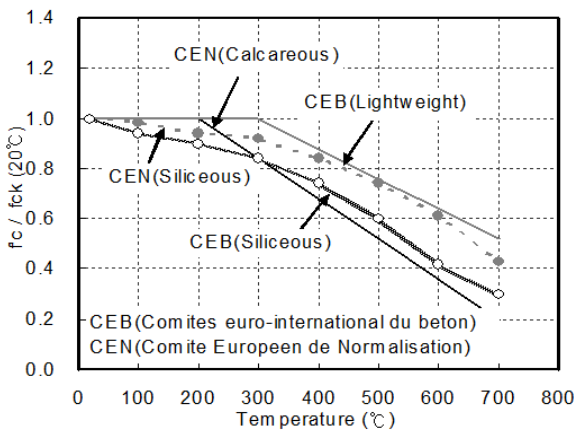


Fig. 1 Compressive strength properties of concrete with temperature

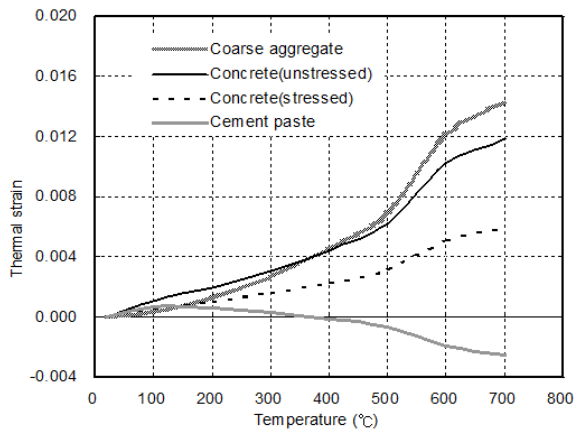


Fig. 2 Thermal strain of concrete, coarse aggregate, cement paste with temperature and loading condition

Table 1 Experimental plan and concrete mix proportion

| F _{ck} | W/B (%) | Heating method (°C/min) | Load (X · f _{cu}) | Slump-flow (mm) | Heating temp. (°C) | Air (%) | S/a (%) | Unit weight (kg/m ³) | | | | | | | Test item | | |
|-----------------|---------|-------------------------|-----------------------------|-----------------|--------------------|---------|---------|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----------|--|--|
| | | | | | | | | W | C | BFS | FA | SF | Gy ⁽¹⁾ | S | | G | |
| 80 | 20.0 | 1 | 0.25 | 750±100 | 20 | 2±1 | 43.0 | 150 | 525 | 0 | 150 | 75 | 0 | 644 | 870 | · Stress-strain · Compressive strength (MPa) · Elastic modulus (GPa) · Thermal strain · Strain at peak stress · Transient creep | |
| 130 | 14.5 | | | | 200 | | | | 652 | 207 | 0 | 124 | 52 | 448 | 848 | | |
| | | | | | 300 | | | | | | | | | | | | |
| 180 | 12.5 | | | | 500 | | | | 660 | 240 | 0 | 240 | 60 | 389 | 736 | | |
| | | | | 700 | | | | | | | | | | | | | |

⁽¹⁾ Gy: gypsum

Table 2 Physical properties of used material

| Material | Physical properties |
|---------------------------|---|
| Cement | OPC (density: 3.15 g/cm ³ , specific surface area: 3200 cm ² /g) |
| Blast furnace slag powder | Density: 2.9 g/cm ³ , specific surface area: 6000~7000 cm ² /g |
| Silica fume | Density: 2.5 g/cm ³ , specific surface area: 200000 cm ² /g |
| Coarse agg. | Crushed granitic aggregate (size: 20 mm, density: 2.62 g/cm ³ , absorption: 0.8%) |
| Fine agg. | Sea sand density: 2.65 g/cm ³ , absorption: 100% |
| Super plasticizer | Polycarboxylic-based super plasticizer |

본산계 고성능 감수제를 사용하였다. 잔골재는 천연잔골재로서 밀도 2.65 g/cm³, 흡수율 1.00%의 세척사를 사용하였다. 굵은 골재는 밀도 2.70 g/cm³, 흡수율 0.9% 및 최대치수 13 mm의 화강암류 부순 자갈을 사용하였다.

2.3 시험체 제작 및 양생방법

고온시 역학적특성 평가를 위한 콘크리트 시험체는 KS F 2403 「콘크리트의 강도시험용 시험체 제작방법」에 준하여 $\varnothing 100 \times 200$ mm 크기로 제작하였다. 시험체는 탈형 후 7일간 수중양생을 실시하였으며, 이후 20 ± 3°C, RH 50 ± 5%의 항온항습실내에서 재령 300일까지 기건양생을 실시하였다. 또한, 가열 시험 전 시험체의 상면을 콘크리트용 연마기를 사용하여 평활하게 마감한 후, 가열실험을 실시하였다.

2.4 시험방법

2.4.1 가열방법

1) 하중재하 및 가열방법

이 연구의 가열·재하 실험을 위한 장치는 Fig. 3과 같은 2000 kN급 UTM에 전기 가열로를 설치하여 재하와 가열이 동시에 이루어 질 수 있도록 하였으며, 시험체의 변형은 가력관 상·하부 및 냉각기 중심에 $\varnothing 15$ mm의 공간을 두어 석영관을 설치하고, 시험체 반대쪽의 석영관 끝에 변형률 게이지를 설치하여 공시체의 변형을 측정하였다. 변위계의 용량은 최대 5 mm이며, 시험 중의 기록은 데이터 로거를 사용하여 1초 간격으로 기록하였다.

콘크리트 시험체의 가열은 결합된 전기히터를 활용한 가열 방식으로 사전에 3시간 동안 하중을 재하한 후, 가열로의 상부와 하부에 위치한 가력지그를 가열하여 열을 전달하는 열전달 가열방식을 사용하였다. 가열온도 조절은 열전대에 의해 입력되는 시험체의 온도데이터를 통해 전기히터의 온도를 제어하고 시간과 온도변동의 관계를

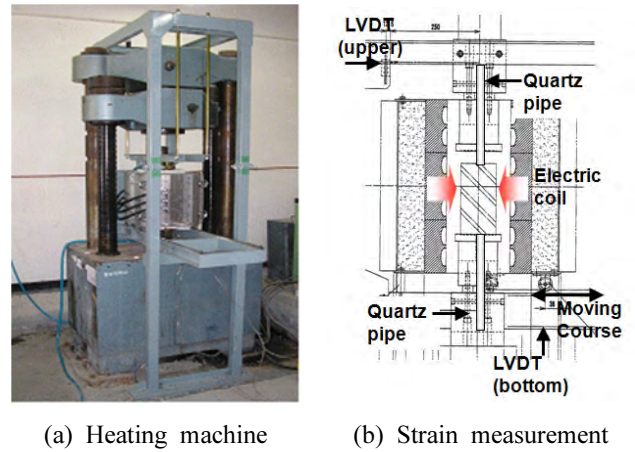


Fig. 3 Heating machine and method of strain measurement

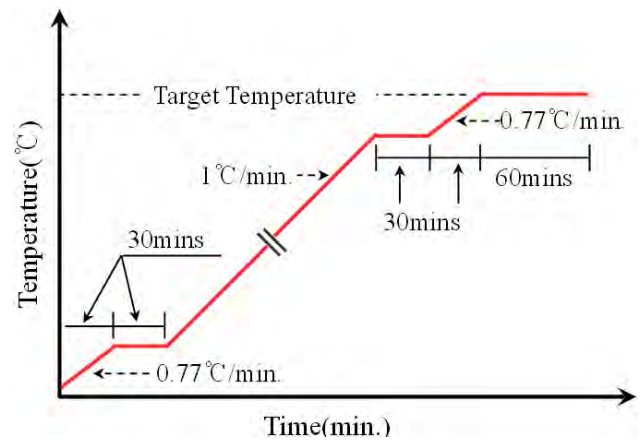


Fig. 4 Heating method in this study

프로그램화하였다. 시험체를 내·외부의 온차를 5°C 이하로 균일하게 가열하기 위해 Fig. 4와 같이 상온(20°C)~50°C 및 목표온도 도달전의 50°C 구간은 0.77°C/min로 가열하였으며, 이외의 구간은 1°C/min의 가열속도로 가열하였다.

2) 콘크리트의 열팽창변형 및 역학적 특성의 평가

가열 중 콘크리트의 열적변형량은 Fig. 3(b)에 나타낸 바와 같이 상부에 설치된 변위계에서 가열지그의 열팽창변형을 측정하고 하부변위계에서 지그의 팽창변형과 시험체의 팽창변형을 동시에 측정하도록 설정하여 식 (1)에 의해 시험체의 변형량을 산출하였다.

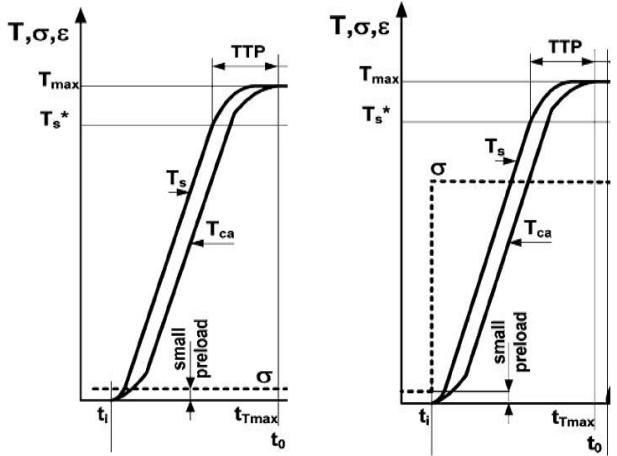
$$\Delta L_c = \Delta L_2 - \Delta L_1 \quad (1)$$

여기서, ΔL_c : 콘크리트의 열팽창량(mm)

ΔL_1 : 상부변위계의 변형량(mm)

ΔL_2 : 하부변위계의 변형량(mm)

하중재하 및 고온에 따른 초고강도 콘크리트의 열팽창변형은 가열시점부터 목표온도까지의 시간동안 측정하는 방법으로 그 측정개요를 Fig. 5에 나타냈다. 하중재하조



Where, T : Temperature
 σ : Load
 ϵ : Strain
 T_{max} : maximum temperature
 T_s : Temperature at surface of specimen
 T_{ca} : Temperature at central axis of rotation of specimen
 T_s^* : surface temperature at which dT_s/dT
 TTP : Transitional thermal period
 t_i : Time at initiation of test unloading
 t_0 : time at beginning of steady state regime

(a) Thermal strain (b) Total strain

Fig. 5 Test method of strain properties^{17,18)}

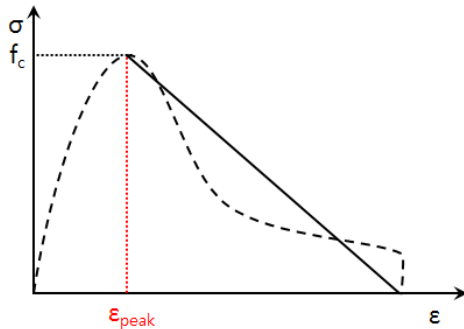


Fig. 6 Evaluation method of strain at peak stress

건은 상온압축강도의 25%를 재하하는 것으로 설정하였으며, RILEM TC 129-MHT 「Part 6-Thermal strain」에 준하여 변형특성을 측정하여 화재시 콘크리트의 열적거동을 분석하였다. 단기고온크리프는 RILEM TC 129-MHT 「Part 7-Transient creep」에 준하여 식 (2)로 계산하였다.^{17,18)}

$$\epsilon_{tr} = \epsilon_{tot} - \epsilon_{th} - \epsilon_{el} \quad (2)$$

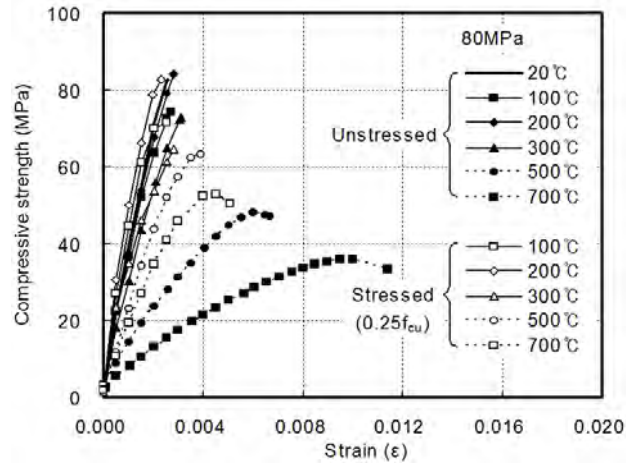
여기서, ϵ_{tr} : 단기재하 고온크리프(transient creep)

ϵ_{tot} : 전체 변형(total strain)

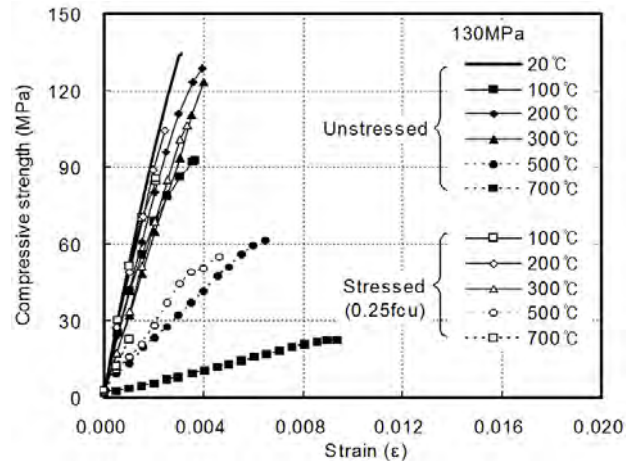
ϵ_{th} : 열팽창 변형(thermal strain)

ϵ_{el} : 탄성 변형(elastic strain)

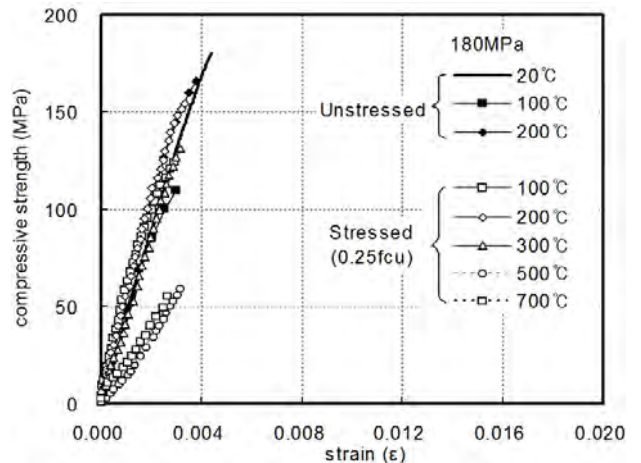
또한, 역학적 특성의 평가는 목표온도 도달후 1시간의 유지시간을 두어 시험체 내·외부의 온도가 균일하도록 한 상태에서 「KS F 2405-콘크리트 압축 강도 시험방법」 및 「KS F 2438-콘크리트 원주 공시체의 정탄성계수 및 포아송비 시험방법」에 준하여 측정하였으며, 최대하중에서의 변형은 Fig. 6에 나타난 바와 같이 EN 1992-1-2:2004(E)에서 제시하고 있는 방법으로 평가하였다.¹⁰⁾



(a) 80 MPa



(b) 130 MPa



(c) 180 MPa

Fig. 7 Stress-strain curve with high temperature and loading conditions

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 응력-변형

Fig. 7은 고온 및 하중재하조건에 따른 초고강도 콘크리트의 응력-변형 곡선을 나타낸 것이다. 비재하상태의

경우, 80 및 130 MPa 초고강도 콘크리트 시험체는 가열 온도 300°C까지 변형률 0.004 이하의 직선에 가까운 응력-변형곡선 형태로 취성적 파괴현상을 보였으나, 500°C 이후로 그 기울기가 낮아져 700°C에서의 파괴변형률 0.01로 연성적으로 파괴되었다. 한편, 180 MPa 초고강도 콘크리트의 경우에는 200°C 이하의 온도조건에서는 상온의 변형률과 유사한 수준을 보였고, 300°C 이상의 온도조건에서는 가열 중 파괴되어 고온압축강도의 측정이 불가능하였다.

하중재하상태에서는 500°C 이상의 고온을 받을 경우에도 목표온도에서 파괴시 취성거동을 나타냈다. 또한, 초고강도 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 기울기가 높아지고 대부분의 시험체에서 최종파괴시의 변형률이 0.003~0.004사이의 값을 갖는 것으로 확인되었다. 이는 콘크리트가 500°C 이상의 고온을 받을 경우, 시멘트 페이스트와 골재의 계면에서 균열이 발생해 내력저하가 발생하게 되지만, 하중재하에 의해 균열이 억제되어 고온에도 취성적 파괴가 발생하는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 하중재하 및 고온을 받은 초고강도 콘크리트의 최대응력에서의 변형률을 나타낸 것으로 비재하상태의 경우, 콘크리트의 최대변형률은 300°C까지는 0.003~0.004의 범위에 있으나 그 이상의 온도에서 0.005~0.01까지 증가했다. 하중재하상태에서는 콘크리트의 최대하중에서의 변형은 상온시와 비교하여 약간 상회하지만 유사한 값으로써 0.25f_{cu}의 하중재하에 의해 골재팽창에 따른 콘크리트의 팽창변형이 재하하중에 의한 수축변형과 상쇄되는 효과가 있는 것을 확인할 수 있었다.

한편, CEN code에서 규정하고 있는 최대응력에서의 변형값은 이 연구의 결과 값과는 큰 차이가 발생하는 것으로 확인되었다. CEN에서 규정하고 있는 값은 비재하 잔존강도 시험방법에 의한 결과 값으로써 목표온도까지 가열한 후 상온까지 냉각시켜 평가를 하기 때문에 균열이 크게 발생할 수 있고, 공기 중의 수분과 반응 후 팽창이 발생되어 길이변화가 생길 수 있는 요인도 존재한다. 이에 CEN code에서도 냉각시 발생할 수 있는 이러한 영향요인을 고려하지 못할 수 있다고 제시하고 있다.¹⁰⁾

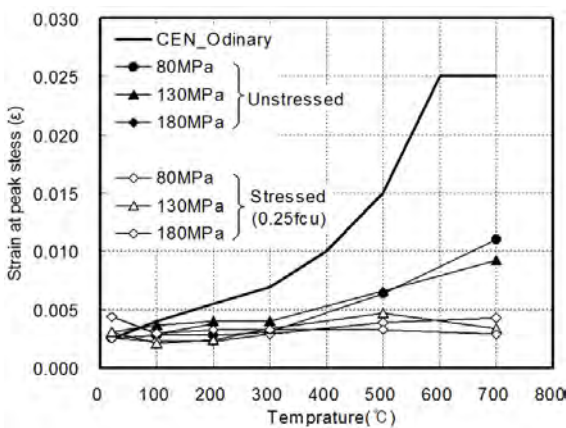


Fig. 8 Strain at peak stress of concrete

3.2 고온압축강도 및 고온탄성계수

Fig. 9는 상온에 대한 고온에서의 잔존 압축강도비를 나타낸 것으로서 CEB 및 CEN code와 비교한 것이다. 모든 시험체에서 CEB 및 CEN code에서 제시되고 있는 것과 달리 100°C에 약 10~40%의 범위로 압축강도가 낮아지는 경향을 나타냈다. 180 MPa 시험체는 약 40%, 130 MPa 시험체는 30%, 80 MPa 시험체는 10%로 콘크리트의 설계 압축강도가 높을수록 100°C에서의 강도 저하율이 큰 것으로 나타났다. 또한, 200°C에서 압축강도가 재상승하는 현상이 나타났으며, 상온압축강도에 비하여 180 MPa 시험체의 경우 약 90%, 130 MPa 시험체의 경우 95%, 80 MPa 시험체의 경우 102%의 압축강도비를 나타내 설계 압축강도가 낮을수록 강도의 상승량이 증가하였다. 300°C에서 시험체가 파괴된 180 MPa 시험체를 제외한 80, 130 MPa 시험체에서 300°C 이후로 압축강도가 감소하였으며 최고온도 700°C에서 80 MPa 시험체는 44%, 130 MPa의 시험체는 17%의 압축강도 잔존율을 나타냈다. 따라서, 콘크리트의 설계강도가 높을수록 고온에 의한 압축강도의 저하가 크게 발생하는 것으로 확인되었다.

Fig. 10에 초고강도 콘크리트의 고온압축강도에 대한 하중재하의 영향을 나타냈다. 하중재하상태에서도 가열

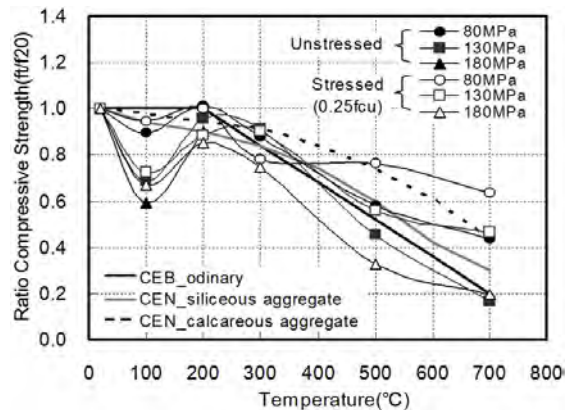


Fig. 9 Residual compressive strength of concrete with high temperature and loading conditions

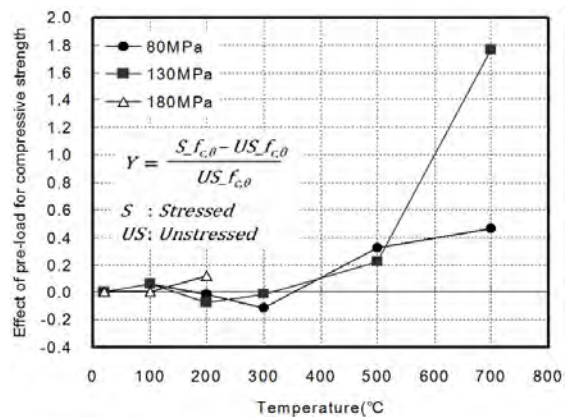


Fig. 10 Effect of loading for compressive strength

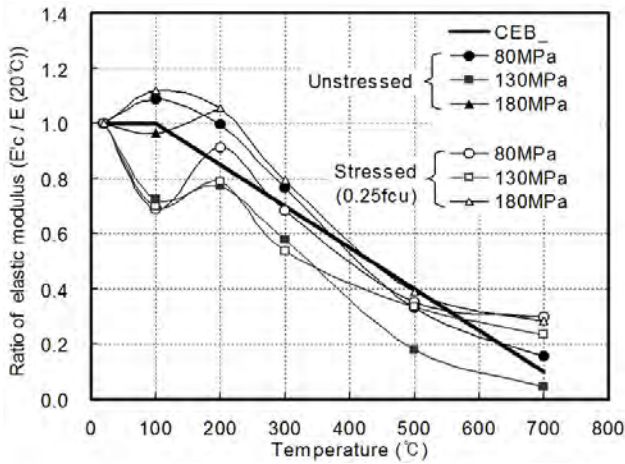


Fig. 11 Residual elastic modulus of concrete with high temperature and loading conditions

온도에 따른 강도저하 및 강도의 상승은 비재하상태와 동일한 경향을 나타냈다. 300°C이하의 온도범위에서는 재하하중에 따른 고온압축강도의 차이는 크게 나타나지 않았지만, 500°C 이상의 온도범위에서 하중재하에 의한 압축강도의 잔존율이 높아지는 것으로 나타났다. 특히, 130 MPa 시험체에서 비재하 상태에 비해 1.8배 높은 잔존 압축강도를 나타냈고, 180 MPa 시험체는 300°C이상의 온도에서 비재하시험의 경우는 파괴되었으나, 하중재하 경우에는 파괴되지 않아 고온에서 잔존강도를 확보할 수 있는 것으로 확인되어 하중재하에 의한 효과는 설계 강도가 높을수록 커지는 것으로 판단된다.

Fig. 11에 상온에 대한 고온에서의 잔존 탄성계수비를 나타냈다. 100°C에서 잔존탄성계수 비가 일부 증가하거나 감소하는 경향을 나타냈으나, 200°C 이후의 탄성계수는 온도상승에 의해 감소하는 것으로 나타났다. 비재하 상태의 경우, CEB code와 비교해 80 MPa 콘크리트는 300°C 이하의 온도조건에서 기존코드를 상회하는 결과를 보였으며, 500°C이상의 온도에서는 기존코드와 유사한 경향을 나타냈다. 130 MPa의 콘크리트는 비재하 상태의 경우 전범위에서 CEB code 보다 낮게 평가되었다. 그러나 재하한 경우에는 100°C에서 30%정도 낮았지만 300°C 이상에서는 유사한 경향을 나타냈다.

Fig. 12에 초고강도 콘크리트의 고온탄성계수에 대한 하중재하의 영향을 나타냈다. 80 MPa 콘크리트의 경우 500°C이하의 온도에서는 하중재하에 의한 탄성계수의 증가효과가 없었지만, 700°C에서는 0.9배 높아지는 것으로 나타났다. 130 MPa 콘크리트 시험체는 500°C에서 0.9배, 700°C에서 4.3배 가량 잔존탄성계수의 상승효과가 나타났다. 따라서, 고온강도와 유사한 경향으로 500°C이상의 온도에서 하중재하에 의한 영향으로 고온탄성계수가 증가되는 것으로 나타났다.

Hertz¹⁴⁾의 연구보고에 따르면 0.25~0.30f_{cu}의 재하하중을 받을 경우, 압축강도가 25%정도 상승하는 것을 확인하였고 이 연구에서도 같은 효과가 확인 되었다. 또한,

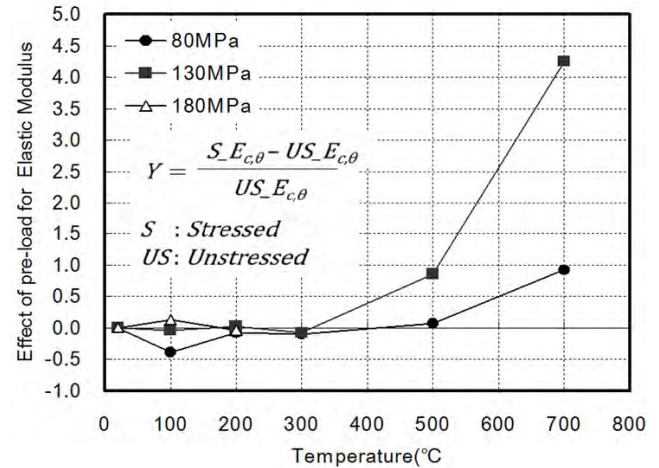


Fig. 12 Effect of loading for elastic modulus

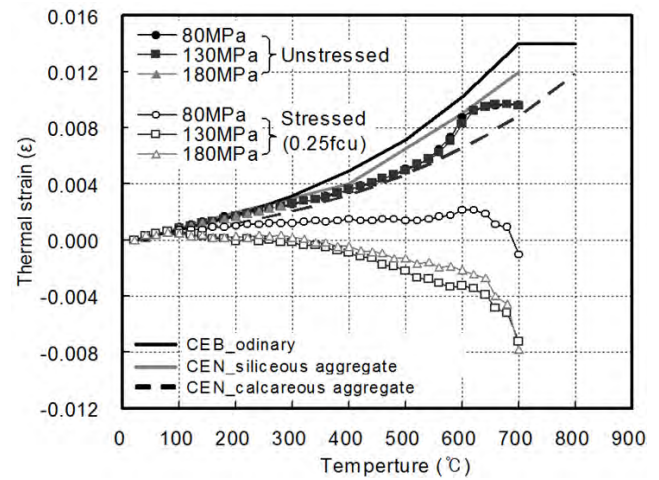


Fig. 13 Thermal strain of concrete with high temperature and loading conditions

설계압축강도가 높은 콘크리트 일수록 하중재하에 의한 고온압축강도 및 고온탄성계수의 잔존율이 높아지는 것을 확인할 수 있었다.

3.3 열팽창변형 특성

Fig. 13은 하중재하 및 고온에 따른 초고강도 콘크리트의 열팽창 변형을 나타낸 것으로 비재하 상태에서는 온도가 증가함에 따라 열팽창변형이 증가하는 경향을 나타냈다. 또한, 가열온도 600°C이상에서 열팽창 변형률 0.009로 수렴되는 경향을 나타내 700°C에서는 0.01이하의 변형률을 나타냈다. 압축강도에 따른 열팽창변형의 차이는 없었지만, 180 MPa 콘크리트의 경우, 300°C이상의 온도에서 파괴되어 열팽창변형을 평가할 수 없었다.

또한, CEN code와 비교하여 500~700°C에서 차이가 발생하는 반면 CEB code와 거의 유사한 경향으로, 500°C 이상의 온도에서 석영의 상변이에 따라 열팽창변형이 증대되고 600°C이후의 온도에서 결합수의 탈수작용에 의하여 약간 수축현상이 나타난다는 보고와 일치한다.^{10,11)} 이

는 사용된 화강암계 골재는 석영과 사장석이 주성분으로 석영의 주성분이 실리카성분(SiO₂)이 칼슘질(Ca)에 비하여 크기 때문에 판단된다.

하중재하를 받는 경우는 비재하시 발생하는 콘크리트의 열팽창변형이 재하에 의한 수축변형에 의해 상쇄되어 변형이 크게 저감되는 것으로 나타났다. 80 MPa 초고강도 콘크리트의 경우 하중재하에 의해 열팽창변형이 억제되었지만, 상대적으로 골재량이 많아 변형률이 0.001로 유지되다가 600°C 이상의 온도에서 수축하여 열팽창변형이 상쇄되었다. 130 및 180 MPa 콘크리트의 경우에는 시멘트 페이스트의 열팽창이 발생하는 약 100°C까지는 유사하게 팽창하였으나, 이상의 온도에서 열팽창변형이 상쇄되었으며 300°C 이후에서는 수축변형이 서서히 발생하였다. 또한, 콘크리트의 상태변화가 발생하는 600°C 이상의 온도에서 급격한 수축변형이 발생하고 700°C에서는 변형률 -0.008로 나타났다.

한편, 130, 180 MPa 초고강도 콘크리트에 0.25f_{cu}의 하중을 가할 경우 700°C에서 최종 변형률이 -0.008로 크게 발생했음에도 파괴가 발생하지 않는 것은 골재의 열팽창변형에 따라 재하에 의한 수축균열이 제어되어 서서히 내력이 저하하면서 연성상태에서 에너지소산이 가능했기 때문으로 판단된다.

3.4 단기고온콘크리트

Fig. 14는 하중재하 및 온도에 따른 초고강도 콘크리트의 단기고온콘크리트를 나타낸 것이다. 단기고온콘크리트는 하중에 의해 발생하는 수축변형으로써 온도상승에 따른 콘크리트의 상태변화 및 내력저하에 의해 발생하게 된다.

0.25f_{cu}의 하중재하상태에서는 80 MPa 초고강도 콘크리트 시험체의 경우 300°C 이하의 온도에서는 변형이 서서히 증가되고, 500°C 이상의 온도에서 재하하중의 영향으로 수축변형이 빠른 속도로 일어나게 되며, 700°C에서는 비재하시 발생하는 열팽창변형의 절대값과 유사하게 -0.01로 나타났다.

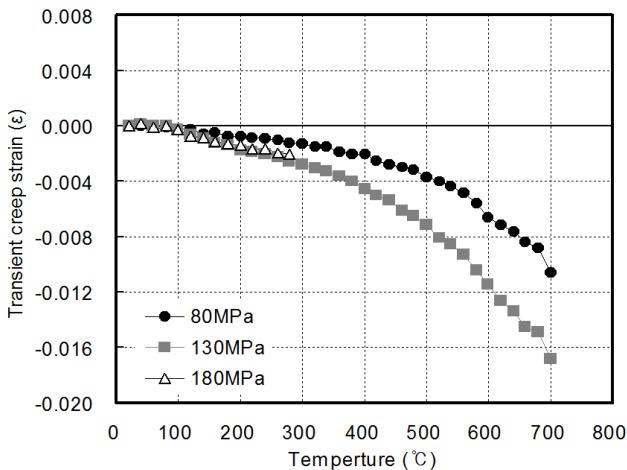


Fig. 14 Transient creep of concrete

일반 콘크리트의 경우, Ca(OH)₂의 분해에 따른 매트릭스 붕괴와 골재의 열팽창변형에 의한 균열발생으로 인해 500°C 이후의 온도에서 콘크리트의 transient creep이 급격하게 증대된다. 이 연구에서 사용한 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 굵은 골재 최대치수가 작고 결합재량이 많기 때문에 300°C 이후에서 압축강도가 크게 저하하며, 재하하중 및 고온을 받을 경우 콘크리트 매트릭스의 결속력이 저하하여 수축변형이 급격하게 발생함으로써 취성적으로 파괴되는 것으로 판단된다.

4. 결 론

하중재하와 고온에 의한 고강도 콘크리트의 고온특성 평가를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 가열온도 300°C 이하의 범위에서는 하중재하조건에 관계없이 취성적으로 파괴되었지만, 하중재하 상태에서는 모든 온도조건에서 일반상태와 유사한 취성적 파괴 거동을 보였다.
- 2) 설계기준강도가 높을수록 고온에 따른 콘크리트의 압축강도가 저하되는 폭이 크게 나타났으며 하중재하에 의한 영향으로 고온에서 압축강도 및 탄성계수의 잔존율이 높게 나타났다.
- 3) 비재하상태에서 가열에 의한 초고강도 콘크리트의 열팽창변형은 압축강도에 관계없이 유사한 경향을 나타내고, 하중재하에 의한 수축변형이 고온에 의한 열팽창변형을 상쇄시키는 것으로 나타났다.
- 4) 하중재하에 의해 콘크리트의 열팽창이 억제되어 잔존압축강도 및 잔존탄성계수가 높게 나타났으며, 이러한 현상은 500°C 이상의 온도에서 설계기준강도가 높을수록 명확하게 나타났다.

감사의 글

이 논문은 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원(09 첨단도시A01)과 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업(2012H1B8A2025606)으로 수행된 연구 결과이고 이에 감사드립니다.

References

1. Franssen, J. M. and Dotreppe, J. C., "Fire Test and Calculation Methods for Circular Concrete Columns," *Fire Technology*, Vol. 39, Issue 1, 2003, pp. 89-97. (doi: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1021783311892>)
2. Kalifa, P., Menneteau, F. D., and Quenard, D., "Spalling and Pore Pressure in HPC at High Temperatures," *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, Issue 12, 2000, pp. 1915-1927.
3. Notification No. 2008-334 of Ministry of Land in Korea, Management Standard for Fire Resistance of Concrete

- Column and Beam, 2008, pp. 1-9.
4. Kalifa, P., Chéné, G., and Gallé, C., "High-Temperature Behaviour of HPC with Polypropylene Fibres from Spalling to Microstructure," *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, Issue 10, 2001, pp. 1487-1499.
 5. Song, H., Hyung, W. G., Do, J. Y., and Soh, Y. S., "Explosive Spalling Dependent on Compressive Strength and Moisture Content of High Strength Concrete including Silica Fume," *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 20, No. 9, 2004, pp. 111-117.
 6. Ko, J. W., Ryu, D. W., and Noguchi, T., "The Spalling Mechanism of High-Strength Concrete under Fire," *Magazine of Concrete*, Vol. 63, Issue 5, 2011, pp. 357-370. (doi: <http://dx.doi.org/10.1680/mac.10.00002>)
 7. Hertz, K. D., "Limits of Spalling of Fire-Exposed Concrete," *Fire Safety Journal*, Vol. 38, Issue 2, 2003, pp. 103-116.
 8. Fu, Y. and Li, L., "Study on Mechanism of Thermal Spalling in Concrete Exposed to Elevated Temperature," *Material and Structures*, Vol.44, Issue 1, 2011, pp. 361-376. (doi: <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-010-9632-6>)
 9. Comites Euro-International Du Beton, Fire Design of Concrete Structures-in Accordance with CEB/FIP Model Code 90 (Final Draft), CEB Bulletin D'Information No. 208, July, 1991, Lausanne, Switzerland, pp. 33-48.
 10. Comité Européen de Normalisation (CEN), BS EN Eurocode 2: Design of Concrete Structures, Part 1-2: Structural Fire Design, 2004, pp. 19-32.
 11. Kodur, V. K. R. and Sultan, M., "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. (doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2003\)15:2\(101\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:2(101)))
 12. Kodur, V. K. R. and Lie, T. T., "Fire Resistance of Fibre-Reinforced Concrete," *Fibre Reinforced Concrete: Present and the Future*, Canadian Society of Civil Engineers, 1998, pp. 189-213.
 13. Sullivan, P. J. E. and Sharshar, R., "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. (doi: <http://dx.doi.org/10.1680/mac.2005.57.8.445>)
 15. Phan, L. T., "High-Strength Concrete at High Temperature-An Overview," *Utilization of High Strength/High Performance Concrete, 6th International Symposium Proceedings*, Vol. 1. 2002, pp. 501-518.
 16. Anderberg, Y. and Thelandersson, S., "Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperature: Part 2 Experimental Investigation and Material Behaviour Model," *Bulletin, University of Lund, Sweden*, Vol. 54, 1976, pp. 1-84.
 17. RILEM Technical Committee, *Recommendation: Part 6-Thermal Strain*, *Materials and Structures*, 1997, pp. 17-21.
 18. RILEM Technical Committee, *Recommendation: Part 7-Transient Creep*, *Materials and Structures*, 1998, pp. 290-295.

요약 콘크리트는 고온에 강한재료로 인식되어 왔으나, 화재 등의 고온에 의해 내부조직의 물리·화학적 변화가 발생해 역학적 특성이 저하하게 된다. 이에, 고온시 콘크리트의 역학적 특성의 저하에 관한 연구보고 및 기준이 제시되고 있다. 그러나 고강도 콘크리트 및 하중을 재하한 상태에 관한 연구데이터는 적다. 따라서 이 연구에서는 고온 및 하중재하에 따른 고강도 콘크리트의 고온특성을 평가하였다. W/B 12.5%, 14.5%, 20%의 고강도 콘크리트를 대상으로 비재하상태 및 $0.25f_{cu}$ 의 하중조건을 설정하여, 고온시의 응력-변형, 최대하중에서의 변형, 압축강도, 탄성계수, 열팽창변형, 단기 고온크리프를 평가하였다. 실험 결과, 압축강도가 높아질수록 가열에 의한 압축강도의 저하가 크게 나타났고, 500°C 이상의 온도에서 고온에 의한 열팽창변형과 하중재하에 의한 수축변형이 상쇄되어 압축강도 및 탄성계수의 잔존율이 높아지는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 고강도 콘크리트, 잔존 압축강도, 잔존 탄성계수, 열팽창변형, 단기 고온크리프