고온에 노출된 초고강도 콘크리트의 압축특성

강용학¹⁾ · 강충현¹⁾ · 최현국¹⁾ · 신현준²⁾ · 김화중^{1)*}

¹⁾경북대학교 건축토목공학부 ²⁾한국건설기술연구원 화재안전연구센터

Compressive Properties of Ultra High Strength Concrete Exposed to High Temperature

Yong-Hak Kang,¹⁾ Choong-Hyun Kang,¹⁾ Hyun-Guk Choi,¹⁾ Hyun-Jun Shin,²⁾ and Wha-Jung Kim^{1)*}

¹⁾School of Architecture & Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

²⁾Fire Research Center, Korea Institute of Construction Technology, Hwasung 445-861, Korea

ABSTRACT Recently, the trend toward larger architectural structures continues and accelerates demand for Ultra High Strength Concrete (UHSC) which satisfies structural performance. However, UHSC has weakness in fire and the performance tests are required. In this paper, the change of mechanical properties of 100 MPa grade UHSC exposed to high temperatures (20°C~800°C) was observed to develop high temperature material model of UHSC: residual compressive strength, modulus of elasticity, property of stress-strain on monotonous loading and property of stress-strain on cyclic loading. In addition, TG/DTA and SEM Images analyses were performed to investigate chemical and physical characteristics of UHSC, and the results of this research were compared with those of previous studies. As a result, UHSC at the heating temperature of 300°C showed a sharp decrease of residual compressive strength and modulus of elasticity. And It was shown that UHSC had a plastic behavior at more than 400°C on the cyclic loading and revealed a same tendency in both monotonous and cyclic loading of all heating temperatures. In addition, through TG/DTA and SEM images analyses compared with those from previous studies, it was shown that the deterioration of concrete inner tissue, water evaporation and chemical reaction caused the decrease of residual compressive strength and modulus of elasticity.

Keywords : ultra high-strength concrete, high temperature, cyclic loading, stress-strain curve

1. 서 론

건축물이 초고층화, 대형화 되어감에 따라 초고강도 콘크리트에 대한 수요는 점차 증가하고 있다. 이러한 초고강도 콘크리트는 구조적 장점뿐만이 아닌 내구성 및 사용성이 우수하여 건축 및 토목 구조물에서의 활용이 점차 증대하고 있으나, 고온에 노출되면 표면에 균열, 박리, 결손 및 물리적 열화현상 등이 발생하여 강도 및 내구성은 현저하게 저하하게 된다.^{1,2)} 따라서 초고강도 콘크리트가 가진 열적특성을 확인하기 위해서는 고온을 받은 콘크리트의 역학적 특성을 정확하게 이해할 필요가 있으며, 물리적·화학적 분석 등을 통하여 그 매커니즘을 규명할 필요가 있다.

이와 관련하여, Furumura 등은 보통강도 및 인공경량

골재 콘크리트를 대상으로 고온에서의 역학적 성질을 규명하기 위한 실험을 실시하고, 응력-변형곡선과 탄성계수와 관계, 반복하중에 따른 응력-변형곡선 및 가열온도의 증가에 따른 콘크리트의 압축강도 변화에 대하여 기존 문헌과 함께 비교 분석함으로써 보통강도 및 인공경량골재 콘크리트의 역학적 특성을 정리하여 보고하였다.³⁻⁵⁾ 또한, 기존 연구 결과를 바탕으로 고온에서의 보통강도 및 고강도 콘크리트를 대상으로 일정 가열온도 하의 응력-변형 관계를 나타내기 위한 실험과 함께 수학적 해석을 실시하고, 반복하중을 받은 보통강도 및 고강도 콘크리트의 응력-변화의 관계에 대한 추정식을 제안하였다.⁶⁾

또한, Nishita 등은 120 MPa 급 초고강도 콘크리트를 대상으로 실험대 모의 기둥 타설을 실시하고, 공시체를 제작하여 고온가열 실험을 통해 초고강도 콘크리트에 대한 역학적 성질을 조사하였다. 그 결과, 고온가열을 받은 콘크리트의 압축강도와 탄성계수가 가열온도에 따라 크게 저하한다는 점과 고온가열 후 공시체에 수분을 공급함으로써 탄성계수가 약간 회복하였다는 점 등을 보고하였다.⁷⁾

*Corresponding author E-mail : kimwj@knu.ac.kr

Received April 17, 2014, Revised May 31, 2014,

Accepted June 2, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

국내에서는 김상식 등이 고온가열에 따른 섬유를 혼입한 고강도 콘크리트의 역학적 특성을 확인하기 위하여 상온으로부터 1000℃까지 콘크리트를 가열하고 관련 실험을 실시하였다. 그 결과, 상온에서 300℃까지는 탄성계수의 변화가 거의 없다는 점과 함께 SEM 촬영을 통하여 400℃ 이상에서는 고온으로 인해 콘크리트의 조직이 파괴되었다는 점을 보고하였다.⁸⁾

한편, 한민철 등은 60 MPa급 고강도 콘크리트를 대상으로 고온조건이 고강도 콘크리트의 역학적 특성에 미치는 영향에 대하여 응력-변형곡선, 공극분포, SEM 촬영 및 XRD 분석을 통하여 고찰하였으며, 400℃ 이후부터의 고온 영역에서는 응력-변형 곡선이 낮은 범위까지 저하한다는 점과 SEM 및 XRD 분석을 통하여 400℃ 이상의 고온에서는 콘크리트의 화학적 성분이 변화하여 콘크리트의 강도와 내구성에 영향을 미친다는 점을 보고하고 있다.⁹⁾

그 외에도, 송훈,^{10,11)} 윤현도,¹²⁾ 김우석¹³⁾ 등이 고온을 받은 고강도 콘크리트에 대한 강도특성 및 콘크리트의 미세구조 등에 대해서 기존 연구를 토대로 정리·고찰하여 보고하고 있다.

이와 같이 콘크리트의 고온 특성에 대한 많은 연구들이 보고되었으나 아직까지는 초고강도 콘크리트의 고온 특성에 대한 연구가 충분하다고 하기는 어려운 실정이며 고온 재료 모델 제안을 위한 기초 자료 또한 부족한 것이 사실이다. 따라서, 이 연구에서는 상온에서 800℃까지의 고온 가열을 받은 100 MPa급 초고강도 콘크리트를 대상으로, 가열온도의 변화에 따른 잔존압축강도, 탄성계수 및 단일하중과 반복하중 시의 응력-변형 성상 등 역학적 특성 변화를 확인함과 동시에 시차열분석(이후 TG/DTA 분석)과 전자주사현미경(이후 SEM) 등을 활용하여 콘크리트의 화학·물리적 특성을 확인하고, 그 결과를 기존 연구를 토대로 비교·정리함으로써 초고강도 콘크리트 고온 재료 모델 개발을 위한 기초적 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험 계획 및 콘크리트 배합

이 연구의 실험 계획 및 배합표는 Table 1, 2 및 3에 나타내었다.

이 연구에서는 W/B 20%의 초고강도 콘크리트 1수준을 설정하였으며, 시멘트에 대한 질량비로 플라이애쉬 25%, 실리카폼 15%를 치환하였다. 또한, 시험체의 온도 상승 과정에서 폭렬이 일어나지 않도록 하이브리드 섬유(나일론(이후 NY)+폴리프로필렌(이후 PP))를 콘크리트의 0.05 vol.% 혼입하였으며, 배합에 대한 목표 슬럼프 플로우는 600±100 mm, 목표 공기량은 3.0±1.0%로 설정하였다.

굳지않은 콘크리트에 대해서는 슬럼프 플로우, 공기량

Table 1 Experiment factors and levels

Factors	Experiment levels
W/B (%)	20
Slump flow (mm)	600±100
Air content (%)	3.0±1.0
Ratio of binding (%)	OPC(71)+FA(18)+SF(11)
Fiber	NY+PP
Mixing ratio of fiber (vol.%)	0.05
Heating temperature (℃)	100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800

Table 2 Test items

Subjects	Test items
Fresh concrete	- Slump flow - Air content
Hardened concrete	Before heating - Compressive strength (3, 7, 28 days) - Stress-strain - TG/DTA analysis
	After heating - Residual compressive strength - Stress-strain by monotonous loading - Stress-strain by cyclic loading - SEM

Table 3 Mix design

W/B (%)	S/a (%)	AE/B (%)	Unit weight (kg/m ³)					
			W	C	FA	SF	S	G
20	35	2	154	550	137.5	82.5	502	932

을 측정하였고, 굳은 콘크리트는 재령 3, 7, 28일에 압축강도를 측정하였다. 고온 가열을 받은 콘크리트의 역학적 특성을 분석하기 위하여 100℃, 200℃, 300℃, 400℃, 500℃, 600℃, 700℃ 및 800℃까지 100℃ 간격으로 각각의 시험체를 가열한 후 잔존압축강도, 단일하중 및 반복하중 시의 응력-변형을 측정하였으며, 각 케이스별 시험체는 3~5개씩 준비하였다. 또한, 이 연구에서는 콘크리트의 역학적 특성 변화를 고찰하기 위해 TG/DTA 분석을 실시하고, 각 가열온도마다 시편을 채취하여 SEM으로 이미지를 촬영하였다.

2.2 사용 재료

이 실험에서 사용한 재료의 물리적 성질은 Table 4와 같으며, 시멘트는 분말도 3302 cm²/g 및 밀도 3.15 g/cm³의 국내산 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 굵은 골재는(밀도 2.61 g/cm³, 최대치수 10 mm) 화강암류 부순 자갈을 사용하였고, 잔골재는 천연 모래(밀도 2.60 g/cm³)와 부순 모래(2.60 g/cm³)를 1:1의 비율로 혼합한 혼합 잔골재를 사용하였으며, 사용된 골재의 입도와 입형은 KS F

Table 4 Properties of materials used in the experiment

Materials	Physical properties
Cement	OPC (fineness: 3302 cm ² /g, density: 3.15 g/cm ³)
Fly ash	Fineness: 4061 cm ² /g, density: 2.21 g/cm ³
Silica fume	Fineness: 200000 cm ² /g, density: 2.20 g/cm ³
Coarse agg.	Crushed coarse agg. (granitoid) (max. size: 10 mm, density: 2.61 g/cm ³)
Mixed fine agg.	- Natural sand (density: 2.60 g/cm ³) - Crushed sand (density: 2.60 g/cm ³)
Chemical agent	Polycarboxylic-based super plasticizer
Hybrid fiber	- NY fiber (length: 9 mm, density: 1.15 g/cm ³) - PP fiber (length: 18 mm, density: 0.91 g/cm ³)

2526 기준을 만족하였다. 플라이애시는 분말도 4061 cm²/g 및 밀도 2.21 g/cm³, 실리카폼은 분말도 200000 cm²/g 및 밀도 2.20 g/cm³의 것을 사용하였고, 혼화제는 폴리카르본산계 고성능 AE감수제를 사용하였다. 하이브리드 섬유는 NY섬유(길이 9 mm, 밀도 1.15 g/cm³)와 PP 섬유(길이 18 mm, 밀도 0.91 g/cm³)를 1:1로 혼합한 것을 사용하였다.

2.3 시험체 제작 및 양생 방법

이 연구에 사용된 콘크리트 시험체는 KS F 2403 「콘크리트의 강도시험용 시험체 제작방법」에 준하여 $\phi 50$ mm $\times 100$ mm 크기로 제작하였다. 콘크리트는 강제식 팬타입 믹서를 사용하여 혼합하였고, 굳지않은 콘크리트의 실험으로 슬럼프 플로우(KS F 2594), 공기량(KS F 2421)을 측정하였다. 시험체는 익일 탈형 후 20 $\pm$ 3 $^{\circ}$ C의 조건으로 28일간 수중양생을 하였으며, 시험체 가열 전 함수량이 2% 이내가 되도록 전처리 과정을 거친 후 윗면을 콘크리트용 연마기를 사용하여 평활하게 마감하고 전기로에 넣어 가열을 실시하였다.

2.4 실험 방법

콘크리트의 가열은 Fig. 1과 같은 전기로에 공시체를 배치하고 Table 5와 같이 RILEM에서 제안하는 승온 온도 값들에 대해 예비실험을 실시하고 시험체에 폭열이 일어나지 않았던 승온 온도 값인 2 $^{\circ}$ C/분으로 설정하여 소정의 목표 온도까지 상승시켰다. 목표 온도 도달 후에는 120분간 목표 온도를 유지시켜 콘크리트 시험체의 내부와 표면이 동일 온도를 갖도록 한 뒤 서서히 냉각시켰다. 그 후 초고강도 콘크리트의 잔존압축강도, 단일하중 및 반복하중 시의 응력-변형 성상을 Fig. 2에 나타난 UTM과

Fig. 1 Electronic furnace used to heat specimens**Table 5** Heating time and temperature for specimen

Heating temperature ($^{\circ}$ C)	Heating speed ($^{\circ}$ C/min)	Heating time (min)	Holding time (min)
100	2	50	120
200		100	
300		150	
400		200	
500		250	
600		300	
700		350	
800		400

Fig. 2 UTM and LVDT set up for compressive strength test

LVDT를 이용하여 측정하였고, TG/DTA 분석 및 SEM 촬영을 실시하였다. 반복하중의 경우, 초고강도 콘크리트의 탄성역을 고려하여 최초 최대하중의 1/3까지 재하한 뒤 하중을 제거하고, 다시 최대하중의 2/3 지점, 최대하중 지점까지 순차적으로 반복재하 하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 콘크리트의 역학적 특성

Table 6에 콘크리트의 기초적 특성을 나타내었다. 굳지않은 콘크리트는 슬럼프플로우 600 mm 및 공기량 4%로 모두 목표치를 만족하였으며, 굳은 콘크리트는 재령 3일 60 MPa, 7일 81 MPa, 28일 111 MPa의 평균압축강도 값을 보였다.

Table 6 Basic characteristics of concrete

W/B (%)	Slump flow (mm)	Air content (%)	Compressive strength (MPa)				
			Age	1	2	3	Ave.
20	600	4	3	59	62	59	60
			7	92	72	80	81
			28	121	95	117	111

Table 7 Properties of concrete exposed to several temperatures

Subjects	Heating temperature (°C)								
	20	100	200	300	400	500	600	700	800
Compressive strength (MPa)	111	108	101	66	63	42	34	23	9
Reduction coefficient of compressive strength ($f_c/f_{c(20^\circ\text{C})}$)	1.00	0.97	0.91	0.59	0.57	0.38	0.31	0.21	0.08
Elastic modulus (GPa)	36.1	34.3	29.9	14.3	9.3	5.1	2.4	1.5	0.9
Reduction coefficient of elastic modulus ($E/E_{(20^\circ\text{C})}$)	1.00	0.95	0.83	0.47	0.40	0.14	0.07	0.04	0.02

Table 7에 각 가열온도에 따른 콘크리트의 역학적 특성을 나타내었다. 가열온도가 올라감에 따라 콘크리트의 잔존압축강도 및 탄성계수 값이 저하되었으며, 특히 가열온도 300°C의 경우, 가열온도 200°C와 비교하여 그 값이 급격하게 줄어드는 것을 알 수 있었다.

3.1.1 잔존압축강도 및 탄성계수

Fig. 3에 가열온도에 따른 잔존압축강도, Fig. 4에 탄성계수를 나타내었다. 모든 가열시료의 결과 값을 상온의 압축강도 및 탄성계수 값과 비교하면 전체적으로 감소하는 경향을 보였고, 100°C의 경우, 상온과 비교하여 큰 차이는 보이지 않았으나, 200°C의 경우, 상온과 비교하여 각각 9%, 17%정도 값이 저하하는 경향을 나타내었다. 또한, 300°C의 경우, 기존 연구^{8,9)}와는 달리 압축강도 및 탄성계수 값이 상온과 비교하여 각각 40%, 50% 이상 큰 폭으로 저하하는 경향을 보였고, 이는 초고강도 콘크리트를 대상으로 하는 기존 연구⁷⁾와 유사한 결과라 판단되며, 100°C 부근에서의 자유수 탈수 및 100°C~300°C 사이에서의 시멘트 경화체의 주성분인 C-S-H계 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 제외한)수화물들의 탈수와 함께, 가열온도가 110°C 이상이 되면서 골재의 팽창과 시멘트 페이스트 부분의 수축이 동시에 일어나면서 온도응력이 발생하여 콘크리트 내부에 미세균열이 생김¹⁵⁾으로써 300°C 부근에서 급격한 강도저하가 일어났다고 사료된다. 또한, 500°C 이후로 압

Fig. 3 Residual compressive strength on the each heating temperature **Fig. 4** Ratio of residual compressive strength at the each heating temperature **Fig. 5** Stress-strain curve at the each heating temperature

축강도 및 탄성계수가 다시 큰 폭으로 저하하는 경향이 보였으며, 이는 기존 연구에서 보고되는 결과들과 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

3.1.2 단일하중 시의 응력-변형도

Fig. 5에 단일하중 시의 각 가열온도별 응력-변형 곡선을 나타내었다. 100°C와 200°C의 경우, 상온과 유사한 직선형태의 응력-변형 곡선을 보이고 있으며, 300°C의 경우, 급격한 응력저하와 함께 기울기 또한 완만해지기는 했으나, 100°C, 200°C와 마찬가지로 직선적 초기 구배를 갖는 탄성적 특성을 나타냈다. 400°C의 경우, 300°C와 유

Fig. 6 Stress-strain curve under cyclic loading at the each heating temperature

사한 직선적 초기 구배를 갖는 탄성 거동을 보이나 압축 강도의 최고점 이후부터 소성적 특성을 보이기 시작하였다. 이는 기존 연구¹⁴⁾와 유사한 결과로써 콘크리트 내부 수분의 탈수 및 수화생성물의 분해 등에 따른 내구성 저하에 의한 것으로 사료된다.

3.1.3 반복하중 시의 응력-변형도

Fig. 6에 각 가열온도별 단일하중과 반복하중 시의 응력-변형 곡선을 나타내었다. 100°C와 200°C의 경우(Fig. 6(b)-(c)), 상온(Fig. 6(a))과 유사한 탄성 거동을 보였으며, 반복하중 후에도 단일하중 시의 잔존압축강도와 유사한 경향과 강도 값을 보였다. 또한, 300°C의 경우(Fig. 6(d)), 단일하중 시의 잔존압축강도 값이 400°C와 유사하나, 반복하중 하에서는 400°C와는 달리 탄성 거동을 보이는 것이 확인되었으며, 하중 제거 후의 잔류변형 값이 조금씩 커지는 경향을 보였다. 그러나 400°C의 경우(Fig. 6(e)), 반복하중에 따른 응력-변형 곡선에서 소성 거동이 보이기 시작했으며, 400°C 이후로는 하중제거 후의 잔류변형이 점진적으로 커져가는 경향을 보임과 동시에 기물기가 급격하게 내려앉는 현상이 확인되었다. 이러한 현상 또한 앞에서 언급한 바와 같이 가열에 의하여 콘크리트 내부의 수분과 화학 결합수의 증발 및 수화생성물의 변화

Fig. 7 Result of TG/DTA test

와 골재의 팽창 및 시멘트 페이스트의 수축 등과도 관계가 있다고 판단된다.

또한, 단일하중과 반복하중 시의 응력-변형 성상을 비교해 본 결과, 대부분의 가열온도에서 그 경향이 거의 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 기존의 연구¹⁴⁾와 유사한 결과로 화재 피해 후 지진과 같은 반복하중을 받았을 때의 초고강도 콘크리트의 응력-변형 성상을 예측할 경우, 단일하중 시의 응력-변형 성상으로도 그 경향을 근사적으로 예측하는 것이 가능할 것이라고 판단된다.

3.2 콘크리트의 미세구조 분석

3.2.1 TG/DTA 분석

Fig. 7에 TG/DTA 분석 결과를 나타내었으며, 왼쪽의 세로축에는 중량 감소율을 오른쪽의 세로축에는 열유속을 각각 나타내었다. Fig. 7로부터 상온으로부터 300℃까지의 구간에서 샘플 중량의 약 6.3%에 달하는 급격한 중량 감소와 함께 100℃ 부근에서 콘크리트 내부의 수분 증발로 인한 강한 흡열반응을 확인할 수 있었다. 또한 300℃로부터 400℃ 부근에 이르는 구간에서 샘플 중량의

0.6% 정도의 중량 감소와 함께 400℃ 부근에서 결합수의 증발로 보이는 약한 흡열 반응을 확인할 수 있었고, 600℃에서 900℃에 이르는 구간에 걸쳐 흡열반응 없이 지속적인 단계적으로 중량이 감소하는 것 또한 확인되었다. 이는 기존 연구¹¹⁾ 및 문헌¹⁵⁾에서 언급하는 100℃까지의 모세관수의 증발에 따른 급격한 중량감소, 100℃에서 200℃에 걸친 자유수의 탈수 및 증발로 인한 중량감소, 100~300℃ 부근에서의 모노설페이트의 탈수, 400℃~500℃ 부근에서의 수산화칼슘의 탈수, 650℃~900℃ 부근에서 탄산칼슘의 탈탄산으로 인한 중량 감소 현상 등에 기인한 것으로 사료된다. 이와 같은 결과를 종합하

Fig. 8 SEM Images of test specimen at the each heating temperature (left: $\times 100$, right: $\times 3.0k$)

여 볼 때, 이 연구에서 사용된 초고강도 콘크리트의 가열에 따른 잔존압축강도 저하 현상은 콘크리트가 고온에 노출됨으로써 콘크리트 내부의 수분과 결합수의 증발 및 수화생성물의 화학적 변화 등에 의한 것이라 판단된다.

3.2.2 SEM 촬영

Fig. 8에 각 가열온도에 대한 초고강도 콘크리트 시험체 시편의 SEM 이미지(왼편: 100배, 오른편: 3,000배)를 나타내었다. 20℃에서 200℃까지의 시편(Fig. 8(a)-(c))에서는 시편의 표면 조직에 대한 열화 현상을 찾아보기는 어려웠으나, 300℃의 경우(Fig. 8(d)), 콘크리트 표면 조직이 거칠어지며 판상으로 열화되기 시작하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 앞에서 설명한 가열에 따른 탈수 현상 및 수화생성물의 분해 현상 등에 기인한다고 사료되며, 이 연구의 범위에서 초고강도 콘크리트의 잔존압축강도 값이 가열온도 200℃와 300℃ 사이에서 크게 저하하는 경향이 있음을 고려할 때, 가열에 따른 콘크리트 조직의 열화가 콘크리트 압축강도에 상당 부분 영향을 끼친다고 판단된다. 또한, 500℃ 이후로부터는 가열온도가 올라갈수록 시편 표면의 미세균열이 더욱 뚜렷해지고 열화가 더욱 진행되는 것을 확인할 수 있었다. 이 또한 앞에서 설명한 가열온도에 따른 화학적 변화와 함께 이로부터 수반되는 수분의 증발에 기인된다고 판단되며, 기존 연구^{8,9,13)}와도 일치함을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과를 종합하여 볼 때, 이 연구에서 사용된 초고강도 콘크리트의 경우에도 고온에 노출될수록 콘크리트 내부 조직의 열화가 심해지면서 콘크리트의 내구성 및 강도가 크게 저하한 것이라고 판단된다.

4. 결 론

이 연구에서는 초고강도 콘크리트의 고온 재료 모델 개발을 위한 기초적 자료를 얻기 위하여 고온 가열을 받은 100 MPa급 초고강도 콘크리트를 대상으로 단순하중과 반복하중 시의 역학적 성질을 확인하였다. 또한, 고온 가열을 받은 시험체의 미세구조 특성 확인을 위해 TG/DTA 분석 및 SEM 촬영을 실시하였고 기존 연구를 토대로 비교·정리한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 고온가열을 받은 초고강도 콘크리트의 경우, 기존 연구와 같이 가열온도 증가에 따른 잔존압축강도 및 탄성계수의 저하가 확인되었다. 그러나 이 연구의 범위에서는 기존의 연구와는 달리 300℃부터 잔존압축강도와 탄성계수의 저하가 눈에 띄게 확인되었으며, 이는 콘크리트 내부의 수분 증발 및 수화생성물의 분해 등에 따른 콘크리트 조직의 열화에 기인한 것으로 사료된다.
- 2) 반복하중 시의 응력-변형 곡선으로부터 상온에서 300℃까지는 탄성 거동, 400℃ 이후로부터는 소성 거동을 보이고 있음을 확인할 수 있었으며, 고온이

될수록 하중제거 후의 잔류변형이 점진적으로 커져가는 경향이 보임과 동시에 기울기가 급격하게 낮아지는 것이 확인되었다. 또한, 단일하중과 반복하중 시의 응력-변형 성상은 대부분의 가열온도에서 거의 일치하고 있음을 알 수 있었으며, 화재 피해 후 지진과 같은 반복하중을 받았을 때의 초고강도 콘크리트의 응력-변형 성상을 예측할 경우, 단일하중의 응력-변형 성상으로도 그 경향을 근사적으로 예측하는 것이 가능할 것이라고 판단된다.

- 3) TG/DTA 분석 결과를 기존 연구를 토대로 검토한 결과, 100℃ 및 400℃ 부근의 흡열반응 등으로부터 내부 수분과 결합수 등의 증발이 있었음을 확인할 수 있었고, 가열 온도의 변화에 따라 수화생성물이 변화함으로써 중량이 지속적이고 단계적으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, SEM 촬영을 통해 300℃~400℃ 부근에서의 콘크리트 조직 표면의 변화 및 판상형태로의 열화 등을 확인할 수 있었고, 500℃ 이후로 부터는 고온이 될수록 미세균열의 발생 및 조직의 열화가 더욱 뚜렷해졌으며, 이는 기존의 연구 결과와 크게 다르지 않음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부가 주관하고 국토교통과학기술진흥원이 시행하는 2014년도 첨단도시개발사업 09첨단도시A01 과제에 의해 수행되었습니다.

References

1. Han, C. G., Yang, S. H., Han, M. C., and Pei, C. C., "Spalling Prevention of High Strength Concrete with 60~100 MPa of the Compressive Strength Corresponding to the Addition of Polypropylene Fiber," Journal of the Architectural Institute of Korea: Structure & Construction, Vol. 24, No. 4, 2008, pp. 91- 98.
2. Kim, G. Y., "The Present Situation for Material Performance and Development of Ultra High Strength Concrete (초고강도 콘크리트의 재료적 성능 및 개발 현황) [in Korean]," Lotte Technological Journal, No. 53, 2006, pp. 3-21.
3. Furumura, F., "Studies on the Stress-Strain Relationship in Compression of Concrete at High Temperatures (I)," Transactions of the Architectural Institute of Japan, No. 172, 1970, pp. 11-18.
4. Furumura, F., "Studies on the Stress-Strain Relationship in Compression of Concrete at High Temperatures (II)," Transactions of the Architectural Institute of Japan, No. 173, 1970, pp. 1-7.
5. Furumura, F., "Studies on the Stress-Strain Relationship in Compression of Concrete at High Temperatures (III)," Transactions of the Architectural Institute of Japan, No. 174, 1970, pp. 11-18.

6. Furumura, F., Oh, C. H., Ave, T., and Kim, W. J., "Simple Formulation for Stress-Strain Relation of Concrete at Elevated Temperature," *Journal of Structural and Construction Engineering*, AIJ, No. 384, 1988, pp. 1-14.
7. Nishida, H., Yokosuka, S., Matsudo, M., and Katayose, N., "Structure Strength and Mechanical Properties Exposed to High-Temperature of Ultra High Strength Concrete (超高強度コンクリートの構造体強度と高温加熱後の力学的性質) [in Japanese]," *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol. 26, No. 1, 2004, pp. 393-398.
8. Kim, S. S. and Kim, S. S., "Strength Properties of the Fiber Mixed High Strength Concrete at Elevated Temperature," *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol. 8, No. 5, 2008, pp. 53-58.
9. Han, M. C. and Choi, H. K., "The Effect on Mechanical Properties and Micro-structure of High Strength Concrete at Elevated Temperatures," *Journal of the Architectural Institute of Korea :Structure & Construction*, Vol. 27, No. 3, 2011, pp. 123-130.
10. Song, H. and Soh, Y. S., "Variation of Pore Structure of High Strength Concrete Including Silica Fume Exposed to High Temperature," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 16, No. 5, 2004, pp. 597-604.
11. Song, H., Mun, K. J., and Soh, Y. S., "Mechanical Properties and Pore Structure of Cement Matrix at High Temperature," *Journal of the Architectural Institute of Korea :Structure & Construction*, Vol. 20, No. 1, 2004, pp. 107-114.
12. Yun, H. D., Kim, G. Y., and Han, B. C., "Strength Properties of High-Strength Concrete Exposed at High Temperature," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 14, No. 5, 2002, pp. 698-707.
13. Kim, W. S., Kang, H. K., and Kim, W. J., "State-of-the-Art Research and Experimental Assessment on Fire-Resistance Properties of High Strength Concrete," *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 18, No. 3, 2014, pp. 28-39. (doi: <http://dx.doi.org/10.11112/jksmi.2014.18.3.028>)
14. Miyamoto, K. and Ave, T., "Mechanical Properties of High Strength Concrete at High Temperatures," *J. Struct. Constr. Eng.*, AIJ, No. 574, 2003, pp. 227-234.
15. Architectural Institute of Japan, *Guide Book for Fire-Resistive Performance of Structural Materials*, 2004. pp. 22-67.

요 약 최근의 건축 구조물이 고층화, 대형화됨에 따라 초고강도 콘크리트의 적용 및 수요가 증가하고 있는 추세이나, 화재에 대한 취약성을 가지고 있는 초고강도 콘크리트의 열적 특성에 대한 검토는 아직 충분하지 않으며 이에 대한 성능 검토 또한 요구되고 있는 실정이다. 이에 이 논문에서는 초고강도 콘크리트의 고온 재료 모델 개발에 대한 기초적 자료를 제공하기 위하여 상온에서 800℃까지의 고온 가열을 받은 100 MPa급 초고강도 콘크리트를 대상으로 가열온도의 변화에 따른 잔존압축강도, 탄성계수 및 응력-변형 성상, 반복하중 시의 응력-변형 성상 등 역학적 특성 변화를 확인하였다. 또한, TG/DTA분석과 SEM 촬영으로 콘크리트의 화학·물리적 특성을 확인하고 국내·외의 기존 연구와 비교·검토하였다. 그 결과, 가열온도 300℃에서 잔존압축강도 및 탄성계수의 급격한 저하를 확인하였으며, 반복하중 하에서는 가열온도 400℃부터 소성거동이 발생하는 것과 함께 단일하중과 거의 동일한 경향을 보임을 확인할 수 있었다. TG/DTA 분석 및 SEM 촬영을 실시한 결과와 기존 연구를 비교·검토한 결과, 콘크리트 내부 조직의 열화와 수분 증발 및 화학반응 등으로 인하여 잔존압축강도 및 탄성계수의 저하가 일어났음을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 초고강도 콘크리트, 고온 가열, 반복 하중, 응력-변형 곡선