

고온 가열에 따른 섬유혼입 고강도 콘크리트의 강도특성 변화

Strength Properties of the Fiber Mixed High Strength Concrete at Elevated Temperature

김 상 식* 김 성 수**

Kim, Sang-Shik Kim, Seong-Soo

Abstract

This study is to investigate experimentally residual strength properties of the high strength concrete containing the hybrid of nylon and polypropylene fiber at elevated temperature. Test results showed that specimens heated up to 300°C exhibited similar strength properties to the one at room temperature. This result is significantly different from previous studies, but specimens heated over 400°C showed dramatic decrease indicating similar tendency. For the residual strength properties, one at 300°C even increased 10%, which is also different from previous studies, but it significantly decreased in 400°C as widely expected. Melted pores by organic fibers in concrete specimens was observed with FE-SEM. For the density of concrete in elevated temperature, internal system in 200°C had even denser than in 20°C, but was collapsed in 400°C.

키워드 : 고강도 콘크리트, 가열온도, 나일론섬유, 폴리프로필렌섬유, 섬유혼입 콘크리트

Keywords : High Strength Concrete, Heating Temperature, Nylon Fiber(NY), Polypropylene Fiber(PP), Fiber Mixed Concrete

1. 서 론

최근 도심부의 건축물들은 토지의 효율성 문제와 관련하여 고층화함에 따라 고강도 콘크리트의 수요량이 점차 증가하고 있는 추세이다. 그러나 이와 같은 고강도 콘크리트는 보통 콘크리트와 달리 건축물 사용 시 발생할 수 있는 화재에 폭발현상이 발생할 수 있고,^{1)~8)} 또한 내부 수증기압에 의한 콘크리트의 조직 이완 등으로 잔존 탄성계수 및 압축강도율이 보통 콘크리트보다 크게 감소하는 것으로 보고되고 있다.^{9)~11)}

그러나 고강도 콘크리트의 많은 폭발방지 공법 중 유기섬유를 혼입하는 고강도 콘크리트의 경우는 고온 시 용해도가 낮은 유기섬유가 먼저 용해하면서 생긴 통로로 수증기를 배출시켜 폭발이 방지 되는데,^{12)~14)} 특히 나일론(이하 NY)섬유와 폴리프로필렌(이하 PP)섬유를 하이브리드(hybrid)한 경우는¹³⁾ 콘크리트의 내부 미세 조직에 포함되어 있는 수증기까지도 원활한 배출이 가능할 수 있으므로 기존의 고강도 콘크리트 연구에서 제시하는 강도 저하율과는 다른 양상이 나타날 것으로 사료된다.

그러므로 본 연구에서는 국내에서 사용되는 일반적인 재료

조건에 NY과 PP 섬유를 하이브리드한 80 MPa급 고강도 콘크리트에 대하여 각 온도 단계별로 공시체를 가열한 다음 자연 상태로 냉각 시킨 후 압축조건에서의 응력-변형 관계로 탄성계수 및 압축강도를 측정, 기존 연구 결과와 비교분석 함으로써 실구조물 화재 시 구조체의 보다 정확한 잔존내력 평가에 기여하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 1과 같고, 콘크리트의 배합사항은 표 2와 같다. 즉, 실험요인으로 공시체는 고성능 콘크리트 범위인 W/B 25 % 1수준에 대해, 시멘트에 대한 질량비로 플라이에서 20 %와 실리카 폼 10 %를 동시에 치환한 3성분계 결합재로 섬유의 종류 및 혼입률은 NY섬유와 PP섬유를 1:1로 혼합한 하이브리드 섬유 0.05 vol.% 혼입시켜 제작하였다. 온도 변수는 상온인 20°C 1수준과 가열온도 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 및 1000°C의 총 10수준으로 변화시켜 실험계획 하였다.

실험사항으로, 굳지않은 콘크리트에서는 슬럼프플로우, 공기량 및 단위용적질량을 측정하였고, 경화 콘크리트에서는 28일 재령에서의 압축강도와 가열온도 변화에 따른 잔존압축강

* 청주대 대학원 박사과정, (주)정일구조기술사사무소소장, 정회원

** 청주대학교 건축공학부 교수, 정회원

도를 측정하는 것으로 하였다.

표 1. 실험계획

실험요인		실험수준	
배합사항	결합재의 구성	1	OPC(70 %)+FA(2 0%)+SF(10 %)
	W/B(%)	1	25
	목표슬럼프 플로우(mm)	1	600±100
	목표공기량(%)	1	3.0±1.0
	섬유 종류 및 혼입률(%)	1	NY ¹⁾ +PP ²⁾ 섬유, 0.05
	온도(°C)	상온	1
가열 온도		10	100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000
시험사항	굳지 않은 콘크리트	<ul style="list-style-type: none"> • 슬럼프플로우 • 공기량 • 단위용적질량 	
	경화 콘크리트	<ul style="list-style-type: none"> • 압축강도(28일) • 가열시험 <ul style="list-style-type: none"> - 전기로: 공시체 내부온도 측정 (25 mm, 50 mm 위치) - 잔존탄성계수(율) - 잔존압축강도(율) 	

1) NY: 나일론 섬유
2) PP: 폴리프로필렌 섬유

표 2. 플레인 콘크리트 배합표

W/B (%)	단위수량 (kg/m ³)	S/a (%)	AE제 (%)	SP제 (%)	질량배합 (kg/m ³)				
					C	FA	SF	S	G
25	160	45	0.04	1.30	448	128	64	660	810

2.2 사용재료

본 실험에 사용한 재료로서 시멘트는 국내산 보통 포틀랜드 시멘트(이하 OPC)를 사용하였고, 그 물리적 성질은 표 3과 같다. 골재는 충북 조치원산의 부순 굵은골재 및 잔골재를 사용하였는데, 단, 잔골재의 경우는 부순 잔골재 및 강모래를 6:4의 비율로 혼합한 혼합골재로서, 그 물리적 성질은 표 4와 같다. 혼화재료로서 플라이애시는 국내 H사산, 실리카 폼은 노르웨이산, 고성능 감수제와 AE제는 국내 E사의 폴리칼본산계 및 음이온계를 각각 사용하였는데, 그 물리적 성질은 표 5~7과 같다.

또한 PP 및 NY 섬유는 국내산 S사 제품을 사용하였고, 그 물리적 성질은 표 8과 같다.

2.3 실험방법

표 3. 시멘트의 물리적 성질

밀도 (g/cm ³)	분말도 (cm ² /g)	응결시간(분)		압축강도(MPa)		
		초결	종결	3일	7일	28일
3.15	3,302	208	351	20.4	29.4	38.7

표 4. 골재의 물리적 성질

구분	밀도 (g/cm ³)	조립률	흡수율 (%)	단위용적질량 (kg/m ³)	0.08mm체 통과량(%)	
						잔골재
	부순 모래	2.60	3.26	0.46	1,684	0.32
굵은 골재	화강암	2.61	6.55	0.58	1,564	0.40

표 5. 플라이애시의 물리·화학적 성질

밀도 (g/cm ³)	분말도 (cm ² /g)	lg · loss (%)	SiO ₂ (%)	습분 (%)
2.21	4,061	3.5	51.2	0.0

표 6. 실리카 폼의 물리·화학적 성질

분말도 (cm ² /g)	밀도 (g/cm ³)	lg · loss (%)	화학 성분(%)				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
200,000	2.20	1.50	96.40	0.25	0.12	0.38	0.10

표 7. 혼화제의 물리적 성질

구분	주성분	형태	색상	밀도 (g/cm ³)
고성능 감수제	폴리카본산계	액상	암갈색	1.05
AE제	음이온계	액상	연한암갈색	1.04

표 8. 섬유의 물리적 성질

구분	길이 (mm)	직경 (mm)	밀도 (g/cm ³)	인장강도 (MPa)	용해점 (°C)
PP 섬유	19	0.040	0.91	560	160
NY 섬유	12	0.012	1.15	918	220

본 연구의 실험방법으로 콘크리트의 혼합은 강제식 팬타입 믹서를 사용하여 혼합하였고, 굳지않은 콘크리트의 실험으로 슬럼프플로우는 KS F 2594, 공기량 및 단위용적질량은 KS F 2421의 규정에 의거 실시하였다.

경화 콘크리트의 실험으로 압축강도는 φ100×200 mm 인 원주형공시체로 KS F 2405규정에 의거 실시하였다. 콘크리트 가열시험은 재령 28일에 φ100×200 mm 원주형 공시체 대해 사진 1과 같은 전기로 내에서 공시체의 중앙 중심 위

치(표면에서 50 mm) 및 중심과 표면의 중간위치(표면에서 25 mm)sp K-Type 열전대를 설치하여 온도도 측정하면서 그림 1과 같이 건축물 화재시의 온도를 고려하여 100~1000℃까지 100℃간격으로 설정하여 가열한 다음 강도시험 하였다. 이때 가열속도는 6.7℃/min.로 목표온도에 도달 한 다음 2시간 동안 가열온도를 유지한 후 자연냉각시킨 다음 탄성계수와 압축강도 측정을 위하여 응력-변형도 곡선을 사진 2와 같이 UTM에 내장된 로드셀과 LVDT를 이용하여 측정하였다.

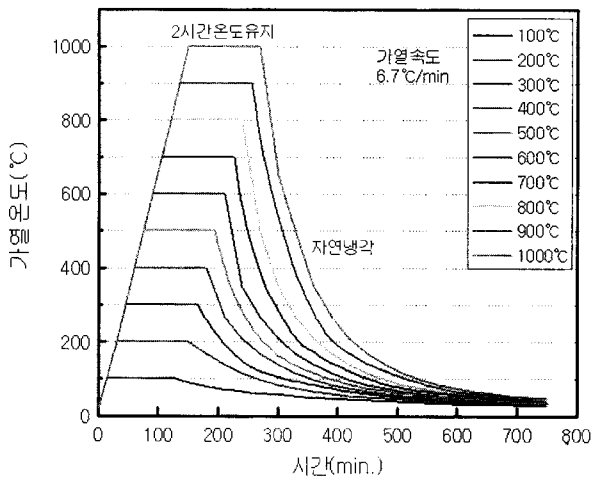


그림 1. 온도가열곡선



사진 1. 전기로를 이용한 가열시험 모습



사진 2. LVDT를 이용한 응력-변형도 측정 모습

3. 실험결과 및 분석

3.1 콘크리트의 기초적 특성

표 9는 콘크리트의 기초적 특성의 실험결과를 나타낸 것이다. 먼저 유동특성으로, 플레인 콘크리트는 목표 슬럼프플로우 600±100 mm를 만족하는 것으로 나타났고, 공기량은 목표 공기량인 3.0±1.0 %의 범위를 만족하였다.

정화 콘크리트의 특성으로 압축강도는 재령 28일에 3개 시험체 평균으로 89.9 MPa를 나타내었다.

표 9. 콘크리트의 기초적 특성

섬유 혼입률 (%)	슬럼프 플로우 (mm)	공기량 (%)	단위용적 질량 (kg/m ³)	압축강도(MPa)			
				1	2	3	평균
NY+PP (0.05)	585	2.8	2,387	88.7	91.3	89.7	89.9

3.2 고온 가열시 온도 이력

그림 2는 고온 가열시간에 따른 시험체 내부의 온도분포를 200℃의 배수에 대하여만 나타낸 그래프이다. 먼저, 공시체 내부 온도 측정위치로서 중심인 표면에서 50 mm되는 부분 및 중심과 표면의 중간 지점인 표면에서 25 mm부분의 온도 차이는 실험결과 거의 차이가 없는 것으로 나타났고, 2시간 동안 가열을 지속한 후에는 시험체 중심까지 모두 목표온도에 이르는 것으로 측정되었다. 이에 따라 각 가열온도에서 시험체는 그 중심까지 모두 목표한 온도로 열화를 받는 것으로 판단하여 역학적 특성 실험을 진행하였다.

3.3 고온 가열시 응력-변형도 곡선

그림 3은 가열온도 변화에 따른 콘크리트의 응력-변형도 곡선을 나타낸 그래프이다. 100~300℃까지 가열한 시험체는 20℃상온에서 양생한 시험체와 유사한 응력-변형도 곡선을 나타냈고, 최고 응력도는 오히려 20℃의 경우보다 약 8~10 % 높게 나타났다.

400℃이상의 경우에는 열화로 인해 급격한 강도 저하와 동시에 변형도 또한 크게 나타났다. 표 10 및 그림 4는 가열온도 변화에 따른 탄성계수와 잔존탄성계수율을 나타낸 것으로 20~300℃까지는 40 GPa이상의 고탄성계수를 나타냈으나, 400℃일 때는 30 GPa, 500℃일때는 25 GPa로 급격한 저하를 나타냈다.

그림 5는 기존연구와의 탄성계수를 비교한 그래프으로써, 본 연구의 경우는 NY+PP 하이브리드 섬유에 의한 수증기 배출로 폭발은 방지되면서, 오토클레이브 양생과 같은 고온조

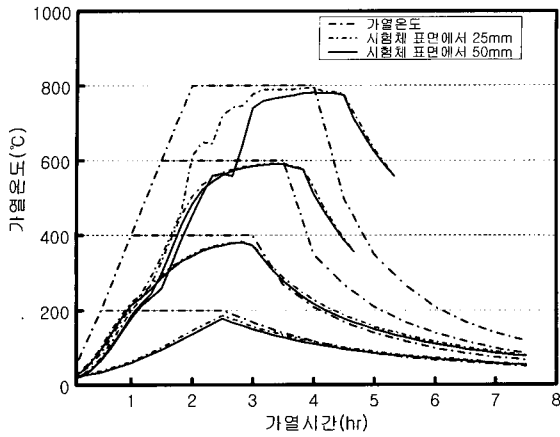


그림 2. 가열시간에 따른 시험체 내부의 온도분포

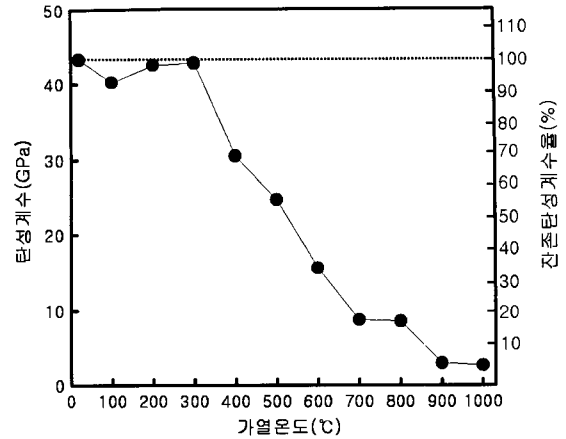


그림 4. 가열온도 변화에 따른 콘크리트의 탄성계수 및 잔존탄성계수율

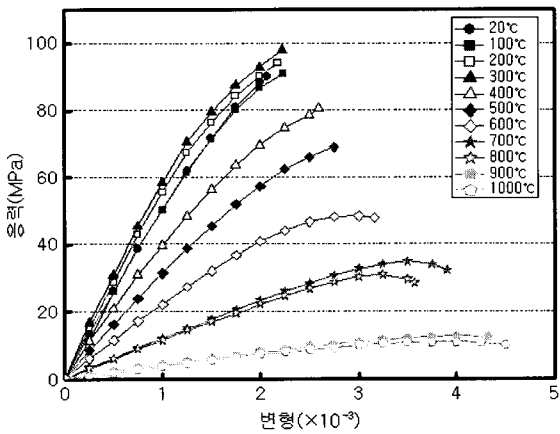


그림 3. 가열온도 변화에 따른 콘크리트의 응력-변형도

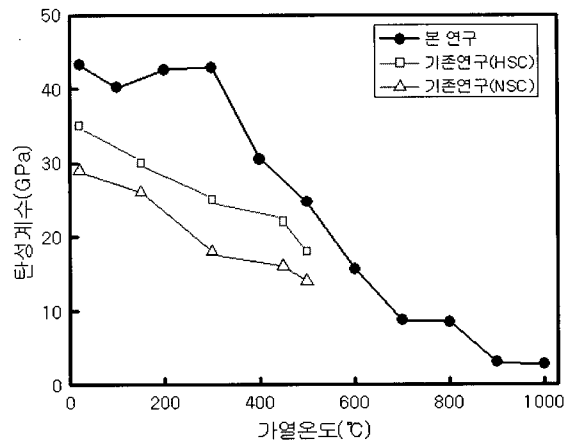


그림 5. 기존 연구와의 탄성계수 비교⁶⁾

표 10. 온도변화에 따른 탄성계수

가열온도 (°C)	탄성계수 (GPa)	가열온도 (°C)	탄성계수 (GPa)
20	43.3	600	15.6
100	40.2	700	8.7
200	42.6	800	8.5
300	42.9	900	3.0
400	30.5	1000	2.7
500	24.7		

건에서 미수화 결합재가 수화반응을 일으켜 조직 치밀화에 의한 강도증진으로 인해 200, 300°C에서의 탄성계수 차이가 매우 크게 나타났고, 그 이상의 가열온도에서는 공통적으로

탄성계수가 급격히 저하하는 것으로 분석된다.

3.4 고온 가열시 압축강도특성

그림 6은 가열온도 변화에 따른 압축강도 및 잔존압축강도를 나타낸 그래프이다. 먼저, 20°C에서 양생한 공시체의 강도는 89.9 MPa에 비하여, 가열온도 300°C까지는 점차 증가하여 약 100 MPa로 상온 강도의 110% 정도 발현되었다. 그러나 가열온도 400°C 이상에서는 압축강도가 급격히 저하하였는데, 600°C에 이르러서는 약 50%의 잔존압축강도율을 나타냈고, 1000°C에 이르러서는 약 10 MPa로 10% 정도 밖에 발휘되지 않는 낮은 강도 특성을 나타내어 고온에 노출된 콘크리트의 경우 강도 저하가 심각한 것을 알 수 있었다.

그림 7은 일본의 大林組기술연구소에서 고온가열 후 고강도 콘크리트의 역학적 성질에 미치는 골재의 영향에 대해 연구한 결과로서,⁷⁾ 온도변화에 따른 잔존강도 및 잔존압축강도율을 나타낸 그래프이다. 이 연구에서는 골재의 종류 조합 변화에 따른 특성에 대해 검토하였는데, 육사, 경질사암 및 석회암 등의 순으로 잔존강도를 발현하고 있고, 그래프 내에 검정 원이 본 실험의 결과로써 육사나 경질사암을 사용한 경

우와 거의 유사한 결과를 나타내고 있다.

사진 3~7은 20~800℃까지 가열온도가 200℃씩 변화함에 따른 FE-SEM촬영을 실시한 사진으로 각각 좌측은 50배, 우측은 3000배를 나타낸 것이다.

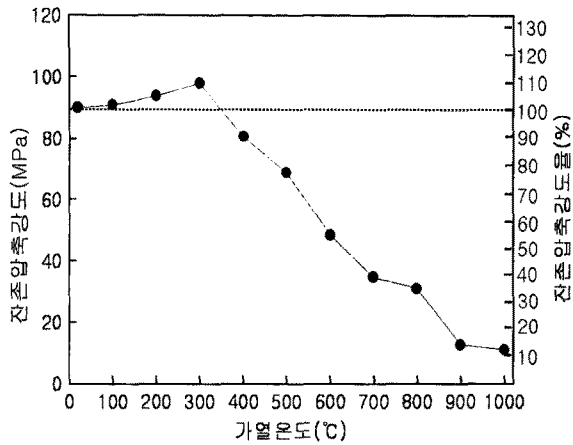
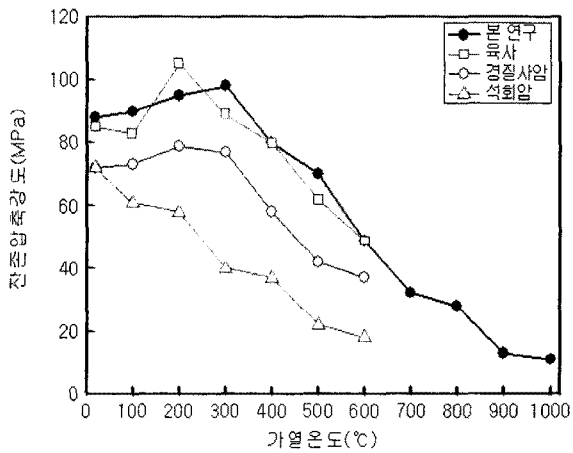
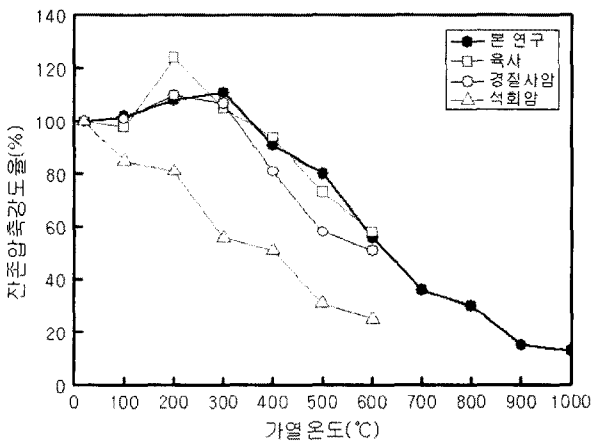


그림 6. 가열온도 변화에 따른 콘크리트의 잔존압축강도 및 잔존압축강도율



a) 잔존압축강도



b) 잔존압축강도율

그림 7. 기존연구와 잔존압축강도(율) 비교⁷⁾

먼저, 50배로 촬영하였을 때에는 400℃로 가열한 시편까지 크게 구별되는 것이 없다가 600℃의 경우 약간의 균열이

보이고 800℃에 이르러서는 눈에 띄는 큰 균열을 확인할 수 있었다. 3000배로 확대한 경우 좀 더 자세한 관찰을 할 수 있었는데, 먼저 200℃의 경우는 20℃와 비교하여 거의 유사하거나, 보다 밀실한 것 같은 모습을 나타내었고, 400℃의 경우는 판상으로 갈라지는 것을 볼 수 있었으며, 600℃에서 침상으로 분해된 결정질들이 보이다가 800℃에 이르러서는 침상과 동시에 그 보다 더 작은 가루가 눈에 띄었다. 이는 고온으로 인해 내부 조직이 파괴현상을 일으켜 강도가 크게 저하된 것으로 분석된다.

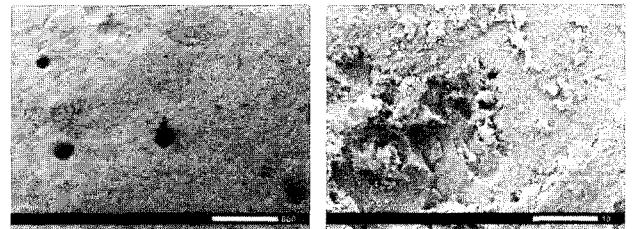


사진 3. 상온(20℃) 시편의 FE-SEM촬영

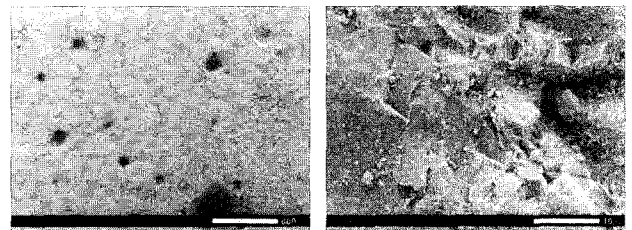


사진 4. 가열온도 200℃ 시편의 FE-SEM촬영



사진 5. 가열온도 400℃ 시편의 FE-SEM촬영

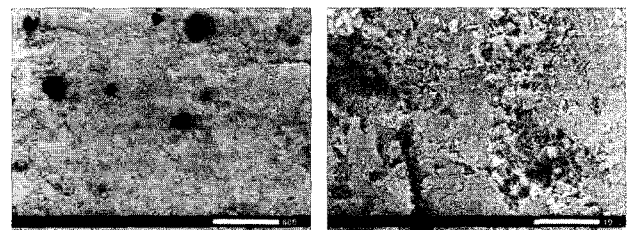


사진 6. 가열온도 600℃시편의 FE-SEM촬영

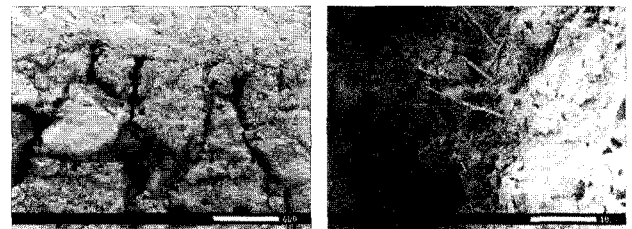


사진 7. 가열온도 800℃시편의 FE-SEM촬영

4. 결 론

본 연구에서는 하이브리드 섬유(NY+PP) 혼입에 의해 폭열이 방지된 고강도 콘크리트의 고온 가열에 따른 역학적 특성 변화에 대해 분석 하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 고온가열 시험 후 탄성계수는 300℃까지는 20℃ 상온 조건과 거의 차이가 없게 나타나 기존 연구자와 큰 차이를 나타내었고, 400℃이상은 급격히 저하하여 기존의 연구와 유사한 경향을 나타내었다.
- 2) 고온 가열 시험 후 잔존압축강도는 300℃의 경우 오히려 10%정도 증가하였고, 400℃이상은 급격히 저하하여 기존 연구지와 유사한 경향이였다.
- 3) FE-SEM사진 촬영을 실시한 결과 강도가 증가하는 200℃인 경우에는 20℃에 비해 내부 조직이 변함없이 치밀한 것으로 나타났으나, 400℃이상에서는 고온으로 인해 조직이 파괴되어가는 것을 관찰할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 김현정, 최은규, 신영수, 이차돈, 권영진; 폴리프로필렌 섬유를 혼입한 고강도 RC 및 SRC 압축부재의 온도분포, 대한건축학회 학술발표대회논문집, 제26권, 제1호, 2006
2. 박찬규, 고온에서의 콘크리트 열적 특성의 변화, 콘크리트 학회지, 18권 6호, 2006
3. 장기현, 배장춘, 김호림, 지석원, 양성환, 한천구; 나일론 및 폴리프로필렌섬유 복합혼입에 따른 고강도 콘크리트의 폭열특성, 한국구조물진단학회 학술발표논문집, 제11권 1호, 2007
4. 콘크리트 연구단, 인명보호를 위한 내화성 고성능 콘크리트의 개발 및 실용화(1-10), 2007년 연차실적보고서, 2007
5. 화재와 콘크리트, 콘크리트학회지 특집기사, Vol. 14, No. 2, 2002
6. 황인성, 화재 시 고성능 콘크리트의 폭열에 미치는 재료 및 배합요인의 영향, 청주대학교 석사학위논문, 1999.12
7. C.G. Han, Y.S. Hwang, S.H Yang, N. Gowripalan, Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement, Cement and Concrete Research, 35, 2005, pp.1747~1753
8. Gai-Fei Peng, Wen-Wu Yang, Jie Zhao, Ye-Feng Liu, Song-Hua Bian, Li-Hong Zhao; Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures,

Cement & Concrete Research 36, 2006, pp.723~727

9. Gary R. Consolazio, Michael C. McVay, Jeff W. Rish III, Measurement and prediction of pore pressures in saturated cement mortar subjected to radiant heating, ACI Materials Journal, Vol. 95, 1998, pp.525~536
10. Long T. Phan, High performance concrete at high temperature an overview, NIST report, 2002
11. NIST, Fire Performance of High-Strength Concrete: A Report of the State-of-the-Art, NIST, Dec., 1996
12. Pierre Kalifa, Gregoire Chene, Christophe Galle, High temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres from spalling to microstructure, Cement and Concrete Research 31, 2001, pp.1487~1499
13. 一漱賢一, 川口徹, 長尾覺博 ; 高温加熱後の高強度コンクリートの力學的性質におよぼす骨材の影響, 日本建築學會大會學術講演梗概集, 2002. 8
14. 韓千求, 李建哲, 韓敏喆, 許榮善; 有機纖維を調査使用した高強度コンクリートの爆裂防止, 日本コンクリート工學協會, vol. 29, No. 2, 2007

(접수 2008. 7. 1, 심사 2008. 7. 30, 게재확정 2008. 8. 6)