골재 및 섬유에 따른 초고강도 콘크리트의 내화성능평가

Evaluation on Fire Resistance of Ultra-High-Strength Concrete Depending on Aggregates and Fibers Types

이주하*

Lee, Joo Ha

Abstract

In this study, in order to evaluate the fire resistance of ultra-high-strength concrete (UHSC), short columns made of various experimental variables were tested with a standard heating curve of KS F 2257-1 for 3 hours. Especially, the effects of fibers and aggregates on fire resistance of UHSC were studied. The main parameters were the length of the polypropylene fibers, the fiber content ratios of polypropylene, nylon and steel, and aggregate types of conventional natural and electric arc furnace oxidising slag aggregates. The fire resistance performance was evaluated by comprehensively considering the weight loss, the spalling depth and the spalling area. In addition the residual compressive strength, carbonation depth, and microstructure were investigated after fire testing. As a result, hybrid fiber reinforcement of polypropylene, nylon and steel fibers enhanced the fire resistance performance of UHSC.

Key words : Ultra-high-strength concrete, Fire resistance, PP fiber, Nylon fiber, Steel fiber

요 지

본 연구에서는 초고강도 콘크리트의 내화성능을 평가하기 위해서 다양한 실험 변수로 제작된 단주 부재를 KS F 2257-1 표준가열곡선에 따라 3시간 내화실험을 수행하였다. 특히, 섬유와 골재가 초고강도 콘크리트의 내화특성에 미치는 영향을 파악하였다. 주요 실험 변수로는 폴리프로필렌 섬유의 길이와 함유량, 나일론 섬유의 함유량, 강섬유 함유량, 그리고 일반 골재와 전기로산화슬래그 골재 등을 설정하였다. 질량손실률, 폭렬 깊이, 폭렬 면적 등을 종합적으로 고려해 내화성능을 평가하였으며, 이에 더하여 잔존압축강도, 중성화, 미세구조 등을 분석하였다. 실험 결과, 초고강도 콘크리트의 내화성능 확보를 위해서는 폴리프로필렌 섬유, 나일론 섬유, 강섬유를 하이브리드 보강하는 것이 유리한 것으로 확인되었다.

핵심용어 : 초고강도 콘크리트, 내화성능, 폴리프로필렌 섬유, 나일론 섬유, 강섬유

1. 서 론

일반적으로 콘크리트는 열에 강한 내화재료로 알려져 있다. 하지만 콘크리트가 고강도화 할수록 조직이 치밀해져 고온을 받으면 내부의 수증기가 외부로 빠져나오지 못하고 수증기압이 콘크리트의 인장강도 보다 크게 작용할 경우 폭렬현상이 일어날 위험이 있다. 특히 콘크리트의 폭렬은 그 자체도 매우 취약적일 뿐만 아니라 콘크리트 내부의 철근이 고온에 직접 노출됨에 따라 구조시스템 전체가 급작스런 붕괴로 이어질 수 있다는 데에 그 위험의 심각성이 있다고 할 수 있다. 이에 많은 연구자들이 고강도 콘크리트 부재가 화재 상황과 같은 급작스런 고온에 노출될 경우에 대한 부재의 거동 및 내화성능 향상 방안 등에 대해 연구를 수행해왔다. 그 결과

경제성과 시공성 등을 고려할 때 가장 널리 쓰이는 방법으로는 콘크리트 배합시 폴리프로필렌(Polypropylene, PP) 섬유를 혼입하는 것으로, 이는 화재시 섬유가 녹아서 수증기 배출 통로를 형성시키는 원리를 이용한 것이다(Ali *et al.*, 2001; Han *et al.*, 2005; Kalifa *et al.*, 2001). 하지만 대부분의 연구는 100~120 MPa 이하의 고강도 콘크리트를 대상으로 하고 있으며, 120 MPa 이상 초고강도 콘크리트의 내화성능에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다(Ali and Nadjai 2008; Ali *et al.*, 2001; Han *et al.*, 2005; Kalifa *et al.*, 2000, 2001; Kodur *et al.*, 2003; Sanjayan and Stocks 1993). 특히 초고강도 콘크리트의 경우 고강도 콘크리트에 비해 조직이 훨씬 더 치밀함에 따라 기존의 방법으로는 내화성능을 확보하는데 무리가 있다. 최근 들어 구조물의 대형화,

*교신저자. 정회원. 수원대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-31-220-2159, Fax: +82-31-220-2522, E-mail: leejooha@suwon.ac.kr)
Corresponding Author: Member, Professor, Department of Civil Engineering, The University of Suwon

초고충화 추세가 뚜렷해짐에 따라 초고강도 콘크리트 기술의 필요성이 점차 증대되고 있다. 따라서 초고강도 콘크리트의 개발 및 실용화를 위해서는 제조 및 시공기술과 함께 내화성능 확보를 위한 기술 개발이 절실하다.

이에 본 연구에서는 120 MPa 이상의 초고강도 콘크리트를 대상으로 섬유혼입 및 사용골재의 종류에 따른 내화성능을 평가하고 최적의 내화보강 방안을 찾고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 시험체 제작

본 실험에서 사용된 실험 변수 및 콘크리트 배합표를 Table 1 및 Table 2에 나타내었다. 골재는 세척사와 쇄석을 사용한 일반골재배합과 전기로산화슬래그 잔골재와 굵은골재를 사용한 슬래그 골재배합을 비교하였으며, 섬유는 PP, Nylon의 유기섬유와 강섬유를 각각 다양한 혼입률로 비교하였다.

기존 연구(박찬규 외, 2006)에 의하면 설계강도 120 MPa 콘크리트에 PP섬유 0.35 Vol.%를 혼입하여 내화성능 확보가 가능하였다. 따라서 본 실험에서는 좀 더 높은 강도 수준의 초고강도 콘크리트 내화성능 확보를 위해 PP섬유의 최소혼입률을 0.38Vol.%로 설정한 후 각 섬유별 다양한 섬유혼입률에 대한 영향을 평가하였다. 또한, 기존 연구(박찬규 외, 2006; 원종필 외, 2006)에 따르면, PP섬유의 길이가 증가함에 따라 고강도 콘크리트의 내화성능도 비례하는 것으로 보고되고 있는데 일반적으로 PP섬유의 길이는 10~20 mm 수준에서 사용되고 있다. 본 실험에서는 사전 실내배합 실험결과 20 mm를 초과하는 PP섬유의 혼입시 초고강도 콘크리트의 매우 낮은 물결합재비로 인해 타설이 힘들 정도로 유동성이 급격히 떨어지는 현상이 관찰되어 PP섬유 최대길이를 19 mm 선택하였으며 이를 10 mm 초반의 상용 PP섬유길이 12 mm

Table 1. Test Variables

Variable		Description
Aggregate type		Conventional natural aggregate (washed sand, crushed stone), EAF oxidising slag aggregate
Length of PP fiber		12 mm, 19 mm
Fiber content	PP	0.38, 0.44, 0.50, 0.60 (vol.%)
	Nylon	0.10, 0.20 (vol.%)
	Steel	0.50, 0.75, 1.00 (vol.%)

Table 2. Mix Proportions

Mix Proportions		Natural Agg. Mix	Slag Agg. Mix
W/B (%)		11.0	
S/a (%)		27.8	
Unit weight (kg/m ³)	W	130	
	B	1181	
	S or SS	333	456
	G or SG	865	1185

Table 3. Properties of Fibers

Fiber	PP	Nylon	Steel
Density	0.91	1.15	7.8
Melting point (°C)	160	225	1380
Diameter (μm)	40	23	550
Length (mm)	12, 19	12	25
Shape	O	O	Crooked

Table 4. Parameters of Test Specimens

No.	Specimen ID	No.	Specimen ID
1	C2-38-50	12	C2-38-50-N1
2	C2-38-50	13	C2-38-50-N2
3	C2-44-50	14	S2-38-50
4	C2-50-50	15	S2-38-50-N1
5	C2-50-50	16	C2-38-100
6	C2-60-50	17	S9-50-50
7	C9-50-50	18	S9-50-50
8	C9-50-50	19	S2-50-50
9	C9-38-50	20	S2-50-50
10	C9-38-50	21	S9-50-75
11	S9-38-50	22	C9-50-75

※ C¹⁾2²⁾-38³⁾-50⁴⁾-N1⁵⁾

¹⁾Agg. type: C=Conventional natural, S=EAF oxidising slag

²⁾Length of PP fiber: 2=12 mm, 9=19 mm

³⁾PP fiber content: 38=0.38%, 44=0.44%, 50=0.50%, 60=0.60%

⁴⁾Steel fiber content: 50=0.50%, 75=0.75%, 100=1.00%

⁵⁾Nylon fiber content: N1=0.10%, N2=0.20%

와 비교하고자 하였다. 각 섬유 종류별 특성을 Table 3에 나타내었다. 위의 각 실험 변수들을 조합하여 각 변수 조합당 1~2개의 시험체를 제작하여 총 22개의 소형 무근 콘크리트 부재(300×300×450 mm)를 제작하였다. Table 4에 각 부재별 사용된 섬유와 골재에 대한 시험체명을 나타내었다(Table 4의 각주 참조). 부재는 타설 후 거꾸집을 비닐 밀봉하여 항온습실에서 탈형 전까지 양생하였다. 거꾸집 탈형 후 증기양생챔버에 넣고 증기 양생을 실시하였다. 증기양생은 최초 6시간 동안 80°C까지 서서히 온도를 올리는 승온과정, 80°C로 108시간 동안 지속하는 유지과정, 그리고 다시 6시간 동안 상온으로 온도를 하강시키는 강온과정으로 진행되었다. 증기양생 종료 후에는 내화시험일까지 기건양생을 실시하였다.

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (1)$$

where, T : furnace temperature (°C), t : time (min.)

2.2 내화시험 방법

내화시험을 실시하기 전에 측정기를 통하여 표면습수율을 측정하고 사전에 제작한 공시체를 통해 압축강도를 측정하였다. 내화시험은 수평가열로에서 실시하였다. 수평가열로 하부에 ALC패널을 이용하여 시험체 중앙이 화구의 높이에 맞도록 설치하였다. 내화시험은 Fig. 1과 Eq. (1)의 KS F 2257-1 표준가열온도곡선을 따라 3시간까지 가열하였다. 또한 열전대를 이용하여 시험체의 내부온도를 측정하였다.

Fig. 1. Standard Heating Curve

2.3 내화특성 평가방법

내화시험 후 육안으로 폭렬상태를 관찰하여 등급을 매겼으며, 폭렬깊이를 측정하여 최대 및 평균 폭렬 깊이를 구하였다. 질량손실을 측정하기 위하여 내화시험 전후 각 시험체의 중량을 측정하였으며, 압축강도 비교를 위해 내화시험 후 코어채취를 하여 잔존압축강도를 측정하였다. 또한 콘크리트의 중성화 측정을 위하여 1% 페놀프탈레인 알코올용액을 채취한 코어의 절단면에 분무하는 방법으로 평균적인 중성화 깊이를 구하였다. 그리고 내화시험 전후의 시편을 채취하여 SEM(ScanningElectronMicroscope, 주사 전자 현미경)촬영을 통해 미세구조분석을 실시하고 Porosimeter를 이용해 수은압입법으로 미세공극구조 분석을 실시하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 압축강도

내화시험 전 압축강도 및 내화시험 후 잔존압축강도를

Table 5에 정리하였다. 내화시험전에 측정된 부재별 압축강도를 살펴보면, 슬래그골재를 사용할 경우 밀실한 구조의 형상으로 일반골재를 사용한 경우보다 강도 증가효과를 보이고 있다. 그러나 그 증가폭은 배합별로 불규칙적인 차이를 나타내고 있어 정량적인 경향을 도출하기에는 다소 무리가 있다. 또한 기존 연구(이범식 외, 2011)와도 유사한 결과로써, 섬유조합에 따른 압축강도 특성의 경우 큰 차이가 없는 것으로 판단된다.

내화시험 후 부재의 코어 압축강도는 전반적으로 고온에 의한 팽창압 및 내부균열 등의 영향으로 크게 저하하였다. Table 5에는 폭렬, 내부균열 등으로 부재 손상이 크거나 코어링 과정 중에 공시체에 손상이 발생한 경우 등을 제외하고 잔존압축강도 측정이 가능한 일부 시편에 대해 측정된 결과를 나타내었다. 섬유혼입물 및 종류 등과 같은 실험변수에 따른 특별한 경향이 나타나진 않았으며, 폭렬의 정도에 따른 잔존압축강도의 차이도 뚜렷하지 않았다. 타 연구자들에 의해서도 이와 유사한 실험결과가 보고된 바 있다(Hoff *et al.*, 2000; Pliya *et al.*, 2011). 내화시험 후 압축강도의 평균 잔존율은 47.9%로써 향후 폭렬방지 뿐만 아니라 잔존 내력을 향상시킬 수 있는 방안이 요구 될 것으로 판단된다.

3.2 폭렬특성

각 부재의 내화성능을 정량적으로 평가하고자 내화시험 후 질량손실률, 폭렬깊이, 폭렬면적 등을 측정하였다. Table 6에 부재별 폭렬특성을 정리하였으며 Fig. 2 및 각주에 결과를 바탕으로 직관적인 비교판단이 가능하도록 관찰등급 기준에 따른 부재별 등급을 정의하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 질량손실률, 최대폭렬깊이 그리고 폭렬 면적률의 상호관계를 나타내었다.

Table 5. Compressive Strength

No.	Specimen	Age at fire test (Day)	Before fire test (MPa)	After fire test (MPa)	Residual ratio (%)
1	C2-38-50	35	129.1	-	-
2	C2-38-50	35	135.2	-	-
3	C2-44-50	35	129.1	-	-
4	C2-50-50	35	144.4	-	-
5	C2-50-50	35	121.2	49.5	40.8
6	C2-60-50	35	124.0	64.4	51.9
7	C9-50-50	29	121.9	-	-
8	C9-50-50	29	117.3	-	-
9	C9-38-50	18	152.3	-	-
10	C9-38-50	18	129.1	-	-
11	S9-38-50	29	177.6	-	-
12	C2-38-50-N1	29	146.9	-	-
13	C2-38-50-N2	23	143.2	-	-
14	S2-38-50	23	188.3	84.6	44.9
15	S2-38-50-N1	23	158.2	87.1	55.1
16	C2-38-100	23	148.6	-	-
17	S9-50-50	23	165.7	93.7	56.5
18	S9-50-50	23	175.6	80.3	45.7
19	S2-50-50	19	177.2	-	-
20	S2-50-50	19	167.6	71.1	42.4
21	S9-50-75	19	176.9	-	-
22	C9-50-75	19	153.4	69.8	45.5

Table 6. Test Results

No.	Specimen	Surface moisture content (%)	Weight loss ratio (%)	Max. spalling depth (mm)	Spalling area ratio (%)	Grade
1	C2-38-50	5.3	10.0	4.1	1.9	1
2	C2-38-50	4.7	9.5	6.1	19.4	2
3	C2-44-50	4.7	11.2	30.9	54.7	3
4	C2-50-50	5.2	8.3	10.0	18.6	2
5		5.0	8.8	0.0	0.0	1
6	C2-60-50	4.3	9.2	2.0	2.4	1
7	C9-50-50	4.7	8.9	0.0	0.0	1
8		5.0	9.9	5.3	18.8	2
9	C9-38-50	5.7	9.0	4.1	6.2	2
10		6.0	8.4	4.4	22.2	2
11	S9-38-50	5.1	17.2	24.4	57.6	4
12	C2-38-50-N1	5.7	9.4	0.0	0.0	1
13	C2-38-50-N2	5.3	9.6	0.0	0.0	1
14	S2-38-50	5.5	25.6	75.6	92.0	4
15	S2-38-50-N1	5.6	8.1	10.4	22.4	2
16	C2-38-100	4.5	5.5	4.0	2.8	1
17	S9-50-50	4.7	13.7	15.7	39.6	3
18		5.0	13.1	21.0	52.3	3
19	S2-50-50	5.0	16.8	39.7	54.6	4
20		4.8	16.0	22.3	58.6	4
21	S9-50-75	5.0	13.7	15.0	63.3	4
22	C9-50-75	5.2	9.0	25.8	39.0	3

(a) Grade 1 (b) Grade 2 (c) Grade 3 (d) Grade 4

※ Grade 1 : No spalling or concrete surface peeling
 Grade 2 : Minor spalling less than 10 mm
 Grade 3 : Moderate spalling on certain areas
 Grade 4 : Severe spalling or complete failure

Fig. 2. Fire Resistance Grade Criteria

Fig. 3. Spalling Area vs Weight Loss Ratio

Fig. 4. Spalling Area vs max. Spalling Depth

그래프에서 보듯이 각 지표들은 상호비례관계에 있으며, 값이 작을수록 내화성능이 우수함을 나타내고 있다.

3.2.1 골재 종류에 따른 폭발특성

Fig. 5는 골재 종류에 따른 부재별 내화특성을 비교하였다. 일반골재 사용부재의 육안관찰 등급은 대부분 1등급 또는 2등급으로 우수한결과를 얻은 반면, 슬래그 골재를 사용한 경우는 주로 3등급 또는 4등급을 보여 내화성능이 저하하였다. 앞서 언급한 바와 같이, 동일한 섬유혼입 조건에서 슬래그 골재를 사용한 부재는 일반골재를 사용한 경우에 비해 높은 압축강도가 나타났다. 즉, 콘크리트 내부 조직이 더 치밀해져 부재 내부의 증기압이 빠져나오지 못하여 폭발이 더 심하게 발생한 것으로 판단된다. 따라서 단순히 슬래그 골재의 사용

Fig. 5. Effect of Aggregate Type

이 내화성능의 저하를 일으키는 것으로 판단하기에는 무리가 있으며, 동일한 압축강도 하에서 슬래그 골재 및 일반골재 시편의 비교가 필요하다.

3.2.2 섬유 종류 및 혼입률에 따른 폭발특성

PP섬유 혼입률이 폭발특성에 미치는 영향을 살펴보면, 압축강도 150 MPa 이하의 부재에서는 PP섬유 혼입률 0.38%로 대부분 폭발 제어가 가능했던 반면에, 150 MPa 이상의 경우 0.50%까지 증가시켜도 폭발이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 일반적으로 PP섬유 혼입률의 증가는 폭발 제어에 긍정적으로 작용한다는 기존의 연구 결과들은 일반강도 혹은 고강도 영역의 콘크리트에 대한 실험 결과였다(Ali and Nadjai 2008; Buchanan 2001; Han *et al.*, 2005; Kalifa *et al.*, 2001; Kodur and Raut 2008). 하지만 본 실험 결과를 바탕으로 볼 때, 초고강도 콘크리트의 경우 단순히 PP섬유 혼입률만을 증가시켜서는 충분한 내화성능을 확보하기 어려운 것으로 보인다. 그 이유 중 하나로 생각할 수 있는 것은, 열전달 통로의 증가를 들 수 있다. 다시 말해, PP섬유는 부재가 고온에 노출시 녹아 내부 증기의 배출 통로 역할을 하게 되는데, 이 때 PP섬유가 과다하게 혼입될 경우 필요한 증기 배출 통로보다도 더 많은 공간이 발생하여 오히려 열전달 경로로 작용하여 외부의 열이 부재 내부로 더 쉽게 침투하는 현상이 발생한다. 다른 측면에서 보면, PP섬유만으로 내화성능 확보가 가능한 콘크리트 강도와 그 PP섬유 혼입률에는 임계치가 있을 것으로 판단된다. 하지만 앞서 언급한 바와 같이 본 실험에서 150 MPa 이상의 부재 대부분은 슬래그 골재가 적용된 것으로(9, 22번 제외), 강도 보다는 골재의 영향으로 폭발현상이 발생했을 가능성을 배제할 수 없다.

다만 본 연구에서는 내화실험 후 부재내부 육안관찰 및 SEM을 통한 미세구조분석 결과, 골재의 용융이나 골재계면의 특이점은 발견하지 못했다. 따라서 이를 정확히 규명하기 위한 추가 연구가 필요하다.

강섬유의 혼입이 내화성능을 향상시킨다는 보고는 많이 이루어져 있다(Ali F and Nadjai A 2008). 하지만 본 연구결과에 따르면, 강섬유 혼입률을 0.5%에서 0.75% 또는 1.0%로 증가시켰을 때 폭발제어효과가 거의 없었다. 육안관찰등급은 동일하거나 오히려 떨어지는 경우도 있었으며, 최대폭렬깊이는 약간 줄어들었으나 미미한 수준이었다. 이는 강섬유 혼

(a)S2-38-50 (b)S2-38-50-N1

Fig. 6 Beneficial Effect of Nylon Fibers

입률이 과다할 경우 유동성 저하로 인한 시공성 문제와 함께 강섬유의 높은 열전도율로 인한 부재내부로의 열전달이 내화성능을 감소시킬 가능성이 있기 때문으로 보인다. 따라서 강섬유의 혼입률은 0.5% 수준이 적절하다고 판단된다.

Nylon섬유를 PP섬유 및 강섬유와 동시에 사용할 경우 모든 시편에서 우수한 내화성능을 발휘했다. 12, 13번 시험체의 경우 1, 2번 시험체와 동일한 배합(C2-38-50)으로 폭발 등급은 유사하나, 더 높은 콘크리트 강도를 가졌음에도 폭발 깊이, 폭발 면적 등을 종합적으로 볼 때 폭발이 완전히 제어된 것을 관찰할 수 있었다. Fig. 6에는 S2-38-50부재의 Nylon섬유 혼입 유무에 따른 폭발특성을 나타내고 있다. 일반골재를 사용한 부재에서는 Nylon섬유 사용시 폭발이 전혀 발생하지 않았으며, 슬래그 골재를 사용한 부재의 경우 얇은 폭발깊이로 육안관찰등급이 2단계 상승되었다. Nylon섬유의 경우 PP섬유에 비해 용융점이 다소 높으며(Nylon섬유: 225°C, PP섬유: 160°C), 사용된 섬유의 직경은 Nylon섬유가 23 μ m으로 PP섬유 40 μ m 보다 작다. 따라서 PP섬유가 먼저 녹으면서 상대적으로 큰 통로를 만들어 1차로 증기를 배출하고, 이어서 Nylon섬유가 녹으면서 생기는 작은 통로는 PP섬유의 큰 통로와 연결되거나 그 자체로 증기 배출 통로가 되어 2차 증기 배출이 일어나는 것으로 판단된다. 하지만 Nylon섬유 0.1%와 0.2%를 혼입한 두 시편 모두 폭발이 완벽하게 제어되면서 Nylon섬유의 혼입률 정도에 따른 내화성능의 차이는 관찰할 수 없었다. 또한 비교 시험체 간의 강도가 상이하여 Nylon 섬유만의 효과를 관찰하기에는 다소 어려운 점이 있다.

3.2.3 섬유 길이에 대한 분석

타 연구자의 실험결과(박찬규 외, 2006)에 의하면 섬유길이의 증가는 내화성능에 긍정적인 영향 나타낸다고 언급하고 있다. 하지만 본 연구의 실험결과, 초고강도 콘크리트 부재에서 PP섬유 길이에 대한 영향은 뚜렷하지 않았다. Fig. 7에서 보는 바와 같이, 질량손실률이나 폭발깊이, 육안관찰등급에서 12 mm와 19 mm PP섬유 간의 차이는 유의할만한 수준은 아니었다. 콘크리트가 초고강도화 할수록 섬유길이가 내화성능에 미치는 영향은 미미한 것으로 보이며, 오히려 유동성 측

Fig. 7. Effect of PP Fiber Length

면을 고려할 때 12 mm의 PP섬유를 사용하는 것이 더 유리할 것으로 판단된다.

3.3 중성화 특성

Fig. 8에는 내화시험 후 부재에서 채취한 코어 시편을 대상으로 측정된 중성화 깊이와 육안관찰등급 관계를 나타내고 있다. 내화시험 후 부재의 중성화는 약 550°C 이상의 고온에 따른 수산화칼슘의 분해에 의한 것으로(Georgali and Tsakiridis 2005), 폭렬의 정도와 관계없이 대부분 10~16 mm의 중성화 깊이를 나타냈다. 이는 부재가 고온을 차단하지 못하고, 모든 부재에서 동일조건 하에 화열을 받은 것으로 판단된다. 콘크리트 표면부의 색은 연한 분홍색을 띤 살구색으로 변하였다. 변색 깊이 역시 폭렬 정도에 상관없이 대부분 피복에서 약 4.5~5.5 mm까지 변색이 진행되었으며, 6 mm 부근을 경계로 다소 연한 회색을 띠며 내부 콘크리트의 색은 변하지 않았다.

3.4 미세구조분석

Fig. 9는 부재의 내화시험 전, 후 내부 모습을 SEM으로

Fig. 8. Carbonation Depth vs Fire Resistance Grade

(a) before heating (b) after heating

Fig. 9. SEM Micrograph of Concrete

Table 7. Porosity Measurement

Variable	Before fire test	After fire test
Total intrusion volume (ml/g)	0.0198	0.0285
Median pore diameter (Volume/Area) (nm)	20095/5.2	124088/9.1
Porosity (%)	4.6	6.9

촬영한 사진이다. 내화시험 전 PP섬유와 Nylon섬유가 혼입되어 있는 모습을 확인할 수 있으며, 시험 후에는 섬유가 녹아 사라진 자리에 공간이 생긴 것을 볼 수 있다. 또한 가열 전에는 콘크리트에 공극이 관찰되지 않지만, 내화시험 후에는 부재의 표면부에서 채취한 시료에서 약 0.5~2.5 μm 의 공극이 다수 발생하였다. 일반적으로 0.1 μm 이상의 공극은 콘크리트 강도에 영향을 줄 수 있음을 고려할 때 부재 표면부의 강도 저하를 예상할 수 있다(Sahmaran *et al.*, 2010). 하지만 부재 중심부에서는 내화시험 후에도 표면부에서와 같은 공극들이 발생하지는 않았다.

단주부재의 내화시험 전 후 기공률과 공극 크기별 분포도를 파악하기 위해 수은압입법을 수행하였다. Table 7에 기공률 측정 시험 결과를 정리하였다. 내화시험 후에 100~1,000 nm 크기의 공극이 급격히 증가하였으며, 내화시험 전에도 100,000 nm 크기의 공극이 상대적으로 많이 분포하고 있으나 내화시험 후에는 더 증가하였다. 결과적으로 내화시험 전과 후의 공극률은 각각 4.6%와 6.9%로 내화시험 후에 약 2.3% 증가하였다. SEM 및 수은압입법 등을 통해 부재 내부 콘크리트의 미세구조분석을 수행한 결과, 고온에 직접 노출된 부재 표면부에서 상당한 콘크리트 열화가 진행된 반면에 부재 중심부에서는 조직의 조대화(coarsening) 현상은 관찰되지 않았다.

4. 결 론

120 MPa 이상의 초고강도 콘크리트를 대상으로 골재 및 섬유를 주요 변수로 하여 내화시험을 수행하였으며, 이를 통해 다음의 결론을 도출하였다.

- 1) 내화시험 후 부재 압축강도의 평균 잔존율은 47.9%이며, 이는 폭렬 여부와 상관없이 거의 유사한 수준으로 나타났다. 폭렬방지와 동시에 잔존 내력을 향상시킬 수 있는 방안이 요구될 것으로 판단된다.
- 2) 일반 골재를 사용한 경우 전기로산화 슬래그 골재보다 우수한 내화성능이 나타났다. 하지만 전기로산화슬래그 골재를 사용한 경우 동일한 배합에서 더 높은 압축강도를 획득함으로써 더욱 치밀한 내부 조직이 형성돼 수증기압 배출에 불리하게 작용한 것으로 판단된다.
- 3) 강섬유와 함께 PP섬유만을 사용할 경우, 150 MPa 이하의 부재에서는 PP섬유 혼입률 0.38%로 폭렬 제어가 가능했으나 150 MPa 이상에서는 PP섬유를 0.5% 이상으로 증가시켜도 폭렬이 발생했다. 이는 강도의 증가 또는 슬래그 골재의 영향으로 판단되나 좀 더 명확한 원인

규명을 위해 추가적인 연구가 필요하다.

- 4) 일반적으로 PP섬유 길이가 증가함에 따라 내화성능이 향상되는 것으로 알려져 있으나, 본 실험결과에 따르면 초고강도 콘크리트 부재에서 PP섬유 길이 12 mm와 19 mm에 대한 내화성능의 차이는 뚜렷하게 나타나지 않았다.
- 5) PP, Nylon, 강섬유를 동시에 함께 사용할 경우 상대적으로 더 우수한 내화성능을 관찰할 수 있었다. 동일한 섬유 조합에서 나일론 섬유의 유무에 따라 강도가 더 높은 부재에서 폭렬이 완전히 제어되거나 폭렬 등급이 향상되었다. 하지만 이와 같은 하이브리드 섬유보강의 효과를 좀 더 명확히 파악하기 위해서는 동일한 수준의 강도를 지나는 시편에서 다양한 실험변수 비교가 필요하다.
- 6) 미세구조분석 결과, 내화시험 후에 부재 표면부에서는 상당한 콘크리트 열화가 진행된 반면에 부재 중심부는 비교적 양호한 상태로 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 본 내화시험에서는 3시간 가열 과정이 연속적으로 진행됨에 따라 내부온도별 잔존압축강도, 폭렬현상 그리고 내부공극 등을 확인할 수 없었다. 향후 온도 수준별 초고강도 콘크리트의 내화특성에 대한 심도 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 삼성물산(주) 건설부문의 지원 및 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이며(No. 2013R1A1A1A1005577), 이에 감사드립니다.

References

- Ali, F. and Nadjai, A. (2008) Fire resistance of concrete columns containing polypropylene and steel fibres., *ACI Special Publication*, Vol. 255, No. 9, pp. 199-216.
- Ali, F., O'Connor, D. and Abu-Tair, A. (2001) Explosive spalling of high-strength concrete columns in fire., *Magazine of Concrete Research*, Vol. 53, No. 3, pp. 197-204.
- Buchanan, A.H. (2001) *Structural Design for Fire Safety.*, Wiley, Chichester, UK.
- Georgali, B. and Tsakiridis, P.E. (2005) Microstructure of fire damaged concrete., *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, No. 2, pp. 255-259.
- Han, C.G., Hwang, Y.S., Yang, S.H., and Gowripalan, N. (2005) Performance of spalling resistance of high performance concrete

- with polypropylene fibre contents and lateral confinement., *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 9, pp. 1747-1753.
- Hoff, G.C., Bilodeau, A., and Malhotra, V.M. (2000) Elevated temperature effects on HSC residual strength., *Concrete International*, Vol. 22, No. 4, pp. 41-47.
- Kalifa, P., Chéné, G., and Gallé, C. (2001) High temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres from spalling to microstructure., *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, No. 10, pp. 1487-1499.
- Kalifa, P., Menneteau, F.D. and Quenard, D. (2000) Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures., *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 12, pp. 1915-1927.
- Kodur, V.K.R. and Raut, N.K. (2008) Fire resistance of reinforced concrete columns: State-of-the-art and research needs., *ACI Special Publication*, Vol. 255, No. 5, pp. 97-124.
- Kodur, V.K.R., Cheng, F.P., Wang, T.C., and Sultan, M.A. (2003) Effect of strength and fibre reinforcement on fire resistance of high strength concrete columns., *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, No. 2, pp. 253-259.
- Lee, B.S., Kim, S.D., Kim, S.Y., Bae, K.S., Jun, M.H., and Park, S.H. (2011). Properties Evaluation of Fiber Type and Mixing methods for 80MPa High Strength Fire Resistance Concrete with Ternary Cement, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 2, pp. 235-236.
- Park, C.K., Lee, S.H., Kim G.D., Sohn, Y.S., and Lee, H.K. (2006) Fire Resistance of High Strength Concrete Columns with Design Strength 120 MPa., *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 18, No. 1, pp. 21-24.
- Park, C.K., Lee, S.H., Sohn, Y.S., and Kim, H.K. (2006) The Effect of Fiber Length and Specimen Size on Spalling and Temperature Distribution in High Strength Concrete Specimen., *Proceedings of the Korea Concrete Institute* Vol. 18, No. 1, pp. 17-20.
- Pliya, P., Beaucour, A.L., and Noumowé A (2011) Contribution of cocktail of polypropylene and steel fibres in improving the behaviour of high strength concrete subjected to high temperature., *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 4, pp. 1926-1934.
- Sahmaran, M., Lachemi, M., and Li, V.C. (2010) Assessing mechanical properties and microstructure of fire-damaged engineered cementitious composites., *ACI Material Journal*, Vol. 107, No. 3, pp. 297-304.
- Sanjayan, G. and Stocks, L.J. (1993) Spalling of high strength silica fume concrete in fire., *ACI Material Journal*, Vol. 90, No. 2, pp. 170-173.
- Won, J.P., Park, K.H., Kim, H.H., Kim, J.H., Lee, S.J., and Lee, S.W. (2006) Geometry and Volume Fraction of Polypropylene Fiber in Cement Based Composites for Fire Resistance., *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 18, No. 1, pp. 397-400.

© Received August 26, 2013

© Revised August 27, 2013

© Accepted October 23, 2013