고온노출된 강섬유보강 콘크리트의 인장성능에 대한 실험적 연구

Experimental Study on Tensile Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Subjected to High Temperature

문도영*

Moon, Do Young

Abstract

Tensile strength of steel fiber-reinforced concrete was investigated with experimental program. For the investigation, Double Punch Test, which is known as a test method with low validity, was used. Fiber type(hooked and twisted fiber), mix ratios by volume ranged from 0.25% to 1.0%, aspect ratio were used as variables for the tests. The specimens were exposed to the elevated temperatures(300°C, 500°C and 700°C) for 2 hours and placed at ambient temperatures for 12 hours before testing. Results demonstrated that residual tensile strength increases as mix ratio and aspect ratio increase. The effect of fiber type was insignificant. Based on the test results, the linear equation for prediction of DPT residual tensile strength was proposed in terms of mix ratio and aspect ratio.

Key words : Aspect ratio, Fiber type, Mix ratio, Residual Tensile strength, Steel fiber reinforced concrete(SFRC)

요 지

본 논문에서는 고온 노출된 강섬유 보강콘크리트의 인장성능을 실험적 연구를 통하여 검증하고자 하였다. 실험방법은 낮은 변형성을 특징으로 하는 DPT를 이용하였다. 일반적인 후크강섬유와 트위스트 강섬유, 0.25~1.0%의 강섬유 혼입률, 섬유형상비를 변수로 하여 실험을 수행하였다. 시험체는 고온 전기로에서 300°C, 500°C 및 700°C의 온도에서 2시간 노출되었으며, 12시간 동안 자연냉각 된 후에 가력되었다. 실험결과, 섬유혼입률이 증가할수록, 형상비가 클수록, DPT 인장강도가 증가하는 것으로 나타났다. 섬유종류의 영향은 다른 변수에 비하여 그 영향이 미미한 것으로 판단되었다. 실험결과를 근거로 강섬유의 혼입량과 형상비의 영향을 고려할 수 있는 노출온도 수준에 따른 DPT 인장강도 예측식을 제시하였다.

핵심용어 : 강섬유보강콘크리트, 혼입비, 강섬유 종류, 형상비, 잔존인장강도

1. 서 론

콘크리트 구조물에 화재가 발생하게 되면 콘크리트 표면과 내부는 매우 높은 온도에 노출된다. 화재의 규모에 따라 표면은 1000°C 이상의 온도에 직접적으로 노출되며, 내부는 열전달에 의하여 300~700°C의 온도에 도달한다(Moon, 2010). 고온에서 콘크리트는 탈수(dehydration)와 분해(decomposition) 과정을 겪게 되며, 심대한 재료적 열화와 균열이 발생하게 된다. 미세 구조적으로는 내부 공극에 공기압의 급격한 상승으로 국부적인 박락(spalling)이 발생한다(Balazs and Luboly, 2012; Kim and Kang, 2011). 이와 같은 단면의 손상과 손실은 장기내구성능의 저하, 철근 노출로 인한 강도저하와 내하성능의 저하 등 심각한 문제를 발생시킨다.

철근콘크리트 구조물의 균열에 대한 성능을 확보하고 인성

을 증진시키기 위한 적극적인 방법으로 강섬유를 활용한 강섬유보강 콘크리트의 개발이 수십년 전부터 수행되었으며, 최근에는 터널 및 일반구조물에 다양하게 적용되고 있다(Kim et al., 2011). 특히 NATM 터널에 숏크리트로 활용될 뿐 아니라 TBM 공법의 영구복공구조인 세그먼트에도 강섬유보강 콘크리트가 적용되고 있다(Chiaia et al., 2009).

강섬유보강 콘크리트의 내화성능에 대한 연구는 건축 및 터널분야에서 주로 수행되었다. 건축분야에서는 고층빌딩에 고강도 콘크리트를 적용하게 됨으로서, 고강도 콘크리트의 폭렬에 대한 취약성을 개선시키기 위한 목적으로 강섬유와 합성섬유를 혼합한 고강도 섬유보강콘크리트의 고온거동에 대한 연구에 집중하고 있다(Lau and Anson, 2006; Jang et al., 2008). 한편, 토목분야에서는 화재시 터널복공의 안전성 확보를 위한 연구가 주로 수행되었다. 교통사고로 인한 화재발생

*교신저자. 정회원. 경성대학교 토목공학과 조교수(Tel: +82-51-663-4750, Fax: +82-51-621-0729, E-mail: dymoon@ks.ac.kr)
Corresponding Author. Member. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Kyung Sung University

가능성이 크고, 연소물이 휘발유 등으로 최대온도가 매우 높은 심각한 화재가 발생할 수 있기 때문에 터널복공의 내화성은 매우 중요하다. 터널 분야에서도 강섬유와 합성섬유를 혼합한 섬유보강콘크리트의 고온특성에 대한 연구가 수행된 바 있다(Yan and Zhu, 2007).

강섬유보강 콘크리트 고온거동 및 특성에 대한 연구는 실험의 편이성 때문에 대부분 고온상태에서 압축강도, 할렬인장강도 및 휨강도의 변화에 집중하였다(Shallal and Al-Owaisy, 2007; Chen and Liu, 2004; Khalil, 2006; Alireza et al., 2008; Singh et al., 2010; Peng et al., 2006). 압축강도의 경우 강섬유의 영향이 크지 않은 것으로 보고되고 있으며, 할렬인장강도는 강섬유에 의하여 성능증진이 큰 것으로 나타났다. 한편, 휨강도에 대한 대부분의 연구는 강섬유의 혼입률, 강섬유와 타 합성섬유의 혼합에 대한 영향, 콘크리트 강도에 대한 영향을 고찰하였다. 연구결과에 따르면, 합성섬유의 경우 강도증진에는 큰 효과가 없으나, 고강도 콘크리트에서 낮은 온도에서 연소됨으로 공기압의 통로를 확보하게 됨으로써, 폭발을 방지하는데 효과가 있다. 또한, 다양한 온도에 노출된 시험체의 잔존강도 비교를 통하여 강섬유의 혼입률이 증가할수록 내화성능이 증진된다고 보고하고 있다.

주목할 것은 인장강도를 고찰하기 위한 할렬인장강도 및 휨강도 시험의 실험의 변동특성이 매우 크다는 것이다. Bernard(2002)의 분석에 의하면 정방형 프리즘 시험체를 이용한 휨강도 시험의 변동계수는 일반적으로 20%를 초과하는 것으로 나타났다. 이와 같이 실험의 변동계수가 크면 상온이라 할지라도 강섬유의 단부형상과 형상비와 같이 민감한 영향인자에 대한 검토가 매우 어렵다. 더욱이 고온에 노출되었을 때는 성능의 변동이 더욱 커진다는 것을 감안할 때, 변동계수가 적은 실험방법을 통한 고찰이 필요한 상황이다.

본 연구에서는 300~700°C 범위의 고온노출조건에서 강섬유의 혼입률, 강섬유의 종류 및 강섬유의 형상비에 따른 인장강도의 변화를 고찰하였다. 본 연구에서는 Double Punch Test(이하 DPT 시험)를 이용하여 인장강도를 고찰하고자 하였다. DPT 시험은 일명 Barcelona test라고 알려져 있으며, ASTM C-1018에서 규정하고 있는 휨공시체를 이용한 방법에 비하여 파괴면적이 4배 이상이기 때문에 휨강도 시험에 비하여 실험의 변동계수가 적은 것이 특징이다(Chao et al., 2012). Chao 등(2012)이 수행한 실험의 결과 변동계수가 최대 12%를 이하로 매우 정밀도가 우수한 것으로 주장하였다. 본 실험에서 주목한 변수의 영향이 상대적으로 민감하다고 판단하였기 때문에 변동성이 적은 DPT 실험방법이 유효할 것으로 판단하였다.

2. DPT 실험

2.1 DPT 실험개요

원형 강재를 이용한 DPT 실험은 Chen(1969)에 의하여 최초 개발되었으며, Chao 등(2012)과 Malatesta 등(2012)에 의하여 FRC의 품질관리를 위한 스페인의 시험규격에 채택되었다. 두 개의 원형강재를 시험체의 상면과 하면에 두고 축방향력을

Fig. 1. Tensile stress caused by DPT

Fig. 2. Double Punch Test

가력함으로써, 원형 강재 하면에 원추형태의 수직변형이 발생하고 이로 인해 Fig. 1과 같은 인장응력이 발생하도록 하는 시험방법이다.

본 실험에서는 2000 kN 용량의 UTM 장비를 사용하였으며, 0.3 mm/min의 변위제어를 통하여 실험을 실시하였다(Fig. 2 참조). 강재 원형편치와 시험체의 크기는 Malatesta 등(2012)의 시험체 크기에 따른 최적화 연구에 근거하였으며, 시험체의 직경(2x)과 높이(H)는 150 mm로 동일하며, 편치는 직경(2xa) 38 mm, 높이 25 mm로 제작하였다.

본 논문에서 DPT 시험에 의한 SFRC의 DPT 인장강도($f_{t,DPT}$)는 최대하중을 파괴면적으로 나눈 평균강도의 개념으로 다음 식 (1)로부터 계산하였다. 식 (1)에서 P는 최대하중(N)을 b와 H는 시험체의 반경과 높이(mm), a는 강재원형 편치의 반경(mm)을 의미한다.

$$f_{DPT} = \frac{P}{\pi(1.2bH - a^2)} \quad (1)$$

2.2 시험변수

본 실험의 변수는 강섬유의 혼입률, 강섬유의 종류 및 형

Table 1. Test variables

강섬유 종류	인장강도	섬유 제원(mm)		형상비(<i>l/d</i>)	노출온도(°C)	노출시간	혼입률(Vol.%)
		직경	길이				
후크 강섬유	1,050MPa	0.5	30	60	상온 300 500 700	2 hr	0%
		0.75	60	80			0.25%
트위스트 강섬유	2,450MPa	0.5	40	80			0.50%
							1.0%

Fig. 3. The used steel fibers

Table 2. Concrete mix proportion

28일 압축강도	W/B (물-시멘트비)	S/a (잔골재율)	단위재료량(kg/m ³)				Steel Fiber(강섬유)	
			W(물)	C(시멘트)	S(잔골재)	G(굵은 골재)		
31.1MPa	46.65	40.13	189.44	406.07	652.78	1005.54	0%	-
							0.25%	20
							0.5%	40
							1.0%	80

상비로 설정하였다(Table 1 참조). 강섬유의 종류는 가장 일반적으로 사용되는 후크섬유와 트위스트섬유로 하였다(Fig. 3 참조). 트위스트 섬유는 섬유의 종방향으로 제작시 꼬임을 준 섬유로서, 외부에 부식방지를 위한 코팅이 되어 있다. Kim (2010)에 의하면 파괴시 트위스트섬유는 균열면에서 꼬임이 풀어지면서 상당한 변형수용능력을 갖는 것으로 보고한 바 있다. 본 실험에서 사용된 후크 강섬유의 형상비(l/d)는 60과 80으로 2가지이다. 강섬유의 자세한 성능 및 제원은 Table 1과 같다.

2.3 콘크리트 배합 및 시편제작

각 변수별로 3개의 동일한 시험체가 제작되었으며 총 120개의 시험체가 실험실에서 타설되었다. 콘크리트의 배합은 Table 2와 같고, 28일 압축강도는 KS F 2405에 의하여 측정되었으며, 측정결과 31.1 MPa로 나타났다. 타설중 굳지 않은 콘크리트의 시험을 실시하였으며, 슬럼프는 120 mm, 공기량은 3.5%로 나타났다. 타설은 강섬유의 뭉침현상을 최대한 억제하기 위하여 배려하였으며, 3차로 나누어 진행하였다. 재료의 투입순서는 시멘트, 물 및 모래를 교반한 후 마지막으로 굵은골재와 강섬유를 투입하였다. 강섬유는 미리 물속에서 섬유간 접착제를 용해하여 준비된 상태에서 각 배합비에 맞추어 투입하였다.

2.4 시험체 가열 및 압축강도 변화

시험체의 가열은 1,000°C까지 가열이 가능한 전기로를 사용하였다. 각 시험체는 타설 후 28일동안 양생실에서 수중양생이 되었으며, 실험 전 7일동안 상온에서 건조되었다. 전기로의 설정온도 도달을 위하여 약 1시간의 사전운전을 실시하였으며, 각 시험체는 전기로에 투입되고, 2시간동안 설정온도에 노출되었으며, 전기로에서 꺼내어진 뒤 12시간동안 상온

Fig. 4. Residual compressive strength

에서 자연냉각 되었다.

Fig. 4는 고온에 노출된 3개의 압축강도 실험결과 평균치를 나타내고 있다. 그림에 실선과 “Model”이라 표시된 것은 화재설계시 콘크리트 노출온도에 따른 일반콘크리트의 콘크리트 잔존 압축강도 모델의 결과를 나타내고 있다. 그림과 같이 노출온도에 따라 압축강도가 크게 저하되는 것을 확인할 수 있다. 일반강도 콘크리트의 모델에서는 350°C까지 강도저하가 없지만, 실험결과에서는 약 92%의 잔존압축강도를 나타내었으며, 500°C에서는 약 60%, 700°C에서는 약 30%에 불과한 것을 확인할 수 있다. 모델의 예측보다는 실험의 결과 압축강도의 저하가 다소 큰 것으로 나타났다. 그러나 모델과 전반적으로 일치하는 변화를 나타냄을 확인할 수 있다.

3. 실험결과 고찰

3.1 시험체 파괴형태 고찰

Fig. 5와 Fig. 6은 각 온도에 노출된 시험체의 DTP 실험 전 UTM 거치 사진을 나타내고 있다. 그림과 같이 300°C의 노출에도 모든 시험체의 표면에는 균열이 발생하였다. 이는 전술한 바와 같은 재료적 손상에 의한 균열이며, 온도가 증가할수록 균열의 수나 폭이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 무강섬유 시험체와 트위스트 강섬유가 보강된 시험체의 균열 상태를 비교하여 보면, 강섬유가 보강되어 있는 경우 균열의 수나 폭이 무강섬유 시험체 보다 적은 것을 분명하게 확인할 수 있다.

(a) 무강섬유 시험체 (b) 트위스트 강섬유 보강 1%

Fig. 5. Exposure to 300°C

(a) 무강섬유 시험체 (b) 트위스트 강섬유 보강 1%

Fig. 6. Exposure to 700°C

Fig. 7은 DPT 실험을 통해 파괴된 시험체의 파괴형태를 나타내고 있다. 그림과 같이 300°C 및 500°C에서는 Fig. 1에 제시된 바와 같은 전형적인 DPT의 파괴양상을 나타낸다. 그러나 700°C에 노출된 시험체는 파괴면이 3개 이상인 것을 확인할 수 있다. 이는 700°C에 노출시 시험체에 발생한 균열이 DPT 하중가력시 성장하여 주된 3개의 파괴면 이외의 파괴면을 형성하기 때문이다. 무강섬유 시험체와 강섬유 보강 시험체의 파괴양상은 무강섬유의 경우 최대하중 이후 급격한

(a) 300°C(무강섬유)

(b) 500°C(후크강섬유 보강)

(c) 700°C(후크강섬유 보강)

Fig. 7. Failures of test specimens

하중감소를 나타내며, 취성적인 파괴를 나타내는 반면, 강섬유보강시험체는 파괴면에 걸쳐있는 강섬유가 파괴면에서 충분한 인성을 발휘함으로써, 연성적인 파괴거동을 나타내는 것을 확인하였다. 또한, 강섬유의 혼입량이 증가할수록 연성과 파괴의 경향은 증가되는 것을 확인하였다.

3.2 DPT 인장강도 및 변동계수

Table 3에는 각 실험체의 인장강도, 평균인장강도, 변동계수를 요약하여 나타내었다. 괄호안에 표시된 값은 평균강도를

의미한다. 표에 제시된 비(ratio)는 무강섬유의 상온 시험체의 DPT 인장강도 3.35 MPa로 모든 시험체의 인장강도를 나눈 정규화 된 % 결과이다. 무강섬유 시험체의 전반적인 결과를 살펴보면 온도가 증가할수록 인장강도의 감소가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특히, 300°C의 노출에서 압축강도의 저하는 10%에 불과하지만, 인장강도의 감소는 약 40% 이상으로 상당한 감소가 발생한다. 결과적으로 고온으로 인한 화학적 변화로 인한 콘크리트의 재료적 열화가 인장성능의 저하에 주된 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 동일

Table 3. Tensile strengths and coefficient variables obtained by DPT

구분			상온			300°C			500°C			700°C		
섬유종류	형상비 (l/d)	혼입률 (Vol.%)	Mean (MPa)	C.V (%)	Ratio (%)	Mean (MPa)	C.V (%)	Ratio (%)	Mean (MPa)	C.V (%)	Ratio (%)	Mean (MPa)	C.V (%)	Ratio (%)
무강섬유	-	-	3.49 3.29 3.26 (3.35)	3.6	100	1.98 1.89 1.97 (1.94)	2.6	56	1.37 1.37 1.32 (1.36)	2.2	41	0.68 0.74 0.68 (0.70)	4.7	21
후크	80	0.25%	3.39 4.07 3.65 (3.70)	9.3	110	2.33 1.91 2.23 (2.16)	10.3	64	1.57 1.41 1.87 (1.62)	14.3	48	1.65 0.78 0.86 (1.10)	43.8	33
		0.5%	3.40 3.40 2.98 (3.26)	7.3	97	2.65 2.53 2.10 (2.43)	11.8	73	1.69 1.45 1.91 (1.68)	13.4	50	0.70 0.74 1.08 (0.84)	24.6	25
		1%	3.63 3.21 3.30 (3.38)	6.5	101	2.67 (2.67)	-	80	1.55 2.02 2.34 (1.97)	20.3	59	1.11 1.51 1.76 (1.46)	22.3	44
	60	0.25%	3.49 3.32 3.29 (3.36)	3.2	100	1.98 1.98 2.42 (2.13)	12.1	64	1.42 1.40 1.53 (1.45)	5.1	43	0.68 0.74 0.68 (0.70)	4.7	21
		0.5%	3.43 3.15 3.16 (3.25)	5.0	97	2.10 2.10 1.74 (1.98)	10.5	59	1.77 1.45 1.77 (1.66)	10.9	50	0.95 0.74 0.93 (0.87)	13.1	26
		1%	3.27 3.15 3.09 (3.17)	2.9	95	1.85 1.85 2.29 (2.00)	12.9	60	1.55 1.76 1.81 (1.70)	8.0	51	0.75 1.05 1.14 (0.98)	20.9	29
	트위스트	0.25%	3.57 3.79 3.93 (3.76)	4.8	112	2.31 2.31 2.42 (2.35)	2.7	70	1.40 1.33 1.70 (1.47)	13.2	44	0.96 1.04 0.94 (0.98)	5.3	29
		0.5%	3.58 3.44 3.28 (3.43)	4.4	102	2.04 2.19 2.06 (2.10)	3.9	63	1.41 1.30 1.66 (1.46)	12.5	44	1.53 0.88 1.10 (1.17)	28.3	35
		1%	3.24 3.05 3.04 (3.11)	3.7	93	2.35 1.70 2.49 (2.18)	19.5	65	1.56 1.73 1.61 (1.63)	5.4	49	0.95 1.57 1.73 (1.42)	28.9	42

한 노출온도라 할지라도 강섬유가 혼입된 경우에는 잔존 인장강도가 무강섬유 시험체 보다 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서, 강섬유가 고온에 의한 인장강도의 감소를 저감시킬 수 있다고 판단된다. 상온에서는 이와 같은 효과가 제한적이지만 고온으로 갈수록, 혼입률이 증가할수록 효과가 커짐을 확인할 수 있다.

고온에서 강섬유보강 콘크리트의 DPT 강도가 무강섬유 콘크리트보다 큰 것은 강섬유의 균열저항효과로부터 설명될 수 있다. 이는 고온에서 매트릭스인 콘크리트의 인장성능 저하가 발생하지만, 강재인 강섬유에는 고온으로 인한 성능저하가 거의 없으며, 콘크리트의 인장응력이 강섬유로 전달되면서 DPT 인장강도가 증가하였기 때문이다. 다만, 고온에서는 강섬유를 포함하고 있는 매트릭스재인 콘크리트의 재료적 열화가 강섬유의 정착성능을 제한하기 때문에 상대적으로 높은 고온에서는 그 효과가 크지 않은 것을 알 수 있다.

변동계수를 살펴보면, 상온, 300°C에서의 변동계수는 최대 약 15%인데 반하여 500°C 및 700°C에서의 변동계수는 20% 이상으로 매우 크게 나타났다. 또한, 강섬유 혼입률이 적을 때보다 혼입률이 클 때 변동계수가 큰 것으로 나타났다. 이와 같은 차이는 고온 영향에 내부 균열의 발생 정도, 섬유의 분산도와 형상비 등 다양한 원인에서 기인할 수 있다. 본 실험 결과에서는 섬유의 길이가 30 mm, 40 mm인 형상비 60의 후크강섬유와 트위스트 강섬유의 실험 변동계수가 적은 것으로 나타났다. 그러므로, 섬유의 길이가 실험의 변동성에 주요한 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다.

3.2.1 노출온도가 DPT 인장강도에 미치는 영향

Fig. 8은 최고노출온도가 DPT 인장강도에 미치는 영향을 나타내고 있다. 종축은 잔존 DPT 인장강도 비로서, 각 시험체의 상온에서의 인장강도로 나눈 비(%)이다. 각 그래프에는 선형보간 그래프와 선형보간식이 제시되어 있다. 최고노출온도에 따라 급격한 DPT 인장강도의 감소를 확인할 수 있다. 압축강도와는 달리 DPT 인장강도의 변화는 불연속구간 없이 온도에 대하여 선형적인 감소의 경향을 나타냄을 확인할 수 있다.

후크강섬유와 트위스트 섬유의 결과에서 혼입률이 증가함에 따라 보간식의 기울기가 작아지는 것을 볼 수 있다. 또한, 동일한 후크 강섬유의 결과에서 형상비의 영향을 보면, 형상비가 클수록 보간식의 기울기가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과로부터 본 실험에서 사용한 각 섬유에 대한 DPT 인장강도 예측식을 섬유혼입률의 함수로 예측할 수 있다. 후크강섬유에 대해서는 섬유혼입률과 형상비 변수를 포함하는 식으로서 식 (2)를, 트위스트 섬유에 대해서는 섬유혼입률만의 함수로서 식 (3)을 제안할 수 있다.

$$f_{DPT,T} = \left[\left(\left(0.02 + 0.0002 \frac{l}{d} \right) F - 0.117 \right) T + 100 \right] f_{DPT,amb} \quad (2)$$

$$f_{DPT,T} = [(0.018F - 0.117)T + 100] f_{DPT,amb} \quad (3)$$

여기에서, $f_{DPT,T}$ 는 고온에서 DPT 인장강도(MPa), F 는 강섬

(a) 후크강섬유 (형상비 80)

(b) 후크강섬유 (형상비 60)

(c) 트위스트 강섬유 (형상비 80)

Fig. 8. Effect of the maximum temperature

유의 혼입률(Vol. %), T 는 온도(°C), $f_{DPT,amb}$ 는 상온에서의 DPT 인장강도(MPa)를 의미한다. l/d 는 섬유 형상비를 의미한다. 상기식에서 상온일 경우에는 $T=0$ 일 때를 의미한다.

3.2.2 강섬유 혼입률의 영향

Fig. 9는 강섬유 혼입률의 영향을 나타내고 있다. 종축은 Table 3에 제시된 잔존 DPT 강도비를 의미한다. 섬유의 중

Fig. 9. Effect of mix ratio of steel fibers

Fig. 10. Effect of steel fiber type

류에 따라 다소의 차이는 있지만 500°C 및 700°C의 노출에서 강섬유의 혼입률이 증가할수록 DPT 잔존인장강도는 증가하는 것을 확인할 수 있다.

3.2.3 강섬유 종류의 영향

Fig. 10은 동일한 섬유형상비 80을 갖는 후크강섬유와 트위스트 강섬유로 보강된 시험체의 DPT 인장강도결과를 대비하여 나타내고 있다. 강섬유의 혼입률에 따라 다른 결과를 나타내고 있다. 1% 혼입률에서는 전반적으로 후크강섬유가 우수한 것으로 나타났지만, 혼입률 0.25%와 0.5%의 경우에 트위스트 강섬유 실험체의 인장강도가 큰 경우도 있다. 따라서, 강섬유의 종류에 따라 성능의 명확한 차이는 확인할

수 없었다. 섬유의 종류에 따른 거동의 차이를 고찰하기 위해서는 균열발생 후 인성측면의 거동분석이 필요한 것으로 판단된다.

3.2.4 형상비의 영향

Fig. 11은 동일한 후크 강섬유에 대하여 형상비 60과 80인 시험체의 결과를 대비하여 나타내고 있다. 모든 경우에 있어서 강섬유의 형상비가 클수록 고온에서의 성능이 우수한 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 성능치는 상온 보다는 고온에서 뚜렷한 경향을 나타낸다. 따라서, 고온 노출시 성능확보를 위해서는 섬유형상비가 큰 강섬유를 사용하는 것이 유리하다고 판단된다. 특히 700°C 노출에서 형상비가 80인 강섬유

Fig. 11. Effect of steel fiber aspect ratio

결과가 우수한 것으로 나타났다. 따라서 고온에서 매트릭스인 콘크리트의 성능저하가 발생함으로서 섬유유 정착이 문제가 되며, 정착이 유리한 높은 형상비의 섬유유가 유효한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 강섬유보강 콘크리트의 300~700°C의 고온 노출 조건에서 인장성능을 고찰하였다. 강섬유의 혼입률 (0.25~1.0%), 강섬유의 종류(후크 및 트위스트) 및 강섬유의 섬유형상비($l/d=60, 80$) 등 다양한 인자들에 대한 영향을 고찰하였다. 이와 같은 민감한 영향인자에 대한 고찰을 위해서는 기존에 할렬인장 및 휨인장강도 방법 보다 정밀한 시험방법이 필요하다고 판단하여 유럽에서 실험의 정밀도가 우수한 것으로 알려진 DPT 실험을 활용하였다. 실험결과를 통하여 획득한 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) DPT 인장강도 결과를 분석한 결과, 고온노출로 인하여 급격한 인장강도의 감소를 확인하였다. 강섬유의 종류 및 형상비와 혼입률에 따라 다소의 차이는 있지만, 300°C의 노출에서는 30%~40%, 500°C 노출에서는 40%~55%, 700°C의 노출에서는 60%~70%의 강도 감소가 나타났다. 압축강도의 경우 온도구간에 따라 압축강도의 감소정도가 다른 반면 인장강도의 감소는 상온에서 노출온도의 수준에 따라 선형적인 감소를 나타내는 것으로 판단된다.
- 2) DPT 실험 방법의 낮은 변동성은 본 연구에서도 확인할 수 있었다. 특히, 상온 및 300°C의 노출에서는 변동계수가 10%~15% 범위로 정밀도가 우수한 것으로 나타났다. 그러나, 500이상의 온도결과에서는 변동계수가 20% 이상으로 매우 큰 것을 알 수 있으며, 원인으로서는 고온노출로 발생된 균열이 DPT 재하하중의 증가와 함께 성장하면서, 전형적인 인장파괴 거동이 아닌 복잡한 파괴거동을 나타내기 때문이다.
- 3) 각 영향인자에 대한 영향고찰 결과, 고온노출시 섬유의 혼입률이 높을수록, 섬유형상비가 클수록 잔존 DPT 인장강도가 큰 것으로 나타났다. 또한, 섬유종류의 영향 비교에서는 노출온도 및 혼입비에 따라 일관된 경향을 보이지 않았다. 그러므로, 강섬유 보강콘크리트의 DPT 인장강도는 섬유의 종류 보다는 섬유형상비와 혼입률에 보다 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 특히 고온에서는 매트릭스인 콘크리트의 강도저하로 정착이 문제가 되므로, 형상비가 큰 섬유유가 유효한 것으로 판단된다.
- 4) 실험결과 분석을 통하여 본 실험에서 사용한 강섬유 보강콘크리트의 고온에 의한 잔존 DPT 인장강도를 예측할 수 있는 모델식을 제안하였다. 제안된 식은 강섬유의 혼입률을 고려할 수 있으며, 특히, 후크강섬유에 대해서는 강섬유의 형상비를 고려할 수 있도록 하였다. 그러나 제안된 식은 형상비 60과 80의 후크강섬유의 실험결과에만 근거하였기 때문에 향후 추가적인 실험과 분석을 통한 검증이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2012학년도 경성대학교 학술연구 지원에 의하여 수행되었음.

References

- Alireza, J., Susanto, T. and Hooi, T. T. (2008) High Temperature Effect on Flexural Strength of Steel-Fibre Concrete, *The 3rd ACF International Conference*, pp. 1160-1167.
- Balazs G. and Luboly, E. (2012) Reinforced Concrete Structures in and after Fire, *Concrete Structures*, pp. 72-80.
- Benard, E.S. (2002) Correlations in Behavior of Fibre Reinforced Concrete Beam and Panel Specimens, *Materials and Structures*, Vol. 35, pp. 156-164.
- Chao, S.-H, Karki, N.B., Cho, J.-S. and Waweru, R.N. (2012) Use of Double Punch Test to Evaluate the Mechanical Performance of Fiber Reinforced Concrete, *HPFRCC6*, pp. 27-34.
- Chen, B. and Liu, J. (2004) Residual strength of Hybrid-Fiber-Reinforced High-Strength Concrete after Exposure to High Temperature, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, pp. 1065-1069.
- Chen, W.F. (1969) Double Punch Test for Tensile Strength of Concrete, Sept. 1969(70-18) PB224770/AS(NTIS), *Fritz Laboratory Reports*, Paper 1995.
- Chiaia, B., Fantilli, A. P. and Vallini, P. (2009) Combining fiber-reinforced concrete with traditional reinforcement in tunnel linings, *Engineering Structures*, Vol. 31, pp.1600-1606.
- Jang, C.I., Lee, S.W., Choi, M.J., Kim, J.M., Kim, H.Y. and Won, J.P. (2008) Fire Resistance Performance for Fiber Reinforced High Strength Concrete Column Member, *Proceedings of the Korean Concrete Institute*, Vol. 20, No. 2, pp. 457-460.
- Khalil, L.W. (2006) Influence of High Temperature on Steel Fiber Reinforced Concrete, *Journal of Engineering and Development*, Vol. 10, No. 2, pp. 139-150.
- Kim, D. (2010) Influence of Number of Twist on Tensile Behavior of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites with Twisted Steel Fibers, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 4, pp. 575-583.
- Kim, H.S. and Kang, J. (2011) Fire Resistance Performance of Concrete Filled Square Steel Tube Columns with Fire Spray Protection, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 6, pp. 31-37.
- Kim, M., Min, K., Yoo, D. and Yoon, Y. (2011) Strengthening effect of CFRP sheets and steel fibers for enhancing the impact resistance of RC beams, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 5, pp. 41-47.
- Lau, A. and Anson, M. (2006) Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, pp. 1698-1707.
- Malatesta, S.C., Aguado, A. and Molins, C. (2012) Generalization of the Barcelona test for the toughness control of FRC, *Materials and Structures*, Vol. 45, pp. 1053-1069.
- Moon, D.Y. (2010) Simplified Evaluation Method for Residual Bond Strength of Reinforced Concrete Using Standard Fire Curve, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 5, pp. 41-47.
- Peng, G.-F., Yang, W.-W., Liu, Y.-F., Bian, S.-H. and Zhao, L.-H. (2006) Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, pp. 723-727.

Shallal, D.M.A. and Al-Owaisy, L.S.R. (2007) Strength and Elasticity of Steel Fiber Reinforced Concrete at High Temperatures, *Journal of Engineering and Development*, Vol. 11, No. 2, pp. 125-133.

Singh, S.P., Singh, A.P. and Bajij, V. (2010) Strength and Flexural Toughness of Concrete Reinforced with Steel-Polypropylene Hybrid Fibers, *Asian Journal of Civil Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 495-507.

Yan, Z.G. and Zhu, H.H. (2007) Experimental study on mechanical behavior of tunnel lining under and after fire scenarios, *Underground Space-the 4th Dimension of Metropolises*, pp. 1805-1809.

◎ 논문접수일 : 2012년 12월 08일
◎ 심사의뢰일 : 2012년 12월 11일
◎ 심사완료일 : 2013년 01월 14일