강섬유의 혼입이 고강도 강섬유 보강 시멘트 복합체의 압축강도에 미치는 영향

The Effect of Steel Fiber on the Compressive Strength of the High Strength Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites

강 수 태* 김 성 욱** 박 정 준* 고 경 택**
Kang Su-Tae Kim, Sung-Wook Park, Jung-Jun Koh, Gyung-Taek

Abstract

Many researchers have reported that adding steel fiber to concrete improved its tensile and flexural strength significantly, but relatively few studies have been made on the compressive behavior of steel fiber-reinforced concrete. It is still less in case of high strength steel fiber-reinforced cementitious composites(SFRC). The main objective of this research is to examine the effect of adding steel fiber on the compressive strength of high strength SFRC using fiber reinforcing index(*RI*, $V_f(l_f/d_f)$). It was found from the study that compressive strength was noticeably increased in proportion to *RI*. In conclusion, the relationship between Reinforcing Index(*RI*) and compressive strength in case of high strength steel fiber-reinforced cementitious composites was suggested.

요 지

본 연구에서는 마이크로 입자들로 구성된 매트릭스의 강섬유 보강 시멘트 복합체에서 강섬유가 압축강도에 미치는 영향을 규명하고자 하였으며, 강섬유의 섬유혼입률과 섬유형상비에 따른 영향을 파악하고 혼입률과 형상비를 동시에 고려한 변수인 섬유보강지수(*RI*)에 따른 압축강도의 변화를 살펴보았다. 실험결과에 따르면 마이크로 입자로 구성된 매트릭스의 강섬유보강 복합체에서는 섬유보강지수가 증가에 따라 압축강도가 선형적으로 증가하였다. 이와 같은 결과로부터 섬유보강지수와 압축강도와의 관계를 나타내는 모델식을 제안하였다.

Keywords : Compressive strength, Fiber-reinforced, High strength, Reinforcing index, Steel fiber
핵심 용어 : 압축강도, 섬유보강, 고강도, 섬유보강지수, 강섬유

* 정회원, 한국건설기술연구원 연구원
** 정회원, 한국건설기술연구원 책임연구원
E-mail : alphard@kict.re.kr 031-910-0106

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2008년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

지난 수 십여 년 동안 섬유보강 복합체는 구조재료로서 매우 많은 분야에서 사용되면서 복합체의 역학적 성질에 많은 연구들이 이루어져 왔다.[1),16)-18)] 콘크리트는 본질적으로 많은 공극과 미세균열을 가지고 있다. 하중이 재하될 경우 이러한 미세균열의 급격한 진전으로 인해 낮은 인장강도를 나타내고 상대적으로 낮은 휨강도와 인성을 가지며 충격에 대해서도 저항성이 약하다. 일반적으로 콘크리트에 섬유를 보강할 경우 인장강도와 휨강도에 상당한 강도증진을 이룰 수 있는 것으로 밝혀졌다. 이것은 섬유가 미세균열의 진전을 구속하고 인장균열의 발생을 늦춰서 인장강도를 증진시키기 때문이다. 섬유가 인장특성을 향상시킨다는 관점에서 섬유보강 콘크리트에 대한 지금까지 대부분의 연구가 일축인장 또는 휨거동에 관한 것이었고 상대적으로 압축하중을 받는 콘크리트의 특성에 관한 연구는 미흡한 상태이다.

Nelissen(1972), Kupfer et al(1969) 등의 압축실험 결과에 따르면, 보통강도 콘크리트는 최대 인장변형률 방향의 수직한 방향으로 생성되는 파괴면에 대해 인장 쪼개짐에 의해 파괴된다. 이것은 콘크리트의 압축파괴가 인장특성에 의해 지배됨을 보여준다. 따라서 강섬유의 혼입에 따라 인장강도가 증가하듯이 압축강도 또한 증가될 수 있음을 의미한다. 그러나 이러한 개념은 Shah and Rangan(1971), Chen and Carson(1971), 그리고 Williamson(1974)의 압축실험 결과와 비교할 때 잘 일치하지 않았다. 이 실험들에서 섬유를 혼입하였을 때 파괴시 압축 변형률은 상당히 증가하였지만 압축강도의 향상은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 섬유의 부피비가 증가함에 따라 압축강도가 처음에는 조금씩 증가하는 현상을 보이나 일정 비율 이상의 섬유를 혼입한 경우에는 그 경향에 다소 차이가 있다. 섬유의 혼입은 일정 값 이내에서는 균열진전에 대한 저항성이 커져 압축강도를 증진시키는 효과가 있지만 그 이상의 섬유를 혼입하게 되면 증진효과와 함께 부가적인 결함생성으로 인한 결함밀도의 증가로 압축강도 감소효과를 발생하기 때문이다. 하지만 근래의 다른 몇몇 연구결과들을 살펴보면 아주 높은 섬유 부피비에 대해서도 매트릭스 상의 결점을 보완할 수 있는 특별한 기술을 사용하면 압축강도를 상당히 증가시킬 수 있다고 한다.[10),11)] 고농축밀도로 하는 배합설계 또한 섬유의 도입으로 논란이 되는 결함들을 훌륭히 극복할 수 있는 하나의 방법으로 제시되었다.

본 연구에서는 강도증진의 방안으로 많은 양의 물을 감소시키고 혼화제 및 실리카퓸을 포함하는 초세립 미립자들로 구성된 고농축밀도 시멘트 복합체에 인성을 향상시키고 더불어 여러 가지 역학적 성능을 향상시키도록 강섬유를 혼합한 고강도 강섬유 보강 시멘트 복합체(Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites, SFRC)에서 섬유의 혼입이 압축강도에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

2. 실험계획

2.1 사용재료

고강도 SFRC의 매트릭스는 마이크로 균열이나 공극과 같은 결함을 최소화하여 조직이 매우 치밀하게 구성되는 특징이 있으며, 이를 위해 미세입자들을 일정 범위 내에서 입도분포를 가지도록 구성된다.[12)]

2.1.1 시멘트 및 실리카퓸

본 실험에 사용한 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트이며, 반응성 분체로 실리카퓸을 사용하였으며 이들의 물리·화학적 성질은 Table 1과 같다.

2.1.2 골재

잔골재로는 원산지 안면도의 0.5mm이하의 모래를 사용하였고, 굵은 골재는 사용하지 않았다. 잔골재는 밀도 2.62 g/cm^3, SiO_2 93%정도의 특성을 나타내었다.

2.1.3 혼화제

혼화제로는 고형성분 30%, 밀도 1.06 g/cm^{3}의 폴리칼본산계의 고성능 감수제를 사용하였다.

Table 1 Physical & chemical properties of cement and silica fume

	Specific surface area (cm^2/g)	Density(g/㎤)	Ig.loss(%)	Chemical Composition(%)		
				SiO_2	MgO	SO_3
OPC	3330	3.14	1.40	-	2.8	2.3
SF	240000	2.10	1.50	96.0	0.1	-

Table 2 physical & chemical properties of filler

	Chemical Composition(%)					Ig.loss (%)
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	
filler	99.3	0.15	0.01	0.03	0.004	0.01

Table 3 Variables and test specimen

	Mixture	Fiber parameters		
No.	*w/b*	V_f (%)	A_r	*RI*
1	0.3	1	65	0.65
2	0.3	2	65	1.30
3	0.3	3	65	1.95
4	0.3	5	65	3.25
5	0.2	-	-	-
6	0.3	-	-	-
7	0.4	-	-	-
8	0.2	3	65	1.95
9	0.3	3	65	1.95
10	0.4	3	65	1.95
11	0.3	3	55	1.65
12	0.3	3	60	1.80
13	0.3	3	61.5	1.85
14	0.3	3	63	1.89
15	0.3	3	65	1.95

$b=(c+f)$ c : cement f : silica fume
V_f = fiber volume fraction
A_r = aspect ratio
RI = fiber reinforcing index

2.1.4 충전재

충전재(filler)는 구성입자 평균입경이 10㎛ 정도이고 SiO_2 98% 이상, 밀도 2.60 g/cm^3의 재료를 사용하였다. 물리·화학적 성질은 Table 2와 같다.

2.1.5 강섬유

강섬유는 밀도 7.5kg/cm^3, 인장강도 2,500MPa, 직경 0.2mm, 길이 13mm로 형상비(aspect ratio) 65의 고탄성용 강섬유를 사용하였으며, 형상비의 영향에 대한 검토에서는 일반적으로 SFRC에 많이 사용되는 ϕ 0.5×30mm 또는 ϕ 0.7×35mm의 강섬유를 혼합하여 사용하였다.

3.2 배합설계

강섬유 보강 시멘트 복합체의 압축거동을 물결합재비와 섬유혼입률, 그리고 강섬유의 형상비 등 3개의 실험변수에 따른 영향으로 나누어 파악하였다. 물결합재비를 각각 0.2, 0.3, 0.4로 선정하였고, 부피비 0, 1, 2, 3, 5%의 섬유혼입률에 대해 파악하였으며, 강섬유의 형상비는 섬유형태는 같으나 길이와 직경이 상이한 두 가지의 강섬유를 혼합 사용한 경우에 대한 영향 파악을 목적으로 55에서 65까지에 대해 알아보았다. Table 3은 실험 변수값이 다른 각각의 시험체에 대해 고려한 변수들의 값을 나타낸 것이다.

시멘트 복합체 배합설계는 Table 4와 같으며, 배합수와 고성능감수제를 통해 요구되는 워커빌리티를 맞추었다. 시험체는 ϕ 100×200mm의 크기의 원주형으로 제작하였으며, 0.3m^3 용량의 강제식 회전 믹서기를 사용하였으며, 진동을 이용한 섬유 투입기를 제작하여 일정한 비율로 균일하게 섬유를 투입하였다. 또한 20℃ 수중에서 28일 동안 양생을 실시하였다.

3. 실험방법

KS L 5105 및 KS F 2421에 의하여 굳지 않은 콘크리트의 플로우 및 공기량을 측정하였으며, 목표 플로우 및 공기량을 18±1cm와 5% 이내로 하였다.

Table 4 Mix Proportion of cementitious composites(ratio in weight)

W/B	cement	silica fume	filler	sand	superplasticizer	steel fiber (×concrete volume)
0.2, 0.3, 0.4	1	0.25	0.3	1.1	0.016	0.01~0.05

KS F 2405에 준하여 압축강도를 시험하였으며, 재하용량 5,000kN의 유압식 만능재료시험기를 사용하여 재하하였고, 가력은 시험체가 완전 파괴될 때까지 변위 제어방법으로 실시하였다.

4. 실험결과 및 분석

일반적으로 섬유보강 콘크리트에서 섬유의 혼입으로 매트릭스 자체의 압축강도가 증진되는 것은 아니다. 따라서 섬유보강 콘크리트의 압축강도는 매트릭스의 강도와 섬유의 혼입이 강도에 미치는 영향을 개별적으로 고려해야 한다. 매트릭스의 강도는 물결합재비의 함수로 나타낼 수 있으며 섬유의 혼입으로 인한 강도의 변화는 섬유와 관련한 변수들을 고려한 함수형태로 나타낼 수 있다. 일반적으로 섬유혼입률 V_f와 섬유의 형상비 l_f/d_f, 그리고 섬유와 매트릭스 사이의 부착강도 τ가 강도와 관련 있는 변수들이며, 본 연구에서는 동일한 물결합재비에 대한 동일형태를 가진 섬유는 매트릭스와의 부착강도가 동일하다고 가정하고, 섬유혼입률, 형상비 및 섬유보강지수가 섬유가 강도에 미치는 영향을 분석하였다.

부착강도가 동일하다고 가정할 수 있는 이유는 다음과 같다. 일반적으로 섬유와 매트릭스 사이의 부착강도는 실험결과의 편차가 크게 나타나며, 이러한 결과는 섬유의 하중방향에 대한 경사각, 매립길이, 섬유의 기하형상, 그리고 매트릭스의 강도에 영향을 받기 때문이다.[13] 섬유와 매트릭스 사이의 부착강도 τ는 하중방향에 대한 섬유의 경사각 a와 균열폭 ω의 함수로 나타낼 수 있다. 불연속적인 임의의 섬유 혼입에 대해서 방향각 a가 정규분포의 확률밀도함수를 갖는다고 가정할 수 있고, 또 최고하중 상태에서 섬유에 발생하는 부착강도가 부착길이에 걸쳐 균일하게 완전히 발현된다고 생각한다면 부착강도는 일정한 값을 갖는다고 가정할 수 있다.

4.1 물결합재비에 따른 압축강도의 변화

섬유의 혼입에 따른 압축강도의 영향을 규명하기 위해서 우선 섬유가 혼입되지 않은 고강도 시멘트 복합체의 물결합재비와 압축강도와의 관계를 규정할 필요가 있다. Table 3에서 No.5에서 No. 10까지의 물결합재비에 따른 압축강도 실험결과를 통해 다음의 식

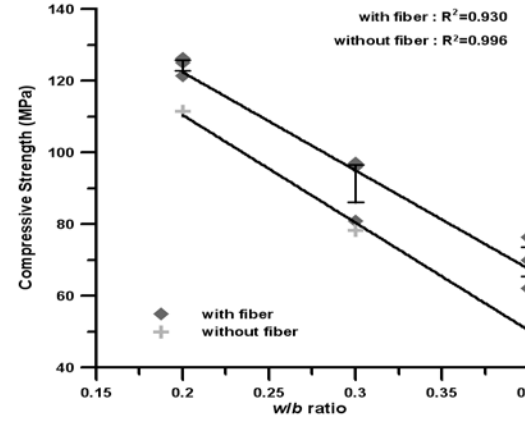

Fig. 1 Relationship between w/b ratio and compressive strength

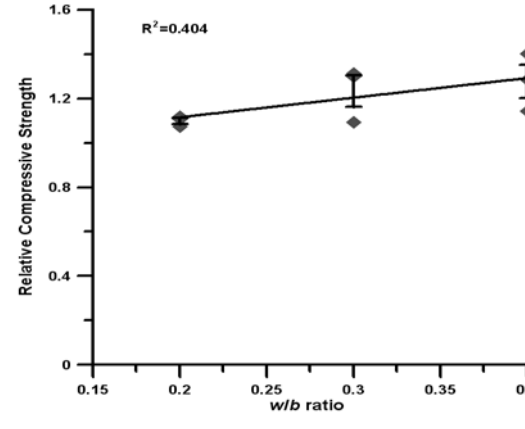

Fig. 2 Relationship between w/b ratio and relative compressive strength

(1)과 같은 물결합재비와 압축강도와의 경험적인 관계식을 추정하였다.

$$f_c' = \frac{23.44}{(w/b)} - 4.18 \quad \text{(MPa)} \qquad (1)$$

이 관계식을 근거로 하여 섬유의 혼입에 따라 압축강도가 어떻게 변화하는지 파악하였다.

Fig. 1과 Fig. 2는 섬유를 혼입하지 않은 경우와 형상비 65의 강섬유를 3% 혼입한 경우에 대해 물결합재비를 0.2에서 0.4까지 변화시켰을 경우 시험체의 압축강도 및 압축강도비의 변화를 보여주고 있다. Fig. 2에서 상대압축강도(relative compressive strength)는 동일 물결합재비에 대해 섬유가 없는 경우의 압축강도(f_c')에 대한 섬유가 혼입된 경우의 압축강도(f_{cf}')비를 의미한다. Fig.1 과 Fig. 2를 살펴보면 섬유를 혼입한 경우와 혼입하지 않은 경우를 비교할 때, 상대압축강도를 살펴보면 물결합재비가 높을수록 더 크게 나타나는 경향이 다소 보이며, 압축강도 증가량은 물결합재비에 관계없이 거의 일정하게 나타난다.

4.2 섬유의 혼입에 따른 압축강도의 변화

섬유혼입에 따른 압축강도의 변화는 섬유혼입률(V_f), 섬유형상비(l_f/d_f), 그리고 두 변수를 결합한 $V_f(l_f/d_f)$로 표현되는 섬유보강지수(Reinforcing Index, *RI*)를 통해 강섬유 보강 시멘트 복합체를 분석하는데 이용하였다. 앞서 서론에서 언급한 바와 같이 섬유보강 콘크리트의 압축강도에 대한 기존의 연구결과들에 따르면 압축강도와 섬유의 혼입 사이에는 명확한 상관관계를 규정하기가 어렵다. 하지만 일반콘크리트에 섬유를 보강하였을 경우 압축파괴가 섬유의 항복이나 인발에 따른 파괴가 아니라 섬유가 구조적 역할을 하기 이전에 상대적으로 낮은 강도의 매트릭스의 파괴로 인한 것이라 판단할 때, 고강도 초세립 미립자로 구성된 매트릭스를 사용할 경우에는 섬유에서 충분한 부착강도가 발현되고, 높은 응력상태에서의 매트릭스와 섬유사이의 상호결속(interlocking) 작용으로 인해 섬유혼입에 따른 압축강도의 향상을 기대할 수 있다.

미세균열의 생성원인이 모두 굵은골재와 시멘트 페이스트 계면특성에 기인하므로 굵은골재를 사용하지 않고 미세입자들로 구성된 복합체의 경우 계면에 내재하는 균열을 줄일 수 있고, 또한 시멘트 페이스트와 미세 구성입자간의 부착이 견고해져서 매트릭스 파괴에 의한 압축강도 특성이 아닌 섬유의 영향을 반영한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

4.2.1 섬유혼입률과 압축강도와의 관계

물결합재비 0.3에 대해 섬유혼입률 0, 1, 2, 3, 5%로 2회에 나누어 실험한 결과를 통해 섬유혼입률이 압축강도에 미치는 영향을 파악하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 섬유혼입률과 압축강도 및 상대압축강도의 관계를

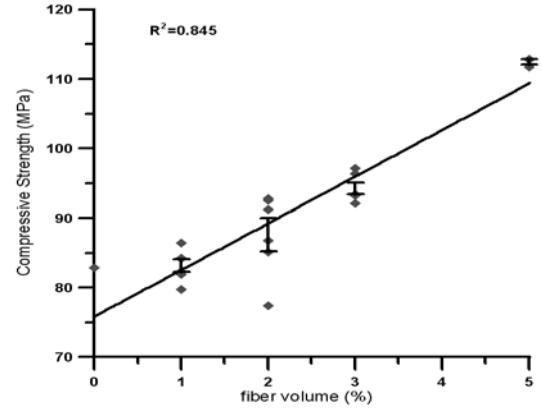

Fig. 3 Relationship between fiber volume fractiion and compressive strength

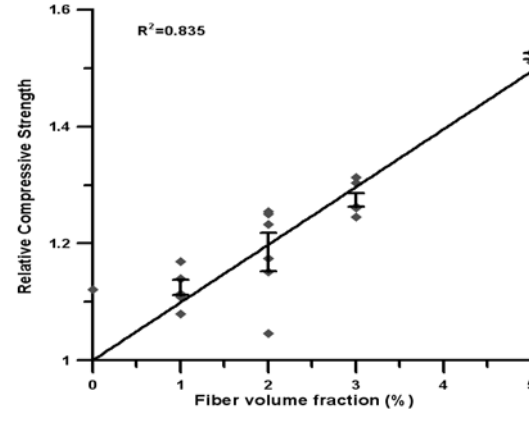

Fig. 4 Relationship between fiiber volume fraction and relative compressive strength

나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 섬유의 혼입률이 증가할수록 선형적으로 강도가 증가함을 볼 수 있었다. 시험체의 파괴면을 살펴보면 Nelissen(1972), Kupfer et al(1969)의 압축실험 결과와 마찬가지로 최대 인장변형률 방향에 거의 수직한 방향으로 파괴면이 형성되었는데, 이와 같은 결과로 볼 때, 압축파괴가 인장쪼개짐에 의해 발생하였음을 추측할 수 있으며, 압축파괴가 인장특성에 의해 결정되어 진다고 볼 수 있다. 따라서 섬유혼입률에 따른 압축강도의 증가는 혼입률이 증가함에 따라 인장파괴면에 존재하는 단위면적당 섬유의 수가 증가하여 인장에 대한 전체 섬유의 인장저항력이 증가하였기 때문으로 판단된다.

4.2.2 섬유의 형상비와 압축강도와의 관계

물결합재비 0.3에 대해 섬유혼입률 3%로 일정한 값을 가지고 강섬유의 형상비를 55에서 65까지 변화시킨 경우에 대한 실험결과를 통해 압축강도에 미치는 영향을 파악하였다.

Rossi et al(1987)에 의하면 단섬유는 일반적으로 마이크로 균열을 제어하는 역할을 하고 장섬유는 매크로 균열의 진전을 제어하는 역할을 한다. 본 연구에서는 두 종류의 섬유를 동시에 사용하여 균열저항성을 향상시키고자 하였으며, 따라서 강섬유의 형상비는 섬유형태는 같으나 길이와 직경이 상이한 두 가지의 강섬유를 혼합 사용한 경우에 대한 영향을 형상비의 함수로 파악하고자 하였다.

두 가지의 강섬유를 혼합하여 사용한 경우, 형상비는 각각의 섬유부피비를 고려하여 산술 평균한 값을 취한 것으로 다음의 관계식을 이용하였다.

$$A_r = \frac{V_{f,1}A_{r,1} + V_{f,2}A_{r,2}}{V_{f,1} + V_{f,2}} \quad (2)$$

여기서, V_{f1}과 V_{f2}는 다른 형상비를 가진 섬유의 부피비를 나타내고 $A_{r,1}$과 $A_{r,2}$는 각각의 형상비 값을 의미한다. A_r은 혼합 사용한 경우의 평균 형상비 값으로 이 값을 형상비 영향을 고려하는 변수값으로 사용하였다.

섬유형상비 값의 변화에 따른 압축강도 및 상대압축강도의 변화는 Fig. 5와 Fig. 6에서 보는 바와 같다.

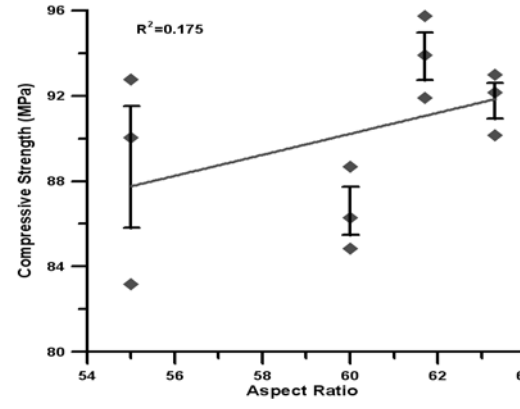

Fig. 5 Relationship between aspect ratio and compressive strength

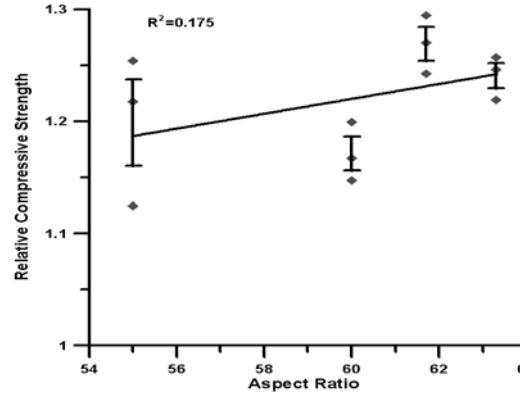

Fig. 6 Relationship between aspect ratio and relative compressive strength

고려한 형상비의 범위가 좁고, 실험결과의 편차가 많아 다소 신뢰성은 떨어지지만, 실험범위 내에서 형상비의 값이 증가함에 따라 압축강도가 조금 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 부착력이 작용하는 섬유 표면적이 증가함에 따른 결과로 판단되며, 섬유혼입률이 압축강도에 미치는 영향에 비해 형상비의 영향은 아주 작은 것으로 나타났다.

4.2.3 섬유보강지수와 압축강도와의 관계

Fig. 7과 Fig. 8은 섬유보강지수와 압축강도, 섬유보강지수와 상대압축강도의 관계를 나타낸 것이다. 섬유 혼입률과 형상비는 모두 강섬유보강 시멘트 복합체의 압축강도와 선형적인 상관관계를 가진다. 따라서

강섬유가 시멘트 복합체의 압축강도에 미치는 영향은 두 변수를 모두 고려하여 곱의 형태로 나타낸 섬유보강지수를 사용하여 분석하는 것이 타당하다. 섬유보강지수(reinforcing index, RI), $V_f(l_f/d_f)$가 압축강도에 미치는 영향을 살펴보면 Fig. 7과 Fig. 8에서 보는 바와 같이 섬유보강지수와 압축강도 및 상대압축강도가 선형적인 관계를 보인다. 이것은 앞서 언급한 바와 같이 파괴면에 작용하는 단위면적당 섬유의 수의 증가와 부착력이 작용하는 섬유 표면적의 증가로 인한 보강효과가 함께 나타난 결과이다.

4.3 고강도 강섬유 보강 시멘트 복합체의 압축강도 예측식

압축강도 70 MPa 이하의 섬유보강 모르타르에 대한 Fanella and Naaman(1985)의 연구결과에 따르면 섬유보강 모르타르의 압축강도를 물결합재비에 의해 결정되는 모체의 강도와 섬유에 의해 보강되는 압축강도의 잉여 증가분의 합으로 정의하고 있으며 이와 경향은 Fig. 7과 Fig. 8에서 보는 바와 같이 본 연구에서도 동일하게 나타났다. Fig. 7에서와 같이 섬유보강지수와 압축강도의 관계가 섬유보강지수가 증가함에 따라 선형적으로 압축강도가 증가하는 것으로 나타났으며 물결합재비에 따른 섬유보강효과는 Fig. 1에서와 같이 압축강도 증가량의 크기가 거의 일정하게 나타났다. 이와 같은 분석 결과를 바탕으로 본 연구에서 수행한 강섬유보강 시멘트 복합체의 압축실험 결과에 대해 다음과 같은 섬유보강지수와 압축강도와의 관계식을 얻을 수 있었다.

$$f_{cf}^{'} = 9.8\left(\frac{V_f l_f}{d_f}\right) + f_c^{'} \qquad \text{(MPa)} \qquad (3)$$

Fig. 9에서 보는 바와 같이 위의 관계식에서 섬유보강지수에 의한 보강효과는 Fanella and Naaman (1985)에서 제시하는 값보다 약 5배 정도 크게 나타나는데 이와 같은 현상은 반응성을 가진 충전재, 실리카퓸 등의 사용으로 인해 공극의 크기 및 공극률이 작아지고 비결정질의 결정형상 생성으로 인해 보다 치밀

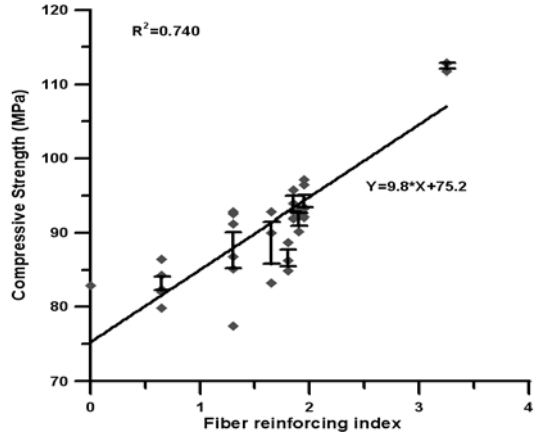

Fig. 7 Relationship between *RI* and compressive strength

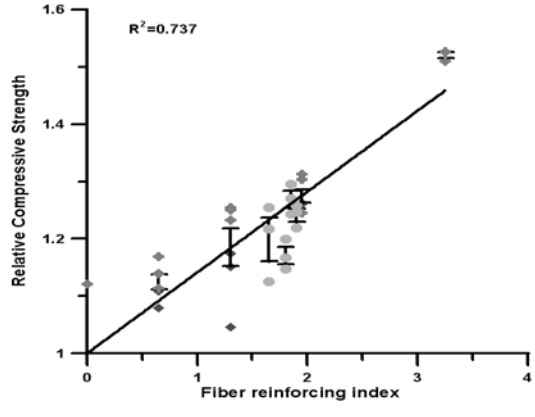

Fig. 8 Relationship between *RI* and relative compressive strength

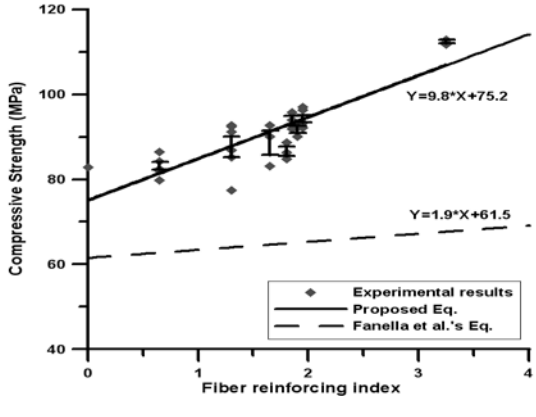

Fig. 9 Comparison between proposed Eq. and Farella et al.'s Eq

한 미세구조를 이루게 되어 강섬유와 매트릭스 사이의 물리적 부착력이 증가하기 때문으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 압축강도 70~120 MPa 범위에 있는 고강도 섬유보강 시멘트 복합체에 섬유의 혼입률, 형상비, 물결합재비가 압축강도에 미치는 영향을 검토하였다. 그 결과, 고강도 SFRC에서 섬유의 영향은 물결합재비에 관계없이 섬유로 인한 압축강도의 증가량이 거의 일정하게 나타났으며, 섬유혼입률이 증가할수록 압축강도의 증진효과가 크게 나타났다. 또 상대적으로 적은 값이지만 형상비가 증가함에 따라 압축강도가 다소 증가하는 경향이 나타내었으며, 섬유보강지수와 압축강도와의 관계는 선형적인 관계로 나타났다. 이것은 섬유보강지수가 증가함에 따라 매트릭스 파괴면에 작용하는 섬유밀도의 증가와 함께 파괴면을 따라 작용하는 부착력의 증가에 기인하는 것으로 판단된다. 마지막으로 섬유보강지수와 압축강도의 관계를 나타낸 모델식을 제안하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 '콘크리트코리아 연구단'에서 주관하여 시행한 2006년도 건설핵심기술 연구개발사업「05-CCT-D11, 고성능·다기능 콘크리트의 개발 및 활용기술」지원으로 수행되었으며, 이에 감사한다.

참고문헌

1. 부척량 등, "강섬유보강 콘크리트의 압축응력-변형률 특성에 관한 실험적 연구", 대한건축학회논문집 6권 6호, 통권32호, 1990. 12, pp. 295-307.
2. 박정준 등, "초고강도 강섬유 보강 시멘트 복합체의 구성인자가 압축강도에 미치는 영향", 한국콘크리트학회논문집, Vol. 6, No. 1, 2005, pp. 35-41.
3. 한국건설기술연구원, "초고성능 시멘트 복합재를 활용한 교량 거더 개발 중간보고서", 건설교통부, 2004.
4. V. Ramakrishnan, G. Y. Wu and G. Hosalli, "Flexural Behavior and Toughness of Fiber Reinforced Concretes", Transportation Research Record 1996, pp. 69-77.
5. L. J. M. Nelissen, "Biaxial Testing of Normal Concrete", Heron(Delft), Vol. 18, No. 1, 1972, pp. 90.
6. H. Kupfer, H. K. Hilsdorf, and H. Rusch, "Behavior of Concrete under Biaxial Stresses", ACI Journal Proceedings, Vol. 66, No. 8, August, 1969, pp. 656-666.
7. S. P. Shah and B. V. Rangan, "Fiber Reinforced Concrete Properties", ACI Journal Proceedings, Vol. 68, No. 2, February, 1971, pp. 126-135.
8. W. F. Chen and J. L. Carson, "Stress-Strain Properties for Random Wire Reinforced Concrete", ACI Journal proceedings, Vol. 68, December, 1971, pp. 933-936.
9. G. R. Williamson, "Effect of Steel Fibers on the Compressive Strength of Concrete", Fiber Reinforced Concrete, SP-44, American Concrete Institute, Detroit, 1974, pp. 195-207.
10. P. Thiptbroto, "Tensile Strain Hardening of High Performance Fiber Reinforced Cement Based Composites", Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Michigan, 1991.
11. A. Naaman, D. Otter and H. Najm, "Elastic Modulus of SIFCON in Tension and Compression", ACI Materials Journal, Vol. 88, No. 6, 1991, pp. 603-612.
12. P. Richard and M. Cheyrezy, "Composition of Reactive Powder Concretes", Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, pp. 1501-1511, 1995.
13. Hugo S. Armelin and Nemkumar Banthia, "Predicting the Flexural Postcracking Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete from the Pullout of Single Fibers", ACI Material Journal, V. 94, No. 1, pp. 18-31.
14. P. Rossi, P. Acker and Y. Malier, "Effect of Steel Fiber at Two Stages: the Material and the Structure", Materials and Structures, Vol. 20, 1987, pp. 436-439.
15. D. A. Fanellla and A. E. Naaman, "Stress-Strain Properties of Fiber Reinforced Mortar in Compression", ACI Journal, Vol. 82, No. 4, 1985, pp. 475-483.

16. Yoshio Kosaka et al, “Experimental Study on Inelastic Stress-Strain Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete under Compression”, Trans. of A. I. J., No. 337, March, 1984, pp. 15-24.
17. A. S. Ezeldin and P. N. Balaguru, “Normal- and High-Strength Fiber Reinforced Concrete under Compression”, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 4, No. 4, November, 1992, pp. 415-429.
18. W. Yin and T. T. C. Hsu, “Fatigue Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete in Uniaxial and Biaxial Compression”, ACI Materials Journal, Vol. 92, No. 1, 1995, pp. 71-81.

(접수일자 : 2007년 7월 10일)