강섬유 보강 콘크리트의 물성과 응용

이 차 돈*

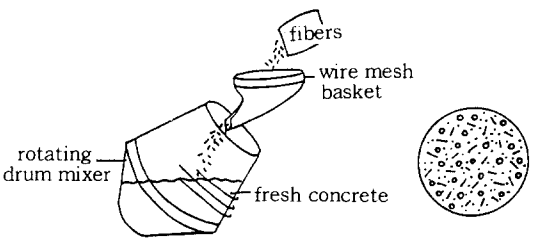
강섬유보강 콘크리트는 외국의 경우 다양하게 건축 및 토목 구조물에 적용되고 있는 건설 신소재이다. 콘크리트 내에 투입되는 강섬유의 종류도 다양하게 개발되어 생산되고 있다. 그러나 국내의 경우는 강섬유보강 콘크리트에 대한 인식이 부족하여 실제 시공에 적용된 예는 드물다고 볼 수 있다.

본 글에서는 기존콘크리트와 비교하여 강섬유보강 콘크리트가 갖는 재료적 우수성과 함께 외국의 경우에 이 강섬유보강 콘크리트를 사용하여 실제 시공된 예를 살펴보고자 한다.

1. 강섬유 보강 콘크리트(SFRC)의 재료적 특성

강섬유보강 콘크리트(Steel Fiber Reinforced Concretes : 이하 SFRC)는 콘크리트에 길이가 짧고 단면이 작은 강섬유를 혼입함으로써 얻게 되는 콘크리트를 일컫는다. 이들 강섬유들은 콘크리트내에 임의 방향으로 일정하게 분포되어 있음으로써 콘크리트의 물성을 향상시키게 된다(그림 1). 콘크리트에 첨가되어 사용되는 콘크리트에는 강섬유 외에도 유리섬유, 플라스틱섬유, 탄소섬유(Carbon Fibers), Kevlar, 자연섬유(Natural Fibers)등이 있다(그림 2).

콘크리트 모체내에서 강섬유는 응력에 의해 발생되는 미세균열(microcracks)들을 제어함으로



a. Fibers being added during mixing.

b. Fiber Reinforced Concrete

그림 1. 강섬유의 콘크리트 내 혼입과정

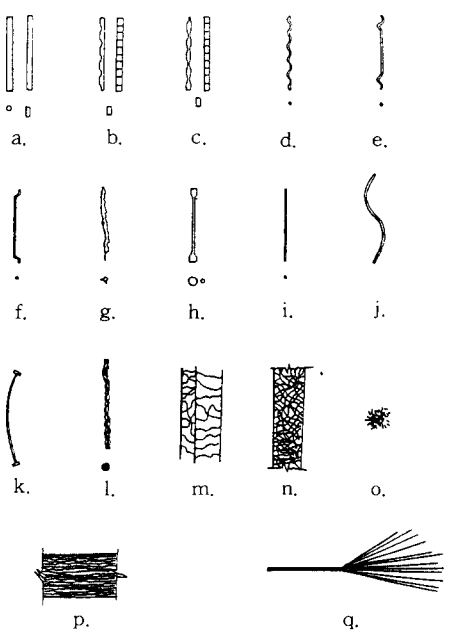


그림 2. 여러가지 섬유 형태((a)-(h) : Steel Fibers, (i) : Glass Fibers, (j)-(n) : Plastic Fibers, (o)-(q) : Carbon Fibers)

* 부회장, 건국대학교 건축공학과 교수

써 콘크리트의 물성을 향상시키게 되는데 강섬유와 미세균열간의 주요 mechanism을 보면 강섬유에 의해 미세균열의 경로가 바뀌거나(그림 3(a) : parallel running), 강섬유를 지나면서 미세균열이 강섬유를 따라 진전되거나(그림 3(b) : shifting) 여러 갈래로 갈라지는 현상(그림 3(c) : branching)등을 살표볼 수 있다. 이외에도 큰 균열이 콘크리트에 발생하였을 경우 강섬유가 균열된 콘크리트의 양단을 저지하여 저항력에 견디는 bridging 현상 등을 들 수 있다. 미세 균열과 강섬유간의 상호 작용은 강섬유와 콘크리트 모체간의 접착면의 특성과 관계가 있다. 연구결과[1]에 의하면 이 접착면은 크게 3개의 영역으로 나뉘어져 있는데 실제로 콘크리트와 강섬유가 접촉하고 있는 부분(thin duplex film)과 이와 연접하여 있는 10내지 30×10^{-6}m 두께의 calcium hydroxide crystal들로 이루어진 부분과 이를 둘러싸는 다공성의 층으로써 이루어져 있다(그림 4). 응력이 가해질때 이 다공층에서 강섬유와 모체콘크리트간의 debonding현상이 일어나게 된다.

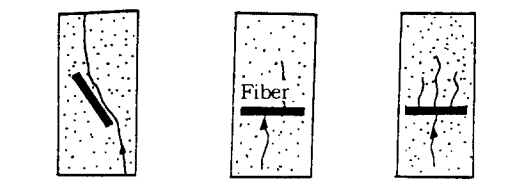


그림 3. 콘크리트 내의 강섬유의 미세균열 제어작용

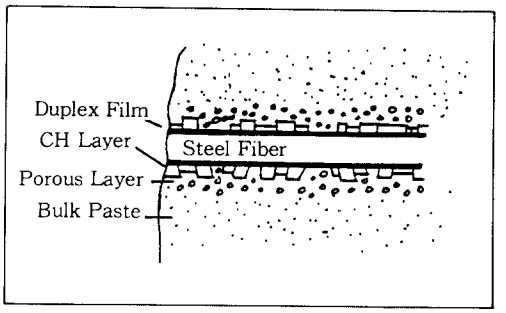


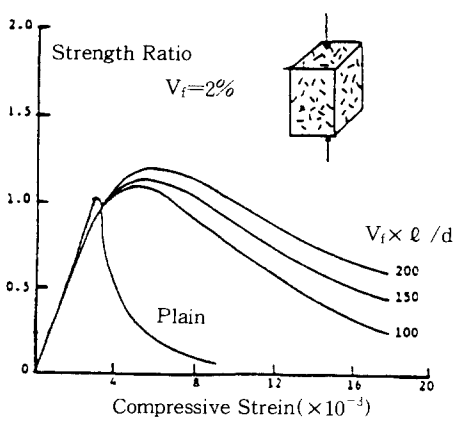
그림 4. 강섬유와 모체 콘크리트의 미세구조

강섬유들을 콘크리트에 혼입함으로써 향상되는 콘크리트의 물성은 (a) 콘크리트의 연성증가 (b) 내 충격성 (c) 인장 및 휨 강도의 증가 (d) 내 피로성 (e) 건조수축의 감소 (f) 내 마모성 등을 들 수 있다. 이들 개선점들의 특성과 이로 인한 SFRC의 응용분야에 대하여 살표보기로 한다.

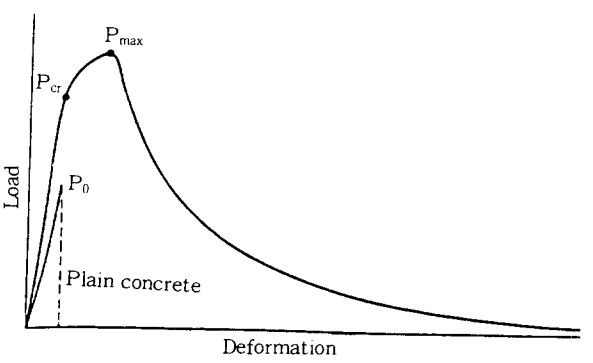
1.1 연성 증가

콘크리트가 갖는 구조적인 최대 취약점은 인장응력을 받을 때 취성적인 파괴를 하는데 있다. SFRC는 이러한 기존 콘크리트의 약점을 보완하여 연성적으로 콘크리트가 파괴하도록 한다(그림 5).[2-6]

기존 콘크리트와 비교하여 증가되는 SFRC의 연성적 특성은 구조체에 큰 변형이 일어나도 붕괴가 일어나지 않아야 하는 내진 구조체의 설계에 이용될 수 있다. 그림 6에 나타난 바와 같이 지진



(a) 압축하중



(b) 휨 하중

그림 5. 강섬유보강 콘크리트의 보강 효과

시 반복 하중에 의해 붕괴되기 쉬운 보-기둥 접합부에 SFRC를 사용함으로써 지진 에너지를 흡수하고 궁극적으로 구조물이 연성적 거동을 할 수 있도록 한다. 압축 응력하에서 큰 연성의 증가를 보이는 SFRC는 일반적으로 매우 취성적인 파괴형태를 보이는 고강도 콘크리트에나 또는 고강도 철근과 함께 사용되어 구조체의 연성의 증가를 확보할 수 있다.

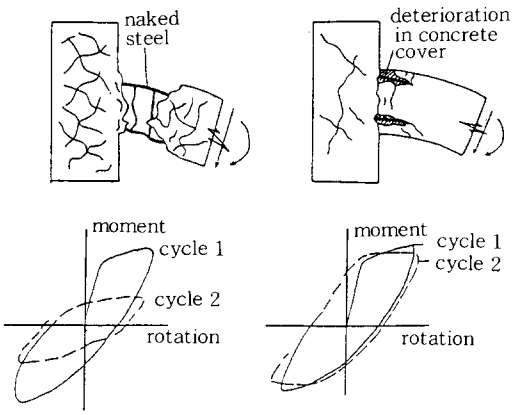


그림 6. 강섬유보강 콘크리트 사용에 의한 부재의 연성 증가

1.2 내충격성

일반 콘크리트는 충격하중에 비교적 약하다. 그러나 SFRC의 경우, 충격에 대한 저항은 거의 10배 이상의 증가를 하게 된다. 이러한 SFRC의 특성은 충격하중을 받는 활주로나 또는 방어용 구조물에 응용될 수 있다.

1.3 인장 및 휨 강도의 증가

일반 콘크리트는 직인장 하중을 받을 경우 응력이 최대 인장강도에 도달한 직후 큰 균열이 발생하며 취성적인 파괴를 하게 된다. 그러나 SFRC의 경우 응력이 인장 강도에 이르기 전에는 주로 강섬유의 crack-arresting mechanism에 의하여 균열 진전이 제어되어 강도가 증가하게 되며 응력이 SFRC의 인장강도에 이른후에는 강섬유의 bridging-action mechanism에 의하여 균열을 가로지르는 강섬유의 pull-out 저항에 의하여 연성이 크게 증가하게 된다(그림 7). 인장에서의 연성 증가는 SFRC가 도로, 물탱크, pipe 등의 재료로서의 가능성을 제시할 뿐 아니라 전단 응력이 크게 작용하는 구조재(예를 들면 보, slab, 보-기둥 접합부 등)에도 적절히 응용될 수 있는 가능성을 보여준다.

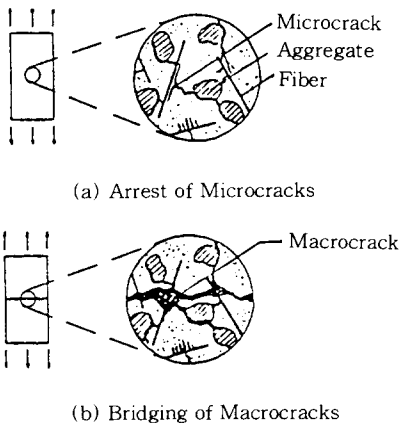


그림 7. 인장응력하에서 강섬유의 균열에 대한 제어 적용

1.4 내 피로성

콘크리트내에 강섬유의 혼입량이 증가할수록 피로강도가 증가하며 또한 피로하중하에서 발생하는 균열폭이나 처짐량이 감소하게 된다. 이 특성은 SFRC가 도로나 교량 등에 효율적인 구조재료로써 사용될 수 있음을 보여주는데 SFRC를 도로에 적용할 경우 실제로 기존 도로와 비교하여 두께를 약 50%감소시킬 수 있었다[5].

1.5 건조수축의 감소

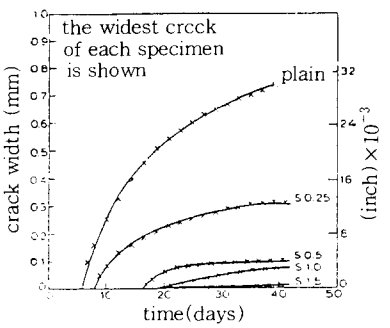


그림 8. 건조수축양의 비교

그림 8은 일반 콘크리트와 SFRC의 건조수축양을 비교하고 있다. 일반 콘크리트와 비교하여 SFRC의 경우 건조수축양이 크게 감소함을 볼 수 있으며 이 특성은 구조물의 많은 부문에 적용될 수 있다.

1.6 기 타

SFRC는 위에서 언급된 항목 외에도 내구성, 내열성, 마찰저항 증진등 구조재로서 많은 우수한 성능을 보유하고 있다. 그러나 이러한 SFRC의 우수성을 확보하기 위하여는 SFRC배합시 강섬유의 적절한 분산과 SFRC의 적절한 시공연도 확보, 그리고 강섬유의 부식에 대한 주의가 요구된다.[2, 5, 7]

즉 기존 concrete와 비교하여 혼화제 및 혼화제 사용에 대한 보완조치가 필요하며 또한 배합순서에도 주의를 기울여야 한다.[2, 5, 8]. 강섬유의 종류 및 콘크리트내 강섬유의양 세장비(aspect ratio : 강섬유 길이를 그 직경으로 나눈값)에 따라 SFRC내 강섬유의 분산도 및 SFRC의 시공연도는 큰 영향을 받는다. 대개의 경우 알칼리성을 띤 콘크리트에 의해 장기간의 심한 외적 기후 조건에서도 콘크리트내의 강섬유는 부식을 하지 않음이 고찰되었다.[5]

2. 강섬유 보강 콘크리트의 구조적 응용

앞에서 언급한 바와 같이 SFRC는 기존 콘크리트와 비교할 때 압축, 인장, 휨 하중하에서 강도 및 연성이 크게 증가함을 볼 수 있다. 이러한 SFRC의 우수성은 각종 건축 및 토목 건축물 구조부재에 응용되며 사용되고 있다.

다음에서 SFRC가 실제로 응용된 실례를 살펴보기로 한다.

2.1 콘크리트 슬래브

강섬유 보강 콘크리트는 동적하중으로 인한 진동이나 큰 고정하중으로 말미암아 많은 보강 철근의 배근이 요구되는 공장 바닥이나 피로 하중과 균열발생에 대한 저항이 필요한 상업건물의 바닥, 또는 일반 건축 구조물의 metal deck에 타설하여 합성 슬래브로서 사용되고 있다. 지반에 접한 슬래브의 경우 열악한 환경조건에 슬래브가 타설되에 되는데 이런 경우 기존의 철근 콘크리트의 사용대신, 직접 SFRC를 레미콘에 실어와 현장에 타설함으로써 철근을 배근할 필요가 없어짐으로써 시공비의 절감 및 시공의 안정성을 확보할 수 있고 전체적으로 레미콘의 운반 및 투하 시간을 절감 할 수 있는 효과를 거둘 수 있다. 실제로 미국 Missori에 위치한 공장의 경우 22,300m^2의 공장 바닥을 압축강도가 280kg /cm^2이고 콘크리트 1m^3에 20kg의 강섬유를 혼입한 SFRC를 사용하여 두께 127mm로 슬래브를 타설하였다.

또 철골 구조물에서 metal deck위에 타설되는 콘크리트의 건축수축과 온도변화에 의한 균열발생을 제어하기 위하여 기존에 사용되던 용접철망의 대체재로써 SFRC가 직접 사용된다. SFRC로 용접철망을 대신할 경우 구조적인 안정성을 유지하며 도시에 시공의 편의성과 함께 연성을 확보할 수 있는 잇점이 있다.

2.2 프리케스트 콘크리트

SFRC는 프리케스트 부재가 운반도중에 균열이 가거나 쪼개지는 현상을 방지하는데 사용되고 있다. 또한 이들 부재가 충격하중이나 갑작스런 열을 받아 파괴될 가능성이 있는 경우 그리고 casting bed에 타설시 균열발생을 최소화하기 위한 경우에 SFRC를 사용한다. 1970년대 미국 공병단에 의한 보고서에 의하면 두개의 H자 형태의 부재가 비틀린 형상을 하고 있는 무게 42ton의 프리케스트 dolosse를 전혀 철근 보강이 없이 단지 콘크리트 1m^3에 강섬유를 약 47내지 71kg을 사용한 SFRC로 제작하였는데 600개중 오직 2개만이 운반 도중 파손이 일어났다고 보고 하였다.

동일한 형태의 dolosse를 철근으로 보강하여 제작, 해안을 따라 설치하여 놓은 경우 균열사이로 해수가 침투하여 전체의 80%가 수년내에 파괴되었다. 그러나 SFRC로 제작된 dolosse의 경우 미국 공병단의 보고에 의하여 대부분의 dolosse가 양호한 상태로 있음이 보고 되었다. Dolosse 이외에도 여러형태 및 크기를 갖는 단위 프리케스트 부재들이 부재내 철근이나 용접철망의 집중 배근

현상을 줄이고 경제적인 시공 및 구조재로서의 효율성을 증진시키기 위하여 SFRC를 사용하고 있다.

2.3 Shotcrete

Shotcrete가 타설될때 타설되는 면이 수직이고 또 불규칙할 경우 일반 콘크리트에 비하여 시멘트량이 많은 shotcrete는 많은 균열을 일으킬 수 있다. 뿐만 아니라 철근을 타설 대상면에 배근하였을 경우 이 철근 뒤로 shotcrete가 효과적으로 뿜어질 수 없음으로써 공극이 발생할 수 있다(그림 9). 또한 용접철망으로 배근하였을 경우 shotcrete가 용접망에 걸리어서 용접망과 타설 대상면 사이의 공간에 콘크리트가 타설되지 못할 수가 있다(그림 10).

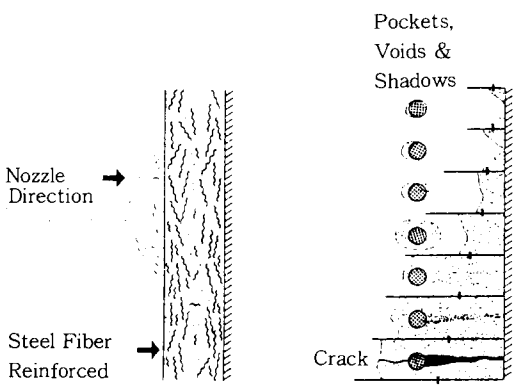


그림 9. Shotcrete의 경우 강섬유보강 효과

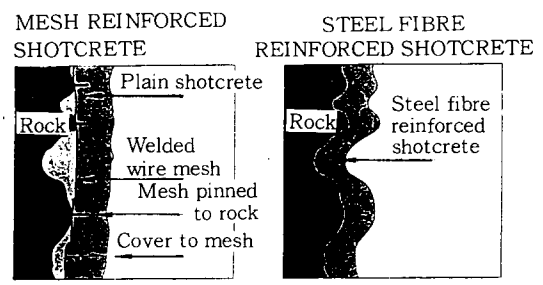


그림 10. Shotcrete의 경우 강섬유콘크리트의 타설 효과

SFRC를 shotcrete로 사용할 경우 철근 또는 용접철망의 배근이 필요가 없어지므로써 이러한 현상을 피할 수 있으며 비교적 균질한 질의 표면을 타설 대상 표면의 요철에 상관없이 확보할 수 있다. 이러한 특성으로 인하여 tunel lining 등에 SFRC는 광범위하게 이용되고 있다.

2.4 도로

SFRC는 상당한 부분의 도로(일반국도, 고속도로, 교량, 활주로 등) 포장재로써 성공적으로 사용되고 있다. Houston 남부의 610 주간 고속 도로의 경우 50kg /m^3의 강섬유를 두께 50-75mm로써 심하게 균열이 간 기존도로위에 overlay로써 1983년과 1984년 사이에 타설하였는데 정기적인 검사결과에 의하면 육안으로 확인되는 균열이 발생되지 않고 매우 양호한 상태를 유지하고 있음이 보고되었다. 일반도로의 경우 철근을 배근하여 콘크리트를 타설하게 되는데 대부분의 경우 콘크리트에 파손이 일어나는데 반하여 SFRC로 타설된 경우 횡 또는 종 방향 균열이 강섬유에 의하여 잘 제어됨이 보고되었다. 부분적으로 미끄러짐을 방지하기 위한 도로 표면용에도 SFRC를 사용하게 되는데 이때에도 매우 잘 보존됨이 보고되었다.

2.5 기 타

앞에서 언급한 바와 같이 SFRC는 강도 및 특히 연성의 증가로 많은 부분에서 응용될 수 있다. 특히 내진 설계가 요구되는곳(예를 들면 보-기능 접합부 등)이나 높은 온도를 받는 구조물(refractory 구조물) 또는 보수, 보강재로써도 사용될 수 있다.

3. 결 론

강섬유보강 콘크리트는 콘크리트 내에 강섬유를 임의로 투입함으로써 취성의 콘크리트 물성을 연성적으로 향상시킴과 동시에 압축, 인장, 휨 강도를 증가시킨 새로운 구조 신소재라고 할 수 있다. 과거 70년대가 SFRC의 재료적 물성에 대한 실험적 시기였던 반면 현재는 현장에 SFRC를 시공하는 응용단계라 할 수 있다. SFRC의 우수성은 선진 외국의 경우 일반적으로 기업, 정부, 계약관계자 등에게 잘 인식되어 있어 이미 많은 시공현장에서 응용되고 있다. 이로인하여 외국(미국, 일

본, 유럽 등)의 경우 구조적으로 안정되고 경제적인 구조물을 실현하고 있으나 국내의 경우는 안타깝게도 SFRC에 대한 인식이 아직 일반화되어 있지 않으며 시공현장도 매우 드문 실정이다.

SFRC에 대한 연구는 국·내외 학회에서 꾸준히 연구, 개발하고 있으며 이들 연구결과가 경제적이고 우수한 구조물을 실현하는데 기여할 수 있기를 기대한다.

參 考 文 獻

1. Diamond, S and Bentur, A, "On Cracking in Concrete and Fiber Reinforced Cements," *Application of Fracture Mechanics to Cementitious Composites*, NATO-ARW, Sept.4-7, 1984, pp. 87-140, editted by Shah, S.P.
2. Ziad, B., "Mechanical Properties and Structural Applications of Steel Fiber Reinforced Concrete," *Ph.D. Thesis*, Vol. Ⅱ, MIchigan State University, 1987.
3. Swaris, W. and Shah, S., "Properties of Concretes Subjected to Impact," *ASCE Journal of Structural Division Proceedings*, Vol. 109, o.7, July 1983, pp.1727-1741.
4. Naaman, A., "Fiber Reinforced Concrete Under Dynamic Loading," *SP-81, ACI*, 1984, pp.169-186.
5. Soroushian, P. and Bayasi, Z., "Prediction of the Tensile Strength of Fiber Reinforced Concrete : A Critique of the Composite Material Concept," *ACI Convention on Fiber Reinforced Concrete*, Baltimore, Nov.1986.
6. ACI Committee 544, "State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete," Report : *ACI 544.IR-82*, American Concrete Institute, Detroit, May 1982, pp.16
7. Johnston, C., "Steel Fiber Reinforced Mortar and Concrete : A Review of Mechanical Properties," *ACI Publication SP-44* : Fiber Reinforced Concrete, 1974, pp.127-142.