

纖維補強 콘크리트의 特性和 最近의 技術 (其 II)

제 II 장. 강섬유 보강 콘크리트(SFRC)

朴 承 範

〈忠南大學校 土木工學科 教授〉

강섬유보강 콘크리트(SFRC, Steel Fiber Reinforced Concrete)는 SF단섬유를 시멘트·콘크리트중에 혼입시켜 이것을 보강재로 한 복합재료로써, 종래의 보통 콘크리트에 비하여 SFRC는 인장·휨·전단강도 및 인성을 현저히 개선하고, 균열에 대한 저항성, 내충격성, 내마모성 등도 크게 증가시킬수 있는 우수한 특성을 가지고 있기 때문에, 철근콘크리트 또는 구조부재로 이용함에 있어 도로포장, 터널 라이닝, 법면보호공, 수리구조물, 내화로재 및 보수공사 등의 토목구조물에 특히 유효하게 이용되고 있고, 건축분야에서도 칸막이벽, 내화벽, 계단, 셸구조, 구조용 패널등 점차 다양한 용도 개발이 시도되고 있다.

따라서 본고에서는 강섬유의 종류와 제조법에 대해 알아보고, 또한 SFRC의 물성 및

용도개발 그리고 앞으로의 과제등에 대하여 소개한다.

1. 강섬유(SF, Steel Fiber)

1.1 강섬유의 종류와 특징

강섬유의 일반적인 치수는 길이 20 ~ 40mm, 단면적 0.06~0.3mm²정도이고, 강섬유의 기본적인 형상, 치수 및 품질특성은 강섬유의 제조방법에 의해 크게 영향된다.

강섬유의 제조방법은 크게 鋼線切斷法, 薄板剪斷法, 厚板切削法 및 溶鋼抽出法의 4 종류로 구분하며, 이들 제조법의 개략적인 단면을 그림1에 나타내었다.

(1) 鋼線切斷法 (Cut Wire)

그림1(a)와 같이 압연, 인발한 강선을 소정의 길이로 회전커터(Cutter)에 의해 연속

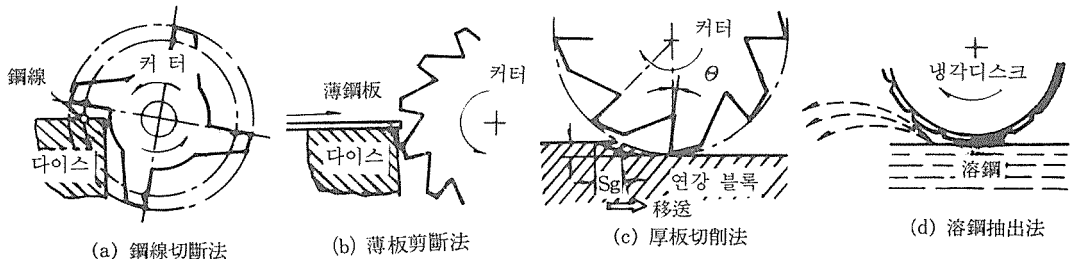


그림 1. 강섬유의 제조방법

적으로 절단하는 방법이다. 이 방법에 의해 제조된 강섬유의 특징은 원형단면의 강선을 인장시켜 가늘게 할 수 있고, 아울러 가공경화에 의한 높은 인장강도를 갖는 것이며, 또한 원형단면이므로 부착강도가 작으나 섬유표면에凹凸을 만들어주는 異形(Indent) 가공이나 섬유끝에 정착용 후크(Hook) 또는 패들(Paddle)을 설치하여 부착성능을 향상시킬 수 있다. 그리고 재질은 탄소강 또는 스테인레스강으로 강섬유의 인장강도는 이들과 거의 같아서 탄소강의 경우 $\phi 5\text{mm}$ 일 때 약 $130\text{kg}/\text{mm}^2$, $\phi 0.6\text{mm}$ 일 때 약 $100\text{kg}/\text{mm}^2$ 정도이며, 일본에서 시판되는 강섬유의 표준치수는 $\phi 0.5\sim 0.8 \times 25\sim 50\text{mm}$ 이고 미국등지에서는 100mm 이상의 것도 사용되고 있다.

(2) 薄板剪斷法

그림1(b)와 같이 판두께 $0.25\sim 0.6\text{mm}$ 의 냉연강판을 섬유의 길이와 같은 폭으로 절단한 후 회전커터에 의해 연속적으로 절단하는 방법이다. 이 제조법에 의한 강섬유의 단면형상은 矩形이고, 특히 연강판인 경우는 변화가 크고 섬유의 축방향 표면은 비틀림, 휨등의 변형이 발생되지만 콘크리트에 대한 부착강도를 증대시킬 수 있는 효과가 있다. 또한 회전커터의 끝에 의해 이송로울러에서凹凸을 만들어주거나 표면에 Wave를 만들어 부착성능을 증진한다. 이 방법에 의한 SF의 인장강도는 강판의 강도와 거의 같고, 가공경화의 영향은 비교적 작다. 따라서 이 섬유의 인장강도는 $40\sim 130\text{kg}/\text{mm}^2$ 정도이고 단면치수는 $0.25 \times 0.5\sim 0.6\text{mm}$, 길이 $25\sim 50\text{mm}$ 로 제조되고 있으며, 재질은 일반적으로 저탄소강이고 스테인레스강을 사용하기도 한다.

(3) 厚板切削法

이 제조법은 일본東京大學 生産技術研究所에서 개발된 것으로, 그림1(c)와 같이 탄소강의 厚板블록을 회전커터에서 절삭가공하는 방법이다. 이 방법에 의한 SF는 절삭에 의해 대단히 큰 소성변형을 일으키며,

사용재료로써 연강을 사용하며 섬유축방향의 표면상태는 현저한 가공경화로 많은凹凸이 형성된다. 또한 이 섬유의 인장강도는 통상 $40\sim 70\text{kg}/\text{mm}^2$ 이고, 동일단면적의 다른 섬유에 비해 절삭가공에 의한 비틀림, 단면형상의 변화로 표면적이 크고 매트릭스와의 부착성이 우수하다. 현재 일본에서 시판되는 섬유의 표준치수는 환산직경(동일단면적을 가진 원형단면을 직경으로 환산한 직경) $0.55\sim 0.6\text{mm}$, 길이 $25\sim 30\text{mm}$ 이다.

(4) 溶鋼抽出法 (Melt extraction)

이 제조법은 미국 벡텔社에서 개발한 것으로서, 그림1(d)와 같이 용강의 표면에 선단이 나선형으로 된 디스크에 접하게 하여 이를 회전시켜 디스크에 붙어 있는 용강을 순간적으로 응고시켜 원심력에 의해 디스크에서 분리해 섬유를 제조하는 방법이다. 이 방법에 의해 제조된 SF는 탄소강의 경우 산화가 심하게 일어나서 연질의 섬유로 되기 때문에 품질이 좋은 것을 얻기 어려워 일본에서는 스테인레스강에 한하여 사용하고 있다. 또 이 방법에서는 디스크 선단의 notch부 형상을 연구함으로써 섬유양단이 Dog·bone 형태로 된 섬유를 제조할 수 있다.

(5) 기타

전술한 방법이외에 섬유의 재료로써 鋼製 rod를 회전시켜 진동이 있는 절삭커터를 이용해 가늘고(환산직경 $0.03\sim 0.2\text{mm}$) 정삼각형에 가까운 단면형의 강섬유를 제조하는 방법과 유리섬유 제조법과 같이 용강으로부터 섬유를 인발하여 $0.025\sim 0.15\text{mm}$, 길이 1m 이하의 섬유를 제조하는 Melt overflow방법 등이 있다.

1.2 강섬유의 역학적 성질

(1) 인장강도

SFRC의 파괴는 섬유의 인발에 의해서 일어나기 때문에, 이 경우 섬유는 파단되지 않을 정도의 인장강도가 요구된다.

섬유의 길이를 l , 직경을 d , 아스펙트비

(Aspect ratio) l/d , 콘크리트와의 부착강도를 τ 라하면, 콘크리트중의 섬유에 발생하는 인장응력 σ_f 와의 사이에는 $\sigma_f = \tau \cdot l/d$ 의 관계가 성립한다. 일반적으로 $\tau = 50 \sim 60$ kg/cm², $l/d = 60 \sim 80$ 이므로 강섬유의 인장강도는 50kg/mm²정도의 우수한 값을 가지고 있다.

(2) 경도

경도는 시공성과 보강효과에 관계되며, 열처리에 의해 재질이 연화된 것은 콘크리트 혼합중 折曲되기 쉽고, 단단한 것은 혼합중에 折損된다. 이와같이 혼합중이나 부착시의 휨과 꺾임은 섬유보강효과를 현저히 저하시키게 된다. 따라서 단단하여 탄력성을 유지할 수 있는 것이 적당하며, 일본에서 시판중인 강섬유는 마이크로 빅커스경도(Hv)가 200~370인 것이다.

(3) 형상 및 치수

강섬유에는 그림2에 나타낸 것과 같이 각종 형상의 것이 판매되고 있으며, SFRC제조시 및 경화후의 제성질에 큰 영향을 미치고 있다. 또 강섬유의 치수는 주로 시공성

과 콘크리트의 보강효과에 관계되며, 섬유의 길이가 지나치게 길거나 짧게 되면 보강 성능이 나빠지고 Fiberball이 형성되며 또한 Workability도 나빠지게 된다.

특히 강섬유 혼입에 의해 슬럼프는 감소하지만 동일한 섬유혼입율에서는 섬유의 길이(혹은 아스펙트비) 및 단면적(동일길이의 경우 섬유의 본수가 달라짐)이 주요 영향인자이고 그 이외의 형상변화는 무시할 수 있으며, 적절한 혼화제 사용에 의해 Consistency를 상당히 개선할 수 있다. 한편, 섬유의 치수형상과 강섬유를 혼입시킨 콘크리트의 정적강도와와의 관계는 일반적으로 강섬유의 형상치수를 아스펙트비(l/d)로 대표할 수 있으며, SFRC의 인장강도는 그림3과 같이 아스펙트비가 클수록, 그리고 섬유형상이 입자상으로부터 섬유상으로 변화됨에 따라 크게 증가 한다. 또한 휨시험에 의한 하중-변형관계(그림4)에서도 아스펙트비가 클수록 강도가 크게 됨을 알수 있으며, 일반적으로 전단강도에 대해서도 아스펙트비의 영향이 현저하여 섬유의 아스펙트비가 커지면 SFRC의 전단강도를 현저히 증대시킬수 있다는 것을 확인할수 있다.

(4) 부착강도

강섬유의 보강효과가 충분히 발휘할수 있는 것은 콘크리트와의 부착강도에 의해 크게 영향된다. 시공상 아스펙트비를 크게 하는데에는 그 한계가 있으므로 각 제품은 각종 형상의 연구를 시도하고 있다. 대표적인 강섬유의 형상은 그림2에 나타낸 바와 같고, 또 그 표면처리는 표면산화, 에폭시등의 수지에 의한 코팅(Coating), 금속도금등에 의해 부착성능을 개선시킬수 있다.

(5) 내부식성

SFRC는 균열발생을 억제하고, 또 균열이 발생해도 이를 섬유에 의해 분산시킨다. 따라서 콘크리트내부의 섬유는 콘크리트의 알칼리 성분에서 발생하는 녹으로부터 보호할 수 있고, 통상의 콘크리트와 비교해

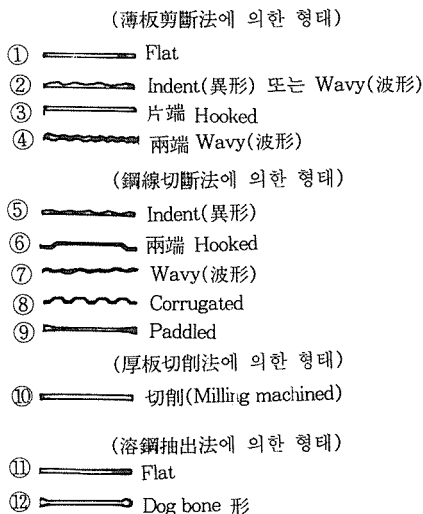


그림 2. 제조 방법에 의한 강섬유의 형상

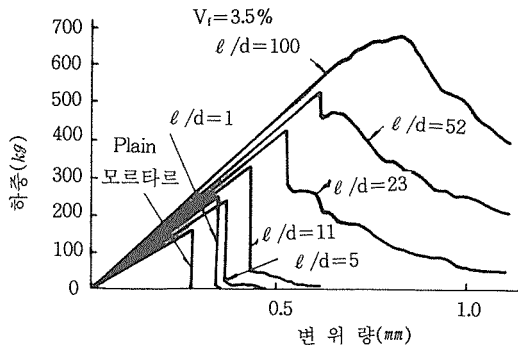


그림 3. 아스펙트비에 따른 SFRC의 인장강도

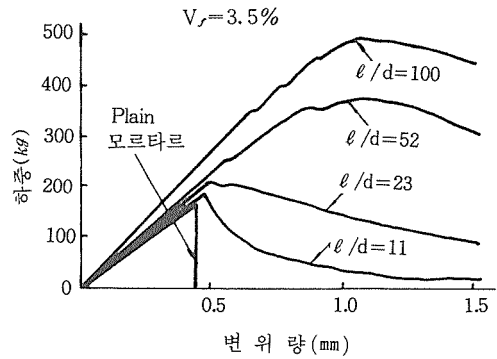


그림 4. 아스펙트비에 따른 SFRC의 휨강도

표 1. 각종 강섬유의 물리적 성질

(日本 鋼材俱樂部)

섬유의 형상	아스펙트비 (l/d)	인장강도 (kg/mm^2)	경도 (Hv)	휨하중 (g)	부착강도* (kg/cm^2)	제조법
Straight (I)	60	47.8	159	443	1.6	薄板剪斷
" (II)	"	81.5	265	591	1.9	"
" (III)	"	131.4	402	1,161	3.6	"
Wavy (I)	"	40.6	138	400	4.2	"
" (II)	"	74.6	233	787	7.1	"
" (III)	"	136.2	404	1,465	7.1	"
Indent (異形)	"	105.4	306	850	5.2	鋼線切斷
원 호	55	73.6	297	536	7.8	厚板切削
Hook 형	"	81.8	252	731	2.4	薄板剪斷
Twist 형	60	73.7	236	726	-	"

주) *W/C=50%, C/S=1/1.7

내부식성은 크게 변화하지 않는다. 일반적으로 콘크리트표면의 섬유는 산화를 방지할 수 없으므로, 시간의 경과와 함께 표면에 녹이 떠올라 미관을 중시하는 건물의 외벽에 사용하는 경우에는 이를 방지할 수 있는 방청처리가 필요하다.

한편, 표1은 각종 강섬유의 물성을 나타낸 것이다.

2. SFRC 의 역학적 성질

SFRC의 역학적 성질은 보통콘크리트에 비해 거의 모든 분야에서 대폭적으로 향상된다. 휨·인장·전단등의 하중을 받는 경우 강도는 강섬유혼입율(콘크리트에 대한 용적 혼입율, 이하 섬유혼입율 또는 V_f 로 표시)의 증가와 함께 크게 되고, plain콘크리트에 비해 크게 증가하며, 보통콘크리트의 약점

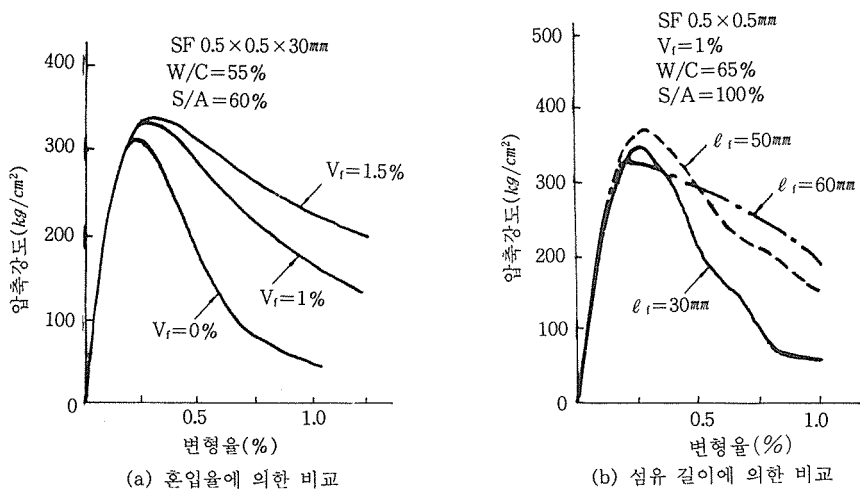


그림 5. SFRC의 압축응력-변형을 관계

인 인성도 대폭 개선된다.

이와같은 SFRC의 역학적 성질은 섬유 혼입율에 의해 크게 영향되고, 이외에 매트릭스의 품질, 배합조건, 강섬유의 품질, 형상치수 및 강섬유의 분산·배향등에 의해서도 영향된다.

2.1 압축강도

SFRC의 압축강도는 강섬유 혼입에 의한 영향은 크게 나타나지 않고 Plain콘크리트와 비슷하며, 오히려 Plain콘크리트가 약간 큰 값을 나타내는 경우도 있다. 그러나 SFRC도 w/c비가 작아질수록 섬유 혼입율에 의한 압축강도의 영향은 크게 나타나며, w/c비가 증가하면 콘크리트와 섬유와의 부착력을 약화시킴으로써 압축강도의 증가율은 둔화된다.

한편, 그림5의 압축재하시 응력-변형 관계로부터 초기하중단계에서의 변형거동에는 현저한 차이를 보이지 않지만 최대응력도 부근과 응력하강域에서는 Plain콘크리트와는 큰 차이를 보여, V_f 가 증가함에 따라 최대응력도는 약간 상승하고 그 후에서는 급속한 응력저하현상을 보이며, 또 섬유길이에

따라서는 l_f 가 클수록 최대응력도이하의 응력저하현상은 작게 됨을 알 수 있다.

또한, 강섬유를 혼입함에 의하여 미소균열의 진전을 억제할 수 있으므로 SFRC에서는 압축재하시의 소성변형능력 및 에너지 흡수능력을 크게 증가시킬수 있는 특성이 있으므로, 압축파괴시 보통콘크리트와는 달리 균열이 발생하여 극한강도에 이르고 난 후에도 급격한 파괴를 나타내지 않으며, 큰 변형이 일어나 후에도 상당한 압축인성을 나타낸다.

2.2 인장강도

강섬유를 콘크리트 매트릭스중에 혼입시켜 혼합하면 통상 3차원적인 배향·분산이 이루어져 SFRC가 형성되며, 이 SFRC가 직접인장을 받으면 섬유와 매트릭스간에 생기는 부착 Slip에 의하여 균열이 발생한다. 이 균열이 완만히 진전되어 섬유가 인발되면 전단응력이 중국부착강도에 도달할때 최종 파괴가 일어난다.

이들에 의해 SFRC의 인장강도는 특히 전면전단응력도, 섬유 혼입율, 아스펙트비 및 섬유의 배향등에 큰 영향을 받는다고 판단

된다.

그리고 보통콘크리트의 인장강도는 모르타르의 직접인장시험 또는 콘크리트의 활렬 시험에 의해 평가되지만, SFRC의 경우 아직까지 규정된 인장강도 측정법은 없으며 연구자들에 의해 여러방법이 시도되고 있는 실정이다.

직접인장시험에 의한 SFRC의 인장강도는 섬유혼입율이 증가함에 따라 증가하여 $V_f=1\sim 2\%$ 의 범위에서는 Plain콘크리트에 비하여 30~60%정도 증가된다고 보고되고 있다. 그러나 SFRC의 직접인장시험은 jig의 불량에 의한 2차응력의 개입, 공시체의 형상 및 치수, 공시체 제작시 콘크리트의 타입방향등에 의해 크게 좌우되므로 충분한 주의를 필요로 한다.

또한, 보통콘크리트에 이용되는 활렬시험법을 SFRC에 적용할 경우 균열강도는 직접인장강도와 거의 비슷한 값을 나타내지만, 균열발생후는 섬유가 균열의 발전을 억제하기 때문에 활렬강도는 직접인장강도에

비해 크게 되는 경향을 보이고, 이런 경향은 섬유혼입을 증가와 함께 현저하게 나타난다고 보고되고 있다.

한편, 그림6은 섬유혼입을 변화에 따른 SFRC의 인장응력-변형관계를 나타낸 것으로서, 인장파괴시의 변형은 섬유혼입을 증가와 함께 크게 나타나고 있다. 또한 이들 곡선은 매트릭스 내부에서의 미소균열의 급격한 성장에 의한 균열개시응력과 전면적으로 균열이 전파된 가시균열응력도 및 최대인장응력도(인장강도)의 세 특성치에 의해 표현할수 있다. 섬유혼입을 $V_f=2\%$ 혼입시킨 SFRC의 가시균열응력시의 변형은 Plain콘크리트에 비하여 약2.2배, $V_f=2.5\%$ 인 경우 약4배의 신장능력을 나타낸다고 보고되고 있다.

2.3 휨강도

SFRC의 휨강도는 특히 섬유혼입율, 섬유의 성상, 골재의 치수 및 함유율에 의해 크게 영향된다.

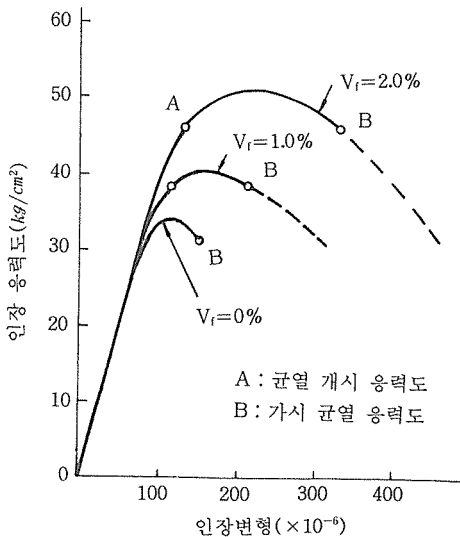


그림 6. SFRC의 인장응력-변형 관계

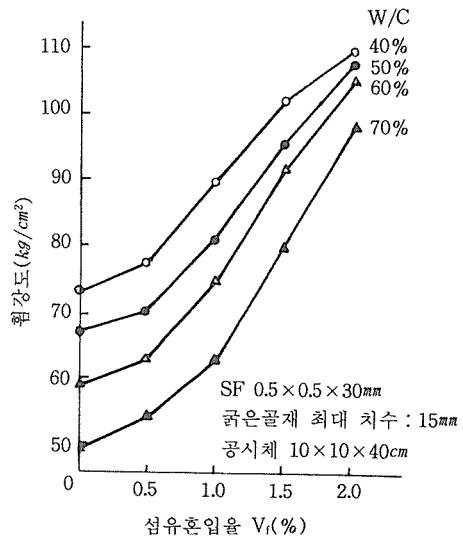


그림 7. SFRC의 휨강도와 섬유혼입율과의 관계

그림7은 w/c비의 변화에 따른 휨강도와 섬유혼입율과의 관계를 나타낸 것으로, 휨강도는 w/c비가 작을수록 증가하며, 또 $V_f=0.5\%$ 이상에서 휨강도는 섬유혼입을 증가에 따라 거의 직선적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

한편, 그림8의 휨하중-처짐관계에 의하면, SFRC의 최대 특징은 균열발생후 강섬유에 의해 저항하고 최대하중에 도달하며, 최대하중 이후에도 강섬유의 인발저항에 의해서 내력을 유지하면서 변형을 일으키기 때문에 SFRC의 에너지 흡수능력은 Plain콘크리트에 비하여 현저히 크게 된다.

이 변형능력은 휨하중-처짐곡선에 둘러싸인 면적으로 표시되는 휨인성으로 평가하며, SFRC의 휨인성은 Plain콘크리트에 비해 현저히 증대하여, $V_f=1.5\%$ 혼입시 약100배에 이르고 있다고 보고되고 있다.

또한 섬유의 형상, 재질이 다른 경우에도 최대하중은 큰 차이가 없으나, 최대하중 이후의 변형특성에는 큰 변화가 일어나고, 고강도의 SF를 사용하면 SFRC의 휨인성은 현저히 개선된다고 한다.

일반적으로 강섬유를 콘크리트중에 고르게 분산시켜 Fiberball을 형성하지 않고,

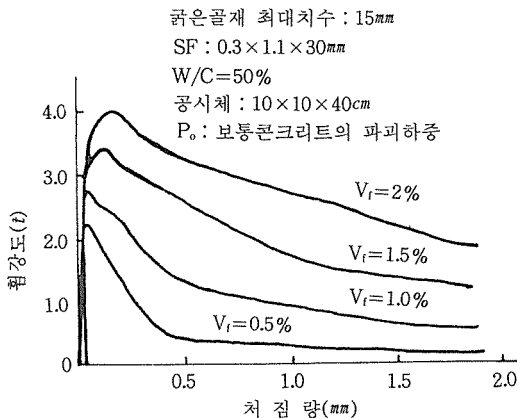


그림 8. SFRC의 섬유혼입율에 따른 휨하중-처짐관계

Workability가 양호한 콘크리트의 배합을 위한 섬유혼입율은 $V_f=2\sim3\%$ 로 알려지며, 이때의 휨강도는 Plain콘크리트에 비해 2.5~3배 증가한다. 또한 굵은골재 함유량에 의해서는 모르타의 경우가 최대이고, 굵은골재 함유량 증가에 따라 비례적으로 감소한다고 한다.

2.4 전단강도

SFRC의 전단강도는 섬유혼입을 증가와 함께 증가한다. 그러나 동일량의 강섬유를 혼입시킨 경우 전단강도는 시험방법에 의해 차이가 생기는 문제점이 있다. 魚本등은 2축재하시험에 의해 구한 순전단강도가 개량형의 직접2면전단시험에 의해 구한 전단강도와 잘 일치한다고 보고하였다. 이 방법에 의해 구한 SFRC의 전단시험결과는 그림9와 같이 섬유혼입을 증가와 함께 전단강도 및 전단 toughness는 크게 증가한다.

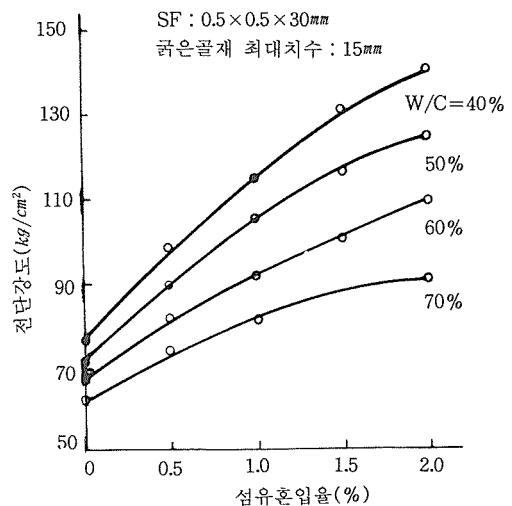


그림 9. SFRC의 전단강도와 섬유혼입율과의 관계

2.5 부착강도

철근과 SFRC의 부착·정착특성에 관한 연구보고에 의하면, 이형철근을 사용한 경우

부착 및 정착강도는 강섬유의 혼입량증가와 함께 증가하여, $V_f=1.5\%$ 인 SFRC의 경우 Plain콘크리트에 비하여 부착강도는 13~34%, 정착강도는 53%이상 향상된다고 한다.

또한 섬유는 섬유와 매트릭스 사이의 부착강도에 큰 영향을 주며, 이때 섬유표면에凹凸 또는 Hook등의 가공을 통해 어느정도 부착특성을 개선시킬수 있다.

2.6 내충격성

SFRC는 Plain콘크리트에 비해서 충격하중에 대한 저항성이 현저히 개선되고, 그 효과는 인장·휨강도의 경우에 비하여 대단히 큰 특징이 있다.

내충격성 측정방법은 ACI 544 Committee에 의해 제안되어 있으나 일반적으로 값이 작게 평가되어, 연구목적에 부응하는 각종 시험이 행하여지고 있으며, 또한 시험방법에 따른 충격하중의 속도, 에너지, 공시체의 치수 및 파괴의 정의가 서로 다르므로 상호비교는 어렵다.

그 중에서 휨·압축시험에 이용하는 공시체에 강구를 낙하해서 충격을 가해 평가하는 방법이 널리 이용되며, 그 개요 및 시험결과를 그림10에 나타내었다.

시험결과, 균열이 발생하는 낙하높이를 Plain콘크리트와 비교하면, $V_f=2\%$ 인 SFRC의 경우 평판下面에 생기는 초기균열에서는 약4배의 낙하높이를 나타내었고, 균열이 발전하여 上面에 이를 때까지의 낙하높이는 약11배가 된다고 보고되고 있으며, 이는 SF가 판의 강성 및 내력을 증진함과 아울러 균열의 발생과 성장을 억제하기 때문으로 판단된다.

또한 SFRC의 충격파괴시의 에너지 흡수량은 Plain콘크리트에 비하여 현저히 증대하여 $V_f=0.5\%$ 일때 약50배, $V_f=1\%$ 일때 약100배에 이른다고 한다.

2.7 내구성

SFRC에 있어서 내구성은 주로 SF의 부식에 의한 것이 문제시 된다. SF의 부식은 SFRC표면에 노출된 것과 내부에 있어서 매

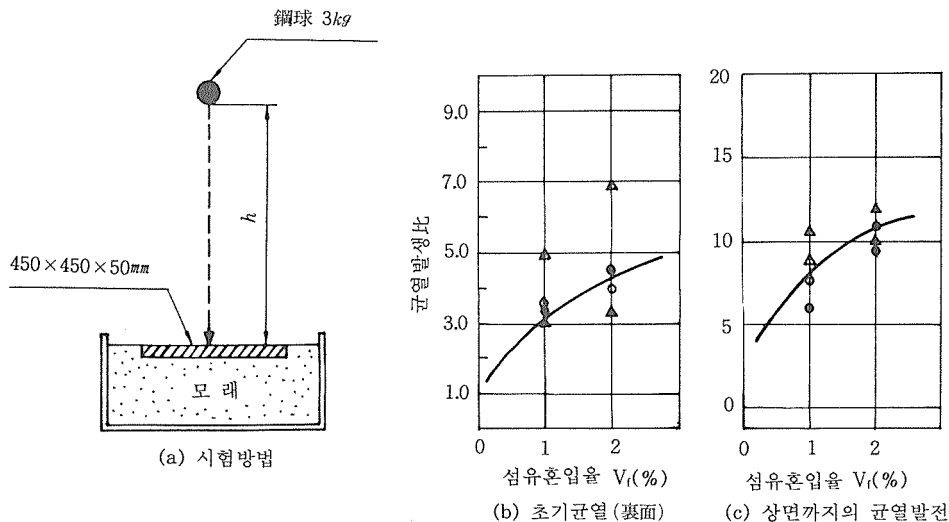


그림 10. 平版의 강구낙하에 의한 SFRC의 내충격성

트릭스의 중성화에 의한 것의 2가지가 있다. 전자는 건물의 외벽등 미관상 문제가 되는 경우에는 스테인레스강 또는 방청처리를 한 SF를 이용할 필요가 있으나 통상의 경우 실용상의 큰 지장은 없으며, 후자는 확인에 다소 문제가 있으나 지금까지의 폭로시험결과에 의하면 밀실한 매트릭스의 경우 장기간에서도 중성화의 진행은 느리고, 深部까지 중성화되지 않는다고 한다. 또 내부에서 부식된 SF는 철근과 같이 팽창되지 않고 소멸하는 경향이 있으며, 오히려 SFRC는 균열구속이 크기 때문에 내구성은 향상된다고 보고되고 있다.

2.8 Creep 및 건조수축

SFRC의 Creep에 관한 연구보고는 극히 적고, 그 성상은 충분히 해명되지 않고 있다. 그러나 지금까지 보고된 바에 의하면, SFRC의 Creep변형은 Plain콘크리트에 비해 약간 증가하며, 이는 두 공시체의 Workability를 같은 정도로 하기 위하여 SFRC의 경우 SF의 혼입에 의한 단위수량 증가가 악영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 SF의 혼입은 SFRC의 Creep거동에 큰 영향을 미치지 않으며, Creep계수도 Plain콘크리트의 값과 거의 같을 것으로 판단된다.

한편, 시멘트·콘크리트는 건조에 수반하여 수축을 일으키고 균열 및 Creep발생의 원인이 되며, SFRC는 SF의 효과에 의해 매트릭스의 변형억제효과가 있고, 섬유혼입율이 증가함에 따라 수축변형량도 감소된다.

2.9 피로강도

반복하중을 받는 SFRC의 피로강도는 Plain콘크리트에 비하여 5~10%정도 개선되고, 휨의 경우 SFRC의 정적강도가 Plain콘크리트에 비하여 대폭적으로 향상되므로 보에 재하한 반복상한응력도 크게 증가되기 때문에 휨피로강도는 우수하다고 알려진다. 이 밖에 처짐량이 균열발생에 의해서도 급

격한 증가를 나타내지 않고, 균열도 하중계거에 의해 거의 폐합된다는 것으로부터 SFRC는 균열 발생후에도 탄성적인 거동을 나타내는 경향이 있다. 또한 균열발생으로부터 파괴에 이를때까지 약 수백~100만회의 반복재하를 필요로 함으로써 Plain콘크리트에 비해서도 현저하게 내피로성이 증가된다고 한다. 금속도금 강섬유를 이용한 압축피로시험에서는 피로강도는 Plain콘크리트와 큰 차이가 없고, Plain콘크리트에서 보이는 급속한 균열에 의한 파괴를 나타내지 않으며, 이는 강섬유 부착특성에 영향되는 것으로 판단된다.

2.10 열에 대한 성질

SFRC는 Plain콘크리트에 비해 열전도율의 상승이 예상되며, 절대건조상태에서 상온~500℃의 범위에서는 SF의 1% 혼입에 의해 열전도율은 약10%정도 상승한다고 보고되고 있다. 또한 내열성에 대해서는 $V_f=2\%$ 혼입된 Castile내화물의 열간휨강도는 110~1100℃의 범위에서 Plain콘크리트에 비하여 80~120%정도 증가되어 대단히 유효함을 알 수 있다.

3. SFRC의 용도개발

SFRC를 구조부재나 구조물에 적용하는 경우, ① 콘크리트 구조물의 성능개선을 위한 포장, 터널 라이닝, 여수로·수로의 라이닝등 수리구조물, 법면보호공, ② RC부재의 대체용인 원심력성형 콘크리트관 등의 2차제품, ③ RC와 병용하여 RC부재의 성능을 향상시키는 내진벽, 기둥, 보접합부 등의 전단보강을 위한 이용형태로 분류할 수 있다.

SFRC의 성형방법으로는, 현장시공의 경우 보통콘크리트에 의한 타설, 뿔칠시공, 주입공법 등이 있고, 공장생산으로는 진동성형, 원심력성형, 압출성형 및 주입성형

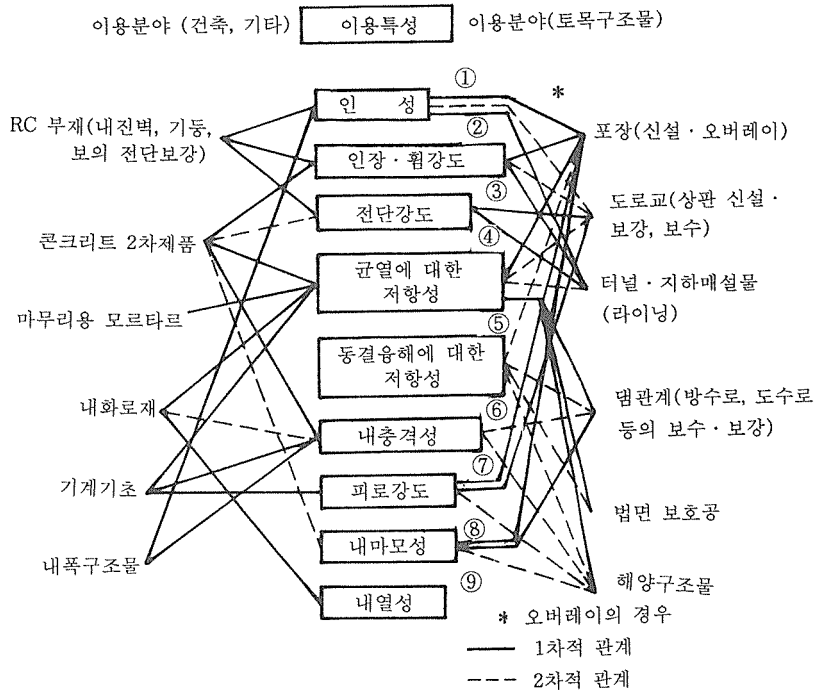


그림 11. SFRC의 특성과 이용분야

등이 있으며, SFRC의 특성과 적용분야는 그림11에 나타난 것처럼 균열에 대한 저항성, 인성, 인장·휨·전단강도등의 특성을 이용하는 적용분야가 많음을 알 수 있다.

3.1 토목분야에의 적용

(1) 터널 라이닝

SFRC는 휨강도 및 균열저항성이 우수하므로 터널의 라이닝에 적용하는 것이 효과적이다. 따라서 SFRC를 이용함에 의해서 종래의 철근콘크리트 및 뿔어붙이기 라이닝에 비하여 두께를 상당히 감소시킬수 있으므로, 굴착단면의 감소 및 공기단축 등 자원절약·에너지 절약에 크게 기여하고 있다. 또한 균열구속성이 크기 때문에湧水및 고드름 방지 그리고 콘크리트의剝落을 방지할수 있으므로 안전성, 내구성의 향상에 유효하다. 터널의 라이닝에는 1차라이닝과 2

차라이닝이 있고, 또한 시공방법으로서 뿔어붙이기와 타설의 두 종류가 있으며, 터널의 형식, 크기 및 지질조건에 따라 선택하여 사용하고 있다.

(2) 법면보호공

급경사지의 법면을 장기간에 걸쳐 안정화시키기 위하여 그 표면에 SFRC를 뿔어붙이는 공법이 증가하고 있다. 이것은 균열에 대한 저항성이 크고, 또 균열이 발생해도 박리되어 달라 붙는등 SFRC의 특성을 충분히 활용할수 있어 보통콘크리트에 비해서薄層의 시공이 가능하다.

일반적으로 뿔어붙이기 공법은 건식, 습식 및 반습식이 있고, SFRC의 법면시공의 경우도 이들중에서 선택하여 실시한다. 뿔어붙이기 공법의 특징은,

① 건식:노즐을 통해서 물과 Dry mix한 재료를 혼합하는 것이므로, 물의 관리는 작

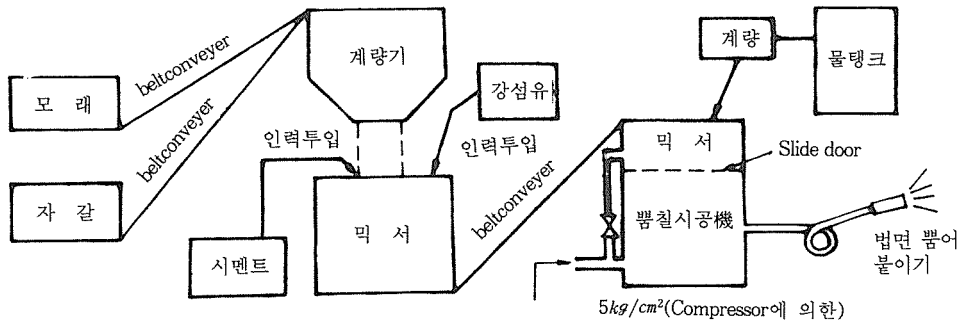


그림 12. 습식 뿔어불이기 시스템

업자에 의해 크게 영향된다. 분진의 발생이 비교적 많고 부배합에도 적용할 수 있다.

② 습식: 물의 함량을 정확하게 계량할 수 있으므로 콘크리트의 품질관리가 용이하고 분진도 거의 없다. 시멘트량이 많은 부배합의 경우 점성이 크고 호스내의 막힘이 일어나기 쉬워 부적당하다.

③ 반습식: 호스의 도중에 물과 Dry mix된 재료를 혼합하기 때문에 물의 관리는 작업자에 의해 크게 영향되고, 분진은 약간 발생한다.

(3) 도로포장 및 쇼트크리트

일반적으로 도로포장에는 차륜하중에 의한 휨응력과 포장표면과 下面과의 온도차에 의한 열응력이 생기며, 또한 차량의 주행 및 열응력에 의해 주야간의 수축이 반복되어, 종래의 콘크리트포장에서는 포장두께를 크게 하여 이를 극복해 왔다. 또한 포장판은 기온의 변화에 의해서 팽창수축이 생기기 때문에 적당한 간격으로 이음부를 설치해야 하므로 아스팔트 포장에 비하여 주행시의 쾌적감저하 및 도로손상의 원인이 되고 있다. 그리고 도로포장에는 차량의 충격하중, 콘크리트의 팽창수축 및 동결등에 의한 균열, 차량 주행시의 마모등 요구되는 성능이 많다.

이런 성능에 대해서 SFRC는 휨강도, 균

열구속성, 내충격성, 피로강도, 내마모성 및 동결융해 저항성등이 크기 때문에 포장판의 내하력 증진, 포장두께의 경감, 균열 발생 감소 및 이음간격의 연장, 내구성의 향상에 유효하다. 그래서 SF를 1.5% 혼입한 SFRC는 보통콘크리트에 비하여 포장두께를 1/2정도로 할 수 있고, 이음부 간격을 50m까지 늘릴 수 있으며 재포장시까지 25년 정도의 수명연장을 꾀할 수 있어 경제적으로도 충분히 기대되는 용도이다.

한편, SFRC에 의한 쇼트크리트는 비교적 두께가 얇고 넓은 지역의 광범위한 면적을 단시간내 시공할 수 있어 터널의 라이닝, 법면보호 및 지하매설 구조물, 호안·수로등의 콘크리트 라이닝, 방파제, 콘크리트탱크, 여수로등에 적용되고 있다. 표2는 SFRC쇼트크리트의 적용분야를 나타낸 것이다.

(4) 수리구조물

댐의 여수로나 압력터널 등 고속수류에 의해 손상을 많이 받는 곳이나 하천에 축조된 보나 사방댐에 있어서 상류로부터의 토사류나 암석에 의하여 표면이 파괴될 우려가 있는 곳의 강도증강이나 보수공법으로 매우 유리하다.

수리구조물에 SFRC를 사용하는 주된 이유는 충격저항, 인성, 인장변형이나 파괴에 대한 저항성에서 SFRC가 적합하기 때문이

표 2. SFRC 쇼트크리트의 적용 분야

분 야	시 공 예
하천·항만	호안, 수로등의 콘크리트 라이닝 및 보수, 토류벽, 방파제, 침식방지벽 보수 등
법면보호공	비탈면 대책, 급경사면 대책, 암반면 등의 대책 등
수리구조물	수로터널, 지하발전소 공사, 토류벽, 풍화방지 대책용, 댐주변 수벽, 댐서지 탱크, 수로등의 보수, 굴뚝·탱크 등의 라이닝, 원자력발전소 압력용기 등
상·하수도	大口徑管의 라이닝, 실드공사, 고가수조의 ps 콘크리트 라이닝 등
도로·교량	터널의 뿔칠시공 및 보수, 비탈면 대책, 조인트, 각종 보수공사 등
건축구조물	건축물의 보수, 보강, 각종 공동溝의 라이닝, 각종 건축구조물의 외벽보수 등

다.

(5) 기타

토목분야에서는 그 외에도 도수로의 Invert, 교량상판, 댐의 頂部, 도로의 Overlay, 교량상판의 Joint 및 콘크리트 구조물의 보수등에 널리 이용되고 있다.

3.2 建築分野 및 콘크리트 2차 製品

SFRC를 건축물에 이용하는 예는 아직 많지 않으나 기계기초 또는 구조용패널, 셸구조, 사이로, 취수구, 내폭·내진구조물 등에 사용할수 있다.

(1) 構造軀體

SFRC를 이용한 구조부재는 종래 RC 구조부재에 비해 균열 및 전단 강도가 크고, 인성도 풍부하기 때문에 높은 내진성을 요구하는 건축구조물에 대단히 유효하다.

그러나 SFRC는 Plain콘크리트에 비하여 굳지 않았을 때의 유동성이 나쁘고, 또한 매입된 섬유가 많기 때문에 시공시의 Pumping작업성, 타입 및 성형등 그 실용화에는 해결되어야 할 과제가 많다.

(2) RPC 공법의 접합부

라멘구조의 프리캐스트 콘크리트(RPC) 공법은 최근 다양하게 개발되고 있다.

이 공법은 공장생산된 기둥, 보, 상판등의 부재를 현장에 운반해 순차조립하고 그 조립부를 콘크리트로 접착시켜 완성시키는 것이다. 따라서 기둥과 보의 접합부는 구조상 대단히 중요한 역할을 갖게 된다. 여기서 이 접합부에 SFRC를 이용함에 의해서 내진성의 향상, 배관방법의 간략화로 Cost를 절감할수 있다.

또한 보의 하강근을 보강링부착 앵커로 판넬내에 정착할수 있어 RPC공법으로서 접합부에 충분한 강도가 확보될수 있기 때문에 설계의 자유도가 얻어지고, 주근의 정착성능이 향상되어 고강도 철근 및 굵은 철근이 이용될수 있으며 정착깊이를 단축할수 있는 등 단면이 축소되어 콘크리트량도 절감할수 있다. 특히 SFRC를 이용함에 의해서 접합부 전단판넬의 전단강도는 증대되고 보강용 철근량의 절감 및 시공성 개선에도 유효하다.

(3) 管용 모르터

종래의 Plain모르터는 주택의 외벽 및 타일 등 많은 건축물에 이용되고 있으나 균열이 발생하기 쉽고, 시공기술 및 환경조건에도 좌우된다. 또한 모르터의 건조수축 작용과 주변구속에 의해 단면내에 인장응력이

생기고, 재료 자체의 인장강도 및 변형능력을 초월하여 수축균열이 발생하며, 또 이와는 별도로 외력에 의한 구조적인 균열이 있으며 이것도 또한 수축응력의 영향을 받게 된다. 따라서 균열저항성, 인성, 인장강도 및 장기변형특성이 우수한 SFRC의 사용이 대단히 유효하다.

(4) 콘크리트 제품

SFRC를 공장제품화하면 종래의 제품에서 얻기 힘든 성능을 갖게 되는데, 예를들면, ①단면을 얇게 하는 것, ②경량화·고강도화 하는 것, ③인성이나 내충격성을 높일수 있는 것이다. 주요제품으로는 칸막이벽, 궤도 슬랩, 차음벽, 내화벽, 흡관, 타일, 소파블록, 프리캐스트 콘크리트관, 하수탱크, 맨홀, 칼버트, 침목, 계단 및 주택의 구조요소 등에 사용할수 있다. SFRC의 이용방법으로는 ①SFRC 단독구조, ②RC와 SFRC 조합구조, ③ Chemical프리스트레스의 미시구조를 기대하는 세가지 경우로 생각할수 있다.

구조부재로 이용할때 강도개선, 인성증가, 균열 및 변형구속효과등을 얻을수 있다. 또한 건축물에서는 이들 2차제품을 단독으로 이용할수 있고 RC부재와의 조합도 주목되고 있다.

3.3 내화로재에의 적용

SFRC는 내화로재에 널리 사용되고 있으나, 내화로재 전체의 수요량에 비해 아주 미진한 실정이다. 강섬유 혼입 내화로재는 가열·냉각에 의한 열사이클, 진동, 충격등 가혹한 환경에서의 사용이 많고 그 사용되는 온도조건은 1,000~1,500℃에 이른다. 따라서 SF의 재질은 800℃이상의 온도域에서는 스테인레스강, 1,200℃이하의 온도域에서는 탄소강이 널리 사용되고 있다. 지금까지의 사용 결과로는 종래의 내화로재에 비하여 수명은 최저2배이상, 최고10배에 달하고 있으며, Cost면에서의 상승분, 스테인

레스 강섬유의 4%wt.에서 1.4~1.8배, 탄소강섬유의 1.1~1.2배를 고려해도 충분한 효과가 있다고 알려지고 있다.

4. SFRC의 앞으로의 과제

SFRC는 많은 장점을 지니고 있으나 다소의 문제점도 지적되고 있다. SFRC의 앞으로의 과제에 대해서 강섬유의 품질, SFRC의 재료성상, 배합 및 시공성의 기초부문과 SFRC의 구조성상, 적용, 설계기준 및 시공 지침의 응용부문으로 나누어 보면 다음과 같은 문제점 및 발전방향이 시사된다.

4.1 강섬유의 품질, SFRC의 재료성상, 배합 및 시공성, 경제성

(1) 강섬유의 품질개선

시멘트 매트릭스중에 있어서 SF는 균열폭이 크게 되면 인발된다. 따라서 균열저항을 증대하기 위해서는 강섬유의 표면형상을 변화시키기도 하고, 端部에 Hook또는 패들을 부착시키는 등 강섬유의 부착성능을 증대하기 위한 연구가 필요하다.

(2) 강섬유의 내구성

SFRC내부에 함유된 강섬유는 알칼리성분의 보호에 의해 녹의 발생은 없으나, 표면에 존재하는 강섬유는 콘크리트의 중성화 강섬유 및 외부로부터의 염분에 의해서 비교적 빠른 시기에 녹이 발생한다. 건축분야에서는 외관에 나타난 녹이 미관을 손상시키고, 또 강섬유는 녹이 발생할 것이라는 우려가 SFRC의 발전에 지장이 되고 있다. 따라서 강섬유의 녹을 방지하기 위하여 스테인레스 강섬유 및 코팅한 강섬유가 개발되어 있으나 강섬유가격이 너무 비싸서, 앞으로 저가격의 녹이 발생하지 않는 SF의 개발이 기대되고, 또 현상태에서는 적절한 마무리를 행함에 따라 녹을 방지할수 있는 사용법을 개발하고, 사용자의 우려를 불식시키는 것도 필요하다.

(3) 인장 시험방법 및 인장강도식의 확립

SFRC를 구조부재로 적용할때 그 인장강도가 휨 및 전단강도에 큰 영향을 미치고 있음이 밝혀지고 있다. 따라서 인장강도를 정확히 평가하기 위해 SFRC를 위한 인장시험방법을 확립하고, 강화기구를 해명하지 않으면 안되며, 또한 일반적인 인장강도식을 확립하여 SFRC구조부재의 강도설계식에 반영할 필요가 있다.

(4) SFRC의 배합·제조 및 시공방법의 확립

SFRC의 배합시 작업성이 좋아야 하고 강섬유의 균등분산이 이루어져 Fiber ball이 생기지 않도록 해야하며, 배합에 큰 영향을 미치는 요인으로 강섬유혼입율, 굵은골재 최대치수, 잔골재율, 단위수량에 대해서는 많이 알려져 있으나 이에 대한 연구보고는 부족한 실정이다. 또 SFRC의 배합과 각종 물성과의 관계를 명확히 하고 필요한 성능을 가진 SFRC의 배합결정방법을 확립할 필요가 있다.

한편, SFRC의 제조·공급에 관해서는 현재 레디믹스드콘크리트에서 제조하는 경우와 현장에서 타설하는 방법이 있으나 아직 시험적인 단계일 뿐이며, 요구되는 품질의 SFRC를 확실히 제조공급할수 있는 제조관리체계의 확립이 필요하다. 그리고 SFRC의 펌프압송성에 관해서는 Fiber ball에 의한 막힘 및 과부하 상태에 의한 압송성저하가 일부 보고되며, 또 일반적으로 거푸집내의 타입, 성형의 적절한 방법에 대해서도 연구보고가 부족하므로, 금후 많은 시공실적의 축적이 요구된다.

(5) SFRC의 경제성

SFRC의 제조 Cost는 강섬유 자체의 단가, 투입에 필요한 인건비, 긴 혼합시간으로 인한 경비의 증가분 등에 의해서 통상의 콘크리트에 비해 약 2.8배에 이르므로 현재에는 그 이용이 한정되고 있다. 따라서 앞으로는 가능한한 SFRC를 안정된 가격으로 공급할수 있는 System을 개발함과 함께 그

용도개발 및 구조물로서의 Cost Performance의 명확화를 도모할 필요가 있다.

4.2 SFRC의 구조성상, 적용, 설계기준 및 시공지침

(1) 강섬유와 철근의 보강효과

강섬유와 철근을 병용한 SFRC구조부재에서는 휨에 대한 보강보다 전단에 대한 보강에 현저한 상승효과를 나타내고 있어, 앞으로 특히 전단거동에 대해서 강섬유와 철근의 상승효과가 높은 원인을 규명하여 전단보강철근의 최소규정 저감을 도모할 필요가 있다.

(2) 휨·전단강도식의 확립과 인성평가법

확립된 인장강도식 및 강섬유와 철근과의 상승에 대한 해명에 의해 휨 및 전단에 대한 강도식과 인성의 평가법 개발에 의해서 부재설계에 반영할 필요가 있다.

(3) 진동특성의 파악

지금까지 얻어진 SFRC의 구조성상은 정적점중하중 또는 교통반복하중에 의한 부하를 가하여 강섬유의 보강효과를 조사한 것이 대부분이고, 지진등의 동적특성에 관한 연구는 거의 없는 실정이다. SFRC 부재는 에너지 흡수능력이 우수하여 동적거동에도 우수한 특성을 나타낼 것으로 예상되므로, 이에 대한 규명도 중요한 과제이다.

(4) SFRC부재에의 유효한 적용

건축부재에 대한 SFRC의 적용에는 현재까지 거의 칸막이벽, 계단등의 2차부재가 대부분이고 보, 기둥, 슬랩등의 주요 구조물에서는 통상의 철근보강에 대한 부가가치로서의 적용에 한정되고 있다. 이는 건축공사에 있어서 건축기준법의 설계기준에 따르지 않으면 인정되지 않으므로 규제가 완만한 부분이나 규제에 저촉되지 않는 형태에만 적용되고 있기 때문이다. 앞으로 SFRC의 유효한 적용으로서는 練材보다 강섬유가 2차 상태로 응력을 전달하기 때문에 보강효과가 현저히 나타나는 상판, 쉘 및 내진벽

등의 面材가 있다. 또한 프리캐스트부재 및 경량콘크리트에 강섬유를 혼입하여 보강효과를 크게 한 것도 시사되며, 금후, 이 방면의 적용도 크게 기대된다.

(5) SFRC기술지침의 작성

건축분야에서 SFRC를 실제구조물에 적용하는 경우에는 이 재료가 건축기준법에 규정되지 않은 새로운 재료이므로 건축구조재

료로서의 구조성능, 내화성능, 내구성등의 필요요건에 대해 규명하여야 한다. 따라서 건축기준법 개정을위한 필요한 실증적 자료를 작성하고, 실제구조물에의 적용실적을 축적함과 아울러 이들로부터 얻은 정보를 취합해 설계·시공규준의 표준화를 도모할 필요가 있다.

質 疑 應 答

레미콘(READY MIXED CONCRETE)에 관한 모든 質問에
 答을 드립니다.
 (Question & Answer)

編輯者註：當協會는「質疑應答」칼럼을 마련하여 會員여러분의 궁금증을 풀어드리고자 합니다. 質問內容에 따라 當協會 技術分科委員으로 하여금 答을 드리도록 하겠습니다.

Q :

A :

■ 상기와 같이 「質疑應答」칼럼을 新說하였으니 레미콘에 관련된 諸般問題點에 대하여 利用하시기 바랍니다.

- 利用方法：1) 會員社의 關係者로부터 레미콘에 關聯된 諸般問題點을 當協會 接受
- 2) 技術分科委員會에 質疑問을 의뢰하여 諮問 또는 解決하여 레미콘지에 掲載