

강섬유보강 콘크리트

강섬유보강 콘크리트의 배합설계 및 물성

Mix Design and Mechanical Property
of Steel Fiber Reinforced Concrete



박 승 범*



윤 의 식**

1. 머리말

강섬유보강 콘크리트(Steel Fiber Reinforced Concrete, SFRC)는 1963년 미국의 Romualdi와 Batson이 그 연구결과를 발표한 이래, 세계 각국에서 활발한 연구개발 및 적용이 이루어져 왔다.

SFRC는 보통 콘크리트에 비하여 인장강도, 휨강도 및 전단강도가 크고 균열에 대한 저항성이 우수하며 균열 발생 후에도 파괴에너지의 증대로 인하여 인성이 현저히 개선됨은 물론, 내충격성, 내마모성, 내동해성 및 내열성 등이 우수하기 때문에 미국, 일본 등의 선진국에서는 이미 1970년대 중반부터 대단히 광범위하게 이용되어 왔다.

우리나라에서도 최근 토목학회에서 개정된 「콘크리트 표준시방서」에 SFRC에 관한 조항이 추가되는 등 관심이 증대되고 있고, 또한 현장적용도 증대

되고 있으나 아직 SFRC의 설계·시공 지침 등이 확립되어 있지 않은 실정이다. 따라서 본 고에서는 SFRC의 효과적인 적용을 위하여 강섬유 및 SFRC용 혼화재료의 종류 및 특성과 SFRC의 배합설계 방법 및 역학적 특성에 대하여 국내·외 자료를 참조하여 소개하기로 한다




2. SFRC용 강섬유 및 혼화재료의 종류 및 특성

2.1 강섬유의 종류와 특징

강섬유는 일반적으로 길이 20~60mm, 직경 0.2~0.8mm(또는 환산직경), 단면적 0.06~0.3mm², 아스펙트비 35~100 정도의 것이 이용되며, 기본적인 형상, 치수 및 품질 특성은 제조방법에 따라

* 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수
** 정회원, 한국원자력안전기술원 선임연구원

표 1 강섬유의 종류

제조법 구분	박판적단법	강선절단법	용강추출법
단면형상	단면이 각진 것 	단면이 원형인 것 	각저거나 원형이 아닌 것 
소재	주로 0.3~0.5mm 두께의 냉간압연강판(연강)	압연강선, 인발강선(탄소강, 스테인레스강)	스테인레스강
인장강도	30~40kg/mm ² (항복강도 20~30kg/mm ²)의 것	탄소강, 열처리여부, 직경에 따라 다르나 주로 60~200kg/mm ² 의 고강도의 것	용강의 성분, 열처리여부에 따라 상당히 광범위한

크게 영향을 받는다.

강섬유는 제조방법에 따라 크게 박판적단법, 강선절단법 및 용강추출법, 후판적삭법의 4가지로 나눌 수 있으며, 일본토목학회규준 「SFRC 설계 시공 지침(안)」의 「콘크리트용 강섬유」에서는 표 1과 같이 규정하고 있다.

이 규격에서는 강섬유의 공칭길이가 25, 30 및 40mm의 것에 대하여 규정되어 있는데, 강섬유의 길이가 30mm이하의 것은 현장타설이나 Shotcrete









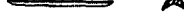
공법 모두 사용해도 좋다고 규정되어 있으나, SFRC의 보강효과는 굵은골재 최대치수의 약 2배일 때 최대가 된다고 알려지고 있기 때문에 현장타설에 의한 SFRC에서는 길이가 30mm 이상의 강섬유를 이용하는 경우가 많다. 그러나 40mm를 초과하는 것은 규격 이외의 것이므로 배합, 비비기, 타설, 다짐 등에 대하여 충분히 검토하고 소요의 품질이 얻어지는 지를 확인한 다음 사용하는 것이 중요하다.

한편, 최근에는 강선을 단순히 잘라낸 Straight-Round 강섬유의 경우 섬유와 매트릭스의 부착력이 떨어지므로 섬유의 부착특성 개선을 위한 연구와 함께 매트릭스 중에 섬유 혼입시 Fiberball 생성 및 워커빌리티 저하라는 문제가 발생할 수 있으므로 콘크리트 구조체 내에서의 섬유의 분산을 양호하게 하기 위한 강섬유 형상의 최적화에 관한 연구가 활발히 이루어져 왔다. 현재 널리 이용되고 있는 대표적인 강섬유의 종류 및 제원을 정리하면 표 2와 같다.

2.2 혼화재료의 종류와 특징

SFRC의 배합 및 믹싱에 있어서는 강섬유의 배

표 2 대표적인 강섬유의 제원

제조방법	치수 (mm)		소재	형상
	단면	길이		
박판적단법	0.5×0.5	25, 30	냉간압연강판	波形 
	0.2×1.3			
	0.25×2.0			
	0.5×0.5	20, 25 30, 40		異形 
	0.5×1.0	50	냉간압연강판 상당의 고강도재	端部 Indent 附着 
강선절단법	∅ 0.6	25, 30, 40	연강선재를 냉간 가공한 것	異形 
	∅ 0.7	45, 50		兩端 Hook形 
	∅ 0.6	30, 40		兩端 Hook 附着 結束形 
	∅ 0.8	50, 60		
	∅ 0.6	30		
		∅ 0.8		30, 60
후판적삭법	∅ 0.6	30, 40	용적구조용 압연 강판, 형강	兩端 Hook形 
	∅ 0.8	50, 60		
용강추출법	∅ 0.4, 0.5	22, 25, 30, 35, 40	마르텐사이트계 스테인레스강	Dong-bone形 
	∅ 0.3, 0.4, 0.5		오스테나이트계 스테인레스강	Straight形 

트릭스 중의 균등분산, 적절한 워커빌리티 및 요구 성능의 확보 등 3가지 점을 항상 고려하는 것이 중요하다.

이와 같이 섬유유 균등분산, 적절한 워커빌리티와 요구성능의 확보라는 관점에서 적절한 혼화재료를 선정해 사용하는 것이 중요하며, SFRC용 혼화재료의 종류 및 특성은 다음과 같다.

2.2.1 혼화재

SFRC용 혼화재로는 플라이애쉬, 고로슬래그 미분말, 실리카흙, 팽창재 등이 있으며, 그 효과는 표 3에 나타낸 바와 같다.

2.2.2 혼화제

강섬유보강 콘크리트의 경우 소요의 컨시스턴시를 얻기 위해서는 일반적으로 단위수량이 많아지게 된다. 그러므로 강섬유보강 콘크리트의 경우에는 소요의 품질을 만족하는 범위내에서 단위수량을 될 수 있는 대로 적게 하는 것이 특히 중요하기 때문에 AE제, 감수제, AE감수제 및 고성능 AE감수제 등을 이용하는 경우가 많다.

중요한 혼화제의 종류와 특성을 다음 표 4에 표시하였다.

이외에도 증점제, 수축저감제, 발포제, 방수제, 수화열 저감제, 수중 불분리성 혼화제, 폴리머콘크리트용 혼화제 등이 있으며, 필요에 따라 그 품질을 확인한 후 사용방법을 충분히 검토한 후 사용해야 한다.

3. SFRC의 배합설계

3.1 SFRC의 배합을 결정할 때의 기본사항

SFRC의 배합을 고려하기 전에 먼저 필요한 것은 SFRC가 보통 콘크리트의 연장선상에 있는 특수 콘크리트라고 하는 개념을 버리고 FRP, FRR, Cermet(세라믹과 금속으로 이루어진 입자 강화계 복합재료) 등과 같은 복합재료의 일종으로서, 새로운 구조재료라고 하는 인식을 가질 필요가 있다.

따라서 SFRC는 강섬유와 콘크리트를 소재로 하는 二相系 複合材料로 생각할 수 있기 때문에 SFRC의 배합을 결정하는 경우에는 보통 콘크리트의 경우와 마찬가지로 필요로 하는 굳지 않은 콘크리트로서의 성질과 경화 콘크리트로서의 성질을 고려하여 결정해야 하며, 강섬유가 콘크리트 매트릭스 중에 균등하게 분산하고, 강섬유 주위에 모르터

표 3 주요 SFRC용 혼화재의 종류 및 사용 효과

종 류	품 질 기 준	사 용 효 과	비 고
플라이 애쉬	KS L 5405	① 워커빌리티 개선 및 단위수량 저감 ② 수화열에 의한 온도 상승 억제 ③ 장기간도 증진 ④ 건조수축 저감 ⑤ 수밀성 및 화학저항성 개선 ⑥ 알칼리 골재반응 억제	초기강도 발현이 늦으므로 Shotcrete에는 사용 불가
고로슬래그 미분말	사용전 품질을 확인 하고 사용방법은 충분히 검토한 후 사용할 것	① 장기간도 증진 ② 수화열 발생속도 지연 ③ 수밀성 증대 ④ 해수 등에 대한 화학저항성 개선 ⑤ 알칼리 골재반응 억제	습윤양생기간의 영향을 받기 쉬우므로 양생이 부적절하면 강도 저하 및 중성화 촉진 등의 우려가 있음
실리카 흙	상 동	① 재료분리가 적고 블리닝 감소 ② 고강도화 ③ 수밀성 및 화학저항성 향상 ④ 단위수량 증가 ⑤ 건조수축 증가	고성능감수제와의 병용 필요
팽창재	KS F 2562	① 건조수축 및 경화수축에 의한 균열 발생 저감 ② 화학적 프리스트레스 (Chemical Prestress) 도입에 의한 균열내력 향상	

표 4 주요 혼화제의 종류 및 특성

종 류	주요 성분	기 능	효 과	품 질 기준	
AE제	수지비누 합성계면활성제 (양이온, 음이온, 양성)	· 계면장력 저하와 시멘트 소수화(疏水化)에 의해 안정 · 미세공기를 연행	· 워커빌리티 개선 · 재료분리 저감 · 내동해성 개선 · 피니셔빌리티 개선	KS F 2560	
감수제	리그닌 설펜산염 그루론산염 계면활성제 NSF ¹⁾ , MSF ²⁾	시멘트 표면에 흡착해서 시멘트를 분산시켜 응집 방지	· 단위수량 저감 · 강도·내구성 향상 · 시멘트량 저감 · 수화열에 의한 수축 균열 방지	KS F 2560	
고성능 감수제	상 동	· 감수제와 기능 동일 · 사용중대로 효과증대	· 단위수량 대폭 저감 · 고강도 콘크리트의 제조	품질 확인후 사용방법검토	
AE 감수제	표준형	감수제+AE제	감수제, AE제의 양 효과	KS F 2560	
	지연형	감수제+AE제+지연제	감수제, AE제, 지연제의 효과		
	촉진형	감수제+AE제+촉진제	감수제, AE제, 촉진제의 효과		
고성능 AE감수제 ①표준형 ②지연형	AE감수제 또는 AE감수제+(특수리그닌+ 양이온화합물 등)	· AE감수제의 기능 향상 · 고성능감수제의 슬럼프 보유	· 단위 수량 대폭 저감 · 고강도 콘크리트 · 고내구성 콘크리트	품질확인후 사용 사용방법 검토 ³⁾	
유동 화제	표준형	AE제, NSF, MSF	감수제, AE감수제의 후 첨가에 의한 성능향상	단위수량이 동일한 때 슬럼프 증대	· 품질확인후 사용방법검토 · KASS 5T-401
	지연형	AE제, NSF, MSF, 폴리카보네산계 화합물, 기타			
응결 조절제	촉진제	염소계, 비염소계, 기타	수화반응 촉진	· 조기강도 증대 · 한중콘크리트 · 거푸집 조기 제거	품질확인 후 사용방법검토
	지연제	리그닌 설펜산염 옥사카르본산염 당산화물 또는 당규불화물	수화반응 지연	· 타설가능시간 확대 · Cold Joint 방지 · 석중 또는 메스 콘크 리트의 초기 수화열 저감	
급결제	알루미늄산화물, 규산소다, 탄산소다 등의 화합물	간극수 중의 수산화칼슘과 반응해 불용성 화합물 석출	응결시간을 수초~수분 내로 단축	KS F 2561	
		불과 급속히 반응하여 경화			
RC용 방황제	아질소산 칼슘	철근의 이온화 억제	철근의 부식방지	KS F 2561	
분진억제제	셀룰로즈 유도체	물의 점성증대에 의한 분자간의 접촉응집력 향상	Shotcrete의 분진 억제	품질확인 후 사용방법 검토	

(주) 1. 나프탈렌 설펜산염과 포르말린 축합물염, 2. 벤라민 설펜산염과 포르말린 축합물염
3. JASS 5T-403참조

가 골고루 퍼져 경화 후 복합체로서 기능하도록 배합을 정하는 것이 필요하다. 이 조건이 만족되지 않고 강섬유가 현저히 편재하거나 강섬유 혼입률이 불충분한 경우에는 요구되는 품질의 SFRC가 얻어지지 않고, 그 특성이 충분히 발휘되지 않는다.

즉, SFRC 배합설계의 기본은 보통 콘크리트의 배합설계를 확대할 뿐만 아니라, 목표로 하는 물성에 알맞은 강섬유 혼입률의 결정, 배합과 섬유 분

산 및 배향 특성의 관계 등 새로운 유의사항이 추가됨을 잊어서는 안된다.

3.2 인장강도 또는 휨강도에 기초한 SFRC의 배합

3.2.1 강섬유 혼입률 및 물·시멘트비의 결정
SFRC의 인장강도 및 휨강도는 기본적으로 섬유
의 평균 간격과 콘크리트 매트릭스의 강도에 의해

지배되는 것이라고 생각해도 좋다. 따라서 강섬유가 랜덤 배향상태로 균등하게 분산되어 있다고 할 때, SFRC의 인장강도 및 휨강도는 섬유의 평균간격이 작을수록(즉, 섬유혼입률을 증가시키고 직경이 가는 섬유를 사용할 수록), 그리고 콘크리트의 물·시멘트비를 작게 할 수록 증대된다. 그러나 이들의 상관관계는 그다지 명확하게 밝혀지지 않은 상태이고, 인장강도 및 휨강도를 정확하게 추정하기 위해서는 그 영향을 고려할 필요가 있다.

식 (1)은 인장강도 추정식으로 제안되어 있지만, 휨강도에 관해서는 실용적인 추정식이 없다.

$$\sigma_t = k(1/\sqrt{S}-1) + \sigma_m \quad (1)$$

여기서,

σ_t : SFRC의 인장강도 (kg/cm²)

σ_m : 매트릭스 콘크리트의 인장강도(kg/cm²)

K : 주로 강섬유와 콘크리트와의 부착강도에 의해 결정되는 상수, 강선 절단섬유 사용시 45, 냉연강관 잔단섬유 사용시 57로 한다.

S : 인장단면에 있어서의 섬유의 평균 간격(cm)

$$S = 5 \sqrt{\frac{\pi}{\beta} \cdot \frac{d}{\sqrt{p}}} \quad (2)$$

β : 강섬유의 배향계수로서,

$$\beta = 0.002 (l/d) 0.4 \quad (3)$$

d : 섬유의 직경(cm),

l : 강섬유의 길이 (cm)

p : 강섬유의 매트릭스에 대한 체적백분율 (vol.%)

현 단계에서는 실험적으로 소요의 강도를 가진 SFRC의 배합(구체적으로는 강섬유 혼입률과 물·시멘트비)을 구하는 것이 무난하고, 배합 실험에 있어서는 섬유혼입률과 강도 사이에는 직선적인 관계가 성립한다는 것을 이용해도 좋다.

그러나 강섬유 혼입률의 결정은 단지 강도만을 고려해서는 안되고, 인성과 균열구속성능 등 다른 성능

에도 영향이 있다는 것을 유의해야 할 필요가 있다.

한편 일본 토목학회 기준 「SFRC의 설계·시공 지침(안)」에서는 물·시멘트비는 SFRC의 소요 압축강도를 고려하여 정하는 경우 55% 이하로 해야 하며, SFRC의 내구성을 고려하여 정하는 경우에는 심한 기상작용에 의해 동결융해를 종종 받는 경우 45% 이하, 가끔 동결융해가 일어나는 경우 50% 이하로 해야 한다고 규정하고 있다.

3.2.2 굵은골재 최대치수의 결정

보통 콘크리트의 경우 굵은 골재 최대치수는 주로 부재의 치수와 철근 간격에 의해 결정되지만, SFRC의 경우에는 섬유의 길이와의 관계에 따라 영향을 받으므로 그 영향을 고려하여 결정할 필요가 있다.

섬유의 길이에 비하여 골재 최대치수가 너무 크면 그림 1에 나타난 것처럼, 강도에 대한 섬유의 보강효과가 현저히 감소한다. 그 이유는 SFRC의 인장강도 및 휨강도는 섬유의 평균 간격에 의해 크게 지배되는데, 굵은골재 최대치수가 너무 크게 되면 섬유의 균등 분산이 잘 이루어지지 않고, 국부적으로 평균 간격이 큰 부분이 발생함에 따라 결국 SFRC의 강도가 이 부분에 의해 지배되기 때문이다. 한편, 콘크리트 매트릭스 중에서의 굵은 골재는 강섬유를 균등하게 분산시키는 역할을 하기도 하며, 사용 강섬유의 길이의 1/2 정도의 굵은 골재 최대치수가 최대의 보강효과를 나타낸다고 알려지고 있으나, 경제성을 고려해 강섬유 길이의 2/3 이하의 골재를 사용해야 하며, 시판되는 강섬유를 사용하는 경우 굵은 골재의 최대치수는 10~25mm 정도가 적당하다.

3.2.3 잔골재율의 결정

SFRC의 배합에 있어서 잔골재율은 보통 콘크리트의 배합과 비교할 수 없을 정도로 중요한 의미를 가지는데, 그 이유는 잔골재율이 콘크리트 중에서의 강섬유의 분산도를 지배함에 따라 강도에 큰 영향을 미치고(그림 1 참조), 또 SFRC의 컨시스턴시를 지배하는 최대 요인으로 되고 있기 때문이다.

강도면에서 결정된 SFRC의 최적 잔골재율은 60% 정도이고, 컨시스턴시 면에서 결정된 잔골재

율은 목표로 하는 컨시스턴시 및 섬유 혼입률에 따라 다르지만 일반적으로 60~70% 정도이다.

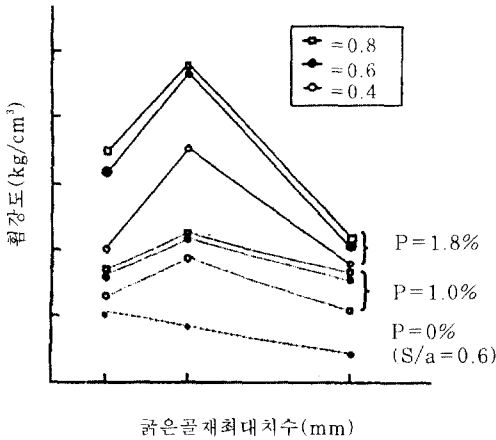


그림 1 SFRC의 취강도에 미치는 굵은골재 최대치수와 잔골재율과의 관계

3.3 컨시스턴시에 기초한 SFRC의 배합

슬럼프를 발생하는 중간 정도 이상의 컨시스턴시를 갖는 배합의 경우에는 최적 잔골재율과 단위수량을 결정할 필요가 있고, 포장용과 같이 된배합의 SFRC에서는 최적 단위 굵은골재용적과 단위수량을 결정할 필요가 있다.

SFRC는 그림 2에 나타낸 것처럼, 섬유혼입률의 증대와 함께 그 컨시스턴시는 현저하게 저하한다. 이것은 혼입한 섬유의 전표면적이 동일 용적의 골재에 비하여 현저히 크게 되기 때문에 이들의 표면에 다량의 수분이 흡착되고, 유리섬유나 탄소섬유 등에 비하여 직경이 크기 때문에 섬유의 강성이 크게 되며, 형상이 아주 불량한 골재를 사용한 것과 같은 영향을 받는 등의 이유 때문이다.

또한 어느 일정한 슬럼프의 콘크리트에 소정의 강섬유를 혼입한 경우 슬럼프의 변화율은 잔골재율에 따라 상당히 다르고, 잔골재율이 작을수록 그 변화는 크게 되며, 물·시멘트비가 작을수록 슬럼프의 변화도 작게 된다.

여기에서는 슬럼프에 의해 컨시스턴시가 결정되는 경우의 SFRC에 대하여 슬럼프 및 배합요인의 영향에 관해 정리하였다.

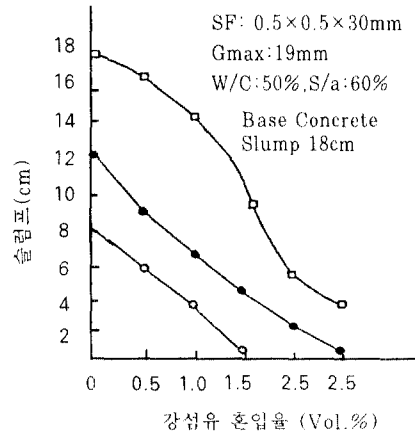


그림 2 강섬유 혼입률과 슬럼프 관계

3.3.1 중간배합 및 묽은 배합의 SFRC의 배합

최적 잔골재율은 섬유혼입률, 굵은 골재 최대치수에 관하여 구할 수 있고, 소요의 슬럼프를 갖기 위해 필요한 단위수량은 섬유혼입률, 강섬유의 형상치수, 물·시멘트비 및 굵은골재 최대치수에 따라 좌우되며, 단위수량 일정법칙이 성립하지 않는다.

이러한 사실을 고려하여 일본 토목학회 기준 「SFRC의 설계·시공 지침(안)」에서는 표 5와 같이 중간 배합 및 묽은 배합의 SFRC에 대한 배합참고표 및 조건이 다른 경우의 보정방법을 규정하고 있고, 우리나라의 경우도 국내에서 주로 사용되고 있는 사용재료, 배합 및 시공조건 등을 고려한 이에 대한 기준(안)을 마련하여 활용함이 요망된다.

3.3.2 된배합의 SFRC의 배합

포장용 콘크리트와 같이 된배합의 SFRC의 경우 최적 단위 굵은골재용적은 섬유혼입률, 강섬유의 형상·치수, 굵은골재 최대치수 등에 관하여 침하도를 지표로 하여 구하며, 최적 단위 굵은골재용적은 침하도에는 그다지 영향을 미치지 않는 것으로 알려지고 있다.

또한 슬럼프가 동일하면 침하도는 SFRC의 경우 작게 되며, 이는 SFRC의 경우가 다짐에 필요한 작업량이 작아짐을 의미한다.

표 6은 일본 토목학회 기준 「SFRC의 설계·시공 지침(안)」에 규정된 된배합의 SFRC에 대한 배

표 5 중간배합 및 묽은 배합의 SFRC의 배합참고표

이 표의 값은 아래의 조건에 대한 것이다.

- (1) 강섬유의 형상치수 : $0.5 \times 0.5 \times 30\text{mm}$, 아스펙트비 : 60, (2) 강섬유혼입율 $V_f=1.5\%$
- (3) 잔골재는 조립률 3.0이하의 것. 굵은 골재는 부순돌을 사용하고, 양질의 감수제를 사용한다.
- (4) 물·시멘트비 : 50%, 슬럼프 : 약 8cm

굵은 골재 최대 치수 Gmax(mm)	AE 콘크리트 (공기량 5%)		AE 제를 사용하지 않은 콘크리트		
	잔골재율 S/a(%)	단위수량 W(kg/m ³)	간헐공기량 (%)	잔골재율 S/a(%)	단위수량 W(kg/m ³)
10	68	214	3.0	70	225
15	65	208	2.8	68	221
20	60	200	2.5	63	215
25	55	191	2.1	58	208

이상의 조건이 다른 경우에 대한 보정

조건의 변화	잔골재율 (%)		단위수량 (kg/m ³)
	Gmax (mm)		
강섬유 혼입율 0.5%의 증감에 대하여	10, 15	± 10	± 10
	20	± 8	
	25	± 5	
물·시멘트비 5%의 증감에 대하여	± 1		± 2.5
잔골재의 조립률 0.1의 증감에 대하여	± 0.5		보정하지 않음
슬럼프 1cm의 증감에 대하여	보정하지 않음		± 3
공기량 1%의 증감에 대하여	∓ 1		∓ 6
강섬유 아스펙트비 10의 증감에 대하여	± 3		± 10

(주) 이 표는 강섬유의 단면치수가 0.3~0.6mm 범위의 경우에만 적용된다.

표 6 된배합의 SFRC의 배합참고표

이 표의 값은 아래의 조건에 대한 것이다.

- (1) 강섬유의 형상치수 : $0.5 \times 0.5 \times 30\text{mm}$, (2) 강섬유 혼입율 $V_f=1.5\%$ (3) 잔골재는 조립률 2.76의 것. 굵은 골재는 부순돌을 사용하고, 양질의 감수제를 사용한다. (4) 침하도 30초, (5) 공기량 4%

굵은 골재 최대 치수 Gmax(mm)	단위 굵은 골재용적 V_G	단위수량 (kg/m ³)
25	0.59	165(172)
15	0.51	174(180)
10	0.46	185(191)

(주) ()내의 값은 AE제를 사용하지 않은 경우의 단위수량을 나타냄

이상의 조건이 다른 경우에 대한 보정

조건의 변화	단위 굵은 골재용적		단위수량 (kg/m ³)	
	Gmax (mm)			
강섬유혼입율(V_f)=0.5%의 증감에 대하여	10, 15	$\mp 0.08V_G$	$V_f=1\%$	∓ 3.5
	25	$\mp 0.13V_G$		
침하도 10초의 증감에 대하여	보정하지 않음		$V_f=2\%$	∓ 5
	보정하지 않음		∓ 3.5	
공기량 1%의 증감에 대하여	보정하지 않음		∓ 3.5	
잔골재의 조립률 0.1의 증감에 대하여	$\mp 0.01V_G$		보정하지 않음	
$0.25 \times 0.5 \times 25\text{mm}$ 의 진단 이형섬유	보정하지 않음		$+10$	

(주) 이 표는 잔골재의 조립률이 2.50~0.30 범위의 경우에만 적용한다.

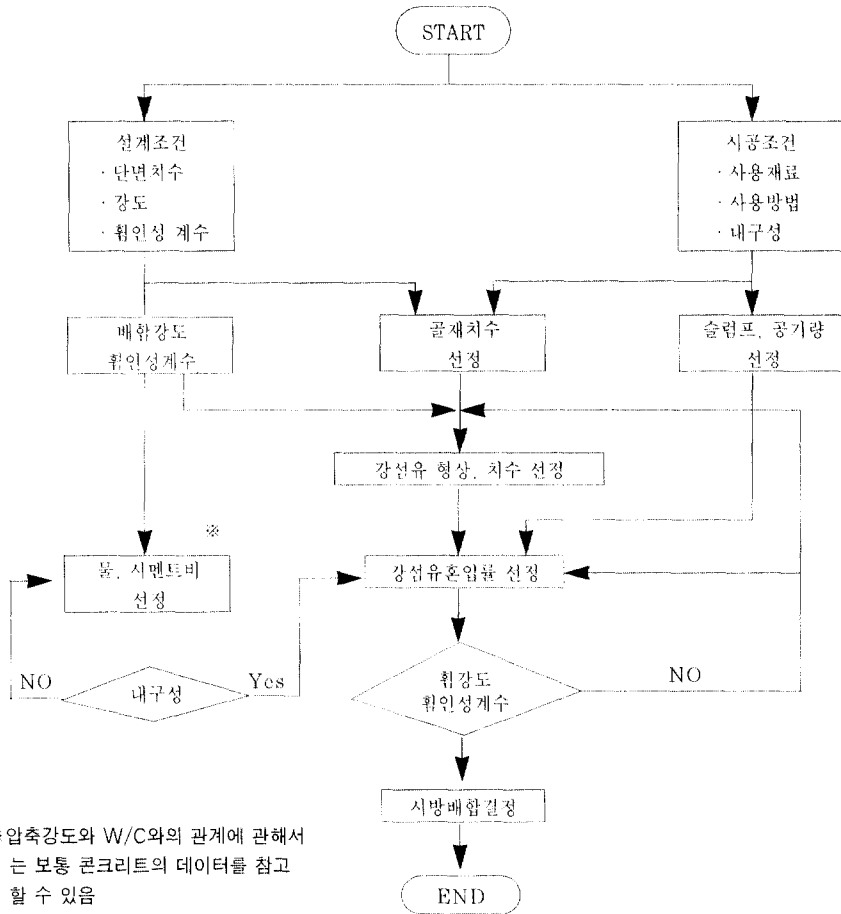


그림 3 SFRC의 배합설계를 위한 Flowchart 예

합참고표 및 조건의 변화에 대한 보정방법을 나타낸 것이다.

3.4 SFRC의 배합설계 방법

SFRC의 배합설계는 보통 콘크리트의 경우와 달리 압축강도는 물론, 휨강도 및 휨인성을 고려해야 한다는 사실에 주의할 필요가 있다. 압축강도에 관해서는 보통 콘크리트와 큰 차이가 없기 때문에 그 데이터를 이용하는 것은 가능하다.

SFRC의 배합설계의 Flowchart의 예를 그림 3에 나타내었다.

4. SFRC의 물성

SFRC의 역학적 성질은 표 7에 나타난 바와 같이 보통 콘크리트에 비하여 거의 모든 분야에서 대폭적으로 향상되는 것으로 확인되고 있으며, 이러한 역학적 성질은 섬유혼입률에 의해 크게 영향을 받고, 이밖에도 매트릭스의 품질, 배합조건, 강섬유의 품질, 형상·치수 및 분산·배합에 의해서도 영향을 받는다.

이밖에도 SFRC는 장기 변형특성, 내구성, 내열성, 내충격성 등이 향상되는 것으로 알려지고 있으며, 이에 대해 간단히 설명하면 다음과 같다.

표 7 SFRC의 제 특성 ($V_f = 2\%$)

항 목	보통콘크리트에 대한 비
초기 균열강도	1.5~2배
인장 및 휨강도	1.5~2배
신장 능력	약 2 배
압축 강도	1~1.3배
전단 강도	1.5~2배
인 성	약 2 배
피로 강도	개선됨

4.1 SFRC의 장기변형 특성

4.1.1 SFRC의 건조수축

시멘트 콘크리트는 건조에 수반하여 수축을 일으키고, 균열 및 크리프 발생의 원인이 된다.

전반적으로 SFRC의 건조수축은 보통 콘크리트와 마찬가지로 물·시멘트비가 증가할수록 증대하지만, 동일 배합조건에서 강섬유 혼입률의 증가와 함께 건조수축은 저감되는 경향을 나타내는데, 이는 강섬유 혼입에 의해 매트릭스의 변형억제효과가 증대되기 때문인 것으로 판단된다.

4.1.2 SFRC의 크리프

SFRC의 크리프에 관한 연구는 극히 적고, 그 성상은 충분히 해명되지 않고 있다. 지금까지의 연구보고에 의하면 동일한 슬립프일 때 SFRC의 크리프 변형은 보통 콘크리트에 비해 약간 증가하며, 이는 동일한 워커빌리티를 얻기 위해서는 SFRC의 경우 강섬유 혼입에 의한 단위수량의 증가가 악영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다.

그러나 필자의 연구에 의하면 그림 4에 나타난 바와 같이 동일한 물·시멘트비로 한 경우 강섬유 혼입률이 증대함에 따라 크리프 변형량은 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 SFRC의 크리프 거동은 사용재료(강섬유의 종류, 매트릭스 요인, 믹싱 방법 등), 배합조건에 따라 큰 영향을 받으며 강섬유 혼입은 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

4.2 SFRC의 내구성

4.2.1 SFRC의 중성화 및 녹에 대한 내구성

SFRC의 내구성은 주로 강섬유의 부식에 의한

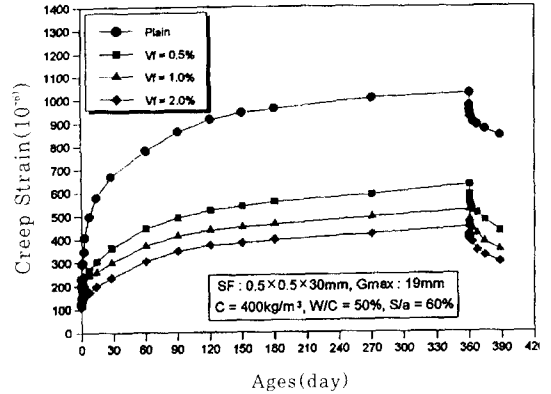


그림 4 SFRC의 크리프 변형 특성

것이 문제로 된다. 강섬유의 부식은 SFRC 표면에 노출된 것과 내부에 있어서 매트릭스의 중성화에 의한 것이 있다.

전자는 건물의 외벽 등 미관상 문제가 되는 경우에는 스테인레스강 또는 방청처리한 강섬유를 이용할 필요가 있으나 실용상 큰 지장이 없는 것으로 알려져 있다. 후자는 확인에 다소 문제가 있으나, 지금까지의 연구보고에 의하면 밀실한 매트릭스의 경우 장기간 경과 후에도 중성화 진행은 느리고, 또 내부에서 부식된 강섬유는 철근과 같이 팽창되지 않고 소멸하는 경향이 있으며, 오히려 SFRC는 균열 구속 성능이 우수하기 때문에 내구성은 향상된다고 보고되고 있다.

4.2.2 SFRC의 동결융해 저항성

SFRC의 동결융해저항성에 관한 필자의 연구에 의하면 그림 5에 나타난 바와 같이 AE감수제를 사용하지 않은 경우에는 강섬유 혼입에 의한 동결융해저항성은 크게 개선되지 않았으나, AE감수제를 사용해 AE콘크리트로 하면, 워커빌리티 개선, 단위수량 감소는 물론 내동해성의 개선에도 크게 효과적인 것으로 나타났다.

4.2.3 SFRC의 화학저항성

SFRC의 화학저항성을 검토하기 위하여 1% 황산용액, 5% 규산나트륨 용액 및 10% 황산마그네슘 용액에 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 공시체를 침전시켜 재령별로 시험한 필자의 연구에 의하면 전반적으로 용액

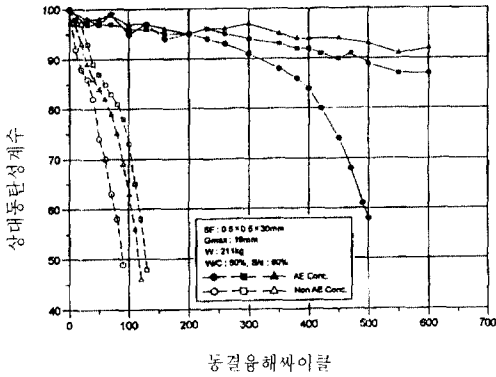


그림 5 SFRC의 동결용해저항성

의 종류에 관계없이 보통 콘크리트에 비하여 SFRC의 경우가 화학저항성은 증대하는 경향을 나타내었으나, 강섬유를 1.0 vol.% 혼입한 경우가 2.0 vol.% 혼입한 경우에 비하여 다소 우수한 내화학성을 나타내었는데, 이는 매트릭스 내에서의 강섬유의 체적 증가로 인하여 섬유들의 균등분산이 잘 이루어지지 않고 공극 발생 등 조직이 치밀하지 못하기 때문인 것으로 판단되므로 적정량의 강섬유 혼입은 화학저항성 개선에 유효한 것으로 판단된다.

4.2.4 SFRC의 내마모성

SFRC의 역학적 특성을 고려하면 도로포장용 콘크리트로서의 적용이 앞으로 큰 비중을 차지할 것으로 보인다. 이 때 내구성 및 균열 구속성능과 함께 내마모성이 포장 콘크리트의 내용년수를 좌우하는 중요한 특성으로 된다. ACI 544위원회의 연구보고에 의하면 $V_f = 2.5\%$ 의 SFRC판의 경우가 보통 콘크리트판보다 마모 깊이가 27% 정도 감소되고, 포장판 표면의 마모, 침식 및 열화가 생기기 전의 표면상태에 대한 정지마찰계수는 강섬유 혼입율에는 무관하지만, 마모·침식을 가한 후의 SFRC의 마모저항은 표면건조, 습윤, 빙결 상태에 대해서 보통 콘크리트에 비해 최대 15% 정도 높다고 보고하고 있는 등 전반적으로 보통 콘크리트보다 SFRC의 내마모성이 우수하다고 알려지고 있다.

4.3 SFRC의 내충격성

SFRC는 보통 콘크리트에 비하여 충격 하중에 대한 저항성이 현저히 개선되고, 그 효과는 인장·휨강도에 비하여 대단히 큰 특징이 있다. 강구 3 kg을 $45 \times 45 \times 5\text{cm}$ 의 평판공시체에 낙하해 충격을 가해 평가한 연구보고에 의하면, 그림 6과 같이 균열이 발생하는 낙하높이는 $V_f = 2\%$ 인 SFRC의 경우 보통 콘크리트에 비하여 평판 밑면에 초기균열이 발생할 때까지의 낙하 높이는 약 4배, 균열이 발전해 평판 윗면에 이를 때까지의 낙하 높이는 약 11배에 이른다고 하며, 이는 강섬유가 평판의 강성 및 내력 증진과 함께 균열의 발생과 성장을 억제하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 SFRC의 충격파괴시의 에너지 흡수량은 보통 콘크리트에 비하여 현저히 증가하여 $V_f = 0.5\%$ 일 때 약 50배, $V_f = 1\%$ 일 때 약 100배에 이른다고 보고되고 있다.

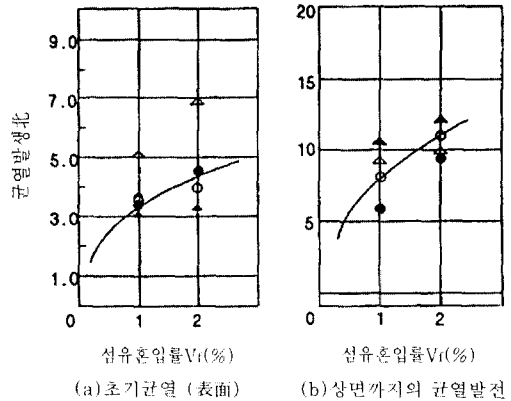


그림 6 평판강구 낙하에 의한 SFRC의 내충격성

4.4 SFRC의 열적 특성

내화 콘크리트의 품질로서는 고온에서의 강도 특성이 우수한 것은 물론이고, 될 수 있는 대로 열경사를 일으키지 않도록 열전도율이 높은 것 등이 요구된다.

ACI 544 위원회의 보고에 의하면 SFRC 모르터의 열전도율은 대기압 상태에서 섬유혼입률(0.5~1.5 % 범위)의 증가와 함께 현저히 증가하고, V_f

= 2%의 경우 120℃에서 - 20℃의 진공중에서 일반 모르타르보다 열전도율은 30%정도 큰 값을 나타내는 등 일반적으로 열전도율이 상승한다고 보고하고 있다.

또한 내열성에 관해서는 $V_f=2\%$ 를 혼입한 SFRC Castile 내화물의 열간 휨강도는 110~1100℃의 범위에서 보통 콘크리트에 비하여 80~120% 정도 증가되어 대단히 효과적인 것으로 알려지고 있다.

5. 맺음말

본 고에서도 서술한 바와 같이 SFRC는 적용시 소요의 강도, 인성 및 위커빌리티를 확보하면서 강섬유의 균등분산을 위한 적절한 배합설계와 함께 믹싱, 타설 및 다짐이 충실히 이루어지면 SFRC는 보통 콘크리트에 비하여 대단히 우수한 특성을 가지고 있으므로 앞으로 그 적용이 증대될 것으로 기대된다. 적용 분야로서는 신설 포장 및 Overlay, 터널 라이닝, 수리구조물의 각종 라이닝 및 보수, 법면 보호공 등의 토목구조물은 물론, RC부재의 대체용인 원심력 성형 콘크리트관 등 2차제품과 RC부재와 병용하여 RC부재의 성능 개선을 위한 내진벽, 기둥, 보접합부 등의 전단 보강 등에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

그러나 우리나라의 경우 전술한 바와 같이 SFRC의 배합·제조방법 및 설계규준 및 시공지침이 확립되어 있지 않은 실정이다. 따라서 SFRC의

배합설계 방법을 확립할 필요가 있으며, 아울러 실제 구조물에의 적용 실적을 축적하여 설계·시공 규준을 마련할 필요가 있는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 朴承範, "纖維補強 콘크리트의 特性과 最近의 技術(基Ⅱ) -鋼纖維補強 콘크리트", 레미콘지, pp. 14-28, 1990. 9
2. 朴承範, 尹義植 外, "에너지 節約型 高機能 纖維補強 콘크리트의 開發 및 設計 施工 指針案 作成에 關한 研究", KICT 研究要約報告書, 1996. 7
3. 日本土木學會, "鋼纖維補強 콘크리트 設計·施工 指針(案)", p.183, 1983
4. 鋼材俱樂部, "鋼纖維補強 콘크리트 設計·施工 指針(案)", 日本建築學會, P. 195, 1993
5. 小林一輔, "鋼纖維補強 콘크리트의 配合", 콘크리트工學, Vol. 15, No. 3, pp. 78-83, 1977
6. 小林一輔, "纖維補強 콘크리트; 特性と應用", 오름社, pp. 1-196, 1981
7. 鋼材俱樂部 SFRC構造設計施工研究會, "鋼纖維補強 콘크리트 設計施工 마뉴얼 : 톤넬編", 技報堂 出版, p. 290, 1995
8. 鋼材俱樂部 SFRC構造設計施工研究會, "鋼纖維補強 콘크리트 設計施工 마뉴얼 : 道路鋪裝編", 技報堂 出版, p. 94, 1995
9. ACI 544 Committee, "State of Art Report on Fiber Reinforced Concrete", J. of ACI, Vol. 70, 1973