

特輯

“건설분야에서의 복합재료 응용기술”(총 7편) 중 - 제 3편

건설분야의 섬유강화 시멘트 복합 신재료

홍건호*, 김기수**, 한복규***

High Performance Fiber Reinforced Cement Composites in Construction Field

Geon-Ho Hong*, Ki-Soo Kim**, Bog-Kyu Han***

ABSTRACT

High performance fiber reinforced cement composites have better performances than traditional cement based materials, therefore, have been expected as new construction applications such as the materials for construction & bridge structure, repair and rehabilitation applications, anti-collapse applications, anti-noise applications etc. However, they have lots of the problems such as material design, fabrication method and structural analysis. Also, the most serious problems of High performance fiber reinforced cement composites have been expensive initial cost, lack of long-term exposure data. As a result, it is needed that the efforts for lowering the initial cost and accumulation of long-term exposure.

There has been hardly assessment results of life cycle cost for HPFRCC in construction field, but some papers showed that total life cycle cost could be profitable if the initial cost could be reduced.

Key Words : FRP, HPFRCC

1. 서론

섬유강화 시멘트 복합 신재료는 시멘트 콘크리트계의 구조성능과 내구성을 향상시킬 수 있다는 장점과 함께 고성능의 보수용 재료, 내충격재료, 강재의 피복재료 등 새로운 용도로 다양한 기술개발이 기대되는 최첨단 신재료이다. 이와 같은 신재료들은 고강도의 모재를 사용하고, 고성능 섬유를 다량으로 첨가함으로써, 일반 콘크리트와 달리 휨모멘트 작용 혹은 인장응력 작용 하에서 균열이 발생하더라도 응력 저하가 발생하지 않는다. 이러한 특성은 재료의 변형률 증가와 동시에 응력도 함께 증가하는 변형 강화(Strain hardening)의 특성과 많은 미세균열이 분산되어 발생하는 멀티크랙(Multi-Cracking)현상을 보여주게 된다.

섬유강화 시멘트 복합 신재료는 기존의 시멘트 콘크리트에 비해 매우 우수한 성능을 보유하고 있기 때문에, 건축/토목의 구조물용 재료 이외에도 각종 보수용 재료, 완충재료,

차음방음용 재료 및 내화피복재 등으로 적용 가능성이 매우 넓다고 할 수 있다. 그러나 현재까지는 이와 관련된 연구 및 개발의 역사가 짧아 사용재료, 제조방법, 구조해석 등 해결해야 하는 과제가 여전히 많이 남아있는 실정이다. 뿐만 아니라, 섬유강화 시멘트 복합 신재료는 우수한 적용 가능성을 보이는데 반해 초기건설비용이 높다는 점과 장기적인 내구성에 대해 신뢰할 수 있는 실험 데이터가 없다는 것이 큰 단점으로 지적되고 있다. 다만, 최근 국내에서 재료비용을 낮추기 위한 노력과 구조물용으로 설계된 섬유강화 복합재료에 대한 장기적인 거동에 대한 연구가 진행되고 있는 점은 기술 발전에 다행스러운 일이라 할 수 있다.

모재를 시멘트계로 하여 각종 섬유로 강화시킨 예는 비교적 오래 전부터 연구되고 사용되어 왔으며, 일반적인 시멘트 콘크리트의 성능과 비교해 매우 우수한 역학적 성능 및 내구성을 보유한 모재를 사용한 연구는 최근 개발되고 있으나, 본고에서는 섬유강화 시멘트 복합 신재료의 기본이 되는 RPC(Reactive

* 호서대학교 건축공학과 교수

** 호서대학교 정보통신공학부 교수

*** (주)한국쇼본드건설 과장, 교신전자(E-mail:conc@dreamwiz.com)

Powder Composite), ECC(Engineered Cementitious Composite), SIFCON(Slurry Infiltrated Fiber CONcrete), SIMCON(Slurry Infiltrated Mat CONcrete)을 중심으로 소개하고자 한다.

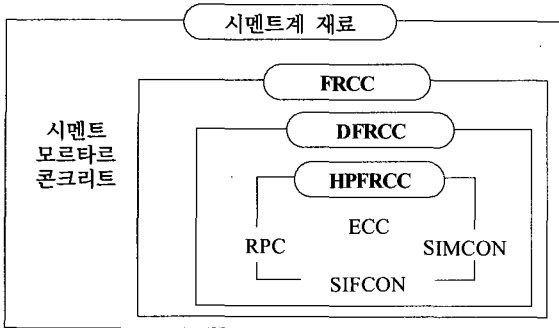


Fig. 1 각종 시멘트계 재료의 분류.

Table 1 각종 재료의 특징

구분	시멘트 모르타르	섬유강화 콘크리트	고인성시멘트복합재료	
			DFRCC	HPFRCC
재료거동	취성	준취성	준취성	연성
변형경화/연화	-	변형연화	변형연화/경화	변형경화
휨재하시 균열양상	국부	국부	복수	복수
인장재하시 균열양상	국부	국부	국부	복수

2. 섬유강화 시멘트 복합재료의 정의

시멘트계 재료를 섬유로서 보강시킨 복합재료를 일반적으로 섬유보강 시멘트계 재료(Fiber Reinforced Cementitious Composite, FRCC)라고 한다. Fig. 1에서는 시멘트계 재료의 분류를 나타내었다. 섬유보강 시멘트 재료 안에는 섬유보강 모르타르와 콘크리트가 있고, 특히, 각종 역학적 성질과 인성을 대폭 향상시킨 고인성시멘트 복합재료(Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite, DFRCC)가 있다. 고인성 시멘트 복합재료 중에 A.E.Naaman과 H. W.Reinhardt는 특별히 일축인장응력에서 멀티크랙 특성과 변형경화 특성을 보여주는 재료를 고성능 섬유보강 시멘트 복합재료(High Performance Fiber Reinforced Cement Composite, HPFRCC)라고 정의하기도 한다. 앞에서 서술한 재료 중 ECC가 HPFRCC의 특징을 갖추고 있고, RPC와 SIFCON 등은 일부 HPFRCC의 특징을 갖추고 있다. Fig. 1에서 보는 각종 재료 별 특징은 Table 1에 나타내었다.

3. 섬유강화 시멘트 복합재료의 특성

콘크리트는 조골재, 세골재와 시멘트의 넓은 입도 분포를 갖는 혼합재료로서 콘크리트의 강도저하를 발생시키는 요인으로는 조골재-모르타르 계면의 결합부 응력 집중, 페이스트 부분의 강도, 골재-페이스트간의 부착강도, 페이스트 부분의 낮은 인성 등을 들 수 있다. 섬유강화시멘트 복합재료는 이러한 점에 대하여 다음과 같은 재료의 특성을 개량한 것으로써 그 특성을 살펴볼 수 있다.

Table 2 섬유 강화 시멘트 복합재료의 플레인모재에 대한 개선율

복합재료특성	개선율(%)	체적혼입률, 섬유종류	복합재료특성	개선율(%)	체적혼입률, 섬유종류
초기균열강도	10-40	2% PE	압축탄성계수	10-50	12% 강섬유
	100	4% PVA	압축강도	50	2% PE
	80	3% 탄소		100	1% 아라미드
인장강도	20-200	2% PE	압축변형	150-300	12% 강섬유
	500	12% 강섬유		40-100	2% PE
	400	12% 강섬유		300	12% 강섬유
초기균열시 변형	40	2% PE	인성	150000	3% PE
	60	3% 탄소		600000	12% 강섬유
인장강도시 변형				170000	6% 강섬유
	20000	2% PE	휨강도	500	2% PE
	2900	12% 강섬유		150-950	14% 강섬유
	7900	4% PVA		40-160	5-20% 강섬유
	10000	7% PP		2000	8% 탄소+매쉬
1750	6% 강섬유	350		6% 강섬유	

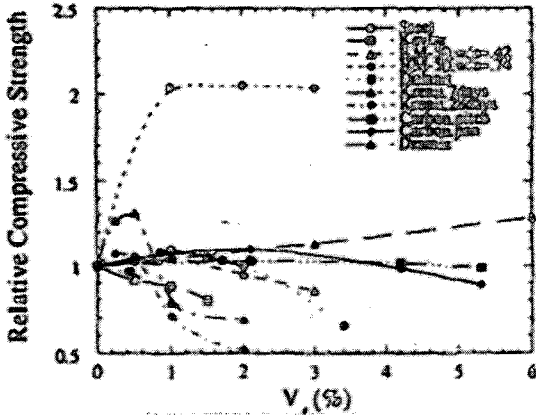


Fig. 2 섬유혼입률과 압축강도와의 관계.⁴⁾

섬유의 종류에 따라 혼입률이 증가하면 압축강도가 증가하는 것이 일반적인 특성이나, 섬유 종류에 따라 압축강도가 감소하는 특성을 가지기도 한다. 또한, 동일 섬유라 하더라도 혼입률이 크게 되면 일시적으로 압축강도가 상승하나, 그 이후 감소하는 섬유종류도 존재한다. Fig. 2에서는 섬유 혼입률과 압축강도와의 실험결과를 나타내었다.⁴⁾ Table 1과 Fig. 2에서 섬유 강화 시멘트 복합재료의 역학적 특성을 살펴본 결과, 각종 성능에 대한 사용재료의 적정함량이 있으므로 이들의 균형을 고려하여 사용재료 및 함량을 결정하여야 한다.

3.2 내화성능 향상

일반적으로 초고강도 콘크리트는 화재시 가열에 의한 박리, 비산의 우려가 있어 내화성능을 확보하기 위하여 내화피복을 시공하는 등의 대책이 반드시 필요함으로써 비용 상승과 부재 단면의 증대가 문제시 되고 있다. 이에 대하여, 선진국(일본)에서는 강섬유를 이용한 복합기술을 개발하게 되었다. 이는, 초고강도 콘크리트에 강섬유를 체적비 0.1~0.35%의 혼입량으로 균질하게 혼입함으로써 콘크리트의 박락, 비산을 방지할 수 있는 기술로써, 혼합된 강섬유가 콘크리트를 보강시키고, 화재 시 표면 콘크리트가 박락, 비산이 되지 않도록 방지하는 뛰어난 효과를 확인할 수 있다. 뿐만 아니라, 지진 시에도 강섬유가 콘크리트의 인성을 증가시켜 손상을 억제시키는 부가적인 효과도 확인할 수 있었다. Fig. 3에서는 일반 고강도 콘크리트와 강섬유가 혼합된 고강도 콘크리트와의 내화성능 실험결과를 나타내고 있다.

3.3 복합재료 인성의 향상

콘크리트는 강도가 커질수록 취성적 거동을 나타내게 된다. 섬유강화 시멘트 복합재료는 이러한 단점을 보완하기 위하여 인성을 증가시킬 수 있는 강섬유를 혼합하여 사용하며, 일반 콘크리트에 사용되는 강섬유는 지름 1mm에 길이 40mm 정도의 섬유를 사용한다. 또한, 섬유를 첨가함으로써 재료의 인성을 증가시킬 뿐 만 아니라, 강도도 증가하여 섬유를 첨가하지 않은 경우에 비해 2~5배 정도의 휨강도를 갖는 것으로 나타나고 있다. Fig. 4에서는 폴리에틸렌 섬유를 이용한 고인성 시멘트 복합재료의 섬유혼입률과 파괴에너지의 관계에 대한 실험결과이다. 그림에서 보는바와 같이 인장연화곡선 아래의 면적으로부터 구한 파괴에너지지도 섬유가 혼입되면서 개선되고, 특히 초경량 골재를 사용한 모르타르의 취성과 괴형태를 현저하게 개선시킬 수 있는 것으로 나타나고 있다.

3.4 내구성 향상

압축강도가 90 MPa 이상의 실리카흙을 첨가한 고강도 콘크리트와 섬유강화 시멘트 복합재료의 공기투과 특성을 비교해

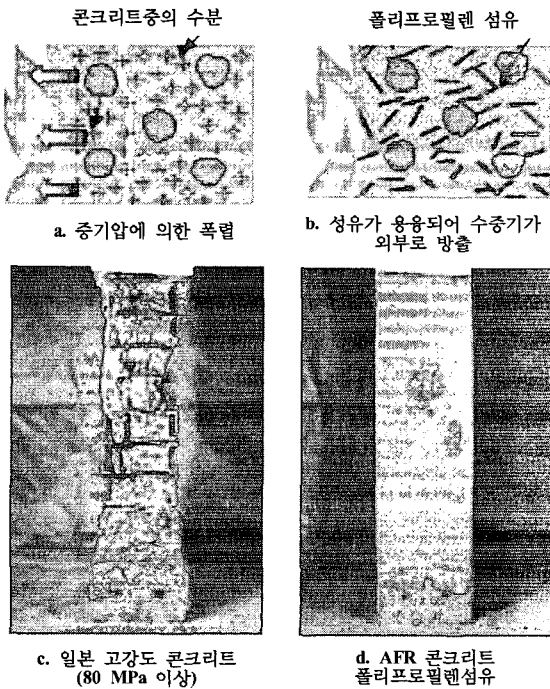


Fig. 3 강섬유 콘크리트 내화성능 비교.

3.1 역학적 특성

섬유강화 시멘트 복합재료와 섬유를 혼입하지 않은 플레인 모재와 비교했을 때 역학적 특성이 어느 정도 개선되었는지를 Table 2에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 각종 섬유 첨가로 인해 다양한 역학적 특성이 향상되었음을 관찰할 수 있으며, 특히, 복합재료의 인성이 두드러지게 향상된 것을 알 수 있다.

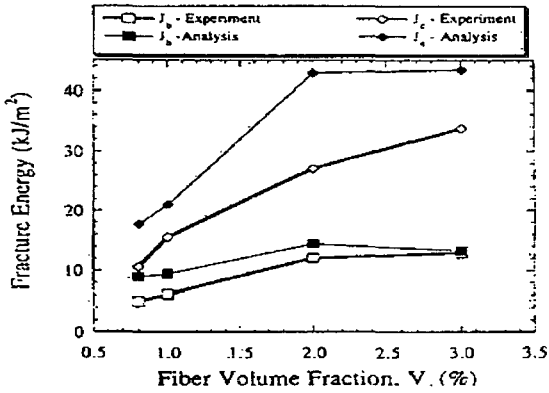


Fig. 4 PE첨가 HPRC의 파괴에너지.



Fig. 5 셔부르크 보도교 (캐나다).

보면, 복합재료가 2 order(수백 배) 정도 작고, 수분, 염화물, 탄산가스 등에 대한 투과성도 매우 작은 것으로 나타나고 있다. 이는 매우 치밀한 조직에 의해 내부 공극량이 매우 작은 것에서 기인하는 것으로, 동결융해에 대한 저항성 및 구조물 내구성 향상에 매우 우수한 것으로 많은 연구결과에서 보고되고 있다.

4. 섬유강화 시멘트 복합재료의 종류

4.2.1 RPC

RPC(Reactive Powder Composite)는 반응성 분체를 이용한 재료로서 최밀충진이론에 기초하여 개발된 시멘트계 모재에 강섬유를 혼입한 초고강도+고인성을 갖는 새로운 개념의 무기계 복합재료로서 DUCTAL이라는 상품명으로 개발된 바 있다. 특성은 초고강도(압축강도 240 MPa, 휨강도 45 MPa), 고내구성, 고유동성을 갖으며 적용된 예로서는 보도교, 경량 방음판넬, 호안벽용 앵커플레이트 등이 있다.

4.2.2 ECC

ECC(Engineered Cementitious Composite)는 미국 미시간

Table 3 RPC의 역학적 특성(셔부르크 보도교)

압축강도(MPa)	217
정탄성계수(GPa)	49
포아송비	0.19

대학의 V.C.Li 교수에 의해 개발된 재료로서, 가장 큰 특징은 일축인장응력 하에서 변형경화(strain hardening)현상을 나타내고, 미세한 고밀도의 균열을 형성함으로써 최대인장변형률이 8%까지도 도달할 수 있다는 점으로, 매우 인성이 높은 재료로 평가될 수 있다. 또한, ECC는 마이크로메카닉스와 파괴역학을 설계원리로 하고 있어, 재료의 거동에 대한 예측과 설계가 가능하다. 이러한 특성을 이용하여 적용된 예로는 내진에너지 흡수 디바이스, 보수보강용 재료(단면복구 혹은 증설용 재료), 강재피복 재료 등이 있다.

4.2.3 SIFCON, SIMCON

SIFCON(Slurry Infiltrated Fiber CONcrete)은 D.R.Lankard에 의해 1984년에 제안된 재료로서, 강섬유를 형틀 내에 미리 비치하고, 시멘트 슬러리를 침투, 주입시켜 제조한 것으로, 섬유혼입량이 최대 20% 정도까지 확보하는 것이 가능하다. 다량의 섬유에 의한 구속 효과에 의해 압축강도는 210 MPa에 달하고, 또한 강섬유의 가교 효과에 의해 인장에서도 변형경화 거동을 보인다. 적용된 예로서는 내진, 내폭발 구조물, 보수보강용 재료, 프리캐스트 구조물 등이 있다.

SIMCON(Slurry Infiltrated Mat CONcrete)은 강섬유 대신에 섬유매트를 이용한 것이다.

5. 섬유강화 시멘트 복합재료의 적용 예

5.1 셔부르크(Sherbrooke) 보도교(캐나다)

복합재료의 하나인 RPC의 실제 시공 예로서 캐나다 퀘벡주 셔부르크의 보도교가 있는데, 구조는 RPC제 프리캐스트거더, 슬라브, 광관구속 RPC를 조합하여 건설하였다(Fig. 5). 이때 사용된 RPC의 역학적 특성을 Table 3에 나타내었다. 타설시 바이브레이터를 사용하지 않고 성형하였기 때문에 물시멘트비는 28%(물결합재비로는 21%) 정도로 높았다. 압축강도는 약 220 MPa, 휨강도는 표에는 나타나지 않았으나 약 30 MPa 정도라고 추정되었다. 사용한 시멘트로는 중용열 포틀랜드시멘트, 갑수제는 나프탈렌계를 사용하였으며, 증기양생을 실시하였다.

셔부르크 보도교에 사용한 RPC는 특수용도로서 원심성형에 의한 파이프 구조물을 제작한 예도 보고되고 있다. 또한, 공기투과계수가 매우 작게 제조한 저수조, 케이슨, 코팅용도, 산업폐기물 및 핵폐기물 저장용기 등의 용도가 제안되어 있는 것이 특징이라 할 수 있다.

Table 4 DUCTAL의 일반 물성치

항 목	DUCTAL	고강도콘크리트	철근	화강암
비중(kg/m ³)	2460~2560	2400	7250	2900
압축강도(kg/cm ²)	1500~2100	600	-	1500~2900
휨강도(kg/cm ²)	270~450	90	-	-
인장강도(kg/cm ²)	80~90	40	2750	60~120
정탄성계수(GPa)	48~50	40	114	60~100
내마모성(mm)	1.0~1.5	2.3	-	1.8
건조수축(μ)	50	400~600	-	-
투수계수(cm/sec)	1.0×10 ⁻¹⁵	-	-	-

내마모성시험은 ASTM C 779에 의함.

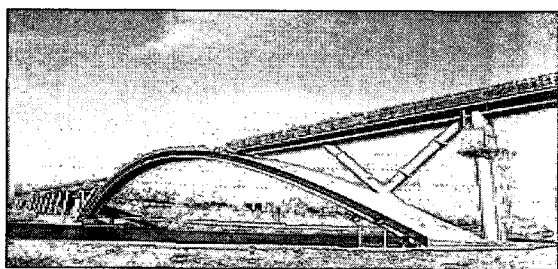


Fig. 6 선유도 보도교 전경(한국).

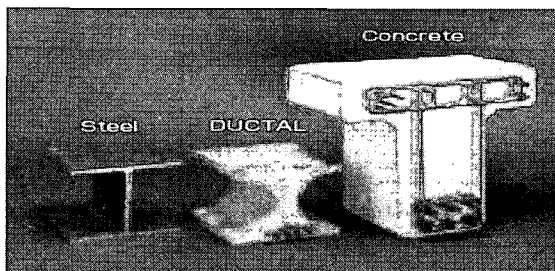


Fig. 9 각 재료별 크기 비교.

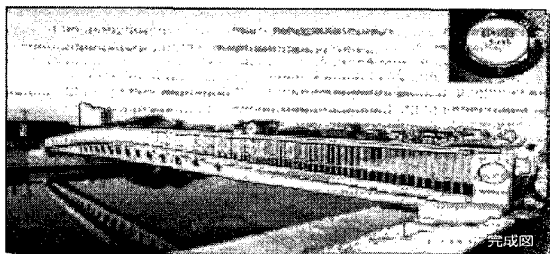


Fig. 7 사카타 미라이교 (일본).

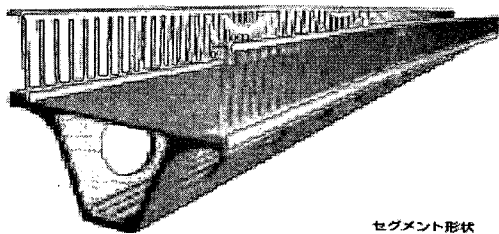


Fig. 8 사카타 미라이교의 세그먼트 모습.

5.2 선유도 보도교(국내 서울 한강 소재)

교량 지간 120m(6분할)의 프리스트레스트(포스트텐션 방식) 구조로서 교폭은 4.3m, 거더높이 1.3m이며, 월드컵 기념으로 건설되어 2002년 4월에 준공 완료하였다. 선유도 보도교의 전경은 Fig. 6에 나타내었다.

선유도 보도교에 사용된 DUCTAL은 RPC를 베이스로 강도 및 변형 성능에 대한 밸런스를 맞춰 개량하여 상품화된 복합재료이다. 이는 프랑스의 Bouygues, Lafarge, Rhodiaemd 3개 회사에서 공동으로 1999년 개발된 것으로서 타입별로 A, B, C의 3타입이 있으며, 모두 증기양생을 통해 제작한다.

A타입은 모재 자체의 인성을 높여주기 위해 침상의 무기계 보강재를 배합하여 일반적인 RPC에 비해 3배 이상의 인성을 증가시킨 것이고, B타입은 필수 구성재료인 강섬유에 특수 표면처리를 실시해 강섬유의 인출 특성을 1.7배 이상 향상시킨 것이다. 한편, C타입은 A, B타입을 조합하여 휨강도 52 MPa, 압축강도 225 MPa, 탄성계수 55 GPa의 역학적 성능간의 균형을 갖도록 한 것이다. Table 4에서는 DUCTAL의 일반적인 물성을 고강도 콘크리트, 철근과 화강암을 대상으로 비교한 시험결과를 나타내었다. 국내 선유도 보도교의 적용 뿐 만 아니라, 일본의 사카타 미라이교에도 적용 예를 찾아볼 수 있으며, 다음 Fig. 7과 8에 나타내었다.

DUCTAL의 복합재료는 자체가 강재에 필적할 만한 성능을 지니고 있으므로, 비용절감이 가능할 것으로 예상된다. 또한, 강구조물과 철근콘크리트에 비해 경량이고 내구성이 우수해 유지관리비용이 절감되며, 보강철근이 필요없는 구조가 가능하데 반해, 일반적인 콘크리트 제조설비로서 제조가 가능하므로 추가적인 비용이 들지 않는다. Table 5에 설계휨모멘트 150 kN·m로 거더를 설계하였을 경우, 각 구조별 결과를 나타내었으며, Fig. 9에서는 각 재료별 크기를 비교한 결과를 나타내었다.

Table 5 설계힘모멘트(150)에 따른 설계 결과

구 분	H형 강거터	DUCTAL 거터	보통콘크리트 거터
거터높이(cm)	20	20	40
거터 폭(cm)	20	20	40
중 량(kg/m)	50	50	210

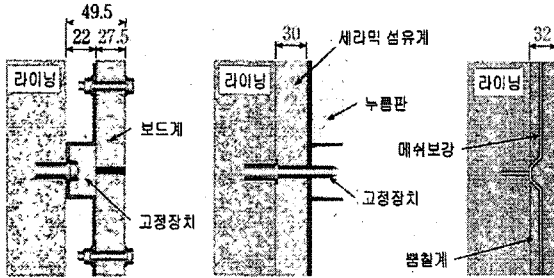


Fig. 10 복합재료를 이용한 내화재 설치.

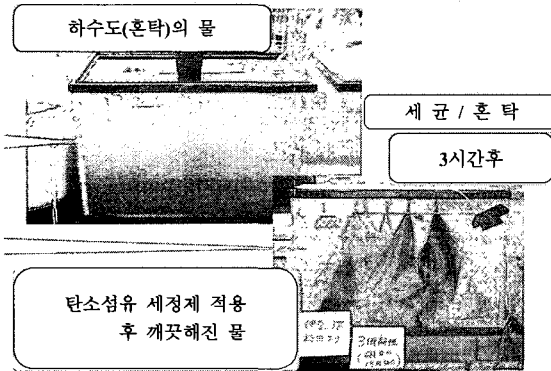


Fig. 11 탄소섭유 세정제.

6. 기타 복합재료의 활용

기타 용도로 터널, 건축물 등에 사용가능한 복합 재료로서는 단열성이 있는 피복재로 라이닝함으로써 연소물의 열전도를 억제하는 방법을 고려할 수 있다. 한 예로, 경량으로 내열성이 뛰어난 실리카계의 세라믹 섬유를 주 재료로 하는 모포 형태의 내화재로서 Fig. 10에서 보는바와 같이 설치한다. 경량이고 유연성이 있으므로 이음부에 특히 적용 가능한 재료이며, 세라믹섬유는 발암성 등으로 인체에 유해성이 지적되는 제품이기도 하나, 최근에는 체내에 축적되지 않는 생체 용해성 섬유인 제품도 개발되고 있다. 또한, Fig. 11에서 보는 바와 같이 탄소섭유를 이용하여 하수 및 시공 장소 근처의

혼탁해진 물을 정화할 수 있는 복합재료도 개발되어 사용하고 있다.

7. 결론

섬유강화복합재료는 건축/토목 구조물 분야에 적용할 경우, 높은 초기건설비가 가장 큰 문제점으로 대두되고 있다. 그러나, 현재 모든 국가에서 초기 투자비용에만 관심을 두고 있기 때문에 문제점으로 지적되지만, 실질적으로 구조물의 성능, 수명 및 유지 관리 등의 측면이 종합적으로 고려된다면 상당히 매력있는 재료임에 틀림없을 것이다. 이러한 LCC 산정의 정밀도를 향상하기 위해서는 각종 열화요인에 대하여 각 과정을 정밀하게 예측할 수 있는 기법의 개발이 필요할 것으로 판단되며, 이와 동시에 각 공법의 비용을 절감시킬 수 있는 신공법의 개발과 새로운 보수·보강 및 설계기술의 개발도 요구된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 “건설핵심기술연구개발사업”(03 산학연 A07-09)의 지원과 “사회기반시설물 평가 중점연구단” 사업의 지원에 의해 이루어진 것입니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) H.W.Reinhardt and C.Fritz, “Optimization of SIFCON Mix”, *Fiber Reinforced Cements and Concretes*, 1989, pp. 11-20.
- 2) 高稻宣和 外, “高靱性セメント複合材料を用いた梁部材の曲げせん断性状”, *日本建築學會學術講演概要集 C-2*, 2001, pp. 37-42.
- 3) A.E.Naaman and H.W.Reinhardt, “Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites - HPRCC, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2”, *Proceedings of the Second International RILEM Workshop*, Edited by A.E.Naaman and H.W.Reinhardt, 1995, pp. 1-23.
- 4) V.C.Li, et al., “Micromechanical Models of Mechanical Response of HPRCC, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2”, *Proceedings of the Second International RILEM Workshop*, Edited by A.E.Naaman and H.W.Reinhardt, 1995.