특 집

건축용 섬유재료

강 태 진

1. 서 론

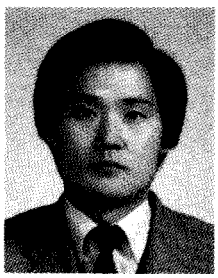
인류가 오랜 역사동안 건축물에 사용하였던 여러 가지 재료 중에서 인장강도가 압축강도에 비하여 현저하게 떨어지는 재료들을 보강하기 위하여 사용하였던 섬유 재료의 응용 기술은 그 연원이 고대로 거슬러 올라간다. 이러한 섬유보강 건축재료의 가장 오래된 예는 지푸라기를 이용한 진흙 벽돌의 응용을 들 수 있다. 현대에 이르러 가장 먼저 그리고 널리 이용된 섬유보강 건축용 재료는 1900년경에 Hatschek process의 개발과 함께 등장한 석면-시멘트이다. 이후 최근에 이르기까지 여러 종류의 섬유들이 에폭시, 플라스틱, 세라믹 등 여러 가지 재료들을 보강하는데 사용되고 있다. 이러한 여러 가지 섬유보강 복합재료중에서 특히 건축용 섬유보강재료에 대해서 살펴보기로 한다.

보강되지 않은 시멘트 재료는 일반적으로 인장 특성이 좋지 못하며 취성(brittleness)을 나타낸다. 따라서 이러한 재료를 건축재료로 이용하기 전에 보강하는 것이 필요하다. 여기에 사용된 전통적인 방법은 연속강화강(鋼)을 사용하는 것인데 이것은 일정한 위치에서 인장응력, 전단응력을 견디도록 되어 있다. 반면에 보강된 단섬유는 불연속이고 섬유의 형태이고 일반적으로 시멘트기지재 속에 임의분포되어 있다. 따라서 섬유를 보강재료로서 사용한 경우에 인장응력을 견뎌내는데 있어서는 강재에 비하여 효과가 떨어지지만, 전통적인 보강강(鋼)에 비하여 훨씬 더 밀집되어 분포하고 있으므로 균열을 억제하는데는 뛰어난 효과를 가진다. 따라서 하중지지능력을 향상시키는 데는 전통적인 보강강(鋼)이 사용되고 균열을 억제하는 데는 섬유가 사용된다. 이러한 차이점 때문에 전통적인 보강강(鋼)보다는 섬유를 보강재료로 사용하는 것이 다음과 같은 분야에서는 더 효과적이다.

- Thin sheet materials: 전통적인 보강강(鋼)이 사용될 수 없는 thin sheet material에 대하여는 보강 섬유가 사용된다. 이러한 경우 일반적으로 섬유 부피분율이 5%이상이고 재료의 강도와 인성 모두를 증진시킨다.
- 부분적으로 높은 하중을 지탱해야 하는 재료: 터널의 지붕이나 폭파 저항 구조물 등
- 수분이나 온도의 변화에 기인되는 균열을 제어하기 위해 사용되는 섬유재료(2차 보강재)

보강 재료로서 섬유를 사용하는 것은 전통적인 시멘트 보강 방법을 대체하는 것이 아니다. 현대적인 시멘트보강 기술에서 섬유와 보강강은 서로 다른 역할을 수행하며, 많은 경우에 섬유와 보강강재가 함께 사용된다.

현대의 FRC(fiber reinforced cememtitious material) 응용분야에는 다양한 종류의 섬유가 보강재로 사용되고 있다. 석면 섬유는 파이프나 지붕재료에 사용되고, 유리 섬유는 주로 precast panel에 사용되며 steel fiber는 도로포장, 댐 건설 등에 사용된다. 또한 폴리프로필렌은 2차보강재로 많이 사용되고 있으며 이외에도 PVA(poly vinyl alcohol)나 탄소 섬유 등이 사용되고 있다. 또한 식물성 섬유들은 저가의 건축재료에 이용되고 있다. 현대의 새로운 섬유 개발에 따라서 사용되는 섬유도 더욱 다양해



강태진
1971~1975 서울대학교 섬유공학과 (공학사)
1977~1979 서울대학교 대학원 섬유공학과 (공학석사)
1979~1983 미국 노스캐롤라이나 주립대학교(공학박사)
1983~1985 미국 Macfield Incorporated 연구원
1985~현재 서울대학교 공과대학 섬유고분자공학과 교수

Textile Materials in Building Construction

서울대학교 공과대학 섬유고분자공학과(Kang Tae Jin, Department of Fiber & Polymer Science, College of Engineering, Seoul National University, Kwanakgu, Shilimdong San 56-1, Seoul, Korea)

지고 새로운 분야로의 이용이 계속되는 추세이다.

현대의 새로운 섬유 생산 기술의 발전에 따른 고기능성 섬유의 등장은 FRC의 새로운 이용범위를 만들어 냈다.

유용한 FRC를 생산하기 위해서는 생산기술이 그 특정한 섬유와 기지재에 합당해야 한다. 이것은 섬유의 종류뿐만 아니라 섬유의 기하학적인 모양에도 의존한다. 특히 섬유형태는 FRC의 취급과 경화(hardening) 사이에서 피할 수 없는 상반된 모순을 가진다. 섬유가 길고 가늘면 FRC의 hardening면에서는 효과적이지만 FRC양생 및 취급과정이 어렵게 된다.

이러한 어려움을 극복하기 위해서 다음과 같은 방법들이 응용되고 있다.

- 길이의 증가 없이도 결합력을 높이기 위한 섬유형태의 변화
- 기지재 내에서의 확산성을 향상시키기 위한 섬유표면의 화학적 처리
- 기지재의 유변학적인 성질의 개선
- 많은 양의 섬유가 확산 되도록 하기 위한 특별한 기술의 개발

섬유재료의 건축재료 응용예는 섬유보강 시멘트 외에도 건축물의 실내장식용 섬유재료, 지하건축물 외벽피복재, 지붕 시트재, 대형 체육관의 멤브레인을 이용한 지붕재등을 들 수 있다.

현대의 섬유재료 개발기술은 건축재에 새로운 기능성 부여 및 확대를 가져왔으며, 이 결과 건축물에 섬유 응용범위가 더욱 광범위하게 되었다.

2. 보 강 재

2.1 시멘트 보강용 섬유재료

콘크리트의 강력과 변형 성질을 향상시키기 위한 섬유보강재의 응용은 잘 확립되어 있다. 섬유보강재의 개념은 하중을 섬유에 전달하는 응력하에서의 기지재 변형을 이용하는 것이다. 만약, 섬유가 강하고 단단하면, 정적 · 동적 성질 향상이 얻어진다. 취성의 시멘트기지재에 섬유를 최초로 보강한 기술은 19세기 후반의 석면섬유 응용에서 찾아볼 수 있다. 현재 섬유-콘크리트 복합재료에 이용되는 섬유는 (a)저탄성계수, 고신장 섬유 (b)고강력, 고탄성계수섬유로 나눌 수 있다.

저탄성계수, 고신장 섬유로는 폴리아미드, 폴리프로필렌, 폴리에틸렌 등으로 에너지 흡수가 크고, 강력향상은 없으며, 시멘트 인성과 충격 저항을 향상시켜 주고, 하중저항을 분산시켜준다. 고강력, 고탄성계수의 섬유로는 강철, 유리섬유, 석면, 탄소섬유 등으로 강한 섬유-콘크리트 복합재료를 만들 수 있다. 이러한 섬유는 우선 강력과 강성을 섬유에 분산시키고, 동적 성질을 변화시켜 준다.

표 1. Typical Properties of Fibers

Fibre	Diameter (nm)	Specific Gravity	Modulus of Elasticity (GPa)	Tensile Strength (GPa)	Elongation at Break (%)
Steel	5-500	7-84	200	0.5-2.0	0.5-3.5
Glass	9-15	2-60	70-80	2-4	2-3.5
Asbestos					
Crocidolite	0.02-0.4	3.4	196	3.5	2.0-3.0
Chrysotile	0.02-0.4	3.1	164	3.1	2.0-3.0
Fibrillated polypropylene	20-200	0.9	5-77	0.5-0.75	8.0
Aramid(Kevlar)	10	1.45	65-133	3.6	2.1-4.0
Carbon (High-strength)	9	1.90	230	2.6	1.0
Nylon	–	1.1	4.0	0.9	13.0-15.0
Cellulose	–	1.2	10	0.3-0.5	–
Acrylic	18	1-1.8	14-19.5	0.4-1.0	3
Polyethylene	–	0.95	0.3	0.710^{-3}	10
Wood Fiber	–	1.5	71.0	0.9	–
Sisal	10-50	1.50	–	0.8	3.0
Cement matrix	–	2.50	10-45	3.7×10^{-3}	0.02

강철섬유, 유리섬유는 시멘트기지재에 이용되어 왔다. 강철섬유의 단점은 분산이 어렵고, 가공시 흙손작업이 어렵다. 게다가 콘크리트 표면의 녹때문에 실외 사용을 어렵게 한다. 한편, 유리섬유는 시간이 지남에 따라 인장강력과 연성을 잃는 단점이 있다. **표 1**에 여러 보강섬유재료의 전형적인 성질들을 보여주고 있다. 보강섬유 재료는 역학적 특성뿐만 아니라 섬유의 기하형태, 종횡비, 부피, 배향, 제조기술 등에 있어 매우 다양하다. 이러한 성질들은 섬유를 보강재로 사용했을 경우 구조재의 성질과 파괴모드에 영향을 미친다.

2.1.1 폴리프로필렌 섬유보강 건축재

이 섬유의 가장 큰 장점은 알칼리 저항성이 높고 가격이 낮은 데 있으나 용융점(165-175 ℃)이 낮다. 콘크리트 기지재는 수분, 광선, 기후에 대한 보호막 역할을 한다. 콘크리트에 가장 많이 이용되는 폴리프로필렌섬유는 피브릴화된 폴리프로필렌 필름이다. 폴리프로필렌은 소수성이고, 표면개질시 계면결합력을 향상시킬 수 있고 또한, 시멘트 페이스트에 대한 친화도도 높일 수 있다. 제한된 강력과 연성 때문에 폴리프로필렌 섬유강화콘크리트재료는 구조물에 이용되지 않는 대신에, 단기간의 충격하중에 의한 손상저항성이 우수하기 때문에 특별한 용도에 응용된다. 폴리프로필렌 강화재료는 마루 슬랩에 많이 이용되며, 이때 섬유재료 시멘트의 균열을 분산시켜 슬랩이 파괴되는 것을 막아준다. 연속적인 폴리프로필렌 피브릴화 필름은 인장응력방향과 나란히 배열되면 높은 굽힘강력을 가진 재료가 된다. 이 결과, 시멘트를 기초로 한 고연성 물질을 생산하여, 석면/시멘트 등 여러 물질을 대체할 수 있는 경제적인 시트형태 물질을 생산할 수 있게 된다. 전형적인 용도는 피복재, 평평하고 골이 진 시멘트

시트, 구멍 패널, 터널 연결 재료, 폭발저항 콘크리트, 수중파이프, 부양장치, 강벽(river walls), 얇은 지붕재료 등이다.

2.1.2 폴리에틸렌 섬유보강 건축재

폴리에틸렌 섬유는 제조방법에 따라서 광범위한 물성을 지니게 되며 특히 강도면에서 큰 변화를 보인다. 폴리에틸렌 섬유는 화학적으로 시멘트와의 친화력이 약하며 따라서 섬유의 표면처리가 요구된다. 따라서 폴리에틸렌의 표면개질이나 전처리는 특히 극성물질에 대한 강한 구조결합을 위하여 필수적이다. 가장 효과적인 표면처리기술은 산소기체 플라즈마를 이용한 산화처리, 크롬산, 방사유도그라프팅(radiation induced grafting) 등을 들 수있다. 폴리에틸렌 피브로스 펄프강화 시멘트복합재료는 다음과 같은 이점과 기본성질을 지니고 있다.

- 배향된 폴리에틸렌 피브로스 펄프는 얇은 시멘트, 시멘트 모르타르 부분을 강화하는 데 효과적으로 이용될 수 있으며. 펄프만 사용하여 굽힘강력을 24 MPa까지 높일 수 있다. 게다가 피브로스 펄프는 우수한 굽힘인성 향상을 보인다.
- 다양한 섬유를 펄프와 함께 사용하여 효과를 더욱 높일 수 있다.
- 피브로스 섬유는 알칼리 분위기에서 안정하며, 가속 숙성시험에서 이러한 펄프로 보강된 시편은 강력과 인성을 유지한다.
- 펄프는 Hatschek, 사출성형, 일반적인 캐스팅과 같은 많은 시멘트공정에서 유용하게 사용되고 있다.

일반적으로, 배향된 폴리에틸렌 피브로스 펄프는 얇은 부분의 시멘트제품의 보강에 매우 유용하게 사용된다.

2.1.3 폴리아마이드 섬유보강 건축재

케블라섬유는 poly(p-phenylene-terephthalamide)로부터 방사되며, 화학구조는 모든 방향족 단위가 축방향으로 배향되어 있고, 축합연결고리가 상대적으로 짧아, 높은 탄성계수를 지닌다. 여러 케블라 섬유중 케블라49와 케블라29는 비슷한 강력을 가지나, 저탄성계수와 높은 신장성을 지닌 케블라 29의 파괴에너지가 더 크다. **표 2**에 케블라 49와 29의 역학적 성질들이 제시되어 있다.

아라미드섬유 보강 시멘트는 짧고 임의분포된 섬유를 함유하는 복합재료이며, 분무기술을 이용하여 부피수축이 1.5%이내인 섬유를 미리 혼합하여 만든다. 폴리아미드 섬유 보강 시멘트는 응력-변형율곡선에서는 일반적으로 기대되는 보강섬유의 특성을 보이며, 복합재료 최대응력과 변형율을 증가시켜 인성이 우수한 섬유보강 시멘트가 되게 한다. 이러한 특성 외에도 섬유부피분율과 길이의 효과는 굽힘강력과 인성을 증가시킨다. 2년 동안의 숙성 후, 60 ℃와 75 ℃의 물속에서 180일 동안 지낸 후에도 시멘트 재료의 강력과 인성은 거의 변화가 없으며, 내구성도 문제가 없음을 보였다. 아라미드섬유의 크리이프계수는 폴리에틸렌, 폴리비닐클로라이드, 폴리카보네이트섬유 보다 훨씬 작다. 따라서 아라미드 섬유 보강 시멘트의 크리이프 성질은 순수시멘트 페이스트 기지재에서 보이는 성질과 비슷하다.

표 2. Yarn Tensile Properties of PPTA(poly-p-phenylene-terephthalamide) Fibers

	Kevlar49	Kevlar29
Tensile Strength(GPa)	2.8	2.8
Specific Tensile Strength(g/den)	22	22
Modulus(GPa)	124	61
Specific Modulus(g/den)	980	480
Elongation at Break(%)	2.5	3-4
Denier per Filament	1.5	1.5
Tatal Yarn Denier	400	1500

2.1.4 탄소섬유 보강 건축재

탄소섬유는 역학적 특성뿐만 아니라 내열성, 내후성의 관점에서도 매우 우수한 성질을 지니고 있다. 탄소섬유를 건물과 건축 구조재의 용도로 사용하려는 시도가 일본에서 태동되었으며, 1987년에 32,000 m^2넓이의 가벼운 탄소섬유보강 콘크리트 막벽이 동경의 37층건물에 설치되었다. 이러한 건축용 탄소섬유재료는 낮은 인장강력과 탄성계수를 지닌 범용 피치 베이스의 탄소섬유가 주로 사용되어지고 있다. 이러한 재료는 시멘트기지재와 혼합되면 섬유가 뭉치는 경향이 있다. 특수한 기능의 혼합기가 없으면 이러한 비중이 가벼운 탄소 섬유를 고르게 분산시키는 것이 어렵다. 그러나 고기능의 피치계 탄소섬유는 이러한 분산의 어려운 문제를 어느 정도 해결해 주었다. 보통의 모르타르와 소량의 분산제를 사용하여 시멘트기지재내에 짧게 자른 탄소섬유를 균일하게 분산시키는 기술이 개발되어 탄소섬유보강 콘크리트의 작업능률을 향상시키게 되었다.

얇은 부분의 탄소섬유보강콘크리트의 굽힘강력은 섬유부피분율이 3%일 때, 200-210 kg/cm^2 정도이고, 섬유부피분율이 2%일 때는 160-170 kg/cm^2이며, 파괴모드는 급격하지 않은 향상된 인성 증가를 보인다. 또한, 이것은 같은 치수의 순수 모르타르에 비해 강도가 3-4배 정도 향상된 수치이며 인성은 20배이상 증가한다. 또한 ASTM-C666-77시험 방법에 의한 300회의 냉동-해빙 실험에서 물성저하는 관측되지 않았다. 동결·해빙에 의한 응력저하및 크랙발생은 시멘트기지재에 고르게 분포된 탄소섬유와 기공에 의하여 억제 완화된다고 여겨진다.

속성 내후성 실험에서 탄소섬유보강 콘크리트는 장기간동안 높은 수준의 강력을 유지한다. 염수분무시험, 장기간 실외 노출시험에서도 유사한 결과를 보인다. 섬유부피분율 2%인 탄소섬유보강 콘크리트는 미연소성시험에서도 우수한 결과를 보인다.

2.1.5 폴리아크릴로니트릴 섬유보강 건축재

우수한 비강도와 탄성계수를 지니는 폴리아크릴로니트릴섬유는 역시 콘크리트를 보강하기 위하여 사용되어진다. 폴리아크릴로니트릴섬유-콘크리트 복합재료의 사용이 다른 보강 섬유를 사용하여 보강한 시멘트와 동일한 작업성을 달성하기 위하여는 모든 혼합물에 대하여 수분함량을 조절하고 초가소제를 첨가하여 작업능률을 올려야만 한다.

아크릴섬유강화 콘크리트는 다른 섬유보강 콘크리트와 마찬가지로 보강되지 않은 콘크리트와 비교하여 다음과 같은 주된 장점이 있다.

- 수축에 의한 균열성장이 감소한다
- 인성이 증가한다
- 파괴 탄성계수가 증가한다.

이러한 성질로 인해 고강도 폴리아크릴로니트릴섬유는 단단한 콘크리트 구조물이나 높은 충격하중을 견딜 수 있는 구조물 등에의 콘크리트보강에 효율적으로 사용될 수 있다.

- 단단한 구조물
- 충격하중을 견딜 수 있는 구조
- 영구 거푸집

2.1.6 폴리비닐알콜 섬유보강 건축재

고강력 폴리비닐알콜섬유는 주로 석면 대체용으로 개발되어 왔다. 습식 또는 건식 방사방법에 의해서 PVA (poly vinyl alcohol) 섬유가 생산되고 있으며, 분자내 결합 형성에 의한 고강력과 높은 강성을 얻기 위하여 보론이 첨가되어진다. 시멘트 기지재와의 계면결합력을 증진시키고 효율적인 분산을 달성하기 위하여 PVA 섬유는 표면처리를 하여 사용한다. 이러한 표면처리 때문에 PVA 섬유에 존재하는 OH기의 존재와 더불어 이 고분자물질의 고유한 친수성으로 인하여 효율적인 분산과 시멘트 기지재와의 강한 결합력을 생성시킬 수 있다. 기존의 석면-시멘트보다 역학적 특성이 우수한 폴리비닐알콜 보강 시멘트복합재료를 소량의 폴리비닐알콜섬유를 사용하여 만들 수 있다. 탄성계수는 석면-시멘트 복합재료보다 다소 작지만 강력과 인성은 오히려 우수함을 보인다. 폴리비닐알콜섬유의 알칼리 저항성은 유리섬유보다 우수하고 열적으로 안정하며, 생물학적 공격에도 안정하다. 폴리비닐알콜 섬유보강 시멘트 복합재료는 냉동-해빙에 대해서 석면보강 시멘트보다 더 우수함을 보인다.

2.2 부직포 건축재

부직포는 임의 배열된 섬유들이 특정한 방법으로 결합된 3차원 섬유 네트워크 형태의 천을 일컫는다. 부직포의 구조는 웹의 형태와 웹을 결합시키는 방식에 따라 결정된다. 웹의 형태는 단섬유를 카딩하여 쌓아준 카드웹과 연속섬유을 쌓아준 스펀웹으로 크게 나눌 수 있다. 이들의 결합방식으로는 접착물질을 뿌려주는 접착방식과 물리적 엉킴을 유도하는 니들펀칭, 스티칭 등의 방법이 사용되고 있다. 부직포의 물성은 사용된 섬유와 구조에 의하여 결정되며 단열성이 뛰어나고 마모와 찢김에 대한 저항성이 크다.

부직포의 토목건축분야 응용은 건설용으로 부수적, 보충적 기능에 국한되지 않고 현대에 들어 그 사용용도가 기능성 향상 만큼이나 급속도로 발전하여 왔다. 부직포는 건축물에서 완충재 역할 및 소리, 수분, 열 전달을 막는 스크린 물질로도 사용된다. 부직포 산업의 생산기술발달과 더불어 사용용도도 확대되어 수중 구조물, 철도, 도로, 댐, 교량 등 다양한 건축물의 내부재 등으로 사용된다. 부직포 응용기술은 이들 산업분야에서 이미 확립되어 있으며 미래에는 건축토목 전분야에 걸쳐서 더욱 크게 확대될 전망이다.

2.3 콘크리트 보강용 섬유구조물

그림 1은 범용복합재료에 이용되는 다양한 섬유보강 구조물의 형태를 보이고 있으며, 기하학적 형태를 차원으로, 섬유방향을 축으로 분류하여 보인 것이다.

3차원 보강재를 제조하는 방법은 3차원 woven 직물을 제조하는 시스템과 동일한 방식의 3-D 직물 제조기술을 응용한 것과, 3-D Braiding제조기술, 부직포 제조기술등을 응용한 다양한 방식의 제조기술을 사용하고 있다. **그림 1**에서 보듯이 3차원 직물은 solid body안에 여러 필라멘트를 제직하여 제조한다. 여러 제조방법이 있지만 가장 기본적인 방법은 **그림 2**에서 보인바와 같다.

그림 1에 보인 조밀한 직물은 원래 보강 플라스틱으로 사용되었던 것이다. 따라서 콘크리트 구조물 보강재에 사용하기 위해서는 훨씬 넓은 공간으로 제직해 콘크리트나 모르타르가 침투하도록 해야한다. 또한 본래 3차원 직물은 제조과정에서 수지로 함침되지 않기 때문에 별도의 수지로 함침하여 필라멘트가 원래의 강력을 발휘하도록 해야한다. 이러한 문제로 인해 생산성이 낮고 단가가 높은 단점이 있다. 이러한 섬유 구조물 보강 콘크리트 재료는 고기능성이 요구되는 특수한 목적의 구조물 외에는 경제성이 낮기 때문에 그 응용에는 한계를 보인다.

3. 섬유보강 콘크리트재의 응용

3.1 3D-FRC Building Panel 에의 응용

3.1.1 Partition Panels-염소개스 저장고

염소개스 저장고에 3차원 섬유보강 콘크리트 판재를 효율적으로 사용할 수 있다. 기존의 염소저장고용 판재 즉, 염소가스 저장실과 인접한 방의 벽은 스테인레스 스틸 봉으로 강화된 콘크리트 판넬을 사용하였다. 그러나, 염소가스의 누출을 대비하여 염소가스 저항성이 강하고 내구성이 우수한 재료가 요구되었고, 설치에 필요한 공간

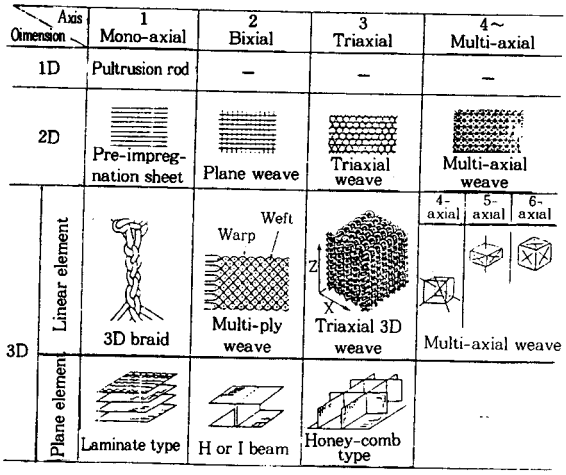


그림 1. Fiber configurations for composite materials.

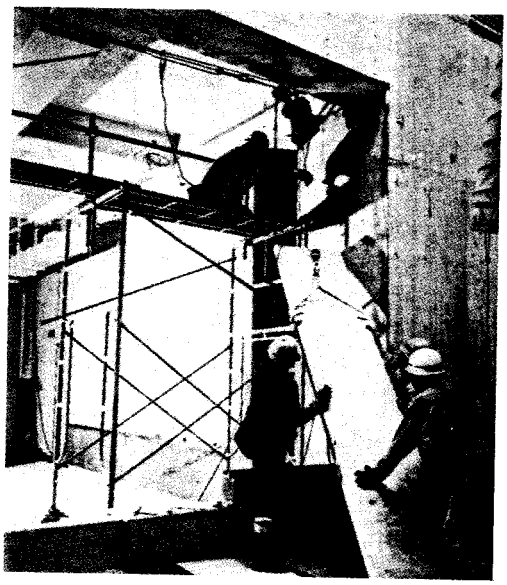


그림 3. Installation of partition panels for chlorine gas store room in progress.

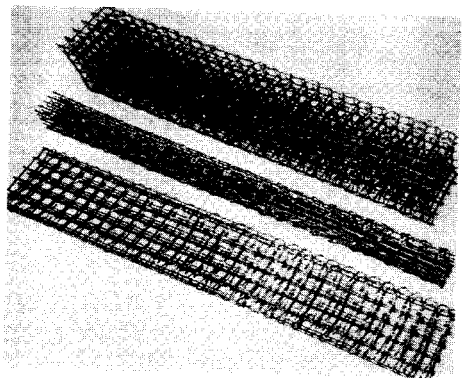


그림 2. 3D fabric.

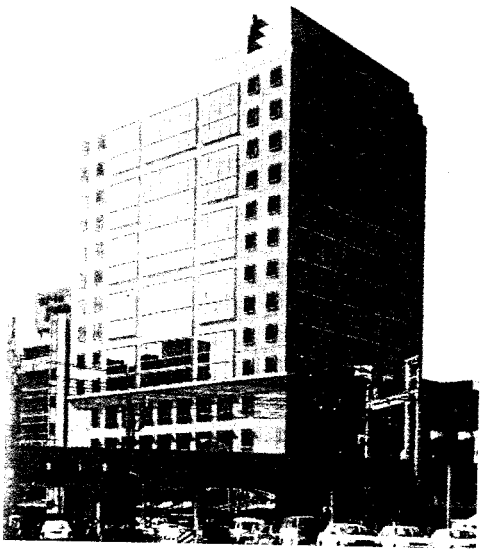


그림 4. Suidobashi building, Tokyo Dental College, Japan.

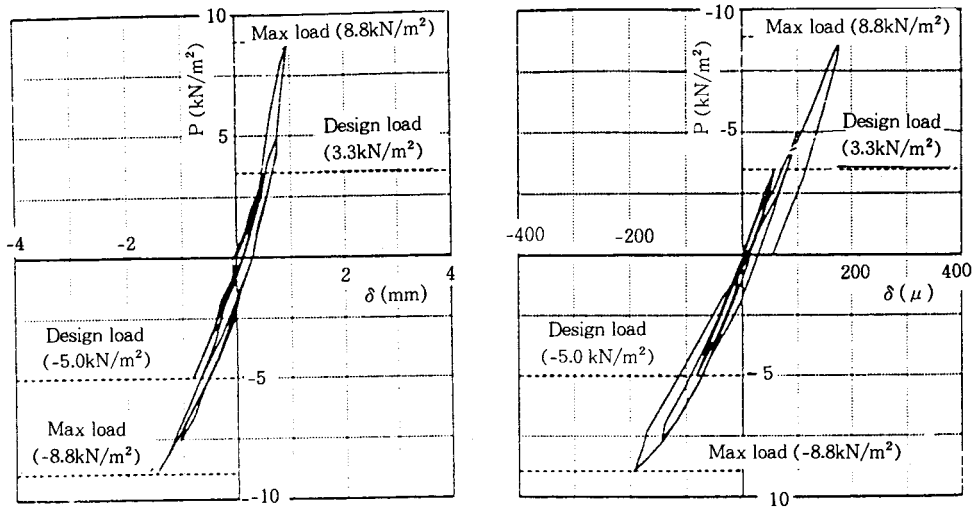
의 제한으로 가볍고 내구성이 우수한 3D-FRC가 효율적으로 사용되게 되었다. **그림 3**은 설치 과정을 보이고 있다. 3차원 직물은, PAN(poly acrylonitrile)형의 탄소섬유(48KF)와 비닐론 단섬유를 1.0% 포함하는 VFRC (vinylon fiber reinforced concrete) 기지재를 사용하였다. 이러한 표준 판넬의 무게는 250 kg 정도이고, 설치면적은 80 m^2 를 필요로 한다.

3.1.2 Parapet Panels

그림 4에 보인 건물은 외관은 철제 프레임으로 둘러싼 화강암 표면처리 벽으로 되어 있고, 벽체는 탄소 단섬유로 강화된 콘크리트로 되어 있다. 그러나, 철제 프레임이 난간으로 쓰일 경우에 기후조건상 부식될 수 있기 때문에 3D-FRC 판넬을 대신 사용한 경우를 보이고 있다.

3D 직물을 만들기 위한 실로는, X,Y 방향으로 아라미드섬유(24KF), 전자파 간섭으로 인한 잡음을 고려하여 Z 방향으로는 탄소섬유(12KF)를 사용하여 구조물을 제작하였다. 또한, 기지재로는 VFRC(vinylon fiber reinforced concrete)(V_f=1.25%)가 사용되었다. 판넬타입의 3D 직물은 X축을 따라 일렬로 600 mm까지 배열되어 보형태의 3D 직물과, 2D 접합 직물에 연결되었다. 표준 판넬의 무게는 약 1톤 정도이며, 넓이는 600 m^2이다.

그림 4에 보인 Suidobashi 빌딩에 쓰인 가장 큰 판넬과 똑같은 판넬을 사용하여 (3573 mm × 2133 mm) 방풍 실험을 하였다. 바람을 5.0 kN/ m^2의 세기로 가



(Wind load vs. displacement) (Wind load vs. strain)

그림 5. Relation between wind load and displacement and strain.

하였을 경우, 반대쪽에는 3.3 kN/ m^2의 압력이 작용되었다. 맨 위쪽 가로보의 중앙에서 측정된 풍압에 의한 최대변위와, 변형률과의 관계를 **그림 5**에 보였다.

이 판넬의 풍압에 의한 변위와 변형률 관계는 바람의 세기와 탄성 관계를 보이는 것으로 나타났으며, 3D-FRC가 방풍용으로 훨씬 더 안정한 변형거동을 보이는 결과를 보여 주었으며 또한 우수한 굽힘강력을 가짐을 알 수 있다.

3.1.3 막벽-Sea Fort Square

동경의 Shinagawa 해안에 있는 23층짜리 Sea Fort Square 빌딩(**그림 6**)의 건축에 처음으로, 대규모의 3D-FRC 판넬재가(1500 m^2) 사용되었다. 타일로 마감처리된 각각의 판넬은 철제 프레임에 600 mm 간격으로 볼트로 고정되어 설치되었다. 원래의 설계는 벽체용으로 알루미늄을 사용하는 것이었으나, 염분에 의한 알루미늄의 부식이 우려되고, 또한 철제 프레임이 기존의 콘크리트 벽의 무게를 견디지 못할 것으로 생각되어서, 가볍고 내구성이 우수한 3D-FRC가 대규모로 사용되게 되었다.

3-D 직물을 만드는 데에는 PAN형의 탄소섬유(X, Y 방향으로 24KF, Z 방향으로 12KF)를 사용하였으며, 접속봉으로는 120KF 탄소섬유를 사용하였고, 두개의 3-D 직물을 보에 접합하여 사용하였다.

도쿄에 있는 37층의 Arc Hill Mort 빌딩(**그림 7**)의 막벽(curtain wall)은 5,540톤의 CFRC(carbon fiber reinforced concrete)로 만들어졌다. 이 재료는 일반적인 건축물보다 무게에서 60%를 절감하였고, 지진 하중 또한 12% 줄일 수 있었다. 또한 빌딩을 지탱하는 철골구조의 무게도 4,000-20,000톤 가량 절감할 수

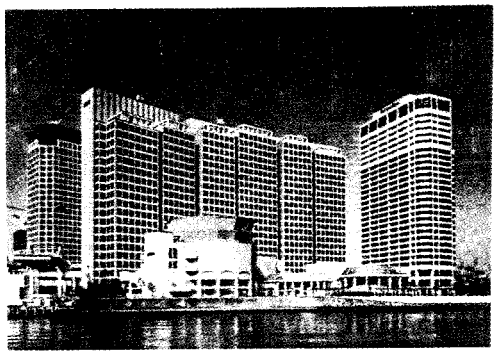


그림 6. Sea Fort Square.

있었다.

CFRC는 길이 3-10 mm, 지름 15 μm의 탄소 섬유를 부피비 2-4%로 시멘트와 혼합하여 사용하였다. 이러한 CFRC는 일반 콘크리트와 비교하여, 역학적 특성, 수명, 형태안정성이 월등히 우수하다. 비강도가 우수한 탄소섬유는 콘크리트내의 강알칼리 환경에서 안정하고 방열성이며 또한 화학적으로도 안정하다. 또한 구조물의 무게 절감이 가능하기 때문에 당시의 킬로당 33불이라는 탄소섬유의 비싼 가격에도 불구하고, 탄소 섬유 사용은 경제적으로도 타당함을 보였다

3.2 멤브레인 구조물에의 응용

단기간동안 사용하는 전시장의 air dome 구조물에 멤브레인 형태의 재료가 많이 사용되었으며 이러한 구조물에의 응용시 단기간의 사용이므로 방열성과 내구성 등은 별로 문제가 되지 않는다. 불소 수지가 코팅된 유리 섬유가 이러한 목적으로 개발되었으며 이러한 유리섬유는 내

그림 7. CFRC curtain wall of the Ark Hills Mori building in Akasaka, Japan.

구성이 우수하기 때문에 영구적인 지붕재로 사용하기에 적당하다. 이 소재가 air dome의 영구적인 지붕에 처음 사용된 것은 1984년부터이며, 1988년에 도쿄돔(**그림 8**)에 매우 효율적으로 사용되었다.

3.3 부직포의 건축물에의 응용

부직포는 건축물 내부의 표면 장식재, 바닥재, 벽지에 많이 사용되고 있으며 장식적인 측면뿐만 아니라 부직포 특유의 기능성 때문에 지하 건축물의 열, 습기 보호막 등으로 효율적으로 사용되고 있다.

3.3.1 장식표재

수지로 경화시킨 부직포는 벽, 마루 등의 장식용 또는 마모방지용으로 많이 사용된다. 또한 구조물의 강도를 높이거나 다른 성질을 향상시키기 위해 보조 물질로 사용되기도 한다.

유리섬유를 수지로 경화시킨 장식판이나 타일이 많이 사용되고 있는데 이는 보강섬유의 배향과 엉킴을 다르게 하여 표면형태의 다양함을 보이는 방법과 수지의 양을 적게 하여 흡수하는 착색제의 양을 다르게 함으로써 시각적 효과를 높여준다.

또한 합판이나 금속판 사이에 부직포를 적층시켜 벽, 천장, 문 등의 건축 내장재로 사용하고 있다. 금속판 사이에 부직포를 적층시킴으로써 금속판이 휘어질 때 균열이

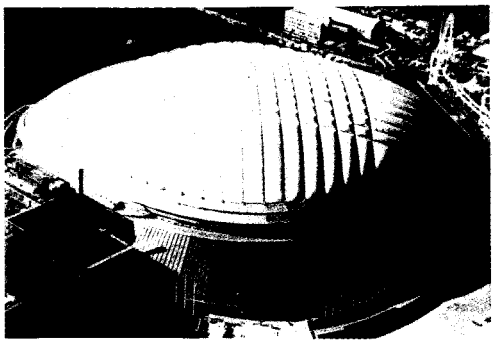
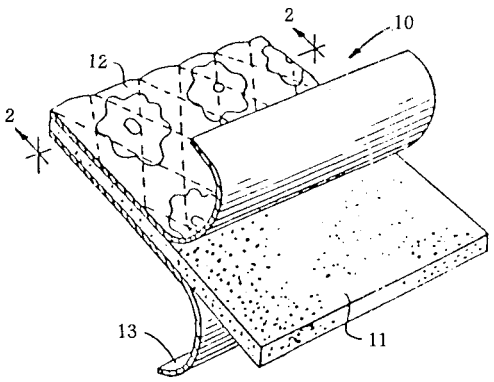


그림 8. Tokyo dome alias "Big Egg" in the Korakuen stadium.



10 : Insulating wall paper web
11 : Foamed synthetic resin intermediate layer having microporous structure
12 : Fire retardant facing sheet bearing a decorative pattern
13 : Backing sheet

그림 9. Insulated wallpaper web.

생기는 것을 방지할 수 있고 방음효과를 발휘하게 된다.

3.3.2 바닥재

대형 체육관의 마루바닥을 대체하여 부직포가 많이 사용되고 있다. 형태 안정성이 우수하고 압축에 의한 변형이 적고 마찰특성이 매우 우수하다. 특히 부직포는 운동화의 스파이크에 의한 구멍을 스스로 메우는 특징을 지니고 있으며, 젖었을 때의 미끄럼을 방지해 주고 걸을 때 편안한 느낌을 준다. 필요한 기능에 맞는 부직포를 여러 층 적층하여 바닥재를 만들게 되는데 아래층에는 니들펀칭 부직포를 사용하여 밀림을 방지하고 위층에는 짧은 섬유층이 남아있도록 만든다. 폴리우레탄으로 처리해준 최종 제품은 스파이크에 의한 손상을 막아주고 표면처리를 해주어 담배불에 견디는 방염성을 부여해 줄 수 있다. 가정용으로는 부직포만을 이용하여 카페트 대용으로 사용할 수 있으며 뛰어난 쿠션성능을 보인다.

3.3.3 장식 벽재

부직포를 사용하여 표면이 올록볼록한 엠보싱을 갖도

록 해준 벽 장식재가 사용되고 있다. 이러한 목적으로 부직포뿐만 아니라 직물도 많이 사용하며 특정한 모양으로 부분용해를 시켜 줌으로써 특별한 엠보싱 효과를 부여한다. 엠보싱된 볼록한 부분은 섬유의 구조를 보이며 디자인과 사용재료를 달리하여 많은 디자인 변화를 줄 수 있다.

부직포는 방염성을 지니는 벽지로도 사용되고 있다. **그림 9**에 보인바와 같이 표면에 방염층을 형성시키고 중간층에는 많은 공기를 함유하는 수지층을 둠으로써 방염성을 나타내게 한다.

참 고 문 헌

1. Suong V. Hoa and Raymond Gauvin, "Composite Structures and Materials", Elsevier Science Publishers Ltd., 1992.
2. A. Nanni, "Fiber-Reinforced-Plastic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures : Properties and Applications", Elsevier Science Publishers B.V., 1993.
3. Tatsuya Hongu and Glyn O. Phillips, "New Fibers", Ellis Horwood Ltd, 1990.
4. Arnon Bentur and Sidney Mindess, "Fibre Reinforced Cementitious Composites", Elsevier Science Publishers Ltd., 1990.
5. J. Lunenschloss and W. Albrecht, "Non-Woven Bonded Fabrics", Ellis Horwood Ltd, 1985.