

복합신소재의 개발과 활용

Development and Application of Composite Material



윤순종(Soon-Jeong, Yoon) 부회장 | 홍익대학교 토목공학과 교수 | 공학박사 | sjyoon@hongik.ac.kr

1. 서론

기존의 건설재료로 사용되고 있는 강재나 콘크리트는 경제성과 내구성 등이 우수하여 건설재료 중 사용성 측면에서 가장 큰 비중을 차지하고 있는 재료로서 콘크리트의 인장부를 강재로 보강한 철근콘크리트 및 강합성 콘크리트 등은 건설재료분야의 혁신적인 성장을 가져왔으며, 반영구적인 구조물의 축조에 적용되어 왔다. 그러나 이러한 강재-콘크리트 합성구조물은 여러 유해환경(이산화탄소, 수분 등)에 의해 콘크리트가 중성화되고 강재가 부식되는 등 시간이 경과함에 따라서 구조물의 내구성이 크게 저하되고 있으며, 이러한 구조물의 성능 저하는 국가경제에 막대한 손실을 끼치고 있다. 실례로, 1979년 미국표준조사국 조사보고서에 의하면 강재의 부식과 관련된 손실만 보더라도 연간 약 820억 달러로서 GNP의 약 4.9%에 해당되는 것으로 연구, 보고된 바 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 강재-콘크리트 합성구조물의 내구성을 확보할 수 있는 보수, 보강에 관한 연구와 더불어 강재의 대체재로 활용할 수 있는

경량신소재의 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

현재, 건설분야에서 구조물에 요구되는 다양한 조건을 만족시키기 위한 신소재로 섬유보강플라스틱(Fiber Reinforced Plastic, FRP)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 섬유보강플라스틱은 하중을 주로 전달하고 지지하는 보강섬유와 피복효과 및 부재의 형상유지를 위한 레진(Resin) 또는 매트릭스(Matrix)를 조합하여 원래의 재료보다 더 효율적인 재료가 되도록 만든 복합재로서 극한환경에서도 그 내구성이 유지될 수 있는 것으로 평가되고 있다. 특히, FRP는 기존 건설재료인 강재나 콘크리트에 비해 각종 화학성분에 대한 저항성이 뛰어나고, 전기와 전자기파의 흐름을 방해하지 않는 등 여러 가지 물리적, 화학적 장점을 가지고 있으며, 보강되는 섬유의 종류와 매트릭스의 종류, 제조방법 등에 따라 재료의 역학적 성질을 요구되는 기능에 맞게 설계할 수 있다.

2. 섬유강화복합재

2.1 섬유강화복합재의 구성

FRP는 그림1 과 같이 보강섬유와 레진으로 구성된다. FRP에서의 보강섬유는 하중을 전달하는 역할을 하며 종류로는 Glass Fiber, Carbon Fiber, Aramid Fiber 등이 있다. 특히, 콘크리트 구조부재의 보강용으로는 유리섬유, 탄소섬유, 아라미드섬유가 대부분을 차지하고 있다. FRP는 보강섬유의 종류, 보강섬유량, 보강섬유의 배치방향, 보강섬유의 적층순서에 따라 역학적 성질을 달리 설계할 수 있다. 레진은 보강섬유 사이의 응력을 전달하고, 보강섬유의 좌굴방지, 유해환경으로부터의 보강섬유보호, 섬유의 기계적 마모를 방지하며 층간 전단특성에 대하여 저항하는 역할을 한다. 레진의 종류로는 에폭시, 비닐에스터, 폴리에스터, 페놀 수지 등이 있다.

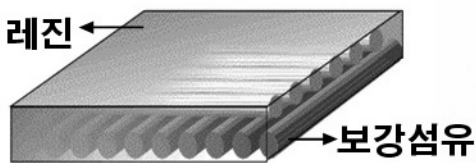


그림 1. FRP의 구성

2.2 섬유강화복합재의 역학적 성질

FRP의 역학적 성질은 보강섬유의 배치방향 및 적층순서에 따라 변할 수 있으며 보강섬유의 종류 및 생산방법에 의해서도 역학적 성질의 차이를 보일 수 있다. 보강섬유에 따른 섬유강화복합재의 성질은 현재 건설분야 보수, 보강재로 사용되고 있는 NEFMAC을 예로 다음 그림 2에 나타내었다.

그림 2에서 응력-변형률 관계는 단위체적에 대한 섬유의 중량이 40%인 것을 기준으로 한 것이며, 섬유를 나타내는데 사용된 기호 CF, AF, GF, HS, HM은 각각

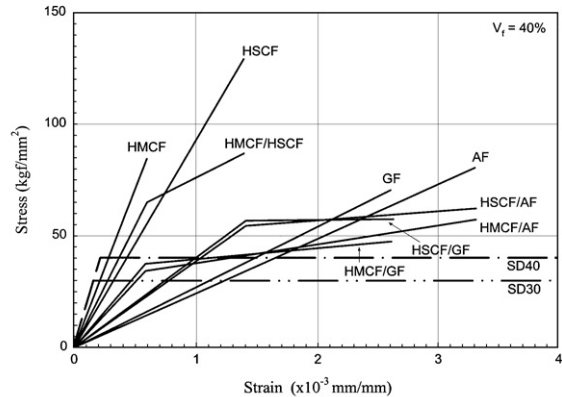


그림 2. 보강섬유의 종류에 따른 강성변화

탄소섬유, 아라미드섬유, 유리섬유, 고강도, 고탄성을 의미한다.

고강도 탄소섬유는 유리섬유나 아라미드 섬유에 비해 약 1.5배 정도의 큰 강도를 나타내며, 고탄성 탄소섬유는 다른 2종류의 섬유에 비해 약 2~3배 정도의 높은 탄성계수를 가지고 있으므로 그만큼 견고하다고 할 수 있다. 따라서 고탄성 탄소섬유를 사용할 경우 부재의 강성이 커지므로 변형에 저항하는 능력이 커진다.

유리섬유와 아라미드섬유는 강도와 강성에 있어서 큰 차이가 없으나 아라미드 섬유가 인성(Toughness)이 비교적 큰 특징을 가지고 있다. 인성은 하중을 받아 끊어질 때까지 변형이 크게 발생한다는 것을 의미한다. 따라서 아라미드섬유와 유리섬유는 콘크리트와 같이 취성(Brittleness)이 크고 인성이 작은 재료와 함께 사용할 경우 역학적 거동이 현저히 다르므로 보수 보강재로 선택할 경우에는 주의가 필요하다. 보강섬유에 따라 FRP의 역학적 성질에서 현저한 차이를 나타내기 때문에 구조물의 보강재로 사용할 경우 구조물의 구조적 특성을 정확히 판단하여 적용하여야 한다.

2.3 섬유강화복합재의 제조방법

앞에서 설명한 바와 같이 FRP는 구성되는 재료의 성질에 따라 그 역학적 성질이 변하기도 하지만 특히,

Hand Lay-up, Molding, Continuous Formation으로 구분되는 제조공정에 의해 역학적 성질에서 차이를 나타낸다. 따라서 FRP를 구조물에 적용할 경우 구조물 주변의 환경, 하중의 종류 및 크기, 구조물의 역학적 거동 등을 신중 고려하여야 한다. 토목분야에서 활용하고 있는 복합재의 제조공정을 간략히 정리하면 다음과 같다.

(1) 펄트루전 공정(Pultrusion Process)

펄트루전공정은 기계장치에 의해 필라멘트나 선형의 섬유에 수지가 스며들게 한 후 일정한 단면을 가진 가열된 금속형틀 속으로 연속해서 공급하여 성형된 제품이 작업대를 빠져나오면 절단톱에 의해 필요한 길이로 자르는 방법으로 인발성형이라고도 하며, 일정한 단면을 가진 부재를 경제적으로 생산할 수 있는 방법이다. 또한 금속형틀 내부에 가열한 봉을 정착하여 속이 빈 부재나 복잡한 형상의 단면도 제작할 수 있고 여러 가지 변형을 통해 부재의 축이 곡선인 부재를 생산해 낼 수 있는 방법도 개발되었으나 대부분의 경우 직선의 제품을 주로 생산한다.

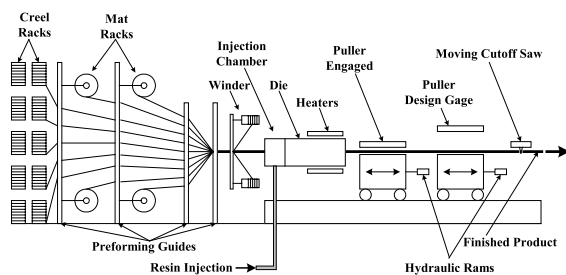


그림 3. 펄트루전 생산공정

(2) 필라멘트 와인딩 공정 (Filament Winding Process)

필라멘트 와인딩 공정은 수지가 함침된 연속섬유를 회전하는 맨드릴(Mandrel) 위에 감아서 주로 파이프나 압력용기, 로켓 모터케이스 등과 같은 축대칭 폐단면 복합재를 제조하는 방법으로 토목건설분야에서는 기둥,

파일 등과 같은 대형 폐단면 구조부재의 제조에 적합한 공정이다. 필라멘트 보강섬유가 주로 원주방향으로 배치되기 때문에 원주방향의 강도 및 강성이 뛰어나므로 내압을 받는 부재나 심부를 구속하기위한 부재에 사용하기 편리하다. 필라멘트와인딩 FRP는 부재의 축방향으로는 낮은 강도와 강성을 나타내어 보통 건설분야에서 콘크리트 압축부재의 외부를 보강하는 방법으로 사용되고 있으나 압축성능을 향상시키는 기능을 수행할뿐 축방향의 낮은 강도와 강성으로 휨에 대한 보강효과는 기대하기 어렵다.

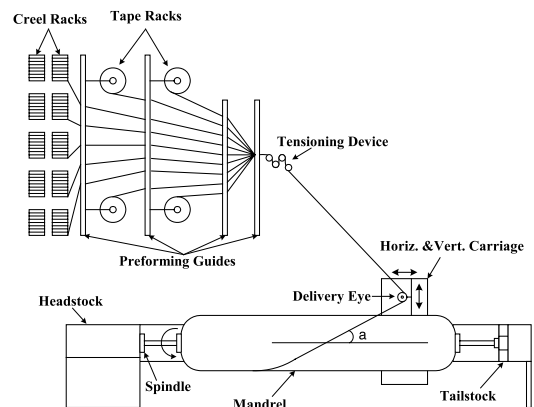


그림 4. 필라멘트 와인딩 생산공정

(3) 핸드레이업 공정(Hand Lay-up Process)

핸드레이업 공정은 유리섬유매트나 직물을 이형 처리시킨 몰드에 놓은 후, 수지를 Brush나 Roller를 이용하여 함침시키고, 불필요한 기포를 제거하면서 계획한 두께까지 적층하여 경화시킨 후 완성품을 얻는 방법이다.

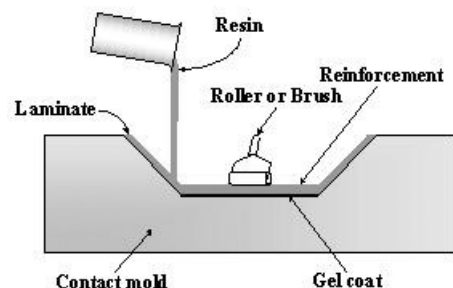


그림 5. 핸드레이업 생산공정

핸드레이업 방법은 토목분야에서 탄소섬유시트를 사용하여 콘크리트부재를 보강하는 공법으로 주로 사용되며, 전통적인 복합재의 접합방법이다.

3. 섬유강화복합재 구조용 부재

FRP 구조용 부재의 단면형상은 기존 강재의 단면형상과 유사하며, 단면형상의 최적화가 진행되고 있는 실정이다. 다음 그림 6과 7은 미국의 복합재 생산회사에서 생산되고 있는 제품이다.

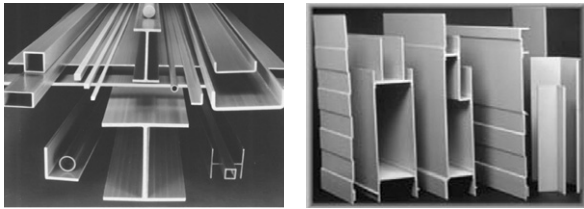


그림 6. FRP 형상(Strongwell Co.)

또한, FRP는 각종 구조조립용 부품으로도 사용이 가능하여 기존의 강재를 대신해 그림 7과 같이 볼트, 너트, Re-bar를 생산하여 각종 구조재의 연결재와 보강재로 사용하고 있다.

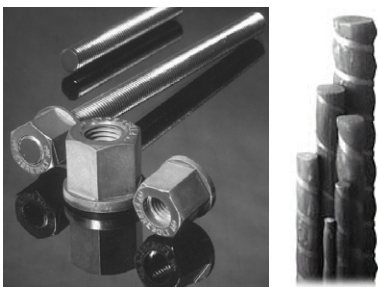


그림 7. FRP bolt (Strongwell Co.)

FRP는 저중량이지만 기존의 재료들에 비해 강도와 내구성이 우수하여 중량의 프리캐스트 콘크리트 제품의 대체품으로 활용이 가능하다. 다음 그림 8은 프리캐스트 콘크리트 제품과 동일한 성능을 갖는 FRP 제품을 프리캐스트 콘크리트 제품을 대신해 시공하고 있는 모습이다.



그림 8. FRP 집수정 시공

4. 건설 구조용 FRP의 활용

현재 FRP는 국내외 건설분야에서 교량 구조재, 교량 보강재, 터널 라이닝, 기둥 및 말뚝 기초, 항만시설, 도로시설, 특수 해양 구조물 등에 적용되고 있다. 적용 사례를 분야별로 정리하여 소개하면 다음과 같다.

4.1 교량 주요 구조부재

건설재료로서의 FRP는 미국, 캐나다, 일본, 유럽 등의 기술선진국에서 1970년대부터 이미 보수, 보강재로 생산하여 사용하고 있다. FRP Re-bar, FRP Grid, FRP Sheet를 사용한 콘크리트 구조물의 보수, 보강 뿐만 아니라 1990년대에 들어서면서 그림 9~11과 같이 FRP를 구조재로 사용한 교량이 시공되어 사용중에 있으며, 현재에는 FRP 교량에 센서를 장착하여 교량의 장단기거동 및 유지관리에 필요한 자료 등을 수집하고 그 결과를 설계에 활용하고 있는 단계에 있다.



그림 9. 전체 FRP 교량, Bolt 연결(Kolding)



그림 10. 세계 최장 보도용 사장교(Scotland)



그림 11. 바닥판 FRP 교체 도로교(Maryland)

국내에서도 1990년대 이후 FRP 제조기술이 급속히 발전함에 따라 토목분야에서도 FRP의 활용이 증가되고 있다. 강성이 우수한 탄소섬유시트나 유리섬유패널 등을 사용하여 철근콘크리트 구조물의 균열제어, 방수 등 기초적인 보수 단계에서 벗어나 FRP Re-bar, FRP Sheet, FRP Grid를 사용한 구조물의 보강, FRP Wrapping을 사용한 기술이 연구 개발 중에 있으며 일부 적용되고 있다. 그림 12~14는 현재 국내에서 FRP를 토목구조물에 적용시킨 사례이다. 특히, 그림 14는

기존에 FRP tube에 콘크리트를 충전하여 압축강도를 증진시키는 개념에서 벗어나 콘크리트에 철근을 보강하여 압축거동 뿐만 아니라 휨에 의한 저항을 증대시킴으로서 기존의 기술력을 한층 확대하여 토목구조물의 구조재로 사용함으로써 FRP가 보수보강 뿐만 아니라 발전된 구조재로서 활용할 수 있는 계기가 된 사례이다.



그림 12. 청계천 인도교 바닥판 시공



그림 13. 강원도, 원동-광전구간



그림 14. 인천대교 FRP Strut설치구간

4.2 교량의 보수보강

FRP는 앞에서 설명한 바와 같이 건설구조물의 구조재로 사용될 뿐만 아니라 FRP Grid, FRP Sheet 등을

사용하여 해상에 설치된 교량의 교각이나 부두의 파일 등의 유지보수와 보강 등으로 많이 쓰이고 있다. 그림 15와 16은 손상된 교량의 교각을 FRP Sheet를 이용하여 유지보수 및 보강을 하고 있는 모습이다.

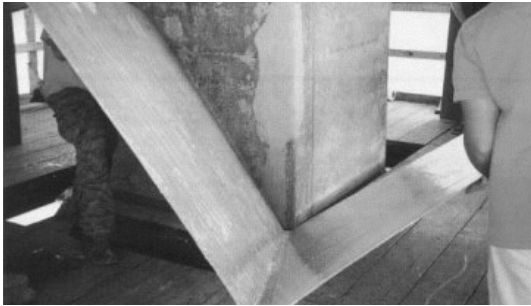


그림 15. 교각의 유지보수



그림 16. 교각의 보강



그림 17. 기둥 및 파일 시공

4.5 그 외 구조물에 적용된 FRP

FRP는 구조재와 유지보수 및 보강재로 건설구조물에 사용되기도 하지만 터널의 라이닝 공사, 건축물의 기둥 또는 해상 파일 등에 적용된다. 또한, 그림 18과 같이 아

직까지 국내에서 시공된 사례는 없지만 도로구간에 설치되는 전신주나 송전탑에 적용된 사례가 있다.



그림 18. 전신주 및 송전탑

또한, 전 세계적으로 관심대상인 신재생에너지분야와 접목하여 국내에서는 해양환경에서 태양광에너지 발전 시스템의 하부구조재를 FRP로 사용하여 친환경적이면서 기존의 재료를 대체할 수 있는 연구를 수행하고 있다 (그림 19 참조).



그림 19. 특수 해양구조물

지하에 매설된 기존의 상수도용 강관 및 콘크리트관을 대체하여 최근에는 FRP로 제작된 상수도관과 맨홀이 국내에서 생산하여 설치되고 있으며, 각종 플랜트의 구조재 및 배관 파이프, 건축내장재 및 구조재, 차량 시설 등에 적용되고 있다.

미국의 경우 해안사구를 보존하기 위해 나무를 사용하여 설치된 보도를 모두 FRP재료로 대체하고 있다. 그림 20은 미국의 Daytona Beach의 해안사구에 설치된

보도를 보여주고 있다.



그림 20. Daytona Beach의 FRP 보도

5. 결론

현재 건설분야에서 FRP에 대한 인식은 경제성을 이유로 아직까지는 부정적이기는 하지만 기존 건설재료로 해결하기 어려운 유해환경 지역에 대한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 적용되어 발전하고 있다. 또한, 구조물의 내구성 설계가 제도화 되고 있고, LCC분석 결과가 의무적으로 설계에 반영되도록 하고 있기 때문에 경제성 문제는 점차 해소되어 가고 있는 추세이며, 대량생산을 하게 된다면 오히려 사용수명동안의 가격은 더 저렴해 질 수 있다.

하지만 현재 기술선진국에서는 그 적용성이 급증하고 있으나 국내에서는 아직 초보적인 단계에 머무르고 있다. 또한, 아직까지 FRP 부재의 구조적 거동 예측 및 해석방법, 설계기준이 마련되어 있지 않아 그 적용에서 한계를 나타내고 있으며, 설계 및 해석을 위한 변수가 다양하므로 특정한 하중 및 경계조건 상태에서 만들어진 FRP 부재에 대한 일부 설계식은 충분한 실험적 검증을 거치지 않았기 때문에 FRP를 구조물에 적용할 경우 자체실험 등을 통하여 부재의 성능을 확인한 후 제한적으로 구조물에 사용하고 있는 실정이다. 이러한 단점들을

개선하기 위해서 각 연구기관과 학계, 산업체들의 연구와 노력이 더욱 더 필요하다.

참고문헌

1. 박주경 (2002). "FRP-콘크리트 합성 압축재의 거동평가 및 예측에 관한 실험적 연구," 박사학위논문, 홍익대학교.
2. 이성우, 손기훈 (2001). "고내구성 신소재 해상파일 개발연구(III)," 국민대학교 구조안전연구소 연구보고서.
3. 윤순중 (2000). 20C 건설용 복합재료, 대한건축학회 구조보강연구회, (주)컨트라넷.
4. 한국건설기술연구원 (2006). FRP·FRC를 활용 하이브리드 교량 시스템 실용화, 건설교통기술 연구계획서.
5. ACI Committee 440 (2000). Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP bar, American Concrete Institute, USA.
6. Strongwell (1999). *Extren® Design manual*, Strongwell, Bristol, Virginia, (<http://www.strongwell.com>)