

탄소섬유 복합신소재를 활용한 송전지지물 제조기술



최 철
KEPCO 전력연구원 미래기술연구소 책임연구원

1. 개 황

현재 국내에 사용되고 있는 송전지지물은 앵글 형태의 철근으로 제작되는 산형강(angle steel) 송전탑이 98% 이상을 차지하고 있으며, 단면이 원형인 원뿔대 형상의 관형주(강관주 또는 강판주)가 1.5% 내외로 사용되고 있다. 산형강 송전탑은 구조적으로나

전기적으로 특별한 하자가 없고 비용도 상대적으로 저렴하여 오랜 기간 널리 사용되어 왔음에도 불구하고, 최근 송전탑에 대한 부정적인 인식으로 인해 그 사용이 점차 제한받고 있는 실정이다. 따라서 최근에는 도심지나 거주 지역을 중심으로 민원해소를 위하여 산형강 송전탑 대신 설치 부지가 좁아도 되고 주위 환경과도 잘 어울리는 관형주 송전탑의 설치가 점

차 늘고 있다. 그러나 다수의 강판을 구부려 용접 공정에 의해 조립하는 관형주 특성 상, 대형 구조물에 적용하기 힘들고 용접부가 넓어 항시 용접결함에 의한 손상사고 가능성이 있다는 단점을 가진다. 따라서 최근에는 상기 문제점들을 극복할 수 있는 새로운 대안으로 복합신소재 송전탑이 개발되고 있다.



[그림 1] 154kV급 관형주 송전탑

복합신소재는 2가지 이상의 재료를 조합하여 단일 성분으로는 가질 수 없는 우수한 물성을 발현시키는 재료로서 ‘강철보다 강하고 알루미늄보다 가벼운’ 이상적인 경량구조재로 큰 관심을 모으고 있다. 복합신소재는 구조적으로 강화재(reinforcement)와 기지재료(matrix)로 구분되는데, 강화재가 외부의 하중과 응력에 저항하는 요소라면, 이들 각각의 강화재를 고정시켜 일정한 구조적 형상을 가지도록 하는 것이 기지재료이다. 복합신소재는 기지재료에 따라 고분자, 금속, 세라믹 복합재료로 구분되며 강화재 형상에 따라서는 섬유강화(fibrous composite), 입자강화(particulate composite) 복합재료 등으로 구분할 수 있는데, 이 중에서도 섬유 형태의 강화재와 고분자 기지재료를 조합한 섬유강화복합재료(Fiber Reinforced Plastics, FRP)가 가장 많이 사용되고 있다.

이러한 FRP 중에서도 탄소섬유복합재료(Carbon

Fiber Reinforced Plastics, CFRP)는 경량, 고강도, 고강성, 내환경성, 반영구적 수명 등의 장점으로 인하여 기존의 재료를 대체할 수 있는 미래형 소재로 간주되고 있으며, 상대적으로 고가의 제품이지만 저렴한 재료와 하이브리드 형태로 적용 시, 기존 제품보다 기계적 물성은 우수하면서 가격은 오히려 더 저렴한 시너지 효과를 얻을 수 있어, 최근 많은 관심의 대상이 되고 있다.

2. 현황

최근 국내외적으로 전력수요가 급증함에 따라 송배전 시스템에 대한 수요가 함께 증가하고 있다. 즉, 새로운 주거 지역 또는 기존 지역에 대한 송배전 설비의 신설 및 교체에 있어서, 철강, 콘크리트, 목재와 같은 기존의 구조재 대신 복합재를 적용하는 사례가 점차 늘고 있다. 즉, 철강재는 쉽게 부식됨으로써 사용수명이 짧고 유지보수에 많은 인력, 시간, 비용이 요구되며, 중량이 커서 산악지대와 같이 접근성이 열악한 장소에 설치 시 이송·설치가 어려운 단점을 가진다. 철근 콘크리트 지지물도 값이 저렴한 장점을 가지지만, 각종 제조결함, 열악한 내환경성 및 흔히 ‘concrete cancer’라고 불리는 내부 철근의 부식문제가 매우 심각하다. 또한, 북미에서 많이 사용하고 있는 목재 지지물은 해충 피해 및 부패 방지용 화학약품 사용으로 인근의 토양과 수원을 오염시키는 일이 잦아 많은 민원의 대상이 되고 있다.

이러한 이유로 최근에는 유리섬유복합재료(Glass Fiber Reinforced Plastics, GFRP)를 이용하여 경량, 고강도, 친환경 송배전지지물을 제작·설치하는 사례가 늘고 있다. 그러나 GFRP는 강도(특히 피로강도)와 강성 및 내환경성이 열악하기 때문에 대형 구조물 또는 가혹한 환경에서 적용하기에는 적합하지 않다는 의견이 지배적이다. 반면에 CFRP는 강도, 강

[표 1] 탄소섬유복합재(CFRP)와 기존 재료의 기계적 물성 비교

재 료	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	밀도 (g/cm ³)	비강도	비강성	열팽창 계수	피로특성
CFRP	4,000	170	1.61	2,484	105.8	0	최상
GFRP	800	27	2.13	375	12.7	10	중
Steel	500	206	7.85	64	26.3	6	중
Concrete	5	61	1.80	3	34.0	0~5	하

성 및 진동감쇄성능이 우수하여 반영구적이면서 신뢰도 높은 대형 구조물 재료로 적합하다.

다만, 아직까지도 산업용 탄소섬유가 매우 高價(\$10/lb)의 재료이며, 복합재료 특성상 높은 압축강도가 요구되는 적용분야에는 적용이 어렵다는 인식이 팽배하여 광범위한 실적용의 장애물로 작용하고 있다.

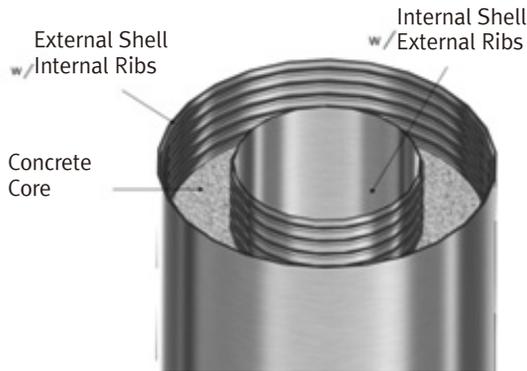
또한, 탄소섬유가 고가의 재료이기 때문에 항공기와 같은 하이테크 구조물뿐만 아니라, 송전지지물, 교량 및 각종 해상구조물과 같은 일반 인프라 구조물

에까지도 CFRP를 적용하기 위해서는 보다 특별한 기술이 필요한데, 값싼 콘크리트와 혼용하는 하이브리드식 구조물(Carbon Shell Structure, CSS) 기술이 이에 해당한다. CSS 구조물은 미국 UCSD (University of California, San Diego)에서 최초로 개발한 것으로, 기존의 강철(steel) 구조물을 능가하는 우수한 기계적 물성과 함께 뛰어난 경제성을 가진다. 즉, 송전지지물 제작에 기존의 강철 대신 CFRP를 적용하면 부식의 우려가 없고 내환경성이 우수하여 구조물의 내구연한을 20년 이상 현저히 증대시키고, 각종 유지관리비를 30% 이상 대폭 절감하는 것



[그림 2] GFRP 송전지지물 (25.6m, 230kV)

이 가능해진다. 또한, 무게가 철강의 20%에 불과하므로 원격지로의 이송과 설치가 용이하며, 다양한 형상으로의 제작이 가능하여 외관이 미려한 미래형 송전탑 제작에 특히 유리하다. 복합재가 압축응력에 취약하다는 편견도 있지만, 콘크리트와 혼용함으로써 콘크리트보다도 더 높은 압축강도를 가지게 된다. CSS 구조물에서 CFRP Shell은 약 1cm 내외의 두께로 콘크리트 core의 변형을 구속하기 위해 외부를 단단히 둘러싸는 역할만 수행하므로 사용량이 많지 않고, 따라서 기존 강철 구조물보다 오히려 저렴하게 제작하는 것이 가능해진다.

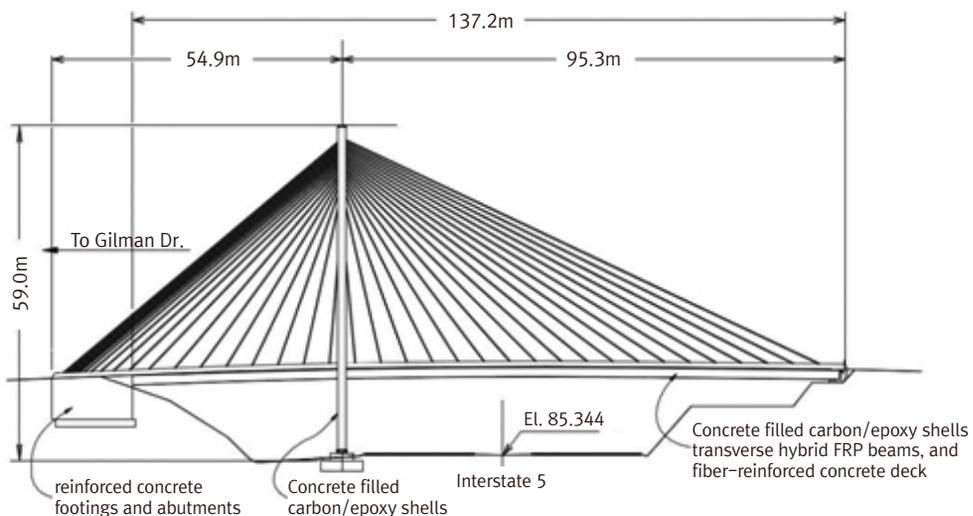


[그림 3] Double-Shell 방식의 CSS 구조물

CSS 기술의 핵심은 복합재 Shell 내벽에 존재하는 Rib이라고 불리는 독특한 요철 모양의 돌기에 있는데, 이것이 콘크리트와 복합재 Shell이 하나의 몸체처럼 거동할 수 있도록 한다. 일반 콘크리트 구조물은 대개 외력에 의해 변형이 발생하면 파괴되기 마련인데, CSS 구조물에서 콘크리트는 CFRP Shell에 의해 변형이 구속됨으로써 길이에 대해 8% 정도의 횡변형이 발생하여도 외력이 제거되면 손상 없이 다시 원래의 형상으로 복원된다.

CSS 구조물은 크게 두 가지 형태로 구분할 수 있는데, 풍력타워와 같이 내부에 승강기 설치 등을 위한 공간이 필요한 경우에는 환상형(環狀形)의 복합재 외피와 내피가 함께 사용되는 Double Shell, 송전탑이나 토목용 말뚝과 같이 내부 공간이 불필요한 경우에는 콤팩트한 형상의 Single Shell 형상이 사용된다.

미국에서는 캘리포니아주를 중심으로 대형 지진에 견딜 수 있는 교량이나 염해에 강한 해양구조물 건설을 목적으로 복합재 구조물을 개발하고 있는데, 2001년에 건설된 Kings Storm Water Bridge와



[그림 4] 복합재로 제작된 美 Gilman Bridge



[그림 5] 해외에 시공 중인 GFRP 전주

2004년의 I-5 Gilman Bridge가 그 대표적인 예이다. 송전 분야에서도 GFRP 지지물이 사용되고 있는데, 캐나다 Resin System Inc.사의 제품(RStandard™)을 예로 들면, 65ft(약 20m) 높이의 송전용 지지물(M2-5, 230kV)은 모든 옵션을 포함하여 기당 \$4,400 수준에 판매되고 있으며, 계속하여 그 수요가 증가하는 추세이다. 다만, 전술한 바와 같이 GFRP는 강성이 취약하여 외력에 의해 쉽게 변형되므로 지지물의 상단부에 상당한 휨 변형이 발생할 수 있고, 그러한 변형을 억제하기 위해서는 복합재의 두께를 증가시켜야 하는데 그럴 경우, 지지물의 중량과 비용이 함께 증가하는 문제가 발생한다. 따라서 배전용 전주 이상의 대형 구조물에 대한 GFRP의 적용에는 분명한 한계가 있을 것으로 판단된다.

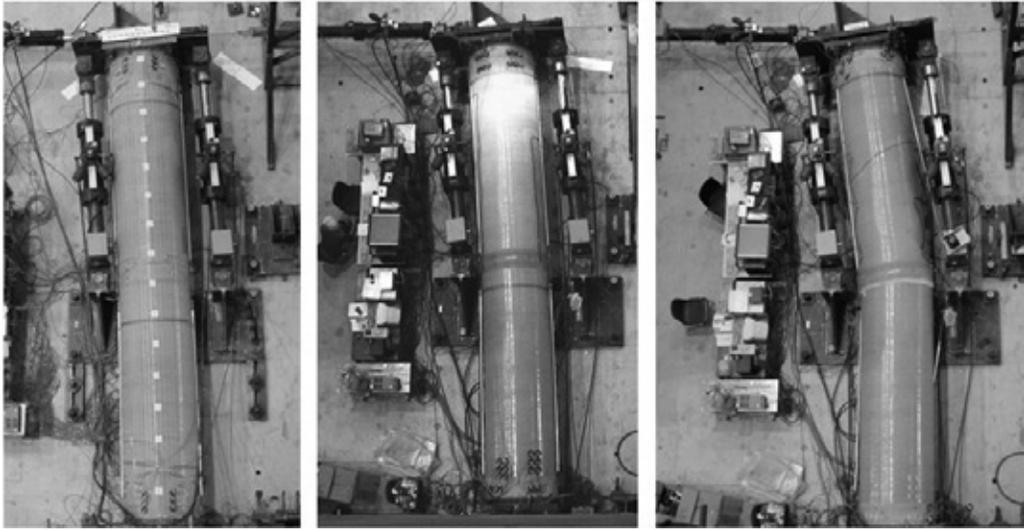
또한 복합재 송전지지물은 맨드릴과 같은 틀만 있

으면 얼마든지 다양한 형상으로 제작이 가능하고, 에어로젤(Aerogel) 등을 이용한 표면 코팅제를 사용하면 표면의 색상 제어가 자유롭고 산불 등에 대비하여 내화성을 대폭 향상시킬 수 있는 특징을 가진다. 또한 스텔스 무기체계의 주 재료로 사용된 만큼 전자파를 흡수하는 특징을 가지기 때문에, 해상풍력 타워로 적용해도 군사용 레이더망을 교란·간섭하지 않는다는 장점도 가진다. 뿐만 아니라 CFRP Shell 자체는 매우 가볍고 또한 극히 소량만 사용되므로 어떤 장소에든 이송과 설치가 용이하다. 물론 하이브리드식으로 적용하기 위해서는 콘크리트 작업을 위한 중장비가 동원되어야 하지만, 모든 송전지지물은 콘크리트 기초 작업을 수반하므로 기존 강철 송전지지물의 시공과 비교하여 특별히 추가되는 공정이나 시공 상 어려움은 없다. 또한 육상 운송의 어려움을 감안하여 11m 내외 길이의 모듈로 분할 생산하여 현장에서 원하는 길이로 조립하여 사용하는데, 모듈과 모듈의 조립은 접착 방식 또는 rebar를 이용하여 완성됨으로써, 공정이 훨씬 간단한 장점을 가진다.

3. 전망

과거에 송전탑은 기계적으로 견고하고 전기적으로 안전하면 충분하였다. 그러나 최근에 송전탑이 일종의 혐오시설로 간주되어 민원발생의 대상이 되면서, 보다 환경조화적이고 경제적인 새로운 개념의 송전탑에 대한 요구가 증가하고 있다. 이러한 관점에서 복합재는 기존의 철강이나 콘크리트 구조물보다 훨씬 유리하다. 즉, 많은 용접과 절단을 필요로 하는 철강재와 큰 체적과 단순한 형태의 콘크리트 구조물보다 형상의 다양화가 용이하고 콤팩트하며 안전성도 높다.

또한 최근에는 해양에너지 및 해양자원의 개발이 활성화되면서 많은 해양구조물이 제작·설치되고 있



[그림 6] EU MEGAWIND 프로젝트에서 GFRP 풍력타워 시작품의 좌굴시험 현장

는데, 심해일수록 접근성이 열악하여 유지관리가 어려워지기 때문에 장기간 염해에 견딜 수 있는 재료가 필요하다. 따라서 유럽과 미국에서는 GFRP를 이용하여 대형 해상풍력 타워를 개발하기 위한 프로젝트를 수행하거나 수행한 바 있다. 대표적인 프로젝트로 EU의 'MEGAWIND'와 미국의 'Ohio Wind Energy Grant' 프로젝트가 있다. 그러나 모두 CFRP가 아닌 GFRP를 주 소재로 사용함으로써, 프로젝트의 성공 가능성은 그리 높지 않은 것으로 평가된다. 그럼에도 불구하고 해상풍력의 대형화 추세가 계속된다면, 복

합재 타워 개발 노력 역시 꾸준히 지속될 것으로 전망된다.

결론적으로 향후 CSS 구조물은 비단 송전지지물 뿐만 아니라, 해상풍력 타워를 비롯한 각종 대형 구조물에 광범위하게 확대 적용될 것으로 전망되며, 아직까지 어느 국가나 업체도 해당 기술을 주도하거나 시장을 선점하지 못한 만큼, 민간과 국가적 차원에서 이에 대한 지속적인 관심과 지원이 절실한 상황이다. 