

건설분야에서의 복합신소재 이용기술 -복합신소재 바닥판을 중심으로-

Technology of Advanced Composite in Construction
-Focused on the Advanced Composites Decks -



이규세(Gyu-Sei, Yi) 부회장 | 선문대학교 토목공학과 교수 | 공학박사 | gyusy@sunmoon.ac.kr
박원태(Won-Tae, Park) 이사 | 공주대학교 건설환경공학부 교수 | 공학박사 | wtpark@kongju.ac.kr

1. 서론

복합신소재는 비강성, 비강도가 기존의 콘크리트나 강재에 비해 상대적으로 높고 비부식성, 경량성, 비전기성 등 재료적 장점과 방향성을 이용하여 우수한 역학적 성질을 얻을 수 있으며, 다양한 형태로 만들 수 있는 뛰어난 성형성을 가지고 있다. 복합신소재를 단순히 기존의 재료에 대한 대체 재료로서가 아니라 비등방성 재료의 특이한 물성을 응용한 구조물의 주재료로 사용하기 위하여 이론연구 및 실험자료의 축적이 필요하다. 미국, 일본, 유럽 등의 선진국에서는 섬유강화 플라스틱을 교량, 건물, 관로 등의 건설분야에 응용하려는 연구가 10여 년 전부터 활발히 진행되어 왔으며 최근에는 미국을 중심으로 전부 유리섬유 보강 폴리에스터와 비닐 에스터 폴리머 복합신소재를 이용한 교량을 건설하게 되었다. 이처럼 복합신소재의 높은 활용 가능성과 엄청난 잠재 시장성 때문에 복합신소재산업뿐만 아니라 적용기술 개발에 많은 관심과 노력을 기울이고 있다. 특히 교량건설에 대한 복합신소재의 응용은 이미 시작되었다. 이처

럼 선진 각국은 복합신소재를 교량 상부구조 등에 이용하는 기술을 개발하여 시험 적용하는 반면 국내에서는 항공우주, 기계, 스포츠 분야 등에는 활발히 이용되어 왔으며, 최근에는 건설분야에서도 연구가 활발히 진행되고 있다. 교량의 공용연수 증대와 중차량 교통량의 증가에 따른 중·소형교량 열화손상이 심하여 안전에 관한 문제가 야기되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 교량유지관리는 주로 교량 상부구조물의 유지보수에 집중되어 왔으며, 상부구조물을 보강하더라도 내하력 부족으로 인해 차량 통행이 어려워 기존의 가설된 교량을 불가피하게 모두 철거하여 신설하는 방식으로 교량을 관리하여 왔다. 이와 같이 기존의 교량을 부분적으로 보수 또는 전면적인 철거 후 재가설하는 방법은 경제적, 시간적으로 많은 손실을 가져오고 있다. 여기서 기존의 노후된 교량을 재가설하는 방법에 있어서, 상부구조만 철거하고 하부구조를 재사용한다면 적은 비용으로도 교량을 신속히 재가설하여 차량통행을 원활히 할 수 있으며 교량수명을 극대화할 수 있다. 특히 교량의 상부구조에서 바닥판은 주로 철근콘크리트로 만들어져 왔다. 철

근콘크리트 바닥판은 차량의 배기가스, 염화칼슘과 같은 제설제의 다량 살포 등의 영향에 의해 바닥판은 심하게 열화손상을 입어 설계수명이 현저히 감소할 뿐만 아니라 구조적인 안전성에도 심한 문제를 야기하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 표 1에서 비교하였듯이 복합신소재를 이용한 교량 바닥판 기술개발을 하게 되면 교량 바닥판의 내구성과 수명을 획기적으로 개선하고 최소의 유지관리가 될 것으로 판단된다.

2. 복합신소재 바닥판 이용기술 현황

복합신소재는 높은 비강도, 비강성으로 인해 구조 경

량화가 요구되는 첨단 우주항공산업 뿐만 아니라 조선, 자동차 등에 널리 사용되어지고 있으며, 그 활용범위가 점차 확대되어 소비규모가 엄청난 건설분야에 적용되고 있다. 이에 대한 연구개발 활동이 주로 정부 주관으로 미국과 유럽을 중심으로 대학 및 연구기관에서 활발히 진행되고 있으며 국내에서도 연구개발이 이루어지고 있다. 국내의 복합신소재 기술개발은 국방과학연구소(ADD)에 의하여 방위산업분야에 편중되어 상당히 추진되어왔으나, 지금까지 추진된 복합신소재 기술은 비행체, 병기 등에 응용에 한정되어 있으며, 대량의 수요를 창출할 수 있는 건설분야에서의 복합신소재 응용에 대한 연구는 미미한 실정이다. 최근에는 국민대학교 연구

표 1 교량바닥판의 장단점 비교

비교 내용		콘크리트 바닥판	복합신소재 바닥판
비용	직접건설비용(건설비용) / 노무비 비중	고가/매우높음	저가/거의 없음
	간접건설비용 / 공사기간	매우 고가/3개월 이상	거의 없음/수시간
	유지관리비용	고가 (건설비의 50% 상회 가능)	거의 없음
	연간 감가상각비용	직접공사비의 약 1/10 수준	거의 없음
환경 친화성	공사 소음 등 주민피해	소음이 크고 장기간 지속됨	소음 거의 없이 심야에 공사완료
	건설 폐자재	다량의 거푸집 등 필요 페콘크리트 등 발생	보조 장치 시설 거의 불필요 재활용 가능으로 폐자재 거의 없음
	대기오염	교통정체로 대기오염 유발	교통정체가 거의 없어 대기오염 없음
내 구 연 한		35년 → 10년 내외	반영구적
기후 제약성		동절기 공사 불가능	제약 없음
내 진 성		자중이 커서 지진력이 큼 지진에 취약함	자중이 작아 내진성이 뛰어남
부 식 성		철근의 사용으로 부식 불가피	비금속 사용으로 부식 거의 없음
무 계		5~10배정도 무거움	5~10배정도 가벼움
바닥슬래브 보수의 경우 바닥판 교체 후 하중		변화 없음	상판의 자중 감소에 따른 하중 증대

팀이 필라멘트 와인딩 공법으로 제작한 교량 적용용 구조데크가 개발되어 2001년에 공사현장 가교에 적용하였다. 이미 구미 선진국을 중심으로 복합신소재를 이용한 교량바닥판 건설이 상당히 진행되고 있다. 미국 UCSD는 Caltrans, DARPA 및 FHWA 으로부터 연구 지원을 받아 100% 완전 복합신소재 교량 바닥판과 콘크리트 바닥판과의 성능비교를 위한 연구를 실시하였다. 최근에는 미국의 웨스터 버지니아 대학교와 Creative Pultrusion 사에 의해서 연구 개발된 복합신소재의 바닥판구조는 H-deck 또는 Superdeck 이라고 불리는데, 이 신형 교량은 속이 비어있는 단위조각의 복합신소재로 제작되어 미국 전역에 노후 교량 바닥판 교체공사에 적용되고 있다.

3. 복합신소재 교량바닥판 해석 및 단면 설계 기술자료 분석

복합신소재는 서로 다른 물성을 갖는 두 가지 이상의 재료를 피구조물에서 요구하는 역학적 성질을 최적화하도록 설계하여 제작하는 방법으로서 피로하중, 염수 및 화학분위기에 대한 저항성이 강하며, 특히 충격에 대한 저항성은 금속보다 강한 특성을 갖고 있다. 그러나 복합신소재는 고가이고 공정개발이 어려우며, 대규모 파괴시 유지보수가 어려운 점 등 기존 건설재료와는 달리 특정한 설계 및 공정도가 요구되어진다. 또한 복합신소재는 방향성의 고유한 특성을 갖고 있으며, 이와 같은 특성은 구조물 제작시 각 소재의 적층 순서 및 강화재의 재질에 따라 서로 상이한 특성을 나타낸다. 따라서 효율적인 물성치를 얻기 위해서는 용도에 따른 적절한 소재의 선택이 중요하다 하겠다. 복합신소재가 갖는 이러한 특성 때문에 사용조건에 적합한 재료의 배열 구성 및 제작 공정개발을 보다 명확히 규명할 필요가 있으며, 특히 교량 상부구조의 경우는 신뢰성 있는 강도(strength), 강

성(stiffness) 및 피로특성을 요구하고 있다. 전체적으로 복합신소재 교량 바닥판의 설계과정은 다음과 같이 간략화 하여 나타낼 수 있다.

- 복합신소재 기초 물성 평가
- 복합신소재 교량바닥판 해석 및 단면설계
- 제작 및 성능시험
- 몰드 및 공정 설계
- 제품 생산

복합신소재 교량바닥판 구조에 적용될 경제적인 원소재는 유리섬유와 기지(Matrix)인 폴리에스터가 사용되고 있다. 섬유강화 복합신소재는 사용온도와 습도 등의 분위기에 따라 강도 및 수명이 저하되는 경향이 있으므로, 설계에서 요구되는 소재의 기초 물성값은 이와 같은 온도 및 습도의 영향을 고려한 기상적인 극한환경 조건에서 재료시험을 수행하여 이의 자료를 이용하여 피 구조물의 강도와 강성 값이 설계치 이하로 떨어지지 않도록 고려하여야 한다. 제작공정은 구조물 크기 및 강도 등을 고려할 때 바닥판 구조는 대부분 인발성형(Pultrusion) 방법으로 하고 있다. 일반적으로 단위 패널에 대한 설계 제작 단면의 섬유함유량은 인발성형공정에서 확보할 수 있는 50~60%로 정하고 있다. 섬유의 적층배열 각도는 플랜지에서는 종방향(0°), 횡방향(90°)으로 Cross-Ply로 배치하며, 복부에서는 경사방향(±45°)으로 배치한다. 전체 바닥판은 다수개의 단위 패널이 서로 병렬로 연결되어 하나의 바닥판 형태로 조립될 수 있다. 일반적으로 복합신소재 바닥판의 단면설계는 응력보다는 처짐이 지배적인 인자이므로, 기본 모델을 기준으로 시방서 상의 처짐 안전율을 고려한 단면을 설계한다.

4. 복합신소재 교량 바닥판 제작공정

복합신소재 교량바닥판은 주로 인발성형 제조방법으



그림 1 복합신소재 단위 튜브 제조과정 (인발공법)

로 제조한다. 그 제조 과정을 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 보는 바와 같이 연속 유리섬유에 수지를 함침시켜 각 단위 튜브단면의 형상을 지닌 가열된 금형을 통과하면서 경화시켜 연속적으로 제품을 성형하는 방법

이다.

그림 1에서 볼 수 있듯이 인발성형의 주공정은 섬유 스폴(Spool), 수지함침통(Resin bath), 가열금형, 인발기 및 절단기 등으로 구성된다. 섬유 스폴로부터 공급되

는 섬유가수지함침통을 거치면서 섬유에 수지가 함침된다. 수지가 함침된 섬유는 가열된 금형을 통과하면서 Modular 튜브의 형상이 유지됨과 동시에 경화되며, 금형을 빠져 나온 튜브는 인발기에 의하여 연속적으로 당겨진다. 이때 주의할 점은 튜브의 크기에 따른 인발력(Pulling Force)의 결정이다. 이렇게 성형된 Modular 튜브는 절단기에 의하여 원하는 길이만큼 절단되어 최종 완성된다.

5. 경제성 분석

복합신소재 교량 바닥판을 이용한 교량성능개선공사를 노후된 교량교체와 신설교량 건설공사에 대한 공사비를 다음 표 2와 같이 개략 비교하였다. 기존의 재료(콘크리트, Steel)를 사용한 것 보다 공사비가 6~10% 정도 높은 것으로 나타났지만 Modular 개념을 도입하여 대량생산과 Pultrusion과 같은 인발공법을 제조방법으로 도입하고 향후 유지관리비와 같은 수명공사비(LCC)를 고려한다면 공사비는 충분히 기존의 재료와 경쟁하였을 때 경쟁력이 있을 것으로 예상된다.

6. 결론

국내의 도로교량은 DB-13.5, 18하중으로 건설된 노후된 교량이 총 7942개소(2000, 교량현황조사, 건설교통부)이다. 중차량의 급속한 증가로 이들 교량을 불가피하게 DB-24 교량등급 상향조정을 위한 보강공사 및 재가설이 이루어져야 한다. 기존 노후된 콘크리트 및 강교량에 대해서 상부구조물을 보강하여도 내하력 부족으로 인한 차량통행이 더이상 어려운 경우에 불가피하게 가설된 교량을 모두 철거하여 신설하는 방법으로 지금까지 교량을 관리하여 왔다. 이와 같은 기존의 교량을 전면 철거 후 재가설하는 방법은 경제적, 시간적으로 많은 손실을 유발시키고 있는 것이 사실이다. 국내 가설된 교량 중 85%가 교량 지간이 짧은 중소형규모의 교량의 대부분이 콘크리트 교량으로 가설되어 있어 차량증가에 따른 노후화가 위험상태에 있다. 따라서 수년 내에 이들 교량을 불가피하게 교체할 수밖에 없다. 이들 교량의 상부구조 형식은 철근콘크리트 슬래브교, 프리스트레스트 콘크리트 빔(PC Beam)교로 가설되어 있다. 이와 같이 노후화된 교량을 철거한 후 재가설하는 데는 이러한 상부, 하부구조 및 기초를 모두 철거하는 등 상당한 시간

표 2 노후된 교량 바닥판 교체 비교

구 분	복합신소재 바닥판	콘크리트 바닥판	비 고
공사개요	- 기존 콘크리트 바닥판 철거 - 복합신소재 바닥판 설치	- 기존 콘크리트 바닥판 철거 - 하부구조보강 - 상부거더보강 - 콘크리트 바닥 판타설	- 공기대폭 단축 - 내진보강 불필요
특징	- 급속시공 가능 - 내하력 증진 - 교량등급 상향조정 - 수명비용(LCC) 감소	- 교통통제기간 길어짐 - 콘크리트 바닥판 재시공 - 하부구조 및 상부구조 보강 - 수명대비 비용 과다	- 건설 중기사용 절감
내구수명	75년	18년(약 20년마다 교체)	
공사기간	3개월	18개월	- 공기를 1/6로 단축 - 교통통제 대폭감소

적, 경제적인 비용손실이 발생하고 가장 큰 문제는 교통소통 지장을 주고 있다는 점이다. 노후원인이 상부구조에 있고 하부구조(교각, 교대), 기초는 구조적 기능을 발휘할 수 있는 것으로 조사되고 있다. 이와 같은 하부구조는 상부구조의 지중에 영향을 받아 단면의 크기가 결정되는 것으로서 상부구조의 형식에 따라 민감하게 작용된다. 상부구조만 철거시키고 기존 하부구조를 이용한다면 적은 비용으로도 교량을 신속히 재가설하여 차량통행을 원활히 할 수가 있다. 따라서, 새로운 건설재료로서 지중을 획기적으로 줄일 수 있고 강도, 강성이

참고문헌

충분한 복합신소재 바닥판을 노후 교량 바닥판 교체공사에 급속시공기술로서 적용할 수 있다.

1. 신속시공, 경량, 고내구성 복합소재 교량바닥판 산업화 연구보고서(2002), 국민대학교 구조안전연구소.
2. Bridge 200 장수명 합리화 바닥판 개발(2002), 한국건설기술연구원.
3. Modular 복합신소재 교량바닥판과 주형의 연결시스템 및 시공공법 개발 연구보고서(2005), 성원건설(주).
4. Douglas A. Eckel II, (1998). A Theoretical and Experimental Study on the Behaviour of Sandwich Bridge Decks Composed of Composite Materials, CCM Report 98-5, Univ. of Delaware.
5. Clarke, J.L.(Ed)(1996).Structural design of polymer composites-EUROCOMP design code and handbook, E&FN Spon, London, England.