

FRP 교량의 기술동향

State-of-the-Art Technology of FRP Bridge



박대용(Dae-Yong Park) 정회원 | 대림산업 특수교량팀 | 과장 | dypark@daelim.co.kr
 이상우(Sang-Woo Lee) | 대림산업 특수교량팀 | 사원 | lswassa@daelim.co.kr

1. 서론

복합재료인 FRP (Fiber Reinforced Polymer)는 1964년 영국의 왕립우주항공국에서 높은 인장강도와 강성을 가진 탄소섬유를 생산하면서부터 개발이 시작되었으며 자동차, 선박, 군수용품등에서 적극적으로 활용되었다. 또한 FRP는 기존의 건설재료보다 가벼우면서 뛰어난 인성, 내구성을 가지는 특성으로 인해 토목구조재료로도 현재 적극적으로 적용되고 있다. 일본에서는 1970년 초부터 많은 실험을 통해 FRP 제조 기술을 개발해 왔으며 1980년대에 들어 건설 재료용 FRP를 개발하는데 성공하였다. 한편, 미국의 Florida 고속도로 관리공단(FHWA)에서는 지난 25년간 FRP 소재를 교량에 적용하는 연구를 진행하였으며 현재 100개가 넘는 교량으로부터 얻어진 실제적인 자료를 통해 FRP 교량의 다양한 연구를 활발히 진행하고 있다. 국내의 경우 1990년대에 FRP 제조기술의 발전으로 인해 군수용품 위주로 부분적인 연구가 진행되어 건설 분야의 활용실적이 미비하였지만 2000년대 들어서 FRP 보

강재를 국산화하여 활용하기 시작하였다.

현재 토목 구조재료로써 FRP는 보유하고 있는 성능을 원래의 상태, 또는 그 이상의 성능을 갖도록 적절한 조치를 취함으로써 안전성을 향상시킬 뿐만 아니라 바닥판, 거더등 구조물자체로 사용하는데까지 발전해왔다. FRP는 비강성, 비강도가 기존의 콘크리트나 강재에 비해 상대적으로 높고 비부식성, 경량성, 비전기성등 재료적 장점과 방향성을 이용하여 우수한 역학적 성질을 얻을 수 있으며, 다양한 형태로 만들 수 있는 뛰어난 성형성을 가지고 있다. 하지만 FRP는 단순히 기존의 재료에 대한 대체 재료가 아니라 비등방성 재료의 특이한 물성을 응용한 구조물의 주재료로 사용하기 위해서는 이론연구 및 실험 자료의 축적이 필수적이다. 따라서 본서는 해외의 FRP 적용 교량의 시공 기술 동향조사를 통해 FRP의 특징, FRP Deck 교량이 가지고 있는 문제점과 적용을 위한 실제적인 연구의 필요성을 제시하고자 한다.

2. FRP 교량의 특징

FRP 교량의 특징은 기존 부재인 콘크리트 열화와 같은 재료적인 문제가 없어서 상대적으로 유지관리에 드는 노력을 최소화할 수 있으며, 구조물의 기대 수명을 증가시킬 수 있다. 그리고 FRP 바닥판은 콘크리트 바닥판에 비해 무게가 20%정도에 불과하므로 중량에 대한 부담이 격감됨에 따라 신속시공을 통한 공기단축, 하부구조 무보강등의 장점을 제공하게 된다. 경제적인 측면에서도 FRP의 내부식성은 강재와 같이 부식을 방지하기 위한 정기적인 도장이 필요없게 되고 부식에 의해 손상된 구조물을 보수하는 비용 역시 줄일 수 있다. 또한 경량으로 인해 취급이 용이하므로 적은 인력으로 현장 작업이 가능하며 공장에서 미리 조립될 경우 현장 시공비용을 절감할 수 있게 된다. 하지만 초기 건설비의 측면에서는 아직 기존의 소재들에 비해 불리하지만 FRP 교량 건설 수량이 많아진다면 장기적으로 이 문제는 극복할 수 있을 것을 판단된다. 마지막으로 FRP는 거푸집등과 같은 보조 장치 시설이 불필요하고 재활용으로 폐자재가 거의 발생하지 않으며 공사 시 소음이 거의 없어 환경친화적인 재료로써 각광받고 있다.

표 1에는 FRP를 사용한 교량 바닥판 공법과 현장타설 및 프리캐스트 콘크리트 바닥판 공법과의 비교를 통해 장단점을 분석하였다.

3. FRP 교량의 적용사례

FRP 교량을 시공한 대표적인 예로 1992년에 영국 스코트랜드에 가설된 Aberfeldy Footbridge이다. 이 교량은 40개의 평행한 케블라 케이블에 의해 지지되며, 높이 17.5m의 GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer) 주탑에 매달려 있다. 이러한 FRP 사장교는 FRP교로서 비교적 긴 교량인데 대부분이 보도

표 1. FRP 바닥판 교량 공법과 기타 공법의 비교

공법	FRP 바닥판 교량 공법	현장타설 콘크리트 바닥판 공법	프리캐스트 콘크리트 바닥판 공법
기술개요	공장제작된 복합소재 바닥판 패널을 주형 상부에 조립, 설치	거푸집 제작, 철근배근, 콘크리트 현장 타설 및 양생과정을 거쳐 시공	공장 제작된 프리캐스트 콘크리트 바닥판을 거더 상부에 조립, 설치
경제성	- 내구년수(75년 이상)향상 - 신속시공으로 공기단축, 공사비 절감 - 교량 성능개선 시 사하중 감소로 하부구조 무보강 성능 개선	- 내구년수(30~50년) - 초기공사비 저렴 - 사하중 과다로 인한 하부구조 비용 증대 - 지속적인 유지관리 필요	- 내구년수(30~50년) - 초기공사비 저렴 - 사하중 과다로 인한 하부구조 비용 증대 - 지속적인 유지관리 필요
시공성	- 운반 및 설치 용이, 시공성 양호 - 공장제작, 품질관리 용이	- 시공경험 풍부, 시공성 양호 - 현장타설로 인한 품질관리 소홀	- 시공속도가 현장타설에 비해 다소 빠름 - 시공장비 규모가 크며 운반 설치시 불리
환경친화성	내화학적 재료, 환경오염 없음	철근부식, 콘크리트 열화, 산화물 및 먼지 발생	철근부식, 콘크리트 열화

교이다. 따라서 보도교 뿐만 아니라 FRP 바닥판을 도로용교량에 적용하는 연구가 계속 진행되면서 미국의 Gilman Advanced Technology Bridge의 경우 FRP 합성바닥판을 사용하였으며 최근에는 더 많은 교량에서 FRP 바닥판이 사용되어지고 있다. 하지만 앞에서 언급했듯이 기존교량의 유지 보수 및 데크 패널, 보도교등에서는 FRP 소재가 보편적으로 사용되고 있으나 고속도로 교량 자체를 완전히 FRP로 만드는데까지는 이르지 못하고 있다. 이는 교량 설계자들이 FRP 소재에 대한 충분한 연구와 지식을 가지고 있지 못하기 때문이라고 판단된다. 표 2에는 국내외의 대표적인 FRP 적용교량을 나타낸 것이다.

표 2. 국내외 FRP 적용교량

교량명	위치	총길이	특징
Aberfeldy Bridge	Scotland	113m	세계 최장 보도용 FRP 사장교
Gilman Advanced Technology Bridge	USA	137m	세계 최장 도로용 사장교 (FRP 합성바닥판 적용)
Noolcha Bridge	Korea	300m	세계 최장 GFPR 바닥판 교량
Broadway Bridge over the Willamette River	USA	531m	도개교 형식 FRP 바닥판 교량



그림 1. Aberfeldy Bridge

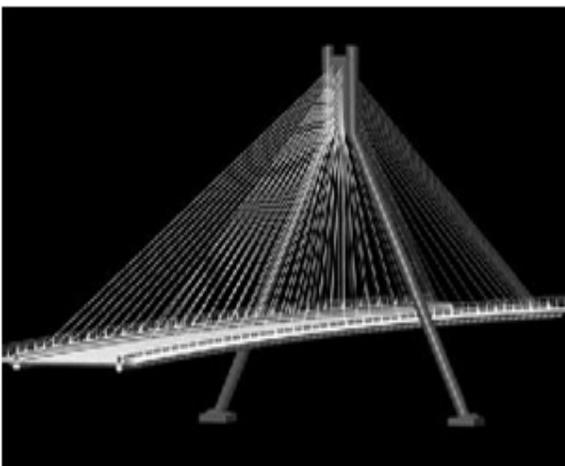


그림 2. Gilman Advanced Technology Bridge



그림 3. Noolcha Bridge



그림 4. Broadway Bridge (Potland)

네덜란드의 Fibercore사는 2009년에 23개의 FRP 교량을 건설했고 2010년에는 150개를 추가로 건설할 것으로 예상하고 있으며, 카본섬유 보강 에폭시 수지를 사용하여 한 스패의 길이가 24.5m인 교량을 건설한 실적도 다수 갖고 있다. 또한 네덜란드 Noorland에 있는 Noorland footbridge 교체공사시 다음과 같은 교량건설재료들을 사용할 때 소비되는 에너지량과 발생하는 환경오염정도에 대한 연구를 통해 각 재료들의 환경적인 영향을 정량적 값으로 나타내었다. 아래 표 3은 각각의 교량건설재료에 따른 비용과 환경적 영향을 요약한 것이다. 여기서 “exergy” 방법은 위 다섯가지 재료에 대한 에너지 소비량을 정량화하는데 사용되었다. 이 방법에서 총 에너지 소비는 가공되지 않은 재료를 완성품으로 만드는 각각의 공정마다 재료에 따라 감소되는 에너지 소비량의 합계를 의미한다.

표 3. 교량 건설 재료별 비용 및 환경적 영향

Bridge material	Construction costs (EUR)	Maintenance Costs (EUR)	Environment ; Energy consumption (J)	Environment ; Critical volume of polluted air and water (m ³)
Structural steel	Painted; 40,000 Aluminium coated; 50,000	Painted; 30,000 Aluminium coated; 6,000	“Exergy” method; 294,000*10 ⁶ J	Water; 697.4 m ³ Air; 7,09*10 ⁶ m ³
Stainless steel	Steel AISI 316L; 110,000 Steel AISI 304L; 96,000	Steel AISI 316L; 6,000 AISI 304L more, life cycle shorter; 96,000	“Exergy” method; 329,600*10 ⁶ J	Not investigated but certainly more pollution than for structural steel
FRP	Pultruded sections of FGRP; 70,000	Rough estimation; 17,000	“Exergy” method; 120,000*10 ⁶ J	Water; 85.8 m ³ Air; 7,92*10 ⁶ m ³
Aluminium	Quality AlMgSi1 acc. to DIN 1748; 77,000	Rough estimation; 19,000	“Exergy” method; 268,700*10 ⁶ J	Water; 565.3 m ³ Air; 41.10*10 ⁶ m ³
Concrete	Reinforced concrete B35 handrails etc; 30,000	Rough estimation; 10,000	“Exergy” method; 277,200*10 ⁶ J	Water; 341.9 m ³ Air; 31.04*10 ⁶ m ³

표 3에 나타난바와 같이 강재와 콘크리트가 건설비용에 있어서는 가장 저렴하고 스테인레스 스틸이 가장 비싼 재료임을 알 수 있었다. 하지만 유지 보수 측면에서는 정반대의 결과를 나타냈다. 스테인레스 스틸의 경우가 유지 보수를 고려할 때 가장 효과적인 재료였으며 강재의 경우 가장 많은 비용이 들어감을 확인할 수 있었다. 다음으로 에너지 소비와 물의 오염 측면에서 볼 때, FRP는 다른 재료들에 비해 월등히 적게 발생함을 알 수 있었고 공기의 오염 측면에서는 강재에 이어 두 번째로 깨끗한 재료임을 확인하였다. 그림 5는 재료에 따라 발생하는 오염물질과 물·공기의 오염정도를 나타낸 것이다. 따라서 위의 연구 결과를 통해 건설비용을 우선 고려한다면 콘크리트나 강재와 같은 재료를 사용해야 하겠지만 현재 건설분야에서도 환경보호에 대한 관심과 요구가 증대되고 있으며 특히, Noorland footbridge에 경우 항구내에 건설되어야 한다는 환경적인 조건에 따라 유지 보수비용뿐만 아니라 환경에 가장 적게 영향을 미치는 FRP 재료를 사용하여 교체공사를 실시하였다.

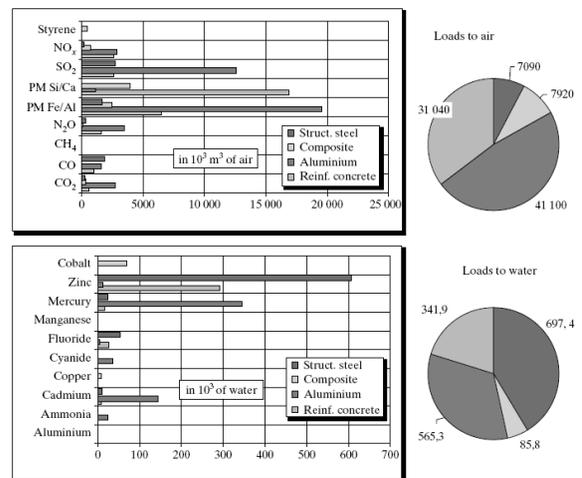


그림 5. 재료에 따른 오염물질에 의한 물과 공기의 오염정도

4. FRP 교량의 문제점

서두에 언급한 바와 같이 FRP의 적절한 사용을 위해서는 이론연구 및 실험 자료는 필수적이며 특히 미국에서 지난 25년간 FRP 소재를 교량에 적용하는 연구를 통해 자연상태에 건설된 교량으로부터 실제적인 실험자료 획득하고 있다. 이러한 실험 자료는 FRP의 교량 적용과 시공에 있어서 의미 있는 자료가 될 것이다.

다음으로는 이러한 실험자료를 통해 FRP 적용교량만이 가지고 있는 몇 가지 문제점들을 언급하도록 하겠다. 첫 번째 가장 큰 문제로는 FRP 바닥판과 교면의 접착상태이다. 나무, 콘크리트, 아스팔트 포장일 경우 문제가 발생하지 않았지만 Polymer concrete 포장시에 Crack과 쪼개지고 벌어지는 현상이 상당히 많이 발견되었다. 아래의 그림 6는 2개의 FRP panel 사이에 발생한 균열을 보여준다. 그리고 그림 7은 FRP는 유동성이 큰 물질이기 때문에 취성의 재료와 함께 사용하게 되면 낮은 온도에서 취성재료가 쪼개지는 현상이 나타나기도 한다. 두 번째로 FRP 바닥판은 추운 온도에서 전통적인 재료와 다른 온도 변화를 보이기 때문에 도로사용에 있어서 약간의 문제가 발생한다. 아래 그림 8을 보면 FRP 교량도로면에 서리가 발생하였지만 교량진입도로에는 도로가 말라있는 것을 알 수 있다. 그 이유는 진입도로는 지표면의 열로 인해 도로표면 온도의 변화가 작지만 FRP 교량의 경우 이러한 지표면의 열을 얻을 수 없으며 콘크리트에 비해 FRP는 태양에너지를 적게 축적하는 물질이기 때문이다. 세 번째로 FRP 바닥판과 강거더와의 연결부 문제이다. 강결구조로 계획한 바닥판 전단포켓의 그라우팅이 파손되어 포장면에 균열이 발생한 사례가 보고되고 있다. 지점부 및 연결부 구조상에

대한 추가적인 연구가 필요하다. 네 번째로 강성이 크고 얇은 두 개의 skin 사이에 가볍고 두꺼운 core를 합성시킨 샌드위치 합성구조로 제작된 FRP 바닥판의 균열문제이다. 이전에 언급한 문제들은 단순히 사용성부분에 관련된 것이지만 FRP 자체의 분리와 파괴는 구조적인 문제를 일으킬 수 있으므로 즉각적인 교량의 교체가 필요하다.(그림 9) 다섯 번째로 도개교의 경우 다리를 들어올릴 때 발생하는 중력으로 인해 교면의 전단력이 발생하게 되고 이것으로 포장면의 미끄러짐 현상이 발생하게 된다. 그림 10은 미국 Oregon에 있는 Lewis & Clark River Bridge의 모습으로 실제 교량을 들어올릴 때 생기는 전단력으로 인해 아스팔트 콘크리트 포장면이 파괴됨을 확인할 수 있다. 이러한 실제 실패사례와 연구 및 실험을 통해 점탄성물질인 아스팔트는 도개교의 포장재료로 적절하지 않음이 밝혀졌으며 현재 본 교량은 Epoxy polymer concrete로 포장을 대체하여 사용하고 있다. 마지막으로 재료의 적절치 못한 배합과 Mixing, 거친 표면처리등과 같은 시공상의 부주의로 인해 시공 후 포장이 떨어져 나가는 경우를 볼 수 있다. 또한 이렇게 쪼개진 부분에는 물이 침투하여 얼게 되면서 포장면의 파괴를 더욱 가속화 시키게 된다.(그림 11)



그림 6. FRP 연결부의 Crack

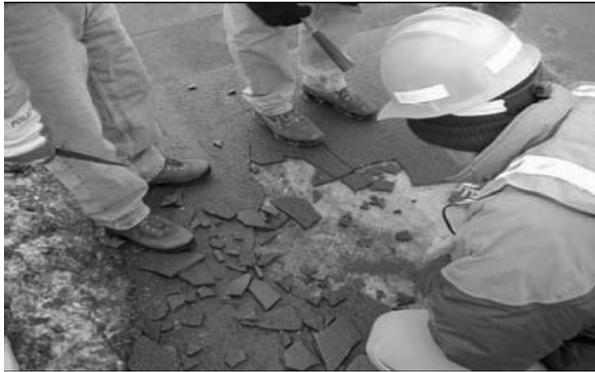


그림 7. Brittle epoxy 교면의 쪼개짐현상



그림 8. FRP 교량의 서리



그림 9. Sandwich 합성바닥판 Skin과 Core의 분리



그림 10. 아스팔트 콘크리트 포장면의 파괴



그림 11. 적절치 못한 시공으로 인해 발생하는 포장면의 파괴



5. 결론

실제 FRP 교량 연구와 자료를 통해 FRP를 적용함에 있어 중요한 몇 가지를 발견할 수 있다. 첫째

로 교량의 자중을 줄이기 위해 얇은 두께로 포장 재료를 접착시킬 경우 시간이 지남에 따라 포장이 쉽게 파괴 된다는 점이다. 두 번째로 FRP 적용에 있어서 바닥판과 교면의 접착력과 마찰저항에 대해 충분히 견딜 수 있도록 설계단계에서 검토가 필요

하다는 것이다. 이처럼 실제적인 연구와 자료는 재료의 특성, 문제점, 단면선택, 적절한 재료의 조합 등 향후 FRP 교량이 더 좋은 성능으로 사용될 수 있도록 하는 밑거름이 된다. 그림 12는 FRP 바닥판과 아스팔트를 조합하여 성공적으로 사용되고 있는 FRP 교량의 예이다. 아스팔트는 가벼운 재료가 아니기 때문에 경량인 FRP의 장점을 감소시키고 크리프나 취성파괴에 대한 검토가 필요하다. 그럼에도 불구하고 많은 성공사례들을 통해 FRP 바닥판과 아스팔트의 조합이 큰 문제없이 사용됨을 확인할 수 있었고 또한 아스팔트는 친숙한 재료이기 때문에 유지보수에도 편하다는 장점을 가지고 있었기에 계속해서 적용되고 있다.



그림 12. 성공적인 FRP 적용 교량 (FRP 바닥판 + 아스팔트 포장)

마지막으로 토목분야에서 FRP의 사용을 더욱 활성화하기 위해서는 콘크리트나 강재와 같은 기존의 재료보다 높은 공사비, 대규모 파괴시 어려운 유지보수, 특정한 설계 및 공정의 필요 등의 문제들도 해결해야 나아가야 할 것이다. 이처럼 아직 FRP 사용은 아직 부분적이며 몇 가지 문제점을 가지고 있는 것이 사실이다. 하지만 공사기간의 단축, 유지관리, 수명공사비(LCC), 환경적인 영향등을 고려해볼 때 강도와 강성이 충분하면서도 재료의 자중

을 획기적으로 줄일 수 있으며 외부환경에 저항성이 크고 환경오염의 영향이 적기 때문에 콘크리트와 강재를 대체할 수 있는 매력적인 재료이고 미래 건설 분야에서 가장 많이 사용될 재료로서 각광받게 될 것이다.