特輯 "건설분야에서의 복합재료 응용기술"(총 7편) 중 - 제 7편

건설구조물에 적용된 섬유복합재료의 LCC 검토

한목규*, 신관수**, 김기수***, 홍건호****+

Life Cycle Cost Analysis on the Application of FRP in Construction Field

Bog-Kyu Han*, Gaon-Su Shin**, Ki-Soo Kim***, Geon-Ho Hong****+

ABSTRACT

The mechanical properties and durabilities of fiber advanced composites make them ideal for widespread applications in construction worldwide. However, one of the problems of fiber reinforced advanced composites has expensive initial costs. So the efforts for lowering the initial cost have to be needed.

There has been hardly assessment results of life cycle cost for fiber reinforced advanced composites in construction field, but some papers showed that total life cycle cost could be profitable, if the initial cost could be reduced.

The purpose of this paper is to report assessment results of LCC(Life Cycle Cost) for application of FRP(Fiber Reinforced Plastic) in construction field.

Key Words : FRP, LCC(Life Cycle Cost)

1. 서 론

섬유강화 복합 신재료(FRP)는 매우 우수한 역학적 성능과 내구성을 나타내고 있어, 기존의 콘크리트 및 강재를 대체할 수 있는 건설재료로 각광을 받고 있으나, 초기건설비용이 매우 높다는 점이 가장 큰 단점으로 지적되고 있는 실정이다. 만약, 획기적으로 초기건설 비용을 현재의 콘크리트 및 강구조물과 같이 낮출 수 있는 대책이 마련된다면, 섬유복합재료(FRP)의 건축구조물 활용성은 매우 높다 할 수 있다. 따라서, 초기건설 비용을 줄이기 위한 재료적, 시공적 관점에서의 심도 깊은 연구검토가 지속적으로 진행되어야 할 필요가 있다. 현재까지 연구 검토된 내용을 분석해 보면, 섬유복합재료(FRP)는 초기건설 비용은 다소 높지만, 적용 이후 구조물 유지관리비용에서 충분한 이점을 가지고 있는 것으로 분석되고 있다. 즉, 구조물의 전체수명(건설-유지관리-재설치)동안 드는 총비용(Life Cycle Cost)의 측면에서 섬유복합재료는 타 재료에 비해 경제적으로 매우 유리하다는 결과를 나타내고 있다.

LCC의 분석 유형을 보면 투자비용, 부지구입비용, 설계비용, 건설비용, 운용(유지보수)비용, 잔여 가치 등으로 나눌 수 있는데 섬유 복합재료가 현재 많은 부분 대중화되고 경제성이 좋아졌다 하지만 기존의 강재/콘크리트와 비교하여 초기건설비용을 낮출 수 있는 대책을 마련하기에는 한계가 있는 것이 현실이다. 하지만, 섬유 복합재료는 유지관리 비용에서는 충분한 이점을 가지고 있는 재료로서 건설비용 외에 건설구조물의 수명기간 전체에 걸친 유지관리 비용까지 포함한 총괄적 비용(Life Cycle Cost)정보를 분석하여 접근하는 것이 필요하다. 영국의 한 조사에 따르면 LCC 중 일반적으로 건설단계 비용은 16%미만이고 전체비용의 80%이상이 유지보수단계에 사용된다고 보고된 바 있다. 이와 같은 결과에 의하여 섬유 복합재료의 건축구조물 적용성에 대한 LCC분석은 반드시 이루어

* (주)한국쇼본드건설 과장
** (주)한국쇼본드건설 연구원
*** 홍익대학교 재료공학부 교수
****+ 호서대학교 건축공학과 교수, 교신저자(E-mail:honggh@office.hoseo.ac.kr)

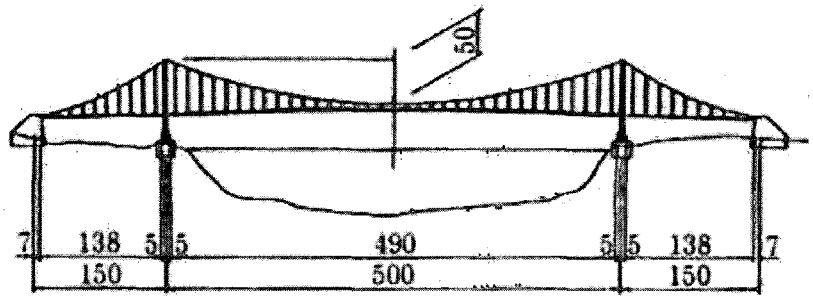

Fig. 1 사장교 형식(단위 m).

져야 한다.

그러나, 섬유복합재료(FRP)를 이용한 구조물에 대한 LCC 분석에 대한 관심은 매우 높으나, LCC개념이 도입된 지 얼마 되지 않았으며, 주로 토목구조물을 중심으로 적용되어왔기 때문에 건축구조물과 관련된 연구 자료는 많지 않은 것이 현실이다. 따라서, 본고에서는 FRP교량에 대하여 섬유 복합재료를 이용한 건설구조물 예를 통하여 비용을 산정하고 LCC관점에서 비교·검토하여 그 경제성을 살펴보고자 한다.

2. CFRP사장교/강사장교의 LCC 비교·검토

CFRP사장교와 강사장교의 LCC 비교·검토는 일본에서 사장교에 대하여 비교검토한 자료를 바탕으로 작성하였으며, 비교검토를 위해 교량 형식은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 주탑은 라멘형식이고 기초는 콘크리트 직접기초, 도로폭원은 2차선으로 전체 12.8m로 가정하여 비교검토 하였다[1].

2.1 사용재료

사장교의 주요 구조재료는 CFRP로 하고, 방호벽과 같은 부대시설은 고강도가 요구되지 않으므로 CFRP보다 싼 GFRP로 선정하였다. 사용된 주요재료의 허용응력도 및 탄성계수는 Table 1에 나타내었으며 강재의 안전율은 3으로 CFRP는 10으로 가정하였다.

2.2 해석모델

정적해석은 사하중, 활하중, 풍하중, 온도하중, 지점이동, 제작가설오차에 대해서 실시하고, 동적 특성은 지진, 바람에 대해서 고려하였다. 해석 결과 강재로 하였을 경우와 CFRP로 하였을 경우, 새그의 비, 케이블 단면적, 주탑 단면적, 변위, 단면력, 진동수 등을 구하였고, 그 결과에 따라 수량 산출을 실시하였다.

2.3 해석모델

CFRP의 재료비는 현재 가격의 1/5수준으로 가정하였다. 향후 적용개소가 증가될 경우 재료비가 떨어질 것이라는 가정 하에 이와 같이 산정하였다. 비용 비교를 위해 초기비용은 재료비, 유지관리비용은 강사장교의 경우 보수도장비용만을 고려하였다. 상부공과 하부공에 대한 건설비용을 Table 2와 3에 각각 나타내었다. 상부공의 경우, 강사장교의 경우 약 161억엔이고, CFRP의 경우에는 220억엔, 하부공은 강사장교는 103억엔, CFRP교는 88억엔으로 산정되었다. 따라서, 초기 건설비용은 강사장교는 264억엔, CFRP교는 308억엔으로 CFRP 사장교가 17% 정도 더 드는 것으로 나타났다.

Table 1 사용재료의 특성

구 분	CFRP	강 재
보강거더	(*T800HB*) 허용응력도 : 102 MPa 탄성계수 : 64 GPa	(SS400) 허용응력도 : 137.3 MPa (SM490Y) 허용응력도 : 205.9 MPa 탄성 계수 : 205.9 GPa
주 탑	(T300) 허용응력도 : 147 MPa 탄성 계수 : 122 GPa	SS400 SM490Y
케이블	(T300) 허용응력도 : 147 MPa 탄성 계수 : 122 GPa	(메인케이블) 허용응력도 : 980 MPa (행어) 허용응력도 : 627.2 MPa
단위용적중량	15.7 kN/m^3	76.9 kN/m^3

Table 2 상부공의 건설비용 계산

구 분	강사장교			CFRP사장교		
	수량(ton)	단가(천엔)	총액(백만엔)	수량(ton)	단가(천엔)	총액(천엔)
케이블관련	1,199	1,600	1,918	65	4,995	310
보강거더	9,214	850	7,832	3,119	4,995	15,579
부속품	958	850	814	958	850	814
주 탑	5,925	900	5,332	1,010	4,995	5,045
포 장	16,009m^2	10	160	16,009m^2	10	160
합 계	16,056			21,908		

Table 3 하부공의 건설비용 계산

구 분		강사장교			CFRP사장교		
		수량(m^3)	단가(천엔)	총액(백만엔)	수량(m^3)	단가(천엔)	총액(천엔)
앵커기초 (2개분)	구체콘크리트	91,200	85	7,752	70,000	85	5,950
	기중암굴삭	51,600	9	464	44,800	9	403
주탑기초 (2개분)	구체콘크리트	22,400	85	1,904	25,400	85	2,159
	기중암굴삭	31,000	9	279	32,400	9	292
합계		10,399			8,804		

한편, 이 정도 규모의 강사장교의 경우 보수도장비용이 약 12억엔 정도이며, 도장주기를 10년으로 할 경우 4회 40년 기간에서 CFRP 교량의 비용을 상회하는 것으로 나타나, CFRP 사장교가 이보다 더 장기간 유지관리 비용이 발생하지 않는다면 LCC 관점에서 비용이 더 절감되는 것을 알 수 있다.

Table 4 LCC검토에 사용된 프리텐션 교량제원

교 장	20.76m
지 간	20.0m
교 폭	8.2m
교량면적	170.2m^2
사 각	90°
하 중	B활화중
염해대책	염해대책구분 Ⅰ (PC강재+철근)
	염해대책구분 Ⅲ (FRP긴장재+FRP보강재)

그러나, 앞서 서술한 바대로 CFRP의 가격을 현재 대비 1/5 수준으로 가정하였기 때문에 현재의 수준에서라면 5배 이상의 초기건설비용이 발생되며, 그럴 경우 공용기간이 최소 500년을 만족해야 강사장교에 비해 경제성이 있다고 판단할 수 있다.

따라서, 적용되는 교량의 제원에 따라 다소 달라지겠으나, 현실적으로 보았을 때 CFRP의 제조가격이 1/5 이하의 수준으로 떨어지고, 많은 검토를 통해 안전율을 일반 강재와 유사한 정도로 가정하는 것이 가능해 진다면, 초기건설비용 측면에서도 CFRP교량의 적용은 충분히 가능성이 있는 것으로 판단할 수 있을 것이다.

3. FRP를 이용한 콘크리트 구조물의 LCC 검토

일본의 후루이치 코스케 등[2]은 염해 환경 하에 있는 프리텐션 방식 단순 I형 거더교를 예로 하여 염해에 의한 열화과정을 추정하고, FRP 보강재를 사용한 구조물의 초기 건설비와 현재 일반적으로 사용되는 기술로 만들어진 구조물을 여러 가지 관리 방법에 따라 100년간 공용된 경우의 LCC를 산출하여 FRP를 강재 대체재료로 사용한 콘크리트 구조물의 사용 가능성을 검토하였다.

대상교량의 제원 및 비교를 위한 염해대책에 대해서 Table 4에 나타내었다. 대상구조물은 해안선으로부터 100m 떨어진 위치에 건설된 프리텐션 방식의 단순상판교량으로 가정하였다. 본 검토에서 사용된 긴장케이블과 보강재의 종류를 Table 5에 나타내었는데, 긴장케이블로는 PAN계 탄소섬유, 아라미드섬유, 보강재로는 유리섬유 제품을 사용한 것으로 하였다. 검토한 보수보강대책공법 및 대책공법을 Table 6에 나타내었다. 100년 후의 구조물의 성능은 염소이온 침투방지대책과 내부염분을

Table 5 사용된 긴장케이블 및 보강재

구 분	염해대책구분 Ⅰ (PC강재+철근)	염해대책구분 Ⅲ (FRP긴장재+FRP보강재)
긴장케이블	PSC강재 SWPR7B IS15.2	*CFCC* 직경 *15.2*
		아라미드섬유 직경 7.5
보강재	철근10(SD345)	유리섬유(격자형상)

Table 6 대책 공법의 종류

대책방법 / 대책시기		대 책 종 별	0년	18년	25년	50년	100년
			잠복기	진전기	가속기		
			건설	피철근부식		PC 강재 부식	공용종료
예방보전 / 건설시 잠복기초기	①	염해대책구분 Ⅰ	무대책			해체철거 (공용 70년)	공용도중 해체철거
	②	FRP 보강	무대책				건전성 유지
	③	에폭시도장강재	무대책			[교면지복부 및 거더하부면의 단면수복 50㎜+표면피복도장 190㎛]×16년마다	건전성 유지
	④	표면방수도장	[교면지복부 및 거더하부면 방수도장피복 500㎛] ×1회 (건설시) [교면지복부 및 거더하부면의 단면수복 50㎜+표면피복도장 190㎛]×16년마다				건전성 유지
	⑤	전기방식	[전기방식(신설)]×1회 (건설시) 시스템 갱신×25년마다+전극 교체×50년마다				건전성 유지
보수공법 / 잠복기후기 전진기초기 (철근발청시)	⑥	표면피복도장	무대책	[거더하부면의 단면수복 70㎜]×1회 (26년째) [표면피복도장 190㎛]×8년마다			건전성 불명
	⑦	전단면수복 표면피복도장	무대책	[거더하부면의 단면수복 70㎜+표면피복도장 190㎛]×26년마다			건전성 유지
	⑧	전단면보수 시트보수	무대책	[거더하부면의 단면수복 70㎜+FRP시트보수]×1회 [전면도막보수]×10년마다			건전성 유지
	⑨	부분단면보수 전기방식	무대책	[거더하부면의 단면수복 70㎜+전기방식(신설)]×1회 시스템 갱신×25년마다+전극교체×50년마다			건전성 유지
보강공법 가속기 열화기초기 (내력저하시)	⑩	전단면보수 시트보강	무대책			[단면수복 70㎜+FRP시트 300g/㎡(5층)]×1회 [전면도막보수]×16년마다	해체철거
	⑪	전단면수복 외부케이블보강	무대책			[단면수복 70㎜+FRP외부케이블보강]×1회 [표면피복도장 190㎛]×8년마다	해체철거

재거하는 공법의 경우인 ④, ⑥, ⑦, ⑧은 건전도를 유지하는 것이지만, 100년간 무대책의 경우인 ①, 그리고 열화기까지 구조물을 방치하는 보강을 한 공법인 ⑩, ⑪의 경우에는 남은 수명이 다한 것이다. 전기방식공법을 시행한 경우인 ⑤, ⑨에 대해서는 100년 후를 예측하는 것이 어렵지만, 건전도를 유지하고 있는 것이다. 또한, 에폭시 도장 강재를 사용한 구조물에 대한 경우인 ③은 현재로서는 에폭시 도장 PC 강선을 사용하여 프리텐션 거더를 제작하는 것에 기술적 문제가 있으며, 에폭시 도장의 핀 홀과 부식의 관계가 아직 명확하지 않지만 참고로 비교하였다.

3.1 비용산정결과

공용기간 100년에 있어서의 LCC의 산정 결과는 Fig. 2와 같다. 열악한 부식환경 하에서 콘크리트 구조물을 유지·보전하기 위해서는 많은 LCC가 요구되는데, Fig 2에 나타난 비용은 현재의 가격에 대한 직접공사비의 예측값으로 금리는 고려되지 않았으며, 점검비용 등의 유지관리비용도 포함되지 않았다.

Fig 2에서 보는 바와 같이 신설 시에 예방 보전을 실시하는 대책안인 ②~⑤에서 100년 간의 LCC는 염해대책구분 Ⅰ종 교량의 초기 건설비에 대하여 1.6~3배 정도이다. 검토한 대책안 중에서는 FRP를 이용한 경우 ②가 1.63배로 가장 저렴하게 나타났다. FRP를 이용한 교량도 예기치 않은 열화가 발생할 가능성이 없지는 않기 때문에 점검 등의 유지관리가 필요한 것은 다른 것과 다르지 않지만, 열악한 염해 환경 하에서는 높은 우위성을 나타내는 것으로 여겨진다. 표면방수

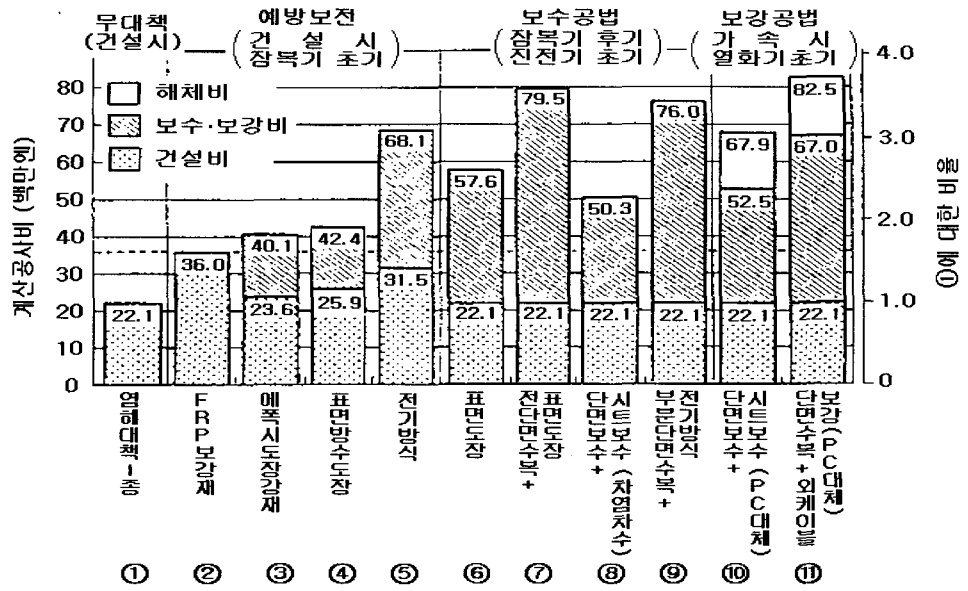

Fig. 2 LCC 산정결과.

도장을 16년마다 덧칠하여 보전하는 방법 ④는 덧칠 비용이 많이 소요되어 초기 건설비의 1.9배로 나타났다. 향후 우수한 내구성을 가진 콘크리트용 도장재료의 개발이 요구된다.

잠복기 후기 또는 진전기 초기에 보수대책을 강구하는 안 ⑥~⑨는 내부에 염분이 다량으로 잔존하기 때문에 LCC가 초기 건설비의 3배 정도이며, 예방 방법에 따라서도 비교적 고가인 공법이다. 이런 종류의 유지관리를 반복할 경우 100년 후의 구조물의 건전도는 유지되지만, 점검과 유지관리의 빈도가 높게 될 것으로 예상된다.

가속기 또는 열화기 초기에 보강을 강구하는 대책안 ⑩, ⑪은 구조물에 각종 손상 및 열화가 발생할 것으로 추정되며, 공용을 계속 이어가기 위해서는 위험관리가 필요할 것으로 생각된다. 또한, 보강 공법을 적용한다 하더라도 교량에 대한 모든 요구 성능을 만족하는 것은 곤란할 것으로 예상된다. 100년의 공용 후 해체철거될 경우, LCC는 초기 건설비의 3.1~3.7배로 되어 다시 신설비가 필요하게 된다.

검토 결과에 대한 결론은 열악한 염해 환경에서는 예방보전에 의한 LCC를 줄일 수 있는 것이 확인되었으며, 이 중에서도 FRP 보강재료를 이용하여 부식이 발생하지 않고, 염해에 의한 열화가 발생되지 않는 구조물을 구축하는 것이 가장 유효한 선택인 것으로 나타났다.

한편, 콘크리트 구조물에 대한 LCC 산정의 정밀도를 좀더 향상시키기 위해서는 각종 열화요인에 대하여 각 과정을 정밀하게 잘 예측할 수 있는 기법의 개발이 필요하며, 각 회사의 지속적인 개발을 위해서는 상기의 평가 정밀도의 향상 외에 각 공법의 저비용화와 새로운 보수보강기술의 개발도 요구되고 있다.

4. 결 론

섬유강화복합재료의 건축구조물 분야에 적용할 경우, 높은 초기건설비가 가장 큰 문제점으로 대두되고 있다. 현재 모든 국가에서 초기 투자비용에만 관심을 두고 있기 때문에 문제점으로 지적되지만, 실질적으로 건축구조물의 수명, 유지 관리 등의 측면이 고려 대상에서 제외되는 경향이 있으므로, 이에 대한 종합적인 비교 검토가 필요하다. 경제적 유효성을 검증하기 위해 섬유강화 복합신재료의 LCC를 검토하여 보았으나 LCC 검토 예가 매우 적어, 기존 재료와 대비했을 때의 LCC 산정 비교에 대한 결론을 내릴 수 없었으나, 초기건설비용을 저감시킨다면 LCC 측면에서 충분히 유효할 것이라고 판단된다. 한편, LCC 산정의 정밀도를 향상하기 위해서는 각종 열화요인에 대하여 각 과정을 정밀하게 예측할 수 있는 기법의 개발과 함께 각 회사의 지속적인 개발을 위해서는 평가 정밀도 향상 외에도 각 공법의 저비용화와 새로운 보수·보강기술의 개발도 요구된다.

5. 연재 후기

현대의 과학기술은 끊임없이 발전하며 새로운 재료의 개발 및 적용에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있으나,

건설 분야에서는 기존의 경험과 재료에 대한 고정관념의 변화가 이루어지지 않아 건설 재료발전을 뒤떨어지게 만든 것이 사실이다. 하지만, 현 시점에서 향후 10년간 콘크리트와 강재의 재료비 상승에 따른 건설재료의 변화는 필연적으로 대비해야 하는 과제이다. 이에, 섬유강화복합재료(FRP)의 건설구조물에의 활용은 재료의 특성상 고강도의 경량재료로서, 내부식성, 에너지 흡수성, 비전도성 및 낮은 열전도성 등의 특징으로 인하여 다른 어떠한 재료보다도 월등하다 할 수 있다. 뿐만 아니라, 여러 건설 사업 현장에서도 섬유강화복합재료를 이용한 구조물의 보수·보강이 활발하게 이루어지고 있으며, 이와 관련된 많은 연구를 진행하고 있다. 하지만, 섬유강화복합재료(FRP)를 활용하기 위해서는 재료자체가 고가라는 단점이 많이 지적되고 있는 만큼 재료비용 절감을 위한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다. 본고에서 여러 차례 강조한 바와 같이 섬유강화복합재료의 건설구조물의 활용은 매우 다양하며, 활용분야가 넓은 만큼, 향후 국내 건설시장의 중요한 건설 재료로써 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 교육인적자원부 지방연구중심대학육성사업(바이오하우징연구사업단)의 지원과 건설교통부 의 사회기반시설물 평가 중점연구단의 지원에 의하여 연구되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

1) 明嵐政司 外, "CFRP吊橋の經濟性に關する研究", 土木技術資料, Vol. 42, pp. 26-31, 日本土木研究所, 2000.
2) 古市耕輔 外, "FRPを用いたコンクリート構造物のライフサイクルコストのケーススタディー", 橋梁と基礎, 第37卷, 第5号, pp. 39-44, 2003.
3) 황윤국, 최영민, "교량에 이어서 복합재료(FRP)의 활용과 전망", 건설기술정보, 2002.
4) V.C.Li, "From Micromechanics to Structural Engineering - The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications", Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, ASCE, No. 471/I-24, pp. 1-12. 1993.