

Rib CFRP 파이프의 강도에 관한 기초적 연구 The Fundamental Study of Strength on the CFRP Pipe Reinforced Rib

서성탁^{1*}
Sung-Tag Seo^{1*}

<Abstract>

The carbon fiber reinforced plastics, one of unidirectional fiber-reinforced composite materials, are widely used in various field including space and aviation industries, sports and leisure industries and general structural members and parts as have high strength in comparison with the weight, elasticity coefficient, high fatigue strength and lower thermal transformation. This paper present analytical behavior of CFRP pipe reinforced rib under the external force. From the results, the maximum compressive stress occurs at the upper flange of CFRP pipe and tensile stress occurs middle flange of the CFRP pipe. The stress of rib CFRP pipe by increasing effective cross-sectional area was reduced by approximately 35%.

Keywords : CFRP, Pipe, Rib, Strength, Resin, CF, GFRP

1. 서론

탄소섬유를 강화재료 사용하는 플라스틱 복합 재료(CFRP)는 비강도(강도/밀도)와 (비강성/밀도)가 높고, 또한 부식되지 않는 등의 우수한 특성이 있다. 최근 응용분야는 항공기와 자동차 등의 산업에서부터 스포츠, 레저, 해양수산 등 까지 다양하게 사용되고 있다. 경량화가 요구되는 각종 기계 및 운반도구에서는 강도가 높은 강성이라는 CFRP pipe가 1차 구조부재에 많이 이용되고 있다. 또한, CFRP는 이방성의 재료로서 설계방향에 따라서 강도와 강성 등의 역학적 특성의 방향을 고려하여 설계하면 불필요한 단면을 감소시킬 수 있으며, 경량화가 가능한 구조물을 설계할 수 있다.

최근 CFRP의 사용이 다양한 분야에서 이용되고, 가격은 매우 저렴해졌지만 아직도 알루미늄 등의 금속에 비해 고가이다. 이러한 문제를 해결하는 방법으로 CFRP를 제작하는 다양한 방법들이 개발되고 있다.

특히, 교량 부속물인 관리로 스틸펜스 등은 건설시 아연도금이나 도장방식을 사용하고 있으나, 아연도금 부재 등은 설치후 30년 정도로 보수도장 등이 필요하며, 설치장소의 부식환경이 열악한 경우 열화가 현저하게 발생하여 부재의 교체가 필요하다. 이로 인하여 현재 기존 부재 수명 및 새로운 재료의 도입에 의한 유지관리비의 경감이 필요하며, 그 일환으로 부식이 심한 부위에 대한 내구성이 뛰어난 CFRP 파이프의 검토가 필요하게 되었다. Fig.1에 다양한 단

¹정회원, 혜천대학 도시건설과 교수, 工博
E-mail : seosungtag@hcc.ac.kr

¹Member, Prof. Dept. of Civil Engineering, Hyecheon University, Ph. D.

면 형상의 CFRP 파이프를 나타냈다.

FRP관련 연구동향으로서는 이정윤 외2인¹⁾은 “연속섬유에 의하여 보강된 철근콘크리트 보의 전단강도 평가”를 통하여 섬유의 파괴모드 경계점을 섬유의 양과 콘크리트 강도의 비에 의하여 정한 후에 이를 이용하여 섬유에 의하여 보강된 철근콘크리트 보의 전단강도를 예측하였다. 한택희 외3인²⁾은 “GFRP 관로의 재료 특성에 관한 실험적 연구”를 통하여 복합재료 구조물의 해석을 위한 사전 연구로서, 현재 국내에서 사용되고 있는 GFRP 관로에 대한 재료특성 실험을 수행하여, 각각의 구성 적층재료별 재료 특성 및 전체 적층판에 대한 재료특성에 관한 연구를 하였다.

본 논문에서는 교량부속요소의 수명주기비용(LCC) 경감을 목적으로 교량 관리로에 대한 섬유강화플라스틱(CFRP) 재질의 적용 가능성에 대한 검토를 한다. 특히, 다양한 직경과 리브를 보강한 CFRP 파이프에 외력을 작용시켜, 그 파괴 강도와 변형거동 등을 조사한다.



Fig. 1. CFRP pipe.

2. 경량화 구조물 시공사례

2.1 적용사례

FRP교량은 ①FRP육교, ②FRP도로교량, ③FRP상판 등으로 많이 사용된다. Fig.2은 FRP로 제작된 상판용 성형재료를 나타냈으며, 또한, Fig.3 및 Fig.4에 상현재 단면과 사재교차부분의 FRP재료를 사용한 교량을 나타냈다. Fig.5에 Dunning Creek Bridge FRP상판의 시공사례를 나타냈다.



Fig. 2. Slab of FRP material.



Fig. 3. Cross section of upper chord.



Fig. 4. Cross section of diagonal member.



Fig. 5. FRP slab in dunning creek bridge.

Fig.6는 염해지역에서 보도교 가설 전경을 나타냈다. 염해지역의 도로교량은 염해방지, 보수가 진행되며, 측면도로교량으로 정비된 스틸육교는 부식이 진행된 상태의 것이 많다. FRP보도교는 내식성이 우수하여 장기간 유지보수가 필요 없다.



Fig. 6. Pedestrian bridges using FRP.

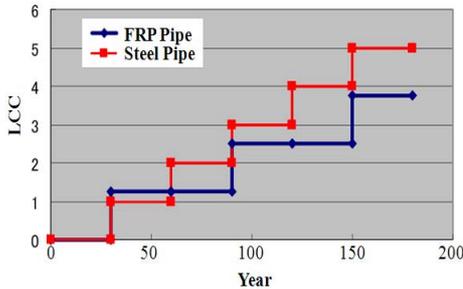


Fig. 7. LCC of pedestrian bridges using FRP pipe and steel pipe.

Fig.7은 교량 가설로의 LCC 비교를 나타냈다. 일반적으로 제작회사에 따르면 FRP제품의 교량 관리로의 경우 철강아연도금 처리로와 비교하여 제작비의 50%, 가설비용까지 포함하여 25% 정도 증가한다. 부식 환경에 설치된 스틸아연 도금 처리로는 수명이 약 30년 정도로 추정되며, FRP 제품 관리로는 2배인 60년의 수명을 갖는다고 가정한다. 단, LCC 산정에 있어서 FRP 제품 관리로의 설치시 구조적인 측면과 환경에 따라서 충분한 검토가 필요하다.

2.2 CFRP의 적용 가능성과 과제

현재 교량을 구성하는 주요 재료는 강재와 콘크리트이다. 각각 뛰어난 특성을 갖고 있지만 강재는 부식되며, 콘크리트는 무거우며, 섬세한 구조에 적합하지 않다. 이것에 반하여 부식되지 않고 가볍고 강도가 높은 구조에도 적용할 수 있는 재료로 CFRP 재료이다. 그러나 CFRP는 아직 몇 가지 해결해야 할 과제들이 산재하고 있으며, 교량 분야에 대한 적용의 역사도 짧고, 보편적으로 많이 사용되기까지는 많은 시간이 필요하다. 다음 CFRP를 본격적으로 적용하

기 위해 해결해야 될 주요 과제를 살펴본다.

- a) CFRP 제품의 제조비용은 전통적인 철강, 아연, 도금제품보다 높으나, 유지관리 차원에서 철강, 아연 도금보다 유리하다.
- b) CFRP의 인장강도는 강재보다 훨씬 높으며, 인장탄성계수는 강재와 유사하다. 그러나, 충격 방지 및 내화도 등은 명확하지 않기 때문에 특성을 충분히 파악한 후에 적용해야 한다.
- c) CFRP를 모재로하는 접합설계방법은 응력전달성질 및 파괴현상의 다양성도 고려하여 설계하여야 하며, 접합부분에 있어서 합리적인 방법이 개발되어야 한다.
- d) 하천을 횡단하는 교량에 있어서, 물, 빛, 염분 등의 작용이 복합적으로 이루어지는 경우에 장기적인 강도저하상태 자료가 부족하기 때문에 CFRP 재료의 내구성을 충분히 파악해야 한다.^{3,4,5,6,7)}

2.3 CFRP Pipe의 강도산정

CFRP Pipe의 기계적 강도를 계산하기 위하여 아래의 Fig.8과 같이 상하 두 개의 강판을 사용하여 CFRP 파이프를 압축하는 경우를 산정한다. CFRP Pipe의 원통곡면을 평면으로 가정하여 인장축의 휨응력은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_x = \frac{3Pd}{2lt^2} C$$

여기서, P : 하중 (kgf)

d : 파이프 직경(mm)

l : 파이프길이(mm)

t : 파이프 두께(mm)

C : 보정계수

식을 P에 대하여 정리하면,

$$P = \frac{2\sigma_x lt^2}{3dC}$$

CFRP를 단순한 휨상태로 가정할 때, 휨응력 σ_y 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

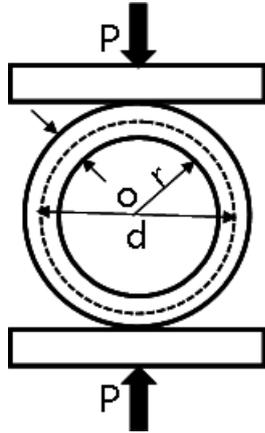


Fig. 8. Calculation Model of the Compressive Strength.

$$\sigma_y = \frac{Mh_x}{I} C$$

여기서, M : 휨모멘트 $M = \frac{1}{4}Pd$

I : 단면2차모멘트 $I = \frac{1}{12}dt^3$

C : 보정계수

위의 식에 휨모멘트 관계식을 대입하면 다음과 같다.

$$\sigma_y = \frac{3Pd}{2lt^2} C$$

3. 해석방법

구조해석은 실제모델에 의한 구조해석을 실시하며, 해석모델을 Fig.9와 같이 8절점 셀요소를 이용하여 모델화 한다. 작용위치의 응력집중을 충분히 고려하여 하중을 점차적으로 재하한다. 해석에 사용된 CFRP Pipe의 규격은 Table.1과 같으며, 먼저 CFRP관의 직경은 41mm, 78mm, 두께는 각각 2.8mm, 5.0mm, 길이는 동일하게 100mm에 대하여 해석을 실시한다. 또한, 파이프의 리브 폭강에 대한 효과를 검증하기 위하여 파이프직경 41mm, 78mm에 대하여 Rib 보강 폭을 20mm, 높이 5.6mm로 설정하여 FEM 해석을 실시한다.

Table 1. Dimension of CFRP pipe

Type	직경 d(mm)	두께 t(mm)	리브폭/높이 t(mm)	길이 l(mm)
D41	41	2.8	20/5.6	100
D78	78	5.0	20/5.6	100

Table 2. Material property of fiber

구분	비중	인장강도 kgf/mm ²	탄성율 kgf/mm ²	휨강도 kgf/mm ²
<CFRP> PAN계 (T300)	1.5	160	12,000	130
<CFRP> 피치계 (M24)	1.7	150	24,000	60
<GFRP> 유리섬유 Vf:60	2	110	4,500	115
<ArFRP> 아라미드	1.4	150	7,000	60
<SiCFRP> 탄화규소	2	150	15,000	190

Table 3. Material property of resin

항목	Epoxy
Tensile Strength(GPa)	55-130
Tensile Modulus(GPa)	2.5-4.1
Ultimate Strain(%)	1-9
Poisson's Ratio	0.2-0.33
Density(g/cm ³)	1.1-1.3
Tg (°C)	50-260
CTE	45-90
Cure Shrinkage(%)	1-5

Table.2 및 Table.3에 Fiber와 Resin의 재료적 특성을 나타냈다. 해석에서는 PAN계섬유 (T300)의 재료를 대상으로 하였으며, Resin의

경우는 일반적으로 많이 사용되고 있는 중간 정도의 강도를 사용한다.

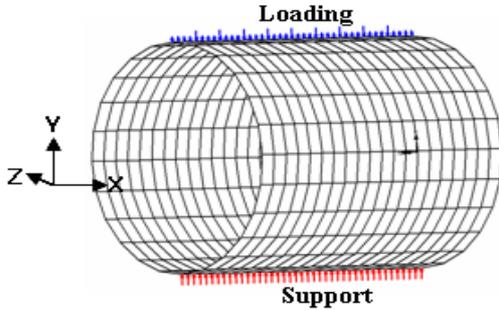


Fig. 9. Analysis model.

4. 해석결과

4.1 하중과 응력과의 관계

하중 7.84kN에서 CFRP Pipe 및 리브보강 CFRP Pipe의 응력분포를 Fig.10~Fig.13에 각각 나타냈다. 그림에서 CFRP pipe의 Z축방향 중앙부에서 인장응력이 발생하며, 리브보강에 의한 CFRP Pipe의 응력은 36.9% 응력저감효과가 나타났다. 최대 압축응력은 파이프의 상하단부에서 발생하며, CFRP 리브보강을 통하여 34.6% 정도까지 응력이 감소되었으며, 특히 리브부근에서 응력감소를 확인할 수 있었다. 이는 리브 높이 20mm, 폭 10mm로 보강함으로써 파이프의 유효단면적이 증가에 따른 응력 변화이며, 그 결과 응력 집중부의 인장 내력이 증가하였다. Fig.14에 파괴시 CFRP 파이프의 타원형 변형형상을 나타냈다. 응력분포 그래프에서 나타난 바와 같이 파이프 중앙에서 타원형을 형성하며, 인장을 받고 있음을 확인할 수 있다.

Fig.15에서 D41 type은 2kN에서부터 비선형적 거동을 시작하여 약 4kN 부근에서 항복하며, 리브보강 Rib D41 type은 약 5kN에서 항복하였다. 또한, Fig.16 D78의 경우도 D41와 같이 보강효과에 의한 높은 강성효과를 확인할 수 있다.

4.2 하중과 변형과의 관계

Fig.17과 Fig.18은 강관 중앙부의 하중 변형을 곡선을 나타냈다. 낮은 단계의 하중에서는

하중이 증가되면서 거의 선형적으로 증가하지만, 무보강 Pipe는 일정한 하중 값을 초과하면 변형이 급격히 증가한다. 그러나 리브보강 Pipe는 파괴점에 도달할 때까지 거의 선형적인 거동을 한다. 파이프의 직경이 커지면 최대변형률이 크게 증가하며, 압축시 파이프의 변형이 크기 때문에, 파이프와 접촉 면적도 커진다.

따라서 접촉면에 응력을 분산함으로써 응력 집중이 완화되고, 파이프 상하면이 측면보다 늦게 파괴된다. 또한 직경이 작은 파이프일수록 측면에 걸리는 모멘트가 커지기 때문에 측면은 상하면보다 응력이 집중된다.

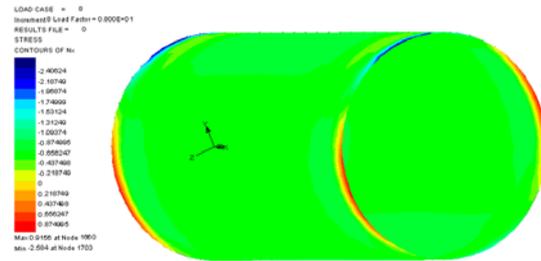


Fig. 10. Distribution of stress on the CFRP pipe(R41, 7.84kN).

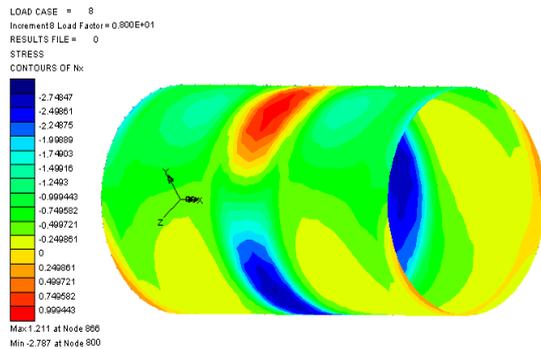


Fig. 11. Distribution of stress on the rib CFRP pipe(D41, 7.84kN).

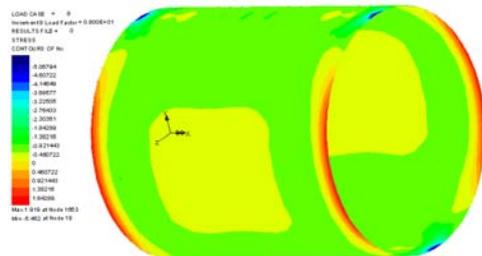


Fig. 12. Distribution of stress on the CFRP pipe (D78, Load:7.84kN).

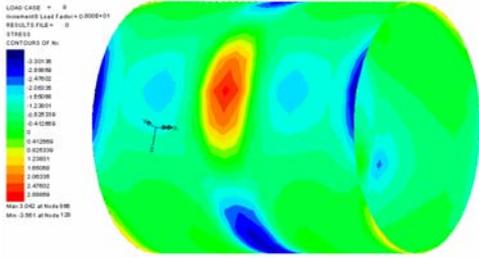


Fig. 13. Distribution of stress on the rib CFRP pipe(D78, Load:7.84kN).

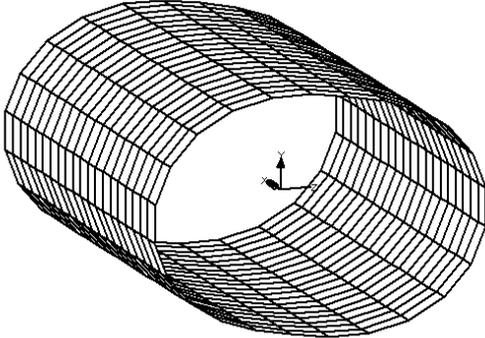


Fig. 14. Failure mode of CFRP pipe.

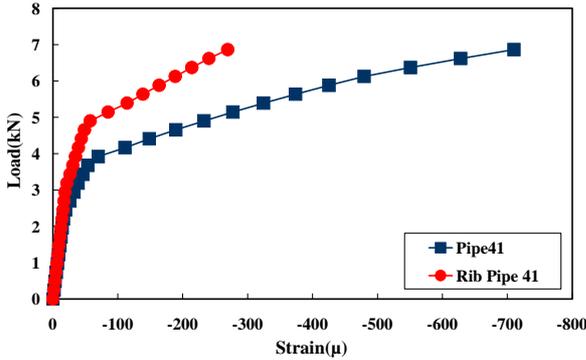


Fig. 15. The strain of CFRP pipe on the middle flange (D41, Load:7.84kN).

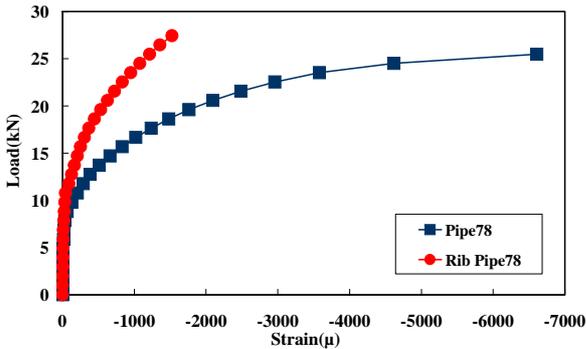


Fig. 16. The strain of CFRP pipe on the middle flange (D78, Load:7.84kN).

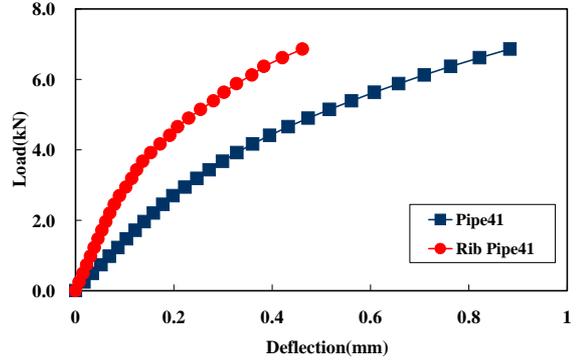


Fig. 17. The deflection of CFRP pipe on the upper flange (D41, Load:7.84kN).

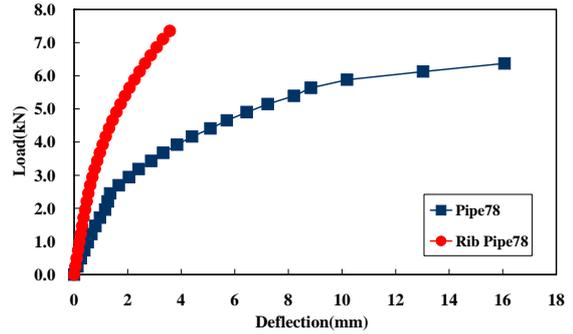


Fig. 18. The deflection of CFRP pipe on the upper flange (D78, Load:7.84kN).

5. 결론

교량부속요소의 수명주기비용(LCC) 경감을 목적으로 교량 관리로에 대한 섬유강화플라스틱(CFRP) 재질의 적용 가능성에 대한 검토결과를 다음과 같이 요약한다.

- (1) 교량 유지보수관리에 사용되는 CFRP Pipe의 LCC 산정에 있어서 CFRP 제품 관리로의 기본적인 구조 및 환경조건을 고려한 비용을 산정할 필요가 있다.
- (2) 외력을 받는 CFRP Pipe의 거동에 관한 해석결과 최대 압축응력 발생은 파이프의 상하단부에 작용하며, Pipe의 중앙단면에는 인장응력이 발생한다.
- (3) Rib CFRP Pipe는 리브보강에 의한 유효단면적 증가로 CFRP Pipe보다 약 35% 정도 응력이 감소되며, 리브에서 응력감소가 현저하게 나타났다.
- (4) CFRP Pipe의 환경이 커지면 파괴시 하중작

용점과 지지점에서의 접합면이 넓어짐에 따라서 응력이 분산되는 효과가 나타났다.

참 고 문 헌

1. 이정윤, 황현복, 김지현, *Journal of the Korea Concrete Institute* **17, 6**, 983, (2005)
2. 한택희 외3인, *한국방재학회 논문집*, **4, 2**, 35, (2004)
3. Isaac M. Daniel, Ori Ishai , “Engineering mechanics of composite materials”, Oxford University Press, (1994)
4. 윤순중, 가넷코팅한 FRP Rod와 고성능 폴리머 모르타르를 이용한 철근콘크리트 구조물용 보강공법의 성능 및 보강효과에 관한 연구, 연구보고서, 홍익대학교 부설 과학기술연구소, (주)리폼시스템, (2004)
5. J.N. Reddy , “Mechanics of Laminated Composite Plates”, CRC Press, (1997)
6. B. Benmokrane, O. Chaallal and R. Masmoudi, *Construction and Building Materials*, **9, 6**, 353, (1995)
7. 심종성, 오홍섭, 유재명, *콘크리트학회논문집*, **12, 5**, 35, (2000)

(접수:2009.12.15, 수정:2010.01.07, 게재 확정:2010.01.22)