

# FRP 부재를 이용한 단순 사장교 모델의 거동 해석

## An Analysis of Simplified Cable Stayed Bridge with FRP Components

박재균†

안일찬\*

Park, Jaegyun

An, Il-Chan

(논문접수일 : 2007년 3월 15일 ; 심사종료일 : 2007년 6월 13일)

### 요지

건설 분야에서는 신소재인 FRP(fiber reinforced polymer) 복합재료는 그 경량성과 고강도로 점차 그 사용영역이 넓어지고 있다. 본 연구에서는 이러한 FRP 소재의 성능을 평가하기 위하여 제2 진도대교를 원형(prototype)으로 하는 3차원 선형 모델링을 하였고 케이블 및 거더에 복합소재를 적용하여 해석하였다. 해석 결과는 Steel 케이블 및 보강형을 사용한 경우와 비교를 통하여 분석하였고 정적해석 및 모드해석을 수행하였다. 정적해석에서는 각 부재의 최대 응력 및 중앙 지점의 최대 처짐을 비교하였다. 사하중 감소 때문에 복합소재를 사용한 경우 상판의 처짐이 감소하는 것을 확인하였으며, 케이블의 단면을 감소시켜 해석함으로써 그 결과를 다시 보였다. 단면 감소, 모드해석에서는 진동수 비를 통해 Flutter의 발생 풍속을 비교하였다.

**핵심용어** : 사장교, GFRP 거더, CFRP 케이블, 삼차원 단순해석, 정적 선형 해석

### Abstract

As an emerging materials in construction fields, FRP(fiber reinforced polymer) has been used in many area of civil engineering for its light weight and high strength. In this study we chose the 2nd Jindo-Bridge as a prototype, and evaluate effect of replacing steel components to FRP components through simplified 3D linear analysis. Static and modal analysis are done and the analysis results are compared with steel case analysis. From the static analysis results, the maximum stress of each component and maximum displacement of middle span are compared. Due to the reduction of deadload, the FRP structure causes less deflection than the original steel structure, and from the reduced section (cable) analysis we confirmed the previous result. The occurrence wind velocity of flutter is compared by the frequency ratio.

**Keywords** : Cable-stayed bridge, GFRP Girder, CFRP cable, simplified 3D analysis, linear static analysis

## 1. 서론

FRP(Fiber Reinforced Polymer) 복합재료는 건설 분야에서는 상대적으로 신소재이나 항공, 우주 산업 등에서는 그 경량성과 높은 강도 때문에 이미 매우 중요한 재료로 쓰이고 있다. 건설 분야에서의 연구가 진전됨에 따라 해외에서는 이미 여러 가지의 FRP 상용 바닥판이 개발되어 시공 실적을 갖고 있으며, 바닥판 뿐만 아니라 케이블, 주탑 등에도 복합 재료를 사용하는 실험적인 교량 계획이 진행되고 있다(Keller, 2001; 2003). 국내에서도 최근 바닥판(이성우, 2004; 2005)을 중심으로 활발한 연구가 진행되고 있다. 그러나 복

합재료에 대한 설계 지침 및 보수 보강 지침 등에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이고 이미 개발된 바닥판 외에 다른 부재에 적용한 연구는 많이 부족하다.

본 연구에서는 기존에 수행된 연구, 상용 바닥판 자료 및 FRP 복합재료를 사용한 교량의 국내외 자료를 기초로 하여, 케이블을 사용하는 교량인 사장교에 FRP 복합소재를 적용하여 그에 대한 분석을 실시하였다. 사장교의 원형(Prototype)은 최근에 건설된 제2 진도대교(조학연 등, 2004)를 바탕으로 하였다. 제2 진도대교는 전남 진도군 군내면과 해남군 문내면을 연결하는 총연장 484m(70+344+70)의 사장교이며, 기존 진도대교의 바로 옆에 건설되었다. 여기에 사용

† 책임저자, 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 조교수

Tel: 031-8005-3473 ; Fax: 031-8005-3496

E-mail: jpark@dankook.ac.kr

\* DM 엔지니어링 연구원

· 이 논문에 대한 토론을 2007년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2008년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

된 강 박스 거더 및 강 케이블을 FRP 복합소재로 대체할 경우의 3D 단순해석을 통하여 FRP 복합소재의 적용성을 알아 보았다. 여기서 단순해석은 물성 및 기하 선형 모델을 사용하였고 초기 장력, 처짐이나 시공 중 하중변화, 초기 평형상태 등을 고려하지 않았음을 의미한다. 또한 일반적으로 FRP 부재는 파괴 강도 근처까지 선형 거동을 하므로 사용 하중 상태에서 선형 거동을 가정하였다. 구조 해석에는 상용 해석 프로그램인 SAP2000(남문희 등, 2001)을 사용하였다.

## 2. 교량 모델링

이 절에서는 교량 각 요소의 모델링과 하중에 대하여 묘사한다.

### 2.1 교량 요소 모델링

제2 진도 대교의 실제 설계 자료를 바탕으로 전체 교량을 3D로 모델링 하였으며, 각 요소의 중요도에 따라 그 요소의 전체 길이, 단면적, 물성치 등을 단순화하여 적용하였다. 크

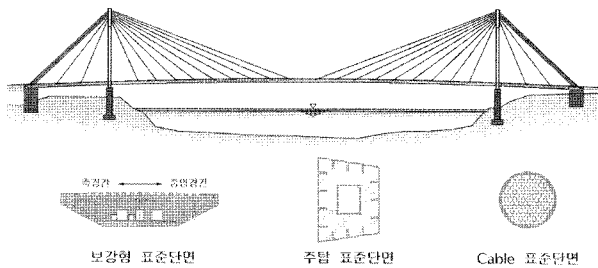


그림 1 제2 진도대교 설계 자료

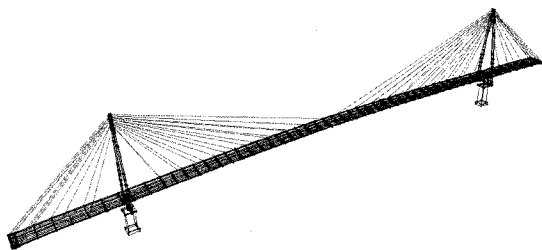


그림 2 단순 3-D 모델

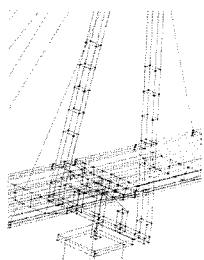


그림 3 주탑 모델

게 요소는 주탑, 케이블, 박스거더의 세 개로 나누었다. 이번 연구에서는 거더의 FRP 대체에 의한 효과가 큰 영향을 미치므로 세 개의 요소 중 거더를 가장 정밀하게 묘사하였다.

먼저 주탑의 경우 육면체 8절점 고체(Solid) 모델을 이용하였다. 제2 진도대교 설계 데이터를 그대로 이용하여 그 원 설계 단면과 단면이차모멘트를 같게 해주어 케이블에 의한 휨과 그에 따른 상판의 거동을 묘사할 수 있도록 하였다. 그리고 케이블의 경우 제2 진도대교에서는 물성은 같고 굵기가 다른 네 종류의 케이블을 사용하였기 때문에 해석 시에도 같은 원형단면을 가지는 케이블을 적용하였다. 주 케이블의 사양은 표 1과 같다.

박스거더는 거더의 일부 또는 전체를 FRP로 대체할 때의 효과를 봐야 하므로 여섯 개의 단면을 나누어 각각 얇은 판 모양을 갖는 쉘로 모델링하였다. 실제 거더에서는 u-rib를 포함하는 두꺼운 모양의 거더를 볼 수 있으나, 이번 연구에서는 단면이차모멘트와 단면 면적을 실제 설계에 맞춰줌으로써 1.2cm~1.8cm의 두께를 갖는 모델이 되었다.

강재 거더를 FRP 거더로 대체하는 방법이 있어서는 전체 단면을 FRP로 대체하는 경우와 윗면 바닥판 만을 대체하는 경우의 두 가지를 조사하였다. 이를 그림 5와 표 2에 나타냈다. 기본적으로 재설계 없이 이런 재료의 대체를 시도할 수 있는 이유는 다음 절(표 3)에서 나오는 바와 같이 GFRP의 인

표 1 NPWS(parallel wire strand) 강 케이블의 사양

소선의 직경×갯수	전체 직경	탄성계수	인장강도	파괴하중
7mm×151	108mm	2.0×105MPa	1,800MPa	10290kN

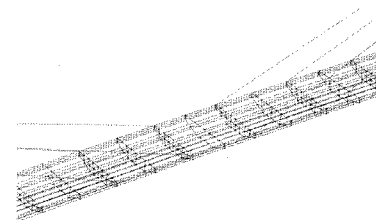


그림 4 거더 모델

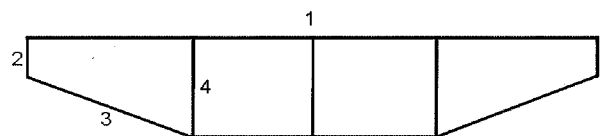


그림 5 거더모델의 부재 분류

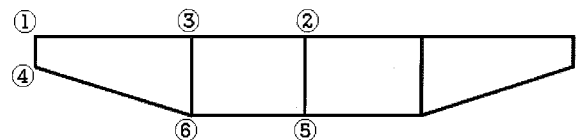


그림 6 거더모델의 노드 분류

표 2 교량 거더의 분류

거더 분류	1(그림5)	2	3	4	Diaphragm	1m당 자중
1. Steel Girder	Steel	Steel	Steel	Steel	Steel	36.874kN
2. FRP Deck	FRP	Steel	Steel	Steel	Steel	27.191kN
3. FRP Girder	FRP	FRP	FRP	FRP	FRP	10.204kN

표 3 E-Glass FRP 물성(거더)

	탄성계수(GPa)	전단계수(GPa)	강도(MPa)	전단강도(MPa)
길이 방향	30	3.5	300	27
수직 방향	7		55	
강재	200	80	400	400

장강도가 강재와 비슷하고 자중이 강재의 25%이기 때문이다.

여기서 1,2,3은 부재 번호, ①, ②, ③은 노드(node) 번호를 나타낸다. 노드의 분류는 상부 플랜지와 하부 플랜지가 같이 거동하는지를 확인하기 위해 여섯 개의 노드를 결정하였고, 해석 후 처짐을 여섯 개의 노드에서 확인하였다.

## 2.2 FRP의 물성

FRP는 이방성을 갖는 재료로써 섬유 방향의 길이 방향을 따라서는 높은 강도를 갖지만 길이에 수직인 방향으로 길기 방향에 비해 약한 특성이 있다. 이러한 특성을 고려하고 복합소재의 물리적 성질(문창권, 2001; Laszlo P. Kollar et al, 2003) 및 현황(Zhao, Lei et al, 2000; Bakis, C.E. et al, 2003; Roberto A. Lopez-Anido, et al, 2000)을 참고하여 그 물성을 정하였다. 건설재료로 많이 사용하는 Eglass/polyester를 기준으로 하여 이번 연구에서 사용한 GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer)의 물성을 표 3에 제시하였다. 일반적으로 FRP 재료는 강도 근처까지 선형 거동을 하기때문에 본 연구에서는 안전성을 강도대비 사용하중의 값으로 고려하였다.

케이블의 경우에는 GFRP 대신에 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer)를 사용한다. GFRP의 경우 강재 케이블에 탄성계수가 너무 낮으므로 인해 같은 하중에도 처짐이 과도하게 발생하게 된다. 따라서 케이블 부재처럼 인장력만을 받는 부재로는 사용하기 부적절하다. 표 4의 CFRP 물성은 Tokyo Rope Mfg. Co(1993)의 자료 *Technical Data on CFCC*를 참조하였다.

## 2.3 하중 조건

거더에 가해지는 하중은 케이블, 주탑, 거더의 자중과 함께 도로교 설계기준(2005)에서 정의된 차선 하중(DL-24)

표 4 Carbon FRP 물성(케이블)

	탄성계수 (GPa)	강도 (MPa)	Poisson's Ratio	밀도 (kg/m <sup>3</sup> )
길이 방향	160	1725	0.26	1.6×10 <sup>3</sup>
수직 방향	10	40	0.02	

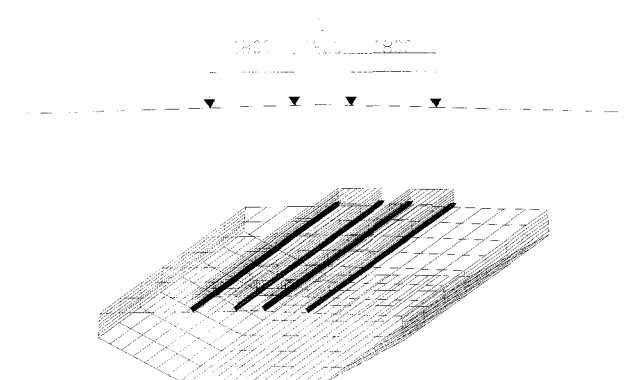


그림 7 차량 하중

을 가하였다. 차선이 여러 개인 도로의 경우 이동 하중에 Scale Factor를 곱하여 사용한다. 4차선 도로가 1차선 도로에 비해 큰 이동 하중을 받긴 하지만 실제적으로 네 배의 하중을 받는 것은 아니므로 이러한 영향을 고려하기 위해 사용한다. 2차선 도로에서는 Scale Factor 1을 사용하므로 여기에서도 1을 사용하였다.

전체 구조물의 지지조건은 보강형의 양 끝단에서 힌지 및 로올러로 지지되었으며 주탑부의 보강형 및 주탑 하단은 고정단으로 지지되었다. 주탑의 케이블 지지부분은 강재로 거동하도록 하였다.

## 3. 정적 해석 및 설계 조정

하중에 의해 발생하는 내력과 처짐, 그 결과를 이용한 케이블 단면적 조정을 기술한다.

### 3.1 내력

케이블의 장력과 최대수직응력(주탑)의 비교에 있어서는 거더에 FRP 부재를 사용한 경우 자중의 감소로 더 작은 값을 얻었고, 최대 모멘트와 최대 전단력은 세 가지 경우 모두 비슷한 값을 얻었다(표 5). 최대 케이블 장력을 갖는 케이블은 주 경간에서 두 번째로 먼 지점에 연결된 케이블이었고, 최대 모멘트와 최대 전단력은 모두 주경간의 중앙 부분에서 발생하였다. 최대 모멘트가 거더의 종류에 관계없이 거의 일정하므로 FRP 거더가 휨에 의해 받는 법선응력도 Steel 거더와 유사함을 알 수 있다. 따라서 강재 보다 항복 응력이

표 5 해석 결과(내력)

거더 분류	최대 케이블 장력(kN)	최대 수직력(kN)	최대 모멘트(kN-m)	최대 전단력(kN)
1. Steel Girder	1,255.61	10,924.45	449.65	465.19
2. FRP Deck	1,176.79	10,583.32	451.00	465.14
3. FRP Girder	1,028.52	9,567.60	451.76	465.10

표 6 해석 결과(DL-24 하중 시 처짐)

거더 분류	처짐(m)					
	①번 노드	②번 노드	③번 노드	④번 노드	⑤번 노드	⑥번 노드
1. Steel Girder	0.5255	0.5249	0.5251	0.5256	0.5249	0.5250
2. FRP Deck	0.4919	0.4915	0.4914	0.4919	0.4912	0.4913
3. FRP Girder	0.4572	0.4542	0.4548	0.4570	0.4529	0.4534

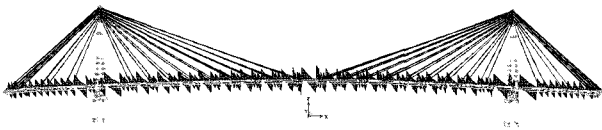


그림 8 shear force diagram

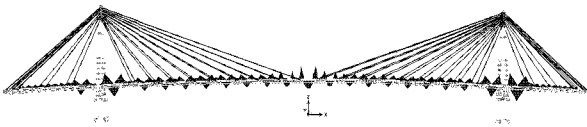


그림 9 moment diagram

월등히 큰 FRP 거더는 안전하다고 할 수 있다.

### 3.2 처짐에 따른 강 케이블의 단면 조정

도로교 설계기준(2005)에서 제시된 강 사장교의 허용 처짐 값은 다음과 같다:

$$\frac{L}{400} = \frac{344}{400} = 0.86m \quad (1)$$

계산된 처짐 값을 비교해보면, ①, ②, ③번 노드 모두 상판의 위치에 따라 비슷한 값을 얻음으로써 상판이 일체로 거동함을 확인할 수 있다(표 6). 또한 이들 처짐 값은 도로교 설계기준에 제시된 허용 처짐 값보다 작다. 본 연구에서는 초기 처짐을 고려하지 않았으며 실제 설계에서는 초기 처짐을 고려하므로 사용 중 처짐이 위의 계산 값 보다 작아진다.

하중만을 봤을 경우 FRP를 사용하면 자중이 줄어들어서 처짐이 작아져야 하고, FRP의 탄성계수를 고려하면 처짐이 늘어나야 한다. 해석 결과 탄성계수 보다는 자중감소에 의한 영향이 더 커서 거더 재료로 FRP를 사용하면 처짐이 감소하는 것으로 나타났다(표 6).

상판의 단면을 Steel에서 FRP소재로 대체할 경우 자중의 감소가 일어나므로 전체 사용하중이 감소하며 따라서 케이블의 단면을 축소할 수 있다. 그러나 이 경우 구조해석을 통하여 구조적 안정성과 사용성을 검토해야 한다. 따라서 자중과 처짐에 대한 위의 결과를 토대로 케이블의 단면을 수정하였고, 또한 자중 값은 위의 표 2에서 제시하였다. 케이블 단면 수정 시의 케이블 단면적은 하중(고정하중+이동하중)에 비례한다고 생각하였다.

표 7 Steel Girder의 경우 처짐 값

	고정하중	DL하중	DL+ 고정하중	고정하중에 의한 처짐/고정하중	이동하중에 의한 처짐/이동하중
중앙경간의 처짐(m)	0.3162	0.2087	0.5249	0.3162/36.874 = 0.0086	0.2087/27 = 0.0077

위의 표에서 고정하중과 이동하중의 비는 3:2정도이며, 고정하중이 약 8.7의 비율로 단위하중 당 처짐을 더 많이 유발시킴을 알 수 있다. 여기에서 이동하중은 2차선 도로이므로 DL하중(13.5kN/m)×2의 값을 이용하였다. 따라서 상판의 FRP 사용에 따른 이동하중과 고정하중의 총합의 비를 이용하여 상판을 FRP로 바꿈으로써 자중의 감소가 생기는 경우의 케이블 단면을 조정하였다.

표 8에 나타난 하중의 감소를 케이블의 단면에 반영하여, 원래의 Steel Girder 설계와 같은 크기의 처짐이 발생하도록 하는 강 케이블 단면의 지름을 계산하였다. 그림 10과 11에서 가로축은 새 케이블의 단면적 비율이고 세로축은 그 결과로 발생하는 처짐 양이다. 이 해석에는 케이블의 자중이 고려되기 때문에 비선형 해석이 되며, 따라서 반복 해석이 필요하다. 케이블 단면의 변화에 따른 중앙 경간의 처짐의

표 8 각 경우의 하중 계산

	산출 근거	하중(kN/m)	1번 경우에 대한 비율
1. Steel Girder	36.874+13.5×2	63.874	-
2. FRP Deck	27.191+13.5×2	54.191	0.8484
3. FRP Girder	10.204+13.5×2	37.204	0.5825

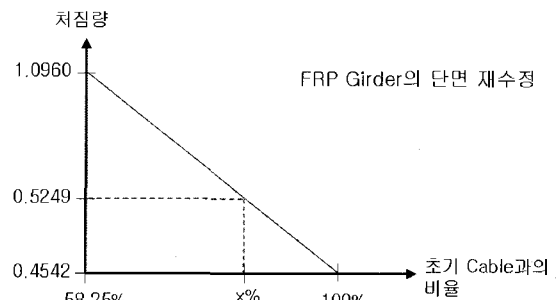


그림 10 FRP Girder의 cable 단면 재수정

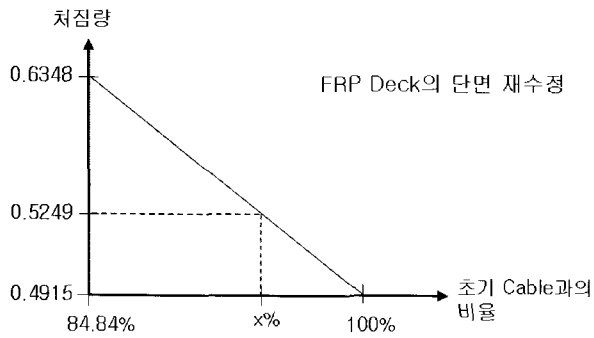


그림 11 FRP Deck의 cable 단면 재수정

표 9 반복법에 의한 케이블 단면 조정

반복 회수(회)	FRP Deck		FRP Girder	
	단면 비율(%)	처짐 값	단면비율(%)	처짐 값
0(초기)	84.84	0.6348	58.25	1.0960
1	96.47	0.5199	95.40	0.4894
2	95.84	0.5252	90.76	0.5299
3	-	-	91.38	0.5249

표 10 케이블 단면 수정 전후 해석 결과 비교(응력)

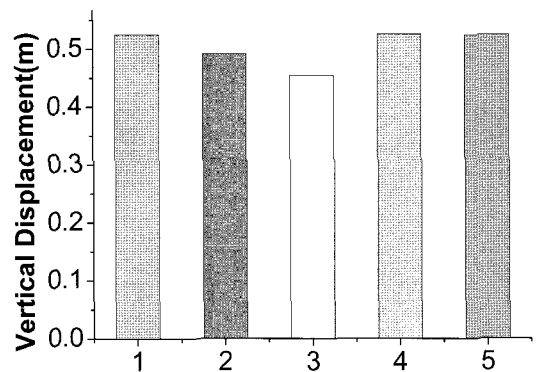
거더 분류	최대 케이블 장력(kN)	최대 수직력(kN)	최대 모멘트(kN-m)	최대 전단력(kN)
1. Steel Girder	1,255.61	10,924.45	449.65	465.19
2. FRP Deck	1,176.79	10,583.32	451.00	465.14
3. FRP Girder	1,028.52	9,567.60	451.76	465.10
4. FRP Deck (단면 수정 후)	1,081.77	10,104.09	450.79	465.42
5. FRP Girder (단면 수정 후)	938.40	9154.08	451.62	465.64

변화량은 선형 관계가 아니나 편의상 그림 8, 그림 9와 같이 나타냈다.

위와 같이 반복법에 의하여 Steel Girder의 경우와 같은 처짐이 발생하도록 단면을 조정하였다. 반복계산은 소수 둘째자리까지의 값이 같을 때(cm단위)까지 실행하였다. 이와 같이 Steel Girder의 경우와 같은 처짐이 발생하도록 케이블 단면을 설계하였을 때 FRP Deck의 경우 95.84%, FRP Girder의 경우 91.38%크기의 케이블 단면을 가지게 된다. 이는 Steel Girder의 경우에 비해 약 4%와 9%의 케이블 단면 감소를 가져오며, 그 결과 케이블에 사용하는 강재의 양을 줄일 수 있다. 표 10과 표 11, 그림 12-16에 전체 결과가 정리되어 있다. 대부분의 값에서 큰 변동이 없으며 자중에 감소할 때 케이블 장력과 최대 수직력이 감소하는 경향을 보인다.

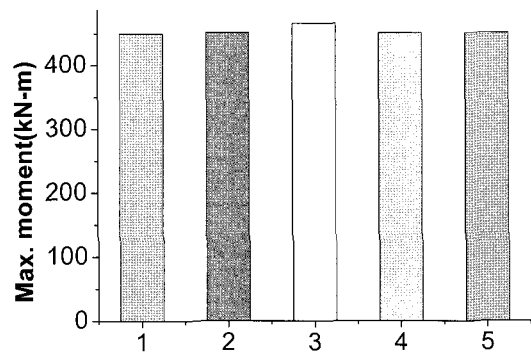
표 11 케이블 단면 수정 전후 해석 결과 비교(처짐)

거더 분류 \ 처짐(m)	①번 노드	②번 노드	③번 노드	④번 노드	⑤번 노드	⑥번 노드
1. Steel Girder	0.5255	0.5249	0.5251	0.5256	0.5249	0.5250
2. FRP Deck	0.4919	0.4915	0.4914	0.4919	0.4919	0.4913
3. FRP Girder	0.4572	0.4542	0.4548	0.4570	0.4529	0.4534
4. FRP Deck (단면 수정 후)	0.5256	0.5252	0.5252	0.5257	0.5249	0.5250
5. FRP Girder (단면 수정 후)	0.5273	0.5242	0.5248	0.5271	0.5229	0.5235



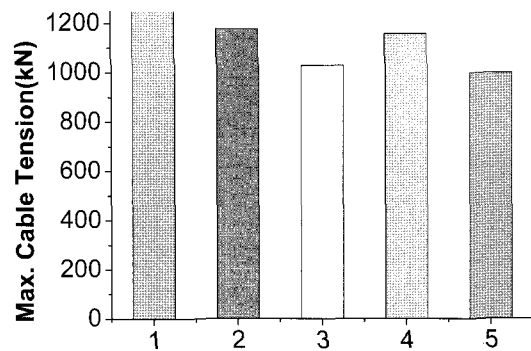
Girder Classification

그림 12 거더의 분류에 따른 최대 처짐



Girder Classification

그림 13 거더의 분류에 따른 최대 모멘트



Girder Classification

그림 14 거더의 분류에 따른 최대 케이블 장력

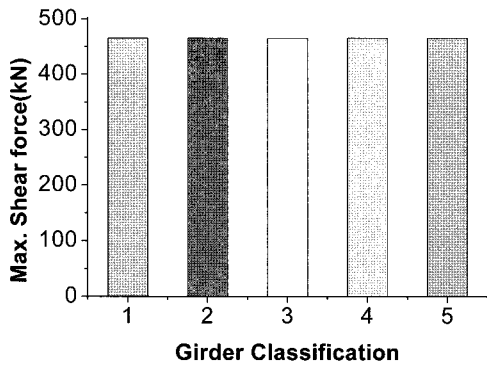


그림 15 거더의 분류에 따른 최대 전단력

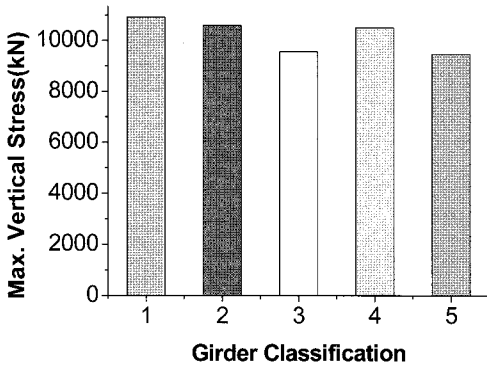


그림 16 거더의 분류에 따른 주탑 최대 수직력

표 12 CFRP 케이블 사용 해석 결과(응력)

거더 분류	최대 케이블 장력 (kN)	최대 수직력 (kN)	최대 모멘트 (kN-m)	최대 전단력 (kN)
1. Steel Girder	1,169.30	10,396.62	449.46	465.42
2. FRP Deck	1,081.77	10,104.09	450.79	465.42
3. FRP Girder	938.40	9,154.08	451.62	465.64
4. FRP Deck (Cable 단면수정)	1,066.12	10,050.03	450.71	465.56
5. FRP Girder (Cable 단면수정)	921.45	9,107.43	451.47	465.44

### 3.3 CFRP 케이블의 적용

탄소섬유강화폴리머(CFRP)는 GFRP에 비하여 월등히 높은 탄성계수와 인장강도(표 3, 표 4)를 가지므로 강재 케이블을 대체할 수 있는 좋은 재료이다. 표 1과 표 4를 비교하면 길이방향의 하중에 대하여 강재 케이블과 비슷한 성능을 보임을 알 수 있다. 따라서 CFRP를 이용하여 표 1의 사양으로 케이블을 제작하면 성능의 저하없이 케이블 하중의 80%를 줄일 수 있다. 표 15와 표 16에서 1번은 원래의 강재 거더에 강재 케이블과 같은 설계단면을 가지는 CFRP 케이블을 사용한 경우이다. 2번과 3번은 각각 거더의 일부 또는 전체를 GFRP로 교체하고 CFRP 케이블을 사용한 결과이다. 4번과 5번은 1번과 같은 정도의 처짐이 발생하도록

표 13 CFRP 케이블 사용 해석 결과(처짐)

거더 분류 \ 처짐(m)	①번 노드	②번 노드	③번 노드	④번 노드	⑤번 노드	⑥번 노드
1. Steel Girder	0.6025	0.6018	0.6020	0.6025	0.6018	0.6019
2. FRP Deck	0.5660	0.5656	0.5656	0.5661	0.5653	0.5654
3. FRP Girder	0.5182	0.5153	0.5158	0.5180	0.5141	0.5147
4. FRP Deck (단면수정)	0.6063	0.6058	0.6058	0.6064	0.6056	0.6057
5. FRP Girder (단면수정)	0.6056	0.6025	0.6031	0.6054	0.6013	0.6020

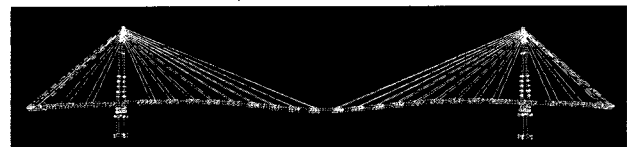
CFRP 케이블 단면을 수정한 결과이다. 케이블의 단면이 약간 줄어들면서 사하중 감소로 장력도 줄어드는(표 12) 결과를 보인다. 표 13의 결과로부터 모든 곳의 변위가 허용값(0.86m) 보다 작음을 알 수 있다.

### 4. 모드해석(modal analysis)

Steel Girder의 경우



mode #1 period: 1.72978 좌우진동



mode #2 period: 1.00211 상하진동



mode #3 period: 0.64478 상하진동



mode #4 period: 0.62430 좌우진동

그림 17 Steel Girder의 경우 모드 해석

각 경우에 대하여 간접적으로 모드해석을 통해 특성을 비교하였다. 각 경우에 대하여 4차 모드까지를 계산하였다. 사장교의 진동모드는 4가지로 분류할 수 있는데, 상부구조의 수직 및 비틀림 모드, 종방향 모드, 횡방향 모드이다. 이중 횡방향 모드는 비틀림모드와 같이 나타나고, 종방향 모드는

표 14 모드해석 결과(모드 별 period)

	mode#1	mode#2	mode#3	mode#4
Steel Girder	1.72978(1)	1.00211(2)	0.64478(2)	0.62430(1)
FRP Deck	1.81257(1)	0.92160(2)	0.65185(1)	0.63778(2)
FRP Girder	2.73599(1)	0.93027(1)	0.71335(2)	0.60855(2)
단면 수정 FRP Deck	1.80618(1)	0.95011(2)	0.65341(2)	0.75290(1)
단면 수정 FRP Girder	2.69473(1)	0.92886(1)	0.75474(2)	0.62626(2)
CFRP Cable 사용 Steel Girder	1.67937(1)	1.05660(2)	0.67232(2)	0.61321(1)
CFRP Cable 사용 FRP Deck	1.74295(1)	0.96580(2)	0.66470(2)	0.63674(1)
CFRP Cable 사용 FRP Girder	2.49316(1)	0.88259(1)	0.70233(2)	0.59191(2)
CFRP Cable 사용 단면수정 FRP Deck	1.74208(1)	0.99854(2)	0.68230(2)	0.63713(1)
CFRP Cable 사용 단면수정 FRP Girder	2.48924(1)	0.88872(1)	0.75609(2)	0.61923(2)

\*(1)은 좌우진동 모드, (2)는 상하진동 모드를 나타낸다.

표 15 각 경우의 진동수 비

cable	상판	전체 steel	일부 FRP (FRP Deck)	전체 FRP (FRP Girder)	단면 재수정 일부 FRP	단면 재수정 전체 FRP
Steel cable		1.72614(1)	1.96676(2)	3.83541(3)	1.92144(4)	3.66681(5)
CFRP cable		1.58941(6)	1.80467(7)	3.54984(8)	1.76025(9)	3.37478(10)

수직방향 모드와 연계되어 발생한다. 다른 경우에 대하여서도 같은 방법으로 모드 해석을 수행하였고 그 결과를 표 14에 정리하였다.

지진의 경우 그 주기가 짧으므로 4차 모드까지의 주기 특성을 보면 지진 하중에 대한 위험보다는 풍하중에 대한 위험이 더 클 것이라고 예상된다. Steel Girder의 경우 8차 모드 이상이 되어야 주기가 0.5초 이하로 떨어지는 경향을 보였다. 따라서 지진에 의하여 공진이 일어날 가능성은 매우 적다.

바람의 작용에 의해 구조물에 나타나는 거동은 강제진동과 자기진동으로 분류된다. 강제 진동이란 바람의 시간적 변화에 의한 하중에 의해 생기는 진동이고, 자기진동이란 그 시간적 변화(주기)에 의한 진동이 구조물 자체의 주기 특성에 따라 구조물의 자체 진동으로 나타나는 현상이다. 이러한 자기진동의 대표적인 현상으로는 flutter와 galloping 등이 있는데 사장교에서는 특히 flutter가 발생하기 쉽다(박연수 등, 2005).

Flutter 발생의 한계풍속은 이론적으로는 계산하기 어렵다. 풍동실험의 결과를 보면 한계풍속은 여러 변수의 영향을 받지만 고전적 flutter의 발생풍속은 연직휨모드와 비틀림모드의 고유진동수비에 의해 크게 좌우된다. 고유진동수비가 약 1.1에서 고전적 flutter 발생풍속이 최저가 되며, 이보다 증가하거나 감소함에 따라 발생풍속이 증가하는 특성을 갖는다. 따라서, 진동수비가 1.8~2.0이상이 되도록 주형의 단면을 설계한다(황학주, 1994). 위에서 구한 진동수를 고려하

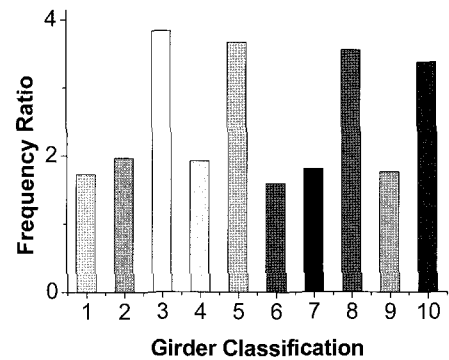


그림 18 진동수 비

여 각각의 경우 고유진동수 비를 구해보았다.

비틀림모드와 연직휨모드의 진동수비를 구한 결과 강제 거더의 경우 가장 작은 값이 나왔고, 그 값은 1.8~2.0 이상이어야 한다는 조건을 만족하지 못하였다. 일부 FRP의 경우에는 Steel의 경우보다 조금 큰 값을 얻었는데 이는 대체로 위의 조건을 만족하였으며, 전체 FRP의 경우는(표 15와 그림 18에서 case 3, 5, 8, 10) 진동수 비가 3이상인 값을 얻음으로써 flutter 발생풍속이 다른 경우에 비해 클 것으로 예상된다. 다만 이 결과는 여러 가지 조건 중 한 가지를 본 것으로 상대적으로 참고해야 한다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 제2 진도대교를 크게 거더, 주탑, 케이블로 나누고 각 부분을 단순 모델링하여 해석하였다. 거더의 경우

세 가지 경우로 나누어, 전체 강(steel)인 경우와 일부만 GFRP로 대체한 경우, 그리고 전체 거더를 GFRP로 대체한 경우의 처짐과 내력값들을 비교하였다. 부재를 FRP로 대체한 경우 자중의 감소를 고려하여 케이블의 단면의 수정을 시도하였으며, 강재 케이블을 CFRP 케이블로 대체한 경우도 분석하였다. 이상의 연구내용을 정리하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서 적용된 사양의 사장교에 대하여 FRP를 사용할 경우 자중 감소 효과로 인해 주탑이 받아주는 전체 사용하중과 처짐이 감소하며, 전체적인 내력에는 큰 변화가 없었다. GFRP의 경우 인장강도(strength)가 강재(steel)와 유사하고, 해석 결과 최대 모멘트와 전단력이 크게 변하지 않았으므로 원래의 강재를 이용한 설계 단면을 거의 고치지 않고 적용하였다. 또한 전체 하중이 경감됨에 따라 기둥이나 케이블의 설계하중이 줄어들게 되었다. 주탑의 경우도 전체 설계하중의 감소로 인한 단면감소를 고려한 재설계가 가능하다.
2. 강성과 강도가 모두 우수한 CFRP 케이블을 원래의 강재 케이블과 같은 단면 설계로 제작할 경우 케이블 자중 감소로 인한 전체 사용하중의 감소를 기대할 수 있으며, 강재 케이블의 사용 중 처짐 량에 맞출 경우, 원래의 설계보다 4~9%의 케이블 단면 감소가 가능하다.
3. 모드해석에 의해서 고유진동수 비를 구해본 결과 FRP를 사용한 경우 고유진동수비가 크게 나옴으로써 flutter 발생 최대풍속이 커지게 되어 그 발생 가능성이 적어지게 된다. 강재 거더의 경우 고유진동수비가 작게 나와 flutter에 위험할 수 있지만, 실제 제2 진도대교에서는 유선형의 거더를 사용하고 양 끝단에 날개를 달아 공기역학적 성능을 향상시키는 방법으로 그러한 문제점을 해결하였다.
4. 사장교의 경우 설계 시 초기 긴장력을 도입하여 사장교가 완공될 경우 고정하중과 이 케이블의 긴장력이 평형을 이루도록 한다. 이번 연구에서는 이러한 과정을 생략하고 단순화하여 FRP부재를 사용할 경우의 성능을 상대적으로 평가하였다. 또한 본 연구에서는 고정하중과 이동하중만을 사용하였으나 제2 진도대교 설계 시에는 이외의 하중 또한 고려한 차이가 있다.

### 감사의 글

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-003-D00380). 본 연구의 일부는 서울대학교 교량설계핵심기술

연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

**남문희, 이관희** (2001) (엔지니어를 위한)SAP2000 구조해석, 서울.

**문창권** (2001) 고분자 복합재료, 시그마프레스, 서울.

**박연수 등** (2005) 사장교 계획과 해석, 구미서관, 서울.

**이성우** (2004) 복합소재의 건설분야 이용 현황과 전망, 건설기술교육원 교육자료.

**이성우** (2005) 필라멘트 와인딩과 인발성형 제작 복합소재 교량 바닥판의 휨 특성 비교분석, 한국전산구조공학회 논문집, 18(2), pp.191~200.

**한국도로교통협회** (2005) 도로교설계기준.

**조학연, 김태섭, 박해일, 차영일** (2004) 비대칭성 사장교인 제2진도대교 가설공사, 한국강구조공학회지, 16(3), pp. 91~102.

**황학주** (1994) 최신 교량공학 제2판, 동명사, 서울, p.520

**Bakis, C.E., Bank, L.C., Brown, V.L., Cosenza, E., Davalos, J.F., Lesko, J.J., Machida, A., Rizkalla, S.H., Triantafillou, T.C.** (2003) *Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction*, American Society of Civil Engineers. Pennsylvania State Univ, US. pp.41~78.

**Keller, Thomas** (2001) *Recent all-composite and hybrid fibre-reinforced polymer bridges and buildings*, *Prog. Struct. Engng Mater.*, 3, pp.132~140.

**Keller, Thomas** (2003) *Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Zurich, Switzerland.

**Kollar, Laszlo P. George, Springer, S.** (2003) *Mechanics of Composite Structures*, Cambridge

**Roberto A. Lopez-Anido, Vistasp M. Karbhari** (2000) *Fiber Reinforced Composites in Civil Infrastructure*, ASCE.

**Tokyo Rope Mfg. Co** (1993) *Technical Data on CFCC*.

**Zhao, Lei. Burgueno, Rigoberto., La Rovere, Henriette., Seible, Frieder., Karbhari, Vistasp** (2000) *Preliminary Evaluation of the Hybrid Tube Bridge System*, Report No. TR-2000/4, University of California, San Diego, US.