

# CFRP 케이블의 거동에 대한 연구

## A Study on the Behavior of CFRP Cable

박재균\* · 홍기중\*\*  
Park, Jaegyun · Hong, Kee-Jeung

### ABSTRACT

The high tensile strength of steel cable enabled the development of long span cable bridges, which implies that a better tensile element can break the limitation of current bridge design. A carbon fiber has at least as high strength as steel cable and is very light material relatively. Due to its superior characteristics, commercial carbon fiber composite cables are already used in place of steel prestress tendons already. This study proposes a parallel carbon fiber(CF) cable for cable bridges based on NPWS and CFCC cables. Static and dynamic nonlinear analyses reveal that the CF cable develops much less stress than the NPWS cable does during cyclic loads.

**Keywords:** CFRP cable, static and dynamic analysis, nonlinear analyses, cable bridge

### 1. 서론

구조물의 역사를 살펴보면, 압축강도로 구조물을 지지하는 석재 등의 재료에서 인장강도가 큰 강재로의 이동은 구조물의 형식에 큰 변화를 가져왔다. 특히, 인장강도를 가장 효율적으로 이용하는 강재 케이블은 현수교와 사장교의 건설을 가능하게 하였다. 이런 교량 형식은 일반적으로 경간장이 길기 때문에 장대교량에 적합하며, 현재 이러한 특성을 더욱 발전시켜 케이블 교량의 경간장을 극대화하는 노력이 여러 곳에서 이루어지고 있다. 일반적으로 케이블 교량의 경간을 늘리기 위한 중요한 요소 중 하나는 고강도인 동시에 경량인 케이블이며, 이러한 요구조건을 만족시키기 위하여 HPS(High Performance Steel)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Miki *et al.*, 2002 등). 한편, 고강도이면서 강재보다 더 가벼운 탄소섬유복합재료(Carbon Fiber Reinforced Polymer) 케이블에 대한 연구도 점차 증가하고 있으며, 이미 상용 제품이 일본에서 출시된 상태이다(Tokyo Rope, 1993). 그러나 이 제품은 프리스트레스 텐던 용으로 개발되었으며 일반 도로교에 케이블로 이용된 예는 드물다.

### 2. 케이블 모델

#### 2.1 케이블의 사양

본 연구에서는 사장교인 제2 진도대교에 사용된 NPWS 강 케이블의 사양을 고려하고 Tokyo Rope Mfg. 사의 CFCC 케이블 소선을 원형으로 하여 단순 설계를 하였다. 제2진도대교의 NPWS 케이블은

\* 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 조교수 Email: jpark@dankook.ac.kr

\*\* 정회원 · 국민대학교 건설시스템공학부 전임강사 Email: kjhong@kookmin.ac.kr

7mm 강 소선을 소요강도에 적합하도록 다발을 형성하고 인장강도 및 탄성강도를 유지하는 범위 내 (3~4°)로 꼬아서 사용하였다. 받음 하중에 따라 네 가지의 케이블이 사용되었으며, 그 중 가장 굵은 단면에 대한 자세한 사양은 표 1 과 같다:

표 1 NPWS 강 케이블의 사양

소선의 직경 * 갯수	전체 직경	탄성계수	인장강도	파괴하중
7mm × 151	108mm	2.0 × 10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup>	1,800 N/mm <sup>2</sup>	10290 kN

한편, 전형적인 CFCC(Carbon Fiber Composite Cable) 제품의 사양은 표2 와 같다.

표 2 CFCC 케이블의 사양

소선 한개의 직경	다발의 휨강성(EI)	탄성계수	인장강도	단위하중 g/m
5mm	Steel 의 약 1/4	1.37 × 10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup>	2kN/mm <sup>2</sup>	30g/m

강재의 밀도는 CFCC 의 약 5 배 이고 소선 다발로 이루어진 CFCC 케이블의 파괴하중은 강 케이블의 86% 로 이론값인 111% 보다는 작다. 실험 결과는 제작공정에 따라 어느 정도의 차이가 있으므로, 본 연구에서는 CF(Carbon Fiber)의 인장강도 이론값으로 강재의 100% 을 사용하여 설계한다. 다발의 휨 강성이 낮은 이유는 소선끼리의 마찰이 적어서 미끄러지기 때문이다. NPWS 강 케이블과 비교하기 위한 CF 케이블의 사양은 다음과 같다:

표 3 설계 CF 케이블의 사양

소선의 직경 * 갯수	전체 직경	탄성계수	인장강도	파괴하중
7mm × 151	108mm	1.37 × 10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup>	1,800 N/mm <sup>2</sup>	10290 kN

즉, 제안한 케이블은 NPWS 케이블과 외형적으로 같고, 탄성계수가 강재의 68.5%, 단위하중이 강재의 20%에 이르는 평행 케이블이다.

## 2.2 해석 모델

대부분의 케이블은 나선형으로 꼬여 있는데 이는 케이블의 휨 강성을 작게 만들어 드럼에 감아 운반할 때 소성변형이 생기지 않게 하는 역할을 한다. 이러한 케이블은 축 변형에 대한 강성이 높은 반면 휨에 대한 강성이 매우 작은 특징이 있다. 이 특징은 케이블이 하중을 받아 거동할 때 큰 변위와 회전을 갖게 하며 케이블의 거동을 정확히 파악하기 위해서는 이러한 기하비선형을 고려해야만 한다. 기존의 모델 중 Simo and Vu-Quoc(1986a,b)이 개발한 유한요소 모델을 사용하면 기하비선형을 정확히 고려할 수 있다. 다음은 위 문제를 해석하기 위해 단위길이 당 케이블에 적용되는 운동방정식이다:

$$A_p \ddot{\mathbf{u}} = \frac{d\mathbf{n}}{dX_1} + \bar{\mathbf{n}} \quad (1)$$

$$I_p \ddot{\theta} = \frac{dm}{dX_1} + \left(1 + \frac{du_1}{dX_1}\right) m_2 - \frac{du_2}{dX_1} n_1 + \bar{m} \quad (2)$$

여기서  $A_p$  는 단위 길이 당 질량,  $I_p$  는 단위 길이 당 회전 관성 질량이며,  $\mathbf{u} = (u_1 \ u_2)^T$  은 케이블 중심의 변위 벡터,  $\mathbf{n} = (n_1 \ n_2)^T$  은 현재 위치에서 케이블의 단면에 작용하는 내력 벡터,  $\bar{\mathbf{n}}$  는 외부 분포하중,  $m$  은 현재 위치에서의 휨모멘트,  $\bar{m}$  는 외부 분포 모멘트 하중이다.

위에서 언급한 기하비선형과 함께, 케이블 내부의 와이어들의 미끄러짐 때문에 생기는 케이블 휨 거동의 재료비선형도 고려해야만 한다. 케이블에 큰 인장력이 작용하지 않는 경우에는 케이블이 휘기 시작한 후 작은 곡률의 변형이 생길 때에도 이미 대부분의 와이어들이 미끄러지는 현상을 가진다 (Hong *et al.* 2004). 그러므로 케이블에 크지 않은 인장력이 작용할 때는 계산상의 편의를 위해서 케이블의 최소 휨 강성을 사용한 탄성해석을 함으로써 근사 해를 구할 수 있다.

큰 변위와 회전을 갖는 케이블의 동적 탄성해석은 큰 비선형성을 가지며 그에 대해 구해진 해가 알려져 있지 않다. 널리 쓰이고는 있지만 비선형 문제에서 에너지 보존법칙을 위배하는 Newmark 시간 적분법 내지는 그의 변형된 방법은 이러한 동적해석에서 정확한 해를 구할 수 없다. 에너지 보존법칙을 위배하지 않으면서 비선형 문제의 동적 해를 구할 수 있는 Energy-Conserving Algorithm (Simo *et al.* 1995)을 사용함으로써 정확한 해를 구할 수 있다(Hong 2003). 우리는 이 알고리즘을 약간 변형하여 numerical damping을 도입함으로써 계산된 해를 안정화하여 해석을 수행하도록 한다.

### 3. 해석 및 결론

#### 3.1 정적해석

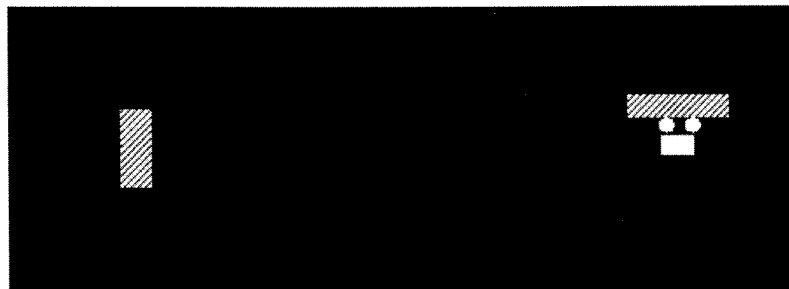
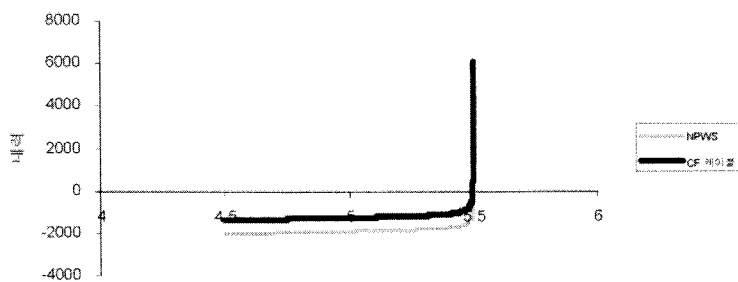


그림 1 정적 해석 셋업

정해석 결과



케이블 양 단의 간격

그림 2 자중을 받는 케이블의 정적 내력변화

첫 번째 해석은 직선길이 5.5m의 강 케이블과 CF 케이블의 지지 단 간격을 5.5m에서 서서히 줄여가면서 케이블 지지 단에 발생하는 인장/압축 반력을 계산한 것이다. 5.5m-4.5m-5.5m의 사이클을 1회 수행하였는데 예상할 수 있는 바와 같이 탄성계수가 높은 NPWS 케이블의 압축응력이 대체적으로 크게 나왔다(그림 2). 특히 그 크기의 비가 대체적으로 탄성계수의 비와 같은 점으로 미루어 자중의 기여도는 낮고 탄성계수의 기여도가 높음을 알 수 있다. 따라서 인장응력을 주로 받아야 하는 케이블의 특성상 압축응력의 가능성과 그 크기에서 CF 케이블이 더 유리하다고 볼 수 있다.

### 3.2 동적해석

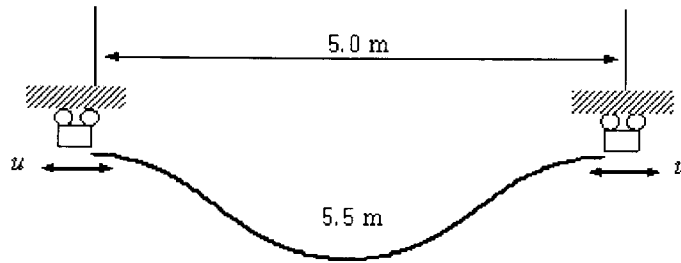


그림 3 동적 해석 셋업

두 번째 해석은 정적 해석 때와 같은 길이의 케이블에 out-of-phase 하중을 양단에 가하였다(그림 3). 하중 함수는 다음과 같다:

$$u(t) = [1 - \exp(-2\pi\alpha ft)] \cdot A \cdot \sin(2\pi ft) \quad (3)$$

여기서 진동수  $f = 3.5 \text{ Hz}$ , 진폭  $A = 0.02 \text{ m}$ ,  $\alpha = 0.1$  이 사용되었으며 그 모양은 그림 4에서 찾을 수 있다. 가로 축은 시간을 나타낸다. 초기에 점진적으로 증가하는 하중을 사용한 이유는 충격하중으로 인한 고주파 노이즈를 없애기 위해서이다.

동적 해석의 결과 케이블 장력의 크기가 밀도에 대체적으로 비례하여 NPWS 케이블이 약 6-7배 크게 나오는 것을 확인하였으며, 심한 경우 압축응력까지 발생하였다(그림 5). 실제 사용하중이 자중보다 훨씬 큰 문제에서는 다른 결과가 나올 수 있겠으나, 본 문제와 같이 자중이 중요한 부분을 차지하는 문제에서는 가벼운 케이블이 월등한 성능을 보여주었다.

### 3.3 결론

본 논문에서는 경량, 고강도로 성능이 우수하나 여러 가지 이유로 아직까지는 그 활용도가 낮은 탄소섬유 소선을 이용하여 NPWS 케이블의 인장강도를 가지는 교량 케이블을 제안하였다. 기하비선형 거동을 엄밀하게 고려한 모델로 정적, 동적 해석을 수행한 결과 기존의 강(steel) 케이블과 비교하여 월등히 작은 장력이 발생함을 확인하였다. 그러나 완전한 성능을 알기 위해서는 여러 진동수의 사용 하중 및 자중을 고려한 교량 규모의 full scale 비선형 해석을 통한 성능 검증이 필요하다.

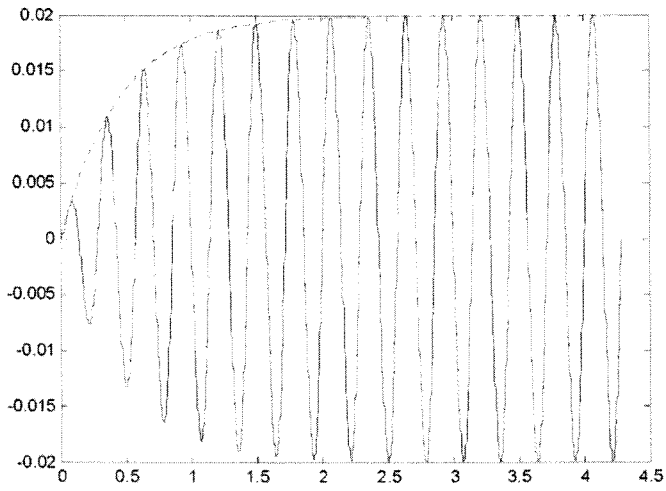


그림 4 Out of Phase 동하중

동적 응답

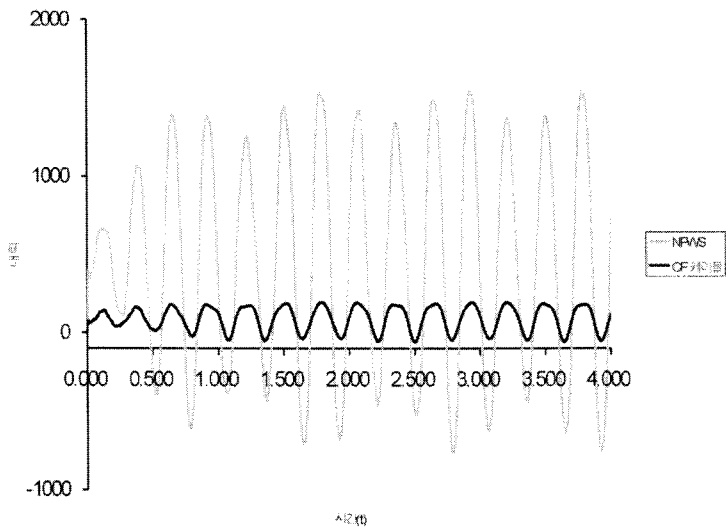


그림 5 케이블의 동적 응답(시간-내력)

## 참고문헌

- Hong, K.-J. (2003) Dynamic interaction in cable-connected equipment. *Dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy*, University of California, Berkeley, CA.
- Hong, K.-J., A. Der Kiureghian and Sackman, J. L. (2004) Interaction effect on cable-connected electrical equipment, *Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 595, Vancouver, B.C., Canada.
- Miki, C., Homma, K. and Tominaga, T. (2002) High strength and high performance steels and their use in bridge structures, *Journal of Constructional Steel Research*, 58, pp.3-20.
- Tokyo Rope Mfg. (1993) Technical Data on CFCC.
- Simo and Vu-Quoc (1986a) On the dynamics of flexible beams under large overall motion-The plane case: Part 1, *ASME Journal of Applied Mechanics*, 53, pp.849-854.
- Simo and Vu-Quoc (1986b) On the dynamics of flexible beams under large overall motion-The plane case: Part 2, *ASME Journal of Applied Mechanics*, 53, pp.855-863.