

사장교 시스템의 실용적인 초기형상 결정법

Practical Determination Method of Initial Cable Forces in Cable-Stayed Bridges

송요한* 김문영†
Song, Yo-Han Kim, Moon-Young

요지

본 논문에서는 비선형해석이라는 복잡한 과정을 거치지 않고도 사장교 시스템의 초기형상을 효율적이고 합리적으로 결정하는 방법을 제시하고자 한다. 사장교 시스템의 초기형상해석이라 함은 주형의 수직 처짐과 휨모멘트, 주탑의 수평변위와 휨모멘트를 최소화하면서, 고정하중과 평형을 이룰 수 있는 케이블의 장력과 무응력길이를 결정하는 방법으로 이때, 케이블이 정착되는 주형의 수평위치, 주탑의 수직위치가 변하지 않아야 한다. 본 연구에서는 주형과 주탑의 케이블 정착부에서 힘의 평형조건을 이용하여 주형의 수직 처짐과 주탑의 수평변위를 효과적으로 제어할 수 있는 장력 산정법을 사장교의 형태별로 정리하여 제시하였으며, 2차원 사장교 예제들에 대하여 기존 연구의 방법들과 장력, 주형의 모멘트와 처짐 등을 비교하였다. 또한 3차원 실교량에 대해 Improved TCUD법으로 초기형상해석을 수행하여 그 결과와 비교함으로써 본 방법의 정확성을 입증하고자 하였다.

핵심용어 : 사장교, 초기형상해석, 비선형 해석, 힘평형법, Improved TCUD법

Abstract

A rational method for determination of initial cable forces in cable-stayed bridges without complicated nonlinear analysis is presented. Initial shape analysis for cable-stayed bridges should be able to find optimized initial cable forces and unstrained length that minimize deflection and vending moments of the deck and pylon. A presented method utilizing the idea of force equilibrium organizes initial shape analysis for each types of cable-stayed bridges. The results of that analysis were compared to several existing methods for 2D numerical examples. And for 3D actual bridges, the improved TCUD method was performed to demonstrate the accuracy of this study.

Keywords : cable-stayed bridges, initial cable force, nonlinear analysis, force equilibrium method, improved TCUD

1. 서론

사장교는 주탑에 연결된 케이블로 보강형을 직접 지지하는 구조물로서, 사장교의 설계 시 가장 먼저 수행해야 하는 것은 고정 하중에 의한 대상 교량의 초기형상을 결정하는 것이다. 여기서, 초기형상의 결정이라 함은 완성된 구조계에서 고정하중에 의해 발생하는 케이블 지지교량의 주형 및 주탑에 발생하는 휨모멘트와 변위가 최소화되면서 고정하중과 평형을 이룰 수 있는 케이블 장력과 무응력길이를 결정하는 것을 말한다.

현재까지 앞선 연구에서 많은 방법들이 제시되었으나 기존에 제시되었던 여러 방법들은 해석결과의 정확성에도 불구하고 복잡한 비선형 해석을 수행해야 하며, 비선형 해석 시 수렴성에서 많은 문제를 내포하고 있는 것이 사실이다. 따라서 이러한 문제점들을 극복함과 동시에 현장의 실무자들이 간단하게 케이블지지 교량의 초기형상해석을 수행할 수 있는 실용적인 초기형상해석 방법이 필요하다고 사료된다.

본 연구에서는 사장교의 초기형상 결정시 비선형 해석이라는 복잡한 과정을 거치지 않고도 비교적 정확하고 효과적으로 초기형상을 결정하는 방법을 제시하였다. 고정하중 하에

† 책임저자, 정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과 정교수
Tel: 031-290-7514 ; Fax: 031-299-4259
E-mail: kmye@skku.edu

* 성균관대학교 초고층장대교량학과 석사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2011년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2011년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

서 사장교의 주형의 처짐과 휨모멘트가 최소화되어야 한다는 설계조건과 케이블 정착부에서 힘의 평형조건을 이용하였으며 사장교의 형식별로 그 방법을 구분하여 정리하였다. 마지막으로 제시한 방법을 다양한 교량모델에 적용하고, 기존에 제시되었던 비선형 해석 방법들과 비교하여 그 실효성 및 정확도를 검증하고자 한다.

2. 기존의 사장교 초기형상 해석법

현재까지 거론되어 온 초기형상 결정방법에는 힘평형법, 초기부재력법, Target Configuration Under Dead load(이하 TCUD) 해석법 등이 있다.

초기부재력법은 김제춘 등(1999)에 의해 소개되었으며 초기부재력법을 이용한 해석법은 초기 장력 크기에 민감하다는 단점이 있다. TCUD 해석법은 케이블지지 구조물에서 절점 변위 이외에 케이블의 초기 장력이나 무응력길이를 미지수로 추가하고, 그 수만큼 그림 1과 같이 절점변위를 구속하여 케이블의 무응력길이와 장력 등을 결정하는 방법으로 Kim 등(2001)에 의해 소개되었으며, 수렴속도가 빠르고 초기 장력 크기에 민감하지 않지만 사장교의 경우 주형과 주탑의 압축력으로 인한 변위를 제어할 수 없다.

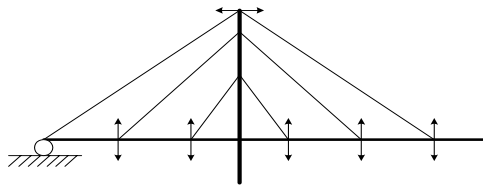


그림 1 TCUD의 기하학적인 구속조건

3. Improved TCUD법

Improved TCUD는 보다 정확한 초기형상을 결정하기 위하여 초기부재력법과 TCUD법을 효과적으로 결합시킨 개선된 해석방법으로 김문영 등(2003)에서 2차원 예체에 대해 그 정확성이 입증된바 있다. 본 연구에서는 3차원 실제 교량에 Improved TCUD방법을 적용하였으며 안상섭(1990), 김문영 등(2007)에서 소개된 탄성 현수선 요소를 사용하여 그 결과를 본 연구에서 제시한 실용적인 방법과 비교하였다.

Improved TCUD의 알고리즘은 다음과 같다.

3.1 케이블 장력의 초기 값 산정:

고정하중 하에서 기하학적 비선형 해석을 수행하여 장력의 초기 값을 결정한다.

3.2 TCUD법에 근거한 평형반복계산:

경계조건 이외에 케이블 개수만큼의 절점변위를 설계자의 초기형상에 가깝게 되도록 추가적으로 절점변위를 구속하여 TCUD 해석을 실시한다. 이때 구속되는 절점은 그림 1에 표시되어있다. 특히, 지점부에 연결된 케이블에 대응하는 구속 변위는 주탑상부의 수평변위가 된다.

3.3 초기부재력법 적용

수렴이 되었을 때 형상은 주탑, 주형이 압축력을 받아 변위를 일으킨다. 이때 축방향 변위를 제거하기 위하여 초기부재력법의 개념을 이용하여 모든 절점좌표를 처음 위치로 환원시킨 후 다시 TCUD법에 근거한 비선형 반복계산을 수행한다. 이를 간단히 나타내면 그림 2와 같다.

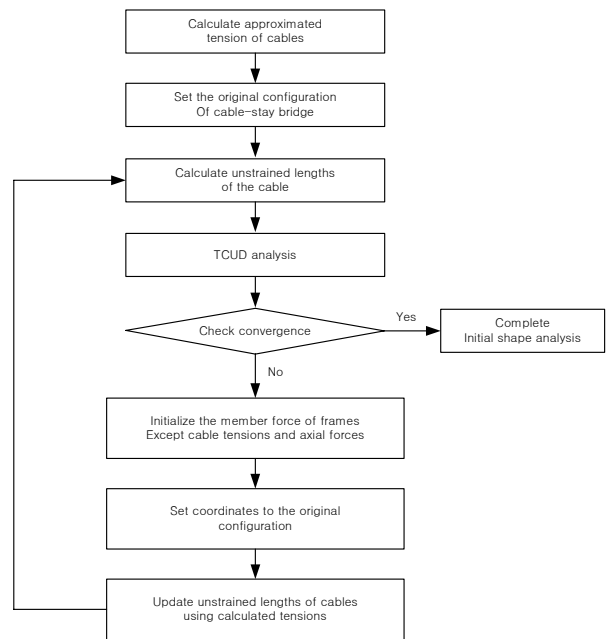


그림 2 Improved TCUD법의 알고리즘

4. 실용적인 초기형상 해석법(Practical Method)

먼저, 사장교의 초기형상해석을 수행하기에 앞서 다음과 같은 가정을 도입한다.

- 1) 사장교의 모든 주형의 자중은 케이블이 지지하고 있으며, 이는 케이블의 장력으로 표현된다.
- 2) 사장교의 케이블 사장재의 새그는 현수교에 비해 상당히 작다고 간주하여 새그를 고려하지 않으며, 또한 주탑과 주형의 연결 시 직선으로 가정한다.

사장교는 형태에 따라 방사형, 하프형, 팬형 등으로 분류

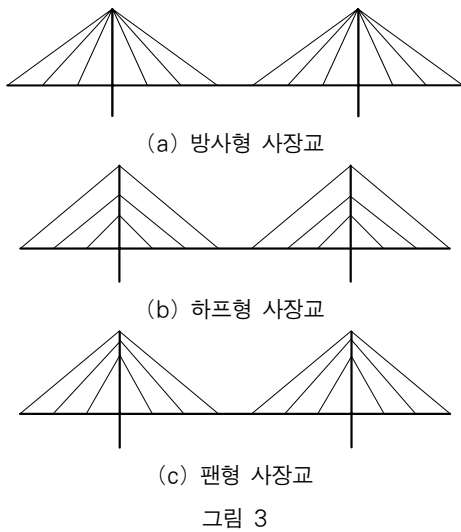


그림 3

할 수 있으며, 그림 3(a), (b), (c)는 각각의 형태에 대한 사장교의 초기평형상태를 나타내고 있다. 먼저 그림 3(a)와 같은 방사형 사장교의 경우, 주탑 상부에 모든 케이블이 한꺼번에 연결되어 있으므로 지점연결부를 제외한 나머지 케이블의 장력을 구한 후, 주탑 상부에서 케이블의 장력 수평성분의 평형을 이용하여 미지의 지점 연결부 즉 back-stay 케이블의 장력 값을 구할 수 있다.

그림 3(b)와 (c)는 하프형 사장교와 팬형 사장교의 형태를 나타내고 있으며, 일반적으로, 하프형과 팬형 사장교의 경우 주탑의 상부에 케이블의 끝단이 모여있지 않고 약간의 간격을 두고 떨어져 있는 형태이므로 방사형과 같이 케이블 수평성분의 평형조건만을 이용할 경우 주탑내의 수평변위를 효과적으로 제어할 수 없으므로 임시지점법 등 본 연구에서 제시한 방법들을 사용하여 합리적인 초기형상을 구할 수 있다.

4.1 방사형 사장교의 초기형상 결정법

방사형 사장교는 주탑 상부에 모든 케이블이 한꺼번에 정착되어 있는 형태로 주탑을 기준으로 양 쪽 케이블 장력의 수평력이 동일하도록 제어한다면, 주탑의 수평변위 및 모멘트를 발생시키지 않을 수 있다. 케이블 장력의 수평력은 교량의 지점(교대)와 직접 연결된 최외측 케이블을 통하여 제어할 수 있으며, 그 케이블을 back-stay cable이라고 한다.

그림 4(a), (b)는 사장교의 케이블 시스템과 주형시스템의 개념도이고, 고정하중을 받는 방사형 사장교의 케이블 장력을 결정하는 구조해석 절차는 다음과 같다.

단계 1) 케이블 정착부를 가상지점으로 가정하고 고정하중 하에서 연속보의 반력을 산정한다.

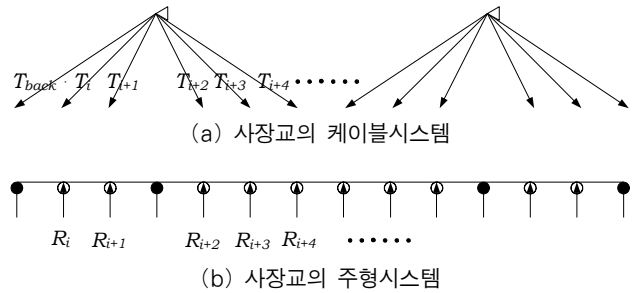


그림 4

우선 사장교의 초기형상을 결정하기에 앞서 그림 4(a)를 그림 4(a), (b)와 같이 케이블부와 주형부로 분리시킨 분리형 사장교 시스템으로 표현한다. 이때 케이블은 단순히 주형에 정착된 사장재의 경사각과 장력은 α_i, T_i 그리고 최외측 지점에 연결된 사장재의 경사각과 장력은 α_{back}, T_{back} 로 나타낸다. 주형의 중량은 모두 케이블이 받고 있다고 가정하고 있으며, 주형의 수직변위가 발생하지 않아야 하므로 주형과 케이블의 맞닿는 연결점을 가상 지점부로 치환한다. 결과적으로 그림 4(b)는 실제 지점뿐만 아니라 케이블 정착부를 가상지점으로 간주하는 연속보로 모델링할 수 있다.

그 후 그림 4(b)와 같이 주형의 자중을 고려한 연속된 시스템에서 각 가상 지점부의 수직반력 R_i 를 구한다. 이때 케이블은 트러스 요소를 이용하여 모델링하고, 케이블의 자중은 주형과 주탑 정착부에 각각 절반씩 작용하는 것으로 가정한다. 이 방법은 Chen(2000)에서 사용된 힘평형개념을 활용하였으며, 본 연구에서는 초기 부재력법과 결합하여 압축력에 의한 주형과 주탑의 탄성수축이 발생하지 않도록 하였다. 또한 Back-stay cable의 장력 결정법을 명확하게 하고 사장교의 형태별로 그 해석법을 정리하였다.

단계 2) 정착부 절점의 수직방향 평형조건으로부터 케이블 장력을 산정한다.

그림 5는 사장재 정착부 절점의 자유물체도를 나타낸 것이다. 이 그림에서 원래의 지점부와 맞닿는 사장재, 즉 back-stay cable을 제외한 모든 사장재 케이블 장력의 수직성분은 케이블시스템을 제외한 주형시스템에서의 연속보조건에 의해 구해진 수직반력과 같으므로 이런 절차에 의해 사장재의 장력을 결정할 수 있다. 결과적으로 정착부 절점에서 평형조건은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_i \sin \alpha_i = R_i + w_i l_i / 2 \tag{1}$$

$$T_i \cos \alpha_i = P_{i+1} - P_i \tag{2}$$

여기서, R_i 는 주형의 중량에 의한 주형시스템에서의 반력을

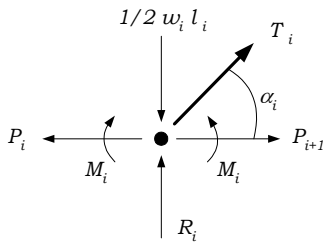


그림 5 사장재의 장력 결정

나타내며, w_i 는 케이블의 단위길이당 중량, l_i 는 사장재의 길이를 나타낸다. 따라서 케이블의 장력 T_i 는 식 (1), 주형의 축력변화는 식 (2)로부터 산정할 수 있다.

단계 3) 주탑 정착부의 평형조건으로부터 최외측 케이블의 장력을 산정한다.

방사형 사장교의 경우에 모든 케이블은 주탑의 상부 정착부에 집중된다. 따라서 이 점에서 아래와 같이 각 케이블장력의 수평성분 $T_i \cos \alpha_i$ 의 합이 영이라는 평형조건으로부터 실제 지점부와 연결된 사장재의 장력 T_{back} 을 산정할 수 있다.

$$T_{back} \cos \alpha_{back} = - \sum_i (T_i \cos \alpha_i) \quad (3)$$

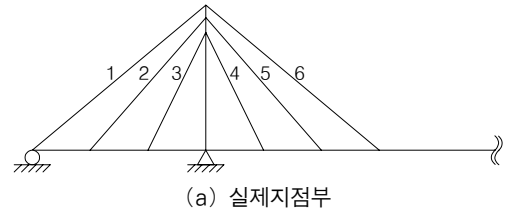
4.2 Fan/Harp type 사장교의 초기형상 결정법

한편 하프형 및 팬형 사장교의 경우 주탑에 연결된 사장재는 한 점에서 모이는 것이 아니라, 주탑의 여러 지점에 정착부를 가지고 있으므로 이 경우는 주형 및 주탑의 모든 경우에 변위 및 모멘트를 최소화할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 Fan Type과 Harp Type의 최외측 케이블(back-stay cable) 장력을 결정하기 위한 두가지의 방법을 제시하고자 한다.

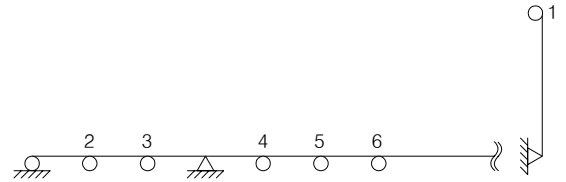
4.2.1 임시 지점법

임시 지점법은 그림 6, 7과 같이 사장재 케이블과 동일한 수만큼 주형의 수직 변위를 구속시킬 뿐만 아니라 추가적으로 주탑에서 수평변위를 구속시킨 가상의 지점을 두어 반력을 측정하는 방법이다. 이 방법으로 주형 수직변위 뿐만 아니라, 주탑에서도 수평변위를 구속함으로써 주형 및 주탑의 변위 및 모멘트를 최소화시킬 수 있다. 이때 케이블 개수와 주형 및 주탑의 수평, 수직 방향의 지점의 총합은 같아야 한다. 여기서 주탑 임시지점의 반력을 최외측 케이블 장력의 수평성분으로 놓아 최외측 케이블의 장력을 결정할 수 있다.

그림 6와 같이 back-stay cable이 하나인 경우에는 back-

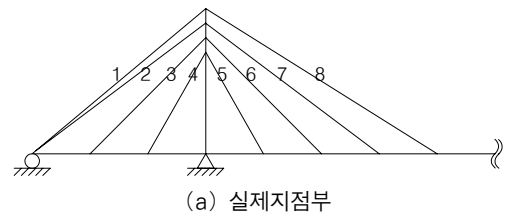


(a) 실제지점부

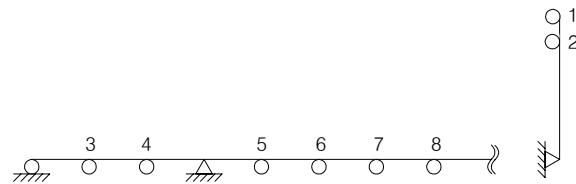


(b) 가상지점부의 결정

그림 6 mono back-stay의 경우



(a) 실제지점부



(b) 가상지점부의 결정

그림 7 multi back-stay의 경우

stay를 제외한 나머지 케이블이 연결되는 보강형 지점의 수직 변위를 구속하여 반력을 측정하기 위해 그림 2~6번과 같은 임시지점을 두고, back-stay가 연결되는 주탑의 수평변위 제어를 위해 1번 케이블에 대응하는 1번 임시지점을 두어 반력을 측정한다.

실제 사장교에서는 back-stay가 여러 개 존재하는 경우가 많다. 이러한 경우에는 그림 7의 예와 같이 back-stay인 1,2번 케이블과 대응하는 1,2번 임시지점을 주탑부에 두어 수평변위를 제어하고, 나머지 3~8번 케이블에 대응하는 3~8번의 임시지점을 보강형에 두어 그 수직변위를 제어함으로써 각 임시지점에서 측정된 반력에 따라 케이블 장력을 결정할 수 있다.

4.2.2 Moment 평형법

주탑이 지면에 연결되는 부분이 힌지나 물러로 가정할 수 있을 경우에, 예를 들어 주탑이 주형과 만나는 부분에서 지점에 연결된다고 할 때에는 주탑이 지면과 연결되는 지점에서의 모멘트 평형을 이용하여 최외측 케이블의 장력을 조정

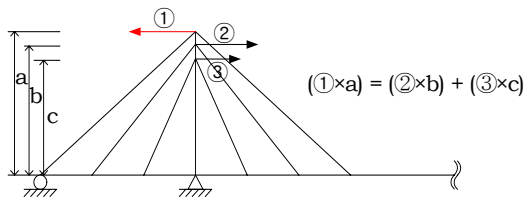


그림 8 모멘트 평형법 개념도

할 수 있다.

먼저 각 케이블이 주탑과 연결되는 지점에서 주탑의 좌우측 케이블 장력의 차이로 인해 수평력의 불평형이 발생하게 된다. 이로 인하여 주탑의 지점부에서는 모멘트가 발생하게 되는데 이를 최외측 케이블의 수평력으로 조정하여 모멘트 평형을 맞추는 개념이다. 최외측 케이블과 최외측 케이블에 맞닿은 중앙부 케이블의 수평력 차이가 주탑의 지점부에서 발생하는 불균형 모멘트를 상쇄할 수 있도록 지점과 연결되어 있는 최외측 케이블의 장력을 조정할 수 있다.

4.3 초기 부재력의 도입 및 3D 변환

위의 제시한 방법으로 계산된 사장교 케이블 장력과 무응력장을 사장교 모델에 도입하게 되면, 사장교의 구조적 특성으로 인해 주형과 주탑에 발생하는 압축력으로 인해 각 부재에 탄성수축이 발생하게 된다. 이로 인해 원래 설계자가 의도하였던 목표 지점에 각 절점이 위치하지 못하고, 주형의 경우 수평변형이 주탑은 수직 변형이 발생하게 되어 원하는 초기 형상을 만족하지 못한다. 본 연구에서는 주형 및 주탑에 발생하는 압축력을 각 부재의 부재력으로 도입하여 최초로 목표하였던 형상을 만족시키고자 하였다.

이 때 주형의 모멘트는 그림 4(b)의 주형 시스템에 케이블 장력의 수평성분을 각 절점의 절점하중으로 가한 후, 기하비선형 해석을 수행하여 확인할 수 있다.

이렇게 최종 결정된 사장교의 초기장력은 그림 9과 같이 실제 삼차원의 장력으로 치환하여 사용할 수 있다.

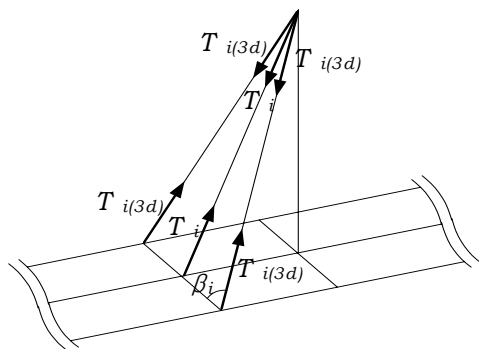


그림 9 3D 장력변환

여기서, 삼차원 사장재의 장력 $T_{i(3D)}$ 는 다음의 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{i(3D)} = \frac{T_i}{2 \sin \beta_i} \tag{4}$$

5. 수치예제

본 논문에서는 Improved TCUD와 Practical method에 의한 수치해석을 기존의 연구방법과 비교하여 그 정확도 및 실효성을 검증하고자 하였다. 먼저 기존 연구들에서 수행된 2차원의 방사형과 Fan type 예제에 Practical method를 적용하여 기존연구결과 및 2차원 예제에 대해 이미 검증된 Improved TCUD와 비교하였다. 그리고 Improved TCUD의 3차원 모델 적용성을 검증하기 위하여 김제춘 등(1999)의 연구에서 사용된 영흥대교에 대하여 Improved TCUD 및 Practical method를 실시하여 각각의 결과들을 비교하였다.

5.1 방사형 형태의 2차원 사장교

본 연구에서 해석한 예제는 Wang 등(1993,1996)의 연구에서 사용된 12개의 사장 케이블로 지지된 방사형 사장교로서 모델의 단면상수 및 물성치는 표 1과 같다.

Wang 등(1993, 1996)은 본 예제에 대해 초기부재력법을 적용했으며, 동일 예제에 대하여 Kim 등(2001)은 TCUD를 적용한 바 있다.

해석결과 중 케이블 초기 장력 값은 표 2와 그림 11에 표시하였으며 Practical method의 결과가 Improved TCUD와 거의 일치함을 확인할 수 있다.

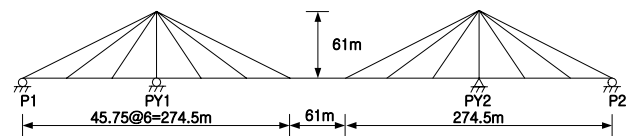


그림 10 2차원 방사형 형태의 사장교 모델

표 1 2차원 방사형 형태의 사장교 모델의 단면상수

Member	E(GPa)	A(m ²)	I(m ⁴)	w(KN/m)
Exterior cable	207	0.042	-	3.2
Interior cable	207	0.016	-	1.2
Deck	207	0.320	1.131	87.5
Tower(20.3m)	207	0.269	0.432	-
Tower(40.6m)	207	0.228	0.345	-
Tower(61m)	207	0.203	0.211	-

표 2 방사형 사장교의 케이블 장력(MN)

Cable Number	This study		Kim (2001) TCUD	Wang (1993) I.Force	Wang (1996) I.Force
	Practical method	Improved TCUD			
1	10.86	10.87	11.38	11.34	10.74
2	8.50	8.50	8.26	7.37	8.27
3	4.98	4.98	4.85	5.29	4.80
4	5.15	5.15	5.11	5.00	4.55
5	6.82	6.83	6.79	6.77	7.81
6	12.27	12.28	12.55	12.08	11.31

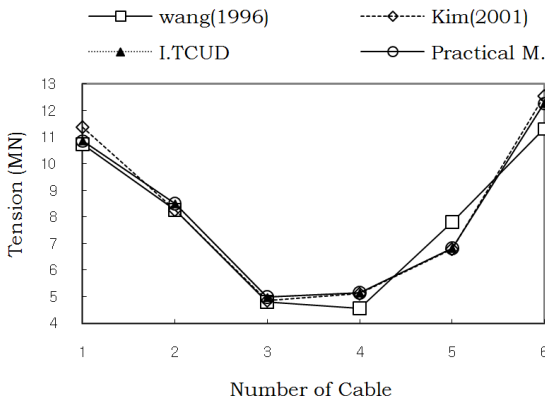


그림 11 방사형 형태의 장력비교

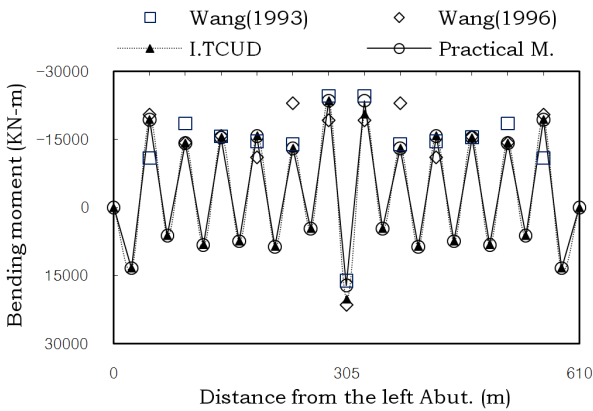


그림 12 방사형 사장교 모델 주형의 모멘트 비교

Practical method에 의한 주형의 모멘트를 살펴보면, 모멘트 분배가 적절히 이루어져 있으며, 그 결과가 Improved TCUD와 매우 유사함을 확인할 수 있다. 최대 정모멘트는 중앙지점에서 발생하며 주형의 모멘트를 살펴보면, 최대 정모멘트는 중앙지점에서 발생하며, 그 값은 17170MN-m이고, Improved TCUD법과 Wang 등(1993, 1996)에서는 각각 20,118MN-m, 16,105MN-m, 그리고 21,409MN-m이다.

보강형의 변위를 살펴보면 Wang 등(1993)의 연구는 중앙부에서 16.5cm, Wang(1996)은 5.2cm이며, Practical method와 Improved TCUD는 각각 1.8cm, 2.1cm로 비교적 작다는 것을 확인할 수 있다.

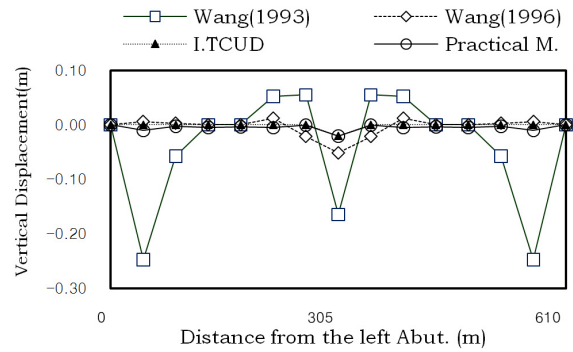


그림 13 방사형 사장교의 처짐 비교

5.2 Fan Type의 2차원 사장교

본 연구에서 Fan Type 예제는 김제춘 등(1999)의 논문에서 사용된 모델이다. 본 예제의 형상은 그림 14과 같으며 back-stay가 두 개인 경우이다. 예제에 적용된 물성치는 표 3과 같다.

표 4와 그림 15은 Practical method에 의해 구하여진 장력과 기존 연구 결과들을 비교하여 나타내었다. Fan Type 예제의 경우에도 방사형과 마찬가지로 Practical method의 결과가 기존 비선형 결과들과 비슷한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 back-stay cable이 두 개인 Fan Type의 경우에도 본 연구에서 제시한 Practical method가 유용함을 확인할 수 있다.

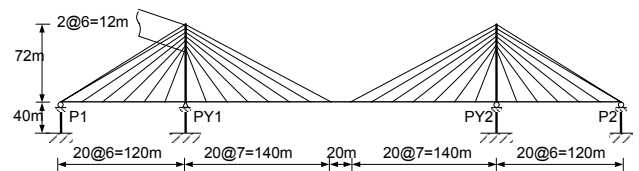


그림 14. Fan Type 사장교 모델

표 3 Fan Type 사장교 모델의 단면상수 및 물성값

Member	E(GPa)	A(m ²)	I(m ⁴)	w (KN/m)	부가사하중 (KN/m)
Cable	200	0.01	-	0.78	-
Deck	200	1.06	1.00	127.2	40
Tower(72m)	200	1.21	1.30	145.2	-
Tower(40m)	200	2.25	1.90	270	-

고정하중 상태에서의 초기형상해석에 의한 주형의 모멘트는 그림 16, 17에 보인다. 모멘트의 분포를 살펴보면 그림에서 보이듯이 본 연구의 결과도 다른 연구와 비교하여 볼 때 전 기간에 걸쳐 균등한 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 주형의 수직 변위와 주탑의 수평 변위는 세 방법에서 모두 동일하게 거의 '0'에 가까운 결과를 보인다.

표 4 Fan Type 사장교 모델의 장력(KN)

Cable No.	This study		김제춘 등(1999) 초기 부재력법	
	Practical method	Improved TCUD	Initial tension	Last tension
1	8208	8210	8200	8193
2	5640	5636	5648	5638
3	6828	6827	6827	6831
4	5130	5129	5130	5153
5	4675	4675	4675	4705
6	4004	4003	4004	3980
7	3553	3553	3553	3317
8	3551	3551	3551	3309
9	4014	4014	4014	3984
10	4631	4630	4631	4666
11	5318	5318	5318	5357
12	6031	6030	6033	6057
13	6744	6744	6741	6739
14	7446	7445	7447	7405

5.3 실제 교량 모델(영흥대교)

본 연구에서는 여러 형태의 3차원 실 교량 모델을 적용하여 해석을 수행하였다. 영흥대교는 인천광역시 옹진군 영흥도와 선재도를 연결하는 3경간 사장교로서 64개의 케이블로 지지되어 있으며 보강형은 전형적인 강상판 단면을 적용하고 있다(한국전력공사, 1995).

본 교량은 김제춘 등(1999) 에서도 사용된 예제로 구조물의 제원은 그림 18에 도시하였으며 대표적인 단면 상수 및 물성값은 표 5에 나타내었다.

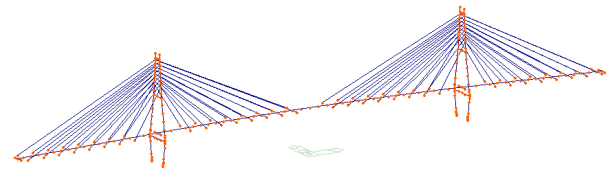
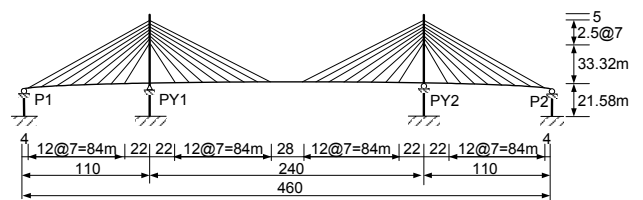


그림 18 영흥대교의 구조제원과 3D모델

표 5 영흥대교 모델의 단면상수 및 물성값

구분	E (GPa)	A(m ²)	I(m ⁴)	w (tonf/m)	비고
Cable	204	0.0076	-	0.0741	
Deck1	214	0.6292	0.6576	8.21	부가사하중 3.5 tonf/m
Deck2	214	0.6798	0.7091	8.70	부가사하중 3.5 tonf/m
Deck3	214	0.7650	0.7963	9.55	부가사하중 3.5 tonf/m
Tower1	214	0.6896	1.2326	5.9547	
Tower2	214	0.5544	0.9887	4.7838	
Tower3	214	0.6278	1.1165	5.4211	
Tower4	214	0.4549	0.8160	3.9281	
Tower5	214	0.4133	1.0381	3.5688	

□ 김제춘등(1999) ▲ I.TCUD ○ Practical M.

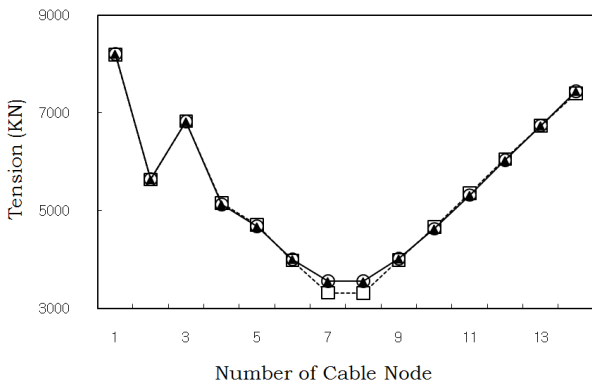


그림 15 Fan Type 사장교의 장력비교

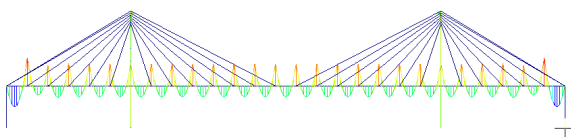


그림 16 Fan Type 모델의 주형의 모멘트

□ 김제춘등(1999) ▲ I.TCUD ○ Practical M.

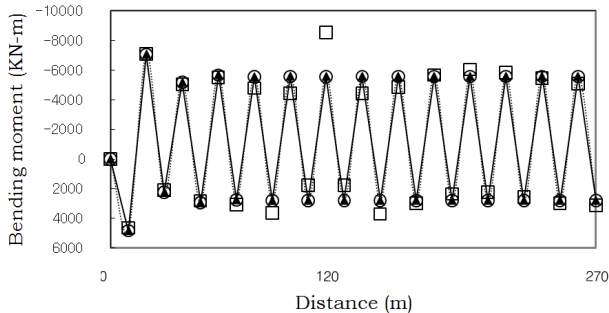


그림 17 Fan Type 모델의 주형의 모멘트 비교

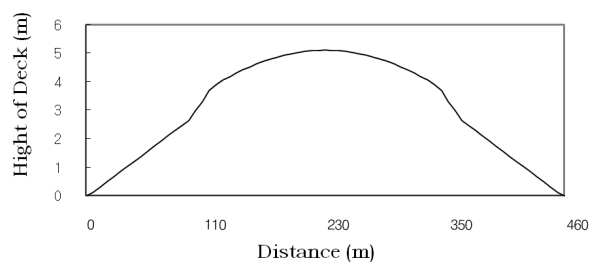


그림 19 영흥대교 주형의 camber(m)

표 6 영흥대교 모델의 장력(tonf)

Cable No.	This study		김제춘 등(1999) 초기 부재력법	
	Practical method	Improved TCUD	Initial tension	Last tension
1	2437	2258	2870	2901
2	2330	2356	1790	1778
3	1309	1389	1400	1393
4	1483	1524	1510	1511
5	1222	1258	1260	1265
6	1184	1217	1210	1214
7	808	805	800	809
8	1300	1343	1340	1348
9	1316	1182	1190	1204
10	830	830	820	828
11	1223	1124	1120	1111
12	1305	1230	1210	1184
13	1413	1323	1400	1370
14	1745	1683	1340	1310
15	1030	878	2170	2179
16	3317	3486	2570	2675

표 7 최대 모멘트 비교(KN·m)

구분	This study			김제춘 등 (1999)
	Practical M. (선형)	Practical M.	Improved TCUD	
최대정모멘트	6197	5068	5543	8779
최대부모멘트	-5276	-6411	-6055	-5275

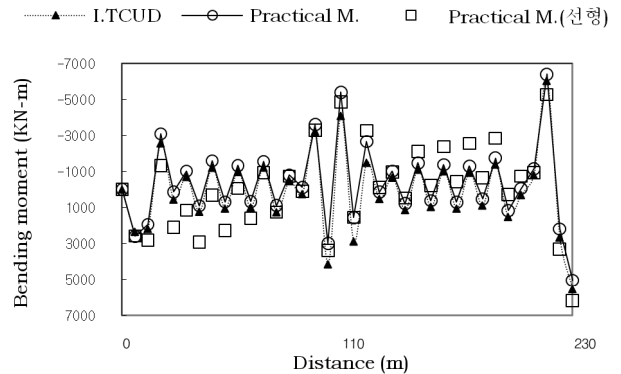


그림 21 영흥대교의 모멘트 선도(KN·m)

표 8 최대변위 비교(mm)

구분	This study		김제춘 등 (1999)
	Practical M.	Improved TCUD	
수직변위	9.6	0.1	16.0

그림 20을 보면, Practical method의 결과 장력값이 김제춘 등(1999)과는 주형의 중앙부분에서 차이를 보이거나 Improved TCUD와는 더욱 유사한 패턴을 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한 표 7의 최대 정부 모멘트를 비교하면 본 연구의 결과들이 기존연구에 비해 더욱 잘 분배되었음을 알 수 있다. Practical method에 의한 모멘트 형상은 그림 21과 같다.

본 연구에서는 이러한 기하비선형 효과를 확인하기 위하여 그림 4(b)의 주형 시스템에 케이블 장력의 수평성분을 각 절점의 절점하중으로 가한 후, 기하비선형 해석을 수행하였다. 이 과정을 생략하고 선형해석을 한 결과를 Practical M(선형)으로 표시하여 그림 21에 나타내었으며, Practical M.와 I.TCUD는 매우 유사한 결과를 보이거나 기하비선형해석을 생략한 Practical M(선형)과는 확연히 차이가 나는 것을 확인할 수 있다.

중앙부 최대 변위를 살펴보면 Improved TCUD의 경우 변위가 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있으며 Practical M.는 9.6mm로 기존 김제춘 등(1999) 연구보다는 우수한 결과를 보이고 있다.

본 3차원 예제에서 Improved TCUD는 상당히 만족할 만한 결과를 보이고 있음을 알 수 있으며, Practical M.도 장력 및 모멘트 분배가 적절히 이루어졌다는 것을 확인할 수 있다.

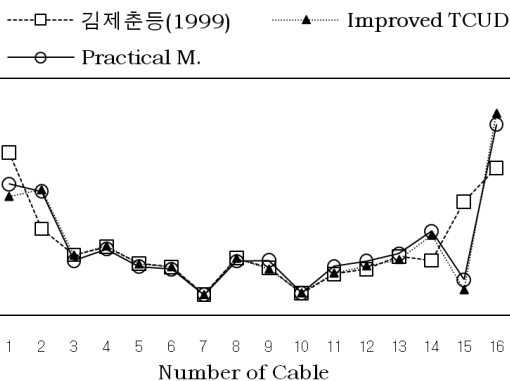


그림 20 영흥대교의 장력비교

영흥대교의 주형은 직선이 아니라, 교대를 기준으로 하여 최대 약 5m의 camber를 가진 그림 19와 같은 형상을 최종 목표 형상으로 하고 있으며 본 연구의 해석 시 이를 감안하였다.

영흥대교의 초기형상을 Practical method로 해석하기 위하여 먼저 주형의 케이블 정착부에 임시지점을 두고 연속보의 반력을 통하여 최외측 케이블을 제외한 나머지 케이블들의 장력을 결정하고 모멘트 평형법을 사용하여 back-stay의 장력을 결정하였다. 결정된 초기 장력을 교량 모델에 적용시킨 결과로 발생하게 되는 주형과 주탑의 압축력은 각 부재에 초기 부재력으로 작용하여 목표하는 형상을 만족하도록 하였다. Practical method에 의한 영흥대교의 장력값은 표 6과 같고 이를 김제춘 등(1999)의 결과와 비교하였으며 추가로 본 연구의 타당성을 증명하기 위해 Improved TCUD를 수행하여 그 결과와 비교한 것을 그림 19에 표현하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 비선형 유한요소법을 거치지 않고도 케이블 지지교량의 초기형상을 비교적 정확하고 효율적으로 나타내었으며, 이 방법을 이용한 해석 결과를 제시하였다. 또한 Improved TCUD방법이 3차원 실제 교량에도 유용함을 증명하였다. 이 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구는 기존의 비선형해석 대신 케이블지지교량의 전체계에서의 초기 평형상태에 적합하도록 각 절점의 응력평형상태를 이용하여 초기형상 해석을 수행하였다.
- 2) 주형의 모든 중량을 사장재가 모두 지지해야 하며, 이때 케이블이 주형과 맞닿는 부분을 가상의 지점부로 가정하여 반력을 계산하였다. 이때 반력이 사장교의 사장재의 수직장력이 됨을 알 수 있었다.
- 3) 사장교의 경우, 각각의 교량의 형태에 따라 초기형상해석방법이 조금씩 달라질 수 있으며, 임시 지점법이나 모멘트 평형법을 이용하면 주형 및 주탑의 변위를 만족할 만한 정도로 제어할 수 있음을 확인하였다.
- 4) 결과적으로 제안된 방법을 이용하면 비선형해석을 거치지 않고도, 비교적 정확하고 효율적이며 빠르게 초기형상해석을 수행할 수 있다
- 5) 또한 초기부재력과 TCUD법을 결합한 Improved TCUD법이 3차원 실제 교량에도 적용가능하며 매우 우수한 결과를 보인다는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업의 초장대교량사업단 연구과제비(과제번호 : 08기술혁신E01)에 의해 연구되었기에 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

김제춘, 장승필 (1999) 초기부재력을 이용한 사장교의 초기형

상 및 캠버량 결정, 대한토목학회 논문집, 19(I-3), pp.377~386.

김문영, 경용수, 이준석 (2003) 사장교의 개선된 초기형상 해석법, 한국강구조학회 논문집, 강구조공학회, 15(2), pp.175~185.

김문영, 경용수, 이준석 (2003) 현수교의 개선된 초기형상 해석법, 한국강구조학회 논문집, 강구조공학회, 15(2), pp.219~229.

김문영, 김호경, 경용수 (2007) 사장교의 초기형상해석을 위한 탄성포물선 케이블 요소, 한국전산구조공학회 논문집, 20(1), pp.1~7.

안상섭 (1990) 탄성현수선 케이블 요소를 이용한 3차원 케이블망의 정적 및 동적 비선형 해석, 서울대학교 석사학위논문.

한국전력공사 (1995) 영흥도 화력발전소 진입도로 및 교량 시설설계 구조계산서.

Chen, D.W., Au, F.T.K., Tham, L.G., Lee, P.K.K. (2000) Determination of Initial Cable Forces in Prestressed Concrete Cable-Stayed Bridges for Given Design Deck Profiles using the Force Equilibrium Method, *Computer & Structures* 74, pp.1~9.

Kim, K.S., Lee, H.S. (2001) Analysis of Target Configurations under Dead Loads for Cable-Supported Bridges, *Computer & Structures*, 79, pp.2681~2692.

Wang. P.H., Tseng. T.C., Yang. C.G. (1993) Initial Shape of Cable-Stayed Bridges, *Computer & Structures*, 46(6), pp.1095~1106.

Wang. P.H., Yang. C.G. (1996) Parametric Studies on Cable-Stayed Bridges, *Computer & Structures*, 60(2), pp.243~260.

- 논문접수일 2010년 9월 10일
- 논문심사일 2010년 9월 27일
- 게재확정일 2010년 10월 27일