

실험을 통한 시공 중 강사장교의 극한거동 연구

이기세¹⁾ · 김승준²⁾ · 최준호³⁾ · 강영종^{4)*}

¹⁾ 박사과정, 고려대학교 건축사회환경공학부 ²⁾ 박사후과정, Texas A&M University, Texas Transportation Institute

³⁾ 석박통합과정, 고려대학교 건축사회환경공학부 ⁴⁾ 교수, 고려대학교 건축사회환경공학부

Experimental Study for Ultimate Behavior of Steel Cable Stayed Bridge Under Construction

Lee, Kee Sei¹⁾ Kim, Seung Jun²⁾ Choi, Jun Ho³⁾ Kang, Young Jong^{4)*}

¹⁾ Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, 136-713, Korea

²⁾ Post Doc., Texas Transportation Institute, Texas A&M University, TX 77843-1342, U.S.A

³⁾ Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, 136-713, Korea

⁴⁾ Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul, 136-713, Korea

ABSTRACT : The girders of cable stayed bridge are subjected to not only the bending moments but also additional compressive axial forces due to the horizontal components of cable forces. Because of these axial forces, the stiffness of girder can be decreased, and this problem should be considered especially for under-construction model rather than the full model. Korean domestic design specification suggests the linear elastic eigen value analysis for the stability problem of cable stayed bridges. However, this method cannot be applied to the under construction model because various geometric nonlinear characteristics cannot be considered. Therefore, in this study, 3 models which are assumed to be constructed by balanced cantilever will be considered experimentally and analytically to analyze the behavior of steel cable stayed bridges.

KEYWORDS : experiment, cable stayed bridge, ultimate behavior, under construction, nonlinear

1. 서 론

사장교는 현수교와 더불어 대표적인 케이블 지지교량으로 미관이 수려하고, 구조적 특성상 장지간화가 가능하여 최근 각광받고 있는 교량 형식이다. 그러나 사장교는 고차 부정정 구조물이며, 케이블의 자중에 의한 새그 및 구조물 자체의 대변위 효과 등의 이유로 구조해석에 있어 그 거동 분석은 쉽지 않다. 특히 사장교는 현수교와 달리 케이블 장력의 분력 성분들은 주탑뿐만 아니라 거더에도 압축력으로 작용하게 되

Note.-Discussion open until June 30, 2013. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on September 28, 2011; revised July 18, 2012; approved on December 6, 2012.

© KSSC 2012

* Corresponding author

Tel. +82-2-927-7715; Fax. +82-2-921-5166

E-mail: yjkang@korea.ac.kr

는데, 이러한 부가적인 압축력을 결과적으로 구조물의 강성 및 내하력을 저하시키는 주요 원인으로 작용한다. 이러한 이유로 그동안 사장교의 극한거동에 대한 연구가 이루어져 왔는데, Ying(1999)등은 Energy method를 이용하여 사장교의 재료, 기하학적 비선형 해석 방법을 제시 하였고^[1], Tang and Shu(2001)는 중앙경간과 총경간비, 주탑과 거더의 강성비를 매개변수로, Eigen-solver를 이용하여 사장교의 안정성을 검토하였다^[2]. Wei-Xin(1999)은 사장교의 극한거동에 대한 연구를 수행하였으며^[3] Longfei(2011)는 극한해석을 수행하여 완성계 사장교가 극한상태에 이를시 케이블이 구조계에 미치는 영향을 검토하였다^[4]. 그러나 이들은 모두 완성계 사장교에 국한된 연구였다. 국내에서는 경용수(2006) 등이 비탄성 좌굴 고유치 해석법을 이용하여 사장교 거더의 유효좌굴길이를 산정하고 이를 통한 사장교의 좌굴 설계방법을 제안한 바 있으며^[5], 김승준(2010&2011&2012)등은 사장교 전용해석프로그램 개발을 통해 완성계 사장교의 좌굴

안정성에 대하여 연구를 진행 하였다^{[6], [7], [8]}. 그러나 이들 또한 완성계 상태의 사장교에 대한 해석적 연구라는 한계가 있다. 실험연구로는 Xudong shao(2005)를 들수 있는데, 이는 주탑 부근 거더의 극한 거동을 실험적으로 규명했다는 점에서 타 연구와의 차별성이 부각 되지만 이 또한 특정 교량 모델의 완성계에 대한 연구라는 점에서 한계를 지닌다^[9].

본 연구의 모델이 되는 2주탑 3경간 사장교의 경우, 완성계에서는 반대편 주탑에 거치되는 케이블에 의하여 중앙경간의 보강형에 작용하는 압축력은 상쇄되고, 이로 인한 부재의 강성저하 현상은 그만큼 줄어든다 할 수 있다. 그러나 주탑부에서부터 한 새그먼트씩 가설하는 FCM공법의 경우, Key-Segment 가설전에는 이러한 상쇄 없이 케이블의 수평방향 분력은 그대로 보강형에 작용하게 된다. 이때에 보강형은 수평분력으로 인한 압축력 이외에 자중 및 테릭크레인의 무게까지 저항해야 하며, 압축력이 가장 크게 작용하는 주탑부근의 보강형에서는 이러한 휨모멘트와 압축력의 상호작용으로 인하여 부분적으로 소성화가 일어날 수 있다.

그러나 상술한 바와 같이 이러한 시공 중 모델에 대한 극한거동 연구는 미미한 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 FCM공법으로 가설되는 2주탑 3경간 사장교의 폐합 직전 모델에 대하여 축소모델을 제작하여 실험적으로 그 거동 양상을 분석하고, 재료적, 기하학적 비선형성을 모두 고려하여 극한 거동에 관한 해석연구를 수행 하였다.

2. 실험모델

2.1 모델의 종류

실험체는 실제 교량을 기준으로한 상사모델을 사용함이 적절하나, 실험실 환경 및 여타 조건을 만족할 수 있는 모형은 그 축척으로 인하여 단면이 큰 폭으로 줄어들어 제작 및 설치·조립에 어려움이 있다. 따라서 본 실험에서는 보고자 하는 거동을 가장 비슷하게 재현할 수 있는 또 다른 하나의 교량을 설계한다는 관점에서 출발한다(이호종, 2002)^[10].

실험 모델은 Wang and Yang(1996)이 제안한 총경간 610m 주탑 높이 61m의 2주탑 3경간 사장교 모델을 기본 모형으로 삼고 이를 실험실 조건에 맞도록 길이에 대하여 상사법칙을 적용 하였다^[11]. 주탑과 케이블 거더는 기성 품으로 제작된 단면을 그대로 사용하거나 절단등의 가공을 하여 사용하며, 경계조건은 기본모형의 것을 따른다. 요컨대, 실제 교량 총 경간에 대한 실험체의 경간은 대략 70:1 정도의 축척으로 상사하여 제작하되, 제작이 불가능한 부분은 최대한 실제 거동과 비슷하도록 이상화 시킬 수밖에 없다는 점을 미리 명시한다.

실험체는 Harp형 사장교와 Semi-Harp형 사장교 총 두 가지 모델에 대하여 제작하고, Semi-Harp형의 경우 주탑과 거더, 케이블은 모두 Harp형 모델과 동일한 것을 사용하되 케이블의 배치 형식만 달리 한다. 실험체 모델은 상사모델 기준 총경간 9m의 사장교이며, 시공중 모델은 반경간만 제작하게 되므로 총길이 4.5m 주탑 높이 1.48m에 대하여 제작 한다. 상사로 인한 고정하중의 감소분은 250kg의 추를 등간격으로 달아 대신하도록 하였다.

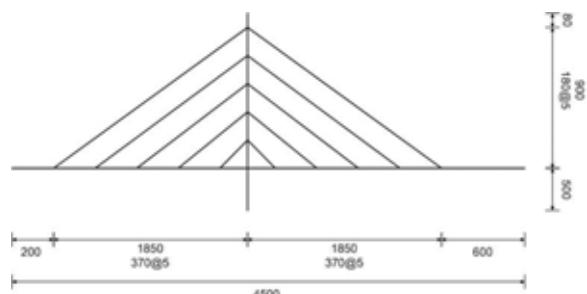


Fig. 1 Harp Type Model

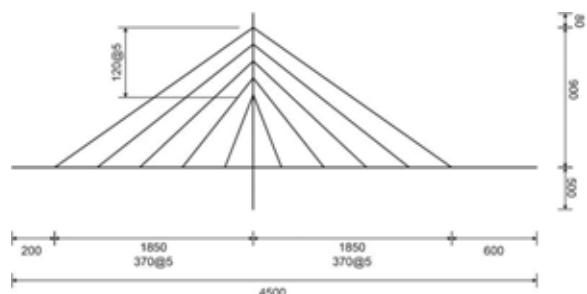


Fig. 2 Semi-Harp Type Model

2.2 단면제원

거더와 주탑의 단면제원은 Fig. 3, Fig. 4에 나타난 바와 같다. 거더는 국내에서 생산되는 기성품중 가장 작은 'ㄷ'형 단면을 사용하였으며, Harp-Type 2에 대해서는 거더의 좌굴 모드를 확인하기 관측하고자 Harp-Type 1에 사용한 거더의 플랜지를 15mm 절단하여 제작하였다. 이 경우 실험결과 분석 및 유한요소 해석을 위한 단면제원은 수계산을 통하여 산정 하였으며, 필렛 부분의 효과는 무시하였다(Table 1).

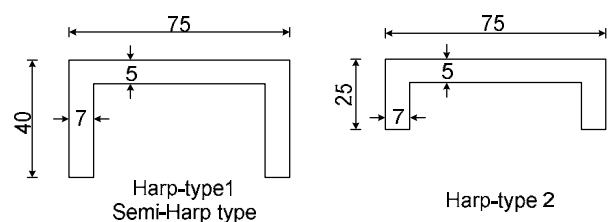


Fig. 3 Section of Girders

사장교의 거더는 케이블에 의하여 지지되지만, 케이블은 모두 주탑에 거치되어 있어, 주탑에 소성한지가 발생하거나, 과도한 변위가 생기는 것은 구조계 전체의 파괴를 의미한다. 따라서 본 연구에서는 보강형의 거동에 주안점을 두었으며 이에 따라 실험 모델에서는 주탑의 휨강성을 충분히 확보하였다. 따라서 T형강 두 개로 이루어지는 주탑의 휨강성은 대략 Harp-Type 1의 11배, Harp-Type 2의 40배가 된다.

Table 1. Sectional Property of Girders

	Harp-type 1 Semi-Harp Type	Harp Type 2
A	881.8 mm ²	655 mm ²
I_x	122,000 mm ⁴	33,404 mm ²
I_y	753,000 mm ⁴	475,574 mm ⁴
P_y	35,272 kg	26,200 kg
M_{Px}	446,513 kg · mm	177,347 kg · mm
M_{Py}	966,055 kg · mm	531,037 kg · mm

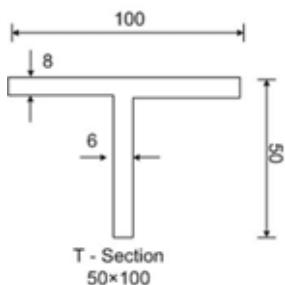


Fig. 4 Section of Pylon

Table 2. Sectional Property of Pylon

A	1,095 mm ²
I_x	161,000 mm ⁴
I_y	669,000 mm ⁴
P_y	43,800 kg
M_{Px}	657,000 kg · mm
M_{Py}	1,314,000 kg · mm

케이블은 각 모델마다 6mm의 직경을 갖는 7연선 20개를 사용하였으며, 초기장력 재하를 위해 케이블 중간에 턴버클을 설치하였다. 해석 결과, 극한하중 재하시 최외측 케이블의 장력은 1톤에 다다르게 되며 이에 따라 턴버클 후크 부분의 변형이 문제가 될 수 있다는 결론을 얻었다. 후크의 변형은 케이블 장력의 정확한 측정에 영향을 미칠 뿐만 아니라 구조계 전체의 거동에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 턴버클의 후크

부분은 용접을 통하여 폐합하였다. 또한 실험 중 케이블 장력 측정을 위하여 케이블 중간에 i-bolt를 설치하여 스트레인계 이지를 부착하였다(Fig. 5).

케이블의 초기장력은 사장교의 강성에 영향을 미치는 주요한 요인이라 할 수 있다. 이에 따라, 구조해석프로그램을 이용하여 초기형상해석 및 시공단계해석을 수행, 해당 모델에 대한 초기장력을 도출하여 재하하였다.

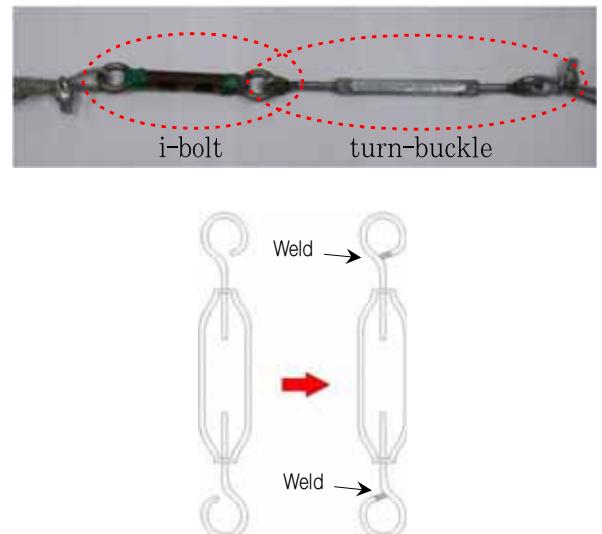


Fig. 5 Turn buckle & i-bolt for strain gages

Table 3. Model Type

모델	거더	케이블거치형식
Harp-Type 1	ㄷ형강 75x40	Harp
Harp-Type 2	ㄷ형강 75x25	Harp
Semi-Harp Type	ㄷ형강 75x40	Semi-Harp

2.3 경계 조건

모델의 경계조건은 측경간 끝단부 및 거더와 주탑의 교차점은 롤러, 주탑은 고정지점을 모사하도록 한다. 측경간 끝단부는 Fig. 7과 같이 롤러와 브라켓을 사용하여 수직방향 변위만을 구속하였으며, 주탑의 고정지점은 Fig. 8과 같이 볼트와 덧댐판을 이용하여 13cm 가량을 단단히 구속하여 모사하였다.

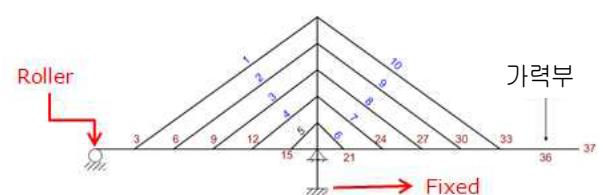


Fig. 6 Boundary Condition of Model



Fig. 7 Roller Support

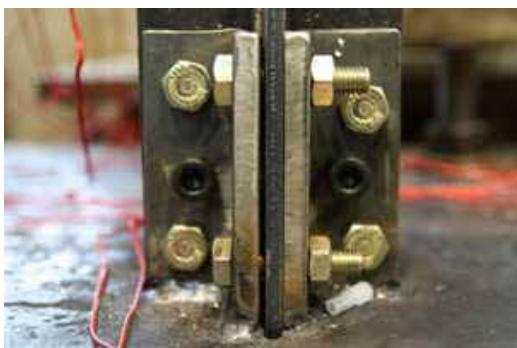


Fig. 8 Fixed Support

3. 구조해석

실험에 앞서 구조물의 거동 양상과 극한하중을 예측하는 한편, 시공중 모델의 초기장력을 결정하기 위하여 구조해석을 실시하였다.

해석 모델은 실험체와 동일한 제원을 갖추도록 모델링 하였다(Fig. 10). 보강형은 하나의 뼈으로 모델링하였고 실험에서 자중의 보강으로 사용되는 추를 모사하기 위하여 등간격으로 무한강성을 지닌 가로보를 설치하였으며, 가로보의 길이는 실험체 거더의 폭과 같도록 하여 케이블 또한 가로보에 거치하는 형태를 모사하였다.

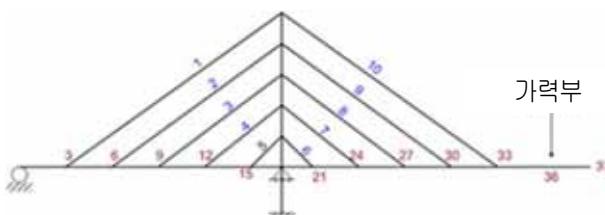


Fig. 9 Analysis Model

해석에서 거더와 주탑은 3차원 비선형 프레임요소, 케이블은 등가 트러스 요소가 사용되었으며, 각 요소는 Updated Lagrangian Formulation에 의해 정식화 되었다. 하중 증분 반복 해석방법으로는 Generalized Displacement

Control Method를 채택하였고, 재료의 점진적인 소성화를 고려할 수 있도록, 개선소성한지법을 적용하였다. 모델은 기본적으로 대칭을 띠고 하중에 대한 편심효과는 없기 때문에 평면 외 방향 거동은 없었다. Fig. 9에 주요 절점 번호 및 케이블 요소 번호를 나타내었다.

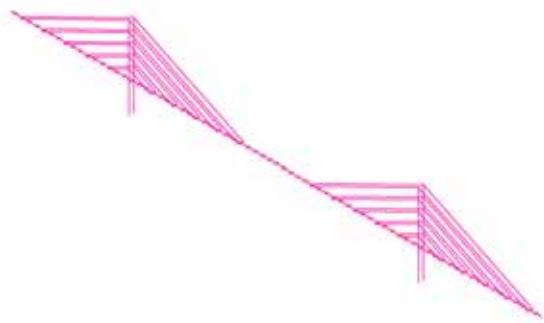


Fig. 10 3D Model

본 연구에서는 실험 모델의 해석을 수행하기 위하여 사장교 전용 해석 프로그램(김승준 등, 2010)을 사용하였으며, 해석은 총 3단계로 이루어진다^{[12], [13]}. 첫 번째로 완성계 모델에 대하여 초기형상 해석을 수행하게 되는데 이를 통하여 고정하중하에서 목표형상을 만족하고 주탑·거더의 휨모멘트가 최소가 되는 케이블의 장력을 결정하게 된다. 이후 Key-Sag를 제거하고 이에 따른 불평형 하중에 대하여 반복 해석을 통해(역해석) 실험 모델에 대한 평형상태를 추적한다. 이 단계에서 얻어진 장력은 실험시 사용하게 되는 초기 장력이 된다. 마지막으로 데릭 크레인과 Key-Sag의 무게를 재하하는 극한해석이 진행되게 된다. 본 해석을 통하여 폐합진 상태를 구현하는 케이블 장력을 도출하였으며, 데릭크레인과 Key-Segment의 무게를 재하하여 극한하중 및 극한거동을 예측하였다.

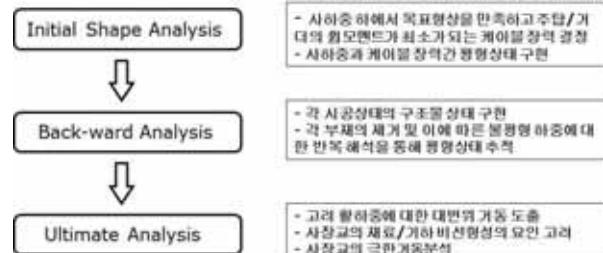


Fig. 11 Analysis Scheme

전술한 바와 같이 해석은 1차적으로 완성계 상태에서 목표형상과 가장 잘 부합하며, 자중에 의한 거더의 모멘트 분포를 고르게 할 수 있는 케이블의 초기장력을 결정하게 된다. 이후, 중앙부의 Key-Sag를 제거하고 평형 상태를 추적하는 역

해석 과정이 수행되며, 이때의 모델과 모멘트 분포는 Fig. 12와 같다. 이후 36번 노드에 데릭크레인과 Key-Sag의 무게를 재하 하는 극한 해석이 수행 되게 된다.

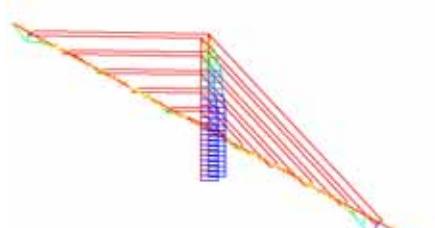


Fig. 12 Backward Analysis

3.1 하중-변위곡선

Fig. 13은 세가지 실험 모델에 대한 가력부의 하중-변위곡선이다. Harp-Type 1의 경우 하중은 선형적으로 증가하다가 300kg 이후부터 서서히 강성의 감소를 보였다. 하중이 502kg에 이르러서 주탑에 가장 가까운 부분인 20번과 21번 노드에서 소성현지가 발생 되었으며 이후부터 구조물의 강성은 급격히 감소하여 극한하중에 이르렀다. 여기서 거더의 20번 노드는 실제로 가장 큰 압축력이 작용하는 부분이며, 작용하는 압축력 및 증폭된 휨모멘트에 의해 재료적 소성화가 발생하였다.

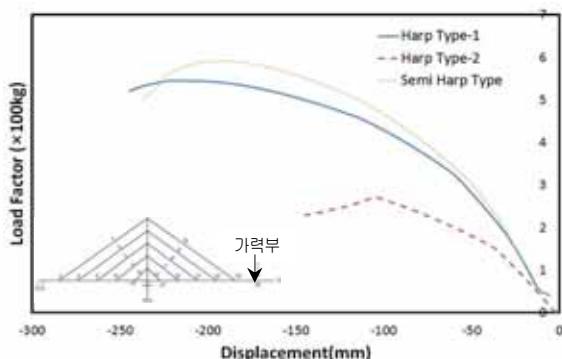


Fig. 13 Load Displacement Curve of 3 Models

Harp-type 2의 경우에는 하중-변위 곡선의 경향성은 Harp-type 1과 유사하였으나, 단지 변위가 커짐에 따라서 구조물의 강성이 점차적으로 감소하는 경향을 보였을 뿐, 극한하중에 이르기까지 소성현지는 발생하지 않았다. Harp-Type 1의 극한하중은 271kg이었으며 이후 구조물의 강성은 빠르게 감소하였다. Semi-Harp Type의 경우에는 하중-변위곡선의 전개양상은 Harp-Type 1과 매우 유사하였으며 소성현지 또한 같은 곳에서 발생 하였다. 그러나 극한하중은 591kg으로

케이블 배치만 다른 Harp-Type 1에 비하여 7.74% 증가하였다. 이는 케이블과 거더가 이루는 각도가 커짐에 따라 Harp-Type에 비해 케이블 인장력의 수직분력대비 수평방향 분력의 크기가 작아 동일 외력대비 거더에 작용하는 압축력이 감소하였기 때문이라 판단된다.

3.2 케이블 장력 변화

Fig. 14와 Fig. 15는 좌굴거동이 확인이 나타났던 Harp-Type 2에 대한 케이블의 장력 변화곡선이다. 이 모델의 경우 극한하중에 이르기까지 케이블, 주탑, 거더 어느 부분에서도 소성현지가 발생되지 않아, 기하 비선형성에 대한 고찰이 중요하다 할 수 있다. 다시 말해 사장교의 경우에서는 거더의 변위와 케이블 장력의 상호작용이 구조계 전체에 미치는 영향을 고려할 필요가 있다.

그래프에서 보는 바와 같이 중앙경간과 측경간의 최외측 케이블의 장력은 극한하중 재하시까지 꾸준히 증가하는 반면, 내측케이블은 장력이 감소하기 시작하여 극한하중에 가까워지면서 장력이 0이 되는 것을 볼 수 있다. 이는 거더의 상방향 휨변형이 증가하는 압축력에 의해 증폭됨에 따른 것으로, 거더가 좌굴을 일으켰다는 사실을 입증할 수 있는 결과이다. 이러한 경향성은 Harp-Type 2뿐만 아니라 나머지 두가지 모델에 대해서도 동일하였으며, 후술될 실험 결과에서도 나타났다.

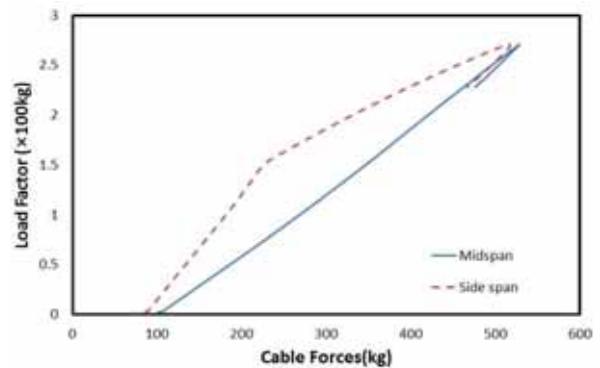


Fig. 14 Tensile Forces of Outside Cables

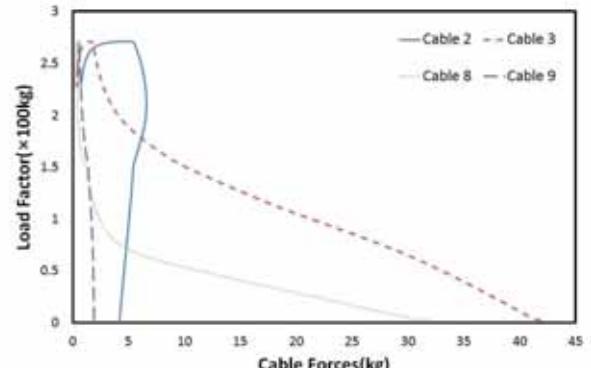


Fig. 15 Tensile Forces of inside Cables

4. 실험결과

4.1 Harp-Type 1

Fig. 16은 Harp-Type 1에 대한 가력부 하중 변위 곡선이다. 실험결과 극한 하중 값은 533kg이었으며 육안으로 확인이 가능한 소성힌지는 없었으나, 부분적으로 단면이 항복함을 Strain Gage로부터 읽어 들인 값으로 알 수 있었다. 해석에서 나타난 바와 같이 소성힌지 발생 이후 강성은 급격히 저하되고, 그 직후 극한 하중을 나타내는 양상을 보였다.

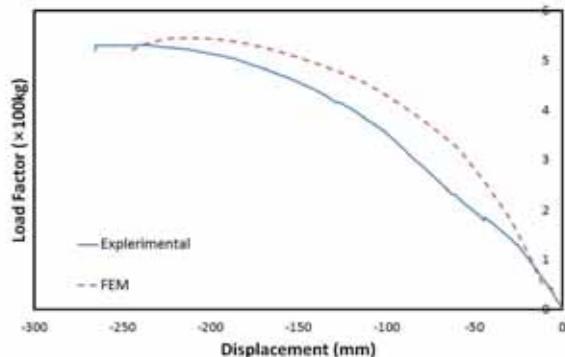


Fig. 16 Load Displacement Curve

Fig. 17은 내측케이블 장력의 변화를 도시한 것이다. 장력의 변화 양상은 앞서 도시한 Harp-Type 2의 해석 결과와 큰 차이는 없으나, 거더의 강성이 상대적으로 크기 때문에 케이블이 받는 장력의 절대적인 크기는 늘어났다. 특히, 하중가력시점부터 내측케이블의 장력이 감소하기 시작했던 Harp-Type 2와 달리 측경간 내측 케이블은 어느정도 저항을 한 이후 장력이 손실 되었다. 이는 거더의 강성이 Harp-Type 2에 비하여 크기 때문에 케이블의 수평방향 분력에 의해 발생하는 압축력에 기인하는 모멘트로 인한 상방향 변위가 발생하기 이전에 어느 정도 케이블의 수직방향 분력에 저항을 했기 때문이라 보여진다.

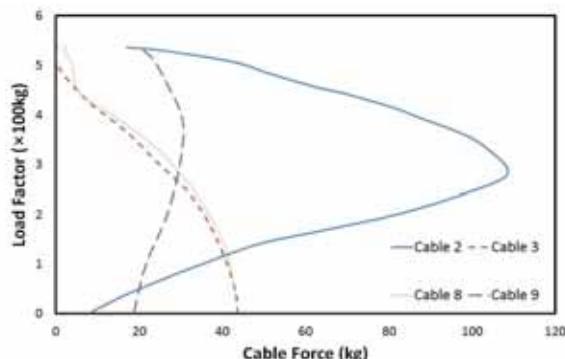


Fig. 17 Cable Forces

Fig. 18은 Harp-Type 1의 파괴모드이며, 굵은 원으로 표시된 부분에서 소성힌지가 발생 되었다. 소성힌지는 육안으로 뚜렷하게 확인되지는 않았으나, 부착한 스트레인게이지로 부터 단면의 부분적인 항복을 알 수 있었으며, 해석상에서도 동일한 지점에서 소성힌지가 발생하였다. 이는 케이블의 수평분력에 의한 압축력이 최대인 점으로, 휨모멘트와 압축력의 상호작용 즉 보-기둥 효과에 의한 것으로 판단된다.



Fig. 18 Failure Mode of Harp Type 1

4.2 Harp-Type 2

Fig. 19는 Harp-Type 2에 대한 가력부 하중 변위 곡선이다. 실험에서 극한 하중 값은 250kg 이었으며 그 이후 급격한 강성 저하를 일으켰다. 해석 결과에서도 270kg 가력후 강성이 소실되는 양상을 띠었다. 해석결과와 마찬가지로 극한 하중에 도달할때까지 거더 및 주탑에서의 소성힌지는 없었으며, 극한하중에 도달한 후 급격히 강성이 저하 되었다.

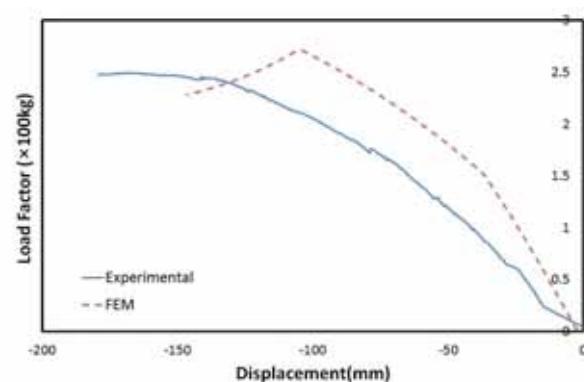


Fig. 19 Load Displacement Curve

Harp-Type 2 모델은 앞서 기술한 바와 같이 거더의 좌굴 모드를 확인하고자 선택된 Harp-Type 1의 비교 모델로, 중앙경간에 LVDT를 설치하여 변위 양상을 살펴보았다. 그 결과, 측점부에서는 하중재하 초기에 하중과 같은 방향, 즉 아랫방향의 처짐을 보였으나, 약 100kg(극한하중의 약 40%)재하 이후 변위의 방향은 반대가 되고, 약

125kg에 이르러서는 초기평형상태보다 높이 올라가는 양상을 띠었다. 이는 하중 증가에 따른 케이블 장력의 증가로 수직방향 분력에 기인한 것일 수 있으나, 내측케이블 장력이 손실된 이후에도 변위가 급격히 증가하는 양상으로 보아, 거더에 작용하는 압축력과 모멘트의 상호작용 즉 $P - \Delta$ 효과로 인한 것이라 할 수 있다. 이때에 상방향 변위는 하중재하의 반대방향이며, 보강형에 작용하는 압축력의 직각방향으로, 좌굴거동이라 할 수 있다.

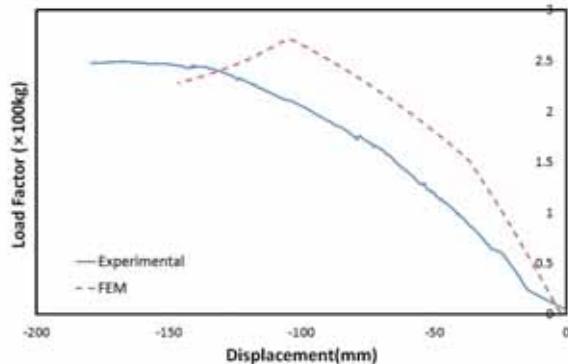


Fig. 20 Load Displacement Curve

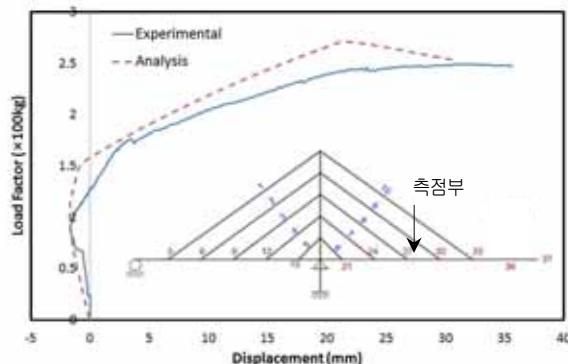


Fig. 21 Load Displacement Curve (LVDT)

이러한 거동양상은 Fig. 22에서 나타난 바와 같이 내측케이블의 장력 손실과 연관 지을 수 있다. 중앙경간 내측케이블의 장력은 거더의 상방향 변위에 의해 장력을 거의 손실하게 되고, 이에 따라 케이블과 거더의 정착부는 더 이상 탄성지지 역할을 할 수 없게 된다. 2번 케이블과 3번 케이블 또한 하중 재하시점부터 그 장력이 손실되기 시작하였고 앞선 결과로 미루어보아 측경간 거더 역시 상방향 변위를 떤다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 23은 Harp-Type 2의 파괴모드이며, 측경간 거더의 상방향 변위와 이로 인한 내측케이블의 이완 및 장력손실을 육안으로 확인할 수 있었다. 전술한 바와 같이 스트레인게이지를 통한 결과에서도 거더 단면의 부분적인 항복은 나타나지 않았으며, 이는 탄성좌굴모드를 나타내는 전형적인 예로

간주될 수 있다. 극한상태에서는 앞서 기술한바와 같이 내측케이블의 장력은 거의 모두 손실되었기 때문에 거더와 케이블의 정착점은 더 이상 지지점 역할을 할 수 없게 된다. 이러한 이유로 본 실험체의 좌굴 모드는 거더 전반에 걸친 Global Buckling의 형태를 띠게 된다.

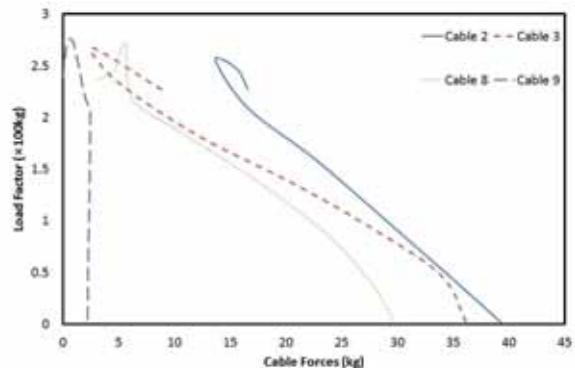


Fig. 22 Cable Forces



Fig. 23 Failure Mode of Harp-Type 2

4.3 Semi-Harp Type

Harp형의 대조군으로 선택된 Semi-Harp형 모델은 Harp-Type 1과 모든 조건이 같고 다만 케이블 배치만 달리한 모델이다. 가력부의 하중 변위 곡선을 Fig. 24에 도시하였다. 극한하중은 Harp-Type 1보다 실험적으로 5.5% 증가한 것을 볼 수 있었으며, 다른 양상은 하프형과 매우 비슷하였다.

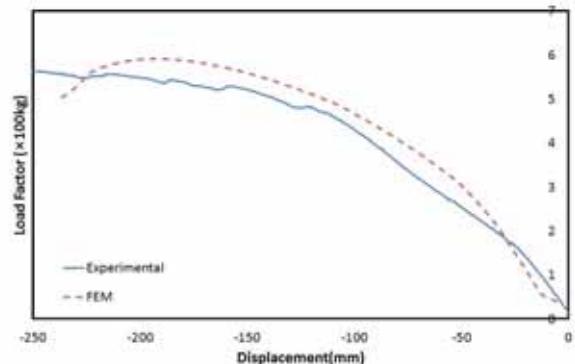


Fig. 24 Load Displacement Curve

해석상 Semi-Harp형의 경우에도 Harp-Type 1과 같은 위치에 소성한지가 발생하였는데, Harp-Type 1에서는 502kg 이후 소성한지가 발생된 반면 Semi-Harp형에서는 518kg 재하 후 소성한지가 발생하였다. 소성한지 발생 이후 구조물은 강성을 손실하면서 극한하중을 나타내었다.

Fig. 25는 Semi-Harp Type 실험체의 파괴모드로, Harp-Type 1과 비교하여 보았을 때 유판으로 구분할 수 있는 뚜렷한 차이점은 없었다.



Fig. 25 Failure Mode of Semi-Harp Type

Semi Harp형 모델의 경우 동일 하중 재하시 최외측케이블의 최대 장력은 Harp(Case2)보다 작게 측정되었다. 이는 케이블과 거더가 이루는 내각이 커짐에 따라 Harp형에 비하여 작은 장력으로도 큰 수직분력을 만들어 낼수 있기 때문이라 판단된다. 최종 케이블 장력 증가량은 Semi-Harp Type 이 Harp-Type 1보다 큰 것을 볼수 있는데, 이는 구조물 전체의 내하력 증가에 따른 것이라 할 수 있다.

Table 4. Change of Cable Forces of Each Model

모델	케이블	Experiment	Analysis
Harp-Type 1	중앙경간	902.75kg	852.47kg
	측경간	1014.86kg	882.16kg
Harp-Type 2	중앙경간	590.148kg	572.82kg
	측경간	604.80kg	528.65kg
Semi-Harp type	중앙경간	942.693kg	908.60kg
	측경간	994.71kg	937.45kg

5. 파괴모드

국내 설계지침에서는 사장교의 안정성 평가를 위한 방법으로써, 선형탄성해석법을 제안하고 있다(케이블강교량설계지침 6.4)^[14]. 이에 따르면 사장교 거더의 유효길이는 Fig. 26와 같이 오일러좌굴 공식을 역산하여 산정되게 된다.

그러나 이러한 방법을 사용하는 것은 다음과 같은 두 가지 사항에 대한 가정을 기본으로 한다.

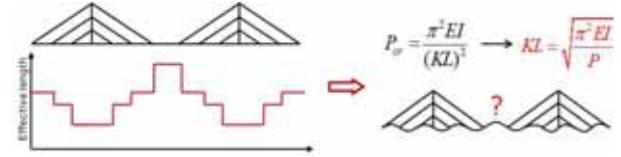


Fig. 26 Domestic Design Specification

- 케이블과 거더의 정착점은 탄성 연결이다.
- 완성계에서 교량이 고정하중만 받고 있는 상태, 즉 초기 평형상태에서 거더에 작용하는 압축력은 각 세그먼트의 좌굴 강도로 간주 될 수 있다.

그러나 고유치 해석법으로는 케이블 장력의 변화에 따른 거동 변화를 고려할 수 없으므로 첫 번째 가정은 적용할 수 없게 된다. 또한 교량에 활하중이 작용할 경우 케이블의 장력은 증가하게 되고 이에 따라 거더에 작용하는 압축력은 증가하게 되어 두 번째 가정 또한 적용할 수 없다. 사장교와 같이 대변위 효과가 큰 구조물에 대한 안정성 검토시 이러한 가정을 가지는 선형탄성고유치 해석법을 적용할 경우, 실제 거동과는 전혀 다른 양상의 결과를 얻을 수 있다. 요컨대 이러한 방법은 작용하는 내력에 의하여 구조물의 강성차이가 커지는 사장교와 같은 구조물에 적용되었을시 실제 구조물의 거동과 상이한 양상을 띠므로, 실제 거동을 정확히 반영할 수 없다.

본 연구에서는 이러한 차이점을 확인하기 위해 상용 유한요소 해석 프로그램인 Abaqus 6.9를 이용하여 좌굴모드의 확인을 위한 모델인 Harp-Type 2에 대하여 고유치 해석을 수행하고(Fig. 27) 이를 구조해석 프로그램(김승준외, 2010)을 통한 비선형해석(극한해석, Fig. 28)과 비교하였다. 극한해석에서는 하중이 증가함에따라 측경간과 중앙경간의 보강형은 상방향 변위를 보였으며, 이에 따른 내측 케이블 장력손실을 확인할 수 있었다. 그러나 고유치 해석에서 측경간 거더는 아래방향 치짐을 나타내고 있으며 이는 측경간 내측 케이블의 장력 증가를 야기하게 되므로 실제 구조물의 거동과는 차이를 보인다 할 수 있다. 더욱이 하중의 변화에 따라 케이블 장력은 민감하게 변화하여 사장교의 거동에 큰 영향을 미치게 되는데, 이는 비선형 해석을 통해서만 반영할수 있는 효과라 할 수 있다.

Harp Type-2의 경우 실험과 해석 두 경우 모두 극한하중에 이르기까지 거더 및 주탑에서는 소성한지가 발생되지 않았으며 이는 사실상 탄성좌굴거동으로 간주될 수 있다. 그러나 전술한 바와 같이 탄성좌굴 고유치 해석은 사장교의 거동양상을 정확히 반영할 수 없으며, 경우에 따라 전혀 다른 좌굴 모드를 보이게 된다.

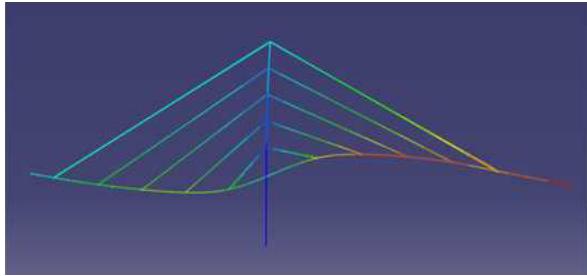


Fig. 27 Eigen Value Analysis

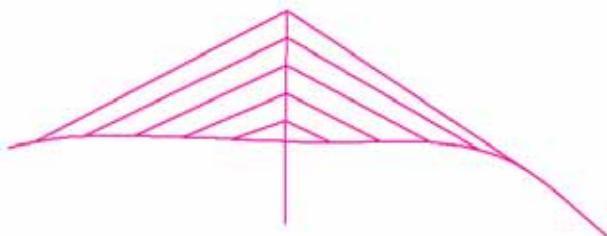


Fig. 28 Geometrical & Material Nonlinear Analysis

6. 결 론

사장교는 구조적 특성상 고정하중 및 활하중 재하시 거더에 휨모멘트 외에 부가적인 압축력이 재하되며 이로 인해 세장한 거더는 결과적으로 구조물의 강도 및 강성이 저하되고, 거더의 휨강성이 작을 경우 좌굴 가능성 또한 존재한다. 이는 FCM으로 가설되는 2주탑 3경간 사장교의 경우 완성계보다 시공중 모델에 대하여 두드러지게 되며, 본 연구에서는 이러한 거동을 규명하기 위하여 실험적, 해석적으로 접근하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 실험 모델의 가력부 하중-변위 곡선은 비선형성을 띠었으며, P- Δ 효과에 의하여 대변위가 발생됨에 따라 가하는 하중이 커질수록 강성이 저하되는 현상을 확인 할 수 있었다. 이러한 경우 거더나 케이블의 재료가 항복하지 않았음에도 불구하고 극한 하중에 다다르게 되었으므로 강성감소의 원인은 기하학적 비선형성에 근거한다 할 수 있다. 한편 Harp-type 1과 Semi-Harp type의 경우에는 이와 달리 가력 중 소성현지가 나타나고 그 이후 급격히 강성이 감소하여 극한 하중에 다다랐으며, 이에 비추어 볼 때에 사장교는 구조적 특성에 따라 기하학적 비선형성과 재료적 비선형성을 동시에 고려해야 한다고 판단 할 수 있다.
- (2) Harp-type 2의 경우 LVDT 측점부의 하중-변위 곡선으로부터 극한하중 재하시 중앙경간의 처짐이 상방향임을 알 수 있다. 이는 케이블의 수직 분력과 거더에 도입

되는 압축력과 휨모멘트의 상호작용에 의한 것이고, 그 방향은 가하는 하중의 반대방향, 거더에 작용하는 압축력의 직각 방향으로 좌굴 거동으로 볼 수 있다.

- (3) 파괴모드는 개별부재의 탄성 좌굴이 아닌 P- Δ 효과에 의한 거더 전반에 걸친 Global Buckling의 형태로 나타났다. 따라서 현행 설계기준에서 제시하고 있는 선형탄성좌굴해석 방법에 의한 유효좌굴 길이 산정법은 사실상 적용이 어렵다고 할 수 있다.
- (4) 하중이 증가하면서 내측케이블의 장력은 점차적으로 소실되고 마지막에는 케이블의 장력은 0이 되면서 사실상 탄성지지점의 역할을 할 수 없다. 따라서 극한해석을 위해서는 하중 단계에 따라 케이블 장력의 변화를 고려할 수 있는 비선형 해석이 필요하다 할 수 있다.
- (5) Harp-type 1과 Semi-harp type의 극한하중은 해석상 7.74%의 차이를 보였으며 그 값은 Semi-Harp type이 더 큰 것으로 나타났다. 따라서 주탑의 강성이 충분히 확보될 시에 거더의 안정성을 확보하기 위해서는 Harp type보다 Semi harp type이 더 유리할 것으로 판단된다.

요컨대, 사장교의 극한 해석 시, 구조적 특성을 반영하기 위해서는 선형탄성좌굴해석은 적합하지 않으며 특히 시공 중 모델에 대해서는 재료적 기하학적 비선형성을 모두 고려하여야 한다고 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 GS건설에서 지원한 고려대학교 BK21 건설 글로벌 리더 양성사업단의 과제 “강사장교의 좌굴안정성 평가기법개발”의 일환으로 수행되었습니다. 본 연구를 위해 많은 지원을 아끼지 않은 GS건설과 고려대학교 건축사회환경공학과에 감사드립니다.

참 고 문 헌(References)

- [1] Xi, Y. and Kuang, J.S. (1999) Ultimate load capacity of Cable Stayed Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp.14-22.
- [2] Tang, C.C. and Shu, H.S. (2001) Stability analysis of steel cable-stayed bridges, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 11, No. 1, pp.35-48.
- [3] Ren, W.X. (1994) Ultimate Behavior of Long-Span Cable-Stayed Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp.30-37.

- [4] Wang, L. and Liu, M. (2011) Effects of Stable Cable on Ultimate Load-Carrying Capacity of Long-Span Composite Girder Cable-Stayed Bridge with Three Pylons, *Advanced Materials Research*, Vol. 163-167, pp.2337-2342.
- [5] 경용수, 김문영, 장승필(2008) 활하중의 영향을 고려한 시스템 좌굴해석 및 2차 탄성해석을 이용한 사장교의 개선된 좌굴설계, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제26권, 제3A호, pp.485-496.
- Kyung. Y.S., Kim, M.Y., and Chang, S.P. (2008) An Improved Stability Design of Cable-Stayed Bridges using System Buckling and Second-Order Elastic Analysis, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 3A, pp.485-496 (in Korean).
- [6] 김승준, 이기세, 김경식, 강영종(2010) 사장교의 기하학적 비선형 거동의 해석적 연구, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제30권, 제1A호, pp.1-14.
- Kim, S.J., Lee, K.S., Kim, K.S., and Kang, Y.J. (2010) Analytical Study of Geometric Nonlinear Behavior of Cable-stayed Bridges, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 1A, (in Korean).
- [7] 김승준, 임석빈, 이기세, 강영종(2012) 완성계 강사장교의 극한거동의 해석적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제32권, 제2호, pp.85-95.
- Kim, S. J., Im, S.B., Lee, K.S., and Kang, Y.J. (2010) Analytical Study of Ultimate Behavior of Cable-stayed Bridges, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 32, No. 2, (in Korean).
- [8] 김승준, 한승룡, 김종민, 조선규, 강영종(2011) 기하형상에 따른 강사장교의 안정성에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제1호, pp.13-27.
- Kim, S.J., Han, S.R., Kim, J.M., and Kang, Y.J. (2011) Effect of Geometric Shapes on Stability of
- Steel Cable-Stayed Bridges, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 23, No. 1, pp.13-27 (in Korean).
- [9] Shao, X.S., Zhao, H., Li, L., Peng, W., Liu, D., and Yan, B. (2005) Design and experimental study of a harp-shaped single span cable-stayed bridge, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 10, No. 6, pp.658-665.
- [10] 이호종(2002) 모형실험을 이용한 비대칭 사장교의 자유 진동 해석, 석사학위논문, 건국대학교.
- Lee, H.J. (2006) Free vibration analysis of unsymmetrical Cable-Stayed bridge by model test, Master's thesis, Konkuk Univ. (in Korean).
- [11] Wang, P.H. and Yang, C.G. (1996) Parametric Studies on Cable-Stayed Bridge, *Computers & Structures*, Vol. 60, No. 2, pp. 243-260.
- [12] 김승준, 한승룡, 김종민, 조선규, 강영종(2011) 기하형상에 따른 강사장교의 안정성에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제1호, pp.13-27 (in Korean).
- Kim. S.J., Han. S.R., Kim. J.M., Cho. S.K., and Kang. Y.J. (2011) Effect of Geometric Shapes on Stability of Steel Cable-stayed Bridges, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 23, No. 1, pp.13-27.
- [13] GS건설, 고려대학교(2008) 사장교의 좌굴 안정성 평가 및 비선형 해석 기법 개발.
- GS E&C and Korea Univ. (2008), Development of Nonlinear Analysis Technique & Stability Evaluation for Cable Stayed Bridges, *Research Report*, Korea (in Korean).
- [14] 대한토목학회(2006) 케이블 강교량 설계지침.
- Korean Society of Civil Engineers (2006) Design Guideline for Steel Cable Bridges (in Korean).

요약 : 사장교의 거더에는 케이블의 수평방향 분력에 의하여 휨모멘트 외에 부가적인 압축력이 가해지게 된다. 세장하게 설계되는 거더는 이러한 압축력에 의해 강성이 저하될 수 있으며, FCM으로 가설되는 사장교의 경우 이러한 문제는 완성계보다 시공중 모델에 대하여 고려되어야 할 필요가 있다. 현행 설계기준에서는 사장교 거더의 안정성 평가를 위하여 선형탄성고유치 해석법을 제안하고 있다. 그러나 이러한 방법으로는 비선형성 거동을 하는 사장교의 구조적 특성을 반영할 수 없을 뿐 아니라, 완성계 상태를 기준으로 하는 해석 방법은 시공중 모델에 대한 적용이 어렵다 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 FCM으로 가설되는 2주탑 3경간 강사장교에 있어, 케이블 거치 형식과 거더의 강성에 따라 총 3개의 모델을 제작하고 실험적, 해석적으로 시공중 사장교의 거동 특성을 분석하였다.

핵심 용어 : 실험, 사장교, 극한거동, 시공중, 비선형