

양방향 BSS 구조의 형상 매개 변수 연구

Geometrical Parametric Study on Two-Way Beam String Structures

이 승 혜* 서 민 회** 박 상 은*** 김 선 명**** 이 기 학***** 이 재 흥*****
Lee, Seunghye Seo, Minhee Park, Sangeun Kim, Sun-Myung Lee, Kihak Lee, Jaehong

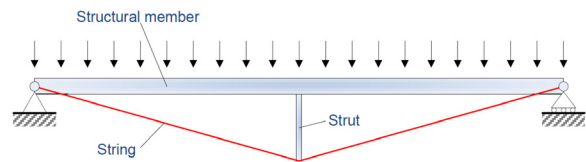
Abstract

A Beam String Structure (BSS) is a type of hybrid structures, which is composed of upper structural members, lower strings, and struts. Due to the advantages that the pre-tensioned strings elicit pre-camber of the upper structural members, the deflection can be greatly reduced without increasing the structural member size. In this study, a two-way beam string structure is proposed to endure bi-directional loading. The two-way beam string structure consists of two cable parts, namely, sagging and arch-shaped cables. A parametric study is presented aimed at proposing design guide lines of the two-way beam string structures. Numerical finite element analyses through the ABAQUS package were implemented to obtain their behaviors.

Keywords : Beam String Structure, BSS, Two-way BSS, Parametric study

1. 서론

BSS(Beam String Structure) 구조는 일종의 하이브리드 시스템으로 상부는 구조 부재(Structural member), 하부는 케이블(String)로 구성되어 있다. 상부 구조와 케이블 사이에는 스트럿(Strut) 수직 부재를 두어 케이블을 긴장할 때 수직 부재를 통해 상부 구조 하단을 지지하는 원리를 가진다<Fig. 1>. 장스팬 구조물의 설계에서 구조물의 처짐을 제어할 때 부재의 크기를 증가시키는 방법을 대체하여 BSS 구조를 적용한다면 구조물 전체의 물량을 감소시키면서 처짐을 효과적으로 줄일 수 있다¹⁾.

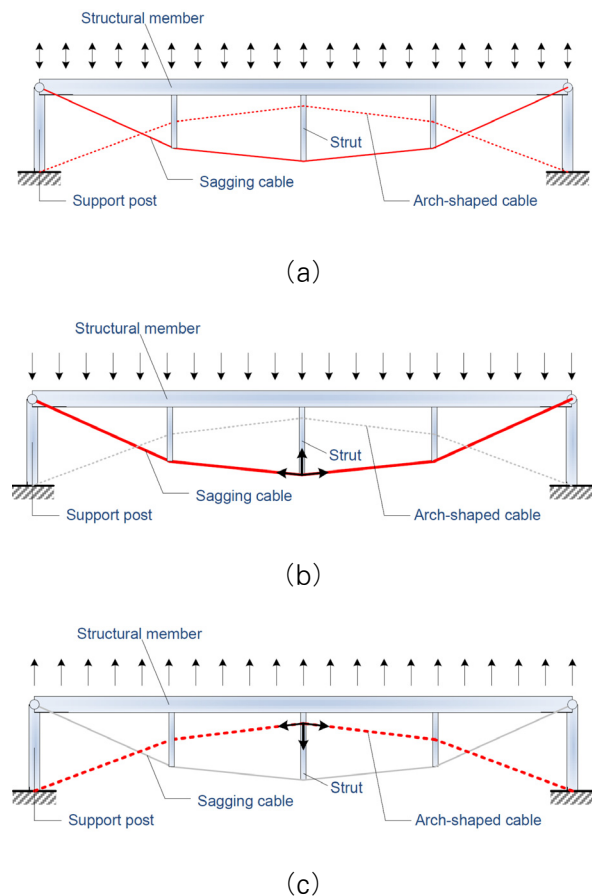


<Fig. 1> Schematic of the typical BSS (Beam String Structure)

<Fig. 1>에 보이는 바와 같이 기존의 BSS 시스템은 장경간 구조에서 중력 방향 정압에 대해 처짐을 감소시키는 것에 초점을 맞추어 개발된 것으로 스트럿 부재의 하단에 케이블을 관통하고, 케이블의 인장력으로 발생하는 스트럿의 압축력이 상현재에 부 모멘트를 작용시키는 원리를 가지고 있다. 본 연구는 이 점에 착안하여 대공간 지붕 구조물에 BSS 시스템을 적용하는 것을 목적으로 두었지만 바람에 의한 부압이 발생할 때에는 하단 케이블이 긴장력을 잃어 상부 구조만으로 지지를 해야 하는 경우가 발생한다. 이를 위해 <Fig. 2>와 같이 새로운 시스템을 제안하였으며 선행 연구에서 실험을 통해 가능성을 입증하였다²⁾.

양방향 BSS 구조는 일방향 BSS 구조에 아치 모양

* 주저자, 정회원, 세종대학교 건축공학과 조교수, 공학박사
Dept. of Architectural Engineering, Sejong Univ.
** 학생회원, 세종대학교 건축공학과, 공학석사
Dept. of Architectural Engineering, Sejong Univ.
*** 학생회원, 세종대학교 건축공학과, 석사과정
Dept. of Architectural Engineering, Sejong Univ.
**** 정회원, 한국타이어 중앙연구소 책임연구원, 공학박사
Hankook Tire Central R&D Center
***** 정회원, 세종대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Dept. of Architectural Engineering, Sejong Univ.
***** 교신저자, 정회원, 세종대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Dept. of Architectural Engineering, Sejong Univ.
Tel: 02-3408-3287 Fax: 02-3408-4331
E-mail: jhlee@sejong.ac.kr



<Fig. 2> (a) Schematic of the two-way BSS (Beam String Structure) (b) Action under positive pressure and (c) at upward force

의 케이블(Arch-shaped cable)을 추가한 형태이다. 중력 방향의 정압에서는 처짐 형태의 케이블(Sagging cable)에 내력이 발생하여 스트럿을 통해 상부 구조에 부압이 발생하며, 반대로 상향의 부압이 발생할 경우 아치 형태의 케이블에 내력이 발생하여 부압에 저항하는 원리를 가진다<Fig. 2 (a)>.

<Fig. 2 (b)>는 중력 방향 하중을 받을 때 양방향 BSS 구조의 거동을 나타낸다. 이때 처짐 케이블에 긴장력이 도입되어 스트럿의 압축력이 상부 구조의 처짐을 저감시킨다. 반대로 <Fig. 2 (c)>는 구조물에 부압이 발생한 경우로 아치 형상 케이블에 긴장력이 도입되어 스트럿을 중력 방향으로 압축하는 힘이 발생하고 이로 인해 부압에 의한 처짐을 저감시킬 수 있다.

일방향 BSS 구조는 1985년 최초로 개발³⁾된 이후 주로 중국과 일본 연구진에 의해 발전되어 왔으며 BSS 구조 스트럿 부재의 국부 좌굴에 대한 해석 연구⁴⁾나 제작 및 실험 연구⁵⁾, 비선형 동적 해석 연구⁶⁾에 대한 것이 주를 이룬다. 최근에는 접는 형태가 가능한 BSS 구조에 대한 연구도 찾아볼 수 있다⁷⁾. 하지만 본 연구에서 제안한 바와 같이 양방향 케이블이 장착된 BSS 구조는 최초의 시도라고 할 수 있다.

본 논문에서는 양방향 BSS 구조의 설계 지침서 작성을 위한 형상 매개 변수 연구를 수행하였다. 케이블의 곡률, 상부 구조의 길이와 스트럿 높이의 비, 스트럿의 개수에 따라 전체 구조의 강성이 어떻게 변화하는지를 분석하였다. 이를 위해 유한 요소 해석 프로그램인 ABAQUS⁸⁾를 이용하였으며, 하중-처짐 곡선이나 응력 분석을 통해 결과를 비교 분석하였다.

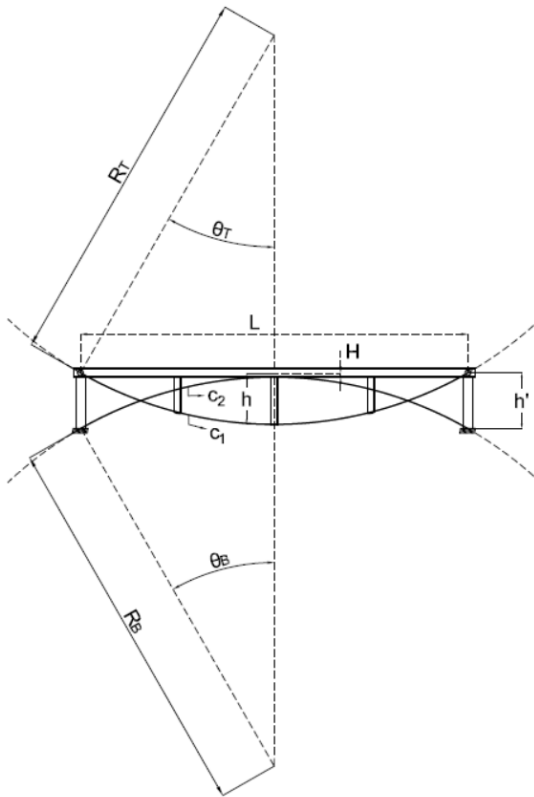
2. 대상 구조와 변수 설정

2.1 대상 구조물

<Fig. 3>은 형상 매개 변수를 위한 대상 구조물을 나타내고 있다. L은 상부 구조 부재의 길이를 뜻하며, H는 상부 구조 부재의 중심에서 아치 형상 케이블 C₂ 상단까지의 거리를 뜻한다. θ_T 와 θ_B 는 각각 케이블 C₁과 C₂의 곡률을 결정하는 상부 구조 부재의 중심에서부터 끝단까지의 각도를 의미하며 이를 통해 반경 R_T와 R_B를 정의할 수 있다. h는 중심 스트럿의 길이를 나타내며, h'는 양단 지지대의 길이를 뜻한다.

해석을 위해 우선 재료의 단면과 물성 값을 설정하였다. 상부 구조는 150X150X7X10 크기의 H형 강으로 길이 L은 4m로 고정하였다. 강재는 SM355B (KS D 3515)의 물성을 사용하였으며 이는 항복 강도 355MPa 이상, 인장 강도 490~630MPa의 범위를 갖는다. 케이블은 두 유형 모두 인장 강도 1,860MPa의 재료로 설정하였으며, 처짐 케이블과 아치형 케이블은 각각 지름 17.8mm와 12.59mm의 단면으로 설정하였다. 스트럿 부재는 125X65X6X8 단면을 갖는 C-채널 2개를 사용한 단면으로, 재료는

SS275 (KS D 3503)의 물성, 항복 강도 245MPa 이상, 인장 강도 400~510MPa의 범위로 설정하였다. 모든 강재의 탄성 계수는 $E = 200GPa$ 로 설정하였다.



〈Fig. 3〉 Notation for the target two-way beam string structure

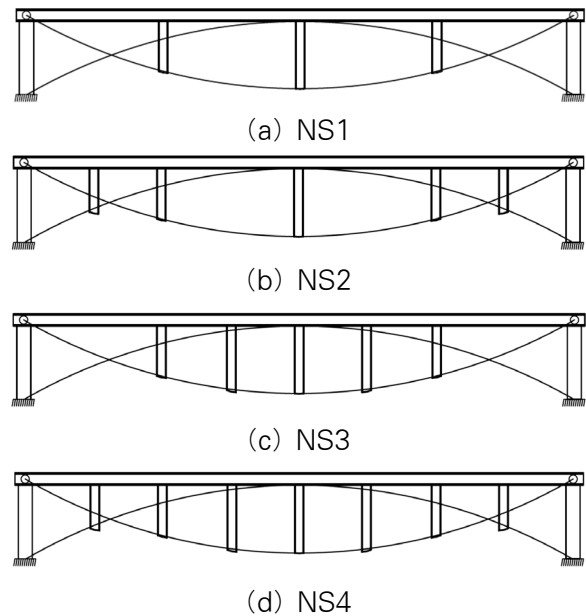
2.2 변수 설정

변수는 크게 스트럿의 개수와 각도 θ 로 나뉜다. 상부 구조 부재의 형상과 길이 L 이 결정되어 있으므로 상부 구조 부재와 아치 형상 케이블 상단까지의 길이 H 또한 고정 값으로 설정된다. 상부 구조 길이에 따른 스트럿 높이의 비율인 L/h 또한 변수가 될 수 있으나 L/h 의 값은 각도 θ 에 따라 자동으로 정해진다.

상·하부 케이블의 각도는 동일하게 변하는 것으로 설정하였다. 만약 처짐 케이블과 아치 형상 케이블의 2가지 형상이 다르게 변화한다면 이에 따라 결정되는 스트럿 길이 설정이 어려워지므로 각도는 모두 θ 로 설정하고, 15도부터 90도까지 15도 단위로 변화시키면서 이에 따른 상부 구조의 응력 변화

를 비교 분석하였다. 결론적으로 R_T 와 R_B 값 또한 R 로 동일해진다.

스트럿의 개수는 기본 3개로 설정하였으나 2개 혹은 4개를 추가적으로 배치하여 물량 증가에 따른 효과를 알아보았다.



〈Fig. 4〉 Strut layout cases

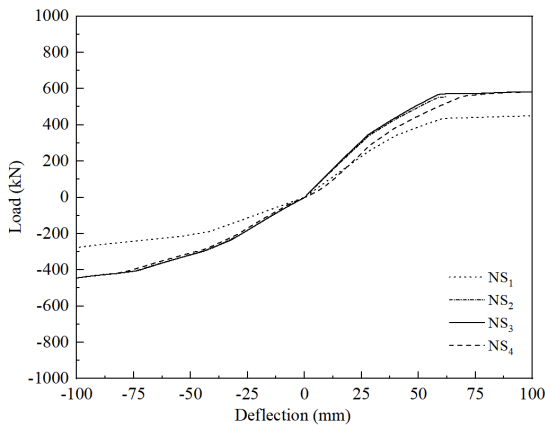
3. 스트럿 배치에 따른 영향

3.1 스트럿 배치 설정

〈Fig. 4〉는 스트럿 배치 변수를 나타내고 있다. 스트럿의 기본 배치 〈Fig. 4 (a)〉는 〈Fig. 3〉에서와 같이 총 3개를 1m 간격으로 균등하게 설치한 것이다. 〈Fig. 4 (b)〉는 2개의 스트럿을 지점에 가까운 곳에 추가 배치한 것이며, 〈Fig. 4 (c)〉는 2개의 스트럿을 중심 스트럿 좌우로 추가 배치한 경우이다. 〈Fig. 4 (c)〉는 4개의 스트럿을 기본 3개 위치의 사이사이에 추가 배치한 타입으로 스트럿의 개수는 총 7개가 된다. 단, 아치 형상의 케이블 끝단 고정을 위하여 전체 구조물의 양단에 지지대가 필요하다.

3.2 스트럿 배치의 영향

<Fig. 5>는 스트럿 배치에 따른 하중-변위 곡선을 나타내고 있다. 하중의 양수는 중력 방향의 정압을 의미하며, 음수는 반대 방향인 부압을 의미한다. 변위 또한 양수는 중력 방향의 하향을 의미하며, 음수는 상향의 처짐을 의미한다.



<Fig. 5> Load-Deflection curve of the two-way BSS at three different layout cases

<Fig. 5>를 살펴보면 모든 배치의 경우가 비슷한 양상을 보인다. 기본 3개를 배치한 경우보다 스트럿을 추가 배치한 NS₂, NS₃, NS₄의 경우가 50kN 정도 상회한 하중 결과 값을 보인다. 또한 스트럿을 5개 배치한 NS₂, NS₃의 경우가 스트럿을 7개 배치한 NS₄의 경우보다 정압이 발생할 때 약간의 하중을 추가적으로 받을 수 있는 강성을 지니는 것으로 보이지만 이는 근소한 차이이다. 결론적으로 스트럿을 5개 배치한 경우가 가장 큰 강성을 갖는 것으로 결과 값이 나왔지만 기본 3개일 때보다 2개의 스트럿을 추가로 배치하는 비용과 전체 구조물의 소요 하중을 고려하여 설계 시 스트럿 개수를 산정해야 할 것이다.

4. 케이블 곡률에 따른 영향

4.1 케이블 곡률 변수

<Fig. 3>에서 케이블 곡률을 변수로 설정할 때 변화하는 값은 보의 중심과 끝단으로 나타낼 수 있는

각도 θ 이다. 이때 그려지는 원의 반지름은 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$R = \frac{L}{2\sin\theta} \quad (1)$$

식 (1)에서 L 값은 고정이므로 R 값은 각도 θ 에 의해 변한다. 중심 스트럿의 길이인 h 또한 반지름 R 값과 각도 θ 를 사용하여 표현할 수 있으며 식 (2)와 같다.

$$h = R(1 - \cos\theta) \quad (2)$$

처짐 케이블 C₁과 아치 형상 케이블 C₂의 길이 c는 식 (3)으로 구할 수 있다.

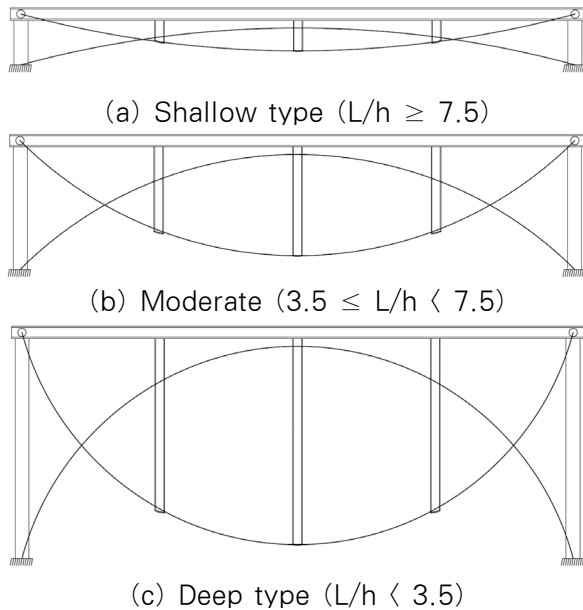
$$c = 2R\theta \quad (3)$$

케이블의 곡률 형상 각도에 따라 상부 구조 길이에 따른 스트럿 높이의 비율인 L/h이 자동으로 결정된다. <Table 1>은 각도 θ 에 따른 L/h 값을 나타낸다.

<Table 1> L/h values according to the angle variables

| θ (Degree) | L/h |
|-------------------|------|
| 15 | 15.2 |
| 30 | 7.5 |
| 45 | 4.8 |
| 60 | 3.5 |
| 75 | 2.6 |
| 90 | 2.0 |

<Fig. 3>에서 중심 스트럿 길이 h 외에도 모든 스트럿 길이가 케이블의 곡률에 따라 결정된다. <Fig. 6>은 스트럿 길이에 따른 형상 차이를 보여주고 있다. L/h의 비가 7.5보다 크거나 같으면 (a)와 같이 얇은 형상이 되고, $3.5 \leq L/h < 7.5$ 일 때는 중간 형상 (b), 마지막으로 3.5보다 작을 때에는 (c)와 같은 깊은 형상을 갖는다. 다음 장에서 해석을 통해 도출한 최적의 형상을 제안하고자 한다.



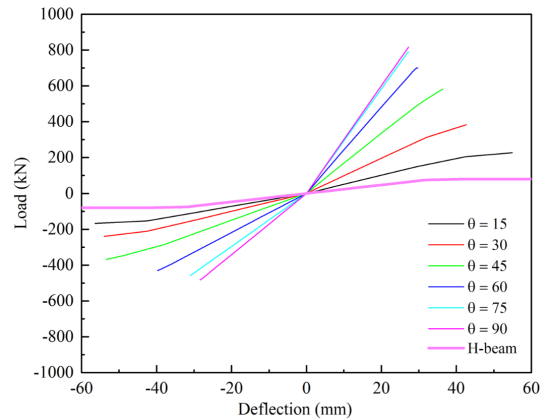
〈Fig. 6〉 Geometric types of the two-way BSS

4.2 케이블 곡률에 따른 처짐 영향

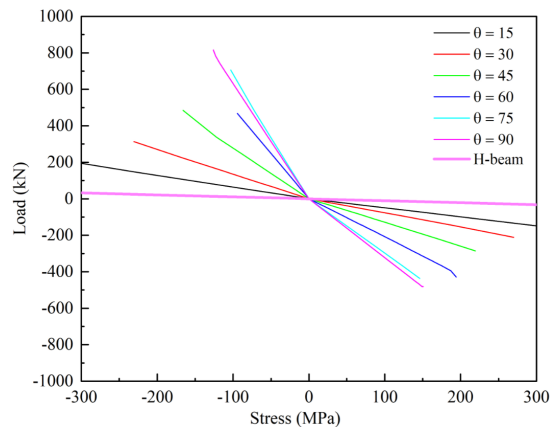
〈Fig. 7〉은 케이블 곡률 각도에 따른 하중-변위 곡선을 비교한 것이다. 처짐은 구조물의 중앙부 최대 처짐으로 계산하였다. 〈Fig. 7〉의 H-beam은 상부 구조 부재로만 하중을 지지했을 때의 결과를 나타낸다. 모든 양방향 BSS 경우가 일반 H-형강으로 지지했을 때보다 우세한 결과 값을 보인다.

또한 각도가 90도로 증가하여 깊은 형상($L/h < 3.5$)이 될수록 강성이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 정압과 부압 모두에서 동일한 효과를 보였으며, 케이블 길이의 증가에 따라 내력의 합이 커지게 되면서 처짐 값이 줄어드는 결과라 할 수 있다. 하지만 75도와 90도의 경우를 비교해보면 정압에서는 그 크기가 거의 동일하게 나타난다. 부압에서는 약간 차이를 보이나 거의 동일한 수준으로 나타난다. 이는 75도 이상에서는 각도 증가의 영향이 거의 없고, 〈Fig. 6 (c)〉와 같이 현실적으로 적용하기 어려운 깊은 형상으로 도출되기 때문이다.

정압과 부압의 경우를 분석해보면 정압의 경우가 부압의 경우보다 동일한 하중에서 약 1.5배의 강성을 보인다. 이는 처짐 케이블과 아치 형상 케이블이 완전히 대칭 형상이 될 수 없는 상황에서 기인한 결



〈Fig. 7〉 Load-Displacement curves according to angle variables

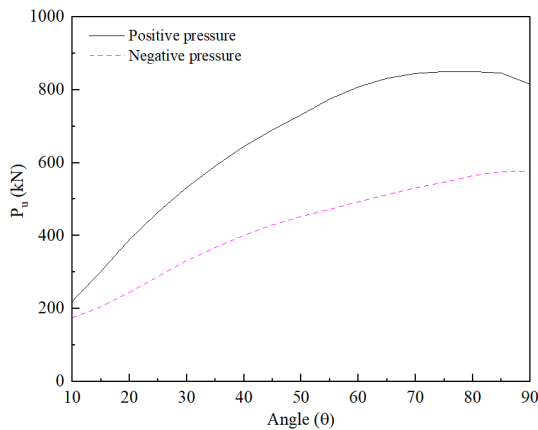


〈Fig. 8〉 Load-Stress curves according to angle variables

과이며, 양방향 BSS 시스템이 정압에서 약간 유리한 형상을 갖는다고 볼 수 있다. 일반적으로는 중력 방향을 주된 하중으로 보지만 실제 설계에서는 현장 상황을 고려하여 산정하여야 한다.

〈Fig. 8〉은 각도 변수에 따른 상부 구조 부재의 응력 변화를 하중 변화에 대해 비교한 그래프이다. 〈Fig. 7〉과 마찬가지로 H-beam은 상부 구조 부재로만 하중을 지지했을 때의 결과를 나타낸다. 〈Fig. 8〉에서 보이는 바와 같이 깊은 형상($L/h < 3.5$)으로 갈수록 상부 구조 부재의 응력 부담이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 각도가 커질수록 케이블 길이가 늘어남에 따라 내력의 합이 증가하여 상부 구조 부재의 부담을 덜어주는 효과라고 할 수 있다. 하지만 이 경우에도 75도와 90도의 경우를 비교해보면

정압과 부압 모두에서 거의 동일한 결과 값을 보이고 있다. 이를 통해 75도 이상에서는 각도 증가의 효과가 없다는 것을 다시 한 번 확인할 수 있었다.

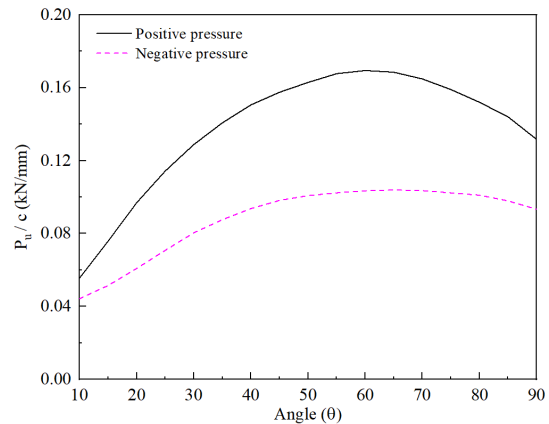


〈Fig. 9〉 Ultimate load according to angle variables

4.3 케이블 곡률에 따른 극한 하중 변화

〈Fig. 9〉는 케이블 곡률에 따른 형상에서 받을 수 있는 극한 하중 변화를 나타낸 그래프이다. ABAQUS 유한 요소 해석에서 변위 제어로 응답을 산출하였으며, 이때 각 변위마다 가장 큰 극한 하중 P_u 값을 얻어 그래프를 그려보았다. 〈Fig. 9〉의 그래프에서 나타낸 바와 같이 케이블의 곡률 각도가 증가할수록 극한 하중이 계속 증가하며 80도 부근 ($L/h = 2.4$)에서 가장 큰 극한 하중을 받음을 알 수 있다. 하지만 각도가 증가할수록 케이블 길이도 증가하기 때문에 케이블 단위 길이당 극한 하중 값을 비교할 필요가 있다.

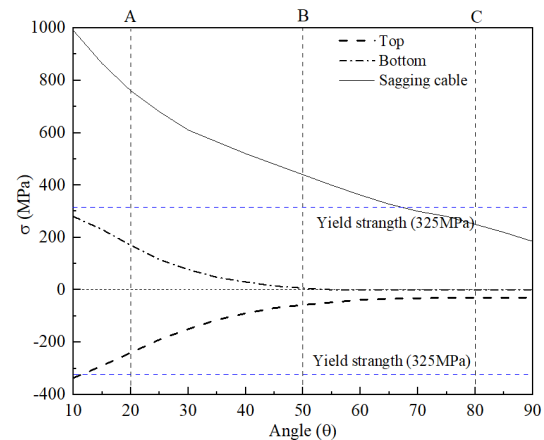
〈Fig. 10〉은 케이블 곡률에 따른 형상에서 받을 수 있는 극한 하중을 케이블 길이 c 로 나누어 정규화한 값을 나타내고 있다. 케이블 길이를 고려했을 때 60도의 형상에서 가장 큰 극한 하중 값을 얻을 수 있었으며, 이때 L/h 의 크기는 3.5이다. 결론적으로 양방향 BSS의 형상은 케이블의 곡률 각도가 75도 이상에서는 변함이 없고 75도에서 최적의 강성을 보이지만 케이블의 단위 길이로 비교했을 때는 60도 형상에서 가장 큰 극한 하중을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.



〈Fig. 10〉 Normalized ultimate load with respect to the cable length according to angle variables

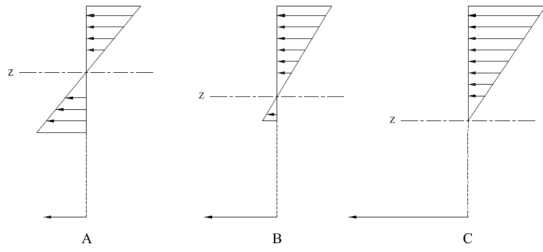
4.4 케이블 곡률에 따른 상부 구조 부재의 영향

〈Fig. 11〉은 케이블 곡률에 따른 형상에서 정압을 가할 때 상부 H-형강 보의 상단과 하단, 처짐 형상의 케이블 응력 변화를 나타낸 그래프이다.

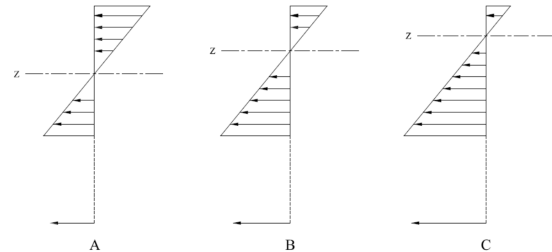


〈Fig. 11〉 Stress results of the beam and sagging cable according to angle variables under positive pressure

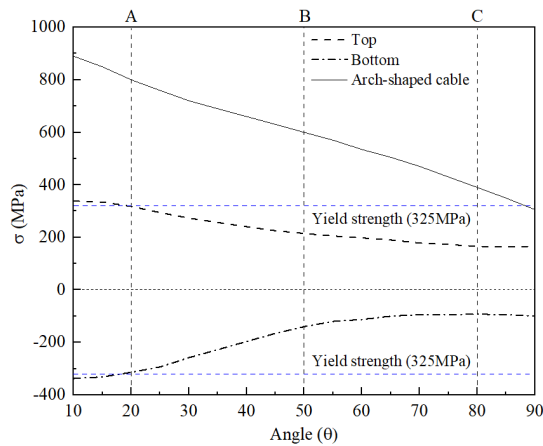
각도가 증가할수록 상부 구조 부재의 하단의 응력, 즉 인장력은 감소하며 50도를 기점으로 응력 값은 0을 보인다. 이는 각도가 커질수록 케이블 길이가 늘어나 내력의 합이 증가하고 이로 인해 상향으로 지지하는 힘이 증대되어 인장력을 상쇄시키기 때문이다. 상부 구조 부재 상단의 응력과 압축력 또한 60도 이후에서 작은 값으로 유지되며 이 또한 같은 의미로 해석할 수 있다.



<Fig. 12> Stress distribution of the cross-section of upper beam under positive pressure



<Fig. 14> Stress distribution of the cross-section of upper beam under negative pressure



<Fig. 13> Stress results of the beam and arch-shaped cable according to angle variables under negative pressure

<Fig. 12>는 <Fig. 11>의 A, B, C 지점 각도 20, 50, 80도에서 H-형 보 단면의 응력 분포도를 나타낸 것이다. A 지점에서는 거의 비슷한 응력 분포도를 갖다가 B 지점으로 갈수록 하부 응력 값이 0으로 수렴한다. C 지점의 상부 응력은 거의 0에 가까운 값이지만 0 값을 보이는 하부 응력과 비교했을 때는 상부 부재에 약간의 응력 부담이 남아있음을 알 수 있다.

<Fig. 13>은 케이블 곡률에 따른 형상에서 부압을 가할 때 상부 H-형강 보의 상단과 하단, 아치형상 케이블의 응력 변화를 나타낸 그래프이다.

<Fig. 14>는 <Fig. 13>의 A, B, C 지점 각도 20, 50, 80도에서의 H-형 보 단면의 응력 분포도를 나타낸 것이다. <Fig. 13>에서 나타낸 바와 같이 케이블 곡률 각도가 증가할수록 상부 구조 부재의 응력 부담이 줄어드는 것을 알 수 있으며 60도 이상의 각도에서는 거의 일정한 값을 보이고 있다. 하지만 정압

의 결과에서는 응력이 거의 0의 값을 보이는 경우와는 달리 부압에서는 상부 부재의 응력 부담이 남아 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 처짐 케이블과 아치형 케이블의 효율 차이에서 오는 결과로 해석할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 이전 연구에서 실험을 통해 가능성을 입증한 양방향 BSS 구조에 대한 연장선으로 형상 매개 변수 해석을 수행하였다. 변수는 케이블 곡률을 결정할 수 있는 상부 구조 부재의 중심에서부터 끝단까지의 각도로 설정하였으며, 이에 따라 스트럿 길이가 결정된다. 또한 최적의 스트럿 개수를 제안하기 위하여 스트럿 개수에 따른 구조 해석을 수행하였다. 양방향 BSS 구조의 설계 지침에 반영하기 위한 결론은 아래와 같다.

1) 스트럿 개수는 기본 3개로 설정하였으며 2개 혹은 4개를 추가 배치하여 물량 증가에 따른 효과를 알아보았다. 스트럿을 5개 배치한 경우가 가장 큰 강성을 갖는 것으로 나왔지만 기본 3개일 때보다 2개의 스트럿을 추가로 배치하는 비용과 전체 구조물의 소요 하중을 고려하여 설계 시 스트럿 개수를 산정해야 할 것이다.

2) 케이블 길이를 고려하여 산정하였을 때는 케이블 곡률 60도 형상(L/h = 3.5)에서 가장 큰 극한 하중을 얻을 수 있었다. 케이블 형상 각도를 증가시키면 더 큰 하중을 받을 수 있으나 경제성과 효율을 고려하여 설계 상황에 맞는 형상으로 결정하는 것이 중요하다.

3) 얇은 형상($L/h \geq 7.5$)일 때는 상부 구조 부재의 응력 감소의 영향이 없으므로 케이블 형상 각도를 증가시키는 것이 좋으나 일정 각도 이상에서는 상부 구조 부재가 전혀 작용하지 않으므로 상부 구조 부재가 작용할 수 있는 구간 내의 각도로 설정하는 것이 중요하다.

본 연구는 양방향 BSS 구조의 설계 지침을 작성하기에 유용한 결과를 담고 있으며 추후 실제 대공간 구조에 적용할 때 중요한 자료로 사용될 수 있다.

감사의 글

본 논문은 행정안전부장관의 지진 방재 분야 전문인력 양성 사업으로 지원되었습니다.

References

1. Saitoh, M., & Okada, A., "The role of string in hybrid string structure", *Engineering Structures*, Vol.21, No.8, pp.756~769, 1999
2. Seo, M., Lee, S., Baek, K., Jeong, J., Kim, S. M., & Lee, J., "Experimental Study of Structural Behavior of Two-Way Beam String Structures", *Journal of Korean Association for Spatial Structures*, Vol.18, No.3, pp.93~103, 2018
3. Saitoh, M., & Tosiya, K. (1985). A study on structural behaviors of beam string structure. *Proceedings of the Annual Meeting of Architectural Institute of Japan*, Japan, Vol.1, pp.280~284
4. Wu, M., "Analytical method for the lateral buckling of the struts in beam string structures", *Engineering Structures*, Vol.30, No.9, pp.2301~2310, 2008
5. Xue, W., & Liu, S., "Design optimization and experimental study on beam string structures", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.65, No.1, pp.70~80, 2009
6. Hamed, Y. S., Sayed, M., Cao, D. -X., & Zhang, W., "Nonlinear study of the dynamic behavior of a string-beam coupled system under combined excitations", *Acta Mechanica Sinica*, Vol.27, No.6, pp.1034~1051, 2011
7. Cai, J., Feng, J., & Jiang, C., "Development and analysis of a long-span retractable roof structure", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.92, pp.175~182, 2014
8. Dassault Systems Simulia Corporation, *ABAQUS Analysis User's Manual v6.14*, Dassault Systems Simulia Corporation, RI, USA, 2017.

- Received : August 13, 2019
- Revised : August 27, 2019
- Accepted : August 27, 2019