CAD를 이용한 텐세그리티 구조물의 평형응력모드 결정법

Equilibrium Stress Mode Determination of Tensegrity Structure by CAD

김 재 열 *

Kim, Jae-Yeol

요 약

텐세그리티 구조시스템의 한 종류인 케이블 돔 시스템은 케이블과 마스트로 이루어져 있다. 이 케이블에 외부하중이 가해지지 않은 상태에서 안정된 구조물이 되기 위하여 일정한 프리텐션이 가해져야 하며, 구조물은 가해진 프리텐션 하에서 자기평형응력상태에 있어야 한다. 본 연구에서는 부재의 내력 벡터의 합 원리를 기초하여 자기평형 응력모드를 구하는 새로운 방법을 제안하였으며, 자기평형응력을 유지하기 위해 필요한 응력모드를 시각화할 수 있다는 점이 기존의 논문과 비교하여 독특성을 갖는다. 본 연구에서 제안된 방법에서 사용된 기본 원리는 모든 절점에서 외부하중이 가해지지 않은 상태에서 내력벡터의 합은 0이 되어야 한다는 것이다. 제안된 방법은 CAD를 이용하여 간단히 자기평형응력모드를 찾을 수 있으며, 예제 케이블 돔 구조물을 대상으로 각 절점에 연결된 부재들의 내력을 결정하였다. 결과 값은 역학적 계산 방법과 기존의 이론에 의해 검증하였으며 잘 일치하였다.

Abstract

Cable dome structures are composed of cables-masts and the cables should be in pre-tension since a structure without pre-tension is not stable. Under the pretension, self equilibrium stress state is the main characteristic of a cable dome structure. In this paper, a new method based on the basic principle of closed force polygon for equilibrium system is proposed for the determination of self-equilibrium mode of cable dome structure. The proposed method which is called geometric method has the unique characteristic of visualization of the force mode needed for maintenance of self-equilibrium. The basic theory for a self equilibrium of structure is that the summation of forces at each joint without any external load should be zero. The simplicity of the method which involves only drawing close polygon with the aid of suitable CAD software has been illustrated by means of a example. The results compared with mechanical calculation and existed method and shows good agreement.

키워드 : 케이블 돔, 힘 다각형, 기하학적 방법, 자기평형모드

Keywords : cable dome, force polygon, geometric method, self-equilibrium mode

1. 서 론

주요 구조부재로서 내부링, 외부링, 래디얼 부재 그리고 마스트 부재로 이루어진 케이블 돔 구조시스템은 텐세그리티 구조시스템의 한 종류이다. 일반적으로 마스트 부재와 외부링 부재는 압축을 받고 래디얼부재와 내부링부재는 인장을 받도록 설계된다. 불안정구조물인 텐세그리티 구조시스템은 외부하중이 가해지지 않은 상태에서 안

정된 구조물이 되기 위하여 일정한 프리텐션이 가해져야 한다. 이 프리텐션에 의한 자기평형상태가 케이블 돔 구조시스템의 기본적인 특성이며, 이를 위해서는 각 절점에서의 프리텐션에 의한 내력벡터들의 합이 0이 되어야 한다.

케이블 돔 구조물은 링의 기하학적 형상, 내외부 링의 상대적 위치, 래디얼 부재의 크기, 링 부재들의 배열방법등으로 구분할 수 있다. 케이블 돔 구조물의 내외부링이 원형 혹은 타원형으로 이루어졌느냐에 따라 구분하는 방법이 가장 일반적이고 간단한 방법이다. 또 다른 분류는 내외부링의 배열에 의한 것으로 케이블 돔 구조물에서 내

* 정회원, 교신저자, 협성대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Tel: 031-299-0758
E-mail: jykim@uhs.ac.kr

외부링의 중심점이 같은 2차원적 좌표를 가지고 있으나에 따라 대칭형 혹은 편심형 구조물로 나뉘어 지는 것이다. 대표적인 대칭형 케이블 돔으로서 자전거바퀴형태의 단층구조를 고려할 수 있다.

케이블 돔 구조물을 해석하는 첫 번째 단계는 각 부재에서 자기평형이 가능한 프리텐션비율을 찾는 것이다. 그러나, 이들 구조물을 풀기 위하여 세운 방정식으로부터 생성되는 매트릭스가 장방형매트릭스가 되어 일반적인 연립방정식을 이용한 유한요소법등으로 해석하기에 무리가 있다. 케이블 돔 구조물을 해석하기 위하여 Tanaka and Hangai¹⁾는 Moore-Penrose 일반역행렬법을 도입하였고, 이 이론을 응용한 연구들이 발표되었다. Choong²⁾등은 자전거 바퀴형태의 단층형 케이블 돔을 일반역행렬법을 이용하여 해석하였다. Anidawati³⁾는 삼각형, 사각형, 오각형, 십각형 형상을 갖는 다수의 단층형 대칭 및 편심형구조물을 해석하였다. Tan⁴⁾, Amrita⁵⁾도 타원형구조물을 포함한 케이블 돔 구조물에 대한 해석 결과를 발표하였다. Choong⁶⁾은 다양한 형태와 기하를 갖는 구조물에 대한 연구를 수행하였다. Chong⁷⁾은 내외부 링이 원형과 타원형으로 이루어진 40여개의 단층형모델을 해석하였다. 이 연구에서 내외부링이 다른 형태 즉, 타원-원형 혹은 원형-타원형 형태를 갖는 구조물에서는 해의 불일치성을 확인하였다.

국내에서는 이재홍⁸⁾등에 의해 고유치해석을 이용한 케이블 돔 구조물의 자기평형 응력 모드 해석방법을 제시하였고, 한상을⁹⁾등은 시공과정을 고려한 케이블 돔 구조의 형상최적화문제를 발표하였다. 김재열¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾은 일반역행렬을 이용한 케이블형 구조물의 자기평형응력 해석을 수행하였다. 이 연구에서 정형화된 형태의 구조물 해석은 매우 우수하게 진행되었으나, 역시 케이블 형태가 복잡해진 경우 혹은 기하학적으로 상하부 링의 형태가 원형-타원형으로 이루어진 경우 잘 수렴이 되지 않는 경우가 발생하였다.

본 연구에서는 지금까지 제안되었던 수치적 접근방법과는 달리, 케이블 돔 구조의 자기평형응력 모드를 찾기 위한 새로운 방법을 제안하였다. 본

연구에서 제안된 방법에서 사용된 기본 원리는 모든 절점에서 내력벡터의 합은 0이 되어야 한다는 것이다. 자기평형응력모드를 찾는 과정에서 일반상요프로그램인 CAD가 이용되었으며, 기초이론 및 풀이과정을 단계별로 설명하였다. 제안된 방법을 이용하여 간단한 예제 케이블 돔 구조물을 대상으로 각 절점에 연결된 부재들의 내력을 결정하였으며, 방법의 타당성을 확인하기 위하여 모든 절점에서의 내력벡터의 합이 0이 되는지를 점검해보았다. 해석모델은 마스트가 수직이며 세 개의 부재가 한절점에 만나는 형태에 제한되었으며, 제안된 방법에 의한 결과는 수치해석적 접근방법인 일반역행렬을 도입한 해석결과와 비교하였다.

2. 부재내력과 절점벡터

2.1 벡터비율의 성질

케이블 돔은 자기평형을 유지해야하므로 모든 절점에서 힘의 평형상태를 유지하여야 한다. 즉, 각 절점에서 안정한 평형을 이루는 조건으로 각 절점에 모이는 각 방향 힘 벡터들의 합은 0이 되어야 한다. 우선, 케이블 돔 구조의 모든 부재에 가해지는 프리스트레스(내력)의 비율을 찾고, 내력에 의해 발생하는 각 방향 힘 벡터들의 합은 0이 되는지를 확인하여야 한다.

먼저, 부재에 할당되는 내력비의 관계를 정의해야 한다. 각 부재에 할당되는 내력비의 비율은 각 부재의 실제 프리스트레스(힘)를 표현하는 하나의 계수이다. 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\bar{F} = \bar{T} \times a \quad (1)$$

여기서, “F”는 부재의 실제 프리스트레스(내력)이고, “T”는 전체구조물에 대해서 그 부재가 할당 받는 부재의 비율, “a”는 상수계수이다. 전체구조물에 대하여 각 부재의 내력을 나타내면 다음과 같다.

$$\bar{F}_n = \bar{T}_n \times a \quad (2)$$

“n”은 부재 수이고, a는 모든 부재에 일정하게 곱

해지는 상수 계수이다. 실제 값인 프리스트레스와 이론적인 해석 값인 부재내력비 그리고 부재내력비와 계수를 곱한 값도 벡터이다.

케이블 돔의 각 절점 모이는 부재들의 내력과 부재내력비를 포함한 힘의 평형을 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\overline{T}_1 \times a + \overline{T}_2 \times a + \overline{T}_3 \times a + \dots + \overline{T}_n \times a = 0 \quad (3)$$

식(3)에서 식이 성립하기 위해서는 방정식의 계수가 0이거나, 내력비의 합이 0이어야 한다.

$$\begin{cases} a = 0 \\ \overline{T}_1 + \overline{T}_2 + \overline{T}_3 + \dots + \overline{T}_n = 0 \end{cases} \quad (4)$$

윗 식에서 “a”가 0이란 의미는 부재가 존재하지 않는다는 의미이므로, 결국 안정한 케이블 돔을 이루기 위해서는 각 절점에서의 부재내력비에 대한 각 방향 벡터값의 합이 0이 되어야 한다.

2.2 프리스트레스

프리스트레스가 없을 때 절점에서 불안정이 되는 것은 간단한 물리법칙에 의해 설명이 된다. 그림 2와 같이 하나의 점에 세 부재가 같이 접합되어 있을 때, 이 세 개중 두 개의 각도가 180° 이고 이 세 힘의 합을 0이라 할 때, 0 이 아닌 다른 세 개의 부재 각각의 힘을 정의하기가 쉽지 않다. 다른 말로 두 부재의 각도가 180° 이고 세 번째 부재가 작은 하중을 받는 경우 두 부재의 각도변화 없이는 전체구조물은 작은 하중에 견딜 수 없다.

〈그림 1〉 세 부재중 두 부재가 180도 각을 이루는 벡터

그러나 여기에 프리스트레스를 가하면 이동이 거의 없이 저항 할 수 있게 된다. 〈그림 2〉와 같이 프리스트레스가 없는 케이블 돔 구조는 외부

력에 대응하기 위해 많은 이동이 필요하다. 아래에서 화살표는 절점에서의 힘 벡터를 의미한다.

〈그림 2〉 절점벡터

2.3 벡터 합의 기본 원칙

3개 또는 3개 이상의 벡터의 합이 0일 때, 이 벡터들은 닫혀진 다각형을 만들 수 있다는 것을 의미한다. 〈그림 3〉와 같이 3개의 벡터의 합이 0인 경우 닫혀진 삼각형이 된다. 즉, 〈그림 3〉과 같은 케이블 구조에서 각 절점에 연결된 부재들의 내력비의 합은 닫혀진 삼각형을 만들어야 한다.

〈그림 3〉 세 벡터의 합

3. 구조물의 해석

케이블 돔 구조를 해석하기 위해 우선 각 절점의 높이 방향의 좌표를 0으로 하여 2D로 만든다. 다음으로 외부링 또는 내부링의 절점을 선택하여 해석을 진행한다. 부재내력의 비율을 찾는 것이 이 연구의 목적이며, 첫 번째 부재 비율은 임의의 값으로 가정한다.

첫번째 절점과 연결된 모든 부재들의 힘 벡터가 닫혀진 형태를 이룰 수 있도록 CAD를 이용하여 그려나간다. 각 부재내력 벡터 방향은 2D 기하학 형상에서 부재의 방향이다. 첫 번째 절점으로부터 그려진 형상은 다각형이며, 이 다각형 면의 갯수는 첫 번째 절점에 연결된 부재의 갯수와 같다. 결국 최종적으로 그려진 이 다각형이 그 첫 절점에 연결된 부재들의 부재내력비이다.

대부분의 경우에 있어서 2D로 단순화 된 케이블 돔 구조에서 내부링 또는 외부링의 각 절점에서는 세개의 부재가 연결되며, 그려지는 다각형은

삼각형이다. 가정된 하나의 부재비 혹은 전 단계에서 정해진 부재비에 의해 삼각형의 한 면에 대한 부재비가 정해지고, 또한 이 부재와 다른 부재들 사이의 각을 알 수 있다. 오토캐드와 같은 캐드 프로그램에서, 부재들 사이의 각도와 한 부재의 길이를 알 수 있기 때문에 다른 두 부재를 고려한 삼각형을 간단히 그릴 수 있다.

하나의 절점에서의 삼각형이 완성되어 결정된 각 부재의 길이는, 이 부재와 연결된 다른 절점의 부재비로 사용되는 것이다. 즉, 한 부재는 새로운 절점과 이전의 한 절점(이미 삼각형이 그려진) 사이에서 공유되며, 새로운 절점에서 삼각형을 그릴 때 공유된 부재의 길이를 이미 알고 있기 때문에 새로운 절점의 삼각형을 그릴 때 기준 길이가 된다. 이 과정은 내부링 또는 외부링의 마지막 절점까지 계속된다. 이 전체모양은 다각형으로 이루어지며 부재들에 할당되는 비율은 다각형의 면의 길이이다. 이 모든 과정들이 끝나고, 지금까지 구한 2D에서의 값들을 마스트를 고려한 3D 값들로 변환을 해야 한다. 변환 하기위해 우선 래디얼부재의 수평선과 이루는 각도를 구한다. 구해진 각도와 삼각함수를 이용하여 마스트 부재의 비율을 계산해야 한다.

3.1 해석 예

예제 해석 케이블 돔 구조는 <그림 4>와 같이 6개의 외부링 부재, 6개 마스트부재, 상하부가각 12개의 내부링 부재 그리고 12개의 래디얼부재로 이루어진다.

<그림 4> 케이블 돔 해석 예제

3.1.1 해석순서

1단계 : 2D 좌표 변환

첫 번째 단계로 케이블 돔을 3D에서 2D로 변환하여 Z방향의 길이를 0으로 한다. 변환을 하면 <그림 5>와 같이 외륜과 내륜 그리고 6개의 래디얼부재가 생기는 2D 케이블 돔 구조물이 된다.

<그림 5> 2D변환

2단계: 해석을 시작하기 위한 절점의 선택과 첫 번째 부재의 비율 가정

CAD프로그램에서 케이블 돔을 그린 후, 해석은 외부링 또는 내부링에서 부터 시작한다. 먼저, 첫 번째 선택된 부재의 내력비는 임의의 값으로 가정하며, 이 외의 다른 부재의 내력비는 이 가정된 값에 기초하여 계산된다. 예를들어, 해석은 내부링 절점 7번으로부터 시작하고 1-7부재의 비를 100으로 가정한다. 연결된 부재들의 첫 번째 절점은 <그림 6>과 같다.

<그림 6> 첫 번째 절점과 가정된 부재내력비

3단계: 첫 절점에 대한 폐쇄 다각형 작성

7번 절점에서 내력비의 합은 0이어야 한다. 세 개의 부재는 7번 절점에 연결 되어 있으므로, 그려지는 다각형은 삼각형이 될 것이다.

우선, 1-7부재의 길이를 100으로 가정하고, 7-8 부재와 1-12부재를 1-7부재의 끝에 연결한다. 1-7부재의 각 끝 지점에서 7-8, 7-12부재의 정확한 각을 알기 위해, 기본모양을 미리 복사를 하고 이동하는 것이 좋다. 부재의 위치는 다각형에서 기하학상으로 변화된다.

〈그림 7〉 닫힌 링을 만드는 첫 번째 순서

〈그림 8〉 첫 번째 닫혀진 삼각형

이 삼각형에서 1-7, 7-12 그리고 7-8부재의 수직, 수평각은 기하학 형상에서 부재들의 수직, 수평각과 같으며, 이들의 각은 〈그림 9〉와 같다. 기하학적 형상과 계산된 부재 내력비에 의한 길이는 다르다. 기하학적 형상은 단지 길이를 나타내지만, 그려진 그림에 의한 부재들의 비는 내력비를 나타내기 때문이다.

〈그림 9〉 닫혀진 삼각형의 각도와 기하학적 모양

4단계: 다음 절점을 위한 다각형 비의 그림

다음으로 8번 절점을 선택하며, 7-8, 2-8, 8-9의 부재는 8번 절점에 연결된다. 여기서, 2-8과 8-9의 비는 알 수 없지만, 7-8의 부재는 7번 절점과 8번 절점 사이에 공유되기 있고 7번 절점에 대한 삼각형을 그릴때 이미 정해진 기지의 수이다. 그리고 나서 7번 절점과 8번 절점의 부재비는 공유된 부재에 연결된다. (그림 10, 그림 11). 이 과정은 마지막 절점까지 계속된다.

〈그림 10〉 두 번째 절점에서의 닫힌 삼각형 순서

〈그림 11〉 두 번째 절점으로부터 그려진 삼각형

5단계: 마지막 절점과 내부링 다각형 비율

마지막 절점에 대한 다각형이 완성되면 하나의 케이블 돔에 대한 해석이 완료된다. 모든 절점에서 그려진 개개의 삼각형은 <그림 12>와 같이 닫혀진 형태의 하나의 다각형으로 정리된다.

6단계: 외부링의 해석

내부링에 대한 다각형을 완성한 후, 외부링에 대한 다각형을 그린다. 래디얼부재는 내부링과 외부링 사이에서 공유되기 때문에, 내부링에 대한 다각형을 그리면서 알수 있는 부재는 1-7, 2-8, 3-9, 4-10, 5-11, 6-12부재이고, 외부링에 대한 다각형을 그리면서 결정되는 부재는 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 1-6이다.

<그림 12> 닫혀진 내부링

외부링의 해석도 1번 절점에서 시작되며, 과정은 <그림 14>와 같이 내부링의 순서대로 한다.

<그림 14> 첫 번째 절점의 닫힌 형태

7단계: 2D에서 부재의 비율

내부링에 대한 과정이 끝나면 외부 링에 대해

서도 똑 같은 방법으로 각부재에 대한 부재내력비를 구할 수 있다. 내부링과 외부링에 대한 각 부재의 부재내력비는 <그림 15>와 같다.

<그림 15> 2D에서의 비율

8단계: 2D에서 3D로 변환 비율

지금까지 구한 2D에서의 값들을 마스트를 고려한 3D 값들로 변환을 해야 한다. 변환 하기위해 우선 래디얼부재의 수평선과 이루는 각도를 구한다. 수평선에서 각 반경부재의 각도를 계산하기 위한 공식은 다음과 같다.

$$\theta_{n-m} = \tan^{-1} \left(\frac{z_m - z_n}{\sqrt{(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2}} \right)$$

$$m = \begin{cases} x_m \\ y_m \\ z_m \end{cases} \quad n = \begin{cases} x_n \\ y_n \\ z_n \end{cases}$$

(5)

여기서, “m” 은 마지막 절점이고 “n” 은 각 케이블 부재의 첫 절점이다.

참고로 1-7부재의 수평선과 이루는 각도를 식 (5)를 이용하여 계산해 보면 다음과 같다.

$$\theta_{1-7} = \tan^{-1} \left(\frac{11.7158 - 0}{\sqrt{14.5223^2 + 25.1534^2}} \right) \quad (7)$$

$$= 21.9677823 \cong 21.97$$

부재1-7이 수평선과 이루는 각도는 21.97도 이다. 대칭형이므로 다른 부재들도 같은 각도로 이루어졌다.

3D구조에서 내부링 부재의 비는 2D구조에서의

비와 같고, 3D구조에서 래디얼 부재 비율은 2D구조에서 래디얼 부재의 각도를 코사인으로 나눈 값이다. 마스트 부재의 비율은 3D구조에서 래디얼 부재의 비율에 기초가 되고 3D구조의 래디얼 부재 비는 마스트부재와 래디얼 부재 사이의 코사인 각도에 대해 변화된다.

〈표 1〉 내부링, 외부링부재의 3D 내력비

부재	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	7-12
비율	100	100	100	100	100	100
부재	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	1-6
비율	200	200	200	200	200	200
부재	1-7	2-8	3-9	4-10	5-11	6-12
비율	107.8	107.8	107.8	107.6	107.6	107.6

〈표 2〉 래디얼 부재의 3D 내력비

부재	1-13	2-14	3-1	4-16	5-1	6-18
비율	107.8	107.8	107.8	107.8	107.8	107.8

〈표 3〉 마스트의 3D 내력비

부재	7-13	8-14	9-15	10-16	16-17	17-18
비율	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3	40.3

단계9 : 평형의 확인

예제 케이블 돔의 각 절점에서 구해진 내력비에 의한 힘의 평형이 만족하고 있는가를 확인하였다. 내부링 7번 절점과 외부링 1번 절점을 사용하여, 이 두 절점에 연결된 부재들의 내력비를 X, Y, Z방향으로 재분배 하였다. 부재들과 그 비율은 〈표 4〉과 같다.

〈표 4〉 1,7번 절점에 연결된 부재들의 비율

부재번호	1-7	7-8	7-12	7-13
절점 7	x	50	100	50
	y	86.6025	0	86.6025
	z	40.3371	0	40.3371
부재번호	1-2	1-6	1-7	1-13
절점 1	x	200	100	50
	y	0	173.20	86.6025
	z	0	0	40.3371

각 절점에서의 힘의 평형을 계산하여 본다.

$$f_x@7 = 50 - 100 + 50 + 0 = 0$$

$$f_y@7 = 86.6 + 0 - 86.6 + 0 = 0$$

$$f_z@7 = 40.34 + 0 + 0 - 40.34 = 0$$

$$f_x@1 = 200 - 100 - 50 - 50 = 0 \quad (6)$$

$$f_y@1 = 0 + 173.2 - 86.6 - 86.6 = 0$$

$$f_z@1 = 0 + 0 + 40.34 - 40.34 = 0$$

위의 계산에서 절점 1번과 7번은 모든 방향에서의 합이 0이다. 그러므로 예제구조물은 각 절점에서 힘의 평형을 이룬 자기평형상태라고 할 수 있고, 제안된 방법은 타당성이 있다고 볼 수 있다.

4. 결과비교

제안된 방법의 타당성을 파악하기 위해 기존에 발표된 일반 역행렬을 이용한 GI법과 비교하였다. 〈표5〉는 1-2부재를 기준으로 다른 부재들과의 비율을 나타낸 것이다. 1-2의 부재를 1로 가정하여 비율을 구한 결과 GI법과 GM법이 일치하였다.

〈표 5〉 부재 내력비 비교

	1-2	1-7	2-8	7-8	13-14	1-13	2-8
GI	1	0.54	0.54	0.5	0.5	0.54	0.54
G M	1	0.54	0.54	0.5	0.5	0.54	0.54

5. 결론

CAD를 사용해 기하학적 방법을 이용하여 케이블 돔 구조물에 대한 자기평형응력모드 찾는 방법을 제안하였다. 제안된 방법에 대한 이론적 배경과 해석방법을 아주 쉽게 순서대로 설명하였다. 제안된 방법을 이용하여 예제구조물을 해석한 결과를 분석하기 위해 이론에 근거한 역학적 계산과 기존의 방법에서 나온 값과 비교하여보았으며, 두 경우 모두 정확히 일치하였다.

이상의 결과를 바탕으로 제안된 새로운 방법은 상용프로그램인 CAD 이용하여 케이블 돔 구조의 자기평형 응력모드 해석이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

그러나 본 연구에서는 마스트가 수직이며 세 개의 부재가 한 절점에 만나는 비교적 간단한 형상의 케이블 돔에 대한 자기평형응력 해석으로 한정되었다. 네 개 이상의 부재가 한 절점에 모이는 경우 또, 마스트가 수직이 아닌 경우의 케이블 돔에 대한 연구는 추후 연구에서 다루기로 한다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구 사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0021548)

참고문헌

1. Tanaka, H. and Hangan, Y., "Rigid Body Displacement and Stabilization Condition of Unstable Structures", Proceeding IASS Symposium, Osaka, Vol.2,1986, pp. 41-47
2. Choong, K.K., Tanami, T. and Yamamoto, C., "Determination of Self-equilibrium Stress Mode for Bicycle Wheel-Like Structural Systems", Proc. of 6th Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structures, Vol. II, ed. Taek-Jin Kwon and Dong-Guen Lee, Seoul Korea, 16-18 October 2000, pp.826-836
3. Anitawati, "Determination of Self-equilibrium Stress Mode for Bicycle Wheel Like Structures using Moore-Penrose Generalized Inverse Matrix", Undergraduate Final Year Project Report, School of Civil Engineering, University Sains Malaysia, 2000
4. Tan, Teck Chai, "Determination of Self-equilibrium Stress Mode for Bicycle Wheel Like Structures", Undergraduate Final Year Project Report, School of Civil Engineering, University Sains Malaysia, 2001
5. Amrita d/o Sivapatham, "Analysis of Self-equilibrium Stress Mode for Bicycle

Wheel Like Structures with Eccentric Opening", Undergraduate Final Year Project Report, School of Civil Engineering, University Sains Malaysia, 2004

6. Choong, K.K, Kim, J.Y. and Kang, J.W., "Development of Computational Tool for Structural Investigation of Bicycle Wheel-Like Roof Structure", Proceedings of CDS05, Singapore, 25-26, August 2005
7. Choong, C.F., "Effect of complexity in configuration on determination of self-equilibrium stress mode of cable-dome structures", Undergraduate Final Year Project Report, School of Civil Engineering, University Sains Malaysia, 2006
8. 정미루, 이재홍, "고유치해석을 이용한 케이블 돔 구조물의 자기평형 응력 모드 해석", 대한건축학회 논문집, 제25권 4호, pp.101-108, 2009. 4
9. 한상을, 황보석, 조남철, "케이블 돔 구조물의 형상최적화에 관한 연구", 대한건축학회 논문집, 제19권 7호, pp.53-60, 2003. 7
10. 김재열, 강주원, "일반역행렬을 이용한 케이블 돔 구조물의 자기평형 응력모드 해석방법", 대한건축학회 논문집, 제22권 10호, pp.3-10, 2006. 10
11. M. Ohsaki, J. Zhang and J.Y. Kim, "텐서그리티 구조물 설계를 위한 다목적 최적화 기법에 관한 연구," 한국공간구조학회지논문, 제8권 제1호, pp.49-56, 2008. 2
12. 김재열, 강주원, 박상민" 케이블-막구조물의 요소이동(slip)에 관한 연구", 한국공간구조학회지논문, 제8권 5호, pp.95~105, 2008.10

(접 수 일 자 : 2012년 02월 16일)

(심사완료일자 : 2012년 05월 16일)

(게재확정일자 : 2012년 06월 04일)