

케이블 돔의 안정화 이행과정해석 및 적용

An Analysis of Stabilizing Process of Cable Dome and Its Application

황보 석*
Hwangbo, Seok

유 용 주**
Yoo, Yong-ju

한 상 을***
Han, Sang-eul

요 약

케이블 돔은 초기에 불안정한 상태에서 각각의 케이블에 장력을 도입하면서 점차적으로 안정화되는 구조이다. 이러한 과정은 케이블에 압축력이 발생하게 되며, 일반적인 구조해석으로는 그 해를 찾을 수 없으므로 이 논문에서는 동적이완법을 사용한다. 또한, 안정화 이행과정해석을 실제적인 문제에 적용하는 방법으로 서울올림픽 체조경기장 케이블 돔 지붕에 적용함으로써 해석결과와 실측결과를 비교하고 안정화 이행과정해석의 적절함을 검증한다.

Abstract

Cable dome is one of tension structure which is gradually stabilized by tensioning cables from initially unstable state to finally stable state. This stabilizing process is not able to be developed by general analysis because some cables endure compression forces during stabilizing process. Thus, this paper uses dynamic relaxation method to solve this problem. To apply this stabilizing process analysis to the actual project, this paper deals with cable dome roof of Seoul Olympic Gymnasium. Finally, this paper prove the usefulness of stabilizing process analysis by comparing the analysis results and the measurements.

키워드 : 케이블 돔, 안정화 이행과정해석, 동적이완법

Keywords : Cable dome, Stabilizing process analysis, Dynamic relaxation method

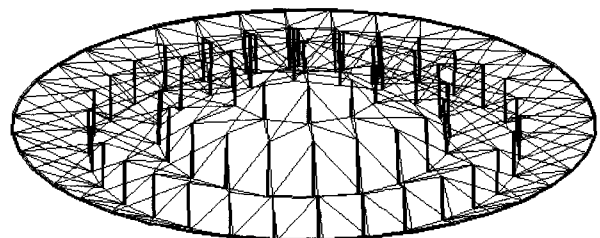
1. 케이블 돔의 구조적 특성

케이블 돔은 <그림 1>과 같이 David Geiger가 서울올림픽 체조경기장에서 최초로 제안한 구조형식으로 압축부재인 포스트와 인장부재인 케이블이 조화롭게 연결된 일종의 텐세그리티(tensegrity) 구조시스템이다. 자중이 가벼운 케이블과 포스트로 되어 있기 때문에 장스팬 구조물로 적당한 구조시스템이다.

케이블 돔은 케이블, 포스트, 막요소에 의해 구성되며, 초기에는 불안정하지만 케이블에 장력을 도입함에 따라 전체 구조시스템이 불안정에서 안정화되

어 구조적 특성을 발휘하는 복합구조시스템(hybrid structural system)이다. 케이블 돔은 최소한의 포스트와 케이블의 연속적 결합에 의해 닫힌 형태(closed shape)를 이루기 때문에 단위구조의 반복에 의해 전체 구조시스템을 이루는 텐세그리티와 구별되며, 인장부재만으로 구조물을 이루는 케이블네트나 막구조와도 구별된다.

케이블 돔은 초기의 불안정상태에서 장력도입후 안정상태로 이행하는 과정을 찾기 위한 해석을 수

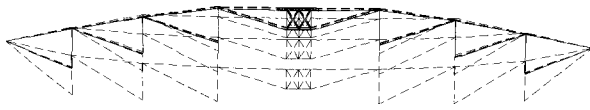


<그림 1> 케이블 돔 구조의 형상

* (주)ES건축구조엔지니어링 대표이사, 공학박사
Tel : 02-579-9371 Fax : 02-579-9372
E-mail : esnp@chol.com

** (주)ES건축구조엔지니어링, 공학석사

*** 인하대학교 건축학부 교수, 공학박사



<그림 2> 케이블 돔 구조의 안정화 이행과정

행한 후 외부하중에 따른 구조적 거동 특성을 파악하게 된다. 또한 외부하중에 의한 케이블과 막요소에 압축응력이 발생하는 불안정현상을 극복해야 한다. 따라서 두 가지 해석과정에 있어서 압축력 발생에 의한 불안정 현상을 극복할 수 있는 안정화 이행과정해석이 필요하며, 이를 통해 케이블 돔의 초기장력을 결정하게 된다.

케이블 돔의 안정화 이행과정해석은 일반적 해석기법인 뉴튼랩슨법을 적용하기 어렵다. 그 이유는 케이블 돔의 주요 구조요소인 케이블에 압축력이 발생하는 불안정 현상에 의하여 강성행렬의 행렬값(determinant)이 영(zero)이 되는 특이현상(singularity)이 발생하기 때문이다. 역행렬을 통하여 해를 구하는 뉴튼랩슨법과 달리 동적이완법(dynamic relaxation method)은 차분적으로 변위를 구하기 때문에 케이블에 압축력이 발생하는 불안정 현상을 극복할 수 있게 된다.

케이블 돔은 인장부재인 케이블에는 항상 인장력만이 작용하도록 시공 중에 초기장력을 도입하여야 하며, 그 과정은 <그림 2>와 같이 늘어진 형상에서 지붕형상으로 서서히 상승하게 된다. 케이블 돔의 초기장력 결정문제는 케이블 돔에서 가장 핵심적인 사항으로, 초기장력의 도입으로 케이블 돔에 구조적 안정성을 부여할 수 있다.

2. 안정화 이행과정해석 정식화

케이블 돔의 안정화 이행과정을 해석하기 위하여 Day에 의해 제안된 동적이완법을 사용한다. 동적이완법은 시간증분단계 Δt 마다 구조물의 운동상태를 추적해 나가면서 구조물의 감쇠작용에 의해, 구조물이 정적평형상태에 도달한다는 원리에서 출발한다. 따라서 동적이완법에 의하여 초기형상과 초기응력에 의해 발생된 구조물의 운동에 대한 정적평형상태를 찾는 형상해석과 이를 통해 얻은 평형상태에 외부하중을 작용시켜 발생한 운동에 대한 정적평형

상태를 찾는 응력변형해석을 수행하게 된다.

정적평형상태를 찾는 과정은 동적감쇠(kinetic damping)에 의해 자동적으로 조절되는데, 무감쇠상태에서 구조물의 거동을 추적하면서 각 시간증분마다 구조물의 총 운동에너지지를 계산하고, 최대 운동에너지일 때의 시간증분단계를 새로운 기준상태로 설정하여 반복계산을 수행하는 것이다.

구조물의 운동방정식은 위 식과 같이 나타내며,

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{W\} \quad (1)$$

동적감쇠에 의해 감쇠행렬을 고려하지 않으므로, 감쇠행렬 $[C]=0$ 가 되어 식(1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{u}\} = \{W\} - [K]\{u\} \quad (2)$$

식(2)의 오른쪽 항을 불평형력벡터 $\{R\}$ 로 보면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{R\} = \{W\} - [K]\{u\} \quad (3)$$

$$[M]\{\ddot{u}\} = \{R\} \quad (4)$$

식(4)를 중앙차분법 (central finite difference approximation algorithm)에 의한 벡터연산으로 변위를 구하게 된다.

중앙차분법에 의해 가속도벡터를 속도벡터에 대해 표현하면 다음 식과 같다.

$$\{\ddot{u}\} = \left(\{\dot{u}\}^{t+\Delta t/2} - \{\dot{u}\}^{t-\Delta t/2} \right) \frac{1}{\Delta t} \quad (5)$$

식(5)를 식(4)에 대입하고, 속도벡터에 대해 정리하면 다음 식과 같다.

$$\{\dot{u}\}^{t+\Delta t/2} = \{\dot{u}\}^{t-\Delta t/2} + \{R\}^t \frac{\Delta t}{[M]} \quad (6)$$

식(5), (6)에 의해 가속도와 속도벡터를 구할 수 있고, 변위벡터는 속도벡터를 선형보간하여 구한다.

$$\{u\}^{t+\Delta t/2} = \{\dot{u}\}^{t+\Delta t/2} \Delta t \quad (7)$$

수치해석상의 안정성을 위해, Barnes는 시간중분 단계 Δt 를 다음과 같이 제안하였다.

$$\Delta t \leq \sqrt{2 \frac{[M]}{[K]}} \quad (8)$$

따라서, 식(8)에 의해 식(6)은 다음 식과 같이 표현된다.

$$\{\dot{u}\}^{t+\Delta t/2} = \{\dot{u}\}^{t-\Delta t/2} + \{R\}^t \left(\frac{2}{\Delta t [K]} \right) \quad (9)$$

식(9)에서 알 수 있듯이 속도벡터는 질량행렬에 독립된 관계식을 갖게 되고, 결국 구조물의 거동(변위)은 질량행렬에 독립되며, 질량행렬은 수렴성에만 관여하게 된다.

질량행렬이 오직 수렴성에만 관여한다는 위와 같은 사실은 동적이완법의 가장 큰 수치해석상 특징으로, 식(9)로부터 질량행렬을 식(10)과 같이 강성행렬의 대각행렬로 가정할 수 있으며, 뉴튼랩슨법의 접선강성행렬로부터 질량행렬을 쉽게 유도할 수 있게 된다.

$$[M_{ii}] = \lambda \frac{\Delta t^2 [K_{ii}]}{2} \quad (10)$$

식(10)으로 질량행렬을 계산하면 프로그램 중 구조물의 실제 질량행렬의 계산과정 없이 기존의 강성행렬 계산과정에 의해 질량행렬을 구할 수 있고, 케이블, 막, 트러스, 보(beam) 등 다양한 구조요소의 결합에 의한 복합구조물(hybrid structure) 해석시 서로 다른 재료적 성질에서 오는 해석상의 복잡해짐을 덜 수 있게 되며, 경우에 따라서는 식(10)에 의한 질량행렬로 더 좋은 계산결과를 얻을 수 있게 된다. 식(10)에서 λ 는 수렴속도를 위한 임의의 상수이다.

동적이완법에 의한 형상해석은 외부하중 $\{W\}$ 를 영(zero)으로 하여 위의 식들을 계산하며, 불평형력 $\{R\} \approx \{0\}$ 일 때의 구조물 좌표계를 초기평형상태로 결정한다. 위 수식에서 알 수 있듯이, 동적이완

법은 강성행렬의 역행렬을 계산하는 과정이 필요 없으며, 동적감쇠에 의해 수치해석과정을 제어할 수 있다.

3. 케이블 돔의 안정화 이행과정해석

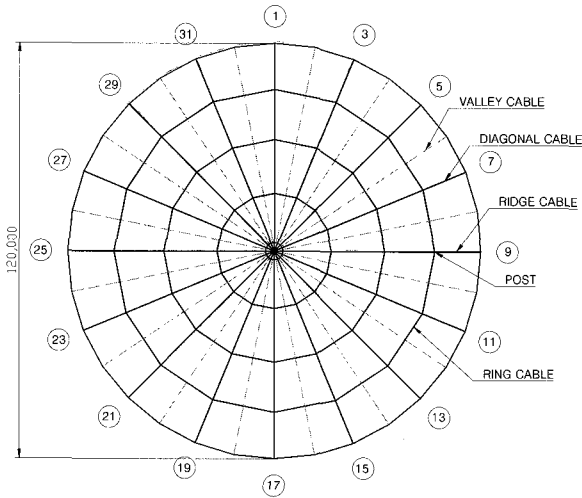
이 장에서는 케이블 돔의 안정화 이행과정해석을 수행하고 이를 실제 구조물과 비교검토한다. 대상 구조물은 서울올림픽 체조경기장으로서 1985년에 완공된 세계 최초의 케이블 돔 구조이다. 건설 당시의 기술로는 큰 직경의 케이블을 사용할 수 없어서 한 개의 부재요소에 1개 이상의 스트랜드(서울올림픽 체조경기장에서 스트랜드는 케이블을 이루는 기본 단위로, 케이블은 부재요소를 일컫는 총괄적인 개념으로 사용된다)를 사용하여 케이블을 이루었으며, 인장력이 도입되면 스트랜드가 포스트의 상부를 미끄러지면서 구조물의 안정화가 이루어지게 된다. 근래에는 큰 직경의 케이블의 생산이 가능해짐에 따라 여러 개의 스트랜드를 사용하지 않고 큰 직경의 케이블 하나로서 부재를 구성하게 되어 구조설계나 시공에 있어서 더욱 효율적으로 개선되었다.

서울올림픽 체조경기장에서 막의 가장 중요한 구조적인 역할은 지붕하중을 지지하는 역할이외에 케이블 포스트 열이 조그마한 불안전성이나 횡하중에 의하여 면외로 전도되는 것을 막아주는 것이다. 그러나 막의 역할 수행은 케이블 돔의 안정화 이행과정이 완료된 후에 가능하며, 특별한 외적 요인이 없는 안정화 이행과정 도중에 면외 전도가 발생하지 않는다.

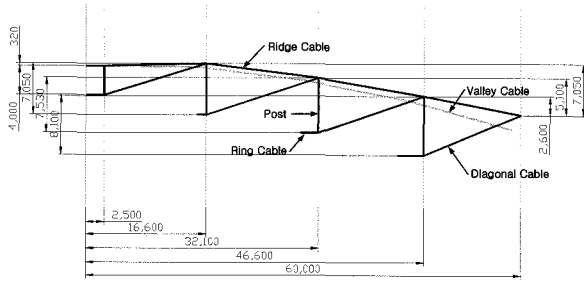
이와 같은 케이블 돔의 안정화 이행과정에 대하여 안정화 이행과정해석에 의한 해석값과 실제의 측정값을 분석하여 수치해석의 정확성을 입증하도록 한다.

3.1 서울올림픽 체조경기장의 개요

서울올림픽 체조경기장은 <그림 3>과 <그림 4>에서 보는 바와 같이 직경 120m의 원형 지붕을 16개의 케이블-포스트 열로 구분하고 이 사이에 막 패널을 설치하게 되며, 막 패널의 곡면 위에 밸리 케이블이 설치되어 상향하중에 저항하도록 설계되었



<그림 3> 서울올림픽 체조경기장 평면도

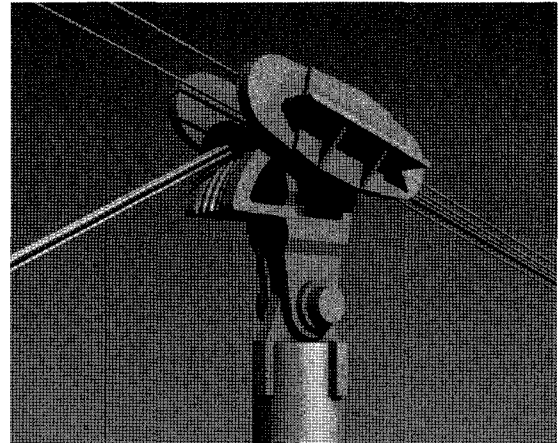


<그림 4> 서울올림픽 체조경기장 단면도

다. 이와 같은 지붕구조는 콘크리트 보(링 빔)에 지지되며 링 빔은 철골기둥 위에 높게 된다.

하나의 열에서는 중앙부의 트러스 코어부(센터링)와 3개의 포스트(inner, middle, outer post)를 상부의 리지 케이블과 하부의 다이아고날 케이블이 트러스 형식으로 엮여져 있으며, 포스트 하부와 이웃 열의 포스트 하부를 링 케이블이 공간상으로 엮여지게 됨으로써 3차원적인 평형을 이루게 된다.

<그림 4>는 포스트 상부 캐스팅의 상세로 리지 케이블, 다이아고날 케이블 접합 형태와 다이아고날 케이블이 캐스팅 상부에서 미끄러지는 것을 알 수 있다. 이러한 절점은 핀 절점과는 달리 이웃한 부재가 같이 거동하며 일정한 방향으로 연결되어 미끄러지게 되므로 이를 미끄럼 절점(sliding joint)이라 한다. 포스트 상부는 다이아고날 케이블과 포스트의 미끄럼 절점이 공존하게 되며, 마찬가지로 포스트 하부에서도 링 케이블과 포스트의 미끄럼 절점이 공존하게 된다. 그러나 포스트 하부의 미끄럼 절점



<그림 5> 포스트 상부 캐스팅

의 경우 링 케이블에 높은 인장력이 발생하고 미끄러지기 힘들 기하학적 형상으로 인하여 링 케이블의 미끄러짐을 기대하기 어렵다.

안정화 이행과정해석시 이와 같은 미끄럼 절점을 반영하여 해석하는 것은 대단히 복잡한 해석기법을 요구하게 되며, 기존의 연구에서는 미끄럼 절점을 고려한 해석과 이를 편 절점으로 고려한 해석과의 차이는 미소한 것으로 밝혀져 있다. 이 연구에서도 미끄럼 절점은 연구의 대상에서 벗어나 있으므로 미끄럼 절점을 고려하지 않았다.

서울올림픽 체조경기장의 안정화 이행과정은 최초 지상의 가설지지대에 올려진 센터 링 상부에 리지 케이블, 다이아고날 케이블, 링 케이블, 포스트를 매단다. 이후 아우터 다이아고날 케이블부터 인장력을 도입하면서 지붕구조는 점차 상승하게 되고 최종 센터 다이아고날 케이블에 인장력을 도입하여 케이블 돔 구조물을 완성하게 된다.

3.2 부재의 제원 및 강도

서울올림픽 체조경기장의 케이블 돔 지붕에 사용된 케이블 재료는 지름 0.6"의 PC Strand로서 26.37tf의 파단강도를 지닌다. 각 부재의 제원 및 강도를 <표 1>에 나타낸다.

3.3 실측형상

케이블 돔의 실측형상은 센터 링, 이너 포스트, 미들 포스트, 아우터 포스트의 각 상하부 기준점

〈표 1〉 부재의 제원 및 강도

부재 번호	부재명칭		단면적 [cm ²]	탄성계수 [tf/cm ²]	파단하중 [tf]	장기허용강도 [tf]	단기허용강도 [tf]
1	Center Ridge cable	2 $\phi 9/8$ ~ WIRE ROPE	6.903	1400	93.3	42.4	46.7
2	Inner Ridge cable	2 $\phi 9/8$ ~ WIRE ROPE	6.903	1400	119.9	54.5	60.0
		1 $\phi 0.6$ ~ STRAND	1.4	1968			
3	Middle Ridge cable	2 $\phi 9/8$ ~ WIRE ROPE	6.903	1400	226.3	102.9	113.2
		5 $\phi 0.6$ ~ STRAND	7.0	1968			
4	Outer Ridge cable	2 $\phi 9/8$ ~ WIRE ROPE	6.903	1400	492.3	223.8	246.2
		15 $\phi 0.6$ ~ STRAND	21.0	1968			
5	Valley cable	8 $\phi 0.6$ ~ STRAND	11.2	1968	212.8	96.7	106.4
6	Center Diagonal cable	1 $\phi 0.6$ ~ STRAND	1.4	1968	26.6	12.1	13.3
7	Inner Diagonal cable	4 $\phi 0.6$ ~ STRAND	5.6	1968	106.4	48.4	53.2
8	Middle Diagonal cable	10 $\phi 0.6$ ~ STRAND	14.0	1968	266.0	120.9	133.0
9	Outer Diagonal cable	16 $\phi 0.6$ ~ STRAND	22.4	1968	425.6	193.5	212.8
10	Inner Ring cable	8 $\phi 0.6$ ~ STRAND	11.2	1968	212.8	96.7	106.4
11	Middle Ring cable	20 $\phi 0.6$ ~ STRAND	28.0	1968	532.0	241.8	266.0
12	Outer Ring cable	36 $\phi 0.6$ ~ STRAND	50.4	1968	957.6	435.3	478.8

부재 번호	부재명칭		단면적 [cm ²]	탄성계수 [tf/cm ²]	항복강도 [tf/cm ²]	장기허용압축응력도 [tf/cm ²]	장기허용압축력 [tf]
13	Inner Post	$\phi 219\text{mm} \times 8\text{mm}$	53.03	2100	2.4	0.94	50.05
14	Middle Post	$\phi 219\text{mm} \times 8\text{mm}$	53.03	2100	2.4	0.87	46.32
15	Outer Post	$\phi 324\text{mm} \times 10\text{mm}$	98.65	2100	2.4	1.17	115.55

(Working Point)과 외주보(Perimeter Ring Beam)의 실측값을 사용하여 파악한다.

실측값은 편의상 센터 링, 이너 포스트, 미들 포스트, 아우터 포스트, 링 빔을 각각 A, B, C, E, D점으로 하여 상하부를 극좌표계로 나타내며, R은 중심점에서의 거리, Z는 링 빔의 기준점에서 부티의 높이로 한다.

실측형상을 검토하면 미들 포스트가 올라가있는 반면 아우터 포스트는 내려가 있음을 알 수 있다. 이로부터 미들 다이아고날 케이블에 많은 인장력이 도입되어 있는 것으로 사료되며, 이는 다이아고날 케이블 인장력 실측값의 경향과 일치하고 있다.

3.4 케이블 실측장력

서울올림픽 체조경기장의 케이블 부재력 측정은 리지 케이블이 막 패널과 접합되어 있으므로 측정할 수 없으며, 링 케이블 또한 각각의 스트랜드를 측정할 수 없는 관계로 다이아고날 케이블만 가능하다.

케이블의 장력은 앞의 실측형상과 연관되어 있음을 알 수 있으나 각 열마다 인장력의 차이가 많이 난다. 여기에 대해선 자세한 원인을 파악할 수 없지만, 오랜 시간 몇 차례의 보수를 하면서 다이아고날 케이블을 인장하였는데 이때 다이아고날 케이블의 인장력을 각 열마다 고르게 인장할 수 없었던 까닭으로 사료된다. 실측결과 미들 다이아고날 케이블

인장력이 다소 높으며, 이로 인하여 센터 링, 이너 포스트, 미들 포스트는 올라가고, 아우터 포스트는 내려갔음이 입증되고 있다.

3.5 해석모델

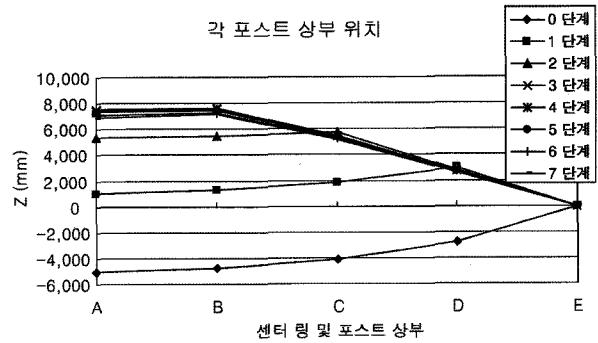
서울올림픽 체조경기장의 모델링은 도면을 근거로 작성한다. 안정화 이행과정해석의 최종단계는 센터 다이아고날 케이블을 인장하여 케이블 인장이 끝났을 때까지로 보아야 하나, 비교의 대상이 되는 실측자료는 막과 캐워크 등의 하중이 적용된 상태이므로 안정화 이행과정 이후에 막과 캐워크를 적용한 해석을 추가적으로 수행하여 실측형상 및 실측인장력과 비교하도록 한다.

<표 2> 케이블 돔의 시공과정순서

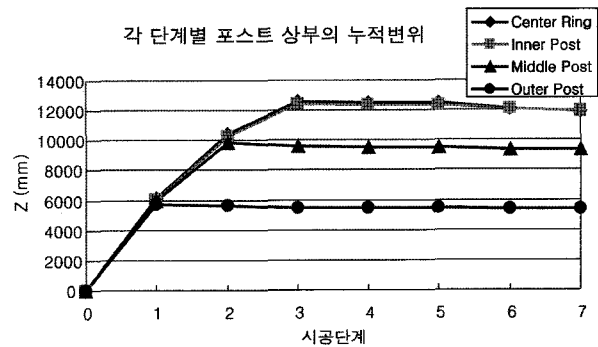
시공단계	구조물 상태
0	케이블 인장력 도입전
1	아우터 다이아고날 케이블 인장 완료
2	미들 다이아고날 케이블 인장 완료
3	이너 다이아고날 케이블 인장 완료
4	센터 다이아고날 케이블 인장 완료
5	막 설치 완료
6	캐워크 및 각종 장비 설치 완료
7	밸리 케이블 인장 완료

3.6 해석결과

<그림 6>은 각 시공단계별 포스트 상부의 위치를 나타낸 것이며, <그림 7>은 각 시공단계별 포스트 상부의 누적변위를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 지붕구조가 다이아고날 케이블의 인장시에는 상당히 많은 양을 상승한 반면, 다이아고날 케이블의 인장이 끝난 후 막 설치, 캐워크 등의 시설물 설치, 밸리 케이블 인장 등의 상황에서는 조금 밖에 처지고 있지 않다. 즉 다이아고날 케이블을 인장하기 전까지는 불안정한 구조물로서 약간의 부재력의 변화에도 민감하게 움직이나, 다이아고날 케이블을 점차적으로 인장하면서 케이블 돔 구조의 강성이 증가하고 안정화로 이행하는 것이다. 최종적으로 센터 다이아고날 케이블을 인장하면 케이블 돔 구조는 안정화가 끝나게 되고 이후의 고정하중에 대하



<그림 6> 각 시공단계별 포스트 상부 위치



<그림 7> 각 시공단계별 포스트 상부 누적변위

여 높은 강성을 나타냄을 알 수 있다.

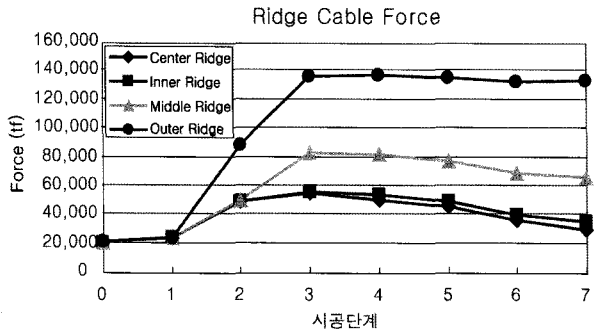
<그림 8, 9, 10>은 각각 리지 케이블, 다이아고날 케이블, 링 케이블의 시공단계별 부재력을 나타낸 것으로 다이아고날 케이블 인장이 완료되면 케이블 돔은 안정화를 이루게 되고, 이후의 시공단계별 하중에 따라 리지 케이블은 중앙부의 인장력이, 다이아고날 케이블과 링 케이블은 외단부의 인장력이 많이 변하고 있음을 알 수 있다.

막은 케이블 돔 구조의 안정화 이행에 영향을 미치는 것이 아니라 안정화가 완료된 후 포스트 상부의 우발적인 전도에 대한 안정성을 증대하는 역할을 하며, 밸리 케이블은 안정화가 완료된 후 부압을 받는 풍하중에 대하여 저항하는 역할을 한다.

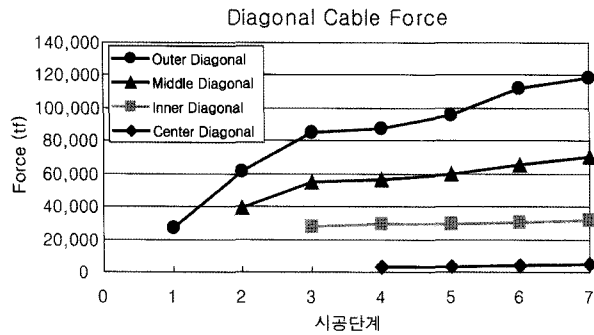
<그림 11>에 케이블 돔의 안정화 이행과정의 형상변화를 각 단계별로 나타내었다.

3.7 실측결과와 비교

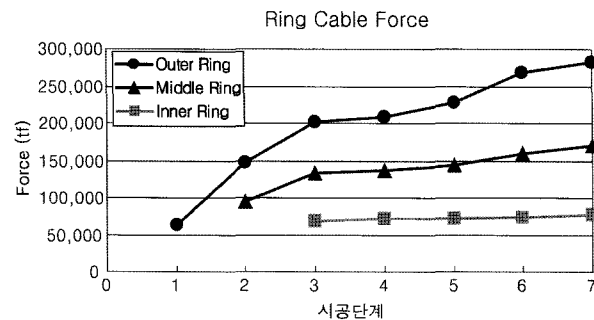
실측결과와 안정화 이행과정해석의 결과를 비교하면 우선 최종상태에서 차이가 많이 발생하고 있다. 그 이유는 안정화 이행과정해석은 설계도면의



〈그림 8〉 각 시공단계별 리지 케이블 부재력



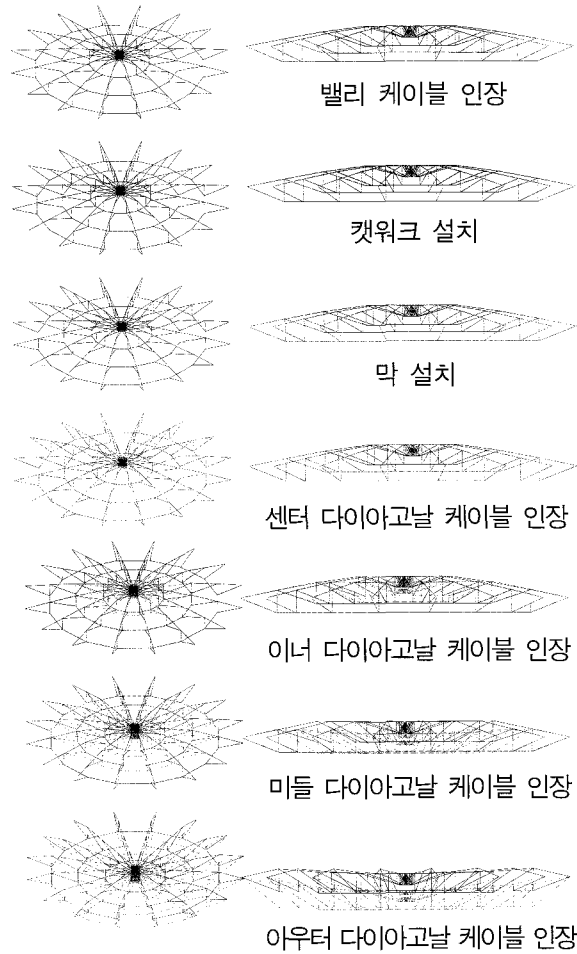
〈그림 9〉 각 시공단계별 다이아고날 케이블 부재력



〈그림 10〉 각 시공단계별 링 케이블 부재력

좌표와 부재력을 기준으로 수행된 반면 하중의 산정에 있어서 자료의 부족, 내막재의 쏠림 등 실제 구조물의 고정하중을 정확히 반영하기가 매우 힘들어 실제 구조물이 받는 하중과 모델링에 적용한 하중과는 많은 오차가 있기 때문이다. 또한 실측된 인장력보다 다소 낮은 값으로 해석한 결과 지붕구조의 형상도 실제보다 낮게 나타난 것을 알 수 있다.

그러나 형상과 부재력에 있어서 실측값과 해석결과의 전체적인 흐름은 거의 비슷한 양상을 나타내고 있으며, 해석된 최종형상과 부재력으로부터 안정화 이행과정해석을 진행하는 것에는 별다른 문제가 없다.



〈그림 11〉 케이블 돔 구조의 안정화 이행과정

4. 결 론

이 논문에서는 케이블 돔 구조에 대한 안정화 이행과정을 살펴보았다. 서울올림픽 체조경기장에 대하여 4단계의 안정화 이행과정에 대한 해석을 수행하였으며, 이 결과 각 단계가 진행될수록 케이블 돔 구조의 강성이 증가함을 알 수 있었다.

센터 링의 높이로 살펴보면 다이아고날 케이블을 처음 인장한 경우 6.089m 올라갔으며, 두 번째 인장에서 4.346m, 세 번째 인장에서 2.133m 올라갔다. 네 번째 인장에서는 오히려 6cm가 내려갔는데, 이는 센터 링의 하부를 설치해야 마지막 센터 다이아고날 케이블을 인장할 수 있으므로, 이 하중으로 인하여 센터 다이아고날 케이블을 인장하여도 최종 강성만 확보하게 될 뿐 구조물은 더 이상 올라가지 않게 된다. 센터 링의 높이에서 알 수 있듯이 이너

다이아고날 케이블이 인장되면 이마 구조물 대부분의 강성을 확보하고 있음이 분명하며, 센터 다이아고날 케이블을 인장함으로써 최종적인 강성이 완성되었다.

즉 불안정성에 있어서도 최초 아우터 다이아고날 케이블을 인장하기 전이 가장 불안정하며, 미들, 이너, 센터 다이아고날 케이블을 인장할수록 불안정성은 줄어들고 점차 안정하게 됨을 알 수 있다.

안정화 이행시의 형상에 있어서도 다이아고날 케이블을 인장하기 전에는 리지 케이블들이 아래로 늘어진 현수케이블 같은 형상을 이루고 있으며, 다이아고날 케이블 인장한 후에는 인장된 곳의 포스트가 올라가게 되고 나머지 리지 케이블들이 다시 현수케이블 형상을 이루게 된다. 여기서 아래로 늘어진 형상이 위로 볼록하게 되는 과정에서 해석상의 특이성이나 불안정성이 발생하게 되며, 이러한 현상은 일반적인 해석으로는 풀 수 없어 뉴튼랩슨법이나 동적이완법 같은 비선형해석법을 사용하게 된다.

해석의 수렴과정을 살펴보아도 불안정성이 큰 아우터 다이아고날 케이블 인장에서는 많은 수렴성 낮았지만, 해석이 진행되면서 수렴성도 점차 향상됨을 보여주었다.

서울올림픽 체조경기장의 안정화 이행과정을 통하여 케이블 돔과 같은 인장구조물의 실제의 시공

과정을 유추할 수 있으며, 시공전에 케이블 프리스트레스와 이에 따른 구조물의 거동을 미리 확인할 수 있으므로 정밀한 시공계획을 확립할 수 있다.

참고문헌

1. 한상을, 이경수, "동적이완법에 의한 막구조의 등장력곡면 형태해석에 관한 연구", 한국전산구조공학회, 제11권 4호, pp.321~330, 1998. 12.
2. 한상을, 이경수, 이주선, 황보석, "케이블돔 구조물의 안정화 이행과정 및 구조적 거동특성에 관한 연구", 한국전산구조공학회 봄 학술발표대회 논문집, pp.260~267, 1999.
3. 황보석, "케이블돔구조물의 보수보강 설계", 한국전산구조공학회, 제15권 4호, pp.7~21, 2002
4. Day, A. S., "An Introduction to Dynamic Relaxation", The Engineer, London, Vol. 219, pp.18-221, 1965.
5. Papadrakakis, M., "A Method for Automatic Evaluation of the Dynamic Relaxation Parameters", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 25, pp.35-48, 1981.