

케이블 돔의 구조적 거동 특성에 관한 연구

A Study on the Structural Behavior of Cable Domes

한 상 을* 윤 종 현** 이 승 훈** 진 영 상** 황보 석***
Han, Sang-Eul Yoon, Jong-Hyun Lee, Seung-Hun Jin, Young-Sang Hwang bo, Suk

ABSTRACT

Cable dome that consists of three component such as cable, strut and fabric membrane has complex structural characteristics. Main structural system of cable dome is cable-strut tensegric system, and fabric membrane element is conceived as cladding roof material. One of the important problem of cable dome is to investigate the structural response from external load effect such as snow and wind. When cable dome is subjected to load each structural component has various special structural characteristics. One is that geometrical nonlinearity should be considered because large deformation is occurred from their flexible characteristic. The other is that wrinkling occurs occasionally because cable and membrane elements can not transmit compressive forces. So this paper researches the physical structural response of cable dome structure and the structural behavior when failure occurred at a part of structure.

1. 서 론

케이블 돔은 그 구조 형식상 압축부재인 스트럿과 인장부재인 케이블이 조화롭게 연결된 일종의 텐세그리티(tensegrity) 구조 시스템의 한 종류라고 볼 수 있으며, 자중이 가벼운 케이블과 포스트로 되어있기 때문에 장스팬 구조물로 적당한 구조시스템이다. 케이블 돔의 구조는 케이블, 스트럿, 막 요소에 의해 이루어지며, 초기에는 불안정하지만 케이블에 장력을 도입함에 따라 전체 구조시스템이 불안정에서 안정화되어 구조적 특성을 발휘하는 복합구조시스템(hybrid structural system)이다. 케이블 돔은 최소한의 압축부재(스트럿)와 케이블 요소의 연속적 결합에 의해 닫힌 형태(closed form)를 이루기 때문에 단위구조의 반복에 의해 전체 구조 시스템을 이루는 텐세그리티 구조와 구별되며, 인장 부재만으로 구조물을 이루는 케이블네트나 막구조와 구별된다. 이러한 복합구조에서 어느 한 부재가 파괴되었을 때 구조물의 전체적인 평형상태는 흐트러질 수 밖에 없다. 구조물의 파괴시 피해를 최소화하기 위해서는 구조물의 파괴 거동에 대하여 어느정도 인지하고 있어야 할 것이다. 본 연구에서는 부산 월드컵 경기장의 케이블 돔에 대하여, 뉴튼랩스법을 사용하여 다양한 외력이 작용하였을 때 부재의 응력, 변형 분포 등을 파악할 수 있는 응력-변형 해석을 수행하고, 동적이완법을 사용하여 일부 부재의 파괴시의 케이블 돔의 거동에 대하여 파악하고자 한다.

2. 수치 해석 알고리즘

동적이완법은 시간증분단계 Δt 마다 구조물의 운동상태를 추적해 나가면서 구조물의 감쇠작용에 의해, 구조물이 정적평형상태에 도달한다는 원리에서 출발한다. 동적이완법에 의한 형상탐색은 임의의 초기구조물상

* 정회원 · 인하대학교 건축공학과 교수

** 학생회원 · 인하대학교 건축공학과 석사과정

*** ES 건축구조 엔지니어링 대표

태와 초기응력에 의해 발생된 구조물의 운동에 대한 정적평형상태를 찾는 것이고, 응력-변형해석은 형상해석을 통해 얻은 평형상태에, 임의의 외부하중을 작용시켜 발생한 운동상태를 동적이완법의 수치해석과정을 수행하여 정적평형상태를 찾는 것이다. 정적평형상태를 찾는 과정은 동적감쇠(kinetic damping)에 의해 자동적으로 조절되는데, 비감쇠상태에서 구조물의 거동을 추적하면서 각 시간증분마다 구조물의 총 운동에너지를 계산하고, 최대 운동에너지일 때의 시간증분단계를 새로운 기준 상태로 설정하여 반복계산을 수행하는 것이다.

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

구조물의 운동방정식은 위 식과 같이 나타내며, 동적감쇠에 의해 감쇠매트릭스를 고려하지 않으므로, 감쇠매트릭스 $[C]=0$ 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.

$$[M]\{\ddot{u}\} = \{R\} \quad (3)$$

$$\{R\} = \{W\} - [K]\{u\} \quad (4)$$

동적이완법에서는 강성매트릭스를 만들지 않아도 되며, 강성매트릭스의 역행렬 계산이 필요한 뉴튼랩슨법과 달리, 식(3)을 중앙차분법에 의한 벡터연산으로 변위를 구하게 된다. 중앙차분법에 의해 가속도벡터를 속도벡터에 대해 표현하면 다음 식과 같다. 변위벡터는 속도벡터를 선형보간하여 구한다.

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

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

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

수치해석상의 안정성을 위해, Barnes는 시간증분 Δt 를 다음과 같이 제안하였다.

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

따라서, 식(8)에 의해 식(9)는 다음 식과 같이 표현된다.

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

식(9)에서 알 수 있듯이 속도벡터는 질량매트릭스에 독립된 관계식을 갖게 되고, 결국 구조물의 거동(변위)은 질량매트릭스에 독립되며, 질량매트릭스는 수렴성에만 관여하게 된다. 질량매트릭스가 오직 수렴성에만 관여한다는 사실은 동적이완법의 가장 큰 수치해석상의 특징으로, 식(9)로부터 질량매트릭스를 식(10)과 같이 강성매트릭스의 대각매트릭스로 가정할 수 있으며, 뉴튼랩슨법에서의 접선강성매트릭스로부터 질량매트릭스를 쉽게 유도할 수 있게 된다.

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

식(10)에서 λ 는 수렴속도를 위한 임의의 상수이다. 동적이완법에 의한 형상해석의 단계에서는 외부하중벡터 $\{W\}$ 를 zero로 하여 위의 식들을 계산하며, 불평형력 $\{R\} \approx \{0\}$ 일 때의 구조물 좌표계를 초기평형상태로 결정한다. 위 수식에서 알 수 있듯이, 동적이완법은 강성매트릭스의 역행렬을 계산하는 과정이 필요 없으며, 동적감쇠에 의해 수치해석과정을 제어할 수 있다. 따라서, 탄성계수를 zero로 하여 형상해석을 수행할 때 대단히 많은 반복계산이 요구되는 막구조 해석에서 매 단계마다 강성매트릭스의 역행렬계산을 수반하는 뉴튼랩슨법에 비해 수치해석시간을 줄일 수 있다.

3. 응력-변형 해석

3.1 부산 케이블 돔

2002년 월드컵을 위해 건설 중에 있는 부산 케이블 돔 (그림 1)은 상부 구조가 228m 의 직경에 장변 방향 (North-South), 단변 방향 (East-West) 으로 각각 180m와 152m 의 타원형의 개구부를 갖는다. 케이블 트러스의 높이는 단변 방향에서 21.6m, 장변 방향에서 13.6m 으로 연속된다.

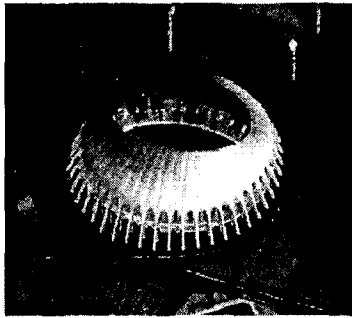


그림 1. 부산 케이블 돔의 전경

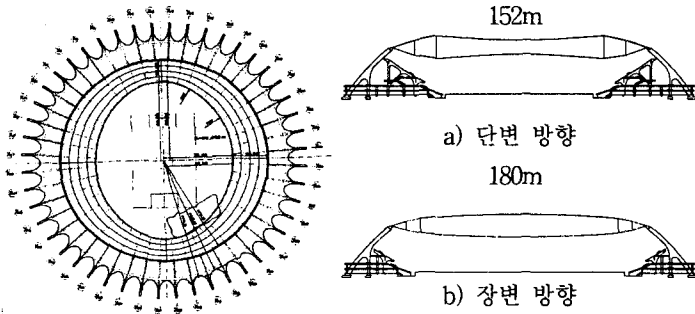


그림 2. 평면 및 입면

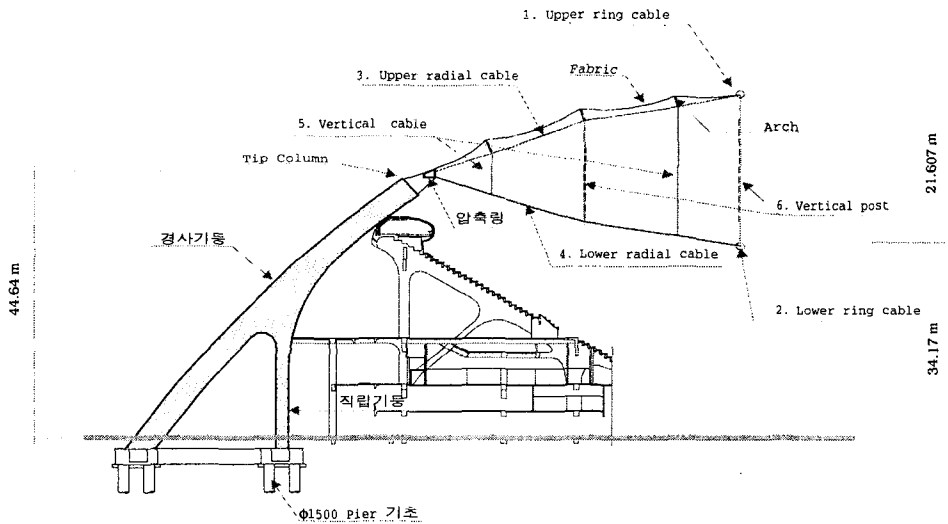


그림 3. 부산 케이블 돔 구조 부재의 명칭

표 1. 부재 제원

부재번호	부재 명칭	단변 방향	장변 방향
1	Upper Radial Cable	φ 52	φ 43
2	Lower Radial Cable	φ 68	φ 56
3	Upper Ring Cable	3- φ 71	3- φ 71
4	Lower Ring Cable	3- φ 94	3- φ 94
5	Vertical Cable	φ 18	φ 18
6	Vertical Post	Inner	Steel Pipe φ 244.5×25
		Outer	Steel Pipe φ 244.5×12.5

3.2 하중의 산정

3.2.1 고정하중

초기 장력에 의한 하중 및 구조부재의 자중은 프로그램 내에서 자동 계산하여 고려하였으며, 막자중은 $8kg/m^2$, clamp의 자중은 $400kg/EA$ 을 부가적인 하중으로 고려하였고, cat-walk하중도 포함시켰다.

3.2.2 적설하중

부산지역의 적설량을 기준으로 적설하중계수와 노출계수를 적용하여 막 단위면적 당 $55kg$ 으로 고려하였다.

3.2.3 풍하중의 산정

부산지역의 기본풍속을 $50m/s$ 로 하여, 캐나다 RWDI의 풍동실험 (wind tunnel test) 결과에 의한 풍력 계수 및 설계 속도를 적용하여 산출하였다.

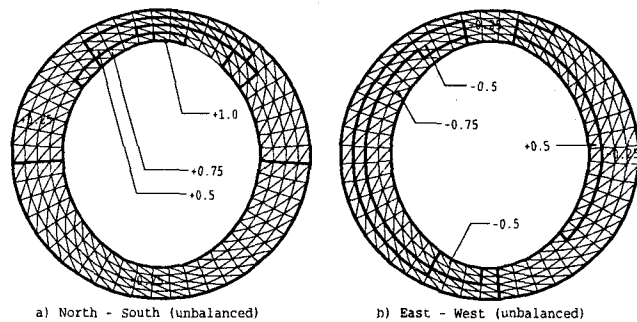


그림 4. 설계속도압 (kPa)

3.3 수치 해석

케이블 돔은 외부하중에 대하여 막과 케이블의 초기장력에 의해 구조적 안정성을 확보하는데, 막과 케이블의 초기 장력과 재료적 성질 때문에 외부 하중에 대하여 대변형이 발생된다. 따라서 기하학적 비선형 해석이 필수적인 구조시스템이므로, 비선형 수치해석 기법인 뉴튼랩슨법을 사용하였으며, 막과 케이블에 발생하는 주름현상(wrinkling)을 고려하였다.

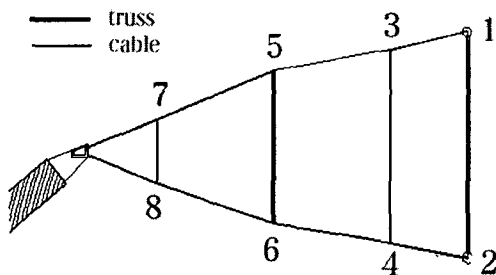


그림 5. 장변 방향 절점 번호

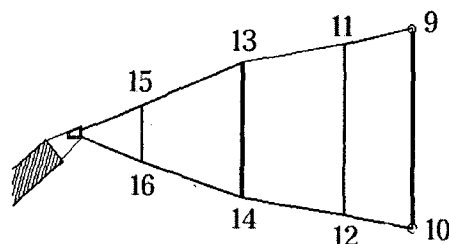


그림 6. 단변 방향 절점 번호

표 2. 최대 절점 변위 () : 절점군 번호

	Dead Load	Dead + Snow	Wind Load (N-S)	Wind Load (E-W)
x	-9.8 cm (2)	-15.1 cm (6)	-22.0 cm (6)	58.8 cm (1)
y	-7.0 cm (1)	-6.9 cm (1)	-40.6 cm (11)	-9.8 cm (1)
z	-17.4 cm (5)	-38.1 cm (3)	122.5 cm (12)	161.0 cm (2)

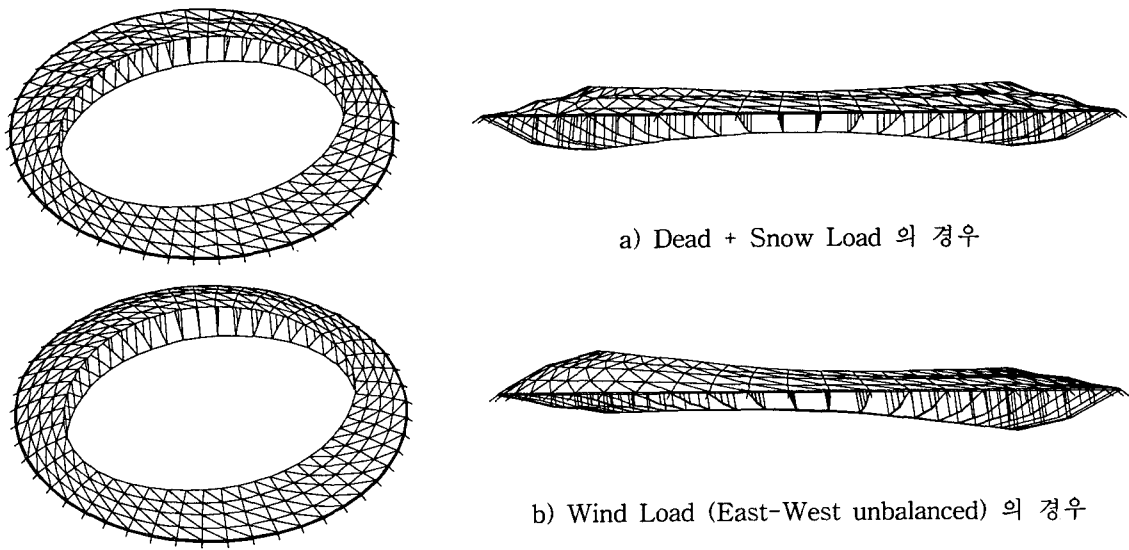
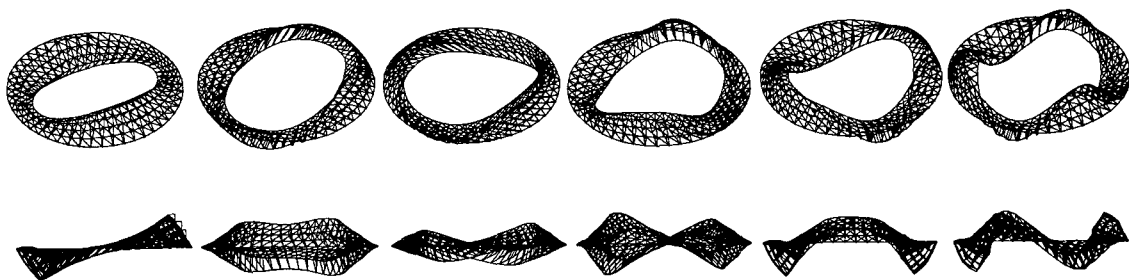


그림 7. 하중에 의한 변위 형상 (a)-배율 : 5배 , b)- 배율 : 3배)

표 3. 해석에 의한 최대 부재 내력 (+ : 인장력, - : 압축력)

		최대 부재 내력 (ton)	부재 허용력(ton)	비율
Upper radial cable	장변	100.0	166.0	0.6
	단변	156.0	166.0	0.9
Lower radial cable	장변	96.0	285.0	0.3
	단변	157.0	285.0	0.55
Upper ring cable	장변	716.0	932.0	0.7
	단변	606.0	932.0	0.65
Lower ring cable	장변	890.0	1654.0	0.5
	단변	753.0	1654.0	0.45
Vertical cable	장변	53.0	15.4	0.3
	단변	6.0	15.4	0.4
Vertical post	장변	-23.0	-28.0	0.8
	단변	-21.4	-28.0	0.76



a) 1st-mode b) 2nd-mode c) 3rd-mode d) 4th-mode e) 5th-mode f) 6th-mode

그림 8. 고유 모드 형상

표 2 는 각 하중에 따른 최대 절점변위를 나타내는 것으로, 장변 방향이 구조적으로 불리함을 확인할 수 있다. 부재의 허용력은 부재 파단 강도로부터 산출하였다. 그림 7은 각각의 하중에 따른 구조물의 변위 형상을 나타낸 것으로 적설하중에 대해서는 변위의 5배의 배율을 취했으며, 풍하중에 대해서는 3배의 배율을 취했다. 표 3은 가장 불리한 하중인 East-West Wind Load에 의한 각 부재별 발생한 최대 내력을 나타낸 것이다. 그림 8은 고유모드형상을 나타내었다.

3.4 막의 해석

막요소에 대한 보다 정밀한 해석을 위해 장변방향의 하나의 스트립을 선택하고, 보다 세밀하게 요소분할 하여 형상 및 응력해석을 수행하였다. 막의 형상해석은 동적이완법을 사용하여 $\{R_i\} \approx \{0\}$ 일때의 구조물의 절점좌표계를 초기응력(prestress)에 의한 초기형상으로 결정하였다. 응력-변형해석에서는 기하학적 비선형성과 막의 주름현상(wrinkling)을 고려하였다.

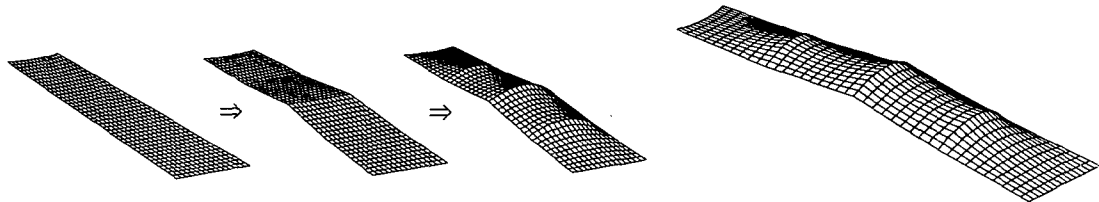
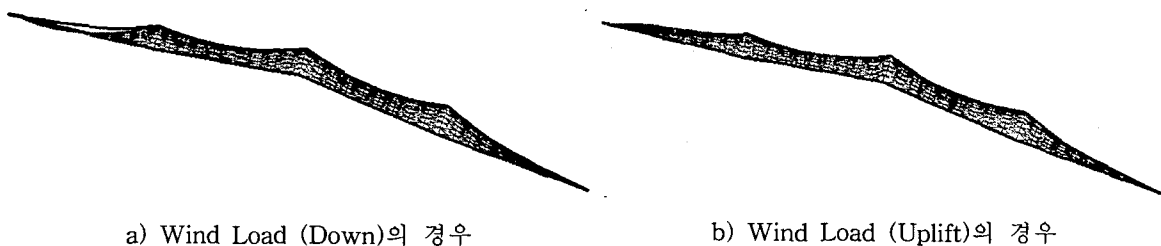


그림 9. 막의 형상 해석 과정

그림 10. 목적 형상

표 4. 최대 변위 및 최대 응력 (최대 응력 ≤ 적합 기준)

		Dead + Snow	Wind Load (Uplift)	Wind Load (Down)
최대 변위	x	-28.2 cm	33.7 cm	-35.5 cm
	y	9.7 cm	-8.5 cm	11.0 cm
	z	-63.9 cm	69.5 cm	-91.0 cm
최대 응력 (kg/cm ²)		74.2	230	356
적합 기준 (kg/cm ²)		185	370	370



a) Wind Load (Down)의 경우

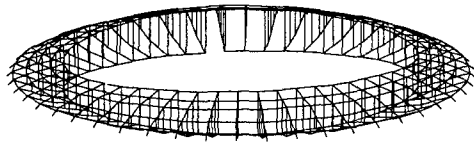
b) Wind Load (Uplift)의 경우

그림 11. 각 하중에 대한 변위 형상

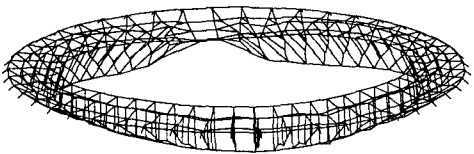
표 4는 각 하중에 따른 최대 변위 및 최대 응력을 나타내고 있으며, 응력에 대한 적합기준은 일본막구조 협회의 막구조 건축물 구조설계기준을 따랐다. 그림 11은 각 하중에 대한 변형상태를 나타낸 것으로, 두꺼운 선은 변형전 형상을 보여준다.

4. 일부 부재의 파괴시 케이블 돔의 거동

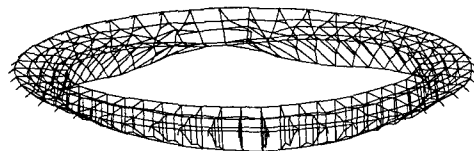
동적이완법을 사용하여 일부의 케이블이나 트러스 부재의 파괴 발생시의 케이블 돔의 거동을 파악하였다. 동적이완법은 동적 평형방정식으로부터 정적 평형상태를 찾는 비선형 해석기법으로, 시간 증분단계 Δt 마다 구조물의 운동상태를 추적해 나가면서, 구조물의 감쇠작용에 의해 평형상태를 찾는다. 따라서, 수치해석과정 중 강성매트릭스를 만들지 않으며, 다만 질량 매트릭스만 초기 상태에서 만들어, 이 매트릭스에 의해 수렴과정이 조절되는 차분적 적분기법이다. 본 연구에서는 임의로 부재를 제거한 케이블 돔에 고정하중만을 주고 해석을 수행하였다. 부재의 파단에 영향을 받아 발생된 구조물의 운동에 대한 평형상태를 찾는 것이다.



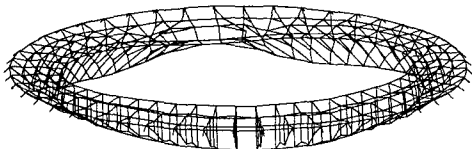
Iteration = 0



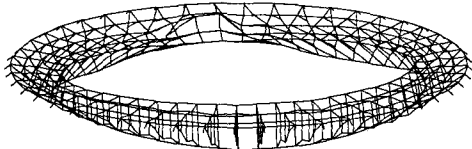
Iteration = 1000



Iteration = 2500



Iteration = 4000



Iteration = 10000

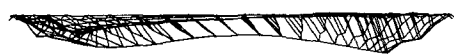


그림 12. Lower ring cable 의 상실

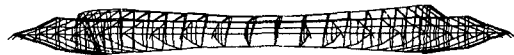
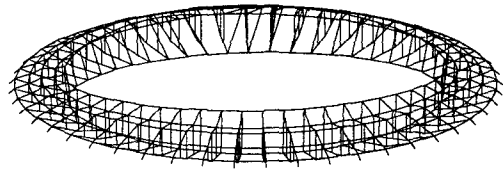


그림 13. Upper ring cable 의 파단

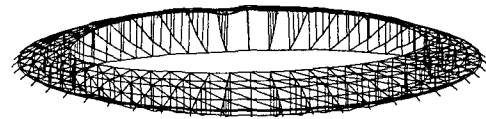


그림 14. Radial cable의 파단

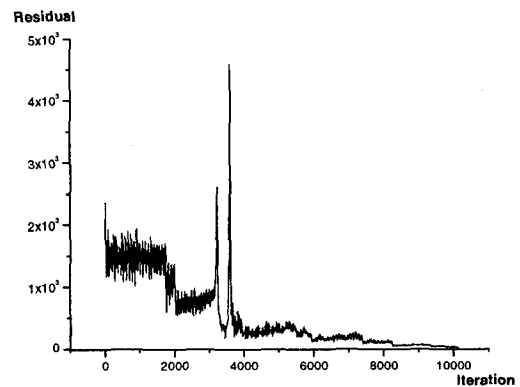


그림 15. Lower ring cable 파단의 경우의 수렴 과정

그림 12는 가장 불리한 경우로 사료되는 장변 방향의 Lower ring cable의 한 요소를 제거한 후 해석한 iteration에 따른 변위 형상이고, 그림 13은 장변 방향의 Upper ring cable의 한 요소를 제거한 케이블 돔의 변위형상이다. 그림 14는 장변 방향의 한 스트립의 상하 두 개의 Radial cable을 제거했을 때의 변위형상이다. 그림 15는 Lower ring cable 파단에 대한 수렴 과정을 나타내고 있다. 파단된 부재에 따라 파괴의 거동 및 정도의 차이가 큼을 알 수 있다. 부산 케이블 돔의 경우 Ring cable이 보다 중요한 역할을 함을 알 수 있었고, Radial cable의 경우엔 구조적 안정성에 큰 문제를 주지 않았다. 이는 각각의 Radial cable이 국부적으로 작용하고, 전체 구조물의 거동에는 크게 영향을 미치지 않기 때문이다.

5. 결론

부산 월드컵 경기장을 해석 모델로 하여 케이블 돔의 응력-변형 해석, 막의 형상 및 응력해석을 수행하였고, 일부 부재의 파괴 후의 구조적 거동 및 안정성을 수행하였다. 응력-변형 해석을 통해 구조물의 거동을 파악할 수 있었으며, 고유 모드 형상은 변형 형상과 잘 일치됨을 알 수 있었다. 일부 부재의 파괴 발생 후 거동 파악은 강성행렬의 역행렬을 구하는데 있어 수치 해석상 많은 어려움이 있으나, 강성 행렬의 역행렬을 구하지 않는 동적이완법을 사용함으로써 효과적으로 구할 수 있었다. 이 과정을 각 부재에 대하여 시뮬레이션 해봄으로서 구조물의 파괴 거동에 보다 취약한 부재의 파악이 용이할 것으로 보인다.

참고 문헌

1. 한상울, 이경수 "동적이완법에 의한 막구조의 등장력곡면 형태해석에 관한 연구", 대한건축학회 추계 학술발표대회 논문집, 제 18권 제 4호 pp. 147~152, 1998
2. 한상울, 이경수 "케이블 돔 구조물의 안정화 기법에 관한 연구", 대한 건축학회 학술발표논문집, 제 19권 제 1호, pp. 111~116, 1999
3. 한상울, 이경수 "케이블 돔 구조물의 안정화 이행과정 및 구조적 거동특성에 관한 연구", 한국전산구조공학회, 제 11권 1집, pp. 260~267, 1999
4. R. J. Qian "Structure mechanism of cable dome and The structure concept", IASS International symposium university of Stuttgart-Volume II, Conceptual design of structures, 1996
5. Ikuo Yamaguchi " A study on the mechanism and structural behaviors of cable dome"
6. W. J. Lewis and M. S. Jones "Dynamic relaxation analysis of the non-linear static response of pretensioned cable roofs", Computers & Structures Vol. 18 pp. 989~997, 1984
7. M. Papadrakakis "Post-buckling analysis of spatial structures by vector iteration methods", Computers & Structures Vol. 14 pp. 303~402, 1981
8. David Geiger, Andrew Stefaniuk "The design and construction of two cable domes for the Korean olympics", IASS Ptoceedings IASS symposium Vol. II, 1986
9. D. A. Gasparini, "Dynamic and static behavior of cable dome model", ASCE, 1990
10. Day, A.S., "An Introduction to Dynamic Relaxation", *The Engineer*, London, 1965, vol. 219, pp. 18-221
11. Barnes, M.R., "Form-finding and Analysis of Prestressed Nets and Membranes", *Computers and Structures* vol. 30, 1988, pp. 685-695.
12. "膜構造建築物 構造設計 の 手引・計算例集", 日本膜構造協會, 平成 7年