

케이블돛구조물의 보수보강 설계



황 보 석*

1. 서 론

현대 산업사회는 다양한 형태와 목적을 갖는 건축물의 건설을 요구하고 있다. 특히 경제의 발달과 생활의 질적향상에 따라 초대형 공간에 대한 욕구가 증대되면서 전시공간, 관람시설, 산업시설 등의 구조물들이 대공간을 필요로 하게 되었으며, 이러한 욕구에 따라 대공간구조물에 적절한 구조시스템이 개발되어 건설되고 있다. 대공간을 구성하는 구조시스템은 철골트러스구조, 셸구조, 케이블 막구조 등으로 분류할 수 있으며, 특히 케이블 막구조는 경량의 재료로서 대공간을 구성하는 효율적인 구조시스템이라 할 수 있다. 대공간구조의 발전과정을 살펴보면 1970년대 이전에는 콘크리트 연속체 셸구조가 주류를 이루었으며 이후 재료의 중량에 따른 스펬의 한계, 경제성, 시공성 등으로 인하여 콘크리트 셸구조에 대응하는 새로운 구조시스템으로 철골트러스구조를 사용하였다. 한편 경량재료의 개발과 해석법의 개발로 인하여 초대형 공간을 덮을 수 있는 연구가 지속적으로 이루어지면서 케이블과 막을 이용한 구조시스템이 대공간구조로서 적용되고 있다.

국내의 대공간구조의 경우 철골로 지어진 체육관 등이 이미 오래전에 건설되어졌고, 1980년대 중반에 들어 88서울올림픽이 유치되면서 케이블과 막을 사용한 경량구조로 구성된 대공간구조물이 본격적으로 건설되기 시작하였다. 이후 93년 대전 엑스포와 최근에 건설된 월드컵경기장을 건설하기 까지 케이블과 막을 이용한 대형전시공간 및 관람집회시설의 건설이 증가하였다.

일반구조물과 마찬가지로 대공간구조물의 경우에서도 사후 유지관리가 필요하며, 일정 수명이 경과하면 보수보강이 요구된다. 대공간구조의 경우 작용하는 응력과 변형이 상대적으로 크므로 보수보강시 상당한 주의를 기울여야 하고, 보수보강시 발생할 수 있는 구조적인 불안정 문제를 엔지니어링을 통하여 사전에 시뮬레이션 할 필요가 있다. 특히 케이블과 막으로 이루어진 케이블 막구조의 경우 초기장력에 의해 구조물의 강성이 발현되는 시스템이므로 이에 대한 검증이 매우 중요하다.

본고에서는 대공간을 구성하는 여러 가지 구조시스템 중 케이블돛구조에 대한 시스템과 이에 대한 보수보강기법을 소개하고자 한다. 2장에서는 케이블돛의 구조시스템에 대하여 기술하며 3, 4장에

* (주)ES건축구조엔지니어링 소장, 건축구조기술사

기술기사

서는 보수보강공사를 위하여 수행한 구조설계 및 해석 과정 등 보수보강공사에 필요한 기술적 근거를 기술한다. 마지막으로 5장에서는 보수보강공사의 공법에 대하여 간략하게 서술한다.

2. 케이블들의 구조시스템

2.1 구조개념

케이블돔구조와 같은 경량인장구조물은 일반구조물과 달리 대변형을 수반하며 부재의 인장력으로 구조물을 지지하게 되므로 어느 부재에도 압축이 발생하지 않아야 한다.

본 케이블돔은 120m의 원을 16개의 리지 케이블로 분할하고 각각의 리지 케이블은 3개의 포스트의 압축력으로 지지한다. 포스트의 하부는 리지 케이블로 연결되는 다이아고날 케이블과 링 케이블이 3차원으로 지지하게 된다. 포스트와 리지 및 다이아고날 케이블은 삼각형을 형성하면서 압축과 인장으로 평형화된다. 상부의 막구조는 리지 케이블을 경계구조로 지지되고, 리지 케이블 사이에 밸리 케이블을 설치하여 장력을 도입함으로써 막구조를 형성하게 된다. 하중방향에 따라 하중저항부재가 달라지는데 수직하중방향에 대해서는 링 케이블과 다이아고날 케이블이 지지하게 되고, 상하에 대해서는 밸리 케이블과 리지 케이블이 저항하게 된다. 시공시 구조물이 안정화되기 위하여는 케이블에 초기장력이 도입되어야 하며 케이블이 적설이나 바람 등의 설계하중에 대하여 압축력이 발생하지 않도록 도입되어야 한다.

케이블 재료는 인장력만을 지지하는 선형 탄성 재료이며 구조해석을 위한 케이블들의 평면 및 단면은 그림 2와 같다.

2.2 사용재료 및 부재명칭

케이블돔구조에 사용된 케이블 재료는 직경 0.6"의 PC Strand로서 26.37tf 정도의 파단강도를 지닌다. 케이블 부재와 막재의 명칭 및 제원은 그림 3 및 표 1, 표 2와 같다.

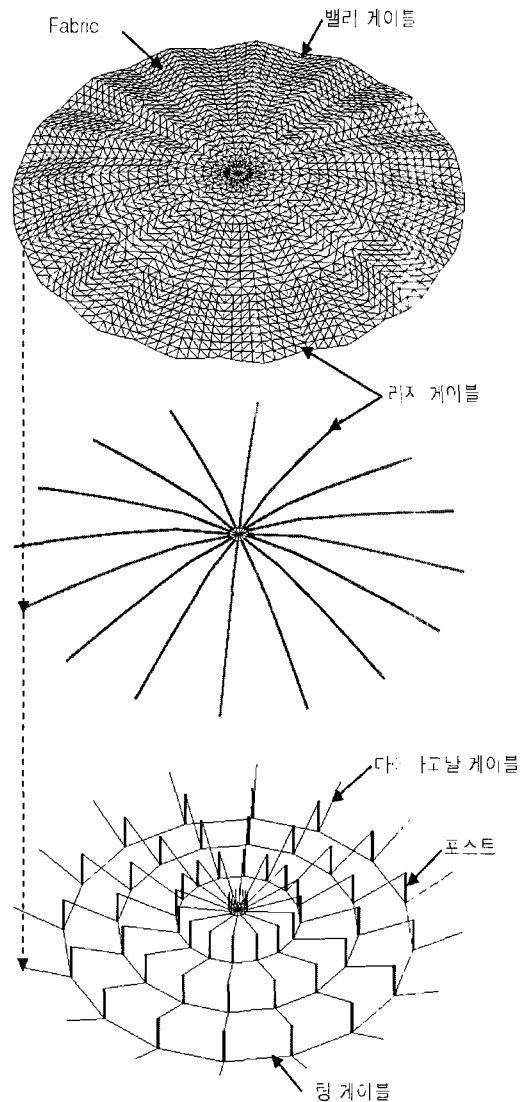
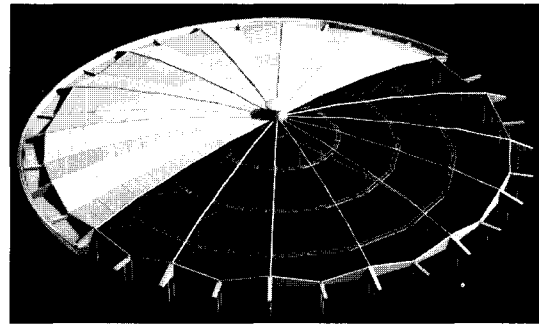


그림 1 케이블돔의 구조개념

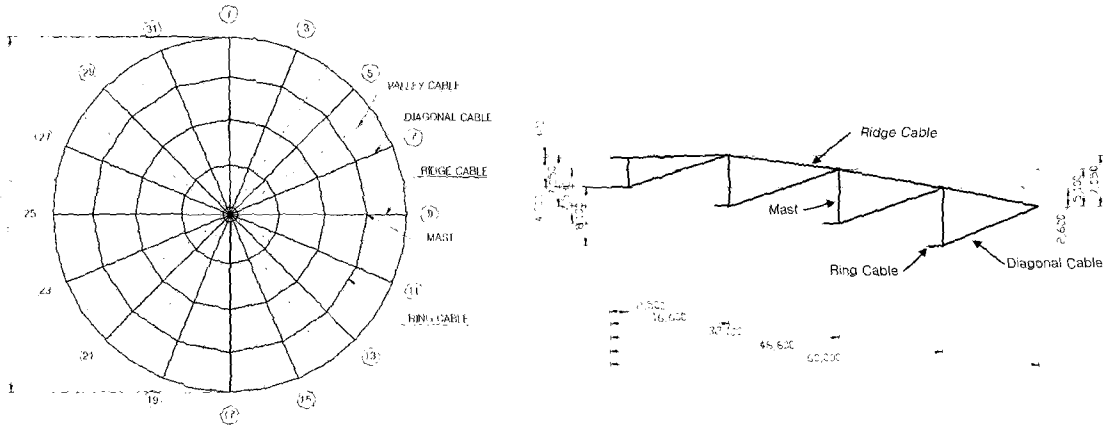


그림 2 케이블돔의 평면 및 단면

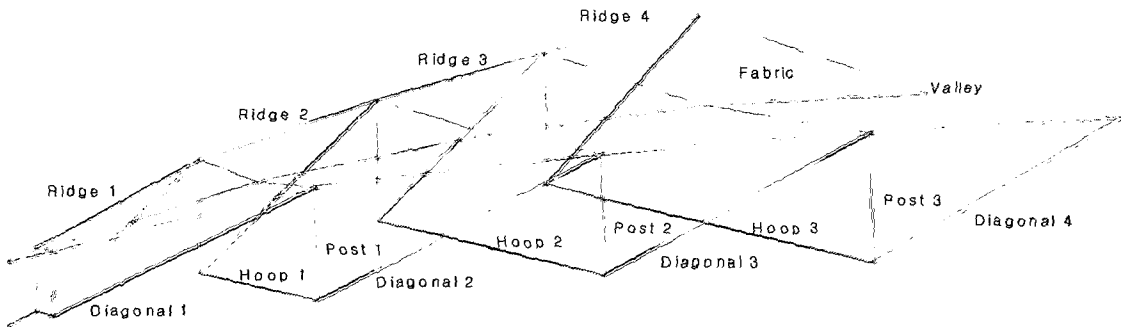


그림 3 부재 명칭

표 1 케이블 부재 제원

Ridge 1	2- ϕ 9/8"	Wire Rope
Ridge 2	2- ϕ 9/8"	Wire Rope
	1- ϕ 0.6"	Strand
Ridge 3	2- ϕ 9/8"	Wire Rope
	5- ϕ 0.6"	Strand
Ridge 4	2- ϕ 9/8"	Wire Rope
	15- ϕ 0.6"	Strand
Valley	8- ϕ 0.6"	Strand
Diagonal 1	1- ϕ 0.6"	Strand
Diagonal 2	4- ϕ 0.6"	Strand
Diagonal 3	10- ϕ 0.6"	Strand
Diagonal 4	16- ϕ 0.6"	Strand
Ring 1	8- ϕ 0.6"	Strand
Ring 2	20- ϕ 0.6"	Strand
Ring 3	36- ϕ 0.6"	Strand
Post 1	ϕ 219×8	Steel Pipe
Post 2	ϕ 219×8	Steel Pipe
Post 3	ϕ 324×10	Steel Pipe

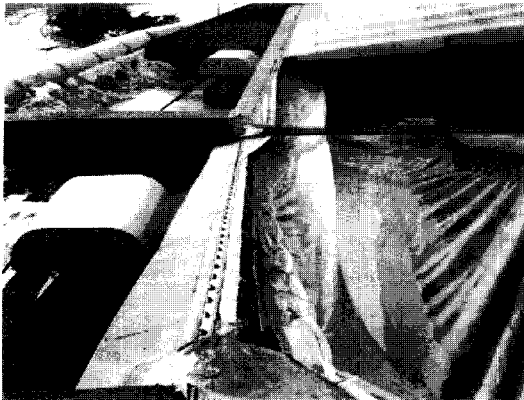
표 2 막재료

두께		0.762mm
무게		1.306kg/m ²
인장강도(Strip Tensile)	경사	140kgf/cm
	위사	100kgf/cm
접힘후 인장강도 (Strip Tensile After Crease Fold)	경사	115kgf/cm
	위사	70kgf/cm
찢김강도(Trapezoidal Tear)	경사	31.75kgf
	위사	29.48kgf

3. 케이블돔의 보수보강

3.1 배경

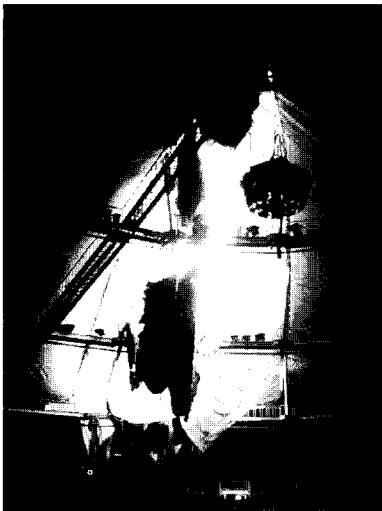
제1체육관은 88올림픽을 위하여 85년에 건설되었으며, 이 건물의 지붕구조는 세계최초의 케이블 패브릭 서스펜션 돔구조로서 케이블과 막의 인장력으로 지붕구조를 지지하는 경량구조물이다. 케



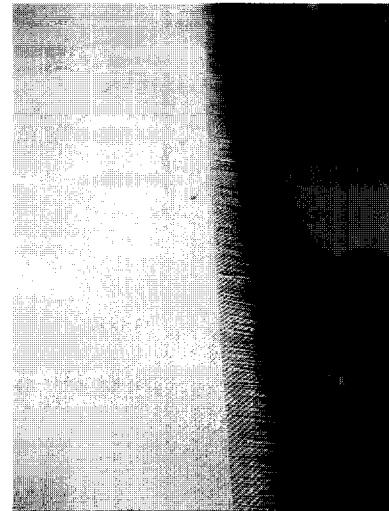
(a)



(b)



(c)



(d)

사진 1 폭설로 인한 막 패널의 파손

이블돔은 정기적인 유지관리만으로도 일반구조물과 같은 수명을 가질 수 있으나 막재는 내구연한이 정해져 있는 재료이므로 어느 정도의 시기가 지난 후에는 보수를 해야 한다. 제1체육관 지붕구조는 2000년까지 4번에 걸친 미미한 보수공사를 하였으나 2001년 1월에는 폭설로 인하여 일부 케이블이 이탈하였으며, 2002년 2월에는 폭설로 인하여 사진 1에서 보는 것과 같이 일부 막 패널이 파손되었다.

막 패널의 파손의 원인은 여러 가지 있을 수 있으나 직접적인 원인은 이미 내구연한이 지난 막재의 강도가 저하된 상태에서 과도한 국부적설하중이 작용되었기 때문으로 보고되었다. 시공당시에

사용된 막재는 유리섬유직포에 실리콘을 코팅한 실리콘 코팅 막재(silicon coated fiber glass)로서 강도는 유리섬유직포에 의해 어느 정도 발휘되지만 실리콘의 특성으로 자정작용이 매우 나쁘고 시간이 경과함에 따라 부식하여 장기구조물에는 적절치 않은 것으로 알려져 있다. 따라서 최근에는 실리콘 코팅 막재는 사용되지 않고 있다. 막 패널의 파손으로 인하여 지붕구조에는 케이블 장력 불균형, 대변위 발생 등의 추가적인 피해가 발생된 것으로 사료되며, 특히 오랜 시간 동안에 걸쳐 케이블 인장력의 분포가 불균등하게 진행된 상태에서 막 패널의 파손은 추가적인 인장력의 발생 및 충격으로 인한 일부 케이블의 탈락 등 구조물의

안전성에 불리한 상황을 야기하였다고 추정된다.

사고에 대한 임시 대책으로 파손된 막 패널 부분을 PVC 코팅 막재로 보수하여 내부시설을 보호하였으며, 전체적인 구조물 안전진단을 실시하였고 보수보강공사를 수행하게 되었다. 이와 같이 지붕구조의 현재 상태를 파악하기 위하여 지붕구조의 기하학적인 형상, 케이블 인장력의 측정, 케이블 및 막재의 강도 측정, 손상 부위의 파악 등 정밀안전진단을 실시한 결과, 지붕구조 초기형상의 변형, 지붕막의 노후화로 인한 강도 저하, 케이블의 인장력 편차 증대, 일부 케이블의 과인장력 발생, 케이블의 여유길이 부족, 벨리 케이블 인장력 소실, 웨지 불량 등 전반적으로 보수보강이 시급한 상태임이 보고되었다.

따라서, 보수보강공사에서는 오랜 시간 동안 누적된 케이블 인장력의 불균등을 바로 잡고, 내구연한을 다한 막재를 내구성이 우수한 막재로 교체시공하고, 손상된 웨지 및 이음 정착부를 보수하는 등의 케이블돔구조 전반에 걸친 보수공사를 실시하여 케이블 이탈 및 막 패널 파손 등에 의하여 발생된 지붕구조의 불안정한 위험요소를 제거하고 지붕구조의 안전성과 내구성을 증대시켜야 한다. 특히 이러한 보수보강 공사과정은 앞에서 언급한 바와 같이 주요부재의 인장력이 조정되어야 하며, 이로 인하여 전체형상이 변화하는 상황이 필수적으로 수반된다. 따라서 정밀한 엔지니어링 작업을 수행하여 공사중 또는 공사후의 장력변화, 형상변화를 시뮬레이션하고 최종적으로 현재조건에서 가장 안정된 형상을 구현하여야 한다.

3.2 보수보강범위

케이블돔 경기장의 보수보강은 다음과 같이 구분할 수 있다.

- 1) 케이블구조 보수보강
- 2) 막구조 보수보강
- 3) 노후시설 보수보강

다시 이를 세분화하면 케이블구조 보수보강에는 케이블 웨지 교체, 케이블 장력측정 및 조정, 갯위

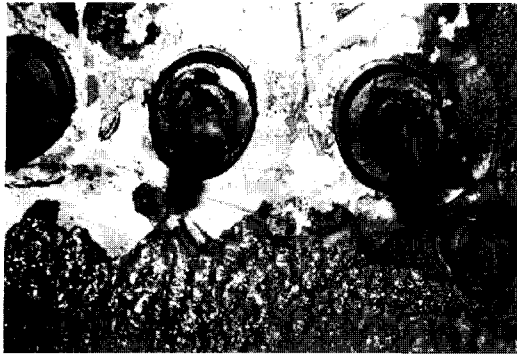
크, 포스트 및 캐스팅 보수 등이 포함되며, 막구조 보수보강에는 노후화된 외막의 교체, 마지막으로 노후시설 보수보강에는 관람석 의자 교체 및 승강식 무대 설치 등이 포함된다. 구조물의 보수보강은 구조적 위험요소를 제거하는 것을 목적으로 하며 노후시설 보수보강은 사용성 증대를 통한 경기장의 가치를 증대시키는 것을 목적으로 한다. 케이블 돔의 주요 보수보강부위는 사진 2에서 볼 수 있다

4. 보수보강설계

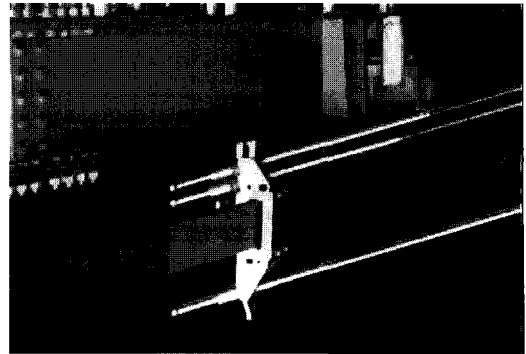
앞에서 언급한 바와 같이 케이블돔구조는 도입된 장력에 의해 구조물의 강성이 발현되는 형태저항형 구조시스템이다. 따라서 이 구조시스템은 공사중, 즉 장력이 도입되기 전에는 불안정구조로서 장력이 도입된 후에야 비로소 안정화되는 장력안정구조이다. 케이블돔구조의 보수보강시에는 일부 케이블의 장력을 해제하고 작업하며 최종적으로 장력재도입을 수행하여 공사를 완료한다. 케이블 돔 보수보강설계시에는 그동안 조사되었던 문제점을 해결하기 위하여 형상변경이 요구되며 이것은 결국 초기의 형태와는 다른 형태를 갖는 구조물로서 완성되게 된다. 따라서 보수보강설계시에는 이러한 문제점을 해결하기 위한 구조해석을 실시하게 되며, 구조설계의 일련과정은 그림 5과 같다. 특히 초기설계와 관련한 자료가 매우 부족하여 현재의 문제점을 구조적으로 파악하기에 어려움이 있으므로, 설계초기의 조건으로 해석을 수행하고 한편으로는 초기 시공과정에 대한 시뮬레이션을 수행하여 현재상태를 역추적하였다.

4.1 최초 시공시 시공과정해석

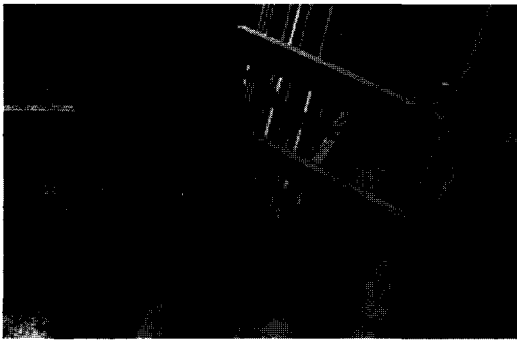
현재 구조물의 문제점중 일부는 준공 이후 지속적으로 발생되었던 것으로 예상된다. 이것을 해결하기 위하여 시공 당시의 상황을 추정해 볼 필요가 있다. 따라서 최초 시공시의 시공과정해석을 수행하여 최초 시공과정해석 결과를 당시에 제시되었던 시공과정해석 결과 및 현재 구조물의 조사자료와 비교하여 원인을 역추적하였다. 당초 공사에서 그림 6의 2단계 완료시에 미들 다이아고날 케이블



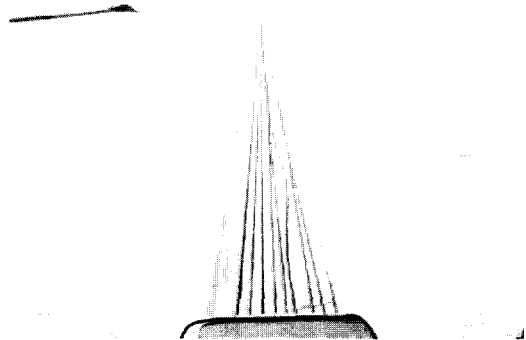
(a) 웨지 파손 및 케이블 여장 부족



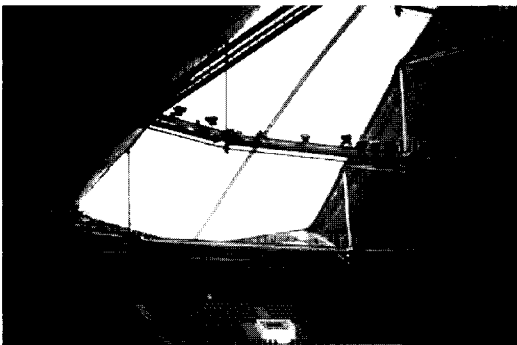
(b) 다이아고날 케이블 장력 손실



(c) 캐트워크 거동 불량



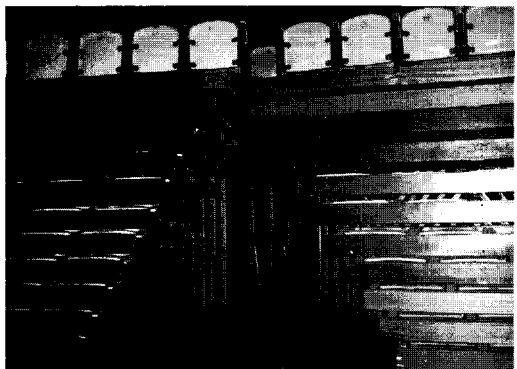
(d) 벨리 케이블 장력 손실



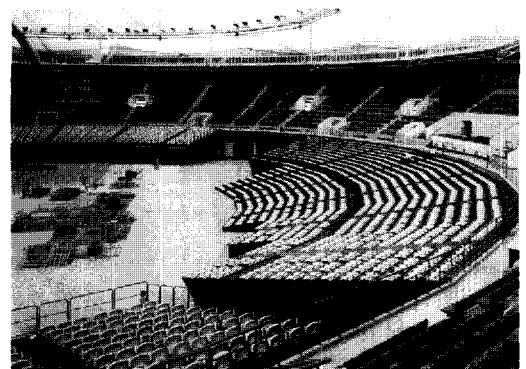
(e) 막재 노후화



(f) 하부구조물 균열



(g) 이동식 의자 노후화



(h) 고정식 의자 노후화

사진 2 케이블돛구조물의 보수보강부위

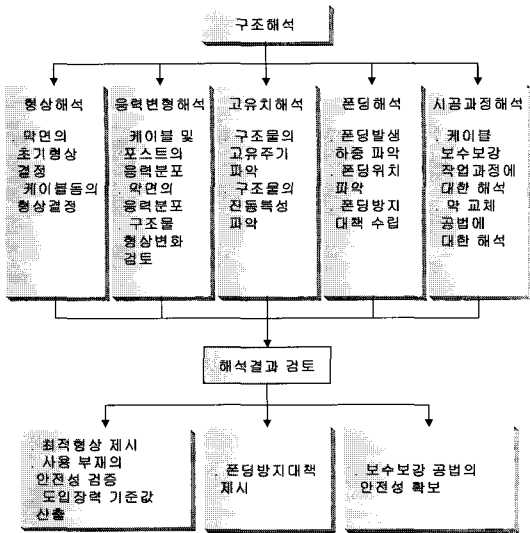


그림 5 케이블돔구조의 보수보강설계 과정

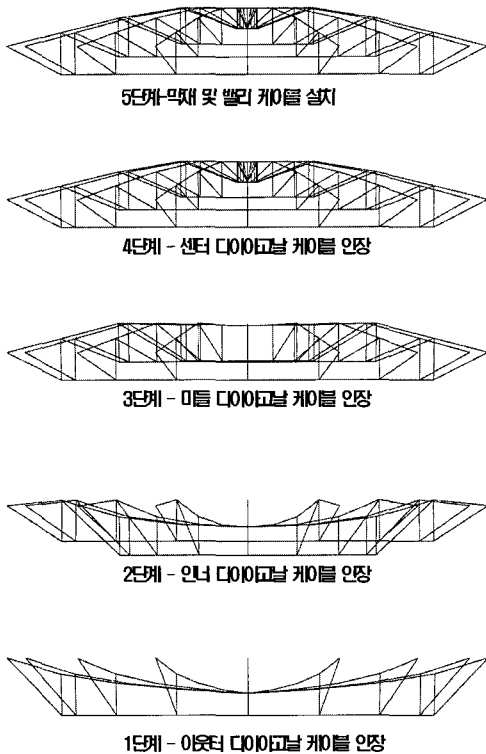


그림 6 케이블돔 시공과정결과 도해

불에 장력이 과도하게 도입되어 1단계에서 완료된 부분(아웃터 포스트)에 처짐이 발생하고 아웃터 다이아고날 케이블에 추가적인 장력이 발생되어 케

이블의 도입장력이 설계장력보다 높아진 상태가 되었을 것으로 사료된다. 이러한 상이점은 케이블 장력 불균형, 최종형상의 오차 등이 발생하는 원인이 될 수 있다.

4.2 케이블돔 구조해석

케이블돔 구조해석에 적용된 하중은 그림 7에서 보는 바와 같으며, 적용된 하중에 대하여 기하학적 비선형해석을 수행한 결과 각 부재에 발생하는 부재력을 나타내면 그림 8 및 그림 9와 같다.

상기의 부재력은 모두 케이블의 허용응력 이내에 있으며, 결과적으로 현재의 지붕구조의 부재는 적절한 부재가 사용되었다고 판단된다. 포스트의 경우에는 허용응력에 대한 안전율이 0.5 정도에 이르지 않지만, 케이블의 경우 허용응력에 거의 도달한 것을 볼 수 있다. 본 설계에서 적용된 파단하중에 대한 허용하중의 안전율은 설계당시에 적용된 안전율인 단기 2.0, 장기 2.2가 사용되었다.

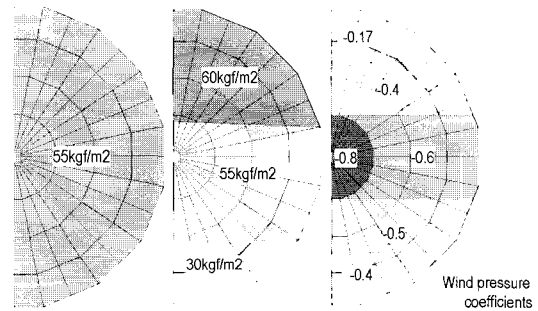


그림 7 적용된 적설하중 및 풍하중

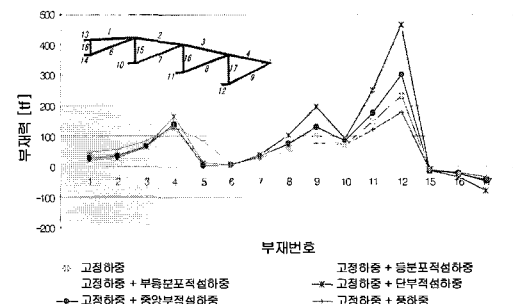


그림 8 케이블 및 포스트의 부재력

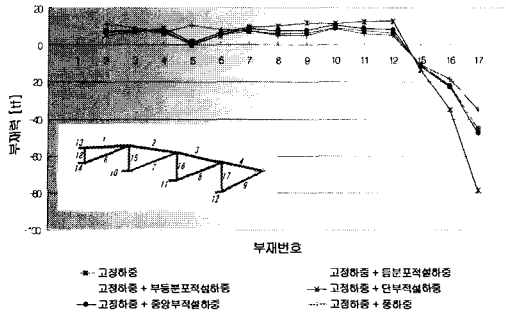


그림 9 케이블 1개 및 포스트에 작용하는 부재력

4.3 막 패널해석

보수보강공사시 교체될 막재는 성능이 우수한 PTFE 코팅 막재를 사용하도록 한다. 케이블들의 막구조 해석 결과를 그림 10, 그림 11 및 그림 12에 나타내었다. 해석결과에 따르면 막 응력은 모두 허용응력을 만족하는 것으로 나타났다. 막구조 설계에서 사용한 파단하중에 대한 허용하중의 안전율은 장기 8.0, 단기 4.0을 적용하였다.

막응력은 그림에서 보는 바와 같이 포스트가 있는 부분에서 주로 높게 분포되어있다. 이는 막 패널의 케이블 경계 부분보다 포스트가 연결된 부분에서 강성이 높아 연직하중 작용시 응력이 집중되는 것으로 판단된다. 따라서 하중이 반복적으로 작용하여 피로에 의한 강도저하, 국부파손 등이 염려되므로 이에 대한 고려가 필요하다. 벨리 케이블에

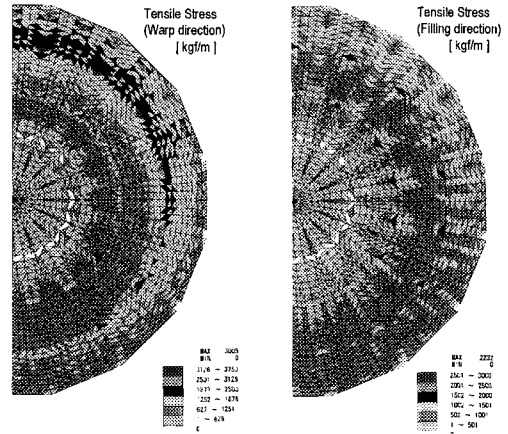


그림 11 고정하중+부등분포적설하중에서의 막 응력

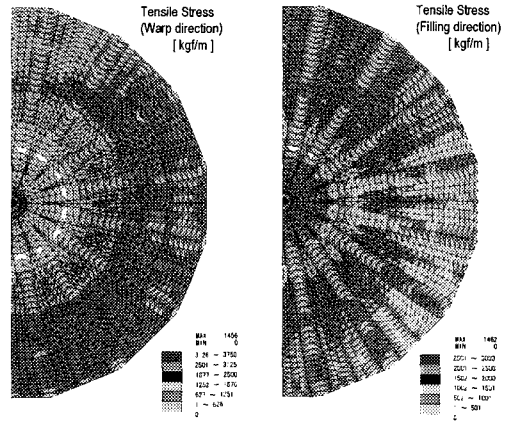


그림 12 고정하중+풍하중에서의 막 응력

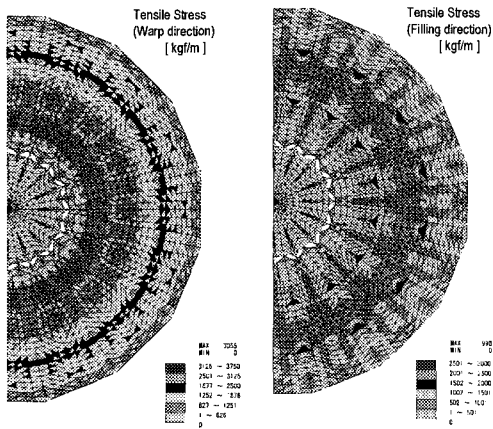


그림 10 고정하중+등분포적설하중에서의 막 응력

의해 보강된 막구조의 경우 국부파손이 발생하면 벨리 케이블의 장력이 소실될 때까지 연속적으로 막의 파단이 발생하므로 이에 대한 배려가 매우 중요하다.

4.4 고유치해석

일반구조물과는 달리 케이블돔구조와 같은 경량인장구조물은 그 동적특성을 파악하기에는 매우 어려우며 현재에도 많은 부분이 연구중에 있다. 비감쇠 고유치해석을 수행하여 1차부터 100차에 이르는 고유주기를 다음의 표 3 및 그림 13에 나타내었다.

표 3 고유주기(1차~100차)

MODE	[sec]	MODE	[sec]	MODE	[sec]	MODE	[sec]	MODE	[sec]
1	2.21	2	1.68	3	1.36	4	1.23	5	1.23
6	0.99	7	0.99	8	0.95	9	0.95	10	0.95
11	0.94	12	0.94	13	0.93	14	0.93	15	0.91
16	0.91	17	0.90	18	0.89	19	0.89	20	0.86
21	0.86	22	0.78	23	0.78	24	0.78	25	0.78
26	0.74	27	0.74	28	0.72	29	0.70	30	0.70
31	0.68	32	0.68	33	0.63	34	0.63	35	0.61
36	0.61	37	0.59	38	0.59	39	0.58	40	0.58
41	0.58	42	0.57	43	0.57	44	0.56	45	0.56
46	0.56	47	0.56	48	0.55	49	0.55	50	0.54
51	0.54	52	0.53	53	0.53	54	0.51	55	0.51
56	0.50	57	0.50	58	0.48	59	0.48	60	0.45
61	0.45	62	0.45	63	0.45	64	0.45	65	0.45
66	0.45	67	0.45	68	0.45	69	0.44	70	0.44
71	0.43	72	0.43	73	0.42	74	0.42	75	0.42
76	0.42	77	0.42	78	0.42	79	0.42	80	0.40
81	0.40	82	0.40	83	0.40	84	0.40	85	0.39
86	0.39	87	0.39	88	0.39	89	0.39	90	0.39
91	0.38	92	0.38	93	0.38	94	0.38	95	0.37
96	0.37	97	0.37	98	0.37	99	0.36	100	0.35

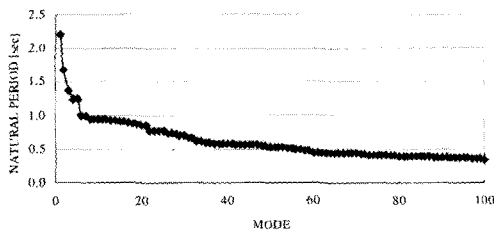


그림 13 고유주기(1차~100차)

이상의 고유모드를 간단하게 정리하면 다음 표 4와 같다.

표 4에서 보는 것처럼 30차까지의 고유모드 가운데 대부분이 포스트 하부를 연결하는 링 케이블의 변형모드이다. 케이블돛의 구조적 특징중의 하나는 구조물의 변형을 방지하는 사재가 적어 포스트 하부를 연결하는 링 케이블이 변형하기 쉽다는 것이다. 그러나 실제의 구조물에서는 이러한 모드를 발생시키는 외력을 기대하기 어려우므로 이와

같은 링 케이블의 변형모드를 고려할 필요는 없다고 사료된다.

8차~19차(고유주기 0.95sec~0.89sec)모드는 벨리 케이블 및 센터 링의 상하이등을 포함하는 모드로서 풍하중시 변동풍력에 의하여 발생될 수 있으나 막재의 감쇠계수는 매우 작으므로 이와 같은 모드가 발생될 가능성은 낮다고 사료된다.

26차~28차모드는 포스트 상부의 전도모드이다. 포스트의 전도에 대한 강성이 부족하면 적설하중에 의하여 이들 모드가 발생되고 결과적으로 포스트의 좌굴이 야기될 수 있다. 따라서 적설하중에 대한 포스트 상부의 전도 가능성 및 좌굴 가능성을 확인할 필요가 있다. 여기에서는 정적해석으로 좌굴하중을 구하고 적설하중에 대한 응답이 좌굴하중에 대하여 어느 정도의 안전한지 확인한다.

29차 이상의 모드는 리지 케이블과 다이아고널 케이블의 변형모드로서 2차 이상의 고차모드이다. 고차모드에 이르면 막재의 감쇠가 크기 때문에 막

표 4 고유모드(1차~30차)

고유모드	고유주기	모드형상	중요도
1차	2.21sec	Outer Ring의 회전, Outer Post의 전도	
2차	1.68sec	Middle Ring의 회전, Middle Post의 전도	
3차	1.36sec	Inner Ring의 회전, Inner Post의 전도	
4, 5차	1.23sec	Ring의 강제변위(수평방향)	
6, 7차	0.99sec	Ring의 변형(2차모드)	
8~16차	0.95~0.91sec	Valley의 상하이동	◎
17차	0.91sec	Center Ring의 상하이동	◎
18, 19차	0.89sec	Valley의 상하이동	◎
20, 21차	0.86sec	Ring의 강제변위(수평방향)	
22, 23차	0.78sec	Valley, Ridge의 수평, 수직이동	○
24, 25차	0.78sec	Ring의 수평변형(3차모드)	
26, 27차	0.74sec	Post 상부의 전도(동일방향)	◎
28차	0.72sec	Post 상부의 전도(회전)	◎
29, 30차		Ring의 3차원적 변형	

면의 진동은 작게 되며 지붕 전체의 진동에 지배적인 영향이 미치지 않게 된다.

4.5 시공과정해석

일반적으로 케이블 구조물에서는 케이블을 지상에서 조립한 후 케이블을 양중 및 인장하면서 정해진 좌표점이나 정해진 케이블 프리스트레스에 도달하는 과정을 시뮬레이션하여 케이블 인장시의 케이블 프리스트레스 결정 및 시공시 문제점의 예측 등을 목적으로 시공과정해석을 수행하게 된다. 그러나 케이블돔의 보수보강공사에서는 케이블돔이 이미 완공되어 있으므로, 이와 같은 해석을 수행할 필요가 없다. 따라서 케이블돔 보수보강공사시의 시공과정해석은 다음의 보수보강공사 순서에 맞추어 수행한다.

- 1) 내막 해체 및 가능한 하중 제거
- 2) 케이블 장력조정
- 3) 막 교체
- 4) 벨리 케이블 장력도입
- 5) 내막 설치 및 기타 시설물 설치

본 보수보강공사에서는 이러한 일련의 시공과정

에서 발생할 수 있는 문제를 미리 예측하기 위하여 시공과정해석을 수행하게 된다. 시공시 주의해야 할 주요 단계는 케이블의 장력을 조정하기 위하여 일부 케이블의 장력을 해제한 경우와 막 교체를 위하여 막을 제거한 경우 등으로 고려해 볼 수 있으며, 케이블의 장력이 조정되고 막의 교체가 완료된 후에는 최종적으로 벨리 케이블의 장력도입과정이 중요한 관점이 된다. 따라서 상기의 2), 3), 4)의 과정을 시뮬레이션한 결과 모든 시공단계에서 부재력은 모두 안전하다고 판단되나, 이는 5장의 보수보강공법에 따라 공사가 수행되어야 함을 전제로 한다. 또한 각 시공단계에 대한 장력의 변화를 예측하는 시공해석을 수행하여 적정장력도입되도록 하였으며, 구조물의 거동을 파악하여 현장에서 변위를 확인함으로써 정밀한 시공이 가능하도록 하였다.

5. 보수보강공법

케이블돔의 보수보강은 크게 케이블구조, 막구조, 하부구조 및 노후시설의 보수보강으로 구분할 수 있다. 하부구조와 노후시설의 보수보강은 별도로 진행할 수 있지만 케이블구조와 막구조 보수보강은 반드시 케이블구조의 보수보강이 선행되어야

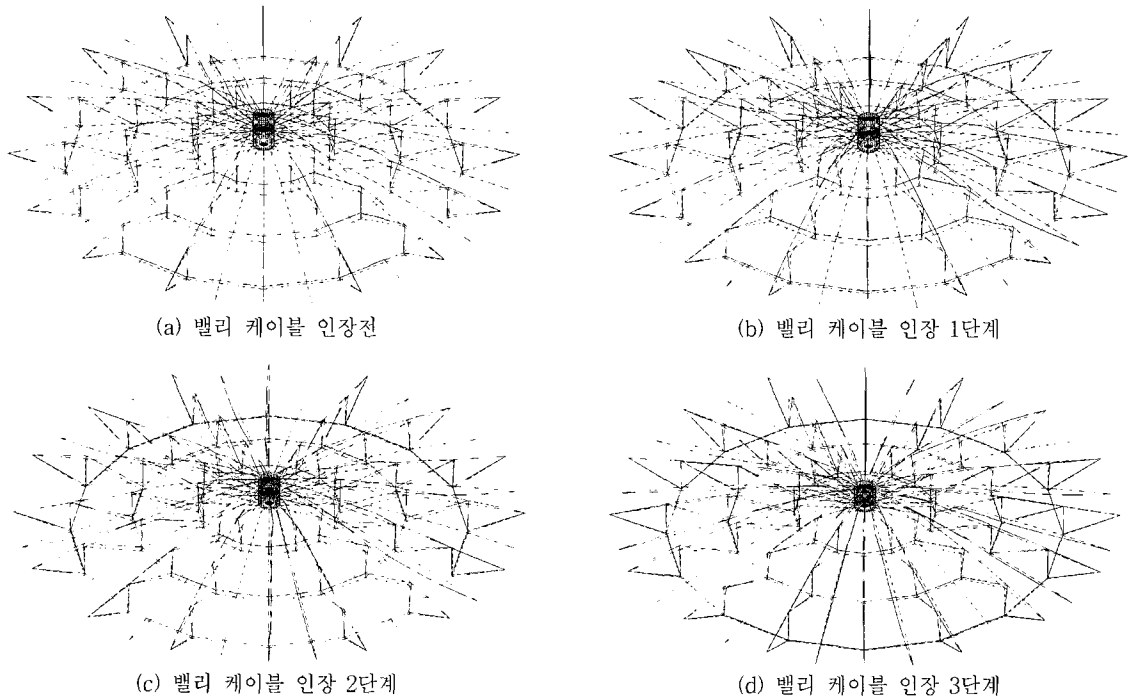


그림 14 막 장력도입과정 해석

한다. 케이블돔의 보수보강에 있어서 가장 중요한 점은 케이블돔의 건립 당시의 공사여건이 주어지지 않는다는 것이다. 우선적으로 외부에 안치될 장비의 제약이 있으며, 내부에 큰 장비(양중장비)가 들어올 수 없다. 또한 공사기간 내내 경기장 마루 바닥과 관람석을 보호해야 하며 지붕이 개방되어 우수가 내부로 들어와서도 안 된다. 또한 경기장 일부 시설은 공사중에도 일반인에게 개방될 수도 있다. 가장 큰 공사여건은 지붕구조가 이미 완공된 상태에서 보수보강을 한다는 것이다. 따라서 케이블돔의 보수보강공사는 이러한 모든 공사여건을 고려하여 계획되고 수행되어야 하며, 또한 건물의 개선된 기능과 요구를 충족하여야 한다.

5.1 케이블구조 보수보강

케이블돔의 케이블구조는 우선적으로 웨지를 교체하게 된다. 웨지는 웨지의 조임력에 의한 케이블과의 마찰력이 케이블의 미끄럼 하중을 충분히 견딜 수 있는 것을 채택한다. 웨지의 상세를 나타내면 그림 15와 같다.

웨지가 교체된 후 다이아고날 케이블의 장력을 조정하게 되며 이 때에는 각 케이블에서 한 개의 스트랜드만을 조정하도록 한다. 또한 8개월씩 두 개조로 구분하여 각 열에서 동시에 작업하며 아웃터 다이아고날 케이블에서부터 센터 다이아고날 케이블로 작업해 나간다. 케이블 장력조정과정을 그림 16에 나타내었으며 장력측정 및 조정장비에 대한 개념도를 그림 17에 나타내었다.

5.2 막구조 보수보강

막 패널의 교체는 모든 막 패널을 제거하여 다시 설치하는 것이 구조적인 관점에서는 가장 좋은 방법이지만, 모든 막 패널을 제거할 경우 막공사 완료시까지 약 2개월간은 실내가 외부에 노출된다는 점이다. 따라서 막 패널의 교체는 케이블 장력이 조정된후 한 개의 패널씩 순차적으로 진행한다(그림 18).

막 패널을 설치함에 있어서 중요한 점의 하나는 지붕 스펠의 반 즉 60m에 도달할 수 있는 양중장비가 건물 전 주위에 안치될 수 없다는 점이다. 즉

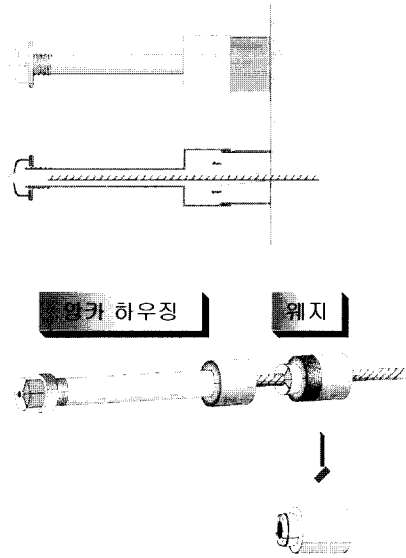


그림 15 웨지 상세

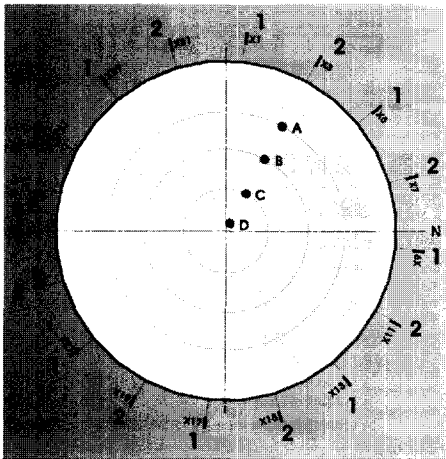


그림 16 케이블 장력도입 순서

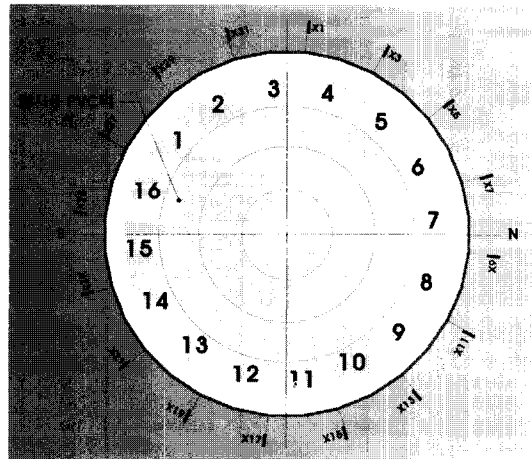


그림 18 막 패널 설치 순서

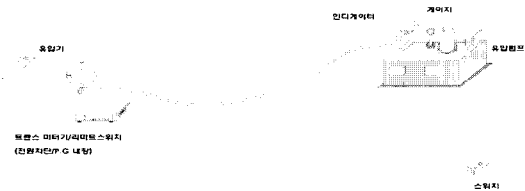


그림 17 장력측정/조정장비 개념도

어떤 막 패널에 있어서 양중장비의 붉은 지붕의 중앙에 까지 막 패널을 양중할 수 없다. 따라서 막 구조 보수보강에서는 기존의 설치된 막이나 또는

리지 케이블 사이에 가설 로프 넷을 설치하여 막 패널이 도달할 수 있는 곳에 막 패널을 양중한 후 지붕 위에서 막 패널을 펼친후 그림 19와 같이 막 패널을 리지 케이블에 클램핑한다.

리지 케이블과의 클램핑에서 리지 케이블 방향으로의 막 인장은 막이 두 겹이 된다. 이는 점에서 쉽게 늘어나지 않으므로 막 패널 시공시 중요한 고려사항이 된다. 또한 막 클램핑 완료후 막에 주름이 발생하지 않아야 하는 것도 중요하다.

막 교체가 완료되면 벨리 케이블을 설치하여 인

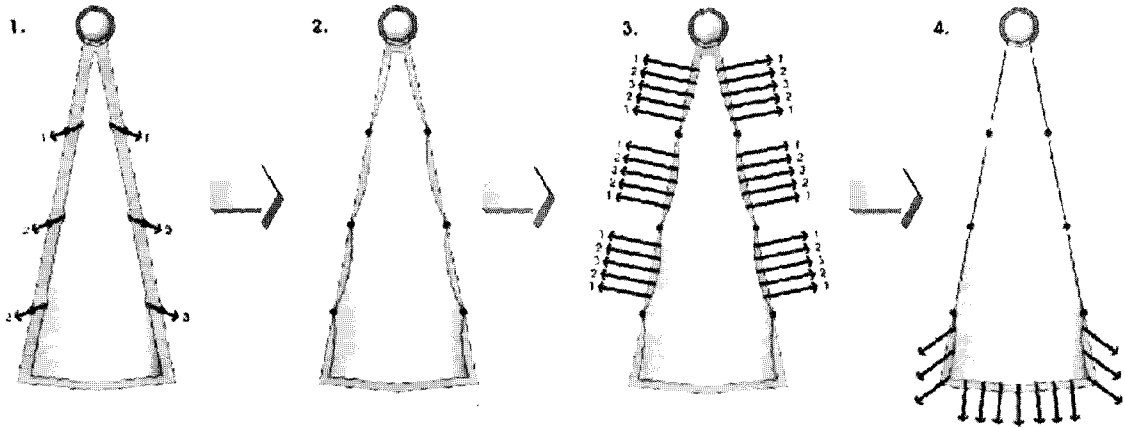


그림 19 막 패널 시공방법

장하는 과정이 남는다. 벨리 케이블 인장시 지붕구조물의 변형이 가장 많이 발생하게 되므로 가장 주의를 요하는 단계이다. 따라서 4.5의 시공과정해석에서 시물레이션한 결과를 토대로 지붕구조물이 안정성을 잃지 않도록 벨리 케이블은 그림 20과 같이 전체적으로 대칭이 되게 4단계로 인장한다. 벨리 케이블의 장력후 막 장력은 약 200kgf/m로 예상하나, 실제로 막 장력과 구조물의 변형을 조절하여 벨리 케이블의 장력을 도입하게 된다. 막의 초기장력도입 시에는 막재의 신율을 고려하여 시공초기에는 목표장력값보다는 더 큰 장력을 도입해야 하며 이에 따른 케이블부재의 장력변화에도 주의를 기울여야 한다.

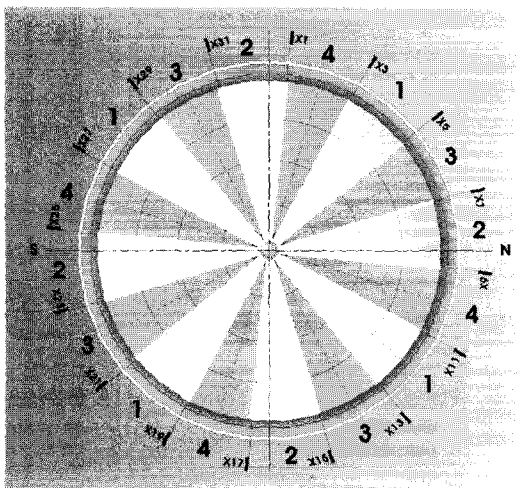


그림 20 벨리 케이블 장력도입 순서

5.3 기타 보수보강

5.3.1 개폐식 암막 설치

내막 설치에 있어서 중요한 기능은 주간에 일정량의 조도가 확보되어야 하는 점인데, 본 보수보강 공사에서는 암막을 일정구간 개폐하도록 하여 주간내의 실내조도를 자연채광으로서 해결할 수 있도록 계획한다(그림 21 및 그림 22).

5.3.2 노후시설 교체

관람석 의자는 이동식과 고정식으로 구분되는데 노후화된 이동식 의자의 골조를 보수보강하게 되며, 고정식 의자 또한 체육관의 기능에 맞도록 교

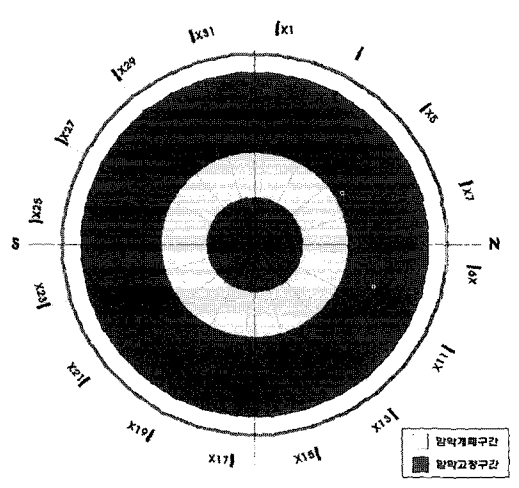


그림 21 암막 개폐 구간

S-05 '입체상세도'참조

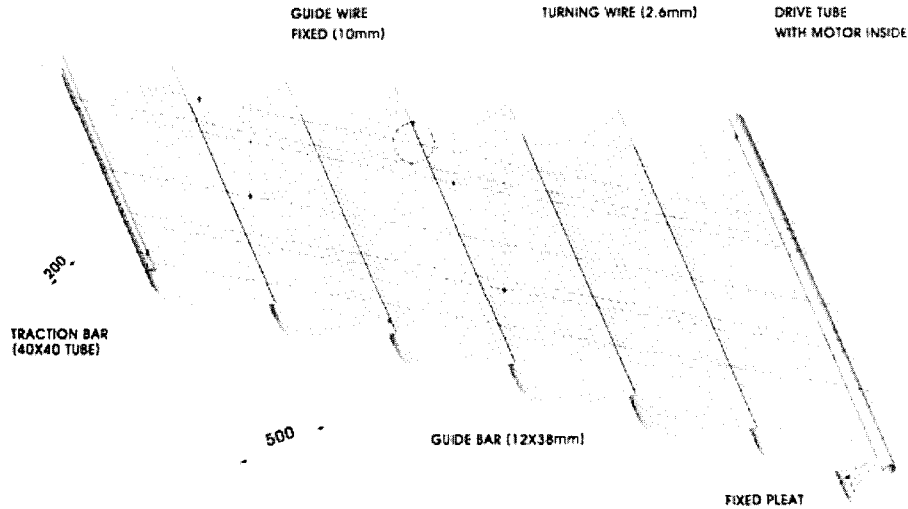


그림 22 암막 개폐 개념도

체된다. 주요 관점은 의지는 쾌적하여야 하며 소음이 발생하지 않아야 한다(공연이나 기타 행사시 소음 발생이 없어야 한다). 또한 실내경기나 공연에 따른 초점의 변화에 맞도록 계획되어야 한다(사진 2 참조).

5.3.3 승강식 무대 설치

케이블돔 경기장의 주된 기능은 경기장으로서의 기능과 공연장으로서의 기능이다. 그러나 각 공연 주관사마다 무대를 설치하고 해체하는 과정에서 실제로 마루바닥이 많이 손상되므로 이를 개선하기 위하여 승강식 무대를 설치하도록 한다. 보통의 승강식 무대는 유압식과 기계식이 사용되나, 현장 여건상 유압식 무대는 반입을 할 수 없으므로 기계식 무대를 채택한다. 승강식 무대는 마루바닥의 일부를 해체한 후 설치하며 승강식 무대에 관한 개념도는 그림 23와 같다.

6. 결 론

본고에서는 케이블돔의 보수보강 설계를 소개하였다. 케이블 막구조의 보수보강공사는 위에서 언급한 것과 같이 전체적인 구조해석과 이를 수행하기 위한 시공과정해석을 수행하여 공사중 구조물의 안전성을 충분히 검토하여 보수보강공사계획을 수립하여야 한다. 본고에서 언급한 보수보강설계는 구조물의 최적상태를 목표로 하여 수행되었으며 실제 현장에서의 시공조건과 상황을 고려하여 지속적인 보완이 필요할 것이다. 특히 케이블 막구조물의 경우에서 보수보강은 일반구조물과 달리 장력조정에 의해 전체적인 형상의 변화가 일어나게 되므로 정밀구조해석 등을 통한 엔지니어링을 수행하여 구조물의 거동에 대한 검증과 장력변화와 형상변화에 따른 공사중, 공사후의 문제점을 예

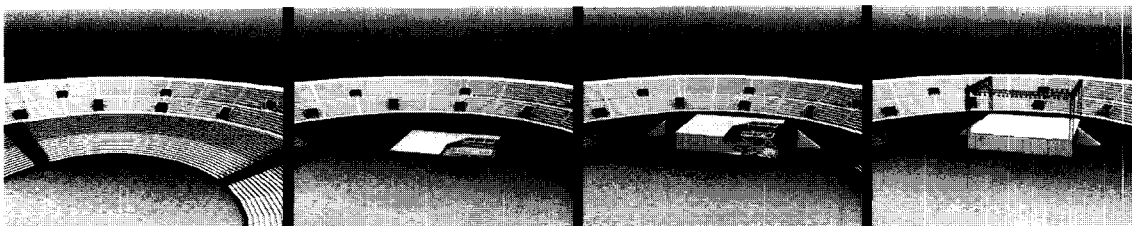


그림 23 승강식 무대 개념도

측하여 이에 대한 대책을 사전에 수립하는 것이 중요하다.

본 보수보강공사는 구조물의 구조적인 안전성 확보 및 기능성 향상을 목적으로 수행되며 보수보강공사 완료시에는 경기장의 역할 외에 공연장, 전시장 등의 다목적 공간으로써 활용도가 높아질 것이다. 또한 세계 최초로 시도된 구조물로서의 역사적 가치를 계속 유지하게 될 것으로 사료된다.

보수보강설계시에는 설계 당시와 시공시의 자료가 거의 전무한 상태여서 구조물의 초기 가정에 어려움이 있었으며, 현재의 상태를 면밀히 조사하여

초기상태를 유추하는 과정을 수행하였다.

케이블 막구조의 경우 초기에는 단기구조물로서 건설되어진 것이 많으나 최근에는 영구구조물로서 건설되어지고 있으며 국내에서 건설된 대공간구조물들도 향후 노후화가 진행될 것이다. 구조물의 성능을 유지하고 안전성을 확보하는 보수보강을 위해서는 시공시에 발생하는 자료를 정리하여 보관하는 것이 매우 중요하다. 특히 보수보강 설계 및 검증자료와 유지관리에 대한 이력은 향후 구조물의 성능 판단시 매우 귀중한 자료가 되므로 이에 대한 관심이 중요하다고 사료된다. 