

새로운 이중공기막구조 개발

Development of New Roof system



조 병 욱*
Cho, Byung-Wook



이 혜 원**
Lee, Hye-Won



이 용 기***
Lee, Yong-Kee

1. 개요

1.1 공기막구조소개

공기로 막(membrane)지붕을 떠받치는 공기막구조 (Air membrane supported structure)는 기둥 없는 대공간(spacial structure)을 형성하는데 가장 경제적인 구조방식이다. 공기로 막(membrane)을 떠받치는 공기막구조 (Air supported membrane structure)를 지붕으로 사용한 스타디움으로는 전세계적으로 소수의 사례가 있다. 미국의 메트로돔, 캐리어돔, 캐나다의 밴쿠버돔, 일본의 도쿄돔등이다. 이들 스타디움의 지붕은 공기압으로 지붕전체를 떠받치는 일중공기막구조 방식(air supported type)이며, 경기장에 따라서는 실내에 음향이나 단열을 위해 커튼처럼 통기(通氣)가 되는 내막(內膜, Thermal, Acoustic liner)을 설치하는 경우도 있어 이중공기막이라고 불리기도 한다. 그러나 단순히 막을 위(구조막)와 아래(내막)의 두겹을 사용하였다고 하여 이중공기막이라 지칭하는 것은 옳지 않으며, 위와 아래에 통

기가 되지 않는 구조용막을 사용하고 상부막과 하부막 사이를 완전히 밀폐하여, 건물이 아닌 상,하부막 사이에만 공기를 넣어 지붕구조로 사용해야 이중막구조라 할 수 있다.

1.2 공기막구조의 문제점

도쿄돔, 메트로돔, 캐리어돔등의 일중공기막구조는 건물실내전체에다 강압된 공기를 불어넣어 외부보다 높은 실내공기압이 지붕을 떠받치는 구조이기 때문에 반드시 건물전체를 밀폐시켜야 한다. 이런 구조적인 조건으로 인하여 출입문,창호,유지관리,환기등에 어려움이 있었다. 출입문의 경우 회전문등의 공기가 새어나가지 않는 특수한 문의 형태가 요구되어지며, 공기가 새어나가는 유리창등을 자유롭게 설치할 수 없어 환기의 어려움이 있으며, 실내전체에 공기를 불어넣는 방식이기 때문에 공기를 불어넣는 대용량의 에어블로워가 다수 필요하게 되었고 이러한 많은 공기블로워를 가동하기위해서 유지관리에 많은 비용이 소요되는 문제가 있었다. 공기막구조는 이런 문제점들로 인하여 여러 장점들에도 불구하고 야구장, 축구장등의 스타디움 지붕구조로는 1986년의 도쿄돔을 마지막으로 더 이상 사용되어지지 않게 되었다. (표 1참조).

* 정회원 · 타이가 대표이사
** 타이가 기술연구소 차장, 건축구조기술사
*** 타이가 기술연구소 과장, 공학석사

〈표 1〉 2009년 현재 공기막구조 스타디움

번호	스타디움명	국가
1	Pontiac Silverdome, Pontiac, Michigan	미국
2	UNIdome, Cedar Fall, Iowa	미국
3	Leavey Center, Santa Clara, California	미국
4	Dakotadome, Vermillion, South Dakota	미국
5	Sundome, Tampa, Florida	미국
6	O'Connell Center, Gainesville, Florida	미국
7	Carrier Dome, Syracuse, New York	미국
8	Hubert H. Humphrey Metrodome, Minneapolis, Minnesota	미국
9	B.C. Place Stadium, Vancouver, British Columbia, Canada	미국
10	Hoosier Dome, Indianapolis, Indiana	미국
11	Tokyo Korakuen Stadium, Tokyo, Japan	일본

2. 공기막구조의 필요성과 개선방향

2.1 공기막구조의 필요성

최근 국내에서는 돐구장의 필요성이 크게 증대되고 있다. 하지만 그 천문학적인 공사비로 인해 쉽게 현실화되지 못하고 있는 상황에서 경제성이 뛰어난 공기막구조가 최선의 대안이 될 수 있기에 기존 일중 공기막구조의 여러 단점들을 보완하여 돐구장의 지붕으로 가장 적합한 새로운 공기막구조방식 개발의 필요성을 느끼게 되었다.

당사는 1994년 국내최초로 공기막구조물을 개발하여 서울 올림픽공원에 설치한 것을 시작으로, 여의도의 명물이었던 중소기업중앙회 여의도전시장, KOEX의 야외전시장등을 시공하였고, 1996년에는 당사의 공기막구조물이 기네스북협회로부터 'THE GREATEST AIR DOME' 으로 선정, 등재되었으며, 2005년에는 충청북도 청원군에 가로*세로가 214M * 214M 에 이르는 스타디움급의 초대형 공기막구조도 시공하였다. 그동안 당사는 영국 Tensys사등 외국유수의 막구조설계 사무소와 공동으로 기술개발을 진행하여 왔는데 그간의 여러 대형 공기막구조 공사를 통해 축적된 기술과 여러 어려움들을 개선하면서

고안된 기술로 안전성과 경제성, 디자인이 대폭 개선된 새로운 구조시스템인 이중공기막구조(Tiger Air Lens roof)를 개발하게 되었다.

2.2 개선내용

1. 지붕에 공기가 통하지 않는 구조용 막재로 만든 상부막과 하부막을 상부케이블과 하부케이블에 고정, 체결하여 케이블과 막이 분리되지 않고 일체형으로된 막과 케이블 일체형 체결방식.

2 상부막이 체결되어있는 상부케이블과 하부막이 체결되어있는 하부케이블을 연결하는 타이케이블(TIE CABLE) 방식.

〈표 2〉 기존방식과 개선된방식 비교표

	기존방식	개선된 방식	개선된 방식의 장점
상부보강케이블의 유무	케이블이 있거나 없다	반드시 케이블이 있음	케이블의 내부 공기압에 의해 막이 부풀어 올라질 때 발생하는 인장력을 구조용케이블이 부담하므로 막에 걸리는 하중이 줄어든다.
케이블과 막의 체결 유무	케이블이 막의 상부나 하부에 얹어져 있다	케이블과 막이 플레이트에 의해 일체형으로 체결되었다.	외부에서 바람이나 눈에 의해 공기막에 누르는 힘(pressure)이나 뜨는 힘(부압, suction)이 작용할 때 막과 케이블이 일체형으로 체결되어 있어 구조상 유리.
패널 크기	케이블과 막이 고정되지 않아 전체막을 최대한 크게 분할한다. 패널 크기가 크다	케이블과 막을 고정하여 케이블경간과 막의 패널크기가 일치(케이블과 케이블사이). 패널크기가 작다.	막패널의 크기가 작아 운반설치가 용이하여 설치시 점함에 의한 강도저하가 발생이 적다.
타이케이블	없음	있음	별첨 참조.

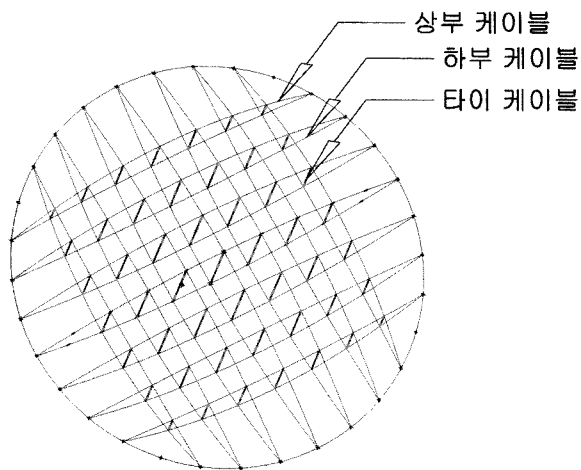
3. 시스템소개

- 이중 공기막은 양면의 막구조 안에 공기압을 도입하고 막면이 압력으로 부풀어 오르면 보강된케이블 넷이 하중을 지탱하게 된다.

이중 공기막 구조는 초경량 구조물로서 대공간 장스팬 구조물에 적합하고 공기 단축에 유리하나 설계와 시공에 높은 기술과 노하우가 필요하며 유지관리 상에서도 타 구조물에 비해 주의가 필요하다.

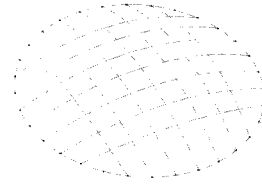
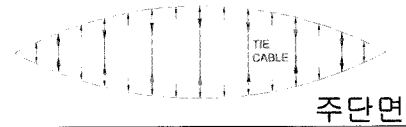
- 단일 공기막은 구조물 전체 체적에 대해 공기압을 도입해야 하며, 개구부가 열리면 누기(漏氣)량이 매우 커지므로 큰 용량의 에어 블로어가 필요하게 되며 내압유지에 많은 노력이 필요하게 되지만 이중 공기막은 공기막 내부의 체적만 담당하면 되며 개구부와 같은 누기요인이 없어 상대적으로 유지관리가 유리하다.

- 이중 공기막이라해도 100m 이상의 장스팬 구조물이 되면 수평력의 크기가 매우커서 케이블의 크기가 커지고 지지점에서 그 반력을 지지하기도 부담스럽게 된다. 이에 상부 케이블과 하부케이블을 수직으로 연결하여 내압에 의한 수평력을 현저히 감소시키는 타이케이블 시스템을 개발하였다.



〈그림 1〉 이중 공기막 타이 케이블 시스템

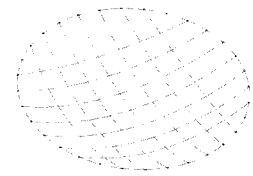
- 이중 공기막 내부로 내압이 도입되면 막이 압력을 받아 부풀어 오르게 되고 메인케이블은 분담하는 막면적 만큼의 하중을 부담한다. 이로서 케이블에 인장력이 발생하며 이를 지점에 전달하는 하중 경로를 가지게 된다.



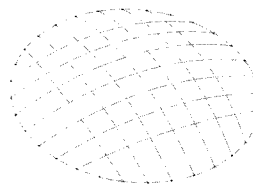
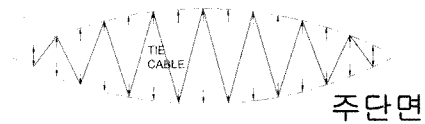
+



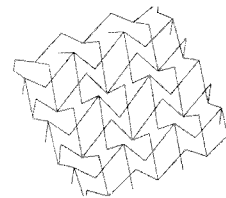
+



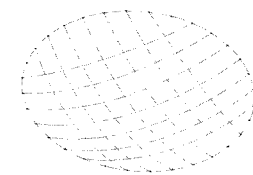
〈그림 2〉 이중공기막 타이케이블 시스템 도식도 (수직 TIE 방식)



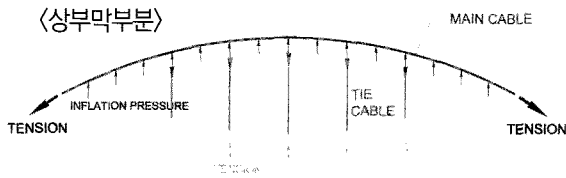
+



+



〈그림 3〉 이중공기막 타이케이블 시스템 도식도 (대각 TIE 방식)



〈그림 4〉 이중공기막 타이케이블 시스템

대공간 장스팬의 경우 메인케이블의 분담면적이 커짐에 따라 장력 또한 늘어나며, 최대 풍속시와 같은 설계 하중을 고려할 때 더욱더 큰 장력에 안전할 수 있도록 케이블 사이즈를 설계하게 된다. 이렇게 되면 케이블 사이즈가 매우 크게 설계되고 케이블 지지점의 반력 또한 커서 이를 해결하기 위해 많은 노력이 필요하게 된다.

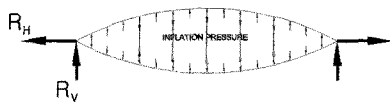
타이케이블 시스템의 타이 케이블은 메인케이블의 장력을 나누어 가지게 되어 메인 케이블의 최대 장력을 현저히 줄여주고 지지점의 반력 또한 크게 줄여 준다. 이로서 메인 케이블의 설계 사이즈를 줄여주며 지지점에서 반력의 크기를 줄여 압축링과 같은 메인 구조물의 부담을 덜어주어 경제적인 설계를 가능하게 한다.

- 이중공기막과 이중공기막 타이케이블 시스템 지점 반력비교

일반 이중공기막의 경우 내부 지지가 없기 때문에 수평력에서 매우 큰 차이를 보인다. 이는 주 구조물 설계에 있어 많은 부담을 가지게 된다.



〈그림 5〉 일반 이중공기막 지점 반력



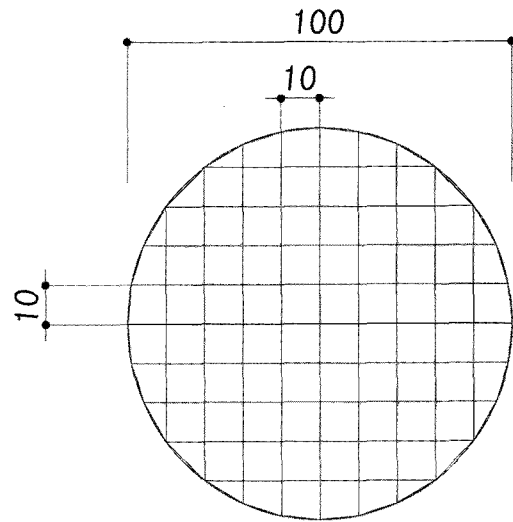
〈그림 6〉 이중공기막 타이시스템 지점 반력

4. 해석결과

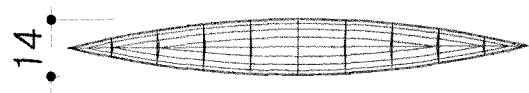
■ 해석 모델

- 직경 : 100 m
- 깊이 : 14 m
- Rise/Span Ratio : 0.07
- Cable span : 10m x 10m

- 모델1 : 타이케이블 無
- 모델2 : 타이케이블 有



〈그림 7〉 CABLE NET PLAN

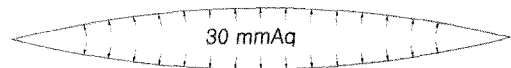


〈그림 8〉 CABLE NET SECTION

■ 해석 하중

- Self weight : membrane + cable : 자동계
- Inflation load

$$30 \text{ mmAq} = 30 \text{ kgf/m}^2$$

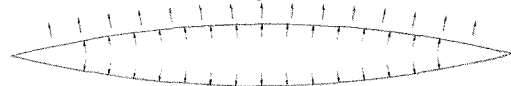


- Wind Load

$$W_r = p_r \times A$$

$$\text{설계력: } p_r = q_n \cdot G_f \cdot C_f = 140 \text{ kgf/m}^2 \text{ (suction)}$$

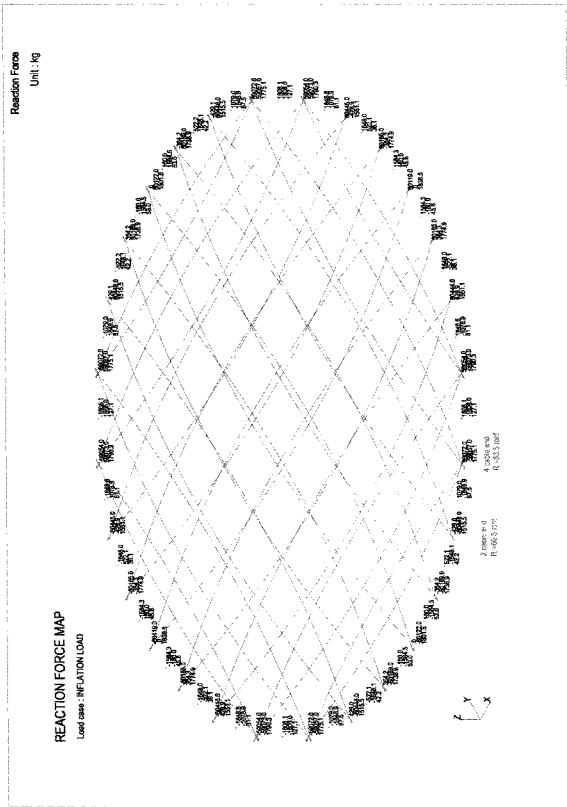
$$140 \text{ kgf/m}^2$$



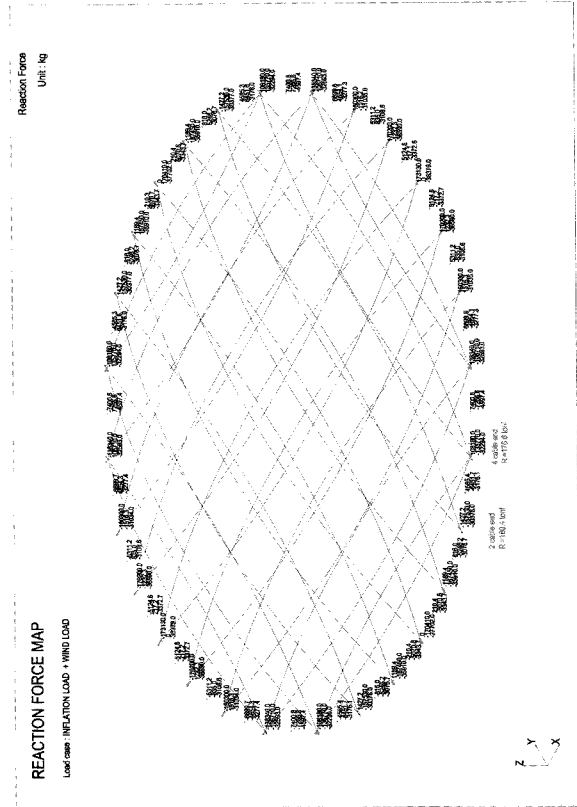
■ 해석 결과

1. Reaction Force

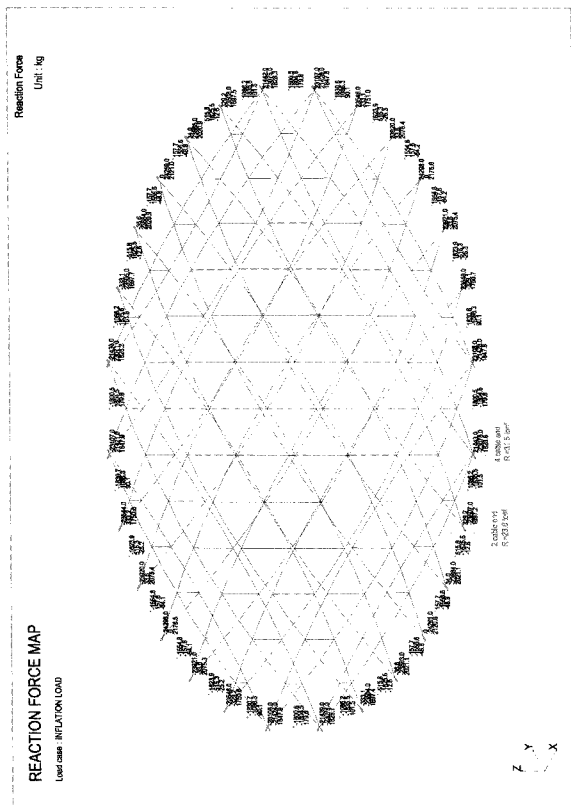
- LC: INFLATION LOAD,
Tie Cable 이 없는 경우



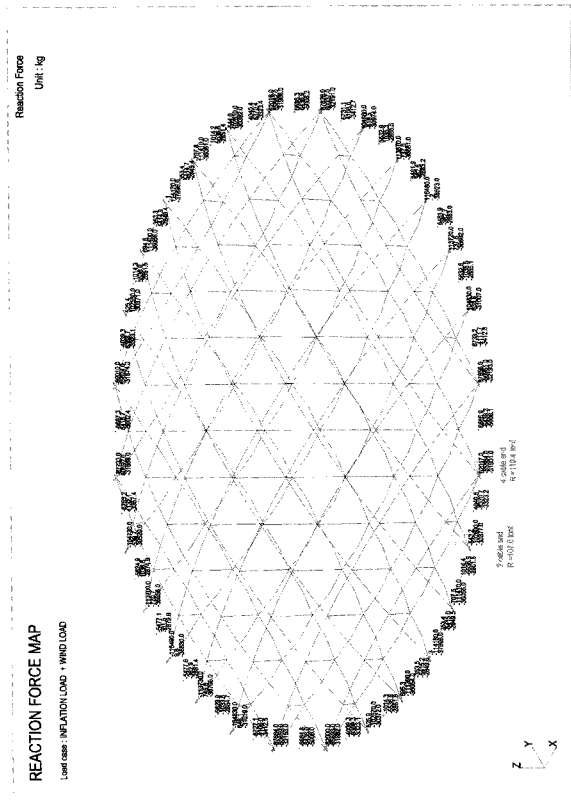
- LC: INFLATION LOAD+WIND LOAD,
Tie Cable 이 없는 경우



- LC: INFLATION LOAD,
Tie Cable 이 있는 경우



- LC: INFLATION LOAD+WIND LOAD,
Tie Cable 이 있는 경우



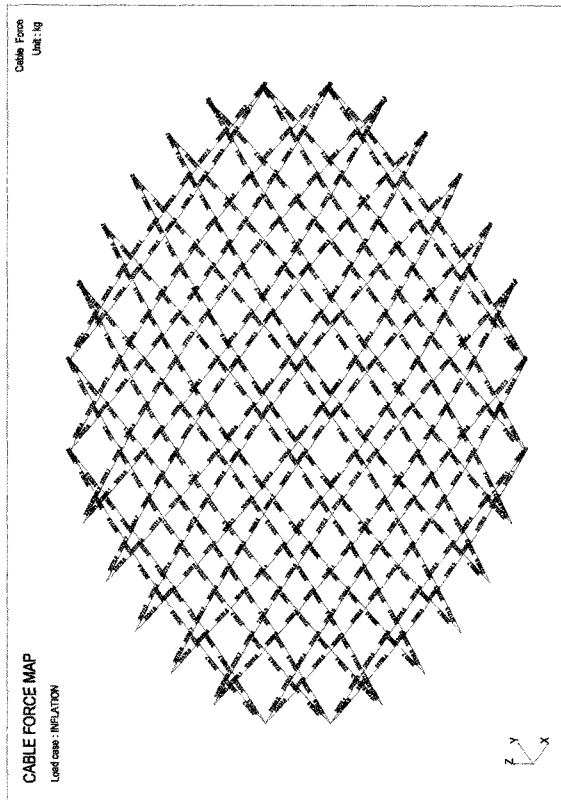
〈표 3〉 SUMMARY

		REACTION FORCE (tonf)		NOTE
		MODEL1 (TIE CABLE ×)	MODEL2 (TIE CABLE ○)	
Load Case	INFLATION LOAD	83.5	31.5	62.3% 감소
	INFLATION LOAD + WIND LOAD	176.6	110.4	37.5% 감소

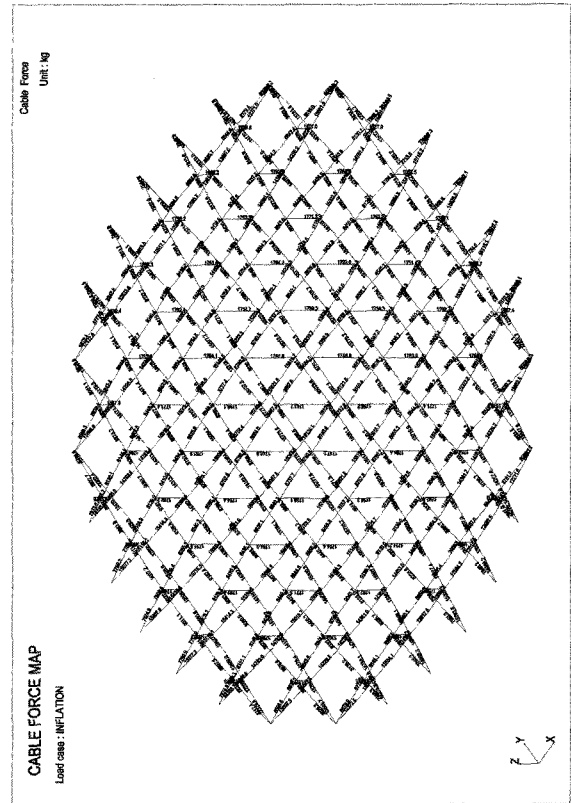
2. Cable Force

- LC: INFLATION LOAD ,

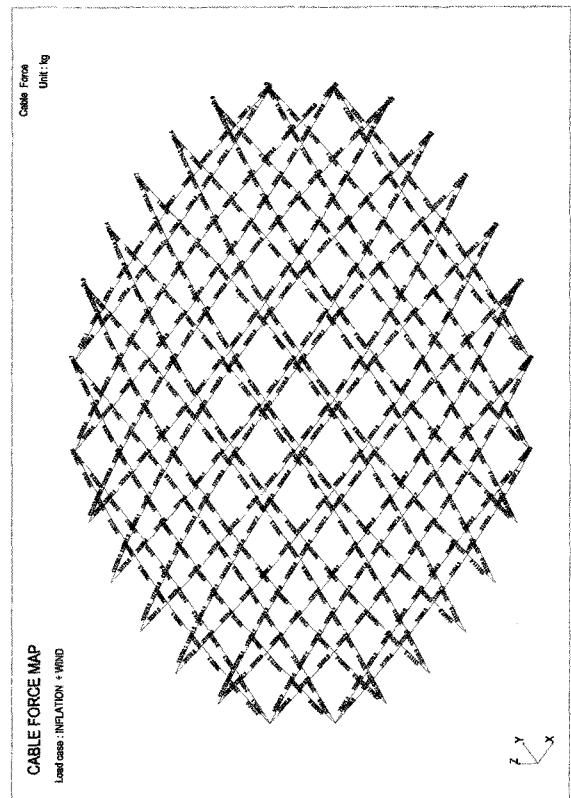
Tie Cable 이 없는 경우



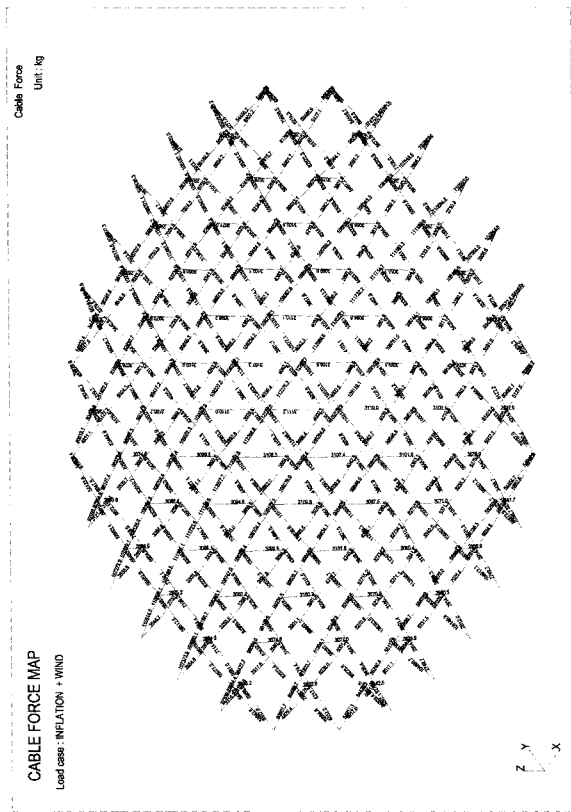
- LC: INFLATION LOAD,
Tie Cable 이 있는 경우



- LC: INFLATION LOAD+WIND LOAD,
Tie Cable 이 없는 경우



- LC: INFLATION LOAD+WIND LOAD,
Tie Cable 이 있는 경우



〈표 4〉 SUMMARY

		CABLE FORCE MAX. (tonf)		NOTE
		MODEL1 (TIE CABLE ×)	MODEL2 (TIE CABLE ○)	
Load Case	INFLATION LOAD	33.2	16.1	51.5% 감소
	INFLATION LOAD + WIND LOAD	138.5	113.5	10.2% 감소

5. 결론

(주) 타이가에서 새롭게 개발한 렌즈형 이중공기막구조는 대공간에서 사용될 수 있는 구조시스템중 경제성과 구조적 안전성이 매우 뛰어난 구조시스템으로 다음과 같은 장점이 있다.

1. TIE-CABLE을 이중공기막구조에 세계최초로 적용하여 상,하부 cable에 작용하는 장력을 대폭 줄였으며 막과 케이블이 고정되는 압축링 (CRB, Compression Ring Beam)에 작용하는 반력의 크기도 줄여 메인구조물과 압축링의 경제적인 설계가능.
2. 골조가 없는 렌즈형의 내부그리드는 그 전체로 하나의 커다란 조명등의 역할을 하여 새로운 내부환경 조성. (렌즈형 이중공기막내부에 LED 조명 설치로 다양한 색상의 조명가능)
3. 볼록렌즈모양의 내부천정형태는 돔형상의 내부천정형상보다 음향적으로 우수함.
4. 100m 직경의 경우 중심부 높이가 12m-15m가 되어 차음(SOUND ISOLATION)에 유리.
5. 렌즈형태가 단열층으로 작용하여 단열성능 우수.
6. 철골조가 없이 막과 케이블로만 구성된 가장 경량의 지붕으로 시공이 간편. LIFT-UP공법의 양증가 능하여 공기단축 가능.
7. 건물내부전체에 공기를 주입하던 일중공기막과 달리 이중공기막 내부에만 공기를 주입함으로 창호, 출입문등의 설계가 자유로워졌으며 유지관리비의 절감이 가능.

위와 같은 장점들로 이하에 최근 폭발적으로 늘어나고 있는 대공간구조물에 대한 요구에 부응할 수 있으며, 또 다양한 형태로 쓰일 수 있는 구조방식 이라 하겠다.

