

대공간구조물의 미래전망



한 상 열*

1. 서 론

大空間構造(large span spatial structures)란 3차원적인 힘의 흐름을 기초로 외력에 대한 저항능력을 확보하는 구조로서, 그림 1 및 그림 2에서 보는 바와 같이 인류는 긴 역사에 걸쳐 구조시스템 및 재료의 개발을 통하여 단위중량을 줄이고, 대공간을 확보하려는 노력을 경주해왔다. 이러한 노력의 결과, 20 C 후반에 들어서는 중력에 대한 저항능력의 하한치(下限値)인 100 kg/m^2 이하 범주에 속하는 공기막구조의 탄생을 보게되었다.

이러한 대공간 구조물은 그림 3에서 보는 바와 같이 다양한 구조시스템을 통하여 실현될 수 있지만, 국내의 실정은 스페이스 프레임 분야를 제외하면 현대적인 개념의 대공간구조물 설계를 위한 이론, 구조설계기법 및 시공면에서 대단히 낙후된 상황이므로 대공간구조물의 미래전망이란 본고의 제목이 현 실정에 부합되지 않는 면도 있다고 사료된다. 그러나, 좀 더 미래지향적인 입장에서 외국의 선례 특히 미래의 대공간구조에 대한 체계적인 연구가 활발히 진행되고 있는 일본의 "슈퍼

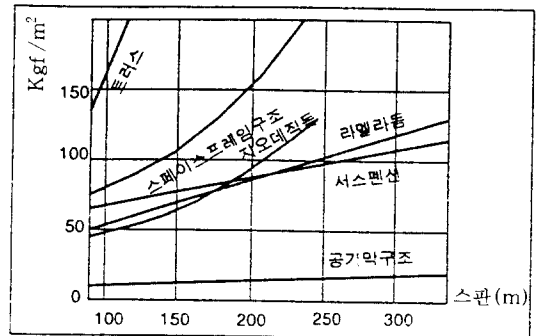


그림 1 구조시스템에 따른 단위중량 및 최대스팬 비교

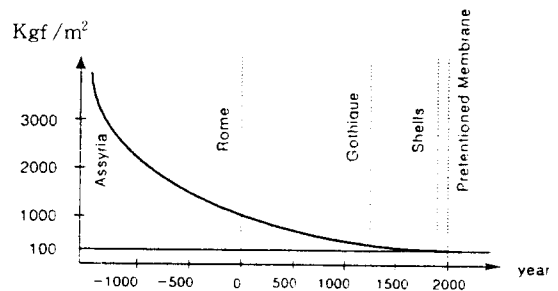


그림 2 지붕 단위중량의 연대별 변화

* 정회원, 인하대학교 건축공학과 교수

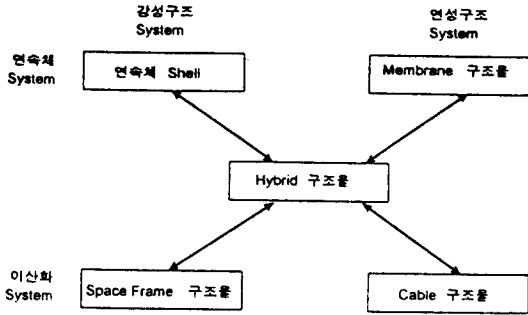


그림 3 재료의 강성 및 구조시스템에 따른 대공간구조물의 분류

(super) 500 研究會” 보고서인 “次世代型 500m 스패 / 都市 · 建築 시스템”의 내용을 중심으로 대공간구조의 미래를 전망해보기로 한다.

일반적으로 기술개발에는 두가지 접근방법, 즉 내삽접근법(內插接近法 interpolation approach) 과 외삽접근법(外插接近法 outerpolution approach)이 있다. 대공간구조물의 스패를 예로 들면, 실재하는 대스팬구조의 최대스팬은 250m 정도이며, 만일 200m 스패 건물의 설계를 생각하는 경우 200m 스패는 0~250m 사이에 있으므로 내삽점이 된다. 적설량, 풍하중등 자연환경 및 기능, 형태 등 인공환경은 프로젝트에 따라 다르므로 디자인, 구조계획 그리고 시공법등 새로운 기술적 과제가 제기되지만 200m 스패의 가능성은 내삽점이 되므로 이미 증명이 완료된 상태이며, 개발연구의 결과는 지금까지의 기술에 깊이와 폭을 더한 정도의 상태가 된다.

그러나, 500m 또는 그 이상의 대스팬 구조물을 계획하는 경우에는 외삽점이 되므로 기술의 축적이나 경험은 전무한 상태이다. 따라서 기존의 방법으로부터는 해결점을 찾을 수 없으며, 프로젝트 해결을 위한 가능성의 검토가 중심과제가 된다.

대스팬구조는 인공환경으로서의 거대건축물이며, 그의 존재는 그것을 둘러싸고 있는 환경에 커다란 영향을 미치기 때문에 기술적인 해결이 그대로 대스팬구조의 존재를 허용하는 것을 의미하지 않고, 도시나 지역사회의 중심에 있어서의 대스팬 구조의 존재 의의를 명확히 할 필요가 있다.

2. 초대스팬구조의 형태형성

2.1 형태형성과 형태변화

초대스팬구조를 성립시키기 위해서는 형태저항형 구조로서의 장점을 최대한 활용하는 것이 요구되며, 이를 위해 초대스팬구조의 설계에 있어서 형태설계의 비중이 점점 커지고 있다. 형태를 설계하는 경우 기본적으로 다음의 두가지를 생각할 수 있다.

- 1) 사용시 형태변화를 제어하지 않는 경우
- 2) 사용시 형태변화를 제어하는 경우

예를 들어 철근콘크리트 셸은 강성이 높고, 시공시의 형태를 사용기간중 그대로 유지하지만, 공기막구조의 경우 비상시 내압을 상승시켜 형태변화를 시키므로서 외압에 저항케 한다. 첫째항의 경우는 초기형태의 결정이, 둘째항의 경우는 형태제어가 중요한 과제가 된다. 형태를 형성 또는 결정하는 과정과 형성한 형태가 외력에 의해 변형하는 과정을 고려하여, 목표로 하는 형태를 “가치있는 형태”, 외력에 의해 변형된 형태를 “가치없는 형태”로 명명하는 구조물의 형태를 생각해보자. 일반적인 구조해석은 형태변화과정에 대한 정보를 얻는 것을 목표로 하고, 구조설계는 외력이 작용한후 가치가 있는 형태를 얻는 것을 목표로 한다. 초대스팬구조의 설계에 있어서는 형태형성과정에 있어서의 해석법이 요구되며, 형태형성을 위한 수리과정은 본질적으로 비선형성이 지배하는 경우가 대부분이다. 따라서, 구조물의 역학적 거동은 대단히 복잡하고, 이론해가 양의 형태(explicit form) 로 얻어지는 경우가 적고, 수치해석에 의해 얻어지는 경우가 대부분이다.

위에서 언급한 가치가 있는 형태를 얻기 위하여 현재 진행되고 있는 이 분야의 연구로는 불안정구조의 형태해석, 변위지정 구조물의 형태해석, 구조안정해석등이 있으며, 이를 기초로 형태형성과정과 형태변화과정에 대한 새로운 시점의 구조해석법을 개발하고 있다.

2.2 불안정구조의 안정화이행해석

형태형성과정의 대표적인 예로는 동경 돔의 형

태해석에에서 보는 바와 같이 공기막구조의 인플레이트(inflate)가 있다. 케이블구조나 박구조 등에서는 미소변위의 범위에서 보면 강체로서의 운동자유도를 갖는 불안정구조가 이용되는 경우가 많다. 이들 구조가 “가치가 있는 형태”로서 구조물로 채용되는 이유는 유한변위 범위에 있어서 강체로서의 운동자유도가 구속되는 구조인 점과 자기평형력(초기장력등)의 도입으로 기하강성을 부여할 수 있다는 점등이다. 이들의 내용을 수리적으로 검토하기 위해서는 미소변위 범위내에서 강

체변위의 추출, 유한변위 범위내에서의 강체변위의 존재조건, 자기평형력계의 존재조건, 자기평형력의 도입에 의한 안정화 조건등을 명확히 할 필요가 있다.

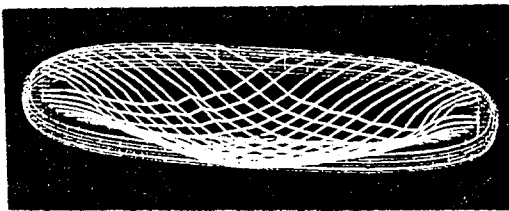
2.3 구조물의 형태해석

이 분야의 연구에서는 주어진 하중하에서 지정된 제약조건을 만족하는 구조물의 형태를 결정하는 해석법 즉 형태해석법(shape finding method)을 다루고 있다. 형태해석을 행하는 경우, 목표로 하는 양, 즉 목표로 하는 형태가 필요하다. 기존 연구의 대부분은 최소하중과 최대강성, 일정한 응력과 변형도 밀도 등을 목표로 하고 있으며, 이중 미리 지정한 형태, 결국 변형모-드를 목표로 하는 형태해석법의 개념을 설명하기로 한다. 트러스 구조를 이용하여 정밀기기를 지지하는 구조물의 설계를 예로 들면, (a) 와 같은 형태의 트러스를 채택할 경우 정밀기기를 실으면 (b) 와 같이 변형하여 A - A 면은 휘게 된다. 따라서, 변형후에도 A - A 면이 평면이 되도록 설계하는 경우를 생각해 보자. 결국, 변형전의 위치 A - A 로부터 변형후의 위치 A'-A'로의 변위는 허용하지만, A'-A'면의 평면유지를 제약조건으로 하는 트러스 구조의 형태를 설계하는 것이 된다. 따라서, (c) 에서 보는 바와 같이 절점을 “변위모-드지정을 받는 절점”과 “형태변화를 받는 절점”으로 분류한다. “형태변화를 받는 절점”의 좌표위치를 미지량으로 하고, 평형조건과 제약조건을 만족하도록 미지량을 결정한다. 결정된 형태가 (d) 에 표시된 것으로, 정밀기기를 장치하더라도 A'-A'면은 평면을 유지한다.

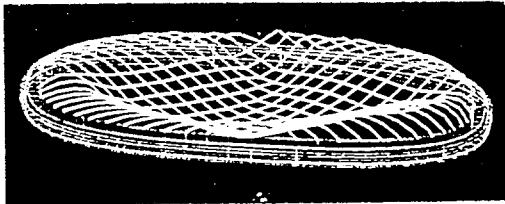
형태해석법은 $Kd=f$ 를 하중(f) 과 변위(d) 의 관계식으로 하고, (c) 의 절점분류에 따라 다음과 같이 분할한다.

$$\begin{bmatrix} K_{hh} & K_{hf} \\ K_{fh} & K_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_h \\ d_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_h \\ f_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

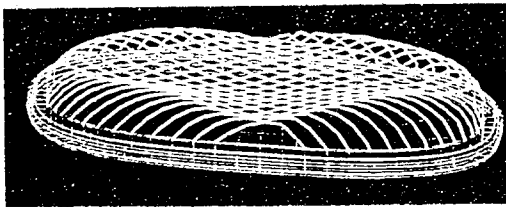
여기에서, $d_h=xd_0$ 와 같이 변위모-드를 지정하면 식(1)은 다음과 같이 된다.



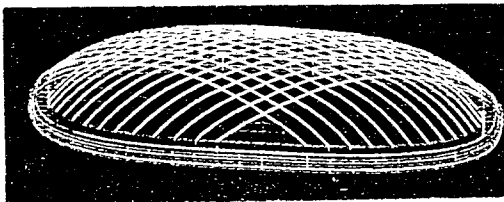
(가) 내압이 13.5mm Aq.일때



(나) 내압이 14.5mm Aq.일때

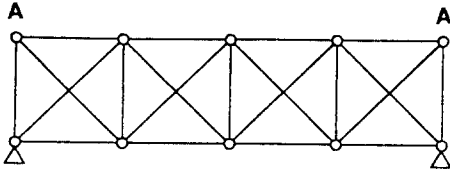


(다) 내압이 15.5mm Aq.일때

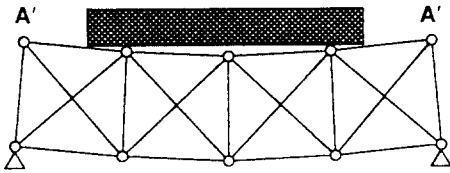


(라) 내압이 30.0mm Aq.일때

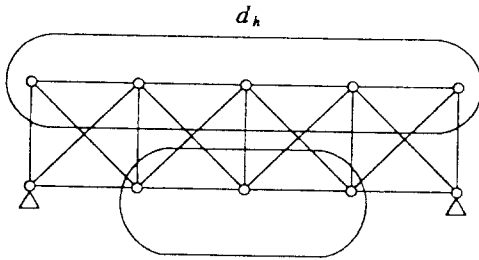
그림 4 동경 돔의 안정화 이행과정 해석



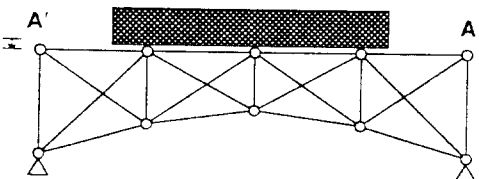
(가) 구조모범



(나) 변형의 모양



(나) 질점의 분류



(라) 지정변위를 만족하는 형태

그림 5 형태지점의 구조해석

$$\begin{bmatrix} h_h & K_{hf} \\ h_f & K_{ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ d_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_h \\ f_f \end{bmatrix}, Au = f \quad (2)$$

위식의 계수행렬은 상방행렬로서, 해를 가진 조건은 다음과 같다.

$$g(x) = [A(x)A(x)^T - I]f = 0 \quad (3)$$

x 는 형태를 나타내는 미지좌표로서, 위식을 만족하는 x 를 구하면 그것이 바로 해가 된다. 형태해석은 역문제(逆問題 inverse problem)의 일종으로서 고도의 비선형문제이며, 해의 존재조건이나 해석법의 연구는 근후의 과제이다.

3. 재래형 대공간구조의 응용

현대적인 재래형 대공간구조의 발달은 1961년 철골조의 개폐식 돔인 미국 피츠버그시의 시빅 아레나로부터 시작하여 1970년대 중반부터 80년대 중엽까지 공기막구조가 주류를 이룬다. 그후 케이블구조와 래티스 돔에 이르는 최신 구조시스템이 활용되어 현재에는 스펠 300m 급의 부산 스타디움의 탄생을 눈앞에 두고 있다. 돔기술의 발전상황을 정리하면 표 1 과 같다.

표 1 돔 기술의 발전현황

HARD 지향형 (기술지향형)	HARD SOFT 병용지향	SOFT 지향
제 2세대(공기막구조) 1972 ~ 1989	제 3세대(개폐식) 1990 ~ 1994	제 4세대(Hybrid) 1995 ~
· 투광성이 있는 개방식공간의 요망 · 잠실한 조형미를 갖는 강개각	· 전천후 공간의 활용 · 세계사체가 Impact를 갖는 이벤트	· 공간은 확장, 분할시 다목적 용도에 맞는 공간의 유효이용 · 멀티미디어의 중추기지
· 1975, 산타칼라라 돔 · 1976, 실버 돔 · 1988, 농경 돔	· 1989, 스카이어 돔 · 1993, 후쿠오카 돔	· 1996, 나고야 돔 · 1996, 오사카 돔 · 1998, 오이타 돔

3.1 에어 돔(Aerodynamic dome)

에어 돔은 대스팬가구로서 광범위하게 사용되고 있는 대표적인 재래형 대공간구조이다. 이 구조시스템은 가벼운 막재를 케이블로 보강한 막지붕을 작은 공기압으로 지지하는 시스템이다. 그림 6 에서는 현재 이미 지어진 200m 스펠 에어 돔의 구조기술을 500m 스펠에 확장한 경우의 형태해석 및 응력해석결과를 보여주고 있다. 케이블의 단면적은 기준내압(30mmAq) 시 200m 스펠과 동등한 응력이 얻어지도록 조정했지만, 500m 스펠 케이블의 단면적은 200m 스펠의 4배가 되었다. 풍하중시의 안전성을 고려하여 막재 강도에 따라 3 가형

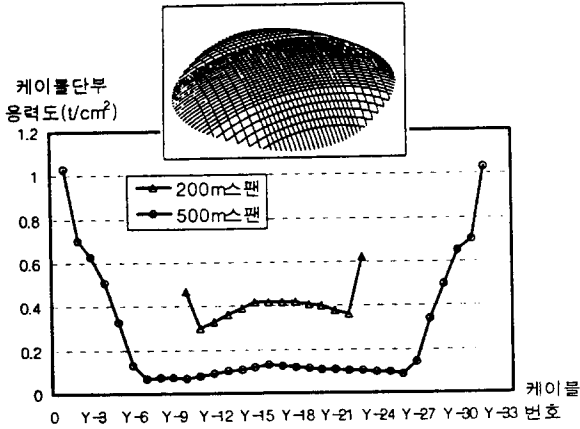


그림 6 기준내압시 케이블의 형상해석결과 및 단위장력분포

막패널의 크기가 제약을 받으며, 10~20m 피치 정도의 케이블을 배치한다.

3.2 하이브리드 돔(hybrid dome)

이 시스템은 케이블에 프리스트레스를 도입하고, 포스트재에 압축력을 발생시켜 막지붕을 지지하는 텐세그리티 시스템(tensegrity system)이다. 그림 7과 그림 8은 이 시스템의 형상해석 결과와 200m 스패와 500m 스패의 눈하중시의 정역학적 특징을 나타내고 있다. 변형은 리지 케이블장력이 소실되는 단계부터 비선형성이 크게 나타나지만 목표치인 스패비 1/100은 만족하고 있다.

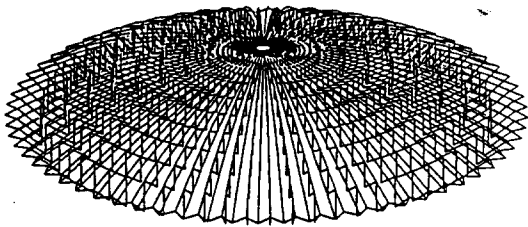


그림 7 500m 케이블 돔의 형상해석 결과

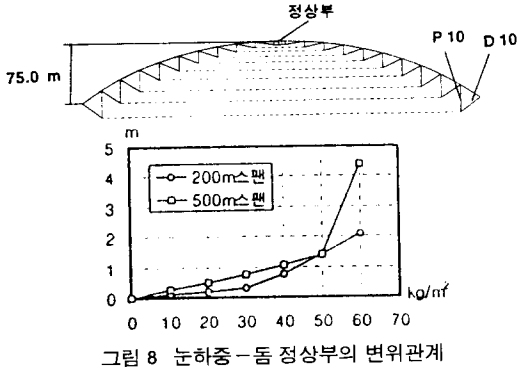


그림 8 눈하중-돔 정상부의 변위관계

4. 차세대형 대공간구조의 전개

4.1 선진복합재료(ACM) 초경량 셸

여기에서 말하는 선진복합재료(advanced composite materials)는 고성능섬유(알라미드섬유, 탄소섬유, 유리섬유, 세라믹 섬유, 금속섬유 등)의 입체배치와 충전제(에폭시수지, 내열수지, 열가소성수지, 세라믹 등)의 복합화에 의해 성형된 고강도, 초경량의 재료이며, 다음과 같은 특성을 갖는다.

- 1) 대단히 높은 강도특성을 갖는다(철의 5~10 배).
- 2) 높은 탄성률을 갖는다.
- 3) 비중은 철의 1/4 정도로 초경량이다(비중 4~1.8 배).
- 4) 열전도율은 철의 1/200 로 내열성이 강하다.
- 5) 진동감쇄성이 크다.
- 6) 우수한 내식성, 내후성을 갖는다.
- 7) 다양한 단면설계를 위한 성형품이 얻어져 어떤 색이라도 착색이 가능하며, 투명한 부재도 가능하다.

이러한 재료를 사용한 ACM 돔은 신기능성과 고도공업화(합리적인 공법, 접합부에 맞는 곡면분할이 가능, 초경량부재에 의한 공법 그리고 치수 안정성등) 그리고 다양한 디자인에 대응가능한 차세대형 대공간구조의 주류를 형성하게 될 것이다.

4.2 등고집적(等高集積) 셸

이 기법은 폐쇄형 곡선단위구조를 등고선에 따

라 집적하여 임의 형상의 셸구조를 만드는 것이다. 이 셸의 특징은 다음과 같다.

- 1) 임의 형상의 셸이 가능하다.
- 2) 프리캐스트 콘크리트 단위구조를 집적하므로서 형틀과 서포트가 필요없게 된다.
- 3) 폐쇄형 단위구조를 이용하기 때문에 안정구조가 된다.
- 4) 다양한 단면형이 가능하다.
- 5) 동일 유닛를 이용한 규격화가 가능하다.

4.3 제어 메가스트럭처(制御 mega structures)

구조해석을 위한 파라메타로는 구조형태, 경계조건, 작용외력, 응답 등이 있다. 구조물의 제어로서 외력의 제어와 응답 제어는 많이 실용화되고 있으나 구조형태를 파라메타로 하는 연구는 아직 미흡한 상태이다. 셸이나 스페이스 프레임을 포함한 공간구조들은 형태저항형구조로 불리우며, 사용시의 형태에 의해 외력에 대한 저항능력이 좌우된다. 따라서, 구조형태 자신을 제어할 수 있는 "형태제어구조"의 개발이 요망된다. 형태제어 방정식은 제약조건이 붙는 비선형방정식이 되는 경우가 많으며, 하나의 예로 주어진 하중조건을 기초로 지정된 변위모-드가 얻어지는 연구 등이 활발히 진행되고 있다.

4.4 차세대 대공간구조물의 연구 비전

대공간구조물의 수요가능성을 검토하기 위한 전제조건으로 공간적, 기술적 특성등 제조건을 정리한다. 재료의 경량화와 초대스팬화의 기술적 진보에 따라 건축분야에 있어서는 현재 300m 를 넘는 돔 구조물이 현실화되고 있으며, 종래의 닫힌 공간으로서의 대공간에서 개폐식 공간을 지향하는 대공간구조물이 널리 건설되고 있다. 현 시점에서 생각할 수 있는 대공간구조물의 공간적, 기술적 특성을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 복합화, 통합화를 지향하는 새로운 도시기능 공간

- 2) 500m 이상의 스패를 갖는 무주대공간
- 3) 태양광 등을 자유로이 제어할 수 있는 대공간
- 4) 임의 형태의 건축물 형태가 가능
- 5) 개폐와 이동이 가능한 대공간의 창조 등이 있다.

또한, 레저활동의 활성화, 생활의 질적 향상 그리고 다양화 등에 대응하는 21세기에 부응하는 복합화, 통합화된 대공간구조물의 도시, 건축공간을 창조하기 위한 향후 연구의 목표를 도표화하면 표 2와 같다.

표 2 대공간구조물의 향후 연구방향

기 능	단일기능	복합화·통합화기능		
도시건축시설	경남교	항만시설 터미널	생태계의 보호	
	이벤트홀·박람회장 공장·물류센터 스포츠·레저시설 (체육관, 골프장, 스키장, 테마파크, 레저파크, ...)	재해피난지역 리조트타운 사막 및 해상도시	유적의 보존 환경보전	공중도시 공중정원 정보인프라 인공기후시디
스팬규모	~100m ~200m	~300m	~400m	~500m
실시가능기간	~ 20C	21C ~		

참 고 문 헌

1. 次世代型 500m 스패 / 도시·건축시스템, 슈퍼 500 연구회, 1992. 2
2. 空間構造(1), (2), (3), 坪井善勝記念講演會實行委員會, 1995
3. Kazuo Ishii, "Membrane Structures in Japan", SPS Pub. Com., 1995
4. "Spatial, Lattice and Tension Structures", Proc. of ASCE and IASS, 1994
5. "개폐식 돔 및 스페이스 프레임에 관한 국제심포지움 논문집", STRESS, 1995. 11 [7]