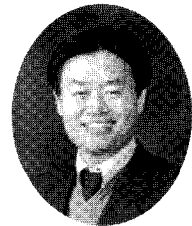


## 공기압에 의한 안정 : 공기막 구조에서 텐사리티(Tensairity)까지

Pressure Induced Stability : from Pneumatic Structures to Tensairity

- Rolf H, Luchsinger, Mauro Pedretti and Andreas Reinhard -



김종수\*

Kim, Jong-Su

### 개요(Abstract)

공기압에 의한 안정은 쉽게 인식은 되지 않지만 자연상태에서는 매우 흔하다. 공기압에 의한 안정 기술은 타이어, 풍선, 공기압선박과 공기압주택 등에서 발견된다. 이 공기압 구조는 대개 구형, 실린더 같은 단순한 형태이다. 이러한 것들은 공기압선박처럼 낮은 기압의 큰 형태나 높은 기압의 작은 형태인 타이어를 포함한다. 최근에는 중간기압의 공기막구조를 조사했다. 공원의 공기압 벤치 또는 공기압 비행선은 이러한 연구의 산물이다. 다양한 형태로 공기압 구조가 만들어지며, 중간기압 범위에서 하중 전달 능력은 놀라운 결과물에 적용 가능할 만큼 충분히 강하다는 것이 밝혀졌다. 말라가는 식물에서 안정을 증가시키기 위해 목질화 하는 과정을 볼 때 우리는 더 큰 기술 발전의 가능성을 발견한다. 스위스의 한 회사는 Tensairity라는 새로운 구조개념을 개발해 왔다. Tensairity는 재래의 공기막 구조

와 케이블과 스트럿의 혼합체이다. 그 결과는 상당히 가벼우면서 강재 보의 재하능력이 있는 공기막 보이다. 이 기술은 가설교량, 임시 지지대, 대형텐트 같은 설치물에 응용될 수 있으며, 장경간 구조물에 적합하며, 공기압에 의한 안정을 필요로 하는 다양한 새로운 기술분야를 열 것으로 기대된다.

### 1. 소개(Introduction)

공기막 구조의 매력은 하늘에서 시작됐다. Mongolfier 형제가 1783년 뜨거운 공기로 채운 비행선으로 첫 하늘을 개척하는 시대를 열었다. 프랑스의 Charles, 2년 뒤 영해협을 횡단한 Blanchard 등 그 당시 이 기술에 사람들이 매료되었다. 그러나 본격적인 상업용 비행선은 100년 이상이 걸렸으며, 20세기가 시작되면서 붐을 일으켰다. 그러나 1937년 Lakehurst에서 Hindenburg 호의 비극으로 비행선 시대를 마감했다.

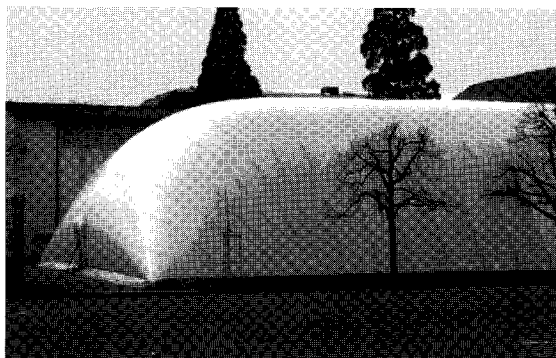
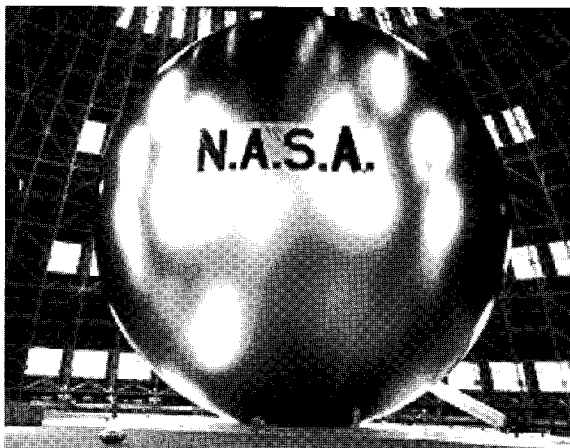
땅 위에서 공기막 구조는 2차 세계대전 후 레이더 기지국의 설비 보호막으로 시작했다. 가볍고, 짧은 시간에 설치돼야 하고, 금속성이 없어야 하는 레이더 기지의 보호막으로는 공기막 구조가 이상적이

\* Airlight Ltd, Switzerland, (주)CS구조엔지니어링 대표이사, 대공간 건축물 건축기술 개발 연구단장

다. 미국에서 water bird가 개발한 radom은 전세계적으로 기지국에 설치됐다.

민간분야에서는 1960년대에 Frei Otto<sup>2)</sup>가 공기막 주택을 연구했으며, 1970대엔 Thomas Herzog<sup>3)</sup>가 많은 기여를 했다. 공기 건축막 구조는 오사카의 Expo'70에서 다양한 건축막 구조가 소개되면서 전성기를 열었다. 그 이후 테니스 코트를 덮는 공기막 구조 또는 대형 스포츠 시설을 덮는 것 등이 개발됐으나 의미있는 진전은 별로 없었다<sup>4)</sup>. 1996년에 Festo가 공기보를 기초로한 건축인 Airtecture 소개했으나 더 이상의 진전은 없었다<sup>5)</sup>.

건축 공기막구조의 큰 한계는 공기막주택에서는 형태제한이며 공기막보에서는 재하능력이다. 비누 거품에서 보듯이 공기막 구조의 자연스런 형태는 구(그림 1)이다. 어떤 형태의 탄성막이던 구형태로 수렴한다. 탄성막의 적절한 재단에 의해 긴 형태가 가능하지만(그림 1) 오른쪽과 같은 소세지 형태를 띠게 된다. 실제로 지금까지 가장 성공적인 공기막

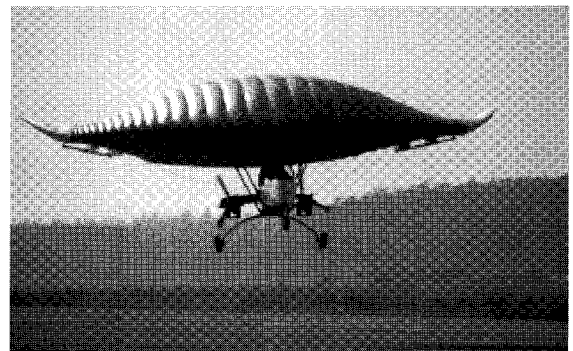


〈그림 1〉 기본 공기막 형태 : 나사의 구형 ECHO I 통신위성 (위), 주요 원통형의 공기막주택(아래)

구조는 타이어이다. 공기막보와 압축공기로 채운 원통막이 기존의 보와 트러스를 대체할 수 있도록 연구를 해왔다.

## 2. 진보된 형태 : Advanced Forms-The Web Technology

1998년 5월 Stringray와 Pneuwing이 유인 공기막 비행기를 공개했을 때 크게 화제가 됐다(그림 2). Stringray는 공기막구조의 가능성과 새로운 형태를 성공적으로 검증했다. 날개 길이 13m와 길이 9.4m의 비행기는 날개 면적이 70m<sup>2</sup>이며, 68m<sup>3</sup>의 가스로 채워졌다.



〈그림 2〉 새로운 공기막 팽창된 비행선 Stringray (위), 팽창한 날개 Pneuwing(아래)

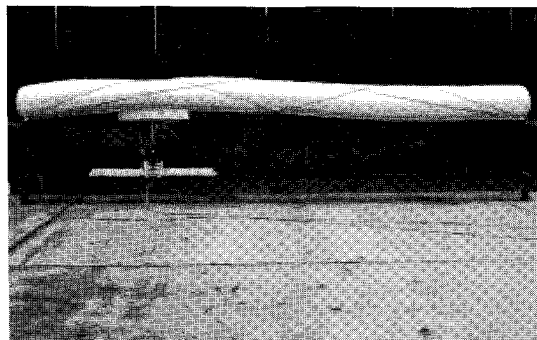
이 비행체는 비행기와 비행선의 복합형태로 보인다. 이 비행체는 시속 47km에서 이륙하며 두 개의 47kw엔진으로 최대 속도는 시간당 130km이다. 이 비행체의 공기막 날개의 무게는 80kg이며 최대 양중무게는 840kg이다. 비행기의 형태는 공기역학 원칙에 의해 결정되며 매우 제한적이다. 복잡한 형태를 가진 공기막 구조를 제작하기 위해 웹 기반기술

이 적용된다. 이것은 현대의 CAD기술에 기반을 두며 많은 경험이 필요하다. Stingray에 의해 증명된 이 기술의 최대 제작 오차는 10m길이의 공기막 비행체에서 1cm미만이였다. 이것은 형태변화가 공기압 주입과정 중에 발생할 수 있고 또한 막의 응력이 응력형상과 막의 종류에 따라 매우 복잡하기 때문에 큰 의미를 가진다.

물위의 공기압 부유체와 공기압의자, 등받이 방석 등 다양한 응용품들이 웹기반 기술에 의해 발전해왔다. Stingray는 1mbar 기압의 비행선과 2mbar 이상의 타이어 사이의 기압을 사용했다. Stringray의 날개와 비교해서 상대적으로 얇은 이 날개는 안정을 유지하기 위해 700mbar의 기압을 사용했다. 공기보의 경우는 좌굴비 때문에 높은 압력이 필요하다. 따라서 보로서 세장한 공기압 구조의 응용은 매우 제한적이 된다.

### 3. 진보된 기술, Advanced Strength : Tensairty

대공간 건축물 건설기술 개발 연구단에서 개발

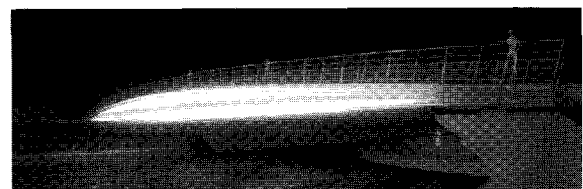


〈그림 3〉 강력히 긴장된 공기막 구조 : 최대 3.5ton이 재하된 8.0m 경간의 공기막보 구조(위), 공기막보의 극한하중 시험(아래)

예정인 새로운 공기막 보는 세장한 공기막 구조의 재하능력 문제를 해결 할 수 있을 것으로 기대된다. Tensairity는 인장(Tension)과 공기(Air)의 결합(integrity)을 뜻한다. 이것은 공기막 보와 보통의 보구조의 결합기술이다. 이 결합에 의해 공기보의 재하능력은 2배 이상 개선되며, 또한 아주 가볍고 어디든지 배치할 수 있는 구조가 된다.

기본 공기막보+텐션(Tensairity) 구조는 공기막보의 전체길이에 따라 부착되는 압축재와 공기막보 양끝의 압축재(compression strut)와 연결되는 최소한쌍 이상의 케이블로 구성된다. 하중은 케이블과 압축재에 의해 전달된다. 압축공기의 역할은 케이블에 인장을 도입하고 압축재의 좌굴을 방지하는 것이다. 따라서 압축재와 케이블을 위해 최소한의 단면적이 필요하다. 한마디로 공기막보+텐션(Tensairity) 구조는 압축재와 케이블에 의해 안정이 되는 공기막 구조이다.

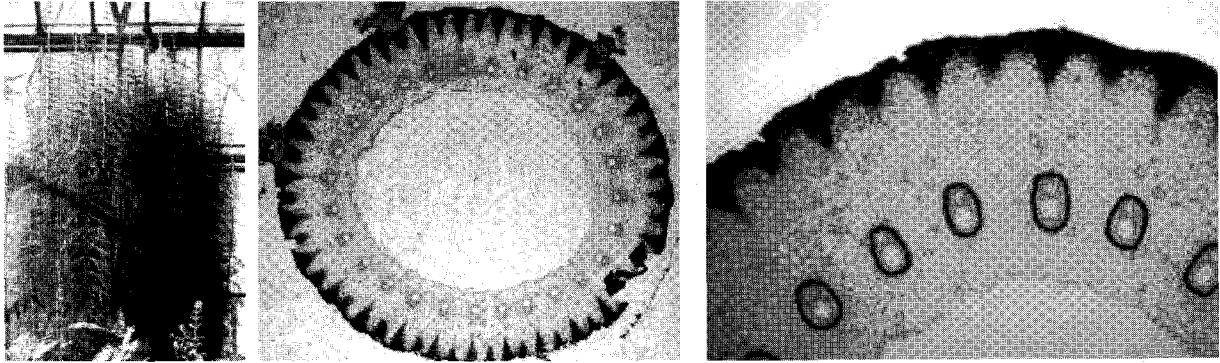
공기막보+텐션(Tensairity) 구조의 기술은 건축, 토목분야에 광범위하게 쓰일 수 있다. 지붕구조에 적합하고 보도교에도 적합하다(그림 4). 뛰어난 경량구조로써 넓은 공간에 이상적으로 적용 될 수 있다. 다른 공기막 구조처럼 공기막보+텐션 구조는 이동, 재배치가 자유롭다. 따라서 대형공간, 이동식 공장과 임시로 설치되는 교량에도 적합하다. 이 기술은 건축, 토목분야에만 한정되지 않고 항공분야, 우주분야 또는 기둥으로서 등 광범위하게 응용될 수 있다.



〈그림 4〉 72m경간의 공기보+텐션의 보도교(영국 Leamouth 다리 공모전 출품작, Blue office architecture, Bellinzona)

### 4. 공기막 구조, 생태공학(Bionics)과 공기막+텐션(Tensairity)

압력에 의한 안정은 자연에서 아주 흔한 것이다.



〈그림 5〉 쇠뜨기 식물 모습(왼쪽), 단면(중앙), 단면의 상세(오른쪽)

〈표 1〉 자연 대 기술 : 공기막구조는 자연의 많은 특징을 가지고 있다.

자연	부드럽다	둥글다	가볍다	유연하다	다목적	구조지향적	변하기 쉬운
기술	딱딱하다	모가진다	무겁다	경직되다.	단일목적	재료지향적	영속적인

식물의 세포막 압력은 상당히 높은 5~10bar이다. 쇠뜨기 식물은 세포막 압력에 의해 안정화된 구조의 대표적 예이다. 쇠뜨기 식물의 구조적 탄성계수와 이 식물의 휨강성은 연계되어 있다. 쇠뜨기 식물 줄기의 단면은 팽팽한 내부조직과 톱니 같은 외부 섬유 결합을 보여준다(그림 5).

여하튼 식물은 압력물질로 액체를 사용하고 공기막보+텐션(Tensairity) 구조는 공기를 사용한다. 식물의 구조적 복잡함은 공기막보+텐션(Tensairity) 구조의 단순함과 비교하면 차원이 다르다. 그렇지만 Tensairity는 압력으로 안전성을 확보하는 기본 원칙에서는 동일하다. 공기막구조의 흥미로운 점 중 하나는 그것이 생체공학적인기술인 점이다. 자연과 기술은 서로 떨어진 양 끝에 있는 것 같다. 부드럽고, 둥글고, 가볍고, 유연하고, 다목적이고, 구조 지향적이고 변화하는 것이 자연의 특징이라면 딱딱하고, 네모지고, 무겁고, 경직되어 있으며, 단일 목적이며, 재료 재향적인 것이 기술의 특징이다. 공기막 구조는 확실히 부드럽고, 둥글고, 가볍다(표 1). 구조의 유연성은 압력의 변화에 의해 얻을 수 있다. 공기막보+텐션(Tensairity) 구조는 인장과 압축의 역할분담에 의해 구조 지향적이다. 오늘날 막재료의 제한된 사용기간은 공기막 구조에 타고난 변화의 특성을 부여한다. 실제로 막지붕은 20~30년 후에 바꾸어야 한다. 이것은 이 구조물이 20년 이후에도 그 장소에 아직도 적합한 것인가에 대한 검토의 기회

를 준다. 오늘날 기차역에 있는 공기막 구조의 장점 중 하나는 해체하기 쉽고 제한된 시간내에 가장 적은 자원을 사용하는 경제적이고 빠른 공기를 보장한다는 점이다. 실제 빠르게 변화하는 건축세계에서 생태학적인 요소에 이제 무게를 실을 때가 되었다. 이러한 생태학적인 특성을 고려하면 공기막 구조는 생태학적인 목표와 일치하는 자연과 기술의 융합을 가져올 수 있다.

### 5. 맺으면서

약 200년전 공기막 구조로 만든 하늘로의 탐험은 귀족사회의 명예를 지고 있는 사람들에게 자유를 추구하는 정신에 용기를 북돋아 주었다. 공기압구조는 많은 이점과 동시에 부족함 있다. 공기막구조는 이제까지 가장 성공적인 예인 타이어 외엔 비행선, 공기막주택 등과 같이 인기의 부침이 심했다. 공기막보+텐션 구조는 공기막구조의 재해성능 크게 개선시키며, 동시에 공기막 구조가 가지는 생태학적인 특성이 낡은 기술과 사고에서 벗어나려고 하는 오늘날의 기술자에게는 굉장한 잠재력이 되어 줄 것이다.

#### ※ 번역을 마치며

본인이 속한 대공간 건축물 연구개발 연구단의

41세세부에서는 3차년도 Pilot project의 연구개발 과제로 공기막보+텐션을 개발하고 있다. 위에 언급한 장점들을 수용하면서 한국의 건축물 시장에 적합한 기술을 개발할 예정이다. 3차년도 개발된 이 요소기술은 제 4차년도의 Pilot project에 융합기술로 적용될 예정이다. 관심 있는 여러분들의 많은 의견을 기대합니다.

### 참고문헌

1. Topham, S: blow up: inflatable art, architecture and design. Muchen: Prestel Verlag, 2002.
2. Otto, F and Trostel, R: Zugbeanspruchte Konstruktionen. Frankfurt: Ullstein Fachverlag, 1962.
3. Herzog, Th, Minke, G and Eggers, H: Pneumatische Konstruktionen. Stuttgart: Gerd Hatje, 1976.
4. Onate, E and Kr?lin, B(eds): Textile Composites and Inflatable Structures. Barcelona CIMNE publication, 2003.
5. Schock, H-J: Segel, Folien und Membranen. Basel: Birkh?ser Verlag, 1997, pp.102-105.
6. L' Garde Inc., Inflatable Space Structures, www.lgarde.com, 2004.
7. Vertigo Inc., Airbeam maintenance shelter, www.vertigo-inc.com, 2004.
8. e.g. GEO Nr. 6, Juni, 1998, pp. 178-180.
9. For an overview of the projects of prospective concepts ag see our web page www.prospective-concepts.ch
10. Luchsinger, RH, Pedretti, A, Steingruber, P and Pedretti, M: The new structural concept Tensairity : Basic principles. A. Zingoni (ed), Proceedings of the Second International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation. Lisse: A.A. Balkema/Swets Zeitlinger, 2004, accepted.
11. Spatz, H-Ch, K?ler, L and Speck, Th: Biomechanics and functional anatomy of hollowstemmed sphenopsids: I. Equisetum giganteum. American Journal of Botany vol. 85, 1998, pp. 305-314.