

Airdome의 사용과 구조적 안전성

Air-Supported Fabric Structures



김재열*
Kim, Jae-Yeol

1. 서론

고대 로마시대 건축 구조 양식으로부터 발전된 돔(Dome) 건축은 초기에는 재료와 구조 기술의 한계에 의해 오늘날에 비하면 소규모의 공간이었다. 그러나 당시에는 상대적으로 큰 규모의 내부 공간으로 주로 신전 등으로 사용되었으며, 높고 둥근 천장에서 느껴지는 장엄함, 경외감으로 인한 공간 자체의 상징성에 의미가 있었다. 반면 현대의 돔 건축은 도시의 상징적 조형으로서의 외부 형태 뿐만 아니라 다양한 용도와 기능으로 활용되는 내부 공간의 구성으로 돔의 의미가 변화되었다. 현대의 돔 건축은 인공적·기계적으로 내부 공간을 조절하여 쾌적성을 확보하며, 외부의 미세먼지 등을 피할 수 있는 공간을 창출하고, 계절 조건에 제한 없이 전천후 다목적으로 활용하는 시설 유형으로 대부분 돔 건축이 해당된다. 특히 실내 인공 스키장, 레저 온수 풀, 실내 체육관, 다목적 공간 등이 대표적인 사례

이다. 최근 돔 구조물은 축구장 몇 개를 합쳐놓은 만큼의 대공간이 필요하거나 기후변화에 대처 및 극복하기 위한 방법으로 활용된다. 즉 돔은 기후 환경에 영향을 덜 받는 실내 대공간을 만든다고 설명할 수 있다. 이때 대공간은 단순히 넓은 공간만을 의미하는 것이 아니다. 공간을 최대한 사용할 수 있도록 벽이나 기둥이 전혀 없거나 최소한으로 설치해야 한다. 이러한 인공적 환경을 만들어내는 건축학적 돔 구조의 형식 중에서 에어돔(Airdome)을 소개하고 구조적 안전성에 대해 기술하고자 한다.

공기막(Airdome) 구조는 공기의 가압을 통해 실내 공간을 형성하는 돔 구조로서 내부 지주 없이도 대공간을 창출할 수 있는 장점으로 인해 최근 적용 범위가 넓어지고 있다. 일반적으로 공기막 구조는 실내 공간에 가압 송풍된 공기의 내압을 통해 인장력을 확보하는 단일 공기막과, 튜브와 같은 막 구조물에 공기를 주입하고 이 공기 튜브가 지지 역할을 하는 공기 지지 구조로 구분된다. 본고에서는 전자의 경우로서 송풍기로 불어 넣은 공기막과 바람과 같은 외부 하중에 견딜 수 있도록 설계된 공기막 구

* 협성대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Hyupsung University, Department of Architectural Engineering, Ph.D

조를 다루고자 한다.

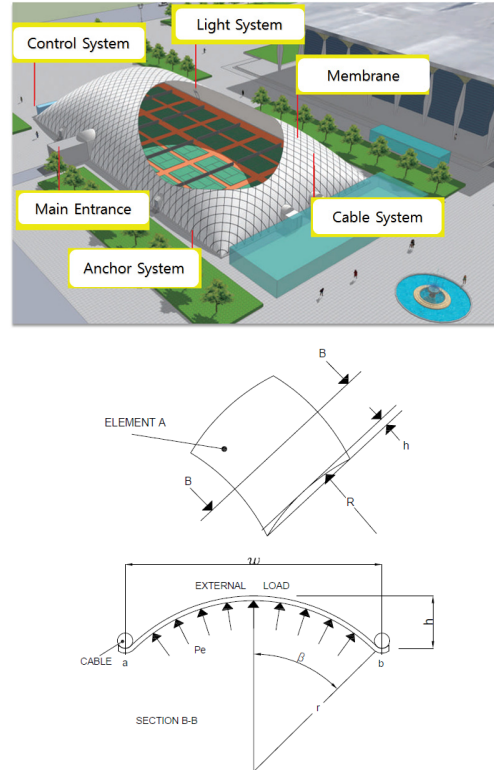
공기막 구조는 철근 콘크리트 구조 및 철골 구조 건축물보다 가볍고 설치가 쉽기 때문에 많이 사용되고 있다. 또한 구조적인 측면에서 안정성이 높고, 계획적인 측면에서 우주 대공간 창출이 가능하며, 실내의 공기 흐름이 우수하다. 돐의 실내는 유선형 구조로 공기의 흐름이 원활하기 때문에 내부가 상대적으로 쾌적하고 온도 변화 및 유지 관리가 우수하다.

근래에 들어서는 지진 및 미세먼지와 같은 자연재해에 대응하기 위해 공기막 구조물이 다수 지어지고, 자연재해가 발생했을 때 한 번에 많은 인원을 수용할 수 있는 임시 수용소 등에 많이 쓰이고 있다. 또한 미세먼지의 피해로부터 벗어나고자 어린이 운동장과 같은 대형 구조물, 휴대가 가능한 우주 구조물에도 점점 활용도가 높아지고 있다.

2. 공기막 구조의 구성

공기막 구조는 일반적으로 <Fig. 1>과 같이 구성되며 공기로 지지되는 구조물이다. 그림 상부에서 보는 바와 같이 막은 케이블로 덮여져 있으며, 그림 하부는 그 가운데 하나의 유니트에 받는 내외부 하중의 평형 상태를 나타낸 것이다. 그림과 같이 바람, 눈 등 외부 하중(External load)에 안전할 수 있도록 내부압(P_e)과 케이블의 인장력이 평형을 이루는 구조이다. 구조물의 안전성이 공기 내압으로만 지지되므로 에어돐의 안전성을 확보하기 위하여 막재의 외부에 케이블을 설치하게 된다. 이러한 케이블은 눈이나 바람에 의해 막에 가해지는 외부 하중을 분산시키는 역할을 한다. 설계 시에 내부압과 케이블의 인장력을 계산하여 주어져지며, 한 유니트의 크기에 분담하는 인장력의 크기를 정하여 설계하게 된다. 그러나 눈과 바람 등 외부력이 설계 시 고려한 것과 같을 수 없고, 케이블과 케이블의 접합점이 처음 설계했을 때와 다르게 움직여서 케이블 하나가 이루는 유니트의 크기 및 담당하는 면적이 달라질 수가 있다. 이는 응력 집중이나 주름 발생에

따른 파손의 원인이 될 수 있으므로 설계 및 시공 시 주의 해야 한다.



<Fig. 1> Air supported structures

3. 공기막 구조 설계

공기막(Airdome) 구조의 특징으로는 (a) 설치 지역에 제한이 없고, (b) 시공이 매우 쉽고, (c) 일반 건축물에 비해 건축 비용이 매우 저렴하며, (d) 설치 목적에 따라 다양한 모양을 만들 수 있다는 점을 들 수 있다¹⁾. 공기막 구조는 돐 안의 압력을 일정하게 유지하기 위해 공조 시스템이 반드시 필요하고, 막 재료가 무한정 팽창하는 것을 막고 고정시키기 위한 케이블 네트워크가 사용된다. 구조물 내부에 기둥이나 대들보가 없기 때문에 철저한 구조 계산에 의해 설계·제작·시공된다. 공기막 구조 설계 시 모든 케이블은 인장력이 걸리는 부재인데 만약 시공 후 느슨하여 쳐져있는 상태가 되면 당초 구조 계산과 다른 구조물이 된다. 만약 일부 케이블에 이러한 현상이 발생하면 그 케이블이 부담해야 할 하중을

다른 케이블이 추가적으로 견뎌야 하므로 응력의 집중 현상이 발생할 수 있으며 이로 인하여 강풍, 지진, 폭설 등으로 케이블이 끊어지는 현상과 막의 파손이 연속적으로 일어나게 된다. 일반적인 방식의 케이블은 처짐 현상이 발생할 확률이 매우 높다. 따라서 가장 안전한 케이블 형태는 바람과 같은 외부 하중에 의해 원래 설계되었던 케이블의 위치가 변하여 응력 집중이 생기지 말아야 하며, 외력에 의해 발생된 부가 하중을 기초로 전달하지 않도록 원래의 케이블 형태를 유지할 수 있는 Self-balance 기능을 갖추어야 한다. 이러한 Self-balance 기능은 케이블의 이동에 의한 응력 집중 방지, 주름(Wrinkling) 방지에 도움이 되어 공기막 구조가 파괴되는 것을 미연에 방지할 수 있다. 국내 및 국외에서 이론적으로 케이블의 이동에 의해 응력 집중과 주름이 발생할 수 있다는 것은 규명하였으나²⁻⁴⁾, 이를 방지하거나 줄일 수 있는 시스템에 대해서는 아직 기술적 보고가 없다. 공기막 구조는 가볍고 상대적으로 외부에 노출된 경우가 많아 바람 및 눈 하중의 영향이 많기 때문에 이로 인해 케이블 이동과 응력 집중 및 주름이 발생하므로 케이블의 위치가 변했을 때 가능한 한 원래 설계 위치를 찾아주는 Self-balance 부분에 많은 노력을 기울여야 할 것이다.

다음으로 막의 재질은 에어돔의 내구성을 좌우하는 중요한 역할을 한다. 근래에는 자동차에 의한 공기오염뿐 아니라 막 표면의 미세먼지 부착에 의한 오염도 고려해야 한다. 특히 해안 도시에는 해풍으로 인한 부식 방지 처리(코팅)된 막재(PVF, 예: Dupont Tedlar)를 사용하는 것이 바람직하다.

최근에는 미세먼지로 인한 막 자체의 오염 뿐만 아니라 심각한 대기오염 유해물질로부터 에어돔 내부의 쾌적한 공기를 유지하기 위해 공기 청정 시스템을 갖추어야 한다.

4. 해외 설계 예

2012년 중국 심천에 약 43m/s의 태풍이 내륙으

로 상륙했지만 에어돔으로 지어진 배드민턴 체육관은 전혀 지장 없이 태풍에 견뎠다. 심천은 중국의 남부 지역으로 홍콩과 맞닿은 항구 도시이다. 이곳은 동남아의 강태풍 지역에 걸쳐 있기 때문에 매년 최소 20m/s에서 최대 50m/s의 태풍의 피해가 있는 지역이다(Fig. 2 (a)).

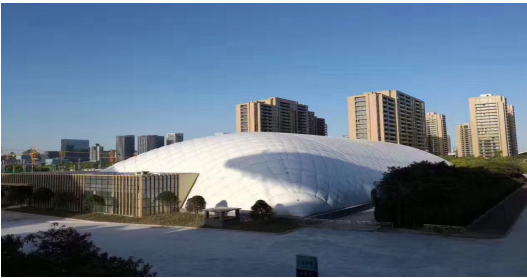
창장 고원 지진대 구역에 위치한 청두 후스강 크린 공장은 프로젝트 준공 후 부근에서 규모 7.0의 지진이 두 차례 일어나 많은 피해가 있었지만 에어돔에는 전혀 피해가 발생하지 않았다. 해당 에어돔은 후스강을 생산하기 위해 설치한 면적 2,560m²의 크린 공장 중 하나로 미국 Apple의 부품 조립 공장이다(Fig. 2 (b)).

2008년 쓰촨성 완촨에서 8.0 강진, 2013년 쓰촨성 루산에서 7.0 강진, 2017년 쓰촨성 주하이거우에서 7.0의 강력한 지진이 있었는데 에어돔으로 지어진 Apple의 아이폰 공장은 전혀 피해가 없었다고 한다(Fig. 2 (c)).

중국의 국제학교 ISB는 극심한 초미세먼지의 영향을 받지 않는 에어돔으로 CNN에 소개가 될 정도로 아주 좋은 사례이다. ISB는 에어돔 최초로 초미세먼지(pm2.5)의 수치가 외부는 400 μ m일 때 내부는 평균 20 μ m 정도가 나올 만큼 매우 쾌적하고 안전한 에어돔이다(Fig. 2 (d)).

5. 결론

지구 온난화, 대기오염, 자연재해로부터 보호받을 수 있는 에어돔과 같은 초대형 공간의 필요성이 나날이 대두되고 있다. 따라서 미세먼지로부터 자유로운 공간을 창출하고, 자연재해로부터 안전하며, 환경 친화적이고 과학적인 에어돔은 우리들의 삶에 매우 긍정적인 건축 구조이다. 최근에는 이 같은 문제를 극복할 수 있는 기술들이 다수 상용화된 상태이며, 공기막 구조의 장점을 살리고 안전하고 쾌적하게 상용화하기 위해 다음의 기본적인 사항에 관심을 두어야 한다.



(a) Shimchun Gymnasium



(b) Chung Doo factory



(c) Sichuan Apple factory



(d) ISB international school

〈Fig. 2〉 Examples of air supported structures

해석 및 설계 시에는 외부력으로부터 평형과 안정을 유지할 수 있는 형태를 취하는 것은 기본이고, 파손을 피하기 위해 케이블 간격을 조금 더 촘촘히 하거나 어떠한 움직임에도 케이블이 원 위치로 다시 돌아 올 수 있는 장치 및 기능(Self balancing)이 있으면 도움이 될 것이다. 또한, 케이블 접합부의 돌출에 의해 눈이 쌓이지 않도록 적절한 곡률 및 케이블의 간격, 시공의 정확성에 주안점을 두고 형상 결정을 해야 할 것이다.

돔의 핵심 자재인 막 재료가 다양하게 개발되어야 한다. 특히 근래에 화두가 되고 있는 미세먼지 및 오염에 의한 피해를 줄여야 한다. 또한 사용 용도에 따라 복사열과 가시광선 투과율을 고려해 적합한 막 재료를 선택해 사용할 수 있어야 한다. 목적에 맞는 조도를 확보하거나 알맞은 조명을 설치하고 자외선, 열의 이동, 소음, 결로 등에 대처해야 한다.

중요 요소인 공조 시스템도 돔의 활용도를 높일 수 있다. 자동으로 내부 압력을 조절해 돔 형태를 유지할 수 있으며 풍속, 적설 등에 실시간으로 대응할 수 있다. 또한 실내 온도를 일정하게 유지하고, 정전에 대비해 보조 발전까지 할 수 있는 공조 시스템도 상용화되어야 한다.

마지막으로 시공의 섬세함과 정확성이다. 설계된 그대로 시공할 수 있는 능력과 경험을 키워야 한다. 이와 더불어 사명감을 가지고 설계 및 시공할 수 있다면 공기막 구조의 사용은 늘어날 것이며 많은 사람들이 안전하게 이용하는 쾌적한 구조 시스템으로 자리매김 할 것이다.

References

1. Ryu, S. H. (2017, November 11). Large spatial airdome out of whether changes, Kosca Journal, Retrieved from <http://www.koscaj.com/news/articleView.html?idxno=100172>
2. Kim, J. Y., Kang, J. W., & Park, S. M., "A Study on the Slipping Problem for Cable-Membrane Structures", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.8, No.5, pp.95~105, 2008
3. Kang, J. W., & Kim, J. Y., "A Study on Uniaxial Tensile Stress of Tensioned Membrane", Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.11, No.3, pp.85~93, 2011
4. Kim, J. Y. (2012). Wrinkling Check in Tensioned Membrane Structure, IASS-APCS 2012, Republic of Korea, pp.258