

개폐식 대공간 구조물의 시공기술 사례

Construction Technology for Retractable Large Spatial Structures



박 금 성*
Park, Keum-Sung



김 형 도**
Kim, Hyung-Do



곽 명 근**
Kwak, Myong-Keun



이 상 섭**
Lee, Sang-Sup

1. 개폐식 대공간 구조물의 개요

개폐식 구조물(Retractable Structure)이란, 지붕이 개폐되는 구조물로 구조시스템별로 보면 크게 연성구조시스템(Soft Structural system)과 강성구조시스템(Hard Structural system)로 분류할 수 있다. 강성개폐시스템은 철골로 된 지붕 전체를 몇 개의 파트로 나누어, 각 피스별로 이동 및 회전시키며 열고 닫는 방식이며, 연성개폐시스템은 막과 케이블을 이용하여 커튼과 같이 열고 닫는 방식이 주를 이룬다. 현재까지 건설된 개폐식구조물은 상기 구조시스템을 적용 또는 응용한 것들이 대부분이다.

지붕구조의 개폐를 통해 다양한 공간 활용성을 가지는 친환경적인 대공간 구조시스템으로서, 기존의 대공간 구조시스템이 갖는 요소기술에 개폐식 지붕구조의 특성을 고려하여 지붕의 개폐 형태 및 방법과 이에 따른 구조안전성, 건축환경제어, 유지

관리 등에 대한 최적화 개념을 도입한 공간으로 형성된 구조물로 정의할 수 있다.

본 연구에서 추구하는 개폐식 대공간 건축물의 건설 시공기술 자립화를 통한 해외시장 진출의 목표를 실현하기 위해서는 개폐를 목표로 하는 구체적인 특성으로 인하여 구동장치가 반드시 갖추어져 있어야 하며 이는 일반 구조물에서 찾을 수 없는 특수화된 기술과 개폐식 지붕의 구동 특성이 고려된 시공기술이 요구된다. 따라서 개폐식 대공간 건축물에 대한 국제적인 기술 우위를 확보하기 위해서는 개폐 구동장치와 관련된 기술 개발이 무엇보다 중요하다.

국내에 건설된 완전 개폐식 대공간 건축물은 거의 전무한 실정으로 특히, 구동시스템을 포함하는 최적화된 시공기술 분야에 대한 선진국의 시장 독점으로 야기되는 국내 기술의 해외기술 의존 및 종속 그로 인하여 막대한 로열티 지급이 발생함에 따라 관련분야 핵심기술의 개발이 시급한 실정이다.

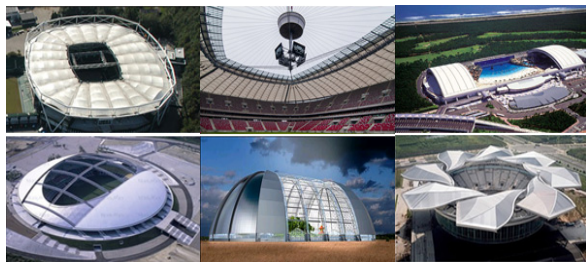
개폐식 구동시스템 및 최적화된 시공기술 개발은

* 정회원·한국건설기술연구원 연구위원

** 정회원·한국건설기술연구원 수석연구위원

극한환경에 대응 가능하고, 단시간에 이동 및 개폐 가능한 구조시스템을 활용하기 위하여 필요한 기술이며, 현재 세계적으로 연구 단계에 있으며, 새로운 선도적 자립형 기술 개발을 위해 국가적 차원의 연구개발 지원이 절실히 필요하다.

개폐식 대공간 구조물을 효과적으로 건설하기 위해서는 경량 재료의 활용 및 구조시스템의 개발과 이를 구현할 수 있는 최적화된 시공기술이 요구되며, <Fig. 1>은 시대 변화에 따른 대표적인 개폐식 대공간 구조물에 적용되고 있는 사례를 나타낸다.



<Fig. 1> Construction case for Retractable structures

본 연구에서는 개폐식 대공간 건축물은 구조형식, 지붕개폐방법, 구동장치, 마감재료 등에 따라 여러 가지 건설 형태로 구분할 수 있으며, 개폐 구조물의 구동장치와 시공기법이나 시공관리 차원에 있어서도 매우 고난도의 기술개발이 요구된다. 이에, 해외에서 시공된 대표적인 개폐방식에 따른 시공기술 사례를 기술하고자 하며, 현재 수행 중에 있는 하이브리드 구동장치 및 최적 시공 기법 개발 연구의 방향을 가늠하는데 활용하고자 한다.

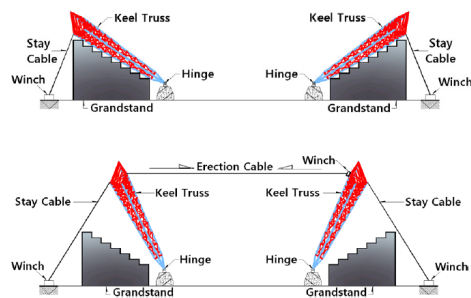
2. 최근 국내 대공간 시공 기술 현황

전 세계적으로 국민소득의 증가로 인해 문화수준의 향상, 레저 스포츠 등에 대한 관심이 증가되면서 경간 200~300m 전후의 대공간 구조물에 대한 관심과 수요가 한층 높아졌다.

우리나라도 올림픽, 엑스포, 월드컵 등의 각종 국제 행사를 주체하고 문화, 여가, 스포츠, 산업화 등에서 대공간 구조물에 대한 수요가 계속 증가되고

있는 실정이다. 대공간 구조물 중 개폐식 지붕을 갖는 구조물은 건설 시공 기술의 총집약체라고도 할 수 있다.

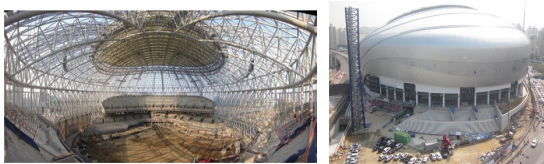
우리나라에서 개폐식 지붕구조물이 적용된 것은 대전월드컵 경기장이 처음으로 경기장에 잔디생육 등의 이유로 반개폐식 지붕이 채택되었으며, 이러한 반개폐식 지붕을 설계시공하는 과정에서 국내의 기술력으로 해결할 수 없어 해외 기술력의 지원을 받아 시공되었다.



<Fig. 2> Construction method of Narae Dome(Rotation-Up)

국내에 완전 개폐식 지붕이 도입된 것은 2012년에 준공된 한국기술교육대학교 나래돔 지붕이 처음으로 이 구조물은 건설교통기술평가원에서 국가연구개발사업의 일환으로 진행된 “대공간 건축물 건설 기술 개발” 과제의 파일럿 프로젝트로 건설된 것으로 나래돔 지붕은 각 분야에서 개발된 핵심 요소기술의 실용화 검증차원에서 초대형 돔 구조물의 300m 스패ن 규모의 10분의 1 스패의 대공간 구조물을 실제 제작 시공한 사례이다. 나래돔은 대공간 구조물의 축소형 구조물이지만 실증경험을 갖추었기 때문에 앞으로 관련 연구가 더 진행된다면 선진국 못지않은 충분한 기술력을 갖추는데 별 어려움은

없을 것으로 예상할 수 있다. 나래돔 지붕은 강성구조물로 구조체의 안전성 유지와 공기 단축, 고소작업 감소, 장비사용의 최소화, 가설 자재비 감소 및 인건비 절약에 유리한 Rotation-up 공법으로 시공되었다.



〈Fig. 3〉 Construction method of Gocheok Dome

국내 최초 돔 야구장으로 최근 준공된 고척돔의 구조시스템은 골조막 방식의 완전돔 구조로 돔야구장(22,258석), 수영장, 헬스장 등으로 사용할 수 있도록 설계·시공되었다. 고척돔은 협소한 대지조건으로 인한 조립 및 장비 이동경로 확보를 위해 Block 현장 지상 조립·시공하는 Bent 공법을 이용하여 시공하였다.



〈Fig. 4〉 Construction method of Arena Dome(Philippines)

한화건설이 Design-build 형태로 공사수주한 필리핀 아레나 돔경기장은 세계에서 가장 큰 규모의 Arena 구조물이다. 아레나 돔경기장의 주요 구조는 짧은 공기 내에 시공 가능한 공법으로 지붕의 조립 용이성을 위하여 Space Frame(Ball Connection) 선택하였다. 아레나 돔경기장의 시공기법은 지상에서 조립된 구조물을 양중장비를 이용해 설치하는 공법으로 골조 설치 소요시간의 손실을 최소화하기 위해서는 크레인 용량 산정에 주의가 필요하였다.

세계적인 대공간 건축물 관련 주요업체의 부재와 낮은 해외건설시장 점유율 보유하고 있던 우리나라도 최근 대공간 건축물 관련 기술의 해외시장 수출 사례가 있었다. 정부R&D ‘대공간 구조물 건설기술 개발’ 지원의 성과로 해외건설시장 진출의 초석이 되고 있다.

또한, 국내 기업의 해외건설 공사의 수익성 악화와 더불어 선진국의 사례로부터 일반구조물에 요소기술로 활발히 적용하고 있는 상황에서 새로운 건설시장 형성이 필요한 상황으로 특히 개폐식 대공간 건축물의 건설과 관련된 고부가가치의 엔지니어링 기술시장은 대부분 선진국에 선점하고 있는 상황에서 해외 의존적인 기술의 기술료 절감과 해외 시장에서의 기술경쟁력 확보 및 해외 건설시장 진출을 위해서는 관련 기반기술의 개발과 확보가 반드시 필요한 시점으로 판단된다.

3. 개폐식 대공간 시공 사례

강성개폐시스템은 철골로 된 지붕 전체를 몇 개의 파트로 나누어 이동 및 회전시키며 열고 닫는 방식이며, 연성개폐시스템은 막과 케이블을 이용하여 커튼과 같이 열고 닫는 방식이 주를 이룬다.

연성 막 개폐식은 대부분 부분개폐형식이며, 강성 개폐는 부분개폐와 완전개폐 형식 가능한 시스템이다. 개폐식 지붕구조 시스템은 조립·시공법이 구조 시스템별로 상이하여 고난도의 시공기술이 요구되며, 비용, 공기, 안정성 및 구조 및 개폐형식, 구동장치, 마감재료 고려한 최적화된 시공기법이 필요하다. 또한, 개폐형식, 시공방법, 구동시스템(장치/기구/제어) 고려한 시공기술이 요구되며, 일반 대공간 구조물과는 시공법이 상이하여 혁신적인 시공프로세스가 필요하며, 고난도의 시공기술이 요구되어진다. 이에 본 연구에서는 강성 및 연성 개폐 방식에 대한 대표적인 2가지의 시공기술에 대한 사례를 소개하고자 한다.

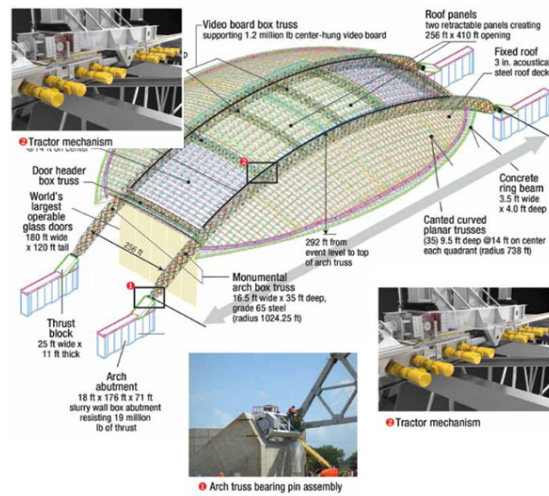
3.1 카우보이스 스타디움(Cowboys Stadium)

달러스 카우보이스 스타디움(Cowboys Stadium)은 “지붕에 구멍이 있는” 독특한 설계를 유지하면서 이전 홈구장보다 더 웅장하고 기술적인 면이나 환경적인 면에서 진보한 스포츠 경기장을 제공하도록 설계되었다. 이 밖에도 새 스타디움은 세계에서 가장 큰 단일경간 지붕 구조를 특징으로 하면서 지붕 층에 기계화된 방식이 추가되었다. 새 스타디움의 지붕에 있는 개구부를 닫을 수 있게 된 것이다.

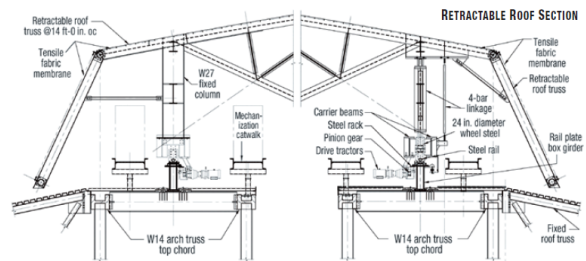


〈Fig. 5〉 Construction method of Cowboys Stadium

교대 사이 경간이 1,225피트에 달하는 높게 솟구친 한 쌍의 아치 박스 트러스에 의해 지탱되는 단일경간 지붕 구조물은 세계에서 가장 길다. 660,800 제곱피트에 달하는 스타디움의 지붕 역시 세계에서 가장 큰 돔형 구조물이다. 그리고 돔 상단을 가로질러 세로로 접이식 구간을 이루는 두 개의 반투명 패널은 불과 12분 만에 열리고 닫힌다. 엔드존 광장에 있는 작동식 유리문은 너비 180피트, 높이 120피트로 세계 최대를 자랑한다. 이 문은 5개의 가동 패널로 이루어져 있으며, 6분 안에 열리거나 닫힐 수 있다. 카우보이스 스타디움은 세계에서 가장 긴 단일경간 지붕 구조물로 교대 사이 경간이 1,225피트에 달하는 높게 솟구친 한 쌍의 아치 박스 트러스에 의해 지탱되어 있다. 각각의 아치 트러스는 세우는 데만 거의 5개월이나 걸렸다.



〈Fig. 6〉 Arch truss assembly & Tractor mechanism



〈Fig. 7〉 Retractable roof section

케이블 드럼, 도르래, 기타 기계화 장비의 무게는 거의 50만 파운드의 하중을 지붕 구조물에 더한다. 이 추가 하중은 전략적으로 지붕 구조물 내에 놓여 있으며, 하중 경로는 기존 트러스 설계에 통합되었다. 예를 들어 케이블 드럼은 아치 트러스에 놓여 있고, 케이블들은 두 아치 사이에 걸쳐 있는 박스 트러스 밑에 수평하게 놓여 있다. 케이블들은 필드 중심 위 한 점에 도달할 때까지 수평하게 계속 이어지며, 거기에서부터 도르래에 의해 수직 방향을 향하고 비디오 보드까지 아래로 계속 이어진다.

시공 중에 구조물에 내장된 잔류응력을 정확하게 다루는 컴퓨터 모델링을 통해 시공가설 프로세스도 연구하였다. 2차 단계별 시공 분석에는 중대한 가설 프로세스들이 모두 포함되었고, 주 아치 트러스, 임시 가설 가새, 고정된 트러스 시트 연결부에 있는 임시 가설 슬라이드 베어링이 원형 보에 미치는 영

향을 파악하였다.

세계에서 경간이 가장 긴 지붕을 시공하는데 가장 효율적인 시공 방법을 결정하였다. 가설 순서는 설계 초기 단계에 결정되었으며, 기술자의 분석 내용이 명확히 모델링되었기 때문에 비용이 낮아졌을 뿐 아니라 일정도 단축되었다.

시공 프로세스에는 임시 쇼어링 타워 6개에 각각의 아치를 가설하는 것이 포함되었다. 작업은 교대에서 시작되어 50야드 라인까지 진행되었다. 50야드 라인에는 가새 트러스 2개가 설치되었다. 그 다음 다른 교대로 작업이 옮겨졌고, 이 프로세스가 반복되었다. 남쪽 아치가 가장 먼저 완공되었고, 북쪽 아치에서 작업을 할 수 있도록 쇼어링 타워를 옮겼다. 각각의 아치 트러스는 세우는 데만 거의 5개월이나 걸렸다. 그 이후에 고정 지붕과 지붕판이 설치되었다. 중앙에서 고정형 지붕, 박스 트러스, 개폐식 지붕은 총 17개월이 걸려 완공되었다.

3.2 New National Arena, Bucharest (Romania)

케이블 지붕이 시공된 지도 60년이 지났다. 케이블 지붕은 미적 측면, 기술적 측면, 심지어 환경적 측면에서도 매우 매력적이다.

부쿠레슈티에는 루마니아의 유명한 여성 원반던지기 선수 Lia Manoliu의 이름을 딴 환상적인 새 국립경기장이 시공되었다. 55,000석 규모의 다가능 경기장에서 눈에 띄는 것 중 하나는 매우 섬세한 Filigree 케이블 막지붕이다.

바깥쪽 지붕은 좌석 구역을 영구적으로 덮고 안쪽 개폐식 지붕은 반투명 막구조로 이루어져 있어 단혔을 때에도 야외 경기장의 분위기를 자아낸다. 안쪽 지붕은 경기장을 덮으며 15분 이내에 열고 닫을 수 있어 어떤 기후 조건에서도 스포츠 경기를 할 수 있다.

VSL Heavy Lifting은 케이블 넷 구조물을 인양하고 인장을 가하는 작업을 수행하였다. 바깥쪽 지붕에는 지름 135mm 이하 방사상 케이블이 3개

층 있다. 이들은 플라이 마스트(Flying mast)의 형태로 지주에 의해 떨어져 있는 2개의 압축 링을 고정한다. 안쪽 지붕의 2개 층은 모두 중앙에 있는 단일 중앙 노드에, 그리고 바깥쪽 압축 링 2개에 연결되어 있다. 각각의 케이블 층은 방사형 케이블 40개로 이루어져 있다. 스트랜드의 총량은 92톤이었고, 최대 고정력은 507톤이었으며, 설치된 총 인장 용량은 16,000톤이었다. 케이블 넷의 무게는 위쪽 케이블만으로는 전체 구조물을 들어 올릴 수 없는 정도이었다.



〈Fig. 8〉 The cable net structure was laid out before the lifting operation

VSL Heavy Lifting은 의뢰자 및 설계자와 긴밀히 협력하여 특별한 인양 프로세스를 개발하였다. 위쪽과 중간 케이블 층을 동시에 들어올렸다. 이때 총 80개의 방사형 케이블이 압축 링에서부터 당겨졌다. 위쪽 방사형 케이블이 고정된 후 중간층의 인장작업이 계속되었다.

VSL 표준 시공 지침에 따라 중앙제어소에서 모든 힘들을 모니터링하여 이를 모든 단계에서 얻은 계산값과 비교하였다. 인양 및 인장 절차 내내 힘은 예상한 대로 발생되었다. 플라이 마스트를 설치하고 아래쪽 방사형 케이블을 고정시킬 수 있게 계획된 중간 스톱퍼는 요구되는 정확한 위치에서 이루어졌고 진행은 매끄럽게 이루어졌다.

최종 케이블이 고정된 직후 멤브레인 설치와 Heavy Lifting 장비의 제거가 동시에 시작되었다.

마지막으로, 케이블 네트가 펼쳐져 있던 좌석 열의 틈새는 루마니아의 국가상징색으로 칠해 진 시트로 채워졌다.

새 국립 경기장은 2012년 UEFA 유럽축구챔피언십 예선 프랑스전을 위해 2011년 9월 7일 개장되었다.



〈Fig. 9〉 The cable net structure in its final position



〈Fig. 10〉 Installation of the strand jacks at the pressure ring

4. 개폐식 대공간 구조물 향후 전망

현재 활발한 대공간 구조물이 실현되고 있는 국가 중에서 연성 막재료를 이용하여 개폐형구조물을 실현하고 있는 독일의 경우 스타디움뿐만 아니라 다양한 구조체에 접근하여 새로운 기술을 창출하고 있다.

첨단 소재의 국산화, 설계엔지니어링의 고부가가

치화, 시공기술의 첨단화 등의 효과는 건설 산업의 혁신적인 변화를 가져올 것이며, 에너지의 자급자족과 지속가능한 친환경 공간 제공으로 삶의 질을 높일 수 있을 것이다.

국제적 건설흐름은 건축물의 대규모화, 고도 산업사회의 복잡화, 기술의 고도화, 국제화, 지구환경 보존, 에너지 자족 등에 부응하는 방향으로 초점을 맞추게 될 것으로 예상된다. 스펜 규모에 따라 대공간 건축의 용도는 첨단 건물로 지화하고 있으며, 300m 이상의 스펜을 갖는 대공간의 실현, 스포츠 콤플렉스, 테마 파크 등에 대한 대공간의 축조, 거대한 쓰레기 처리시설 및 정밀 공장건설을 위한 차폐 건축물, 기후변화에 영향을 받지 않고 4계절 동안 작업이 가능한 조선소와 같은 대공간 건축물, 우주 공장의 공간을 실현하기 위한 미래 우주 건축물, 해저도시 실현하기 위한 해상건축물 및 플로팅 돔 시티, 극한지 건설 등의 방향으로 대공간 건축물이 발전하게 될 것으로 예측된다.

5. 결론

국내에 건설된 완전 개폐식 대공간 건축물은 설계 및 시공은 거의 전무한 실정으로 특히, 구동시스템을 포함하는 최적화된 시공기술 분야에 대한 선진국의 시장 독점으로 야기되는 국내 기술의 해외 기술 의존 및 종속으로 인하여 막대한 로열티 지급이 발생함에 따라 관련분야 핵심기술의 개발이 시급한 것으로 생각된다. 개폐식 구동시스템 및 최적화된 시공기술 개발은 극한환경에 대응 가능하고, 단시간에 이동 및 개폐가 가능한 구조시스템을 활용하기 위하여 필요한 기술이며, 현재 세계적으로 연구 단계에 있으며, 새로운 선도적 자립형 기술 개발을 위해 국가적 차원의 연구개발 지원이 절실히 필요한 상황인 것으로 판단된다. 또한, 국내 기업의 해외건설 공사의 수익성 악화와 더불어 선진국의 사례로부터 일반구조물에 요소기술로 활발히 적용하고 있는 상황에서 새로운 해외 시장에서의 기술

경쟁력 확보 및 해외 건설시장 진출을 위해서는 설계·시공 관련 기반기술의 개발과 확보가 반드시 필요한 시점이라 할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 학술기사는 국토교통부 도시건축사업(과제번호: 15AUDP-B100343-01)의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. G ppert K., Stein M., "A spoke wheel roof for the World's largest convertible roof", The new Commerzbank Arena in Frankfurt, Germany. Structural Engineering International, 4/2007. pp.282-287.
2. Ishii K., "Structural Design of Retractable Roof Structures", WIT Press, 2000.
3. Le Cuyer A., "ETFE Technology and Design", Birkh usser Verlag AG, 2008.
4. Bart Riberich, SE, "Retractable Stadium Roofs and Flooring", JANUARY 2009
5. Motoi MASUBUCHI, "CONCEPTUAL AND STRUCTURAL DESIGN OF ADAPTIVE MEMBRANE STRUCTURES WITH SPOKED WHEEL PRINCIPLE - FOLDING TO THE PERIMETER", vorgelegt von Master of Science, Berlin 2013.
6. John A. Gimblette, P.E., Associate, Hardesty & Hanover, LLP, "MILLER PARK - CLOSING THE CHAPTER ON RETRACTABLE ROOF PROBLEMS", HEAVY MOVEABLE STRUCTURES, INC. 12TH BIENNIAL SYMPOSIUM, November 3-6, 2008.
7. Iago GONZ LEZ QUELLE, "Cable Roofs Evolution, Classification and Future Trends", Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, pp.264-275.
8. VSL (Switzerland) Ltd., "Heavy Liftin g opened New National Arena, Bucharest-Romania, Lifting the cable net for a membrane roof", 2011(www.vsl-heavy-lifting.com).
9. R.John Aniol, P.E., Joseph Dowd, P.E., "Superspan(Cowboys Stadium, in Dallas)", Civil Engineering Journal, 2010.