

개폐식 대공간 구조물의 현황과 전망

The Present and Future of Retractable Roof Structures



강 주 원*
Kang, Joo-Won



김 기 철**
Kim, Gee-Cheol



김 현 수***
Kim, Hyun-Su



석 근 영****
Seok, Keun-Young

1. 서 론

전 세계적으로 국민소득의 증가로 인해 문화수준이 향상되고 레저, 스포츠 등에 대한 관심이 증가되면서 경간 200m-300m 전후의 대공간 구조물에 대한 관심과 수요가 한층 높아졌다. 우리나라도 올림픽, 엑스포, 월드컵 등의 각종 국제 행사를 주최하고 문화, 여가, 스포츠, 산업화 등에서 대공간 구조물에 대한 수요가 계속 증가되고 있는 실정이다. 대공간 구조물 중 개폐식 지붕을 갖는 구조물은 건설기술의 총집약체라고도 할 수 있다. 우리나라와 같이 4계절의 기후변화에 능동적으로 대처하고, 환기, 채광 등의 에너지 절감 및 친환경적 공간창출을 위해 개폐식 대공간 구조물의 수요가 증가하고 있다. 1961년 완성된 미국 피츠버그 오디트리움을 시작으로 미국, 일본, 유럽 등의 선진국을 중심으로 개폐식 대공간 구조물이 다수 건설되고 있다. 그러나 국내에서는 개

폐식 대공간 건축물 뿐만 아니라 돔형 대공간 건축물도 아직 본격적으로 건설되고 있지 못하고 있는 실정이다. 이에 본 기사에서는 개폐식 대공간 구조물의 현황과 앞으로의 전망에 대해서 살펴보고자 한다.

2. 국내 대공간 구조물의 현황

국내 대공간 구조물의 본격적인 시작은 1986년 아시안게임 개최에 맞추어 개관한 올림픽 체조경기장과 펜싱경기장이다. 이들 구조물은 세계 최초로 케이블 돔이라는 새로운 구조 형식으로 만들어졌다. 그 후 1993년의 대전 EXPO에서는 다양한 경량 구조 시스템이 선보였고, 이후 2002년 월드컵 경기 개최로 인해 10개의 경기장이 신축되었다. 여기에는 대규모 지붕을 만들기 위해 다양한 구조시스템이 등장하였고, 한국의 건축 구조 개념의 획기적인 발전을 이루게 된 계기가 되었다. 현재 대중 스포츠의 활성화에 맞춰 구로구 고척동에 서남권 돔 야구장이 공사 중에 있고, 프로야구 제10구단이 발족됨에 따라 수원에 돔구장 건설 계획이 발표된 바 있다. 이뿐 아니라 지방자치단체에서 운영 중인 실내체육관들 중

* 정회원, 영남대학교 건축학부, 교수
** 정회원, 서일대학교 건축과, 부교수
*** 정회원, 선문대학교 건축학부, 부교수
**** 정회원, 영남대학교 공업기술연구소, 연구교수

노후하여 리모델링 시점이 도래한 건축물이 상당수 있으며 서울 장충체육관이 전면 리모델링 공사 중에 있다. 그리고 공설운동장도 전천후 사용가능한 시설물로 개조할 필요성이 점점 높아지고 있는 반면, 잔디의 생육, 공간의 개방성, 에너지저감 등의 이유로 개폐식 지붕의 필요성은 더욱 높아지고 있다.

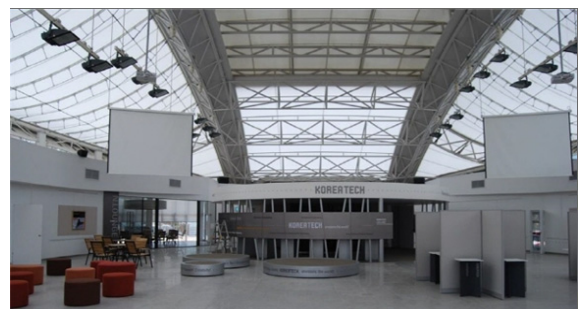
이러한 대공간 구조물의 용도는 대규모의 전시, 유통, 레저 및 체육시설 등 점차 확대되는 추세이고 이러한 예로는 광명경륜돔, 부산 컨벤션센터(BEXCO), 일산의 한국국제전시장(KINTEX), 대구 컨벤션센터(EXCO Daegu), 제주도의 국제컨벤션센터(ICCJEJU) 등이 있다. 이러한 시설물들에서도 향후 개폐식 지붕을 설치하여 친환경적이고 개방적인 공간의 필요성이 점차 높아질 것이다.

2.1 국내 개폐식 대공간 구조물의 현황

우리나라에서 개폐식 지붕구조물이 적용된 것은 일부 무도장이나 소규모 이벤트 홀 등을 제외한다면, 대전월드컵 경기장이 처음이다. 대전월드컵 경기장에 잔디생육 등의 이유로 반개폐식 지붕이 채택되었으며, 전면 돔구장에 채택된 것은 아니다. 특히 이러한 반개폐식 지붕을 설계·시공하는 과정에서 국내의 기술력으로 해결할 수 없어 해외 기술력의 지원을 받을 수 밖에 없었다. 국내에 완전한 개폐식 지붕이 도입된 것은 2012년에 준공된 한국기술교육대학교 나래돔 지붕이 처음이다. 이 구조물은 건설교통기술평가원에서 국가연구개발사업의 일환으로 진행하였던 ‘대공간 건축물 건설기술 개발’ 과제 진행 중 파일럿 프로젝트로 건설된 것으로서, 각 분야에서 개발된 핵심 요소기술의 실용화 검증을 위해 초대형 돔구장인 300m 스패급 구조물의 10분의 1인 30m 스패의 대공간 구조물을 실제 제작해 시공한 것이다. 나래돔 지붕구조에는 철골 길아치, 막구조, 격자형 케이블 형식의 지붕구조물에 텐서닝 에어버미 시스템을 사용한 슬라이딩 방식의 개폐형 지붕구조가 채택되었다.

우리나라에 개폐식 돔구장이 건립된 사례가 없었

고 다른 용도의 구조물에도 개폐식 지붕형식이 사용되는 사례가 극히 적었기 때문에 현재 우리나라에서 전문업체는 없다고 할 만큼 열악한 상황이다. (주)스판코리아에서 개폐식 지붕의 시공을 하고는 있으나 이 회사에서 시공하는 개폐식 지붕은 대공간 구조물이 아닌 소규모 개폐식 지붕으로서 주로 슬라이드형과 폴더형이며 본 연구에서 추구하는 바와는 아직까지 기술적으로 거리가 멀다. (주)동아스트에서는 대공간 건축물 건설기술연구의 일환으로 건립된 한국기술교육대학교 나래돔 지붕구조물을 시공하였으며, 이 구조물의 지붕은 개폐식 지붕으로서 슬라이딩공법이 적용되었다. 이 개폐식 돔은 열릴 때는 중력에 의하여, 닫힐 때는 모터에 의하여 구동하는데, 비록 대공간 구조물의 축소형 구조물이지만 일단 시공경험을 갖추었기 때문에 앞으로 관련 연구가 더 이루어진다면 기술력을 갖추는 데는 그다지 어렵지 않을 것으로 예상된다. 현재까지는 국내에 개폐식 대공간 건축물이 건설되지 않았기 때문에 관련 산업의 발전이 없었던 것으로 볼 수 있으나, 앞으로 연구개발이 되고 국내에 개폐식지붕의 채택이 빈번해지고 본 연구의 결실로서 해외시장에까지 진출까지 한다면 국내 산업의 발전에 충분한 밑거름이 될 것이다.



〈그림 1〉 국내 최초 개폐식 지붕구조물 나래돔

2.2 국내 대공간 건축물 건설관련 기술 및 연구 동향

건설교통기술평가원의 국가연구개발사업으로 2006년 9월부터 2011년 말까지 5년 3개월동안 총 6차년도에 걸쳐 진행된 ‘대공간 건축물 건설기술 개발’ 연구사업이 있기 전까지는 대공간 건설기술(설계 및 시공)이 선진국에 비해 상대적으로 뒤쳐진 것으로 평가받고 있었다. 그러나 이 국가과제를 통해 국내 대공간 건설 관련 산업의 기술력이 전반적으로 향상됨으로 인해, 2002년 월드컵 경기장 건설 시 지붕의 설계와 시공을 해외기술력에 의존하였던 것이 반전되어 이제는 해외시장에까지 진출하게 되었다.

2011년 8월, 한화건설과 (주)CS구조엔지니어링에서는 선진국과의 경쟁을 뚫고 필리핀의 필리핀 마닐

라 아레나(Manila Arena) 돔구장 설계 및 시공을 수주하였다. 필리핀 마닐라 아레나 돔구장은 너비 250m, 폭 150m, 높이 40m, 수용인원 5만여명으로 지어지며 시공비 1700억원이다. 이는 연구 기간 중 300m 스패의 대공간 건축물 설계 및 시공에 필요한 요소기술에 대한 개발을 진행했기에 가능한 일이었다. 이를 통해 우리나라가 돔 구장과 같은 대공간 건축물의 건설기술을 확보하고, 국내는 물론 해외에서도 선진국과 대등한 위치에서 경쟁을 할 수 있는 기반이 마련됐다고 볼 수 있다. 이러한 연구가 없었다면 지붕구조물 설계 및 시공을 외국 기술에 의존해야 하였을 것을 순수한 국내 기술로 구로구 고척동에 건설중인 서남권 야구장 지붕을 설계 및 시공을 하고 있다. 이와 같이 대공간 건설기술은 국가의 과

〈표 1〉 세계 대공간 건축물의 지붕 형태 (5만명 이상)

(출처: <http://en.wikipedia.org>)

Stadium	Capacity	City	Country	Domed or Retractable Roof
Cowboys Stadium	80,000	Arlington, Texas	USA	RR
Millennium Stadium	74,500	Cardiff	Wales	RR
University of Phoenix Stadium	73,719	Glendale, Arizona	USA	RR
Mercedes-Benz Super dome	72,968	New Orleans, Louisiana	USA	D
Reliant Stadium	71,500	Houston, Texas	USA	RR
Georgia Dome	71,228	Atlanta, Georgia	USA	D
Lucas Oil Stadium	70,000	Indianapolis, Indiana	USA	RR
Esprit Arena	66,500	D sseldorf	Germany	RR
Montreal Olympic Stadium	66,308	Montreal, Quebec	Canada	D
Edward Jones Dome	66,000	St. Louis, Missouri	USA	D
Alamo dome	65,000	San Antonio, Texas	USA	D
Ford Field	65,000	Detroit, Michigan	USA	D
Hubert H. Humphrey Metro dome	64,111	Minneapolis, Minnesota	USA	D
Stadion Narodowy	58,145	Warszawa	Poland	RR
Etihad Stadium	56,347	Melbourne	Australia	RR
Stadionul Național	55,600	Bucharest	Rumania	RR
Tokyo Dome	55,000	Tokyo	Japan	D
BC Place	54,500	Vancouver, British Columbia	Canada	RR
Friends Arena	54,329	Solna, Stockholm	Sweden	RR
Safeco Field	54,097	Seattle, Washington	USA	RR
Veltins-Arena	53,951	Gelsenkirchen	Germany	RR
Sapporo Dome	53,845	Sapporo	Japan	D
T rk Telekom Arena	52,647	Istanbul	Turkey	RR
Commerzbank-Arena	52,300	Frankfurt	Germany	RR
Rogers Centre	52,230	Toronto, Ontario	Canada	RR
Amsterdam ArenA	51,628	Amsterdam	Netherlands	RR
LTU Arena	51,500	D sseldorf	Germany	RR
Stade Borne de l'Espoir	50,186	Lille	France	RR

감한 R&D 투자로 인해 관련 산업 경쟁력을 짧은 시간에 선진국을 추격할 수 있는 기반을 조성하였다는 데에 큰 의미를 부여할 수 있을 것이다.



〈그림 2〉 필리핀 마닐라 아레나(Manila Arena) 돔구장

반면, 개폐식 지붕의 설계 및 시공 현황은 아직은 매우 더딘 상태이다. 지금까지 이렇다 할 개폐식 대공간 구조물이 우리나라에 건설된 바가 없으며, 따라서 관련 연구 및 산업도 선진국에 비해 많이 뒤쳐져 있다고 볼 수 있다. 아직까지 우리나라에서 개폐식 돔을 적용한 사례가 없기 때문에 지금까지 이와 관련한 연구는 거의 없었다고 해도 과언이 아니다.

3. 해외 개폐식 대공간 구조물의 현황 및 기술동향

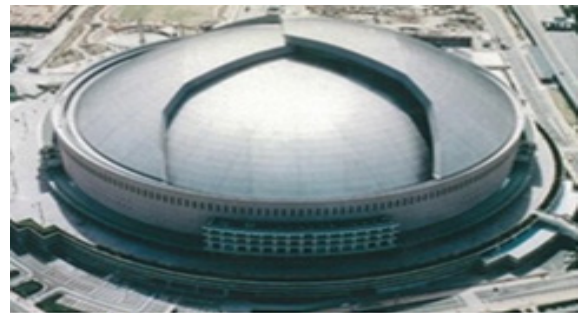
세계적인 대공간 건축물의 건설사례를 살펴보면 대다수의 나라에서 개폐식 대공간 건축물을 건설하는 추세에 있으며 스타디움과 같은 관람객 30,000명 이상의 대규모 대공간 건축물의 경우에는 대부분이 개폐식 지붕구조를 갖는 대공간 건축물을 건설하고 있다. 일본, 독일 및 미국 등과 같이 대공간 건축물의 기반기술을 확보한 나라에서는 개폐식 대공간 건축물에 대한 많은 시공 경험을 바탕으로 관련 분야에 있어서 기술 경쟁력 우위를 차지하고 있다. 일본과 같이 대공간 구조물 건설기술이 발달한 나라에서는 개폐식 돔과 같은 개폐식 지붕 구조물이 상당히 보편화되어 있으며, 운영 및 유지관리 분야에서도 실적을 통하여 노하우를 가지고 있는 반면, 우리나라는 소규모 돔 실적만 있을 뿐이다.



(a) 수평이동 - 중첩방식



(b) 상하이동 - 중첩방식



(c) 회전이동 - 중첩방식



(d) 주름접기방식

〈그림 3〉 다양한 개폐방식

개폐식 지붕구조물은 그 개폐방식에 따라 중첩방식(重盤方式 : overlapping system), 수평이동방식(水平移動方式 : parallel movement system), 조합방식(組合方式 : mixed system), 주름접기방식(folding system) 등의 네 가지로 크게 나눌 수 있다.

현재 활발한 대공간 구조물이 실현되고 있는 나라 중에서 연성 막재료를 이용하여 개폐형 구조물을 실현하고 있는 독일의 경우 스타디움 뿐만 아니라 다양한 구조체에 접근하여 새로운 기술을 창출하고 있다. 캐나다 몬트리올 올림픽 스타디움에서 최초로 시공하였던 접힘/펼침 구조 메커니즘을 가지고 있는 케이블 하이브리드 개폐구조시스템은 프랑크푸르트 코마츠뱅크 아레나에도 적용되었고, 폴란드 바르샤바의 국립 운동장에도 적용된 시스템이다. 강성 구조시스템에 비해 매우 효과적으로 펼칠 수 있는 장점이 있으며, 국제적인 규모의 스타디움과 중소규모의 운동장 및 집회장에도 적용이 가능하다.



〈그림 4〉 게리웨버 스타디움 (연성 개폐식)



〈그림 5〉 Esprit Arena 전경 (강성 개폐식)

Gerryweber Station은 실내 스포츠 경기장으로 독일의 Halle, North Rhine-Westphalia에 위치해 있으며, 경기장의 수용력은 12,300명이며, 1992년에 첫 개장을 하였다. 경기장은 88초 안에 닫히는 개폐식 지붕을 가지고 있기 때문에 비가 내리기 시작해도 테니스 경기를 계속 할 수 있다. 사용된 막재의 경우 ETFE라는 기존의 막재와는 다른 초경량 재

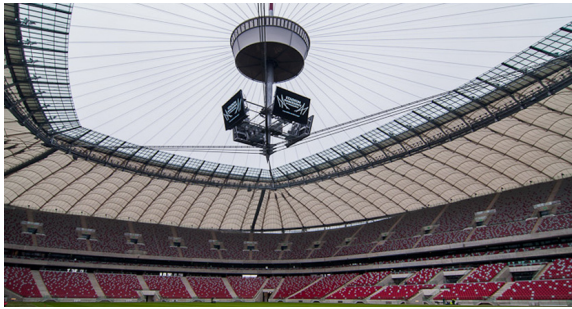
료를 외장재로 사용된다.

코마츠뱅크 아레나는 독일의 프랑크푸르트에 위치한 스포츠 경기장으로 그림에서 보는바와 같이 접이형 막구조물이지만 게리웨버 스타디움과는 달리 스포크 휠 케이블 구조물에 인베디드 된 막구조이며, 막구조 내부의 형상은 초기장력이 유지된 채로 구조체의 역할이 가능하며, 이것은 게이웨버 스타디움의 경우와는 다른 형식이다. 일반적으로 원래 이름인 Waldstadion으로 알려져 있으며, 1925년에 오픈하였다. 경기장은 오픈한 이래로 여러 번 업그레이드를 거쳐왔으며, 가장 최근의 리모델링은 2005 FIFA Confederations Cup과 2006 FIFA World Cup 준비에 필요한 축구전용 경기장의 재개발이었다. 리그 경기에서 51,500명의 관중을 수용할 수 있으며, 미식축구와 국제 축구경기에 있어 48,500명의 관중을 수용할 수 있다. 현재의 설계는 함부르크 건축가인 Gerkan과 더불어 슈투트가르트의 엔지니어인 Schlaich와 Marg and Partners가 협업을 통해 2002년부터 2005년까지 2006 FIFA 독일 월드컵을 위해 진행되었다. 스탠딩 석은 대개 좌석으로 변경되면서 48,500명의 관중을 수용할 수 있는 공간으로 변경되며, 최대 65,000명을 수용할 수 있는 공간으로 변화 가능하다. 경기장은 길이 210m, 폭 190m, 그리고 총 바닥면적 110,000m²와 더불어 480,000m³의 밀폐된 공간도 포함된다.

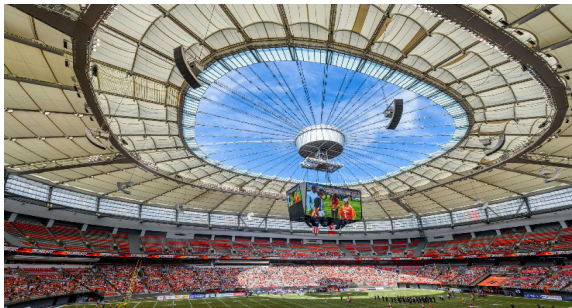
개폐형 지붕은 스포크와 림이 장착된 37,500m²에 이르는 대형텐트로 구성되며, 3,000톤의 지붕하중은 와이어케이블을 통해 44개의 주 기둥과 경기장 외벽의 외측압축링에 의해 지지된다. 내부의 지붕은 9,000m²의 전체보드로 덮어, 세계에서 가장 큰 강철 케이블 막구조물로 발표되었고, 세계에서 가장 큰 변환 가능한 구조물이라고도 불리고 있다. 테플론으로 코팅된 폴리에스테르 섬유로 제조된 지붕은 개폐되는데 게리웨버 스타디움에 비해 빠르고 간단하게 작동된다. 지붕공사의 비용의 경우 알리안츠 아레나의 반 정도에 해당되는 비용으로 시공되었다. 이 개폐식지붕은 밴쿠버 스타디움, 바르샤바 스타디움도



〈그림 6〉 코마츠뱅크 아레나



〈그림 7〉 바르샤바 국립경기장



〈그림 8〉 캐나다 BC 스타디움

우 큰 스타디움에서 적용되는 기계구조를 소형 또는 중형구조물로 가져오기 위한 기술의 격차는 비용면에서 감당하기 어려운 면이 있으나 연성구조물의 경우 재료의 가벼움으로 인해서 구조체의 면적이 증가하더라도 비교적 쉽게 기술이 적용되는 장점이 있다. 또한 형상의 가변성은 프레임형 구조물에 비해서 매우 아름다운 곡선을 형성할 수 있기 때문에 건축적 의미도 또한 부여될 수 있을 것이다.



〈그림 9〉 학교 중정을 활용한 무대시설



〈그림 10〉 일방향 경량 접힘구조

거의 유사하다.

독일에서의 경량막재를 이용한 다양한 시스템의 개발이 가능한 이유는 포크 휠 시스템과 같은 케이블 돔 구조물의 발전이 이미 오랜 기간 동안 이루어졌었고, 기계적 요소에 대한 건축적 활용용도가 많았기 때문으로 생각된다. 이러한 결과로 뮌헨이나 오스트리아, 이태리 등에 수출되고 있는 기술의 활용도는 소규모 건축물에서 중규모 또는 대규모에 이르기 까지 기술의 정도를 분류하여 이용되고 있다. 특히 실외 극장의 활용은 매우 인상적이며, 축사와 같은 구조체에도 막재의 접힘성질을 이용한 응용은 무한한 가능성을 가지게 한다. 개폐형 구조물의 경

4. 개폐식 대공간 구조물의 전망

미국의 Bank One Ballpark(1998년) 건설을 시작으로 북미에서는 Safeco Field, Minute Maid Park, Miller Park, Reliant Stadium과 같은 개폐식 대공간 건축물이 대대적으로 건설되기 시작했다. 개폐식 대공간 건축물의 건설을 위해서는 모든 부분에 대한 엔지니어의 이해와 비용적인 측면을 고려하여 설계가 이루어져야 할 것이다. 또한 계획, 구조, 설비, 시공 등 다양한 분야의 엔지니어의 전문적인 지식과 유기적인 통합으로 협력이 이루어져야 할 것이다. 개폐식 대공간 건축물과 관련된 기준의 제정이전에

관련 업체의 협회가 구성되어 건설과 관련된 다양한 기술의 표준화를 이루어야 할 것이다. 국내에는 개폐식 대공간 구조물에 대한 시공 사례가 거의 전무한 실정이나 향후 그 수요는 점점 증가할 것으로 예상된다. 따라서 시공성, 경제성, 안정성 등 기술경쟁력 확보를 위한 개폐식 대공간 건축물에 대한 원천 기술과 요소기술 개발이 절실히 필요하다. 개폐식 대공간 건축물 분야의 신기술 개발은 건설기술 발전을 위한 필수적인 과제이다. 기존의 노동력 중심의 해외 건설시장 참여는 경제성장과 함께 점차 경쟁력을 잃고 있다. 이러한 국제 경쟁력 약화의 타개책 및 고용창출과 고급 기술인력 양성에 대한 시발점으로 건설 분야의 첨단 분야라 할 수 있는 개폐식 대공간 건축물 건설기술 개발이 절실히 요구된다.

국제적 건설흐름은 건축물의 대규모화, 고도 산업 사회의 복잡화, 기술의 고도화, 국제화, 지구 환경 보존 등에 부응하는 방향으로 초점을 맞추게 될 것이다. 건축물의 대규모화를 위해서는 200m-500m 스패를 갖는 대공간의 실현, 스포츠 콤플렉스, 테마파크 등에 대에 필요한 우주 대공간의 축조, 거대한 쓰레기 처리시설 및 정밀 공장건설을 위한 차폐 건축물, 우주 스테이션이나 우주 공장의 공간을 실현하기 위한 미래 우주 건축물, 해상도시 및 해저도시를 실현하기 위한 해상 건축물, 대규모 핵 피난시설이나 환경오염으로부터 인류를 지키기 위한 환경 건축물 등의 방향으로 대공간 건축물이 발전하게 될 것이며, 국가 전략차원에서 이 분야에 대한 관심이 높아져야 될 단계이다. 국가차원의 체계적인 연구개발정책에 있어서는 대공간 건축물의 핵심기술 개발, 대공간 건축물의 전문성을 보유한 전국적 연구단체 및 전문 연구진의 육성, 대공간 건축물을 주요사업으로 하는 고급기술중심 전문건설업체의 지원, 기술선진국과의 효과적인 공동연구 및 기술자문 등이 요구된다.

5. 결 론

미국, 일본을 비롯한 건설분야 선진국의 대다수 나라에서는 스타디움과 같은 대규모의 공간 건축물의 경우에 대부분이 개폐식 지붕구조를 갖는 대공간 건축물을 건설하고 있다. 그러나 국내에 건설된 완전 개폐식 대공간 건축물은 거의 전무한 실정이므로 해당 분야에 대한 기술 선진국의 시장선점(독점)으로 야기되는 국내 기술의 해외기술 의존 및 종속으로 인하여 막대한 로얄티 지급이 발생함에 따라 관련분야 핵심기술의 개발이 시급한 실정이다. 국토교통 기술수준조사 보고서를 보면 대공간 건축물분야의 기술 선진국은 미국, 일본 등은 성숙기이나 한국은 아직 성장기로서 추격형 기술이며 개폐식 대공간 구조물의 경우에는 그 격차가 더욱 크다고 할 수 있다. 따라서 선진국이 주도하고 있는 개폐식 대공간 구조물 건설관련 기반기술에 대한 추격과 동시에 저개발국가에 대한 수출 가능성이 높고 보다 다양한 시장이 존재하는 중소규모 개폐식 지붕구조시스템을 집중 개발하는 등의 효율적인 전략이 필요할 것이다. 특히 우리나라가 국제적인 경쟁력을 가지고 있는 ICT기술과 개폐 구동방식, 안전도 모니터링 및 스마트 구조제어 기술을 융복합한다면 효과적인 경쟁력 향상을 기대할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 기사는 국토교통부 국토교통연구기획사업의 지원 (과제번호14RDPP-C074964-01)에 의해 작성되었습니다.

References

1. Kazuo Ishii, Structural Design of Retractable Roof Structures, WIT Press, 2000
2. 김승덕, "대공간 구조물의 연구 동향," 한국강구조학회지, 제7권, 3호, 1995.9, pp.78-81.
3. 한상을, "대공간 구조물의 구조적 특성 및 현황,"

- 대한건축학회지, V.39, N.8, 1995.
4. 정환목, “스페이스 프레임 구조의 구조적 특성 현황,” 한국강구조학회지, 제8권 2호, 1996, pp.49-58.
 5. 박선우, 지붕구조시스템, 세진사, 2000.
 6. 강주원, 정찬우, “대공간 건축물의 형태별 지진거동 특성,” 한국공간구조학회지 학술기사, 제8권, 1호, 2008, pp.5-12.