

# 연성개폐 지붕구조물 Erection 시공법에 관한 사례 연구

## The Case Study on the Erection Construction Method for Soft Retractable Roof Structures

박 금 성\*  
Park, Keum-Sung

김 형 도\*\*  
Kim, Hyung-Do

곽 명 근\*\*  
Kwak, Myong-Keun

### Abstract

Lifting plan in the large spacial structure is an important factor influencing the efficiency and economy of the construction process. The purpose of this study was deriving the requirements for lifting techniques as the basic research in the double spoke wheel roof structure construction. In the lift up erection method, management plan of the interference error in the column and outer-ring was needed that occur during lifting roof structure. In the bent erection method, material usage reduction plan was required by the structural design of the temporary bent. In the hybrid erection method, lifting plan was needed that minimizes weather condition and crane usage. All lifting techniques were required Value Engineering model for reduction of cost and construction period.

*Keywords : Large spatial structure, Retractable roof structure, Double spoke wheel, Erection*

## 1. 서론

지붕이 개폐되는 개폐식 지붕구조시스템은 크게 연성구조시스템과 강성구조시스템으로 분류할 수 있다. 강성개폐 지붕구조시스템은 철골로 된 지붕 전체를 몇 개의 파트로 나누어 각 피스별로 이동 및 회전시키며 열고 닫는 방식이며, 연성개폐 지붕구조시스템은 주로 막과 케이블을 이용하여 커튼과 같이 열고 닫는 방식이 주를 이룬다. 현재까지 건설된 개폐식 지붕구조물은 상기 지붕구조시스템을 적용 또는 응용한 것들이 대부분이다.

개폐식 지붕구조물은 개폐를 통해 다양한 공간 활용성을 가지는 친환경적인 대공간 지붕구조시스템이다. 기존의 대공간 지붕구조시스템과는 달리 개폐되는 지붕구조물의 개폐 형태와 개폐방법 및 이에 따른

구조안전성, 환경설비제어, 시공, 유지관리 등의 특성을 고려하여 건설되어지는 구조물로 정의할 수 있다.

본 연구에서 추구하는 연성 개폐식 지붕구조물의 건설 시공기술 자립화를 통한 해외시장 진출의 목표를 실현하기 위해서는 개폐를 목표로 하는 구조적인 특성으로 인하여 구동장치가 반드시 갖추어져 있어야 한다. 이는 일반 구조물에서 찾을 수 없는 특화된 기술과 개폐식 지붕구조물의 구동 특성이 고려된 프로젝트마다 그에 적합한 개선된 시공기술이 요구된다.

국내에 건설된 완전 개폐식 대공간 지붕구조물은 전무한 실정으로 특히, 연성개폐 장치를 고려한 최적화된 지붕구조물의 시공기술 개발에 대한 시공분야 핵심기술의 개발이 시급한 실정이다.

또한, 연성 개폐식 지붕구조물에 대한 최적화된 시공기술 개발은 극한환경에 대응 가능하고, 단시간에 이동 및 개폐 가능한 지붕구조 구조시스템을 활용하기 위하여 필요한 기술이다. 현재 세계적으로 연구 초기단계에 있으며, 새로운 선도적 자립형 시공기술 개발을 위한 지속적 연구가 필요한 시점이다.

본 연구에서는 연성 개폐식 대공간 지붕구조물의

\* 교신저자, 한국건설기술연구원, 건축도시연구소, 연구위원  
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Building and Urban Research Institute  
Tel: 031-910-0370 Fax: 031-910-0392  
E-mail: kspark1@kict.re.kr

\*\* 공동저자, 한국건설기술연구원, 건축도시연구소, 수석연구원  
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Building and Urban Research Institute

다양한 구조형식 중에서 막과 케이블 및 강재로 구성된 더블스포크 휠 구조시스템을 이용하여 연성막 개폐형태를 갖는 대공간 지붕구조물의 최적화된 시공법 제안을 목표로 하였다. 연성개폐 지붕구조물은 구동장치나 시공기법이나 시공관리 차원에 있어서도 매우 고난도의 기술개발이 요구된다.

본 연구 내용으로서 국내·외에서 시공된 대표적인 연성개폐 방식에 따른 시공프로세스 등의 사례를 종합적으로 조사·검토하였다<sup>1)2)</sup>. 또한, 더블스포크 휠 연성개폐 지붕구조물에 적용 가능한 3가지 시공법의 대안을 제시하였다. 제시된 시공법의 특성을 분석하여 향후 계획하고 있는 파일럿프로젝트에 적용이 용이한 시공법을 선정하는데 자료로 활용하고자 한다.

## 2. 연성개폐 지붕구조물의 시공프로세스

### 2.1 국내 선행 연구 사례 검토

국내에서는 연성개폐 대공간 지붕구조물의 설계 및 적용사례는 없는 것으로 파악되었다. 따라서 국내의 경우에는 일반 대공간 지붕구조물을 대상으로 시공당시 적용된 Erection 공법을 조사하여 규모별, Span별, 층고별, 구조형식별로 분석한 선행 연구의 내용을 참조하였다.

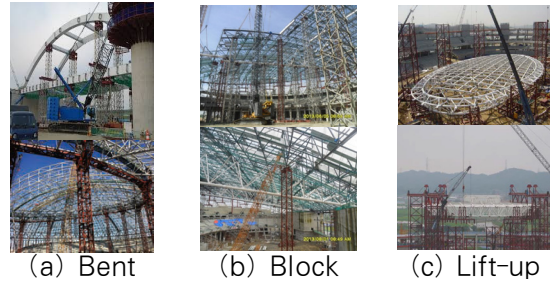
효율적인 Erection 공법 개발을 위해 연성개폐 지붕구조물의 시공기법을 제시하고 분석하는데 기존 선행연구의 결과를 활용하고자 한다<sup>4)</sup>.

일반 대공간 지붕구조물 시공에 있어서 Erection 공법은 공사비용, 공사기간 그리고 안전성 등에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다<sup>6)</sup>.

대공간 지붕구조물 Erection 공법은 현장 여건 및 제반 조건에 따라서 헤아릴 수 없을 정도로 많고 다양하지만, 대표적인 공법으로는 Element 방식, Block 방식, Sliding 방식, Lift-up 방식 그리고 복합방식 등이 있다<Fig. 1>.

기존 연구<sup>4)</sup>에 따르면 국내·외 70여개의 대공간 건축물에 사용된 Erection 공법은 Block 공법이 가장 많은 것으로 조사되었고, 지붕 구조형식은 강성 구조물인 스페이스프레임 구조가 가장 많은 것으로

조사되었다. 특히 막 및 케이블 지붕구조는 총 9개 건축물 중 Bent 공법이 4개로 가장 많았으며, Block 공법 및 복합공법이 각 2개, Lift-up 공법이 1개로 조사되었다<Table 1>.



<Fig. 1> Existing lifting method

<Table 1> Construction method by roof type

| Type \ Erection | Space frame | Truss | Membrane & Cable | Etc. | Total |
|-----------------|-------------|-------|------------------|------|-------|
| Bent method     | 2           | 5     | 4                | 2    | 13    |
| Block method    | 31          | 3     | 2                | 0    | 36    |
| Sliding method  | 3           | 0     | 0                | 1    | 4     |
| Lift-up method  | 9           | 1     | 1                | 2    | 13    |
| Complex method  | 0           | 1     | 2                | 2    | 5     |
| Sum             | 45          | 10    | 9                | 7    | 71    |

<Table 1>에서는 국내·외의 일반 대공간 건축물의 건축면적과 스패, 층고에 따라 Erection 공법 적용에 있어서 공법별로 빈도 편차가 높음을 알 수 있다. 층고가 낮은 경우, 대부분 Block 공법을 적용하였으며, 국내·외 모두 층고가 높을수록 Lift-up 공법을 적용하는 경향이 나타났다.

본 연구사례를 통해 국내의 경우 선진기술국에 비해 대규모 대공간 건축물의 시공사례가 많지 않아 Block 공법에 대한 기술을 제외하고는 아직 선진기술국에 비하여 Lift-up 공법 등 Erection 공법 전반에 대한 기술력 축적이 열악한 것으로 추정할 수 있다.

### 2.2 국외 연성개폐 시공 사례 분석

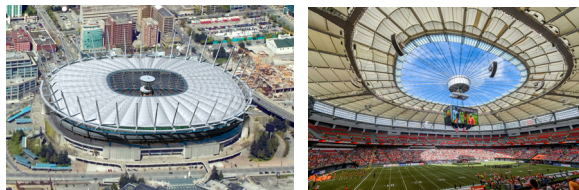
#### 2.2.1 BC 경기장 지붕구조 개요

BC Place Stadium<sup>1)</sup>은 캐나다 브리티시 컬럼비아

에 위치한 다목적 경기장으로 현재는 캐나다 풋볼 리그의 BC 라이온스의 홈구장으로 사용되고 있으며 2010년 캐나다 밴쿠버 동계올림픽과 장애인 올림픽의 주경기장으로 사용되었다<Fig. 2>.

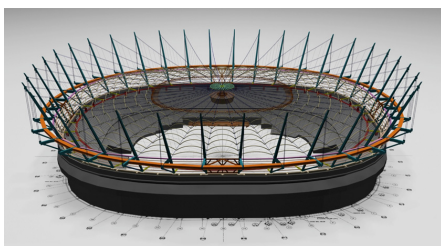
당초 경기장은 1983년에 공기막 형식의 돔으로 건축되었지만 2010년부터 1년 6개월 공사, 5억 6,300만 달러의 비용이 발생하여 재활성화를 위해 54,000석 규모의 새 경기장이 2011년 9월 30일 다시 개장하였다.

실내의 개축이 광범위하게 이루어졌는데, 그 중에서도 가장 특별한 것은 가이어 엔지니어에서 지붕구조물의 엔지니어링 및 설계를 수행한 케이블로 지지되는 세계 최대 규모의 연성 개폐식 지붕구조물이다.



<Fig. 2> BC Place Stadium

새로운 지붕시스템은 Post-tension된 방사형 케이블 트러스(Radial cable truss)로 이루어져 있으며 스팬은 195m×236m이며, 지붕 멤브레인은 36개, 47.5m의 철골 마스트로 지지되며 지붕 막은 PTFE coated fiberglass, ETFE film, & retractable expanded woven ptfe pneumatic cushions로 구성되어 있다. 총 16,500톤의 철골과 1,750톤의 케이블, 압축링에 160톤의 철골이 사용되었다.



<Fig. 3> Roof structure system of BC Place

지붕구조물에 관한 요구량을 최소화하기 위해 새로운 지붕구조물은 폐쇄형 시스템(Closed system)으로 되어 있기 때문에 케이블 트러스의 수평력은

균형을 이루고 있고 수직 지지를 위해 그리고 가해지는 횡하중에 저항하기 위해서 기존 스타디움 상부구조에만 의존하고 있는 형태이다<Fig. 3>.

상부 방사형 케이블로 인해 발생하는 마스트 조립체에서의 접선 수평 모멘트(Tangential horizontal moment)는 인장링과 압축링의 수직분리에 의해 저항한다. 경기장 계획에서 원래의 링 기하구조는 공기 부양식 지붕의 비대칭 케이블 레이아웃이 평형을 이루도록 초타원(Superellipse)으로 개발되었기 때문에 새 링의 36면 다각형은 이 형태를 따르지 않아 케이블 힘이 균형을 이루도록 케이블 트러스 초기응력과 함께 링 다각형의 기하구조가 확립되었다.

이로 인해 외부 압축링 및 내부 인장링이 계획에 추가 포함되면서 주변에 있는 구조재료를 집중시켜 지붕 경간이 케이블만으로 형성되도록 하였다.

### 2.2.2 BC 경기장 시공프로세스

주요 지붕구조물의 조립·시공 1단계로 <Fig. 4>와 같이 새로운 지붕구조물의 지지를 위하여 원래의 공기 부양식 지붕의 프리캐스트 압축링 내부에 새로운 현장타설 콘크리트 전이보(Transfer girder)를 설치하고, 전이구조와 새로운 지붕하중을 지탱하기 위해 상부 데크의 바깥쪽 기둥선과 평행하게 별도의 강재 기둥을 추가로 설치하였다.

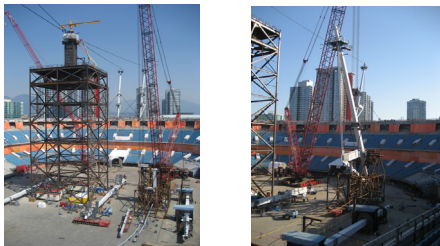


<Fig. 4> Concrete transfer beams and support columns

조립·시공 2단계로서 지붕 케이블을 지지할 36개의 마스트(Mast)를 현장에서 조립하여 설치하였다. 마스트는 케이블을 지지할 수 있도록 주기둥(Pylon)과 외측 스트러트(Outrigger) 및 내측 스트러트(In-rigger)로 구성되어 있다. 마스트는 크레인으로 인양되어 전이보의 상단부에 고정시켰다.

마스트 설치와 동시에 아웃리저를 연결하는 압축 링(Compression ring)과 외측 Perimeter edge beam이 먼저 설치된 이후에 내부 링을 연결하는 인장링(Tension ring)의 설치가 이루어진다<Fig. 5>.

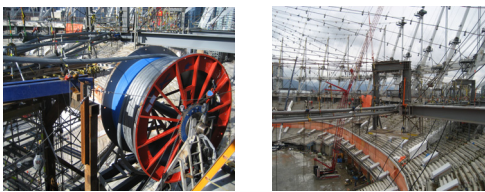
지붕 막이 모이는 중앙 노드는 마스트 설치와 동시에 중앙에서 가설벤트를 설치하고 미리 위치시킨 마스트와 동시에 조립되었으며 이후에 상부와 하부 메인 케이블을 설치하였다.



<Fig. 5> Install mast and central node

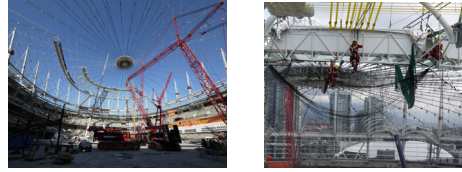
3단계 조립·시공으로서 마스트 설치 이후에는 마스트와 중앙 노드를 연결하는 메인 케이블을 설치하게 된다. 메인 케이블은 마스트의 상단에서 시작하는 상부 케이블과 외측 Perimeter edge beam에서 시작하는 하부 케이블로 구성되며 중앙 노드와 한 점에서 만나도록 설치되었다<Fig. 6>.

메인 케이블은 지붕구조물을 지지할 수 있도록 큰 인장력이 요구되기 때문에 36개의 마스트에는 메인케이블의 초기 장력을 도입하기 위한 스트랜드 잭을 설치하여 설계 단계에서 미리 시뮬레이션한 장력을 도입하였다.



<Fig. 6> Cable installation

조립·시공 4단계에서는 메인 케이블이 설치되면 개폐부분을 지지하는 내측 Perimeter edge beam을 우선 설치한다. 내측 Perimeter edge beam은 하부 케이블에 지지되며 지상에서 구조물의 일부분을 인양하여 공중에서 조립하는 방식으로 설치하였다.



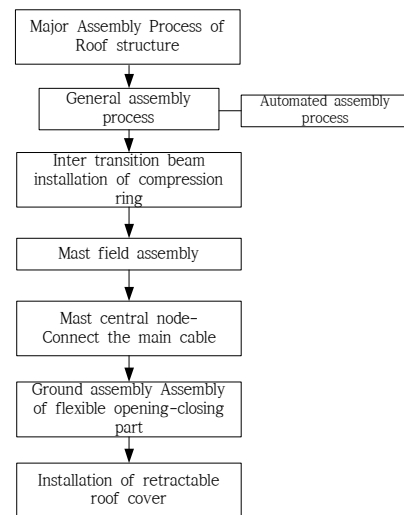
<Fig. 7> Inner installation of perimeter edge beam

내측 Perimeter edge beam의 설치과정에서 메인 케이블의 응력 상태가 변하기 때문에 조립과정에 맞추어 케이블의 장력을 유지하는 것이 매우 중요하다<Fig. 7>.

마지막 5단계 조립·시공에서는 개폐식 지붕 구조의 마지막 공정은 지붕 막 설치 공사로 지붕 막은 PTFE coated fiberglass, ETFE film, & retractable expanded woven ptfe pneumatic cushions의 3가지 종류의 막 재료로 구성하였다<Fig. 8>.



<Fig. 8> Install of roof membrane



<Fig. 9> Main process of roof assembly

<Fig. 9>에는 BC Place 경기장 지붕구조물의 주요한 조립공정에 대한 프로세스를 도식화하였다.

시공단계에 들어가기 전에 확인 및 검증사항으로는 연성 개폐식 지붕구조시스템은 대부분 케이블에

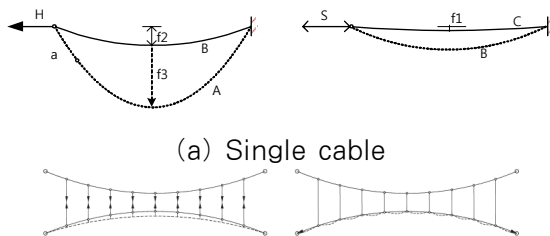
의해서 지붕구조물이 지지되므로 케이블의 장력 관리가 가장 중요한 설계 요소이다. 또한, 시공 전 설계단계에서 반드시 확인해야 할 사항으로는 철골 부재와 케이블 설계, 지붕 막 형상, 응력, 막 재료의 선정, 내진 성능과 설계, 시공 순서, 메인 케이블 장력 도입 처리방법, 지붕 막 설치 방안에 대해 사전에 철저한 준비가 필요한 것으로 파악되었다.

BC Place Stadium의 시공프로세스와 상세를 고찰한 결과, 연성개폐 대공간 지붕구조물의 케이블 시공프로세스별 고려해야 하는 사항으로 지상 배치 및 조립에서는 케이블 길이, 정착구의 길이 조정 범위, 클램프 등의 이동거리, 고소 작업 공정, 교차부 케이블의 분절 노드 필요성을 검토해야 한다.

인양 단계는 인양 중량을 고려한 장치선정, 인양 가설 구조물, 인양 및 텐서닝 순서를 검토해야 한다. 텐서닝 및 도입장력 검증에서는 단계별 하중 도입 계획, 텐서닝 장비 선정 및 반력 지지 가설 구조물 계획, 케이블 형상과 해석결과의 반복 비교 검토, 케이블 장력 유지관리 계획을 철저히 수립해야 할 것으로 판단된다.

### 2.3 케이블 텐서닝 프로세스

케이블 지붕구조물의 설계 형상은 케이블 텐서닝 작업을 통해 구현된다. 케이블 텐서닝 작업 시 케이블은 매순간 위치와 형상이 변형되며, 하중 적용 과정에서 지역적인 구속력 집중에 따른 케이블 파손이 발생할 수 있다. 케이블 텐서닝은 로프 스프레더, 폴리 블록, 스트랜드 텐서닝 등의 장비가 활용되며, 단일 케이블과 평면 케이블의 텐서닝을 통한 형상 구현 개념은 <Fig. 10>과 같다.



(a) Single cable  
(b) Flat truss cable  
<Fig. 10> Cable tensioning

케이블 장력 검증은 케이블 텐서닝 장비 유압실린더의 압축력 측정 방식과 케이블 진동 공진 주파수 또는 케이블 휨 처짐(3점 굽힘 측정)을 통해 간접적으로 케이블 장력을 측정하는 방법이 일반적이다.

텐서닝 작업 완료 후 케이블 지붕구조의 최종 응력 및 변형율과 케이블 및 지붕구조의 형상을 모니터링 해야 한다. 시공 중 케이블 장력 모니터링에는 유압실린더의 압축력 측정방식이 유리하고, 장기적인 케이블 장력 모니터링이 필요한 경우에는 케이블 진동 공진 주파수 측정방식이 사용된다<sup>9)</sup>.

케이블 텐서닝 및 장력 검증을 위해 시공계획서에서 검토해야 하는 항목은 다음과 같다.

첫째, 케이블 종류별 역학적 특성(파단하중, 신장율, 크리프, 선팽창계수 등)과 정착구의 성능(보장 결합성능, 수축, 피로성능, 외부환경에 대한 내구성)에 기초한 단계별 하중(장력) 도입 계획을 수립한다.

둘째, 장력 도입 계획에 따라 최대 하중과 재하 속도를 고려한 텐서닝 장비의 종류와 소요개수, 이동장치(크레인 등)를 결정하고, 케이블 텐서닝 시 발생하는 유압실린더 압축력의 반력 지지 가설 구조물을 계획한다.

셋째, 케이블 파손을 방지하기 위해 단계별 케이블 장력 도입, 케이블 곡률 및 교점 정착구 검토, 구조물 형상해석결과와 비교 검토를 반복 수행한다.

넷째, 바람에 의한 진동, 케이블 크리프 및 이완 영향, 피로, 온도변화를 고려한 케이블 장력 유지관리 계획이 필요하고, 진동 공진 주파수 측정방식을 유지관리 방식으로 고려할 경우 주기적인 센서 조정과 케이블 허용 장력 기준을 마련해야 한다<sup>7)</sup>.

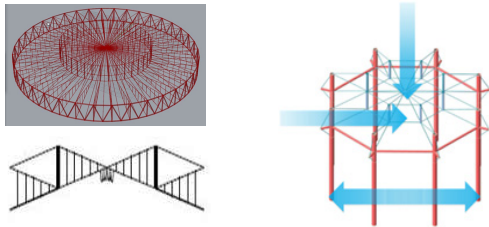
## 3. 더블스포크 휠 지붕구조물의 Erection (인) 방법 검토

### 3.1 더블스포크 휠 지붕구조의 개요

본 연구에서 고려하는 더블스포크 휠 구조방식에서 케이블 지붕구조는 <Fig. 11>과 같이 케이블 중심부, 중간링(원형, 케이블), 외측링(원형, 강 트러스)으로 구성된다. 케이블은 케이블 중심부로부터 중간

링의 교차부를 지나 외측링 단부에 정착되며, 필요 시 지상조립 단계에서 중간링 교차부에 케이블 정착기구 설치 및 케이블 텐서닝 작업을 통해 케이블 중심부와 중간 링의 초기형상을 선행 시공할 수 있다.

일반 대공간 지붕구조물과 대표적인 연성개폐 대공간 지붕구조물의 시공법과 프로세스를 검토한 결과, 더블스포크 휠 연성개폐 지붕구조물의 시공법으로는 가설벤트나 리프트업 공법 및 이를 혼용하는 복합시공법(안)에 대해 검토하였다. 더블스포크 휠 구조 특성에 적합한 연성개폐 지붕구조물의 시공법으로 적용 가능성을 알아보려고 하였다<Fig. 11>.



(a) Wheel roof shape (b) Support principle

<Fig. 11> Structure overview of double spoke wheel cable

### 3.2 Bent 공법 활용한 Erection(안) 방법

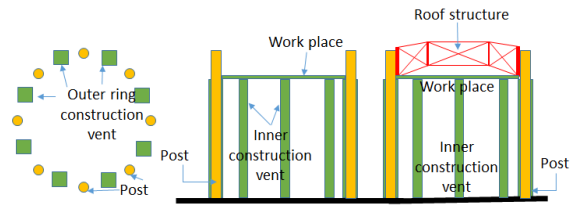
외측 링 트러스 단위 모듈(분절 구조물) 조립을 위해 최외측 기둥 사이에 일정간격으로 가설벤트를 설치하고, 외측 링 트러스를 제외한 더블스포크 휠 구성하는 케이블 지붕구조가 경량 구조물임에 착안하여, 케이블 중심부부터 외측 링 트러스까지 가설벤트를 활용한 인공 작업대 조성방법을 고려하였다.

외측 링 트러스를 지지하는 최외측 기둥의 수직도 확보 및 전도 방지를 위한 경사형 임시 지지용 가설재를 가설 벤트와 연결하여 전체구조물의 일체 거동으로 인공대지의 안전성을 높인다.

기존 Bent 공법을 활용한 더블스포크 휠 연성개폐 지붕구조물의 Erection(안) 방법은 고소 작업의 안전성을 높일 수 있고, 시공오차를 관리하기 용이하며 케이블 텐서닝 작업 시 발생할 수 있는 지붕구조물의 형태 변형을 방지하는 특징이 있다.

그러나 가설 벤트 설치에 따른 벤트 하부의 기초 시공을 위한 지반 안전성 검토 또는 벤트 상부에 수직높이 조절용 잭 설치가 요구된다. 구조물 하부 공간 활용 제한과 직경이 큰 지붕구조물에는 가설 벤트 설치 수량의 증가에 따른 가설비용 증가로 전체 공사비가 증대되는 요인이 된다<Fig. 12>.

이러한 Erection(안) 방법의 최적화를 위해서는 가설벤트 구조설계를 통해 부재 사용량과 VE 평가 모델 반영을 통해 비용을 줄일 수 있는 방안이 확보되어야 한다.



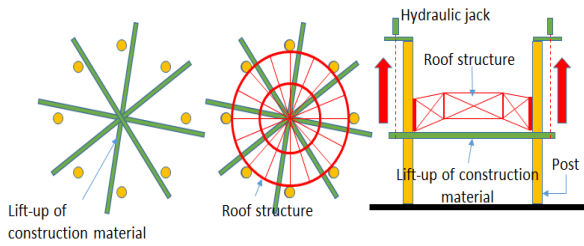
<Fig. 12> Erection concept using bent method

### 3.3 Lift-up 공법 활용한 Erection(안) 방법

더블스포크 휠 지붕구조물의 양중을 위해 양중고리가 장착된 가설재를 지상에서 설치하고, 가설재 위에서 케이블의 지상배치 및 조립 작업을 통해 상하 및 현수 케이블을 외측 링까지 연결 후 1차 케이블 텐서닝 작업을 완료하며, 더블스포크 휠 지붕구조물 최외측 기둥 상부에 설치된 유압장치를 이용하여 지상 조립된 지붕구조물을 위로 들어 올리는 Erection(안) 방법을 고려하였다<Fig. 13><sup>3)</sup>.

이러한 Erection(안) 방법은 지상 설치조립 작업으로 시공 안전성을 높일 수 있고, 시공오차 관리가 용이하다. 반면 케이블 장력으로 발생할 수 있는 지붕구조물 형태 변형제어에 외측 링이 충분히 저항 가능해야 한다. 또한, 양중 시 최외측 기둥의 전도 방지를 위한 지지 보강가설재 설치비용과 다수 유압잭을 제어할 수 있는 긴장력 시스템과 유압잭 사용을 위한 추가 장비비용이 발생한다.

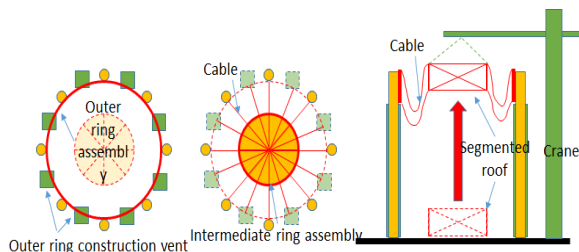
Lift-up을 활용한 Erection(안) 시공방법의 최적화를 위해서는 양중 시 발생하는 기둥과 외측 링의 간섭오차 관리방안과 양중 비용을 줄이는 VE 모델 정립이 우선 요구된다.



<Fig. 13> Erection concept using lift-up method

### 3.4 복합공법 활용한 Erection(안) 방법

복합공법을 활용한 Erection(안) 방법은 외측 링 트러스와 최외측 기둥의 연결 공정과 케이블 중심부와 중간 링의 초기형상 지상 조립 공정을 병행하여 조립시공하게 된다. 케이블로 외측 링 트러스와 지상 조립 지붕구조물을 연결한 후 크레인으로 지상 조립 지붕구조물을 들어 올리고 외측 링 트러스에서 케이블 텐서닝을 통해 최종 지붕형상을 구현하는 방법을 제안하였다<Fig. 14>.



<Fig. 14> Erection concept using complex construction method

이러한 Erection(안) 방법은 병렬시공으로 공기를 단축하고, 가설베트 수량의 절감이 가능하여 경제성을 향상시킬 수 있다. 그러나 케이블 텐서닝 시 고소작업으로 시공 안전성이 저하되고, 바람 등의 영향으로 시공오차 관리와 형상 구현이 어렵다는 단점을 지니고 있다.

복합공법을 활용한 Erection(안) 방법의 시공 최적화를 위해서는 기후영향을 최소화 하고 크레인 사용기간을 최소화 할 수 있는 가설 계획과 대안별 VE 평가가 우선적으로 요구된다.

<Table 2>에는 더블스포크 휠 연성개폐 지붕구조물에 적용 가능한 3가지 시공방법(안)에 대해 시공

성, 안전성, 공기 및 경제성, 그리고 품질확보 측면에서의 정성적인 평가를 하였다.

이러한 평가결과를 기반으로 향후, 논리적인 시공법 선정을 위한 정량적인 평가와 더불어 시공분야 전문가 자문을 통해 최종적으로 연성개폐 지붕구조물의 적용 가능성이 우수한 시공법을 선정할 필요가 있는 것으로 판단된다.

<Table 2> Comparative evaluation of erection method

| Item           | Construction | Safety   | Duration | Cost     | Quality |
|----------------|--------------|----------|----------|----------|---------|
| Bent method    | Normal       | Highness | Normal   | Lowness  | Good    |
| Lift-up method | Good         | Highness | Normal   | Lowness  | Normal  |
| Complex method | Good         | Lowness  | Fast     | Highness | Normal  |

## 4. 결론

국내외 일반 대공간 지붕구조물과 연성개폐 지붕구조물의 선행연구와 시공사례를 분석하여 3가지 더블스포크 휠 연성개폐 지붕구조물의 시공이 가능한 Erection 방법을 제안하여 얻은 결론은 아래와 같다.

1) 시공단계에 들어가기 전에 확인 및 검증사항으로는 연성 개폐식 지붕구조시스템은 케이블에 의해서 지붕구조물이 지지되므로 케이블의 장력 관리가 가장 중요한 설계 요소이다. 또한, 시공 전 설계 단계에서 반드시 확인해야할 사항으로는 철골 부재와 케이블 설계, 지붕 막 형상, 응력, 막 재료의 선정, 내진 성능과 설계, 시공 순서, 메인 케이블 장력 도입 처리방법, 지붕 막 설치 방안에 대해 사전 철저한 준비가 필요한 것으로 파악되었다.

2) 연성개폐 지붕구조물의 지상 배치 및 조립에서는 케이블 길이, 정착구의 길이 조정 범위, 클램프 등의 이동거리, 고소 작업 공정, 교차부 케이블의 분절 노드 필요성도 검토해야 한다.

3) 양중 단계에서는 인양 중량을 고려한 장치선정, 인양 가설 구조물, 인양 및 텐서닝 순서를 검토해야 한다.

4) 텐서닝 및 도입장력 검증에서는 단계별 하중 도입 계획, 텐서닝 장비 선정 및 반력 지지 가설 구조물 계획, 케이블 형상과 해석결과의 반복 비교 검토, 케이블 장력 유지관리 계획을 철저히 수립해야 한다.

5) 더블스포크 휠 연성개폐 지붕구조물에 대해 비교평가 및 시공법 선정을 위한 분석항목을 도출하였으며, VE 모델 수립과 평가가 병행하여 진행될 필요가 있는 것으로 생각된다.

6) 더블스포크 휠 연성개폐 지붕구조물에 적용 가능한 3가지 시공법(안)에 대해 시공성, 안전성, 공기 및 경제성, 그리고 품질확보 측면에서의 시공법 선정을 위한 정량적 평가와 더불어 다양한 대공간 분야의 전문가 자문을 통해 최종적으로 연성개폐 지붕구조물의 최적화가 가능한 시공법을 선정할 필요가 있는 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비지원(16AUDP-B100343-02)에 의해 수행되었습니다.

### References

1. David Campbell, Retrofitting BC Place Stadium with a New Retractable Roof, BC PLACE, 2012.
2. Michael Seidel, Tensile Surface Structures, Ernst & Sohn, 2009.
3. C.u. Kang, K.H. Park, M.K. Choe, A Study Condition Analysis of Lifting Planning for Roof System of Large Span Spatial Structure, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol.27, No.11, 2011.
4. H.M. Jung, S.Y. Lee, S.W. Jee, The Case Study on the Erection Method of Large Span Structures, Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol.7 No.2, 2007
5. J.Y. Lee, S.H. Ryu, Construction of Cable Roof Structure for Pusan Main Stadium, Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol.2 No.1, 2002
6. M.H. Jang, M.C. Cheong, S.Y. Sur, Analysis on the Construction Cost of Spatial Structures - Focused on the Roof Structure, Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol.7 No.1, 2007
7. S. Hwangbo, Y.J. Yoo, S.E. Han, An Analysis of Stabilizing Process of Cable Dome and Its Application, Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol.6 No.2, 2006.

■ Received : November 25, 2016

■ Revised : December 06, 2016

■ Accepted : December 07, 2016