

Rotation-Up 공법에 의한 킷 트러스 대공간 구조물의 Erection 실험에 관한 연구

Experimental Investigation of Rotation-Up Erection for Keel Truss Spatial Structures

김 철 환* 채 원 탁** 백 기 열*** 정 환 목****
Kim, Cheol-Hwan Chae, Won-Tak Baek, Ki-Youl Jung, Hwan-Mok

Abstract

There are a number of construction methods to build spatial structures such as erection method, Element method, Block method, Sliding method, Lift-up method and Push-up method. These methods are uneconomical and low accuracy, and require long construction duration because of a need of a scaffold or a tower crane to build spatial roof frame. In this study, the construction method to erect a truss structure was proposed as an economical and easy installation method. The proposed method has end hinges of keel truss and winches with horizontal cable. This method makes safe and accurate production and reduces construction duration because trusses are built on the floor or supporter. The goal of this study is to verify the validity of construction method by building scale model using the proposed method.

Keywords : Rotation-up Method, Erection method, Keel truss, Constructability

1. 서 론

철골구조물은 공장에서 제작된 부재를 현장에 반입하여 크레인을 통하여 지정된 위치로 양중하여 접합하게 된다. 이러한 철골 구조물의 세우기에는 대용량의 크레인이 요구되고, 가설비계의 설치, 조립단계에서의 오차 등이 발생하기도 한다. 특히, 대공간 구조물의 경우에는 무주공간의 장대지붕을 일

반구조물과 같은 공법으로 설치할 경우에는 소요되는 가설재의 양과 비용 및 인건비의 과다와 고소에서 작업으로 인한 안전상의 문제 등이 발생하기도 한다. 따라서 대공간 구조물의 설치에는 각각의 구조형식에 적합한 공법의 적용¹⁻²⁾이 필요하다.

본 연구에서는 대공간 구조물 중에서 킷트러스로 구성된 대공간 구조물을 대상으로 구조체 설치시 안전성과 경제성이 확보되고, 간편하게 설치할 수 있으며, 공기단축이 가능한 새로운 공법으로서 Rotation-up 공법을 제안하여 공법의 유효성과 문제점을 규명하는 것을 그 목적으로 한다.

* 정희원, 경북대학교 건축토목공학부 교수
Kyungpook National Univ. School of Architecture and Civil Engineering

** 교신저자, 경북대학교 건축도시환경공학부 외래강사
Kyungpook National Univ. School of Architecture and Urban Environmental Engineering
Tel: 054-530-1374 Fax: 054-530-1379
E-mail : cwtak@hanmail.net

*** 정희원, (주)포스코건설, 기술연구소
Posco E&C CO. LTD R&D Center

**** 정희원, 경동대학교 건축토목공학부 교수
Kyungdong Univ. School of Architecture and Civil Engineering

2. 대공간 구조물 Erection 공법

2.1 기존 공법

스팬이 200m가 넘는 대공간 구조물에는 크게 셸 구조, 스페이스 프레임구조, 막구조, 현수구조, 그리고 이들 구조시스템의 장점을 상호 적용한 복합구

조 등으로 분류할 수 있다. 이들 대공간 구조물은 기둥없이 넓은 공간을 확보해야 되는 구조적 특성과 구조체의 강성은 구조체가 완성된 이후에 확립되기 때문에, 일반적인 구조시스템의 구조물보다 더욱 철저하게 설계초기 단계에서부터 시공문제를 병행하여 검토해야만 원활한 시공이 가능하다.

현재 일반적으로 알려져 있는 대공간 구조물의 양중공법은 강성구조물과 연성구조물로 크게 구분하여 생각 할 수 있다. 연성구조물은 막과 케이블을 동시에 사용한 구조물로서 양중문제는 막재 위에 설치하는 케이블과 막 자체의 장력도입문제가 가장 중요한 분야³⁾로서, 막구조물 자체의 양중문제는 일반구조물의 양중기술 수준에서 크게 벗어나지 않는다.

강성구조물인 경우의 양중공법은 Element 공법, Block 공법, Sliding 공법 그리고 Lift-up 공법 등 다양한 공법이 있으며, 구조물의 규모와 공기, 현장여건 등에 따라서 적당한 공법이 도입되어야 한다. <Table 1>에서는 기존 대공간 구조물의 양중공법의 종류와 특징³⁾을 나타낸다.

<Table 1> Erection methods

공 법	특 징
Block 공 법	<ul style="list-style-type: none"> - 지상에서 조립된 구조물을 양중장비를 이용해 설치하는 공법 - 설치 소요시간의 손실 최소화 - 크레인 용량 산정 주의 - 양중케이블 설치위치 선정의 어려움
Sliding 공 법	<ul style="list-style-type: none"> - 지상에서 설치된 구조물을 소정의 위치로 수평 이동시키는 방법 - 골조/마감 등의 반복작업 효과에 의한 공기단축 - 가설재 및 장비투입의 감소로 원가절감에 유리 - 고소 작업량의 감소로 안전성 확보에 유리
Element 공 법	<ul style="list-style-type: none"> - 부분적으로 조립된 구조물을 가설구조물 위에서 조립하는 방법 - 자재수송의 용이 - 특별한 기술과 장비의 불필요 - 층고가 높아지면 가설자재의 비용증가
Lift-up 공 법	<ul style="list-style-type: none"> - 조립된 구조물을 아래에서 밀어 올려 소정의 위치로 이동시키는 공법 - 가설자재 및 중장비 사용의 절감 - 소 작업량의 감소로 안전성 확보에 유리 - 지상에서 작업하므로 작업능률 및 시공성 향상 - 공사중 공법 변경에 불리

2.2 Rotation-up 공법

대공간 구조물의 지붕설치 공법으로는 전술한 바와 같이 여러 가지 공법이 있다. 이들 공법은 공장에서 제작된 부재를 현장에 반입하여 부분적으로 조립하여 소요위치에 이동시켜 완성하는 방법으로 대부분 많은 가설재가 필요하고 또한 공기도 길어 시공 코스트가 많이 드는 단점을 가지고 있다.

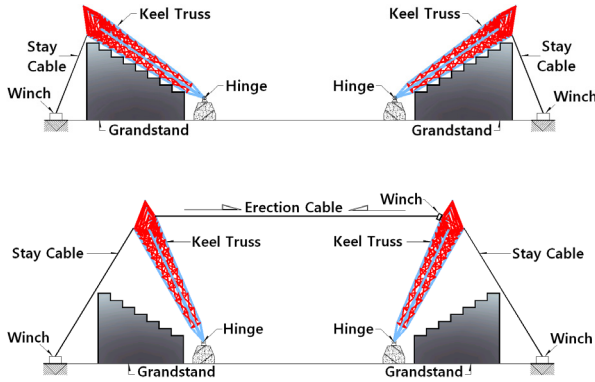
본 연구에서 대상으로 하고 있는 킬트러스와 같은 대공간 구조물의 경우에는 일반적으로 벤트공법이 적용되고 있다. 벤트공법이란, 지상에서 어느 정도의 크기로 조립하고, 크레인 등의 중기로 지붕 높이까지 들어 올려 이것을 적당한 간격으로 배치된 높이 조정기구를 가진 지보공을 사용하여 지지하는 공법이다. 따라서 벤트공법을 채용하면 높고 넓은 가구를 지지하기 위한 많은 지보공이 필요하므로, 지보공만으로도 상당한 양의 가설자재가 되어, 가설 코스트가 높아진다. 또한 고소작업으로 인한 안전성 문제 등도 따른다.



<Fig. 1> Bent method for keel truss

본 연구에서는 킬트러스 구조물의 기존 양중공법 시 발생할 수 있는 이러한 제반 문제점을 해결하기 위하여 개발된 공법^{4,5)}이다. 공법의 기본개념은 <Fig. 2>에 나타낸다. <Fig. 2>에서와 같이 주각이 힌지로 구성된 킬트러스 구조물을 지반 또는 미리 설치된 경기장 스탠드와 같은 구조물 위에서 조립하고, 대칭의 킬트러스를 원치에 연결된 케이블을 이용하여 구조체를 당겨서 일으켜 세워 소정의 위치에 설치 및 고정하는 공법이다. 이러한 공법은 설치 시에 고소에서의 작업이 없어 안전성을 확보할 수 있다. 또한 지반이나 관중석 등과 같은 구조물위에서 구조체를 조립하게 되므로 시공시 오차가 거

의 발생하지 않고, 특히 설치를 위한 가설재가 불필요하며, 공기를 획기적으로 단축할 수 있는 장점이 있다.



<Fig. 2> Concept of the Rotation-up method

3. 실험계획

3.1 실험체 제원 및 형상

실물실험에 적용할 실험체의 형상 및 주요부재 제원은 <Fig. 3>에 나타낸다. <Fig. 3>에서와 같이 실험체의 저변이 46,785mm이며, 높이는 12,450mm, 아치로 이루어진 킬트러스 골조로서 아치의 전체 길이는 57,800mm이다.

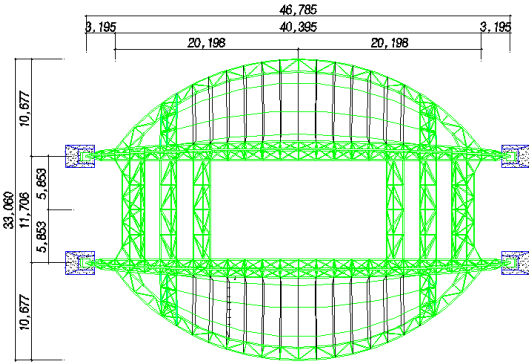
실험체에 사용된 강재는 SS400을 사용하였으며, 부재의 제원은 <Table 2>에 나타낸다.

<Table 2> List of Members

	상현재	φ165.2x6.0, φ165.2x5.0
	중간현재	φ165.2x6.0, φ165.2x4.5
	하현재	φ165.2x6.0, φ165.2x4.5
	상부 사재	φ101.6x4.0, φ101.6x3.2
	하부 사재	φ89.1x3.2, φ76.3x3.2
단면형상	수평재	φ89.1x3.2, φ76.3x3.2

3.2 양중케이블 설치위치

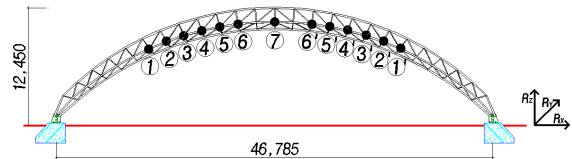
조립된 킬트러스를 소정의 위치로 양중하기 위하여 양중케이블을 설치하여야 한다. 양중케이블은 작업의 간편을 위하여 적은 수로 설치하는 것이 유리



<Fig. 3> Test Specimen

하지만 구조적 안정성을 확보하기 위하여 복수의 케이블 설치가 필요하다.

따라서 <Fig. 4>에 나타내는 것과 같이 점으로 표시한 지점을 대상으로 구조해석을 행하여 적합한 케이블 개수와 위치를 선정하고 있다. 표시한 위치는 하현재와 하부사재, 중간현재가 만나는 지점으로 강성 및 강도에 있어서 다른 부위에 비하여 높게 나타나는 위치이다. 해석은 상용 S/W인 Midas-gen을 사용하였으며, 해석시 작용하중은 시공하중으로 자중의 1.2배의 하중이 작용하는 것으로 하고 있다.



<Fig. 4> Installing point of erection cable

3.2.1 양중케이블 개수 산정

양중케이블의 설치개수 산정은 기본적으로 양중케이블을 킬트러스 중앙부 ⑦번 위치에 1개를 설치한 경우와, ③, ③' 위치에 2개를 설치한 경우, 그리고 ①⑦①' 위치에 3개를 설치한 경우를 대상으로 설치 갯수의 적정성을 검토하였다.

해석방법은 <Fig. 2>에서와 같이 30° 각도에 설치된 구조물을 대상으로 <Fig. 4>에 나타낸 지점에 양중케이블을 설치하여 수평으로 10°씩 당겨서 최종 설치위치인 90°에 도달할 때까지 각 양중위치에서 발생하는 케이블의 장력과 구조체의 변형을 검토하였으며, 얻어진 결과는 <Table 3>에 나타낸다.

<Table 3>에서 나타난 것과 같이 30°의 양중케이블 3개를 설치한 경우에는 중앙부 ⑦번 케이블과 양단 약 1/4지점인 ①, ①'번 케이블의 장력은 46.9kN, 53.3kN으로 케이블 간에 6.4kN전후의 장력의 차이가 발생하고 있으며, 이는 케이블 설치 위치에 따른 것으로서 본 연구에서는 트러스의 절점에 양중케이블을 설치함으로써 정확한 힘의 균형점을 설정할 수 없기 때문에 발생하는 것으로 판단된다. 따라서, 양중케이블을 많은 개소에 설치한 경우에는 적게

력은 작아지나 케이블장력의 합은 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

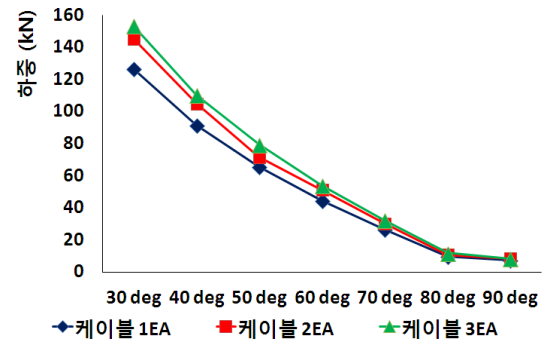
<Fig. 5>(a)는 양중케이블 설치개수에 따른 장력의 크기를 시공 단계별로 나타내고 있다. <Fig. 5>에서 알 수 있듯이 30°의 경우에 양중케이블이 하나만 설치한 경우에는 126.6kN으로 양중케이블을 2개를 설치한 경우에는 145.2kN으로 나타나고 있어 15%정도의 차이를 나타내고 있다.

<Table 3>에는 양중단계에서의 최대 변위도 나타나고 있다. 구조체의 최대변위는 양중케이블을 많이

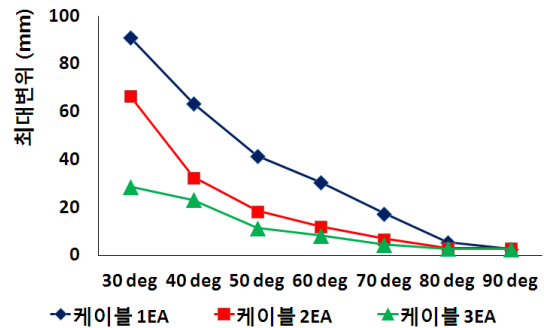
<Table 3> Results according to number of erection cable.

양중각	케이블 장력(kN)	양중 위치	최대 변위 (mm)	최대변위 위치
30°	케이블 3EA 46.9 53.3	⑦ ①, ①'	28.65	중앙부
	케이블 2EA 72.6	③, ③'	66.8	〃
	케이블 1EA 126.6	⑦	91.2	1/3, 2/3위치
40°	케이블 3EA 35.7 37.2	⑦ ①, ①'	23.17	중앙부
	케이블 2EA 52.4	③, ③'	32.7	〃
	케이블 1EA 91.3	⑦	63.58	1/3, 2/3위치
50°	케이블 3EA 24.5 27.5	⑦ ①, ①'	11.4	중앙부
	케이블 2EA 35.7	③, ③'	18.6	1/4, 3/4위치
	케이블 1EA 65.5	⑦	41.6	〃
60°	케이블 3EA 16.5 18.7	⑦ ①, ①'	8.2	1/3, 2/3위치
	케이블 2EA 25.6	③, ③'	12.2	중앙부
	케이블 1EA 44.6	⑦	30.6	1/4, 3/4위치
70°	케이블 3EA 9.0 11.6	⑦ ①, ①'	4.5	1/4, 3/4위치
	케이블 2EA 15.2	③, ③'	7.0	〃
	케이블 1EA 26.4	⑦	17.6	〃
80°	케이블 3EA 2.1 4.9	⑦ ①, ①'	2.8	중앙부
	케이블 2EA 5.4	③, ③'	3.1	1/4, 3/4위치
	케이블 1EA 9.5	⑦	5.6	1/4, 3/4위치
90°	케이블 3EA 4.7 1.8	⑦ ①, ①'	2.7	중앙부
	케이블 2EA 4.2	③, ③'	3.0	〃
	케이블 1EA 7.2	⑦	2.7	〃

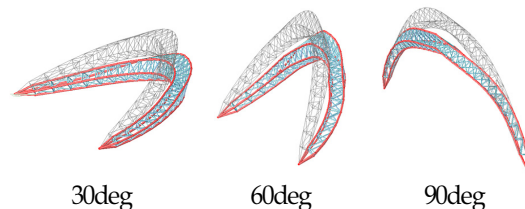
설치한 경우에 비해 개개의 케이블에 작용하는 장



(a) 양중케이블 수에 따른 장력



(b) 양중케이블 수에 따른 변위



(c) 양중각도에 따른 변형도 분포

<Fig. 5> Analysis results
설치할수록 작게 나타나고 있다. 가장 큰 변위가 발

생한 경우는 케이블을 1개 설치한 경우로서 최초의 30° 위치에서 발생하고 있으며, 이때의 최대변위는 91.2mm으로 나타나고 있다. 그러나, 최대변위의 크기는 스패의 0.0019 정도로서 부재의 허용처짐량 (1/300)의 60% 이하에 머물고 있어 안전상, 구조상 위해한 수준은 아니라고 판단된다.

또한, 양중케이블의 설치 수와 실험체의 변위 관계는 초기에는 양중케이블이 1개 설치된 경우가 큰 변위를 일으키고 있으나, 전반적으로 케이블의 설치 개수가 많을수록 변위량도 적게 나타나는 경향이 있다. 케이블 설치개수에 따른 변위는 <Fig. 5>(b)에 나타나고 있으며, <Fig. 5>(c)는 양중각도에 따른 변형도 분포를 나타나고 있다.

이상의 해석결과에 따라 양중시 필요한 케이블의 수는 1개에서 3개까지 어느 범위로 결정하여도 문제는 없다고 판단되나, 양중작업의 효율성과 안전성 등을 고려하여 양중케이블의 설치는 2개로 선정하였다.

3.2.2 양중케이블 위치 선정

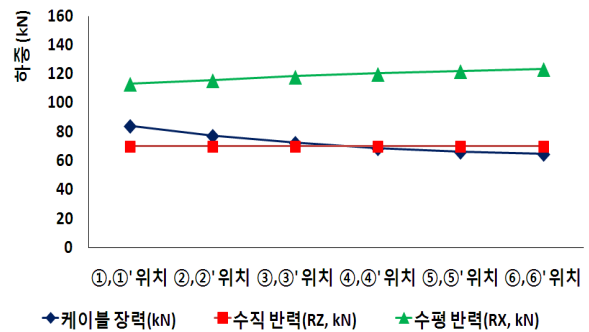
위 해석 결과를 바탕으로 양중케이블을 2개소로 할 경우, 가장 효율적인 작업 및 케이블에 미치는 인장하중 및 기타 변위 등과 같은 제반 영향을 줄이기 위한 케이블의 위치 선정을 위해 해석을 수행하였다. 해석은 응력 및 변위가 가장 큰 30°에서 수행하였으며, 결과는 <Table 4>에 나타낸다.

<Table 4>에서 나타내는 것과 같이 양단부에서 중앙부로 갈수록 양중케이블에 작용하는 장력은 점진적으로 줄어들고 있다. 즉, 양단부에 가까이 위치한 ①,①' 번의 경우에는 양중케이블에 작용하는 장력이 84.3kN으로 중앙부에 가까운 지점인 ⑥,⑥' 번 위치의 64.8kN에 비해 30%이상 높은 값을 나타내고 있다.

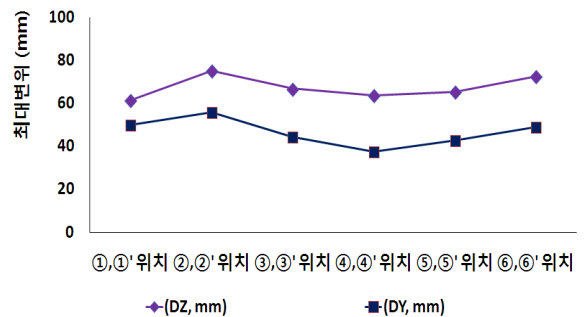
한편, 양중케이블의 설치 위치에 따른 구조체의 변위는 ②,②' 번의 위치와 중앙부와 가까운 ⑥,⑥' 번 위치에서 가장 크게 나타나고 있으며, 각 각 75.2mm, 75.6mm가 나타나고 있으며, ④번 위치에 케이블을 설치할 때 가장 작은 63.8mm의 변위가 나타나고 있다.

<Table 4> Analysis results according to position of erection cable (30°)

케이블 설치위치	케이블 장력(kN)	최대변위(mm) 및 방향	최대변위 위치
①, ①'	84.3	61.5 DZ	중앙부
		50.1 DY	중앙부
②, ②'	77.4	75.2 DZ	중앙부
		55.8 DY	중앙부
③, ③'	72.6	66.8 DZ	중앙부
		44.5 DY	중앙부
④, ④'	69.0	63.8 DZ	중앙부
		37.4 DY	중앙부
⑤, ⑤'	66.5	65.3 DZ	중앙부
		42.7 DY	1/4, 3/4위치
⑥, ⑥'	64.8	72.6 DZ	1/3, 2/3위치
		49.1 DY	1/4, 3/4위치



(a) 양중위치별 케이블장력 및 반력



(b) 양중위치별 최대변위

<Fig. 6> Analysis results according to position of erection cable

또한, 최대변위의 발생부위는 ① ~ ④, ①' ~ ④' 번 위치에서는 킬아치 트러스 중앙부 상부에서 가장 크게 나타나며, ⑤,⑤' 및 ⑥,⑥' 번 위치에서는

수직 최대변위(Z방향)는 각 각 중앙부 및 1/3, 2/3 위치에서 가장 크게 나타났으며, 수평변위(Y방향)는 모두 1/4, 3/4위치에서 크게 나타났다. Fig. 5는 양중케이블 위치에 따른 케이블 인장력 및 반력, 변위를 나타낸다.

위 해석결과를 검토한 결과 ④,④' 번 위치에 케이블을 설치했을 때 변위가 가장 작게 나타나고 양중 하중도 적절한 것으로 나타났다.

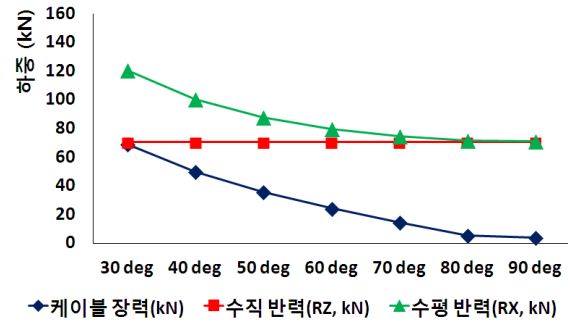
3.2.3 시공단계별 구조해석

선정된 위치에서의 양중케이블에 의한 영향을 검토하기 위하여 30°~90°까지 10° 단위의 단계별로 지점의 반력, 부재력, 변위, 케이블 인장력을 검토하기 위해 해석을 수행하였다. 시공단계별 해석결과는 <Table 5>, <Fig. 7>에 나타낸다.

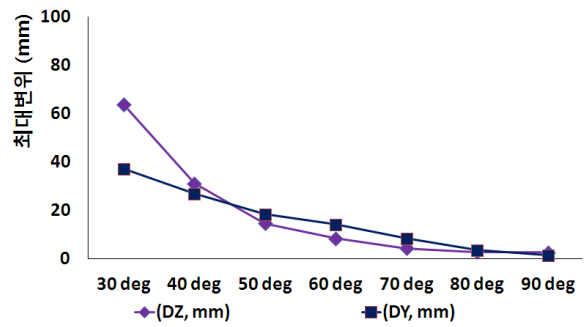
<Table 5> Analysis results of erection steps

양중각	케이블 인장력 (kN)	최대변위 및 방향 (mm)	최대변위 위치
30°	69.0	63.8 D _Z	중앙부
		37.4 D _Y	중앙부
40°	45	31.1 D _Z	중앙부
		27.1 D _Y	1/4, 3/4위치
50°	35.7	14.7 D _Z	중앙부
		18.6 D _Y	1/4, 3/4위치
60°	24.3	8.5 D _Z	중앙부
		14.3 D _Y	1/4, 3/4위치
70°	14.4	4.4 D _Z	중앙부
		8.6 D _Y	1/4, 3/4위치
80°	5.2	2.9 D _Z	중앙부
		3.8 D _Y	1/4, 3/4위치
90°	4.0	2.8 D _Z	중앙부
		1.6 D _Y	중앙부

양중케이블의 최대 인장하중은 30°에서 69.0kN으로 이때 구조체 상현재 중앙부에서 최대 변위를 나타내며, 최대변위는 연직방향으로 63.8mm이다. 또한, 지점의 반력도 가장 크게 나타나고 있으나 양중이 진행됨에 따라 반력 및 케이블의 인장하중 및 변위도 작아지고 있어 안정적인 거동을 하고 있음을 알 수 있다.



(a) 시공단계별 장력 및 반력



(b) 시공단계별 최대변위

<Fig. 7> Analysis results (Erection step)

3.3 실험체 설치

실험체 형상은 <Fig. 3>에서 나타난 것과 같이 저변이 46,785mm이며, 높이는 12,450mm로서 킬트러스 아치로 이루어진 골조의 전체길이는 57,800mm로 이루어져 있다.

실험체는 동아스트 괴산공장에서 제작하였으며, 설계도면에 따라 절곡된 부재를 반입하여 용접 접합하여 제작하였다. 또한, 지점은 <Fig. 2>에 나타내는 것과 같이 킬트러스와 지반과는 힌지지점을 형성하였으며, 베이스 플레이트는 콘크리트 지반위에 앵커 볼트로 충분히 지지하여 설치하였다.

양중은 실험체 위에 설치된 윈치를 이용하여 2개의 킬 트러스를 맞당겨서 양중 하였으며, 양중케이블은 양중시 제어의 간편성과 구조체에 미치는 영향 등을 고려하여 stay 케이블을 양중방향과 반대편에 각 2개소씩 설치하여 양중시에 구조체가 흔들리는 것을 방지하였다.

양중단계별 케이블의 장력을 확인하기 위해 양중

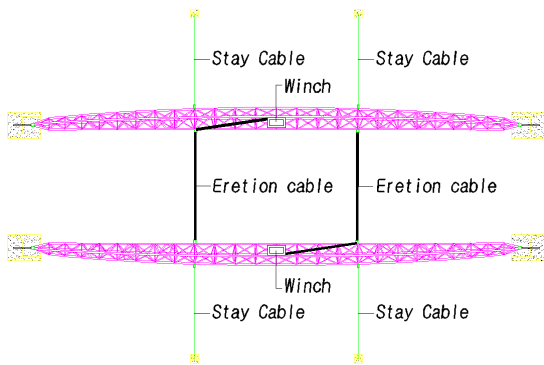
케이블의 단부에 100kN 용량의 로드 셀을 설치하였으며, stay 케이블에는 용량 50kN의 로드셀을 각각 설치하였다. 구조물 응력 및 변형 등을 확인하기 위하여 각 구조체에 strain gauges를 좌·우 구조물에 대칭되게 부착하였으며, 구조해석 결과에 따라 응력을 가장 많이 발생하는 킨트러스 상현재, 중간현재, 내부 부재, 가새 등에 설치하였다.

또한 단계별 양중각도를 확인하기 위하여 킨트러스 주각부에 각도계를 설치하였다. 기초부 base plate 변형 여부를 판단하기 위하여 각 base plate에 변위계를 설치하였다.

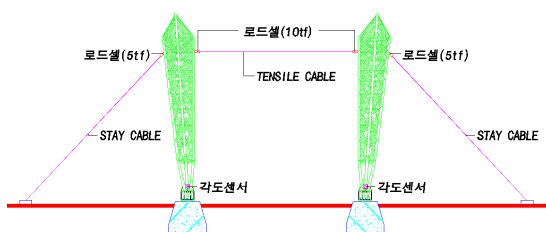
킨트러스 프레임 상부 중앙부에 윈치를 설치하여 하중 균형을 유지하였으며, stay 케이블의 윈치 능력은 최대 10kN의 양중이 가능하도록 설계하였으며, 바닥에 앵커 볼트로 고정하였다.

양중시 기초 힌지부의 회전 마찰저항을 줄이기 위해 윤활유 등을 도포하고, 구조물에 각종 게이지를 부착하였다.

데이터의 취득은 데이터 로거를 이용하여 실시간으로 취득 및 확인하여 양중의 속도 및 균형을 유지하였다. <Fig. 8>, <Fig. 9>에서는 윈치의 설치 위치, 양중케이블 및 stay 케이블 설치 및 계측장비 부착현황을 나타낸다.



<Fig. 8> Positions of erection and stay cables

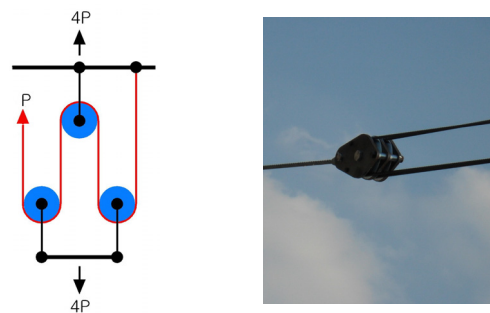


<Fig. 9> Positions of measuring instruments



<Fig. 10> Test set-up

특히 양중에 사용한 윈치의 용량은 구조해석에서 65kN의 용량이 필요한 것으로 확인되었으나, 안전율, 힌지부 마찰저항 등을 고려하여 20kN 용량의 윈치를 <Fig. 11>과 같은 도르래 원리를 이용하여 80kN의 용량을 가지도록 설계하였다.



<Fig. 11> Concept and view of pulley

3.4 실험방법

실험은 <Fig. 2>과 같은 구조체가 경기장의 스텐드 등과 같은 기 설치된 구조물 위에서 조립된 상태를 상정하여 실시하였으며, 초기 설치 위치는 지반에서 30°위치에서 실시하였다.

실험의 진행은 처음 30°의 위치에서 서서히 윈치를 작동시켜 실험체의 트러스가 양중되기 시작하는 것을 확인하고 단계적으로 양중을 진행하였다. 양중과중에 있어 설치된 2개의 양중윈치의 속도에 차이가 발생하여 편측의 윈치에 큰 하중이 작용하는 경우가 발생하였으며, 이때 양중속도를 적절히 제어하여 하중의 불균형을 해소하였으며, 전반적으로 양중을 10°단위로 정지하여 양중케이블의 하중 및 기타

전반적인 점검을 실시하며 실험을 진행하였다.

또한, 양중 시에 2개의 킬트러스가 서로 균등하게 양중이 되지 않고 한쪽의 트러스만 일방적으로 양중되는 경우가 발생하였으며, 이를 킬트러스 뒤쪽에 설치한 stay cable로 제어하면서 양중하였다.

실험은 예상대로 무리없이 진행되어 초기 설치위치 30°에서 소요위치인 90°까지 양중에 1시간 전후의 시간이 소요되었다.

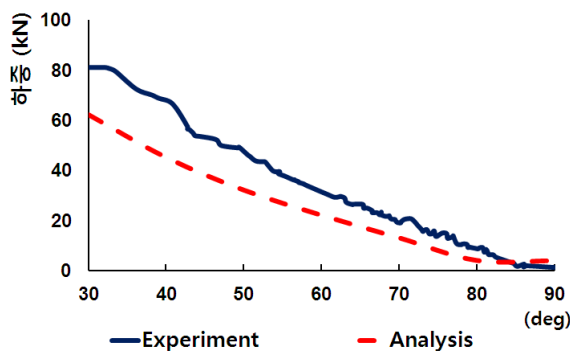
4. 실험결과 및 분석

4.1 하중-양중각도 관계

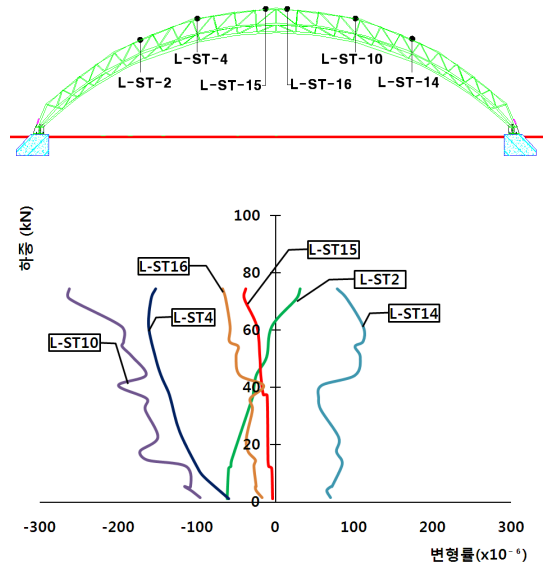
양중케이블의 작용하중과 양중각도와의 관계는 <Fig. 12>에 나타낸다. <Fig. 12>에는 해석 치에 의한 값도 같이 나타내고 있다. 해석 시에는 초기 양중하중이 69kN으로 나타나고 있으나, 구조물의 실험에서는 해석치보다 20%정도 높은 82kN에서 양중이 시작되었다. 이는 해석 시에 고려하지 못한 추가 하중과 구조체에 작용하는 추력에 의한 주각 힌지부의 마찰하중에 의한 것으로 판단된다.

또한 실험결과에서 하중 값이 안정되지 않고 부분적으로 변동이 발생하는 것은 양중 시 작용하는 풍하중의 영향과 양중속도 제어 시에 발생하는 충격하중에 의한 것으로 판단된다.

<Fig. 12>는 해석결과와 실험결과를 비교하여 나타낸다.



<Fig. 12> Tensile load of erection cable



<Fig. 13> Load-strain relationship

4.2 하중-변형률 관계

<Fig. 13>는 킬트러스 상현재의 하중-변형률 관계를 나타낸다. 양중케이블이 위치한 부위(L-ST-4와 L-ST-10)에서는 압축 변형이 일어나고 있으나, 중앙부 상단(L-ST-15, L-ST-16)에서는 변형이 거의 일어나지 않고 있어, 양중케이블이 위치한 부분에서 응력이 집중되어 있음을 알 수 있다.

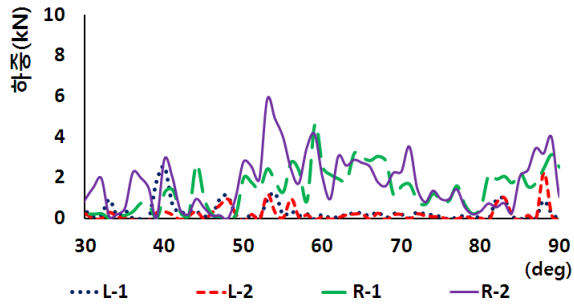
또한 실험체 약 1/4위치(L-ST-2)는 거의 변형이 일어나지 않으나 3/4위치(L-ST-14)에서는 약간의 인장변형이 발생하고 있다. 기본적으로 모든 위치에서 축방향 변형은 항복변형율의 10%전후의 범위에서 거동을 하고 있어 탄성적인 거동을 하고 있음을 알 수 있다.

4.3 시공단계별 구조체의 안정성

시공단계별 구조체의 안정성을 확보하기 위하여 원치로 양중하는 지점에 stay cable를 설치하였다. <Fig. 13>에서는 stay cable의 작용하중과 양중각도와의 관계를 나타낸다.



<Fig. 15> View of test process



<Fig. 13> Tensile load of stay cable

좌측 킬트러스에 설치한 L-1과 L-2 stay cable은 안정적인 상태를 유지하나, 우측의 R-1과 R-2 stay cable은 하중값이 안정되지 않고 불규칙한 양상을 나타내고 있어 좌우측 킬트러스가 균등하게 양중되지 못하고 한쪽으로 치우침이 발생하고 하고 있음을 알 수 있다. 또한 킬트러스의 흔들림에 의해 급격한 하중의 변화도 나타나고 있으나, stay cable에 발생하는 최대 하중은 양중케이블 작용 최대하중의 10% 미만으로 나타나고 있어 구조체 전체의 양중시의 안정성에는 문제가 없음을 알 수 있다.

킬트러스 실험진행과정은 <Fig. 15>에 나타낸다.

5. 결 론

본 연구에서는 킬트러스 대공간 구조물의 양중공법으로 제안된 Rotation-Up 공법의 유효성을 확인하기 위한 구조해석과 실험을 진행하였으며 얻어진 결론은 아래와 같다.

1. 실험시 양중케이블의 초기장력은 해석결과에 비해 20% 높게 나타났으며, 이는 주각부의 마찰하중 등에 의해 발생하고 있다.
2. 양중 케이블의 설치 개수는 2개로 하여 안정적으로 양중이 가능함을 규명하였다.
3. 양중실험 과정에서 발생하는 풍하중 및 충격하

중에 의한 영향을 충분히 고려할 필요가 있으며 또한 각 원치의 속도 차이에 따른 양중케이블의 속도 차이를 줄일 수 있는 방안이 필요하다.

4. 본 공법이 킬트러스 대공간 구조물의 양중에 매우 유효한 공법임을 확인하였다.

5. 추후 구조물 양중시 구조적 안정성을 고려한 인장케이블의 연결방법, 정착위치, 원치의 제어 등에 관한 심도 있는 연구가 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 경북대학교 학술지원사업의 지원을 받았습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Jung, Hwan Mok, Lee, Seong Yeun and Jee, Suck Won, Case Study on the Erection Method of Large Span Structures, Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol 7, No.2, pp.97-104, April 2007.
2. Yang, Jae-Hyuk, A Research on the Classified Structural System in Long-Span Structures, Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol 2, No.3, pp.81-92., Sep. 2002
3. Ministry of Land Transport and Maritime Affairs, The development of the core constructional technology of the soft flexible membrane structures, Construction & Transportation R&D Report, 2010
4. Kim, Cheol Hwan, et al, An experimental study on the erection method for spatial structure with keel truss by using Rotation-Up method, Proceedings of 22nd

- Annual Conference, Korean Society of Steel Construction, Vol. 22, No.1, pp. 171-172, 2011
5. Kim, Cheol Hwan, et al, Development of Erection Method for Spatial Structure with Keel Truss (Outline of Rotation-Up Method), Proceedings of 22nd Annual Conference, Korean Society of Steel Construction, Vol. 22, No.1, pp. 173-174, 2011
 6. Baek, Ki-Youl et al, A Study on Component Technology Applicable to the Spatial Structures, Proceedings of 22nd Annual Conference, Korean Society of Steel Construction, Vol. 22, No.1, pp. 59-60, 2011
 7. Lee, Seung-Chang et al, Structural Concerns and Erection Engineering for Pipe Truss with Long Span, Magazine of Korean Society of Steel and Construction, Vol 19, No.1, pp. 99-106, 2007. 3.
 8. Lee, Seung-Chang et al, Analysis, Design and Erection Engineering of Medium-sized Dome Structure, Magazine of Korean Society of Steel and Construction, Vol 18, No.2, pp. 75-81, 2006. 6.

(접 수 일 자 : 2013년 02월 18일)

(심사완료일자 : 2013년 04월 18일)

(게재확정일자 : 2013년 05월 22일)