

부산종합운동장 주경기장 케이블 지붕구조물의 시공

Construction of Cable Roof Structure for Pusan Main Stadium

이 주 영* 유 상 현 **
Lee, Ju-Young Ryu, Sang-Hyon

Abstract

Construction of roof structure, cable suspended structure, for Pusan main stadium is adapted a lifting method that is VSL lifting system. 5 processes are practiced for erection of the roof structure including the first lifting process for erection of upper cables and the second lifting process for erection of lower cables. Since all cables of this roof structure with two open spelter sockets are determined their length, some cable were wrong length, the roof structure would be unstable. But, At complete of erection for the roof structure each cable is attained to theoretical tension force with average 4% errors.

keywords : cable suspended structure, lifting method, tension force

1. 서 론

부산종합운동장 주경기장 지붕구조는 최초에는 와이드링거(Weidlinger)에서 설계한 텐스타(Tenstar) 구조로 버드에어(Birdair)에서 설치하기로 되었다. 그러나, IMF에 따른 경기침체로 건설비의 부담이 가중되어 일부공사가 중단된 상황에서 월드컵 경기장으로도 사용하기로 결정이 되어, 120m의 원형 개구부가 있는 당초의 설계안이 FIFA의 규정에 따른 잔디의 성장을 위한 일조조건에 적합하지 않으므로 지붕 개구부의 확장이 불가피하였다. 그리고 개구부의 확장을 위하여 텐스타구조는 180m × 152m의 타원형 개구부를 가진 케이블구조로 변경하게 되었으며, 예산과 공기의 시급성으로 개폐식 방식은 포기하게 되었다. 설계변경방침 결정 당시에는 주기둥의 공사가 상당부분 진척된 상황이었으므로 당시 시공된 주기둥으로 충분히 지지가 가능한 지붕구조물의 결정이 불가피 하였다. 이와 같은 상황에서 최종적으로 SBP (Schlaich Bergerman und

Partner)에서 설계한 케이블현수구조 (cable suspended structure)가 지붕구조로 결정되었고 파이프(Pfeifer)에서 제작하여 설치하게 되었다.

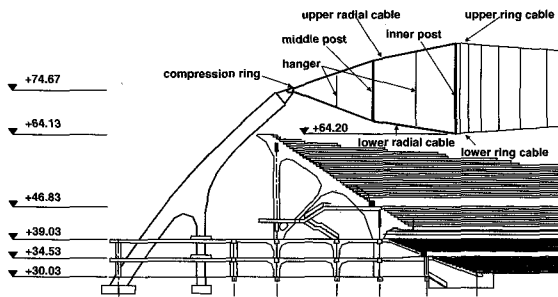
채택된 지붕구조인 케이블현수구조 (cable suspended structure, 이하 케이블구조)는 상부 래디얼케이블(upper radial cable), 하부 래디얼케이블(lower radial cable), 상부 링케이블(upper ring cable), 하부 링케이블(lower ring cable), 내부 포스트(post), 중간 포스트, 내측 행어(hanger), 외측 행어로 구성 되어 있다(<그림 1> 참조). 일반적인 케이블현수구조는 외부의 압축링과 내부의 인장링의 형태가 동일하나 부산종합운동장 주경기장의 경우는 외부의 압축링은 원형이며 내부의 인장링은 타원을 형성해야 하기 때문에 각 래디얼케이블의 길이도 다르게 되며, 래디얼케이블, 압축링과 주기둥에 발생하는 부재응력도 불균등하게 발생하게 된다.

부산종합운동장 주경기장 지붕구조물에 적용된 케이블은 락코일스트랜드(locked-coil strand)에 갈판(galfan)도금이 되어 있으며, 케이블의 정착단은 주물형의 오픈 스펠터 소켓(open spelter socket)을 사용하였다. 케이블의 정착단을 조정이 불가능한 주

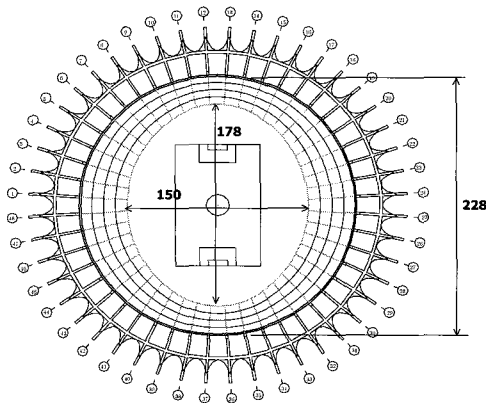
* 정희원 · 현대건설(주) 기술연구소 주임연구원

** 현대건설(주) 기술연구소 선임연구원

물형 소켓을 사용함으로써 현 시공된 주기둥의 측량과 압축링의 시공, 케이블 구조물의 해석 및 케이블의 제작 등이 정밀하게 이루어져야 케이블구조물이 안정된 구조물로서 거동을 하게 된다. 만약, 이 중에 하나라도 오차가 발생하면 시공시 케이블의 길이가 부정확하게 되어 케이블에 안정적인 구조물의 부재로서 거동하기에 필요한 초기응력의 주입이 정확하게 이루어지지 않게 된다.



〈그림 1〉 케이블지붕의 구성



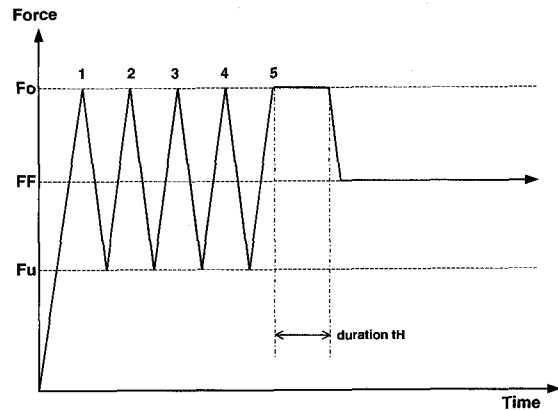
〈그림 2〉 케이블지붕의 평면

2. 케이블의 길이 계산

하중이 걸리지 않은 케이블은 하중에 대한 변형이 비선형으로 나타난다. 그러므로 같은 크기로 동일하게 구성된 케이블이라도 그 길이를 측정하기 위해서는 정해진 하중을 부가해야 가능하다. 즉, 하중이 주입된 케이블만이 그 신장을 예측할 수 있다. 상기와 같은 이유로 케이블의 재단 등의 목적으로 길이 및 탄성계수의 측정은 특정하중 하에서 이루어진다.

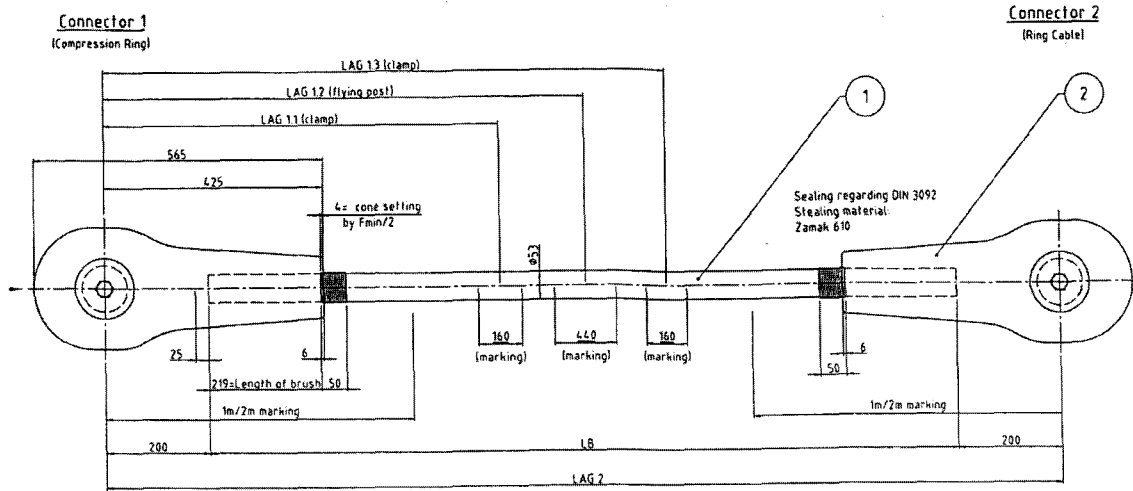
〈표 1〉 사용 케이블의 종류

명칭	종류	단면	갯수	길이
상부 링케이블	락코일 스트랜드	VVS ϕ 73	3	510,780
				512,038
				513,296
하부 링케이블	락코일 스트랜드	VVS ϕ 95	3	510,614
				511,966
				513,316
상부 래디얼케이블	락코일 스트랜드	VVS ϕ 53	12	24,483 - 27,138
상부 래디얼케이블	락코일 스트랜드	VVS ϕ 44	36	29,429 - 39,290
하부 래디얼케이블	락코일 스트랜드	VVS ϕ 69	12	24,409 - 26,836
하부 래디얼케이블	락코일 스트랜드	VVS ϕ 57	36	29,070 - 38,864
내측 행어케이블	나선 스트랜드	OSS ϕ 18	48	11,296 - 18,199
외측 행어케이블	나선 스트랜드	OSS ϕ 18	48	3,324 - 5,432
아치 타이케이블	나선 스트랜드	ϕ 28	62	10,157 - 13,144
아치 타이케이블	나선 스트랜드	ϕ 24	82	10,563 - 13,508



〈그림 3〉 케이블의 프리스트레칭

부산종합운동장 주경기장 지붕구조물의 모든 케이블은 케이블의 길이의 측정과 표시를 위하여 각각의 케이블에 최소절단하중의 10%에서 55%이하의 하중을 5회 반복하여 가하고 계산된 주입하중(일반적으로 구조물의 적재 하중과 고정하중이 포함됨)하에서 전체 길이, 새들과 클램프 부착을 위한 모든 계측지점들을 표시하며, 부재설치 후의 길이측정 등을 위하여 추가적인 표시를 하였다(〈그림 4〉 참조).



〈그림 4〉 케이블의 표기

부산종합운동장의 지붕구조물의 케이블의 경우는 계측오차 때문에 발생하는 조립시의 허용오차를 상쇄시키기 위해 시공 후 이를 재조정할 수 없다. 그러므로 하중이 주입된 상태에서 케이블에 허용되는 허용오차는 다음과 같다.

$$\Delta L(mm) = \pm(\sqrt{L(m)} + 5) \quad (1)$$

ΔL : 허용오차
 L : 케이블 길이

모든 케이블은 0.35%보다 작은 케이블 크리프(cable creep)가 발생하게 되며, 주조된 정착부를 가진 케이블의 경우는 추가적으로 주조된 콘의 수축이 발생하게 된다. 이 케이블 크리프와 콘의 수축은 구조물에서 특정 시간과 하중 후에 발생하는 것으로 가정되기 때문에 현장설치 중에 케이블 크리프가 끝나지 않는 경우도 있으므로 더 높은 하중이 필요할 수도 있다. 또한, 케이블 크리프의 종료까지는 하중의 크기, 하중의 수, 온도 등과 같은 다른 요인의 영향도 받는다. 케이블 크리프와 주조된 콘의 크리프의 예측은 제작사의 경험에 의존하므로 이들 값은 약간의 차이가 발생할 수 있다. 이와 같은 이유로 기하학적으로 정밀도를 요하는 시공은 케이블의 길이 조정이 가능한 방법으로 설계되어야 한다

케이블 제작길이를 계산하기 위해 먼저 구조해석 후의 기하학적 좌표와 케이블 응력으로부터 무응력

상태의 길이를 계산하고 이를 이용하여 다시 재단시 주입되는 하중하의 케이블 길이를 계산하고, 이를 기준으로 재단을 수행한다.

구조해석 후, 케이블의 길이($L(x)$)는 다음과 같다.

$$L(x) = L_{sysa}(x) - B_{1s} \text{ (or } B_{2s}) \quad (2)$$

$L_{sysa}(x)$: 절점간의 케이블 길이
 B_{1s} : 장력연결부1의 감소
 B_{2s} : 장력연결부2의 감소

이를 하중이 0일때의 길이(L_0)로 환산하면 다음과 같다.

$$L_0(x) = L(x) \left\{ 1 - \frac{S_v(x)(1 + E_k)}{AE} \right\} \quad (3)$$

E : 탄성계수(kN/mm²)
 A : 단면적(mm²)
 E_k : 크리프 = 0.00035
 $S_v(x)$: 해석된 응력(목표하중)

계산된 장력하에서 환산 길이(LA)는 다음과 같다.

$$LA(x) = L_0(x) \left\{ 1 + \frac{N_c(1 - E_k)}{AE} \right\} \quad (4)$$

N_c : 계산된 하중(kN)

정착구1의 중심에서 각 표시지점까지의 길이(LAG1)

는 다음과 같이 구한다.

$$LAG1 = LA(1) - B_1 + LA(2) + \dots + LA(n) \quad (5)$$

B_1 : 원뿔1의 감소(mm)

시스템 길이 ($LAG2$)는 다음과 같다.

$$LAG2 = LAG1 - B_2 \quad (6)$$

B_2 : 원뿔2의 감소(mm)

이와 같은 계산을 통하여 최종적으로 제작되는 케이블 길이(LB)는 다음과 같다.

$$LB = LAG2 - B_{1B} - B_{2B} \quad (7)$$

B_{1B} : 정착구1에서 이격거리

B_{2B} : 정착구2에서 이격거리

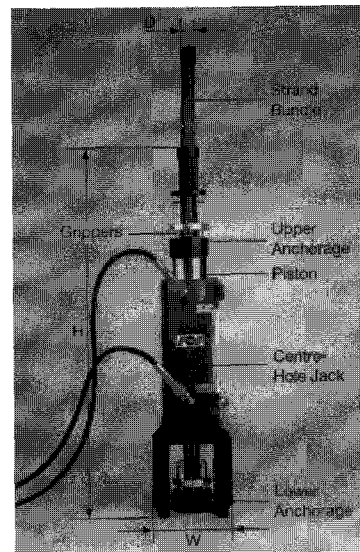
3. 인양공법

일반적으로 대공간 구조물의 시공은 고공에서의 설치작업이 대부분을 이루기 때문에 인양장비의 수요가 크고 위험도가 높으므로 지상 선조립의 범위를 확대하고 높은 곳에서의 설치작업을 최소화하려고 인양공법(lifting method)을 많이 채택하게 된다. 부산종합운동장 주경기장 지붕구조물도 이와 같은 이유로 VSL 리프팅시스템을 사용한 인양공법을 채택하였다.

VSL 리프팅시스템은 VSL 스트랜드시스템(strand system)이라고 부른다. 이 시스템은 케이블에 중량물을 올리거나 내릴 때, 또는 인장을 주거나 끌 때 사용이 가능하다. 이 시스템은 모티브유닛(motive unit)과 중량물을 고정하여 인장하는 인장재, 유압 펌프 그리고, 컨트롤유닛으로 구성되어 있다.

모티브유닛은 중앙홀 유압잭(hydraulic centre hole jack)과 상부 정착부(upper anchorage), 하부 정착부(lower anchorage)로 구성되어 있다. 상부 정착부는 잭피스톤(piston)에 부착되어 있다(<그림 5> 참조). 리프팅(lifting) 작업은 피스톤이 상부로 이동하면 상부 정착부에 물린 인장재의 개별 스트랜드를 작동시키고 그러면 인장재에 고정된 중량물이 상부로 이동

하게 되어 이루어진다. 다음으로 피스톤이 하부로 이동하면 상부 정착부가 풀림과 동시에 스트랜드는 바로 하부 정착부에 물리게 되어 중량물의 이동이 고정되고 피스톤은 원래의 위치로 돌아오게 된다. 그리고, 이 작업을 단계별로 반복함으로써 중량물이 이동하게 되는 것이다. 로워링(lowering) 작업은 이 모티브유닛에서 자동적으로 정착부를 풀리고 물리게 할 수 있는 보조장치가 있어 수행이 가능하다.



<그림 5> 모티브유닛

인장재는 $\phi 15.2$ 7선 PC스트랜드(이하 스트랜드)를 사용하는데, 이 인장재는 프로젝트에 따라 중량물의 리프팅등에 적합한 정착부를 별도로 설계, 제작하여 부착하게 된다.

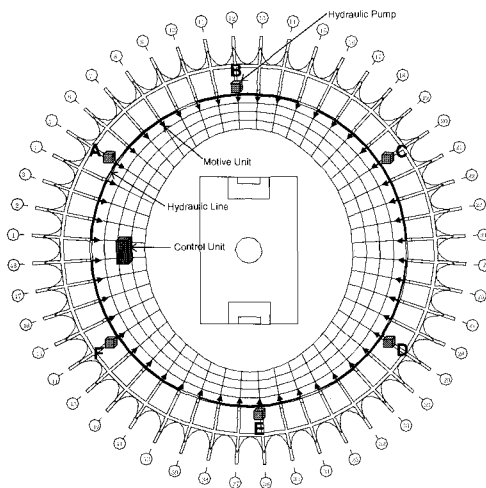
유압펌프에는 한 개나 여러 개의 유출구를 가지고 있으며, 모티브유닛에 오일을 보내게 된다. 이 펌프는 잭 내의 유압계와 원거리 유압조절장치를 통하여 전체의 작업공정 중 항상 계측 및 제어가 가능하다.

모든 VSL의 모티브유닛과 잭, 펌프는 수동 조작이나 원거리 조작이 가능하다. 케이블 지붕구조나 복합구조시스템은 일반적으로 리프팅시 정확한 좌표로 이동이 요구된다. 이를 위하여 특별히 설계된 컴퓨터로 운영되는 다중 계측제어시스템이 중앙통제하여 최종값과 정확한 높이를 계측, 제어하여 리프팅이나 로워링 작업을 수행하게 된다. 이때 중앙통제장치인 컨트롤유닛에서 계측된 데이터는 디지털 수치 또는, 그래픽 등으로 압력을 표시하게 된다.

4. 시 공

부산종합운동장 주경기장의 케이블 지붕구조물은 크게 나누어 공장제작과 현장 지상선조립 및 인양설치의 세가지 과정을 통하여 구축되었다.

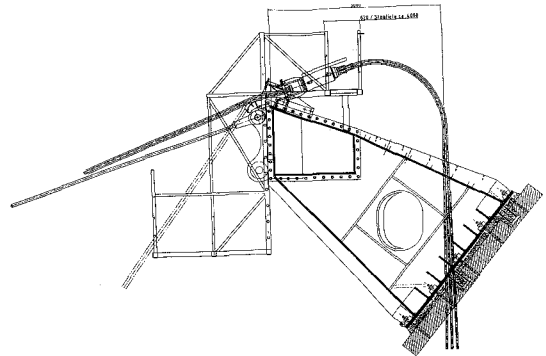
시공정밀도를 확보하고 현장에서의 공정을 최소화하기 위하여 수송에 지장이 없는 범위 내에서 공장제작의 비중을 늘렸으며, 조달비용을 절감하기 위하여 국내제작의 비중도 높였다(압축링 제작 및 설치, 포스트(post) 및 아치파이프(arch pipe) 제작, 가설비계 및 모티브유닛(유압잭) 고정용 지그(jig) 제작 등). 공중에서의 설치작업은 인양장비의 소요가 크고 위험도가 높으므로 지상 선조립의 범위도 확대하여 높은 곳에서의 설치작업을 최소화하려고 유압잭을 이용한 일종의 리프팅공법(lifting method)을 채택하였다.



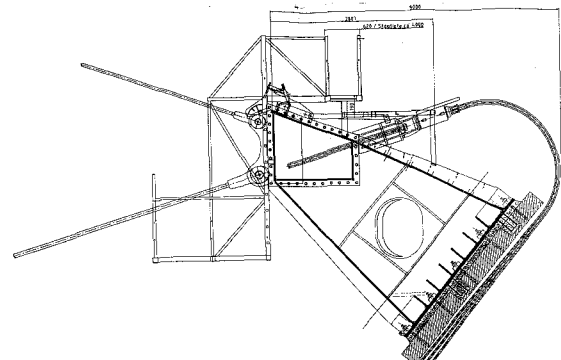
〈그림 6〉 리프팅시스템의 배치

현장 시공은 공장제작물의 반입 및 분배, 가설 및 지상 선조립, 인양설치, 가설 해체 및 반출의 과정으로 진행되며, 세부 시공계획은 시공정밀도의 확보, 작업의 능률 향상 및 안전성 확보, 공기단축을 목표로 작성하여 시행하였다. 즉, 공장제작된 케이블 부재 및 각종 결합부품을 지상에서 조립한 다음 리프팅장치(VSL 리프팅시스템)에 연결하여 인양하여 설치함으로써 케이블 지붕구조물이 구축되도록 현장 시공이 계획되었다. 지상선조립은 케이블 부재와 인양장치로 구분되어 각각 조립되며, 선조립된 VSL

리프팅시스템을 기둥전단의 압축링 상단에 설치하여 PC스트랜드(이하 스트랜드)로 전개된 래디얼케이블 부재를 연결한 다음, 유압잭으로 이 인장재를 끌어당기므로써 이 스트랜드에 연결된 래디얼케이블 부재와 이 래디얼케이블과 연결된 케이블 지붕구조물 전체를 인양하는 것으로 계획하였다.



〈그림 7〉 상부케이블 인양시 모티브유닛의 설치



〈그림 8〉 하부케이블 인양시 모티브유닛의 설치

4.1 리프팅시스템의 배치계획

리프팅을 위한 장치의 배치계획을 살펴보면, 우선 48개의 기둥마다 모티브유닛이 배치되는데, 상부 래디얼케이블의 인양에는 40톤급 1대씩 배치되고, 더 큰 장력이 소요되는 하부 래디얼케이블의 인양에는 상부에 사용된 40톤급을 이동 설치하고 100톤급을 추가하여 2대씩이 배치된다(〈그림 7〉 <그림 8〉 참조). 48개 기둥(축선)에 배치된 각 모티브유닛은 소요장력의 크기에 따라 6~9개소의 유닛을 유압라인을 통하여 하나의 그룹으로 묶어 1개의 유압펌프로 작동되며, 이를 위하여 총 6개의 유압펌프를 배치하였다. 각 그룹별로 모티브유닛의 작동은 유압 트랜

듀서에 연결된 계측라인과 유압펌프에 연결된 제어 라인을 통하여 2개의 컨트롤유닛에서 이루어 진다.

4.2 케이블 구조물 설치 공정

케이블 구조물 설치 공정은 다음과 같은 순서로 진행되었다. 공기를 단축하기 위하여 선후행 관계가 없는 작업은 자원 소요의 변동이 크지 않은 범위에서 병행하도록 계획하였다. 공정계획에서 링케이블과 래디얼케이블 지상조립작업, 인양장치 설치작업은 병행작업으로 계획하였다.

- ① 링케이블 전개 배치계획에 따라 가설발판을 설치한다. (가설발판은 링케이블의 지상 조립작업에서 케이블 부재가 오염되거나 손상되는 것을 방지하고 평탄한 작업장에서 조립하여 정밀도를 확보하고, 또한 이미 시공 완료된 운동장 콘크리트 구조물(스탠드 및 트렌치피트)이 손상되는 것을 막기 위하여 설치한다).
- ② 각 기둥 상단부에 인양작업을 위한 플랫폼을 가설한다.
- ③ 하부 링케이블 3라인, 6본을 지상 가설발판에 풀어놓은 다음, 1/2로 분할된 각 링케이블을 장축방향인 18번 및 54번 기둥에서 스레드로드(threaded rod)와 커니컬소켓(conical socket)으로 1개의 링케이블로 연결한다.
- ④ 하부 래디얼케이블을 각 기둥별로 스탠드에 전개하여 링케이블 커넥터로 하부 링케이블과 연결한다.
- ⑤ 지상조립장에서 모터브유닛과 스트랜드 및 지그를 선조립한 다음, 기둥 상단 압축링 및 플랫폼에 거치한다.



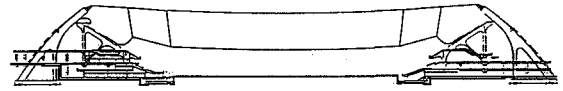
〈그림 9〉 1단계 공정



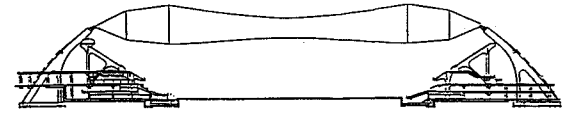
〈그림 10〉 2단계 공정



〈그림 11〉 3단계 공정

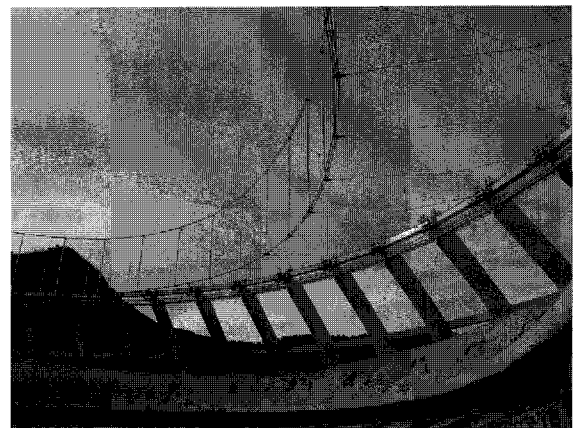


〈그림 12〉 4단계 공정



〈그림 13〉 5단계 공정

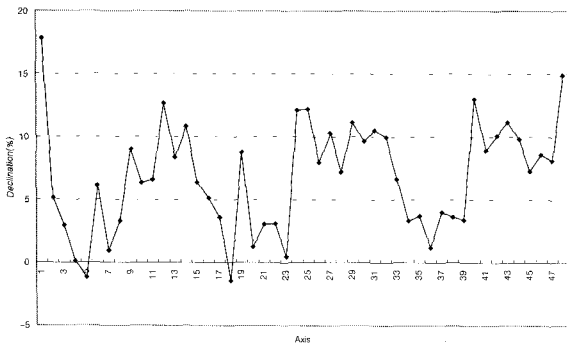
- ⑥ 지상 가설발판에 링케이블을 받치는 작업대를 설치하면서 그 위에 상부 링케이블을 전개한 다음, 스레드로드와 커니컬소켓으로 연결한다.
- ⑦ 하부 래디얼케이블과 같은 방법으로 상부 래디얼케이블을 각 기둥별로 전개하여 커넥터로 상부링케이블과 결합한 다음, 기둥 상단에 설치된 모터브유닛으로부터 스탠드로 내려진 스트랜드의 단부 결합구와 래디얼케이블의 결합클램프로 결합하여 연결한다(〈그림 9〉 참조).



〈그림 14〉 케이블 지붕구조물의 설치 완료 후 모습

- ⑧ 상부 래디얼케이블과 그에 연결된 상부 링케이블을 유압장비를 사용하여 1차 인양한다. 이때 하부케이블도 가설케이블을 연결하여 동시에 인양한다(〈그림 10〉, 〈그림 11〉 참조).
- ⑨ 크레인을 사용하여 내부 포스트를 상·하부

링케이블 사이에 커넥터로 체결하여 설치한다.



〈그림 15〉 스트랜드가 500mm일 때 계산값과 계측값의 차이

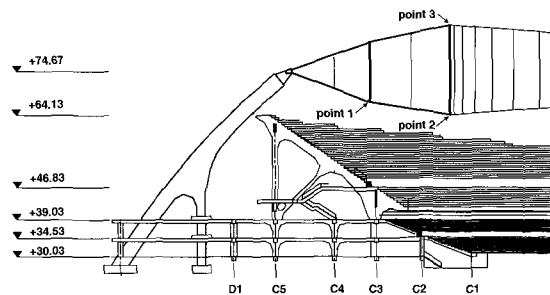


〈그림 16〉 인장응력 도입 완료 후 계산값과 계측값의 차이

- ⑩ 상·하부 래디얼케이블 사이에 내부 포스트와 중간 포스트를 조립하고, 또한 내측 행어케이블을 조립한다(〈그림 12〉 참조).
- ⑪ 하부 케이블 인양 위치로 상부에 설치된 모터 브유닛을 이동하여 설치하고 추가 인양장비를 설치한다.
- ⑫ 하부 래디얼케이블에 장력을 주어 하부 케이블을 인양하고 기둥 상단 압축링의 아이플레이트홀(eye plate hole)에 케이블 소켓을 도달시켜 핀을 체결하여 고정시킨다(〈그림 13〉 참조).
- ⑬ 상·하부 래디얼케이블 사이에 외측 행어케이블을 설치한다.
- ⑭ 인양장비 및 가설철물을 해체하고, 막 설치 작업자에게 인계한다.

〈표 2〉 설계좌표와 측량좌표의 비교

Axis	point	오차(m)		
		x	y	z
12	1	0.004	-0.005	-0.023
	2	-0.010	-0.009	0.018
	3	0.012	-0.041	0.019
24	1	0.011	0.001	-0.026
	2	-0.018	0.014	0.081
	3	0.012	-0.006	0.075
36	1	0.025	0.012	-0.040
	2	0.017	0.016	0.009
	3	-0.008	0.055	0.009
48	1	0.004	-0.019	-0.033
	2	0.035	-0.010	0.076
	3	-0.004	0.007	0.073



〈그림 17〉 측량 포인트

5. 계측 및 평가

이완된 상태에서의 케이블에서는 구조부재로서의 소정의 성능을 기대하기 어렵다. 그러므로 케이블의 안정된 인장강성을 확보하기 위해서는 케이블에 소정의 인장응력이 발생되도록 하는 것이 필요하다. 본 지붕구조물의 케이블의 경우는 케이블의 정착단이 고정되어 있어 설계 시 길이의 계산이 잘못될 경우에 케이블에 필요한 소정의 인장응력을 도입할 수 없게 된다.

그러므로 인양이 완료된 시점에서 케이블의 장력은 구조물이 정확하게 시공되어 안정적인 구조거동을 하게 되는지의 중요한 판단 척도가 되며, 추후의

유지보수를 위해서도 확인이 필요한 사항이다. 인장 응력의 주입완료 후 각 케이블의 장력은 설계값에 비교하여 평균 4%정도의 정확도를 보이고 있으며, 기하학적인 좌표도 측량된 12개 절점에서 설계좌표에 대하여 90mm이내의 정확도를 보여주고 있는 것으로 나타났다(<그림 16> <표 2> 참조).

6. 결 론

부산종합운동장 주경기장 지붕구조물은 시공 중에 케이블의 길이 변경이 전혀 불가능함에도 불구하고 케이블 구조물의 인장응력의 도입이 완료된 상태에서 계측된 각 케이블의 장력에 의하면 평균 4%정도의 정확도를 보이고 있고, 기하학적인 좌표의 측량 결과에서 90mm이내의 정확도를 보이고 있어 구조물의 설계뿐만 아니라 지붕구조와 관련된 모든 공

정의 시공이 치밀하게 이루어 졌음을 보여 주고 있다.

참고문헌

1. Buchholdt, H. A., "An introduction to cable roof structures", Thomas Telford, 1999
2. 김승덕, 서일교, 최옥훈, 서삼열, 한상을, "대공간 구조물의 해석 및 설계", 한국전산구조공학회, 1997
3. 조창휘, 이재홍, 황재호, 권택진, 최현식, 서삼열, "대공간구조물의 구조방식 및 공법특성에 관한 연구", 현대건설(주) 기술연구소, 1995
4. 정혜교, 이주영, "대공간구조 지붕시스템의 설계 및 해석기술", 현대건설(주) 기술연구소, 1999
5. 유상현, 이주영, 오명호, "부산종합운동장 주경기장 케이블 지붕구조물 시공", 현대건설(주) 기술연구소, 2001
6. 이병철, "사장교의 설계와 시공", 도서출판엔지니어즈, 1993