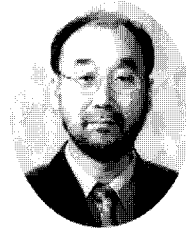
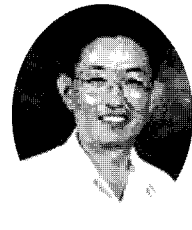


# 인장재 보강 아치구조

## Tensile Restrained Arches



박 선 우\*  
Park, Sun-Woo



최 취 경\*\*  
Choi, Chui-Kyung

경량구조물의 중요한 구조형태인 인장재로 보강된 아치구조물은 두 과정을 걸쳐 발전되었다. 산업혁명 이후 19세기에 기차가 발견되어 많은 경간이 큰 역사가 필요하게 되었다. 주철과 유리를 이용하여 자연광을 실내로 끌어드리기 위해 이러한 인장보강된 대형 건축물이 등장하게 된다. 70년의 침체기를 걸쳐 20세기 후반기에 대형 유리건축물에 재등장하여 아치 형태의 대형 유리구조물에 상당히 많이 적용되고 있고, 한국에서도 전망은 상당히 밝다고 할 수 있다.

이 학술기사를 통하여 이러한 구조형태의 발전과정을 살펴보고 전망에 대해서 알아보려고 한다.

### 1. 일반사항

#### 1.1 아치구조

아치는 2차원적인 곡선(曲線) 형태의 구조물이다. 일반적으로 아치는 외부하중을 압축력을 통하여 지지대에 전달하기 때문에 휨모멘트를 받는 경우는 상당히 희박하다. 이러한 구조거동은 지지대에서 수

평과 수직방향의 분력을 부담한다는 것을 의미한다.

아치는 2개의 관점에서 살펴 볼 수 있다. 첫 번째는 주된 하중부담이 휨 모멘트가 아닌 압축력을 받는 경우이고, 두 번째는 양단 지지대에서 수평·수직적으로 고정된 경우이다. 이러한 양단 지지대 사이에 타이로드(tie-rod)로 보강함으로써 자중과 외력의 합력으로 전달되는 즉 간헐 구조 시스템이 되어 단지 기초에서는 수직방향으로 하중이 전달된다. 이러한 시스템에서는 단순보의 경우와 마찬가지로 각각의 지지대는 고정-과 힌지지지가 필요하다. 수평지 지력에 대해 양단부에 타이로드의 구조적인 사용은 구조적인 면에서 확실히 유리하다. 그러나 아치의 수직 침하는 구조적인 지지력을 상당히 저하시킨다.

#### 1.2 구조 거동

단순히 압축력만 받는 아치 구조물이 지탱하기 위해서는 그것의 시스템 선은 지지선과 일치해야 한다 (일명 현수선). 다르게 표현하면 지지선은 외부 하중 상태에서 현수케이블의 대칭 형상이다. 다양한 하중 상태에서 케이블의 기하학적인 형태가 변하듯이 아치의 지지선도 다양한 상태로 변한다. 부재자체의 강성(stiffness) 때문에 아치는 하중에 적절하도록 지

\* 정회원.한국예술종합학교 건축과 교수, 공학박사

\*\* 정회원.경원대학교 건축공학과 교수, 공학박사

지선이 변하지 않는다. 그것은 지지선과 시스템선이 일치하지 않은 편심으로 인하여 모멘트를 발생시킨다. 이러한 것으로부터 생기는 변형은 아치에서 작용하는 큰 일반축력으로 인하여 모멘트는 계속 증가한다. 이러한 기하학적으로 일치하지 않는 효과는 세장하고 플랫한 아치에서는 상당히 큰 영향력을 미친다. 아치에 작용하는 외력은 기본적으로 좌굴이나 전도의 원인이 된다. 아치 면에서 안정 붕괴는 이러한 구조적인 대책으로 방지될 수 있는 반면에, 아치면에서 좌굴과괴는 항상 염두를 두어야 한다.

경량구조물 분야에서는 자중에 의한 시스템線은 큰 역할을 하지 못한다. 경량 아치구조의 설계와 계산에서는 균등하지 않은 적설하중과 풍하중으로 발생하는 비대칭하중의 경우를 고려해야 한다. 그러한 연유에서 아치의 형상이 특별한 하중조합으로 생기는 지지선은 별 의미가 없다. 아치 형상의 확정은 형상적, 사용성, 건축기술적인 면에서 결정되어야 한다.

압축과 인장력으로 발생하는 일반응력은 휨응력과 반대로 전체 단면적을 이용하여야 하고 그것을 통하여 부재의 사이즈를 줄일 수 있다. 외력과 그것으로 인한 변형으로부터 발생하는 휨응력을 줄이는 과정은 경량구조물의 설계에 있어서 초기단계부터 실행되어야 한다. 동시에 안정과괴, 압축부재의 좌굴길이와 같은 불안정 요소를 줄이는 것이 중요하다. 그리하여 경량 아치구조물은 인장부재로 보강되어야 하는 기본적인 원리가 적용되어야 한다.

### 1.3 인장 보강 아치

인장 보강 아치구조물은 2개의 상호적인 부부 시스템으로 되어 있다. 하나는 2차원적인 곡선형태인 압축과 휨에 강한 아치이고, 다른 하나는 경우에 따라 플랫 또는 휘어진 판형태의 인장을 사용하기 도 하지만, 직선적이고 선형적으로 긴장되는 부재 시스템이다. 선형적인 인장부재 대신에 플랫하고 휘어진 부재형태의 부재가 사용되기도 한다.

인장 보강의 역할은 특히 등변분포하중의 경우에 아치의 변형을 줄이는 데 사용된다. 또한 이것으로 아치의 휨하중으로부터 발생하는 비선형적인 형상의 영향력을 줄일 수 있다. 그것은 적은 재료를 사용함에도 불구하고 안정이나 강성을 높일 수 있는

하이브리드 형태의 구조시스템이 된다.

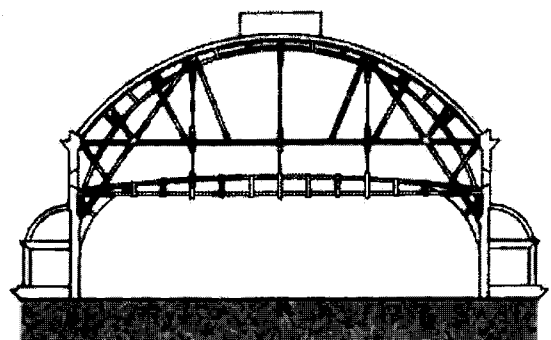
## 2. 역사적인 발전

### 2.1 고대시대에서 산업혁명

아치는 가장 오래된 구조물 중에 하나이며, 외형적으로 2개의 기본적인 형태로 전통적인 건축에 출현하였다. 하나는 자연석 또는 인조석으로 된 조적 아치이고, 다른 하나는 목재, 대나무, 갈대 다발로 된 비교적 좁은 경간에 사용된 탄성적이고 변형되는 트러스 형태와 유사한 아치다. 우리가 인식하고 있는 대부분의 장스팬 아치 구조물에 관한 사례들은 대부분 석조 볼트(vault)들이다. 최초로 봉 형태로 해결된 장스팬 아치 구조물은 Philibert De l'Orme(1510-1570)에 의해 고안되었다. 그것은 비교적 단부재를 이용한 둥근 아치와 뾰족한 아치를 중첩시켜 안정성을 향상 시킨 목재 아치구조물이다<그림 1>.

### 2.2 최초의 인장보강 아치구조물

1779년에 영국 콜부룩달(Coalbrookdale)에 세워진 교량구조물은 최초의 주철 아치구조물이다. 이러한 새로운 건축 재료들이 상당히 빠른 속도로 건축물에 도입되었다. 취성과 낮은 인장강도는 주철 사용에 많은 제약으로 작용하였다. 세장하고 스팬이 긴 구조물은 인장 부재를 이용한 안정성 확보가 필요하다. 주철에 비해 인장과 압축에 강한 선철은 대형 아치에서 상하현재와 경사재로 된 트러스 아치 구조물로 전환되는 역할을 하였다. 이러한 새로운 건축방법에 대한 하나의 사례는 1786년에 건축된



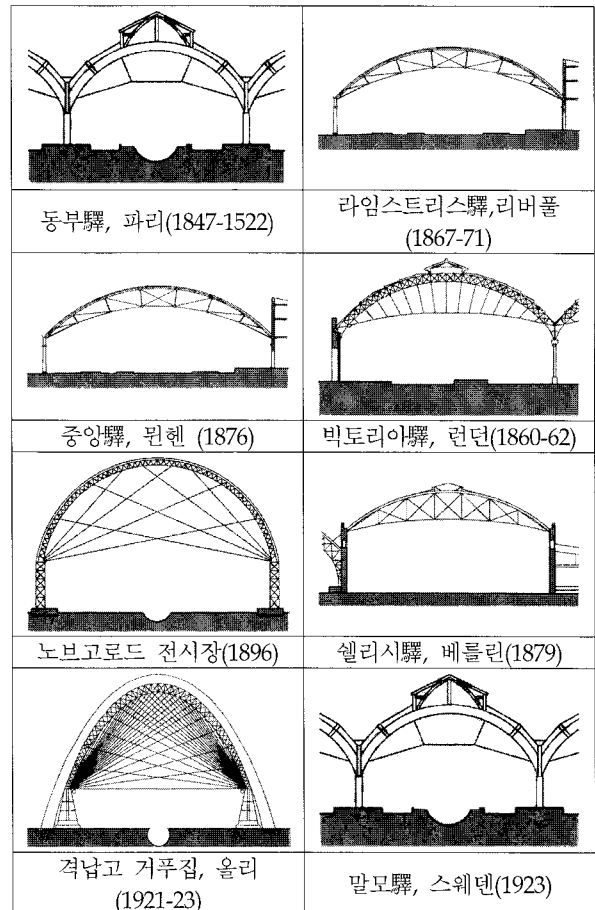
<그림 1> 파리의 프랑스 극장

파리의 프랑스 극장(Theatre de Francais)의 지붕구조에서 찾아 볼 수 있다(그림 1). 비교적 세장한 24m 스패의 구조물은 다양한 구조부재를 이용하여 안정과괴를 방지하려는 엔지니어의 노력으로 건축되었다. 경험부족과 불가능한 계산을 보충하기 위하여 보다 많은 안정적인 시스템의 중첩이 새로운 건축방법으로 생각된다. 항상 첫 번째 사례는 가끔 실험적인 모험을 감수해야만 한다. 이것은 19세기 초까지 매우 빠른 속도로 발전한 공학이론과 보다 긴 스패의 구조물에 대한 필요성에 따라 변화였다. 급속한 산업화와 그것에 연관된 철로망의 발전으로 많은 경량구조물의 필요성을 느끼게 되었다. 기본의 조적식 아치 구조로는 거대한 공간에 자연광의 도입이 불가능하기 때문에 철과 유리를 이용한 건축물이 많이 등장하게 되었는데, 19세기에 지어진 대부분의 철로역사와 식물원 등이 이에 속한다.

19세기 중반부터 우아하고 경제적인 해결책을 위한 인장재 보강의 아치구조물이 전성기를 맞이하였다. 이러한 경우에 있어서 독창적인 구조계획, 힘의 흐름, 재료거동과 연관된 확실한 구조적인 이해와 경험을 통하여 불확실한 계산의 가능성을 보충하였다. 첫 번째 사례는 1852년에 건축된 파리의 동부역(Gare de l'Est)이다. 폴론소(Polonceau) 거더(언더텐션 구조물과 유사)의 아이디어에서 영감을 얻은 이 지붕의 구조물 스패는 27m이다. 1/4 지점과 지지점에서 힘의 단힘, 측면 당김과 같은 아치를 지지하기 위한 다양한 시스템들은 전체적으로 상당히 세장한 구조물에서 불확실한 면을 지니고 있다. 1862년에 파올러(J. Fowler)는 각각 39m의 스패로 된 런던 빅토리아驛의 남동쪽 홀을 위해 그리드 아치와 선철로 된 안정 시스템을 응용하여 계획하였다. 이 시대에 최대 스패의 지붕이 리버풀 라임스트리트驛(1962)에 건축되었다. 구조 엔지니어 튜너(R. Turner)와 웨어번(W. Fairburn)은 46m 스패로 된 길이 113m 길이의 홀을 위해 선철 형강으로 된 상당히 세장한 구조물을 개발하였다. 안정 시스템을 위한 인장 경사재를 사용하여 구조 효율성을 개선시켰고, 아치의 단면적을 상당히 줄였다. 이러한 구조물은 슈베들러(J. W. Schwedler)에 의해 베를린의 쉴레시驛(1869)와 구엘리찌驛(1870), 게르버

(H. Gerber)에 의해 뮌헨의 중앙역(1876)에 이용되었다. 이러한 인장재 보강 아치 구조물의 보편적인 이용은 19세기 후반에 담보상태를 맞이한다. 그 원인은 2가지로 요약해 볼 수 있다. 첫 번째로 주철은 가격이 비싸고 단지 강봉형태로 획득할 수 있는 반면에, 주철에 비교하여 저가이고 다양한 형태로 생산되는 선철형강에 대한 주철의 경쟁력이 저하되었다. 다른 하나는 19세기 중반에 개발된 쿨만(K. Culmann)의 트러스 이론과 함께 1868년에 Winkler의 아치 구조물에 대한 계산방법이 개발되어 확실한 이론적인 근거가 없는 인장재 보강 아치구조물의 존재는 상실하고 말았다. 형강으로 된 평면 트러스 아치는 중간 또는 대형 스패에 대한 당연한 해결책이었다. 2힌지 아치는 3번째 힌지의 도입으로 정정 구조물로 되어 온도변화나 불규칙 침하에도 민감하지 않고 비교적 단순하게 계산할 수 있게 되었다<그림 2>.

이러한 새로운 가능성은 베를린에 1882년에 건축



<그림 2> 19세기에 개발된 인장보강 아치

된 52m 스패의 제2의 쉴레시驛 또는 1888년에 56m의 스패으로 건축된 프랑크프르트 중앙역과 같은 새로운 아치구조물의 실현으로 찾을 수 있다. 새로운 계산 방법과 기술적인 발전으로 19세기 말경에 2 또는 3개의 힌지의 트러스 아치형태로 더욱 더 긴 스패에 현실화되었지만, 동시에 인장재로 보강된 아치의 다양한 형태와 재료절약에 대한 해결책이 요구되었다.

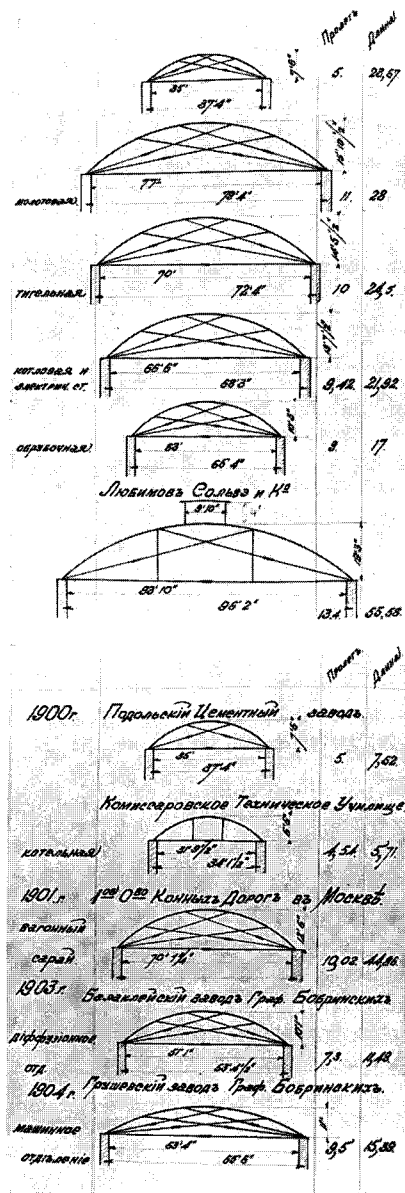
대형스패의 재료절약에 관한 해결방법은 러시아의 구조 엔지니어 슈코브(V. G. Suchov, 1853-1939)에 의해 인장 보강된 아치구조물의 완전한 새로운 형태에서 찾아 볼 수 있다. 그는 아치 지지점으로부터 아치의 중간지점에 인장을 보강하는 방법을 사용하였다. 안정을 위한 이러한 부재는 인장력을 받는 것 이외에 비대칭 하중의 경우에 하중을 받지 않는 아치 면이 외부로 휘어 지는 것을 방지해 준다. 하중을 받는 아치부분의 인장재는 변형되는 동시에, 안정성을 상실하여 붕괴된다. 이러한 정확한 하중상태에서 제 기능을 하지 못하는 부재에 다른 정확한 대응책은 엔지니어들이 찾아야 할 의무이다. 슈코브는 이러한 인장재의 기능상실을 단순한 트러스 이론으로 아치구조물을 해석하였다. 슈코브는 이러한 자신의 시스템을 지붕구조물에 상당히 많이 응용하였다. 첫 번째 사례로는 18m 스패으로 된 모스크바 GUM 백화점(1889-1893) 유리지붕과 1896년에 건축된 36m 스패의 니시니 로고로드(Nischni Nowgorod)의 전시장이다<그림 3>.

재료절약에 대한 이러한 경제적인 구조방법은 상당히 오랫동안 주목을 받지 못했다. 예외적으로 프랑스 엔지니어 프라이시네트(E. Freyssinet)의 포물선 형태의 철근 콘크리트의 비행기 격납고의 거푸짐에 이러한 구조를 이용하였다. 또한 1923년에 헤츠러(O. Hetzer)는 인장재를 이용한 안정 시스템을 이용하여 스웨덴 말모에 목재 지붕구조물을 계획하였다.

### 2.3 구조형태의 재등장

엔지니어가 다양한 형태와 재료절감에 탁월한 인장 보강된 아치와 셸구조물의 가능성을 다시 생각하는 데 거의 65년이 흘렀다. 이러한 구조물이 새로 등장하는데는 라이스(P. Rice), 슈라히(J. Schlaich)와 같은 엔지니어의 많은 노력으로 이루어졌다. 1989년에

슈라히는 함부르크 역사박물관에서 격자형태로 계획된 볼트(vault) 유리 구조물에서 인장재를 이용한 안정시스템을 위해 자전거 바퀴형태(spoked wheel)의 기본 아이디어를 적용하였다. 계속하여 라이스가 설계한 런던 MOMI의 전시장(1991), 스위스 추르의 역사(1992), 스페인 세빌리아의 엑스포 파빌론(1992), 일본 간사이 공항의 터미널(1994), 프랑스 릴(Lille)의 TGV 역사(1994) 등등에서 완전히 새로운 형태의 인장 보강된 아치 구조물이 실현되었다. 또한 슈라히가 설계한 드레스덴의 세계무역센터(1994)는 유리지붕



<그림 3> 슈코브(V. G. Suchov)의 인장보강된 아치구조의 스케치

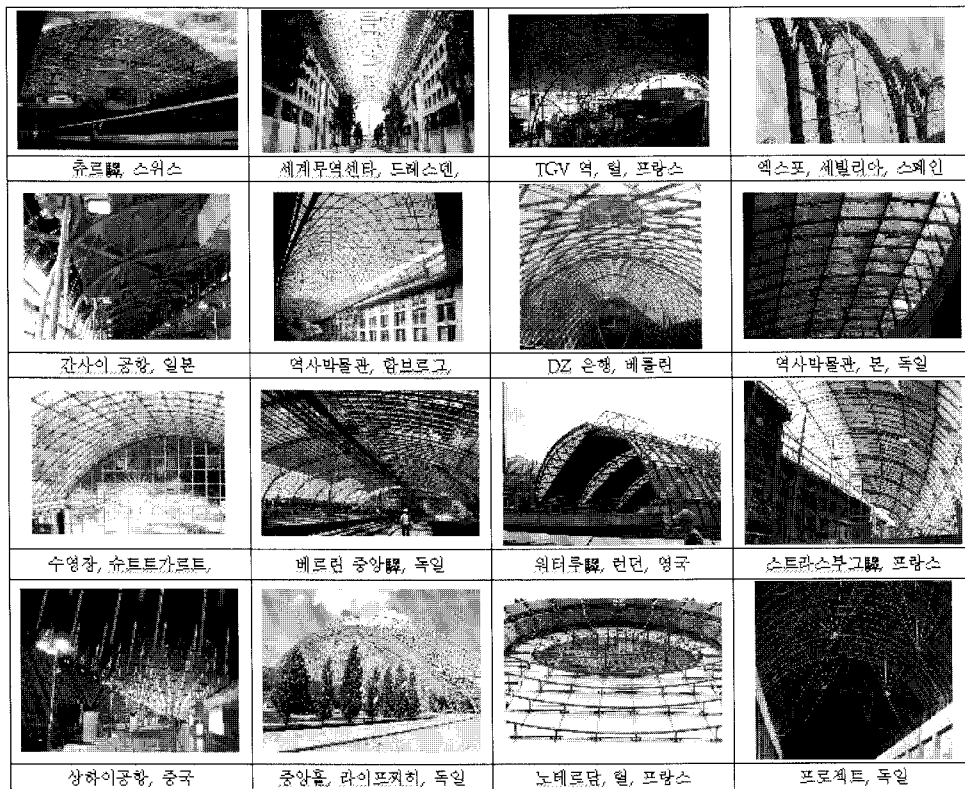
의 새로운 해결책에 진수를 보여주고 있다<그림 4>.

라이스가 개발한 몇몇의 시스템들은 슈코브가 응용한 인장 보강방법을 연상케 한다. 인장재 보강 아치의 새로운 세대는 프리스트레스트된 인장부재를 이용하고 이것으로 시스템의 효율성을 높였다. 이러한 구조물의 전성기를 누리게 된 원인은 엔지니어의 창의성과 재료, 생산기술적인 진보보다는 무엇보다도 FEM의 도움으로 상당히 복잡하고 부정정 시스템의 컴퓨터 해석으로 새로운 가능성에서 찾아 볼 수 있다. 엔지니어들은 컴퓨터를 이용하여 새로운 모험적이고 실험적인 경량 장스팬 구조물의 해결책 찾을 수 있었다. 당연히 엔지니어들은 이러한 컴퓨터에 의존하기 이전에 충분한 구조지식이 근본이 되어야 하고 기초적인 공학을 바탕으로 하고 있어야 한다.

### 3 결 언

비대칭 또는 등변분포 하중상태에서 모멘트를 줄일 수 있다면, 아치는 구조능력을 상당히 향상시킬 수 있는 탁월한 구조요소다. 이것은 인장재를 보강한

안정시스템으로 아치의 변형을 최소화하는데 상당히 효율적인 방법이다. 이러한 시스템은 직접 또는 간접적으로 아치의 지지점과 연결되는 방사형태의 인장봉 시스템으로 1/4 지점 또는 최상부 지점에서 단순하게 연결하는 것이다. 반대편에 있는 아치면이 부채살 형태로 2 지지점으로 당겨 변위를 억제하는 형태는 재료소모, 구조비용과 모멘트 감소의 의미에서 가장 효율적인 방법이다. 다른 하나의 유사한 방법은 아치의 기본적인 형태에 자전거 바퀴 형태로 인장 시스템을 계획하는 것이다. 그것은 견고한 지지대 잡아 당겨 고정함으로써 더욱 더 효율성을 높일 수 있다. 이러한 두 형태의 단점은 안정 시스템으로 인하여 순수한 공간면적이 줄어든다는 점이다. 그것의 사용성은 높은 실내공간을 필요로 하는 건물 지붕의 구조요소로서 상당히 제약을 받는다. 구조의 전체 시스템이 아치단면에서 공간사용에 대한 문제가 없다면, 또한 인장재와 압축재로 된 시스템으로 아치의 이동과 회전을 제어할 수 있다면 유리지붕에 필요한 경량구조물로서 계속 개발할 필요성이 있다.



<그림 4> 인장재 보강된 현대 유리건축물에 관한 사례들