



장스팬 대공간 구조시스템인 STRARCH(STRESSED ARCH) SYSTEM에 대하여



김진모*

1. 서론

1990년대 중반부터 국가적인 이벤트사업 즉 아시안게임, 월드컵경기 등이 유치되고, 영종도공항, 고속전철등 대규모 SOC사업이 계획되며 지자체의 이벤트시설이 계획되면서 장스팬 대공간 구조시스템의 적용이 증가되고 있다. 장스팬 대공간 구조시스템에 대한 이와 같은 사회적 필요성이 증대되면서 국내에 도입된 STRARCH(Stressed-arch) Structure System은 트러스, 아치 그리고 tendon의 장점을 이용해 건설되는 장스팬(최대 300M) 건물이다. 본 시스템은 스포츠 및 종합레저시설, 비행기 격납고, 물류창고 및 산업박람회 관련 시설물 등에 적용하여 외력에 의한 힘의 흐름을 자연스럽게 하고, 휨모멘트의 영향을 가능한 저감시켜 부재 축방향 내력만으로 외부하중에 저항하여 부재의 효율성과 전체적인 경제성을 최대한 확보하고자 하는 구조시스템이다.

본 기고에서는 장스팬(Long Span) 대공간 구조시스템인 STRARCH 시스템의 개요(구조물의 기하학적인 형태 및 단위 프레임구성 등), 시공일반 및 구조해석적 방법 등에 대하여 언급한다.

* 금호STRARCH 특수사업팀, 팀장

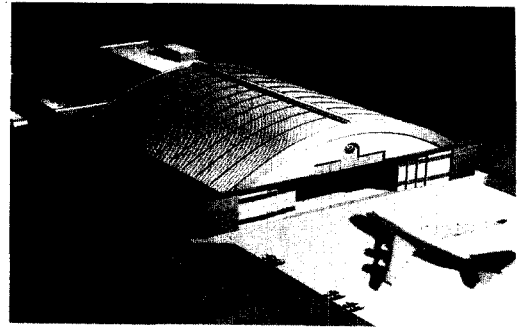


그림 1 인천국제공항 아시아나항공 항공정비시설(87m×90m)

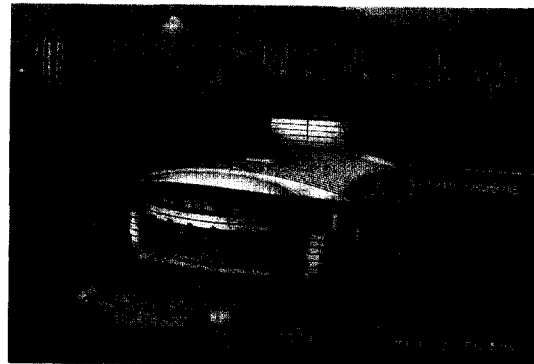


그림 2 올림픽홀(69m×71m)

2. STRARCH 건물시스템 개요

2.1 일반사항

STRARCH건물의 시공은 특수한 Stress-Erection 즉, 프레임을 펼친 상태로 지면 가까이에서 조립해 다수의 고장력 Stressing Tendon을 당겨 최종 아치 형태의 STRARCH건물을 만드는 과정을 포함하고 있다. 이때의 긴장건조 과정은 STRARCH 건물에 주어진 Catenary Span의 Moment Effect 효과를 이용하여 STRARCH 프레임의 하현재에 Prestress를 가하는 과정이다.

2.2 STRARCH 건물배열

일반적으로 STRARCH 건물은 일정한 스패를 갖는 일련의 STRARCH 프레임으로 구성되어 있다. 이 프레임들은 전체 구조 부재, 그리고 Purlin과 철재 지붕으로 구성된 지붕과 벽에 의해 연결되어 있다. 구조물은 아치형 볼트 모양으로 되어 있으며 End Wall은 기존의 시공법과 동일한 방법으로 마감된다. 이에 대한 일반적 배열을 그림 3에서 보여주고 있으며 다양한 형태로 응용될 수 있다.

2.3 STRARCH 프레임 형태

STRARCH 프레임은 부재의 특성 및 프레임의 형태에 따라 그림 4와 같이 유동부위(flexible section)와 부동부위(rigid section)로 나뉘어 진다. 트러스의 Flexible Section는 특수 Sliding Joint (gap)를

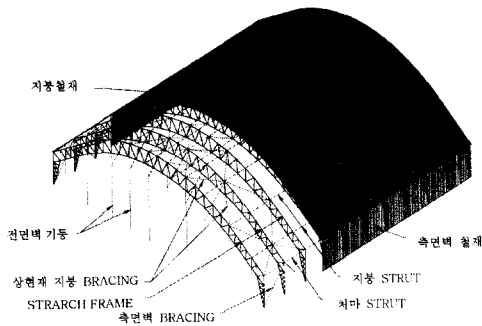


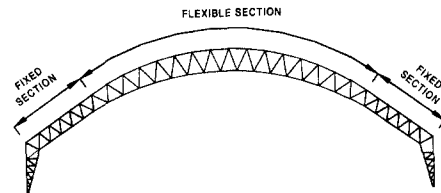
그림 3 일반적 STRARCH 건물배열

갖고 있다.

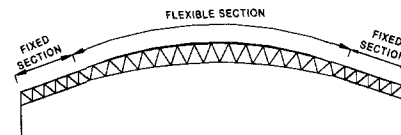
Stress Erection과정 중에 하현재의 간극이 닫히면서 트러스를 휘어 최종 형태를 이루며, 정확한 형태는 Gap Size와 Gap의 분포상태에 따라 결정된다. 트러스의 부동 부위는 일반적으로 기둥 및 단부를 이루고 있으며 Stress-Erection중에 형태가 바뀌지 않는다.

대부분의 STRARCH 프레임은 각형 그리고 원형 중공강관으로 이루어지며, 프레임 분절(Frame Segments)로 용접하고, 프레임 분절은 볼트로 연결해 현장에서 완성된 프레임(Assembled Frame)이 된다. 전형적인 STRARCH 프레임 디테일은 그림 5와 같다.

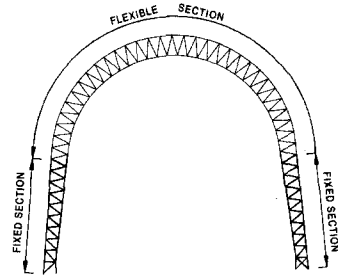
그림 5에서 하현재 디테일의 Sliding Joint는 Gap을 가진 하현재와 Gap-Closing을 유도하는 내부관(Inner Sleeve)으로 이루어져 있다. 내부관은 Stress-Erection과정의 최종단계에서 이웃한 하현재가 서로 맞물리도록 유도하게 된다.



(a) Long Span



(b) Low Rise



(c) High Rise

그림 4 STRARCH FRAME TYPE

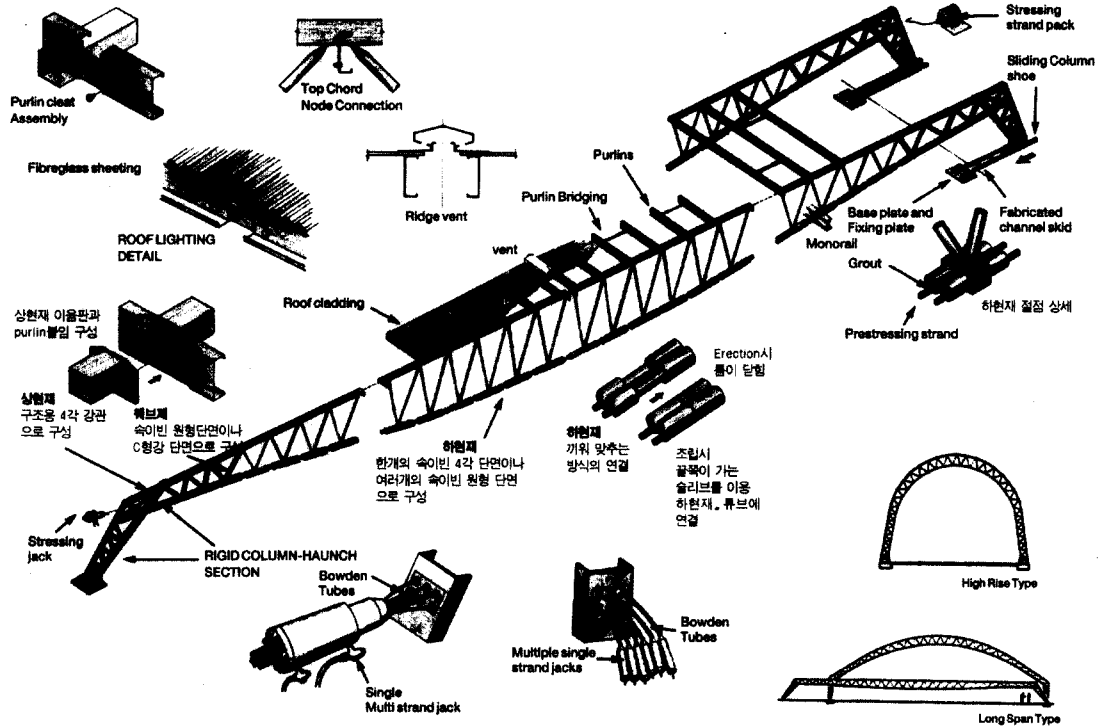


그림 5 Typical STRARCH Frame Details

3. 시공과정

STRARCH건물의 시공 순서는 다음과 같다:

1. 기본형태와 부재 조달 여건을 위한 기초설계 및 최종설계
2. 제작된 부재의 조달여부 확인 및 구조, 조립 도면준비
3. STRARCH 프레임 구획제작 - 일반적으로 프레임 구획은 전체 용접을 하나, 운송을 위해 부분적으로 조립하거나 주로 볼트 조립시공
4. STRARCH 프레임 분절을 현장에 반입한 후 볼트로 연결하여 지지대위에서 프레임 완성. 양단벽, 프레임빔 등 부대철재 조립을 동시에 시행.
5. STRARCH 프레임이 조립된 후에 지붕재(purlin, 보온재, 지붕 마감재)를 프레임의 조립과 함께 시행.
6. 프레임 및 지붕재 조립 완성과 함께, Stressing

Tendon을 하현재에 삽입하여 Prestressing력을 이용해 긴장력을 가해 건물을 긴장건조(Stress-Erection)하여 최종 형태로 완성한다. 최종 형태를 갖춘 후, Stressing Tendon은 고정되며 Sliding Column을 기초에 고정하여 긴장건조를 마친다.

7. 전, 후면벽과 이어지는 부속물들은 일반적 방법과 동일하게 설치한다.

4. 긴장건조(STRESS-ERECTION)

STRARCH 건물시스템의 최대 특징은 Stress-Erection 과정이다. 이 과정중에, 건물은 조립 위치에서 최종 완성 위치로 상승한다.

조립 위치에서 프레임은 비계나 타워형 지지대 위에 일정한 간격(보통 7-12m)으로 지지된다. 이때 프레임은 아무런 긴장력을 받지 않는 상태에 있다. Prestressing Tendon은 프레임 하현재를 구성하는 이중원형 증공 강관에 삽입된다. 한쪽 끝

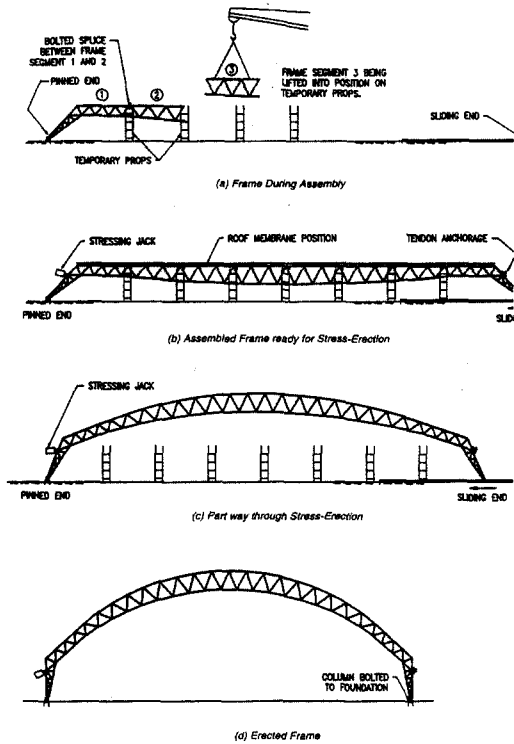


그림 6 STARCH Assembly/Erection Procedure

(Dead End)에 있는 Strand Anchorage에 다수의 Strand를 끼우고 프레임의 단부에서 Jacking Plate에 고정되며, 나머지 잭킹 단부측에서는 Strand를 통과시켜 Jacking Plate까지 끼운다.

Prestressing Jack을 통해 Tendon에 가해지는 하중은 건물의 자중 및 Sliding Column의 마찰저항, Tendon의 wobble friction저항을 극복하고 건물을 들어올릴 때까지이다. 이 시점에서 상승(Lift-Off)이 일어나며, 프레임이 비계로부터 분리되면서 양끝의 기둥 사이에서 자체로 지지하는 스패를 갖는다. 잭에 하중을 증가시키면서 하현재의 간극은 점차로 닫히게 되며 프레임은 아치 형태로 상승한다. Stress-Erection을 통해 모든 하현재의 Gap-Closing이 끝난 이후, 건물은 최종 형태로 완성된다.

프레임의 한쪽(핀지지부)은 기초의 baseplate에 고정되며 다른 쪽(이동면)은 stress-erection과정 중에 Skid pad(활재)를 따라 이동한다. Stress-erection이 끝난 후에는 기둥 하부의 sliding shoe

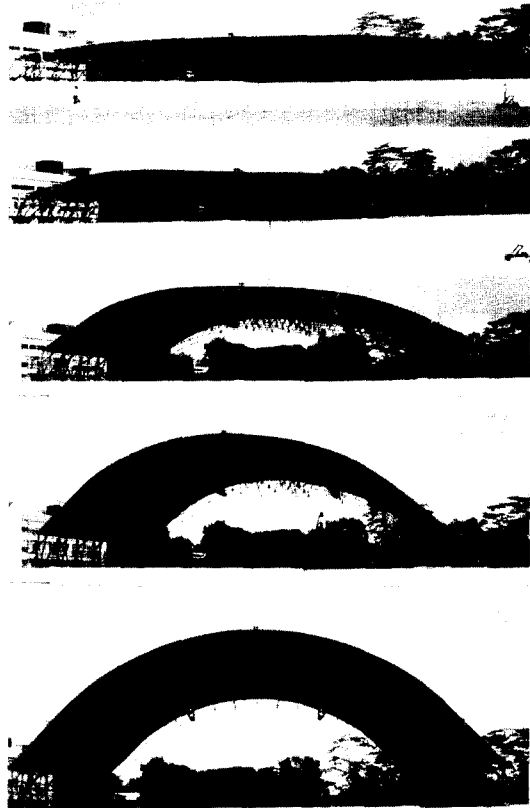


그림 7 Stress Erection Process

는 기초의 baseplate에 도달하고 이를 최종위치에서 볼트로 조인다.

5. STARCH 프레임 부재 해석 및 설계

5.1 부재의 거동특성 및 해석

완성된 상태의 STARCH 프레임은 부재축력으로 외부하중에 저항하는 트러스 구조와 유사한 거동을 하며, 최초에 직선부재(Straight Member)였던 상·하현재는 긴장건조(Stress Erection) 과정에서 소요 곡률을 갖게 된다. 이러한 결과로 구조물의 최종적인 아치형상과 상현재 부재크기에 따라 초기의 기하학적 변형(initial geometric imperfection)이 발생하게 된다. 또한 곡률에 의한 초기 변형과 Erection 과정에서 휨응력(bending stress)

이 부재 내에 발생하는데, 이러한 초기 변형과 휨 응력에 의해 상현재에는 항복응력을 초과하는 응력이 발생되며, 탄성영역을 넘어 재료적으로 비탄성 영역(inelastic range)이 된다. 따라서 STRARCH 구조의 상현재는 응력도입에 의한 초기변형(초기 불완전, Initial Imperfection)을 가지는 비탄성 상태의 트러스 요소로서 거동하게 된다.

그림 8은 응력 도입과정 및 외부하중 작용 하에서의 상현재 변형과 내력에 대한 거동상태를 보여준다. 그림 8(a)와 같이 상현재는 응력 도입 과정 후 휨모멘트에 의한 초기변형 Δ 와 축력 P_a 가 작용하게 되며, 이러한 응력에 의하여 발생된 휨 변형 ϵ_b , 축변형 ϵ_a 은 항복변형을 초과하게 된다.

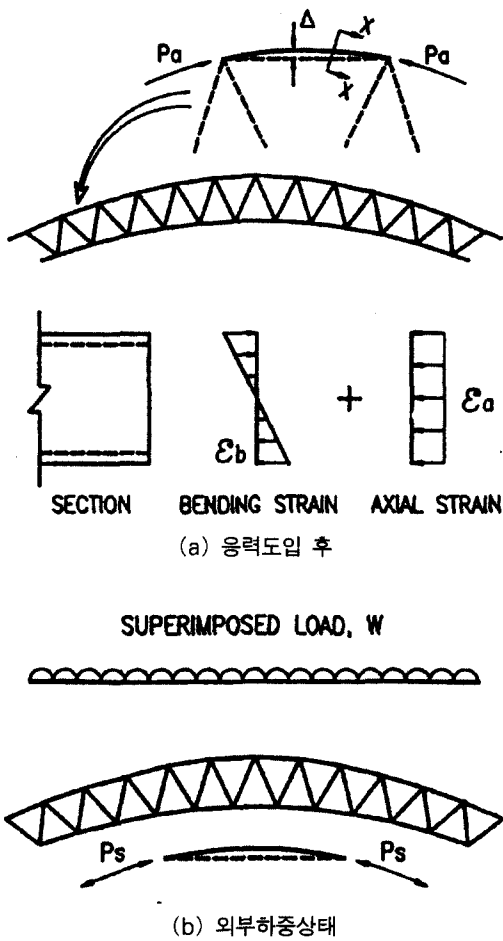


그림 8 하중상태의 STRARCH 상현재

이에 더하여 그림 8(b)와 같이 외부하중이 STRARCH 상현재에 작용하게 되면 외력에 의한 축력 P_s , 또한 발생된다. 위와 같은 특징으로 인하여 STRARCH 프레임은 초기변형과 휨응력을 가지는 Continuous Column으로 고려될 수 있으며, 탄성상태에 의한 일반적인 설계방식으로는 설계가 불가능하게 된다. 따라서 기하학적인 초기변형에 따른 재료적 비탄성 특성과 Residual Stress를 설명하는 Tangent Modulus Theory와 초기변형에 대한 수정계수를 사용하는 Perry Equation을 동시에 적용한 이론식으로 STRARCH 상현재의 설계공식을 유도 할 수 있다.

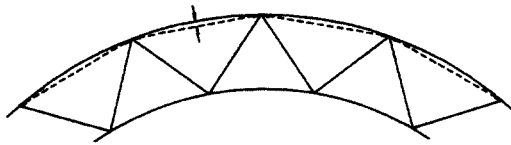
STRARCH 프레임의 전용해석 프로그램인 "micro-STRARCH"는 Frame의 조립, 하중작용 및 하중조합상태에 대한 3차원 선형 탄성해석 프로그램으로 일반적인 하중상태나 프레임의 극한 강도한계상태(Ultimate Strength Limit State) 설계 적용에 유용한 것으로 판명되었다.

5.2 STRARCH 프레임 부재의 설계

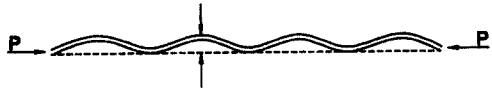
5.2.1 유동상현재의 설계 (Top Chord Design in the Flexible Section)

STRARCH 상현재는 부재의 연속성(Continuity)으로 인하여 긴장건조(stress erection)과정에서 절점간 초기 곡률(Curvature)을 갖게되고, 추가적인 외력의 작용은 초기 변형에 의한 2차의 휨응력을 발생켜 결국 부재가 항복상태(Inelastic Range)에 이르게 된다. 이러한 STRARCH 프레임의 특징이 일반적인 Steel 프레임에서는 발생하지 않는데, 초기변형을 가진 유동상현재는 그림 9(b)와 같이 초기변형을 가진 연속기둥(Continuous Column)과 유사한 거동을 하게 된다.

따라서 상현재의 곡률, 세장비, 재료상수에 따른 상현재의 극한강도를 계산하기 위한 비선형 유한요소해석을^{1)~2)} 수행하였고, 그 결과 그림 10과 같은 강도곡선을 얻게 되었다. 그림 10의 강도곡선을 통해 무차원 곡률비 x_o/x_{yo} 및 수정세장비(modified slenderness ratios) $\sqrt{\frac{P_{Yn}}{P_E}}$ 값에 의해 $\frac{P_{Tu}}{P_{Yn}}$ 를 알 수 있다.



(a) Top Chord Curvature Imperfection



(b) Top Chord Equivalent Column Imperfection

그림 9 Top Chord Curvature Imperfection and Equivalent Column Imperfection

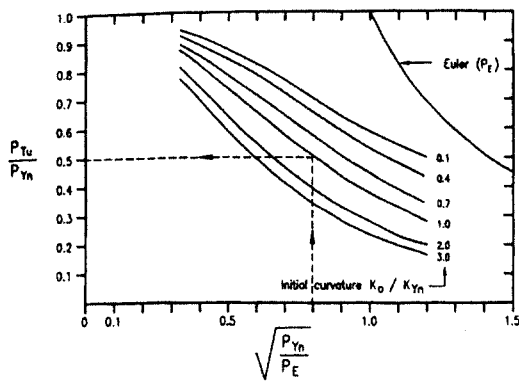


그림 10 상현재의 강도 곡선

따라서, 그림 10의 상현재 강도곡선으로부터 상현재의 P_{Tu} 를 알 수 있으며, 이 P_{Tu} 가 외부하중에 의한 F 보다 크도록 부재를 설계한다.

$$F \leq P_{Tu}$$

여기서

α_o : initial curvature of STRARCH top chord

α_{yn} : curvature to cause first yield of

STRARCH top chord

P_E : Euler buckling load

P_{Yn} : yield load

P_{Tu} : ultimate axial load capacity

F : axial member load

5.2.2 유동하현재

(Bottom Chord Design in the Flexible section)

하현재의 Flexible 구간은 튜브로 제작되며 고강도 스트랜드(Strand)를 삽입하고 스트랜드가 부식되지 않도록 시멘트로 채워져 있다. 따라서 튜브, 스트랜드는 시멘트에 의해 합성부재와 같이 거동(Composite Action)하며, 하현재를 이루는 각 부재의 설계는 개별적으로 이루어진다.

긴장건조과정(Stress Erection Process)을 거친 유동하현재는 튜브와 스트랜드에 압축력과 인장력 T_t , T_s 가 각각 발생된다. 외부하중상태에 의한 하현재의 축력을 P_{sd} 라고 할 때, 긴장건조과정 및 외부하중에 의한 파이프, 스트랜드, 시멘트 그라우트의 분력은 다음식과 같다.

$$C_t = T_t + \frac{A_t}{A_{total}} P_{sd}$$

$$C_s = T_s + \frac{A_s}{A_{total}} P_{sd}$$

$$C_g = \frac{A_g}{n A_{total}} P_{sd}$$

$$A_{total} = A_t + A_s + \frac{A_g}{n}$$

여기서,

T_t : 긴장건조과정에 의해 발생된 튜브 압축력

T_s : 스트랜드에 도입되는 긴장력

P_{sd} : 외부하중에 의해 발생된 하현재 축력

C_t : component of force to tube

C_s : component of force to strand

C_g : component of force to grout

A_t : tube area

A_s : strand area

A_g : grout area

n : modular ratio

유동하현재의 튜브는 응력도입과정을 거치는 동안 유동상현재와 같은 곡률을 가지게 되는 등 그 거동특성이 비슷하다. 따라서 설계방법도 유동상현재와 같은 방법으로 설계한다. 이에 반해 스트랜드는 일반적인 설계규준에 의해 설계한다.

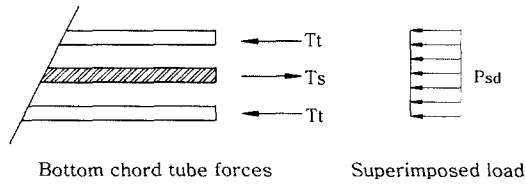


그림 11 하현재의 분담력

5.2.3 기타 부재설계

유동상현재와 유동하현재를 제외한 다른 부재는 일반적인 방법과 동일한 해석 및 설계를 한다.

6. 맺음말

Strarch Structure System은 Australia의 Strarch Internatioal社에 의해 개발·보급된 것으로 당사와의 기술체휴를 통해 영종도 신공항 Asiana Hangar 및 잠실 올림픽 공원내의 올림픽 홀에 적용하여 시공계획 중에 있으며, 여러 건의 참고건물, 체육시설 등의 Roof Structure에 적용할 예정이다. 최고 300M 스패까지 가능한 장스팬(Long Span) 대공간 구조시스템인 STRARCH 시스템의 특징점은 다음과 같다.

1. 시공성에 있어서 프레임 구조체의 조립과 동시에 지붕마감, 각종설비 시설이 완료되고, 단기간(최대 24시간)의 Stress-Erection과정을 통해 거의 모든 공사가 이루어지므로 공기가 매우 짧다.
2. 또한 Strarch Roof 구조가 완성되면, 하부의 일반 골조공사는 전천후시공이 가능하게 된다.
3. Strarch System의 형상구조 특성상 프레임의 부재 거동이 아치구조의 거동을 하게되므로 비교적 적은 부재 단면으로 큰 부재 응력을 확보할 수가 있어 평균 약 25~30kgf/m² 정도로 소요 프레임물량이 매우 적게 든다.
4. 실험결과에 근거한 구조적인 안정성에 있어서 스패의 실제적인 처짐은 1/6800 수준으로 매우 안정적이며, 동일 스패의 일반 철골트러스 구조에 비해서 2배 이상의 안정성을 확보할 수

있는 시스템이다.

이상과 같은 특징점에도 불구하고 Strarch System이 현실적으로 국내에 있어서 건축주 및 설계자의 욕구충족에 만족할 수 있도록 앞으로 본 구조 시스템에 대한 학계와의 공동연구 및 Know-How 축적, 기술개발을 통해 국내 장스팬 대공간 구조 시스템을 한 차원 발전시켜 나아갈 것이며, 장스팬 대공간 구조 시스템보급에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. Clarke, M.J., and Hancock, G.J., "A Comparison of Finite Element Nonlinear Analysis with Tests of Stressed Arch Frame", *Proceedings, Tenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, St Louis, Missouri, USA, 1990, pp.605~635
2. Clarke, M.J., and Hancock, G.J., "A Finite Element Nonlinear Analysis of Stressed Arch Frames", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 10. 1991, pp.2819~2837
3. Clarke, M.J., and Hancock, G.J., "Tests and Nonlinear Analysis of Small-Scale Stressed-Arch Frames", Research Report R659, School of Civil and Mining Engineering, University of Sydney, 1992
4. Hancock, G.J., Key, P.W., Clarke, M.J. and Olsen, C.J., "Structural Tests on the Top Chord of Strarch(Strarch Arch) Frames", *Proceeding, Pacific Structural Steel Conference*, Gold Coast, Queensland, Australia, 1989, pp.557~569
5. Hancock, G.J., Key, P.W. and Olsen, C.J., "Structural Behavior of a Stressed Arch Structural System", *Proceedings, Ninth International Specialty Conference on Coldformed Steel Structures*, St Louis, Missouri, USA, 1990, pp.273~294
6. Key, P.W., Mansell, D.S., Morgan, P.R. and

Stevens, L.K., "Full-Scale Testing of a 30m Span STRARCH industrial Building", Proceedings, The Institution of Engineers Australia, Structural Engineering Conference, 1990,

pp.351~355

7. Structural Stability Research Council, Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, 3rd. Wiley, 1976 