

Stressed-Arch 시스템의 시공 과정 해석에 관한 연구

A Study on the Analysis of Construction Process for the Stressed-Arch System

김종범* 윤종현** 이경수*** 한상을****
Kim, Jong-Bum Yoon, Jong-Hyun Lee, Kyung-Soo Han, Sang-Eul

Abstract

The objectives of this research are to verify the structural stability and estimate the resisting performance of Stressed-Arch system during the construction process.

Full scale models are taken to obtain the objective shape by the Dynamic Relaxation Method. As a result, it measured more strain than yielding strain at the extreme fiber of top chord member on the crown, but it is shown that members have the sufficiently compressive resisting performance as well as a considerable strain recovery capacity under unloading. Therefore, it is confirmed that Stressed-Arch system apparently have sufficient range of the structural capacity, but it is required that the elasto-plastic behavior of this system must be verified more detailed by numerical analysis and experiments.

1. 서론

최근 새로운 대공간 구조 시스템으로 도입된 Stressed-Arch 시스템은 프레임을 지면에서 조립한 후, 하현재에 포함되어 있는 스트랜드에 프리스트레스를 도입시킴으로써 아치 형태를 갖게 하는 특수한 설치 과정이 포함된 공법을 채택하고 있다. 그리고 강재 트러스, 아치 및 스트랜드의 장점을 살려 재료의 효율적인 이용과 구조적인 안정성을 동시에 얻을 수 있는 복합 구조 시스템이다.

이 시스템의 시공 및 구조적인 특징은 Hancock의 연구 결과 및 세계 각국에서의 시공 사례 등을 통해 규명되고 있으나, 국내에서는 제반 여건의 미성숙으로 인하여 이 시스템으로 구조물을 구축한 경험이 없으며, 설계 및 시공 전반에 관한 기술이 축적되지 않은 상태이다.

따라서, 이 연구에서는 실물 크기 단위부재 시험체의 실험과 전체 시스템에 관한 시공 과정의 해석을 통하여 Stressed-Arch 시스템의 구조 성능을 확인하고, 시공 과정에 따른 부재의 안정성을 평가하는데 목적을 두고 있다.

* 정회원, 인하대학교 대학원 석사과정

** 정회원, 인하대학교 대학원 박사과정

*** 정회원, 금호건설 기술연구소 연구원

**** 정회원, 인하대학교 건축공학과 교수, 공학박사

2. Stressed-Arch 시스템

2.1 Stressed-Arch 시스템의 개요

Stressed-Arch 시스템은 상현재, 웨브재, 스트랜드를 포함하는 하현재로 구성되어 있으며, 이 프레임들은 전체 구조 부재, 또는 중도리와 철재 지붕으로 구성된 지붕과 벽에 의해 연결되어 있다. 하현재의 긴장 결과 구조물은 아치 또는 볼트 형상을 갖게 되며 양단은 케이블 정착공법에 의해 마감된다. 그림 1은 이 시스템의 일반적인 프레임 배열을 보여주고 있으며, 용도에 따라 여러 가지 형태로 응용할 수 있다.

2.2 Stressed-Arch 시스템의 형태

Stressed-Arch 시스템은 라이즈-스팬(rise-span) 비에 따라 깊은 아치형, 얇은 아치형, 장스팬 형으로 분류할 수 있으며 다양한 요구 조건에 따라 지붕높이, 처마 높이 및 스패인이 결정된다.

Stressed-Arch 시스템의 구조는 시공 과정 도중이나 이후에 연성부분(flexible truss)과 강성부분(rigid haunch)으로 나뉘어 지며, 트러스 하현재의 접합부는 특수 sliding joint(그림 2에서 보이는 갭)를 갖는다. 하현재가 시공 과정 중에 갭(gap)이 닫히면서 트러스의 연성부분을 휘게 하여 최종 형태를 이루며, 정확한 형태는 갭의 크기와 분배에 따라 결정된다.

시스템의 상현재는 대부분 각형 강관, 하현재 및 웨브재는 원형 강관으로 구성된다. 그림 2는 시스템의 전형적인 프레임을 나타내고 있으며, sliding joint는 트러스의 연성부분 하현재에 위치한다.

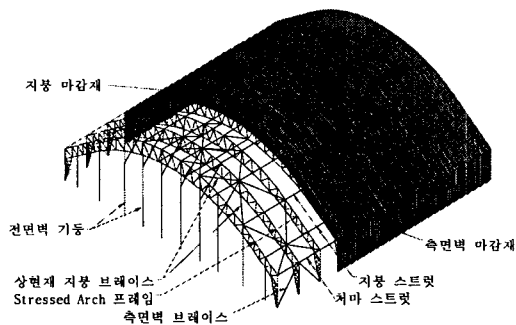


그림 1. Stressed-Arch 시스템

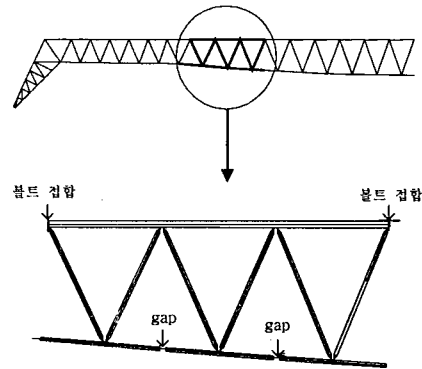


그림 2. Stressed-Arch 시스템의 부재구성

3. Stressed-Arch 시스템의 시공 과정 해석

3.1 수치해석 결과 및 고찰

이 연구의 해석모델은 모두 12개의 Stressed-Arch 프레임으로 구성되어 있으며, 그 중 양 측면이 보강되지 않은 일반적인 프레임과 상현재의 양 측면이 보강된 프레임을 선택하여 시공 과정에 대한 해석을 수행하였다. 해석에 있어서는 대공간 구조물 전용 프로그램인 APHYSS를 사용하여 기하학적 비선형 해석을 수행하였고, 전체 프레임에 대한 시공 과정 해석에 있어서 각 절점은 구조물 전체의 강성 및 접합부 등을 고려하여 핀(pin)으로 가정하였으며, 단위 부재에 대한 해석에서는 용접부를 포함한 모든 요소가 강접합 되어 있는 것으로 가정하였다.

해석에 사용된 전체 프레임은 그림 3과 같으며, ○으로 표시한 부분은 단위부재 시험체를 나타낸 것이다. 구조해석을 통해 하현재 내에 포함된 스트랜드의 긴장력을 20 톤씩 단계별로 증가시키면서 상·하현재 및 웨브재의 부재력을 산정하고 최종형상을 얻을 때까지의 수렴성을 검토하였으며, 시공 과정에 대한 해석결과는 그림 4~7에 나타난 바와 같다.

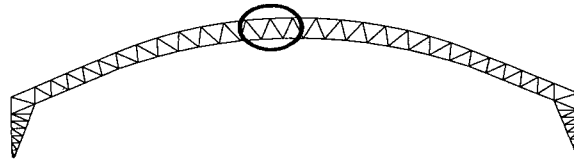


그림 3. 단위부재 시험체의 적용 위치

전체 프레임에 대한 시공 과정 해석 결과, 하현재의 갭이 모두 닫히고 목적형상에서의 하현재 긴장력은 일반적인 프레임에서는 120 톤, 보강된 프레임에서는 130 톤 정도로 조사되었다. 또한 시공 과정에서 상현재가 단기적으로 부담해야 할 내력은 일반 프레임에서 최대 132.2 톤이며, 목적형상에 도달한 이후에는 83.9 톤 정도의 압축력이 작용하게 될 것으로 해석되었다. 상현재 측면이 보강된 프레임에서는 상현재가 단기적으로 부담해야 할 내력은 최대 143.6 톤이며, 형상이 갖춰진 이후에는 108 톤 정도의 하중이 작용하게 될 것으로 나타났다.

시공 과정 해석에서 시험체가 목적형상에 수렴하기까지의 반복계산 회수(iteration)는 일반 프레임은 193,012회, 보강된 프레임은 201,596회로 나타났다.

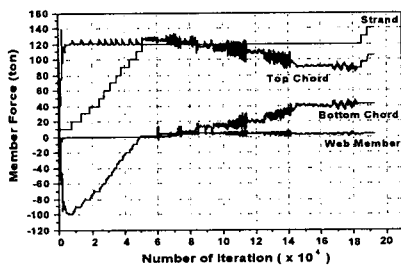


그림 4. 하현재 긴장에 따른 각 부재의 응력 변화 (일반 프레임)

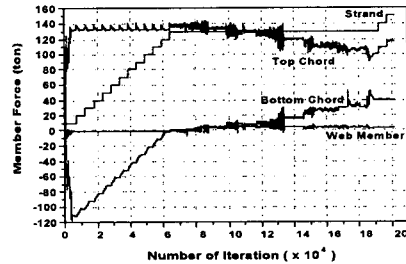


그림 5. 하현재 긴장에 따른 각 부재의 응력 변화 (보강 프레임)

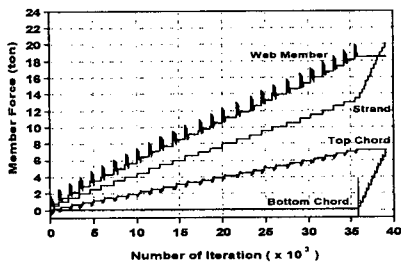


그림 6. 단위부재의 안정화 해석 결과 (일반 프레임)

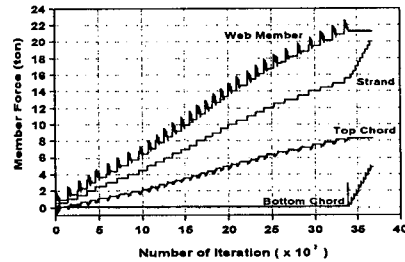


그림 7. 단위부재의 안정화 해석 결과 (보강 프레임)

4. Stressed-Arch 시스템의 구조 성능 실험

4.1 실물 크기 단위부재의 하현재 긴장 실험

4.1.1 시험체의 제원 및 실험 방법

단위부재 시험체는 그림 3에서 보는 바와 같이 전체 프레임 중 중앙부에서 2개의 상현재 구간

4.2 실물 크기 전체 프레임의 시공 과정 실험

4.2.1 시공 과정 개요

Stressed-Arch 시스템은 지상의 조립 위치에서 하현재 내의 스트랜드에 긴장력을 도입함으로써 나타나는 시공 과정을 통해 장기적인 외력에 저항하는 최종적인 형태에 도달하게 된다. 프레임은 가설대에 의해 8 m 간격으로 지지되는데, 이 단계에서 프레임은 자중만을 받게 된다. 스트랜드는 프레임 하현재의 두개의 원형 부재에 삽입되어, 프리스트레싱 잭을 통해 스트랜드에 긴장력을 도입함에 따라 일정 단계에서 상승이 시작되며, 프레임이 가설대와 분리되면서 양단의 기둥이 하중을 지지하게 된다. 잭에 의해 긴장력이 가해지면서 하현재의 갭은 점차로 닫히게 되고 프레임 들은 아치 형태로 상승하며 시공 과정은 모든 하현재의 갭이 닫히면서 건물은 최종 형태로 완성된다. 프레임의 한쪽(회전단)은 기초의 베이스 플레이트에 고정되며, 다른 쪽(이동단)은 시공 과정 중에 임시 받침대를 따라 이동한다. 시공 과정이 끝난 후에 기둥 하부의 이동 슈(shoe)는 기초의 베이스 플레이트에 도달하고 이를 최종위치에서 볼트로 조여 고정시킨다.

4.2.2 시공 과정 실험

1) 실험 방법

4.2.1에서 설명한 바와 같이, Stressed-Arch 시스템은 초기 형태에서 최종 형태로의 시공 과정을 거치게 되며, 이에 따라 프레임의 각 부분에는 필연적으로 초기 변형이 발생한다. 따라서 이러한 시공 과정 시의 부재 변형에 대해 단계별로 예측할 필요가 있다.

실험의 편의와 프레임의 대표성을 고려하여 예측용 프레임은 일반적인 단면 형상을 갖는 보강되지 않은 프레임을 선택하였으며, 상현재, 하현재, 웨브재 및 기둥재 등 프레임의 각 부에 변형도 게이지를 부착하였다. 변형도 게이지의 부착위치는 그림 13에 나타나 있으며, 동일 위치에 여러 개의 게이지가 부착된 경우 위치를 나타내는 부호 뒤에 상하좌우를 나타내는 부호를 추가하여 구분하였다. 예를 들어 UIT는 U1 위치의 상현재 상단, UF1-T는 강성 부분 상현재 상단, D1은 웨브재, C1은 기둥, L1은 하현재에 부착되어 있는 게이지를 의미한다. Stress-Erection 과정 동안 각 단계별로 주재별 변형도를 측정하였으며, 측정장비로는 일본 TML 사의 TDS-602 데이터 로거와 스위치박스를 사용하였다.

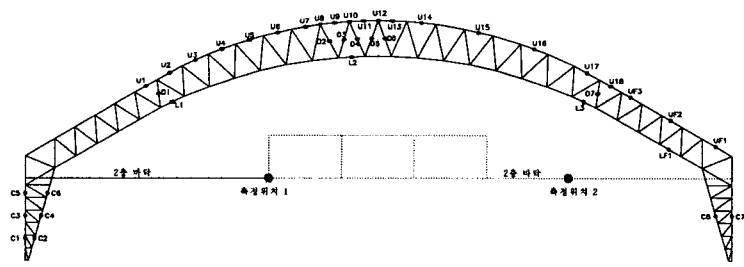


그림 13. 변형도 게이지의 부착 위치

2) 실험 결과

인천국제공항 아시아나 정비시설을 대상으로 시공 과정 예측 실험을 수행하였으며, 시공 과정 중 기둥재와 웨브재, 하현재 및 상현재 측면에서의 변형도는 측정 위치 중 그 어느 곳에서도 항복 변형도를 넘지 않고 있는 것으로 조사되었으나, 단위부재 긴장 실험 시와 마찬가지로 상현재 상연단과 하연단에서는 항복 변형도를 넘고 있는 것으로 조사되었다.

측정된 각 위치별 변형도 곡선은 그림 14에 나타나 있다.

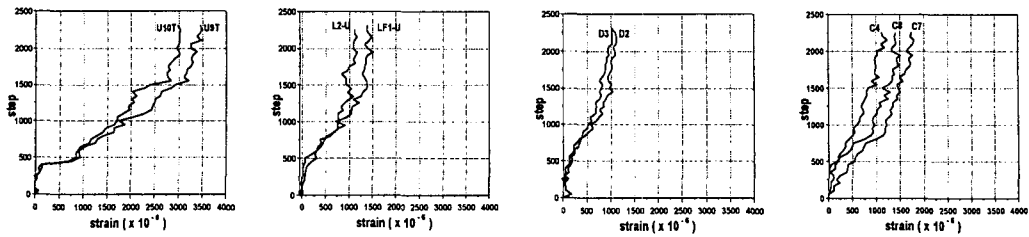


그림 14. 시공 과정에 따른 각 위치별 변형도 곡선

여기서 step은 시간을 나타내며, 1 step은 10초이다.

5. 결 론

수행된 구조 해석 및 실험 연구를 통해 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 전체 프레임에 대한 시공 과정 해석 결과, 일반적인 프레임에서는 하현재 긴장력이 120 톤, 상현재의 양 측면이 보강된 프레임에서는 130 톤 정도의 하현재 긴장력이 필요한 것으로 나타났다.
- 2) 상현재의 내력실험을 위해 중앙부에 위치한 부분을 절취하여 단위 부재 시험체로 선택하였으며, 이에 대한 시공 과정 해석 결과, 시험체의 안정화에 필요한 하현재 긴장력은 APHYSS 프로그램으로 계산한 경우 KSF-1 시험체는 약 13 톤, KSF-2 시험체는 약 15 톤으로 나타났다.
- 3) 인천국제공항 아시아나 정비시설을 대상으로 한 안정화 과정 계측 실험 결과, 시공 과정 동안 시험 대상 프레임의 상현재 상연단과 하연단에서 항복 변형도를 넘고 있는 것으로 조사되었으나, 그 이외의 기둥재, 웨브재, 하현재 및 상현재 측면에서는 항복 변형도를 넘지 않고 있는 것으로 조사되었다.

참고문헌

1. Hancock, G. J., Clarke, M., Key, P. and Olsen, C., "Structural Tests on the Top Chord of Strarch Frames", University of Sydney.
2. Hancock, G. J. and Clarke, M., "Design of Top Chord of Stressed-Arch Frames", Journal of Structural Engineering, ASCE, 121(2), 1995, pp. 187~200.
3. Hancock, G. J. and Clarke, M., "Tests and Nonlinear Analyses of Small-Scale Stressed-Arch Frames", Journal of Structural Engineering, ASCE, 121(2), 1995, pp. 201~213.
4. Day, A. S., "An Introduction to Dynamic Relaxation", The Engineer, London, V.219, 1965, pp. 18~221
5. Barnes, M. R., "Form-Finding and Analysis of Prestressed Nets and Membranes", Computer and structures Vol. 30., No. 3., 1988, pp. 685~695.
6. Johnston, B. G., "Guide to Stability Design for Metal Structures", 4th Edition, Wiley-Interscience, New York, 1998.