

스페이스프레임 구조물의 통합설계시스템 개발

Development of Integrated Design System for Space Frame Structures

이주영* 이재홍**
Lee, Ju-Young Lee, Jae-Hong

Abstract

This paper describes three modules for development of the Space Frame Integrated Design System(SFIDS). The Control Module is implemented to control the developed system. The Model Generation Module based on PATRAN user interface enables users to generate a complicated finite element model for space frame structures. The Optimum Design Module base on a branch of combinatorial optimization techniques which can realize the optimization of a structure having a large number of members designs optimum members of a space frame after evaluating analysis results. The Control Module and the Model Generation Module is implemented by PATRAN Command Language(PCL) while C++ language is used in the Optimum Design Module. The core of the system is PATRAN database, in which the Model Generation Module creates information of a finite element model. Then, PATRAN creates input files needed for the analysis program from the information of the finite element model in the database, and in turn, imports output results of analysis program to the database. Finally, the Optimum Design Module processes member grouping of a space frame based on the output results, and performs optimal member selection of a space frame. This process is repeated until the desired optimum structural members are obtained.

keywords : space frame, integrated design system, optimization, grouping

1. 서론

스페이스프레임 구조물과 같은 대공간 구조물은 그 형태와 부재의 구성이 복잡하고 부재의 수도 많기 때문에 수동의 방법을 통한 해석 및 설계는 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 그러므로 본 논문에서는 스페이스프레임 구조물의 해석과 설계를 위하여 필요한 일련의 작업을 통합하여 구조물의 설계가 일괄적으로 수행할 수 있는 시스템의 개발에 대해 기술한다.

일반적인 구조물을 설계하기 위해서는 이들 구조물을 해석하기 위한 적당한 도구가 필요하다. 현재에는 컴퓨터와 같은 전자계산기의 기술이 발전하면서 복잡하고 대규모 구조물의 해석도 간단히 계산할 수 있는 프로그램이 많이 개발되어 있다. 그러나, 구

구조물의 해석을 수행하기 위해서는 이 해석프로그램을 사용하기 위하여 여전히 복잡한 모델을 만드는 작업을 수행해야 하며, 또한 적합한 부재를 선택하기 위해 해석된 구조물의 각 부재가 설계기준에 적합한지를 확인하고 변경하는 작업을 수행해야 한다.

구조물의 최적설계를 위하여 대상 구조물에 따라 선형 또는 비선형 최적화 기법을 여러 형태로 적용하여 주어진 구조 시스템의 재료나 기하학적 형상에 대하여 최적의 해를 찾고자 하는 연구가 많이 진행되고 있다¹⁻⁴⁾. 본 연구에서는 조합최적화기법(combinatorial optimization techniques)의 일종인 임의선택기법에 의한 여러 형태의 반복 계산 및 개선 알고리즘을 통하여 대공간 구조물과 같은 큰 자유도를 가진 구조의 최적화를 실현하고자 하였다⁵⁾. 이 방법은 주어진 수렴조건이 만족될 때까지 반복적으로 현재 주어진 설계를 선택하거나 거부하는 과정을 반복하여 목적함수의 최적해에 도달하게 하므로 목적함수나 제약

* 정회원 · 현대건설(주) 기술연구소 주임연구원

** 정회원 · 세종대학교 건축공학과 교수

함수의 미분가능성 또는 연속성을 요구하지 않는다.

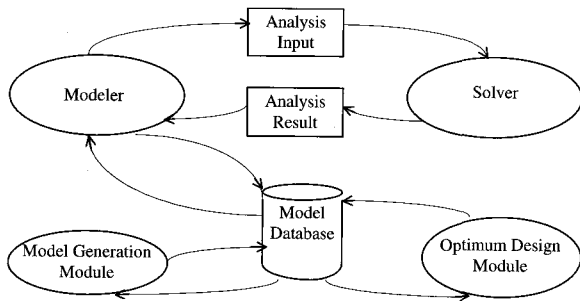
본 연구에서는 통합시스템의 신뢰성과 개발의 효율을 위하여 이미 개발되어 사용되고 있는 범용유한요소해석프로그램과 모델러를 사용하였다. 이 응용프로그램과 더불어 스페이스프레임 구조물의 모델 생성 및 최적설계를 위하여 개발한 제어모듈과 모델 생성모듈, 최적설계모듈을 데이터베이스와 매개화 일을 통하여 연결하여 일괄적인 설계를 진행할 수 있는 스페이스프레임 통합설계시스템(Space Frame Integrated Design System, SFIDS)을 개발하였다.

2. 통합설계시스템의 데이터모델링

2.1 데이터의 흐름

통합설계시스템의 데이터는 그림 1과 같이 데이터베이스를 중심으로 모델러와 해석프로그램, 모델 생성모듈, 최적설계모듈로 이동하며 필요한 작업을 수행한다.

모델러는 구조물의 기하학적인 형상과 유한요소의 생성, 하중과 경계조건을 생성하고 해석결과 검토를 수행하는 전·후처리 프로그램이며, 해석프로그램은 모델러에서 생성된 데이터를 입력받아 구조물의 해석을 수행한다. 일반적으로 이들은 서로 독립된 응용프로그램으로 개발되는 경우가 많으며 이들은 모델러에서 생성시킨 해석프로그램의 입력화일과 해석프로그램이 생성한 결과화일을 통하여 상호 데이터를 교환한다.



〈그림 1〉 시스템의 데이터 흐름도

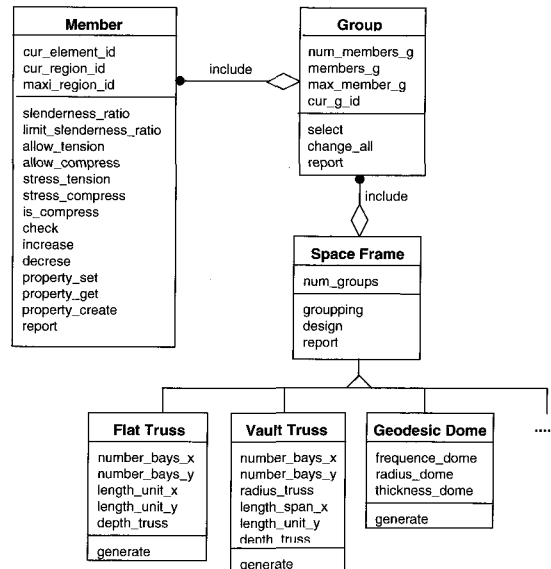
이들 응용프로그램을 스페이스프레임 구조물에 적용하기 위하여 복잡하고 다수의 부재로 구성된 구조물의 기하학적 형상의 패턴을 생성할 수 있는 모

델생성모듈과 이 구조물을 위하여 한국강구조설계 기준에 따라 최적의 부재를 선택하는 최적설계모듈을 개발하였다. 또한, 제어모듈은 기 개발된 응용프로그램인 모델러와 해석프로그램을 제어하고 또한, 통합설계시스템을 위하여 개발된 모델생성모듈과 최적설계모듈을 제어하여 스페이스프레임의 일괄설계를 수행하도록 한다.

모델생성모듈은 모델러의 모델 데이터베이스에 생성된 유한요소모델을 저장하는데, 이 저장된 모델은 모델러를 통하여 다시 자유롭게 편집될 수 있다. 최적설계모듈은 모델러가 해석프로그램의 결과화일을 모델 데이터베이스에 저장하면 이 데이터를 읽어 설계기준에 적합한 지를 판별하고 최적의 부재를 선택한다.

2.2 시스템의 객체 모델링

스페이스프레임 통합설계시스템을 개발하기 위하여 객체지향모델링기법⁶⁾(object oriented modeling methodology)을 사용하여 개념적으로 스페이스프레임 통합설계시스템의 데이터 구조를 모델링을 하였다.



〈그림 2〉 시스템의 객체 다이어그램

본 시스템의 주요한 객체(object)는 그림 2와 같이 구조물 전체를 상징하는 스페이스프레임과 부재로 나눌 수 있다. 그리고, 부재는 시공과 설계를 위하여

그룹핑되므로 부재를 그룹이라는 객체를 통하여 분류할 수 있다. 시스템을 객체 모델링하기 위하여 이들 객체들에 각각 Space Frame, Member, Group으로 명칭을 부여하였다. 각 객체는 자신의 속성(attribute)과 자신의 오퍼레이션(operation)을 가진다. Member는 스페이스프레임 단위부재를 나타내며 속성으로 현재 부재의 데이터베이스 구분자, 부재단면정보의 데이터베이스 구분자, 부재단면정보의 최대갯수 등을 가지고 있고, 오퍼레이션은 세장비와 허용응력도, 부재응력의 계산과 부재검토, 부재단면변경 등을 수행한다. Group은 속성으로 그룹내의 부재의 수, 부재의 구분자, 최대 응력을 갖는 부재의 구분자, 현재의 그룹 구분자 등을 가지며, 메소드는 부재의 설계와 관련된 작업을 수행한다. Group은 고정하중하에서 다수의 비슷한 부재응력을 받는 Member를 관리하므로 다수의 Member를 포함하고 있다. Space Frame의 속성은 그룹의 수 등이며, 메소드는 부재의 그룹핑과 부재의 설계, 구조계산서 작성 등을 수행한다. Space Frame은 다수의 Group을 포함하고 있다. 또한, 일정한 규칙을 가진 스페이스프레임 구조물인 평트러스(Flat Truss), 원통형트러스(Vault Truss), 지오데식돔(Geodesic Dome)등으로 분류할 수 있다.

3. 부재의 생성

기하학적으로 복잡하고 다수로 구성된 스페이스프레임의 유한요소모델을 생성하기 위하여 본 시스템에서는 3가지 방법을 사용하였다.

첫 번째 방법은 일정한 규칙을 가진 평트러스나 원통형트러스, 지오데식돔 등의 경우는 포맷스대수학⁷⁾을 이용하여 절점과 부재를 표현하는 식으로 표현하고 이를 함수화하여 몇가지의 변수만을 입력함으로써 간편하게 구조물의 유한요소모델을 생성할 수 있는 방법이다. 다음은 그림 3과 같은 평트러스형태를 포맷스 표현으로 나타낸 것이다⁸⁾.

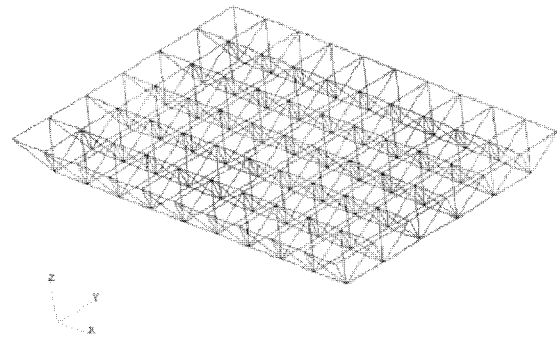
절점 : $j_1 = [1, 1]$ $j_2 = [3, 1]$

부재 : $e_1 = [1, 1; 3, 1]$ $e_2 = [1, 1; 1, 3]$

$$a_1 = [1, 1; 2, 2] \quad b_2 = \text{tran}(1, 2): a_1$$

$$F = \sum_{i=0}^6 \text{tran}(2, 2i): \sum_{j=0}^9 \text{tran}(1, 2j):$$

$$\sum_{k=0}^9 \text{ver}(1, 2; 2, 2)k [1, 1; 2, 2]$$



<그림 3> 평트러스의 유한요소모델

두 번째 방법은 모델러의 편집기능을 이용하여 수동으로 기하적형상을 생성하고 부재의 속성을 입력하는 방법이며, 세 번째 방법은 다른 모델러나 캐드프로그램과 같은 다른 응용프로그램으로 생성된 파일을 간단한 포맷의 중간파일로 변환하여 읽어들이는 방법이다. 이 중간파일은 절점의 좌표와 부재의 연결정보, 부재의 속성 등으로 구성된다. 다음은 중간파일의 포맷을 주여 주고 있다.

```

2000 2500 (절점 수, 부재의 수)
1 23.51 33.4 44.1 (절점의 좌표)
2 25.23 33.4 55.1
3 25.23 33.4 66.2
...
1 2 6 (부재의 연결정보)
2 3 4
3 4 5
...
1 49.2 (부재의 속성)
2 70.7
3 120.0
...
    
```

4. 최적설계

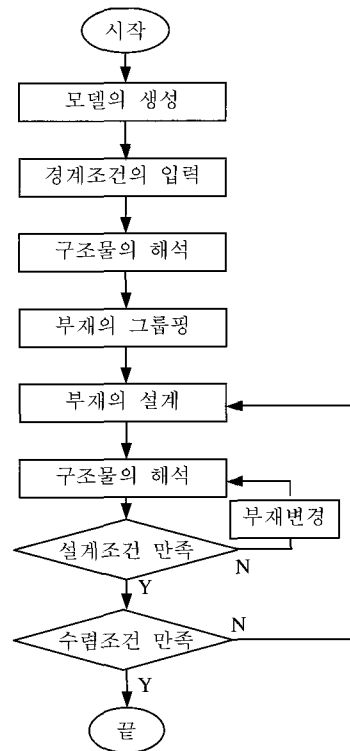
스페이스프레임 구조물의 최적설계를 수행하기 위하여 조합최적화기법의 일종인 임의의 선택기법에 의한 여러형태의 반복 계산 및 개선 알고리즘을 사용하였다. 이 방법은 주어진 수렴조건이 만족될 때까지 반복적으로 현재 주어진 설계를 선택하거나 거부하는 과정을 반복하여 목적함수의 최적해에 도달하게 한다.

본 시스템에 사용한 최적설계방법은 그림 4와 같이 구조물의 모델을 생성하고 부재를 그룹핑하고 그룹에 따라 한국강구조설계규준에 따라 설계를 수행하고 이 설계안이 규준의 설계조건을 만족하는지를 검토하고 만족하면 수렴조건을 검토하고 수렴조건이 만족하면 설계를 종료하게 된다.

4.1 그룹핑

본 시스템에서 사용하는 그룹핑 방법은 응력에 의한 그룹핑 방법이다. 이 방법은 스페이스프레임의 최초 부재들을 한 종류의 단면으로 초기화하고, 이를 해석하여 각 부재의 응력의 크기에 따라 부재를 그룹별로 추가시키는 방법이다. 먼저 그룹의 수를 지정하고 최초에 동일한 부재단면을 사용하여 해석한 부재응력을 기준으로 압축재와 인장재를 나눈다. 그리고, 인장재와 압축재 중 각각 최소 부재응력과 최대 부재응력을 찾고, 이 최소 부재응력과 최대부재응력의 차이를 그룹의 수로 나누어 각 그룹에 해당하는 응력의 범위를 지정하고, 구조물 중 이 응력의 범위에 해당하는 부재를 검색하여 그룹별로 추가시킨다.

일반적으로 스페이스프레임 구조물 뿐 아니라 대부분의 구조물은 여러 가지 하중이 작용하기 때문에 때로는 수개에서 수십개까지의 하중조합에 대해 구조물이 안전해야 한다. 그러나, 그룹핑에서 이와 같은 하중상태를 모두 고려하여 최적의 그룹핑을 하는 것은 거의 불가능하므로 장기적으로 구조물의 부재에 응력을 발생시키는 고정하중 상태에서 그룹핑이 이루어지도록 하였다.



〈그림 4〉 최적설계 순서도

〈표 1〉 원형강관의 부재속성

번호	외경 (mm)	두께 (mm)	단위중량 (kg/m)	단면적 (cm ²)	단면2차반경 (cm)
1	21.7	2.0	0.972	1.238	0.70
2	27.2	2.0	1.24	1.583	0.89
3	27.2	2.3	1.41	1.799	0.88
4	34.0	2.3	1.8	2.291	1.12
5	42.7	2.3	2.29	2.919	1.43
6	48.6	2.3	2.63	3.345	1.64
7	42.7	2.8	2.76	3.510	1.41
...
113	1016.0	22.0	539	687.0	35.2

4.2 부재최적설계

스페이스프레임 구조물의 최적설계를 위하여 한국강구조설계규준(허용응력설계법)을 최적화를 위한 제약함수로 사용하였다. 이 규준에 따르면 인장재와 압축재로 구성된 트러스 구조물은 식(1)과 식(2)를 만족하여야 한다⁹⁾.

인장재 : $\frac{\sigma_t}{f_t} \leq 1.0$ (1)

여기서 $f_t = \frac{F_y}{1.5}$ (허용인장응력도)
 F_y : 항복응력, σ_t : 인장응력도

압축재 : $\frac{\sigma_c}{f_c} \leq 1.0$ (2)

$\lambda \leq \lambda_p$ 일 때 $f_c = \frac{\left\{1 - 0.4\left(\frac{\lambda}{\lambda_p}\right)\right\} F_y}{\frac{3}{2} + \frac{2}{3}\left(\frac{\lambda}{\lambda_p}\right)^2}$

$\lambda > \lambda_p$ 일 때 $f_c = \frac{0.277 F_y}{\left(\frac{\lambda}{\lambda_p}\right)^2}$

σ_c : 압축응력도
 f_c : 허용압축응력도
 λ : 세장비
 λ_p : 한계세장비

구조물의 최적설계시 위의 식들은 전체 구조물의 중량을 최소화 시킴과 동시에 만족하여야 한다. 최적설계시 부재단면의 변경은 공장 생산되는 원형강 관 부재의 단면 크기에 따라 인덱스를 부여 하여 데이터베이스를 구축하고, 이 데이터베이스에서 인덱스 순서에 따라 이루어지도록 하였다.

최적설계를 위한 목적함수와 제약함수는 다음과 같이 정의될 수 있다.

Minimize $W = \sum_{i=1}^m \rho^i A^i L^i$ (3)

subject to : 인장재 : $\frac{\sigma_t^i}{f_t} \leq 1.0$ (4)

압축재 : $\frac{\sigma_c^i}{f_c} \leq 1.0$

여기서 ρ^i : i번째 부재의 단위용적중량
 A^i : i번째 부재의 단면적
 L^i : i번째 부재의 길이
 m : 전체 부재수

실제 구조물의 설계에서는 설계와 시공의 편리를

위하여 구조물의 각 부재들을 그룹핑하게 되며, 또한 한가지의 하중이 아닌 다수의 하중조합을 만족해야 한다. 이를 위해 부재의 최적설계시 각 그룹중 최고의 부재응력도와 가장 불리한 하중조합을 가지는 부재를 기준으로 상기 조건의 만족여부를 판단하게 된다.

만약 그룹내의 모든 부재가 부여된 모든 하중조합을 만족하지 못할 경우는 그룹내의 모든 부재의 단면 인덱스를 한 단계 상승시키고 설계조건의 만족여부를 검토하는 작업을 반복적으로 수행하게 된다.

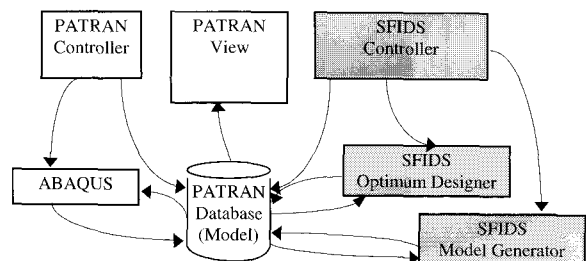
5. 통합설계시스템의 구현

5.1 시스템의 설계

스페이스프레임 통합설계시스템을 구현하기 위하여 사용된 응용프로그램은 모델러로는 MSC PATRAN을 사용했고, 해석프로그램으로는 HKS ABAQUS를 사용하였다. 사용한 컴퓨터는 PATRAN 과 개발된 제어모듈, 모델생성모듈, 최적설계모듈을 위하여 SGI Indigo2 워크스테이션을 사용했고, 해석 프로그램을 위하여는 SGI Power Challenger 서버를 사용하였다. 이들 시스템은 모델러인 PATRAN상에서 운용된다.

그림 5는 스페이스프레임 통합설계시스템의 전체적인 구성을 보여 주고 있고, 이 시스템의 개발과 운용환경을 정리하면 다음과 같다.

하드웨어 : SGI Power Challenge, Indigo2
 운영체제 : IRIX 6.2
 개발언어 : C++, PCL
 응용프로그램 : PATRAN, ABAQUS



<그림 5> 시스템의 구성

5.2 시스템의 프로그램 작성

통합설계시스템의 프로그램 작성은 PATRAN의 내부 매크로언어인 PCL과 일반적인 프로그래밍 언어인 C++를 사용하였다. 통합설계시스템 전체를 제어하는 제어모듈과 모델을 간편하게 생성할 수 있는 모델생성모듈은 PCL로 작성되었고, 최적설계모듈은 C++로 작성하였다.

제어모듈은 space_frame클래스로 구성되어 있으며, 모델생성모듈은 포벡스 대수학 함수를 포함하는 formex클래스와 flat클래스, geodesic클래스, vault클래스, utility클래스로 구성되어 있다. 최적설계모듈은 주요하게 Space Frame클래스와 Group클래스, Member클래스로 구성되어 있다.

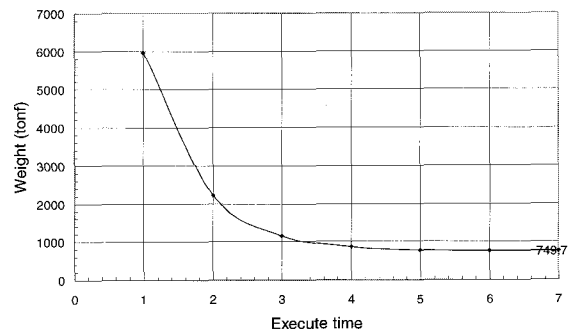
6. 통합설계시스템의 실행예

스페이스프레임 통합설계시스템을 검증하기 위하여 이 시스템을 시공을 위하여 계획된 창원자전거경기장과 부산종합운동장 주경기장 지붕구조물의 실시 설계안을 대상으로 검토하였다. 먼저 각각의 계획안을 부재의 변경없이 그대로 스페이스프레임 통합설계시스템을 통하여 평가한 후, 다음으로 통합설계시스템의 최적설계기능을 이용하여 구조물의 최적설계를 수행하고 그 결과를 실시 설계안과 비교하였다.

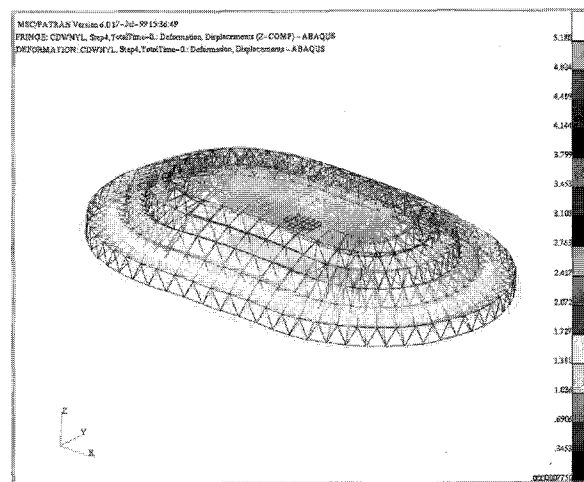
6.1 창원자전거경기장

창원자전거경기장의 지붕구조물 시공 계획안은 단변의 스패이 110m이고 장변의 스패이 160m인 타원형의 형태로 이루어져 있으며, 기본 유니트의 길이는 약7m이다. 사용한 하중조합은 다음과 같이 6개의 조합을 사용하였다.

- DL : D1Lx1.2+D2L+D3L+D4L+D5L+D6L+D7L
- DLL : DL + LL
- DWPXL : 0.67 x (DL+WPXL)
- DWNXL : 0.67 x (DL+WNL)
- DWPYL : 0.67 x (DL+WPYL)
- DWNYL : 0.67 x (DL+WNYL)



〈그림 6〉 창원자전거경기장 부재의 수렴



〈그림 7〉 창원자전거경기장의 변형

창원자전거경기장 지붕구조물은 트러스 요소를 사용하여 모델링하였고, 구조물 전체의 요소수는 4761개이며, 경계조건은 구조물의 강제운동만을 저항할 수 있도록 롤러와 핀을 조합하여 정의하였다.

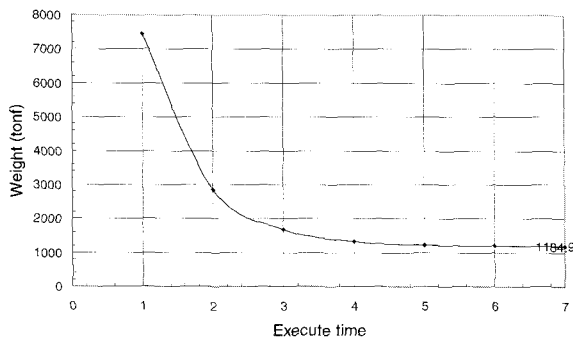
실시 설계안의 평가결과 전체구조물의 중량이 732tonf으로 나타났으며, 통합설계시스템으로 최적설계를 수행한 결과 750tonf으로 수렴하였다. 그림 6은 창원자전거경기장 지붕구조물의 수렴도를 보여 주고 있고, 그림 7은 하중조합DWPXL에서 구조물의 변형이다.

6.2 부산종합운동장 주경기장

부산종합운동장 주경기장 지붕구조의 실시 설계안은 직경이 236m의 원형의 형태에 중앙부에 직경 200m, 140m의 타원형 개구부를 가진 스페이스프레임 구조이다. 이 스페이스프레임의 기본 유니트의 길이는 약7m이다. 사용한 하중조합은 다음과 같이

12개 조합을 사용하였다.

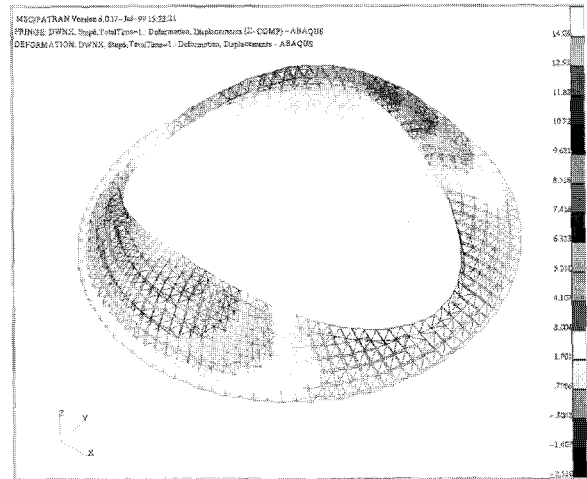
- DL : SL x 1.2 + DL1
- DLL : DL + LL
- DLLS : 0.67 x (DL+LL+SN)
- DLLT : 0.67 x (DL+LL+TL)
- DWPX : 0.67 x (DL+WPX)
- DWNX : 0.67 x (DL+WNX)
- DWPY : 0.67 x (DL+WPY)
- DWNY : 0.67 x (DL+WNY)
- DLWPX : 0.67 x (DL+LL+WPX)
- DLWNX : 0.67 x (DL+LL+WNX)
- DLWPY : 0.67 x (DL+LL+WPY)
- DLWNY : 0.67 x (DL+LL+WNY)



〈그림 8〉 부산종합운동장 부재의 수렴

부산종합운동장 주경기장의 지붕구조를 위하여 사용한 요소는 트러스 요소이며 전체 요소 수는 4564개이다. 대부분의 스페이스프레임 구조물의 경우는 구조물 자체가 내부적으로 안정한 구조이기 때문에 하부구조에서 구조물의 강제운동만을 지지하면 되나, 본 설계안의 경우는 최초 설계된 지지구조의 특성을 고려하여 지지구조에서도 구조물의 반력을 분담할 수 있도록 편지기로 설계하였다.

이 실시 설계안의 해석결과 전체구조물의 중량은 1473tonf으로 나타났으며, 통합설계시스템의 최적화 모듈을 사용하여 설계한 결과는 실시 설계안보다 19.6%감소된 1185tonf에서 수렴하였다. 그림 8은 부산종합운동장 주경기장 지붕구조물의 수렴도를 보여 주고 있고, 그림 9는 하중조합DWNX에서의 구조물의 변형이다.



〈그림 9〉 부산종합운동장 주경기장의 변형

〈표 2〉 설계안의 비교

설계안	하중 조합	그룹수 (부재수)	구조물중량(tonf)		비교 (%)
			실시 설계안	시스템 설계안	
창원자전거 경기장	6	641 (4761)	732	750	+2.6
부산종합운동장 주경기장	12	655 (4564)	1473	1185	-19.6

창원자전거경기장과 부산종합운동장의 실시 설계안과 통합설계시스템의 최적설계결과를 비교하면 표 2와 같이 창원자전거경기장의 경우는 실시 설계안에 비하여 최적설계 결과가 2.6%증가한 결과를 보여 주었고, 부산종합운동장 주경기장의 경우는 19.6%를 감소한 결과를 보여 주었다. 창원자전거경기장의 경우 최적설계 결과가 오히려 증가한 것은 이 구조물의 실시 설계안에서 일부 부재가 설계기준의 허용응력을 초과함으로 발생한 결과이다.

7. 결 론

스페이스프레임의 통합설계시스템은 이미 개발된 응용프로그램인 모델러와 해석프로그램, 그리고 복잡한 스페이스프레임의 설계를 위하여 사용할 수 있도록 개발한 제어모듈과 모델생성모듈, 최적설계 모듈을 추가하여 구축하였다.

이미 개발된 모델러와 해석프로그램을 사용함으

로써 구조물의 해석에 대한 신뢰성과 개발효율을 높일 수 있었다. 또 이들 응용프로그램을 일괄적으로 사용할 수 있도록 연결하기 위해 모델러의 데이터베이스와 매개화일을 조합하여 사용함으로써 서로 다른 응용프로그램간의 데이터교환을 원활히 할 수 있는 방법론을 제시할 수 있었다.

스페이스프레임 구조물의 유한요소모델생성을 위하여 공식화된 방법과 모델러에서 직접생성하는 방법, 다른 응용프로그램의 데이터를 변환하는 방법을 사용함으로써 복잡한 모델의 생성을 손쉽게 할 수 있는 방법론을 제공하였다.

스페이스프레임 구조물의 최적설계를 위하여 조합최적화기법을 응용하여 수렴조건을 만족할때까지 반복적으로 주어진 설계조건을 선택하거나 거부하는 과정을 수행하는 알고리즘을 사용함으로써 스페이스프레임 구조물과 같이 큰 자유도를 가진 구조물의 최적화의 수행이 가능하였고, 최적화 결과 실시 설계안과 동일하거나 우수한 설계결과를 보여 주었다. 또한, 최적설계시 시공과 설계의 편의를 위하여 그룹핑과 다수의 조합하중을 적용할 수 있는 방법론을 제시하였다.

참 고 문 헌

- 1) Chong, E.K.P., "An Introduction to Optimization", Wiley-Interscience. 1995, p.409
- 2) Arora, J.S., "Introduction to Optimum Design", MacGraw-Hill, 1989, p.625
- 3) 김한수, "초고층건물의 횡방향 변위제어를 위한 최적화 기법", 현대건설(주) 기술연구소, 1999, p.83
- 4) Wu S.J., "Integrated Discrete and Configuration Optimization of Trusses using Genetic Algorithms", Comput. Struct, Vol. 55, 1995, pp.695-702
- 5) 이차돈, "Stochastic Simulated Annealing에 의한 3차원 철틀구조물의 최적설계", 대한건축학회 논문집, 12권 1호, 1996, pp. 159-167
- 6) Rumbaugh, J., "Object-oriented Modeling and Design", Prentice-Hall, 1991
- 7) Nooshin, H., "Third International Conference on Space Structures", Elsevier Applied Science Publishers, 1984
- 8) 이병해, "대공간구조물의 구조방식 및 공법특성에 관한 연구", 현대건설(주) 기술연구소, 1995, p.296
- 9) 김상식, "건축철틀구조", 문운당, 1987, p.375