

최적화 기법을 이용한 3차원 트러스 구조물의 설계자동화 Design Automation of Space Truss Structure Using Optimizations Technique

최은규 * 임기식 ** 이병해 ***
Choi, Eun-Gyu Lim, Ki-Shik Lee, Byung-Hai

A B S T R A C T

The optimum design of a structure requires the determination of the economical member size and shape of the structure which satisfies the design condition and function. In this study, the process of design automatization of three-dimensional truss structure introduces the optimization technique, tests its application in the design automatization, proposes its application method and applies the example structure of the parabolic antenna truss. Using the Formex Algebra of configuration function, the structure's mesh-generation is automatized. By using the program developed in this study, the input member array, member size and load condition designer can generate the input data file for the structure analysis and optimum design. This study is aimed at the development of a design automatization system that search for the optimum value of a structure design by observing the structure's sensitivity from the modification of member array and member property.

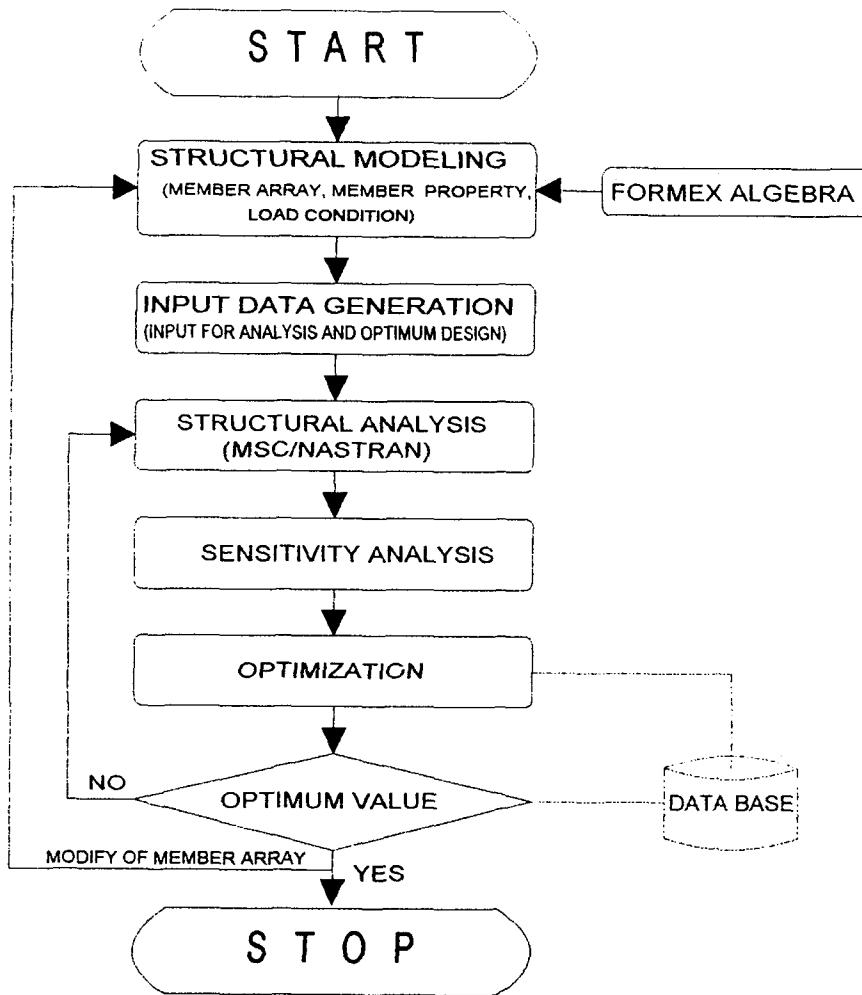
1. 서 론

구조 설계란 대상 구조물이 주어진 제반조건하에서 안전하게 제기능을 발휘 할 수 있도록 경제적인 구조물의 모양과 크기들을 결정하는 과정을 말한다. 따라서 우리가 흔히 말하는 설계라는 개념은 그 바탕에 '최적성(Optimality)'을 내포하고 있는 것이다. 지난 수십년동안 컴퓨터 기술의 급속한 발전은 구조해석 분야에 엄청난 발전을 가져왔다. 특히 1960년대 유한요소법(Finite Element Method)의 개발은 이의 발전을 더욱 촉진시켰다. 이에 따라서 최적설계 분야도 상당한 향의 연구와 획기적인 알고리즘의 개발등으로 인해서 꿈寐할 만한 성과를 이룩한 것은 사실이다. 그러나, 이것은 기계, 항공, 조선 등 극히 제한적인 분야에서만 활발히 응용되기 시작하였고, 아직도 건축, 토목, 해양구조물 등과 같은 거대한 구조물 자체의 설계과정에서는 최적화 개념이 그리 활발하게 응용되지 못하고 있는 실정이다. 아마도 그 이유는 구조물이 갖는 특성 즉, 대량생산되는 제품 구조물이 아니라 한번 설계된 구조물은 한번 시공됨으로써 그 구조물이 갖추어야 하는 안전계수에 대한 개념이 다르기 때문일 것이다. 본 연구에서는 수치적 기법을 도입한 최적설계 개념을 3차원 입체 철골 트러스 구조물의 설계 자동화 과정에 적용시킴으로써, 어떻게 응용 될 수 있는가 하는 방법론을 제시하고 이 방법론을 특정한 구조물인 Parabolic 안테나 구조물의 설계에 적용하여 보고자 한다.

2. 설계자동화 과정

본 연구에서 의도하는 설계자동화 과정은 설계자가 구조물의 모델링을 위해서 필요한 몇몇개의 변수들과 하중조건 및 부재의 성질 등을 입력하면 해석 및 최적설계를 위한 입력데이터가 자동적으로 생성되며, 그 입력 데이터를 통해서 구조해석 프로그램은 해석과정을 수행하고, 또다시 최적설계 과정을 통해 구조물의 설계를 일괄 처리하게 하는 것이다. 연구 대상 구조물은 3차원 트러스 구조물로써 인공위성 송수신용 Parabolic 안테나 트러스 구조물이다. 여기서 해석(Analysis) 및 최적설계(Optimum Design)를 위해 사용된 프로그램은 MSC/NASTRAN Ver 67.5[3]이다. 설계과정은 [그림 2. 1]과 같다.

* 한양대 건축공학과 석사과정
** 한양대 건축공학과 박사과정
*** 한양대 건축공학과 교수



[그림 2.1] 최적설계 자동화 과정

본 연구에서는 단지 대상으로 하는 구조물의 정밀한 최적해를 구하는 것에 목적을 두는 것이 아니라, 기존에 개발되어 있는 최적화 알고리즘들과 FEM 해석 프로그램들을 이용하여 해석 및 설계를 하는데 있어서 어떻게 하면 그러한 도구들을 좀더 효율적으로 사용하여 설계과정을 자동화 시킬 것이며, 정확한 설계값들을 얻을 것인가에 그 목적을 두고 있다. 그리고 설계자가 대화식(Interactive)으로 구조물의 부재배열 상태 등을 변경시켜가면서 구조물의 민감도(Sensitivity)를 관찰하여 컴퓨터가 계산해낸 수치적 최적해와 설계자의 판단으로 최적의 설계안을 도출시키도록 하는 설계자동화 과정을 이룩하는데 그 목적이 있다. 따라서 해석 및 설계과정에서 얻어지는 많은 정보들을 일관성있게 처리하는 강력한 데이터 베이스의 도입이 필수적이라 할 수 있다. 현재 구조설계 과정에서의 데이터 베이스 이용에 관한 연구는 활발히 진행중에 있다.

3. 구조물의 모델링

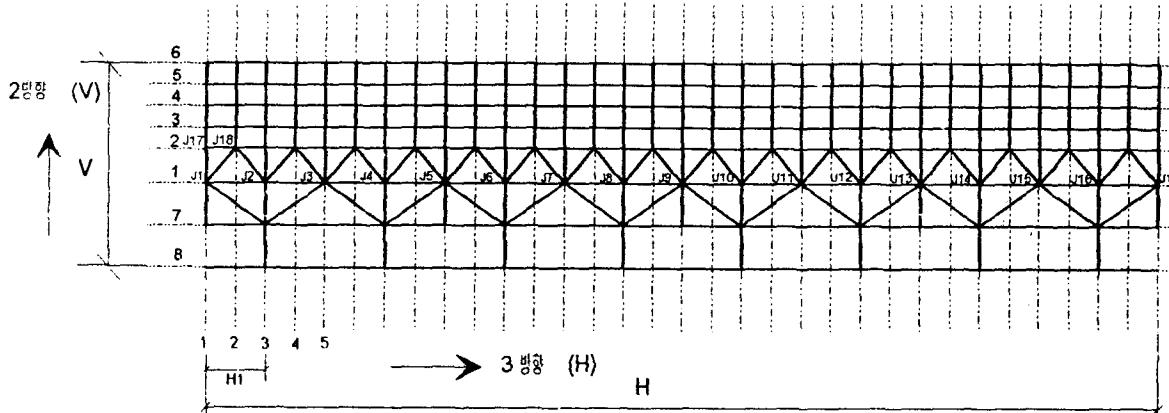
구조물의 모델링을 위해서는 절점 좌표값과 부재의 연결상태 등이 정의되어야 한다. 이러한 작업을 위해서 본 연구에서는 형상 표현 함수인 포맥스 대수학(Formex Algebra)[4]을 이용하여 절점과 부재를 자동으로 생성시키도록 하였다.

3.1 포맥스(FORMEX) 대수학의 도입배경

설계 자동화 과정 중 구조물의 모델링을 위해서 각 절점의 좌표값과 부재의 연결상태를 수작업으로 입력한다는 것은 구조물이 복잡한 경우 데이터에서의 오차와 시간, 노동력의 낭비는 상당히 크게 된다. 따라서 구조물의 형상 표현을 위해 포맥스 대수학을 이용하였다. 포맥스 대수학의 개념은 구조 형상의 표현 뿐만 아니라 이와 관련된 자료들을 자동 생성하는데에 효과적인 수단이 된다. 즉, 여러가지 규칙성을 갖는 망상조직의(網狀組織) 기하학적 특성을 손쉽게 공식화 하므로써 복잡한 배열 형상을 다루는데 유용하며, 적절한 컴퓨터 프로그램과 연관지어 사용되어 왔다.

포맥스에서 지원되는 함수들은 각각 다음과 같은 것들이 있다.

- 1) 이동함수(移動函數)(Translation Function)
- 2) 대칭함수(對稱函數)(Reflection Function)
- 3) 회전함수(回轉函數)(Vertition Function)
- 4) 투영함수(投影函數)(Projection Function)
- 5) 팽창함수(膨脹函數)(Dilatation Function)
- 6) 중복함수(重複函數) 및 3중복함수(Gamination and Triad Function)
- 7) 복합함수(複合函數)



[그림 3.1] 포맥스 함수를 위한 구조물의 표현

3.2 포맥스(FORMEX) 대수학을 이용한 구조물의 표현

구조물에 있어서 각 절점 및 부재를 표현하기 위해 그림 3.1과 같이 구조물을 간략화 시켜 살펴보자. 여기서 주목할 것은 포맥스로는 구조물의 배열 및 상호 연결관계만을 나타내며, 그들의 위상학적 특성은 수반되는 여러가지 좌표계들로 표현된다.

절점 J1과 J18을 포맥스로 표현하면 다음과 같다.

절점 $J1=[1, 1]$, $J18=[2, 2]$

이동함수를 이용하여 [그림 3.1]과 같은 형태를 표현하면 다음과 같다.

1) 절점

$$F1 = \sum_{i=0}^H \text{tran}(2, 2, 2, i*H1) \quad (3.1)$$

$$F2 = \sum_{j=0}^V \text{tran}(2, 2, 2, j*V1) : \sum_{i=0}^{2*H} \text{tran}(3, 2, 2, i*H1/2) \quad (3.2)$$

$$F3 = \sum_{i=0}^{H/2} \text{tran}(3, 3, 8, i*2H1) \quad (3.3)$$

$$F4 = \sum_{i=0}^{H/2} \text{tran}(3, 1, 7, i*2H1) \quad (3.4)$$

$$F = F1 \# F2 \# F3 \# F4 \quad (3.5)$$

2) 부재

$$F1 = \sum_{i=0}^H \text{tran}(3, i*H1) : [1, 1; 3, 1] \quad (3.6)$$

$$F2 = \sum_{j=0}^V \text{tran}(2, j*V1) : \sum_{i=0}^{2*H} \text{tran}(3, i*H1/2) : [1, 2; 2, 2] \quad (3.6)$$

$$F3 = \sum_{i=0}^H \text{tran}(3, i*H1) : [1, 1; 1, 2] \quad (3.7)$$

$$F4 = \sum_{j=0}^{V-2} \text{tran}(3, j*V1) : \sum_{i=0}^{2*H} \text{tran}(3, i*H1/2) : [1, 2; 1, 3] \quad (3.8)$$

$$F5 = \sum_{i=0}^{2*H} \text{ref}(3, i*H1/2) : [1, 1; 2, 2] \quad (3.9)$$

$$F6 = \sum_{i=0}^{H/2} \text{tran}(3, i*2H1) : [3, 7; 7, 7] \quad (3.10)$$

$$F7 = \sum_{i=1}^{H/2} \text{tran}(3, i*2H1) : [3, 8; 7, 8] \quad (3.11)$$

$$F8 = \sum_{i=0}^{H/2} \text{tran}(3, i*2H1) : [3, 7; 3, 1] \quad (3.12)$$

$$F9 = \sum_{i=0}^{H/2} \text{tran}(3, i*2H1) : [3, 8; 3, 7] \quad (3.13)$$

$$F = F1 \ # \ F2 \ # \ F3 \ # \ F4 \ # \ F5 \ # \ F6 \ # \ F7 \ # \ F8 \ # \ F9 \quad (3.14)$$

3.3 구조물의 형태상 특성

본 연구에서 대상으로 한 구조물은 인공위성 송수신용 Parabolic 안테나의 반사판을 지지하는 트러스 구조물로서 3차원의 트러스 구조물들중 매우 복잡한 구조물중의 하나이다. 구조물의 특징은 트러스 구조물이 그 기능의 특성상 반사판의 각도가 변화한다는 것이다. 따라서 각도의 변화도 모델링 과정에서 변수로 입력하게 되어 있어 원하는 각도로 어느 것이든 손쉽게 모델링 할 수 있다. 모델링된 구조물은 절점의 수가 575개이며 부재의 수는 트러스 요소로서 1843개이다. 이것은 부재의 배열상태를 변경시킴으로써 절점과 부재의 수는 변화 할 수 있다. 그 구조물의 형태는 다음 [그림 3.2]와 같다.

4. 최적화 과정 및 연구모델

구조 최적설계의 비선형 문제를 해결하는데 유용한 알고리즘들은 다양하다. 본 연구에서 사용된 최적화 알고리즘은 직접법(Direct Method)이라 불리는 일반화된 Reduced Gradient방법과 Feasible Direction방법의 우수한 점들만을 가지고 만들어낸 Modified Feasible Direction방법이다. 이 방법에 대한 알고리즘의 내용은 Vanderplaats[8]에 의하여 상세히 기술되어 있다.

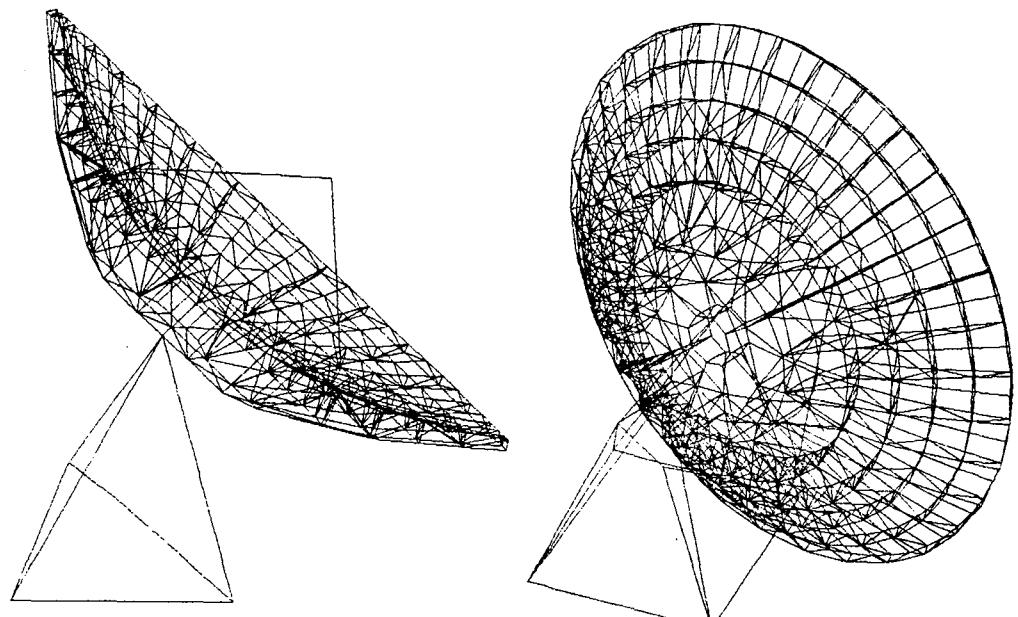
4.1 MFD(Modified Feasible Direction) 방법

MFD방법의 기본적인 가정은 목적함수 $F(X)$ 와 제약조건 함수 $g_j(X) \leq 0, j=1, 2, \dots, M$ 뿐만 아니라 그 하한, 상한 값은 주어진다는 것이다. 또한 목적함수와 제약조건 함수에 대한 기울기(Gradient)가 유효하다고 가정한다. 따라서 우리는 일반적인 최적화 문제와 같이 다음과 같은 형태로 문제를 표현한다.

$$\text{Minimize}, \quad F(X_i) \quad i = 1, \dots, n \quad (4.1)$$

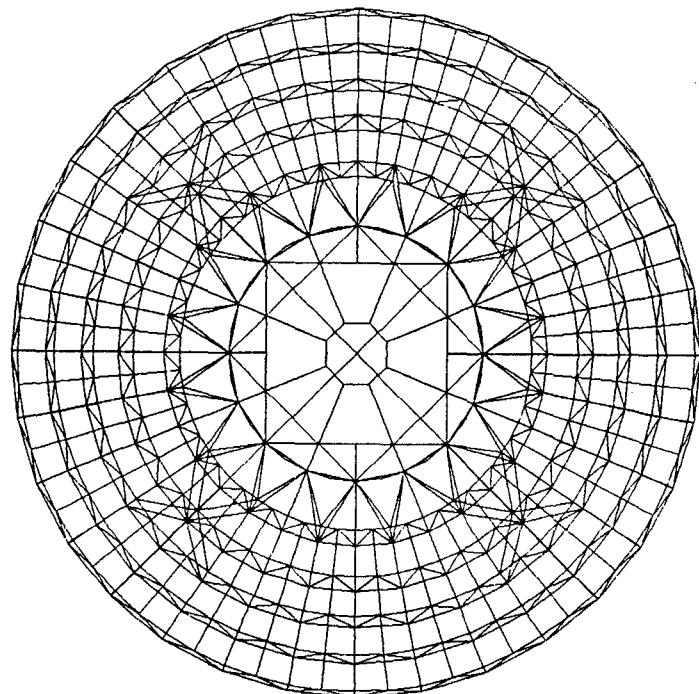
$$\text{Subject to}, \quad g_j(X_i) \leq 0 \quad j = 1, \dots, m \quad (4.2)$$

$$X_i^L \leq X_i \leq X_i^U \quad (4.3)$$



(a) 입면형태(운용각도 45°)

(b) 전체모습



(c) 반사판의 평면

[그림 3.2] 구조물의 형태

초기값 X^0 은 주어지며, 개선된 설계값은 다음과 같이 표현된다.

$$X^q = X^{q-1} + \alpha^* S^q \quad (4.4)$$

여기서, α^* : 이동량(Step Size)
 S^q : 탐색방향(Search Direction)

전체적인 최적화 과정은 다음과 같이 각 단계별로 설명 할 수 있다.

- 1단계) 시작. $q=0, X^q = X^{q+1}$
- 2단계) $q = q+1$
- 3단계) $J=1, 2, \dots, M$ 에서의 $F(X)$ 와 $g_j(X)$ 를 계산.
- 4단계) 결정적인 혹은 거의 결정적인 제약조건들의 인식.
- 5단계) $\nabla F(X)$ 와 $\nabla g(X)$ 의 계산.
- 6단계) 가능-유용한(Feasible-Usable) 방향 S^q 를 결정.
- 7단계) 이동량(Step-Size) α^* 을 구하기 위해 1차원적인 탐색(One-Dimensional)을 수행.
- 8단계) $X^q = X^{q-1} + \alpha^* S^q$
- 9단계) 최적값에 대한 수렴성을 검토. 만일 만족되지 않으면 2단계로 피드백.

4.2 해석 모델

본 구조물의 해석 모델은 반사판의 중심부분(Hub Structure)과 반사판을 지지하는 하부 지지 구조물(Pedestal Structure)들은 보요소(Beam Elements)로 모델링 하였으며 나머지 반사판 구조물들은(Radial Structure) 트러스 요소(Truss Elements)로 모델링하였다. 그리고 구조물의 지지점들은 모두 고정점으로 취급하였다. 본 연구에서 설계변수로 정의된 부분은 트러스요소들로 국한시켰다. 부재들에 대한 재료적 성질은 다음과 같다.

탄성계수(Young's Modulus) = 2.1×10^6 Kg/Cm²

프와송 비(Poisson's Ratio) = 0.33

밀도(Weight Density) = 7.93×10^{-3} Kg/Cm³

4.2.1 하중조건

외부하중은 바람에 의한 풍하중과 구조물 자중의 110%를 조합한 것으로 고려하였다. 풍하중의 산정은 바람의 속도를 평균 풍속도(35 m/s)보다 28%정도 강하게 고려한 45 m/s로 가정하였으며, 풍압계수는 곡면의 영향에 따른 풍동실험에 의한 계수를 사용해야 하나 근사치의 값을 구하여 평균계수 1.5를 취하여 계산한 값으로 Inter Layer의 절점하중으로 가하였다. 따라서 전체적인 하중은 실제의 하중보다 약간 과하게 계산되었으며, 본 연구에서는 앞에서 언급했듯이 설계 자동화 과정에 최적화 개념의 도입을 중점적으로 고려한 점을 감안해 볼때, 후속되는 연구에서 하중의 정확한 계산을 위한 모듈이 첨가될 것을 전제로 하고 있다.

4.3 문제의 정식화

본 연구에서 대상으로 한 트러스 구조물에 대한 최적화 문제의 정식화는 다음과 같은 비선형 문제로 요약될 수 있다.

$$\text{Minimize}, \quad F(X_i) \quad i = 1, \dots, n \quad (4.5)$$

$$\text{Subject to}, \quad g_i(X_i) \leq 0 \quad j = 1, \dots, m \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} & i = 1, \dots, n \\ & X_i^L \leq X_i \leq X_i^U \\ & X_i^L = 0.1, \quad X_i^U = 100 \end{aligned} \quad (4.7)$$

여기서, $F(X_i) = \sum L_i \rho_i$: 목적함수

$g_i(X_i) = \sigma_{all}/\sigma_i$: 부등제약조건

목적함수는 구조물의 총중량은 그 비용에 비례한다고 가정하였으며, 제약조건은 각 부재들에 대한 측응력조건만을 선택하였다.

4. 4 설계변수

최적화 과정에서 정의된 설계변수 X_i 는 각 트러스 부재의 단면적으로 설정하였다. 설계변수를 각각의 부재들에 대해 설정하면 설계변수가 방대해 지므로 각 열과 행 및 Brace부재들에 대해서 부재들을 그룹화하여 설계변수를 감소시켰다. 이렇게 정의된 설계변수의 수는 38개로 정의되었다. 설계변수들에 대한 초기값은 본 구조물이 실재하는 구조물임을 감안해 실제 구조물의 부재 크기(Size)로 결정하였으며, 그 하한값(Lower Bound)과 상한값(Upper Bound)은 각각 0.1cm^2 과 100cm^2 으로 설정하였다.

4. 5 제약조건

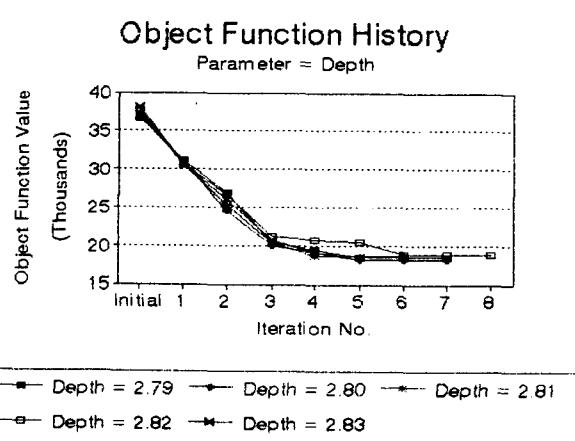
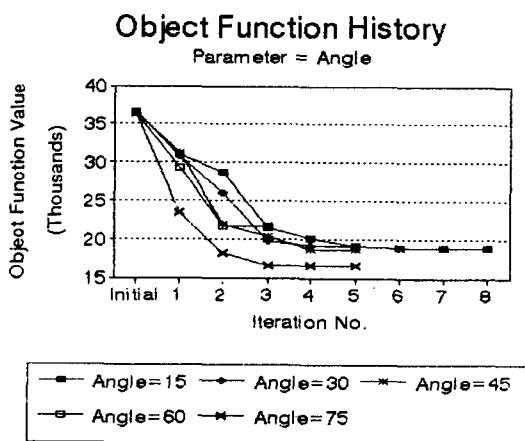
제약조건(Constraints)은 각 부재의 축응력을 그 항복응력을 초과하지 않는다는 가정을 이용하였다. 항복응력은 인장, 압축 모두 2400Kg/cm^2 으로 정의하였다. 본 구조물은 그 특성상 설계과정에서 응력조건에 지배받기 보다는 동적거동에 의한 고유진동수(Natural Frequency)에 의해 지배받을 것으로 사료되나, 본 연구에서는 정적해석(Static Analysis)에 의한 각 부재들의 축응력만을 검토하는 것으로 하였다. 또한 좌굴에 대한 고려도 별도의 좌굴해석(Buckling Analysis)을 하여 검토한다는 가정하에서 제외시켰다.

5. 예제실행 및 결과분석

본 구조물은 반사판의 트러스 구조물을 지지하는 Pedestal Frame을 중심으로 0° 에서 90° 영역에서 각도가 변화한다. 본 연구에서는 구조물을 0° 에서 90° 사이를 15° 간격으로 모델링하여 각각의 각도에서의 최적값을 구하여 보았으며, 운용각도인 20° 에서 Inter Layer와 Outer Layer의 두께(Depth)를 변화시켜가면서 두께의 변화에 대한 중량의 최적화 과정을 살펴보았다. 그 결과 도표는 [그림 5.1]부터 [그림 5.9]와 같다.

5. 1 각도와 두께의 변화에 따른 목적함수의 이력(History)

다음 [그림 5.1]은 반사판의 운용각도를 15° 간격으로 변경시켜 가면서 어느 각도에서의 최적값이 가장 결정적인가를(Critical) 판단하도록 하여 보았다. [그림 5.2]은 반사판의 각도를 운용각도 20° 로 고정시켜 놓고 Inter Layer와 Outer Layer사이의 두께를 10cm 씩 증가시켜가면서 최적값이 어떻게 변화하는가를 관찰하여 보았다.

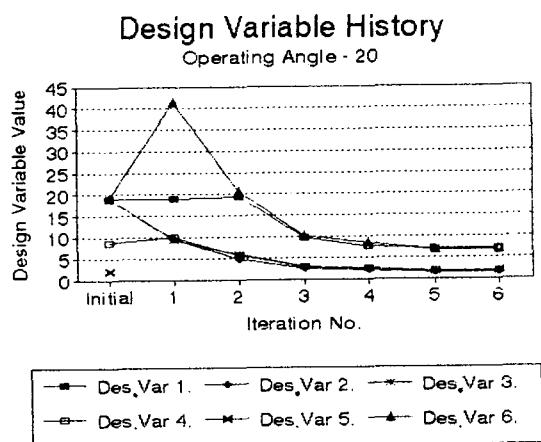


[그림 5.1] 각도의 변화에 따른 목적함수의 비교

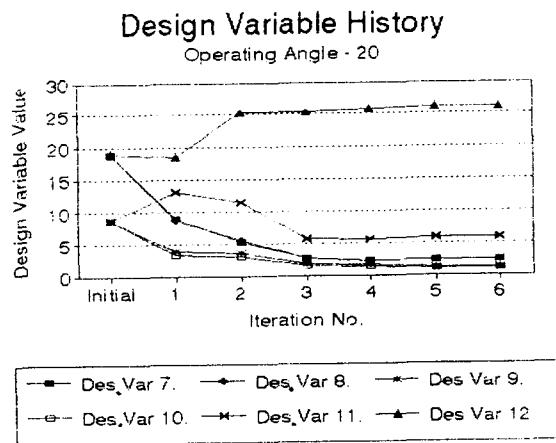
[그림 5.2] Layer두께의 변화에 따른 목적함수의 비교

5.2 운용각도(20°)에서의 설계변수들의 이력(History)

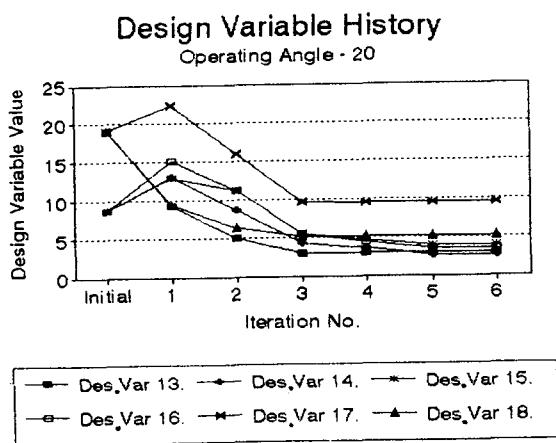
[그림 5.3]부터 [그림 5.9]까지는 운용각도 20° 에서 주어진 조건들을 만족시키면서 초기의 설계변수값(부재의 초기단면적)에서 최적화 과정을 통해 수렴하는 설계변수값까지의 과정을 나타내는 그림이다.



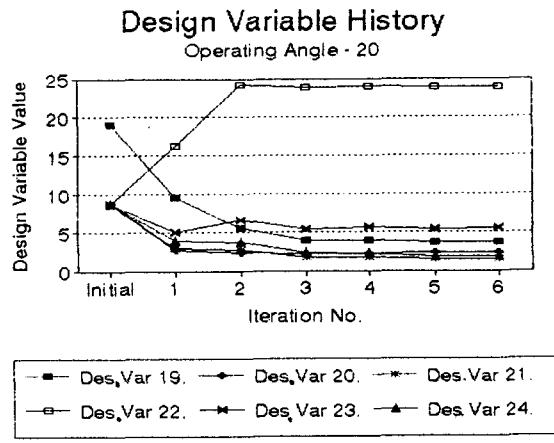
[그림 5.3] 설계변수 1 - 6



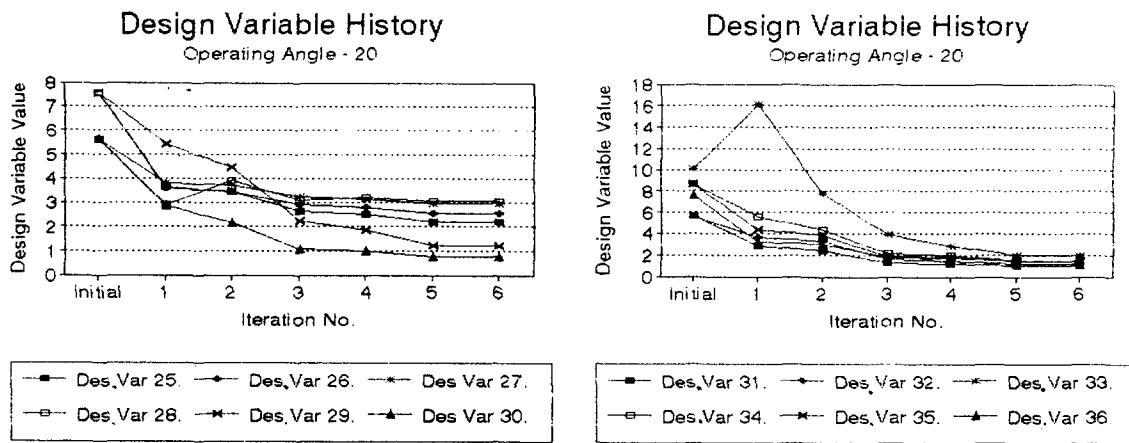
[그림 5.4] 설계변수 7 - 12



[그림 5.5] 설계변수 13 - 18

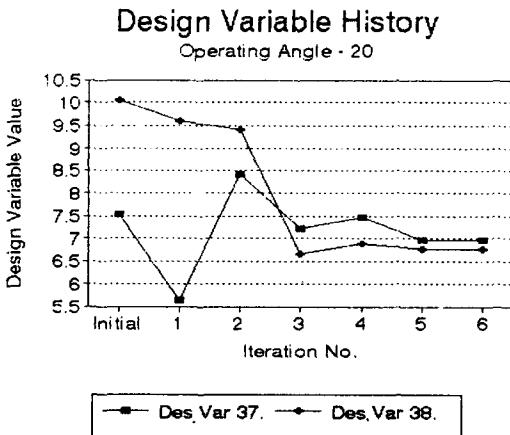


[그림 5.6] 설계변수 19 - 24



[그림 5.7] 설계변수 25 ~ 30

[그림 5.8] 설계변수 31 ~ 36



[그림 5.9] 설계변수 37 ~ 38

5.3 결과분석

- 구조물의 운용각도와 Layer의 두께를 변화시켜가면서 설계를 수행시켜보았으나 각각의 경우 모두 수렴하는 값을 일정한것을 알수 있다.
- 운용각도의 변화에 따른 최적해의 수렴양상은 해석모델에서 운용각도에 따른 풍하중을 별도로 고려하지 않고 일정한 하중으로 입력한 것에서 기인한 원인도 있겠으나 대체적으로 각각의 경우에 있어서 수렴하는 값에 큰차이가 없다는 것을 알 수 있다.
- Layer의 두께 변화에 따른 민감도는 두께가 두꺼울 수록 구조물의 전체 강성이 증가함으로 목적함수의 값이 줄어들 것으로 예상했으나 본 연구에서 시도한 두께의 변화량이 최적의 영역에 포함되어 있었던 것으로 사료된다.
- 위의 그래프에서 알 수 있듯이 보통 수렴하기 위한 반복계산의 수(Iteration Number)는 5에서 8 범위에 있었다.

6. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 3차원 트러스 구조물의 해석 및 설계를 위한 구조물의 모델링 과정에서 Formex함수를 이용함으로써 최적화 설계 자동화 과정에서 가장 걸림돌이 되었던 Mesh-Generation과 모델링 과정을 자동화 할 수 있었다.
- 2) 구조물의 해석 및 설계를 위한 입력데이터를 자동으로 생성시킴으로써 설계자가 대화식(Interactive)으로 모델을 변경시켜가면서 민감도를 관찰하는 방법으로 한 가지 모델에 대한 수치적 최적해에 의존하지 않고 여러가지 경우를 고려하면서 수치적 최적해를 고칠할 수 있었다.
- 3) 설계방법론적인 면에서도 허용응력 조건등은 단순히 제약조건으로 명시함으로써 기존의 설계방법들도 포함하여 수치적 최적해를 얻는 방법을 고안해 낼 수 있었다.
- 4) 해석 및 설계과정에서 발생하는 많은 데이터들이 일관성 있게 제어됨으로써 일관 설계시스템을 구축할 수 있는 기틀을 마련할 수 있었다.
- 5) 향후 일관설계시스템을 구축할 때에는 최적화 개념을 도입하여 설계된 각종의 정보들을 정리하는 단계에서 강력한 데이터 베이스의 도입이 필수적임을 확인하게 되었다.
- 6) 입체 트러스 구조물의 설계과정에서 최적화 기법을 실무에서 편리하게 적용할 수 있는 방법론을 제안 할 수 있었으며, 사용한 도구에(MSC/NASTRAN) 대한 검증의 기회도 가질 수 있었다.

7. 참고문헌

- [1] Arora, J. S., "Introduction to Optimum Design", McGraw-Hill Book Company, 1989.
- [2] B. H. LEE, "Structural Optimization of Space Truss", Ph. D. Thesis, Univ. of Minnesota, 1972
- [3] Gregory J. Moore, "MSC/NASTRAN Design Sensitivity and Optimization User's Guide", The Macneal-Schwendler Corporation, 1992.
- [4] Hoshyar, Nooshin, "Formex Configuration Processing in Structural Engineering", Elsevier Applied Science Publishers, Ltd., London, 1984.
- [5] Hoshyar, Nooshin, "Third International Conference on Space Structure", Elsevier Applied Science Publishers Ltd., London, 1984.
- [6] Maxwell C., Scientific Paper, Vol. 2, 1869, pp. 175-177.
- [7] MSC/NASTRAN-User's Manual, Ver 67.5, The Macneal-Schwendler Corporation, 1992.
- [8] Vanderplaats, G. N, "An Efficient Feasible Direction Algorithm for Design Synthesis", AIAA Journal, Vol. 22, No. 11, Nov. 1984.
- [9] Vanderplaats, G. N, "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Application", McGraw-Hill Book Company, 1984.
- [10] Z. PRASCEVIC, "A Survey of Current Research Trends in Optimum Design of steel Frame"
- [11] Z. S. Makowski, "Analysis, Design and Construction of Braced Domes", Nichols Publishing Company, New York, 1984.
- [12] 부용석, "입체 철골 트러스의 설계자동화에 관한 연구", 한양대학교 대학원, 1990.
- [13] 조병현, "장방형 입체 트러스의 중량 최적화", 한양대학교 대학원, 1991.
- [14] 조효남외 2인, "구조물의 최적 설계", 한국전산구조공학회, 1991.
- [15] 이 철, "Formex 대수학을 이용한 입체구조의 기하학적 연구", 대한건축학회 논문집 제 8권 제 1호, 1988.