

# 퍼지-유전자 알고리즘에 의한 공간 트러스의 형상 최적화

## The Shape Optimization Design of Space Trusses Using Genetic Algorithms

박 춘 욱\*                      김 수 원\*\*                      강 문 명\*\*\*  
Park, Choon-Wook              Kim, Su-Won                      Kang, Moon-Myung

### Abstract

The objective of this study is the development of a size and shape discrete optimum design algorithms, which is based on the genetic algorithms and the fuzzy theory. This algorithms can perform both size and shape optimum designs of plane and space trusses. The developed fuzzy shape-GAs (FS-GAs) was implemented in a computer program. For the optimum design, the objective function is the weight of structures and the constraints are limits on loads and serviceability. This study solves the problem by introducing the FS-GAs operators into the genetic.

*keywords : genetic algorithms, discrete optimum, fuzzy, fitness, shape optimum*

### 1. 서 론

강 구조물의 구조해석과 단면 및 형상최적화가 동시에 일괄적으로 실행할 수 있는 통합 시스템화된 최적화 알고리즘 및 프로그램의 개발은 재료의 절감은 물론 건설경비의 절감을 위하여 대단히 중요한 연구과제인 것이다. 그 대표적인 문제로서 정수 또는 이산적 수치를 가지는 설계 변수가 혼합되어 있는 혼합형 최적화 문제와 여러 개의 국소 최적점이 존재하는 경우 전체 최적점을 효율적으로 구하는 문제, 미분 불가능함수나 불연속함수의 최적화문제, 그리고 기존의 형상최적화 문제에서는 해석 및 최적 설계과정에서 민감도를 계산하여 이를 바탕으로 근사해석을 반복 수행한다. 이러한 수학적인 접근법에 의해 산출된 결과는 연속해 영역에 존재하게 되므로 규격제품의 구조용재를 사용하는 구조물의 이산화

최적설계에는 비합리적일 수 있다. 또한, 구조물 최적설계범위의 경계영역에 대한 애매 모호성을 다루고, 이를 반영시킬 도구가 필요하고 합리적으로 반영시키기 위해서는 전문가들의 경험과 판단에 기준을 둔 적절한 허용오차를 선택하는 것을 필요로 한다. 그렇기 때문에 이 허용오차의 결정은 객관적이어야 하면서도 다분히 주관적이다.

따라서, 본 연구에서는 신뢰성과 범용성이 좋으며, 설계변수로서 이산화 된 코드를 사용하므로 조합최적화 문제에 적용이 매우 용이한 유전자 알고리즘(genetic algorithms, 이하 GAs)과 최적설계에 있어서 필연적으로 불확실성을 포함하게 되는데 퍼지 집합이론(fuzzy set theory)을 도입하여 위에서 언급한 국소점이 많은 경우인 전체 최적화 문제를 보다 효율적으로 해결할 수 있도록 하고 모호한(fuzziness) 주관성을 도입할 수 있도록 기존의 Simple GAs를 개선한 퍼지-형상 유전자 알고리즘 (fuzzy shape genetic algorithms, 이하 FS-GAs)을 제시하고, FS-GAs에 의한 공간 트러스의 단면 및 형상 최적화가 가능

\* 정회원 · 경북대학교 건축공학과 강사, 공학박사

\*\* 정회원 · 영진전문대학 건축디자인계열 부교수

\*\*\* 정회원 · 경북대학교 건축공학과 교수, 공학박사

한 이산화 최적설계 프로그램을 개발하고, 최적 설계 예를 수행하여 그 결과를 비교, 고찰하고자한다.<sup>(1),(2),(5)</sup>

## 2. 유전자 알고리즘

GAs를 이용하여 문제를 해결하기 위해서는 문제 해결을 위한 방법을 스트링(string)에 기술한다.<sup>(3),(4)</sup> 이 때 주로 이진코드를 사용하여 기술하며, 이렇게 만들어진 스트링을 '염색체(chromosomes)'라고 한다. 이들 염색체의 집단(개체군, population)을 대상으로 각 염색체의 문제 해결 능력을 평가 한 후 문제 해결 능력이 높은 염색체들끼리 교배시켜 얻어진 새로운 염색체들로 구성된 집단을 만든다. 이 과정에 작용하는 연산자로서는 복제(reproduction), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)등이 있다. 이렇게 여러 세대(generation)를 거치는 동안 집단의 문제 해결 능력이 높아지게 된다.

GAs에서 염색체의 생존 확률 계산의 기준이 되는 매우 중요한 요소가 적합도이며, 본 연구에서는 목적함수의 역수를 기본적으로 사용하였으며 이때 목적함수가 1.0 미만의 수치로 표현되는 것을 방지하기 위하여 식(1)과 같이 최대 목적함수 값과의 비를 적합도로 표현하였다.<sup>(4),(11)</sup>

$$Fitness = \frac{Object_{Max}}{Object_{Sum}} \quad (1)$$

$$Object_{Max} = \sum_{i=1}^n A_{max} \times L_i$$

$$Object_{Sum} = \sum_{i=1}^n A_i \times L_i$$

여기서,  $A_{max}$ : 검색에 사용되는 단면 데이터베이스의 단면적중 가장 큰 값

$A_i$ :  $i$  번째 부재의 단면적

$L_i$ :  $i$  번째 부재의 길이

## 3. 퍼지집합의 기본이론

전체공간(total space)  $X$ 상의 퍼지 집합  $A$ 와 소속함수  $\mu_A$ 는 다음 식 (2)와 같은 순서쌍의 집합

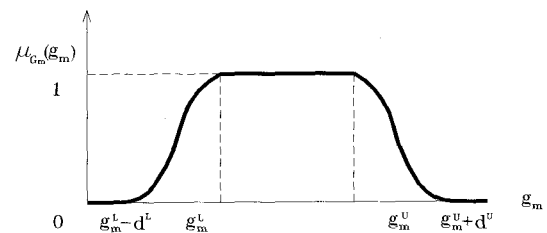
으로 정의한다.<sup>(5,6)</sup>

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid x \in X\} \quad (2)$$

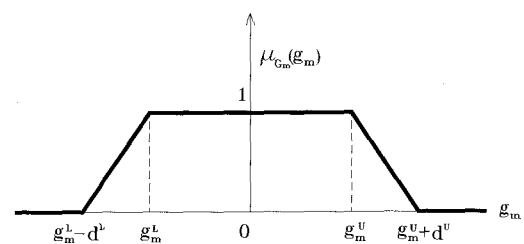
$\tilde{A}$ 의 소속함수는  $\mu_{\tilde{A}}: X \rightarrow [0, 1]$ 이다. 따라서 소속함수  $\mu_{\tilde{A}}$ 는 다음 식 (3)을 만족한다.

$$0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x) \leq 1 \quad (3)$$

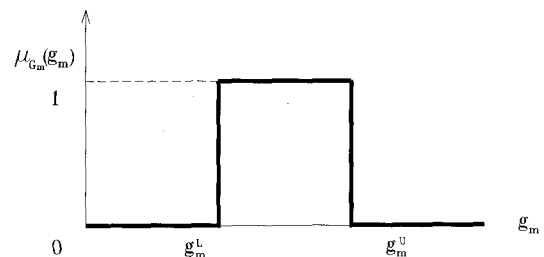
식 (3)에서  $\mu_{\tilde{A}}(x)$ 의 값이 크면  $\tilde{A}$ 에 대한  $x$ 의 소속도가 높고,  $\mu_{\tilde{A}}(x) = 1$ 이면  $x$ 는 확실히  $\tilde{A}$ 에 속하고,  $\mu_{\tilde{A}}(x) = 0$ 이면  $x$ 는 확실히  $\tilde{A}$ 에 속하지 않음을 의미한다. 소속함수  $\mu_{\tilde{A}}$ 의 점진적 과도성을 표시하는 과도구간을 나타내는 문제는 아래 그림 2~4와 같이 사용되는데, 여기서는 과도성을 나타낸다는 것이 중요하므로 어떤 함수를 택하는 가는 큰 문제가 되지 않는다.



〈그림 2〉 곡선형의 소속함수



〈그림 3〉 직선형의 소속함수



〈그림 4〉 보통함수의 소속함수

그러므로, 본 연구에서는 소속함수  $\mu_{\tilde{A}}$ 의 계산을 쉽게 하기 위해 선형 함수를 선택하여 식(4) 및 식(5)와 같이 퍼지 제약식의 소속함수를 나타낼 수 있다.

i) 감소소속함수

$$\mu_{\tilde{C}_i^-}(X) = \begin{cases} 1 & \text{if } g_i(X) < b_i^u \\ \frac{(b_i^u + d_i^u) - g_i(X)}{d_i^u}, & \text{if } b_i^u \leq g_i(X) \leq b_i^u + d_i^u \\ 0 & \text{if } g_i(X) > b_i^u + d_i^u \end{cases} \quad (4)$$

ii) 증가소속함수

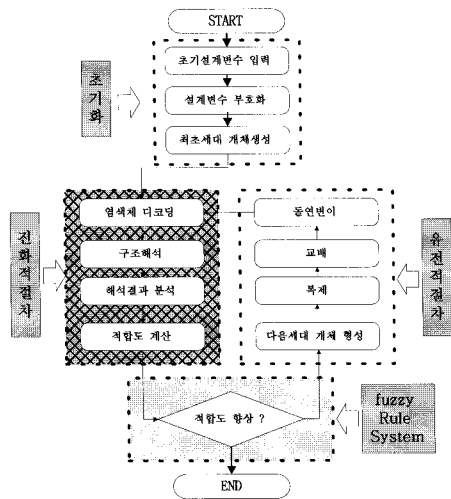
$$\mu_{\tilde{C}_i^+}(X) = \begin{cases} 0 & \text{if } g_i(X) < b_i^l - d_i^l \\ \frac{g_i(X) - (b_i^l - d_i^l)}{d_i^l}, & \text{if } b_i^l - d_i^l \leq g_i(X) \leq b_i^l \\ 1 & \text{if } g_i(X) > b_i^l \end{cases} \quad (5)$$

여기서  $\mu_{\tilde{C}_i^-}(X), \mu_{\tilde{C}_i^+}(X) \in [0, 1]$

### 4. FS-GAs에 의한 단면 및 형상 이산화 최적 문제 형성

#### 4.1 FS-GAs을 이용한 이산화 최적설계프로그램

그림 5는 본 연구에서 FS-GAs 적용절차를 도시화한 것으로 초기화절차와 진화적 절차 및 유전적 절차 그리고 fuzzy rule system으로 구성된다.<sup>(9-10)</sup>



<그림 5> FS-GAs 적용 흐름도

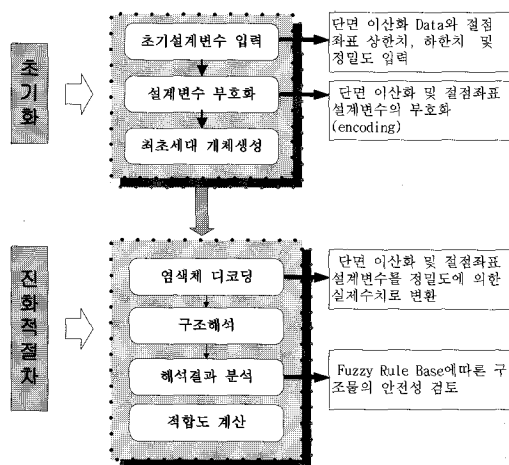
그림 5의 초기화 작업에서 GAs은 임의의 난수를 발생시켜 한 세대의 개체 수만큼의 염색체를 생성해 내어야 한다. 이때 본 연구에서 적용한 형상최적설계를 수행하기 위해 절점 이동의 퍼지 상·하한치를 결정하고 검색할 데이터의 간격을 결정한다. 이렇게 생성된 염색체들은 진화적 절차에 전달되며 디코딩 수치화 작업을 통하여 실제 설계 변수에 사용될 수치로 변환되며, 얻어진 설계 변수들을 사용하여 구조 해석을 수행한다. 진화적 절차는 구조 해석의 결과를 분석하여 염색체의 퍼지 적합도를 계산하며 계산된 퍼지 적합도를 유전적 절차에 전달한다. 유전적 절차에서는 GAs의 연산자인 복제와 교배 및 돌연변이 등을 통하여 다음 세대의 유전자를 생성하게 되며 다시 진화적 절차에 전달한다.

#### 4.2 퍼지 시스템

Crisp 또는 conventional 논리의 특성은 전형적으로 흑백논리이다. 즉 어떠한 사건이 사실이나 아니냐의 문제이고 그 이외의 것은 없다. 과학에서 이러한 사고는 피할 수 없는 것이다. 그러나 여러 가지 시방서나 code등에 의해 제공되는 정보는 대부분 실제적인 경우이기 때문에 conventional 논리법으로 취급하기에는 애매한 부분이 많았다. 예를 들면, 부재 응력  $\sigma$ 는 상한치 경계값에 의해 제한을 받는다면  $\sigma \leq \sigma^U$ , 이것은  $\sigma = \sigma^U$ 는 허용되지만  $\sigma = \sigma^U + \Delta\sigma$  ( $\Delta\sigma > 0$ )는  $\Delta\sigma$ 가 아무리 작은 값이라 해도 허용되지 않는다. 설계자의 관점에서 보면, 완전히 제외하는 구간과 완전히 포함하는 구간간의 변화가 있는 것이 더 합리적인 것으로 보인다. 포함(1), 제외(0)의 두 개의 boolean 값을 가지는 함수 대신에 퍼지 집합이론은 완전히 제외(0)에서 완전히 포함(1) 사이에 소속의 정도를 허용한다. 그리고 형상 최적화 문제의 어려움은 구조물의 배치나 크기 등의 변수들이 동시에 변한다는 사실이다. 모든 설계 변수들이 수치적인 특성과 구조물의 반응거동 사이에 큰 차이를 보이고 있다. 무엇보다도 초기 설계단계에서 최적형상(배치)의 개념이 적용되어야 한다. 초기 설계에서 구조물 배치설계의 의사결정은 주로 부재력의 개념적인 이해와 기능의 요구조건 등을 기초로 하여야 한다. 그러나 이러한 정보들은 대개 전문가나 시방서에서도 애매하다.<sup>(5)</sup>

또한 모든 설계(real-world) 문제들은 제약조건들을 포함한다. 그리고 구조 형상 최적화는 제약조건 만족의 문제가 된다. 일반적으로 구조 형상 설계는 설계 코드와 시방서(기능, 구조거동 등)에 의해 제약을 받는다. 제약조건이 정해지면 남은 문제는 최소의 중량을 구하는 것이다. 기존의 최적화는 모든 제약조건들이 엄격히 만족되어야 하였다. 그러나 GAs에서는 다양성이 본래의 특성이다. 만일 몇 개의 해들이 제약조건을 만족하지 못했다는 이유로 초기 최적화 과정에서 선택되지 않았다면 결국에는 최적 해에 도달할 수 있는 중요한 요소를 잃어버리는 것일 수도 있는 것이다. 동시에 어떤 제약조건은 조금 만족하지 못한 것이 다른 제약조건에 아주 큰 영향을 미칠 수도 있다. 따라서 서로 다른 또는 상반되는 제약조건들은 중요하거나 제어할 수 있는 제약조건들을 어떤 식으로 표현하고 평가하느냐 하는 문제점을 가지게 되는 것이다. 어느 제약이 아주 많이 제약을 받느냐 하는 결정은 항상 우선될 수는 없다. 유효하고 유효하지 않은 제약들은 아주 애매하다.

이러한 이유로 GAs의 수행능력을 높이고 애매한 정보를 처리하기 위해 잘 선택된 느슨한(soften) 제약식들이 필수적이다. 이러한 문제들을 다루는데 퍼지 논리가 유용하다. 그 이유는 퍼지 논리는 표현에 있어서 애매 모호함을 포함한 퍼지 모델을 취급할 수 있기 때문이다.

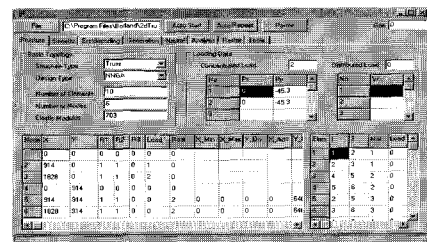


〈그림 6〉 FS-GAs 알고리즘

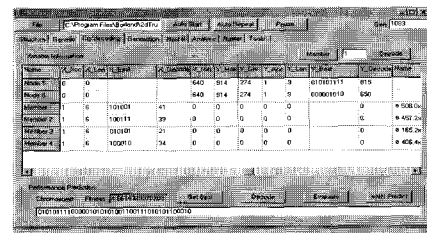
따라서 그림 5의 전체 흐름도에서 그림 6과 같이 본 연구에서 초기화단계 및 진화적 절차 단계에서

절점 이동의 상한치와 하한치 그리고 정밀도 및 방향을 입력하여 부호화(encoding) 그리고 실제수치(decoding)로 변환가능 하므로써 각 비트의 역할에 따라 각각 독립적으로 처리할 수 있도록 하였으며, 새롭게 구성된 염색체에 의한 구조해석결과를 바탕으로 적합성과 퍼지 제약 조건식에 의한 구조물 안전성 검토를 할 수 있는 최적설계 알고리즘을 제시하였다.

그림 7, 8은 FS-GAs에 의한 입·출력 화면의 부호화, 디코딩 과정을 나타내었다.



〈그림 7〉 FS-GAs의 입력과정



〈그림 8〉 FS-GAs의 출력과정

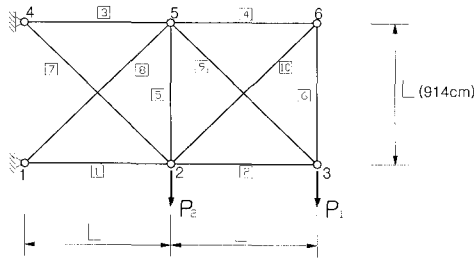
## 5. 최적설계 예 및 결과고찰

본 장에서는 FS-GAs을 이용하여 10부재 평면 트러스와 공간 트러스 등에 대하여 구조해석과 단면 및 형상최적화를 동시에 고려하는 이산화 최적설계 문제를 수행하고, 그 결과를 비교·고찰하고자 한다. (4), (10)

### 5.1. 10부재 평면 트러스

그림 9와 같은 10부재 평면 트러스에 대하여 FS-GAs를 이용한 이산화 최적 설계를 수행하기 위해 구조해석과 설계에 적용되는 단면은 실제 공장에서 제작되는 상용제품인 KS 규격의 원형강관에 대한 단면 성질을 사용하여 최적설계를 수행하였다. 강구

조의 중량을 목적 함수로 사용하였고, 제약 조건으로는 강재의 기계적 성질, 허용 응력, 절점의 수평 및 수직방향의 변위 제한인데 이 값들은 표 1과 같다. 트러스의 절점 강성은 고려하지 않았으며, 교배 확률과 돌연변이확률 매개변수는 각각 0.5와 0.025를 사용하였으며, 설계집단은 60, 최대세대수는 3000번으로 하였다.



〈그림 9〉 10부재 평면 트러스

〈표 1〉 최적 설계 조건

부재의 허용응력 (tf/cm <sup>2</sup> )	탄성계수 E (tf/cm <sup>2</sup> )	단위중량 ρ (tf/cm <sup>3</sup> )	절점 허용 변위 (cm)	절점하중 P <sub>1</sub> = P <sub>2</sub> (tf)
1.76	703	2.768 × 10 <sup>-6</sup>	±5.08	45.3

최적화 문제를 수식화하면 식 (6)과 같이 정식화한다.

$$\text{Minimize } W(X) \tag{6}$$

$$\text{Subject to } G(X) \geq 0 \tag{6a}$$

$$W(X) = \rho \sum_{i=1}^m V_i \tag{6b}$$

$$V_i = A_i \times L_i \tag{6c}$$

여기서, W : 목적함수, 구조물 중량(tf)

X : 설계변수, G : 제약 조건식

V<sub>i</sub> : 체적 (cm<sup>3</sup>), A<sub>i</sub> : 단면적 (cm<sup>2</sup>)

L<sub>i</sub> : 부재길이 (cm), ρ : 강재의 단위중량 (tf/cm<sup>3</sup>)

우선, 본 연구에서 제시한 FS-GAs을 이용하여 KS

규준의 원형 강관 단면을 이용하여 표 1의 최적설계 조건에 대한 설계자의 주관적 판단의 퍼지 허용오차 5% 와 10% 범위에 대해 퍼지 제약식을 고려한 단면 이산화 최적설계를 수행하였다.

〈표 2〉 10부재 평면 트러스의 퍼지제약식을 고려한 단면 이산화 최적 설계 결과

부재 번호	이산최적설계		
	퍼지허용오차		
	비퍼지	5%범위	10%범위
1	φ-558.8×9.5	φ-609.6×9.5	φ-457.2×9.5
2	φ-457.2×6.4	φ-318.5×10.3	φ-457.2×6.4
3	φ-609.6×9.5	φ-508.0×9.5	φ-711.2×9.5
4	φ-21.7×1.9	φ-60.5×2.3	φ-21.7×1.9
5	φ-21.7×1.9	φ-21.7×1.9	φ-76.3×3.2
6	φ-21.7×1.9	φ-21.7×1.9	φ-42.7×2.4
7	φ-216.3×8.2	φ-216.3×8.2	φ-190.7×5.3
8	φ-508.0×9.5	φ-406.4×12.7	φ-508.0×9.5
9	φ-457.2×9.5	φ-406.4×9.5	φ-406.4×9.5
10	φ-21.7×1.9	φ-42.7×2.4	φ-21.7×1.9
목적함수 (tf)	2.3058	2.2810	2.1910

표 2을 비교하여보면 퍼지 제약식을 고려하지 않고 단면 이산화 최적 설계 한 결과보다 퍼지 제약식에 대한 허용오차를 각각 5%범위, 10%범위가 주어졌을 때 각각의 목적함수가 1.09%, 5.24% 감소함을 고찰 할 수 있었다.

표 3에서는 10부재 트러스를 구성하는 절점의 이동한계를 정의하였으며 각각의 유전자길이를 나타낸 것이다. 부동절점(floating node)을 2개로 하였을 경우는 상현재의 위치를 결정하는 절점만 이동하는 것이다.

또한, 최적설계에 사용되는 부재그룹은 상현재, 하현재, 수직재, 사재로 구성하였다. 표 3, 표 4에 나타난 조건으로 10부재 트러스의 비퍼지인 경우와 퍼지를 고려했을 때 단면 및 형상 최적 설계를 수행한 결과 표 5와 같은 최적 설계 결과를 얻을 수 있었으

며 그림 10은 이때 각각 case의 목적함수 변화 형상이다. 또한 그림 11~그림 13은 최적설계수행결과 수렴된 형상을 나타내었다.

〈표 3〉 10부재 평면 트러스의 절점 이동 조건 및 유전자 길이

설계변수	이동 한계(cm)			설계 공간	유전자 길이
	기준	최소	최대		
Node 5	X	914	-	-	-
	Y	914	640	914	274
Node 6	X	1828	-	-	-
	Y	914	640	914	274

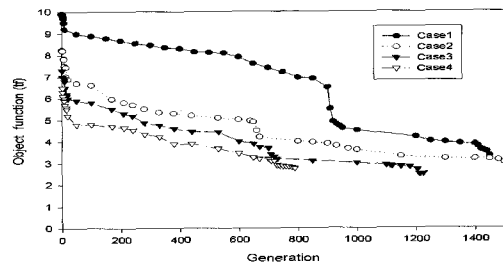
표 5와 그림 14를 살펴보면 형상을 고정시킨 것보다 형상을 고려한 이산화 최적설계결과가 약 4.7% 경제적인을 알 수 있고, 형상을 동시에 고려한 이산화 최적설계결과에서도 퍼지 제약식을 적용했을 때가 비퍼지인 경우보다 각각 약 4%, 8.7% 더 경제적인을 알 수 있었다. 또한, 표 5 에서 나타나 있는바와 같이 퍼지허용오차의 범위가 클수록 적합도가 증가하고, 목적함수값은 감소함을 또한 알 수 있다.

〈표 4〉 10부재 평면 트러스의 형상 최적 설계 조건

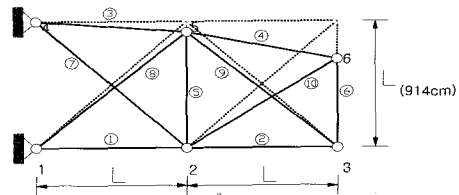
부동절점	부재그룹	유전자 길이 (bit)
2	4	42

〈표 5〉 부동 절점 2개인 10부재 평면 트러스의 단면 및 형상 최적 설계 결과

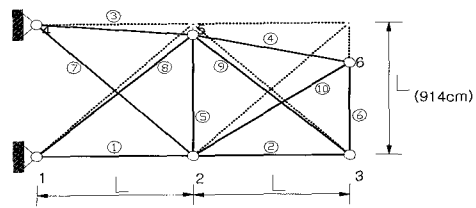
		case1(cm <sup>2</sup> )	case2(cm <sup>2</sup> )	case3(cm <sup>2</sup> )	case4(cm <sup>2</sup> )
		비퍼지		퍼지 허용오차 범위	
		형상고정	형상고려	형상고려	형상고려
상현재		$\phi$ -457.2×12.7 (177.30)	$\phi$ -406.4×12.7 (157.10)	$\phi$ -508.0×9.5 (148.80)	$\phi$ -508.0×9.5 (148.80)
하현재		$\phi$ -406.4×12.7 (157.10)	$\phi$ -508.0×9.5 (148.80)	$\phi$ -508.0×9.5 (148.80)	$\phi$ -406.4×9.5 (118.50)
수직재		$\phi$ -165.2×5.0 (25.16)	$\phi$ -165.2×5.0 (25.16)	$\phi$ -114.3×3.5 (12.18)	$\phi$ -139.8×4.0 (17.06)
사재		$\phi$ -318.5×10.3 (99.73)	$\phi$ -318.5×10.3 (99.73)	$\phi$ -406.4×7.9 (98.90)	$\phi$ -406.4×7.9 (98.90)
Y	5	914	838	837	850
	6	914	640	640	640
목적함수 (tf)		3.2372	3.0934	2.9742	2.8459
적합도		6.3923	6.5289	6.6435	6.8431



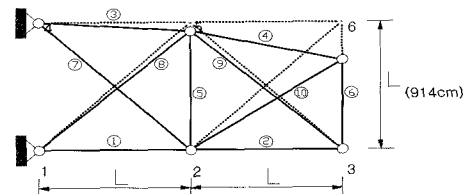
〈그림 10〉 2개의 부동 절점을 가진 10부재 평면 트러스의 목적함수 변화



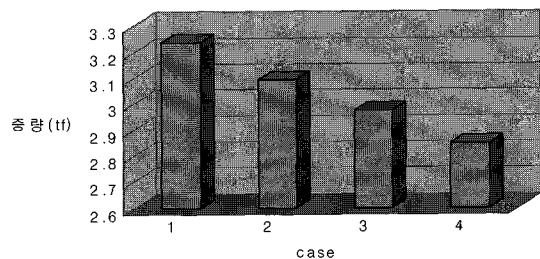
〈그림 11〉 비퍼지일 때 최적형상



〈그림 12〉 퍼지 허용오차 5% 범위일 때 최적형상



〈그림 13〉 퍼지 허용오차 10% 범위일 때 최적형상



〈그림 14〉 10부재 평면 트러스의 퍼지상태에 따른 형상최적설계의 목적함수비교

- case 1 : 형상 고정 (비퍼지)
- case 2 : 형상 고려 (비퍼지)
- case 3 : 형상 고려 (퍼지 허용오차 5%범위)
- case 4 : 형상 고려 (퍼지 허용오차 10%범위)

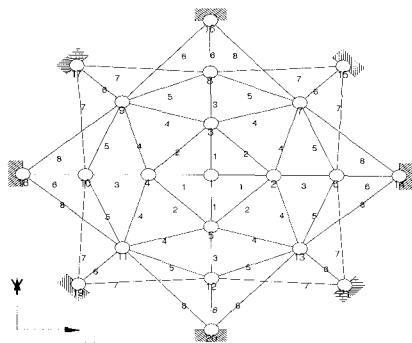
### 5.2. 공간 트러스 돔

본 장에서는 그림 15, 그림 16과 같은 공간 트러스 돔 구조물의 예제를 통하여 본 연구에서 제시한 FS-GAs를 이용하여 공간 트러스의 구조해석 과 단면 및 형상 이산화 최적설계를 일괄적으로 수행하여 그 결과를 비교, 검토하고자한다. 공간 트러스의 구조해석은 기하학적 비선형 해석을 수행하였다. 본 연구에서 제시한 FS-GAs 과 프로그램의 신뢰성과 범용성을 확인하기 위하여 단면 및 형상 이산화 최적설계를 수행하였다. 그리고 그 결과를 표 7과 표 10에 나타내었다. 구조해석과 설계에 적용되는 단면을 실제 공장에서 제작되는 상용제품인 KS 규격의 원형 강관 단면에 대한 성질을 사용하여 최적화를 수행하였다. 강구조의 중량을 목적 함수로 사용하였으며, 하중조건은 표 6과 같이 하였다. 교배 및 돌연변이확률 매개변수는 각각 0.5와 0.025 을 사용하였으며, 초기설계집단은 60, 최대세대수는 500번으로 하였다.

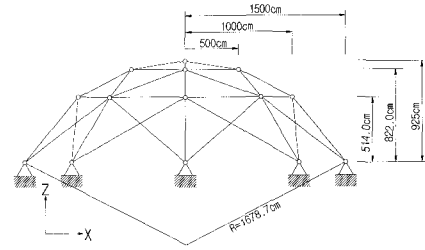
최적설계조건은 탄성계수  $E=2100\text{tf/cm}^2$ , 강재의 단위중량  $\rho=7.85\times 10^{-6}\text{tf/cm}^3$ , 절점의 최대 변위제한을  $\pm 10\text{cm}$ 로 하였고, 제약조건은 대한건축학회의 한계상태 설계기준을 근거로 하였다.<sup>(11)</sup>

〈표 6〉 공간 트러스 돔의 하중조건

절점 번호	좌표축	하 중 (tf)
1	Z	-15.3
2	Z	-7.1
3	Z	-7.1
4	Z	-7.1
5	Z	-7.1



〈그림 15〉 스페이스 트러스 돔의 평면도



〈그림 16〉 공간 트러스 돔

대한건축학회의 한계상태설계기준의 제약식에서 상·하한 값의 약 10%정도를 허용오차로 두고, 퍼지의 소속함수 식(4)와 식(5)에 근거하여 퍼지 제약식의 소속함수를 나타내면 식(7)~식(13)과 같다.

$$\mu_{\bar{c}_1} = \begin{cases} 1, & \text{if } g_1 < 1.0 \\ \frac{1.1 - g_1}{0.1}, & \text{if } 1.0 \leq g_1 \leq 1.1 \\ 0, & \text{if } 1.1 < g_1 \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_{\bar{c}_2} = \begin{cases} 1, & \text{if } g_2 < 1.0 \\ \frac{1.1 - g_2}{0.1}, & \text{if } 1.0 \leq g_2 \leq 1.1 \\ 0, & \text{if } 1.1 < g_2 \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_{\bar{c}_3} = \begin{cases} 1, & \text{if } g_3 < 200 \\ \frac{220 - g_3}{20}, & \text{if } 200 \leq g_3 \leq 220 \\ 0, & \text{if } 220 < g_3 \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_{\bar{c}_4} = \begin{cases} 1, & \text{if } g_4 < 1.0 \\ \frac{1.1 - g_4}{0.1}, & \text{if } 1.0 \leq g_4 \leq 1.1 \\ 0, & \text{if } 1.1 < g_4 \end{cases} \quad (10)$$

$$\mu_{\bar{c}_5} = \begin{cases} 1, & \text{if } g_5 < 1.0 \\ \frac{1.1 - g_5}{0.1}, & \text{if } 1.0 \leq g_5 \leq 1.1 \\ 0, & \text{if } 1.1 < g_5 \end{cases} \quad (11)$$

$$\mu_{\bar{c}_6} = \begin{cases} 1, & \text{if } g_6 < 1.0 \\ \frac{1.1 - g_6}{0.1}, & \text{if } 1.0 \leq g_6 \leq 1.1 \\ 0, & \text{if } 1.1 < g_6 \end{cases} \quad (12)$$

$$\mu_{c_7} = \begin{cases} 1, & \text{if } g_7 < 1.0 \\ \frac{1.1 - g_7}{0.1}, & \text{if } 1.0 \leq g_7 \leq 1.1 \\ 0, & \text{if } 1.1 < g_7 \end{cases} \quad (13)$$

여기서,

$$g_1 = \frac{(P_u)_i}{\phi_t (P_n)_i}, \quad g_2 = \frac{(P_u)_i}{\phi_c (P_n)_i}$$

$$g_3 = \lambda_i = \frac{KL_i}{r_i}, \quad g_4 = \frac{\sqrt{F_y} b_f}{34 t_f}$$

$$g_5 = \frac{\sqrt{F_y} h}{170 t_w}, \quad g_6 = \frac{D \cdot F_y}{145 t}$$

$$g_7 = \frac{300 \Delta}{L}$$

〈표 7〉 공간 트러스돔의 원형강관을 이용한 이산화 최적설계

부재번호	본 연구	
	이산화 최적단면	단면적 (cm <sup>2</sup> )
1	φ-139.8×4.0	17.060
2	φ-34.0×2.2	2.198
3	φ-139.8×4.0	17.060
4	φ-139.8×4.0	17.060
5	φ-34.0×2.2	2.198
6	φ-139.8×4.0	17.060
7	φ-34.0×2.2	2.198
8	φ-60.5×2.3	4.203
목적함수(tf)	2.841	

본 연구에서 제시한 FS-GAs를 이용하여 KS규격 원형 강관을 이용한 단면 이산화 최적설계의 결과는 표 7과 같다. 표 8과 같은 절점의 이동조건에 따른 형상최적 설계조건에 따라 수행한 결과, 표 10과 그림 18, 그림 19와 같은 최적설계결과를 얻을 수 있었다.

표 7, 표 10, 그림 17을 비교하여보면 형상을 고정 시킨 것보다 형상을 고려한 이산화 최적설계결과가 약 5.8% 더 경제적인을 알 수 있다. 뿐만 아니라 형상최적설계에 있어서 표 10과 그림 17에서 비퍼지인 경우 보다 퍼지최적화인 경우가 약 12.4% 더 경제적인을 알 수 있었다.

이는 본 연구에서 제시한 FS-GAs으로 다양한 최적설계조건에 의한 형상최적설계가 가능성을 보였고, 다양한 최적설계정보를 얻는데 효과적임을 알 수 있었다.

〈표 8〉 공간 트러스 돔의 절점 이동 조건 및 유전자 길이

설계변수	설계변수 좌표	이동 한계(cm)			설계 공간	유전자 길이
		기준	최소	최대		
Node 1	Z	925	825	1100	275	9
Node 2	Z	822	750	900	250	8
Node 3	Z	822	750	900	250	8
Node 4	Z	822	750	900	250	8
Node 5	Z	822	750	900	250	8

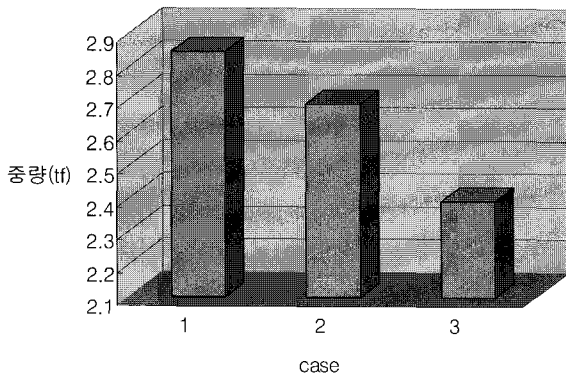
〈표 9〉 공간 트러스돔의 형상 최적설계 유전자 길이

부동 절점	부재그룹	유전자 길이 (bit)
5	8	89

〈표 10〉 부동 절점 5개인 공간 트러스돔의 비퍼지인 경우와 퍼지인 경우의 단면 및 형상 최적 설계 결과

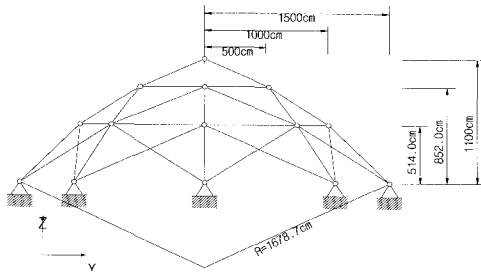
	부재 번호	이산화 최적단면 (cm <sup>2</sup> )	절점 좌표(cm)		목적 함수(tf)
			좌표	값	
형상 고려 (비퍼지)	1	φ-114.3x3.5 (12.180)	1	1100	2.685
	2	φ-114.3x3.5(12.180)			
	3	φ-139.8x4.0(17.060)	2	852	
	4	φ-139.8x4.0(17.060)			
	5	φ-34.0x2.2(2.198)	3	852	
	6	φ-139.8x4.0(17.060)			
	7	φ-21.7x1.9(1.182)	4	852	
	8	φ-21.7x1.9(1.182)			
형상 고려 (퍼지 허용 오차 10% 범위)	1	φ-114.3x3.5(12.180)	1	1072	2.389
	2	φ-101.63x3.2(9.892)			
	3	φ-139.8x4.0(17.060)	2	860	
	4	φ-114.3x3.5(12.180)			
	5	φ-34.0x2.2(2.198)	3	860	
	6	φ-139.8x4.0(17.060)			
	7	φ-21.7x1.9(1.182)	4	860	
	8	φ-21.7x1.9(1.182)			



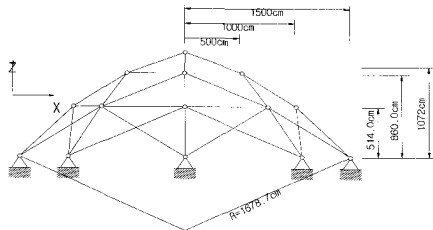


〈그림 17〉 공간 트러스들의 목적함수비교

- case 1 : 형상 고정 (비퍼지)
- case 2 : 형상 고려 (비퍼지)
- case 3 : 형상고려 (퍼지 허용오차10%범위)



〈그림 18〉 비퍼지 일 때 형상 최적설계의 수렴형상



〈그림 19〉 퍼지화 했을 때 형상 최적설계의 수렴형상

## 6. 결 론

본 연구에서는 기존의 단순 유전자 알고리즘을 확장하여 퍼지이론을 접목한 FS-GAs를 제시하고 이산화 형상 최적화 프로그램을 개발하여, 평면 및 공간 트러스의 구조해석과 단면 및 형상 이산화 최적화를 동시에 일괄적으로 수행한 결과는 다음과 같다.

- 1) 기존논문에서 다룰 수 없었던 이산형, 연속형 변수 및 퍼지이론을 동시에 고려하여 단면 및 형상 이산화 최적설계를 효과적으로 수행할

수 있는 알고리즘을 제시하고, 평면 및 공간 트러스의 구조해석과 단면 및 형상 이산화 최적화를 동시에 수행할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

- 2) 본 연구의 평면 및 공간 트러스에 대하여 형상을 고정한 상태의 단면 이산화 최적설계결과보다 단면 및 형상을 동시에 고려하여 일괄적으로 수행한 형상 최적설계결과가 약 4.7%~5.8% 정도 경제적임을 알 수 있다. 또한 비퍼지 형상 최적화인 경우보다는 퍼지 형상 최적화의 경우가 약 4%~12.4% 정도 경제적임을 알 수 있었다.

- 3) 제약 조건식의 애매 모호한 부분에 대하여 설계자의 경험 및 객관적 판단 그리고 주관적 의사를 반영할 수 있으므로 일반 GAs 최적화보다 FA-GAs 최적화가 보다 신속하게, 구조물의 실제거동에 더욱 근접한 최적설계가 됨을 알 수 있었다.

- 4) 제시한 FS-GAs 최적화 접근법은 직관에 의해서가 아니라 전문지식과 경험이 융합된 시뮬레이션에 의해 최적형상과 더불어 최소의 중량을 이끌어 내었고, 설계자에게 초기설계단계에서 구조물의 형상에 대한 선택을 도울 수 있을 뿐만 아니라 공학적인 다양성과 건축적인 조건등을 취급하는데 아주 유연하게 대처할 수 있음을 형상 최적설계 예에서 알 수 있었다.

따라서 FS-GAs 최적화 접근법은 실제 설계의 형상최적화에 잠재성을 가지고 있음을 알 수 있다. 그러나 보다 더 효과적인 FS-GAs 제어를 위하여 더 많은 전문지식과 경험 등이 퍼지 시스템에 포함되어야 할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

이 논문은 2001년도 경북대학교의 연구비에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- 1) Arora, J. S., and Huang, M. W., 'Discrete Structural Optimization with Commercially Available Sections', Structural Eng./Earthquake Eng. JSCE, Vol. 13, No. 2, 1996, p. 93~110
- 2) Reinschmidt, K. F., 'Discrete Structural Optimization', Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 97, No. ST1, 1971, p. 133~156
- 3) Rajeev, S., and Krishnamoorthy, C. S., "Discrete optimization of structures using genetic algorithm", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 5, 1992, p. 1233~1250
- 4) Rao, S.S., et al., "Multi-Objective Fuzzy Optimization Techniques for Engineer in Design", Com.&Struct.Vol.42, 1992, p.37-44
- 5) Zimmermann, H.J., "Fuzzy Set Theory and Its Applications", Second, Revised Edition, Kluwer Academic Publishers, 1991, p.274-283
- 6) Park, C. W. , and B.Y. Youh, M.M. kang. "Sizing and Topology Optimum Design of Truss Structures Using Genetic Algorithms", Shell and Spatial Structures, Vol 2, 2000, p. 84 3~850
- 7) 박춘욱, 조인기, 강문명, "유전자 알고리즘에 의한 철골 연속보의 위상 및 이산화 최적설계", 대한건축학회 논문집, 제16권 제8호, 2000, p. 3~10
- 8) 이동훈, "퍼지 집합이론을 이용한 시스템 신뢰도 분석", 한양대학교 대학원(박사학위논문), 1991.
- 9) 김명선, "퍼지-유전자 알고리즘에 의한 트러스의 형상 이산화 최적설계", 경북대학교 대학원(박사학위논문), 2002.
- 10) 박춘욱, "개선된 유전자 알고리즘에 의한 입체 트러스의 단면 및 형상 이산화 최적설계," 경북대학교 공학박사 학위논문, 2001.
- 11) "강구조 한계상태 설계기준 및 해설," 대한건축학회, 1998.