

유전알고리즘을 이용한 비균일 하중을 받는 구조물의 지지위치 최적화 연구

김근홍[†] · 이영신* · 박주식**

(2004년 4월 2일 접수, 2004년 8월 13일 심사완료)

A Study on the Supporting Location Optimization a Structure Under Non-Uniform Load Using Genetic Algorithm

Geun-Hong. Kim, Young-Shin. Lee and Joo-Shik. Bak

Key Words : Genetic Algorithm, FEM, Global Optimization, KSTAR(차세대 초전도 핵융합 연구장치 개발사업), In-Vessel Control Coil(진공용기 내 제어코일)

Abstract

It is important to determine supporting locations for structural stability when a structure is loaded with non-uniform load or supporting locations as well as the number of the supporting structures are restricted by the problem of space. Moreover, the supporting location optimization of complex structure in real world is frequently faced with discontinuous design space. Therefore, the traditional optimization methods based on derivative are not suitable. Whereas, Genetic Algorithm (GA) based on stochastic search technique is a very robust and general method. The KSTAR in-vessel control coil installed in vacuum vessel is loaded with non-uniform electro-magnetic load and supporting locations are restricted by the problem of space. This paper shows the supporting location optimization for structural stability of the in-vessel control coil. Optimization has been performed by means of a developed program. It consists of a Finite Element Analysis interfaced with a Genetic Algorithm. In addition, this paper presents an algorithm to find an optimum solution in discontinuous space using continuous design variables.

기호설명

- N : 수직지지구조물의 수량
- w : 별점상수
- X : 설계변수
- f(X): 적합도함수
- F(X): 목적함수
- g(X): 부등호 제약조건
- P(X): 별점함수

1. 서론

각종 하중이 구조물에 작용할 때 구조물의 지지위치에 따라 구조물은 구조적 안정성에 큰 영향을 받는다. 더욱이 구조물이 복잡한 비균일 하중을 받거나 공간상의 제약으로 인해 지지구조물의 설치위치 및 수량이 한정될 경우, 구조물의 안정성을 보장할 수 있는 지지위치를 결정하는 것은 매우 중요하다. 예를 들면 복잡한 공간을 통과하는 배관을 진동으로부터 구조적으로 안전하게 보장할 수 있는 지지위치, 복잡한 공간에서 전도에 의한 열전달을 최소화하면서 구조적으로 안전하게 보장할 수 있는 지지위치 등을 들 수 있다.

일반적인 최적설계에서는 대부분 설계변수가 연속으로 고려되지만, 현실세계에서 접할 수 있는 복잡한 구조물의 지지위치를 최적화 할 경우, 불

[†] 책임저자, 회원, 한국기초과학지원연구원
E-mail : ghk0705@kbsi.re.kr
TEL : (042)870-1774 FAX : (02)870-1709

* 회원, 충남대학교 기계설계공학과

** 한국기초과학지원연구원

연속적인 설계공간에서 다루어야 할 경우가 빈번하게 발생한다. 예를 들어 Fig. 1 과 같이 비균일 하중을 받는 구조물의 구조적 안정성을 보장하기 위하여 가운데 부근에 설치되는 지지구조물의 지지위치를 최적화 한다고 가정할 때, 지지구조물을 설치할 수 없는 불연속적인 설계공간으로 인하여 목적함수의 연속성을 보장할 수 없다. 따라서 도함수를 기반으로 한 전통적인 최적화 방법은 이러한 문제에 적합하지 않다.

확률적 탐색기법에 근거한 유전알고리즘은 전역최적화(global optimization)알고리즘으로 연속적인 목적함수를 필요로 하지 않기 때문에 불연속적인 설계공간에서 해를 탐색하는 것이 가능하여 이산최적화에서 보다 효과적으로 사용되고 있다. 유전알고리즘은 1975년 Holland⁽¹⁾에 의해 표준모델이 제시되었고 그의 제자인 Goldberg⁽²⁾가 10-bar truss 구조물의 부피최소화 문제에 적용함으로써 구조최적화 문제에 최초로 적용되었다. 이후 유전알고리즘은 유한요소법과 결합하여 파라미터(parameter), 형상(shape), 위상(topology) 등의 구조 최적화 분야에서 다양하게 적용되고 있다.

본 연구에서는 연구사례로 불연속적인 설계공간에 있는 KSTAR (Korea Super-conducting Tokamak Advanced Research) 진공용기 내 제어코일 (In-vessel control coil, IVCC)의 수직지지구조물의 위치를 최적화하기 위하여 유전알고리즘을 사용하였다. 수직지지구조물은 매우 복잡하고 비균일한 전자기력으로부터 제어코일의 구조적 안정성을 보장하는 역할을 하며, 진공용기 내부에 설치되는 다른 복잡한 부품들의 간섭을 피해서 설치되어야 한다. 본 연구를 수행하기 위해서 상용유한요소해석 프로그램과 유전알고리즘을 결합하는 프로그램을 개발하였으며, 3-bar truss 문제를 통하여 결합한 프로그램을 검증하였다. 특히 본 연구에서는 불연속설계공간 문제를 해결하기 위하여 이산설계변수를 사용하지 않고 연속형 설계변수를 이용하여 불연속설계공간에서 최적화를 수행할 수 있는 알고리즘을 개발·적용 하였다.

2. 유전알고리즘

유전알고리즘은 환경에 가장 우세한 유전자는 다음 세대에서도 선택될 확률이 높고 그렇지 않은 유전자는 도태한다는 자연선택 과정을 컴퓨터 프로그램상에서 구현한 것으로 초기집단구성, 적합도 평가, 재생산, 교배, 돌연변이의 기본구조를 갖는다.

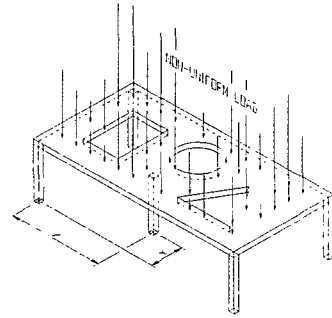


Fig. 1 Discontinuous design space

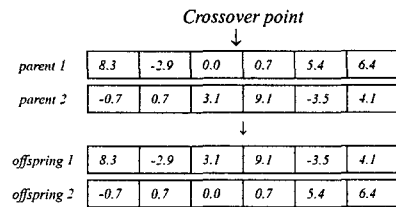


Fig. 2 One-point crossover

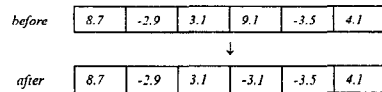


Fig. 3 Simple mutation

초기집단구성(initial population) : 유전알고리즘은 점에 의한 탐색이 아니라 염색체(chromosome)로 이루어진 초기화된 집단을 구성하여 세대 교체를 반복함으로써 우수한 해를 보유하게 된다.

적합도 평가(fitness evaluation) : 환경에 대한 개체들의 적합성을 평가하며, 일반적으로 목적함수로부터 계산된다.

재생산(reproduction) : 환경에 더 적합한 개체들이 다음 세대에서 생존할 확률을 높이는 메커니즘으로 룰렛 휠 선택(roulette wheel selection), 순위에 기초한 선택(ranking-based selection), 토너먼트 선택(tournament selection) 등이 있다.

교배(crossover) : 자연계의 성적교배를 알고리즘으로 구현한 것으로 한 쌍의 부모 염색체를 임의로 선택하여 교배점 이후의 유전자를 교환함으로써 적합도가 우수한 개체가 생성되도록 한다. 교배방법으로는 일점교배(one-point crossover), 다점교배(multi-point crossover), 균등교배(uniform crossover) 등이 있으며, Fig. 2는 일점교배를 보여준다.

돌연변이(mutation) : 세대가 반복되면서 재생산과 교배 연산자는 염색체들을 서로 유사하게 만들어간다. 이러한 경우 탐색영역이 좁아져서 원하는 해에 수렴하게 된다. 돌연변이는 다양한

방향으로 탐색을 하여 원하는 전역해를 찾을 수 있게 하며, Fig. 3 은 단순돌연변이를 보여준다.

초기 대부분의 유전알고리즘은 이진코딩(binary)을 사용하였으며, 이진코딩은 유전 연산조작을 위한 부호공간(coding space)과 적합도 평가를 위한 해공간(solution space)을 필요로 하였다. 본 연구에서는 위의 과정을 실수로 표현하여 부호화, 복호화 과정을 필요치 않음으로써 연산속도를 높일 수 있을 뿐만 아니라 유전자를 변수와 일치시켜 정밀도를 개선할 수 있는 실수코딩 유전알고리즘(real-coded genetic algorithm, RCGA)⁽³⁾을 이용하였다.

3. 해석모델

진공용기 내 제어코일(in-vessel control coil, IVCC)은 플라즈마 신속위치제어(fast plasma position control), 자기장오차보상(field error correction) 등의 역할을 위하여 진공용기 내부에 설치된다.⁽⁴⁾ 제어코일은 90°의 세그먼트(segment) 4 개가 360° 형상을 이루고 있으며, Fig. 4 와 같이 반경 2,120 mm 와 2,500 mm 인 Top, Bottom, Upper, Lower IVCC 로 구분된다. 각각의 세그먼트는 진공용기 내부로 투입·설치되며, 진공용기 포트(port) 밖에서 결선 되어 전체코일 시스템을 이룬다. 제어코일은 운전 중에 매우 큰 전자기 하중을 받게 됨으로써, 이 전자기 하중으로부터 코일에 인가되는 응력을 분산하기 위하여 코일의 원주방향으로 수직지지구조물이 설치된다. 이 수직지지구조물은 진공용기 내부에 설치되는 다른 부품들과 간섭을 피해 설치되어야 한다. 본 연구에서는 운전중 전자기 하중을 가장 많이 받는 Top IVCC 를 해석 모델로 하였다.

3.1 하중조건

진공용기 내 제어코일은 자기장을 발생시키는 코일이라는 특성상 자체에서 발생하는 자기장과

플라즈마(plasma) 전류에 의한 자기장 등으로 조합 된 복잡한 전자기하중을 받게 된다. Fig. 5 는 Top IVCC 에 가장 큰 전자기 하중을 미치는 운전 조건의 크기와 방향을 나타내며, 제어코일에 작용하는 전자기하중은 원형부에 비해 2 개의 세그먼트가 서로 결합되는 전이부(transition part)에 매우 크게 작용하는 것을 알 수 있다. Fig. 6 은 코일의 길이에 따라 작용하는 전자기 하중의 방향 및 크기를 나타낸다.

3.2 유한요소 모델 및 경계조건

Fig. 7 에서와 같이 제어코일은 구리로 된 전도체(conductor)와 다층으로 이루어진 절연체, 이들을 보호하기 위한 케이스로 구성된다. 전자기 하중이 코일에 작용할 때 코일케이스에 응력이 가장 크게 발생함⁽⁵⁾에 따라 본 연구에서는 코일 케이스에 발생하는 최대응력을 평가 기준으로 하였다. 코일의 원형부에 설치되는 수직지지구조물은 힌지(hinge) 구조로 되어 있어 반경방향의 회전자유도를 제외 한 모든 자유도를 구속하였으며, 코일 직선부의 양끝단에 대해서는 코일중심으로 부터의 반경방향을 제외한 모든 자유도를 구속하였다.

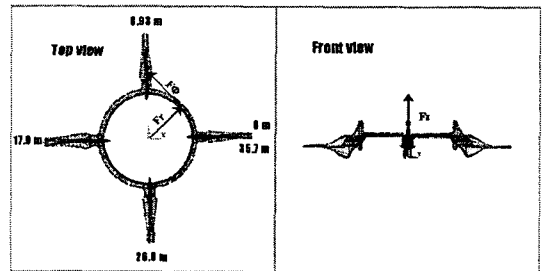


Fig. 5 Top IVCC under EM load

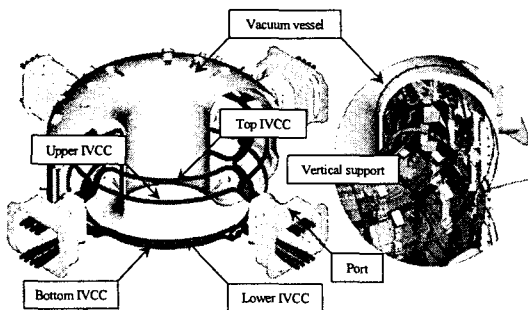


Fig. 4 Configuration of the KSTAR Vacuum vessel and IVCC

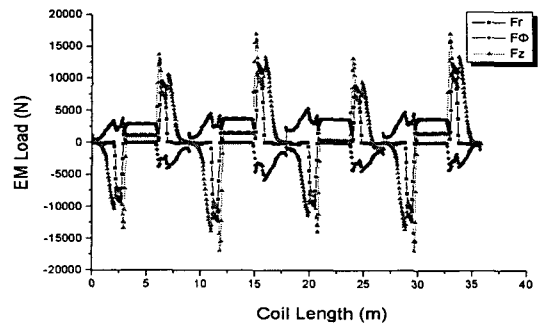


Fig. 6 Magnitude of EM load applied on Top IVCC

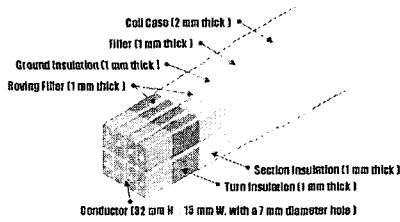


Fig. 7 Detail configuration of IVCC internal structure

Table 1 Material and element

Item	Material	Element
Coil case	Inconel 625	Shell 63
Clamp	Inconel 625	Beam 4
Conductor & insulations	Equivalent material	Solid 45
Vertical support	Inconel 625	Beam 4

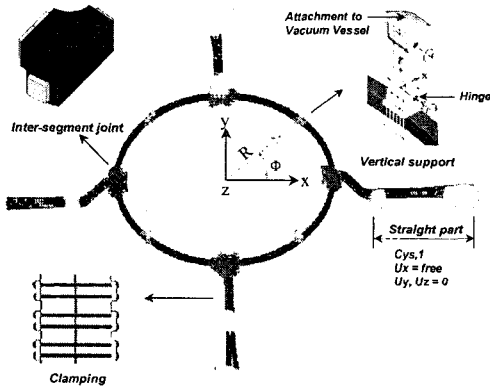


Fig. 8 FE model and boundary condition

코일과 코일이 결합되는 전이부에 설치하는 코일간 결합구조물(inter-segment joint)은 상당히 견고한 구조로 되어 있어 강체영역으로 가정하였으며, 전자기력에 의해 상하좌우 서로 틀어지는 직선부위를 고정하기 위한 클램프(clamp)는 beam 요소를 이용하였다. Fig. 8 에서 Top IVCC의 유한요소모델 및 경계조건을 보여주며, Table 1은 해석에 사용된 유한요소모델의 물성 및 요소들을 나타내었다.

4. 최적화

4.1 최적화 프로그램의 개발 및 검증

현재 개발된 대부분의 유한요소해석 프로그램들은 전통적인 최적화 알고리즘을 채택하고 있으며 다량의 설계변수를 사용할 경우 해의 신뢰도가 떨어지거나 해를 찾지 못하는 등 매우 제한적이다. 또한 불 연속적인 설계공간에서 최적화 수행은 적합하지 않기 때문에 본 연구에서는 상용

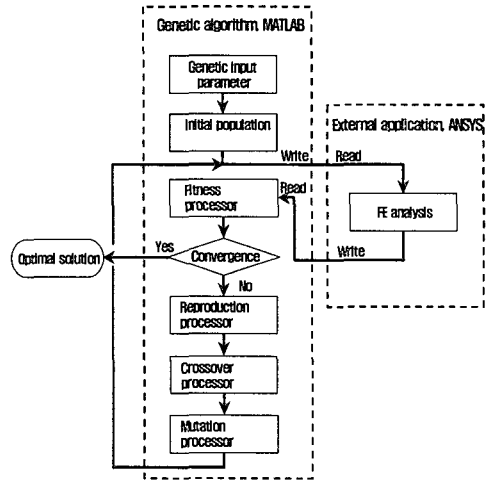


Fig. 9 Flow chart of combining FEM with GA

유한요소 해석프로그램과 유전알고리즘을 결합하였다.

수치해석 및 언어 프로그램인 MATLAB은 프로그램 내에서 다른 응용프로그램을 실행할 수 있을 뿐만 아니라 다른 프로그램에서 생성한 데이터 파일의 입·출력(I/O)을 쉽게 처리할 수 있는 장점이 있으며, 상용 유한해석 프로그램 ANSYS는 파라미터 변화에 의한 모델형상의 변경, 반복 연산 및 데이터의 입·출력 등을 할 수 있도록 APDL (ANSYS Parametric Design Language)을 지원하고 있다. 따라서 이 두 프로그램을 사용할 경우 상호간에 효과적인 데이터 교환이 가능하다.⁽⁶⁾ ANSYS는 MATLAB 내에서 동작하며 두 프로그램은 ASCII 형태로 설계변수 및 결과 파일을 주고 받는다.

본 연구에서는 ANSYS와 진강규가 집필한 도서⁽⁷⁾에서 제공하는 실수코딩 유전알고리즘을 이용하였다. 유전알고리즘은 MATLAB으로 코딩되어 있으며, 결합하는 프로그래밍 또한 MATLAB에서 구현하였다. 결합된 프로그램은 유전알고리즘의 초기집단구성으로부터 생성된 설계 변수들은 파일로 저장되어 ANSYS로 입력된다. 입력된 설계 변수로부터 유한요소해석을 수행한 후, 결과파일은 다시 유전알고리즘내로 입력되어 적합도 평가를 한 후, 적합도 수렴여부에 따라 재생산, 교배, 돌연변이 연산자를 통하여 새로운 집단이 구성된다. 결합한 프로그램은 이와 같은 반복과정을 통해 최적해를 탐색하며, Fig. 9에서는 유전알고리즘과 유한요소해석이 결합되어 최적해를 얻는 수행과정을 보여준다.

프로그램을 검증하기 위하여 최적화 문제로 주로 다루고 있는 3-bar truss 구조물의 부피최소화

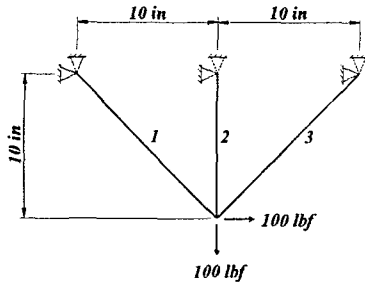


Fig. 10 3-bar truss

Table 2 Comparison of optimum results

	Morris ⁽⁸⁾	Developed program	Deviation (%)
A_1 (in ²)	14.230	14.244	0.09
A_2 (in ²)	4.926	4.944	0.36
A_3 (in ²)	0.100	0.102	2.00
Volume (in ³)	251.916	252.322	0.16

문제를 수행하여 참고문헌의 결과⁽⁸⁾와 비교하였다. Fig. 10 에서와 같이 끝단에 집중되는 3-bar truss 의 부피를 최소화 하였다. 이때 제약조건으로 부재 1, 3 에 발생하는 응력은 10,000 psi, 부재 2 에 발생하는 응력은 40,000 psi 이하, 부재의 단면적 $A_1 = 0.1 \sim 20 \text{ mm}^2$, $A_2 = 0.1 \sim 10 \text{ mm}^2$, $A_3 = 0.1 \sim 1.0 \text{ mm}^2$ 이며, 재료의 탄성계수는 $E=10^7 \text{ psi}$ 이다.

$$\text{Minimize } F(A) = \sum_{i=1}^3 A_i L_i$$

Subject to

(1)

$$\sigma_{1,3} \leq 10,000$$

$$\sigma_2 \leq 40,000$$

$$0.1 \leq A_1 \leq 20.0$$

$$0.1 \leq A_2 \leq 10.0$$

$$0.1 \leq A_3 \leq 1.00$$

각각의 부재에 대한 단면적을 최소화 시킴으로써 트러스 구조의 부피를 줄일 수 있으며, 목적 함수 및 제약조건은 식 (1)로 정의할 수 있다. 본 연구에서 개발한 프로그램을 이용하여 수행된 3-bar truss 구조물의 부피최소화에 대한 목적함수 및 해의 추이는 Fig. 11 에서 나타내었다. 해는 약 35 세대에서 수렴하기 시작하였으며, 해가 충분히 수렴할 수 있도록 100 세대까지 반복 연산하였다. 최적화 수행결과는 Table 2 에서와 같이 참고문헌의 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

4.2 최적화를 위한 정식화

Top IVCC 에 설치되는 모든 수직지지구조물은

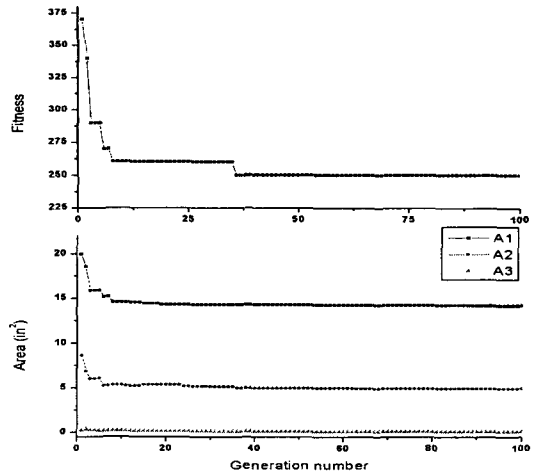
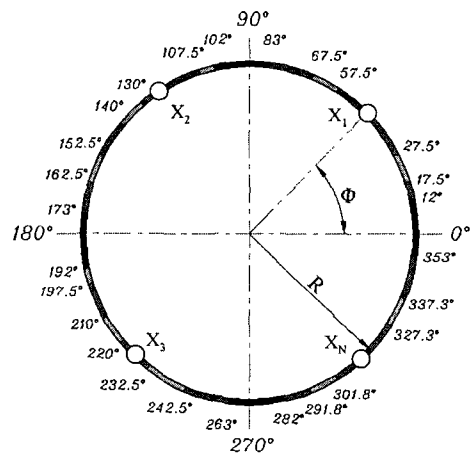


Fig. 11 Result of test problem



: Allowable area to support
 : Discontinuous area (Inter-segment joint)
 : Interfered area (Other parts)
 X_1, X_2, \dots, X_N : Design variables (N: Number of vertical supports)

Fig. 12 Boundary condition for optimization

제어코일의 원주방향으로 0~360°까지 최적의 위치를 탐색하게 된다. 단, 코일과 코일이 서로 결합하기 위한 세그먼트간 결합구조물과 다른 부품들과의 공간을 피해서 위치 해야 한다. 따라서 Fig. 12 와 같이 표현할 수 있으며, 제어코일에 작용하는 전자기하중으로부터 발생하는 최대응력을 최소화 하기 위하여 지지위치 최적화 문제는 식 (2)와 같이 정식화 할 수 있다.

유전알고리즘에서는 일반적으로 제약조건을 문제를 비제약 조건으로 변환하여 최적화를 수행하며, 주로 벌점전략(penalizing strategy)을 사용한다. 이것은 설계변수가 부적합한 영역을 탐색할 때 벌점을 부과하여 적합도를 떨어뜨리게 하여 다음 세대에 선택되지 못하고 도태하게 하는 것의 의

미 한다. 적합도 함수는 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimize } F(X)= \text{Stress of Top IVCC} \\
 &\text{Subject to} \quad (2) \\
 &g_1(X) = 12.0 \leq X_1, X_2, \dots, X_N \leq 17.5 \\
 &g_2(X) = 27.5 \leq X_1, X_2, \dots, X_N \leq 57.5 \\
 &g_3(X) = 67.5 \leq X_1, X_2, \dots, X_N \leq 83.0 \\
 &g_4(X) = 107.5 \leq X_1, X_2, \dots, X_N \leq 130.0 \\
 &g_5(X) = 140.0 \leq X_1, X_2, \dots, X_N \leq 152.5 \\
 &g_6(X) = 162.5 \leq X_1, X_2, \dots, X_N \leq 173.0 \\
 &g_7(X) = 197.5 \leq X_1, X_2, \dots, X_N \leq 210.0 \\
 &g_8(X) = 220.0 \leq X_1, X_2, \dots, X_N \leq 232.5 \\
 &g_9(X) = 242.5 \leq X_1, X_2, \dots, X_N \leq 263.0 \\
 &g_{10}(X) = 282.0 \leq X_1, X_2, \dots, X_N \leq 291.8 \\
 &g_{11}(X) = 301.8 \leq X_1, X_2, \dots, X_N \leq 327.3 \\
 &g_{12}(X) = 337.3 \leq X_1, X_2, \dots, X_N \leq 353.0 \\
 &0 \leq X_1, X_2, \dots, X_N \leq 360
 \end{aligned}$$

여기서 $F(X)$ 는 목적함수, $P(X)$ 는 벌점함수 이다. 본 연구에서는 외부선형벌점함수(external linear penalty function)⁹⁾를 사용하였으며, 각각의 설계변수가 제약조건을 위배하면 벌점상수 w 를 부가한다. 본 연구에서는 모든 제약조건에 동일한 벌점을 부과하였다.

$$f(X) = F(X) + \sum_{i=1}^N P_i(X) \quad (3)$$

$$P_i(X) = w [\max(0, g_i(X))] \quad (4)$$

$$g_i(X) = \begin{cases} 0, & \text{if } X \text{ is acceptable} \\ g_i(X), & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

4.3 인위목적함수 알고리즘

360° 형상을 이루는 코일의 세그먼트들은 90° 간격으로 세그먼트간 결합구조물에 의해 연결된다. 이 부분은 수직지지구조물이 설치될 수 없는 영역으로 설계변수가 탐색 도중 이 구간에 빠지면 유한요소모델의 오류로 인하여 해석도중 에러(error)를 발생시켜 최적 해를 구할 수 없게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 유한요소해석 대신 적합도가 떨어지는 임의의 목적함수를 부여함으로써 최적화 수행이 중지되는 것을 방지하고 다른 영역을 연속적으로 탐색하게 하였다. 이

```

for i=1 : popsize
  for i=1 : N
    if Xi=in discontinuous area
      P(X)=P(X)+wigi(X)
    else
      end
    end
    F(X)=artificial objective function(No FEA)
  if P(X) > 0
  else
    for i=1 : N
      if Xi=in allowable area to support
        gi(x)=0
      else (interfered area)
        P(X)=P(X)+wigi(X)
      end
    end
    F(X) = from FEA
  end
  f(X)=F(X)+P(X)
end
    
```

Fig. 13 Artificial-objective function algorithm

Table 3 Genetic operator type and value

Operator	Type	Value
Reproduction	Gradient-like selection	1.7
Crossover	Modified simple crossover	90 %
Mutation	Dynamic mutation	10 %

알고리즘은 연속적인 목적함수를 요구하지 않는 유전알고리즘의 특성에서 착안 한 것으로 불연속적인 설계공간에서 연속형 설계변수를 다룰 수 있도록 한다. Fig. 13 은 본 연구에서 개발한 인위 목적함수 알고리즘을 보여준다.

4.4 최적화 수행 및 결과

최적화 수행을 위해 사용된 RCGA 의 유전 연산자 및 제어 파라미터는 Table 3 과 같이 사용되었다. 또한 정밀도를 높이기 위한 엘리티즘¹⁰⁾ 과 적합도 평가방법으로는 스케일링 윈도우방법 (scaling window scheme)¹¹⁾이 사용되었다.

코일간 결합구조물로 인한 불연속 구간과 다른 부품들로 인한 조건에서 Top IVCC 에 발생하는 최대응력을 최소화 하기 위하여, 식 (2)의 조건에서 지지위치 최적화를 수행하였다. 최적화 수행 도중 설계변수가 불연속 구간에 빠져 해석이 중단되는 것을 방지하는 인위목적함수는 1.2×10^9 로 설정하였으며, 설계변수가 다른 부품으로 인하여 간섭이 발생하는 지역을 탐색할 경우 부여하는 벌점상수 w 는 5×10^5 로 설정하였다. 이 벌점상수는 설계변수가 불연속 구간에 빠질 경우에서도 적용된다. 벌점상수를 너무 낮게 부여하면 부적합한 공간을 계속 탐색하게 되어 제약조건에 위배되어 원치 않는 해를 얻을 수 있으며, 반대로

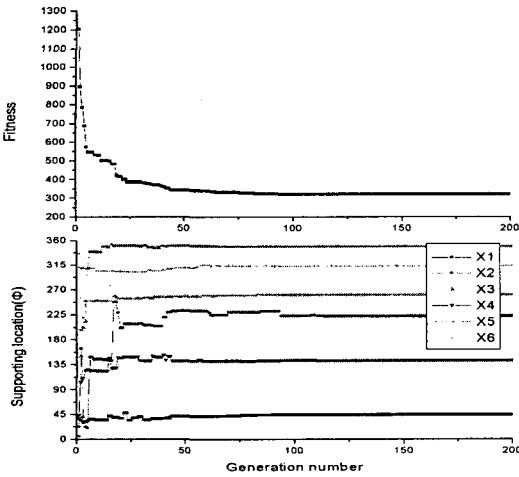


Fig. 14 History of best fitness and design variable values against GA generation (N=6)

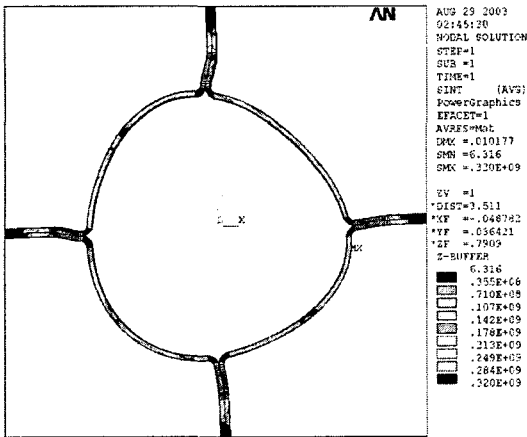


Fig. 15 Stress intensity contour of Top IVCC (N=6)

너무 높게 부여하면 해가 제대로 수렴하지 않는 경우가 발생한다. 본 연구에서는 시행착오를 통하여 별점상수 값을 결정하였다.

Fig. 14 는 수직지지구조물의 수량 N=6 일 때 목적함수 및 지지위치에 대한 해의 추이를 나타낸다. 설계 변수들은 세대 초기에 설계공간을 서로 엮갈려 탐색함으로써 유한요소해석이 불가능한 영역에서도 인위 목적함수 알고리즘을 통해 다른 영역을 연속적으로 탐색할 수 있었다.

최대응력을 최소화하는 것은 국부적으로 집중되는 응력을 구조체 전구간에 고루 분포 시키는 것을 의미하며, Fig. 15 에서 지지위치가 최적화 되었을 때 Top IVCC 에 고루 발생하는 응력분포를 보여준다.

최적화 결과에 따른 그 효과를 알아보기 위하

Table 4 Supporting locations of equal interval design and optimization

N	Design type	Supporting locations
4	Equal interval	45.0, 135.0, 225.0, 315.0
	Optimization	14.8, 140.2, 249.3, 307.0
5	Equal interval	35.0, 107.0, 169.0, 251.0, 323.0
	Optimization	16.1, 123.2, 206.0, 261.6, 306.2
6	Equal interval	20.0, 80.0, 140.0, 200.0, 260.0, 320.0
	Optimization	43.8, 142.5, 222.2, 260.7, 312.6, 348.1
7	Equal interval	15.0, 66.0, 117.0, 169.0, 220.0, 262.0, 323.0
	Optimization	13.8, 74.1, 147.7, 230.4, 260.5, 303.9, 348.5
8	Equal interval	22.5, 67.5, 112.5, 157.5, 202.5, 247.5, 292.5, 337.5
	Optimization	40.8, 122.8, 146.4, 232.2, 252.3, 262.1, 303.9, 348.5

Table 5 Maximum stress results and decreasing rate according to design method

Number of Supports (N)	Design method		Decreasing rate (%)
	Equal interval (MPa)	Optimization (MPa)	
4	723.2	480.4	33.6
5	617.1	458.8	25.7
6	538.0	319.6	40.6
7	501.2	275.0	45.1
8	489.1	271.7	44.4

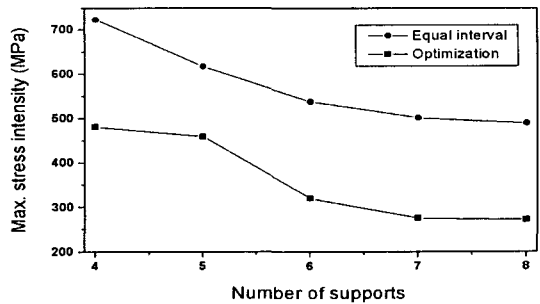


Fig. 16 Comparison of maximum stress results between two design methods

여 설계에서 주로 사용하는 등간격 설계방법과 비교하였다. 수직지지구조물의 수량을 변화해가면서 최적화 수행을 한 후, 지지구조물을 등간격으로 배치하여 유한요소해석을 수행하였다. 이때 불연속 구간을 피하기 위하여 임의의 각도에서 시작하여 등간격으로 배치하였으며, 부득이하게 불연속 구간에 존재하는 경우에 대하여 지지위치를 임의적으로 조정하였다. N=5 일 경우 169°, N=5 일 경우 262° 가 해당된다. 이때 Table 4 는 최적화 결과에 맞 등간격 설계방법에 따른 수직지지구조물의 지지위치를 보여준다.

최적화 결과는 등간격 설계방법에 비하여 N=4 일 경우 33.6%, N=5 일 경우 25.7%, N=6 일 경우 40.6%, N=7 일 경우 45%, N=8 일 경우 44.4% 감소하였다. 뿐만 아니라 N=4 일 때 최대응력 결과는 등간격에 의한 설계방법 N=8 에서의 결과보다 더 낮게 나타났다. Table 5 와 Fig. 16 은 설계방법 및 지지구조물의 수량에 따른 최대응력과 응력감소율을 나타낸다.

5. 결론

본 연구에서 지지위치 최적화 연구사례로 복잡한 비균일 전자기 하중을 받는 KSTAR 진공용기 내 제어코일의 지지위치를 최적화 하였다. 연구 수행을 위하여 유전알고리즘과 유한요소해석을 결합하는 프로그램을 개발하였으며, 개발한 프로그램은 참고문헌의 결과와 비교함으로써 검증하였다. 특히 본 연구에서는 연속형 설계변수를 이용하여 불연속 설계공간에서 해를 찾을 수 있는 인위목적함수 알고리즘을 제시하였다. 본 연구를 수행함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 최적화 수행과정에서 설계변수들은 세대초기에 불연속적인 설계공간이 존재함에도 불구하고 전 구간을 서로 엮갈려 탐색함으로써 연속형 설계변수를 이용하여 불연속 설계공간에서 최적해를 얻을 수 있는 인위목적함수 알고리즘의 타당성을 증명하였다.

(2) 지지위치를 최적화 함으로써 전자기 하중으로부터 Top IVCC 에 발생하는 최대응력을 등간격으로 설치할 때 보다 약 26~45% 줄일 수 있었다.

(3) 지지구조물 수량을 줄임으로써 제작으로 인한 비용 절감 및 협소한 공간적인 문제를 해결할 수 있었다.

본 연구는 각종 하중으로부터 구조물의 구조적 안정성을 보다 높일 뿐만 아니라 지지구조물의 제작비용을 줄이거나 지지구조물의 수량 및 설치공간이 제한될 때 매우 효과적인 결과를 얻을 수 있다는 것을 제시하였다. 본 연구에서 개발한 인

위목적함수 알고리즘은 불연속적인 설계공간을 갖는 다양한 최적화 문제에 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Holland, J. H., 1975, "Adaptation in Natural and Artificial Systems," The University of Michigan Press.
- (2) Goldberg, D. E., 1989, "Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning," Addison-Wesley.
- (3) Goldberg, D. E., 1991, "Real-coded Genetic Algorithms, Virtual Alphabets, and Blocking," *Complex System*, Vol. 5, pp. 139~167.
- (4) Lee, G. S., Ivanov, D. P., Yang, H. L., Jhang, H., Kim, J. Y., Lee, D. K., You, K. I., Kim, H. K., Bak, J. S., Kwon, M., Han, J. H. and Last, J., 2001, "Advanced Physics and Plasma Control with Segmented In-vessel Control Coils in the KSTAR Tokamak," *Proceedings of 12th International Toki Conference on Physics and Controlled Nuclear Fusion*.
- (5) Kim, H. K., Yang, H. L., Lee, S. C., Choi, C. H., Bak, J. S. and Lee, G. S., 2002, "Structural Analysis of the KSTAR In-vessel Control Coils under Electromagnetic Loads," *Proceedings of the KAMES 2002 Symposium A*, pp. 488~493.
- (6) Gleichmar, R., Langer, H., Müller, M., Müller, U. C., Pühlhofer, T., and Baier, H., 2002, "Multidisciplinary Optimization and Statistical Evaluations of Structures and Electro-Mechanical Components with ANSYS on a PC-Cluster," 20th CAD-FEM Users' Meeting.
- (7) Jin, G. G., 2002, "Genetic Algorithms and Their Applications," Kyo woo sa, Vol. 2.
- (8) Morris, A. J., 1982, "Foundations of Structural Optimization: A Unified Approach," John Wiley & Sons.
- (9) Crossley, W. A. and Williams, E. A., 1997, "A Study of Adaptive Penalty Functions for Constrained Genetic Algorithm Based Optimization," *35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, AIAA 97-0083.
- (10) Dejong, K. A., 1975, "An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems," Doctoral Dissertation, The University of Michigan.
- (11) Grefenstette, J. J., 1986, "Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithm," *IEEE Trans. Syst.*, Vol. SMC-16, No. 1, pp. 122~128.