유전알고리즘을 이용한 비균일 하중을 받는 구조물의 지지 위치 최적화 연구

김근홍† · 이영신* · 김학근** · 허남일** · 사정우** · 양형렬** · 김병철** · 박주식**

Study of Supporting Location Optimization for a Structure under Non-uniform Load Using Genetic Algorithm

G.H. Kim, Y.S. Lee, H.K. Kim, N.I. Her, J.W. Sa, H.L. Yang, B.C. Kim and J.S. Bak

Key Words : Genetic algorithm, FEM, Global optimization, KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research), In-vessel control coil(진공용기 내 제어코일)

Abstract

It is important to determine supporting locations for structural stability of a structure under non-uniform load in space interfered by other parts. In this case, There are many local optima 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. This paper has been presented to determine supporting locations of the vertical supports for reducing stress of the KSTAR(Korea super Superconducting Tokamak Advanced Research) IVCC(In-vessel control coil) under non-uniform electromagnetic load and space interfered by other parts using genetic algorithm. For this study, we develop a program combining finite element analysis with a genetic algorithm to perform structural analysis of IVCC. In addition, this paper presents a technique to perform optimization with FEM when design variables are trapped in an incongruent design space.

기호설명

$\varphi(X)$: 목적함수(objective function)

$f(X)$: 적합도함수(fitness function)

$P(X)$: 벌점함수(penalty function)

w : 벌점상수(penalty constant)

1. 서 론

각종 하중이 구조물에 작용 할 때 구조물의 지지 위치에 따라 구조물은 구조적 안정성에 큰 영향을 받는다. 더욱이 구조물이 복잡한 비균일 하중을 받거나 공간상의 제약으로 인해 지지구조물의 설치 위치 및 수량이 한정될 경우, 구조물의 안정성을 보장 할 수 있는 지지 위치를 결정하는 것은 매우 중요하다. 복잡한 제약조건을 가지는 공간에서 지지 위치를 최적화 할 경우, 불연속적인 설계영역을 갖게 됨으로써 많은 국부 해(local optimum)가 존재하게 된다. 도함수를 기초로 한 전통적인 최적화 방법은 연속적인 목적함수를 필요로 하기 때문에 이러한 문제에서는 적합하지 않으며 확률적 탐색기법에 근거한 유전알고리즘(genetic algorithm)을 이용할 경우 보다 신뢰할 수 있는 해를 얻을 수 있다. 유전알고리즘은 전역 최적화(global optimization) 알고리즘으로 연속적인 목적함수를 필요로 하지 않기 때문에 불연속의 설계영역에서 해를 찾는 것이 가능하다. 유전알고리즘은 1975년 Holland[(1)]에 의해 표준모델이 제시되었고 Goldberg[(2)]에 의해 최초 구조최적화 문제에 적용되었었다. 이후 유전알고리즘은 유한요소법과 결합하여 파라미터(parameter), 형상(shape), 위상

† 한국기초과학지원연구원
E-mail : ghk0705@kbsi.re.kr
TEL : (042)870-1774 FAX : (02)870-1709
* 충남대학교 기계설계공학과
** 한국기초과학지원연구원

(topology) 등의 구조최적화 분야에서 다양하게 적용되고 있다. 본 연구에서는 불 연속적인 설계영역 조건에 있는 KSTAR 진공용기 내 제어코일의 수직지지구조물의 위치를 최적화 하기 위하여 유전알고리즘을 사용하였다. 수직지지구조물은 매우 복잡하고 비 균일한 전자기력으로부터 제어코일의 구조적 안정성을 보장하는 역할을 하며 진공용기 내부에 설치되는 다른 복잡한 부품들의 간섭을 피해서 설치되어야 한다. 또한 본 연구를 수행하기 위해서 상용 유한요소해석 프로그램과 유전알고리즘을 결합하였으며 3-bar truss 문제를 통해 결합한 프로그램을 검증하였다. 특히 본 연구에서는 최적화 수행 중 불연속성을 가지는 설계영역에서 설계변수가 적합하지 않은 영역을 탐색할 때, 유한요소해석을 수행하지 않고 임의적으로 목적함수를 부여함으로써 유한요소모델 오류로 인하여 해석이 중단되는 것을 방지하는 알고리즘을 개발하였다.

2. 유전알고리즘

유전알고리즘은 환경에 가장 우세한 유전자는 다음 세대에서도 선택될 확률이 높고 그렇지 않은 유전자는 도태한다는 자연선택 과정을 컴퓨터 프로그램상에서 구현한 것이다.

2.1 유전알고리즘의 기본구조

Holland 에 의해 제시된 유전알고리즘의 표준모델은 초기집단구성, 적합도 평가, 재생산, 교배, 돌연변이의 기본 구조를 갖는다.

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 루울렛 휠 선택(roulette wheel selection), 순위에 기초한 선택(ranking-based selection), 토너먼트선택(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. 1은 일점교배를 보여준다.

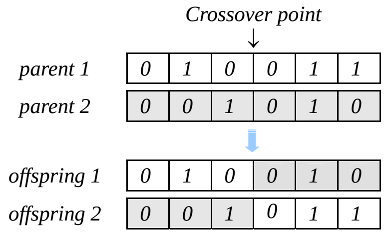


Fig. 1 One-point crossover

돌연변이(mutation) : 세대가 반복되면서 재생산과 교배 연산자는 염색체들을 서로 유사하게 만들어간다. 이러한 경우 탐색영역이 좁아져서 원하지 않는 해에 수렴하게 된다. 돌연변이는 다양한 방향으로 탐색을 하여 원하는 전역 해를 찾을 수 있게 한다.

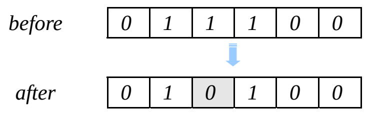


Fig. 2 Simple mutation

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 내부에 설치되는 진공용기 내 제어코일은 총 16 개로 구성되며 각각의 세그먼트(segment)는 진공용기 포트(port) 밖에서 결선 된다. 수직지지구조물은 코일에 인가되는 응력을 분산하기 위하여 코일의 원주방향으로 설치되며 진공용기 내벽에 용접으로 고정된다. Fig. 3에서와 같이 제어코일은 반경 2,120 mm 와 2,500 mm 로 상하 대칭구조를 하고 있으며 Top, Bottom, Upper, Lower IVCC 로 구분된다. 본 연구에서는 진공용기 내부에 설치되는 다른 부품들로 인해 공간상의 제약이 가장 심할 뿐만 아니라 전자기 하중을 가장 많이 받는 Top IVCC 를 해석모델로 하였다.

3.1 하중조건

진공용기 내 제어코일은 자기장을 발생시키는 코일이라는 특성상 자체에서 발생하는 자기장과 플라즈마(plasma) 전류에 의한 자기장 등으로 조합

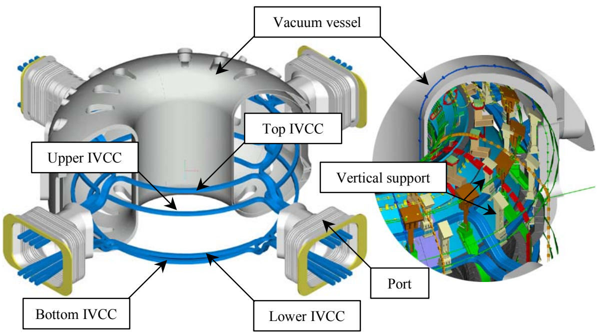


Fig. 3 Configuration of KSTAR vacuum vessel and IVCC

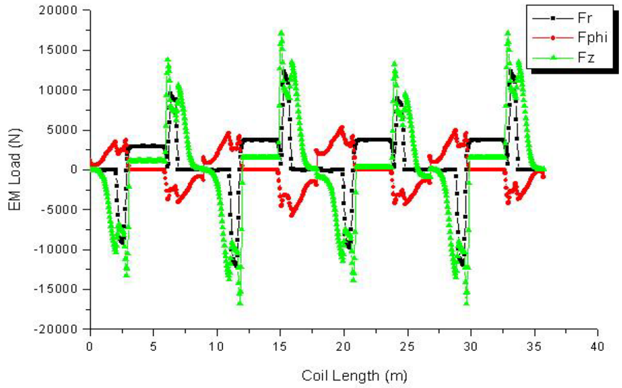


Fig. 5 Magnitude of EM load applied on Top IVCC

된 복잡한 전자기하중을 받게 된다. Fig. 4 는 Top IVCC 에 가장 큰 전자기 하중을 미치는 운전 조건(0973)의 크기와 방향을 나타내며 제어코일에 작용하는 전자기하중은 원형 부에 비해 2 개의 세그먼트가 서로 결합되는 전이부(transition part)에 매우 크게 작용하는 것을 알 수 있다. Fig. 5 는 코일 길이에 따라 작용하는 전자기 하중의 방향 및 크기를 나타낸다.

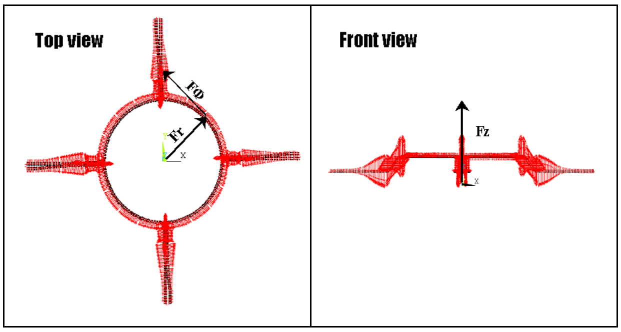


Fig. 4 Top IVCC under EM load of scenario 0973

3.2 유한요소 모델 및 경계조건

제어코일은 구리로 된 전도체(conductor)와 다층으로 이루어진 절연체(multi-layered insulation), 이들을 보호하기 위한 케이스로 구성된다. 전자기 하중이 코일에 작용할 때 코일케이스에 응력이 가장 크게 발생함[4]에 따라 본 연구에서는 코일 케이스에 발생하는 최대 응력을 평가 기준으로 하였다. 코일의 원형부에 설치되는 수직지지구조물은 반경방향의 회전자유도를 제외한 모든 자유도를 구속하였으며 제어코일의 직선부에 대해서는 포트의 시작부와 종단부를 반경방향을 제외한 모든 자 유도를 구속하였다. 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 clamp 는 beam 요소를 이용하였다. Table 1은 해석에 사용된 유한요소모델의 물성 및 요소들을 나타낸다.

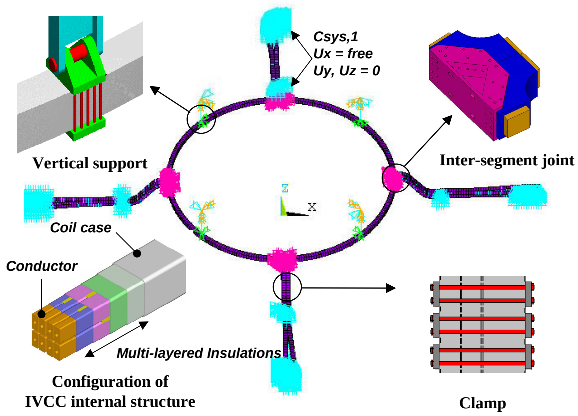


Fig. 6 FE model and boundary condition

Table 1 Material property and element

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

4. 최적화

4.1 최적화 프로그램의 검증

유전알고리즘과 유한요소해석을 결합하기 위하여 상용유한요소해석 프로그램 ANSYS 와 기존에 MATLAB 으로 작성된 RCGA[8]를 이용하였으며 결합하는 프로그래밍은 MATLAB 에서 구현하였다. Fig. 7 은 유전알고리즘과 유한요소해석을 결합 하여 최적화 수행을 하는 과정을 보여준다.

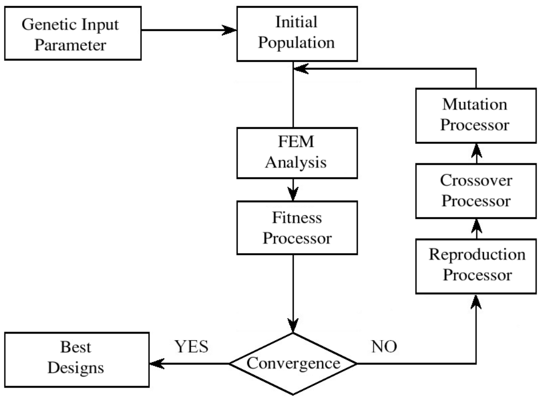


Fig. 7 Flow chart of combining FEM with GA

프로그램을 검증하기 위하여 최적화 문제로 주로 다루고 있는 부피최소화 문제로 Fig. 8 과 같이 부재에 끝 단에 집중되는 3-bar truss 의 부피를 최소화 하였다. 이때 제약조건으로 작용하는 부재에 발생하는 응력은 허용압축응력(compressive stress) 15,000 psi, 인장응력(tensile stress) 22,000 psi 이하, 부재의 단면은 5 in^2 이하로 제한되며 재료의 탄성계수는 $E=30^6$ psi 이다.

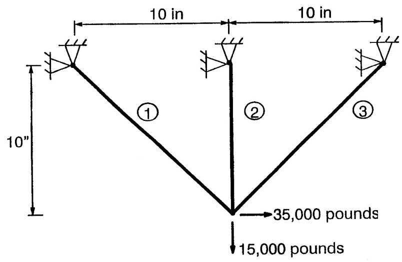


Fig. 8 3-bar truss

$$\text{Minimize} \quad \varphi(X) = \sum_{i=1}^{3} A_i L_i$$

Subject to (1)

$$-1500 \le \sigma \le 22,000$$
$$0 \le A_i \le 5, \; i = 1, \ldots 3$$

각각의 부재에 대한 단면적을 최소화 시킴으로써 트러스 구조의 부피를 줄일 수 있으며 (1)식으로 정의된다. 최적화 수행결과 32 세대에서 기존의 결과 값[9]과 유사하였으며 이후 세대를 거치면서 기존의 결과 보다 더 정확한 값을 보였고 Table 2 에서 100 세대에서의 결과를 기존의 값들과 비교하였다.

4.2 최적화를 위한 정식화

0973 운전 조건에서 Top IVCC 에 설치되는 모든 수직지지구조물은 제어코일의 원주방향으로 0°에서부터 360°까지 최적의 위치를 탐색하게 된다. 단, 코일과 코일을 서로 결합하기 위하여 설치되는 세그먼트간 결합구조물과 진공용기 내부에 설치되는 다른 부품들을 피해서 위치 해야 한다. 따라서 Fig. 10과 같이 표현할 수 있으며 제어코일에서 발생하는 최대응력을 최소화 하기 위한 지지위치 최적화 문제는 식(2)와 같이 정식화 할 수 있다.

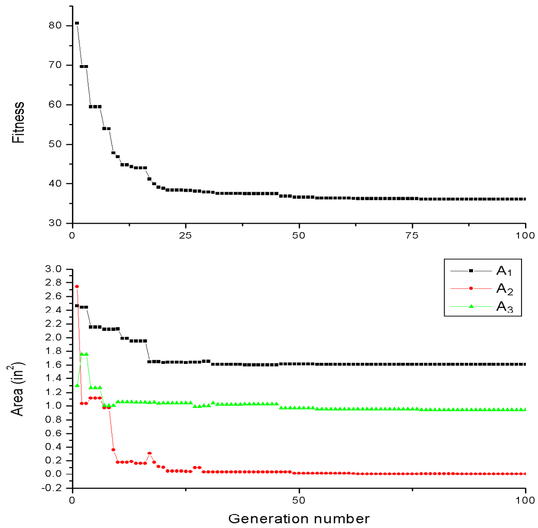


Fig. 9 Result of test problem

Table 2 Comparison of optimum results

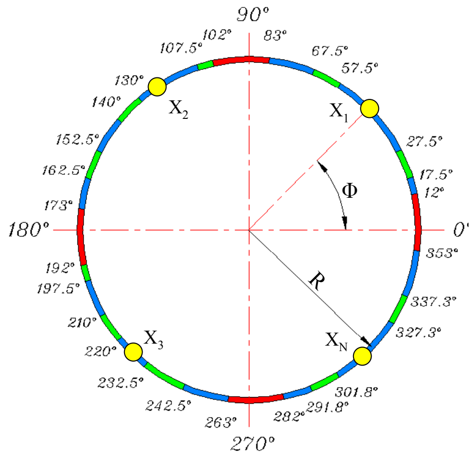
	Initial	Developed program
A_1 (in^2)	1.6298	1.6078
A_2 (in^2)	0.1687	0.0009
A_3 (in^2)	1.0215	0.9439
Volume (in^3)	37.663	36.087

$$\text{Minimize} \quad \varphi(X) = \text{Stress of Top IVCC}$$

Subject to

$$g_1(X) = 12 \le X_1, X_2, \ldots, X_N \le 17.5$$
$$g_2(X) = 27.5 \le X_1, X_2, \ldots, X_N \le 57.5$$
$$g_3(X) = 67.5 \le X_1, X_2, \ldots, X_N \le 83$$
$$g_4(X) = 107.5 \le X_1, X_2, \ldots, X_N \le 130$$
$$g_5(X) = 140 \le X_1, X_2, \ldots, X_N \le 152.5$$
$$g_6(X) = 162.5 \le X_1, X_2, \ldots, X_N \le 173 \quad (2)$$
$$g_7(X) = 197.5 \le X_1, X_2, \ldots, X_N \le 210$$
$$g_8(X) = 220 \le X_1, X_2, \ldots, X_N \le 232.5$$
$$g_9(X) = 242.5 \le X_1, X_2, \ldots, X_N \le 263$$
$$g_{10}(X) = 282 \le X_1, X_2, \ldots, X_N \le 291.8$$
$$g_{11}(X) = 301.8 \le X_1, X_2, \ldots, X_N \le 327.3$$
$$g_{12}(X) = 337.3 \le X_1, X_2, \ldots, X_N \le 353$$

$$0 \le X_1, X_2, \ldots, X_N \le 360$$



: Allowable area to support

: Not allowable area to support (Inter-segment joint area)

: Not allowable area to support (Other part area)

$X_1, X_2, \ldots, X_N$: Supporting location (Φ)
(N = Number of vertical support)

Fig. 10 Boundary condition for optimization

유전알고리즘에서는 일반적으로 제약조건의 문제를 비제약 조건으로 변환하여 최적화를 수행하며 주로 벌점전략(penalizing strategy)을 사용한다. 이것은 설계변수가 부적합한 영역을 탐색할 때 벌점을 부과하여 적합도를 떨어뜨리게 하여 다음세대에 선택되지 못하고 도태하게 하는 것을 의미한다. 적합도 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$f(X) = \varphi(X) + \sum_{i=1}^{N} P(X) \qquad (3)$$

본 연구에서는 external linear penalty function[5]을 사용하였으며 w_i 는 i 번째 제약조건에 부과되는 벌점상수 이다. 본 연구에서는 모든 제약조건에 동일한 벌점을 부과 하는 일반적인 방법을 사용하였다.

$$P(X) = w_i\left[\max(0, g_i(X))\right] \qquad (4)$$

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

4.3 인위목적함수 알고리즘

360° 형상을 이루는 코일의 세그먼트들은 90° 간격으로 세그먼트간 결합구조물에 의해 연결된다. 이 부분은 수직지지구조물이 설치 될 수 없는 영역으로 설계변수가 탐색 도중 이 구간에 빠지면 유한요소모델의 오류로 인하여 해석도중 에러(error)를 발생시켜 최적 해를 구할 수 없게 된다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여, 유한요소해석 대신 임의의 목적함수를 부여함으로써 최적화 수행이 중지되는 것을 방지하고 다른 영역을 연속적으로 탐색하게 하였다. Fig. 11 은 인위적으로 임의의 목적함수를 부여하고 유한요소해석을 수행하지 않게 하는 알고리즘을 보여준다.

if $g_i(X)$ are acceptable
Obtain $\varphi(X)$ through FEA
$P(X)=0$
else
$\varphi(X)$=artificial objective function (no FEA)
$P(X)=w_i g_i(X)$
end
$f(X)=\varphi(X)+P(X)$

Fig. 11 Artificial-objective function algorithm

4.4 최적화 수행 및 결과

최적화 수행을 위해 사용된 RCGA 의 유전 연산자 및 제어 파라미터는 Table 4와 같이 사용되었다. 또한 정밀도를 높이기 위한 엘리티즘[6]과 적합도 평가방법으로는 스케일링 윈도우 방법(scaling window scheme)[7]이 사용되었다.

Table 4 Genetic operator type and value

Operator	Type	Value
Reproduction	Gradient-like selection	1.7
Crossover	Modified simple crossover	0.9
Mutation	Dynamic mutation	0.1

본 연구에서는 수직지지구조물 수량에 따른 제어코일에 발생하는 최대응력을 살펴보기 위하여 N=4, 5, 6 의 경우에 대하여 최적화 수행 하였다.

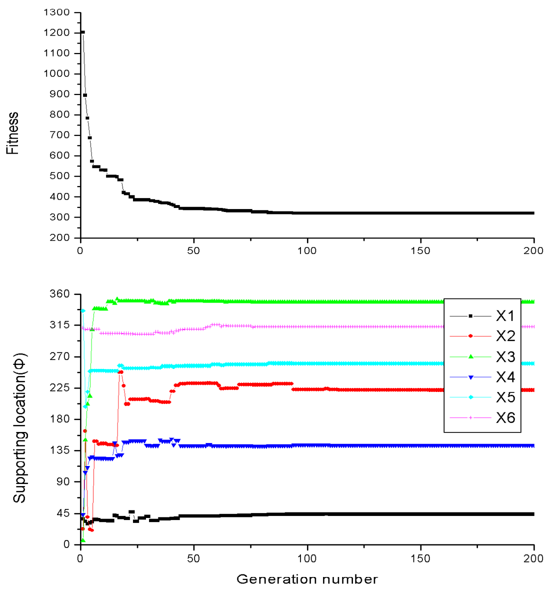


Fig. 12 Result of optimization (N=6)

Fig. 12에서와 같이 설계 변수들은 세대 초기에 설계영역을 서로 엇갈려 탐색함으로써 유한요소 해석이 불가한 영역에서도 인위 목적함수 알고리즘을 통해 다른 영역을 연속적으로 탐색 할 수 있다는 것을 증명 하고 있다.

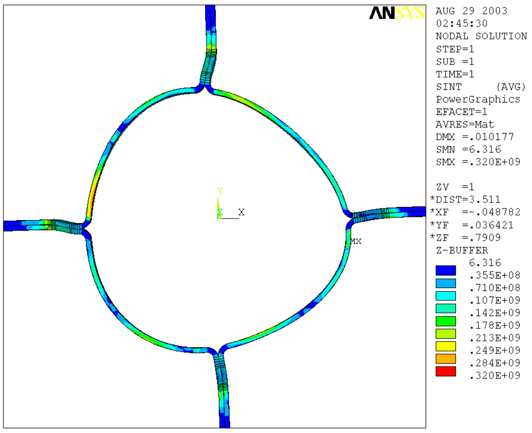


Fig. 13 Stress intensity contour of Top IVCC

Fig. 13은 6개의 수직지지구조물의 위치를 최적화 하였을 때 제어코일에 발생하는 응력분포를 보여준다. 최대응력이 감소됨에 따라 응력은 코일에 고루 분포하였다. 또한 최적화 수행 후 일반적인 설계 방법에 따라 지지 구조물을 임의의 각도에서 부터 등 간격으로 위치 시킨 후 구조해석을 수행하여 코일에 발생하는 응력을 비교하였다. Table 5에서는 지지구조물의 수량에 따른 위치 및 그에 따른 최대응력을 보여준다.

Table 5 Comparison of general design and optimization

N	Design type	Supporting locations	Max.stress intensity (MPa)
4	General design	45.0, 135.0, 225.0, 315.0	723
	Optimization	14.8, 140.2, 249.3, 307.0	480
5	General design	35.0, 107.0, 169.0, 251.0, 323.0	617
	Optimization	16.1, 123.2, 206.0, 261.6, 306.2	459
6	General design	20.0, 80.0, 140.0, 200.0, 260.0, 320.0	538
	Optimization	43.8, 142.5, 222.2, 260.7, 312.6, 348.1	320

5. 결 론

본 연구를 수행하기 위하여 유전알고리즘과 유한요소해석을 결합하는 프로그램을 개발하였으며 3-bar truss 문제를 통하여 기존의 값과 비교함으로써 개발한 프로그램을 검증하였다. 특히 최적화 수행 중 불연속적인 설계영역에서 유한요소모델의 오류로 인하여 해석을 중단되는 것을 방지하는 인위 목적함수 알고리즘을 제시하였으며 진공용기 내 제어코일의 수직지지구조물의 위치 최적화 문제에 적용하여 전역 최적 해를 구할 수 있었다. 최적화를 수행하여 수직지지구조물의 수량에 따라 제어코일에 발생하는 최대응력을 알 수 있었을 뿐만 아니라 일반설계 방법과 비교하여 수직지지구조물을 최적화 함으로써 제어코일에 발생하는 최대응력을 약 30~37% 줄일 수 있다는 것을 알 수 있었다. 본 연구를 통하여 유전알고리즘을 이용하면 보다 복잡하고 현실적인 문제에 접근이 용이하다는 것을 확인하였다.

후기

이 연구는 KSTAR Project의 연구비 지원으로 수행 되었으며 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

(1) J. H. Holland, 1975, “Adaptation in Natural and Artificial Systems”, The University of Michigan Press.
(2) D. E. Goldberg, 1989, “Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning”, Addison-Wesley, Reading Massachusetts.
(3) D. E. Goldberg, 1991, “Real-coded Genetic Algorithms, Virtual Alphabets, and Blocking”, Complex System, Vol. 5, Complex Systems Publications, Inc., pp. 139-167.
(4) H. K. Kim, H. L. Yang, S. C. Lee, C. H. Choi, J. S. Bak and G. S. Lee, 2002, “Structural Analysis of the KSTAR In-vessel Control Coils under Electro-magnetic Loads”, Proceedings of the KAMES 2002 Symposium A, pp. 488-493.
(5) W. A. Crossley, E. A.Williams, 1997, “A Study of Adaptive Penalty Functions for Constrained Genetic Algorithm Based Optimization,” AIAA Paper 97-0083, AIAA Paper 97-0083, AIAA 35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, Jan. 6-9.
(6) K. Dejong, 1975, “An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems, “Doctoral Dissertation, The University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.
(7) J. J. Grefenstette, 1986,“Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithm,” IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol. SMC-16, No.1, pp122-128.
(8) G. G. Jin, 2002, “Genetic Algorithms and Their Applications”, Kyo woo sa, Vol. 2.
(9) Swanson Analysis Systems, 1993,“Design Optimization Seminar”.