

## 가압경수로로심의 제1순환연료장입최량화에서 유전알고리즘의 응용

서철, 홍덕수, 허일문

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《현시대는 과학과 기술의 시대이며 과학과 기술은 경제적인보의 기초입니다.》

(《김정일선집》 증보판 제13권 172페이지)

로심연료장입을 최량화하는것은 원자력발전소운영의 안전성과 경제성제고에서 매우 중요한 자리를 차지한다. 로심연료장입방안에 대한 최량화문제는 매우 큰 탐색공간과 고도의 비선형성, 여러개의 극값을 가지는것으로 특징지어지며 따라서 효율적인 최량화방법에 대한 연구가 필요하다.

우연탐색방법에 속하는 유전알고리즘은 여러 극값문제의 대역적인 최량풀이를 구하는데 효과적인것으로 하여 과학기술의 여러 분야에 널리 적용되고있으며 로심연료장입최량화를 실현하는데서도 좋은 결과들을 주고있다.[2-4]

본문에서는 옹근수부호화유전알고리즘을 리용한 우연탐색프로그램을 작성하고 가압경수로물리계산체계 《부흥》[1]을 결합하여 가압경수로의 최량연료장입방안에 대한 탐색체계를 수립하였다.

### 1. 유전알고리즘을 리용한 가압경수로로심연료장입최량화모형

#### 1) 옹근수렬에 의한 유전자부호화와 초기염색체군의 생성

가압경수로의 로심은 연료집합체를 단위로 하여 구성되며 일반적으로 그 배치는 연료집합체의 형태가 정방형인 경우 1/4 혹은 1/8대칭구조를 가진다. 실제적인 연료장입최량화는 이 대칭구조들에 대하여 진행되며 대칭구조에서 가능한 집합체배치방안을 부호화하여 염색체를 생성한다.

유전알고리즘은 염색체에 대해서만 적용할수 있으므로 어떻게 연료집합체배치를 부호화하며 어떻게 실제풀이로 변환하는가 하는것은 로심연료장입최량화에서 관건적인 문제로 된다.

우리는 옹근수렬을 리용하여 연료집합체배치를 부호화하였다.

원자로의 로심연료장입최량화에서는 일반적으로 2진수렬과 옹근수렬을 리용하여 집합체배치방안에 대한 유전자부호화를 진행한다. 2진수렬에 의한 부호화에서는 교잡, 변이와 같은 유전조작과정에 문제의 요구에 맞지 않는 외곡된 배치방안을 생성할수 있으므로 옹근수렬을 리용한 유전자부호화를 리용하는것이 더 합리적이다.

초기방안의 1/8대칭구조에 포함된 매 연료집합체들에 하나의 옹근수를 대응시키고 위치에 따라 정돈하여 옹근수배렬을 얻는다.(그림 1)

하나의 장입방안을 표현하는 이 옹근수배렬은 하나의 염색체로 된다.

11	12	13	
7	8	9	10
4	5	6	
2	3		
1			

그림 1. 초기방안에 대한  
용근수부호화

초기염색체군은 초기장입방안을 변경시키는 방법으로 설정된 개체수만큼 생성하게 된다. 초기방안에서의 연료집합체위치들을 우연적으로 변화시키면 위치에 따르는 집합체번호들이 같이 변하며 이때 새로운 용근수배열 즉 염색체가 얻어진다.

## 2) 목적함수선택

일반적으로 가압경수로의 로심연료장입최량화에서는 순환길이(혹은 순환초기 유효증식결수)에 대한 제한조건을 만족시키면서 출력불균일결수를 최소로 되게 하거나 출력 불균일결수에 대한 제한조건을 만족시키면서 순환길이를 최대로 되게 하는것을 최량화목표로 설정한다.

우리는 출력불균일결수를 최소로 되게 하는것을 최량화목표로 설정하고 순환초기 로심의 유효증식결수에 대한 제한조건을 반영하여 목적함수를 다음과 같이 설정하였다.

$$fit = w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2 \quad (1)$$

$$f_1 = 1 / F_{xy}$$

$$f_2 = \begin{cases} 1 & (k_{eff} \geq \text{제한값}) \\ 0 & (k_{eff} < \text{제한값}) \end{cases} \quad (2)$$

여기서  $fit$ 는 적응도값이고  $w_1=1$ ,  $w_2=0.2$ 로서 경험적으로 선택되었다.  $f_1$ ,  $f_2$ 는 벌칙함수,  $F_{xy}$ 와  $k_{eff}$ 는 각각 순환초기 로심의 반경방향출력불균일결수와 유효증식결수이다.

목적함수에 포함되는 유효증식결수와 출력불균일결수 등은 가압경수로로심물리계산 체계 《부흥》의 2차원대듬그린함수법에 의한 로심립계확산모듈을 리용하여 계산한다.

## 3) 유전조작

### ① 선택

선택연산자로는 두 부모염색체에 대한 경쟁선택을 리용하였다. 경쟁선택에서는 부모 세대염색체들가운데서 2개의 염색체를 우연적으로 선택하고 그것들의 적응도를 비교하여 적응도가 큰 염색체를 선택한다.

### ② 교잡

교잡은 다음과 같은 방법으로 진행하였다.

우선 선택된 두 부모염색체를 비교하여 일치하는 부분들을 찾는다. 이 공통부분은 그대로 자식염색체들에 넘어간다. 나머지 위치들에 공통부분에 속하지 않은 연료집합체들이 우연적으로 배치된다.

교잡과정은 그림 2와 같다.

### ③ 변이

변이는 서로 다른 종류의 두 집합체를 우연적으로 선택하고 그 위치를 서로 바꾸는 방법으로 진행한다.

초기염색체군의 생성과 변이, 교잡과정에 로심구조의 대칭성으로부터 로심에서 집합체들의 실제적인 개수를 고려하여 위치를 변화시킨다.

유전조작을 반복하여 세대를 갱신하여나가며 세대갱신은 최량화기준을 만족시킬 때까지 진행한다.

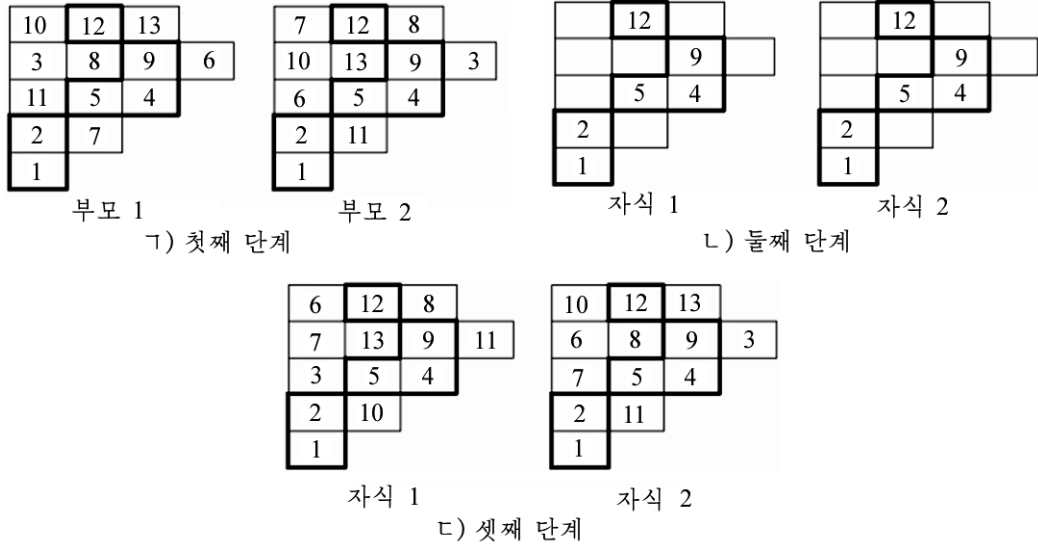


그림 2. 교잡과정

우리는 유전알고리즘을 리용한 가압경수로로심연료장입최량화모형을 작성한데 기초하여 최량로심연료장입방안탐색체계를 수립하고 그것을 리용하여 전기출력이 1 000MW인 가압경수로의 1순환의 연료장입방안[5]에 대한 최량화를 진행하였다.

1순환초기 로심의 연료집합체배치구조는 그림 3과 같다. 로심은 9개 종류의 177개의 집합체로 구성되었으며 1/8대칭구조를 가진다.

최량화는 유효증식결수에 대한 제한조건  $k_{eff} > 1.165$

를 리용하여 연소가 진행되지 않은 순환초기 가온령출력

상태의 로심에 대하여 진행하였다. 최량화전과정에서 중심위치의 연료집합체는 고정된다. 리용된 교잡확률과 변이확률, 세대당 개체수는 각각 0.5, 0.1, 100이며 150세대까지 진화하도록 하였다.

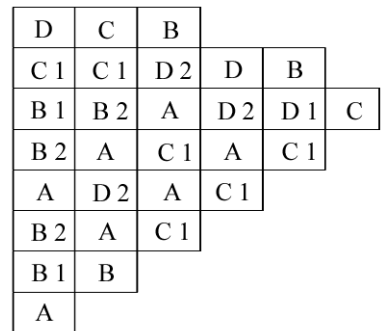


그림 3. 1순환초기 로심의 연료집합체배치구조

## 2. 가압경수로의 로심연료장입방안 최량화 계산결과

그림 4와 5에 방안탐색수에 따르는 최량방안의 출력불균일결수변화와 세대수에 따르는 세대평균적응도변화를 보여주었다. 그림 4에서 보는바와 같이 최량방안의 출력불균일결수는 탐색된 방안수가 증가함에 따라 초기 약 1.89로부터 급격히 감소하여 약 6 000개의 방안탐색이후부터는 거의 수렴

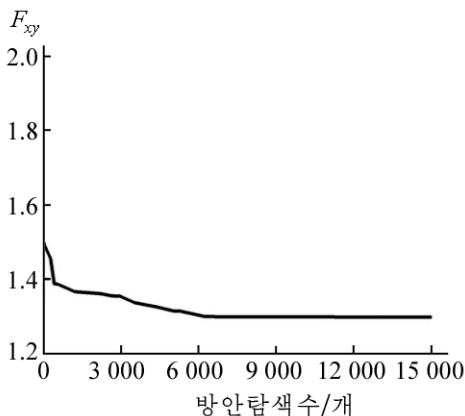


그림 4. 방안탐색수에 따르는 최량방안의 출력불균일결수변화

된 상태에 도달하였다. 세대평균적응도의 변화는 세대에 포함된 개체들이 최량풀이로 수렴된 정도를 보여주므로 최량방안의 출력불균일결수보다 좀 늦어서 약 90세대의 진화이후부터 수렴하기 시작한다.

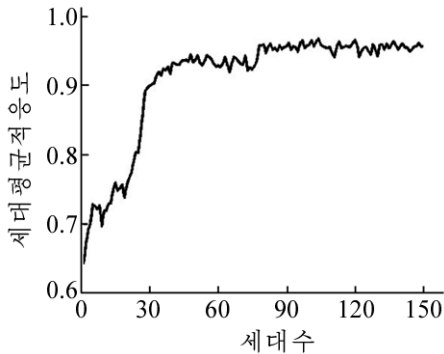


그림 5. 세대수에 따르는 세대평균 적응도변화

D	D	B			
C	A	D	D	A	
A	D	C	B	C	D
C	C	B	C	B	
B	A	A	B		
B	A	B			
C	D				
A					

그림 6. 갱신된 로심연료집합체배치방안 (1/8대칭구역)

150세대의 진화가 끝난 후 얻어진 최량장입방안의 갱신된 로심연료집합체배치방안은 그림 6과 같다. 이 방안의 유효증식결수와 출력불균일결수는 각각 1.176 868, 1.298 571로서 그림 3에서 보여준 로심연료집합체배치방안의 1.162 148, 1.605 67에 비하여 유효증식결수가 더 크면서도 출력불균일결수가 크게 감소되었다. 이것은 주어진 상태의 연료장입방안에 대한 최량화가 원만히 수행되었으며 우리가 작성한 유전알고리즘에 의한 가압경수로로심연료장입최량화모형이 정확하다는것을 보여준다.

## 맺 는 말

1) 옹근수부호화에 의한 유전알고리즘과 매듭그린함수법에 의한 2차원확산계산프로그램을 리용하여 순환초기 유효증식결수에 대한 제한조건을 만족하면서 출력불균일결수가 최소인 가압경수로로심의 최량연료장입방안탐색체계를 수립하였다.

2) 동력용가압경수로의 초기순환에 대한 최량방안탐색을 통하여 계산체계의 유효성을 검증하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] 허일문 등; 원자력, 2, 19, 주체102(2013).
- [2] M. Rafiei Karahroudi et al.; Annals of Nuclear Energy, 57, 142, 2013.
- [3] A. Norouzi et al.; Progress in Nuclear Energy, 53, 449, 2011.
- [4] Cecilia Martín Del Campo et al.; Annals of Nuclear Energy, 36, 1553, 2009.
- [5] System 80+(Trademark) Standard Cessar Design Certification, Amendment 1, 4, 59, 1990.

## **Application of Genetic Algorithms in Charging Pattern Optimization for the Initial Cycle of PWR Core**

*So Chol, Hong Tok Su and Ho Il Mum*

In this paper, we have established the optimization system of searching PWR optimal charging pattern for the initial cycle by using Genetic Algorithm(GA) and the two dimensional diffusion calculation code based on nodal Green's function method.

Key words: PWR, genetic algorithm, charging pattern