

## 연속호프필드신경망을 리용한 가압경수로의 최량연료장입방안탐색

홍광학, 서철

현재 세계적으로 인공신경망을 리용하여 원자력발전소의 여러 계통과 설비들에 대한 계측 및 감시, 조종, 고장진단을 진행하며 원자로의 로심연료장입최량화를 실현하여 원자력발전소운영의 안전성과 경제성을 높이기 위한 연구들[2-4]이 진행되고있다.

우리는 연속호프필드신경망을 리용한 가압경수로로심의 최량연료장입방안탐색모형을 작성하고 가압경수로물리계산체계 《부흥》[1]과 결합하여 가압경수로로심의 제1순환을 위한 최량연료장입방안을 탐색하였다.

### 1. 가압경수로의 최량연료장입방안탐색을 위한 연속호프필드신경망모형

연속호프필드신경망을 동작시키면 망은 에네르기극소값에 해당하는 안정상태로 반드시 수렴하게 되며 이것을 리용하여 조합최량화문제를 풀수 있다.

연속호프필드신경망을 리용하여 조합최량화문제인 가압경수로의 로심연료장입최량화문제를 풀자면 목적함수와 속박조건을 반영한 항들로 이루어지는 에네르기함수를 작성하여야 한다.

로심의 한 위치에 한번에 하나의 연료집합체만 배치되어야 하는 가압경수로의 최량연료장입방안탐색문제는 순회판매원문제와 류사하므로 이에 기초하여 에네르기함수를 작성할수 있다.

순회판매원문제는  $N$ 개의 도시가 있고 도시들사이의 거리  $d_{xy}$ 를 알고있을 때 매 도시에 한번만 들리면서 모든 도시들을 다 통과하고 출발점으로 돌아오는 최단경로를 찾는 문제로서  $N \times N$ 개의 신경세포로 구성된 연속호프필드신경망을 리용하여 풀수 있다. 여기서  $N \times N$ 개의 신경세포는  $N \times N$ 형행렬  $V$ 에 대응하며 매 풀이행렬은 하나의 가능한 경로에 해당한다.

순회판매원문제를 풀기 위한 연속호프필드신경망의 한가지 에네르기함수는 다음과 같이 정의된다.[6]

$$E = \frac{A}{2} \sum_{x=1}^N \left( \sum_{i=1}^N V_{xi} - 1 \right)^2 + \frac{A}{2} \sum_{i=1}^N \left( \sum_{x=1}^N V_{xi} - 1 \right)^2 + D \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^N \sum_{i=1}^N d_{xy} V_{xi} V_{y, i+1} \quad (1)$$

여기서  $V_{xi}$ 는 행렬  $V$ 의 원소로서  $V_{xi}=1$ 은  $x$ 번째 도시를  $i$ 째 순서로 통과한다는것을 의미한다. 식 (1)의 첫 항과 두번째 항은 판매원은 한 도시에 한번만 들릴수 있고 한번에 하나의 도시만 통과하여야 한다는 속박조건들에 해당하는 항들이며 세번째 항은 목적함수 즉 통과경로의 최소화해 해당한다.

가압경수로의 최량연료장입방안탐색문제와 순회판매원문제의 류사성으로부터 순회판매원문제의 속박조건들을 그대로 적용할수 있으며 다만 목적함수부분만이 차이난다.

론문에서는 로심의 대칭구조를 고려하여 1/8구역에 대한 최량화를 진행하기 위한 계산모형을 작성하였다. 여기서 리용되는 방법은 대칭구조를 가진 로심에서뿐만아니라 비대칭구조에서도 리용할수 있다.

로심의 1/8구역에 배치되는 연료집합체수가  $N$ 일 때 런속호프필드신경망의 신경세포수를  $N \times N$ 으로 설정하였다. 이때  $i$ 째 행,  $j$ 째 열에 놓인 신경세포의 출구를  $V_{ij}$ 라고 하면  $V_{ij}=1$ 은 로심의  $i$ 째 위치에  $j$ 째 연료집합체가 배치된다는것을 의미한다.

에네르기함수는 다음과 같이 정의하였다.

$$E = E_1 + E_2 + E_3 \quad (2)$$

여기서  $E_1$ 과  $E_2$ 는 연료집합체배치에 관한 속박조건에 대응하는 에네르기들로서 식 (1)의 첫번째 및 두번째 항과 같은 형식을 가진다.  $E_3$ 은 목적함수에 대응하는 에네르기가이다. 로심에서 출력분포의 평탄화를 실현하는것을 목적으로 하여  $E_3$ 을

$$E_3 = \frac{D}{2}(F_{xy} - 1)^2 \quad (3)$$

으로 정의하였다. 여기서  $F_{xy}$ 는 로심의 출력불균일결수로서 다음과 같이 정의되는 량이다.

$$F_{xy} = \frac{p_i^{\max}}{\bar{p}} \quad (4)$$

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^N v_i p_i}{\sum_{i=1}^N v_i} \quad (5)$$

여기서  $p_i$ 와  $v_i$ 는 각각 로심의  $i$ 째 위치에 놓인 연료집합체의 출력과 체적이며  $p_i^{\max}$ 는  $p_i$ 들의 최대값이다.

식 (2)로 표시된 에네르기함수에 따르는 상태방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dU_{ij}}{dt} = -\frac{\partial E}{\partial V_{ij}} = -A \left( \sum_{j=1}^N V_{ij} - 1 \right) - A \left( \sum_{i=1}^N V_{ij} - 1 \right) - \frac{\partial E_3}{\partial V_{ij}} \quad (6)$$

여기서  $U_{ij}$ 는  $i$ 행,  $j$ 열 신경세포의 입구값이다. 위의 상태방정식을 리용하면 신경세포 입구값의 변화에 대한 계차식은 다음과 같다.

$$U_{ij}(t + \Delta t) = U_{ij}(t) + \Delta t \frac{dU_{ij}}{dt} \quad (7)$$

신경세포의 입구와 출구사이의 관계는 다음과 같은 시그모이드함수에 의하여 표시된다.

$$P_{ij} = f(U_{ij}) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{th} \left( \frac{U_{ij}}{\alpha} \right) \right] \quad (8)$$

식 (1), (3), (8)에서 결수  $A$ 와  $D$ ,  $\alpha$ 는 경험적으로 설정되는 상수들이다.

식 (7)로부터 시간에 따르는 신경세포의 입구값을 계산하려면  $\partial E_3 / \partial V_{ij}$ 을 구하여야한다. 하지만 식 (4)와 (5)에서 보는바와 같이 출력불균일결수  $F_{xy}$ 에는  $V_{ij}$ 가 양적으로 들어있지 않으므로  $F_{xy}$ 를  $V_{ij}$ 의 함수형태로 만들어야 한다.

연속호프필드신경망의 상태가 수렴되는 과정에 신경세포들은 0 또는 1의 출구값을 가지게 된다. 출구값  $V_{ij}$ 가 1이면  $i$ 째 위치에  $j$ 째 연료집합체가 배치되었다는것을 의미하고 0이면 배치되지 않았다는것을 의미하므로 식 (4)와 (5)에서  $p_i$  대신  $V_{ij}p_{ij}$ 를 받아들이 다음과 같이 출력불균일결수와 평균값을 정의하였다.

$$F_{xy} = \frac{(V_{ij}p_{ij})^{\max}}{\bar{p}} \quad (9)$$

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^N v_i \sum_{j=1}^N V_{ij}p_{ij}}{\sum_{i=1}^N v_i} \quad (10)$$

여기서  $p_{ij}$ 는 로심의  $i$ 째 위치에 놓인  $j$ 째 연료집합체의 출력으로서 로심확산계산을 통하여 얻어진다.

식 (2), (7), (8)을 리용하여 망의 상태를 변화시키면서 수렴판정기준을 만족할 때까지 계산을 반복해나간다.  $E_1$ 과  $E_2$ 가 모두 0일 때 신경망의 상태가 수렴된것으로 보고 계산을 중지하도록 하였다.

## 2. 가압경수로의 최량연료장입방안탐색결과

우리는 연속호프필드신경망을 리용한 가압경수로의 최량연료장입방안탐색모형을 작성한데 기초하여 선행연구[5]에 소개된 전기출력이 1 000MW인 가압경수로의 제1순환을 위한 최량연료장입방안을 탐색하였다.

제1순환초기 로심의 연료집합체배치구조는 그림 1과 같다. 로심은 9개 종류의 177개의 연료집합체로 구성되었으며 1/8대칭구조를 가진다. 1/8대칭구역에 놓이는 연료집합체의 수는 29개이며 이로부터 연속호프필드신경망의 신경세포수를  $29 \times 29$ 로 설정하였다.

최량방안탐색은 연소가 진행되지 않은 순환초기 가온령출력상태의 로심에 대하여 진행하였으며 유효증식결수에 대하여  $k_{eff} > 1.165$ 의 제한조건을 만족시키도록 하였다. 수렴과정에 생성된 연료장입방안들의 출력불균일결수  $F_{xy}$ 는 가압경수로 물리계산체계 《부흥》에서 제2종경계조건을 가진 매듭그린함수법에 의한 2차원확산계산모듈을 리용하여 계산하였다.

계산과정에 1/8구역에 배치된 연료집합체들의 종류별개수는 고정되며 신경망파라미터  $A$ ,  $D$ ,  $\alpha$ ,  $\Delta t$ 에 대하여 선행연구[3]에 소개된  $A=2\ 000$ ,  $D=1\ 000$ ,  $\alpha=0.05$ ,  $\Delta t=0.5$ 의 값을 리용하였다.

연속호프필드신경망을 리용하여 얻은 연료장입방안은 에네르기최소값이 아니라 극소값에 대응하는 방안이므로 탐색을 여러번 진행하고 그가운데서 가장 우수한 방안을 선택하도록 하였다.

5번의 최량방안탐색을 진행한 결과는 표와 같다.

D	C	B				
C1	C1	D2	D	B		
B1	B2	A	D2	D1	C	
B2	A	C1	A	C1		
A	D2	A	C1			
B2	A	C1				
B1	B					
A						

그림 1. 제1순환초기 로심의 연료집합체배치구조

표. 련속호프필드신경망을 리용한 최량방안탐색결과

방안 번호	유효증식 결수( $k_{eff}$ )	출력불균일 결수( $F_{xy}$ )	초기상태에 대응 하는 신경망의 에네르기	수렴상태에 대응 하는 신경망의 에네르기	반복회수
1	1.172 28	1.490 88	995 661	120.481 1	1 014
2	1.175 29	1.526 36	1 073 330	138.525 3	971
3	1.171 22	1.392 26	993 779	76.934 8	745
4	1.172 84	1.550 06	1 036 660	151.281 9	998
5	1.165 39	1.534 35	1 057 290	142.764 9	971

B	C	C1			
B	A	D	B2	D	
B2	D2	A	D1	C1	D2
B1	A	D2	C1	C1	
A	C1	B2	C1		
A	A	A			
B1	C				
B					

그림 2. 갱신된 로심연료집  
합체배치방안(1/8대칭구역)

표에서 보는바와 같이 신경망은 에네르기가 매우 큰 초기상태들로부터 76~152의 에네르기값을 가지는 안정상태들로 수렴되었으며 그에 따라 각이한 연료장입방안들이 얻어졌다. 얻어진 방안들에서는 그림 1의 초기방안( $k_{eff}=1.162\ 15$ ,  $F_{xy}=1.551\ 54$ )보다 출력불균일결수가 감소되었으며 유효증식결수는 증가되었다. 특히 방안 3의 출력불균일결수는 다른 방안들에 비해 훨씬 작으며 따라서 최량화목적에 제일 부합되는 방안이라고 볼수 있다.

방안 3에 해당하는 로심에서의 연료집합체배치방안은 그림 2와 같다. 그림 2에서 보는바와 같이 방안 3에서는 로심의 중심부에 농축도가 작은 A, B1, B집합체들이 집중적으로 배치되어 출력불균일결수를 크게 감소시킨다.

이상의 결과들은 우리가 설계한 련속호프필드신경망모형이 가압경수로의 최량연료장입방안탐색에 적합하다는것을 보

여준다.

## 맺 는 말

련속호프필드신경망을 리용하여 출력평탄화를 목적함수로 하는 가압경수로의 최량연료장입방안탐색모형을 작성하고 전기출력이 1 000MW인 동력용가압경수로의 제1순환에 대한 최량방안탐색을 통하여 계산모형의 효과성을 검증하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] 허일문 등; 원자력, 2, 19, 주체102(2013).
- [2] A. Pazirandeh et al.; Ann. Nucl. Energy, 42, 112, 2012.
- [3] A. H. Fadaei et al.; Ann. Nucl. Energy, 35, 1968, 2008.
- [4] M. Sadighi et al.; Ann. Nucl. Energy, 29, 41, 2002.
- [5] System 80+(Trademark) Standard Design: Cessar Design Certification, Amendment 1, 4, 1990.
- [6] 魏海坤; 神经网络结构设计的理论与方法, 国防大学出版社, 67~77, 2005.

주체108(2019)년 12월 5일 원고접수

## **Finding of the Optimum Loading Pattern for PWR Core Using Continuous Hopfield Neural Network**

*Hong Kwang Hak, So Chol*

By using continuous Hopfield neural network, we made the finding model of PWR optimum loading pattern considering the power flattening as the objective function. The efficiency of the model was verified through finding of the optimum loading pattern for the initial cycle of 1 000MWe PWR.

Keywords: PWR, Hopfield neural network, fuel loading pattern