

## 모의소둔법에 의한 가압경수로 로심장입방안최량화

허일문, 리철학, 서철

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《…우리 나라의 실정에 맞는 수력발전소, 화력발전소, 원자력발전소를 건설하는데서 우리는 과학기술적문제를 풀도록 하여야 합니다.》(《김정일선집》 증보판 제11권 135페이지)

현재 세계적으로 원자력발전소운영의 안전성을 담보하는 조건에서 경제성이 가장 높은 로심설계방안을 찾는 최량화문제에 우연최량화방법의 하나인 모의소둔법이 널리 적용되고있다.[1-3, 5, 6]

우리는 모의소둔법에 의한 우연탐색프로그램을 작성하고 자체로 개발한 가압경수로물리계산체계 《부흥》을 결합하여 가압경수로의 최적화된 연료장입방안을 선택하는 탐색체계를 수립하였다.

### 1. 모의소둔법의 원리

$E(X_i)$ 가  $X_i$  상태에서 물리적계의 내부에너지기이고 계가 주어진 온도  $T$ 에서 열평형 상태에 있을 때  $E(X_i)$ 는 다음의 볼츠만분포를 따른다.[5]

$$f(E, T) = \frac{1}{\sum_i \exp[-E(X_i)/(kT)]} \exp[-E(X_i)/(kT)]$$

여기서  $k$ 는 볼츠만상수이다.

계에 어떤 섭동  $\Delta X_i$ 가 가해져 내부에너지가  $\Delta E = E(X_i + \Delta X_i) - E(X_i)$ 만큼 변하였다고 하자.

$\Delta E \leq 0$ 이면 섭동후의 상태는 접수되며 상태  $X' = X_i + \Delta X_i$ 가 다음계산결음의 시작점으로 된다. 이때 계의 내부에너지는  $E(X')$ 로 된다.

만일  $\Delta E > 0$ 이면 상태  $X'$ 는

$$P(\Delta E) = \exp[-\Delta E/(kT)]$$

의 확률로 접수된다. 즉 구간  $[0, 1]$ 에 균등분포된 표준우연수  $r$ 를 발생시켜  $P(\Delta E) > r$ 이면 계의 새로운 상태( $X' = X_i + \Delta X_i$ )가 접수되어 다음결음의 시작점으로 되지만 내부에너지는 여전히  $E(X_i)$ 로 취한다. 만일  $P(\Delta E) < r$ 이면 섭동후의 상태는 접수될수 없으며 원래의 상태  $X_i$ 를 다음결음의 시작점으로 삼는다.

이런 과정을 계속 반복해나가면 계는 주어진 온도  $T$ 에서 열평형상태에 도달하며 계의 내부에너지는 이 온도에서 최소값에 이르게 된다. 이 과정을 메트로폴리스추첨이라고 하며 메트로폴리스추첨을 통하여 최량화문제의 대역적최량풀이 또는 근사적인 대역적최량풀이를 구하는 방법을 모의소둔법이라고 한다.

이 방법에서는 최량화하려는 계의 개별적무이방안을 물리적계의 미시상태  $X_i$ 로 정의하고 계의 목적함수를 물리적계의 내부에너지  $E(X_i)$ 로 대치시킨다. 이때 온도  $T$ 는 1개의 조종파라미터이며 그것의 본은 목적함수의 본과 같다.

## 2. 모의소둔법에 의한 최량로심연료장입방안탐색체계수립

우리가 수립한 모의소둔법에 의한 최량로심연료장입방안탐색체계는 크게 장입방안생성부분과 목적함수계산부분, 갱신방안탐색부분으로 이루어졌다.

장입방안생성부분에서는 초기장입방안(로심의 집합체배치)에 우연섭동을 주어 집합체 배치를 변화시키는 방법으로 새로운 로심연료장입방안을 추천(생성)한다.

우연선택동은 구간  $[0, 1]$ 에 균등분포된 표준우연수를 발생시키고 그 우연수에 대응하는 위치에 놓인 집합체를 추천한 다음 다른 1개의 위치(집합체)를 더 추천하여 선택된 두 집합체의 위치를 서로 교체하는 방법으로 실현한다. 이때 로심의 대칭성과 관련하여 로심전체가 아니라  $1/4$  또는  $1/8$ 대칭구역만을 대상하는 경우 서로 다른 위치에 놓이는 집합체의 실제적인 개수가 서로 다르다는것을 고려해야 한다.

또한 서로 같은 종류의 집합체들사이의 위치교체는 새로운 방안을 주지 않으므로 다른 위치를 추첨해야 한다.

목적함수로 선정되는 유효조식결수나 출력불균일결수 등은 모두 로심의 립계확산계산을 통하여 얻어진다. 결국 목적함수계산부분은 새로 작성할 필요가 없이 이미 세워진 2차원(3차원)로심립계확산계산코드부분을 리용하면 된다. 다만 수천수만개의 방안들을 비교평가해야 하므로 높은 계산속도를 보장해야 한다. 우리는 전로심그린함수법을 적용한 2차원 고속로심계산코드인 《부흥 2D》를 목적함수계산에 리용하였다.

갱신방안탐색부분에서는 메트로폴리스추첨을 통해 서로 다른 우연방안들을 비교하여 목적함수가 갱신되는 방안을 추적해나간다. 수렴조건(결속기준)이 만족되면 갱신방안추적과정을 결속한다.

### 3. 가압경수로의 로심연료장입방안최량화 계산결과

우리는 수립된 최량로심연료장입방안탐색체계를 리용하여 선행연구[4]에 소개된 전기출력이 1 000MW<sub>e</sub>인 가압경수로의 제1순환의 로심연료장입방안에 대한 최량화계산을 진행하였다.

로심은 9개 종류의 177개의 집합체로 구성되었다. 1순환초기 로심의 연료집합체배치와 개별적집합체들의 특성은 그림 1, 표 1과 같다.

출력불균일계수를 낮추면 로심의 출력분포가 평탄화되어 로심의 평균출력을 높이고 열공학적인 안전여유를 늘일 수 있다. 한편 출력분포의 평탄화는 로심변두리에서의 증성자루실을 증대시켜 유효증식계수를 감소시키며 그만큼 주

D	C	B					
C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D	B			
B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	A	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	C		
B <sub>2</sub>	A	C <sub>1</sub>	A	C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	B	
A	D <sub>2</sub>	A	C <sub>1</sub>	A	D <sub>2</sub>	D	
B <sub>2</sub>	A	C <sub>1</sub>	A	C <sub>1</sub>	A	D <sub>2</sub>	B
B <sub>1</sub>	B	A	D <sub>2</sub>	A	B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C
A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	A	B <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	D

그림 1. 1순환초기 로심의  
연료집합체배치

표 1. 종류별집합체들의 특성

집합체의 종류	로심에서 집합체수/개	연료농축도 /%	집합체에서 연료붕수/개	집합체에서 가연성 흡수붕수/개
A	45	1.28	236	
B	20	2.34	236	
B <sub>1</sub>	8	2.34/1.28	176/52	8
B <sub>2</sub>	16	2.34	232	4
C	12	2.84/2.34	184/52	
C <sub>1</sub>	32	2.84/2.34	176/52	8
D	12	3.34/2.84	184/52	
D <sub>1</sub>	8	3.34/2.84	176/52	8
D <sub>2</sub>	24	3.34/2.84	128/100	8

어진 연료순환주기를 작게 한다. 때문에 유효증식결수에 대한 어떤 제한조건을 만족시키면서 출력불균일결수가 작은 방안을 찾는 최량화문제가 제기된다.

이때 로심장입방안최량화문제를 다음과 같이 정식화할수 있다.

$$k_{\text{eff}} > k_{\text{eff}, 0}, \quad \min F_{xy}(X)$$

즉 유효증식결수를  $k_{\text{eff}, 0}$  이상 보장하는 조건에서 반경방향출력불균일결수  $F_{xy}$ 가 가장 작은 장입방안  $X$ 를 구하는데 귀착된다.

유효증식결수에 대한 각이한 제한조건에서 출력불균일결수가 최소로 되는 장입방안에 대한 탐색계산을 진행한 결과는 표 2와 같다.

표 2에서 보는바와 같이 유효증식결수에 대한 요구(제한조건)가 높아짐에 따라 탐색된 장입방안의 출력불균일결수의 최소값이 증가한다.

유효증식결수에 대한 제한조건이  $k_{\text{eff}} > 1.26$ 일 때 방안탐색수에 따르는 출력불균일결수의 갱신결과는 그림 2와 같다.

표 2. 제한조건에 따르는 방안결과

제한조건	계산시간/s	$k_{\text{eff}}$	$F_{xy}$
$k_{\text{eff}} > 1.21$	279	1.227 01	1.309 23
$k_{\text{eff}} > 1.24$	264	1.245 10	1.331 00
$k_{\text{eff}} > 1.26$	270	1.261 68	1.415 46
$k_{\text{eff}} > 1.27$	268	1.270 92	1.486 42
$k_{\text{eff}} > 1.30$	272	1.300 18	2.094 32

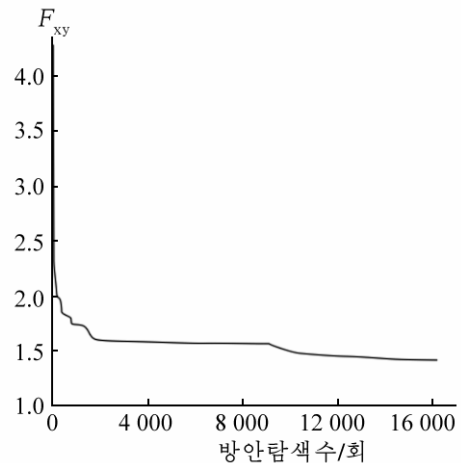


그림 2. 방안탐색수에 따르는  
출력불균일결수갱신결과

그림 2에서 보는바와 같이 방안탐색수가 늘어남에 따라 목적함수인 출력불균일결수값이 초기에는 불과 수백회만에 4.3에서 1.8정도까지 빨리 감소(갱신)되지만 그후부터는 그 갱신속도가 급격히 떨어지면서 느리게 감소하여 16 000여회만에 1.415 46에 도달하였다. 이때

의 유효증식결수는  $k_{\text{eff}}=1.261\ 68$ 이다. 이것은 그림 1에 보여준 순환초기의 로심연료집합체 배치방안(유효증식결수 1.220 934, 출력불균일결수 1.437 61)[4]에 비해볼 때 출력불균일결수는 작아지고 유효증식결수는 보다 높아진다는것을 보여준다.(모의결과는 연소흡수체의 연소를 고려하지 않은 순환초기 평상태에 대한 탐색결과이다.)

이 방안의 로심연료집합체배치는 그림 3과 같다.

그림 3에서 보는바와 같이 변두리에는 농축도가 가장 낮은 집합체들이 배치되어 로심 밖으로의 중성자의 루실을 줄이고 증식결수를 크게 한다.

로심내부구역에는 출력분포를 평탄화하면서 설정된 유효증식결수를 보장하도록 농축도가 높은것들과 낮은것들이 엇바꾸어 배치되었다. 결과 이 배치방안의 출력분포(그림 4)를 보면 로심중심에서 변두리로 가면서 출력이 낮은 부분과 높은 부분이 서로 엇바뀌는것을 알수 있다.

C <sub>1</sub>	A	A					
D	D <sub>2</sub>	D	A	A			
B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	C	C <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	A		
B	A	C <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	C	B <sub>2</sub>	A	
D <sub>2</sub>	B	C <sub>1</sub>	B	D <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	A	
C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C	D	A
D <sub>2</sub>	B	D <sub>1</sub>	B	A	B <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	A
A	D <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	B	B <sub>1</sub>	D	C <sub>1</sub>

그림 3. 갱신된 로심연료집합체 배치방안(1/4대칭구역)

0.502	0.341	0.249					
1.226	1.108	1.114	0.416	0.193			
0.951	1.232	1.415	1.044	0.768	0.256		
1.183	0.869	1.245	1.410	1.321	0.768	0.193	
1.369	1.298	1.223	1.398	1.410	1.044	0.416	
1.308	1.399	1.027	1.223	1.245	1.415	1.114	0.249
1.383	1.373	1.399	1.298	0.869	1.232	1.108	0.341
0.907	1.383	1.308	1.369	1.183	0.951	1.226	0.502

그림 4. 갱신된 방안의 출력 분포(1/4대칭구역)

## 맺는 말

우연최량화방법인 모의소듐법과 전로심그린함수법에 의한 2차원확산계산코드를 리용하여 경수로의 최적화된 연료장입방안을 찾는 제한조건을 가진 단일목적최량화탐색체계를 수립하고 동력용가압경수로의 초기순환에 대한 최량방안탐색을 통해 계산체계의 유효성을 검증하였다.

## 참고 문헌

- [1] K. Kirkpatic et al.; Science, 220, 671, 1983.
- [2] D. J. Kropaczek et al.; Nucl. Tech., 95, 9, 1991.
- [3] Aneela Zameer et al.; Annals of Nuclear Energy, 65, 122, 2014.
- [4] System 80+(Trademark) Standard Cessar Design Certification, Amendment 1, 1900, DOE/SF/16564-T4, 4.
- [5] 钟文发 等; 清华大学学报, 41, 10, 52, 2002.
- [6] 谢仲生; 压水堆核电站堆芯燃料管理及优化, 原子能出版社, 146~153, 2001.

## **Optimization of PWR Fuel Loading Pattern by Simulated Annealing**

*Ho Il Mun, Ri Chol Hak and So Chol*

By using the two dimensional diffusion calculation code based on simulated annealing (SA) and core-wise Green's function method, a single object optimization system for searching PWR optimal loading pattern under the given constraints was established. The efficiency of system was verified through the searching of optimal loading pattern for the initial cycle of PWR.

Key words: PWR, simulated annealing, fuel loading pattern