

# VVER형가압경수로의 3차원로심연소계산에 대한 연구

서철, 허일문, 류금봉

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 지적하시였다.

《과학연구사업을 더욱 강화하여 세포공학과 유전자공학, 초고압물리학, 극저온물리학을 발전시키며 레이자와 플라즈마기술, 원자에너지와 태양에너지를 개발하여 인민경제에 받아들이는데서 나서는 과학기술적문제를 적극 풀어나가야 하겠습니다.》(《김정일선집》 제11권 증보판 139페이지)

VVER형가압경수로의 로심은 일반 가압경수로(PWR)들과 달리 바른6각형연료집합체들로 이루어졌다.

본문에서는 가압경수로물리계산체계를 리용하여 VVER-440형가압경수로에 대한 3차원로심연소계산을 진행하였다.

## 1. 계산체계구성과 계산모형

가압경수로물리계산체계는 크게 연료집합체균질화 및 연소계산부분(균질화소수군상수작성부분)과 로심확산립계계산부분, 로심의 3차원열계산 및 연소해석부분, 립계탐색부분으로 구성되어있다.

가압경수로물리계산체계의 계산흐름도식은 그림 1과 같다.

세포균질화계산에서는 충돌확률법으로 위그너-세이츠의 1차원등가원기동세포에서 69군수송계산을 진행하여 세포의 균질화거친군상수를 얻는다.

연료집합체균질화계산에서는 투과확률법으로 2차원거친군수송계산을 진행하여 집합체균질화소수군상수를 구하고  $B_1$ 근사방정식을 풀어 루실효과를 보정한다. 루실 및 투과확률계산에서 균질화한 세포의 내부와 경계에서 중성자묵음의 공간분포에 관하여 2차근사를, 각 분포에 대하여 단순 $P_1$ 근사를 적용하였다.

한편 세포와 집합체의 연소계산에서는 라플라스변환법과 예측-교정방법을 적용하여 필요한 정확도를 보장하면서도 연소걸음을 크게 하여 계산시간을 단축하였다.

6각형연료집합체로 구성된 로심의 확산립계계산에서는 2차근사매듭법을 리용하여 소수군확산방정식에 대한 수값풀이를 진행한다.

로심의 정적열계산에서는 단상강제대류열교환에 관한 Dittus-Boelter의 공식, W-3공식 및 개선된 Barnett공식을 비롯한 여러가지 반경험식들과 열물성자료[5]들을 리용하며 립계탐색은 활줄법으로 진행한다.

개별적계산블록들의 정확도와 효율성은 해당한 기준문제에 대한 계산을 통하여 검증하였다.[1-7]

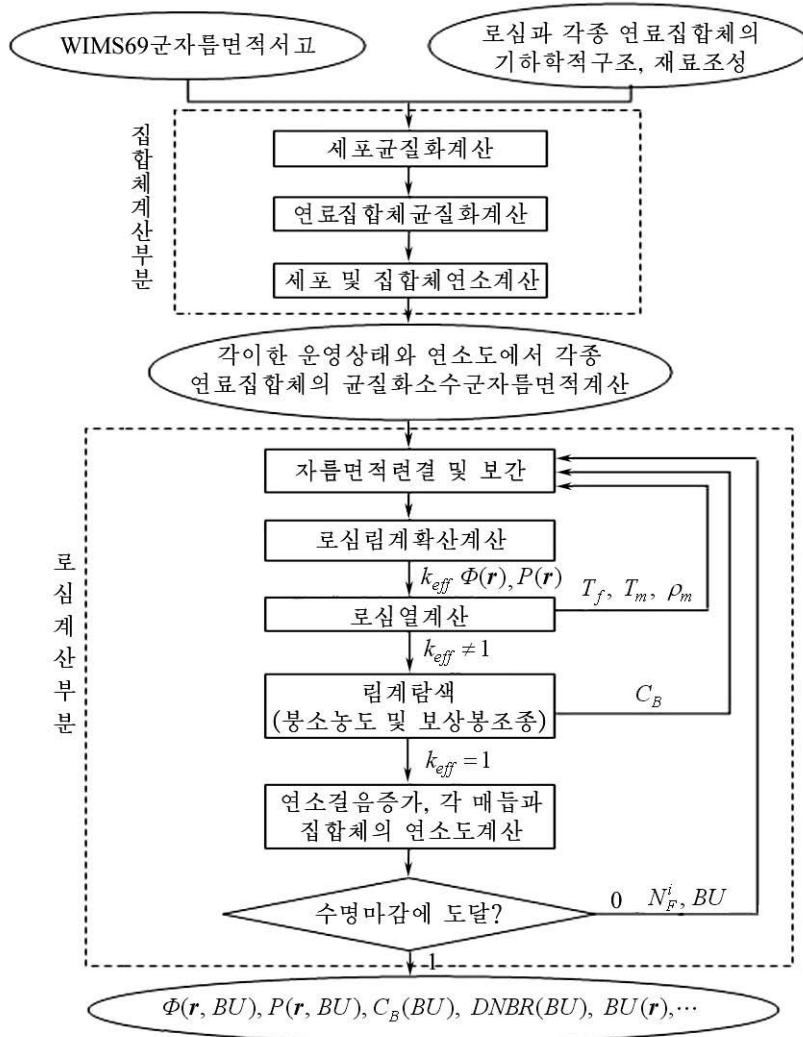


그림 1. 가압경수로물리계산체계의 계산흐름도식

## 2. 계산 결과

우리는 VVER-440형가압경수로[6]의 출력운전(연소)과정에 대한 물리계산을 진행하였다.

VVER-440형원자로의 1/12대칭구역에 대한 집합체배열번호는 그림 2와 같다.

랭상태(20℃), 고온령출력(270℃), 고온만출력(0%)상태에서 로심의 유효증식계수는 각각 1.305, 1.228, 1.196이다.

순환초기와 연소도 10.436GWd/tU, 순환마

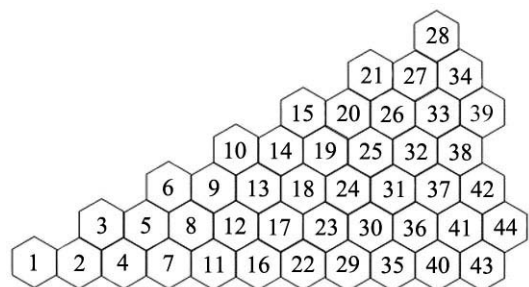


그림 2. VVER-440형원자로 1/12대칭구역의 집합체배열번호

감에서의 집합체평균상대출력분포는 표와 같다.

표. 집합체평균출력분포

| 위치 | A     | B     | C     | 위치 | A     | B     | C     |
|----|-------|-------|-------|----|-------|-------|-------|
| 1  | 1.796 | 1.304 | 1.064 | 23 | 1.102 | 1.156 | 1.164 |
| 2  | 1.790 | 1.306 | 1.072 | 24 | 0.936 | 1.069 | 1.125 |
| 3  | 1.762 | 1.305 | 1.081 | 25 | 0.738 | 0.928 | 1.026 |
| 4  | 1.747 | 1.305 | 1.085 | 26 | 0.513 | 0.723 | 0.845 |
| 5  | 1.702 | 1.303 | 1.099 | 27 | 0.283 | 0.455 | 0.581 |
| 6  | 1.626 | 1.297 | 1.120 | 28 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 7  | 1.664 | 1.299 | 1.105 | 29 | 0.993 | 1.099 | 1.140 |
| 8  | 1.610 | 1.296 | 1.124 | 30 | 0.846 | 1.006 | 1.083 |
| 9  | 1.515 | 1.283 | 1.146 | 31 | 0.659 | 0.856 | 0.962 |
| 10 | 1.375 | 1.253 | 1.166 | 32 | 0.446 | 0.646 | 0.774 |
| 11 | 1.563 | 1.290 | 1.136 | 33 | 0.243 | 0.396 | 0.515 |
| 12 | 1.482 | 1.277 | 1.153 | 34 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 13 | 1.365 | 1.251 | 1.170 | 35 | 0.718 | 0.906 | 1.004 |
| 14 | 1.209 | 1.202 | 1.176 | 36 | 0.551 | 0.751 | 0.865 |
| 15 | 1.013 | 1.114 | 1.151 | 37 | 0.353 | 0.532 | 0.656 |
| 16 | 1.415 | 1.262 | 1.163 | 38 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 17 | 1.313 | 1.236 | 1.173 | 39 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 18 | 1.174 | 1.187 | 1.174 | 40 | 0.411 | 0.602 | 0.726 |
| 19 | 0.996 | 1.104 | 1.147 | 41 | 0.251 | 0.401 | 0.519 |
| 20 | 0.779 | 0.965 | 1.060 | 42 | 0     | 0     | 0     |
| 21 | 0.534 | 0.747 | 0.869 | 43 | 0     | 0     | 0     |
| 22 | 0.122 | 1.203 | 1.172 | 44 | 0     | 0     | 0     |

A: 순환초기, B: 10.436GWd/tU인 상태, C: 순환마감 20.873GWd/tU인 상태

표에서 보는바와 같이 연소가 진행됨에 따라 출력분포는 점차 평탄해진다. 이것은 순환초기에는 중성자뭉음이 큰 로심의 가운데부분에서 연소가 많이 진행되어 분렬성핵들의 밀도가 로심변두리에 비해 작아지고 그것에 따라 점차적으로 중심에서의 출력이 상대적으로 감소하는 것과 관련된다.

순환초기와 순환마감에 중심연료집합체에서 출력분포와 그것에 따르는 로심재료의 온도분포계산결과는 그림 3-6과 같다.

순환마감에 집합체별평균연소도분포는 그림 7과 같다.

그림 7에서 보는바와 같이 중심부분에서 연소도가 높고 로심변두리로 가면서 연소도가 급격히 감소한다는 것을 알 수 있다. 이것은 연소기간 출력분포의 루적효과가 반영된 것이라고 볼 수 있다.

연소도에 따르는 출력불균일결수의 변화는 그림 8과 같다.

그림 8에서 보는바와 같이 Xe평형해독이후 로심의 출력불균일결수는 초기의 2.49로부터 1.31까지 감소한다는 것을 알 수 있다. 연소결음은 497MWd/tU로 하였으며 순환마감까지의 시간은 1 892s(31min 32s)이다.

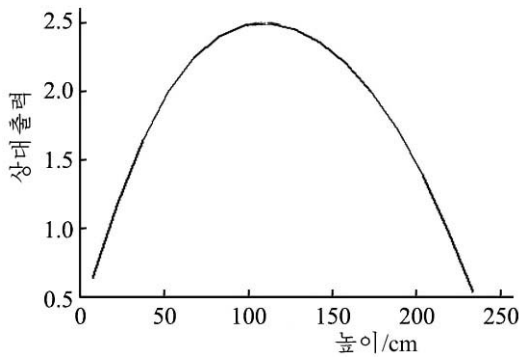


그림 3. 순환초기 중심집합체에서 축상출력분포

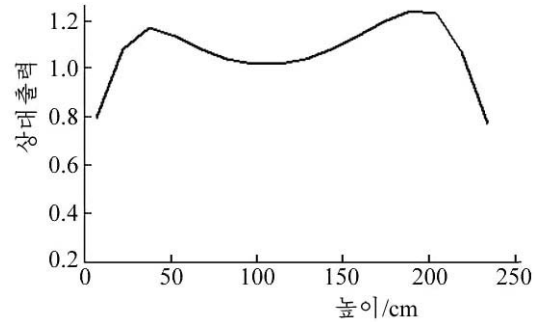


그림 4. 순환마감 중심집합체에서 축상출력분포

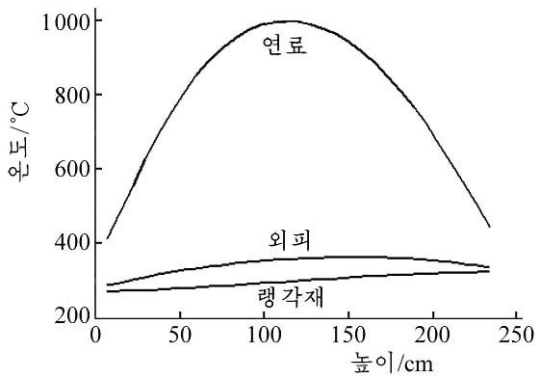


그림 5. 순환초기 중심집합체에서 재료들의 축상온도분포

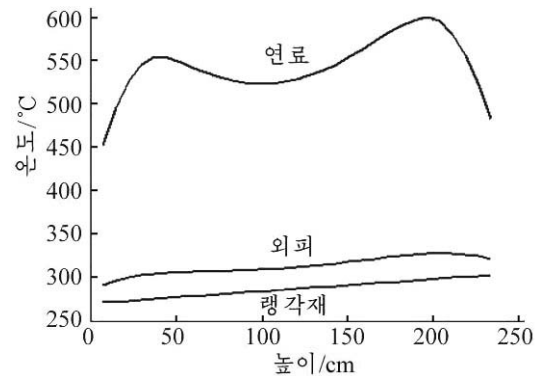


그림 6. 순환마감 중심집합체에서 재료들의 축상온도분포

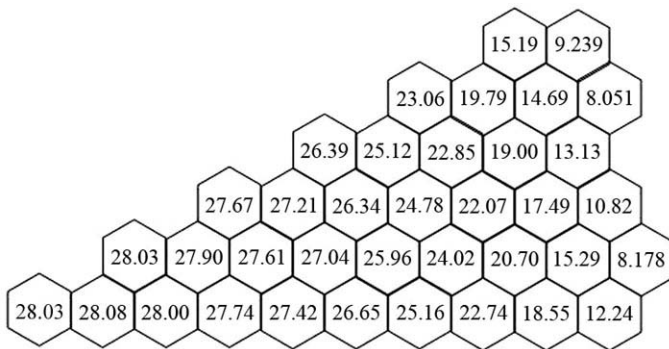


그림 7. 그림 2에 따르는 순환마감의 집합체별연소도분포(GWd/tU)

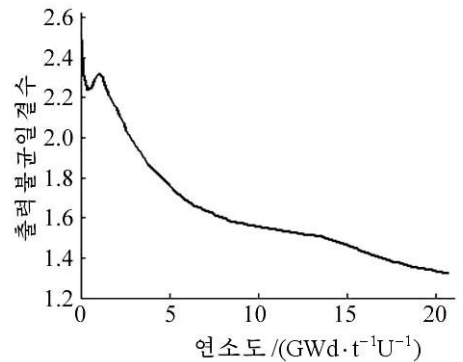


그림 8. 연소도에 따르는 출력불균일계수의 변화

## 맺 는 말

계산결과 6각형연료집합체들로 구성된 VVER형가압경수로의 물리계산에 가압경수로물리계산체계를 리용할수 있다는것을 밝혔다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 53, 9, 76, 주체96(2007).
- [2] 김일성종합대학학보(자연과학), 57, 8, 71, 주체100(2011).
- [3] 허일문; 조선민주주의인민공화국 과학원통보, 5, 27, 주체98(2009).
- [4] 허일문 등; 원자력, 4, 2, 주체96(2007).
- [5] W. Wagner et al.; International Steam Tables, Springer, 189~287, 2008.
- [6] S. B. Ryzhov et al.; Handbook of Nuclear Engineering, Springer, 2249~2302, 2010.
- [7] 谢仲生; 压水堆核电厂堆芯燃料管理计算及伏化, 原子能出版社, 86~104, 2001.

주 체 103(2014)년 4월 5일 원고접수

## **3-Dimensional Core Burn-up Calculation of VVER-Type Pressured Water Reactor**

*So Chol, Ho Il Mun and Ryu Kum Bong*

The 3-dimensional core burn-up calculation of VVER- 440 type PWR was performed by the PWR physical calculation system which have functions of fuel depletion analysis, thermal-hydraulic feedback and criticality search. The results show that the calculation system can be used to physics calculation of VVER-type PWR with hexagonal fuel assemblies.

Key words: VVER-type PWR, three-dimensional burn-up calculation