

압력용기에서의 중성자 조사량 평가 및 감소방안 연구

김 동규*, 김 명현

경희대학교

요 약

압력용기로의 속중성자 조사량 평가를 4군 노달 노심해석코드로 수행하였다. 이 코드는 MCNP에 비해 정확성은 떨어지나, 핵연료 연소의 효과나 핵연료 장전 모형의 영향을 쉽게 고려할 수 있었다. 속중성자 조사량 감소 방안으로서 반사체 차폐 구조물을 설치하는 방안과 노심외곽에 대체 핵연료 집합체를 장전하는 방안을 비교하였다. 신형원전의 경우 가장 효과적인 방안은 물 반사체 영역에 급속 차폐 구조물을 설치하는 것이나 운전중인 원자로의 경우 비록 주기길이의 감소와 핵연료 비용의 증가는 있으나 속중성자 감소 효과에 있어서는 대체 핵연료 집합체의 장전이 대안일 수 있다.

1. 서론

원자로의 수명연장을 위해서는 압력용기의 건전성 확보가 절대적으로 필요하다. 이 건전성은 (개략적으로 1MeV이상의 에너지를 갖는)속중성자의 조사에 의한 취화현상(Embrittlement)에 의해 감소가 된다. 그러므로, 건전성을 유지하기 위해서 중성자조사량을 감소시키는 방안을 연구할 필요가 있다. 압력용기에서 중성자 조사량을 감소시키는 방안으로는 반사체영역에 차폐체(Radial Reflector)를 설치하는 방법, 로심의 장전모형을 변경하는 방법, 로심외각에 대체 핵연료 집합체(Dummy Fuel Assembly)를 설치하는 방법등 여러 가지가 있다. 본 연구에서는 이 세가지 방안을 동시에 비교하기 위해서 노심해석코드인 NECTA-C⁽¹⁾를 이용하였다.

지난번에는 2군 핵계산 체계를 이용하여 속중성자속을 평가할 때 반사체 영역에서의 균질화작업과 불연속인자를 적용하는 방법에 대해서 발표하였고,⁽²⁾ 이 방법에 대한 검증까지 하였었다. 반사체 영역에서 균질화 작업은 CASMO-3가 비균질 구조의 반사체에 대해서 균정수 생산을 할 수 없으므로 MCNP-4/A⁽³⁾를 이용하여 균정수 및 불연속인자를 계산하였다.

이번 연구에서는 4군 핵계산 체계로 변경하여 속중성자속 평가를 하였다. 그러나, 지난 번과는

* 현재소속 : 한국전력기술(주)

달리 반사체영역에서의 균정수 생산코드는 NECTA-C코드를 이용하였다. 반사체 영역을 포함한 Color Set을 Fine Node로 나누어 NECTA-C코드로 비균질계산을 하여 균질화 균정수를 생산하였다. 이 방법을 이용하여 중성자속 감소방안 3가지에 대해서 고리 1호기 1 주기를 연소시키면서 비교하고, 특히 대체 핵연료 집합체를 장전한 경우 주기길이의 손해를 평가해 보았다.

2. NECTA-C 와 MCNP-4A의 중성자속 분포 검증

NECTA-C코드의 검증을 위해서 MCNP-4/A코드를 이용하였다. 검증계산 문제는 그림 1과 같은 가상의 원자로이다. 농축도 3.2w/o와 농축도 2.83 w/o의 핵연료 집합체로만 구성되어 있는 가상의 1/4 노심이다. 노심외부는 Baffle과 물로 되어 있으며, 높이는 고리 원자력 1호기의 1/16크기인 22.86 Cm로 하였다. 핵자료집의 문제로 인해서 원자로의 운전조건은 상온으로 하여 계산을 하였다.

NECTA-C와 CASMO-3의 속중성자속 계산결과는 그림 2에서 보여주고 있다. 노심 중앙에서는 MCNP-4/A와 NECTA-C의 계산결과와는 상당히 잘 맞는다. 그러나 노심외각에서는 NECTA-C 계산결과가 다소 높은 중성자속분포를 보이고 있다. 그러나, 전반적으로 볼 때 중성자속의 분포는 크게 틀리지 않아서 중성자속 감소량을 평가하는데 있어서는 NECTA-C계산체계를 사용하여도 큰 문제가 없을 것이다.

3. 반사체 차폐 구조물(Radial Reflector)설치 로심

본 연구에서는 고리 1호기를 선택하여 중성자 조사량 감소방안에 관한 연구를 하였다. 감소방안의 일환으로써 반사체영역에 반사체 차폐 구조물을 설치하였다. 반사체 차폐 구조물은 스테인레스강 304로된 봉이며, 각 봉의 크기는 핵연료집합체와 동일한 제원을 갖도록 설계를 하였다.

이 영역에 대한 균질화균정수는 CASMO-3를 통한 균정수생산방법의 한계성때문에⁽²⁾ NECTA-C를 통하여 유한차분법과 같이 미세하게 노드를 구성하여 균질화 균정수를 생산하였다. 이 방법은 출력 분포도를 FSAR과 비교시에 r.m.s error가 0.727%로 매우 정확한 결과를 얻음을 확인하였다.

기존 로심에서의 속중성자속($E > 0.821\text{MeV}$) 분포와 비교시에 압력용기에서의 중성자속은 43% 감소하여 나타났다. 로심은 중성자속의 누출이 줄어들어 그림 3처럼 로심전체에서는 임계도값이 증가되었다. 로심중앙으로부터 압력용기까지의 속중성자속의 분포는 그림 4처럼 나타나고 있다. 이 그림은 속중성자속의 분포는 로심중앙에서는 적은 값을 보이지만, 로심외각에서는 증가하고 반사체영역을 지나서부터는 급격히 감소함을 볼 수 있다. 그림 5는 반사체와 접한 로심외각에서의 출력이 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

기존의 물이 있는 반사체영역에 차폐 구조물을 사용하면 압력용기에서의 속중성자속은 43% 감소하고, 주기의 길이는 약 14% 정도 증가하는 결과를 보였다.

4. 대체 핵연료 집합체(Dummy Fuel Assembly)설치 로심

본 연구에서 사용한 대체 핵연료 집합체는 천연우라늄(UO_2)핵연료를 사용하였다. 그리고, 집합체의 크기는 일반 핵연료집합체와 동일하게 설계를 하였다. 그러나, 제어봉이나 가연성독봉이 들어가는 기존의 17개의 안내관을 대체 핵연료 봉으로 채워서 집합체를 설계하였다.

대체 핵연료 집합체 설치 로심을 장전 모형에 대해 분석하였다. 고리 원자력 1 호기의 1주기 노심처럼 농축도가 높은 핵연료를 외각에 설치하는 방법을 채택한 방법과 농축도가 낮은 핵연료를 로심외각에 두는 LLLP를 채택하여 장전을 하였다.

고리 1 호기 1주기의 노심은 121개의 핵연료 집합체로 이루어져 있으며, A형, B형 집합체는 총 40개, C형 집합체는 41개로 되어 있다. 그 중에서 농축도가 제일 낮은 C형 집합체중 32개를 대체 핵연료 집합체로 바꾸어서 로심을 장전하였다.

그림 6 (장전모형 - A)은 로심의 최외각에 대체 핵연료집합체를 배치하고, 중심으로부터 A형, B형, C형의 순서로 집합체를 배치하였다. 노심의 출력의 첨두를 최대한 줄이기 위해서 최대 출력 부분에는 B.P.를 최대 16개까지 설치하여 노심을 구성하였다.

반면 그림 7 (장전모형 - B)은 로심의 최외각에 대체 핵연료 집합체를 배치한 것은 그림 6과 동일하나, 농축도가 높은 A형 집합체를 노심 중앙으로 배치하고 B형을 외각에 장전하는 모형으로 설정하였다. 역시 첨두출력을 최대한 줄이기 위해서 B.P.를 최대 16개까지 설치를 하였다.

4.1 장전모형 - A의 효과

계산결과 기존 원자로와 비교시에 원자로 압력용기에서의 속중성자 속은 61% 감소하였다. 그림 8은 속중성자속 분포를 기존 원자로인 고리 1호기 1주기 로심과 비교한 그래프이다. 노심내부에서 중성자속의 분포는 상당히 큰 값을 보이고 있음을 알 수 있었다. 대체 핵연료집합체를 사용하여 기존 설계안과 동일한 출력을 내도록 하였다. 그렇기 때문에 상대적으로 핵연료가 적은 이 장전모형의 경우 기존 노심보다 주기가 26% 감소하는 결과를 보이고 있다.

4.2 장전모형 - B의 효과

장전모형 A 와 비교하여 저누설 장전 모델을 선택하였으므로 중성자의 누설이 상대적으로 적으며, 누출이 적은 만큼 주기의 길이도 길어진다. 이 장전모형은 장전모형을 충분히 최적화하지 못한 노심이며 장전모형 A와 비교시에는 주기의 길이가 25.4% 증가하여 기존의 고리 원자력 1 호기 비교하면 주기의 길이가 7.3%만 감소하는 결과를 보인다. 그러나, 한 주기를 타고 나오는 A형의 핵연료는 약 22,000MWD/MTU정도 연소하였다. 따라서 다음 주기의 노심 장전모형에서는 주기의 손실이 무척 클 것을 알 수 있다.

가장 중요한 속중성자속의 감소율은 67.8%를 보임으로써, 가장 우수한 감소효과를 보이고 있다. 그림 9에는 장전모형 B를 기존 고리 1호기 1주기와 비교시에 중성자속의 분포를 나타낸 것이다. 그러나, 이 장전모형을 설계하면서 로심의 최대 출력부분에 B.P.를 최대한 삼입을 하였으나 첨두 출력 계수가 안전한계를 넘어섰다. 따라서 첨두출력을 낮추기 위해 전혀 다른 핵연료집합체를 설

제하여야 하고, 이는 결과적으로 주기길이의 감소를 가져올 것이다.

5. 결론 및 향후과제

표 1에서 이상의 계산 결과를 요약하여 비교하여 보았다. 기존 노심에서 저누설 장전 모델을 택하면서 대체핵연료집합체를 장전할 경우 가장 뛰어난 속중성자속 감소효과를 보임을 알 수 있었다. 그러나, 대체 핵연료 집합체를 사용함으로써 핵연료량이 감소되고 그로인해 주기가 감소된다. 또한 침투현상등이 발생할 수 있으므로 노심 설계에 많은 수고를 해야 한다. 반면, 반사체 차폐 구조물은 노심의 장전모형에 관계없이 쉽게 적용할 수 있고, 속중성자속의 감소율도 우수하여 기존의 원자로에 쉽게 적용을 할 수 있을 것으로 판단이 된다.

결론은 수명연장의 방법으로써 기존 발전소인 고리 원자력 1 호기의 경우에는 반사체 차폐 구조물을 설치하는 방법이 현재로써는 가장 타당함을 알 수 있었다. 아울러, 신형로의 설계에서는 반사체 차폐 구조물의 설치는 물론이고 저누설 장전모형을 선택하여 중성자속의 감소방안을 고려하는 것이 가장 우수한 방법임을 확인 하였다.

현재까지는 기존 고리 1 호기 1주기의 제원만을 갖고 설계를 했기 때문에 한계가 많았고, 또한 반사체 차폐 구조물을 설치한 경우 2가지만을 고려했기 때문에 부족한 점이 많아서 보다 많은 경우에 대해서 연구를 해 볼 필요가 있다.

참고문헌

1. 김 종채, 김 명현, 이 은철 "산업용 가압경수로의 무봉산 운전 가능성 연구," 한국원자력학회, '96 춘계학술논문발표회 논문집, 한국원자력학회 (1996)
2. 김 동규, 김 명현, "압력용기에서의 중성자 조사량 감소를 위한 반사체 변경 설계안 해석", '97 춘계학술논문발표회 논문집, 한국원자력학회 (1997)
3. MCNP-4A," A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Manual," Los Alamos National Lab.,1993
4. 한국전력공사, "KORI 1, Final Safety Analysis Report, VOL III",
5. Malte Edenius et al.,"CASMO-3, A Fuel Assembly Burnup Program Users' Manual," STUDESVIK/NFA-89/3,1991
6. John C. Wagner, "Monte Carlo Transport Calculations and Analysis for Reactor Pressure Vessel Neutron Fluence", The Penn State Univ,1995

표 1. 압력용기에서의 중성자속 및 기존설계안과의 감소율

	기존노심	반사체변경안	대체 핵연료 집합체 상정	
			상정 모형 - A	상정 모형 - B
Flux	1.14E13	6.88E12	4.45E12	3.66E12
속중성자감소율	-	39.52 %	60.914 %	67.85 %
주기길이 변화율	-	+14%	-26%	-7.3%

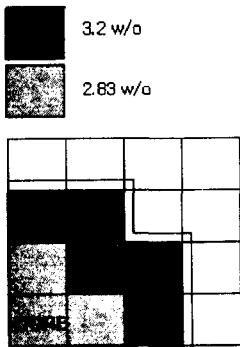


그림 1. 계산검증에 사용한 로심 모델

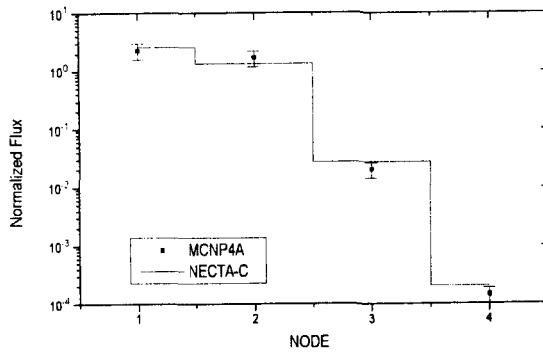


그림 2. NECTA-C와 MCNP-4/A의 검증계산 결과

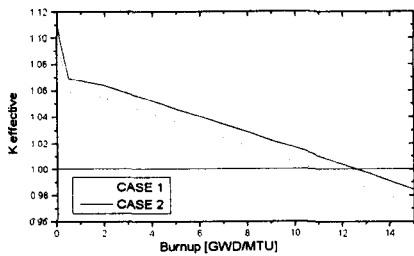


그림 3. 기존설계안(CASE1)과 반사체변경설계안(CASE2)의 임계도 비교

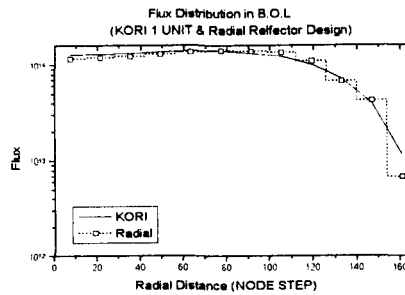


그림 4. 고리1호기와 반사체변경 설계안의 중성자속 분포 ($E > 0.821\text{MeV}$)

C	기존설계안 반사체변경 %ERROR						0.767 0.902 14.995
D				1.110 1.136 2.246	1.049 1.125 6.756	0.609 0.641 5.022	
E			1.135 1.091 -4.052	1.189 1.172 -1.425	1.048 1.071 2.102	0.803 0.859 6.563	
F		1.093 1.016 -7.621	1.103 1.041 -5.966	1.130 1.091 -3.603	1.151 1.144 -0.656	1.089 1.118 2.576	0.652 0.645 -1.038
G	1.093 1.005 -8.810	1.015 0.937 -8.290	1.096 1.028 -6.636	1.115 1.069 -4.332	1.126 1.107 -1.762	1.050 1.061 1.055	0.824 0.838 1.647
	7	8	9	10	11	12	13

그림 5. 기존설계안과 반사체변경 설계안의 상대출력분포도
B.O.L, No Xenon, Boron 1270 ppm
반사체영역에서 Color Set구성, D.F.는 NECTA로 계산

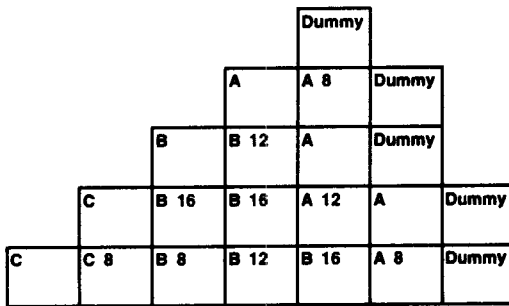


그림 6. 장전 모형 - A

- A* 농축도 3.2w/o
- B* 농축도 2.83 w/o
- C* 농축도 2.1w/o
- Dummy 농축도 0.711 w/o

주: *표 B.P. rod 개수

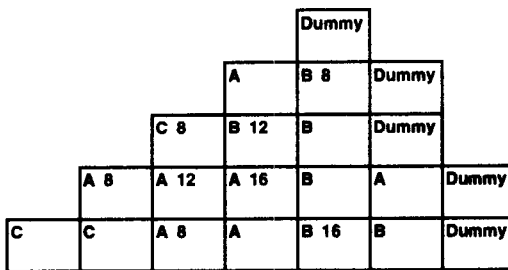


그림 7. 장전 모형 - B

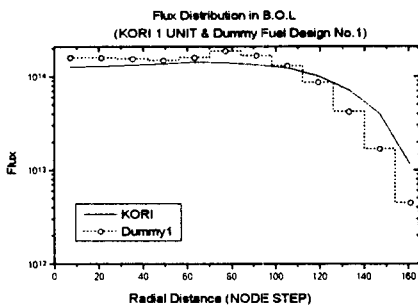


그림 8. 고리 1 호기와 제 1 설계안과의 속중성자 속 비교

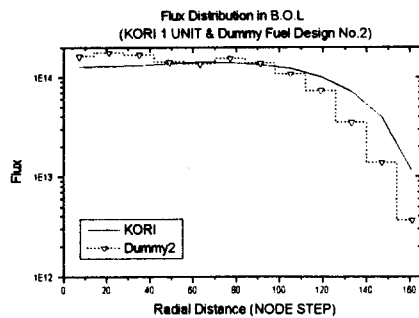


그림 9. 기존 설계안과 제 2 설계안과의 속중성자속 분포