

압력용기에서의 중성자 조사량 감소를 위한 반사체 변경 설계안 해석

김 동규, 김 명현

경희대학교

요 약

원자로 압력용기의 수명연장을 위해 중성자속 조사량을 감소시키려면 여러 가지 방법이 있고, 각 방법의 효율성을 비교 검토하기 위해서는 새로운 노심 해석 방법이 필요하였다. 본 연구에서는 고리 원자력 1 호기 반사체영역에 Radial Reflector를 삽입한 경우에 대해 노달코드를 이용하여 압력용기 표면의 중성자속 분포를 계산하는 방법론을 개발하고, Radial Reflector 설치의 효과를 검토하였다.

1. 서론

원자력발전소가 점차 폐로 시점에 다가옴에 따라 수명연장의 필요가 절실하다. 원자력발전소의 수명은 원자로 압력용기와 밀접한 관련이 있다. 압력용기는 원자력발전소의 수명동안 교체가 불가능하므로 압력용기의 수명이 곧 발전소의 수명이라고 볼 수 있다. 발전소의 수명연장을 위해서는 압력용기의 수명을 연장해야 한다. 그러기 위해서는 압력용기의 건전성을 유지시켜야 한다. 이 건전성은 중성자의 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 장전모델을 변경하는 방법, 로심외각에 Dummy Fuel Assembly를 설치하는 방법, 저출력 운전 방법 등 여러 가지가 있다. 이 중에서 가장 중성자 조사량을 감소시킬 수 있는 방법을 찾기 위해 많은 경우에 대한 계산을 해야 한다. 중성자 조사량은 중성자속과 시간의 함수이므로, 중성자속 계산을 통해서 조사량을 계산할 수 있다. 중성자속을 계산하는 MCNP-4A⁽¹⁾코드는 비교적 정확한 중성자속을 계산할 수 있다. 그러나, 중성자속의 감소량만을 계산하기 위해서 MCNP-4A 코드를 사용한다는 것은 계산상 매우 비효율적인데다가, 몬테카를로 방법 자체는 연소이력에 따른 계산을 할 수 없으므로, 핵특성 해석에는 부적합하다. 그래서, 기존의 노심해석코드를 이용하여 중성자속의 감소량을 계산하는 방법을 개발하였다.

2. 계산을 위한 모델 및 가정

본 연구에서 중성자속의 감소를 위한 방법으로 선정된 기본 모델은 반사체영역에 Radial Reflector를 설치하는 방법으로 하였다. 반사체의 구체적인 모델은 그림 1과 그림2와 같다. 그림 1은 비균질 로심에서 핵연료집합체 외부의 반사체영역 격자이다. 그림 2는 비균질 로심에서 로심 외각의 구석진 부분이다. 검은색 영역은 Baffle이고, 오른쪽에 위치한 구조물은 Radial Reflector이다. Radial Reflector는 스테인레스강 304 봉으로 되어 있으며, 크기는 핵연료 봉과 같도록 하였다. 봉과 봉사이는 서로 붙도록 배열을 하였다. 스테인레스강 304는 구조재로써 많이 사용되고 있으며, 쉽게 구할 수 있기 때문에 이 재료를 선정하였다.

중성자속 감소량을 계산을 하기 위해 사용한 노심해석코드는 NECTA-C⁽²⁾코드를 이용하였다. 이 코드는 핵연료집합체뿐만 아니라 반사체영역도 격자로 구성한다. NECTA-C코드로 압력용기에서 중성자속을 계산하는데 있어 다음과 같은 몇 가지 가정을 하였다. 첫째는 로심외각에 존재하는 Barrel, Thermal Shield가 없다고 가정을 하였다. 원자로 압력용기내부에는 핵연료집합체, Baffle, Barrel, Thermal Shield등의 구조물들이 들어있다. 그 중에서 Barrel과 Thermal Shield는 중성자의 조사량에 큰 영향이 없을 뿐만 아니라, 본 연구의 목적이 중성자 감소량의 상대적인 차이를 보고자 하는 것이기 때문에 계산에서 이 구조물은 무시하였다. 그래서, 노심 외각에는 Baffle과 물로만 되어 있는 원자로라고 가정을 하여 계산을 하였다. 둘째는 압력용기가 위치한 노드의 평균 중성자속을 압력용기의 중성자속으로 가정하였다. 노달코드에서는 원통으로 된 압력용기를 직접 모사할 수 없으므로, 로심의 중앙에서부터 압력용기가 위치한 부분의 격자에서 구해진 중성자속을 압력용기에서의 중성자속이라고 가정하였다.

3. 계산방법

NECTA-C코드를 위한 균정수는 CASMO-3를 통해서 구한다. 그러나, CASMO-3는 로심외각에 비균질구조가 있는 경우 균질화 균정수 계산을 할 수 없다. 이 코드는 핵연료집합체간의 Color Set에서는 균정수를 생산 할 수 있으나, Color Set 계산시에 반사체영역을 고려하지 못한다. 또한, CASMO-3는 불연속인자의 계산시에 집합체의 경계조건을 전반사조건으로 두고 계산하므로 로심 외각의 불연속인자 계산에 대해서는 부적합하여 CASMO-3코드가 아닌 다른 코드를 이용하게 되었다. 본 연구에서 로심외각부분에 대한 Color Set의 계산 및 불연속인자는 MCNP-4A를 이용하였다. 이렇게 얻어진 균정수자료와 불연속인자를 NECTA-C코드에 적용하여 계산을 하면 중성자속의 계산은 비교적 정확해진다. 기존 설계안(고리 원자력 1호기의 계산)과 반사체 변경 설계안에서 균질화된 반사체영역에서 균질화 균정수의 자료는 표 1과 같다. 표 1에서 보면 반사체 변경 설계안은 기존 설계안에 비해서 흡수단면적은 증가하였으나, 확산계수의 감소, 산란단면적이 감소되었음을 알 수 있다. 여기서 균질화된 반사체격자는 Baffle과 스테인레스 반사체영역이 합쳐진 균질화된 격자를 말한다. 그림 3은 핵연료집합체와 반사체격자로 구성된 Color Set계산 모델이다.

그림 3에서 회색부분은 Baffle이고 Baffle의 오른쪽과 아래쪽은 반사체, 좌측은 핵연료집합체이다. 균질화된 반사체격자에서 핵연료집합체방향에 대한 불연속인자는 표 1과 같다.

표 1. 균질화된 반사체영역에서 로심방향에 대한 불연속인자의 값

에너지 군 \ 설계안	기존설계안 (물)	반사체변경설계안
1 군	1.61685	0.67246
2 군	0.38949	0.72505

표 2. 기존설계안과 반사체변경설계안에 대한 균질화 균정수 자료

설계안 \ 균질화 단면적	D ₁	D ₂	Σ_{a1}	Σ_{a2}	$\Sigma_{s1 \rightarrow 2}$
기존설계안	1.21615	0.27031	0.00257	0.04150	0.02341
반사체 변경 설계안	0.87150	0.30793	0.00434	0.10737	0.00710

4. 중성자속 분포의 계산

4.1 기존 설계안에서 중성자속 분포 검증계산

본 계산체계의 정확성을 검증해보기 위해 DORT⁽³⁾의 계산결과와 비교하였다. DORT코드는 2차원 계산이므로, NECTA-C코드를 2차원으로 모사할 수 있도록 기존 설계안을 1/8 높이로 구성하고, 세로방향으로 1개의 격자로 구성하여 계산을 하였다. 검증을 하기 위해 중성자의 에너지는 전 중성자(Total Neutron)에너지영역에 대해서 계산을 하였다. NECTA-C코드는 격자단위의 중성자속을 계산하므로, 45° 에서의 중성자속의 분포를 이용하였다. 반면, DORT코드는 실제 측정자료가 있어야 하는데, 13, 23, 33도에 감시시편이 있으므로, 이 각도에서의 중성자속 분포만 알 수 있다.⁽³⁾ 이 중에서 33도에서의 횡방향분포가 45도와 가장 비슷한 구조를 갖기 때문에 이 자료를 토대로 하여 중성자속 분포를 비교하였다. 33도와 45도에서는 횡방향으로 핵연료집합체의 길이가 같으며, 반사체영역의 크기도 같다. 계산 자료를 비교해보면, NECTA-C코드가 DORT코드에 비해서 노심 내부에서는 비교적 높은 중성자속 분포를 보이지만, 노심 외각에서는 감소하는 경향을 보였다. 그림 4는 NECTA-C 계산과 DORT계산 자료를 비교한 그래프이다. NECTA-C가 노심 내부에서는 비교적 높은 중성자속을 가졌고, 중성자속이 노심 중앙에서 외부로 나갈수록 증가하다가 떨어지는 경향을 나타낸다. 또한, 노심 외각에서는 오히려 더 낮은 중성자속 분포를 보였다. 이 계산은 NECTA-C에 불연속인자를 적용하지 않은 경우이다. 정확도를 높여주기 위해 불연속인자를 노심 외각에 적용하여 계산을 하면 DORT계산 자료와 상당히 근접함을 알 수 있다. 그림 5는 NECTA-C코드에 불연속인자를 적용하여 계산하였을 때 참고자료인 DORT와 비교한 그래프이다. NECTA-C의 계산결과는 노심 내부에서는 비교적 높은 중성자속을 보였지만, 불연속인자를 사용하지 않았을 경우에 비해서 안정적인 값을 보였다. 또한, 반사체영역에서는 DORT계산 자료와 비슷해지는 경향을 보였다. DORT코드가 2차원 코드인데다가, 각이 33도인 부분에서의 중성자속분포를 고려했기 때문에 NECTA-C코드에서 계산한 중성자속과 정확한 비교는 할 수 없으

나, 중성자속의 분포는 큰 차이가 없을 것이다. NECTA-C계산체계에서 불연속인자를 적용하여 계산을 하였을 경우 반사체영역에서는 DORT계산 자료와 중성자속이 어느 정도 일치하므로, 반사체설계 변경에 의한 중성자속의 감소량 계산에는 적합하다고 판단이 된다.

4.2 반사체 변경 설계 로심에서의 중성자속 분포

NECTA-C계산체계는 DORT계산자료와 비교해 볼 때 압력용기에서 중성자 조사량의 감소연구에는 적합하다고 판단이 된다. DORT와 검증계산을 위한 기존의 설계안 계산은 전 에너지 중성자속으로 계산하였다. 하지만, 실제로는 속중성자의 영향을 고려해야 하므로, 기존 고리 1호기 설계안과 반사체 변경 설계안의 계산은 2군 에너지계산 체계에서 속중성자(0.625eV이상)에 대해서만 비교하였다. 반사체 변경 설계안은 앞서 제시한 격자모델인 그림 1과 그림2에 나타나있다. 노심해석코드를 사용하기 위해 설정한 횡방향 격자의 크기는 핵연료집합체간의 간격의 반의 크기인 9.90981Cm로 설정하였다. 반사체 변경 설계안을 적용한 부위는 로심외각을 둘러싸고 있는 격자에 대해서만 적용을 하였다. 그림 6에 반사체변경 설계안의 격자가 이용된 부분을 나타내었다. 회색 부분이 반사체변경 설계안을 적용한 격자이다. 대각선은 중성자속 분포를 나타낸 곳이다. NECTA-C에서 기존설계안 및 반사체변경 설계안 계산시에 축방향으로는 로심전체인 144inch에 대해서 모사하여 26개의 격자로 나누었다. 이 격자 중에서 주기초에 최대의 중성자속을 나타내는 곳인 72 inch 높이에서 중성자속 분포를 나타내었다. 로심외각에 대해서 계산의 정확도를 높여주는 불연속인자를 적용하여 계산을 해 본 결과 압력용기부근의 격자에서 중성자속은 기존의 고리 1호기 계산결과에 비해 11% 감소하였다. 그림 7은 기존의 설계안과 반사체변경 설계안의 비교계산이다. 노심내부에서의 중성자속의 분포는 큰 차이를 보이지 않지만, 기존설계안보다 반사체변경 설계안의 계산결과가 중성자속이 약간 높았다. 그러나, 로심외각의 경우에는 반사체변경 설계안의 계산결과가 감소하는 결과를 보였다.

5. 결론 및 향후과제

노심해석코드가 기존설계안에서 로심외각 중성자속 계산은 비교적 정확하여 중성자 조사량 감소 연구에는 적합하다. 그래서, 노심해석코드를 이용해서 중성자 조사량을 감소시키기 위해 반사체를 변경하는 설계를 적용하였다. 노심해석코드인 NECTA-C계산체계를 이용하여 반사체변경 설계안을 적용하면 기존설계안과 비교하여 중성자조사량의 감소율은 11%를 보였다. 그러나, 반사체변경 설계안을 적용한 계산결과에 대한 검증은 하지 못했다. 이 검증문제는 MCNP-4A를 이용하여 계산을 해보고, 반사체영역에 Radial Reflector의 설치에 따른 중성자속 계산과 중성자속의 감소량이 일치한다면, 노심해석코드를 통한 중성자조사량의 계산체계는 확립되었다고 판단이 된다. 또한, 수명연장을 위한 중성자 조사량 감소방안을 비교해 볼 때 압력용기의 수명에 영향을 미치는 중성자 에너지는 1MeV이상이다. 이 계산체계는 2 군 에너지그룹이므로 중성자에너지에 대한 충분한 고려를 하지 못하고 있다. 이를 고려하기 위해서 4군 에너지그룹체계에 대해서 적용을 할 예정이다.

참고문헌

1. MCNP-4A, "A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Manual,"
Los Alamos National Lab.,1993
2. "Nodal Expansion Core Transient Analysis - Cartesian",
3. 기초전력공학공동연구소, "몬테칼로 모사를 이용한 원자로 압력용기에 대한 중
성자 조사량 계산", 한양대학교 김 종경,1996
4. 한국전력공사, "KORI 1, FINAL SAFETY ANALYSIS REPORT, VOL III",
5. "CASMO-3, A Fuel Assembly Burnup Program Users' Manual,"
STUDSVIK/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
7. 趙南振, "原子爐物理 特講", 현진사,1993
8. 신 영화, "핵재료공학", 한국원자력학회, 현진사., 1989

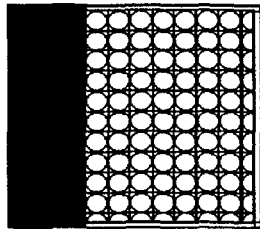


그림 1. 반사체영역에 스테인레스강
봉을 삽입한 격자 모델

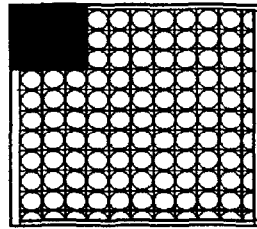


그림 2. 반사체영역에 스테인레스강
봉을 삽입한 격자 모델

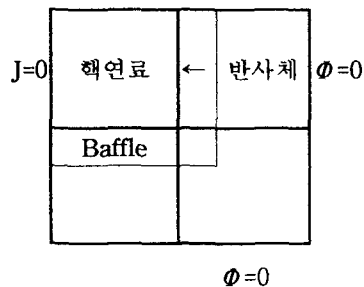


그림 3. 균질화된 반사체영역.

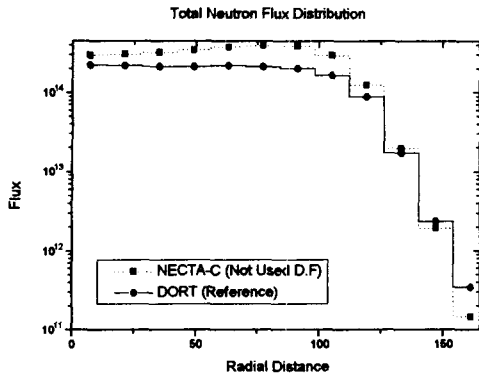


그림 4. NECTA-C 계산결과와 DORT계산결과와의 중성자속 분포 전 에너지 중성자 계산
(NECTA-C코드에 불연속인자를 사용하지 않음)

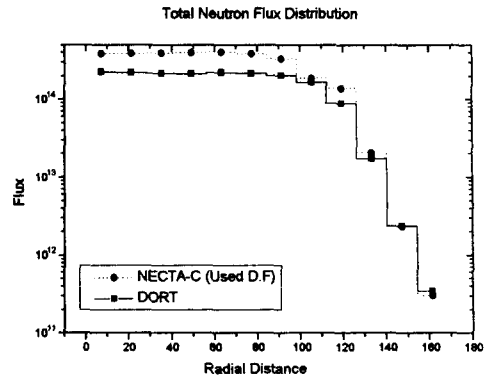


그림 5. NECTA-C 계산결과와 DORT계산결과와의 중성자속 분포 전 에너지 중성자 영역
(NECTA-C에 불연속인자를 적용하여 계산)

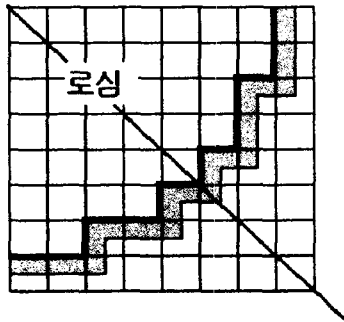


그림 6. 반사체 설계 변경안 격자를 적용한 부분 (회색부분), 대각선은 중성자속을 분포를 나타낸 곳

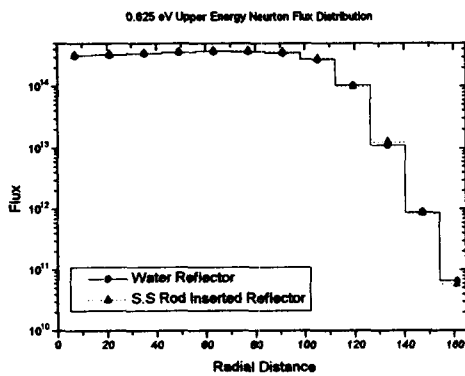


그림 7. 기존 설계안과 반사체 변경 설계안에 대한 중성자속 비교