

Evaluation of Neutron Flux Distributions of SMART-P IST Region for the Design of Ex-Core Detector

Bon-Seung Koo · Kyo-Youn Kim · Chung-Chan Lee ·
Sung-Quun Zee

Korea Atomic Energy Research Institute

SMART 연구로 노외계측기 설계를 위한 IST 영역의 중성 자속 분포 평가

구본승 · 김교윤 · 이정찬 · 지성균

한국원자력연구소, 대전 유성구 덕진동 150, 306-600

(2004년 11월 12일 접수, 2005년 5월 10일 채택)

Abstract - The evaluation of neutron flux distribution was performed for the ex-core detector design of SMART-P. DORT and MCNP code were used for the calculation of energy-dependent neutron flux distribution at 100% full power condition. Two code results show that maximum thermal flux appears at the 1st water region in IST region and agree within 10% difference. In addition, another evaluation was performed code with assumptions that core was composed of fission source and control rod without fuel assemblies. These assumptions make neutron count rate to be minimized. As a results, maximum thermal flux showed $6.99 \times 10^{-2} (\text{n/cm}^2\text{-sec})$, when the strength of initial fission source was assumed as $1.0 \times 10^8 (\text{n/sec})$. The main reason of these results is due to the thermalization of fast neutrons in the water region and thermal flux is proportional to 80% of total neutron flux. Therefore, optimization of filler material of detector guide tube, position of installation and axial length of detector segments is necessary for the design of ex-core detector to enhance the neutron count rate and above results could be used in ex-core detector design as a fluence requirement.

Key words : SMART-P, Ex-core detector, IST(Internal Shielding Tank), DORT/MCNP, Neutron Flux

요약 - SMART 연구로의 노외계측기 설계를 위하여 고온 전출력 조건과 중성자 계수율이 최소가 되는 조건에 대해서 중성자속 분포 평가를 수행하였다. 고온 전출력 조건에서 IST 영역의 에너지 구간별 중성자속 분포 계산은 DORT와 MCNP코드를 이용하였으며, 계산 결과 IST 내의 첫 번째 물 영역에서 최대의 열중성자속을 보였고 두 코드 결과는 대략 10% 이내에서 일치하는 것으로 나타났다. 그리고 중성자 계수율이 최소가 되는 조건에서 노외계측기 설치 영역에서의 중성자속을 계산한 결과, 선원의 세기가 $1.0 \times 10^8 (\text{n/sec})$ 이라고 가정할 경우 최대 열중성자속의 크기는 $6.99 \times 10^{-2} (\text{n/cm}^2\text{-sec})$ 로 전체 중성자속의 80% 이상을 차지하는 것으로 나타났는데 이는 IST 철 구조물을 통과한 속중성자가 감속능이 큰 물 영역에서 에너지를 잃고 열중성자로 변화했기 때문이다. 그러므로 노외계측기 설계시 계측기를 둘러싸는 계측기 안내관 충전물질, 설치위치 그리고 각 계측기 Segment들의 길이 등을 최적화하여 중성자 계수율을 증가시키는 방안을 모색할 필요가 있겠으며, 이러한 중성자속 평가 결과는 노외계측기가 IST 영역에 설치될 경우 노외계측기 선속 요건으로 이용될 수 있다.

중심어 : SMART 연구로, 노외계측기, 내부차폐탱크, DORT/MCNP, 중성자속

서 론

현재 한국원자력연구소에서 개발중인 SMART 연구로는 65.5MWt 열출력의 일체형원자로로 육방향 배열 구조와 무봉산 운전, 그리고 원자로압력용기 (Reactor Pressure Vessel) 외부 영역에 내부차폐탱크 (Internal Shielding Tank, IST)를 설치하여 방사선 차폐 기능을 강화하는 등의 특징을 가진다. 또한 선원영역부터 출력영역까지 중성자속 출력신호를 제공하는 노외핵계측계통이 SMART 연구로에 적합하도록 개발중에 있으며 계측기는 원자로압력용기 외부 영역에 설치된다. 노외계측기 개발시 우선적으로 고려할 사항으로는 계측기가 설치되는 위치에서의 중성자속의 크기이다. 그래서 본 연구에서는 100% 출력 운전 조건에서 노외계측기 설치가 예상되는 IST 영역의 에너지 구간별 중성자속 분포를 DORT와 MCNP 전산코드를 이용하여 평가하였으며 또한 중성자 계수율이 최소가 되도록 노심 조건을 가정하고 MCNP 코드를 이용하여 중성자속 분포를 평가하였다. 각각의 결과는 노외계측기가 IST 영역에 설치될 경우 노외계측기 선속 요건으로 이용된다.

본 론

1. IST 영역의 중성자속 분포 평가

전산코드

중성자속 평가에 사용된 DORT[1] 코드는 2차원 각분할법 수송코드로 방사선 차폐에 주로 사용되며 노심 선원향 자료와 GIP[1]에 의한 거시 핵단면적 자료를 필요로 한다. GIP 계산에는 중성자 47군과 감마 20군으로 구성된 67군의 BUGLE-96[2]을 사용하였다. 그리고 DORT 계산에서 P_5 차원 산란 및 S_8 차원 각분할 방법을 사용하였는데, S_8 차원 각분할 방법에 사용되는 Quadrature Set은 참고문헌3으로부터 취하였다.

MCNP 계산에서는 핵단면적 자료로 ENDF/B-VI[4]의 600K/300K 라이브러리를 사용하였으며 입력문의 TMP(Free-Gas Thermal Temperature) 카드를 이용하여 각 영역별 온도분포 변화를 보정하였다. 그리고 냉각재로 사용되는 물의 밀도를 위치에 따라 변화시켰다. 즉 노심영역은 노심 평균온도에서의 값을, 노심원통(Barrel)부터 원자로압력용기 사이는 노심 입구온도에서의 값을, 그리

고 IST 내부는 상온에서의 값을 사용하였다.

SMART 연구로의 IST는 원자로압력용기 외벽과 일정한 공간을 두어 원자로압력용기로부터의 급속한 열전달을 방지하고 IST 내부에 여러겹의 원통형 차폐체를 동심원으로 배치하고 냉각수를 채워 노심에서 방출되는 방사선을 차폐한다. 그리고 냉각수는 기기냉각계통을 이용하여 항상 일정한 온도와 압력을 유지하도록 설계된다.

모사 범위 및 해석 방법

그림1은 DORT 및 MCNP 모사에 사용된 SMART 연구로의 구조로, DORT 계산 모델은 축 방향으로 원자로압력용기 하단($z=-116.5\text{cm}$)으로부터 노심 부분을 거쳐 노심 수직해더 상부($z=78.3\text{cm}$)까지 포함한다. 모델링은 반경 방향과 축 방향에 대해 245×191 미세 격자 구간으로 나누어 R-Z 기하구조로 모사하였으며 Reflective 및 Void 경계조건을 적용하였다. IST 영역에서의 중성자속 분포는 계측기 안내관이 설치되지 않은 경우와 계측기 안내관이 설치된 경우의 2가지 경우로 나누어 평가하였다.

MCNP 계산 모델에서는 축 방향으로 유효노심을 포함하여 상·하 30cm의 반사체 영역과 반경 방향으로는 IST 영역까지 3차원으로 모사하였다. 그리고 계산 결과는 F2/F4 Tally 및 중성자속 정규화 상수를 이용하여 IST 영역까지 거리에 따른 중성자속을 계산하였다. 또한 IST 영역에서 높이에 따른 중성자속 분포를 예측하기 위하여 가상 Surface를 정의, 등 간격 별 중성자속을 동시에 계산할 수 있도록 하였다.

MCNP 결과값을 중성자속으로 전환하는데 사용되는 중성자속 정규화 상수는 특정 출력에 대해서 단위 시간당 총 중성자수로 표현된다. 즉 핵분열당 발생에너지를 기준으로 특정 출력이 발생하려면 몇 개의 중성자가 있어야 하는지를 역으

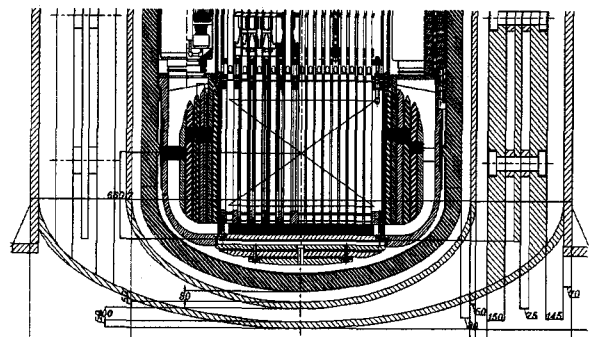


Fig. 1. View of reactor assembly and IST of SMART-P.

로 계산한 것이다. 핵분열당 200 MeV의 에너지가 발생하고 노심 열출력이 65.5MW일 경우 중성자속은 다음과 같이 계산된다.

- 1 fission = 200 MeV
 = $200 \times 10^6 (\text{eV}) \times 1.6 \times 10^{-19} (\text{J/eV})$
 = $3.20 \times 10^{-11} (\text{J})$
- Total number of fissions
 = $65.5 \times 10^6 (\text{J/sec}) / 3.20 \times 10^{-11} (\text{J/fission})$
 = $2.047 \times 10^{18} (\text{fission/sec})$
- Total number of neutrons (중성자속 정규화 상수)
 = $2.047 \times 10^{18} (\text{fissions/sec}) \times 2.5 (\text{n/fission})$
 $\approx 5.0 \times 10^{18} (\text{neutrons/sec})$

그리고 계산된 중성자속 정규화 상수에 MCNP 코드로 계산된 결과(Tally)를 곱하여 실제 중성자속을 예측한다. 아래에서 f4(또는 f2) Tally는 1 n/sec로 정규화된 값으로 노심 내부의 핵연료 영역에서 핵분열에 의해서 특정한 에너지를 가지고 발생된 단일 중성자가 특정 위치에서 단위면적당 보일 확률의 개념이며, 단위는 cm^{-2} 이다.

- Real Flux (neutrons/ cm^2 -sec)
 = f4(f2) tally $\times 5.0 \times 10^{18}$

노심 영역에 대한 선원항은 임계도 계산에 수반되는 핵분열 선원을 이용하였다

계산 결과

DORT 코드를 이용하여 SMART 연구로 IST 영역에서의 중성자속 분포를 계산하였으며 보수적인 해석을 위하여 30%의 불확실도를 적용, DORT 결과의 70%를 최종 중성자속으로 간주하였다.

고온 전출력 조건에서 계측기 안내관이 설치되지 않은 경우와 설치된 경우에 대한 중성자속 분포를 그림2와 그림3 그리고 표1에 각각 나타내었다. 그림2의 IST 내부 첫 번째 물 영역 (151.7cm ~ 161.7cm)에서의 중성자속 분포를 살펴보면, 0.625eV 이하의 에너지를 갖는 열중성자속의 경우, 물 영역이 시작되는 반경 152cm 부근은 $3.2 \times 10^8 (\text{n/cm}^2\text{-sec})$ 지만 155cm 근처에서는 $6.2 \times 10^8 (\text{n/cm}^2\text{-sec})$ 까지 증가했다가 IST 내부 철 구조물 영역인 반경 162cm 부근에선 다시 $1.0 \times 10^8 (\text{n/cm}^2\text{-sec})$ 로 감소한다. 계측기 안내관이 설치된 경우인 그림3에서도 유사한 결과를 보이

는데, 반경 152cm 부근은 $2.9 \times 10^8 (\text{n/cm}^2\text{-sec})$, 155cm 부근은 $4.1 \times 10^8 (\text{n/cm}^2\text{-sec})$ 를 보이고, 계측기 안내관이 설치되는 반경 162cm 부근에선 $9.2 \times 10^7 (\text{n/cm}^2\text{-sec})$ 로 다시 감소한다. 그리고 안내관 내부에서는 이 값을 유지하다가 안내관의 끝부분, 즉 2번째 철 구조물 영역인 반경 184cm부터 급격히 감소하는 것으로 나타났다.

그림4는 고온 전출력 조건에 대한 MCNP 결과로 전체적인 중성자속 분포 형태는 계측기 안내관이 설치되지 않은 경우의 DORT 결과(그림2 참조)와 유사한 것을 알 수 있다. IST 바깥 면을 기점으로 열중성자속은 급격하게 증가하여 물 영역에서 최대치를 보이고 다시 감소하게 되며 이때의 열중성자속은 속중성자속보다 큰 값을 보이는데 앞의 경우와 마찬가지로 IST 철 구조물을 통과한 속중성자가 감속능이 큰 물 영역에서 에너지를 잃고 열중성자로 변하였기 때문이다. 이런 현상은 IST 영역이 끝날 때까지 반복 진행되며 중성자속의 크기는 선형적으로 감소한다. 그림 5는 노심에서 원자로압력용기 내부까지의 온도가 상온이라는 가정하고 동일한 방법을 이용하여 계산한 결과로 고온 조건에 비해서 약 1 decade 정도 감소한 결과를 보이는데 이는 온도 감소로 인한 물 밀도 증가가 차폐 능력을 증가시켰기 때문이다. 표2는 고온 및 저온조건에 대한 영역별 중성자속 분포를 보여준다.

그림6은 IST 내부 첫 번째 물 영역에서 높이에 따른 중성자속 분포를 보여준다. 노심을 기준으로 중앙(segment 4) 영역에서 높고 반사체 영역으로 갈수록 상하 대칭적으로 작아짐을 볼 수 있다. 상부보다 하부(segment 1 방향)에서 좀더 큰 값을 보이는데 그 이유는 제어봉의 삽입 유무와 상하부 반사체를 구성하는 구조물의 영향 때문이다.

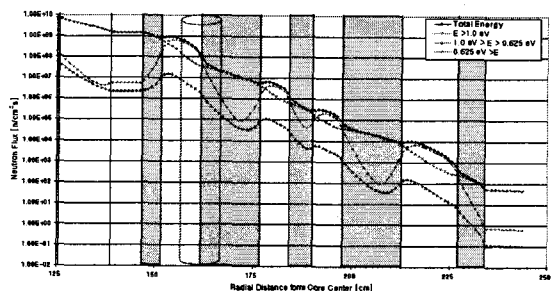


Fig. 2. Neutron flux distributions in SMART-P IST region in case of ex-core detector guide tube uninstalled (DORT) - Hot condition.

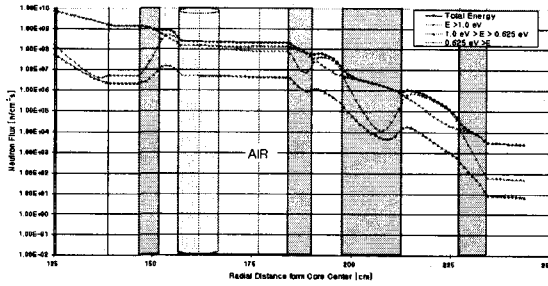


Fig. 3. Neutron flux distributions in SMART-P IST region in case of ex-core detector guide tube installed (DORT) - Hot condition.

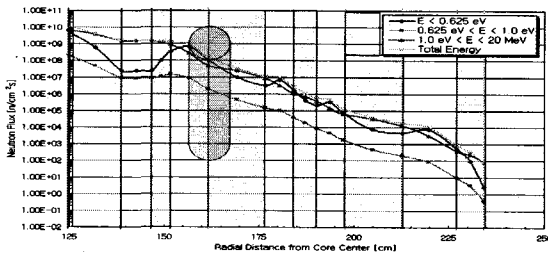


Fig. 4. Neutron flux distributions in SMART-P IST region in case of ex-core detector guide tube uninstalled (MCNP) - Hot condition.

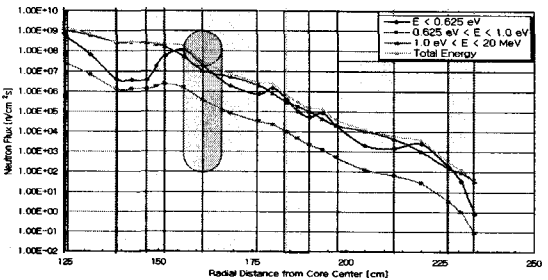


Fig. 5. Neutron flux distributions in SMART-P IST region in case of ex-core detector guide tube uninstalled (MCNP) - Cold condition.

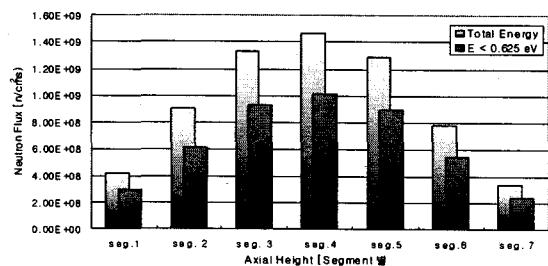


Fig. 6. Axial neutron flux distribution in IST 1st water region (MCNP) - Hot condition.

Table 1. Thermal flux distribution in IST region (DORT vs. MCNP).

		Distance from Center [cm]	152	155	162
DORT	Φ_{th}	w/o Det. GT	3.2×10^8	6.2×10^8	1.0×10^8
		w/ Det. GT	2.9×10^8	4.1×10^8	9.2×10^7
MCNP	Φ_{th}	w/o Det. GT	3.4×10^8	6.6×10^8	1.0×10^8

Unit: n/cm²-sec

Table 2. Neutron flux distribution in IST Region (MCNP) - Hot vs. Cold.

Temp. Condition	Energy (MeV)	In-vessel water	Vessel Steel	Air
Hot	6.25×10^{-7}	9.16×10^9	6.15×10^8	2.46×10^7
	1.00×10^{-6}	2.58×10^8	4.99×10^7	8.80×10^6
	20.0×10^1	7.52×10^9	3.67×10^9	1.56×10^9
	Total	1.69×10^{10}	4.33×10^9	1.59×10^9
Cold	6.25×10^{-7}	1.30×10^9	6.51×10^7	3.77×10^6
	1.00×10^{-6}	3.54×10^7	6.68×10^6	1.30×10^6
	20.0×10^1	1.20×10^9	5.96×10^8	2.64×10^8
	Total	2.53×10^9	6.67×10^8	2.69×10^8
Temp. Condition	Energy (MeV)	IST Region		
		Steel	Water	Steel
Hot	6.25×10^{-7}	1.03×10^8	6.63×10^8	9.88×10^6
	1.00×10^{-6}	1.01×10^7	8.41×10^6	4.88×10^5
	20.0×10^1	1.25×10^9	2.78×10^8	2.42×10^7
	Total	1.36×10^9	9.49×10^8	3.46×10^7
Cold	6.25×10^{-7}	1.72×10^7	1.15×10^8	1.80×10^6
	1.00×10^{-6}	1.60×10^6	1.45×10^6	8.58×10^4
	20.0×10^1	2.14×10^8	5.04×10^7	5.28×10^6
	Total	2.32×10^8	1.67×10^8	7.16×10^6

* Maximum SD: 1.4%

[Unit: n/cm²-sec]

2. 핵연료 미장전 조건에서의 중성자속 평가

SMART 연구로에서 사용하는 노외계측기는 핵분열 전리함(Fission Chamber)으로 튜브 내에 봉형태로 이루어진다. 측정범위는 선원영역부터 전출력 영역까지($10^{-8}\%$ ~ 200%)이며 상·중·하 3개의 Segment로 하나의 집합체를 이루고 총 6개의 집합체로 구성되며 원자로압력용기 외부 영역에 설치된다. 그래서 MCNP 전산코드를 이용하

여 노외계측기 설치가 예상되는 영역에서의 중성자속을 평가하였다.

노외계측기의 설치를 위한 중성자속 평가시 우선적으로 고려해야 할 사항으로는 설치될 위치에서 중성자 계수율이 노외계측기 성능면에서 요구하는 최소 계수율보다 커야 한다는 것이며, 이와 관련하여 Reg. Guide 1.68[5]에서는 최소 중성자 계수율에 대하여 기술하고 있다.

전산코드

MCNP 계산에서는 핵단면적 자료로 ENDF/B-VI[4]의 600K/300K 라이브러리를 사용하였으며 입력문의 TMP 카드를 이용하여 각 영역별 온도 분포 변화를 보정하였다. 그리고 앞의 IST 영역의 중성자속 분포 평가 계산과 동일하게 냉각재로 사용되는 물의 밀도를 위치에 따라 변화시켰다.

가정 및 해석 방법

중성자 계수율이 최소가 되도록 SMART 연구로 노심을 모사하고 노외계측기 설치 영역의 중성자속을 계산하였다. 중성자 계수율이 최소가 되도록 노심 조건을 다음과 같이 가정하였다.

- 노심은 핵연료집합체가 장전되지 않은 상태로,
- 상온의 물과 제어봉안내관으로만 구성되었으며
- 제어봉집합체(정지제어봉 및 조절제어봉)는 하부 12cm까지 삽입되었고,
- 특정 위치에 중성자 선원(Cf-252)만 존재한다.

그림 7은 MCNP 코드로 모사된 SMART 연구로의 선원 및 노외계측기 설치 위치를 보여준다. 앞의 경우와 마찬가지로 IST 영역과 상·하 반사체 영역까지 모사하였으며 노심 내부의 특정 위치에 중성자 선원이 존재할 때 노외계측기 설치 위치에서 중성자속 계산이 가능하도록 하였다.

노외계측기 위치를 원자로압력용기 외부 영역에 설치할 경우 가능한 위치는 그림과 같이 IST 내부 첫 번째 물 영역(10cm)과 철 구조물의 사이로 노외계측기 안내관의 내부직경 1 inch를 고려할 때 충분한 공간적 여유를 가진다.

중성자 선원으로는 자발붕괴 핵종인 Cf-252를 사용하였으며 SDEF(General Source Define Card) 카드를 이용하여 정의하였다. 그림 6과 같이 선원은 노심 중심에서 58.2cm 떨어진 위치에 반지름 0.1cm, 길이 10cm의 봉 형태로 정의하였다. 그리고 중성자 스펙트럼은 Watt Fission 스펙트럼으로 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$f(E) = C \exp(-E/a) \sinh(bE)^{1/2}$$

여기서, $a=1.025(\text{MeV})$, $b=2.926(\text{MeV}^{-1})$ 이며, 상수 a , b 는 Cf-252에 대한 값으로 각 핵종에 따라 다른 값을 갖는다.

NPS카드를 이용하여 초기 입자수를 조절하였으며 Cell Averaged Tally (F4:n) 및 Point Detector Tally (F5:n) 카드를 사용하여 중성자속을 계산하고 각각의 결과를 비교하였다. 계산 위치는 IST 내의 첫 번째 물 영역과 철 구조물 사이($x,y,z = (141.42, -81.65, 0.0)\text{cm}$, $r = 163.3\text{cm}$)며 Cell Averaged Flux 계산을 위하여 각 영역에 반경 5cm, 높이 20 cm의 봉(Cylinder) 형태의 Cell을 정의하였으며 Point Detector Flux에서는 반경 5cm 원으로 입사되는 중성자를 이용하여 중성자속을 계산하도록 하였다.

계산 결과

노외계측기 설치가 예상되는 위치에서의 중성자속 계산을 수행하였다. 중성자 계수율이 최소가

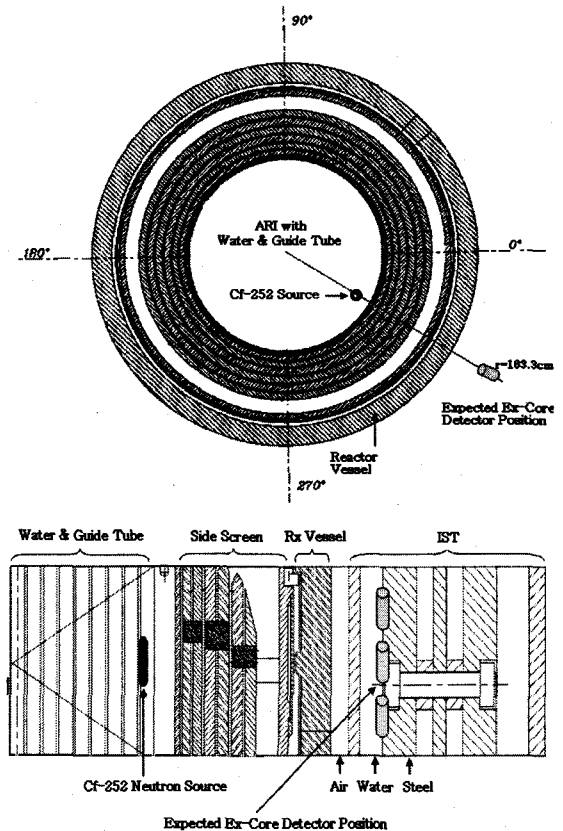


Fig. 7. Positions of fission source and expected ex-core detector assembly of SMART-P.

Table 3. Expected neutron flux at the ex-core detector position (Initial fission source assumption, $S_0 = 1.0 \times 10^8$ (n/sec)).

Tally Type	Energy (MeV)	Neutron Flux		
		Top	Middle	Bottom
Cell Avg. Flux	6.25×10^{-7}	5.41×10^{-2}	6.99×10^{-2}	5.42×10^{-2}
	1.00×10^{-6}	3.68×10^{-4}	4.62×10^{-4}	3.67×10^{-4}
	2.00×10^1	8.65×10^{-3}	1.09×10^{-2}	8.64×10^{-3}
	Total	6.30×10^{-2}	8.13×10^{-2}	6.32×10^{-2}
Point Det. Flux	6.25×10^{-7}	5.47×10^{-2}	7.02×10^{-2}	5.48×10^{-2}
	1.00×10^{-6}	3.83×10^{-4}	4.79×10^{-4}	3.86×10^{-4}
	2.00×10^1	8.76×10^{-3}	1.13×10^{-2}	8.76×10^{-3}
	total	6.39×10^{-2}	8.20×10^{-2}	6.40×10^{-2}

* Maximum SD: 2.1%

[Unit: n/cm^2 -sec.]

되도록 SMART 노심을 모사하고 에너지별 중성자속을 계산하였다. 계산결과를 표3에 정리하였는데 표 안의 결과는 노심 내부에 위치한 핵분열 선원의 세기를 1.0×10^8 (n/sec)라고 가정한 경우, 노외계측기 설치 영역에서 예상되는 중성자속을 의미한다. 상·중·하 영역중 가운데 영역에서 전 에너지 구간에 대한 중성자속은 8.13×10^{-2} (n/cm^2 -sec)와 8.20×10^{-2} (n/cm^2 -sec)로 두 Tally 모두 유사한 값을 보였다. 이 값은 1 n/sec로 정규화된 값으로 그 의미는 Watt Fission 스펙트럼에 따라 특정한 에너지를 가지는 단일 중성자가 그림6의 선원이 위치한 곳에서 방출될 경우 노외계측기 설치 위치에서 단위면적당 보일 확률과 동일하다. 에너지 측면에서 보면 열중성자가 전체의 80% 이상을 차지하고 중간 및 속중성자가 함께 존재함을 볼 수 있는데 이는 앞에서와 마찬가지로 노외계측기가 설치되는 물 영역에서 물이 감속제 역할을 하기 때문이다.

결론

SMART 연구로의 노외계측기 설계를 위한 중성자속 분포 평가를 고온 전출력 조건과 중성자 계수율이 최소가 되는 각각의 조건에 대해서 중성자속 분포 평가를 수행하였다.

고온 전출력 조건에서 IST 영역의 에너지 구간별 중성자속 분포는 계산은 DORT와 MCNP 코드를 이용하였으며, 계산결과 IST 내의 첫 번째 물 영역에서 최대의 열중성자속을 보였으며 이때의 열중성자속은 속중성자속보다 크게 나타났다.

비록 전산코드의 계산 불확실도, 모델 구성에 의한 bias 등은 평가되지 않았지만 두 코드간 결과는 대략 10% 이내에서 일치하는 것으로 나타나 30% 불확실도가 고려된 DORT 계산값은 충분히 보수적이라고 판단된다.

중성자 계수율이 최소가 되는 조건에서 노외계측기 설치 영역에서의 중성자속을 계산한 결과는 선원의 세기가 1.0×10^8 (n/sec)라고 가정한 경우, 최대 열중성자속의 크기는 6.99×10^{-2} (n/cm^2 -sec)로 전체 중성자속의 80% 이상을 차지하는 것으로 나타났는데 이는 IST 철 구조물을 통과한 속중성자가 감속능이 큰 물 영역에서 에너지를 잃고 열중성자로 변하였기 때문이다.

그러므로 노외계측기 설계시 계측기를 둘러싸게 될 계측기 안내관 충전물질, 설치위치 그리고 각 계측기 Segment들의 길이 등을 최적화하여 중성자 계수율을 증가시키는 방안을 모색할 필요가 있겠으며, 이러한 중성자속 평가 결과는 노외계측기가 IST 영역에 설치될 경우 노외계측기 선속 요건으로 이용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 일체형원자로 연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. RSICC Computer Code Collection-DOORS3.2, CCC-650, ORNL(1998)
2. J. E. White, D. T. Ingersoll, C. O. Slater and R. W. Rossin, "BUGLE-96: Coupled 47 Neutron, 20 Gamma-Ray Group Cross Section Library Derived from ENDF/B-VI for LWR Shielding and Vessel Dosimetry Application," DLC-185, ORNL(1996)
3. J.P. Jenal et al, "The Generation of a Computer Library for Discrete Ordinates Quadrature Sets," TM-6023, ORNL(1977)
4. "MCNP4C : Monte Carlo N-Particle Transport Code System," RSICC Code Collection, CCC-700, ORNL.
5. U.S. NRC, Initial Test Programs for Water-Cooled Nuclear Power Plants, Regulatory Guide 1.68(1978)