2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

SMART-P 압력용기에서의 방사선 선속을 이용한 측면 차폐통의 방사선 차폐 효과 분석

Analysis of Shielding Effects of Side Shield Screens Using Radiation Flux at the Reactor Pressure Vessel of the SMART-P

김교윤, 김하용, 이정찬, 장문희, 지성균

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

SMART-P는 정상 출력 운전 조건에서 65.5 MWt의 열에너지를 생산하는 소형 일체형 가압경수로이다. SMART-P의 개념 설계 단계에서 측면 차폐통의 켜가 8개에서 7개로 감소하는 대신에 차폐통 내부의 스크린 4개의 두께를 1cm씩 증가시키는 구조 변경이 고려되었다. 따라서, 측면 차폐통의 차폐 효과를 검증하기 위한 차폐 해석이 수행되었다. SMART-P 노심 주변 영역의 차폐 해석을 위해 R-Z 기하학적 모델에 대해 2차원 각분할법 수송 코드인 DORT를 이용하였다. 방사선 차폐 해석 결과에 의하면 측면 차폐통의 스크린 수가 8개에서 7개로 감소하더라도 방사선 차폐 효과는 오히려 향상되는 것으로 나타났다.

Abstract

The SMART-P is a small-sized advanced integral PWR that produces a thermal energy of 65.5 MWt under full power operating conditions. Under a conceptual design stage of SMART-P, it was considered to change the structure of side shield screens, which was to reduce from 8 screens to 7 screens instead of increasing the thickness of 4 screens by 1cm. Therefore, it was performed the shielding analysis to verify the shielding effect of side shield screens. The two-dimensional discrete ordinates transport code, DORT, was used to evaluate the shielding designs for the near-core region of the SMART-P for the R-Z geometry model. According to the results of radiation shielding analysis, it was shown that the radiation shielding effects by 7 screens was improved as compared with those by 8 screens.

1. 서 론

330MWt의 열출력을 갖는 일체형 원자로인 SMART[1]의 기본 설계가 완료된 상태에서 현재 65.5MWt의 열출력을 갖는 소형 일체형 원자로인 SMART-P가 개발 중이다. SMART-P의 개념

설계 단계에서의 두 가지 측면 차폐통의 모델이 고려되었다. 개념설계 단계에서 그림 1(A)와 같은 스크린이 8개인 측면 차폐통이 먼저 고려되었으나 방사선 외적인 양호한 구조적 환경을 위해 그림 1(B)와 같은 스크린 수가 7개인 측면 차폐통이 추가로 제안되었다. 대신에 내부 차폐통 안쪽의 스크린 4개는 두께가 4㎝에서 5㎝로 1㎝씩 증가하였다. 따라서, 최적의 SMART-P 설계를 위해 그림1(A)와 그림 1(B)와 같은 두 가지 구조에 대한 압력 용기에서의 방사선 차폐 해석이 필요하다.

본 논문의 방사선 차폐 해석에는 전통적으로 PWR의 방사선 차폐 해석의 설계용 전산 코드로 사용하고 있는 2차원 각분할법 수송 전산 코드인 DORT[2]를 이용하였다. 그림 1(A)와 그림 1(B)에 나타난 두 가지 모델에 대해 SMART-P의 노심 주변 영역과 압력 용기를 포함하는 영역을 R-Z 기하학적 구조로 모델링하고, DOTR 코드를 이용하여 중성자 및 감마선 선속을 평가하였다. 또한, 본 연구에서 수행한 압력용기에서의 중성자 및 감마 선속 분포는 SMART-P의 압력 용기 외부 공간에서의 방사선장 해석의 중요한 선원항으로 이용된다.

2. 평가 방법

65.5MWt 일체형 원자로인 SMART-P에 대한 전 출력에서의 압력용기 내면과 외면에서의 중성자 및 감마선 선속 분포를 평가하기 위해 군정수 생산 코드인 GIP[3] 및 2차원 각분할 수송방정식 코드인 DORT[2] 를 사용하였다.
DORT 계산에 필요한 군정수 단면적 자료는 DLC-185/BUGLE-96[4] 라이브러리로부터 GIP 코드를 이용하여 생산하였다. DLC-185/BUGLE-96 단면적 자료는 중성자 및 감마선 반응 단면적이 67군 축약되어 있는데, 에너지 군이 1.0×10^{-2} eV부터 1.492×10^{7} eV까지의 47군 중성자 단면적 과 1.0×10^{4} eV부터 1.0×10^{7} eV까지 20군 감마선 단면적을 포함하고 있다.

연소에 따른 반경 방향 출력분포는 3차원 노심계산 코드인 MASTER[5]를 이용한 평가 결과를 사용하였다. 표 1에 나타난 반경 및 축 방향 정규화된 출력 분포는 노심 영역의 68x40 격자 구조의 DORT 모델링에 적합하도록 cubic spline 내삽법에 의해 처리된 것이다.

DORT 계산에서는 고정 선원항(fixed source term)으로 이용되는 에너지 군별 핵분열 스펙트럼이 필요하다. 노심 평균 핵분열 밀도는

$$\begin{aligned}\text{노심 평균 핵분열 밀도} &= (\text{노심열출력}) \;/\; (\text{노심체적}) \\ &= 65.5[\text{MW}] \,/\, [\pi(67.90\ \text{cm})^2 \times (80\ \text{cm})] \\ &= \frac{65.5 \times 10^6[\text{W}] \times 3.1 \times 10^{10}[\text{fissions/W}\cdot\text{s}]}{1.16\text{x}10^6[\text{cm}^3]} \\ &= 1.75\text{x}10^{12}[\text{fissions/cm}^3\cdot\text{s}]\end{aligned}$$

으로, Watt 핵분열 에너지 스펙트럼[7]과 핵분열 당 발생하는 중성자수와 BUGLE-96 에너지 군을 이용하여 표 2와 같이 구하였다.

DORT코드를 사용하여 P_5 차원 산란(scattering) 및 S_8 차원 각분할(Angular Quadrature) 방법으로 2차원 R-Z 방향 계산을 수행하였다. S_8 차원 각분할 세트는 참고문헌 6으로부터 얻어진 값을 사용하였다.

3. 결과 및 토론

65.5MWt의 열출력을 생산하는 SMART-P의 2차원 R-Z 모델에 대한 DORT 계산을 수행하고 불확실도 30%를 고려하여 결과를 그림 2~ 그림 5에 나타내었다. 그림 2와 그림 3은 각각 압력용기 내면 및 외면의 노심 중앙 높이에서 축 방향 상단 부위에 대한 중성자 선속을 고속 중성자 에너지 군, 중간 중성자 에너지 군 및 열 중성자 에너지 군으로 구분하여 중성자 선속 분포를 나타낸 것이다. 그림 2에 의하면 7개의 스크린으로 되어있는 모델 B의 중성자 선속 분포가 전반적으로 8개의 스크린으로 되어있는 모델 A의 중성자 선속 분포보다 낮게 나타났다. 열 중성자 선속의 경우는 노심 중심 높이로부터 약 6 ㎝부터 26 ㎝까지의 중간 영역을 제외하고는 큰 차이를 나타내었다. 이는 모델 A는 측면 차폐통과 압력용기 사이의 구조가 단순한 데에 비해 모델 B는 압력 용기의 내부 돌출로 인한 것과 감속재인 물의 양의 증가로 인한 이유 때문에 하단과 상단 부위의 열 중성자 선속이 감소하는 결과를 가져온 것으로 보인다. 그림 3에 의하면, 모델 B의 압력 용기 외면에서의 고속 중성자 선속은 모델 A의 값과 유사한 것으로 나타났고, 열중성자 선속의 경우는 전체 영역에서 약 70% ~ 80% 감소한 것으로 나타났으며, 중간 중성자 선속의 경우는 약 20%~ 50%의 감소하는 효과를 나타내었다.

그림 4에는 모델 A와 모델 B의 압력용기 내면 및 외면에서의 전체 중성자 속 분포를 나타내었다. 전체적으로 모델 B의 40㎝ 높이 까지 영역에서의 중성자 선속은 모델 A에 비해 낮게 나타났다. 압력용기 내면 및 외면에서의 전체 중성자 선속은 최대 약 40% 정도까지 감소하였는데, 압력용기 내면의 노심 중앙 높이 17㎝인 위치에서 모델 B의 중성자 선속은 모델 A의 약 40% 정도인 $2.37x10^9$ n/㎠s으로 감소되었다. 압력용기 외면의 노심 중앙 높이 19㎝인 위치에서 모델 B의 중성자 선속은 모델 A의 약 40% 정도인 $2.17x10^8$ n/㎠s으로 감소되었다. 노심 중심에 높이로부터 멀어질수록 전체 중성자 선속은 거의 유사해진다. 그러나, 노심 높이 영역의 압력 용기 외부로의 중성자 선속이 영향을 주는 방사선장 해석의 선원 항으로서 모델 B가 모델 A에 비해 차폐 효과 면에서 좋은 결과를 유발할 것으로 판단된다.

그림 5에는 모델 A와 모델 B의 압력용기 내면 및 외면에서의 전체 감마선 선속 분포를 나타내었다. 압력용기 내면에서는 모델B의 감마 선속 분포가 모델 A의 감마 선속 분포와 유사한 모양을 나타내지 않았다. 이는 감마 선속이 주로 압력 용기의 철에서의 열중성자에 의한 (n,γ) 반응에 의해 2차 감마선으로 나타나는데, 그림 2에서 나타난 바와 같이 모델 B의 낮은 열중성자 선속에 영향을 받은 것이다.

본 논문의 수행과정에서 생산되는 48개의 S_8 quadrature set에 대한 각 선속 분포는 SMART-P 압력 용기 외부에서의 방사선 장 해석의 선원항으로 이용된다.

4. 결론

본 연구에서는 개념 설계 단계에서의 SMART-P 압력 용기 내부 구조물인 측면 차폐통의 방사선 차폐 효과를 2차원 각분할법 수송 코드인 DORT를 이용하여 분석하였다. 노심 중심으로부터 압력 용기 사이에 위치하는 측면 차폐통의 차폐 스크린이 8개인 경우와 7개인 경우에 대해 각각 방사선 차폐 해석을 수행하여 비교하였다. 방사선 차폐 해석 결과에 의하면 측면 차폐통의 내부에서 1개의 차폐 스크린이 감소되고 대신에 4개의 차폐 스크린 두께가 1㎝ 증가할 경우 압력 용기 내면과 외면에서의 차폐 효과는 오히려

향상된다는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 얻어지는 압력 용기 외면에서의 중성자 및 감마선 각선속 분포는 SMART-P의 원자로 압력 용기 외부에서의 방사선장 해석의 중요한 선원항으로 이용된다.

본 연구에서 각분할법을 이용하여 평가된 결과는 몬테 칼로 수송 코드인 MCNP에 의해 검증될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었다.

참 고 문 헌

1. Moon H. Chang, et al., "Advanced Design Features Adopted in SMART," Proceeding of International Seminar of Status and Prospects for Small and Medium Sized Reactors, May 27-31, Cairo, Egypt, (2001).
2. RSICC Computer Code Collection-DOORS3.2, CCC-650, ORNL, April, 1998.
3. W. A. Rhoades, "The GIP for preparation of group-organized cross-section libraries," ORNL, April 13, 1978.
4. J. E. White et al., "DLC-185/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, Oak Ridge National Laboratory, 1996.
5. 이창호 외, "MASTER 2.1 User's Manual," KAERI/UM-06/2000, September 2000.
6. J. P. Jenal et al, "The Generation of a Computer Library for Discrete Ordinates Quadrature Sets," ORNL TM-6023, October 1977.
7. J. F. Briesmeister,"MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code," Version 4C3, Ch.3 and App. H, LA-13709-M, LANL, March 2001.

표 1. 노심 반경 및 축 방향 정규화 출력 분포

Radial Power Distribution						Axial Power Distribution		
Mesh No.	Radial Distance [cm]	Normalized Power	Mesh No.	Radial Distance [cm]	Normalized Power	Mesh No.	Axial Distance [cm]	Normalized Power
1	0.5	0.9291	41	40.5	1.0437	1	0.5	1.2887
2	1.5	0.9301	42	41.5	1.0279	2	1.5	1.2800
3	2.5	0.9308	43	42.5	1.0449	3	2.5	1.2700
4	3.5	0.9311	44	43.5	1.0909	4	3.5	1.2587
5	4.5	0.9308	45	44.5	1.0555	5	4.5	1.2463
6	5.5	0.9298	46	45.5	1.0275	6	5.5	1.2325
7	6.5	0.9280	47	46.5	1.0252	7	6.5	1.2176
8	7.5	0.9252	48	47.5	1.0391	8	7.5	1.2014
9	8.5	0.9218	49	48.5	1.0470	9	8.5	1.1840
10	9.5	0.9182	50	49.5	1.0213	10	9.5	1.1654
11	10.5	0.9149	51	50.5	0.9829	11	10.5	1.1456
12	11.5	0.9123	52	51.5	0.9808	12	11.5	1.1247
13	12.5	0.9109	53	52.5	0.9934	13	12.5	1.1025
14	13.5	0.9106	54	53.5	1.0121	14	13.5	1.0792
15	14.5	0.9104	55	54.5	1.0299	15	14.5	1.0549
16	15.5	0.9103	56	55.5	1.0201	16	15.5	1.0295
17	16.5	0.9108	57	56.5	0.9729	17	16.5	1.0032
18	17.5	0.9125	58	57.5	1.0010	18	17.5	0.9760
19	18.5	0.9158	59	58.5	0.9661	19	18.5	0.9480
20	19.5	0.9209	60	59.5	0.9713	20	19.5	0.9192
21	20.5	0.9270	61	60.5	0.9784	21	20.5	0.8897
22	21.5	0.9327	62	61.5	0.9194	22	21.5	0.8597
23	22.5	0.9412	63	62.5	0.8763	23	22.5	0.8296
24	23.5	0.9611	64	63.5	0.8654	24	23.5	0.7998
25	24.5	1.0011	65	64.5	0.8543	25	24.5	0.7705
26	25.5	1.0539	66	65.5	0.8271	26	25.5	0.7422
27	26.5	1.0745	67	66.5	0.7678	27	26.5	0.7152
28	27.5	1.0699	68	67.5	0.6603	28	27.5	0.6898
29	28.5	1.0615				29	28.5	0.6659
30	29.5	1.0625				30	29.5	0.6431
31	30.5	1.0694				31	30.5	0.6207
32	31.5	1.0756				32	31.5	0.5983
33	32.5	1.0688				33	32.5	0.5752
34	33.5	1.0413				34	33.5	0.5510
35	34.5	1.0183				35	34.5	0.5258
36	35.5	1.0330				36	35.5	0.5000
37	36.5	1.0886				37	36.5	0.4737
38	37.5	1.0815				38	37.5	0.4471
39	38.5	1.0638				39	38.5	0.4205
40	39.5	1.0611				40	39.5	0.3942

표 2. DORT 계산에 이용된 중성자 선원 스펙트럼

Energy Group	Upper Energy [eV]	Fission Spectrum [n/cm^{3}s]	Energy Group	Upper Energy [eV]	Fission Spectrum [n/cm^{3}s]
1	1.7332E+7	1.4394e+08	25	2.9721E+5	1.5197e+11
2	1.4191E+7	6.5254e+08	26	1.8316E+5	7.9982e+10
3	1.2214E+7	4.1461e+09	27	1.1109E+5	3.9266e+10
4	1.0000E+7	1.0177e+10	28	6.7379E+4	1.8985e+10
5	8.6071E+6	2.3680e+10	29	4.0868E+4	5.3792e+09
6	7.4082E+6	6.9792e+10	30	3.1828E+4	3.0795e+09
7	6.0653E+6	1.3711e+11	31	2.6058E+4	9.3841e+08
8	4.9659E+6	3.6852e+11	32	2.4176E+4	1.1000e+09
9	3.6788E+6	3.5139e+11	33	2.1875E+4	2.9324e+09
10	3.0119E+6	2.0023e+11	34	1.5034E+4	2.6336e+09
11	2.7253E+6	2.1170e+11	35	7.1071E+3	8.6031e+08
12	2.4660E+6	9.0721e+10	36	3.3546E+3	2.7935e+08
13	2.3653E+6	1.8236e+10	37	1.5846E+3	1.1380e+08
14	2.3457E+6	1.1029e+11	38	4.5400E+2	1.3928e+07
15	2.2313E+6	3.3418e+11	39	2.1445E+2	4.5221e+06
16	1.9205E+6	3.2981e+11	40	1.0130E+2	1.6889e+06
17	1.6530E+6	4.1597e+11	41	3.7266E+1	4.1071e+05
18	1.3534E+6	5.4334e+11	42	1.0677E+1	5.0242e+04
19	1.0026E+6	2.9895e+11	43	5.0435E+0	1.8764e+04
20	8.2085E+5	1.3032e+11	44	1.8554E+0	3.6396e+03
21	7.4274E+5	2.2457e+11	45	8.7643E-1	1.1816e+03
22	6.0810E+5	1.8094e+11	46	4.1399E-1	5.0058e+02
23	4.9787E+5	2.0322e+11	47	1.0000E-1	6.7432e+01
24	3.6883E+5	1.0590e+11		1.0000E-5*	

* Lower limit of 47 Group

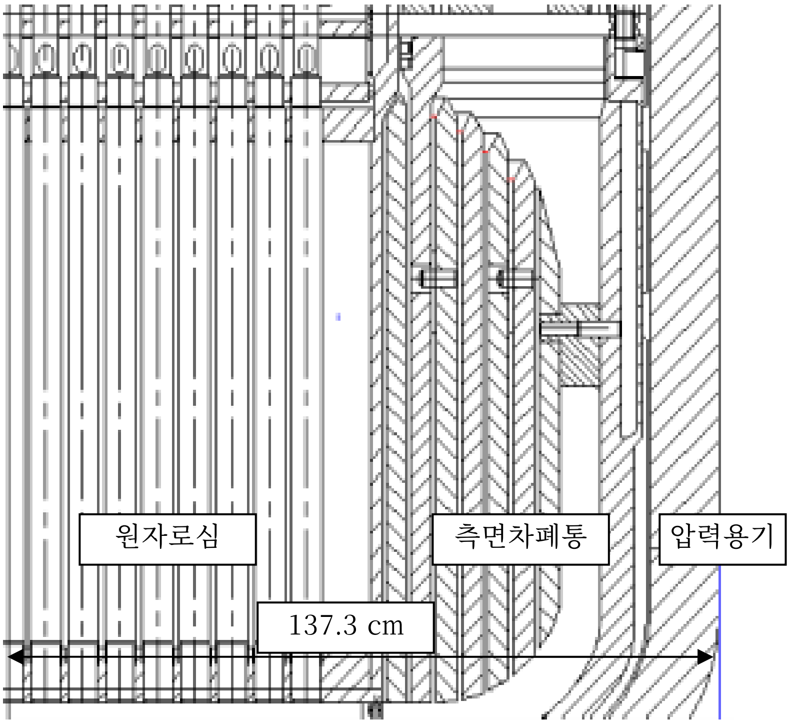

그림 1(A). 8겹의 SMART-P 측면 차폐통(모델 A).

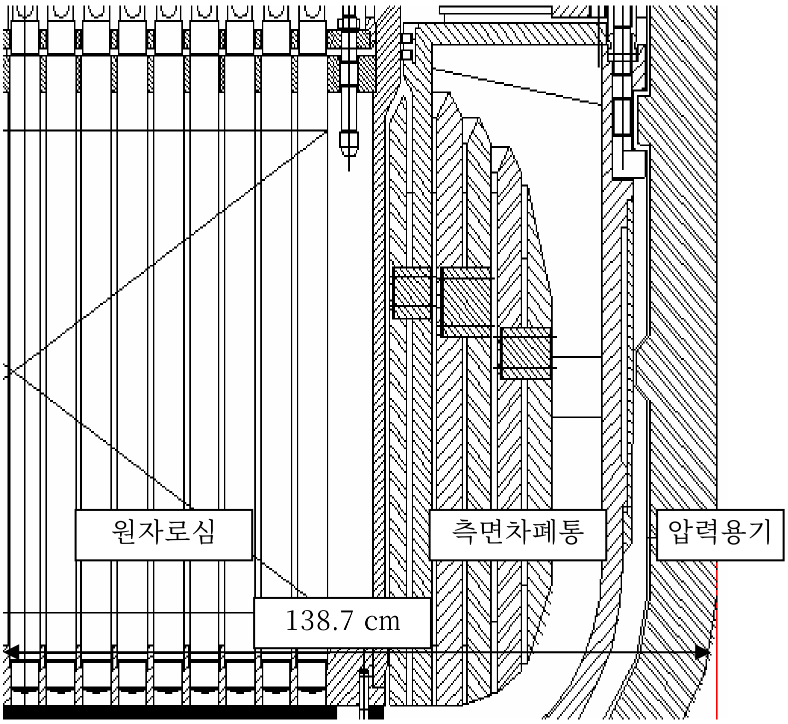

그림 1(B). 7겹의 SMART-P 측면 차폐통(모델 B).

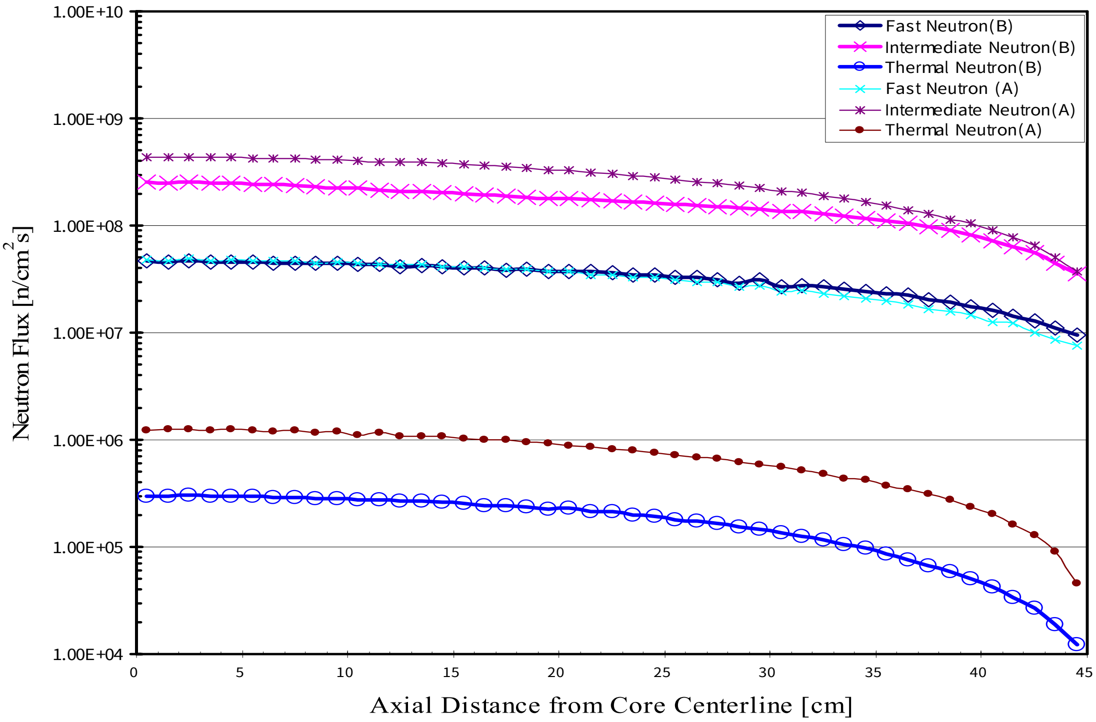

그림 2. SMART-P 압력용기 외면에서의 에너지 그룹별 중성자 선속

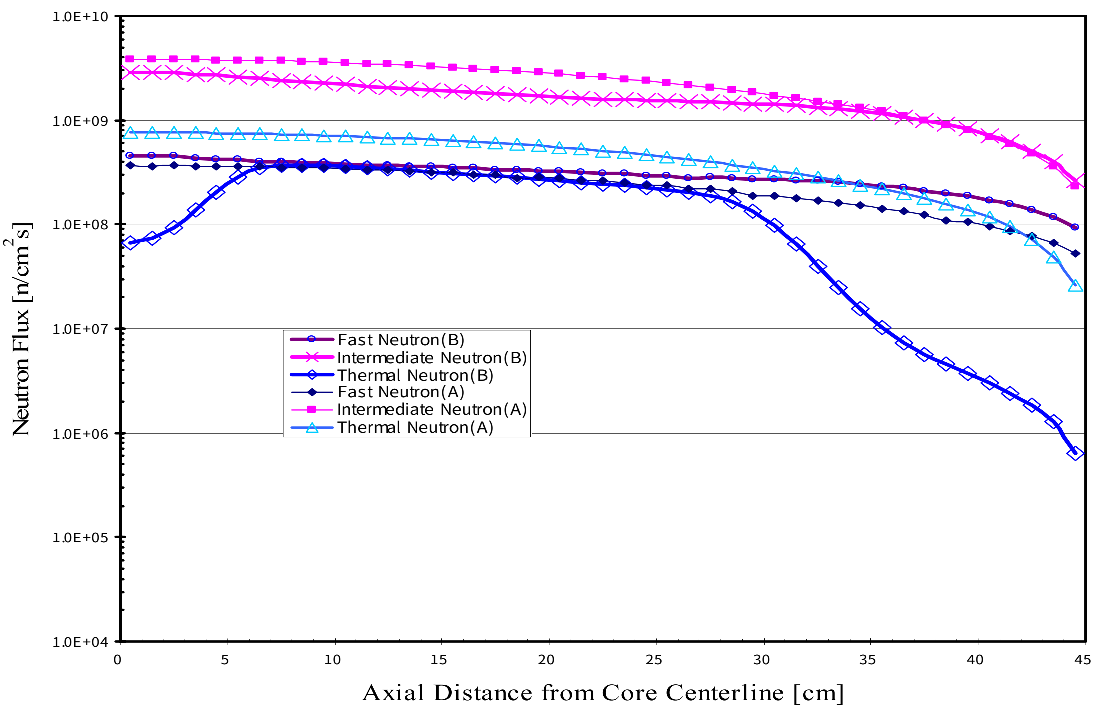

그림 3. SMART-P 압력용기 내면에서의 에너지 그룹별 중성자 선속

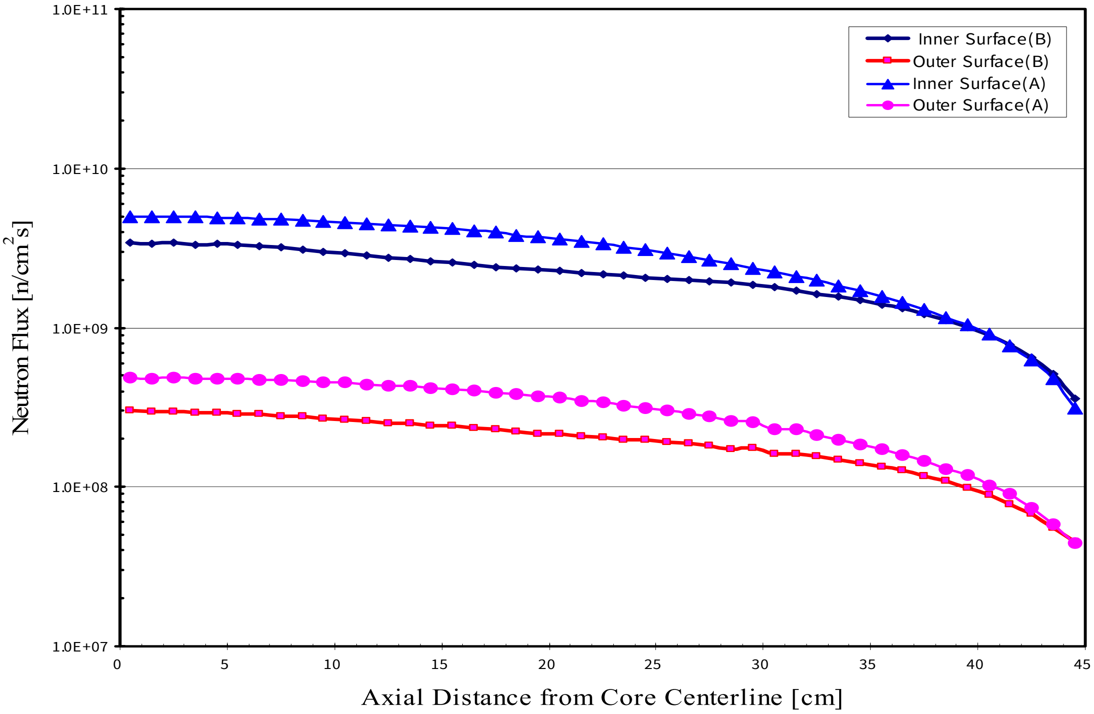

그림 4. SMART-P 압력용기 내/외면에서의 전체 중성자 선속

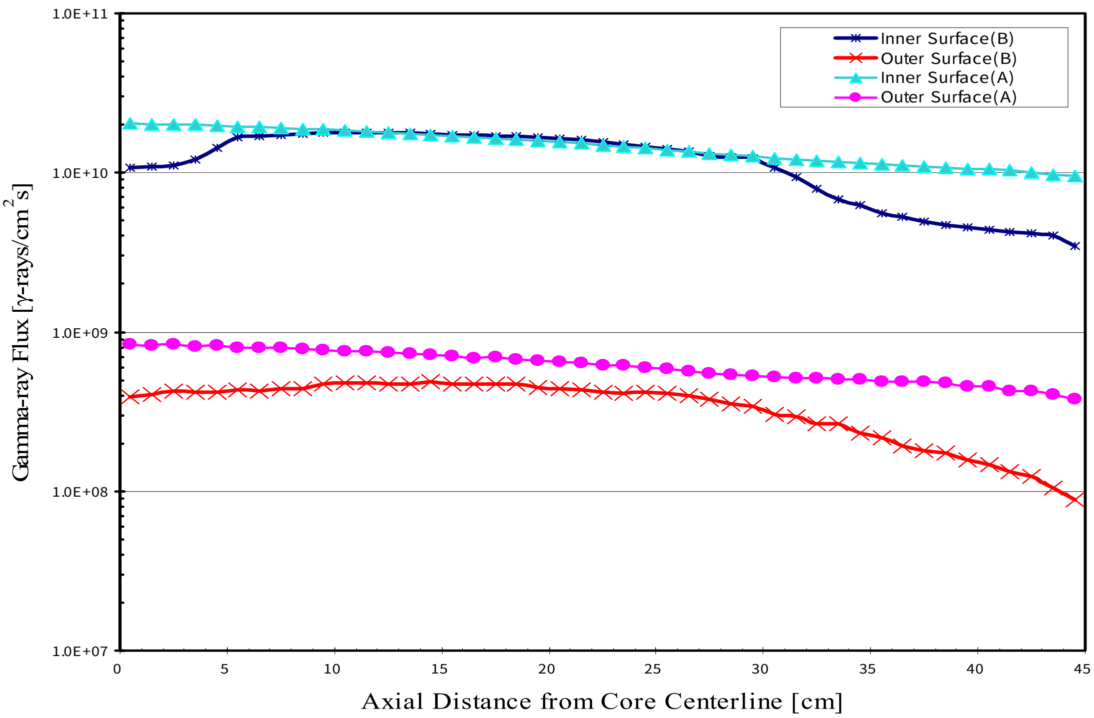

그림 5. SMART-P 압력용기 내/외면에서의 감마선 선속