'96 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

각분할법을 이용한 월성 2 호기 반응도제어기구의 방사선흐름 해석

김용일, 문복자, 김교윤
한국원자력연구소

요 약

CANDU 6 형 원자로의 반응도제어기구 설치대에 있는 수많은 반응도제어기구들은 원자로심에서 발생한 방사선의 흐름통로를 제공하므로 설치대에서의 방사선 피폭이 예상된다. 이런 반응도제어기구 설치대에서의 방사선량을 예측하기 위하여 1 차원 각분할 전산코드인 ANISN 과 2 차원 각분할 전산코드인 DOT 를 사용하여 방사선 차폐해석을 수행하였다. 반응도제어기구 도관을 통과하는 방사선의 흐름에 기인한 월성 2 호기 반응도제어기구 설치대 상단에서의 최대 선량율은 31 μSv/hr 로 설계 목표치 250 μSv/hr 보다 낮게 평가되었다.

1. 서 론

CANDU 6 형 원자로의 상단차폐계통은 원자로 운전시 반응도제어기구 설치대 (Reactivity Mechanism Deck, R/M Deck) 로의 출입이 허용 되도록 설계된다. R/M Deck 은 반응도제어기구 구동기가 설치되어 있는 곳으로써 반응도제어기구의 유지보수를 위한 작업공간을 제공한다.

월성 2 호기의 반응도제어기구중 조절장치 (Adjuster Unit) 상단에서 가장높은 선량율이 예상되므로 본 연구에서는 조절장치가 상단차폐계통의 방사선흐름해석 대상으로 선택되었다. 방사선흐름해석 방법은 두 단계로 나누어 지는데 첫번째 단계는 노심으로부터 연장된 유도관 (Guide Tube Extension) 에 의해 형성된 도관 입구에서의 방사선속 분포를 ANISN[1] 계산에 의하여 구하는 것이고 두번째 단계는 ANISN 계산에 의한 방사선속을 이용해서 R/M Deck 에 위치한 조절장치 차폐구조에서 DOT 코드[2]에 의한 중성자와 감마선 수송계산을 하는 것이다.

2. ANISN 계산

그림 1 에 제시된 감속재 영역과 칼란드리아 영역의 경계면에서 칼란드리아 영역으로 향하는 선속을 구하기 위해 1 차원 각분할 방사선수송 코드인 ANISN 을 원주좌표계에서 사용하였다. 본 계산에서는 중성자 광자 연계 38 군 핵단면적 자료의 에너지 구조를 사용하였는데 이는 DLC-37[3] 의 100n-21γ 연계 핵단면적 자료

로 부터 나온 것이다. 그 구조는 27 개의 중성자 에너지 군 과 11 개의 광자 에너지 군으로 구성되는데 중성자 에너지 군은 7 개의 고속 중성자 군 ($E_n \geq 0.82$ MeV), 19 개의 중간영역 에너지 중성자군 (0.82 MeV > E_n > 0.414 eV) 그리고 하나의 열중성자 군 ($E_n \leq 0.414$ eV) 으로 구성된다. 산란단면적에 P_3 차수를 적용하였고 각 분할에는 S_8 차수의 방향코사인과 가중치[1]를 사용했다.

그림 2 는 ANISN 계산에 포함된 핵연료 지역을 보여준다. 원자로 중앙의 수직 평면에서의 핵분열 수밀도 분포는 시간평균 핵연료다발 열출력 분포 (time-average bundle power distribution)[4] 로부터 계산되어지는데 ANISN 계산에 사용되는 정규화된 선원항 분포는 표 1 에 나타나 있다.

ANISN 계산결과인 감속재 영역에서 칼란드리아 영역으로 향하는 방사선속의 에너지 영역별 분포는 표 2 에 나타나 있다.

3. DOT 계산

전 출력시 조절장치의 차폐구조에 대한 방사선수송 문제를 해석하기 위하여 2 차원 각분할 코드인 DOT 가 R-Z 기하구조에서 사용되었다.

CANDU 6 형 원자로에는 21 개의 조절장치가 있는데 R/M Deck 에서의 위치는 그림 3 에 나타나 있다. DOT 계산에서의 반경 경계면은 R/M Deck 에서 조절장치가 차지하는 비중 (Adjuster Worth) 에 의해서 결정된다. 그림 3 로부터 조절장치의 등가반경은 다음과 같이 계산된다.

$$\chi \pi R^2 = 342.92 \times 160.02 = 5.487 \times 10^4 \text{ cm}^2$$

$$\chi = 5 \times 1 + 12 \times \frac{1}{2} + 4 \times \frac{1}{4} = 12 \quad \text{adjuster worth}$$

$$\therefore \quad R = \sqrt{\frac{5.487 \times 10^4}{12 \times \pi}} = 38.15 \text{ cm.}$$

본 계산에서 사용된 에너지 군 구조는 ANISN 계산과 마찬가지로 38 군 에너지 구조가 사용되었고 산란단면적에는 P_3 차수가 적용되었다. 입자의 운동방향에 대해서 상단방향으로 편중된 100 개의 각 (100 Angle Biased Up) 을 가진 Angular Quadruture Set[5] 이 사용 되었다.

상단차폐계통에는 노심의 칼란드리아에서 R/M Deck 까지 연장된 유도관에 의해 도관이 형성되어 있기 때문에 도관 입구에서 출발한 방사선은 그 흐름경로를 통해서 감쇄되고 일정한 방향으로 조준된다. 원주형 도관에서 입구의 방사선속 방향이 여현분포 (Cosine Distribution) 를 갖는 경우 기하학적 감쇄인자[6]는 다음과 같다.

$$\frac{4.55^2}{636.24^2} = 5.114 \times 10^{-5}$$

여기서, 4.55 = 도관의 반경 (cm)

636.24 = 도관의 길이 (cm).

칼란드리아로 부터의 방사선속 (J^+) 은 도관을 통과하여 도관의 출구에서 일정한 방향으로 조준되기 때문에

본 계산에서 사용된 방사선원은 100 개의 방향각중 가장 전방 (most-forward) 으로 향하는 2 방향만 가진다고 가정된다. 따라서 DOT 계산의 고정표면선원 (Fixed Boundary Source) 인 각의존 선속 (Angular Flux) φ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$J^+ \times 5.114 \times 10^{-5} = \varphi_1\omega_1 + \varphi_2\omega_2 = 2\varphi\omega$$

$$\therefore \quad \varphi = J^+ \times \frac{1}{2} \times \frac{5.114 \times 10^{-5}}{0.0001976} = 0.129 \times J^+$$

여기서, J^+ = 칼란드리아 내벽에서의 상단 방향 선속 (Current)

5.114×10^{-5} = 도관에 의한 기하학적 감쇄인자

$\varphi(=\varphi_1=\varphi_2)$ = 도관 출구에서의 각의존 방사선속 (Angular Flux)

$\omega(=\omega_1=\omega_2)$ = 가장 전방인 방향과 관련된 Gaussian Quadruture Weight.

위의 식을 이용하여 계산한 고정표면선원 φ 가 표 2 에 나타나 있다.

그림 4 는 조절장치에 대한 차폐구조를 보여주고 그림 5 는 본 계산에서 사용된 차폐구조의 DOT 모델을 나타낸다. DOT 모델에서는 인접한 장치들에 의한 방사선 흐름효과를 반영하기 위하여 왼쪽과 오른쪽의 경계면에 반사체 경계조건을 적용하였다. 모델의 상단에는 진공 경계조건을 적용 하였고 하단에는 하단 차폐마개의 바닥면에 고정표면선원을 적용하였다. R/M Deck 에 위치한 조절장치 상단에서의 선량율은 위의 DOT 계산 모델을 근거로 구해졌다.

4. 결과 및 토의

각분할 수송 코드인 ANISN 과 DOT 를 이용하여 R/M Deck 에 위치한 조절장치 상단에서 중성자와 감마선의 선속과 선량율을 계산했다. CANDU 6 형 원자로의 R/M Deck 에는 여러 종류의 반응도제어기구들 (조절장치, 흡수봉, 그리고 액체영역제어기) 과 수직중성자속검출기들이 설치되어 있는데 본 연구에서 사용된 방법으로 각 기구들의 상단에서의 선속과 선량율들이 계산되었다.

R/M Deck 에 설치되어 있는 여러 종류의 반응도제어기구들 상단에서의 최대 선량율 계산 결과 조절장치 상단에서의 선량율이 가장높게 나타났다, 그리고 각각의 최대 선량율의 합은 조절장치 상단에서의 최대선량율의 대략 2 배로 나타났는데 중성자와 감마선에 대한 비율은 각각 2 와 2.19 로 나타났다. 따라서 조절장치 상단에서의 중성자와 감마선에 대한 DOT 계산결과들은 위의 비율을 곱하므로서 R/M Deck 에서의 선속과 선량율을 보수적으로 나타냈다. 그림 6 과 7 에 중성자와 감마선의 선속 분포와 선량율 분포를 각각 제시하였다. 그림 6 과 7 에 의하면 조절장치 중심에서 멀어질수록 중성자속는 단조 감소하는데 감마선속은 증가 하다 다시 감소하는 경향을 보인다. 감마선속이 이러한 거동을 보이는 이유로는 차폐체를 통과하는 중성자의 스펙트럼 변화로 R/M Deck 의 발판 (Tread Plate) 에서 열중성자에 의한 (n,γ) 반응이 부분적으로 증가하기 때문인 것으로 보인다.

5. 결론

월성 2 호기의 상단차폐계통으로의 방사선 흐름계산이 각분할 코드들에 의해 수행 되었는데 ANISN 과 DOT 연계 계산시 노심의 칼란드리아에서 R/M Deck 으로 연결된 긴 도관으로의 방사선흐름은 기하학적 감쇄인자라는 간단한 수식으로 단순화되어 본 계산의 연구 결과에 어느정도 불확실도가 포함된다. 따라서 차후에는 본 계산의 결과와 해석 대상을 사실적으로 모델링할 수 있기에 단순화된 수식이 필요없는 Monte Carlo MCNP 코드에 의한 계산결과 와의 비교 분석이 요구된다. 결론적으로 단순화된 해석학적 방법에 의존한 월성 1 호기의 상단차폐계통 방사선 흐름해석과는 달리 차폐계산에 가장 널리쓰이는 각 분할 코드들을 이용한 CANUD 6 형 원자로의 상단차폐해석 방법론를 구축할 수 있었으며 계산결과는 설계 목표치보다 낮게 평가되었다.

참고문헌

1. Westinghouse Astronuclear Laboratory and NASA Space Flight Center(Contributor), " ANISN-W : Multigroup One-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering," Oak Ridge National Laboratory, RISC-CCC-255, July 1975.
2. W. A. Rhoades, D. B. Simpson, R. L. Childs, and W. W. Engle Jr, "DOT IV - Two Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport Code System, Version 4.2," Oak Ridge National Laboratory, RSIC-CCC-320, 1979.
3. W. E. Ford, "Coupled 100 Neutron-21 Gamma Ray Group, P_3 Cross section Library for EPR," Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-5249, 1976.
4. H. C. Chow, "Fuel Management Report," Atomic Energy of Canada Limited, 86-03310-AR-003, 1992.
5. J. P. Jenal et al, "The Generation of a Computer Library for Discrete Ordinates Quadruture Sets," Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-6023, October 1977.
6. T. Rockwell III, "Reactor Shielding Design Manual," D. Van Nostrand Company, Inc., New Jersey, 1956.

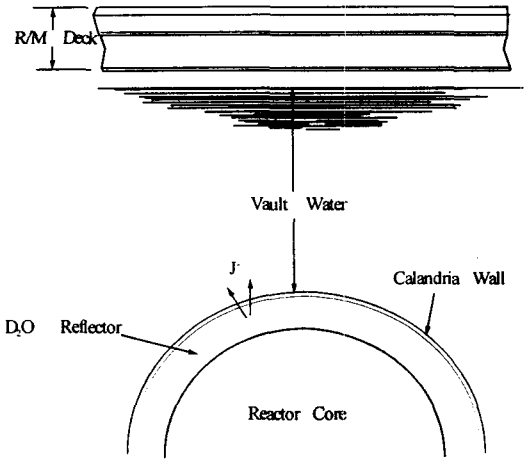

Figure 1 Top Shield Schematic

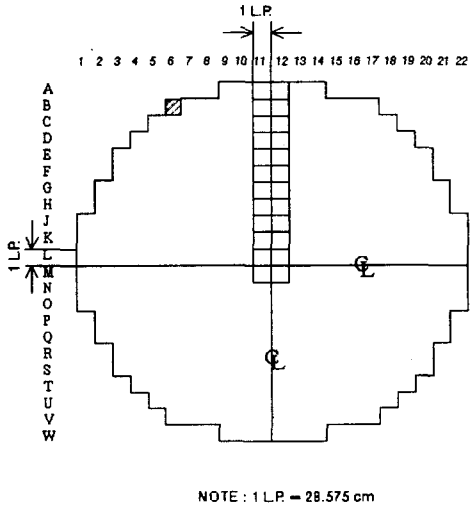

Figure 2 Core Channel Map for Wolsong 2

Table 1 Fission Density Distribution on the Vertical Mid-Plane of the Reactor Used in ANISN Calculation

Radial Distance from Core Center [cm]	Average Thermal Power [kW]	Normalized Fission Density
0.0	723.0	1.000*
14.3	723.0	1.000
42.9	726.8	1.005
71.5	734.5	1.016
100.1	744.8	1.030
128.7	752.5	1.041
157.3	767.0	1.061
185.9	793.8	1.098
214.5	772.3	1.068
243.1	697.3	0.964
271.7	583.5	0.807
300.3	454.5	0.629
314.3	390.0	0.539

* Corresponds to 5.80×10^{13} fission/cm·s or 723.0 kW bundle thermal power.

Table 2 Streaming Currents at the Foot and Top of the Duct

Group	E_g(eV)	Current J^- at Calandria [Particles/cm²·s]	DOT4.2 Fixed Boundary Source φ [Particles/cm²·s]	Group Structure
1	1.49E+07	5.381E+05	6.97E+04	
2	1.22E+07	6.939E+05	8.99E+04	
3	1.11E+07	4.577E+07	5.93E+06	
4	6.07E+06	7.920E+07	1.03E+07	Fast
5	3.68E+06	6.788E+07	8.80E+06	
6	2.23E+06	3.276E+07	4.25E+06	
7	1.35E+06	1.804E+07	2.34E+06	
8	8.21E+05	1.985E+07	2.57E+06	
9	4.98E+05	1.619E+07	2.10E+06	
10	3.02E+05	2.106E+07	2.73E+06	
11	1.83E+05	5.274E+07	6.84E+06	
12	6.74E+04	3.043E+07	3.94E+06	
13	4.09E+04	3.300E+07	4.28E+06	
14	2.48E+04	3.489E+07	4.52E+06	
15	1.50E+04	7.754E+07	1.00E+07	
16	5.53E+03	8.984E+07	1.16E+07	
17	2.03E+03	1.039E+08	1.35E+07	Intermediate
18	7.49E+02	1.209E+08	1.57E+07	
19	2.75E+02	1.418E+08	1.84E+07	
20	1.01E+02	1.206E+08	1.56E+07	
21	4.79E+01	1.362E+08	1.76E+07	
22	2.26E+01	1.524E+08	1.98E+07	
23	1.07E+01	2.380E+08	3.08E+07	
24	3.93E+00	2.785E+08	3.61E+07	
25	1.45E+00	2.371E+08	3.07E+07	
26	6.83E-01	1.724E+08	2.23E+07	
27	4.14E-01	4.724E+12	6.12E+11	Thermal
28	1.40E+07	6.580E+04	8.53E+03	
29	1.00E+07	1.600E+10	2.07E+09	
30	7.00E+06	4.806E+10	6.23E+09	
31	5.00E+06	9.987E+10	1.29E+10	
32	3.00E+06	1.515E+11	1.96E+10	
33	2.00E+06	1.155E+11	1.50E+10	Gamma
34	1.50E+06	1.756E+11	2.28E+10	
35	1.00E+06	5.809E+11	7.53E+10	
36	4.00E+05	5.714E+11	7.41E+10	
37	2.00E+05	8.521E+11	1.10E+11	
38	1.00E+05	8.742E+10	1.13E+10	

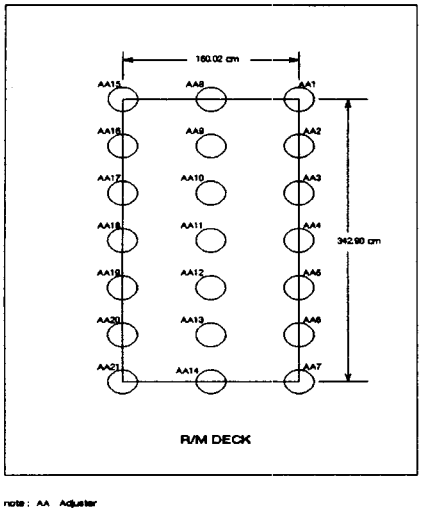

Figure 3 Locations of Adjuster Unit Penetrations on R/M Deck

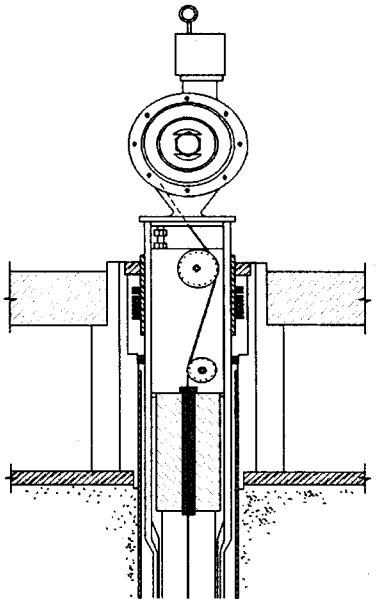

Figure 4 Adjuster Unit Penetration Shielding Arrangement

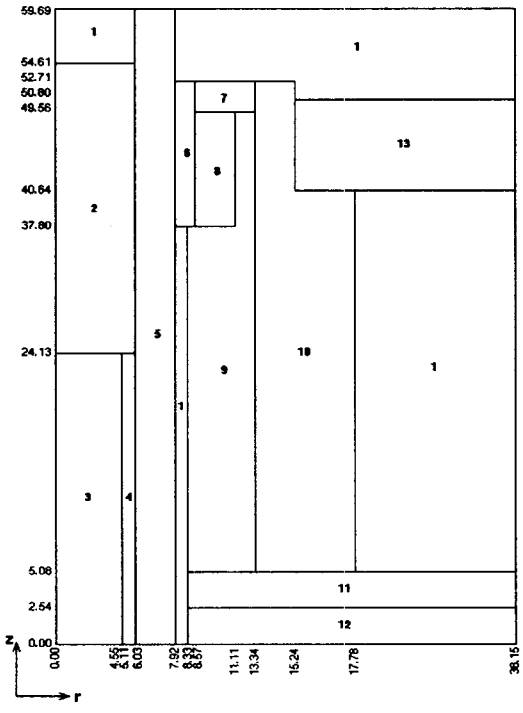

Figure 5 DOT Model of Adjuster Unit Penetration Shielding Arrangement

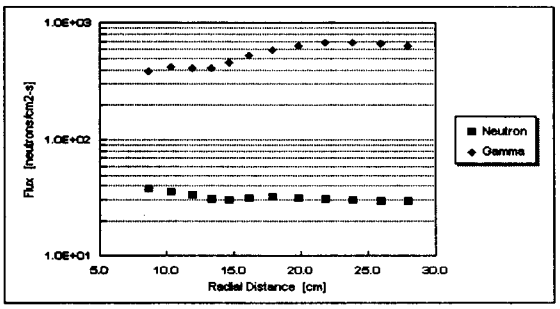

Figure 6 Neutron and Gamma Flux Distributions above R/M Deck

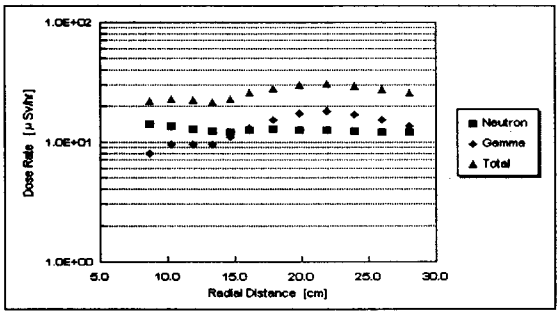

Figure 7 Dose Rate Distributions above R/M Deck