

'96 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

BUGLE93 라이브러리를 이용한 원자로 일차차폐벽에 대한 차폐해석

박계원, 강상호
한국전력기술(주)

요 약

ENDF/B-VI 핵단면적자료를 기초로 생성된 BUGLE93^[1] 라이브러리를 이용하여 울진 3.4 호기 원자로 주변의 콘크리트 일차차폐벽에 대한 방사선차폐해석을 수행하였다. 중성자 및 감마선 수송계산은 일차원 각분할 해석코드인 ANISN-ORNL^[2]을 이용하였다. 또한, 기존의 영광 3.4 호기 설계에 이용하였던 CASK^[3] 라이브러리를 대체할 경우 예상되는 차폐효과의 변화를 평가하기 위하여 노심으로부터 일차차폐벽 사이의 모든 매질에 대한 중성자 및 감마선속을 계산하고, 계산결과를 비교·분석하여 제시하였다. 중성자선속에 대한 분석결과, BUGLE93을 이용한 계산결과는 원자로용기 내부에서는 CASK를 이용한 결과보다 적은, 보다 현실적인 결과를 제공하지만 일차차폐벽내에서는 CASK를 이용한 결과보다 오히려 큰 선속을 보였다. 그러나 이차감마선에 의한 분석결과는 원자로용기 내부에서의 큰 차이에도 불구하고 일차차폐벽을 통과하면서 두 결과가 거의 일치하였다. 이것은 BUGLE93 라이브러리가 노심 및 철성분에 대해서는 증가된 핵단면적을 제공하지만 콘크리트 성분에 대한 핵단면적은 오히려 감소하였기 때문이다. 결론적으로, 최소 7 피트 두께의 일차차폐벽 외부에서 중성자선속은 감마선속에 비하여 무시할 수 있을 정도이므로, 원자로 내부영역에서 CASK 라이브러리와는 다른 결과를 보이는 BUGLE93 라이브러리를 원자로 일차차폐벽의 방사선차폐해석에 사용할 경우 기존의 CASK 라이브러리를 이용한 해석결과와 동일한 결과를 보이는 것으로 평가되었다.

1. 서론

새로운 ENDF/B-VI 핵단면적자료를 이용한 해석^[4]을 통하여 기존의 핵단면적자료들이 원자로압력용기에서 고속중성자에 대한 철의 단면적을 과소평가한다는 사실이 밝혀지면서, 격납건물 내 기기검증 및 작업자 피폭선량에 중요한 영향을 주는 원자로 일차차폐벽에 대한 차폐해석에도 기존의 CASK 라이브러리를 대신할 수 있는 보다 현실적인 핵단면적자료의 적용이 요구되었다. 따라서, ENDF/B-VI 자료를 기초로 하여 생성된 BUGLE93 라이브러리를 이용하여 원자로 일차차폐벽의 차폐해석을 수행하였다. 또한, 노심으로부터 일차차폐체에 이르는 중성자 및 감마선속

을 CASK 라이브러리를 이용한 계산결과와 비교·분석하여 일차차폐벽의 방사선차폐해석에 현실적인 새로운 핵단면적자료를 사용할 경우 예상되는 영향을 평가하였다.

2. 핵단면적자료 및 선량환산인자

2.1 CASK

CASK 라이브러리는 ENDF/B-II 중성자 핵단면적 자료와 DLC-12/POPLIB 감마선 생성 자료를 기초로 하여 22 그룹의 중성자 에너지군과 18 그룹의 감마 에너지군에 대하여 만들어진 핵단면적자료이다. 원래의 목적은 사용후핵연료 수송용기의 차폐해석용으로 개발되었으나, 영광 3,4호기를 비롯하여 최근까지 원자로압력용기의 방사선조사 분석, 일차차폐벽의 차폐해석 및 방사선에 의한 열생성을 계산, 원자로공동을 통한 중성자흐름분석 등에 널리 사용되어 왔다.

2.2 BUGLE93

BUGLE93 라이브러리는 가압경수형 원자로의 원자로차폐 및 원자로 압력용기 선량분석 목적으로 개발된 ENDF/B-VI 세밀 에너지군 핵단면적 자료를 ANSI/ANS 6.1.2의 처리과정을 거쳐 광범위 에너지군 핵단면적 자료로 변환시켜 기존의 BUGLE80와 SAILOR 라이브러리를 교체하는 자료이다. BUGLE93의 모체인 VITAMIN-B6 라이브러리는 상세 에너지군으로 분류되어 있는데, 120개 핵종에 대한 자료를 포함하고 있다. 이를 AMPX-77 처리체계를 사용하여 처리한 BUGLE93 라이브러리도 120개 핵종에 대한 자료를 갖고 있으며, 47 그룹의 중성자 에너지군과 20 그룹의 감마선 에너지군을 갖고, 콘크리트 차폐체에 대하여 가중 스펙트럼을 사용한 핵단면적자료를 포함하고 있다. 또한, 105개의 핵종에 대해서는 원자로 구성매질에 대한 공명 자기차폐효과와 가중 스펙트럼효과를 고려하여 처리하고 있다. CASK는 모든 핵종에 대하여 Legendre P_3 전개로 되어 있으나, BUGLE93에서는 P_5 내지 P_7 전개로 처리하고 있다.

2.3 선량환산인자

선량계산에 사용되는 중성자 및 감마선의 에너지군별 선량환산인자는 ANSI/ANS 6.1.1에 근거한 자료를 BUGLE93 에너지군에 맞게 내삽하여 사용하였으며, 표 1에 제시하였다.

3. 중성자/감마선속 및 선량을 계산

CASK와 BUGLE93 라이브러리의 핵단면적자료를 비교하기 위하여 노심으로부터 원자로 일차차폐벽에 이르는 중성자 및 감마선속을 비교·분석하였다. 선속계산은 Boltzmann 수송이론을 일차원 S_N 방법을 사용하여 해석하는 ANISN-ORNL 코드를 사용하였다. 노심내 초기 중성자선원은 고정선원(Fixed Source)계산법에 따라 원자로 열출력 $2,872\text{MW}_{th}$ 에 해당하는 초기선원을 결정하였다. 노심내 핵분열밀도는 노심에서 139.08cm 까지는 1.0, 노심외곽에서는 0.5, 그 사이에는 선형내삽에 따른 가중치를 적용하였으며, 핵분열당 생성되는 에너지그룹별 중성자수는 BUGLE93

라이브리에서 제공되는 χ 값을 사용하였다. 공간분할을 위하여 그림 1 및 표 2에서 보여지는 바와 같이 노심에서 일차차폐벽까지 8개의 구역으로 나누고 이를 총 111개의 mesh로 분할하였다. 중성자의 핵산란단면적을 CASK 및 BUGLE93에 대해 모두 P_3 전개까지 사용하였다. Stainless steel과 Carbon steel의 화학적 재질 구성은 ASME SA-240과 SA-508에 근거한 자료를 사용하였으며, 콘크리트는 ANSI/ANS 6.4에서 권고한 밀도 2.35 g/cm^3 을 올진 3,4호기 설계기준에 맞게 2.242 g/cm^3 로 줄여서 사용하였다. 각 매질의 조성 및 원자밀도는 표 3에 보여진다. 선량은 각 mesh별로 계산되는 중성자 및 감마선속에 에너지그룹별 선량환산인자를 적용하여 계산하였다.

표 1. BUGLE93 선량계산에 사용되는 선량환산인자 [$\text{rem/hr}/\#/ \text{cm}^2 \cdot \text{sec}$]

에너지군	선량환산인자	에너지군	선량환산인자	에너지군	선량환산인자	에너지군	선량환산인자
1	2.14E-4	18	1.31E-4	35	3.62E-6	52	6.19E-6
2	1.96E-4	19	1.26E-4	36	3.68E-6	53	5.42E-6
3	1.64E-4	20	1.16E-4	37	3.76E-6	54	4.62E-6
4	1.47E-4	21	1.08E-4	38	3.96E-6	55	3.72E-6
5	1.47E-4	22	9.72E-5	39	4.09E-6	56	2.93E-6
6	1.48E-4	23	8.08E-5	40	4.24E-6	57	2.32E-6
7	1.53E-4	24	6.37E-5	41	4.40E-6	58	1.83E-6
8	1.49E-4	25	4.78E-5	42	4.53E-6	59	1.60E-6
9	1.37E-4	26	3.13E-5	43	4.50E-6	60	1.44E-6
10	1.31E-4	27	1.98E-5	44	4.47E-6	61	1.17E-6
11	1.27E-4	28	1.34E-5	45	4.30E-6	62	7.59E-7
12	1.25E-4	29	9.73E-6	46	3.98E-6	63	3.79E-7
13	1.25E-4	30	8.21E-6	47	3.67E-6	64	2.67E-7
14	1.26E-4	31	7.31E-6	48	1.11E-5	65	3.35E-7
15	1.26E-4	32	6.85E-6	49	8.77E-6	66	8.00E-7
16	1.27E-4	33	5.65E-6	50	7.66E-6	67	1.95E-6
17	1.29E-4	34	3.84E-6	51	6.93E-6		

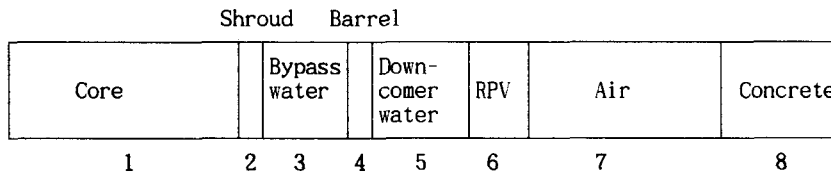


그림 1. ANISN 계산을 위한 구역구분

표 2. 구역별 노심으로부터 거리 및 구성물질

구역	내 경(cm)	외 경(cm)	매 질
1	0.0	156.21	UO ₂ , H ₂ O, Zr, Pu
2	156.21	157.86	Stainless steel
3	157.86	175.26	H ₂ O
4	175.26	181.93	Stainless steel
5	181.93	205.74	H ₂ O
6	205.74	226.21	Carbon steel
7	226.21	358.14	Air
8	358.14	571.50	Concrete

표 3. 구역별 구성물질의 화학적조성 및 원자밀도 (#/barn · cm)

Region Element	Core	Stainless Steel (SA-240)	Carbon Steel (SA-508)	Water*	Air	Concrete
H	2.764E-2	-	-	4.688E-2	-	7.409E-3
B-10	2.303E-6	-	-	3.907E-6	-	-
C	-	3.169E-4	6.514E-4	-	-	-
N	-	-	-	-	4.340E-5	-
O	2.682E-2	-	-	2.344E-2	1.020E-5	4.205E-2
Na	-	-	-	-	-	9.997E-4
Mg	-	-	-	-	-	1.418E-4
Al	-	-	-	-	-	2.279E-3
Si	-	1.694E-2	-	-	-	1.518E-2
S	-	-	-	-	-	5.376E-5
K	-	-	-	-	-	6.613E-4
Ca	-	-	-	-	-	2.782E-3
Cr-52	-	1.647E-2	1.947E-4	-	-	-
Mn	-	1.732E-3	1.189E-3	-	-	-
Fe	6.108E-5	6.036E-2	7.964E-2	-	-	2.984E-4
Ni	-	6.483E-3	7.683E-4	-	-	-
Zr	4.518E-3	-	-	-	-	-
Mo	-	-	2.782E-4	-	-	-
U-235	1.052E-4	-	-	-	-	-
U-238	6.173E-3	-	-	-	-	-
Pu-239	3.274E-5	-	-	-	-	-
Pu-240	8.981E-6	-	-	-	-	-

*) 가연성독봉 농도 500 ppm일때 물의 밀도 0.687 g/cm³를 가정할때의 값임.

4. 결과 분석

ANISN-ORNL 계산결과는 노심으로부터 일차차폐벽의 외벽에 이르는 전 영역에 대해 중성자선속 및 감마선속을 보여준다. 그림 2, 4, 6에서 각각 중성자선속, 감마선속 및 총선속을 보여주고 있다. 또한 그림 3, 5, 7은 이들 각각에 대해 BUGLE93에 의한 결과에 대한 CASK 계산 결과의 비를 나타낸다.

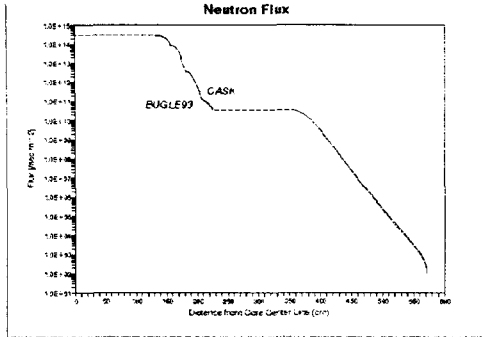


그림 2. 중성자선속 분포

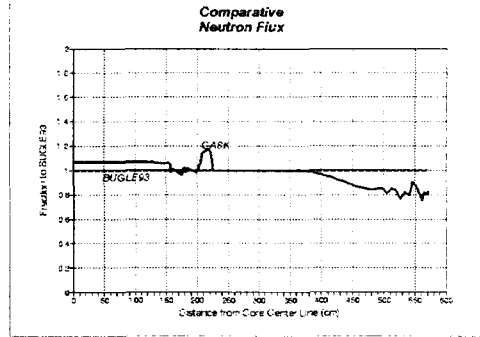


그림 3. 라이브러리별 중성자선속 비교

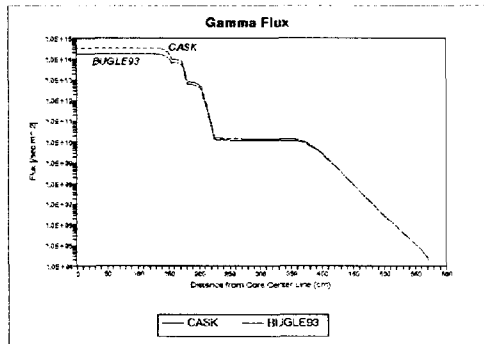


그림 4. 감마선속 분포

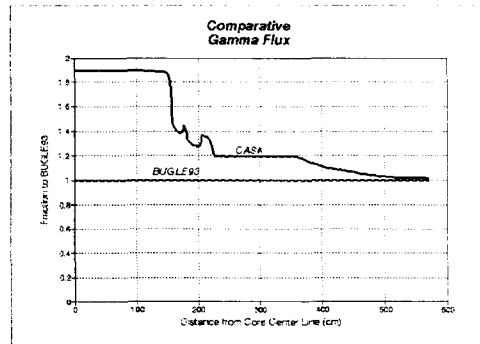


그림 5. 라이브러리별 감마선속 비교

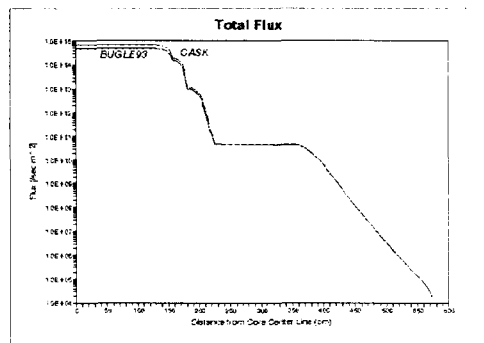


그림 6. 총선속 분포

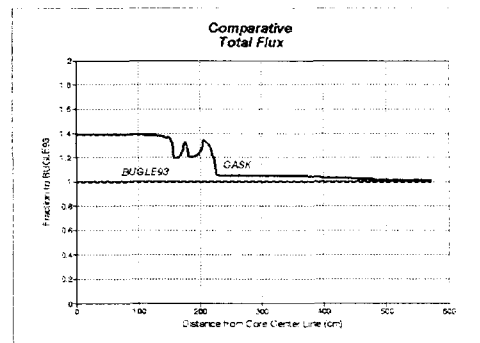


그림 7. 라이브러리별 총선속 비교

그림 2, 3에서 보듯이 노심내에서는 CASK에 의한 중성자 선속이 약간 높게 평가되고 있다. 또한, CASK에 의한 중성자선속 분포가 원자로용기 부근에서 BUGLE93에 의한 값과 비교해서 첨두현상을 보이는 것은 Shroud, Barrel 및 압력용기의 주요 구성물질인 철에 대한 고속중성자의 핵

단면적이 과소평가되었음을 말해준다. 이러한 중성자선속의 차이는 원자로압력용기에 의하여 대부분의 고속중성자가 열중성자로 전환되면서 차이가 줄어들고, 원자로공동의 공기층에 이르러서는 두 결과가 완전히 일치하다가 콘크리트차폐벽을 통과하면서 BUGLE93에 의한 결과가 더 커지는 역전현상을 보이고 있다. 한편, 감마선속은 그림 4, 5에서 보듯이 노심영역에서는 CASK 결과가 BUGLE93에 비하여 약 2배 정도 큰 값을 보이다가 노심 바깥에서 급격한 감소를 보이고 7피트 차폐벽의 외부에서는 거의 일치함을 보이고 있다. 중성자와 감마선속을 합한 총선속에 대한 CASK 및 BUGLE93의 선속비는 그림 6, 7에서 보듯이 감마선속비와 유사한 형태의 반경방향 분포를 갖는다. 결국 일차차폐벽의 외부에서 두 라이브러리에 의한 총선속은 거의 일치하고 있다. 이러한 사실은 BUGLE93 라이브러리의 기초가 되는 ENDF/B-VI 핵단면적자료가 노심영역과 원자로용기내 철구조물에 대해서는 증가된 핵단면적자료를 제공한다는 것을 감안할 때 다음과 같은 사실을 말해준다. 즉, 핵단면적을 균정화하는 과정에서 기존의 CASK 라이브러리는 모든 원소에 대하여 노심 가중스펙트럼을 사용하여 개발되었지만, BUGLE93 라이브러리는 콘크리트 가중스펙트럼을 사용한 핵단면적을 동시에 제공함으로써 콘크리트 구성원소에 대해서는 기존의 CASK 라이브러리 보다 오히려 감소된 핵단면적을 제공하고 있다.

BUGLE93 라이브러리를 이용한 선량을 계산결과는 그림 8에서 보여주고 있으며, 원자로 일차차폐벽 외부에서의 선량은 약 53 mRem/hr로 계산되었다.

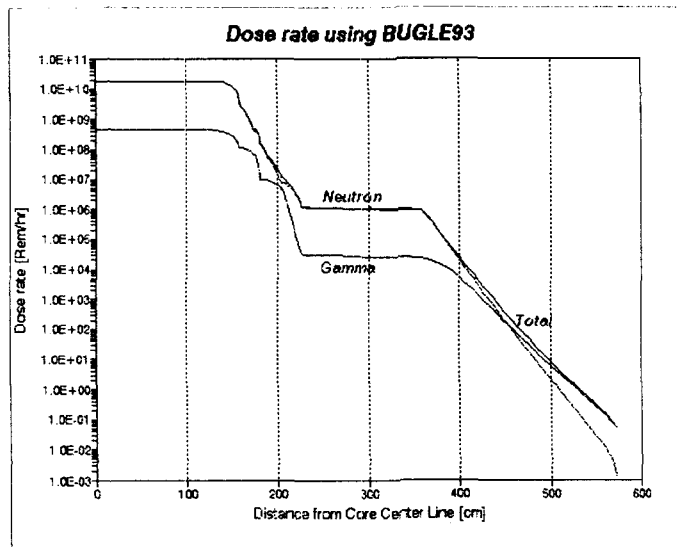


그림 8. BUGLE93을 사용한 선량을 계산 결과

5. 결 론

본 논문에서는 울진 3,4호기 원자로 일차차폐벽에 대한 차폐해석시 새로운 ENDF/B-VI 핵단면적자료에 기초한 BUGLE93 라이브러리를 사용할 때 예상되는 차폐효과를 평가하였다. 이를 위하여 BUGLE93 라이브러리와 기존의 CASK 라이브러리를 각각 사용하여 노심에서 일차차

폐벽에 이르는 전영역에 대해서 중성자 및 감마선속을 계산하고 계산결과를 비교·분석하였다. 분석결과 전영역에 대해서 중성자 및 감마선속을 합한 총선속은 BUGLE93 라이브러리를 사용할 경우가 CASK 라이브러리를 사용할 때보다 적게 평가되었다. 그러나 일차차폐벽의 차폐효과를 결정하는 차폐벽 외부에서의 총선속은 두 라이브러리에 의한 결과가 거의 일치하였다. 이러한 사실은 BUGLE93 라이브러리가 노심영역 및 원자로용기내 철성분에 대하여 상당히 현실적인 단면적 자료를 사용하여 실제로 원자로용기 내부영역에 대해서는 CASK 결과와는 상당히 다른 중성자 및 감마선속 분포를 보임을 고려할 때 예상밖의 결과이다. 이런 효과는 새로운 BUGLE93 라이브러리가 노심 및 철성분에 대해서는 증가된 핵단면적자료를 제공해주는 대신 콘크리트 구성원소에 대해서는 균정화과정에서 콘크리트 가중스펙트럼을 사용하여 오히려 감소된 핵단면적자료를 제공하고 있기 때문이다.

결론적으로 BUGLE93 라이브러리가 제공하는 핵단면적자료는 원자로용기 내부에 대한 해석에서는 CASK 라이브러리와 다른 결과를 보이지만, 원자로용기 외부의 일차차폐벽에 대한 차폐해석에는 CASK 라이브러리와 동일한 결과를 주는 것으로 분석되었다.

참고문헌

1. CCC-254/ANISN-ORNL, "One-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code System with Anisotropic Scattering", ORNL, RSIC, June 1994
2. DLC-175/BUGLE-93, "Coupled 47 Neutron, 20 Gamma-ray Group Cross Section Library Derived from ENDF/B-VI for LWR Shielding and Pressure Vessel Dosimetry Applications", ORNL, RSIC, May 1994
3. DLC-23/CASK, "A 40 Group Neutron/Gamma Cross Section Data Library for Elements and Mixtures that are Commonly Used for Shielding Calculations", Rev.0, 1981, Bechtel
4. "Comparison of Iron Data of ENDF/B-IV and VI in YGN 3&4 Vessel Fluence Calculation", Journal of Korean Nuclear Society, V27 #1, 1995. 2
5. UCN 3&4 Calc. No. 9-310-N376-001, "Containment Primary Shield Structure Shielding", Rev.2, KOPEC, 11/14/95