

## 〈기술보고〉

# CASK, BUGLE80, BUGLE93을 이용한 원자로 압력용기 중성자 조사량 분포 비교

문복자 · 이성희

한국원자력연구소

(1994. 8. 30 접수)

## 요 약

고리 3호기 원자로를 대상으로 압력용기에서의 고속중성자 집적량을 계산하였다. 수송계산에는 2차원 각분할 수송코드인 DOT 4.3을 사용하였고 핵단면적 라이브러리는 ENDF/B-II와 ENDF/B-III를 근거로 한 CASK와 ENDF/B-IV를 근거로 한 BUGLE80, 그리고 ENDF/B-VI를 근거로 한 BUGLE93 등이다. 사용한 핵단면적에 따른 압력용기에서의 고속중성자속 분포를 살펴보고 최근에 배포된 BUGLE93 라이브러리의 Dosimeter File을 사용하여 1, 2차 감시시험에서 측정된 중성자 측정시료의 방사능으로부터 계산된 고속중성자속 측정치를 계산된 고속중성자속과 비교하였다. 이 비교를 통하여 압력용기에서의 고속중성자속과 수명기간동안의 고속중성자 집적량을 평가하였다.

## 1. 서 론

철의 핵단면적자료에 대한 R.H. Johnson 등<sup>1)</sup>과 C. Y. Fu 등<sup>2)</sup>에 의한 보고서가 발표된 이후로 ENDF의 여러 핵단면적자료들을 이용한 계산 결과들이 실험치와 비교 분석되었으며 이러한 과정을 통해 ENDF/B-V 이전의 핵단면적 자료는 철을 포함하는 물질에 대한 고속중성자속의 투과를 작게 평가한다는 것이 알려져 있다. ENDF/B-VI를 이용한 수송 계산에서 철을 포함하는 물질의 중성자 투과가 커지는 이유는, 첫째로 ENDF/B-VI에서는 철의 비탄성산란단면적이 ENDF/B-V나 ENDF/B-IV에 비해서 3-12 MeV 영역에서 5-15% 감소하여 산란되지 않고 통과되는 중성자 수가 증가하기 때문이고 둘째는 이전의 핵단면적자료에서는 비탄성산란에 의한 이차중성자의 각분포를 등방성 분포로 처리한데 반해 ENDF/B-VI에서는 전방에 최대치가 나타나는 분포를 고려하였기 때문으로 알려지고 있다.<sup>3)</sup> <sup>4)</sup> BUGLE93<sup>5)</sup>은 90년 이후 공개된 ENDF/B-VI로부터 생산된 라이브러리로 개선된 철의 핵단면적을 포함하여 여러가지 핵종에 대한 최근의 실험과 계산치를 반

영하고 있다.

본 보고서에서는 이미 운전되고 있는 고리 3호기 원자로를 대상으로 현재까지 수송 계산에 많이 사용되고 있는 CASK<sup>6)</sup>와 BUGLE80<sup>7)</sup> 그리고 BUGLE93 라이브러리를 이용하여 압력용기를 포함한 원자로 내부의 고속중성자속 분포를 계산하기 위한 수송 계산을 수행하였다. 특히 압력용기의 고속중성자속 집적량은 원자로 수명을 결정짓는 중요한 요소의 하나이므로 고속중성자 조사에 대한 압력용기의 건전성을 평가하기 위하여 발전소 건설초기에 압력용기와 같은 재질의 시편을 여러개 제작하여 압력용기 내벽에 가까이 설치해 두었다가 감시시험시 이 시편을 인출하여 여러가지 시험을 거쳐 수명기간동안의 안전성을 평가하게 되는데 고리 3호기의 2차에 걸친 감시시험결과<sup>8)</sup> 측정된 고속중성자속 측정치를 본 보고서에서의 수송 계산을 통해 얻어진 계산치와 비교 분석하였다.

## 2. 핵단면적자료의 비교

비교대상 라이브러리중 가장 오래전에 생산된 CA-

SK 라이브러리는 ENDF/B-II와 ENDF/B-III를 기초로 생산되었는데 사용후 핵연료를 운송하기 위한 CASK의 차폐 계산을 위해 만들어졌으며 22개의 중성자군과 18개의 감마선 군으로 이루어져 있다. CASK 라이브러리는 차폐에 많이 사용되는 29개 핵종에 대한 자료를 포함하고 있는데 중성자 단면적의 원천은 ENDF/B-III와 SUPERTOG를 이용하여 공명보정을 거친 104개의 상세군 데이터이다. 이 상세군 데이터를 다시 우라늄-물 혼합물질에 대하여 ANISN으로 축약하여 22군 데이터로 만들었다. 감마선 단면적은 POP-OP4로부터 얻은 2차 감마선 생성단면적과 MUG로부터 얻은 감마선 수송단면적을 결합한 18군 구조로 되어 있다.

경수로형 원자로의 차폐 계산에 사용하기 위한 목적으로 VITAMIN-C 라이브러리로부터 만들어진 BUGLE80 라이브러리는 42개 핵종에 대해서는 47개 중성자군과 20개의 감마선 군에 대한 자료가 주어져 있고 24개 핵종에 대해서는 47개 중성자군에 대한 자료만 주어져 있다. BUGLE80의 상세군 라이브러리인 VITAMIN-C 라이브러리는 ENDF/B-IV, LENDL, ENDF/B-III 자료로부터 생산되었으며 171개의 중성자군과 36개의 감마선군으로 이루어져 있다. BUGLE80 라이브러리는 VITAMIN-C 라이브러리로부터 PWR의 압력용기 바깥쪽 콘크리트 차폐벽에서의 중성자 스펙트럼을 가중함수로 하여 생산되었다.

BUGLE93 라이브러리는 120개의 핵종에 대한 자료를 포함하고 있으며 Sn과 Zirc2를 제외한 전 핵종에 대한 자료를 ENDF/B-VI로부터 취했다. BUGLE93 라이브러리에 수록된 핵종은 표 1에 있는 바와 같다. ENDF/B-VI로부터 유도된 상세군 라이브러리인 VITAMIN-B6 라이브러리는 199개의 중성자 에너지군과 42개의 감마선 에너지군으로 이루어져 있고 VITAMIN-B6를 AMPX-77 처리체제를 사용하여 만든 축약된 다군 라이브러리인 BUGLE93은 BUGLE80과 같은 47개의 중성자군과 20개의 감마선 에너지군으로 이루어져 있다. BUGLE80 라이브러리가 모든 핵종의 단면적 생산에 콘크리트 차폐벽에서의 중성자 스펙트럼을 가중함수로 사용한 반면 BUGLE93 라이브러리는 가압 경수로 노심, 비동경수로 노심, 가압경수로의 downcomer 영역, 압력용기, 콘크리트 등 5개 영역에서의 가중함수를 사용하여 핵종들의 해당영역에 따른 단면적을 제공한다. 또한 BUGLE93 라이브러리는 EN-

DF/B-VI 계산에 근거한 중성자 측정자료의 핵반응 단면적을 제공하고 있다.

표 2에 세 라이브러리의 에너지 군구조를 비교하였다. CASK와 BUGLE80 라이브러리는 Legendre P3 전개로 되어 있는 반면 BUGLE93 라이브러리는 Z(30)인 핵종에 대해서는 Legendre P7 전개, 그 이외의 핵종에 대해서는 P5 전개로 되어 있으며 본 계산에서는 세 개의 라이브러리에 대한 계산 모두 P3 전개를 적용하였다.

### 3. 계산과정

수송계산에 필요한 거시적 핵단면적을 계산하기 위한 각 물질 구성 원소들의 수밀도가 표 3에 있으며 이중

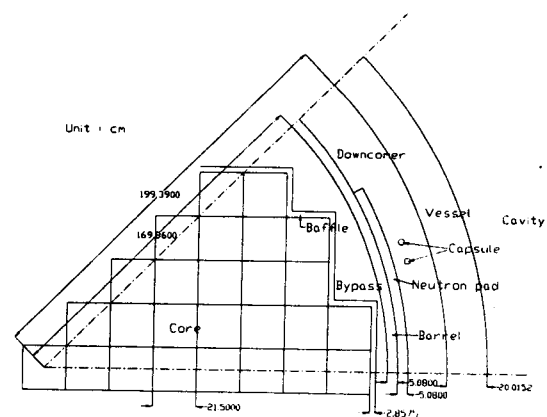


그림 1. 고리 3호기 원자로의 형태

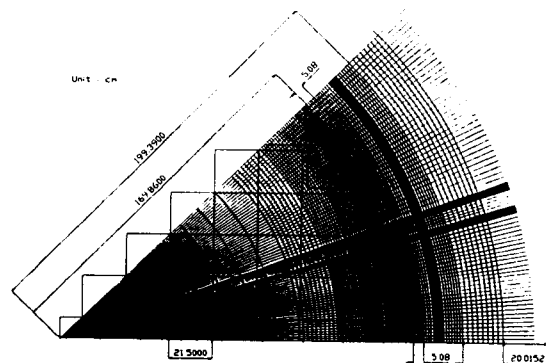


그림 2. 압력용기 중성자 조사량 계산을 위한 R-θ 모델링

표 1. BUGLE93 라이브러리에 수록된 핵종

Entry	Nuclide	ANISN-ID	Entry	Nuclide	ANISN-ID
1	Ag-107	1- 6	61	Li-7	419-426
2	Ag-109	7- 12	62	Mg	427-434
3	Al-27	13- 20	63	Mn-55	435-442
4	Am-241	21- 26	64	Mo	443-448
5	Am-242	27- 32	65	N-14	449-456
6	Am-242m	33- 38	66	N-15	457-464
7	Am-243	39- 44	67	Na-23	465-472
8	Au-197	45- 50	68	Nb-93	473-478
9	B-10	51- 58	69	Ni-58	479-486
10	B-11	59- 66	70	Ni-60	487-494
11	Ba-138	67- 72	71	Ni-61	495-502
12	Be-9	73- 80	72	Ni-62	503-510
13	Be-9 (Thermal)	81- 88	73	Ni-64	511-518
14	Bi-209	89- 94	74	Np-237	519-524
15	C	95-102	75	Np-238	525-530
16	C(Graphite)	103-110	76	Np-239	531-536
17	Ca	111-118	77	O-16	537-544
18	Cd-Nat	119-124	78	O-17	545-552
19	Cl-Nat	125-132	79	P-31	553-560
20	Cm-241	133-138	80	Pa-231	561-566
21	Cm-242	139-144	81	Pa-233	567-572
22	Cm-243	145-150	82	Pb-206	573-578
23	Cm-244	151-156	83	Pb-207	579-584
24	Cm-245	157-162	84	Pb-208	585-590
25	Cm-246	163-168	85	Pu-236	591-596
26	Cm-247	169-174	86	Pu-237	597-602
27	Cm-248	175-180	87	Pu-238	603-608
28	Co-59	181-188	88	Pu-239	609-614
29	Cr-50	189-196	89	Pu-240	615-620
30	Cr-52	197-204	90	Pu-241	621-626
31	Cr-53	205-212	91	Pu-242	627-632
32	Cr-54	213-220	92	Pu-243	633-638
33	Cu-63	221-228	93	Pu-244	639-644
34	Cu-65	229-236	94	Ru-185	645-650
35	Eu-151	237-242	95	Ru-187	651-656
36	Eu-152	243-248	96	S	657-664
37	Eu-153	249-254	97	S-32	665-672
38	Eu-154	255-260	98	Si	673-680
39	Eu-155	261-266	99	Sn-nat	681-686
40	F-19	267-274	100	Ta-181	687-692
41	Fe-54	275-282	101	Ta-182	693-698
42	Fe-56	283-290	102	Th-230	699-704
43	Fe-57	291-298	103	Th-232	705-710
44	Fe-58	299-306	104	Ti	711-718
45	Ga	307-312	105	U-232	719-724
46	H-1(H <sub>2</sub> O)	313-320	106	U-233	725-730
47	H-1(CH <sub>2</sub> )	321-328	107	U-234	731-736
48	H-2(D <sub>2</sub> O)	329-336	108	U-235	737-742
49	H-3	337-344	109	U-236	743-748
50	He-3	345-352	110	U-237	749-754
51	He-4	353-360	111	U-238	755-760
52	Hf-174	361-366	112	V	761-768
53	Hf-176	367-372	113	W-nat	769-774
54	Hf-177	373-378	114	W-182	775-780
55	Hf-178	379-384	115	W-183	781-786
56	Hf-179	385-390	116	W-184	787-792
57	Hf-180	391-396	117	W-186	793-798
58	In-Nat	397-402	118	Y-89	799-804
59	K	403-410	119	Zr	805-810
60	Li-6	411-418	120	Zr (Zirc-2)	811-816

표 2. CASK, BUGLE80, BUGLE93 라이브러리의 에너지 군구조 비교

CASK		BUGLE80 & BUGLE93	
Group Number	Upper Energy(eV)	Group Number	Upper Energy(eV)
1	1.492e+7	1	1.7332e+7
2	1.220e+7	2	1.4191e+7
3	1.000e+7	3	1.2214e+7
4	8.180e+6	4	1.0000e+7
5	6.360e+6	5	8.6071e+6
6	4.960e+6	6	7.4082e+6
7	4.060e+6	7	6.0653e+6
8	3.010e+6	8	4.9659e+6
9	2.460e+6	9	3.6788e+6
10	2.350e+6	10	3.0119e+6
11	1.830e+6	11	2.7253e+6
12	1.110e+6	12	2.4660e+6
13	5.500e+5	13	2.3653e+6
14	1.110e+5	14	2.3457e+6
15	3.350e+3	15	2.2313e+6
16	5.830e+2	16	1.9205e+6
17	1.010e+2	17	1.6530e+6
18	2.900e+1	18	1.3534e+6
19	1.070e+1	19	1.0026e+6
20	3.060e+0	20	8.2085e+5
21	1.120e+0	21	7.4274e+5
22	4.140e-1	22	6.0810e+5
	1.000e-2	23	4.9787e+5
		24	3.6883e+5
		25	2.9721e+5
		26	1.8316e+5
		27	1.1109e+5
		28	6.7379e+4
		29	4.0868e+4
		30	3.1828e+4
		31	2.6058e+4
		32	2.4176e+4
		33	2.1875e+4
		34	1.5034e+4
		35	7.1017e+3
		36	3.3546e+3
		37	1.5846e+3
		38	4.5400e+2
		39	2.1445e+2
		40	1.0130e+2
		41	3.7266e+1
		42	1.0677e+1
		43	5.0435e+0
		44	1.8554e+0
		45	8.7643e-1
		46	4.1399e-1
		47	1.0000e-1
			1.0000e-5

표 3. 내부구조물의 구성원자 밀도

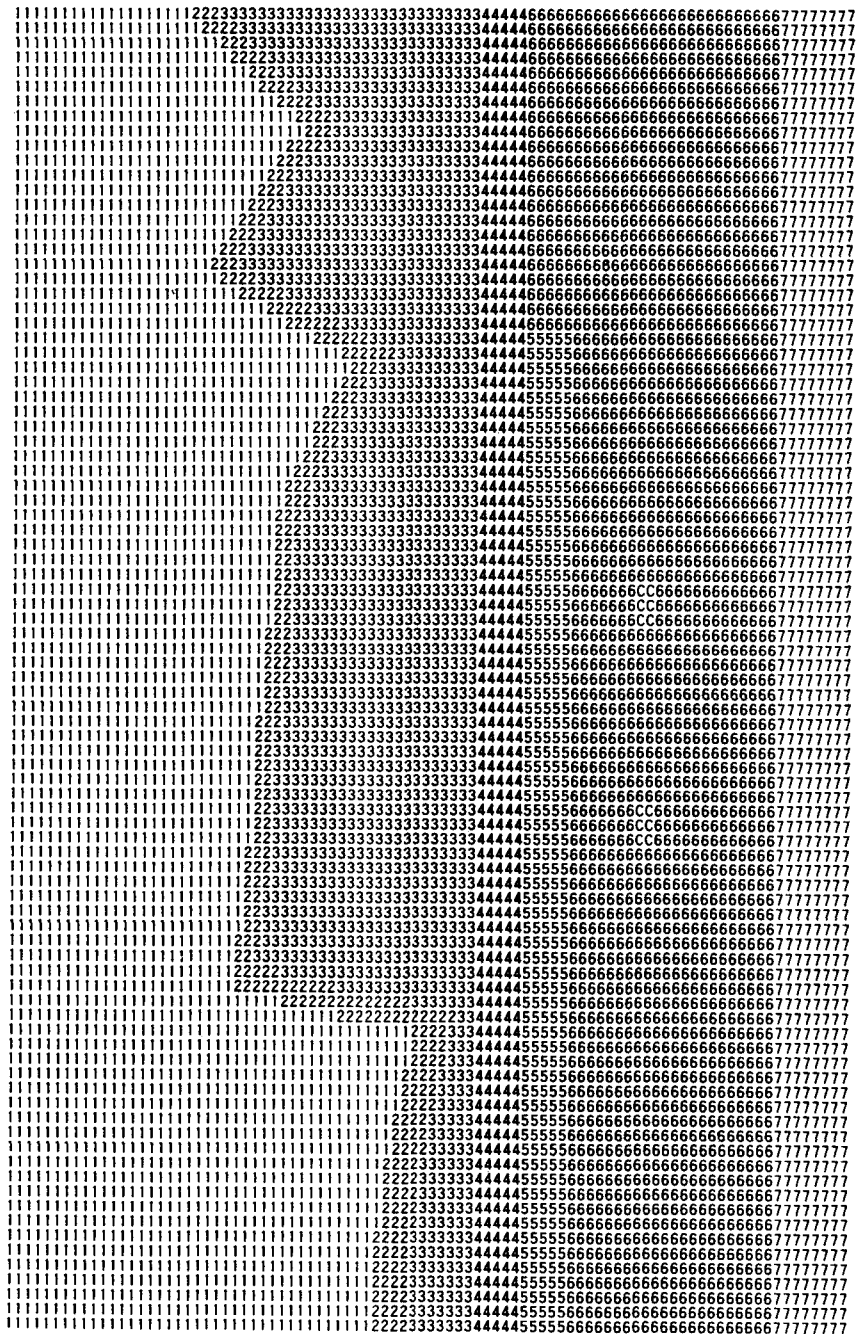
Nuclide	Atom Density (atoms/cm · barn)				
	Core	Coolant		Baffle, Barrel	Vessel
		Bypass	Downcomer	Neutron pad	
Fe54	1.128 E -5			3.384 E -3	4.757 E -3
Fe56	1.786 E -4			5.357 E -2	7.529 E -2
Fe57	4.182 E -6			1.255 E -3	1.763 E -3
Fe58	5.641 E -7			1.692 E -4	2.378 E -4
Fe <sup>γ</sup>	1.945 E -4			5.835 E -2	8.201 E -2
Cr50	4.550 E -6			7.560 E -4	1.188 E -6
Cr52	8.764 E -5			1.456 E -2	2.288 E -5
Cr53	9.937 E -6			1.651 E -3	2.594 E -6
Cr54	2.469 E -6			4.102 E -4	6.445 E -7
Cr <sup>γ</sup>	1.046 E -4			1.738 E -2	2.731 E -5
C	1.765 E -6			3.169 E -4	8.670 E -4
Mn	4.917 E -6			1.732 E -3	1.258 E -3
Si	5.790 E -6			1.694 E -3	4.045 E -4
Ni58	1.078 E -4			5.119 E -4	3.414 E -4
Ni60	4.119 E -5			1.956 E -4	1.305 E -4
Ni61	1.783 E -6			8.469 E -6	5.649 E -6
Ni62	5.665 E -6			2.691 E -5	1.795 E -5
Ni64	1.436 E -6			6.820 E -6	4.549 E -6
Ni <sup>γ</sup>	1.578 E -4			7.495 E -4	4.999 E -4
Sn	5.083 E -5				1.196 E -6
Mo	4.883 E -6				4.394 E -4
Ti	2.960 E -6				9.880 E -6
Al	2.915 E -6				3.859 E -5
B-10	4.062 E -6	3.350 E -6	3.350 E -6		
H	2.736 E -2	4.667 E -2	4.976 E -2		
O	2.681 E -2	2.333 E -2	2.488 E -2		
Zr	4.330 E -3				
U-235	1.670 E -4				
U-238	6.890 E -3				

\*) used in CASK and BUGLE80 calculation

BUGLE93 라이브러리의 경우는 각 핵종들의 동위원소 별로 단면적이 나타나 있으므로 존재비를 고려한 수밀도를 나타내었다. 핵단면적 라이브러리의 미시적 핵단면적과 수밀도를 입력으로 GIP 코드<sup>9)</sup>를 사용하여 거시적 핵단면적을 계산하였다. 수송계산에는 2차원 각분할 수송 코드인 DOT 4.3<sup>10)</sup>이 사용되었고 구적계수는 S<sub>8</sub>을 사용하였다. 그림 1과 2에 고리 3호기 원자로의 수송계산을 위한 R-Θ 모형과 mesh 분포가 있으며 반경방향과 방위각방향으로 각각 90개의 mesh로 나누어 계산하

였다. 각 mesh에 해당하는 물질은 그림 3에 있다. 감시 시험 결과와의 비교를 위해 원자로 모델링시 시편을 포함시켰는데 시편은 그림 1에 보이는 바와 같이 17°와 20° 방향에 있다. 사용된 분열 스펙트럼은 U-235 분열 스펙트럼인 Watt 스펙트럼으로 CASK와 BUGLE93의 군구조에 해당하는 각 group별 X값이 표 4에 있다.

계산에 사용된 선원항은 노심 분석에 사용되는 MEDIAN/PINPOW 계산을 통해 얻은 핵연료봉의 출력 분포를 사용하였다. 핵연료봉 출력은 각 주기별로 연소



( 1: Core, 2: Baffle, 3: Bypass Water, 4: Barrel, 5: Neutron Pad, 6: Downcomer Water  
7: Vessel, C: Surveillance Capsule )

그림 3. DOT 계산모델 영역별 물질구분

표 4. 에너지 군구조에 따른 U-235 Fission Spectrum(Watt Spectrum)

CASK			BUGCE80 & BUGCE93		
Group Number	Upper Energy(MEV)	$\int \chi(E)dE$	Group Number	Upper Energy(MEV)	$\int \chi(E)dE$
1	1.492e+1	1.879389e-04	1	1.7332e+1	3.867174e-05
2	1.220e+1	1.009025e-03	2	1.4191e+1	1.667486e-04
3	1.000e+1	3.815304e-03	3	1.2214e+1	1.011393e-03
4	8.180e+0	1.490457e-02	4	1.0000e+1	2.402180e-03
5	6.360e+0	3.538788e-02	5	8.6071e+0	5.456212e-03
6	4.960e+0	4.881427e-02	6	7.4082e+0	1.571812e-02
7	4.060e+0	1.068775e-01	7	6.0653e+0	3.029857e-02
8	3.010e+0	8.898502e-02	8	4.9659e+0	8.008765e-02
9	2.460e+0	2.127216e-02	9	3.6788e+0	7.557539e-02
10	2.350e+0	1.183683e-01	10	3.0119e+0	4.288108e-02
11	1.830e+0	2.147463e-01	11	2.7253e+0	4.524072e-02
12	1.110e+0	1.960439e-01	12	2.4660e+0	1.936319e-02
13	5.500e-1	1.335422e-01	13	2.3653e+0	3.890682e-03
14	1.110e-1	1.605535e-02	14	2.3457e+0	2.352119e-02
15	3.350e-3	8.193777e-05	15	2.2313e+0	7.118672e-02
16	5.830e-4	5.958846e-06	16	1.9205e+0	7.016870e-02
17	1.010e-4	3.919002e-07	17	1.6530e+0	8.843513e-02
18	2.900e-5	5.529109e-08	18	1.3534e+0	1.154901e-01
19	1.070e-5	1.352881e-09	19	1.0026e+0	6.356598e-02
20	3.060e-6	1.901717e-09	20	8.2085e-1	2.771999e-02
21	1.120e-6	4.193196e-10	21	7.4274e-1	4.778991e-02
22	4.140e-7	1.210980e-10	22	6.0810e-1	3.852952e-02
			23	4.9787e-1	4.330787e-02
			24	3.6883e-1	2.258515e-02
			25	2.9721e-1	3.243732e-02
			26	1.8316e-1	1.708685e-02
			27	1.1109e-1	8.393792e-03
			28	6.7379e-2	4.060023e-03
			29	4.0868e-2	1.150602e-03
			30	3.1828e-2	6.587588e-04
			31	2.6058e-2	2.007514e-04
			32	2.4176e-2	2.353216e-04
			33	2.1875e-2	6.273762e-04
			34	1.5034e-2	5.638026e-04
			35	7.1017e-3	1.837780e-04
			36	3.3546e-3	5.977605e-05
			37	1.5846e-3	2.435220e-05
			38	4.5400e-4	2.980490e-06
			39	2.1445e-4	9.676892e-07
			40	1.0130e-4	3.614196e-07
			41	3.7266e-5	8.788831e-08
			42	1.0677e-5	1.075141e-08
			43	5.0435e-6	4.015268e-09
			44	1.8554e-6	7.788463e-10
			45	8.7643e-7	2.528580e-10
			46	4.1399e-7	1.071197e-10
			47	1.0000e-7	1.443030e-11

도에 따라 그 분포가 달라지는데 본 계산에서는 해당주기의 연소도에 따른 분포를 평균하여 사용하였다.

#### 4. 결과 분석

분석에 사용된 중성자속은 압력용기의 취화에 영향을 미치는 고속중성자( $> 1\text{MeV}$ )속만을 고려하였다. 그림 4의 반경방향 고속중성자속 분포를 보면 고속중성자속은 노심을 지나면서 급격히 감소하게 되는데 특히 물을 통과할 때 감소하는 경향이 더 커지며 이는 중성자 감속 효과가 큰 수소 입자 때문이다. 사용한 라이브러리에 따른 중성자속분포의 차이를 보기 위해 BUGLE80과 BUGLE93으로 계산된 결과를 CASK 계산에 대한 상대적 비로 나타낸 것이 그림 5에 있다. 그림 5에서

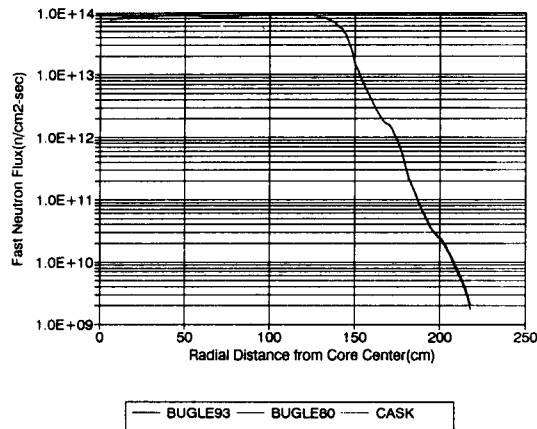


그림 4. 반경방향 고속중성자속 분포( $\theta=17^\circ$ )

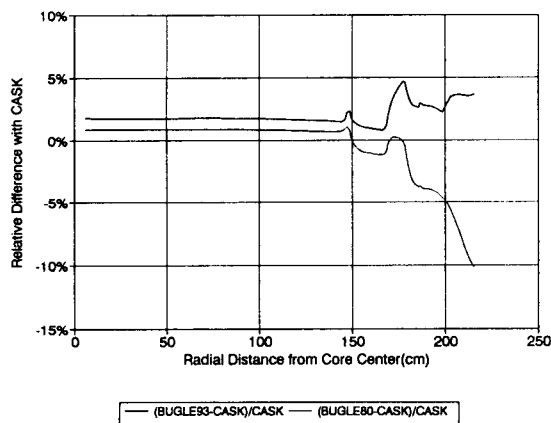


그림 5. 반경방향 고속중성자속의 라이브러리에 따른 상대적인 차이 비교

CASK로 계산된 중성자속은 graph의 0%에 해당하므로 BUGLE93의 결과는 CASK로 계산된 중성자속보다 항상 크며 BUGLE80으로 계산된 고속중성자속은 CASK에 비해 노심에서는 더 큰 값을 갖다가 압력용기 바깥쪽에서는 약 10% 이상 작은 값을 보인다.

그림 6에 압력용기 안쪽과 바깥쪽에서의 방위각방향 고속중성자속 분포를 보이고 있다. 방위각방향 고속중성자속분포를 보면  $0^\circ$  방향에서 최대치를 갖다가 서서히 감소하게 되는데 이는  $0^\circ$  방향에서 압력용기가 노심에 가장 근접해 있기 때문이다. 이를 반경방향 중성자속 분포와 마찬가지로 CASK에 대한 BUGLE80과 BUGLE93 계산치의 상대적 비로 나타낸 것이 그림 7에 있다

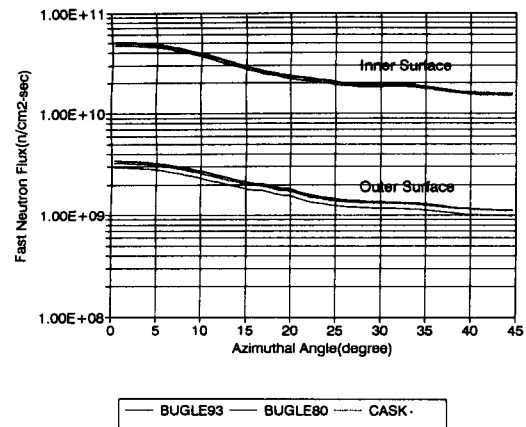


그림 6. 방위각방향 고속중성자속 분포(압력용기 안쪽과 바깥쪽)

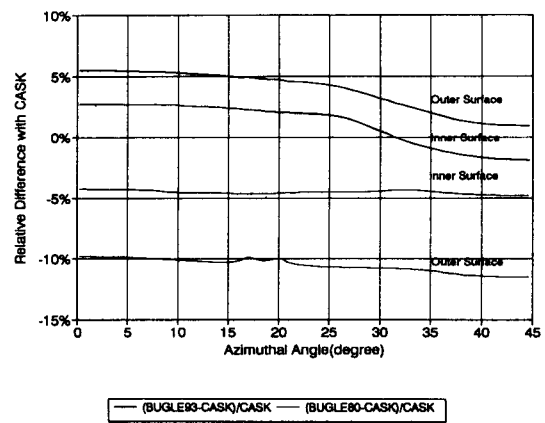


그림 7. 방위각방향 고속중성자속의 라이브러리에 따른 상대적인 차이 비교



며 이 graph를 보면 BUGLE80에 의한 계산 결과는 압력용기 안쪽에서는 CASK 보다 5%정도 작고 바깥쪽에서는 10%정도 더 작은 값을 갖는다. 그리고 BUGLE93에 의한 압력용기 안쪽에서의 고속중성자속 분포를 보면 0° 부근에서는 CASK보다 3% 더 큰 값을 갖다가 30° 위쪽에서는 오히려 CASK에 의한 고속중성자속이 더 큰 값을 갖는다. 이러한 결과가 나타나는 이유는 압력용기 안쪽, 방위각 0°~30° 영역에 위치한 중성자 패드를 통과하는 고속중성자속의 상대적인 차이 때문으로 스테인레스강에 대한 중성자 투과량이 CASK에 비해

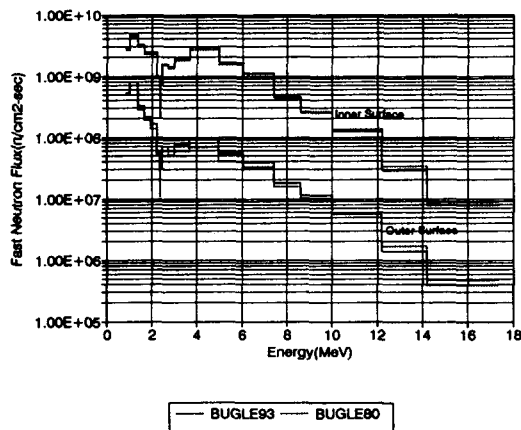


그림 8. 압력용기 바깥쪽에서 BUGLE80과 BUGLE93 라이브러리로 계산된 에너지에 따른 고속중성자속의 분포

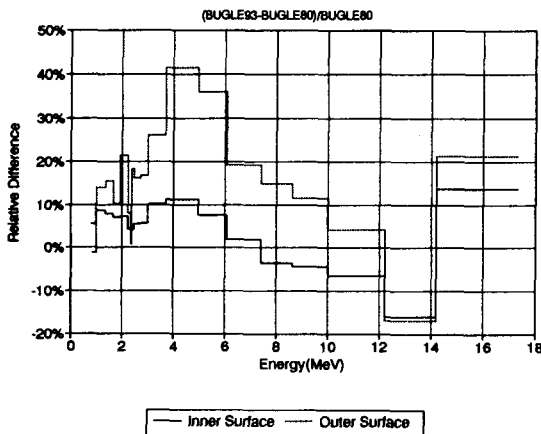


그림 9. BUGLE80과 BUGLE93 라이브러리로 계산된 에너지에 따른 고속중성자속의 상대적인 차이

BUGLE93이 상대적으로 큼을 보여주는 것이다. 그림 7에서 BUGLE80과 BUGLE93으로 계산된 압력용기 안쪽과 바깥쪽에서의 고속중성자속 분포를 보면 BUGLE80에서는 압력용기를 통과하면서 고속중성자속이 5~7%의 감소를 보임에 비해 BUGLE93의 결과는 약 3%만이 감소됨을 볼 수 있다. 그림 8은 같은 군구조를 갖는 BUGLE80과 BUGLE93으로 계산된 중성자속을 에너지에 따른 분포로 나타낸 것인데 압력용기 안쪽에서는 8MeV이상 영역에서 BUGLE80에 의한 고속 중성자속이 더 큰 값을 나타내는 반면 압력용기 바깥쪽에서는 12MeV 이하 영역에서 BUGLE93에 의한 결과가 더 크다. 이 결과를 그림 9에 BUGLE80과 BUGLE93으로 계산된 중성자속의 상대적 비로 나타내었는데 이 그림에서보면 1~12MeV 영역에서 BUGLE93에 의한 고속중성자속이 압력용기를 통과함에 따라 BUGLE80보다 크게 증가함을 볼 수 있다. 특히 압력용기를 통과하면서 BUGLE93으로 계산된 3~12MeV 영역의 중성자속이 BUGLE80에 의한 계산보다 10~30% 더 증가하는 것은 서론에서 언급하였듯이 이 에너지 영역 중성자의 비탄성산란단면적이 ENDF/B-VI에서 15~20% 감소하였기 때문으로 추정된다.

감시시험시 시편에 조사된 고속중성자속은 직접 측정되는 것이 아니라 중성자 측정시료에서 측정된 방사능(activity)으로부터 다음 식에 의해 계산된다.

$$\phi_{\text{meas}}(E > E_c) = \frac{A_{\text{TOR}}}{N \sigma(E > E_c) C} \quad (1)$$

이 때  $A_{\text{TOR}}$ 은 핵주기말에서 측정된 방사능인데 실제로 방사능은 실험실로 옮겨진 후 측정되므로 측정된  $A_{\text{count}}$ 로부터 다음 식에 의해 계산된다.

$$A_{\text{TOR}} = A_{\text{count}} \exp(\lambda T_{\text{count}}) \quad (2)$$

여기서  $\lambda$ 는 중성자 측정시료의 붕괴상수이고  $T_{\text{count}}$ 는 핵주기말에서 중성자가 측정될 때까지의 시간이다. 그리고  $N$ 은 mg당 중성자 측정시료의 원자수이며  $\sigma(E > E_c)$ 는  $E > E_c$ 인 중성자의 평균핵반응단면적으로 중성자 측정시료가 있는 위치에서 에너지  $E$ 를 갖는 중성자속  $\phi_{\text{calc}}(E)$ 와 에너지  $E$ 인 중성자에 대한 중성자 측정시료의 핵반응단면적  $\sigma(E)$ 로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma(E > E_c) = \frac{\int_0^\infty \sigma(E) \phi_{\text{calc}}(E) dE}{\int_{E_c}^\infty \phi_{\text{calc}}(E) dE} \quad (3)$$

BUGLE93 라이브러리에는 Dosimeter File이 제공되어 있으므로 이 data를 이용하여 계산된 평균 핵반응단면적이 표 5에 있다. (1) 식에서 C는 포화율로 대상 원자로가  $t_0^*$  기간동안  $f_n$ 의 가동율로 운전되다가 어느 기간 중지하기를 K회 반복하다가 핵주기말(Time of Removal; TOR)이 되어 정지했을 때

$$C = \sum_{n=1}^K f_n [1 - \exp(-\lambda t_n^*)] \exp(-\lambda t_w^*) \quad (4)$$

로 계산되는데 여기서  $t_w^*$ 은  $t_0^*$ 부터 핵주기말까지의 시간이다. 100% 출력일 때 방사성 동위원소의 생성률은 포화방사능(Saturated Activity)  $A_{SAT}$ 인데 측정된  $(A_{SAT})_{meas}$ 는  $A_{TOR}/C$ 로 나타나며 이에 해당하는 포화방사능 계산치  $(A_{SAT})_{calc}$ 는 다음 식으로 정의된다.

$$(A_{SAT})_{calc} = N \int_0^\infty \sigma(E) \phi_{calc}(E) dE \quad (5)$$

(1) 식과 (5) 식으로부터

$$\phi_{meas}(E > E_c) = \frac{(A_{SAT})_{meas}}{(A_{SAT})_{calc}} \phi_{calc}(E > E_c) \quad (6)$$

를 얻을 수 있으며 이 때 보정인자  $(A_{SAT})_{meas}/(A_{SAT})_{calc}$ 는 중성자 측정시료로부터 측정된 방사능을 근거로

압력용기에 조사되는 중성자 조사량을 추정하는데 사용된다. 즉 압력용기에서 계산된 고속중성자속에 보정인자를 곱해서 압력용기에 조사되는 실제 고속중성자조사량을 추정할 수 있다.

표 5의 평균핵반응단면적과 Reference 7의 측정 방식으로부터 (1) 식을 적용하여 얻은 고속중성자속 측정치와 포화방사능 측정치 및 계산치가 표 6과 7에 있으며 이 때 계산치는 수송계산 결과 시편에서의 고속중성자속 값이다. 표의 계산치와 측정치는 BUGLE93을 사용하여 얻은 값이다. 검시시험시 측정시료의 반감기가 너무 짧은 경우는 오래전에 생성된 동위원소들이 이미 소멸되어 없어지고 너무 긴 경우는 생성된 동위원소 수가

표 5. 중성자 측정시료에서의 평균핵반응단면적

핵반응	평균핵반응단면적	
	1차 감시시험	2차 감시시험
$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	0.107020	0.109397
$^{63}\text{Cu}(n, \alpha)^{60}\text{Co}$	0.000994	0.001038
$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$	0.141513	0.144393

표 6. 1차 감시시험시 시편에서의 고속중성자속 계산치와 측정치

핵반응	포화방사능 (dps/mg)		고속중성자속 (n/cm <sup>2</sup> ·sec)		고속중성자집적량 (n/cm <sup>2</sup> )	
	측정치 <sup>*)</sup>	계산치	측정치 <sup>*)</sup>	계산치	측정치 <sup>*)</sup>	계산치
$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	6029.4362	9209.966	$9.01 \times 10^{10}$	$1.38 \times 10^{11}$	$2.54 \times 10^{18}$	$3.87 \times 10^{18}$
$^{63}\text{Cu}(n, \alpha)^{60}\text{Co}$	553.6627	897.4397	$8.49 \times 10^{10}$	$1.38 \times 10^{11}$	$2.39 \times 10^{18}$	$3.87 \times 10^{18}$
$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$	88390.7970	13465.8	$8.91 \times 10^{10}$	$1.38 \times 10^{11}$	$2.51 \times 10^{18}$	$3.87 \times 10^{18}$

\* 측정치는 중성자측정시료에서 측정된 방사능과 BUGLE93의 Dosimete File을 적용하여 계산된 값이다.

표 7. 2차 감시시험시 시편에서의 고속중성자속 계산치와 측정치

핵반응	포화방사능 (dps/mg)		고속중성자속 (n/cm <sup>2</sup> ·sec)		고속중성자집적량 (n/cm <sup>2</sup> )	
	측정치 <sup>*)</sup>	계산치	측정치 <sup>*)</sup>	계산치	측정치 <sup>*)</sup>	계산치
$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	4909.9553	7726.78	$7.18 \times 10^{10}$	$1.13 \times 10^{11}$	$7.71 \times 10^{18}$	$1.21 \times 10^{18}$
$^{63}\text{Cu}(n, \alpha)^{60}\text{Co}$	569.0294	768.6366	$8.36 \times 10^{10}$	$1.13 \times 10^{11}$	$8.99 \times 10^{18}$	$1.21 \times 10^{18}$
$^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$	348.6248	114281.2	$3.45 \times 10^{10}$	$1.13 \times 10^{11}$	$3.70 \times 10^{18}$	$1.21 \times 10^{18}$

\* 측정치는 중성자측정시료에서 측정된 방사능과 BUGLE93의 Dosimete File을 적용하여 계산된 값이다.

적어 통계적인 의미가 없어지므로 일반적으로 가동기간과 거의 비슷한 반감기를 갖는 핵종을 대상으로 측정된 방사능으로부터 고속중성자속 측정치를 계산한다. 따라서 1차 감시시험에서는  $^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$  반응으로 계산된 고속중성자속을 취하고 2차 감시시험에서는  $^{63}\text{Cu}(n, \alpha)^{60}\text{Co}$  반응에 의한 결과를 취한다.

## 5. 결 론

본 보고서에서는 CASK, BUGLE80, BUGLE93 라이브러리를 사용하여 고리 3호기 원자로를 대상으로 압력용기를 포함한 원자로내부에서의 고속중성자속을 계산하였다. 계산 결과 BUGLE93 핵단면적 자료를 이용한 고속중성자속이 압력용기 바깥쪽에서 BUGLE80을 이용한 계산에 비해 최고 15% 정도, CASK 라이브러리를 이용한 계산값보다는 최고 6% 정도 더 큰 결과를 보여주었다. 이러한 결과는 BUGLE93 라이브러리는 개선된 철의 핵단면적을 사용하고 있어 그 이전 핵단면적 자료에 비해 철을 포함하는 물질의 중성자 투과를 크게 계산하고 있기 때문이다.

표 6과 7에서 계산된 고속중성자속으로부터 측정치를 얻기 위한 보정인자는

$$\frac{(A_{SAT})_{meas}}{(A_{SAT})_{calc}} \Big|_{1차} = \frac{6029.4362}{9209.966} = 0.65,$$

$$\frac{(A_{SAT})_{meas}}{(A_{SAT})_{calc}} \Big|_{2차} = \frac{4909.9553}{7726.78} = 0.64$$

와 같으므로 이로부터 추정된 압력용기에서 고속중성자속 측정치는 표 8과 같다. 표 8의 값은 해당지점에서의 최대치를 나타낸 것이다.

표 6과 7에서 고속중성자속 측정치는 계산치의 약 65%에 불과한 값을 나타내어 두 결과가 잘 일치되지 않음을 알 수 있다. ENDF/B-VI 자료를 이용한 참고문서 11의 계산 결과를 보면 측정치가 계산치보다 35~40% 더 작은 값을 나타내고 있어 이 보고서의 계산과 같은 결과를 보인다. 하지만 현재 보고된 바에 의하면 ENDF/B-V에 개선된 철의 핵단면적을 적용하면 측정치와 상당히 잘 일치되는 결과를 얻고 있다.<sup>4)</sup> 실제로 현재의 감시시험시 분석방법을 근거로 하면 감시시험과 압력용기에서의 중성자속 비만이 필요하므로 측정치와 계산치의 절대치 비교 분석 결과는 포함시키지 않는 경우가 많다. 따라서 이러한 측정치와 계산치의 비교분석 자료도 많지 않은데 최근들어 이러한 분석이 활발히 진행되고 있고 특히 BNDF/F-VI를 근거로 한 자료는 현재 계속 발표되고 있는 상황이므로 종합적인 분석결과를 얻으려면 더 많은 자료가 필요하다. 그리고 우리나라에서 운전되고 있는 원자로를 대상으로 한 이러한 분석은 거의 행해지고 있지 않아 지금까지 실시된 감시시험 자료를 토대로 종합적인 분석이 이루어져야 할 것이다.

## 참고문헌

1. R.H. Johnson, et al., *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **22**, 799 (1975)

표 8. 압력용기에서의 고속중성자 집적량 계산치와 측정치

위치	고속중성자속 ( $n/cm^2 \cdot sec$ )				고속중성자 집적량 <sup>②</sup> ( $n/cm^2$ )			
	1차 감시시험		2차 감시시험		1차 감시시험		2차 감시시험	
	측정치 <sup>①</sup>	계산치	측정치 <sup>①</sup>	계산치	측정치 <sup>①</sup>	계산치	측정치 <sup>①</sup>	계산치
감시시험	$9.01 \times 10^{10}$	$1.38 \times 10^{11}$	$8.36 \times 10^{10}$	$1.13 \times 10^{11}$	$9.09 \times 10^{19}$	$1.39 \times 10^{20}$	$8.44 \times 10^{19}$	$1.14 \times 10^{20}$
압력용기 내벽	$4.78 \times 10^{10}$	$7.35 \times 10^{10}$	$3.16 \times 10^{10}$	$4.93 \times 10^{10}$	$4.82 \times 10^{19}$	$7.42 \times 10^{19}$	$3.18 \times 10^{19}$	$4.98 \times 10^{19}$
압력용기 1/4 T	$3.02 \times 10^{10}$	$4.65 \times 10^{10}$	$2.00 \times 10^{10}$	$3.12 \times 10^{10}$	$3.05 \times 10^{19}$	$4.69 \times 10^{19}$	$2.02 \times 10^{19}$	$3.15 \times 10^{19}$
압력용기 3/4 T	$7.09 \times 10^9$	$1.09 \times 10^{10}$	$4.72 \times 10^9$	$7.37 \times 10^9$	$7.15 \times 10^{18}$	$1.10 \times 10^{19}$	$4.76 \times 10^{18}$	$7.44 \times 10^{18}$

\* 압력용기에서의 중성자 측정치는 계산치에 보정인자를 곱한 값이다. ((6) 식 참고)

② 고속중성자 집적량은 전수명기간(32 EFPY) 동안 조사된 양을 계산한 것이다.

2. C.Y. Fu, et al., *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **53**, 409 (1986)
3. M.L. Williams, et al., "Transport Calculations of Neutron Transmission through Steel using ENDF/B-V, Revised ENDF/B-V, and ENDF/B-VI Iron Evaluations," NUREG/CR-5648, US NRC, April 1991.
4. H.S. Basha, et al., *Nuclear Technology*, **100**, 79 (1992)
5. D.T. Ingersoll, et al., "Production and Testing of the VITAMIN-B6 Fine-Group and the BUGLE-93 Broad-Group Neutron/Photon Cross Section Libraries Derived from ENDF/B-VI Nuclear Data," Draft, Oak Ridge National Laboratory, April 1994.
6. R.W. Roussin, "Cask-81 22 Neutron, 18 Gamma-Ray Group, P3, Cross Sections for Shipping Cask Analysis," DLC-23, Oak Ridge National Laboratory, June 1981.
7. R.W. Roussin, "BUGLE-80, Coupled, 47 Neutron, 20 Gamma Ray, P3 Cross Section Library for Light Water Reactors," DLC-75, Oak Ridge National Laboratory, June 1980.
8. 최순필 등, "고리 원자력 3호기 원자로 압력용기 재료 제2차 감시시험 (캡슐V)," 한국원자력연구소, December 1991.
9. W.A. Rhoades, "The GIP Program for preparation of Group-Organized Cross Section Libraries," Oak Ridge National Laboratory, April 1978.
10. W.A. Rhoades, et al., "An Updated Version of the DOT4 One- and Two-Dimensional Neutron/Photon Transport Code," ORNL-5851, Oak Ridge National Laboratory, April 1982.
11. F.B.K. Kam, et al., "Pressure Vessel Fluence Analysis and Neutron Dosimetry," ORNL/TM-10651, Oak Ridge National Laboratory, December 1987.