

울진 1,2호기 노심운전분석코드 대체 및 검증

신호철, 김용배, 박문규, 이상희
전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

국내의 17×17형 원전연료는 종전의 KOFA 연료로부터 Westinghouse(WH)사 Vantage-5H (V5H) 연료로 대체중에 있으며, 울진 1,2호기의 경우 8주기부터 V5H 연료를 장전한다. V5H 연료는 연료 상하부를 천연우라늄으로 구성함으로써 축방향 농축도가 균일하지 않으므로 기존 FRAMATOME사의 2차원 노심운전분석코드체계 (CEDRIC-CARIN-ESTHER)로는 정확한 노심분석이 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 V5H 연료가 장전되는 울진 1,2호기에 대한 3차원 노심분석을 위하여 WH사의 INCORE-3D와 TOTE 코드를 PC-Version으로 개발하여 기존 코드체계를 대체하였다. 또한 WH형 원전과는 상이한 형식을 갖는 울진 1,2호기의 중성자속 측정자료를 INCORE 코드에 적합한 형태로 변환하기 위한 C2I 코드를 개발하고 울진 1호기 6주기의 실제 중성자속 측정 자료를 이용하여 검증하였다. 이들 개발 코드들을 울진 원전에 설치하고, 1호기 8주기 출력상승중 노심출력분포 측정시험(75% 및 100% 출력시험)에 적용한 결과 기술지침서상의 모든 제한사항이 만족되며 코드성능 또한 만족함을 확인하였다.

1. 서 론

현재 국내에서 가동중인 가압경수로 10기는 WH사가 공급한 6기(고리 1·2·3·4 호기, 영광 1·2 호기), Framatome사가 공급한 2기(울진 1·2 호기) 및 ABB-CE사가 공급한 2기(영광 3·4 호기) 등 3개 유형으로 구분되며, 각 유형마다 고유한 노심운전분석 전산코드 체계를 운영해 오고 있다. 그중 울진 1,2호기는 WH형 원전과 원자로의 설계가 사실상 동일함에도 불구하고 노심출력분포를 측정하는 방법상의 사소한 차이 때문에 서로 다른 노심분석체계를 유지하여 왔으며 이는 축방향으로 농축도가 균일한 종전의 핵연료를 사용하는 한 별로 문제 될 것이 없었다. 그러나, 최근 국내의 17×17 형 원전연료를 종전의 KOFA로 부터 좀더 개량된 V5H로 전환하면서 울진 1,2호기 노심운전 분석 업무는 커다란 문제에 직면하게 되었다. 즉, V5H의 여러 특성중 하나인 "Axial Blanket"은 연료봉 양단에 각각 6 inch 씩을 농축우라늄 대신 천연우라늄으로 채움으로써 축방향의 중성자 누출 감소로 연료의 경제성을 향상시킨다는 개념인데, 이는 곧 축방향 연료 농축도가 종전과는 달리 불균일해진다는 것을 의미한다. V5H 개념 출현과 동시에 WH사의

노심운전 분석체계는 이를 반영한 전산 코드 개선이 이루어진 반면 Framatome사의 노심운전 분석체계는 이러한 연료형태의 변경에 대처할 아무런 조치가 없었으므로, 울진 1,2호기에 V5H가 최초로 장전,가동되는 1996년 상반기 이전까지 이에 대한 해결책을 마련하지 않는다면 발전소 운전이 불가능한 사태까지도 예상할 수 있었던 것이다. 물론 고리나 영광의 WH형 원전에서, 사용중인 노심운전 분석용 코드들을 그대로 울진에 갖다 쓸 수 있다면 문제는 간단히 해결되었으나, 노심출력분포 측정개소 및 자료 처리방법의 차이등으로 인하여 그리 단순히 되지는 않으며 이들 코드를 분석하여 울진 1,2호기에 적용할 수 있도록 코드를 수정하고, 이왕이면 좀더 운영이 편리한 PC-Version으로 변환하는 작업이 필요한 것이다. 따라서 본 연구는 울진 1,2호기에 V5H 연료사용시 노심운전분석이 가능하며 업무효율 증대를 위한 PC version 노심운전분석 전산코드를 확보하는 것을 목적으로 한다.

2. 중성자속 측정자료 변환코드(C2I) 개발 및 검증

WH 및 FRAMATOME형 원전의 출력분포 측정방법, 계측기 형태와 계측 Thimble 위치 등은 동일하나 Thimble 번호, 축방향 계측 point수, 축약 point수 및 측정자료 저장형식이 다르다. 울진 원전의 중성자속분포 측정계통(RIC-KIT)은 한개의 핵연료집합체 실제 길이에 대해 총 512 point에서 중성자속 측정치에 해당하는 전류값을 읽어 전송하며 CEDRIC 코드는 이들 512개의 source data를 처리하여 57개 point로 축약하여 노심출력분포계산용 CARIN 코드의 입력자료를 생산한다. 그러나 WH형 원전의 중성자속 측정계통(DFMS)은 핵연료집합체 축방향 높이 0.5" 당 1 point씩 총 297개의 source data를 측정된 후 이를 49개 point로 축약하여 노심출력분포계산용 INCORE 코드의 입력자료(formatted data)를 생산한다. 또한, 울진 원전의 RIC-KIT는 측정자료를 16진수 형태로 저장하나 WH형 원전의 DFMS source data는 10진수 형태로 저장된다. <표 1>은 WH 및 FRAMATOME 원전의 노내 핵계측계통 특성을 비교한 것이다.

<표 1> WH 및 FRAMATOME 원전의 노내 핵계측계통 특성 비교

	WH형	FRAMATOME형
측정 장치명	DFMS	RIC-KIT
측정계측관 수	50	50
측정 point 수	297	512
Source data 형식	10 진수	16 진수
축약 point 수	49	57

따라서 울진 1, 2호기에서 INCORE 코드를 사용하기 위해서는 기존의 WH형 발전소와는 달리 RIC-KIT 계통에서 전송되는 source data를 INCORE 입력자료로 변환하는 과정을 필수적으로 거쳐야 하며 이를 위하여 CEDRIC 코드를 바탕으로 다음의 기능을 갖는 C2I (CEDRIC to INCORE) 코드를 개발하였다.

- 16진수 자료를 10진수로 변환
- 연료집합체 축방향 위치 설정
- 512개 측정점을 49개 측정점으로 축약
- 노심상태 자료 편집 및 INCORE 입력 file 출력

C2I 코드의 타당성을 확인하기 위하여 울진 1호기 6주기의 실제 중성자속 측정자료로부터 C2I 코드로 축약한 49개의 값과, CEDRIC 코드로 축약한 57개의 값을 비교한 결과 그림 1과 그림 2에서와 같이 각 코드의 계산 결과 차이는 무시할 만큼 작으므로 C2I 코드에 의한 측정자료의 축약 및 변환이 타당함을 알 수 있다. 또한 기존 WH형 발전소 보다 많은 측정 포인트로 부터 울진 1,2호기 INCORE 코드 입력 데이터를 축약함으로써 통계적 유효성이 증대되는 효과가 있다.

3. PC-Version INCORE-TOTE 코드 개발 및 검증

노심운전분석업무의 효율성 증대를 위하여 HP workstation용 최신 version의 INCORE-3D 7.4.3 및 TOTE 7.30 코드의 원시 프로그램을 Lahey Fortran 77 5.01 compiler를 사용하여 C2I 코드와 연계성을 갖으며 IBM 호환 PC에서 수행 가능한 PC version INCORE 및 TOTE 코드를 개발한 후 WH 사의 검증용 test matrix 및 고리 3호기 제9주기 측정자료를 이용하여 검증계산을 수행한 결과 <표 2>와 같은 결과를 얻었다. COMPAR 코드로 비교한 HP workstation version과 PC version의 INCORE-TOTE 코드 출력 file의 Numeric mismatch로서 각 코드의 수치계산 결과에 대한 각 version간의 % 오차를 의미하며 모든 계산결과가 10^{-5} 오차 범위 내에서 일치함을 확인할 수 있었다.

<표 2> HP workstation 및 PC version INCORE-TOTE 코드 계산결과 비교

검증 data	Number of Numeric Mismatch (% 오차)	
	0.000 % - 0.001 %	> 0.001 %
INCR10	4	0
INCR11	78	0
INCR12	4	0
INCR13	2	0
INCR14	2	0
INCR15	47	0
INCR16	51	0
INCR17	57	0
INCR18	62	0
INCR19	6	0
INCR20	2	0
INCR21	4	0
INCR22	2	0
INCR23	78	0
INCR24	78	0
INCR25	77	0
K3062394	4	0
K3092894	4	0
K3112594	6	0
TOTE17	1	0
TOTE19	0	0
K3051494	0	0
K3053194	0	0

4. 울진 1호기 8주기 노물리 시험 적용

울진 1호기 제8주기 원자로심은 157 다발의 핵연료집합체 중 97 다발의 KOFA 연료와 60 다발의 V5H 연료로 구성되어 있는 혼합 노심으로 운전 여유도를 충분히 활용하기 위하여 국내 최초로 RAOC(Relaxed Axial Offset Contol) 운전을 적용하였으며 기술지침서상의 V5H 및 KOFA 연료의 최대 Q(z) 제한치는 아래와 같다.

<u>V5H</u>	<u>KOFA</u>
$Q(z) \leq \frac{2.45}{P} [K(z)] \text{ for } P > 0.5$	$Q(z) \leq \frac{2.35}{P} [K(z)] \text{ for } P > 0.5$
$Q(z) \leq 4.90 [K(z)] \text{ for } P \leq 0.5$	$Q(z) \leq 4.70 [K(z)] \text{ for } P \leq 0.5$

$$Q(z) = [\text{Meas } F_q(z)] * W(z, Bu(\text{map}), \Delta I \text{ Band}) * F_q(E) * F_q(U)$$

$W(z, Bu(\text{map}), \Delta I \text{ Band})$: W(z) function

$F_q(E)$: 공학적 열속첨두계수 $F_q(U)$: 핵적 불확실도 열속첨두계수

PC-Version INCORE-TOTE 코드를 울진 1,2호기에 설치하고 울진 1호기 제8주기 75% 및 100% 출력중 노물리 시험에 적용하여 노심 출력분포를 측정된 결과 위 Q(z)를 포함한 노심 안전성 관련 제반 변수들이 기술지침서상의 모든 제한치를 만족함을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 울진 1,2호기 노심에 축방향 농축도가 다른 V5H 연료 장전시 FRAMATOME사의 CEDRIC-CARIN-ESTHER 코드로는 노심 3차원 분석이 불가능한 문제점을 WH사의 INCORE-3D와 TOTE 코드를 PC version으로 변환, 대체함으로써 해결하였다. 노심출력 측정자료를 INCORE 코드의 입력자료로 변환하기 위한 측정자료 변환코드인 C2I 코드와 INCORE-TOTE 코드의 PC Version을 개발한 후 검증계산을 통하여 측정자료 축약으로부터 최종적인 노심출력분포의 계산에 이르기까지 노심분석계산의 전 과정에 대한 타당성을 확인하였다. 개발 코드의 울진 1호기 제8주기 출력상승중 노물리 시험 적용계산 결과 그림 3부터 그림 8에서와 같이 모든 노심 안전성 관련 인자의 값이 기술지침서상의 제한치를 만족하며 코드의 성능도 모두 기준치내에 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] OCAP User Manual, INCORE 3D 7.4.3, Westinghouse, (1994)
- [2] OCAP User Manual, TOTE 7.3.0, Westinghouse, (1994)
- [3] INCORE 3D Programmers Manual for Version 7.4.3, Westinghouse, (1994)
- [4] TOTE Programmers Manual for Version 7.4.3, Westinghouse, (1994)

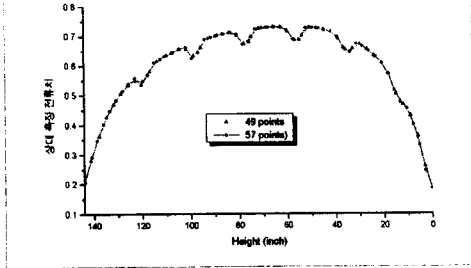


그림 1 계측관 # 40 측약값 비교

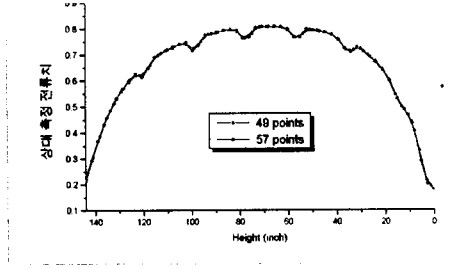
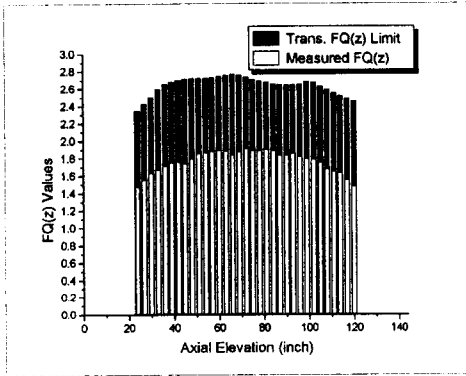
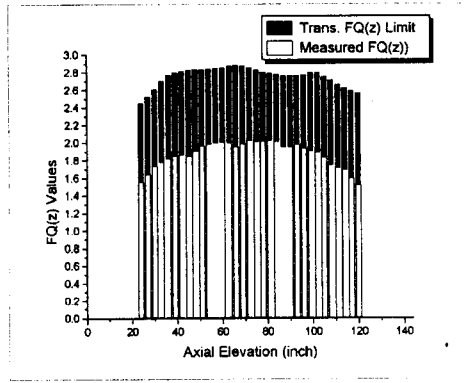


그림 2 계측관 # 8 측약값 비교



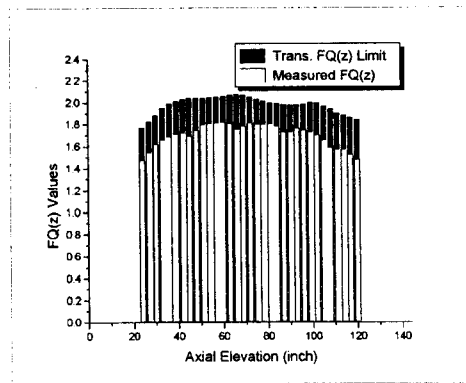
최소 Margin	28.61 %	노심 위치	G 3 Node # 22
-----------	---------	-------	------------------

그림 3 75% 출력시 JDAFA 연료 FQ(z)



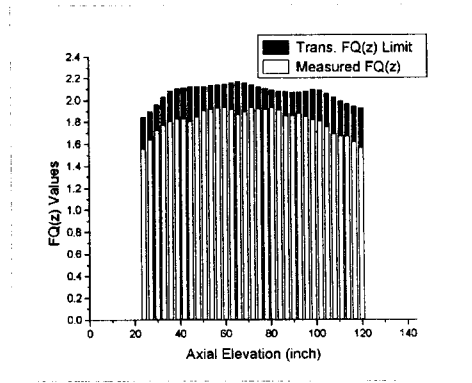
최소 Margin	27.21 %	노심 위치	H 3 Node # 22
-----------	---------	-------	------------------

그림 4 75% 출력시 V5H 연료 FQ(z)



최소 Margin	9.14 %	노심 위치	G 3 Node # 22
-----------	--------	-------	------------------

그림 5 100% 출력시 JDAFA 연료 FQ(z)



최소 Margin	7.51 %	노심 위치	H 13 Node # 22
-----------	--------	-------	-------------------

그림 6 100% 출력시 V5H 연료 FQ(z)

	R	P	N	M	L	K	J	H	G	F	E	D	C	B	A
1									0.285	0.313	0.291				
									-3.8	-3.8	-1.4				
2					0.348	0.989	1.099	0.994	1.103	1.004	0.358				
					-2.8	-0.4	-1.3	-1.6	-0.8	1.2	0.1				
3				0.316	1.068	1.299	1.290	1.352	1.299	1.305	1.076	0.314			
				-1.0	-0.8	0.5	0.0	0.0	0.7	1.1	0.1	-1.2			
4			0.316	0.599	1.122	1.217	1.302	1.102	1.303	1.220	1.129	0.600	0.315		
			-0.3	0.3	-0.1	0.8	0.5	0.5	0.6	1.0	0.6	0.5	-1.3		
5		0.365	1.095	1.135	1.264	1.177	1.212	1.147	1.220	1.188	1.274	1.140	1.063	0.343	
		1.9	2.0	1.2	0.8	0.9	1.2	1.3	1.9	1.6	1.6	1.5	-1.4	-4.3	
6		0.992	1.294	1.213	1.177	1.177	1.242	1.106	1.253	1.186	1.183	1.219	1.284	0.947	
		0.0	0.2	0.4	0.6	0.6	1.1	1.1	1.9	1.3	1.4	0.9	-0.7	-4.7	
7	0.281	1.064	1.271	1.287	1.203	1.239	1.200	0.941	1.207	1.248	1.212	1.295	1.280	1.099	0.292
	-4.6	-2.6	-1.4	-0.7	0.5	0.7	1.0	1.1	1.6	1.6	1.3	0.0	-0.8	-1.3	-1.6
8	0.310	0.962	1.333	1.082	1.139	1.105	0.940	0.759	0.943	1.109	1.145	1.091	1.343	0.979	0.313
	-4.6	-2.8	-1.4	-1.3	0.6	1.0	1.1	1.2	1.4	1.3	1.0	-0.5	-0.7	-3.0	-3.7
9	0.283	1.092	1.280	1.289	1.222	1.260	1.214	0.946	1.205	1.249	1.210	1.291	1.282	1.068	0.287
	-4.6	-2.0	-0.8	-0.5	2.1	2.5	2.1	1.7	1.4	1.5	1.1	-0.4	-0.6	-2.1	-2.7
10	0.992	1.292	1.204	1.191	1.192	1.249	1.108	1.241	1.179	1.177	1.209	1.292	0.965		
	-0.1	0.0	-0.2	2.1	1.9	1.6	1.2	1.0	0.8	0.7	0.1	0.1	-2.6		
11	0.355	1.066	1.113	1.233	1.194	1.212	1.146	1.199	1.167	1.253	1.118	1.071	0.359		
	-1.0	-1.0	-0.9	-1.7	2.1	1.2	1.2	0.2	0.0	-0.1	-0.3	-0.3	0.3		
12	0.314	0.587	1.101	1.204	1.299	1.097	1.297	1.205	1.120	0.586	0.317				
	-1.7	-1.7	-1.8	-0.3	0.2	0.0	0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3				
13	0.312	1.053	1.292	1.286	1.349	1.284	1.288	1.072	0.318						
	-1.7	-2.0	0.0	-0.3	-0.2	-0.5	-0.4	-0.5	-0.3						
14	0.340	0.940	1.083	0.988	1.110	0.988	0.357								
	-4.9	-5.2	-2.7	-2.2	-0.4	-0.5	-0.5								
15	0.280	0.316	0.294												MEAS
	-4.9	-3.0	-0.8												DIFF

그림 7 75% 출력시 Measured power and percent difference in measured vs. predicted power

	R	P	N	M	L	K	J	H	G	F	E	D	C	B	A
1									0.289	0.322	0.295				
									-2.9	-2.9	-0.4				
2				0.348	0.964	1.081	1.018	1.085	0.979	0.356					
				-1.4	0.4	-0.7	-0.7	-0.1	2.1	1.1					
3			0.318	1.046	1.265	1.270	1.333	1.277	1.271	1.053	0.317				
			-0.2	-0.1	1.0	0.4	0.5	1.0	1.5	0.8	-0.1				
4		0.318	0.601	1.112	1.209	1.293	1.102	1.294	1.214	1.117	0.602	0.317			
		0.4	0.7	0.4	0.9	0.6	0.5	0.7	1.3	1.0	1.0	-0.5			
5		0.359	1.067	1.118	1.266	1.199	1.227	1.164	1.234	1.210	1.275	1.126	1.040	0.343	
		2.1	2.2	1.1	0.5	0.6	0.6	1.2	1.3	1.3	1.6	-0.7	-2.9		
6		0.965	1.262	1.206	1.197	1.246	1.270	1.136	1.276	1.256	1.203	1.209	1.245	0.938	
		0.7	0.8	0.6	0.2	0.4	0.5	0.5	0.9	1.1	0.9	0.8	-0.6	-2.3	
7	0.287	1.070	1.254	1.278	1.213	1.263	1.233	0.976	1.237	1.271	1.223	1.282	1.253	1.078	0.295
	-3.1	-1.5	-0.7	-0.5	-0.5	-0.2	0.4	0.5	0.7	0.6	0.3	-0.3	-0.9	-1.0	-1.0
8	0.322	1.010	1.318	1.090	1.149	1.128	0.975	0.795	0.974	1.133	1.156	1.088	1.318	1.008	0.325
	-3.0	-1.6	-0.7	-0.7	-0.6	-0.1	0.4	0.5	0.3	0.3	0.0	-0.8	-0.7	-1.7	-2.0
9	0.289	1.074	1.257	1.281	1.212	1.264	1.230	0.973	1.231	1.269	1.224	1.285	1.264	1.074	0.292
	-3.1	-1.3	-0.6	-0.3	-0.6	0.0	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.0	0.1	-1.1	-1.3
10	0.962	1.256	1.199	1.184	1.244	1.267	1.130	1.265	1.245	1.199	1.209	1.262	0.946		
	0.2	0.2	0.0	-0.6	0.1	0.2	0.0	0.1	0.3	0.4	0.8	0.8	-1.3		
11	0.351	1.041	1.103	1.246	1.196	1.218	1.155	1.215	1.195	1.266	1.114	1.051	0.356		
	-0.6	-0.6	-0.4	-1.0	0.1	-0.1	-0.1	-0.4	0.3	0.5	0.7	0.6	1.2		
12	0.315	0.591	1.094	1.193	1.283	1.092	1.284	1.202	1.112	0.602	0.319				
	-1.1	-1.0	-1.1	-0.5	-0.2	-0.4	-0.1	0.2	0.4	1.0	0.8				
13	0.313	1.030	1.250	1.257	1.323	1.260	1.253	1.051	0.321						
	-1.1	-1.3	-0.2	-0.5	-0.3	-0.4	0.0	0.4	0.8						
14	0.341	0.926	1.067	1.011	1.087	0.959	0.354								
	-3.3	-3.5	-1.8	-1.4	-0.1	-0.1	0.2								
15	0.287	0.325	0.296												MEAS
	-3.2	-2.0	-0.7												DIFF

그림 8 100% 출력시 Measured power and percent difference in measured vs. predicted power