

《기술보고》

영광 3호기 1주기 시운전 자료를 통한 ONED94 코드의 검증

이창규 · 이정찬

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

(1995. 9. 11)

요 약

ONED94는 노심추적계산, 부하추종모사, 출력증감발 및 재기동 운전전략, 제논진동모사 및 제어봉 이동전략수립 등을 위한 전산 코드로, Westinghouse 형 노심에 대해서는 적용절차 및 방법이 이미 검증되어 노심관리용으로 사용되고 있으며, CE형 노심에 대해서는 CE형 노심핵설계체계를 이용한 단면적 자료생산에서 적응계산에 이르기 까지 ONED94 모델 생산 방법과 절차는 확립된 상태에 있다. 이 보고서에서는 영광3호기 초기노심의 시운전 자료를 토대로 50, 80 및 100% 출력에서의 제논진동 및 출력증감발 모사계산을 수행하여 CE형 노심에 대하여 ONED94 코드를 검증하였다.

1. 서 론

ONED94는 한국원자력연구소에서 개발한 1차원 2군화산 코드이다[1,2,3]. 이 코드는 노심 모사 및 핵설계를 위한 코드로 노심추적계산, 부하추종모사, 출력증감발 및 재기동 운전전략, 제논진동모사 및 제어봉 이동전략 등에 폭넓게 사용할 수 있다. 특히 ONED94는 노심의 축방향 거동을 적절히 모사하기 위한 방법으로 출력적응(Power Adaptation), 제어봉가적응(Control Rod Adaptation), 제논적응(Xenon Adaptation) 등의 기법을 사용함으로써 3차원 노심핵설계 코드 또는 실제 발전소의 실측치와 잘 일치시킬 수 있다. 현재 ONED94는 Westinghouse형 노심에 대해서는 적용절차 절차 및 방법은 이미 검증되어 노심관리용으로 사용되고 있으며[2] CE형 노심에 대해서는 CE 핵설계체계를 이용한 ONED94 모델생산 절차가 수립되어 3차원 노심설계코드인 ROCS[5]와의 비교 결과를 통한 검증이 완료된 상태이다[4]. 따라서 CE형 원자로노심에 대한 실측치와의 검증이 완료되

면, ONED94의 검증이 모두 완료되었다고 할 수 있으므로 이 보고서에서는 영광 3호기의 시운전 시험에서 입수된 노심 실측자료를 통하여 ONED94코드의 정확성과 적용성을 검증하고자 한다.

ONED94 검증에 적합한 시험은 주로 축방향출력분포 변화를 관측할 수 있는 시험으로 대부분의 경우 노심은 축방향 제논진동을 유발하게 된다. 이 제논진동 현상의 시간에 따른 변화를 관측하기 위해서는 축방향출력분포를 하나의 수치로 나타낼 수 있는 인자를 정하는 것이 좋으며 일반적으로 CE형 노심 설계에서는 ASI(Axial Shape Index)를 다음과 같이 정의하여 사용하고 있다.

$$ASI = \frac{P_B - P_T}{P_B + P_T} \quad (1)$$

여기서 P_B 및 P_T 는 노심 하반부 및 상반부의 평균 상대 출력을 각각 의미한다. 영광 3호기는 노심 감시체계의 하나로 COLSS[7] 뿐 사용하고 있는데 On-Line Monitoring에 의하여 항상 ASI를 계산하고

있다. ONED94의 검증은 시험기간중 측정된 COLSS ASI와 ONED94 모사계산의 ASI 결과를 비교하여 그 정확도를 분석함으로써 이루어진다.

2. 영광 3호기 1주기 시운전 모사계산

2.1. 기본균점수 및 적응인자 생산

검증계산을 하기 위한 준비단계로 먼저 ONED94에 사용될 영광 3호기 초기노심의 기본 균점수를 3차원 노심계산 코드인 ROCS의 계산결과로 얻어진 균점수를 편집하는 기능을 가진 CEKLAPS[6]를 사용하여 네개의 주요 연소단계(0, 3000, 8000, 13650 MWD/MTU)에 대하여 각각 생산하였다. 균점수생산 방법과 절차는 참고문헌 4에 서술되어 있다. 이렇게 생산된 각각의 균점수는 하나의 화일로 편집되어 ONED94 계산에 사용 되는데 위에서 명시한 네개의 주요 연소점 이외의 연소점에 대해서는 ONED94에서 내삽하여 사용하게 된다.

출력적응인자 및 제어불가적응인자는 시험이 이루어졌던 연소도 부근에서 각각 계산하였다. 출력적응인자는 ONED94가 계산한 축방향 출력분포 및 임계봉산농도가 입력된 축방향출력분포 및 임계봉산농도와 일치하도록 하기 위해서 반경방향 buckling 을 조정하는데 사용되는 값으로 ONED94에서 자동으로 계산하게 된다. 반경방향의 누출량을 buckling으로 대신한 중성자 확산방정식에서 출력적응인자(fp)는 아래 식과 같이 사용된다[3].

$$-D_1 \nabla^2 \phi_1 + (D_1 f_p \cdot B_1^2 + \Sigma_1) \phi_1 = \frac{1}{K_{eff}} (\nu \Sigma_{f1} \phi_1 + \nu \Sigma_{f2} \phi_2), \quad (2)$$

$$-D_2 \nabla^2 \phi_2 + (D_2 f_p \cdot B_2^2 + \Sigma_2) \phi_2 = \Sigma_3 \phi_1. \quad (3)$$

여기서,

B_k^2 = 반경방향 g 군 buckling,

이 식으로부터 i 격자에 대하여 f_{pi} 를 입력으로 계산된 상대출력(P_i^{ref})과 i 격자의 f_{pi} 를 변화시켜 계산된 상대출력(P_i)를 이용하여 출력적응인자를 얻을 수 있다.

이 때 상대출력 P_i 는 i 격자의 출력적응인자 f_{pi} 만의 함수가 아니며 다른 격자의 출력적응인자에 의해서도 영향을 받게 된다. 즉, $P_i = P_i(f_{p1}, f_{p2}, \dots, f_{pI})$ 라 할 수 있다. 따라서 각 격자에 대한 적응인자들을 주어진 값으로부터 Δf_{pi} 만큼 바꾸었을때 P_i 의 변화량은

$$\Delta P_i = \frac{\partial P_i}{\partial f_{p1}} \Delta f_{p1} + \frac{\partial P_i}{\partial f_{p2}} \Delta f_{p2} + \dots + \frac{\partial P_i}{\partial f_{pI}} \Delta f_{pI} \quad (4)$$

이 되며, 적응인자들을 바꿈으로써 얻고자 하는 격자 i의 상대출력 변화량은 기준 상대출력 P_i^{ref} 와 적응인자 변화전의 상대출력 P_i 의 차이가 된다.

$$\Delta P_i = P_i^{ref} - P_i \quad (5)$$

식(5)를 식(4)에 대입하면,

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_i}{\partial f_{p1}} \Delta f_{p1} + \frac{\partial P_i}{\partial f_{p2}} \Delta f_{p2} + \dots + \frac{\partial P_i}{\partial f_{pI}} \Delta f_{pI} \\ = P_i^{ref} - P_i, \quad (i=1, 2, \dots, I) \end{aligned} \quad (6)$$

가 된다. 식(6)을 살펴보면, I 개의 미지수 f_{pi} 에 대해 I 개의 방정식으로 나타내고 있으나, 실제로는 특정 격자의 적응인자에 대한 각 격자들의 출력변화율이 선형 독립이 아니므로 Δf_{pi} 를 바로 구할 수 없으므로 하나의 식이 더 필요하다. 이 식은 임계봉산농도 또는 k_{eff} 변화량을 이용하여 구할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} \frac{\partial CB}{\partial f_{p1}} \Delta f_{p1} + \frac{\partial CB}{\partial f_{p2}} \Delta f_{p2} + \dots + \frac{\partial CB}{\partial f_{pI}} \Delta f_{pI} \\ = CB^{ref} - CB, \quad (i=1, 2, \dots, I) \end{aligned} \quad (7)$$

또는

$$\begin{aligned} \frac{\partial k_{eff}}{\partial f_{p1}} \Delta f_{p1} + \frac{\partial k_{eff}}{\partial f_{p2}} \Delta f_{p2} + \dots + \frac{\partial k_{eff}}{\partial f_{pI}} \Delta f_{pI} \\ = k_{eff}^{ref} - k_{eff}, \quad (i=1, 2, \dots, I) \end{aligned} \quad (8)$$

ONED94는 사용자에게 따라 식(7) 또는 식(8)을 식(6)과 함께 Δf_{pi} 를 구한다. 식(8)을 이용하는 경우의 Matrix 형태는 다음과 같이 표현되며, Gauss Elimination으로 쉽게 구해진다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial CB}{\partial f_{p1}} & \frac{\partial CB}{\partial f_{p2}} & \dots & \frac{\partial CB}{\partial f_{pI}} \\ \frac{\partial p_1}{\partial f_{p1}} & \frac{\partial p_1}{\partial f_{p2}} & \dots & \frac{\partial p_1}{\partial f_{pI}} \\ \frac{\partial p_2}{\partial f_{p1}} & \frac{\partial p_2}{\partial f_{p2}} & \dots & \frac{\partial p_2}{\partial f_{pI}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial p_{I-1}}{\partial f_{p1}} & \frac{\partial p_{I-1}}{\partial f_{p2}} & \dots & \frac{\partial p_{I-1}}{\partial f_{pI}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_{p1} \\ \Delta f_{p2} \\ \Delta f_{p3} \\ \vdots \\ \Delta f_{pI} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} CB^{ref} - CB \\ p_1^{ref} - p_1 \\ p_2^{ref} - p_2 \\ \vdots \\ p_{I-1}^{ref} - p_{I-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

위의 방법을 이용하여 영광 3 호기 1 주기에 대한 출력적응인자는 표1에 제시된 바와 같이 시운전 시험이 실시된 0, 1200 그리고 1900 MWD/MTU 의 연소

도에서 ROCS 코드를 이용한 3차원 연소계산의 결과를 기본으로하여 계산하였다. 일반적으로 초기노심의 경우 연소도에 따른 축방향출력분포의 변화가 교체노심에 비하여 상당히 심하다. 특히 영광 3호기 초기노심의 경우는 가연성흡수물질로 흡수단면적이 매우 큰 가돌리니아를 사용하며, 또한 다량의 가연성흡수붕이 사용되고있기 때문에 주기초에서 가돌리니아 연소점에 이르기까지 축방향 출력분포의 변화가 심하게 나타난다. 따라서 ONED94 모사 계산시 축방향출력분포가 심하게 변하는 연소도 부근에서는 출력적응인자를 추가로 생산하여야 한다. 이 출력적응인자는 각 연소도에서 세가지의 출력준위에 대해서 생산되었는데 각각의 출력준위는 모사계산을 수행하려는 과도상태의 출력변화에 적절하도록 정하였다. 예를 들어 100% Load Cycling Test의 경우 노심의 출력준위는 처음 100% 출력으로 유지 되다가 40% 정도까지 출

표 1. 출력적응인자

Axial Node	0 MWD/MTU			1200 MWD/MTU			1900 MWD/MTU			
	70%	50%	20%	80%	50%	30%	100%	70%	50%	
Bottom	1	0.9963	0.9999	0.9983	0.9987	0.9988	0.9988	0.9978	0.9981	0.9981
	2	0.9761	0.9994	0.9891	0.9917	0.9927	0.9926	0.9865	0.9878	0.9879
	3	0.9399	0.9985	0.9728	0.9793	0.9816	0.9815	0.9662	0.9696	0.9697
	4	0.8944	0.9975	0.9522	0.963	60.9678	0.9675	0.9405	0.9465	0.9468
	5	0.8333	0.9960	0.9246	0.9426	0.9491	0.9487	0.9062	0.9156	0.9160
	6	0.8020	0.9952	0.9106	0.9317	0.9395	0.9390	0.8883	0.8996	0.9001
	7	0.8044	0.9940	0.9135	0.9303	0.9388	0.9388	0.8866	0.8989	0.9000
	8	0.8104	0.9914	0.9204	0.9277	0.9375	0.9386	0.8835	0.8978	0.9001
	9	0.8187	0.9880	0.9297	0.9241	0.9358	0.9383	0.8792	0.8963	0.9003
	10	0.8267	0.9846	0.9389	0.9206	0.9341	0.9381	0.8749	0.8948	0.9005
	11	0.8333	0.9818	0.9462	0.9177	0.9328	0.9379	0.8715	0.8937	0.9007
	12	0.8374	0.9801	0.9509	0.9159	0.9319	0.9377	0.8693	0.8929	0.9008
	13	0.8374	0.9798	0.9507	0.9158	0.9318	0.9376	0.8693	0.8927	0.9006
	14	0.8333	0.9804	0.9448	0.9171	0.9318	0.9370	0.8713	0.8923	0.8993
	15	0.8268	0.9813	0.9355	0.9191	0.9318	0.9361	0.8745	0.8916	0.8972
	16	0.8188	0.9824	0.9240	0.9216	0.9319	0.9349	0.8784	0.8909	0.8947
	17	0.8107	0.9836	0.9123	0.9242	0.9320	0.9337	0.8824	0.8901	0.8921
	18	0.8047	0.9844	0.9037	0.9261	0.9320	0.9329	0.8853	0.8895	0.8902
	19	0.8023	0.9848	0.9000	0.9271	0.9322	0.9326	0.8869	0.8894	0.8896
	20	0.8335	0.9873	0.9156	0.9387	0.9429	0.9433	0.9049	0.9070	0.9071
	21	0.8946	0.9919	0.9465	0.9612	0.9638	0.9641	0.9398	0.9411	0.9411
	22	0.9400	0.9954	0.9696	0.9779	0.9794	0.9795	0.9657	0.9665	0.9665
	23	0.9761	0.9981	0.9878	0.9912	0.9918	0.9918	0.9863	0.9866	0.9866
Top	24	0.9963	0.9997	0.9981	0.9986	0.9987	0.9987	0.9978	0.9979	0.9979

력이 감소되었다가 다시 50%로 유지되다가 100% 출력으로 상승하는 출력변화를 보여주고 있다. 따라서 출력적응인자는 이와 같은 출력변화에 잘 적응되도록 표1 에서 보는 바와 같이 100%, 70% 그리고 50% 출력에 대해서 각각 생산하였다.

제어부가적응인자는 ONED94가 계산하는 완전삽입된 제어봉가가 기준값이 되도록 제어봉의 균정수를 조절하는 값으로서 기준제어봉가를 유효증배계수로 환산하여 입력으로 넣으면ONED94에 의해 자동적으로 계산된다. 제어봉이 완전 삽입된 격자에서 제어봉가적응인자(f_c)는 다음과같이 사용된다[3].

$$\Sigma'_{jg} = \Sigma_{jg} + f_c \delta \Sigma_{jg} \quad (10)$$

여기서,

- Σ'_{jg} : 제어봉 삽입시의 g 군 j 종류 유효단면적
- Σ_{jg} : 제어봉 삽입전의 g 군 j 종류 단면적
- $\delta \Sigma_{jg}$: 제어봉 완전삽입시의 g 군 j 종류 단면적의 증가분

기준값으로 사용된 제어봉가는 3차원 ROCS계산으로 부터 구하였으며 시운전 시험에 사용된 Bank P, Bank 5, Bank 4 에 대한 적응인자를 표 2에 제시하였다.

제논적응인자는 ONED94가 계산한 제논반응도가가 입력된 반응도와 같도록 제논의 중성자 흡수율을 조절하는 값이다. 제논적응인자(f_x)를 사용하여 적용된 제논의 소멸율은 다음과 같다[3].

$$A_x = \lambda_x + f_x (\sigma_{a1} \phi_1 + \sigma_{a2} \phi_2) \quad (11)$$

여기서,

- A_x : 제논의 소멸율
- λ_x : 제논의 붕괴상수.

이때, 입력으로 사용된 제논반응도가는 제논 평형상

태의 3차원 ROCS계산 결과를 사용하였다. 주기초에서 계산한 제논적응인자는 50% 출력에서 1.0083 이었으며 100% 출력에서는 1.0053 이었다. 이 제논적응인자는 제논평형상태에서 ONED94가 계산하는 제논반응도를 ROCS결과에 맞도록 적용한 것으로서 실제 제논 천이상태에 대해서는 추가적인 적용절차가 필요할 수도 있다.

2.2. 50% SAM Test 모사계산

SAM (Shape Annealing Matrix) Test는 20% 및 50% 출력준위에서 수행되는 CPC[8] Power Distribution Measurement Test의 일부이다. 이 CPC Power Distribution Measurement Test를 통해 CPC 출력분포의 측정에 사용되는 SAM, BPPCC (Boundary Point Power Correlation Coefficient) 등을 결정하며 또한 TSF(Temperature Shadowing Factor), RPF(Radial Peaking Factor), RSF(Rod Shadowing Factor) 등을 결정하게된다. SAM 및 BPPCC등을 결정하기 위해서 50% 출력에서는 최소 30시간 동안 축방향 제논자유진동을 시키게되는데 Bank 5 와 Bank P를 이용하여 축방향 제논진동을 야기시키게된다.

그림 1은 50% SAM Test 동안 제어봉의 위치를 보여주고있는데 완전인출상태는 381 cm 인출상태이다. 처음 ARO (All Rod Out) 상태로 운전하다가 약 200 분이 지난뒤 Bank 5 가 삽입되고 완전 삽입된 후 이어서 Bank P 도 완전히 삽입된 뒤 다시 두 제어봉의 조작으로 축방향 제논 진동을 야기하게 된다. 이 때 노심의 출력은 50% 로 일정하게 유지되고 제어봉의 조작에 의한 반응도 변화는 붕소농도의 조절로 보상하게 된다. 이 시험은 노심 연소도 약 350 MWD/MTU 근처에서 이루어 졌는데 ONED94 입력으로 사용된 출력적응인자는 표 1의 0 MWD/MTU 에서 계산한 값이 사용 되었고 제어부가적응인자는 표 2의 350 MWD/MTU 50% 출력에서 계산된 값을 사용하였다. 그림 2는 ONED94가 계산한 노심평균 ASI를 실측치와 함께 나타내고 있는데 "Measured"로 표시된 것이 COLSS ASI 로부터 얻은 실측치이며 점선으로 표시한 것은 ONED94 가 계산한 ASI로서 제논적응인자로 2.1 절에서 설명한 1.0083을 사용했을 때의 경우이다. 그림에서 보는 바와 같이 자유제논진동 영역에서 계산치의 진폭이 실측치보다 작게 예측

표 2. 제어부가적응인자

연소도(MWD/MTU) 출력(%)	Bank P	Bank 5	Bank 4	
150	20	0.51223	0.39850	-
350	50	0.55313	0.44254	0.60748
1200	80	0.58495	0.51224	0.70333
1900	50	0.59281	0.49888	0.69605
1900	80	0.60698	0.53573	0.69582
1900	100	0.61192	0.54760	0.69826

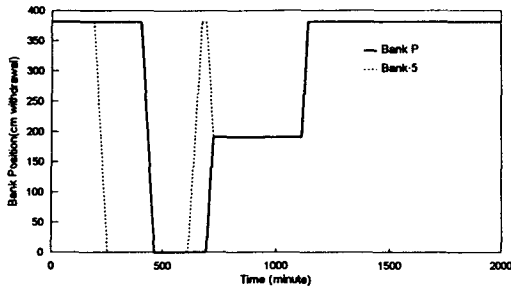


그림 1. 50% SAM Test중 제어봉의 위치

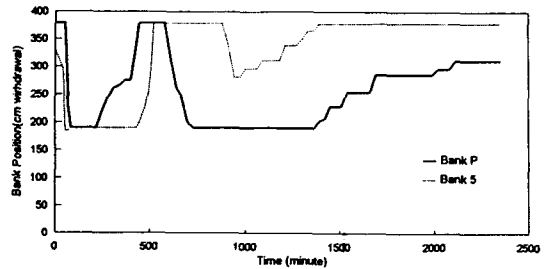


그림 3. Xenon Oscillation Control Test중 제어봉의 위치

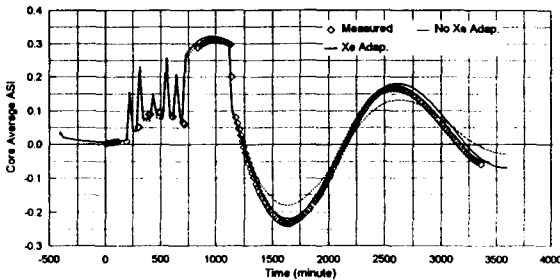


그림 2. 50% SAM Test중 노심평균 ASI

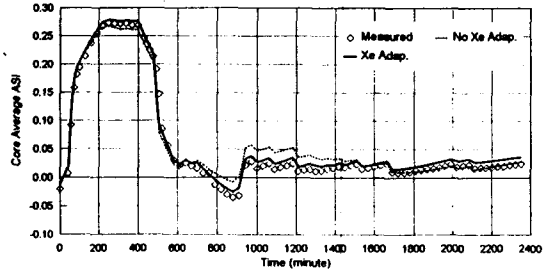


그림 4. Xenon Oscillation Control Test중 노심평균 ASI

되고 있는데 이것은 결국 제논의 반응도가가 실제보다 작게 계산되고 있음을 의미한다. 이런 현상은 제논적응인자를 적용시킴으로써 해결할 수 있는데 그림 2에서 실선으로 표시된 것은 제논적응인자로 1.095를 사용하였을 때 ONED94가 계산하는 노심평균 ASI를 나타낸 것으로 1.0083을 사용했을 때보다 실측치에 매우 가까워졌음을 알 수 있다. 여기서 사용된 제논적응인자 1.095는 2.3 절에서 설명하게 될 50% Xenon Oscillation Control Test 모사계산에서 사용되어 이 값이 50% 출력의 다른 모사계산에서도 적용가능한 지 확인하였다.

2.3. 50% Xenon Oscillation Control Test 모사계산

이 시험은 연소도 약 300 MWD/MTU 근처 50% 출력하에서 수행되었는데 Bank 5와 Bank P를 이용하여 축방향제논진동을 제어하는 시험이다. 그림 3은 이 시험이 진행되는 동안의 제어봉의 위치를 보여주고 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 Bank 5와 Bank P를 이용하여 약 500분 근처까지 삽입과 인출

을 통해 먼저 축방향 제논진동을 발생시켰다. 그 후 다시 삽입과 인출을 통해 축방향제논진동을 제어하는 모습을 보여주고 있다. 이와같은 제어봉의 조작을 입력으로 ONED94계산을 수행하여 노심평균 ASI를 계산하였다. 이 때 사용된 출력적응인자는 표 1의 0 MWD/MTU에서 생산한 것이고 제어봉가적응인자는 표 2의 350 MWD/MTU 50% 출력에서 생산된 것이다. 그림 4는 시험이 진행되는 동안의 노심평균 ASI를 보여 주고 있는데 ONED94 계산치중 점선으로 표시한 값은 제논적응인자로 1.0083을 사용한 경우이고 실선으로 표시한 값은 2.2 절에서 얻은 1.095를 사용하였을 때의 경우이다. 제논적응인자로 1.0083을 사용하였을 때 300분 근처에서 ONED94가 실측치보다 ASI를 다소 작게 예측하고 있으며 800분 이후에는 높게 예측하고 있음을 알 수 있다. 그러나 새로 적용된 제논적응인자를 사용함으로써 실측치에 상당히 가까워졌음을 볼 수 있다. 이렇게 적용된 제논적응인자 1.095는 이후 50% Unit Load Transient 계산에서 계속 사용하게 된다.

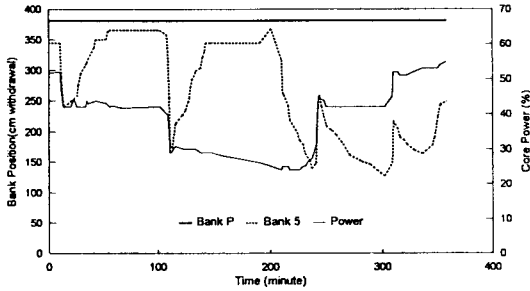


그림 5. 50% Unit Load Transient 중 출력변화 및 제어봉의 위치

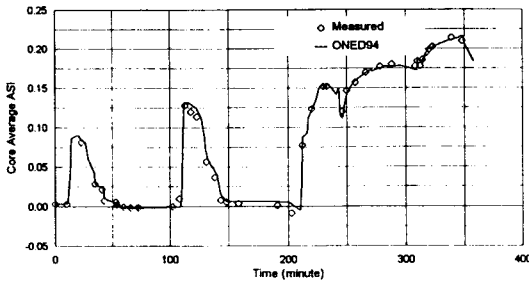


그림 6. 50% Unit Load Transient 중 노심평균 ASI

2.4. 50% Unit Load Transient

50% Unit Load Transient Test는 노심연소도 약 1100 MWD/MTU 근처에서 진행되었는데 처음 노심의 출력을 50% 정도로 유지시키다가 터빈의 출력을 분당 5% 정도로 줄여서 약 25% 정도 까지 떨어뜨렸다가 다시 회복시키는 시험인데 이에 따라 노심의 출력도 변하게 된다. 터빈의 출력을 줄이고 올리는 동안에 CEDMCS (Control Element Drive Mechanism Control System)는 AS (Auto Sequential) 모드로 작동된다. 그림 5에 시험이 진행되는 동안의 제어봉의 위치 및 노심의 출력준위를 제시하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 Bank P는 완전인출 상태로 계속 유지되며 Bank 5만의 작동이 있었음을 볼 수 있다. 그림 6은 시험이 진행되는 동안 제어봉의 움직임과 노심 출력을 입력으로 하여 ONED94가 계산한 노심평균 ASI를 실측치와 비교한 것이다. 이 때 사용된 출력적응인자는 표 1에서 1200 MWD/MTU의 값이 사용되었으며 제어봉가적응인자는 표 2의 350 MWD/MTU 50% 출력의 값이 사용되었고 제논적응

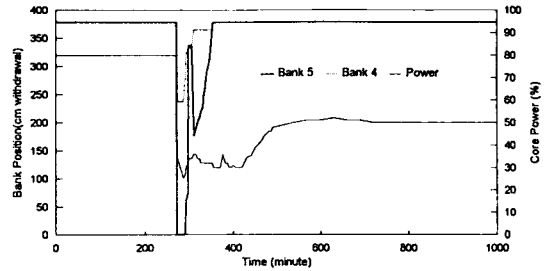


그림 7. 80% Load Rejection Test 중 출력변화 및 제어봉의 위치

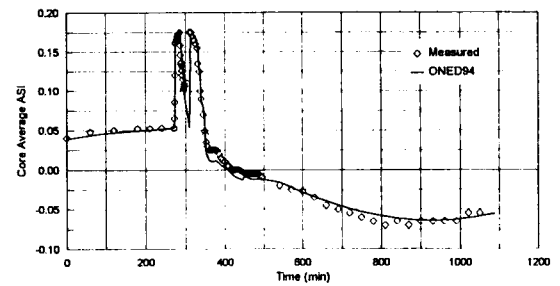


그림 8. 80% Load Rejection Test 중 노심평균 ASI

인자로는 2.2 절에서 구한 1.095 가 사용되었다. 그림에서 보는 바와 같이 시험의 전구간에 걸쳐 ONED94가 계산한 노심평균 ASI가 실측치와 매우 잘 일치함을 볼 수 있다.

2.5. 80% Load Rejection Test

80% Load Rejection Test는 노심연소도 약 1200 MWD/MTU 정도에서 수행 되었다. 이 시험은 노심이 처음 80% 출력으로 운전되다가 갑자기 터빈부가 제거되었을 때 RPCS(Reactor Power Cutback System)의 작동으로 원자로의 긴급 정지없이 출력을 급감발시키는 시험이다. 이 때 노심의 출력을 급감발시키기위해 Bank 5가 자동적으로 순식간에 완전삽입(drop) 되었고 Bank 4의 부분적 삽입이 이루어졌는데 Bank P는 완전인출상태로 유지되었다. 그림 7은 시험이 진행되는 동안 제어봉의 위치 및 노심의 출력준위를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 노심의 출력이 80% 에서 약 25% 정도 까지 급격히 감소하였고 차츰 회복되어 50% 부근에서 안정된 것을 볼

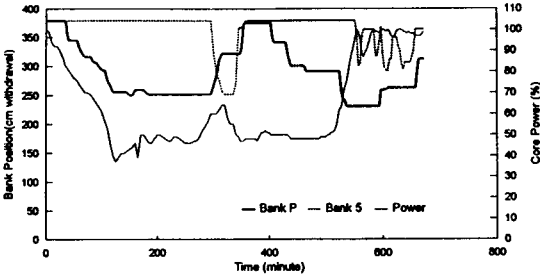


그림 9. 100% Load Cycling Test 중 출력변화 및 제어봉의 위치

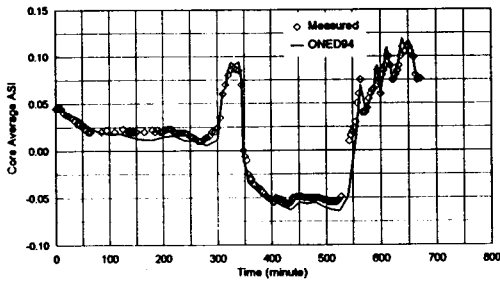


그림 10. 100% Load Cycling Test 중 노심평균 ASI

수 있다. 그림 8은 ONED94 모사계산으로 얻은 노심 평균 ASI를 실측치와 함께 보여주고 있다. 제어봉의 삽입과 인출에 의한 ASI의 급격한 변화를 ONED94가 비교적 정확하게 예측하고 있으며 실측치 대비 최대 1.5% ASIU 정도의 오차를 보이고 있다.

2.6. 100% Load Cycling Test

100% Load Cycling Test는 노심연소도 약 1900 MWD/MTU 근처에서 수행 되었다. 이 시험은 처음 100% 출력으로 운전되는 노심을 붕소농도를 높이면서 출력을 점점 줄여 약 2시간동안 50% 정도 까지 줄였다가 약 6시간동안 안정을 취한후 다시 붕소농도를 희석시키면서 2시간동안 노심의 출력을 100% 로 회복시키는 시험이다. 시험이 진행되는 동안 노심 평균 ASI의 제어를 위해서 Bank P와 Bank 5를 사용하였다. 그림 9에 제어봉의 위치 및 노심의 출력준위가 나타나 있다. 그림 10은 ONED94가 계산한 노심평균 ASI를 실측치와 함께 보여주고 있는데 그림에서 보는 바와 같이 ONED94가 상당히 정확하게 ASI를 예측하고 있음을 볼 수 있다.

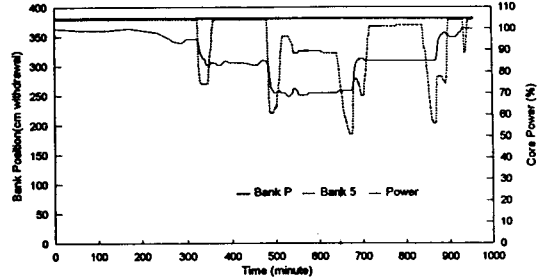


그림 11. 95% Unit Load Transient 중 출력변화 및 제어봉의 위치

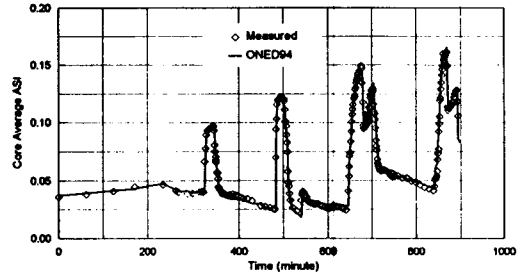


그림 12. 95% Unit Load Transient 중 노심평균 ASI

2.7. 95% Unit Load Transient

95% Unit Load Transient Test는 100% Load Cycling Test 직후에 역시 노심연소도 약 1900 MWD/MTU 근처에서 수행되었다. 처음 95% 출력으로 운전하다가 터빈부하를 점점 줄여 85% 정도 까지 줄이게 되는데 이에 따라 2.3. 절에서와 같이 AS 모드로 작동하는 제어봉이 삽입되면서 노심의 출력도 점점 줄게된다. 85% 출력에서 안정을 취한 후 다시 70%까지 터빈부하를 줄이고 이에 따라 노심의 출력준위도 70%까지 줄게된다. 이후 안정을 취한 후 다시 터빈부하를 증가시켜 85%까지 올리고 안정을 취한후 100%까지 출력을 회복시키는 시험이다. 출력이 내리고 오르는 동안에는 제어봉이 AS 모드로 작동되었고 안정을 취하는 동안에는 MS (Manual Sequential) 모드로 작동되어 노심의 ASI를 제어하였으며 필요에 따라 붕소농도의 조절도 있었다. 그림 11에 시험이 진행되는 동안의 제어봉의 위치와 노심의 출력준위를 제시하였으며 그림 12는 ONED94가 계산한 노심평균 ASI를 실측치와 함께 보여주고 있다. 그림 11에서 보는 바와 같이 Bank 5가 계속적으

로 삽입과 인출을 반복하였고 이에 따라 그림 12에서와 같이 ASI의 변화도 시험 전구간에 걸쳐서 상당히 심하게 변화하였음을 알 수 있다. 전체적으로 ONED94가 심하게 변하는 축방향 출력을 비교적 정확히 묘사하고 있음을 볼 수 있다.

3. 결론 및 토의

영광 3호기 1주기 시운전시 수행한 출력 증감발 및 축방향 제논진동 시험을 ONED94 코드로 모사계산을 수행하였다. 총 6개의 시험에 대하여 수행된 모사계산은 1) 50% SAM Test 2) 50% Xenon Oscillation Control Test 3) 50% Unit Load Transient 4) 80% Load Rejection Test 5) 100% Load Cycling Test 6) 95% Unit Load Transient 등이다.

모사계산을 위해서 먼저 영광 3호기 1 주기의 기본군정수를 중요한 네가지의 연소도에 대하여 생산하였으며 또한 출력적응인자, 제어봉가적응인자 그리고 제논적응인자 등을 필요한 연소도 및 출력준위에 대해서 각각 계산하였다. 이렇게 생산된 기본군정수와 적응인자 등을 이용하여 시험이 진행되는 동안의 제어봉의 위치와 노심의 출력준위를 입력으로 ONED94를 실행시켜 제논천이상태의 노심평균 ASI를 시간에 따라 계산하였다. 시험이 진행되는 동안 필요에 따라 붕소주입과 회석이 있었다. 특히 시험진행중에 100% Load Cycling Test의 경우에는 최대 약 70 ppm, 95% Unit Load Transient의 경우에는 최대 약 30 ppm 정도 붕소농도의 변화가 있었고 이 정도의 붕소농도는 축방향 출력분포에 상당한 영향을 줄 수 있다. 정확한 계산을 위해서는 노심의 정확한 붕소농도를 입력으로 사용하여야 하지만 실시간으로 변하는 노심의 붕소농도를 정확히 예측하여 입력으로 사용하기는 거의 불가능하다. 따라서 이 계산에서는 임계붕소농도 탐색 모드로 ONED94 계산을 수행하였다. 즉, 매 계산마다 임계붕소농도를 계산하여 그것을 노심의 실제 붕소농도로 간주하는 것이다. 50% SAM Test의 모사계산시 처음 ROCS 결과로부터 얻은 제논적응인자 1.0083을 사용하는 것보다 이 보다 약간 큰 1.095를 사용함으로써 실측치에 더 가까운 계산 결과를 얻었다. 1.0083은 50% 제논 평형상태의 ROCS계산을 기준으로 구한 값인데 ONED94 계산을 통해 실측치와 간접비교한 결과 ROCS가 50% 출력에서 제

논반응도가 약간 낮게 예측하고 있음을 알 수 있었고 새로이 적용된 1.095를 50% Xenon Oscillation Control Test, 50% Unit Load Transient 등의 모사계산에 적용하여 매우 만족할 만한 결과를 얻었다.

위에서 언급한 6가지의 모사계산을 통해 얻은 노심평균 ASI를 실측치와 비교하여 본 결과, 자유 제논진동 및 제어봉삽입과 인출에 의한 급격한 ASI의 변화에도 ONED94가 비교적 정확한 계산을 하고 있음을 보여주었고 최대 약 1.5% ASIU 정도의 오차를 보였으나 이는 천이상태에 있는 노심의 ASI 변화 폭이 15%~25% ASIU 정도임을 감안할 때 출력분포의 추이를 예측하는데 충분할 정도로 정확하다고 볼 수 있다. 천이상태동안 계속적으로 변하는 노심의 수용성 붕소농도의 정확한 입력이 불가능하기 때문에 임계붕소농도를 입력으로 사용한 것도 다소간 오차를 증가시켰을 것으로 사료된다. 50% SAM Test에서 보여준 자유제논진동시 ASI의 변화곡선은 실측치에 비해 진동의 주기길이가 다소 길게 계산되고 있는데 이것은 기준값으로 사용한 ROCS의 결과로부터 생긴 오차이므로 실측치를 이용한 적용계산을 수행함으로써 좀더 정확한 ASI의 변화를 예측할 수 있을 것으로 사료되며 이것은 또다른 계산의 기준값으로도 사용될 수 있을 것이다. 이렇게 실측자료로부터 얻은 적응인자들은 제논 과도상태 또는 제어봉의 움직임에 의한 ASI의 제어등의 운전에서 수일동안의 실제노심의 출력분포를 훌륭히 예측하며, 시간이 경과되면서 나타나는 다소간의 계산오차는 다시 적응인자를 적용 시킴으로써 해결할 수 있기 때문에 ONED94를 이용한 노심추적계산, 부하추종모사, 출력증감발, 제논진동모사 및 제어봉 이동전략수립 등 다양한 계산이 가능함을 입증하였다.

4. 후 기

본 보고서의 작성에 인용된 영광 3호기 1주기 시운전 시험 자료의 취득을 위해 많은 지원과 수고를 아끼지 않았던 영광 제2발전소 기술부 직원 여러분 그리고 한국원자력연구소 영광사무소의 지성구씨 등에게 감사의 뜻을 전한다.

참고문헌

1. 장중화외, "노심관리용 1차원코드 ONED90 개선,"

- KAERI/RR-1296/93, 1994.2.
2. 이기복외, "ONED90 코드 검증 보고서," KAERI/TR-396/93, 1993. 12.
 3. 장종화외, "1차원 확산코드 ONED90," KAERI/TR-353/93, 1993. 5.
 4. 송재승, "CE 형 노심에 대한 ONED94 적용," KAERI/N-410-N1-462-001, 1994. 12.
 5. "User's Manual for ROCS, Coarse- and Fine-Mesh Advanced Diffusion Theory Code for Reactor Core Analysis," CE-CES-4 Rev 8-P, March 1993.
 6. "User's Manual for CEKLAPS, Cross Section Collapsing Utility Program," CE-CES-48 Rev. 3-P, August 1994.
 7. Combustion Engineering Inc., "Functional Design Requirement for a Core Operating Limit Supervisory System," CE-NPSD-423-P Rev. 1, December 1988.
 8. Combustion Engineering Inc., "Functional Design Requirement for a Core Protection Calculator," CE-NPSD-335-P Rev. 02-P, April 1988.