2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

영출력 원자로 특성시험 방법 개선

Improved Core Physics Test Method at HZP

우해석, 송재웅, 박찬오
한전원자력연료㈜
대전 광역시 유성구 덕진동 150

장주경
한국전력공사
경북 울진군 북면 부구리 84-4

요 약

국내원전의 3 루프 발전소의 경우 열수력적 성능이 개선된 V5H 연료가 장전되면서 원자로 특성시험 항목 중 하나인 제어봉 제어능 측정값의 오차가 과거 주기들에 비해 상당히 증가되었다. 제어봉 제어능의 오차가 증가된 주요 원인으로는 개량핵연료의 장전으로 중성자누출이 줄어든 저누출 장전모형으로 인해 영출력상태에서 노외핵계측기에 감지되는 측정신호의 준위가 낮아지게 되었고, 계획예비정비기간의 단축과 장주기로 인해 감마기저준위가 증가됨으로 기저준위의 영향이 심화되었다. 따라서 기존의 시험방법으로는 기저준위의 영향을 감소시키는데 한계가 있음을 울진 1 호기 9 주기 원자로 특성시험 측정자료를 근거로 확인하였다.

본 연구에서는 정확한 영출력 원자로 특성시험을 수행하기위해 기저준위를 측정하거나 계산하는 방법과 그 영향을 평가할 수 있는 방법을 보여주었고, 발전소에서 보유하고 있는 반응도전산기 장비를 이용해 기저준위의 영향을 제거하는 방법을 제시하였다. 본 연구의 결과로 최근의 제어봉 제어능 오차가 증가된 원인을 규명하였고, 저누출, 장주기 및 계획예비정비기간의 단축에도 불구하고 신뢰도 높은 영출력 원자로 특성시험을 수행 할 수 있는 개선된 시험방법을 수립하였다.

ABSTRACT

In case of 3 loop nuclear plants in Korea, the error of control rod worth measurement which is one item of core physics test at HZP is increased considerably compared with previous cycle data since loading of V5H. The cause of error increase of control rod worth and the reactivity effect according to flux and background level are analyzed. The root cause of error increment is that the flux level which is detected by excore detector is decreased by applying low-low leakage or ultra low leakage loading pattern and the background level is increased due to reduction of planned outage and longer fuel cycle length. In current test method, it is limited to decrease or eliminate the effect of background. This is confirmed based on the data of physics test for ulchin 1 cycle 9. In order to perform credible core physics test at HZP at this circumstance, the elimination of such background effect is reviewed and setup by adjusting electrometer used in reactivity computer by compensating the amount of background level. Therefore the improved core physics test method to perform the credible test at HZP is setup by this study regardless of any kind of loading pattern and cycle scheme.

1. 서 론

국내 가압경수로(PWR)는 핵연료 재장전후 전출력 정상운전을 시작하기 전에 영출력에서부터 해당주기의 노심핵설계 자료의 유효성과 노심의 안전 제한치를 만족하는지 확인하기위해 발전소 절차서 및 ANSI/ANS-19.6.1-1997[1] 에 따라 영출력 원자로 특성시험을 수행한다.

국내 3LOOP 원전의 경우 고리 3호기 9주기를 시작으로 기존에 사용되던 KOFA 연료를 대신하여 열적성능이 향상된 V5H 연료를 장전하면서 영출력 원자로 특성시험 항목의 하나인 기준제어봉 제어능 측정값의 설계치와의 오차가 과거주기들에 비해 표1 과 같이 상당히 증가되었다.[2] 몇 개 주기의 경우에서는 시험허용기준을 만족하지 못해 재시험을 수행하기도 하였다. 특별히 울진 1호기 9주기의 경우 기준제어봉의 제어능이 시험허용기준을 만족하지 못해 측정출력준위를 상향 조정한 후 재수행한 결과 허용기준을 만족하였다.

본론에서는 V5H 연료로 장전되면서 제어봉 제어능의 오차가 증가된 원인분석과 기저준위 및 출력준위에 따른 계산 반응도의 영향평가 그리고 원자로 특성시험을 정확히 수행 할 수 있는 새로운 시험방법 확립을 위한 연구내용을 기술하였다.

2. 본 론

2.1 장전모형에 따른 제어봉 제어능 오차증가 원인분석

3LOOP 원전의 경우 고리 3호기 9주기를 시작으로 기존에 사용되던 KOFA 연료를 열적성능이 향상된 V5H 연료로 대치하고 설계기술의 고도화로 노심첨두계수(F_Q, $F_{\Delta H}$) 제한치가 증가하게 되어 저-저(Low-Low) 또는 초-저(Ultra-Low) 누출 장전모형이 가능하게 되었고, 핵연료 집합체의 농축도를 증가시켜 장주기로 운전하고 있다. 또한 발전소 유지보수기술의 향상으로 계획예방정비기간이 통상 60일 정도에서 45일 정도로 점차 단축되어가고 있다. 따라서 누출율이 줄어든 장전모형으로 인해 노외계측기에 감지되는 중성자의 양은 줄어들었고, 계획예비정비기간의 단축 및 장주기 운전으로 인해 핵분열 생성물의 붕괴로 인한 감마기저준위는 더욱 증가하게 되었다.

원자로 특성 시험시 반응도 계산으로 사용되는 반응도 전산기는 출력영역 계측기의 신호를 받아 반응도를 계산하게 되는데, 출력영역 계측기는 감마기저준위의 효과를 보상하지 않는 비보

상 전리함이다. 따라서 반응도 전산기에 입력되는 신호는 핵분열에 의한 중성자속 준위와 핵분열 생성물의 붕괴에 의한 기저준위의 합으로 구성되어지며, 기저준위에 의한 영향을 최소화하기 위해서는 원자로 특성시험 범위 중 가능한 출력준위를 높게 유지하며 시험을 수행하는 것이 바람직하다. 하지만 기저준위가 증가되고 중성자속 준위가 떨어지면서 특성시험범위의 상한에서 시험을 수행하더라도 기저준위의 영향은 무시할 수 없는 양이 되었다.

2.2 기저준위영향평가

반응도 전산기에서 사용되는 점 동특성 방정식 및 반응도 계산식은 다음과 같다.[3][4]

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{r-b}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^{6} l_i c_i(t) + S \tag{1}$$

$$\frac{dc_i(t)}{dt} = \frac{b_i}{\Lambda} n(t) - l_i c_i(t) \tag{2}$$

이때 상용원자로에서 S 는 무시할 수 있다.

기저준위를 고려한 측정출력준위를 식(3)과 같이 나타낼 수 있고, 식 (1), (2)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.[6]

$$N(t) = n(t) + g \tag{3}$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{r_N - b}{\Lambda} N(t) + \sum_{i=1}^{6} l_i C_i(t) \tag{4}$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{b_i}{\Lambda} N(t) - l_i C_i(t) \tag{5}$$

이때

n(t) = neutron level in the reactor

c_i(t) = delayed neutron precursors of type i

β_i = effective fraction of delayed neutron precursors of type i

Λ = effective neutron lifetime

ρ = reactivity

ρ_N = pseudo reactivity based on the signal of neutron and background

λ_i = decay constant of delayed neutron precursors of type i

S = Source Strength

γ = Background level

반응도 ρ가 일정할 경우, 식(1),(2)와 (4),(5)로부터 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$N(t) \cdot r_N(t) = N(t) \cdot r - g \cdot r \tag{6}$$

따라서 식(6)으로부터 측정신호 N(t)와 반응도전산기의 계산반응도 ρ_N(t)를 알면 실제반응도 ρ 및 기저준위 γ를 그림 1.과 같이 구할 수 있다. 또한 식(6)으로부터 계산된 기저준위와 고온정지상태에서 계측기를 통해 측정된 준위는 동일한 값임이 확인되었다. 따라서 기저준위는 발전소에서 직접 측정하여 구할 수 있다.

식(6)은 다음과 같이 나타낼 수 있으며 측정반응도는 실제반응도에 비해 기저준위만큼 적게 계산함을 알 수 있다. 따라서 중성자에 의한 출력준위가 낮거나 기저준위가 높으면 계산반응도는 상당히 저평가 될 수 있음을 알 수 있다.

$$r_N = \frac{n}{n+g} \cdot r \tag{7}$$

실제적으로 울진 1 호기 9 주기의 제어봉 제어능 측정시 일차시험과 이차시험의 출력준위에 따른 반응도 결과를 보면, 그림 2 와 같이 출력변동이 심하였던 상부지역에서 반응도변화가 심함을 알 수 있다.[5] 일차시험의 경우, 기준제어봉 제어능 측정은 시험 범위 중에서도 낮은 출력준위에서 수행되었다. 이로 인해 기저준위의 영향을 더욱 많이 받게 되어 측정반응도가 적게 예측되게 되었다. 한편 이차시험은 상대적으로 출력준위가 높은 상태에서 수행되어 기저 준위의 영향을 적게 받아 실제값에 가깝게 측정되었다. 축방향의 상부위치인 제어봉위치가 119 223 step 구간에서 일차와 이차 시험의 출력준위 변화가 컸고 이때 제어능 변화도 심하게 나타났다. 그리고 상대적으로 출력준위변화가 적었던 축방향의 하부위치인 제어봉위치가 0 119 step 구간에서는 제어능 변화량이 작았고 그 결과는 표 2.와 같다.

울진 1 호기 8 주기와 9 주기의 원자로특성시험범위 및 기저준위는 그림 3 과 같다. 따라서 울진 1 호기 9 주기의 경우 출력준위를 시험범위의 상한에서 수행하더라도 기저준위에 의해 측정반응도는 실제반응도에 비해 4.2%저평가되며 일차시험의 경우 15%, 이차시험의 경우 5.7% 저평가됨을 식(7)를 이용해 알 수 있다.

신뢰할 만한 시험을 수행하기위해서는 측정준위가 기저준위의 영향을 1%이하로 되도록 적어도 시험범위의 하한치를 기저준위의 100 배 이상이 되도록 유지해야 하지만 현실적으로 불가능한 범위이며, 기저준위의 영향을 줄이기 위해 시험범위를 상향 조정하더라도 기저준위로 인한 측정반응도는 상당량 과소평가된다.[6][7] 따라서 시험방법의 개선이 요구된다.

2.3 기저준위 보상법

원자로 특성 시험시 반응도 계산으로 사용되는 반응도 전산기는 출력영역계측기의 전류신호를 받아 전류/전압변환기(Electrometer)를 거쳐 반응도를 계산하게 된다. 이때 일반적으로 사용되는 전류/전압변환기는 그림 4. 와 같다. 전류.전압변환기에는 전류를 바이어스 걸어줄 수 있는 기능이 있으므로 고온정지상태에서 측정된 기저준위나 식(6)에 의해 구해진 기저준위를 근거로 그림 5. 와 같이 보정해 주면 신뢰할 만한 반응도를 구할 수 있다. 이 방법은 현재 발전소에서 보유하고 있는 반응도전산기 장비를 이용해 쉽게 적용할 수 있다.

3. 결론

본 연구결과, V5H 연료로 장전되면서 제어봉 제어능의 오차가 증가된 원인으로는 개량핵연료의 장전으로 인해 장전모형이 저누출에서 초저누출로 장전모형 전략이 변화되면서 영출력에서의 노외핵계측기에 감지되는 측정신호의 준위가 낮아지게 되었고 계획예비정비기간의 단축으로 인해 감마기저준위가 증가됨으로 인해 오차가 증가되었음을 울진 1 호기 9 주기 자료를 근거로 확

인하였다. 또한 측정 출력준위를 상향조정함으로 기저준위의 영향을 다소 감소시킬 수는 있지만 여전히 기저준위의 영향이 상당량 존재함으로 근본적인 해결책이 되지는 못하였다. 따라서 최근의 저-저누출, 장주기 및 예방정비기간의 단축 등의 상황에서 신뢰할 만한 영출력 원자로특성시험을 수행하기위해서는 고온정지상태에서 기저준위를 측정하거나 측정신호중 기저준위에 해당하는 만큼을 계산적으로 구한 후, 반응도전산기의 전류측정기를 이용해 보상해 줌으로 가능함을 알 수 있었다. 따라서 설계기술 고도화(저누출, 장주기) 및 운전기술 향상(계획예방정비기간의 단축)에 따른 신뢰도 높은 영출력 원자로 특성시험 자료를 취득하기위한 시험방법을 수립하였으며 국내 타발전소뿐만 아니라 국외 발전소에도 적용가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. "Reload Startup Physics Tests for Pressurized Water Reactors," ANSI / ANS-19.6.1-1997
2. 국내 원자력발전소 각호기, 각주기 노물리시험 보고서, 한국전력공사
3. Lynn E. Weaver, "Reactor Dynamics and Control," American Elsevier Publishing Company, INC.(1968)
4. "Digital Reactivity User Manual," Westinghouse(Rev.2)
5. "울진 1 호기 8, 9 주기 원자로 특성시험 결과", 한국전력공사
6. B.J. Jun, C.G. Suh and J.B. Lee, "Determination of neutron source and gamma effect for a reactivity computer, " p767-771 Proceeding 5thof Asian symposium on research reactor, May 29-31, 1996 Taejeon.
7. B.L. Palowitch, R.A. Kerr "Post-Refueling Nuclear Testing Program Criticality to full Power," WCAP-9468, Westinghouse (1979)

표 1. WH 형 기준제어봉 제어능 측정오차

대상 호기,주기	오차	비고
3LOOP 평균오차 (U1C8,U1C9,U2C8,K3C10,K3C11, K4C9,K4C10,Y1C10,Y2C10)	-5.2	9 Data
‘88 년 이후 8 년간 평균오차	-2.2	54 Data

표 2. 울진 1 호기 9 주기 기준제어봉 제어능 일차,이차 시험비교

항목	축방향 상부 (119-225 step)		축방향 하부 (0-119 step)	
	일차	이차	일차	이차

평균출력(%,**상한치대비**)	24.8	73.4	61.7	86.2
측정제어능(pcm)	601	674 (11.6% **증가**)	525	553 (5.3% **증가**)

그림 1. N(t)와 N(t)*rN(t)의 상관관계

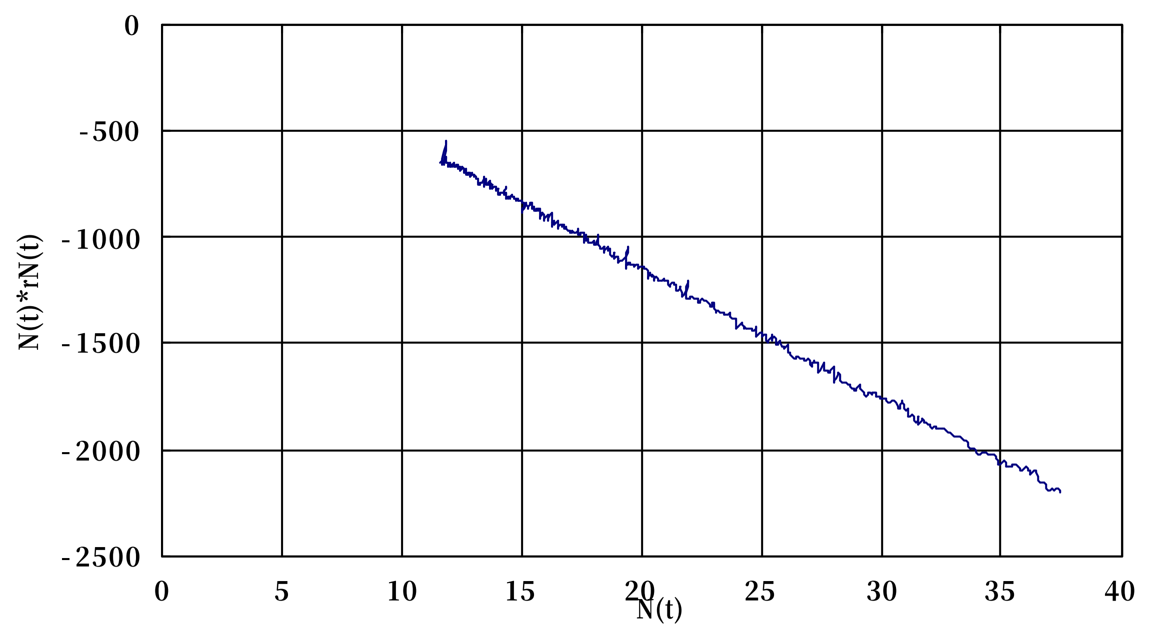

그림2. 울진 1호기 9주기 기준제어봉 미분제어능 분석

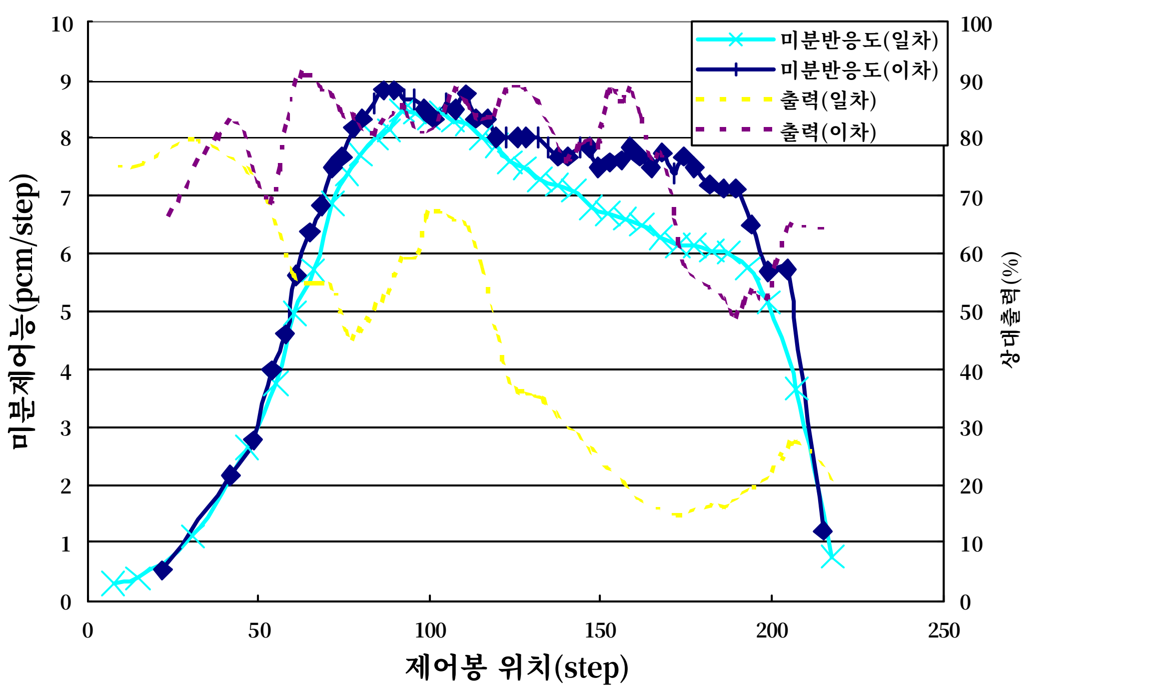

그림3. 울진 1호기 노물리 시험 범위 비교

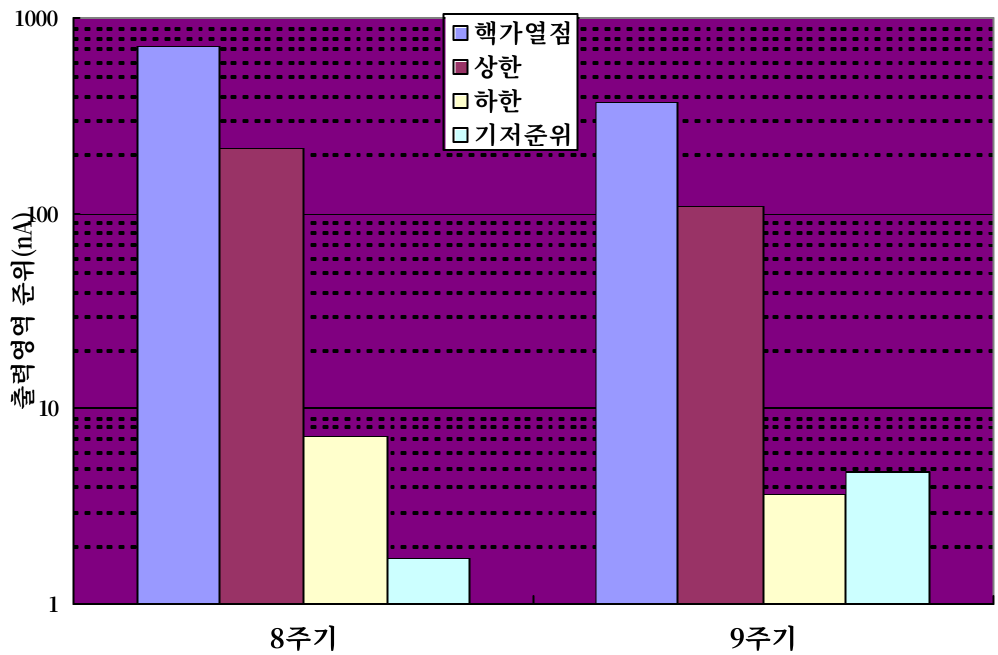

그림 4. Eletrometer

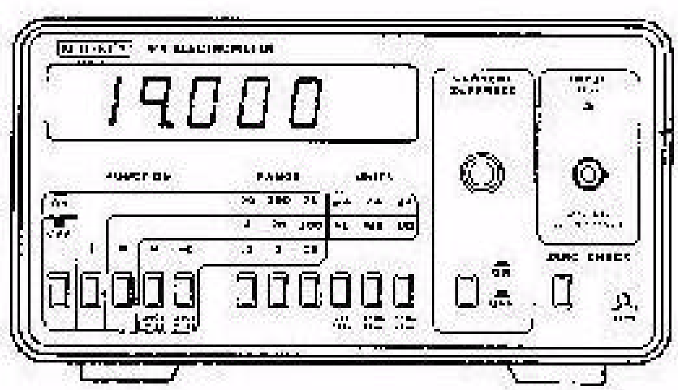

Figure 1-1. Model 614 Front Panel

그림 5.반응도 측정 방법 개선

- 기존방법

- 개선방안(기저준위보상)