2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

영광원자력 1호기 제14주기 동적제어능 측정

Dynamic Control Rod Worth Measurement of Yonggwang Unit 1 Cycle 14

송재승, 조병오, 김강석, 지성균
한국원자력연구소

배성만, 신호철
한전전력연구원

정영기, 김대겸
한국수력원자력(주)

장도익
한전원자력연료(주)

요 약

영광원자력 1호기 제 14주기 영출력 노물리시험 기간 중 조절제어군 D, C, B 및 A의 동적제어능 측정법에 의한 제어능측정을 수행하였다. 측정된 노외계측기 신호로부터 정적제어능을 구하기 위하여 필요한 3차원 노심동특성 해석에는 MASTER 코드를 사용하였으며 노심설계에 사용된 ANC 코드와 동일한 모델링과 군정수를 사용하였다. 제어군의 제어능이 큰 경우 계측기 신호가 배경신호에 가까워지면서 제어능을 왜곡시키는 문제를 해결하기 위하여 신호를 함수화하는 방법을 고안하였으며 측정된 제어능은 설계과정에서 예측된 값과의 차이가 시험 판정값인 ±15% 범위 이내에 충분히 들고 있다.

Abstract

A dynamic control rod worth measurement was performed for control bank D, C, B, and A of Yonggwang unit 1 cycle 14 during its low power physics test. MASTER was used for three-dimensional core kinetics calculations required to convert excore detector signal into static rod worth, using the same modeling and cross sections as ANC which was used for the core static design. A signal curve fitting method was proposed to solve a low signal problem due to large amount of rod worth, which leads to the distortion of resulting static worth. The static worths measured in this test well agreed with the predicted worth of design within ±15% which is a test requirement of rod worth measurement.

1. 개요

영출력 노물리시험은 안전성 분석에 적용된 노심해석 모델 및 방법론의 타당성을 확인하는 시험이다. 영출력 노물리시험 중 특히 제어봉의 제어능 측정시험은 노물리 시험기간의 대부분을 소요하는 시험으로 현재 국내에서 보편적으로 사용하고 있는 제어봉교차법의 경우 12시간 이상의 시간이 소요되고 있다. 최근 새로 개발되어 외국의 일부 상용 가압경수로에 적용되고 있는 동적제어능 측정법[1, 2]은 노심 내의 붕산농도를 변화시키지 않고 제어봉을 최대속도로 삽입, 인출하는 과정으로 측정이 종료되므로 통상적인 재장전 노심의 경우 3시간 이내에 모든 제어군의 제어능 측정을 종료하게 된다. 이는 이용율 향상으로 직결되며 원전의 조기가동은 물론 붕산농도 조절로 인한 방사성폐기물의 발생요인을 근원적으로 제거하는 장점도 가지고 있다. 국내에서도 이 방법을 적용하기 위한 연구가 진행되고 있는데 동적제어능 측정방법론과 측정절차상의 문제점을 확인하고 실측자료를 확보하기 위한 일련의 시험이 계획되어 있으며 그 일환으로 영광원자력 1호기 제 14주기 영출력 노물리시험 기간 중 조절제어군 D, C, B 및 A의 동적제어능 측정을 수행하였다.

동적 제어능 측정법은 영출력에서 측정 대상 제어군을 최대 속력으로 삽입할 때 나타나는 노외계측기의 신호 변화를 사용하여 제어군의 제어능을 산출하는 방법이다. 이를 위해서는 측정된 노외계측기 신호로부터 노심평균 중성자속을 추정하여 중성자속의 시간에 따른 변화로부터 역점운동방정식을 이용하여 동적제어능을 산출하고 이 동적제어능을 정적제어능으로 변환해야 한다. 이 과정에서 정적상태의 3차원 노심해석은 물론 동특성해석이 필요한데 이 연구에서는 한국원자력연구소에서 개발한 MASTER[3] 코드를 사용하였다. 실제 설계와의 일관성 유지를 위하여 노심의 계산의 입력 군정수를 노심설계코드인 ANC[4]와 동일하게 사용할 수 있는 연계체계를 수립하여 적용하였다. 노외계측기 신호의 변화로부터 노심평균 중성자속의 변화를 산출하기 위해서는 노심의 각 부분에서 발생한 핵분열중성자가 노외계측기에 반응하는 영향도 즉, 노외계측기 가중함수의 3차원 분포를 계산해야 한다. 이 과정에는 2차원 중성자 수송해석 코드인 DORT[5]를 사용하여 축방향 불균질성을 무시하는 (r,θ) 좌표계와 방위각에 따른 불균질성을 무시하는 (r,z) 좌표계에 대한 계산을 각각 수행하고 이를 합성하는 방법[6]을 채택하였다. 동적제어능 측정 중 반응도가 큰 제어봉이 깊이 삽입되는 경우 노외계측기의 신호는 원자로의 배경신호에 근접하는 값을 갖게 된다. 이 신호에서 배경신호를 분리하고 나면 동적제어능 분석에 필요한 신호는 잡음의 영향을 크게 받아 정적제어능 분석값을 왜곡시키게 된다. 이 연구에서는 그 영향을 줄이는 방법을 제시하였으며 동적제어능 측정법에 의하여 측정된 정적제어능을 설계단계에서 예측된 제어능과 비교함으로써 측정절차와 방법론의 신뢰성을 검증하였다.

2. 동적제어능 측정방법론

동적제어능의 수식적 표현은 다음과 같은 점운동방정식으로부터 유도된다.[1]

$$\frac{d\bar{n}(t)}{dt} = \left(\frac{\rho(t)-\beta(t)}{l(t)}\right)\bar{n}(t) + \sum_i \lambda_i(t)\,\bar{C}_i(t), \qquad (1)$$

$$\frac{d\overline{C}_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i(t)}{l(t)}\overline{n}(t) - \lambda_i(t)\,\overline{C}_i(t)\,. \tag{2}$$

여기서 측정값의 상대적 변화를 관찰하는 동적제어능 분석의 특성상 중성자밀도와 선행핵종 농도는

$$\overline{n}(t) = \frac{n(t)}{n(t_0)}, \tag{3}$$

$$\overline{C}_i(t) = \frac{C_i(t)}{n(t_0)} \tag{4}$$

와 같이 초기 중성자밀도에 대한 상대값을 사용하며 다른 부호들은 관행에 따른 표현을 사용하였다. 이 식은 중성자밀도와 선행핵종농도의 상대적 변화량의 두가지가 미지수인 방정식이 되는데 먼저 시간영역을 차분하고 그 구간 내에서 중성자 밀도의 시간에 따른 변화를 지수함수로 근사하면 시간간격 $[t_{l-1}, t_l]$에서의 중성자밀도 변화는 다음과 같이 표현된다.

$$\overline{n}(t) = \overline{n}(t_{l-1})e^{\gamma_l(t-t_{l-1})}. \tag{5}$$

여기서

$$\gamma_l = \frac{1}{\Delta t_l}\ln\left(\frac{\overline{n}(t_l)}{\overline{n}(t_{l-1})}\right) \tag{6}$$

이며 이를 지수계수(exponential coefficient)라 하는데, 식 (5)을 식 (2)에 대입하면

$$\overline{C}_i(t_l) = \overline{C}_i(t_{l-1})e^{-\lambda_i(t_l)\Delta t_l} + \frac{\beta_i(t_l)}{l(t_l)}\left(\frac{e^{-\gamma_l\Delta t_l} - e^{-\lambda_i(t_l)\Delta t_l}}{\lambda_i(t_l)+\gamma_l}\right)\overline{n}(t_{l-1}) \tag{7}$$

와 같이 된다. 여기서 $\Delta t_l \equiv t_l - t_{l-1}$로 정의되며 시간간격 내에서 점운동인자들은 일정한 것으로 가정한다. 이 결과를 사용하기 위해서는 시간 t_{l-1}에서의 선행핵종농도를 알아야 하는데 이는 선행핵종농도의 초기조건을 알아야 함을 의미한다. 동적제어능 측정이 정상상태에서 시작됨을 감안하면 선행핵종농도의 시간에 따른 변화는 중성자밀도의 변화양상을 따르게 되므로

$$\overline{C}(t) = \overline{C}(t_{l-1})e^{\gamma_l(t-t_{l-1})} \tag{8}$$

로 근사할 수 있다. 식 (5)과 (8)을 식 (2)에 대입하고 정의에 따라 $\overline{n}(t_0)=1$을 이용하면 초기 선행핵종 밀도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\overline{C}_i(t_0)=\frac{\beta_i(t_0)}{l(t_0)}\left(\frac{1}{\lambda_i(t_0)+\gamma_0}\right). \tag{9}$$

이제 식 (1)로부터 역점운동방정식의 반응도는

$$\rho(t_l)=\beta(t_l)+l(t_l)\left(\gamma_l-\frac{1}{\overline{n}(t_l)}\sum_i \lambda_i(t_l)\overline{C}_i(t_l)\right) \tag{10}$$

가 되며, 동적제어능 측정은 초기 전제어봉 인출상태에서 약간의 양의 반응도에서 시작되므로 제어봉의 반응도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta\rho^D(t_l)=-(\rho(t_l)-\rho(t_0)). \tag{11}$$

한편 노심평균 중성자밀도는 노심평균 중성자속을 측정하여 다음 관계를 이용하여 구한다.

$$\overline{n}(t)=\left(\frac{v(t_0)}{v(t)}\right)\overline{\phi}(t). \tag{12}$$

여기서 v는 중성자의 속력을 의미하며, 중성자속은

$$\overline{\phi}(t)=\frac{\phi(t)}{\phi(t_0)} \tag{13}$$

와 같이 중성자속의 상대적 변화로 정의된다. 노외계측기의 반응으로부터 노심평균 중성자속을 구하기 위해서는 제어봉이 삽입되는 도중의 노심 내 중성자속 분포의 변화가 고려되어야 한다. 축방향으로 두개의 노외계측기가 설치되어 있는 시스템을 가정하고 지발중성자의 영향을 무시하면 각 노외계측기의 반응과 중성자속 분포와의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$R^X(t_l)=\sum_n V_n w_n^X \sum_g \nu\Sigma_{fgn}(t_l)\phi_{gn}(t_l). \tag{14}$$

여기서 $R^X(t_l)$은 노외계측기 X (상부 또는 하부)의 반응을 의미하며, V_n은 노드 n의 체적을,

w_n^X 는 노외계측기 X 의 반응함수를 각각 의미한다. 노외계측기 신호 역시 절대값 대신 상대적 변화를

$$\overline{R}^X(t) = \frac{R^X(t)}{R^X(t_0)} \tag{15}$$

와 같이 정의하면 노외계측기 반응은 다음과 같이 나타난다.

$$\overline{R}^X(t_l) = \left(\frac{\sum_n V_n w_n^X \sum_g \nu\Sigma_{fgn}(t_l)\phi_{gn}(t_l)}{\sum_n V_n w_n^X \sum_g \nu\Sigma_{fgn}(t_0)\phi_{gn}(t_0)} \right) \overline{\phi}(t_l) \tag{16}$$

이제 상하 두개의 노외계측기 반응을 결합하면

$$\overline{R}(t_l) = \overline{R}^{top}(t_l) + \overline{R}^{bottom}(t_l) = \overline{\alpha}(t_l)\overline{\phi}(t_l) \tag{17}$$

가 되며, 3차원 노심계산으로 미리 분석된 변환인자 $\overline{\alpha}$ 를 이용하면 측정된 신호로부터 노심평균 중성자속을 구할 수 있다.

원자로의 노물리시험에서 측정해야하는 인자는 정적제어능($\Delta\rho^S$)이므로 동특성 방정식을 이용하여 구한 동적제어능($\Delta\rho^D$)은 정적제어능 보정인자

$$\eta(t) \equiv \frac{\Delta\rho^S(t)}{\Delta\rho^D(t)} \tag{18}$$

를 통하여 정적제어능으로 변환된다. 이 보정인자를 구하기 위해서는 3차원 동특성 노심계산을 통하여 제어봉 삽입 도중의 노외계측기 신호변화를 모사할 필요가 있다. 이 모사계산에서 예측된 노외계측기 반응을 이용하여 역점운동방정식으로부터 유도된 동적제어능이 계산된다. 정적제어능은 정상상태 고유치계산으로부터 구할 수 있으므로 모사계산 결과에서 산출된 동적제어능을 이용하면 정적제어능 보정인자를 구할 수 있다. 실제로 정적제어능 보정인자는 제어봉의 삽입위치에 가장 큰 영향을 받으므로 다음과 같이 제어봉 위치 z 에 관한 함수로 표현한다.

$$\Delta\rho^S(z) = \eta(z)\Delta\rho^D(z) \tag{19}$$

3. 동적제어능 측정을 위한 자료 생산

전 절에서 논의한 바와 같이 동적제어능 측정법을 적용하기 위해서는 노외계측기 신호를 노심

평균 중성자속으로 환산하는 중성자속 환산인자, 노심평균 중성자속의 변화로부터 동적반응도를 구하기 위한 점운동인자 및 동적제어능을 정적제어능으로 환산하는 정적제어능 환산인자 들을 사전에 준비하여야 한다. 이 때 노심의 정적상태 계산은 물론 동적상태를 계산하여야 하므로 3차원 노심동특성을 계산할 수 있는 노심해석코드가 필요하다. 그러나, 영광원자력 1호기는 미국 Westinghouse 사의 ANC 코드로 노심을 설계하고 있으며 3차원 노심 동특성을 분석할 수 있는 해석체계가 갖추어져 있지 않다. 따라서, 노심의 3차원 동특성 해석을 위하여 한국원자력연구소에서 개발한 MASTER를 사용하였는데 설계와의 일관성을 확보하기 위하여 3차원 노드분할을 ANC 계산 조건과 동일하게 모델링하였으며 각 노드별 군정수는 ANC 해석에서 사용된 값을 그대로 사용할 수 있는 연계체계를 수립하여 MASTER에 입력하였다.

그림 2는 MASTER 와 ANC로 계산된 ARO 상태 및 각 제어군이 완전 삽입된 상태의 반경방향 출력분포의 차이를 나타낸 것인데 최대 차이가 0.005에 불과하며 표 1에 나타난 바와 같이 각 제어군의 제어능의 차이는 1% 미만으로 정적상태의 분석에서 두 코드는 제어능 분석에 영향을 주지 않을 정도로 충분히 일치하는 결과를 주고 있음을 확인할 수 있다.

0.001 0.002 0.002 -0.002 -0.002	0.001 0.001 0.002 -0.003 -0.004	0.002 0.002 0.002 0.000 -0.002	0.001 0.001 0.001 -0.001 -0.001	0.001 0.001 0.000 0.002 0.001	-0.001 0.000 -0.001 0.002 0.000	-0.002 0.000 -0.002 0.001 0.000	-0.005 -0.003 -0.005 -0.004 -0.004
	0.002 0.002 0.002 -0.002 -0.003	0.002 0.002 0.002 -0.003 -0.002	0.002 0.001 0.002 0.000 0.000	0.002 0.001 0.001 0.001 0.001	0.000 0.000 0.000 0.002 0.001	-0.003 -0.001 -0.003 -0.001 -0.001	-0.002 -0.002 -0.003 -0.003 -0.002
	0.002 0.001 0.002 -0.002 -0.002	0.001 0.001 0.002 0.000 0.000	0.002 0.001 0.002 0.000 0.001	0.001 0.001 0.001 0.002 0.002	0.000 -0.001 0.000 0.001 0.001	-0.002 -0.002 -0.002 -0.001 0.000	
	0.002 0.002 0.002 0.000 0.000	0.002 0.001 0.002 0.000 0.001	0.000 0.001 0.002 0.001 0.002	0.001 0.001 0.001 0.001 0.003	0.000 -0.001 0.000 0.001 0.002	-0.001 -0.002 -0.002 -0.001 -0.001	
	0.001 0.001 0.001 0.001 0.001	0.002 0.000 0.001 0.001 0.002	0.001 0.000 0.000 0.002 0.002	0.000 -0.001 0.000 0.001 0.001	0.000 0.000 0.000 0.000 0.000		
	0.000 0.000 0.000 0.002 0.002	-0.001 -0.001 -0.001 0.001 0.001	-0.001 -0.001 -0.001 0.001 0.002	0.000 -0.001 0.000 0.000 0.000			
	-0.003 -0.002 -0.003 0.000 -0.001	-0.002 -0.001 -0.002 -0.001 0.000	-0.002 -0.001 -0.003 -0.002 -0.001				
	-0.003 -0.002 -0.004 -0.002 -0.002						ARO D IN C IN B IN A IN

그림 1. MASTER 와 ANC 반경방향 출력분포 차이

표 1. MASTER와 ANC의 제어군 정적제어능 비교

제어군	제어능 (pcm)		% 차이
	MASTER	ANC	
D	353.9	350.8	-0.9
C	683.9	686.8	0.4
B	1357.3	1359.3	0.2
A	278.8	278.8	0.0

4. 영광원자력 1호기 14주기 동적제어능 측정

동적제어능 측정방법론과 측정절차 상의 문제점을 확인하고 실측자료를 확보하기 위한 시험의 일환으로 영광원자력 1호기 14주기의 영출력 노물리시험 중에 조절제어군 D, C, B 및 A 에 대한 동적제어능 측정 시험을 수행하였다. 시험은 ARO 상태에서 40 ~ 60 pcm의 양의 반응도를 주기 위하여 선행제어군 D를 183 step에 삽입하고 붕산농도를 조절하여 노심을 임계로 유지한 상태에서 제어군 D를 인출하면서 시작하였다. 시험 도중의 모든 제어군 이동은 분당 48 step의 속력을 유지하였다. 제어군 D의 인출과 동시에 노심의 출력은 증가하게 되며 ARO 상태에서 노심의 출력이 핵방출점의 약 60 ~ 70 %에 도달하면 측정하고자 하는 제어군의 삽입을 개시하여 일정한 속도로 6 step 까지 삽입하였으며 6 step 도달 즉시 인출을 시작하였다. 제어군의 삽입 중 노심의 반응도가 임계에 이르는 위치를 통과하면 노심의 출력은 감소하기 시작하며 제어군의 인출 중 동일한 위치를 통과하면 노심의 출력은 증가하게 된다. 시험 결과의 일관성을 점검하기 위하여 제어군 D는 측정을 두번 수행하였으며 이어서 제어군 C, B, A의 순서로 삽입 인출을 반복하였다. 모든 경우 제어군의 삽입은 노심출력이 핵방출점의 60 ~ 70%에 도달하는 시점에서 시작하였다. 그림 2에 제어군의 이동과정과 측정된 노외계측기 신호를 나타내었다.

그림 3은 측정 대상 제어군 D, C, B 및 A 의 삽입중 측정된 노외계측기 신호에서 배경신호를 제한 후의 상대적인 변화를 나타낸 것이다. 이 결과에서 계측기 신호가 감소하면 신호에 잡음이 발생하는 것을 관찰할 수 있는데 이 잡음은 동적제어능을 산출하는데 필요한 식 (6)의 지수계수의 변화에 커다란 영향을 미치게 된다. 그림 4에 제어군 D와 B의 지수계수의 변화를 각각 나타내었는데 제어능이 비교적 큰 제어군 B의 경우 잡음의 영향이 크게 나타나고 있으며 이 자료를 근거로 산출한 동적제어능의 신뢰성을 떨어뜨리게 된다.

이와 같이 낮은 신호에서 발생하는 잡음문제를 해결하기 위하여 배경신호가 보정된 값을 최소자승법을 사용한 회귀분석을 통하여 함수화 하는 방법을 고안하였다. 이 연구에서는 계측기신호의 상대적 변화가 최대값을 지난 이후의 자료부터 제어봉 삽입완료 후 100초까지의 자료를 다음 식으로 함수화 하였다.

$$\ln(\overline{R}) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 + \frac{c_4}{t} + \frac{c_5}{t^2} \qquad (20)$$

그림 5에 제어군 D와 B의 삽입 중 계측기신호의 상대적 변화를 함수화한 후의 지수계수를 나타내었다. 동적제어능 측정법에 의한 정적제어능을 산출하기 위한 최종자료로는 잡음의 영향이 심하지 않은 제어봉 삽입 초기에는 측정자료를 그대로 사용하고 계측기 신호가 약해지면서 잡음의 영향이 크게 나타나는 제어봉 삽입 후기에는 함수화된 자료를 사용하였다. 그림 6과 7은 각 제어군의 정적제어능을 측정값을 그대로 사용한 경우와 비교하여 나타낸 것인데 측정자료를 함수화하지 않는 경우 나타나는 적분제어능의 왜곡현상이 측정값을 함수화함으로써 교정됨을 알 수 있다. 표 2에는 각 제어군이 완전 삽입된 상태에서의 정적제어능을 비교하였다.

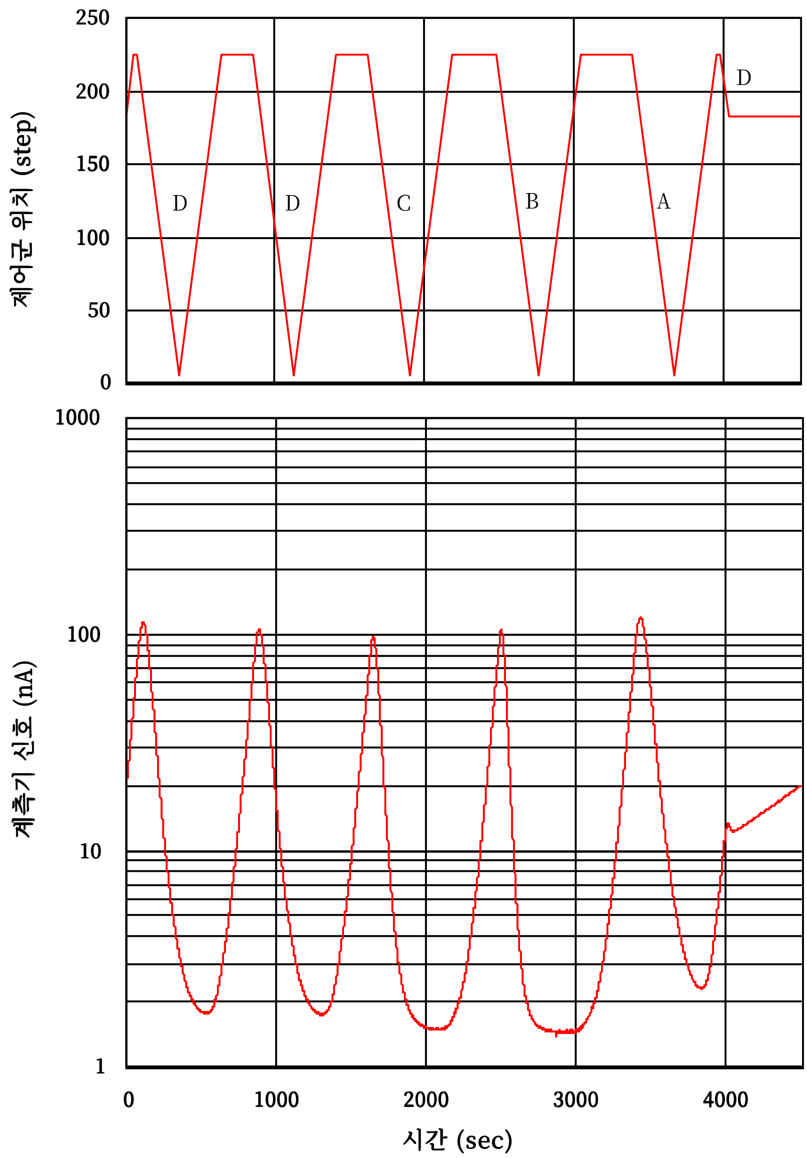

그림 2. 제어군 이동과정 및 노외계측기 신호

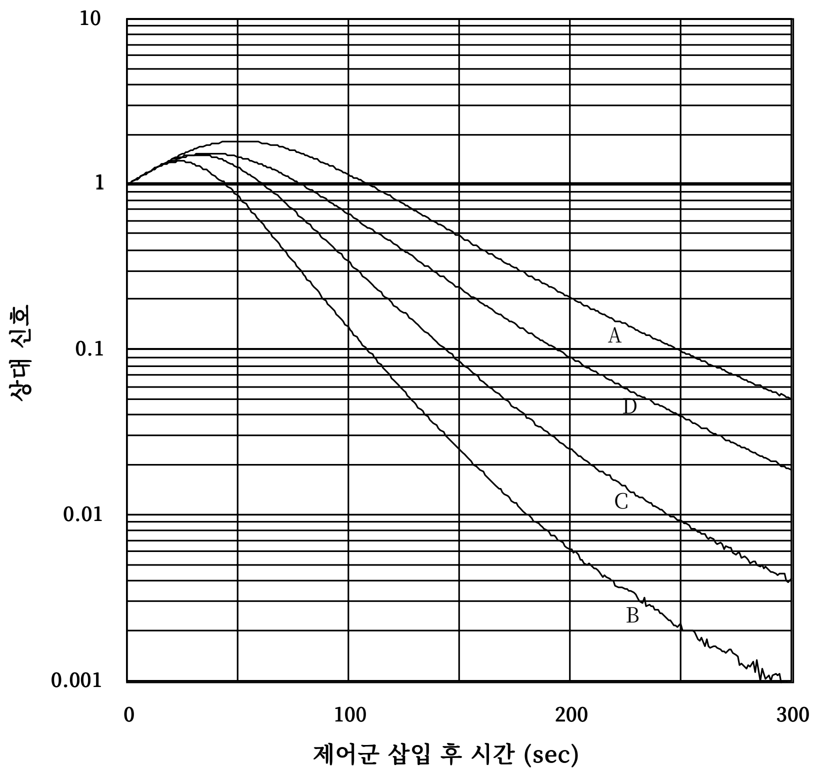

그림 3. 배경신호가 보정된 노외계측기 신호의 상대적 변화

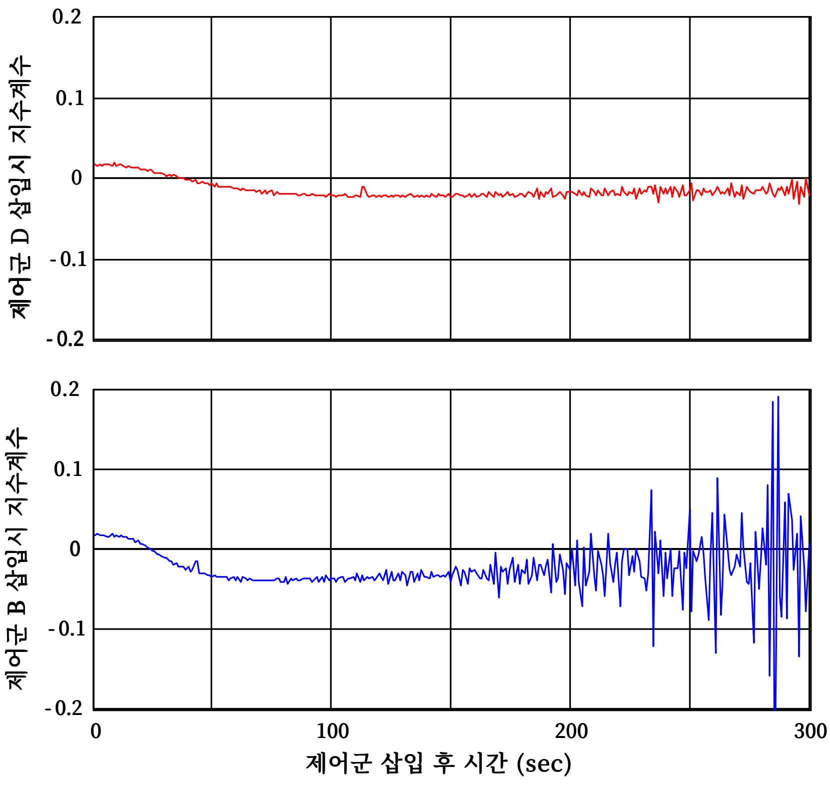

그림 4. 제어군 D 와 B의 삽입 후 지수계수 변화 비교

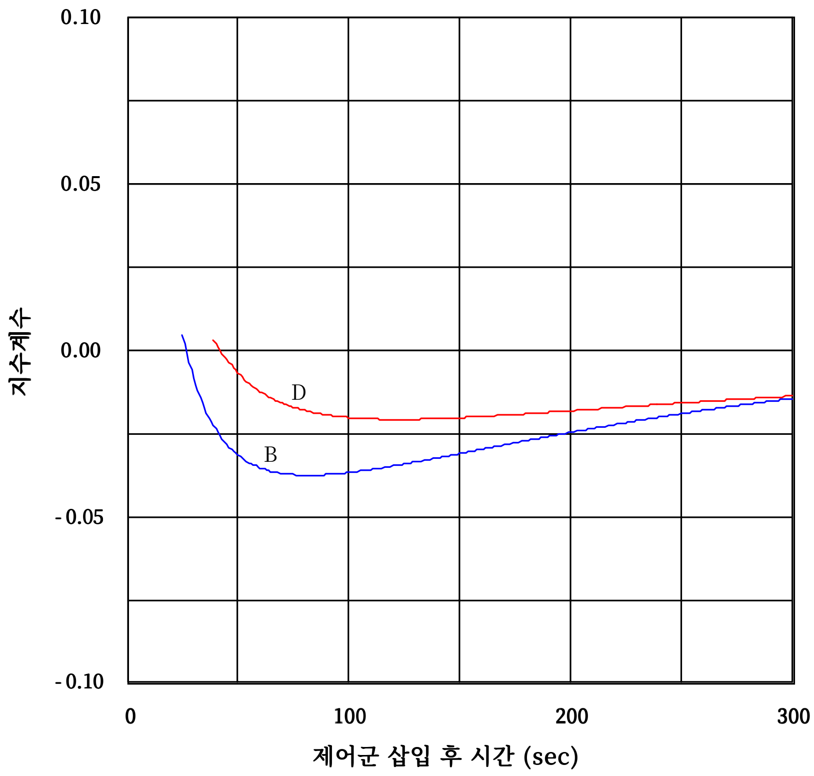

그림 5. 함수화된 계측기 신호를 사용한 지수계수 변화

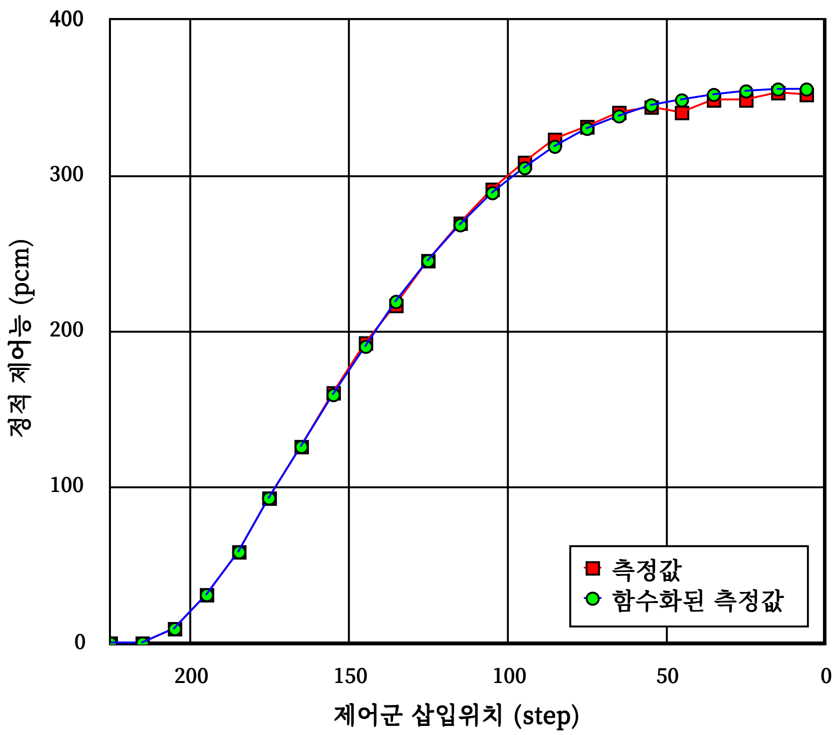

그림 6. 제어군 D 의 정적 적분제어능

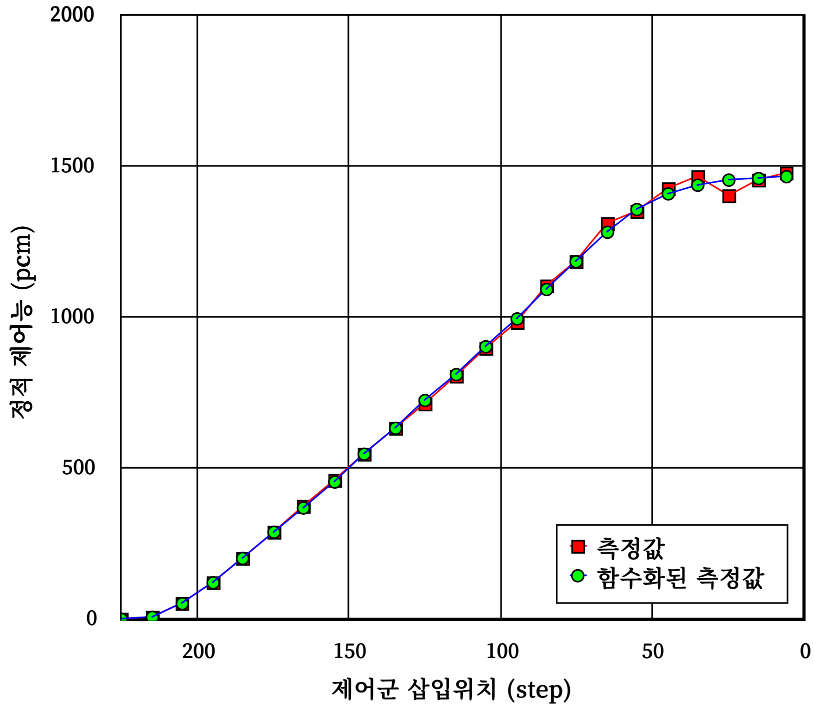

그림 7. 제어군 B 의 정적 적분제어능

표 2. 동적제어능 측정법에 의한 정적제어능 비교

제어군	설계값	측정값	% 차이
D	350.6	355.7	-1.4
		356.9	-1.7
C	686.8	717.3	-4.2
B	1358.5	1466.6	-7.3
A	279.1	279.7	-0.2

5. 결론

영광원자력 1호기 제 14주기 영출력 노물리시험 기간 중 조절제어군 D, C, B 및 A의 동적제어능 측정을 수행하여 시험절차, 노외계측기 신호취득장치 및 제어능분석 방법론 등을 점검한 결과 별다른 문제점은 발견되지 않았으나 제어능이 큰 제어군 삽입량이 많은 경우 계측기 신호가 배경신호에 가까워지고 이로 인한 잡음이 동적제어능 분석에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 특히 동적제어능 측정법이 적용되고 있는 해외 발전소의 경우 삽입속도가 분당 64 step인 것에 비하여, 영광원자력 1호기는 이의 70%에 해당하는 분당 48step의 속도로 제어봉을 삽입함으로써 제어군의

삽입시간이 길어지는 것이 주 원인이며 상대적으로 짧은 발전소의 유지보수 기간으로 인한 배경신호의 증가도 주 요인인 것으로 판단된다. 이 연구에서는 배경신호에 가까워진 계측기 신호를 최소자승법에 의한 회귀분석을 통하여 함수화 처리함으로써 잡음의 영향을 줄이는 방법을 제시하였다. 동적제어능 측정법에 의한 정적제어능 측정값은 설계값과의 오차가 통상적으로 인정되는 ±15%[7] 이내에 충분히 들고 있어 측정 및 분석 방법의 신뢰성을 확인할 수 있다.

참고문헌

1. “User’s manual RAMBO Version 1.0.0, Dynamic Rod Worth Measurement,” Electric Power Research Center North Carolina State University, 1998.
2. Y. A. Chao, et al., “Dynamic Rod Worth Measurement,” *Nucl. Tech*., **132**, 403, 2000.
3. 조병오 외, “MASTER 2.1 User’s Manual,” KAERI/UM-06/2000, 한국원자력연구소, 2000.
4. Y. S. Liu, et al., “ANC-A Westinghouse Advanced Nodal Computer Code, WCAP-11596-P-A, 1986.
5. “RSIC Computer Code Collection. TORT-DORT: Two- and Three-Dimensional Discrete Ordinates Transport Version 2.12.14,” Radiation Shielding Information Center, Oak Ridge National Laboratory, 1995.
6. 김강석 외, “노외계측기 반응도 계산에서의 2차원 DORT 합성법과 3차원 TORT 계산 비교,” 한국원자력학회 2001 추계학술발표회 논문집.
7. “Reload Startup Physics Tests for Pressurized Water Reactor,” ANSI/ANS-19.6.1, American Nuclear Society, 1997.