

'96 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

단순 노외계측기 교정법

하창주, 정선교, 성기봉, 이해석
한국원전연료주식회사

이상희, 박현택, 조희봉, 박재원, 윤준구, 김윤호
한국전력공사

요약

노심 외각에 설치되어 노심 외각으로 누설되는 중성자를 검출하여 노심내의 출력 변화를 지시해 주는 노외계측기(Excore Detector)는 운전중 노심의 변화를 정확히 감지 하도록 정기적으로 교정되어야 한다. 노외계측기는 노내계측기(Incore Detector)를 통하여 측정되어진 축방향 출력편차(Axial Offset)를 이용하여 교정하고 있다. 기존의 방법은 노내계측기로 최소한 4회 노심 출력을 측정하여 최소자승법(Least Square Method)으로 상수들을 구한후 노외계측기를 교정한다. 여기서 소개되는 단순 노외계측기 교정법은 노내계측기로 2회 측정되어진 자료들을 이용하는 2점 교정법과 1회 측정되어진 자료들을 이용하는 1점 교정법으로, 계측기 반응상수(Detector Response Factor)를 계산한후 교정되어진 노외계측기의 출력편차를 측정값과 비교하였다. 위의 두가지 방법을 고리 3호기 9주기, 10주기에 적용하여 노심 운전영역($\sim \pm 10\%$)에서 2점 교정법은 최대 1.40 %, 1점 교정법은 최대 0.63 %의 오차를 보여주고 있다. 단순 노외계측기 교정법은 노심출력을 1회 또는 2회 측정하므로 교정시간을 줄이고 제어봉의 사용을 억제하여 방사성 폐기물을 감소시키는 효과와 기존의 교정 방법과 같은 정확성을 기대할수 있다.

1. 서론

원자력 발전소에서 사용되고 있는 노외계측기는 노심 외각에 대칭적으로 4개가 배치되어 있으며 각각 1.5 m 길이의 상부계측기와 하부계측기로 구성되어 있는 Ion Chamber 이다. 노외계측기는 급격한 출력 변화, 노심의 Overpower, 비정상 축방향 출력 분포등을 감시하여 원자로 보호를 위한 경보 발생 및 비상

정지 신호를 제공하여 노심을 보호한다. 따라서 정확한 출력 계측을 위해 정기적인 교정이 필요하다. 주기초 출력 상승중 75% 출력 노물리 실험중 최초로 노외 계측기를 교정하며 이후 정기적으로 교정한다.

노외계측기를 매번 교정할때 마다, 다양한 축방향의 출력 분포를 고려하기 위하여 노내계측기로 최소한 4회이상 노심 출력을 측정한다. 기존의 교정방법에서는 노내계측기의 출력 편차와 노외계측기의 전류가 서로 선형적인 관계식을 가진다고 가정하여 최소자승법으로 노내계측기의 출력편차와 노외계측기의 전류와의 관계식을 구한다. 이때 다양한 축방향 출력 분포를 이용하기 위하여 제어봉과 봉소를 사용하므로 많은 시간이 소요되며 또한 많은 방사성 물질이 발생된다. 따라서 측정 회수를 줄이며 주기초 75% 출력에서 노외계측기 교정으로 인한 출력 손실을 줄이고, 제어봉 사용을 억제하여 방사성 물질의 배출을 감소시킬 방법론의 개발이 필요하다.

여기서 소개되는 단순 노외계측기 교정법은 계측기 반응상수를 계산하여 노심의 출력을 노외계측기의 전류로 환산하여 정확하게 노내계측기의 출력편차를 계산하도록 한다. 2장에서는 현재 발전소에서 사용하는 방법을 간단히 설명하고, 3장에서는 단순 노외계측기 교정법을 설명하고, 4장에서는 이 방법을 고리 3호기 9주기, 10주기에 적용한 결과를 설명한다. 5장에서는 결론과 실제 발전소의 적용 가능성을 설명한다.

2. 기존의 방법론

노심의 축방향 출력편차는 원자로 운전에 직접적인 영향을 주는 중요한 요소로서 일정한 출력편차 범위내에서 운전하도록 제한하는 CAOC(Constant Axial Offset Control) 운전 전략에 사용된다. 노심의 축방향 출력편차는 다음과 같이 정의된다.

$$A_I = \frac{P_T - P_B}{P_T + P_B}, \quad P_T = \text{상부 출력}, \quad P_B = \text{하부 출력}$$

$$A_E = \frac{C_T - C_B}{C_T + C_B}, \quad C_T = \text{상부 전류}, \quad C_B = \text{하부 전류}$$

여기서 A_I , A_E 는 노내계측기와 노외계측기의 축방향 출력편차이다. 노외계측기의 전류는 노내계측기의 축방향 출력편차와 선형적인 관계식을 갖는다는 가정 아래 4회 측정되어진 자료를 이용하여 최소자승법으로 다음 방정식의 상수들($\alpha_T, \beta_T, \alpha_B, \beta_B$)을 계산한다.

$$C_T = P(\alpha_T A_I + \beta_T), \quad C_B = P(\alpha_B A_I + \beta_B) \quad (1)$$

100% 출력에서 축방향 출력 편차가 0.0% 일때 전압과 전류를 V' , C' 이라고 하면, 식 (1)을 전압으로 다음과 같이 쓸수 있다.

$$V_T = \frac{PV^*}{\beta_T}(\alpha_T A_I + \beta_T), \quad V_B = \frac{PV^*}{\beta_B}(\alpha_B A_I + \beta_B) \quad (2)$$

발전소에서는 상부계측기와 하부계측기의 전압차이가 축방향 출력편차로 계산되므로, 노심의 축방향 출력편차는 다음과 같다.

$$A_I = \frac{1.0}{PV^* \left(\frac{\alpha_T}{\beta_T} - \frac{\alpha_B}{\beta_B} \right)} \Delta V \quad (3)$$

여기서 $\Delta V = V_T - V_B$ 이다.

식 (3)에서와 같이, 축방향 출력편차는 상하부 계측기의 전압차이와 선형적인 관계식으로 기술되어 식 (3)의 계수를 이용하여 노외계측기를 교정한다. 식 (3)과 같이 교정된 노외계측기는 92 EFPD(Effective Full Power Day)마다 재교정되어진다. 교정때 마다 제어봉을 사용하여 많은 양의 방사성 물질을 만들어 내므로 가능한 노심 출력분포 측정 회수를 줄이는 새로운 방법론의 도입이 요구되어진다.

다음 장에서 설명될 단순 노외계측기 교정법은 궁극적으로 측정 회수를 4회에서 1회 또는 2회로 줄이며, 주기초 75% 출력에서 빠른 시간내에 100% 출력에 도달하도록 하여 저출력 운전시간을 줄이고 또한 방사성 물질의 증가를 억제하도록 하는데 있다. 3 장에서는 계측기 반응상수라는 개념을 도입하여 노심의 출력을 노외계측기의 전류로 전환시켜 노외계측기를 교정하는 방법론을 설명한다.

3. 단순 노외계측기 교정법

노외계측기의 전류는 노심내에서 핵분열에 의해 생성된 중성자가 계측기까지 도달하여 계측기내에서 일으키는 반응율에 비례한다. 노외계측기 반응을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$C(r_e, z_e) = \int \int_{\Delta V_i} R(r_i, z_i \rightarrow r_e, z_e) \cdot P(r_i, z_i) drdz \quad (4)$$

여기서 $C(r_e, z_e)$ 는 위치 (r_e, z_e) 에 있는 노외계측기의 반응을 나타내며 $R(r_i, z_i \rightarrow r_e, z_e)$ 는 Green 함수[1]이고, $P(r_i, z_i)$ 는 노심내 출력분포이다. 식 (4)의 적분방정식은 다음과 같이 표현될수 있다.

$$\int \int_{\Delta V_i} R(r_i, z_i \rightarrow r_e, z_e) \cdot P(r_i, z_i) drdz \cong \hat{R} \sum_i P_i \quad (5)$$

\hat{R} 는 계측기 반응상수로 정의되며 노심에서 생산되는 출력에 대한 Weighting Factor이다. 식 (5)를 이용하여 상부계측기 전류를 상부 노심으로부터 오는 중성자에 의한 전류와 하부노심으로부터 오는 중성자에 의한 전류로 구분하여 행

렬식으로 표현할수 있다. 노외계측기의 전류를 계측기 반응상수와 노심 출력으로 표현하면 다음과 같다.

$$C_{2 \times 1} = R_{2 \times m} P_{m \times 1} \quad (6)$$

$C_{2 \times 1}$ 는 노외계측기 전류 Vector이고 $R_{2 \times m}$ 은 계측기 반응상수로 구성된 Matrix이며, $P_{m \times 1}$ 은 노심출력 Vector이다.

3.1 단순 노외계측기 교정 이론

상하부 계측기의 전압차이를 축방향 출력편차로 계산하기 위해서, 식 (6)을 이용하여 계측기 전류와 축방향 출력편차와의 관계식을 구한다. 2장에서 설명한 방식과 같이 상하부 전류를 전압으로 바꾸어 그 전압차이를 축방향 출력분포와의 관계식을 구하면 다음과 같다.

$$A_I = \frac{1.0}{\alpha_T - \alpha_B} \Delta V \quad (7)$$

식 (7)의 α_T , α_B 는 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha_T = \frac{V^r}{P^r} \left(\frac{R_T^T - R_T^B}{R_T^T - R_T^B} \right), \quad \alpha_B = \frac{V^r}{P^r} \left(\frac{R_B^T - R_B^B}{R_B^T + R_B^B} \right)$$

여기서 V^r 은 노심 출력 P^r 에서 축방향 출력편차가 0% 일때의 기준 전압이며, R_T^B 는 하부노심에서 생산되는 출력에 대해 상부계측기에 적용되는 계측기 반응상수이다.

(가) 2점 교정법

2점 교정법은 계측기 반응상수들을 다른 보조 계산없이 2회 측정된 자료를 이용하여 계산하는 것으로 노심 출력과 노외계측기 전류의 함수로 표현된다.

$$R_i^j = F(P_i^{j,1}, P_i^{j,2}, C_i^1, C_i^2) \quad (8)$$

식 (8)에 있는 첨자 ij 는 노심의 상부와 하부를, 첨자 1,2는 측정횟수를 표시한다. 식 (7)과 (8)을 고리 3호기 9주기, 10주기에 적용하여 측정값과 비교하였다. 표 1은 고리 3호기 9주기 2000 MWD/MTU에서 노외계측기들을 교정했을때의 결과를 보여주고, 표 2는 고리 3호기 9주기 11100 MWD/MTU에서의 교정 결과들을 비교하고 있다. 2점 교정법은 운전영역(10% ~ -10%)에서의 최대오차는 1.40 %를 보여 준다.

(나) 1점 교정법

1점 교정법은 2점 교정법과 같은 방법을 쓰나, 계측기 반응상수를 구할때 1회 측정되어진 자료와 전산코드를 이용하는 차이점만 있을 뿐이다. 따라서 1회 측정되어진 자료를 이용하여 계측기 반응상수를 구하여 곧바로 교정을 수행한다. 계측기 반응상수는 아래와 같은 Transport Equation과 Adjoint Transport Equation을 이용한다.

$$L\phi(r, \Omega, E) + Q(r, \Omega, E) = 0 \quad (9)$$

$$L^*\phi^*(r, \Omega, E) + \Sigma_d(r, E) = 0 \quad (10)$$

여기서 $Q(r, \Omega, E)$ 와 $\Sigma_d(r, E)$ 는 중성자원과 계측기의 거시 핵단면적이다. 식 (9)와 (10)에 적절한 Adjoint Operator를 사용하여 빼면 다음과 같은 방정식[2]을 구한다.

$$\int \Sigma_d(r, E)\phi(r, \Omega, E)dVd\Omega dE = \int Q(r, \Omega, E)\phi^*(r, \Omega, E)dVd\Omega dE \quad (11)$$

식 (11)의 왼쪽항은 계측기의 반응율이며, Adjoint Flux와 중성자원으로 표시될 수 있다. 3장에서 도입된 계측기 반응 상수의 정의와 식 (11)을 이용하면 계측기 반응 상수는 다음과 같이 쓸수 있다.

$$R = \frac{\int P(r, E)\phi^*(r, E)dVdE}{\int P(r, E)dVdE} \quad (12)$$

식 (12)를 상부와 하부계측기로 분리하여 표현하면 아래와 같다.

$$R_i^j = \frac{\sum_{i,j \in T, B} P_j \phi_i^{*,j}}{\sum_{j \in T, B} P_j} \quad (13)$$

1점 교정법으로 계측기 교정상수들을 구하기 위해서는 ANC[3] 3차원 계산으로 노심출력을 구하고, DORT[4] 2차원 (r-z) 모델로 부터 Adjoint Flux를 계산한다. 표 3은 고리 3호기 9주기를 대상으로, 표 4는 고리 3호기 10주기 대상으로 계측기 반응상수들을 계산하여 측정값과 비교하였다. 1점 교정법은 2점 교정법에 비하여 Weighting Factor를 계산하는 노력이 필요하나, 교정시간을 더욱 줄이고 제어봉의 사용을 감소시키는 잇점이 있다. 1점 교정법은 운전영역에서 최대 0.63 %의 오차를 보여주고 있다.

4. 결론

단순 계측기 교정법은 최소자승법을 대체할수 있도록 개발되었다. 계측기 반응상수를 도입하여 보다 단순하고 빠른 교정법을 제시하였다. 2점 교정법은 2회 측정자료를 이용하여 교정하는 것으로 계측기 교정상수를 주어진 측정자료로부터 계산하는 것으로, 고리 3호기 4주기와 9 주기에 적용하였다. 1점 교정법은 ANC와 DORT를 이용하여 노심내의 출력과 Weighting Factor를 얻어 계측기 반응상수를 계산하였으며, 고리 3호기 9 주기와 10 주기에 적용하였다. 2점 교정법은 측정값과 최대 1.40 %이내의 오차를, 1점 교정법은 측정값과 최대 0.63 %이내의 오차를 보여주고 있다. 표 5는 표 4의 측정 한달후 교정결과와 측정값과의 차이를 보여 주는 것으로, 기존의 교정법과 1점 교정법의 결과가 거의 동일함을 보여주고 있다. 이는 재교정 요구조건인 $\pm 3\%$ 이하의 오차를 만족하고 기존의 방법과 같은 정도의 정확성을 보여주므로, 실제 발전소에 적용할 경우 교정시간의 단축과 제어봉 사용에 따른 방사성 폐기물량의 감소를 기대할수 있다.

표 1. 2점 교정법 결과(고리 3호기 9주기 100% 출력, 2000 MWD/MTU)

측정 출력편차	Ch. 41	Ch.42	Ch.43	Ch.44
*-1.55 %	-1.55 %	-1.55 %	-1.55 %	-1.55 %
*-5.63 %	-5.63 %	-5.63 %	-5.63 %	-5.63 %
-7.96 %	-7.63 %	-7.91 %	-7.91 %	-8.03 %
-9.62 %	-9.34 %	-9.64 %	-9.47 %	-9.60 %

* : 노심 출력편차 -1.55 %와 -5.63 %에서 측정되어진 자료를 기준으로 교정.

표 2. 2점 교정법 결과(고리 3호기 9주기 100% 출력, 11100 MWD/MTU)

측정 출력편차	Ch. 41	Ch.42	Ch.43	Ch.44
*-4.60 %	-4.60 %	-4.60 %	-4.60 %	-4.60 %
*-5.92 %	-5.92 %	-5.92 %	-5.92 %	-5.92 %
-8.05 %	-8.24 %	-7.69 %	-8.61 %	-8.09 %
-9.73 %	-10.59 %	-9.48 %	-11.13 %	-9.61 %

* : 노심 출력편차 -4.60 %와 -5.92 %에서 측정되어진 자료를 기준으로 교정.

표 3. 1점 교정법 결과(고리 3호기 9주기 100% 출력, 11000 MWD/MTD)

측정 출력편차	Ch. 41	Ch.42	Ch.43	Ch.44
*-4.60 %	-4.60 %	-4.60 %	-4.60 %	-4.60 %
-5.92 %	-5.69 %	-5.92 %	-5.55 %	-5.87 %
-8.05 %	-7.62 %	-7.68 %	-7.48 %	-7.95 %
-9.73 %	-9.58 %	-9.48 %	-9.29 %	-9.40 %

* : 노심 출력편차 -4.60 %에서 측정되어진 자료를 기준으로 교정됨

표 4. 1점 교정법 결과(고리 3호기 10주기 100% 출력, 4000 MWD/MTD)

측정 출력편차	Ch. 41	Ch.42	Ch.43	Ch.44
*-3.46 %	-3.46 %	-3.46 %	-3.46 %	-3.46 %
-5.80 %	-5.57 %	-5.39 %	-5.59 %	-5.71 %
-8.24 %	-7.91 %	-7.73 %	-7.80 %	-7.91 %
-10.30 %	-9.77 %	-9.67 %	-9.81 %	-10.02 %

* : 노심 출력편차 -3.46 %에서 측정되어진 자료를 기준으로 교정됨

표 5. 1점 교정법과 기존의 교정법(고리 3호기 10주기, 5000 MWD/MTU)

	Ch. 41	Ch. 42	Ch. 43	Ch. 44
측정 출력 편차	-4.07 %	-4.07 %	-4.07 %	-4.07 %
*기존의 교정법	-3.87 %	-3.92 %	-4.03 %	-3.62 %
**1점 교정법	-3.79 %	-3.79 %	-3.94 %	-3.60 %

* : 4000 MWD/MTU에서 구한 교정상수 이용.

** : 4000 MWD/MTU에서 구한 계측기 반응상수를 이용.

참고문헌

1. Y. Shimazu, "An Analytical Method for Recalibration of Incore and Excore Nuclear Instrumentation System of PWRs", Proceedings of a Specialists' Meeting on Incore Instrumentation and Reactor Assessment, p.34-p.41, 1988, Cadarache, France.
2. J. G. Ahn and N. Z. Cho, "Generation of Spatial Weighting Functions for Ex-Core Detectors by Adjoint Transport Calculation", Nuclear Technology, vol. 103, p.114-p.121, 1993.
3. Y. S. Liu et al., "ANC: A Westinghouse Advanced Nodal Computer Code", WCAP-10965, 1985.
4. W. A. Rhoades and R. L. Childs, "An Updated Version of the DORT One- and Two-Dimensional Neutron/Photon Transport Code", ORNL-5851, Oak Ridge National laboratory, 1982.