

해석적 자료를 이용한 최소자승 추정법의 성능 개선

- 원자로보호계통에의 응용 -

최유선, 박문규, 차균호, 이창섭

한국전력공사 전력연구원

Improvement of Accuracy for Least Square Estimator Combining
Analytic Solution - Application to Reactor Protection System

Yuseon Choi, Moon Ghu Park, Kuneho Cha, Changsup Lee

Korea Electric Power Research Institute

요 약

본 논문은 선형모델의 모델 계수의 결정방법으로 사용되는 최소자승법 (Least Squares Method, LSM)의 단점을 해결하기 위해 해석적으로 계산된 자료를 함께 적용하는 방법과 원자로의 출력분포 측정을 위한 SAM (Shape Annealing Matrix) 결정에 적용한 결과를 기술하고 있다. 해석적 자료를 함께 적용할 경우 연료 연소에 따른 원자로 특성변화를 적절히 반영하여 LSM 추정치의 정확도를 크게 개선할 수 있음을 확인하였다.

1. 서 론

선형모델 (엄밀히는 Linear-in-Parameter Model)을 이용한 상태변수의 추정시 수반되는 모델 계수의 결정방법으로 LSM이 일반적으로 사용되고 있다.[1] 특히 측정자료가 충분할 경우, LSM은 Overdetermined 문제의 해를 구하는 가장 편리한 방법 중의 하나이다. 그러나, LSM은 측정자료의 취득시점에 대해서는 매우 정확한 해를 제공하나 측정자료의 물리적 특성 변화를 반영하기 어려우며 측정 Noise에 매우 민감한 단점이 있다.

이의 해결을 위해 Robust LSM, Adaptive Method 등을 고려할 수 있으나 설계방법의 보수성으로 인해 원자로보호계통에는 적용하기 힘든 것이 현실이다. 본 논문은 원자로의 출력분포 측정을 위한 SAM 결정에 사용되는 최소자승 추정치가 운전주기초에 측정한 자료만으로 모델 계수를 결정하여 연료 연소에 따른 영향을 반영하지 못하는 단점을 개선하기 위해 정확도 높은 해석적 자료를 미리 생산하고 이를 측정자료와 결합하여 모델계수를 결정하는 방법론을 기술한다.

2. SAM 결정방법론

한국표준형원자력발전소(Korea Standard Nuclear Power Plant, 이하 KSNP)에는 4개의 노외계측기가 설치되어 있으며, 노심보호계통 각 채널은 하나의 노외계측기 신호를 독립적으로 이용하여 노심의 측방향 출력분포를 계산한다. 그림 1에는 KSNP 노외계측기의 관련 구조 및 위치를 개념적으로 나타내었다.

노심보호계통은 두 단계의 과정을 이용하여 노심의 측방향 출력분포를 계산한다. 먼저 SAM을 이용하여 상, 중, 하 노외계측기 신호를 삼등분된 노심의 출력분포 (상, 중, 하)로 변환한다. 그림 1은 SAM의 의미를 개념적으로 보여주고 있다. 노심의 상, 중, 하 출력분포가 결정되면, 노심상하부의 경계조건을 이용하여 상, 하 노심 경계에서의 출력이 결정된다. 이와 같이 결정된 노심의 상, 중, 하부 출력 및 경계에서의 출력뿐만 아니라 노심 상, 하부 경계에서 일정한 거리만큼 떨어진 위치에서 출력이 영(Zero)이라는 제한조건(Constraints)을

이용하는 Cubic Spline 합성법으로 연속적인 축방향 출력분포가 결정된다.

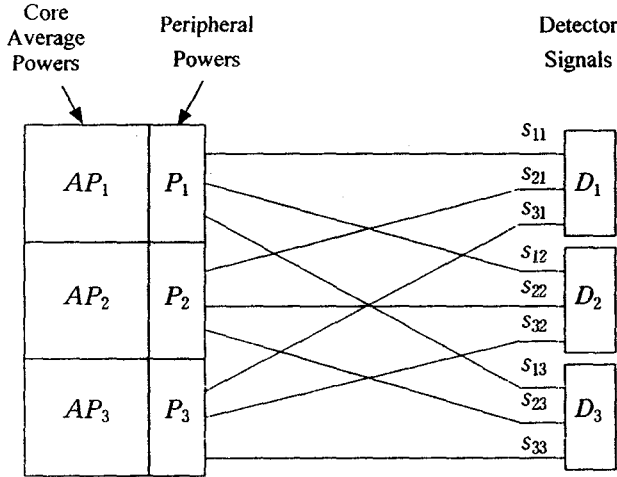


그림 1. 노외계측기 신호와 노심 출력분포 사이의 관계

노심보호계통은 노심외곽 상, 중, 하 출력은 노외계측기 상, 중, 하 신호와 선형적인 관계가 있다고 가정하며, 두 벡터(Vector)간의 선형성을 나타내는 3x3 행렬을 SAM이라 정의한다. 즉 노심외곽의 상, 중, 하 출력 P_i는 노외계측기 상, 중, 하 신호 D_i와 식(1)과 같은 관계가 있다고 가정한다.

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{pmatrix} = [SAM] \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

식(1)을 이용하여 노심외곽의 출력분포 P_i가 결정되면, 노심 평균 상, 중, 하 출력분포 AP_i를 결정한다.

원자로 출력변동시 다양한 측정자료가 주어지면 SAM은 최소자승법에 따라서 결정된다. N 개의 측정자료가 주어져 있다고 가정하면, 각 노심보호계통 채널에 대하여 SAM의 각 요소는 식 (2)와 같이 최소자승법에 의해 결정될 수 있다.

$$\begin{pmatrix} S_{i1} \\ S_{i2} \\ S_{i3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle D_1^i D_1^i \rangle & \langle D_1^i D_2^i \rangle & \langle D_1^i D_3^i \rangle \\ \langle D_2^i D_1^i \rangle & \langle D_2^i D_2^i \rangle & \langle D_2^i D_3^i \rangle \\ \langle D_3^i D_1^i \rangle & \langle D_3^i D_2^i \rangle & \langle D_3^i D_3^i \rangle \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \langle P_i^i D_1^i \rangle \\ \langle P_i^i D_2^i \rangle \\ \langle P_i^i D_3^i \rangle \end{pmatrix}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

여기서 $\langle \cdot \rangle$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$\langle X \rangle = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_j$$

3. 해석적 자료의 생산

SAM 결정에 필요한 해석적 자료는 노심연소에 따른 노심 상, 중, 하부 3개 Segment에 대한 출력분포 (그림2)와 이에 해당하는 노외계측기 신호이다. 노심출력은 원자로의 3차원 중성자 확산방정식의 해로 주어진다.

원자력발전소 노외계측기 신호의 이론적인 예측은 소위 공간중요도함수 (Spatial

Weighting Function, SWF) 개념을 이용하여 가능하다. 만약 노심내 3차원 출력분포가 $P(r)$ 이라면, 노외계측기의 신호 R 은 식 (3)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$R = \int_V P(r) \omega(r) dr, \quad (3)$$

여기서 $\omega(r)$ 은 계측기의 SWF를 의미하며, V 는 노심의 체적이다. 노외계측기에 대한 SWF가 알려져 있으면, 어떠한 출력분포에 대해서도 계측기의 신호를 계산할 수 있다.

노외계측기의 SWF는 몇 가지 방법을 통하여 결정할 수 있는데, 일반적으로 식 (4)와 같은 중성자 수송 방정식의 수반해 (Adjoint Flux)를 이용하여 효과적으로 결정할 수 있다.

$$L^* \Phi^*(r, \Omega, E) + \Sigma_d(r, \Omega, E) = 0, \quad (4)$$

여기서 L^* 는 정상상태 Adjoint Transport Operator이며, $\Sigma_d(r, \Omega, E)$ 는 계측기 단면적을 의미한다. 노외계측기에 대한 정확한 SWF를 계산하기 위해서는 식 (4)를 3차원 노심을 대상으로 풀어야 한다. 그러나 3차원 중성자 수송계산은 엄청난 계산시간을 요구하기 때문에 본 논문에서는 그림 3과 같은 축방향 1차원 SWF만을 적용한다.

위와 같은 방법으로 미리 계산된 자료를 실제 측정된 자료에 부가하여 식 (2)를 이용하여 SAM을 결정하는 것이 본 논문의 핵심이다.

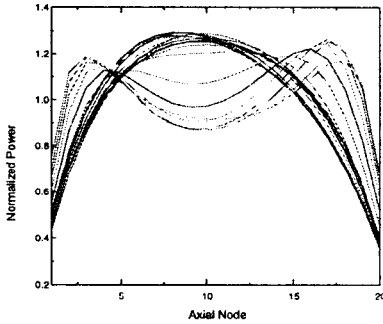


그림 2. 연료연소에 따른 원자로 출력분포 변화

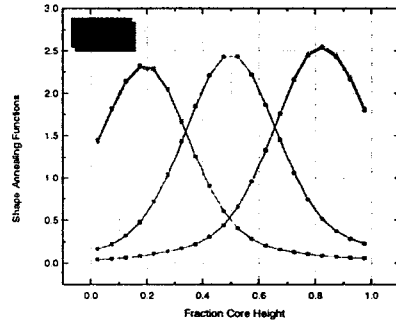


그림 3. 원자로축방향 1차원 SWF

4. 개선된 방법의 적용결과

그림 4,5는 영광원자력 3호기 2주기와 울진원자력 4호기 1주기에 개선된 방법을 적용하여 기존 결정방법과 비교한 결과이다. (가장 오차가 큰 Channel B 결과) 전술한 바와 같이 기존 SAM을 사용했을 경우 연료연소가 진행되면서 오차가 지속적으로 증가하여 주기말에서는 약 5~6%까지 도달하였다. 그러나 개선된 방법론을 적용할 경우 연소가 진행되어도 매우 정확한 계산결과를 제공함을 확인할 수 있다. 즉, 기존 방법으로 결정된 SAM이 연소특성을 제대로 반영하지 못하는 반면, 개선된 방법은 연소특성은 물론 노외계측기와 노심간의 물리적 관계를 잘 나타내고 있다.

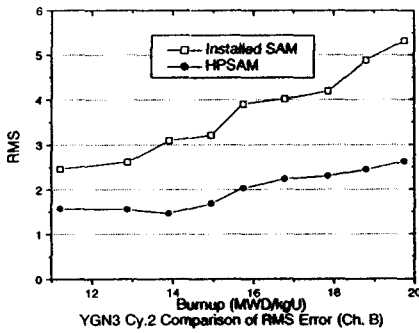


그림 4. 영광 3호기 2주기 RMS 오차

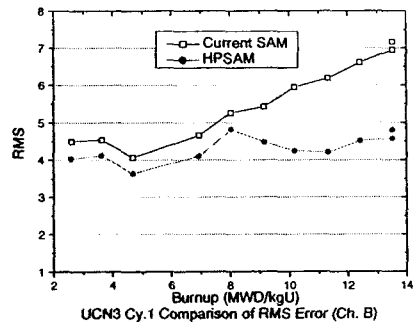


그림 5. 울진 4호기 1주기 RMS 오차

5. 결론

원자로의 안전성을 확보하기 위한 원자로보호계통은 운전변수 감시방법의 보수성과 일관성이 유지되도록 엄격한 규계기준이 적용되어 최근에 활발히 적용되고 있는 모델계수 적응(Adaptation), Robust LSM 등의 방법론을 적용하기 힘들다. 본 논문은 선형모델의 모델계수의 결정방법으로 일반적으로 사용되는 최소자승법의 단점을 해결하기 위해 해석적으로 계산된 자료를 함께 적용하는 방법을 원자로의 출력분포 측정을 위한 SAM (Shape Annealing Matrix) 결정에 적용한 결과를 기술하고 있다. 해석적 자료를 함께 적용할 경우 연료 연소에 따른 원자로 특성변화를 적절히 반영하여 LSM 추정치의 정확도를 크게 개선할 수 있음을 확인하였다.

정확한 모델을 이용하여 미리 해석적 방법으로 상태변화에 대한 자료를 생산하는 것이 가능할 경우 원자로이외의 일반적인 공정감시 방법으로도 적용될 수 있어 On-line으로 적용 계산할 경우의 전산부하를 경감시킬 수 있는 방법으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 강근석, 김충락, “회귀분석”, 교우사 (1999).
- [2] 이창섭, 이상희, 박문규, 차균호, 최유선, “한국표준형원전 노심보호연산기 SAM 결정방법 개선”, KEPRI (2000).