99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력 학회

가상 핵계측기 정보를 이용한 노심 축방향 출력분포 계산

Calculation of Core Axial Power Shapes Using the Pseudo-Detector Information

이은기, 김용희, 차균호, 박문규

한국전력 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

ABB-CE 형 원전 노심감시계통의 노심 축방향 출력분포를 보다 정확하게 계산하기 위해 현행 5 개 실제 핵계측기 정보를 이용하는 방법에서 추가로 4 개의 가상 핵계측기 정보를 더 고려하는 방법을 제안하고 그 타당성을 수치실험을 통해 살펴보았다. 가상 핵 계측기 신호는 5 개 실제 핵계측기 신호를 이용하여 계산하는데, 4 개의 가상 핵계측기 각각과 5 개 실제 핵계측기 사이의 최적상관관계는 Alternating Conditional Expectation (ACE) 방법을 이용하여 구하였다. 축방향 출력분포는 9 개 핵계측기 정보를 이용하여 기존과 같이 Fourier fitting 방법으로 구하였다. 제안된 방법의 타당성을 살펴보기 위해 영광 3 호기 3 주기, 4 호기 4 주기를 대상으로 각 주기별로 총 3462 개의 20 개 노드 축방향 출력분포를 재생산 하였으며, 이를 '기존 5 개 핵 계측기 정보만을 사용하여 계산한 결과' 및 '20 개 노드 각각과 5 개 핵계기 신호와의 최적상관관계를 이용하여 통계적 방법으로 계산한 결과'와 비교하였다. 그 결과 제안된 방법은 5 개 핵계측기를 이용한 경우에 비해 평균 제곱근오차는 ~50%, 평균 축방향 첨두 출력 오차는 ~70% 정도 감소하였다. 이 수치는 통계적 방법과 유사한 것이지만 통계적 방법과는 달리 20 개 노드 이상의 축방향 출력분포 계산에 아무런 제한이 없고, 출력분포 계산용 상수도 통계적 방법의 20% ~ 45% 수준에 그친다는 점에서 실제 노심감시계통에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

ABSTRACT

To improve the computational accuracy of core axial power shapes in COLSS (Core Operating Limit Supervisory System) of ABB-CE reactors, a new method using extra 4 pseudo-detector signals to evaluate axial power shapes was proposed and tested for YoungGwang Nuclear Unit (YGN) 3 cycle 3 and YGN 4 cycle 4. To find optimal correlation between each pseudo-detector signal and 5 real detector signals, the Alternating Conditional Expectation (ACE) algorithm was used. And the conventional Fourier fitting method was adopted to calculate 20-node axial power shapes with 9-detector information. To verify the usefulness of new method, a total of 3462 axial power shapes per each cycle produced by ROCS (Reactor Operation and Control Simulation) code were recalculated by different axial power shape reconstruction methods. The results were compared with those of the existing Fourier fitting method and stochastic method using the ACE algorithm. The average Root Means Square (RMS) error and average of axial peaking, ΔF_Z, error of the proposed 9-detector method shows about 50% and 70 reduction, respectively, relative to the existing 5-detecotor method. Because the proposed 9-detector method, compared with the stochastic power prediction method, has no restriction on expanding from 20-node shape to 40- or 50-node axial power shape, it may be an useful method for precise reconstructing of axial power shapes when only 5-detector information are available.

1. 서론

영광 3,4 호기에 설치된 노심감시계통[1] (COLSS, Core Operating Limit Supervisory System)은 운전제한조건(Limiting Conditions for Operation, LCO)을 감시하기 위해 원자로 출력, Departure Nucleate Boiling Ratio (DNBR), Peak Linear Heat Rate (PLHR), Azimuthal Tilt, Axial Shape Index(ASI)를 실시간으로 계산하여 운전원에게 제공한다. 특별히 DNBR 과 PLHR 는 노심감시에 중요한 변수들인데 이들을 계산하기 위해 COLSS 는 225 개 노내 핵계측기 신호를 사용한다. 영광 3,4 호기의 경우 노내 핵계측기는 반경방향으로 45 개가 들어가며, 각 핵계측기는 축방향으로 균등하게 분포된 5 개의 핵계측기를 가지고 있다. COLSS 는 각 축방향 위치에서 45 개 핵계측기 신호를 모두 합산하고 이렇게 구한 5 개 값을 정규화한 뒤 Fourier fitting 방법을 이용하여 축방향 출력분포를 계산한다. PLHR 을 계산할 때는 축방향으로 40 개 노드의 출력분포를 사용하고, DNBR 을 계산할 때는 40 개 노드 출력분포를 20 개로 축약하되 축방향 첨두 출력은 동일하게 유지되도록 재 규격화한 출력분포를 사용한다.

문제는 축방향으로 5 개 지점의 핵계측기 정보만을 이용하므로 축방향 출력분포가 말안장 형태(saddle-type)가 되거나 노심 상하부로 치우친 경우는 Fourier fitting 에 의한 출력분포 모사능력이 저하된다는데 있다. 출력분포 모사능력이 열적여유도 향상에 큰 영향을 미치는 만큼 가능한 정확한 출력분포 계산이 요구되지만, 계측기 수를 늘리는 것이 힘들기 때문에 5 개 정보를 이용한 Fourier fitting 방법으로는 계산 정확성 향상을 기대하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 개발된 것이 Spline function 합성법[2]이다. 그러나 이 방법 역시 가용 정보가 5 개에 국한되기 때문에 근본적인 한계를 벗어날 수 없다. 이런 결정론적 방법에서 벗어나 최근에 개발된 방법으로는 5 개 핵계측기 신호와 20 개 축방향 노드 각각의 최적 상관 관계를 도출하여 출력분포에 사용하는 통계적 방법[3,4]이 있다. 여기서 최적 상관 관계는 Alternating Conditional Expectation (ACE)[5] 방법을 사용하여 구한다. 이 방법은 기존 방법에 비해 정확성은 향상되었지만, 20 개 노드 출력분포 계산에만 적용할 수 있고, 이 경우라도 최대 1980 개의 상수가 추가로 필요하다는 것이 단점으로 지적되었다.

본 논문은 통계적 방법과 결정론적 방법을 절충한 새로운 접근 방법을 제안하고자 한다. 제안 방법의 핵심은 기존 Fourier fitting 방법을 사용하되 계산정확성 향상을 위해 "가상 핵계측기"를 도입하는 것이다. 가상 핵계측기는 실제 핵계측기 사이에 모두 4 개가 존재한다고 가정하였다. 이 경우 가상 핵계측기의 출력과 실제 핵계측기 출력과의 최적 상관 관계는 ACE 방법으로 도출하였다. 새로운 방법을 영광 3 호기 3 주기, 영광 4 호기 4 주기 COLSS 불확실도 평가용 자료에 적용하여 ROCS 계산 결과와 비교한 결과,

1) 5 개 핵계측기 정보를 이용하는 기존 방법에 비해 계산 오차가 대폭 감소하였으며,
2) 계산에 필요한 최적 상관 관계 상수가 통계적 축력분포 재구성 방법(최대 1980 개)에 비해 1/2 수준인 최대 864 개로서 전산메모리 부담이 줄었으며
3) 20 개, 40 개, 50 개 등 임의의 노드의 축방향 출력분포 계산에 아무런 문제가 없음을 알 수 있었다.

2. 본론

가. ACE(Alternating Conditional Expectation) 방법론

ACE 방법은 $(y, x_1, x_2, ..., x_p)$라는 자료가 존재할 때 종속변수 y 와 독립변수 $x_1, x_2, ..., x_p$ 사이의 최적 상관 관계식을 도출하는데 매우 유용한 통계적 방법이다. 통상 독립변수와 종속변수 사이의 최적 상관 관계를 도출하기 힘들 때는 이들 자료를 임의의 새로운 영역으로 변환(transformation)하되 변환된 자료들 간의 관계성이 쉽게 표현되도록 변환하는 기법을 도입한다. ACE 방법에 따르면, $(y, x_1, x_2, ..., x_p)$의 자료 집합이 N 개 존재할 때 종속변수 y 및 $x_i(i = 1,...,P)$의 최적 변환 자료(optimal transformation data)는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\phi_n(x_n) = E\left[\theta(y) - \sum_{d\neq n}^{5} \phi_d(x_d)\right](n = 1,...,5), \tag{1}$$

그리고

$$\theta(y) = \frac{E\left[\sum_{d=1}^{5} \phi_d(D_d)\right]}{\left\| E\left[\sum_{d=1}^{5} \phi_d(D_d)\right] \right\|} = \frac{E\left[\sum_{d=1}^{5} \phi_d(D_d)\right]}{E\left[\sum_{d=1}^{5} \phi_d^2(D_d)\right]}. \tag{2}$$

여기서 E 는 기대값(Expectation), 즉 평균을 의미한다. 상기한 두 식의 해는 반복계산을 통해 구하는데 회귀분석에 의한 오차가 최소가 되도록 반복계산을 수행한다. 오차는 식 (3)으로 표현된다.

$$e^2 = \frac{1}{N}\sum_j \left[\theta(y) - \sum_{d=1}^{5}\phi_d(D_d)\right]^2 . \tag{3}$$

ACE 방법은 변환된 자료가 fitting 하기 매우 좋은 형태로 나타난다는 점에서 큰 장점을 갖고 있다.

식 (1), (2)를 풀기 위해 PRACE(Power Shape Reconstruction using ACE algorithm) 전산코드를 제작하였다. PRACE 코드는 임의의 i 위치의 최적 변환 값, 즉 $\phi_j(x_i)$나 $\theta(y_i)$을 구하기 위해 그 위치로부터 특정구간($[i-M, i+M]$, M 은 입력으로 주어짐)에 존재하는 모든 자료를 대상으로 가중 평균을 수행한다. 반복계산을 통해 일련의 최적 변환 자료가 구해지면 이를 모사하기 위한 연속함수를 최소제곱법으로 구하는데 각각의 최적 변환자료 세트를 3 개 구간으로 구분, 양 끝단의 경우는 외삽을 고려하여 1 차식으로 근사하고, 가운데 구간은 최대 9 차 다항식까지 적용하여 그 계수를 구한다. 따라서 종속변수와 독립변수 각각에 대한 최적 변환 자료를 기술하는 연속함수는 경우에 따라 최대 16 개의 다항식 계수를 갖게 된다. 만일 5 개 핵 계측기 정보와 1 개의 가상 핵계측기 정보가 주어져 있다면 총 6 개의 최적변환 자료 세트가 계산되고, 이에 따른 연속함수도 6 개가 구해지며 최대 96 개의 전개상수가 이 자료세트에 대해 생산되는 것이다. 최적 변환 자료 세트를 도표화하여 내삽으로 출력을 구하면 연속함수를 따로 계산할 필요도 없고, 그로 인한 오차발생도 방지할 수 있겠지만, 필요한 전산메모리가 연속함수에 비해 450 배나 요구되기 때문에 고려하지 않았다.

나. 분석 대상 호기, 평가 자료 및 축방향 출력분포 계산 방법

새로운 방법의 적용 가능성을 살펴보기 위해 영광 3 호기 3 주기 및 영광 4 호기 4 주기 COLSS OUA(Overall Uncertainty Analysis)에 사용되는 출력분포 자료를 평가하였다. COLSS 를 노심감시계통으로 사용하는 경우 설계자는 매 주기마다 COLSS 의 불확실도 평가를 위해 ROCS 전산코드[6]로 약 3600 개의 축방향 출력분포를 계산하는데, 출력준위 및 제어봉 삽입 정도에 따라 BOC(Beginning Of Cycle), MOC(Middle Of Cycle), EOC(End Of Cycle)에서 각기 1200 개 가량의 축방향 출력분포를 계산한다. 이 자료를 평가해 보기로 한 이유는 1)현재 COLSS 불확실도 계산에 사용되는 출력분포 자료를 이용함으로써 제안된 방법이 향후 COLSS 불확실도 계산에 응용될 경우 추가 분석 없이 사용 가능하며, 2)실 설계에 적용되는 자료를 통해 출력분포 계산 방법별 오차를 비교함으로써 열적여유도 향상 가능성을 가름해 볼 수 있기 때문이다.

분석에는 20 개 축방향 출력 및 5 개 계측기 정보를 하나의 자료 세트로 취급하여 영광 3 호기 3 주기 3489 개 세트, 영광 4 호기 4 주기 3489 개 세트를 사용하였다. 각 주기별로 ACE 방법에 의한 최적상관관계 상수들이 결정되면, 5 개 계측기 정보를 입력으로 주기별로 3489 개의 축방향 출력분포를 재 생산하여 ROCS 축방향 출력분포와 비교, 평가하였다.

가상 핵계측기를 고려하는 경우는 사실상 9 개의 새로운 핵계측기가 존재한다고 보아야 한다. 축방향으로 균등 배분된 5 개 축방향 계측기 정보는 45 개 반경방향에 분포한 각 핵 계측기 정보를 모두 합산하여 축방향으로 규격화한 값이기 때문에 4 개의 가상 핵 계측기가 어떤 값을 가져야 할지, 이들을 어떻게 재 규격화해야 할지 현재로선 알 수 없다. 이 문제를 해결하려면 출력분포 자료 세트에서 실제의 핵 계측기 위치를 포함하여 축방향으로 9 개의 핵 계측기가 있다고 보고 실제 계측기 정보와 이들 9 개 계측기와의 상관관계를 구하면 된다. 이 경우 계측기 위치의 출력은 계측기 위치에 해당하는 노드 출력을 합산하여 구한다. 실제 핵계측기 노드와 가상의 핵계측기 위치가 같다면 두 계측기 간의 상관관계는 선형적이겠지만 실제 핵 계측기 정보가 반경방향으로 45 개 정보만을 표현하는 것에 비해 ROCS 결과는(혹은 가상 핵 계측기는) 177 개의 정보를 모두 대변한다는 점에서 약간의 오차가 있을 수 있다. 이 때문에 기타 다른 실제 핵 계측기와도 미미 하지만 상관관계를 갖는다. 이런 이유로 우선 ROCS 출력분포 세트를 수정하여 5 개 실제 핵 계측기 정보와 9 개 가상 핵계측기 정보 간의 최적상관관계를 구하였다. 축방향 출력분포를 재 생산할 때는 5 개 계측기 정보를 이용해 먼저 가상의 9 개 핵 계측기 정보를 생산하고 이들을 규격화 한 뒤 Fourier fitting method 로 구하였다.

다. 실제 핵계측기와 가상 핵 계측기와의 관계성

그림 1 은 핵 계측기 4 번과 5 번 사이에 존재하는 가상 핵 계측기(8 번째)가 실제 5 개 핵 계측기와 어떤 관계가 있는 지를 보여 주고 있다. 예상대로 이 가상 핵계측기는 4 번, 5번 핵 계측기 신호와는 비례하고, 노심 하부의 1 번, 2 번 핵 계측기 신호와는 반비례하고 있다. 그러나 (반)비례

관계에 있다고 해도 최적상관관계 도출이 쉽지 않음은 계측기 신호가 커질수록 자료 분포가 산만해지고 연소도에 따라서 그 기울기에 차이가 있음을 보면 짐작할 수 있다. 더욱이 3번 계측기는 특별한 관계성을 예상하기 힘들 정도로 산만한 분포를 보이고 있다. 1번부터 9번까지 가상 핵 계측기 각각에 대한 그림을 살펴보면 위치에 따라 다르기는 하지만 한결같이 직접적인 상관관계 도출이 힘듦을 알 수 있다. 그런데 여기에 ACE 방법을 적용하면, 여러 단계의 통계분석 단계를 거치지 않더라도 손 쉽게 최적 상관 관계를 찾아낼 수 있다. 8번 가상 핵계측기에 대해 ACE 방법을 적용하여 찾아낸 최적 변환 자료가 그림 2에 나타나 있다. 여기서는 ACE 방법이 갖고 있는 장점 중의 하나인 fitting의 용이성도 확연히 알 수 있다. PRACE 코드는 9개 핵계측기 각각에 대해 같은 작업을 거쳐 최적 변환 자료를 계산하였다.

라. Fourier Fitting Method (FFM)

COLSS는 축방향 출력분포를 삼각함수의 조합으로 표현한다. 즉, 임의의 축방향 위치에서 출력은 식 (4)와 같이 표현되는데

$$P(z) = \sum_{n=1}^{ND} \left(a_n \cos n\pi B_C (z - 0.5) + b_n \sin n\pi B_C (z - 0.5) \right), \tag{4}$$

여기서

n =모드(mode) 갯수(n=1,...,ND), $a_n, b_n = n$ 모드에 대응하는 Fourier 계수,
z =노심높이로 정규화한 축방향 길이, B_C = fitting 인자
ND =계측기 정보의 총 수

이다. 당연한 사실이지만 ND가 충분히 크면, 어떤 형태의 출력분포일지라도 적절히 모사할 수 있는 것이 FFM이다. 문제는 현재 주어진 ND가 출력분포 모사에는 조금 부족하다는데 있다. 출력분포 계산에 있어 제안된 방법은 ND 값이 5에서 9로 증가하는 것 외에는 기존과 다를 것이 없다. 그러나 이로 말미암아 계산정확성은 매우 향상될 것으로 기대된다.

한편, fitting 인자 B_C 는 연소도 별로 약 1200개에 달하는 여러 형태의 출력분포를 적절히 모사하기 위해 도입된 상수이다. 통상은 임의의 값에서 시작하여 1200개에 대한 평균 오차, 평균 첨두 출력 오차가 가장 낮게 나올 때까지 반복계산을 통해 결정한다. 기존에는 출력분포가 연소도에 따라 달라지는 것을 고려하기 위해 BOC, MOC, EOC 각각에 맞는 fitting 인자를 구하였지만, 제안된 방법은 3600개의 출력분포 자료를 대상하므로 연소도에 무관하게 단 하나의 fitting 인자만 사용한다. Fitting 인자가 중요한 것은 식 (4)에서 보듯이 이 인자가 출력분포에 직접 영향을 주기 때문인데, 제안된 방법은 이 인자가 연소도와는 상관없이 0.91 ~ 0.93 사이에서 결정됨을 보여 주었다. 이는 제안된 방법에 있어 fitting 인자에 대한 민감도가 상당히 감소하였음을 말해 주는 것이다.

Fourier 계수들은 식 (4)를 적분하여 각 핵 계측기 위치에서 출력값이 일치되도록 함으로써 결정한다. 즉,

$$PD_m = \int_{z_l^m}^{z_h^m} P(z)dz, \quad (m=1,..., ND), \tag{5}$$

을 만족하며, 여기서 Z_l, Z_h는 m번째 핵 계측기의 하단 및 상단위치를 나타낸다. 식 (5)에 의하면 fitting 인자가 고정된 경우 우변은 $ND \times ND$ 행렬과 Fourier 계수 벡터, 좌변은 핵계측기 정보 벡터가 주어지므로 쉽게 Fourier 계수들을 계산할 수 있다. 9개 핵계측기가 있는 경우 a_n, b_n을 계산하기 위해 9×9 행렬이 구성되지만 LU 분해법 등을 이용하면 간단히 계산된다. 각 노드별 출력은 식 (5)에 따라 노드 하단부터 상단까지 적분하면 된다. 이미 FC가 계산되었으므로 적분 수행만으로 출력은 구해진다.

마. 평가 결과

표 1은 영광 3호기 3주기, 영광 4호기 4주기에 대한 계산 결과를 축방향 계산 방법별로 중요 인자를 비교하여 정리한 것이다. 제안된 방법이 통계적 방법에 비교할 만한 계산 정확도를 보여 주고 있다. 표 1에는 기술되어 있지 않지만 첨두 출력 오차 면에서 기존 방법은 참고값보다 높게, 통계적 방법은 낮게 계산하는 경향을 보였는데 제안된 방법은 대체적으로 참고값보다 높게 계산함으로써 ‘보수적 평가’라는 측면도 만족시켰다.

표 1. 축방향 출력분포 계산 방법별 결과 비교.(주기별, 주요 특성 인자별 비교)

	YGN 3 Cycle 3			YGN 4 Cycle 4		
	5-detector1)	9-detector2)	Stochastic3)	5-detector	9-detector	Stochastic
Avg. RMS (%)	2.48	1.01	0.76	2.50	1.11	0.69
Max.RMS(%)	24.8	7.14	8.84	31.17	20.76	20.0
Avg.ΔF_Z (%)	2.65	0.79	0.57	2.53	0.87	0.44
Max.ΔF_Z (%)	5.84	3.38	2.72	6.54	3.54	3.30
Avg. ΔASI	0.00246	0.00211	0.00226	0.00261	0.00218	0.00184
Max. ΔASI	0.01057	0.01024	0.01103	0.01122	0.00911	0.01061

1) 평가 자료가 연소도에 의존하기 때문에 대표적인 B_C를 사용하면 오차가 너무 크게 계산됨. 따라서 출력분포오차가 최소가 되도록 각 연소도별 B_C을 구하였음. 여기 기록된 수치는 이들 3 개 연소도 별로 구한 수치의 평균값이거나 최대값임. 연소도별 B_C 는 0.89 ~ 0.91 사이임.
2) B_C는 주기 전체에 대해 한 개 값만 적용함. 기록된 자료는 B_C이 0.93 일 때의 것임. 0.93 보다 큰 B_C값이라도 결과에는 별다른 영향이 없음. 영광 3 호기, 영광 4 호기 모두 같은 값이 사용됨.
3) 보다 자세한 정보는 참고문헌 3,4 를 참조.

그림 3, 4는 제안된 방법이 최대 RMS 오차를 보인 경우에 기존 방법과 통계적 방법이 어떤 출력분포를 보였는지 ROCS 코드 결과를 기초로 보인 것이다. 제안된 방법과 통계적 방법은 영광 3 호기 3 주기, 영광 4 호기 4 주기 모두 ROCS 결과와 매우 유사한 형태를 보여 주고 있다. 기존 방법의 문제점 중 하나가 출력분포가 비현실적이라는 것이었는데(그림 3, 4에서도 이를 확인할 수 있다) 제안된 방법은 그러한 현상을 거의 보이지 않는다. 제안 방법의 정확성은 그림 5와 6을 통해서도 볼 수 있다. 그림 5는 영광 3호기 3주기 3489 개 출력분포에 대해 ROCS 결과와 절대오차가 얼마나 나는지를 나타낸 것으로 제안방법이나 통계적 방법에선 대부분 평균 절대오차가 0.01 정도였으나 기존 방법은 0.03 에 가까움을 확인할 수 있다. 이것은 임의의 위치에서 계산한 출력이 기존 방법의 경우 참고값보다 평균 0.03 만큼 과대/과소 평가한다는 의미이고, 그 만큼 열적여유도 계산에 불확실성이 많이 포함됨을 뜻한다. 영광 4 호기 4 주기도 비슷한 결과를 보였다. 계산 정확성을 보여 주는 또 다른 그림은 주기별로 총 69780 개(=3489 세트 * 20 노드) 포인트(혹은 노드) 각각의 상대 오차 분포를 살펴본 그림 6 이다. 기존 방법이 2%이내의 오차를 보이는 포인트가 약 4 만개에 근접하는 반면 통계적 방법이나 제안방법은 1%이내의 포인트가 6 만개, 2%까지 합치면 6 만 5 천 개를 상회한다. 즉, 전체의 93% 이상이 2% 이내의 오차를 보일 정도로 제안된 가상 핵계측기 이용 방법이 각 노드별 출력을 매우 정확하게 계산하고 있다는 것이다.

3. 결론

가상 핵계측기를 도입한 새로운 축방향 출력분포 계산 방법은 방법론상 가상 핵계측기 정보가 적절히 얻어졌느냐에 그 성패가 좌우된다. 만약 이 정보를 정확히 알아낼 수 있다면 계측기 수가 많아진 만큼 기존 방법보다 훨씬 더 정확히 ROCS 출력분포를 모사할 것이라 예상할 수 있다. 문제는 가상 핵계측기와 실제 핵계측기 간에 어떤 관계가 있느냐를 알아내는 것이다. 이것은 통계적 문제에 속하는 것으로 이를 해결하기 위해 독립 변수와 종속 변수사이의 최적 상관 관계를 계산할 수 있는 ACE 방법을 이용하였다. 영광 3 호기 3 주기, 영광 4 호기 4 주기 COLSS 불확실도 평가에 사용되었던 3489 개 축방향 출력분포 자료를 대상으로 3 가지 축방향 출력분포 계산 방법론별로 이들 축방향 출력분포를 재구성하여 ROCS 출력분포와 비교한 결과, 제안된 방법은 평균 RMS 오차 1.2%이하, 평균 축방향 첨두 출력 오차 0.9%이하로 축방향 출력을 계산하였다. 이 결과는 기존 방법이 각기 2.5%와 2.7%를 보인 것에 비한다면 그 오차가 상당히 줄어든 것으로 가상 핵계측기 정보 계산이 정확하였다는 것을 뒷받침함과 동시에 만약 제안된 방법이 COLSS 에 적용된다면 열적여유도 향상에 크게 기여할 것임을 암시하고 있다. 더욱이 제안된 방법은 20 ~ 50 개 노드에 대해 아무런 제한 없이 축방향 출력분포를 계산할 수 있어 20 개 노드에 국한되었던 통계적 방법의 단점을 극복하였으며, 기존 Fourier fitting 방법을 그대로 사용하므로 손쉽게 COLSS 에

적용할 수 있다는 점에서 매우 유용한 COLSS 출력분포 계산용 도구가 될 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] J. P. Pasquenza, et. al., “COLSS: Assessment of the Accuracy of PWR Operating Limit Supervisory System,” CENPD-169-P, Combustion Engineering, Inc. (1975).

[2] 인왕기, “Cubic Spline Synthesis in CPC and COLSS,” Presented in Korea Nuclear Fuel Corp., July 7 1997

[3] E. K. Lee, Y. H. Kim, K. H. Cha, and M. G. Park, “Calculation of Core Axial Power Shapes using the Alternating Conditional Expectation Algorithm,” *Proc. KNS Autumn Meeting*, 제 1분과 노심핵설계(B)-해석방법론, Vol 1. p53, Seoul, Korea, October (1998)

[4] E. K. Lee, Y. H. Kim, K. H. Cha, and M. G. Park, “Reconstruction of Core Axial Power Shapes using the Alternating Conditional Expectation Algorithm,” *Annals of Nuclear Energy*, 26, 983 – 1002 (1999)

[5] L. Breiman and J. H. Friedman, “Estimating Optimal Transformations for Multiple Regression and Correlation,” *Journal of the American Statistical Association*, *Theory and Method*, 80:391, 580-619 (1985).

[6] R. Loretz et. al., “ROCS User’s Manual – Coarse Mesh Diffusion Theory Neutronics Code,” CE-CES-4 Rev. 4-P, December (1989)

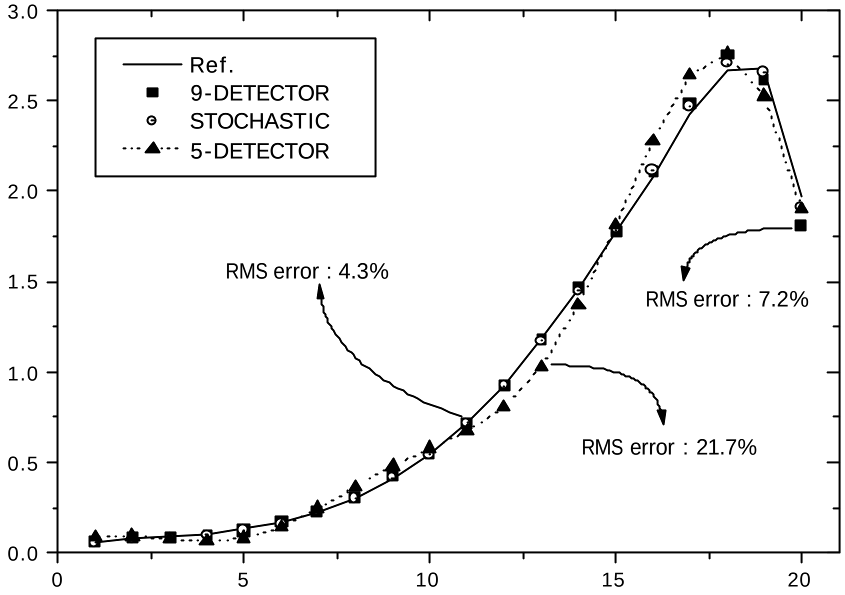

그림 3. 제안 방법에 의한 결과 중 최대 RMS 오차가 발생한 자료에 대해 계산방법론에 따른 출력분포 비교 (영광 3호기 3주기, 2319 번째 자료 세트)

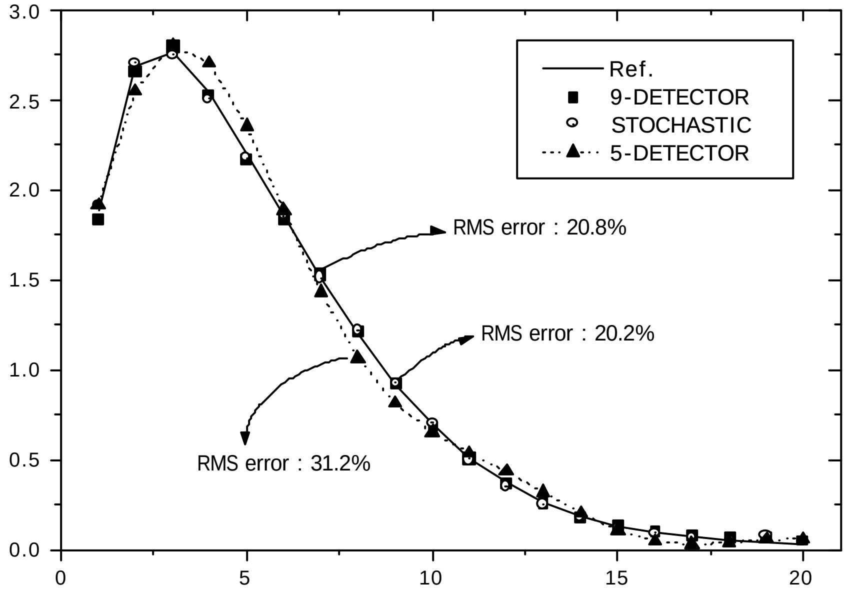

그림 4. 제안 방법에 의한 결과 중 최대 RMS 오차가 발생한 자료에 대해 계산방법론에 따른 출력분포 비교 (영광 4호기 4주기, 2286 번째 자료 세트)

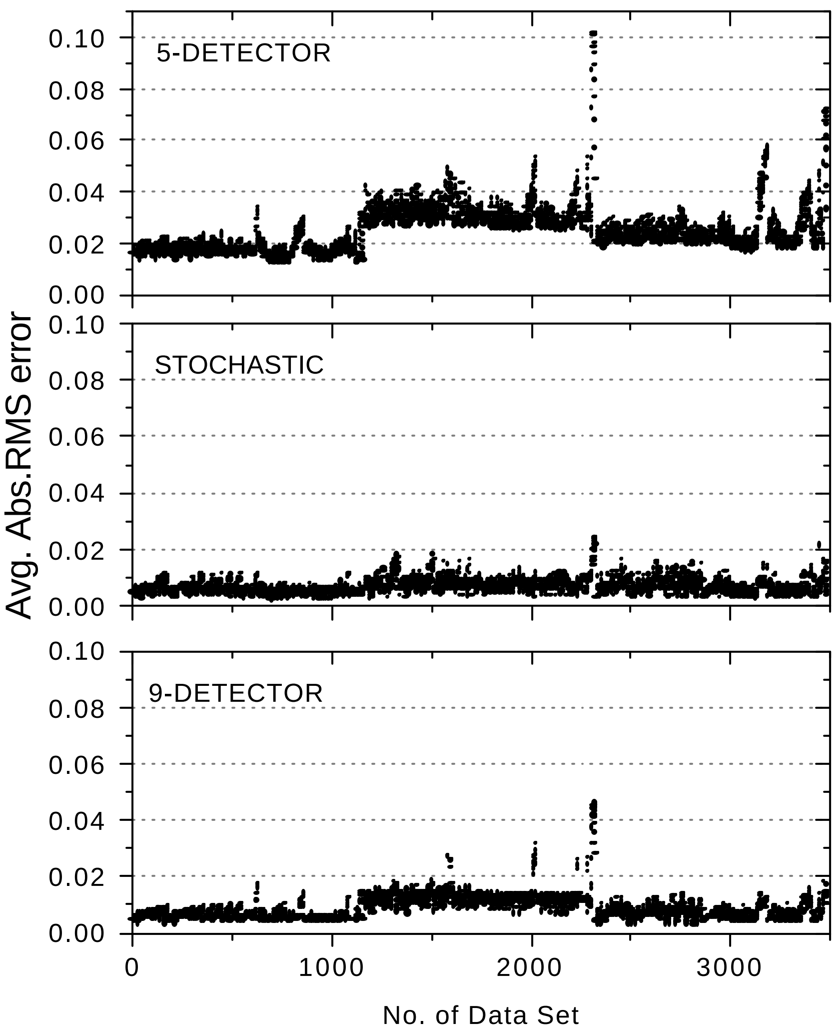

그림 5. 영광 3 호기 3 주기 축방향 출력분포.
(계산 방법론별 Avg. Absolute RMS error 분포 비교)

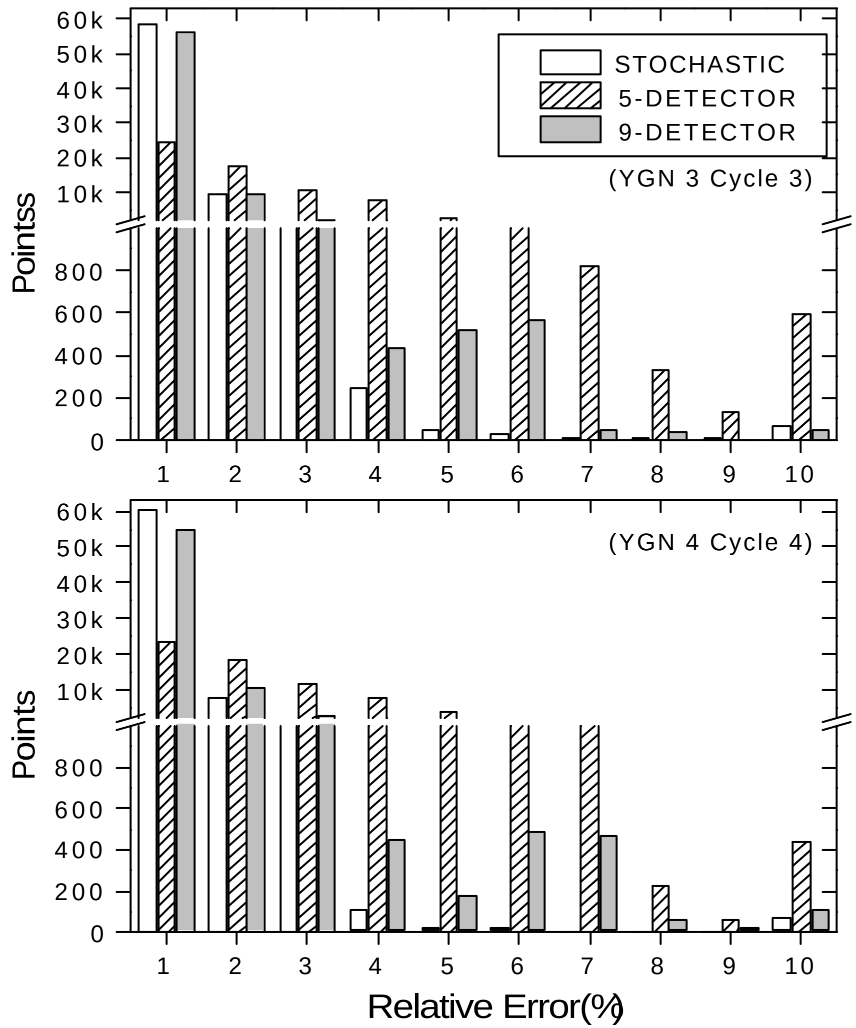

그림 6. 총 67890 개 포인트(20 개 노드*3489 개 출력분포)의 오차 분포도

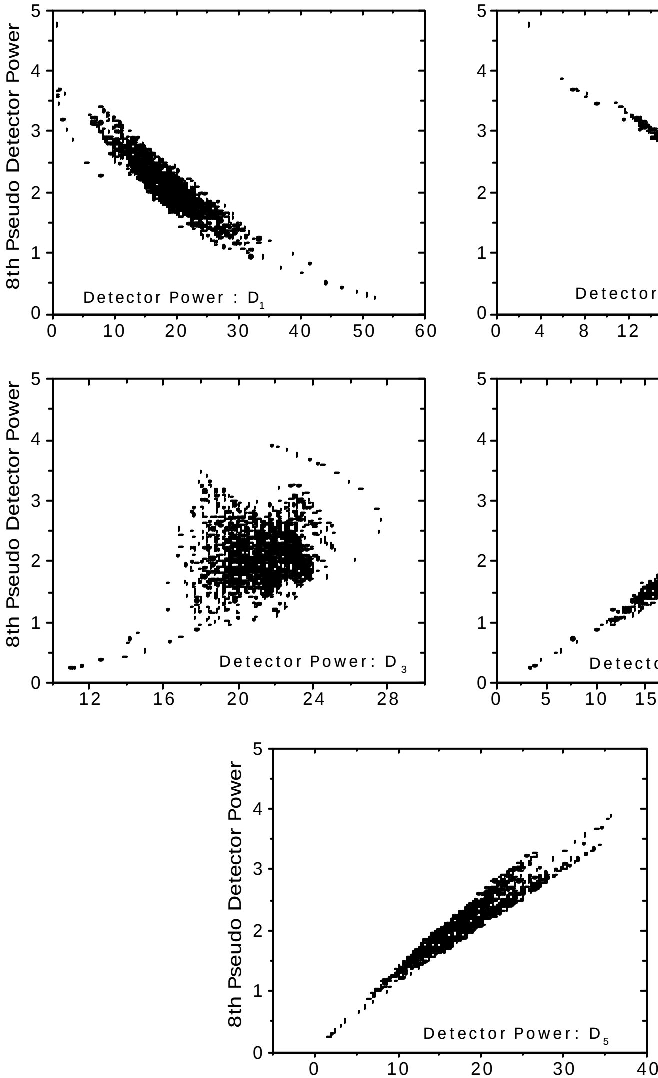

그림 1. 8 번째 가상 핵 계측기와
실제 핵 계측기간 상관 관계(영광 3 호기 3 주기)

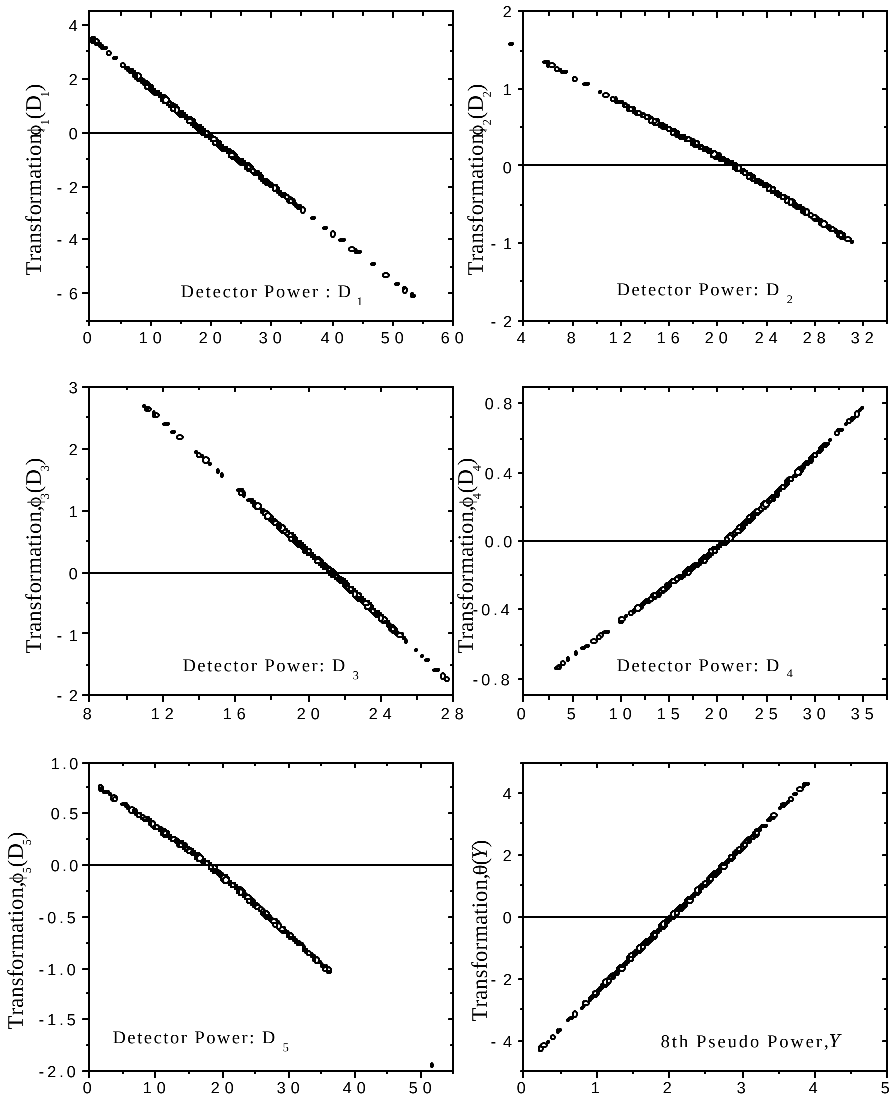

그림 2. 8 번째 가상 핵 계측기 대한 ACE 방법 적용 결과
(영광 3 호기 3 주기 자료)