

한국표준형원전의 임계전 노외계측기 선형부채널 교정법 개발

Development of Pre-critical Excore Detector Linear Subchannel Calibration Method

최유선, 구본승, 차균호, 박문규, 이창섭, 김용희¹⁾, 안철수*, 김만수**

한전 전력연구원

대전시 유성구 문지동 103-16

* 한전 울진원자력본부, 경북 울진군 북면 부구리 84-4

* 한전 영광원자력본부, 전남 영광군 홍농읍 계마리 514

요 약

ABB-CE형 원전의 임계전 노외계측기 교정법의 단점을 해결할 수 있는 새로운 임계전 교정법을 개발하였다. 기존의 임계전 교정법은 이전 주기 교정결과를 고려하지 않기 때문에 임계전 교정의 정확도가 보장되지 않는 단점을 가지고 있다. 본 논문에 기술된 임계전 교정법은 이러한 문제를 해결하기 위해 이전 주기에 결정된 교정자료를 이용하므로 임계전 교정을 계속해서 수행하더라도 교정의 부정확성에 따른 오차가 후속 주기에 전파되는 것을 차단하는 특성을 가진다. 새로운 임계전 교정법의 특성을 파악하고 정확도를 평가하기 위해 동 방법론을 영광 3호기 및 울진 3호기의 측정자료를 이용하여 평가하였다.

Abstract

The improved pre-critical excore detector linear subchannel calibration method has been developed to improve the applicability of pre-critical calibration method. The existing calibration method does not always guarantee the accuracy of pre-critical calibration because the calibration results of the previous cycle are not reflected into the current cycle calibration. The developed method has a desirable feature that calibration error would not be propagated in the following cycles since the calibration data determined in previous cycle is incorporated in the current cycle calibration. The pre-critical excore detector linear calibration is tested for YGN unit 3 and UCN unit 3 to evaluate its characteristics and accuracy.

1) 현재주소 : 한국원자력연구소, 대전시 유성구 덕진동 150

1. 서론

한국표준형원전(KSNP)에는 안전채널(Safety Channel), 제어채널(Control Channel), 기동채널(Startup Channel) 등 세 종류의 노외계측기가 원자로 용기 외부에 설치되어 있다. 이들 중 안전채널 노외계측기(Safety Channel Excore Detector) 시스템은 4개의 독자적인 채널로 구성되며, 각 채널은 상, 중, 하 3개의 부채널(Subchannel)로 이루어져 있다. 안전채널 노외계측기 신호는 노심보호계통인 노심보호연산기(Core Protection Calculator, CPC)의 입력으로 사용되어 노심의 출력 및 출력분포를 결정하기 위한 것이기 때문에 관련 절차에 따라서 주기적으로 교정하도록 되어 있다. 안전채널 노외계측기의 교정은 각 부채널의 이득상수를 개별적으로 조절하는 Linear Subchannel Calibration (LSC)과 관련 계기의 Drift 효과를 제거하기 위한 Subchannel Electronic Calibration (SEC)으로 구분된다. LSC는 매 주기초에 수행되며, SEC는 노외계측기가 주기초에 교정된 특성을 전주기에 걸쳐서 유지되도록 하기 위해서 약 한 달에 한 번씩 수행된다. LSC는 해당주기 Shape Annealing Matrix (SAM) 결정용 자료취득 이전에 수행되어야 하므로 초기노심인 경우에는 20% 출력과 50% 출력에서, 재장전 노심은 주기초 20% 출력에서만 수행된다.

LSC 수행을 위해서는 출력이 일정하게 안정된 상태로 유지되어야 하며 각 부채널을 정해진 절차에 따라 독립적으로 교정해야 하기 때문에 상당한 시간이 소요된다. KSNP의 경우 주기초 LSC 과정에 10시간 이상이 필요하며, 이러한 LSC 과정은 발전소 기동과정에서 Critical Path에 해당한다. 또한 20% 정도의 저출력 운전을 장시간 수행하는 것은 기기 건전성 확보 관점에서도 바람직하지 않다. 이에 따라 LSC를 원자로 임계전에 수행하는 방법이 과거 ABB-CE에 의해서 개발되었으며, 현 KSNP 노외계측기 교정 관련 절차서에 반영되어 있다. 그러나 이 방법은 기존 SAM 결정방법과의 일관성 문제와 충분하지 못한 교정 정확도로 인하여 실제 이용되지 못하고 있는 실정이다.

2. 임계후 노외계측기 선형부채널교정법

노외계측기 LSC는 두 가지 목적으로 수행된다. 먼저 교정이 이루어지는 시점에서 각 노외계측기가 측정하는 노심출력이 발전소 기준출력(발전소 2차측 출력, BSCAL)과 일치하도록 하는 것이다. 또 다른 목적은 상, 중, 하 노외계측기의 출력분포가 노심의 상, 중, 하 출력분포와 같도록 하는 것이다. 이 경우 노심의 기준출력분포는 CECOR로 계산된 3차원 출력분포를 축약하여 구한다. 노외계측기의 상, 중, 하 출력분포를 CECOR의 결과와 일치하도록 교정하는 것은 노심보호연산기의 SAM과 관련된다. 노심보호연산기는 노외계측기 신호를 이용하여 노심의 축방향 출력분포를 합성하고 DNBR, LHR 등과 같은 안전변수를 계산한다. 이 때 노외계측기 신호는 주기초 FPA 시험기간에 결정된 3×3 행렬인 SAM을 통하여 노심의 상, 중, 하 출력으로 변환되어 출력분포 계산에 이용된다. 즉, SAM은 노외계측기 출력과 노심출력과의 선형관계를 나타내며, SAM 결정을 위해서 사용되는 측정자료 취득 전에 노외계측기의 상, 중, 하 출력분포와 CECOR 상, 중, 하 출력분포를 같도록 해야 한다는 제한조건이 설정되어 있다. 노외계측기 출력분포 교정의 필요성은 SAM을 결정하는 방법론에 따라서 달라질 수 있으며, 기본적으로 반드시 필요한 조건은 아니다. 이는 노외계측기 출력분포가 CECOR의 분포와 크게 다르지 않다면 최적의 SAM을 결정하는데 문제가 없기 때문이다. KSNP 재장전 노심의 경우 SAM은 20%~80% 출력의 FPA 과정에서 취득된 측정자료를 이용하여 결정되므로 노외계측기 LSC는 일반적으로 20% 출력 근처에서 수행되며, 이를 위해 발전소는 상당시간 동안 안정된 상태로 유지되어야 한다. 노심을 포함한 발전소가 안정된 상태에서 각 노외계측기 신호와 발전소 기준출력(BSCAL)을 기록하고 그 순간의 노심출력분포를 CECOR를 이용하여 계산한다. 이와 같은 정보가 주어지면 각 부채널 증폭기의 이득상

수 교정은 다음과 같은 식을 이용하여 결정된다.

$$K_j = (3 S_j \times Power) / D_{jraw}, \quad j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

여기서 K_j 는 j 번째 부채널의 증폭기 이득상수 교정상수 (Amplifier Gain Multiplier)이고, S_j 는 j 번째 부채널에 해당하는 CECOR가 계산한 정규화된 노심출력이며 ($S_1 + S_2 + S_3 = 1.0$), D_{jraw} 는 j 번째 부채널 노외계측기 출력분율(%)이다. 식 (1)에서 $Power$ 는 발전소 기준출력(%)을 의미한다. D_{1raw} , D_{2raw} , D_{3raw} 는 각각 상, 중, 하 노외계측기 출력을 나타내며, 노심보호연산기 각 채널의 출력은 다음과 같이 결정된다.

$$P_{CPC} = (D_{1raw} + D_{2raw} + D_{3raw}) / 3 \quad (2)$$

ABB-CE형 원전의 노심보호연산기 관련 중요 인자 중의 하나는 기준출력과 노심보호연산기 출력간의 차이를 나타내는 KCAL 값이다.

$$KCAL = \frac{\text{기준출력}(BSCAL)}{CPC \text{ 출력}} \quad (3)$$

전술한 바와 같이 노외계측기 교정의 중요한 목적의 하나는 발전소 기준출력과 노심보호연산기 출력을 일치시키는 것이다. 즉 정확한 노외계측기 교정은 KCAL을 1.0이 되도록 하는 것이다. 한편 노외계측기 이득상수 교정은 저출력에서 한번 수행되기 때문에 일반적으로 KCAL 값은 출력 및 연소도와 노심특성이 변함에 따라 교정 당시의 값과 약간씩 달라지는 경향이 있다.

3. ABB-CE형 원전의 임계전(Pre-Critical) 교정법

노외계측기 LSC는 계측기의 연소효과, 교체, 원자로 구조변경, 노심설계의 변화 등을 고려하기 위한 것이다. 노외계측기가 교체되거나 노심의 내부구조물 설계, 계측기 위치가 변경되는 경우에 노외계측기의 LSC를 반드시 재수행해야 한다. 원자로심의 구조 변경과 계측기 위치 변화는 노심에서 생성된 중성자 누설율에 직접적으로 영향을 주고 계측기의 위치변경 또한 노외계측기 신호에 직접적으로 연관되기 때문이다. 그러나 재장전 노심의 경우 이전 주기에 비해 핵연료관리의 변화와 노외계측기 연소효과 만이 노외계측기 신호에 영향을 준다고 할 수 있다. 이 중에서 계측기 연소효과는 매우 느리게 나타나기 때문에 주된 영향은 핵연료 농축도의 변화와 핵연료 장전모형의 차이에서 유발된다. 또한 가압경수로 재장전 노심은 핵연료 관리방법의 큰 변화가 없는 한 저출력에서의 출력분포 또한 매우 유사하며, 특히 평형노심에 가까운 경우에는 재장전 노심과 거의 동일한 특성을 가진다고 할 수 있다. 과거 ABB-CE가 개발한 임계전 LSC 방법은 노외계측기의 신호를 핵연료집합체 가중인자 (Assembly Weighting Factor, AWF) 개념으로 비교적 정확하게 예측할 수 있다는 사실을 이용한다. AWF는 노심내 각 핵연료집합체가 노외계측기 신호에 기여하는 정도를 나타내는 것으로서 중성자 수송방정식의 수반해 (Adjoint Solution)를 이용하여 쉽게 구할 수 있으며, 노심내 반경방향 출력분포가 주어질 때 노외계측기의 신호는 아래의 식을 이용하여 계산된다.

$$D^E = \sum_i^N P_i AWF_i \quad (4)$$

여기서 P_i 와 AWF_i 는 각각 i 번째 핵연료집합체의 상대출력과 가중인자를 나타내고 D^E 는 예상되는 계측기 신호이며, N 은 노심내 핵연료집합체 개수이다. 노외계측기는 주로 노심을 이탈한 속중성자와 반응하므로 노외계측기 관련 핵연료집합체의 가중상수 AWF는 핵연료의 농축도/연소도에 거의 영향을 받지 않는다. 따라서 AWF는 노심내 축방향 위치에 상관없이 거의 일정하다고 할 수 있다. 핵연료집합체 가중인자의 특성은 노심의 핵연료관리에 있어서 매우 큰 변화가 없는 한 초기노심에 대하여 결정된 값이 모든 재장전 노심에 사용될 수 있음을 의미한다. <그림 1>은 KSNP의 안전채널 B 노외계측기에 대한 핵연료집합체 가중인자 분포를 보여준다. 그림과 같이 노외계측기에 가까이 위치한 핵연료집합체 일수록 계측기 신호에 대한 기여도가 큼을 확인할 수 있다. 일반적으로 노외계측기는 원자로압력용기를 투과한 중성자만을 계측할 수 있기 때문에 노심 내부의 중성자는 노외계측기에 도달할 확률이 거의 없다고 할 수 있다. 즉 노심 내부 핵연료집합체의 AWF 값은 거의 영이다. 다른 채널 A, C, D에 대한 AWF는 각 채널간의 대칭성에 의해서 결정될 수 있다.

FA No. AWF				1	2	3				
				0.0945	0.0168	0.0036				
				6	7	8	9	10		
				0.3486	0.1052	0.0289	0.0050	0.0009		
				15	16	17	18	19	20	
				0.1879	0.0627	0.0159	0.0052	0.0015		
				26	27	28	29	30	31	32
				0.0663	0.0248	0.0110	0.0028	0.0009		
				39	40	41	42	43	44	45
				0.0072	0.0041	0.0016				
52	53	54	55	56	57	58	59			
0.0029	0.0009	0.0007								
67	68	69	70	71	72	73	74			
82	83	84	85	86	87	88	89			

<그림 1> KSNP 핵연료집합체 가중상수 (AWF, 노외계측기 채널 B)

노외계측기의 연소효과를 무시할 수 있다면 재장전 주기의 주기초 노외계측기 교정상수는 이전 주기의 핵연료 장전모형과 현 재장전 노심의 장전모형 만을 고려하여 결정할 수 있다. ABB-CE 는 이러한 노심 특성을 이용하여 노외계측기 교정상수를 아래와 같이 결정하는 것을 제안하였다.

$$K_{1,2,3} = \frac{\text{전주기 주기초 계측기 신호(전출력)}}{\text{현주기 주기초 계측기 신호(전출력)}} \quad (5)$$

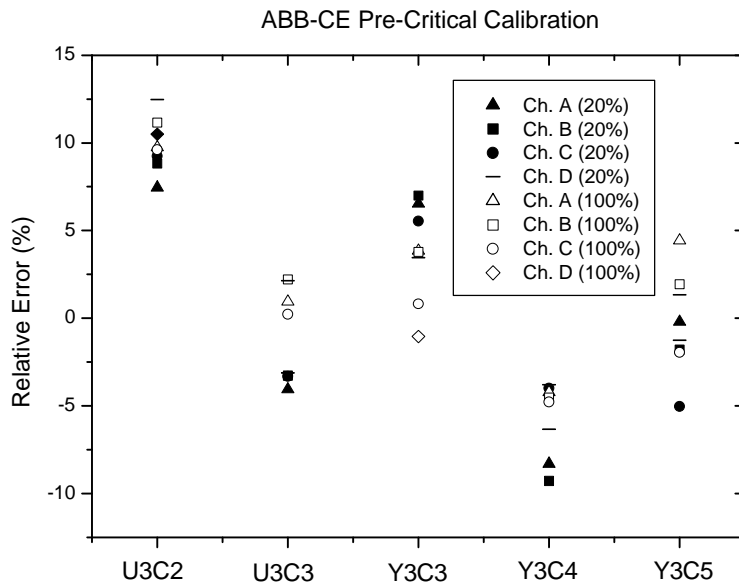
ABB-CE의 임계전 노외계측기 교정법을 사용할 경우 식 (5)의 교정상수는 상, 중, 하 부채널 모두에 균일하게 적용된다. 이는 핵연료집합체 가중인자의 특성상 장전모형 변화에 따른 계측기 신호의 변화는 노외계측기의 축방향 위치에 영향을 받지 않기 때문이다. 식 (5)를 이용하여 각 채널의 교정상수를 결정할 경우 노심의 출력분포가 대칭적이라면 모든 채널에 동일한 교정상수를 사용함을 의미한다. 따라서 위의 임계전 노외계측기 교정법을 사용할 경우 현 주기의 노외계측기 출력분포는 실제 CECOR 출력분포와 다를 수밖에 없다. 전술한 바와 같이 재장전 노심의 경우 축방향 출력분포는 주기에 상관없이 상당히 유사하기 때문에 핵연료나 장전모형에 있어서 큰 변

화가 없다면 식 (5)를 이용하여 구한 교정상수를 모든 부채널에 적용하더라도 노외계측기 출력분포는 CECOR의 출력분포와 크게 다르지 않을 것으로 판단된다. ABB-CE의 임계전 교정법을 영광3호기 및 울진3호기의 측정자료에 적용하여 그 타당성을 평가하였다.

<그림 1>의 핵연료집합체 가중상수와 식 (4)를 이용하여 영광 3호기 2, 3, 4, 5주기에 대한 임계전 교정법에 의한 교정상수는 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{2주기: } K_{1,2,3} &= \frac{D^E(\text{Cycle 1})}{D^E(\text{Cycle 2})} = \frac{0.7570}{0.6022} = 1.2571 \\
 \text{3주기: } K_{1,2,3} &= \frac{D^E(\text{Cycle 2})}{D^E(\text{Cycle 3})} = \frac{0.6022}{0.7223} = 0.8337 \\
 \text{4주기: } K_{1,2,3} &= \frac{D^E(\text{Cycle 3})}{D^E(\text{Cycle 4})} = \frac{0.7223}{0.7074} = 1.0211 \\
 \text{5주기: } K_{1,2,3} &= \frac{D^E(\text{Cycle 4})}{D^E(\text{Cycle 5})} = \frac{0.7074}{0.7374} = 0.9593
 \end{aligned}$$

위의 결과는 영광 3호기 2주기의 경우, 만약 노외계측기 이득상수 교정을 하지 않으면, 주기초 노외계측기 반응율은 1주기의 약 79.5%에 해당함을 나타내며, 3주기 주기초 노외계측기 신호는 2주기 주기초 신호의 약 120% 정도로 증가됨을 의미한다. 또한 4주기의 중성자 누설량이 3주기의 누설량보다 약간 적어서 실제 출력의 약 98% 정도를 나타내며, 5주기에서는 중성자 누설에 따른 계측기 신호는 4주기의 값에 비하여 약간 증가하여 노심보호연산기 출력이 기준출력보다 약 4.2% 정도 크게 예측함을 예상할 수 있다.



<그림 2> ABB-CE 방법을 이용한 임계전 교정결과

<그림 2>는 위와 같은 방법으로 구한 교정상수를 적용한 임계전 교정 결과이다. 재장전 노심의 특성이 크게 바뀌지 않는 3주기 이후부터는 임계전 교정이 비교적 양호한 결과를 제공한다. 그러나 오차 발생형태가 일관되지 않고 임계전 교정법만을 사용할 경우 이전 주기의 교정이 완전하다고 가정할 수 없기 때문에 실제 노심보호연산기 출력오차는 더 커질 것이다. 따라서 임계

전 교정법을 성공적으로 적용하기 위해서는 이전주기 교정의 정확도를 반영할 수 있는 방안이 필요하다.

4. 개선된 임계전 교정법

앞절에 기술된 ABB-CE의 임계전 노외계측기 교정법은 다음과 같은 특성 및 문제점을 지닌 것으로 판단된다.

1) 임계전 교정법은 모든 부채널에 동일한 교정상수를 적용한다. 따라서 노외계측기 출력분포의 교정은 불가능하다. 특히 2주기에 대한 임계전 교정 결과에 부정확한 영향을 미친다. 그러나 연속된 두 주기의 축방향 출력분포가 큰 차이가 나지 않는 경우에는 (3주기 이후) 임계전 교정법을 사용하더라도 계측기 출력분포는 실제 노심의 출력분포와 비교적 유사하다.

2) 임계전 교정법으로 계산된 교정상수의 정확도는 주기에 따라 달라질 수 있다. 따라서 임계전 교정법을 모든 주기에 적용할 수 있기 위해서는 정확도를 향상시킬 필요가 있다. 특히 이전 주기에 수행된 임계전 교정의 부정확도를 반영할 수 있는 방안이 필요하다.

3) 일반적으로 전산코드로 계산된 노심의 반경방향 출력분포는 매우 정확한 1/4 노심 대칭성을 가지므로 기존 ABB-CE의 방법론을 적용할 경우 노외계측기 4 채널에 동일한 교정상수가 적용될 수밖에 없다. 그러나 실제 노외계측기 출력은 노심의 출력이 완전히 대칭적일 지라도 약간씩 다를 수 있다. 이러한 특성을 고려할 수 있는 새로운 교정법이 필요하다.

4) 노외계측기 연소는 비교적 천천히 진행되지만 연소기간이 충분히 길 때에는 노외계측기의 연소효과를 무시할 수 없다. 그러나 기존 임계전 교정법은 계측기의 연소효과를 고려할 수 없다.

5) ABB-CE사의 임계전 교정법은 전출력에서의 오차를 최소화하기 위한 것이다. 그러나 전출력에서의 오차가 저출력에서보다 커질 수 있는 결과를 보이고 있다. 즉, 방법론의 Consistency가 부족하다 할 수 있다. 이와 같은 현상은 주로 이전주기 교정 결과를 반영하지 못하기 때문이다.

6) 임계전 교정법을 적용할 경우 주기에 따라 계측기 출력과 기준출력은 상당한 오차를 가질 수 있다. ABB-CE형 발전소의 노심보호연산기의 출력 오차는 주기적으로 KCAL이라는 상수를 조절함으로써 해소할 수 있다. 그러나 전출력에서의 노심보호연산기 출력이 기준출력에 비해 큰 값을 지시할 경우 다음과 같은 문제를 초래할 수 있다. 일반적으로 KCAL 값은 노심 연소에 따라서 점차 작아지는 특성이 있다. 따라서 임계전 교정법을 사용할 경우 주기초 KCAL 값이 1보다 너무 적으면, 주기말에 문제가 발생할 수 있으나, ABB-CE사의 임계전 교정법은 주기초 전출력에서의 KCAL 값이 1.0 근처인 것을 보장할 수 없다. 이러한 문제점은 ABB-CE사의 임계전 교정법이 이전 주기 교정의 특성을 반영하지 못하기 때문이다. 이러한 기존 임계전 교정법의 문제점은 전주기의 KCAL 값을 현주기 교정상수 계산에 이용함으로써 해결될 수 있다. 본 논문에서는 식 (6)과 같이 전주기 KCAL 값을 이용하여 새로운 교정상수를 계산하는 방식을 제안한다.

(이하 B2B, BOC-To-BOC 교정법)

$$K_{1,2,3} = \frac{\text{전주기 주기초 계측기 신호(전출력)}}{\text{현주기 주기초 계측기 신호(전출력)}} \text{KCAL}_{(\text{전주기, 주기초, 전출력})} \quad (6)$$

식 (6)으로 계산된 교정상수는 전주기 KCAL을 현주기 교정상수 계산에 반영하기 때문에 전주기 교정의 정확도를 현주기에 반영하는 개념이다. 이와 같이 하면 이전 주기에서 임계전 교정이 부정확하더라도 그 영향은 현주기 주기초에 제거되는 특징이 있다. 따라서 매주기 임계전 교정을 하더라도 주기초 KCAL 값이 1.0 근처에 있도록 하는 장점이 있다. 결과적으로 주기말 KCAL 값이 매우 작아질 가능성을 사전에 배제할 수 있다. 또한 이 임계전 교정법은 노외계측기의 연소효과를 어느 정도 반영하는 특성을 가지고 있다. 일반적으로 ABB-CE형 발전소에 사용되는 노외계

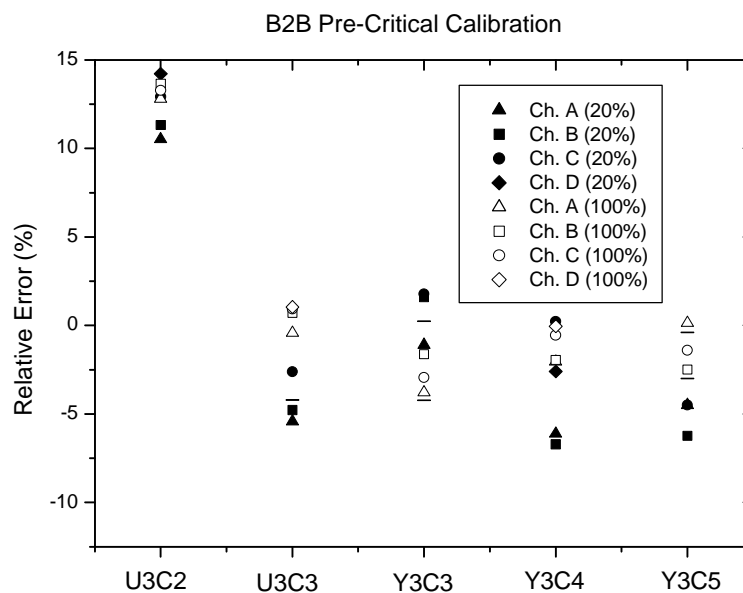
측기의 연소에 따른 특성변화는 매우 천천히 일어나는 것으로 알려져 있으며 1주기 정도의 연소에 따른 효과는 미미하다고 할 수 있다. 그러나 4-5년에 걸친 장기간 연소에 따른 영향은 무시할 수 없다. 한편 노심보호연산기 출력과 기준출력을 정확히 일치시켜주는 KCAL에는 노외계측기의 연소에 따른 영향도 포함되어 있다. 따라서 만약 식 (6)과 같이 교정상수를 구한다면 1주기 동안의 계측기 연소에 따른 특성 변화가 새로운 교정상수 결정에 반영되어 연소효과가 축적되는 것을 제거하는 특징이 있다.

ABB-CE사의 기존 임계전 교정법과 비교하여 B2B 임계전 교정법은 다음과 같은 특성 및 제한점을 가진다.

1) 전출력 KCAL이 1.0이 되도록 교정 : 이는 ABB-CE사의 교정법과 같다. 만약 주기초 전출력 KCAL 값이 1.0 근처라면 주기말 KCAL 값의 저하에 따른 문제는 (18개월 장주기 노심에서도) 발생할 확률이 거의 없다고 할 수 있다.

2) 노심보호연산기 부채널 출력분포 교정 : 개선된 임계전 교정법에서도 노심보호연산기 부채널의 출력분포를 CECOR의 출력분포에 일치시키는 과정이 없으나 이러한 부채널 출력분포 교정은 SAM 결정과정과 관련되어 있다. SAM 행렬은 노심의 출력분포와 노외계측기 출력간의 선형적인 관계를 나타낸다. 본질적으로 SAM 행렬의 정확도는 노외계측기 출력분포의 CECOR 출력분포와의 일치정도에는 크게 의존하지 않는다. 그러나, 임계전 교정법을 사용할 경우 다음과 같이 CECOR의 예측치와 측정치간의 차이를 이용한 계측기 신호의 신뢰도 평가는 필요하다. FPA 시작 전 저출력(20%)에서의 측정을 통해 CECOR 코드에 내재되어 있는 SAF의 재규격화 상수를 계산할 수 있으며 이를 이용하여 3차원 노심출력분포에 따른 노외계측기 신호를 예측할 수 있다. 이 방법은 기본적으로 현재 CECOR에서 계측기 신호를 예측하는 방법과 동일하다. 현재의 교정 방법은 노외계측기 자체를 교정한다는 차이점이 있을 뿐이다.

3) 각 부채널별 교정상수가 다르다 : 식 (6)과 같이 개선된 임계전 교정법에는 KCAL이 사용된다. 따라서 기존의 임계전 교정법과는 달리 각 채널 별로 상이한 교정상수가 계산된다. 일반적으로 KCAL 값은 채널에 따라서 약간씩 다르다. 즉, 새로운 교정법은 채널별로 전주기의 교정특성이 그대로 반영될 수 있다.



<그림 3> B2B 방법을 이용한 임계전 교정결과

<그림 3>은 KCAL 상수를 이용한 B2B 임계전 교정 결과이다. B2B 임계전 교정법은 전주기 교정의 정확도를 KCAL 값을 이용하여 반영함으로써 기존 임계전 교정법의 단점을 보완할 수 있음을 확인하였다. B2B 방법론은 ABB-CE의 방법론에 비하여 2주기를 제외하고는 훨씬 정확하고 일관된 결과를 제공한다. B2B 방법론 적용시 2주기에서 출력오차가 증가하였으나 이는 1주기초와 2주기초 노심특성의 차이가 큰 것에 기인한다. B2B 교정방법은 3주기 이후에는 임계전 교정 후 전출력에서의 KCAL 값이 1.0에 매우 가깝게 유지되기 때문에 주기말 KCAL 값 감소에 따른 노심보호연산기 기능의 문제점을 완전히 해결할 수 있다. 일반적으로 PWR 노심의 연료관리 특성을 고려할 때 3주기 이후 연속되는 노심의 주기초 특성은 매우 유사하다. 따라서 B2B 임계전 교정방법은 KSNP의 임계전 노외계측기 교정방법으로 적용성이 크다고 판단된다.

5. 결 론

ABB-CE의 임계전 노외계측기 교정법의 단점을 보완할 수 있는 새로운 교정방법을 개발하였다. 이 방법을 적용하면 매 주기초 20% 출력에서 약 10시간이 소요되는 노외계측기 교정을 수행할 필요가 없어 이용률 향상은 물론 각 기기 성능에 나쁜 영향을 미치는 저출력 운전시간을 크게 단축할 수 있는 매우 바람직한 특성을 가지고 있다. 동 방법론을 영광 및 울진 원전의 측정자료에 적용하여 임계후 교정법 및 ABB-CE의 임계전 교정법과 비교한 결과 주기간 노심 특성의 변화가 적은 3주기 이후에는 매우 정확하고 일관된 교정결과를 제공함을 확인하였다.

참고문헌

- [1]. J. P. Pasquenza et al., "CPC : Assessment of the Accuracy of PWR Safety System Actuation as Performed by the Core Protection Calculators," CENPD-170-P, Combustion Engineering, Inc. (1975)
- [2]. Combustion Engineering Inc., "User's Manual for CECOR," CE NPSD-104 Rev. 7
- [3]. M. W. Crump and J. C. Lee, "Calculation of Spatial Weighting Functions for Excore Neutron Detectors," Nuch. Tech., **41**, 87 (1978).
- [4]. J. G. Ahn and N. Z. Cho, "Generation of Spatial Weighting Functions for Excore Detectors by Adjoint Transport Calculation," Nuch. Tech., **103**, 114 (1993)