

수반중성자속을 이용한 고리 1,2호기 노외 핵계측기 교정 Excure Detector Calibration of Kori Unit 1,2 Using Adjoint Flux

우일탁, 최유선, 김운호, 이창섭

전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

방환기, 권기한

한국전력공사 고리 1발전소
부산광역시 기장군 장안읍 고리 216

요 약

고리 1,2호기 노심 축방향 출력분포는 목표 축방향 출력편차(Target A.O)를 중심으로 일정한 범위내(고리 1호기 : +5, -5%, 고리 2호기 : +3, -12%)에서 운전하도록 되어있고, 노심 출력분포는 노외계측기로 감시하게 되어있다. 특히 노외계측기는 노심보호시스템의 입력장치로 정기적으로 교정하도록 되어있다. 현재 고리 1호기는 제어봉 삽입,인출을 통하여 인위적으로 출력분포를 찌그러뜨려 4가지 이상의 출력분포를 만들고 최소자승법을 통하여 노외계측기를 교정하는 방법을 사용하고 있다. 하지만 이 방법은 축방향 출력분포의 일정한 범위내 운전을 어렵게 하며 노심에 인위적인 교란요인을 주는 단점이 있어 제어봉 조작없이 단 일회 노심 출력분포 측정만으로 노외계측기 교정이 가능한 단순교정법을 고리 1,2호기에 적용하여 그 결과를 분석하였다. 고리 1호기 17, 18주기와 고리 2호기 15, 16주기 월간 노심 출력분포 측정결과를 이용하여 기존방법과 단순 교정법의 교정 오차를 비교하여 보면, 기존방법은 평균 오차 0.913%, 0.373%, 0.763%, 0.574%인 반면 단순 노외계측기 교정법은 평균 오차 0.928%, 0.346%, 0.761%, 0.617%로 기존방법과 유사한 정확도를 보여 주고 있다. 단순 교정법의 적용으로 노심 출력분포 측정 시간을 단축하고 제어봉 사용을 배제하여 방사성 폐기물을 줄이는 부수적인 효과도 거두었다.

Abstract

Axial power distribution in Kori Unit 1,2 is required to be controlled within general band centered target axial offset(A.O) and power distribution is monitored through excure detector which is calibrated periodically. Up to now Kori Unit 1,2 have adopted multi point calibration method which needs 4 different power distributions by manipulating control rod position. But this method increase the possibility of violating axial power distribution limit and disturbs equilibrium power distribution by forcing control rod to move manually. To calibrate excure detector without disturbing stable core status, Kori unit 1,2 applied Simplified Excure Detector Calibration Method(SEDCAM) which needs only one flux mapping data. Comparison of SEDCAM with conventional method shows equivalent accuracy and additional benefits like shortening of calibration time and reduction of liquid radwaste production.

1. 서론

원자력발전소의 운전원은 안전운전의 기본적 요구조건인 핵연료 건전성 확보를 위해 지속적으로 노심출력분포를 감시해야 한다. 설계자는 핵연료가 견딜 수 있는 최대 허용출력편차를 미리 계산하여 제공하고, 운전원은 최대 허용범위를 초과하지 않도록 운전함으로써 핵연료의 건전성을 유지하는 것이다. 발전소 운전시 반경방향 출력분포는 설계시 장전모형 및 제어봉 삽입한계 결정으로 제어할 수 있지만, 축방향 출력분포는 제논천이현상 등으로 제어의 어려움이 있다. 웨스팅하우스형 발전소는 핵연료 건전성이 유지될 수 있도록 축방향 운전허용영역 Target A.O를 설정해 두고 있다. 노심출력분포는 노내계측기(Incore detector)와 노외계측기(Excore detector)로 측정되며, 노내계측기는 이동형계측기이며 노내 강한 중성자속과 열에 의한 계측기 소모 및 성능저하를 방지하기 위해 평소에는 원자로심 외부에 위치하고, 정확한 노심출력분포 측정·확인을 위해 정기적으로 노심내로 삽입되어 노내출력분포 측정에 사용된다. 한편 노외계측기는 원자로 압력용기 바깥에 설치되어 노외로 누설되는 중성자를 검출함으로써 출력운전중 운전원이 노심 출력준위 및 축방향 출력편차를 감시할 수 있는 중요한 장치이다. 웨스팅하우스형 노외계측기는 길이가 각각 약 150cm인 상부계측기와 하부계측기로 구성되고, 노심외곽에 대칭적으로 4개 channel이 배치되어 각 channel별로 축방향 출력편차를 지시한다. 노외계측기가 지시한 축방향 출력편차가 미리 설정된 정상상태 축방향 출력편차범위를 벗어나면 정지설정치(Trip set point)에 페널티(penalty)로 작용하여 발전소 정지신호발생에 영향을 미치게 된다. 그러므로 노외계측기는 장기간 사용에 따른 계측기 오차를 줄이고 노외계측기의 정확한 노심출력편차 예측을 위해서 정기적인 교정이 필요하다. 노외계측기 교정은 incore flux map 작업을 통하여 노심의 실제 출력분포를 측정하고, 압력용기 외부로 누설되는 중성자가 노외계측기에 검출된 전류를 전압으로 바꾸어 주는 저항을 조절함으로써 수행된다. 최종적으로 일정기간 동안 발생 가능한 다양한 노심상태에 적용할 수 있는 저항을 생산하는 것이 목적인 바, 매 교정시마다 다양한 노심상태 즉 다양한 축방향 출력분포를 생산하기 위하여 제어봉의 움직임이 필요하고 이에 따라 노심반응도를 임계상태로 만들기 위한 붕소농도 조절이 필요하게 된다. 이러한 교정작업은 최소 4회 이상 측정된 자료에 최소자승법(Least Square Method)을 적용하여 노내 출력분포와 노외 출력분포의 정확한 상관관계식을 만든다. 이 방법의 장점은 다양한 노심출력분포에 대한 오차를 최소화하는 관계식을 찾는 방법이므로 비교적 정확한 결과를 나타내지만 반대로 출력분포 생산을 위한 제어봉 조작과 그에 따른 붕소 희석/주입 소요시간 및 과도상태 안정화를 위한 대기 등 많은 시간이 소요되며 붕소농도 조절을 위한 수처리 비용이 발생하는 단점이 있다. 최소자승법의 정확성을 유지하면서도 위와 같은 단점을 보완하기 위한 교정자료 생산방법으로 노내 출력분포 측정횟수를 줄일 수 있는 교정방법인 노외계측기 단순교정법(Simplified Excore Detector Calibration Method, SEDCAM)이 개발되었다. SEDCAM은 현재 고리 3,4호기와 영광 1,2호기에서 적용되어 사용되고 있으며 최소자승법을 이용하는 기존 교정 방법과 동등한 정확도를 보이고 있다.¹⁾ 본 연구는 같은 웨스팅하우스형 발전소인 고리 1,2호기에 대하여 노외계측기 교정에 단순교정법을 적용하여 정확도를 살펴보았다.

2. 노외계측기 교정 방법

2.1 기존 교정방법 (Multi-point Method)

Multi-point method는 국내 웨스팅하우스형 발전소에서 사용되는 전형적인 방법으로 flux

mapping시 제어봉이용방법과 제논진동 방법이 있다. 일련의 교정절차에 따라 취득되어진 자료는 소내 전산기를 통하여 노외계측기의 각 채널별로 교정상수가 구하여진다.²⁾ 표 1은 고리 1호기 18주기 약 7,700 MWD/MTU에서 측정된 자료이다.

표 1. 고리 1호기 18주기 교정자료 (7,700 MWD/MTU)

Date	Flux Map NO.	Reactor Power (%)	Incore A.O	Detector Current		Excore A.O	Current at FP	
				Top	Bottom		Top	Bottom
Channel 41								
2000.05.15	KPR-118-015	99.84	-2.22	389.13	365.00	3.20	389.75	365.58
2000.05.16	KPR-118-016	99.91	-5.18	383.10	372.10	1.46	383.45	372.44
2000.05.16	KPR-118-017	99.90	1.02	398.20	356.30	5.55	398.59	356.65
Channel 42								
2000.05.15	KPR-118-015	99.84	-2.22	360.00	334.00	3.75	360.57	334.53
2000.05.16	KPR-118-016	99.91	-5.18	353.90	341.10	1.84	354.22	341.41
2000.05.16	KPR-118-017	99.90	1.02	367.50	326.70	5.88	367.86	327.02
Channel 43								
2000.05.15	KPR-118-015	99.84	-2.22	388.25	350.13	5.16	388.86	350.68
2000.05.16	KPR-118-016	99.91	-5.18	383.00	358.10	3.36	383.35	358.42
2000.05.16	KPR-118-017	99.90	1.02	397.70	342.50	7.46	398.09	342.84
Channel 44								
2000.05.15	KPR-118-015	99.84	-2.22	278.00	274.00	0.72	278.44	274.43
2000.05.16	KPR-118-016	99.91	-5.18	273.90	279.90	-1.08	274.15	280.15
2000.05.16	KPR-118-017	99.90	1.02	284.40	266.70	3.21	284.68	266.96

노심 축방향 출력편차(A.O_{in})와 각 채널별 상·하부 노외계측기 전류는 일반적으로 선형적인 관계식을 갖는다. 그림 1에서 보는 바와 같이 고리 1호기 18주기 7,700MWD/MTU에서도 각 채널별 A.O_{in}과 노외계측기 전류간 선형적인 관계를 보여 주고 있다. 상·하부 노외계측기 전류는 노심 축방향 출력편차와 다음과 같은 관계식을 갖는다고 정의할 수 있다.

$$C_T = a \times A.O_{in} + b \tag{1}$$

$$C_B = c \times A.O_{in} + d$$

여기서, C_T, C_B는 노외계측기 채널별 상·하부 계측기의 전류, A.O_{in}은 노내계측기의 축방향 출력편차, a, b, c, d는 노외계측기 채널별 특성곡선 상수이다. Multi-point method는 노내계측기로 전노심 출력분포를 4회 이상 측정하여 노외계측기 전류와 노심 축방향 출력편차와의 상관 관계를 최소자승법을 사용하여 구하고 특성곡선 상수 a, b, c, d를 알아낸다. 노외계측기는 주기초 출력상승시 75% 출력과 100% 출력에서는 92 EFPD마다 교정하도록 기술지침서에서 정하고 있다. 또한 매달 1회씩 교정결과를 확인하여 노내계측기로 측정된 축방향 출력편차와의 오차가 3%이내여야 하고 3% 이상 오차가 발생할 경우는 재교정 작업을 수행해야 한다.

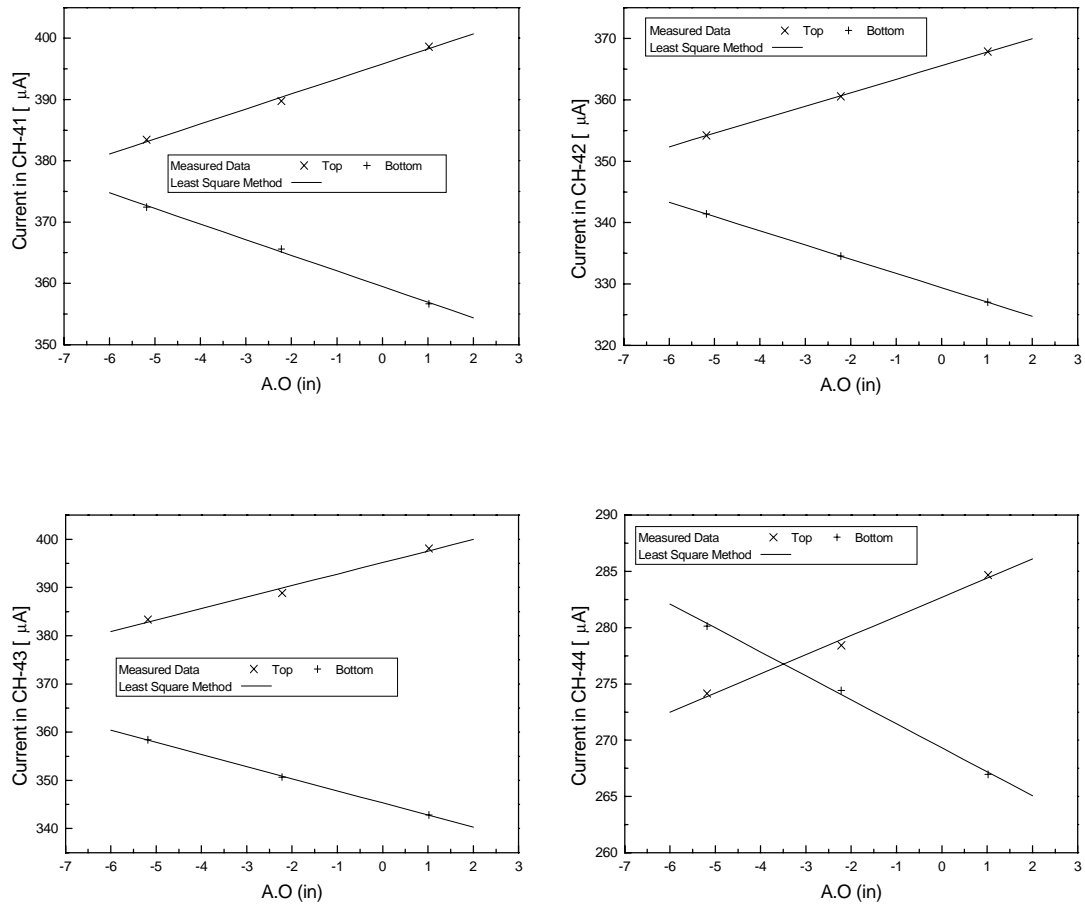


그림 1. Incore A.O와 노외계측기 각 채널별 상·하부 전류와의 관계 그래프

2.2 단순 교정방법(Single-point Method)

단순 교정방법은 노외계측기 교정을 위해 한번만 노내계측기로 노심 출력편차를 측정하고 설계 자료를 이용하여 생산된 계측기 반응상수(DRF)를 이용하는 방법이다.³⁾ 계측기 반응상수는 노심에서 방출되는 중성자가 노외계측기에 도달하여 반응을 일으킬 수 있는 확률을 나타낸다. 상·하부 노외계측기 전류를 상·하부 노심 출력과 계측기 반응상수로 표현하면 다음과 같다.

$$C_T = a_T P (R_T^T P_T + R_T^B P_B) \quad (2)$$

$$C_B = a_B P (R_B^T P_T + R_B^B P_B) \quad (3)$$

여기서, C_T , C_B 는 상부계측기의 전류와 하부계측기의 전류를 나타내며 P_T , P_B 는 상부 노심과 하부 노심의 출력을 나타낸다. P 는 노심 출력준위를 나타낸다. R_T^B 는 하부 노심으로부터 방출되는 중성자가 상부계측기에 도달하는 확률을 나타내는 계측기 반응상수이다. R_B^T 는 상부 노심으로부터

방출되는 중성자가 하부계측기에 도달하는 확률을 나타내는 계측기 반응상수이다. 원자로 노심의 축방향 출력편차와 상부 노심 출력과 하부 노심 출력과의 관계식을 쓰면 다음과 같다.

$$AO_{in} = \frac{P_T - P_B}{P_T + P_B} \times 100 \quad ; \quad P_T + P_B = 1.0 \quad (4)$$

윗 식을 이용하여 노외계측기 전류를 축방향 출력편차와의 관계식을 쓰면 다음과 같다.

$$C_T = \alpha_T P \times \left(\frac{R_T^T - R_T^B}{2} \right) \times AO_{in} + \alpha_T P \times \left(\frac{R_T^T + R_T^B}{2} \right) \quad (5)$$

$$C_B = \alpha_B P \times \left(\frac{R_B^T - R_B^B}{2} \right) \times AO_{in} + \alpha_B P \times \left(\frac{R_B^T + R_B^B}{2} \right) \quad (6)$$

식 (5)과 식 (6)에서 노외계측기 반응상수(R)값들은 adjoint flux 계산과 nodal 계산을 통해 구해지지만, α_T, α_B 값을 결정하기 위해서는 1회의 노심 출력분포 측정이 필요하다. 이것은 단 한번의 노심 출력분포 측정자료만 있으면 노외계측기를 교정하기 위한 자료를 생산할 수 있다는 것이 단순 교정법의 핵심이다.

3. Weighting Function과 DRF 생산

3.1 고리 1,2호기 노심 modeling

노외계측기 반응상수 생산을 위한 전산체계는 교정 당시 연소도에 해당하는 노심 출력분포와 원자 수밀도를 얻는데 사용되는 PHOENIX⁴⁾/ANC⁵⁾와 노심의 adjoint flux 분포를 얻기 위해 사용되는 중성자 수송코드인 GIP/DORT⁶⁾가 사용되었다. PHOENIX는 2차원 다군 수송방정식 전산코드으로써 ENDF/B-VI로부터 유도된 42 group cross section library를 사용한다. PHOENIX는 collision probabilities와 heterogeneous response flux method를 이용하여 subcell regions의 2차원 42군 중성자속을 계산한 후, S_n discrete ordinate calculation을 하여 coarse energy-group flux를 계산한다. 이러한 계산으로 ANC에 사용될 거시 핵단면적을 생산하는 중성자 수송코드으로써 계측기에 가장 큰 영향을 미치는 집합체를 이용하여 PHOENIX의 baffle/reflector 모델을 입력자료로 하여 원자 수밀도를 계산한다. GIP은 각 원소들의 microscopic cross section을 BUGLE93 library로부터 읽어 DORT에 사용될 macroscopic cross section을 생산한다. 원자로심, 냉각수, baffle/barrel/vessel, 공기, 노외계측기등의 영역으로 나누어 이에 해당하는 원자 수밀도를 입력하면 각 영역의 macroscopic cross section을 생산한다. GIP 입력자료로 사용되는 BUGLE93은 ENDF/B-VI로부터 유도된 fine group VITAMIN-B6을 축약하여 만들어진 library로 47군 중성자 핵단면적과 20군 gamma ray에 대한 정보를 가지고 있다. Adjoint flux 분포계산을 위해 사용된 전산코드는 중성자 수송방정식을 풀어 중성자 거동을 관찰하는 DORT 코드이다. Discrete ordinate S_n 수송방정식 해석 코드인 DORT는 S_{48} 차수의 angular quadrature를 사용하였으며 중성자 에너지는 47개 군이고 중성자 단면적 라이브러리는 BUGLE93을 이용하여 P_3 까지 전개된 중성자 산란단면적을 사용하였다. 고리 1,2호기 계측기 반응상수 계산에 사용된 R-Z 노심 모델은 노심 반경방향으로 190mesh를 사용하였고 노심 축방향으로는 232mesh를 사용하였다. 그림 2는 고리 1,2호기 노심 수평, 수직 방향 단면도이다. 노외계측기는 그림에서 보는 바와 같이 각 사분면

에 하나씩 90각도로 대칭으로 위치하며 상부, 하부계측기로 구성되어 있다. 표 2는 고리 1,2호기 노심 제원이다.^{8),9)}

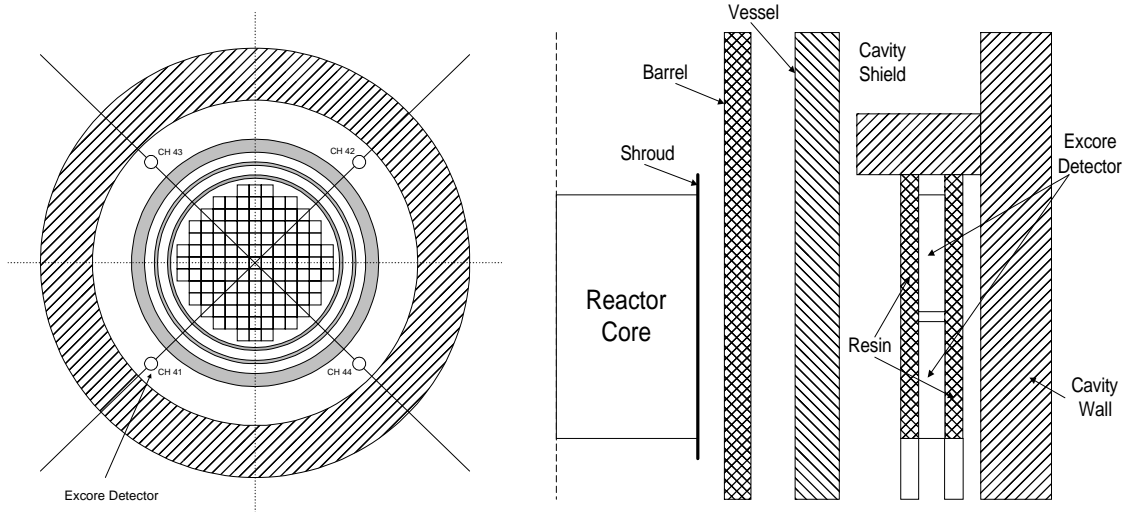


그림 2. 고리 1,2호기 노심 수평, 수직 단면도

표 2. 고리 1,2호기 노심 제원

Parameter	고리 1,2호기
Reactor Core	
Power (MWth)	1,723.5 / 1,876
Height (cm)	365.76
Equivalent Radius (cm)	123.06
Top and Bottom Reflector Thickness (cm)	40
Reactor Coolant	
Normal Pressure (psia)	2250
Inlet Temperature (°C)	282.9 / 288.6
Average Temperature (°C)	302.2 / 307.3
Reactor Internal and Vessel	
Core Baffle Thickness (cm)	2.8575
Core Barrel Inner Radius/Thickness (cm)	138.43/4.365
Reactor Vessel Inner Radius/Thickness (cm)	267.64/10.51
Excore Detector	
Number of Radial Location	4
Distance from Core Center (cm)	211.931
Number of Axial Detectors per Location	2
Length of Detector (cm)	152.5
Type of Detector	Uncompensated Ionization Chamber

3.2 Weighting function 계산

축방향 adjoint flux 분포에 영향을 미칠것으로 예상되는 인자들-연소도, 제어봉 삽입정도, 붕소 농도, 농축도 분포, 출력준위, 축방향 비균질성-에 대한 민감도 분석결과, 냉각재 밀도의 축방향 분포를 변화시키는 인자만이 adjoint flux 계산에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.¹⁰⁾ 고리 1,2

호기는 노심 출력이 다르기 때문에 adjoint flux 분포 계산을 각 호기별로 수행하였다. 노심 출력이 같다고 하더라도 출력준위에 따라 냉각재 밀도의 차이가 크기 때문에 출력 준위별로 adjoint flux를 계산하였다. 노외계측기 교정은 주기초 출력상승시 75% 출력과 100% 출력에서 92 EFPD 마다 수행된다. 따라서 교정시 출력준위에 맞도록 75%와 100% 출력에서 adjoint flux 분포를 계산하였다. 노외계측기에 대한 weighting function은 노심내 특정 위치에 존재하는 중성자가 노심 외곽으로 누설되어 노외계측기 신호에 기여하는 정도를 나타낸다. 중성자가 노외계측기에 도달하기까지 거치게 되는 재질-냉각재, baffle, barrel, vessel-의 특성에 따라 달라지게 된다. Barrel, vessel등의 재질 및 두께가 결정되면 weighting function은 정해지지만 노외계측기 교정 측면에서 상·하부 계측기에 대한 상대적 weighting function이 중요 관심사항이므로 축방향 재질의 분포에 영향을 주는 인자는 상·하부 노외계측기에 대한 weighting function에 영향을 미친다. 출력준위 변화는 냉각재 재질의 축방향 밀도분포 변화를 유발하여 노심에서 발생하는 중성자가 노외계측기에 도달하는 정도의 축방향 중속성을 유발시킨다. 고리 1,2호기 100% 출력과 75% 출력에서 정규화된 weighting function을 그림 3에서 나타내었다. 그림에서 보는 것처럼 상하부 계측기 weighting function은 서로 대칭이며 상부 노심이 상부계측기에 미치는 영향이 하부노심이 하부계측기에 미치는 영향보다 큼을 알 수 있다. 이것은 상부노심의 냉각재 밀도가 하부노심보다 낮아서 고속중성자가 더 많이 누설됨을 의미한다.

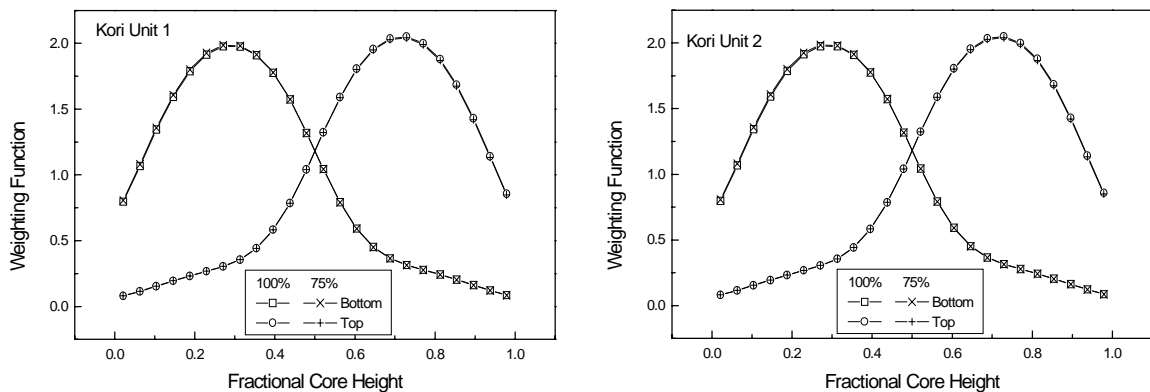


그림 3. 고리 1,2호기 출력준위별 weighting function

3.3 노외계측기 반응상수 생산

단순 교정법에 사용되는 계측기 반응상수는 노심 출력에 대한 weighting function 및 노심 출력 분포의 함수에 의해 정의되며, 노외계측기 교정전에 미리 계산하여 현장에 제공한다. 노외계측기 반응상수에 영향을 미치는 요인-냉각재 온도분포, 제어봉 삽입위치, 축방향 연소도 분포, 노심 출력준위 및 반경방향 출력분포-중에 냉각재 온도 분포와 제어봉 삽입위치의 영향은 무시할 수 있고 노심출력 및 연소도는 상대적으로 큰 영향을 미친다. 따라서 정기적으로 수행하는 노외계측기 교정작업시 그 조건에 맞는 노심 출력분포를 생산하여 반응상수를 계산해야지만 정확한 결과를

얻을 수 있다. 표 3은 고리 1,2호기 출력준위별로 계산된 weighting function과 ANC로 계산된 고리 1,2호기 주기별 노심 출력분포를 사용하여 생산된 노외계측기 반응상수이다. 노외계측기 반응상수는 주기별, 연소에 따라 생산되었으며, 노외계측기 단순교정법에 이용할 때 교정당시 연소도에 가장 근접한 연소도의 노외계측기 반응상수를 사용한다.

표 3. 노외계측기 반응상수

출력 (%)	연소도	고리 1호기 17주기				연소도	고리 1호기 18주기			
		RTT	RTB	RBT	RBB		RTT	RTB	RBT	RBB
75	0	0.40498	0.10217	0.09689	0.39596	0	0.40563	0.10144	0.09661	0.39632
	150	0.40694	0.10062	0.09897	0.39347	150	0.40749	0.10003	0.09865	0.39383
	1,000	0.40798	0.09850	0.09961	0.39390	1,000	0.40852	0.09787	0.09944	0.39418
	2,000	0.40841	0.09776	0.09974	0.39408	2,000	0.40875	0.09743	0.09957	0.39425
	3,000	0.40895	0.09692	0.09985	0.39428	3,000	0.40929	0.09658	0.09967	0.39446
	4,000	0.40924	0.09654	0.09983	0.39439	4,000	0.40967	0.09610	0.09967	0.39456
	6,000	0.41013	0.09545	0.09965	0.39477	6,000	0.41028	0.09534	0.09957	0.39481
	8,000	0.41062	0.09493	0.09946	0.39499	8,000	0.41044	0.09510	0.09959	0.39487
	10,000	0.41083	0.09472	0.09942	0.39503	10,000	0.41078	0.09489	0.09945	0.39488
	12,000	0.41119	0.09449	0.09918	0.39514	12,000	0.41131	0.09458	0.09896	0.39515
	13,890	0.41138	0.09442	0.09905	0.39515	13,190	0.41153	0.09440	0.09879	0.39528
14,390	0.41151	0.09438	0.09888	0.39523	13,690	0.41139	0.09449	0.09888	0.39524	
출력 (%)	연소도	고리 2호기 15주기				연소도	고리 2호기 16주기			
		RTT	RTB	RBT	RBB		RTT	RTB	RBT	RBB
75	0	0.40352	0.10204	0.10122	0.39322	0	0.40177	0.10741	0.09748	0.39334
	150	0.40539	0.10006	0.10341	0.39114	150	0.40575	0.10074	0.10146	0.39205
	1,000	0.40666	0.09841	0.10305	0.39188	1,000	0.40705	0.09860	0.10148	0.39286
	2,000	0.40723	0.09773	0.10295	0.39209	2,000	0.40775	0.09769	0.10140	0.39315
	3,000	0.40807	0.09696	0.10247	0.39250	3,000	0.40847	0.09687	0.10121	0.39345
	4,000	0.40900	0.09618	0.10188	0.39293	4,000	0.40924	0.09613	0.10083	0.39380
	6,000	0.41025	0.09530	0.10097	0.39348	6,000	0.41032	0.09525	0.10024	0.39419
	8,000	0.41105	0.09457	0.10050	0.39389	8,000	0.41097	0.09451	0.10010	0.39442
	10,000	0.41157	0.09419	0.10023	0.39401	10,000	0.41134	0.09419	0.10001	0.39446
	12,000	0.41204	0.09394	0.09990	0.39412	12,000	0.41203	0.09392	0.09949	0.39456
	13,750	0.41226	0.09385	0.09970	0.39419	12,950	0.41212	0.09386	0.09930	0.39472
14,250	0.41248	0.09376	0.09944	0.39432	13,450	0.41207	0.09389	0.09931	0.39473	

4. 기존 교정법과 단순 교정법 교정오차 비교

노외계측기는 노심연소에 따라 변화하는 노심내의 축방향 출력편차를 정확하게 지시할 수 있도록 노내 출력분포 측정을 통해 1개월마다 노외계측기를 점검하고 3개월마다 교정작업을 수행하며, 한주기 운전기간 중 통상 5~6회의 교정작업을 실시한다. 교정후 1개월마다 노외계측기를 점검하는 과정은 정기교정후 노외계측기 정확성이 노심 연소에 따라 어떻게 변화하는가를 분석하고 정기교정작업에서 유도된 노내계측기로 측정된 노심 축방향 출력편차와 노외계측기로 측정된 노심 축방향 출력편차로 유도된 선형관계식의 정확성을 분석하고 노심 연소도에 따라 교정된 노외계측기 물리적 특성이 얼마나 변화하였나를 분석하는 것이다. 노외계측기 단순교정법 정확도는 노외계

측기 정기교정에 단순교정법을 적용하고 교정오차가 노심연소도에 따라 어떻게 변하는가를 기존 교정방법의 교정오차 비교로 살펴보았다. 노외계측기 교정시 제어봉 삽입등과 같은 방법으로 노심 축방향 출력편차에 변화를 주고 Incore A.O와 각 계측기에서 나오는 전류와의 선형관계식을 유도하여 노외계측기 교정에 필요한 교정상수를 생산한다. 표 4는 고리 1,2호기 주기별 교정일자이다. 통상적으로 약 3개월마다 한번씩 노외계측기 교정이 실시되었음을 알 수 있다. 고리 2호기 15주기의 경우는 첫 번째 교정후 한달 후 다시 교정이 실시되었는데 그 당시 교정오차 분석시 노내 출력편차 지시값과 노외 출력편차 지시값의 차이가 3%를 초과하였기 때문에 다시 교정이 이루어졌다.

표 4. 고리 1,2호기 노외계측기 교정일시

고리 1호기 17주기				
년월일	98. 9. 9	98.12.16	99. 3.26	99. 6. 29
연소도(MWD/MTU)	70	3,712	7,700	11,375
[원자로 출력] (%)	[75]	[100]	[100]	[100]
고리 1호기 18주기				
년월일	99.11. 3	00. 2. 9	00. 5.15	00. 8.24
연소도(MWD/MTU)	113	3,881	7,700	11,675
[원자로 출력] (%)	[75]	[100]	[100]	[100]
고리 2호기 15주기				
년월일	99. 5.10	99. 6. 7	99. 8.30	99.11.30
연소도(MWD/MTU)	60	807	3,696	7,113
[원자로 출력] (%)	[75]	[100]	[100]	[100]
고리 2호기 16주기				
년월일	00. 6.26	00. 7.20	00.11. 7	01. 2.21
연소도(MWD/MTU)	64	950	5,105	8,972
[원자로 출력] (%)	[75]	[100]	[100]	[100]

그림 4, 5, 6, 7은 고리 1호기 17, 18주기, 고리 2호기 15, 16주기에서 취득된 자료를 기초로 기존 교정법으로 계산된 교정상수와 노외계측기 단순 교정법으로 계산된 교정상수를 이용하여 예측된 노심 출력편차와 월간 노심 출력편차 측정 시점에서 실측 노심 출력편차와의 오차를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 정기 교정후 1개월, 2개월 후에는 기존 교정법이나 단순 교정법 모두 어느 정도의 오차를 보이고 있고 특히, 교정후 시간이 많이 흐를수록 교정 오차가 커짐을 볼 수 있다. 이는 노심의 연소에 따라 노외 계측기 전류와 노심 출력편차와의 선형관계식의 특성이 변하였기 때문이다. 월간 노심 출력분포 측정으로부터 계산된 노심 출력편차와 교정상수로부터 구한 노심 출력편차의 오차가 3.0%미만, 계기로부터 읽혀진 노심 출력편차의 오차가 3.0% 미만이면 노외계측기를 재 교정할 필요가 없다. 또한, NIS 계기에 의한 오차는 기존 교정법이나 단순 교정법이 동일하다고 가정할 수 있다. 단순 교정법은 전반적으로 기존 교정법과 상응하는 정확성을 보여주고 있으며 교정 기준인 3% 미만 오차 범위를 만족하고 있다. 정기 교정 직전에는 최대 오차를 보여주고 교정 직후에는 오차가 작음을 알 수 있다.

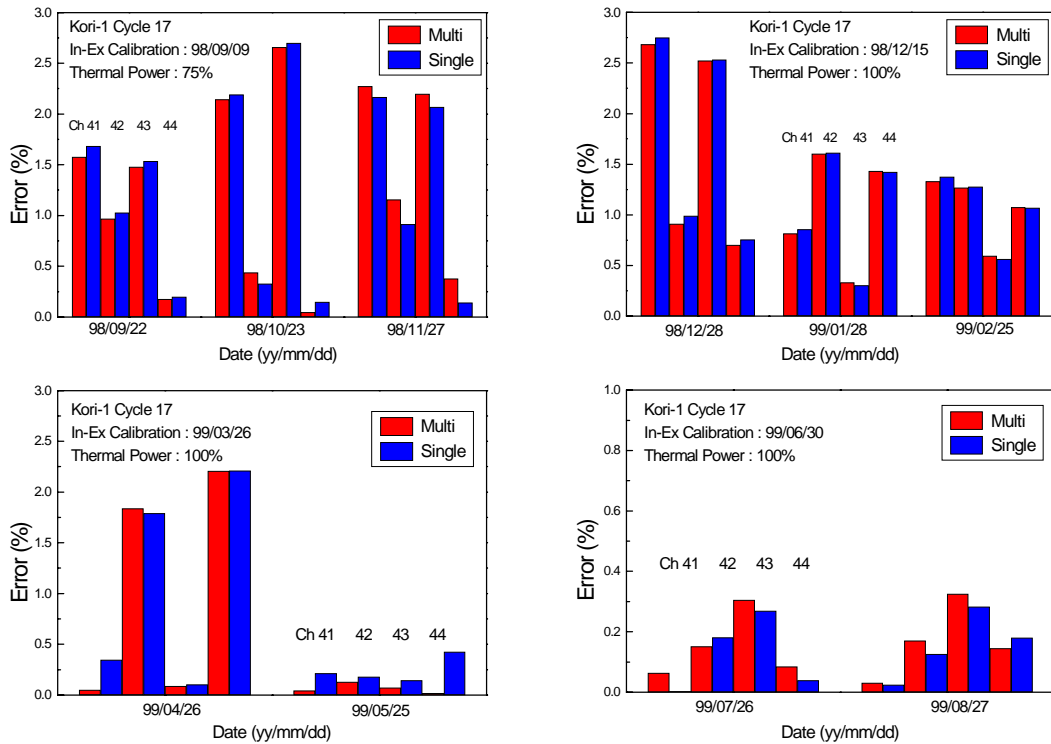


그림 4. 고리 1호기 17주기 채널별 월간 교정 오차 비교

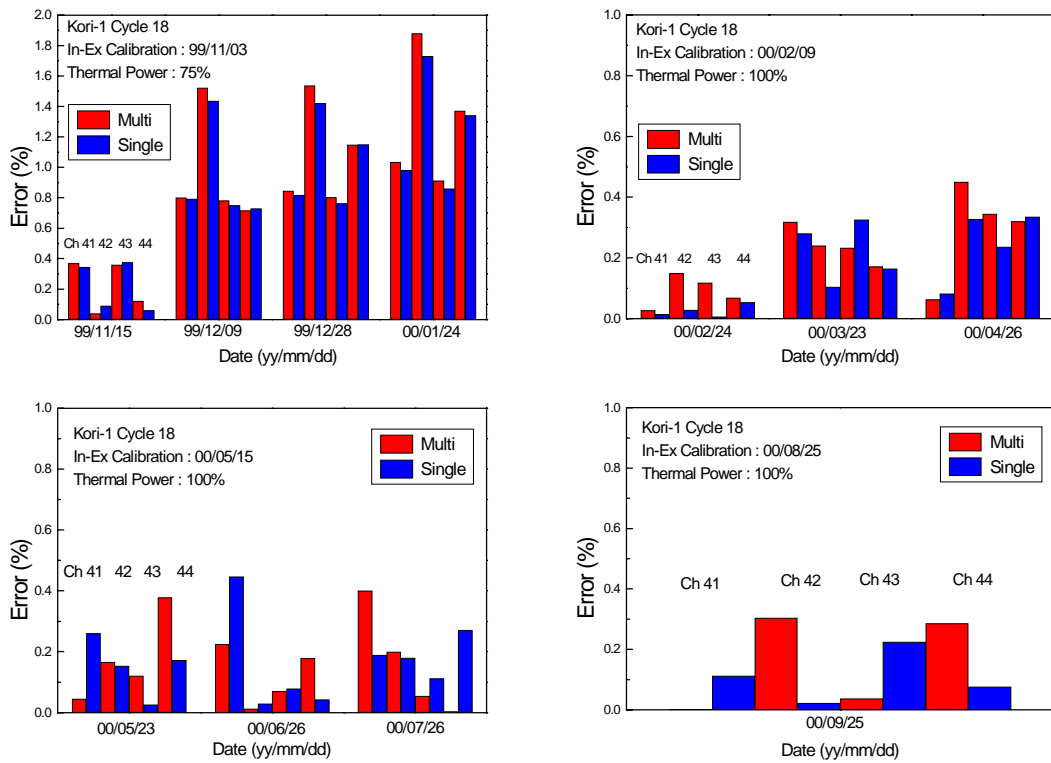


그림 5. 고리 1호기 18주기 채널별 월간 교정 오차 비교

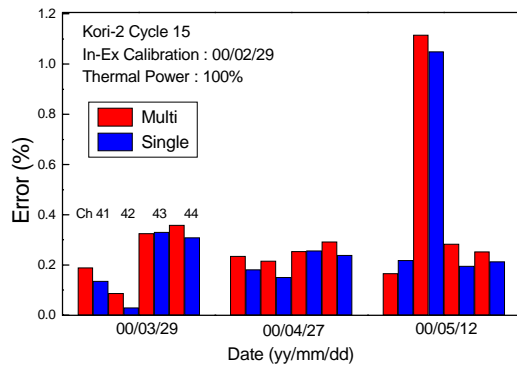
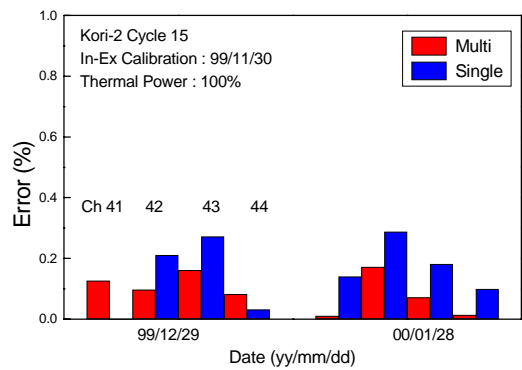
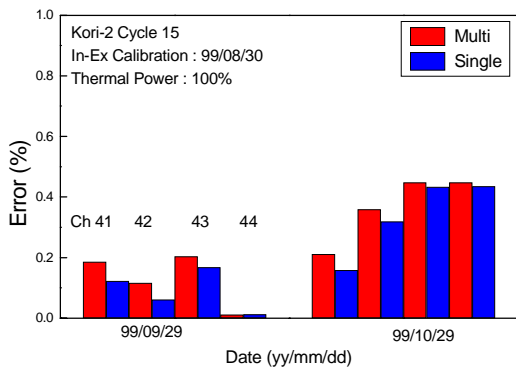
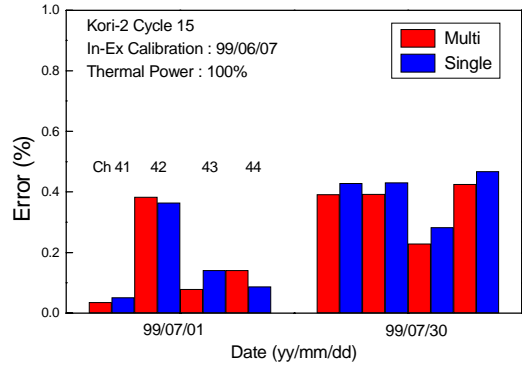
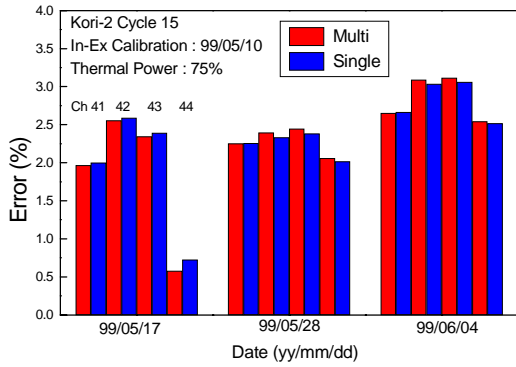
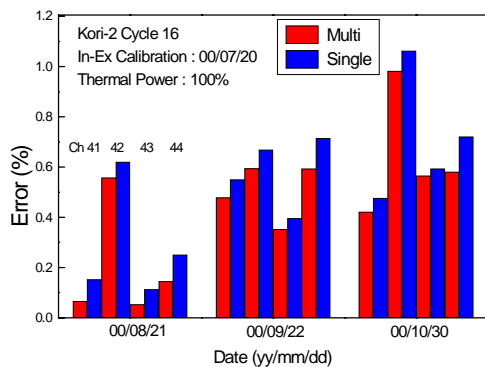
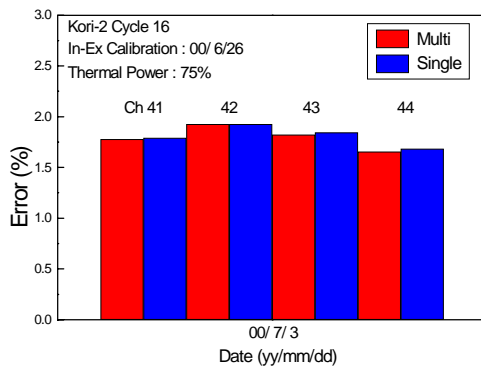


그림 6. 고리 2기 15호기 채널별 월간 교정 오차 비교



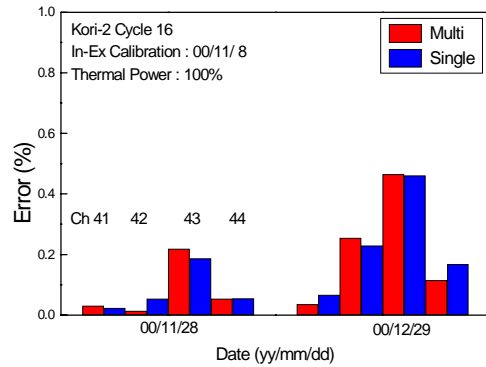


그림 7. 고리 2호기 16주기 채널별 월간 교정 오차 비교

월간 flux map 오차 분석 결과 단순 교정법은 기존 교정법과 동등한 교정오차를 보임을 알 수 있다. 그렇지만 단순교정법은 기존 교정법과 같이 노외 계측기 전류와 축방향 출력편차와의 선형적인 관계를 가정하였기 때문에 기존 교정법보다 많이 향상된 결과를 보여 주는 데는 한계가 있음을 알 수 있다.

표 5는 교정오차 결과를 통계 처리한 것으로 평균오차, 최대오차를 보여주고 있다. 평균오차는 기존방법과 단순 교정법 모두 정기교정 절차에 따라 구해진 교정상수로 노외계측기를 교정한 후 소내전산기에서 계산되는 값과 실제 Incore 계산값간의 차이를 평균한 것이며 최대오차는 그 오차 중 최대인 것이다. 고리 2호기 15주기의 경우 99년 6월 4일 월간 Flux Map 당시 노외계측기 교정 오차가 3%를 초과하여 99년 6월 7일 노외계측기 정기교정을 실시하였다. 고리 1,2호기 몇 주기를 대상으로 기존 교정법과 단순교정법을 적용하여 교정오차를 비교한 결과, 평균오차에서 기존 교정법이 0.913%, 0.373% 0.763% 0.574%인 반면에 단순교정법은 0.928%, 0.346% 0.761%, 0.617%로 나타났으며 두 방법간 교정오차 차이는 크지않고 동등한 교정 정확도를 가진다고 할 수 있다.

표 5. 월간 flux map 오차 분석

		평균오차	최대오차
고리 1호기 17주기	기존	0.913	2.687
	단순	0.928	2.753
고리 1호기 18주기	기존	0.373	1.88
	단순	0.346	1.73
고리 2호기 15주기	기존	0.763	3.118
	단순	0.761	3.063
고리 2호기 16주기	기존	0.574	1.928
	단순	0.617	1.926

5. 결론

노외계측기는 노심의 출력을 감시하는 보호 장치로써 현재 고리 1,2호기에서 사용되는 노외계측

기 교정법은 제어봉을 사용하여 노심 출력분포를 4회 정도 측정하는 multi-point method을 사용하고 있다. 노외계측기 교정에 multi-point method을 사용함에 따라 발생하는 여러 단점을 줄이고 원자력 발전소의 경제적 이익을 얻을 수 있는 노외계측기 단순 교정법을 개발하였다. 단순 교정법은 노외계측기 반응상수를 이용하고, 노심출력분포를 1회 측정하여 노외계측기를 교정하는 방법이다. 고리 1,2호기를 대상으로 단순교정법을 적용하여 교정오차 측면에서 정확도를 살펴보았다. 노심 축방향 adjoint flux를 계산하고 노심 축방향 출력분포를 사용하여 노외계측기 반응상수를 계산하였다. 고리 1,2호기용 노외계측기 반응상수를 이용하여 노외계측기 교정상수를 구하였다. 고리 1호기 17,18주기, 고리 2호기 15,16주기를 대상으로 교정오차를 기존 방법과 비교한 결과 실제 축방향 출력편차에 근접하는 좋은 결과를 얻었으며 기존 교정방법과 동등한 교정오차를 얻었다. 또한 노외계측기 단순교정법을 사용함으로써 기존 교정방법보다 교정 시간을 단축시킬 수 있고 제어봉 사용을 배제하여 붕산수의 사용을 최소화함으로써 노심내에 액체 방사성 폐기물 발생을 줄여 돈으로 환산할 수 없는 경제적인 이득과 노내계측기의 사용을 줄임으로써 노내계측기 수명 연장에도 이득이 있다. 현재 고리 1호기는 01년 2월 23일(19주기 3,490 MWD/MTU)부터 단순교정법을 적용하고 있으며, 고리 2호기는 01년 5월(17주기 노물리시험)부터 적용할 것이고, 향후 올진 1,2호기에 대해서도 단순교정법을 적용하여 정확도를 살펴볼 계획에 있다.

참고문헌

1. 전력연구원, 노외계측기 교정법 개선연구(최종보고서), TR.97NJ24.J1998.53, (1998).
2. “노외 핵계측기 교정자료 취득 및 교정결과 확인”, 고리 3,4호기 발전소 운영 절차서, 노물리 4-7, 개정 4 (1996).
3. 하창주 등, “단순 노외계측기 교정법,” ‘96춘계학술발표회 논문집(I), 433 (1996).
4. "PHOENIX-P User Manual", Westinghouse Electric Corporation (1994).
5. "ANC User Manual", Westinghouse Electric Corporation (1994).
6. 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
7. D.T. INGERSOLL et al., "Production and Testing of the VITAMIN-B6 Fine-Group and the BUGLE-93 Broad-Group Neutron/Photon Cross-Section Libraries Derived from ENDF/B-VI Nuclear Data," ORNL-6795 (Draft 4/94)
8. "The Nuclear Design and Core Physics Characteristics of the Kori Nuclear Power Plant Unit 1 Cycle 17," 한국원전연료주식회사
9. "The Nuclear Design and Core Physics Characteristics of the Kori Nuclear Power Plant Unit 2 Cycle 16," 한국원전연료주식회사
10. 이덕중 등, “노외계측기 반응률 계산을 위한 Weighting Function 민감도 분석,” 97추계학술발표회 논문집(I), 50 (1997)