

Development & Application of Dynamic Control Rod Reactivity Measurements Methodology
for LWRs

103-16

1 3 8

가 가

(± 15%)

. 8

ABSTRACT

Dynamic rod worth measurement (DRWMTM) methodology commercialized by Westinghouse Co. was successfully applied to many nuclear power plants in USA to measure the control rod worth at Low Power Physics Tests. But in KOREA, to increase the nuclear power plant economy using more quick and sophisticated reactivity measurement methodology without the change of boron concentration, KEPRI has developed Dynamic Control rod Reactivity Measurement (DCRMTM) methodology that was the results of a cooperative work with KAERI except the development of core analysis codes. And KAERI recently published the preliminary results for 4 control rod worths using their own inverse kinetics code and measured detector signals. The object of this paper is to show some DCRM results for the same measured data using KEPRI tools, RAST-K & INVERSE, and introduce DCRM system that could measure top and bottom detector signals fully digitally. As a result, background and noises signals at the region of low signal strength were very important to determine the rod worth. But for now, because there was no numerical model to describe the behavior of background signals, a method reflecting the characteristics of dynamic reactivity was suggested. And for noise, traditional data averaging technique was adopted. Each static worth of 8 control assemblies well agreed with those of NDR within 15%, the requirement of Tech. Spec.

I. 서론

국내 원자력 법은 원자력발전소가 원전연료 장전 후 상업운전에 들어가기 전 영출력 상태에서 각종 시험을 시행하고, 규정된 조건을 만족하는지를 검사하도록 하고 있다. 이는 안전성분석에 사용된 각종 인자들의 타당성을 확인하기 위함이다. 일련의 절차에 따라 수행되는 각 시험들을 수행함에는 일정 시간이 필요한데, 규정조건을 만족하면서 시험시간을 줄일 수 있다면 원자로 정상출력 도달시간을 그 만큼 줄여 원전 경제성 향상을 기할 수 있기 때문에 시험시간을 줄이기 위한 시도들이 지속적으로 이루어져 왔다. 제어봉 제어능(제어봉가) 측정 시험도 그 중의 하나이다. 이것은 전체 영출력 노물리 시험 시간의 대부분을 차지할 만큼 소요시간이 길기 때문에 발전소에서도 측정 순서 변경 혹은 측정 절차의 간소화 등으로 가능한 최적화된 방법들을 개발하여 소요시간을 줄이기 위해 노력하고 있다. 그럼에도 불구하고 현재 WH형 노심이나 한국표준형 원전 노심의 제어봉가 측정에 공히 이용되는 붕소희석법에 이은 제어봉 교차방법은 그 측정 소요시간이 10 ~ 12시간에 이른다. 향후 현재 측정하지 않는 정지제어봉까지 측정하는 경우는 그 시간이 더욱 늘어날 것으로 전망된다. 이에 따라 제어봉가 측정을 보다 빠른 시간에 수행할 수 있는 방법을 모색하게 이르렀다.

제어능을 보다 신속히 측정하려면 현재와 같이 보론 농도를 변화시키는 방식에서 탈피해야 한다. 제어봉가 측정에서 가장 많은 시간이 기준제어봉가 측정에 할애되고 이는 기본적으로 보론 농도 변화시간에 좌우되기 때문이다. 미국 Westinghouse(WH)사가 개발하고 이미 미국내 여러 원전에 적용하고 있는 DRWMTM[1]은 이러한 제어봉가 평가방법의 새로운 모형이자 적절한 대안이라 할 수 있다. 평형상태 노심에 제어봉을 삽입하고 완전 삽입 전후의 노외계측기 신호를 분석하여 제어봉가를 계산하는 이 방법은 약 2시간 만에 8~9개 제어봉의 제어봉가를 모두 측정할 수 있고, 각 제어봉의 절대적 제어능을 알 수 있으며, 미분제어봉가도 측정이 가능하고 액체폐기물이 발생하지 않는 등의 장점을 가지고 있다. 다만 이 방법을 적용하기 위해서는 동 방법론에 필요한 자료와 노외계측기 신호를 적절히 다룰 수 있는 기술이 필요하다. 한편 North Carolina State Univ.에 소재한 Electric Power Research Center (EPRC) 역시 지난 8년간 꾸준히 독자적인 방법론에 따라 동적 제어봉가 측정 (Dynamic Reactivity Measurement of Rod Worth, DRMWM)[2] 기술을 개발하여 왔으며 일부 미국내 WH형 원전에 적용하여 방법론을 검증하고 현재 특정기술주제보고서를 미 원자력 규제기관에 제출, 인허가를 신청한 상태에 있다. 프랑스의 경우 EdF사가 EPRC의 방법론을 이용하여 실제 측정까지 연구를 진행한 바 있으나 구체적인 결과를 제시하지는 않고 있다.

상기한 바와 같이 동적 제어봉 제어능 측정 방법론은 현재 국제적으로 개발 완료 혹은 개발중인 기술이지만 WH형 노심에만 상용 적용되었다. 전력연구원은 WH형 노심뿐만 아니라 한국표준형 노심에도 적용할 수 있도록 원자력연구소와 공동으로 동적 제어봉 제어능 측정 방법론(Dynamic Control rod Reactivity Measurement, DCRMTM)을 개발하고 관련 기기(DDRCS, Direct Digital Reactivity Computer System [3])는 독자적으로 개발하여 실제 원자로 실험에 적용하였다. 이미 영광 1호기 14주기 실험 해석에 관하여 송재승 등이 발표[4]한 바 있으나 본 논문은 전력연구원이 보유한 계산도구를 이용한 동적 제어봉 제어능 측정방법론의 개발과 검증, 영광 1호기 14주기(WH형) 및 영광 3호기 7주기(한국표준형) 실험 결과와 해석, 그리고 나타난 문제점들에 대해 논하기로 한다.

II. 본 론

동적 제어봉가 측정은 단 하나의 제어봉만을 노심에 삽입하고 인출할 때 얻어지는 노외계측기 전류신호를 근거로 계산한다. 만일 전류신호와 노심 중성자 평균 밀도 사이의 관계를 얻어 낼 수 있다면 식 (1)와 같이 표현되는 역 반응도 관계식으로부터 제어봉 삽입에 따른 반응도를 알아낼 수 있게 된다.

$$\rho^D(t) = \sum_k \beta_k \int_{-\infty}^t \frac{N'(t')}{N(t')} e^{-\lambda_k(t-t')} dt' + \Lambda \frac{N'(t)}{N(t)} - \frac{s_{ext}(t)}{N(t)}. \quad (1)$$

식 (1)은 점 반응도 관계식에서 아무런 가정없이 유도할 수 있다. 식 (1)을 차별화하면

$$\rho^D(t_n) = \sum_k \beta_k \left(e^{-(\lambda_k + \omega_n)\Delta t_n} B_{n-1,k} + A_{n,k} \right) + \Lambda \omega_n - s(t) \frac{e^{-\omega_n \Delta t_n}}{N_{n-1}}, \quad (2)$$

여기서

$$B_{n,k} = e^{-(\lambda_k + \omega_n)\Delta t_n} B_{n-1,k} + A_{n,k}, \quad \omega_n = \ln(N_n/N_{n-1})/\Delta t_n, \\ A_{n,k} = \frac{\omega_n}{\lambda_k + \omega_n} \left(1 - e^{-(\lambda_k + \omega_n)\Delta t_n} \right).$$

단, 통상 임계상태에서 약간의 정반응도 삽입으로 향후 제어봉 인출 후 중성자속 회복을 도모하므로 초기 노심내 평균 선행 핵종밀도는 평형상태에 존재하지않게 되며, 따라서 실제로는 이를 고려하여 반응도를 계산한다. 식 (2)의 해를 구하게 되면 시간에 따른 제어봉의 동적 반응도는 다음과 같이 쓸 수 있게 된다.

$$\Delta \rho^D(t_n) = \rho^D(t_n) - \rho^D(t_0) \quad (3).$$

식 (2)를 풀어내고 향후 언급할 DRCF (Density-to-detector Response Conversion Factor), DSCF (Dynamic-to-Static Conversion Factor)등의 인자를 구하며 측정 신호를 이용, 동적/정적 반응도를 계산하기 위한 전산도구로는 자체 제작한 INVERSE 코드를 사용하였다.

이제 문제는

1. 전류신호로부터 노심 중성자 평균 밀도사이의 관계를 어떻게 추정할 수 있느냐
2. 역반응도 관계식으로 얻은 반응도는 동적 반응도인데 비해 Tech. Spec.은 핵설계보고서에 기술된 정적 반응도를 확인 대상으로 한다. 두 반응도를 어떻게 정량적으로 연관시킬 수 있는가

로 집중된다.

가. DRCF (Density-to-detector Response Conversion Factor)

첫번째 질문에 대해선 DRCF를 정의하면 해결할 수 있다. 우선 송재승[4] 등이 밝힌 바와 같이 이미 3차원 노심 각 영역에서 노외계측기에 미치는 영향[5]이 알려져 있다고 한다면, 이들 인자를 이용하여 제어봉의 삽입 및 인출시 각 노외계측기내의 중성자 반응율을 알아낼 수 있게 된다. 통상 노외계측기 전류 신호와 반응율은 선형성을 가지므로 갖도록 실험영역이 정해지므로, 노외계측기

신호의 변화정도는 곧 노외계측기내 중성자 반응을 변화량과 동일하게 놓을 수 있다. 그리고 지발 중성자군이 반응률에 미치는 영향을 무시한다면 노외 계측기 반응률과 노심 평균 중성자 밀도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{R}_{T,B}^{Sim}(t) = DRCF_{T,B}(t) \cdot \bar{n}_{Core}^{Sim}(t) \quad (4)$$

여기서

$$DRCF_{T,B}(t) = \frac{\sum_{n=1}^N \Delta V_n W_n^{T,B} \sum_{g=1}^G \kappa \Sigma_{fg}^n(t) f_g^{n,T,B}(t)}{\sum_{n=1}^N \Delta V_n W_n^{T,B} \sum_{g=1}^G \kappa \Sigma_{fg,ARO}^n f_g^{n,T,B}}, \quad f_g^{n,Q}(t) \equiv \frac{\phi_g^{n,Q}(t)}{\left\langle \phi_{ARO}^*, \frac{\phi^Q(t)}{v(t)} \right\rangle},$$

이며 윗글자 (-)는 ARO상태와의 상대적 값을 의미한다.

식 (1.4)로부터 상하부 노외계측기 각각, 혹은 두 계측기 값을 각기 따로 규격화하여 합산한 것이나 합산하여 규격화 한 것의 DRCF값을 얻을 수 있다. 이렇게 노심 모사 결과로부터 DRCF를 얻게 되면, 실제 측정된 노외계측기 전류신호의 변동정도를 DRCF로 나눠 노심평균 중성자 밀도를 추정할 수 있게 된다. 식 (1.4)가 기존 EPRC나 송재승 등이 발표한 것과 다른 점이 있다면 노외계측기 반응 계산에서 중성자원 대신 출력을 사용한 것과, 정상상태를 기준으로 계산한 값을 쓰지 않고 과도상태 반응값을 그대로 사용하였다는 점이다. 이 경우 상하부 각각의 노외계측기가 예측하는 동적반응도가 동일하게 나타나고 역반응도 관계식으로 얻은 동적반응도와 3차원 노심동특성 해석코드가 계산한 동적반응도가 동일하게 되어 계산과정에서 생길 수 있는 오류를 사전 체크할 수 있다. 과도상태시 노외계측기 반응률은 3차원 노심동특성 해석코드인 RAST-K (Reactor Analysis code for Steady and Transient state - KEPRI) 전산코드[6]를 사용하여 구하였다.

나. DRCF (Dynamic-to-Static worth Conversion Factor)

두번째 문제는 단순 보정으로 해결한다. 제어봉 삽입은 과도상태에서 진행되지만 특정 시각에 해당하는 노심 축방향 위치에서 동적 반응도는 3차원 노심 과도해석코드로 계산할 수 있다. 일단 노심 각 축방향 위치별로, 또 각 제어봉별로 동적제어봉가가 결정되면, 같은 위치에서 정적 제어봉가를 계산한다. 통상 정적제어봉가는 약 20개 정도의 위치에서 계산되고, 이를 내삽하여 사용한다. 두 값이 얻어지면 다음 관계식에서 보듯이 측정된 동적 제어봉가로부터 정적 제어봉가를 얻을 수 있다.

$$DSCF_Q(z) = \frac{\Delta \rho_Q^{S,Sim}(t_z)}{\Delta \rho_Q^{D,Sim}(t_z)} \Rightarrow \Delta \rho_Q^{S,Mea}(t_z) = DSCF_Q(z) \Delta \rho_Q^{D,Mea}(t_z) \quad (5)$$

여기서 Q는 상하부 노외계측기를 의미하며, 식 (1.5)의 우변 마지막 항은 역반응도 관계식에서 얻은 값을 의미한다.

다. 사용 전산코드의 검증

그림 [1]은 전체 DCRMTM의 자료흐름을 나타낸 것인데 이를 보면 3차원 노심해석전산코드가 어떤

역할을 감당하고, 역반응도 계산코드는 어떤 역할을 수행하는지를 잘 알 수 있다. DCRM™에 사용된 3차원 영출력 노심과도해석 코드는 RAST-K이고 반응도와 기타 인자를 계산하는 부분은 INVERSE 코드가 담당하였다. 먼저 RAST-K 전산코드의 동특성 해석 정확성은 이미 발표된 논문 [6,7]들을 통해 동적 제어능 측정 방법론에 적용에 무리가 없다고 가정하기로 한다. 남은 문제는 RAST-INVERSE 전산체계가 동 방법론에 적절한지를 검증하는 것이다. 실제 측정된 자료를 대상으로 기존 개발된 동적 제어능 측정방법과의 비교를 통해 코드체계를 검증하는 것이 가장 타당하다고 판단하여 EPRC의 8개 주기 자료 중 WH형 4 LOOP 노심 2개 주기 18개 제어봉에 대해 계산하고 EPRC 결과와 비교함으로써 검증계산을 수행하였다. 사용된 자료는 노심장전모형에 따른 변화를 살펴보기 위해 같은 원자로로부터 2개 주기 연속으로 취득한 것이었다. EPRC의 노심 계산 도구는 NESTLE 전산코드[8]로 3차원 4각/6각형 노심에 대해 다균 비선형 Nodal Expansion Method로 정상/과도 상태를 모사할 수 있다. 핵자료를 동일하게 유지하기 위해 제어봉별로 NESTLE 전산코드 계산결과로부터 노드별 핵단면적과 동특성인자를 추려내어 RAST-K 전산코드의 핵자료로 사용하였다. 그림 [2]은 A형 노심에 대해 정상상태 ARO와 Bank 7이 완전 삽입되었을 때의 반경방향 출력 분포를 서로 비교한 것이고, 표 [1]은 제어봉이 완전 삽입된 경우를 포함한 총 18개 케이스에 대해 반경방향 출력분포 오차와 k-eff 값을 비교한 것이다. DCRM™은 기본적으로 핵적 노드를 4 node/assembly로 한다. 계산 정확성을 기할 수 있고 NESTLE이나 기타 핵설계 전산코드들이 표준적인 노드크기로 사용하고 있을 뿐아니라 한국표준형 노심에 쓰이는 12-finger 제어봉 다발을 고려하기 위해서이다.

표 [1] 정상상태 비교 결과: WH형 4 LOOP 2개 노심

절대오차	Core Model A								
	ARO	Bank 1	Bank 2	Bank 3	Bank 4	Bank 5	Bank 6	Bank 7	Bank 8
RMS FA Power	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Max FA Power	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
<i>k_{eff}</i> (pcm)	1.2	1.5	0.4	1.2	1.5	1.6	1.6	1.9	1.7

절대오차	Core Model B								
	ARO	Bank 1	Bank 2	Bank 3	Bank 4	Bank 5	Bank 6	Bank 7	Bank 8
RMS FA Power	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Max. FA Power	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
<i>k_{eff}</i> (pcm)	0.3	1.0	1.1	1.2	1.2	1.4	1.1	1.6	1.6

정상상태 계산이 NESTLE 전산코드와 비교하여 정확하게 계산되었음을 확인하고, 각 제어봉별, 제어봉 축방향 위치별 DRCF, DSCF등을 RAST-INVERSE 코드체계로 얻은 뒤 실제 측정자료를 이용하여 정적 반응도가를 계산하였다. 비교 대상은 NESTLE-RAMBO 전산체계를 이용하여 얻은 18개 정적 제어능으로 표 [2]가 이것을 요약한 것이다. RAMBO[9]는 EPRC가 개발한 역반응도 해석 및 각종 인자들을 계산하는 전산코드이다. 비교 결과 18개 제어봉 모두에 대하여 EPRC 계산 자료와 잘 일치할 뿐 아니라 규정조건을 모두 만족하고 있음을 볼 수 있었다. 이로부터 RAST-INVERSE 전산코드 체계가 적절히 개발되었음을 확인할 수 있었다.

표 [2] 노심 모델 A, B에 대한 18개 제어봉별 측정 정적 제어봉가 비교

		NESTLE-RAMBO				RAST-INVERSE			
		M	P	M-P	Error	M	P	M-P	Error
Core Model A	Bank 1	283.8	301.5	-17.7	-5.80%	285.5	300.5	-15	-5.00%
	Bank 2	648.7	651.9	-3.2	-0.50%	650.5	649.6	0.9	0.10%
	Bank 3	695.4	746.9	-51.5	-6.90%	694.7	746.2	-51.5	-6.90%
	Bank 4	580	566.8	13.2	2.30%	583.9	565.1	18.8	3.30%
	Bank 5	257.7	261.8	-4.1	-1.60%	259.8	259.6	0.2	0.10%
	Bank 6	982	1006.3	-24.3	-2.40%	980.3	1004.6	-24.3	-2.40%
	Bank 7	460.9	451.2	9.7	2.20%	464.9	449	15.9	3.50%
	Bank 8	451	451	0.0	0.00%	453.6	448.8	4.8	1.10%
	Bank 9	504.4	526.3	-21.9	-4.20%	506.9	525.1	-18.2	-3.50%
	SUM	4863.9	4963.7	-99.8	-2.00%	4880.1	4948.5	-68.4	-1.40%
Core Model B	Bank 1	397.6	409.5	-11.9	-2.90%	401	411.5	-10.5	-2.60%
	Bank 2	586	576.2	9.8	1.70%	593.5	577.7	15.8	2.70%
	Bank 3	925	954	-29	-3.00%	928.2	956	-27.8	-2.90%
	Bank 4	548.8	533.3	15.5	2.90%	553.2	535.1	18.1	3.40%
	Bank 5	201.8	198.5	3.3	1.70%	206.9	200.3	6.6	3.30%
	Bank 6	825.6	835.3	-9.7	-1.20%	833.2	836.8	-3.6	-0.40%
	Bank 7	403.1	390.1	13	3.30%	409.5	391.7	17.8	4.50%
	Bank 8	404.8	390.5	14.3	3.70%	409.9	392.1	17.8	4.50%
	Bank 9	438	474	-36	-7.60%	443.3	475.9	-32.6	-6.90%
	SUM	4730.7	4761.4	-30.7	-0.60%	4778.7	4777.1	1.6	0.00%

라. 국내 원전을 대상한 실험자료 취득 및 처리

영광 1호기 14주기는 2002. 4월, 영광 3호기 7주기는 2002. 8월에 각각 시험이 실시되었다. 자료 취득에 사용된 계측장비(DDRCs[3])는 DCRM™에서 요구하는 자료취득 구간을 만족하기 위해 따로 제작되었다. 영광 1호기의 경우 상하부 노외계측기 신호를 합산하여 취득하였고 영광 3호기의 경우는 각기 따로 자료를 취득하였다. 계측장비는 초당 100회 이상의 자료를 취득할 수 있으나 이를 평균하여 초당 1개 자료만을 이용하여 동적 반응도가를 계산하였다. 그리고 자료 취득시간을 단축하기 위해 제어봉 완전 삽입후 즉시 제어봉을 인출하도록 하였다.

마. DCRM™ 적용 및 결과

실제 적용에 앞서 모델의 정확성을 기하기 위해 ANC[10], ROCS[11] 핵설계 결과로부터 계산 노드별 핵단면적과 동특성 인자를 추려내 RAST-K 코드에 입력한 뒤 반경 방향 출력분포를 비교, 모델의 정확성을 살펴보았다. 실제 동적 제어능 측정 자료를 얻은 것은 영광 1호기 14주기와 영광 3호기 7주기 이므로, 이 두 노심의 ARO와 각 제어봉의 완전삽입시의 반경방향 출력분포를 계산하여 ANC, ROCS 결과와 각각 비교하였다. 표 [3]은 그 결과를 기술한 것이다. 영광 3호기에 비해 1호기 반경방향 출력분포가 상대적으로 큰 오차를 보인 것은 ANC의 경우 4개 면의 ADF (Assembly Discontinuity Factor)가 서로 다름에도 불구하고 RAST-K에선 노드 평균한 값으로만 쓸 수 있기 때문에 - ROCS의 경우는 4개면 ADF를 모두 쓸 수 있다 - 기인한 것으로 파악된다. 그러나 최대 절대

오차가 0.005 가까이 나타났어도 제어봉 평가치는 3 pcm 오차이내에서 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 한국표준형의 경우도 제어봉가 오차는 평균 1 pcm 에 불과하였다. 따라서 핵설계코드와 동일한 핵단면적 자료를 사용토록 하는 방법은 성공적이라 할 수 있겠다. 2개 주기에 대한 노심모델이 적절히 얻어졌다는 판단하에 3차원 노심모형 결과로부터 DRCF 및 DSCF를 각기 구하였다. 이때 INVERSE 코드는 상하부 계측기 신호의 합산과 분리를 모두 고려하도록 개정하였다.

표 [3] 정상상태 비교 결과: 영광 1호기 14주기, 영광 3호기 7주기

절대오차	영광 1호기 14주기(WH형)					영광 3호기 7주기(한국표준형)					
	ARO	CA	CB	CC	CD	ARO	R5	R4*	R3	R2	R1
RMS FA Power	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Max FA Power	0.005	0.004	0.005	0.006	0.004	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
keff (pcm)	3.43	0.0	2.0	3.0	3.0	3.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0

* 그림 [2] 반경방향 출력분포 참조

표 [4]는 각각의 경우에 있어 계산된 제어봉가를 정리한 것이다. 취득 신호의 크기가 EPRC 결과와는 달리 그 감소폭이 더 크고 제어봉 삽입시간이 길어져 취득된 자료내 노이즈가 심하며, background signal의 보정이 되지 않았기 때문에 초기 해석 결과는 정적제어봉가와 심한 경우 수백 pcm의 오차를 보였다. 그림 [3]은 배경신호의 보정에 따른 측정 제어능의 변화전도를 보여준다. 그러나 background signal을 물리적으로 처리하려면 보정에 필요한 추가적인 실험이 수반되어야 하고 그나마 정확한 보정을 기대할 수 없으며, 현재까지는 감마선에 의한 background signal의 수치해석 모델도 개발된 바 없기 때문에 보다 간편한 방식을 택하여 보정하였다. 즉, 제어봉 삽입 및 완전 인출 후 중성자속이 회복되는 시간동안에는 논리상 삽입되는 반응도가 없기 때문에 반응도값은 일정하게 나타나야 한다는 점을 이용하는 것이다. 통상 삽입시점을 기준으로 반응도가 0이 되도록 보정하므로 인출 후에도 반응도는 0이 되어야 하지만 실제로는 background signal의 영향으로 0이 되지 않는다. 따라서 이 영역의 반응도가 최소가 되도록 background signal을 반복하여 추정하는 방식을 택한 것이다.(그림 [3] 참조) 이 경우는 완전 인출 후 수십초간 취득된 자료를 사용하지만 이들의 평균값이 최소되도록 하므로 노이즈에 보다 덜 민감하게 된다. 다른 한편으론 송재승 등이 밝힌 바와 같이 완전 삽입 후 동적 반응도의 기울기 변화를 살펴보는 것도 한 방안이 될 수 있다. 이 경우는 특히 제어봉 삽입 후 즉시 인출을 시작하기 때문에(혹은 그 상태를 유지하더라도) 논리상 반응도 기울기가 완전삽입 직후 0이 되어야한다는 점을 이용한다. 그러나 이때는 취득 자료에 포함된 노이즈를 어떻게 적절히 제거(smoothing)하느냐가 관건이 된다. 노이즈가 심한 경우는 기울기 변화 역시 심하기 때문이다. 송재승 등은 함수 fitting 방법으로 노이즈를 제거하지만 전력연구원은 Fast Fourier Transform [12]에 의한 자료 평탄화 법을 도입하였다. 그러나 이 방법도 해석구간내에선 유용하지만 자료구간의 양 끝단에서 때때로 예측할 수 없는 smoothing pattern을 보이는 현상이 있어 문제점이 제기 되었다. 따라서 자료이용구간을 제한하거나 wavelet을 이용하거나 혹은 adjacent average [12]기법 등의 적용여부를 시험하고 있다. 그림 [4]는 기준 제어봉 삽입에 따른 적분제어봉가를 영광 1호기 및 영광 3호기 각 시험에 대하여 나타낸 것이다. 노이즈를 제거하기 위한 도구를 사용하였음에도 불구하고 여전히 노이즈가 문제될 수 있다는 것을 그림 [4]의 우측 영광 1호기 14주기 기준 제어봉가 평가 결과 그래프로부터 알 수 있다.

표 [4] 측정 정적 제어봉가 비교: 영광 1호기 14주기, 영광 3호기 7주기

	영광 1호기 14주기(WH형)				영광 3호기 7주기(한국표준형)			
	CA	CB	CC	CD	R5	R4	R3	SB7
NDR	279	1357	684	354	309	440	341	838
DCRM™: 정상상태	279	1359	687	351	309	441	342	837
DCRM™: 측정 정적 제어봉가	281	1353	686	351	308	440	341	835
오차(NDR-DCRM™)(pcm/%)	-2/-0.7	4/0.3	-2/0.3	3/0.8	1/0.3	0/0.0	0/0.0	3/0.4

III. 결론

전력연구원이 보유한 전산코드와 새로이 개발된 계측장비를 이용하여 동적 제어봉 제어능 측정 실험을 수행하고, 그 결과를 핵설계 보고서 자료와 비교하여 Tech. Spec.에 기술된 판정치($\pm 15\%$)이 내로 정적 제어봉가가 계산되었음을 확인하였다. Background signal 보정 방안은 방법론에 못지않게 중요한 것으로 부각되었지만, 현재까지는 물리적 보정을 위한 실험이나 해석적 모델 등이 제안된 바 없기 때문에 완전 인출 후 동적 반응도가 최소가 되도록 반복 계산하는 방법을 제안하고 이에 따라 측정 정적 제어봉가를 평가하였다. 이때 핵설계 전산코드 결과를 그대로 이용함으로써 핵 자료의 일관성 문제를 극복하고자 했다. 검증 및 실제 적용된 26개 제어능 평가 사례를 통해 개발된 RAST-INVERSE 코드체계에 의한 동적제어봉 제어능 측정 방법이 제어봉가 평가에 문제가 없다고 판단하였다. 따라서 background signal 처리와 노이즈 처리에 대해 보다 더 명확한 수학적 방안이 제시된다면 현재의 제어봉가 평가방식을 대체할 수 있을 것으로 생각된다.

References

1. Y. A. Chao, et al., "Dynamic Rod Worth Measurement," *Nucl. Tech.*, **132**, 403 (2000).
2. D. F. Kastanya, I. Ariani and P. J. Turinsky, "Verification of Dynamic Rod Worth Measurement Calculational Methodology," *Advances in Nuclear. Fuel Management. II*, Myrtle Beach, ANS, 14-65, (1997).
3. 우일탁 외, "동적 제어봉 제어능 측정장치 개발", 한국원자력학회 2002 춘계학술발표회 논문집, (2002) (발간예정)
4. 송재승 외, "영광 원자력 1호기 제 14주기 동적제어능 측정," 한국원자력학회 2002 춘계학술발표회 논문집, 제1분과(B), 54 (2002).
5. 김강석 외, "노외계측기 반응도 계산에서의 2차원 DORT 합성법과 3차원 TORT 계산 비교," 한국원자력학회 2001 춘계학술발표회 논문집 (2001).
6. 이은기 외, "비선형NEM/ANM 방법에 의한 과도상태 모사," 한국원자력학회 2002 춘계학술발표회 논문집, 제1분과(A),217, (2002).
7. 이은기 외, "NEM 기반의 비선형 유한차분법에 적용한 노심-반사체 경계조건의 과도상태 모사능력 평가," 한국원자력학회 1999 춘계학술발표회 논문집, 제 1분과(A) (1999).
8. P. J. Turinsky, et al., "NESTLE, A Few-Group Neutron Diffusion Equation Solver Utilizing the Nodal Expansion Method for Eigenvalue, Adjoint, Fixed-Source and Transient Problem," Idaho National Energy Laboratory, EGG-NRE-11406, 1994.
9. "RAMBO Version 1.0.0 Users Manual," EPRC, North Carolina State Univ. (1998).
10. Y. S. Liu, et al., "ANC-A Westinghouse Advanced Nodal Computer Code," WCAP-11596-P-A (1986).
11. "The ROCS and DIT Computer Codes for Nuclear Design," CENPSD-266-P-A, *Combustion Engineering Inc* (1983).
12. "MicrocalTM Origin[®] Ver. 6.0 : Help file," Micorocal Software, Inc. (1999)

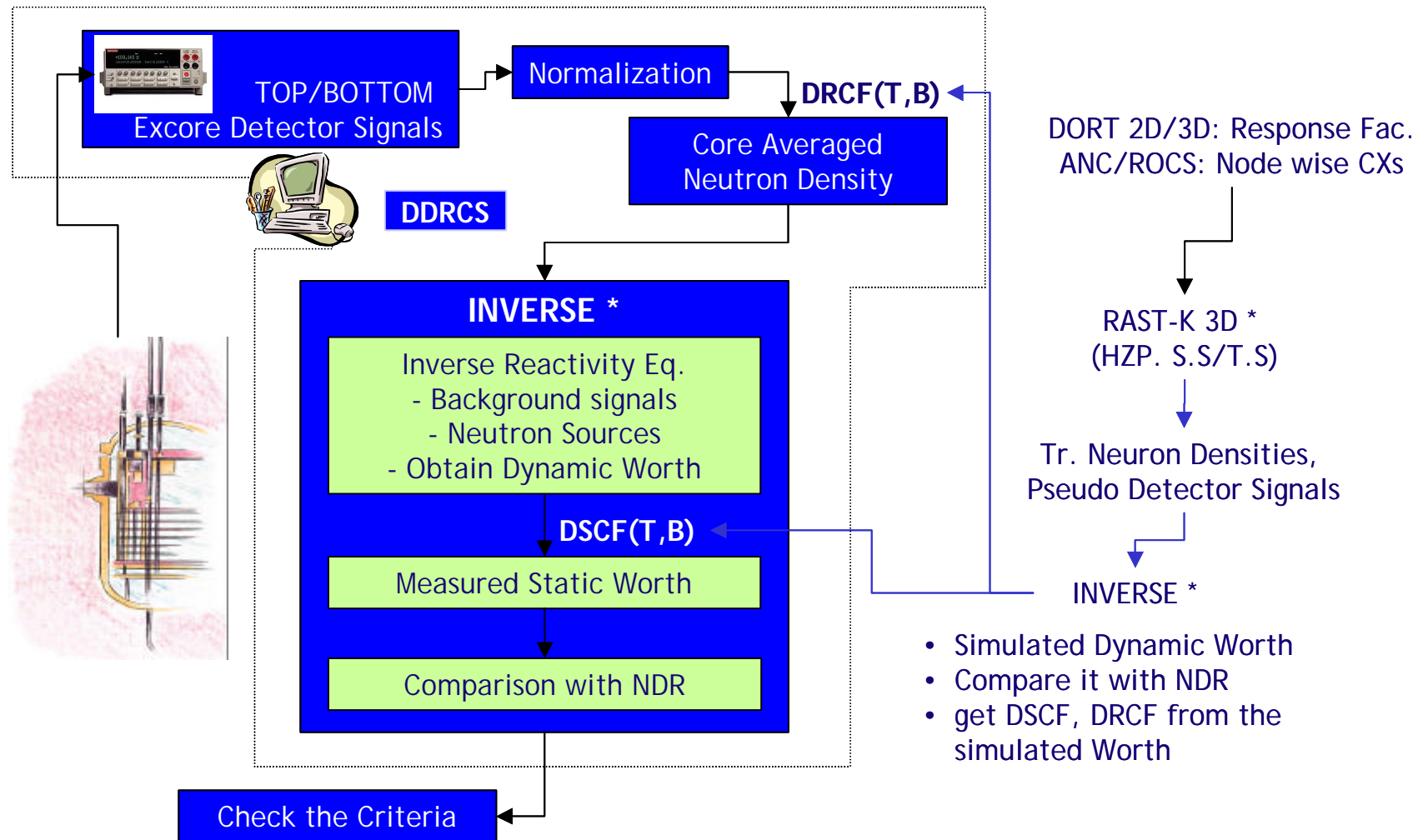


그림 [1] DCRM™ 계산 흐름도

0.826	1.114	0.959	1.245	1.237	1.340	1.082	0.746
0.826	1.114	0.959	1.245	1.236	1.341	1.081	0.746
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
1.115	1.062	1.148	1.159	1.281	1.268	1.237	0.472
1.115	1.062	1.148	1.158	1.281	1.267	1.237	0.472
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
0.980	1.152	0.864	1.177	1.235	1.319	1.002	0.368
0.980	1.153	0.864	1.177	1.235	1.319	1.002	0.368
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.246	1.162	1.179	1.200	1.312	1.245	1.122	0.283
1.247	1.162	1.179	1.199	1.313	1.245	1.123	0.283
0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1.238	1.282	1.236	1.312	1.226	1.262	0.597	
1.238	1.282	1.236	1.313	1.226	1.263	0.597	
0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	
1.341	1.267	1.319	1.244	1.262	0.535	0.219	
1.341	1.267	1.319	1.244	1.263	0.535	0.219	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	
1.082	1.236	1.002	1.122	0.597	0.219		RAST
1.081	1.237	1.001	1.122	0.597	0.219		NESTLE
0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000		DIFF(%)
0.746	0.472	0.368	0.283			MAX	0.001
0.746	0.472	0.368	0.283			AVG	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000				

0.781	1.042	0.896	1.209	1.205	1.155	0.513	0.499
0.781	1.042	0.896	1.209	1.205	1.156	0.512	0.500
0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000
1.043	0.960	0.999	1.105	1.279	1.198	1.038	0.379
1.043	0.960	1.000	1.105	1.280	1.198	1.038	0.378
0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000
0.916	1.003	0.474	1.115	1.309	1.412	1.046	0.372
0.915	1.004	0.473	1.115	1.309	1.412	1.045	0.372
0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
1.210	1.107	1.116	1.263	1.491	1.449	1.300	0.321
1.210	1.107	1.117	1.262	1.492	1.448	1.301	0.321
0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000
1.207	1.280	1.309	1.491	1.464	1.537	0.726	
1.206	1.280	1.309	1.491	1.463	1.538	0.725	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	
1.155	1.198	1.411	1.448	1.537	0.664	0.273	
1.156	1.197	1.412	1.448	1.538	0.663	0.273	
0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	
0.513	1.037	1.045	1.299	0.726	0.273		RAST
0.512	1.038	1.044	1.300	0.725	0.273		NESTLE
0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000		DIFF(%)
0.499	0.379	0.372	0.321			MAX	0.001
0.500	0.378	0.372	0.321			AVG	0.000
0.001	0.000	0.000	0.000				

1.050	1.225	1.192	1.057	1.409	1.113	0.486	
1.051	1.225	1.193	1.057	1.410	1.113	0.486	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
1.218	0.794	1.221	1.196	1.021	1.382	0.679	
1.218	0.794	1.221	1.196	1.021	1.382	0.679	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
0.795	1.286	1.149	1.337	1.393	1.248	0.371	
0.795	1.286	1.149	1.337	1.393	1.248	0.371	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
1.220	1.147	0.825	0.909	1.097	1.064		
1.220	1.147	0.825	0.909	1.097	1.064		
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
1.193	1.334	0.908	0.784	0.882	0.350		
1.194	1.334	0.908	0.783	0.882	0.350		
0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000		
1.021	1.392	1.086	0.878	0.315			
1.021	1.392	1.086	0.878	0.315			
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			
1.379	1.245	1.059	0.347				RAST
1.379	1.245	1.059	0.348				ROCS
0.000	0.000	0.000	0.000				DIFF(%)
0.677	0.370					MAX	0.075
0.678	0.370					AVG	0.000
0.000	0.000						

그림 [2]. 노심 반경방향 출력분포 비교
좌: WH형 4LOOP A형 ARO,
중간: WH형 4LOOP A형 BANK7 완전 삽입시,
우: 영광 3호기 7주기 bank 4 완전 삽입시

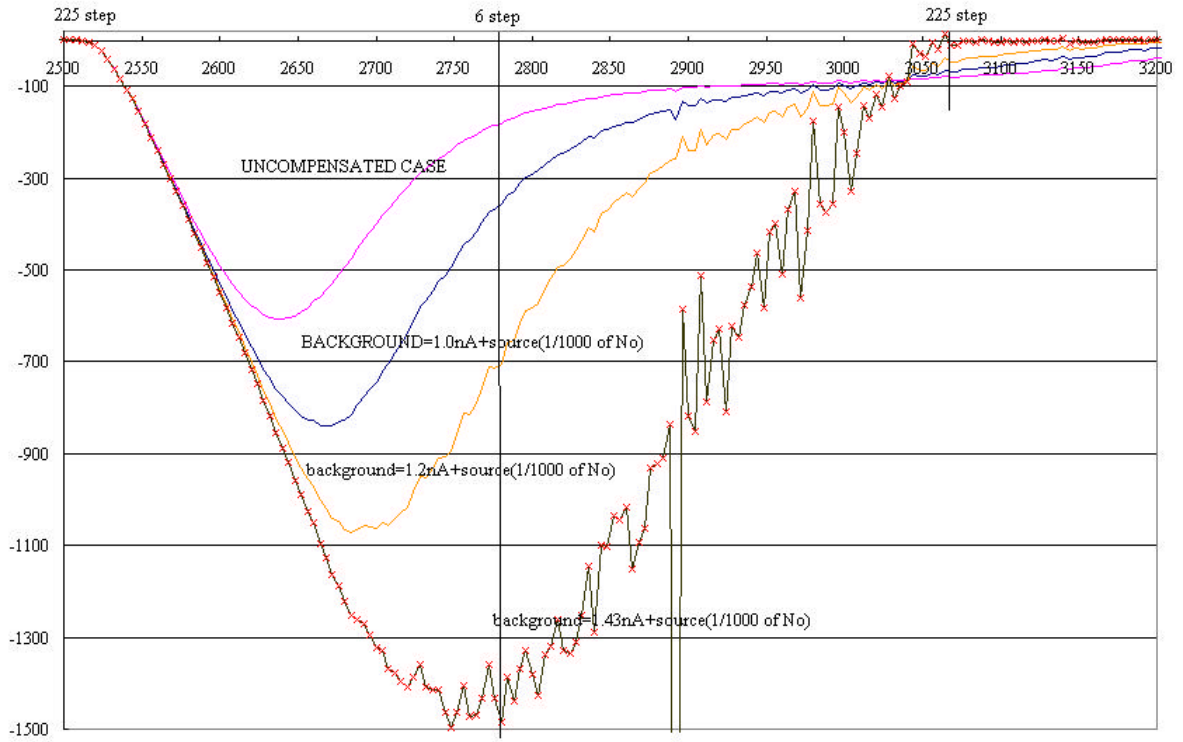


그림 [3] 영광 1호기 14주기 BANK B의 경우 background signal 보상에 따른 정적 제어봉가 비교

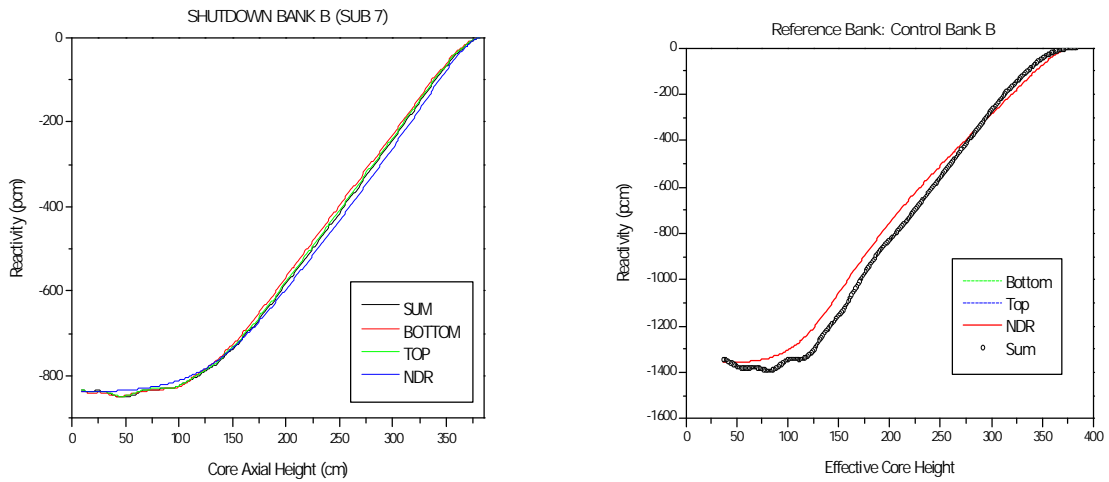


그림 [4]. 제어봉 삽입 위치별 적분제어봉가 비교

좌: 영광 3호기 7주기 기준제어봉 SB7, 우: 영광 1호기 14주기 기준제어봉 B