

《기술보고》

고리 3호기 7주기 운전자료 분석

김재학 · 이창호 · 송재웅

한국원자력연구소

(1993. 11. 26 접수)

요 약

노심설계의 검증을 통하여 설계의 신뢰성을 확인하며 이는 발전소 운전의 안전성과 경제성을 향상시킬 수 있는 발판이 된다. 본 보고서는 국산핵연료를 장전한 고리 3호기 7주기의 운전자료 중에서 핵설계와 관련한 인자의 측정치를 설계치와 비교 분석하고 평가하였다. 비교대상이 된 핵특성인자는 반응도 관련 자료인 임계봉소농도, 제어봉가, 등온온도계수 및 감속재온도계수등이고 출력분포 관련자료인 핵반응률 분포, 집합체 출력분포, 반경방향 침투출력 $F_{\Delta H}^N$, 축방향 출력분포, 축방향 침투출력 $F_q(z)$ 및 노심 평균 축방향 출력편차(AO)등이다. 이들 인자들에 대한 설계치는 측정치와 잘 일치하였으며, 모두 안전성 관련 제한치이내로 만족함을 확인하였다. 또한 이러한 비교 분석을 통하여 후속주기의 핵설계에 운전자료를 반영할 수 있는 근거를 마련하였다.

1. 서 론

일반적으로 원자력발전소를 운전하면서 운전상황을 파악하고 설계의 검증을 위하여 여러 형태의 운전자료를 취득하고 분석 평가하여야 한다. 설계의 검증은 곧 전체 노심설계의 신뢰성 확인이며 이것은 발전소 운전시 취득한 다양한 형태의 측정치와 설계치를 비교 분석하고 평가함으로써 이루어질 수 있는 것이다. 이러한 작업을 수행하기 위해서는 운전자료의 취득, 처리, 그리고 평가를 일관성 있게 진행할 효율적인 운전자료 평가체제 구축이 필요하다. 효율적인 운전자료 평가 체제를 구축하면 노심설계의 신뢰성을 향상시킬 수 있음은 물론이고 운전상황의 경제성과 안전성을 향상시킬 수 있다. 이러한 목표 아래 본 보고서는 국산핵연료가 장전되었던 고리 3호기 7주기의 운전자료 중에서 핵설계와 관련한 인자의 측정치를 설계치와 비교 분석하고 평가한 결과를 수록하였다.

고리 3호기 7주기는 한국원자력연구소가 독자설계^[1]하여 국산핵연료가 두번째 장전된 천연노심으로 웨스팅하우스핵연료인 WSTD와 WOFA가 각각 4개와 57개,

국산핵연료는 기연소핵연료 48개와 신연료 48개가 장전되었으며^[2], 1992년 2월 17일 임계에 도달하여 1992년 12월 21일 최종 연소도 12225 MWD/MTU로 정상운전 정지되었다. 국산핵연료는 이전주기까지 장전된 핵연료(웨스팅하우스의 WOFA 핵연료)와는 핵적 관점에서 상이한 점이 많다. 즉 핵연료 소결체 및 피복관의 기하학적 특성, 가연성 독봉의 형태 등이 다르다.^[2] 따라서, 국산핵연료 장전노심에 대한 핵특성 파악을 위해 운전자료 분석은 많은 관심의 대상이 되고 있다.

원자력 발전소 운전을 통하여 생산되는 핵설계 관련 운전자료는 크게 나뉘어 반응도 관련 자료와 출력분포 관련 자료이다. 반응도 관련 자료는 노심의 잉여반응도 정도를 나타내는 임계봉소농도 자료가 있으며 이는 발전소에서 수시로 생산하고 있다. 영출력 노물리시험시 측정하는 자료로는 제어봉가(Control Rod Worth), 등온온도계수(Isothermal Temperature Coefficient : ITC)가 있다. 또한 주기후반에 노심의 봉소농도가 약 300ppm 일 때 감속재온도계수(Moderator Temperature Coefficient : MTC)를 측정한다. 이밖에 운전중의 출력, 제어봉위치, 냉각재온도와 봉소농도 등의 자료

도 반응도 관련 자료이며 특히 운전과도현상시의 이들 값은 중요한 반응도 관련 정보이다. 출력분포 자료는 노 외계측기(Excore Detector)를 통하여 운전중 연속적으로 얻는 축방향 출력편차(Axial Flux Difference)와 노내계측기(Incore Movable Detector)로 대략 한달에 한번 정도 측정되는 노내 3차원 출력분포이다. 이외에 열전대(Thermocouple)로 측정되는 노심 출구 냉각재온도도 집합체별 출력분포와 관련된 정보를 제공한다.

위에서 열거한 여러가지 운전자료에 대하여 고리 3호기 7주기 노심을 대상으로 반응도 관련 자료 분석 결과를 제 2장에서 논의하였고, 출력분포 관련 자료 분석 결과를 제 3장에 수록하였다. 마지막장에는 결론 및 논의에 대하여 간단히 기술하였다.

2. 노심의 반응도 분석

원자력발전소 운전을 통하여 생산되는 노심의 반응도

표 1. Summary of Startup Measurements

Item	Designed (D)	Measured (M)	Deviation (D-M)	Criteria	Satisfied
End – Point Boron Concentration (ppm)					
ARO	1582	1610	-28	D-M < 50 ppm	OK
CB-in	1451	1482	-31		
Isothermal Temp. Coef. (pcm /°C)					
ARO	-0.93	-1.162	0.232	D-M < 3.6	OK
Moderator Temp. Coef. # (pcm /°C)					
ARO	2.28	2.048	N / A	< +9	OK
Bank Worth (pcm)					
Ref. Bank : CB	1132	1053	79 (7%)	Ref. Bank : D-M < 0.1 *D	OK
Test Banks : CD	494	497	-3 (1%)	Test Banks: D-M < 0.15*D or D-M < 100	OK
: CA	655	579	76 (12%)		
: SD	605	682	-77 (13%)		
: SC	392	408	-16 (4%)		
: SA	900	795	105 (12%)		
Total Worth	4178	4014	N / A	M > 0.9*D	
# : MTC=ITC-DTC					
MTC : Moderator Temperature Coefficient					
ITC : Isothermal Temperature Coefficient					
DTC : Doppler Temperature Coefficient					
DTC=-3.21 pcm /°C at Hot Zero Power, ARO & Din (Design Value)					

관련 인자는 임계붕소농도, 제어봉가, 등온온도계수, 감속재온도계수 및 출력계수 등이다. 이들 핵특성 인자는 정상 및 비정상적인 노심조건의 변화에 따른 노심의 핵특성 변화가 각 요인별로 정량화된 값들로서 노심의 제어, 주기길이 예측, 그리고 노심의 안전성 확인 등을 위한 중요 정보가 되고 있다.

2.1. 임계붕소농도

임계붕소농도 자료는 크게 기동(Startup Operation)시의 임계붕소농도와 출력운전중의 임계붕소농도 등 두가지로 나뉠 수 있다. 기동시에 측정되는 임계붕소농도는 주기연소도 예측의 척도가 되는 것으로 영출력 노물리시험시에 측정토록 ANSI-19.6.1-1985^[3]에서 제안된 항목이다.

고리 3호기 7주기 노심에 대한 영출력 노물리시험 결과가 표 1에 요약되어 있다. 표 1에 나타낸 바와 같이 붕소농도(End-Point Boron Concentration)의 경우 제어봉 완전 인출 및 기준 제어봉(Control B-Bank) 삽입 등의 조건하에서 모두 기준치 이내로 조건을 만족하였으며, 전체적으로 측정치가 설계치보다 약 30 ppm 내외로 크게 예측하고 있다.

한편, 출력운전중의 붕소농도는 ANSI-19.6.1-1985

에서 허용기준(± 50 ppm)을 제시하고 있고, 발전소의 기술지침서(Technical Specifications)^[4]에는 붕소농도를 측정하여 설계치와 비교하고 노심의 반응도로 환산하여 그 차이가 1000 pcm을 넘지 않도록 제한하고 있다. 이때 노심의 반응도는 붕소농도의 차이에 핵설계 보고서로부터 얻은 미분붕소제어능(Differential Boron Worth)을 곱하여 환산한다. 미분붕소제어능은 붕소농도의 크기에 따라 다르며 고리 3호기 7주기의 경우 전출력(Hot Full Power : HFP), 전제어봉인출(All Rod Out : ARO), 평형제논 상태에서 주기초(240 MWD/MTU), 주기중(6100 MWD/MTU) 및 주기말(11900 MWD/MTU)의 값이 각각 -8.36, -8.85 및 -9.76 pcm/ppm이다^[2]. 고리 3호기 7주기의 연소진행에 따른 임계붕소농도의 측정치 및 설계치를 표 2와 그림 1에 비교하였다. 표 2의 CBm은 측정치(HFP, ARO, Eq. Xe 조건으로 환산된 값)이고, CBc는 현재 교체노심 핵설계에 사용되고 있는 SAV79A 전산체계^[5]로 부터 계산된 설계치^[2]이다. 표 2의 오른쪽 끝에는 임계붕소농도에 대한 측정치와 설계치의 차이를 나타낸 것인데 주기중반(약 4000 MWD/MTU)에 약 53 ppm의 붕소농도 차이를 보였으나 노심의 반응도로는 500pcm 이내이므로 주기중 모두 기술지침서의 제한치를 만족하였다.

표 2. Critical Boron Concentration vs. Cycle Burnup

Burnup (MWD/MTU)	Critical Boron Concentration(ppm)		
	CBm	CBc	CBm-CBc
1026	1007.9	990.8	17.1
2163	921.2	890.0	31.2
3219	829.6	789.3	40.3
4071	759.8	706.9	52.9
5005	664.9	616.0	48.9
6060	561.8	514.8	47.0
7197	448.6	409.4	39.2
8049	363.6	334.0	29.6
9168	263.0	238.3	24.6
10020	189.0	167.5	21.5
11440	55.9	49.4	6.4

CBm : measured Critical Boron Concentration

CBc : calculated Critical Boron Concentration

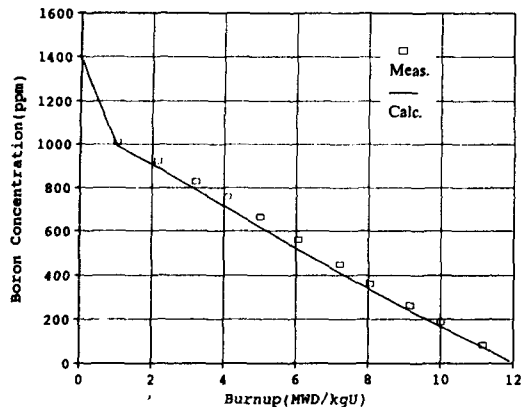


그림 1. Comparison of Critical Boron Concentration

2.2. 반응도계수

원자력발전소 운전중 측정되는 반응도계수는 영출력 노물리시험시의 등온온도계수(ITC), 주기말 근처로서 붕소농도가 약 300ppm인 노심에서의 감속재온도계수(MTC), 그리고 주기초 출력상승중에 수행하는 출력계수 등이다. 일반적으로 출력계수 측정은 제어군의 위치를 고정하고, 붕소농도를 일정하게 유지시킨 상태에서 터빈출력을 조절하여 노심열출력을 변화시킨 다음 그에 따른 냉각재계통의 평균온도를 측정하여 출력계수 확인 인자($\Delta T_{avg} / \Delta p$)를 구함으로써 이루어진다. 그러나 고리 3호기 7주기의 경우는 출력계수가 측정되지 않았으므로 본 보고서에서는 기술하지 않기로 한다.

영출력 노물리시험시의 등온온도계수 측정은 이차측의 증기량을 조절함으로써 냉각재 및 핵연료 온도변화를 야기시켜 이에따른 반응도 변화를 분석하는 것이다. 이 등온온도계수는 핵설계 타당성 확인을 위한 것이지만 $MTC = ITC - DTC$ 의 관계식으로부터 감속재온도계수에 대한 안전성 확인시험^[6]도 포함하고 있다. 고리 3호기 7주기에 대한 이들 인자의 측정치와 설계치를 제어봉 완전인출 및 D 제어봉삽입 두가지 경우에 대하여 표 1에 나타내었다. 표 1에서 두 경우 모두 기준치 이내로 조건을 만족시켰음을 알 수 있다. 한편 주기말 근처에서 붕소농도가 약 300 ppm 일때의 MTC 측정은 주기말에 SLB사고시 냉각재온도의 냉각에 따른 반응도 주입이 MTC에 의해 주도됨으로 SLB사고 해석시 사용된 MTC 제한치를 실측자료로부터 검증하기 위하여

수행된다. 따라서 이 주기말 근처의 MTC를 측정하여 기술지침서^[4]의 제한치($-48.6 \text{ pcm}/^{\circ}\text{C}$)보다 더 크기가 작은 값(less negative MTC)으로 나타날 경우는 SLB사고에 대한 노심의 안전성이 확인된다. 만약 그 제한치를 만족시키지 못할 경우는 적어도 약 2주(14EFPD)에 한번씩은 재측정하여 주기말 제한치($-71.3 \text{ pcm}/^{\circ}\text{C}$)와 비교하여야 한다. 출력 운전중 MTC 측정은 원자로냉각재계통(RCS)의 냉각수 누설률에 따라 연소도이용법 및 붕소주입/희석법으로 나뉘지만 고리 3호기 7주기의 경우는 RCS 냉각수 누설률이 작을 경우(1 gpm 이하)에 사용되는 연소도이용법에 따라 측정하였으며 그 결과는 아래와 같이 제한치를 만족시키고 있다.

MTC _M (300ppm)	MTC _L (300ppm)	MTC _L (EOL)
$-46.2 \text{ pcm}/^{\circ}\text{C}$	$-48.6 \text{ pcm}/^{\circ}\text{C}$	$-71.3 \text{ pcm}/^{\circ}\text{C}$

여기서 하첨자 M은 측정치를, 하첨자 L은 제한치를 의미한다.

2.3. 제어봉가

제어봉은 잘 알려진 바와 같이 급격한 출력변화를 제어하며 원자로를 정지시키는 역할뿐만 아니라 여러 가지 원자로심의 조건 변화에 따른 반응도 변화를 제어하기 때문에 노심 운전중 가장 중요한 인자중 하나이다. 따라서 영출력 노물리시험중 임계붕소농도와 ITC 등과 함께 주된 관심의 대상이 되고 있다.

고리 3호기 7주기의 영출력 노물리시험시 제어봉가 측정은 C-E사의 Swap 방법^[7]을 이용하여 수행되었다. 결과는 표 1과 같이 각 제어봉에 대하여 수록하였다. 측정치에 대한 설계치의 상대차이 기준이 기준제어봉의 경우는 10%이내, 다른 제어봉의 경우는 15%이내(혹은 100 pcm 이내)로 되어 있다. 기준제어봉인 B-Bank의 제어봉가는 설계치와 측정치의 차이가 79 pcm으로 상대차이로 환산할 경우 약 7%로 비슷하고 다른 제어봉들도 모두 기준을 만족하였다.

3. 노심의 출력분포 분석

출력분포자료는 서론에서 언급한 바와 같이 노의 계측기, 노내계측기, 그리고 열전대등으로부터 얻어

진다. 고리 3호기 7주기의 경우 열전대로부터 측정된 자료는 확보되지 않아 여기서는 논의하지 않기로 한다.

원자로 운전중에는 노내계측기에 의해 교정된 노외계측기에서 나온 축방향 출력편차(Axial Offset : AO)와 출력준위를 포함하여 냉각재온도, 제어봉위치 등이 연속적(on-line)으로 측정되므로 전반적인 노심의 거동을 파악하는데 가장 중요한 인자들이다. 따라서 고리 3호기 7주기 운전중 그들 인자들에 대한 변화 추이를 파악할 수 있도록 그림 2에는 출력을 그림 3에는 D-Bank 위치를 그림 4에는 축방향 출력편차를 각각 나타내었다. 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 주기중 무정지 운전이었고 주기말에는 약 5일간의 감발운전을 하고 정상운전이 정지되었다. 그림 4에 나타나 있듯이 전체적으로 축방향 출력 편차는 연소가 진행될수록 음의 값을 갖게 됨을 알 수 있다. 노내계측기에 의한 노심의 출력분포 측정은 기동시 저출력(less than 30% of full power)에서 중성자 속분포의 반경방향에 대한 대칭성(azimuthal symmetry)을 확인하기 위한 것과 고출력(more than 40% of full power)에서 원자로 운전중 출력분포에 대한 핵설계의 타당성 및 침투출력의 제한치^[4]부과 여부 등을 확인하고 노외계측기에 대한 교정작업을 위하여 수행된다. 또한, 이와 관련하여 측정 출력분포는 웨스팅하우스 가압경수로의 경우 Constant Aial Offset Control(CAOC) 방법으로 운전되므로 target axial offset을 제공하고, 출력 편차(AO) 및 연소도 분포등을 산출할때도 이용되고 있다. 기동시 노심의 저출력 분포 측정은 출력 침투 계수, 상하부 및 사분면에 대한 출력편차등을 측정하여 핵설계 예측치와 비교 확인하고 이후의 출력상승시의 출력분포를 예측하여 안전한 출력상승 및 운전을 보장하기 위하여 실시한다. 이러한 목적으로 기술지침서에서는 출력분포에 관한 제한치를 Total Heat Flux Hot Channel Factor(F_q), Enthalpy Rise Hot Channel Factor($F_{\Delta H}^N$), Quadrant Power Tilt Ratio(QPTR), Axial Flux Difference(AFD)에 대해 규정하고 있다. 고리 3호기 7주기의 경우 기동시 저출력에서의 측정자료는 아래와 같으며 모두 제한치를 만족하고 있다.

출력분포	F_q		$F_{\Delta H}^N$		QPTR	
노심출력 측정치	제한치	측정치	제한치	측정치	제한치	
36%	2.2036	4.600	1.5327	1.7761	1.0102	1.02
75%	2.017	3.067	1.4600	1.6018	1.0091	1.02
100%	1.9235	2.300	1.411	1.490	1.0063	1.02

사분면출력경사도는 기술지침서^[4]에 규정된 출력분포에 관한 제한치중 하나이며, 50%이상의 출력에서 노심사분면 출력경사도가 1.02를 넘지않도록 제한하고 있는데 고리 3호기 7주기는 이를 잘 만족하고 있다. 한편 고리 3호기의 경우 노내 157개 집합체중 계측관이 있는 집합체는 그림 5에서 보는 바와 같이 50개이다. 그러나, 일부 계측관의 불량 또는 기타 원인모를 이유등으로 계측기의 계측관내로의 삽입이 양호치 않을 경우 계측기 보호를 위해 50개 계측관 모두에 대한 핵반응률 자료를 구할 수 없다. 기술지침서^[4]에는 전체 계측관의 75%(38개) 이상의 계측관 자료와 각 사분면당 적어도 2개의 계측관 자료가 있어야 측정 출력분포자료 생산이 가능하다고 제한하고 있다. 고리 3호기 7주기의 경우에도 표 3에 나타낸 바와 같이 측정시점에 따라 사용가능한 계측관에서 핵반응률을 측정하여 그에 대한 자료로 부터 측정 출력분포를 산출하였다.

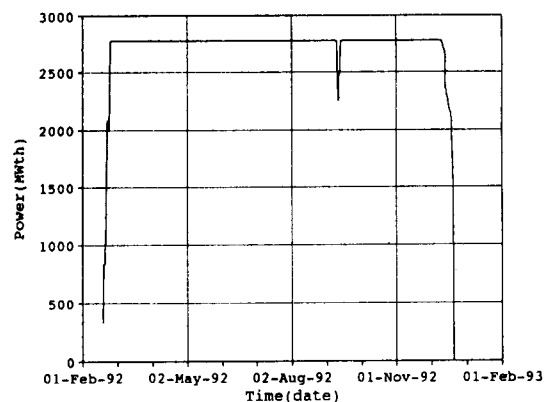


그림 2. Reactor Power

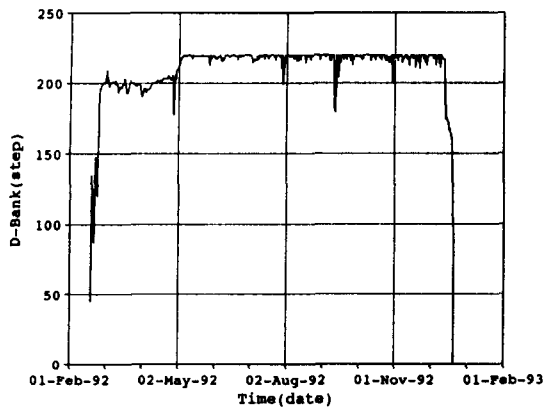


그림 3. D-Bank Position

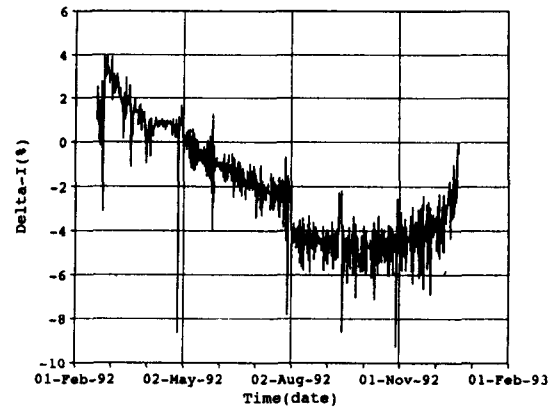


그림 4. Axial Power Difference (Axial Offset)

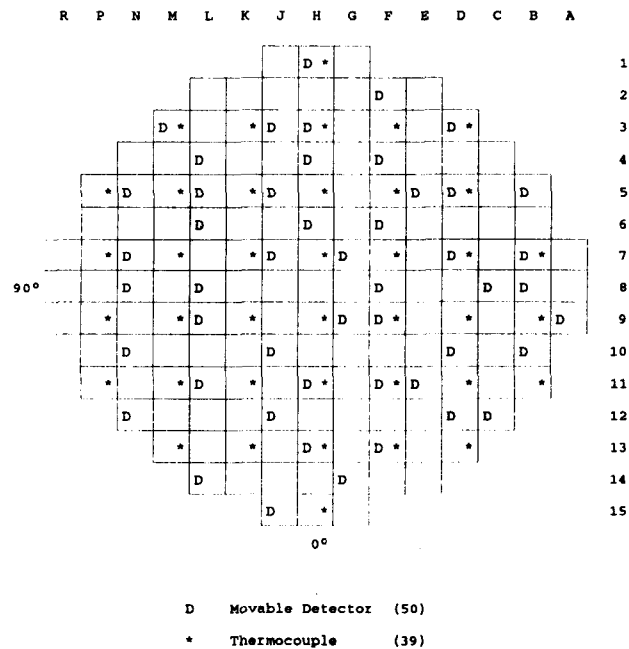


그림 5. Thermocouple and Incore Movable Detector Locations

3.1. 측정 출력분포와 해석적상수

측정 출력분포는 노내계측기로부터 측정된 핵반응률과 설계측의 노심 설계 전산코드로 계산된 해석적 상수(INCORE 상수) 등을 INCORE^[8] (울진 1,2

호기는 CARIN) 전산코드에 입력시켜 핵반응률과 집합체 출력의 단순 비례관계식을 이용하여 처리된 것이다.^[9] INCORE 코드는 노내계측기로부터 측정된 핵반응률 분포와 노심 설계 정보인 노심출력분포 계산용 해석적 상수를 이용하여 출력분포와 관련된

노심 특성인자를 추론하는 기능을 가지고 있다. 해석적상수는 노내 계측기로 핵반응률을 측정하는 지역이 노심의 일부(고리 3호기는 50개 계측관)로 한정되어 있으므로 그 측정 자료를 사용하여 전 노심의 출력분포를 산출하기 위하여 필요하다. 그러나 핵반응률과 집합체 출력은 단순 정비례하지 않을뿐 아니라 핵반응률은 한정된 계측관에 대해, 집합체 출력은 노심전체에 대해 규격화(normalization) 되기 때문에 측정 출력분포의 신뢰도를 높이기 위해서는 해석적상수가 정확히 계산되어야함은 물론이고 핵반응률 측정 및 분석. 평가시에도 측정된 계측관 위치를 고려하여야 할 필요가 있다.

3.2. 반경방향 출력분포

반경방향 측정 출력분포와 관련된 인자는 핵반응률분포, 집합체 출력분포, 반경방향 침투출력, 그리고 노심사분면 출력경사도등이다.

일반적으로 노내계측기로 측정된 핵반응률 자료중 출력률이 90%이하이고 D 제어봉의 위치가 200step 아래의 조건인 경우는 설계치와의 비교를 위해 적절치 않으므로 분석대상에서 제외시킨다. 왜냐하면 설계치는 출력 100%, 전 제어봉 인출 상태를 묘사하기 때문이다. 그러나 노심연소도에 대해서는 측정시 연소

도 전후의 설계치를 내삽하여 측정치 연소도와 동일한 연소도에 대한 설계치를 구한다. 핵반응률은 노내 계측기로 측정된 위치에 대해서만 측정치와 설계치를 비교하므로 그들 위치에 대해서는 비교적 정확히 차이를 분석할 수 있을 것으로 판단된다. 표 3에 핵반응률의 측정치와 설계치를 비교하여 요약한 결과를 수록하였다. 표 3에 나타난 바와 같이 주기 전체를 통하여 측정치에 대한 설계치의 평균오차는 0.25%이고 오차의 최대 양의 값과 음의 값은 각각 7.10%, -7.10%이다. 여기서 주기 전체에 대한 평균오차는 각 측정연소도의 측정 자료수로 가중하여 구하였다.

앞에서 기술한 바와 같이 노내 계측기로 측정된 일부 집합체들의 안내관 내부에서의 반응률과 해석적상수로부터 INCORE Code를 사용하여 노심 전체의 집합체 측정출력 분포를 산출한다. 설계치와 측정치의 노심조건은 위의 “핵반응률 분포”에서 기술한 것과 같으며 비교결과를 표 4에 요약하였다. 표 4에 요약된 바와 같이 주기 전체를 통하여 측정치에 대한 설계치의 평균오차는 0.13%이고 오차의 최대 양의 값과 음의 값은 각각 6.93%와 -5.88%이다. 또한 표준편차의 최대값은 연소도 3848 MWD/MTU에서 2.50%이다. ANS/ANSI-19.6.1^[3]에 따르면 측정된 각 집합체의 출력오차가 10% 이내이고 이들 오차의 표준편차가 5%이내이면 설계치와 측정치가 잘 일치

표 3. Summary of Comparison of The Measured and Calculated Reaction Rate

Burnup (MWD/MTU)	No. of Detector Points	(Measured - Calculated) / Calculated			
		Average Error(%)	Max Positive Error(%)	Max Negative Error(%)	Error St. Devi.
1412	48	0.25	7.10	-6.20	2.99
2670	47	0.14	5.70	-4.10	2.04
3848	44	0.27	6.50	-7.10	3.79
5066	48	0.17	4.90	-3.50	2.29
6366	50	0.17	3.90	-2.50	1.60
7582	48	0.30	4.70	-2.90	1.79
8823	48	0.42	7.10	-2.70	2.38
10122	59	0.26	4.30	-3.00	1.82
11301	52	0.28	6.10	-3.80	2.26
Total	444	0.25	7.10	-7.10	

하는 것으로 기준을 삼고 있는데 고리 3호기 7주기 노심은 이 기준치를 잘 만족시키고 있음을 알 수 있다.

반경방향 첨두출력, $F_{\Delta H}^N$ 은 연료봉 출력을 노심 평균 출력으로 나눈 값이다. 설계치와 측정치의 노심 조건은 위의 “핵반응률 분포”에서 기술한 것과 같다. 노내 계측기로 측정된 일부 집합체들의 안내관 내부에서의 반응률은 INCORE Code에 의해 노심 전체 집합체 내부의 연료봉 출력분포로 환산되는데 모든

연료봉에 의하여 구하여지지는 않고 각 집합체별로 첨두 출력이 예상되는 수 개의 연료봉만을 선택하여 $F_{\Delta H}^N$ 값을 제공하게 된다. 이러한 $F_{\Delta H}^N$ 값들을 각각의 집합체 별로 최대 $F_{\Delta H}^N$ 값을 갖는 한 개의 연료봉만을 선택한 측정값들과 이에 대응하는 설계값을 비교한 결과를 표 5에 수록하였다. 표 5에 나타난 바와 같이 주기 전체를 통하여 측정치에 대한 설계치의 평균 오차는 0.08%이고 오차의 최대 양의 값과 최대 음의 값은 각각 7.11%와 -5.65%이다.

표 4. Summary of Comparison of The Measured and Expected Assembly Power

Burnup (MWD/MTU)	(Measured - Calculated) / Calculated			
	Average Error(%)	Max Positive Error(%)	Max Negative Error(%)	Error St. Devi.
1412	0.08	6.93	-3.82	2.21
2670	0.02	5.59	-4.22	1.60
3848	0.14	6.59	-5.88	2.50
5066	0.10	4.92	-3.01	1.52
6366	0.09	4.01	-2.41	1.30
7582	0.17	4.61	-2.19	1.43
8823	0.23	6.92	-2.69	1.89
10122	0.17	4.46	-2.57	1.44
11301	0.17	5.66	-3.28	1.67
Total	0.13	6.93	-5.88	

표 5. Summary of Comparison of The Measured and Expected $F_{\Delta H}^N$ of Peak Pin in Assemblies

Burnup (MWD/MTU)	(Measured - Calculated) / Calculated			
	Average Error(%)	Max Positive Error(%)	Max Negative Error(%)	Error St. Devi.
1412	0.22	7.11	-4.15	1.81
2670	0.15	3.48	-3.10	1.29
3848	0.26	5.48	-5.65	1.96
5066	0.09	3.74	-2.71	1.29
6366	0.00	2.92	-2.09	0.99
7582	0.05	4.16	-2.00	1.08
8823	0.04	6.65	-2.23	1.36
10122	-0.03	3.78	-3.00	1.10
11301	-0.08	3.72	-3.82	1.32
Total	0.08	7.11	-5.65	

3.3. 축방향 출력분포 및 침두출력

3.3.1. 축방향 출력분포

노내계측기의 측정 해반응률 자료를 사용하여 INCORE Code로 얻은 축방향 출력분포의 측정치와 노심설계코드인 MEDIUM의 3차원 연소 계산으로 구한 설계치를 주기초, 주기중, 주기말에 대하여 그림 6~8에 나타내었다. 측정치 분포의 축방향 중간 중간에 약간씩 함몰(sinking)된 곳이 spacer grid의 위치이다. 그림에 나타난 일반적인 경향은 시각적으로 뚜렷이 나타나지 않을 정도로 측정치와 설계치가 매우 유사하지만 측정치가 주기초에는 상대적으로 약간 노심 상부쪽으로 주기말로 갈수록 약간 하부쪽으로 기울어져 있다. 전체적인 형태는 주기초에는 cosine함수 모양에서 연소도의 증가에 따라 노심 하부쪽에 침두 출력이 나타나는 saddle type으로 변해가는 경향을 보여주고 있다.

3.3.2. 축방향 침두출력

축방향 침두 출력 $F_q(z)$ 은 노심 축방향을 따라 연료봉의 최대 국부 출력을 노심 전체 평균 연료봉 출력으로 나눈 값으로, 정상 출력 운전중 기술지침서^[4]의 제한조건 만족여부를 확인하기 위한 것이다. 축방향 침두 출력의 만족여부 확인을 위한 방법으로는 설

계측에서 제공하는 $F_{xy}(z)$ 와 $W(z)$ 함수등을 이용하는 두가지 감시방법이 있는데 고리 3호기는 후자의 경우를 사용하고 있다. 정상운전시 발생할 수 있는 제어봉삽입, 출력준위의 변화 및 제논과도로 인한 $F_Q(z)$ 의 증가인자($W(z)$)를 설계측에서 제공하고, 평형상태(HFP, ARO, ΔI)에서 측정된 $F_Q^M(z)$ 와 해석적으로 구한 $W(z)$ 의 곱이 기술지침서의 제한치를 만족시킴을 확인하는 것이다.

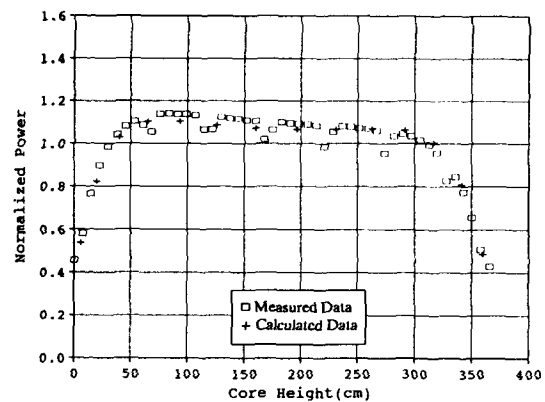


그림 7. Axial Power Distribution
(Burnup(MWD/MTU): Meas.= 6366, Pred.=6100,
D-Bank(step) : Meas.= 215, Pred.=ARO,
Axial Offset(%) : Meas.= -3.457, Pred.= -2.066)

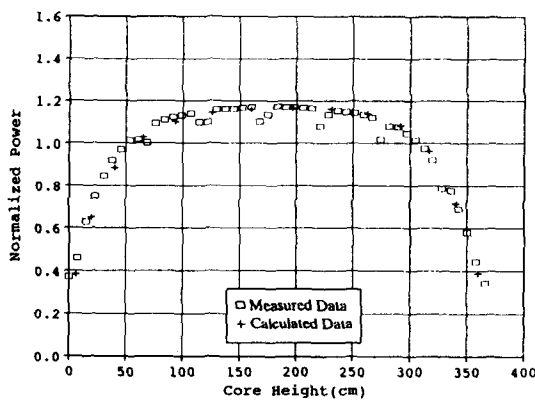


그림 6. Axial Power Distribution
(Burnup(MWD/MTU): Meas.= 1412, Pred.=1627,
D-Bank(step) : Meas.= 199, Pred.=ARO,
Axial Offset(%) : Meas.= -0.971, Pred.=0.318)

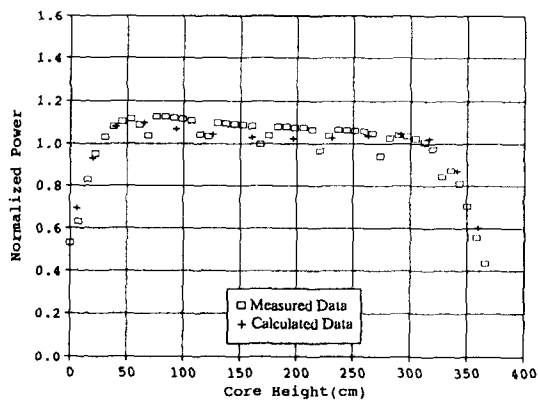


그림 8. Axial Power Distribution
(Burnup(MWD/MTU): Meas.= 11301, Pred.=11306,
D-Bank(step) : Meas.= 214, Pred.=ARO,
Axial Offset(%) : Meas.= -3.453, Pred.= -2.311)

즉, $F_Q(\text{LOCA}) * K^L(z) \geq F_Q^M(z) * W(z)$, 여기서 $F_Q(\text{LOCA})$ 는 2.3이며 $K^L(z)$ 는 축방향(z)의 함수로 규격화한 침투출력 제한치이다.

본 보고서에서는 측정 핵반응물과 해석적 상수를 이용하여 INCORE코드에서 측정불확실도 및 가공오차(manufacturing tolerances)등을 고려하여 산출된 축방향 침투출력분포를 각 주기연소도에 따라 기술지침서의 제한치와 비교한 결과를 그림 9~11에 나타냈다. 또한 연소도가 증가함에 따라 그림 6~8에 나타난 축 방향 출력 분포들과 매우 유사한 형태를 갖고 있고, 침투 출력이 발생하는 위치는 노심 중앙에서 노심 하부로 이동함을 볼 수 있다.

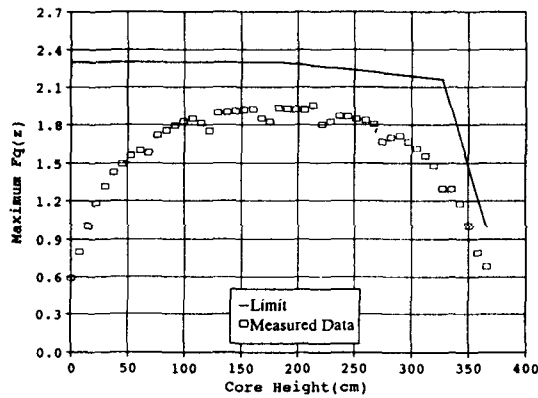


그림 9. Maximum $F_q(z)$ Distribution
(Meas. :BU(MWD/MTU)=1412,
D-Bank=199, A.O.(%)=-0.971)

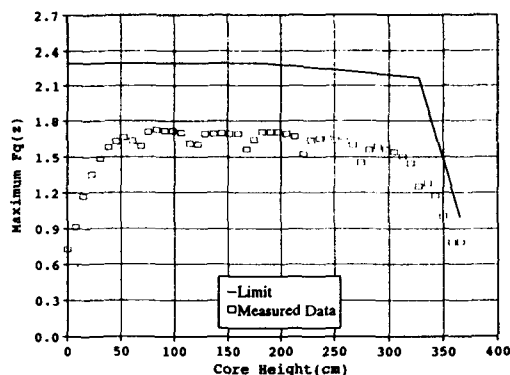


그림 10. Maximum $F_q(z)$ Distribution
(Meas. :BU(MWD/MTU)=6366,
D-Bank=215, A.O.(%)=-3.457)

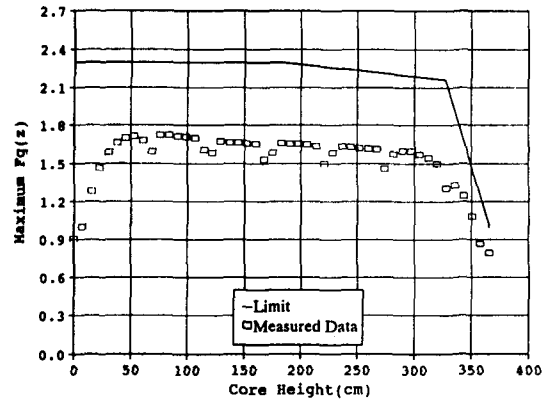


그림 11. Maximum $F_q(z)$ Distribution
(Meas. :BU(MWD/MTU)=11301,
D-Bank=214, A.O.(%)=-3.453)

3.3.3. 노심 평균 축방향출력편차

노심 평균 축방향출력편차(AO)는 앞에 기술한 출력분포 관련 여러 인자와 함께 INCORE Code로 부터 얻을 수도 있지만 노내계측기에 의해 교정된 노외 계측기에 의해 운전중 연속적(on-line)으로 얻을 수 있다. 따라서 노외계측기에 의한 노심 평균 축방향출력편차는 출력준위, 냉각재온도, 계통압력, 그리고 제어봉위치등과 함께 운전중 노심의 거동을 파악하는데 가장 중요한 인자이며, 과온도 온도차 ($OT\Delta T$) 및 과출력 온도차 ($OP\Delta T$)등의 안전 제한치 설정에 입력자료로도 사용된다. 측정된 노심 평균 축방향출력편차는 노심의 여러가지 해석, 물리적 특성 변화가 반영된 반면, 계산치는 그들 변화가 모두 고려될 수 없으므로 직접적인 비교는 어려울 것으로 판단된다. 그러나 대략적인 비교를 통하여 전체적인 운전추이를 살펴보기 위하여 그림 12에 측정치와 노심설계 코드인 MEDIUM의 3차원 계산으로 부터 나온 계산치를 비교하였다. 연소가 진행될수록 측정치가 계산치보다 작게 나타나며, 주기중반 이후(6000 ~ 9000 MWD / MTU)에서 약 1.3% 차이로 가장 큰 차이를 보였다. 이러한 원인중 하나는 연소계산시 노심 조건을 제어봉 완전인출상태로 놓고 계산하였기 때문으로 사료된다. 왜냐하면 발전소는 제어봉이 어느

정도(ARO~200step) 삽입되어 운전되기 때문에 노심하부의 연소도가 계산치보다 실측치가 더 크게 된다. AO는 노심의 상태나 Xenon Oscillation에 의해 민감한 반응을 보이므로 그림 12에 나타난 측정치와 설계치의 관계가 일반적인 경향은 아니며 다만 AO값이 주기말로 갈수록 음의 값을 갖는 운전추이를 보이고 있음을 확인할 수 있고 측정치와 설계치의 차이가 2%이내로 예측되었음을 알 수 있다.

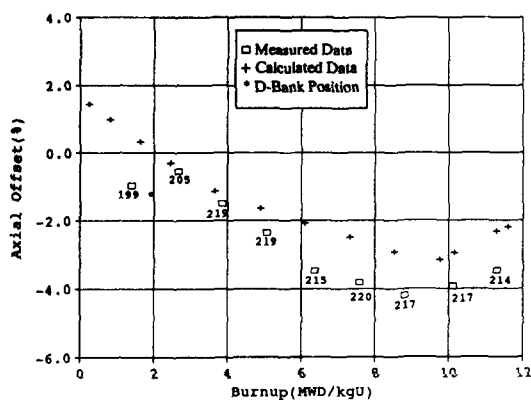


그림 12. Axial Offset Variation (Calc: D-Bank=ARO)

4. 결론 및 논의

가압경수형 국산핵연료가 장전된 고리 3호기 7주기 노심에 대한 운전자료 분석결과 제 2, 3장에 기술한 바와 같이 노심반응도 및 출력분포 관련인자에 대해서 비교적 정확히 예측하고 있으며 관련 안전제한치를 모두 만족시키고 있다. 노심의 전체 반응도변화를 나타내는 임계붕소농도는 영출력 및 출력운전중

모두 약 30ppm 정도 측정치보다 낮게 예측하고 있어 이에 대한 검토가 필요할 것으로 사료된다. 노심의 축방향 출력편차 (AO)에 대한 계산치는 MEDIUM 코드를 이용한 3차원 계산시 현행방법에 의하면 항상 측정치 보다 주기초에는 상대적으로 낮고 주기말에는 높게 나타날 것으로 예상된다. 따라서 이에 대한 다각적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

효율적인 운전자료 평가체제를 구축하기 위하여 이러한 측정치와 설계치의 비교 검토는 운전중인 모든 발전소에 대하여 체계적으로 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. 교체노심 핵연료 계약서 (KNF/KRI-F-87-5001).
2. "Nuclear Design Report for Kori Nuclear Power Plant Unit 3 Cycle 7," KAERI/TR-222/91, Nov. 1991.
3. "Reload Startup Physics Tests for PWR's," ANS/ANSI-19.6.1-1985, ANS, 1985.
4. "FSAR for Kori Unit 3," Chap. 16.
5. K. Koebke, "Topical Report on Nuclear Design Procedure, SAV79A," SIEMENS-KWU, Sept. 1987.
6. "RTSR for Kori 3 & 4," SIEMENS-KWU/KAERI, June 1988.
7. "Swap방법을 이용한 제어봉의 제어능 측정에 관한 연구," KAERI/RR-974/90, 1991년 1월.
8. A.J. Harris and K.A. Jones, "INCORE3 Program," WCAP-8492, March 1975.
9. "노심출력분포 계산용 상수 생산절차," KAERI/TR-174/90, 1990년 7월.
10. "영광 2호기 4주기 운전자료 분석보고서," KAERI/TR-331/93, 1993년 2월.