Journal of the Korean Nuclear Society
Volume 28, Number 2, April 1996

《기술보고》

울진 2호기 5주기 저출력 노물리 시험에서의 감마 Background 의 영향 분석

송재웅 · 김용래
한국원자력연구소
(1995. 9. 14 접수)

요 약

울진 2호기 5주기 노물리 시험 결과 기준 제어군의 제어능과 기준 제어군 삽입 전후의 붕소 농도의 차이의 비로 정의되는 평균 붕소능의 측정 결과가 제한치를 위배하였다. 이것은 노물리 시험시 사용하는 노외 계측기가 비보상형 전리함이기 때문에 중성자속 준위가 낮을 때 감마 background 에 의한 영향이 커지며, 이런 경우에 발생될 수 있는 현상으로 판명되었다. 따라서 본 연구에서는 이러한 감마 background 로 인한 반응도 증가 현상을 분석하기 위해 점 동특성 방정식을 수치 해석적으로 풀고 이로부터 감마 background가 없을 때의 기준 제어군 제어능 측정 시험을 모사 계산하였다. 이러한 방법으로 계산한 결과, 기준 제어군의 예상 측정제어능이 실제 측정치보다 약 6% 증가하였으며 이 값을 사용하여 평균 붕소능을 계산한 바에 의하면 그 제한치를 만족하는 것으로 평가되었다.

1. 서 론

국내 가압 경수로(PWR)는 핵연료 재장전후 출력을 올리기 전에 해당 주기 노심핵설계의 타당성 및 안전 제한치의 만족 여부를 확인하고, 설계한 대로 원자로가 운전될 수 있는지를 확인하기 위하여 American Nuclear Standard ANSI /ANS-19.6.1－1985[1]에 기술된 방법 및 기준(표 1－1 참조)에 따라 저출력 노물리 시험(low power startup physics tests)을 수행하고 있다.

울진 2호기 5주기 저출력 노물리 시험을 수행한 결과는 표 1－2와 같으며 평균 붕소능(average boron worth)이 제한치를 위배하였으며 나머지 모든 시험 항목은 제한치를 만족하였다. 평균 붕소능은 기준 제어군의 제어능과 기준 제어군 삽입 전후의 붕소 농도의 차이의 비로 정의되므로 기준 제어군 제어능 또는 붕소 농도 측정 자료를 분석하면 평균 붕소능 위배 원인의 추적이 가능하다. 기준 제어군 제어능 측정시의 자료는 중성자속 준위 및 감속재 평균 온도 등과 함께 전산기(reactivity computer)의 연속 기록지(strip chart recorder)에 기록되어 있어 자료 분석 및 추적이 붕소 농도 측정시의 자료 분석보다 용이하다. 연속 기록지에 기록된 자료(그림 1－1)을 살펴보면 기준 제어군 제어능 측정 시험 중 기준 제어군을 48 스텝에서 5 스텝으로 삽입한 후 반응도가 변할 수 있는 추가적인 요인이 없음에도 반응도가 서서히 증가하는 이상 현상이 나타났다. 이러한 현상은 노물리 시험시 중성자속 준위가 낮을 때 발생하는 현상이며, 노외 핵계측기로 비보상형 전리함을 사용함에 따라 감마 background가 존재하기 때문이다.

본 연구에서는 이러한 감마 background 로 인한 반응도 이상증가 현상을 분석하기 위하여 점 동특성 방정식(point kinetics equations)을 수치 해석적 방법을 이용하여 모사 계산하여 적절한 감마 background 준위를 산정 함으로서, 계산한 노심의 반응도 변화가 연속 기록지에 기록된 자료를 정확하게 모사 함을 확인하였고, 감마 background 가 없을 때의 노심의 반응도 변화를 계산하여 기준 제어군 제어능을 새로 산출하였으며 모사 계산치와 설계 계산치를 비교 분석하였다.

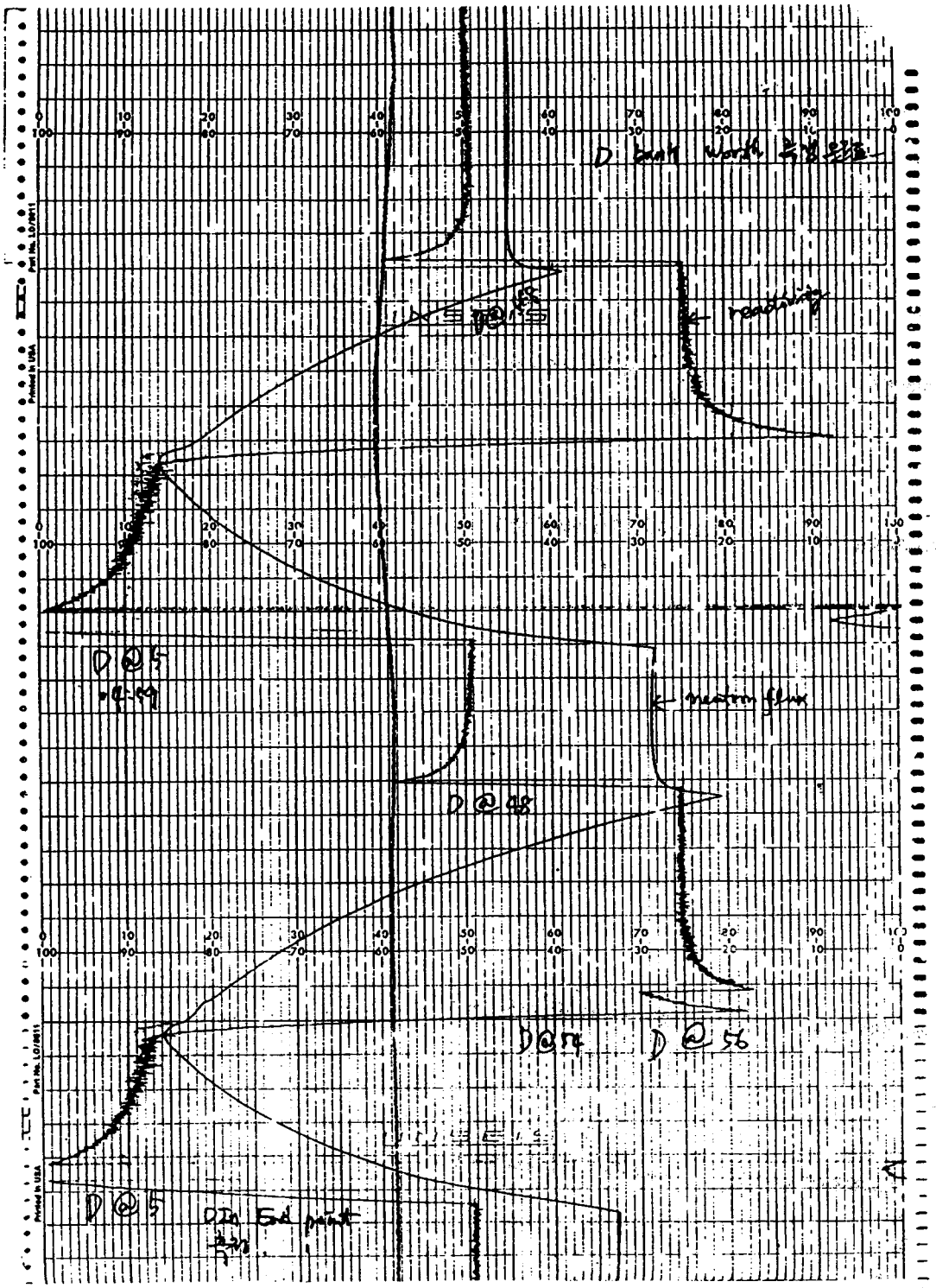

그림 1'-1. 기준 제어군의 제어능 측정 결과(일부분)

표 1-1. 저출력 노물리 시험 항목별 판정 기준

Test Parameter	Test Criteria
1. HZP Critical Boron (Control Rod Withdrawn)	±50 ppm
2. Differential Boron Worth (Boron Reactivity Coefficient)	±15% (*)
3. Control Rod Worth	
Individual Bank	±15% or 0.1% whichever is greater (for rod swap, the reference bank shoud be within 10%)
Sum of Banks	±10%
4. ITC	$0.2*10^{-4}\Delta\rho$ /°F

(*) Note : for calculating percent difference use (Pred / Meas. −1)*100

2. 기준 제어군의 제어능 측정

제어봉은 원자로 제어에 있어서 가장 중요한 요소중 하나이며 원자로의 출력 제어, 과도 상태 제어 및 원자로 보호계통으로서 최소 정지 여유도 확보 등의 역할을 수행한다.

제어봉 제어능 측정 시험은 여러 가지가 있으나 기본적으로 제어봉을 노심에 삽입하여 인가되는 부반응도의 양을 붕소나 (붕소 농도 희석법) 다른 제어봉을 (제어봉 교환법) 이용하여 상쇄하면서 노심 내에서 변화되는 반응도를 측정하는 것이다.

붕소 농도 희석법에 의한 제어봉 제어능 측정 시험은 반응도 계산기를 이용하여 해당 제어봉의 미분 및 적분 제어능을 측정하여 설계치와 일치하는지의 여부를 판정하는 시험이다. 이 시험은 제어군 중에서 설계 제어능이

표 1-2. 울진 2호기 5주기 저출력 노물리 시험 결과

시 험 항 목	설계치 (D)	측정치 (M)	오차[2] (D-M)	판정기준	비고
임계붕소농도 (ppm) HZP, ARO	1637	1665	−28	±50이내	만족
붕소 제어능 (pcm/ppm)	−8.47	−7.12	−19%	±15%이내	위배
등온온도계수(ITC) (pcm/℃) HZP, ARO	−2.33	−1.71	−0.62	±3.6이내	만족
감속재 온도계수(MTC)[1] (pcm/℃) HZP, ARO	0.95	1.57	−	9 이하	만족
제어봉 제어능 (pcm)					
기준 제어군 : CD	1160	1125	3.1%	기준제어군 : ±10% 이내	
기 타 : CC	1015	1092	−7.1%		
CB	930	826	12.6%	기타 :	
CA	722	630	14.6%	±15% 또는	만족
SB	1049	1156	−9.3%	±100 pcm 이내	
SA	1041	1003	3.8%		
총 제어봉 제어능 : (CD+CC+CB+CA)	3827	3673	4.2%	총 제어능 : ±10% 이내	

1) MTC(pcm/℃)=ITC(측정치)−DTC(−3.28 pcm/℃)

2) 오차(%)=[(설계치−측정치)/측정치]*100

가장 큰 제어군을 기준 제어군으로 선택하고, 노심에 어떠한 제어군도 삽입되지 않은 상태에서 기준 제어군의 제어능을 붕소 농도 희석법으로 측정한다.

그리고 제어봉 교환법에 의한 제어봉 제어능 측정 시험은 기준 제어군과 교환하면서 측정한 각 제어군 및 정지군의 제어능이 설계치와 잘 맞는지의 여부를 판정하는 시험이다. 특히 기준 제어봉의 제어능 측정은 임의의 제어군 측정에 큰 영향을 미치고 평균 붕소능에도 직접 영향을 미치는 중요한 시험 항목이므로 정확한 시험이 요구된다.

울진 2호기 5주기 경우는 표 1-2에서 알 수 있듯이 제어군 D 그룹의 제어능이 가장 큰 기준 제어군이다. 기준 제어군 D 그룹의 제어능 측정 시험 결과는 표 2-1에, 그림 2-1 및 그림 2-2에는 기준 제어군의 미분 및 적분 제어능을 설계치와 측정치를 비교하였다.

3. 해석적 방법에 의한 제어군의 제어능 예측

3.1. 점 동특성 방정식의 수치 해석적 모델

점 동특성 방정식(Point Kinetics Equations)의 수치 해석적 해를 구하기 위한 기본식은 아래와 같다.[2]

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k(1-\beta)-1}{l^*} n(t) + \sum_{i=1}^{6} \lambda_i c_i(t) \qquad (1)$$

$$\frac{dc_i}{dt} = \beta_i \frac{k}{l^*} n(t) - \lambda_i c_i(t) \qquad (2)$$

여기에서

i : 1, 2, …, 6 (delayed neutron group index)

$n(t)$: 중성자속 (time-dependent neutron flux)

c_i : i 군 지발중성자 선행 핵종농도 (delayed neutron precursor concentration for i-th group)

λ_i : i 군 지발중성자 선행 핵종 붕괴상수 (decay constant of precursor concentration for i-th group)

β_i : i군 지발중성자 분율 (delayed neutron fraction for i-th group)

β : 지발중성자 분율 (total delayed neutron fraction)

k : 증배 계수 (multiplication factor)

표 2-1. 기준 제어군 제어능 측정 시험 결과

제어봉위치(Step)		이동거리	노심반응도	미분제어능	적분제어능
구간초	구간말	(Step)	(pcm)	(pcm/step)	(pcm)
222	212	10	28.0	2.80	28.0
212	206	6	28.0	4.67	56.0
206	200	6	34.0	5.67	90.0
200	195	5	32.0	6.40	122.0
195	191	4	27.5	6.88	149.5
191	186	5	34.0	6.80	183.5
186	182	4	29.5	7.38	213.0
182	178	4	28.5	7.13	241.5
178	174	4	28.5	7.13	270.0
174	170	4	29.0	7.25	299.0
170	166	4	28.0	7.00	327.0
166	162	4	29.5	7.38	356.5
162	158	4	29.0	7.25	385.5
158	154	4	29.0	7.25	414.5
154	150	4	28.5	7.13	443.0
150	146	4	29.0	7.25	472.0
146	142	4	30.0	7.50	502.0
142	138	4	29.5	7.38	531.5
138	134	4	27.5	6.88	559.0
134	130	4	28.5	7.13	587.5
130	126	4	30.0	7.50	617.5
126	122	4	29.0	7.25	646.5
122	118	4	29.0	7.25	675.5
118	114	4	29.0	7.25	704.5
114	110	4	30.0	7.50	734.5
110	106	4	28.5	7.13	763.0
106	102	4	28.0	7.00	791.0
102	98	4	29.0	7.25	820.0
98	94	4	28.5	7.13	848.5
94	90	4	28.0	7.00	876.5
90	86	4	28.0	7.00	904.5
86	82	4	27.0	6.75	931.5
82	78	4	26.0	6.50	957.5
78	74	4	25.0	6.25	982.5
74	68	6	31.5	5.25	1014.0
68	61	7	25.5	3.64	1039.5
61	58	3	18.0	6.00	1057.5
58	53	5	13.0	2.60	1070.5
53	48	5	14.0	2.80	1084.5
48	5	43	40.0	0.93	1124.5

l^* : 즉발 중성자 수명 시간 (prompt neutron lifetime)

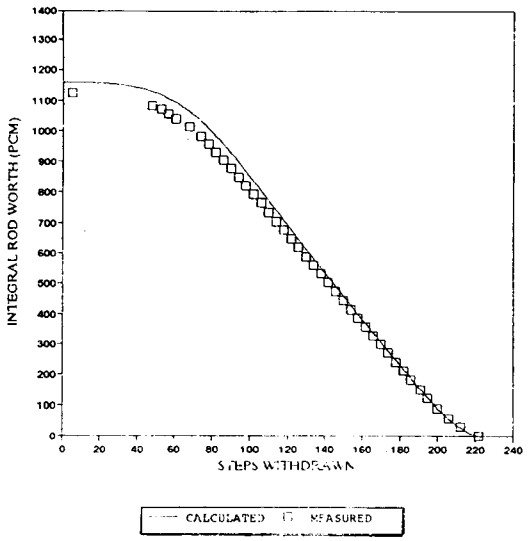

그림 2-1. 기준 제어군 D 그룹의 적분 제어능 측정 시험

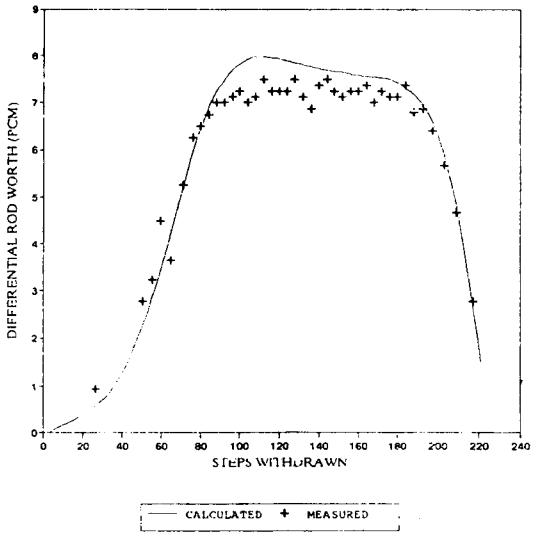

그림 2-2. 기준 제어군 D 그룹의 미분 제어능 측정 시험

식 (1), (2) 를 중성자 세대 시간 (neutron generation time) 및 반응도 (reactivity)로 나타내면 아래와 같으며[3], [4], [5] 여기에서 Λ와 ρ는 각각 l^*/k와 (k-1) /k로 정의된다.

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho(t)-\beta}{\Lambda} n(t) + \sum \lambda_i c_i(t) \tag{3}$$

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i c_i(t) \tag{4}$$

Gamma background 를 포함한 중성자속 $N(t)$는 아래와 같이 순수하게 중성자에 의한 계측수와 gamma 선에 의한 계측수의 합으로 표시될수 있다.
즉,

$$N(t) = n(t) + \gamma \tag{5}$$

여기에서

$N(t)$: gamma background 에 의한 영향이 고려된 중성자속 (time-dependent neutron flux with the gamma background)

γ : gamma background 준위 (gamma background level)

식 (4)와 (5)로 부터 gamma background 준위를 고려한 중성자속 및 선행 핵종농도를 나타내면 아래와 같다.

$$N(t) = n(t) + \gamma = n(t)\left[1 + \frac{\gamma}{n(t)}\right] \tag{6}$$

$$C_i(t) = \frac{1}{\lambda_i}\frac{\beta_i}{\Lambda} n(t)\left[1 + \frac{\gamma}{n(t)}\right] \tag{7}$$

여기에서

$C_i(t)$: gamma background 영향이 고려된 i군 지발 중성자 선행핵종농도 (delayed neutron precursor concentration for i-th group with the gamma background)

한편 식 (3)을 반응도 를 구하는 inverse kinetics equation 으로 바꾸어 감마 background 영향을 고려하면 반응도는 다음과 같다.

$$\rho(t) = \beta + \frac{\Lambda}{N(t)}\left[\frac{N(t+\Delta t) - N(t)}{\Delta t} - \sum \lambda_i C_i(t)\right] \tag{8}$$

3.2. 측정자료의 모사 계산

상기 1장에서 기술한 감마 background 에 의한 반응도 이상증가 현상을 모사하기 위하여 노심 반응도크기

표 3-1. 기준 제어군 제어능 설계치, 측정치 및 해석적 측정치의 비교
[감마 background 준위 = 10%]

제어봉 위치 (step)		측정치 (pcm)	설계치 (pcm)	해석적 측정치 (감마 준위 제외)			해석적 측정치 (감마 준위 포함)		
구간초	구간말			$+\rho$	$-\rho$	$\Sigma\rho$	$+\rho$	$-\rho$	$\Sigma\rho$
222	212	28.0	26.5	28.0	0.0	28.0	28.0	0.0	28.0
212	206	56.0	55.3	16.7	−13.3	30.0	15.5	−12.5	28.0
206	200	90.0	90.6	20.3	−16.0	36.3	19.0	−15.0	34.0
200	195	122.0	123.5	21.2	−12.5	33.7	20.0	−12.0	32.0
195	191	149.5	151.3	16.4	−12.7	29.1	15.5	−12.0	27.5
191	186	183.5	187.1	17.4	−18.7	36.1	16.5	−17.5	34.0
186	182	213.0	216.4	13.2	−17.9	31.1	12.5	−17.0	29.5
182	178	241.5	246.1	9.1	−21.3	30.4	8.5	−20.0	28.5
178	174	270.0	276.1	16.6	−14.3	30.9	15.0	−13.5	28.5
174	170	299.0	306.3	16.5	−14.2	30.7	15.5	−13.5	29.0
170	166	327.0	336.5	17.0	−12.9	29.9	16.0	−12.0	28.0
166	162	356.5	366.8	18.5	−12.5	31.0	17.5	−12.0	29.5
162	158	385.5	397.1	18.4	−11.9	30.3	17.5	−11.5	29.0
158	154	414.5	427.6	18.3	−11.9	30.2	17.5	−11.5	29.0
154	150	443.0	458.1	19.3	−10.3	29.6	18.5	−10.0	28.5
150	146	472.0	488.8	15.7	−15.5	31.2	14.5	−14.5	29.0
146	142	502.0	519.5	16.2	−16.2	32.4	15.0	−15.0	30.0
142	138	531.5	550.4	16.2	−15.5	31.7	15.0	−14.5	29.5
138	134	559.0	581.5	15.1	−14.4	29.5	14.0	−13.5	27.5
134	130	587.5	612.8	16.2	−14.3	30.5	15.0	−13.5	28.5
130	126	617.5	644.2	18.2	−13.7	31.9	17.0	−13.0	30.0
126	122	646.5	675.8	15.0	−15.9	30.9	14.0	−15.0	29.0
122	118	675.5	707.5	15.0	−16.3	31.3	14.0	−15.0	29.0
118	114	704.5	739.3	15.0	−15.9	30.9	14.0	−15.0	29.0
114	110	734.5	771.2	14.0	−18.1	32.1	13.0	−17.0	30.0
110	106	763.0	803.1	15.1	−15.5	30.5	14.0	−14.5	28.5
106	102	791.0	834.8	15.1	−15.0	30.1	14.0	−14.0	28.0
102	98	820.0	866.1	15.6	−15.4	31.0	14.5	−14.5	29.0
98	94	848.5	896.8	15.6	−14.9	30.5	14.5	−14.0	28.5
94	90	876.5	926.7	15.0	−15.0	30.0	14.0	−14.0	28.0
90	86	904.5	955.6	14.5	−15.5	30.0	13.5	−14.5	28.0
86	82	931.5	983.2	14.5	−14.5	29.0	13.5	−13.5	27.0
82	78	957.5	1009.1	14.0	−13.9	27.9	13.0	−13.0	26.0
78	74	982.5	1033.0	13.4	−12.3	25.7	12.5	−12.5	25.0
74	68	1014.0	1064.4	16.6	−17.0	33.6	15.5	−16.0	31.5
68	61	1039.5	1093.5	13.4	−13.8	27.2	12.5	−13.0	25.5
61	58	1057.5	1103.9	10.8	− 8.6	19.4	10.0	− 8.0	18.0
58	53	1070.5	1118.4	13.9	0.0	13.9	13.0	0.0	13.0
53	48	1084.5	1129.9	0.0	−15.1	15.1	0.0	−14.0	14.0
48	5	1124.5	1160.5	40.0	0.0	40.0	40.0	0.0	40.0
합 계		1124.5	1160.5	650.9	−542.1	1193.0	613	−511.5	1124.5

와 감마 background 준위를 조절하면서 감마 background로 인한 반응도가 반응도 전산기의 연속 기록지에 기록된 노물리 시험 측정치 결과와 같게 나타나도록 노심 반응도 및 감마 background 준위를 결정하였다.

결정된 초기 반응도는 각각 −60 pcm 및 40 pcm이며 감마 background 준위는 약 10%이다. 표 3−1의 해석적 측정치(감마 준위 포함)를 살펴보면 감마 background 영향을 고려한 해석적 측정치와 실제 측정치를 정확히 모사 했음을 알 수 있다.

이에 대한 결과중 감마 background 영향이 나타난 부분을 그림 3−1에 나타내었다. 그림 3−1에서 굵은 실선으로 그린 것은 주어진 시간에 다른 측정 반응도 변화량, 가는 실선으로 그린 것은 중성자속이며 x 표시는 모사 계산된 반응도를 나타낸다.

3.3. 해석적 방법에 의한 측정치 예측

상기 3.2절에서는 3.1절에서 기술한 해석적 방법을 사용하여 울진 2호기 5주기 기준 제어군(제어군 D)의 제어능 측정 결과를 정확히 모사 계산할 수 있음을 확인하였다. 그리고 3.2절에 언급한 바와 같이 기준 제어군의 제어능 측정시 반응도 전산기의 반응도 계산에 사용된 중성자속 준위에는 감마 background에 의한 영향이 약 10% 정도라고 평가되었다. 이를 근거로 본 절에서는 기준 제어군의 제어능 측정시 감마 background 영향이 없을 때의 기준 제어군의 제어능 측정치를 해석적으로 예측하였다.

상기 3.1절의 해석적 방법을 이용하여 감마 background를 고려하기 전과 후에 대한 기준 제어군의 제어능을 각각 예측하였으며, 그림 3−2에 기준 제어군의 제어능 측정시 감마 background의 영향이 확연히 나타난

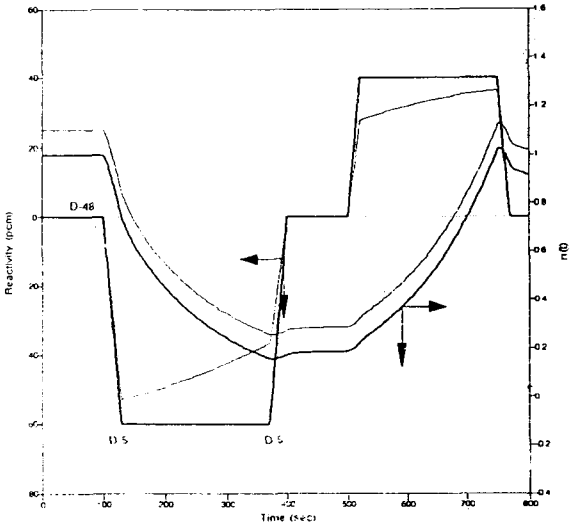

그림 3−2. 감마 Background 배제 전과 후에 대한 기준 제어군의 제어능 모사 계산 결과

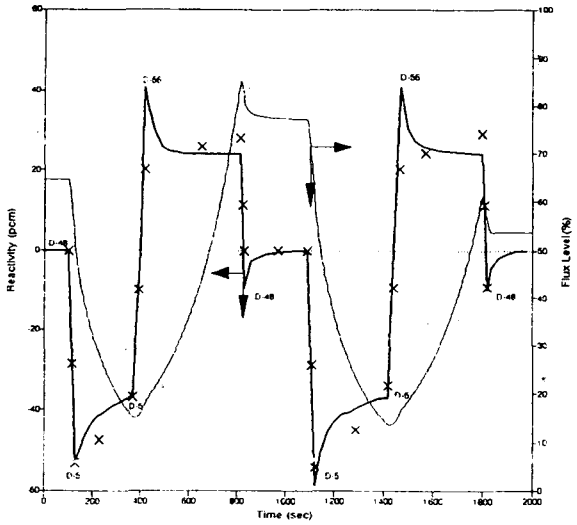

그림 3−1. 기준 제어군의 제어능 측정치와 모사 계산 결과 비교(일부분)

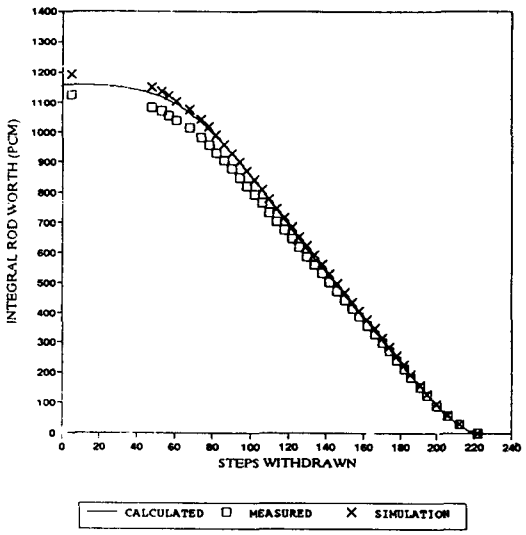

그림 3−3. 기준 제어군 D 그룹의 적분 제어능 모사 계산

부분에 대해서만 제시하였다. 그림 3-2에서 가는 실선은 감마 background를 고려할 때이고 굵은 실선은 감마 background를 배제하였을 때의 반응도 변화를 나타낸 것이다. 그림 3-2에서 알 수 있듯이 감마 background가 배제될 경우에는 제어군이 움직이지 않으며 시간에 따른 반응도 크기가 변하지 않지만, 감마 background가 고려될 때에는 제어군이 움직임이 없을 때도

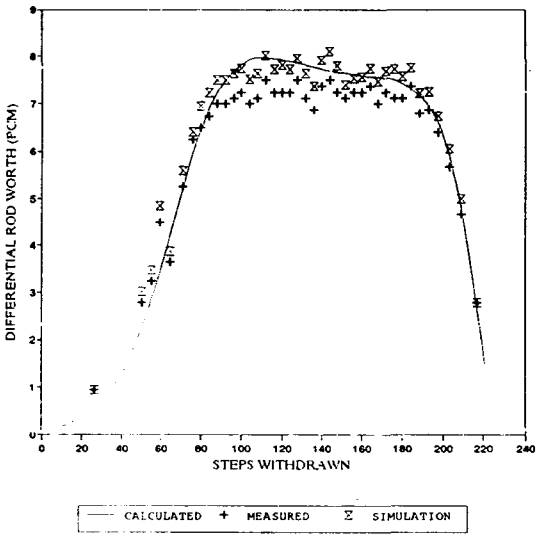

그림 3-4. 기준 제어군 D 그룹의 미분 제어능 모사 계산

반응도 크기가 변하고 있다. 표 3-1에는 울진 2호기 5주기 노심에서 기준 제어군의 제어능 측정치, 설계치 및 본 절에서 예측한 해석적 측정치 등을 요약하였다. 표 3-1의 마지막 줄에 기준 제어군의 적분 제어군이 나타나 있으며 기준 제어군의 제어능 측정시 감마 background가 배제될 경우 그 제어능의 크기는 약 6%(68.5 pcm) 증가하는 것으로 예측되었다. 그림 3-3과 그림 3-4에는 기준 제어군의 미분 및 적분 제어능에 대해 측정치, 설계치 및 해석적 측정치(감마 background 배제)등을 비교하였다. 대체적으로 측정치와 설계치의 차이보다는 해석적 측정치와 설계치의 차이가 작게 나타났다.

4. 결 론

울진 2호기 5주기 노물리 시험시 기준 제어군(제어군 D)의 제어능을 측정할 때 반응도 전산기에서 반응도 계산에 이용된 중성자속 준위의 약 10%는 감마 background에 의한 것으로 예측되었다.

본 보고서에서는 감마 background 준위를 배제하고, 해석적 방법에 따라 기준 제어군의 제어능을 예측한 결과(해석적 측정치) 및 그 결과에 따라 결정되는 임의 제어군의 제어능 그리고 평균 붕소능 등을 새로 산출하여 그 결과를 표 3-2에 정리하였는데 모두 현 제한치를 만

표 3-2. 울진 2호기 5주기 노물리 시험 결과

시 험 항 목	설계치 (D)	모사치[1] (S)	오차[2] (D-S)	판정기준	비고
평균붕소능 (pcm/ppm)	-8.47	-7.62	-11.2%	±15%이내	만족
제어봉 제어능(pcm)					
기준 제어군 : CD	1160	1193	-2.8%	기준제어군 : ±10% 이내	
기 타 : CC	1015	1161	-12.6%		
CB	930	877	6.0%	기타 :	
CA	722	670	7.7%	±15% 또는	만족
SB	1049	1224	-14.3%	±100 pcm	
SA	1041	1035	0.6%	이내	
총 제어봉 제어능 : (CD+CC+CB+CA)	3827	3901	- 1.9%	총 제어능 : ±10%이내	

[1] 모사치 (S) : 감마 Background 가 없을 경우의 해석적 측정치

[2] 오차(%)=(설계치-모사치)/모사치. * 100

족한다.

1) 울진 2호기 5주기 저출력 노물리 시험시 감마 background 로 인한 반응도 증가 현상을 모사 하여 감마 background 준위를 산정 한 결과 감마 background 준위는 0.1(약 10%)이다.

2) 감마 background 준위 0.1을 배제하고 기준 제어군(제어군 D)의 제어능 측정 시험을 모사 계산한 해석적 측정치는 1193 pcm으로 설계치 1160 pcm과의 오차는 2.8%이다.

3) 모사된 기준 제어군(제어군 D)의 예상 적분 제어능 1193 pcm을 사용하여 평균 붕소능을 산출한 결과 해석적 측정치가 −7.64pcm/ppm으로 핵 설계치 인 −8.47pcm/ppm과 11.2%의 오차를 보여 허용 범위 15%를 만족하였다.

참고문헌

1. "Reload Startup Physics Tests for Pressurized Water Reactors," ANS standard 19.6.1−1985, American Nuclear Society (1985)
2. Samuel Glasstone, Alexander Sesonske, "Nuclear Reactor Engineering," Third Edition, Van Nostrand Reinhold (1981)
3. D.L.Hetrick, "Dynamics of Nuclear Reactors," University of Chicago Press (1971)
4. P.R.Engrand, P.J. Turinsky, "Comparison of Several Numerical Methods for Solving Point Kinetics Equations," Trans. Am. Nucl. Soc. 63. 204 (1991)
5. A.F. Henry, "Nuclear Reactor Analysis," MIT (1975)
6. B.J. Jun, et. al., "Real Time Reactivity Measurement by Multiple Neutron Counters," Korean Nucl.Soc.Annual Autumn Meeting, October 26 (1991)
7. "Nuclear Design Report for Ulchin Nuclear Power Plant Unit 2 Cycle 5," KAERI/TR−384/93, Korea Atomic Energy Research Institude, 10 (1993)