

《기술보고》

加壓 經水爐 제어봉 제어능 測定에 대한 새로운 技術

(New Technique on the Control Rod Worth Measurement for PWRs)

徐 斗 錫 · 朴 琦 演

(韓國電力公社 原子力發電處)

(1987. 2. 18 접수)

I. 諸 言

制御棒 제어능 測定은 經水爐 原電의 每 週期 핵연료 교체後에 수행되는 爐物理試驗의 重要 項目의 하나로서 동 시험측정 방법으로는 “봉산화식방법”과 “제어봉교환방법”이 있다.

재래식 技術인 봉산화식방법은 그림-1에 예시된 바와 같이 모든 제어봉크를 爐內에서 完全히 인출한 상태 (ARO, All Rod Out)에서 제어봉크 D, C, B, A를 爐內에 넣고 이에 따른 反應度 變化를 冷却材內 봉산농도를 회색하여 보상함으로써 제어능을 측정한다. 이 방법은 아래와 같은 단점을 안고 있다.

첫째, 제어봉 삽입에 따른 반응도 보상을 위한 봉산화식에 소요되는 시험 시간이 길다.

둘째, 정확한 봉크의 제어능을 구하기 위해서는 측정봉크의 측정이 완료되는 最終點(예로 D봉크 측정시 D IN, C봉크 측정시 D+C IN)에 도달하기 직전 냉각재의 봉산이 완전히 혼합(Mixing)될 때까지 시험을

잠정적으로 중단하고 대기하여야 한다.

세째, 측정봉크가 완전히 삽입되도록 적정하게 봉산을 회색해야하나 과도 회색함으로써 다른 봉크가 부분 삽입되는 경우(예로 D봉크 측정시 D봉크가 완전히 삽입되고 C봉크까지 부분 삽입되는 경우)에 봉산첨가를 해서 동 봉크를 인출함으로써 시험시간이 길어지고 봉산회수 처리량이 증가된다.

이에 반하여 새로운 기술인 제어봉 교환방법은 제어능이 가장 큰 봉크의 제어능만 봉산화식법으로 먼저 측정하여 이를 기준으로 삼아서 나머지 봉크의 제어능을 봉산 대신 기준봉크와 측정봉크를 삽입/인출하여 측정하는 것이다. 이 경우 재래식 방법의 상기 단점은 보완되어 시험시간이 단축되고 봉산회수처리량이 감소되는 잇점을 얻을 수 있다.

우리나라에서는 종전까지 봉산화식방법으로 동 시험을 수행하여 왔으며, 美國과 불란서 일부 原電에서 최근에 사용되고 있는 제어봉교환방법을 자체적으로 도입하여 86년에 原電 2호기와 5호기에 試驗適用하여 본 결과 成功的인 결과를 얻었다.

本稿는 이에 대한 方法說明과 實際 試驗된 결과에 대한 技術的 妥當性과 經濟性을 考察하였다.

II. 原理 및 測定方法

1. 方法 A^{1,2)}

가. 측정방법 : 그림-2 참조.

1) 영출력(HZP), 모든 봉크 완전인출(ARO) 초기조건에서, 제어능이 가장 큰 기준봉크(R)의 제어능을 재래식 봉산화식방법으로 측정한다.

2) 다른 봉크(X)의 제어능 측정은 기준봉크(R)와 상호교환하여 측정한다.

먼저, 기준봉크(R)은 완전히 삽입되고, 다른 모든 봉크는 인출된 상태(Position 1)에서 시작한다.

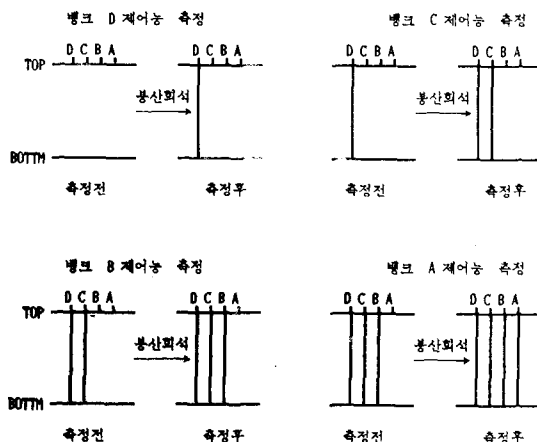
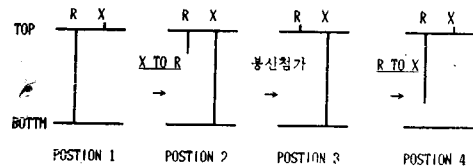


그림 1. 봉산화식 방법에 의한 제어능 측정

뱅크 X 제어능 측정



뱅크 Y 제어능 측정

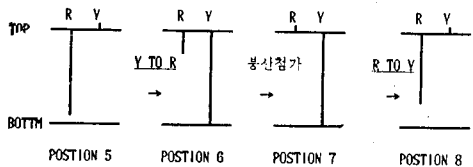


그림 2. 제어불교환 방법에 의한 제어능 측정

뱅크 X를 삽입하고 이에 따른 부 반응도 주입을 뱅크 R의 인출로써 보상해주는 과정을 반복해서, 뱅크 X가 완전 삽입, 뱅크 R은 부분 인출된 임계상태가 되게 한다. (Position 2)

부분 인출된 뱅크 R은 붕산을 첨가하여 완전히 인출되게 한다. (Position 3)

뱅크 R을 삽입하면서 뱅크 R을 인출하는 과정을 반복해서 뱅크 X가 완전 인출 뱅크 R이 n스텝에서 임계상태가 되게 한다. (Position 4)

여기서 뱅크 X의 제어능은 뱅크 R의 완전 인출에서 새 임계위치(n스텝)까지 반응도와 같음을 알 수 있다.

3) 측정할 다음 뱅크인 뱅크 Y는 같은 절차(Position 5에서 8까지)를 사용해서 상호교환해서 측정한다.

붕산회수처리량을 감소시키기 위해서 제어능이 높은 순서로 하는 것이 시험상 요령이다.

나. 설계자료

뱅크 X와 Y의 제어능은 각각 Position 4와 8에서 기준뱅크의 완전 인출에서 새 임계위치까지 반응도로 측정되었다. 즉, 측정뱅크의 제어능은 초기조건이 모든 뱅크 인출인 기준 뱅크의 제어능과 모든 뱅크가 인출된 경우 기준 뱅크의 임계 위치에서 완전 삽입까지 제어능의 차이이다. 따라서 본 방법으로 뱅크 제어능을 측정할 경우 적용되는 설계 개개 뱅크 제어능은 반드시 HZP, ARO 조건에서 생산되어야 한다. 표-1이 방법 A 적용시의 설계자료 예이다.

2. 방법 B³⁾

가. 측정방법

1) HZP ARO 초기조건에서 제어능이 가장 큰 기준뱅크(R) 제어능을 붕산희석방법으로 측정한다. (Position 1)

표 1. 방법 A 적용시 설계자료*

Condition	Boron concentration (ppm)	Isothermal temperature coefficient (PCM/DEG F)	Bank worth (PCM)
ARO	1,690	1.02	—
Bank D IN	1,592	-0.66	850
Bank C IN	—	—	1,106
Bank B IN	—	—	713
Bank A IN	—	—	1,111

* BOL, HZP, NO XE, ARO Critical Condition

2) 측정 뱅크 X의 제어능은 뱅크 X를 삽입하면서 기준뱅크 R을 인출하는 과정을 반복해서 뱅크 X가 완전히 삽입 뱅크 R이 부분 인출된 임계상태에서 구한다. (Position 2)

3) 다른 뱅크의 제어능은 그림의 Position 1과 2를 반복함으로써 구한다.

나. 설계자료

측정뱅크 X의 제어능(W_X)은 기준뱅크의 제어능(W_R)과 뱅크 X가 존재한 경우의 인출상태에서 임계위치(CH_X)까지 제어능($W_R^{Xpresent}(CH_X)$)의 차이이다. 그러나, 측정된 것은 뱅크 X가 인출되어 있는 상태에서 기준 뱅크 R의 인출상태에서 임계위치까지 제어능($W_R(CH_X)$)이다. 따라서 $W_R(CH_X)$ 를 $W_R^{Xpresent}(CH_X)$ 로 변환하기 위한 보정인자(α_X)가 필요하다. 이를 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$W_X = W_R - W_R^{Xpresent}(CH_X)$$

or

$$W_X = W_R - \alpha_X W_R(CH_X)$$

$$\text{where } \alpha_X = \frac{W_R^{Xpresent}(CH_X)}{W_R(CH_X)}$$

또한 모든 측정 뱅크의 초기조건은 기준뱅크가 완전 삽입, 임계상태이므로, 이 조건에서 모든 뱅크의 설계 제어능이 생산되어야 한다. 표-2가 방법 B 적용시의 설계자료 예이다.

3. 방법 A 및 B의 비교

방법 A는 개개 뱅크 측정시 마다 붕산첨가를 해서 기준뱅크를 단계적으로 인출하게 된다. 그러나, 방법 B는 제어불 측정이 완료된 시점에서 측정뱅크가 완전히 삽입, 기준뱅크가 부분 인출되어 있는 상태이므로, 붕산첨가에 의해 삽입되어 있는 뱅크를 인출해야 한다.

그러나, 표-1과 표-2에서 알 수 있는 바와 같이 방법 A가 설계자료 생산시 컴퓨터 사용 비용 측면에서 훨씬 경제성이 있음을 알 수 있다.

표 2. 방법 B 적용시 설계자료

Individual Bank Fully Inserted	Integral Bank Worth (PCM)	Critical Height of Bank A (Steps Withdrawn)	α_x (PCM/PCM)
B	628	79	1.065
D	711	81	0.998
SD-B	882	96	1.004
C	919	97	0.975
SD-A	1,065	114	0.984
A	1,742	Bank A is the heavy bank	

Comments:

1. All calculations were performed at BOL, HZP, 530 Deg F, 1,160ppm
2. The boron concentration of 1,160ppm corresponds to Bank A IN, Criti. Condition
Integral Worth of Bank A to critical height with individual bank inserted
3. $\alpha_x = \frac{\text{Integral Worth of Bank A to critical height, all other rods out}}{\text{Integral Worth of Bank A to critical height with individual bank inserted}}$

Ⅲ. 結果 및 考察

우리의 경우 以上の 제어봉 교환방법을 自體 檢討한 결과, 방법 A가 방법 B보다 經濟性이 더있고, 설계자료 생산이 용이한점을 감안하여 방법 A를 채택 시험하기로 결정하였다. 방법 A 적용시 必要한 표-1의

설계 자료는 설계 契約者로부터 入手하여 원전 5號機 2週期 및 2號機 4週期에 試範 적용하였으며 시험결과는 표-3, 4와 같다.

1. 측정결과판정

ANSI/ANS-19.6.1⁴⁾에 의하면 제어뱅크 제어능 측정시험의 판정기준은 아래와 같다.

시험항목	구 분	판 정 기 준
제어봉 제어능	개개 제어뱅크	±15% 또는 .1%9중 큰 것(제어봉 교환방법에서 기준뱅크는 ±10%이내)
	제어뱅크의 합	±10%이내

우리의 경우에는 설계치의 ±10%를 판정기준으로 적용하였으며 표-3, 4에서 보는 바와 같이 모든 시험결과가 이를 만족하였으며, 이로서 동 방법에 따른 시험의 타당성이 立證되었다.

2. 동 방법의 經濟性

가. 시험시간의 단축

채택식방법의 경우 통상 26시간 소요된대 반하여, 새로운 방법에서는 제어뱅크 4개 측정에 약 7시간 소요됨으로 영출력 노물리 시험 기간을 약 19시간 단축됨으로써 정기보수기간의 공기를 약 1일 단축할 수 있게 되었다. (표-3, 4, 5 참조)

나. 불산회수처리량 감소

표 3. 원전 5호가 2주기 제어봉교환 방법 시범 적용 결과

시 행 항 목	설 계 치	측 정 치	판 정 기 준	결 과	소요시간 (hr)	소 요 물 량	
						순수(ton)	불산(ton)
기준뱅크(B) 제어능(pcm)	1,419	1,357	1,419±142	만 족	2.7	15	0.2
기준뱅크(C) 제어능(pcm)	1,053	1,006	1,053±105	만 족	1.0	—	1.2
기준뱅크(A) 제어능(pcm)	670	616	670± 67	만 족	1.8	—	1.1
기준뱅크(D) 제어능(pcm)	436	433	436± 44	만 족	1.7	1.0	—
총 제어능(pcm)	3,578	3,412	3,578±358	만 족	7.2	16	2.5

표 4. 원전 2호가 4주기 제어봉교환 방법 시범 적용 결과

시 행 항 목	설 계 치	측 정 치	판 정 기 준	결 과	소요시간 (hr)	소 요 물 량	
						순수(ton)	불산(ton)
기준뱅크(C) 제어능(pcm)	1,600	1,595	1,600±160	만 족	3.2	10.4	0.4
기준뱅크(D) 제어능(pcm)	874	839	874± 87	만 족	1.6	—	1.4
기준뱅크(B) 제어능(pcm)	779	741	779± 78	만 족	0.7	—	0.2
기준뱅크(A) 제어능(pcm)	539	500	539± 54	만 족	0.9	—	0.4
총 제어능(pcm)	3,792	3,675	3,792±379	만 족	6.4	10.4	2.4

표 5. 재래식방법에 의한 제어능 측정시간 비교

구 분	호 기 주 기	원전 1호기				원전 2호기			
		6		7		2		3	
		설계제어능 (pcm)	측 정 소요시간 (hr)	설계제어능 (pcm)	측 정 소요시간 (hr)	설계제어능 (pcm)	측 정 소요시간 (hr)	설계제어능 (pcm)	측 정 소요시간 (hr)
뱅크 D		902	1.9	768	5.2	740	6.5	827	2.9
뱅크 C		1,377	3.3	1,234	3.6	1,750	4.0	1,797	4.3
뱅크 B		726	11.0	822	2.1	1,041	4.8	940	2.1
뱅크 A		1,800	8.3	1,848	5.9	844	3.3	711	2.0
Overlap		4,805	6.4	4,672	9.5	4,375	2.8	4,275	8.9
계			30.9		26.3		21.5		25.2

표 6. 재래식방법에 의한 노령각재 계통의 순수/봉산 처리량 비교

단위 : Ton

구 분	호 기 주 기	원전 1호기				원전 2	
		6		7		2	
		순수	봉산	순수	봉산	순수	봉산
뱅크 D		9.5	—	7.0	—	7.5	—
뱅크 C		15.8	—	11.5	—	17.0	—
뱅크 B		8.8	—	8.3	—	11.9	—
뱅크 A		25.29	—	20.5	—	10.3	—
Overlap		—	13.5	—	6.9	—	11.8
계		59.39	13.5	47.3	6.9	46.7	11.8

재래식방법에서는 순수(Demi. Water) 약 51톤, 봉산 약 11톤이 사용된데 비하여 동 방법에서는 순수 13톤 봉산 2.5톤이 소요되어 봉산회수처리량이 약 75% 감소되었다. 즉 새로운 방법은 순수 38톤 봉산 8.5톤 절감과 함께 동 봉산회수처리 설비의 가동시간을 그만큼 줄이게 된 효과를 가져왔다.

IV. 結 言

이상과 같이 제어봉교환 방법 중 방법 A를 원전 5호기 2주기와 원전 2호기 4주기에 시험적용한 결과 시

험의 타당성과 경제성이 입증되었다.

특히 방법 A 제어봉교환 방법은 방법 B보다 설계자료 생산에 있어 간편하고 우리 실정에 보다 적용하기 용이하며, 방법 A 적용 결과 새로운 기술의 타당성이 입증됨과 동시에 기존 기술인 봉산회수 방법보다 열출력 노물리 시험 기간을 短縮하였으며 봉산회수처리량을 약 75% 減少시킨 利點을 보여주었다.

따라서, 先進國 일부에서 최근 사용되고 있는 새로운 기술을 우리 스스로 소화하여 외국 기술의 用役 欠가없이 도입함으로써 경수로 원전 운용의 高度化에 진일보하였다는 自負心을 가질 수 있게 되었으며 앞으로 모든 경수로의 노물리시험에 새로운 동 방법을 적용할 수 있게 되었다.

참 고 문 헌

1. Framatome Letter dated March 8, 1984, SEL. 84, 1808, "Rod Swap Technique"
2. Framatome Letter dated June 14, 1986, KUK. 86, 0491, "Rod Swap Technique"
3. Westinghouse Memo, "Rod Swap," 1984.
4. American Nuclear Society. "Reload Startup Physics Tests for Pressurized Water Reactor," ANSI/ANS-19.6.1, 1985.