

제어봉 중첩수 조절을 통한 축방향 출력분포 제어

김 인환, 김 범년, 김 대응, 정 우태

전력연구원

요 약

국내에 신규로 건설되는 원자력발전소(이하 원전)는 부분강 제어봉을 설치하여 축방향의 출력 분포 제어에 별다른 어려움 없이 운전하고 있으나, 일부 가압 경수로형 원전의 경우는 부분강 제어봉이 설치되어 있지 않아 원자로 출력 변동시 출력분포 제어에 어려움이 많다. 기존 원전 경우의 제어봉 운전 방식은 원자로 출력의 균일한 제어를 위해 각 제어봉 뱅크를 순서적으로 운전하고 있으며, 각 뱅크간에는 일정한 수(일반적으로 113 Step) 만큼 중첩하여 운전하고 있다. 출력운전중에는 모든 제어봉을 인출하여 균일한 출력분포를 유지하며 축방향의 출력분포 제어를 위해 제어봉을 조절한다. 출력을 변동하면 제어봉이 원자로내에 삽입하게 되는 데, 먼저 D Bank 가 삽입되며 D Bank가 113 Step에 도달하면 C Bank가 삽입되기 시작하는 데, D 130에서 부터 C Bank가 삽입되어 제어값을 갖는 D 100 Step 까지는 축방향 출력 제어가 되지 않아 출력 편차가 제한값을 벗어나 출력을 급격히 감소해야 하는 등의 어려움이 있다. 본 연구는 제어봉의 중첩을 조절하여 C Bank를 조기에 노심에 삽입시의 영향을 분석하기 위하여 제어봉값이 출력에 미치는 영향을 예측하고, 제어봉 중첩수를 변경시에 노심에 미치게 될 안전성을 검토하였으며, 그 결과 중첩수를 조절할 경우 축방향 출력 분포를 초기부터 양호하게 제어할 것으로 예측된다.

1. 서 론

국내에 설치된 가압 경수로중 Westinghouse형 발전소의 경우에는 부분강 제어봉이 설치되어 있지 않아 축방향 출력분포 제어에 어려움을 많이 겪고 있다. 특히 노심말기에서 출력 증,감 발시에는 축방향 출력 편차가 제한값을 벗어나 정상 출력운전을 하지 못하는 경우가 종종 있었다. 지금까지 원전은 기저부하를 담당하고 기타의 전력 생산 설비가 부하를 추종하는 방식으로 운영함에 따라 특별한 경우를 제외하고는 문제되지 않았지만, 향후 원전설비의 수가 늘어남에 따라 부하 추종운전을 하게 되면 많은 어려움이 예상된다. 원자로에 따라 다소의 차이는 있지만, 노심의 안전을 위해 그림 1-1의 허용값내에서 축방향 출력 편차의 목표값을 정해 두고 목표값의 일정한 범위(일반적으로 +3 ~ -12)내에서 운전하도록 기술지침서에 정하여 규제해왔으나, 지나치게 보수적인 점이 인정되어 100%에서는 +8 ~ -16 사이, 50%에서는 +26 ~ -42의 범위(그림 1-2 참조)내에서 운전하도록 다소 완화되었다. 그러나 이러한 완화에도 불구하고 축방향의 출력 균형이 깨어지기 시작하면 핵분열 생성 독물질의 영향으로 이 규제치를 넘어갈 위험이 많다. 정상 운전시에 거의 완전 인출되어있던 제어봉을, 출력 변화시 차츰 원자로내에 삽입하게되는 데, 그 주된 목적은 출력 준위를 조절하기 위함이 아니라 상,하부 축방향 출력의 균형을 유지하기 위함이다. 출력 변화에 따라 제어봉을 원자로 노심에 삽입하면 일반적으로 원자로 출력이 60 ~ 70% 정도에 도달하면 제어봉의 위치는 D 130 ~ 100 Step

이 되는 데, 이 위치는 제어봉이 원자로의 중앙부위(완전 인출 위치 : 228 Step)에 도달함으로써 제어봉에 의해 축방향의 출력이 제어되지 않는다. 출력 편차가 제한값을 벗어나서 일정시간 이상되면 원자로 출력을 50% 이하로 유지하면서 편차를 운전 범위내로 들어오게 해야 하며, 운전 범위내로 유지하면서도 24시간 동안 출력을 50%이상으로 상승시키지 못하는 등의 제약 사항이 있다. 본 연구에서는 이러한 어려움을 해결하기 위해 작은 양의 제어봉 제어값이 원자로 노내의 출력분포에 미치는 영향을 계산하였으며, 이러한 영향을 적용할 수 있는 방안을 연구하여 다른 안전 값에 미치는 영향 등을 검토하였다.

2. 검토 조건

제어값 변화에 따른 출력의 변화 파악과 제어봉 증첩값을 변화 시킴에 따른 적분 제어능의 변화를 보기 위한 자료는, 전출력 상태의 제어봉 제어값을 사용해야 하나 자료가 없는 관계로 초기노심 영출력 상태의 제어값을 사용했다. 그러나 초기 노심 보다는 말기 노심이, 영출력보다는 전출력 상태에서 원자로내의 중성자속이 큰 관계로 초기노심 영출력의 제어값을 적용하는 것이 더 보수적임을 알 수 있다. 그러나 본 연구에서 제어봉을 노심에 삽입하며 적분제어값을 계산시에, 제어봉 증첩에 따른 이웃한 제어봉에 의해 발생하는 그림자 효과는 고려하지 않았다.

3. 이론적 고찰

3.1 출력제어

가압 중수로형 원전의 경우는 매일 연료를 교체하며 핵연료의 연소를 보상하여 출력운전을 하는 반면에, 가압 경수로형 원자로의 원자로내에 일정기간 전 출력 운전할 수 있는 충분한 양의 핵연료를 장전하여 놓고 가연성 독물질의 연소와 수용성 독물질의 농도 조절에 의해 연료의 연소를 보상해가며 연속적인 출력운전을 한다.

$$\text{출력 } P = C \times \Sigma_f \times \Phi \times V \quad \text{----- (식 3-1)}$$

여기서 C : 변환계수(3.2×10^{-11} Watt · sec/fission)

Σ_f : 거시적 분열 단면적(cm^{-1})

$$\Sigma_f = \sigma_f \times N$$

여기서 σ_f : 연료의 미시적 분열 단면적(cm^2) - - (식 3-2)

N : 연료의 장전량(핵의 수/ cm^3)

Φ : 중성자 속(Neutrons/ $\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$)

$$\Phi = n \times v$$

여기서 n : 중성자 밀도(Nneutrons/ cm^3) - - - (식 3-3)

v : 중성자 속도(cm/sec)

V : 원자로 체적(cm^3)

식 3-1에서 볼 수 있는 바와 같이 핵연료를 한 번 장전한 후 출력을 제어할 수 있는 방법은 중성자 속을 변화시켜 출력을 제어하게 되는 데, 그 방법으로 중성자를 잘 흡수하는 물질

의 양을 변화시켜 주는 것으로 제어봉의 위치와 수용성 독물질의 농도를 조절하는 것이 대표적인 방법이다.

3.2 제어봉 제어

출력 변화는 반응도값의 변화가 수반되는 데, 이는

$$\text{반응도 } \rho = \frac{K_{eff} - 1}{K_{eff}} \quad \text{----- (식 3-4)}$$

여기서 K_{eff} : 유효 증배 계수

로 정의 되며, 노심에 반응도를 변화시키는 제어봉의 반응도값은 핵설계 보고서에서 정해지며, 반응도 변화에 따른 제어봉 조작 직후의 즉발 강하를 적용하여 지발 중성자의 효과를 고려하지 않은 상태의 원자로내의 출력을 계산할 수 있다.

$$\text{출력 } P = \frac{\beta(1 - \rho)}{(\beta - \rho)} \times P_0$$

여기서 β : 지발 중성자 분율($BOL : 0.0078, EOL : 0.0054$) - (식 3-5)
 ρ : 반응도($\Delta K/K$)
 P_0 : 제어봉 조작전의 출력(%)

4. 해석결과 및 분석

4.1 출력 분포 변화

현재 각 원전에서 적용하고 있는 제어봉 중첩은 113 Step으로, D Bank가 228 Step 에서 삽입되기 시작하여 113 Step에 도달하면 C Bank 가 삽입되기 시작하는 방식으로 운전되고 있으나, C Bank 제어값을 갖기 위해서는 약 10 Step가 삽입된 D Bank 103 Step이 되어야 하며, 축방향 출력 분포에 영향을 미치기 위해서는 D 93 Step(C 208 Step) 정도가 되어야한다 (그림 4-1 참조). 따라서 D 130~95 Step에서 축방향 출력분포를 제어하지 못함으로써 축방향 출력 분포 제어가 곤란하며, 일단 축방향의 출력 분포 불평형이 시작되면 제어 독물질의 영향으로 불평형은 점점 심각해져서 결국은 제한값을 넘어가게된다.

표 4-1에서 나타낸 바와 같이 제어봉 중첩을 123 Step으로 조정하게 되면, D Bank 123 Step에서 C Bank 가 삽입되기 시작하여 Bank 115 Step이 되면 출력 분포에 영향을 미치기 시작하여 105 Step 정도에서는 축방향 출력 분포 상당한 영향(출력 영향이 약 3%이므로 상하부 출력 편차는 약 6%정도임)을 미친다. 제어봉 중첩을 133 Step으로 조정하게 되면 D Bank 133 Step에서 C Bank 가 삽입되기 시작하여 Bank 125 Step이 되면 출력 분포에 영향을 미치기 시작하여 115 Step 정도에서는 약 6% 정도 축방향 출력 편차에 영향을 미치는 것으로 나타난다. 따라서 제어봉 중첩수를 조절하게되면 축방향 출력 분포 제어가 용이할 것으로 사료된다.

표 4-1 제어봉 중첩 운전에 따른 제어봉 위치별 출력 영향(113 step중첩 대비, %)

D-Bank 제어봉 위치 (STEP)	123 step 중첩				133 step 중첩			
	C Bank	$\Delta \rho$ (pcm)	출력 변화(%)		C Bank	$\Delta \rho$ (pcm)	출력 변화(%)	
			노심초기	노심말기			노심초기	노심말기
125	-	-	-	-	220	1.9	0.14	0.19
120	225	0.375	0.06	0.07	215	9.5	1.32	1.72
115	220	1.0	0.15	0.18	210	18.0	2.46	3.21
110	215	9.125	1.26	1.66	205	28.625	3.86	5.00
105	210	17.0	2.33	3.04	200	39.0	5.18	6.70
100	205	19.5	2.67	3.38	195	46.2	5.94	7.66
95	200	22.0	3.00	3.89	190	51.0	6.67	8.39

4.2 제어값 분석

제어봉 중첩수를 변경함에 따라 제어봉의 제어값 변화를 조사하기 위해서, 초기노심 영출력 상태에서의 제어봉값을 사용하여 제어봉간의 그림자 효과를 고려하지 않은 상태에서 검토 결과 그림 4-2 및 4-3과 같이 적분 및 미분 제어값의 그래프를 얻을 수 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 중첩 위치에서 제어값의 급격한 변화가 발생하지 않는 것은 중첩수 변경에 관계가 없음을 알 수 있으며, 미분 제어값의 변화는 중첩수가 증가함에 따라 위치의 변동은 발생하나 값의 크기 자체는 변화가 없음을 알 수 있다.

4.3 안전성 검토

원자력 발전소는 출력운전중 원자로의 출력 분포 및 침투계수, 운전중의 정지 여유도 확보 및 제어봉 이탈사고시의 충격 완화등을 위해 그림 4-4과 같이 제어봉 삼입한계를 설정하여 사용하고 있다. 제어봉은 한 Bank내에 여러개의 제어봉이 있으며, 원자로 수평 평면상에서 서로 대칭되게 설치되어 있으므로 반경방향 출력분포 및 침투계수는 문제되지 않으나, 제어봉의 중첩수를 변경하게되면 제어봉 삼입한계의 검토를 충분한 정지여유도를 확보할 수 있는 방향으로 하여야한다. 따라서 113 step 삼입시의 적분 제어봉값을 기준으로 중첩에 따른 새로운 위치를 계산하면 표 4-2와 같이 나타낼 수 있으며, 이를 그림으로 나타내면 그림 4-5, 그림 4-6과 같다.

표 4-2 제어봉 중첩에 따른 삼입한계 조정

출력	113 step 중첩		123 step 중첩		133 step 중첩	
100	D 160	C 228	D 160	C 228	D 160	C 228
72		C 225				
12	D 0	C 115	D 10	C 115	D 23	C 118
0		C 93				

5. 결론 및 향후과제

제어봉 중첩값을 변화시켜 제어봉 제어값을 변화시키게 되면, 출력편차 발생을 조기에 차단 하여 독물질 등에 의한 파급효과를 억제함으로써, 원자로 내의 상하부 출력 편차 제어가 용이 하여 원자로의 출력 제어가 쉬워진다. 이는 원자력 발전소 원자로 노심의 안전성을 향상 시키고 향후 예상되는 부하 추종 운전에도 활용될 수 있을 것이다. 부수적으로는 운전원들의 부하를 경감시키고 인적 실수의 요인 제거에도 기여할 수 있을 것이다. 이 운전 방안을 현장에 적

용하기 위해서는 정지 여유도를 반영한 제어봉 삽입한계를 재설정하기 위해, 핵설계시에 제어봉의 상호 간섭 등의 그림자 효과, 전 출력 노심말기 운전시의 제어봉 값 설정 등에 대한 검토가 있어야 한다.

참고문헌

1. Introduction to Nuclear Engineering, 연합출판사, Lamash, 1984.
2. 영광 1,2호기 FSAR, 한국전력공사
3. 영광 1호기 8주기 핵설계 보고서, 한국원자력 연구소, 1993
4. 원자로 이론, 한국전력 원자력 연수원, 1995
5. 원자로 제어, 한국전력 원자력 연수원, 1995

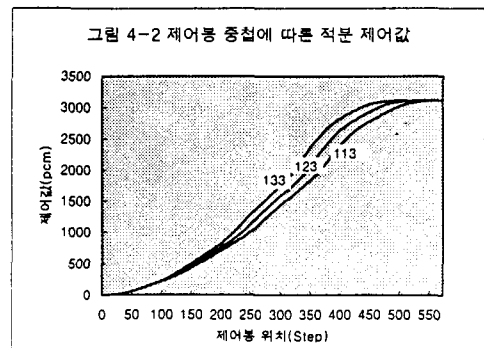
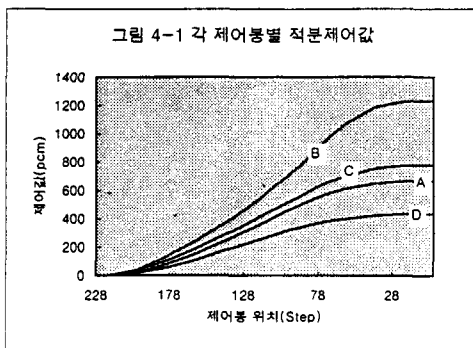
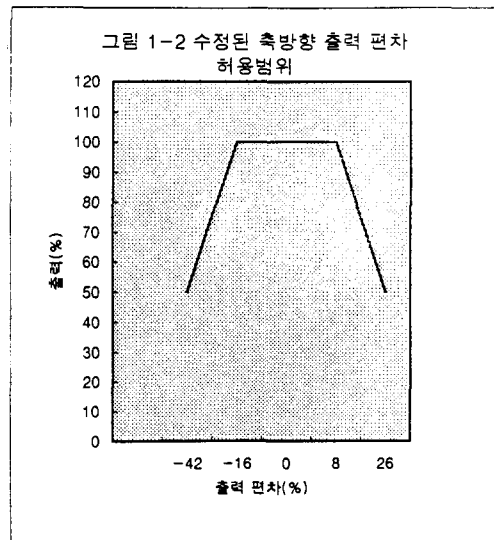
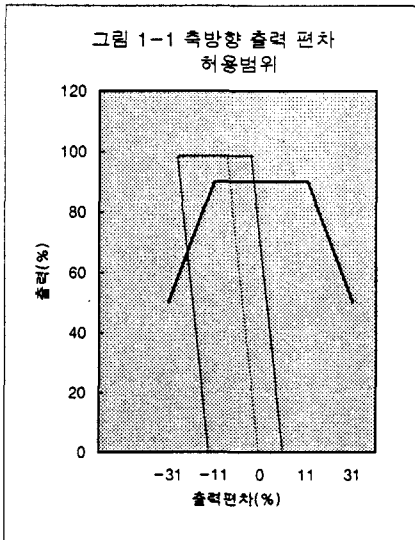


그림 4-3 제어봉 중첩 변화에 따른
이론 제어봉 제어값의 변화

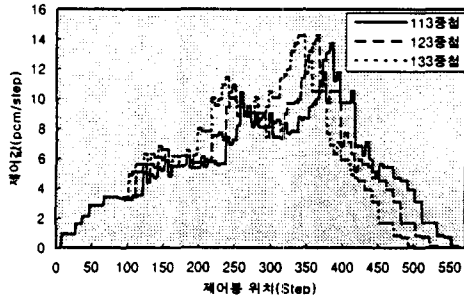


그림 4-4 제어봉 삽입한계(113 중첩)

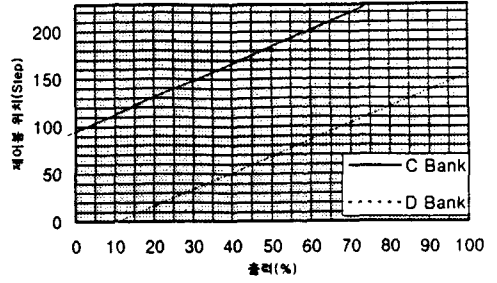


그림 4-6 제어봉 삽입한계(133 중첩)

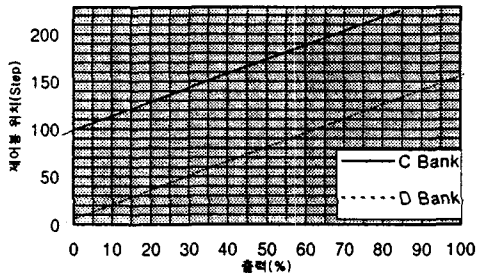


그림 4-5 제어봉 삽입한계(123 중첩)

