2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

NFRT제거와 첨두인자 감소율 변경에 따른 제어봉 낙하사고 영향 평가 (Evaluation of Dropped Rod Accident after Elimination of NFRT and Correction of Hot Channel Factor Reduction Rate)

이해찬, 김재식, 최규환, 김선두
한전원자력연료(주), 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

서두석, 명선엽, 권기환
한국전력공사(주), 서울특별시 강남구 삼성동 169번지

요 약

최근 국내 웨스팅하우스형 발전소에서는 경미한 제어봉 낙하에 의한 발전소 불시 정지를 방지하기 위해 NFRT(Negative Flux Rate Trip) 보호계통을 제거하였다. 이를 위해 적용된 방법론 및 제어봉 낙하사고 분석에 이용된 코드의 상관 관계식에 대한 검증을 수행하였다. 상관 관계식 가운데 Hot Channel Factor Reduction Rate (HCFRR)가 현재와 같이 저누출 장전모형이 적용되는 노심에 대해서는 보수적이지 않은 것으로 평가되어 새로운 상관 관계식을 도출하였다. 새로운 HCFRR를 적용하여 NFRT 보호계통을 제거한 경우에 대한 제어봉 낙하사고 평가를 수행한 결과, 고리 1호기의 경우는 낙하전 $F_{\Delta H}$가 약 2.6% 감소되어 설계기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 관련인자의 민감도 분석을 통해 설계여유도 확보에 가장 효과적인 인자는 제어봉 삽입한계선의 높낮이로 평가되었으며, 제어봉 삽입한계선을 전출력 기준 14 스텝 상향 조정할 경우 제어봉 낙하전 $F_{\Delta H}$가 약 2.5% 증가되어 NFRT 보호계통의 제거가 가능한 것으로 평가되었다. 아울러 제어봉 삽입한계선 상향조정이 발전소의 운전에 미치는 영향을 평가한 결과 노심의 출력변동 및 출력분포 제어에 문제가 없는 것으로 나타났다.

ABSTRACT

In recent years, NFRT(Negative Flux Rate Trip) is eliminated in order to prevent the reactor trip during dropped rod accident in domestic Westinghouse type plants. The theoretical background of dropped rod accident is introduced and the correlations related $F_{\Delta H}$ are verified for KORI unit 1 which is 2-loop plant. The results show that the default line of Hot Channel Factor Reduction Rate(HCFRR) for low level leakage loading pattern isn't conservative. So, new correlation is generated and applied to the analysis of the dropped rod accident. The minimum pre-drop $F_{\Delta H}$ is decreased about 2.6% because of NFRT elimination and new HCFRR correlation. According to the sensitivity study on compensation for the reduction, the Rod Insertion Limit(RIL) is shifted 14 steps upward. So, the minimum pre-drop $F_{\Delta H}$ is increased about 2.5%. The effect of RIL change on plant operation is additionally evaluated.

1. 서론

최근 국내 웨스팅하우스형 발전소에는 제어봉 낙하사고시 노심보호를 위해 원자로를 정지시키는 NFRT(Negative Flux Rate Trip) 설비를 제거하였다. 이를 위해 제어봉 낙하시 원자로가 정지 되지 않아도 안전성에 문제가 없음을 입증하였으며, 이에 따라 제어봉가가 작은 제어봉 낙하사고시 불필요한 원자로 정지를 방지할 수 있다. 제어봉가가 큰 제어봉의

낙하사고의 경우에는 NFRT 신호에 앞서 가압기의 Low Pressure Trip 신호가 먼저 작동되어 원자로가 정지되므로 안전성에는 큰 문제가 없다.

본 연구에서는 웨스팅하우스형 발전소의 제어봉 낙하사고에 대한 분석 방법론을 우선 살펴 보았고, NFRT 제거에 대한 영향을 평가해 보았다. 아울러 현재와 같이 저누출 장전모형이 적용되는 노심에 대해서는 제어봉 낙하 사고 분석에 사용되는 DRPROD 전산코드[1]에서 사용하는 Hot Channel Factor Reduction Rate (HCFRR)이 3-loop의 경우 보수적이지 않은 것으로 평가되어[2] 반경방향 첨두출력인자($F_{\Delta H}$)에 관련된 HCFRR를 포함하여 두개의 상관 관계식을 2-loop인 고리 1호기의 경우에 대해 검증하여 적절하지 못한 상관 관계식을 수정하였다. 고리 1호기의 경우 NFRT의 제거와 개정된 상관 관계식을 적용하여 제어봉 낙하사고에 대한 설계기준이 만족되는지 평가하였고, 설계여유도 확보를 위한 방법을 마련해 보았다.

2. 본론

2.1 사고분석 방법론

정격출력 운전(제어봉 자동모드) 상태에서 제어봉이 낙하되면 부반응도 삽입으로 출력이 감소되고 반경방향 첨두출력인자($F_{\Delta H}$)는 증가하게 된다. 이후 1, 2차측의 출력 차이를 일치시키기 위해 삽입된 제어봉이 인출되어 과출력(Overshoot) 노심상태가 된다. 삽입된 제어봉의 제어봉가가 클수록 과출력의 정도는 커지고, 비대칭으로 제어봉이 낙하되어 있으므로 반경방향 첨두출력인자가 증가되어 DNB가 발생될 수 있다. 제어봉 낙하사고는 Condition II 사고로서 설계기준을 만족하기 위해서는 DNB가 설계제한치 보다 커야 한다. 일반적으로 제어봉 낙하사고시 시간에 따른 원자로 출력 변화는 그림 1과 같다.

제어봉 낙하후 출력(P^{PD})은 다양한 3차원 계산을 통하여 다음과 같은 상관식을 이용하여 계산된다.

$$P^{PD} = P^{O} - \frac{\partial P}{\partial r}(MTC, T_{avg}, F_{\Delta H}) \cdot \Delta r_{D} \qquad \text{(식1)}$$

여기서, $\frac{\partial P}{\partial r}$ = Inverse Power Defect for Dropped Rod Events(%Power/pcm)

Δr_{D} = Dropped Rod Worth (pcm)

(식1)에 의해 P^{PD}를 계산하기 위해, 낙하된 제어봉가와 MTC 변화에 대한 온도와 압력 변화로 인한 출력변화는 시스템의 과도상태 모사 코드인 LOFTRAN[3]을 이용한 분석결과를 이용한다.

제어봉 낙하후 첨두출력인자 ($F_{\Delta H}^{PD}$)는 (식1)에서 계산된 (P^{O}-P^{PD})를 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$F_{\Delta H}^{\ PD} = F_{\Delta H}^{\ O} \cdot [P^{O} \cdot R(P^{O} - P^{PD}) / P^{PD}] \quad \text{(식2)}$$

여기서, R = Hot Channel Reduction Factor이며 ΔP 에 대한 2차 다항식으로 다음과 같이 정의된다.

$$R(\Delta P) = F_{1} + F_{2} \cdot \Delta P + F_{3} \cdot \Delta P^{2} \quad \text{(식3)}$$

제어봉이 낙하되면 반경방향 첨두출력인자는 증가 되지만 출력은 감소되며, 출력 감소율이 첨두출력인자 증가율보다 항상 커서 출력 변화가 커질수록 R값은 작아진다. $F_{\Delta H}^{PD}$를 예측하기 위해 여러 경우의 3차원 계산을 통해 R값에 대한 보수적인 경험 상관식이 설정되어, 가장 제한적인 제어봉 낙하의 경우에도(일반적으로 3 RCCA Drop) $F_{\Delta H}^{PD}$를 예측할 수 있도록 R값을 사용하고 있다 (그림 2). 아울러 (식1)과 (식2)의 일관성을 위하여 반복과정을 거쳐 최종 P^{PD}와 $F_{\Delta H}^{PD}$가 결정된다.

다음으로 과출력 상태(State Point)에서의 출력(P^{ST})과 첨두출력인자 ($F_{\Delta H}^{ST}$)는 위에서 계산된 P^{PD}와 $F_{\Delta H}^{PD}$를 이용하여 (식1)과 유사한 방법으로 다음과 같이 계산된다.

$$P^{ST} = P^{PD} + \frac{\partial P}{\partial r}(MTC, T_{avg}, F_{\Delta H}{}^{PD}) \cdot \Delta r_{ST} \quad \text{(식4)}$$

여기서, Δr_{ST} = Withdrawal Rod Worth + Temperature Defect (pcm)

$F_{\Delta H}^{ST}$는 (식4)에서 계산된 (P^{ST}-P^{PD})값을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$F_{\Delta H}{}^{ST} = (F_{\Delta H}{}^{PD} + A_1 / A_2)\exp[A_2 \cdot (P^{ST} - P^{PD})] - A_1 / A_2 \quad \text{(식5)}$$

(식5)에서 A1, A2는 Hot Channel Factor Reduction Rate의 계수들로써 출력이 증가되면 감소되는 반경방향 첨두출력의 감소율을 계산한 값들이며 아래식과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial F_{\Delta H}}{\partial P} = A_1 + A_2 \cdot F_{\Delta H} \quad \text{(식6)}$$

위에서 계산된 P^{ST}와 $F_{\Delta H}^{ST}$ 값들과 이때의 온도와 압력을 이용하여 DNB 발생여부를 확인한다. (식1) ~ (식6)에서 볼 수 있듯이 $F_{\Delta H}^{O}$가 커지면 $F_{\Delta H}^{ST}$가 일정한 관계로 증가 되므로 DNB가 발생되는 $F_{\Delta H}^{ST}$가 나오는 초기 $F_{\Delta H}^{O}$(Pre-drop $F_{\Delta H}$)를 구할 수 있다. 이를 이용하면 연소도에 따라 제어봉 낙하사고시 제어봉가와 MTC를 알면 DNB 발생 여부를 쉽게 확인해 볼 수 있다. 즉, 계산된 낙하전 $F_{\Delta H}$가 $F_{\Delta H}$ 설계제한치 보다 크다는 것을 확인하면 된다.

2.2 NFRT 제거에 따른 영향 평가

NFRT가 있는 발전소의 경우 원자로에서 감지할 수 있는 최소 제어봉가는 제어봉 낙하시간에 따라 다른데 2.2초 이하일 경우는 400 pcm, 2.2 ~ 3.2초 사이일 경우는 500 pcm 정도이다[4][5]. 고리 1호기의 경우는 실제로는 낙하 시간이 2.2초 미만이지만 보수적으로 500 pcm이 최소 감지 제어봉가인 것으로 가정하여 500pcm 이하의 제어봉가를 갖는 제어봉이 낙하되어도 설계기준을 만족하는지 평가하면 된다. 그러나 NFRT가 제거되면 그 이상의 낙하 제어봉가의 경우에도 원자로가 정지되지않기 때문에 가압기의 Low Pressure Trip이 일어나기 전 1000pcm 까지는 분석할 것을 권장[4]하고 있다. 따라서 제어봉 낙하사고에 대한 적용범위가 늘어나 DNB에 대한 여유도가 줄어들게 된다. 고리 1호기 18주기에 대해 NFRT 제거 여부에 따라 분석한 결과 표 1과 같이 낙하전 $F_{\Delta H}$의 변화율이 평균 0.345%, 최대 0.483%로 나타났다. 결과에서 보여주듯이 사실상 NFRT 제거에 따른 Pre-drop $F_{\Delta H}$의 증가는 작은 것으로 평가 되었다. 참고로 표 1에서 변화율이 0%인 경우는 최소 낙하전 $F_{\Delta H}$가 500 pcm 이하에서 발생된 경우이다.

2.3 경험 상관식 평가 및 분석

열수력 설계 방법론의 개선과 연료개발로 증가된 열적 여유도를 이용하여 첨두출력인자($F_{\Delta H}$)를 증가시켜 경제성 향상을 도모하기 위해 대부분의 WH형 노심은 과거에 비해 중성자 누출이 현저히 감소된 장전모형을 적용하고 있다. 따라서 이와 같이 연료의 부담이 증가된 장전모형 적용에 따라 $F_{\Delta H}$ 예측을 위해 사용되는 (식3)의 Hot Channel Reduction Factor와 (식6)의 Hot Channel Factor Reduction Rate에 대한 유효성 검증에 대한 필요성이 제기되어 3-loop 노심에 대해 이를 수행하였다.[2] 계산은 3차원 노심연소 코드인 ANC[6]를 이용하였으며 제어봉 낙하가 발생되는 모든 조합을 고려하였다. 계산 결과 기존의 R Curve는 여전히 보수적인 것으로 나타났으나, Hot Channel Factor Reduction Rate (식6)는 기존의 설정치가 보수적이지 못한 결과를 보였다.

2-loop 노심인 고리 1호기에 대해 계산한 결과 그림 2와 같이 R Curve는 기존의 상관식이 적절한 것으로 평가되었으나, Hot Channel Factor Reduction Rate는 그림 3에 나타낸 바와 같이 기존의 상관식이 적절치 못한 것으로 나타났다. 따라서 고리 1호기에 적용하기 위한 새로운 Hot Channel Factor Reduction Rate를 설정하였으며, 이를 이용한 낙하전 $F_{\Delta H}$ 계산 결과는 표 2에 나타낸 바와 같이 평균 1.569%, 최대 2.150%가 감소되어 설계기준이 만족되지 못하는 결과가 나왔다.

2.4 제어봉 삽입 한계선(RIL) 변경 및 평가

위에서 살펴 본 바와 같이 NFRT의 제거와 새로운 Hot Channel Factor Reduction Rate을 적용할 경우 설계기준을 만족시키기 위해 각 입력 변수에 대한 민감도 평가를 수행하였다. 평가결과 제어봉 낙하사고시 삽입한계선에 위치한 D-Bank가 인출되면서 노심에 양의 반응도를 유입시키는 D-Bank 제어봉가에 의한 영향이 가장 큰 것으로 나타났다. 기존의 고리 1호기는 전출력에서 D-Bank가 171 스텝까지 삽입될 수 있고 제어봉 중첩시작위치(Tip-to-Tip)는 128 스텝이다. 제어봉 낙하후 제어봉 삽입한계선에 있는 D-bank의 인출에 의해 유입되는 양의 반응도를 감소시키기 위해 삽입한계선에 따른 제어봉가 및 낙하전 $F_{\Delta H}$에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 평가 결과 그림 4와 같이 제어봉 중첩시작위치를 유지하면서 전출력에서 185 스텝 정도로 삽입한계선을 상향조정하는 것이 가장 적절한 것으로 나타났다. 새로운 삽입한계선을 적용하여 고리 1호기 18주기에 대한 재평가 결과 표 3과 같이 낙하전 $F_{\Delta H}$는 평균 3.170%, 최대 4.526% 증가되었으며, 최소 낙하전 $F_{\Delta H}$는 1.446로써 설계제한치(1.435) 보다 큰 값을 보여주므로 제어봉 낙하사고에 따른 설계기준을 만족하는 것으로 평가되었다.

2.5 제어봉 삽입 한계선(RIL) 변경에 따른 운전 영향

제어봉 삽입한계선이 상향 조정되면 제어봉 관련 모든 안전성 인자는 덜 제한적인 결과를 보이지만, 발전소 운전중에는 필요한 만큼의 반응도 제공 및 출력분포 제어에 제약이 될 수 있다. 따라서 출력 증발/감발시 축방향 출력편차(ΔI) 제어에 문제가 없는지 여부를 알기 위해 ΔI 제어가 가장 어려운 주기말에서 ΔI 거동 모사를 수행하였다. 그림 5는 고리 1호기 18주기 주기말에서 100%에서 20%까지 시간당 5%씩 감발을 가정하여 모사한 것으로 기술지침서 제한 범위 내인 ±5% ΔI 운전영역 내에서 제어가 가능한 것으로 나타나 변경된 제어봉 삽입한계선을 적용하여도 운전에 문제가 없는 것으로 나타났다. 그림 6은 0%에서 100%까지 시간당 3%씩 출력증발을 가정하여 원자로 기동을 모사한 결과로써 마찬가지로 상향 조정된 제어봉 삽입한계선이 특별히 운전에 영향을 미치지 않는 것으로 평가 되었다.

3. 결론

본 연구에서는 고리 1호기를 대상으로 NFRT 보호계통 제거에 따른 제어봉 낙하사고 평가를 수행하였다. 이를 위해 과거에 설정해 놓은 $F_{\Delta H}$ 관련 경험 상관식을 최근의 장전모형에 대하여 검증하였으며, 그 결과 Hot Channel Factor Reduction Rate이 덜 보수적인 것으로 평가되어 새로운 관계식을 도출하였다. 새로이 도출된 상관식을 적용한 결과 낙하전 $F_{\Delta H}$는 평균 1.569%, 최대 2.150% 낮아졌으며, NFRT를 제거할 경우 낙하전 $F_{\Delta H}$는 평균 0.345%, 최대 0.483%의 감소되어 설계기준이 위배되어 NFRT 제거가 어려운 것으로 평가되었다. 민감도 분석을 통하여 여유도 확보에 가장 효과적인 제어봉 삽입한계선을 전출력 기준 171 스텝에서 185 스텝으로 상향 조정하여 낙하전 $F_{\Delta H}$가 평균 3.170%, 최대 4.526% 상승하였고 최소 낙하전 $F_{\Delta H}$는 1.446으로써 설계 제한치를 만족하였다. 이 때 설계에 미치는 영향을 최소로 하기 위해 중첩시작위치는 기존 값을 그대로 유지하도록 하였다. 아울러 제어봉 삽입한계선 상향조정에 따른 영향을 평가하기 위해 출력 증감발을 모사한 결과 ΔI 제어에 문제가 없는 것으로 평가 되었다.

따라서 고리 1호기의 경우 운전에 영향을 주지 않는 범위에서 제어봉 삽입한계선을 상향조정하여 경미한 제어봉 낙하에 의한 불필요한 발전소 불시정지를 방지할 수 있도록 NFRT를 제거할 수 있음을 확인하였다.

REFERENCES

1. “DRPROD User Manual,” Westinghouse, October 2000
2. ’98 전력연- 단910, “첨두인자 감소율 변경 영향 평가 보고서,” 한국전력공사, 1998. 11.
3. WCAP-7878, “LOFTRAN Code Description and User’ s Manual,” Westinghouse, November 1989
4. WCAP-10297, "Dropped Rod Methodology of Negative Flux Rate Trip Plants," Westinghouse, June 1983
5. WCAP-11394-A, "Methodology for the Analysis of Dropped Rod Event," Westinghouse, January 1990
6. WCAP-10956-P-A, "ANC : A Westinghouse Advanced Nodal Computer Code," Y.S. Liu et. al., December, 1985

표 1. NFRT 제거 여부에 따른 Pre-drop $F_{\Delta H}$의 변화율

Burnup [MWD/MTU]	낙하전 $F_{\Delta H}$		변화량	변화율(%)
	CASE 1	CASE 2		
0	1.495	1.495	0	0
150	1.487	1.487	0	0
1000	1.490	1.490	0	0
2000	1.493	1.493	0	0

3000	1.487	1.487	0	0
4000	1.480	1.480	0	0
6000	1.461	1.461	0	0
8000	1.452	1.452	0	0
10000	1.447	1.447	0	0
12000	1.446	1.443	0.003	0.207
13690	1.449	1.442	0.007	0.483

CASE 1 : NFRT 제거 전의 Pre-drop $F_{\Delta H}$
CASE 2 : NFRT 제거 후의 Pre-drop $F_{\Delta H}$

표 2. Hot Channel Factor Reduction Rate **개선에 따른 영향 평가 결과**

Burnup [MWD/MTU]	**낙하전** $F_{\Delta H}$		**변화량**	**변화율**(%)
	CASE 2	CASE 1		
0	1.480	1.495	0.015	1.003
150	1.470	1.487	0.017	1.143
1000	1.474	1.490	0.016	1.074
2000	1.473	1.493	0.020	1.340
3000	1.465	1.487	0.022	1.480
4000	1.457	1.480	0.023	1.554
6000	1.436	1.461	0.025	1.711
8000	1.426	1.452	0.026	1.791
10000	1.419	1.447	0.028	1.935
12000	1.413	1.443	0.030	2.079
13690	1.411	1.442	0.031	2.150

CASE 1 : HCFRR 변경 전의 Pre-drop $F_{\Delta H}$
CASE 2 : HCFRR 변경 후의 Pre-drop $F_{\Delta H}$

표 3. **제어봉 삽입 한계선 변경에 따른** Pre-drop $F_{\Delta H}$ **비교**

Burnup [MWD/MTU]	**낙하전** $F_{\Delta H}$		**변화량**	**변화율**(%)
	CASE 1	CASE 2		
0	1.480	1.512	0.032	2.162
150	1.470	1.510	0.030	2.721
1000	1.474	1.512	0.038	2.578
2000	1.473	1.514	0.041	2.783
3000	1.465	1.512	0.047	3.208
4000	1.457	1.512	0.055	3.775

6000	1.436	1.501	0.065	4.526
8000	1.426	1.484	0.058	4.067
10000	1.419	1.469	0.050	3.524
12000	1.413	1.456	0.043	3.043
13690	1.411	1.446	0.035	2.481

CASE 1 : 제어봉 삽입 한계선 변경 전의 Pre-drop $F_{\Delta H}$
CASE 2 : 제어봉 삽입 한계선 변경 후의 Pre-drop $F_{\Delta H}$

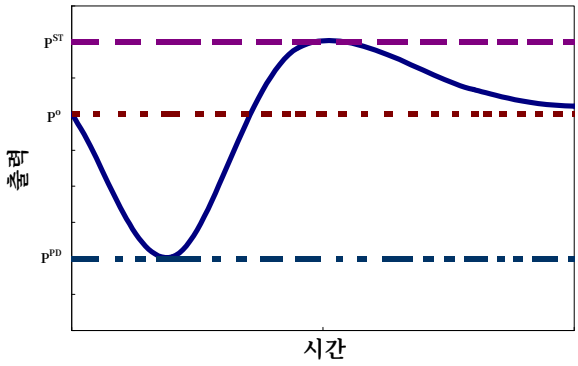

그림 1. 제어봉 낙하 사고시 시간에 따른 원자로 출력 변화

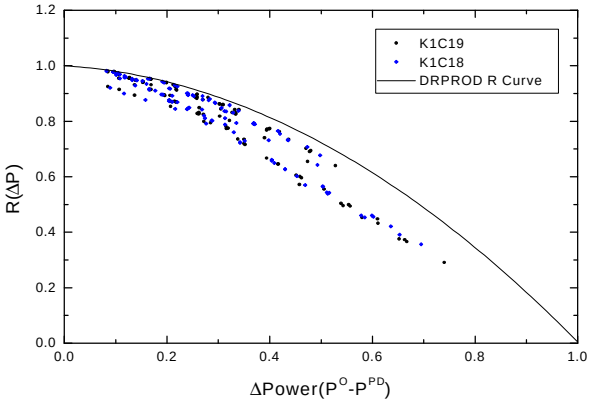

그림 2. Hot Channel Reduction Factor 계산 결과 비교

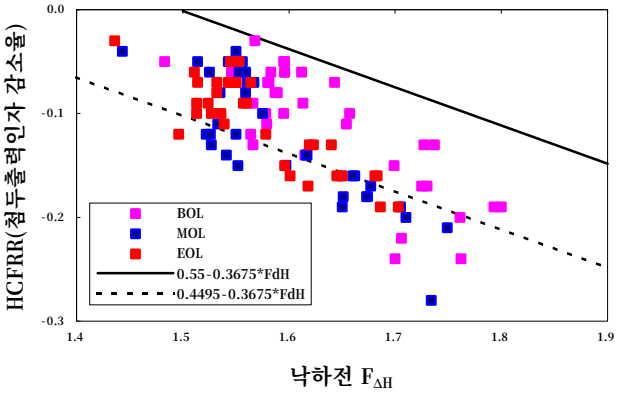

그림 3. Hot Channel Factor Reduction Rate 계산 결과 비교

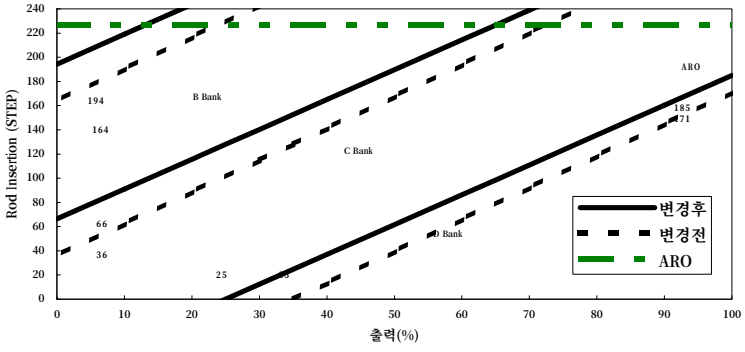

그림 4. 제어봉 삽입 한계선 변경 전후의 값 비교

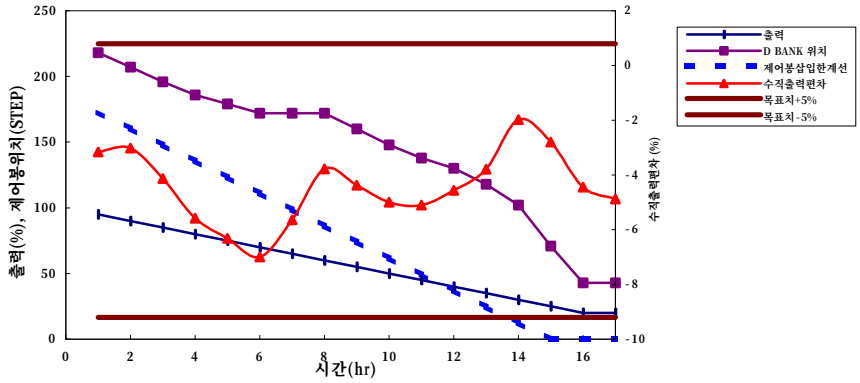

그림 5. 출력 감발시 ΔI 제어 모사 (100% ~ 20%, 5%/hr)

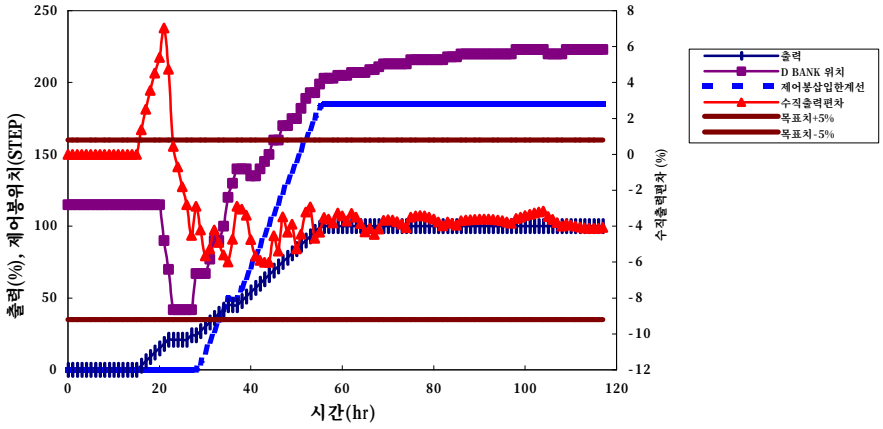

그림 6. 출력 증발시 ΔI 제어 모사 (0% ~ 100%, 3%/hr)