원전 제어봉제어계통 순시변동을 방지하기위한 지상-지연회로 설정치 최적화 연구

윤덕주+,이재용*,김인환*,김주성**

A Research on Optimization of Lead-lag Controller Setpoint for Rod control system to prevent fluctuation for NPP

Duk Joo Yoon, Jae-Yong Lee, In-Hwan Kim, Joo-Sung Kim

Key Words : Fluctuation(순시변동), Control rod(제어봉제어), Lead-lag(지상-지연),

Abstract : Fluctuation of control rod was experienced when plant was operating in normal operation mode in WH type NPPs. In order to cope with increased control rod fluctuation, the lead-lag controller setpoint for rod control system was optimized and resulted in increasing the margin of operation and minimizing unnecessary control rod movement. By optimization of the time constant, the margin of operation was increased by 1.5°F and the control rod movement was not occurred due to mitigation of temperature fluctuation in loop. According to the mitigation of time constant, the margin of operation was increased but safety margin can be affected badly, so that the influences to FSAR design reference was evaluated. As the result of this evaluation, it satisfied the design reference of the existing safety analysis and was applied to NPP after obtaining the approval.

기호설명

RTD : Resistance Thermal Detector
ESF : Engineered Safety Features
HFP: Hot Full Power
HZP : Hot Zero Power
OTΔT: Over temperature delta temperature
OPΔT: Over Power delta temperature
NSSS: Nuclear steam supply system

1. 서 론

고리 3,4호기 및 영광 1,2호기는 자동 제어봉 운전모드시에 정상운전 중임에도 불구하고 원치 않는 제어봉 이동을 경험하였다. 원치 않는 제어봉 이동은 고온관 온도순시변동(fluctuation)의 증가가 주 원인이 되어 발생하였다. 고온관 온도 순시변동은 RTD우회배관 제거 후에 고온관의 온도를 직접 취득함에 따라 증가되었다. 고온관 온도는 저온관 온도와 평균되어 제어봉 제어를 위한 냉각재 평균온도로 이용된다. 증가된 냉각재 평균온도 순시변동은 정상운전중 원치 않는 제어봉 이동이 발생하는 원인이 되었다. 이러한 현상은 국내의 고리3,4호기 및 영광1,2호기뿐만이 아니라 다수 외국의 웨스팅하우스형 발전소에서도 발생하였다. 외국의 Westinghouse형 발전소에서는 원치 않는 제어봉 이동을 방지하기 위하여 제어봉 제어계통의 설정치 및 시정수를 완화한 사례가 있다. 본 연구에서는 영광 1,2호기에서 정상상태 운전중에 원치 않는 제어봉 이동을 방지하는 것이 목적이다[1,2].

† 한전 전력연구원
E-mail : djyoon@kepri.re.kr
TEL : (042)865-5593 FAX : (042)865-5504
* 한전 전력연구원
** 한국 원자력안전기술원

2. 제어봉 제어계통 설정치 개선안

고리 3,4호기 및 영광 1,2호기는 출력증강 이후 정상운전중 원치 않는 제어봉 이동을 방지하기 위해 원전사례 분석 및 민감도 평가를 통하여 제어봉 제어계통 설정치 최적화 방안을 다음과 같이 최적화 개선방안을 제안한다. (1)

lead/lag($\frac{1+\tau_1 s}{1+\tau_2 s}$)의 시정수 변경(80/10 (sec/sec) → 40/10(sec/sec)), (2) lag($\frac{1}{1+\tau_3 s}$) 시정수 변경(5 (sec) →10 (sec))

$$T_E = T_{ref}\frac{1}{(1+T_2 S)} - T_{avg}\frac{(1+T_3 S)}{(1+T_4 S)}\frac{1}{(1+T_5 S)} + [(Q_{tu} - Q_n)\frac{T_1 S}{(1+T_1 S)}K_1 K_2] \quad \cdots\cdots (1)$$

3. 과도해석 방법론

제안된 제어봉 제어계통 설정치 및 시정수가 원자로 응답에 미치는 영향을 평가하기 위하여 다음과 같은 Condition I 과도해석을 수행하였다. 제어봉 제어계통 설정치 결정방법 및 설정치 변경이 영향을 미치는 원자로 과도응답은 (1) 90% 출력에서 10% 단계부하 증가 (2) 15% 출력에서 5%/min 경사부하 증가 (3) 100% 출력에서 95% 대형부하 감발 등이다.

Condition I 과도해석은 최적 해석방법에 따라 수행되었다. 분석도구로는 웨스팅하우스사에서 NSSS 과도상태 해석용으로 사용하는 LOFTRAN 전산코드[2]를 이용하였다. 입력은 다음과 같다. (1)원자로 출력은 2787MWt, 냉각재 평균온도는 588.5°F이다. (2) 전출력(HFP) 및 영출력(HZP)시 RCS 및 2차측 조건 : RCS 유량으로는 열설계 유량(TDF)을 이용하였다. RCS 유량은 제어계통 평가에 민감하지 않다. (3) 제어계통 동작논리는 현재와 동일하다. 증기발생기 수위제어 계통이 제어계통 안정도 분석에서는 모델되지 않으며 단지 증기발생기 초기 질량이 새로 계산되어 안정도 분석에 이용된다. (4) 원자로 정지 및 공학적 안전계통(ESF) 작동 논리가 그대로 이용된다. (5) 제어봉 제어계통 설정치는 개선안과 같이 조정되었다. (6) 원자로 정지 설정치, ESF 설정치 및 시정수는 기술지침서에 있는 정격 설정치가 이용된다. 이에 반하여 안전해석에 사용하는 설정치는 기술지침서 정격 설정치에 적절한 불확실도를 고려하여 사용한다. 제어계통 설정치 평가에 사용된 OTΔT 및 OPΔT 설정치는 변경 없다. (7) 가압기 PORV 용량은 가압기 PORV 3개가 있으며 2335 psig에서 각 밸브가 210,000 lbm/hr의 포화증기 방출능력이 있다. (8) 가압기 살수밸브 용량 700 gpm을 사용하였다. 이 값을 질량률로 환산할 때는 RCS 운전온도 및 압력을 고려한다. (9) 가압기 히터 용량은 1000kW, 비례히터 용량은 400kW의 설계치를 사용한다. (10) RCS와 SG 2차측 체적, SG 질량등 기타 자료는 제어계통 설정치 평가를 위한 기본입력이다[3,4.5].

4. 안정도 분석결과

NSSS 제어계통은 정상과도상태시 허용가능하고 안정된 반응을 보이도록 설계된다. 불안정한 제어계통은 NSSS 변수들을 통제권 밖으로 보낼 수 있을 뿐만 아니라 제어계통의 심각한 고장을 야기할 수도 있다. 본 연구에서는 제어봉 제어계통의 설정치 및 시정수 변경에 따른 NSSS제어계통의 안정도를 평가하였다.

4.1 운전성능 분석

제어봉 제어계통 설정치 및 시정수의 변경이 정상 과도상태시(Condition I) 여러 가지 원자로 정지 및 공학적 안전기능(ESF) 작동 설정치와의 적절한 여유도를 유지하는지를 평가한다. 정상과도상태는 대부분 전출력에서 발생하나 때로는 부분출력에서도 발생한다.

본 연구에서는 전부하상실의 OTΔT 운전여유도를 평가하기 위하여 전출력에서 전부하 상실 과도 발생시 원전에서 취득된 자료를 과도해석에 이용하였다. 터빈 1단 압력은 출력에 따른 기준온도(Tref)프로그램을 거친 후에 제어봉 제어를 위한 입력으로 이용된다. 전부하 상실 과도시에 터빈 압력은 0% 출력에 해당하는 기준온도(557°F)로 급격히 감소하는 것으로 가정 되지만, 실측 자료에 의하면 전부하 상실과도시 초기 3초에 25% 출력(564°F)까지 감소하고 이후 60초 동안에 0% 출력(557°F)까지 감소한다. 이런 현상은 제어봉 제어 및 증기덤프 제어 성능을 감소시켜 운전여유도 감소의 직접적인 원인이 된다. 본 연구에서는 보수적인 운전여유도 평가를 위하여 전부하 상실 과도시 실측된 자료를 이용하여 운전여유도를 평가하였다.

4.1.1 허용기준

핵증기 공급계통 제어계통의 자동 동작을 가정한 모든 Condition I 과도해석 결과에서 원자로 출력, 압력, 평균온도, 제어봉 위치 및 증기발생기 압력 등이 진동없이 원자로가 제어되어야 한다. 또한 OTΔT/OPΔT 등의 모든 원자로 보호계통 및 공학적 안전설비(ESF) 작동 설정치에 대하여 적당한 운전여유도를 유지해야한다.

4.1.2 분석결과

(1) 10% 단계부하 증가

그림 1 ~ 그림 4 까지는 90% 출력에서 10% 단계부하 증가 과도상태의 결과를 나타낸다. 변

경(안)의 제어봉 제어계통 설정치를 원자로에 적용하더라도 1차 및 2차 계통에서 진동없이 안정도가 유지되면서 원자로가 제어되고, 현재 설정치와 비교하더라도 원자로 제어성능에는 큰 차이가 없음을 확인하였다.

그림 5 및 그림 6은 OPΔT 운전여유도 및 35/5(lead/lag) 제어기에 의하여 보상된 증기관 압력 변화를 나타낸다. 변경(안)의 제어봉 제어계통 설정치를 원자로 제어계통에 적용하였을 경우 최소 OPΔT 운전여유도가 현재 3.2%에서 2.6%로 약간 감소하였지만 여전히 적당한 운전여유도를 유지함을 확인하였다. 보상된 최소증기관 압력도 현재설정치 조건의 결과와 유사하고 공학적 안전설비 작동 설정치(600psia)에 대하여도 적당한 운전여유도를 유지함을 확인하였다.

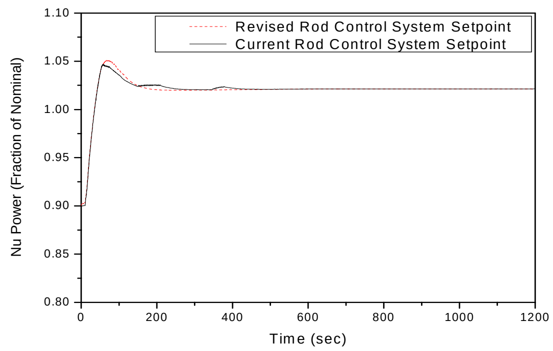

Fig. 1 Nuclear Power in 10% Load Increase

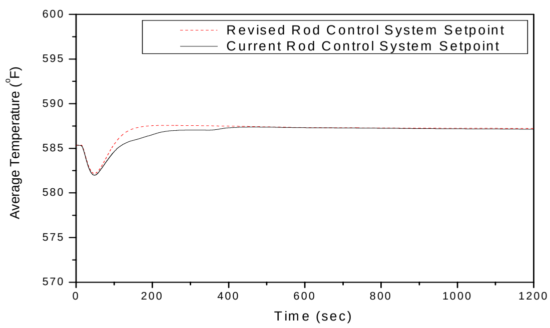

Fig. 2 Temperature in 10% Load Increase

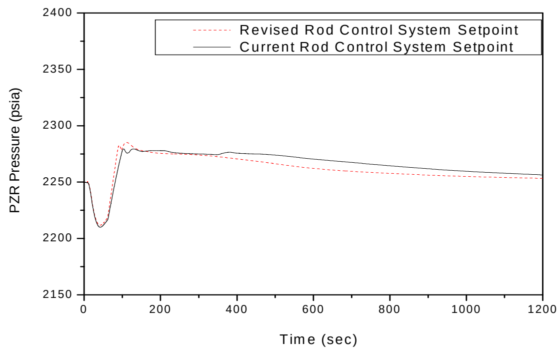

Fig. 3 Pressure in 10% Load Inrease

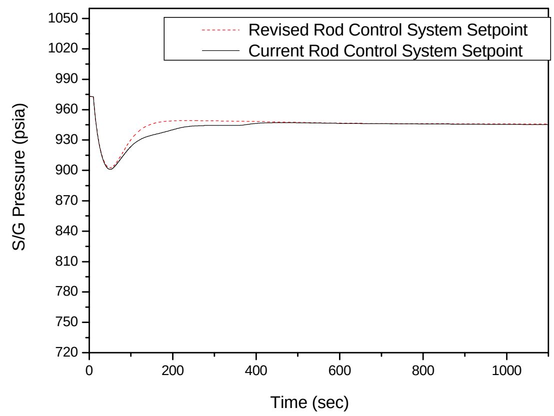

Fig. 4 SG Pr. in 10% Load Increase

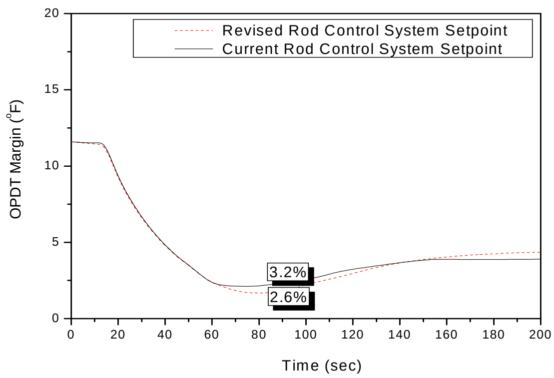

Fig. 5 OTDT Margin in 10% Load Increase

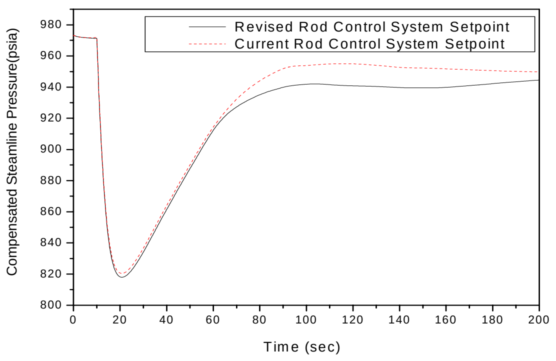

Fig. 6 Steam Pr. in 10% Load Increase

(2) 5%/min 경사부하 증가

5%/min 경사부하 증가 과도상태는 그림 7~ 그림 10에 나타난다. 변경(안)의 제어봉 제어계통 설정치를 원자로에 적용하더라도 1차 및 2차 계통에서 진동없이 안정도가 유지되면서 원자로가 제어되고, 현재 설정치와 비교하더라도 원자로 제어성능에는 큰 차이가 없음을 확인하였다.

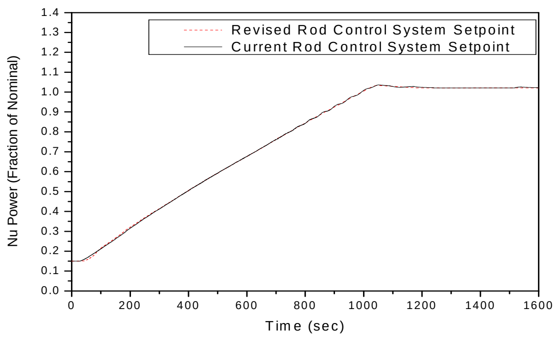

Fig. 7 Nuclear Power in 5%/min Ramp Increase

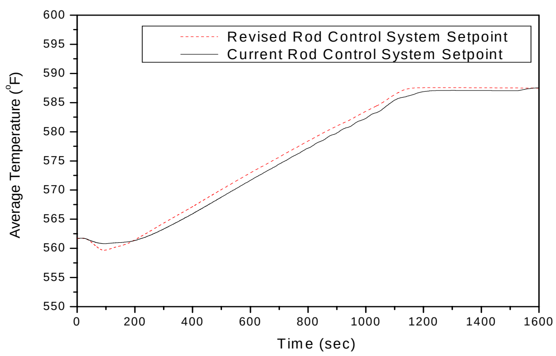

Fig. 8 Temperature in 5%/min Ramp Increase

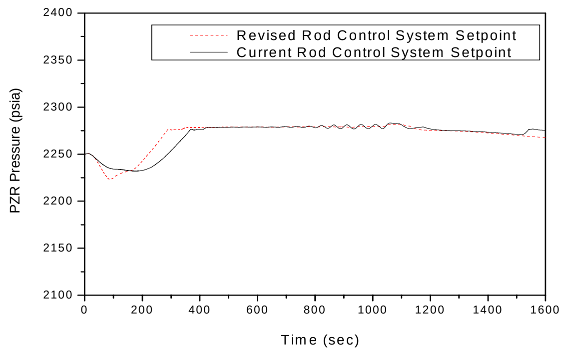

Fig. 9 Pressure in 5%/min Ramp Increase

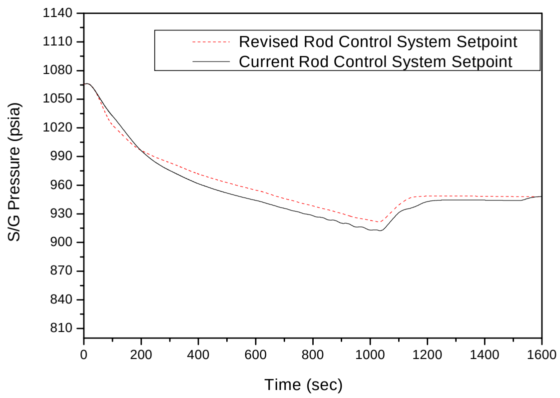

Fig. 10 SG pressure in 5%/min Ramp Increase

(3) 95% 부하감발

그림 11 ~ 그림 14 까지는 100% 출력에서 95% 부하 상실 과도상태의 결과를 나타낸다. 변경(안)의 제어봉 제어계통 설정치를 원자로에 적용하더라도 1차 및 2차 계통에서 안정도가 유지되면서 원자로가 제어되고, 현재 설정치와 비교하더라도 원자로 제어성능에는 큰 차이가 없음을 확인하였다. 소내부하 운전시에는 제어봉이 진동하여 약간 불안정한 것으로 나타나지만, 실질적으로는 수동 원자로 제어 운전을 수행하므로 제어봉 진동이 발생하지 않는다.

그림 15 ~ 그림 14 에 나타나듯이 제어봉 제어계통 설정치 변경이 대형부하감발 과도의 운전여유도에 미치는 영향은 미미하다. 95% 부하감발 발생 시 운전여유도는 제어봉 제어계통보다 증기덤프 제어계통에 영향을 많이 받기 때문이다. 변경(안) 제어봉 제어계통 설정치 조건에서 OTΔT 운전여유도가 3.3%(정지설정치 0%), 최대 가압기 수위가 934.56 ft^3(정지설정치: 1274.69 ft^3)으로써 원자로 정지에 대하여 적절한 운전여유도를 유지함을 확인하였다. 또한,

lead/lag(35/5) 제어기에 의하여 보상된 최소 증기관 저압력이 804.7 psia(SI 발생설정치: 600psia), 최대 증기발생기 압력이 1105 psia (안전밸브 작동 설정치: 1200 psia)로써 공학적 안전계통 작동 및 증기발생기 안전밸브의 작동에 대하여도 적당한 운전여유도가 있음을 확인하였다.

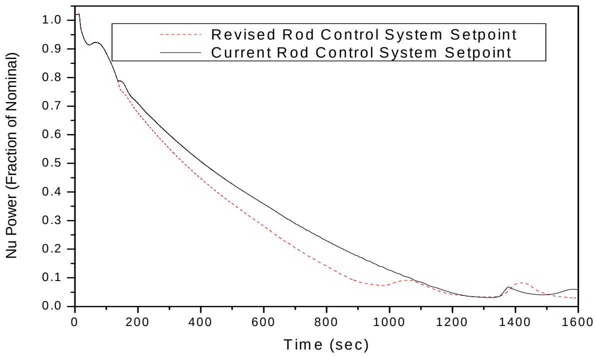

Fig. 11 Nuclear Power in 95% Load Rejection

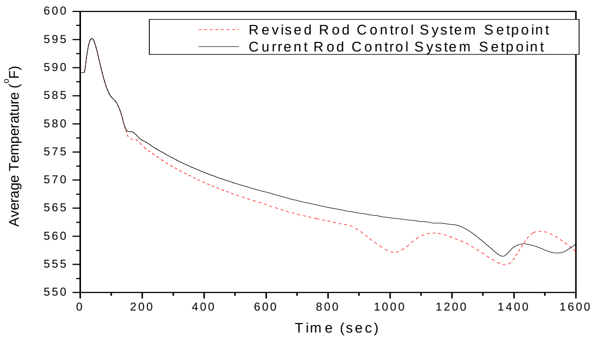

Fig. 12 Temperature in 95% Load Rejection

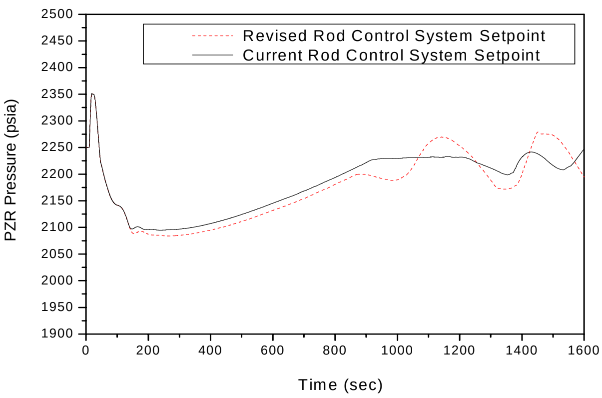

Fig. 13 Pressure in 95% Load Rejection

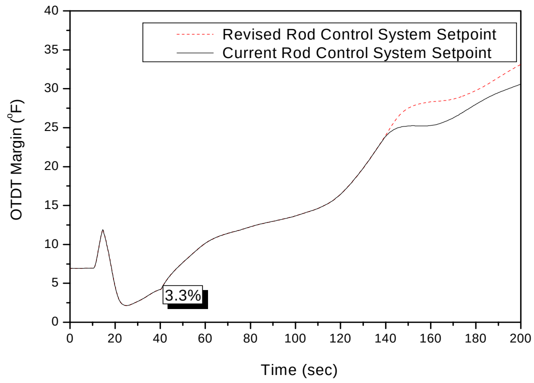

Fig. 14 OTDT Margin in 95% Load Rejection

4.2 안전해석 평가

제어봉 제어계통의 설정치 및 시정수의 변경은 사고시에 제어봉 제어성능에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 자동 제어봉 제어모드가 가정된 FSAR 설계기준 안전해석을 재평가하였다. 제어봉 제어에 영향을 받는 FSAR 설계기준 안전해석은 급수계통 오작동 사고, 과도한 부하증가 사고, 제어봉 낙하사고가 있으며, 모든 사고는 ANS-Condition II사고로 분류된다.

4.2.1 급수계통 오작동 사고(FSAR 15.1.2)

증기발생기로 공급되는 주급수 유량의 과도한 증가나 주급수의 온도가 감소되어 증기발생기를 과냉각시켜 원자로 출력을 전출력 이상으로 증가시키는 사고이다. 증기발생기 고수위에 의한 원자로 정지가 발생하며 자동 제어봉 제어계통 동작과 수동 제어봉 제어계통의 동작이 사고해석에서 가정된다. 평가결과 제어봉 제어계통의 설정치 변경이 본 사고에 미치는 영향은 매우 미미하다. 따라서 기존의 FSAR 결과가 계속 유효하다.

4.2.2 과도한 부하증가 사고(FSAR 15.1.3)

2차측의 과도한 부하 증가로 인하여 발생하는 사고이다. 2차측의 과도한 부하증가는 1차측과 출력 불일치가 발생하고, 원자로 제어계통은 15% 출력과 100% 출력범위에서 10% 단계부하변화 및 5%/min 경사부하 변화를 제어할 수 있도록 설계된다. 자동 제어봉 제어계통 동작과 수동 제어봉 제어계통의 동작이 사고해석에서 가정된다. 평가결과 제어봉 제어계통의 설정치 변경이 본 사고에 미치는 영향은 매우 미미하다. 따라서 기존의 FSAR 결과가 계속 유효하다.

4.2.3 제어봉 낙하 사고(FSAR 15.4.3)

제어봉이 노심으로 낙하하여 음의 반응도 삽입에 의해 노심 출력은 급격히 감소하고, 자동 제어봉 운전 모드에서는 제어봉이 인출되는 사고이다. 최소 DNBR이 제한치 이상으로 유지됨을 보장하여 핵연료의 피복관의 건전성이 유지되어야 한다. 평가결과 제어봉 제어계통의 설정치 변경이 본 사고에 미치는 영향은 매우 미미하다. 따라서 기존의 FSAR 결과가 계속 유효하다.

4.3 운전여유도 분석

정상운전중에 취득된 제어봉 제어계통 데이타 분석은 제어기의 설정치 및 시정수 변경이 제어봉 제어계통에 미치는 영향을 평가하기 위함이다. 데이터 분석은 원치 않는 제어봉 이동이 발생한 기간동안 실측된 냉각재 평균온도 채널과 출력편차 채널의 신호를 이용하였다.

4.3.1 분석방법

신호가 취득된 기간 이외의 불안정한 기간 및 타 발전소를 고려하여 그림15처럼 냉각재 평균온도 채널과 출력편차 채널에 약 2배의 가상적 보수성을 적용하였다.

4.3.2 분석결과

그림 15는 현재 설정치 조건에서 정상운전 중 실측된 제어봉 제어를 위한 최종신호와 제안된 제어봉 제어계통 설정치 및 시정수 조건에서 분석결과를 나타낸다. 검정색 실선은 현재 설정치에서 제어봉 제어를 위한 최종신호로써 제어봉 제어 불감대 온도(Dead Band)인 1.5°F를 초과하여 원치 않는 제어봉 이동이 발생하였다. 빨간색 실선은 변경(안) 설정치 조건에서 제어봉 제어를 위한 최종신호이다. 제어봉 제어 불감대 온도(Dead Band)를 초과하지 않았으므로 변경안의 설정치 조건에서는 정상운전중에 제어봉 이동이 발생하지 않음 확인되었다.

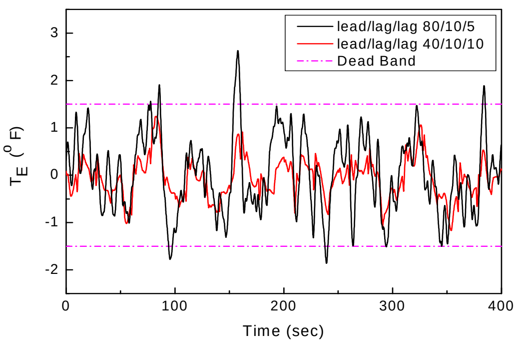

Fig. 15 Temperature after setpoint change

5 결론

원치 않는 제어봉 이동을 방지하기 위하여 Condition I 과도해석 및 데이터 분석을 통하여 제어봉 제어계통 설정치 최적화를 제안하였다. 제안된 제어봉 제어계통 설정치를 웨스팅하우스형 국내원전에 적용하여 Condition I 과도해석을 평가한 결과 원자로 출력, 냉각재 온도, 제어봉 제어 및 증기발생기 압력 등 1차측 및 2차측이 안정적으로 제어됨을 확인하였다. 또한, 운전여유도 평가결과 모든 Condition I 운전 조건에서 원자로 정지가 발생하지 않으며, 공학적 안전설비의 작동 설정치에도 적절한 운전 여유도가 있음을 확인하였다. 정상운전 중에 실측된 제어봉 제어계통 신호를 분석한 결과 제안된 제어봉 제어계통 설정치 조건에서는 원치 않는 제어봉 이동이 발생하지 않음을 확인하였다. FSAR 설계기준 안전해석을 평가한 결과 제어봉 제어계통의 설정치 변경이 안전해석에 미치는 영향은 미미함을 확인하였다.

참고문헌

1. WCAP-10348, Setpoint Study Korea Electric Power Corporation Units 5&6, WEC, 1983.
2. WCAP-7878, LOFTRAN Code Description and User's Manual, Latest Revision., WEC
3. KGA/KHB/KTR Base Deck for Vantage 5 Hybrid Fuel, CN-TA-92-147, KEPRI & WEC, 1992..11.12
4. Kori 3&4, Yonggwang 1&2, FSAR Chapter 16
5. Yonggwang 1$2/Kori 3&4 Uprate - Rod Control System Setpoint Revision, J.Srinivasan, R.Calvo, WEC, 2005.3.18