

'01 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

중수로형 원전의 정화계통(Purification System) 제어성 분석

The Controllability Analysis of the Purification System for Heavy Water Reactors

이광대, 조병학, 신창훈, 김석곤
한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

이연기, 김기업
한국수력원자력(주) 월성원자력본부
경북 경주시 양남면 나아리 260

요 약

중수로형 원전인 월성1,2호기에는 냉각재 회로의 방사성 부식 생성물을 최소화하고 pH 조정을 위하여 냉각재 정화 계통이 있다. 이 계통은 냉각재 계통으로부터 일정한 유량의 냉각수를 받아서 열교환기를 통하여 후단의 이온 교환 수지 요건에 적합한 적정 온도로 제어후 이온 교환기로 보내게된다. 그러나, 운전중의 핵연료 교체 후, 냉각재 계통 압력 증가에 따라 정화 유량이 증가하고 이에 따라 정화 유량 온도 제어에 난조가 발생하는 현상이 있어왔다. 본 논문에서는 먼저 정화 계통 온도 제어 특성을 분석하고 제어 대상을 ARMA(Auto Regressive Moving Average) 식으로 모델링하였다. 제어 모델에 대한 실제 운전 특성과의 적합성을 검증하였으며, 제어 모델을 이용하여 제어성을 분석하였다. 또한, 현재 제어 루프에서 최적 파라미터를 찾고 적용 결과를 분석하였으며, 보다 나은 제어 특성을 얻기 위하여 Feedforward 제어 방식을 제안하고 효과에 대하여 검토하였다.

Abstract

The heavy water reactor such as Wolsung #1 & #2 has a purification system to purify the reactor coolant. The control system regulates the coolant temperature to protect the ion exchanger. After the fuel exchanges of operating plant, the increase of the coolant pressure makes the purification temperature control difficult. In this paper, the controllability of the control dynamics of the purification system was analysed and the optimal parameters were proposed. To reduce the effects of the flow disturbance, the feedforward control structure was proposed and analysed.

1. 서론

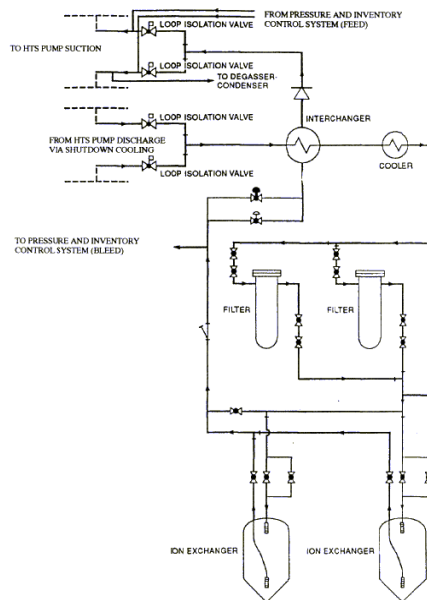
중수로형 원전인 월성1,2호기에는 냉각재 회로의 방사성 부식 생성물을 최소화하고 pH 조절을 위하여 냉각재 정화 계통이 있다. 이 계통은 냉각재 계통으로부터 일정한 유량의 냉각수를 받아서 열교환기를 통하여 후단의 이온교환수지 요건에 적합한 적정 온도로 제어 후 이온 교환기로 보내게된다.

그러나, 운전중 핵연료 교체 후, 냉각재 계통의 압력이 유량이 증가하고 이에 따라 정화 유량 온도 제어에 난조가 발생하는 현상이 있어왔다.

본 논문에서는 먼저, 정화 계통 온도 제어 특성을 분석하고 제어 시스템을 ARMA (Auto Regressive Moving Average) 식으로 모델링하였다. 제어 모델에 대한 실제 운전 특성과의 적합성을 검증하였으며 제어 모델을 이용하여 제어성을 분석하였다. 또한, 현재 제어 루프에서 최적 파라미터를 찾고 적용 결과를 분석하였으며, 보다 나은 제어 특성을 얻기 위하여 Feedforward 제어 방식을 제안하고 효과에 대하여 검토하였다.

2. 정화 계통 (Purification System) 개요

월성2호기 정화 계통(Purification System)의 구성은 [그림 1], 기능은 다음과 같다.



[그림 1] 정화 계통 간략도

- 핵연료 손상부위로부터 방출되는 핵분열 생성물 농도 조절
- 냉각수 pH 조절
- 원하는 최대 유량 24Kg/s까지 수동 조절

- 필터, 이온 교환 수지탑 여과기 차압 감시
- 정화수를 266℃ 에서 65℃로 제어 (온도 설정치는 48℃이고 65℃에서 격리 밸브가 차단 됨)

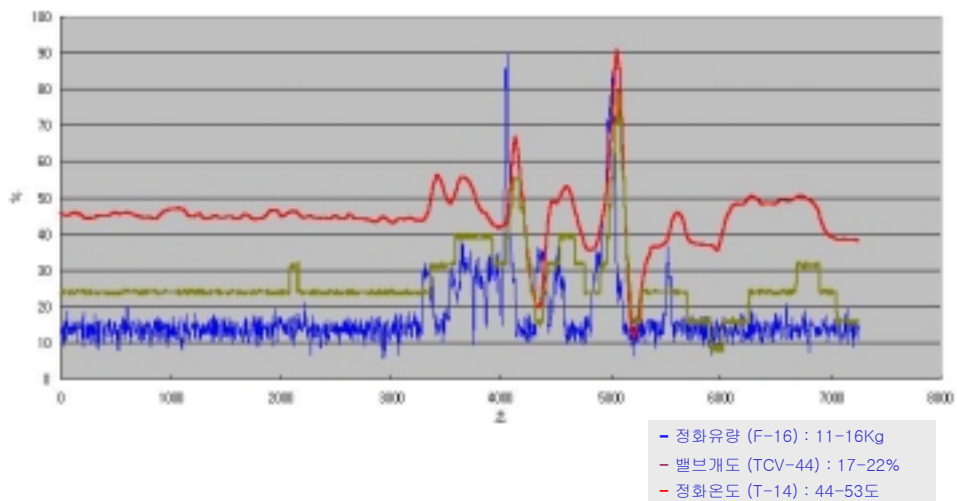
3. 정화 계통(Purification System) 제어 현상 분석

정화 계통(Purification System)의 제어 특성은 다음과 같고 실제 운전 현상은 [그림 2], 상세 운전 현상은 [그림 3]과 같다.

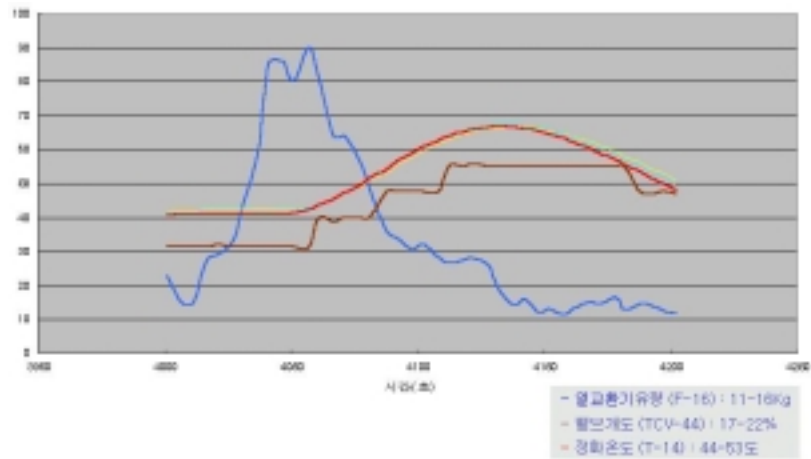
- 핵연료 교체후 원자로 냉각재 팽창에 의한 가압기 수위가 설정치보다 상승 [표 1]
- 가압기 수위 증가에 대한 Bleed 밸브 개방
- Bleed 밸브 개방으로 정화 계통으로 유입되는 유량 증가
- 정화 계통 출구 온도 상승 (정화용 수지 손상 가능)
- 온도 상승에 따른 수지 보호를 위해 전단 수동 밸브가 차단

	연료 교체전	연료 교체후
가압기 수위(m)	8.95m	9.10m
Bleed 유량(Kg)	12	
정화계통 온도(C)	48	58 이상

[표 1] 연료 교체 전후 가압기 수위 변화



[그림 2] 정화 계통 제어 현상



[그림 3] 상세한 제어 현상

[그림 2]에서는 핵연료 교체후, 정화 유량 변화에 따라 적정한 설정 값으로 제어가 되지 못하고 정화 온도가 계속적으로 흔들리며 제어가 됨을 보여주고 있다.

[그림 3]에서는 [그림 2]의 제어 특성을 부분 확대한 것으로, 정화 유량이 증가를 시작한 후 약 50초 후에 정화 온도가 서서히 증가를 한다는 것을 알 수 있다. 정화 온도가 증가함에 따라, PID 제어 동작에 의해 냉각수 밸브가 열리기 시작하고 냉각 능력 증가에 따라 정화 온도는 감소하기 시작한다.

4. 정화 계통 열교환기 제어 모델 개발

정화 계통 온도 제어 루프에 대한 제어 안정성 분석과 시뮬레이션을 위하여 제어 대상인 열교환기의 제어 모델을 개발하였다. 제어 모델은 열역학 미분 방정식을 이용한 전달 함수 모델과 실제 운전 데이터를 이용한 ARMA 모델을 검토하였으며 여기서 적용한 모델은 차분 방정식 형태의 ARMA 모델을 사용하였다. 제어 입력으로는 냉각수 유량, 제어 출력은 정화 유량 온도로 설정하였으며 정화 유량은 제어 출력에 대한 외란으로 설정하였다.

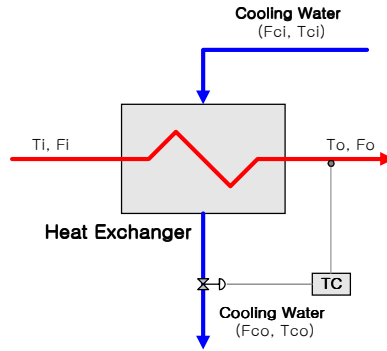
(1) 열평형식에 의한 열교환기 전달 함수

정화 계통 온도 제어를 위한 열교환기 모델은 [그림 4]와 같다.

열교환기 거동에 대하여 다음과 같은 수식을 작성할 수 있다.

○ Mass Equation

$$\frac{d(Ah)}{dt} = F_{\infty} - F_{st}$$



[그림 4] 정화계통 온도제어 열교환기 간략도

○ Energy Equation

$$\left[\frac{\text{축적에너지}}{\text{시간}} \right] = \left[\frac{\text{입력에너지}}{\text{시간}} \right] - \left[\frac{\text{출력에너지}}{\text{시간}} \right] + \left[\frac{\text{냉각수공급에너지}}{\text{시간}} \right]$$

$$\left[\frac{d[\rho AhC_p (T - T_{ref})]}{dt} \right] = [\rho F_i C_p (T_i - T_{ref})] - [\rho F_o C_p (T_o - T_{ref})] + Q$$

$$Ah \frac{dT}{dt} = F_i (T_i - T) + \frac{Q}{\rho C_p}$$

여기서, C_p = 탱크 열용량

위의 식들로부터 Laplace 방정식의 전달 함수를 구하면

$$\text{열교환기출구온도 } T_o = \frac{K_1}{S+T_1} T_i + \frac{K_2}{S+T_2} T_a$$

제어 출력인 정화 온도는 제어 입력과 외란에 대해 1차 전달 함수로 나타낼 수 있다.

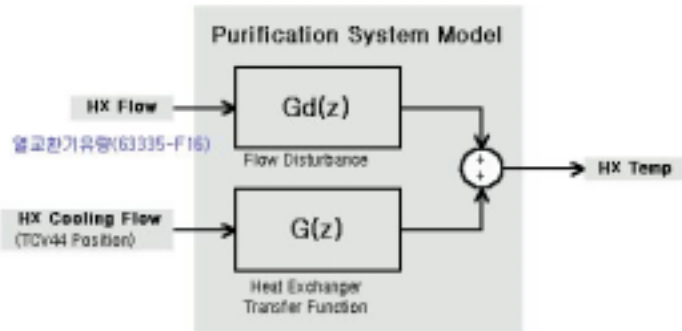
(2) ARMA 모델을 이용한 차분 모델 개발

위의 열평형식을 이용한 제어 모델 개발에는 수식을 정확하게 작성할 수 있을 정도의 깊은 열역학 지식이 필요하고 운전 특성을 정확하게 반영하는 데는 어려움이 있다.

따라서, 제어 대상을 차분 형식의 ARMA(Auto Regressive Moving Average) 모델로 작성한 후 실제 운전 값을 이용하여 파라미터를 찾음(Identification)으로서 제어 모델을 구하는 방법을 사용하였다.

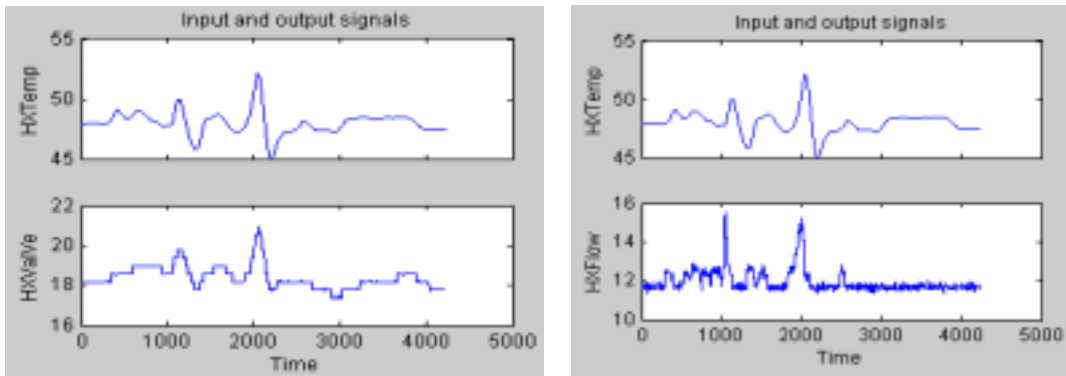
정화 계통 열교환기의 ARMA 모델은 [그림 5]와 같이 나타낼 수 있다. 여기에서 열교환기 냉각수 유량은 제어 입력으로, 정화 유량은 제어 시스템 외란으로 나타내었고 제어 입력에 대한 전달 함수를 $G(z)$, 외란에 의한 전달 함수를 $Gd(z)$ 로 나타내었다.

[그림 6]에서는 $G(z)$, $G_d(z)$ 의 파라미터 Identification을 위하여 사용한 실제 운전 데이터를 보여준다.



• 정화계통 열교환기 모델 : ARMA Model
 $HXTemp(z) = G(z) \cdot HXValve(z) + G_d(z) \cdot HXFlow(z)$

[그림 5] 정화계통 열교환기 ARMA 모델



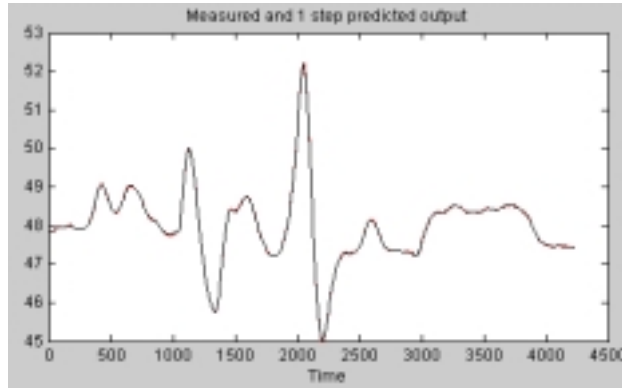
[그림 6] 열교환기 제어 모델에 사용한 운전 데이터

위로부터 구한 정화계통 열교환기 제어 모델은 다음과 같다.

$$G(z) = \frac{-0.01198}{z^2 - 1.911z + 0.9103} \quad \text{----- [식 1]}$$

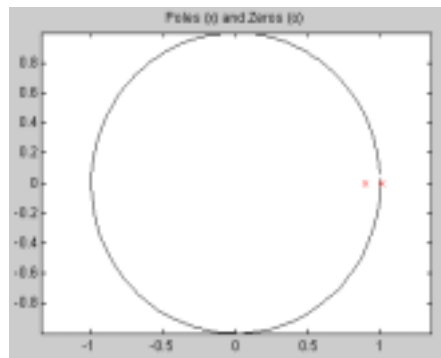
$$G_d(z) = \frac{0.01384}{z^2 - 1.911z + 0.9103}$$

운전 데이터로 구한 ARMA 모델을 검증하기 위하여 실제 제어 입력과 외란을 인가하며 모델 출력과 실제 운전 출력 온도를 비교한 것이 [그림 7]이다. 이로부터 실제 제어 입력을 인가하였을 때, 실제 열교환기 거동은 ARMA 모델의 거동과 거의 일치함을 보여주며 모델링이 적절하게 되었음을 나타내고 있다.



[그림 7] 실제 운전 출력과 모델 출력의 비교

[식 1]의 열교환기 제어 모델의 제어 안정도를 검토하기 위하여 그린 Pole-Zero Plot은 [그림 8]과 같다. 이 그림에서 열교환기는 두 개 Pole이 제어 안정도 경계선인 1.0에 인접한 내부 혹은 외부에 위치하여 입력이나 외란에 대한 제어 출력이 불안정한 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.



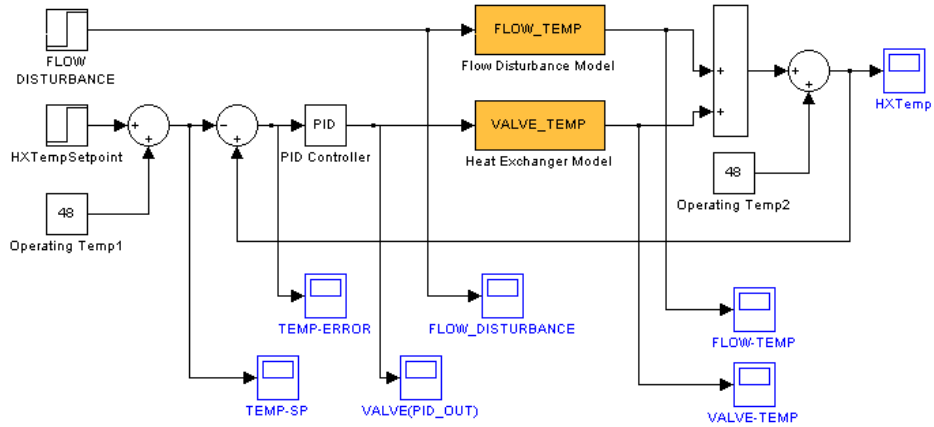
[그림 8] 제어모델의 Pole-Zero Plot

5. 현재 제어 루프에서의 최적 파라미터 설정

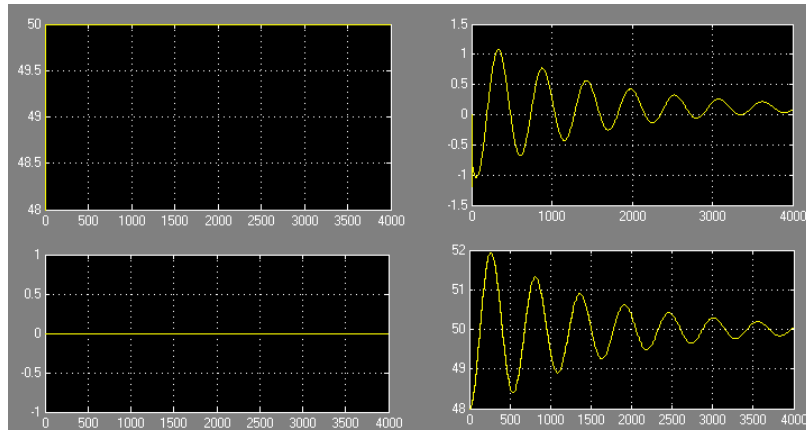
현재 운전중인 제어 파라미터 상에서 제어 루프의 특성을 분석하고 최적 제어 파라미터를 찾기 위한 시뮬레이션 모델을 [그림 9]와 같이 구성하였다.

현재 PID 제어 파라미터(비례이득=0.4%/ $^{\circ}\text{C}$, 적분시간=180초, 미분시간=2.5초)에서 제어 특성을 분석하기 위하여, 제어 입력에 대한 동특성과 정화 유량 외란에 의한 동특성을 각각 검토하였다. 정화 유량에 의한 Flow Disturbance가 없을 때, 온도 설정치를 48 \rightarrow 50 $^{\circ}\text{C}$ 로 변화시켰을 때의 정화 온도는 [그림 10]과 같다. 설정치 변경에 대해서 제어 출력인 정화 온도는 약 2 $^{\circ}\text{C}$ 의 오버슈터를 나타내고있으며 1 시간 30분 이상의 안정 시간이 필요한 것으로 보인다.

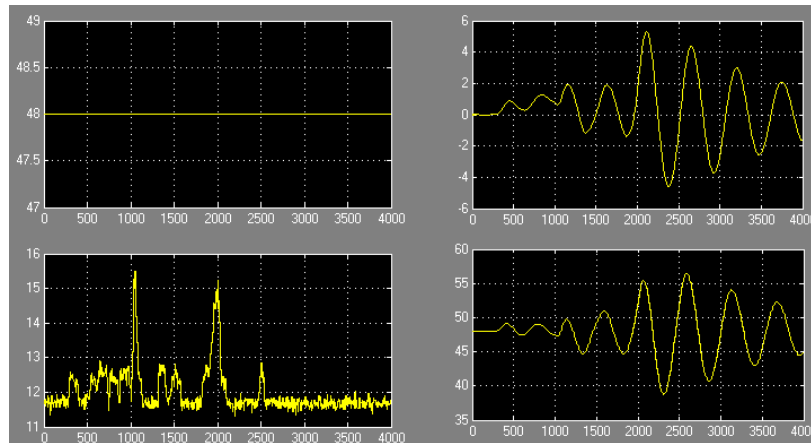
[그림 11]에서는 정상적인 제어 상태에서 정화 유량이 변화하는 Flow Disturbance가 있을 경우의 제어 형태를 보여주고 있다.



[그림 9] 현재 제어루프 설정을 위한 구성



[그림 10] 온도 설정치 변경시 거동(Flow Disturbance 없음)
(상단좌/우:온도설정치/제어기출력, 하단좌/우:정화유량/정화온도)

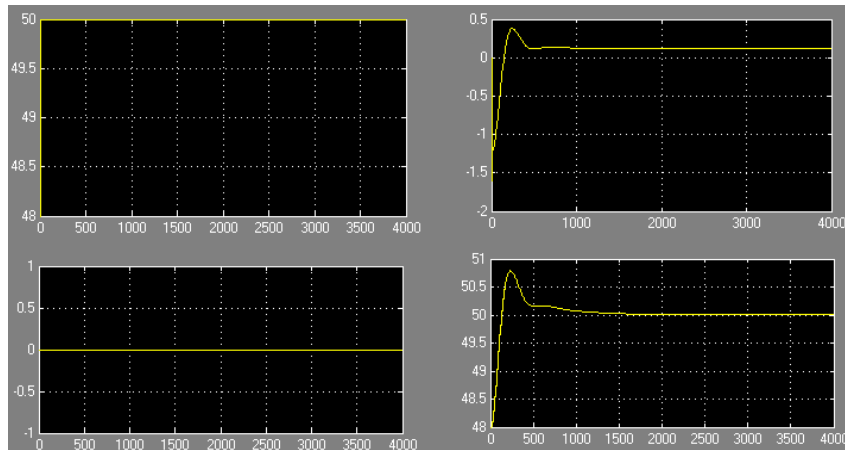


[그림 11] 정상 제어 동작에서 Flow Disturbance가 있을 경우

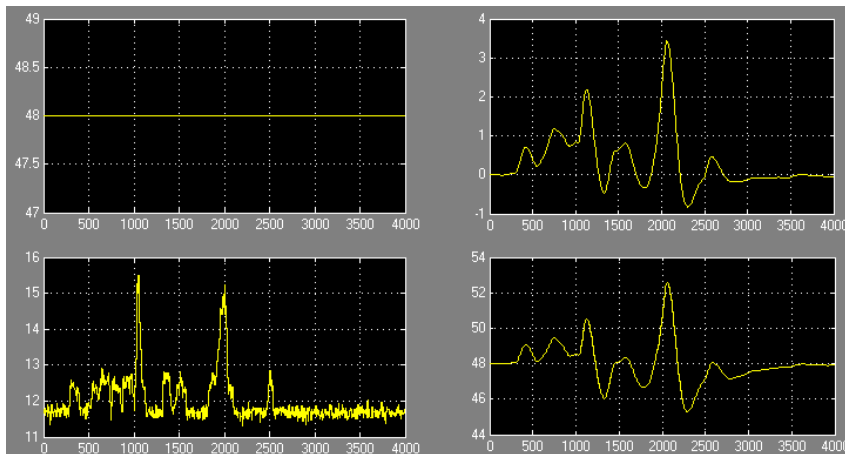
[그림 11]에서 정화 온도는 정화 유량 Disturbance에 대해 약 57℃까지 상승하면서 변화하게 되고 Disturbance가 없어진 뒤에도 1시간 이상의 안정 시간이 필요하다.

위의 결과로부터 현재 제어 시스템은 제어 안정도가 매우 낮아 설정치 변경이나 외란에 의하여 제어 출력에 많은 흔들림이 나타남을 알 수 있다.

현재 제어 루프 구성에서 제어 안정성이 최적이 되도록 PID 제어기 파라미터를 시뮬레이션을 통하여 재 설정하였으며 구한 값은 비례이득=0.6%/도, 적분시간=1200초, 미분시간=2.5초이다. 재 설정된 제어 파라미터에서 정화 유량 외란이 없고 설정치만 변경하였을 경우의 제어 특성은 [그림 12], 설정치 변경은 없고 외란이 발생하였을 경우의 제어 특성은 [그림 13]과 같다.



[그림 12] 최적 파라미터 설정시 제어 거동(설정치 변경)



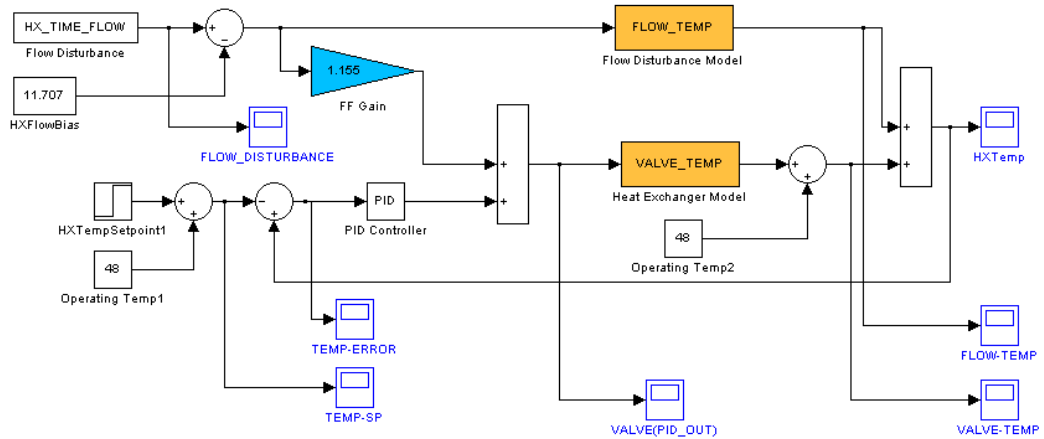
[그림 13] 최적 파라미터 설정시 제어 거동(유량 외란시)

파라미터 재 설정 전에는 온도 설정치 변경 시에 52℃까지 오버슈터가 발생하고 1시간 30분 이상의 안정 시간이 필요하였으나 재 설정 후에는 오버슈터가 50.7℃, 안정시간은 30분 정도로 짧아져, 제어성이 개선되었음을 알 수 있다. 외란이 발생할 경우에도 정화 온도가 약 57℃까지 변화하였으나 최적 설정 후 약 52.5℃까지 변화하여 외란에 의한 영향도 완화되었다.

6. 개선된 제어루프 구성

제어 파라미터 변경에 따른 제어 특성 검토를 통하여 유량 외란의 영향을 최소화하기 위하

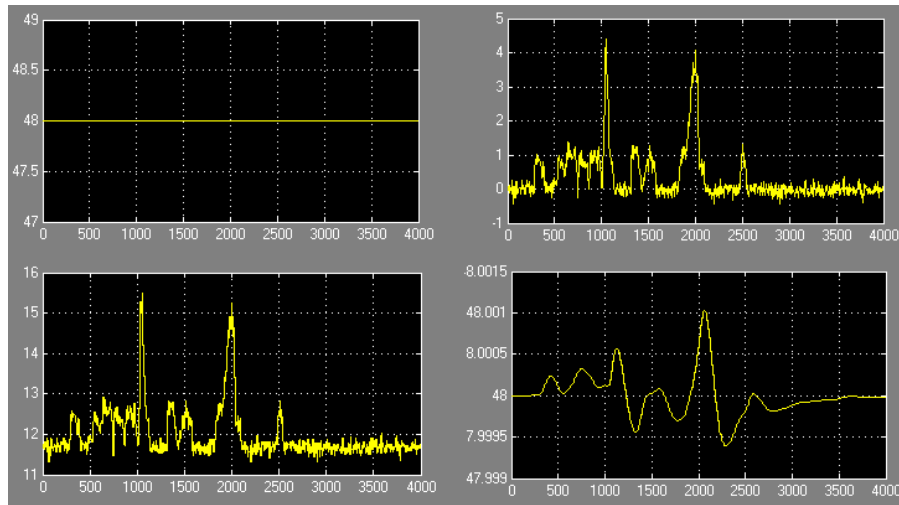
여 [그림 14]와 같이 현재 제어루프에 Feedforward 제어 루프를 추가하였다.



[그림 14] 외란을 최소화하기 위한 Feedforward 루프 구성

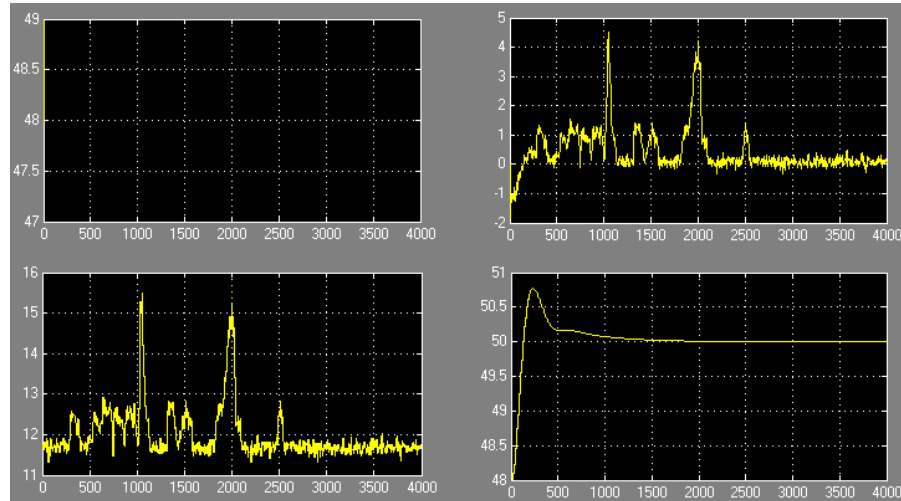
개발된 Feedforward 시뮬레이션 모델을 통하여 구한 최적 Feedforward 이득은 1.155 이다.

이 값을 이용하여 정화 유량 외란에 대하여 시뮬레이션한 제어 특성은 [그림 15]이며 유량 외란에 대해서 정화 온도는 거의 48℃ 부근 값으로 일정하게 제어가 됨을 알 수 있다.



[그림 15] Feedforward 이득을 최적 조정 시 제어 거동

[그림 16]에서는 설정치를 48→50℃로 변경하면서 외란이 유입되었을 때의 종합 제어 특성을 나타내고 있다. Feedforward 제어 루프 추가로 인해, 외란 영향은 거의 나타나지 않으며 약 0.7℃의 오버슈터만 발생되고 흔들림은 나타나지 않는 안정된 제어 특성을 보이고있다.



[그림 16] 설정치와 외란이 동시에 인가시 종합 제어 거동

7. 결 론

중수로형 원전인 월성1,2호기에는 원자로 냉각재를 정화하여 냉각재 계통으로 순환하는 정화 계통이 있다. 이 계통은 약 266℃의 냉각재를 약 50℃로 냉각하여 이온교환수지탑으로 보내는 열교환기를 이용한 온도 제어 루프가 있다. 운전중 핵연료 교체후, 증가하는 가압기 수위에 의해 정화 유량이 증가하는 운전 특성을 가지고있으며 이로 인하여 현재 제어 출력은 오버슈터가 크고 1시간 30분 이상의 안정 시간이 필요하였다.

여기에서는 정화 계통 온도 제어 특성을 분석하고 제어 시스템을 ARMA(Auto Regressive Moving Average) 식으로 모델링하였다. 제어 모델에 대한 실제 운전 특성과의 적합성을 검증하고 제어 모델을 이용하여 제어성을 분석하였다. 분석 결과, 열교환기 온도 제어 루프는 Pole 이 1.0 부근에 위치하여 매우 불안정한 제어 특성을 나타냄을 보여주었다.

현재 제어 루프 구성 하에서 제어성을 개선하기 위하여 최적 파라미터를 다시 찾고 그 결과도 분석하였다. 현재 제어 구성에서는 최적 튜닝에 의하여 제어성은 개선되나 정화 유량 외란의 영향을 감소시키는데는 한계가 있다는 것을 알 수 있었다.

정화 유량 외란의 영향을 없애기 위하여 제어 루프에 Feedforward 루프를 추가한 구성과 최적 이득 값을 제안하였다. 시뮬레이션 결과, 유량 외란에 의한 영향은 거의 없어졌으며 제어 입력과 외란에 의한 제어 출력의 제어성이 매우 개선됨을 확인하였다.

8. 참고 문헌

- [1] Karl J. Astrom, Bjorn Wittenmark, "Computer Controlled Systems Theory and Design", Prentice-Hall, pp 93-117, 1984

- [2] Stanley M. Shinnars "Modern Control Systems Theory and Design", John Wiley and Sons INC, pp 722-743, 1992
- [3] "Control System Toolbox For Use with MATLAB" and "System Identification Toolbox For Use with MATLAB", Mathworks INC, 2000
- [4] 월성2호기 최종안전성분석보고서, 5장 냉각재 보조 계통, 1996
- [5] 박귀남 외, "월성1호기 발전실무(원자로운전원)", 한국전력공사 원자력연수원, pp 312-324, 1988