

중수로 액체영역제어시스템의 경험적 모델링

Empirical Modeling of Liquid Zone Control System in PHWR

김종대, 양승욱, 이광대
한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 106-13

요 약

중수형 원자로에서는 원자로의 국부출력을 제어하기 위해, 액체영역제어시스템(Liquid Zone Control System ; LZC)을 사용하고 있다. 이 시스템은 원자로를 14개의 구역으로 나누고 각 zone compartment 내의 경수 수위를 조절함으로써 운전 중 각 영역의 출력이 평균 출력을 유지되도록 설계되어 있다. 이 시스템의 제어성과 운전 특성을 검토하기 위해서는 효과적인 모델링과 시뮬레이션 작업이 필요하다. 그러나, 열수력학적 상관관계를 정확히 파악하기가 현실적으로 쉽지 않고, 다양한 비선형 요소를 포함하고 있는 시스템때문에 분석적인 모델링에는 한계가 있다. 그래서, 본 논문에서는 발전소의 운전데이터를 활용하여 비선형성과 시간지연을 갖고 있는 LZC를 모델링하기 위해서, Hammerstein model을 적용한 비선형 시스템 식별법을 이용하였고, 그 결과를 검토하였다.

Abstract

In PHWR, Liquid Zone Control System has been used to control zone power in reactor. This system is designed to maintain average power by controlling water level in zone compartment which is divided to 14 parts. we need effective model and simulation to examine control performance and operation characteristics, but because it is so difficult to find all of the hydro-thermodynamics of the system and various nonlinear elements was included to the system potentially, analytical modeling is limited. Thus, In this paper we deal with nonlinear modeling with Hammerstein model and simulate the system and demonstrated the results.

1. 서론

중수로형 원자력 발전소의 중성자 출력 및 열 출력을 일정한 프로그램으로 원하는 값에 유지하기 위해서는 현재의 원자로 상태를 고려하여 핵반응을 일으키는 주된 요소인 중성자속을 반응도 제어장치를 사용하여 적절하게 조절하고 있다. 이런 중수로형 원자로 제어장치에는 조절봉, 흡수봉, 정지봉, 보론 및 가돌리늄 첨가 계통 및 SDS 및 액체영역 제어시스템이 있다.

원자로 제어계통에서 액체영역제어시스템을 이용하여 bulk control 과 spatial control의 을 병행할 수 있으며, 개별제어를 하는 이유는 중성자속의 분포가 원자로 내에서 일정하도록 하기 위해 각 zone 수위를 조절한다. 액체영역제어계통의 경수 영역은 그림과 같이 원자로 내부에 14개 지역으로 나누어져 있으며, 각 영역은 수직원통형의 zone compartment 내에 내부 수위를 적절하게 제어함으로써 각 영역 중성자 흡수율을 조절하여 국부 출력을 제어하게 된다.

각 지역은 지역별 혹은 전체적으로 수위를 조절하여 정상 운전 중 노심 내 순간 반응도 변화량을 조절하여 노심이 항상 임계상태가 되도록 하며, 제논 진동(Xe Oscillation)이나 기타 핵분열 독물질의 영향에 의한 국부적인 중성자속 불균형을 조절한다. 또한, 핵연료 교환으로 인한 정 반응도 주입 시, 주입된 반응도 만큼 수위를 상승시켜 반응도를 흡수하고, 운전 중 반응도 감소 시에 수위를 낮추어서 흡수율을 조절한다.

LZC는 zone compartment의 경수량을 조절하기 위해, 경수순환과 헬륨가스순환계통으로 이루어져 있다. 경수순환계통은 LZC의 경수순환펌프에 의해 공급된 경수를 경수조절밸브에 의해 제어신호를 받아 조절하게 된다. 헬륨가스순환계통은 zone에서 유출되는 경수량을 일정하게 유지하기 위해 존재한다. LZC의 운전성능을 평가하기 위해서 우선 LZC를 모델링하고 시뮬레이션 과정이 필요하다. 열수력학적인 수치적인 모델식을 세우는 방법은 시간과 노력이 많이 소요되고, 여러가지 시행착오가 필요하며, 실제 시스템의 거동과는 많은 차이를 유발할 수 있다. 그리고, 아직 zone의 수위와 국부출력에 대한 정확한 동특성을 알 수 있는 모델이 없기 때문에 전체 시스템을 모델링하기란 현실적으로 어렵다. 또한, 수위 및 국부출력관계는 중수로의 RFSP(Reactor Fuel Simulation Program)에 의해 비선형적임을 밝혀졌다. 이런 비선형성을 포함한 모델링하기 위해서는 다양한 방법들이 제시되고 있다.

본 논문에서는 이와 같은 비선형 공정을 효과적으로 모델링하기 위하여 Hammerstein model과 system identification 기법을 동원하여 모델링을 하였고, 구한 공정모델식을 이용하여 LZC의 동특성을 모사하는데 활용하여 그 결과를 검토하였다.

2. 액체영역제어계통

그림 1에 액체영역제어계통을 나타내었다.

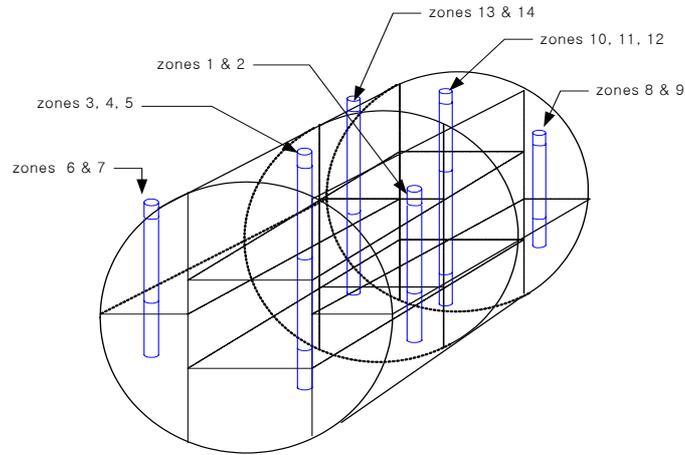


그림 1. 칼란드리아 내의 14 개 영역

액체영역제어계통은 원자로의 여러 반응도 조절장치 중 하나이며, 노심내에 6개의 지르칼로이관에 14개의 격실로 구성되어 있다. 중성자 흡수량은 노심내의 격실수위를 변화시킴으로서 조절되며 각 격실의 상부에는 헬륨가스로 채워져 있다. 경수영역제어계통의 수위 제어는 원자로 제어 프로그램에 의해 전산기로 제어되며 전체출력제어와 개별제어를 하게 된다. 저출력 상태에서는 전체제어방법으로 수위를 제어하며 정상출력하에서는 각 영역의 개별제어 방법으로 수위를 제어한다. 14개 영역에 경수를 최대비율로 일제히 채우거나 비울때의 반응도 변화율은 약 7.5 mK이다.

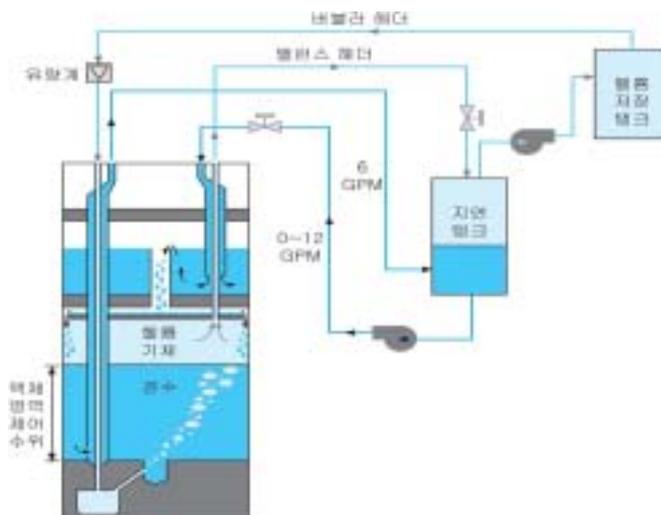


그림 2. 액체 영역 제어 시스템 장치도(상부 zone)

각 영역의 액실 용량은 18 L ~ 38 L로 위치에 따라 다르며 각 격실에는 경수의 입구와 출구가 있다. 각 격실의 입구유량과 출구 유량에 의한 쌍방향제어를 통하여 격실의 수위는 조절된다. 경수 영역제어계통의 최대허용 반응도 변화율은 0.1 mK/초이며 크게 경수 순환계통과 상층기체계통으로 나누어져 있으며 경수와 상층기체인 헬륨은 계속 순환한다.

각 영역 제어기의 수위는 제어밸브로 유입량을 0 ~ 12 IGPM 범위로 조절하므로써 제어된다. 각 영역의 상부에는 헬륨가스로 채워져 있으며 제어된 압력을 유지하므로써 6 IGPM의 일정량을 흐르도록 한다. 인입밸브가 완전히 개방되었을 때 영역은 최대의 유량율로 배수되며 중간위치에 있을 때 배수 및 충수가 평형을 이루게 하여 수위는 변하지 않게 된다. 액체영역제어 프로그램은 원자로 출력 및 영역 출력을 설정치에 유지하도록 14개 수위제어 밸브의 개방신호를 보내며 출력편차에 따른 밸브개도는 반응도 제어도면에 나타나 있으며 각 영역은 출력편차가 -3% 미만이면 최대 비율로 배수, +3% 이상이면 최대 비율로 채워진다.

14개 영역의 중성자속 변이를 제거하기 위하여 편차에 따른 개방신호가 보내지며 원자로 제어는 중성자속 변이 제어보다 우선하여 이루어진다. 각 영역의 수위가 너무 높거나 낮으면 중성자속 변이 제어 프로그램은 서서히 정지되며 범위를 벗어나게 되면 원자로 출력제어는 중단된다. 중성자속 변이 제어는 낮은 출력에서는 영역 출력 측정의 정확성이 떨어지고 기울기 제어가 필요하지 않기 때문에 제거된다.

액체영역제어 계통의 정상운전범위는 평균수위가 20%에서 70%사이이며 이 제한치는 각 제어기가 중성자속 기울기 제어를 위한 충분한 범위에 있도록 보증설정되었다.

14개 밸브 중 i 밸브의 개도 LIF_i 는 0.5 초마다 다음과 같이 계산한다.

$$LIF_i = BIAS_i + RLIF_i$$

$$RLIF_i = K_p \times E_p \times DLIF_i$$

$BIAS_i$ = 6GPM에 해당하는 기준개도

$DLIF_i$ = 매 2차마다 계산되는 차성분항으로서 각 경수 영역의 중성자속을 평균화시키기 위하여 중성자속의 변이 및 경수수위의 차이를 복합적으로 고려한 것이다.

LZC 시스템의 주요 제어대상변수는 zone의 국부출력이다. 그래서, LZC 시스템 중에서 zone compartment의 수위에 대한 출력변화를 중심 공정으로 하여 제어모델 블록선도를 그림에 나타내었다. 여기서 각각의 전달함수들은 기술할 system identification에 의해 공정모델식을 구하였다. 각 존의 국부출력 평균값이 제어목표값이며, phasing-out factor를 적용하여 수위가 80% 이상이면 자체적인 수위제어를 하여 flooding을 방지하게 된다.

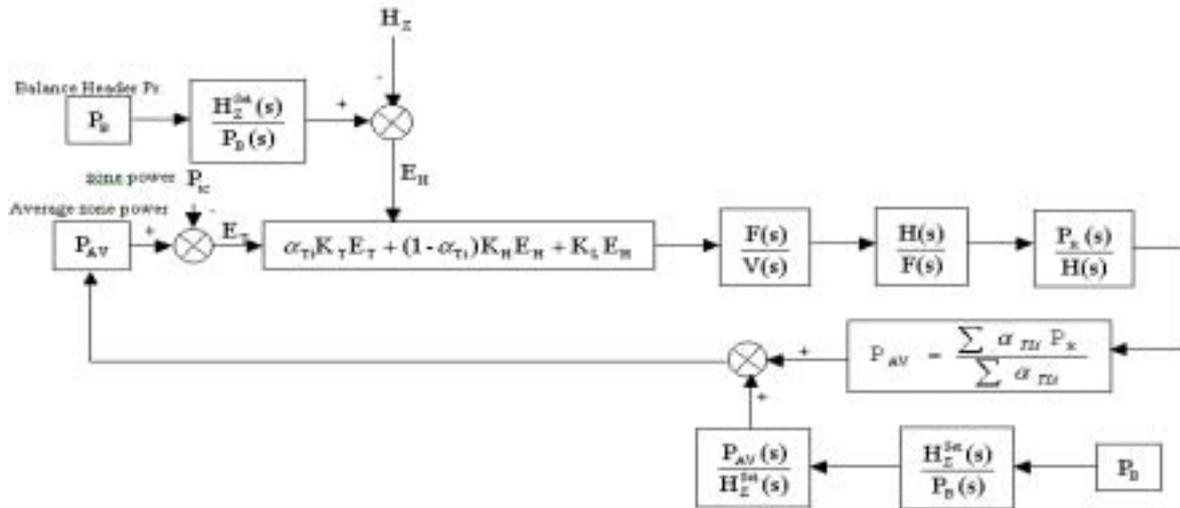


그림 3. 액체영역제어 시스템의 공정 블록선도

3. 비선형공정 모델링

비선형 공정을 나타내는 연속모델(continuous model)형태로는 일반적으로 Hammerstein model, Winner model, Hammerstein-winner model이 있다. Hammerstein model은 공정의 입력부에 정적인 비선형관계식(static nonlinear function)과 선형동적함수(전달함수)로 구성된 모델이고, winner model은 공정의 출력부에 비선형관계식을 추가한 것이다. Hammerstein-Winner model은 Hammerstein model과 Winner model을 합친 것이다.

한편, 비선형 공정을 나타내는 또 다른 형태의 모델로는 일반적으로 입출력관계식으로만 나타내는 불연속모델로써 NARX와 일종의 black box모델인 Neural Networks가 있다. 그러나, 이것들은 비선형 연속모델보다 상대적으로 긴 계산시간, 초기파라미터 선택, 테스트 시그널 문제등이 존재한다.

Hammerstein모델은 비선형공정모델을 나타내는 한 가지 형태로서 비선형을 나타내는 정적 다항식(static polynomial equation)과 함께 선형 동특성 모델로 구성된다. 이 모델의 블록선도를 간단히 그림으로 나타내었다. Hammerstein 모델의 파라미터 추정(parameter estimation)을 위한 다양한 최적화 방법들이 연구되었지만, 공통적으로 긴 계산시간 소요, 초기값 설정문제, 파라미터 수렴 문제등이 드러났다. 최근에 반복적인 최적화를 지양하는 새로운 최적화기법도 발표되고 있다. 본 연구에서는 수렴속도가 비교적 빠르고, 정확도가 높은 파라미터 최적화법인 Levenberg-Marquardt 알고리즘을 이용하였다.

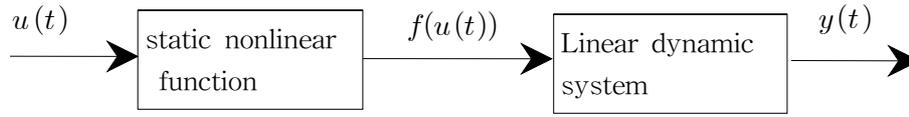


그림. 4. Hammerstein type nonlinear model

2.3. Levenberg-Marquardt 알고리즘

이 방법은 다음과 같이 목적함수를 최소화하는 방법을 말한다.

$$P(i) = P(i-1) - \left[\frac{\partial^2 V}{\partial P^2} \Big|_{P=P(i-1)} + \alpha I \right]^{-1} \left[\frac{\partial V}{\partial P} \Big|_{P=P(i-1)} \right]$$

여기서, i 는 반복횟수 (iteration number)를 말하고 α 는 어떤 작은 값을 나타낸다.

$\frac{\partial V}{\partial P} \Big|_{P=P(i-1)}$ 와 $\frac{\partial^2 V}{\partial P^2} \Big|_{P=P(i-1)}$ 는 각각 목적 함수 V 의 파라미터 P 에 대한 일차 편미분과 이차 편미분을 나타낸다. 즉,

$$\frac{\partial V(P)}{\partial P} = \left[\frac{\partial V(P)}{\partial P_1} \quad \frac{\partial V(P)}{\partial P_2} \quad \dots \quad \frac{\partial V(P)}{\partial P_n} \right]$$

$$\frac{\partial^2 V(P)}{\partial P^2} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 V(P)}{\partial P_1^2} & \frac{\partial^2 V(P)}{\partial P_2 \partial P_1} & \dots & \frac{\partial^2 V(P)}{\partial P_n \partial P_1} \\ \frac{\partial^2 V(P)}{\partial P_1 \partial P_2} & \frac{\partial^2 V(P)}{\partial P_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 V(P)}{\partial P_n \partial P_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 V(P)}{\partial P_1 \partial P_n} & \frac{\partial^2 V(P)}{\partial P_2 \partial P_n} & \dots & \frac{\partial^2 V(P)}{\partial P_n^2} \end{bmatrix}$$

$$P = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_n]^T$$

그러면, 비선형공정이 시간지연이 있는 비선형 1차계일 때, Levenberg - Marquardt 법으로 모델의 파라미터를 예측하면 다음과 같은 계산과정은 따른다.

비선형공정은 다음과 같고,

$$\frac{d\hat{y}(t)}{dt} + a_1 \hat{y}(t) = b_1 \hat{v}(t - \theta)$$

이것을 1차계의 동적전달함수와 정적 비선형 함수로 나누면 다음과 같다.

$$\hat{y}(s) = \left(\frac{b_1}{s + a_1} \right) e^{-\theta s} \hat{v}(s)$$

$$v(t) = u(t) + p_1 u^2(t) + p_2 u^3(t)$$

모델식의 파라미터를 다음 식으로 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ \theta \\ p_1 \\ p_2 \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ \theta \\ p_1 \\ p_2 \end{bmatrix}_{i-1} - \left[\frac{\partial^2 V}{\partial P^2} \Big|_{i-1} + \alpha I \right]^{-1} \left[\frac{\partial V}{\partial P} \Big|_{i-1} \right]$$

$$\text{여기서, } \frac{\partial V}{\partial P} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V}{\partial a_1} \\ \frac{\partial V}{\partial b_1} \\ \frac{\partial V}{\partial \theta} \\ \frac{\partial V}{\partial p_1} \\ \frac{\partial V}{\partial p_2} \end{bmatrix} \quad \frac{\partial^2 V}{\partial P^2} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 V}{\partial a_1^2} & \frac{\partial^2 V}{\partial a_1 \partial b_1} & \frac{\partial^2 V}{\partial a_1 \partial \theta} & \frac{\partial^2 V}{\partial a_1 \partial p_1} & \frac{\partial^2 V}{\partial a_1 \partial p_2} \\ \frac{\partial^2 V}{\partial b_1 \partial a_1} & \frac{\partial^2 V}{\partial b_1^2} & \frac{\partial^2 V}{\partial b_1 \partial \theta} & \frac{\partial^2 V}{\partial b_1 \partial p_1} & \frac{\partial^2 V}{\partial b_1 \partial p_2} \\ \frac{\partial^2 V}{\partial \theta \partial a_1} & \frac{\partial^2 V}{\partial \theta \partial b_1} & \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} & \frac{\partial^2 V}{\partial \theta \partial p_1} & \frac{\partial^2 V}{\partial \theta \partial p_2} \\ \frac{\partial^2 V}{\partial p_1 \partial a_1} & \frac{\partial^2 V}{\partial p_1 \partial b_1} & \frac{\partial^2 V}{\partial p_1 \partial \theta} & \frac{\partial^2 V}{\partial p_1^2} & \frac{\partial^2 V}{\partial p_1 \partial p_2} \\ \frac{\partial^2 V}{\partial p_2 \partial a_1} & \frac{\partial^2 V}{\partial p_2 \partial b_1} & \frac{\partial^2 V}{\partial p_2 \partial \theta} & \frac{\partial^2 V}{\partial p_2 \partial p_1} & \frac{\partial^2 V}{\partial p_2^2} \end{bmatrix}$$

3. 결과 및 고찰

경수조절밸브의 개도와 수위관계는 zone compartment 내에서 경수유출량이 설계대로 0.45 l/sec 으로 일정하다고 보고, 밸브 개도와 수위 관계를 전달함수형태($H(s)/V(s)$)로 나타내었다. 경수조절밸브는 원래 equal percentage 특성을 갖는 밸브로서 개도와 유량사이는 비선형관계가 있고 수위관계에도 비선형성과 함께 시간지연이 발생할 구조로 되어 있다. 그래서, 이론에서 언급한 Hammerstein 비선형 모델을 구하여 보았다.

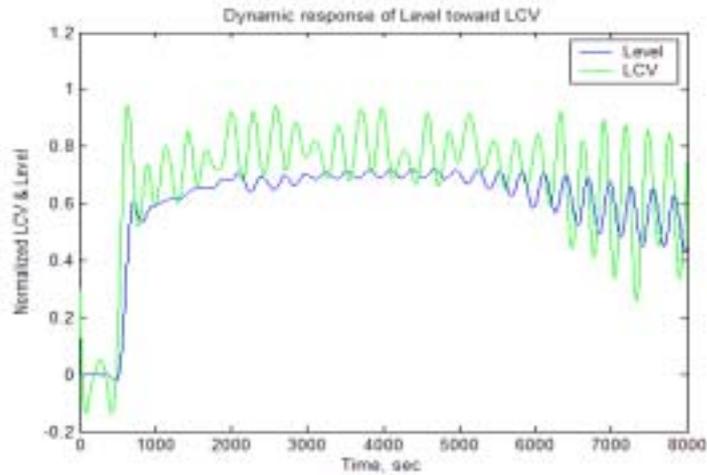


그림 5. 밸브개도 대 수위에 대한 입출력 데이터

그림 5는 실제 경수조절밸브의 개도값에 대한 수위의 모델($H(s)/V(s)$)을 파라미터를 추정하기 위한 입출력 운전데이터이다. 본 운전데이터는 500 sec 근처에서 핵연료 교체에 의한 급격하게 수위가 상승되었다. 수위는 80%부터 foodling을 방지하기 위해 자체적으로 수위조절에 들어간다. 이 데이터는 실제 데이터를 low pass 필터링한 것이다.

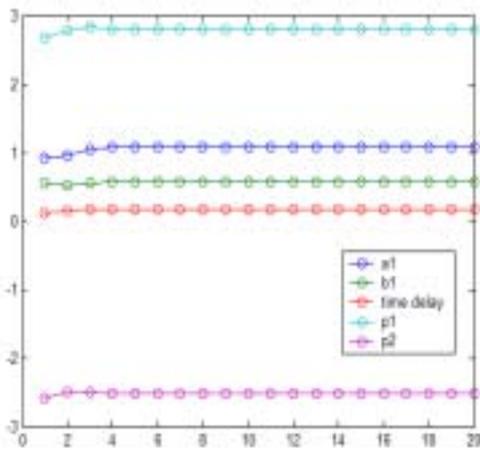


그림 6. 공정모델의 추정 파라미터

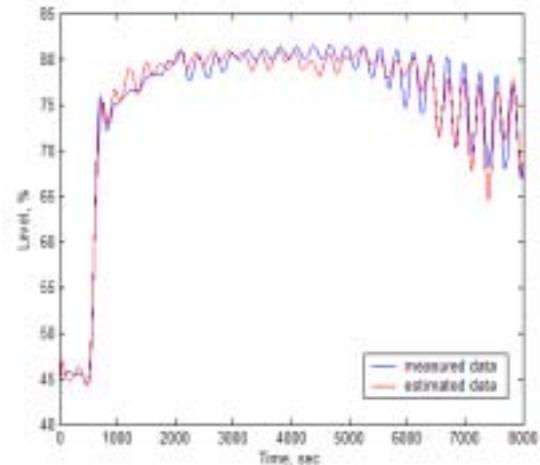


그림 7. 실제데이터 및 추정모델데이터

20회까지 반복하여 L-M법에 의해 Hammerstein 모델의 파라미터를 추정하였다. 5회 정도에서 0.052 정도의 오차를 보이고, 수렴되었다. 파라미터의 벡터값은 $P=[1.075 \ 0.577 \ 0.175 \ 2.800 \ -2.510]$ 로 추정되어 이를 모델식으로 표현하면 다음과 같다.

$$v(t) = u(t) + 2.800u^2(t) - 2.510u^3(t), \quad \hat{y}(s) = \left(\frac{0.577}{s+1.075} \right) e^{-0.175s} \hat{v}(s)$$

그림 8과 9에서 보듯이 실제 데이터를 필터링하지 않고 모델식을 구하여도 실제 데이터를 잘 근사하는 모델식을 얻을 수 있었다. 입출력데이터는 수위변동이 큰 부분을 대상으로 하였다.

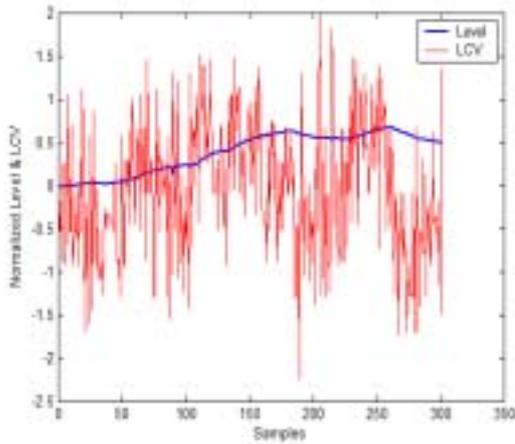


그림 8. 입출력데이터

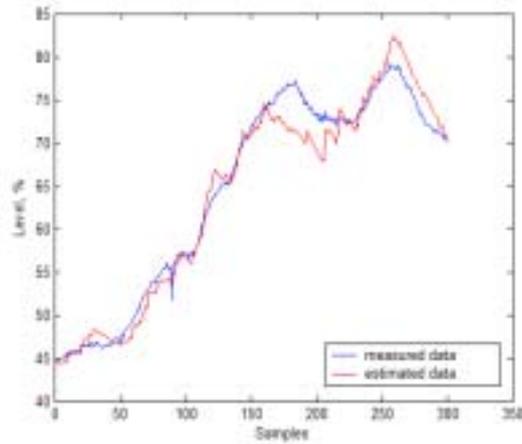


그림 9. 실제데이터 와 추정모델데이터

다음은 수위 대 출력 관계를 위의 기술한 대로 모델링하였다.

운전데이터는 상부 zone의 연료교체의 의한 출력상승에 따라 제어동작인 수위가 상승하는 것으로서 수위가 입력데이터 국부출력이 출력데이터로 했을 때는 모델데이터와 실제데이터가 잘 맞지 않는다. 그 이유는 여기서의 출력변화는 수위에 의한 변화보다 출력외란에 의한 동특성을 보이고 있고, 제어능부족으로 인해 제어가 제대로 되지 않음을 알 수 있다. 즉 출력이 먼저 일어나고, 수위변화가 나중에 일어나는 관계로 볼 수 있으므로 이것은 올바른 비선형 모델이라 볼 수 없고, 출력외란을 갖는 것으로 판단된다. 그것은 추정한 파라미터를 검토해 보면 시간지연이 초기 설정값이 0.01로 고정된 상태에서 다른 파라미터보다 큰 오차를 보이고 있다. 즉, 어느 시스템이나 존재하는 시간지연이 초기값으로 고정되어 오차만 커졌으므로 이 시스템은 수위에 의해 출력이 제어되는 것이 아니고, 외란작용에 의해 수위가 변화가 생긴것으로 판단해 볼 수 있다.

그러므로, 위 결과로 부터 핵연료교체와 같은 zone 출력외란이 작용하였을 경우에는 LZC의 수위에 대한 출력의 관계는 위에 기술한 system identification을 파악할 수 없다. 그래서, 전체 시스템의 제어 동특성을 시뮬레이션하려면 zone별 수위와 출력관계를 시뮬레이션할 수 있는 RFSP 코드를 기반으로 동특성을 유추할 수 밖에 없었다. 출력이 급상승하는 지점부터 진동을 갖는 출력외란이 입력되는 것으로 생각하였다. RFSP코드로 부터 수위와 zone 출력은 동특성이 반대 형태로 나타나며, 출력외란은 전체 출력에서 RFSP코드에 의한 zone 출력을 뺀 것으로 하였다. 그림 12은 그림 3에 나타난 공정 블록

선도에서 LZC 시스템의 운전특성을 시뮬레이션한 프로그램이다. 이 시뮬레이션 프로그램은 Matlab/Simulink로 작성하였다

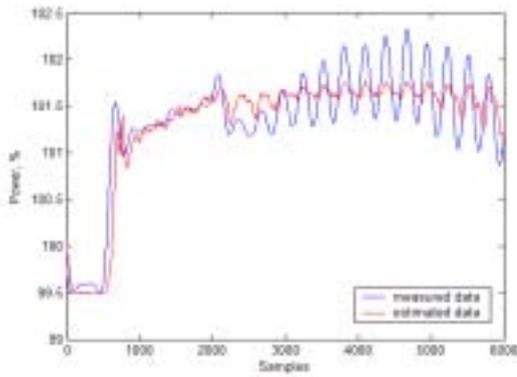


그림 10. zone 출력 데이터

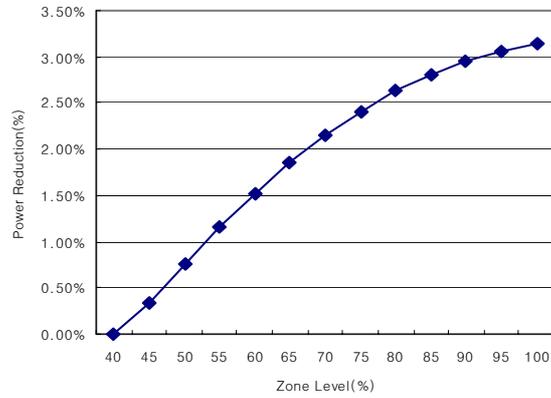


그림 11. 수위에 대한 출력감소율

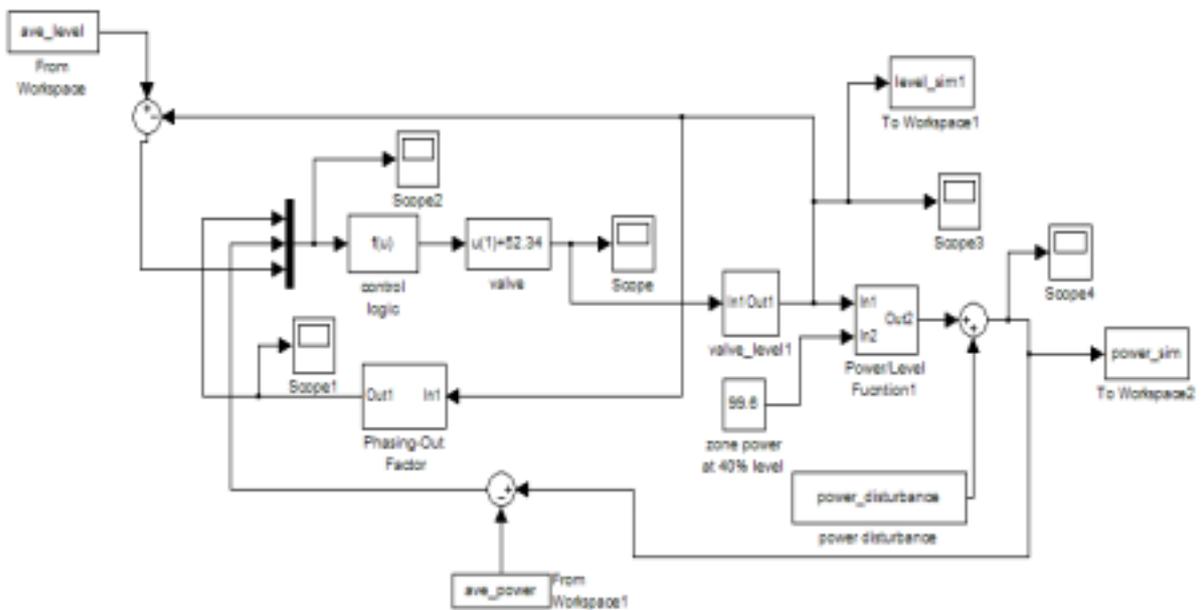
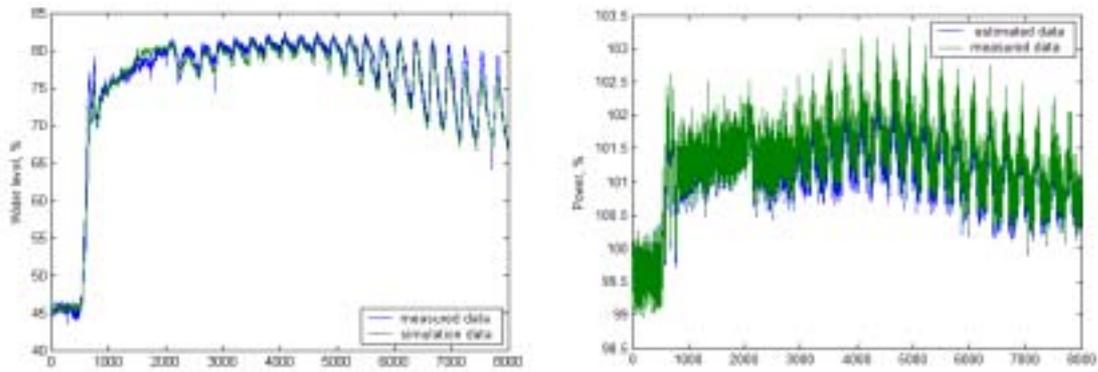


그림 12. 시뮬레이션을 위한 Simulink 프로그램

경수조절밸브의 Bias는 52.34 % 이고, power/level 블록에서는 RFSP 코드에 따라서 수위와 출력관계를 나타내었다. 즉, 그림 11에서 보듯이 수위상승에 따라서 출력감소가 이루어지고 있으며, 동특성에 대한 정보는 알 수 없어, 적분공정(integral process)이라고 가정하였다. Phasing-Out factor블록에서는 수위가 80% 부터 점차 수위제어를 시작하여, 90% 이상에서는 출력제어는 완전히 없어지고, 수위제어만 하게 된다. zone 출력과 수위는 각각 평균 출력과 수위로 나타내었다.



(a) 수위 동특성 비교

(b) 출력 동특성

그림 13. LZC 시스템의 시뮬레이션 결과

그림 13에 시뮬레이션 프로그램을 실행한 결과를 보여주고 있다. 시스템의 수위와 출력 모두 예측데이터가 실제데이터의 동특성과 잘 일치하고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 중수로 액체영역제어 시스템의 동특성을 분석하기 위해서 취득한 운전 데이터를 기반으로 비선형 system identification을 이용하여 시스템을 모델링하였다.

시뮬레이션 대상에 대한 전체적인 열수력학적 관계와 기기별의 정확한 매커니즘을 파악하지 못하더라도, 동특성을 파악할 수 있는 운전데이터를 확보하면, 연속모델형태의 전달함수를 유도하여 LZC 시스템의 운전 동특성을 효과적으로 모사할 수 있었다. Hammerstein model을 적용한 공정모델은 실제데이터를 잘 일치하였고, 시뮬레이션에 적용하여 양호한 결과를 나타냈다. 앞으로는 출력외란이 일어나는 원인을 정확히 밝혀 내고, Phasing factor와 제어기 파라미터에 따른 응답특성을 검토할 예정이다.

참 고 문 헌

- (1) 한국전력공사 원자력연수원 “중수로 개요”, pp. 10-11.
- (2) 한국전력공사 원자력연수원 “중수로 원전제어 (I)”, pp. 27-30.
- (3) Matlab System Identification Toolbox User's Guide, 3-25.
- (4) Lennart Ljung, "SYSTEM IDENTIFICATION:Theory for the User", P T R Prentice-Hall, Inc pp. 127-138.
- (5) Su Whan Sung, "System Identification Method for Hammerstein Processes", Ind. Eng. Chem. Res. Vol. 41, pp. 4295-4302, 2002.