

액체영역제어계통의 제어모델링 및 제어성 평가

Control Modelling and Controllability Evaluation of Liquid Zone Control System

이광대*, 양승옥**, 오웅세***
(Kwang Dae Lee, Seung Ok Yang, and Eung Se Oh)

Abstract - Liquid Zone Control System controls the power of heavy water reactor. Changing the level of each zone compartment regulates one local zone power of 14 zone powers, and the level is limited less than 90% by the control algorithm to prevent the flood. In recent years, the level and the power was controlled oscillatory in the upper zones. To find out the condition of cycling, the zone control system was modelled with the linear difference equations and identified using parameter estimation. The pole-zero plot showed that the major pole was near the stability boundary, and the system had oscillatory characteristics in nature.

Key Words : Nuclear, Reactor, Zone Control, Heavy Water

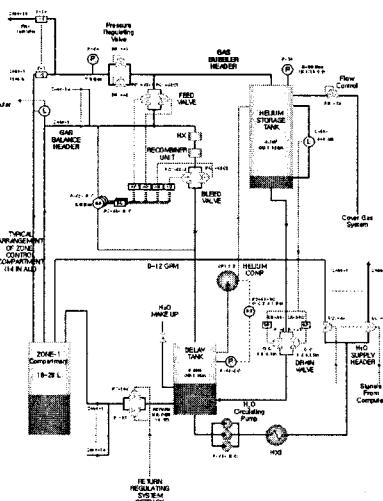
1. 개요

중수로 원자로 출력 제어를 위하여 액체 영역 제어계통이 있다. 14개 액체 영역이 3차원적으로 원자로 내부에 설치되어 있으며, 각각의 수위 제어를 통하여 국부 출력 제어를 한다.

본 논문에서는 국내외 중수로 원전에서 관찰되고 있는 80% 이상 수위에서의 수위와 국부 출력 흔들림 제어 현상을 고찰하고 제어 거동 모델링을 통하여 제어 안정도를 평가하였다. 제어 거동 모델에서는 수위 거동 모델과 출력 거동 모델을 각각 구하고, 두개의 모델을 적절 결합하는 방법을 적용하여 전체 모델링을 완성하였다. 모델링에는 운전 자료를 사용한 파라미터 인식 방법을 사용하였으며, 제어 안정도는 모델의 Pole-Zero Plot으로 평가하였다.

액체영역제어계통은 [그림 1]과 같이, 원자로 내에 3차원적으로 설치되어 있는 14개의 컴파트먼트 물통에 수위를 제어함으로서 국부적인 중성자 흡수력 제어를 통하여 국부 출력을 제어한다. 수위 제어 알고리즘은 [그림 2]와 같이, 수위는 수위 편차와 출력 편차에 의해 비례 제어로 제어되며, 수위가 90% 이상 범람을 방지하기 위하여 벨브 개도를 제한하는 Phasing-Out 기능이 있다. [그림 3]에서는 상부 영역에서 발생하는 수위와 국부 출력 제어 진동 현상을 나타낸다. 핵연료 교체에 의해서, 국부 출력이 순간 증가하면, 제어 알고리즘에 의해서 수위가 증가하도록 제어되고, 수위가 80%보다

커지게 되면, 수위 제한을 위하여 Phasing-Out 이득이 비례 제어 이득에 작용하여 수위 제어 이득은 커지는 반면, 국부 출력 이득은 매우 작아지게 된다.



[그림 1] 액체영역제어기기 블록도

2. 액체영역 제어모델 개발

액체영역 거동 모델링은 제어 입력 요소들에 대하여 선형 차분 방정식의 ARMA(Auto Regressive Moving Average) 모델과 실제 운전 값을 사용한 파라미터 인식 기법을 사용하였다.

저자 소개

* 이광대 : 전력연구원 I&C그룹 선임연구원

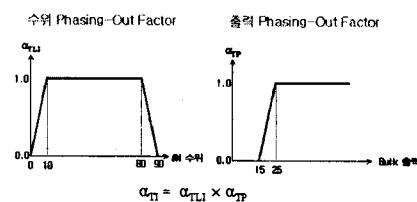
** 양승옥 : 전력연구원 I&C그룹 선임연구원

*** 오웅세 : 전력연구원 I&C그룹 책임연구원

■ 수위제어밸브 개도 LCV Lift = BIAS + [BUF + DLF] 수령수치 - 0.63
 ■ Bulk Lift $BLF = K_p \times Ep$
 $Ep = Kb \times [P_{\text{low}} - P_{\text{high}}] + Kr \times [RI - RD]$

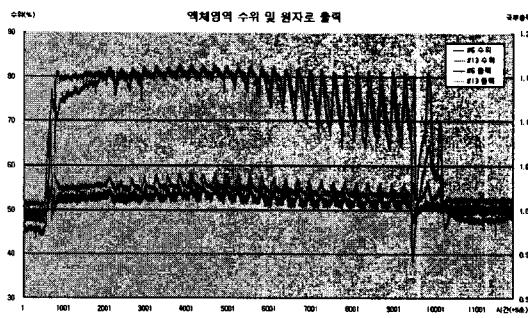
■ Diff Lift $DLF = \alpha_{TL} \times Kt \times Ep + [1 - \alpha_{TL}] \times Kh \times El + Kl \times El$ 수령수치 - 2.0.3
 ① ② ③

- 수위가 80% 미만일 때: ① + ③
- 수위가 80% 이상일 때: ① + ② + ③
- * Ep : 출력오차. E_L : 수위오차



■ Diff Lift $DLF = \alpha_{TL} \times Kt \times Ep + [1 - \alpha_{TL}] \times Kh \times El + Kl \times El$

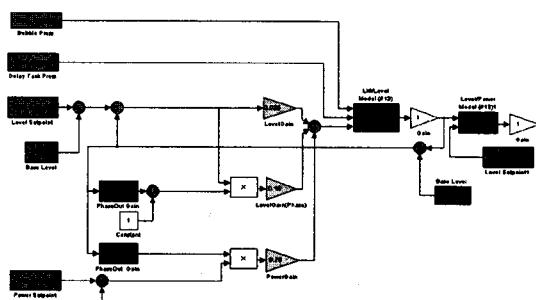
[그림 2] 액체영역 수위 제어 알고리즘



[그림 3] 액체영역 수위, 출력 진동 현상

$$y(t) = - \sum_{i=1}^n a_i y(t-i) + \sum_{i=1}^m b_i u(t-d-i)$$

액체영역 제어는 수위와 국부 출력이 상호 영향을 주므로 “수위 모델”과 “출력 모델”을 별도로 구하고, 케스케이드로 통합하여 모델링 하였다[그림 4].



[그림 4] 액체영역제어 모델 블록도

수위 모델 식은 다음과 같고, 시뮬레이션 결과는 [그림 5]

와 같다.

$$A(q)y(t) = B(q)u_1(t-lk) + C(q)u_2(t-mk) + D(q)u_3(t-nk)$$

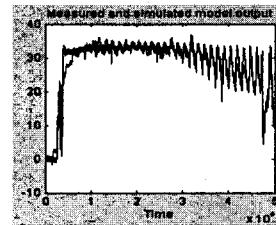
여기서, $y(t)$: 수위
 $u_1(t)$: 수위 제어 밸브 개도
 $u_2(t)$: 지연 탱크 압력
 $u_3(t)$: 상부 헬륨 기체 압력

$$A(q) = 1 - 0.5471q^{-1} - 0.05194q^{-2} - 0.3242q^{-3} - 0.067755q^{-4}$$

$$B(q) = 0.2293q^{-1} + 0.1156q^{-2} + 0.03455q^{-3} + 0.05369q^{-4}$$

$$C(q) = 0.3289q^{-1} - 4.312q^{-2} + 4.672q^{-3} - 0.7198q^{-4}$$

$$D(q) = -6.756q^{-1} - 0.7719q^{-2} + 6.826q^{-3} + 1.213q^{-4}$$



[그림 5] 수위 모델 시뮬레이션 결과

출력 모델 식은 다음과 같고, 시뮬레이션 결과는 [그림 6] 과 같다.

$$A(q)y(t) = B(q)u_1(t-lk) + C(q)u_2(t-mk)$$

여기서, $y(t)$: 국부 출력

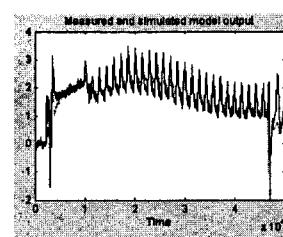
$u_1(t)$: 수위

$u_2(t)$: 타 영역 국부 출력

$$A(q) = 1 - 2.444q^{-1} + 1.807q^{-2} - 0.1559q^{-3} - 0.2067q^{-4}$$

$$B(q) = -0.001158q^{-4} - 0.0002371q^{-5} - 0.0002262q^{-6} + 0.001614q^{-7}$$

$$C(q) = 0.4362 - 1.197q^{-1} + 1.142q^{-2} - 0.3802q^{-3}$$

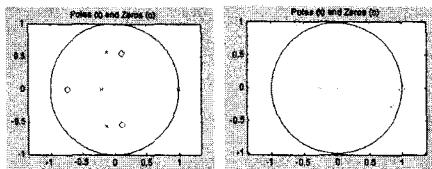


[그림 6] 출력 모델 시뮬레이션 결과

3. 제어성 평가

[그림 9]는 수위 모델과 출력 모델의 Z-영역에서의 Pole-Zero Plot을 나타낸다. 수위 모델의 경우, Pole 중 하나가 안정도 경계선에 매우 인접하게 위치하며, 이것은 제어 안정도가 매우 낮음을 나타내며, 실제 수위 거동에서도 진동 특성을

나타낸다.



[그림 9] 수위 및 출력 모델의 Pole-Zero 위치

출력 모델의 경우, Pole이 안정 경계 내부에 위치하지만, 안정도 경계선 부근에 위치하므로 제어 시에 감쇄 Cycling 특성을 나타낼 것으로 예측할 수 있다.

4. 결 론

중수로 원전의 원자로 출력 제어 계통인 액체영역 제어계통의 제어 진동 현상을 고찰하고 제어 안정성을 평가하기 위하여 제어 계통을 차분 방정식으로 모델링 하였다. 제어 출력 변수는 수위와 원자로 출력이므로 “수위 모델”과 “출력 모델”로 각각 구한 후, 케스케이드로 연결하여 통합 모델을 만들었다. 모델의 파라미터는 실제 운전데이터와 최소차승법을 사용한 파라미터 인식 기법으로 구하였으며, 시뮬레이션 결과는 실제 운전 거동과 유사한 특성을 나타내었다. 제어 안정도 평가를 위하여 각 모델 특성 방정식의 Pole-Zero 위치를 평가하였다. 평가 결과, 수위의 경우에는 진동 특성을 나타내는 불안정 제어 특성을 나타내었으며, 국부 출력의 경우에는 감쇄 진동 특성을 나타내어, 전체적인 제어 거동이 안정하지 못한 것으로 평가되었다.

참 고 문 헌

- [1] Ioan Dore LANDAU, "System Identification and Control Design", PRENTICE HALL, 1990
- [2] Lennart Ljung, "System Identification : Theory for the User", PRENTICE HALL, 1987
- [3] Lee J.S. and Yim H.S., "Design Manual-Liquid Zone Control System (Wolsong-2,3, 4)", KOPEC, 1999
- [4] P. Micheal, "Program Specification-Light Water Zone Control Absorbers (Wolsong- 2), AECL, 1996