

## 액체 영역 제어 난조 분석

### Analysis of Liquid Zone Control Cycling

이광대, 양승욱, 김종대  
한국전력공사 전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

#### 요 약

중수로 원전의 원자로 출력 제어를 위하여 액체 영역 제어 계통이 있다. 14개 액체 영역이 3차원적으로 원자로 내부에 설치되어있으며, 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 안정도와 원인에 대해서 분석하였다. 이를 위하여 제어 밸브와 국부 출력 사이의 거동을 모델링하고 운전 값을 사용하여 모델 파라미터를 인식하였다. 제어 안정도 분석으로부터 이 계통은 흔들림이 발생할 수 있는 불안정한 제어 특성을 가지고 있음을 확인하였다. 또한, 수위 및 국부 출력 흔들림은 각 영역에서 경수가 넘치는 것을 방지하기 위하여 제어 알고리즘에서 사용하는 Phasing-Out 기능에 의해 유발 될 수 있음을 확인하였다.

#### Abstract

Liquid Zone Control System controls the power of Heavy Water Reactor. Changing the level of Liquid Zone regulates the local zone power and the level is limited by the control algorithm between 80% and 90% 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 stability analysis showed that the major pole was near the stability boundary, and the system had oscillatory characteristics in nature. In conclusion, the control algorithm which has high gain in the phasing-out can be one of the reasons of oscillation.

## 1. 서론

중수로 원자로에는 원자로 출력 제어를 위하여 액체 영역 제어 계통이 있다. 14개 액체 영역 수위는 각각의 수위 편차와 국부 출력 편차를 이용하여 제어가 되며, 경수가 넘치는 것을 방지하기 위하여 수위가 80% 이상이 되면 Phasing-Out 방법을 사용하여 밸브 개도를 제한한다. 수위 80% 이상일 경우, 원자로 상부 영역에서 수위 난조(Cycling) 현상이 국내의 중수로 원전에서 관찰되었다.

제어 현상을 분석하기 위하여, 제어 밸브와 국부 출력 사이 거동을 다변수 선형 차분 방정식 모델로 구하고, 운전 데이터를 이용한 파라미터 인식 방법을 사용하여 모델을 최적화하였다. 그것을 기반으로 제어 안정도를 평가하고, Phasing-Out이 제어 안정도에 미치는 영향을 분석하였다.

분석 결과, 수위 및 원자로 출력 Cycling 원인으로는 80% 이상 수위에서 Phasing-Out 이득의 급격한 변화가 원인중 하나일 수 있음을 확인 하였다.

## 2. 중수로 원전의 액체 영역 제어 개요

### (1) 액체 영역 제어 개요

중수로 원전의 원자로 출력을 일정한 프로그램으로 원하는 값에 유지하기 위해서, 핵 반응을 일으키는 주된 요소인 중성자속을 반응도 제어 장치를 사용하여 적절하게 조절한다. 이를 위하여 중수로에서는 5개의 중성자 흡수를 통한 반응도 제어 장치가 있다.<sup>(1)</sup>

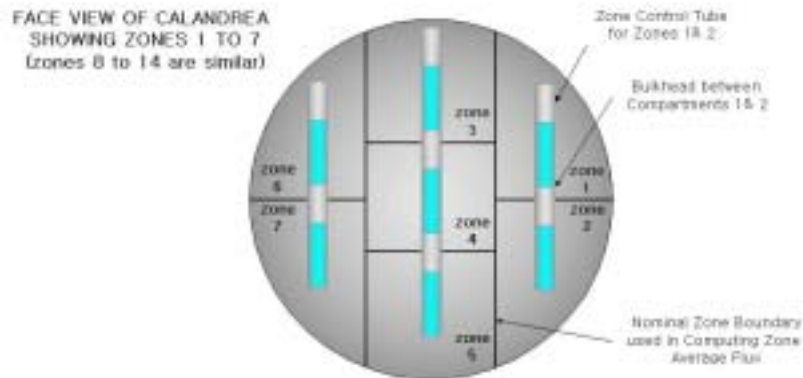
- 1) 액체 영역 제어 장치(Liquid Zone Control) : 14개 영역
- 2) 조절봉 (Adjuster Rods) : 21개 Rods
- 3) 흡수봉 (Mechanical Control Absorber) : 4개 Rods
- 4) 정지봉(Shut-Off Rod) : 28개 Rods
- 5) 보론 및 가돌리늄 첨가계통 및 SDS #2

중성자 출력과 요구 출력은 출력 오차 신호를 만들어 내는데, 이 출력 오차가 액체 영역 제어 수위를 조정하며, 출력 오차가 큰 경우 조절봉과 정지봉의 구동 신호를 제공한다. 출력 오차가 제어장치의 동작으로 반응도의 제어를 수행하지 못하여 10%이상 증가하게 되면 원자로 제어 장치에서 감속재 독물질 주입 계통에 의한 독물질을 주입하게 한다.

원자로 제어 계통에서는 액체 영역 제어 장치에 Bulk 제어와 Spatial 제어의 두 가지를 병행할 수 있도록 신호를 제공하며 중성자속의 분포가 원자로 내에서 일정하도록

하기 위해 각 지역별로 수위를 조절하게 된다.

액체 영역 제어 계통의 경수 영역은 [그림 1]과 같이 원자로 내부에 14개 지역으로 나누어져 있다. 각 영역은 수직 원통형의 물기둥으로서 내부 수위를 적정하게 제어하여 각 영역의 중성자 흡수율 제어를 통하여 국부 출력 제어를 하게 된다.



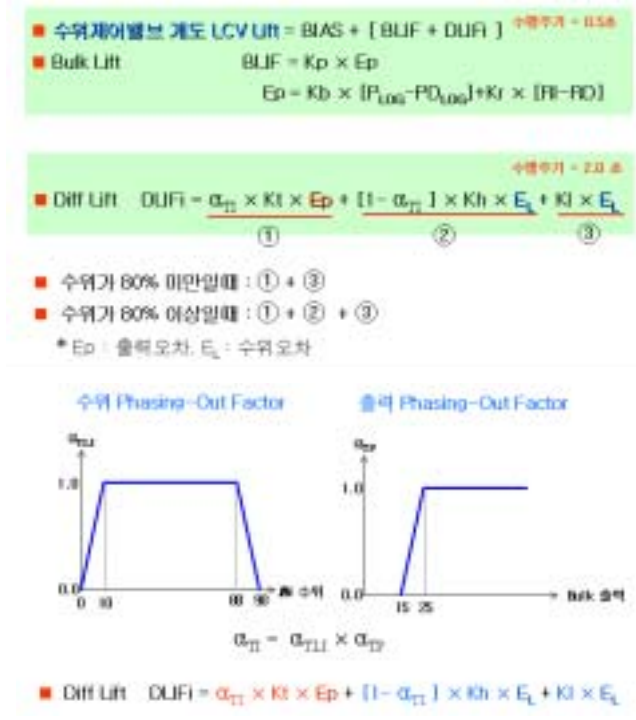
[그림 1] 노심 내의 액체영역제어 Zone

액체 영역 제어 계통 블록선도는 [그림 2], 상부 영역의 내부 거동은 [그림 3]과 같다. 수위 제어는 지연 탱크 하부 경수를 내부로 흐름 제어하는 경수 제어 부분과 수위 측정, 유출 경수 제어를 위한 상부 헬륨 가스 부분으로 구성된다. 제어 계통은 14개 수위를 한꺼번에 조절하여 전반적인 출력을 조절하거나, 각 수위를 개별 조절하여 원자로의 단기간 반응도 제어를 한다. 각 영역의 유출 경수량을 일정하게 하고 유입 경수량을 조절 밸브로 조절하여 수위를 조절한다. 수위 측정은 액체 영역 바닥으로 일정한 헬륨 기체를 흘리고, 수위에 따른 튜브 끝단의 압력으로 측정하는 버블러 방식을 사용한다.

## (2) 액체 영역 제어 알고리즘

액체 영역 수위 제어 알고리즘은 [그림 4]와 같이, 평균 수위와 각 영역 수위와의 수위 차, 평균 출력과 각 영역 출력과의 출력 차를 사용하는 비례 제어 방식이다.<sup>(2)</sup> 제어 밸브 개도는 전역 제어와 국부 차 제어, 유출 유량과 동일한 개도의 바이어스 개도의 합으로 나타낼 수 있다. 수위가 80% 이상이면, Phasing-Out에 의하여 각 영역 수위는 90% 이상이 되지 않도록 밸브 개도에 제한을 둔다.

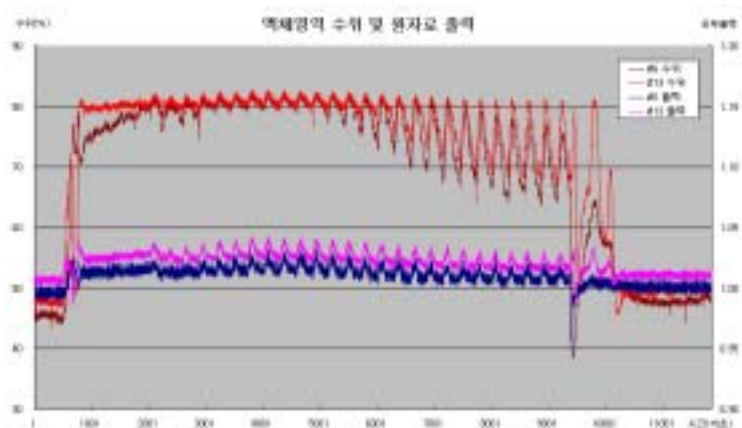




[그림 4] 액체 영역 제어 알고리즘

(3) 액체 영역 제어 난조(Cycling) 현상

국내 중수로뿐만 아니라 캐나다 중수로에서도 출력 오차가 특정 값을 초과하고 수위가 80% 이상인 경우, 6번과 13번과 같은 상부 영역에서 [그림 5]와 같은 수위와 출력 Cycling 현상을 나타나고 있다.



[그림 5] 액체영역 제어 난조 현상

핵연료 교체 후, 영역 출력이 약 3% 증가하면, 제어 알고리즘에서는 출력을 설정치로 낮추기 위하여 영역 수위를 증가시키게 된다. 그러나 80%이상 수위에서 알고리즘 상의 Phasing-Out 기능에 의해 제어 밸브 개도는 더 이상 열리지 못한다. 대부분의 하부 영역에서는 80% 수위에서 제어능이 충분하므로 곧 국부 출력이 감소하여 안정된 제어 상태가 되나 상부 영역에서는 약간의 제어능 부족으로 국부 출력이 즉시 안정되게 감소하지 못한다. 따라서 수위는 80%이상을 상당 기간 머무르게 되고 국부 출력은 서서히 증가하게 된다. 이때, 타 영역에서 핵연료를 교체하여 상부 영역의 제어 출력이 동반 상승할 경우에는 Phasing-Out 영향이 더욱 커지게 되고, 제어 알고리즘에 의해 밸브는 닫히도록 된다. 수위는 감소하고, 이에 따라 시간을 두고 출력은 증가하게 된다. Phasing-Out에 의한 수위와 출력 변화의 상호 작용에 의해, 원자로 출력은 일정한 Cycling을 하게 되고, 이와 동반되어 수위는 흔들리게 된다.

이것의 원인을 찾기 위하여, 제어기기 기능과 성능, 제어 알고리즘 등을 검토하였으며, 여기에서는 제어 알고리즘 관점에서 분석하였다.

### 3. 액체 영역 제어 모델 개발

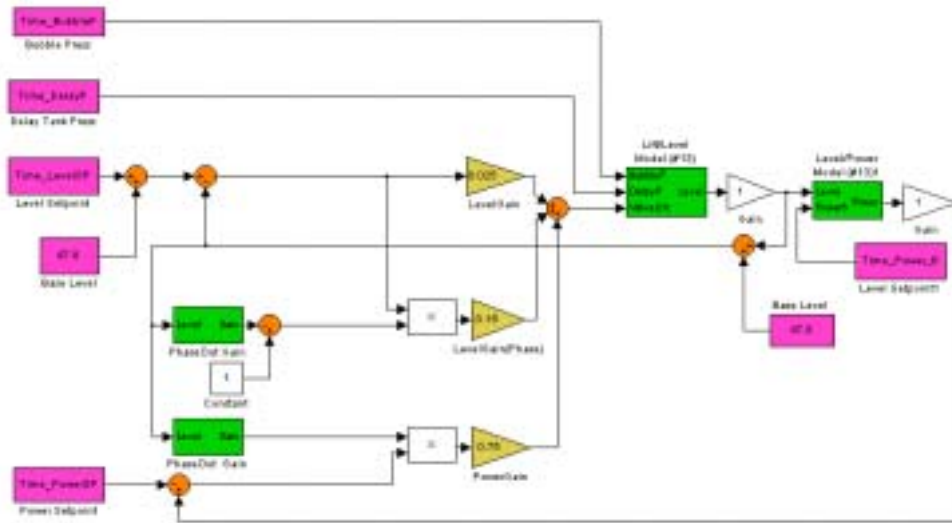
제어 알고리즘의 적합성과 계통 제어 안정도를 분석하기 위하여, 제어 입력 요소들에 대하여 실제 운전 값을 사용한 시스템 파라미터 인식 기법을 사용하여 모델을 구하였다. 표준 모델 식은 아래와 같은, 선형 차분 방정식의 ARMA(Auto Regressive Moving Average) 모델을 사용하고, 각 파라미터는 MATLAB을 사용하여 최소자승법으로 구하였다.

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

액체 영역 제어 계통의 13번 영역의 전체 모델 블록도는 [그림 6]과 같다. 모델은 “밸브 개도/수위” 사이 거동 모델과 “수위/국부 출력” 사이 거동 모델, 그리고 기타 변수들 사이 연결도로 구성된다. 개도/수위 모델에는 수위에 영향을 미치는 지연 탱크 압력과 상부 기체 압력을 외란 입력으로 사용하였다. 13번 수위/출력 모델에는 인접하여 영향을 가장 크게 미치는 6번 출력을 외란으로 사용하였다.

#### (1) 밸브 개도/수위 모델링

밸브 개도/수위 거동 모델 표준식은 다음과 같다.<sup>(3)</sup>

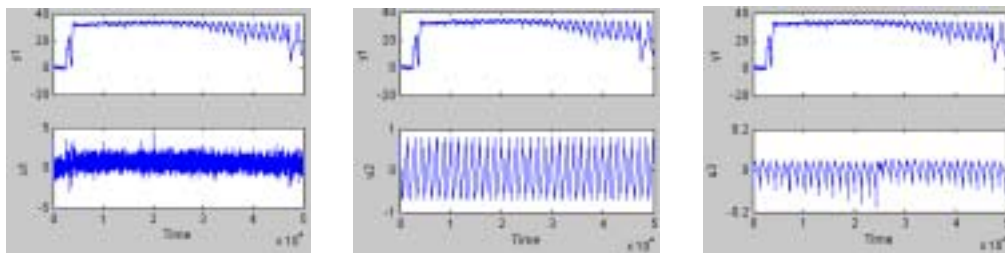


[그림 6] 액체 영역 제어 모델 블록도

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

- 여기서,  $y(t)$  : 13번 영역 수위
- $u_1(t)$  : 13번 수위 제어 밸브 개도
- $u_2(t)$  : 지연 탱크 압력
- $u_3(t)$  : 상부 헬륨 기체 압력

모델 인식에 사용한 운전 데이터는 [그림 7]과 같다.

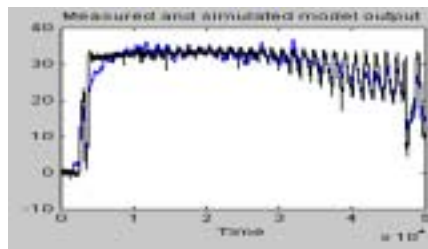


[그림 7] 밸브 개도/수위 모델에 사용한 운전 데이터

모델 식은 4차 차분 방정식으로 나타내었으며 시 지연은 동일하게 한 스텝을 사용하였다.<sup>(4)</sup> 파라미터 인식에 의한 모델 식은 아래와 같다.

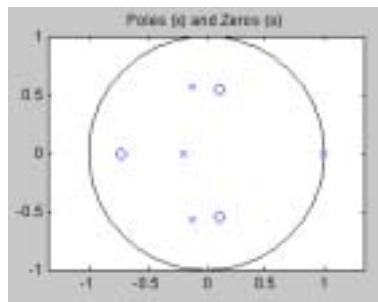
$$\begin{aligned}
 A(q) &= 1 - 0.5471q^{-1} - 0.05194q^{-2} - 0.3242q^{-3} - 0.06755q^{-4} \\
 B(q) &= 0.2293q^{-1} + 0.1156q^{-2} + 0.03455q^{-3} + 0.05369q^{-4} \\
 C(q) &= 0.3289q^{-1} - 4.312q^{-2} + 4.672q^{-3} - 0.7198q^{-4} \\
 D(q) &= -6.756q^{-1} - 0.7719q^{-2} + 6.826q^{-3} + 1.213q^{-4}
 \end{aligned}$$

차분 방정식 모델을 운전 데이터로 시뮬레이션 한 결과는 [그림 8]과 같다.



[그림 8] 밸브 개도/수위 모델 시뮬레이션 결과 (청색)

[그림 9]는 모델의 Z-영역에서의 Pole-Zero 위치를 나타낸다. Pole-Zero 안정도 분석 결과, Pole 중 하나가 안정도 경계선에 매우 인접하게 위치하며, 이것은 제어 안정도가 매우 낮음을 나타낸다. 따라서 실제 수위 거동에서 진동 특성을 나타낼 것으로 예측할 수 있으며, 실제 수위의 거동에서도 확인할 수 있다.



[그림 9] 모델의 Pole-Zero 위치

## (2) 수위/국부 출력 모델링

수위/국부 출력 모델 표준식은 다음과 같다.



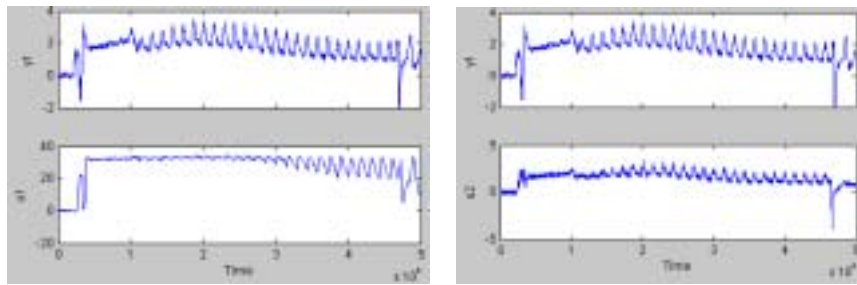
$$A(q)y(t) = B(q)u_1(t-lk) + C(q)u_2(t-mk)$$

여기서,  $y(t)$  : 13번 영역 출력

$u_1(t)$  : 13번 영역 수위

$u_2(t)$  : 6번 영역 출력

모델 인식에 사용한 운전 데이터는 [그림 10]과 같다.



[그림 10] 수위/국부 출력 모델에 사용한 운전 데이터

모델 식은 4차 차분 방정식으로 나타내었으며, 시 지연은 13번 수위 신호에 대해서는 4 스텝 지연을 두었고, 6번 출력 신호에 대해서는 시 지연을 두지 않았다.

파라미터 인식에 의한 모델 식은 아래와 같다.

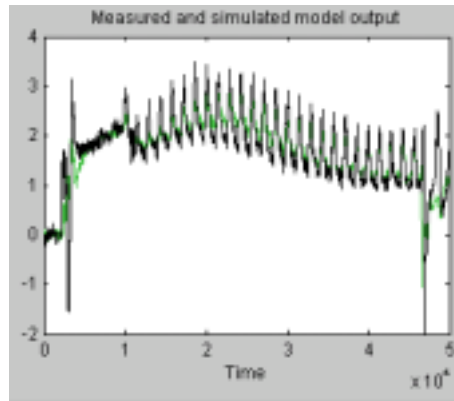
$$A(q) = 1 - 2.444q^{-1} + 1.807q^{-2} - 0.1559q^{-3} - 0.2067q^{-4}$$

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

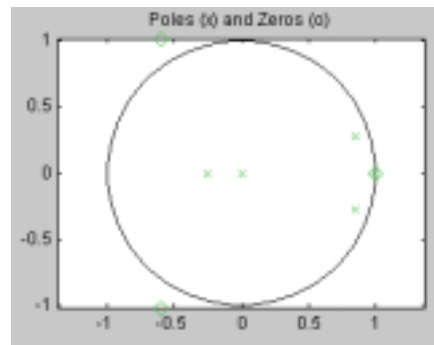
$$C(q) = 0.4362 - 1.197q^{-1} + 1.142q^{-2} - 0.3802q^{-3}$$

차분 방정식 모델을 운전 데이터로 시뮬레이션 한 결과는 [그림 11]과 같다.

[그림 12]는 모델의 Z-영역에서의 Pole-Zero 위치를 나타낸다. Pole-Zero 안정도 분석 결과, Pole 이 안정 경계 내부에 위치하지만, 안정도 경계선 부근에 위치하므로 제어 시에 감쇄 Cycling 특성을 나타낼 것으로 기대할 수 있다.



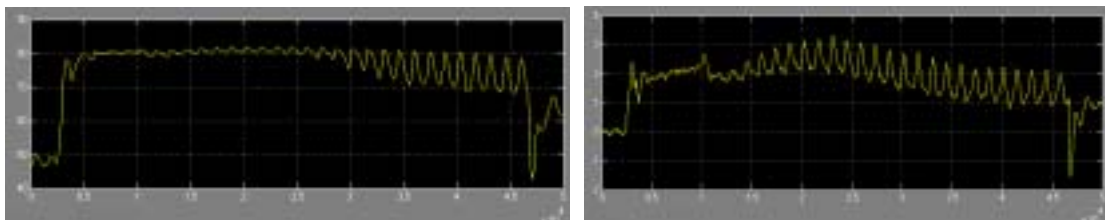
[그림 11] 수위/국부 출력 모델 시뮬레이션 결과 (녹색)



[그림 12] 수위/국부 출력 모델의 Pole-Zero 위치

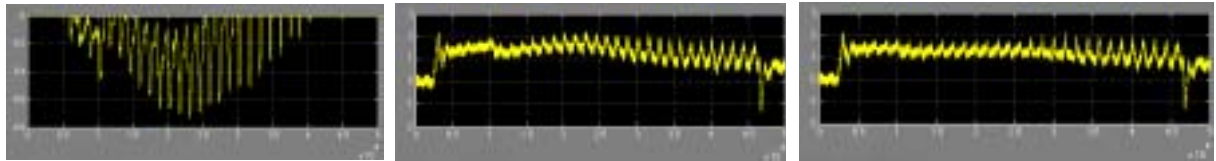
#### 4. 제어 난조 분석

액체 영역 수위 제어 계통은 Pole-Zero 제어 안정도 분석으로부터 고유한 진동 특성을 지닌 안정도가 낮은 시스템으로 분석되었다. [그림 6]의 제어 모델을 이용하여 수위와 국부 출력이 Cycling이 발생하는 현상을 시뮬레이션 한 결과는 [그림 13]과 같다.



[그림 13] 13번 영역 수위와 출력 Cycling 시뮬레이션 결과

13번 영역에서 핵연료 교체 후, 국부 출력이 약 2.5% 순간적으로 증가하였으며, 제어 알고리즘에 의해 수위는 80%까지 증가하였다. 그러나 80% 한계 수위까지 증가하여 유지하여도 제어능 부족으로 국부 출력은 서서히 증가하는 현상을 나타내었다. 약 10,000초 부근에서 인근 영역의 핵연료 교체가 이루어졌고, 이의 영향으로 13번 국부 출력은 순간 증가 현상을 나타낸다. 이때 알고리즘의 수위 Phasing-Out과 출력 Phasing-Out이 상호 작용하면서 수위 증가는 억제된다. [그림 14]는 수위 및 출력 Phasing-Out을 각각 나타낸 것이다.



[그림 14] 수위 및 출력 Phasing-Out 과 합산 Phasing-Out

수위 Phasing-Out과 출력 Phasing-Out은 상호 상쇄 현상을 나타내며, 합산된 Phasing-Out 결과의 Cycling 크기는 작아지게 되어 제어에 미치는 영향이 완화되도록 설계되어있다. 그러나 Phasing-Out이 작용할 경우, 작은 수위 Cycling이 원자로 출력을 Cycling 시키게 된다. 수위가 80% 미만으로 줄어들면서 수위 Phasing-Out은 없어지는 반면, 출력 Phasing-Out 이득은 100%로 되어 출력의 흔들림이 수위 흔들림으로 직접적으로 나타나게 되므로, 수위의 Cycling은 매우 크게 나타난다.

Pole-Zero 안정도 분석 결과로부터 액체 영역 제어 계통의 특성은 안정도 경계에 Pole이 위치하여 불안정한 Cycling이 발생할 경우에는 특별한 제어 안정화 동작에 의해서만이 안정화가 가능함을 보여준다.

## 5. 결론

중수로 원전에는 원자로 출력 제어를 위하여 액체 영역 제어 계통이 있다. 14개 액체 영역 수위는 각각의 수위 편차와 국부 출력 편차를 이용하여 제어가 되며, 경수가 넘치는 것을 방지하기 위하여 수위가 80% 이상이 되면 Phasing-Out 방법을 사용하여 밸브 개도를 제한한다.

수위 80% 이상일 경우, 원자로 상부 영역에서 수위 난조(Cycling) 현상이 국내외 원전에서 관찰되고 있다. 본 논문에서는 제어 현상을 분석하기 위하여 다변수 차분 방정식 형태의 모델을 구하였다. 그것을 기반으로 제어 안정도를 평가하고, Phasing-Out이 제어 안정도에 미치는 영향을 분석하였다.

분석 결과, 수위 Cycling 원인으로는 80% 이상 수위에서 Phasing-Out 이득의 급격한

변화가 원인 인자일 수 있음을 확인 하였다.

#### 참고 문헌

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