

## 액체영역 제어시스템의 노심 및 열유체 모델

# The Thermal-hydraulic and Neutronics Model for The Liquid Zone Control System of CANDU Reactor

김상녕, 지준석, 고병만  
경희대학교  
경기도 용인시 기흥읍 서천리 1번지

### 요 약

국내뿐만 아니라 전 세계적으로 CANDU형 원전의 액체영역제어시스템에서 일어나는 불안정 문제는 원자로 운전원을 불안하게 하고 원자로 운영에 많은 지장을 초래함은 물론 원자로의 안전성에 위협이 될 수 있다. 이 문제는 원 설계자인 캐나다의 AECL 조차도 원인 규명과 대책 수립에 어려움을 겪고 있다. 또한 노심 출력과 관련한 노물리, 시스템의 거동 분석에 필요한 수력학, 시스템 제어 논리 등 다양한 전문 지식이 상호 연관된 문제이다. 따라서 본 연구에서는 시스템을 구성하는 부품들에 대한 지배방정식과 보존방정식, 경계조건 등으로 이루어진 시스템의 수력학적 모델과 액체영역제어 시스템의 반응도와 관련된 교체 연료, Xe 및 Sm, 수위, 출력 등에 대한 노물리 모델이 완성되었다. 본 모델은 노심 모델, 기기 제어 모델과 연계되어 시스템의 불안정 원인규명과 대책 수립에 활용될 것이다.

### Abstract

The instability of Liquid Zone Control System(LZCS) in CANDU reactor has been a worldwide problem and made reactor operators uneasy and reactor operation difficult. Also the problem can threaten the reactor safety seriously. Even AECL(Atomic Energy Canada Limited), original designer of the reactor type, have not yet found out the root causes and the correction measures of the problem. Furthermore the problem is interrelated with the multidisciplinary knowledge such as reactor physics, hydraulics, and instrumentation and control(I&C). In this study, therefore, the thorough investigation of related literatures, local plant experience data, and private communication letters was made to sort out the potential causes. Through this study, it was found that in the compartments of upper side region the combined feedback of the insufficient control worth, xenon instability and reactor regulation logics may be the root causes of the instability. Finally, to fix the potential causes as a solid clue, sophisticated and quantitative analysis should be made. To do this, a hydraulics and neutronics modeling of the system consisted of governing equations, boundary conditions, state equations, and some associated equations was completed.

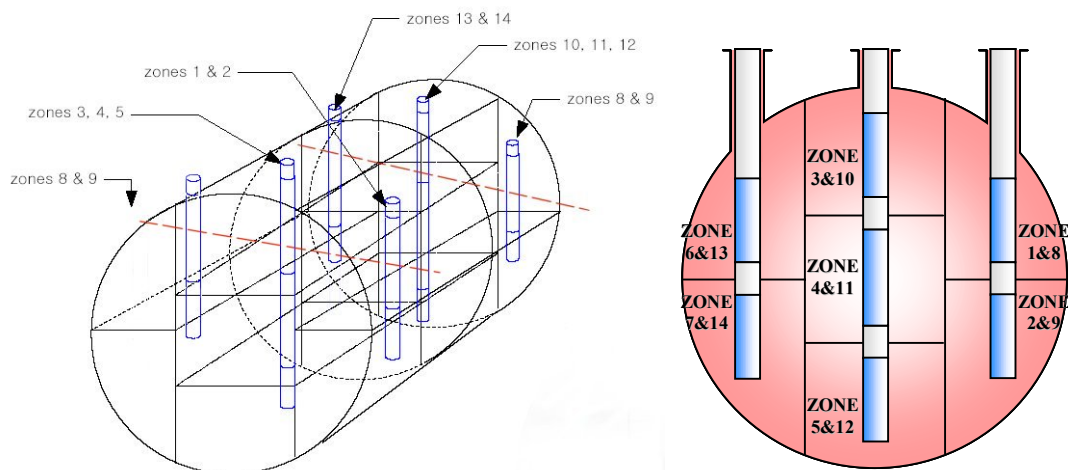
## 1. 연구배경

월성 2호기에서 발생한 액체영역제어계통(Liquid Zone Control System ; LZCS)의 수위와 출력의 급등락 및 흔들림(Cycling) 현상은 원전의 원활한 운전과 제어를 어렵게 할 뿐만 아니라 안전에도 위협이 될 수 있다. 이러한 현상은 CANDU형 발전소에서 공통적으로 발생하는 문제로서 계통의 결함에 기인하는 것으로 판단된다. 특히 CANDU형 원전의 설계회사인 AECL도 원인규명과 대책수립에 어려움을 겪고 있으며 뚜렷한 해결책을 제시하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 운전이력, 관련 문헌 및 자료, 정보 등을 철저히 수집하고 분석하여 원인이 될 수 있는 수리학, 노물리, 제어에 관련된 현상들을 하나도 빠짐없이 분석할 필요성과 이를 통해 원인규명과 해결책이 제시되어야 한다. 또한 이들을 간단한 모델화 하여 실제 발전소에서 일어나는 현상을 모사하므로 원인을 입증하고 해결책의 효과를 입증할 수 있다.

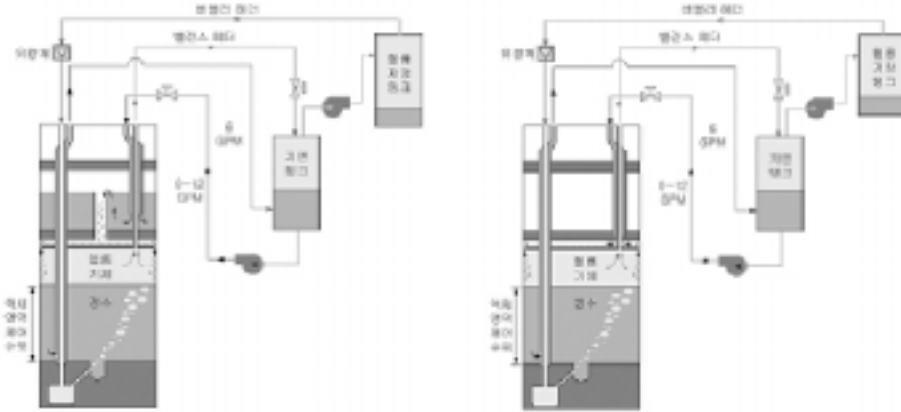
## 2. 액체영역제어계통의 개요

액체영역제어계통은 CANDU형 원자로의 여러 반응도 조절장치 중 하나이며, 노심 내에 6곳에 설치되어 있다. 각각 2~3개의 지르칼로이 격실로 이루어졌으며 총 14개로 구성되어 있다. CANDU형 중수로의 핵연료 교체 후 발생하는 국부과다 출력을 평탄하게 하는 기능을 제공하며 이는 중성자 흡수체인 격실의 수위(경수량)를 조절함으로써 구현된다. 각 격실의 상부에는 헬륨(Helium) 가스로 채워져 있고 14개 영역에 경수를 최대로 일제히 채우거나 비울 때의 반응도 변화율은 격실당 약 7.5 mK이다.

각 영역의 격실 용량은 18L~38L로 위치에 따라 다르며 각 격실에는 경수의 입구와 출구가 있다. 각 격실의 수위는 유입량과 유출량을 쌍방향 제어하며 조절한다. 액체영역제어계통은 크게 경수순환계통과 상층기체계통으로 나누어져 있으며 경수와 상층기체인 헬륨은 계속 순환되도록 설계되어 있다. 정상 운전시에 격실 내 경수의 수위를 40% 정도로 일정하게 유지하고, 격실 상층부의 헬륨(Helium) 가스의 압력(헬륨밸런스헤더와 버블리헤더의 압력차)을 3bar로 일정하게 유지하여 경수가 경수영역의 아래에 위치한 배수구(Scavenger)를 통해 수직방향으로 배출되도록 설계되어 있다. 경수의 수위는 0~12GPM으로 제어되는 유입량과 6GPM으로 고정된 배출량의 차이에 따라 조절 된다. EH한 계통을 거쳐나온 He은 지연탱크에 모아지며 압축기에 의해 저장탱크에 가압 저장되어 계통으로 다시 순환한다. 압축기의 작동방식은 연속운전이나 단속운전이 가능하며 발전소에 따라 다르다.



[그림 1] 경수영역제어계통 입체도와 단면도



[그림 2] 액체영역제어계통 격실 구조 및 계통(상부 및 중/하부)

### 3. 불안정(Instability) 사례

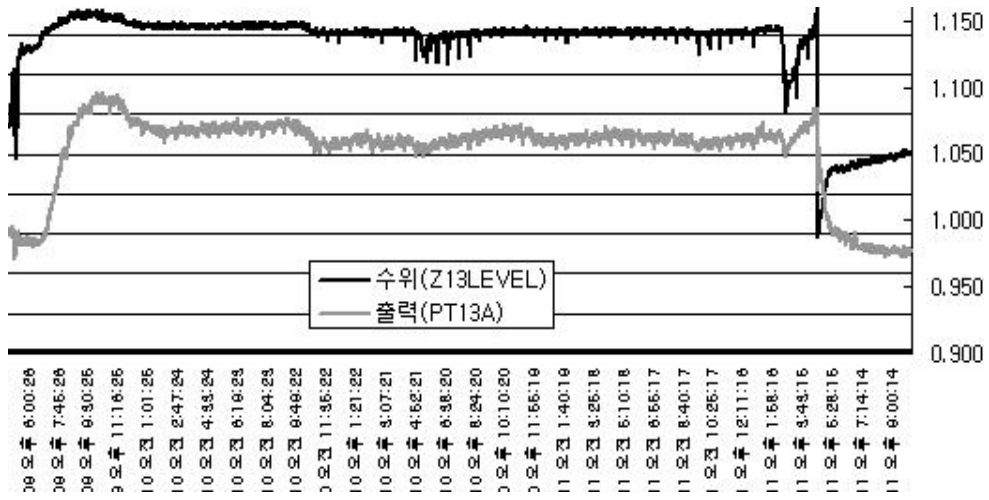
#### 3.1 국내 사례

1999년 6월~7월 동안의 계획예방정비 이전에는 국내 월성2호기의 경우 영역 #13에서 80% 이상 수위가 증가되어 2~4일 동안 80% 이상의 수위 유지 후 2~3분 동안 수위가 40%로 급락(1999년 2월 11일 16시 28분)하는 현상이 발생한 뒤 정상으로 복구되었다. 그 이후로도 같은 현상이 10회 이상 발생하였으며 초기 수위가 35%에서도 수위와 출력의 급등락 현상이 발생하였다. 월성1호기의 경우 영역 #1에서 1999년 5월 11일에 연료 교체 없는 상태에서 수위가 50%에서 헬륨 압축기(CP1)의 구동만으로 약 30%가 증가하는 현상이 발생하였다.

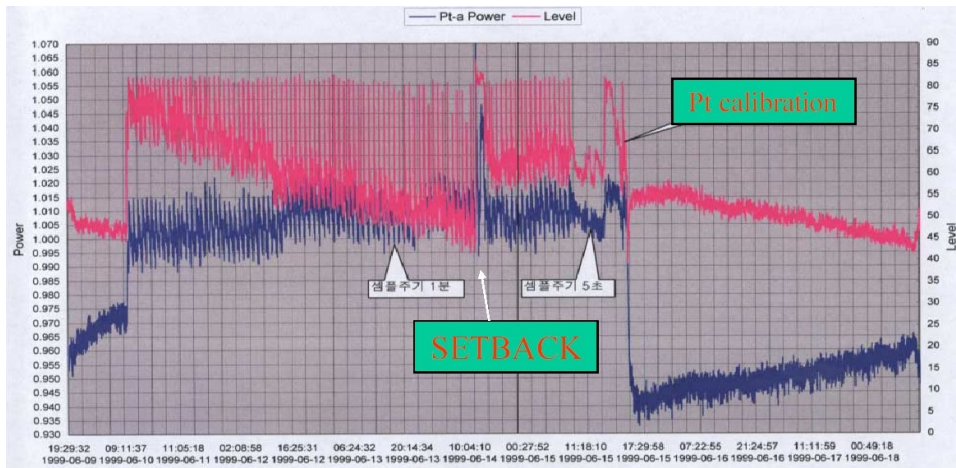
1999년 계획예방정비 이후에는 월성2호기의 경우 상부 영역인 영역 #1, #6, #8, #13에서 수위가 80% 이상으로 증가한 뒤 서서히 감소하면서 헬륨압축기의 주기에 따라 흔들림 현상이 발생하였고 50% 정도에서 정상 수위를 유지하기까지 약 2일이 걸렸다. 하지만 수위의 급등락현상은 없어졌고 하부 영역에서는 수위가 80% 이상 증가하여도 수위의 흔들림이나 급등락 현상은 없었다. 월성1호기의 경우 영역 #1에서 1999년 6월 10일에서 15일까지 수위의 흔들림 및 급등락 현상이 발생하였다. 6월 14일에는 수위의 흔들림 시점에 연료의 교체로 출력은 110%, 수위는 80%에 도달한 후 상승되는 출력을 억제할 수 없어 영역의 출력 증가에 의한 Setback이 발생하였다. 월성3호기의 영역 #1에서도 2000년 7월 13일부터 14일까지 출력과 수위의 급등 및 흔들림 현상이 발생하였다.

그림 3은 핵연료 교체 후 Zone #13의 국부출력의 증가에 따라 격실의 수위가 80% 이상으로 증가하였지만 국부출력은 감소하지 않았고 이에 따라 격실의 수위는 계속 80% 이상을 유지한 뒤 급락하였음을 보여주고 있다.

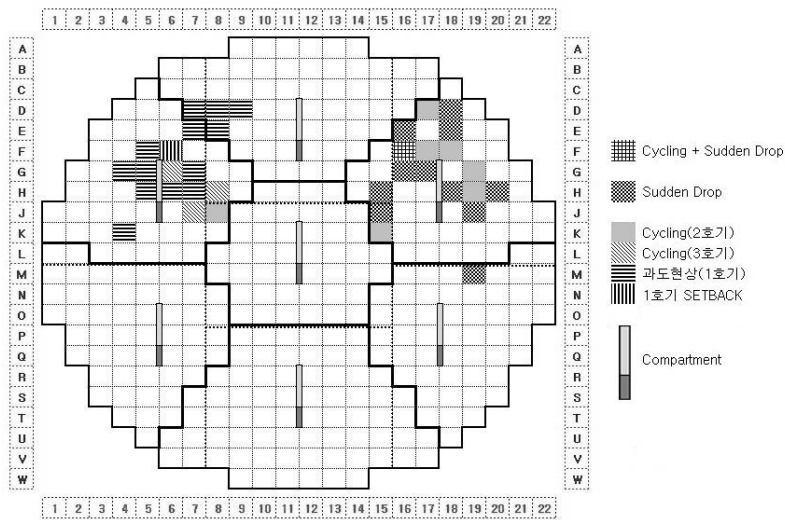
그림 4는 국부출력이 97.5%에서 100.4%로 증가하였고 수위 제어 알고리즘에 따라 수위가 50%에서 80%로 증가하였다. 하지만 격실 수위의 증가에도 불구하고 국부출력은 감소하지 않고 유지되었다. 또한 국부출력이 빈번하게 흔들림에 따라 수위가 심하게 흔들리면서 수위가 전체적으로 낮아지는 현상이 나타났다. 더욱이 중간지점에서 Setback이 발생한 것을 나타내고 있다. 마지막 지점에서는 Pt검출기(PT13A)가 교정된 후 서서히 정상으로 복구하였다. 핵연료 교체부터 Pt검출기(PT13A)의 교정까지는 약 2시간동안 난조 현상이 발생하였다.



[그림 3] 월성 2호기 D19, K03 교체 후 Zone#13 수위 및 출력 변화(1999년 2월 9일)



[그림 4] 월성 1호기 F06 연료 교체 후 Cycling (1999년 6월 18일)



[그림 5] 월성원전 호기별 연료교체 후 이상 징후 발생위치

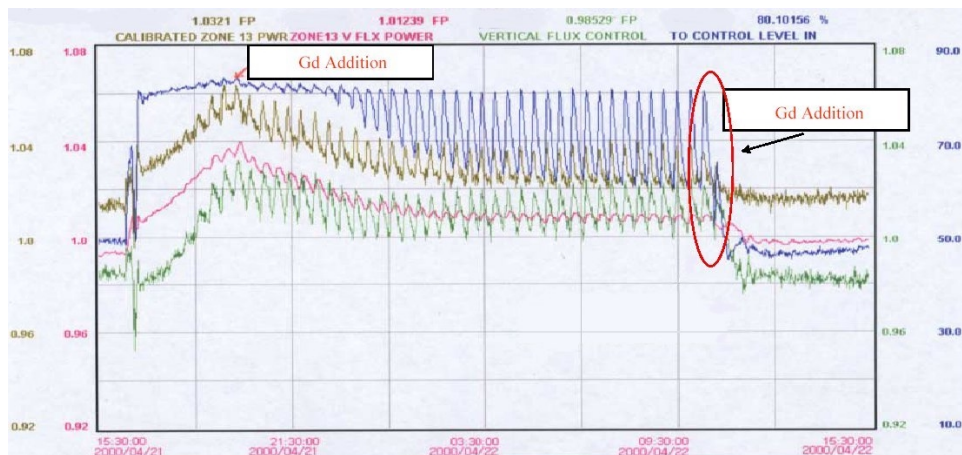
### 3.2 국외 사례

- ① Darlington 4호기: 월성 2호기 영역 #13 위치와 구조적으로 같은 영역 #8에서 수위 급락이 4회 반복적으로 발생하였다. Darlington 4호기의 수위 흔들림 및 급등락 현상은 월성 2호기의 현상과 동일하였으며 원인 또한 아직까지 밝혀내지 못하고 있다.
- ② Point Lepreau: 영역 #3, 10에서 수위의 불안정성이 발생하였으며 연료 교체시에 수위를 낮게 유지하고 액체영역제어계통의 설계변경을 통해 압축기의 운전방식을 단속운전에서 연속운전방식으로 변경한 후 불안정 현상이 발생하지 않았다.
- ③ Gentilly 2: 액체영역제어계통의 설계변경을 통해 압축기의 운전방식을 단속운전에서 연속운전방식으로 변경한 후 1996년부터 불안정 현상이 발생하지 않았다.
- ④ Cernavoda: 액체영역제어계통의 설계변경을 통해 압축기의 운전방식을 단속운전에서 연속운전방식으로 변경하였다.

### 4. 불안정의 특징

- 불안정성의 일반적인 특징을 살펴보면 다음과 같다.

- ① 경수의 수위가 급등한 후 Cycling 하다 다시 급락한다.
- ② 출력검출기(Pt) 신호(출력)도 수위와 거의 동일하게 거동한다.
- ③ 상부 격실 중에서도 영역 #1, #6, #8, #13에서 심각하게 발생하고, 같은 상부 영역이라도 영역 #3, #10에서는 잘 일어나지 않는다.
- ④ 경수의 수위가 80% 이상에서 발생하는 특징이 있다.
- ⑤ 발전소나 기타 상황에 따라 불안정 양상에 다소 차이가 있으나 대체적인 형태는 유사하다.
- ⑥ 불안정이 발생하면 5~6일 정도 지속된다.
- ⑦ 압축기의 기동과 연관성이 있으며 압축기의 용량차이와 운전형태에 따라 다르다.
- ⑧ 연휴나 연료 교체기 수리 등으로 과도한 연료 교체 후 발생한다.



[그림 6] 월성 2호기 F18 연료교체 후 Zone#13 수위 및 출력 변화 (2002년 4월 21일 - 2002년 4월 22일)

### 5. 불안정 원인 후보 분석 및 선별

- 이제까지 문헌들에서 언급된 잠정원인 및 이들의 검토결과는 다음 표와 같다.

[표 1] 잠정원인 및 검토결과

잠정 원인	원인 검토	평가
수위측정장치 결함	작동성 및 교정 확인	×
반응도조절장치 작동	반응도조절장치 작동 없음	×
핵검출기 교정	핵검출기 교정 없음	×
감속재 온도	급락크기에 미치지 못함	×
독물질 침전과 용해	급격한 변화 없음	×
채널비등	수위변화 작고 사례와 다름	×
제어모델링 결함	모델링 결함 확인 필요	○
Xenon Instability	반응도, 불안정 형태 및 지속시간	○
압축기 운전(헬륨)	불안정 발생 위치, 압축기 운전영향 등	○
출력 및 수위 제어	수위가 80% 이상에서는 출력 제어보다 수위 제어가 우선임	○

## 6. 불안정 각본 (Instability Scenario)

CANDU형 원자로의 액체영역제어계통 불안정은 노물리 현상, 수력학적 현상, 제어논리 등이 복잡하게 얽힌 현상의 결과로 야기된다고 판단된다. 섭동의 크기가 일정한 수준을 넘어서면 수위가 80%이상에서는 출력제어보다는 수위제어가 우선하므로 수위가 고정되어 이러한 섭동으로 인한 출력변화를 수위조절로 신속한 제어가 불가능해진다. 즉 상부 양측면 격실은 이러한 불안정 요건을 충족시켜준다. 제어능이 충분치 못하면 압축기 작동과 정지시 (+)와 (-)반응도의 섭동을 일으킨다. 또한 이때 상부측면 격실 인근에 새 연료가 교체되면 국부출력이 증가하고 이를 제어하기위해 수위가 증가한다. 하지만 이미 상당히 높은 수위에 도달한 수위는 쉽게 80%를 초과하고 수위는 한계에 도달한다. 따라서 더 이상 제어 능력을 갖지 못하므로 출력이 일정수준 증가한다. 증가출력(중성자속)이 일정시간 지속되면 출력변화와 Xenon 반응도 변화의 악순환(Viscous Feedback)이 야기된다고 판단된다. 이러한 악순환은 Xe과 Sm의 악순환이 개입되기 전에 신속히 제어가 이루어지면 제압될 수 있다. 하지만 격실의 수위가 80% 이상에 도달하여 제어능을 상실하여 제압할 수 없다. 따라서 액체영역제어계통의 불안정의 Scenario는 다음과 같이 요약될 수 있다.

- ① 상부 측면 액체영역제어계통 부근의 반응도(출력)가 상당히 높아 이미 수위와 출력이 일정수준 이상인 상태로 운전 중. (예로 60%~70% 수준)
- ② 새로운 핵연료가 이 영역 인근에 교체되어 이 영역 부근의 출력(반응도)이 더욱 과다하게 상승함.
- ③ 이러한 과다한 국부 출력을 제어하기 위해 이 영역 격실의 수위는 증가함. 하지만 이미 상당히 수위가 높아진 상태이고 상부측면 격실의 노물리적 특성과 높은 수위에서 제어능의 한계로 인하여 수위가 쉽게 80%이상에 도달함.
- ④ 수위가 80%를 초과하면 격실의 넘침(Flooding)을 방지하기 위해 제어가 출력우선에서 수위우선으로 변경됨. (더 이상 제어 능력이 없음)
- ⑤ 따라서 수위는 80%~90%선에서 고정되므로 더 이상 액체영역제어계통은 국부 출력 제어 능력을 상실하게 되므로 이 영역 부근의 출력은 일정 부분 계속 상승함.
- ⑥ Xe 농도 모델에서 언급한 바와 같이 출력증가는 Xe 농도의 감소를 가져와 출력은 더욱 증가하고 다시 Xe농도의 감소를 가져와 출력이 급증하는 악순환(Viscous Feedback)이 일어난다. 따라서 일시적으로 악순환에 의해 Overshoot 현상도 발생할 수 있음
- ⑦ 하지만 노심 고유의 핵연료 온도 계수와 주위 제어봉이나 액체영역제어계통 등의 제어

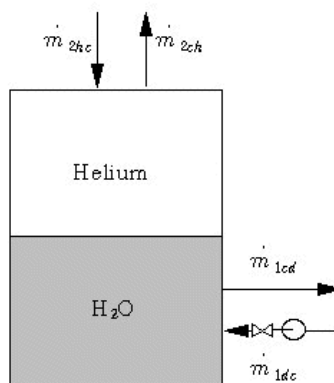
참여로 출력은 증가된 일정수준에서 유지됨.

- ⑧ 이러한 현상은 헬륨 유량 증가에 따른 반응도 효과모델에서 언급하였듯이 헬륨 압축기의 작동과 정지 같은 유체 계통의 섭동에 의해 시작되고 불안정요인(Xe 불안정)등에 의해 증폭될 수 있음. 따라서 압축기의 작동과 정지에 따라 Cycling 현상 발생.
- ⑨ 증가된 출력으로 일정기간 운전이 지속되면 상승한 수위와 핵연료의 연소 및 Xe과 같은 핵분열 생성물의 새로 증가된 평형상태의 독작용 등에 의해 새 연료 교체에 따른 반응도 증가분이 거의 소멸되게 됨.
- ⑩ 이때 압축기 정지나 헬륨 유량 감소등과 같은 계통에 (-)반응도 효과를 나타내는 섭동이 발생하면 출력이 감소하고 일시적 출력(중성자속) 감소는 Xe 농도의 증가를 가져와 (-)반응도 삽입효과가 나타나며 다시 더욱 출력을 감소시키고 Xe 농도를 더욱 증가시켜 더욱 (-)반응도 삽입효과로 나타남. ((-)반응도가 악순환을 일으킴)
- ⑪ 이에 따라 이들 출력과 Xe의 악순환에 의해 출력은 급락하고 출력이 급락 하므로 수위도 급락함
- ⑫ Xe과 출력의 급락 Feedback이 지나쳐 일시적으로 수위 감소에 의한 (+)반응도 효과보다 클 경우 출력과 수위는 Undershoot까지 발생할 수 있으며 이때 핵연료 온도 감소에 따른 (+)반응도도 가세하여 다시 반응도를 (+)로 돌려 일정 수준 수위와 출력이 회복되어 거의 정상상태에 도달함.
- ⑬ 이후 수위와 반응도가 제어범위에 충분히 들어오므로 정상제어가 가능해짐. 즉 모든 것이 정상으로 돌아옴.

## 7. 관련현상 모델링

### 7.1 계통의 각 부분의 지배방정식 모델링

- 격실 질량 방정식



[그림 7] 격실의 제어체적

① 제어체적에 관한 방정식

$$V_{Tc} = V_{1c} + V_{2c} = const. = A_{Tc}(L_{1c} + L_{2c}) \quad V_{1c} = M_{1c}/\rho_{1c} = A_{Tc}L_{1c} \quad L_{1c} = \frac{M_{1c}}{A_{Tc}\rho_{1c}}$$

$$V_{2c} = A_{Tc}L_{2c} = \frac{M_{2c}}{\rho_{2c}}, \quad L_{2c} = \frac{M_{2c}}{A_{Tc}\rho_{2c}} \quad P_{2c}v_{2c} = RT_c \quad \rho_{2c} = \frac{P_{2c}}{RT_c} \quad \rho_{1c} = \rho_{1c}(\rho_1, T_c)$$

② 격실 제어체적에 대한 질량방정식

- 경수에 대해

$$\frac{dM_{1c}}{dt} = \dot{m}_{1dc} - \dot{m}_{1cd}$$

$$\dot{m}_{1dc} = \rho_{1d} U_{1d} A_{dc} \quad A_{dc} = \frac{\pi}{4} D_{dc}^2$$

$$\dot{m}_{1cd} = \rho_{1c} U_{1c} A_{cd} \quad A_{cd} = \frac{\pi}{4} D_{cd}^2$$

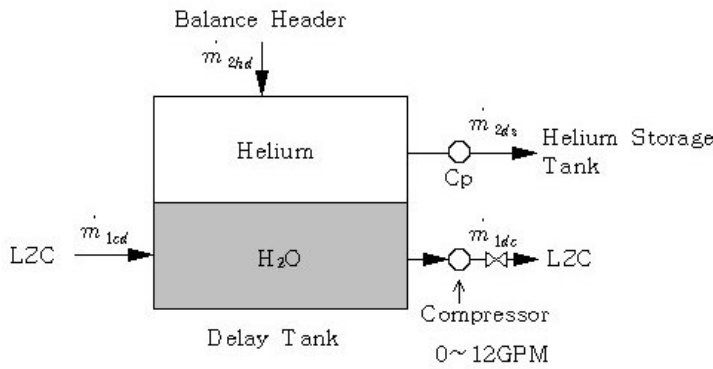
- 헬륨 기체에 대해

$$\frac{dM_{2c}}{dt} = \dot{m}_{2hc} - \dot{m}_{2ch}$$

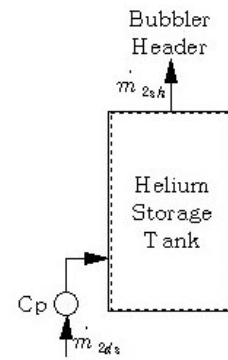
$$\dot{m}_{2hc} = \rho_{2h} U_{2hc} A_{hc} \quad A_{hc} = \frac{\pi}{4} D_{hc}^2$$

$$\dot{m}_{2ch} = \rho_{2c} U_{2ch} A_{ch} \quad A_{ch} = \frac{\pi}{4} D_{ch}^2$$

- 지연 탱크 및 헬륨 저장 탱크의 질량 방정식



[그림 8] 지연 탱크의 제어체적



[그림 9] 헬륨 저장 탱크의 제어체적

$$\frac{dM_{1d}}{dt} = \dot{m}_{1cd} - \dot{m}_{1dc}$$

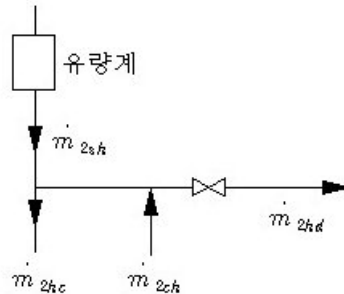
$$\frac{dM_{2d}}{dt} = \dot{m}_{2hd} - \dot{m}_{2ds}$$

$$\frac{dM_{2s}}{dt} = \dot{m}_{2ds} - \dot{m}_{2sh}$$

- 격실과 지연탱크 사이의 운동량 방정식

$$P_d + \Delta P_p + \rho g \Delta H + \frac{1}{2} \rho_d U_d^2 = P_c + \frac{1}{2} \rho_c U_c^2 + \Delta P_f + \Delta P_{us}$$

- 헤더 (밸런스/버블러)의 질량 방정식

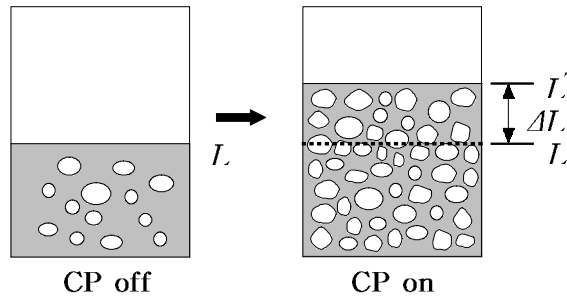


[그림 10] 밸런스/버블러 헤더에서의 헬륨의 흐름도

$$\dot{m}_{2sh} = \dot{m}_{2hc} + (\dot{m}_{2hd} - \dot{m}_{2ch})$$



## 7.2 Level Swelling



[그림 11] 압축기(CP)의 기동으로 인한 수위의 변화

$$V_g = Q_g L' / \overline{U_{rg}}, \quad \alpha = \frac{V_g}{V_t} = \frac{Q_g L' / \overline{U_{rg}}}{AL} = \frac{Q_g}{A \overline{U_{rg}}}$$

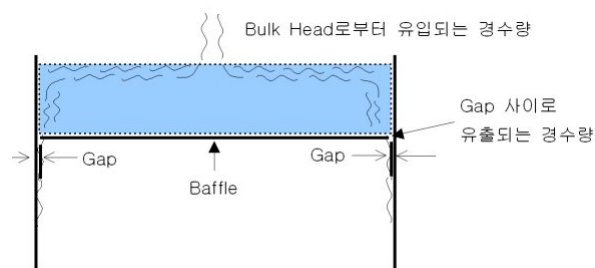
$$\alpha = \frac{Q_g}{A \overline{U_{rg}}} = \frac{L' - L}{L'} \doteq \frac{\Delta L}{L}$$

$$\therefore \Delta L \doteq \frac{Q_g}{A \overline{U_{rg}}} L$$

- 액체 내에서 기포 상승속도는 조건에 따라 다르지만 일반적으로 속도는 30-40cm/sec이다.
- 경수량의 증가 없이 수위상승(경수의 수위상승)시 반응도 계산

$$\Delta \rho = \rho - \rho_o \doteq - \frac{\int_V \delta \Sigma_a (\phi^2 - \phi_o^2) dV}{\nu \int_V \Sigma_f \phi^2 dV} = \frac{\int_V \delta \Sigma_a (\phi_o^2 - \phi^2) dV}{\nu \int_V \Sigma_f \phi_o^2 dV}$$

## 7.3 Baffle



[그림 12] Baffle의 구조

- Baffle은 격실에서 나가는 헬륨과 들어오는 경수를 물리적으로 분리
- Baffle과 격실 벽사이의 틈새(Gap)가 매우 좁아 Baffle위에 어느 정도 물이 차는 것은 당연함
- 차인 경수는 Bulkhead로부터 경수가 들어오는 좁은 통로의 차폐도 검할 것으로 판단됨

#### 7.4 핵연료 온도에 따른 출력 및 반응도 모델링

- 출력/반응도 (연료온도)

$$\Delta\rho_T = -\alpha_T \Delta\bar{T}_f = -\alpha_T \Delta\bar{T}_{f_0} \left( \frac{P_1}{P_0} - 1 \right)$$

( $\Delta\bar{T}_{f_0} = \bar{T}_f - T_s$ ; 100% 정상 출력시 핵연료 평균온도와 핵연료 표면온도와의 차이)

- 출력과 반응도를 시간의 함수로 표시

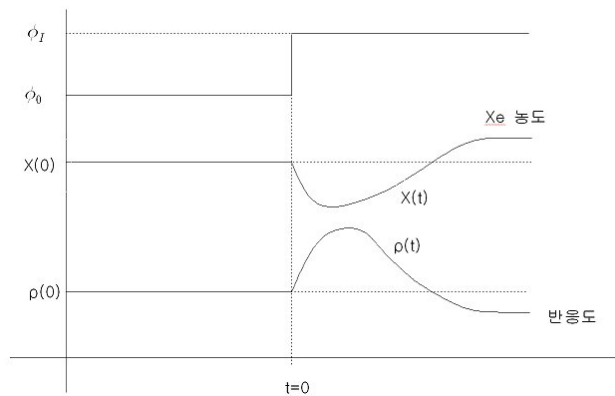
$$\Delta\rho_T(t) = -\alpha_T \Delta\bar{T}_{f_0} \left( \frac{\rho_1(t)}{\rho_0} - 1 \right)$$

$$\bar{T}_{f_0} - T_s = \frac{\dot{q}'_0}{8\pi K_f} = \Delta\bar{T}_{f_0}$$

#### 7.5 Xenon 모델링

- Xe과 반응도(Reactivity) 변화량은 다음식과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta\rho &= \rho_0 \left( 1 - \frac{X(t)}{X_\infty} \right) \\ &= \rho_0 \left[ 1 - \frac{\phi_I}{\phi_0} \left( \frac{\lambda_X + \sigma_a^X \phi_0}{\lambda_X + \sigma_a^X \phi_I} \right) \times \left\{ 1 - \left( \frac{\phi_I - \phi_0}{\phi_I} \right) \left[ \left( \frac{\lambda_X}{\lambda_X + \sigma_a^X \phi_0} \right) e^{-(\lambda_X + \sigma_a^X \phi_0)t} \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. + \left( \frac{\gamma_I}{\gamma_X + \gamma_I} \right) \left( \frac{\lambda_X + \sigma_a^X \phi_I}{\lambda_X + \sigma_a^X \phi_I - \lambda_I} \right) [e^{-\lambda_I t} - e^{-(\lambda_X + \sigma_a^X \phi_0)t}] \right] \right\} \right] \end{aligned}$$



[그림13]출력증가시 Xe농도와 반응도 변화추이

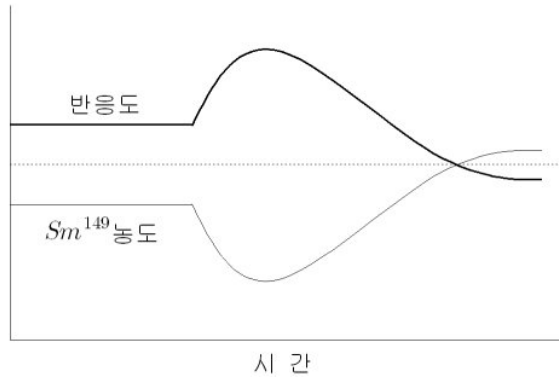
#### 7.6 Samarium 모델링

- 사마리움의 농도

$$S = \frac{\gamma_P \Sigma_f}{\sigma_a^S} \left[ 1 + \frac{\phi_0 - \phi_1}{\phi_1 - \lambda_P / \sigma_a^S} (e^{-\lambda_P t} - e^{-\Sigma_a^S \phi_1 t}) \right]$$

- Sm과 반응도(Reactivity) 변화량은 다음식과 같다.

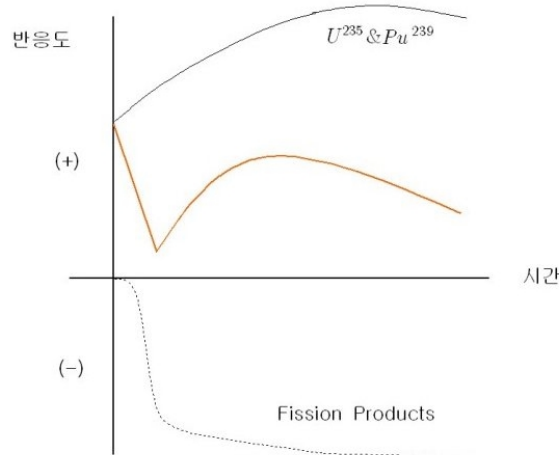
$$\begin{aligned} \Delta\rho &= \rho_1 - \rho_0 = -\frac{\sigma_a^S}{\Sigma_a} \frac{\gamma_P \Sigma_f (\phi_0 - \phi_1)}{\sigma_a^S \phi_1 - \lambda_P} (e^{-\lambda_P t} - e^{-\Sigma_a^S \phi_1 t}) \\ &= \frac{\Sigma_f}{\Sigma_a} \frac{\sigma_a^S \gamma_P (\phi_1 - \phi_0)}{\sigma_a^S \phi_1 - \lambda_P} (e^{-\lambda_P t} - e^{-\Sigma_a^S \phi_1 t}) \end{aligned}$$



[그림14] 시간에 따른 Sm의 농도 및 반응도 변화

### 7.7 핵연료 교체 후 반응도 모델링

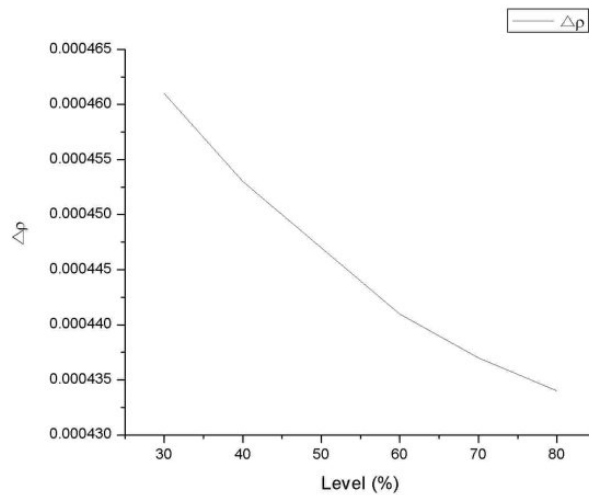
- 새 연료에는 U-235의 양이 많으며 핵분열 생성 독물질의 양도 거의 없기 때문에 핵연료 교체시에 노심에는 상당한 (+)반응도 삽입 효과가 일어난다.
- 시간이 지남에 따라 새로운 열중성자 핵분열 물질인 Pu-239가 생성되고 핵분열 생성 독물질은 Xe나 Sm등이 누적되는 현상이 발생되게 된다.
- [그림15]는 CANDU형 원자로에서의 새 연료의 연소시간에 따른 핵연료 반응도의 변화를 나타내었다.



[그림 15] 새 연료의 연소시간에 따른 핵연료 반응도의 변화

### 7.8 수위에 따른 반응도 모델링

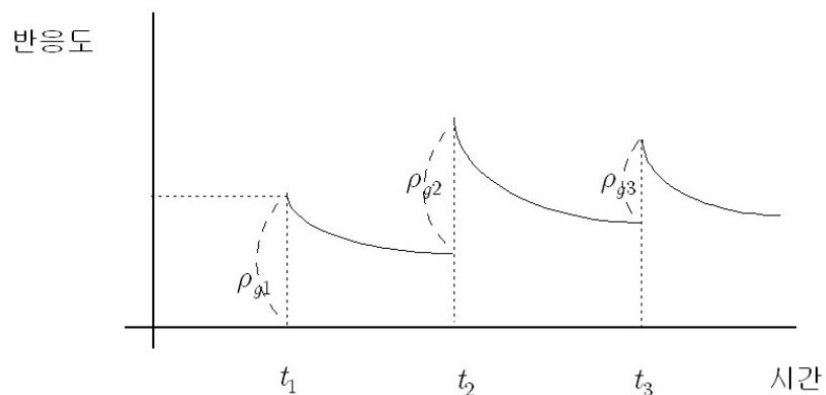
- CANDU 원전의 노심모사 전산 코드인 RFSP(Reactor Fuel Simulation Program)을 이용하여 계산 [그림16]
- 연료교체 전 수위에서 제한수위까지 수위변화에 따른 제어능(Control Worth) 계산
- 수위가 높은 수준(60%이상)에서 핵연료 교체시 급등한 출력 예측
- 시간이 따라 핵연료의 (+)반응도가 연소와 노심의 노물리 변화에 의해 소멸 될 때까지의 불안정 지속시간 예측
- 반응도가 소진(0) 상태에 도달한 후 섭동(Perturbation)에 의해 (-)반응도가 미량 삽입될 때 출력과 수위가 어느 선까지 급락 할지를 예측



[그림16]Level과 반응도 계산(RFSP)

### 7.9 독물질 투입에 따른 반응도 모델링

- CANDU형 원전에서 출력의 이상 급등이나 과도한 출력 Tilt 발생시 독물질인 게돌리움 ( $Gd^{64}$ )을 투입하여 출력이나 Tilt를 제어함
- 반응도는 투입되는 양과 시간에 따라 모델링 되어야 함
- [그림17]은 시간에 따른 독물질 영향으로 인한 반응도의 변화를 나타내었다.



[그림17]시간에 따른 독물질 영향으로 인한 반응도 변화

## 8. 잠정적 결론

- ① 상부 측면 격실(#1, #6, #8, #13)의 위치에 따른 노물리 특성과 한정된 제어능 때문에 과도한 국부 출력 제어에 충분한 여유(Margin)가 부족함.
- ② 초기 수위(핵연료 교체 전 수위)가 높은 상태에서 해당 격실 인근의 핵연료 교체시 해당 격실의 제어능은 더욱 필요하나 제어가 충분치 못하므로 국부 출력은 상당 수준 증가함
- ③ 상당기간 동안의 증가된 국부 출력 운전은 Xe, Sm과 같은 핵분열 생성 독물질의 개입(불안정 주요인)을 가져와 출력과 수위의 급등과 급락요인이 됨
- ④ 헬륨압축기의 On/Off에 따라 격실내의 경수의 위치와 밀도 변화에 따른 섭동((+),(-)반응도)이 야기 이에 따라 Xe 등으로 불안정한(Metastable)계통에 악순환 야기함
- ⑤ Setback이나 Gd 투입은 전체 출력을 낮추나 국부 출력 조절은 실패함

## 9. 차후 연구 과제

- ① 예비 Modeling의 Tune-up 및 점검
  - 불안정 요인들에 대한 보다 정밀 분석과 검토를 통해 최종적으로 원인을 확정
- ② 원인과 관련된 현상 모델링. 특히 H<sub>2</sub>O와 He의 유량 결정 모델이 미정임
- ③ Helium Compressor와 Instability의 관련성 규명(Coupling Model)
- ④ 원인 요소 모델의 정확한 입력
  - 필요시 정밀도를 높임
  - 누락이나 오류를 검토하여 완성도를 높여야 함.
  - 국부 현상이므로 국부 Information을 구하기가 힘 들것임
- ⑤ 원인 요소 모델의 결합 및 불안정 모사
  - 원인 요소 모델을 결합하고 전산코드화 하여 불안정 사건을 모사하므로 원인에 대한 충분한 설명이 이루어져야 함
- ⑥ 불안정 원인 확정
  - 원인이 확정되면 이의 개선책으로 설계변경, 운전행태 변경 등과 같은 연구가 현실에 입각하여 이루어 져야 함
- ⑦ 대책 수립
  - 계통의 설계 변경과 같은 개선책이 제시(기존 원전의 경우는 현실성 결여 문제)
  - 기존 원전에서는 현실적인 운전행태를 제안(타당성과 구체적 방법이 제시)
    - a. 상부 측면 격실 인근의 과도한(집중적인) 핵연료 교체 지양
    - b. 부득이한 경우 제어봉이나 기타 제어수단을 이용하여 수위를 최대한 낮춘 상태에서 연료 교체
    - c. 수위제어 범위의 확대나 제어 Gain 조절. 현재의 제한 수위 80%를 확대하여 제어능을 높이거나 제어 Gain을 조절하여 제어를 신속하게 할 필요 있음 반드시 계통의 Flooding 방지 보장이 필요
    - d. 이와 같은 경우 구체적인 관련 수치 제시가 필요
- ⑧ 현장 적용 및 점검(지원)

## 10.참고문헌

- [1] 한국수력원자력(주), “월성2호기 Zone #13의 급락분석보고서 (TTR-712)”, August 2000
- [2] 한국수력원자력(주), “월성 1호기 LZCS Zone #1 수위 이상변동 관련 검토의견 종합보고서”, May 1999
- [3] 한국수력원자력(주), “월성 1,2호기 LZCS 압축기 입출구 역지밸브개선 및 압축기연속운전

검토서”, May 2000

- [4] 한국전력공사, 중수로기계설비실무, 1998
- [5] 박귀남, 중수로개요(I) (II), 1989
- [6] 조두연, 증기발생기 수위제어에 관한 연구, 한국원자력안전기술원, 1992
- [7] 한국수력원자력(주), Liquid Zone Control System
- [8] 한국전력공사, Final Safety Analysis Report Wolsung Unit 2, 3 &4
- [9] 한국원자력안전기술원, A Survey and Evaluation of Stability- Robustness of CANDU Reactor Regulating System, December 1997
- [10] 한국수력원자력(주), COG/AECL CANDU Liquid Zone Control Workshop - LZCS Experiences at Wolsung 2,3&4, Power Oscillation and Enhanced Redundancy, October 2001
- [11] AECL, Wolsung Unit #2 Program Specifications, March 2001
- [12] BrucePower, COG/AECL CANDU Liquid Zone Control Workshop - Bruce B Liquid Zone Control System OPEX, October 2001
- [13] Richard Nicholls, COG/AECL CANDU Liquid Zone Control Workshop - Liquid Zone Control System Gentilly 2 Experience, October 2001
- [14] Darlington, COG/AECL CANDU Liquid Zone Control Workshop - Darlington NGS Unit 4 Flux Tilt Events, October 2001
- [15] AECL, Design Manual(600MW Generating Station LZCS Assemblies), April 1979
- [16] Gordon J. Van Wylen, Richard E. Sonntag, "Fundamentals of Classical Thermodynamics", 3rd Edition, 1976
- [17] Robert W. Fox, Alan T. Macdonald, "Introduction to Fluid Mechanics", Fourth Edition, Purdue University, 1994
- [18] The Temperature Handbook, Vol. 28, OMEGA
- [19] James J. Duderstadt, Louis J. Hamilton, "Nuclear Reactor Analysis", 1975
- [20] George I Bell, Samuel Glasstone, "Nuclear Reactor Theory", Litton Educational Publishing, INC. , 1970
- [21] Walter E. Meyerhof, "Elements of Nuclear Physics", McGraw-Hill Book Company, 1967
- [22] John C. Villforth, George R. Shultz, "Handbook-Radiological Health", U.S. Department of Health, Education and Welfare, 1970
- [23] Neil E. Todreas, Mujid S. Kazimi, "Nuclear Systems I", Hemisphere Publishing Corporation, 1990