

2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

액체영역 제어시스템의 열유체 모델

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

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

요 약

현재 CANDU형 원전의 액체영역제어시스템에서 일어나는 불안정 문제는 국내뿐 아니라 전 세계적인 공통의 문제로 원자로 운영에 많은 어려움을 초래하고 있다. 이러한 불안정은 운전원을 불안하게 하고 원자력의 신뢰성을 떨어뜨리며 경제성에도 악영향을 미칠 것이다. 이 문제는 열 수리학, 제어논리, 노물리 등 다양한 전문지식이 서로 연관된 문제이며 원 설계자인 캐나다의 AECL 조차도 원인 규명과 대책 수립을 하지 못하고 있다. 본 연구에서는 불안정 요인으로 다양한 가능성을 검토 하였으며 최종적으로 Zone내의 He과 H₂O의 입출 배관을 지지하기 위한 다공지지판(Support Plate)에서 기체와 액체만의 CCFL(Counter-Current Flow Limit)을 주요인으로 추정하고 있다. 본 논문에서는 현재 원인으로 추정하고 있는 CCFL에 관하여 중점적으로 다룰 것이며 불안정의 추정 원인인 다공지지판에서의 Flooding 가능성을 계산하였다. 본 모델은 노심 모델, 기기 제어 모델과 연계되어 시스템의 불안정 원인규명과 대책 수립에 활용될 것이다.

Abstract

Since, the instability of Liquid Zone Control System(LZCS) has occurred, it is induce for table of reactor operation, operators uneasy, depreciation of nuclea power plants reliability, and have a bad influence on economical efficiency in CANDU type reactor in worldwide. It is interrelated with the multidisciplinary knowledge such as reactor physics, thermal hydraulics, and Instrumentation and Control. Even AECL(Atomic Energy Canada Limited), the original designer of the reactor type, has not yet found out the root causes and the correction measures of the problem. In this study, CCFL(Counter-Current Flow Limit) of water and gas at Support Plate was estimated as main cause of instability and the possibility of the Flooding at Support Plate was calculated. To do this, a reactor physics modeling of the system consisted of governing equations, boundary conditions, state equations, and some associated equations was completed. This model will be utilized on finding out the cause as well as establishment of measures against instability of the system.

1. 연구배경

액체영역제어계통(Liquid Zone Control System; 이하 LZCS)은 CANDU형 원자로의 반응도 조절 장치 중 하나로서 핵연료 교체 후 발생하는 Power Tilt 의 평탄화 조절을 위해 설치된 장치이다. LZCS는 Calandria 중심부 내에 6곳에 설치되어 있으며 각각 2~3개의 지르칼로이 격실로 이루어졌으며 총 14개로 구성되어있다. LZCS의 대표적 불안정유형은 핵연료교체 후 운전초기에 LZCS 중 2 Zone으로 구성되어있는 Assembly의 상부에서 수위가 80% 이상에서 Cycling을 반복하거나 급락하는 현상을 일으키는 것이다. 이러한 현상은 원자로제어에 곤란을 주고 나아가서 원자로보호 및 안정성에도 큰 위협이 될 가능성이 농후하다. 이러한 수위의 Cycling & 급락 현상은 국내의 대부분 CANDU형 원자로에서 발생하고 있으나 AECL(Atomic Energy of Canada Limited)과 COG(Candu Owner Group)에서도 명확한 원인과 대책 제시 못하고 있다, 이러한 위험에 노출된 상태에서 보다 확실한 원인 규명과 대책 마련이 시급하다.

2. 연구목적

본 연구의 목적으로 최종적으로는 LZCS의 수위 Cycling 및 급락의 원인 규명과 이의 개선책 제시라 할 수 있겠다. 이에 대한 방법으로는 LZCS의 수력학적 모델과 관련기기(격실, 지연탱크, 헬륨저장탱크, 경수펌프, 밸브, He Compressor, 배관)의 모델링은 물론 원자로 출력을 모델링하는 노물리 모델링과 이들을 제어하고 신호를 발송하는 I&C 모델링이 필수적이며 이와 같은 모델링들을 통합하여 실제 발전소 모사 및 문제의 원인 규명을 계획 중이다.

위에 같이 밝혀진 원인을 토대로 모델 모사를 통해 개선책의 효율성을 입증함으로써 연구의 질을 높일 수 있도록 하겠다.

3. 연구과정

현재 3년차 연구가 시작되었고 연구과정은 자료수집, 원인파악과 같은 정성적 해석을 전제로 모델개발, 개선책 제시와 같은 정량적 해석의 단계로 진행되고 있으며 현재는 모델개발의 단계이다.

- 1) 자료수집: CANDU원전 LZCS의 설계와 운전자료, 계통설명서, 절차서의 자료수집
국내 및 캐나다의 운전경험, 조치사례, COG Workshop등의 자료수집
수집된 정보를 관련 전문분야별로 분류(열유체, 노물리, I&C등)하여 검토분석
- 2) 원인파악: 잠재원인 압축
문제 원인이 탈락되는 오류가 없도록 국내외 전문가의 자문 및 의견수렴
- 3) 모델개발: 선정된 후보 원인들을 포함한 수력학, 노물리, I&C등의 모델개발
이들 3분야의 개별모델을 하나로 통합한 완성모델을 이용하여 실제 발전소에 모사
- 4) 개선책 제시: 모사를 통해 문제의 원인파악 및 개선책 제시

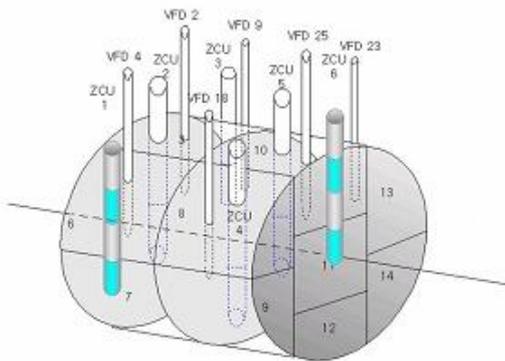
4. 연구내용

4.1. 개요

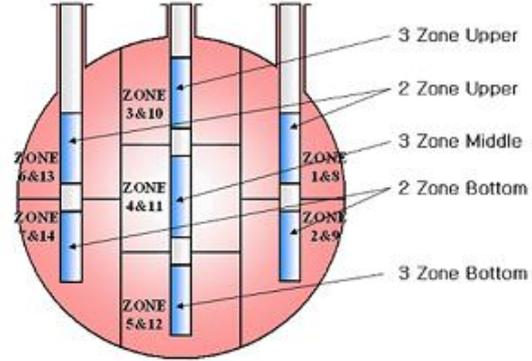
LZCS는 저출력 상태에서는 전체 제어방법을 쓰고 정상출력상태에서는 각 영역의 개별제어

방법을 사용하는데 각 영역의 격실용량은 18L~38L이며 최대 허용 반응도 변화율은 0.1mk/s이다. 각 격실의 입구에 설치된 14개의 수위조절밸브는 0~0.9L/sec 경수의 유량을 조절하며 헬륨에 의한 각 격실의 일정차압(3bar)을 가하여 0.45L/sec의 연속적인 배수유량을 유지시켜 격실수위의 쌍방향제어 기능을 제공한다. 헬륨의 유량은 정상치 150L/hr 유입되는데 발전소에서의 실측치는 최대 184L/hr로 조사 되었다.

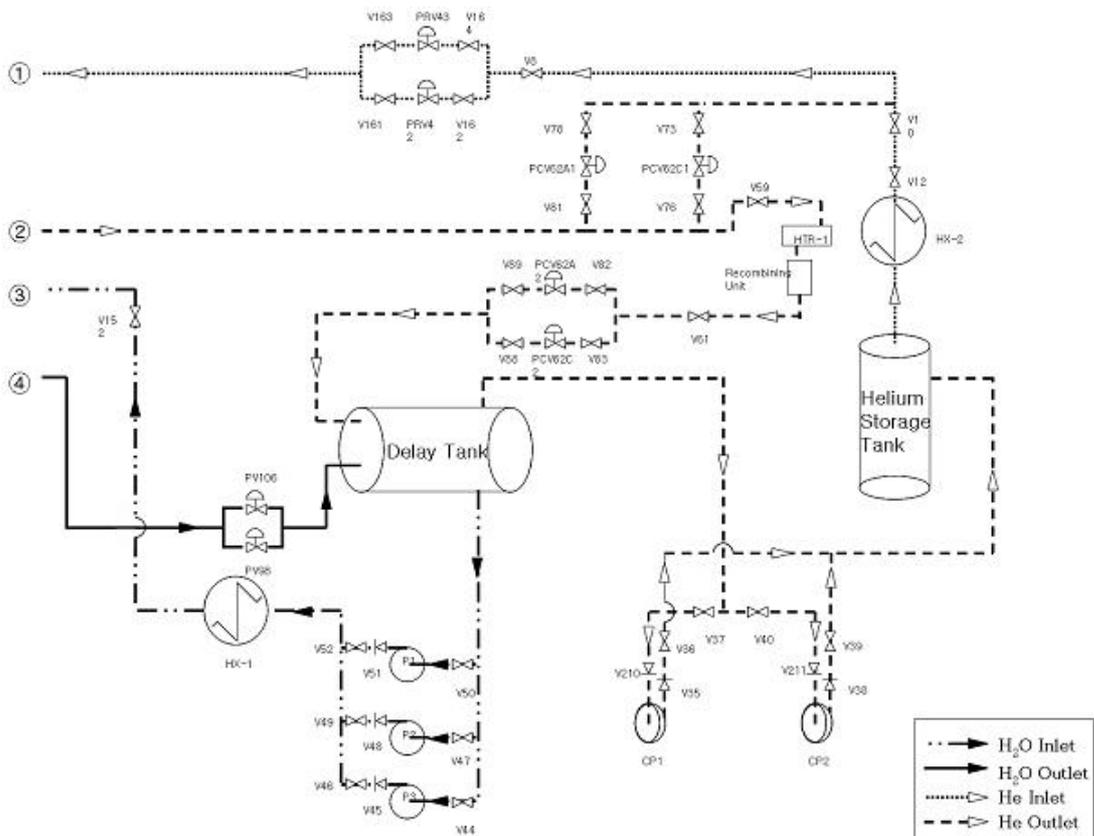
[그림 1]과 [그림 2]는 Calandria에서의 LZCS의 위치를 표시한 것이다.



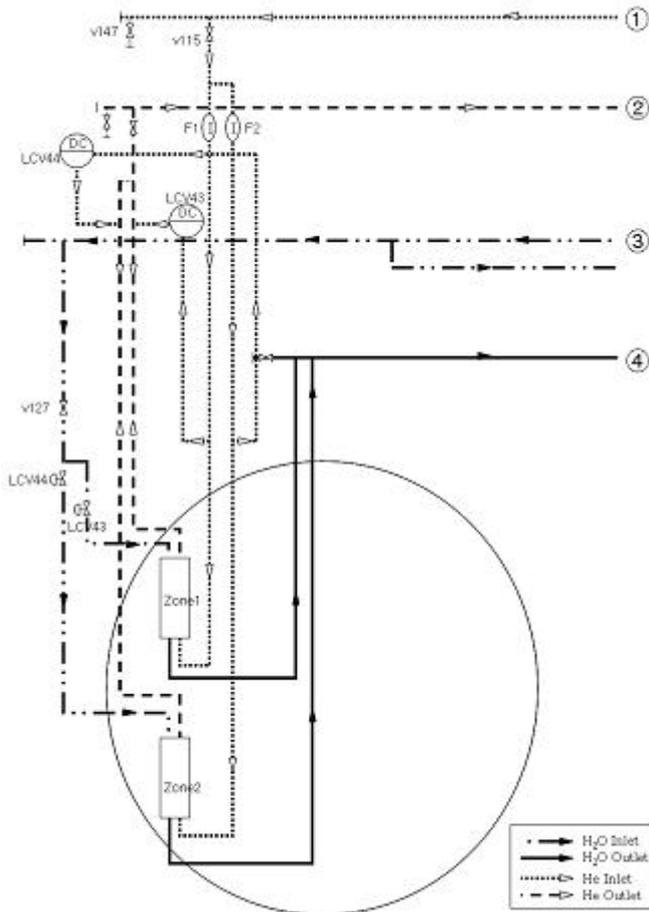
[그림 1] LZCS의 영역위치 입체도



[그림 2] LZCS의 영역위치 단면도



[그림 3] LZCS의 전체 계통도



[그림 3]과 [그림 4]의 원문자들은 서로 이어지는 부분이며 [그림 3]은 격실을 제외한 LZCS의 전체 계통을 나타내었다.

[그림 4]는 2 Zone으로 구성된 Assembly에서의 H₂O와 He의 계통을 표시하였다.

He의 유량은 ①번 Line을 따라 Zone으로 내려갈 때 'I'(Flow Indicator)로 표시된 부분에서 측정을 하게 되어있다.

[그림 4] 격실상세 계통도

[표 2] 격실내 배관의 In & Out-Diameter

	Out-Diameter	in-Diameter
H2O-inlet	1.23"	1.17"
H2O-outlet	0.693"	0.633"
He-inlet	0.25"	0.19"
He-outlet	0.774"	0.714"
격실 Compartment		4.6"

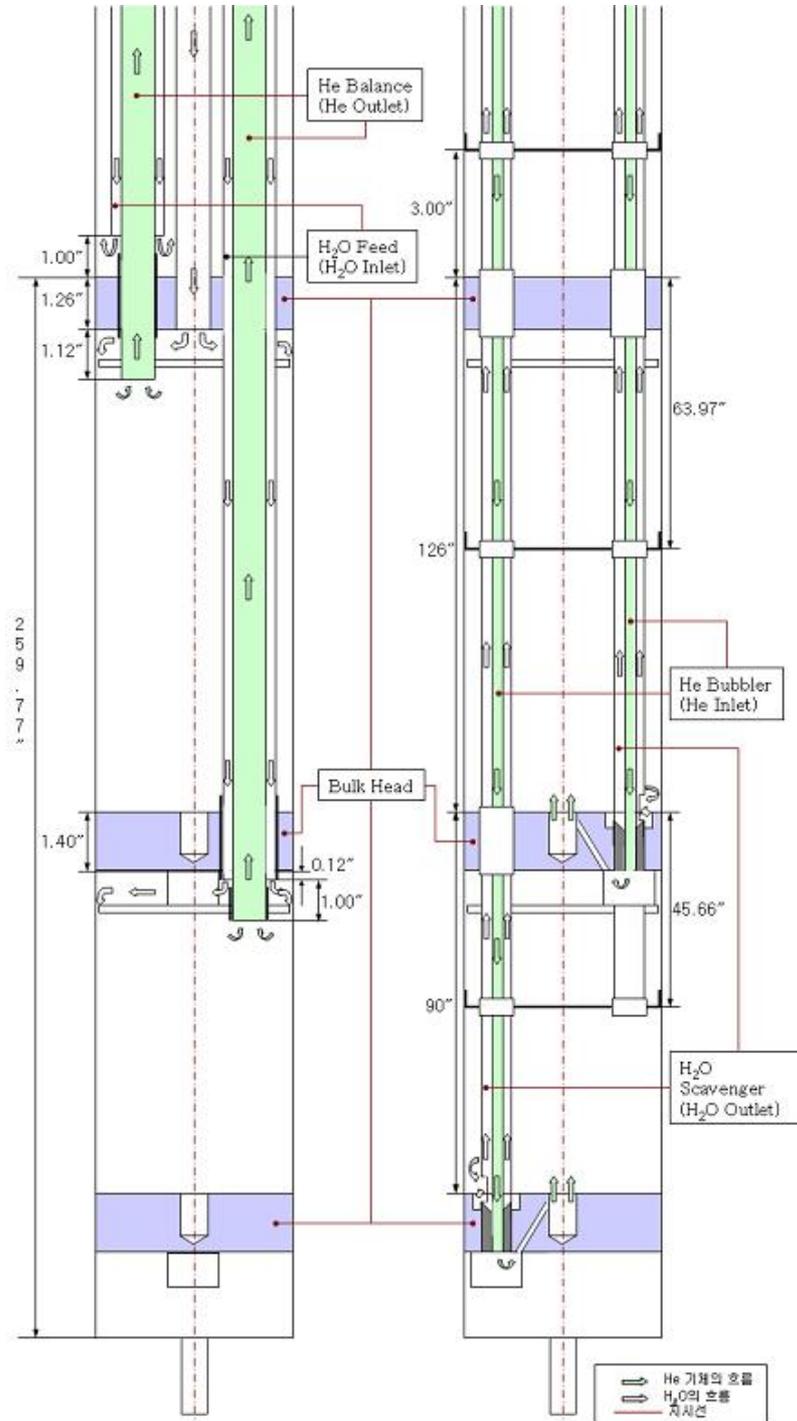
[표 3] 주요 부분의 수치 (도면에서 비례 측정)

Baffle	두께	≒ 0.17"
	격실 벽과의 Gap	≒ 0.17"
	Bulk Head와의 간격	≒ 0.83"
He Bubble	노즐 in-Diameter	0.17"
	Bubble Case Out-Diameter	2.04"
	Bubble Exit in-Diameter	0.65"
Tube Support and Guide	두께	0.034"

[그림 5]은 2 Zone으로 구성된 Assembly의 단면을 표현하였는데 좌측 그림에서 우선적으로 H₂O Feed와 He Balance에 관한 배관만을 표현하였고 우측에서는 좌측 그림을 90° 회전시킨 후 H₂O Scavenger와 He Bubbler에 관한 배관을 표현하였다.

배관의 모양은 H₂O Line의 경우 원통형이고 He Line의 경우는 Inlet, Outlet 모두 물결모양으로

포여있으며 H₂O Inlet 속에는 He Outlet이 들어있고 H₂O Outlet 속에는 He Inlet이 들어있다. 각각의 제원들은 설계도면에 있는 수치를 사용하였고 도면에 표시되지 않은 수치에 대해서는 도면에서 직접 비례 측정하여 표시 하였다.



[그림 5] 2 Zone Assembly 상세 구조

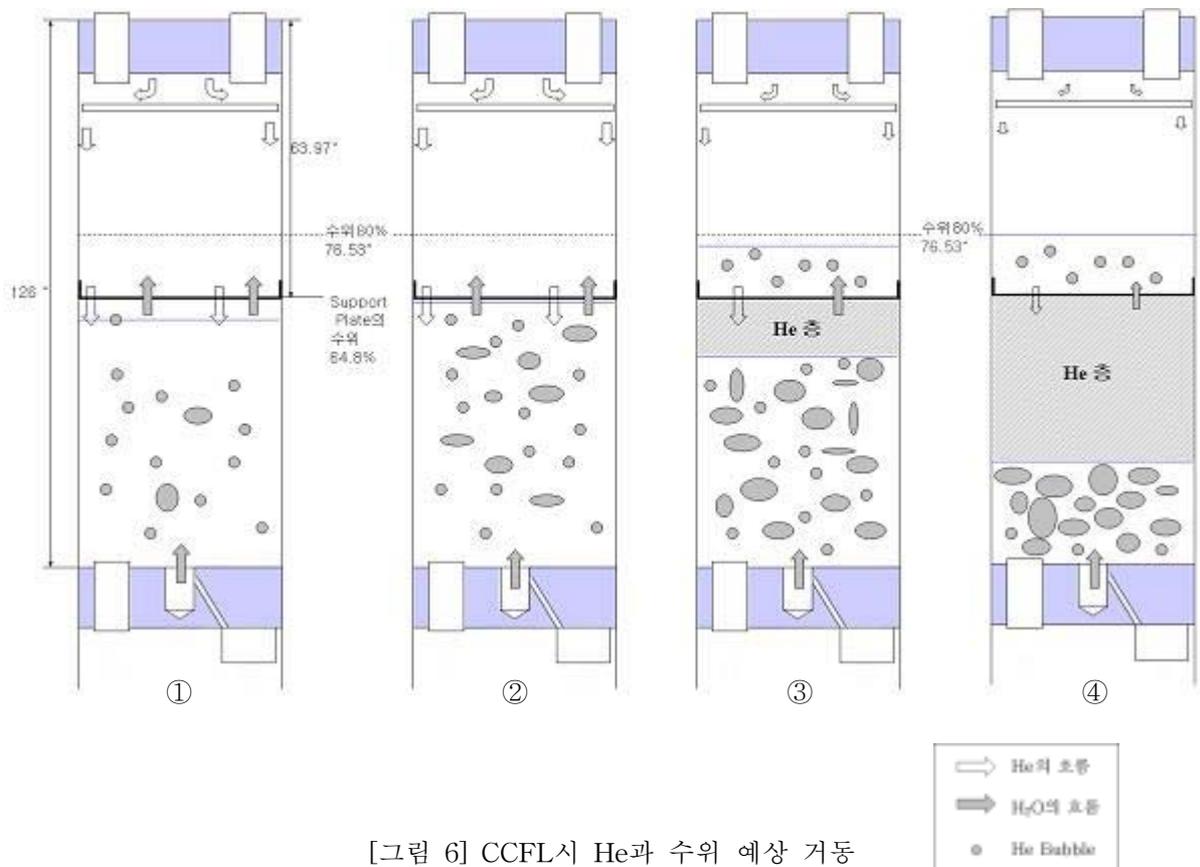
4. 2. LZCS의 불안정 원인 분석

지금까지의 자료조사와 연구를 거친 불안정 원인은 다음과 같다.

[표 4] 불안정 원인 분석 결과

잠정 원인	원인 검토	평가
수위측정장치 결함	작동성 및 교정 확인	×
반응도조절장치 작동	반응도조절장치 작동 없음	×
핵 검출기 교정	핵 검출기 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	○
Zone내에서의 CCFL	Support Plate에서의 CCFL으로 인한 반응도 제어 불안정	○

4. 3. Support Plate에서의 CCFL



[그림 6] CCFL시 He과 수위 예상 거동

Support Plate에서 CCFL이 되는 과정과 급락, Cycling의 예상 시나리오를 추론해 보도록 하겠다.

[그림 6]은 Support Plate에서 CCFL이 일어날 때 He과 수위의 예상 거동을 나타낸 그림이며 이 부분은 2 Zone Upper를 나타내었고 Support Plate의 위치는 격실의 64.8%의 위치이고 수위 80%는 점선으로 표시 하였다.

[그림 6]의 ①은 Support Plate에 근접전에 정상상태의 LZCS 거동으로 볼수 있으며 [그림 6]의 진행처럼 Zone의 수위가 Support Plate에 근접하면서 단면적이 순식간에 줄어들게 되고 줄어드는 단면적으로 인해 He과 H₂O는 Support Plate 사이에서 유동성이 조금씩 떨어지게 된다(②).

수위가 더욱 증가하게 되면 Support Plate의 위쪽에는 Counter-Current Flow Limit (CCFL)가 되어 H₂O의 층이 생기고 아래쪽에서 He의 양이 증가하기 시작한다. 이때의 수위는 He Bubble로 인해 부풀려진 수위이며 실제 H₂O의 양은 지시된 수위보다 적은 것을 볼 수 있다(③)

H₂O로 국부출력을 제어하는 LZCS에서 이러한 수위 부풀림 현상은 불안정한 상황을 유발하고 수위가 지시하는 만큼의 H₂O가 없기 때문에 그만큼의 반응도 감소효과를 볼 수 없으며 이러한 상태로 계속 진행시 수위도 상승하고 반응도도 상승하는 현상이 일어나는 것이다.

수위가 80%이상 도달하게 되면 [그림 6]에서 보이는 것과 같이 H₂O의 유입이 매우 적어지고 H₂O의 배출은 지속되므로 Support Plate의 아래 대부분은 He Bubble로 채워지게 된다.(④)

수위가 한계수위에 다다르면서 더 이상의 H₂O 유입은 차단되고 Zone내의 H₂O의 양은 더욱 줄어들게 되어 반응도는 더욱 상승하게 된다. 이런 현상이 지속되다가 CCFL된 물이 조금씩 Support Plate 아래로 유입되고 어느 순간 CCFL된 물이 쏟아지듯이 내려가면서 급작스럽게 수위는 매우 낮은 수치를 보여주게 되고(급락) 이때부터 다시 Control Worth가 회복되어 수위가 올라가면서 반응도가 낮아지는 정상상태가 되는 것이다.

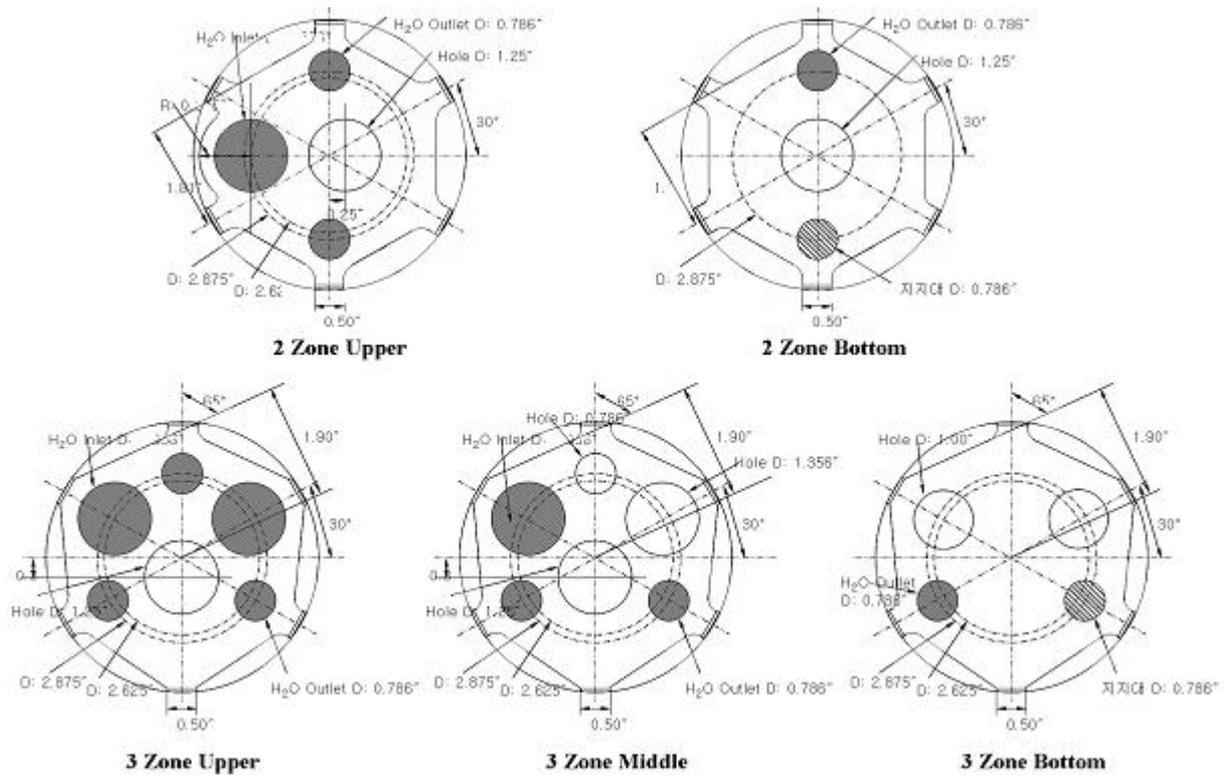
가장 문제시 되고 있는 2 Zone Upper의 경우에는 Support Plate와 한계수위와의 간격이 좁기 때문에 정상 상태가 되지 못하고 이런 현상이 계속적으로 발생하여 Cycling 되는 것으로 볼 수 있을 것이다.

[그림 7]는 각 Zone의 위치별 Support Plate를 표시 하였다.

[표 5]와 [표 6]은 각각의 Zone에서 위치별 수위와 단면적을 나타낸 것인데 이것은 다음에 다룰 기포 상승 속도 계산과 기공률 계산에서 쓰일 것들이다.

앞에서 제기 하였던 2 Zone Upper의 한계수위와 Support Plate의 간격이 좁다는 것은 [표 5]에 보면 다른 Zone들에 비해 확연히 차이나는 것을 볼 수 있다.

다른 Zone들은 23"를 넘는데 비해 유독 2 Zone Upper만이 14.5"로 약 9" 정도의 차이를 보이고 있다. 이것은 2 Zone Upper에서 자주 일어나는 불안정 현상과 관련이 많을 것으로 예상된다.



[그림 7] 각 Zone의 Support Plate 정밀 모형

[표 5] 각 Zone에서의 위치별 수위

	①수위80%	②Support Plat 위치	간격 (①-②)	③ 수위 30%
2-Zone Upper	76.53 "	62.03 "	14.50 "	28.70 "
		64.84%	15.16%	
2-Zone Bottom	67.40 "	44.34 "	23.06 "	25.28 "
		52.63%	26.37%	
3-Zone Upper	72.13 "	48.9 "	23.23 "	27.05 "
		54.24%	25.76%	
3-Zone Middle & Bottom	62.99 "	39.39 "	23.6 "	23.62 "
		50.03%	29.97%	

[표 6] 각 Zone에서의 위치별 단면적 (단위:cm²)

위치	2 ZoneUpper	2 ZoneBotto m	3 ZoneUpper	3 ZoneMiddle	3 ZoneBotto m
수위 80%	94.69	102.355	84.593	94.69	102.355
Support Plate	29.142	31.606	24.214	36.662	26.431
수위 30%	94.69	104.787	84.593	94.69	104.787

다음 절에는 기포 상승 속도와 기공률에 관하여 논할 것이다.

이와 같은 계산을 하는 이유는 각 Zone에서 H₂O는 Baffle을 통해서 위에서 유입되고 He은 채워진 H₂O를 거쳐서 유입되기 때문에 He의 기포 상승 속도를 계산하여 이상류 이론에 의해 Void Fraction을 구하고 이것을 이용하여 각 Zone별로 Support Plate위에 CCFL 되는 H₂O 양을 구하기 위함이다.

이와 같이 CCFL되는 H₂O 양이 중요한 이유는 다음 절에서 자세히 설명토록 하겠다.

4. 4. 기포 상승 속도

Tong & Weisman에 의하면 정지된 유체 내에서 기포 상승속도는 다음과 같다.

$$V_b = 1.18 \left[\frac{\sigma g_c g (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right]^{1/4} : (\text{English Unit}) \dots \dots \dots (1)$$

(1) 식을 SI Unit로 바꾸면 g_c는 1.0이고 ρ_g는 ρ_l에 비해 월등히 작으므로

$$V_b = 1.18 \left[\frac{\sigma g}{\rho_l} \right]^{1/4} : (\text{SI Unit}) \dots \dots \dots (2)$$

으로 정리된다.

한편 액체영역제어계통의 격실내에서 T=71.1℃이고

$$\rho_g (\text{기포의 밀도}) = 0.14 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_l (\text{액체의 밀도}) = 980 \text{ kg/m}^3$$

$$g (\text{중력가속도}) = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$g_c (\text{변환상수}) = 1.0$$

$$\sigma (\text{표면장력}) = 0.064 \text{ N/m}$$

$$\text{따라서 } V_b = 1.18 \left[\frac{\sigma g_c g (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l^2} \right]^{1/4} = 0.187 \text{ m/s} = 18.7 \text{ cm/s} \dots \dots \dots (3)$$

4. 5. He 유량에 따른 기공률 계산

격실내에서 He Bubbler로부터 공급된 Helium은 부력에 의해 앞에서 계산한 바와 같이 18.7cm/s로 상승하고 H₂O(Light Water)는 Scavenger를 통해 하부로 0.45 l/s로 빠져나가고 0~0.9 l/s로 유입된다. 이들을 각각 41.67cm³/sec(150 l/hr) 와 450cm³/sec(0.45 l/sec)의 유량에 해당한다. 따라서 격실에서 경수와 Helium은 Counter-Current를 형성한다.

이상류 이론에 의해 격실내의 액체(경수)와 기체(Helium)는 다음 식을 만족해야 한다.

$$(1 - \alpha)AU_1 = Q_1 = 450 \text{ cm}^3 / \text{sec} \quad : \text{액체} \dots\dots\dots (4)$$

$$\alpha A(U_b - U_1) = Q_g = 41.67 \text{ cm}^3 / \text{sec} \quad : \text{기체} \dots\dots\dots (5)$$

(4), (5)식을 각각의 경우에 대해 Helium Flow Rate에 따른 기공률을 구해보자.

운영절차상의 유량(He = 150 l/hr, H₂O = 0.45 l/sec)을 식 (4), (5)에 대입하여 연립방정식을 풀어서 판별식을 통해 CCFL의 여부와 α 값을 구한다.

판별식 D가 (-)값을 갖게 되면 Counter-Current Flow Limit (CCFL; 상반류 유동한계)를 의미한다.

계산결과 Support Plate에서는 모두 CCFL이 일어나는 것으로 판명 되었고 각 Zone에서의 CCFL 되는 양을 계산하기 위해 다음 공식을 이용하였다.

CCFL되는 물의 양

$$V_1 = A \text{ TRIANGLEH} (1 - \alpha) \dots\dots\dots (6)$$

여기서, A = 격실의 단면적

$$\text{TRIANGLEH} = H_{\text{lim}} - H_{\text{s,p}}$$

$$\alpha = \text{Void Fraction}$$

[표 7] 각 Zone에서의 CCFL되는 H₂O의 양

	A (cm ²)	△H (cm)	α ₁	α ₂	V ₁₁ (cm ³)	V ₁₂ (cm ³)
2 Zone Upper	94.69	14.5	3.19%	89.80%	1329.206	140.0465
2 Zone Bottom	102.355	23.05	2.90%	75.80%	2290.864	570.9464
3 Zone Upper	84.593	23.21	3.70%	70.40%	1890.758	581.1674
3 Zone Middle	94.69	23.6	3.19%	89.80%	2163.398	227.9378
3 Zone Bottom	102.355	23.6	2.90%	75.80%	2345.526	584.5699

[표 7]에서 볼 수 있듯이 2 Zone Upper의 경우 다른 Zone들에 비해 CCFL 되는 양이 매우 적다. 그만큼 Control Worth가 적다고 볼 수도 있고 급락이나 Cycling이 일어나는 현상을 잘 설명할 수 있다고 볼 수 있다.

5. 결론

앞에도 언급하였듯이 LZCS의 불안정은 CANDU형 원자로의 운영에 많은 지장을 주고 있고 원자로의 안전에 심각한 위협을 잠재하고 있는 상태이므로 이러한 불안정 현상을 해결할 수 있는

방안을 빠른 시일내에 마련해야 할 것이다. 윗 절에서 연구되었던 결과를 종합하면 LZCS의 불안정 원인은 격실내의 Support Plate에서의 CCFL이 주된 원인이며 앞으로 계획중인 He Compressor의 On/Off와 관련되어진 문제도 있을 것으로 보여진다.

또한, 불안정 발생의 빈도수가 높은 2 Zone Upper의 경우는 위에서 언급하였던 모든 연구를 통해 다른 Zone들과 유독 다른 것을 볼 수 있었다. 이것은 2 Zone Upper의 설계상 문제점이 될 수도 있으며 좀 더 자세한 연구를 통하여 불안정 현상이 나타나지 않는 Zone들과 비교하여 원인을 제시토록 할 것이다.

차후에 실험장치를 발전소와 동일하게 모사하여 Support Plate 상단에 H₂O가 CCFL 되는 현상과 Support Plate 아래에 H₂O가 아닌 He으로 대부분이 가득 차는 현상을 확인할 수 있도록 할 것이며 He Compressor의 작동과 관련된 부분도 실험으로 모사할 예정이다.

6. 차후연구과제

- ① 각각의 모델들의 정확성 검증하여 전산 코드화 과정에서 누락이나 오류를 검토하여 정확성을 높이고 Input의 정밀도를 높임으로서 불안정의 원인이 혹여 탈락되는 일이 없도록 하겠다.
- ② 현재는 실제 원전의 불안정 상태의 Data를 주로 사용 하였는데 차후 모델의 타당성을 위해 실제 원전의 정상상태 Data와 비교 분석하여 검증하겠다.
- ③ He Compressor의 On/off에 따라 수위의 Cycling이 일어나는 것은 국내 및 해외 CANDU형 원전에서 확인되었고 He Compressor의 운전방식 변경으로 해결하는 임시방편적인 해결이 아닌 작동에 의한 유량 변화 및 수위 반응도의 관계 해석과 Bubbler Header에서 Zone까지의 압력강하 그리고 Control Logic을 검토하여 근본적인 불안정 원인을 제거하겠다.
- ④ 종합 모델을 만드는데 있어 수력학적 모델과 노물리모델, I&C모델이 완성되면 각 모델의 결합과정에서 누락이나 오류를 검토하여 정확성을 높이고 최종적 모델이 불안정 현상을 정확히 모사할 수 있도록 하고 불안정 원인에 대한 충분한 설명이 이루어질 수 있도록 하겠다.
- ⑤ 원인이 확정되면 이의 개선책으로 설계를 변경하거나 운전형태 변경 등과 같은 연구가 현실에 입각하여 이루어지도록 하겠다. 계통의 설계 변경과 같은 개선책은 기존 원전의 경우는 현실성 결여되는 문제가 발생할 수 있으므로 기존 원전에서는 현실적으로 타당하고 구체적인 운전형태를 변경하는 방법을 제안하도록 하겠다.

7. 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] 지준석, 액체영역 제어계통의 노심 및 열유체 모델, 원자력학회, 2002. 5