

수직 단일 관에서의 재관수응축시 유동 패턴과 동적 특성분석

이 재 영

한동대학교 기계제어시스템공학과

Dynamics and Flow Pattern in the Vertical Single-tube Reflux Condenser

Jae Young Lee

School of Mechanical and Control System Engineering, Handong University

요 약

본 연구에서는 수직 단일관에서의 재관수(reflux) 응축 현상에서 증기유량이 역류제한치보다 큰 경우에 발생하는 다양한 유동 패턴을 예측하고, 그 동적 특성을 해석하기 위한 모델을 개발하였다. 특히 L/D 가 큰 재관수 응축기에서 발생하는 충전 방출 모드에서의 동적 특성을 예측하는 것이 목표이다. 응축기의 내부를 액체와 증기의 두 영역으로 나누어 질량, 에너지, 운동량 보존에 입각한 본 모델은, 형성된 물기둥의 진동시 갈래질 경계(bifurcation boundary)와 진동주기를 예측할 수 있다. 이 모델은 McMaster 대학에서 수행한 실험 결과와 비교한 결과 양호한 예측을 했고, 튜브 직경 변화 효과를 잘 묘사하였다. 이러한 단순 모델은 재관수 응축기의 설계시에 설계변수를 도출하는데 사용될 수 있고, 인위적으로 부여한 압력펄스를 이용하여 재관수 응축기의 운전영역을 개선하는데 기초로 활용될 수 있다.

Abstract — In the present paper, a dynamic model was developed for the vertical single tube reflux condenser to identify various flow patterns and dynamics. The main objective of this study was to analyze the fill-and-dump mode in the reflux condenser with the large L/D ratio. The present model, a lumped parameter model based on the first principle, could predict the bifurcation boundary and oscillation frequency of the fill-and-dump mode. The experimental data of McMaster University have shown a good agreement with the present model in both pressure drop and oscillation frequency for the tubes of different diameter. The present simple dynamic model may be used to produce design parameters as well as to provide a guide line enlarging the operation envelope of the reflux condenser.

1. 서 론

공업용 재관수 응축기(reflux condenser)는 수직관에 유입된 증기를 외부에서 냉매를 이용하여 냉각시켜, 응축수를 생성한다^[1]. 이는 다양한 열 및 물질 전달의 도구로 사용되고 있다. 열 파이프^[2]나, 태양열관을 이용한 폐수처리관 등에 응용될 수 있다^[3]. 또한 일반적인 열수력계통에서도 특정 운전 상황에서 발생하여 운전을 제한하는 메커니즘으로 인식되기도 한다. 이러한 응용에 있어 재관수 응축기는 계통을 단순하게 하는 장점이 있는 반면 역류제한 현상(CCFL : counter current flow limit)이 발현하면, 재관수 응축의 효율이 급격히 감소하는 단점이 있다^[4].

이의 분석을 위해 많은 실험이 수행되어 왔는데, 대부분이 140 이하의 L/D 에서 수행되었다^{[5][6][7]}. 나타나는 유동 패턴 중에서 액체 기둥의 요동이 관찰되었는데 이는 L/D 의 변화에 민감했다. Russel^[8]은 액체기둥(liquid column)의 요동을 관측하였는데 그의 시험장치의 L/D 는 250 이었다. 그러나 L/D 가 53에 불과한 Deakin 등^[9]의 경우에는 요동을 발견할 수 없었다. McMaster대학의 장치^[10]는 L/D 가 450으로서 매우 큰 경우에 해당하는데, 역시 요동이 발생하였다. 특히 Girard와 Chang^[10]은 역류제한(Counter current flow limit: 이후 플라딩(flooding)) 발생 이후에 튜브 중간에 응축수가 모여 액체 기둥을 형성하고, 이것이 증기의 압력과 자체의 체적력으로 인해 주기적인 생성 소멸을 하는 것의 규모와 주기를 관측하

였다. 더욱 증기를 증대하면 요동이 사라지고 환형 순방향 유동이 형성되는데, 부분적인 응축만이 이루어져 효율이 불량해진다. 본 연구는 액체기둥의 형성과 소멸과 관련한 동적 특성을 예측하는 단순한 모델을 도출하는 것을 목적으로 수행되었다.

그간 많은 연구는 플라딩 발전점의 예측에 집중되었다.^{[10][11][12]} 이는 재관수 응축기의 고효율 운전 영역의 결정에 매우 중요하다. 그러나 플라딩 이후의 동적 상태에 대한 연구는 상대적으로 많이 이루어지지 않았다. 이는 과도상황에서의 플라딩 연구가 많이 이루어지지 않은 점에도 기인한다. Obinelo 등^[13]은 액체기둥의 발생과 이의 진동에 착안하여 외부에서 통제된 압력 펄스를 증기에 부여할 경우, 재관수 응축열전달이 증대되는 현상을 보고한 바 있다. 또한 Lee와 Chang^[14]은 과도(transient) 플라딩 연구를 통해 재관수 응축운전 영역에 결정적 역할을 하는 역류제한 현상이 외부에서 통제된 압력펄스를 기체 상에 부여할 경우, 그 조건이 완화되기도 하고, 경우에 따라 소멸됨을 보고한 바 있다. 따라서 재관수 응축기에서도 외부에서 압력 펄스 등을 부여할 경우, 운전 영역이 확대될 가능성이 존재한다. 또한 이러한 동적 특성화는 재관수 응축기의 동적 축소화 규칙(dynamic scaling laws)을 생성하는 데 사용될 수도 있다.

통상적으로 재관수 응축기 계통은 튜브 다발로 구성되는데, 본 연구에서는 단일 관을 사용하여 분석함으로써, 튜브와 튜브사이의 상호작용에 의한 복잡성을 배제하였다. 수직 단일관에 증기를 이용한 재관수 응축을 lumped parameter method에 의해 해석하고자 했고, 이의 검증은 McMaster 대학의 단일관 재관수 응축장치^[15]의 실험결과를 사용하여 검증하였다.

이 연구는 원자력발전소의 가상 사고시 핵증기 발생기에서 발생하는 재관수 응축현상의 연구와 연관될 수 있다. 수직관 증기발생기(OTSG, Once through steam generator)의 경우에는 본연구가 적용될 수 있다. 그러나 우리나라의 원자력 발전소의 경우, U-tube를 사용하므로(UTSG : U-tube steam generator), 본연구를 이에 적용하는 것에는 무리가 있다. 이 경우 본 연구에서 지적하는 액체기둥이 U-tube 상단부에 형성되어도, 이것의 캐리오버(carryover) 양태는 원자로심의 압력 섭동에 따라 결정된다. 따라서 이 경우는 U-tube에 대한 재관수 응축현상에 대한 정밀 실험과 분석이 필요하다. 그러나 본 연구에서 확인된 충전 방출의 요동 현상은 원자로심의 마노미터식 요동과 연계될 경우, flooding 조건의 완화 가능성^[16]과 재관수 응축열전달이 증대효과^[13] 등을 기대할 수 있어 원자로 안전성 향상의 가능성을 시사하여 추가 연구가 필요하다.

2. 실험장치

재관수 응축기들은 많은 튜브로 이루어져서, 튜브와 튜브 사이의 상관효과, 튜브의 형상, 튜브 양끝의 경계 조건에 불확실성이 개입될 여지가 많다. 따라서 본 연구는 가급적 복잡성을 배제하고, 재관수 응축현상의 기초적인 핵심 문제들을 관찰하고 이를 해석해 내기 위해 수직 단일관을 사용하였다. 관의 L/D를 크게 하고, 튜브 직경을 달리하여 이러한 기하적 요소가 현상에 기여하는 것을 확인하고자 하였다. 실험시 튜브 양단의 압력을 일정하게 유지하는 운전 방식과 증기 유량을 일정하게 유지 시키는 운전 방식을 채택하여 시스템 코드등에 편리한 경계조건을 부여할 수 있도록 하였다.

그림 1에 나타난 바와 같이, 사용된 튜브는 8개의 파이렉스 글라스로 제작되어 총 길이는 4.8m에 달한다. 이는 대략 핵증기 발생기의 U-tube 의 1/2 규모에 접근한다. 하단부터 6개의 칼럼은 0.305 m의 길이를 갖고있고, 그 위에는 0.606 m와 2.17 m의 길이를 갖는다. 각 섹션은 테플론으로 연결되어 유체의 누출 및 냉각유체와의 직접 접촉을 막고, 각종 센서를 장착할 수 있도록 하고 있다. 관의 내부에는 온도와 압력, 액막의 두께 센서, 관의 외부에는 냉각수의 상하 출력을 할 수 있는 연결 관과 온도센서를 장착하여, 섹션마다 열전달량을 측정하였

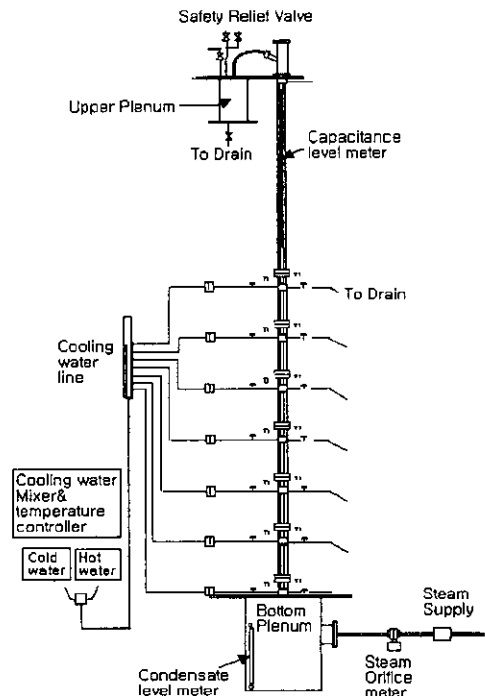


그림 1. 실험장치의 개관.

다. 하부 공동과 상부공동과의 튜브의 연결에 동관을 삽입하여 밀폐성을 증대시켰다. 상하공동은 단열 처리되어 열량의 출입을 계획적으로 통제 확인할 수 있도록 하였다.

유량의 측정을 위해, 오리피스 메타를 사용하였고, 냉각유체의 제어는 각 냉각재킷에 밸브를 설치하여 각각의 유량을 제어하였다. 상부 공동에는 방출밸브와 안전밸브를 설치하여, 지나친 기압으로부터 계통을 보호하도록 하였다. 상부 공동에 역시 오리피스 메타를 사용하여 증기 유량을 측정했으며, 상부에 응축기를 설치하여, 캐리오버(carryover)되는 유량을 측정했다. 압력과 온도는 차압계와 열전쌍을 이용하여 컴퓨터로 신호를 처리하였다.

3. 재관수 유동 패턴 관측

육안관측을 통해, 유동 패턴의 차이와 유동 패턴 천이시의 주요 현상등을 관측하였다. 이미 언급한 바와 같이, L/D가 큰 경우에 전 재관수 응축(total reflux condensation)과 방출(carryover)사이에는 충전 방출(fill-and-dump) 형태의 유동 패턴을 관측하였다. 이러한 유동 패턴은 경계조건의 부여에 따라 달라진다. 튜브의 양단의 압력강하를 일정하게(imposed pressure drop across the tube mode(IPDT)) 유지할 경우, 안정적인 액체 기둥이 형성됨을 볼 수 있었으나, 증기 유량을 일정하게 유지할 경우(an imposed steam flow rate(ISF) mode)에는 액체 기둥은 성장하다가 하부공동의 압력과의 불균형을 유발하며 갑자기 방출되는 것이 반복되었다.

3-1. 일정 압력강하(IPDT) 모드에서의 운전

재관수 응축기의 튜브의 압력강하를 일정하게 유지하여, 계통을 매우 안전한 상태로 만들므로, 국지적 파라미터등을 측정할 때 매우 유용하다. 이를 위해 증기를 미세하게 조절했다. 플라딩 발현 이전의 증기유량의 상

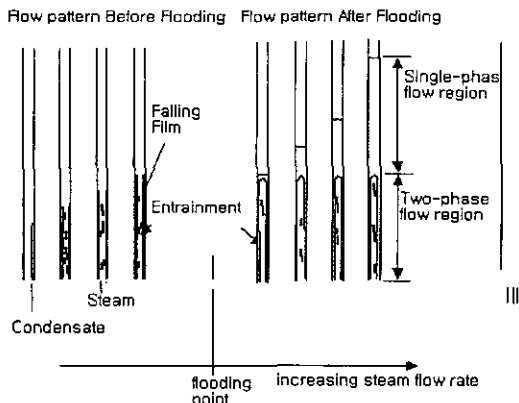


그림 2. IPDF모드의 상태.

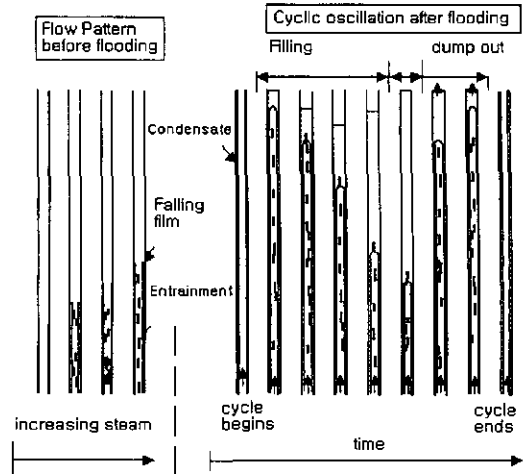


그림 3. ISF 모드에서의 상태.

태에서는 증기 유량을 일정하게 유지한 실험결과와 유사했는데, 이유는 두 상황이 모두 압력강하를 일정하게 유지하는 것과 큰 차이가 없이 환형액막유동 형태를 보였다. 그러나 플라딩 발현 이후에는 재관수 튜브에 액체기둥(liquid column)이 성장하므로, 이것의 크기를 일정하게 제한하는 것이 이 모드의 운전 방식이 된다. 결국 증기의 유량을 순간 증가시켜 압력강하를 키울 수는 있으나, 이후 그 압력강하 상태를 유지하는 것은 결국 플라딩 조건의 증기 유량을 공급하게 되어, 실험자료는 플라딩 선상에 나타나게 된다. 형성된 액체 기둥은 자체 진동수를 갖고 요동하게 된다.

3-2. 일정 증기유량 주입 운전(ISF)

이 경우에는 계통의 압력과 무관하게 일정한 증기 유량을 주입한다. 플라딩이 발현하기 전에는 위의 IPDT의 경우와 비슷했다. 그러나 그림 3에 나타난 바와 같이 플라딩 조건을 넘는 증기 유량에서는 재관수 응축기는 순환 요동을 보이기 시작하였다.

설정된 증기 유량의 값이 작을 경우에는 그 주기가 길고, 액체 기둥의 길이가 길게 나타났다. 설정된 증기 유량을 증대하면, 그 주기가 짧아지고, 액막기둥의 길이도 작아졌다. 이보다 더 큰 증기 유량을 부여할 경우, 액체 기둥은 사라지고, 매우 요동치는 순방향 환형유동이 발생하며, 모든 증기와 응축수가 상부로 방출되었다.

4. 단순 동특성 모델

이상의 동적 변화를 분석하기 위해서는 그 요동의 크기와 주기를 결정해야 한다. 본 연구에서는 증기유량의

합수로 재관수 튜브 양단의 압력강하를 예측하는 모델을 만들고, 이를 통해 충전 방출모드의 동특성을 분석할 수 있도록 하고자 한다. 이를 위해 튜브 내부의 증기와 액체를 서로 분리하여 따로 모델하고, 질량, 에너지, 운동량의 보존을 검토하여 모델을 수립하였다. 본 연구에서는 전 재관수 응축 영역은 이미 Girard와 Chang¹⁰⁾에 의해 검토가 이루어졌으므로, 충전-방출모드의 동특성을 분석하는데 중점을 두었다.

4-1. 제1법칙 적용

재관수응축관 내에서의 열수력적 현상을 묘사하기 위해서 질량 에너지 모멘텀 보존식을 고려한다. 이때 증기영역과 액체 영역을 분리하여 lump하는 방식으로 식을 유도한다.

그림에서 액체기둥의 요동에 따라 최선단의 속도 v_2 는 액체기둥이 압축성이 적은 관계로 이상유동의 선단 높이의 시간적 변화에 따라 결정된다. 이 액체 기둥에 유입되는 유량 W' 은 응축유량 W_{st} 에서 역류제한을 받는 하강유량 W_{fl} 의 차이가 된다. 따라서 이상유동의 선단부위의 속도 v_1 은 이것에 액체 기둥으로 유입되는 속도가 더해져서 결정된다. 증기 유입부위의 속도 v_0 는 증기 유입량으로부터 환산하였다. 운동량 보존식을 전체 계통에 대하여 적분할 때 이들 속도는 질량에너지 보존식을 운동량 보존식에 도입하는 역할을 하게 된다.

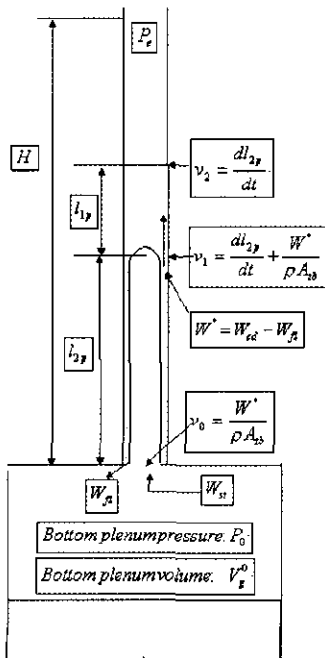


그림 4. lumped parameter modelling을 위한 개념도.

(1) 증기지역의 질량과 에너지 보존

$$\frac{dM_g}{dt} = W_{st} - W_{fd} \tag{1}$$

$$\frac{dM_g h_g}{dt} = W_{st} h_{st} - W_{cd} h_f - Q_c \tag{2}$$

위에서

$$M_g = \rho_g V_{bp}^0 + \alpha \rho_g l_{2p} A_{ib}$$

$$Q_c = \pi D U \alpha l_{2p} \Delta T$$

이다.

(2) 액체지역의 질량 보존

$$\frac{dM_f}{dt} = W_{st} - W_{cd} \tag{3}$$

여기서

$$M_f = \rho_l A_{ib} (H - l_{2p}) + (1 - \alpha) \rho_l l_{2p} A_{ib} \text{ 이다.}$$

(3) 전 지역의 운동량 보존

운동량은 튜브의 하단에서 상단까지 적분하여 구하는 데 그 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_c - P_e = & \frac{l_{1p} + 2l_{2p}}{2A_{ib}} \frac{dW'}{dt} + \frac{1}{2}(\rho_f + 2\rho_{2p})l_{2p} \frac{d^2 l_{2p}}{dt^2} + \frac{1}{2}\rho_f \left(\frac{dl_{2p}}{dt}\right)^2 \\ & + \frac{f_{2p} l_{2p}}{4DA_{ib}^2} \left(\frac{W_{st}^2}{\rho_g} - \frac{W_{fl}^2}{\rho_f} + \rho_{2p} A_{ib}^2 \left(\frac{dl_{2p}}{dt}\right)^2 + 2W' A_{ib} \frac{dl_{2p}}{dt} + \frac{W'^2}{\rho_{2p}}\right) \\ & + \frac{2\pi\mu l_{2p}}{A_{ib}^2} \left((\rho_f + \rho_{2p})A_{ib} \frac{dl_{2p}}{dt} + W'\right) + \frac{2K-1}{4A_{ib}^2} \left(\frac{W_{st}^2}{\rho_g} + \frac{W_{fl}^2}{\rho_f}\right) \\ & + \rho_f g l_f + \rho_{2p} g l_{2p} \end{aligned} \tag{4}$$

4-2. 충전-방출 모드(Fill-and-dump mode)에서의 갈래질(bifurcation)과 요동주기

4-2-1. 충전 방출시 최대압력 강하

최대 압력은 액체 기둥이 재관수 응축기의 상단 부에 도달할 때 발생한다. 이보다 더 큰 액체 기둥은 존재하지 않고 그 액체는 관 밖으로 유출된다. 이를 결정하기 위해서는 다음과 같은 경계조건을 사용하여야 한다.

$$v_2 = \frac{dl_{2p}}{dt} + \frac{W'}{\rho_f A_{ib}} \quad \text{그리고} \quad l_{1p} = H - l_{2p}$$

이로부터 다음과 같은 압력강하를 예측하는 방정식을 얻을 수 있다.

$$\Delta P = \frac{f_{2p} h_{fg}}{16\rho_g A_{ib}^3 U \sqrt{\alpha} \Delta T} W_{st}^3 + \frac{K-1}{2\rho_g A_{ib}^2} W_{st}^2$$

$$\frac{\sqrt{\alpha\Delta\rho gh_{fg}}W_{st} + \rho_l gH}{\pi DU\Delta T} \quad (5)$$

식(5)에서 제3항과 4항이 크게 작용하여, 큰 증기 유량에서 최대 압력강하가 작아지는 역할을 하게된다. 이 경우 유입되는 증기량에 비해 재관수 응축량은 무시할만하다.

4-2-2. 전(total) 재관수 응축시 압력강하

주입된 증기 유량이 충분치 않을 경우에는 응축액막의 선단이 튜브의 상단부까지도달하지 못할 수 있다. 증기량을 증가하면 응축액막의 선단이 상승하여 이상유동영역이 증가하며 이에따라 압력차이는 증가하게 된다. 이 경우 경계조건은 다음과 같다.

$$v_0 = \frac{W_{st}}{\rho_g A_{ib}}, v_1 = v_2 = 0$$

이로부터 얻어지는 결과는 다음과 같다.

$$\Delta P = \frac{f_{2p} h_{fg}}{16\rho_g A_{ib}^3 U \sqrt{\alpha\Delta T}} W_{st}^3 - \frac{1}{2\rho_g A_{ib}^2} W_{st}^2 + \frac{\rho_{2p} g h_{fg}}{\pi DU \sqrt{\alpha\Delta T}} \quad (6)$$

4-2-3. 충전방출시 최저압력강하

성장한 액체 기둥이 증기의 흐름을 차단하여, 하부공동에 발생한 압력상승으로 방출될 때, 재관수 응축관은 얇은 액막(liquid film)으로 덮인 상태에서 잠시동안 액막유동을 하게 된다. 이때 액막의 흐름 방향에 따라 그 두께가 달라지며, 이것은 응축관 안의 작동유체의 밀도를 결정하는데 결정적인 기여를 하게 된다. 특히 액적비산(entrainment)이 발생할 정도의 상황과, 이보다 더욱 심한 경우로, 강력한 증기의 압력을 견디지 못하고, 관의 하단부부터 액막이 파괴되며, 관 안의 유체의 밀도는 더욱 하락하게된다. 따라서 액막이 유지되면, 증기량의 증대에 따라 압력강하가 증대하나, 액막이 파쇄되면 증기량 증대에 따라 압력강하는 오히려 감소하는 형태가 될 것이다. 본 연구에서는 일반적인 순방향 환형 유동의 경우를 일반적으로 가장 많이 발생하는 유동패턴으로 선정하여 모델 하였다. 이 경우 식(4)에 대입할 경계 조건은 다음과 같다.

$$v_0 = v_1 = v_2 = \frac{W_{st}}{\rho_g A_{ib}}, l_{ip} = 0, \text{ and } l_{2p} = H$$

이로부터 얻어지는 압력강하는 증기 유량에 대하여 2차 방정식으로 나타낸다.

$$\Delta T = \frac{1}{\rho_g A_{ib}} \left(K + \frac{1}{2} f_{2p} \frac{H}{D} \right) W_{st}^2 + \rho_{2p} gH \quad (7)$$

4-2-4. 충전 방출 요동 주기

이상에서 압력강하 요동 시에 최대치와 최소치를 구

하였으므로, 이 두 압력사이만큼 압력강하는 순환적으로 변화하게 되어있다. 이 순환 변환의 주기를 결정하기 위해, 최소치에서 최대치로의 압력 변화에 걸리는 시간을 모델 하고자 한다. 압력이 최소치에서 최대치로 변화는 단조 증가로 서서히 이루어지는 반면, 최대치에서 최소치로의 변화는 매우 빨리 이루어졌다. 충전과 방출시의 압력강하의 차이는 식(5)과 식(7)의 차이에서 얻어진다.

$$\Delta P_{oscil} = \frac{f_{2p} h_{fg}}{16\rho_g A_{ib}^3 U \sqrt{\alpha\Delta T}} W_{st}^3 - \frac{f_{2p} H + 2D}{4\rho_g D A_{ib}^2} W_{st}^2 - \frac{\rho_{2p} g h_{fg}}{\pi DU \sqrt{\alpha\Delta T}} + \alpha\Delta\rho gH \quad (8)$$

질량 보존식에서 주기는 다음과 같이 정의된다.

$$\tau = \frac{M(\tau) - M(0)}{W_{st} - \int_0^\tau W_n(t) dt} \quad (9)$$

식(8)과 (9)에 대입하면 주기를 증기유량의 함수로 얻을 수있다.

$$\tau = \frac{A_{ib}}{(W_{st} - W_n)} \left[\Delta P_{oscil} - \frac{f_{2p} h_{fg}}{16\rho_g A_{ib}^3 U \sqrt{\alpha\Delta T}} W_{st}^3 + \frac{f_{2p} H + D}{2\rho_g D A_{ib}^2} W_{st}^2 \right] \quad (10)$$

5. 결과 및 토의

앞 절에서 유도된 충전 방출모드의 압력의 요동 범위와 이의 요동 주기에 대한 예측식을 실험결과와 비교 검토하였다. 특히 관 직경 효과가 잘 반영되고 있는지의 여부를 보고, 본 제안식의 적용의 일반성을 검토하였다.

5-1. 압력강하 특성

증기의 유량을 증가시키면서 하부공동과 상단사이의 압력강하를 측정하였다. 직경이 다른 3개의 관 모두 동일한 경향을 보여주었다. 플라딩 발생이전에는 완만한 증가, 플라딩 발현 점에서는 급격한 증가, 주기적 요동은 충전방출 구간에서, 2차함수적인 증가는 환형 순류상황(annular cocurrent flow)에서 발생한다. 실험 결과를 표현함에 있어 종축은 압력강하를 나타내었는데, 이는 무차원화 하지 않았다. 그 이유는 L/D에 따라 요동 운전영역이 발생하지 않는 수도 있어, 관의 수두로 이를 무차원화할 경우, 본 연구결과를 지나치게 일반화하여 확대 해석하게 할 수도 있기 때문이다. 그러나, 횡축은 증기 유량을 무차원화 하였는데, flooding의 관계식에 사용되는 Kutatelaze 수를 사용하였다.

$$K_G = \frac{W_{st}}{\rho_g A_{th}} \left[\frac{\rho_g^2}{g \sigma \Delta \rho} \right]^{1/4} \quad (11)$$

그림 5, 6, 7에는 McMaster 대학의 실험자료와 본 연구의 모델과의 비교가 나타나있다. 그림에 나타난 실험 자료에서 ◆는 IPDT 운전 모드에서의 전재관수 영역에서의 압력강하를 나타낸 것이고, ■는 ISF 운전 모드에서의 전재관수 응축시 압력강하이다. 또한 ●는 충전 방출 모드에서 최대 충전시 발생하는 압력강하의 최대치를 나타내고 ○는 방출시 발생하는 압력강하의 최소치를 나타낸다. △는 증기 유량을 더욱 증대하였을 때, 더 이상 액체 기동이 발생하지 않고 액막은 순방향 환형유동을 형성하며 방출되는 상황의 압력강하이다. 실험 결과를 보면, 최대점이 증기 유량이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있는데, 이는 모델에서 보이는 바와 같이 액체 기동의 형성 위치가 상단부로 점차 상승하여, 액체 기동의 최대 크기가 상부 관의 크기에 의해 제한 받기 때문이다. 일단 관의 하단부에서 형성된 플라딩 조건에

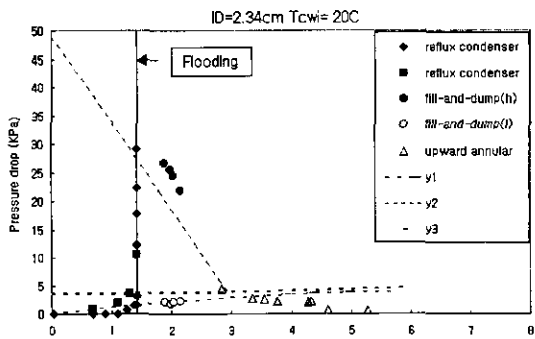


그림 5. 2.34 cm 내경의 재관수 응축기의 압력 갈래질 선도. y1 = 충전방출시 최대압력강하(식5), y2 = 전재관수 응축시 압력강하(식6), y3 = 충전방출시 최저 압력강하(식7).

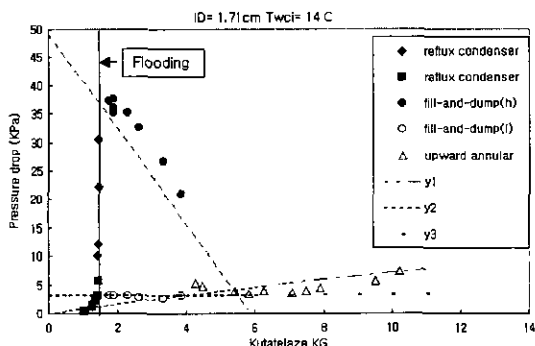


그림 6. 직경 1.71 cm 재관수 응축기의 압력 갈래질 선도. y1 = 충전방출시 최대압력강하(식5), y2 = 전재관수 응축시 압력강하(식6), y3 = 충전방출시 최저 압력강하(식7).

의한 액체 브리지는 액체 기동을 형성하나, 높은 증기 유량의 유입이 차단되어, 허부공동에 형성되는 압력과 액체기동의 체압력의 균형점이 상향 설정되기 때문이다. 이는 액체기동이 상승하면서 소멸될 때, 벽의 액막이 정상적인 역류나 순류의 상태와 다소 다른 액막의 유동 분포가 형성되는 것에 기인한다. 실험 자료에 충전 방출 모드와 순방향 환형유동의 사이에 압력 강하 자료가 없는 것이 발견되는데, 이는 이 지역에서 압력강하의 요동이 충전 방출 모드에서 보이는 규칙적인 요동 형태가 아니라, 매우 혼돈적(chaotic) 양상을 보여, 외부의 노이즈에 민감한 관계로, 특정 값을 대표적으로 상정하기 어려웠기 때문에 발생했다.

그림 5는 2.34 cm의 내경의 튜브에 설치 20도의 냉매로 외벽을 냉각하는 상황의 실험결과와 본 모델을 비교하였다. 모델은 그림에 표시된 바와 같이, 증기 유량에 따른 최대 압력강하가 y1으로 나타나 있는데 식(5)에 해당한다. 이는 ●로 나타난 실험자료를 잘 추적하고 있다. 또한 최저 방출시 발현하는 최저압력강하는 y3로 표현되는데 이는 식(7)에 해당하며 ○로 나타난 결과를 잘 묘사하고 있다. 재관수 영역의 압력강하를 표현한 y2, 식(6)도 최저 압력을 잘 묘사하는데, 이는 본질적으로 두경우가 모두 환형 유동에 해당하고, 튜브전체에 액막이 형성된 상황으로써, 단지 유동의 방향이 달라, 그 두께가 다소 다른 정도이기 때문이다. 그러나 최소 압력 강하식은 Kutatelaze 수가 3 이상의 영역인 환형 순류 유동에서는 잘 맞지 않는다. 여기서 실험자료는 오히려 압력강하가 증기 유량이 증가할수록 감소하고 있는 것을 보여준다. 유입 증기가 응축되어 형성한 액막이 하부로부터 건조되거나 파쇄되는 현상이 발생하여 액막의 형성이 짧아짐을 의미한다.

또한 그림 6와 7은 각각 1.71 cm와 1.07 cm의 내경을 갖는 재관수 튜브에 대한 결과이다. 관의 직경이 작아지면서 눈에 띄게 나타나는 현상은 충전 방출모드가 큰 쿠타텔라즈 수(Kutatelaze number)에서도 발현한다는 점이다. 그 동안 많은 연구자들이 발견한 사실과 같이, L/D가 커질수록 충전 방출 모드가 극명하게 발현하고 있음을 입증하고있다. 또 한가지는 순방향 환형 유동시에 2.34 cm 내경의 관에서의와 달리 압력강하가 증대하는 현상을 보여주고 있다는 점이다. 이 실험자료로부터 알 수 있는 것은 관의 직경이 작아질수록 액막의 표면압력이 증대되어 액막의 파쇄나 말아올림등현상이 잘 발생하지 않는다. 따라서 응축수의 증대는 비단 이것이 순류로 상승 제거되고 있다 하더라도 액막의 두께 증대, 그리고 액체 비산량(entrainments)의 증대등을 통해 압력강하를 증대시키고 있음을 알 수 있다.

본 모델은 압력강하의 최대치 예측에서는 매우 좋은

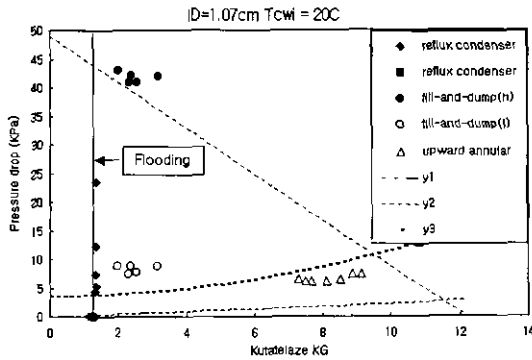


그림 7. 직경 1.07 cm의 재관수 응축기의 갈래질 선도. y1 = 충전방출시 최대 압력강하(식5), y2 = 전재관수 응축시 압력강하(식6), y3 = 충전방출시 최저 압력강하(식7).

일치를 보여주고 있다. 그러나 최저점에 있어서는 다소 미흡한 예측을 보여준다. 특히 1.07 cm 직경의 튜브의 경우에는 순방향 환형 유동 모델이 적절치 않음을 보여주고 있다. 충전방출 모드의 식(7), y3가 이를 잘 예측하므로 본 모델의 타당성을 보여준다.

5-2. 충전 방출시 동시의 요동 주기

이상의 논의에서 충전방출모드에서의 압력강하는 잘 예측된 것으로 나타났다. 따라서 이 모드의 시간적 요동 주기에 대하여 검토하고자 한다. 이는 액체기둥의 자연 요동주기와 함께, 성장 소멸의 주기는 외부에서 증기 압력에 필스를 부여하여 재관수 응축현상을 증대하거나 운전 영역을 확대하고자 시도할 경우 중요한 고려 요소이다.

그림 8은 본 실험에서 사용된 3가지 튜브에서의 액체 체적의 성장 소멸의 주기를 표현하고 있다. 실험 결과를 보면, 증기 유량이 증가할수록 액체 체적의 성채 주기는 감소하였다. 또한 증기 유량이 작아지면, 액체 체

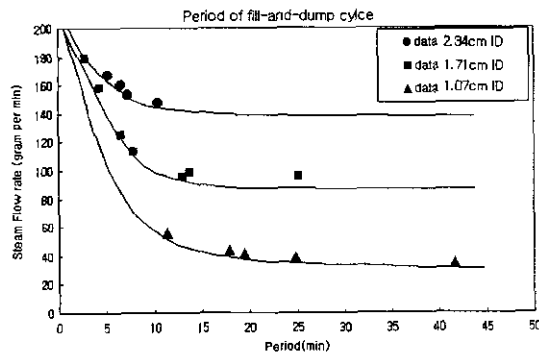


그림 8. 충전 방출 주기의 실험치와 이론적 예측.

적이 성장하는데 많은 시간이 걸리므로, 성채의 주기가 커지는 경향을 보였다. 관의 크기가 작을수록 적은 증기유량에서도 액체 기둥이 성장하여, 관의 직경 효과가 명확하게 나타났다. 본 연구에서 제시한 성장 주기는 실험자료 결과를 매우 잘 예측하는데, 이는 압력강하의 최고점과 최저점의 예측이 비교적 잘 맞아, 액체 기둥의 성장 크기를 합리적으로 예측하였다.

6. 결 론

본 연구에서 L/D가 큰 경우의 단일 수직 재관수 응축 튜브의 증기 유량 관련한 압력강하 거동에 대한 실험과 이론적 예측을 수행하였다. 이를 통해 증기유량에 따라 전재관수 응축영역과 충전방출영역이 플라딩(flooding)발현에 따라 구분됨을 알 수 있었고, 순방향 환형 유동(cocurrent carryover regime)이 높은 증기 유량에서 형성되었다. 이를 분석할 수 있는 럼프 파라미터(lumped parameter)방법에 입각한 압력강하 분석식을 구하여, 충전방출모드에서 압력강하 요동시 최고점과 최저점을 예측하는 모델과, 요동의 주기에 관한 예측 모델을 수립하였다. 이는 실험결과와 비교할 때 합리적으로 예측하고 있음을 확인하였다. 특히 관의 직경에 대한 변화를 잘 반영하였다.

운전 제한 요소로 작용하는 플라딩 발현 이후의 재관수 응축현상에 대한 동적 분석은 일부 연구에서 가능성이 제시되고 있는 증기 압력 요동 부여를 통한 응축 열 전달 증대 효과를 통한 계통 설계 최적화와 플라딩 발현억제로 인한 운전 영역 증대등의 효과에 직접적으로 연관되어 있어 이 분야의 추후 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국원자력연구소의 증장기 연구프로젝트에서 일부지원을 받았다. McMaster 대학의 Jen-Shin Chang 교수의 비평에 감사한다.

사용기호

- A : 면적
- D : 직경
- f : 미찰계수
- g : 중력상수
- H : 관 길이
- h : 엔탈피
- K : 형상손실계수, Kutatelaze number
- l : 길이, 액체

M : 질량
T : 온도
U : 열전달 계수

Greeks

α : 기포분율
 μ : 점도
 ρ : 밀도
 π : 원주율
 τ : 주기
 Δ : 차이

Subscripts

bp : 하부공동
cd : 응축수
f : 유체
fg : 스팀과 액체의 차이
fl : flooding시 하향유량
G : 스팀
oscil : 충전 방출 요동
st : steam
2p : 이상
tb : 관

참고문헌

1. Wetry, J.R., Wilson, R.W. and Wicks, C.E.: Fundamentals of Momentum Heat and Mass Transfer, Wiley, 3rd Ed. (1984).
2. Teng, H., Cheng, P. and Zhao, T.S.: "Instability of Condensate Film and Capillary Blocking in Small-diameter Thermo-Syphon Condenser", Int. J. of Heat and Mass Transfer, 42, 3071-3083 (1999).
3. Chen, G. and Hihara, E.: "A New Absorption Refrigeration Cycle using Solar Energy", Solar Energy, 66, Issue 6, 479-482 (1999).
4. El-Genk, M.S. and Daber, H.H.: "Determination of Operation Envelopes for Closed, Two-phase Thermo Syphons", Int. J. Heat and Mass Transfer, 42, pp. 889-903 (1999).
5. English, K.G. *et al.*: "Criteria of Flooding and Flooding Correlation Studies with a Vertical Updraft Partial Condenser", Chemical Engineering Progress., Vol. 59, No. 7 (1963).
6. Calia, C. and Griffith, P.: "Modes of Circulation in an Inverted U-tube Array with Condensation", HTD-Vol. 15, ASME, New York (1981).
7. Nquyen, Q.T. and Banerjee, S.: "Flow Regime and Heat Removal Mechanisms in a Single U-tube Steam Condenser", ANS Transactions, Vol. 43, pp. 788-789 (1982).
8. Russel, C.M.B.: "Condensation of Steam in a Long Reflux Tube", HFTS, Research Symposium Paper No. HTFS RS352 July (1980).
9. Deakin, A.W., Pulling, D.J. and Owen, R.G.: "Flooding in Reflux Condenser", Inst. of Chemical Engineering, Birmingham, April (1978).
10. Girard, R. and Chang, J.S.: "Reflux Condensation Phenomena in Single Vertical Tube", Int. J. Heat and Mass Transfer Vol. 35, No. 9, pp. 2203-2218 (1992).
11. Banerjee, S., Chang, J.S., Girard, R. and Krishnan, V.S.: "Reflux Condensation and Transition to Natural Circulation in a Vertical U-Tube", J. Heat Transfer Vol. 105, pp. 719-727 (1983).
12. Wan, P.K., Girard, R. and Chang, J.S.: "The Role of Flooding Phenomena in Reflux Condensation in Vertical Inverted U-tube", Multi-phase Flow and Heat Transfer III, Part B: Applications, T.N. Verizoglu and A.E. Bergles Eds, Elsevier Science Publishing B.V. Amsterdam, pp. 279-292 (1984).
13. Obinelo, I.F., Round, G.F. and Chang, J.S.: "Condensation Enhancement by Steam Pulsation in a Reflux Condenser", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 15, No. 1, 20-29 (1994).
14. Lee, J.Y. and Chang, J.S.: "Vertical Countercurrent Flow Limitation Phenomena under Oscillatory Gas Flow", ICONE IV, ASME, Vol. 1. Part A, Basic Technology Advances, 261-267 (1996).