

비응축가스 이상 임계유동 모델 개발 및 평가

Development and Assessment of Two-Phase Critical Flow Model with Non-Condensable Gas

김수형, 임홍식, 김희철
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

본 연구는 해석적인 모델을 바탕으로 하여 비응축가스를 고려할 수 있도록 모델을 확장시키는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 물과 가스의 물성치를 계산할 수 있는 프로그램을 작성하였으며 이 물성치를 이용하여 비응축가스가 포함된 이상유동의 임계유량을 HEM, Moody 모델, 확장된 Henry-Fauske 모델을 이용하여 계산하였다. 개발된 모델들은 기존에 발표된 실험결과와 KAERI에서 수행한 실험결과를 통하여 비교 검토하였다.

Abstract

Based on analytical approach, two-phase critical flow models(HEM, Moody model, extended Henry-Fauske Model) are extended to predict the effect of a non-condensable gas. A Computer program developed to calculate critical mass flux, and pressure. Developed models assessed with the results of two-phase critical flow experiments with non-condensable gas injections.

1. 서론

SMART는 질소를 이용한 자기가압형 가압기를 사용하고 있다. 이 가압기는 SMART 압력용기 내부에 위치하고 있으며 Wet Thermal Insulator와 Cooler를 통하여 고압의 낮은 온도를 유지하고 있게 된다. 가압기 내부는 질소 가스와 수증기, 물의 혼합물로 채워진다. SMART는 가압기 상부에는 직경 20 mm, 길이 300 mm 정도인 3개의

관통부를 통하여 3개의 질소 가스 실린더와 연결되어 있어서 고압의 질소가 가압기의 상태의 변화에 따라 일정한 압력을 유지하게 된다. 이 배관 중 하나가 파단되면 고압의 질소, 물, 수증기의 혼합물이 파단부위를 통하여 방출되게 되고, 온전한 다른 두 개의 질소 가스실린더로부터 계속해서 질소가 공급되게 된다. 이때 파단부위를 통해 방출되는 유량을 결정하기 위하여 임계유량의 계산이 필요하다.

지난 수십 년 동안 많은 연구자에 의하여 이상임계유동이 연구되었다. 이상임계유동이 정체상태의 압력, 온도, 건도 등 유체의 상태와 방출되는 부분의 형태나 길이에 의한 영향을 받는 것으로 알려져 있으나, 아직까지 정확한 메커니즘이나 전 영역에 걸쳐 합리적인 예측을 할 수 있는 상관식이 개발되어 있지 않다. 특히 비응축가스의 영향을 고려한 연구는 거의 없는 실정이다. 비응축가스의 영향을 고려한 실험은 Celata 등(1988)의 실험이 유일하다. 질소가스를 이용한 자기가압형 가압기를 갖고있는 SMART의 경우는 질소의 영향을 고려한 임계유량 모델이 안전해석을 위해 필수적이다. 이를 위해서 KAERI에서는 실제 원자로 조건에서 질소가스의 영향을 파악하기 위한 실험을 수행하고 있으며 일부 결과가 제시되었다(2002).

Saha(1978), Wallis(1980), Ishibin(1980) 등은 그동안 연구된 이상임계유동 연구에 대한 검토를 수행하였으며 Elias와 Lellouche(1994)는 주요 모델과 실험데이터를 수집하여 비교하는 연구를 수행하였다. KAERI에서도 임계유동의 실험을 수행한 바 있으며 비교적 정확한 실험상관식을 제안하였다(1997).

이상임계유동 모델은 크게 해석적인 방법과 Mechanistic 방법으로 나눌 수 있다. 해석적인 방법은 이상 유체를 단상 압축성 유체처럼 고려하여 물성치를 결정하고 단상유체에 적용되는 보존식을 적용하여 계산하는 방법으로 균질 평형 모델(Homogeneous Equilibrium Model)과 Moody, Fauske, Extended Henry and Fauske, Levy, Frozen 모델 등을 들 수 있다. Mechanistic한 방법은 각 상의 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식으로부터 임계조건을 찾아내고 그 조건으로부터 임계유량을 구하는 방법으로 Trapp & Ransom 모델, Richter 모델, Elias-Chambre 모델 등을 들 수 있다.

해석적인 방법은 물리적인 현상을 바탕으로 하고 있지 않기 때문에 한정된 조건에서만 사용 가능한 방법이다. 반면 Mechanistic한 방법은 복잡한 형상과 다양한 조건에서 사용 가능한 방법이며 비교적 정확한 예측결과를 보여준다. 반면 계산과정이 복잡하고 계산시간이 오래 걸리는 단점을 갖고있어서 TASS와 같은 실시간 모사용 코드나 설계의 참고 계산을 위한 코드에는 적합하지 못한 단점이 있다.

본 연구는 해석적인 모델을 바탕으로 하여 비응축가스를 고려할 수 있도록 HEM, Moody 모델을 확장시키는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 물과 가스의 물성치를 계산할 수 있는 프로그램을 작성하였으며 이 물성치를 이용하여 비응축가스가 포함된 이상유동의 임계유량을 계산하였다. 개발된 모델들은 기존에 발표된 실험결과와 KAERI에서 수행한 실험결과를 통하여 비교 검토 하였다.

2. 비응축가스 모델 개발

가. 비응축성 기체의 영향

비응축성 기체가 존재할 경우 임계유속에는 적어도 다음 네가지방향으로 영향을 미치게 된다.

- 단성분 단상 액체(과냉된 액체) \Rightarrow 다성분의 유체(이상유동 혼합물)
- 단성분 이상 유체(물,수증기 혼합물) \Rightarrow 다성분의 유체 (포화조건, 물성치 변화)
- 단성분 단상 기체(과열된 기체) \Rightarrow 다성분 단상 기체 (물성치 변화)
- 액체에 용해되어 있는 비응축성 가스 \Rightarrow Nucleation site, 비평형도에 영향

액체에 비응축가스가 용해되어 있는 경우 액체의 경우 Flashing에 영향을 줄 수 있으나 HEM이나 Moody 모델 등에 영향을 직접적으로 고려하기 어렵다. 비응축성가스는 기체 상에만 존재한다고 가정하면, 기체상에 대해서 비응축성 가스에 의한 물성치와 포화조건 의 변화를 고려해야 한다.

1) 기체상의 물성치

서로 반응하지 않는 기체의 혼합물은 균질한 혼합물이므로 또 다른 순수한 기체로 볼 수 있다. 가스 혼합물의 물성치는 각 혼합물의 물성치와 양에 의하여 영향을 받는다. 그러므로, 혼합물에 대한 표를 만드는 것도 가능하다. 한 예로 공기에 대한 열역학적 물성치 표를 들 수 있다. 하지만 모든 성분의 변화에 대한 표를 만드는 것은 비효율적이므로, 혼합물의 구성비와 각 기체의 물성치를 이용하여 혼합물의 물성치를 결정하는 방법이 연구되었다. 수증기와 질소의 혼합물에 대해서 다음과 같은 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned}P_m &= P_n + P_g \\h_m &= x_n h_n + (1 - x_n) h_g \\u_m &= x_n u_n + (1 - x_n) u_g \\s_m &= x_n s_n + (1 - x_n) s_g\end{aligned}$$

여기서 x_n 는 기체 혼합물 전체 질량 중 질소의 질량분율이다.

혼합물의 압력으로부터 비체적의 관계는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{R_m T}{v_m} = \frac{R_g T}{v_g} + \frac{R_n T}{v_n}$$

R_m , R_g , R_n 은 혼합물, 수증기, 질소의 기체상수를 나타낸다. 각 기체상수가 비슷한 값을 갖고 온도가 균일하다고 가정하면 기체혼합물의 비체적은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{1}{v_m} = \frac{1}{v_g} + \frac{1}{v_n}$$

또는

$$v_m = x_n v_n = (1 - x_n) v_g.$$

위에서 정의된 기체 혼합물의 물성치를 이용하여 다성분 이상유동의 물성치를 계산할 수 있다.

2) 이상 혼합물에서의 평형상태

HEM, Moody 모델을 적용하기 위해서 이상 혼합물에서의 평형상태를 계산해야 한다. 두 모델은 열적 평형을 가정하고 총 엔트로피가 일정하게 유지되는 것으로 가정하므로 아래와 같은 식을 적용할 수 있다.

$$s_0 = x \{ x_n s_n + (1 - x_n) s_g \} + (1 - x) s_f$$

정체상태의 압력(P_0), 온도(T_0), 엔탈피(h_0), 엔트로피(s_0)를 알고있다고 가정할 때 임의의 압력 P에서 비응축성기체와 수증기의 물성치와 압력을 구하면 다음과 같다.

과냉액체와 비응축성기체

압력 P일 때 과냉액체와 비응축성 기체만 존재한다면 가스중 질소 가스의 분율은 1 ($x_n = 1$)이 된다. 비응축성 가스의 질량은 정체상태일 때와 변화하지 않으므로 정체상태에서의 건도와 압력 P에서의 건도가 일치한다 ($x = x_0$). 또, 비응축성 기체만 존재하므로 수증기의 분압이 0이고 물의 압력은 P가 된다. 따라서 식으로부터 물의 엔트로피를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$s_f(P, T) = \frac{s_0 - x_0 s_n(P, T)}{1 - x_0}$$

압력이 일정하므로 온도를 변화시켜가면서 위 식을 만족하는 온도를 계산한다. 각 상의 압력과 온도를 알고 있으므로 나머지 물성치들을 모두 구할 수 있다.

포화액체 + 포화수증기 + 비응축성기체

비응축성가스가 존재하게 되면 물이 실제보다 더 높은 압력에서 증발되게 된다. 이것은 수증기의 분압이 비응축성 기체로 인하여 실제 압력보다 낮아지기 때문이다. 압력이 P일 때 질소와 수증기, 물 혼합물의 물성치를 구하면 다음과 같다. 비응축성기체의 질량은 일정하게 유지되므로

$$x_0 x_{n0} = x x_n$$

을 만족한다. 비응축성기체가 이상기체에 가깝다고 가정하면 이상기체 상태방정식을 사용할 수 있다.

$$P_n v_n = R_n T_{sat}(P_g)$$

혼합물의 비체적관련 식을 이용하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$v_n = \frac{1 - x_n}{x_n} v_s = \frac{x - x x_n}{x x_n} v_s = \frac{x - x_0 x_{n0}}{x_0 x_{n0}} v_s$$

압력 P에서의 엔트로피는 다음과 같다.

$$s_0 = x_0 x_{n0} s_n + (x - x_0 x_{n0}) s_g + (1 - x) s_f$$

위 식을 건도에 관하여 정리하면

$$x = \frac{s_0 - x_0 x_{n0} s_n + x_0 x_{n0} s_g - s_f}{s_{fg}}$$

이 된다. 전체 압력 P는 질소와 수증기의 압력의 합이고, 모든 성분의 온도가 같으므로 기체상태방정식은

$$(P - P_g) \frac{x - x_0 x_{n0}}{x_0 x_{n0}} v_s \{ T_{sat}(P_g) \} = R_n T_{sat}(P_g)$$

이다. 위 식을 만족하는 수증기의 압력 P_g 를 구한다. 수증기의 압력을 구하면 그 압력에서의 포화 온도가 이상 유체의 온도가 된다. 온도와 각 성분 및 각 상의 온도를 알고 있으므로 나머지 물성치를 구할 수 있다.

나. 비응축성가스의 영향을 알아보기 위한 수식 전개

비응축성 가스가 과냉 액체의 물과 함께 고압의 통으로부터 방출되면 물의 포화압력을 높이는 작용 이외에 유로를 좁게 만드는 영향을 미치게 된다. 그 영향의 정도를 알아보기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- 질소가 함께 주입되면 노즐의 단면적이 줄어든다.
- 물은 줄어든 단면을 통하여 방출되게 된다.
- 물의 임계유속은 변화하지 않는다.

비응축성가스가 없을 경우 과냉액체의 임계질량유속을 G_{d0} , 비응축성가스가 존재할 경우 물의 임계질량유속을 G_c , 비응축성가스의 질량유속을 G_a 로 정의하면 위 가정을 바탕으로 하여 임계질량유속의 비는 다음과 같다.

$$\frac{G_c}{G_{d0}} = \frac{G_c A}{G_{d0} A} = \frac{W_c}{W_{d0}}$$

물의 임계유속은 변화하지 않으므로 물의 질량유량은

$$W_c = G_{d0}(1 - a)A$$

이다. 위 식을 대입하여 정리하면

$$\frac{G_c}{G_{d0}} = \frac{G_{d0}(1 - a)}{G_{d0}} = (1 - a)$$

이다. 건도는 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{Q_a}{Q_a + Q_l} = \frac{G_a/\rho_a}{G_{d0}(1-\alpha)/\rho_l + G_a/\rho_a}$$

위 식을 정리하면

$$(\alpha - 1) \left(\frac{G_{d0}}{\rho_l} \alpha - \frac{G_a}{\rho_a} \right) = 0$$

이다. 기공률이 1이 아니라면

$$\alpha = \frac{G_a}{G_{d0}} \frac{\rho_l}{\rho_a}$$

이다. 따라서 질량유속의 비는 다음과 같다.

$$\frac{G_c}{G_{d0}} = 1 - \frac{G_a}{G_{d0}} \frac{\rho_l}{\rho_a} = 1 - \frac{Q_a}{Q_{d0}} \quad (1)$$

Celata 등(1988)의 실험 분석에 의하면 질량유속의 비는 체적유속의 비와 밀접한 연관이 있는 것으로 나타났다.

다. 물성치 계산

1) 물

임계유동을 계산하기 위하여 물의 물성치 계산이 필요하다. 물성치의 계산을 위하여 근래에 발표된 IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam을 사용하였다. IAPWS(the International Association for the Properties of Water and Steam)에서는 1997년 공업용의 물과 증기의 열역학 물성치 공식을 제안하였으며 이 공식은 1967년의 “The 1967 IFC-Formulation for Industrial Use”(IFC-67)을 대체하게 된다. 새로운 공식은 다음 영역에서 적용 가능하다.

$$273.15 \text{ K} \leq T \leq 1073.15 \text{ K} \quad \text{for } P \leq 100 \text{ MPa}$$

$$1073.15 \text{ K} < T \leq 2273.15 \text{ K} \quad \text{for } P \leq 10 \text{ MPa}$$

2) 비응축가스

비응축가스의 물성치를 구하기 위하여 RELAP5/MOD3.2.2Gamma에서 사용된 식을 이용하였다. 비체적은 이상기체 상태방정식으로 계산한다.

$$P_n v_n = R_n T_g$$

내부에너지는 다음과 같은 식을 이용한다.

$$U_n = \begin{cases} U_0 + C_0 T_g & T_g < T_0 \\ U_0 + C_0 T_g + \frac{1}{2} D_0 (T_g - T_0)^2 & T_g \geq T_0 \end{cases}$$

T_0 는 250 K 이고 질소와 공기에 대해서 다음과 같은 값을 사용한다.

종류	R_n (J/kgK)	C_0 (J/kgK)	D_0 (J/kgK ²)	U_0 (J/kg)
질소	296.7906	741.9764	0.1184518	145725.884
공기	287.0663	715.0	0.10329037	158990.52

위 식을 바탕으로 하여 엔탈피는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$H_n = \begin{cases} U_0 + (C_0 + R_n) T_g & T_g < T_0 \\ U_0 + (C_0 + R_n) T_g + \frac{1}{2} D_0 (T_g - T_0)^2 & T_g \geq T_0 \end{cases}$$

엔탈피를 온도에 관하여 미분하면 정압비열을 얻을 수 있다.

$$C_{pn} = \begin{cases} C_0 + R_n & T_g < T_0 \\ C_0 + R_n + D_0 (T_g - T_0) & T_g \geq T_0 \end{cases}$$

엔트로피는 열역학적인 관계로부터 다음과 같다.

$$s = C_{pn} \ln \frac{T}{T_{ref}} - R_n \ln \frac{P}{P_{ref}}$$

3. 모델 검증

가. 모델을 이용한 계산 결과

초기 정체상태의 엔탈피와 압력을 변화시켜가면서 HEM, Moody 모델, Extended Henry and Fauske (H-F)모델의 그래프를 그렸으며 그림 1에 나타내었다. HEM과 Moody Model의 경우 과냉된 액체상태일 때는 베르누이 방정식을 이용하여 그래프를 그렸다. 정체압력이 1.38 MPa 이하일 때 포화액체와 이상유동의 경계에서 약간 불안정한 값을 보이기는 하지만 불안정성이 큰 편은 아니다.

H-F 모델의 경우 과냉도가 심할 때 질량유속이 급격히 작아지는 것으로 계산되었다. 정체압력이 13.8 이상일 때 다른 모델과 편차가 심한 것으로 보이는 데 계산에서 사용되어진 등엔트로피 팽창계수 (Isentropic Expansion Coefficient)의 변화와 정압비열 및 정적 비열의 변화가 크기 때문인 것으로 보인다. 대체적인 경향은 Moody 모델이 대부분의 영역에서 임계유량을 높게 계산한 것으로 보이나 과냉액체 부근에서는 H-F 모델이 임계유량을 크게 예측하는 것으로 나타났으며 정체 엔탈피가 낮아짐에 따라 계산은 액체의 베르누이 식의 결과에 접근하는 것으로 나타났다. 임계압력은 H-F 모델이 비교적 높게 예측하였으며 Moody 모델이 낮게 예측하는 것으로 나타났다.

질소가 있는 경우에 대해서 각 모델마다 질소 가스의 건도

$$x_{GAS} = \frac{G_{GAS}}{G_{total}}$$

가 0.0, 0.001, 0.01에 대한 계산을 수행하였으며 그 결과를 그림 2부터 4에 나타내었다. 대부분의 경우 이상유동일 때는 비응축성 기체의 영향이 크지 않은 것으로 나타났으며 포화된 물에 가깝거나 과냉된 액체와 비응축성 기체의 혼합물일 때 영향이 커지는 것으로 나타났다. H-F 모델은 상간의 질량전달이 미미하다고 가정하기 때문에 포화상태에서 과냉 상태로 넘어갈 때 부드러운 변화를 보이며 그 영향은 임계압력에 잘 나타나있다. 그림 2는 HEM이다. 질량유속의 경우 비응축가스가 존재함에 따라서 과냉된 물과 함께 수증기가 생기기 때문에 이상유동 영역이 증가한 것을 볼 수 있다. 정체 엔탈피가 낮아짐에 따라 불연속적인 부분이 나타나는데 이것은 정체상태에서 수증기의 존재 여부에 따라 달라지는 것이다. 물이 과냉상태일 때 비응축가스의 건도가 클수록 임계유량이 점점 낮아지며 임계압력은 점점 높아지는 것으로 나타났다. 정체압력이 낮을 경우 임계유속은 비응축성가스의 영향을 정체압력이 높은 경우에 비하여 더 많이 받는 것으로 나타났다. 이 경향은 그림 4의 Moody 모델에서도 같이 나타났다. 하지만 Moody 모델은 HEM에 비하여 비응축성가스가 존재할 경우에도 임계유량을 크게 예측하였으며 임계압

력은 낮게 나타났다. H-F 모델의 경우(그림 3) 정체엔탈피가 낮은 경우 임계유량이 갑자기 증가하는 것으로 나타났으나 원인이 무엇인지는 아직 파악되지 않았다. 과냉 영역에서의 임계유량 값은 HEM과 비슷하게 나타났으나 정체엔탈피가 낮아질수록 증가정도가 큰 것으로 나타났다. 임계압력의 경우는 비응축가스의 양과 상관없이 비슷하게 나타났으며 연속적인 형태를 보여준다.

나. 질소의 영향 파악

KAERI(2002)와 Celata 등(1988)의 실험결과를 이용하여 질소의 영향을 파악하였다. Celata 등은 직경 4.6 mm, 길이 1500 mm의 시편을 가지고 실험을 수행하였다. 실험조건은 정체압력이 0.5, 1.0, 1.5 MPa이었고 입구의 과냉도는 최고 60 °C였다. 비응축가스 주입유량은 0.02 - 1.5 g/s였다. KAERI에서는 직경 10.9 mm 길이 1000 mm인 시편과 직경 20 mm, 길이 300 mm인 시편을 가지고 실험을 수행하였다. 정체압력은 4, 7, 10 MPa 이고, 과냉도는 최고 50 °C였다. KAERI에서의 실험결과 중 20 mm관에 대한 결과만을 적용하였다. 10 mm 결과는 물의 유량이 유량계의 범위를 벗어나기 때문에 신뢰할 수 없었기 때문이다. Celata의 실험결과는 과냉상태의 물에 대한 데이터만을 사용하였다. 포화조건의 데이터의 경우 불안정성으로 인하여 측정이 제대로 이루어지기 어려웠기 때문이다.

식(1)에 대한 그림을 그림 5, 6에 나타내었다. 그림 5에서 체적유량의 비가 작을 경우 비교적 식 (1)과 일치하거나 낮게 나타났다. 체적유량의 비가 커지게 되면 점점 비응축가스가 물이 통과하는 유로를 줄이는 효과 이외의 다른 효과가 나타나는 것을 볼 수 있다. 대표적으로 고려할 수 있는 영향은 수증기가 포화압력보다 낮은 압력에서 증발하는 현상이며 과냉도가 낮은 경우 쉽게 나타난다. 식(1)을 이용하여 임계유량을 예측한 결과를 그림 6에 나타내었다. 그 결과 대부분의 데이터가 ±20% 내의 범위에 들어왔으며 임계유속이 낮은 경우 낮게 나타났다.

다. 실험결과와의 비교

실험결과를 예측하기 위하여 입구조건을 가지고 계산을 수행하였다. 정체조건을 계산하기 위하여 물의 엔탈피와 비응축가스의 엔탈피의 합을 정체엔탈피로 하였으며 다음과 같다.

$$x_{gas} = \frac{G_{gas}}{G_c + G_{gas}}$$

$$h_0 = (1 - x_{gas})h_f(P_0, T_0) + x_{gas}h_{nc}$$

정체압력은 물의 저장용기 압력으로 하였다. P_0 와 h_0 를 기준으로 물, 수증기, 질소 혼합물의 평형상태 계산하였으며 수증기가 존재할 경우 평형상태의 건도는 비응축가스의 건도보다 커지게 된다. ($x \geq x_{gas}$)

개발된 모델을 이용하여 실험결과를 예측한 결과를 그림 7부터 9에 나타내었다. KAERI의 Celata 등의 데이터는 모두 과냉된 액체와 비응축가스 혼합물의 데이터이며 포화액체와 이상유체의 데이터는 측정의 불안정성으로 인하여 포함되지 않았거나 실험이 수행되지 못했다.

HEM, Moody 모델, H-F 모델의 예측결과는 대부분 Celata 등의 임계유속과 임계압력을 실제보다 높게 예측했으며 이는 Celata 등의 실험이 지름 4.6 mm 직경 1500 mm의 긴 관에서 수행되어 관 벽의 마찰이 크게 작용했기 때문인 것으로 보인다. 적용시킨 모델들은 모두 등엔트로피 과정으로 가정하며 마찰을 무시하기 때문이다. KAERI의 실험 결과에 대해서는 Moody 모델과 H-F 모델이 임계질량유속에 대해서 보수적으로 예측하는 것으로 나타났으나 HEM의 경우 질소가 존재하면 낮게 예측하는 것으로 나타났다. H-F모델은 데이터가 일정하게 모여있어 계수 조정만으로 실험결과를 정확하게 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 임계압력에 대해서는 KAERI의 실험결과를 낮게 예측한 반면 Celata 등의 데이터는 높게 예측했다.

예측결과에 의한 오차를 표 1에 나타내었다. Celata의 실험결과에 대해서는 평균오차와 표준편차가 크게 나타났다. KAERI 데이터를 기준으로 임계질량유속에 대하여 평균 오차는 HEM이 작은 것으로 나타났지만 표준편차는 H-F 모델이 가장 낮은 것으로 나타났다. 특히 비응축가스가 존재할 경우 표준편차가 가장 낮은 값을 보였다.

4. 결 론

이상임계유동 모델을 비응축성기체의 영향을 고려할 수 있도록 확장시키는 연구를 수행하였으며 개발된 모델을 실험결과와 비교 검토하였다. 비응축성기체와 물 및 수증기의 물성치를 계산하기 위한 프로그램을 작성하였고 2성분 이상유동의 평형상태의 물성치를 계산하기 위한 방법을 개발하였으며 이를 HEM, Moody 모델, H-F 모델에 적용하였다. 또 비응축가스 이상임계유동 실험 결과와 비교 검토하였다. 결론은 다음과 같다.

- 포화 이상임계유동에서는 비응축가스의 영향이 미미하다.
- 과냉액체의 경우 비응축가스가 존재하게되면 없을 경우에 비하여 임계유속이 낮아지고 임계압력은 높아진다.
- 비응축가스가 존재할 경우 임계유속은 적어도 Q_d/Q_{d0} 의 함수인 것으로 보이며 식 (1)과 같은 관계가 있다. 이것은 Celata(1988) 결론과 같은 결과이다.
- Moody 모델의 경우 비응축성기체가 있을 경우 없는 경우에 비하여 보수적으로 예측

하는 것으로 나타났다.

- H-F 모델은 보수적으로 예측하였으며 계수조정을 통하여 정확한 값을 예측할 수 있는 것으로 나타났다.
- HEM은 KAERI(2002)의 실험결과를 비교적 잘 예측하나 비응축가스가 있는 경우 실제보다 낮게 예측하는 경향이 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 개발 계획의 일환으로 수행된 것이다.

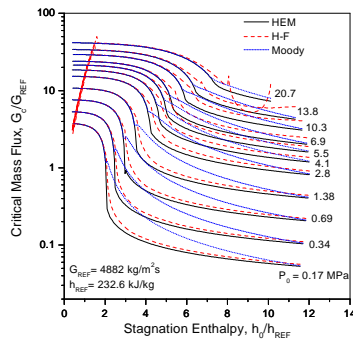
참고문헌

- [1] Isbin, H.S., "Some observations on the status of two-phase critical flow models", Int. J. Multiphase Flow Vol. 6, pp. 131-37, 1980
- [2] Wallis, G.B., "Critical two-phase flow", Int. J. Multiphase Flow Vol. 6, pp 97-112, 1980
- [3] Celata, G.P, Cumo, M., D'Annibale, F. and Farello, G.E., "The influence of non-condensable gas on two-phase critical flow", Int. J. Multiphase Flow Vol. 14, pp. 175-187, 1988
- [4] Elias, E. and Lellouche, G.S., "Two-phase critical flow", Int. J. Multiphase Flow Vol. 20, Suppl., pp. 91-168, 1994
- [5] Saha, P, A Review of Two-Phase Steam-Water Critical Flow Models with Emphasis on Thermal Nonequilibrium, NUREG/CR-0417, BNL-NUREG-50907, 1978
- [6] 박춘경 외 4, 이상임계유속 연구, KAERI/TR-887/97, 1997
- [7] 장석규, 정장환, 비응축가스 이상 유동 임계유량 실험자료보고서, SMART-TE-TE830-00, 2002
- [8] RELAP5/MOD3 Code Manual, NUREG/CR-5535, 1999
- [9] Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the thermodynamic Properties of Water and Steam, Erlangen, Germany, September 1997.

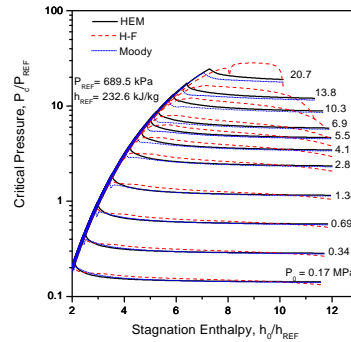
표 1. 실험데이터 예측 오차

(단위: %)

		KAERI (2002)				Celata et al. (1988)			
		w/o gas		with gas		w/o gas		with gas	
		Mean	Std.	Mean	Std.	Mean	Std.	Mean	Std.
HEM	G_c	11.4	15.1	0.02	27.2	576.0	217.7	283.9	79.7
	P_c	-24.7	18.8	-29.1	15.2	32.6	39.9	67.0	53.5
Moody	G_c	20.2	4.9	41.4	27.9	576.0	217.7	532.3	182.0
	P_c	-29.8	14.9	-36.6	11.7	32.6	39.9	34.5	36.5
H-F	G_c	35.7	10.7	23.6	10.6	593.6	232.0	233.2	58.2
	P_c	-30.6	16.4	-13.7	3.9	28.3	34.7	157.7	61.8

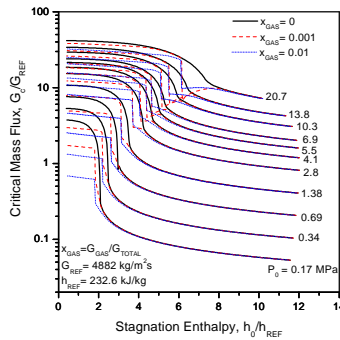


(a) 임계유속

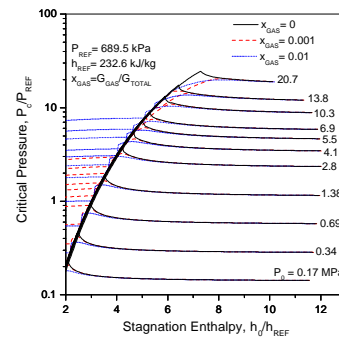


(b) 임계압력

그림 1. 계산 결과 (HEM, Moody, H-F)

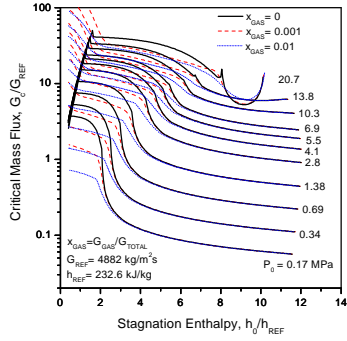


(a) 임계유속

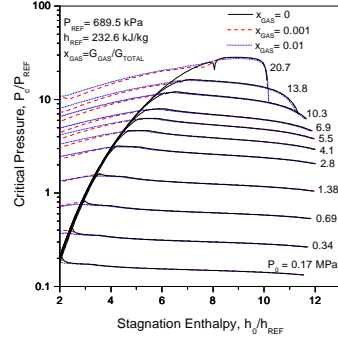


(b) 임계압력

그림 2. 비응축가스 양에 따른 임계유속 및 임계압력 (HEM)

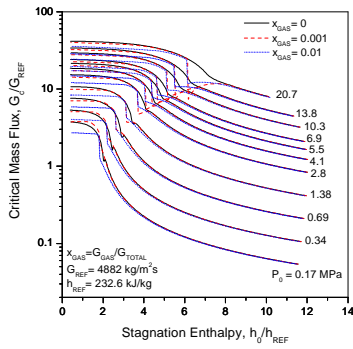


(a) 임계유속

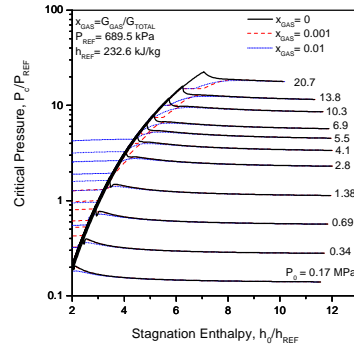


(b) 임계압력

그림 3. 비응축가스 양에 따른 임계유속 및 임계압력(H-F)



(a) 임계유속



(b) 임계압력

그림 4. 비응축가스 양에 따른 임계유속 및 임계압력(Moody)

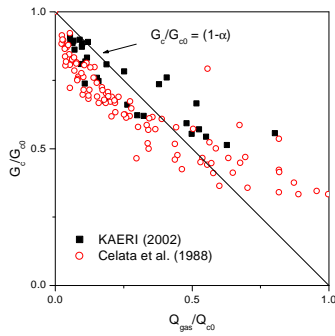


그림 5. 체적유량 비와 질량유량 비의 관계

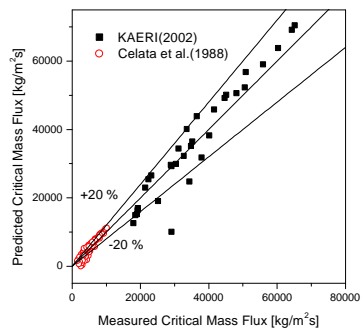
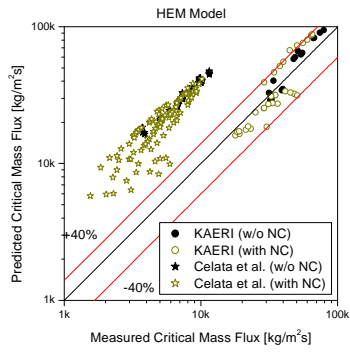
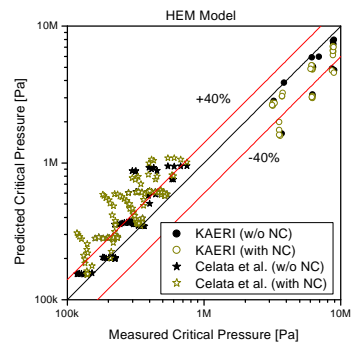


그림 6. 식(1)에 의한 임계유속 예측

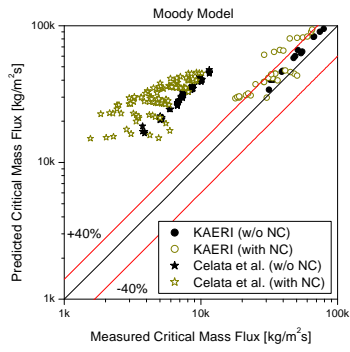


(a) 임계유속

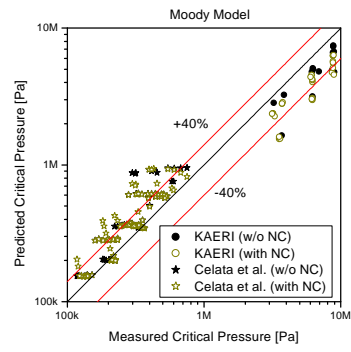


(b) 임계압력

그림 7. 임계유동 예측 결과 (HEM)

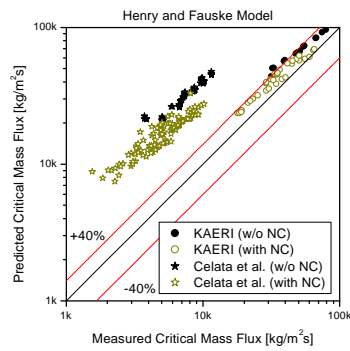


(a) 임계유속

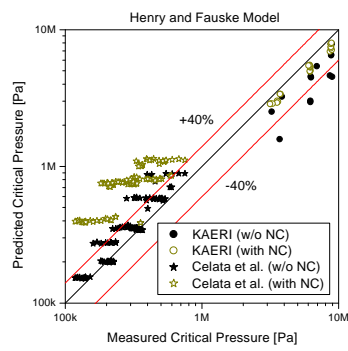


(b) 임계압력

그림 8. 임계유속 예측 결과 (Moody)



(a) 임계유속



(b) 임계압력

그림 9. 임계유속 예측 결과 (H-F)