

MARS 코드 액막건조 모델 개선을 위한 임계두께 상관식 개발

Development of the Critical Thickness Correlation for an Improvement of MARS Code Dryout Model

전지한, 이원재
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

이은철
서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산56-1

요 약

역학적 액막건조 모델은 증발, 액적 이탈 및 점착 등의 현상으로 액막이 건조될 때의 임계열유속으로 정의한다. 액막건조 모델은 액막의 두께가 영(zero)이 될 때로 가정하는 것이 일반적이다. 그러나 이와 같은 완전건조 가정은 균일 가열 상태에서는 잘 예측하나 비균일 가열의 경우는 제대로 예측하지 못함이 증명되었다. 이러한 약점을 보완하기 위해 임계두께 개념이 도입되었으며 이와 같은 액막이 상당히 얇아졌을 때 순간적인 액막건조가 발생할 수 있으므로 물리적으로 현실에 가까운 가정이라 할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 MARS 코드와 몇 가지 정상상태 균일 가열 액막건조 실험자료를 사용하여 액막두께 상관식을 개발하고 비균일 가열 조건과 유량감소 과도상태 실험을 포함한 여러 조건의 실험들을 사용한 검증을 통해 매우 향상된 성능을 가짐을 입증하였다.

Abstract

The mechanistic film dryout analysis defines that the critical heat flux arises when liquid film calculated from evaporation, droplet entrainment and deposition gets dryout. The dryout of film is generally assumed when film thickness becomes zero. However, it was proven that the complete dryout assumption can estimate CHF well for uniform heating case but can not simulate accurately for non-uniform heating case. The critical thickness concept is an appropriate approach physically because there is a

possibility of instantaneous disappearance of liquid film when it gets very thin. Therefore, the dryout phenomenon was modeled introducing critical thickness concept and development of proper critical thickness correlation. In this study, MARS code and some steady state dryout experimental data were used to develop a critical thickness correlation. The version including new critical thickness correlation was assessed using the several dryout CHF tests of various test conditions including non-uniform heating case and flow reduction transient test and the results showed enhanced agreement with the experimental data.

1. 서론

최근 들어, 환상류의 액막건조 임계열유속에 대한 관심이 높아지고 이에 따른 연구가 활발히 진행되어 왔다. 이에 대한 해석방법은 보조 상관식만을 사용하는 역학적 방법론이 일반적이다. 역학적 액막건조 방법론은 증발, 액적이탈 및 점착 등의 현상에 대한 보조 상관식을 사용하여 액막의 두께를 구하고 액막이 건조되는 순간의 열유속을 임계열유속으로 정의하는 방법이다. 이때, 액막의 두께가 영(zero)이 될 때 임계열유속으로 가정하는 완전건조 방법론이 일반적이거나 액막의 두께가 어느 정도 얇아졌을 때 임계두께 개념을 사용하여 액막의 두께가 임계두께 이하가 되면 임계열유속이 발생한다고 가정하는 방법론이 사용되기도 한다.^[1]

일반적으로 사용되는 완전건조 가정은 균일 가열 조건의 경우 임계열유속을 잘 예측하고 있으나 비균일 가열 조건에서는 현상을 온전히 모사하지 못함이 보고되고 있으며 또한 현상적으로 볼 때에도 액막의 두께가 상당히 작아지면 열적, 수력학적 현상으로 순간적 건조 가능성이 크므로 임계열유속 판별에 있어서 임계두께 개념을 사용하는 것이 현상을 기술함에 적절하다 사료된다.

그러므로 본 연구에서는 액막건조 임계열유속 현상을 모사함에 있어 임계두께 개념을 도입하고 MARS 코드 개선을 위한 적절한 임계두께 상관식을 개발하였다. 액막건조 임계두께 상관식을 도출하기 위해 몇 가지 정상상태, 균일 가열의 원형관 및 환상관 구조의 임계열유속 실험자료를 사용하였으며 이들 실험값과 일치하는 MARS 코드 계산값을 갖기 위한 임계두께를 도출하여 열유속, 액상유량 및 압력의 함수로 상관식을 도출하였다. 이때, 정확한 액막두께 결정을 위해서는 증발과정에 관여하는 액상유량을 정확히 예측해야 한다. 환상관의 경우, 가열봉과 비 가열관을 따라 서로 다른 두께를 가지는 두 개의 액막이 형성되는 특성을 가지며 가열봉에 형성된 액막만이 증발현상에 관여하므로 이와 같은 액막분리 현상이 임계열유속에 영향을 주게 된다. 이러한 현상을 비가열벽 효과라 하며 MARS 코드에서는 이와 같은 액막분리 현상을 고려하지 못하므로 새로운 액막분리 모델이 요구된다. 본 연구에서는 이와 같은 비가열벽 효과를 고려하기 위한 새로운 역학

적 액막분리 모델을 개발하고 이 모델을 근간으로 정확한 액상유량을 예측하여 임계두께 상관식을 도출하였다.

2. MARS 코드 기존 액막건조 모델

일반적으로 임계열유속 현상은 원자력 발전소의 노심이나 증기발생기에서 중요하다. 이러한 노심이나 증기발생기는 MARS 코드 모델 시 3-D 모듈을 사용하므로 이 장에서는 임계열유속과 관련된 3-D 모듈 열수력 모델에 대해 설명하고자 한다.^[2]

2.1 지배 방정식

MARS 코드의 3-D 모듈은 이상유동을 모사하기 위해 연속적인 기상, 연속적인 액상 그리고 액적으로 표현되는 세 가지 유체 상태에 대한 지배방정식을 사용하며 각 상에 대한 계면 반응을 고려하는 부가적인 방정식들로 구성되어 있다.

질량보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \underline{U}_k) = \Gamma_k^m$$

운동량보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k \underline{U}_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k \underline{U}_k \underline{U}_k) = -\alpha_k \nabla P + \alpha_k \rho_k g + \nabla \cdot [\alpha_k (\underline{\tau}_k + \underline{T}_k^T)] + \underline{M}_k^\Gamma + \underline{M}_k^d$$

에너지보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k h_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k h_k \underline{U}_k) = -\nabla \cdot [\alpha_k (\underline{Q}_k + \underline{q}_k^T)] + \Gamma_k h_k^i + q_{I_k}^m + \alpha_k \frac{\partial P}{\partial t}$$

2.2 유동양식 선도

3-D 모듈의 유동양식 선도는 수직유동을 근간으로 개발되었으며 있고 기포류, 슬러그류, 처언류, 그리고 환상류의 4가지 유동영역으로 구성되어 있다. 각 영역의 천이기준은 기공률(void fraction)을 기준 인자로 하며 다음과 같다.

- 기포류 : 0.0 - 0.2
- 슬러그류 : 0.2 - 0.5
- 처언류 : 0.5 - a_{crit}
- 환상류 : a_{crit} - 1.0

여기서, α_{crit} 은 환상류로 천이되는 임계기공률이며 0.8을 최저값으로 갖고 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha_{v,crit} = 1.0 - 4.0 C_1 \sigma / (\rho_v |U_{vl}|^2 D_H)$$

2.3 액막건조 모델

액막건조 모델을 모사하기 위한 열전달양식 선도는 그림 1과 같다. 액상분율이 0.01보다 작아졌을 때 post-dryout 양식으로 천이된다. 액막건조로 인한 임계열유속값을 계산하기 위해서 수정된 Zuber 상관식을 사용한다.

$$q''_{CHF} = \frac{\pi}{24} h_{fg} \rho_g^{0.5} [g_c g \sigma (\rho_f - \rho_g)]^{0.25} \times \max[0.2, 200(\alpha_f - 0.005)]$$

이때 다음 식을 사용하여 임계열유속 발생 시 표면온도를 계산한다.

$$q''_{CHEN}(T_{CHF}) = q''_{CHF}$$

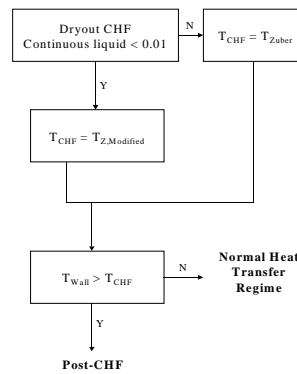


그림 1. 액막건조 모델을 위한 열전달 양식 선도

3. MARS 코드 액막건조 모델의 개선

역학적 액막건조로 인한 임계열유속의 정확한 예측은 환상유동에서의 유량의 정확한 예측과 액막의 건조에 대한 정의에 의존한다. 또한 환상유동 시 정확한 유량 예측은 환상류로의 천이 시점과 액적이탈 및 점착 모델의 정확성에 의존한다. 본 연구에서는 환상류 천이 시점에 대한 개선과 액막건조에 대한 정의로 임계두께의 개념을 도입하여 그 모델을 개발, 적용하므로 역학적 액막건조 모델을 개선하였다.

3.1 환상류 천이 시점에 대한 개선

열전달에 큰 영향을 미치는 액적의 양을 정확히 모사하기 위해서 환상유동으로의 천이

시점에 대한 정의는 매우 중요하다. MARS 코드 3-D 모듈은 주로 reflood 시 발생하는 물리적 현상에 대한 해석을 위해 개발되었기 때문에 고압 조건에 대한 환상류로의 천이 시점이 적절히 묘사하고 있지 못함이 증명되었다. 이런 단점을 극복하기 위해서 본 연구에서는 이전의 여러 연구에서 넓은 압력범위에 적용 가능성이 입증된 RELAP 5 Mod 3 모델을 적용하므로 개선을 시도하였다.

$$\alpha_{SA} = \max[0.7, \min(\alpha_{crit}^f, \alpha_{crit}^e, 0.8)]$$

여기서, $\alpha_{crit}^f = \frac{1}{v_g} \left[\frac{gD(\rho_f - \rho_g)}{\rho_g} \right]^{1/2}$, $\alpha_{crit}^e = \frac{3.2}{v_g} \left[\frac{g\sigma(\rho_f - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{1/4}$

3.2 액막건조 임계두께 상관식 개발

유동양식이 환상류가 되면, 액막의 건조 여부를 결정한다. 만약 액막이 소멸되었다고 판단되면 다음 그림과 같이 열전달양식은 post-CHF로, 유동양식은 hot wall 양식으로 전환된다. 이 열전달 및 유동양식에서는 열전달계수는 급격히 감소하고 벽온도는 급격히 상승하는 물리적 현상이 나타난다.

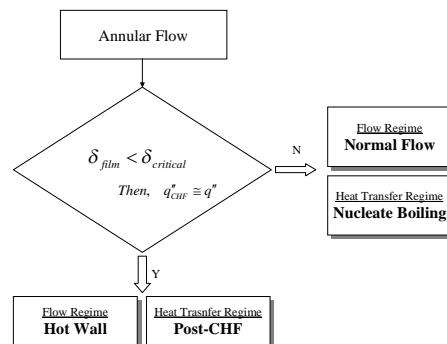
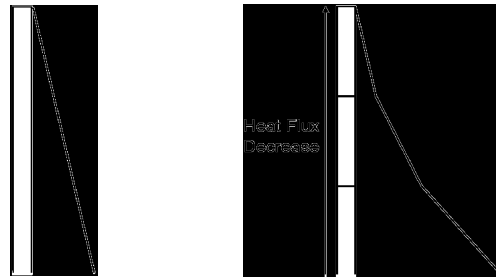


그림 2. 개선된 유동양식 및 열전달양식 선도

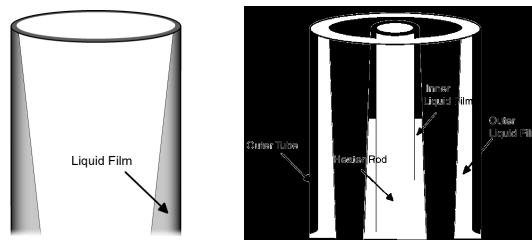
많은 연구자들이 액막건조로 인한 임계열유속 현상에 대한 실험적 또는 이론적 연구를 수행하였으며 이들 이론적 연구들의 대부분은 액막의 두께가 영(zero)이 되었을 때 액막이 건조되는 것으로 가정하는 완전건조 방법론이다. 그러나 몇몇 연구자들은 아주 작은 액막분율에서 임계열유속 상관식을 사용하거나 액막의 두께가 영(zero)이 아닌 임계두께 개념을 사용하여 액막의 두께가 그 임계두께보다 작아질 때 액막건조가 일어난다는 가정을 사용하기도 하였다. 일반적으로 사용되는 완전건조 가정은 가열봉이 균일하게 가열되는 경우에는 임계열유속 현상을 잘 예측하는 것으로 알려지고 있으나 비균일 가열의 경우에는 그 현상을 잘 묘사하지 못하는 것으로 증명되었다. 이는 다음과 같은 이유에서 기인한다. 실험적으로 비균일 가열을 하는 경우, 임계열유속 발생 위치는 가열되는 가열봉의 최상단이 아닌 최상단에서 조금 아래 부분에서 관측되는 것이 일반적이다. 하지만 이

론적 해석의 경우 아래 그림과 같이 가열봉의 상부로 갈수록 액막의 두께는 감소하게 되므로 액막건조 조건을 영(zero)으로 가정하면 실험과는 달리 최상단에서 임계열유속이 발생하게 된다. 그러므로 액막건조 조건에 대한 완전건조 가정이 아닌 임계두께 개념의 도입은 좀 더 실제 실험에 가까운 모사가 가능하며 액막이 극도로 얇아졌을 때 액막의 순간적 건조가 가능하므로 좀 더 물리적으로 실제에 가까운 해석방법이라 할 수 있다.^[3]



균일 가열 조건 비균일 가열 조건
그림 3. 가열 조건에 따른 액막 분포

그러므로 본 연구에서는 일관성을 유지하기 위해 모든 가열 조건에 대해 임계두께 개념을 도입하고 MARS 코드에 적합한 임계두께 상관식을 개발하였다. 상관식을 개발하기 위해서는 적절한 실험값들이 필요하나 순간적으로 건조되는 액막의 두께를 실험적으로 측정하는 것은 불가능하므로 임계열유속 실험값들을 사용하는 간접적 접근 방법을 사용하였다. 상관식 개발에 사용된 실험들은 정상상태 균일 가열 조건의 원형관 및 환상관 임계열유속 실험들이며 이들 실험의 임계열유속 값과 MARS 코드에서 계산하는 임계열유속 값이 일치하게 하는 두께를 그 조건의 임계두께로 정의하고 이들 자료들을 적절히 fitting하는 방법으로 상관식을 도출하였다. 임계두께 상관식을 생산하기 위한 각 조건의 임계두께를 도출하기 위해서는 증발과정에 관여하는 정확한 액막 유량을 예측하는 것이 필요하며 이는 구조적 특성에 의존한다. 그림 4에서 보여지는 것과 같이 원형관 구조에서는 벽을 따라 하나의 액막이 형성되며 이 액막의 모든 유량이 증발과정에 관여하게 되지만 환상관의 경우는 외벽과 내벽에 두 개의 액막이 형성되며 이 두 개의 액막 중 가열되는 내벽을 타고 흐르는 액막만이 증발에 관여하게 된다. 이러한 현상은 임계열유속 현상에 큰 영향을 미치게 되며 이를 비가열면 효과라 한다.



원형관 구조 환상관 구조
그림 4. 원형관 및 환상관 구조에서의 액막 분포

3.2.1 원형관 구조에서의 액막건조 모델

원형관 구조의 경우는 벽을 따라 하나의 액막만이 형성되고 그 액막이 모두 증발과정에 관여하므로 다음과 같은 판별조건을 가지게 된다.

$$\delta_{tube} = 0.5 \left[D_{tube} - \sqrt{D_{tube}^2 - \frac{4w_f}{\pi\rho_f u_f}} \right] < \delta_{critical}$$

3.2.2 환상관에서의 액막건조 모델

3.2.2.1 환상관에서의 역학적 액막분리 모델

환상관에서 환상류 형성 시 관 중심부로 액적을 포함한 기상이 흐르고 내벽과 외벽을 따라 두 개의 액막이 형성되게 된다. 하지만 MARS 코드에서는 이러한 두 개의 액막의 존재를 고려할 수 없으며 이는 환상관에서의 액막건조 임계열유속값을 높게 예측하는 결과를 가져왔다. 이와 같은 단점을 극복하기 위해서 새로운 액막분리 모델을 개발하였다.^[4]

새로운 액막분리 모델 개발을 위해서 다음과 같은 가정이 도입되었다. 그림 5와 같이 환상관에서 형성되는 환상류는 두 개의 액막과 기상 영역의 최대속도 선을 따라 두 개의 기상 영역으로 구분된다. 기상 영역의 속도분포는 벽법칙을 따르는 난류 단상 만능속도분포로 가정되었으며 각 액막의 속도는 일정한 값을 갖는다고 가정하였다.

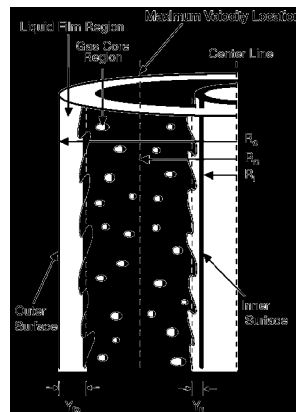


그림 5. 액막분리 모델

위에서 제시한 가정들을 토대로 기상 영역에서 다음과 같은 속도분포를 가진다.

$$u_{co}^+ = 2.5 \ln \left(\frac{y}{Y_{fo}} \right) + 5.5 \quad \text{외벽 속도 분포}$$

$$u_{ci}^+ = A_i \ln \left(\frac{y}{Y_{fi}} \right) + B_i \quad \text{내벽 속도 분포}$$

내벽 기상 속도 분포의 계수 A_i 와 B_i 에 대해서는 많은 연구자들에 의해 제시되었다. 본 연구에서는 그 중에서 Barrow 상관식을 선택하였다. 다른 상관식들에 비해 많은 실험 자료들을 사용하였고 적용범위 또한 넓기 때문이다. 이는 대부분의 환상관 액막건조 임계 열유속 실험들에 적용 가능한 범위라 할 수 있다.^[5]

$$A_i = 2.7 \left(\frac{R_i}{R_o} \right)^{0.353}, \quad B_i = 3.6 \left(\frac{R_i}{R_o} \right)^{-0.439}$$

새로운 액막분리 모델의 계산 절차는 다음과 같다.

1. 최대 속도 위치를 가정한다. (R_m)
2. 외벽 액막두께를 가정한다. (Y_{fo})
3. 외벽 액막의 액상분율을 계산한다.

$$\alpha_{fo} = \frac{R_o^2 - (R_o - Y_{fo})^2}{R_o^2 - R_i^2}$$

4. 내벽 액막두께를 가정한다. (Y_{fi})
5. 내벽의 액막과 기상과의 계면전단응력에 대한 외벽의 계면전단응력의 비를 다음과 같이 계산한다.

$$\frac{\tau_{i_o}}{\tau_{i_i}} = \frac{R_i + Y_{fi}}{R_o - Y_{fo}} \frac{(R_o - Y_{fo})^2 - R_m^2}{R_m^2 - (R_i + Y_{fi})^2}$$

6. 내벽의 액막의 액상분율을 계산한다.

$$\alpha_{fi} = \frac{(R_i + Y_{fi})^2 - R_i^2}{R_o^2 - R_i^2}$$

7. R_m 에서 기상 속도분포가 연속성을 가지는 Y_{fi} 를 결정한다.

$$\sqrt{\frac{\tau_{i_o}}{\tau_{i_i}}} \left[2.5 \ln \left(\frac{R_o - R_m}{Y_{fo}} \right) + 5.5 \right] = A_i \ln \left(\frac{R_m - R_i}{Y_{fi}} \right) + B_i$$

8. 외벽과 내벽의 액상분율의 합이 MARS 코드로부터 얻어진 액상분율과 일치하는 Y_{fo} 를 결정한다.

$$\alpha_{fo} + \alpha_{fi} = \alpha_{f,Code}$$

9. R_m 을 결정하기 위해서 R_m 에서 eddy diffusivity의 연속성을 만족하기까지 단계 1에서 단계 8까지 반복한다.

$$\frac{1}{2.5} (R_o - R_m) \sqrt{\frac{\tau_{i_o}}{\rho}} = \frac{1}{A_i} (R_m - R_i) \sqrt{\frac{\tau_{i_i}}{\rho}}$$

다음 식과 같이 외벽과 내벽의 벽 전단응력의 비가 결정된다. 이때 전단응력에 대한 Blasius 상관식을 사용하여 전단응력비를 속도비로 치환한다.

$$\frac{\tau_{R_o}}{\tau_{R_i}} = \frac{R_i R_o^2 - R_m^2}{R_o R_m^2 - R_i^2}, \quad \frac{\tau_{R_o}}{\tau_{R_i}} = \frac{\alpha_{fo}^{-0.25} u_{fo}^{1.75}}{\alpha_{fi}^{-0.25} u_{fi}^{1.75}}$$

위의 식으로부터 속도비가 결정되고, 속도비로부터 내벽과 외벽으로 흐르는 액막유량의 비가 결정된다.

$$\frac{u_{fo}}{u_{fi}} = \left(\frac{\alpha_{fo}}{\alpha_{fi}} \right)^{1/7} \left(\frac{\tau_{R_o}}{\tau_{R_i}} \right)^{1/1.75}, \quad \frac{G_{fo}}{G_{fi}} = \left(\frac{\alpha_{fo}}{\alpha_{fi}} \right) \left(\frac{u_{fo}}{u_{fi}} \right)$$

3.2.2.2 역학적 액막분리 모델의 검증

개발된 액막분리 모델을 근간으로 하여 검증용 코드를 개발하고 Wurtz 17/26L 실험을 통해 이의 적확성을 검증하였다. Wurtz 17/26L 실험은 단일조건의 환상관 구조에 대한 증기-물의 환상류 실험으로 0.026 m 지름의 외벽과 0.017 m 지름의 봉으로 구성되어 있으며 압력 30 - 90 bar, 건도 20 - 60 %의 조건에서 실험이 수행되었다. 검증용 코드를 통한 모델 검증 결과는 그림 6에서 보이는 것과 같이 외벽을 따라 흐르는 액막유량은 실험값에 비해 다소 낮게 예측되고 있으며 내벽을 따라 흐르는 액막유량은 다소 높게 예측되는 것으로 나타나고 있으나 평균오차 0.0801, RMS 오차 0.0602로 만족스러운 결과라 할 수 있다.^[6]

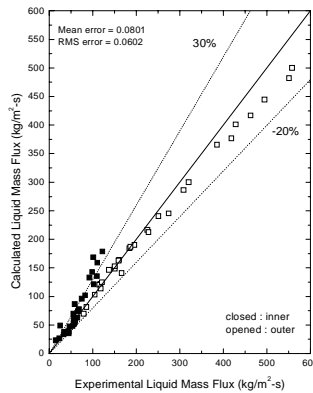


그림 6. 역학적 액막분리 모델 검증

3.2.2.3 역학적 액막분리 모델의 MARS 코드 적용

개발된 액막분리 모델을 MARS 코드에 적용하는 방법은 크게 직접 삽입하는 방법과 표로 삽입하는 방법이 있다. 직접 삽입법은 정확한 결과를 얻을 수 있으나 해를 얻기 위해 여러 번의 iteration 수행으로 계산시간 증가를 초래하게 되므로 본 연구에서는 표를 구성하여 적용하는 방법을 사용하였다. 검증용 코드를 사용하여 외벽과 내벽의 반지름비와 액상분율을 변수로 하는 액막분리 표를 생산하였다. 액막분리 표의 적용범위는 표 1과 같

다.

Parameter	Range
R/R_o	0.1 - 0.8
Continuous liquid fraction	0.0001 - 0.3

표 1. 액막분리 표의 적용 범위

개발된 액막분리 모델을 MARS 코드에 적용하는 절차는 다음과 같다.

1. 유동양식이 환상류에 도달하면 모델의 적용이 시작된다.
2. MARS 코드에서 계산된 총 액상유량에 증발량을 더한다.
3. 액막분리 표를 사용하여 외벽과 내벽을 따라 흐르는 액막유량을 분리한다.
4. 증발에 관여하는 가열되는 내벽의 액막유량으로부터 증발량을 제거한다.
5. 다음 식과 같이 내벽으로 흐르는 액막의 두께가 임계두께보다 작으면 열전달양식을 post-CHF로 전환한다.

$$\delta_{fi} = 0.5 \left[\sqrt{\frac{4w_{fi}}{\pi \rho_f u_{fi}}} + D_{rod}^2 - D_{rod} \right] < \delta_{critical}$$

3.2.3 임계두께 상관식 개발을 위한 실험자료 fitting

임계두께에 미치는 영향을 고려하기 위해서 7개의 인자(적용되는 열유속, 증발잠열, 가열되는 액상유량, 각 상의 비체적 차, 표면장력 그리고 각 상의 점도)를 선택했다. Buckingham Pi 이론을 사용하여 다음과 같은 주요 무차원 변수를 추출하였다.

$$f_1 \left(\frac{\delta_{critical} \sigma}{\nu_{fg} \mu_l^2} \right) = f_2 \left(\frac{q''}{h_{fg} G_{f,h}}, \frac{\mu_g}{\mu_l} \right)$$

f_1 과 f_2 의 함수는 그림 7과 같이 실험값과의 fitting으로 결정되어진다. 그림에서 실험값은 몇 가지 정상상태 균일 가열 조건의 원형관 및 환상관 임계열유속 실험과 MARS 코드에서 계산되는 임계열유속값이 일치할 때의 설정된 임계두께를 의미한다. 이는 실험을 통해 순간적으로 건조되는 임계두께 측정이 불가능하므로 임계열유속 실험자료를 간접적으로 이용하였다.

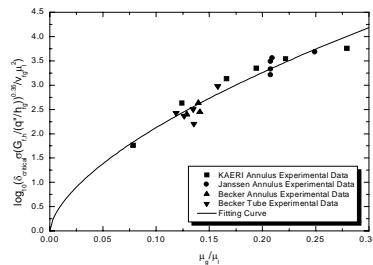


그림 7. 임계두께 상관식 개발을 위한 실험자료 fitting

결론적으로 다음과 같은 액막건조 임계열유속 임계두께 상관식을 얻을 수 있다. 물리적으로 증발열, 각 상의 비체적 차와 기상 점도는 순간적 액막건조에 긍정적인 영향을 미치는 인자이며 표면장력과 액상 점도는 부정적인 영향을 미치는 인자이다. 본 상관식은 이와 같은 물리적 현상을 잘 대변하고 있음을 알 수 있다.

$$\delta_{critical} = \left(\frac{q''}{h_{fg} G_{f,h}} \right)^{0.35} \frac{v_{fg} \mu_l^2}{\sigma} \times 10^{8.8 \left(\frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{0.617}}$$

환상류 액막건조 현상은 항상 포화상태에서 발생하므로 본 상관식의 인자 중 열유속, 가열면을 따라 흐르는 액상유량을 제외한 모든 인자는 압력만의 함수이다. 그러므로 임계두께 상관식은 압력, 열유속, 가열면을 따라 흐르는 액상유량의 함수가 되며 그림 8과 같이 주어진 액상유량에 대해 압력과 열유속에 따라 일정한 경향을 가짐을 알 수 있다. 그림에서 보여지는 것과 같이 0.1 MPa 근처에서 최저값을 가지며 압력에 따라 증가하는 경향을 보이고 열유속에 대해서도 증가하는 경향을 보인다. 이때 임계두께는 10^{-2} mm 정도로 매우 얇은 두께에서 순간적 액막건조가 일어남을 알 수 있다.

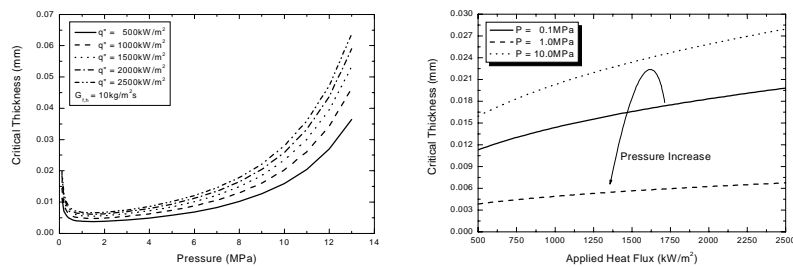


그림 8. 압력과 열유속에 따른 임계두께의 변화

4. 개선된 MARS 코드 액막건조 모델의 검증

본 연구에서 개발된 임계두께 상관식을 사용하여 개선된 액막건조 모델을 검증하기 위하여 몇 가지의 원형관 및 환상관 임계열유속 실험을 사용하였다. 가열면이 존재하는 영역은 균일 가열, 비균일 가열 조건에 대해 10 - 20개의 노드로 비균일하게 나뉘었으며 입구와 출구 부분은 경계 volume과 junction으로 모델링하였다.

임계열유속 계산을 위해서 5초 동안 주어진 질량유속까지 증가시키고 이로부터 5초 후에 10초 간 유동양식이 환상류에 도달할 때까지 가열한다. 정상상태에 도달할 때까지 열유속을 유지하고 정상상태 후에 서서히 열유속을 증가시킨다. 임계열유속에 도달하면 가열면의 온도가 순간적으로 증가하게 되고 이때의 표면열유속을 임계열유속으로 정의한다.

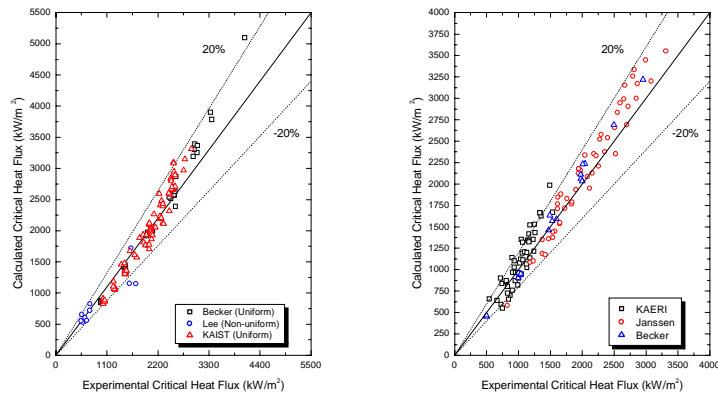
4.1 정상상태 검증

정상상태 임계열유속 검증을 위해서 몇 가지 원형관 및 환상관 실험을 선택하였다. 이들 실험의 실험조건은 표 2에 설명되어 있다. 비균일 가열 조건을 포함한 검증 결과는 그림 9와 같으며 이들 결과들에 대한 평가 오차는 표 3과 같다. 전체적으로 평균 오차가 0.00872, RMS 오차가 0.1212, 표준편차가 0.1199로 평가되었다. 이와 같은 오차는 받아들일 만한 오차범위로 판단되며 본 연구에서 개발된 임계두께 상관식이 실제 원자력 발전소와 같은 비균일 가열 조건에 대해서도 적용 가능함을 알 수 있다.^{[7][8][9][10][11]}

	<i>D</i> (mm)	<i>P</i> (MPa)	<i>G</i> (kg/m ² s)
<i>KAIST(T/U)</i>	17.5 - 37.5	1.961 - 6.895	231.0 - 1926.0
<i>Becker(T/U)</i>	13.06, 12.98	0.2 - 10	200 - 1200
<i>Lee(T/N)</i>	9.47	7	2000 - 4000
<i>KAERI(A/U/N)</i>	19.4/9.54	0.5 - 16	250 - 650
<i>Janssen(A/U)</i>	22.0/13.7	4 - 7	850 - 2000
<i>Becker(A/U)</i>	17.42/9.92	0.2 - 10	80 - 650

T(Tube), A(Annulus), U(Uniform heating), N(Non-uniform)

표 2. 정상상태 검증에 사용된 실험조건



원형관

환상관

그림 9. 정상상태 검증 결과

	<i>Mean Error</i>	<i>RMS Error</i>	<i>Standard Deviation</i>
<i>KAERI</i>	0.05384	0.1692	0.1618
<i>Janssen</i>	0.02689	0.1036	0.1010
<i>Becker(Annulus)</i>	0.00914	0.0728	0.0744
<i>Becker(Tube)</i>	-0.01154	0.0962	0.0968
<i>Lee</i>	-0.05868	0.1569	0.1526
<i>KAIST Databank</i>	-0.01669	0.1021	0.1014
Total	0.00872	0.1212	0.1199

표 3. 정상상태 검증 결과의 오차 통계

4.2 과도상태 검증

과도상태에 대한 검증의 KAERI에서 수행된 유량과도상태에 대한 실험을 사용하였다. 일정한 열유속에 대해서 그림 10과 같이 유량을 감소시키는 실험이다. 그림 11에서 보이는 것과 같이 정상상태보다는 좀 더 큰 오차를 보이나 18.7 %의 RMS 오차 범위 내에서 균일한 분포를 가짐을 알 수 있다. 이는 개발된 임계두께 상관식이 유량감소 과도상태에도 적용 가능함을 의미한다.

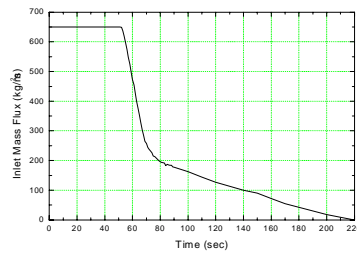


그림 10. 유량 과도상태 시 유량감소 곡선

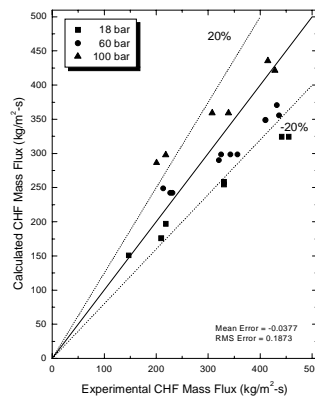


그림 11. 유량 과도상태 검증 결과

4.3 임계두께 상관식의 적용 범위

개발된 임계두께 상관식의 적용범위는 검증결과로부터 설정되었다. 본 연구에서 개발된 임계두께 상관식은 국부적 조건에 의해 결정되므로 적용범위의 인자 또한 압력, 유량, 국부 건도의 국부적 조건으로 결정하였다. 다음의 그림들에서 보여지듯이 표 4의 적용범위 내에서 평균 RMS 오차 0.12로 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

Parameters	Range
Pressure	0.5 - 12.0 MPa
Mass Flux	100.0 - 2000.0 kg/m ² s
Local Quality	0.1 - 0.9

표 4. 임계두께 상관식의 적용범위

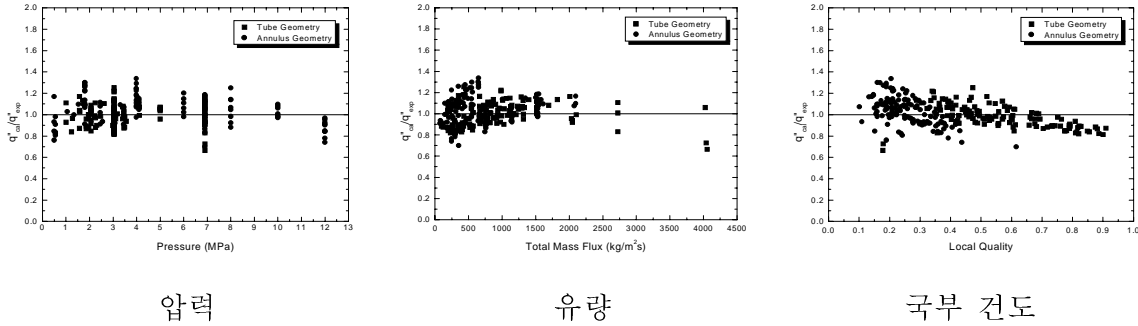


그림 12. 각 인자에 대한 q''_{cal}/q''_{exp}

5. 결론

본 연구에서 액막건조 임계두께 상관식을 개발하고 MARS 코드에 적용하므로 MARS 코드 액막건조 모델의 예측 능력을 개선하였다. 임계두께 상관식을 개발하기 위해서 MARS 코드와 원형관 및 환상관 구조에 대한 임계열유속 실험자료를 사용하였으며 환상관 자료의 사용을 위해서 환상관 구조에서 나타나는 액막분리 현상을 모사하기 위해서 역학적 액막분리 모델을 개발하여 MARS 코드에 적용하였다.

정상상태 균일 가열 조건 뿐 아니라 비균일 가열 조건 및 유량 감소 과도상태에 대한 실험자료에 대한 검증도 실시하여 적용 가능성도 확인하였다.

참고문헌

1. Chang, S. H. and Baek, W. P.(1997), CHF : Fundamental and Application, Chung Moon Gak
2. Lee, W. J., et al.(1999), Improved Features of MARS 1.4 and Verification, KEARI/TR-1386-99
3. Miloshenko, V. I., et al.(1989), Burnout and distribution of liquid in evaporative channels of various lengths, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 15[3], pp.393-401
4. Chun, J. H., et al.(1999), Assessment of MARS 1.4 Dryout Model Using

- KAERI Annulus CHF Test, *Proceeding of KSME Conference*, pp.607 -613
5. Barrow, H., et al.(1965), The Similarity Hypothesis Applied to Turbulent Flow in an Annulus, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.8, pp.1499-1505
 6. Wurtz, J., et al.(1978), An Experimental and Theoretical Investigation of Annular Steam-Water Flow in Tubes and Annuli at 30 to 90 bar, Riso report, No.372
 7. Becker, K. M., et al.(1965), Burnout Data for Flow of Boiling Water in Vertical Round Ducts, Annuli and Rod Clusters, *AE-177*
 8. Chang, S. H. and Baek, W. P.(1996), The KAIST CHF Data Bank (Rev. 3), *KAIST-NUSCOL-9601*
 9. Lee, D. H.(1965), An Experimental Investigation of Forced Convection Burnout in High Pressure Water, Part 3. Long Tubes with Uniform and Non-uniform Axial Heating, U.K. *AEW-R-355*, AEEW, England
 10. Chun, S. Y., et al.(1998), Effect of Pressure on Critical Heat Flux in Vertical Annulus Flow Channel under Low Flow Condition, *Proceeding of NTHAS98*, pp.342-347
 11. Janssen, E., et al.(1963), Burnout Conditions for Single Rod in Annular Geometry, Water at 600 to 1400 Psia, *GEAP-3899*