

열수력안전해석코드 계면 및 벽면마찰 모델 비교

Comparison for the Interfacial and Wall Friction Models in Thermal  
Hydraulic System Analysis Codes

*KAERI*

2007. 7. 18

한국원자력연구원

## 제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

이 보고서를 2007년도 "원전 안전해석코드개발(I)" 과제의 기술보고서로 제출합니다.

제목: 열수력안전해석코드 계면 및 벽면마찰 모델 비교  
(Comparison for the Interfacial and Wall Friction Models in Thermal-Hydraulic System Analysis Codes)

2007년 7월 12일

주저자: 황문규 (열수력안전연구센터)  
공저자: 박지원 (열수력안전연구센터)  
정범동 (열수력안전연구센터)  
김수형 (열수력안전연구센터)  
김시달 (열수력안전연구센터)

# 열수력안전해석코드 계면 및 벽면마찰 모델 비교

## 요 약

현재 열수력해석코드에서 사용하고 있는 평균방정식을 해를 구하기 위해서는 각 지배방정식에서 필요로 하고 있는 보조방정식을 제공하여야 한다. 이 보조방정식을 위한 모델 중 계면 및 벽면마찰은 운동량 보존방정식의 소스항으로 존재하며 압력강하 예측뿐 아니라 코드의 안전성에도 영향을 미치는 중요한 항이 된다. 본 보고서에서는 현재 그 사용빈도가 비교적 높은 열수력해석코드인 RELAP5-3D, MARS-3D, TRAC-M, 그리고 CATHARE코드를 대상으로 계면 및 벽면 마찰에 대하여 정리한다.



# **Comparison for the Interfacial and Wall Friction Models in Thermal Hydraulic System Analysis Codes**

## **Summary**

The average equations employed in the current thermal hydraulic analysis codes need to be closed with the appropriate models and correlations to specify the interphase phenomena along with fluid/structure interactions. This includes both thermal and mechanical interactions. Among the closure laws, an interfacial and wall frictions, which are included in the momentum equations, not only affect pressure drops along the fluid flow, but also have great effects for the numerical stability of the codes. In this study, the interfacial and wall frictions are reviewed for the commonly applied thermal-hydraulic system analysis codes, i.e. RELAP5-3D, MARS-3D, TRAC-M, and CATHARE.

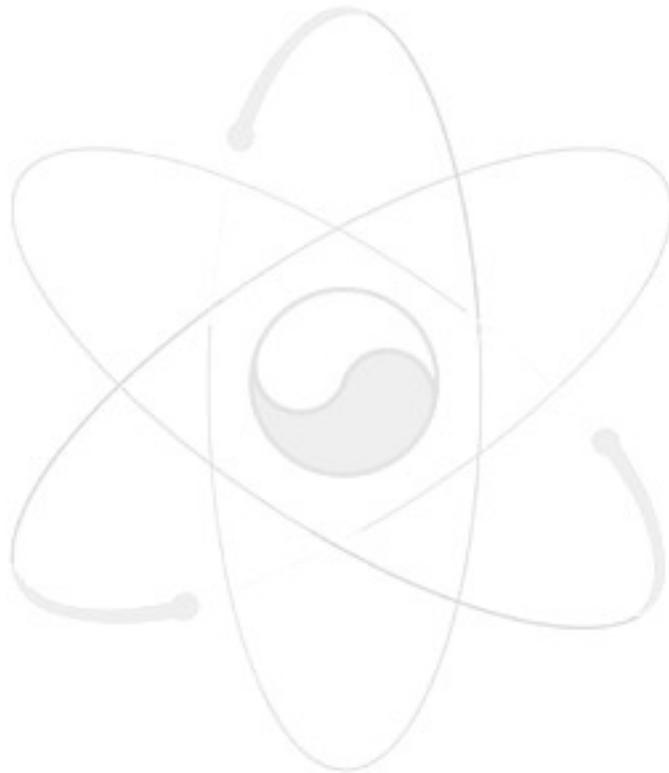


# 목 차

요약 .....	ii
Summary .....	iii
목 차 .....	iv
표목차 .....	v
그림목차 .....	vi
1.0 서 론 .....	1
2.0 계면 및 벽면 마찰 기존 상관식 .....	2
2.1 RELAP5-3D 코드 .....	2
2.1.1 RELAP5-3D 계면마찰 상관식 .....	2
2.1.2 RELAP5-3D 벽면마찰 상관식 .....	12
2.2 MARS-3D (COBRA-TF) 코드 .....	13
2.2.1 MARS-3D 계면마찰모델 .....	18
2.2.2. MARS-3D 벽면마찰모델 .....	23
2.3 TRAC-M 코드 .....	25
2.3.1 TRAC-M코드 계면마찰 상관식 .....	25
2.3.2 TRAC-M코드 벽면마찰 상관식 .....	32
2.4 CATHARE 코드 .....	38
2.4.1 CATHARE 코드 계면마찰 상관식 .....	38
2.4.2 CATHARE 코드 벽면마찰 상관식 .....	43
2.4.3 Form Losses .....	44

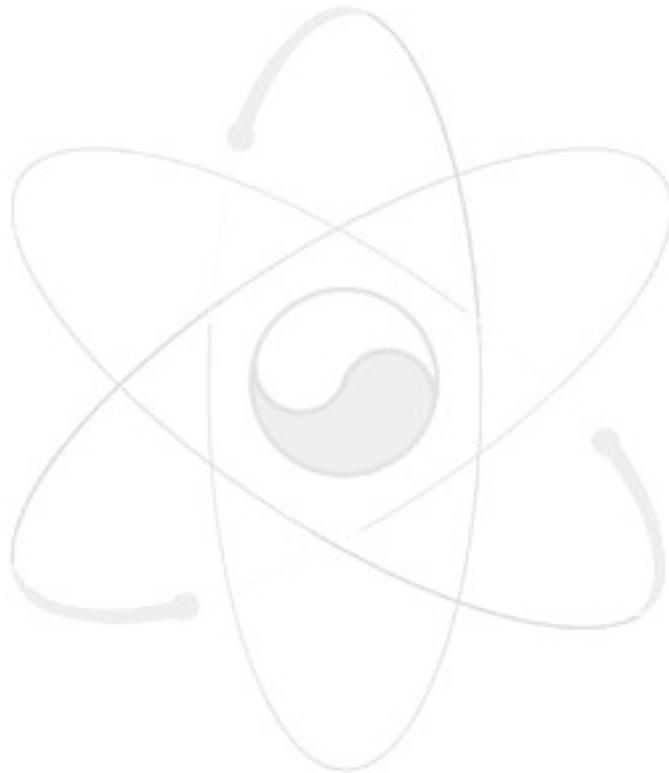
# 표 목 차

표 1. RELAP5-3D에 사용된 drift-flux상관식.....8



## 그림 목 차

그림 1. Slug Flow ..... 7



## 1. 서론

이상유동 즉 물의 경우 액상의 물과 기상의 증기가 혼합 형태로 유동 시 그 거동을 정확히 예측하는 것은 지금 까지도 관련 기술의 한계를 완전히 극복하지 못하고 있다. 특히 단상유동과 달리 이상유동의 경우 각 상의 거동 및 열적 혹은 기계적 상호 작용은 그 경계면의 불확실성과 시간에 따른 동적 변화로 인해 분석을 더욱 더 어렵게 만들고 있다.

지금까지 제시되고 또 그 목적에 따라서는 나름대로의 의미를 제시한 방법으로는 homogeneous model(균질유동 모델), drift flux model, 분리유동(separated flow model) 등이 있으며 이 중 separated flow model은 각 상(phase)의 거동을 관련 방정식으로 각각 정의하고 또한 상간(interphase)의 현상도 별도의 모델로 기술한다. 또 여기에는 관련 방정식 자체에서는 구할 수 없는 유동형식(flow morphology)에 대한 기술로 유동양식(flow regime map)을 정의하거나 혹은 별도의 수송방정식(IAT)을 추가로 다루고 있다.

현재 열수력해석코드에서 사용하고 있는 평균방정식을 해를 구하기 위해서는 각 지배방정식에서 필요로 하고 있는 보조방정식을 제공하여야 한다. 이 보조방정식을 위한 모델 중 계면 및 벽면마찰은 운동량 보존방정식의 소스항으로 존재하며 압력강하 예측뿐 아니라 코드의 안전성에도 영향을 미치는 중요한 항이 된다. 본 보고서에서는 현재 그 사용빈도가 비교적 높은 열수력해석코드인 RELAP5-3D, MARS-3D, TRAC-M, 그리고 CATHARE코드를 대상으로 계면 및 벽면 마찰에 대하여 정리한다.

## 2.0 계면 및 벽면 마찰 기존상관식

### 2.1.0 기존 코드 상관식 조사

#### 2.1.1 RELAP5-3D 계면마찰 상관식

RELAP5-3D 코드의 운동량지배 방정식에 나타나는 계면력은 다음의 상관관계가 있다.

$$FI = \frac{FIF}{\alpha_g \rho_g} = \frac{FIG}{\alpha_f \rho_f} = \frac{\frac{F_i}{\alpha_g \rho_g} + \frac{F_i}{\alpha_f \rho_f}}{\rho_m v_R}$$

위에서 FI는 총체적 계면력 항이며  $F_i$ 는 계면력 (interfacial force)이다. 계면력은 다음의 두 가지 모델을 사용하여 계산된다. 그 선택은 유동영역에 의하여 결정되는데 이를 정리하면 다음과 같다:

가. Bubbly flow, Slug flow: Drift flux model

$$F_i = C_i |v_R| v_R$$
$$C_i = \frac{\alpha_g \alpha_f^3 (\rho_f - \rho_g) g \sin \phi_j}{|v_{gj}| v_{gj}}$$
$$v_R = C_1 v_g - C_0 v_f$$

나. 그 외의 유동영역: Drag coefficient model

$$F_i = C_i |v_R| v_R$$
$$C_i = \frac{1}{8} \rho_c S_r a_{gf} C_D$$
$$v_R = v_g - v_f$$

##### 2.1.1.1 Bubbly Flow

Bubbly 및 mist 유동영역은 분산유동 (dispersed flow)으로 취급된다. 분산유동조건

에서는 계면면적밀도는 Wallis (1969) 및 Shapiro & Erickson (1957)의 모델이 사용된다.

$$a_{gf} = \frac{3.6\bar{\alpha}}{d_0}$$

$$d_0 = 1/2d_{\max}$$

$$We = \frac{d_{\max}\rho_c(v_g - v_f)^2}{\sigma}$$

$$We = 10.0 \quad \text{for bubbles}$$

$$= 3.0 \quad \text{for CHF droplets}$$

$$= 12.0 \quad \text{for post-CHF droplets}$$

분산영역의 non-vertical 유동에 대하여는 Ishii & Chawla (1979)의 상관식이 사용되는데 이는 다음과 같다.

$$C_D = \frac{24(1 + 0.1\text{Re}_p^{0.75})}{\text{Re}_p}$$

$$\text{Re}_p = \frac{\rho_c |v_g - v_f| d_0}{\mu_m}$$

$$\rho_c = \rho_f, \quad \mu_m = \frac{\mu_f}{\alpha_f} \quad \text{for bubbles}$$

$$= \rho_g, \quad \mu_m = \frac{\mu_g}{\alpha_g^{2.5}} \quad \text{for pre-CHF droplets}$$

$$= \rho_g, \quad \mu_m = \mu_g \quad \text{for post-CHF droplets}$$

수직관의 bubbly 유동영역에 대하여 Putney (1988, 1988, 1988, 1989, 1991)등의 drift-flux 모델이 사용된다. RELAP5-3D에서 각 유동의 물리 및 기하학적 조건에 대하여 적용여부는 표1에 정리되어 있다. Chexal & Lellouche (1986, 1991, 1997)의 EPRI 상관식도 내장되어 있는데 global slip 계수는 다음과 같이 주어진다:

$$C_0 = \frac{L}{K_0 + (1 - K_0)\alpha_g^r}$$

$$\alpha_g = \max(\alpha_{g,j}^*, 10^{-2})$$

$$\alpha_f = \min(1 - \alpha_g, 10^{-2})$$

$$L_n = 1 - \exp(-\alpha_g C_p) \quad \text{if } \alpha_g C_p < 170$$

$$= 1 \quad \text{otherwise}$$

$$L_d = 1 - \exp(-C_p) \quad \text{if } C_p < 170$$

$$= 1 \quad \text{otherwise}$$

$$L = \frac{L_n}{L_d}$$

$$K_0 = B_1 + (1 - B_1) \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{1/4}$$

$$C_p = \left| \frac{4P_{crit}^2}{P(P_{crit} - P)} \right|$$

$$B_1 = \min(0.8, A_1)$$

$$A_1 = \frac{1}{1 + \exp\left\{ \max[-85, \min(85, -\frac{Re}{60,000})] \right\}}$$

$$Re = Re_g \quad \text{if } Re_g = Re_f \quad \text{or } Re_g < 0$$

$$= Re_f \quad \text{otherwise}$$

$$Re_f = \frac{\rho_f j_f D_h}{\mu_f}$$

$$Re_g = \frac{\rho_g j_g D_h}{\mu_g}$$

$$j_f = \alpha_f v_f$$

$$j_g = \alpha_g v_g$$

$$r = \frac{1 + 1.57(\rho_g / \rho_f)}{1 - B_1}$$

$j_k = \text{positive when upward flow}$

Chexal-Lellouchel 상관식에 사용되는 기상의 local slip 계수는 다음과 같다:

$$v_{gj} = 1.41 \left[ \frac{(\rho_f - \rho_g) \sigma g}{\rho_f^2} \right]^{1/4} C_1 C_2 C_3 C_4$$

$$C_1 = (1 - \alpha_g)^{B_1} \text{ if } \text{Re}_g \geq 0 \\ = (1 - \alpha_g)^{0.5} \text{ if } \text{Re}_g < 0$$

$$C_2 = 1 \text{ if } \frac{\rho_f}{\rho_g} \geq 18 \text{ and } C_5 \geq 1 \\ = 1 \text{ if } \frac{\rho_f}{\rho_g} \geq 18 \text{ and } C_5 < 1 \text{ and } C_6 < 85 \\ = \frac{1}{1 - \exp(-C_0)} \text{ if } \frac{\rho_f}{\rho_g} \geq 18 \text{ and } C_5 < 1 \text{ and } C_6 < 85 \\ = 0.4757 \left\{ \ln \left[ \max \left( 1.00001, \frac{\rho_f}{\rho_g} \right) \right] \right\}^{0.7} \text{ if } \frac{\rho_f}{\rho_g} < 18$$

$$C_5 = \left[ 150 \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right) \right]^{1/2}$$

$$C_6 = \frac{C_5}{1 - C_5}$$

$$C_4 = 1 \text{ if } C_7 \geq 1$$

$$= \frac{1}{1 - \exp(-C_8)} \text{ if } C_7 < 1$$

$$D_2 = 0.09144m \text{ (normalizing diameter)}$$

$$C_8 = \frac{C_7}{1 - C_7}$$

$C_3$  계수는 기상의 유동방향에 따라 달라지는데, 상승류의 경우에는 ( $j_g$  와  $j_f$  모두 양수)

$$C_3 = \max \left[ 0.50, 2 \exp \left( - \frac{|\text{Re}_f|}{300,000} \right) \right]$$

이며, 하강류의 경우 ( $j_g$  와  $j_f$  모두 음수) 및 countercurrent flow ( $j_g$  는 양수,  $j_f$  은 음수) 경우에는

$$C_3 = 2 \left( \frac{C_{10}}{2} \right)^{B_2}$$

$$B_2 = \frac{1}{\left( 1 + 0.05 \left| \frac{\text{Re}_f}{350,000} \right| \right)^{0.4}}$$

$$C_{10} = 2 \exp \left( \left( \frac{|\text{Re}_f|}{300,000} \right)^{0.4} \right) - 1.7 |\text{Re}_f|^{0.035} \exp \left[ \left( \frac{-|\text{Re}_f|}{60,000} \right) \left( \frac{D_1}{D} \right)^2 \right] + \left( \frac{D_1}{D} \right)^{0.1} |\text{Re}_f|^{0.001}$$

$$D_1 = 0.0381m \text{ (normalizing diameter)}$$

와 같이 주어진다.  $C_1, C_2 \dots, C_{10}$  는 Chexal-Lellouche 상관식에 의하여 결정된다.

Griffith 상관식은 수직 사각세관 (narrow rectangular channels)에 적용을 목적으로 만들어졌다. 분포계수는 Ishii (1977)에 의하여 개발된

$$C_0 = 1.35 - 0.35 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_f}}$$

이며, drift velocity는 Griffith (1964)에 의하여 다음과 같이 주어진다.

$$v_{gj} = (0.23 + 0.13 \frac{W}{S}) \left[ \frac{(\rho_f - \rho_g)gS}{\rho_f} \right]^{1/2}$$

위에서 W는 유동방향과 수직인 채널의 폭 (pitch, gap, short dimension)이며 S는 채널의 길이 (span, long dimension) 이다.

### 2.1.1.2 Slug Flow

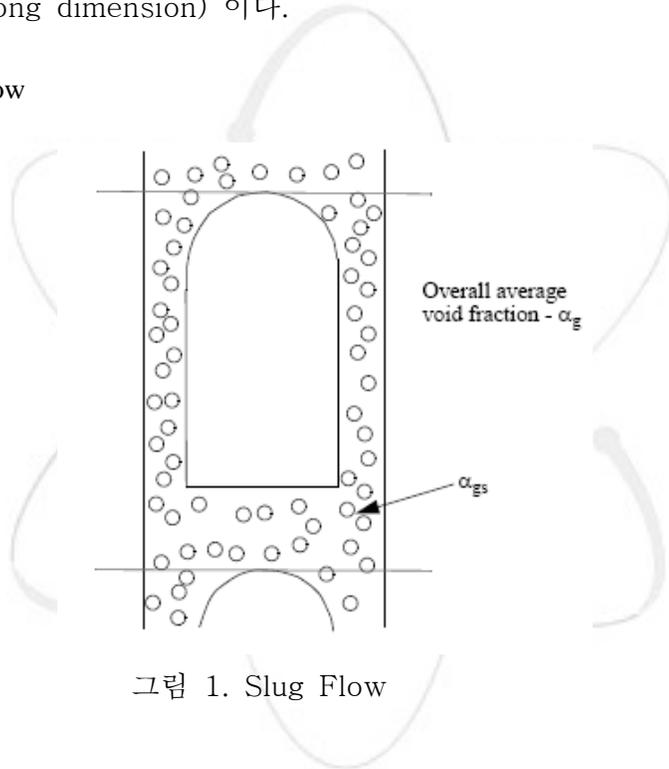


그림 1. Slug Flow

수직관의 slug flow 에 대하여 drift-flux 모델이, non-vertical slug flow 에 대하여서는 drag coefficient 모델이 사용된다. Slug flow의 drag model은 액체 slug 로 분리된 연속된 Taylor 기포를 모델한 것으로 그 계면면적밀도는 다음과 같다.

$$a_{gf} = \frac{\alpha_b}{L} + \frac{3.6\alpha_{gs}}{d_0} (1 - \alpha_b)$$

$$\alpha_{gs} = \alpha_{BS} \exp \left[ -8 \frac{\alpha_g - \alpha_{BS}}{\alpha_{SA} - \alpha_{BS}} \right]$$

Ishii & Chawla (1979)의 Taylor bubble에 대한 drag 계수는 다음과 같다.

$$C_D = 10.9 \frac{D'}{D} (1 - \alpha_b)^3$$

위에서  $D'$ 은 Taylor bubble의 직경이며,  $\alpha_b = (\alpha_g - \alpha_{gs}) / (1 - \alpha_{gs})$  이다.

Non-vertical slug 유동 내의 작은 기포에 대한 drag 계수는 다음과 같이 주어진다.

$$C_D = \frac{24(1 + 0.1\text{Re}_p^{0.75})}{\text{Re}_p}$$

표 1. RELAP5-3D에 사용된 drift-flux 상관식

Flow rates	Rod bundles	Narrow rectangular channels	Small pipes $D \leq 0.018\text{m}$	Intermediate pipes $0.018\text{m} < D \leq 0.08\text{m}$	Large pipes $0.08\text{m} < D$
High upflow rates $G \geq 100$ $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$	EPRI (2) (eprij)	Griffith (2) (griftj)	EPRI (3) (eprij)	EPRI (9) (eprij)	Churn-turbulent bubbly flow (14) transition (15) Kataoka-Ishii (16) (katokj)
Medium upflow rates $50 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} < G < 100 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$			Transition <sup>a</sup> (5)	Transition <sup>a</sup> (13)	
Low upflow, downflow, and countercurrent flow rates $- 50 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \leq G \leq 50 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$			Zuber-Findlay slug flow (4) (zfslgj)	Churn-turbulent bubbly flow (10) transition (11) Kataoka-Ishii (12) (katokj)	
Medium downflow rates $- 100 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} < G < - 50 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$			Transition <sup>a</sup> (5)	Transition <sup>a</sup> (13)	
High downflow rates $G \leq -100 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$			EPRI (3) (eprij)	EPRI (9) (eprij)	

a. 두개의 유량을 interpolation하여 사용한다.

### 2.1.1.3 Annular Flow

간단한 기하학적인 모델을 이용하면 annular 유동에 대한 계면면적밀도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha_{gf} = \left(\frac{4C_{ann}}{D}\right)(1 - \alpha_{ff})^{1/2} + \left(\frac{3.6\alpha_{fd}}{d_0}\right)(1 - \alpha_{ff})$$

위에서  $C_{ann} = (30\alpha_{ff})^{1/8}$  이며 이는 액상의 표면에 존재하는 파동에 의한 표면거칠기 (roughness)를 나타낸다.

벽면에 존재하는 액상의 부피 분율은 다음과 같이 주어진다.

$$\alpha_{ff} = \frac{V_{f, film}}{V_{tot}} = 1 - \frac{V_{core}}{V_{tot}} = 1 - \frac{\alpha_g}{1 - \alpha_{fd}}$$

위에서  $\alpha_{fd} = \frac{\alpha_f - \alpha_{ff}}{1 - \alpha_{ff}}$  이며  $d_0$  는 액적의 평균 직경을 나타낸다.

#### 2.1.1.4 Inverted Annular Flow

기하학적 고려를 하면 계면면적밀도는 다음과 같이 주어진다.

$$\alpha_{gf} = \left(\frac{4C_{ann}}{D}\right)(1 - \alpha_{g,ann})^{1/2} + \left(\frac{3.6\alpha_{gb}}{d_0}\right)(1 - \alpha_{g,ann})$$

$$\alpha_{g,ann} = \frac{V_{g,ann}}{V_{tot}}$$

$$C_{ann} = (30\alpha_{g,ann})^{1/8}$$

이 영역에서 Bharathan & Ishii (1985)가 개발한 계면마찰계수 ( $C_D$ 와 동일함)를 사용한다.

$$f_i = 4[0.005 + A(\delta^*)^B]$$

$$\log_{10} A = -0.56 + \frac{9.07}{D^*}$$

$$B = 1.63 + \frac{4.74}{D^*}$$

$$D^* = D \left[ \frac{g(\rho_f - \rho_g)}{\sigma} \right]^{1/2}$$

$$\delta^* = \delta \left[ \frac{(\rho_f - \rho_g)g}{\sigma} \right]^{1/2}$$

$$\delta = \text{film thickness}$$

#### 2.1.1.5 Inverted Slug Flow

DelJarlais & Ishii (1985)의 모델을 사용한다.

#### 2.1.1.6 Dispersed (Droplet, Mist)

Bubbly 유동영역에서 기술한 바와 같이 pre-CHF mist에 대해서는, We=3.0, mist와 post-CHF mist에 대해서는, We=12.0 을 사용한다.

수직다발의 pre-CHF mist에 대해서는 EPRI drift-flux 모델의 bubbly-slug 상관식의 최고치를 계면마찰계수로 사용하며 pre-CHF mist의 계면마찰 상관식을 사용한다.

#### 2.1.1.7 Horizontally Stratified Flow

계면면적밀도는 기하학적으로 다음과 같이 결정된다.

$$a_{gf} = \frac{4C_{st} \sin \theta}{\pi D}$$

계면마찰계수 ( $C_D$ 와 같음)는 Blasius or Darcy 상관식의 최고값을 사용한다.

즉,

$$f_i = \max \left( \frac{64}{\text{Re}_i}, \frac{0.3164}{\text{Re}_i^{0.25}} \right)$$

위에서 Reynolds 수는 다음과 같이 정의 된다.

$$\text{Re}_i = \frac{\rho_g |v_g - v_f| D_i}{\mu_g}$$

$$D_i = \frac{\alpha_g \pi D}{\theta + \sin \theta}$$

#### 2.1.1.8 Vertically Stratified Flow

수직성층된 노드체적에 대해서는 하부에서 유입되는 액체가 다시 강하 할 수 있도록 계면저항계수를 낮은 값을 부여하여 수직성층 구조의 수위가 유지되게 한다. 이는 junction의 계면저항계수를 결정하는데 필요한 junction 기포율을 상위의 노드체적의 기포율을 사용함에 의하여 가능하게 된다. 이와 유사하게, 수직성층 노드체적의 하위 junction에 대하여 계면저항계수로 낮은 값을 설정한다. 이는 junction 계면저항계수를 결정하는데 필요한 junction 기포율을 하위 노드체적의 기포율을 사용함으로써 가능하게 된다. 이와 같은 모델은 mixture 수위를 결정하기 위하여 개발된 것은 아니다.

## 2.1.2 RELAP5-3D 벽면마찰 상관식

벽면마찰 모델은 유동영역별로 계산된다. 벽면마찰 모델은 이상류 two-phase multiplier 방식을 사용한다. 이에 사용되는 two-phase multiplier는 HTFS (1972)-modified Baroczy 상관식에 의하여 계산되며, 각 상의 벽면마찰력은 Lockhart-Martinelli (1949)의 모델에 의하여 계산된다. 각 마찰력의 요소별 배분에 관해서는 Chicholm (1967)의 가설에 의하여 quasi-static 운동량 균형식을 적용한다.

### 2.1.2.1 The Two-Phase Friction Multiplier Approach

Lockhart-Martinelli model은 총 압력 강하량을 각 상이 각각 독립적으로 흐를 때의 압력 강하량에 일정항 계수를 곱하는 형식으로 되어있다. 즉,

$$\left(\frac{dP}{dx}\right)_{2\phi} = \phi_f^2 \left(\frac{dP}{dx}\right)_f,$$

혹은 기상만이 존재할 때의 상관식으로 다음과 같이 나타낸다.

$$\left(\frac{dP}{dx}\right)_{2\phi} = \phi_g^2 \left(\frac{dP}{dx}\right)_g$$

위에서 각 multiplier는 two-phase Darcy-Weisbach friction multipliers가 사용된다. 위의 정의를 사용하면, Lockhart-Martinelli ratio는 다음과 같이 정의된다.

$$\chi^2 = \frac{\left(\frac{dP}{dx}\right)_f}{\left(\frac{dP}{dx}\right)_g} = \frac{\phi_g^2}{\phi_f^2}$$

HTFS 상관식을 이용하여 two-phase friction multiplier를 계산하게 되는데, 각 상의 multiplier는 다음과 같이 정의된다.

$$\phi_f^2 = 1 + \frac{C}{\chi} + \frac{1}{\chi^2}$$

$$\phi_g^2 = \chi^2 + C\chi + 1$$

$$C = -2f_1(G)T_1(A, G)$$

$$f_1(G) = 28 - 0.3\sqrt{G}$$

$$T_1(A, G) = \exp\left[-\frac{(\log_{10} \Lambda + 2.5)^2}{2.4 - G(10^{-4})}\right]$$

$$\Lambda = \frac{\rho_g}{\rho_f} \left( \frac{\mu_f}{\mu_g} \right)^{0.2}$$

Chisholm의 모델에 의하면 각 상의 운동량 보존식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_f A \left( \frac{dP}{dx} \right)_{2\phi} - \tau_f p_f + S_{FI} = 0$$

$$\alpha_g A \left( \frac{dP}{dx} \right)_{2\phi} - \tau_g p_g + S_{FI} = 0$$

이를 정리하면,

$$\frac{1 + S_R \left( \frac{\alpha_g}{\alpha_f} \right)}{1 - S_R} = \frac{\left( \frac{\tau_f p_f}{\alpha_f} \right)}{\left( \frac{\tau_g p_g}{\alpha_g} \right)} = Z^2$$

$$S_R = \frac{S_{FI}}{\alpha_g A \left( \frac{dP}{dx} \right)_{2\phi}}$$

위의 정의를 사용하여, 각 상의 벽면 마찰력은 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_f p_f = \alpha_f \left( \frac{dP}{dx} \right)_{2\phi} \left( \frac{Z^2}{\alpha_g + \alpha_f Z^2} \right)$$

$$\tau_g p_g = \alpha_g \left( \frac{dP}{dx} \right)_{2\phi} \left( \frac{1}{\alpha_g + \alpha_f Z^2} \right)$$

여기서 Chisholm은 액상의 벽면 마찰력을 액상의 물리적 성질을 이용하여 계산된 Reynold 수를 사용하여 Darcy-Weisbach 마찰 상관식을 이용하여 계산하면 된다고 가정한다.

$$\tau_f = \frac{\lambda(\text{Re}_f) \rho_f v_f^2}{4 \cdot 2}$$

$\lambda(\text{Re}_f) = \text{liquid Darcy friction factor}$

$$\text{Re}_f = \frac{\rho_f v_f D_f}{\mu_f}$$

$$D_f = \frac{4}{p_f}$$

$$A_f = \alpha_f A$$

$$p_f = \alpha_{fw} p$$

기상의 경우에도 마찬가지로 계산하여 기상에 의한 마찰력을 구할 수 있다. 이를 이용하여 미지수  $Z^2$  를 계산하면 다음과 같다.

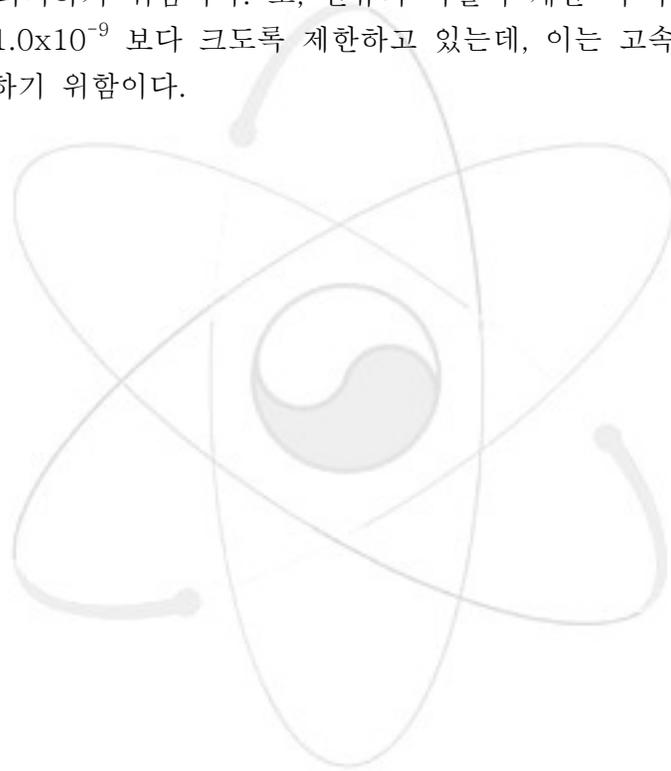
$$Z^2 = \frac{\lambda_f(\text{Re}_f) \rho_f v_f^2 \frac{\alpha_{fw}}{\alpha_f}}{\lambda_g(\text{Re}_g) \rho_g v_g^2 \frac{\alpha_{gw}}{\alpha_g}}$$

이를 이용하여 운동량 방정식에 나타나는 벽면 마찰력 항을 표시하면 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$FWF(\alpha_f \rho_f v_f) A = \tau_f p_f = \alpha_f \left( \frac{dP}{dx} \right)_{2\phi} \left( \frac{Z^2}{\alpha_g + \alpha_f Z^2} \right)$$

$$FWG(\alpha_g \rho_g v_g) A = \tau_g p_g = \alpha_g \left( \frac{dP}{dx} \right)_{2\phi} \left( \frac{1}{\alpha_g + \alpha_f Z^2} \right)$$

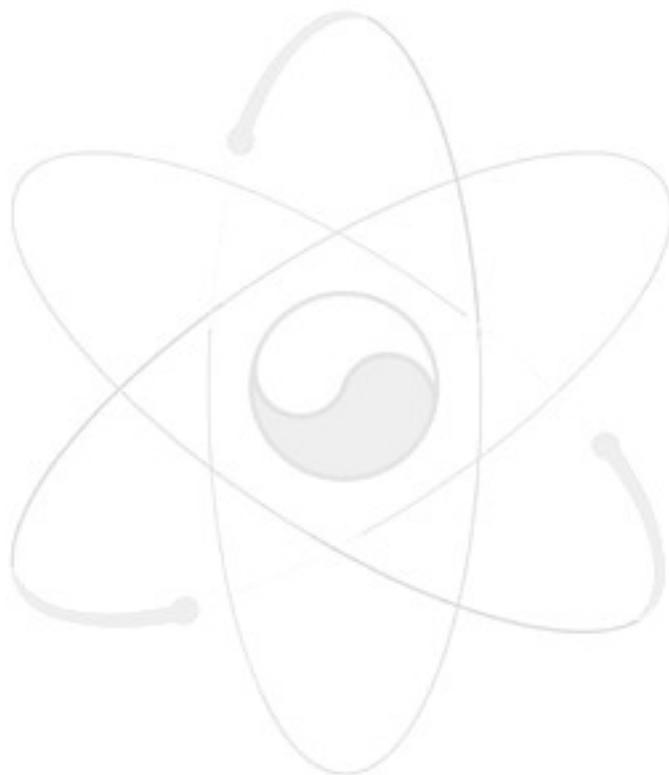
RELAP5-3D 코드의 벽면 마찰계수 모델은 laminar flow의 경우 Reynold 수를 50 이상이 되도록 제한하고 있다. 그 이유는 매우 저 유속의 유동의 경우 0으로 나누어 지는 경우를 회피하기 위함이다. 또, 난류의 마찰력 계산 시 수력직경에 대한 표면 거칠기 비율을  $1.0 \times 10^{-9}$  보다 크도록 제한하고 있는데, 이는 고속유동에서 log에 0 값이 되지 않도록 하기 위함이다.



## 5. 참고문헌

1. G.B. Wallis, One-Dimensional Two-Phase Flow, New York, McGraw-Hill, 1969
2. A.H. Shapiro and A.J. Erickson, Transaction of ASME, 79, 1957, p775.
3. M. Ishii and T.C. Chawla, Local Drag Laws in Dispersed Two-Phase Flow, NUREG/CR-1230, ANL-79-105, Argonne National Laboratory, Dec. 1979
4. J.M. Putney, Proposals for Improving Interphase Drag Modeling for the Bubbly and Slug Regimes in RELAP5, CERL Report RD/L/3306/R88, PWR/HTWG/P(88)622, June 1988.
5. J.M. Putney, Implementation of a New Bubbly-Slug Interphase Drag Model in RELAP5/MOD2, CERL Report RD/L/3369/R88, PWR/HTWG/P(88) 597, Nov. 1988.
6. J.M. Putney, Equations for Calculating Interfacial Drag and Shear from Void Fraction Correlations, CEGB Report RD/L/3429/R88, PWR/HTWG/P(88) 630, Dec. 1988.
7. J.M. Putney, Development of a New Bubbly-Slug Interfacial Friction Model for RELAP5—Final Report, National Power Report ESTD/L/0075/R89, PWR/HTWG(89) 722, Oct. 1989.
8. J.M. Putney, Development of a New Bubbly-Slug Interfacial Friction Model for RELAP5, Nuclear Engineering and Design 131, 1991, pp223-240.
9. . B. Chexal and Lellouche, A Full-Range Drift-Flux Correlation for Vertical Flows (Rev. 1). EPRI NP-3989-SR, Sept. 1986.
10. B. Chexal et al., The Chexal-Lellouche Void Fraction Correlation for Generalized Applications, EPRI, NSAC-139, April 1991
11. B. Chexal et al., Void Fraction Technology for Design and Analysis, EPRI, TR-106326, March 1997.
12. D. Bharathan, G.E. Wallis and H.J. Richter, Air-Water Counter-Current Annular Flow, EPRI NP-1165, 1979.
13. G. DeJarlais and M. Ishii, Inverted Annular Flow Experimental Study, NUREG/CR-4277, ANL-85-31, Arnonne National Laboratory, April 1985.
14. K.T. Claxton, J.G. Collier and J.A. Ward, H.T.F.S. Correlation for Two-Phase Pressure Drop and Void Fraction in Tubes, HTFS Proprietary Report HTFS-DR-28, AERE-R7162, Nov. 1972
15. D. Chisholm, A Theoretical Basis for the Lockhart-Martinelli Correlation for Two-Phase Flow, Int. J. of Heat and Mass Transfer, 10, 1967.

16. R.W. Lockhart and R. C. Martinelli, Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two-Component Flow in Pipes, Chem. Eng. Progress, 45, 1, 1949.



## 2.2 MARS-3D 코드

### 2.2.1 MARS-3D 계면마찰모델

MARS-3D 에서는 다차원 유동계산을 위해 축 방향과 횡 방향의 운동량 보존식을 각각 사용하고 있다. 축 방향으로의 운동량 방정식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v u_v A) + \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_v \rho_v u_v A) + \sum_k (\alpha_v \rho_v u_v v_v S)_k \\ & = -\alpha_v A \frac{\partial P}{\partial x} - \alpha_v \rho_v A g + \tau_{vwx}''' A - \tau_{lvx}''' A - \tau_{lve}''' A + (\Gamma''' U)_x A \end{aligned}$$

위의 방정식에 필요한 계면드래그와 벽면 마찰은 단위볼륨 당 미치는 힘으로 압력의 gradient와 같은 단위를 갖는다. 계면 마찰모델계수  $K_I$  는 상대속도를 곱하면 단위 볼륨 당 계면 드래그가 되게 정의한다. 즉

$$\begin{aligned} \tau_{lv}''' &= K_{lv} (u_v - u_l) \\ \tau_{le}''' &= K_{le} (u_v - u_e) \end{aligned}$$

여기서 마찰계수  $K$ 는 유동양상에 따라 상관식이 틀리며 아래와 같이 표현할 수 있다.

For Bubble

$$K_{lv} = \frac{A_v}{V_v} \frac{V_v}{V} C_{D_v} \frac{1}{2} \rho_l |u_v - u_l| = \frac{\pi r_b^2}{\frac{4}{3} \pi r_b^3} \alpha_v C_{D_b} \frac{1}{2} \rho_l |u_v - u_l| = \frac{3}{8} \alpha_v C_{D_b} \rho_l |u_v - u_l|$$

For Droplet

$$K_{lv} = \frac{A_d}{V_d} \frac{V_d}{V} C_{D_d} \frac{1}{2} \rho_l |u_v - u_d| = \frac{\pi r_d^2}{\frac{4}{3} \pi r_d^3} \alpha_d C_{D_d} \frac{1}{2} \rho_l |u_v - u_d| = \frac{3}{8} \alpha_d C_{D_d} \rho_l |u_v - u_d|$$

For Film

$$K_{Ivl} = \frac{A_v}{V_v} \frac{V_v}{V} f_I \frac{1}{2} \rho_l |u_v - u_l| = \frac{\pi(\sqrt{\alpha_v} D_H L)}{\frac{\pi}{4}(\sqrt{\alpha_v} D_H)^2 L} \alpha_v f_I \frac{1}{2} \rho_l |u_v - u_l| = 2 \frac{f_I}{D_H} \sqrt{\alpha_v} \rho_l |u_v - u_l|$$

For Inverted Annular

$$K_{Ivl} = \frac{A_v}{V_v} \frac{V_v}{V} f_I \frac{1}{2} \rho_v |u_v - u_l| = \frac{\pi(\sqrt{\alpha_l} D_H L)}{\frac{\pi}{4}(\sqrt{\alpha_l} D_H)^2 L} \alpha_l f_I \frac{1}{2} \rho_v |u_v - u_l| = 2 \frac{f_I}{D_H} \sqrt{\alpha_l} \rho_v |u_v - u_l|$$

### 2.2.1.1 Bubble 드래그 계수에 대한 실험적 상관식

윗 식의 마찰계수를 결정하는 Bubble과 Droplet에 대한 무차원 드래그 계수인  $C_{Db}$ ,  $C_{Dd}$  는 Reynolds수에 따른 상관식으로 표현되며 Single Bubble이나 Droplet과 밀접한 관계가 있다. 아래 그림 xx.xxx (Ishii, M., 1977) 는 Bubble Reynolds수에 따른 드래그 계수를 나타내고 있으며 Bubble속도가 증가함에 따라 Viscous 영역, churn-turbulent 를 동반하는 Distorted bubble영역, 그리고 cap bubble영역을 나누고 각 영역에 맞는 상관식을 사용한다.

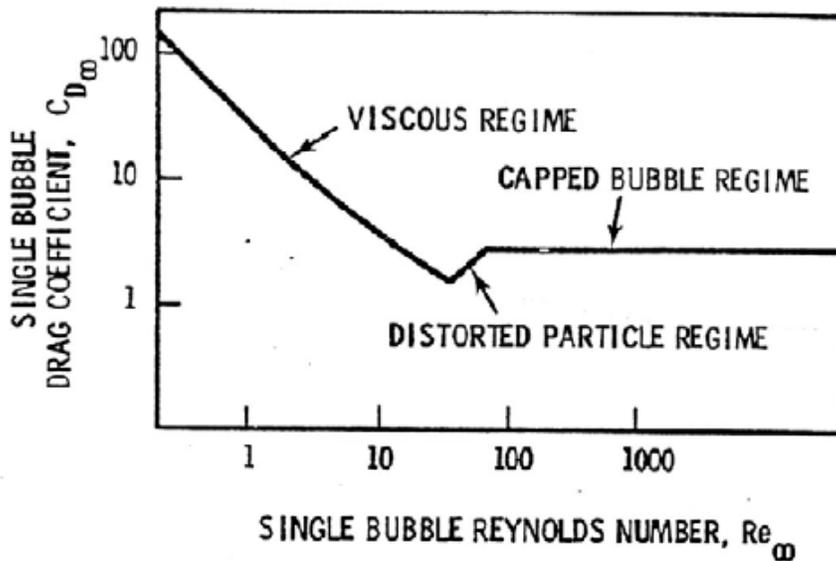


그림 2. Single Bubble Drag Coefficient

### Viscous 영역

$$C_{Db} = \frac{24}{\text{Re}_b} (1.0 + 0.1 \text{Re}_b^{0.75})$$

where

$$\text{Re}_b = \frac{2r_b \rho_l |U_{vl}|}{\mu_{mb}}, \quad \text{where } \mu_{mb} = \mu_l (1 - \alpha_v)^{-2.5} \frac{(\mu_v + 0.4\mu_l)}{(\mu_v + \mu_l)}$$

### Distorted Bubble 영역

$$C_{Db} = \frac{\sqrt{2}}{3} N_\mu \text{Re}_b (1 - \alpha_v)^2$$

where

$$N_\mu = \frac{\mu_l}{\left( \rho_l \sigma \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \right)^{\frac{1}{2}}}$$

$$\text{Re}_b = \frac{2r_b \rho_l (1 - \alpha_v) |U_{vl}|}{\mu_m}, \quad \text{where } \mu_m = \frac{\mu_l}{(1 - \alpha_v)}$$

여기서  $(1 - \alpha_v)^2$  는 disrtorted bubble에서는 single bubble과는 달리 다른 bubble로 인하여 발생하는 wake내에서 bubble이 움직이는 경향이 있기 때문에 드래그상관식과 Reynolds수에 사용되는 속도는 상대속도 대신 drift 속도인  $U_{vj} = (1 - \alpha_v)U_{vl}$  를 사용하여야 하기 때문에 나타난 항이다.

### Cap Bubble 영역

$$C_{Db} = \frac{8}{3}(1 - \alpha_v)^2$$

그러나 Cap Bubble에 속하지 않고 Large Bubble인 경우는 Viscous 영역의 상관식을 확장시키되 최소 값인 0.45 까지 확장이 가능한 것으로 하였다. 그러나 이 경우 drift velocity를 사용하여야 하므로 아래 식과 같이 하한 값을 표현 할 수 있다.

$$C_{Db} = 0.45(1 - \alpha_v)^2$$

#### 2.2.1.2. Droplet 드래그 계수에 대한 실험적 상관식

Droplet에 대한 상관식은 Bubble보다 간단하며 아래와 같이 Viscous 영역의 상관식을 사용하며 하한 값으로 0.45를 적용한다.

$$C_{Db} = \max\left(\frac{24}{\text{Re}_d} (1.0 + 0.1 \text{Re}_d^{0.75}), 0.45\right)$$

$$\text{Re}_d = \frac{2r_d \rho_v |U_{vd}|}{\mu_{md}}, \text{ where } \mu_{md} = \mu_v (\alpha_v)^{-2.5} \frac{(\mu_l + 0.4\mu_v)}{(\mu_v + \mu_l)}$$

#### 2.2.1.3. Film flow 마찰계수에 대한 실험적 상관식

Film flow에 대한 마찰계수는 film이 안정적이냐 아니냐에 따라 상당히 틀려진다. 현재 MARS-3D 에서는 2 종의 상관식을 사용한다. 하나는 Wallis 상관식(Wallis, 1970) 으로 안정적인 film에 적용하고 있으며 또 하나는 Henstock & Hanratty (Henstock&Hanratty 1976)가 많은 종류의 co-current와 counter-current film의 실험자료를 사용하여 구한 상관식이다. 횡 방향으로 적용할 때는 실험적 상관식의 제한에 의하여 Wallis 상관식을 전 영역에 대하여 적용하고 있다. 축 방향으로 적용할 시 불안정한 film에 대하여는 Wallis 상관식의 5배와 Henstock & Hanratty 상관식 중 최대 값을 사용한다.

#### Henstock & Hanratty 상관식

$$f_l = f_s \left\{ 1 + 1400F \left[ 1 - \exp \left( -\frac{1}{G} \frac{(1 + 1400F)^{3/2}}{13.2F} \right) \right] \right\}$$

where

$$F = \frac{m^+}{\text{Re}_v^{0.9}} \frac{\mu_l}{\mu_v} \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_l}}$$

$$m^+ = \left[ (0.707 \text{Re}_l^{0.5})^{2.5} + (0.0379 \text{Re}_l^{0.9})^{2.5} \right]^{0.40}$$

$$f_s = 0.046 \text{Re}_v^{-0.20}$$

Wallis 상관식

$$f_l = 0.0025(1 + 75\alpha_l)$$

Inverted Annular Film 유동

Inverted annular film 유동에 대하여는 아래와 같이 상수 값을 정하였다.

$$f_l = 0.01$$

2.2.1.4. Cell Interface에 대한 추가적인 마찰계수

축 방향과 횡방향의 cell boundary에 급격한 변화가 있을 경우 MARS-3D에서 특별히 추가적으로 고려하는 항으로 Cell i-j interface에서  $\alpha_i > 0.8$  이고  $\alpha_j < 0.6$  일 경우에 적용한다.

축 방향에 대한 적용식

$$F_{I_x} = f_l \frac{1}{2} \rho_v |u_{v_i} - u_{l_j}| (u_{v_i} - u_{l_j}) A_{I_x}$$

횡 방향에 대한 적용식

$$F_{I_y} = f_l \frac{1}{2} \rho_v |u_{v_i} - u_{l_j}| (u_{v_i} - u_{l_j}) A_{I_y}$$

윗 식에서 마찰계수는 0.08의 상수를 사용하며 j cell의 liquid 운동량방정식에 추가되며 i cell 의 증기 운동량방정식에서는 그 양 만큼 감소시킨다.

### 2.2.2. MARS-3D 벽면마찰모델

단위볼륨당 각 유동에 대한 벽면 마찰 힘은 아래와 같이 계면 마찰과 유사하게 정의한다.

$$\underline{\tau}_{wl}''' = -K_l \underline{U}_l$$

$$\underline{\tau}_{wv}''' = K_v \underline{U}_v$$

$$\underline{\tau}_{we}''' = -K_e \underline{U}_e$$

여기서 각 계수 K는 form loss와 벽면 마찰을 포함하고 있으며 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_l = \left( \frac{f_l}{2D_H} + \alpha_l \frac{K}{\Delta X} \right) \rho_l |\underline{U}_l|$$

$$K_v = \left( \frac{f_l}{2D_H} + \alpha_v \frac{K}{\Delta X} \right) \rho_v |\underline{U}_v|$$

$$K_e = \alpha_e \frac{K}{\Delta X} \rho_l |\underline{U}_e|$$

윗 식에서 마찰계수의 상관식은 laminar flow 혹은 Modified Blasius 상관식을 사용한다.

$$f_k = \begin{cases} 64.0 / \text{Re}_k & \text{la min ar flow} \\ 0.0055 + 0.55 \text{Re}_k^{-1/3} & \text{turbulent flow} \end{cases}$$

For single phase liquid, bubbly, film flow

vapor friction  $f_v = 0.0$

For single phase vapor, droplet(no film), inverted annular flow

liquid friction  $f_l = 0.0$

bubbly와 droplet 유동에 대하여 각 wall friction을 고려하지 않는 것은 분산유동에 대하여 벽면과의 상호작용을 무시하기 때문이다. 그러나 이와 같은 접근 방식은 droplet 속도는 항상 내부의 vapor 속도보다 빠르게 되며 bubble속도도 주변의 유체 속도보다 빠르게 계산된다는 점을 염두에 두어야 한다.

참고문헌

Ishii, M. " Drift Flux Model and Constitutive Equations for Relative Motion Between Phases in Various Two-Phase Flow Regimes, " ANL-77-47, October 1977.

Wallis, G. B. " Annular Two-Phase Flow, Part I: Simple Theory,"Journal of Basic Engineering (March 1970).

Henstock, W. H. and Hanratty, T. J. "The Interfacial Drag and the height of the Wall Layer in Annular Flows," AIChE Journal 22 (6), 990-1000 (November 1976).

## 2.3 TRAC-M 코드

TRAC-M코드에서는 액체(Liquid) 및 혼합기체(steam+gas)에 대해 각각 보존식을 사용하고 있으며 운동량 보존식은 액체 및 혼합기체에 대하여 각각 다음과 같다.

액체(Liquid) 운동방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{V}_l}{\partial t} + \vec{V}_l \cdot \nabla \vec{V}_l = & -\frac{1}{\rho_l} \nabla P + \frac{c_i}{(1-\alpha)\rho_l} (\vec{V}_g - \vec{V}_l) |\vec{V}_g - \vec{V}_l| \\ & - \frac{\Gamma^-}{(1-\alpha)\rho_l} (\vec{V}_g - \vec{V}_l) - \frac{c_{wl}}{(1-\alpha)\rho_l} \vec{V}_l |\vec{V}_l| + \vec{g} \end{aligned}$$

혼합기체 운동방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{V}_g}{\partial t} + \vec{V}_g \cdot \nabla \vec{V}_g = & -\frac{1}{\rho_g} \nabla P + \frac{c_i}{\alpha\rho_g} (\vec{V}_g - \vec{V}_l) |\vec{V}_g - \vec{V}_l| \\ & - \frac{\Gamma^+}{\alpha\rho_g} (\vec{V}_g - \vec{V}_l) - \frac{c_{wg}}{\alpha\rho_g} \vec{V}_g |\vec{V}_g| + \vec{g} \end{aligned}$$

### 2.3.1 TRAC-M코드 계면마찰 상관식

#### 2.3.1.1 Bubble Slug Flow Interfacial Drag Coefficient

TRAC코드의 경우 interfacial drag coefficient는 다음과 같이 정의한다.

$$c_i = \frac{0.75 c_{Db} \alpha \rho_l P_s}{D_b}$$

여기서,  $c_{Db}$  는 bubble drag coefficient이고  $D_b$ 는 bubble 직경, 그리고  $P_s$ 는 profile slip 값을 나타낸다. 특별한 상황 즉 예를 들어 upper plenum에서의 bubbly flow regime에서의 interfacial drag coefficient는 TRAC-M Theory Manual의 Appendix H에 기술되어 있다. 이 Appendix H에서는 100쪽이상을 할애하여 interfacial drag 및 wall drag 특수경우에 대하여 상세히 기술하고 있다.

위 방정식에서 bubble 직경은 Laplace 계수(Ishii, 1987)와 channel hydraulic

diameter의 다음과 같은 함수가 된다.

$$D_b = 2L_0(1 - XS) + \min(40L_0, 0.9D_h) \cdot XS \quad (3-83)$$

이때,

$$L_0 = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}}$$

그리고

$$XS = \begin{cases} 0.0 & \text{bubbly flow} \\ \frac{(2700 - G)}{(2700 - 2000)} \cdot \frac{(\alpha - 0.3)}{(0.5 - 0.3)} & \text{bubbly slug transition} \\ \frac{(\alpha - 0.3)}{(0.5 - 0.3)} & \text{bubbly slug flow} \end{cases}$$

한편 bubble 직경은 다음과 같은 제한조건을 갖는다.

$$0.0001m < D_b < \min(40 L_0, 0.9D_h)$$

여기에서 제시한 내삽법 그리고 weighting factor는 TRAC 코드를 위해 개발된 것이며 특별한 물리적 의미가 있는 것은 아니다. 하지만 본 방식은 두 regime간에 천이를 가능케 한다. 또, bubble 직경에 대한 하한치는 TRAC 코드를 위해 선정된 경험치이다.

앞서 언급한 profile slip factor는 channel 내에서 bubble이 고속의 영역으로 이동하려는 경향을 기술한다. 이 역시 참고문헌(Ishii, 1987)에 내용에 따라 다음과 같이 정의한다.

$$P_s = \frac{(C_1 V_g - C_0 V_l)^2}{(V_r)^2}$$

여기서,

$$C_0 = 1.2 + 0.2 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}$$

그리고

$$C_1 = \frac{1.0 - C_0 \alpha_b}{1.0 - \alpha_b}$$

이며  $V_r$ 은 상대속도이다. 3D component의 경우에 대해서는 이  $V_r$ 값을 0.01m/s 이상으로 제한한다.

한편, bubble drag coefficient는 다음과 같이 Reynolds number의 함수가 된다.

$$C_{Db} = \begin{cases} 240.0 & \text{bubbly flow} \\ \frac{24.0}{\text{Re}_b} \cdot (1.0 + 0.15 \text{Re}_b^{0.678}) & \text{bubbly slug transtion} \\ 0.44 & \text{bubbly slug flow} \end{cases}$$

여기서,

$$\text{Re}_b = \frac{D_b V_r \rho_l}{\mu_l}$$

### 2.3.1.2 Churn-Flow Interfacial Drag Coefficient

TRAC 코드에서 churn-flow regime(기포율 0.5에서 0.75사이)에 대해서는 bubbly slug drag coefficient와 annular-mist drag coefficient를 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$c_{itrans} = c_{iam} W_t + c_{ibs} (1 - W_t) \text{ where } W_t = 4\alpha_g - 2$$

이때,

$$W_t = 4\alpha - 2$$

가 된다.

여기서 weighting factor는  $0.0 \leq W_t \leq 1.0$  이다. 또 bubbly slug drag coefficient  $c_{ibs}$ 는 기포율 0.5에 대해서 구한 값이며 앞 절에 논의한 방식으로 구한다. 그리고 annular-mist interfacial drag coefficient  $c_{iam}$ 는 기포율 0.75에 대한 값이며 다음 절에서 구하는 방식을

논의한다.

위에 논의한 churn flow regime에 대한 내삽방식은 TRAC 코드를 위해 특별히 고안한 방식이며 내삽방식 자체에 물리적 의미가 있는것은 아니다. 하지만 제시한 내삽방식을 통해 regime간의 원활한 천이가 가능하다.

### 2.3.1.3 Annular-Mist-Flow Interfacial Drag Coefficient

Annular-mist regime에 대한 drag coefficient는 droplet 에 대한 drag force와 annular film에 대한 drag force를 중첩하여 구한다. 즉,

$$C_i = \frac{M_i}{|V_r|V_r}$$

여기서,

$$M_i = M_{id} + M_{ia}$$

이 때,  $M_{id}$ 와  $M_{ia}$ 는 각각 droplet 및 annular film에 의한 drag force를 나타낸다. 이 모델은 Ishii와 Mishima(1984)에 의해 개발되었다. 위 방정식에 서 상대속도  $V_r$ 은 Ishii(1977)의 Drift flux 모델로 결정한다. 한편, Kataoka 와 Ishii (1982) 모델에 대한 상세 내용은 관련 보고서에 기술되어 있다.

Annular film에 의한 interfacial drag force는 Ishii와 Mishima (1984) 모델로 결정하며 다음과 같다.

$$M_{ia} = a_{if}\tau_f$$

여기서,  $\tau_f$ 는 interfacial shear 이고 interfacial area는

$$a_{if} = \frac{4C_{an}}{D} \sqrt{\frac{\alpha}{1-\alpha_d}}$$

로 결정하는데 여기서  $C_{an}$ 은 film의 파동성(waviness)를 고려하기 위한 roughness parameter 이며 1 이상의 값이 된다. 또,  $\alpha_d$ 는 droplet의 area fraction이다.

$$\alpha_d = \frac{j_l}{j_g} E$$

이때, entrainment rate E는 Kataoka 와 Ishii (1982) 방식에 의해 결정한다. 즉,

$$E = \tanh(7.25e - 07We_d^{1.25} Re_l^{0.25})$$

이 식에서 Reynolds number는

$$Re_l = \frac{\rho_l j_l D}{\mu_l}$$

그리고 droplet의 Weber number는

$$We_d = \frac{\rho_g j_g^2 D}{\sigma} \left( \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} \right)^{1/3} = 4.0$$

추가로 shear force  $\tau_f$

$$\tau_f = 0.5 f_i \rho_c (V_g - V_f)^2$$

이때,  $\rho_c$ 는 gas/droplet core의 밀도이고  $V_f$ 는 annular film의 속도이다. film의 interfacial friction factor  $f_i$ 는 Wallis(1969) 상관식으로 구하며

$$f_i = 0.005[1 + 75(1 - \alpha)]$$

droplet에 의한 interfacial drag force는 역시 Ishii 와 Mishima (1984)에 의해

$$M_{id} = a_i \left[ \frac{c_d}{4} \left( \frac{r_{sm}}{r_d} \right) \frac{\rho_g (V_g - V_d)^2}{2} \right]$$

및

$$a_i = \frac{\alpha}{1 - \alpha_d} \left( \frac{3\alpha_d}{r_{sm}} \right)$$

가 된다. 위 방정식에서  $c_d$ 는 droplet drag coefficient 이고  $r_{sm}$ 는 Sauter mean radius 그리고  $r_d$ 는 drag radius이다. 또,  $V_d$ 는 droplet 속도이고  $\alpha_d$ 는 droplet의 면적비가 된다. Drag coefficient는 Ishii와 Chawla(1979)에 의해 다음과 같이 결정한다. 즉,

$$c_d = \frac{24}{\text{Re}_d} (1.0 + 0.1 \text{Re}_d^{0.75})$$

$$\text{Re}_d = \frac{D_d \rho_g |V_g - V_d|}{\mu_m}$$

$$\mu_m = \frac{\mu_g}{(1 - \alpha_d)^{2.5}}$$

Droplet 직경은 Kataoka, Ishii 와 Mishima(1983)에 의해

$$D_d = \frac{2.0}{\rho_g j_g^2} \left[ 0.005 \sigma \left( \frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{2/3} \text{Re}_g^{2/3} \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{1/3} \right]$$

로 결정하며 이때  $0.000042 < D_d < 0.002\text{m}$  이다. Sauter mean radius 는 유사하게 droplet 직경(Kataoka Ishii (1982)) 이며 다음과 같다.

$$r_{sm} = 0.796 \frac{D_d}{2}$$

#### 2.3.1.4 Stratified-Flow Interfacial Drag Coefficient

완전히 발달한 stratified flow에 대한 interfacial drag coefficient는 Taitel 과 Dukler (1976) 방법으로 결정되며 특히 drag coefficient는

$$c_i = \frac{1}{2} f_i \rho_g \frac{S_i}{A_{flow}}$$

이때,  $f_i$ 는 interfacial fraction factor,  $S_i$ 는 stratified interface의 폭 그리고  $A_{flow}$ 는 유동면적이다.

1D 및 3D component 모두 interfacial fraction-factor 상관식은 Ohnuki(1987) 방법 즉,

$$f_i = 1.84 f_{wg}$$

를 사용한다. 이 때,

$$f_{wg} = \begin{cases} 16.0(\text{Re}_g)^{-1} & \text{la min ar flow} \\ 0.079(\text{Re}_g)^{-0.25} & \text{Re}_g < 10^5 \\ 0.0008 + 0.05525(\text{Re}_g)^{-0.237} & \text{Re}_g \geq 10^5 \end{cases}$$

한편, 완전히 발달한 stratified flow가 아닌 경우에 대해서는 앞서 논의한 stratified flow에 대한 drag coefficient 와 그 외의 방법으로 결정한 값을 내삽한다. 즉,

$$c_i = (1 - W_{st})c_{imap} + W_{st}c_{ist}$$

이때  $W_{st}$ 는 0과 1사이의 값이 된다.

여기서 기술한 내삽방식 및 weighting factor는 TRAC 코드를 위해 고안한 것이다. 내삽방식 자체에 어떤 특별한 물리적 의미가 있는 것은 아니다.

### 2.2.1.5 Reflood Interfacial Drag Coefficient

노심의 reflood 상태에서 TRAC 코드는 Ishii와 DeJarlais (1987,1986) 및 Obot 및 Ishii (1988)의 방법에 의한 flow-regime map을 따른다. 따라서, reflood시 다음 각각의 flow regime에 대해 interfacial drag model을 제공한다. flow regime은 subcooled boiling, smooth inverted annular flow, rough-wavy inverted annular flow, agitated inverted annular flow,

dispersed flow, highly dispersed flow를 대상으로 한다.

### 2.3.2 TRAC-M코드 벽면마찰 상관식

본 절에서는 TRAC 코드의 wall drag(벽면마찰)에 대해서 논의한다. 즉 TRAC코드의 지배방정식중 liquid 및 gas혼합체 각각에 대한 운동량방정식에 필요한 wall drag coefficient  $c_{wl}$  및  $c_{wg}$  결정방식을 제공하여야 한다. 1D component의 경우에는 다음과 같이 결정한다.

$$c_{wl} = \frac{\alpha_l \rho_l c_{fl}}{D_h}$$

$$c_{wg} = \frac{\alpha_g \rho_g c_{fg}}{D_h}$$

이 때,  $c_{fl}$ 과  $c_{fg}$ 는 각각 liquid 와 gas혼합체에 대한 coefficients of friction이다. 또, 이 계수들은 다음과 같이 Fanning friction factor와 관계가 있다.

$$c_{fl} = c_{fg} = 2f$$

여기서 다시, friction factor  $f$ 는 다음 세 경우에 대해서 각각 결정한다. 즉 single-phase model, two-phase homogeneous model 그리고 horizontal stratified-flow model에 각각 별도로 결정한다. 그 명칭이 의미하듯 single-phase model은 단상의 액체 및 기체에 적용하고 two-phase homogeneous wall drag model은 기본적인 이상유동맵 즉 bubbly slug, churn, 그리고 annular mist flow에 적용한다. stratified-flow 상태에 대해서 TRAC은 horizontal stratified-flow wall drag model을 적용한다.

#### 2.3.2.1 Single-Phase Wall Drag Model

단상유동에 대해서 TRAC코드는 수정 Churchill 방정식(Churchill, 1977)을 이용한다. 이 Churchill 방정식은 Moody diagram을 laminar, transition, 그리고 turbulent flow에 대하여 fitting 한 방정식이다. 코드 내에서 Churchill friction factor는 다음과 같이 정의한다.

$$f_{churchill} = 2 \left[ \left( \frac{8}{\text{Re}} \right)^{12} - \frac{1}{(a+b)^{3/2}} \right]^{1/12}$$

여기서,

$$a = \left[ 2.475 \ln \left( \frac{1}{\left( \frac{7}{\text{Re}} \right)^{0.9} + \frac{0.27\varepsilon}{D_h}} \right) \right]^{16}$$

$$b = \left( \frac{37530}{\text{Re}} \right)^{16}$$

이 때 Reynolds number는  $\text{Re} \geq 100$  로 제한된다.

TRAC에서 사용한 Churchill 상관식은 앞서 언급한 참고문헌(Churchill, 1977)에 기술된 내용을 그대로 사용한다. 다양한 flow-channel 구조를 대상으로 단상유동 friction factor 에 Moody curve를 사용하는 것은 일반적으로 사용하는 방식이다.

### 2.3.2.2 Two-Phase Homogeneous Wall Drag Model

이상유동(Two-phase)에 대한 friction factor도 유사하게 Churchill 상관식(Churchill, 1977)을 사용한다. 반면 단상유동에 대한 Reynolds number는 이상유동에 대한 식으로 다음과 같이 변경한다.

$$\text{Re}_m = \frac{G_m D_h}{\mu_m} = \frac{(j_g \rho_g + j_l \rho_l) D_h}{\mu_m}$$

이 방정식에서 혼합체(mixture) viscosity  $\mu_m$ 은 다음과 같이 static quality  $X$ 에 대한 함수가 된다.

$$\mu_m = \left[ \frac{X}{\mu_g} + \frac{(1-X)}{\mu_l} \right]^{-1}$$

여기서,

$$X = \frac{1}{1 + \frac{(1 - \alpha_g)\rho_l}{\alpha_g\rho_g S_r}}$$

이때 상간의 slip은 작은값을 취하거나 아니면

$$S_r = 1.0$$

로 한다.

한편 단상유동과 마찬가지로 mixture Reynolds number 도 100 이상의 값을 간도록해야 friction-factor 방정식에서 0으로 나누는 경우를 배제할 수 있다.

TRAC 코드의 friction-factor model에서는 liquid에 대한 coefficient of friction을

$$c_{fl} = 2f$$

그리고 vapor 혼합체에 대해서는

$$c_{fg} = c_{fl}$$

를 취한다. 이때, friction factor  $f$ 는 위에서 기술한 이상유동에 대한 Reynolds number를 사용한 Churchill equation을 이용하여 결정한다.

단상유동에 대한 friction-factor 상관식에 이상유동 Reynolds number를 적용하는 방식은 two-phase friction factor를 결정하는 한 방식이며 이러한 방식은 실제 실험치를 대상으로 검증을 수행하여야 한다.

### 2.3.2.3 Two-Phase Horizontal Stratified Wall Drag Model

Fully stratified-flow 상태에서 각 상에 대한 wall drag coefficient는 다음 friction-factor 상관식을 적용한다.

$$f = 0.046 \text{Re}^{-0.2}$$

여기서  $R_e$  값은  $\text{Re} \geq 1502$  (turbulent flow) 이고  $\text{Re} < 1502$  (laminar flow)에 대해서는

$$f = \frac{16}{\text{Re}}$$

위 식에서 각 상(phase)에 대한 Reynolds number는 다음과 같이 결정한다.

$$\text{Re}_k = \max\left(100, \frac{\rho_k |V_k| D_k}{\mu_k}\right)$$

이 때,  $k$ 는 liquid 및 gas 에 대해 각각  $l$ 과  $g$ 를 갖는다. Hydraulic diameter  $D_l$  및  $D_g$ 는 각 상에 대한 유동면적 및 wetted parameter로 결정한다. 즉 Reynolds number 및 drag-coefficient 정의에서, 총 유동면적 및 wetted parameter에 근거한  $D_h$ 를 대신하게 된다.

이상유동(two-phase flow)가 분리유동(separate flow)의 형태를 보일 때 이상유동 혼합체의 각 상에 대해 표준 단상유동 상관식을 적용하는 것은 일반적인 접근방식이다. 이러한 방식은 실제 실험치에 대한 검증절차를 거쳐야 할 것이다.

TRAC 코드의 경우, stratified 영역과 그렇지 않은 경우와의 천이영역(transition region)은 weighting factor를 사용하여 각각의 wall drag coefficient를 내삽(interpolation)하여 결정한다.

#### 참 고 문 헌

M. Ishii and T. C. Chawla, "Local Drag Laws in Dispersed Two-Phase Flow," Argonne National Laboratory report ANL-79-105 (NUREG/CR-1230) (December 1979).

M. Ishii, Argonne National Laboratory, personal communication to R. Nelson, Los Alamos National Laboratory, July 1987.

M. Ishii and K. Mishima, “Two Fluid Model and Hydrodynamic Constitutive Relations,” *Nucl. Eng. and Design*, **82**, 107–126 (1984).

M. Ishii, “One Dimensional Drift-Flux Model and Constitutive Equations for Relative Motion between Phases in Various Two-Phase Flow Regimes,” Argonne National Laboratory report ANL-77-47 (1977).

I. Kataoka and M. Ishii, “Mechanism and Correlation of Droplet Entrainment and Deposition in Annular Two-Phase Flow,” Argonne National Laboratory report ANL-82-44 (NUREG/CR-2885) (1982).

G. B. Wallis, *One Dimensional Two Phase Flow* (McGraw-Hill Book Company, New York, 1969).

I. Kataoka, M. Ishii, and K. Mishima, “Generation and Size Distribution of Droplet in Annular Two-Phase Flow,” *Trans. ASME, J. Fluid Engineering*, **105**, 230–238 (1983).

Y. Taitel and A. E. Dukler, “A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow,” *AIChE J.*, **22** (1), 47–55 (1976).

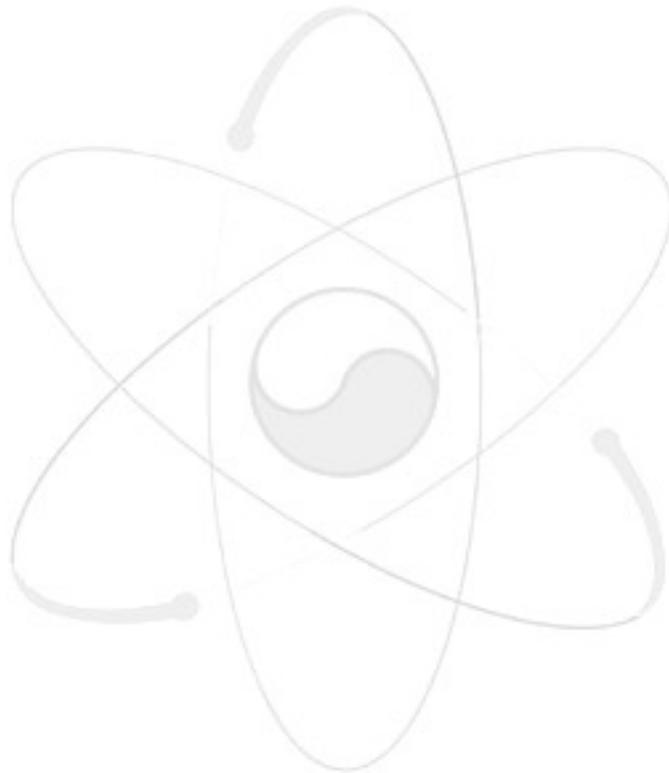
A. Ohnuki, H. Adachi, and Y. Murao, “Scale Effects on Countercurrent Gas-Liquid Flow in Horizontal Tube Connected to Inclined Riser,” American Nuclear Society, ANS 1987 National Heat Transfer Conference (Pittsburgh, Pennsylvania, August 9-12, 1987), pp. 40-49.

M. Ishii and G. DeJarlais, “Flow Visualization Study of Inserted Annular Flow of Post Dryout Heat Transfer Region,” *Nuclear Engineering and Design*, **99**, 187–199 (1987).

M. Ishii and G. DeJarlais, “Flow Regime Transition and Interfacial Characteristics of Inverted Annular Flow,” *Nuclear Engineering and Design*, **95**, 171–184 (1986).

N. T. Obot and M. Ishii, “Two-Phase Flow Regime Transition Criteria in Post-Dryout Region Based on Flow Visualization Experiments,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, **31**, 12, pp. 2559–2570 (1988).

S. W. Churchill, "'Friction-Factor Equation Spans All Fluid-Flow Regimes,'" *Chemical Engineering*, pp. 91--92 (Nov. 7, 1977).



## 2.4 CATHARE 코드

CATHARE코드에서의 계면마찰 및 벽면마찰은 다음식 운동량 지배방정식에 나타나며 Gas phase 및 Liquid Phase 에서 대해서는 다음과 같은 형태가 되며 .

Gas phase:

$$\begin{aligned}
 & A\alpha\rho_G\left[\frac{\partial V_G}{\partial t}+V_G\frac{\partial V_G}{\partial z}\right]+A\alpha\frac{\partial P}{\partial z}+Ap_i\frac{\partial\alpha}{\partial z} \\
 & +A\beta\alpha(1-\alpha)\rho_m\left[\frac{\partial V_G}{\partial t}-\frac{\partial V_L}{\partial t}+V_G\frac{\partial V_G}{\partial z}-V_L\frac{\partial V_L}{\partial z}\right] \\
 & =A\Gamma(W_i-V_G)-A\tau_i-\chi_f C_G\frac{\rho_V}{2}V_G|V_G| \\
 & +A\alpha\rho_G g_z+\frac{R(1-\alpha)}{4}p_i\frac{\partial A}{\partial z}
 \end{aligned}$$

Liquid Phase:

$$\begin{aligned}
 & A(1-\alpha)\rho_L\left[\frac{\partial V_L}{\partial t}+V_L\frac{\partial V_L}{\partial z}\right]+A(1-\alpha)\frac{\partial P}{\partial z}+Ap_i\frac{\partial(1-\alpha)}{\partial z} \\
 & -A\beta\alpha(1-\alpha)\rho_m\left[\frac{\partial V_G}{\partial t}-\frac{\partial V_L}{\partial t}+V_G\frac{\partial V_G}{\partial z}-V_L\frac{\partial V_L}{\partial z}\right] \\
 & =-A\Gamma(W_i-V_L)+A\tau_i-\chi_f C_L\frac{\rho_L}{2}V_L|V_L| \\
 & +A(1-\alpha)\rho_L g_z+\frac{R\alpha}{4}p_i\frac{\partial A}{\partial z}
 \end{aligned}$$

여기서,

$$\rho_m = \alpha\rho_G + (1-\alpha)\rho_L$$

$R$ : rate of stratification

$\chi_f$ : friction perimeter

I. Wall friction and Form Loss

## 2.4.1 CATHARE 코드 계면마찰 상관식

계면마찰에 대해서는 다음 세 가지 주요 유동형태를 고려하여 모델한다.

-A : 액적이 없는 비성층류

$$\tau_{INSNE} = C_{INSNE} |\Delta V| \Delta V$$

-B : 액적이 있는 비성층류

$$\tau_{IEN} = C_{IEN} |\Delta V| \Delta V$$

-C : 성층류

$$\tau_{IST} = C_{IST} |\Delta V| \Delta V$$

계면 마찰 상관식은 다음과 같다.

$$\tau_I = C_{IST}^R [(1-E)C_{INSNE} + EC_{IEN}]^{1-R} |\Delta V| \Delta V$$

다음은 앞에서 언급한 세 가지 경우에 대해 각각 기술한다.

### 2.4.1.1 액적이 없는 비성층류

액적이 없는 비성층류의 경우에는 bubbly-slug-churn 유동의  $\tau_{BSC}$  그리고 annular 유동의  $\tau_{IAN}$  의 두 상관식을 결합한다.

#### 2.4.1.1.1 Bubbly-Slug-Churn 유동에 대한 상관식

$\tau_{BSC}$  는 drift flux 에 기초하여 결정한다. Drift velocity에 대한 일반적인 형태는

$$V_{gj} = C_m \left[ \frac{g(\rho_L - \rho_G)L_m}{\rho_m} \right]^{1/2}$$

여기서  $L_m, \rho_m$  및  $C_m$ 는 각각 length scale, density, 그리고 모델 상수를 나타내며 이에 상응하는 계면마찰 상관식은 다음과 같이 나타난다.

$$\tau_I = \alpha(1-\alpha) \frac{\rho_m(1-C_0\alpha)^2}{C_m^2 L_m} |V_G - C_K V_L| (V_G - C_K V_L)$$

$$C_K = \frac{C_o(1-\alpha)}{1-C_o\alpha}$$

이를 기초로 tube geometry, bundle geometry, 그리고 annulus geometry에 대해 모두 세 가지 drift velocity 모델을 개발하였다.

Tube geometry:

$$V_{gtube} = \left[ \frac{g(\rho_L - \rho_G)L}{K_L \rho_L + K_G \rho_G} \right]^{1/2}$$

$$L = \left[ \frac{1}{D_H^2} + \frac{1}{f_1^2 La^2} \right]^{-1/2}$$

$$K_L = f_2 \left( \frac{L}{D_H} \right) F_{\mu L}^{1/4}$$

$$F_{\mu L} = \mu_L \left[ \frac{\rho_L^2 \sigma^3}{g(\rho_L - \rho_G)} \right]^{-1/4}$$

$$La = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_G)}}$$

$$K_G = 29$$

여기서,  $f_1$ 은 기포율의 함수이며 기포율  $\alpha > 0.25$ 에 대해서는 17이 되고 또  $\alpha = 0$ 인 경우에는 1.3 까지 감소하게 된다. 또, 작은 직경의 유로에 대해서는 length scale  $L$ 은 hydraulic diameter  $D_H$ 가 되고 직경이 큰 경우에는 Laplace scale  $La$ 에 비례하게 된다.

한편,  $f_2$  값은 다음과 같이 결정된다. 즉, 작은 직경의 유로의 경우는 그 값이 36.81로 하고 이때  $V_{gj}$ 에 대한 상관식은 slug flow에 대한 고전 상관식과 유사하다. 직경이 큰 경우에는  $f_2$  값은 2.81로 작은 상수를 사용하게 되며  $V_{gj}$ 는 압력증가시 감소하는 값은 갖게 된다.

#### Rod bundle geometry

Rod bundle geometry의 경우에 대한 상관식은 다음과 같다.

$$V_{gjrodbundle} = \left[ \frac{g(\rho_L - \rho_G)La}{Cf_G \rho_G \frac{La^*}{D_H} + K_L \rho_L + K_G \rho_G} \right]^{1/2}$$

$$La^* = f(\alpha) \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_G)}}$$

그리고  $K_G = 0.75$ ,  $K_L = 0.01063$ , 또  $Cf_G = 37.045$ 가 된다.

여기서  $f$ 는 기포율의 함수이며  $\alpha > 0.25$ 에 대해서는 그 값이 1이 되고  $\alpha = 0$ 인 경우에는 0.0213까지 감소한다.

#### Annulus geometry

Annulus geometry의 경우 상관식은 다음과 같다.

$$V_{gjrodbundle} = \left[ \frac{g(\rho_L - \rho_G)La}{f_a(K_L \rho_L + K_G \rho_G) + (1 - f_a)C_G \frac{D_{ex}}{La}} \right]^{1/2}$$

여기서  $K_G = 4.6$ ,  $K_L = 0.03$ , 또  $C_G = 28.3$ 이 된다.

$D_{ex}$ 는 annulus의 external diameter이며  $f_a$ 는 기포율의 함수로  $\alpha > 0.5$ 에 대해서는 그 값이 1이 되고  $\alpha = 0$ 인 경우에는 0이 된다.

#### 2.4.1.1.2 Annular flow 대한 상관식

이 경우  $\tau_{IAN}$  는 Wallis 모델에서 결정한다. 즉,

$$\tau_{IAN} = 5 \times 10^{-3} [1 + 75(1 - \alpha)] \frac{4\rho_G |\Delta V| \Delta V}{D_H^2}$$

결국, 액적이 없는 비성층류의 경우 계면마찰은 bubbly-slug-churn flow 및 annular flow의 경우의 합의 형태를 취한다. 즉,

$$\tau_{INSNE} = \tau_{IBSC} + \tau_{IAN}$$

#### 2.4.1.2 액적이 있는 비성층류 (mist flow)

액적이 있는 비성층류 즉 mist flow인 경우 계면마찰은 다음과 같다.

$$\tau_{IEN} = \frac{3(1 - \alpha) C_d \rho_G \Delta V |\Delta V|}{2 \delta}$$

여기서  $C_d$  는 액적 drag coefficient 이며 다음과 같다.

$$C_d = \frac{24}{Re_d} + \frac{3.6}{Re_d^{0.313}} + \frac{0.42}{1 + 4.15E^{-4} / Re_d^{1.16}}$$

$$Re_d = \frac{\rho_G |\Delta V| \delta}{\mu_G}$$

이때,  $\delta$  는 액적(droplet)의 직경이며 다음과 같은 상관식으로 결정된다.

액적 직경 상관식

$$\delta = \text{Min}(\delta_1, \delta_2) F_{BR}(We_L)$$

$$\delta_1 = 1.73 \sqrt{\frac{\sigma}{g \Delta \rho}}$$

$$\delta_2 = \frac{\sigma We_G}{\rho_G \Delta V^2}$$

$$We_L = \frac{\rho_L V_L^2 \delta}{\sigma}, \quad We_G = 8$$

$F_{BR}$  은 rod bundle 유동에서의 spacer grid에 의한 액적 break up을 고려하는 break up function으로  $We_L$ 의 함수가 된다.

### 2.4.1.3 성층류 (stratified flow) 에 관한 계면마찰 상관식

성층류에 대한 계면마찰은 annular flow에 대한 Wallis model을 사용하며 다음과 같다.

$$\tau_{IST} = 4 \times 10^{-2} \frac{\sqrt{\alpha(1-\alpha)}}{\pi} [1 + 75(1-\alpha)] \frac{\rho_G}{D_H} \frac{\Delta V |\Delta V|}{2}$$

### 2.4.2 CATHARE 코드 벽면마찰 상관식

CATHARE 코드에서의 Wall Friction은 다음과 같이 정의되며 실제 지배 방정식내에서는 Wetted parameter (혹은 friction parameter)를 곱하여 그 힘의 크기를 설정한다.

$$\tau_{WK} = -C_K C_{FK} \rho_K V_K \left| \frac{V_K}{2} \right|$$

여기서  $C_{FK}$ 는 phase K Reynolds number에 대한 single phase friction coefficient function 이다. 즉,

$$C_{FK} = C_{FK}(\text{Re}_K), \quad \text{Re} = \frac{a_K \rho_K V_K D_H}{\mu_K}$$

또,  $C_K$ 는 two-phase multiplier 이며 다음 세 경우에 대하여 각각 모델된다.

- 성층류(stratified flow) 에 대해서는  $C_K$ 는 phase K가 차지하고 있는 friction parameter의 비(ratio)가 된다.
- 액적이 없는 비 성층류에 대해서는 벽면을 따라 액체만이 유동을 형성하고 있으므로  $C_G = 0$  그리고  $C_L = 1$ 에 근접하는 식을 사용한다. 즉,

$$C_K = \frac{\alpha_K \rho_K}{\alpha_K \rho_G + (1 - \alpha_K) \rho_L}$$

- annular mist flow의 경우 유동은 서로 다른 형태의 두 액체(liquid)의 거동이 있다. 즉 벽면마찰이 없는 비교적 높은 속도를 유지하는 액적과 벽면마찰을 유지하며 상대적으로 낮은 속도를 갖는 액막(liquid film)으로 나뉘어 진다. 따라서  $V_L$ 은 액막의 속도보다 크게 되고  $C_L$ 값은 1보다 작게 된다. 본 모델은 Lockhardt-Martinelli 상관식과 일관성이 있으며 고압에서 압력의 영향을 적절히 고려한다.

### 2.4.3 Form Losses

유로단면적의 변화 혹은 유로의 굽음등 기하학적 영향에 의한 수두(head)감소 혹은 압력강하는 단상유도의 경우 다음과 같다.

$$\Delta P_{\text{single}} = -\frac{K}{2} [\alpha_g \rho_g V_g |V_g| + \alpha_l \rho_l V_l |V_l|]$$

이 압력강하의 크기는 기상 및 액상 운동량 보존식에 대해서 각각  $DP_{\text{single},g}$  및  $DP_{\text{single},l}$ 로 다음과 같이 나뉘어 진다.

$$\Delta P_{\text{single},K} = -\frac{K}{2} [\alpha_K \rho_K V_K |V_K|]$$

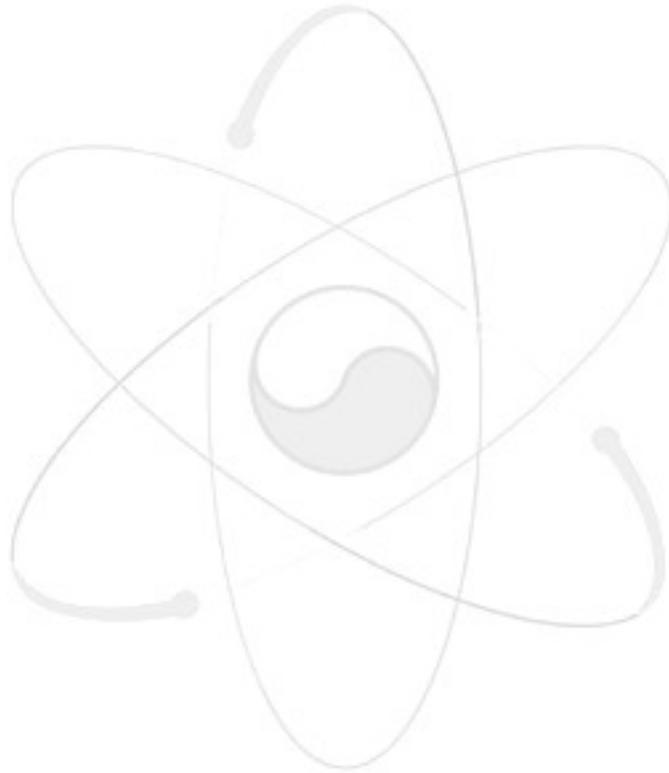
한편, Patricia SG2 실험에서의 증기발생기 support plate에서의 압력강하 분석 결과 국부 flow restriction에 대해서는 위 식이 적절하지 않은것으로 나타난 바 있다. 따라서, Patricia SG2 실험에 적합한 다음식도 선택적으로 제공한다.

$$\Delta P_{\text{single}} = -\frac{K}{2} [\alpha_g |V_g| + \alpha_l |V_l|] [\alpha_g \rho_g V_g + \alpha_l \rho_l V_l]$$

이 상관식 역시 기상 및 액상 운동량 보존식에 대해서 각각  $DP_{\text{single},g}$  및  $DP_{\text{single},l}$ 로 다음과 같이 나뉘어 진다.

$$\Delta P_{\text{single}} = -\frac{K}{2} [\alpha_g |V_g| + \alpha_l |V_l|] [\alpha_K \rho_K V_K]$$

여기서  $K$  값은 유동방향과 관련이 있으며  $K+$  및  $K-$  를 정의하여야 한다.  $K+$  및  $K-$  에 대한 선택은 각 상의 유동방향에 따라 각각의 상에 대해 선택하여야 한다.



서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/TR-3437/2007					
제목/부제	열수력안전해석코드 계면 및 벽면마찰 모델 비교				
연구책임자 및 부서명 (주저자)	황문규				
연구자 및 부서명 (공동저자)	박지원, 정법동, 김수형, 김시달				
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구원	발행년	2007. 7.
페이지	p. 53	도표	있음( V ), 없음( )	크기	26 Cm.
참고사항	공업기반기술개발사업, 원전안전해석코드개발(I)				
비밀여부	공개( V ), 대외비( ), __ 급비밀	보고서종류	기술보고서		
연구위탁기관			계약 번호		
초록 (15-20줄내외)	<p>이상유동의 거동을 기술하기 위해서는 그 목적에 따라서 homogeneous model(균질유동 모델), drift flux model, 분리유동(separated flow model) 등이 있으며 이 중 separated flow model은 각 상(phase)의 거동을 관련 방정식으로 각각 정의하고 또한 상간(interphase)의 현상도 별도의 모델로 기술한다. 또 여기에는 관련 방정식 자체에서는 구할 수 없는 유동형식(flow morphology)에 대한 기술로 flow regime map을 정의하거나 혹은 별도의 수송방정식(IAT)을 추가로 다루어야 한다. 현재 열수력해석코드에서 사용하고 있는 평균방정식을 해를 구하기 위해서는 각 지배방정식에서 필요로 하고 있는 보조방정식을 제공하여야 한다. 이 보조방정식을 위한 모델 중 계면 및 벽면마찰은 운동량 보존방정식의 소스항으로 존재하며 압력강하 예측뿐 아니라 코드의 안전성에도 영향을 미치는 중요한 항이 된다. 본 보고서에서는 현재 그 사용빈도가 비교적 높은 열수력해석코드인 RELAP5-3D, MARS-3D, TRAC-M, 그리고 CATHARE코드를 대상으로 계면 및 벽면 마찰에 대하여 정리한다.</p>				
주제명키워드 (10단어내외)	이상유동, 계면마찰, 벽면마찰				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET											
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code					
KAERI/TR-3437/2007											
T i t l e / Subtitle		<b>Comparison for the Interfacial and Wall Friction Models in Thermal Hydraulic System Analysis Codes</b>									
Project Manager and Department		Moonkyu Hwang (Thermal Hydraulics Safety Research Center)									
Researcher and Department		Jee-Won Park, Bub-Dong Chung, Soo Hyung Kim, See-Dal Kim									
Publication Place		Daejeon		Publisher		KAERI		Publication Date		July 2007	
Page		p. 53		Ill. & Tab.		Yes( V ), No ( )		Size		26 Cm.	
Note											
Classified		Open( V ), Restricted( ), ___ Class Document				Report Type		Technical Report			
Sponsoring Org.						Contract No.					
Abstract (15-20 Lines)		<p>The average equations employed in the current thermal hydraulic analysis codes need to be closed with the appropriate models and correlations to specify the interphase phenomena along with fluid/structure interactions. This includes both thermal and mechanical interactions. Among the closure laws, an interfacial and wall frictions, which are included in the momentum equations, not only affect pressure drops along the fluid flow, but also have great effects for the numerical stability of the codes. In this study, the interfacial and wall frictions are reviewed for the commonly applied thermal-hydraulic system analysis codes, i.e. RELAP5-3D, MARS-3D, TRAC-M, and CATHARE.</p>									
Subject Keywords (About 10 words)		Two-phase flow, interfacial friction, wall friction									