

기액이상류의 압력손실과 가스상의 체적분율에 관한 이론적 해석

최부홍*

* 목포해양대학교 기관시스템공학부

A Theoretical Analysis on Pressure Loss and Gas Volumetric Fraction of Gas-Liquid Two-Phase Flow

Bu-Hong Choi*

* Division of Marine Engineering System, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

요 약 : 가스상의 체적분율과 압력강하는 기액이상류에 대한 이해와 예측에 있어서 매우 중요한 인자이다. 또한 그것들은 산업용 대용량의 열교환시스템 및 선박에 설치되는 보일러 및 냉동시스템의 설계에 있어서 필수적인 항목이다. 따라서 본 논문에서는 파이프의 모든 경사각도에 서 기액이상류 가스상의 체적분율과 압력손실을 예측할 수 있는 이론적 해석 방법을 제시한다. 여기서의 이론적 해석은 2유체 층상류 모델을 기초로 하고 있다. 또한 이론적 해석결과와 기존의 실험결과와 비교한 결과에 대해서도 제시한다.

핵심용어 : 기액이상류, 압력손실, 가스상의 체적분율, 이상마찰증배계수, 2유체 층상류 모델

Abstract : Gas volumetric fractions and pressure loss are very important parameters in understanding and predicting gas-liquid two-phase flows. They are also essential to design large heat exchanging system in many industries, boiler and refrigerating systems mounted at ships. This paper therefore presents a theoretical method of predicting the pressure loss and gas volumetric fractions in gas-liquid two-phase flows for the whole range of pipe inclinations. The theoretical analysis is based on the two-fluid stratified flow model. It also provides the results of the comparisons between this theoretical analysis results and previous experimental results.

Key Words : Gas-liquid two-phase flow, Pressure loss, Gas volumetric fraction, Two-phase multiplier, Two-fluid stratified flow model

1. 서 론

산업현장에서 사용되고 있는 대용량의 열교환시스템 및 선박 내의 보일러와 냉동기 등에서는 기액이상류 흐름이 대부분 존재한다. 그러나 기액이상류 흐름의 복잡성 때문에 그 해석이 용이치 않아 열교환시스템의 설계는 많은 연구자들의 실험으로부터 얻어진 경험식에 의존하고 있다. 그런데 실험적 연구의 대부분은 기액이상류의 체적분율(volumetric fraction)과 마찰압력손실(frictional pressure drop) 등과 같은 유동특성에 관한 것이며, 이는 열교환시스템의 설계에 있어 매우 중요한 요소가 된다. 또한 이에 관련된 이론적 연구는 Lockhart and Martinelli (1949), Chisholm(1967), Taitel and Dukler(1976), Brauner and Moalem(1992), Van and Siegarth(2001) 등에 의해 행해져 왔다. 그들은 수평 혹은 약간의 경사각을 갖는 배관 내를 흐르는 기액이상류에 대해 2유체 층상류 모델(two-fluid stratified flow model)을 적용하여 이론적인 연구를 실시하였으며, 체적분율과 마찰압력손실을 각각 독립적으로 해석하였다. 그러나 체적분율과 마찰압력손실은 서로 매우 밀접한 관계를 갖고 있으며, 서로

중요한 영향을 미치기 때문에 동시에 취급하는 것이 바람직하다. 또한 기존 문헌들에서는 수직상향 혹은 수직하향 흐름에 대한 체적분율과 마찰압력손실에 관한 이론적 해석이 거의 수행되지 않은 실정이다. 따라서 여기에서는 2유체 층상류 모델을 가스상과 액체상이 공존하는 기액이상류에 적용하여 수평관에서 뿐만 아니라 수직관에서의 체적분율과 마찰압력손실을 동시에 예측할 수 있는 이론적 해석 접근 방법에 대해 기술한다. 또한 그 해석의 적합성을 검토하기 위해 기존의 일부 실험 데이터와 비교 검토한 결과에 대해서도 기술한다.

2. 물리모델

기액이상류 가스상의 체적분율과 마찰압력손실을 이론적으로 해석하는데 사용된 유동 모델은 Fig. 1에 제시하였다. 여기서 사용된 유동 모델은 경사각도 θ 를 갖는 층상류 흐름이며, 배관내의 흐름은 충분히 발달된 흐름이라고 가정하고, 기체상과 액체상에 대해 각각 운동량식(momentum equations)을 적용하면 식(1), (2)와 같다.

* 대표저자 : 종신회원, bhchoi@mmu.ac.kr , 061-240-7227

가스상:

$$-A_G \left(\frac{dp}{dz} \right)_{TP} - \tau_G S_G - \tau_i S_i - g \rho_G A_G \sin \theta = 0 \quad (1)$$

액체상:

$$-A_L \left(\frac{dp}{dz} \right)_{TP} - \tau_L S_L + \tau_i S_i - g \rho_L A_L \sin \theta = 0 \quad (2)$$

여기서 A : 단면적, S : 접촉길이, g : 중력가속도, ρ : 평균밀도, θ : 배관 경사각도를 나타내며, 아래첨자 TP : 이상류, G : 기체상, L : 액체상을 의미한다.

또한 식(1), (2)에서 이상류의 압력손실 항 $\left(\frac{dp}{dz} \right)_{TP}$ 을 소거하고 정리하면 식(3)이 얻어진다.

$$\tau_G \frac{S_G}{A_G} - \tau_L \frac{S_L}{A_L} + \tau_i S_i \left(\frac{1}{A_G} + \frac{1}{A_L} \right) - g(\rho_L - \rho_G) \sin \theta = 0 \quad (3)$$

여기서 가스상과 액체상의 벽면 전단응력 τ_G, τ_L 은 식(4), (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_G = \frac{1}{2} f_G \rho_G u_G^2 \quad (4)$$

$$\tau_L = \frac{1}{2} f_L \rho_L u_L^2 \quad (5)$$

여기서 각 상의 관 마찰계수 f_G, f_L 는 식(6), (7)과 같이 정의된다.

$$f_G = C_G (Re_G)^{-m} \quad (6)$$

$$f_L = C_L (Re_L)^{-n} \quad (7)$$

또한 각 상의 레이놀즈수는 식(8), (9)와 같다.

$$Re_G = \frac{u_G d_G}{\nu_G} \quad (8)$$

$$Re_L = \frac{u_L d_L}{\nu_L} \quad (9)$$

여기서 u_G, u_L 은 가스상과 액체상의 실제속도이며, d_G, d_L 은 각 상의 수력직경을 의미하고 ν_G, ν_L 은 각 상의 동점성계수이다.

한편, 기액계면 전단응력 τ_i 는 가스상과 액체상의 상대속도 $(u_G - u_L)$ 를 사용하여 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_i = \frac{1}{2} f_i \rho_G (u_G - u_L)^2 \quad (10)$$

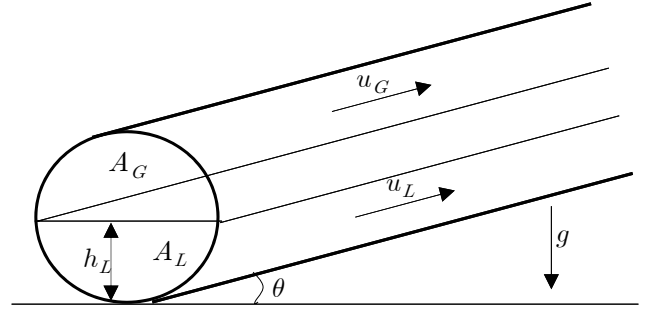


Fig. 1. Stratified flow model with an inclination.

여기서 f_i 는 기액계면 마찰계수로써 식(11)과 같이 정의할 수 있다.

$$f_i = BC_G (Re_i)^{-m} \quad (11)$$

이 식에서 B 는 기액계면의 상태에 따른 난류보정계수 (turbulence coefficient) 이고, 레이놀즈수 Re_i 는 가스상과 액체상의 상대속도 $(u_G - u_L)$ 와 기체상의 수력직경 d_G 및 동점성계수 ν_G 를 이용하여 식(12)와 같이 표현할 수 있다.

$$Re_i = \frac{(u_G - u_L) d_G}{\nu_G} \quad (12)$$

또한 앞에서 기술한 식들 중의 C_G, C_L 과 m, n 값은 흐름의 상태에 의존하는 즉, 흐름이 층류 혹은 난류에 따라 정해지는 정수 값으로써 식(13)과 같다.

$$Re_G, Re_L < 1500, C_G = C_L = 16, m = n = 1 \quad (13)$$

$$Re_G, Re_L \geq 1500, C_G = C_L = 0.046, m = n = 0.2$$

따라서 식(4)~(12)에 정의된 식들을 식(3)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$C_G \left(\frac{u_G d_G}{\nu_G} \right)^{-m} \frac{\rho_G d_G^2}{2} \frac{S_G}{A_G} - C_L \left(\frac{u_L d_L}{\nu_L} \right)^{-n} \frac{\rho_L d_L^2}{2} \frac{S_L}{A_L} \quad (14)$$

$$+ BC_G \left(\frac{(u_G - u_L) d_G}{\nu_G} \right)^{-m} \frac{\rho_G d_G^2}{2} \left(\frac{S_i}{A_G} + \frac{S_i}{A_L} \right)$$

$$- g(\rho_L - \rho_G) \sin \theta = 0$$

또한 위 식의 양변을 $\frac{4}{D} C_G \left(\frac{U_G D}{\nu_G} \right)^{-m} \frac{\rho_G U_G^2}{2}$ 로 나누고 정리

하면 식(15)이 얻어진다.

$$(\overline{u_G \overline{d_G}})^{-m} (\overline{u_G})^2 \frac{\overline{S_G}}{A_G} - X^2 (\overline{u_L \overline{d_L}})^{-n} (\overline{u_L})^2 \frac{\overline{S_L}}{A_L} \quad (15)$$

$$+ B (\overline{u_G \overline{d_G}})^{-m} (\overline{u_G})^2 \left(1 - \frac{1}{\xi} \frac{\overline{u_L}}{\overline{u_G}}\right)^{2-m} \left(\frac{\overline{S_i}}{A_G} + \frac{\overline{S_i}}{A_L}\right) - 4Y = 0$$

여기서 $\xi = U_G/U_L$ 로서 가스상과 액체상의 길보기 속도비 ($U_G = Q_G/A$, $U_L = Q_L/A$, Q_G , Q_L ; 가스상과 액체상의 체적유량)이다. 또한 X 는 Martinelli 파라미터(Lockhart and Martinelli, 1949)로서 가스상과 액체상이 각각 단독으로 관내를 흐를 경우의 압력손실비를 의미하며, Y 는 중력과 관의 경사각도에 관련된 중력-경사 파라미터(gravity-inclination parameter)로써 각각 식(16), (17)과 같다.

$$X^2 = \frac{\frac{4}{D} C_L \left(\frac{U_L D}{\nu_L}\right)^{-n} \frac{\rho_L U_L^2}{2}}{\frac{4}{D} C_G \left(\frac{U_G D}{\nu_G}\right)^{-m} \frac{\rho_G U_G^2}{2}} \quad (16)$$

$$Y = \frac{g(\rho_L - \rho_G) \sin \theta}{\frac{4}{D} C_G \left(\frac{U_G D}{\nu_G}\right)^{-m} \frac{\rho_G U_G^2}{2}} \quad (17)$$

그리고 식(15) 중의 “ $\overline{\quad}$ ”로 표시된 값들은 변수가 길이 단위인 경우에는 관직경 D 로, 면적인 경우에는 D^2 로 무차원화한 값들이다. 즉,

$$\overline{d_G} = \frac{d_G}{D} = \frac{4\overline{A_G}}{\overline{S_G} + \overline{S_i}}$$

$$\overline{d_L} = \frac{d_L}{D} = \frac{4\overline{A_L}}{\overline{S_L}}$$

$$\overline{S_G} = \frac{S_G}{D} = \cos^{-1} \left(2\frac{h}{D} - 1\right) = \cos^{-1}(2\overline{h} - 1)$$

$$\overline{S_L} = \frac{S_L}{D} = [\pi - \cos^{-1}(2\overline{h} - 1)]$$

$$\overline{S_i} = \frac{S_i}{D} = (1 - (2\overline{h} - 1)^2)^{0.5}$$

$$\overline{A_G} = 0.25 \left[\cos^{-1}(2\overline{h} - 1) - (2\overline{h} - 1)(1 - (2\overline{h} - 1)^2)^{0.5} \right]$$

$$\overline{A_L} = 0.25 \left[\pi - \cos^{-1}(2\overline{h} - 1) + (2\overline{h} - 1)(1 - (2\overline{h} - 1)^2)^{0.5} \right]$$

또한 각 상의 무차원 속도는 식(18)과 같다.

$$\overline{u_L} = \frac{u_L}{U_L} = \frac{\pi}{4A_L}$$

$$\overline{u_G} = \frac{u_G}{U_G} = \frac{\pi}{4A_G} = \frac{1}{\alpha} \quad (18)$$

한편, 기액계면 전단응력 τ_i 을 소거하기 위해 식(1)과 (2)를 더하고 이상류 압력손실 $\left(\frac{dp}{dz}\right)_{TP}$ 로 나타내면 식(19)를 얻을 수 있다.

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_{TP} = \frac{\tau_G S_G + \tau_L S_L}{A_G + A_L} + \frac{(\rho_G A_G + \rho_L A_L)g \sin \theta}{A_G + A_L} \quad (19)$$

식(19)에서 우변 첫 번째 항은 마찰에 의한 압력손실 성분이며, 두 번째 항은 중력에 의한 압력손실 성분을 의미한다. 따라서 이상 마찰증배계수(two-phase multiplier) ϕ_{GO}^2 는 식(20)과 같이 구할 수 있다.

$$\phi_{GO}^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dz}\right)_f}{\left(\frac{dp}{dz}\right)_G} = \frac{\frac{\tau_G S_G + \tau_L S_L}{A_G + A_L}}{\frac{4}{D} C_G \left(\frac{U_G D}{\nu_G}\right)^{-m} \rho_G U_G^2} \quad (20)$$

또한 식(20)에 식(4)~(9)를 대입하고 무차원화 하여 정리하면 식(21)을 얻을 수 있다.

$$\phi_{GO}^2 = \frac{1}{\pi} \left[X^2 (\overline{u_L \overline{d_L}})^{-n} (\overline{u_L})^2 \overline{S_L} + (\overline{u_G \overline{d_G}})^{-m} (\overline{u_G})^2 \overline{S_G} \right] \quad (21)$$

여기서 “ $\overline{\quad}$ ”로 표시된 값들은 앞에서 기술한 무차원 값들과 동일하다.

3. 계산결과

3.1 가스상의 체적분율

가스상의 체적분율 α 는 유로단면적(A)과 가스상이 차지하는 단면적(A_G)의 비로 정의할 수 있으며, 식(22)과 같다.

$$\alpha = \frac{A_G}{A} = \frac{1}{u_G} \quad (22)$$

이 식에서 $\overline{u_G}$ 값은 무차원 액체레벨 $\overline{h_L} = h/D$ 에 의존하는 값이며, 따라서 $\overline{h_L}$ 값을 0에서 1까지 변화시키며 계산하면 가스상의 체적분율 α 를 구할 수 있다.

또한 Fig. 2는 식(15)을 이용하여 계산한 결과를 Martinelli 파라미터 X 와 가스상의 체적분율 α 와의 관계로 나타낸 것이다.

식(15)의 계산에 있어서 가스상과 액체상의 겉보기 속도비 값은 $\xi=10$, 기액계면의 상태에 따른 난류보정계수 값은 $B=1$, 중력-경사 파라미터 값은 $Y=-1000 \sim +1000$ 로 하였다. 또한 그림 중의 실선은 가스상과 액체상을 모두 난류로 취급하여 계산한 결과이고, 파선은 양상을 모두 층류로 하여 계산한 결과를 나타낸다. 그림으로부터 중력-경사 파라미터 Y 값이 0 보다 작아질수록 가스상의 체적분율 α 는 증가하는 경향을 보이며, 0 보다 커질수록 α 값은 작아짐을 알 수 있다. 이는 식(17)에 포함되어 있는 값들 중에 $\sin\theta$ 값을 제외한 모든 값들은 양(+)의 값이기 때문에 Y 값의 부호는 $\sin\theta$ 값에 의해서만 결정된다. 따라서 $\sin\theta > 0$ (+ Y)인 경우는 유체의 흐름이 상향 흐름이고, $\sin\theta < 0$ (- Y)인 경우는 하향흐름에 해당된다. 또한 Y 의 절대값은 중력가속도 g 와 밀도차 $\Delta\rho(=\rho_L-\rho_G)$ 및 관경 D 가 증가할수록 큰 값을 갖게 된다. 그러므로 식(17) 중에 $\sin\theta$ 값을 제외한 모든 값이 일정한 조건에서 $\sin\theta$ 값이 -1에 가까워질수록 가스상의 체적분율 α 는 최대값에 이르게 되고, $\sin\theta$ 값이 +1에 가까워질수록 최소값이 되기 때문에 Y 값이 0 보다 작아질수록 가스상의 체적분율 α 는 증가하게 된다. 한편, 중력가속도 g 값이 0인 무중력 상태 혹은 기름과 물과 같이 밀도차가 거의 없는 흐름 및 $\sin\theta=0$ (수평 흐름)인 경우에는 중력-경사 파라미터 Y 값을 $Y=0$ 으로 하여 가스상의 체적분율을 구할 수 있다.

Fig. 3은 식(15)의 Y 값이 일정한 조건 즉, $Y=+100$ 혹은 $Y=-100$ 인 조건에서 기체상과 액체상을 모두 난류로 가정하여 계산한 결과로서 기액계면의 난류보정계수 B 값이 가스상의 체적분율 변화에 미치는 영향을 보여준다. 그림 중의 파선은 $Y=+100$ 인 조건에서 B 값을 $B=0.01 \sim 1000$ 으로 변화시키며 계산한 결과로서 각각의 B 값에 대해 X 값이 감소할수록 가스상의 체적분율 α 는 점차 증가하다가 각각 일정한 값을 유지한다. 또한 B 값이 증가할수록 α 값도 증가하지만, B 값이 $B < 1$ 인 경우에는 α 값은 B 값의 변화에 대해 큰 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 한편, 그림 중의 실선은 Y 값을 $Y=-100$ 하여 계산한 결과이다. α 값은 B 값이 증가할수록 증가하지만 X 값이 감소할수록 α 값에 미치는 B 값의 영향은 점점 줄어드는 것을 알 수 있다. 또한 $X=0.63$ 에서는 모든 B 값에 대해 α 값이 0.9에 가까워지게 되고, $X < 0.63$ 인 범위에서는 α 값의 예측이 어려워짐을 알 수 있다.

3.2 마찰압력손실

Fig. 4는 식(21)을 이용하여 계산한 결과로서 Martinelli 파라미터 X 와 기액이상류의 이상 마찰증배계수(two-phase multiplier) ϕ_{GO}^2 와의 관계를 보여준다. 이 계산에 있어서 식(21)중에 “-”로 표시된 무차원 값들은 앞에서 언급한 바와 같이 무차원 액체레

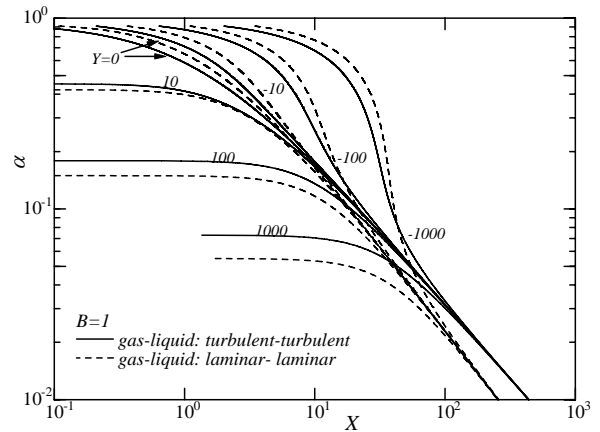


Fig. 2. Effect of gravity-inclination parameter Y values on gas volumetric fraction at turbulence coefficient $B=1$.

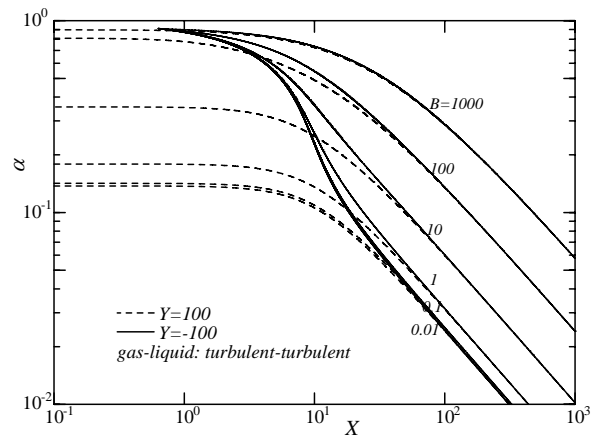


Fig. 3. Effect of turbulence coefficient B values on gas volumetric fraction at gravity-inclination parameter $Y=100$ or $Y=-100$.

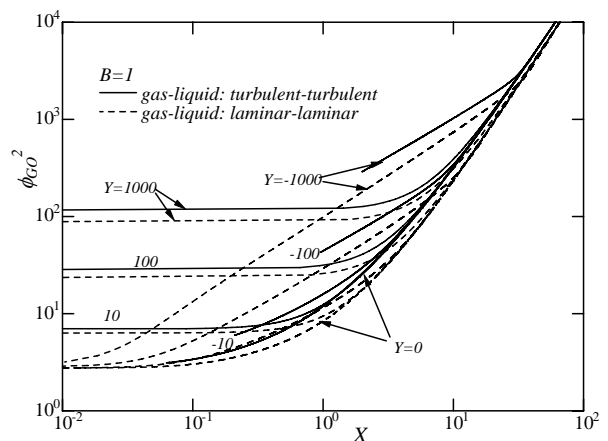


Fig. 4. Effect of gravity-inclination parameter Y values on two-phase multiplier at turbulence coefficient $B=1$.

벨 $\overline{h_L}$ 의 변화에 모두 의존하는 값들이다. 또한 X 값은 식(15)을 X 에 대한 식으로 재정리하면 얻을 수 있으며, 따라서 식(21)은 기체상과 액체상의 겉보기 속도비 ξ , 기액계면의 난류보정계수 B , 중력-경사 파라미터 Y 가 포함된 이상 마찰증배계수 ϕ_{GO}^2 에 대한 관계식이다. 그리고 그림 중의 실선과 파선은 B , ξ 및 Y 값을 각각 $B=1$, $\xi=10$, $Y=-1000 \sim +1000$ 으로 하고 가스상과 액체상을 모두 난류로 취급하여 계산한 결과를 나타낸다. 그림으로부터 $Y < 0$ 인 조건에서 양상을 모두 난류로 취급하여 계산한 경우, Y 의 절대 값이 감소할수록 ϕ_{GO}^2 값도 감소하고, 보다 낮은 ϕ_{GO}^2 값까지도 예측할 수 있지만, 일정 한계 값에 도달하게 되면 그 이하 범위에서는 ϕ_{GO}^2 값의 예측이 어려움을 알 수 있다. 그러나 양상을 층류로 간주하고 계산한 경우에는, 매우 낮은 X 값의 범위까지 ϕ_{GO}^2 값을 예측할 수 있으며, $X < 0.01$ 인 범위에서는 $\phi_{GO}^2 = 2.6$ 값에 가까워지는 것을 알 수 있다. 한편, $Y > 0$ 인 조건으로 계산한 경우에는 Y 값이 증가할수록 ϕ_{GO}^2 값은 증가하게 되고, 양상을 모두 난류로 계산한 경우가 층류로 계산한 것 보다 약간 큰 ϕ_{GO}^2 값을 예측하는 것을 알 수 있다. 또한 중력가속도 값이 $g=0$ 혹은 밀도차 $\Delta\rho=0$ 또는 $\sin\theta=0$ 인 경우에 해당하는 $Y=0$ 인 조건으로 계산한 결과는 $X > 0.03$ 인 범위에서 양상을 난류로 취급하여 계산한 결과가 다소 큰 ϕ_{GO}^2 값을 예측하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 양상의 겉보기 속도비 $\xi=10$, Y 값은 각각 $Y=+100$, $Y=-100$ 으로 하고, 기체상과 액체상을 모두 난류로 취급하여 식(21)을 계산한 결과이다. 그림 중의 실선은 Y 값을 $Y=-100$ 하여 계산한 결과이며, 기액계면의 난류보정계수 B 값이 증가할수록 ϕ_{GO}^2 값도 증가 하지만, X 값이 일정 범위 이하가 되면 ϕ_{GO}^2 값을 예측할 수 없음을 알 수 있다. 그러나 $Y=+100$ 인 조건으로 계산한 경우에는 $X < 0.025$ 범위 내에서 B 값이 증가할수록 ϕ_{GO}^2 값은 감소하지만, $X > 8$ 인 범위 내에서는 B 값의 증가와 함께 ϕ_{GO}^2 값도 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 상향 흐름($Y > 0$)의 이상마찰증배계수 ϕ_{GO}^2 값이 하향 흐름($Y < 0$)의 경우 보다 기액계면의 난류보정계수 B 값의 영향을 크게 받으며, X 값의 범위에 따라서 그 효과가 달라짐을 의미한다.

4. 실험결과와의 비교

4.1 수평류

Fig. 6~8은 해석결과와 Choi(2004)의 실험 데이터를 비교한 것이다. 그는 관경 $D=10\text{mm}$, 길이 $L=600\text{mm}$ 의 투명 아크릴제 수평 원관($\sin\theta=0$)을 시험부로 하여 지상($1g$, $g=9.81\text{m/s}^2$)

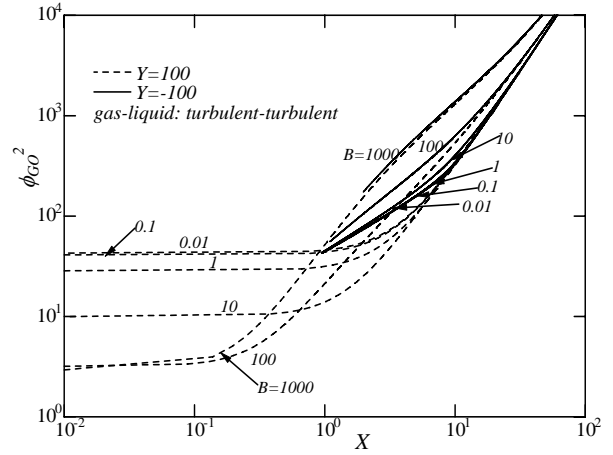


Fig. 5. Effect of turbulence coefficient B values on two-phase multiplier at gravity-inclination parameter $Y=100$ or $Y=-100$.

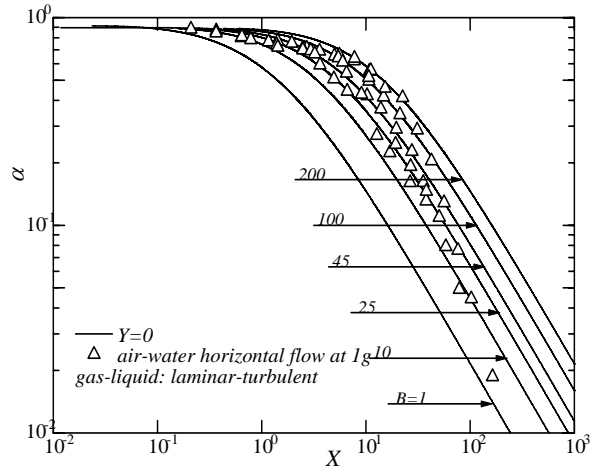


Fig. 6. Comparison with gas volumetric fraction data for air-water horizontal flow at $1g$ condition.

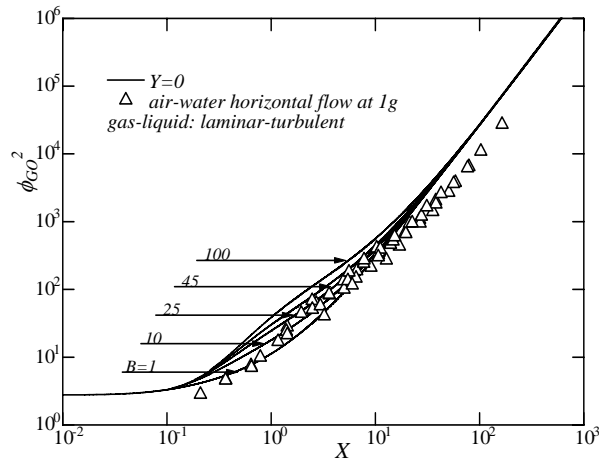


Fig. 7. Comparison with two-phase multiplier for air-water horizontal flow at $1g$ condition.

에서 실험을 실시하였다. 그는 작동유체로서 공기와 물을 사용하였고, 공기와 물의 유량범위는 각각 $Q_G = 0.2 \sim 95 \text{ l/min}$, $Q_L = 0.5 \sim 11.8 \text{ l/min}$ 이다. 또한 가스상의 체적분율은 4개의 원형 전극을 이용하여 전기적 폐회로를 구성하고, 그 폐회로에 직류 전압을 인가하는 직류정전압 방식으로 측정하였다. 마찰 압력손실은 다이어프램 방식의 차압계를 이용하여 600 mm 간의 차압을 측정하였다. 한편, 그의 실험결과와 비교를 위한 계산에 있어서 각종 물성 값들은 그들의 실험이 20°C 에서 실시된 것을 고려하여, 그의 실험 온도를 기준으로 한 값들을 사용하였다. Fig. 6은 식(15)의 계산결과와 Choi(2004)의 가스상의 체적분율 데이터와 비교한 것을 보여준다. 그림 중의 실선들은 $Y = 0$, $\xi = 10$ 으로 하고, B 값을 변화시키며 계산한 결과이다. 그림으로부터 알 수 있듯이, 그의 가스상의 체적분율 데이터는 모두 $1 < B \leq 200$ 의 범위 내에 존재하고 있으며, Martinelli 파라미터 X 값이 감소할수록 보다 큰 B 값으로 계산한 결과와 일치하는 경향을 보인다. 이는 X 값이 작아질수록 액체상의 유속에 비해 기체상의 유속이 상대적으로 증가하게 되고, 기액계면 또한 보다 거친 계면상태로 되기 쉽기 때문에, 보다 큰 B 값으로 계산한 결과와 일치하는 것으로 여겨진다. 또한 Fig. 7은 식(21)의 계산결과와 Choi(2004)의 마찰압력손실 데이터를 이용하여 산출한 이상마찰증배계수 ϕ_{GO}^2 와 비교한 것이다. ϕ_{GO}^2 값은 X 값의 증가와 더불어 증가하는 경향을 보여준다. 또한 기체상의 유량이 비교적 큰 $0.2 < X < 1.4$ 인 범위에서는 그들의 실험 결과는 $B = 1$ 로 계산한 결과와, $1.8 < X < 14$ 인 범위에서는 X 값의 증가와 함께 $B = 10, 25, 45$ 으로 계산한 결과와 매우 좋은 일치를 보여준다. 그러나 $X > 14$ 인 범위 즉, 기체상의 유량이 액체상의 유량 보다 상대적으로 매우 작은 영역에서는 모든 B 값에 대한 계산결과는 실험결과를 다소 과소평가함을 알 수 있다. Fig. 8은 가스상의 체적분율 α 와 이상마찰증배계수 ϕ_{GO}^2 간의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림은 앞에 보여준 바와 같이 Fig. 6의 가스상의 체적분율 α 의 전체적인 평가에서는 B 값을 45로 계산한 결과가, Fig. 7의 이상마찰증배계수 ϕ_{GO}^2 의 평가에서는 $B = 10$ 로 계산한 결과가 실험결과를 가장 잘 예측하듯이, 각각 다른 B 값으로 실험결과를 예측하기 때문에, α 와 ϕ_{GO}^2 를 종합적으로 평가하기 위한 것이며, 그 평가 결과 실험결과는 $B = 25$ 로 계산한 결과가 가장 합리적인 예측을 보여준다.

4.2 수직류

Fig. 9~11은 Fujii et al.(2000)의 실험 데이터와 계산결과를 비교한 것이다. 그들은 관경 $D = 10.5 \text{ mm}$, 길이 $L = 353 \text{ mm}$ 의 수직관($\sin\theta = 1$)을 시험부로 하고, 작동유체로서 질소가스와 물을 사용하였으며, 유량범위는 각각 $Q_G = 41 \sim 208 \text{ l/min}$, $Q_L = 0.25 \sim 2.3 \text{ l/min}$ 으로 하여 지상에서 실시하였다.

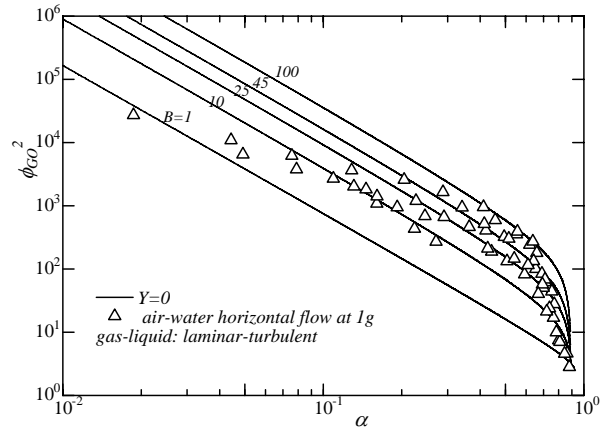


Fig. 8. Estimation of turbulence coefficient B values with two-phase multiplier for air-water horizontal flow at 1g condition.

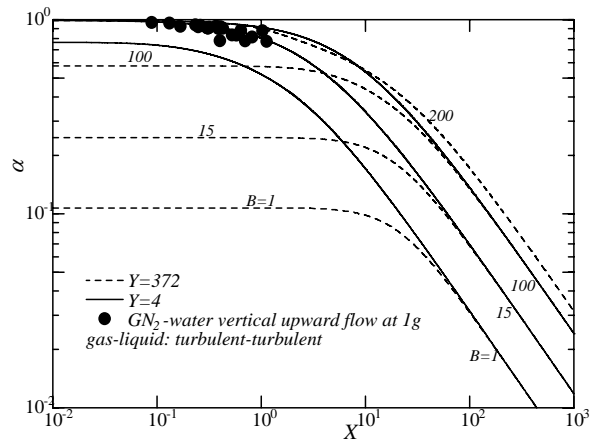


Fig. 9. Comparison with gas volumetric fraction data for GN_2 -water vertical upward flow at 1g condition.

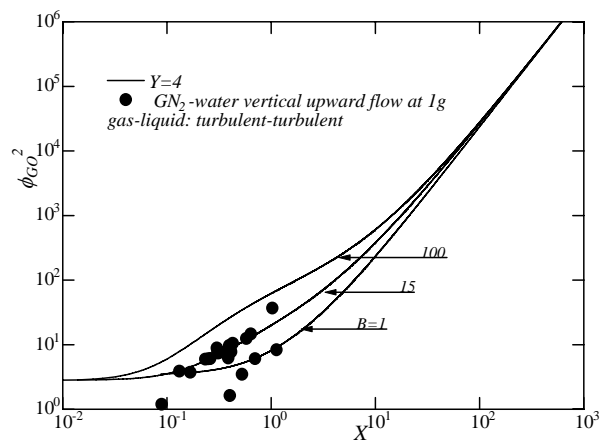


Fig. 10. Comparison with two-phase multiplier for GN_2 -water vertical upward flow at 1g condition.

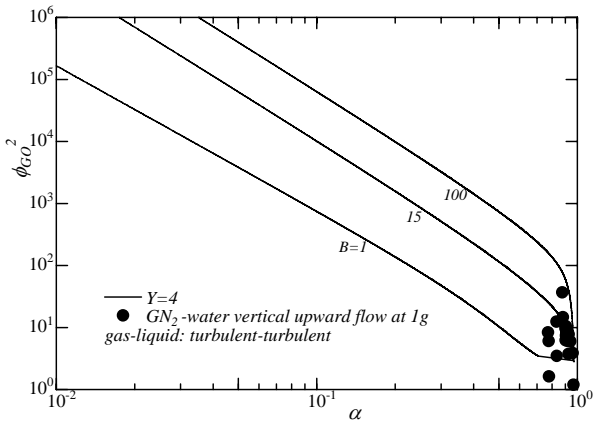


Fig. 11. Estimation of turbulence coefficient B values with two-phase multiplier and gas volumetric data for GN_2 -water vertical upward flow at $1g$ condition.

또한 가스상의 체적분율은 액막 센서를 이용하여 측정하였으며, 마찰압력손실은 수직거리 192mm 간의 차압을 측정하여 얻은 데이터를 이용하여 산출하였다. 또한 계산에 있어서 물성 값들은 25°C 을 기준으로 한 값들을 사용하였다. Fig. 9는 계산 결과와 Fujii et al.(2000)의 가스상의 체적분율 데이터를 비교한 것이다. 그림 중의 파선과 실선은 양상의 겉보기 속도비를 $\xi = 145$ 으로 하고, 식(17)으로부터 계산되어진 최대 및 최소 Y 값을 이용하여 얻어진 결과이다. 그림으로부터 알 수 있듯이, 실험결과는 최대 Y 값 $Y = 372$ 으로 계산한 결과 보다 최소값 $Y = 4$ 로 하여 계산한 결과가 보다 작은 B 값으로 예측이 가능하며, 보다 좋은 예측 결과를 보여준다. 따라서 Fig. 10은 최소 Y 값 $Y = 4$ 을 사용하여 Fujii et al.(2000)의 이상마찰증배계수를 평가한 결과이며, 그 결과 기액계면 난류보정계수 B 값은 $B = 15$ 으로 평가되었다. 또한 Fig. 11은 가스상의 체적분율 α 와 이상마찰증배계수 ϕ_{GO}^2 에 대한 B 값의 평가를 보여준다. 그림 중의 실선은 $Y = 4$ 으로 계산한 결과이며, 藤井 등의 가스상의 체적분율과 이상마찰증배계수는 $B = 15$ 으로 평가할 수 있었다. 이는 앞서 기술한 Choi(2004)의 가스상의 체적분율과 이상마찰증배계수에 대한 B 값이 각각 다른 값으로 평가된 것과는 달리 藤井 등의 실험결과는 모두 $B = 15$ 으로 평가된 것은, 그들의 실험이 Choi(2004)의 실험범위에 비해 매우 한정적인 범위이고, 기체상의 유속이 액체상의 유속에 비해 상대적으로 매우 높은 실험조건에서 실험이 행해졌기 때문으로 판단된다.

6. 결 론

본 논문에서는 경사도를 가진 2유체 층상류 모델에 운동량식을 적용하여 기액이상류 가스상의 체적분율과 이상마찰증배계수에 관한 이론적 해석을 실시하였다. 본 해석적 접근 방법을 통하여 다양한 경사각도를 갖는 배관 내 기액이상류 흐름의 체

적분율과 마찰압력손실을 동시에 예측할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 기액계면의 상태에 따른 난류보정계수 B 값이 일정한 조건에서는 중력-경사 파라미터 Y 값이 작아질수록 보다 큰 가스상의 체적분율과 이상마찰증배계수 값을 예측한다. 또한 본 해석결과와 기존의 실험결과와의 비교에 있어서는, 가스상의 체적분율과 이상마찰증배계수를 각각 독립적으로 평가하는 것 보다 동시에 취급하여 평가하는 것이 보다 합리적인 평가 결과를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Brauner, N. and Moalem Maron, D.(1992), Analysis of Stratified/Non-Stratified Transitional Boundaries in Inclined Gas-Liquid Flows, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 18, No.4, pp. 541-557.
- [2] Chisholm, D.(1967), A Theoretical Basis for the Lockhart-Martinelli Correlation for Two-Phase Flow, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 10, pp. 1767-1778.
- [3] Choi, B. H(2004), Two-Phase Flow Characteristics in an Adiabatic Horizontal Tube, KSPSE, Vol. 8, No.1, pp. 36-40.
- [4] Fujii, T., Asano, H., Ogura, A., Yamaoka, M. and Yamada, H.(2000), A Study of Flow Characteristics in Gas-Liquid Two-Phase Flows under Microgravity (Effect of Gravity and Liquid Surface Tension on Liquid-Film Structure)", Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., 66-652-B, pp. 3085-3091.
- [5] Lockhart, R. W. and Martinelli, R. C.(1949), Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two-Component Flow in Pipes, Chem. Eng. Pro., Vol. 45, pp. 39-48.
- [6] Taitel, Y. T. and Dukler, A. E.(1976), Brief Communication a Theoretical Approach to the Lockhart-Martinelli Correlation for Stratified Flow, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 2, pp. 591-595.
- [7] Van Dresar, N. T. and Siegwarth, J. D.(2001), Near-Horizontal, Two-Phase Flow Patterns of Nitrogen and Hydrogen at Los Mass and Heat Flux, NASA/TP-2001-210380, pp. 1-31.

원고접수일 : 2008년 10월 13일

원고수정일 : 2008년 12월 03일(1차)

2008년 02월 06일(2차)

게재확정일 : 2009년 03월 20일