

〈論 文〉

# 반류 2 상유동에서의 계면마찰계수의 특성

이 상 천\* · 김 동 수\*\*

(1990년 8월 22일 접수)

## Characteristics of the Interfacial Friction Factor in Countercurrent Two-Phase Flows

Sang Chun Lee and Dong Soo Kim

**Key Words :** Countercurrent Stratified Two-Phase Flow(반류성층 2상유동), Interfacial Friction Factor(계면마찰계수), Equivalent Roughness(등가조도), Empirical Correlation(실험식).

### Abstract

A unified correlation of the interfacial friction factor for air-water and steam-water flows in inclined rectangular channels has been developed. The correlation was expressed in the form of a power law of the liquid and the gas Reynolds number, and the liquid-to-gas viscosity ratio. In addition, a relation between the equivalent roughness and the intensity of wave height fluctuation of the interface has been investigated. A new dimensionless intensity of fluctuation including a liquid film Reynolds number is proposed. It has been shown that the dimensionless equivalent roughness, which is calculated from the Nikuradse equation, can be uniquely related to this dimensionless intensity of fluctuation for both air-water and steam-water flows.

### 기 호 설 명

$a$  : 계면과 기상최대속도점 사이의 거리(m)  
 $b$  : 상벽면과 기상최대속도점 사이의 거리(m)  
 $D_h$  : 수력직경(m)  
 $f$  : 마찰계수  
 $H$  : 관높이(m)  
 $h$  : 파고(m)  
 $\Delta(h')$  : 계면파 교란강도(m)  
 $k_s$  : 평균표면조도(m)  
 $Re$  : 레이놀즈수  
 $U$  : 평균속도(m)  
 $u$  :  $x$ 방향 속도성분(m/s)  
 $u^*$  : 계면마찰속도(m/s)

$v$  :  $y$ 방향 속도성분(m/s)  
 $w$  : 관폭(m)  
 $\alpha$  : 기공률  
 $\delta$  : 평균액막두께(m)  
 $\theta$  : 관경사각

### 하 침 자

$f$  : 액상  
 $g$  : 기상  
 $i$  : 계면  
 $w$  : 벽면

### 1. 서 론

\*정회원, 영남대학교 공과대학 기계공학과

\*\*정회원, 영남대학교 대학원

contactor, reflux condenser, film separator 등에 널리 응용되며, 최근에 와서는 가압수형 원자로의 안전해석과 관련하여 관심의 대상이 되고 있는 유동형태이다<sup>(1)</sup>. 이 유동에서는 기상과 액상이 층을 이루어 흐르며, 두 상을 분리하는 계면(interface) 위에는 여러가지 형태의 파가 나타난다. 공학적인 관점에서 가장 널리 관찰되는 계면파의 형태는 자갈이 배열된 구조(pebbly structure)를 가지는 3차원파이다. 이러한 파가 존재할 때 계면전단응력은 유동의 압력강하, 기액상 속도분포, 난류강도 등 유동변수와 밀접한 연관이 있으며 계면의 불안정성, 계면을 통한 열 및 물질전달현상에 영향을 미치는 중요한 인자이다.

파가 존재하는 거칠은 계면 위에서의 전단응력해석은 실험적인 방법에 의존해야 되는데 이것은 계면파에 대한 이론적인 모델링이 불가능하기 때문이다. 지금까지 발표된 계면전단응력 또는 계면마찰계수에 관한 실험식들은 공학적 응용을 위하여 주로 무차원 기액상속도, 유체의 물성치, 무차원 액막 두께 또는 기공율 등 거시적인 유동변수들의 함수로 표현되었다<sup>(2-4)</sup>. 현재까지 발표된 반류유동에 대한 실험식으로는 Kim<sup>(4)</sup>, Lee와 Bankoff<sup>(5)</sup>, 이와 이<sup>(6)</sup>, Wallis<sup>(7)</sup>, 그리고 Bharathan등<sup>(8)</sup>이 있다. 이 가운데 Wallis<sup>(7)</sup>와 Bharathan등<sup>(8)</sup>의 실험식은 수직반류 환상유동에 관한 것으로 계면마찰계수를 기공율만의 함수로 표시하였다. 반면에 Lee와 Bankoff<sup>(5)</sup>, 이와 이<sup>(6)</sup>는 계면파의 구조를 측정하여 이들의 통계치와 계면마찰계수의 상관관계를 구명하였으며 또 마찰계수를 기액상 레이놀즈 수의 함수로 표현되는 실험식을 개발하였다.

그러나 이 실험식들은 단일 2상 유동매질과 특정한 기하학적 형상에서 개발되었기 때문에 유동매질과 관의 기하학적 크기가 다른 경우 적용하는데 문제점이 있다. 이러한 사실은 포화수-수증기의 2상 유동을 다룬 Lee와 Bankoff<sup>(5)</sup>와 공기-물의 2상 유동에 관한 이와 이<sup>(6)</sup>의 결과에서 확인할 수 있다. 즉, Lee와 Bankoff<sup>(5)</sup>는 포화수-수증기의 근사수평 반류 성층유동에서 3차원 계면파일 경우 계면마찰계수,  $f_i$ 를 다음과 같이 표현하였다.

$$f_i = A + B(Re_g^* - Re_g) \quad (1)$$

여기에서  $A$ 와  $B$ 는 실험상수이며  $Re_g^*$ 는 3차원 계면파에서 구름파(roll wave)로의 천이 할때의 임계기상 레이놀즈 수로 액상 레이놀즈 수의 함수로

표현된다. 또 이와 이<sup>(6)</sup>도 물-공기의 반류성층유동에서 계면마찰계수를 식 (1)과 동일한 형태로 표현하였다. 이 식은 각 매질에 대한 계면마찰계수를 비교적 정확하게 나타내어 주지만 포화수-수증기의 경우와 물-공기의 경우에 대한  $A$ 와  $B$ 의 값을 비교한 결과 서로 다른 값을 나타냈으며 따라서  $A$ 와  $B$ 는 유체의 물성치 그리고 유동조건에 따른 함수로 추정된다. 또 계면마찰계수와 계면의 유효조도로 간주되는 교란강도의 상관관계도 유동매질에 따라 달라지는 사실을 밝혀 냈다.

이 결과에 의하면 포화수-수증기의 경우 교란강도는 물-공기에 대한 교란강도에 비하여 몇배의 크기를 가지나 계면마찰계수의 값은 동일한 크기의 정도(order of magnitude)를 가지는 것으로 나타났다. 따라서 이 결과는 Cohen과 Hanratty<sup>(9)</sup>가 제안하고 그 후에 많은 연구자들에 의하여 인용된 사실, 즉 계면파의 교란강도를 단순히 계면의 유효조도로 간주한 사실에 문제점이 있다는 것을 암시하고 있다.

이러한 사실을 바탕으로 본 연구에서는 근사수평 반류 성층유동에서의 계면마찰계수에 관한 일반화된 실험식을 개발하고자 한다. 이 실험식은 본 저자가 발표한 포화수-수증기와 물-공기의 실험자료를 기초로 개발되며 공학적인 응용을 위하여 기액상레이놀즈 수와 유체의 물성치를 포함하는 거시적인 유동변수로 표현된다. 또 동일한 계면 마찰계수에 대한 Nikuradse의 표면조도<sup>(10)</sup>와 계면의 특성치로 표현되는 무차원 계면유효조도와 상관관계를 구명하고 포화수-수증기와 물-공기의 2상유동에 공통적으로 적용할 수 있는 무차원 계면유효조도를 제안할 예정이다. 마지막으로 본 연구에서 개발한 실험식과 기존 실험식을 비교 검토하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 계면전단응력 결정식

Fig. 1에 나타난 바와 같이 수평면과  $\theta$ 의 각도를 이루는 2차원 반류 성층2상유동에서 기상유동의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_g}{\partial x} + \frac{\partial v_g}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\rho_g \left( u_g \frac{\partial u_g}{\partial x} + v_g \frac{\partial u_g}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P_g}{\partial x} - \rho_g g \sin \theta + \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (3)$$

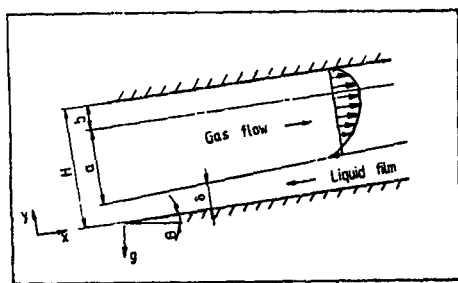


Fig. 1 Coordinate system of a countercurrent two-phase flow

이 식들을 이용하여 기상에 대한 적분운동량방정식 (integral momentum equation)을 다음과 같이 얻을 수 있다<sup>(6)</sup>.

$$\tau_i = -\rho_g \int_0^H \frac{\partial u_g^2}{\partial x} dy - (H - \delta) \left[ \frac{dP_g}{dx} \right] - \rho_g g (H - \delta) \sin \theta + \tau_{wg} \quad (4)$$

여기에서 오른편의 첫항은 운동량 변화량을, 두번째 항은 압력강하, 세번째 항은 중력, 네번째 항은 전단응력을 표시한다.

식 (4)에서 벽면전단응력,  $\tau_{wg}$ 는 다음과 같이 표현될 수 있는데

$$|\tau_{wg}| = \frac{1}{2} f_{wg} \rho_g U_g^2 \quad (5)$$

2상성충유동에서는 벽면마찰계수가 움직이는 계면의 영향을 받지 않는다는 실험결과에 따라 단상유동에 적용되는 Blasius식에서 구할 수 있다<sup>(11)</sup>.

$$f_{wg} = 0.079 Re_g^{-1/4} \quad (6)$$

이 식에서 기체 레이놀즈 수는 다음과 같이 정의된다.

$$Re_g = \frac{U_g D_{hg}}{\nu_g} \quad (7)$$

계면마찰계수,  $f_i$ 는 일반적으로 전단응력을 기상의 동압으로 나눈 값으로 정의된다.

$$f_i = \frac{2|\tau_i|}{\rho_g (U_g - U_i)^2} \quad (8)$$

여기에서  $U_i$ 는 계면속도로 음의 값을 가진다. 계면속도는 측정이 매우 어려우며 유동상태에 따라 달라지나 3차원과 영역에서는 액막두께의 평균속도로 간주하여도 그렇게 큰 오차를 유발하지 않는다<sup>(4)</sup>.

한편 기액 2상유동이 완전화립된 상태에 도달하면 계면전단응력과 벽면전단응력의 비를 다음과 같

이 표현할 수 있다. Fig. 1에 도시된 것과 같이 최대속도위치에서 액막두께를 제외한 거리를,  $a$ , 윗벽면에서 최대속도위치까지의 거리를,  $b$ 라 하며 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\tau_i}{\tau_{wg}} = \frac{a}{b} \quad (9)$$

사각관에서 기공률은 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha = \frac{a+b}{H} \quad (10)$$

식 (9)와 (10)에서  $a$ ,  $b$ 를 구하면 아래 식으로 나타난다.

$$a = \frac{\tau_i}{\tau_i + \tau_{wg}} (\alpha H) \quad (11)$$

$$b = \frac{\tau_{wg}}{\tau_i + \tau_{wg}} (\alpha H) \quad (12)$$

이 관계식은 기상속도분포의 최대지점을 예측하는데 이용될 수 있다.

## 2.2 계면파의 구조에 관한 정의식

시간에 따라 파고의 높이가 변하는 계면파가 이동할 때 계면파의 통계적 해석을 통하여 평균액막두께 (mean film thickness)는 다음의 식에서 구할 수 있다<sup>(1)</sup>.

$$\delta = \int_0^1 h(P) dP \quad (13)$$

여기서  $P$ 는 파고에 대한 누적확률분포함수 (cumulative probability distribution function)로 탐침접촉법 (needle contact method)에 의하여 구하여진다<sup>(1)</sup>. 계면파의 유효조도 (effective roughness)를 나타내는 물리량으로 파고의 교란강도 (the intensity of wave height fluctuation)가 있는데 이 값은 순간파고에서 평균액막두께를 뺀 값의 근평균제곱치 (root mean square value)이다.

$$\Delta(h) = \left[ \int_0^1 (h(P) - \delta)^2 dP \right]^{1/2} \quad (14)$$

## 2.3 계면마찰계수에 대한 지배인자

계면마찰계수는 계면파의 통계적 특성치와 밀접한 관련이 있는 것으로 추론되나 이 특성치는 거시적인 유동인자에 의하여 지배되는 것으로 간주할 수 있다. 따라서 계면마찰계수는 유동속도에 관한 무차원변수, 관의 치수, 그리고 기액상유체의 물성

치 등으로 표현될 수 있을 것이다. 서론에서 언급하였듯이 많은 연구자들은 유동속도에 관한 무차원 변수를 기액상의 레이놀즈수를 선택하였으며 이 사실은 단상유동에서 얻은 결과에 바탕을 두고 있다. 유체의 물성치 가운데 계면전단응력에 미치는 인자로는 점성계수와 표면장력이 있다. 이 가운데 표면장력은 계면파를 안정시키는 역할을 하나 본 연구에서 다룬 근사수평관에서의 계면파는 모세관파(capillary wave)가 아닌 중력파(gravity wave)이므로 표면장력의 영향을 거의 무시하여도 무방하다. 반면에 점성계수는 계면파의 구조에 중요한 영향을 미칠 것으로 판단되므로 이 물성치를 고려하면 계면마찰계수는 다음과 같은 인자들의 함수로 생각할 수 있다.

$$f_i = f_i(Re_g, Re_f, \frac{\mu_L}{\mu_g}) \quad (15)$$

이 표현식에서  $Re_g$ 와  $Re_f$ 는 기액상 레이놀즈 수이며 특성길이를 각 상의 수력직경을 사용하였다.

### 3. 실험 및 결과 자료

본 연구에서는 본 저자의 실험을 통하여 얻은 물-공기와 포화수-수증기의 실험자료를 근거로 계면마찰계수에 관한 특성을 구명하였다. 본 연구에서 다룬 2상유동은 거의 동일한 기하학적 조건을 가지고 있는데 수평면과 4.5°를 이루는 경사사각관을 사용하였으며 관의 치수는 서로 다르나 중형비는 공히 5이다. 물-공기와 포화수-수증기에 관한 이들 실험장치는 다음의 사항을 고려하여 제작되었다.

- (1) 시험관내 2상유동이 2차원 유동을 유지하도록 하였다.
- (2) 시험관내 측정지점에서 유동이 완전확립되도록 관의 길이를 충분히 길게 시험관을 제작하였다.
- (3) 3차원 계면파가 관찰될 수 있는 2상유동 범위를 충분히 확보할 수 있도록 기액상의 유량을 조절하였다.

이들 실험장치와 방법, 그리고 결과 실험자료에 관하여 간략하게 소개한다.

#### 3.1 물-공기 실험

물-공기에 대한 실험장치는 시험부, 공기 공급부, 그리고 물순환부로 구성된다. 시험관은 폭 15 cm, 높이 3cm, 길이 1.72m인 직사각관으로 물입

구와 출구사이의 거리는 1.44m이다. 공기의 공급은 시험관 후방에 설치된 흡입식 송풍기에 의하여 이루어지며 날개축의 회전수 조절기에 의하여 공기유량을 조정한다. 물은 밀폐회로내를 순환하며 시험부에서 7.1m높이에 설치된 420ℓ용량의 일정수두탱크로부터 공급된다. 계면전단응력을 결정하기 위하여 시험관내 물입구에서 0.3m와 0.7m 떨어진 두 지점에서의 공기속도분포와 압력강하를 측정하였으며 평균액막두께는 두 지점의 중간지점에서 탐침접촉법에 의하여 구하였다. 실험은 대기압하의 상온에서 수행하였으며 유량범위대는 3차원 계면파가 관찰되는 범위, 즉  $2,000 < Re_f < 4,000$ 과  $6,000 < Re_g < 18,000$ 의 영역을 택하여 실험을 수행하였다. 기타 실험장치 및 측정방법에 관한 사항은 참고문헌 (6)에 자세히 기술되어 있다.

#### 3.2 포화수-수증기 실험

포화수-수증기에 대한 실험장치는 시험부, 밀폐회로를 순환하는 물공급부, 그리고 보일러와 연결된 수증기공급부로 구성되어 있다. 시험부는 폭 38 cm, 높이 7.6cm, 길이 2.13m인 직사각관으로 물입구와 출구 사이의 거리는 1.27m이다. 포화수는 과열증기와 열교환을 통하여 시험관내에 유입되며 수증기는 130~140°C의 과열상태로 보일러에서 공급된다. 계면전단응력을 결정하기 위하여 시험관내 물입구에서 0.47m와 0.65m 떨어진 두 지점에서 증기속도분포와 압력강하를 측정하였으며 평균액막두께는 두 지점의 중간지점에서 탐침접촉법에 의하여 측정하였다. 실험은 대기압 또는 이보다 약간 높은 압력하에서 수행하였으며 유량 범위는  $5,000 < Re_f < 50,000$ 와  $30,000 < Re_g < 70,000$ 이다. 본 실험에 관한 구체적인 사항은 참고문헌 (1)에 기술되어 있다.

#### 3.3 실험결과 자료

포화수-수증기와 물-공기 실험을 통하여 얻은 자료는 참고문헌 (12)에 자세히 소개되어 있다. 본 실험을 통하여 측정된 유동인자는 기액상의 질량유량, 압력강하, 평균액막두께, 평균과고진폭, 파고의 근평균제곱치, 그리고 파고 교란강도이다. 측정된 유동 인자를 이용하여 기액상 레이놀즈수, 계면 및 벽면전단응력, 계면마찰계수, 마찰속도, 기상의 최고속도위치 등을 계산하였다.

본 연구에서 다룬 2상유동은 기상속도분포의 측

정을 통하여 측정지점에서 완전확립됨을 확인하였으며, 따라서 식 (4)에서 압력강하와 평균액막두께만의 측정을 통하여 계면전단응력을 계산하였다. 그리고 계면파의 구조는 탐침을 최소파고높이에서 최고높이까지 0.02~0.04mm간격으로 단계적으로 이송하여 각 지점에서 물과 탐침의 상대접촉시간들을 측정하여 결정하였다. 각 상의 레이놀즈 수는 식 (7)과 같이 각 상의 평균유속, 수력직경을 구하여 계산하였으며, 이 결과를 이용하여 식 (6)에 따른 벽면마찰계수를 구하였다. 기상의 최고속도지점은 식 (11)에 따라 계산하였는데 속도분포 측정결과와 거의 동일한 것으로 나타났다.

#### 4. 실험자료의 분석 및 고찰

본 연구에서는 물-공기와 포화수-수증기의 2상유동에서의 평균액막두께, 파고교란강도와 계면마찰계수에 대한 자료를 분석하였다. 또 계면마찰계수에 대한 등가조도와 파고교란강도의 상관관계를 구명하여 물성치가 서로 다른 물-공기와 포화수-수증기의 2상유동에 공히 적용할 수 있는 무차원변수를 찾아냈다. 그리고 공학적으로 응용이 가능한, 두 매질에 적용가능한 일반화한 계면마찰계수에 대한 실험식을 개발하였으며 이 식을 기존의 다른 식들과 비교 검토하였다.

##### 4.1 실험자료의 특성분석

실험을 통하여 얻은 물-공기와 포화수-수증기에 대한 평균액막두께, 파고교란강도 및 계면마찰계수가 Figs. 2~4에 도시되어 있다. Fig. 2에 도시되

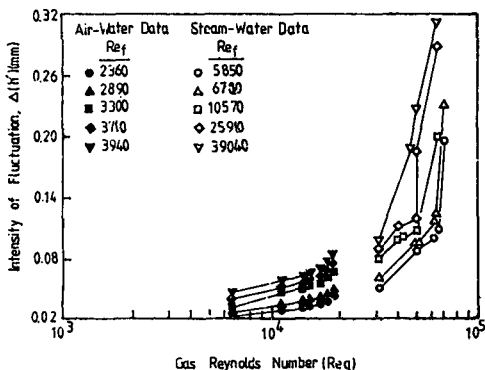


Fig. 2 Data of the mean film thickness for steam-water and air-water flows

어 있는 평균액막두께는 계면에 작용하는 전단응력이 액막유동에 지장을 주므로 기상유량이 증가할때 함께 증가하는 결과를 보여주고 있다. 일반적으로 반류기상유동이 없을 경우 평균액막두께는 다음의 식으로 주어진다.

$$\delta^* = A Re_f^B \quad (16)$$

여기에서  $A$ 와  $B$ 는 상수이며  $\delta^*$ 는 무차원 평균액막두께로 다음과 같이 정의된다.

$$\delta^* = \delta \left[ \frac{\rho_l (\rho_l - \rho_g) \sin \theta}{\mu_f^2} \right]^{1/3} \quad (17)$$

식 (16)에서 상수  $A$ 와  $B$ 는 실험적 또는 해석적으로 결정될 수 있는데 그 결과는 김과 김<sup>(13)</sup>에 요약되어 있다. Lee<sup>(1)</sup>는 액막유동이 난류일 때 간단한 해석적 모델을 세워  $A=0.135$ ,  $B=7/12$ 로 제안하였다. 본 실험에서 얻은 자료를 Lee의 식과 비교하였는데 10%의 오차범위안에 포함된다.

Fig. 3은 파고교란강도를 나타낸 그림으로 액상 레이놀즈 수가 일정할 때 기상 레이놀즈 수에 따른 파고교란강도가 도시되어 있다. 이 그림에 따르면 파고교란강도는 액상 레이놀즈수가 일정할 때 기상 레이놀즈수와 함께 증가하는 사실을 알 수 있다. 포화수-수증기의 경우에 대한 교란강도는 물-공기의 값보다 훨씬 큰 데 이것은 기액상의 레이놀즈수가 훨씬 큰 까닭에 기인하지만 한편으로는 액상의 점성계수도 영향을 미치는 것으로 판단된다. 즉 동일한 액상 레이놀즈수의 경우, 액상의 점성계수가 커지면 평균액막두께는 증가하나 파고교란강도는 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 계면마찰계수로 식 (8)에 의하여 정의

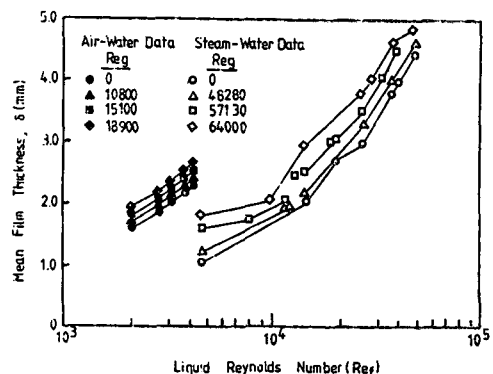


Fig. 3 Data of the intensity of wave height fluctuation for steam-water and air-water flows

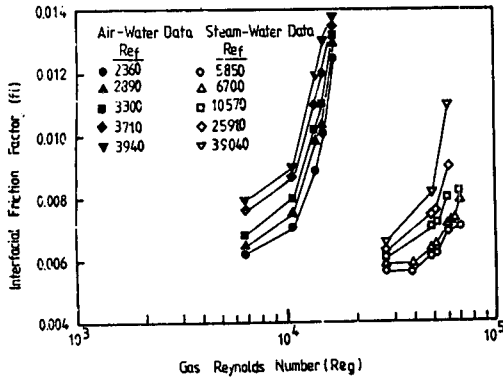


Fig. 4 Data of the interfacial friction factor for steam-water and air-water flows

된 값이다. 3차원 계면파에 대한 계면마찰계수는 물-공기와 포화수-수증기의 양 경우 모두 0.015보다 적은 값을 가지는 것으로 실험결과가 보여 주고 있다. 이 그림에서 흥미로운 것은 물-공기의 경우 기액상 레이놀즈수와 파고교란강도가 포화수-수증기보다 훨씬 작으나 계면마찰계수는 동등한 크기의 정도를 가진다는 사실이다. 이것은 레이놀즈수에 미치는 관크기 효과(tube-size effect)가 높기 때문이며, 앞에서 언급했듯이 3차원 계면파의 경우, 한정된 범위내의 값을 가지며 그 이상의 계면마찰계수는 구름파로의 천이를 야기시킨다는 사실과 일치하고 있다<sup>(6)</sup>.

#### 4.2 계면마찰계수에 대한 등가조도와 파고교란강도의 상관관계

단상난류유동에서 레이놀즈수가 매우 큰 경우 벽면마찰계수는 상대조도만의 함수로 나타내며 이들의 상관관계는 Nikuradse식<sup>(10)</sup>으로 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log \left( \frac{k_s}{D} \right) + 3.48 \quad (18)$$

여기에서 마찰계수  $f$ 는 식 (5)에 따라 정의되며  $k_s$ 는 표면의 평균조도를 의미한다. 기액 2상유동에서 계면은 기상유동에 의하여 유발된 계면파에 의하여 거칠어지는데 이 계면의 거칠기와 계면마찰계수의 상관관계를 고찰하는 것은 흥미있는 일이다. 본 연구에서는 식 (18)를 이용하여 계면마찰계수와 동일한 값을 가지는 고체벽면의 등가조도(equivalent roughness)를 계산하였다. 이 과정에서 직경,

$D$ 는 원관내의 단상유동과 사각관내 성층 2상유동의 기하학적 상사성을 고려하여 계면에서 최대 기속도를 갖는 위치까지의 거리,  $a$ 의 두배로 계산하였다.

Cohen과 Hanratty<sup>(9)</sup>는 파고교란강도를 유효조도로 간주하여 등가조도와 상관관계를 다음과 같이 무차원화하여 비교 고찰하였다.

$$k_s^+ = u^* k_s / \nu_g \quad (19)$$

$$\Delta(h)^+ = u^* \Delta(h) / \nu_g \quad (20)$$

이 식에서  $u^*$ 는 계면전단응력을 기준한 마찰속도, 즉  $\sqrt{\tau_i / \rho_g}$ 이다. 그러나 이 무차원변수들은 Cohen과 Hanratty<sup>(9)</sup>에 의하여 물-공기의 단일 2상매질에 대한 실험결과를 근거로 제안되었는데 본 연구에서 물-공기와 포화수-수증기의 복수 2상매질에 대하여 적용한 결과, 실험자료의 분산현상이 매우 심하였다. 이 사실은 Figs. 3과 4에서 제시한 물-공기와 포화수-수증기의 교란강도와 계면마찰계수에 대한 실험 결과를 쉽게 확인할 수 있다. 즉, 교란강도는 포화수-수증기의 경우 물-공기의 값들과 비교할 때 훨씬 큰 값을 가지나 계면마찰계수는 거의 비슷한 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이것은 액상의 유동조건에 기인한 것으로 추측되며, 따라서 본 연구에서는 액상의 평균속도, 평균액막두께 그리고 액상의 점성계수를 고려하여 다음과 같이 새로운 무차원 파고교란강도 제시하고자 한다.

$$\Delta(h)^+ = [u^* \Delta(h) / \nu_g] [\nu_f / U_f \delta] \quad (21)$$

식 (19)와 (21)를 사용하여 물-공기와 포화수-수증기의 실험자료를 비교한 결과가 Fig. 5에 나타나

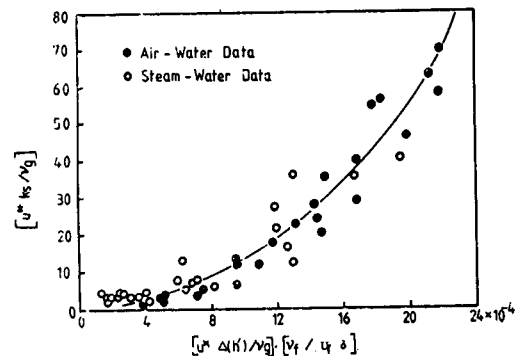


Fig. 5 Comparison between the dimensionless equivalent roughness and the dimensionless intensity of wave height fluctuation

있다. 이 그림은 본 연구에서 제시한 식 (19)에 따른 무차원 등가조도와 식 (21)에 의한 무차원 파고교란강도가 물-공기와 포화수-수증기의 실험자료를 비교적 일관되게 나타내어 주고 있다. 이들의 상관관계를 최소자승법(least squares method)로 구한 결과, 다음의 관계식으로 나타났다.

$$k_s^+ = 2.3282 \exp[0.1595 \times 10^4 (\Delta h')^+] \quad (22)$$

따라서 기액 2상유동에서 파고교란강도의 값이 주어질 때 식 (18), (19), (21) 그리고 (22)을 사용하여 계면마찰계수,  $f_i$ 를 반복법(iteration technique)으로 구할 수 있다.

그리고 한가지 언급할 사항은 식 (18)에 의하여 계산된 등가조도,  $k_s$ 는 계면의 유효조도,  $\Delta(h')$ 보다 훨씬 크다는 사실이다. 즉 계면의 유효조도와 같은 표면조도를 가지는 고체벽면에서의 마찰계수가 계면마찰계수보다 작다는 사실을 의미한다. 이 결과는 매우 흥미로운 사실인데 동류성층 2상유동에서도 유사한 실험결과가 보고되어 있다<sup>(14)</sup>. 계면전단응력은 고체벽면의 전단응력과는 달리 계면의 거칠기에 기인한 전단응력 뿐 아니라 움직이는 계면파에 의하여 유발된 난류전단응력의 합으로 표현된다. 따라서 이 결과는 계면에서의 전단응력이 계면거칠기 보다는 파에 의하여 유발된 난류전단응력에 큰 영향을 받는다는 사실을 암시하고 있다.

### 4.3 계면마찰계수에 대한 실험식의 유도

공학적인 응용을 위하여 계면마찰계수를 거시적인 유동변수로 표현한 실험식의 개발은 중요한 과제이다. 반류유동에서의 계면마찰계수에 관한 실험식은 매우 드물며 발표된 식들도 주로 수직환상유동에 관한 것들이다. 최근에 Lee와 Bankoff<sup>(5)</sup>, Kim 등<sup>(4)</sup>, 그리고 이와 이<sup>(6)</sup>가 반류 성층유동에서 계면마찰계수에 관한 실험식은 발표하였으나 단일 2상유동의 실험자료에 근거하고 있기 때문에 유동조건 또는 관크기가 다른 경우에는 적용에 문제가 있다. 지금까지 발표된 실험식 가운데 다양한 2상유동의 매질과 관형상에 적용 가능한 일반화된 식이 없는 실정이다. 본 연구에서는 포화수-수증기와 물-공기의 실험자료를 근거로 3차원 계면파의 영역에서의 계면마찰계수에 대한 통합 실험식의 개발을 시도하였다. 식 (15)에 표현된 대로 계면마찰계수를 기액상 레이놀즈 수와 기액상 점성계수비의 합수로 보고 지수법칙(power law)에 따라 다음과 같

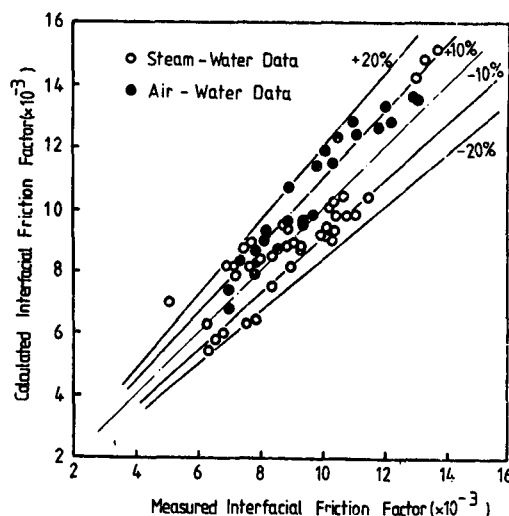


Fig. 6 Comparison of data of the interfacial friction factor with the generalized correlation

이 나타내었다.

$$f_i = C Re_g^{m_1} Re_g^{m_2} \left( \frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{m_3} \quad (23)$$

본 연구를 통하여 얻은 실험자료를 근거로 다중선형회귀법(multiple linear regression method)에 의하여 상수 및 지수를 구한 결과,  $C = 4.13 \times 10^{-11}$ ,  $m_1 = 0.96$ ,  $m_2 = 0.31$ , 그리고  $m_3 = 1.86$ 으로 나타났다. 이 식은 기액상 레이놀즈수가 증가할 때 계면마찰계수도 함께 증가하는 사실을 나타내는데 기상 레이놀즈수에 의한 영향이 액상 레이놀즈수보다 훨씬 큰 사실을 반영하고 있다. 또 액상 및 기상의 점성계수의 비가 계면마찰계수에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났는데 이 결과는 단일 2상 유동에서는 규명할 수 없는 사실이다. 이 실험식과 실제 자료를 비교한 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 이 그림에서 식 (23)에 따른 계산치와 실험치의 오차는 평균  $\pm 10\%$ 이내이며 대부분의 자료가  $\pm 20\%$ 범위 안에 있는 사실을 알 수 있다.

### 4.4 기존 실험식과 통합 실험식의 비교

본 연구에서 개발한 통합 실험식의 타당성을 검증하기 위하여 기존의 실험식과 비교분석하였다. 반류유동의 경우 현재까지 개발된 실험식은 주로 수직환상유동을 대상으로 하였기 때문에 본 실험식과의 직접적인 비교는 불가능하다. 따라서 본 연구

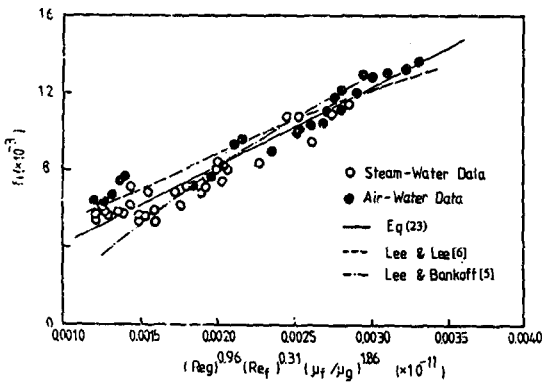


Fig. 7 Comparison of the present correlation with steam-water and air-water correlations

에서는 Lee와 Bankoff<sup>(5)</sup>의 포화수-수증기에 관한 실험식, 그리고 이와 이<sup>(6)</sup>의 물-공기의 실험식과 본 통합의 실험식을 비교하였다. 기존의 이 실험식들은 식 (1)로 표현된 것으로 실험상수 A와 B는 2상유동매질에 따라 다른 값을 가지고 있다.

Fig. 7은 기존의 실험식과 통합 실험식을 물-공기와 포화수-수증기의 실험자료와 비교한 그림이다. 여기에서 횡좌표제는 본 실험식의 함수 인자인 기액상 레이놀즈 수와 기액상의 점성계수비로 나타내었다. 기존의 실험식에서는 마찰계수를 기액상 레이놀즈 수만의 함수로 나타냈기 때문에 이 비교를 위하여 본 실험식에서 사용한 함수 인자로 환산하여 계산하였으며 기존 실험식이 표시된 점선은 실험자료의 기액상 레이놀즈 수와 점성계수비의 값을 대입하여 계산된 결과이다. Fig. 7에서 기존의 실험식들은 각각의 식이 근거한 실험자료와는 비교적 잘 일치하나 2상매질의 물성치가 상이하므로 상대방 매질과는 상당한 차이를 나타내고 있다. 본 연구에서 개발한 통합 실험식은 두 2상매질의 자료와 비교적 잘 일치하는 사실을 알 수 있다. 무엇보다도 본 실험식의 장점은 2상매질의 가장 중요한 물성치인 점성계수를 포함하므로 매질에 관계없이 적용가능하나, 식 (1)과 같이 표현된 기존의 실험식은 다른 매질에 사용할 수 없다는 점이 강조되어야 할 것이다.

## 5. 결 론

물-공기와 포화수-수증기의 2상유동에 대한 제면

마찰계수의 특성을 구명하여 통합실험식을 개발하였다. 이 실험식은 마찰계수를 기액상 레이놀즈수와 점성계수비의 함수로 보고 식 (23)과 같이 지수법칙으로 표현하였다. 이 실험식과 기존의 실험식과 비교하여 본 실험식의 타당성을 입증하였다. 그리고 계면의 유효조건인 파고교란강도에 대한 새로운 무차원 변수를 제안 하였으며 이 무차원 변수가 Nikuradse식에 의한 무차원 등가조도와 두 개의 2상유동의 매질에 대하여 일관된 상관관계를 나타냄을 밝혀냈다. 본 연구에서 얻은 결과는 앞으로 분리유동에서의 제면마찰계수를 구명하는데 큰 기여를 할 것으로 생각된다.

## 후 기

본 연구는 1989년도 문교부학술조성비에 의하여 수행되었으며 문교부관계자에게 감사의 말씀을 드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Lee, S.C., 1983, "Stability of Steam-Water Countercurrent Stratified Flow", Ph.D Dissertation, Northwestern University, Evanston, IL.
- (2) Sinai, Y.L., 1986, "An Extended Charnock Estimate of Interfacial Stress in Stratified Two-phase Flows", Int. J. Multiphase Flow, Vol. 12, No. 5, pp. 839~844.
- (3) Jensen, R.J., 1982, "Interface Transport in Horizontal Stratified Cocurrent Flow", Ph. D Dissertation, Northwestern University, Evanston, IL.
- (4) Kim, H.J., 1983, "Local Properties of Countercurrent Stratified Steam-Water Flow", Ph. D Dissertation, Northwestern University, Evanston, IL.
- (5) Lee, S.C. and Bankoff, S.G., 1983, "Stability of Steam-Water Countercurrent Flow in an Inclined Channel: Flooding", ASME J. Heat Transfer, Vol. 105, pp. 713~718.
- (6) 이상천, 이원석, 1987, "근사수평 반류성층 2상유동에서의 계면전단응력 및 마찰계수", 대한기계학회 논문집, 제12권, 제1호, pp. 116~122.
- (7) Wallis, G.B., 1969, "One-Dimensional Two-Phase Flow", McGraw-Hill, New York, pp. 315~374.
- (8) Bharathan, D.G., Wallis, G.B. and Richter, H.J., 1979, "Air-Water Countercurrent Annular Flow", EPRI Report, NP-1165.



- (9) Cohen, L.S. and Hanratty, T.J., 1968, "Effect of Waves at a Gas-Liquid Interface on a Turbulent Air Flow", J. Fluid Mech., Vol. 31, Part 3., p. 467.
- (10) Schlichting, H., 1979, "Boundary Layer Theory", McGraw-Hill, New York, pp. 615~623.
- (11) Hanratty, T.J. and Engen, J.M., 1957, "Interaction between a Turbulent Air Stream and a Moving Water Surface", AIChE J., Vol. 3, pp. 299~304.
- (12) 이상천, 1990, "반류 2상유동에서의 계면전단응력의 특성", 문교부 보고서.
- (13) 김효정, 김 갑, 1986, "물-증기 역류 성층 이상유동에서의 국부평균액체층두께", 대한기계학회논문집, 제10권, 제6호, pp. 947~958.
- (14) Suzanne, C., 1985, "Structure de Le'coulement Stratifie de gaz et de Liquide en Canal Rectangulaire", Ph.D Thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, France.