

<論 文>

근사수평 반류성층 2상유동에서의 계면전단응력 및 마찰계수

이 상 천\* · 이 원 석\*\*

(1987년 9월 11일 접수)

Interfacial Shear Stresses and Friction Factors in Nearly-Horizontal Countercurrent Stratified Two-Phase Flow

Sang Chun Lee and Won Suk Lee

Key Words: Interfacial Shear Stress(계면전단응력), Interfacial Friction Factor(계면마찰 계수), Countercurrent Stratified(반류성층), Mean Film Thickness(평균액막 두께), Equivalent Roughness(등가조도)

Abstract

Interfacial shear stresses have been determined for countercurrent stratified flow of air and water in a nearly-horizontal rectangular channel, based upon measurements of pressure drop, gas velocity profiles and mean film thickness. A dimensionless correlation for the interfacial friction factor has been developed as a function of the gas and liquid Reynolds numbers. Equivalent surface roughnesses for the interfacial friction factor have been calculated using the Nikuradse correlation and have been compared with the intensity of the wave height fluctuation on the interface. The results show that the interfacial shear stress is mainly affected by turbulent mixing near the interface due to the wave motion rather than by the roughened surface.

기 호 설 명

- $A$  : 실험상수
- $B$  : 실험상수
- $D_s$  : 수력직경 (m)
- $f$  : 마찰계수
- $g$  : 중력가속도 (m/s<sup>2</sup>)
- $H$  : 관높이 (m)
- $\Delta(h')$  : 파고교란강도 (m)
- $\Delta(h')^+$  : 무차원 파고교란강도
- $k_s$  : 표면조도 (m)

- $k_s^+$  : 무차원 표면조도
- $L$  : 물입구에서 거리 (m)
- $P$  : 압력 (Pa)
- $Re$  : Reynolds 수
- $Re_s^*$  : 임계 Reynolds 수
- $U$  :  $x$  방향 평균속도
- $u$  :  $x$  방향 속도
- $v$  :  $y$  방향 속도
- $x$  : 좌표계
- $y$  : 좌표계
- $\alpha$  : 운동량플럭스 수정계수
- $\delta$  : 평균액막두께 (m)

\*정회원, 영남대학교 공과대학 기계공학과

\*\*정회원, 영남대학교 대학원

- $\theta$  : 경사각
- $\nu$  : 동점성계수 (m<sup>2</sup>/s)
- $\rho$  : 밀도 (kg/m<sup>3</sup>)
- $\tau$  : 전단응력 (Pa)

하첨자

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

1. 서론

기상과 액상이 층을 이루며 흐를 때 두 상을 분리하는 계면(interface)위에는 여러 가지 형태의 파가 나타난다. 공학적인 관점에서 가장 관심을 끄는 계면파의 형태는 자갈이 배열된 구조(pebbly structure)를 가지는 3차원파이다. 이러한 파가 존재할 때 계면위에 생기는 전단응력은 유동의 압력강하, 기액상 속도분포, 난류강도등 유동변수와 밀접한 연관이 있으며 계면의 불안정성, 계면을 통한 열 및 물질전달현상에 영향을 미치는 중요한 인자이다.

파가 존재하는 거칠은 계면에서의 전단응력 해석은 실험적인 방법에 의존해야 하는데 이것은 계면파에 대한 이론적인 모델링이 불가능하기 때문이다. 계면마찰계수에 관한 실험식들은 공학적인 응용을 위하여 주로 무차원 기액상 속도, 유체의 물성치, 무차원 액막두께 또는 기공률등 거시적 유동변수들의 함수로 표현되었다<sup>(1-3)</sup>. 그러나 이러한 실험식들은 주로 수평동류유동(horizontal cocurrent flow)에 대하여 개발되었으며 반류유동에 대한 경우는 극히 드문 실정이다. 이 유동은 wetted wall column, film contactor, reflux condenser 등에 널리 이용되며 최근에 와서는 가압수형원자로의 안전해석과 관련하여 관심의 대상이 되고 있는 형태인데 이러한 계통의 사고발생시 열유체역학적 거동해석을 위하여서는 반류유동에 대한 계면전단응력 또는 마찰계수에 관한 지식이 필요하다.

본 연구에서는 공기와 물을 매질로 사용하여 3차원 계면파가 존재하는 근사수평 반류성층유동에서의 계면전단응력과 마찰계수를 결정하였다. 기상과 액상의 유량조건에 따라 3차원 계면파의 특성을 needle contact 법에 의하여 측정하였으며, 기상의 압력강하와 속도분포를 구하여 계면전단응력을 구하였다. 또 공학적인

응용을 위하여 3차원과 영역에서의 계면마찰계수에 관한 실험식을 개발하였다. 그리고 거칠은 고체표면에서의 마찰계수를 표현한 Nikuradse 식<sup>(4)</sup>을 이용하여 계면의 등가조도(equivalent roughness)를 계산하였으며 이것을 계면의 파고교란강도와 비교분석하여 계면전단응력에 영향을 미치는 인자들을 구명하였다.

2. 이론적 배경

Fig. 1에 나타난 바와 같이 수평면과  $\theta$ 의 경사각을 이루는 2차원 반류성층유동에서 기상유동의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\rho_e \left( u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + v_x \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P_x}{\partial x} - \rho_e g \sin \theta + \frac{\partial \tau}{\partial y} \tag{2}$$

이 식에서  $\tau$ 는 전단응력으로 일반적으로 점성전단응력과 난류전단응력의 합으로 표현된다.

식 (1)에  $u_x$ 를 곱하여 식 (2)에 더하면 다음의 식을 얻는데

$$\rho_e \left[ \frac{\partial u_x^2}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} (u_x v_x) \right] = - \frac{\partial P_x}{\partial x} - \rho_e g \sin \theta + \frac{\partial \tau}{\partial y} \tag{3}$$

이 식을 평균액막두께,  $\delta$ 에서 관높이,  $H$ 까지  $y$ 에 대하여 적분하면 기상에 대한 적분운동량방정식(integral momentum equation)을 얻으며 이 식을 계면전단응력에 관하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\tau_i = - \rho_e \int_{\delta}^H \frac{\partial u_x^2}{\partial x} dy - (H - \delta) \left( \frac{dP_x}{dx} \right) - \rho_e g (H - \delta) \sin \theta + \tau_w \tag{4}$$

식 (4)에서 오른쪽 첫째항은 운동량변화량, 둘째항은 압력강하, 셋째항은 중력, 그리고 마지막항은 벽면전단응력을 나타낸다.

식 (4)의 운동량변화량은 다음과 같이 표현될 수 있다

$$\rho_e \int_{\delta}^H \frac{\partial u_x^2}{\partial x} dy = \rho_e U_e^2 (H - \delta) \frac{d\alpha}{dx} \tag{5}$$

여기에서  $\alpha$ 는 운동량플럭스 수정계수로 다음과 같이 정의되는데

$$\alpha = \frac{1}{(H - \delta)} \int_{\delta}^H \left( \frac{u_x}{U_e} \right)^2 dy \tag{6}$$

만약 기상유동이 완전확립된 상태에 도달하면  $\alpha$ 는 길이방향으로 변하지 않을 것이다.

식 (4)에서 벽면전단응력,  $\tau_w$ 는 다음과 같이 표현될

수 있는데

$$|\tau_{wx}| = \frac{1}{2} f_{wx} \rho_x U_x^2 \quad (7)$$

2상성층유동에서는 벽면마찰계수가 움직이는 계면의 영향을 받지 않는다는 실험결과<sup>(5)</sup>에 따라 단상유동에 적용되는 Blasius 식에서 구할 수 있다.

$$f_{wx} = 0.079 Re_x^{-1/4} \quad (8)$$

이 식에서 기체 Reynolds 수는 다음과 같이 정의된다.

$$Re_x = \frac{U_x D_h}{\nu_x} \quad (9)$$

따라서, 식 (4)에서 기상유동이 완전확립된 영역에 도달하면 평균액막두께와 압력강하치의 측정만으로 계면 전단응력을 계산할 수 있다.

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

$$f_i = \frac{2|\tau_i|}{\rho_x (U_x - U_i)^2} \quad (10)$$

여기에서  $U_i$ 는 계면속도로 음의 값을 가진다. 계면속도는 측정이 매우 어려우며 유동상태에 따라 달라지나 3차원파의 영역에서는 액막유동의 평균속도로 간주하여도 그렇게 큰 오차를 유발하지 않는다<sup>(6)</sup>.

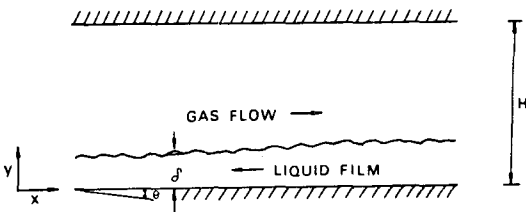


Fig. 1 Coordinate system of countercurrent flow

### 3. 실험

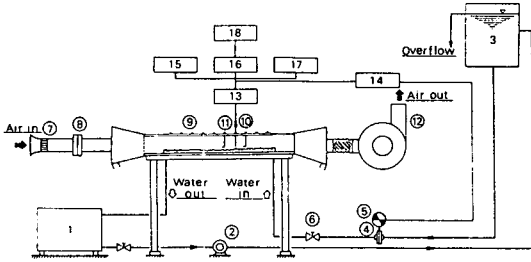
본 연구에서 사용한 실험장치는 시험부, 공기공급부, 물순환부로 구성되어 있는데 개략도가 Fig. 2에 나타나 있다. 시험부는 폭 15cm, 높이 3cm, 길이 1.72m인 직사각관으로 투명한 아크릴수지로 제작되었다. 시험관은 수평면과 4.5°의 경사각을 가지며 물입구와 출구와의 거리는 1.44m이다.

공기의 공급은 시험관 후방에 설치된 흡입식 송풍기에 의하여 이루어지는데 날개축의 회전수조절기에 의하여 공기유량이 조정된다. 이 유량은 시험관 전방에 설치된 동근 오리피스에 의하여 측정되는데 오리피스의 관직경은 7.3cm, 판직경 4.1cm, 판두께 6mm이다.

물은 밀폐회로내를 순환하며 시험부에서 7.1m 높이에 설치된 420l 용량의 일정수두탱크로 부터 공급된다. 공급관은 직경 3.18cm인 PVC 관으로 유량은 판직경 1.55cm, 판두께 3.1mm, 목직경비 0.5인 칼날오리피스를 차압변환기에 연결하여 측정하였다. 시험관내에 유입된 물은 아랫면을 따라 중력에 의하여 액막의 형태로 흐르며 시험관 출구를 나와 860l 용량의 보유탱크에 일시 저장된다. 이 물은 1마력의 원심식 펌프에 의하여 욕상에 있는 일정수두탱크로 보내어진다. 이 탱크의 수면을 일정하게 유지하기 위하여 보유탱크와 직접 연결된 바이패스(by-pass)관을 설치하였다. 본 실험장치에 관한 상세한 설명은 보고서<sup>(7)</sup>에 나타나 있다

계면전단응력을 결정하기 위하여 시험관내 물입구에서부터 0.3m와 0.7m 떨어진 두 지점에서의 공기속도 분포와 압력강하를 측정하였으며, 평균액막두께는 두 지점의 중간위치, 즉 물입구에서 0.5m 떨어진 지점에서 구하였다. 압력강하는 두 지점에 직경 0.5mm의 압력공을 설치하여 정밀경사마노미터와 미소차압변환기로 측정하였다. 차압변환기는 Baratron 223BD로 최대 10cm H<sub>2</sub>O의 압력차까지 측정할 수 있는데 PDR-5B 시그널컨디셔너(signal conditioner)를 거쳐 디지털 멀티미터(digital multimeter)로 값을 읽었다. 공기속도분포는 마이크로미터가 부착된 수직이송장치에 연결된 직경 1.6mm의 피토우정압관에 의하여 계면부근에서 시험관 윗면까지 1~1.5mm 간격으로 이동하면서 측정하였다. 피토우관이 계면가까이 접근할 때 계면과의 일부가 찢기어 액적으로 날리는 엔트레인먼트(entrapment)현상이 발생하여 속도측정에 지장을 주었기 때문에 이의 영향을 받지 않는 최접근지점에서부터 측정하였다. 피토우정압관의 동압 및 정압차도 압력강하의 측정과 마찬가지로 정밀경사마노미터와 차압변환기에 연결하여 측정하였다. 평균액막두께는 탐침(needle probe)을 계면과의 최저높이에서 최고높이까지 단계적으로 이송하면서 침과 액상의 상대접촉시간을 측정하여 계산하였다. 액막두께의 측정에 관한 자세한 내용은 다른 곳에 기술되어 있다<sup>(7)</sup>.

본 논문에서 다룬 유량범위로는 액체유량이 0.693, 0.850, 0.971, 1.093, 1.164 (kg/ms)의 5가지이며 기체유량의 경우, 0.074, 0.116, 0.150, 0.162, 0.181 (kg/ms)를 택하였다. 이 유량들은 3차원 계면파가 나타나는 영역으로 반류성층유동에서 가장 흔하게 관찰되는 파 형태이다.



- ① Holding tank
- ② Circulating pump
- ③ Constant head tank
- ④ Orifice
- ⑤ Pressure transducer
- ⑥ Control valve
- ⑦ Honeycomb
- ⑧ Orifice
- ⑨ Test section
- ⑩ Needle probe
- ⑪ Pitot-tube
- ⑫ Suction blower
- ⑬ Conductivity circuit
- ⑭ Amplifier
- ⑮ Voltmeter
- ⑯ A/D converter
- ⑰ Oscilloscope
- ⑱ Micro-computer

Fig. 2 Schematic of the experimental system

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 공기속도분포

Fig. 3은 본 실험에서 얻은 대표적인 공기속도분포를 나타낸 것이다. 이 그림에서 물입구에서 0.3m와 0.7m 떨어진 두 지점에서의 운동량플럭스 수정계수,  $\alpha$ 가 거의 동일하므로 공기유동이 완전 확립된 영역에 들어간 것으로 간주 할 수 있다. 본 연구에서 다른 유동조건 가운데 거의 대부분의 경우,  $\alpha$ 는 1.02~1.03 사이의 값을 가지며 같은 유동조건인 때 두 지점에서의  $\alpha$ 값의 차이가 1%이하이었다. 이 결과에서 공기유동은 비교적 균일한 속도분포를 갖는 난류유동이며 측

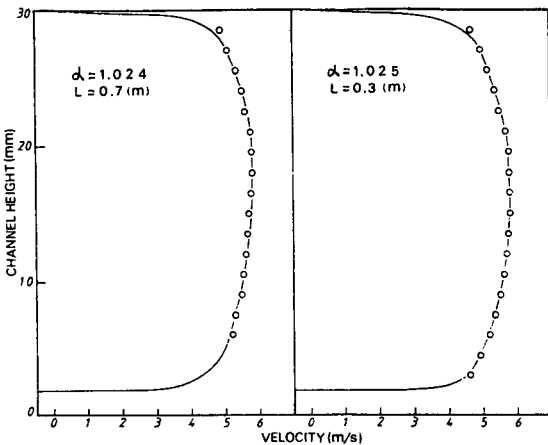


Fig. 3 Typical gas velocity profiles ( $Re_x=16,800$ ;  $Re_f=2,364$ ;  $\delta=1.813\text{mm}$ )

정구간내에서 완전확립된 상태를 나타낸다는 사실을 알 수 있다. Fig. 3에서 공기의 최대속도가 단면중심선에서 약간 윗부분에 위치하는데 이것은 계면전단응력이 벽면전단응력보다 크기 때문에 나타나는 결과이다

##### 4.2 계면전단응력의 결정

기상의 적분운동량방정식인 식(4)를 이용하여 계면전단응력을 계산하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 기상유동이 완전확립된 영역에 들어간 것으로 간주할 수 있으므로 식(4)의 오른쪽 첫항, 즉 운동량변화량을 무시하였다. 따라서 식(4)에서 압력강하와 평균액막두께의 측정으로 계면전단응력을 계산할 수 있는데 여기에서 벽면전단응력은 식(8)의 Blasius 식을 이용하여 구하였다.

Fig. 4는 액체 Reynolds 수가 일정할 때 기체 Reynolds 수의 증가에 따른 계면전단응력의 계산예를 도시한 그림으로 계면전단응력, 벽면전단응력 및 중력에 의한 압력강하의 크기가 비교되어 있다. 기체유량이 증가할 때 중력에 의한 압력강하치의 변화는 거의 없으며 계면 및 벽면전단응력은 함께 증가한다. 일반적으로 계면전단응력의 증가율이 벽면전단응력의 그것보다 훨씬 크며 유량에 따라 계면전단응력이 벽면전단응력의 1.05~2.36배의 크기를 가지는 것으로 나타났다 Fig. 5는 각상의 유량조건에 따른 계면전단응력의 경향을 도시한 그림이다. 액체유량이 일정한 경우 기체유량이 증가함에 따라 계면전단응력은 급격히 증가하나 기체유량이 일정할 때 계면전단응력은 액체유량과 함께 증가하나 증가율이 둔한 사실을 알 수 있다.

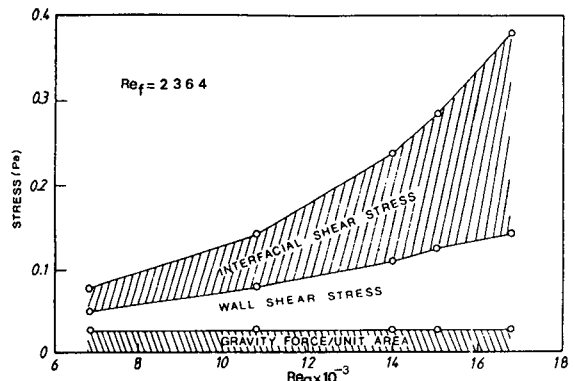


Fig. 4 Comparison of magnitudes of interfacial and wall shear stresses and gravitational pressure drops

4.3 계면마찰계수에 관한 실험식

계면마찰계수는 식(10)에 따라 계면전단응력을 기체의 계면에 대한 상대속도를 기준한 동압으로 나눈 값으로 정의된다. Fig. 6은 계면마찰계수를 기상 Reynolds 수에 따라 도시한 그림이다. 주어진 액체유량에서 기상 Reynolds 수가 증가할 수록 계면마찰계수는 증가하며 기상유량이 일정한 경우 액체유량에 대한 변화경향도 동일하다. 그러나 액상유량보다 기상유량에 대하여 훨씬 큰 영향을 받는 사실을 알 수 있다.

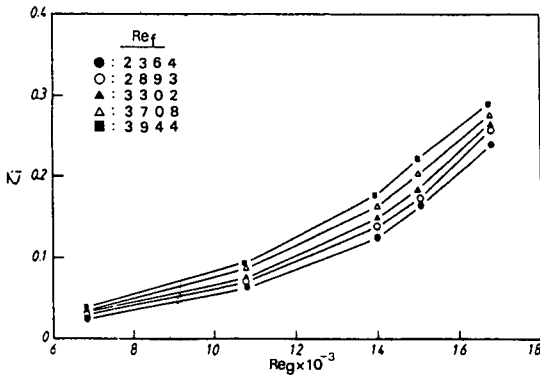


Fig. 5 Interfacial shear stresses as a function of the gas and liquid Reynolds number

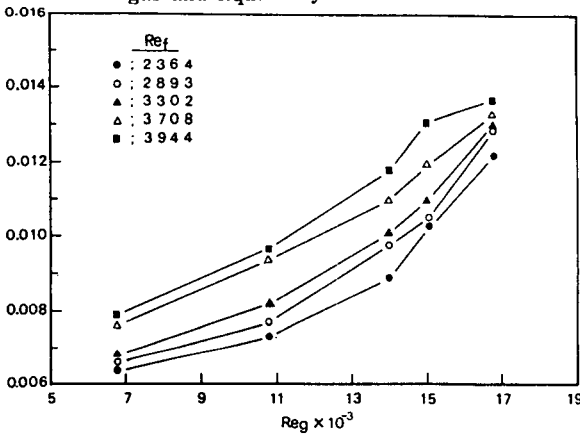


Fig. 6 Interfacial friction factors as a function of the gas and liquid Reynolds number

공학적인 응용을 위하여 계면마찰계수를 거시적인 유동변수로 표현한 실험식의 개발은 중요한 과제이다. 반류운동에서의 계면마찰계수에 관한 실험식은 매우 드물며 발표된 식들도 주로 수직환상유동에 관한 것들이다<sup>(8)</sup>. 최근에 Lee와 Bankoff<sup>(9)</sup>가 포화수-포화수증기의 근사수평반류성층유동에서 3차원파에 대한 계면마찰계수의 실험식을 발표하였다. 이들은 마찰계수,  $f_i$ 가  $(Re_r^* - Re_r)$ 에 근사적으로 비례하는 사실을 발견

하였는데 여기에서  $Re_r^*$ 는 3차원파에서 구름파(roll wave)로 천이하는 기상입계 Reynolds 수이다.

$$f_i = A + B (Re_r^* - Re_r) \tag{11}$$

여기에서  $B$ 는 비례상수이며  $A$ 는 구름파로 천이할 때의 계면마찰계수로 이 값이 포화수-포화수증기의 2상유동에서 일정한 값을 갖는다는 사실도 알아냈다. 본 연구에서 얻은 공기-물의 유동에 대한 계면마찰계수도 이와 유사한 경향을 가지는 것으로 밝혀졌는데 최소자승법을 이용하여 실험상수  $A$ 와  $B$ 를 구한 결과 다음과 같이 나타났다.

$$f_i = 0.0153 + 6.03 \times 10^{-7} (Re_r^* - Re_r) \tag{12}$$

여기에서  $Re_r^*$ 는 액상 Reynolds 수의 함수로 나타낼 수 있는데 본 실험에서 얻은 결과는 다음과 같다.

$$Re_r^* = 5.65 \times 10^4 Re_r^{-0.12} \tag{13}$$

이 실험식과 실험자료의 비교가 Fig. 7에 나타나 있다.

식(12)와(13)에서  $f_i$ 는 액상과 기상 Reynolds 수의 함수로 나타나는데 액상 Reynolds 수에 대한 의존도가 비교적 낮은 약함수(weak function)이라는 사실을 알 수 있다. 식(12)에서 구름파로 천이할 때의 계면마찰계수가 0.0153이라는 사실을 유추할 수 있는데 이 값은 포화수-포화수증기의 유동에 대한 실험치인 0.012와 비교할 만하다.

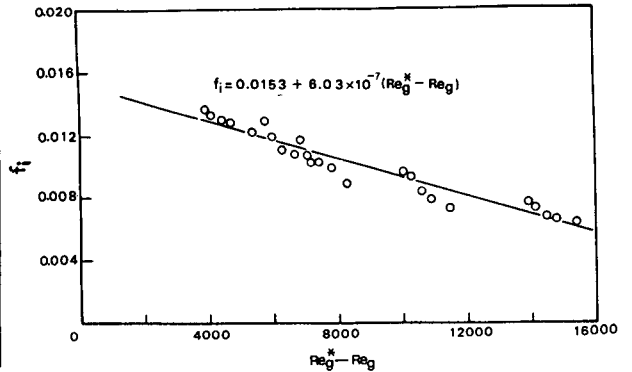


Fig. 7 Correlation of the interfacial friction factor

4.4 계면마찰계수에 대한 등가조도와 파고교란강도의 상관관계

단상난류유동에서의 벽면마찰계수는 Reynolds 수 뿐만 아니라 교체표면의 상대조도에 따른 함수로 표현된다. 기액 2상유동에서 계면은 기상유동에 의해 유발된 파로 인하여 거칠어지는데 이 계면의 거칠기와 계면마찰계수의 상관관계를 고찰하는 것은 흥미있는 일이다. 2상유동에서 파고교란강도,  $\Delta(h')$ 는 순관파고에서 평균액막두께를 뺀 값의 근제곱평균치이므로 계면의 유

효조도로 간주될 수 있다<sup>(7)</sup>.

고체벽면에 대한 벽면마찰계수와 상대조도의 함수관계는 Nikuradse식<sup>(4)</sup>으로 주어진다.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log \left( \frac{k_s}{D_h} \right) + 3.48 \quad (14)$$

여기에서 마찰계수,  $f$ 는 식(7)에 정의되어 있으며  $k_s$ 는 표면의 평균조도를 나타낸다. 식(14)를 사용하여 계면마찰계수와 동일한 값을 가지는 벽면의 등가조도를 구하여 파고교란강도와 비교하였는데 그 결과가 Fig. 8에 나타나 있다. 이 그림에서 무차원등가조도  $k_s^+$ 와 무차원교란강도  $\Delta(h')^+$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$k_s^+ = u^* \cdot k_s / \nu_x \quad (15)$$

$$\Delta(h')^+ = u^* \cdot \Delta(h') / \nu_x \quad (16)$$

이 식에서  $u^*$ 는 계면전단응력을 기준한 마찰속도, 즉  $\sqrt{\tau_i / \rho_x}$ 이다.

이 그림에서  $k_s^+$ 와  $\Delta(h')^+$ 의 관계가 포물선에 가까운 데 최소자승법에 의하여 상관관계를 구한 결과 다음의 식으로 나타났다.

$$k_s^+ = 12.8 (\Delta(h')^+)^{1.70} \quad (17)$$

이 결과는 계면마찰계수와 동일한 값을 갖기 위하여 고체면에서의 표면조도가 계면의 유효조도보다 훨씬 커야한다는 사실을 제시하고 있다. 즉 계면의 유효조도와 같은 표면조도를 가지는 고체면에서의 마찰계수가 계면마찰계수보다 작다는 사실을 의미한다. 이 결과는 매우 흥미로운 사실인데 동류성층 2상유동에서도 유사한 결과가 나와 있다<sup>(10)</sup>. 계면전단응력은 고체면전단응력과는 달리 계면의 거칠기에 기인한 전단응

력뿐 아니라 움직이는 계면파에 의하여 유발된 난류전단응력의 합으로 표현된다. 따라서 이 결과는 계면에서의 전단응력이 계면거칠기보다는 파에 의하여 유발된 난류전단응력에 큰 영향을 받는다는 사실을 암시하고 있다.

### 5. 결 론

물과 공기를 이용한 근사수평 반류성층유동에서의 계면전단응력을 공기속도분포, 압력강하, 평균액막두께를 측정하여 결정하였으며 식(10)으로 정의되는 계면마찰계수를 구하였다. 이 두 값들은 기상 및 액상 Reynolds 수에 따라 함께 증가하는 경향을 나타내었다. 공학적인 응용을 위하여 계면마찰계수에 관한 실험식을 구하였는데 결과식이 식(12)와 (13)식으로 주어져 있다. 계면마찰계수를 갖는 고체면에 대한 등가조도를 구한 결과, 이 값이 계면의 유효조도보다 훨씬 큰 사실을 밝혀냈는데 이것은 움직이는 계면파에 유발된 난류전단응력에 기인한 것으로 믿어진다.

### 후 기

본 연구는 과학재단 연구비의 지원에 의하여 이루어졌으며 재단관계자 여러분들께 깊은 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

- (1) Linehan, J.H., 1968, "The Interaction of Two-Dimensional, Stratified, Turbulent Air-Water and Steam-Water Flows", Ph. D Thesis, University of Wisconsin, Madison, WI.
- (2) Wallis, G.B., 1969, "One-Dimensional Two-Phase Flow", McGraw-Hill, New York, pp. 315~374.
- (3) No, H.C. and Kazimi, M.S., 1982, "Pressure Drop and Interfacial Drag Coefficient in Two-Phase Flow of Sodium", Nuclear Science & Engineering, Vol. 82, pp. 235~242.
- (4) Schlichting, H., 1979, "Boundary Layer Theory", McGraw-Hill, New York, pp. 615~623.
- (5) 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.

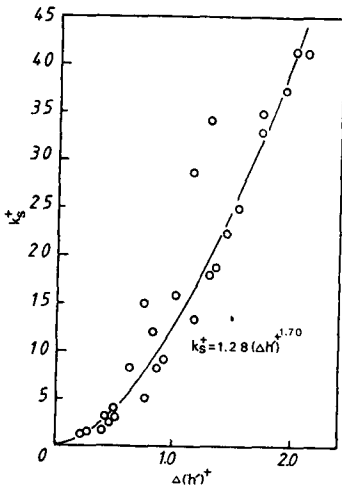


Fig. 8 Comparison between the dimensionless intensity of the wave fluctuation and the dimensionless equivalent roughness

- (6) Kim, H.J., 1983, "Local Properties of Counter-current Stratified Steam-Water Flow", Ph. D Thesis, Northwestern University, Evanston, IL.
- (7) 이 상천, 1987, "2상반류유동에서의 계면파 구조 및 전단응력", 과학재단 보고서.
- (8) Bharathan, D.G., Wallis, G.B. and Richter, H.J., 1979, "Air-Water Countercurrent Annular Flow", EPRI Report, NP-1165.
- (9) 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.
- (10) Suzanne, C., 1985, "Structure de Lécoulement Stratifié de gaz et de Liquide en Canal Rectangulaire", Ph. D Thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, France.