

<論 文>

근사수평 반류성층 2상유동에서의 3차원 계면파의 구조측정

이 상 천*

(1988년 2월 16일 접수)

Measurement of Three-Dimensional Interfacial Wave Structures in Nearly-Horizontal Countercurrent Stratified Two-Phase Flow

Sang Chun Lee

Key Words : Interfacial Wave(계면파), Countercurrent Stratified(반류 성층), Needle Contact Method(탐침 접촉법), Mean Film Thickness(평균 액막 두께), Probability Density Function(확률 밀도 함수)

Abstract

Structures of interfacial waves in nearly-horizontal countercurrent stratified air-water flow have been measured by means of a needle contact method. Based upon a statistical analysis for the liquid film distribution, statistical properties of the waves such as mean film thickness, mean wave amplitude and rms value of the wave fluctuation have been calculated. The results show that the film distribution can be described by a Gaussian probability density function for the three-dimensional wave regime. It is also indicated that the mean film thickness and the rms value of the wave fluctuation increase as gas and liquid flow rates are increased in countercurrent two-phase flow. The dimensionless intensity of the wave fluctuation may be regarded as a function of the Froude number and the dimensionless mean film thickness.

1. 서 론

기액 2상 성층유동에서 계면에 존재하는 파는 유동의 특성을 결정하는 데 중요한 역할을 한다. 이 계면파의 구조는 계면전단응력, 압력강하, 기상 및 액상의 속도분포, 기공율등의 유동변수와 밀접한 연관이 있을 뿐 아니라 계면을 통한 열 및 물질전달현상, 계면의 불안정 현상에도 영향을 미친다. 계면파에는 일반적으로 2차원파, 3차원파 및 구름파(roll wave)등이 존재하는데 이 중에서 3차원파는 자갈이 배열된 구조를 가지며 가장 넓은 유량범

위에서 발견되는 형태이다⁽¹⁾.

이러한 계면파의 구조를 측정하는 데는 몇가지 방법이 있다⁽²⁾. 이 중에서 광학적 방법이나 막컨덕턴스법(film conductance method)은 파의 형상을 가시화 시킬 수 있는 장점이 있으나 보정이 힘들고 액막이 두꺼운 경우 출력신호의 처리에 난점이 있다. 최근에는 탐침접촉법(needle contact method)을 이용하는 경향이 있는데 이 방법은 계면파 자체를 형상화시킬 수 없으나 측정방법이 간편하고 보정이 필요없다. 이 방법의 문제점이었던 침이 액상과 떨어질 때 생기는 히스테리시스효과(hysteresis effect)는 트리거회로(trigger circuit)를 이용하여 제거할 수 있다. Lee는 이 방법에 의하여 측정된 막분포함수(film distribution function)에서

*정회원, 영남대학교 공과대학 기계공학과

평균액막두께, 파고의 근평균제곱치등 파의 구조를 표시하는 통계치들을 계산하는 이론적인 근거를 정립하였다⁽⁵⁾.

계면파의 구조에 관한 연구는 많은 학자들에 의하여 수행되어 왔는데⁽⁴⁻⁶⁾ 주로 수평 또는 수직동류유동에 관하여 이루어졌으며 반류유동에 관한 실험자료는 매우 드문 실정이다. 반류유동은 막분리기, reflux condenser 등 열 및 물질전달장치에 널리 이용되며 최근에는 가압수형원자로의 안전해석과 관련하여 관심의 대상이 되고 있는 유동형태이다. 이러한 장치에서의 열유체역학적 해석이나 원자력발전 시스템의 1차 냉각수 유출사고시 분사되는 긴급냉각수의 거동해석을 위하여 이 분야에 대한 연구는 중요하다.

본 연구에서는 공기와 물을 사용한 근사수평 반류성층유동에서의 계면파 구조를 측정하였다. 3차원 파 영역내의 유동조건하에서 탐침접촉법을 이용하여 계면파의 액막분포도를 구하였으며 Gauss 모델과 비교분석하였다. 또 이 분포도에서 파의 구조와 관련된 통계치, 즉 평균액막두께, 파진폭, 파고 교란강도등을 계산하여 유동조건에 따른 경향을 분석하였다. 본 연구와 병행하여 계면전단응력과 계면마찰계수에 관한 실험을 수행하였는데⁽⁷⁾ 이 결과와 계면파 구조와의 상호연관성도 고찰하였다.

2. 계면파의 통계적 해석

시간에 따라 높이가 변화는 계면파가 이동할때, 특정한 높이에서 액상이 존재할 확률은 탐침과 액상이 접촉하는 시간을 측정으로 나눈 상대접촉시간을(fraction of relative contact time)로 나타나는 데 다음과 같이 정의된다.

$$P(h^*) = \frac{1}{T} \int_0^T H[h(t) - h^*] dt \quad (1)$$

이 식에서 T 는 측정시간, h 는 순간파고높이, h^* 는 특정높이를 나타내며 또 H 는 Heaviside단위계산함수(unit step function)로 다음과 같이 정의된다.

$$H[h(t) - h^*] = \begin{cases} 1 & (h \geq h^*) \\ 0 & (h < h^*) \end{cases}$$

평균액막두께는 일정시간동안 파의 최저높이에서 최고높이까지의 각 위치에 단계적으로 얻은 상대접촉시간율을 적분하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\delta = \int_0^1 h(P) dP \quad (2)$$

또 평균파고진폭(mean wave amplitude)은 아래와 같이 정의되며

$$\Delta \bar{h} = \int_0^1 |h(P) - \delta| dP \quad (3)$$

파고의 근 제곱 평균치(root-mean-square value)는 다음과 같다.

$$\Delta(\Delta \bar{h}) = \left\{ \int_0^1 [h(P)]^2 dP \right\}^{1/2} \quad (4)$$

계면파의 유효조도(effective roughness)를 나타내는 물리량으로 파고의 교란강도(intensity of fluctuation)가 있는 데 이 값은 순간파고에서 평균액막두께를 빼 값의 근제곱평균치이며 아래의 식에서 구할 수 있다.

$$\Delta(\bar{h}) = \left\{ \int_0^1 [h(P) - \delta]^2 dP \right\}^{1/2} \quad (5)$$

특정한 높이에서 기상과 탐침사이의 상대접촉시간율은 물리적으로 파고가 그 높이와 같거나 작은 확률을 나타내므로 누적확률분포함수로 간주될 수 있다. 따라서 파가 특정한 높이에 있을 확률을 표시하는 밀도함수는 식 (1)로 표현되는 액막분포도에 서 구하여 질 수 있다.

$$p(h) = \frac{dP}{dh} \quad (6)$$

만약 이 분포가 Gauss 확률밀도 함수를 따른다면 $p(h)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$p(h) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^{1/2} \Delta \left(\frac{1}{\bar{h}}\right) \exp\left\{-\frac{(h-\delta)^2}{2[\Delta(\bar{h})]^2}\right\} \quad (7)$$

3. 실험

3.1 실험장치

본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도가 Fig. 1에 나타나 있다. 실험장치는 시험부(test section), 공기공급부 및 물순환부로 구성되어 있다. 시험부는 폭 15cm, 높이 3cm, 중형비가 5인 직사각관으로 길이가 1.72m이며 물입구와 출구사이의 거리는 1.44m이다. 이 관은 내부유동상태를 관찰할 수 있도록 10mm 두께의 투명한 아크릴 수지로 제작되었다. 본 연구에서 시험관은 수평면과 4.5°의 경사각을 이루고 있다. 시험관내의 공기유동을 균일하게 하기위하여 공기입구 부분에 mesh screen을 설치하였으며 물입구 부분에서는 수력도약을 방지하기 위하여 안내깃을 부착하였다.

공기의 공급은 흡입식 송풍기에 의하여 이루어지

는 데 시험관 후방에 설치되어 있다. 이 송풍기는 원심식으로 회전수 조절기에 의하여 최대 3000rpm 까지 회전속도를 상승시킬 수 있으며 최대 유량은 0.24m²/s이다. 공기는 시험관 전방에서 노즐을 통하여 유입되며 균일한 갖도록 인공벌집(honey-comb)을 설치하였다.

물은 밀폐회로내를 순환하며 7.1m 높이에 설치된 420ℓ 용량의 일정수두 탱크에서 시험관내로 공급한다. 유량은 시험관 입구에 설치된 밸브에 의하여 조절되며 최대 공급가능유량은 0.47kg/s이다. 공급관의 직경은 3.18cm로 PVC관을 사용하였다. 시험관 내로 유입된 물은 시험관 아랫면을 따라 액막의 형태로 중력에 의하여 흘러내리며 시험관 출구를 나와 실험실 내에 설치된 860ℓ용량의 보유탱크(holding tank)에 저장된다. 이 물은 1 마력의 원심식 펌프에 의하여 옥상에 있는 일정수두탱크로 되올려진다. 옥상에 있는 탱크와 보유탱크를 연결하는 바이패스관을 설치하여 탱크내 수두를 일정하게 유지시켰다.

3.2 측정장치

시험관에 유입되는 공기유량의 측정은 시험관 전방에 설치된 오리피스에 의하여 이루어진다. 이 오리피스는 둥근형(round type)으로 ASME 표준규격으로 제작되었는데⁽⁶⁾ 판직경 7.3cm, 판직경 4.1cm, 판두께 6mm로 목직경비는 0.560이다. 이 오리피스를 물을 매질로 사용하는 마노메타에 연결하여 공기의 유량을 측정하였다.

물유량은 상업용으로 제작된 칼날 오리피스

(sharp-orifice)에 의하여 측정하였다. 이 오리피스의 직경은 3.1cm, 판직경은 1.55cm, 판두께 3.1mm로 목직경비는 0.50인데 차압변환기에 연결하여 유량을 측정하였다. 차압변환기는 KYOWA PD-2kA로 최대 2kgf/cm²의 압력차까지 측정이 가능하며 이것을 KYOWA DPM 307A stain amplifier에 연결하여 digital multimeter로 출력을 읽었다.

계면파의 구조측정을 위하여 탐침접촉법을 사용하였다. 탐침은 직경 0.5mm의 스테인리스 침으로 끝부분을 제외하고는 접착제(epoxy)로 피막하였다. 탐침은 마이크로미터가 부착된 수직이송장치와 연결되어 있으며 수직거리 27mm까지 이동이 가능하다. 탐침은 시험관내 물 입구에서 0.5m 떨어진 곳에 설치되어 있다. 이 지점에서 계면파의 구조측정을 위하여 탐침을 최저파고에서 최대파고까지 0.02~0.04mm간격으로 단계적으로 상승시켜 각 높이에서 물과 상대접촉시간을 구하였다. 상대접촉시간을 측정하기 위하여 자체 제작한 전도도회로(conductivity circuit)를 사용하였는데 회로 상세도가 Fig. 2에 도시되어 있다. 이 회로의 출력은 A/D변환기를 거쳐 8비트 마이크로컴퓨터에 의하여 측정되었다. 컴퓨터에서의 표본횟수는 초당 400개로 하였으며 표본시간은 20초이다.

3.3 실험방법 및 범위

본 연구에서 수행한 계면파 영역은 3차원파로 액체유량의 경우, 0.693, 0.850, 0.971, 1.093, 1.164(kg/ms)의 5개를 택하였으며 기체유량은 0, 0.074, 0.116, 0.150, 0.162, 0.181, 0.196, 0.203(kg/ms)의 8개를 선정하였다. 실험은 우선 액체유량을 원하는 값으로 고정한 후, 기체유량을 0에서 서서히 증가시켜 원하는 유량에서 탐침을 최저파고에서 최고파고까지 0.02~0.04mm 간격으로 수직이동시키면서 각 높이에서 액상과의 상대시간

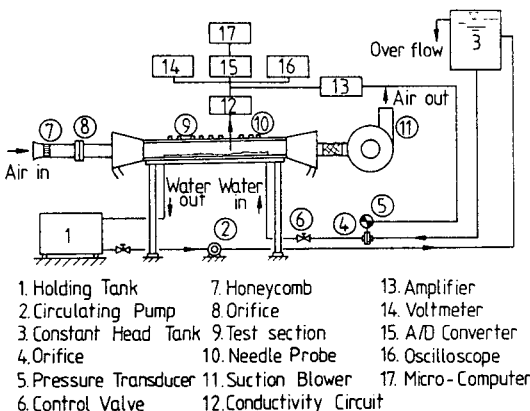


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

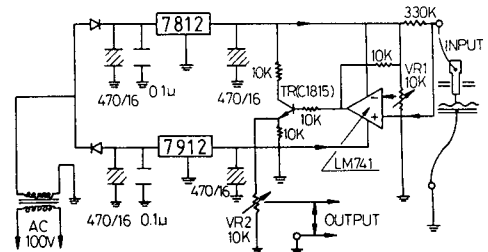


Fig. 2 Conductivity circuit with a power supply

접촉율을 측정하였다. 파고의 진폭에 따라 최저와 최고 높이 사이에 20~30개의 측정점을 가졌다. 이러한 과정으로 하나의 액체유량에 대하여 8개의 기체유량을 변화시켜 측정 한 후 액체유량을 바꾸어 실험을 계속하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 계면파형태도

근사수평 반류유동에서 주로 관찰되는 계면파 형태로는 3차원파와 구름파가 있다. 경사면을 따라 흐르는 액막의 경우, 기상흐름이 없더라도 액체유량이 임계치보다 크면 계면파가 항상 존재하는 데 3차원파가 주로 나타난다⁽⁹⁾. 여기에서 임계액체 Reynolds수는 수십의 크기정도(order of magnitude)를 가진다. 본 연구에서 액체유량을 일정하게 두고 기체유량을 증가시키면 결과 3차원파와 구름파가 주로 관찰되었는데 이 결과가 Fig. 3에 도시되어 있다. 3차원파는 자갈이 배열된 구조(pebbly structure)를 가지며 시험관 전체를 통하여 균일하게 관찰되었다. 주어진 액체유량에서 기체유량을 계속 증가시키면 궁극적으로 구름파가 3차원 파위에 겹쳐서 나타난다. 이 파의 높이는 액막 두께의 3~4배로 관찰되었는데 처음 출현하는 지점은 액체의 유량에 따라 변하였다. 액상유량이 작을 경우 구름파는 물입구 부분에서 처음 나타나 3차원 파보다 빠른 속도로 계면을 따라 하강 하였으며 액상유량이 비교적 큰 경우에는 시험관의 중간 부분에서 첫 출현하며 기상유량이 증가할 때 윗 부분으로 출현지점이 이동하였다. 이것은 물의 입구 조건과 상관된 것으로 믿어지는데 다른 실험결과에서도 이

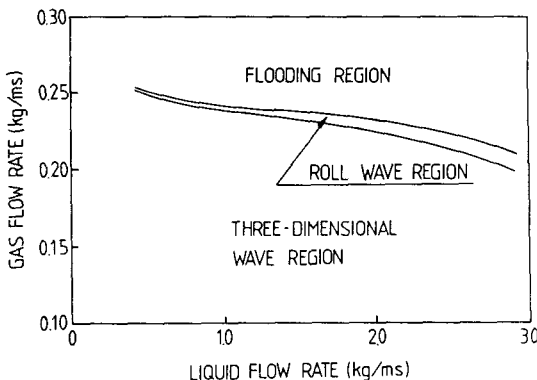


Fig. 3 Interfacial wave pattern map for nearly-horizontal countercurrent air-water flow

와같은 현상이 관찰된 것으로 보고되어 있다⁽³⁾.

본 연구에서 얻은 계면파 형태에 관한 실험 결과를 보면 구름파 영역이 매우 협소하게 나타나 있다. 이 구름파가 계면위에 나타나면 계면의 유효표면조도가 매우 커져 계면전단응력이 증가하며, 파의 끝 부분이 올라 오는 기상유동에 찢기어 액적을 형성하는 엔트레이먼트(entrainment)현상이 발생한다. 이 시점에서 기상유량을 더 증가시키면 플러딩(flooding)이 일어나는데 이 현상은 반류운동의 극한 상태로 액막이 파괴되면서 액체유량의 일부가 역류하기 시작하는 것이다. 본 실험의 관찰에 의하면 액체유량이 작은 경우 구름파가 나타난뒤 곧 플러딩이 일어 났으며 큰 경우에는 기체유량을 꽤 증가시켜야 플러딩이 야기되었다.

4.2 액막 분포도

주어진 액상 및 기상유동 조건하에서 탐침이 액상과 접촉하는 상대접촉시간율을 측정하여 액막분포도를 구하였다. 본 연구에서 얻은 3차원파의 대표적인 액막분포도가 Fig. 4에 도시되어 있다. 이 실험자료는 기체유량($Re_g=14001$)이 일정할때 5개의 액체유량($Re_f=2364, 2893, 3302, 3708, 3944$)에 대하여 얻은 것이다. 이 분포도를 보면 상대접촉시간율은 파의 최저 및 최고높이 부근에서는 완만하게 변하나 중간 부분에서는 짧은 높이 구간내에 급격하게 증가하는 것을 알수 있다. 그러나 분포도가 상대접촉시간율이 0.5인 점을 기준으로 비교적 대칭성을 가진다. 또 실험결과는 근사수평 반류운동에서의 계면파는 비교적 규칙적이며 그 기본유형이 기액상의 유량에 관계없이 일정한 사실을

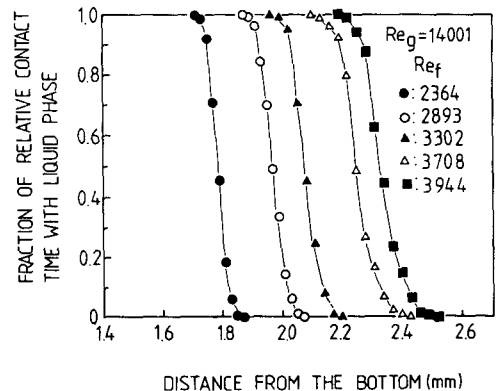


Fig. 4 Typical liquid film distributions for $Re_g=14001$

알려 주고 있다.

물리적으로 탐침이 기상과 접촉하는 상대접촉시간율은 파고가 그 높이와 같거나 작은 확률을 나타내는 분포함수이다. 따라서 액막분포도의 통계적 특성은 적합한 확률밀도함수와 누적확률분포함수로 표현될 수 있다. 이 액막분포도는 앞에서 언급한 대로 대칭성을 가지고 있기 때문에 식(7)로 표현되는 Gauss 함수와 비교하여 보았다. Fig. 5는 대표적인 실험자료를 Gauss 확률밀도 함수와 비교한 것으로 매우 잘 일치하고 있음을 나타내고 있다. Fig. 6은 Gauss 누적 확률분포 함수와 일정한 기상 유량에서 액상유량을 변화시키면서 얻은 실험자료를 비교한 그림이다. 이 그림은 액상유량이 증가함에 따라 평균액막두께와 파고교란강도가 증가하나 파형은 근본적으로 Gauss 모델로 근사화될 수 있다는 것을 나타내고 있다. Lilleleht와 Hanratty⁽¹⁰⁾는 수평동류성층 2상유동에서의 3차원파의 액막분포도도 Gauss 모델과 잘 일치한다는 실험결과를 얻었는데 이 사실에서 수평 또는 근사수평의 성층 2상유동에서 3차원파는 기상의 유동방향과 관계없이 동일한 액막분포도를 갖는다는 사실을 확인할 수 있다.

4.3 평균 액막 두께

평균액막두께는 식(2)를 이용하여 액막분포도에서 구할 수 있다. 본 연구에서는 각 높이에서 얻은 누적 확률분포값을 사다리꼴공식에 따라 적분하여 평균액막두께를 구하였다. 일반적으로 반류기상유동이 없을 경우 평균액막두께는 다음의 식으로 주어진다.

$$\delta^* = A Re_f^B \tag{8}$$

여기에서 A와 B는 상수로 많은 연구가들에 의하여 실험적 또는 해석적으로 결정되었는데 그 결과가 김과 김⁽¹¹⁾에 의하여 요약되어 있다. 식(8)에서 무차원 평균액막두께는 다음과 같이 정의된다.

$$\delta^* = \delta \left\{ \frac{\rho_f (\rho_f - \rho_g) g \sin \theta}{\mu_f^2} \right\}^{1/3} \tag{9}$$

Lee는 액막유동이 난류일때 간단한 해석적 모델을 세워 A=0.135, B=7/12의 값을 구하였다⁽⁹⁾. 본 실험에서 얻은 자료를 Lee의 식과 비교하였는데 10%의 오차범위안에 포함되었다.

반류기상유동이 존재할 때에는 계면에 작용하는 전단응력이 액막유동에 지장을 주므로 액막의 속도가 감소되어 평균액막두께가 증가된다. 본 연구에

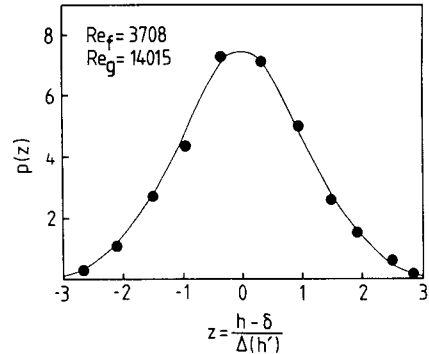


Fig. 5 Comparison of experimental data with Gaussian probability density function

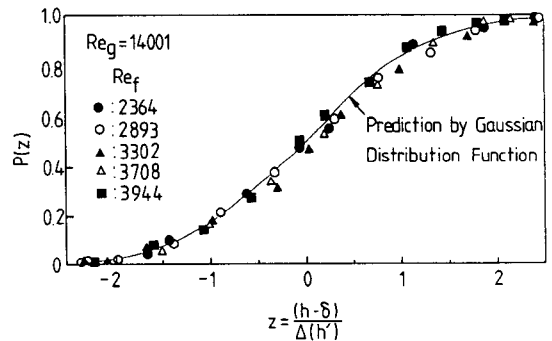


Fig. 6 Comparison of experimental data ($Re_g = 14001$) with Gaussian cumulative probability distribution function

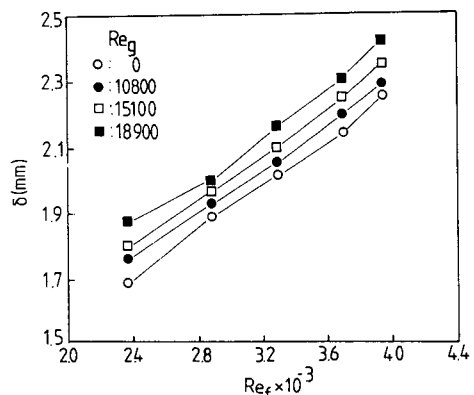


Fig. 7 Mean film thicknesses with countercurrent gas flow

서 얻은 결과를 Fig. 7에 도시하였는데 이 그림에서 액막 Reynolds수가 일정할때 기상 Reynolds수가 많아지면 평균액막두께가 증가하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 수행한 실험범위에서 기상

Reynolds수가 18,100에 이를 때 액막두께의 증가율은 반류유동이 없는 경우에 비하여 10%정도에 지나지 않는다. 이 결과는 포화수-수증기의 2상반류유동에서 얻은 결과, 즉 3차원파의 영역에서 평균액막두께증가율은 액상 Reynolds수에 따라 변하지만 대략 5~20%에 이른다는 사실과 비교할 만하다⁹⁾.

4.4 최대파진폭 및 파고교란강도

계면파의 최고 및 최저높이는 파의 구조를 나타내는 중요한 인자중의 하나이다. 본 연구에서 얻은 파의 최고 및 최저높이가 Fig. 8에 나타나 있다. 이 그림에서 O로 표시된 자료점은 평균액막두께를 나타낸다. 여기에서 액체유량이 일정할 경우, 기체유량이 증가할 때 파의 최저높이는 서서히 증가하는 경향을 가지나 파의 최고높이의 증가폭은 비교적 크다는 사실을 알 수 있다. 기체유량이 일정하면 액체유량의 증가와 함께 비슷한 경향을 나타내

고 있다. 평균액막두께에 대한 최저높이의 비는 0.901에서 0.974로 기체 및 액체유량이 증가함에 따라 낮아지며 최고높이는 1.041에서 1.120사이의 값을 갖는 데 기체 및 액체유량이 증가함에 따라 높아진다. 따라서 기체 및 액체유량이 증가할때 파의 최대진폭은 증가하는 데 본 연구에서 다룬 3차원파의 경우 대략 ±10% 내외의 값을 가진다. 여기에서 언급하여야 할 사실은 평균액막두께가 파고의 최고 및 최저높이의 산술평균값 보다 약간 작지만 그 차는 평균액막두께의 0.9~1.5%에 지나지 않는다는 것이다.

Fig. 9는 계면파의 교란강도를 도시한 그림이다. 교란강도는 식(5)에 정의되어 있는 데 본 연구에서는 사다리꼴공식에 의하여 적분하여 구하였다. 일반적으로 교란강도는 계면의 거칠기와 상관관계를 가진다. 따라서 교란강도는 계면의 유효표면조도로 간주될 수 있으며 계면에 작용하는 전단응력과 밀접한 관련을 가진다⁷⁾. Fig. 9에서 계면파의 교란강도가 주어진 액체유량에 대하여 기체 Reynolds수에 따라 증가하며 기체유량이 일정할 경우 같은 경향을 가지는 것을 알 수 있다. 평균액막두께에 대한 교란강도의 비를 분석하여 보면 본 실험범위에서 1.34~3.36%에 이르며 주어진 액상유량에서 기상유량이 증가함에 따라 이 비도 증가하며 액상유량에 대하여서도 대체로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 액막구조에 대한 실험결과를 종합하여 보면 근사수평 반류성층유동에서의 3차원파는 Gauss모델과 일치하므로 비교적 규칙적인 형상을 가지며 최대진폭은 ±10% 내외의 값을 가지고 평균진폭은 5% 이내의 값을 가지므로 계면파의 안정성 해석에서 일반적으로 계면파를 작은 진폭의 삼각함수파(sinusoidal wave with small amplitude)로 가정하는 것이 타당성이 있다는 사실을 알 수 있다.

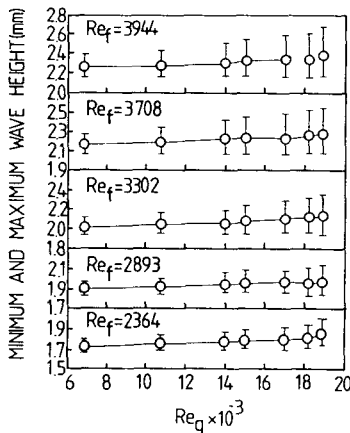


Fig. 8 Maximum and minimum wave amplitudes

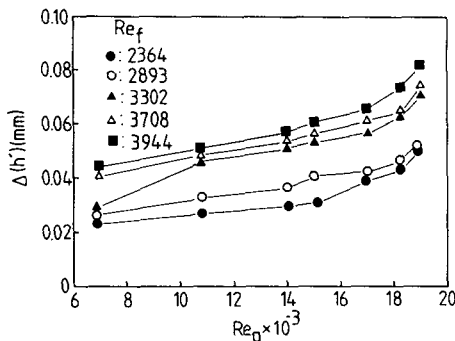


Fig. 9 Intensity of wave height fluctuation

4.5 교란강도와 차원해석

계면파의 교란강도에 영향을 미치는 무차원 변수를 구명하기 위하여 교란강도를 다음과 같은 인자들의 함수로 생각해 보자.

$$\Delta(h') = f(\delta, g \sin \theta, u^*, \nu) \tag{10}$$

식(10)에서 u^* 는 계면전단응력을 밀도로 나누어 제공근한 마찰속도이며 g 는 중력가속도, θ 는 경사각, 그리고 ν 는 동점성계수이다. 여기에서 경사각이 작은경우의, 계면파는 중력파(gravity wave)로 간주될 수 있으므로 표면장력의 영향은 아주 작으

Table 1 Experimental data for the dimensionless intensity of the height fluctuation

Re_f	Re_f	Fr^*	δ^*	$\Delta(h')/\delta$
2365	6875	3.95	14.43	0.0134
	10780	6.17	14.68	0.0154
	13980	8.55	14.86	0.0165
	15060	9.82	14.99	0.0171
	16835	11.78	15.16	0.0212
2895	6880	3.89	15.83	0.0142
	10790	6.17	16.05	0.0173
	13395	8.74	16.32	0.0187
	15075	9.57	16.44	0.0206
	16850	11.75	16.54	0.0212
3302	6890	3.92	16.82	0.0197
	10800	6.23	17.10	0.0226
	14000	8.70	17.24	0.0245
	15085	9.61	17.46	0.0250
	16865	11.48	17.74	0.0264
3710	6895	4.04	18.12	0.0187
	10810	6.51	18.31	0.0220
	14015	8.79	18.74	0.0236
	15095	9.77	18.78	0.0249
	16875	11.37	18.86	0.0267
3945	6895	4.05	18.91	0.0195
	10810	6.52	19.12	0.0220
	14020	8.97	19.40	0.0244
	15105	10.06	19.64	0.0255
	16890	11.31	19.84	0.0274

므로 무시되었다. 차원해석을 통하여 식(10)을 정리하면 다음의 결과를 얻는다.

$$\frac{\Delta(h')}{\delta} = f\left(\frac{u^{*2}}{g\delta\sin\theta}, \frac{\delta^3 g\sin\theta}{\nu^2}\right) \quad (11)$$

이 식에서 오른쪽의 첫번째변수는 마찰속도를 기준으로 한 Froude수의 제곱치이며 두번째 변수는 무차원액막두께를 세제곱한 값이다. 따라서 무차원교란강도는 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$\frac{\Delta(h')}{\delta} = f(Fr^*, \delta^*) \quad (12)$$

이 결과는 무차원교란강도가 Froude수와 무차원액막두께의 함수로 표현된다는 것을 의미하는 데 여기에서 기상유동의 영향은 Froude수의 마찰속도와 무차원액막두께에 포함되어 있다. 일반적으로 δ^* 가 작아지면 평활(smooth)한 계면을 가지므로 무차원 교란강도의 값이 0에 가까워지며 Fr^* 의 값이 감소하면 같은 경향을 가질 것으로 생각된다.

Table 1은 본 연구에서 얻은 무차원교란강도를 Fr^* 와 δ^* 의 함수로 나타낸 표이다. 이 표에서 무차원교란강도는 Fr^* 와 δ^* 가 증가할 때 함께 증가하는 경향을 나타내고 있는데 δ^* 에 대한 의존도가 훨씬 큰 사실을 알 수 있다.

5. 결 론

근사수평 반류성층유동에서 탐침접촉법을 이용하여 계면파의 구조를 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 3차원과의 액막분포도는 Gauss모델로 근사화될 수 있는데 기상유동의 방향은 액막분포도의 형상에 미치지 않는 사실을 확인하였다.
- (2) 반류유동이 존재할 때 평균액막두께는 기상유량에 따라 증가하지만 3차원과 영역에서의 증가폭은 10% 정도에 불과하다. 따라서 3차원파의 영역

에서 평균액막두께는 식(8)에 따라 계산하여도 큰 오차를 유발하지 않을 것이다.

(3) 3차원파의 영역에서 파고의 진폭을 분석한 결과 최대진폭의 평균액막두께의 $\pm 10\%$, 평균진폭은 $\pm 5\%$ 이내의 값을 가진다. 따라서 기액2상성층유동에서 계면파의 안정성 해석시 3차원 계면파를 작은 진폭의 삼각함수파로 가정하는 것은 타당성이 있는 것으로 생각된다. 일반적으로 3차원 계면파를 작은 진폭의 삼각함수파로 가정하는 것은 타당성이 있다.

(4) 식(11)에 정의된 무차원 교란강도는 Froude수와 무차원 평균액막두께의 함수로 표현될 수 있는데 이 값들이 증가할 때 함께 증가한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원에 의하여 이루어졌으며 재단관계자 여러분들께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 본 실험을 수행하는 데 많은 도움을 준 이 정표군과 이 원석군에게도 감사의 뜻을 포함합니다.

참 고 문 헌

- (1) Hanratty, T.J. and Engen, T.M., 1957, "Interaction between a turbulent Air Stream and a Moving Water Surface", AICHE J., Vol. 3, pp. 299~304.
- (2) Hewitt, G.F., 1978, "Measurement of Two-Phase

- Flow Parameters," Academic Press, New York, pp. 111~116.
- (3) Lee, S.C., 1983, "Stability of Steam-Water Countercurrent Stratified Flow," Ph.D Thesis, Northwestern University, Evanston, IL.
- (4) Chu, K.J. and Dukler, A.E., 1975, "Statistical Characteristics of Thin, Wavy Film," AICHE J., Vol.21, No.3, pp. 583~593.
- (5) Maron, D.M., Bruner, No, and Sideman, S., 1982, "Transport Characteristics of Wavy Thin Film on Inclined Surfaces," Presented at NATO Research Workshop on Advances in Two-Phase Flow and Heat Transfer, F.R. Germany.
- (6) Laurinat, J.E., Hanratty, T.J. and Dallman, J.C., 1984, "Pressure Drop and Film Height Measurements for Annular Gas-Liquid Flow," Int. J. Multiphase Flow, Vol. 10, No.3, pp.341~356.
- (7) 이상천, 이원석, 1988, "근사수평 반류성층 2상유동에서의 계면전단응력 및 마찰계수," 대한기계학회논문집, 제12권, 제 1 호, pp.301~307.
- (8) ASME, 1959, "Fluid Meters: Their Theory and Applications," Chap. B-2, 5th ed., New York.
- (9) Fulford, G.D., 1964, "The Flow of Liquids in Thin Films," Advances in Chemical Engineering, Vol.5, pp. 151~236.
- (10) Lilleleht, L.U. and Hanratty, T.J., 1961, "Measurement of Interfacial Structure for Countercurrent Air-Water Flow," J.Fluid Mech., Vol. 21, pp.65~81.
- (11) 김효정, 김 갑, 1986, "물-증기 역류성층 2상유동에서의 국부평균액체층두께," 대한기계학회논문집, 제10권, 제 6 호, pp.947~958.