628 대한기계학회논문집(B) 제 21 권 제 5 호, pp. 628~636, 1997

〈논 문〉

층류파형 액막의 유동특성에 관한 연구

김 진 태* · 이 계 한**

(1996년 1월 23일 접수)

A Study on the Flow Characteristics of Laminar Wavy Film

Jintae Kim and Kyehan Rhee

Key Words: Laminar Wavy Liquid Film(층류파형 액막), Flow Visualization(유동 가시화), Photochromic Dye(광색성 염료), Wall Shear Rate(벽 전단 변형률)

Abstract

Flow visualization technique incorporating photochromic dye is used to study the flow characteristics of the gravity driven laminar wavy film. The film thickness and wave speed are successfully measured by flow visualization. As the inclination angle increases, the waves have higher peaks and lower substrate thickness. The measured cross stream velocity at the free surface is up to 10% of streamwise velocity, which shows enhanced mixing in the lump of the film. The measured streamwise velocity profiles are close to parabolic profile near the substrate and the peak but show significant velocity defect near the rear side of the wave. The measured wall shear rate distributions show good agreement with the previous workers' numerical results.

1. 서 론

액막유동은 응축기, 증발기, 혼합기체의 분리 및 기치의 정제 등과 관련된 화학 반응기와 열교환기의 막응축, 열펌프 내의 응축액의 용해, 액막냉각, 막 코팅 등의 다양한 산업 분야에서 나타난다. 이러한 산업기기에서 액막의 유동은 액막을 통한 열, 물질 및 모멘텀의 전달현상과 밀접한 관계가 있으며, 액막유동장의 정확한 이해는 다양한 산업기기의 설계와 평가에 중요한 자료를 제공하여 줄 수 있다. 경사벽이나 수직벽을 따라 중력에 의해 액체가 흘러내려질 경우 입구지역에서는 미소한 파고를 갖는 사인파 형태의 파형을 가지며, 유동장의 불안정성에 의해 파고가 점점 증가하여 이차원 층류파형이 형성된다. 유동이 진행됨에 따라 이차원 층류파형은 삼차원 불규칙파형으로 천이되게 된다. 액막을 통한 열, 물질 및 모멘텀 전달을 고려하기 위해서는 액막의 파형과 액막 내의 속도 분포가 중요하다. 액막의 파형은 자유 경계면과의 접촉면적을 변화시켜 액막표면을 통한 열 및 물질 전달에 영향을 주며, 액막유동장의 경계를 결정하여 액막 내부의 유동에 영향을 미치게 된다. 액막 내부의 유동장은 벽과 자유표면에서의 전단변형률에 의한 모멘텀 전달 특성을 결정하며, 액막 내부의 대류 특성을 규명하여 열 및 물질의 전달 현상을 특징짓는다. 또한 액막 내부의 속도 분포는 액막유동의 안정성, 모멘텀 적분법을 이용한 파형의 해석 등에도 중요한 자료를 제공한다. 따라서 액막의 파형과 속도분포의 정확한 측정은 액막을 이용한 다양한 전달현상을 이해하는 데 중요하다.

액막 두께의 측정은 접촉침 또는 유량측정을 이용하여 액막평균 두께가 측정된 바 있으며, 다양한 전기 전도 프로브,[1] 정전 용량 프로브,[2] 광 산란

*회원, 명지대학교 기계공학과 대학원
**회원, 명지대학교 기계공학과

법[3] 등을 이용한 액막 두께 측정에 관한 연구가 진행되어 왔다. 수 밀리미터 이내의 얇은 액막 내의 속도분포의 측정은 열선 유속계를 이용하여 측정된 바 있으나[4] 유한한 크기의 속도측정 프로브의 사용은 유동장을 변화시키게 되므로 정확한 속도측정이 어렵다. 레이저 도플러를 이용하여 액막 내의 속도측정이 수행되었으나[5] 특정 위치의 한 점에서의 속도가 측정됨으로 전반적인 속도분포의 측정이 어려우며, 액막 두께와의 동시 측정이 어려워 파형의 위치에 따른 속도분포의 측정이 불가능하다. 유동 가시화를 이용한 액막 내의 속도 측정으로는 알루미늄 입자,[6] 공기 기포,[7] 수소 기포[8] 등을 이용한 방법이 사용된 바 있다. 입자를 이용한 유동 가시화 방법은 입자로 인한 유동장의 변화, 부력, 자유 경계면에서 입자에 미치는 표면장력의 영향 등이 문제가 되며, 사진의 현상과 데이터 해석의 번거로움이 문제점으로 지적된다.

광색성 염료를 사용한 유동가시화 방법은 작동유체 내에 녹아 있는 미소량의 광색성 염료를 광학적인 자극에 의해 자취선(time line)을 만들어 그 자취선의 움직임을 기록한 뒤 해석하여 유동장의 속도 분포를 측정하는 방법이다. 미소량의 광색성 염료가 녹아 있는 투명한 유체에 특정 주파수의 펄스 레이저를 조사하게 되면, 레이저가 지나간 부분에서 광색성 반응에 의한 자취선이 순간적으로 발생하게 되므로 이 자취선의 움직임을 카메라로 기록하여 주어진 속도장 내의 유속을 측정할 수 있게 된다. 이 방법의 가장 중요한 특성은 광학적으로 유동장에 자극이 가해지므로 유동장을 방해하는 요인이 없다는 것이다. 따라서 광색성 염료를 이용한 유동가시화 방법은 기존의 방법으로 측정이 어렵거나 불가능한 얇은 액막 내의 유속을 정확히 측정할 수 있으며, 액막의 두께와 속도를 동시에 측정할 수 있다. 본 연구에서는 유동장에 방해를 주지 않는 광색성 염료를 이용한 유동가시화와 화상처리를 이용하여 경사 벽에서 중력에 의해 흐르는 액막의 두께, 파 속도, 액막 표면의 속도 분포, 벽 전단 변형률을 측정하여 층류 파형 액막 유동장의 특성을 규명하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

실험 장치는 난동 성분이 없는 일정 두께의 층류 액막과 규칙적인 비감쇠의 2차원 액막 파형이 형성되도록 구성되었다. Fig. 1은 유동 순환 장치의 개략도로서 롤러 펌프(Masterflex, model 7019-01), 일정 수두 저장탱크, 덕트, 기액 분리 저장 탱크로 구성되어 있으며, 투명한 덕트의 표면을 따라 일정 두께의 층류 액막과 층류 파형 액막이 유동하도록 배열되었다. 덕트는 길이 1150mm, 폭 50mm, 높이 50mm의 크기이며 5mm 두께의 아크릴로 제작되었고 수평면과 40°~70°까지 각도 변환이 가능하도록 제작된 장치에 설치되었다. 액체 분배기는 두께 5mm, 폭 50mm, 높이 70mm의 크기로 끝부분이 45° 각도로 경사지게 가공되었으며, 액체의 잔류 난동 성분을 제거하고 균일한 두께 분포를 얻기 위해 덕트의 입구로부터 100mm와 150mm 부분에 설치되었다. 액체 분배기와 덕트 사이의 간격은 액막의 발달 길이에는 영향을 미치지만 완전 발달된 액막의 속도와 두께에는 영향을 미치지 않았다.

사용된 작동 유체는 광색성 염료가 용해될 수 있는 비극성 용매이고 가시화가 가능하도록 무색 투명하며 온도 변화에 따라 점도 변화가 작은 두 가지 점도의 실리콘 오일(Shin-Etsu, KF-96 series)로서 25℃에서 동점성계수가 각각 50cs와 100cs이다. 실내 온도의 영향을 감안하더라도 실리콘 오일이 유동을 시작한 후 약 1시간이 경과하면 온도 상승이 거의 발생하지 않으며 실제 자료 획득 시간은 10분 미만이므로 모든 실험은 루프를 작동시킨 지 1시간 이상 경과한 후 실시되었다. 일정 두께의 층

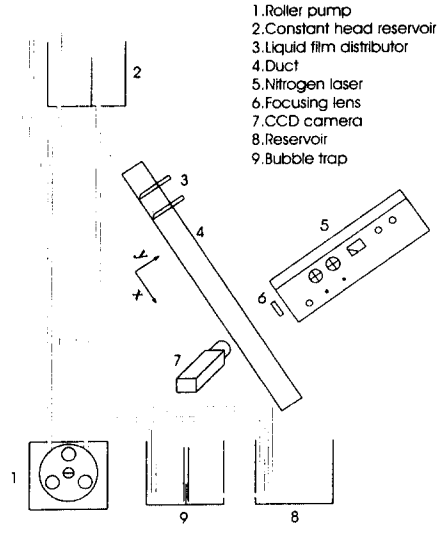


Fig. 1 Schematic diagram of the flow loop system

류 액막을 형성하기 위해서는 롤러 펌프의 자극이 액막 내의 유동장에 영향을 미치지 않도록 해야 하므로 실리콘 오일은 롤러 펌프로부터 일정 수두 저장 탱크로 공급된 후 외부의 자극 없이 덕트로 공급되어 형성되었다. 파형과 파속이 변화할 경우 한 주기의 파형에서 각 위치에 따른 속도 분포를 측정하기가 불가능하며, 3차원 액막이 형성될 경우 유동을 가로지르는 방향으로 속도 분포가 일정하지 않으며 빛의 난 반사로 인해 유동 가시화가 불가능하므로 규칙적인 이차원 액막파가 형성되어야 한다. 자유 낙하 액막이 갖는 불안정성에 의해서는 규칙적인 파형 액막의 형성이 어려우므로 롤러 펌프의 자극에 의해 인위적인 이차원 액막파가 형성되었으며, 유량은 바이패스에 의해 조절되어졌다. 롤러 펌프는 세 개의 롤러로 구성되어 있으며 각각의 롤러가 밀착되어 있는 튜브를 밀어 액체를 유동시키므로 한 회전 당 3번의 맥동이 실리콘 오일에 가해진다. 롤러 펌프의 분당 회전수는 비접촉식 타코미터(Ono Sokki, HT-431)를 사용하여 측정하였다. 일정한 범위의 자극 주파수 범위 내에서는 펌프의 맥동 주파수와 발생되는 파형의 주파수가 같음이 확인되었다. 자연발생파와 자극에 의해 발생된 파의 파형과 파속이 같으면 파 내부의 유동 형태가 일치함이 관찰된 바 있으므로,[6] 자극에 의한 액막파의 유동을 해석함으로서 자연 발생 파형의 유동 특성을 이해할 수 있다. 측정에 사용된 CCD 카메라는 두 가지로서 Pulnix TM-745와 Pulnix TM-9701이다. TM-745(interlace output)는 레이저와 동기가 불가능하므로, 화상을 두 필드로 나누어 자취선의 변위를 두 필드 사이의 시차인 1/60초로 나누어 속도를 측정하게 되므로, 순간 속도 측정에 어려움이 있으나, 두 필드의 피크점의 변위를 이용한 파속 측정이 용이하다. TM-9701(progressive output)은 asynchronous reset이 가능하므로 레이저와 CCD 카메라를 동기시켜 사용하게 되면 속도 평균 구간을 레이저와 카메라의 동기 시차에 의해 조절이 가능하다. 움직이는 자취선의 번짐을 없애기 위해 카메라의 노출 시간을 Pulnix TM-745는 1/2000 sec, Pulnix TM-9701는 1/4000 sec에서 각각 사용하였다. 측정한 액막 내의 속도 분포는 순간 속도가 아닌 구간 평균 속도이며 일정 두께의 층류 액막인 경우에는 유동 방향의 수직 속도 성분이 존재하지 않으나 파형이 존재하는 경우에는 파형 내에서는 유동 방향의 수직 속도 성분이 존재하게 된다. 광색성 염료를 이용한 유동 가시화 방법은 액막 표면에서의 수직 속도 성분은 측정이 가능하나 액막 내의 수직 속도 성분은 측정이 어렵다. 본 연구에서의 파속과 파형 측정은 Pulnix TM-745를 사용하였고 벽 전단 변형률과 액막 내의 속도 분포 측정은 Pulnix TM-9701을 사용하였다. 유동장 양 측벽의 영향에 의해 유동을 가로지르는 방향으로 유동장의 변화가 생겨 이차원 유동에 영향을 줄 수 있다. 고려하고 있는 레이놀즈수 범위에서 액막 파형의 관찰 결과 측벽에서 5 mm 이상의 지역에서는 균일한 규칙 이차원 파형이 형성되므로, 측벽에 의한 영향은 무시되어졌고 측정은 측벽으로부터 약 15mm 지점에서 이루어졌다.

2.2 액막의 두께, 파형 및 파속 측정

액막의 두께는 유동가시화에 의해 측정되었다. 덕트 내에 액막이 형성되어 유동할 경우 화상에서의 액막의 위치는 조명, 측벽 주위의 메니스커스 및 카메라의 위치 등에 의해 영향을 받기 쉽다. 화상에서 측정한 두께는 침 접촉법과 부피 측정법에 의한 두께 측정으로 검증하였다. 정확한 두께 측정을 위해 길이 190mm, 폭 120mm, 높이 225mm의 사각 저장 탱크 내에 5mm의 액막을 형성한 뒤 미세 이동 장치로 침을 이동하여 침이 표면에 닿는 위치를 확대 카메라로 확인하여 표면과 벽의 위치 차이로 두께를 측정하였다. 또한 사각 용기 내의 유체 부피를 측정하여 용기 면적으로 나누어 두께를 측정하였다. 측정 결과 화상에서의 측정 두께는 침 접촉법과 부피 측정법과 비교시 1% 이내의 오차를 가졌다. 액막의 파형을 구성하기 위해서는 한 주기 이상의 파형을 카메라에 기록하여 두께를 측정하여야 하나 액막의 두께가 액막의 파장에 비해 매우 작으므로 두께 측정의 공간 해상도를 저하시킨다. 따라서 파속과 카메라의 프레임 속도를 기준으로 계산한 위치 보정을 통하여 연속된 부분 파형을 중첩하여 한 주기의 액막 파형을 구성하였다. 파속은 연속된 화상의 피크 변위를 두 화상의 시차로 나눔으로써 계산되었다.

2.3 유동 가시화를 이용한 속도 및 벽 전단 변형률 측정

광색성 염료를 사용한 유동 가시화 방법은 작동 유체 내에 미소량이 녹아 있는 광색성 염료를 광학

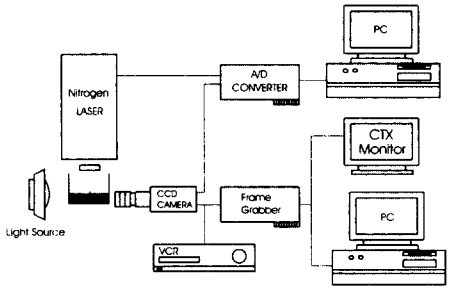


Fig. 2 Schematic diagram of data processing

적인 자극에 의해 자취선을 만들어 그 자취선의 움직임을 기록한 뒤 자취선의 변위를 시차로 나눔으로써 유동장의 속도 분포를 측정하는 방법이다. 사용된 광색성 염료는 TNSB(1', 3', 3'-trimethylindoline-2-spiro-2-benzospyran)이며, 0.01 g%의 TNSB가 실리콘 오일(KF-96-50, KF-96-100)에 녹여진 후 사용되었다. Fig. 2는 자료 처리 과정을 나타낸다. 유체와 함께 움직인 추적선은 CCD 카메라를 통해 비디오 레코더에 녹화되며 녹화된 화면은 한 프레임씩 frame grabber board를 이용해서 디지타이즈된 후 컴퓨터에서 해석되어진다. A/D 컨버터(Data translation DT2831)를 사용하여 Pulnix TM-9701 CCD 카메라와 레이저를 동기시켜 레이저가 조사된 후 1/200초 뒤 CCD 카메라가 화상을 잡도록 장치하였다. 레이저로부터 조사된 337 nm의 자외선은 파형 액막의 경우 자유 표면의 입사각이 파형의 각 부분에 따라 다르게 나타난다. 공기와 오일의 굴절률의 차이에 의한 optical distortion을 보정하기 위해 추적선이 형성된 지점의 입사각을 측정하여 Snell's law($n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$)를 이용하여 굴절각을 계산하여 자취선의 변위 분포를 측정하였다. (실리콘 오일의 굴절률(n_2)=1.4, n_1 : 공기의 굴절률, θ_1 : 입사각, θ_2 : 굴절각).

유동 가시화 방법의 정확도를 검증하기 위해서 KF-96-100cs 실리콘 오일을 사용하여 낮은 레이놀즈수($Re_f=4$, $Re_f=4q/\nu$)의 균일한 두께를 갖는 유동장을 만든 후 속도 분포를 측정하여 이론해와 비교하였다. 액체 분배기를 거쳐 덕트로 유입된 유체는 발달되는 지역을 거쳐 균일한 두께를 갖는 완전 발달된 유동장을 형성한다. 이때까지의 입구 길이는 Pierson[9]이 제시한 이론식

$$Le \simeq (2\nu^2/g\sin\theta)^{1/3} Re^{4/3}, \quad Re = q/\nu$$

(ν : 동점성 계수, g : 중력 가속도, q : 단위 폭 당 유량)

을 이용하여 예측할 경우 약 85 mm이므로 750 mm 떨어진 측정부에서는 충분히 발달되었다고 가정할 수 있다. 발달된 액막 유동장에서는 가속을 받지 않으므로 중력에 의한 힘과 점성력이 균형을 이루게 되는데 이때 액막의 유속과 두께는

$$u_x = g\sin\theta\, y(h-y/2)/\nu, \quad h = (3q\nu/g\sin\theta)^{1/3}$$

(u_x : 유동방향 속도, h : 액막 두께, θ : 축방향 기울기, y : 유동수직방향 좌표($0 \leq y \leq h$))

로 나타난다. (Fig. 2 참조) Fig. 3은 이론 속도 분포와 측정 속도 분포를 나타내고 있다. 유동 가시화에 의한 속도 측정은 이론해와 잘 일치하고 있다.

액막 표면에서의 속도는 화상의 연속된 두 필드에서 자취선과 파 표면이 만나는 점의 위치 변위를 필드의 시차로 나눔으로써 속도 벡터를 구하였다. 벽에서의 전단 변형률은 벽에서 가까운 부분(약 1 mm)에서는 유동 방향의 수직 속도 성분이 작으므로 벽과 평행한 유동 방향의 속도 분포를 구하고, 이 속도 분포를 2차 함수로 curve fitting한 후 미분하여 계산하였다.

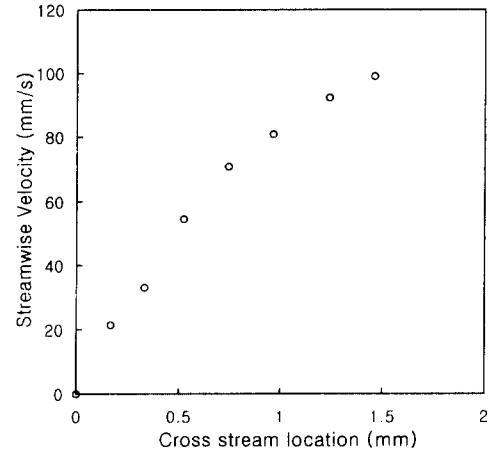


Fig. 3 Velocity profile in smooth laminar film (Re_f =4). Circles denote measured velocities and solid line shows theoretical velocity profile.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 액막의 두께 측정

Fig. 4는 동점성 계수가 100cs(Case 1~4)와 50

cs(Case 5)인 실리콘 오일의 기울임 각도 변화에 따른 파형을 나타내며, Table 1은 각각의 경우에 대한 점도(ν), 파장(λ), 주기(T), 파속(c) 및 레이놀즈수를 나타낸다.

Case 1~4의 경우 파형의 변화는 덕트의 기울기가 커짐에 따라 최대 두께(h_{max})가 크게 높아지며

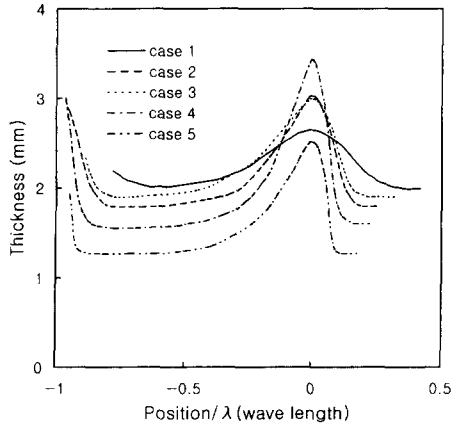


Fig. 4 Comparison of wave shapes for each case Position 0 denotes peaks.

최소 두께(h_{min})는 h_{max}에 비해 상대적인 변화량이 작다. h_{max}와 h_{min}의 차는 자유 표면 경계면의 표면적을 변화시키므로 경계면에서의 열·물질 전달과 밀접한 관련이 있다. 덕트의 기울기가 커짐에 따라 h_{max}와 h_{min}의 차가 커지며 유동 방향 수직 속도 성분이 증가하므로 액막 내의 혼합이 증가되어 액막을 통한 열·물질 전달이 증가되리라 기대된다. 덕트의 기울기가 같은 경우(Case 2, 3)에는 파형 액막의 주파수가 변화함에 따른 파형의 변화는 거의 없으며, 주파수 변화에 따른 파속과 파장의 변화만이 발생하게 된다. 기울기는 같고 점도가 다른 경우를 살펴 보면 Case 5는 Case 1에 비해 shape index($\equiv (h_{max}-h_{min})/h_{min}$)가 약 3배 커지므로, 같은 조건하에서는 점도가 낮을수록 자유 표면 경계면에서의 열·물질 전달이 증가되리라 예측된다. Table 2는 각각의 case에 대한 shape index를 나타낸다.

3.2 벽 전단 변형률 측정

파형 액막 유동에서 측정된 전단 변형률(γ_s)과 액막 두께와 유사한 의미를 갖는 중력에 의한 힘을

Table 1 Typical values of ν, λ, T, c for each case

	θ	ν (m^2/sec)	λ(mm)	T(sec)	c(mm/s)	Re_f
Case 1	40°	1.01	38.1	1/7.4	282	10.3
Case 2	50°	102	47.8	1/6.9	330	10.2
Case 3	50°	101	44.5	1/7.75	345	10.8
Case 4	60°	98	47.4	1/8.1	384	13.2
Case 5	40°	49	50.6	1/7.35	372	20

Table 2 Shape index and Max. cross stream velocities for each case

	θ	h_{max} (mm)	h_{min} (mm)	Shape index	Max. cross stream velocity (mm/s)	Max. streamwise velocity (mm/s)
Case 1	40°	2.65	2.01	0.32	9.9	214
Case 2	50°	3.02	1.79	0.69	25.0	311
Case 3	50°	3.01	1.85	0.63	25.4	295
Case 4	60°	3.43	1.55	1.21	40.3	370
Case 5	40°	2.51	1.26	0.99	35.8	362

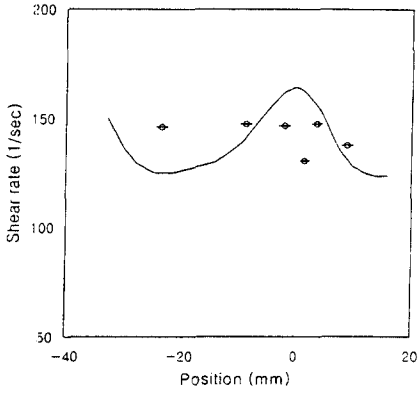


Fig. 5 Measured wall shear rate distribution for case 1 (circle). Solid line shows the gravity force dimensionalized as shear rates. Horizontal bars show the averaged ranges.

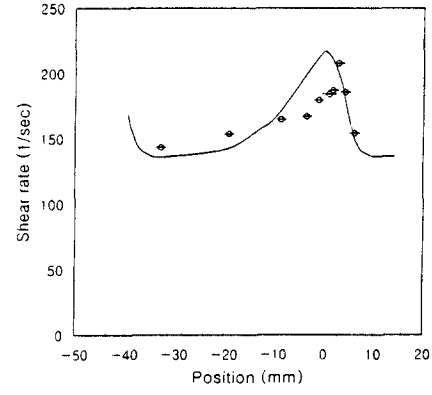


Fig. 6 Measured wall shear rate distribution for case 3 (circle). Solid line shows the gravity force dimensionalized as shear rates. Horizontal bars show the averaged ranges.

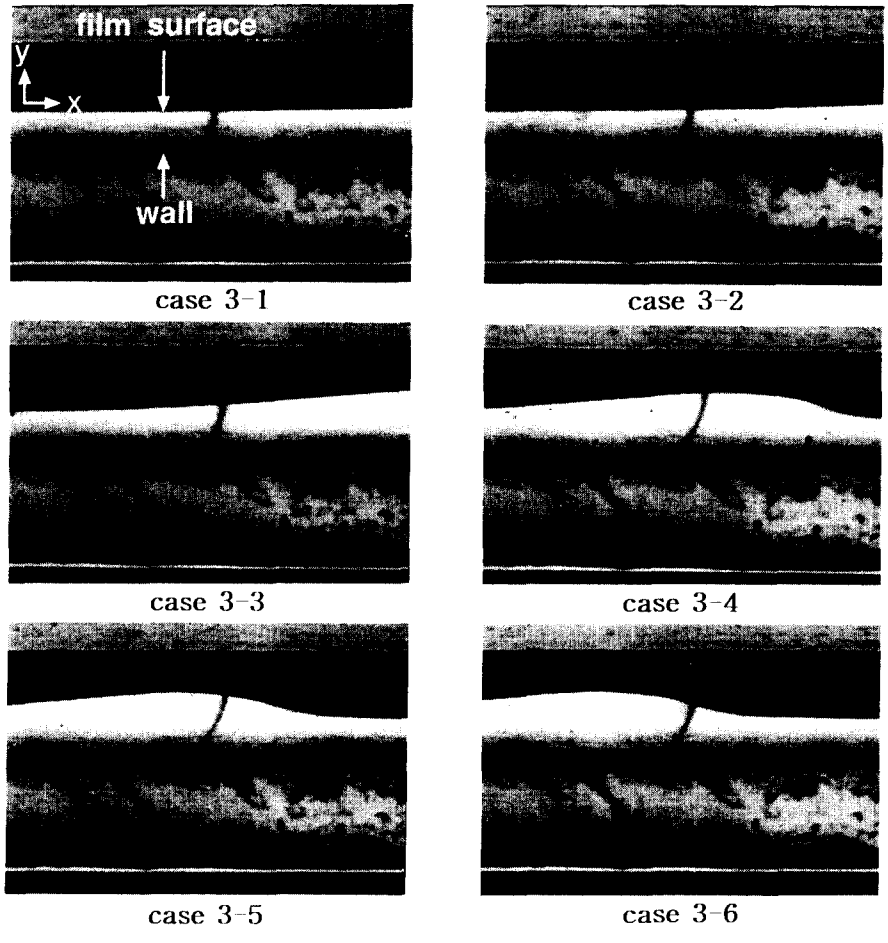


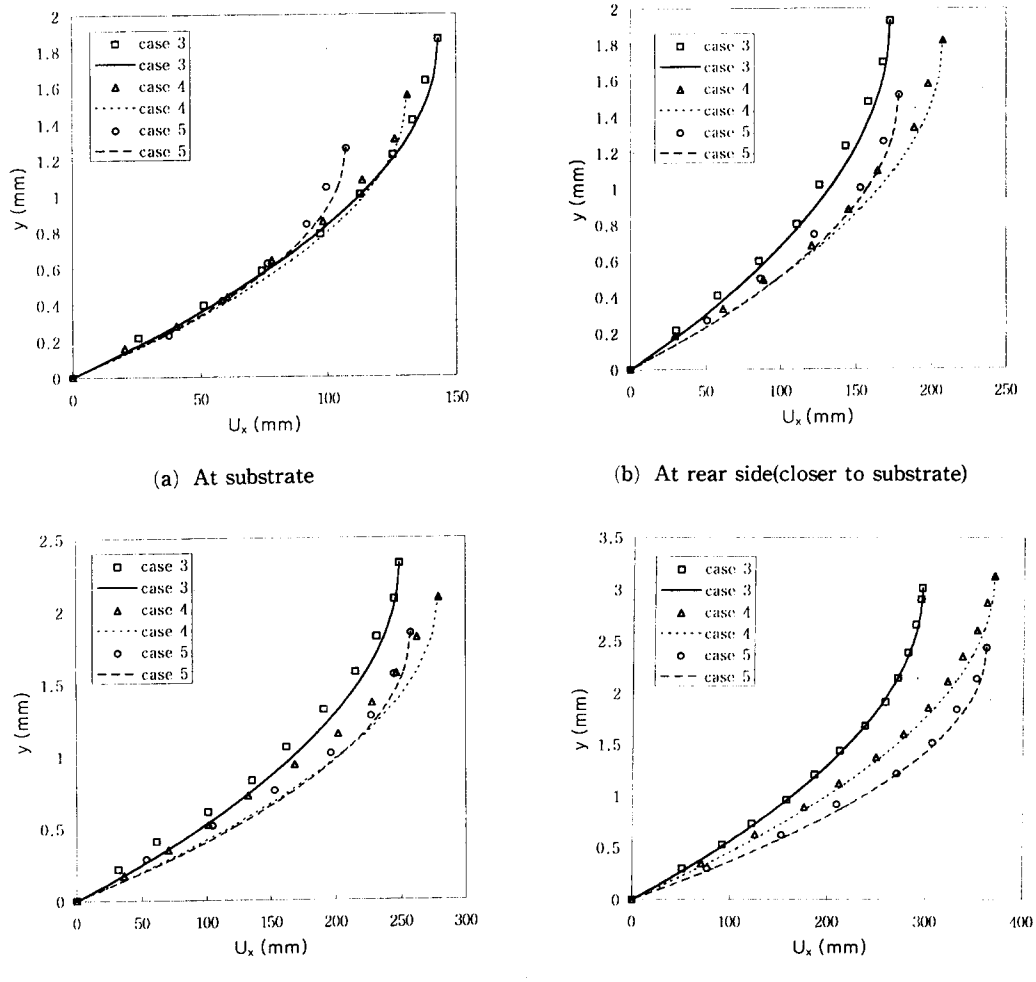
Fig. 7 Image of dye-trace in laminar wavy film for case 3

전단 변형률 차원으로 변화시킨 값($\gamma_g=\rho g\sin\theta h/\mu$)의 분포가 Figs. 5, 6에 나타나 있고 Case 3의 경우에 획득한 화상이 Fig. 7에 나타나 있다.

Case 1은 피크 부분을 제외하면 측정된 전단 변형률이 파형 전반에 걸쳐 크게 변화하지 않는다. Case 1은 shape index(0.32)가 매우 낮으므로 전단 변형률은 큰 변화가 없는 것으로 보인다. Case 2~5는 파형의 전면 부분과 후면 부분에서 γ_g에 비해 높고 피크 부분에서 낮게 나타나며 이는 Wasden[10]의 수치 해석적 결과와 일치한다. γ_s와 γ_g의 차이는 중력과 벽에서의 마찰력의 불균형을 나타내며, 이에 따라 액막 내의 유체는 가속 및 감속을 나타낸다. Mitchell[11] 등은 확산에 의한 평균 질량 전달률이 벽 전단 변형률의 1/3 승에 비례함을 제시하였으므로 측정된 벽 전단 변형률은 벽에서의 질량 전달 현상을 규명하는 자료로서 이용될 수 있다.

3.3 층류 파형 액막 내부의 속도 분포

일정 두께를 갖는 층류 액막과는 달리 층류 파형 액막 내부에서는 유동 방향 속도 성분뿐만 아니라 유동의 수직 방향 속도 성분도 발생한다. 완전 발달되어 일정 두께를 갖는 층류 액막의 경우 속도 분포가 2차 포물선임을 Nusselt[12]가 제시하였으므



(a) At substrate

(b) At rear side(closer to substrate)

(c) At rear side(closer to peak)

(d) At peak

Fig. 8 Measured streamwise velocities for different locations of the wave. Solid lines denote parabolic velocity profiles(case 3). For case numbers, refer to Fig. 7.

로 작동 유체의 물성치와 액막의 두께만 알 수 있다면 속도 분포를 예측하는데 어려움이 없지만 층류 파형 액막의 경우에는 파형의 각 부분에서 가속 및 감속을 받으며 수직 방향 속도가 존재함으로 속도 분포를 예측하기가 어려우며 속도 분포를 2차 포물선으로 가정하는 것은 옳지 못하다. 본 연구에서는 파형의 전면부보다 비교적 수직 방향 속도 성분이 작은 파형의 후면부와 피크 부분에서의 속도 분포를 측정하여 표면 속도와 두께를 기준으로 계산한 2차 포물선 방정식과 비교하였다(Fig. 8).

액막 파형의 최소 두께 부분과 피크 부분에서 2차 포물선과 잘 일치하나, 최소 두께 부분에서 피크부분으로 이동할수록 속도 분포는 2차 포물선보다 더욱 오목해짐을 보였으며, shape index가 클수록 오목해짐이 커짐을 보였다. 최소 두께 부분에서 2차 포물선과 일치함은 Alekseenko[6] 등의 실험 결과와 일치한다. 그러나 Alekseenko의 실험 결과에서 피크부분에서는 2차 포물선보다 볼록해짐을 보였는데 이는 파형의 shape index가 2 이상인 파형에 대한 결과였으므로 본 연구 결과와의 비교는 적당하지 않다. 이러한 결과를 종합해 볼 때 파형 액막 내부의 속도 분포는 파형의 shape index

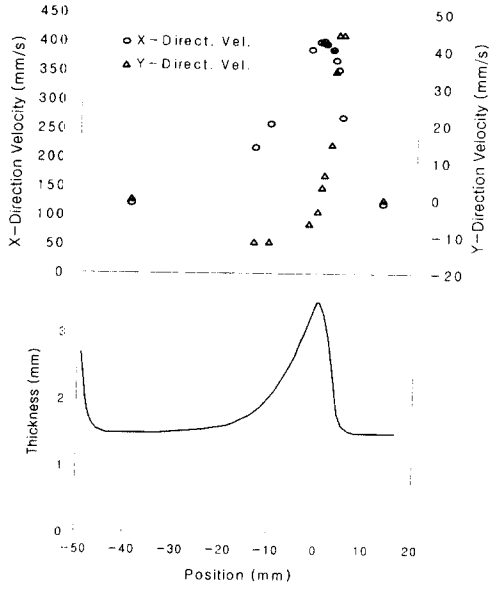


Fig. 9 Free surface velocities of the laminar wavy film. Horizontal bars show the ranges where the velocities are averaged.

와 밀접한 관련이 있는 것으로 보이며, shape index가 약 0.5~1.5인 경우에 대해서는 최소 두께 부분과 피크 부분에서의 속도 분포를 2차 포물선으로 가정할 수 있으나 피크 후반부에서는 2차 포물선으로 가정함이 옳지 못하다. 수직 방향 속도 성분은 파형 전면부에서 가장 크며 유동 방향 속도의 10% 정도의 값을 갖는다. 다른 지역에서의 수직 방향 속도는 유동 방향 속도의 5% 이하이며, 자취선의 유동 방향 변위는 실제 유체의 변위와 거의 같다. 따라서 유동 방향의 변위 측정으로 계산한 속도는 실제 속도와 1% 이내의 오차를 갖는다.

3.4 자유 표면에서의 속도 분포

Fig. 9는 파형 액막의 자유 표면 속도를 나타낸 것으로 액막 레이놀즈수가 12.1 (ν=91.2446 cs, ρ=961 kg/m^3, shape index=1.31, at 30℃)인 경우에 대해서 측정되어졌다. 각각의 Case에 대한 최대 유동 수직 방향 속도는 shape index가 클수록 커지며 shape index가 1 이상인 경우 유동 방향 속도에 10% 이상의 큰 값을 나타낸다(Table 2). 최대 유동 방향 속도는 파형의 정점에서 발생하며, 그 수직 방향 속도는 파형의 전면부에서 양의 값을, 후면부에서 음의 값을 나타낸다. 이는 파의 lump 부분에 재순환하는 유동지역이 존재함을 나타내며, 이에 따라 lump와 substrate 사이의 혼합은 증가되고, substrate 위에 lump가 미끄러져 나가는 형태로 유동하고 있음을 나타낸다. Levich[13]는 유동 방향 속도의 1% 정도의 수직 방향 속도로 자유표면 경계면에서 질량 전달을 15%까지 증가시킬 수 있음을 보였으며, 따라서 실험된 파형 액막 유동장에서는 큰 열·물질 전달 향상도 기대할 수 있으리라 예상된다.

4. 결 론

광색성 염료를 이용한 유동 가시화 방법에 의해 층류 파형 액막 유동에 대하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 액막이 발생하는 표면의 수평면과의 각도가 크고 점도는 낮을수록 shape index가 커지며 자유표면 경계면의 표면적과 유동 수직 방향 속도가 증가하여 경계면에서의 열·물질 전달이 향상되리라 기대된다. 또한 shape index가 커짐에 따라

substrate 영역보다는 lump에 의해 운반되는 유량이 커지게 된다.

(2) 파형 액막 내부에 존재하는 재순환 영역은 substrate와 lump의 혼합을 향상시켜 주므로 벽에서의 열·물질 전달을 향상시킬 것으로 보인다. 따라서 일정 두께의 액막보다는 액막에 파형이 형성될 경우가 벽에서의 열·물질 전달 향상에 유리하다. 벽 전단 변형률 측정 결과 유체의 점도가 같은 경우 shape index가 커질수록 최대 벽 전단 변형률도 커졌으며 벽 전단 변형률의 증가는 벽에서의 열·물질 전달을 향상시킨다. Levich는 유동 방향 속도의 1% 정도의 수직 방향 속도로 자유 표면 경계면에서 질량 전달을 15%까지 증가시킬 수 있음을 보였다. 파형 전면부의 자유 표면에서 수직 방향 속도 성분을 측정한 결과 shape index가 1 이상인 경우 유동 방향 속도 성분에 최대 10% 이상의 큰 값을 가지며, 이는 파형 내부의 2차 유동에 의한 자유 경계면에서의 전달 현상의 향상을 기대할 수 있다.

(3) 파형 액막 내부의 속도 분포는 파형의 shape index와 밀접한 관련이 있으며, shape index가 0.5~1.5인 경우 최소 두께 부분과 피크 부분에서의 속도 분포는 2차 포물선과 일치하나 파의 피크 후반부에서의 속도 분포는 2차 포물선 분포에 비해 오목하게 나타났으며, shape index가 커질수록 이러한 경향은 커졌다. 따라서 shape index가 커짐에 따라 파형 내의 최소 두께 부분을 제외한 지역에서는 속도 분포를 2차 포물선으로 가정하기 어렵다.

참고문헌

(1) Kim, H. C. and Kim, M. H., 1992, "The Development of a Flush -Wire Probe and Calibration Method for Measuring Liquid Film Thickness," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 18, No. 3, pp. 423~437

(2) Dukler, A. E. and Bergelin, O. P., 1952, "Characteristics of Flow in Falling Liquid Films," *Chem. Eng. Prog.*, Vol. 48, No. 11, pp. 557~563

(3) Salazar, R. P. and Marschall, E., 1975, "Thickness Measurement in Liguid film Flow by Laser Scattering," *Rev. Sci. Instrum*, Vol. 46, No. 11, pp. 1539~1541

(4) Ueda, T. and Tanaka, H., 1975, "Measurement of Velocity, Temperature and Velocity Fluctuation Distributions in Falling Liquid Films," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 2, pp. 261~271

(5) Mudawar, I. and Houpt, R. A., 1993, "Measurement of Mass and Momentum Transport in Wavy-laminar Falling Liquid Films," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 36, No. 17, pp. 4152~4162

(6) Alekseenko, S. V., Nakoryakov, V. E. and Pokusaev, B. G., 1985, "Wave Formation on Vertical Falling Liquid Films," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 11, No. 5, pp. 607~627

(7) Wilkes, J. O. and Nedderman, R. M., 1962, "The Measurement of Velocities in Thin Films of Liquid," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 17, pp. 177~187

(8) Thomas, W. C. and Rice, J. C., 1973, "Application of the Hydrogen Bubble Technique for Velocity Measurements in Thin Liquid Films," *J. Applied Mechanics, Trans. of ASME*, pp. 321~325

(9) Pierson, F. W. and Whitaker, S., 1977, "Some Theoretical and Experimental Observations of the Wave Structure of Falling Films," *Ind. Eng. Chem. Fundam.* Vol. 16, No. 4

(10) Wasden, F. K. and Dukler, A. E., 1989, "Insight into the Hydrodynamics of Free Falling Wavy Films," *AIChE Journal*, pp. 187~195

(11) Mitchell, J. E. and Hanratty, T. J., 1966, "A Study of Turbulence at a Wall Using an Electrochemical Wall-stress Meter," *J. Fluid Mech.* Vol. 26, pp. 199~221

(12) Nusselt, W. 1916, "Die Oberflachenkondensation des Wasserdamphes," *Z. Ver Dt. Ing.* 60, 541~546

(13) Levich, V. G., 1962, "Physicochemical Hydrodynamics," *Prentice-Hall, Inc.*