

수직평판을 타고 흐르는 층류파동액막류에 대한 체적분율식 시간차분법에 따른 해석 결과 비교

박일석* · 김영조* · 민준기**†

* 경북대학교 기계공학부, ** 부산대학교 롤스로이스 대학기술센터

Comparison of Numerical Results for Laminar Wavy Liquid Film Flows down a Vertical Plate for Various Time-Differencing Schemes for the Volume Fraction Equation

Il Seouk Park*, Young Jo Kim* and June Kee Min**†

* School of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.,

** Rolls-Royce University Technology Center, Pusan Nat'l Univ.

(Received July 6, 2011 ; Revised August 17, 2011 ; Accepted August 17, 2011)

Key Words: Liquid Film Flow(액막류), Evaporation(증발), Condensation(응축), VOF(체적분율)

초록: 액막류는 레이놀즈수 및 유동 안정성에 의해 파동이 없는 층류액막류, 파동을 동반한 층류 액막류 및 난류액막류로 구분된다. 파동액막류는 강한 비선형성에 의해 매우 복잡하여 기존에는 주로 실험적 연구가 진행되었다. 수치적 해석은 주로 파동이 없는 경우에 국한되었으며 여러 가지 자유표면 해석기법을 이용하여 평균액막두께를 예측하였다. 이 연구에서는 층류액막류의 파동현상을 레이놀즈수 20~1000 범위에서 수치해석하였다. 이 때, VOF 자유표면 해석기법에 기반한 여러 가지 수치방법을 비교 연구하였으며 평균액막두께, 파동속도 및 진폭을 실험결과와 비교하였다.

Abstract: Liquid film flows are classified into waveless laminar, wavy laminar, and turbulent flows depending on the Reynolds number or the flow stability. Since the wavy motions of the film flows are so intricate and nonlinear, studies on them have largely been experimental. Most numerical approaches have been limited to the waveless flow regime. The various free surface-tracking schemes adopted for this problem were used to more accurately estimate the average film thickness, rather than to capture the unsteady wavy motion. In this study, the wavy motions in laminar wavy liquid film flows with Reynolds numbers of 200–1000 were simulated with various numerical schemes based on the volume of fluid (VOF) method for interface tracking. The results from each numerical scheme were compared with the experimental results in terms of the average film thickness, the wave velocity, and the wave amplitude.

- 기호설명 -

C_w : 파동속도(wave velocity)
 f : 파동진동수(wave frequency)
 \bar{h} : 파동진폭(wave amplitude)
 Re : 레이놀즈수(Reynolds number)
 t : 시간(time)
 u_i : 속도벡터(velocity vector)
 V : 유속
 x_i : 위치벡터(position vector of coordinate system)

Δx : 계측점간 거리

그리스문자

α : 체적분율(volume fraction function)
 δ : 액막두께(film thickness)
 $\bar{\delta}$: 평균액막두께(average film thickness)
 Γ : 유량(mass flow rate)
 μ : 점도(dynamic viscosity)
 ρ : 밀도(density)
 ω : 위상차(phase lag)

† Corresponding Author, jkmin@pusan.ac.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

Subscripts
film : 막

in : 입구(inlet)

1. 서론

발전플랜트, 해수담수플랜트, 석유화학플랜트, 식품제조공정, 철강제조공정 등 많은 분야에 적용되고 있는 열교환기들은 높은 열교환 성능을 실현하기 위해 액막유동(liquid film flow) 방식을 채택하는 경우가 많다. 액막유동은 액막이 흐르는 벽면의 모양과 자세에 따라 수평면 액막류와 수직면 액막류, 수평원관 액막류, 수직관 액막류 등 다양한 형태로 구분되며 증발, 응축의 상변화 열전달을 동반하는 경우가 많다.

액막류는 일반적으로 액막레이놀즈수(Re_{film})가 30 미만일 때 파동(wave)이 없는 완전한 층류액막 상태를 유지하고, 이후 1600까지는 파동을 동반한 층류액막유동 양상을 보이며 1600에서 3200까지 천이를 거쳐 3200 이상에서 난류액막류가 되는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾

많은 이전 연구자⁽²⁻⁷⁾들에 의해 액막 열전달의 가장 중요한 지배인자가 액막의 두께임이 알려져 있으며, 층류 영역에서는 액막의 두께가 얇을수록 높은 열전달 성능이 발휘됨이 알려져 있다.

그러나 레이놀즈수 30에서 1600 사이에서는 매우 큰 진폭을 가지는 고립파(solitary wave)를 수반하는 파동액막류가 만들어지고 이로 인한 맥동류(pulsating flow)적 특성 때문에 액막의 평균두께로부터 단순히 열전달 성능을 예측하는 것은 무리가 있고, 액막두께의 시공간적 변화를 추적하여 파동 효과가 고려된 열전달 예측이 요구된다.

본 연구에서는 파동을 수반하는 층류액막유동 구간에서 열전달이 배제된 상황에서 액막류의 유체역학적 거동에 대하여 여러 가지 수치기법을 적용한 해석연구를 수행하고, 이를 통하여 액막의 평균두께와 파동특성, 진폭 등의 결과를 이전 연구자의 실험결과와 상호 비교하였다.

액막유동에 대한 대부분의 수치해석 연구는 액막유동 자체가 가진 단일방향흐름(unidirectional flow) 특성 때문에 Navier-Stokes 식에 경계층근사(boundary layer approximation)를 도입한 포물형 운동량 방정식을 지배방정식으로 채택하는 시도가 주를 이루어왔다.⁽⁵⁻¹¹⁾ 또한 증발 및 응축, 흡수 등 액막 자유표면에 부과되는 추가적인 물리현상을 운동량전달과 연계하여 해석하는 이론 연구가 활발히 진행되어왔다. 수평관 액막 또는 홈진관과 같이 액막 유동방향의 급격한 변화나 자유표면 형

상의 변화가 중요한 경우에 한하여 타원형 운동량 방정식을 채택하고 MAC⁽¹²⁻¹⁴⁾ 또는 움직이는 격자 기법⁽¹⁵⁻¹⁷⁾을 도입하여 계산 중에 자유표면의 형상 변화를 추적하는 시도가 있었다.⁽¹⁸⁻²⁰⁾ 그러나 이들 연구는 파동을 포함하지 않는 층류액막류에 국한되거나 자유표면 처리과정에서 파동의 발생을 강제로 억제하여 파동이 동반된 액막류에 대한 해석은 이뤄지지 않았다.

파동 액막류의 수치해석은 강한 비선형성 및 그에 의한 유동 안정성의 문제로 인해 비정상 Navier-Stokes 해석을 하여야 하며, 그에 따라 발생하는 복잡한 유동 및 액막 거동은 통계적인 방법으로 분석하여야 한다.

본 연구에서는 안정성해석(stability analysis) 차원의 수학적 접근에 국한되어 진행되어온 파동액막류에 대하여 수치해석 연구를 수행한다. 타원형 운동량방정식을 지배방정식으로 채택하고 액막 자유표면 추적을 위해 VOF(Volume of Fluid)⁽²¹⁻²²⁾ 방법을 적용하여 레이놀즈수 200에서 1000까지의 파동을 동반한 층류액막유동 구간에 대한 수치해석 연구를 수행한다.

2. 해석 방법

Fig. 1에 본 연구의 계산영역과 입출구 형상 등을 표시하였다. 수직평관의 총 길이는 1 m, 벽면에

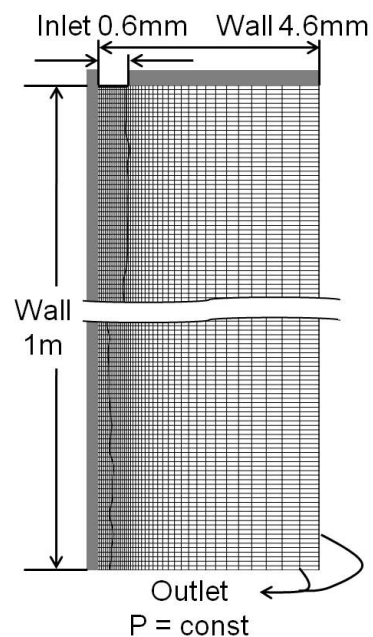


Fig. 1 Schematics of flow fields

수직한 방향으로의 폭은 4.6 mm 이며, 액막류 입구의 폭은 0.6 mm 로 그림과 같이 2 차원 해석을 수행한다. 과동진폭 및 과동속도, 액막두께 등에 대한 격자계 테스트를 통해 채택된 격자시스템은 길이방향으로 2000 개, 두께방향 40 개의 격자점으로 구성되었다. 두께방향 격자는 그림과 같이 벽면 근처로 밀집시켜 액막 자유표면 추적의 정확도를 높였다.

이차원, 비정상, 비압축성, 층류 유동에 관하여 질량보존식, 운동량보존식을 기본 지배방정식으로 이용하고 액체영역과 기체영역의 계면 형상 추적을 위하여 다음의 VOF 함수, α 에 관한 식을 추가로 해석한다.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

VOF 함수, α 는 해석셀 내에서 액체상의 체적분율(volume fraction)을 나타내는 값으로 0 이면 공기로 가득 차있는 셀이 된다.

Fig. 1 의 계산영역에서 각 벽면에서는 점착조건(no-slip condition)을 적용하였으며, 액막류 입구에서는 일정 속도 경계조건이 사용되었다. 액막유동 하류와 벽면 반대편 경계에서는 압력이 일정하고 속도에 대한 경계면의 수직방향 일차미분이 영이 되도록 지정하였다. 또한 액막 표면에서는 자유표면의 곡률을 구하여 표면장력 효과를 고려하였다.

운동량보존식의 대류항은 2 차 정확도를 가지는 선형상류도식(linear upwind scheme)이 사용되었으며, 확산항은 2 차 정확도의 중앙차분법(central differencing scheme)이 적용되었다. 속도와 압력 연계를 위하여는 SIMPLE 알고리즘⁽²³⁾이 사용되었다.

비정상해석을 위해 질량, 운동량보존의 기본 방정식은 1 차 정확도의 암시적(implicit)차분법이 사용되었으며, 식 (1)의 VOF 함수에 관한 전달식은 시간에 대하여 암시적차분법과 현시적(explicit)차분법을 각각 적용하여 각 결과들을 상호 비교하였다. 해석에 적용된 시간 간격(time step)은 1×10^{-4} sec.의 일정한 값을 사용하였다.

식 (1)의 체적분율전달식의 좌변 두 번째 항인 대류항의 차분방법으로 본 연구에서는 HRIC (High Resolution Interface Capturing) 방법⁽²⁴⁾과 PLIC (Piecewise Linear Interface Calculation) 방법⁽²⁵⁾을 각각 적용하여 그 결과를 비교하였다. HRIC 방법은 체적분율식의 시간차분 시 암시적차분법과 현시적차분법을 모두 적용하였으며, PLIC 방법은 자유표면 형상의 재생성을 위해 소요되는 긴 계산 시간

의 절약을 위하여 현시적차분법에 의해서만 자유표면 형상을 업데이트하고 각각의 결과들을 상호 비교하였다.

해석을 위하여 상용 CFD S/W 인 Fluent 6.3.26 이 사용되었으며 해석은 실제 유동시간으로 0 sec.에서 3 sec.까지 진행했으며 이는 액막류의 실제 속도나 해석을 통해 얻어진 과동속도를 고려할 때 충분한 해석 시간이다. 해석을 위한 장비로 Xeon E5620 CPU 가 장착된 클러스터 장비가 동원되었으며 코어 4 개를 동원했을 때 케이스당 96 시간 정도의 해석시간이 소요되었다.

해석은 액막레이놀즈수 200 에서 1000 의 영역에서 수행되었으며, 각 차분방법별로 얻어진 액막 평균두께와 과동진폭, 과동속도들에 대한 결과들을 Takamasa⁽²⁶⁾의 실험결과와 상호 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2 에는 체적분율전달식을 암시적 HRIC 방법으로 차분하여 해석한 경우에 액막레이놀즈수가 300, 400, 600, 1000 일 때의 특정 시간에서의 액막류 과동형상을 나타내었다. 액막레이놀즈수, Re_{film} 는 다음의 식 (2)와 같이 전통적으로 액막류 연구에 사용되어온 단위 폭당 유량, Γ [kg/ms]를 점성계

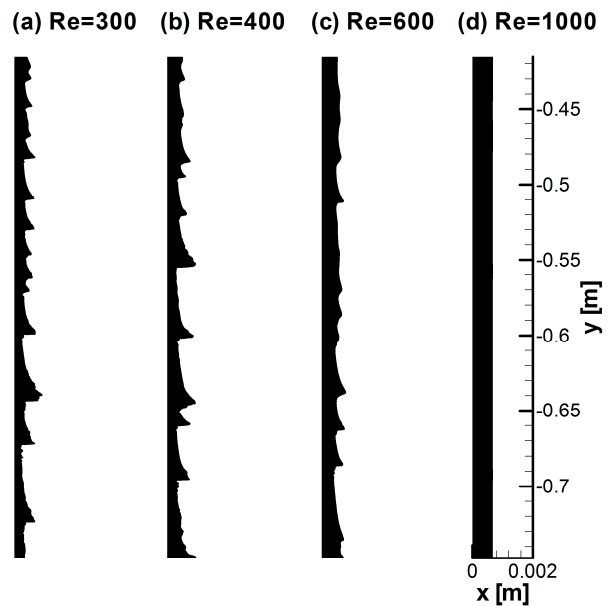


Fig. 2 Free surface shape for various Reynolds numbers by implicit HRIC scheme

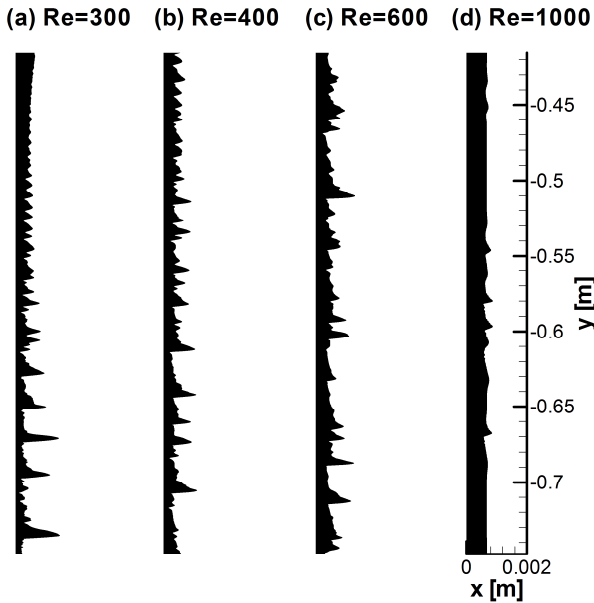


Fig. 3 Free surface shape for various Reynolds numbers by explicit HRIC scheme

수, μ 로 나눈 값을 사용하였다.

$$Re_{film} = \frac{\Gamma}{\mu} \quad (2)$$

본 연구에서는 액막류 입구의 크기가 고정되어 있으므로 입구 유속을 변경하여 레이놀즈수 변화를 구현하였다. 또 본 연구는 액막류를 이차원적으로 해석하므로 단위 폭당 유량, Γ 의 단위 폭은 자동으로 1 m 의 크기가 되어 다음 식 (3)으로 나타낼 수 있으며

$$\Gamma = \rho V_{in} \delta_{in} \quad (3)$$

여기서, V_{in} 은 액막류 입구의 평균 유속, δ_{in} 는 액막류 입구의 두께방향 폭으로 현재는 0.6 mm 로 고정된 값이다.

Fig. 3 은 현시적 HRIC 방법에 의해 차분하여 해석한 경우의 액막 파동전과 형상을 나타내었고, Fig. 4 는 현시적 PLIC 방법에 의한 해석 결과를 나타내고 있다.

암시적 HRIC 방법에 의한 해석 결과는 레이놀즈수가 커짐에 따라 파동이 점점 사라져 레이놀즈수가 1000 이 되면 파동이 거의 관찰되지 않고 있다. 레이놀즈수 증가에 따라 큰 진폭의 파동이 점점 사라지는 현상은 현시적 HRIC 방법과 현시적 PLIC 방법의 해석 결과에서도 동일하게 관찰되고 있지만 각 레이놀즈수 영역에서 관찰되는 파동의 형태는 차분방법별로 매우 다른 것을 확인할 수

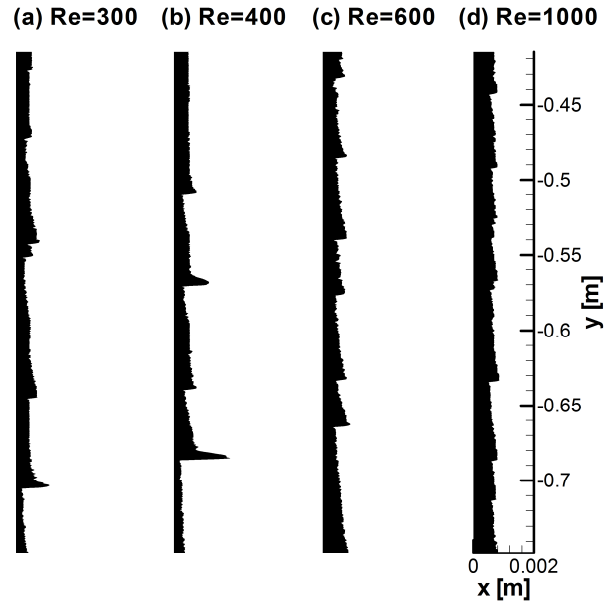


Fig. 4 Free surface shape for various Reynolds numbers by explicit PLIC scheme

있다. 현시적 HRIC 방법에서는 다른 차분 방법들의 결과에 비해 파동의 주파수가 매우 크게 관찰되고 있다. 고립파의 형상도 차분방법별로 다른 모습을 예측하고 있으며 현시적 PLIC 방법에서는 레이놀즈수 1000 인 경우까지도 진폭은 줄어들었지만 고립파의 형태가 유지되고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 5 에서는 액막의 평균두께를 레이놀즈수와 본 연구에서 적용한 여러 가지 차분방법별로 비교하였다. 본 연구의 해석결과에 대한 검증은 위해 Takamsa 의 실험 결과⁽²⁶⁾ 및 Nusselt 의 이론 예측식과 함께 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 액막의 평균두께가 이전의 실험결과와 미소한 차이를 보이지만 레이놀즈수의 증가에 따른 액막두께 증가 양상 및 기울기 측면에서 실험결과와 매우 일치하는 결과를 얻었다. 수치차분 방법별로는 레이놀즈수가 300 이상에서는 모두 동일한 결과를 보이는 반면 레이놀즈수가 200 인 경우에는 액막두께가 수치차분 방법에 따라 각기 다른 값을 예측하고 있는 것을 확인할 수 있다. 현재의 해석에서는 액막레이놀즈수가 작아질수록 액막의 끊김 현상이 발생하였는데 이 때문에 액막레이놀즈수 200 미만의 영역에서는 해석을 수행하지 못하였다. 이는 액막레이놀즈수의 감소에 따라 액막의 두께가 얇아지는 반면 Fig. 2-4 에서 관찰된 바와 같이 액막의 평균두께에 비해 큰 진폭의 고립파가 생성

되기 때문으로 여겨진다. 그러나 실제 실험결과에서는 200 이하의 낮은 액막레이놀즈수 영역에서도 액막 끊김 현상은 나타나지 않는데, 수치해석에서는 수치적 외란과 액막류 자체의 고유 진동수에 의한 파동들이 어느 순간 증폭되며 끊김 현상이 발생하는 것으로 여겨진다. 이와 같은 결과로 수치적 액막 끊김 현상이 시작되는 레이놀즈수 200 근처에서 액막의 평균두께 예측값이 실험결과와 많이 다른 것으로 판단된다. 그림의 액막두께는 입구로부터 거리가 300 mm 떨어진 곳에서 계측한 값들이며 다음의 식 (4)와 같이 0.5 sec. 동안 관찰된 두께의 산술평균으로 얻어졌다.

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (4)$$

액막의 평균두께는 중력에 의한 운동량 발달과 이로 인해 결정되는 속도 크기와 질량보존에 의해 결정되기 때문에 본 연구에서 검토하고 있는 체적분율식 차분법에 따른 차이는 나타나지 않는 것이 당연하다. 파동을 동반한 액막류의 파동특성의 관찰을 위해 Fig. 6 에 나타낸 것과 같이 파동진폭의 크기를 차분방법별로 비교하였다. 파동의 진폭은 다음 식 (5)와 같이 정의하였으며,

$$\bar{h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\delta_i - \delta_{\min}) \quad (5)$$

여기서, δ_{\min} 은 시간 평균을 수행하는 구간 중 계측된 최소 액막두께이다. Ito-Sasaki⁽²⁷⁾는 액막류 파동진폭에 대한 경험식을 제시하였으며 액막의 진폭이 레이놀즈수 증가에 따라 선형적으로 증가한다고 보고하고 있으나 Takamasa 는 층류과동액막유동 및 난류액막유동 구간에 대한 실험을 통해 그림과 같이 레이놀즈수 500 이상에서 파동진폭이 줄어드는 경향이 있는 것을 확인하였다. 본 연구에서도 이와 같은 현상이 잘 계측되었으며 현시적 PLIC 방법으로 해석한 경우가 액막류 파동의 진폭을 실험치와 가장 유사하게 예측하는 것을 확인하였다. 실제로 액막류는 레이놀즈수가 증가하여 난류유동이 되면 Fig. 4 의 레이놀즈수 1000 의 결과와 비슷하게 액막의 두께가 두꺼워지며 큰 진폭의 고립파가 서서히 사라지는 대신 작은 진폭의 물결(ripple)이 높은 주파수를 가지고 나타남이 여러 실험을 통해 보고되고 있다.

수치차분 방법별로 액막류의 파동특성 모사 능력을 검토하기 위해 추가로 파동속도에 대한 결과를 비교하였다. 액막류의 파동속도, C_w 는 다음의 식 (6)으로 정의하며

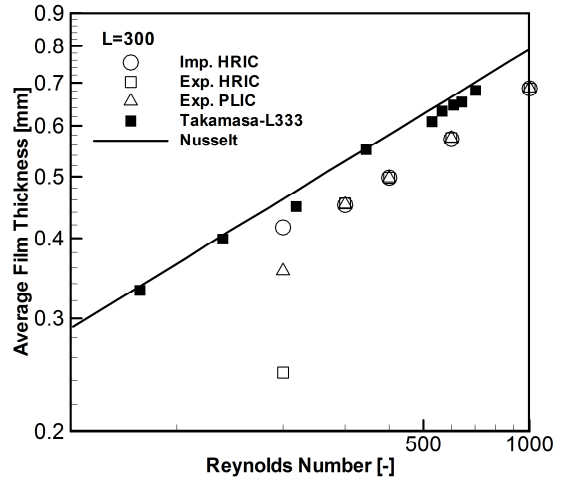


Fig. 5 Average film thickness for various Reynolds numbers and numerical schemes

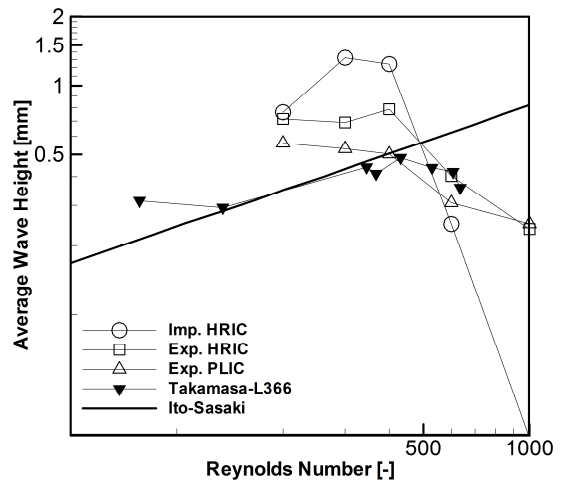


Fig. 6 Wave height for various Reynolds numbers and numerical schemes

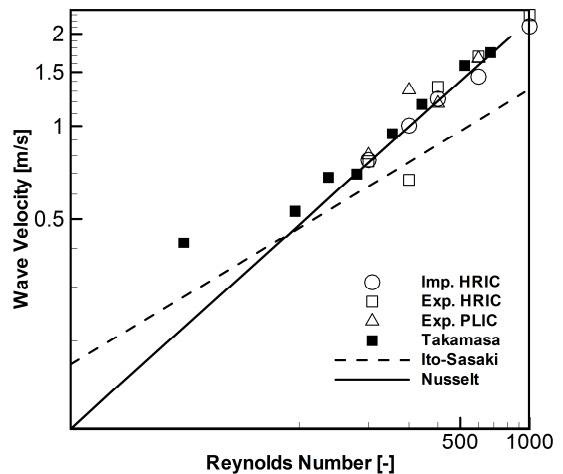


Fig. 7 Wave velocity for various Reynolds numbers and numerical schemes

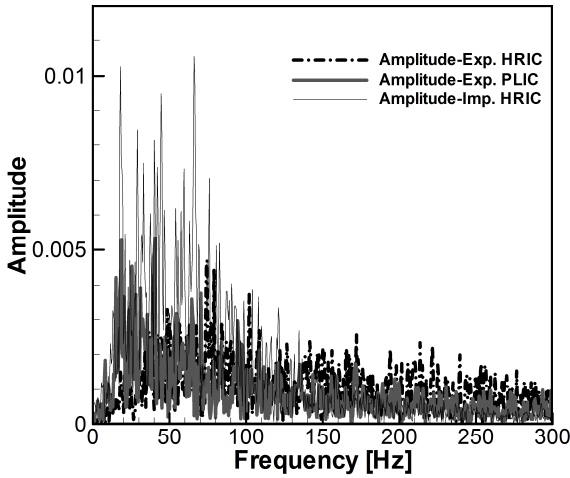


Fig. 8 Power spectrum to frequency band for Reynolds number, 600

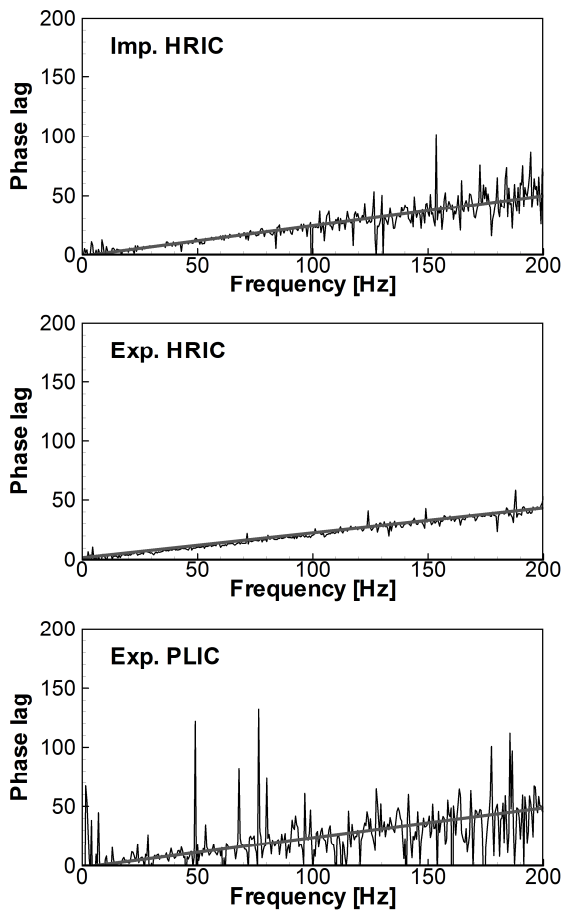


Fig. 9 Phase lag to frequency for various discretizing schemes at Reynolds number, 600

$$C_w = \frac{2\pi f}{\omega} \Delta x \quad (6)$$

여기서 f 는 파동의 진동수며, 본 연구에서는 파동

속도를 계산하기 위해 이웃하는 두 지점에서의 액막두께 변화를 추적하였는데 Δx 는 이 이웃하는 두 지점간의 거리이며 ω 는 두 계측점간 위상차를 의미한다. 본 연구에서는 Δx 의 크기를 0.1 mm 로 일정하게 하고 100 mm 간격으로 모두 아홉 곳에서 파동속도를 관찰하였으나 위치에 따른 차이는 나타나지 않았다. 이것은 현재의 해석 결과들이 액막류 자체의 고유 특성으로 인한 파동을 해석해 내고 있음을 나타내는 결과라 할 수 있다. Fig. 7 에 나타낸 레이놀즈수별 파동속도 변화 결과는 Takamasa⁽²⁶⁾의 실험결과와 매우 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 파동속도는 레이놀즈수가 커짐에 따라 비례하여 증가하고 있다. 차분방법별 결과를 비교하면 본 연구에서 사용하고 있는 모든 차분 방법들이 거의 동일한 파동속도 변화 패턴을 보이고 있다. 이것은 Fig. 2~4 까지의 액막형상에서 확인된 차분방법별 차이에 반하는 결과로 액막의 형상 변화 결과에서는 차분방법별로 각기 다른 주파수영역 대의 파동이 포함된 것으로 확인되었다. 실제 해석결과로 얻어진 파동의 주파수 영역대별 파워 스펙트럼을 Fig. 8 에 나타내었다. 그림은 레이놀즈수가 600 인 경우이며 차분방법에 따라 각기 다른 우세 진동수(dominant frequency)를 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 암시적 방법은 25 에서 75 Hz 사이에 집중된 파동을 계측하였으며 이는 Fig. 2 에서 확인된 바와 같이 매우 단순하고 간결한 자유표면 형상 결과와 일치한다. 반면 현시적 HRIC 방법과 현시적 PLIC 방법에 의한 결과들은 넓은 주파수 영역대를 가짐을 볼 수 있고 우세 진동수의 크기도 각각 75 와 25 Hz 근처로 관측되고 있으며 이 결과 또한 Fig. 3~4 의 자유표면 형상 비교를 통해 확인된 것처럼 두 경우 모두 다양한 주파수의 파동을 포함하고 있고 현시적 HRIC 결과가 보다 큰 우세 주파수를 가지는 결과와 일치하고 있다.

Fig. 9 에서는 각 차분방법 별로 레이놀즈수 600 일 때 파동의 주파수에 따른 위상차를 나타내었다. 각기 조금씩 다른 주파수-위상차 분포를 나타내고 있지만 주파수 증가에 따른 위상차 변화의 기울기는 그림에 표시한 피팅선(fitting line)과 같이 거의 동일한 값을 가지며 그 결과가 식 (6)의 f/ω 에 사용되므로 파동속도는 차분방법에 따라 거의 차이를 보이지 않게 된다.

4. 결론

액막레이놀즈수 200 에서 1000 사이의 파동을 수반하는 층류액막유동 구간에서 파동을 포함한

액막류 유동에 대한 수치해석 연구가 이뤄졌다. 기존의 수학적 안정성해석(stability analysis) 대신 수치해석 연구를 수행함으로써 다양한 유동 정보를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 자유표면의 파동을 모사하기 위하여 VOF 방법을 사용하였으며 체적분율전달식을 차분하는 방법에 따라 각기 다르게 예측되는 액막형상 및 파동특성에 대해 비교 분석하였다. 차분방법이 액막의 평균두께 예측에는 영향을 끼치지 않는 사실을 확인하였다. 액막 파동의 진폭은 차분방법에 따라 크게 다른 결과를 보이는 것을 확인하였다. 그러나 테스트된 세가지 차분방법들 모두 레이놀즈수 500 이상에서 레이놀즈수 증가에 따라 파동진폭이 줄어드는 결과를 얻었고 이는 이전의 실험결과와 일치하는 것이다. 파동속도 면에서도 각 차분방법들이 실험결과와 일치하는 결과를 보이고 있지만 액막 파동의 우세 주파수는 차분방법에 따라 각기 다르게 예측됨을 확인하였다. 이상으로 파동증류액막류의 해석에 있어 현시적 PLIC 차분방법이 액막의 유동 및 파동특성 예측에 적합함을 확인하였다.

후 기

본 논문은 2010 년도 경북대학교 학술연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Min, J. K. and Park, I. S., 2011, "Numerical Study for Laminar Wavy Motions of Liquid Film Flow on Vertical Wall," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 3256~3266.
- (2) Nusselt, W., 1916, "Die Oberflächen Kondensation des Wasserdampfes, *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*," Vol. 60, pp. 541~575.
- (3) Faghri, A. and Seban, R. A., 1988, "Heat and Mass Transfer to a Turbulent Liquid Film," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, No. 4, pp. 891~894.
- (4) Chun, M. -H. and Kim, K. -T., 1990, "Assessment of the New and Existing Correlations for Laminar and Turbulent Film Condensations on a Vertical Surface," *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, Vol. 17, pp. 431~441.
- (5) Park, I. S. and Choi, D. H., "Analysis of LiBr-H₂O Film Absorption on a Horizontal Tube," 1996, *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 20, No. 2, pp. 670~679.
- (6) Grigoreva, N. I. and Nakoryakov, V. E., 1977, "Exact Solution Combined Heat and Mass Transfer Problem During Film Absorption," *J. Eng. Phys.*, Vol. 33, No. 5, pp. 1349~1353.
- (7) Grossman, G., 1982, "Simultaneous Heat and Mass Transfer in Film Absorption under Laminar Flow," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 25, No. 3, pp. 357~371.
- (8) Andberg, J. W. and Vilet, G. C., 1987, "A Simplified Model for Absorption of Vapors into Liquid Films Flowing over Cooled Horizontal Tubes," *ASHRAE Trans.*, Vol. 93, pp. 2454~2466.
- (9) Park, I. S. and Kim, M. Y., 2009, "Numerical Investigation of the Heat and Mass Transfer in a Vertical Tube Evaporator with the Three-Zone Analysis," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 2599~2606.
- (10) Feddaoui, M., Mir, A. and Belahmidi, E., 2003, "Cocurrent Turbulent Mixed Convection Heat and Mass Transfer in Falling Film of Water inside a Vertical Heated Tube," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 3499~3509.
- (11) Groff, M. K., Ormiston, S. J. and Soliman, H. M., 2007, "Numerical Solution of Film Condensation from Turbulent Flow of Vapor-Gas Mixtures in Vertical Tubes," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 3899~3912.
- (12) Harlow, F. H. and Welch, J. E., 1965, "Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface," *Phys. Fluids*, Vol. 8, pp. 2182~2189.
- (13) Daly, B. J., 1969, "A Technique for Including Surface Tension Effects in Hydrodynamics Calculations," *J. Comput. Phys.*, Vol. 4, pp. 97~117.
- (14) Chan, R. K. C. and Street, R. L., 1970, "A Computer Study of Finite-Amplitude Water Waves," *J. Comput. Phys.*, Vol. 6, pp. 68~94.
- (15) The, J. L., Raithby, G. D. and Stubble, G. D., 1994, "Surface-adaptive Finite-Volume Method for Solving Free Surface Flows," *Numer. Heat Transfer B*, Vol. 6, pp. 367~380.
- (16) Lilek, Z., 1965, "Ein Finite-Volume Verfahren Zur Berechnung Von Incompressiblen und Kompressiblen Stromungen in Komplexen Geometrien Mit Beweglichen Randern und Freien Oberflächen," Dissertation, University of Hamburg, Germany.
- (17) Muzaferija, S. and Peric, M., 1997, "Computation of Free-Surface Flows Using the Finite Volume Method and Moving Grids," *Numer. Heat Transfer B*, Vol. 32, pp. 369~384.
- (18) Min, J. K. and Choi, D. H., 1999, "Analysis of the Absorption Process on a Horizontal Tube Using Navier-Stokes Equations with Surface-Tension Effects," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 42, No. 24, pp. 4567~4578.
- (19) Park, I. S. and Choi, D. H., 2001, "Heat- and Mass-Transfer Analysis for the Condensing Film Flow along a Vertical Grooved Tube," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 44, No. 22, pp. 4277~4285.

- (20) Park, I. S., 2010, "Numerical Analysis for Flow Heat and Mass Transfer in Film Flow along a Vertical Fluted Tube," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 53, No. 1-3, pp. 309~319.
- (21) Hirt, C. W. and Nichols, B. D., 1981, "Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," *J. Comput. Phys.*, Vol. 39, pp. 201~225.
- (22) Partom, I. S., 1987, "Application of the VOF Method to the Sloshing of a Fluid in a Partially Filled Cylindrical Container," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 7, pp. 535~550.
- (23) Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," McGraw-Hill, New York.
- (24) Fluent 6.3 Users Guide, 2006, Fluent Inc., Canonsburg.
- (25) Youngs, D. L., 1992, "Time-Dependent Multi-Material Flow with Large Fluid Distortion," *Numerical Methods for Fluid Dynamics*, Academic Press, pp. 273~285.
- (26) Takamasa, T. and Hazuku, T., 2000, "Measuring Interfacial Waves on Film Flowing Down a Vertical Plate Wall in the Entry Region Using Laser Focus Displacement Meters," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 2807~2819.
- (27) Ito, A. and Sasaki, M., 1986, "Breakdown and Formation of a Liquid Film Flowing Down an Inclined Plane," *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 52, pp. 1261~1265.