

## 난류 모형에 따른 수직 평판 위 파동 액막류의 수치해석 연구

민준기\* · 박일석\*\*†

\* 부산대학교 롤스로이스 대학기술센터, \*\* 경북대학교 기계공학부

### Numerical Study of Wavy Film Flow on Vertical Plate Using Different Turbulent Models

June Kee Min\* and Il Seouk Park\*\*†

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

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

(Received October 10, 2012 ; Revised November 18, 2013 ; Accepted November 18, 2013)

**Key Words:** Vertical Plate(수직평판), Free Surface Flow(자유표면유동), Turbulent Model(난류모형), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Wavy Film Flow(파동액막류)

**초록:** 액막류는 다양한 산업분야에 적용되는 셸-튜브 열교환기의 주요 열교환기구로 오랫동안 연구되어 왔다. 액막류의 한쪽 경계는 고정벽에 접하고 있지만 반대편에서는 기체 영역과 경계를 형성하므로 액막 레이놀즈 수가 증가함에 따라 쉽게 불안정해지는 특징을 가지고 있다. 따라서 레이놀즈 수가 증가함에 따라 자유표면 파동 현상이 나타나는데, 층류 영역에서는 큰 진폭의 고립파가, 난류 천이 이후에는 낮은 진폭의 물결파가 나타난다. 액막류의 열전달 성능은 액막의 두께에 의해 크게 지배받는데 액막류에 동반된 파동은 액막 두께의 시공간적 변화를 의미하는 것이므로 이에 대한 정보를 해석적으로 수집하는 것은 액막류 열전달 성능을 예측하는데 필수적이다. 본 연구에서는 낮은 진폭의 물결파를 동반한 난류 액막류에 대하여 여러 가지 난류 모형을 적용한 해석결과들을 실험결과와 비교함으로써 난류 모형들에 대한 평가를 실시하였다.

**Abstract:** Film flows applied to shell-and-tube heat exchangers in various industrial fields have been studied for a long time. One boundary of the film flow interfaces with a fixed wall, and the other boundary interfaces with a gaseous region. Thus, the flows become so unstable that wavy behaviors are generated on free surfaces as the film Reynolds number increases. First, high-amplitude solitary waves are detected in a low Reynolds number laminar region; then, the waves transit to a low-amplitude, high frequency ripple in a turbulent region. Film thickness is the most significant factor governing heat transfer. Since the wave accompanied in the film flow results in temporal and spatial variations in film thickness, it can be of importance for numerically predicting the film's wavy behavior. In this study, various turbulent models are applied for predicting low-amplitude ripple flows in turbulent regions. The results are compared with existing experimental results, and finally, the applied turbulent models are appraised in from the viewpoint of wavy behaviors.

### 1. 서론

발전플랜트, 해수담수플랜트, 석유화학플랜트, 식

품제조공정, 철강제조공정 등 많은 분야에서 사용되고 있는 셸-튜브 열 교환기는 열교환 성능을 향상시키기 위해 액막 유동(Film Flow) 방식을 채택하는 경우가 많다. 이 방식의 열교환기에서는 액막두께가 열전달을 지배하는 가장 중요한 인자

† Corresponding Author, [hclim@pusan.ac.kr](mailto:hclim@pusan.ac.kr)

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

로 알려져 있다.<sup>(1-6)</sup>

액막류는 일반적으로 액막 레이놀즈 수에 따라서 네 가지 유동 패턴<sup>(7)</sup>으로 구분되는데, 액막 레이놀즈 수가 10 미만일 때 파동이 없는 완전한 층류 액막류가 형성되며, 이후 액막 레이놀즈 수 400까지는 큰 진폭의 고립파들을 포함하는 층류 파동 액막류가, 그리고 난류 천이를 거쳐 액막 레이놀즈 수 800 이상에서 완전한 난류 액막류가 형성된다.

Takamasa 등<sup>(8)</sup>은 LFD(Laser Focus Displacement Meter) 기법을 이용하여 실험적으로 액막의 최대 두께, 최소두께 및 Wave의 속도 등을 측정하였고, Hirshburg 등<sup>(9)</sup>은 액막 파동현상에 관한 이론적 연구를 통해 파동 액막류의 유체역학적 특성을 연구하였다. 또한 Jayanti 등<sup>(10)</sup>은 전산유체역학 해석을 통해 물결모양의 얇은 액막류에 대한 유동 특성과 열전달 특성에 대하여 연구하였다.

본 연구에서는 실제 열교환기 등에 자주 사용되고 있는 액막 레이놀즈 수, 800에서 2000까지 범위에서, 액막 유동 특성 모사에 관한 난류 모형별 특징을 관찰하고 있다. Low Reynolds  $k-\epsilon$ , Standard  $k-\epsilon$ , Standard  $k-\omega$  모델, 마지막으로 Reynolds stress 모델의 네 가지 난류 모형이 적용되었으며 각각의 난류 모형을 적용하였을 때 액막의 두께 변화 및 액막 표면의 파동 진행 속도 등의 결과들을 기존 연구 결과들과 비교하여 나타내었다.

## 2. 수치해석 방법

본 연구에서는 수치해석을 통해 유동특성을 파악하기 위하여 Fig. 1 과 같이 수직 길이 1000 mm, 액막류 유입 두께 0.6 mm, 가로 길이 19 mm의 직사각 계산영역에 대하여 직사각형 격자계를 생성하였다. 파동진폭 및 파동속도, 액막두께 등에 대한 격자계 테스트를 통해 채택된 격자 시스템에서는, 수직방향으로 2000개의 격자를 균등하게 배치하고, 가로방향으로 액막 유입 두께 0.6 mm 구간에 15개 격자를 균등 배치하며, 나머지 구간에 45개의 격자를 액막류 근처로 밀집하여 분포하였다.

2차원 비정상(Unsteady), 비압축성 유동에 대하여 물과 공기의 경계면을 추적하기 위하여 VOF (Volume Of Fluid) 기법이 사용되었으며, 체적분

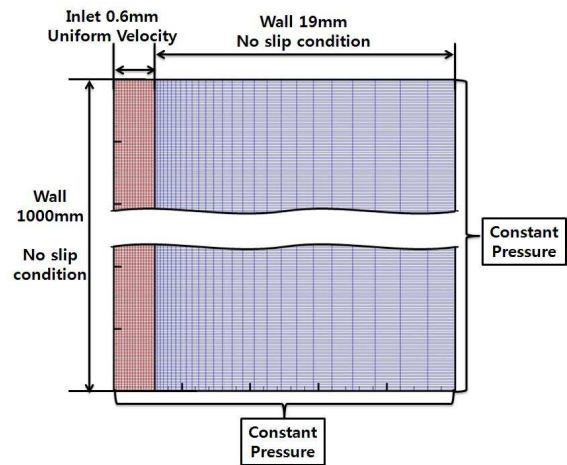


Fig. 1 Schematic of flow fields

율식 해석을 통한 자유표면 형상 업데이트는 명시적(Explicit) 방법을 적용하였다. 체적분율식의 대류항 차분 및 자유표면 경계 추적에는 HRIC (High Resolution Interface Capturing) 방법<sup>(11)</sup>이 적용되었다.

또한 물과 공기 계면에서의 표면 장력 계수는 0.0712 N/m로 일정한 값을 적용하였다. 수직벽면에서는 점착조건(No Slip Condition)이 적용되었으며, 액막류 입구에서는 일정속도 경계조건이 적용되었다. 액막류 유입구 옆 기체 영역은 VOF 해석의 수렴성을 고려하여 벽경계조건을 설정하였다. 액막류 하류와 수직벽 반대편 경계에서는 일정압력 조건이 적용되며 압력 이외의 종속변수에 대해서는 외삽법에 의해 처리되도록 하였다. 운동량 보존식의 대류항은 2차 정확도를 가지는 선형상류도식(Linear Upwind Scheme)이 사용되었으며, 확산항은 2차 정확도의 중앙 차분법(Central Differencing Scheme)이 적용되었다. 속도와 압력 연계를 위해 SIMPLE 알고리즘이 사용되었다. 해석에 적용된 시간 간격(Time Step)은  $10^{-4}$  sec.의 일정한 값을 사용하였고 이때 해당 CFL 수는 모든 액막 레이놀즈수 경우에 1.0 미만이었다.

난류 모델 사용 시, Standard  $k-\epsilon$ , Standard  $k-\omega$  모델, Reynolds stress 모델의 경우, 벽면에서 Enhanced Wall Treatment 기법<sup>(11)</sup>을 사용하였다. 이를 위해 격자를 벽면에 집중하였으며, 모든 경우에 대해  $y^+ < 1.0$ 을 만족하는 계산 결과를 얻었다. Low-Reynolds  $k-\epsilon$  모델로는 Abid<sup>(12)</sup>의 모델이 사용되었으며, Reynolds stress 모델의 경우는 압력-변형률 항(Pressure-strain Term)의 모델로 Gibson

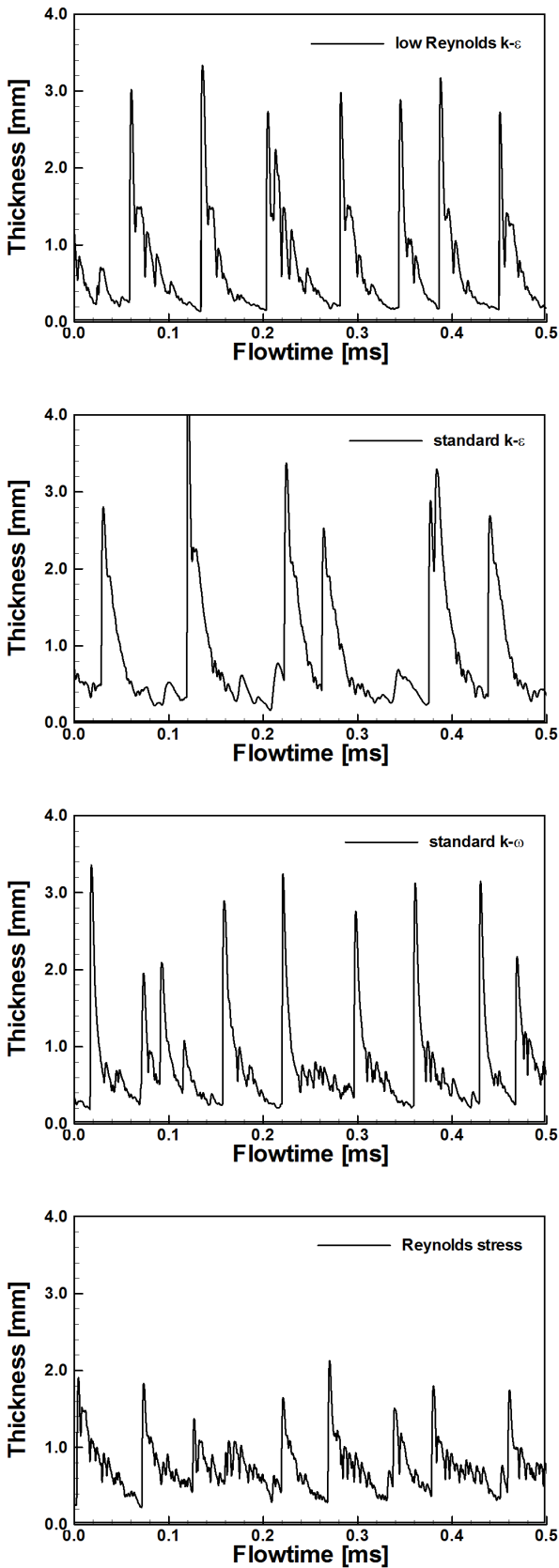


Fig. 2 Film thickness variation over time in  $Re_{film} = 800$

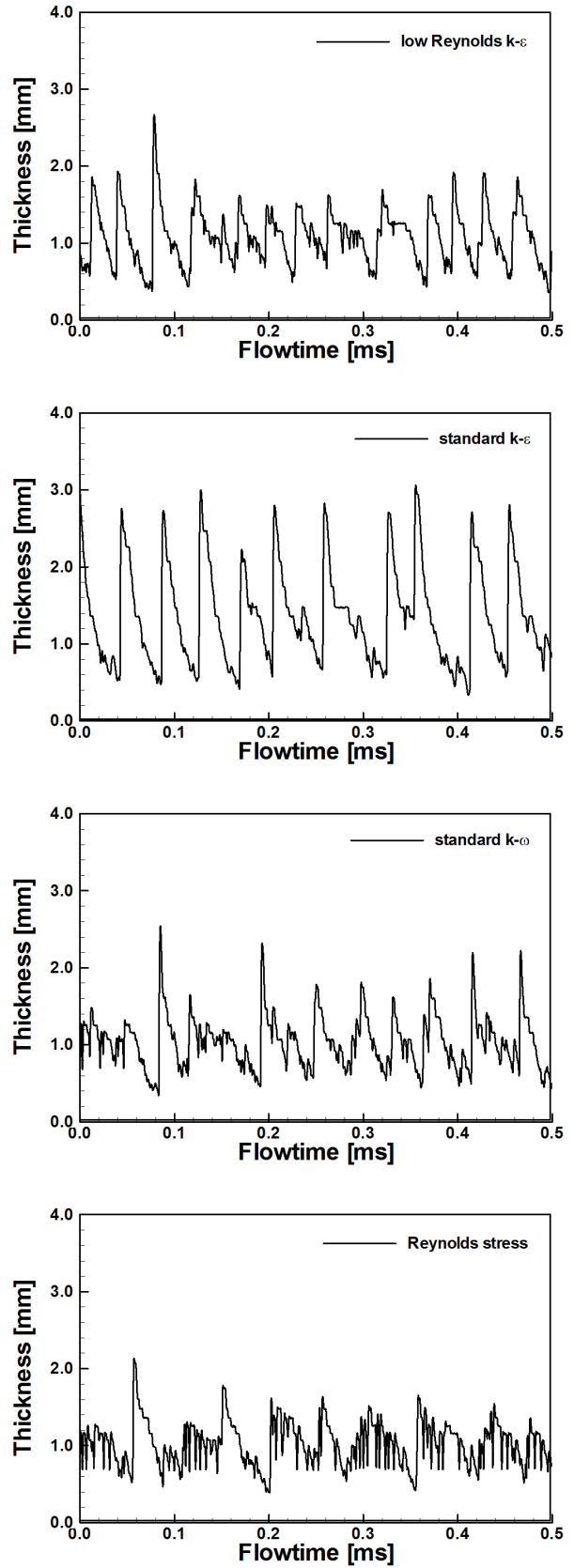


Fig. 3 Film thickness variation over time in  $Re_{film} = 1500$

과 Launder<sup>(13)</sup>의 선형 모형(Linear Pressure-strain Model)을 사용하였다.

액막 레이놀즈 수는 800, 1000, 1500, 2000의 네 가지 경우를 해석하였으며 액막 레이놀즈 수의 정의는 다음과 같다.

$$Re_{film} = \frac{\rho VD}{4\mu} \quad (1)$$

$\rho$ 는 물의 밀도,  $V$ 는 입구 유입속도,  $D$ 는 액막류 입구 두께이고,  $\mu$ 는 작동유체의 점성이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 액막두께의 시공간적 변화

Fig. 2와 Fig. 3은 각각 액막 레이놀즈 수 800과 1500에서 적용된 난류 모형에 따른 액막두께의

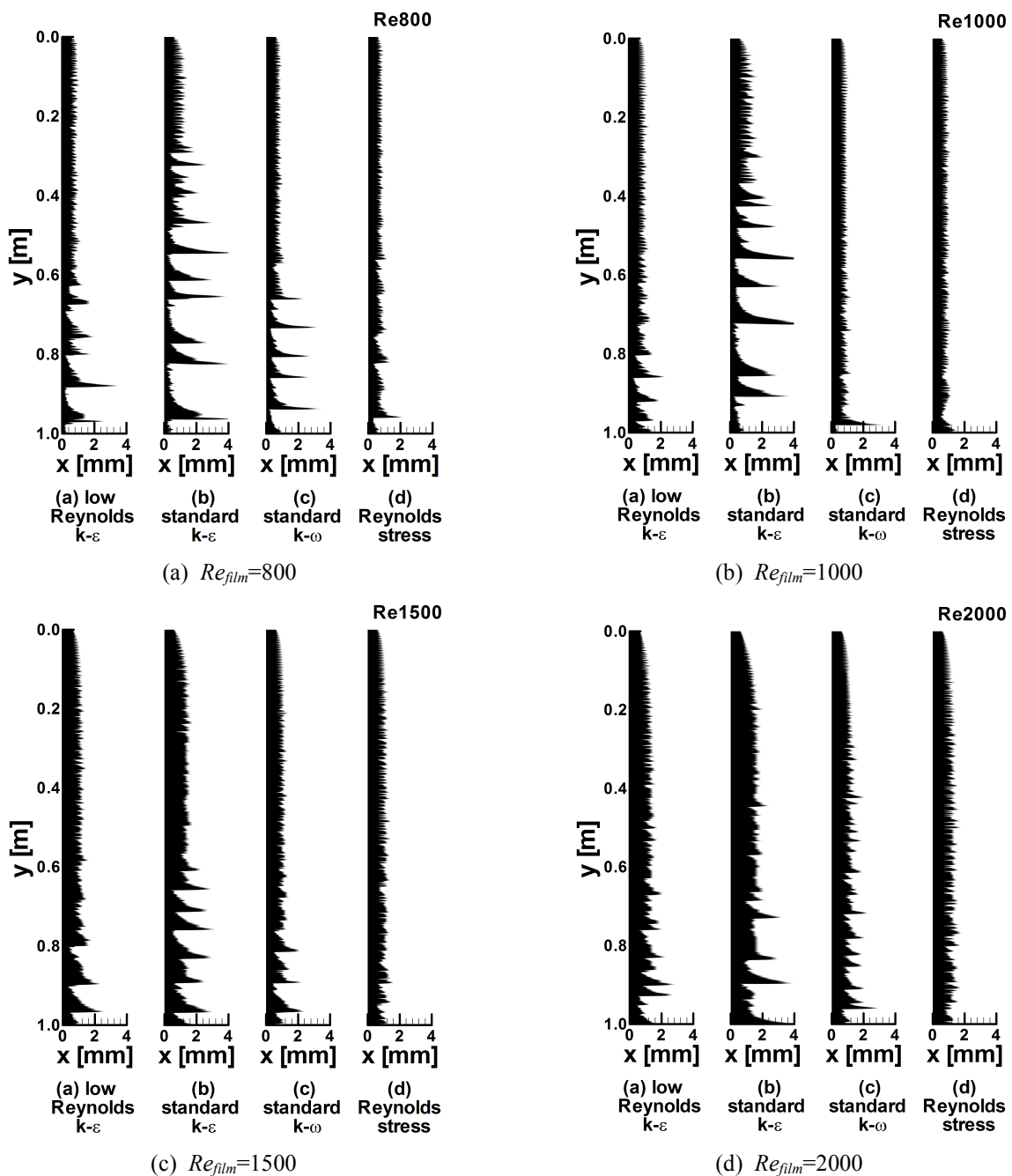


Fig. 4 Spatial variations of film thickness for various turbulent models

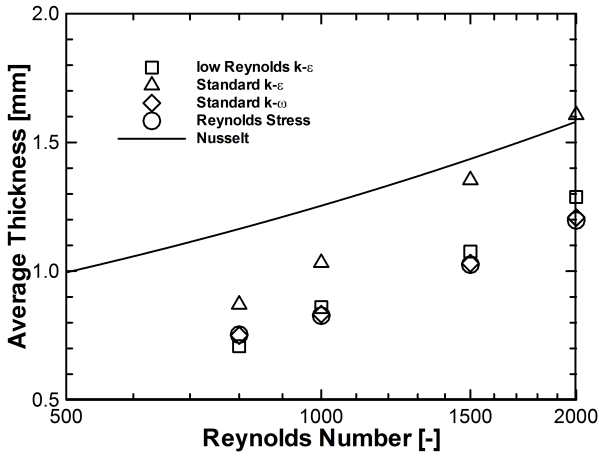


Fig. 5 Average film thickness for different Reynolds numbers and different turbulent models

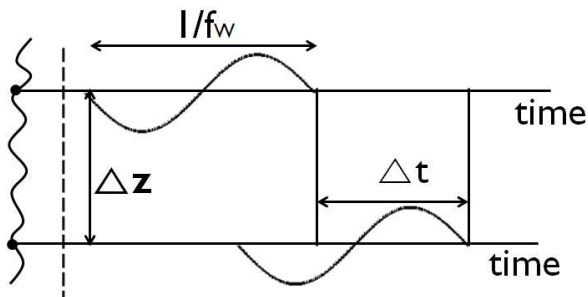


Fig. 6 Schematic for phase lag calculation

시간 변화를 나타내고 있다. 모든 경우에서 측정점의 위치는 입구로부터 900 mm 떨어진 지점이다. 고립파가 성장하기에 충분히 큰 특성시간을 가지는 층류 영역에서는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 고립파의 진폭이 함께 증가하는 것으로 알려져 있지만 난류 영역에서는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 고립파가 급격히 상쇄되는 것으로 알려져 있다. Fig. 2와 3에서도 Reynolds Stress 모델에서 이와 같은 레이놀즈 수의 증가에 의해 고립파의 상쇄 현상이 잘 묘사되고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 2와 3의 비교를 통해 레이놀즈 수가 증가함에 따라 액막 파동의 주파수가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 모든 난류 모형들이 고립파가 중첩되면서 소멸되어 가는 과정을 잘 나타내고 있으나 적용된 난류 모형별로 높은 주파수의 물결파를 묘사하는 능력은 각기 다를 수 있다. 또 일반적으로 널리 사용되고 있는 Standard k-ε 모델의 경우 다른 모형들에 비해 파동의 주파수를 낮게 예측하는 것도 알 수 있으며

파동 진폭 측면에서는 고립파의 상쇄를 가장 잘 반영하고 있는 Reynolds Stress 모형이 다른 모형들에 비해 액막류의 최대두께가 낮게 예측됨을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 네 가지 액막 레이놀즈 수에서 여러 난류 모형들을 적용하여 얻은 액막두께의 공간적인 분포를 나타내고 있다. 난류 액막유동과 천이 액막유동의 경계에 해당하는 액막 레이놀즈 수 800의 경우는 비교적 큰 진폭의 고립파와 고주파의 물결파가 동시에 나타나고 있으나 Reynolds stress 모형에서는 고립파가 거의 상쇄된 모습을 볼 수 있다. 적용된 난류 모형별로 레이놀즈 수의 증가에 따라 고립파의 소멸이 나타나고 있으나 그 정도는 다소 차이를 보이고 있으며 특히 Standard k-ε 모형은 다른 난류모형에 비해 평균 액막두께 측면에서도 유난히 큰 값을 예측하고 있음을 볼 수 있다. 큰 진폭의 고립파가 일부 난류모형에서 나타남에도 불구하고 전체 유동영역에서 액막의 끊김 현상은 발생하지 않았다.

### 3.2 액막의 평균 두께

Fig. 5에서는 액막 레이놀즈 수를 증가시키면서 여러 가지 난류 모형들에 의해 해석된 액막의 평균두께를 나타내고 있다. 평균두께는 액막류 유입구로부터 900 mm 하류에서 측정되었으며, 기존의 Nusselt 해석에 의한 결과를 함께 나타내었다. Nusselt 해석의 결과는 층류 가정에 의해 속도가 포물선형 2차 곡선 분포를 가지는 경우의 값이므로 현재의 난류 액막류 영역에서는 실제 액막 두께보다 큰 값을 제시하고 있다. Standard k-ε 모형은 Fig. 4에서 확인한 바와 같이 다른 모형들에 비해 매우 큰 액막 평균두께를 예측하고 있으며 다른 모델들의 평균과 비교하여 최대 34%의 차이를 나타내고 있다. Standard k-ε 모형을 제외한 나머지 모형들 사이에는 평균 6%의 평균두께 차이를 나타내고 있다.

### 3.3 파동 속도

액막 파동의 위상차와 파동속도를 얻기 위해 본 연구에서는 Fig. 6과 같이 인접한 두 위치에서의 액막두께의 시간에 따른 변화를 모니터링하여 저장하고 있다. 액막류가 충분히 발달했다고 판단되는 입구로부터 700 mm 하류 지점에서 모니터링하였으며 인접한 두 지점 사이의 거리는 1 mm를 적

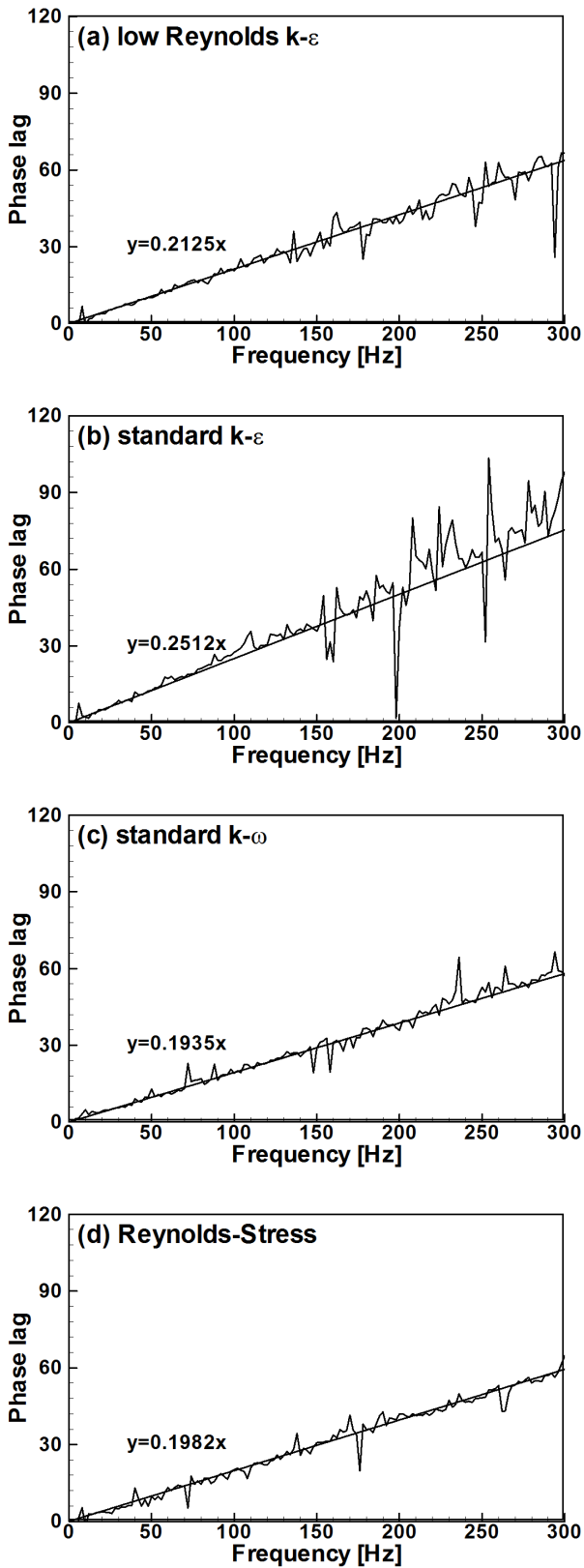


Fig. 7 Phase lag to wave frequency at  $Re_{film}=1500$  for different turbulent models.

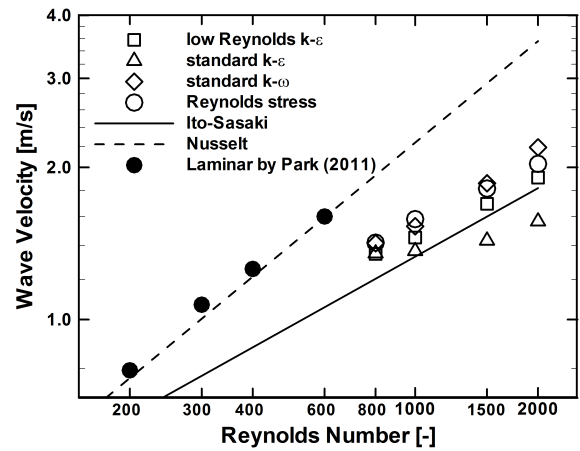


Fig. 8 Wave velocity for various Reynolds numbers for different turbulent models

용하였다.

Fig. 6에서와 같이 위상 지연 시간은 파동 주파수  $f_w$ 와 위상차  $\omega$ 를 이용하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta t = \frac{\omega}{2\pi f_w} \quad (2)$$

위상 지연 시간과 두 지점 간의 거리를 이용하여 다음의 식 (3)과 같이 파동속도를 계산한다.

$$C_w = \frac{\Delta z}{\Delta t} \quad (3)$$

Fig. 7은 액막 레이놀즈 수 1500에서 FFT(Fast Fourier Transform) 해석을 통해 주파수와 위상차의 관계를 적용된 난류 모형별로 구분하여 나타내고 있다. 그림에서 비교적 넓은 주파수 구간에서 다양한 크기의 위상차들이 공존하고 있음을 알 수 있다. Fig. 7 그래프들의 평균기울기를 이용하여 식 (2)와 같이 파동의 위상 지연 시간을 계산하고 다시 식 (3)을 이용하여 파동속도  $C_w$ 를 얻으므로 본 연구에서는 위상차와 주파수의 관계를 그림에 표시한 근사직선과 같이 선형분포로 가정하여 주어진 액막 레이놀즈 수에 대하여 대표 파동속도를 도출하고 있다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 위상차-주파수 비에서도 Standard k-ε 모델이 다른 모형들에 비해 꽤 큰 값을 예측하고 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 여러 가지 난류모형들을 적용하여 해석된 결과들로부터 위상-주파수 분석을 통해 얻

은 파동속도들을 다양한 레이놀즈 수 영역에서 나타내고 있다. 우선 점선으로 표시된 Nusselt 해석해에 의한 파동속도는 본 연구의 계산 영역인 레이놀즈 수 800 이상의 난류 영역에서에서는 본 연구의 수치해석 결과와 잘 맞지 않음을 알 수 있으나, 이전 연구<sup>(14)</sup>에서 실시된 층류 파동 액막류 연구에서 얻어진 파동 속도와 매우 잘 일치함을 확인할 수 있다. 본 연구의 해석 영역인 난류 액막류 구간에서는 해석 결과들은 오히려 Ito-Sasaki<sup>(15)</sup>의 예측값에 더욱 일치하고 있음을 확인할 수 있으며 파동속도는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 자연대수 스케일에서 거의 선형적으로 증가하고 있으며, Standard k-ε 모델을 제외한 난류 모형들에 따른 예측 파동속도의 차이는 평균적으로 10%이며, 레이놀즈 수 2000에서 Standard k-ε 모형은 다른 모형들에 비해 40% 작은 파동속도 값을 예측하고 있다.

3.4 난류 모델 비교

전술한 바와 같이, Reynolds stress 모델이 고립파의 상채를 잘 모사하고 있다. Standard k-ε 모델 등 2방정식 모델에서는 난류 점도(Turbulent Viscosity)  $\mu_t$ 를 등방성(Isotropic)으로 가정하며 이에 따라 유선의 곡률이 큰 경우 정확도가 떨어지는 것으로 알려져 있다. 반면에 Reynolds stress 모델의 경우는 각 레이놀즈 응력방정식을 해석하여 이방성(Anisotropic) 해석이 가능하여 유동의 박리 등 유선 곡률효과를 잘 반영할 수 있다.<sup>(16,17)</sup> 본 연구의 액막 유동은 일반적으로는 유선의 곡률은 크지 않은 편이나, 고립파가 발생하는 경우에는 그 주변에 매우 큰 유선 곡률효과가 발생한다. 이 경우 Reynolds stress 모델의 장점이 해석에 반영된 것으로 판단된다.

또한 Standard k-ε 모델은 주로 고속유동의 완전 난류영역(Fully Turbulent Core)에서 적합한 모델이다.<sup>(11,16)</sup> 본 연구에서 고려한 레이놀즈 수 영역( $Re=800-2,000$ )은 일반적인 고속유동보다는 매우 작은 값을 갖는다. Low Reynolds k-ε 모델은 벽근처에서 상쇄함수(Damping Function)을 도입하여 이와 같은 Standard k-ε 모델의 단점을 보완하고 있으며, Standard k- $\omega$  모델 역시 저 레이놀즈 수 보정식이 포함되어 있다. Fig. 9에는 각 모델에 대한 벽면 전단응력의 변화를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이, 앞서 설명한 저 레이놀즈

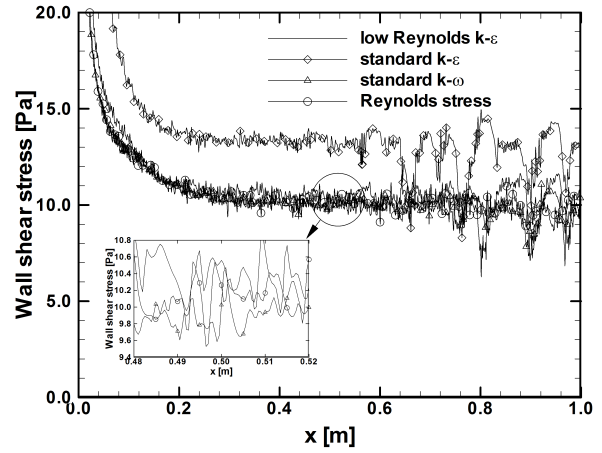


Fig. 9 Wall shear stress at  $Re_{film}=1500$  for different turbulent models

수 영역대에서 Standard k-ε 모델의 한계로 타 모형들에 비해 약 30% 큰 벽면 전단응력을 예측하고 있다.

4. 결론

본 연구는 네 가지 난류 모형을 사용하여 수직 평판 위 난류 파동 액막류의 유동에 대해서 2차원 수치해석 연구를 수행하였다. 레이놀즈 수 800에서 2000 사이 구간에서 난류 모형별로 액막의 형상, 평균두께, 파동속도 등을 기존 연구의 예측식들과 비교하여 나타내었다. 모든 비교 항목들에서 Standard k-ε 모형이 다른 모형들에 의한 예측값과 큰 차이를 보이는 것을 확인할 수 있었으며, 나머지 모형들은 액막의 평균두께, 파동속도 측면에서 모형 간 차이가 거의 없는 것으로 확인되었다. 하지만 고립파의 크기와 소멸 과정 등에서는 모형 간에 다소 차이를 보이는 것이 확인되고 있으며 이것은 열전달을 동반한 해석에서 난류 모형 간 차이를 야기할 수 있을 것으로 예상된다. 향후 열전달 해석을 함께 수행할 필요가 있으며 이 경우 난류 모형 별로 예측되는 대류 열전달 계수의 차이를 분석함으로써 난류 파동 액막류의 열/유동 모사에 적합한 난류 모형에 대한 평가가 완성될 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 일반적으로 3차원 액막유동의 경우에는 유동에 수직한 횡방향으로 Herringbone 혹은 Horse-shoe 형태의 부차적인 파동 진행 형상이 나타나는 것으로 알려져 있지만,<sup>(18)</sup> 이는 단순히 횡

방향으로 파동의 위상차가 영향을 준 것이지 횡방향 진행파가 존재하는 것은 아니므로, 본 연구의 파동속도 및 액막두께의 결과는 유효하다. 하지만 본 연구에서 제안된 수치기법과 난류모델을 사용하여 3차원 해석으로 확장하면 좀 더 향상된 해석 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(No. 2013059593)과 2012학년도 경북대학교 학술연구비 지원을 받아 수행된 것임.

## 참고문헌 (References)

- (1) Nusselt, W., 1916, "Die Oberflächen Kondensation des Wasserdampfes, Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure," Vol. 60, pp. 541~575.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) Park, I. S. and Choi, D. H., 1996, "Analysis of LiBr-H<sub>2</sub>O Film Absorption on a Horizontal Tube," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 20, No. 2, pp. 670~679.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 2807~2919.
- (9) Hirshburg, R. and Florschuetz, L., 1982, "Laminar Wavy-film Flow: Part I, Hydrodynamic Analysis," *Journal of Heat Transfer, Transaction of the ASME*, Vol. 104, pp. 452~458.
- (10) Jayanti, S. and Hewitt, G., 1997, "Hydrodynamics and Heat Transfer in Wavy Annular Gas-liquid Flow : a Computational Fluid Dynamics Study," *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 2445~2460.
- (11) Fluent 6.3 Users Guide, Fluent Inc., 2006.
- (12) Abid, R., 1993, "Evaluation of Two-Equation Turbulence Models for Predicting Transitional Flows," *International Journal of Engineering Science*, Vol. 31, pp. 831~840.
- (13) Gibson, M. M. and Launder, B. E., 1978, "Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 86, pp. 491~511.
- (14) Park, I. S., Kim, Y. J. and Min, J. K., 2011, "Comparison of Numerical Results for Laminar Wavy Liquid Film Flows Down a Vertical Plate for Various Time-differencing Schemes for the Volume Fraction Equation," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 35, No. 11, pp. 1169~1176.
- (15) Ito, A. and Sasaki, M., 1986, "Breakdown and Formulation of a Liquid Film Flowing Down an Inclined Plane," *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 52, pp. 1261~1265.
- (16) Wilcox, D. C., 1993, *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries.
- (17) White, F. M., 2006, *Viscous Fluid Flow*, McGraw Hill.
- (18) Liu, J., Schneider, J. B. and Gollub, J. P., 1995, "Three-dimensional Instabilities of Film Flows," *Physics of Fluids*, Vol. 7, pp. 55~67.