

# Tube-bundle형 열교환기의 액막 유동에 관한 시뮬레이션

김필환<sup>†</sup>, 최두열<sup>\*</sup>, 우주식<sup>\*</sup>, 정효민<sup>\*\*</sup>, 정한식<sup>\*\*</sup>, 김경석<sup>\*\*\*</sup>

<sup>†</sup> (주)에프티이, <sup>\*</sup>경상대학교 대학원 정밀기계공학과, <sup>\*\*</sup>경상대학교 정밀기계공학과, <sup>\*\*\*</sup>한국해양수산연수원

## Numerical study on the flow characteristics of horizontal tube bundle

Pil-Hwan Kim<sup>†</sup>, Du-Youl Choi<sup>\*</sup>, Ju-Sik Woo<sup>\*</sup>, Hyo-Min Jeong<sup>\*\*</sup>, Han-Shik Chung<sup>\*\*</sup>  
and Kyeong-Seok Kim<sup>\*\*\*</sup>

<sup>†</sup> Fluid & Thermal Engineering Co. Ltd., Gimhae, 621-840, Korea,

<sup>\*</sup>Department of Mechanical and Precision Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, 650-160, Korea,

<sup>\*\*</sup>Department of Mechanical and Precision Engineering, Gyeongsang National University, Institute of Marine Industry, Tongyeong, Korea,

<sup>\*\*\*</sup>Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Incheon Korea,

**ABSTRACT:** Seawater amounts to 70% of the earth and represents a quite unlimited resource for the production of fresh water by desalination processes and for the extraction of dissolved salts present in it.

Recently, the falling film evaporation has increased in interest as an efficient method for seawater desalination system. In the desalination system, the flow characteristics of the falling film is very important issue to make highly efficient system. So, this study is taken to investigate numerically the falling film thickness on the inlet Renold Number ranges are 400 to 700. Numerical simulations are performed using FLUENT6.3.26, a commercial CFD code.

**Key words:** Multi effect desalination plant (MED, 다중효용 담수설비), Gain of output ratio(성적계수, G.O.R), Thin film evaporation (박막증발), Volume fraction

### 기 호 설 명

#### Alphabetic

g : acceleration due to gravity (m/s<sup>2</sup>)  
C<sub>p</sub> : Specific heat at constant pressure (J/kg.K)  
Re : Film Reynolds number  
t : Time (s)  
v : Velocity (m/s)

#### Greek Letters

ρ : Density (kg/m<sup>3</sup>)  
μ : Viscosity (kg/m.s)

σ : Surface tension (kg/s<sup>2</sup>)  
Γ : Mass flow rate of the liquid film per unit length of tube (kg/ms)  
δ : Liquid film thickness (m)  
ξ : Capillary constant (m)  
λ : Instability wavelength, spacing between neighbouring jet or droplets (m)

#### 1. 서 론

증발법을 이용한 담수설비에 있어서 담수의 증발에 대량의 에너지가 소모된다. 따라서 에너

지 이용 효율을 높은 다중효용 담수설비가 많이 채용되고 있으며, 특히 G.O.R (Gain output ratio)가 높은 MED-TVC방식이나 MED-MVC 방식의 담수설비가 자주 이용 되고 있다[1]. 이와 함께 담수 생산설비가 점차 대형화되면서 증발관 외부의 흐름에 문제, 바닷물 중에 녹아 있는 각종 무기 염류에 의한 스케일 (scale) 등에 의한 생산량의 감소와 같은 여러 가지 문제가 상존하고 있다. 특히 다중효용 담수설비와 같이 박막 증발 열전달 (Thin film evaporating heat transfer)을 적용하는 담수설비의 경우에는 해수 중의 무기 염류에 의한 스케일의 성장은 설비의 운영에 미치는 영향은 매우 크다. 이를 제어하기 위한 방법으로 증발기에 공급되는 브라인 (brine)의 온도를 65.0 ℃ 이하로 제한하거나 브라인을 전열관에 고르게 분무하기 위한 여러 가지 기술적인 방법이 제안되고 있다.

이와 같이 수평으로 설치된 전열관의 외부에서 증발이 일어나는 박막 증발 열전달에 관한 선행 연구로서 X, Hu[2]는 수평관에 대하여 액막의 형성에 대한 실험적 연구를 수행하였으며, 레이놀즈 수에 따른 물줄기간의 거리에 대한 상관관계를 비교하였다. Kim[3] 은 수직관에서 흐르는 유체에 계면활성제를 첨가에 따른 접촉각의 변화를 관찰하였으며, 계면활성제 농도에 따른 젖음성향상에 관한 연구 결과를 제시하였다. Thanh

T.P.[4] 는 수평관 배열에서 유하액막의 분포특성을 비정상 해석을 통하여 시간에 따른 액막의 형성과 열전달 변화의 관계에 대해서도 제시하였다.

특히, F. Jafar[5] 은 수평으로 배열된 3 column 의 실린더에 대하여 2차원 해석을 수행함으로써 튜브 접촉각과 액막의 형성에 관한 고찰을 하였으며, 유량에 따른 액막 두께의 변화에 대해 분석함으로써 튜브 접촉각이 증가하고, 유량이 증가할수록 액막 두께가 감소한다는 것을 보여주었다.

하지만, 이러한 연구결과에서는 수평배열의 튜브가 1열로 배열되어 있는 전열관의 경우에 제한되어 이에 대한 수치해석에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 복잡한 구조의 증발기에서 유동패턴을 구현하더라도 양방향으로 대칭조건으로 하여 제시된 해석결과가 대부분이므로 실제의 조건을 정확하게 구현하는 것은 매우 힘들다. 특히 대형 MED 담수설비에서의 증발관은 최소 50열 x 100행 이상의 전열관 군으로 형성되어 있어 단일 전열관의 해석 결과를 적용하기에 다소 무리가 있다.

본 연구에서는 상기와 같은 문제점을 해결하기 위한 방법으로 실 설비를 소형화 하여 모사실험을 실시하였다. 특히 브라인의 공급조건에 따른 유동상태, 즉 전열관의 증발부인 전열관 외부의

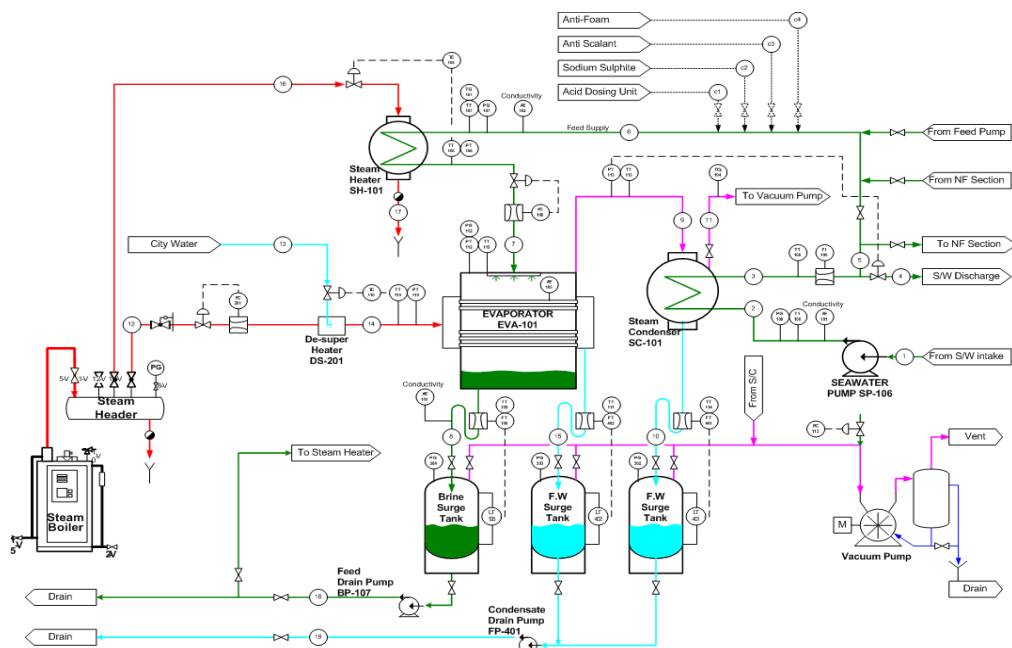


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

유동에 대하여 상용코드 FLUENT Ver.6.3.26을 이용한 수치해석 결과에 대하여 기술한다.

## 2. 이론적 배경

Fig. 2에서는 액막유동에서의 이상적인 현상을 나타낸다. 상부와 하부의 튜브 사이에 a)droplet mode b)jet mode, c)sheet mode 의 단계로 액막이 형성되는 것을 기술하였으며, 이러한 유동과 함께 열 및 물질 전달 또한 동시에 발생되기 때문에 유동특성은 열교환기의 성능에 중요한 요소로 작용한다.

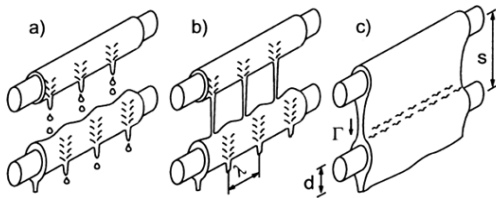


Fig. 2 Ideal flow pattern between adjacent tubes.

여기서 튜브의 단위 길이당 액막의 유량을 실험적 결과를 바탕으로 (1)식과 같이 정리된다.

$$\Gamma = 0.81 \frac{\sigma}{\lambda} \frac{\pi d_p^3}{6} \left( \frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda^3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

여기서,

$$\lambda = \xi [4\pi^2 n]^{0.5} \quad (2)$$

$n$  과  $d_p$  는 실험을 통하여 얻어진 결과이며, 이를 바탕으로 액막 레이놀즈 수에 대해 정의하였다.

$$Re = \frac{2\Gamma}{\mu} \quad (3)$$

이와 같이 액막 레이놀즈 수는 원주 길이당 질량 유량에 의해 정해진다. 하지만, 상기의 조건은 튜브가 1열로 배열되어 있는 경우에 제한되며, 실제 산업현장에서 튜브가 지그재그 배열 및 번들로 구성되어 있는 설비에서는 상부와 하부의 튜브 사이에 유동패턴이 크게 변화할 것으로 예상되며, 결

과적으로 열교환 성능에도 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다.

따라서, 본 논문에서는 지그재그형 튜브 배열에서의 유동 패턴을 시뮬레이션을 통하여 예측하며, 추가적으로 공급 유량에 따른 튜브 벽면에서의 액막 두께의 형성을 비교한 결과에 대해 기술 하였다.

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 실험장치

Fig.1에서 보는 바와 같이 본 실험을 수행하기 위한 실험 장치는 (1) 박막 증발 전열관 및 진공증발기, (2) 브라인의 공급온도를 제어하기 위한 브라인 히터, (3) 증발된 증기를 응축시키기 위한 응축기, (4) 브라인 공급 펌프 및 유량 제어를 위한 컨트롤 밸브, (5) 브라인의 유량 측정을 위한 전자식 유량, (6) 각부의 온도 및 압력 측정을 위한 계측기로 구성되어 있다. 브라인 공급 유량에 따른 유동현상을 파악하기 위한 실험이므로 브라인의 유량 측정은 증발기의 하단에 설치된 회수 탱크에서 다시한번 검정을 실시하여 측정오차를 최소화 시켰다.

Fig. 3은 실제 실험에 사용된 증발기의 튜브 번들을 보여주는데 챔버 내부에 60개의 튜브가 배열되어 있으며, 튜브 위쪽에 다공관이 설치되어 공급된 브라인이 다공관을 통해 튜브의 전체 부분에 균일한 유동이 분포되도록 하였다.



Fig. 3 Tube bundle for experiment

### 3.2 액막유동 실험조건

일반적으로 MED-TVC형의 담수설비는 진공상태에서 운전되며 브라인의 온도는 80℃ 까지 예열

되어 증발기에 공급된다. 하지만, 본 연구에서는 튜브 번들을 타고 내려오는 액막 유동을 좀 더 자세히 관찰하기 위해 증발 챔버를 제거한 실험조건에서 튜브 번들 상부에 다공판을 통해 브라인 대신 물을 공급하여 실험을 실시하였다.

물의 공급 유량은 전체 약 16 LPM 으로 설정하였으며, 이는 다공판의 각 홀에서 약 0.59 m/s 의 속도로 레이놀즈 수가 약 600 으로 계산된다.

### 3.3 액막유동의 분포

Fig. 4는 실험에서 튜브 번들을 따라 브라인이 흘러 내리면서 형성되는 액막의 분포를 카메라로 촬영하여 관찰한 결과이다.



Fig. 4 Flow pattern for velocity=0.6 m/s(mass flowrate is 0.74 kg/s)

여기서, 브라인은 전체 튜브 상부에서 고르게 분포되어 흘러내리는 것을 확인 할 수 있었다. 그리고 실제 실험에서 브라인이 첫 번째 튜브 상부까지는 일정한 유동분포를 보이며 물이 일부 튀는 것으로 보이지만, 전체적으로 액막이 고르게 형성되는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 결과에서, Mitrovic J. 가 제시한 이상 액막 유동 단계에서 jet mode 에 가까운 액막의 형상을 보여준다.

## 4. 액막유동의 시뮬레이션

본 논문에서 기술하는 MED-TVC 시스템에서 증발기 내부에 위치하고 있는 tube-bundle 을 통과하면서 발생하는 증발량은 전체 시스템을 고효율로 유지하는데 중요한 요인으로 작용한다. 따

라서, 브라인이 튜브 벽면을 따라 흐르면서 발생하는 액막의 형성을 통해 브라인의 증발이 집중되는 부분을 예측할 수 있다.

따라서, 본 장에서는 실험에서 사용한 증발기의 tube-bundle을 이용하여 물을 공급하였을 때, 액막 유동해석을 Fluent 6.3.26을 통해 실시한 시뮬레이션 결과를 기술하고자 한다.

### 4.1 해석 모델링 및 경계조건

Fig. 5는 실험에서 사용된 증발기의 모델과 시뮬레이션에 적용된 모델의 경계조건을 보여준다.

여기서, 해석 시 60개의 튜브번들로써 전체 튜브를 대상으로 할 경우 많은 시간이 소요되며 격자수에 대한 검증이 쉽지 않으므로 가장 상부에 위치한 부분의 5개의 튜브 배열에서 한쪽면을 대칭 조건으로 하여 격자를 구성하였다. 또한, 예상되는 액막 유동경로를 중심으로 격자수를 조밀하게 하여 물줄기 사이에 작용하는 간섭으로 불균일한 유동의 발생을 방지하였다.

Table 1에서와 같이 입구조건을 Velocity inlet 으로 하여 실험에서의 유량조건을 속도값으로 환산하였으며, 각각 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 m/s 에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 속도에 따른 액막의 두께를 비교하여 보았다.

Table 1 2D simulation settings

Settings	Choice
Simulation	2D
Solver	Segregated implicit
Model	VOF
Material	Air:primary, Water:secondary
Volume fraction	1 for water and 0 for air
Velocity	0.4, 0.5, 0.6, 0.7 m/s

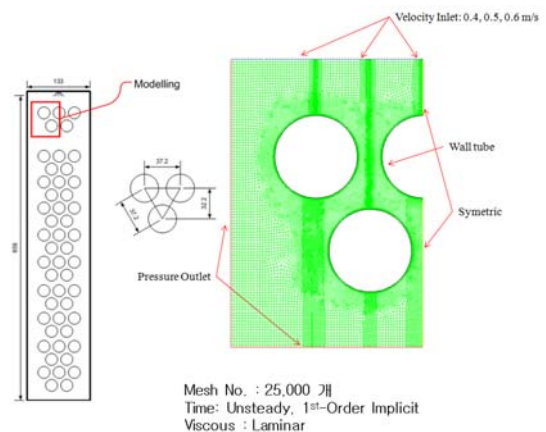


Fig. 5 Simulation modeling and mesh condition

또한, 실험에서 tube-bundle을 하나의 챔버로 구성되어 있어 한쪽 면은 벽면으로 이루어져 있으나, 튜브주변에서의 유동을 파악하기 해석조건에서는 Pressure outlet으로 하여 해석을 수행하였으며, 비정상 계산을 하여 시간에 따른 유동 경로를 파악 할 수 있었다.

#### 4.2 시뮬레이션 결과 및 고찰

##### 4.2.1 액막 분포

시뮬레이션 결과로부터 시간(0~1.2 sec)에 따른 유동 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 여기서, 액막은 물줄기가 첫 번째 튜브에 도달하는 순간부터 형성하게 된다. 액막이 튜브 아래쪽까지 완전히 형성되기 전까지는 튜브 사이의 유동에서 불균일한 유동 분포를 보이지만, 약 0.16초 이후에 물줄기가 2번째 튜브에 도달하고 약 0.96초 이후에 첫 번째 튜브에서 액막이 균일하게 분포된 이후부터는 전체 물줄기가 안정된 분포를 보이면서 1.22초 이후에 전체 튜브에 액막이 고르게 분포되는 것을 볼 수 있다.

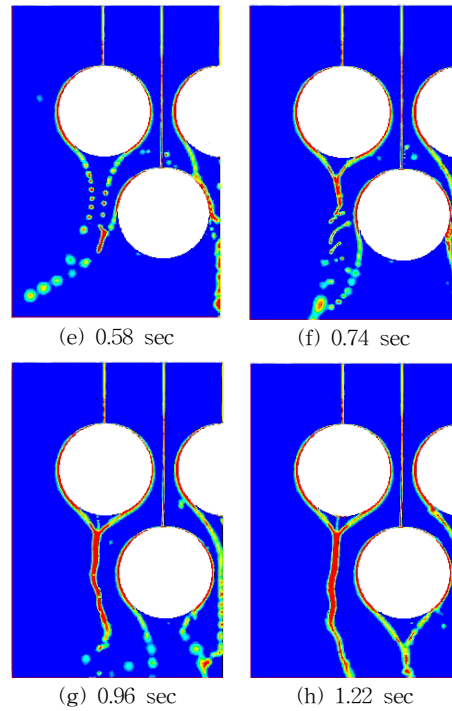
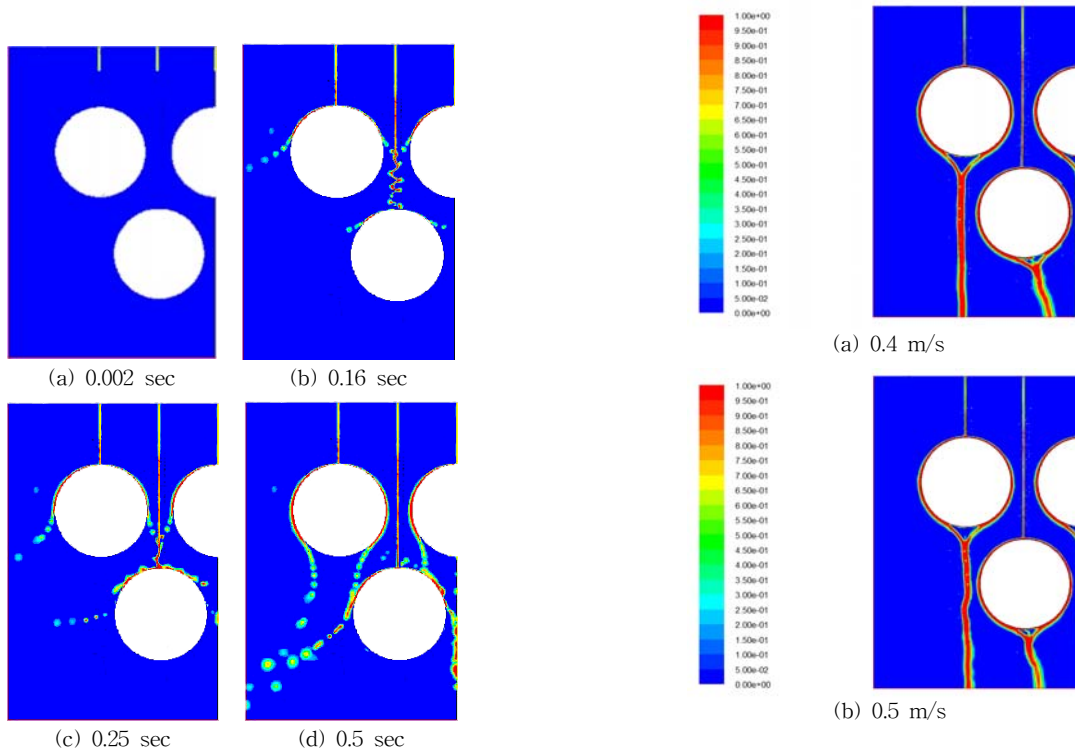


Fig. 6 Flow pattern with every time step

##### 4.2.2 속도에 의한 결과





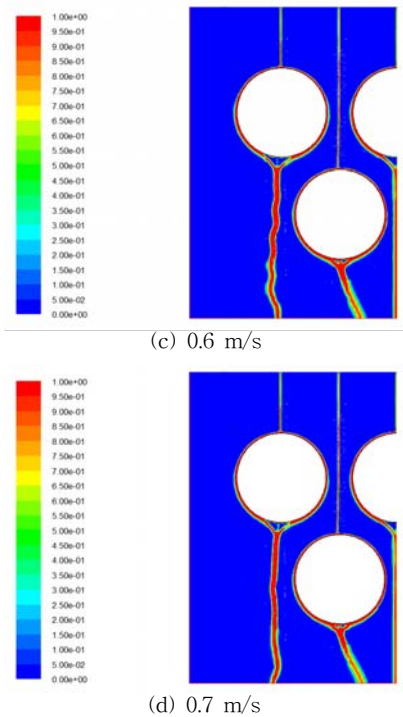


Fig. 7 Liquid film distribution for every inlet velocity

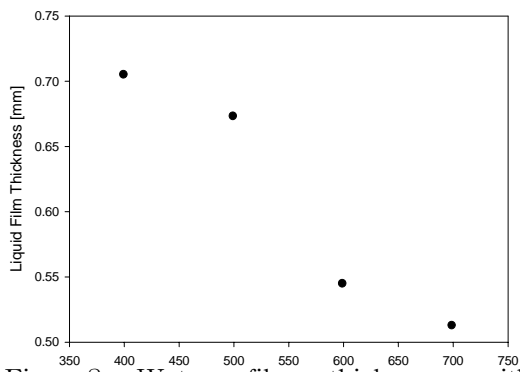


Fig. 8 Water film thickness with Reynold Number

Fig. 7에서 각 속도에 따른 전체 분포는 동일하게 나타나지만, 튜브 주변의 액막 두께를 측정하면 입구 레이놀즈 수의 증가에 따라 액막 두께가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 F. Jafar의 연구결과와 동일한 경향을 보여주며 그 결과는 Fig. 8과 같이 나타난다.

## 5. 결론

본 연구에서는 담수 설비에 중요한 요소로 작용되는 증발 장치 내부에 배열되어 있는 튜브 번들을 따라 브라인이 흘러내리면서 형성되는 액막 두

께에 대하여 실험 및 상용코드를 이용한 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과, 액막 유동에 대한 실험결과 브라인은 전체 튜브표면을 고르게 분포되어 흐르지만, Mitrovic J.의 이상적 액막 유동의 droplet mode 와 jet mode 의 중간 단계의 유동이 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 2차원 시뮬레이션 결과에서는 해석조건 범위내에서 액막유동이 "jet mode" 의 유동패턴으로 흐르며, 튜브 벽면에서의 액막두께는 유입 속도의 증가에 따라 감소하는 것을 볼 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 지역전략기술평가사업, 교육과학기술부와 한국산업기술평가사업, 교육과학기술부와 한국산업기술평가사업의 지역혁신인력양성사업과 경상대 BK21 지원으로 이루어 졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- 2006, "The 19th IDA Worldwide Desalting Plant Inventory", Media analytics ltd.
- X. Hu, A.M. Jacobi, 1998, "Departure-site spacing for Liquid droplets and jets falling between horizontal circular tubes", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 16 pp.322-331
- K. H. Kim, B. H. Kang, D. Y. Lee, 2006, "An Experimental Study on the Effects of Contact Angle on a Falling Liquid Film", Journal of SAREK, Vol. 18, pp.867-873
- Thanh T. P. H. S. Lee, J. I. Yoon, E. P. Kim, 2006, "Numerical Simulation of Solution Droplets and Falling Films in Horizontal Tube Absorbers", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, pp.597-607
- F. Jafar, G. Thorpe, O.F.Turan, 2007, "Liquid film falling on horizontal circular cylinders", 16th Australasian fluid mechanics conference, PP.1193-1200