

증발식 다중효용 담수기에서 열교환기 튜브 배열 및 형상에 따른 액막 유동에 관한 수치해석

정일영*, 윤상국**, 주홍진***, 곽희열***

*한국해양대학교 냉동공조학과 대학원(ilyoung1404@naver.com),

**한국해양대학교 기계에너지시스템공학부(skyun@hhu.ac.kr)

***인하대학교 기계공학과 대학원(joo@kier.re.kr),

****한국에너지기술연구원(hykwak@kier.re.kr)

Numerical Study of Liquid Film Flow on Heat Exchanger Tube Arrangement and Configuration of Multi Effect Distillation

Jung, Il-Young*, Yun, Sang-Kook**, Joo, Hong-Jin***, Kwak, Hee-Youl****

*Dept. of Refrigeration, Air-conditioning Engineering, Graduate School, Korea Maritime
University(ilyoung1404@naver.com)

**Division of Mechanical and Information Engineering, Korea Maritime University(skyun@hhu.ac.kr)

***Dept. of Mechanical Eng., Graduate School, In-Ha University(joo@kier.re.kr),

****Solar Thermal Research Center, Korea Institute of Energy Research(hykwak@kier.re.kr)

Abstract

This study was performed numerical analysis in order to analyze liquid film flow of heat exchanger tube arrangement and configuration of evaporative multi effect distillation system using medium-temperature. Simulation was accomplished the two-dimensional calculations using commercial analyses program FLUENT based on the FVM(finite volume method).

Fresh water generator of this study used Shell & Tubes heat exchanger with Cu_Ni tube, configuration of tube used bare tube and corrugated tube, and arrangement of tube used in-line array and staggered array. Performance of heat exchanger through the formation of liquid film was compared and analyzed. Liquid film flow occurred that falling on heat exchanger tube wall.

Result of simulation showed that liquid film thickness of in-line arrangement was found 0.57mm with bare tube and 0.67mm with corrugated tube, respectively. And liquid film thickness of staggered arrangement was found 0.39mm with bare tubes and 0.62mm with corrugated tubes, respectively.

Liquid film thickness of corrugated tube showed thicker than bare tube, but heat transfer rates of corrugated tube showed higher than bare tube. The reason was considered that surface area of corrugated tube was wider than bare tube. And liquid film thickness of staggered arrangement showed thinner than in-line arrangement, so thermal performance of staggered arrangement showed higher than in-line arrangement.

Keywords : 다중 효용 담수기(Multi effect distillation), 수치해석(Numerical analysis), 분배기(Distributor), 정렬배열 (In-line arrangement), 엇갈림배열 (Staggered arrangement)

기 호 설 명

Ga	: 갈릴레오 수	Re	: 레이놀즈수
ρ	: 밀도, kg/m^3	σ	: 표면장력, kg/s^2
μ	: 점성, $\text{kg/m} \cdot \text{s}$	g	: 중력가속도 m/s^2
Γ	: 질량유량 kg/ms	λ	: Column 거리, m
d	: 직경, m	ζ	: 모세관상수, m

하 첨 자

p : primary

1. 서 론

열교환기는 서로 다른 온도의 두 유체사이에서 열을 교환하는 장치로써, 공기 조화 설비, 화학 플랜트 및 발전설비, 해수 담수화 등 여러 산업공정에서 사용된다. 특히, 증발법을 이용한 담수 시스템에 있어 증발부에서 열교환기를 이용한 해수의 증발은 전체 담수 시스템의 효율에 큰 영향을 미친다. 증온수를 이용한 해수 담수 시스템에서 원통 다관형 열교환기(Shell & Tube Heat Exchanger)가 주로 사용된다. 원통 다관형 열교환기는 가격이 저렴하고 유지 보수가 간편하며 다양한 크기의 제작이 가능하다. 또한 고온 고압용으로 적용범위가 매우 넓고 신뢰성과 효율성이 좋은 장점이 있다.¹⁾

증온수를 이용한 담수 시스템에서 해수를 증발시키는 증발기는 적하식 열교환 방식으로 Feed Water 분배기(Tray)를 통해 상부에서 해수가 중력에 의해 열교환기 전체 면적에 고르게 분사되면 열교환기 튜브 외표면에서 증발이 일어나고 튜브 내에서는 증기가 응축되는 구조로 되어 있다. 그러므로 열교환기 외부에 형성되는 액막(Liquid Film)의 해석은 전체 시스템을 고효율로 유지하는데 중요한 요소가 된다.

지금까지 수평으로 설치된 전열관 외부에서

증발이 일어나는 액막 증발 열전달에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되었다.

Mitrovic²⁾은 단열 상태, 비상변화 조건에서 일반적인 튜브의 액막 유동 모드 변화에 대해 연구를 하였고, 레이놀즈수 150에서 200 사이에서 droplet 모드에서 jet 모드로 유동 모드가 변화한다고 하였다.

Miyazaki, H. and Silberman³⁾은 작동 유체를 물과 공기를 사용하여 수평관의 표면에 형성되는 유하 액막에 대한 이론적 연구를 하였다. laminar jet에서의 유체 유동과 열전달을 이론적으로 해석하였다.

Mohamed⁴⁾는 수평의 고정 및 회전 튜브에 액체가 떨어졌을때 형성되는 액막의 유동을 연구하였다. 그는 액막이 수평의 회전하는 튜브에서 액막은 하나의 모드에서 다음의 모드로 전환할 때 고정 튜브에 비해 낮은 레이놀즈수가 나타난다는 결론을 내었다.

본 연구에서는 담수 시스템에서 증발식 열교환기에 대해서 관의 배열과 형태에 따른 액막 유동을 해석하기 위하여 Fluent를 이용한 CFD해석을 수행하였으며, 액막의 형성을 통해 열교환기의 성능을 비교, 분석하였다.

2. 이론적 배경

Hu and Jacobi⁵⁾는 단열조건에서 유체의 종류, 관의 지름, 관의 경사도와 유량의 변화에 따른 액막 유동의 변화에 대해 연구를 하였고 그림 1과 같이 레이놀즈수, 갈릴레오수와 함께 유동 형태를 구분하였으며, 각각의 유동형태에서의 레이놀즈수는 다음과 같이 정의 한다.

$$\text{Droplet} \leftrightarrow \text{Droplet-Column: } Re=0.074Ga^{0.302}$$

$$\text{Droplet-Column} \leftrightarrow \text{Column: } Re=0.096Ga^{0.301}$$

$$\text{Column} \leftrightarrow \text{Column-Sheet: } Re=1.414Ga^{0.233}$$

$$\text{Column-Sheet} \leftrightarrow \text{Sheet: } Re=1.448Ga^{0.236}$$

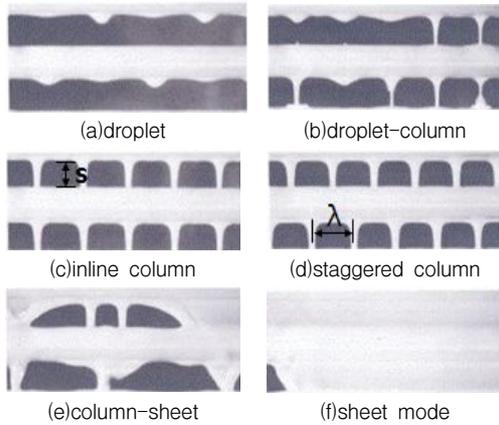


그림 1. The observed falling film modes reported by Hu and Jacobi

위와 같은 정의에서 액체의 갈릴레오수는 다음과 같이 정의된다.

$$Ga = \frac{\rho \sigma^3}{\mu^4 g}$$

그리고 튜브의 단위 길이당 액막 레이놀즈수는 다음과 같다.

$$Re = \frac{2\Gamma}{\mu}$$

Γ 는 단위 길이당 액막의 질량 유량으로 정의되며, 다음과 같다.

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

$$\lambda = \zeta [4\pi^2 n]^{0.5}$$

d_p 는 최초 방울의 직경이고 n 은 실험을 통하여 얻어진 결과이다.

3. 액막유동의 CFD 해석

전산유체역학 CFD는 유체역학과 수치해석

을 병합시켜 수학적으로 풀기 어려운 비선형 편미분 방정식들의 근사해를 구하는 학문으로 실제 유체흐름 현상을 수학적으로 묘사하여 편미분 방정식을 컴퓨터를 이용하여 해석하는 것으로 유체의 흐름 특성, 물질전달 등의 유체현상을 시뮬레이션 하는 것이다. 이러한 이유로 해수 분배기를 통해 증발식 열교환기에 떨어지며 관 외부로 형성되는 액막의 유동 특성을 파악하여 열교환기의 성능인자를 도출하기 위해서는 CFD 접근이 유용하다. 따라서 본 연구에서는 CFD를 이용하여 열교환기의 액막두께를 해석하였으며 해석조건으로 열교환기에서의 유동은 비정상상태 유동으로 가정하였고 벽면에서의 마찰은 고려하지 않았다. 점성 모델로서는 층류(Laminar) 모델을 적용하였다.

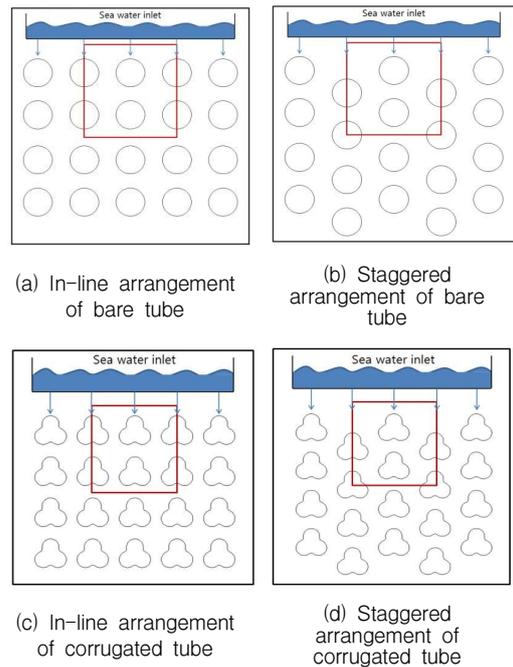


그림 2. Tube arrangement and type of heat exchanger

본 연구에서 사용된 열교환기 형태 및 튜브의 배열은 정렬 배열(In-line arrangement)과 엇갈림 배열(Staggered arrangement)이

며, 튜브의 형태는 Bare tube와 Corrugated tube를 해석하였다. 그림 3은 이러한 튜브의 배열과 형태를 나타내었다.

본 연구에서 해석한 열교환기는 원통 다관형 열교환기로서 분배기에 의해 열교환기 위로 떨어지며 관 외부로 형성되는 액막을 해석하기 위해 2차원 평면 모델로 해석을 수행하였다. 표 1은 열교환기의 주요부 치수를 나타낸 것이다. 동일한 조건에서 해석을 하기위해 표2와 같이 해석 조건에서 시뮬레이션을 수행하였고, 분배기에서 열교환기로 떨어지는 해수의 유속은 0.2m/s이고 유량은 9.41LPM이다. Time-Step Size는 0.0001초로 열교환기 튜브에 모든 액막이 형성될 때까지 해석을 수행하였다.

표 1. Dimensions of the heat exchanger

Parameter	Values(m)
Inlet diameter, D_o	0.001
Tube diameter, D_T	0.01

표 2. Simulation settings

Settings	Choice
Simulation	2D
Solver	Segregated implicit
Model	VOF(Volume of Fluid)
Material	Air-Primary, Water-secondary
Gravitation acceleration	-9.81m/s
Volume fracion	1for water and 0 for air
Top boundary	Velocity inlet and wall
Left and right side boundaries	Symmetry
Bottom boundary	Pressure outlet

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 Fluent 6.3을 이용하여 담수 장치에 사용되는 원통 다관형 증발식 열교환

기의 튜브 배열과 형태에 따른 액막 유동 특성을 파악하기 위한 연구를 수행하였다.

그림 3은 Bare Tube가 정렬의 배열로 되어 있을 때 액막의 형성되는 모습을 나타내고 있다. Bare Tube 정렬 배열의 열교환기 형태는 분배기로부터 물줄기가 첫 번째 튜브에 도달하는 순간부터 형성하게 된다. 액막이 형성되는 시간은 물줄기가 첫 번째 튜브에 도달된 후 약 0.07초 후에 튜브 전체에 액막이 형성되는 것으로 나타났다.

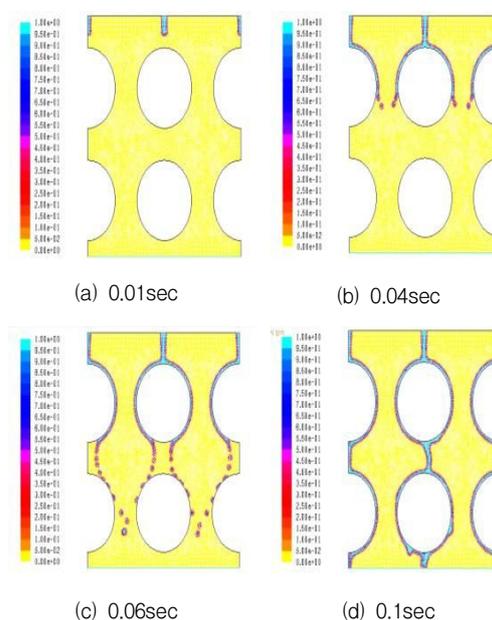


그림 3. Liquid film of bare tube on in-line arrangement

그림 4는 Bare Tube 엇갈림 배열 형태의 열교환기 위로 떨어지는 유체의 유동 형태를 나타낸 것이다. 정렬배열 형태의 열교환기에서의 유동 형태에서는 다음 단의 튜브로 유체가 떨어질 때 약간의 난류 형태의 유동을 보여주었지만 엇갈림 배열 형태에서는 유체가 일정한 모습으로 막을 생성하며 떨어지는 층류의 형태를 보였다. 관주위로 형성된 액막의 두께는 0.39mm로 정렬배열 형태에서의 액막 두께보다 얇게 형성됨을 알 수 있다.

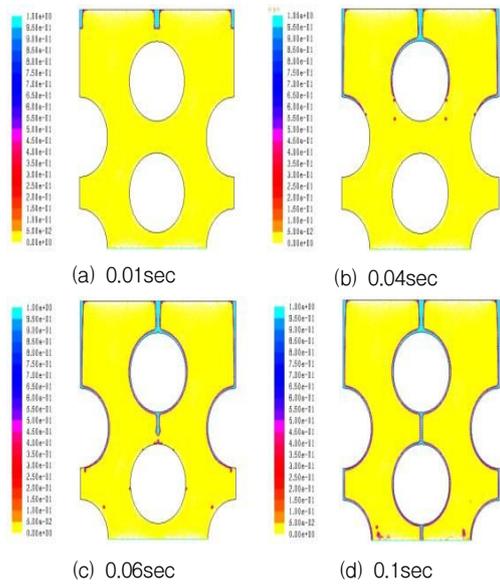


그림 4. Liquid film of bare tube on staggered arrangement

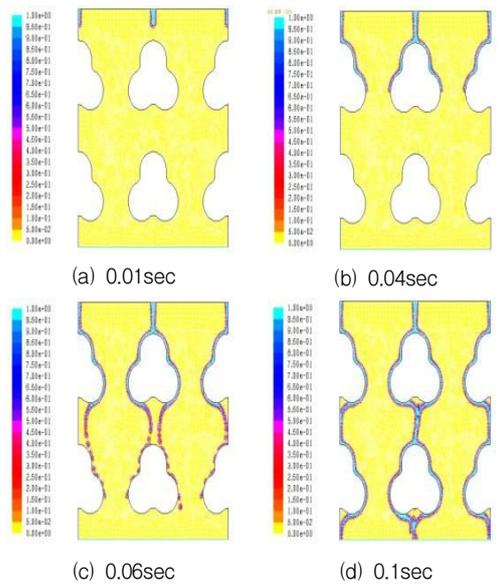


그림 5. Liquid film of corrugated tube on in-line arrangement

그림 5는 Corrugated Tube 정렬 배열 형태의 열교환기로 떨어지는 유체의 유동을 나타낸 그림이다. 유체가 첫 번째 관에서 두 번째 관으로 떨어질 때 유동은 약간 불규칙한

모습을 나타내었다. 이때 첫 번째 관에서 형성된 액막의 두께를 살펴본 결과 0.67mm로 Bare Tube의 경우보다 액막이 두껍게 형성되는 결과를 보였다.

Corrugated Tube 엇갈림 배열 형태의 열교환기에 떨어지는 유체의 외부 유동 모습은 그림 6에 나타내었다. 유체가 첫 번째 관위로 떨어질 때에는 일정하게 튜브 위를 흘러 내리지만 두 번째 관 위로 떨어질 때에는 약간 불규칙한 유동 모습이 관찰되었다. 첫 번째 관위를 유동하는 유체의 액막의 두께는 0.62mm로 정렬배열 형태에서의 액막의 두께보다 작은 결과를 나타내었다.

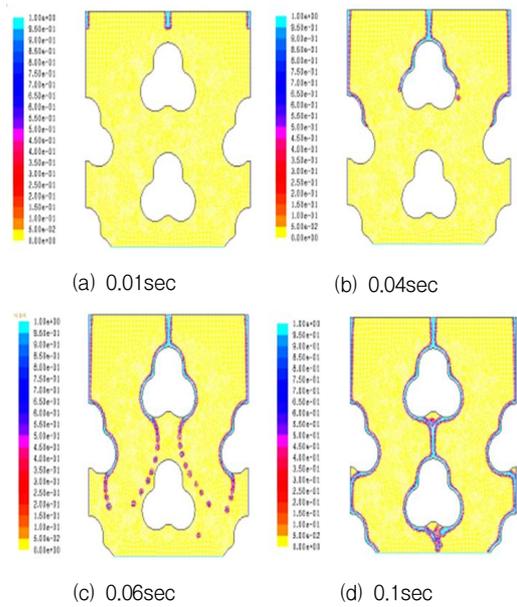


그림 6. Liquid film of corrugated tube on staggered arrangement

그림 7은 Tube 형태에 따른 액막의 두께를 비교한 것이다. Tube의 정렬배열에서의 액막 두께가 엇갈림 배열에서의 두께보다 두꺼운 것으로 나타났으며, 이러한 결과 정렬로 배열된 열교환기보다 엇갈림 배열로 된 열교환기의 액막 두께가 더 얇기 때문에 열성능 측면에서 정렬배열보다 엇갈림 배열이 더 높

다고 할 수 있다. 그러나 Corrugated Tube의 경우 Bare 튜브 형태에 비하여 굴곡진 부분에 액막이 더 크게 생기는 것으로 나타났다. 따라서 평균 액막 두께는 Bare Tube 형태보다 약 40%이상 두꺼운 것으로 나타났다. 그러나 Corrugated Tube의 경우 2차원 단면상의 표면적이 Bare Tube경우보다 넓기 때문에 튜브의 표면이 해수와 접촉되는 면적이 넓어 열 성능 측면에서 Bare Tube 보다 높다.

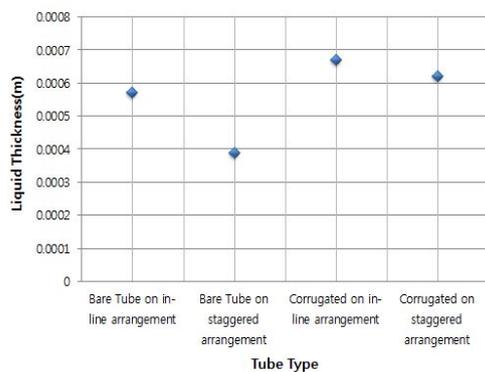


그림 7. Liquid film thickness of tube arrangement and type

5. 결 론

본 연구에서는 중온수를 이용한 해수 담수화 시스템에서 열교환기의 튜브 형태 및 배열에 따른 액막 유동을 해석하기 위하여 Fluent를 이용하여 분석하였으며, 결론은 다음과 같다.

- (1) Bare Tube의 경우 정렬 배열에서 액막의 두께는 0.57mm이고 엇갈림 배열에서 0.39mm로 나타났고, Corrugated Tube의 경우 정렬배열에서 0.67mm, 엇갈림 배열에서 0.62mm로 나타났다.
- (2) 튜브의 정렬배열에서의 액막 두께가 엇갈림 배열에서의 액막 두께보다 두꺼운 것으로 나타났으며, 이는 엇갈림 배열의 열교환기가 열성능 측면에서 우수하다고 할 수 있다.

- (3) Corrugated Tube에서의 액막 두께가 Bare Tube의 경우보다 두꺼운 것으로 나타났지만, Corrugated Tube의 경우 2차원 단면상의 표면적이 Bare Tube경우보다 넓기 때문에 튜브의 표면이 해수와 접촉되는 면적이 넓어 열 성능 측면에서 Bare Tube 보다 높다.

참 고 문 헌

1. 이상천, 조영우, 남상철, 1997, "Effect of Baffle Parameters on Heat Transfer in Shell and Tube Heat Exchangers.", 대한기계학회논문집(B) 제 21권 제 1호, pp185-194
2. Mitrovic, J., Influence of Tube Spacing and Flow Rate on Heat Transfer from a Horizontal Tube to a Falling Liquid Film. Proc. 8th International Heat Transfer Conf. San Francisco. 4, 1986: p. 1949 - 1956
3. Miyazaki, H. and Silberman, H. 1972, Flow and heat transfer on a flat plate normal to a two-dimensional laminar jet issuing from a nozzle of finite height, Int. J. Heat and Mass Transfer, 15, pp. 2097-2107.
4. Mohamed, A.M.I., Flow behavior of liquid falling film on a horizontal rotating tube. Experimental Thermal and Fluid Science. 31, 2007: p. 325 - 332.
5. Hu, X. and A.M. Jacobi, The Intertube Falling Film Part 2 -Mode Effects on Sensible Heat Transfer to a Falling Liquid Film ASME J. Heat Transfer 118, 1996: p. 626 - 633.