



## 관군의 비등열전달 특성에 관한 연구

임태우 · 최용석†

한국해양대학교(교수) · †한국조선해양기자재연구원(선임연구원)

### A Study on Pool Boiling Heat Transfer Characteristics of Tube Bundles

Tae-Woo LIM · Yong-Seok CHOI†

Korea Maritime and Ocean University(professor) · †Korea Marine Equipment Research Institute(senior researcher)

#### Abstract

One of the important factors to consider when designing a shell and tube evaporator is to obtain an optimal heat exchange surface area by using accurate heat transfer coefficients. In this paper, the heat transfer characteristics are compared and analyzed, using models available in the open literature for the nucleate boiling heat transfer. The correlation of Stephan and Abdelsalam shows lower heat transfer coefficient than other correlations. Whereas the correlation of Cooper shows higher heat transfer coefficient. The correlation of Mostinski is almost a median value among the other correlations. It is considered that the basic design of the heat exchanger can be performed from the correlations of Cooper and Mostinski.

**Key words :** Correlation, Heat exchanger, Pool boiling, Shell and tube, Tube bundle

#### I. 서론

셸 앤 관 증발기 설계 시 중요하게 고려되어야 할 요소 중 하나는 정확한 열전달계수를 사용함으로써 최적의 열교환 표면적을 구하는 것이다. 일반적으로 열교환기의 설계는 단일 관의 풀 비등 열전달계수를 기반으로 이루어져 왔다. 관군에 대한 해석은 단일 관의 거동으로부터 경험적 보정 계수를 이용함으로써 해결하였다. 하나의 관이 다른 관 위에 있는 트윈 관 배열을 가장 단순한 관군으로 선택하여 열전달 성능과 상호 관련된 효과를 연구하였으며, 이렇게 얻어진 결과는 다수의 가열관을 가지는 관군의 열전달계수를 예측하는데 사용되어 왔다.

관군의 열전달계수에 대한 초기 연구는 Palen et al. (1962)에 의해 수행되었다. 그들의 연구결과

에 의하면, 관군 평균 열전달계수는 동일조건하에서 포화 풀 비등의 단일 관에서 얻을 수 있는 값보다 상당히 큰 값이 얻어진다는 것을 알았다. 이러한 결과를 관군 비등 계수(bundle boiling factor)또는 관군 효과(bundle effect)라고 한다. 관군 비등 계수(bundle factor)는 전체 관군에 대한 평균 열전달계수의 동일한 표면을 갖는 단일 관의 평균 열전달계수에 대한 비로 정의되며, 관군 효과(bundle effect)는 관군에서 가열되고 있는 전체 관 중 상부 관에 대한 열전달계수의 관군에서 단독으로 가열되고 있는 관의 열전달계수에 대한 비로 정의된다. 관군 비등 계수는 일반적으로 관군 효과보다 약간 낮은 값을 나타낸다. 또한 관군 비등 계수는 평균 관군 열전달계수를 예측하기 위해 단일 관 데이터로부터 관군 비등 계수를 사용할 수 있는 열교환기 설계자에게는 관군 비

† Corresponding author : 051-400-5086, choiys@komeri.re.kr

등 계수가 더 유용할 수 있다. Krasowski et al. (2011)은 피치 대 관의 비( $P_t = 2.0d_o$ )가 2인 관군에서 메탄올의 비등실험을 통해  $15 \sim 50 \text{ kW/m}^2$ 의 열유속에 대해 약 1.8~2.8의 관군 비등 계수를 가지는 것을 확인하였다.

Marto and Anderson (1992)은  $P_t/d_o = 2$ 인 정삼각형 피치로 배열된 전기로 가열되는 매끈한 15개의 구리 관군에 대해 R-113 냉매의 비등 열전달계수를 측정하였다. 그들의 결과에 의하면 저열유속에서 관군 하부의 관들이 상부 관들의 비등 열전달을 상당히 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다.

Liu and Qiu (2002, 2004)는 물과 R11을 사용하여 일련의 소형 관군 실험을 수행하였다. 그들은 피치 대 직경 비율을 작게 하고 관 사이의 틈(0.5, 1.0 그리고 4.0mm)을 제한했을 때 열전달에 미치는 영향을 조사하였다. 매끄러운 관들로 이루어진 소형 관군의 경우 관 사이의 틈을 작게 함에 따라 단일 관보다 열전달계수가 크게 향상되었으며, 관 사이의 틈이 제일 작(0.5mm)은 소형 관군이 가장 큰 열전달계수를 나타내었다. 그러나 열유속을 증가시키에 따라 그 영향은 감소하였다. Qiu and Liu (2004)는 매끈한 수평 관으로 구성된 엇갈린 소형 관군의 제한된 공간 내에서 관 사이의 간격, 관의 위치, 그리고 시험 압력이 물의 비등 열전달에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. 관 사이의 간격이 0.3mm인 엇갈린 소형 관군은 저열유속 및 중열유속의 범위에서 최대의 열전달 향상을 나타내었다. 소형 관군의 비등 시 관 사이의 간격이 0.5~1.0mm인 경우 관군 내 가열관의 위치가 열전달에 미치는 영향은 작은 것으로 나타났다. 그러나 관 사이의 간격이 0.3mm인 가열관의 위치는 열전달에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 관 사이의 간격이 1.0mm이거나 또는 그 이상인 경우, 압력이 열전달 향상에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다.

Leong et al. (1979)은 리보일러의 한 단면을 묘사한 241개의 대형 관군 배열로 대기압하에서 냉매 R113을 사용하여 실험적인 연구를 수행하였다. 관군 내에서 하부 관들의 국소 열전달계수는 단일 관의 경우와 거의 같았지만, 상부의 관들은 상당히 높게 나타났다. Gupta는 대기압 부근에서 포화수의 풀(pool) 또는 저속의 직교 유동 조건하에서 전기적으로 가열되는  $5 \times 3$ 의 정열 수평 관군에서 핵비등 열전달을 조사하였다. 단일 열(single column)의 관군뿐만 아니라 실험이 이루어진 배열의 경우 열전달계수는 단일 관의 열전달계수와 거의 동일한 것으로 나타났다. 풀 비등 조건인  $23 \text{ kW/m}^2$ 의 열유속에서 중앙 열에 있는 상부 관의 최대 열전달계수는 하부 관의 최대 열전달계수보다 약 7배 높게 나타났다.

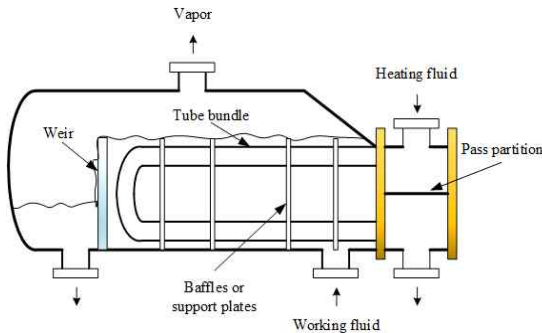
본 연구에서는 셸 앤 관(shell and tube) 증발기 설계를 위해 문헌으로부터 얻을 수 있는 열전달 계수로부터 관군 비등 열전달 특성을 비교 분석하였으며, 최적 셸 앤 관 증발기 설계에 이러한 결과를 반영하였다.

## II. 셸 앤 관 증발기

본 연구에서는 9RTA-96C Sulzer 선박용 엔진으로부터 배출되는 배기가스를 열원으로 한 ORC 시스템(Lim and Lee, 2017)에서 증발기의 최적 설계를 위해 다음과 같이 초기 값을 설정한다. 열원인 배기가스의 질량 유량은  $105.5 \text{ kg/s}$ 이며, ORC 시스템을 순환하는 작동 유체는 Toluene이다. 증발기의 증발 온도는 163K이고, 팽창기 입구 온도인 과열도는 473~543K이다.

셸 앤 관 증발기는 세 가지 그룹으로 분류할 수 있다. 즉, 리보일러(reboilers), 만액식 증발기(flooded-type evaporators) 그리고 이상 열 사이펀 열교환기(two-phase thermosyphon heat exchangers)로 나눌 수 있다. 리보일러는 일반적으로 식품 산업이나 석유 및 화학 산업 등에서 널리 사용되

고 있으며, 만액식 증발기는 난방, 환기 그리고 공기 조화 산업에서 널리 사용되며, 그리고 이상 열 사이펀 열교환기는 열회수 시스템에 적용되고 있다. 본 연구에서는 [Fig. 1]과 같은 타입을 사용하여 열교환기의 열전달 특성을 고찰하였다. 관 (tube)의 외경과 내경은 각각 0.0254m와 0.0218m이며, 관 배열(tube layout)은 30o로 가정하였다.



[Fig. 1] Kettle reboiler

### Ⅲ. 비등열전달계수

#### 1. 관외 비등열전달계수

Rohsenow (1952)는 비등 열전달에 대하여 Nusselt 수로 실험 상수(empirical constant)를 포함하고 있는 다음 식을 제안하였다.

$$Nu_o = \frac{1}{C_{sf}} Re^{(1-n)} Pr_f^{-m} \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $C_{sf}$ 는 액체-표면 조합에 따른 핵생성 특성의 차이를 고려하기 위해 도입되었으며, <Table 1>에 여러 액체-표면 조합에 대한 값들이 주어져 있다. 그러나 어떠한 정보도 없을 경우 초기 근사로 0.013의  $C_{sf}$  값이 사용될 수 있다. 지수 n과 m은 각각 0.33과 0.7의 값을 가진다. Reynolds 수는 액체의 겉보기 속도의 향으로 다음과 같이 정의될 수 있다.

<Table 1> Values of  $C_{sf}$

Liquid-surface combination	$C_{sf}$
n-Pentane on polished copper	0.0154
n-Pentane on polished nickel	0.0127
Water on polished copper	0.0128
Carbon tetrachloride on polished copper	0.0070
Water on lapped copper	0.0147
n-Pentane on lapped copper	0.0049
Water on chemically etched stainless steel	0.0133
Water on mechanically polished stainless steel	0.0132

$$Re = \frac{q''}{h_{fg}\rho_f} \left[ \frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)} \right]^{1/2} \frac{\rho_f}{\mu_f} \dots\dots\dots (2)$$

또한 Nusselt 수는 표면에서 떨어져 나온 기포 직경을 특성 길이로 사용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Nu_o = \frac{h_{nb}}{k_f} \left[ \frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

여기서  $h_{nb}$ 는 핵비등 열전달계수를 나타낸다.

Mostinski (1963)는 핵비등 열전달계수를 다음과 같이 정의하였다.

$$h_{nb} = 0.00417 P_{crit}^{0.69} q''^{0.7} F_p \dots\dots\dots (4)$$

여기서  $P_r = P/P_{crit}$ 이며,  $F_p$ 는 압력보정계수 (pressure correction factor)를 나타내며 다음과 같다.

$$F_p = 0.7 + 2P_r \left( 4 + \frac{1}{1 - P_r} \right) \dots\dots\dots (5)$$

Stephan et al. (1980)은 네 종류의 유체(물, 유기 유체, 냉매 그리고 극저온 유체)에 대한 핵 풀 비등 상관식을 개발하였다. 유기 유체에 대한 상관식이 가장 많이 인용되고 있으며 다음과 같다.

$$\frac{h_{nb}D_d}{k_f} = 0.0546 \left[ \left( \frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{1/2} \left( \frac{q'' D_d}{k_f T_{sat}} \right) \right]^{0.67} \left( \frac{h_{fg} D_d^2}{\alpha_f^2} \right)^{0.248} \left( \frac{\rho_f - \rho_g}{\rho_f} \right)^{-4.33} \dots\dots\dots (6)$$

여기서  $\alpha_f$ 는 액체의 열확산율(thermal diffusivity)을 나타내고,  $D_d$ 는 기포이탈직경(bubble departure diameter)으로 다음과 같다.

$$D_d = 0.0208\beta \left[ \frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (7)$$

접촉 각  $\beta$ 는 유체에 상관없이 35°의 고정 값을 가지며,  $T_{sat}$ 는 유체의 포화온도로 절대온도를 나타낸다.

Cooper (1984)는 변수로 비등 표면의 거칠기를 포함한 환산 압력 형태로 풀비등 상관식을 제안하였다.

$$h_{nb} = 55P_r^{0.12-0.2\ln R_p} (-\ln P_r)^{-0.55} M^{-0.5} q''^{0.67} \dots\dots (8)$$

여기서  $h_{nb}$ 와  $q''$ 의 단위는 각각  $W/m^2K$ 와  $W/m^2$ 이고,  $M$ 은 액체의 분자량을  $R_p$ 는 표면 거칠기로 단위는  $\mu m$ 이다. 특히 지정되지 않은 표면의 경우  $R_p$ 는  $1.0\mu m$ 로 설정된다. 또한 Cooper는 수평 구리 실린더를 사용할 경우 열전달계수에 1.7을 곱할 것을 추천하고 있다. 그러나 이것에 대한 상세한 분석이나 설명은 제공하고 있지 않다. 아마 이것은 핵생성 지점에서 전달된 열유속에 대류, 박막 증발 그리고 과도 냉각 요소들을 추가하여 관의 표면 주위로 움직이는 이탈 기포 때문이라고 가정한 것으로 판단된다.

Collier et al. (1996)에 의하면, Gorenflo는 핵비등 열전달계수를 예측하기 위해 기준 열전달계수( $h_o$ )를 토대로 한 다음과 같은 상관식을 제안하였으며, <Table 2>에 여러 유체에 대한 값을 나타내었다.

<Table 2> Reference values of  $h_o$

Fluid	$P_{crit}(bar)$	$h_o(W/m^2K)$
Methane	46.0	7000
Ethane	48.8	4500
Propane	42.4	4000
Butane	38.0	3600
Benzene	48.9	2750
Toluene	41.1	2650
R134a	40.6	4500
Water	220.64	5600
Ammonia	113.0	7000

$$h_{nb} = h_o F_{PF} [q''/q_o'']^{nf} [R_p/R_{po}]^{0.133} \dots\dots\dots (9)$$

여기서  $q_o''$ 와  $R_{po}$ 는 각각  $20,000W/m^2$ 와  $0.4\mu m$ 의 값을 가지고,  $F_{PF}$ 는 압력보정계수이며 다음과 같다.

$$F_{PF} = 1.2P_r^{0.27} + 2.5P_r + \frac{P_r}{1-P_r} \dots\dots\dots (10)$$

식(9)에서 열유속 보정 항의 지수  $nf$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$nf = 0.9 - 0.3P_r^{0.3} \dots\dots\dots (11)$$

Ribatski (2003)는 Cooper의 원리를 기초한 상관식을 얻었다. 이 상관식의 주요 변수는 열유속, 환산압력 그리고 분자량이며, 또한 표면 거칠기도 주요 변수로 포함되어 있다.

$$h_{nb} = F_{sm} (q^{0.9-0.3Pr^{0.2}}) P_r^{0.45} [-\log(Pr)]^{-0.8} R_p^{0.2} M^{-0.5} \dots\dots\dots (12)$$

여기서  $F_{sm}$ 은 표면 물질 매개변수이며, 표면이 구리, 황동 그리고 스테인리스인 경우 각각 100, 110 그리고 85로 가정한 값을 가진다.

Palen (1983)은 단관의 핵비등 열전달계수에 관한 비등계수(bundle boiling factor)와 혼합물 보정계수(mixture correction factor)를 곱하고 자연대류 열전달계수를 더한 다음과 같은 관군 평균 비등 열전달계수를 사용할 것을 추천하고 있다.

$$h_b = h_{nb}F_bF_c + h_{nc} \dots\dots\dots (13)$$

여기서  $h_{nb}$ 는 핵비등 열전달계수를  $F_b$ 는 관군 비등계수(bundle boiling factor)이며,  $F_c$ 는 혼합물 비등 보정계수(mixture boiling correction factor) 그리고  $h_{nc}$ 는 자연대류열전달계수를 나타낸다.

계수  $F_b$ 는 대형 관군의 경우는 2~3의 값을 가진다. 그러나 특별한 정보가 없는 경우 1.5를 사용할 것을 추천하고 있으며, 다음 식에 의해 계산될 수 있다.

$$F_b = 1 + 0.1 \left[ \frac{0.785D_{out}}{C_t(P_t/d_o)^2 d_o} - 1 \right]^{0.75} \dots\dots\dots (14)$$

여기서  $P_t$ 는 관 피치(tube pitch)이고,  $C_t$ 는 관군 배열에 따라 다른 상수로 관군 배열이 30°와 60°의 경우는 0.866이고, 45°와 90°의 경우는 1이 된다.

계수  $F_c$ 는 혼합물 영향에 대한 보정을 고려한 것으로 순수 성분이나 공비 혼합물(azeotropes)의 경우 1이 된다.

관군에서 액상(liquid-phase) 자연대류의 열전달 계수  $h_{nc}$ 는 탄화수소계(hydrocarbons)의 경우 250W/m<sup>2</sup>K 이고, 물의 경우는 1000 W/m<sup>2</sup>K 이다.

Krasowski et al. (2011)는 만액식 증발기(flooded-type evaporator)로부터 물, 메탄올 그리고 냉매 R141b에 대한 관군 평균 열전달계수를 다음과 같이 제안하였다.

$$Nu_o = 521.7Bo^{0.305} \left[ \left( \ln \frac{p}{p_{cr}} \right)^2 \right]^{-1.48} \left( \frac{P_t}{d_o} \right)^{0.74} Pr^{0.67} \dots\dots\dots (15)$$

여기서  $Nu$ 는 Nusselt 수이고  $Bo$ 는 비등수(boiling number)를 나타내며 각각 다음과 같다.

$$Nu_o = \frac{\bar{h}d_o}{k_f}, Bo = \frac{\dot{q}La\rho_f}{\rho_g h_{fg}\mu_f} \dots\dots\dots (16)$$

위 식에서  $\bar{h}$ 는 평균 열전달계수이고,  $La$ 는 특성 길이(characteristic length)를 나타내며 다음 식

으로 표현된다.

$$La = \left( \frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (17)$$

## 2. 관내 열전달계수

관내 가열 유체인 배기가스의 열전달계수는 다음식과 같다.

$$Nu_i = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \dots\dots\dots (18)$$

$$h_i = \frac{Nu_i k}{d_i} \dots\dots\dots (19)$$

관내 압력 강하는 다음식과 같이 정의 된다.

$$\Delta P_t = \left( 4f \frac{Ln_p}{d_i} + 4n_p \right) \frac{\rho_g u_g^2}{2} \dots\dots\dots (20)$$

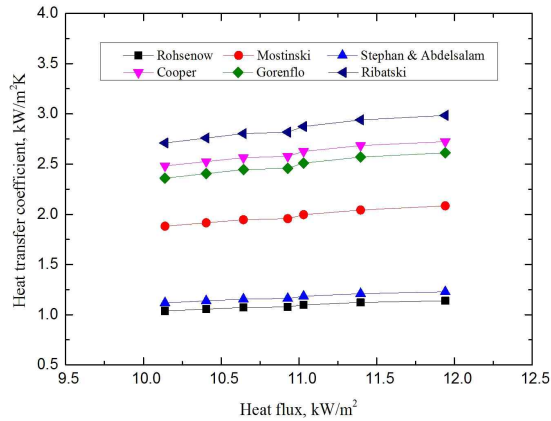
여기서  $f = 0.00128 + 0.1143Re^{-0.311}$ 이며,  $n_p$ 는 관 통로 수(the number of tube passes)를 나타낸다.

열교환기 설계를 위한 시뮬레이션은 Matlab 프로그램을 사용하여 수행되었으며, 전달 물성치 및 열역학 물성치는 REFPROP 9.1로부터 얻어졌다.

## IV. 결과 및 고찰

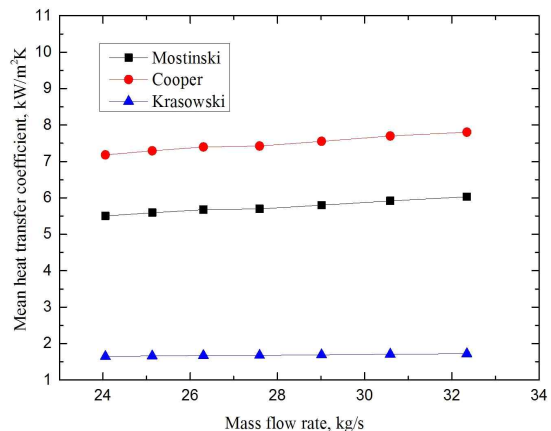
[Fig. 2]는 문헌으로부터 얻을 수 있는 풀비등 상관식들에 대한 열전달계수의 변화를 나타내고 있다. 그림으로부터 알 수 있듯이 Rohsenow의 상관식이 가장 낮은 열전달계수를 나타내고 있으며, Ribatski의 상관식이 가장 높은 열전달계수를 나타내었다. Collier et al.에 의하면, Stephan et al.의 상관식은 아주 신뢰할 수 있으며, 수많은 경질 또는 중질 탄화수소 및 다양한 알콜과 용매(solvents)에 대한 데이터를 정확히 예측하는 것으로 알려져 있다. 그러나 본 연구에서는 열전달계수를 낮게 예측하고 있다는 것을 알 수 있다. Cooper의 식은 가장 많이 언급되는 상관식 중에

하나이나, 본 연구에서는 다른 상관식들에 비해 높게 예측하는 것으로 나타났다.



[Fig. 2] Variation of Heat Transfer Coefficient with Heat Flux

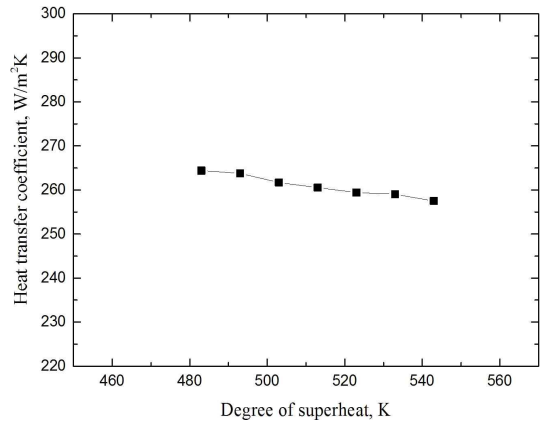
[Fig. 3]은 Mostinski와 Cooper의 핵비등 열전달 계수인 식(4)와 (8)을 평균 비등 열전달계수인 식(13)에 대입하여 얻어진 결과를 작동 유체의 질량 유량에 대하여 나타내었다. 또한 Krasowski et al.의 관군 평균 열전달계수에 대한 결과도 나타내었으나, 본 연구에서는 아주 낮게 예측하고 있다.



[Fig. 3] Variation of Mean Heat Transfer Coefficient with Mass Flow Rate

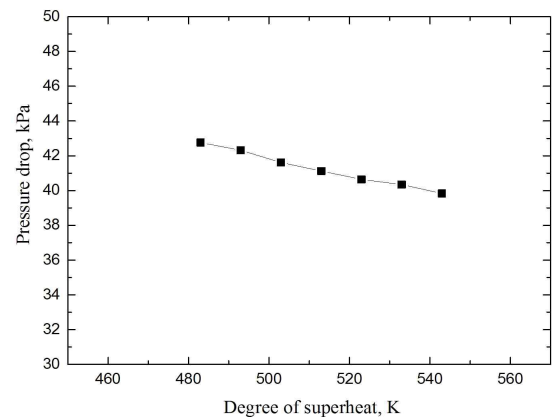
[Fig. 4]는 과열도 증가에 따른 관내 열전달계

수의 변화를 나타내고 있다. 과열도가 증가함에 따라 열전달계수는 조금씩 감소하고 있다. 이것은 과열도가 증가함에 따라 물성치의 변화로 Reynolds수가 조금씩 감소하기 때문에 나타나는 것으로 판단된다.



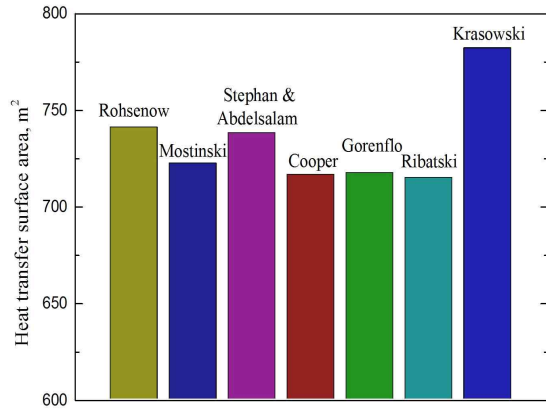
[Fig. 4] Variation of Heat Transfer Coefficient with Degree of superheat

[Fig. 5]는 과열도 증가에 따른 관내 압력 강하의 변화를 나타내고 있다. [Fig. 4]에서 언급한 바와 같이 과열도가 증가함에 따라 Reynolds수가 조금씩 감소하기 때문에 관내 압력강하는 감소하고 있다.



[Fig. 5] Variation of Pressure Drop with Degree of superheat

[Fig. 6]은 과열도가 513K일 때 각 상관식으로 부터 얻어진 열전달계수를 바탕으로 계산된 증발기의 총 열전달 표면적을 나타내고 있다.



[Fig. 6] Heat Transfer Surface Area

그림으로부터 Krasowski et al.의 상관식을 토대로 얻어진 열전달 표면적이 가장 큰 것으로 나타났으며, Cooper, Gorenflo 그리고 Ribatski의 상관식으로부터 얻어진 열전달 표면적이 가장 작게 나타났으며, 거의 비슷하였다. Mostinski의 비등 열전달계수는 본 연구에서 언급된 상관식들 중에서 거의 중간 정도의 값을 나타내었으며, 열전달 표면적도 작은 것으로 나타났다. 따라서 Mostinski의 상관식을 포함하여 Cooper, Gorenflo 그리고 Ribatski의 상관식을 이용하여 열교환기의 개략적인 기초설계를 할 수 있을 것으로 판단된다.

## V. 결론

본 연구에서는 쉘 앤 관 증발기 설계를 위해 풀 비등 열전달에 관한 여러 상관식을 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Cooper, Gorenflo 그리고 Ribatski의 상관식은 다른 상관식에 비해 높게 나타났으며, Rohsenow와 Stephan et al.의 상관식은 낮게 나타났다. 그리고 Mostinski의 상관식은 다른 상관식들 중에서

거의 중간 값을 나타내었다.

2. 과열도 증가에 따른 관내 열전달계수 및 압력 강하는 물성치의 변화로 Reynolds수가 조금씩 감소함에 따라 감소하였다.

3. 증발기의 총 열전달 표면적은 다른 상관식들에 비해 Cooper, Gorenflo, Ribatski 그리고 Mostinski의 상관식들로부터 얻어진 표면적이 작게 나타났으며, 이들 상관식들을 이용하여 열교환기의 기초 설계를 할 수 있을 것으로 판단된다.

## References

- Collier JG and Thome JR(1996). Convective Boiling and Condensation, 3rded., Clarendon Press, Oxford.
- Cooper, MG(1984). Heat flow rates in saturated nucleate pool boiling-a wide-ranging examination using reduced properties, *Advances in Heat Transfer*, Academic Press, Orlando, 16, 157~239. [https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70205-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70205-3).
- Gupta A(2005). Enhancement of boiling heat transfer in a 3x5 tube bundle, *Int. J. Heat Mass Transfer* 48, 3763~3772. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.03.023.
- Krasowski K and Cieslinski JT(2011). Nucleate pool boiling heat transfer from small horizontal smooth tube bundles, *Transactions of The Institute of Fluid-Flow Machinery*, 123, 85~98.
- Leong LS and Cornwell K(1979). Heat transfer coefficients in a reboiler tube bundle, *The Chemical Engineer* 343, 219~221.
- Lim TW and Lee CK(2017). Theoretical Analysis of ORC(organic Rankine cycle) System to Recover Waste Heat of Marine Engine, *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education* 29(5), 1522~1530. <https://doi.org/10.13000/jfmse.2017.29.5.1522>.
- Liu ZH and Qiu YH(2002). Enhanced boiling heat transfer in restricted spaces of a compact tube bundle with enhanced tubes, *Applied Thermal Engineering*, 22(17), 1931~1941. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00111-4](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00111-4).
- Liu ZH and Qiu YH(2004). Boiling characteristics of R-11 in compact tube bundles with smooth and

- enhanced tubes. *Experimental Heat Transfer*, 17(2), 91~102.  
<https://doi.org/10.1080/08916150490271700>.
- Marto PJ and Anderson CL(1992). Nucleate boiling characteristics of R-113 in small tube bundle, *Trans. ASME J. Heat Transfer* 114, 425~433.  
DOI:10.1115/1.2911291.
- Mostinski IL(1963). Application of the Rule of Corresponding States for the Calculation of Heat Transfer and Critical Heat Flux, *Teploenergetika*, vol. 4, p. 66, 1963; English Abstract, *Brit. Chem. Engng.* 8(8), 580.
- Palen JW and Taborek JJ(1962). Refinery kettle reboilers-proposed method for design and optimization, *Chem. Eng. Prog.* 58, 37~46.
- Palen JW and Yang CC(1983). Circulation boiling model for analysis of kettle and internal reboiler performance, In *Heat Exchangers for Two-Phase Applications*, ASME HTD 27, 55~61.
- Qiu YH and Liu ZH(2004). Boiling heat transfer of water on smooth tubes in a compact staggered tube bundle. *Appl. Thermal Engineering* 24, 1431~1441.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.11.021>.
- Ribatski G and Saiz-Jabardo JM(2003). Experimental study of nucleate boiling of halocarbon refrigerants on cylindrical surfaces, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 46, 4439~4451.  
[https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00252-7](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00252-7).
- Rohsenow WM(1952). A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids, *Trans. ASME* 74, 969~975.  
<http://hdl.handle.net/1721.1/61431>.
- Stephan K and Abdelsalam M(1980). Heat transfer correlations for natural convection boiling, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 23, 73~87.  
[https://doi.org/10.1016/0017-9310\(80\)90140-4](https://doi.org/10.1016/0017-9310(80)90140-4).
- 
- Received : 24 January, 2019
  - Revised : 28 February, 2019
  - Accepted : 07 March, 2019