

조수기용 증기분사 열교환기에 대한 모델링

홍철현* · 이억수†

(원고접수일 : 2008년 7월 30일, 원고수정일 : 2008년 9월 5일, 심사완료일 : 2008년 9월 5일)

Modeling of Steam Injection Heater for Fresh Water Generator

Cheol-Hyun Hong* · Euk-Soo Lee†

Abstract : Steam injection heater is the most widely used method for fresh water generator throughout industry. This method is often chosen because of its simplicity. The steam bubbles condense and give up their heat to the surrounding liquid. Experimental study on steam injection heater has been performed in order to find the effect of major parameter. And conservation equation and Bernoulli obstruction theory are used for numerical simulation model of vapor flow-rate. Qualitative comparisons between simulations and measurements show a good agreement and the simulation models are thereby verified.

Key words : Steam injection heater(증기분사 열교환기), Bernoulli obstruction theory (Bernoulli 장애이론), Heat transfer rate(열전달율), Fresh water generator (FWG)(조수기)

기호설명

A : 면적 [m^2]

C_d : 송출계수

C_p : 비열 [kJ/kgK]

d_H : 수력학적 직경 [m]

h : 엔탈피 [kJ/kg]

\dot{m} : 질량유량 [kg/s]

P : 압력 [kPa]

\dot{Q} : 열전달율 [kW]

T : 온도 [K]

\dot{V} : 체적유량 [m^3/s]

Z : 물성치비, $(\rho_H \mu_H / \rho_G \mu_G)^{1/n}$

Re_D : Reynolds 수

그리스 기호

β : 직경비

ρ : 밀도 [kg/m^3]

μ : 점성계수 [Ns/m^2]

† 교신저자(부산대학교 기계공학부, E-mail: esolee@pusan.ac.kr, Tel: 051)510-3097)

* 부산대학교 기계공학부

하첨자

- 1 : SIH의 액체 측 입구
- 2 : SIH의 출구
- cyl : 원통표면
- g : 증기, SIH의 증기 측 입구
- l : 액체
- n : 노즐
- s : 포화상태

1. 서 론

조선해양산업의 활황과 더불어 선박 및 해양플랜트에 필수적으로 탑재되는 조수기(Fresh water generator, FWG)의 수요가 급증하고 있다. 이로 인해 해수(sea water)로부터 담수(fresh water)를 제조하는 담수화장치기술이 고부가가치를 창출하는 품목으로 부상할 것으로 예측하고 있다¹⁾.

일반적으로 조수를 하는 방법으로는 증발법 역삼투법, 냉동법 등이 있으며, 선박용으로는 구조가 간단하고 기관실내의 주기관 또는 발전기 등에서 발생하는 각종 폐열과 보일러의 증기(steam)를 이용하여 해수를 증발 및 응축시킴으로써 청수를 제조하는 방법을 대부분 채용하고 있다²⁾⁻⁽⁴⁾. 또한 이종의 액체 간 혹은 용해질 증기의 용매로 균일혼합 등을 위해서는 축소형 노즐(convergent nozzle)을 채택한 액체구동 인젝터(injector)가 주로 사용되고 있으며, 인젝터는 내부에 가동부가 전혀 없어 기기의 사용수명이 설치된 시스템의 수명과 동일할 정도로 신뢰도가 매우 높은 유체기기이다.

조수기용 증기분사 열교환기(Steam injection heater, SIH)는 가열용 증기를 분사 노즐을 통하여 온수에 직접 분사시키면, 증기가 온수에 의하여 응축되면서 현열 및 응축 잠열에 의한 열전달로 고온수가 얻어진다. 이 과정은 증기와 냉각수가 직접 접촉하여 열교환(직접접촉식 열교환기)이 이루어짐으로 간접접촉식 열교환기에 비하여 전열효과가 매우 뛰어나고, 열전달이 이루어지는 시간이 매우 짧다. 또한 칸막이(barrier)가 없기 때문에 파울링(fouling)에 의한 성능저하가 없고, 구조가 간단하

기 때문에 매우 저렴한 유지비가 든다. 그리고 증기에서 공정유체로 순간적인 열전달이 이루어지므로 빠른 반응속도 및 정확한 온도제어가 가능하여 열효율, 파울링, 반응시간, 온도제어 등에서 장점이 많다⁵⁾⁻⁽⁶⁾.

대부분의 SIH에 대한 연구는 실험과 해석의 어려움 때문에 응축탱크나 정지해있는 액체에 증기를 분사하면서 수행하였다. 그러나 유동중인 액체에 증기를 직접 분사하는 열교환기에 대한 연구는 부족한 실정이므로 상용화설계에 대비하여 유동과 열전달에 대해 많은 실험 및 해석적인 연구가 필요하다⁷⁾⁻⁽⁸⁾.

본 연구에서는 선박의 기관실내에서 발생하는 각종 폐열 중 보일러의 증기를 재활용하기 위해 개발된 조수기용 SIH에 대하여 간단한 실험적 연구를 수행하고, 또한 지배 보존방정식과 Bernoulli 장애이론(Bernoulli obstruction theory)을 이용한 수치 시뮬레이션을 수행하여 최적설계를 하는데 기초자료를 제공하고자 한다.

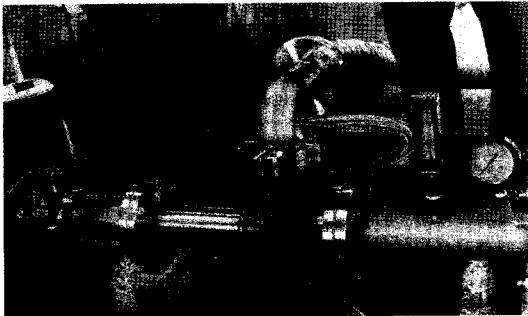
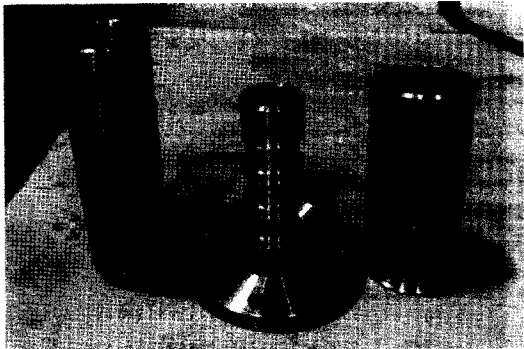
2. 실험장치 및 방법

2.1 작동원리와 구조

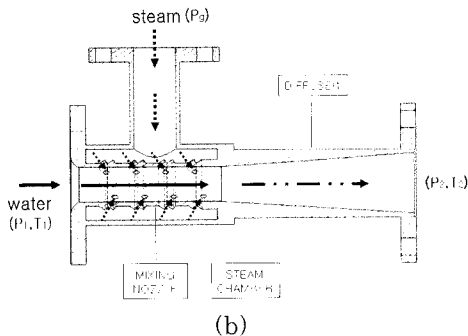
SIH의 주목적은 고온·고압의 증기를 구동액체에 분사해서 조수기내의 증발기에 필요한 출구온도까지 올리는데 있다. 이 온도는 조수기내의 증발기의 종류 및 크기(Plate형, Shell & Tube 형 등)에 영향을 크게 받는데, 일반적으로 가열열원의 온도는 약 80℃~90℃ 정도이다. 직접적인 증기분사는 고온의 증기를 상대적으로 포화온도보다 낮은 액체에 분사함으로써 열전달이 이루어지는데, 증기는 응축되고 주위액체에 상변화에 의한 열전달이 이루어진다. 증기와 액체사이의 직접접촉에 의한 열전달은 단지 증기가 가열하고자 하는 액체의 농도와 질량증가에 문제가 없을 때 사용하는 방법이다. 그러므로 가열되는 액체는 대부분 물(water)이 되고, 가장 널리 사용하는 분야는 조수기와 보일러의 퍼드백가열 등이다.

일반적으로 SIH는 작동원리는 고압, 고온의 증기를 노즐로 분출시켜, 그 분류 주변의 저압액체와

운동량 및 에너지 교환을 통하여 저압유체를 보다 높은 압력과 온도까지 에너지를 수송하는 장치이다. 고온의 증기를 분사하는 SIH내의 열전달 과정은 액상의 온수에 기상의 증기가 분사되어 기체-액체 혼합, 증기의 상(phase)변화, 가열 등의 복잡한 과정을 거쳐서 열전달이 이루어진다.



(a)



(b)

Fig. 1 Experimental steam injection heater (a) and section view of the steam injection heater (b)

본 연구에서 사용된 SIH는 조수기용으로 부품 및 실험사진 그리고 단면도를 Fig.1에서 볼 수 있다. 그림의 (b)에서는 1차 유체(구동유체)인 물과

2차 유체인 증기(steam)의 SIH내의 진행경로를 나타내고 있다. SIH는 구동유체(물)와 증기의 유입부, 구동유체인 물과 유입되는 증기와의 혼합을 위하여 16개의 노즐에 의하여 증기가 분사되는 혼합부(믹싱노즐과 증기챔버) 그리고 출구부 쪽에서 소음감소와 압력을 회복시켜주는 역할을 하는 디퓨저로 구성된다. 구동유체의 입구와 출구의 직경은 65mm이고 증기입구의 직경은 50mm이며, 믹싱노즐 몸체의 외경과 내경은 각각은 53.8mm, 37mm이고, 몸체에 뚫린 16개 노즐 각각에 대한 직경은 5mm이다.

본 실험에 사용된 SIH는 일반적인 주물공정에 의해 제작된 기존의 일체형과는 달리 단순 가공품(SUS304)들로 간편하게 조립이 가능하며, 유지보수에 편의를 도모한 특징이 있다.

2.2 실험장치 및 방법

Fig. 2는 SIH에 대한 실험장치의 전체적인 개략도를 나타내며, 바다와 가까운 해안에 설치하여 가능한 실제 선박에서의 운전조건과 거의 동일한 조건하에서 실험을 수행하고자 노력하였다.

구동유체인 물은 구동펌프를 통해 계측기를 거쳐 실험용 SIH의 구동부에 유입되며, 2차 유체인 증기 또한 계측기를 거쳐 SIH로 유입된다. 그리고 SIH를 통해 나온 혼합유체는 계측기를 통해 조수기의 증발기(evaporator)로 유입되어 순환하게 된다.

SIH의 구동유체는 용량 60m³/hr, 토출압력

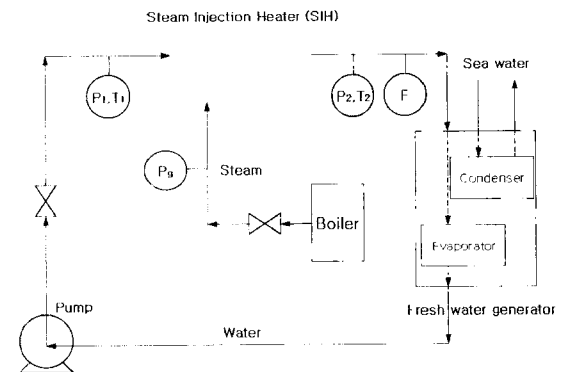


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

0.49 MPa인 원심펌프를 사용하였으며, 조수기를 작동하기 위해 해안에서 가까운 장소에서 실험을 하였는데, 증기 발생을 위한 가열열원으로서는 실제 선박의 기관실에서 발생하는 증기를 모사하기 위해 0.98 MPa 용량의 보일러를 사용하여 약 0.45 MPa(abs)의 압력까지 포화증기를 발생시켰다.

실험은 보일러에서 원하는 압력까지 물을 끓인 후, 조수기와 펌프를 순환시키고 SIH의 구동유체 유량 \dot{m}_1 및 보일러의 증기압력 P_g 을 변화시키면서 수행하였는데, 구동유체의 입구유량은 처음에 보일러의 밸브를 잠그고 증기를 차단한 후 출구에서 유량을 계측하였고, 입·출구의 압력과 온도는 보일러의 밸브를 열고 정밀하게 읽으면서 측정하였다. SIH 전·후의 물 및 증기에 대한 온도, 압력 그리고 유량을 측정하기 위한 측정계기들은 SIH 모델의 가능성 검토를 위한 기초연구로 수행하였기 때문에, 디지털식에 비해 비교적 정밀도가 떨어지는 단점이 있지만 가능한 한 선박에서 실제 사용되는 있는 상용의 계기들을 사용하였다. 온도계는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 의 오차를 가지며, 압력의 경우 부르든(Bourdon) 압력계를 사용했는데 0.7 kPa의 오차를 가진다. 여기서 증기의 온도는 보일러의 압력에 대한 포화 온도로 가정한다.

3. 모델링(Modeling)

3.1 지배방정식

SIH는 단순한 형상이지만 직접접촉 열교환을 하므로 전열효과가 뛰어나다. 이 방법은 그 단순성 때문에 많이 사용되고, 열전달 표면이나 증기트랩(steam trap) 장치 등이 요구되지 않을 뿐만 아니라 응축순환시스템도 필요 없다. 그러므로 장점이 많은 SIH를 개방계로 해석하기 위해서는 질량 보존 방정식, 에너지보존 방정식 그리고 SIH에 대한 이론 및 경험식 등을 이용한 해석이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 해석과 관련된 식들을 이용하여 수치해석하고 분석해서 실험결과와 비교해 보고자 한다.

먼저 직접접촉 분사 중에 열은 간접접촉식 열교

환기와는 다른 방법으로 전달된다. 즉, 열은 열전달 표면을 통해서 전달되지 않고 증기는 가열되는 유체와 자유롭게 혼합된다. 증기에서 사용할 수 있는 열전달량은 기존의 방법과는 다르게 계산되며 아래와 같다.

$$\dot{Q} = \dot{m}_g(h_g - h_2) = \dot{m}_g(h_g - C_p T_2) \quad (1)$$

여기서 첨자 2는 SIH 출구에서의 값이다. 이 식은 증기의 소비량 \dot{m}_g 을 계산하거나 열전달율 \dot{Q} 을 계산하는데 사용될 수 있다. 간접접촉식 열교환기와 의 큰 차이는 구동유체(물)의 질량유량이 분사된 증기의 양만큼 증가했다는 것과 SIH 출구에서의 압력이 증가한다는 것이다.

그리고 2개의 SIH 입구에 액체와 기체가 유입되는데, 각각 상(phase)은 다르지만 SIH 내의 질량 보존법칙과 에너지 보존법칙은 성립하고, 또한 에너지 보존법칙에서 운동에너지와 위치에너지는 무시될 수 있으며 아래와 같다.

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_s = \dot{m}_2 \quad (2)$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_g h_g = \dot{m}_2 h_2 \quad (3)$$

그리고 식(1)~(3)을 이용하면 실험에서 측정된 압력, 온도 및 유량을 이용하여 증기의 유량을 계산할 수 있고 다음과 같다.

$$\dot{m}_s = \frac{\dot{m}_1(h_2 - h_1)}{(h_s - h_2)} = \frac{\dot{m}_2(h_2 - h_1)}{(h_s - h_1)} \quad (4)$$

이 식에서 질량유량 \dot{m}_1 을 알고 있을 경우에는 첫 번째 항을, \dot{m}_2 를 알고 있을 경우에는 두 번째 항을 사용하여 증기의 질량유량을 계산한다. 일반적으로 \dot{m}_2 는 증기의 혼합으로 인해서 완전한 액체로 보기 어렵기 때문에 첫 번째 항을 사용하는 것이 정확하다.

3.2 Bernoulli 장애이론(obstruction theory)

일반적으로 증기의 유량 \dot{V}_g 은 직접 계측할 수도 있으나 현장에서는 별로 실용적이지 못하며, 증기

의 압력 P_g 만 알면 SIH 출구에서의 유량 및 열전달량 등을 알 수 있는 이론 및 경험식이 필요하다. 그런데 단상(single phase)의 비압축성 유체에 대한 경험식은 비교적 많지만, 압축성 유체에 대한 경험식은 조금 있으며, 액체-증기에 대한 2상(two phase)의 경우는 거의 찾아보기 어렵다. 따라서 본 장에서는 단상의 압축성유동에 대한 식을 2상의 경우 대하여 수정 및 보완해서 사용하고자 한다. 노즐출구에서 증기의 유량을 예측하는 부분은 상변화(Phase change)에는 크게 영향을 받지 않으므로 압축성 유동해석과 유사한 방법으로 보정계수를 사용할 수 있을 것이다.

수두손실에 의한 유량계측은 유동 내에 장애물을 두어 압력강하를 발생시킴으로써 유량을 계측하는데, 모세관이나 다공성플러그 같은 마찰손실형 장치와 오리피스, 유동노즐 및 벤튜리 튜브 같은 Bernoulli형 장치가 있다. 일반적으로 마찰손실형 계측기는 회복할 수 없는 큰 수두손실을 유발하고 유동에 심한 장애를 주기 때문에 잘 쓰지 않고, Bernoulli 형 장치가 주로 사용된다. 그러므로 SIH의 노즐에서 분사되는 증기의 질량유량혹은 체적유량을 알기 위하여 Bernoulli가 제안한 유동 장애이론을 적용하고자 한다^[9].

여기서 중요한 변수로서 수정된 직경비 인 β 를 식(5)에서 정의하자. 여기서 A_{cyl} 는 믹싱노즐(mixing nozzle) 몸체의 표면적을 원통으로 가정한 값이며, A_n 은 믹싱노즐 몸체에 있는 16개 중에서 1개의 노즐에 대한 단면적이다.

$$\beta = \sqrt{\frac{16 \times A_n}{A_{cyl}}} \quad (5)$$

체적유량과 압력차와의 관계식을 구하기 위해서 믹싱노즐내에서 비압축성, 비점성 정상상태 유동에 대한 연속방정식과 Bernoulli 방정식을 적용하여 개략해에 대한 식을 얻을 수 있지만, 마찰에 대한 보정계수인 송출계수 C_d 와 상변화에 대한 보정계수 Z 를 적용하면 아래의 체적유량 \dot{V}_g 와 질량유량 \dot{m}_g 에 대한 식들을 얻을 수 있다.

$$\dot{V}_g = C_d Z A_2 \left[\frac{2(P_1 - P_2)/\rho_g}{1 - \beta^2} \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$\dot{m}_g = \rho_g \dot{V}_g \quad (7)$$

여기서 무차원 송출계수 C_d 는 점성오차에 대한 보정의 역할을 하는데, 단상의 경우에 대한 차원해석에 의하면 식(8)과 같이 Re_D 와 β 의 함수이다. 그리고 분사되는 유체가 증기이므로, 식(10)에서 액체과 증기의 물성치비 Z 를 직접접촉 응축에 의한 에너지손실의 보정계수로 사용한다. 여기서 Z 는 응축 열전달의 지배방정식에서 유도된 무차원 변수인데, 압축성유동에서 유량손실에 대한 보정계수인 무차원 팽창인자(dimensionless expansion factor) $Y^{[9]}$ 와 유사하고 0 에서 1사이의 값을 가진다. n 의 값은 공정유체와 SIH의 형상과 종류에 따라 달라지겠지만, 본 모델에서는 실험값과 비교하여 Z 의 지수 n 의 값으로는 12를 사용한다. 그리고 식(9)에서 d_H 는 16개의 노즐에 대한 수력학적 직경이다.

$$C_d = f(Re_D, \beta) \quad (8)$$

$$Re_D = \beta \frac{4\dot{m}_g}{\pi d_H \mu_g} \quad (9)$$

$$Z = \left(\frac{\rho_l \mu_l}{\rho_g \mu_g} \right)^{1/n} \quad (10)$$

송출계수 C_d 에 대한 경험식에는 크게 3종류가 있는데, 얇은판 오리피스, 유동노즐 및 벤튜리이며, SIH는 모양이 유동노즐에 가장 가깝다. 유동노즐은 매끈하고 등글게 가공되어있기 때문에 입구의 베나 콘트랙타의 영향은 없지만 완만한 확대부, 즉 디퓨저가 없기 때문에 비회복성 손실이 오리피스보다 크다. 또한 유동노즐도 두 가지 형태가 있는데 긴 반경노즐 형식과 짧은 반경노즐 형식이다. 긴 반경노즐 형식의 경험식은 β 와 무관하므로, 본 연구에서는 짧은 반경노즐 형식의 식을 사용하며 아래와 같다.

$$C_d = 0.9900 - 0.2262\beta^{4.1} + (0.000215 - 0.001125\beta + 0.00249\beta^{4.7}) \left(\frac{10^5}{Re_D} \right)^{1.15} \quad (11)$$

본 연구에서는 주어진 형상과 치수의 SIH에 대하여 액체와 증기의 밀도, 비열 그리고 엔탈피를 정확한 온도의 함수로서 계산하고, 식(1)~식(11)을 이용하여 증기의 유량과 출구온도 및 열전달량 등을 계산하는 비선형 문제를 수치적 방법으로 풀고자 한다. 또한 실험치와 수치해석 값들을 비교해 보고 증기의 압력 및 구동유체의 유량 등이 출구온도와 열전달율 등에 미치는 영향을 보고자 한다.

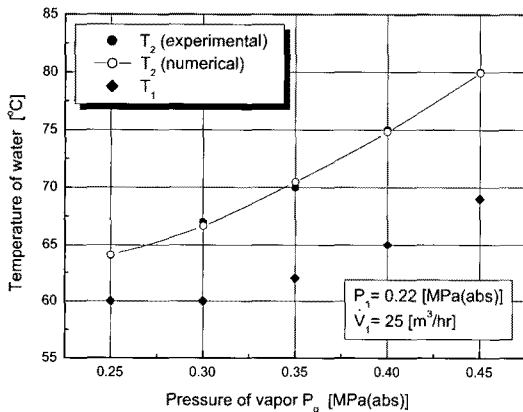


Fig. 3 Temperature of water with vapor pressure

해석하는 방법으로는 입구 1에서의 온도, 압력, 유량 그리고 증기의 압력(포화압력)이 주어지면, 먼저 출구온도 T_2 를 가정하고, 주어진 온도에서 2개의 입구와 1개 출구에 대한 밀도를 계산한다. 그리고 증기의 체적유량 \dot{V}_g 를 가정하고 식(9)와 식(10)에서 Re_D 와 C_d 를 계산하며, 식(6)에서 체적유량 \dot{V}_g 를 계산한다. 가정한 체적유량과 계산한 체적유량 값이 오차범위에 들어오면, 식(3)에서 출구의 엔탈피와 출구온도 T_2 를 계산한다. 처음 가정한 출구온도와 식(3)의 계산값이 오차범위 내에서 수렴하지 않으면 T_2 를 다시 가정하고, 수렴하면 열전달율 등을 계산하고 종료한다. 출구온도 T_2 와 체

적유량 \dot{V}_g 의 비선형에 대한 해석방법으로 사격법(shooting method)를 사용했다.

4. 결과 및 고찰

4.1 출구온도와 열전달율

Fig.3은 SIH의 입구 1(액체)의 압력이 0.22 MPa(abs), 체적유량이 $25m^3/hr$ 인 경우에, 증기압 압력을 0.25 MPa ~ 0.45 MPa 로 변화시키면서 실험적으로 측정된 출구온도를 수치로 계산한 값과 비교한 그림이다. 실험은 입구 1의 온도도 증가시키면서 하였는데, 증기압이 증가함에 따라 출구온도는 증가하고 있으며 (Fig.4 온도차 참조), 실험적 계측에 대한 오차분석(uncertainty analysis)과 수치해석에 대한 오차를 포함하면 약 3%의 오차범위에서 비교적 잘 일치하고 있다.

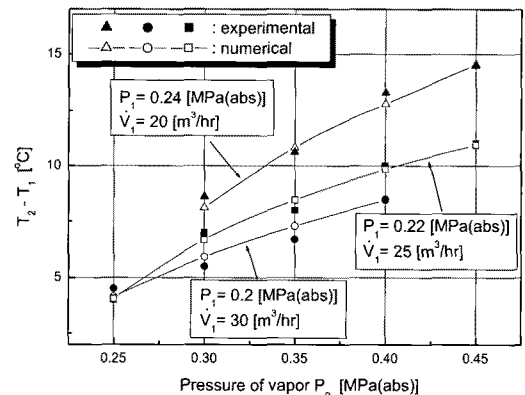


Fig. 4 Temperature difference of water

Fig. 4는 증기의 압력이 온도차에 미치는 영향을 보여주는데, 증기압력이 증가하면 입·출구 온도차가 증가함을 알 수 있다. 입구 1의 압력(0.2 MPa~0.24 MPa)과 체적유량(20~30 m^3/hr)을 각각 달리하면서 증기압력 P_g 가 입구(액체)와 출구의 온도차 $T_2 - T_1$ 에 미치는 영향이다. 증기의 압력이 증가함에 따라 $T_2 - T_1$ 가 증가하고 있으며, 실험값과 수치값이 약 5%의 오차범위에서 잘 일치하고 있다. 그리고 동일한 증기압력 P_g 에서 체적유

량 \dot{V}_1 이 증가하면, $T_2 - T_1$ 가 감소함을 알 수 있다. 다만 증기압력 2.5bar인 경우는 입구 1의 압력 P_1 과 체적유량 \dot{V}_1 의 영향들이 서로 상쇄시키기 때문에 큰 차이를 보이지 않는다. 입구압력과 체적유량이 온도차에 미치는 각각의 영향에 대해서는 Fig. 8에서 볼 수 있다.

Fig. 5는 실험값들을 이용하여 계산한 열전달율 \dot{Q} 과 증기 질량유량 \dot{m}_g 를 수치해석으로 계산한 값들과 비교하였다. 증기의 압력이 증가함에 따라 \dot{Q} 과 \dot{m}_g 는 비선형적으로 증가하는데 식(1)에서 알 수 있듯이 선형비례 하므로 비슷한 경향을 보이지만 증가율은 차이가 있음을 알 수 있다. 그리고 수치값과 실험값은 약 3%이내에서 비교적 잘 일치하고 있다.

이상에서 실험값과 수치해석으로 계산한 값은 비교적 잘 일치하므로 SIH에 대한 수치적 계산방법을 통하여 증기의 압력과 입구 1에서의 체적유량 등이 출구의 온도(혹은 입·출구 온도차)나 열전달률 등에 미치는 영향을 구해볼 수 있으며, SIH의 설계 및 최적화에 도움을 줄 수 있다.

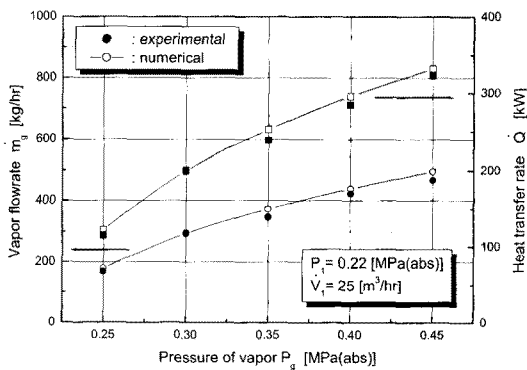


Fig. 5 Vapor flowrate and heat transfer rate with vapor pressure

SIH 입구에서 증기의 압력 P_g 가 증가하면 입·출구의 온도차 $T_2 - T_1$ 가 비선형적으로 증가함을 Fig. 6에서 볼 수 있는데, 온도차의 증가율은 P_g 가 증가함에 따라 완만하게 감소한다. 그리고 동일한 증기의 압력에서 체적유량 \dot{V}_1 이 감소함에 따라

P_g 에 대한 $T_2 - T_1$ 의 증가율은 커지는데, 특히 P_g 가 작을 경우에 더욱 증가율의 차이가 크다. 따라서 \dot{V}_1 이 작을 경우가 P_g 에 매우 민감함을 알 수 있다. 지면관계 상 나타내지는 않았지만, 증기의 유량 \dot{V}_g 과 $T_2 - T_1$ 와의 관계는 Fig. 6과 비슷하지만 선형분포이고, $T_2 - T_1$ 의 증가율 역시 \dot{V}_1 의 감소와 함께 증가한다.

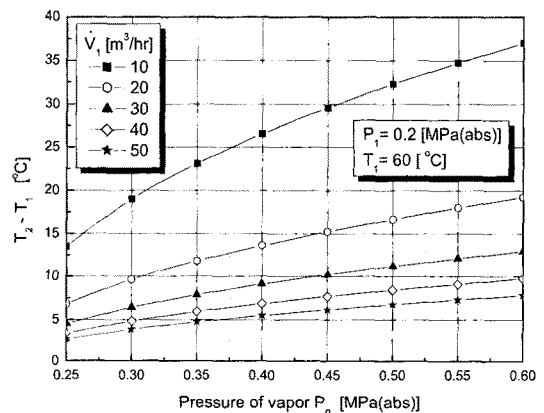


Fig. 6 Temperature difference and vapor pressure

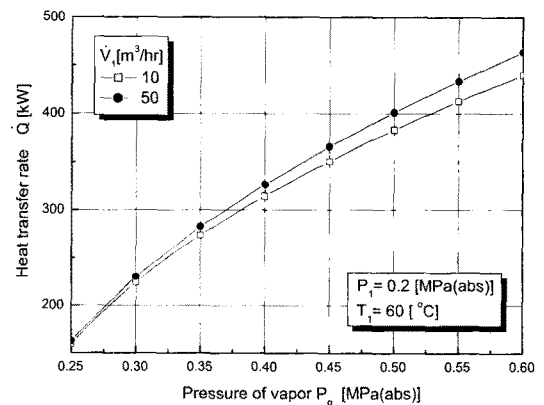


Fig. 7 Heat transfer rate and vapor pressure

Fig. 7에서 증기의 압력 P_g 가 증가하면 열전달율 \dot{Q} 가 증가하고, 증가율은 P_g 가 증가함에 따라 점점 둔화됨을 알 수 있다. 여기서 증기의 압력이 증가하면 증기의 엔탈피와 질량유량이 모두 증가하는데, 주로 질량유량의 증가에 의한 에너지가 주

로 영향을 준다. 또한 체적유량 \dot{V}_1 이 증가하면 \dot{Q} 의 증가율은 커지며, P_g 가 커질수록 열전달율에 대한 차이는 벌어지는데, 이것은 출구온도 T_2 의 영향이다. 또한 x축을 증기의 유량 \dot{V}_g 로 잡으면 전체적인 경향은 유사하지만 열전달율은 선형분포를 보여준다.

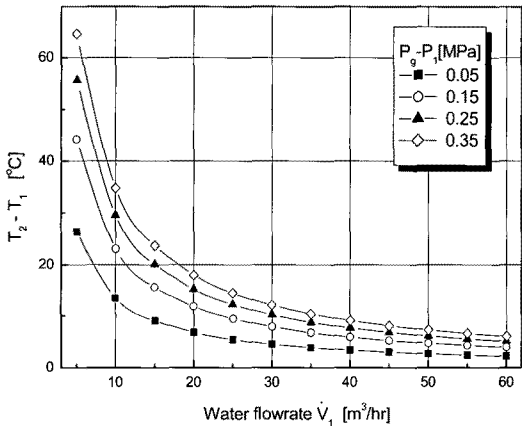


Fig.8 Temperature difference and inlet water flowrate

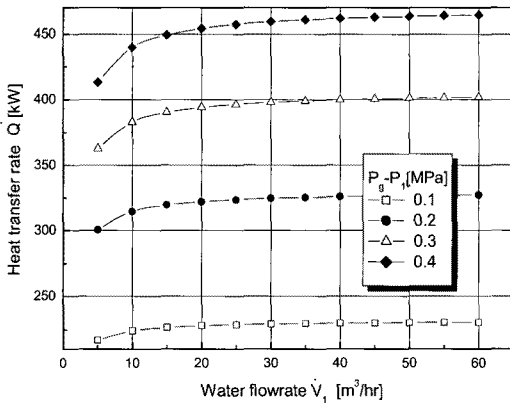


Fig.9 Heat transfer rate and inlet water flowrate

Fig. 8은 SIH 입구 압력차 $P_g - P_1$ 이 고정되어 있을 경우에, 인젝트 입구의 체적유량 \dot{V}_1 이 입·출구 온도차 $T_1 - T_2$ 에 미치는 영향을 보여준다. 특히 \dot{V}_1 이 작고, $P_g - P_1$ 이 클수록 온도차는 매우 민감하며, \dot{V}_1 이 증가할수록 처음에는 급격하게

감소하다가 점점 완만하게 감소함을 볼 수 있다. Fig.9는 SIH 입구유량 \dot{V}_1 이 열전달율 \dot{Q} 에 미치는 영향을 볼 수 있다. 역시 $P_g - P_1$ 이 크고 \dot{V}_1 이 작은 경우에 민감하며, \dot{V}_1 이 증가하면 처음에는 빨리 증가하다가 점점 완만하게 증가함을 볼 수 있다.

5. 결 론

조수기 혹은 담수화 설비 등의 증발기에 열원의 일부를 공급하는 직접접촉 증기분사 열교환기 (steam injection heater, SIH)에 대하여 실험적 연구를 수행하고, 또한 보존방정식과 수정된 Bernoulli 장애이론을 적용하여 비선형방정식을 수치해석으로 계산하였다.

(1) 실험값과 수치해석의 결과값들은 5% 이내에서 비교적 잘 일치하였으며, SIH 설계에 필요한 데이터인, 증기의 압력 P_g 와 입구에서의 물의 유량 \dot{V}_1 등이 입·출구 온도차와 열전달율 등에 미치는 영향에 대한 정량적인 값을 예측할 수 있었다.

(2) 증기의 압력 P_g 가 증가하면 증기의 질량유량이 비선형으로 증가하고 출구에서의 온도 T_2 와 열전달율 \dot{Q} 도 비선형적으로 증가하는데, 이것은 증기의 엔탈피 h_g 증가보다는 주로 질량유량 \dot{m}_g 증가에서 기인한다. 그리고 주어진 증기압력에서 SIH의 입구유량 \dot{V}_1 가 증가하면 입·출구 온도차 $T_2 - T_1$ 는 감소하지만, 열전달율 \dot{Q} 은 완만하게 증가한다.

(3) 본 수치해석 및 실험결과는 증기분사 열교환기의 설계를 개선하거나 보완할 경우에 기초 데이터를 제공할 수 있으며, 또한 조수기이외의 다른 용도로 직접접촉 증기분사 열교환기를 개발할 경우에 증기의 유량, 열전달량 및 출구온도 등을 예측하는데 도움을 줄 수 있다.

후 기

본 연구의 수행을 위해 아낌없이 지원해 주신 FTE(Fluid & Thermal Engineering Co., LTD.) 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] 최순호, 윤석훈, 김창복, 송영호, 전종필, 최두열, "선박 및 해상플랜트용 판형 열교환기의 열 전달계수 측정에 관한 연구", 한국마린엔지니어링학회 후기학술대회 논문집, 2006.
- [2] 문수범, 최현규, 최재혁, 구너형정, 김경근, 최순호, "신형 수이젝트 개발을 위한 실험연구", 한국마린엔지니어링 학회지, 제30권, 제6호, pp.677-684, 2006.
- [3] 김병덕, 송치성, 김경근, 김종현, 김용모, "대형 저압 증발식 조수기 개발", 한국박용기관학회지, 제18권, 제4호, pp. 355-366, 1994.
- [4] 송치성, 강신돌, 최준섭, "선박용 조수장치", 한국박용기관학회지, 제17권, 제3호, pp.137-147, 1993.
- [5] Schroyer, J. A., "Understand the Basics of Steam Injecting Heating", Chemical Engineering progress, May, 1997.
- [6] Deberne, N., "A Model for calculation of steam injector performance", Int. J. Multiphase flow, Vol.25, No.5, 1999.
- [7] Davis, J., Yadigaroglu, G., "Direct Contact Condensation in Hiemenz flow boundary layers", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.47, pp.1863-1875, 2004.
- [8] 이수관, 배성효, 김무환, "미세노즐을 통해 수직 분사된 수증기의 직접접촉응축 영역도", 대한기계학회 추계학술대회논문집, 2004.
- [9] White, F. M., "Fluid Mechanics," Int. Ed., pp. 399-425, 2003.

저 자 소 개



홍철현(洪徹弦)

1970년 8월 12일생, 1997년 부산대학교 기계공학과 졸업(공학사), 1999년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 1999년~2000년 대우정밀(주), 2004년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 2000년~2006년 부산대학교 기계설계전산화인력양성센터, 2006년~현재 부산대학교 기계공학부 NURI BEAM 교수



이억수(李億守)

1964년 3월생, 1989년 부산대학교 기계설계공학과 졸업(공학사), 1992년 부산대학교 대학원 기계설계공학과 졸업(공학석사), 1999년 동대학원 졸업(공학박사), 현재 부산대학교 기계공학부 NURI BEAM 교수