

콤팩트한 소형 담수화장치의 열설계에 관한 연구

최 현 규* · 김 경 근**

A Study on the Thermal Design of the Compact Type Small Fresh Water Generator

Hyun-Kue Choi · Kyung-Kun Kim

Abstract

In Korea, accelerated industry development and urbanization during the last three decades have led serious water pollution problems in many parts of the nation. Especially, in region of west and south coast have low fresh water in the dry season of spring and summer. In the place isolated from land, it is important to secure the fresh water for drinking and general service. The poor process water of marine products has bad effect to island inhabitants. Fresh water generator will be necessary to produce fresh water from seawater for the life style and income of island inhabitants. Fresh water generator use the heat source of non-operating boiler in the season of spring and summer and that use low pressure evaporate method for 1 ton per day capacity fresh water and generated a little salinity (salinity content below 10ppm) The results obtained from this study are as follows.

The water quantities generated from experimental evaporator showed good coincidence with the calculated values.

Fresh water generator product maximum 1.38ton/day fresh water at pressure 40mm Hg abs. and temperature 80°C

* 한국해양대학교 기관공학과 석사과정 열유체 전공

** 한국해양대학교 기관공학과 교수

1. 서 론

우리 나라는 산업의 급격한 발달과 생활환경의 개선으로 공업용수와 생활용수의 부족을 많이 겪고 있다. 특히 많은 섬이 산재된 우리 나라의 서·남해안 도서지방의 경우 봄·여름철의 갈수기에는 식수 및 생활용수의 부족현상이 극심하고, 수산물의 가공용수도 부족하여 어민의 소득에도 상당한 악영향을 미치고 있다. 환경부의 조사에 의하면 앞으로 2001년에는 전국적으로 물의 절대량이 부족한 사태가 올 것을 우려하고 있으며 극심한 식수난을 겪고 있는 도서지역에 대해 바닷물을 수도물로 정수하는 해수 담수화 장비도입을 추진 중에 있다고 발표했다. 따라서 도서지방의 주민의 소득향상과 생활환경개선을 위해 청수를 염가로 제조할 수 있는 청수 제조장치의 개발이 요구된다. 본 연구의 소형 담수화 장치는 도서지방의 각 가정에 설치되어 봄·여름철에는 거의 사용하지 않는 가정 난방용 보일러의 열원을 사용하는 저압증발식 담수화장치로서, 해수를 진공 증발시킨 후 이를 응축시켜 저염도(염분농도 10ppm이하)의 청수 제조가 가능한 용량 1ton/day의 소형 담수화장치이다. 본 연구에서는 증발법으로 기존에 설치되어 있는 가정용 보일러의 열원을 사용하여 해수를 담수화 시키는 담수화 장치의 개발을 위해 핵심부분인 증발기와 응축기의 열설계에 목적을 두고 있다.

2. 주요부의 열전달 해석

2.1 응축기의 열전달 해석

응축기 전열관의 전열해석을 위하여 우선 원통형 좌표계에 대한 열전도방정식이 결정되어야 하며, 이로부터 전열관벽 내외측의 온도차에 의한 전열량을 구할 수 있다. 증공원통형관을 생각해보자. 반경방향으로만 열전달이 존재하고 내부 발열이 없는 정상상태 조건하에서 원통좌표계 열전도방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(kr \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (1)$$

반경방향 r 되는 곳의 원통표면을 통과해서 전도되는 열전달량 q_r 은

$$q_r = -kA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi r l) \frac{dT}{dr} \quad (2)$$

식(2)을 식(1)에 대입하면 반경방향으로의 전열량을 구할 수가 있다.

$$q_r = 2\pi kl \frac{(T_1 - T_2)}{\ln \frac{r_i}{r_o}} \quad (3)$$

증발기에서 증발된 증기는 증기유로를 통해 상승하여 응축기의 냉각전열관 외측에서 응축된다. 이러한 응축열전달 현상에는 응축이 전열표면에서 물방울 상태로 일어나는 적상응축과(dropwise condensation)과 막상태로 응축되어 전열관을 흘러내리는 막응축(film condensation)이 있다. 이와 같이 응축의 형태에 따라 열전달계수에는 현저한 차이가 존재하며, 같은 막응축 상태에서도 막의 흐름상태가 층류 혹은 난류인가에 따라서 또 다르다. 증기측 평판표면의 국부열전달계수는,

$$h_x = \left[\frac{g \rho_l^2 h_{fg} k_l^3}{4 \mu_l (T_v - T_w) x} \right]^{1/4} \quad (4)$$

평판의 길이 $0 \leq x \leq L$ 에 대한 평균열전달계수는,

$$h_m = \frac{1}{L} \int_0^L h_x dx = \frac{4}{3} h_x \Big|_{x=L} = 0.943 \left[\frac{g \rho_l^2 h_{fg} k_l^3}{\mu_l (T_v - T_w) L} \right]^{1/4} \quad (5)$$

수직관군의 경우 관 외측에서 단일 성분의 기체가 응축하는 경우에 $Re = \frac{4\Gamma}{\mu_l} \leq 1,800$ 의 범위에서 Nusselt의 이론식을 기초로 층류일 경우의 응축경막 전열의 실험식을 발표하였으며, 본 논문에서는 이를 참고하였다.

응축기의 전열관내에는 냉각수가 난류상태로 유동을 하며, 이로 인하여 전열관 내면에서 냉각수로의 강제대류에 의한 전열현상이 발생한다. 현재까지 단상류의 난류흐름에 기인하는 국소열전달계수에 관한 실험식은 여러 가지가 발표되었으며, 다음과 같은 Dittus-Boelter식이 실험결과와 잘 일치함이 밝혀져 있으며, 본 논문에서는 이 실험식을 채택하였다.

$$Nu = 0.023 (Re_l)^{0.8} (Pr_l)^n \quad (6)$$

포화증기에서 응축기 전열관내를 흐르는 냉각수로의 전열은 다음과 같은 과정을 거친다.

- (1) 포화증기로부터 전열관 외면으로 응축열전달에 의한 전열
- (2) 전열관 외면에서 내면으로 전도에 의한 전열

(3) 전열관 내면에서 냉각수로 난류열전달에 의한 전열

응축기의 전열관을 설계하기 위한 전열관 미소구간내의 열평형 및 관내유체의 온도 변화는 전열관 외측 포화증기의 평균온도를 T_s , 관외면의 온도를 T_1 , 관내면의 온도를 T_2 , 그리고 관내유체의 평균온도를 T_i 라고 하면 미소길이 전열관 dx 를 통한 미소유입열량 dq_r 을 구할 수 있고 이로부터 응축기의 열관류율을 계산해 낼 수 있으며, 이를 위해서는 우선 위에서 언급한 전열과정들에 의한 미소전열량 dq_r 을 구해야 한다. 응축열전달에 의한 미소전열량 식(3), 전열관벽을 통해 전도되어지는 미소전열량 식(5), 관내면에서 냉각수로의 난류열전달에 의한 미소전열량 식(6), 정상상태 조건하에서 표현된 미소전열량 dq_r 은 모두 같은 값이며, 상식들을 더함으로써 포화증기의 평균온도와 냉각수평균 온도와의 차, 즉 미소길이 전열구간내의 전체 온도차로써 미소전열량 dq_r 을 표현할 수 있다. dq_r 은 다음과 같이 표시된다.

$$dq_r = \frac{2\pi r_o dx (T_s - T_i)}{\frac{1}{h_{co}} + \frac{r_o}{k} \ln \frac{r_i}{r_o} + \frac{1}{h_{tr}} \frac{r_o}{r_i}} \quad (7)$$

상식의 분모항은 단위면적, 단위시간당 단위열량이 전달되기 위해서 유지되어야 하는 온도차, 즉 열저항을 나타내며, 이의 역수는 열관류율로서 단위면적당, 단위시간당 단위온도차에 대해서 전달되는 열량을 의미한다. 이를 식으로 나타내면 열저항 R 과 열관류율 U 는 다음과 같다.

$$R = \frac{1}{h_{co}} + \frac{r_o}{k} \ln \frac{r_i}{r_o} + \frac{1}{h_{tr}} \frac{r_o}{r_i} \quad (8)$$

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{h_{co}} + \frac{r_o}{k} \ln \frac{r_i}{r_o} + \frac{1}{h_{tr}} \frac{r_o}{r_i}} \quad (9)$$

따라서 식(7)은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} dq_r &= \frac{2\pi r_o dx (T_s - T_i)}{R} \\ &= 2\pi r_o dx U (T_s - T_i) \end{aligned} \quad (10)$$

2.2 증발기의 열전달 해석

증발기 전열관내의 전열과정은 다음의 과정을 통하여 해수에 전달되어진다.

- (1) 보일러에서 가열된 온수로부터 전열관 내면으로의 난류열전달에 의한 전열
- (2) 전열관 내면에서 외면으로의 전도에 의한 전열
- (3) 전열관 외면에서 증발기내의 해수로 비등열전달에 의한 전열

위의 설명에서 알 수 있듯이 전열관의 열전달 과정이 앞절에서 기술한 바와 다른 점은 (3)항인 비등열전달에 관한 사항이다. 비등열전달이란 전열관의 표면에서 포화상태의 액체가 비등을 일으키고, 발생된 기포에 의해 주위액체로 전열되는 현상을 말하며, 비등의 조건에 대해서 Rohsenow는 표면거칠기 및 재질에 관한 체계적인 실험을 통해 다음과 같은 실험식을 제시하고 있으며, 본 논문에서는 이를 채택하였다.

$$\frac{C_{pl} \Delta T_s}{h_{fg}} = C_{sf} \left[\frac{q}{h_{fg} \mu_l} \sqrt{\frac{\sigma_l}{(\rho_l - \rho_v) g}} \right]^{0.33} Pr_l^n \quad (11)$$

3. 실험장치

저압 증발방식 담수화장치는 해수를 60~80℃의 보일러 온수로 가열하면서 진공상태에서 증발시키기 위한 진공가열 증발기, 발생된 저압증기를 응축시키기 위한 응축기, 응축기내를 고진공으로 유지시키고 증발기내 증발 후 잔류 해수를 제거하기 위한 복합형 이젝터, 이젝터 구동용 해수펌프, 해수의 액적동반을 효과적으로 막기 위한 데미스터 등으로 구성된다. Fig. 1에 전체 시스템의 구성도를 나타내었다. 증발기의 열설계 기준은 1ton/day이고, 전열관 내측에 온도 80℃를 기준으로 보일러 온수의 열원을 해수에 전달하는 열교환기로 구성되어있다.

해수는 구동수 펌프를 통해 응축기를 거쳐 대부분 이젝터 구동수로 사용되고 일부가 증발기로 공급되어지며, 보일러 온수로부터 열량을 공급받은 해수가 감압증발한다. 포화온도 이상으로 해수가 열량을 공급받게 되면 해수는 증발기에서 증발을 일으키게 되며, 증발기 상부면에는 증발에 의한 기포발생시에 액적의 발생으로 인하여 해수의 캐리오버(carry over)에 대한 대책으로 증발기로부터 증발된 증기가 증기 유로를 거쳐 응축기로 이동되는 증기 유로에 데미스터를 설치하였다. 응축기의 열설계는 증발기에서 발생된 증기를 응축시키기 위한 것으로서 Nusselt의 막응축이론을 적용하였으며, 냉각수 온도는 25℃를 가정하여 설계하였다. 냉각수의 열교환 효율을 높이기 위하여 냉각 유체가 4-Pass되도록 설계하였다고, 응축기에서 응축된 물은 응축기 하부에 직접 연결된

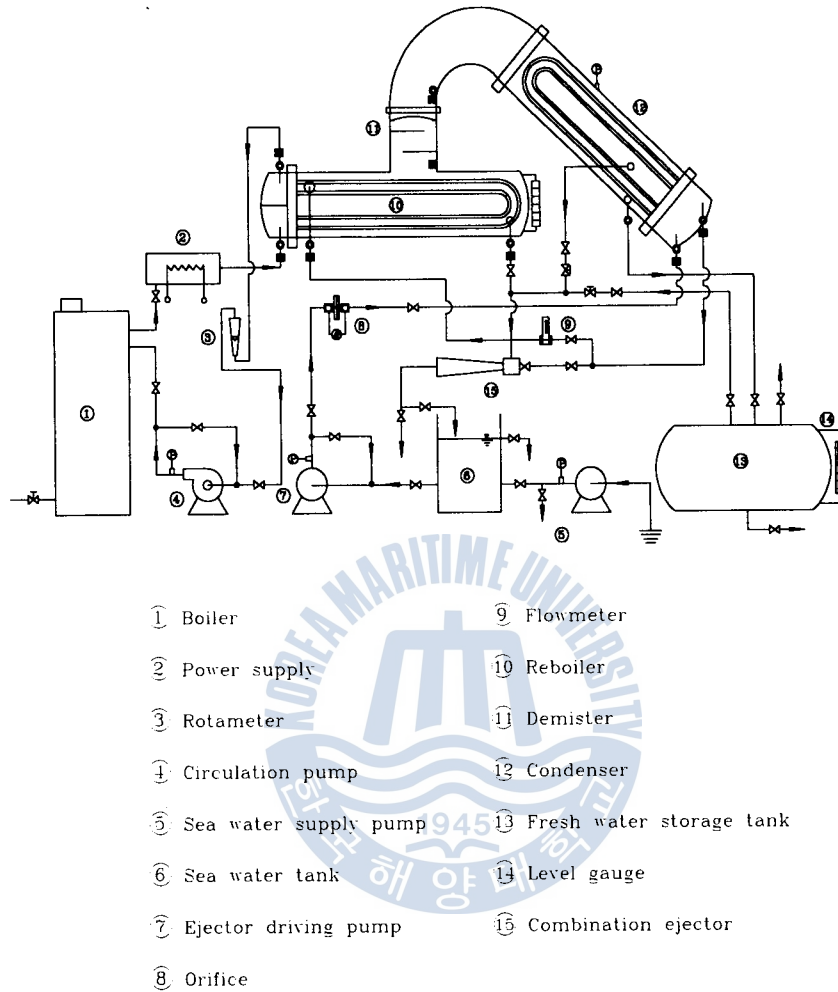


Fig. 1 Schematic diagram of fresh water generator

청수 저장탱크에 저장되도록 고려하였다. 가열원 공급장치는 용량 50,000kcal/hr의 가정용 온수 보일러를 사용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

증발기에서 연구개발의 목표인 하루에 1톤의 담수를 생산하는데 필요한 열량은, 증발기에 유입하는 해수가 보유하는 현열과 증발기의 열원으로 사용하는 보일러 온수가 보유하는 열량이다. 연구 개발하고자 하는 담수화장치의 조수량을 G_f ton/day라고 하

면, 증발기에 공급하여야 할 총열량 Q 는 다음 식과 같다.

$$Q = \frac{1000}{24} G_f h_{fg} \quad (12)$$

증발기에서 공급하는 열량은 보일러 온수의 유량을 G kg/kr, 온수의 입구온도를 T_i , 출구온도를 T_o , 정압비열을 C_p kcal/kg°C 라고 하면, 다음 식과 같다.

$$Q = G C_p (T_i - T_o) \quad (13)$$

Fig. 2은 담수화 장치의 실험을 통해 증발기에서 식(13)에 의해 계산한 조수량과 실제 생산된 조수량을 비교하였다. 0.2~1.0ton/day의 조수량에서 실험치와 계산치가 잘 일치함을 보여주고 있으며, 1ton/day이상에서 계산치보다 실험치가 높게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 3은 응축기에서 계산한 조수량과 담수화 장치의 실험을 통해 생산되어진 조수량을 비교하였으며 그림에서 알 수 있는 바와 같이 0.2~0.6ton/day의 범위에서 실험치와 계산치가 잘 일치하고 있으며 0.6ton/day이상에서 실험치가 계산치보다 높게 나타나고 있음을 나타내고 있다.

4.1 진공도에 따른 영향

조수기의 성능실험은 작동압력인 40~100mmHg abs.일 경우 압력 20mmHg abs.간격으로 점차 증가하면서 실험을 수행하였고, 보일러 온수온도는 65~80°C에 대해서 온수온도를 변화시켜 가면서 수행하였다. 조수량은 보일러 온수 유량 G 와 온수입구온도 T_i , 온수출구온도 T_o , 정압비열 C_p 에 의해 공급되는 열량 Q 와 응축량을 dm , 증발잠열을 h_{fg} 라고 하였을 때 단위시간당 응축량 $dm = \frac{Q}{h_{fg}}$ 으로 계산되어진다. 보일러 온수의 일정온도에서 장치내 압력이 낮을수록 포화온도가 낮아지며, 전열관 내측의 온수온도와 외측의 해수온도와의 온도차가 커지게 된다.

따라서 전열관 내측에서 외측으로 전달되는 열량이 증가함에 따라 증발잠열을 포함한 수증기의 량이 증가하게 되고 생산되는 조수량이 증가하게 된다. 실험결과와 계산결과가 대체로 일치하고 있으며, 장치내부압력 40mmHg abs. 온수온도 65°C에서 0.6ton/day를 생산하였다. 온수온도 80°C에 대해서 장치내부압력이 40mmHg abs.일 때 최고 1.38ton/day 물의 생산이 가능하였다.

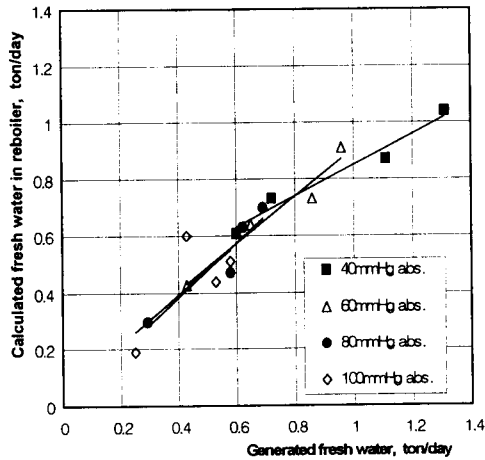


Fig. 2 Compare generated fresh water with the calculated in reboiler

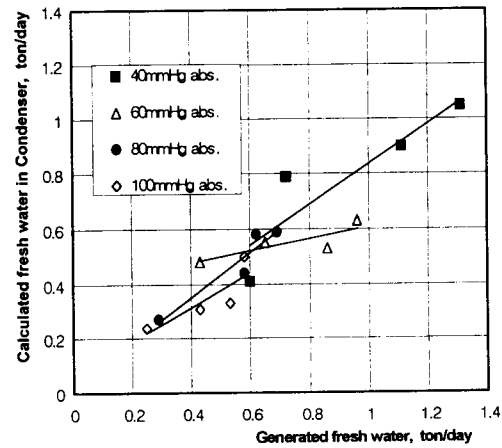


Fig. 3 Compare generated fresh water with the calculated in condenser

4.2 가열원 온도에 따른 영향

가열원 온수온도에 따른 영향을 고려하면 장치내 압력 40mmHg abs.에서 보일러 온수온도 65~80℃의 범위에 대하여 생산된 조수량변화를 나타낸 그래프이다. 실선으로 표시한 데이터는 실제 실험을 통해 생산된 조수량이며, 점선으로 표현된 데이터는 계산을 통해 나타낸 조수량을 표시하고 있다. 조수량은 온수온도가 올라갈수록 증가하고 있으며, 40mmHg abs.에 해당하는 포화온도 34℃에서 보일러 온수온도가 증가할수록 전열량이 증가하여 증발잠열을 포함한 수증기의 양이 증가하면서 생산되는 조수량이 증가하였다. 온수온도 65~70℃에 대해 계산한 조수량과 생산된 조수량이 대체로 일치하고 있으며 70℃이상에서 생산된 조수량이 계산된 조수량보다 증가하고 있는 경향을 보이고 있다. 또한 온수온도 75℃이상에서 1ton/day이상의 물이 생산되며 온수온도 80℃에서 최고 1.38ton/day의 물이 생성되었다. Fig. 4는 증발기에서 계산한 조수량과 실제 생산된 조수량을 보일러 온수온도 전체 범위의 변화에 따라 나타낸 그래프로써 장치내 압력이 증가함에 따라 계산된 조수량과 생산된 조수량이 대체로 일치하고 있으며, 조수량의 기울기가 점차 완만하게 되어지는 경향을 보이고 있다. Fig. 5는 응축기에서 보일러 온수변화에 따른 조수량을 나타내고 있으며 증발기와 마찬가지로 압력이 증가함에 따라 계산값과 측정값이 대체로 일치하고 있다.

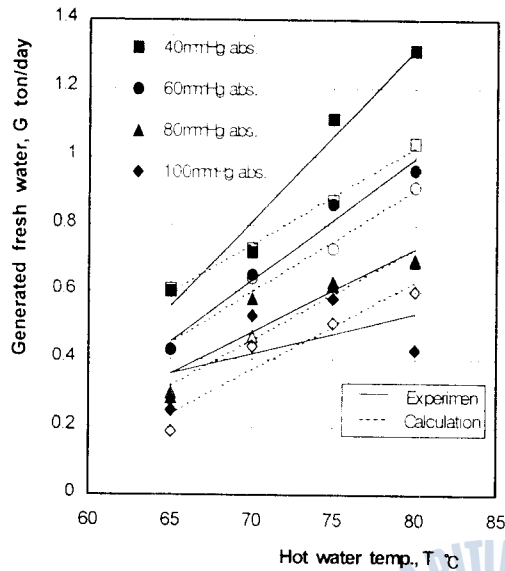


Fig. 4 Generated fresh water with the variation of hot water temperature in reboiler

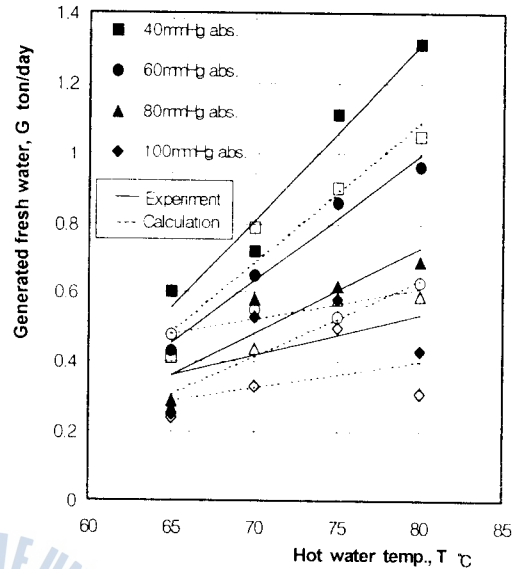


Fig. 5 Generated fresh water with the variation of hot water temperature in condenser

5. 결론

본 연구에서는 도서지방의 갈수기에 부족한 생활용수 및 가공용수를 보충하기 위하여 각 가정에 설치되어 있는 기존의 보일러에서 발생하는 온수를 열원을 이용하여, 하루에 1톤 정도를 생산할 수 있는 소형 담수화 장치의 개발을 목표로, 설계, 제작 및 성능실험결과를 수행하였는데, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 담수화 실험을 통해 증발기에서 계산한 조수량과 실제로 실험을 통하여 생산된 조수량을 비교한 결과, 조수량이 0.2~1ton/day의 범위내에서 실험치와 계산치가 비교적 잘 일치함을 알 수 있었으며, 1ton/day이상에서는 계산치보다 실험치가 약간 높게 나타남을 알 수 있었다.
- 2) 가열원 온수온도에 따른 영향을 고려하여 보일러 온수온도 65~80°C의 범위에 대하여 생산된 조수량 변화는 온수온도가 올라갈수록 전열량이 증가하여 증발잠열을 포함한 수증기의 량이 증가하면서 조수량이 증가하였으며, 온수온도 75°C이상에서 1ton/day이상 물의 생산이 가능함을 알 수 있었다.
- 3) 실험장치 내부의 진공도에 따른 조수량의 변화에 대하여 실험결과와 계산결과를 비

교한 결과, 실험결과와 계산결과가 대체로 잘 일치하고 있음을 알 수 있었고, 진공도가 높을수록 생산되는 조수량이 증가하였으며, 실험부 내부압력 40mmHg abs. 상태에서 온수온도 80℃일 때, 본 실험장치는 최고 1.38ton/day의 청수생산이 가능함을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) 김세영; “열교환기 설계핸드북”, 한미, pp.300~371, pp.433~485(1988)
- (2) “流體の熱物性値集”, 日本機械學會, pp.486~488(1983)
- (3) 吳炳周; “低壓蒸發式 造水機의 性能特性에 關한 研究”, 전남대학교 박사 학위논문집(1988)
- (4) 이종수, 강신들, 김경근; “각종 이젝터의 국산개발과 산업응용시스템에 관한 연구”, 한국박용기관학회지, 제14권, 제1호, pp.28~42 (1990)
- (5) 홍영표, 김경근, 오병주, 정한식, 김성규; “공업열역학”, 진영사, pp. 6~7(1997)
- (6) 최순호; “폐열을 이용한 비등형 선박용 조수기의 열설계에 관한 연구”, 한국해양대학교 대학원 논문집(1989)

