대한설비공학회 2006하계학술발표대회 논문집 pp.663~668

06-S-106

2중효용 담수장치의 가열열원과 공급수 온도에 의한 작동 상태 변화에 관한 연구

최 성 욱*, 박 종 진*, 정 형 호**†

*한국해양대학교 대학원, **한국해양대학교 기계정보공학부

A Study on the Impact of Inlet Temperatures of Heating Water and Feed Water on Operating Conditions of 2 Effect Desalination System

*Graduate School, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

*School of Mechanical & Information Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

ABSTRACT: In the present paper, a single stage fresh water generator was modified and extended to 2 effect desalination system. The inlet temperatures of hot water and feed water were selected as experiment parameters to get operating conditions and fresh water generating rates. The impacts of these parameters on operating conditions and fresh water generating rates were described in detail.

Key words: 2 Effect Desalination System(2중효용담수장치), Operating condition(작동조건)

기 호 설 명

m : 질량유량(kg/h)
Q : 열전달량(kcal/hr)
ΔT_{ml} : 대수평균온도차(kcal/m^2·hr·℃)
T : 온도(℃)

하첨자

r : 기준 유체
i : 입구
o : 출구

1. 서 론

식수 또는 공업용수 등으로 사용되고 있는 담수는 부족해지고 있으며 또한 지역적으로 불균일하게 분포되어 있다. 세계인구의 약 50%에 달하는 개도국에서는 공업용수 수요량이 증가하고 있으며 전체적으로는 물 공급이 부족해지고 있다.[1] 특히 수자원 관리가 잘 되지 않는 도서지방이나 선박과 같이 물 공급을 받는데 제한된 환경에 있는 곳에서는 해수를 담수로 만드는 담수장치는 필수적이다. 그리고 화력 또는 원자력발전소의 약 20%는 바닷물을 담수로 만들어 보일러 급수로 이용되고 있다. 특히 건조한 지역인 중동국가에서 바다와 접하는 도시에서는 담수장치를 이용하여 해수를 담수로 만드는 것은 유일한 방법이다. 최근에는 물 부족에 관한 문제는 중동국가 외에도 전 세계적인 문제로 되고 있다.

중국에서의 물 부족 문제는 지역적인 가용할 수 있는 물의 불균일한 분포에 있다. 중국의 양쯔강을 중심으로 남방부에서는 물이 풍부하나 황하강을 중심으로 한 북방부에서는 물이 부족하다. 2002년 양쯔강에서 황하강으로 3개의 운하를 이용하여 물을 공급하는 계획(South-North water transfer project)이 진행되었는데 이 프로젝트에는 운하의 총연장길이가 1,000km 이상이고 총수량이 약 400억 m^{3}이상이 되었다. 소요되는 투자비용이 많이 들 뿐만 아니라 북경까지 물을 수송하는데 많은 비용이 소요된다. 또한 양쯔

†Corresponding author
Tel: +82-51-410-4362; fax:+82-51-405-4790
E-mail address : junghh@mail.hhu.ac.kr

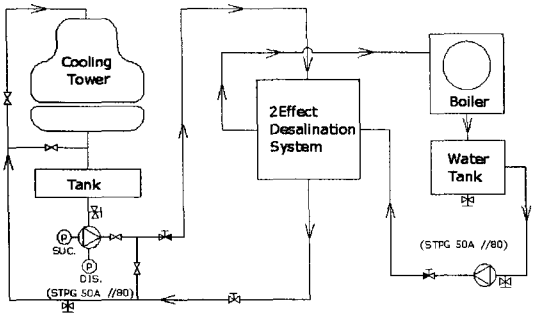

Fig. 1 P&ID of experiment apparatus and related facilities

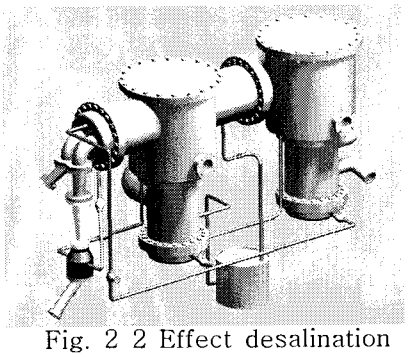

Fig. 2 2 Effect desalination experiment apparatus

강에서 사용할 수 있는 물이 충분하지 못하고, 이 프로젝트가 환경에 미치는 영향은 예측하기가 어렵다. 이 반면 중국에서는 바다와 접하는 해안길이가 18,000km 해수 면적 3,000,000km^{2}에 충분한 해수가 있기 때문에 해수를 담수화 시키는 방법이 그 대안으로 인식하고 있으며 이에 대한 연구가 진행되고 있다.(2)

미국에서도 전 세계적으로 담수와 생수의 수요량이 공급량을 계속 초과하고 있고 가용할 수 있는 자원이 한정되고 있다. 물 부족 문제를 해결할 수 있는 방법은 전 세계적으로 연구 인력를 코오디네이션하는 것이라고 보고하였으며, The Desalination and Water Purification Road Map을 작성하여 미국이 당면하고 있는 물 공급문제를 2020년까지 단기과제와 중장기 과제로 나누어 적용대상에 대한 기술 정리하였다. 케이스 스터디와 기술 현황 파악하여 수요들을 정하고 각 수요에 목표와 목표치를 정량하였다. 그리고 기술분야와 그 연구 분야를 결정하였다. 그리고 궁극적으로는 R&D를 통한 물 부족문제를 해결할 수 있다고 보고하였다.(3)

해수를 담수로 만드는 방법은 감압증발방법인 다단후레쉬방법과 다중효용방법이 있으며 역삼투압현상을 이용한 방법(RO방법)이 있다. 그리고 현재 실험실에서 연구되어 지고 있는 electro-dialysis(ED) 방법이 있다. 이 중 RO방법은 설치비는 적게 드나 운전비가 많이 들고 물 생성 단위 톤 당 비용이 다른 방법에 비해 가장 적게 든다. MSF와 MED 방법을 비교하면 MED방법이 설치비나 운전비가 적게 든다. MSF 방법에는 탈기기 등 물을 전처리하는 장치가 필요한 반면 MED방법에는 이러한 장치가 필요없거나 장치가 작아도 되기 때문이다. 하지만 이들 방법은 그 나름대로의 장점이 있어 개별적으로 적용되고 있거나 RO방법과 감압증발방식(MED 또는 MSF)을 같이 적용하여 생성된 물을 혼합하여 사용하는 방법이 있으며 전기생산과 담수생산을 동시에 하는 하이브리드 방법이 적용되고 있다.(4)

본 연구에서 적용한 방법은 감압증발방법 중 2중효용담수방식이다. 다중효용담수방법은 다단후레쉬방법보다 늦게 적용되었다. 최근 적용되는 사례가 많아지고 있으며 열효율적인 면에서는 다단후레쉬방법보다 월등히 좋다고 보고되어 있다.(5) 그리고 태양열 지열 등 재생 가능한 에너지를 열원으로 사용할 수 있다는 장점이 있다. 기존에 다단후레쉬방법이 많이 적용되었는데 이는 적용실적이 많고 사용자의 보수적인 입장이 많이 작용되었기 때문이다.(6)

본 연구에서는 선박에서 사용되고 있는 1단 담수장치를 2중효용담수장치로 바꾸었다. 가열온수 온도 그리고 공급수 온도를 변화시키면서 담수 생성량과 2중효용담수장치 각 단의 작동상태를 파악하여 향후 설계 또는 시뮬레이션 프로그램 개발에 필요한 기본 데이터를 구하는 목적으로 연구를 수행하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치와 부대시설

실험에 필요한 부대설비는 온수를 공급하는 급탕용 온수보일러와 실험에서 사용한 물을 재사용하고 남은 열을 방출하는 냉각탑이다. 실험장치와 부대시설에 대한 PID는 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 2에는 본 실험에 사용된 실험 장치를 개략화하였다. 이 2중효용담수장치에 사용된 열교환기로는 1단하부에서 온수로 공급수를 증발시키는 수직형 증발기, 2단 하부에 있는 2중효용의 수직

형 증발응축기, 2단 상부에는 2단에서 증발한 증기를 응축시키고 공급되는 물을 예열시키는 수평형 응축기가 있다. 각단의 진공을 유지하고 물속에 포함된 불응축가스를 제거하기 위하여 물 에젝터를 이용하였다.

냉각탑 하부에 있는 펌프를 이용하여 물을 에젝터로 강제수송하면, 에젝터의 챔버는 진공이 유지된다. 이 챔버는 각단으로 배관이 연결되어 에젝터의 구동 유량과 압력으로 각 단의 진공을 유지할 수 있다. 에젝터를 통과한 물은 2단 상부에 있는 수평형 응축기로 유입되고 2단의 수직형의 증발응축기에서 증발된 수증기를 응축시키고 응축열은 공급수를 예열시킨다. 예열된 공급수의 대부분은 냉각탑으로 되돌아가며 그 일부분은 각단의 공급수로 유입된다. 공급수는 오리피스를 통해 감압된 상태에서 각 단으로 유입된다.

감압증발담수장치의 열원은 보일러에서 공급받도록 되어 있다. 보일러에서 가열된 온수는 1단 하부에 있는 수직형 증발기의 쉘로 유입된다. 튜브 측에는 진공으로 감압된 공급수가 흐르며 이 공급수는 쉘 측의 온수로부터 열을 받아 현열과 잠열 형태로 열을 받는다. 증발된 증기는 기체-액체를 분리하는 데미스터를 거쳐 2단 하부에 있는 수직형 증발응축기의 쉘 측으로 들어간다. 1단의 미증발된 공급수는 2단의 공급수와 튜브헤드에서 혼합되고 튜브로 유입된다. 2단 하부에 있는 수직형 증발 응축기의 쉘로 유입된 증기는 이보다 낮은 온도의 혼합액에 열을 전달하고 전량 응축된다. 혼합된 공급수는 증발 응축기의 튜브에서 증발하고 증발된 수증기는 2단 상부에 있는 수평형 응축기에서 응축된다. 최종 2 단에서 미증발된 공급수는 에젝터 챔버로 유입되어 냉각탑에서 공급되는 물과 혼합되어 다시 응축기로 들어간다.

2.2 실험방법

2중효용담수장치의 작동 조건과 담수량을 측정하기 위하여 T-type 열전대와 진공압력을 측정하기 위하여 0-10bar_{abs} 압력트랜스듀스를 계기압을 측정하기 위해서 1-10 bar_g 압력트랜스듀스를 사용하였다. 그리고 구동수의 유량과 온수 공급유량을 측정하기 위하여 터어빈형 유량계와 질량유량계를 사용하였다. 담수장치의 각 부분의 유량을 측정하기 위해서 0~100/min 순시와 적산유량을 동시에 측정할 수 있는 유량계를 사용하였다. T-type 열전대와 압력트랜스듀스는 각각 실험하기 전에 항온조와 dead weight tester로 검증하였다. 질량 유량계와 터빈 유량계는 상호 직렬로 연결하여 유량을 비교하였으며 순시와 적산을 동시에 측정할 수 있는 소형 유량계는 물을 자유 낙하시키고 낙하시킨 물의 무게를 측정하고 유량계에서 표시되는 값을 상호 비교 검증하였다. 검증이 끝난 계측기는 실험장치에 각 부위로 연결되는 배관에 장착하고 데이터획득장치로 연결하여 PC와 인터페이스하였다.

Table 1 Experiment conditions

Descriptions	Values
Flow rate of hot water(l/min)	95
Total feed rate(l/hr)	280
Feed rate of each stage(l/hr)	140
Temperature of ejector driving water(℃)	24, 26, 28, 30, 32
Temperature of hot water(℃)	69.1, 72.4, 73.5, 75.4, 78.1

본 실험에서는 2중효용담수장치의 작동을 확인하는 것이 주 목적이었고 온수공급온도와 공급수 온도 변화에 의한 담수량의 변화와 작동상태의 변화를 보기 위한 것이었다. 실험에서 선택한 실험파라메터와 실험조건을 Table 1에 표시하였다.

정상상태 조건은 공급수 유량과 온수의 입구온도 에젝터 공급수의 온도를 일정하게 유지시키고 각 부위에서 측정된 온도와 압력이 일정하게 유지되는 것으로 하였다. 정상상태를 확인한 뒤 데이터를 획득하는데 1시간 소요하였다. 2분에 한번씩 30회 모든 데이터를 PC에 저장하였으며, 저장된 압력과 온도는 검증을 통해 정한 식으로 보정하여 실험 데이터를 처리하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 공급온수 온도 변화 실험

Fig. 3은 에젝터 구동 온도를 28℃로 고정시키고 공급온수온도를 변화시키면서 생성된 담수량을 유량계 적산모드로 1시간 동안 측정한 결과이다. 온수입구온도가 증가할수록 생성된 담수량

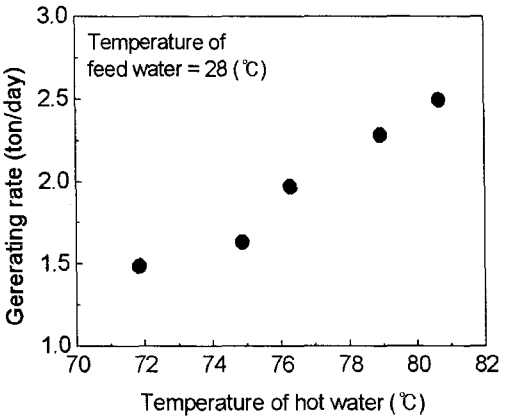

Fig. 3 The impact of hot water temperature on generating rates

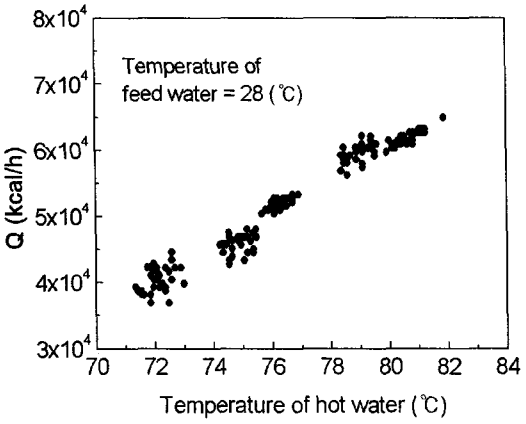

Fig. 4 The impact of hot water temperature on heat transfer rates

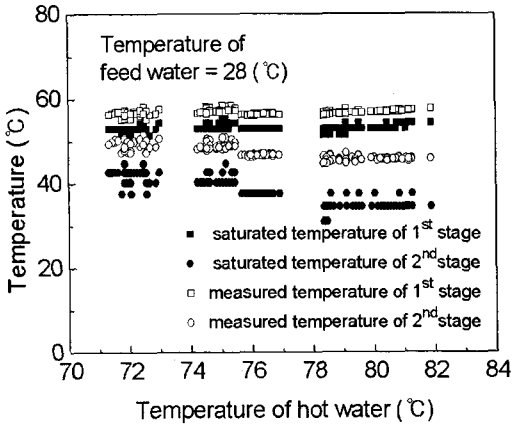

Fig. 5 The impact of hot water temperature on operating conditions

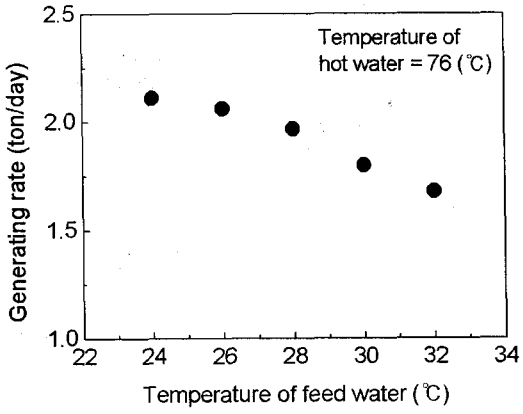

Fig. 6 The effect of feed water temperature on fresh water generating rates

은 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이는 온수온도가 증가하면 2중효용담수장치 Fig. 4에서와 같이 시스템으로 많은 열이 전달되고 증가된 열은 전체 공급수의 증발량을 많게 하여 2단상부의 응축기와 2단하부의 증발응축기에서 응축수량이 증가되었기 때문이다.

Fig. 5에는 1단과 2단에서 측정한 온도와 측정한 압력으로 스팀테이블에서 구한 포화온도를 비교하였다. 1단에서는 측정한 온도와 스팀테이블에서 구한 포화온도는 온수입구온도와는 무관하게 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 그리고 1단 쉘에서 측정온도가 포화온도보다 높게 나타나고 있다. 이는 1단에서 증발한 수증기는 증발관을 빠져나오면서 속도가 빨라지며 미증발된 공급수를 엔트레인한다. 미증발공급수를 수증기와 분리하기 위해 사용하는 데미스터가 온도와 압력 센서 하부에 있는데 이 데미스터에 의한 압력강하 때문이다. 그리고 1단 출구의 증기상태는 압력강하에 해당되는 온도인 약 3.7℃ 만큼 과열상태로 빠져나간다.

2단에서의 측정온도와 측정압력을 스팀테이블로 환산한 포화온도는 온수입구온도 변화에 따라 감소하는 경향을 보여주고 있다. 그리고 1단에서의 온도차 3.7℃와 비교하면 2단에서의 온도차는 온수온도가 72℃인 경우에는 6.5℃, 온수온도가 82℃인 경우 더 크게 12℃ 정도 크게 나타난다. 수증기와 액체를 분리하는 데미스터는 1단과 동일하며 1단 증발기와 2단 증발응축기에서 증발되는 수증기량은 같기 때문에 2단에서 데미스터의 압력강하에 의한 효과 3.7℃를 감한 온도차 2.8~8.3℃는 액체온도에 해당하는 포화압력이 쉘에서의 압력보다 높을 때 일어나는 플래싱에 의한 것이다.

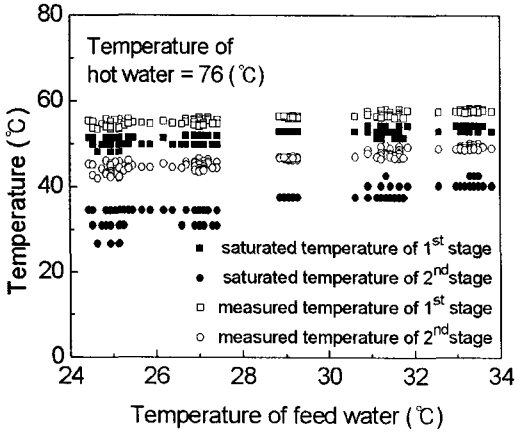

Fig. 7 The effect of feed water temperature on operating conditions

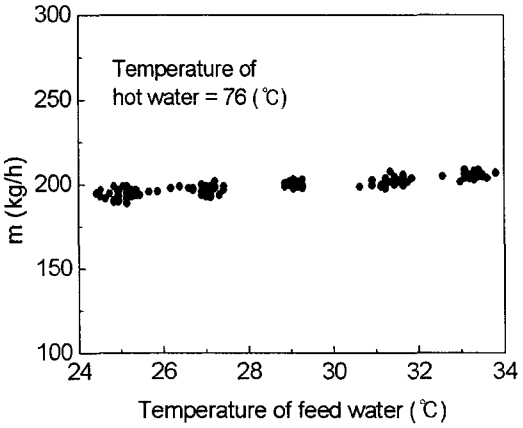

Fig. 8 The effect of tube side mass flow rates of 2nd stage evaporative condenser

3.2 공급수 온도 변화 실험

온수공급온도는 본 실험범위의 중간 값에 해당되는 76℃로 정하고 2중효용담수장치의 공급수 온도를 24℃에서 32℃까지 변화시키면서 행한 담수 생성량을 Fig. 6에 비교하였다. 이 그림에 표시된 것과 같이 담수생성량은 공급수온도가 증가함에 따라 감소하고 있다. 공급수 온도가 높아지면 1단 증발기에서 공급수와 온수와의 온도차가 적어진다. 즉 담수창치에 공급되는 열량이 적어져 담수생성량이 감소하기 때문이다.

공급수온도를 변화시켰을 때 담수장치의 작동조건 변화는 Fig. 7에 표시하였다. 1단 쉘에서의 측정온도와 측정압력을 스팀테이블로 환산한 포화온도의 변화는 3.1절에서 검토한 온수온도변화에 의한 작동조건의 변화(Fig. 5)와 같이 온도차는 약 3.7℃의 차이로 거의 일정하다. 그러나 공급수 온도가 증가함에 따라 미소하게 증가하는 경향을 보여주고 있다. 2단 쉘에서 측정한 온도와 측정한 압력을 스팀테이블에서 구한 포화온도도 공급수 온도에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 스팀테이블을 이용하여 측정압력에 대한 포화온도는 더 급하게 증가하고 있다. 그 온도차는 공급수온도 24.5℃에서 12℃ 그리고 공급수온도 34.8℃에서 5℃ 정도이다. 이 결과는 공급수온도 변화와는 정반대의 경향을 보여 주고 있다. 그리고 공급수온도가 낮은 경우 더욱 플래싱이 일어나고 있음을 보여주고 있다.

공급수 온도변화와 온수온도변화에 대한 반대현상을 구명하기 위하여 2단의 증발응축관으로 들어가는 질량유량을 검토하였다. 2단의 증발응축관의 튜브 측으로 유입되는 유량은 공급된 공급수와 1단에서 증발하지 않고 2단으로 공급된 양의 합이다. 2단 증발응축관으로 공급되는 질량유량이 공급수온도변화에 따른 효과는 Fig. 8에 나타내었다. 이 그림에서 보면 증발응축관의 튜브 측으로 유입되는 수량은 공급수온도의 변화에 미소하게 증가하지만 실험오차 범위 내에서 거의 일정하다. 즉 1단에서 증발된 양이 일정하다는 것을 의미한다.

공급수 온도 변화에 의한 1단 증발관에서 공급되는 열량은 감소하는데 2단 증발응축관의 튜브 측으로 공급되는 질량 유량이 일정한 값을 가진다는 것은 1단 증발관에는 현열가열대가 존재한다는 것을 의미한다. 그리고 공급수온도가 낮은 경우 현열가열대는 많다는 것이다. 담수장치에서 이 현열가열대는 담수장치에서 불필요한 영역이다.

3.3 열관류율

열관류율 계산에 필요한 대수평균온도차는 Renaudin, V. 등이 적용한 식을 동일하게 사용하였다. 한 유체에서 상변화가 일어나고 다른 유체의 입출구온도가 다른 경우에 적용된다. Renaudin, V. 등이 사용한 대수평균온도차는 식 (1)과 같다.

$$\Delta T_{ml} = \frac{T_i - T_o}{\ln \frac{T_i - T_b}{T_o - T_b}} \qquad (1)$$

1단 증발관과 2단의 증발응축관에서 실험에서 구한 열관류율을 실험의 경우에 따라 각각 Fig.

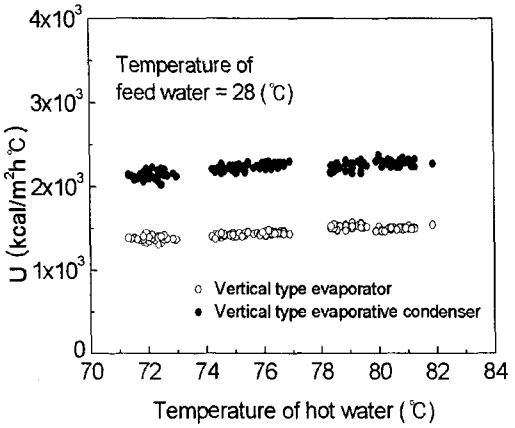

Fig. 9 Overall heat transfer coefficient in the case of constant hot water temperature

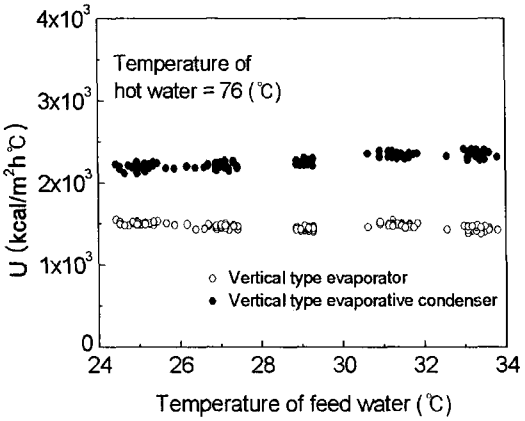

Fig. 10 Overall heat transfer coefficient in the case of constant feed water temperature

9와 Fig. 10에 나타내었다. 본 연구에서 실험한 일정 온수온도조건이나 일정 공급수온도 조건에서 1단 증발기에서는 열관류율의 거의 변화는 없으며, 2단의 증발응축기에서는 약간 변화하는 결과가 나왔다. 이 정도의 변화인 경우 열관류율은 거의 일정하다고 보아도 열교환기를 설계하거나 시뮬레이션 프로그램을 개발하는데 별 문제는 되지 않을 것으로 예측된다.

4. 결 론

본 연구에서는 1단의 담수장치를 2중효용담수장치로 바꾸고 온수공급온도와 공급수온도를 변화시키면서 실험하여 제대로 작동되고 있음을 확인하였다. 그리고 담수량은 일정공급수온도조건에서는 온수온도의 증가에 따라 담수량의 증가하고 일정온수온도조건에서는 공급수온도가 증가하면 담수량은 감소하는 것을 실험으로 정량화하였다. 열관류율은 2가지 경우 거의 일정한 값을 가지며 설계 또는 시뮬레이션 프로그램을 개발할 때 일정하다고 보아도 실험 오차 범위 내에서 허용할 수 있음을 보였다.

본 연구에서는 공급수 유량과 온수 유량을 일정하게 두었다. 향후 이 유량들을 변화시켜 실험을 계속하여 열관류율을 데이터베이스화 또는 수식화 할 예정이다.

후 기

본 연구를 수행하는데 2004-2005 BK사업, 2006 Nuri Beam과 학교시설과의 도움이 많았다.

참고문헌

1. El-Dessouky, H. T., Ettouney, H. M. and Al-Roumi, Y., 1999, Multi-Stage Desalination: Present and Future Outlook, Chemical Eng. J., Vol 73, pp. 173-190.
2. Zhang, L., Xie, L., Chen, H-L., Gao, C-J., 2005, Progress and Prospects of Seawater Desalination in China, Desalination Vol. 182, pp. 13-18.
3. Hinkebien T. E. and Price, M. K., 2005, Progress with the Desalination and Water Purification Technologies US Roadmap, Desalination, Vol. 182, pp. 19-28.
4. Hamed, O. A., 2005, Overview of Hybrid Desalination System Current Status and Future Prospects, Desalination Vol. 186, pp.207-214.
5. Ophir A. and Lokiec F., 2005, Advanced MED Process for Most Economical Sea Water Desalination, Desalination Vol. 182, pp. 187-198.
6. Park, I. S., Park, S. M. and Ha, J. S., 2005, Design and Application of Thermal Vapor Compressor for Multi-Effect Desalination Plant, Desalination Vol. 182, pp. 199-208.
7. Renaudin, V., Kafi, F., Alonso, D. and Andreoli, A., 2005, Performance of a three-effect plate desalination process, Desalination Vol. 182, pp. 165-173.