

## 열압축기를 채용한 다중효용 담수설비의 운전특성에 관한 연구(1보)

최두열† · 김창복\* · 송영호\*\* · 최순호\*\* · 정한식\*\*\* · 김필환\*\*\*

(원고접수일 : 2008년 7월 25일, 원고수정일 : 2008년 8월 1일, 심사완료일 : 2008년 8월 1일)

### A Study on the MED-TVC Operating Performance Characteristics of using the Thermo-Compressor

Du-Youl Choi† · Chang-Fu Jin\* · Young-Ho Song\*\* · Soon-Ho Choi\*\* ·  
Han-Shik Chung\*\*\* · Pil-Hwan Kim\*\*\*

**Abstract :** The core design technology for the multi-effect desalination plant using the thermo compressor (MED-TVC) was investigated by the performance test of multi effect desalination plant in this paper. The final G.O.R (gain of output ratio) of MED-TVC type desalination plant is strongly affected by the performance of thermo-vapor compressor. The present experiments for the desalinating capacity and G.O.R were obtained for the range of the motive steam pressure, 266.0, 250.0, 230.0 and 200.0 kPa. And as a practical problem, to investigate the influence of the sea water temperature to the G.O.R, the inlet steam temperature of the suction water vapor was changed in the range of 311.2~324.2 K in the present experiment. Through the experiments, the maximum value of G.O.R was 8.5 at the condition of the motive steam pressure, 136.0 kPa and the minimum value of G.O.R was 8.1 at the condition of the motive steam pressure, 266.0 kPa. And it was confirmed that the range of desalination capacity was 355.2~264.0 ton/day in the normal operation condition.

**Key words :** Multi effect desalination plant (MED, 다중효용 담수설비), Thermo compressor (열압축기), Gain of output ratio(성적계수, G.O.R), Thin film evaporation (박막 증발), Entrainment ratio (흡입유량비)

#### Nomenclature

Alphabetic	$C_p$ : Specific heat at constant pressure (J/kg.K)
A : Surface area ( $m^2$ )	D : Diameter (m)
	ER : Entrainment ratio

† 교신저자(경상대학교 대학원, E-mail: cdy@fte.kr Tel: 055) 640-3179)

\* 한국해양대학교, 기관시스템공학부

\*\* (주)DHP Engineering

\*\*\* 경상대학교 정밀기계공학과, 해양산업연구소

F : Force (N)  
 G.O.R: Gain of output ratio  
 h : Specific enthalpy (J/kg)  
 k : Turbulent kinetic energy ( $m^2/s^2$ )  
 M : Mach number  
 $\dot{m}$  : Mass flow rate (kg/s)  
 NXP : Nozzle exit position  
 P, p : Pressure (Pa, bar)  
 r : Radial distance (m)  
 T : Temperature (K)  
 t : Time (s)  
 V : Volume ( $m^3$ )  
 v : Velocity (m/s)

#### Greek Letters

$\alpha$  : Angle of converging duct ( $^\circ$ )  
 $\rho$  : Density ( $kg/m^3$ )  
 $\mu$  : Viscosity (kg/m.s)  
 $\varepsilon$  : Turbulence dissipation rate ( $m^2/s^3$ )

#### Subscripts

d : Discharge  
 EVA : Evaporator  
 m : Motive  
 p : Production  
 s : Suction

## 1. 서 론

담수설비(Desalination Plants)는 중동지역과 같이 물 부족 현상이 심각한 지역을 중심으로 1960년대 후반에 상업적 목적으로 도입되기 시작하였으며, 2000년 이후부터 중동지역의 개발붐에 따라 담수설비에 의한 담수생산이 급격하게 증가하고 있다. 세계의 담수생산량은 2005년 기준으로 10,350 개소의 생산설비에서  $4.7 \times 10^7 m^3/day$  정도의 담수를 생산하고 있으며, 2002년 이후 담수설비 증가에 따른 담수생산량은 매년  $3.0 \times 10^6 m^3/day$  정도씩 증가하고 있다<sup>[1]</sup>.

담수를 생산하는 방식에는 상변화를 동반하지 않는 역삼투막(Reverse Osmosis) 방식과 상변화를 이용하는 증발 방식이 널리 이용되고 있다. 증발방식에 의한 담수설비는 다음과 같이 분류된다<sup>[2]</sup>.

MSF : Multi Stage Flash Desalination

MED : Multi Effect Desalination

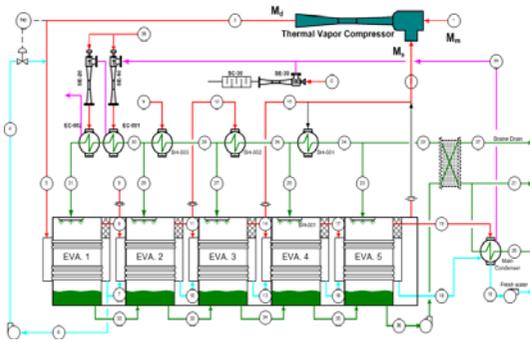
MED-TVC : MED vapor recirculation by TVC

MED-MVC : MED vapor recirculation by MVC

중동지역의 담수 생산량이 전 세계 담수 생산량의 55 % 이상을 차지하며, 이 중 증발방식에 의한 담수 생산량이 75 % 이상을 차지하고 있다. 2005년 이전에 설치된 증발방식의 담수설비는 MSF 방식에 의한 대용량 생산설비가 대부분을 차지하였으나, 최근에는 에너지 사용 효율을 높이기 위한 연구가 진행되면서 다중효용 담수 생산 방식이 자주 이용되고 있다.

특히 열압축기를 채용한 MED-TVC 방식의 담수설비는 대용량 담수생산설비에 적합하여, 리비아의 뱅가지(Banghazi), 자위와(Zawiwa), 아랍에미레이트의 사하라 등지에 설치되어 운전되고 있으며<sup>[4]</sup>, 최근 하루 생산량 65 MIGD(300,000 ton/day)급의 초대형 설비가 프랑스의 S사에 의하여 사우디아라비아의 마라픽(Marafiq)에 건설 중에 있다.

Fig.1은 실험장치 계통도로 주요 운전요소는 MED-TVC 방식 담수설비의 핵심적인 기계요소와 동일하게 구성되어 있다. 본 실험설비의 주요 구성장치는 브라인으로부터 물만을 증발시키기 위한 증발기(Evaporator), 증발된 증기와 브라인 액적을 분리시켜주기 위한 데미스터(Demister), 브라인을 증발기에 분사시켜 주기 위한 분사노즐(Spray nozzle), 증발실(Vacuum evaporating vessel), 진공압력으로 유지시켜주기 위한 진공장치(Vacuum system), 그리고 증발된 증기를 재 압축하여 증발열원으로 사용하기 위한 열압축기(Thermo compressor)로 구성되어 있다. Fig.2는 S사에 의하여 리비아의 사하라에 설치된 MED-TVC 담수생산 설비 전경사진이다.



- ① Thermo Compressor
- ② Steam ejector vacuum system
- ③ 1stage ~ 5 stage evaporator
- ④ Main condenser
- ⑤ Brain pump
- ⑥ Fresh water pump
- ⑦ Pre-heater
- ⑧ TEOO : Temperature gauge
- ⑨ PTOO : Pressure transducer

**Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus**

MED-TVC 방식의 담수설비의 성능계수는 식 (1)의 G.O.R (Gain of Output Ratio)에 의하여 평가된다.

$$G.O.R = \frac{m_p}{m_m} - 1 \approx \frac{n \times (m_m + m_s)}{m_m} - 1 \quad (1)$$

MED-TVC 방식 담수설비의 성능계수를 높이기 위해서는 식(1)의 우변에서 보는 바와 같이 증발기의 단수를 늘이거나 열압축기에 공급되는 증기 유량을 줄임으로서 운전성능을 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 MED-TVC 담수설비의 운전조건에 따른 증발부에서의 온도분포, 압력분포, 총 담수생산량 및 G.O.R 값에 대한 분석을 실시한다.

## 2. 성능시험

### 2.1 성능시험장치

본 연구에서는 350 ton/day용량의 열압축기를 설치하여 성능시험을 수행하였으며, 시스템의 진공 증발관(Vacuum vessel)과 전열관 내부를 진공압력으로 유지시키기 위하여 증기이젝터 진공장치(Steam ejector vacuum system)를 사용하였

다. 시스템의 구성은 담수생산량에 필요한 증기소모량을 최소화 시켜 시스템의 효율을 증가시키기 위한 저압 구동 고효율 열압축기(Thermo compressor), 브라인에서 순수한 증기만을 증발시키기 위한 증발기(Evaporator), 각 증발관에 브라인을 공급하기 위한 브라인 펌프(Brine pump), 생산된 청수를 배출시키기 위한 청수 펌프(Fresh water pump), 브라인의 공급온도를 조절하기 위한 히터(Brine heater) 그리고 증발 증기를 응축시키기 위한 응축기(Main condenser)로 구성되어 있다. 특히 증발기는 전열관의 내부에서는 가열 증기가 응축되고, 전열관 내부에서 공급된 에너지를 이용하여 전열관의 외부에 액적상태로 분무시켜 전열관 외부에 가능한 얇은 막을 형성시켜 전열효과를 최대한 상승시키는 박막 증발(Thin film evaporation) 방식을 채용하였다<sup>[3],[5],[6],[7]</sup>. 본 연구에서는 5중 효용의 증발기를 채용하였으며, 각 증발기에는 외경 25.0 mm, 두께 1.0 mm, 길이 3,500 mm, 전열관의 개수 700본으로 전열면적 200.0 m<sup>2</sup>의 증발기가 설치되었다. 각 증발기에는 10.0 m<sup>3</sup>/hr의 브라인이 공급되며, 이 중에서 약 30 % 정도는 증발된 후 데미스터(Demister)를 통과하여 다음 단의 전열관에서 응축된다. 최종 증발단인 5단 증발기에서 증발된 증기 중 최대 1,525.0 kg/hr의 증기는 열압축기(Thermo compressor)에 회수되고, 나머지는 진공 증발관의 상부에 설치된 외경 25.0



**Fig. 2 MED-TVC desalination plant. This photo is cited from the Sidem's catalogue[4].**

mm, 두께 1.0 mm, 길이 3,500 mm, 전열관의 개수 320본, 전열면적 90.0 m<sup>2</sup>의 주 응축기(Main condenser)에서 응축된다.

2.2 성능시험방법

MED-TVC형의 담수설비는 진공상태에서 운전되므로 먼저 바닷물을 응축기에 공급하고, 각 증발기에는 브라인(Brine)을 공급한다. 브라인이 정상적으로 공급/배출되면 시동용 증기이젝터 (Start-up ejector)를 이용하여 소정의 진공압력인, 24.0 kPa까지 증발관의 압력을 강하시킨 후 연속 운전용 증기 이젝터(Holding ejector)를 이용하여 정상 운전압력까지 진공압력을 강하시킨다.

진공 증발실의 압력이 정상운전압력인 8.0 kPa까지 낮아지면 열압축기에 구동증기를 서서히 공급하여 정상운전 상태까지 구동증기의 공급량을 단계적으로 증가시킨다. 유동배관 및 각 증발실에 설치된 온도계, 압력계 및 유량계가 정상상태를 유지하면서 각부의 물성치를 5분 간격으로 60분간 측정하였다. 증발기 각단에서의 압력, 온도 및 유량은 운전실(Control room)에 설치된 데이터 저장장치(Data logger)에 기록하였다.

2.3 실험조건

MED-TVC형식의 담수설비에서 중요한 평가지표는 식(1)에서 나타난 바와 같이 담수 1톤을 생산하는데 사용되는 구동증기에 반비례한다. 따라서 본 연구에서는 열압축기에 공급되는 구동증기의 유량을 1,615.0 kg/hr(구동압력 266.0 kPa)에서 1,065.0 kg/hr(증기압력 200.0 kPa)로 변화시키면서 이에 따른 총 담수생산량과 G.O.R에 대한 평가를 실시하였다.

또한 계절변화에 따른 운전조건의 변화를 예측하기 위하여 구동증기 압력은 266.0 kPa로 일정하게 유지하면서 5단 증발기에서 흡입되는 증기의 온도를 311.2 K(포화압력 6.0 kPa)에서 324.2 K(포화압력 13.0 kPa)까지 조절하면서 이에 따른 총 담수생산량과 G.O.R에 대한 비교평가를 실시하였다.

3. 성능시험 결과 및 고찰

3.1 증기유량의 변화에 따른 영향

Fig.3은 열압축기에 흡입되는 증기 온도를 314.6 K (포화압력 8.0 kPa)로 일정하게 유지하면서 MED-TVC 담수설비를 운전하는 경우 각 증발기 내부의 온도분포를 보여주고 있다. Fig.3에서 보는 바와 같이 구동증기 압력이 266.0 kPa인 경우 1단증발기와 5단 증발기의 온도차는 15.7 K이며, 200.0 kPa인 경우는 15.0 K로 약 0.7 K 정도의 온도 차이를 보이고 있다. 하단의 점선은 구동증기 유량이 최소인 상태로 구동증기 압력은

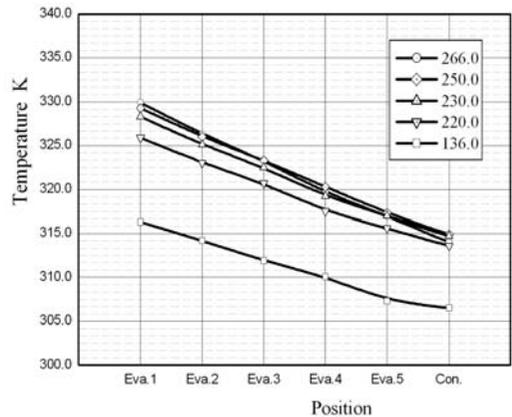


Fig. 3 Temperature distribution of evaporator according to the motive steam pressure

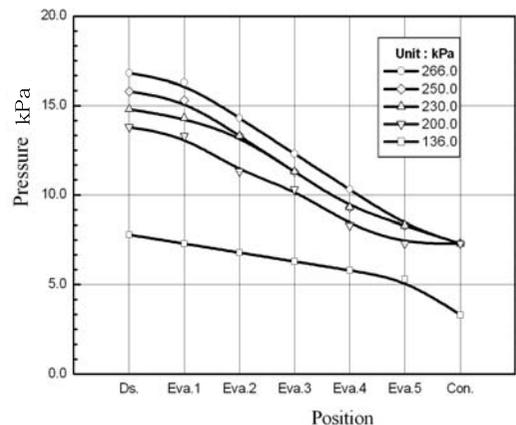


Fig. 4 Pressure distribution of evaporator according to the motive steam pressure

136.0 kPa, 5단 증발기의 흡입압력은 3.3 kPa (증기온도 306.4 K), 1단 증발기의 공급압력은 8.0 kPa (증기온도 327.5 K)이며, 1단증발기와 5단 증발기의 온도차는 9.8 K로 구동증기 압력이 266.0 kPa인 경우의 설계 온도차의 62.4 %임을 알 수 있다.

Fig.4는 증발기 내부의 압력분포로서 구동증기의 압력이 증가함에 따라서 1단 증발기의 공급증기 압력이 증가하고 있으며, 후단 증발기에서의 압력차는 점점 줄어드는 것을 알 수 있다.

Fig.5는 구동증기 압력에 따른 총 담수생산량 및 G.O.R변화를 보여주고 있다. 열압축기의 구동증기압력이 266.0 kPa인 경우 총 담수생산량은 14.8 ton/hr (355.2 ton/day), 200.0 kPa인 경우 총 담수생산량은 11.0 ton/hr (264.0 ton/day), 최소 운전조건인 136.0 kPa에서 총 담수생산량은 7.45 ton/hr (178.8 ton/day)이다.

또한 G.O.R는 열압축기 구동증기의 공급압력에 따라 다소 차이를 보이고 있으며, 열압축기 구동증기압력이 136.0 kPa인 경우 최대치인 8.5, 구동증기압력이 266.0 kPa인 경우 최소치인 8.1으로 나타났다.

3.2 흡입증기의 온도변화에 따른 영향

Fig. 6은 열압축기에 공급되는 구동증기의 압력을 266.0 kPa (포화온도 403.1 K)로 일정하게 유지시키고, 흡입증기의 온도를 311.2 K (포화압력 6.0 kPa) 에서 324.2 K (포화압력 13.0 kPa) 까지 변경하는 경우 증발기 내부에서의 온도분포를 보여주고 있다.

Fig.6에서 보는 바와 같이 설계온도인 314.0 K (포화압력 8.0 kPa)에서 1단증발기와 5단 증발기의 온도차는 15.9 K로 최대치를 보이고, 이후에는 온도차이가 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 열압축기의 압축 성능특성 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.

즉, Fig.7의 증기의 포화온도-포화압력 관계 곡선에서 보는 바와 같이 열압축기의 흡입증기의 온도에 해당되는 310.0 K ~ 320.0 K 부근의 포화압력 곡선 기울기와 열압축기의 압력토출 온도에

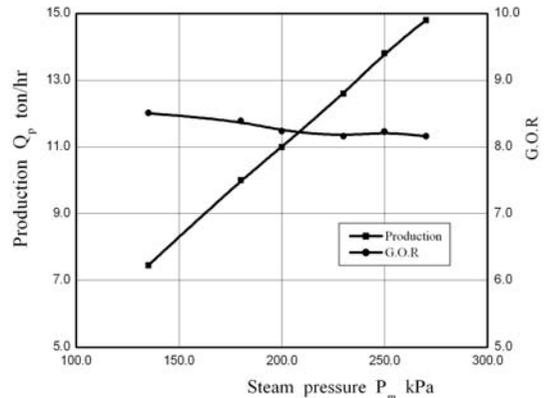


Fig. 5 Total product and G.O.R according to the motive steam pressure

해당되는 330.0 K ~ 340.0 K 부근의 포화압력 곡선의 기울기에서는 상당한 차이를 보이고 있으며, 열압축기의 출구부의 토출압력 상승분이 흡입 온도 상승분에 따른 압력상승 효과보다 크게 나타나는 물리적인 현상으로 판단된다.

Fig.8은 증발기의 각부에서의 압력분포이며, 흡입증기의 온도에 따라 압력이 일정간격을 두고 상승하고 있으며, 앞에서 설명한 흡입온도 상승분에 따른 흡입압력 상승분은 6.0 kPa, 열압축기의 토출압력 상승분은 8.0 kPa로 양압력 차이는 2.0 kPa이며, Fig.7에서 설명한 물리적 현상을 보여 주고 있다.

Fig.9는 흡입증기의 온도에 따른 총 담수생산량과 MED-TVC 담수설비의 G.O.R로 설계압력부근까지는 흡입증기의 온도가 상승함에 따라 총 담수 생산량이 증가하고 있다. 하지만 설계온도 314.0 K (포화압력 8.0 kPa)에서 총 담수생산량은 14.8 ton/hr (355.2 ton/day)로 최대치를 보인 후, 흡입증기의 온도가 증가하게 되면 점차 담수생산량이 감소하여, 324.2 K (포화압력 13.0 kPa)에서는 총 담수생산량은 11.0 ton/hr (264.0 ton/day)로 설계치에 비하여 25.7 % 이상 감소하였음을 알 수 있다.

또한 G.O.R은 열압축기에 공급되는 구동증기의 압력을 일정하게 유지시키기에 MED-TVC 담수설비에 공급되는 증기량은 일정하다. 따라서 G.O.R은 총 담수생산량과 비례하는 값으로 나타난다.

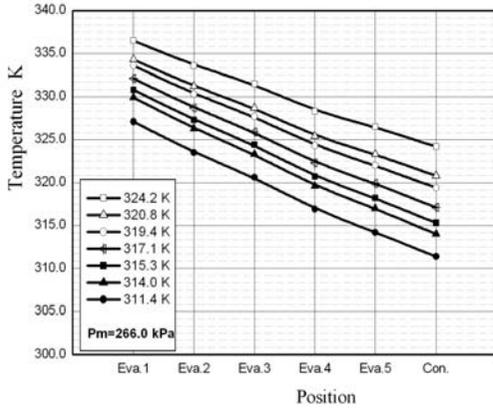


Fig. 6 Temperature distribution of evaporator according to the suction temperature

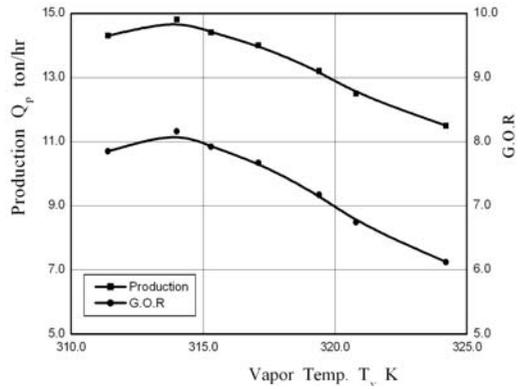


Fig. 9 Total product and G.O.R according to the suction temperature

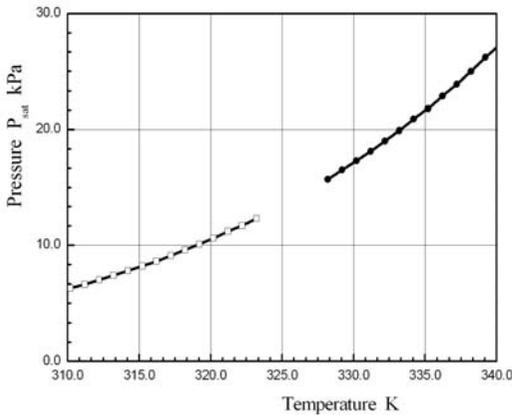


Fig. 7 Saturation pressure vs temperature

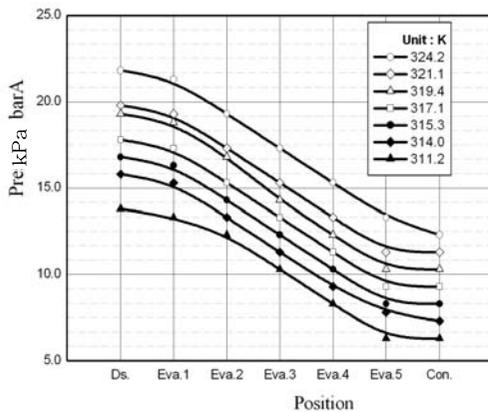


Fig. 8 Pressure distribution of evaporator according to the suction temperature

### 4. 결 론

본 연구에서는 MED-TVC형 담수설비의 운전 성능특성에 대한 실험연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 열압축기 구동증기 압력이 266.0 kPa인 경우 총 담수생산량은 14.8 ton/hr, 200.0 kPa인 경우 총 담수생산량은 11.0 ton/hr, 최소 운전조건인 136.0 kPa에서 총 담수생산량은 7.45 ton/hr 임을 알 수 있었다.

(2) MED-TVC 담수설비의 평가지표인 G.O.R는 열압축기 구동증기의 공급압력에 따라 다소 차이를 보이고 있으며, 열압축기 구동증기압력이 136.0 kPa인 경우 최대치인 8.5, 구동증기압력이 266.0 kPa인 경우 최소치인 8.1로 나타났다.

(3) 열압축기 구동증기 압력을 266.0 kPa로 유지시키며 흡입증기의 온도를 변화시키는 경우, 흡입온도 상승분에 따른 흡입압력 상승분은 6.0 kPa, 열압축기에서의 토출압력 상승분은 8.0 kPa로 양압력에서 압력기울기에 차이가 있음을 알 수 있었다.

(4) 열압축기 구동증기 압력을 266.0 kPa로 유지시키며 흡입증기의 온도를 변화시키는 경우, 설계 온도 314.0 K에서 총 담수생산량은 14.8 ton/hr로 최대치를 보인 후, 흡입증기의 온도가 324.2 K에서는 총 담수생산량은 11.0 ton/hr로 설계치에 비하여 25.7 % 이상 감소하였음을 알 수 있다.

## 후 기

본 연구는 경상대학교 2단계 BK21 친환경냉열 에너지기계연구사업팀과 그린에너지시티 진해 20년 연구 용역에 의하여 연구 되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] 2006, "The 19th IDA Worldwide Desalting Plant Inventory", Media analytics ltd.
- [2] Tony Suryo Utomo, 2008, "An Experimental and Computational Fluid Dynamics Investigation of Thermo Vapor Compressor in Multi Effect Desalination, Ph.D Thesis in Gyeongsang National University
- [3] H.S. Choi, S.K. Lee, G.J. Jung, 2002, "Experimental heat transfer analysis of multiple effect desalination pilot plant", IDA BAH03-099.
- [4] 2006, "Multi effect desalination - Process for sea water desalination", Sidem & Entropie (Veolia : water - solution & technologies)
- [5] F. Jafar, G. Thorpe, O.F.Turan, 2007, "Liquid film falling on horizontal circular cylinders", 16th Australasian fluid mechanics conference, pp.1193-1200
- [6] A.M.I.Mohamed, 2007, "Flow behavior of liquid falling film on a horizontal rotating tube", Experimental thermal & fluid science, Vol.31, pp.325-332
- [7] Y.Fujida, M.Tsutsui, 1994, "Evaporation heat transfer of falling films on horizontal tube", JSME, Vol.60-578, pp.3475-3480

## 저 자 소 개



최두열(崔斗烈)

1968년 7월생, 1993년 한국해양대학교 기계공학과 졸업, 2008년 한국해양대학교 기계공학과 대학원 (공학석사), 2008~현재 경상대학교 정밀기계공학 박사과정.



김창복(金昌福)

1969년 10월생, 1993년 연변대학교 농기계학과 졸업, 2004년 충북대학교 농업기계학과 대학원 (공학석사), 2007년 한국해양대학교 대학원 기관시스템학과 (공학박사)



송영호(宋榮鎬)

1968년 3월 생, 1993년 국립 부산대학교 기계공학과(학사) 2005년 영국 UMIST 대학원 Thermal Power & Fluid Engineering Div.(석사) 2004년 한국해양대학교 기계공학과(박사), 현재 대원열판(주) 대표이사.



최순호(崔淳豪)

1961년 2월생, 1987년 한국해양대학교 선박기계공학과 졸업(공학사), 1989년 한국해양대학교 대학원 선박기계공학과 수료(공학석사), 2003년 동경대학교 대학원 기계공학과 수료(공학박사), (주)현대엔지니어링, 한국원자력연구원 선임연구원을 거쳐 현재 DHP Eng. Co., R&D Center 연구소장, Marquis Who's Who 및 International Biographical Centre (IBC) 등 총 5회에 걸쳐 세계인명사전 등재.



김필환(金必煥)

1982년생 1월생, 2007년도 경상대학교 기계항공공학부 졸업, 현재 경상대학교 대학원 정밀기계공학과 열유체전공 석사과정 재학중



정한식(鄭漢植)

1954년생, 1981년 동아대학교(학사), 1983년 동아대학교 열유체공학(석사), 1987년 동아대학교 열유체공학(박사), 현재 경상대학교 기계항공공학부 교수