

공학석사 학위논문

이중효용 담수화 장치의 안전한 작동상태에  
관한 연구

A study on Safe Operating Conditions of the Double Effect  
Desalination System

지 도 교 수      정 형 호

2008 年 2月

한 국 해 양 대 학 교 대 학 원

기 계 공 학 과

최 성 욱

本 論 文 을 崔 誠 旭 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

위원장 공학박사 이 영 호



위 원 공학박사 도 덕 희



위 원 공학박사 정 형 호



2008 년 2월

한국해양대학교 대학원

# 목 차

Abstract

사용기호

표목차

그림목차

제 1 장 서 론 .....	1
1.1 담수의 필요성 .....	1
1.2 담수화 방법 .....	3
1.3 연구목적 .....	5
제 2 장 실험장치 및 실험방법 .....	8
2.1 실험장치 .....	8
2.1.1 주요부 장치 .....	8
2.1.2 실험장치 및 부대시설 .....	13
2.1.3 측정장비 .....	17
2.2 실험방법 .....	21
제 3 장 실험결과 및 고찰 .....	24
3.1 이론적 배경 .....	24
3.1.1 열역학적 해석 .....	24

3.1.2 플래싱 현상 .....	27
3.1.3 열관류율 .....	30
3.2 담수장치의 실험결과 및 고찰 .....	31
3.2.1 안전한 작동상태와 불안정한 작동상태 .....	31
3.2.2 공급수 온도변화 실험 .....	31
3.2.3 가열온수 온도변화 실험 .....	32
제 4 장 결론 .....	43
참고문헌 .....	44

# A Study on Safe Operating Conditions of the Double Effect Desalination System

SungWook, Choi

Department of Mechanical Engineering  
Graduate School, Korea Maritime University

## Abstract

Global resources of freshwater are scarce, unevenly distributed and, in many cases, may require some form of treatment and handling. There are many types of desalination systems multi-effect desalination(MED), multi-stage flash desalination(MSF), reverse osmosis desalination(RO) and electro-dialysis(ED). Each type of desalination is limited and different according to surroundings, environments and conditions. With advanced technologies in scale control and material selection, Multi-effect is now playing a major role in seawater desalination systems. Multi-effect is inherently superior in economy, low specific electricity consumption, and embraces the possibilities of using lower grade materials to a better effect.

In the present paper, safe operating conditions of the dual effect desalination system were examined by varying the temperatures of the hot water and the feed water. The dual effect desalination system was made by modifying a fresh water generator used in the ship. Pressures and temperatures were kept at a steady state. The effect of the feed water and hot water temperatures on fresh water generating rates were explained. The overall heat transfer rates of heat exchangers were reduced from raw data and the effect of inlet conditions on the overall heat transfer rates were described.

## 사용기호

$A$	면적[m <sup>2</sup> ]
$C_p$	정압비열[kcal/kg℃]
$P$	압력[kPa]
$Q$	열량[kcal]
$T$	온도[℃]
$U$	열관류율[kcal/m <sup>2</sup> h℃]
$d$	관지름[m]
$h$	열전달계수[kcal/m <sup>2</sup> ℃]
$\dot{m}$	질량유량[kg]

## 하첨자

$b$	보일러
$fg$	증발잠열
$i$	입구
$lmtd$	대수온도차
$o$	출구
$s$	표면

## 그리스 문자

$\pi$	원주율
-------	-----

## 표 목 차

Table 2.1 Description of evaporator in 1st stage

Table 2.2 Description of evaporative condenser in 2nd stage

Table 2.3 Description of condenser in 2nd stage

Table 2.4 Experiment conditions

Table 3.1 Fresh water generated

Table 3.2 Temperature differences between inlet temperature of hot water  
and saturated temperature of the 1<sup>st</sup> stage



## 그림 목 차

Fig 1.1 3D modeling of Double effect desalination system

Fig 2.1 Photograph of water ejector

Fig 2.2 P & ID of experiment apparatus and related facilities

Fig 2.3 Schematic diagram of double effect desalination

Fig 2.4 Photograph of turbine flow meter

Fig 2.5 Photograph of mass flow meter

Fig 2.6 Photograph of flow meter

Fig 2.7 Photograph of manometer

Fig 2.8 Photograph of T-type thermo couple

Fig 2.9 Photograph of data acquisition system

Fig 2.10 Photograph of double effect desalination and PC system

Fig 3.1 Schematic diagram for theoretical analysis of Double effect

desalination

Fig 3.2 T-S diagram for flash phenomena

Fig 3.3 Variations of absolute pressures at each stage and inlet of stage with the temperatures of feed water

Fig 3.4 Variations of Temperature at each stage with the temperatures of feed water

Fig 3.5 The impacts of hot water temperature on heat transfer rates

Fig 3.6 Overall heat transfer coefficient in each case of hot water temperature

# 제 1 장 서 론

## 1.1 담수의 필요성

지구상에 존재하는 모든 생명체는 물에 근간을 두며 물에 의해 그 생명을 유지하고 있다. 사람의 경우 70%이상 대부분이 물로 구성되어 있으며 체내의 수분 농도가 2%만 부족해도 심한 갈증의 고통을 느끼게 된다. 뿐만 아니라 5%가 부족하면 혼수상태, 12%가 부족하면 사망에 이르게 된다. 생물학적으로 사람이 음식을 섭취하지 않는 극한의 경우 약 5일정도 생존하지만 물만 섭취하더라도 약 15일을 생존하게 된다. 실제로 1967년 충남 청양 구봉광산이 매몰돼 갱도에 갇혔던 양창선(당시 36세)씨는 하루에 물 1컵 정도를 마시며 15일 8시간(368시간)의 사투를 벌인 끝에 구조되기도 했다.<sup>1)</sup> 사람에게 물은 생명과도 같으며 물이 그만큼 중요하다는 것을 반증하는 것과 같다.

지구에 존재하는 물의 약 97.5%가 해수로 되어있으며 담수는 불과 2.5%에 그치지 않는다. 이 중에서 지하수를 제외한 인간이 사용할 수 있는 담수호의 물 또는 하천 수는 약 9만 km<sup>3</sup>에 불과하며, 이는 전 세계 물 총량의 2.5% 밖에 되지 않는 담수 전체량 중에서도 겨우 0.26%에 불과하다. 하지만 물의 수요는 1950~1990년 사이에 3배나 증가하였고 앞으로 35년 이내에 현재보다 2배나 증가할 것으로 예상되고 있다.<sup>2)</sup>

세계인구의 약 50%에 달하는 개발도상국의 경우, 산업이 증가함에 따라 그 수요량도 점점 증가하고 있으며 그에 따라 전체적으로 물 공급이 크게 부족해지고 있다.<sup>3)</sup> 이런 국가에서의 물 공급은 도시와 산업개발의 필요량에 미치지 못하고 있을 뿐만 아니라 최소한의 생활 필요량에도 영향을 미치지 못하는 경우도 허다하다. 더욱 심각한 것은 깨끗한 물 공급부족으로 인한 저 수질의 물

사용이 크게 증가하고 있다는 것이다. 저 수질의 물 사용은 많은 질병의 원인이 되며 심지어 죽음에 이르게 하는 심각한 결과를 초래하고 있다. 유엔개발계획(UNDP)에 따르면 매년 200만 명이상의 어린이가 물 부족 및 식수오염으로 사망하고 있으며 세계인구의 10억 명이 깨끗한 식수를 공급받지 못한 상황이라고 한다. 또한 국경을 초월한 협력과 지속가능한 관리가 이루어지지 않는다면 2025년에는 30억 명 이상이 물 부족을 겪을 것이라고 경고 하였다.<sup>4)</sup>

20세기가 석유 분쟁의 세기였다면 21세기는 물 전쟁의 시대가 될 것이라는 세계은행의 경고가 점차 눈앞의 현실로 다가오고 있다. 더욱 심각한 것은 석유는 대체 에너지원 개발이 가능 하지만 물은 대체 자원이 전혀 없다는 점이다. 물 부족으로 인한 국가 간 분쟁은 인류 역사만큼 긴 것이지만 특히 중동지역에서 10년에서 15년 내에 물 전쟁이 발발할 것이라는 경고는 가볍게 볼 것이 아니다.

중국의 경우, 사용 가능한 물이 불균일하게 분포되어 있기 때문에 지역적인 물 부족 문제가 심각하다. 중국의 양쯔 강을 중심으로 남방부에서는 물이 비교적 풍부하나 황하 강을 중심으로 한 북방부에서는 물이 부족한 실정이다. 당국에서는 2002년 양쯔 강에서 황하 강으로의 3개의 운하를 이용하여 물을 공급하는 계획(South-North water transfer project)을 진행하였다. 하지만 이 프로젝트에는 운하의 총연장길이가 1,000km 이상이고 총수량이 약 400억 m<sup>3</sup>이상이 되기 때문에 투자비용이 많이 들 뿐만 아니라 북경까지 물을 수송하는데 쓰이는 비용도 엄청나게 소요된다. 더욱 문제가 되는 것은 현재 강에서 사용할 수 있는 물이 예상만큼 충분하지 못할 뿐만 아니라 이 프로젝트로 인해 환경에 미치게 될 영향 또한 예측하기가 어렵다. 중국은 바다와 접하는 해안길이가 18,000km나 되며 그에 따른 해수 면적 3,000,000km<sup>2</sup>의 충분한 해수를 접할 수 있기 때문에 해수를 담수화 시키는 방법을 그 대안으로 인식하고 있으며 이에 대한 연구가 진행되고 있다.<sup>5)</sup>

미국에서도 물의 수요량이 공급량을 계속 초과하고 있고 가용할 수 있는 자원이 한정되고 있음을 인식하고 이에 따른 대책을 마련하고 있다. 물 부족 문제를

해결할 수 있는 방법은 전 세계적으로 연구 인력을 조정 하는 것이라고 보고하였으며, The Desalination and Water Purification Road Map을 작성하여 미국이 당면하고 있는 물 공급문제를 2020년까지 단기과제와 중장기 과제로 나누어 적용대상에 대한 기술 정리하였고 상황별 연구와 기술 현황 파악을 통하여 수요를 정하고 각 수요에 따른 목표와 목표치를 정량하였다. 그리고 기술 분야와 그 연구 분야를 결정하여 궁극적으로는 R&D를 통한 물 부족문제를 해결할 수 있다고 보고하였다.<sup>6)</sup>

우리나라의 경우에도 물 부족은 숙명적인 것이다. 연평균 강수량은 세계평균의 1.3배에 이르지만 높은 인구 밀도 때문에 1인당 평균 강수량은 세계 평균의 12.5%에 불과하다. 그러나 현재 우리나라의 물 공급 능력이 아직 수요를 넘고 있어 물 부족문제는 아직 피부에 와 닿지 않고 있다. 하지만 불과 5년 후에는 연간4억 톤의 물이 부족할 것으로 전망된다. 물 문제는 우리를 직접적으로 위협하는 폭탄과도 같은 셈이다. 빨리 대책을 마련하지 않으면 이 폭탄의 폭발은 필연적일 수밖에 없다.<sup>7)</sup>

이처럼 오늘날 물 부족문제는 세계적인 문제로 확대 인식되고 있다. UN은 먹는 물 공급과 관련된 문제들을 인식하고, 수자원 보존과 먹는 물 공급의 중요성을 알리며, 정부·국제기구·비정부기구·민간부분의 참여와 협력을 증진시키기 위해 1992년부터 매년 3월 22일을 ‘세계 물의 날’로 정하였다. 무엇보다 물 부족의 인식뿐만 아니라 적극적으로 물 부족을 해결하기 위한 기술 마련이 세계적으로 절실히 필요한 시기이다.

## 1.2 담수화 방법

수자원 관리가 어려운 지역뿐만 아니라 도서지방 그리고 선박과 같이 물 공급을 받는데 제한된 환경에서는 기술적인 담수 확보가 무엇보다 중요하다. 해수는 무엇보다 얻기 쉬운 자원이며 세계에서 가장 풍부한 자원이기도 하기 때문

에 해수를 담수로 만드는 방법이 가장 현실적이며 효율적인 방법으로 인식하고 있다. 연간 강수량이 100mm 안 밖의 물 기근 국가가 대부분인 중동지역의 경우 바다와 접하는 도시에서는 해수를 담수로 만드는 방법을 적극적으로 활용하고 있으며 세계적으로 해수담수화 기술과 그 요구량이 증가하고 있는 실정이다.

해수 담수화 방법에는 특수한 막을 이용하는 역삼투법 및 전기투석법, 해수를 증기로 변화시켜서 담수화하는 증발법(다단 플래시 증발법, 다중 효용법, 증기 압축법), 그 외에 냉동법, 태양열 이용법 등이 있다. 그러나 해수담수화에는 주로 증발법과 역삼투법이 사용되고, 기수담수화에는 역삼투법과 전기투석법이 주로 사용되고 있다.<sup>8)</sup>

다단 플래시 방식(MSF : Multiple-Stage Flash Distillation)은 현재 대용량 담수화장치에 가장 널리 사용되는 담수화 기술로 현재 전 세계 담수화 용량의 약 2/3 가량을 담당하고 있으며, 다중효용 방식과 가장 큰 차이점은 증발관 내에서 증발이 일어나는데 비해 다단 플래시 방식에서는 상대적으로 고압의 열교환기 내에서 가열된 해수가 오리피스를 통해 저압의 격실로 분출되면서 증발이 일어나게 된다. 이 때 전체의 열에너지는 동일한 상태로 각 격실에서 외부로부터의 열 공급이 없으므로 원수의 잉여 에너지에 해당하는 부분만의 잠열로 변환되기 때문에 각 격실에서의 증발량은 수% 이내이다. 다단 플래시방식의 일반적인 계통은 점차 진공도가 높은 격실이 직렬로 이어진 형태를 가진다.

다중효용 방식(MED: Multi-Effect Distillation)은 다단 플래시 방식보다 기술적인 방식이며 사용되는 에너지에 비해 많은 담수를 만들어 내기 때문에 에너지 절약에 탁월한 성능을 발휘 한다. 증류기를 여러 개 배열한 형태로 첫 번째의 증발기에 보일러에서 발생된 증기로 열을 가하여 해수를 증발시키면, 발생된 증기는 다음 효용의 증발기에서 응축되어 담수가 되고 동시에 가열 원으로 작용하여 증발기 내부의 해수를 증발시킨다. 또한 이때 발생된 증기는 다시 다음 효용의 증발기에서 가열 원으로 작용한다. 이 때 각 효용 증발기 내의 압력을 차례로 낮게 유지하여 효용이 진행됨에 따라 더 낮은 온도에서 비등이 일어나도록 해 주어야 한다. 또, 각 효용에서 생산된 담수의 온도가 상온보다 높

기 때문에 유입되는 해수와 상호 열교환을 시켜 생산 담수의 현열을 회수하는 방법도 널리 채택되고 있다.

증기 압축식(VC: Mechanical Vapor Compression Distillation)방법은 증발기에서 발생한 증기를 압축기로 압축시키면 온도와 압력이 상승하게 되는데 이를 다시 증발기의 고 열원으로 사용한다. 해수가 열교환기를 거치면서 배출되는 브라인과 생산된 담수의 현열을 회수하여 약 97℃로 증발기에 들어가서 압축된 증기가 응축하면서 방출하는 열에 의하여 증발하고 증기는 다시 압축기로 고온의 증기로 압축되어 증발기에서 응축되고 이후에 열 회수기를 통과하면서 증발기로 들어가는 해수에 그 현열을 전달한다.

역삼투압법에 의한 해수담수화 시설은 물에 용해되어 있는 이온성 물질은 거의 배제되고 순수한 물은 통과되는 반투막에 의해 해수 중에 용해되어 있는 이온성 물질을 여과하는 것이다. 해수에서 이온성 물질과 순수한 물을 분리시키기 위해서는 삼투압 이상의 높은 압력을 필요로 하는데 이때의 압력을 역삼투압이라 하며 해수담수화의 경우 42~60 bar 정도의 높은 압력을 필요로 한다.

최근에는 다단 플래시 방법과 역삼투압법을 혼합한 하이브리드 방법(Hybrid Desalination System)으로 담수와 전기를 동시에 생산하는 방식이 개발되었다. 하이브리드 방법을 사용할 경우 담수와 전기를 각각 생산하는 방식에 비해 에너지 효율이 결과적으로 월등히 높게 나타난다.<sup>9)</sup>

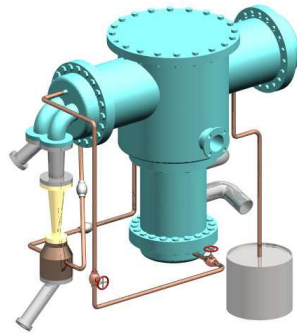
### 1.3 연구목적

장시간 항해를 하는 선박에서 환경적으로 물을 얻는 것은 어려운 일이다. 그래서 물을 얻기 위한 해수담수화 장치는 선박에 필수적이다. 현재 많은 담수방식을 이용한 담수장치가 선박에 사용되고 있으며 많은 연구 또한 진행되고 있다. 선박의 경우 기관실 내부에 발생하는 많은 열을 회수하여 담수 장치에 이용하는 방법은 무엇보다 효율적이게 되며, 특히 엔진의 열이 고온이기 때문에

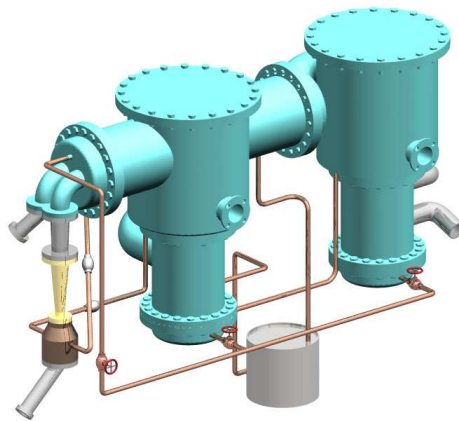
많은 양의 담수를 만들어 낼 수 있는 장점을 가지고 있다. 감압증발 담수장치는 이러한 특성을 이용하기에 가장 적합한 방식이며 현재 역삼투압법과 함께 선박에 가장 많이 사용되고 있는 방식이기도 하다.

본 연구에서는 Fig 1.1과 같이 선박에서 사용되고 있는 1단형 감압증발 담수장치를 보다 에너지 효율이 높은 2중효용 담수장치로 변경하여 실험 하였다. 연구목표는 2중효용 담수장치의 작동상태 여부와 가열온수 온도 그리고 공급수 온도를 변화시키면서 담수의 생성량을 파악하고 각 단의 압력과 온도조건에 따른 2중효용 담수장치의 안전한 작동상태를 파악하기 위함이다.

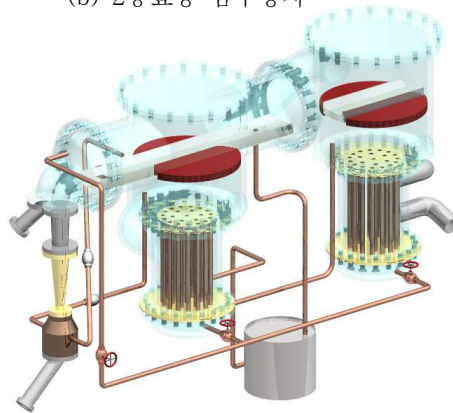




(a) 1단형 감압증발 담수장치



(b) 2중효용 담수장치



(c) 2중효용 담수장치의 내부

Fig 1.1 3D modeling of Double effect desalination system

## 제 2 장 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

#### 2.1.1 주요부 장치

감압증발 담수장치에서 가장 중요한 것은 시스템을 감압 및 유지시킬 수 있는 장치와 감압된 상태에서 공급 수를 증발 및 응축 시킬 수 있는 열교환 장치이다.

각단의 감압상태를 유지하고 공급 수속에 포함된 불 응축 가스를 제거하기 위하여 워터 이젝터(ejector, Fig2.1)를 이용하였다. 이젝터는 고압의 유체를 노즐로 분출시켜, 그 분류 주변의 저압기체와 운동량 교환을 통하여 저압의 유체를 보다 높은 압력까지 압축하여 수송하는 장치이다. 워터 이젝터는 구조가 단순하며 사용범위가 넓고 설치와 조작이 쉬운 장점을 가지고 있다. 감압증발식 담수 장치에서는 무엇보다 감압장치의 성능이 중요하다. 각 단의 압력상태와 온도조건은 가장 밀접한 관계에 있으며 감압성능에 따라서 증발하는 온도가 결정되기 때문에 이젝터에 관한 연구가 무엇보다 필요하다. 초음속 이젝터 유동에 비해 워터 이젝터와 같이 아음속 및 음속 이젝터 유동에 관한 연구결과는 많지 않다. 이것은 이젝터가 아음속 상태로 운전되는 경우, 이젝터 내부에서 발생하는 1차 유동 및 2차 유동의 혼합 특성, 배기성능 및 진공성능 등의 이젝터 유동 특성들이 이젝터의 구동 압력 비에 강하게 의존하게 되므로, 단순한 이론적 수단으로 아음속/음속 이젝터의 성능을 평가하는 것은 용이하지 않기 때문이다. 또 부분적으로는 이젝터의 성능에 밀접하게 관계하는 1차 노즐의 직경, 이젝터의 목 직경, 혼합부의 길이, 디퓨저의 길이 등 초음속 이젝터 유동

에 비하여 많은 특성 길이가 존재하게 되므로, 아음속 이젝터 유동장을 해석하는 것은 매우 곤란하다.<sup>10)</sup>

이젝터를 분석하기 위해서는 진공의 경우 값의 변화가 크기 때문에 조건에 맞는 실험적인 데이터를 획득하는 것이 무엇보다 중요하다. 본 실험에서 16mm 노즐을 사용할 때 전체 진공까지 사용되는 시간은 약 20분정도이며, 본 실험에 적용된 공급량 조건에서 이젝터는 압력을 유지하는데 별다른 무리가 없었다. 앞으로 이에 관련한 연구가 이루어져야 할 것으로 보인다.

본 실험장치인 2중효용 담수장치에 사용된 열교환기는 다관원통형 열교환기이다. 다관원통형 열교환기는 두 개의 관판(Tube sheets)과 이것을 연결한 다수의 전열관(Tube)으로 구성되며, 그 바깥은 원통형의 동체(Shell)로 밀폐한 구조를 가지고 있다. 다관원통형 열교환기는 구조가 간단하고 가격이 비교적 싸 이점이 있으며, 압력강하가 비교적 적고 관내부의 청소가 용이하다.<sup>11)</sup> 해수 담수화 장치의 경우 압력변화에 민감하게 되며 해수 사용에 따른 청소가 무엇보다 중요하므로 다관 원통형 열교환기 사용에 이점이 있다.

1단하부에 있는 수직 형 증발기, 2단 하부에 있는 수직 형 증발응축기와 2단 상부에 있는 수평 형 응축기에 사용되고 있으며, 각각의 채원은 Table 2.1, Table 2.2 그리고 Table 2.3과 같다.



Fig 2.1 Photograph of water ejector

Table 2.1 Description of evaporator in 1st stage

Description	Value
Effective tube length(mm)	400
Number of tubes	105
Tube outdiameter(mm)	16
Tube thickness(mm)	1
Heated area(m <sup>2</sup> )	2.11
Tube pitch(mm)	20
Number of baffles	5
Baffle cut(%)	17
Central baffle spacing(mm)	65
Inlet baffle spacing(mm)	59
Outlet baffle spacing(mm)	61.5

Table 2.2 Description of evaporative condenser in 2nd stage

Description	Value
Effective tube length(mm)	400
Number of tubes	105
Tube outdiameter(mm)	16
Tube thickness(mm)	1
Heated area(m <sup>2</sup> )	2.11

Table 2.3 Description of condenser in 2nd stage

Description	Value
Effective tube length in condenser(mm)	810
Number of tubes in condensing section	160
Pass of condensing section	2
Tube outdiameter of condensing section(mm)	11
Tube thickness of condensing section(mm)	1
Heated area of condensing section(m <sup>2</sup> )	4.48
Number of tubes in preheating section	30
Pass of preheating section	2
Tube outdiameter of preheating section(mm)	11
Tube thickness of preheating section(m)	1
Heated area of condensing section(m <sup>2</sup> )	0.84
Total area of condenser(m <sup>2</sup> )	5.32

## 2.1.2 실험장치 및 부대시설

실험에 필요한 부대시설은 가열온수를 공급하는 급탕용 온수보일러와 실험에서 사용한 물을 재사용하고 남은 열을 방출하는 냉각탑이다. 실험 장치와 부대 시설에 대한 P&ID Fig.2.2에 나타내었으며 본 실험에 사용된 실험 장비를 Fig.2.3에 나타내었다.

보일러는 85℃까지 가열 할 수 있는 온수보일러를 사용하여 일반적으로 엔진 냉각수의 온도와 흡사한 조건을 갖추었으며 냉각탑은 건물의 옥상에 위치시켜 팬의 강제 순환을 통해 냉각속도를 높여 각 해수 온도 조건을 쉽게 조정하도록 하였다. 보일러의 가열온수는 급탕탱크에 저장되어 펌프를 이용해 공급하였고 냉각탑에서 배출되는 공급 수는 냉각 탑 아래에 저장되었다가 펌프를 이용해 공급하였다. 보일러의 온도조절은 보일러에 부착된 세팅온도기준으로 실험을 실시하고 실험 장치에 공급되기 직전의 온도를 측정하여 기록하였다. 냉각탑을 통한 공급 수의 온도는 측정온도를 참고하여 수동으로 팬의 구동을 조정하여 온도를 조정하였다. 각각의 그래프에서 측정온도의 오차를 확인할 수 있다.

냉각탑에서 공급된 공급 수는 2단 상부에 있는 수평 형 응축기로 유입되고 2 패스를 거쳐 2단의 수직 형 증발응축기에서 증발된 증기를 응축시킨다. 일부 공급 수는 다시 2패스를 거쳐 예열을 거치게 되며 나머지 공급 수의 대부분은 냉각탑으로 되돌아가 증기를 응축시킬 때 얻은 열을 발산한다. 예열 된 공급 수는 오리피스를 거쳐 감압된 상태에서 각단의 니들밸브에 의해 공급량을 조정 하게 된다.

1단하부의 수직 형 증발기는 보일러를 통해 들어온 가열 온수와 1단 공급 수를 열 교환 시켜 증기를 생성하게 한다. 생성된 증기는 2단하부의 수직 형 증발 응축기로 이동하게 되며 2단 공급 수와 열 교환을 거쳐 응축되어 담수로 배출된다. 2단 공급 수는 응축된 1단 증기의 잠열재사용을 거쳐 증기를 생성하게 하고 2단 상부에 있는 수평 형 응축기에서 응축되어 담수로 배출된다. 최종적으로 생성된 담수(응축수)는 Fresh Tank에 집결하여 진공펌프를 통해 밖으로 배출

시키게 된다. 실험 장치 내부에는 증발에 의한 기포발생 시에 액적의 발생으로 인하여 해수의 캐리오버(carry-over)를 막기 위해 응축기로 이동되는 증기 유로에 데미스터(Demister)가 설치돼 있다. 물은 상태에 따라서 다르지만 공기를 중심으로 한 상당량의 불응축 가스를 함유하고 있다. 이러한 불응축 가스는 해수에 함유되어 장치내에 유입하게 되고 결국 응축기에 모이게 된다. 그러므로 응축기에 축적되는 불응축 가스를 효과적으로 제거하지 못하면 장치내의 압력이 상승하는 원인이 된다. 이러한 불응축 가스를 제거하기위한 관이 이젝터로 연결되어 있으며 역지밸브를 통해 개폐하게 된다. 또한 증발기에 공급되어진 해수가 증발하지 못하고 남은 해수를 배출시키지 못하면 장치 내에 해수가 축적되므로 이 또한 이젝터에 의해서 외부로 배출되어진다. 증발하고 남은 해수의 농도가 짙어지면 관의 이동이 용이하지 못하게 되므로 이젝터를 통해 강제로 배출 시키도록 해야 한다.



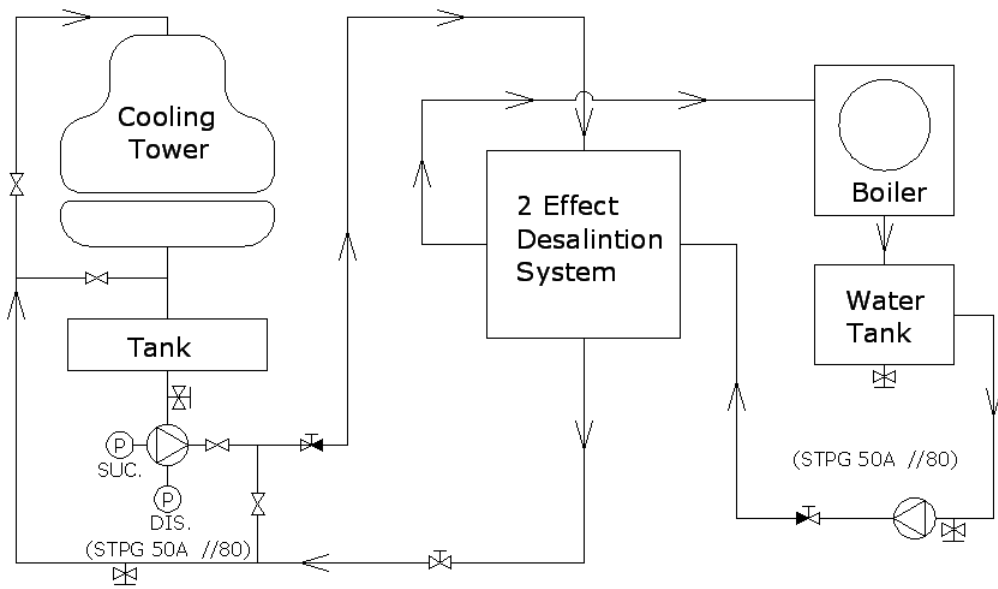


Fig 2.2 P & ID of experiment apparatus and related facilities

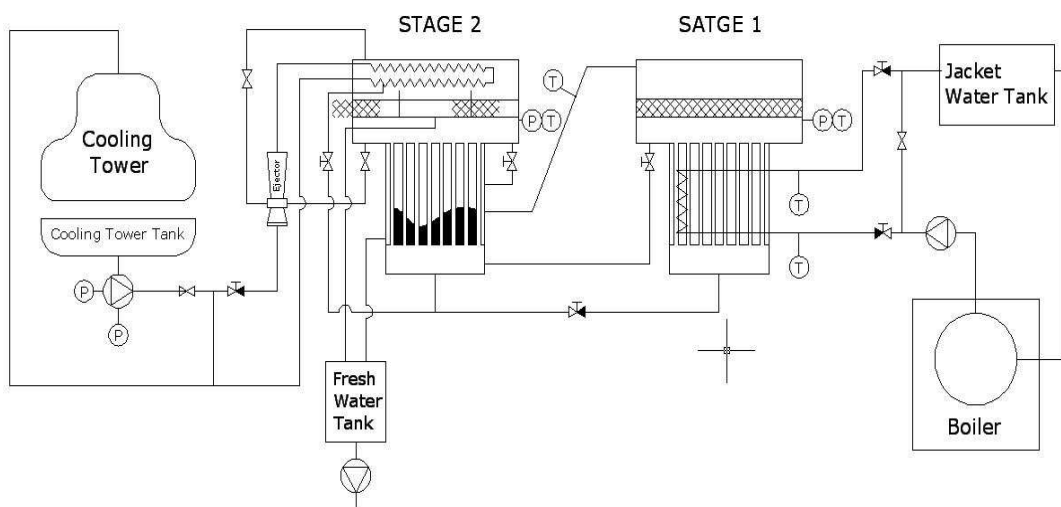


Fig 2.3 Schematic diagram of double effect desalination

### 2.1.3 측정 장비

공급 수와 가열온수의 유량은 각각 터빈유량계(Fig 2.4)와 질량유량계(Fig 2.5)를 사용하여 측정하였으며 예열을 거쳐 각단에 공급되는 공급량과 총 담수 생성량, 각 응축기의 응축수량은 0~100순시 및 적산 유량계(Fig 2.6)를 사용하여 측정하였다. 각 단의 진공압력과 온도상태를 측정하기 위해 -1~9bar, 0~10bar 압력계(Fig 2.7)와 T-type 열전대(Fig 2.8)를 사용하였다. 최종적으로 생성된 담수는 Fresh Tank에 집결하여 진공펌프를 통해 밖으로 배출시키고 각각의 장비에서 얻어진 데이터는 데이터 획득 장치(Fig 2.9)를 이용하여 PC와 인터페이스 하였다.

각 측정 장비의 정확성을 위해 기초실험을 실시하였다. 온도계는 물을 기준으로 항온조를 설치하여 각 단계의 기준온도를 측정 및 비교하여 데이터를 보정하였으며, 압력계의 경우 정밀압력측정 장비와 수은을 이용한 액주압력계와 함께 비교하여 장비의 최저 압력에서부터 각 단계의 기준압력을 측정하여 데이터를 보정하였다. 유량계는 직렬로 장비를 설치하여 각 단계의 기준유량을 흘려보내 전자저울과 각각의 데이터를 비교 보정하였다.



Fig 2.4 Photograph of turbine flow meter



Fig 2.5 Photograph of mass flow meter



Fig 2.6 Photograph of flow meter



Fig 2.7 Photograph of manometer



Fig 2.8 Photograph of T-type thermo couple



Fig 2.9 Photograph of data acquisition system

## 2.2 실험방법

본 실험에서의 실험조건을 Table 2.4에 나타내었으며, 가열 온수 온도조절은 보일러에 설치된 온도 조절 장치를 이용하였고 공급 수 온도조절은 냉각탑의 팬 스위치를 사용하여 조정하였다. 우선 장치를 가동시킨 후 장치내부를 진공으로 만든 다음 각단에 정해진 유량을 흘려보내게 된다. 담수장치가 정상가동을 하게 되면 정해놓은 각각의 온도조건에 맞춰 실험을 실시하게 되며 각 부분에 설치된 측정 장치를 데이터수집 장치와 PC에 연결하여 모니터링 한다. 실험 장치 Fig2.10에 나타나 있다. 데이터가 일정변화가 없는 정상상태에 도달 했을 때 1분당 얻어지는 평균데이터를 30회씩 30분간 측정하여 수집하였다. 실험에 사용되어진 온도조건은 실제 평균적인 해수온도와 근접하는 온도를 설정하였으며 가열온수온도는 기존의 선박에 이용되는 감압증발식 담수 장치에 근접하는 온도를 설정하였다.

Table 2.4 Experiment conditions

Description	Values
Flow rate of hot water( $\ell/\text{min}$ )	95
Flow rate of feed water ( $\ell/\text{min}$ )	238
Total feed rate( $\ell/\text{hr}$ )	280
Feed rate of each stage( $\ell/\text{hr}$ )	140
Temperatures of feed water( $^{\circ}\text{C}$ )	20, 22, 24, 26, 28, 30, 32
Controlled temperatures of hot water( $^{\circ}\text{C}$ )	79, 81, 83, 85





Fig 2.10 Photograph of double effect desalination and PC system

## 제 3 장 실험결과 및 고찰

### 3.1 이론적 배경

#### 3.1.1 열역학적 해석

담수 장치를 이해하기 위해 열역학적인 해석이 중요하다. 하지만 본 실험에서 담수장치의 많은 부분을 측정함에도 불구하고 이론적인 해석을 명확하게 하기 위한 측정 데이터의 부족이 여전히 남아있다. 따라서 열역학적인 단순 해석을 하기 위해 가정을 설정하고 그에 따른 결과를 계산하여 예측하도록 하였다.

가정은 다음과 같다.

- 1) 각단에서 증발된 증기는 응축된 담수량과 같다.
- 2) 각단에서 증발된 증기이외에 불응축 가스는 모두 제거 된다.
- 3) 담수장치 내부는 포화상태이다.
- 4) 실험 중 사용한 물은 해수라고 가정하고 상태량은 물의 상태량으로 계산한다.
- 5) 증기를 제외하고는 모두 압축액 상태이다.
- 6) 실험장치 내의 열 교환을 제외하고 열손실은 무시한다.

위의 가정 하에 다음과 같은 지배 방정식을 사용할 수 있다.

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (1)$$

$$\dot{m}_1 \times C_p \times (T_2 - T_1) = \dot{m}_9 h_9 \quad (2)$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_5 \quad (3)$$

$$T_3 = T_4 = T_5 \quad (h_3 = h_4 = h_5) \quad (4)$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 + \dot{m}_8 \quad (5)$$

$$\dot{m}_5 h_5 + Q = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_8 h_8 \quad (6)$$

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_4 + \dot{m}_6 = \dot{m}_9 + \dot{m}_{11} \quad (7)$$

$$\dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_6 h_6 \quad (8)$$

$$\dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_{11} h_{11} \quad (9)$$

$$\dot{m}_8 + \dot{m}_9 = \dot{m}_{10} \quad (10)$$

$$\dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_{11} h_{11} + \dot{m}_{12} h_{12} \quad (11)$$

위와 같은 식을 사용하여 그 결과로부터 담수장치의 열역학적 단순해석이 가능하다.

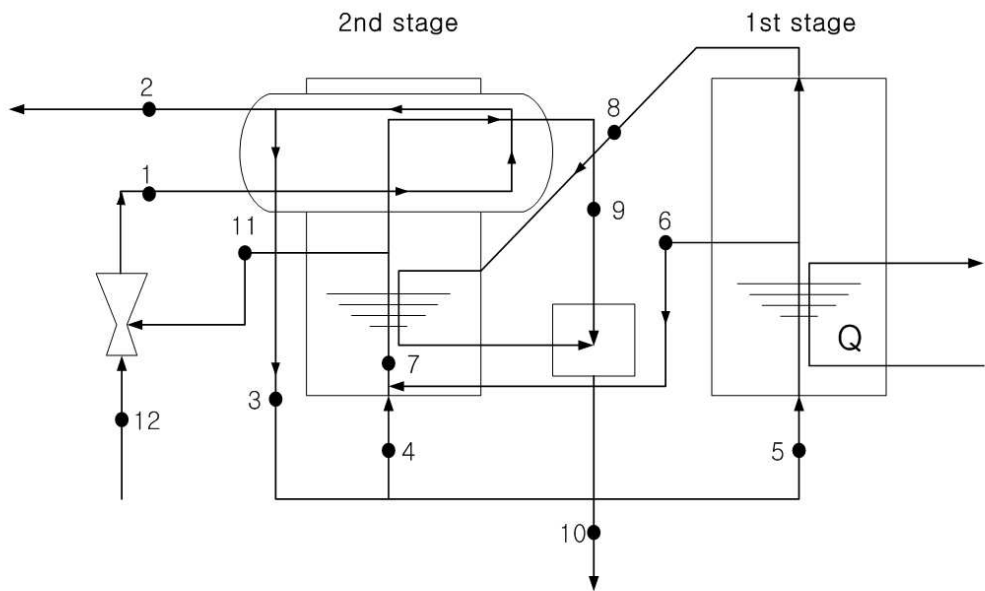


Fig 3.1 Schematic diagram for theoretical analysis of Double effect desalination

### 3.1.2 플래싱 현상

담수 장치에서 가장 중요한 요소 중에 하나인 감압장치는 감압을 통해 해수가 증발되는 비등점을 낮추기 위한 목적이 우선이다. 비등점을 낮춤으로 인해 공급되는 열량의 손실을 최소화하여 보다 쉽게 담수를 얻어 낼 수 있게 된다. 이때 일어나는 현상 중에 하나로 플래싱 현상을 들 수 있는데 플래싱 현상은 비교적 고압 액체가 저압으로 팽창이 일어 날 때 생기는 현상으로 주위로부터 열을 받아 스스로 증발하는 현상이다. 플래시타입 담수 장치에서는 이 현상을 이용하여 증발을 유도하게 되며 다중효용 담수 장치에서도 장치 내에서 유지되는 진공압력과 공급되는 압력차이가 있을 때 플래싱이 일어난다.

포화액체가 저압으로 팽창될 때 가역성이 없는 등 엔트로피 과정이라고 가정하면 Fig 3.2와 같이 팽창 후에는 일부의 액이 증발하여 포화액과 포화증기가 혼합된 상태로 된다. 플래싱의 이론적 모델은 대표적인 한 액적이 액적의 표면에서의 열 밸런스를 이용하여 구할 수 있다. 공급되는 액체의 질량이  $m$  kg이고 액적과 주위와의 대류열전달 계수가  $h$ 이면 액적과 증기사이에서의 열 밸런스는 식(12)과 같이 된다.

$$mC\frac{dT_d}{dt} = h\pi d^2(T_g - T_d) + \frac{dm}{dt}h_{fg} \quad (12)$$

식(12)에는 Biot 수는 0.1보다 작다는 가정 하에서 집중계 해석방법을 적용하여 유도되었으며,  $h_{fg}$ 는 증발잠열,  $T_g, T_d$ 는 각각 주위 증기의 온도와 액적의 온도이다. 여기서 대류열전달계수는 증발잠열에 비해 아주 작으므로 무시할 수 있다. 이 가정을 적용하면 식(12)은 식(13)으로 변화시킬 수 있으며, 포화액이 증발하는 량  $\Delta m$ 을 수할 수 있다.

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{C\Delta T_d}{h_{fg}} \quad (13)$$

위의 식을 적용하게 되면 본 실험에서 증발되는 유량의 5~6%는 플래싱에 의해 증발함을 알 수 있다.

감압 상태에서의 가장 큰 단점은 증발잠열이 증가하게 된다는 것이다. 하지만 증발잠열이 증가한다고 하더라도 상온에서 물을 증발시키는데 소요되는 열량과 본 실험 장치에서 같은 조건의 물을 증발시키는데 소요되는 열량을 비교하면 공급온도 28℃에서 장치 내부의 포화온도가 65℃일 경우 상온에서의 소요되는 열량에 비해 약 10%가량의 에너지 절감을 나타나게 된다. 이것은 증발잠열의 증가보다 현열로 이용되는 열량의 감소가 더 크기 때문이다.

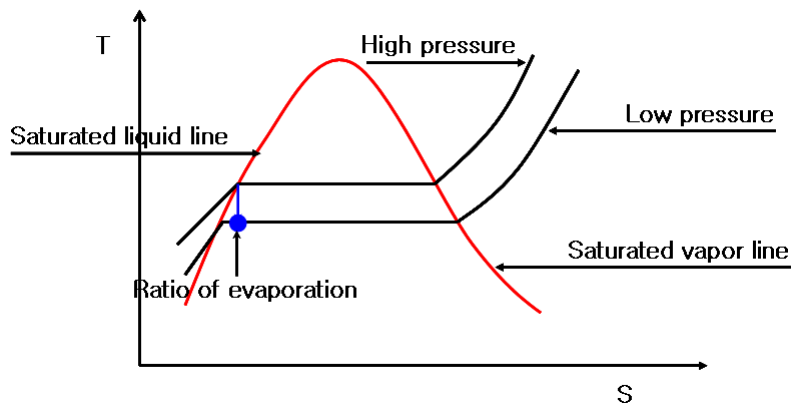


Fig 3.2 T-S diagram for flash phenomena

### 3.1.3 열관류율

본 실험에서 계산한 대수온도차는 보일링온도와 각단의 입 출구 온도를 사용하여 계산하였으며 관계식은 식(14)과 같다.

$$\Delta T_{lmtd} = \frac{T_i - T_o}{\ln \frac{T_i - T_b}{T_o - T_b}} \quad (14)$$

열량과 대수온도차를 사용하여 1단과 2단의 열관류율을 계산하였으며 열관류율은 다음 식(15)과 같다.

$$U = \frac{Q}{A_s \Delta T_{lmtd}} \quad (15)$$

면적  $A_s$ 는 튜브의 전열면적으로 계산되었다.



## 3.2 담수장치의 실험결과 및 고찰

### 3.2.1 안전한 작동조건과 불안정한 작동조건

본 실험에서 생성된 담수량은 Table 3.1에 나타나있다. Table 3.1에서 "F"는 실험의 실패를 나타내며 정상상태에 도달하지 못한 것을 의미한다. 최적의 작동상태는 구동수온도와 가열온수온도 조건에 의해 나타나진다.

가열온수 온도 77℃ 이상의 상태에서 본 실험은 구동되었다. 작동상태를 파악하기 위해 절대압력과 온도의 변화를 측정하였고 Fig 3.3과 Fig 3.4에 각각 나타내었다. 가열온수로부터 1단에 공급되는 열량은 Fig 3.5에 나타나있으며, 1단과 2단의 증발기와 증발응축기의 열관류율을 Fig 3.6에 나타내었다.

가열온수 온도가 79℃인 조건에서부터 본 실험장치가 작동되고 담수가 생성되었다. 이 온도조건에서는 다른 조건에 비해 가열온수의 열량변화가 적었으며 2단에서의 열관류율이 1단과 거의 비슷한 형태로 나타났다. 2단에서는 공급수가 넘치는 현상을 보였고 생성되는 증기 또한 그 양이 적었다.

가열온수 온도가 81℃, 83℃와 85℃인 경우에서 본 실험 장치는 정상적으로 작동하였다. 가열온수 온도가 증가함에 따라 담수량도 증가하는 현상을 보였으며, 본 실험 장치의 경우에는 83℃에서 최적의 담수량을 보였다.

### 3.2.2 공급수 온도변화 실험

공급수의 온도에 의한 담수량과 작동조건의 변화를 측정하기 위해 79℃에서 85℃까지 각각의 가열온수 온도조건에서 공급수 온도를 변화시켰다. Table 3.1에서 공급수 온도의 증가에 따른 담수량의 감소를 볼 수 있다. 이것은 1단에서 포화온도와 가열온수온도사이의 온도차가 작기 때문이다. 공급수 온도가 증가할수록 가열온수와의 온도차가 작고 그로 인해 1단에서의 증발량이 감소하는

경향을 보인다. 이런 감소경향은 Table 3.2에 공급온도와의 온도차를 보면 알 수 있다.

Fig 3.3에서 공급수 온도가 증가하면 그에 따라 압력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 압력이 증가하는 원인은 공급수 온도가 증가하면 각단의 온도가 증가하기 때문이다. Fig 3.4에서 각단의 온도변화와 포화상태의 변화가 나타나있다. 가열온수에서부터 1단으로의 전달되는 열량이 감소하는 경향(Fig 3.5)은 Table 3.2의 변화와 같다는 것을 알 수 있다. Fig 3.6은 열관류율을 나타내는데 79℃의 경우, 열관류율은 각단에서 거의 유사한 형태를 지니고 있다.

### 3.2.3 가열온수 온도변화 실험

Table 3.1의 79℃에서 83℃까지 가열온수 온도가 증가할수록 담수량이 증가하는 것을 알 수 있다. 본 실험 장치에서는 가열온수의 입구온도가 증가할수록 열량이 많이 전달되고 그에 따라 담수량이 증가함을 보였다.

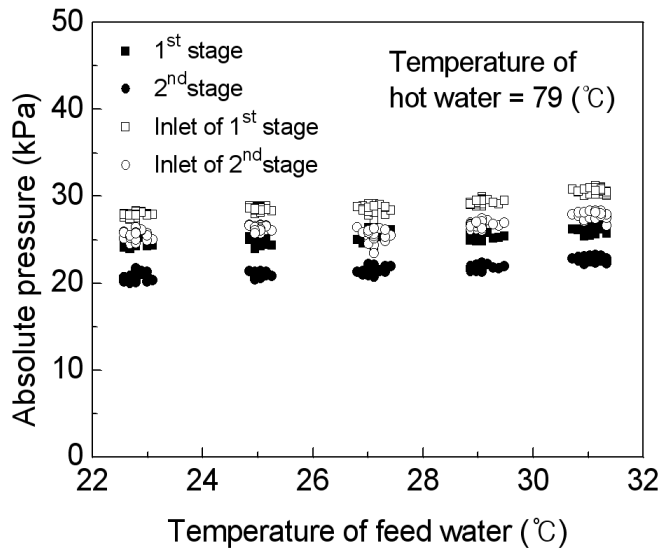
하지만 85℃의 경우는 83℃에 비해서 오히려 담수량이 줄어드는 현상을 나타내었다. 이것은 Table 3.2에 나타난 온도차를 보면 알 수 있으며 본 실험 장치와 실험 조건에서는 83℃의 가열온수 온도일 때 담수량이 최대가 되었다. 이러한 현상은 본 담수장치의 내부 온도조건과 이젝터의 용량적인 문제에 의해서 이루어진 것으로 예상된다. 일반적으로 85℃이상의 온도를 사용하여 담수장치를 구동하게 되면 증발량의 급격한 변화로 인해 염분농도가 짙어지게 되며 심지어 관이 막히는 현상이 발생하기도 한다. 이 부분에 있어서 앞으로 더 많은 실험과 분석이 요구되는 사항이다.

Table 3.1 Fresh water generated(ton/day)

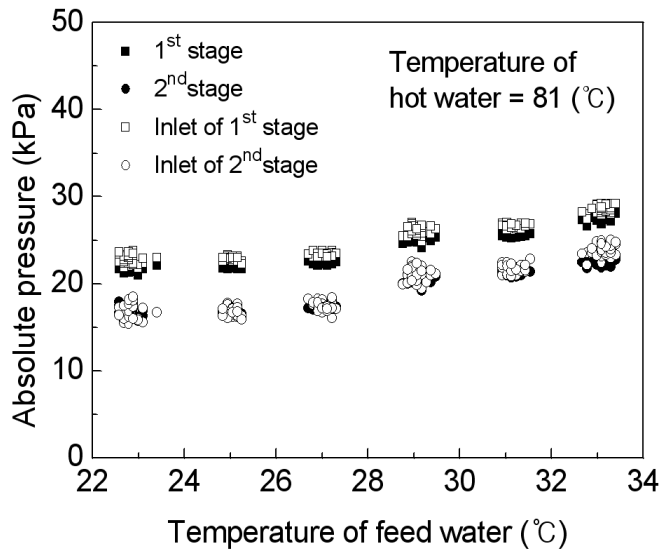
		Controlled temperature of hot water(℃) (Operated temperature of hot water)				
		77	79 (75.2~76.5)	81 (77.1~78.3)	83 (80.1~81.1)	85 (81.7~83.2)
Temperature of feed water(℃)	22	F	F(0.413)	1.008	1.085	
	24	F	F(0.322)	1.008	1.123	1.003
	26	F	F(0.302)	0.960	1.075	0.878
	28	F	F(0.264)	0.768	0.922	0.811
	30	F	F(0.216)	0.720	0.883	0.662
	32	F	F	F(0.614)	0.749	0.653

Table 3.2 Temperature differences between inlet temperature of hot water and saturated temperature of the 1<sup>st</sup> stage(°C)

		Controlled temperature of hot water(°C) (Operated temperature of hot water)		
		81 (77.1~78.3)	83 (80.1~81.1)	85 (81.7~83.2)
Temperature of feed water(°C)	24	14.9	15.7	13.9
	26	14.8	15.5	12.7
	28	14.5	14.2	12.4
	30	12.1	14.2	11.4
	32	10.6	12.5	11.7

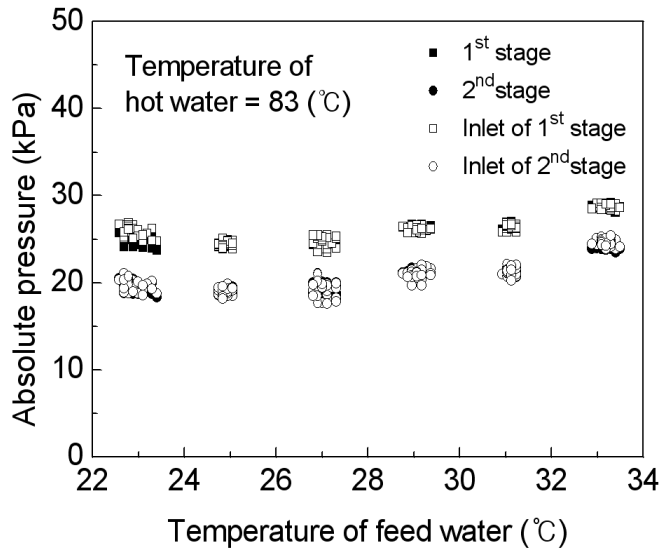


(a) Pressure variation in case of 79°C hot water

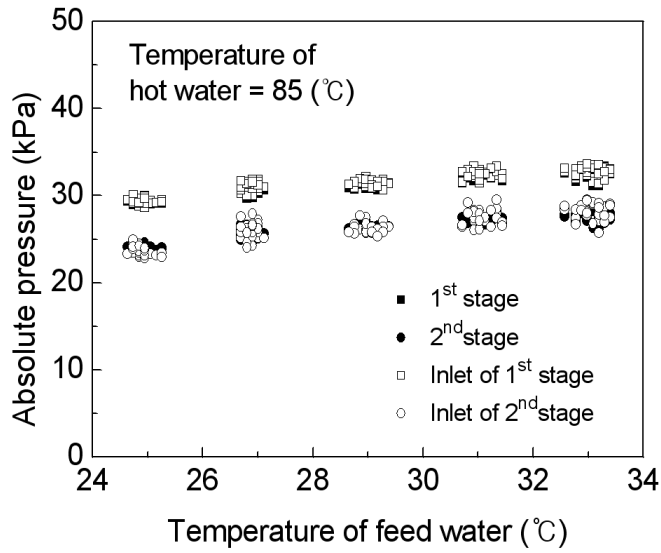


(b) Pressure variation in case of 81°C hot water

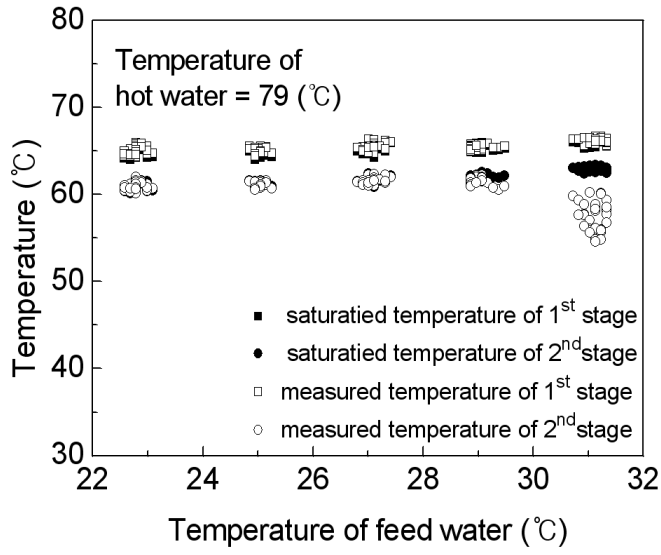
Fig 3.3 Absolute pressure variations at each stage and inlet of stage with the temperatures of feed water



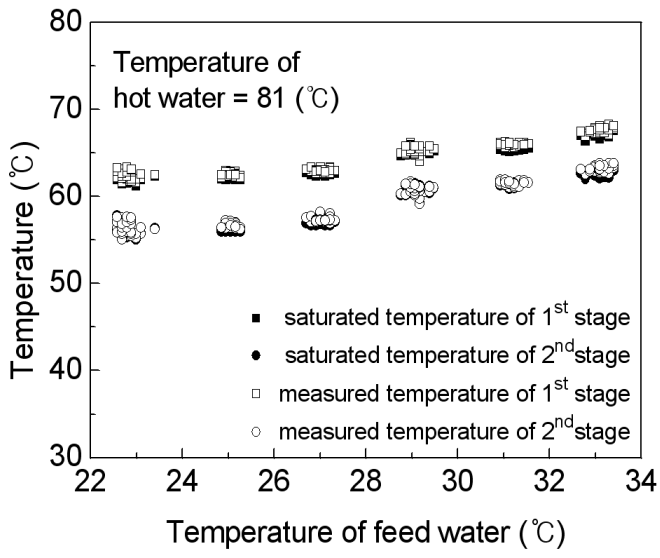
(c) Pressure variation in case of 83°C hot water



(d) Pressure variation in case of 85°C hot water

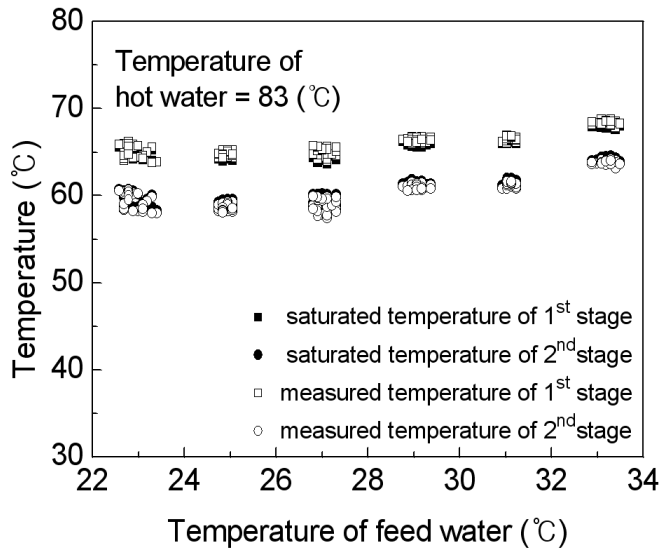


(a) Temperature variation in case of 79°C hot water

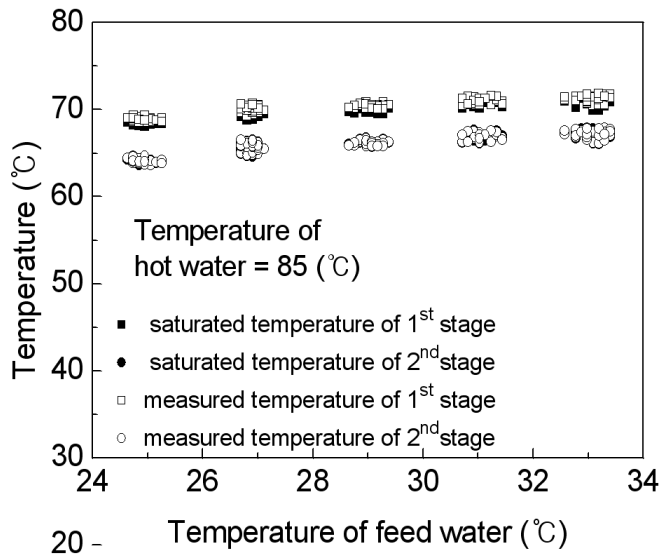


(b) Temperature variation in case of 81°C hot water

Fig 3.4 Temperature variation at each stage with the temperatures of feed water

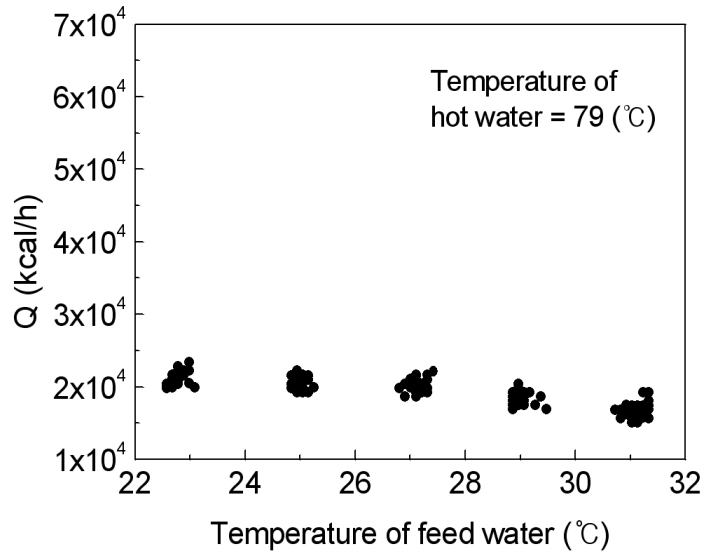


(c) Temperature variation in case of 83°C hot water

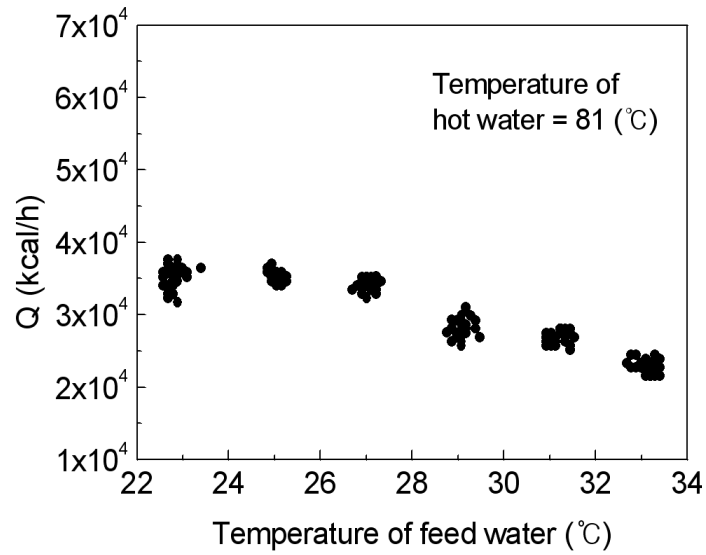


(d) Temperature variation in case of 85°C hot water



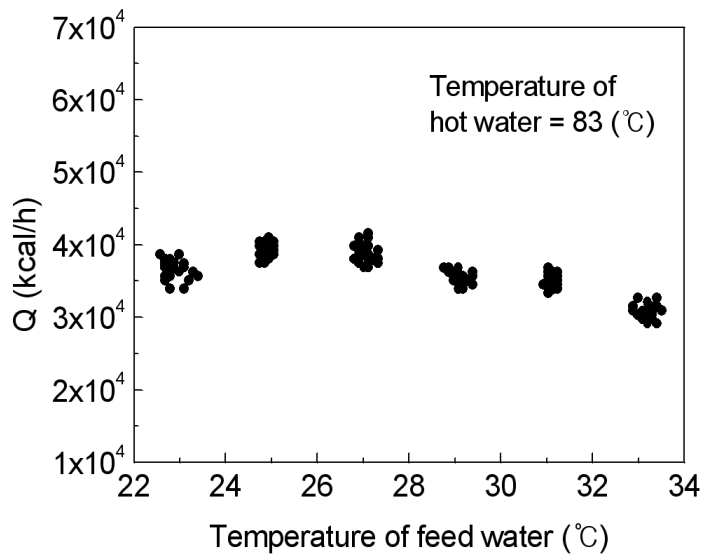


(a) Heat transfer rate variation in case of 79°C hot water

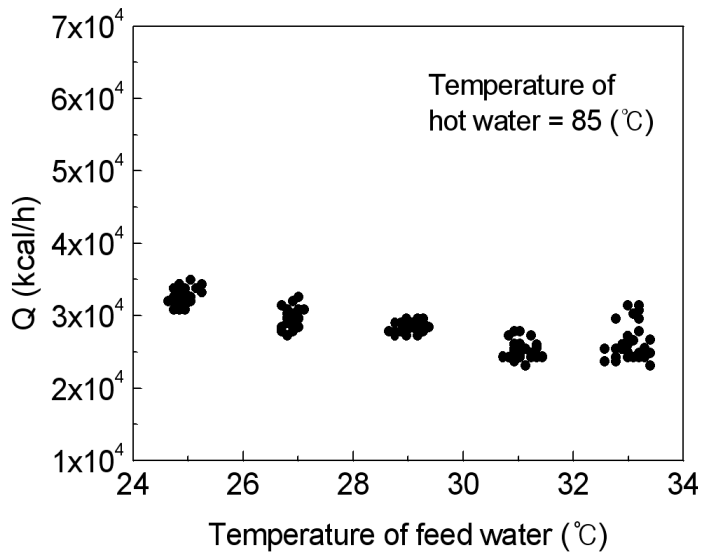


(b) Heat transfer rate variation in case of 81°C hot water

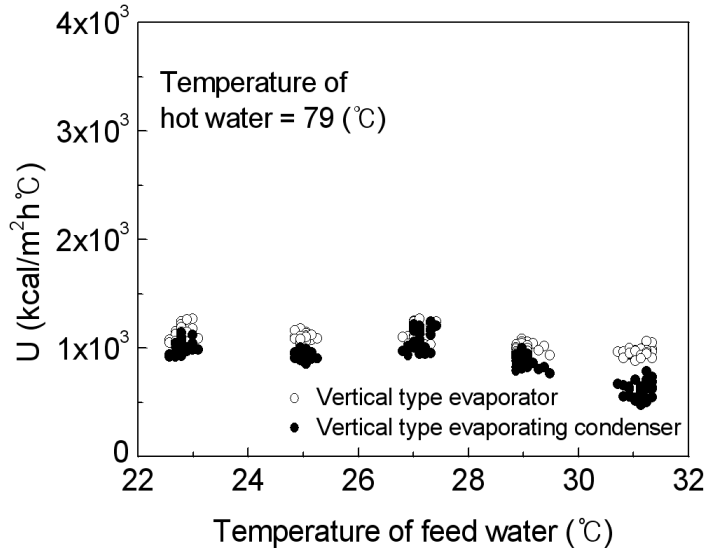
Fig 3.5 The impacts of hot water temperature on heat transfer rates



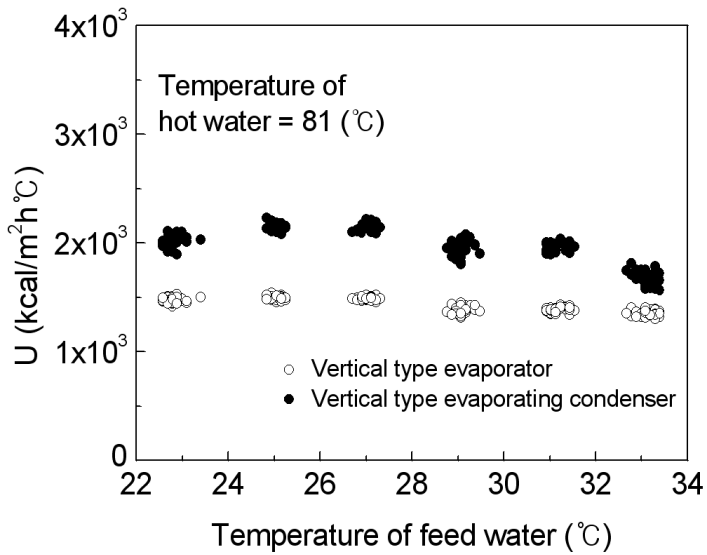
(c) Heat transfer rate variation in case of 83°C hot water



(d) Heat transfer rate variation in case of 85°C hot water

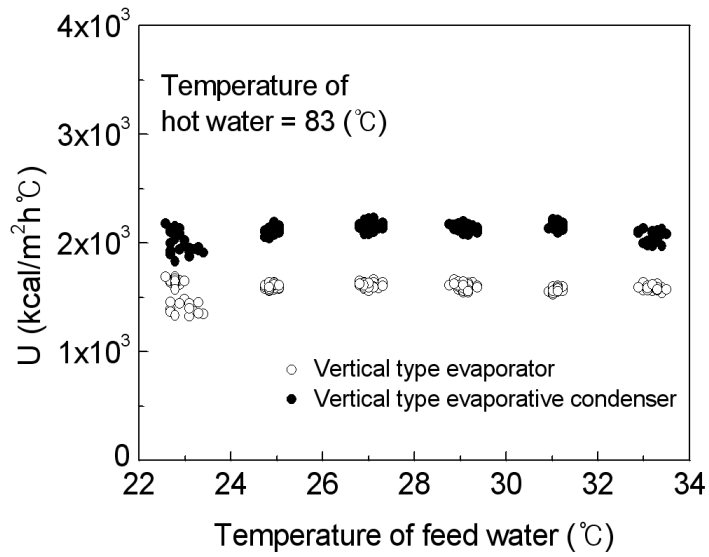


(a) Overall heat transfer coefficient variation in case of 79°C hot water

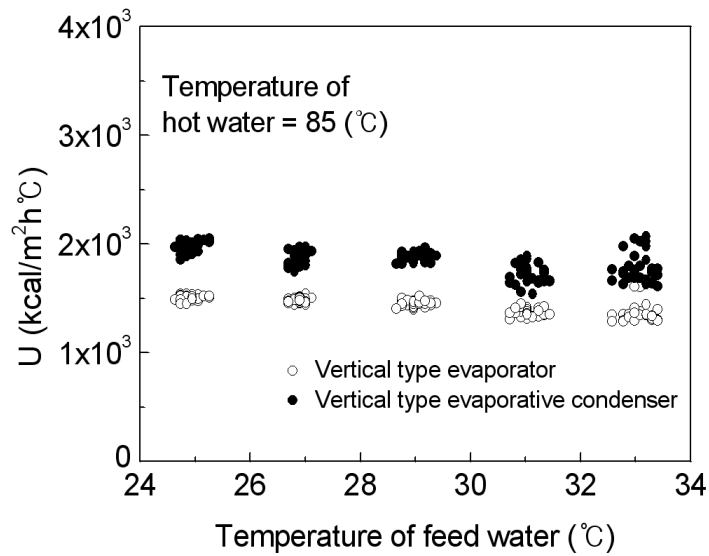


(b) Overall heat transfer coefficient variation in case of 81°C hot water

Fig 3.6 Overall heat transfer coefficient in each case of hot water temperature



(c) Overall heat transfer coefficient variation in case of 83°C hot water



(d) Overall heat transfer coefficient variation in case of 85°C hot water

## 제 4 장 결 론

선박용 감압 증발식 담수장치를 이중 효율 담수화기로 변경하여 작동유무와 구동수와 가열온수의 온도변화를 통해 담수장치의 안전한 작동상태를 조사하였다. 가열온수를 통해 전달된 열량과 열관류율, 압력과 온도 조건의 분석을 통한 결론은 다음과 같다.

- (1) 기존의 감압증발 장치에서 다중효용방식으로 쉽게 전환이 가능하며 작동이 제대로 이루어진다. 또한 20%이상의 연료절감 효과를 기대할 수 있다.
- (2) 구동수와 가열온수의 입구온도가 각각 20℃에서 32℃, 77℃에서 85℃로 증가시킬수록 1단과 2단의 압력과 온도가 비례적으로 증가한다.
- (3) 본 실험 장치에서는 각단의 온도가 높아짐에 따라 포화압력이 변하게 되며 장치내의 증발에도 영향을 끼친다.
- (4) 각단의 압력과 온도는 가열온수와 공급수의 온도차가 클수록 증가 한다.

본 실험 장치와 실험조건을 통해, 가열온수온도가 80℃정도의 조건에서 최적의 담수량이 생성되는 것을 알 수 있다.

## 참고 문헌

- 1) 신현국, 환경동네 이야기, 리즈앤북(2004).
- 2) 한국수자원공사 홍보실, 물과 미래, 한국수자원공사(2007).
- 3) Keitner, G.F., Is there a water crisis, Int. Desalination and Water Reuses, Vol.7, pp. 10-21(1998).
- 4) UNDP(United Nations Development Programme), Human Development Report 2006, UNDP(2006).
- 5) Zhang, L., Xie, L., Chen, H-L., Gao, C-J., Progress and Prospects of Seawater Desalination in China, Desalination, Vol. 182, pp. 13-18(2005).
- 6) Hinkebien T. E. and Price, M. K., Progress with the Desalination and Water Purification Technologies US Road map, Desalination, Vol. 182, pp. 19-28(2005).
- 7) 건설교통부 수자원국, 수자원장기종합계획(Water Vision 2020) 보고서, 건설교통부(2000).
- 8) DICER편집부, 해수담수화를 위한 수처리 공법, DICER TechInfo Part2, Vol.3, No.10, pp. 506~512(2004).

- 9) Doosan hydro technology, [http://doosan.mitymo.com/Doosan web site](http://doosan.mitymo.com/Doosan_web_site)(2007).
- 10) 최보규, 구병수, 김희동, 김덕줄, 추기 펌프형 아음속/음속 이젝터 유동에 관한 수치 해석적 연구(Computations of the Bleed-Pump Type Subsonic/Sonic Ejector Flows), 대한기계학회논문집 B권 제25권 제2호 (2001).
- 11) Hewitt G. F., Shires G. L., and T. R. Bott, Process Heat Transfer, CRC Press(1996).
- 12) Kafi F., Renaudin V., Alonso D., Hornut J.M., New MED plate desalination process : Thermal performances, Desalination Vol. 166, pp. 53-62(2004).
- 13) Hesham T. E., Hisham M. E., Yousef Al-Roumi, Multi-stage flash desalination : present and future outlook, Desalination Vol. 73, pp. 173-190(1999).

## 감사의 글

학위논문이라는 작은 결과물을 빌어 2년이 넘는 소중한 시간들을 함께해준 많은 분들에게 고마움을 표합니다.

우선 대학원을 이끌어 주시고 많은 것을 가르쳐주신 정형호 교수님께 감사드립니다. 그리고 많은 가르침을 주시고 바쁘신 중에도 끝까지 관심을 가지고 논문을 심사해주신 이영호 교수님, 도덕희 교수님께도 감사드립니다.

석사과정동안 논문에 앞서 사람을 남기기 위해 노력하고 싶었습니다. 실험실에서 동고동락하며 많은 것을 함께한 실험실 식구들 경록형, 유상재, 영주, 기표, 재홍, 동근, 태일, 주현, 지은에게 고마운 마음을 전합니다.

대학원이라는 울타리 속에서 함께한 사람들 경규형, 옥근형, 황상재, 정택, 정형, 영환, 상우, 인선, 지선, 명국, 동훈, 소연, 그리고 나보다 먼저 취직해서 길을 떠난 동기들 현권, 기열, 진석 모두들 잊지 않겠습니다. 무엇보다 나의 대학원생활에 있어서 가장 힘이 되어준 두 사람에게 진심으로 감사드립니다. 화진, 종진 정말 고맙다.

마지막으로, 지금까지 부족한 아들을 믿어주시고 든든하게 지켜주신 아버님과 사랑으로 키워주신 어머니, 많은 도움과 애정을 준 누나에게 고마움을 전하면 가족 모두가 행복하길 진심으로 바랍니다.