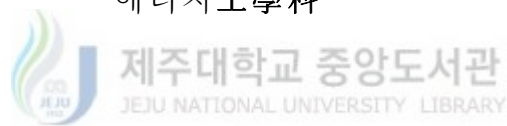


碩士學位論文

맨틀형 蓄熱槽의 熱傳達 特性에 관한  
實驗的 研究

濟州大學校 大學院

에너지工學科



尹 鉉 植

2000年 12月

# 맨틀형 蓄熱槽의 熱傳達 特性에 관한 實驗的 研究


指導教授 李 潤 俊

尹 鉉 植

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2000年 12月

尹鉉植의 工學碩士學位 論文을 認准함

 제주대학교 중앙도서관  
審査委員長 이 윤 준 印  
委 員 천 원 기 印  
委 員 강 용 혁 印

濟州大學校 大學院

2000年 12月

Experimental Study on the Heat Transfer  
Characteristics of Mantle Tank

Hyun-Sik Yoon  
(Supervised by Professor Yoon-Joon Lee)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE  
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF  
ENGINEERING

DEPARTMENT OF NUCLEAR AND ENERGY ENGINEERING  
GRADUATE SCHOOL LIBRARY  
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2000. 12.

# 목 차

LIST OF FIGURES .....	iii
LIST OF TABLES .....	vi
NOMENCLATURE .....	vii
SUMMARY .....	viii
I. 서 론 .....	1
1. 연구 배경 .....	1
2. 연구 동향 .....	3
3. 연구 목적 .....	4
II. 이론적 배경 .....	6
III. 실험장치 및 실험방법 .....	10
1. 실험 장치 .....	10
1) 축열조 사양 .....	10
2) 온도조절탱크 .....	13
3) 축열조의 설치방법 .....	14
4) 데이터의 수집 및 열전대 보정 .....	17
2. 실험방법 .....	20

1) 열교환 성능 실험 .....	20
2) 배수 실험 .....	20
<b>IV. 결과 및 고찰 .....</b>	<b>22</b>
1. 축열조의 설치형태에 따른 열전달특성 .....	22
1) 수직형 축열조 .....	22
2) 수평형 축열조 .....	25
3) 열전달 계수 .....	33
2. 축열조의 높이/반경의 비(Aspect ratio)에 따른 열전달계수 .....	37
1) 수직형 축열조 .....	37
2) 수평형 축열조 .....	38
3. 맨틀 간격에 따른 열전달계수 .....	40
4. 축열조내 성층화 분석 .....	42
1) 축열조 내 성층화 현상 .....	42
2) 수직형 축열조의 상부와 하부의 온도차 .....	45
3) 수평형 축열조의 상부와 하부의 온도차 .....	46
4) 설치형태에 따른 온도 성층화의 비교 .....	47
5. 이용성능분석 .....	48
1) 축열조 II .....	48
2) 축열조 IV .....	48
<b>V. 결 론 .....</b>	<b>51</b>
<b>참 고 문 헌 .....</b>	<b>53</b>

## LIST OF FIGURES

Fig 1. Overall energy balances for the hot and cold fluids of a two-fluid exchanger .....	6
Fig. 2 Schematic of mantle storage tank .....	10
Fig. 3 Photograph of manufactured mantle storage tank(Tank I) .....	11
Fig. 4 Insulated storage tank .....	12
Fig. 5 Hot water supplier .....	13
Fig. 6 Schematic of Thermocouple location and configurations of tank ·	15
Fig. 7 Probes for measuring temperature in storage tank .....	15
Fig. 8 Schematic of experimental apparatus for horizontal tank .....	16
Fig. 9 Photograph of horizontal storage tank .....	16
Fig. 10 Schematic of experimental apparatus for vertical tank .....	17
Fig. 11 Photograph of vertical storage tank .....	18
Fig. 12 Photograph of thermocouple calibration .....	19
Fig. 13 Graph of thermocouple calibration .....	19
Fig. 14 Temperature distribution in the tank I: vertical type .....	23
Fig. 15 Temperature distribution in the Tank II: vertical type .....	24
Fig. 16 Temperature distribution in the tank III: vertical type .....	24
Fig. 17 Temperature distribution in the Tank IV: vertical type .....	25
Fig. 18 Temperature distribution in the tank I: horizontal type (a) .....	28
Fig. 19 Temperature distribution in the tank I: horizontal type (b) .....	28
Fig. 20 Temperature distribution in the Tank II: horizontal type (a) .....	29
Fig. 21 Temperature distribution in the Tank II: horizontal type (b) .....	29
Fig. 22 Temperature distribution in the Tank III: horizontal type (a) .....	30

Fig. 23	Temperature distribution in the Tank III: horizontal type (b) .....	30
Fig. 24	Temperature distribution in the Tank IV: horizontal type (a) ..	31
Fig. 25	Temperature distribution in the Tank IV: horizontal type (b) ..	31
Fig. 26	Temperature distribution in the Tank V: horizontal type (a) .....	32
Fig. 27	Temperature distribution in the Tank V: horizontal type (b) .....	32
Fig. 28	Overall heat transfer coefficients for arrangements of Tank I ..	33
Fig. 29	Overall heat transfer coefficients for arrangements of Tank II ..	34
Fig. 30	Overall heat transfer coefficients for arrangements of Tank III	35
Fig. 31	Overall heat transfer coefficients for arrangements of Tank IV	36
Fig. 32	Overall heat transfer coefficients for arrangements of Tank V ·	36
Fig. 33	Overall heat transfer coefficients for aspect ratio of tanks: vertical type .....	38
Fig. 34	Overall heat transfer coefficients for aspect ratio of tanks: horizontal type (a) .....	39
Fig. 35	Overall heat transfer coefficients for aspect ratio of tanks: horizontal type (b) .....	40
Fig. 36	Overall heat transfer coefficients for mantle interval of tanks: vertical type .....	41
Fig. 37	Overall heat transfer coefficients for mantle interval of tanks: horizontal type (a) .....	41
Fig. 38	Overall heat transfer coefficients for mantle interval of horizontal tanks: horizontal type (b) .....	42
Fig. 39	Stratification in the storage tank I : vertical type .....	43
Fig. 40	Stratification in the Tank I: horizontal type (a) .....	44
Fig. 41	Stratification in the Tank I: horizontal type (b) .....	44

Fig. 42 Temperature differences between top and bottom: vertical type	45
Fig. 43 Temperature differences between top and bottom : horizontal type (a) .....	46
Fig. 44 Temperature differences between top and bottom : horizontal type (b) .....	47
Fig. 45 Inlet and outlet temperatures for drawing experiments of Tank II .....	49
Fig. 46 Inlet and outlet temperatures for drawing experiments of Tank IV .....	50





# LIST OF TABLES

Table 1. Measures of mantle storage tanks .....	11
Table 2. Overall heat transfer coefficients .....	51



## NOMENCLATURE

$q$	:	Total rate of heat transfer between the hot and cold fluids
$\dot{m}$	:	Flow rate
$C_p$	:	Specific heat
$\Delta T$	:	Temperature difference between hot and cold fluids
$T_{in}$	:	Inlet temperature
$T_{out}$	:	Outlet temperature
$UA$	:	Overall heat transfer coefficient
$T_m$	:	Mean temperature
$C_h$	:	Hot fluid heat capacity rates
$C_c$	:	Cold fluid heat capacity rates
$dA$	:	Heat transfer surface area of differential elements
$dq$	:	Total rate of heat transfer of differential elements
$\dot{m}_h$	:	Flow rate of hot fluid
$\dot{m}_c$	:	Flow rate of cold fluid
$dT_h$	:	Temperature difference of hot fluid
$dT_c$	:	Temperature difference of cold fluid
$T_B$	:	Bulk temperature in the storage tank
$T_{top}$	:	Temperature of top of the storage tank
$T_{bottom}$	:	Temperature of bottom of the storage tank

# SUMMARY

The heat transfer characteristics of a horizontal and vertical mantle tanks are studied in order to assess the possibility of replacing the tank-in-coil heat exchanger, which has been used for thermosyphon-type solar water heaters for many years. Short term energy monitoring is conducted in a number of cases to elicit the most optimal system configuration assuring the maximum thermal performance.

In this study, five mantle tanks are constructed using stainless steel that are different geometrically : volume, aspect ratio, and mantle space. Performance data of these tanks are examined and analyzed to determine the most suitable design to be applied for solar systems in reality. Each tank is installed either vertically or horizontally.

There are two different schemes for horizontal installation. Of these, one locates both the inlet and outlet for the heat transfer fluid at the bottom of the tank. This is referred to as type (a). The other, referred to as type (b), differs from type (a) in that it places inlet near the top of the tank. The inlet mass flow rate and mantle temperature are uniformly maintained at 1.2 liter/min and  $70\pm 1^{\circ}\text{C}$ , respectively.

Temperatures are measured at 26 points including one point for monitoring the ambient temperature. 21 points are evenly distributed on

the surface of the tank. The remaining 4 points are located at the inlet and outlet of both the interior and mantle tank. Using the measured temperatures with the LMTD (Log Mean Temperature Difference) method, the overall heat transfer coefficients are calculated and the heat transfer characteristics are investigated in order to obtain the optimal configuration.

The heat transfer rate of horizontal type (b) has shown the best performance compared to other cases. If the volume is identical, the tank with larger aspect ratio gives higher overall heat transfer coefficient than the one with smaller aspect ratio. The heat transfer coefficient increases proportionally with the establishment of thermal stratification within the tank.



# I. 서 론

## 1. 연구 배경

우리 나라와 같이 에너지 자원이 부족한 나라에서는, 에너지의 효율적 이용에 대한 기술 개발이 매우 중요하고 시급한 사항이다. 에너지를 효율적으로 이용하는 방법중의 하나는 에너지 저장 시스템을 사용하여 에너지를 적당한 형태로 저장한 후 용도에 맞게 변환시켜 사용하는 것이다.

에너지 저장은 열적 저장, 화학적 저장, 기계적 저장 및 전.자기적 저장등으로 분류되며, 그 중에서도 열적 저장은 매우 유용한 에너지 저장수단이 될 수 있다. 열 저장은 열의 공급과 수요 사이에 시간적 공간적 격차가 있거나 태양열과 같이 간헐적인 열원을 효과적으로 활용코자 할 때 필요한 방법이다. 이런 에너지 저장기술은 흐린 날과 같이 얻을 수 있는 에너지가 작은 날에 청명한 날에 얻어진 잉여 에너지를 사용하기 위한 태양열 에너지 시스템에 적용되어 왔다. 열 에너지의 저장방법에는 저장 매질의 온도 상승으로 인해서 에너지를 저장하는 현열 저장(sensible heat storage)방법과 저장 매질의 상변화시 잠열 에너지를 이용하는 잠열 저장(latent heat storage)방법으로 나눌 수 있으며, 대부분의 태양열 온수 시스템에서는 현열 저장의 방법이 사용되고 있다.

태양열 온수급탕 시스템의 축열조에서의 열교환 방식은 두 가지 유형으로 분류되는데, 첫째는 가열된 물이 집열기에서 직접 저장탱크로 들어가서 집열 매질과 저장매질의 두 가지 역할을 하는 것과, 둘째는 저장 탱크 내에서 물과 집열 유체 사이에 열교환기를 이용하는 것으로 분류할 수 있다. 첫 번째 유형은 열교환기의 사용에 의한 열손실을 피함으로써 열역학적으로 효율적이지만, 추운 기후에서 동파에 의한 집열기의 손상을 초래할 수 있는 주된 문제점을 가지고 있다. 이런 문제점을

방지하기 위하여 부동액과 같은 빙점이 낮은 작동 유체를 사용하여 집열기와 탱크 사이의 밀폐 루프 순환 형태를 사용하는 것이 일반적이다. 이런 형태는 동파와 녹이 스는 특성들을 막아주며, 급수 시스템의 요구 압력을 많이 필요로 하지 않고, 운반되는 물에서 집열기로의 슬러지 침전이 이루어지지 않으므로 시스템의 설계를 용이하게 한다.

현재, 태양열 온수 시스템에서 사용되고 있는 축열조는 지역의 기후나 제작원에 따라서 각기 다른 형태로 사용되고 있으며, 축열조 내 하층부에 구리관이 담겨진 것으로 구성된 열교환 방식을 기본으로 하고 있다. 맨틀형 축열조(mantle storage tank)는 Fig. 2에서 보여진 것처럼 저장 매질로 채워진 탱크의 둘레에 집열기에서 나오는 고온의 작동유체가 지날 수 있는 맨틀(mantle) 형태의 열교환기가 설치된 축열조를 말한다. 이때 탱크와 맨틀을 분리하는 벽이 열교환 면적이 된다. 맨틀형 축열조는 밀폐 루프 순환 형태의 관점에서 코일 형태와 내부탱크(tank-in-tank) 형태와 유사하나, 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

- 1) 온수 탱크와 열교환기가 하나의 유닛으로 결합됨에 의한 디자인의 간단성.
- 2) 보다 넓은 열교환면적
- 3) 고효율



열교환기를 가진 밀폐 순환 루프 형태의 태양열 온수 시스템에서 축열조에 대한 수치적인 연구가 많이 수행되어 왔지만 이들 연구는 축열조 내 열교환기의 작은 변화와 특정한 형태에 대한 유동 해석들로 한정되어왔다. 맨틀형 축열조는 태양열 온수 시스템에 20여 년간 사용되어 왔지만, 여러 가지 장점에도 불구하고 그 성능이나 설치 형태에 관한 연구가 진행되어 온 것이 거의 없는 실정이다.

## 2. 연구 동향

열교환장치를 사용한 열싸이펀(thermosyphon)식 태양열 온수기에 대해서 그동안 많은 연구가 이루어졌으나 열교환기의 형태와 배치에 국한되었다. 1981년 Mertol et al.은 열싸이펀식 태양열 온수기에 사용되는 열교환장치를 수치해석하기 위하여 수직탱크의 하단에 설치한 동관으로 제작된 것을 사용하여 열전달 계수를 일정하게 가정하여 모델을 계산하였다. 1987년 Webster et al.은 프로필렌 글리콜을 집열매체로 사용하여 온수탱크에서 열교환 성능을 검증하기 위하여 동파이프 열교환장치를 사용한 실험을 수행하였고, 이 실험적 연구 또한 동관 열교환기로 한정되었고 열교환기 손실 인자를 적용하여 계산될 수 있는 집열기 루프에서의 열교환기 사용 때문에 발생하는 시스템 성능의 저하를 보여주었고, 탱크 내 성층화를 직접 열교환장치와 비교하였다. 1990년 Parent et al.은 탱크에서 셀-튜브 방식을 이용하여 성층화에 의한 밀도차로 유동하는 자연대류 루프를 분석하였다. 또한 1995년 Fraser et al.은 자연대류 유동에 의한 외부 열교환장치를 정의하였으며, 태양열 온수기를 이용한 이 열교환장치에 많은 연구를 수행하였다.

그러나 현재 많이 사용되고 있는 2중 탱크 형태의 열교환장치 성능에 대한 연구는 다른 분야에 비하여 상대적으로 미진하였으며, 1993년 Baur et al.은 에너지 평형식을 풀기 위하여 Nusselt number를 이용하여 평판사이의 층류와 유한차분에 대한 경험적인 상관관계를 구하여 펌프에 의하여 순환하는 태양열 온수기의 수직형 2중 탱크를 연구하였다. 이들의 연구에 의하면, 2중 탱크형 축열조는 단일 장치 내에서 온수탱크와 열교환기가 조합되므로 간단하고 다른 코일형 열교환기에 비하여 전열면적이 넓은 장점이 있음이 입증되었다. 또한 1996년 Shah와 Furbo는 2중 탱크의 열성층화에 대한 연구를 수행하였으며, 1994년에는 Buenconsejo는 수평형 2중탱크의 열교환기에 대한 연구를 가시화 실험을 통하여 수행하였고, Nasr et al.(1996)에 의해 계산적인 모델링이 이루어졌다. 결과들은 내부 탱크가 성층화 되었을 때, 더 많은 열이 탱크의 저면으로 전달되기 때문에 맨틀 열교환기 내에서 재순환 영역이 생기고 따라서 열 성층화가 감소하는 것을

보여주었다. 수평형으로 설치된 축열조의 맨틀 내에서의 유동은 자연대류에 의해 지배적이지는 않지만 부력이 유동장을 바꾸는 것이 나타났고 따라서 혼합된 대류 영역에서의 유동이 나타났다.

위와 같이 맨틀형 축열조에 대한 연구는 특정한 형태의 축열조에 한해서 실험식과 실험 값을 통한 보정 형식의 전산해석에 의해 그 성능이 해석되어왔고, 현재 이런 범위 내에서 연구가 진행되어지고 있다.

본 논문에서는 하나의 맨틀형 축열조를 설치형태를 바꾸어 성능을 파악하고, 축열조의 용량, 높이와 반경의 비(Aspect ratio)에 따른 열전달 경향, 그리고 맨틀 간격에 따른 열전달 경향을 축열조 전체의 열전달계수(overall heat transfer coefficient)를 통하여 분석해 보고자 한다.

### 3. 연구 목적

국내의 온수 급탕 시스템에서 보편화되어 있는 코일형 축열조에 비해 고효율의 장점을 가지고 있는 맨틀형 축열조의 성능에 대한 연구는 태양열 온수급탕 시스템에서 열저장 측면에서의 성능을 향상시킴으로써, 시스템의 이용 효율을 높일 수 있을 것으로 기대된다. 맨틀형 축열조의 넓은 열교환 면적과 저유량에서 동작함을 기본으로 본 연구에서는 맨틀형 축열조의 효과적인 이용을 위한 열교환 성능을 알아보고자 다음과 같은 연구 목적을 설정하여 수행하였다.

- 1) 맨틀형 축열조의 열교환성능의 설치 방법에 따른 비교를 위해 동일한 기하학적 형태의 축열조를 수직과 수평형으로 설치하여 열교환 실험을 수행함으로써 각각의 축열조 내부의 온도 상승분포를 제시하였다.
- 2) 설치 방법에 따른 축열조 내의 총 열전달 계수(overall heat transfer



coefficient: UA) 값을 산정하였다.

- 3) 축열조의 높이/반경의 비(aspect ratio)에 따른 열전달 계수와 맨틀의 간격에 따른 열전달 계수 값을 비교 평가하였다.
- 4) 배수실험을 통하여 효과적인 배치 형태를 제시하였다.



## II. 이론적 배경

맨틀형 축열조의 열교환 성능을 계산하기 위하여 우선 축열조에서의 에너지 평형식은 식(2.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = \dot{m}C_p(T_{in} - T_{out}) = UAT_m \quad (2.1)$$

대수평균온도차  $T_m$ 은 수평형 이중탱크 축열조인 경우에 축열조의 내부탱크와 맨틀 사이에 검사체적을 설정하고, 내부 유동을 고온과 저온의 유체가 지나는 열교환기 내에서의 평행류(parallel flow)로 가정하면, Fig. 1처럼 나타낼 수 있다.

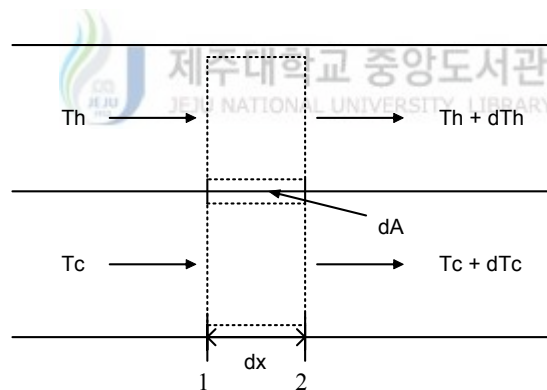


Fig 1. Overall energy balances for the hot and cold fluids of a two-fluid exchanger

각각의 찬물과 더운물의 입·출구 온도를 표기하고, 다음과 같은 가정을 하였다.

1. 외부와 단열이 되어있다.
2. 관내 축방향 열전달 무시할 수 있다.

3. 위치에너지(potential energy)와 운동에너지(kinetic energy)는 무시할 수 있다.
4. 온도 변화에 따른 비열이 일정하다.
5. 축열 탱크의 열전달계수(heat transfer coefficient)가 일정하다.

따라서, 미소 열전달 면적으로 전달되는 열량  $dq$ 는 식(2.2)와 (2.3)처럼 나타낼 수 있다.

$$dq = -\dot{m}_h \cdot C_p \cdot dT_h = -C_h \cdot dT_c \quad (2.2)$$

$$= \dot{m}_c \cdot C_{p,c} \cdot dT_c = C_c \cdot dT_c \quad (2.3)$$

여기서,  $C_h$ ,  $C_c$  : 열용량(thermal capacity)

면적  $dA$ 를 통하여 전달되는 에너지는,

$$dq = U dA \Delta T \quad (2.4)$$

여기서,  $\Delta T = T_h - T_c$

$$d(\Delta T) = dT_h - dT_c$$

식(2.2)와 (2.3)으로부터,

$$dq = -\frac{d(\Delta T)}{\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c}} \quad (2.5)$$

식(2.5)와 식(2.4)를 이용하여 식(2.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -U dA \left( \frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right) \quad (2.6)$$

식(2.6)의 양변을 미소구간(1-2)에 걸쳐서 적분하면 식(2.7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right) = -UA\left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c}\right) \quad (2.7)$$

식(2.7)은 다시 식(2.8)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right) &= -UA\left(\frac{T_{h1} - T_{h2}}{q} + \frac{T_{c2} - T_{c1}}{q}\right) \\ &= -\frac{UA}{q}[(T_{h1} - T_{c1}) - (T_{h2} - T_{c2})] \end{aligned} \quad (2.8)$$

여기서,  $\Delta T_1 = T_{h1} - T_{c1}$ ,  $\Delta T_2 = T_{h2} - T_{c2}$

수평형 축열조에서는 수평방향으로의 온도 구배가 거의 없으며 또한 수평/수직의 비율이 작으므로 그 성층화 효과를 축열조 내부의 대표온도  $T_B$ (Bulk Temperature)를 적절하게 설정하면서 무시할 수 있다.

즉,  $T_{h1} = T_{in}$ ,  $T_{h2} = T_{out}$ ,  $T_{c1} = T_{c2} = T_B$

로 놓을 수 있다. 따라서, 식(2.8)은 다음과 같다.

$$q = -UA \frac{T_{in} - T_{out}}{\ln[(T_{out} - T_B)/(T_{in} - T_B)]}$$

$$\therefore T_m = \frac{T_{in} - T_{out}}{\ln\left(\frac{T_B - T_{in}}{T_B - T_{out}}\right)} \quad (2.9)$$

여기서, 식(2.1)의 에너지 균형식을 이용하면 UA는 식(2.10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$UA = \dot{m} \cdot C_p \cdot \ln\left(\frac{T_B - T_{in}}{T_B - T_{out}}\right) \quad (2.10)$$

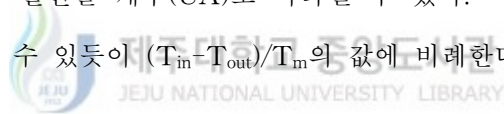
수직형의 경우에는 축열조의 높이/반경의 비가 크므로 성층화의 영향으로 축열조의 높이 방향에 따른 온도구배가 심하다. 그러므로  $T_m$ 의 계산에 있어서  $T_B$ 를 이용하여 일괄적인 UA값의 산정이 어렵다. 따라서, 수직형에서는

$$T_{h1} = T_{in}, T_{h2} = T_{out}, T_{c1} = T_{top}, T_{c2} = T_{bottom}$$

으로 온도를 설정하고 수평형에서와 동일한 UA값의 계산을 수행하면, 식(2.11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$UA = \dot{m} \cdot C_p \frac{(T_{in} - T_{out}) \cdot \ln[(T_{in} - T_{top}) / (T_{out} - T_{bottom})]}{(T_{in} - T_{out}) - (T_{top} - T_{bottom})} \quad (2.11)$$

즉, 축열조로 전달되는 열량은 동일한 유량에 일정한 비열을 가진 유체에 대하여 작동유체의 입·출구 온도차로 나타낼 수 있으며, 이는 축열조 내부의 열교환방식에 따른 평균온도차와 열전달 계수(UA)로 나타낼 수 있다. 여기서, UA값은 식(2.10)과 식(2.11)에서 볼 수 있듯이  $(T_m - T_{out}) / T_m$ 의 값에 비례한다.



### III. 실험장치 및 실험방법

#### 1. 실험 장치

##### 1) 축열조 사양

맨틀형 축열조의 열성능 실험을 위해 제작된 축열조는 100 리터와 200 리터 용량의 축열조를 맨틀의 간격과 높이/반경의 비를 다르게 하여 5개를 제작하였다. 실제 제작된 축열조의 사양은 Fig. 2와 Table 1과 같다.

Fig. 2는 제작된 맨틀형 축열조의 형태를 개략적으로 나타낸 것이며 그림에 나타난 알파벳에 해당하는 치수는 Table 1에 나타내어졌다. a는 축열조 축방향의 길이, b는 맨틀의 축방향 길이, c는 내부탱크의 반경, d는 축열조 축방향의 끝단에서 맨틀까지의 길이, e는 맨틀의 간격을 나타낸 것이다.

Fig. 3는 실제 제작된 축열조들 가운데 축열조 I을 나타낸 것이다. 실제 제작된 축열조는 Fig. 3에서 보이는 것처럼, 제작상의 문제로 인해서 내부탱크의 축 방향 전반에 걸쳐서 맨틀이 둘러 쌓여있지 않기 때문에 축 방향의 양 끝단은 맨틀내부의 유체로부터의 열전달을 받지 못한다.

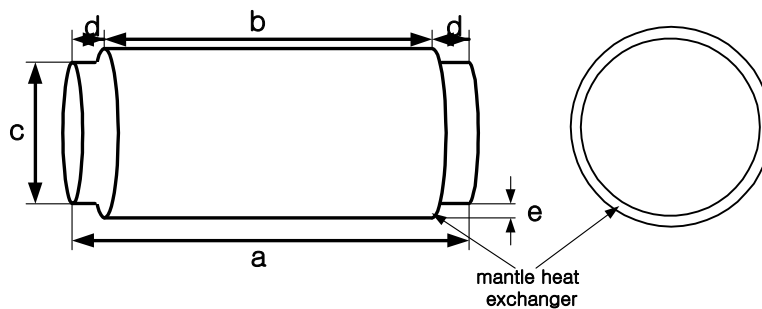


Fig. 2 Schematic of mantle storage tank

Table 1. Measures of mantle storage tanks

	a [cm]	b [cm]	c [cm]	d [cm]	e [cm]	용량 [ℓ]	Aspect ratio
축열조 I (Tank I)	96	80	38	8	1	100	2.526
축열조 II (Tank II)	96	80	38	8	0.5	100	2.526
축열조 III (Tank III)	135	122	44	6.5	1	200	3.068
축열조 IV (Tank IV)	117	101	48	8	1	200	2.437
축열조 V (Tank V)	186	171	38	7.5	1	200	4.895



Fig. 3 Photograph of manufactured mantle storage tank(Tank I)

Table 1의 사양대로 제작된 각각의 축열조는 실험을 위해 그 표면에 단열이 이루어졌다. 축열조의 단열작업은 Fig. 4에서 보여지는 것처럼 2.5 cm 두께의 다공성 고무재질의 단열재로 축열조의 겉표면을 두르고 비닐 테잎으로 둘러싸는 형태로 수행을 하였다.



Fig. 4 Insulated storage tank



## 2) 온도조절탱크

축열조의 열성능 실험에 사용된 온도조절탱크는 Fig. 5와 같다. 그림에서 보이는 4개의 스테인레스 탱크는 용량이 각각 150ℓ로 앞쪽에 보이는 콘트롤 박스에 설치되어 있는 온도조절기에 의해 각 탱크에 내장되어 있는 전기 히터의 전력을 비례 제어하여 탱크 내 물의 온도를 조절할 수 있도록 되어 있다. 즉, 모든 탱크는 온도조절기가 각각 설치되어 있어, 설정 온도를 탱크마다 실험 수행자가 원하는 온도로 조절할 수 있게 되어있다. 또한, 각각의 탱크에는 물의 온도를 일정하게 하기 위해 순환펌프가 설치되어 있다. 각 탱크의 하단에는 솔레노이드 밸브를 설치하여 실험을 위해 온도의 변화를 필요로 할 때 탱크의 교체를 원활하게 할 수 있도록 하였다. 실험 장치에서 나오는 물의 유량을 조절하기 위해 탱크 출구에 펌프를 설치하였고, 정확한 유량 조절을 위해 펌프 출구부분에 유량계를 설치하였다.



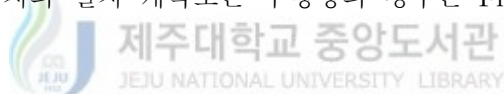
Fig. 5 Hot water supplier

## 3) 축열조의 설치방법

축열조의 설치는 각각의 동일한 축열조에 대하여 수직과 수평으로 설치하여 실험을 수행하였다. 이때, 수평형의 경우는 작동유체 입·출구의 위치를 바꾸어 그 설치 형태가 두 가지 이다. 하나는 작동유체 입·출구가 축열조의 하부에 위치하며, 다른 하나는 작동유체 입구가 축열조의 상부에 위치, 출구가 축열조의 하부에 위치하도록 설치하였다. 열전대의 위치는 수평 설치 시 축열조를 상·중·하부로 나누고 각 부위의 중심에 7개의 측정 포인트를 가진 세 개의 Probe를 삽입하였다. Fig. 6는 축열조의 설치 형태와 열전대의 위치를 나타낸다. Fig. 7은 실제 실험을 위해서 제작한 probe이다.

유량의 정확성을 위해 온도조절탱크의 펌프 앞에 위치한 유량계를 제외하고 축열조의 작동유체 입구와 축열조 내 급수 입구에 각각 유량계를 설치하였다. 축열조와 맨틀의 교반을 위해 각각에 순환펌프를 설치하였고, 이는 실험 개시 전, 축열조 내 물의 온도와 맨틀 내 유체의 온도를 균일하게 유지하고, 축열조의 축열 실험 후 배수 실험 전에 축열조 내의 성층화를 없애기 위해 사용되었다.

완성된 축열조 실험장치의 설치 개략도는 수평형의 경우는 Fig. 8, 수직형의 경우는 Fig. 10과 같다.



실제 설치된 축열조는 수직형과 수평형 각각 Fig. 9와 Fig. 11에서 보여진다. 실제 설치된 축열조의 사진은 전체 시스템을 나타낸 것이 아니라 설치된 축열조만을 나타낸 것이다.

Fig. 8은 앞 절에서 언급한 수평형 축열조의 두 가지 형태 가운데, 작동유체의 입·출구가 축열조의 하단에 위치한 형태를 나타낸 것이다.

축열조의 급수펌프와 온수출구에 연결된 라인은 열 저장을 위한 물이 들어가고 나오는 1차 루프이며, 그림 하단의 작동유체로 온수를 공급하는 두 개의 탱크와 연결되어 있는 라인은 2차 루프를 나타낸다. 각각의 루프에 설치된 순환펌프는 하나는 맨틀형 축열조의 내부 탱크의 물을 교반하는 데 사용되고, 다른 하나는 맨틀내의 물을 교반하는 데 사용되었다.

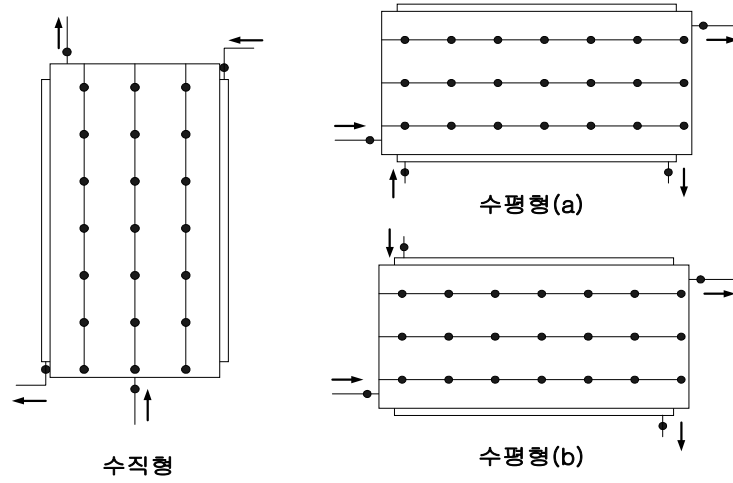


Fig. 6 Schematic of Thermocouple location and configurations of tank



Fig. 7 Probes for measuring temperature in storage tank

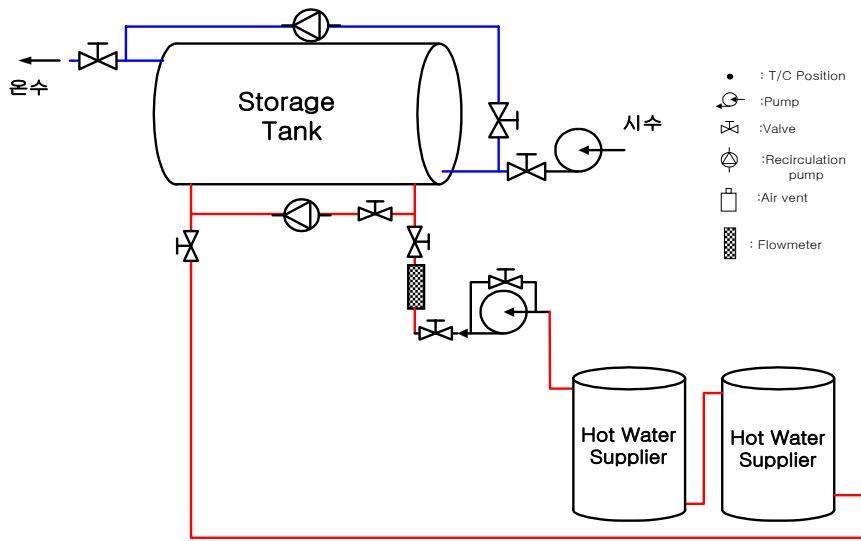


Fig. 8 Schematic of experimental apparatus for horizontal tank

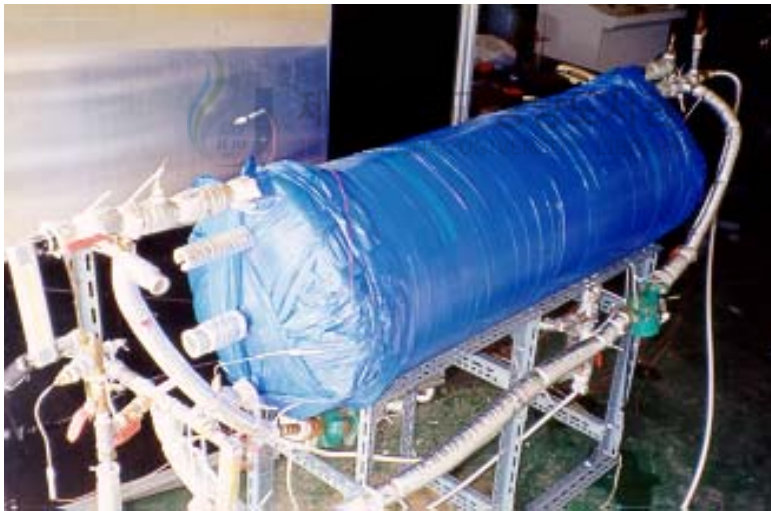


Fig. 9 Photograph of horizontal storage tank

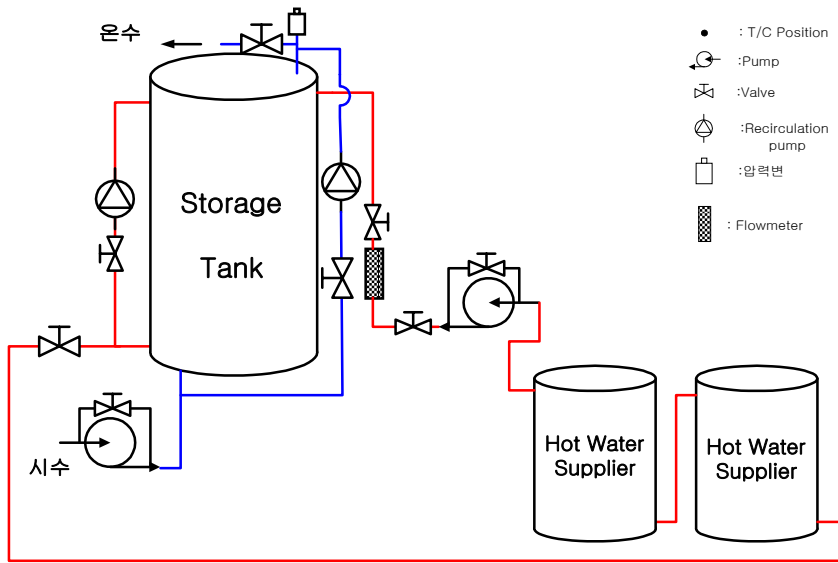


Fig. 10 Schematic of experimental apparatus for vertical tank

Fig. 10은 수직형 축열조의 열교환 성능실험장치 개략도를 나타낸 것이다. 축열조가 수직으로 세워졌으며, 1차 루프와 2차루프를 이루는 것은 Fig. 8과 동일하다.



#### 4) 데이터의 수집 및 열전대 보정

데이터의 수집은 Fluke사의 NetDAQ을 이용하여 1분 간격으로 26개의 채널을 통하여 외기온을 포함한 26개 열전대(thermocouple) 위치에서의 온도를 측정하였다.

열전대의 설치에 앞서서 측정예러를 줄이기 위해 열전대의 보정 작업이 이루어졌다. 보정 작업은 삽입될 모든 열전대를 데이터 수집 장비에 연결하고, 항온조와 표준 온도계를 이용하여 0℃~80℃까지의 범위에 걸쳐서 이루어졌다.

보정된 열전대는  $\pm 0.5$  ℃ 이내의 오차범위 내로 모두 보정이 이루어졌다. Fig.12는 보정 장치를 보여주는 사진이며, Fig. 13은 보정된 열전대 그래프를 나타낸다.

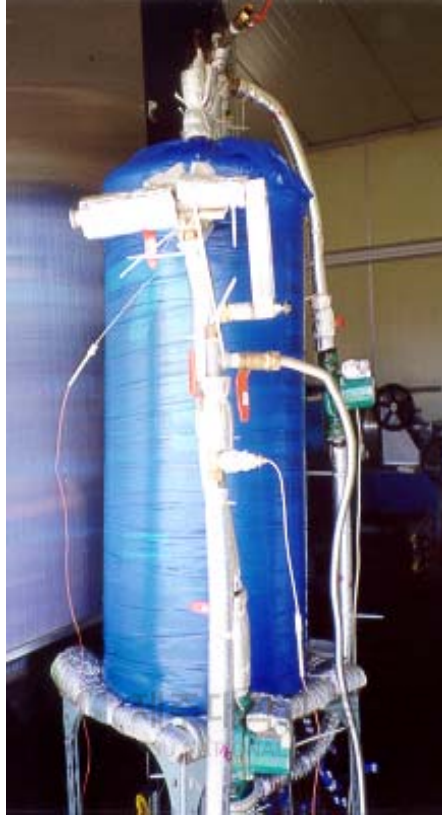


Fig. 11 Photograph of vertical storage tank



Fig. 1 Photograph of thermocouple calibration

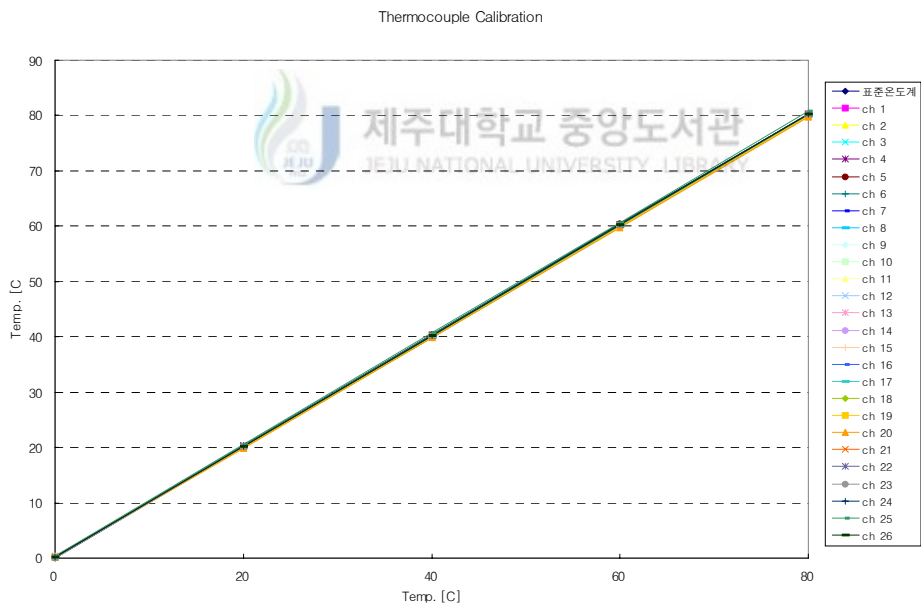


Fig. 2 Graph of thermocouple calibration

## 2. 실험방법

### 1) 열교환 성능 실험

맨틀형 축열조의 열교환 성능 실험은 동일한 축열조의 수직 및 수평설치에 따른 열교환성능을 알아보기 위한 것이다. 초기 축열조 저장탱크의 물 온도와 맨틀 내부에 상온의 물을 급수하고, 맨틀과 저장 탱크의 동일한 온도를 유지하기 위해 축열조와 맨틀 각각에 설치된 순환펌프를 통하여 실험 초기 온도를 균일하게 유지시킨 다음, 고온의 집열매체를 평판형 집열기의 단위면적 당 유량( $0.02 \text{ kg/sm}^2$ )의 작동유체를 맨틀 내부로 흘려보냈다. 이때, 작동유체로 물을 사용하였고, 맨틀로 유입되는 작동유체의 유량은 동요가 없게 수시로 체크하였으며, 작동유체 입구의 온도는  $70 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였다. 축열조의 가열은 모든 축열조 실험에서 동일하게 3시간 30분간 실시하였다.

축열조 하나 당, 설치형태를 달리하여 세 가지 실험을 수행하였고, 축열조 내에 설치된 열전대와 작동유체 입·출구에 설치된 열전대를 통하여 1분 간격으로 온도를 측정하였으며, 측정된 온도는 식(2.10)과 식(2.11)을 이용하여 열전달계수(overall heat transfer coefficient: UA)를 계산하는데 이용하였다.

### 2) 배수 실험

축열조에 정해진 시간동안의 가열이 끝난 뒤 작동유체 주입을 중단하고 축열조 내 물을 내부탱크와 맨틀 각각에 대하여 순환펌프를 사용하여 교반하였다. 내부탱크의 온도의 성층화가 없이 균일한 온도가 되었을 때, 상온의 물을 축열조 내 물이 시간당 한번 교체될 수 있는 유량으로 축열조 내로 유입시키면서 축열조 배수관으로 배수를 실행하였다.

배수 실험이 수행되는 동안 축열조 내로 유입되는 물의 급수온도와 배수 온도를



각각의 입,출구관에 열전대를 설치하여 측정하였다. 온도의 측정은 배수관에서의 온도와 급수관에서의 온도차가 약 1~2℃가 될 때까지 계속 수행하였다.

## IV. 결과 및 고찰

### 1. 축열조의 설치형태에 따른 열전달특성

#### 1) 수직형 축열조

축열조의 열전달 특성 실험을 위해 제작된 5개의 축열조 가운데, 축열조 V는 수직형의 설치가 용이하지 않기 때문에, 축열조 V를 제외한 나머지 4개의 축열조를 수직형으로 설치하여 실험을 수행하였다.

Fig. 14는 축열조 I에 대하여 작동유체의 입구온도를  $70\pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 균일하게 유지하며 흘려보내면서, 축열조 내에 수직방향으로 설치된 각각의 열전대에서 측정된 시간에 따라서 상승하는 온도분포를 나타낸다. 축열조를 7개의 등간격의 노드로 나누었을 때, 각각의 노드 중심부에 설치된 열전대의 위치에 따라서 온도분포가 뚜렷한 성층화 현상을 나타내며 상승하는 것을 볼 수 있었다. 노드(node)1에서 온도 상승폭이 작은 것과 노드(node)7 지점에서의 온도 상승폭이 작은 것은 제작된 축열조의 맨틀이 Fig. 2에서 보여진 것처럼, 노드(node)1과 노드(node)7에는 존재하지 않기 때문이다. 축열조의 맨 윗 쪽 노드(node)7의 온도가 축열조 입구온도와  $3^{\circ}\text{C}$  차이 정도로 가까워지는데 소요되는 시간은 약 150분 경과 시이며, 이때 가장 아래쪽 노드와의 온도차는 약  $37^{\circ}\text{C}$  였다.

Fig. 15는 축열조 II에서의 온도상승 분포를 나타낸다. 축열조 II는 축열조 I과 내부탱크의 기하학적 형상이 같기 때문에 온도분포 또한 축열조 I의 온도분포 Fig.14와 유사하였다.

Fig. 16은 축열조 III의 온도분포를 나타낸다. 각각의 노드1과 노드7을 제외한 나머지 노드들의 온도차를 보면 상부 노드들의 온도차가 하부 노드들의 온도차보다

큰 것을 볼 수 있었다. 이는, 상부로 유입된 작동유체가 부력의 효과에 의해 먼저 상부노드에서 열교환이 이루어진 후 서서히 하부로 이동하면서 하부 노드들로의 열전달을 하기 때문에, 상대적으로 축열조 내 온도와 맨틀유체의 온도차가 적음으로 인해서 그 열전달 양 또한 작아짐을 나타내는 것이다.

Fig. 17은 축열조 IV의 온도분포를 나타낸다. 모든 실험은 앞에서와 동일한 조건 하에서 이루어졌다. 먼저 맨 위쪽에 위치한 노드7의 온도 상승 분포를 보면 그 상승분포가 Fig. 16과 비교해 볼 때, 온도의 상승 속도가 약 20분 정도 느림을 알 수 있었다. 작동유체의 입구온도에 가까이 상승하는 시간 또한 약 200 분을 경과해서 이루어짐으로써 축열조 III와 비교해 볼 때, 열전달 속도가 상대적으로 느렸다.

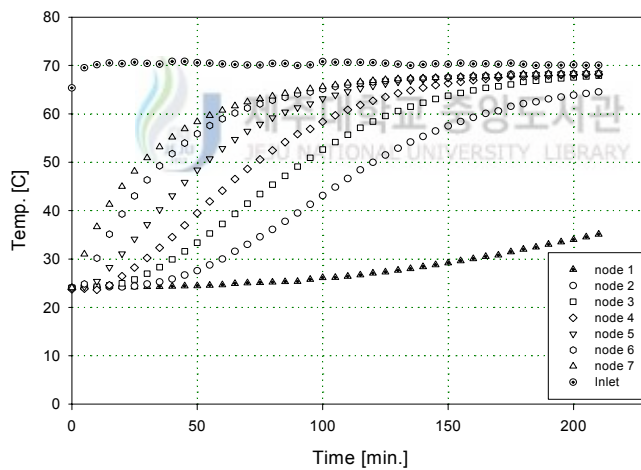


Fig. 14 Temperature distribution in the tank I: vertical type

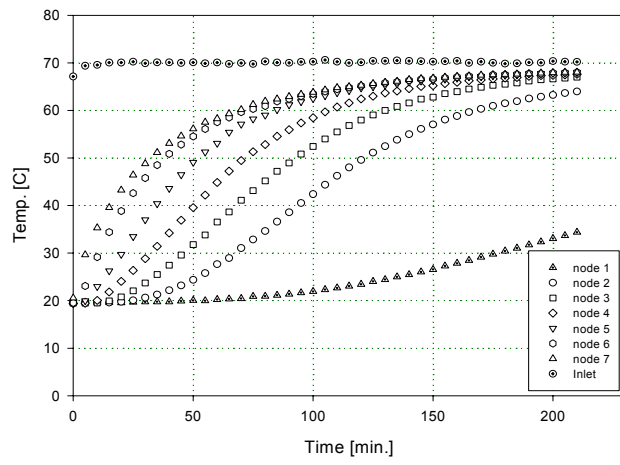


Fig. 15 Temperature distribution in the Tank II  
: vertical type

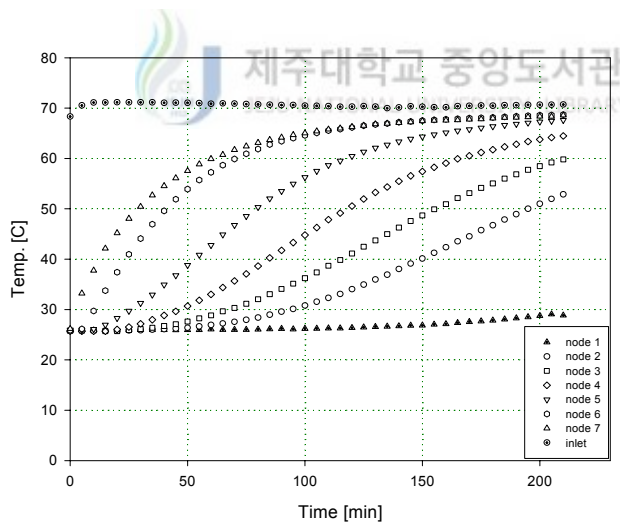


Fig. 16 Temperature distribution in the tank III  
: vertical type

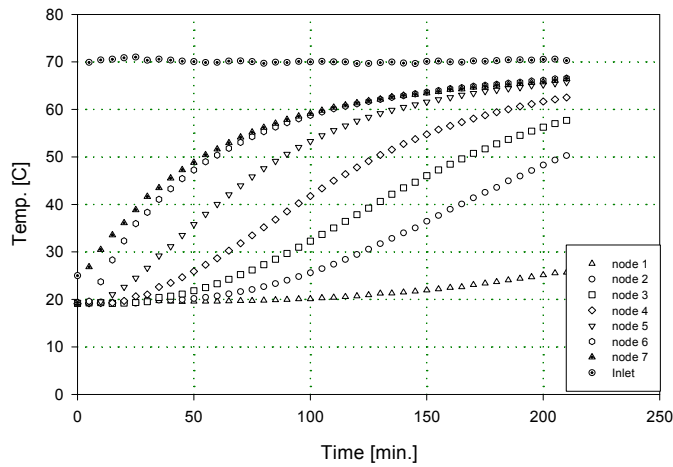


Fig. 17 Temperature distribution in the Tank IV  
: vertical type

## 2) 수평형 축열조

수평형 축열조에 대한 실험은 두 가지의 설치 형태로 나누어 실행하였다. 첫째는 수평형(a)의 형태로 정의된 작동유체의 입구와 출구의 위치가 모두 축열조의 하단에 위치한 설치형태이며, 둘째는 수평형(b)의 형태로 정의된 작동유체의 입구는 축열조의 상부에 위치하고 출구는 축열조의 하부에 위치한 설치형태이다. 수평형 축열조에 대한 실험은 5개의 축열조 모두에 대하여 수행하였다.

Fig. 18은 축열조 I을 수평형(a)의 형태로 설치하였을 때, 축열조 내 온도변화 분포를 나타낸 것이다. 그 온도 분포를 보면 축열조의 중심과 하부의 온도차가 거의 동일하게 상승하고 축열조 상부만이 성층화가 형성되었다. 이는 작동유체의 입구와 출구 모두 축열조 하단에 위치해 있음으로 인해서 작동유체가 부력에 의한 상승보다는 유동이 흐름에 더 많은 영향을 받아서 아래쪽 부분에서만 열전달이 이루어지고, 축열조 하단에서 열전달을 받아 온도가 상승된 내부탱크의 유체가 자연대류에

의해 상부로 이동하기 때문에 사료된다.

Fig. 19는 축열조 I을 수평형 (b)의 형태로 설치하였을 때의 축열조 내 온도분포를 나타낸 것이다. 축열조 상부가 먼저 가열되고 난 후 점차적으로 하부까지 가열되어가는 과정이 나타났으며, 이것은 작동유체의 입구가 축열조 상부에 위치함으로 인해서 고온의 유체가 부력효과에 의해 맨틀의 상부에서 열전달을 통하여 점차 식어가며 축열조 하부 쪽으로 내려오는 교차 유동(counter flow)에서의 열교환 형태와 유사했다. Fig. 18과 비교해 볼 때, 성층화 현상을 이루며 온도가 상승하는 것이 뚜렷하였다.

Fig. 20은 축열조 II를 수평형(a) 형태로 설치하였을 때의 온도분포를 나타내며, 중심에서와 상부에서의 온도차가 축열조 I에 비하여 약 2℃ 정도 높았다. Fig. 21은 축열조 II를 수평형(b)의 형태로 설치하였을 때의 온도분포를 나타낸 것이다. 수평형(b)의 경우에서 중심부와 하부의 온도차가 축열조 I에 비해 100분 경과 지점에서 약 5℃ 정도 더 컸다. 이는 맨틀의 간격이 작으므로 인하여 시간 당 맨틀내부의 유체가 바뀌는 속도가 축열조 I보다 빠르기 때문으로 사료된다. 조내 온도의 축열조 높이에 따른 성층화 현상은 축열조 I에서의 것과 비슷한 경향을 보였다.

Fig. 22와 Fig. 23은 각각 축열조 III를 수평형(a)와 수평형(b)의 형태로 설치하였을 때의 온도분포를 나타낸다. Fig. 22의 경우는 축열조 I과 축열조 II에서의 온도분포와 차이가 거의 없으나, Fig. 23의 경우를 보면, 축열조의 반경이 축열조 I, II보다 큼으로 인해서 그 성층화 효과 또한 컸다. 이는 성층화 현상이 축열조를 설치하였을 때, 수직방향의 길이에 비례함을 나타낸다. 상부의 온도가 작동유체 입구온도와 같아지는 시간은 약 150분 경과 할 때로 축열조 III를 수직형으로 설치 시 노드 7에서의 온도가 상승하는 시간과 거의 일치한다. 따라서 그 열전달 효과 또한 수직형과 유사하였다.

Fig. 24는 축열조 IV를 수평형(a)로 설치하였을 때의 온도분포를 나타낸다. 축열조의 상부와 하부의 온도차가 약 5℃ 정도의 차밖에 존재하지 않으며, 온도의 상

승 곡선 또한 선형에 가까운 형태로 증가하였다. 이는 축열조의 입·출구의 영향으로 부력의 영향이 거의 없이 축열조의 하부에서만 열전달이 이루어짐을 나타낸다. 즉, 대부분의 열전달이 입구 유체의 온도와 탱크 내부의 유체 사이의 열평형 레벨 근처에서보다 탱크의 하부에서 발생함을 의미한다.

Fig. 25는 축열조 IV를 수평형(b)로 설치한 형태에서의 온도분포이다. 축열조 III와 비교해 볼 때, 축열조 반경의 크기가 큼으로 인해서 축열조 내 온도의 성층화 효과는 더 크나 상대적으로 축열조 축 방향의 길이가 작음으로 인한 열전달 면적의 감소로 인해 중심부와 하부의 온도상승이 느림을 볼 수 있었다. 이는 높이/반경비에 따라서 축열조의 열교환능력이 달라질 수 있다는 점을 나타낸다.

Fig. 26은 축열조 V를 수평형(a)의 형태로 설치하였을 때의 온도분포를 나타낸다. 상부의 온도 상승이 다른 축열조들보다 빠르게 이루어졌고, 중심부와 온도차는 약 10℃였다. 중심부와 하부와의 온도차도 크지는 않지만 약 3~5℃ 정도의 격차가 생겼고, 그래프 상에서도 미소한 차이를 볼 수 있다. 축열조의 열교환면적이 크기 때문에 동일한 형태로 설치한 축열조들에 비해 열전달이 잘 이루어짐을 볼 수 있었다. Fig. 27은 축열조 V를 수평형(b)의 형태로 설치하였을 때의 온도분포이며, 그림을 보면 상부의 온도 변화가 약 120분 경과 시 작동유체 입구온도와 가까워지는 것을 볼 수 있다. 또한 중심과의 온도차는 최대 32℃의 차가 생기며 중심과 하부와의 온도차 또한 최대 14℃로 컸다. Fig. 26과 Fig. 27 모두 열교환 면적이 크기 때문에 나타나는 결과라 사료된다.

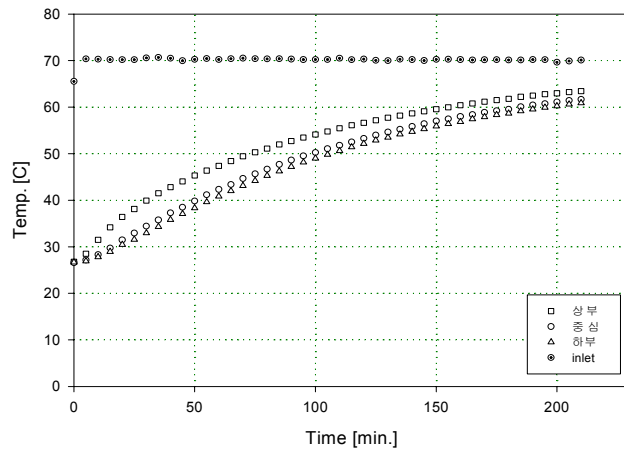


Fig. 18 Temperature distribution in the tank I  
: horizontal type (a)

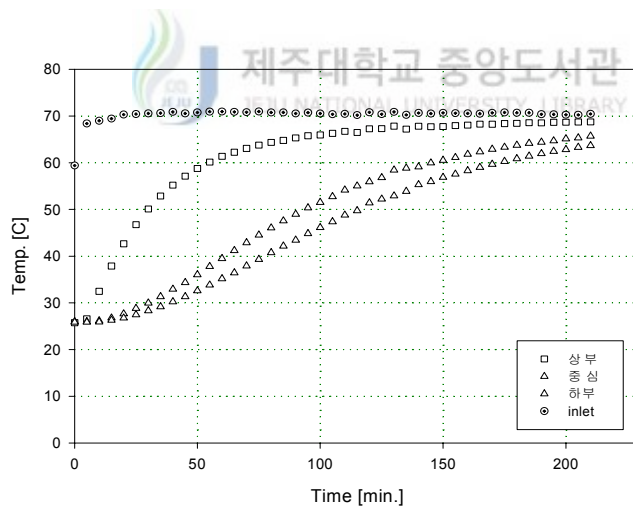


Fig. 19 Temperature distribution in the tank I  
: horizontal type (b)



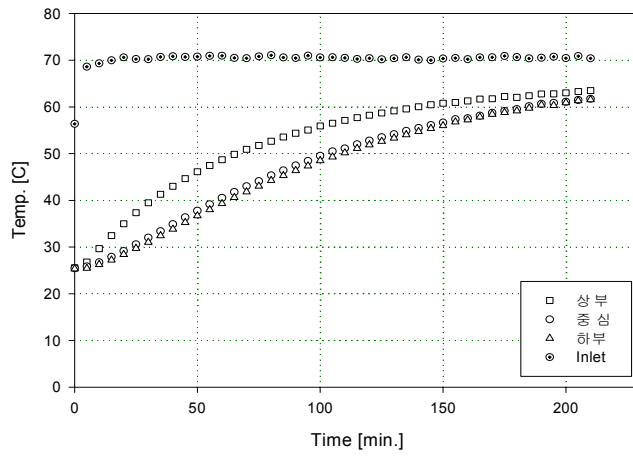


Fig. 20 Temperature distribution in the Tank II :horizontal type (a)

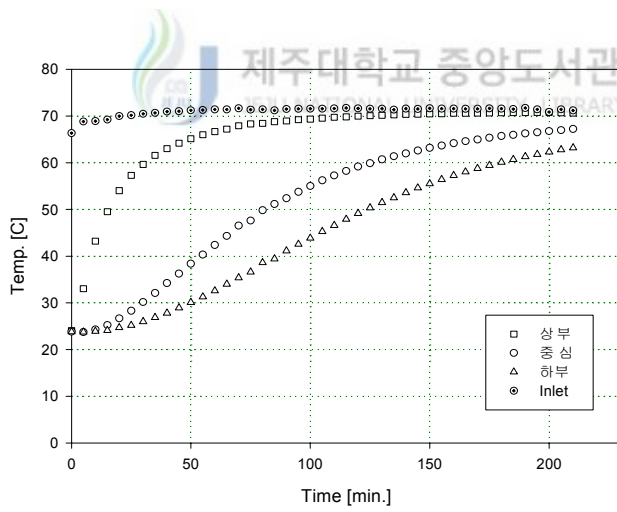


Fig. 21 Temperature distribution in the Tank II : horizontal type (b)

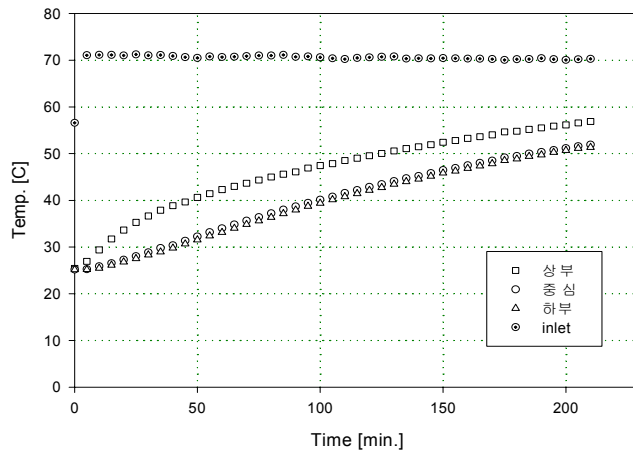


Fig. 22 Temperature distribution in the Tank III : horizontal type (a)

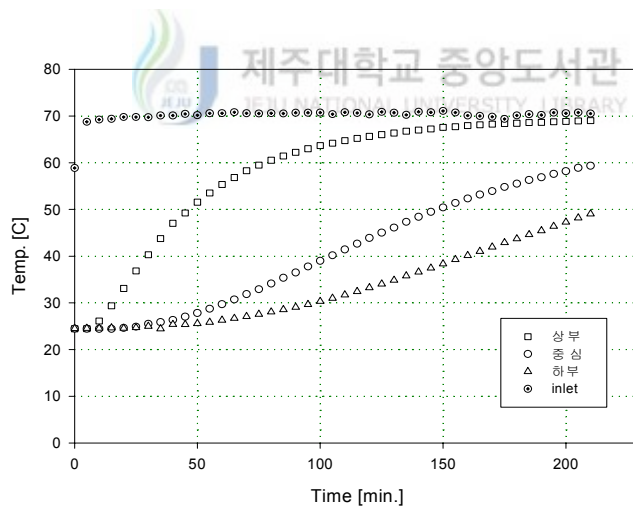


Fig. 23 Temperature distribution in the Tank III : horizontal type (b)

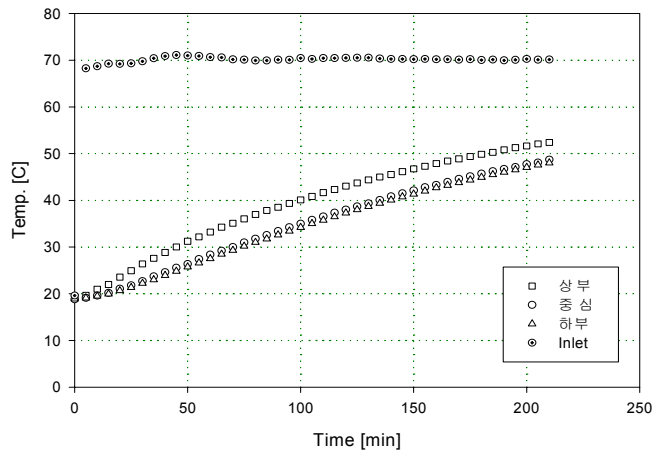


Fig. 24 Temperature distribution in the Tank IV : horizontal type (a)

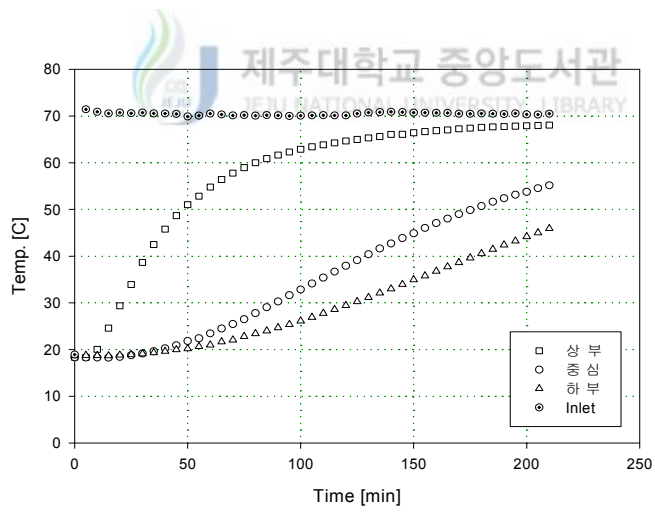


Fig. 25 Temperature distribution in the Tank IV : horizontal type (b)

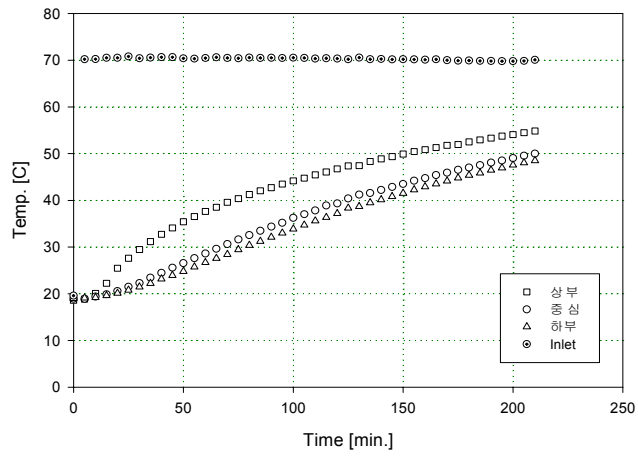


Fig. 26 Temperature distribution in the Tank V  
: horizontal type (a)

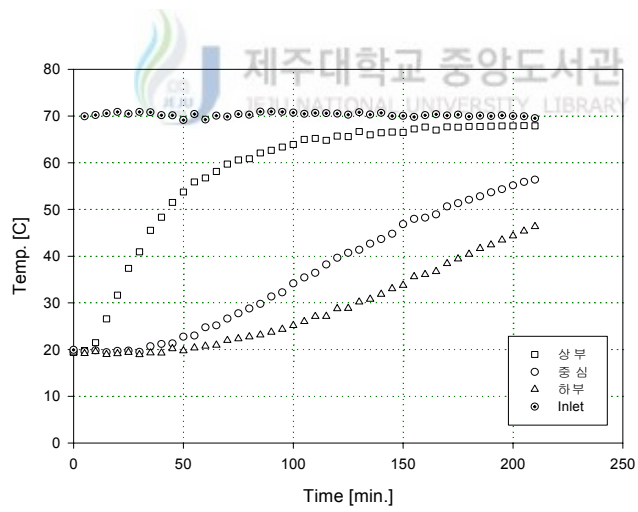


Fig. 27 Temperature distribution in the Tank V  
: horizontal type (b)

3) 열전달 계수

축열조의 열교환 성능 실험에서 축열조 내부에서 측정된 온도와 작동유체의 입, 출구 온도분포를 알고 있을 때, 열교환기 해석 방법의 관점에서 대수평균온도차 (Log Mean Temperature Difference)를 이용하여 열전달 계수의 계산을 수행하였다.

Fig. 28은 축열조 I의 수직형, 수평형(a), 수평형(b)의 세 가지 설치형태에 대하여 계산된 열전달계수(overall heat transfer coefficient) 값을 시간에 따라서 나타낸 것이다. 열전달계수의 값은 수직형과 수평형(a)의 경우는 시간에 따른 변화가 없이 일정한 경향을 보였으나, 수평형(b)의 경우를 보면 실험개시 후 약 100분 경과 시까지는 약간의 상승이 이루어지나 약 100분이 경과한 후로는 일정하게 유지됨을 볼 수 있었다. 그래프에서 보이는 바와 같이 열전달 계수들은 수평형(b), 수직형, 수평형(a)의 순으로 수평형(b)의 경우가 가장 높았으며, 시간에 걸쳐서 평균한 열전달 계수 값 또한 수직형 0.29 kW/°C, 수평형(a) 0.14 kW/°C, 수평형(b) 0.55 kW/°C로 수평형(b)의 경우가 가장 높았다.

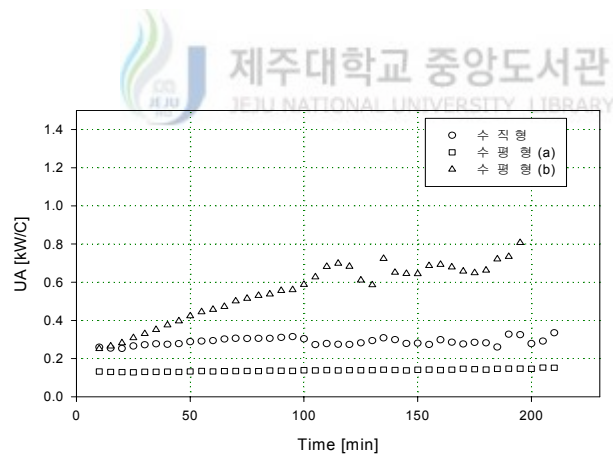


Fig. 28 Overall heat transfer coefficients for arrangements of Tank I

축열조 I에서와 동일하게 축열조 II의 열전달계수(UA)값의 계산이 수행되었고,

그 결과는 Fig. 29에 나타내었다. 축열조 I에서와 유사하게 수평형(b), 수직형, 수평형(a)의 순으로 그 값이 높았으며, 열전달 계수의 평균값은 수직형 0.25 kW/°C, 수평형(a) 0.14, 수평형(b) 0.52 였다.

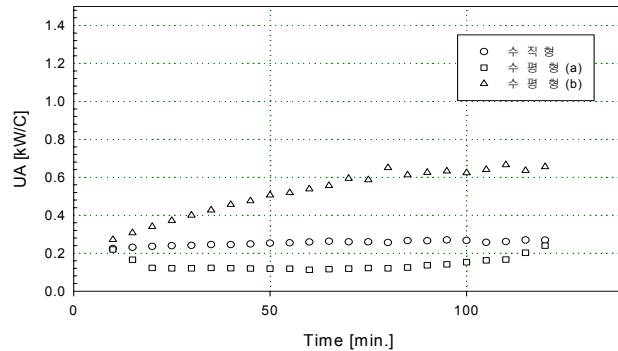


Fig. 29 Overall heat transfer coefficients for arrangements of Tank II



축열조 III의 설치 형태에 대한 열전달 계수는 Fig. 30에서 보여졌다.

용량 100 liter의 축열조의 열전달계수 값과 달리 수직형과 수평형(b)의 열전달계수 값이 거의 비슷한 상승을 보이다가 약 110분이 경과하면서부터 수평형(b)의 열전달계수 값이 조금 더 커진다. 이것은 실험 개시 후 약 100분이 경과하면서부터 열전달계수의 값은 작동유체의 입구와 출구온도의 작은 변화에도 민감하게 변화하였기 때문이다. 그 평균값들을 보면, 수직형 0.75kW/°C, 수평형(a) 0.20 kW/°C, 수평형(b) 0.66kW/°C로 수직형이 가장 높았으며, 수직형의 열전달 계수는 수평형(a)보다 약 3.7배 정도 높았다.

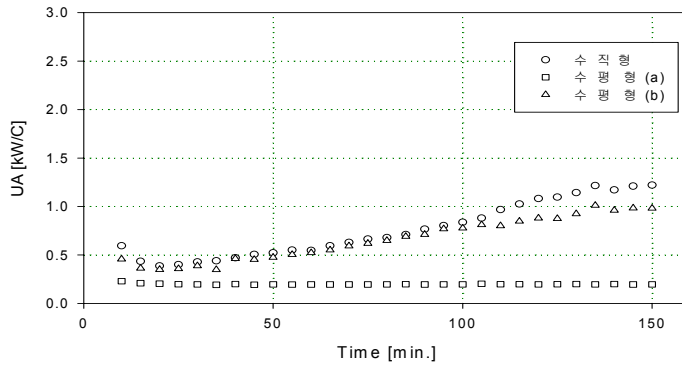


Fig. 30 Overall heat transfer coefficients for arrangements of Tank III

축열조 IV는 축열조 III와 높이/반경의 비가 다른 기하학적 형태를 가지고 있다. 설치 형태에 따른 열전달 계수 값은 Fig. 31에 보여졌다. Fig. 31를 보면, 실험 초기 수평형(b)와 수직형의 열전달 계수 값이 축열조 III에서처럼 동일하게 나가다 실험 개시 약 50분 경과 후부터 차이가 발생했다. 수평형(a)의 열전달 계수는 시간에 따라서 일정하였으며, 이는 앞서와 마찬가지로 수평형(a)로 설치하였을 때, 맨틀 내에서의 작동유체의 유동이 단지 축열조 하부만을 돌아서 빠져나가는 형태임을 알려주는 것이다. 열전달 계수의 시간에 따른 평균값은 수직형 0.60kW/°C, 수평형(a) 0.19 kW/°C, 수평형(b) 0.75 kW/°C로 수평형 (b)의 경우가 가장 높았다.

축열조 V의 열전달 계수는 Fig. 32에서 보여진다. Fig. 32를 보면, 수평형(b)의 열전달 계수 값이 수평형(a)의 경우보다 훨씬 컸다. 열전달 계수의 평균값 또한 수평형(a) 0.24 kW/°C, 수평형(b) 0.61 kW/°C로 수평형(b)의 경우가 약 2.5배 크게 나타났다. 수평형(b)의 열전달 계수 값은 모든 축열조 실험에서와 동일하게 실험초기부터 일정 시점까지 조금씩 상승하다가 실험 중반부에 이르러서 일정하게 유지되는 경향을 보였다.

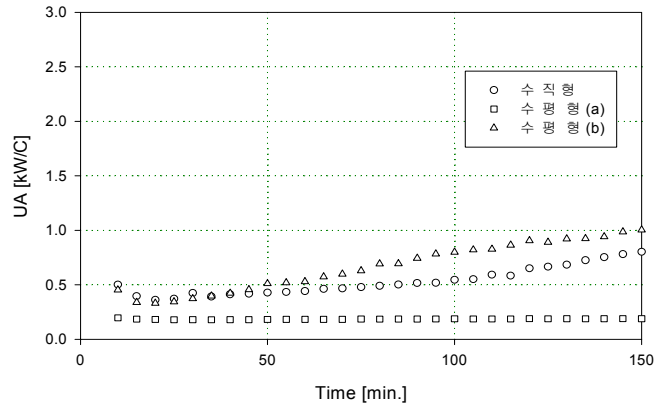


Fig. 31 Overall heat transfer coefficients for arrangements of Tank IV

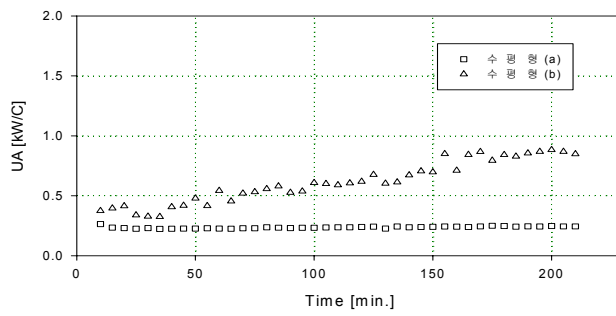


Fig. 32 Overall heat transfer coefficients for arrangements of Tank V



모든 축열조의 설치형태에 따른 열전달 성능은 열전달계수의 평균값으로 볼 때, 수직형과 수평형(b)의 경우가 수평형(a)의 경우보다 약 2~3배 가량 높았다. 이는 축열조의 맨틀을 지나는 작동유체의 유동 형태에서 비롯된 것으로 판단된다. 수직형과 수평형(b)의 경우는 작동유체의 입구가 축열조의 상부에 위치함으로 인해서 교차유동(counter flow)과 유사한 형태의 열교환이 이루어졌다. 따라서, 부력에 의한 고온유체의 상승을 촉진시켰고, 축열조의 상부에서는 고온의 작동유체가 성층화가 이루어진 고온의 저장탱크 내의 유체로 열을 전달하고, 축열조의 하부에서는 저온의 작동유체가 저온의 저장탱크 내의 유체로 열을 전달하는 형태가 이루어졌다. 반면에, 수평형(a)의 경우는 작동유체의 입구와 출구가 모두 축열조 하부에 위치함에 의해서, 입구로 들어오는 고온의 작동유체가 부력에 의한 상승이 이루어지기 전에 출구를 통하여 빠져나가는 형태의 유동이 이루어졌다고 판단된다. 따라서, 내부탱크를 둘러싸고 있는 맨틀에 의한 열교환면적이 동일한 축열조라 하더라도, 실제적인 열전달 면적이 수평형(a)인 경우는 축열조 하부로만 한정된다고 사료된다.



## 2. 축열조의 높이/반경의 비(Aspect ratio)에 따른 열전달계수

높이/반경의 비에 따른 축열조의 열전달 계수의 비교는 맨틀 간격이 1 cm로 동일한 축열조 I, III, IV, V에 대하여 비교되었다. 각각의 세 가지 설치형태에 따라서 분류하여 비교해 보면 다음과 같다.

### (1) 수직형 축열조

수직형의 높이/반경 비에 따른 열전달 계수값의 비교 결과는 Fig. 33에서 보여졌다. 높이/반경의 비는 축열조 I, III, IV에 대하여 각각 2.526, 3.068, 2.437 이다. Fig. 33을 보면 열전달계수의 평균값이 축열조 I 0.29 kW/°C, 축열조 III 0.75 kW

/℃, 축열조 IV 0.60 kW/℃로 높이/반경의 비가 가장 큰 축열조 III의 열전달계수 값이 가장 컸고, 축열조 IV, 축열조 I의 순으로 나타났다.

축열조 III와 축열조 IV의 열전달계수 값을 보면, 그 값이 높이/반경의 비와 비례하나 축열조 I과 축열조 III의 결과를 볼 때 실제적인 열전달 면적이 넓고 좁은가의 문제에 달려있다고 볼 수 있다.

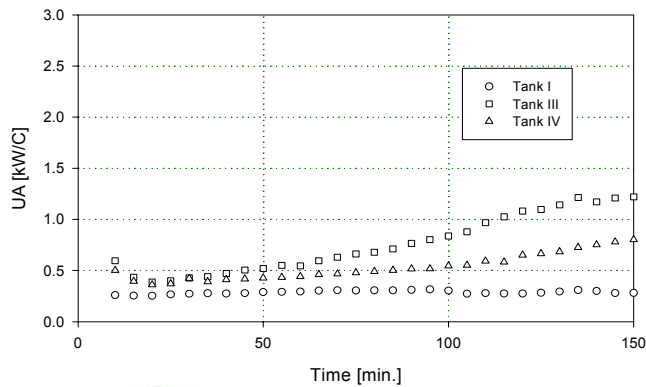


Fig. 33 Overall heat transfer coefficients for aspect ratio of tanks: vertical type

## (2) 수평형 축열조

수평형(a)의 설치형태에서의 열전달 계수 값의 비교는 축열조 I, III, IV, V에 대하여 수행되었다. Fig. 34는 수평형(a)의 설치형태에 대한 높이/반경의 비에 따른 열전달계수를 나타낸다. 각각의 높이/반경의 비는 각각 2.526, 3.068, 2.437, 4.895이다. Fig. 37을 보면, 그 열전달계수의 평균값이 축열조 I 0.14 kW/℃, 축열조 III 0.20 kW/℃, 축열조 IV 0.19 kW/℃, 축열조 V 0.24 kW/℃로 축열조 V, III, IV, I의 순으로 나타났다. 수직형에서와 마찬가지로 높이/반경의 비가 가장 큰 축열조의

열전달 계수 값이 가장 높았다. 축열조 IV과, 축열조 I은 그 비가 축열조 I의 경우가 크긴 하나, 맨틀과 내부탱크가 접해있는 열교환 면적을 보면 축열조 IV가 크다. 따라서 이는 용량이 다른 축열조이기 때문에 높이/반경의 비가 열교환면적의 비와 비례적이지 않을 수 있기 때문이다. 열전달 계수의 평균 값들을 보면, 축열조 I, III, IV, V에 대하여 각각 0.14 kW/°C, 0.20 kW/°C, 0.19 kW/°C, 0.24 kW/°C 였다.

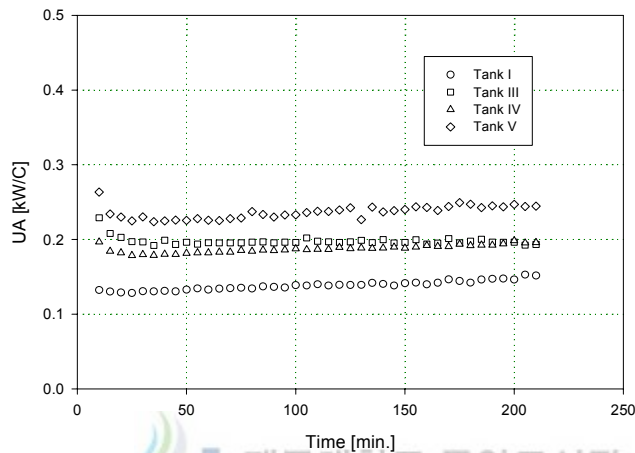


Fig. 34 Overall heat transfer coefficients for aspect ratio of tanks: horizontal type (a)

수평형(b)의 설치형태에 대한 높이/반경의 비에 따른 열전달계수는 Fig. 35에 나타내어져 있다. 수평형(a)에서와 동일하게 축열조 I, III, IV, V에 대하여 그 열전달 계수 값들이 비교되어졌다. 수직형과 수평형에서와 달리 결과는 축열조의 반경이 길이가 긴 축열조가 높았다. 이는 축열조의 열전달이 내부 탱크의 성층화와 결부되어 있음을 단적으로 보여주는 것이다. 열전달 계수 값이 높은 순으로 축열조를 나열해 보면, 축열조 IV, III가 각각 그 평균값이 0.75 kW/°C, 0.67 kW/°C이었고, 축열조 V, I가 각각 0.61kW/°C, 0.55 kW/°C였다.

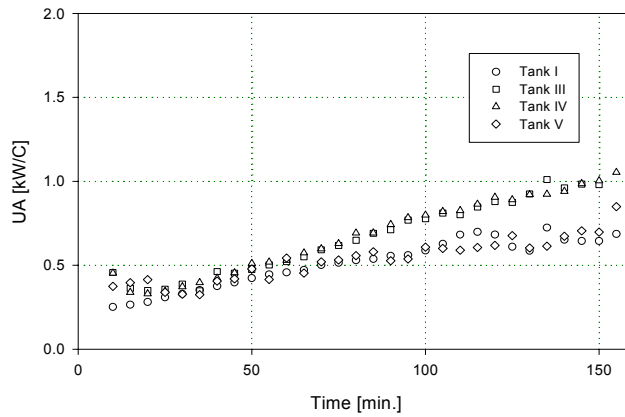


Fig. 35 Overall heat transfer coefficients for aspect ratio of tanks: horizontal type (b)

### 3. 맨틀 간격에 따른 열전달계수



맨틀 간격에 따른 열전달계수를 비교하기 위하여 동일한 기하학적 형상을 가지고 있으나 맨틀 간격이 다른 축열조 I, II에 대하여 비교되었다. 맨틀 간격에 대한 실험은 단지 용량 100 liter에 관해서만 수행이 되었다. 그 결과는 Fig. 36, Fig 37, Fig. 38에서 보여지는 것처럼, 열전달 계수의 평균값은 수직형의 경우 축열조 I, II 각각 0.29 kW/°C, 0.25 kW/°C였고, 수평형(a)의 경우는 0.138 kW/°C, 0.142 kW/°C이며, 수평형(b)의 경우는 0.55 kW/°C, 0.53 kW/°C 였다. 용량 100 liter인 축열조 I, II에서 맨틀 간격에 따른 영향은 수평형의 두 가지 설치형태나 수직형으로의 설치형태에 대하여 커다란 차이가 없었다. 이는 축열조의 용량이 맨틀을 통과하는 작동유체의 유량에 비해 상대적으로 작기 때문이라고 판단되어진다.

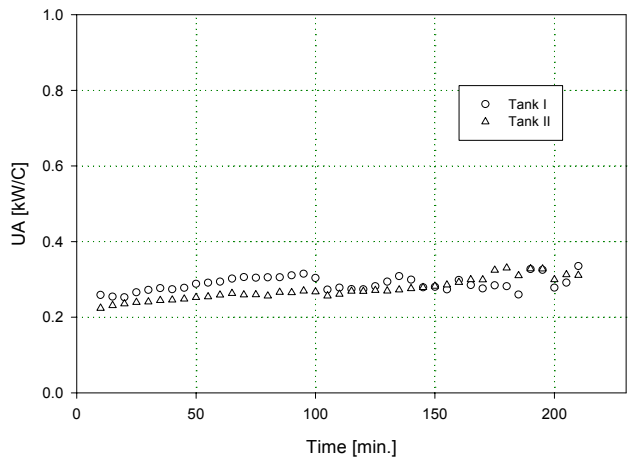


Fig. 36 Overall heat transfer coefficients for mantle interval of tanks: vertical type

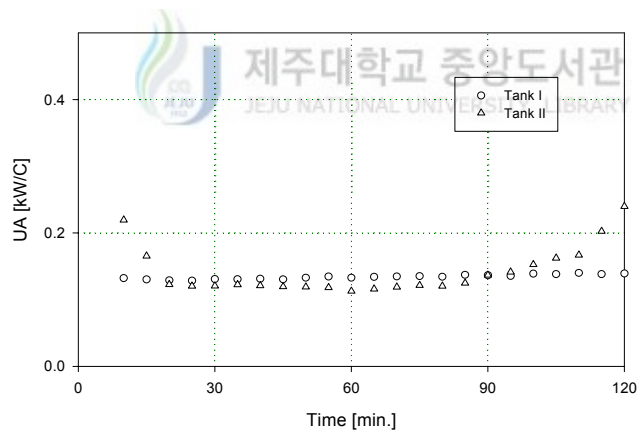


Fig. 37 Overall heat transfer coefficients for mantle interval of tanks: horizontal type (a)

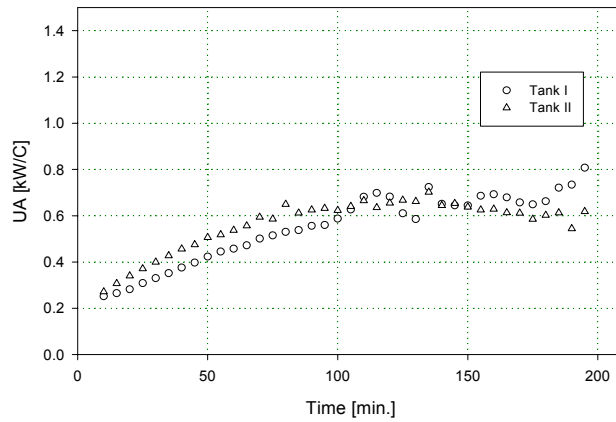


Fig. 38 Overall heat transfer coefficients for mantle interval of horizontal tanks: horizontal type (b)

#### 4. 축열조내 성층화 분석



##### 1) 축열조 내 성층화 현상

밀폐순환루프를 가진 태양열 온수 시스템에 적용되는 축열조는 작동유체와 저장 매질이 분리가 되어있어 작동유체가 저장 탱크 내의 유체의 유동에 영향을 주지 않는다. 따라서, 저장탱크 내의 온도의 성층화 영향이 작동유체에 의한 간섭을 받지 않는 장점이 있다.

Fig. 39는 축열조 I의 높이에 대하여 시간에 따른 온도 변화를 나타낸 것이다. 각각의 열전대 위치에서 측정된 값들은 시간이 갈수록 성층화가 더 크게 발생하였다. 실험 개시 후 60분 경과 시에 그 성층화 현상이 가장 두드러졌으며 온도차는 약 40℃ 였다. Fig. 39에서의 t는 실험 개시 후 경과된 시간을 나타낸다.

Fig. 40 축열조 I을 수평형(a)로 설치하였을 때, 측정된 것이며, 그 곡선들을 보

면 시간에 따른 성층화 현상이 거의 없이 축열조 내의 온도가 고르게 상승하였다. 이것은 맨틀의 하단에서 열전달이 이루어지고 이때, 축열조 내에서 데워진 물은 자연 대류에 의해 상부로 이동하고 하부는 계속해서 가열되기 때문이다. 성층화가 가장 잘 이루어졌을 때 상부와 하부의 온도차는 약 7°C 정도로 수직형과 수평형(b)의 경우와 비교해 볼 때 작았다.

Fig. 41은 축열조 I을 수평형(b)로 설치하였을 때의 축열조 높이에 대하여 시간이 경과함에 따른 온도분포를 나타낸 것이다. 축열조의 상부와 하부의 온도차가 가장 큰 경우는 26°C로 실험 개시 후 약 60분 경과 후였다. 성층화로 인한 온도차가 실험개시 60분 경과 시의 상부와 하부의 온도차로 볼 때 Fig. 40의 경우보다 약 20°C 컸다. 축열조의 반경방향의 길이가 축 방향의 길이보다 작기 때문에 수직형에서 나타나는 상부와 하부의 온도차보다는 작지만, Fig. 40의 경우와 비교해 볼 때, 작동유체의 입구의 위치 변경에 의한 축열조 내 성층화의 효과를 증가시키는 것이 뚜렷하였다.

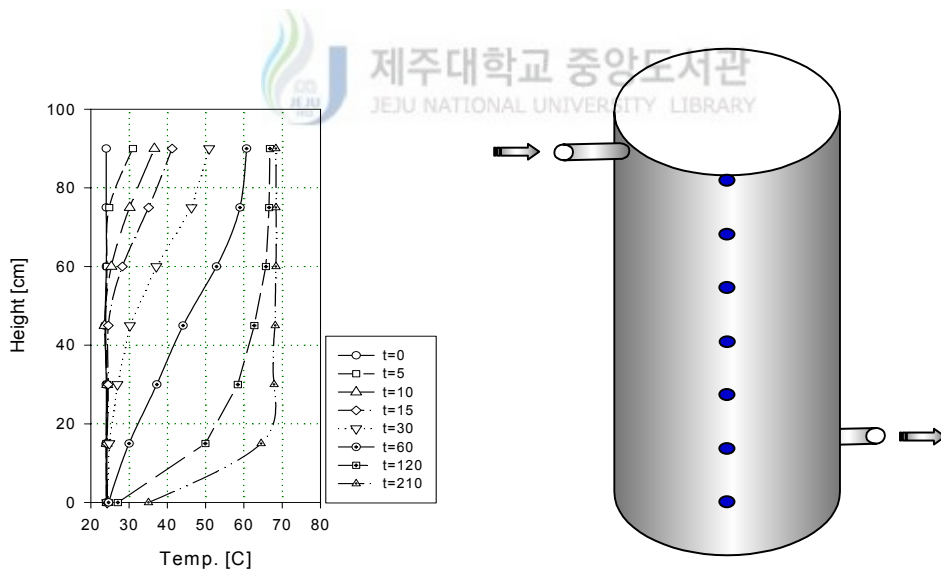


Fig. 39 Stratification in the storage tank I : vertical type

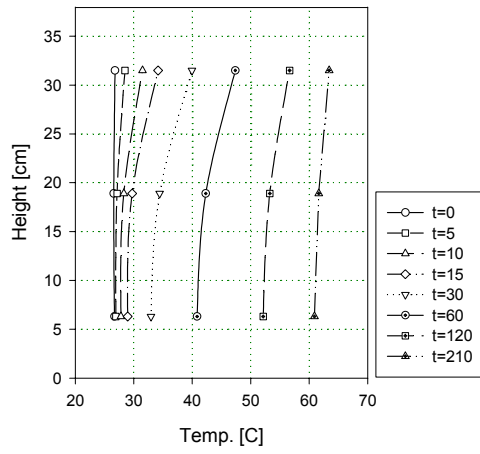


Fig. 40 Stratification in the Tank I  
: horizontal type (a)

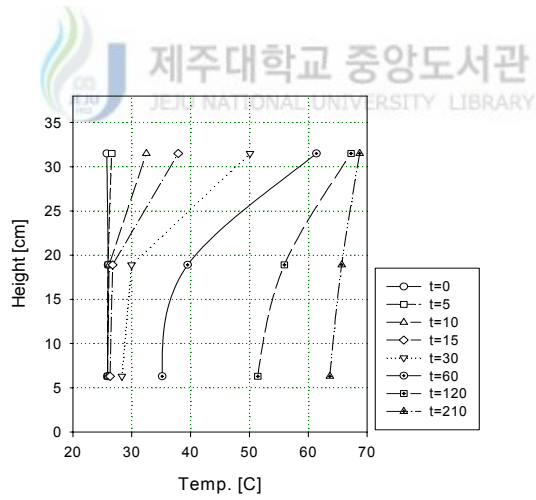


Fig. 41 Stratification in the Tank I  
: horizontal type (b)



2) 수직형 축열조의 상부와 하부의 온도차

Fig. 42는 축열조의 온도 성층화 경향을 알아보기 위하여 수직형으로 실험이 수행된 5개의 축열조 각각에 대하여 축열조 내 상부와 하부의 온도차가 시간에 따라서 변화하는 경향을 나타낸 것이다. Fig. 42를 보면, 축열조 I과 축열조 II는 내부탱크가 동일한 기하학적 형상을 가지고 있으며, 맨틀을 통한 열전달 면적 또한 동일하다. 그러나 탱크 내부의 성층화 현상이 축열조 II의 경우가 성층화의 현상이 더 좋게 나타났다. 이는 축열조 II에서 맨틀 간격이 0.5 cm로 축열조 I보다 작기 때문에 작동유체가 맨틀을 통과하는 시간이 축열조 I보다 빠르기 때문이다. 축열조 III와 축열조 IV의 내부 탱크 온도의 성층화는 실험 개시 후 150분이 경과한 시점에서 하강 곡선을 그리는 축열조 III가 더 좋았다. 동일한 용량과 맨틀 간격을 가지고 있는 축열조에서의 온도의 성층화 차이는 앞서 언급한 높이/반경의 비 때문으로 판단된다.

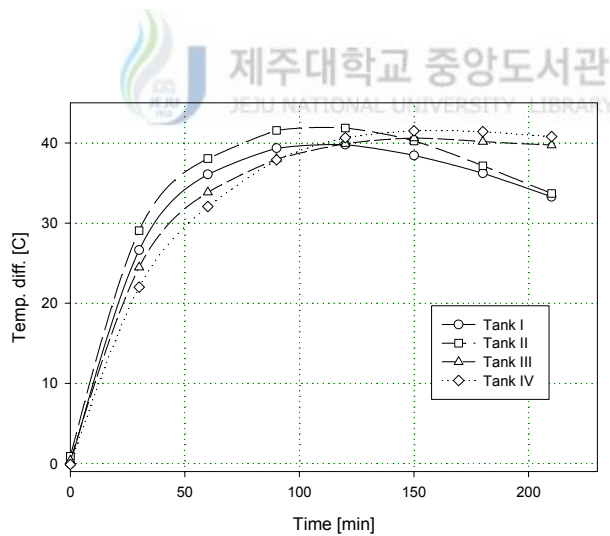


Fig. 42 Temperature differences between top and bottom : vertical type

### 3) 수평형 축열조의 상부와 하부의 온도차

수직형과 마찬가지로 수평형 축열조에서도 상부와 하부의 온도차를 이용하여 성층화의 영향을 고려해 보았다. Fig. 43은 축열조를 수평형 (a)의 형태로 설치하였을 때 나타난 각각의 탱크의 온도 성층화를 나타낸 것이다. Fig. 43을 보면, 축열조 I과 축열조 II의 성층화는 수직형과 유사하게 축열조 II의 경우가 더 발달하였다. 축열조 III와 축열조 IV, 축열조 V는 용량과 맨틀 간격이 같고 높이/반경의 비가 다른 것으로 그 성층화 현상을 볼 때 축열조 V, 축열조 III, 축열조 IV의 순으로 나타났다. 이는 앞서 계산된 열전달 계수의 평균 값에 비추어 볼 때, 축열조 내에서의 온도의 성층화가 열전달 현상을 촉진시킴을 보여주는 것이다.

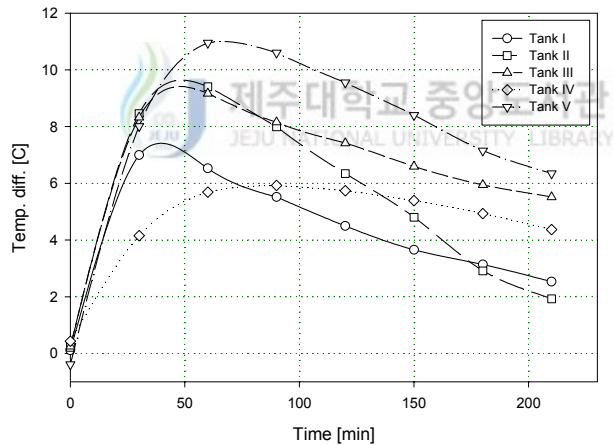


Fig. 43 Temperature differences between top and bottom  
: horizontal type (a)

Fig. 43은 축열조를 수평형(b)의 형태로 설치하였을 때 나타난 축열조 내 상부와 하부의 온도차를 나타낸 것이다. Fig. 43을 보면, 수직형, 수평형(a)의 형태로 설치하였을 때와 동일하게 맨틀 간격의 차이에 의해 축열조 II의 경우가 축열조 I의 경우에 비해 성층화가 더 잘 이루어졌다. 축열조 III, 축열조 IV, 축열조 V의 경우는 수평형(a)로 설치하였을 때와 달리 그 온도의 성층화가 축열조 V, 축열조 IV, 축열조 III의 순으로 나타났다. 이는 작동유체 입구의 위치가 축열조 상부로 변경됨에 따라 작동유체가 상부에서 하부로 흐르면서 열전달이 이루어지기 때문이다.

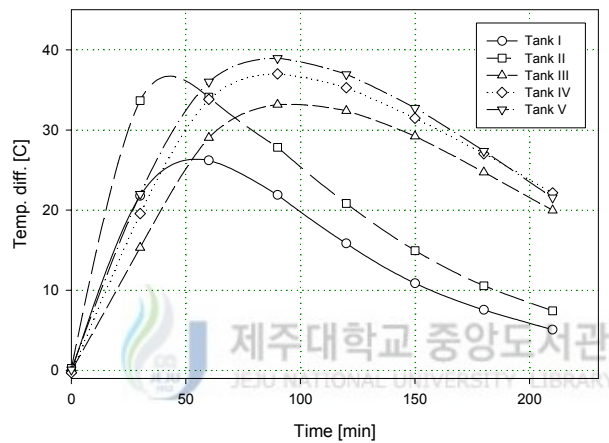


Fig. 44 Temperature differences between top and bottom  
: horizontal type (b)

#### 4) 설치형태에 따른 온도 성층화의 비교

Fig. 42~Fig. 44에서 축열조 설치 형태에 따른 축열조 내 온도 성층화를 비교해 보면, 수직방향의 길이가 긴 수직형의 형태가 성층화가 가장 잘 이루어졌다. 수평형(a)와 수평형(b)의 경우를 비교해 보면 작동유체 입구의 위치 차이에 의한 성층화 효과의 차이가 뚜렷했다. 축열조 내 온도의 성층화는 작동유체에서 축열조 내부

로의 열전달의 효과를 증진시키는데, 이를 위해서는 축열조의 입구 위치가 상부에 위치하고, 수평형이나 수직형의 설치 형태에 관계없이 그 수직 방향의 길이가 긴 쪽이 성층화가 더 잘 이루어짐을 볼 수 있다.

## 5. 이용성능분석

맨틀형태의 축열조의 장점 중의 하나는 작동유체의 유,출입이 내부 탱크의 유동에 영향을 미치지 않음으로써, 온도 성층화의 생성을 방해하지 않는 것이다.

축열조의 이용성능을 알아보기 위해 간단한 배수실험이 수행되었다. 배수 실험에서는 내부탱크의 기하학적 형태와 설치 형태에만 기인한 것이므로, 수직형과 수평형 두 가지 형태에 대해서만 비교되어졌다. 배수 실험결과는 대표적으로 용량 100 리터인 축열조 II와 용량 200 리터인 축열조 IV에 대해서 결과를 나타내었고 Fig. 45와 Fig. 46과 같다.

### (1) 축열조 II



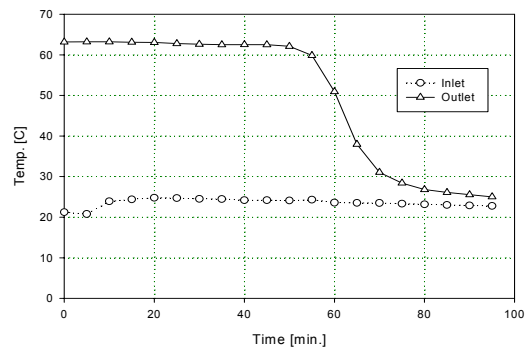
Fig. 42를 보면 축열조에서 나오는 온수 온도의 하강하는 시점이 수직형인 경우는 약 52분 경과 시부터 생겼고, 수평형의 경우는 약 40분 경과 시부터 생겼다. 하강 곡선의 기울기 또한 수직형의 경우가 수평형의 경우보다 기울기가 급했다. 이는 축열조 하부에서 상온의 물이 온수를 밀고 올라올 때, 축열조 중간부분에서의 섞임이 수직형의 경우가 수평형의 경우보다 작음을 입증하는 것이다.

### (2) 축열조 IV

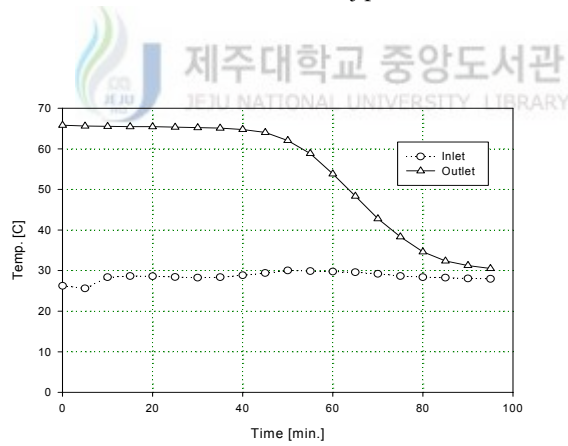
용량 200 liter인 축열조 IV의 경우도 축열조 II의 경우와 비슷한 경향을 나타내었지만, 축열조 IV의 반경이 축열조 II보다 크기 때문에 수직형에서의 하강곡선의 기울기가 보다 완만하였고, 온수 온도의 하강 시점은 수직형과 수평형을 비교해 볼

때 약 5분 정도의 차이만이 존재하였다.

배수 실험에 있어서 내부 탱크로 들어가는 급수관 입구에는 축열조 내 성층화를 깨지 않고 배수하기 위한 분배기(distributor)가 없이 수행된 것이다. 따라서, 설치 형태에 대한 배수 성능의 차이는 분배기를 설치함에 의해 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

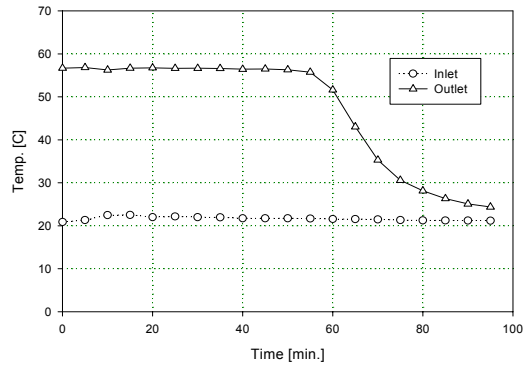


(a) Vertical type

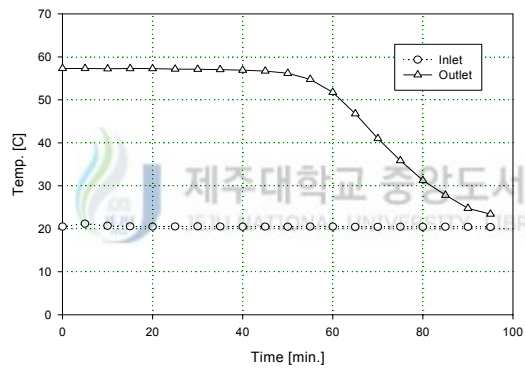


(b) Horizontal type

Fig. 45 Inlet and outlet temperatures for drawing experiments of Tank II



(a) Vertical type



(b) Horizontal type

Fig. 46 Inlet and outlet temperatures for drawing experiments of Tank IV

## V. 결 론

본 맨틀형 축열조의 열전달 특성에 관한 실험적 연구는 기존의 축열조 내에 열교환기 형태의 일환으로 튜브가 설치된 축열조 보다 열전달 성능이 높은 것을 알려진 맨틀형 축열조의 열전달 특성을 파악하기 위한 것이다. 따라서, 5개의 기하학적 형태가 다른 축열조를 제작하였고, 동일한 축열조에 대하여 작동유체의 입·출구 위치와 축열조의 배치 형태를 달리하여 세 가지의 설치형태를 적용하여 실험을 수행하였다. 맨틀형 축열조의 시간에 따른 온도의 상승 분포를 수직형의 경우는 축방향 길이에 따라서, 수평형의 경우는 반경 방향의 길이에 따른 온도의 상승 분포를 제시하였고, 열교환기의 해석방법 가운데 하나인 대수평균온도차를 사용하여 열전달 계수(UA) 값을 계산하였다. 시간에 따른 열전달 계수의 평균값은 Table 2.와 같고, 이들 값에 근거한 결론은 다음과 같다.

Table 2. Overall heat transfer coefficients

(단위: kW/°C)

	수직형	수평형(a)	수평형(b)
축열조I (Tank I)	0.288079	0.138309	0.552165
축열조II (Tank II)	0.253641	0.141916	0.5253
축열조III (Tank III)	0.75739	0.19815	0.65874
축열조IV (Tank IV)	0.599054	0.18616	0.748687
축열조V (Tank V)	-	0.236498	0.614341

1. 축열조의 설치 형태에 대하여 열전달 성능은 작동유체의 입·출구가 축열조의 하부에 위치한 수평형(a)의 경우보다 고온의 작동유체에서 고온의 축열매체로,

저온의 작동유체에서 저온의 축열매체로의 열전달 형태를 가지고 있는 수직형과 수평형(b)의 설치 형태에서의 열전달 성능이 약 2~3배 높았다.

2. 맨틀형 축열조는 높이/반경의 비에 따라서 열교환 면적이 달라지는 특성을 가지고 있다. 따라서, 축열조의 높이/반경의 비에 대한 열전달 성능을 비교하였고, 결과는 축열조의 용량이 같을 경우, 높이/반경의 비가 큰 축열조가 열전달 성능이 우수하였다. 높이/반경의 비가 비슷할 때, 수평형(b)의 경우는 내부탱크의 성층화의 영향으로 반경의 길이가 긴 축열조에서의 열전달 성능이 높았다.

3. 맨틀형 축열조의 맨틀 간격에 따른 열전달 특성의 경향을 보기 위한 실험은 용량 100 리터의 축열조에 대하여 수행하였으며, 그 결과는 두 가지의 수평형이나 수직형으로의 설치에 대하여 커다란 차이가 없었다. 이는 축열조의 용량이 맨틀을 지나는 작동유체의 유량에 비해 상대적으로 작기 때문이라고 판단되며, 보다 큰 용량의 축열조와 범위가 넓은 맨틀 간격에 대한 열전달 성능에 관한 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.



4. 축열조의 열전달 성능은 내부의 성층화 효과에 의해 향상될 수 있으며, 각각의 축열조에서 계산된 열전달 계수와 성층화 효과가 비례적인 경향을 보였다.

5. 열전달 성능실험에 부수적으로 축열조의 배수 실험을 동반하여 수행하였다. 온수의 배수는 축열조의 하단에서 저온의 급수가 공급이 될 때 축열조의 중간 부분에서의 혼합이 적어야 그 배수 성능이 좋다고 할 수 있다. 배수 성능은 수직형의 경우가 수평형의 경우보다 좋았으며, 동일한 수직형의 경우는 반경이 작은 축열조의 경우가 더 좋았다.



## 참 고 문 헌

Buenconsejo N.S.Jr.(1994) "Experimental study of annular free convection heat exchangers: the flow characteristics in the annular gap.", School of Mechanical and Manufacturing Engineering, The University of New South Wales, Australia.

Close,D.J., "Rock Pile thermal storage for Confort air conditioning", Mech. and Chem. Engng Trans. Australia, MCI, 11, 1965. 4. 4. Lof,G.O.G. ,El-Wakli,M.M, and Chiou.

Ee-Tong Pak, "Thermally stratified and hot water storage",1991 SOLAR WORLD CONGRESS, Denver, Colorado, USA, 19-23 August 1991. vol.2, part I, pp.1417-1423.



Fraser K.F., Hollands G.T. and Brunger A.P.(1995) "An empirical model for natural convection heat exchangers in SDHW." Solar Energy, 55, pp. 75~84.

Furbo S. (1993). "Optimum design of small DHW, low flow solar systems." ISES Solar World Congress, 1993, Budapest, Hungary.

Furbo S., "Summary of danish research on matched flow systems", Thermal Insulation Laboratory Technical University of Denmark, Report nr. 92-38, 1992.

J.M. Baur, S.A. Klein, W.A. Beckman, "Simulation of water tanks with mantle heat exchangers.", Proceedings of the 1993 Annual Conference 1993, pp.286-291

Mertol A., Place W., Webster T. and Greif R.(1981), "Detailed loop model analysis of liquid solar thermosyphons with heat exchangers.", Solar Energy, 27, pp. 367-386.

Morrison G.L. (1995). "Design and rating of solar water heater storage tanks", Workshop. International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Program, IEASHC/WS/2-95.

Morrison G.L. et al., "Performance of horizontal mantle heat exchangers in solar water heating systems", Proceeding of ISES 1997 Solar World Congress 1997, 08 v.2, pp.149-158



Nasr A., Morrison G. L. and Behnia M. (1996) "Annular free convection heat exchanger for solar heating systems.", Australasian Heat & Mass Transfer Conference, UNSW.

Parent M.G. Van Der Meer H. and Hollands K.G.T. (1987). "Natural convection heat exchangers in solar water heating systems: theory and experiment." Solar Energy, 38, pp, 219~231.

Shah L.J. and Furbo S., "Correlation of experimental and theoretical data for mantle tanks used in low flow SDHW systems." Proceeding of ISES 1997 Solar

World Congress 1997, 08 v.2, pp.119-128.

Shah L.S. and Furbo S.(1996) "Optimisation of mantle tanks for low flow solar heating systems", Euro Sun 96, Special Issues S-9601.

Telkes,M. (1973). "Energy storage media", Proc. of the Solar Heating and Cooling for Building Workshop. Washington.D.C. NSF/RANN 73-004, pp. 57~59, (NTIS ACCESSION No. PB-223 536)

Telkes,M. (1974). "Solar energy storage" ASHRAE. JL, pp. 38~44.

강용혁 등, "태양열 온수급탕 시스템 성능표준화", 한국에너지기술연구소, KIER-991423, 1999.

양윤섭 등, "그린하우스의 에너지 시스템 실증연구", 한국에너지기술연구소, KIER-971232, 1997.



조일식 등, "태양열 열전 발전 시스템의 실험적 연구", 한국태양에너지학회 논문집, 제 18권, 제 3호, pp. 113~118, 1998.

임동현, "Local energy 활용기반 기술 개발", 한국에너지기술연구소, KE-93002G, 1993.

## 감사의 글

언제나 많은 관심과 배려를 아끼지 않으시고, 부족한 저에게 많은 가르침을 주신 이윤준 교수님, 천원기 교수님께 진심으로 감사드립니다. 짧은 일정 속에서도 학문적인 가르침과 염려의 눈길을 아끼지 않으셨던 박재우 교수님, 이현주 교수님, 김신 교수님께 감사드립니다.

두 해 동안 논문실험에 열중할 수 있도록 가르쳐 주시고 많은 배려를 해주신 한국에너지기술연구소의 강용혁 박사님께 진심으로 감사드립니다. 바쁜 와중에도 많은 관심과 도움을 주신 광희열 박사님, 유창균 선생님, 윤환기 선생님께 감사드립니다. 아울러, 항상 애정 어린 눈길로 지켜봐 주신 이의준 박사님, 윤종호 박사님께 감사드립니다.

연구소 생활이 어렵지 않도록 많은 도움을 주신 김기세 박사님, 준언이 형, 인석이 형, 동언, 호준씨, 병하씨 그리고 지용씨에게도 감사드립니다. 항상 힘들고 어려울 때 버팀목이 되어준 동규 형, 명철 형, 후배 성택에게 진심으로 감사의 말을 전합니다.

같은 학위과정 중에도 서로 관심과 충고를 기울여준 현종관 조교 선생님, 정선, 재광, 학교생활에 무리가 없도록 연락을 해준 박숙희 조교 선생님께도 감사의 말을 전합니다. 멀리 떨어져있어도 많은 관심을 기울여주셨던 김휴찬 선배님께 감사드리고, 사소한 부탁도 서슴없이 들어주었던 후배 보안, 상훈, 승화, 영동, 상범, 지훈, 현조에게도 고마움을 전합니다. 힘들 때, 많은 용기를 주었던 상우 형, 성철 형, 윤석 형, 남철, 상철, 치범, 희정에게 고마움을 전합니다.

항상 감싸주시고 사랑으로 대해주신 누님들과 큰 매형, 작은 매형께 진심으로 감사드리고, 늘 즐겁게 대해준 동생 근식에게도 고마움을 전합니다. 작은 길이지만 항상 힘들고 어려울 때, 곁에서 가만히 지켜봐 주던 눈길만으로도 큰 힘이 되어준 가족 모두에게 진심으로 감사드리며, 돌아가신 아버님과 어머니님 영전에 이 작은 결실을 올립니다.