

[논문] 한국태양에너지학회 논문집  
*Journal of the Korean Solar Energy Society*  
Vol. 21, No. 1, 2001

## 맨틀형 축열조의 열전달 성능 및 특성에 관한 실험적 연구

강용혁\*, 곽희열\*, 윤환기\*, 유창균\*, 윤현식\*\*, 천원기\*\*

\* 한국에너지기술연구소

\*\* 제주대학교

## An Experimental Study on the heat transfer characteristics and performance of storage tanks with mantle heat exchanger

Y.H.Kang\*, H.Y.Kwak\*, H.G.Yoon\*, C.G.Yoo\*, H.S.Yoon\*\*, W.G.Chun\*\*

\* *Korea Institute of Energy Research*

\*\* *Graduate School, Che-ju National University*

### Abstract

The heat transfer characteristics of horizontal and vertical mantle heat storage tanks are studied in order to replace the tank-coil heat exchanger for application in thermosyphon solar water heaters. In this study, 5 mantle storage tanks with different geometric shape are manufactured into stainless steel and each tank is tested. For the test, The inlet flow rate of the heat transfer fluid is maintained 1.2 lpm consistently. The heat transfer fluid temperature through the mantle is  $70 \pm 1^\circ\text{C}$ . The temperatures of 26 points included the ambient temperature are measured at every one minute. The measured data are used to calculate the overall heat transfer coefficient(UA) using the LMTD(Log Mean Temperature Difference) method and it is used on the analysis of the heat transfer characteristics to search for optimum arrangement.

## 1. 서 론

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 전자기적 저장 등으로 분류되며, 그 중에서도 열적 저장은 매우 유용한 에너지 저장 수단이 될 수 있다. 열 저장은 열의 공급과 수요 사이에 시간적 공간적 격차가 있거나 태양열과 같이 간헐적인 열원을 효과적으로 활용코자 할 때 필요한 방법이다.

태양열 온수급탕 시스템에 사용되고 있는 축열조 가운데 하나인 맨틀형 축열조는 집열기 유동에서 나오는 고온 액체가 탱크를 둘러싸고 있는 맨틀을 통과하고 이에 의해 탱크 안으로의 열전달이 이루어진다. 이때, 탱크와 맨틀을 분리하는 벽이 열교환면적이 된다. 이런 루프 분리의 관점에서 코일형태와 내부탱크(tank-in-tank) 형태와 비슷하다. 열교환기를 가진 태양열 열사이폰 온수 시스템에 대한 연구가 계속 수행되어 왔지만 열교환기의 작은 변화들로 한정되었고, 세계 각국에서는 기후와 제작원에 따르는 각기 다른 시스템을 사용하고 있으며, 이들 모델은 수직형 저장 탱크의 저면부에 구리관이 담겨진 것으로 구성된 열교환기에 기초하고 있다.

다른 디자인들 보다 뛰어난 맨틀 열교환기의 이점을 보면 다음과 같다.

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

맨틀형 축열조는 태양열 온수기에 적어도 20년 동안 사용되어 왔지만, 이런 이점에도 불구하고 그 열전달 특성 및 성능에 대한 연구가 진행되어 온 것이 거의 없는 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 서로 다른 기하학적 형

태의 맨틀형 축열조에 대한 열성능 실험을 통하여 설치 형태, 높이/반경의 비(aspect ratio), 그리고 맨틀 간격에 따른 열전달 특성의 경향을 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

본 축열조 실험에 사용된 축열조의 사양은 그림 1, 그리고 표 1과 같다.

그림 1에 나타난 알파벳에 해당하는 치수가 표 1에서 보여졌다. 각각의 축열조 용량은 Tank I, II는 100 리터이고 높이와 반경의 비가 2.526이다. Tank III, IV, V는 각각 용량이 200리터, 높이/반경의 비가 3.068, 2.437, 4.895이다.

축열조 내부의 물의 온도를 측정하기 위하여 등간격의 측정 부위를 가진 세 개의 열전대를 제

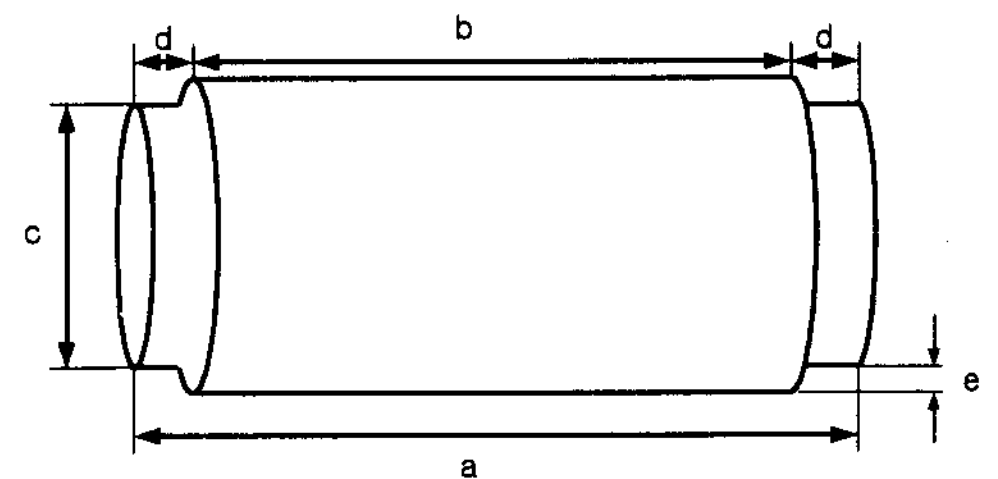


Fig. 1. 축열조의 형태

Table 1. 축열조 사양

(단위 : cm)

	a	b	c	d	e
Tank I	96	80	38	8	1
Tank II	96	80	38	8	0.5
Tank III	135	122	44	6.5	1
Tank IV	117	101	48	8	1
Tank V	186	171	38	7.5	1

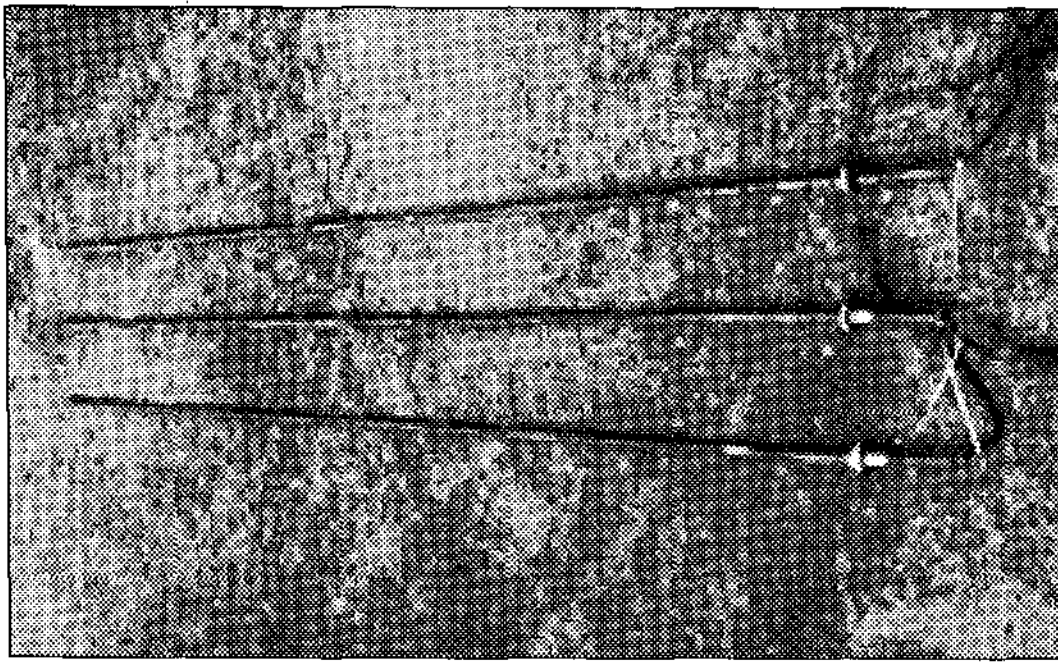


Fig. 2. 축열조 내부온도 측정을 위한 열전대

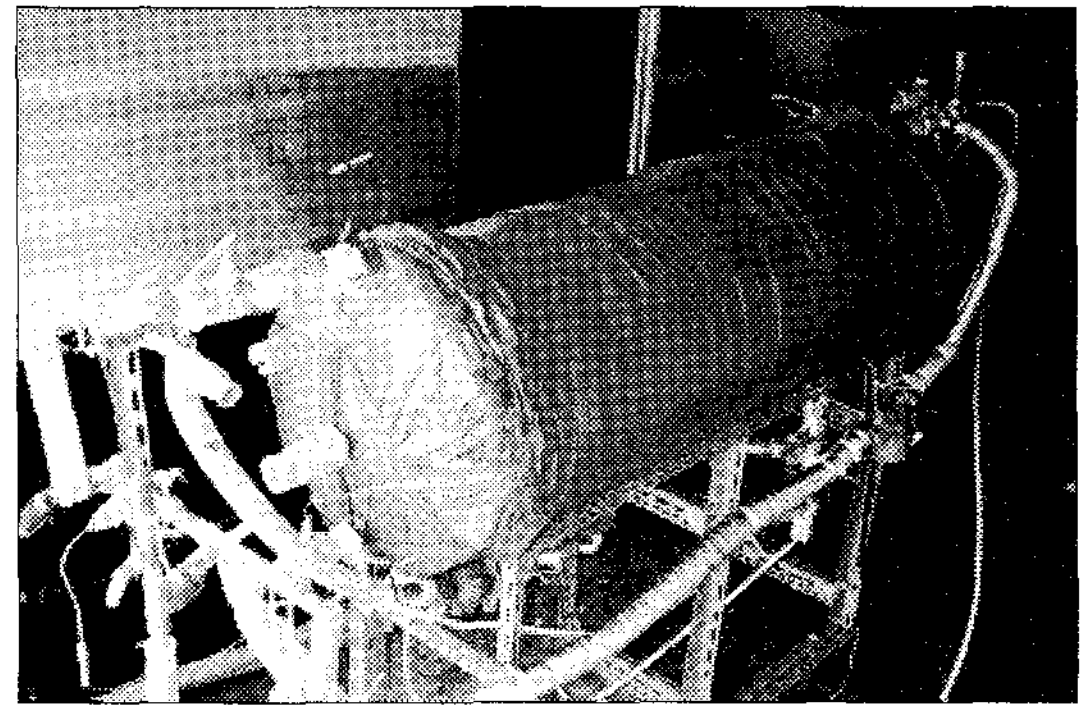


Fig. 4. 수평형 축열조

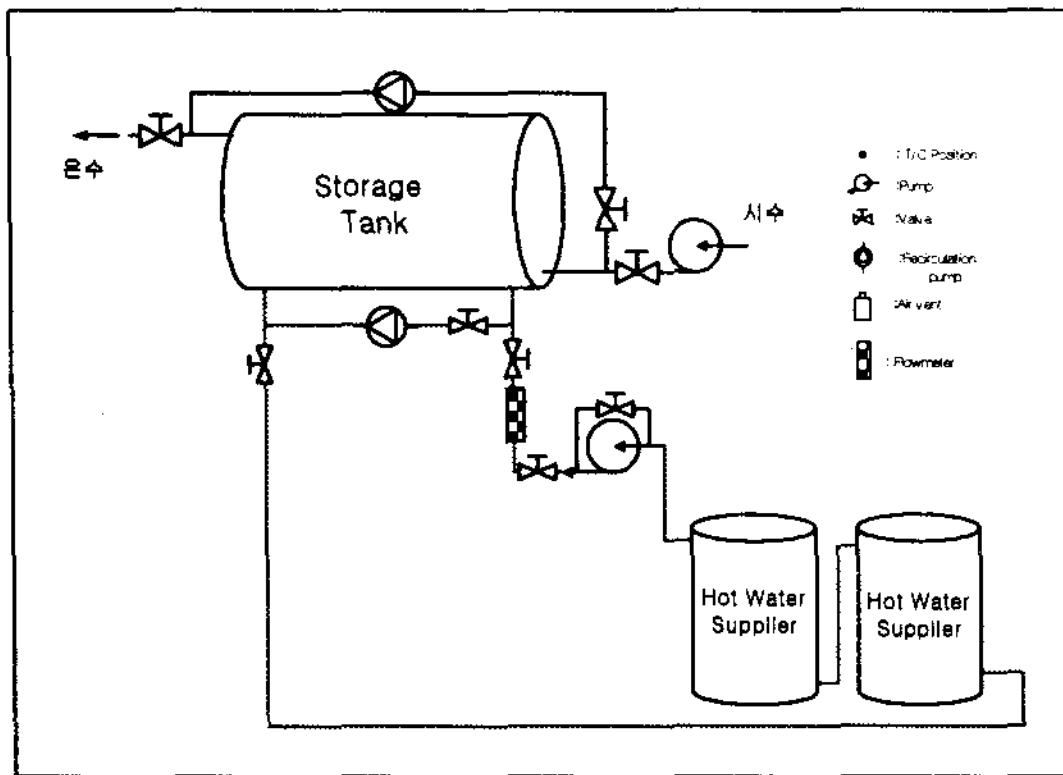


Fig. 3. 수평형 축열조 열교환 성능실험장치 개략도

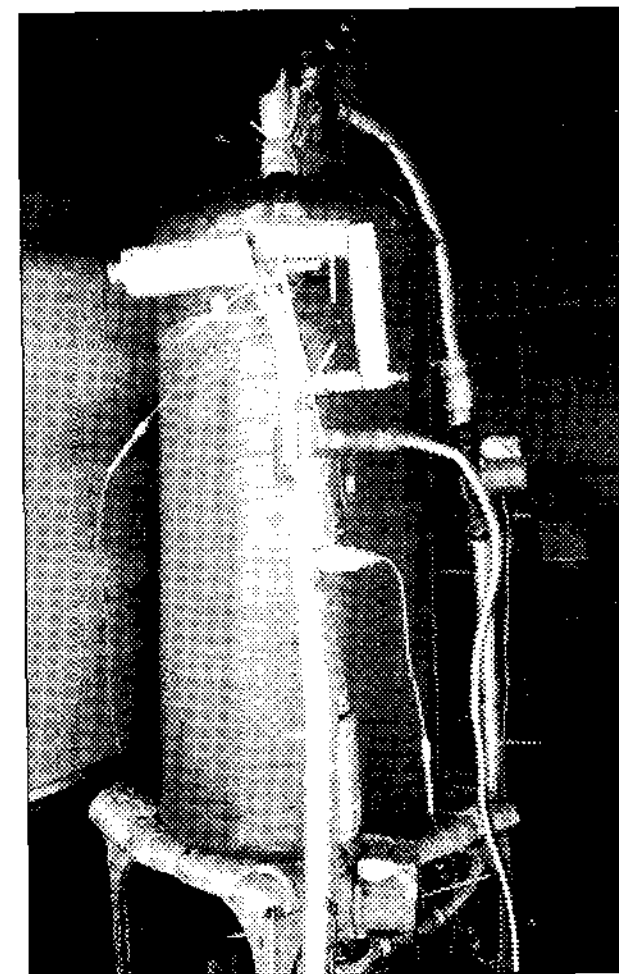


Fig. 5. 수직형 축열조

작하였고, 축열조를 수평설치 시 상, 중, 하부 중심에 삽입하였다. 그림 2는 내부온도 측정을 위하여 제작된 열전대를 나타낸다.

각각의 동일한 축열조에 대하여 수직과 수평으로의 설치가 이루어졌고, 실험이 수행되었다. 그림 3은 수평형으로 설치된 실험장치 개략도를 나타낸 것이다.

집열기에서 나오는 고온의 열매체를 대신하여 고온의 물을 사용하였고, 열매체로 사용되는 물의 온도는  $70 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 고정하였다. 이때, 유량은 집열기 단위면적당 유량( $0.02 \text{ kg/m}^2$ )인 1.2 lpm으로 고정하여 축열조의 맨틀 내로 흘려보내졌다. 축열조 내부탱크는 상온의 물로 채워졌고, 열매체를 흘려보내기 시작하면서 열매체의 입구와 출구, 그

리고 축열조 내부탱크의 21개 지점에서의 온도가 1분 간격으로 측정되었다. 이런 가열실험은 모든 축열조에 대해 동일하게 3시간 30분 동안 실시되었다.

그림 4와 5는 수평형과 수직형으로 각각 설치된 축열조를 나타낸 것이다.

측정된 온도 데이터는 총 열전달 계수(overall heat transfer coefficient:UA)를 계산하는 데 이용되었다. 열전달 계수의 계산은 LMTD (Log Mean Temperature Difference) 방법을 사용하여 수평형의 경우는 식 (1)을, 수직형의 경우는 식 (2)를 사용하여 계산되었다.

$$UA = \dot{m} \cdot C_p \cdot \ln\left(\frac{T_B - T_{in}}{T_B - T_{out}}\right) \quad (1)$$

여기서,  $\dot{m}$  : 유량  
 $C_p$  : 비열  
 $T_{in}$  : 열매체의 입구온도  
 $T_{out}$  : 열매체의 출구온도  
 $T_B$  : 내부탱크의 평균온도

$$UA = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{in} - T_{out}) \times \frac{\ln[(T_{in} - T_{top}) / (T_{out} - T_{bottom})]}{(T_{in} - T_{out}) - (T_{top} - T_{bottom})} \quad (2)$$

여기서,  $T_{top}$  : 수직형 축열조의 상부 온도  
 $T_{bottom}$  : 수직형 축열조의 하부 온도

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 축열조내 온도상승분포

그림 6은 수직형 축열조(Tank I)의 온도분포를 나타낸 것이다. 입구온도는  $70 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 균일하게 유지되었으며, 축열조 내에 수직방향으로 삽입된 각각의 열전대에서 시간에 따라서 상승하는 온도분포를 나타낸다. 축열조를 7개의 등간격의 노드로 나누어 그 노드의 중심부에 삽입된 열전대에 따라서 뚜렷한 성층화 현상을 나타내며 상승하였다.

node 1에서 온도 상승폭이 작은 것과 node 7 지점에서의 온도 상승폭이 작은 것은 제작된 축열조의 맨틀이 그림 1에서 보여진 것처럼, node 1과 node 7에는 존재하지 않기 때문이다. 축열조의 맨 윗쪽 node 7의 온도가 축열조 입구온도에 가까워지는데 소요되는 시간은 약 150분 경과 시이며, 이때 맨 아래쪽 노드와의 온도차는 약  $37^\circ\text{C}$  였다. 그림 7은 수평형 축열조(Tank I)의

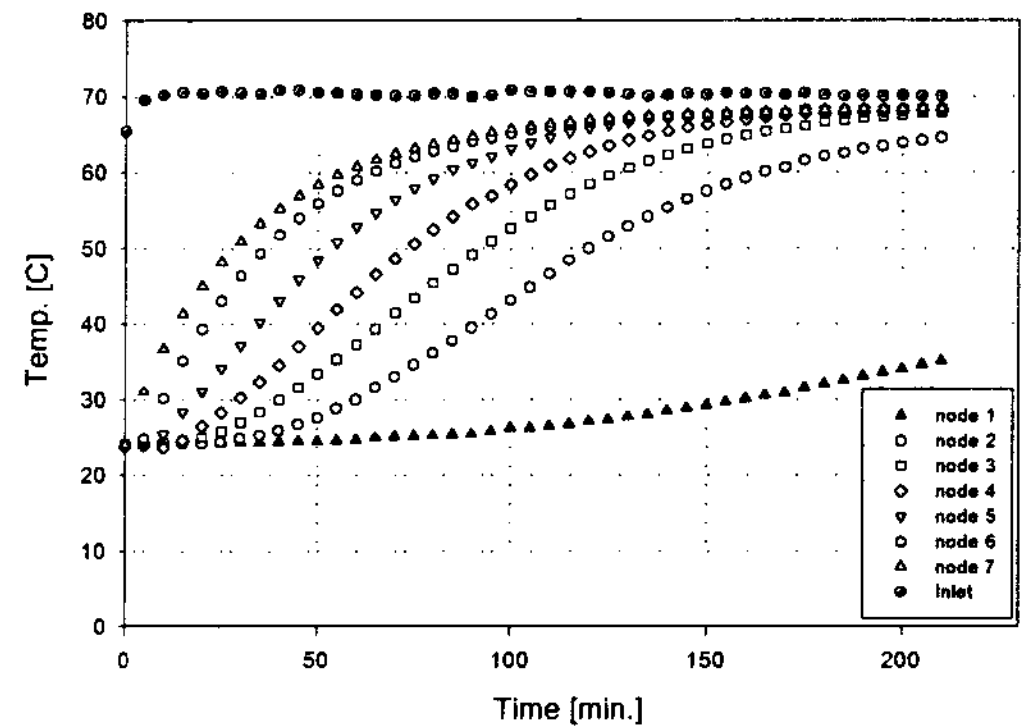


Fig. 6. 수직형 축열조(Tank I)의 온도분포

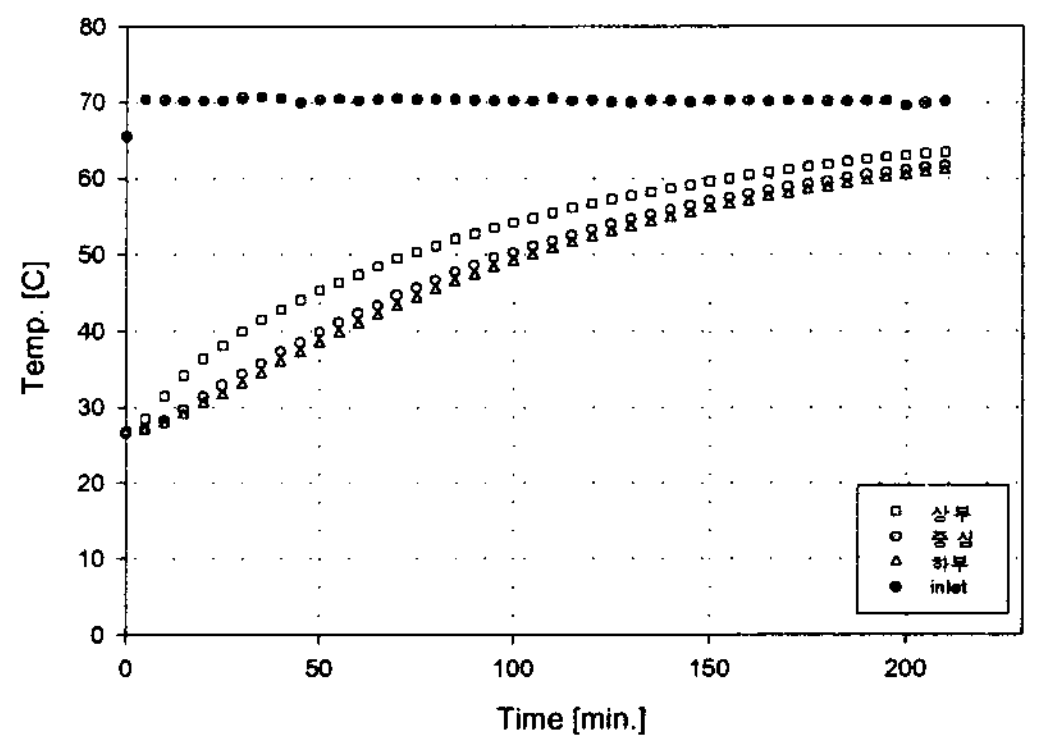


Fig. 7. 수평형 축열조(Tank I)의 온도분포

온도분포를 나타낸 것이다. 열매체의 입구와 출구가 모두 축열조의 하단에 위치한 설치형태에서 측정된 것이며, 그 온도 분포를 보면 축열조의 중심과 하부의 온도차가 거의 동일하게 상승하고 축열조 상부만이 성층화를 이루는 것을 볼 수 있었다.

그림 8은 수직형 축열조의 높이에 대하여 시간에 따른 온도의 성층화 분포를 나타낸 것이다.

각각의 열전대 위치에서 측정된 값들은 시간이 갈수록 성층화 현상이 두드러짐을 알 수 있었다. 실험 개시 후 60분 경과 시에 그 성층화 현상이 가장 두드러졌으며 온도차는 약  $40^\circ\text{C}$  였다. 그림 9는 수평형 축열조의 높이에 따른 온도 성층화 분포를 나타낸 것이다.

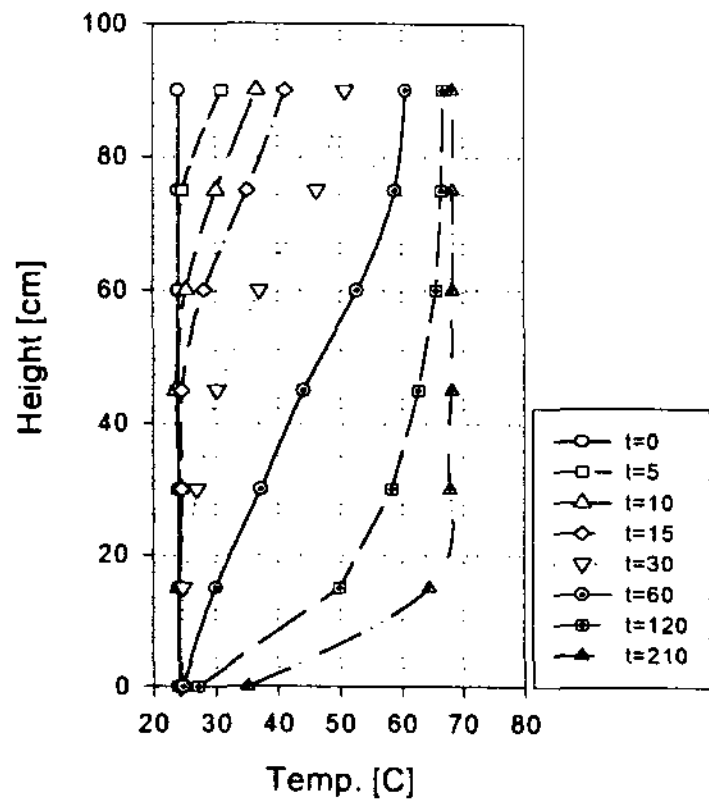


Fig. 8. 수직형 축열조(Tank I)의 시간에 따른 성층화 현상

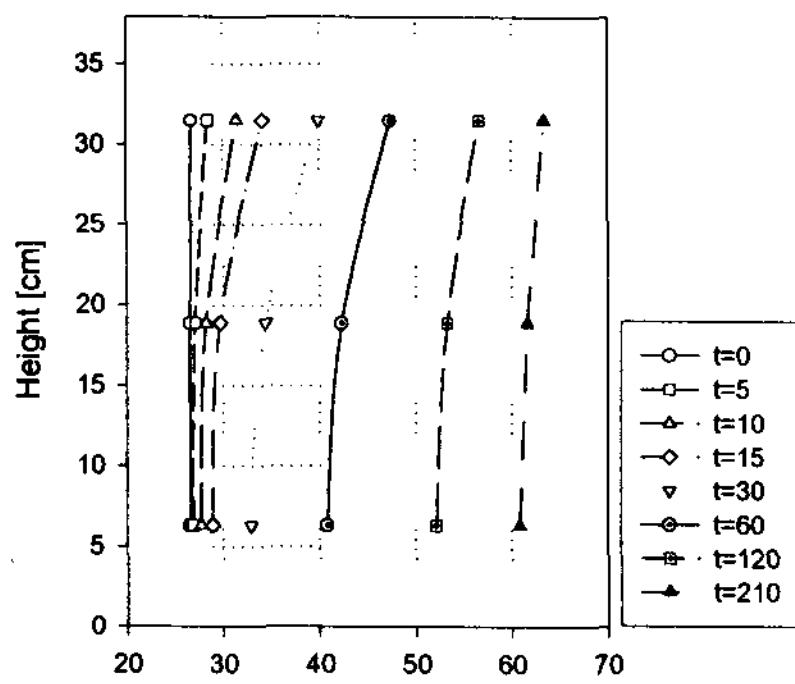


Fig. 9. 수평형 I의 경우, 축열조 중심에서의 온도분포

온도 곡선을 보면 시간에 따른 성층화 현상이 거의 없이 축열조 내의 온도가 고르게 상승함을 볼 수 있다. 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 수직형 경우와 비교해 볼 때 작았다.

### 3.2 축열조 설치 형태에 따른 열전달계수

축열조의 설치 형태에 따른 열전달 계수는 용량 100리터인 경우는 Tank I을, 용량 200 리터인

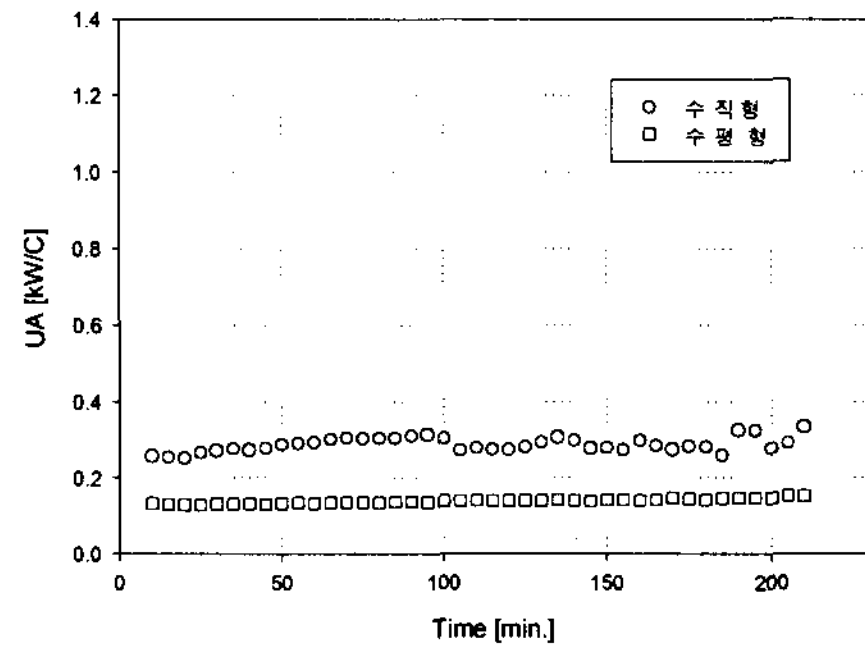


Fig. 10. 축열조(Tank I)의 설치형태에 따른 열전달 계수

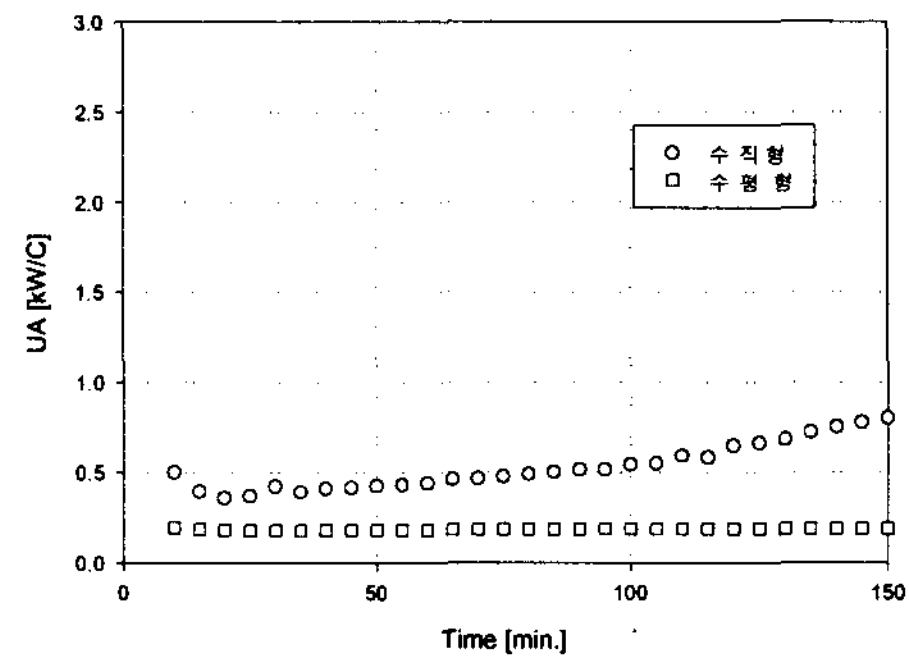


Fig. 11. 축열조(Tank IV)의 설치형태에 따른 열전달계수

경우는 Tank IV의 열전달계수 값을 비교하였다.

그림 10은 축열조(Tank I)의 설치형태에 따른 열전달 계수 값을 비교한 것이다.

축열조 내 온도분포와 열매체의 입출구 온도를 가지고 계산된 총 열전달계수(overall heat transfer coefficient) 값을 시간에 따라서 나타낸 것이다.

열전달계수의 값은 수직형과 수평형 모두 시간에 따른 변화가 없이 일정한 경향을 보였다. 그래프에서 보여진 것 처럼 열전달 계수 값들은 수직형이 수평형 보다 높았으며, 시간에 걸쳐서 평균한 열전달계수 값 또한 수직형 0.29 kW/°C, 수평형 0.14 kW/°C로 수직형의 경우가 약 2배 가량 높았다.



그림 11은 용량 200리터인 축열조(Tank IV)에 대한 설치형태에 따른 열전달 계수값을 비교한 것이다. 수직형의 경우는 시간이 경과함에 따라 그 값이 약간의 상승은 생겼으나 시간에 따라서 커다란 증감폭은 없었다.

그리고, 수평형의 경우에는 Tank I에서와 동일하게 열전달계수값이 시간에 따라서 일정하였다. 열전달 계수의 평균값을 보면 수직형 0.60 kW/°C, 수평형 0.19 kW/°C로 역시 수직형의 경우가 높았다. Tank I과 비교해 볼 때, 수직형의 경우는 열전달 계수 값이 커졌으나 수평형의 경우에는 그 값의 차이가 미미했다. 이는 수평형의 경우 맨틀을 지나는 열매체가 부력에 의한 상승 효과의 영향이 작기 때문이다.

### 3.3 높이/반경의 비에 따른 열전달계수

높이/반경의 비에 따른 축열조의 열전달 계수의 비교는 맨틀 간격이 1 cm로 동일한 Tank I, III, IV, V에 대하여 각각의 세 가지 설치형태에 따라서 비교되었다.

높이/반경의 비는 Tank I, III, IV에 대하여 각각 2.526, 3.068, 2.437 이다. 그림 12를 보면 높이/반경의 비가 가장 큰 Tank III의 열전달계수 값이 가장 컸고, 그 다음은 Tank IV, Tank I의 순으로 나타났다.

Tank III와 Tank IV의 열전달계수 값을 보면

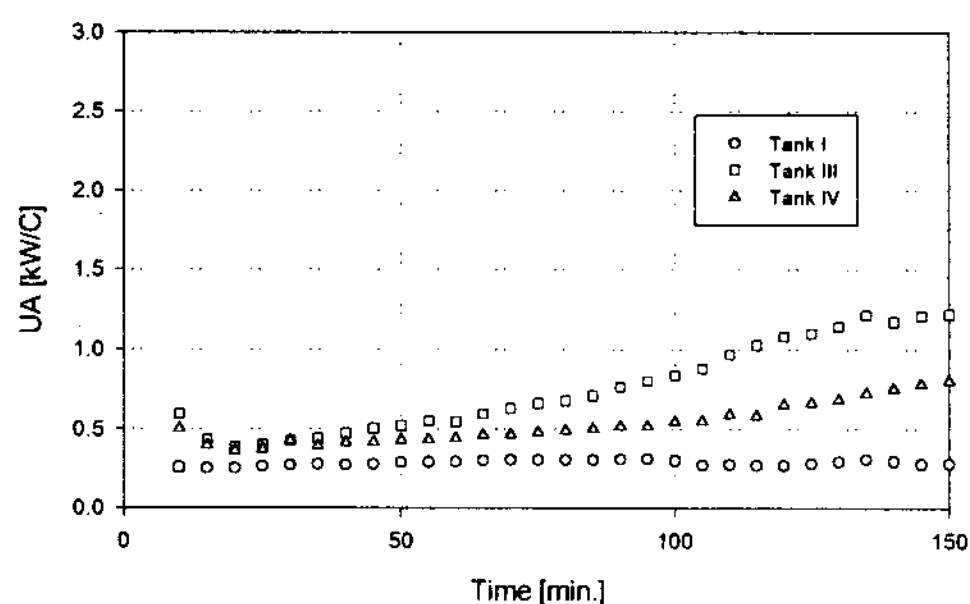


Fig. 12. 수직형에 대한 높이/반경의 비에 따른 열전달계수(UA)

그 값이 높이/반경의 비와 비례하나, Tank I과 Tank III의 결과를 볼 때 실제적인 열전달 면적이 넓고 좁은가의 문제에 달려있다고 볼 수 있다.

수평형으로의 설치형태에서의 열전달 계수 값의 비교는 축열조 I, III, IV, V에 대하여 수행되었다. 그림 13은 수평형의 설치형태에 대한 높이/반경의 비에 따른 열전달계수를 나타낸다. 각각의 높이/반경의 비는 각각 2.526, 3.068, 2.437, 4.895 이다. 그림 13을 보면 그 열전달계수 값이 Tank V, III, IV, I의 순으로 나타났다. 수직형에서와 마찬가지로 높이/반경의 비가 가장 큰 축열조의 열전달 계수 값이 가장 높았다. Tank IV와 Tank I은 그 비가 축열조 I의 경우가 크긴 하나, 맨틀과 내부탱크가 접해있는 열교환 면적을 보면 Tank IV가 크다. 이는 용량이 다른 축열조이기 때문에 높이/반경의 비가 열교환면적의 비와 비례적이지 않을 수 있기 때문이다. 열전달 계수의 평균값들을 보면, Tank I, III, IV, V에 대하여 각각 0.14 kW/°C, 0.20 kW/°C, 0.19 kW/°C, 0.24 kW/°C 였다.

### 3.4 맨틀 간격에 따른 열전달계수

맨틀 간격에 따른 열전달계수를 비교하기 위하여 동일한 기하학적 형상을 가지고 있으나 Jacket 간격이 다른 Tank I, II에 대하여 비교되었다.

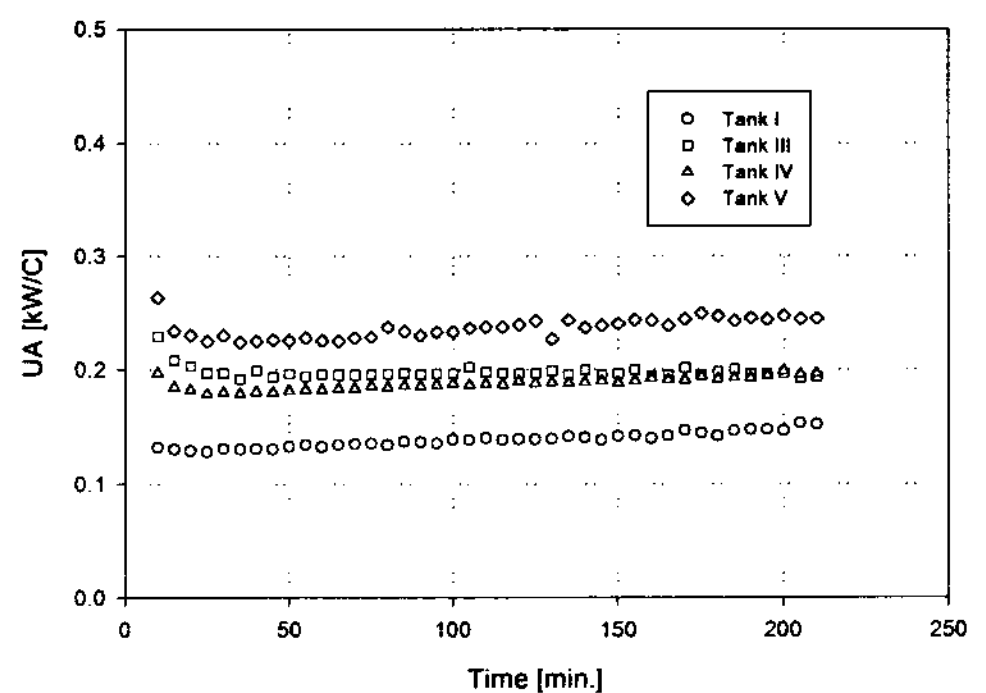


Fig. 13. 수평형에 대한 높이/반경의 비에 따른 열전달계수(UA)

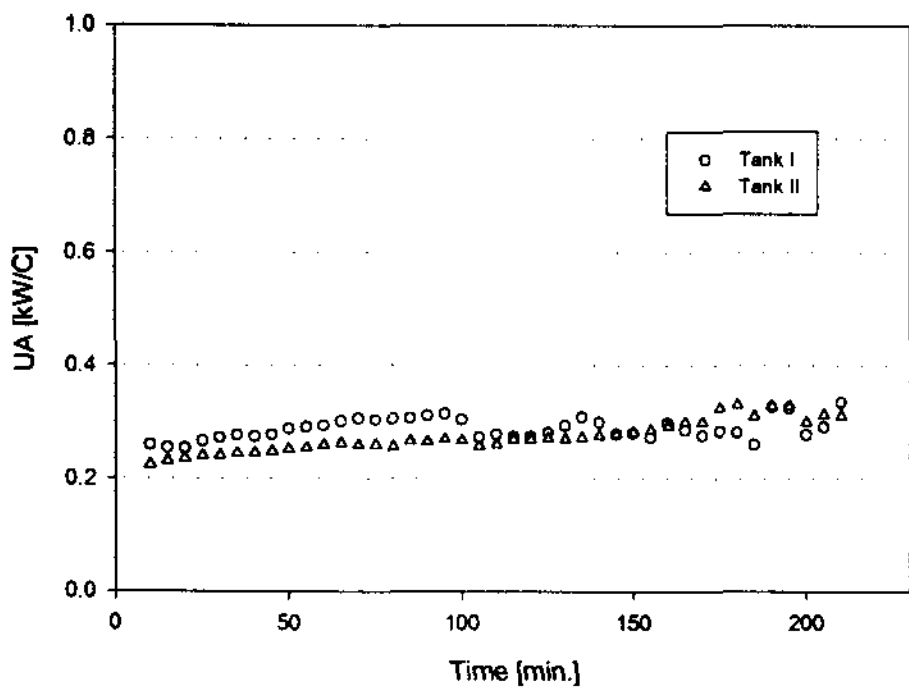


Fig. 14. 수직형 축열조의 Jacket 간격에 따른 열 전달 계수

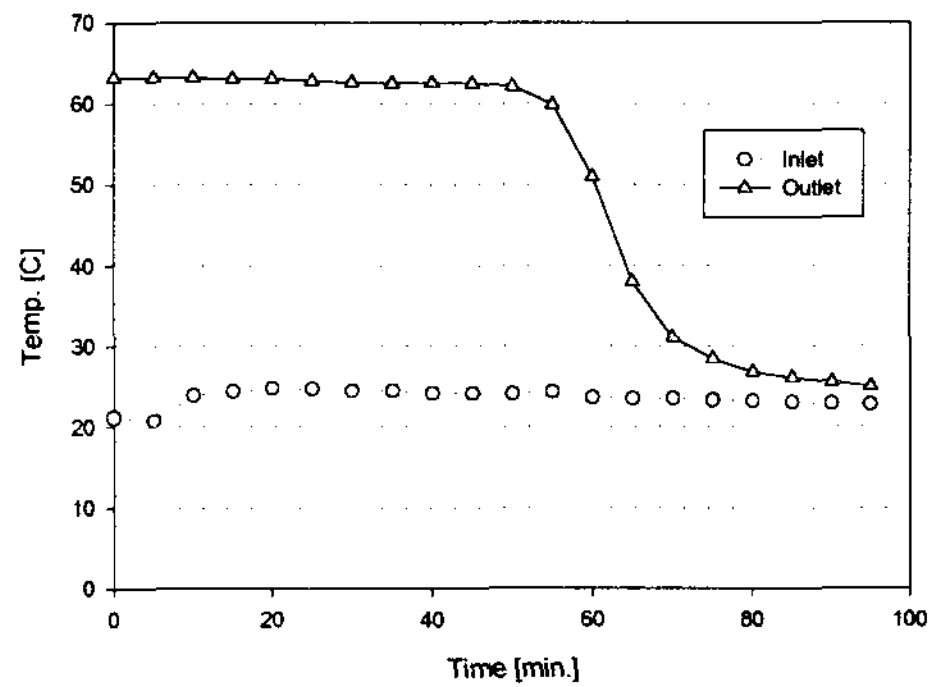


Fig. 16. 수직형에서의 배수온도곡선

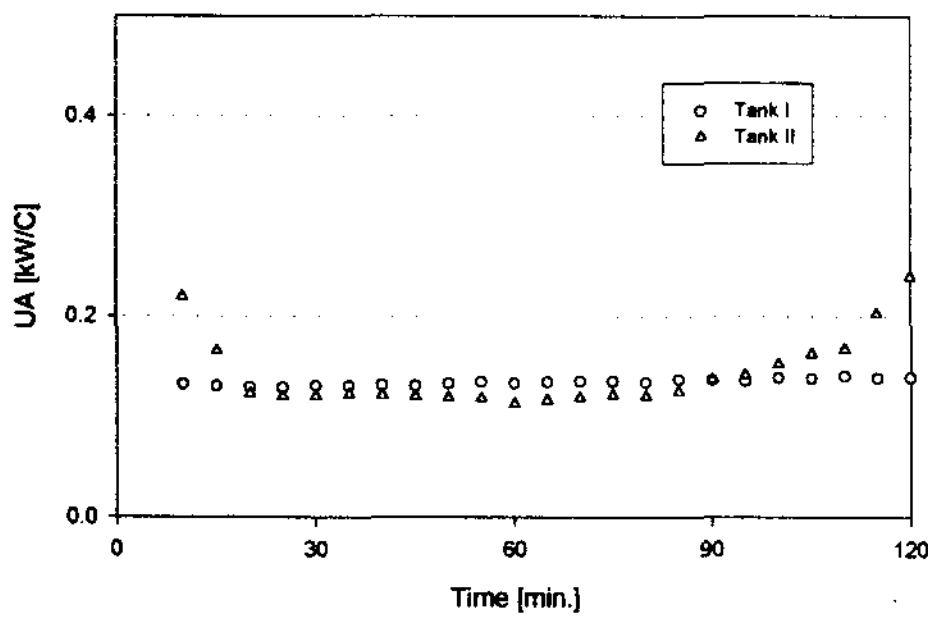


Fig. 15. 수평형 축열조의 맨틀 간격에 따른 열 전달 계수

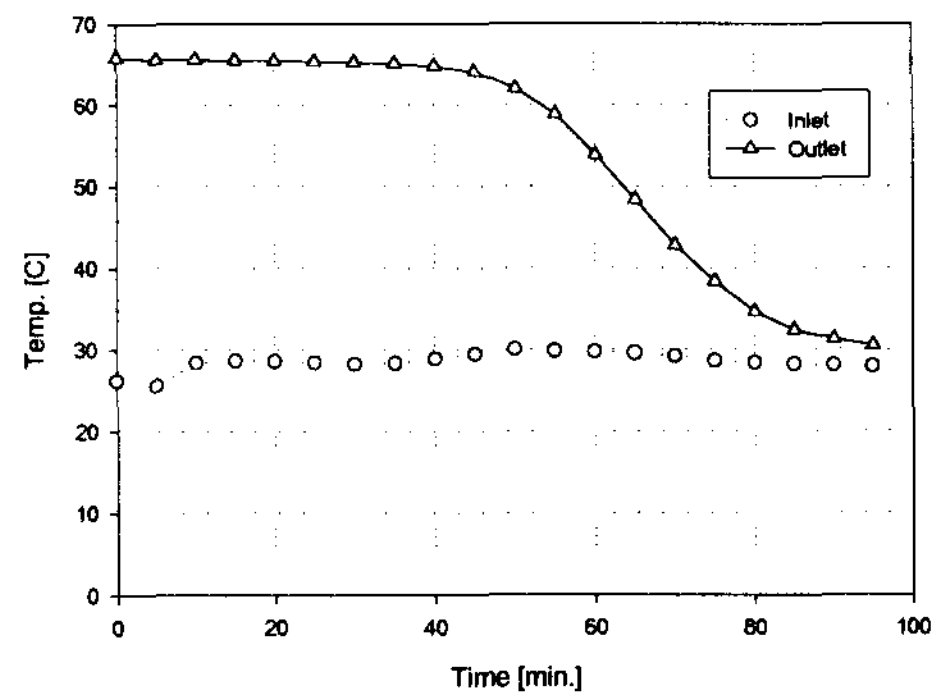


Fig. 17. 수평형에서의 배수온도 곡선

맨틀 간격에 대한 실험은 단지 용량 100 liter에 관해서만 수행이 되었다.

그 결과는 그림 14와 15에서 보여지는 것처럼, 열전달 계수의 평균값은 수직형의 경우 Tank I, II 각각 0.29 kW/°C, 0.25 kW/°C였고, 수평형의 경우는 0.138 kW/°C, 0.142 kW/°C이었다. 용량 100 liter인 Tank I, II에서 맨틀 간격은 수평형이나 수직형으로의 설치형태에 대하여 커다란 차이가 없었다. 이는 축열조의 용량이 맨틀을 지나는 열매체의 유량에 비해 상대적으로 작기 때문이라고 판단된다.

### 3.5 배수실험

맨틀형태의 축열조의 장점 중의 하나는 열매체

의 유·출입이 내부 탱크의 유동에 영향을 미치지 않음으로써, 온도 성층화의 생성을 방해하지 않는 것이다. 맨틀로 들어가는 열매체 입구 측과 출구 측의 밸브를 닫고, 내부탱크의 유체와 맨틀의 유체를 각각 교반하여 균일한 온도가 되게 한 다음, 상온의 물을 축열조의 하부에서 공급하고 상부로는 온수를 배수시키는 실험을 출탕실험이라 한다. 배수실험 또한 수직형과 수평형 두 가지 형태에 대해서 비교되어졌다. 배수 실험결과는 대표적으로 용량 100 liter인 경우인 Tank II에 대해서 결과를 나타내었고 그림 16, 17과 같다.

그림 16과 그림 17을 보면 축열조에서 나오는 온수 온도의 하강하는 시점이 수직형인 경우는 약 52분 경과 시부터 생겼고, 수평형의 경우는 약 40분 경과 시부터 생겼다. 하강 곡선의 기울

기 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.

#### 4. 결 론

본 맨틀형 축열조의 열전달 특성에 관한 실험적 연구는 기존의 축열조 내에 열교환기 형태의 일환으로 튜브가 삽입된 축열조 보다 열전달 성능이 높은 것을 알려진 맨틀형 축열조의 열전달 특성을 파악하기 위한 것이다.

따라서, 5개의 기하학적 형태가 다른 축열조를 제작하였고, 동일한 축열조에 대하여 열매체의 입출구 위치와 축열조의 배치 형태를 달리하여 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 LMTD method를 사용하여 열전달 계수(UA: overall heat transfer coefficient) 값을 계산하였다. 시간에 따른 열전달 계수 값의 평균값은 표 2에 보여졌다.

Table 2. 시간에 따른 열전달 계수의 평균값  
(단위 : kW/°C)

	수직형	수평형
Tank I	0.288079	0.138309
Tank II	0.253641	0.141916
Tank III	0.75739	0.19815
Tank IV	0.599054	0.18616
Tank V	-	0.236498

<표 5- 1>에 근거한 결론은 다음과 같다.

1. 축열조의 설치 형태에 대하여 열전달 성능은 수직형의 경우가 수평형의 경우에 비하여 2~3배 높았다.
2. 맨틀형 축열조는 높이/반경의 비에 따라서 열교환면적이 달라지는 특성을 가지고 있다. 축열조의 용량이 같을 경우, 높이/반경의 비가 큰 축열조가 열전달 성능이 우수하였다.
3. 맨틀형 축열조의 Jacket 간격에 따른 열전달 특성의 경향을 보기 위한 실험은 용량 100 liter의 축열조에 대하여 수행되었으며, 그 결과는 수평형이나 수직형으로의 설치에 대하여 커다란 차이가 없었으며, 이는 축열조의 용량이 맨틀을 지나는 열매체의 유량에 비해 상대적으로 작기 때문이라고 판단되며, 보다 큰 용량의 축열조와 범위가 넓은 Jacket 간격에 대한 열전달 성능에 관한 연구가 더 필요할 것으로 보인다.
4. 열전달 성능실험에 부수적으로 축열조의 출탕 실험을 동반하여 수행하였다. 온수의 출탕은 축열조의 하단에서 저온의 급수가 공급이 될 때 축열조의 중간 부분에서의 섞임이 적어야 그 출탕 성능이 좋다고 할 수 있다. 출탕 실험의 결과는 수직형의 경우가 수평형의 경우보다 더 좋았으며, 동일한 수직형의 경우이더라도 반경이 작은 축열조의 경우가 더 좋았다.

#### 참 고 문 헌

1. 강용혁 등, "태양열 온수급탕 시스템 성능표준화", 한국에너지기술연구소, KIER-991423, 1999.
2. Grahm.L.Morrison, Asghar Nasr, Masud Behnia and Gary Rosengarten, "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.
3. Simon Furbo, "Summary of danish research on matched flow systems", Thermal Insulation Laboratory Technical University of Denmark, Report nr. 92-38, 1992.
  4. 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.
  5. Ee-Tong Pak, "Thermally stratified and hot water storage", 1991 SOLAR WORLD CONGRESS, Denver, Colorado, USA, 19-23 August 1991 1991 vol.2, part I, pp.1417~1423.
  6. 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.
  7. 천원기, 김형택, "감압튜브 및 팽창헤더를 이용한 직접식 태양열온수기의 설계 및 제작에 관한 연구", 태양에너지, Vol20., No.3, 2000, pp.51~60