

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 27, No. 3, 2007

## 태양열 발전을 위한 고온 축열 물질의 열전달 특성

Mao Aiming, 김기만, 한귀영\*, 서태범\*\*, 강용혁\*\*\*

\*성균관대학교 화학공학과(gyhan@skku.ac.kr)

\*\*인하대학교 기계공학부(seotb@inha.ac.kr)

\*\*\*한국에너지기술연구원(yhkang@kier.re.kr)

## Heat Transfer Characteristics of High Temperature molten salt storage for Solar Thermal Power Generation

Mao Aiming, Kim KiMan, Han GuiYoung\*, Seo TaeBeom\*\*, Kang YongHeack\*\*\*

\*Dept. of Chemical Eng, Sungkunkwan University(gyhan@skku.ac.kr)

\*\*Dept. of mechanical Eng. Inha University(seotb@inha.ac.kr)

\*\*\*Korea Inst. of Energy Research(yhkang@kier.re.kr)

### Abstract

The heat transfer characteristics of inorganic salt for high temperature heat storage material of solar power system were examined. The inorganic salts employed in this study was a mixture of  $\text{NaNO}_3$  and  $\text{KNO}_3$  and the operating temperature range was determined by measuring the melting temperature with DSC and by measuring the thermal decomposition temperature with TGA. The heat transfer characteristics was qualitatively obtained in terms of temperature profiles of salt in the tanks during the heat storage and heat release process as a function of steam flow rates, steam inlet temperature and the inlet position of steam. The effects of steam flow rates and inlet temperature of steam were experimentally determined and the effect of natural convection was observed due to significant density difference with temperature.

**Keywords** : 온축열물질 (High temperature heat storage material), 용융염 (molten salt), 태양열 발전 (solar power generation), 열전달 (heat transfer)

접수일자 : 2007년 6월 13일, 심사완료일자 : 2007년 8월 10일

교신저자 : 한귀영(gyhan@skku.ac.kr)

## 1. 서론

태양에너지의 고집광 기술의 발전에 따라서 고밀도의 태양열에너지를 이용하여 고온의 수증기를 발생시켜서 전기를 얻는 태양열 발전 기술이 최근에 크게 발전되고 있다. 태양에너지의 많은 장점에도 불구하고, 태양열 에너지의 사용에는 제한적인 여건이 존재하는바, 이것은 태양에너지의 사용시간이 태양열 일사시간에만 사용할 수 있다는 점이다. 따라서 태양열에너지의 공급과 수요에는 시간적 괴리가 존재하고, 이 점이 태양에너지의 상업적 활용에 있어서의 단점으로 지적되고 있다. 이 문제를 해결할 수 있는 방법으로 축열시스템이 제안되고 있다. 즉 낮 동안에 복사열의 일부를 축열탱크에 저장하였다가, 태양복사열이 없는 시간에 축열탱크에 저장된 열에너지를 회수하여 수요가 많은 시간대에 연속적으로 증기터빈을 운전하여 전기를 지속적으로 공급하는 것이다. 따라서 축열 물질은 사용되는 온도범위가 약 300 ~ 400 °C 스팀을 생산하기에 적당하여야 하고, 단위 부피 또는 단위 무게당 축열 밀도가 높아야만 경제성을 가질 수 있다. 태양열 발전과 고온 축열 시스템의 대표적인 것이 미국 캘리포니아에 설치된 10MW급 태양열 발전시스템인 Solar II이다. 태양열 저장을 위한 축열시스템의 개발은 국내외적으로 저온 평판형 및 진공관형 집열기 시스템에 적합한 축열시스템 및 축열물질의 개발이 주로 이루어 졌고 태양열 발전을 위한 고온 축열 시스템에 대한 연구는 현재 실험용 고온 태양열 발전 설비를 갖추고 있는 미국과 스페인 등에서 최근 활발히 연구가 되고 있다.

축열조에 대한 연구는 초기에 상변화물질을 이용한 온수급탕용 온수를 축열하는 저온 축열시스템이 주로 연구가 되었으며<sup>1,2,3,4,5,6,7)</sup>, 최근에 약 300 ~ 500 °C의 고온 축열시스템에 대한 연구가 진행되고 있는 실정이다<sup>8,9)</sup>. 본 연구는 최근에 연구가 시작되고 있는 무기염을 이용한 고온 축열

시스템의 축열물질의 물리화학적 성질, 그리고 축열시스템의 구조에 따른 축열 및 방열 특성을 살펴보고, 이로부터 축열조 설계를 위한 기본 공학적 자료를 도출하고자 한다.

## 2. 실험

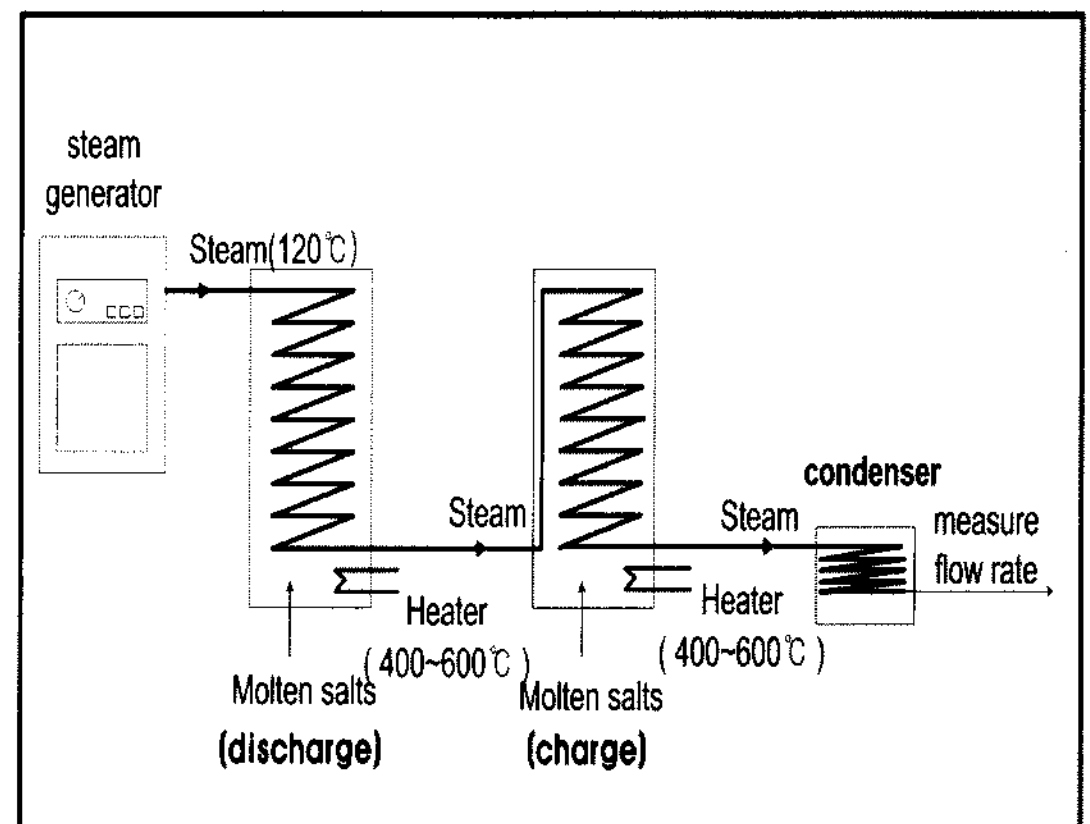


그림 1. 고온축열 및 방열 실험장치

그림 1은 본 실험의 장치도를 보여준다. 실험장치는 크게 스팀발생기, 축열조 및 방열조, 그리고 온도조절시스템으로 구성되어 있다. 스팀발생기에서 만들어진 스팀은 열전달 유체로 사용되며, 축열조의 온도에 따라 스팀에 의한 축열 및 방열이 일어나게 된다. 그림 1에서 볼 수 있듯이, 축열조는 2개가 직렬로 연결되어 있으며, 앞의 축열조는 낮은 온도의 스팀이 고온의 용융염에 의하여 열을 회수하는 열방출 실험용이고, 뒤의 축열조는 고온의 스팀이 낮은 온도의 용융염에 열을

저장하는 열저장 실험용이다. 방열 및 축열조는 길이 50 cm, 직경 15 cm의 원통형이며, 재질은 스텐레스 스틸이다. 방열 및 축열조 내부에는 스팀과 용융염과의 열교환을 위한 직경 1/4 인치의 스텐레스 전열관이 코일형태로 축열조 중앙에 설치되어 있다. 방열 및 축열조에는 축열물질의 온도분포를 확인하기 위하여 축방향으로 3개의 K형 전열대가 설치되어 있으며, 전열관 입구와 출구에도 스팀

의 온도 측정을 위한 K형 전열대가 설치되어 있다. 축열조 및 방열조는 5cm 두께의 ceramic 보온재로 보온이 되어있다.

실험은 먼저 방열조의 온도를 전기 히터를 이용하여 약 350 - 450 °C로 유지한 다음에 스팀발생기에서 만들어진 약 130 °C의 스팀이 방열조 내의 전열관으로 유입이 되면서 방열실험이 시작된다. 한편 축열실험은 앞의 방열조에서 얻어진 약 300 °C 이상 고온의 스팀이 용융온도보다 20 ~ 30 °C 높은 온도로 유지되고 있는 축열조로 유입이 되면서 축열과정이 시작된다. 이러한 비정상 상태 조건에서 방열 및 축열조 내 무기염의 온도 분포, 스팀의 입출구 온도가 데이터 수록장치 (data acquisition system)에 저장된다.

### 3. 결과

#### 3.1 축열물질의 물리화학적 성질 및 부피 팽창

본 실험에 사용된 고온축열 물질은  $\text{NaNO}_2$  (40%),  $\text{NaNO}_3$  (7%) 그리고  $\text{KNO}_3$  (53%)의 무기염의 혼합물로서, 이러한 물질의 고온축열 물질로서 적절한 적용 온도를 알아보기 위해서 DSC(Differential Scanning Calorimetry)를 이용하여 물질의 용융 온도를 측정하였고, TGA (Thermo-Gravity Analyzer) 를 이용하여 이 물질의 분해온도를 측정하였다. 그림 2는 DSC 분석결과이며, 그림 2에서 알 수 있듯이 용융 온도는 143.5 °C로 확인되었다. 그림 3은 TGA 분석 결과로서 이 물질의 분해 온도는 약 650 °C로 확인되었다. 따라서 본 용융염의 적정 적용온도는 약 200 ~ 600 °C로 예상할 수 있다. 한편 용융염은 온도변화에 따른 부피변화가 크기 때문에 방열 및 축열조를 설계할 때 부피팽창을 고려해야 하며, 그림 4는 온도 변화에 따른 용융염의 밀도 변화이다. 그림에서 알 수 있듯이 이러한 온도변화에 대한 상당한 밀도변화는 고온의 열전달 유체가 축열조 하부로 공급이 될 때, 상당한 자연대류

현상이 발생할 것으로 예상된다.

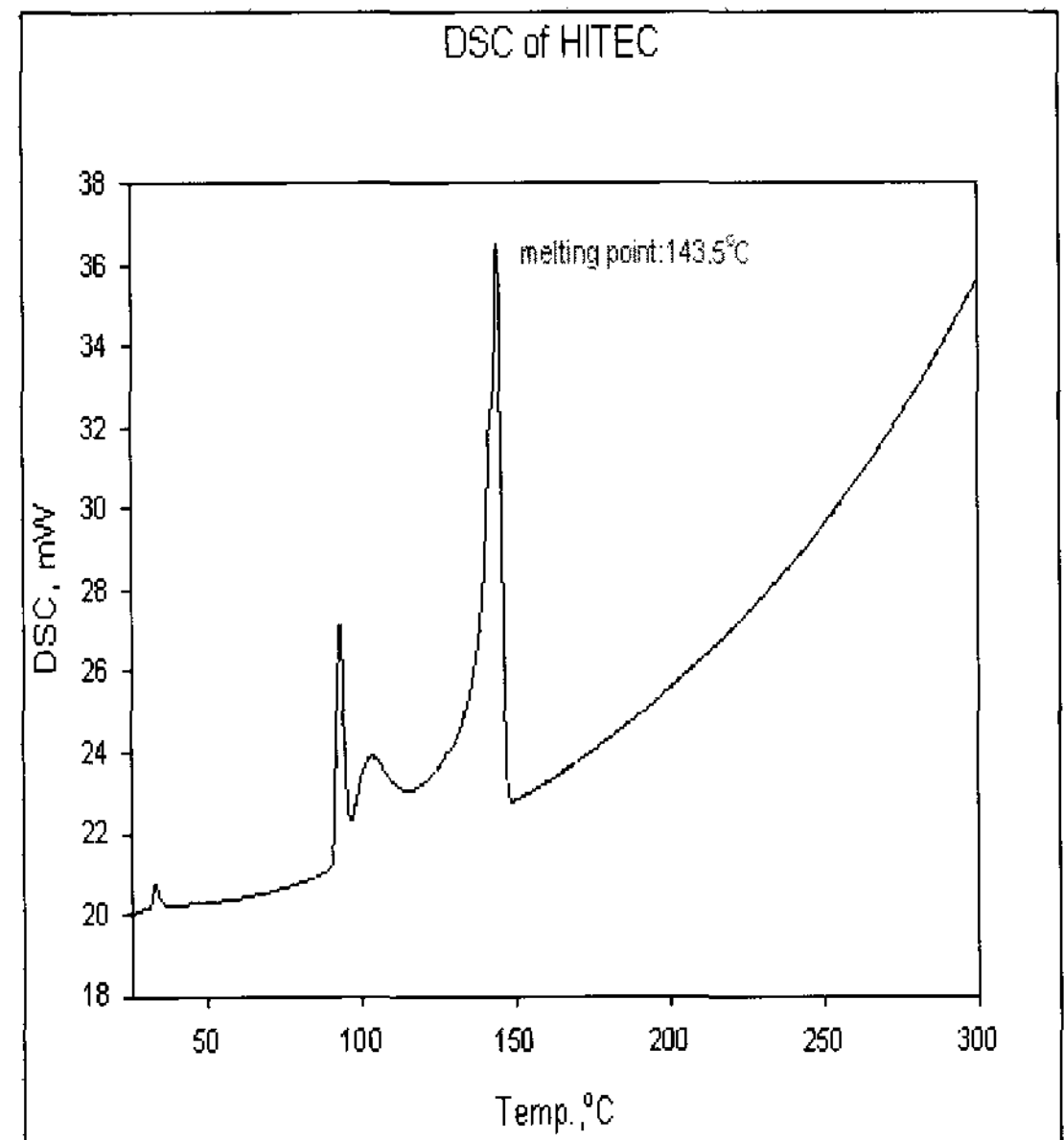


그림 2. 무기염의 DSC 분석

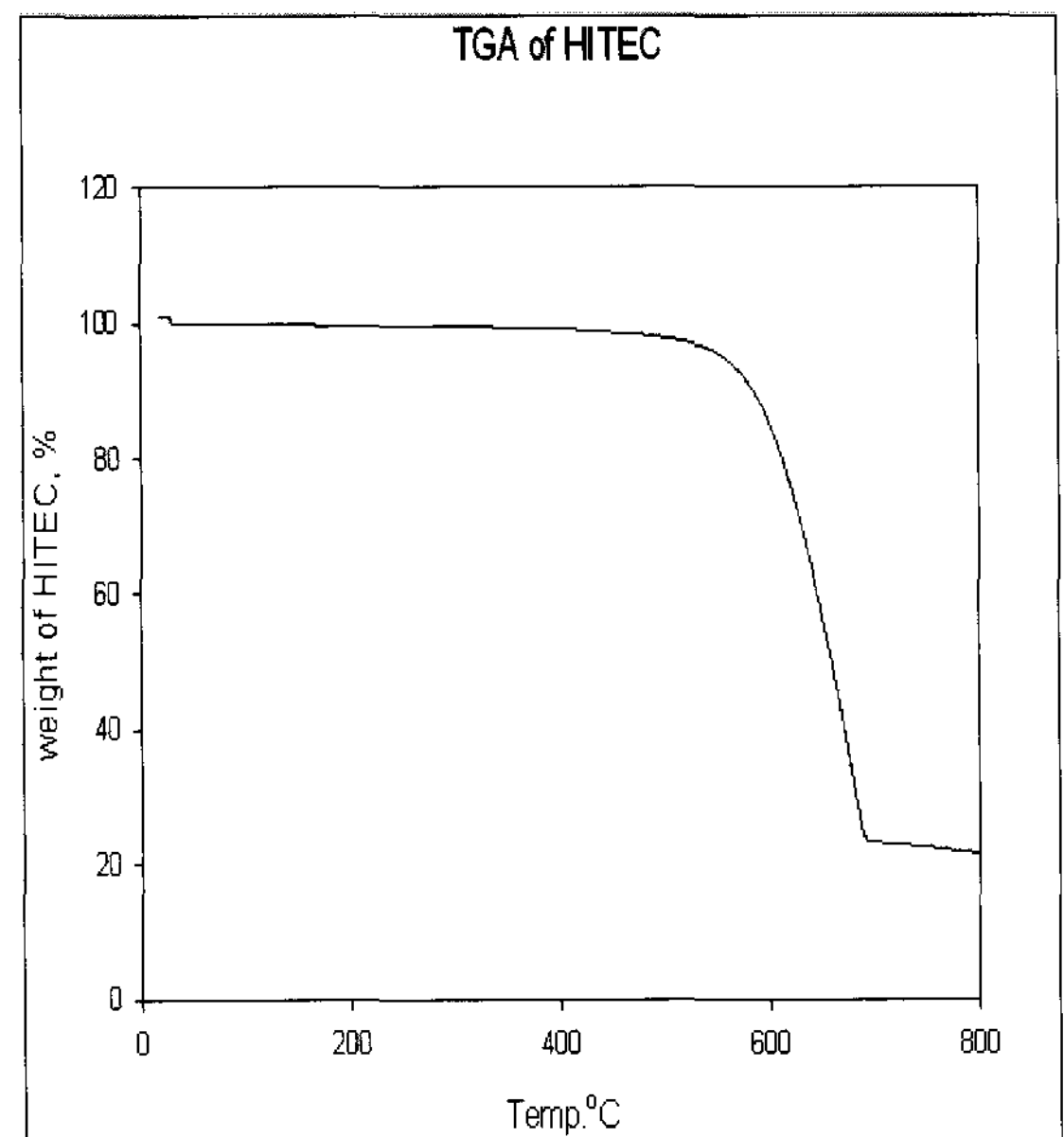


그림 3. 무기염의 TGA 분석

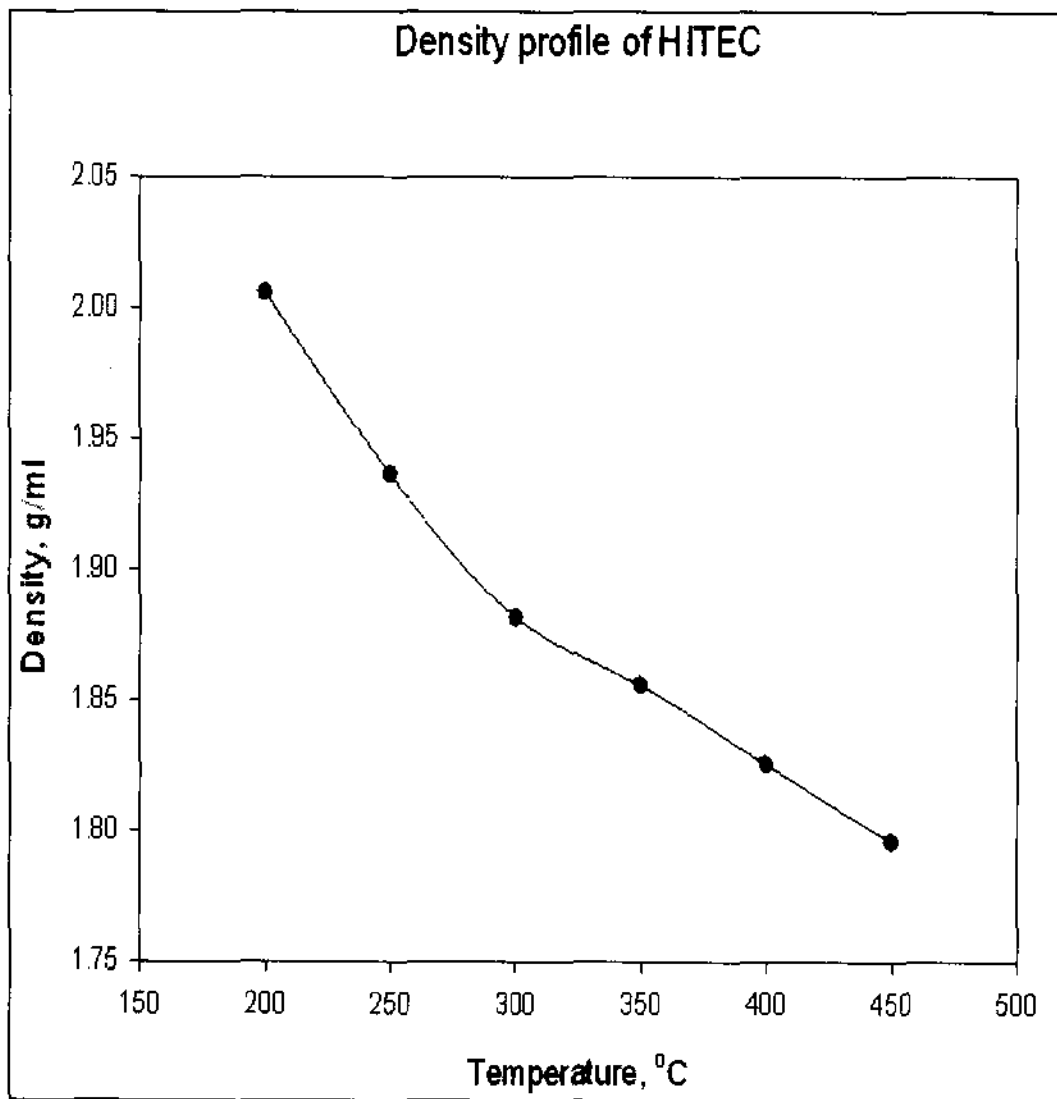


그림 4. 무기염의 온도에 따른 부피팽창특성

### 3.2 축열과정에서의 열전달 특성

그림 5는 축열과정에서 약 300 ~ 330 °C 고온의 스팀이 약 170 °C의 용융염 축열조에 공급이 될 때 시간의 변화에 따른 스팀 및 축열조 내의 축열물질의 온도 분포를 보여주고 있다. 축열 과정의 초기에 유입되는 스팀의 온도가 서서히 증가함에 따라 축열물질과 출구쪽 스팀의 온도가 서서히 증가함을 알 수 있다. 하지만 유입되는 스팀의 온도와 축열조내 축열물질의 온도 차이가 100 °C 이상으로 유지되는 점으로 미루어 볼때, 스팀과 축열물질간에 원활한 열교환이 이루어지지 않고 있음을 알 수 있다. 이것은 첫째로 전열관의 열전달 면적이 충분하지 않기 때문이라고 볼 수 있으며, 둘째로 축열물질과 전열관사이의 지배적인 열전달 메카니즘이 전도에 의하기 때문인 것으로 판단된다. 그림 6은 축열과정에서 열전달 유체인 스팀의 유입온도에 따른 축열조내에서 축열물질의 시간에 따른 온도변화를 보여주고 있다. 예측한대로 스팀의 유입온도가 크면 클수록 축열조의 온도가 시간의 경과에 따라서 증가함을 알 수 있다. 하지만 스팀의 유입온도 300 °C인 경우 축열물질의 온도가

오히려 감소되는 경향을 보이고 있다. 이것은 비록 축열조를 보온재로 단열을 하였으나, 대기로 열손실이 존재하고 있으며, 비교적 낮은 온도의 스팀이 공급될 때, 외부로 손실되는 열량과 축열 물질이 스팀으로부터 얻는 열량이 거의 비슷하기 때문이라고 할 수 있다.

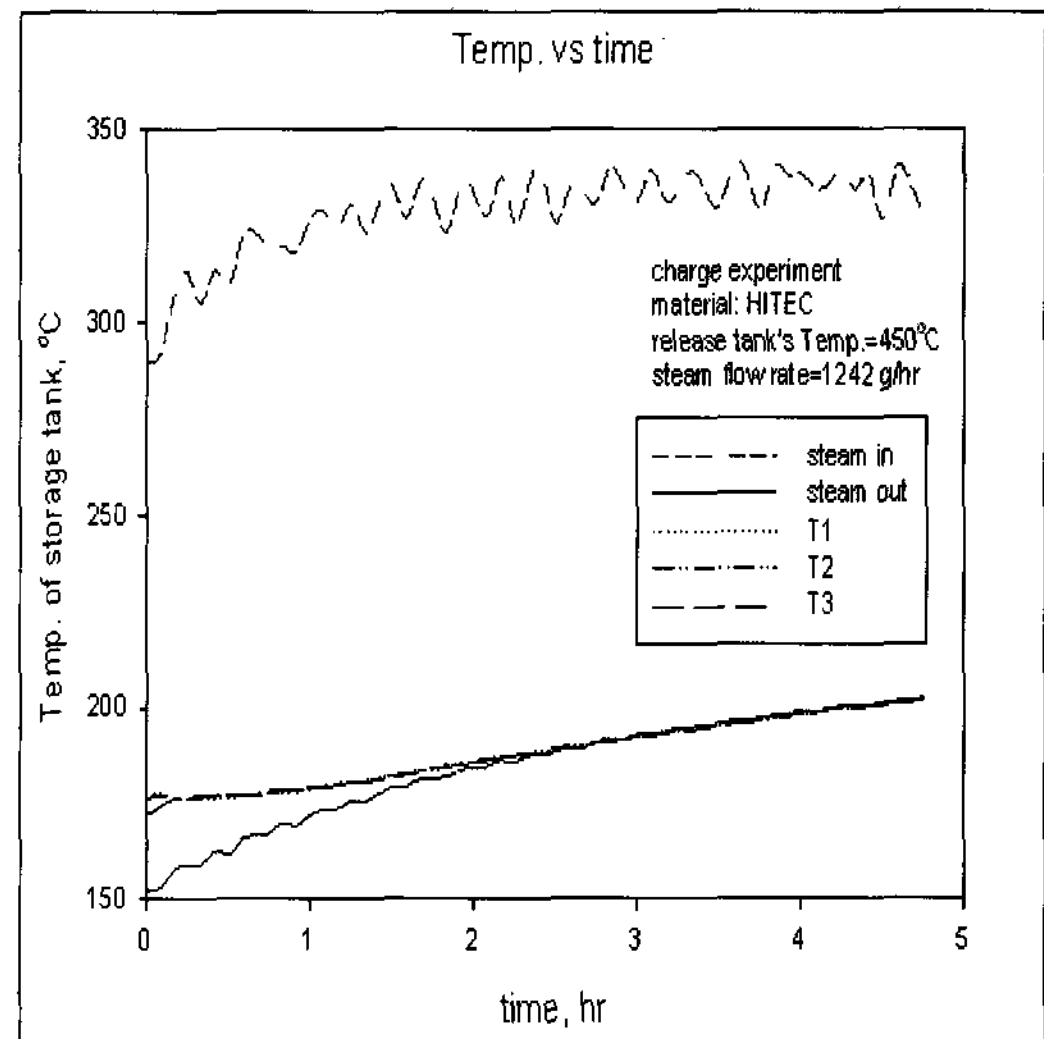


그림 5. 축열과정에서 축열물질 및 스팀의 온도분포

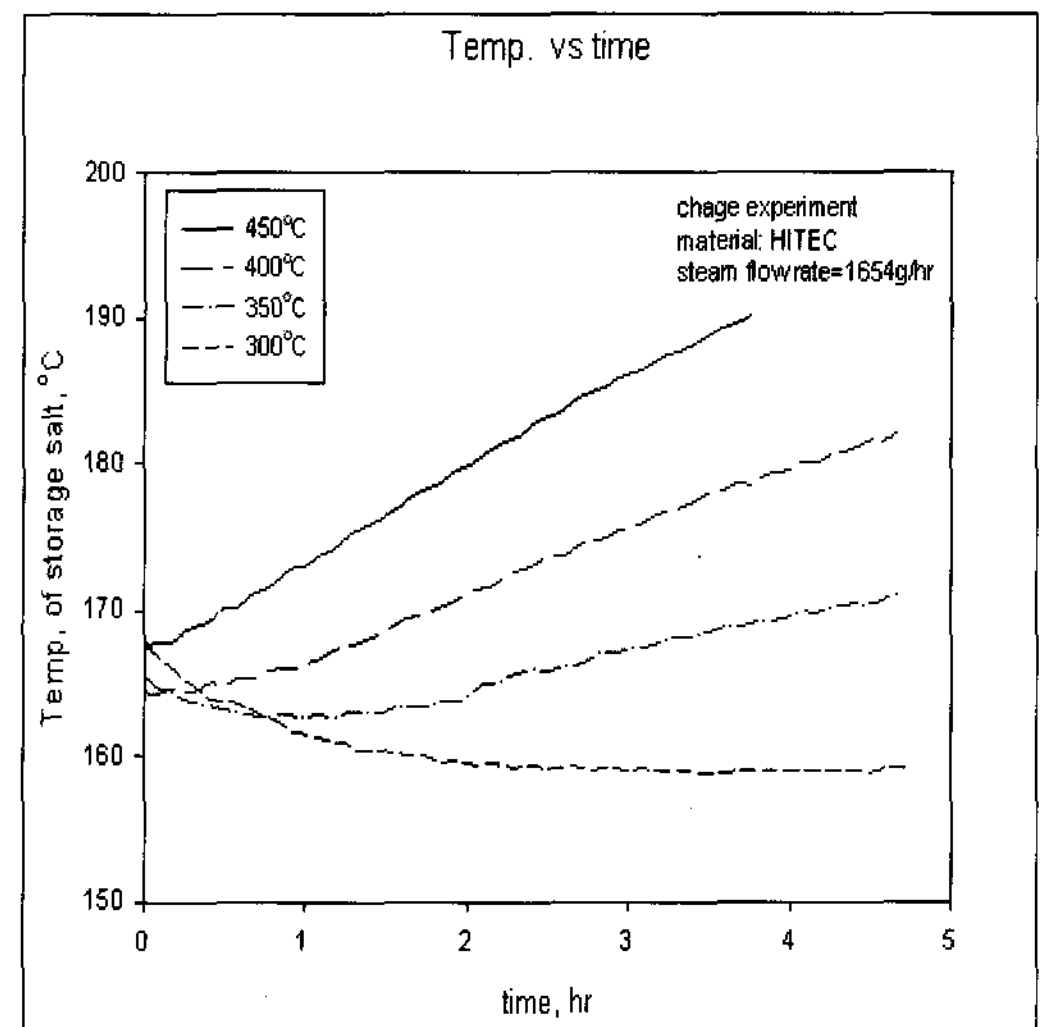


그림 6. 축열과정에서 스팀의 온도변화에 따른 축열조 온도분포

### 3.3 방열 과정에서의 열전달 특성

그림 7은 방열과정에서 약 130 °C의 스팀이 고온의 방열조에 유입이 될 때, 시간의 경과에 따른 스팀의 출구 온도 및 방열조내의 축열물질의 온도 분포를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 초기에는 스팀의 출구온도가 약 320 °C 정도를 유지하였으나, 축열물질의 온도감소에 따라서 스팀의 출구온도 또한 감소함을 알 수 있다. 그림 8은 방열과정에서 열전달 유체인 스팀의 유입 유량 변화에 따른 축열물질 및 스팀의 출구 온도 변화이다. 그림 8에서 알 수 있듯이 스팀의 유량 변화에 따른 축열 물질의 온도 및 스팀의 출구온도는 유량에 따라서 큰 변화가 없는 것으로 관찰되었다. 다만 약간의 차이는 높은 유량의 경우에 열전달계수가 증가하므로, 축열물질과 출구 쪽 스팀의 온도 차이가 낮은 유량의 경우보다 다소 작은 것으로 측정이 되었으나, 시간이 경과할수록 열전달의 추진력인 온도차가 적어지면서 이러한 유량 변화에 따른 스팀의 출구온도 변화는 감소되는 것으로 예측되었다.

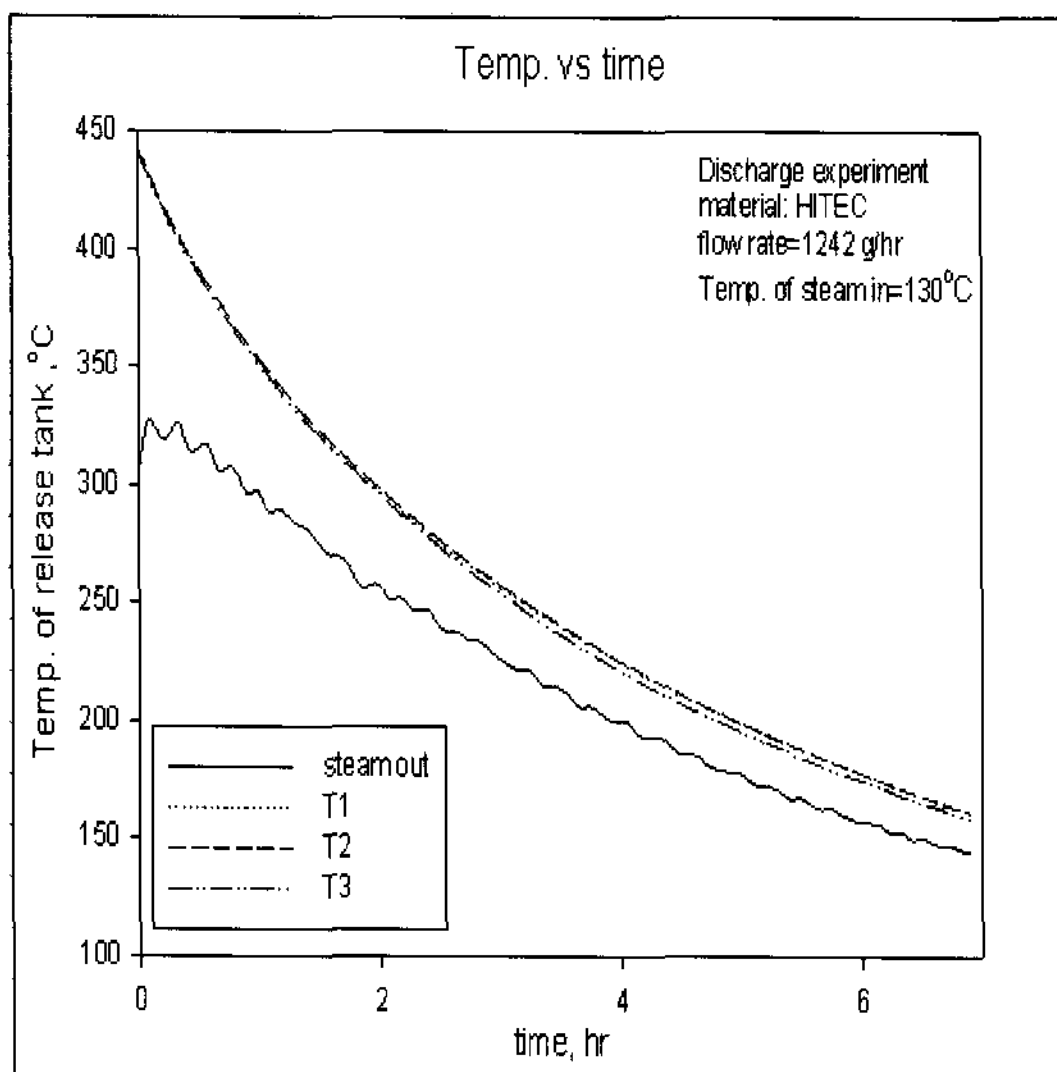


그림 7. 방열과정에서 축열조와 스팀의 온도분포

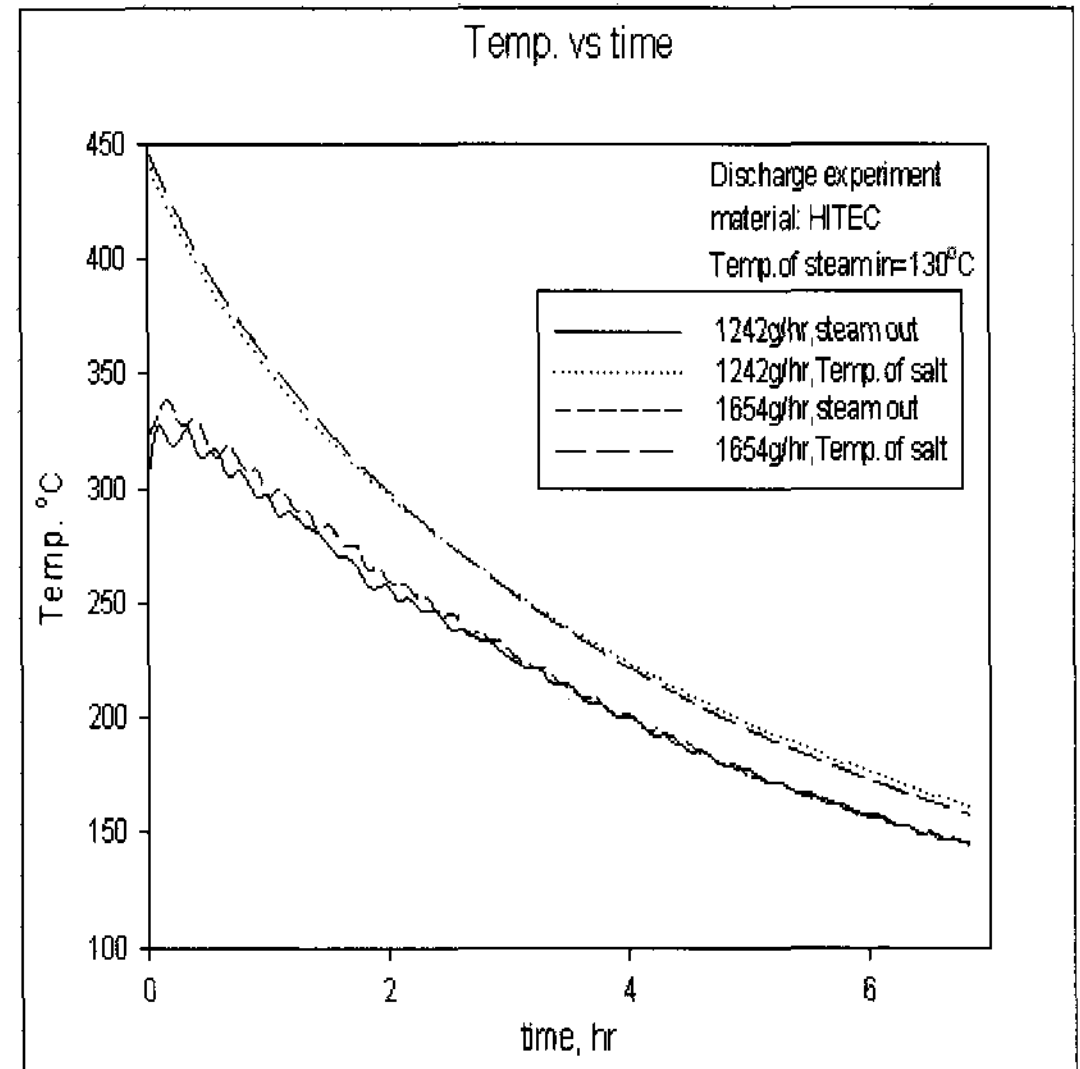


그림 8. 방열과정에서 스팀의 유량변화에 따른 축열조 온도분포

### 3.4 스팀의 공급 위치에 따른 열전달 특성

그림 9의 a), b)는 각각 축열과정에서 고온의 스팀의 유입위치에 따른 축열 물질의 온도분포이다. 즉 그림 9의 a)의 경우는 고온의 스팀의 코일형 전열관을 통하여 축열조 하부에서 유입이 되어 축열조 상부로 유출되는 경우와 그림 9의 b)의 경우는 고온의 스팀이 코일형 전열관을 통하여 축열조 상부에서 유입이 되어 축열조 하부로 유출되는 경우이다. 그림 9의 a)에서 알 수 있듯이, 고온의 스팀이 저온의 축열조 하부로 공급이 되면 하부의 축열물질의 밀도가 감소하면서 상부로 이동을 하게 되며, 축열조 내부에 밀도차이에 의한 축열물질의 순환이 이루어지는 자연대류 현상이 발생한다고 할 수 있다. 따라서 축열과정의 초기 약 20분 정도가 경과하면 축열조 상부, 중간부, 그리고 하부의 축열물질이 같은 온도 분포를 갖게 된다. 하지만 그림 9의 b)의 경우처럼 고온의 스팀이 축열조 상부로 유입이 될 경우에는 그림

그림 9의 a)의 경우와 같은 자연대류가 발생하지 않기 때문에 상부의 축열물질의 온도가 항상 하부보다 높은 온도 분포를 보이게 된다. 이러한 열전달 물질의 특성으로 미루어볼 때 대규모 축열

조 설계 시 열전달 유체의 입구 및 출구 배치에 이러한 현상을 고려하여야 할 것이다.

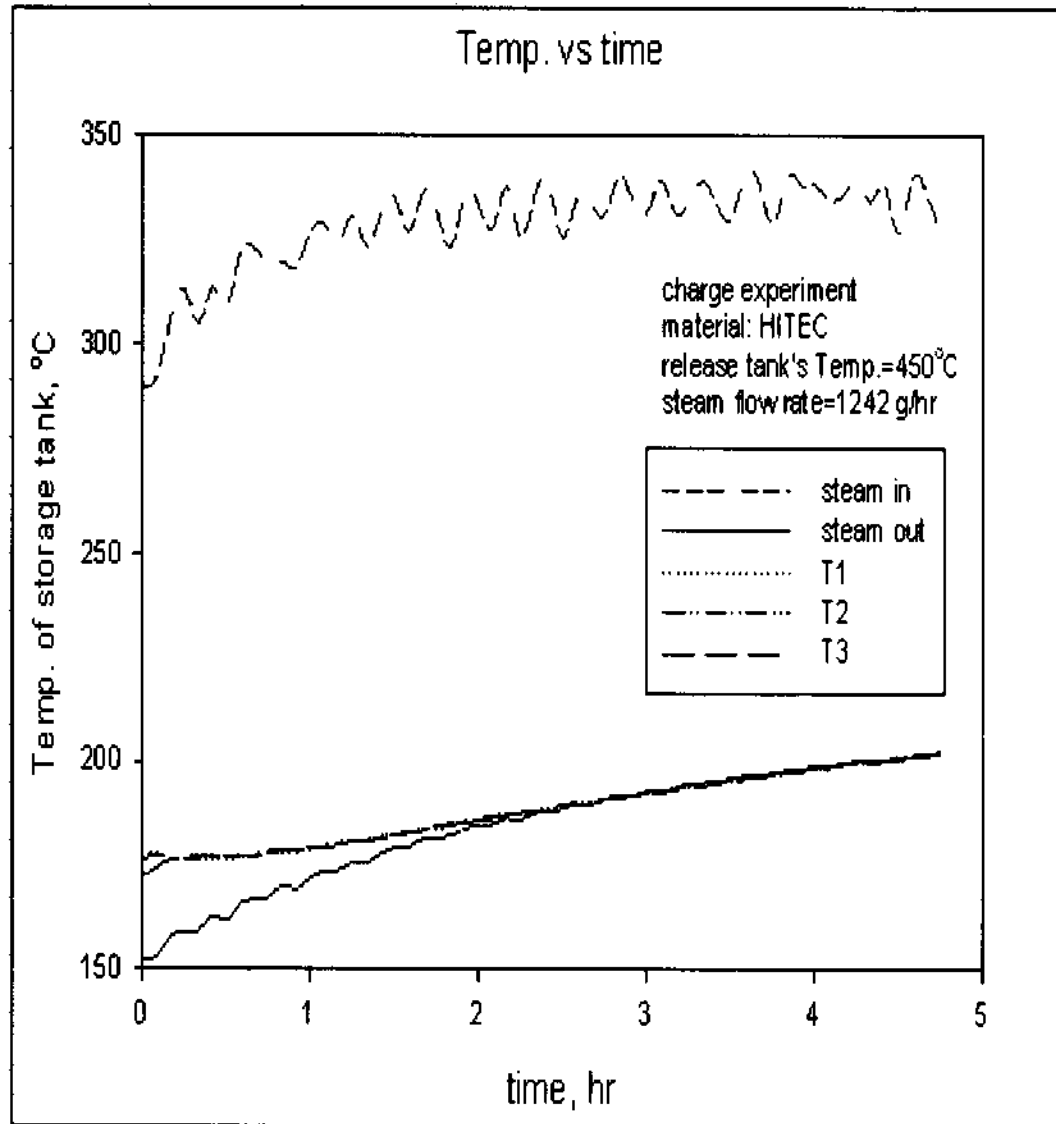


그림 9-a) 축열조내 스팀의 유입위치에 따른 축열조 온도 분포  
(a) 하부에서 상부로 흐를때

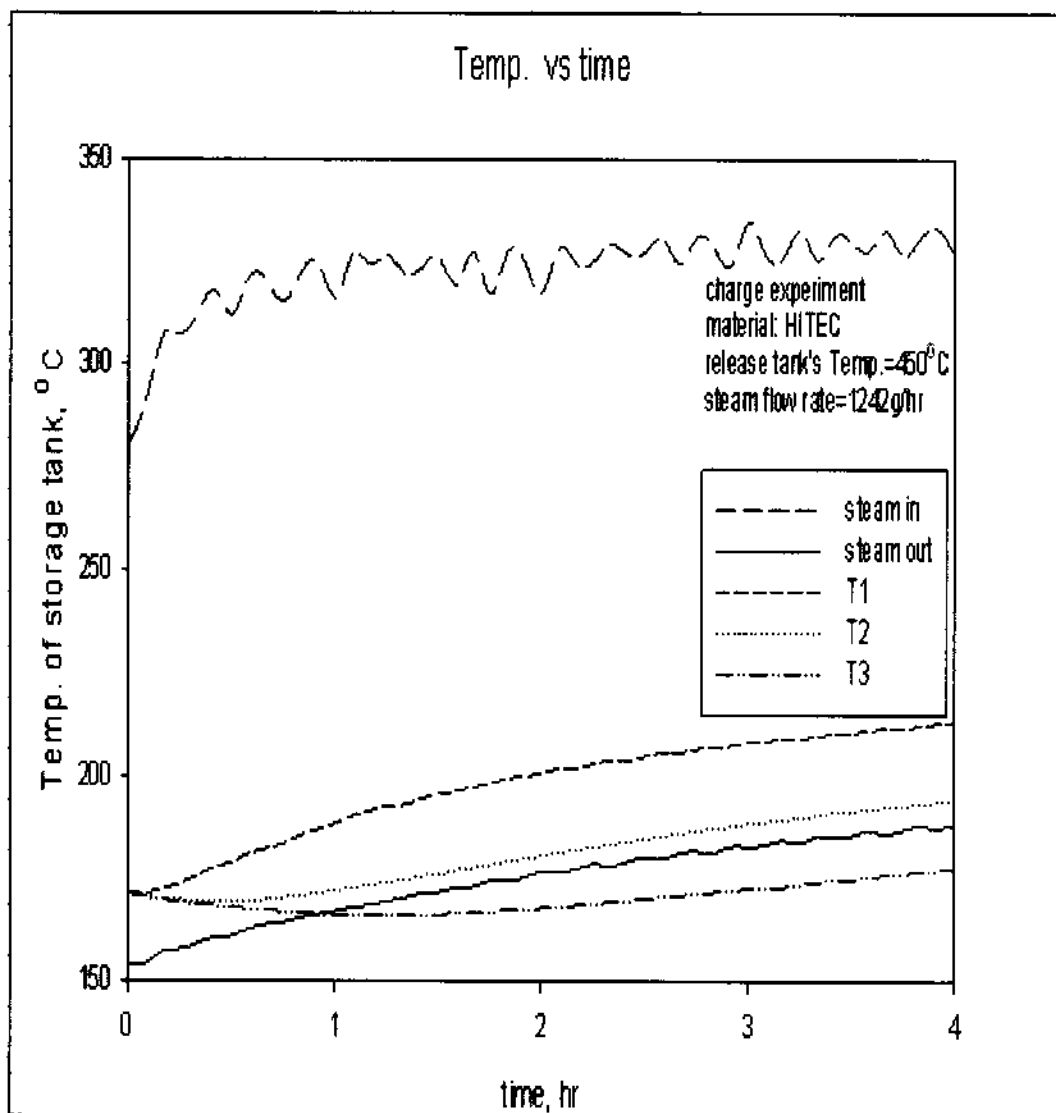


그림 9-b) 축열조내 스팀의 유입위치에 따른 축열조 온도 분포  
(b) 상부에서 하부로 흐를때

#### 4. 결론

고집광을 이용한 태양열 발전 시스템의 중요 구성요소인 고온 축열시스템의 열전달 특성을 살펴 보았다. 본 연구에 사용된 축열물질은  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_2$ , 그리고  $\text{KNO}_3$  혼합물질로서 축열물질의 적정 조업온도 범위는 약 200~500 °C 정도였다. 축열과정에서 축열조의 온도는 열전달 유체인 스팀의 유입온도가 증가함에 따라 온도가 증가하였고, 방열과정에서는 스팀의 출구온도와 축열물질의 온도차는 약 30~50 °C 정도였으며, 시간의 경과에 따라 온도차가 감소하였다. 또한 방열과정에서 스팀의 유량이 클수록 열전달 계수가 증가하여 축열물질과 출구쪽 스팀의 온도차가 작아짐을 관찰하였다. 특히 사용된 용융염은 온도변화에 따른 밀도변화가 매우 커서 스팀을 축열조의 하부로부터 유입하였을 경우에 매우 큰 자연대류 현상이 발생함을 관찰할 수 있었다.

#### 참고 문헌

1. Yoo, Han, Kang, Kwak and Lee, "Thermal Performance of a Microencapsulated PCM Latent Heat Storage System", J. of The Institution of Engineers Singapore, vol.37, No.6, 1997, pp 25 - 29.
2. Choi, Kim, and Han, "Heat transfer characteristics in low temperature latent heat storage system", KJChE. vol.12, No.2, 1995, pp 258-263.
3. Choi, Kim, and Han, "Heat transfer characteristics in low temperature latent heat storage system, Part II: Heat recovery stage", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol.40, 1996, pp71-87.
4. 한승구, 한귀영, 상변화물질을 이용한 축열시스템에서편에 의한 열전달 촉진 연구, 에너지공학,

- 15권 2호, 1996.
5. 유승남, 한귀영, 잠열축열시스템의 축열과정에서 자연대류의 영향에 관한 연구, 태양에너지, 19권, 2호, 1999.
  6. 이육균, 한귀영, 강용혁, 내부코일형 잠열축열조에서 열전달 특성 연구, 태양에너지, 21권 1호, 2001.
  7. 이육균, 한귀영, 강용혁, 3중관 튜브형 잠열축열조에서 열전달 특성 연구, 태양에너지, 21권 1호, 2001.
  8. Herrmann, Kelly, and Price, Two tank molten salt storage for parabolic through solar power plant, Energy, vol 29, 2004, pp 883-893.
  9. Kearney, Herrmann, Nava, Kelly, Mahoney, Pacheco, Blake, Price, Assessment of a molten salt heat transfer fluid in a parabolic trough solar field, J. of Solar Energy Engineering, vol 125, 2003, pp 170-176.