

열 파이프용 수평 축열조에서의 열 입력이 축열에 미치는 영향

An Effect of Heat Input on Thermal Storage for Horizontal Thermal Storage Tank with Heat pipe

최우석*(성균관대 대학원), 박이동, 김철주, 황영규(성균관대)

ABSTRACT

The horizontal thermal storage tank with heat pipe which is suitable for the sensible heat storage system is able to store a hot water from the heat source such as heating pad efficiently and to supply a hot water to load rapidly. Therefore Arrangement of heating pad affects thermal flow and thermal storage efficiency. So, if effective arrangement is decided for condition of constant number of heating pad, the more rapid thermal flow effect and higher thermal storage efficiency is obtainable by active heat transfer. In this experiments, number of heating pad is ranged from three, five and nine, and when number of heating pad is constant, arrangement are two types of concentration-type and dispersion-type. As a result, for the case of concentration-type of heating pad, strong entrainment take place in horizontal thermal storage tank with heat pipe by active heat transfer and in the constant number of heating pad, the concentration-type has the higher efficiency with about 5~6% than the dispersion-type. Therefore, when heating pad is equipped to horizontal thermal storage tank with heat pipe, concentration-type of heating pad is an efficient design in constant number of heating pad.

1. 서론

점차 가속화 되고 있는 에너지 소비량의 증가는 특히 오늘날 주된 에너지원으로 사용되고 있는 화석 연료를 고려할 때 현재와 같은 추세로 본다면 머지 않

는 장래에 고갈될 위험에 직면하게 될 것이다.^[1] 그리고 화석 연료는 자원의 유한성 뿐만 아니라 더 큰 문제가 되고 있는 심각한 환경 오염 문제를 발생하고 있다. 따라서 이러한 지구 환경 보존을 위해서는 에너지의 효율적 이용 기술의 개발과 대체 에너지 개발이 시급한 실정이다. 현재까지의 진행된 열 파이프용 수평 축열조에 대한 연구는 공조System과 태양열에너지 저장System에 적합한 열 파이프용 수평 축열조 형태가 원통형 축열조(Cylindrical Storage Tank)일때 축열효율이 크다는 것을 밝혔다.^[2] 그리고 등 간격인 경사진 heating pad를 가진 실제 열 파이프용 수평 축열조내의 열 및 유체 유동특성에 관한 연구를 통해 축열 및 추출효율을 높이기 위한 성층도를 파악하였는데 이 성층도를 파악하는 선행연구로서 각종 인자들이 열유동특성에 미치는 영향을 밝혔다. 그 결과로써 가장 안정된 열성층을 얻을 수 있는 동적 입계 조건과 유입구와 유출구 형상을 결정하였다.^[3] 그러나 실제 태양열에너지 저장System에서 활용하기 위하여 주간에 태양열 집열기로 얻은 태양열에너지를 heating pad를 통해 축열조에 저장시 heating pad 위치선정에 따른 최적의 열 파이프용 수평 축열조에 대한 연구가 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구는 선행 연구자의 실제 열 파이프용 수평 축열조 연구에서 사용한 등간격인 경사진 heating pad의 수와 위치 및 공급 열량을 기준으로 heating pad의 기하학적 변수와 동적 변수의 변화에 따른 순수 Plume 유동 특성을 파악하여 열 파이프 축열조의 최적 설계의 기초 자료를 제시하는데 있다.

2. 관련 이론

2.1 순수 Plume (Pure Plume)의 특성

순수 Plume은 외부 원동력없이 부력에 의해서만 발생한다. 고온의 열원으로 부터 열원 부근의 유체로 열전달이 발생하여 열원 주위 유체의 온도가 증가한다. 이때 열원 주위 유체는 저온의 주위 유체간의 밀도 차에 의해 발생하는 부력의 영향을 받아, 수직 방향으로 상승하며 순수 Plume을 형성하게 된다. 이때 상승하는 유체는 저온의 주위 유체와 동반 유동(Entrainment)을 일으키며 중심 궤적을 중심으로한 축대칭(Axi-Symmetric)으로 확산된다. 따라서 순수 Plume은 오로지 부력의 영향에 의해서만 형성되므로 초기 관성력이 존재하지 않으며, 전 절에서 제시한 부력 영역(Buoyant Region)의 강제 Plume과 유사한 유동 형태를 이룸을 알 수 있다. 본 연구에서는 축열조에 설치된 열원 공급 장치에 일정량의 전력을 공급해 주면, heating pad 주위 유체의 온도가 증가하며 저온의 저장수 간의 밀도차로 인해 heating pad 주위에서 발생하는 부력의 영향을 받아 축열조 내로 상승하는 열유동을 형성한다. 즉, 본 연구에서는 외부의 원동력없이 부력에

의해서만 열유동이 형성되는 경우이므로 축열조 내에서 발생하는 열유동은 순수 Plume에 해당한다.

2.2 특성치의 무차원화

2.2.1 무차원 온도, θ

$$\theta = \frac{T - T_s}{T_f - T_s} \quad (1)$$

T : 축열조내 각 측정점의 온도(℃)

T_s : 축열조내 저장수의 초기 온도(℃)

T_f : 실험종료를 위한 저장수의 기준 온도(℃)

2.2.2 무차원 시간, τ

$$\tau = \frac{t}{t^*} \quad (2)$$

t : 임의의 측정 시간(sec)

t^* : 저장수의 평균온도가 기준온도에 도달하는데
소요되는 시간(sec)

2.3 축열 효율(Thermal Storage Efficiency), η

임의의 t 시간 동안에 heating pad를 통해 저장수로 공급되는 열 에너지는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$Q_{\text{Heating pad}} = n W t \quad (3)$$

n : heating pad 수

W : heating pad에 공급되는 전력량(Watt)

본 연구에서는 축열조 외부로부터 축열조 내로 저장수의 유출입이 존재하지 않고, 축열조 내에 일정량의 저장수를 충수시킨 후 heating pad에 의해 열에너지를 공급하는 경우이므로, 저장수의 질량 m 은 항상 일정하다. 따라서 임의의 t 시간 동안에 축열조내 실제 축열 열량은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$Q_{\text{real}} = m C_p (T_m - T_s) \quad (4)$$

m : 축열조내 저장수의 질량(kg)

C_p : 정압 비열(KJ/kg·℃)

T_m : 임의의 t 시간 때의 저장수의 평균온도(℃)

따라서 축열 효율 η 는 다음과 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{Q_{real}}{Q_{Heating\ pad}}$$

$$= \frac{m C_p (T_m - T_s)}{n W t} \quad (5)$$

3. 실험

3.1 실험 장치

실험 장치를 크게 분류하면 원통형 축열조(100ℓ), Heating pad, Heating pad에 일정한 전력량(60,80,100Watt)을 공급하기 위한 Voltage controller와 Amperemeter 그리고 온도 측정장치 등으로 이루어져 있다. 원통형 축열조내 저장수의 국소온도를 측정하기 위하여 열전대(T형 $\phi=0.1\text{mm}$)를 2개의 Probe에 각각 17개와 Heating pad 표면에 1개를 부착시켰고, 측정된 온도를 기록하기 위하여 DATA LOGGER(Model: YOKOGAWA DA 2500E)를 사용하였다.

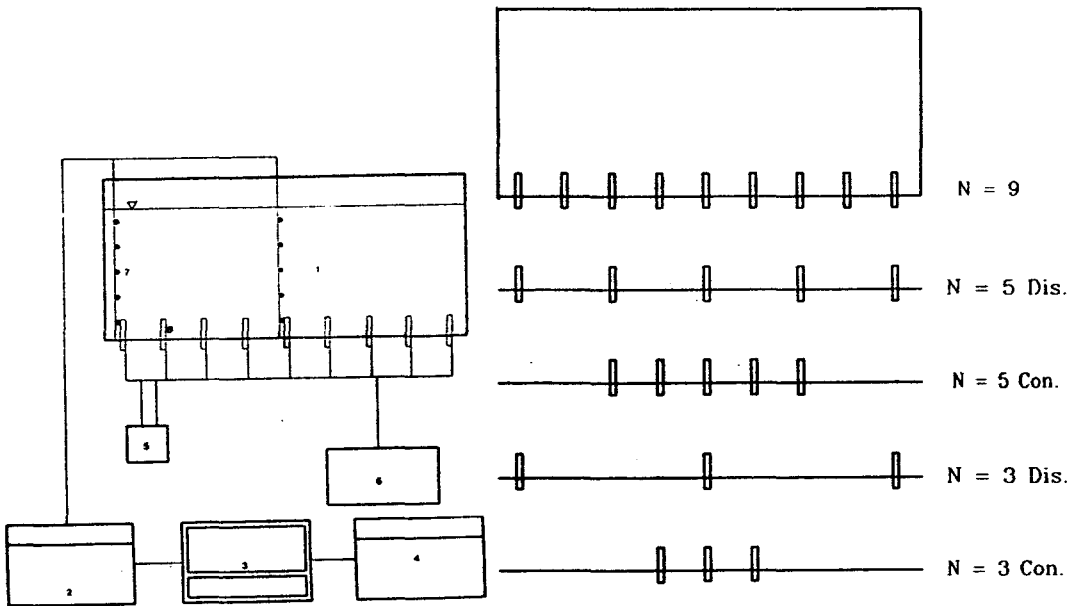


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

- 1. Storage Tank 2. Data Logger 3. Computer
- 4. Printer 5. Amperemeter 6. Voltage Controller
- 7. Thermocouple Probe 8. Heating Pad

Fig. 2. Distribution diagram of heating pad

3.2 실험 방법

- (1) 축열조 내에 초기 온도가 20℃인 100ℓ의 저장수를 채운 후 안정 상태를 유지한다.
- (2) Voltage Controller와 Amperemeter를 통해 Heating pad에 3가지 일정한 전력량 (60,80,100Watt)으로 각각 공급한다.
- (3) 축열조에 설치한 열전대를 통해 축열조내 저장수의 국소온도를 측정하고 DATA LOGGER(Model: YOKOGAWA DA 2500E)를 통해 5분간격으로 온도값을 검출한다.
- (4) 축열조내 저장수의 평균온도가 실험종료를 위한 기준온도인 60℃에 도달하면 전력공급을 멈추고 실험을 종료한다.
- (5) 위와 같은 실험 방법을 주어진 변수에 따라 변화시키면서 실험을 반복 수행한다.

4. 실험 결과 및 고찰

Heating pad에 일정 시간동안 전력량을 각각 60,80,100Watt로 공급하였고 heating pad수(N)도 3,5,9개로 변화시켰다. 그리고 heating pad의 위치도 concentration과 dispersion형태로 나누어 실험하였다. 여기서 무차원높이(H)를 $H = h/h^*$ 로 정의하였으며, H=A(0.158),B(0.368),C(0.579),D(0.789),E(1.0)로 표현하였다.

4.1.1 Heating pad 위치 변화에 따른 무차원 높이(H)에서의 유동특성

Fig. 4~Fig. 7은 동일한 전력량과 heating pad 수에 대해 pad 위치변화에 따른 열전대Probe의 Position 1에서 측정한 H에서의 온도분포를 나타내고 있다. 기준이 되는 heating pad수(N=9)와 비교하면 축열 저장하는데 요구되는 시간이 길지만, 동일한 수(N=3,5일때)에서의 heating pad의 위치 변화를 고려할 때 heating pad를 집중(concentration)배치형태가 축열저장시간이 흐를수록 분산(dispersion)배치형태보다 온도가 빨리 증가함을 나타내고 있으며 동일한 전력량과 heating pad 수에서 H가 증가할 수록 낮은 τ 에서 온도증가폭의 변화가 발생함을 알수있다. Heating pad 수가 일정할때 즉, N=3인 경우 H=A에서 (60Watt시 $\tau = 0.6 \sim 0.63$, 100Watt시 $\tau = 0.48 \sim 0.52$) 또한 H=C, H=E에서도 마찬가지로 전력량이 증가할 수록 집중(concentration)배치형태와 분산(dispersion)배치형태의 온도증가폭의 변화가 발생하는 시간이 짧아짐을 알 수 있고 N=5일때에는 N=3일때보다 H=A에서(60Watt시 $\tau = 0.68 \sim 0.73$, 100Watt시 $\tau = 0.49 \sim 0.54$)로 발생하는 시간이 약간 늦어짐을 알 수 있고 전력량이 100Watt에서는 N=3과 N=5를 비교할 때 H에서 온도증가폭의 변화가 발생하는 시각이 크게 차이가 나지 않는데 전력량이 클수록 더 강한 부력을 가진 순수 Plume으로 주위 저온 유체와 빠른 동반 유동을 일으키기 때문이다. 또한 같은 전력량에서 N=3이 N=5일때 보다 온도증가폭이 크게 발생하고 있음을 볼 수 있는데 그이유는 heating pad가 축열조

중심부에 위치하여 축열시 pad를 중심으로 대칭적으로 동반유동을 일으키는데 pad에서 멀리 떨어진 축열조 구석의 상부와 하부 저장수의 온도가 pad가 집중되어 있는 축열조 중심의 상부, 하부 저장수와 온도가 발생하는데 이때 $N=3$ 이 $N=5$ 보다 크게 발생되기 때문이다.

4.1.2 동일한 높이에서 열전대Probe의 위치변화에 따른 유동 특성

Fig. 8~Fig. 11은 일정한 전력량과 heating pad 수에서 집중(concentration) 배치형태를 취했을때 열전대Probe Position 1과 Position 2의 $H=A$ 와 $H=C$ 에서 시간에 따른 온도변화를 나타낸것이다. Heating pad에서 순수 Plume이 발생하여 저장수표면으로 유동이 발생할때 주위유체와 동반유동으로 축열조내에서 순환함으로 figure와 같은 경향으로 온도분포가 형성됨을 알수있다. 열전대probe 2개가 축열조내 저장수의 순수 Plume이 발생하는 곳과 동반유동이 일어나는 지역에 위치하였다. 시간이 흐를수록 4개 지점의 온도차가 벌어짐을 알 수 있는데 Position 2의 $H=A$ 에서 가장 낮은 온도 분포를 이루고 있는데 이는 순수 Plume이 상부저장수로 이동할 때 상대적으로 저온의 상부저장수가 pad쪽으로 하강하므로 Position 1의 두지점과 동일 Position 2의 $H=C$ 보다 낮은 온도분포를 나타내는 것이다. 그러므로 무차원 시간(τ)을 정할때 Position 2의 $H=A$ 지점에서의 평균온도가 60°C 에 도달할때로 정하였다. 축열조 전체에서 가열시간이 흐를수록 각 지점에서의 온도증가하는 속도가 차이므로 분포곡선이 점점 벌어지고 있음을 알 수 있다. 한편 $N=3$ 과 $N=5$ 를 비교할때 $N=3$ 에서는 Position 1, $H=C$ 와 Position 2, $H=C$ 이 두지점에서의 온도차가 $N=5$ 보다 크게 나고 있고 온도분포 profile이 크게나고 있음을 알 수 있는데 이는 pad수가 $N=5$ 일때는 축열조내에 넓게 분포하므로 동반유동이 일어나는 지역이 좁으므로 그 유동지역 안에서의 온도차가 작기 때문이다.

4.2.1 동일한 공급 전력량에서의 축열효율

Fig. 14는 heating pad 수의 변화에 따른 집중(concentration)배치형태와 분산(dispersion)배치형태의 축열효율을 나타내고 있다. 여기서 집중배치형태이 축열효율이 더 높게 나타남을 알수있다. 여기서 동일한 Watt에서 N 이 작을 수록 축열효율이 감소한 것은 가열시간동안 축열조 외부에 단열재로 충분히 감싸 최대한의 열손실을 막기 위해 노력했지만 $N=3$, $N=5$ 일때의 가열시간이 60Watt, $N=3$ 인 경우 1800분(30시간)으로 매우 길기 때문에 그만큼 효율이 떨어진 것이다. 그렇지만 동일한 Watt에서 비교할때 집중(concentration)배치형태가 분산(dispersion)배치형태보다 약 5~6%정도 증가한 것을 알수있다.

4.2.2 동일한 heating pad 수(N)에서의 축열효율

Fig. 15에서도 마찬가지로 heating pad 수가 동일한 조건에서 집중(concentration)배치형태이 분산배치형태보다 축열효율이 더 높게 나타남을 알 수 있다. 특히, 80Watt에서는 60,100Watt보다 축열효율이 더 높게 나타내고 있다. 이는 100Watt에서는 80Watt보다 더 강한 부력을 가진 순수 Plume으로 축열조 저장수 표면까지 도달하는데 이때 저장수 표면에서 축열조내 대기로의 열전달 현상으로 열손실이 발생하고 60Watt에서는 가열시간이 80Watt보다 길어지므로 외부로의 열손실이 발생한다. 그러나 80Watt는 100Watt보다는 약한 Plume으로 H=C~E사이에 충분한 열전달이 일어나고 가열시간도 60Watt보다는 짧기 때문에 효율이 상대적으로 우수하게 나타난 것이다.

5. 결론

1. Heating pad를 집중(concentration)배치형태를 선택하였을때 동일한 수에서 분산(dispersion)배치형태보다 축열조내 저장수의 더 빠른 온도 상승을 보였고 주위 유체와 강한 동반유동을 일으키므로 heating pad가 집중되어 있는 영역의 열전대probe의 같은 무차원 높이에서 뚜렷한 온도차($\Delta T=1.6\sim 3.2^{\circ}\text{C}$)를 나타내었다.

2. 동일한 heating pad 수에서 집중(concentration)배치형태가 분산(dispersion)배치형태보다 약 5~6%정도의 더 높은 효율을 얻었다.

따라서, 열 파이프용 수평 축열조에서 heating pad를 장착할때 동일한 heating pad의 수에서는 집중(concentration)배치형태로 설계하는것이 효과적임을 알 수 있다.

참고 문헌

1. S.Kakac, E.Paykoc, Y.Yener, 1989, "Energy Storage System", Kluwer Academy Pulisher, pp. 129-161.
2. 박이동,안성호, 1992, "모형 수평 축열조의 열원 유입구 형상에 관한 실험적 연구", 성균관 대학교 석사학위 청구논문.
3. 박이동,정운철, 1994, "열 Pipe용 축열조내의 열 및 유체 유동 특성에 관한 연구", 성균관 대학교 박사학위 청구논문.

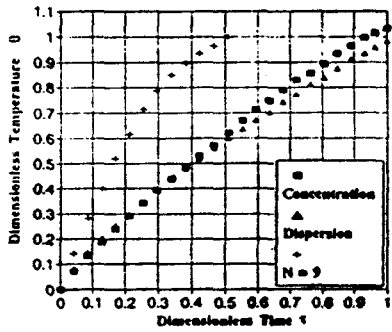


Fig. 2 Dimensionless temperature profiles on C of dimensionless height of a storage tank according to dimensionless time for 60 Watt and 3 of heating pad

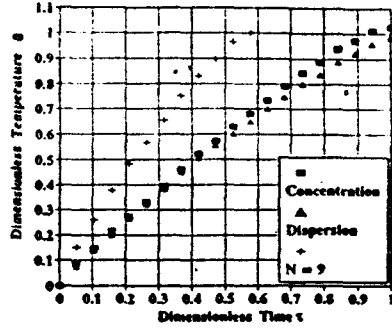


Fig. 3 Dimensionless temperature profiles on C of dimensionless height of a storage tank according to dimensionless time for 60 Watt and 5 of heating pad

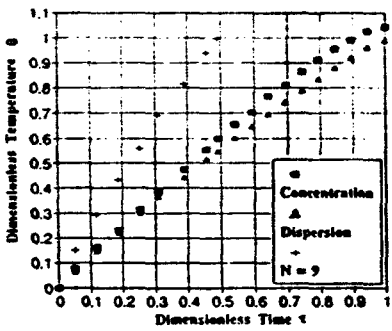


Fig. 4 Dimensionless temperature profiles on C of dimensionless height of a storage tank according to dimensionless time for 100 Watt and 3 of heating pad

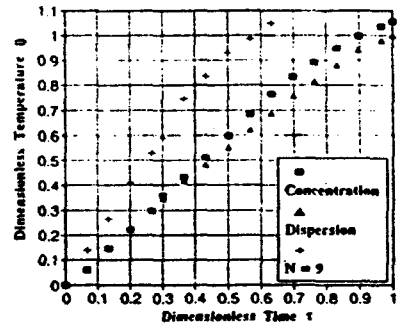


Fig. 5 Dimensionless temperature profiles on C of dimensionless height of a storage tank according to dimensionless time for 100 Watt and 5 of heating pad

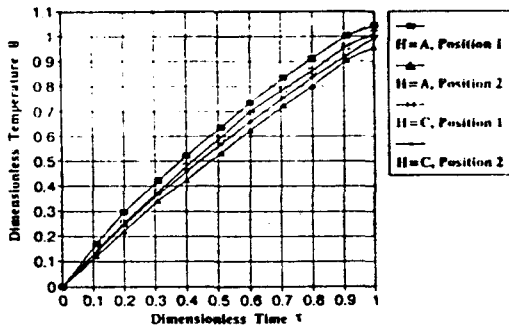


Fig. 6 Dimensionless temperature profiles in a storage tank according to dimensionless time for 100 Watt and 3 of heating pad at A,C of dimensionless height on concentration type

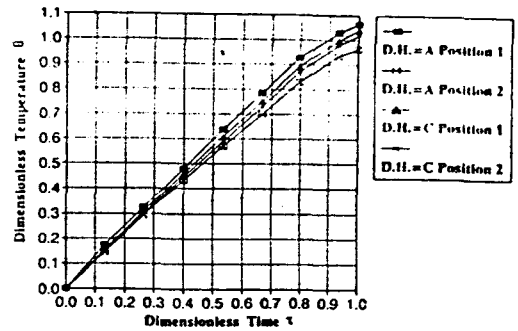


Fig. 7 Dimensionless temperature profiles in a storage tank according to dimensionless time for 100 Watt and 5 of heating pad at A,C of dimensionless height on concentration type

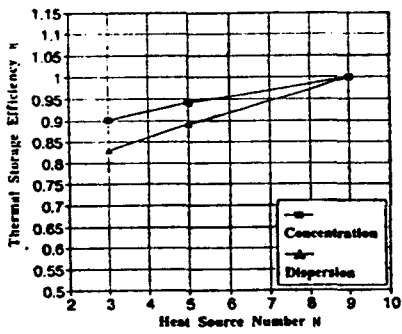


Fig. 8 Thermal storage efficiency variations according to number of heating pad at 80 Watt

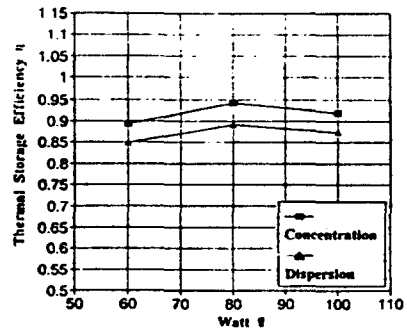


Fig. 9 Thermal storage efficiency variations according to Watts at 5 of heating pad