

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 16, No. 2, 1996

열 파이프용 수평 축열조에서의 열 입력이 축열에 미치는 영향

박이동* · 정운철**

* 성균관대학교 기계공학과

** 경민전문대학교

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

Pak Ee-Tong* · Jeong Un-Chul**

* *Sung Kyun Kwan University*

** *Kyung Min College*

요 약

본 연구에서는 실제 열 파이프용 수평 축열조에서 등간격인 heating pad 수와 위치 및 공급열량을 변화시키면서 축열조내의 순수 Plume 유동특성을 파악하였다. 동일한 heating pad 수를 가지고 집중 배치 형태와 분산 배치를 취하였을 때 집중 배치 형태로 취하는 것이 5~6% 정도의 더 높은 효율을 얻었다.

따라서 열 파이프용 수평 축열조에서 heating pad를 장착할 때 동일한 heating pad의 수에서는 집중(concentration)배치형태로 설계하는 것이 효과적임을 알 수 있다.

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. And arrangement of heating pad play an important role in thermal flow and thermal storage efficiency. In this experiments, number of heating pad is ranged from three, five and nine, and when there is no change on number of heating pad, arrangements are two types of concentration-type and dispersion-type. Strong entrainment take place in the case of concentration-type of heating pad, and rapid temperature rise ($\Delta T \doteq 1.6 \sim 3.2^\circ\text{C}$) in the tank is obtainable on the concentration-type than dispersion-type. In the constant number of heating pad, the concentration-type has the higher efficiency with about 5~6% than the dispersion-type. Therefore, concentration-type of heating pad is an efficient design in constant number of heating pad.

NOMENCLATURE

- A : The position of dimensionless height
(H=0.158)
- B : The position of dimensionless height
(H=0.368)
- C : The position of dimensionless height
(H=0.579)
- D : The position of dimensionless height
(H=0.789)
- E : The position of dimensionless height
(H=1.0)
- H : Dimensionless height
- N : The number of heating pad

Greek symbols

- θ : Dimensionless temperature
- τ : Dimensionless time
- η : Thermal storage efficiency

I. 서 론

현재까지 진행된 열 파이프용 수평 축열조에 대한 연구는 공조 시스템과 태양에너지 저장 시스템에 적합한 수평 축열조 형태로서 원통형 축열조(Cylindrical storage tank)일때 축열효율이 크다는 것을 밝혔다.^{1,2)} 그리고 등간격인 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 임계 조건과 유입구와 유출구 형상을 결정하였다.^{3,4)} 그러나 실제 태양에너지 저장 시스템에서 활용하기 위하여 주간에서 태양열 집열기로 얻은 태양에너지를 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 등간 격인 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 기초 설계 자료를 제시하는 데 있다.

II. 축열 효율(Thermal Storage Efficiency)

본 연구에서 축열 효율은 열원 공급 장치에 일정량의 전력을 공급해 줄 경우, heating pad에 의해 축열조내 저장수로 전달되는 에너지에 대한 축열조 내의 저장수에 저장되는 실제의 축열 열량 비로 정의하였다.

열 효율을 정의하기 위해 다음과 같은 가정을 취하였다.

- 1) 축열조 벽면을 통하여 일어나는 전도에 의한 열 손실을 무시한다.
- 2) 축열조 외부로의 열 손실은 무시한다.
- 3) 공급되는 전력량에 따라 열원 공급 장치로부터 heating pad를 통해 축열 조내 저장수로의 열에너지 공급은 일정하다.

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

$$Q_{\text{Heating pad}} = N W t \quad (1)$$

N : Heating pad 수

W : Heating pad에 공급되는 전력량 (Watt)

t : 가열 시간

본 연구에서는 축열조 외부로부터 축열조 내로 저장수의 유출입이 존재하지 않고, 축열조 내에 일정량의 저장수를 충수시킨 후 heating pad에 의해 열 에너지를 공급하는 경

우이므로, 저장수의 질량 m은 항상 일정하다. 따라서 임의의 t 시간 동안에 축열조 내 실제 축열 열량은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$Q_{\text{real}} = m C_p (T_m - T_s) \quad (2)$$

m : 축열조 내 저장수의 질량 (kg)

C_p : 정압 비열 (KJ/kg · °C)

T_m : 임의의 t 시간 때의 저장수의 평균 온도 (°C)

T_s : 저장수의 초기 온도 (°C)

따라서 축열 효율 η 는 다음과 같이 정의 된다.

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{Q_{\text{real}}}{Q_{\text{Heating pad}}} \\ &= \frac{m C_p (T_m - T_s)}{N W t} \end{aligned} \quad (3)$$

III. 실험장치 및 실험방법

1. 실험장치

본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 실험 장치를 크게 분류하면 원통형 축열조(Cylindrical storage tank), 열원공급장치(Heating pad), 열원공급 장치에 일정한 전력량을 공급하기 위한 슬라이더스(Voltage controller)와 Amperemeter 그리고 온도 측정 장치 등으로 이루어져 있다. 원통형 축열조(Cylindrical storage tank) 내의 측정된 온도를 기록하기 위하여 DATA LOGGER(Model: YOKOGAWA DA 2500E)를 사용하였다.

본 연구에서 사용한 축열조의 제원은 Table 1과 같고, 축열 시간은 초기 저장수의

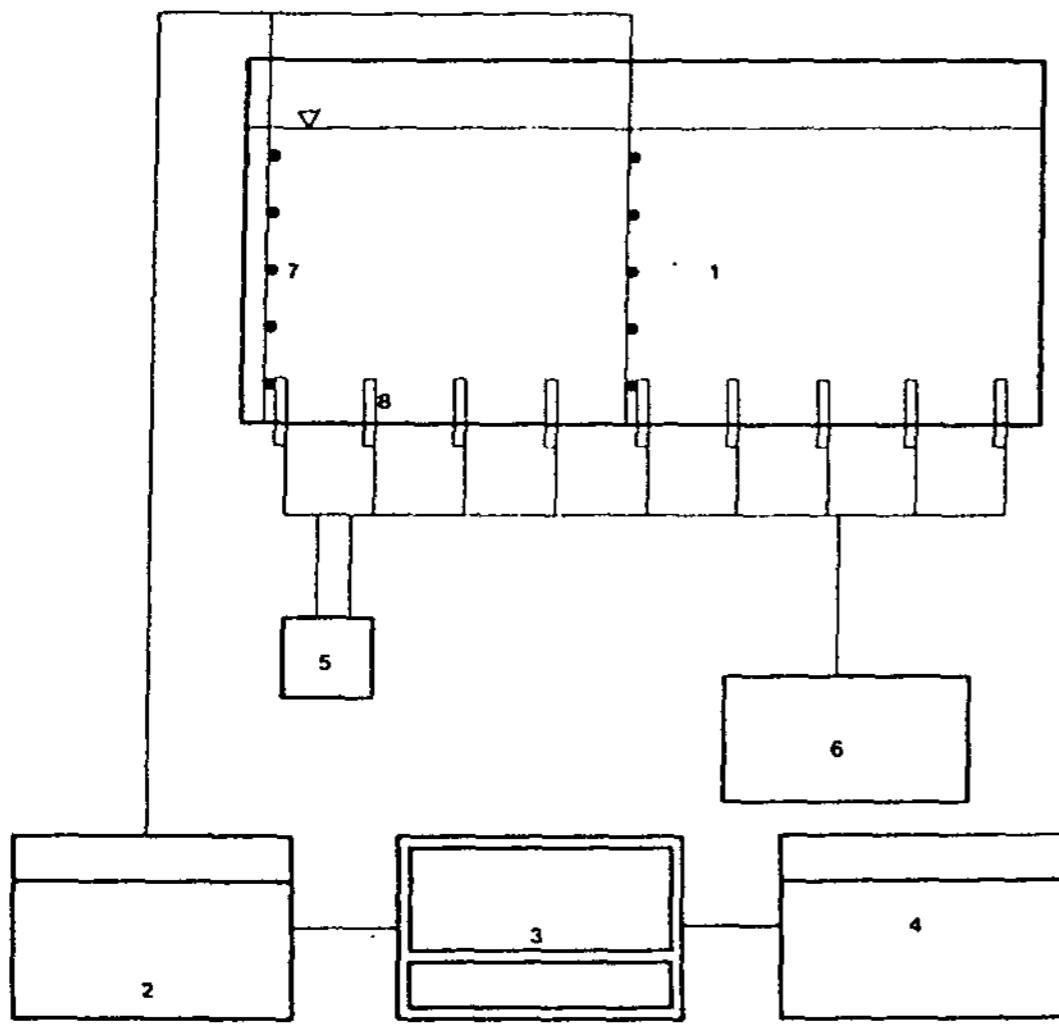


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

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

온도가 실험 종료를 위한 기준 온도 60℃에 도달하는데 소요되는 시간으로 하였다. 축열 시간이 장시간 요구되기 때문에 축열조의 단열 문제가 저장 효율에 중요한 영향을 미치므로 축열 시간 동안에 축열조 외부로의 열 손실을 최대한으로 억제하기 위하여, 본 실험에서는 두께가 10mm인 단열 섬유로 축열조 둘레를 감싸고 그 위에 두께가 10mm인 토티론과 비닐 테이프를 이중으로 덮어 충분히 단열시켰다.

Table 1. Specification of Storage Tank

Storage Tank Type	Cylindrical Storage Tank
Material	Acryl
Diameter × Length	400 × 1000(mm × mm)
Effective Volume	100(ℓ)
Wall Thickness	20(mm)

축열조에 설치된 heating pad에 공급되는 전력을 일정하게 유지하기 위해서, 본 실험에서는 슬라이더스(Voltage controller)를 이용하여 실험에 적용될 범위는 60, 80, 100 Watt의 3가지로 설정하였다. 특히, heating pad의 재질은 스테인레스 스틸이며 그 안에 니크롬선을 감았다. 1개의 저항값은 83.5Ω - 84.5Ω 사이이다. Fig. 2는 heating pad의 수와 위치 선정에 따른 heating pad의 분포를 나타낸 것이다.

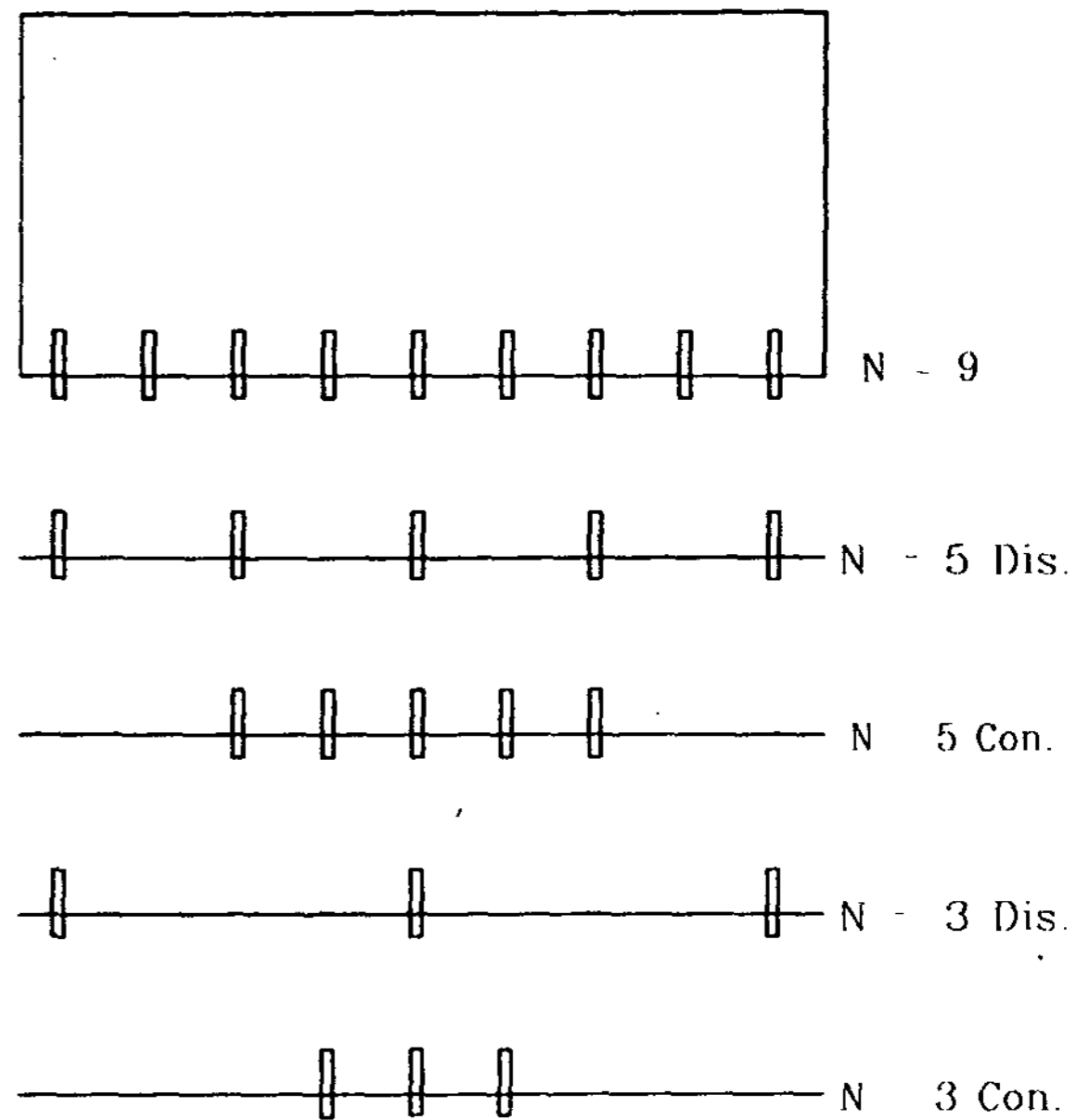


Fig. 2 Distribution diagram of heating pad

Fig. 3과 같이, 본 연구에서는 축열조 내 저장수의 국소 온도를 측정하기 위해 T형, $\phi=0.1\text{mm}$ 인 열전대를 2개의 스테인레스봉(Probe)에 각각 17개를 일정한 간격으로 부착시켜 축열조 내 저장수의 국소 온도를 측정하고 heating pad 표면에 열전대 1개를 부착시켜 축열과정 동안의 온도를 측정하였다. 그리고 온도측정은 DATA LOGGER(Model: YOKOGAWA DA 2500E)를 이용하여 5분

간격으로 각 열전대로부터 온도값을 검출하였다.

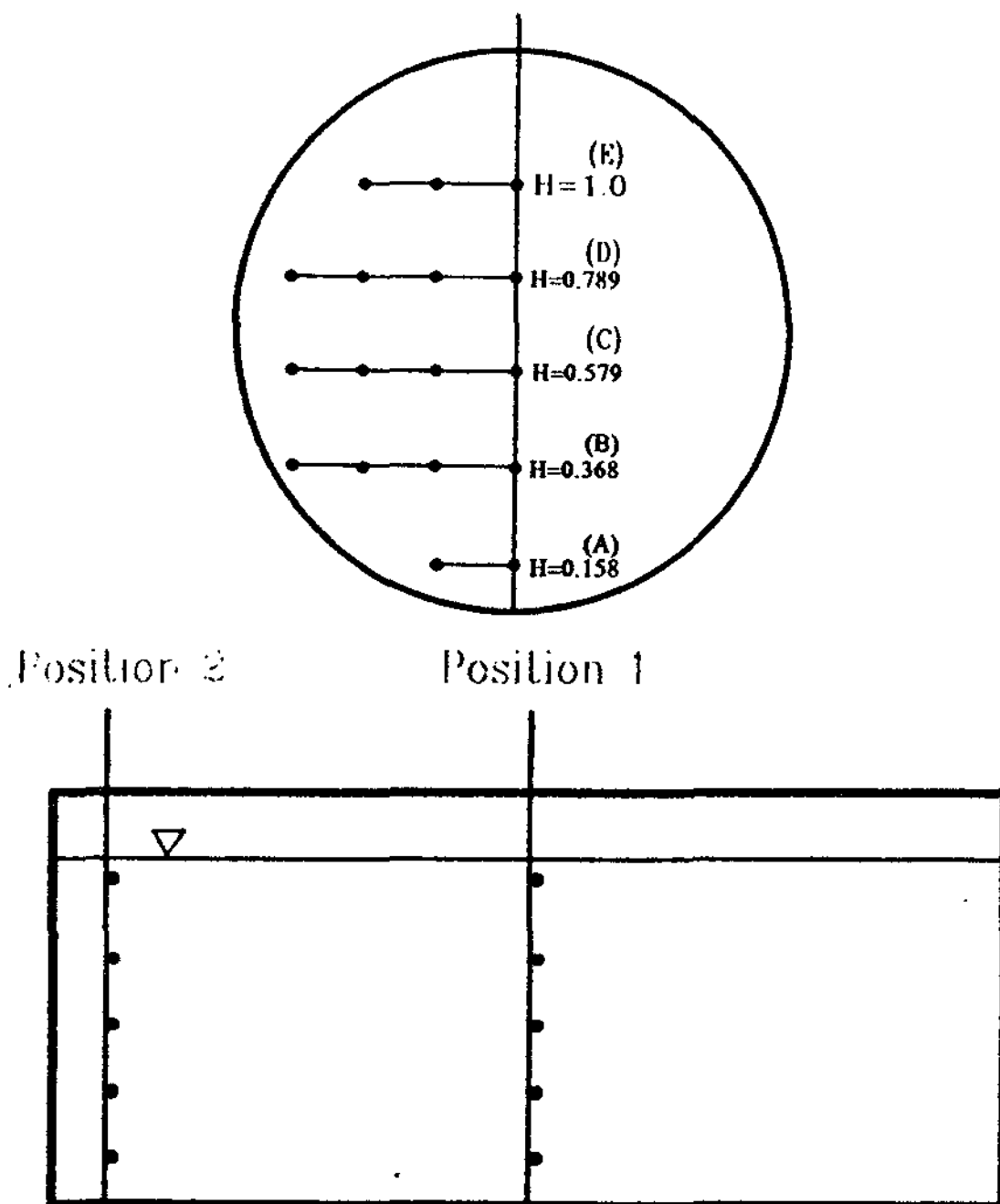


Fig. 3 Position of thermocouple probe

2. 실험방법

축열조내의 순수 Plume 유동특성을 파악하기 위하여 다음과 같은 순서로 실험을 수행하였다.

- (1) 축열조 내에 초기 온도가 20℃인 100ℓ의 저장수를 채운 후 안정 상태를 유지하였다.
- (2) 슬라이더스(Voltage controller)와 Amperemeter를 통해 Heating pad에 3가지의 일정한 전력량(60, 80, 100 Watt)을 각각 공급하였다.
- (3) 축열조 내에 설치한 열전대를 통해 축열조 내 저장수의 국소 온도를 측정하고 DATA LOGGER(Model:YOKOGAWA DA 2500E)를 통해 5분 간격으로 온도값

을 검출하였다.

- (4) 축열조 내 저장수의 평균 온도가 실험 종료를 위한 기준 온도인 60℃에 도달하면 전력 공급을 멈추고 실험을 종료하였다.
- (5) 위와 같은 실험 방법을 주어진 변수에 따라 변화시키면서 실험을 반복 수행하였다.
- (6) Heating pad의 기하학적 변수와 동적 변수에 따라 순수 Plume 유동의 가시화를 통한 축열조 내에서의 순수 Plume 유동특성을 관찰하기 위하여 여 초기 저장수와 비중량이 유사한 유색 염료를 축열조 하부의 heating pad 최고 높이까지 덮히도록 주입시킨 후에 상기의 과정을 반복하면서 가시화하였다.

IV. 실험 결과 및 고찰

1. Heating pad 수(N)의 변화에 따른 무차원 높이(H)에서의 유동특성

Fig. 4는 동일한 전력량에서 N=3,5,9일때 집중(concentration)배치형태와 분산(dispersion)배치형태에 대해 열전대 probe의 Position 1에 있는 무차원 높이(H=C,E)에서 시간의 변화에 따른 온도 분포를 나타내고 있다. N=3일때 저장수의 평균 온도가 60℃에 도달하는데 걸리는 시간을 기준으로 삼았으며 전력량, heating pad 배치형태, 그리고 높이의 변화에 관계 없이 유사한 경향으로 저장수의 각 무차원 높이에서 온도가 증가하고 있는데 N=3일때 축열조내의 저장수의 평균 온도가 60℃에 도달하는데 걸리는 시간을 $\tau=1$ 이라 할때 N=5에서는 대략 $\tau=0.56\sim0.59$ 이고 N=9에서는 $\tau=0.27\sim0.29$ 로 저장시간의 차이가 발생하고 있다. 이것은 heating pad 주위

저장수에 pad에서 전달된 열에너지로 온도가 상승하여 축열조 전체 저장수와 밀도차로 인한 부력(Positive buoyancy)으로 순수 Plume을 이루며 축열조 상부 저장수로 이동하게 된다. 높이가 증가할수록 주위 유체로의 열전달 현상으로 온도차가 작아져서 부력이 감소하게 되고 주위 유체와의 동반유동(Entrainment)에 의해 축열조 수평방향으로 확산되면서 축열조내에 자연대류 순환으로 열 에너지를 저장하게 된다.

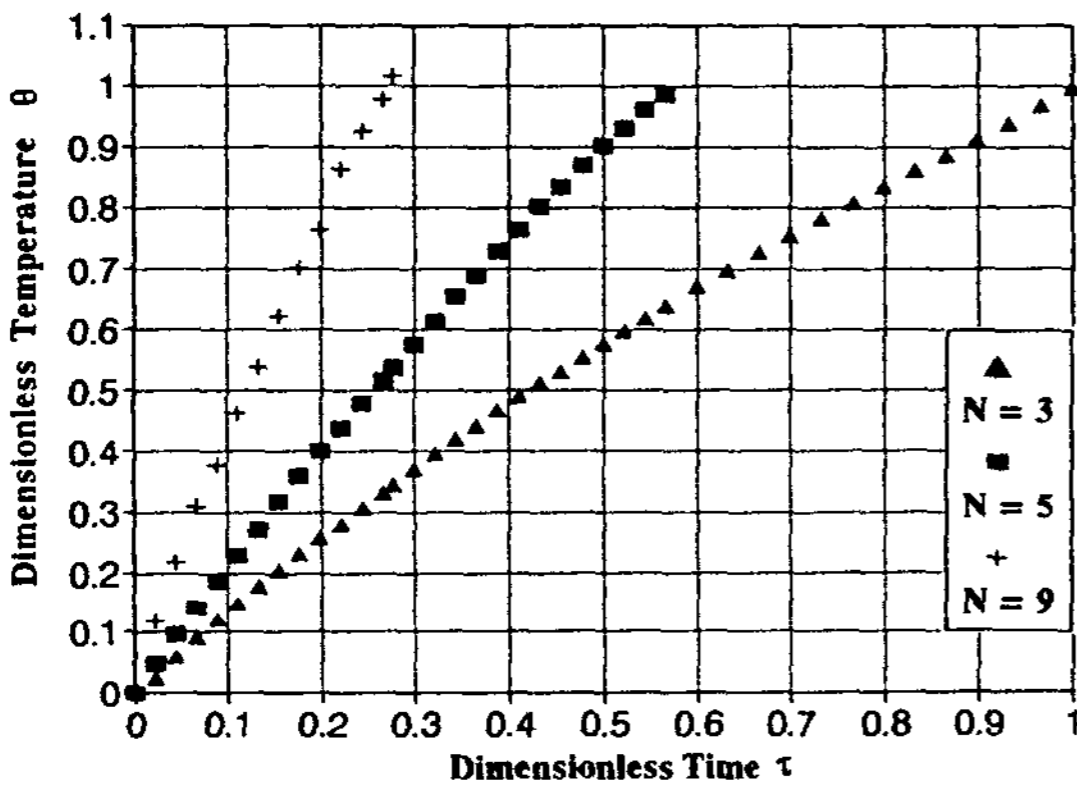


Fig. 4 60Watt, E of dimensionless height concentration type

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

Fig. 5는 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

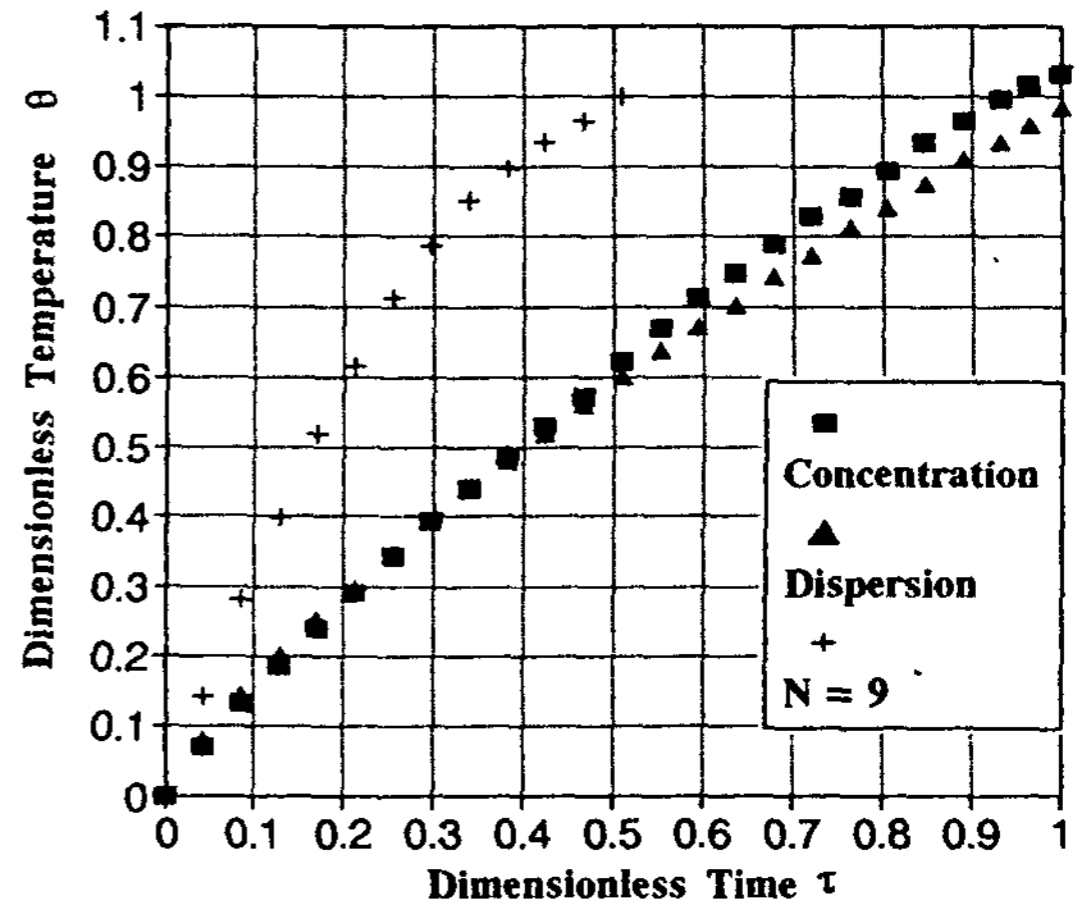


Fig. 5 60Watt, N=3, H=C

H가 증가할 수록 짧은 시간안에 온도증가폭의 변화가 발생함을 알 수 있다. Heating pad 수가 일정할때 즉, N=3인 경우 H=A에서(60Watt시 $\tau=0.6\sim0.63$, 100Watt시 $\tau=0.48\sim0.52$) 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 $\tau=0.68\sim0.73$, 100Watt시 $\tau=0.49\sim0.54$)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 동반유동을 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 집

중되어 있는 축열조 중심의 상부, 하부 저장 수와의 온도차가 발생하는데 이때 $N=3$ 이 $N=5$ 보다 크게 발생되기 때문이다.

3. 동일한 높이에서 열전대Probe의 위치변화에 따른 유동 특성

Fig. 6은 일정한 전력량과 heating pad 수에서 집중(concentration)배치형태를 취했을 때 열전대 probe의 Position 1과 Position 2의 $H=A$ 와 $H=C$ 에서 시간에 따른 온도변화를 나타낸것이다. Heating pad에서 순수 Plume이 발생하여 저장수 표면으로 유동이 발생할 때 주위유체와 동반유동으로 축열조내에서 순환함으로써 그림과 같은 경향으로 온도분포가 형성됨을 알 수 있다. 열전대 probe 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 2

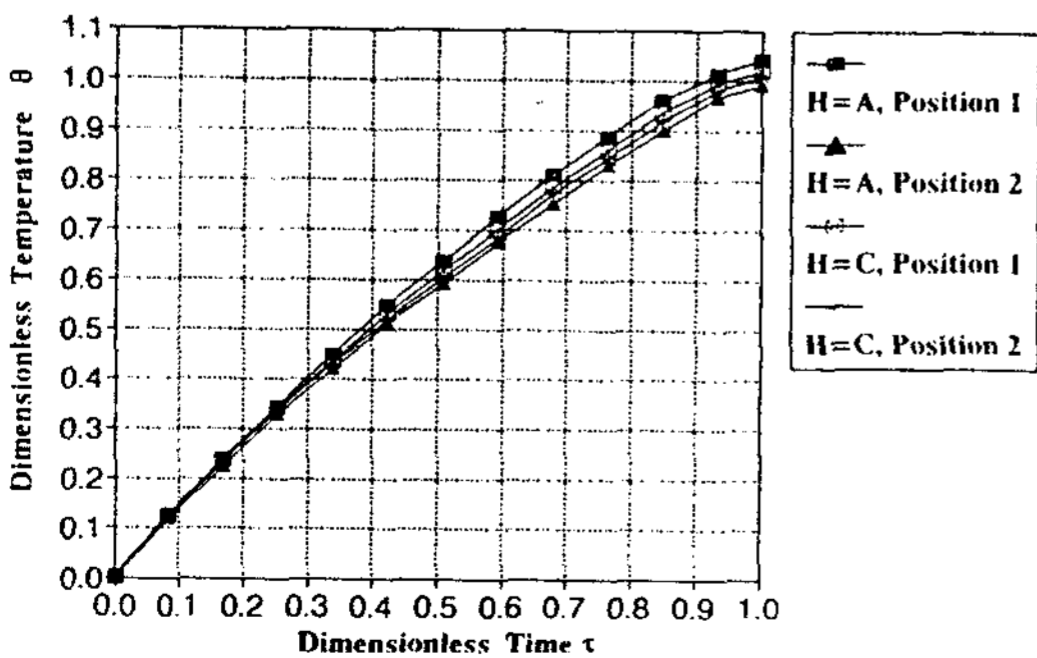


Fig. 6 60Watt, $N=3$, $H=A,C$ concentration type

의 $H=A$ 지점에서의 평균온도가 $60^{\circ}C$ 에 도달할때로 정하였다. 축열조 전체에서 가열시간이 흐를수록 각 지점에서의 온도가 증가하는 시간이 다르기 때문에 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, $H=C$ 인 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 유동 지역 안에서의 온도차가 작기 때문이다.

4. 전력량의 변화에 따른 특성 속도(U)와 부력의 세기(B)

Fig. 7은 각각의 전력량(60,80,100 Watt)에서 시간의 변화에 특성 속도의 변화를 나타내고 있다. 순수 Plume에서의 특성 속도 발생은 heating pad에 의한 heating pad 주위유체의 온도 상승으로 저장수와의 온도차, 즉 밀도차로 인한 부력을 원동력으로 하기 때문에 초기에는 큰 온도차로 특성 속도가 크게 발생하나 시간이 흐를수록 온도차가 감소하므로 속도가 감소하게 된다. 그리고 전력량이 100 Watt에서 특성 속도가 가장 큼을 알 수 있다.

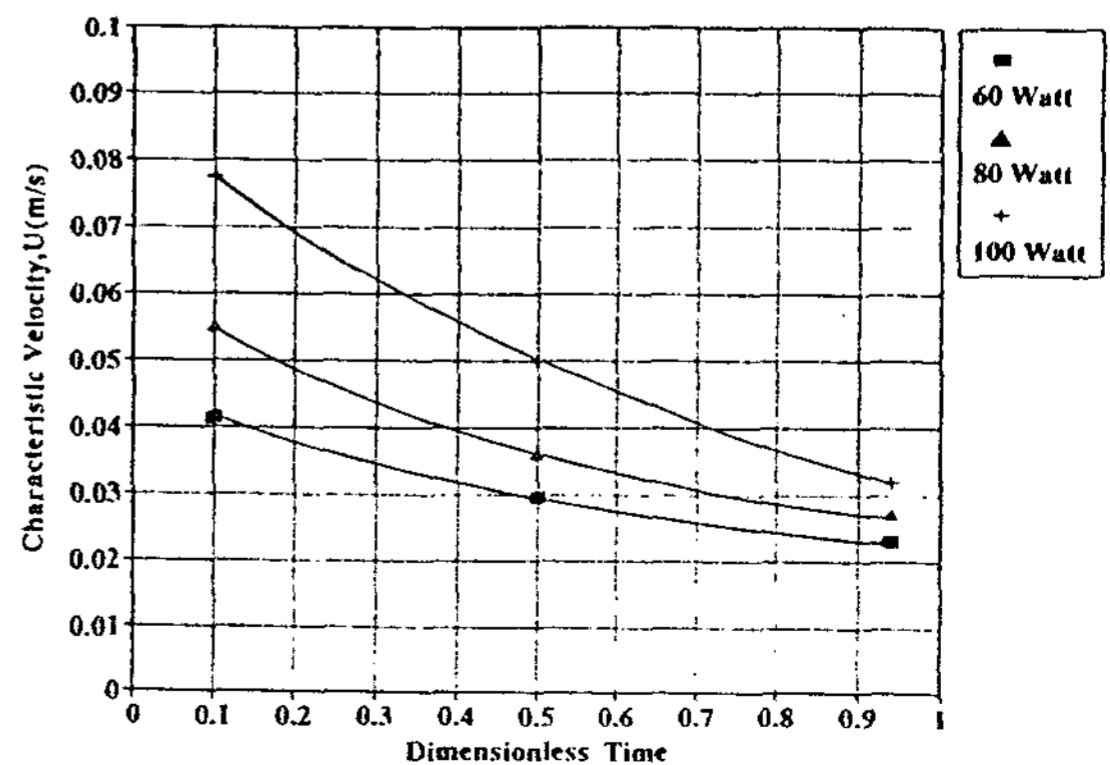


Fig. 7 Characteristic velocity profile

Fig. 8은 각각의 전력량(60,80,100 Watt)에서 시간 변화에 따른 부력강도의 변화를 나타내고 있다. 여기에서도 마찬가지로 부력강도는 특성 속도에 따라 변하므로 시간이 흐를수록 감소함을 쉽게 알 수 있다.

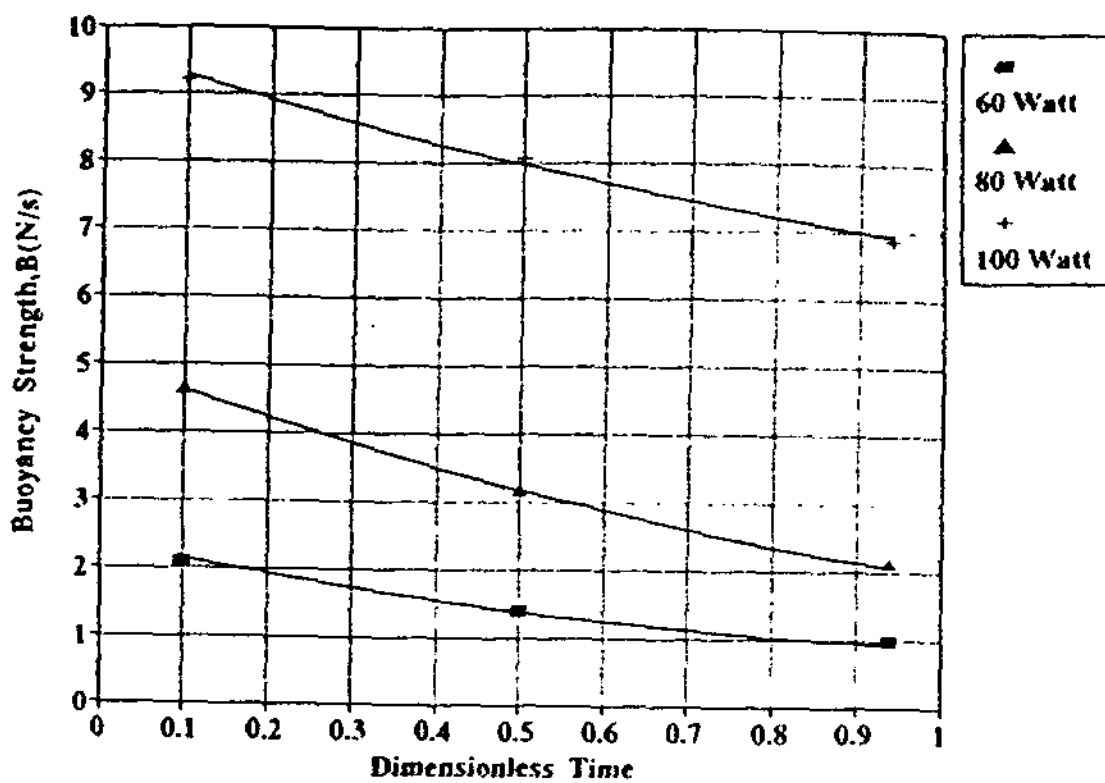


Fig. 8 Buoyancy strength profile

5. 동일한 공급 전력량에서의 축열효율

Fig. 9는 heating pad 수의 변화에 따른 집중(concentration)배치형태와 분산(dispersion)배치형태의 축열효율을 나타내고 있다. 여기서 집중배치형태의 축열효율이 더 높게 나타남을 알 수 있다. 여기서 동일한 전력량에서 N이 작을 수록 축열효율이 감소한 것은 가열 시간동안 축열조 외부로 단열재로 충분히 감

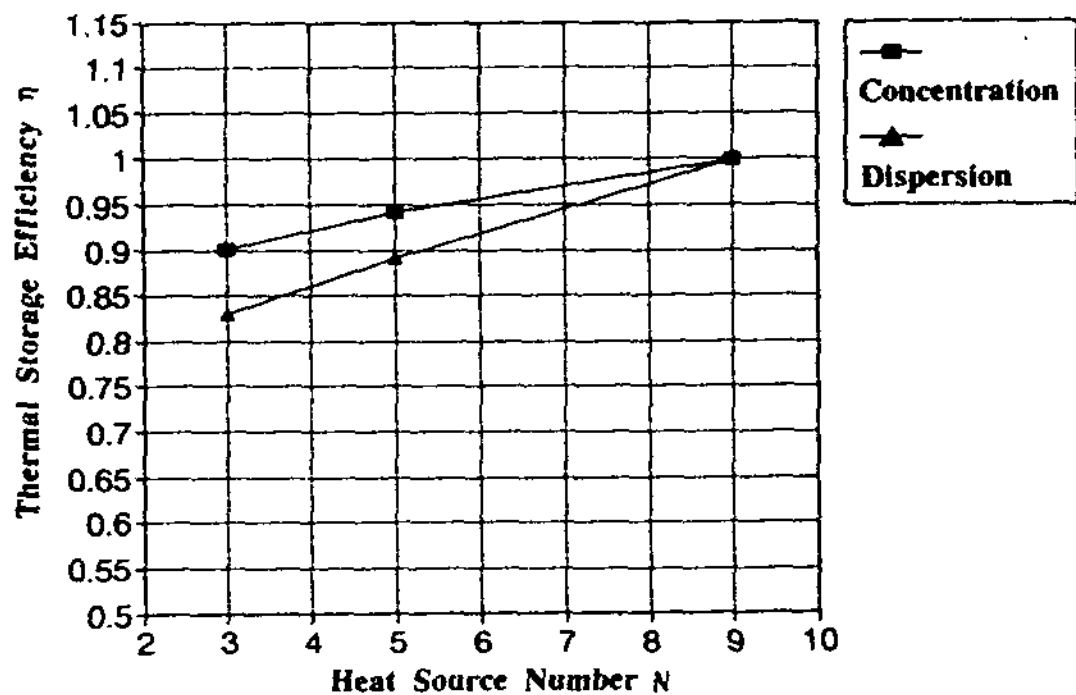


Fig. 9 Thermal storage efficiency at 80Watt

싸 최대한의 열손실을 막기 위해 노력했지만 N=3, N=5일때의 가열시간이 60Watt, N=3인 경우 1800분(30시간)으로 매우 길기 때문에 그만큼 효율이 떨어진 것이다. 그렇지만 동일한 전력량에서 비교할때 집중(concentration)배치형태가 분산(dispersion)배치형태보다 약 5~6%정도 증가한 것을 알 수 있다.

6. 동일한 heating pad 수(N)에서의 축열 효율

Fig. 10에서도 마찬가지로 heating pad 수가 동일한 조건에서 집중(concentration)배치형태가 분산배치형태보다 축열효율이 더 높게 나타남을 알 수 있다. 특히, 80Watt에서는 60, 100Watt보다 축열효율이 더 높게 나타나고 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.

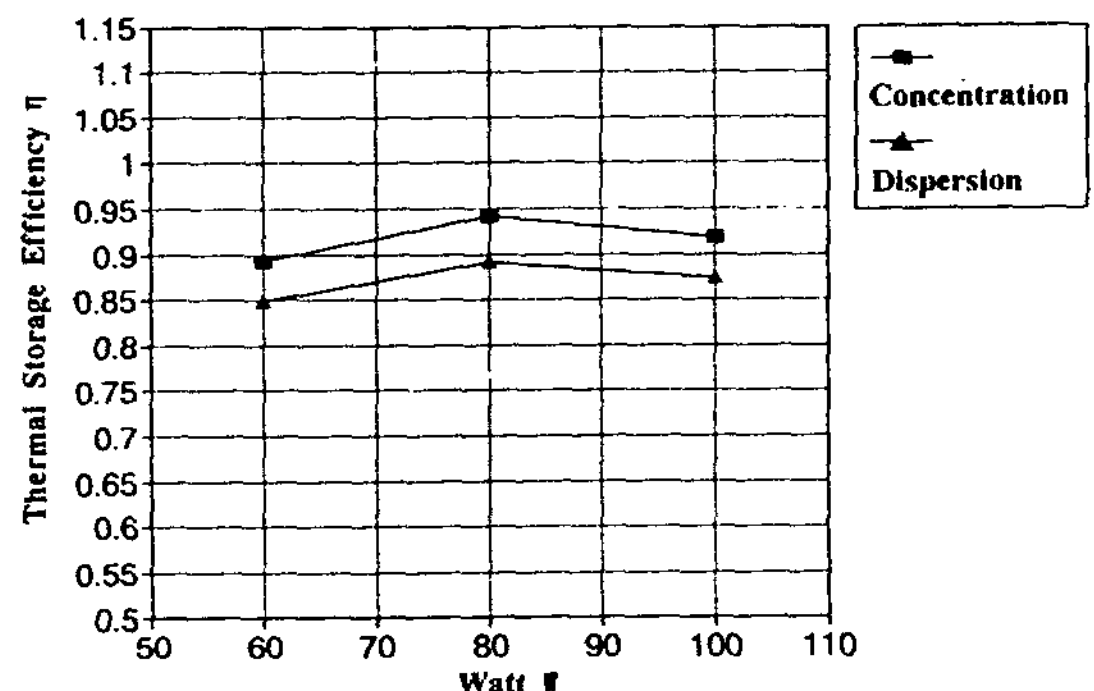


Fig. 10 Thermal storage efficiency at N=5

V. 결 론

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

참 고 문 헌

- 1) B. Gebhart, "Buoyancy Induced Fluid Motions Characteristics of Applications in Technology", J. of Fluid Engineering, Vol. 101 pp. 5-14,(1979)
- 2) Li-Yun Wu, "An Experimental Investigation of the Effect of Water Removal and Replacement on the Thermal Stratification in a Horizontal Solar Storage Tank", Solar Engineering, pp. 380-384, (1984)
- 3) J. Peterson, "Measurement of Velocity and Turbulence in Vertical Axisymmetric Isothermal and Buoyant Jets", ASME, J. of Heat Transfer, Vol. 114, pp. 135-136, (1992)
- 4) 박이동, 정운철, "열 Pipe용 축열조내의 열 및 유체 유동 특성에 관한 연구", 성균관대학교 박사학위 청구논문, (1994)

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

Pak Ee-Tong* · Jeong Un-Chul**

* *Sung Kyun Kwan University*

** *Kyung Min College*

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. And arrangement of heating pad play an important role in thermal flow and thermal storage efficiency. In this experiments, number of heating pad is ranged from three, five and nine, and when there is no change on number of heating pad, arrangements are two types of concentration-type and dispersion-type. Strong entrainment take place in the case of concentration-type of heating pad, and rapid temperature rise ($\Delta T \doteq 1.6 \sim 3.2^{\circ}\text{C}$) in the tank is obtainable on the concentration-type than dispersion-type. In the constant number of heating pad, the concentration-type has the higher efficiency with about 5~6% than the dispersion-type. Therefore, concentration-type of heating pad is an efficient design in constant number of heating pad.