

【 論 文 】

실험 저장조내의 유입구 형상변화에 따른
열 저장효율에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Thermal Storage Efficiency Through
Variable Porous Manifolds in a Test Storage Tank

박 이 동* 황 성 일** 최 영 일***

Ee-Tong Pak Sung-Il Hwang Young-Il Choi

ABSTRACT

This paper dealt with thermal storage efficiency due to difference ($T_{\infty} - T_i$) between the mean temperature of water in the storage tank [0.5m \times 0.5m \times 1.0m] and the temperature of water flowing into the tank, flow rate of water flowing into the tank and shape of porous manifold which water flow into the tank through.

As results of experiments;

- (1) When the flow rate was constant and the diameter of porous section decreased by 8mm, 6mm, and 4mm, the thermal storage efficiency increased.
- (2) When the diameter of porous section was constant and the difference ($T_{\infty} - T_i$) between the mean temperature of water in the storage tank and the temperature of water flowing into the tank increased by $-30, -20, -10, 5, 10, 15$ ($^{\circ}\text{C}$), the thermal storage efficiency increased.
- (3) When the ($T_{\infty} - T_i$) was constant and the flow rate decreased by 0.8, 0.4, 0.25(LPM), the thermal storage efficiency increased.
- (4) When the shape of porous section was rigid, the thermal storage efficiency was the most effective, and with establishing flexible porous section or mesh, the effective thermal storage efficiency was obtained.

NOMENCLATURE

P	: Pressure in porous section (Kg/cm^2)	g	: Acceleration of gravity (m^2/sec)
P_t	: Pressure in storage tank (Kg/cm^2)	A	: Cross-sectional area of manifold (cm^2)
		F	: Friction force per unit length of manifold (Kg)
		C	: Specific heat at constant pressure ($\text{KJ}/\text{Kg } ^{\circ}\text{K}$)

* 정회원 : 성균관대 기계공학과
** 정회원 : 성균관대 대학원
*** 성균관대 대학원

- Z : Depth of downstream direction from free surface (cm)
- E : Ideal storage energy in fully stratified tank (J)
- E_m : Storage energy of storage tank in measuring time (J)
- \hat{E} : Storage efficiency ($= E_m/E$)
- \dot{M} : Mass flow rate through inlet chamber (Kg/sec)
- T_i : Temperature of the water flowing into storage tank ($^{\circ}C$)
- T : Temperature of water at measuring point in storage tank ($^{\circ}C$)
- T_{∞} : Mean temperature of water in storage tank ($^{\circ}C$)
- t^* : Turn-over time (min)
- ρ : Density (Kg/cm³)

1. 서 론

열 에너지는 현열이나 잠열로서 저장이 가능하며, 현열 저장 시스템은 저장물질의 열 용량과 온도변화를 이용하며, 에너지를 흡수할 때는 저장물질의 온도는 상승하고, 추출할 때는 강하한다. 이 시스템의 가장 큰 장점은 시스템 작동시 축열과 방열과정이 완전히 가역적이라는 점이다.

현열 저장물질로서 물이 가장 많이 이용되는 이유는 풍부하고, 취급이 용이할 뿐만 아니라 용량이 크다는 점이다. 현열 저장으로서 현재 가장 많이 사용되고 있는 완전히 혼합된 저장 시스템은 유입물과 저장물 사이에 혼합을 일으키기 때문에 요구되는 온도의 물을 저장하는데 있어서 열 효율이 저하되는 문제점이 있다.¹⁾

따라서, 저장조내의 물리적인 분리장치에 의

존하지 않고, 저장물질을 성층화시키는 열 성층 저장 시스템은 시스템의 성능 및 효율을 효과적으로 향상시킨다. 그러나, 저장 시스템에서 열 성층을 완전하게 형성할 수 없기 때문에 효과적인 열 성층을 얻기 위하여 기하학적, 동적 매개변수를 통하여 연구가 수행되어 왔다.²⁾⁴⁾ 그리고 효과적인 열 성층을 얻기 위해서는 저장조내로 유입되는 작동유체와 저장물질 사이의 경계면에서 혼합을 최소화시킬 수 있는 형상이 중요한 문제로 대두되었다.

1976년 Zalman Lavan와 James Thompson²⁾는 plastic cylindrical vessels인 온수저장 시스템에서 Thermocline을 가파르게 형성시키기 위하여 기하학적, 동적 매개변수인 L/D, 유입구와 유출구에서의 온도차 (ΔT), 유동율등의 상관관계를 연구하였고, L/D, ΔT 가 클수록 성층도는 향상되며, 반면에 유동율이 증가함에 따라 성층도는 감소함을 보여주고 있다.

1979년 R.I.Loehrke³⁾ 등은 잘 단열된 직경 1.16 m, 용량 2.27 m³인 cylindrical steel tank에서 여러 유입구형상에 따른 성층도를 연구하였으며, flexible porous manifold형상이 효과적인 성층을 형성시킴을 보여주고 있다.

1982년 H.N.Gari와 R.I.Loehrke⁵⁾는 저장조 내에서 Thermocline를 향상시키기 위하여 간단한 manifold의 작동모델을 제시하고 있으나, 여기서 제안된 모델은 벽면의 구멍을 결정하기 위한 자료는 제공할 수는 있으나 manifold의 한계 다공성 및 한계 구멍의 크기를 제시하지는 못하였다.

따라서, 본 실험은 porous manifold의 형상 변화, 구멍의 크기, 구멍의 수등의 기하학적 변수들과 유동률을 통하여 효과적인 열 저장 효율을 얻고자 하였으며, 실제 저장 시스템에서 최적의 설계자료를 제시하고자 한다.

2. 관련 이론

2-1 THE POROUS SECTION

유입되는 작동유체가 냉수이면, porous section의 역할은 유입되는 냉수가 하류유동을 할 때, 저장조내의 주위 물과의 전단력에 의해 야기되는 혼합을 억제하기 위하여 동일한 밀도준위에 이를 때까지 주위 물과의 압력평형을 유지시킨다.

porous section내의 하류유동은 정상상태, 일차원 유동이며, 하류 유동을 하는 냉수의 온도가 변화한다고 가정하면, 저장조 내의 운동량 방정식은 다음과 같다.⁵⁾

porous section내의 냉수가 하류유동을 할 때 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dP}{dz} = \rho g - \frac{F}{A} - \frac{1}{A} \frac{d}{dz} \left(\frac{\dot{m}^2}{\rho A} \right) \quad (1)$$

저장조 내의 주위 물에 적용되는 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dP_t}{dz} = \rho_t(z) \cdot g \quad (2)$$

저장조 내로 유입되는 냉수가 하류유동을 할 때 주위 물과 밀도 평형상태에 도달하면 다음 조건을 만족시킨다.

$$\frac{dP}{dz} = \frac{dP_t}{dz} \quad (3)$$

따라서, 저장조 내에서 평형상태에 도달하는 위치 (Z)가 깊을수록 열 저장효율을 향상시킬 수가 있다.

2-2 열저장 효율

본 실험의 열 저장 효율은 유입되는 온(냉)수가 열 손실이 무시된 이상적인 저장조내에

저장되는 에너지양에 대한 실험시 저장되는 실제 에너지양의 비로서 정의한다.

균일한 온도와 일정한 유동율로 성층화된 저장조내에 적용할 수 있는 에너지 식은 열역학 제 1법칙으로 부터 다음과 같다.

$$E = \dot{M} C_p \Delta T t^* = \dot{M} C_p (T_i - T_\infty) t^* \quad \dots\dots\dots (4)$$

\dot{M} : 유동률

ΔT : 유입되는 온(냉)수와 저장조내의 저장물과의 온도차

t^* : 저장조에 저장된 물을 완전히 추출하는데 경과되는 시간 (=M/ \dot{M})

실험시 저장조내에서 저장된 실제 에너지 식은

$$E_m = \dot{M} C_p \Delta T t^* = \dot{M} C_p (T_i - T) t^* \quad (5)$$

ΔT : 일정시간이 경과된 후 유입되는 온(냉)수와 저장조내의 저장물의 평균온도와 의 차

따라서, 열 저장효율은

$$\hat{E} = \frac{E_m}{E} \quad (6)$$

3. 실험장치 및 절차

3-1 실험장치의 개요

실험장치의 구성은 폭 : 0.5m, 길이 : 1m, 높이 : 0.5m인 소형수조, 고온 항온 수조, 저온 항온 수조, 유량계, 펌프, inlet chamber 그리고, 지름이 4,5,6mm인 다공질 유입구, mesh number 18의 mesh와 다공섬유질의 수세미로 제작한 유입구, 그리고 나이론 망사천으로 제작한 유연한 유입구 등으로 구성된

다.

그 이외의 측정장치로는 YOKOGAWA YOKUSHI-IN ELECTRIC사의 Model 3088 Hybrid Recorder, 유동형태의 가시화를 위한 Nikon FM1, FM2 Camera 등이 있다.

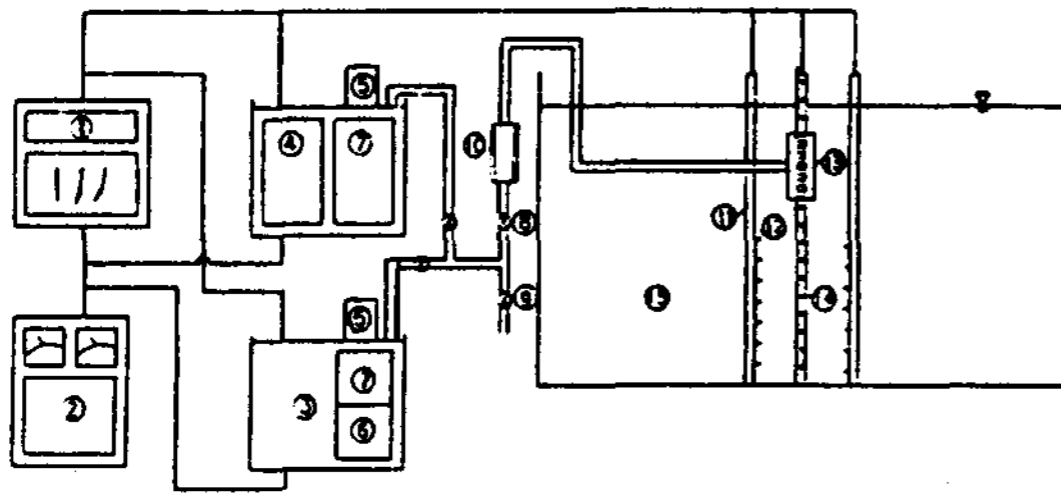


Fig. 1 Skeleton of experimental apparatus

- | | |
|-------------------------------|-----------------------|
| ① Hybrid Recorder | ⑨ Bypass Valve |
| ② Automatic Voltage Regulator | ⑩ Flow Meter |
| ③ Autemp Bath | ⑪ Plastic Hollow Bar |
| ④ Low-Temp Bath | ⑫ Thermo Couple Probe |
| ⑤ Pump | ⑬ Inlet Chamber |
| ⑥ Pump Speed Controller | ⑭ Porous Section |
| ⑦ Temp. Controller | ⑮ Test Tank |
| ⑧ Main Inlet Valve | |

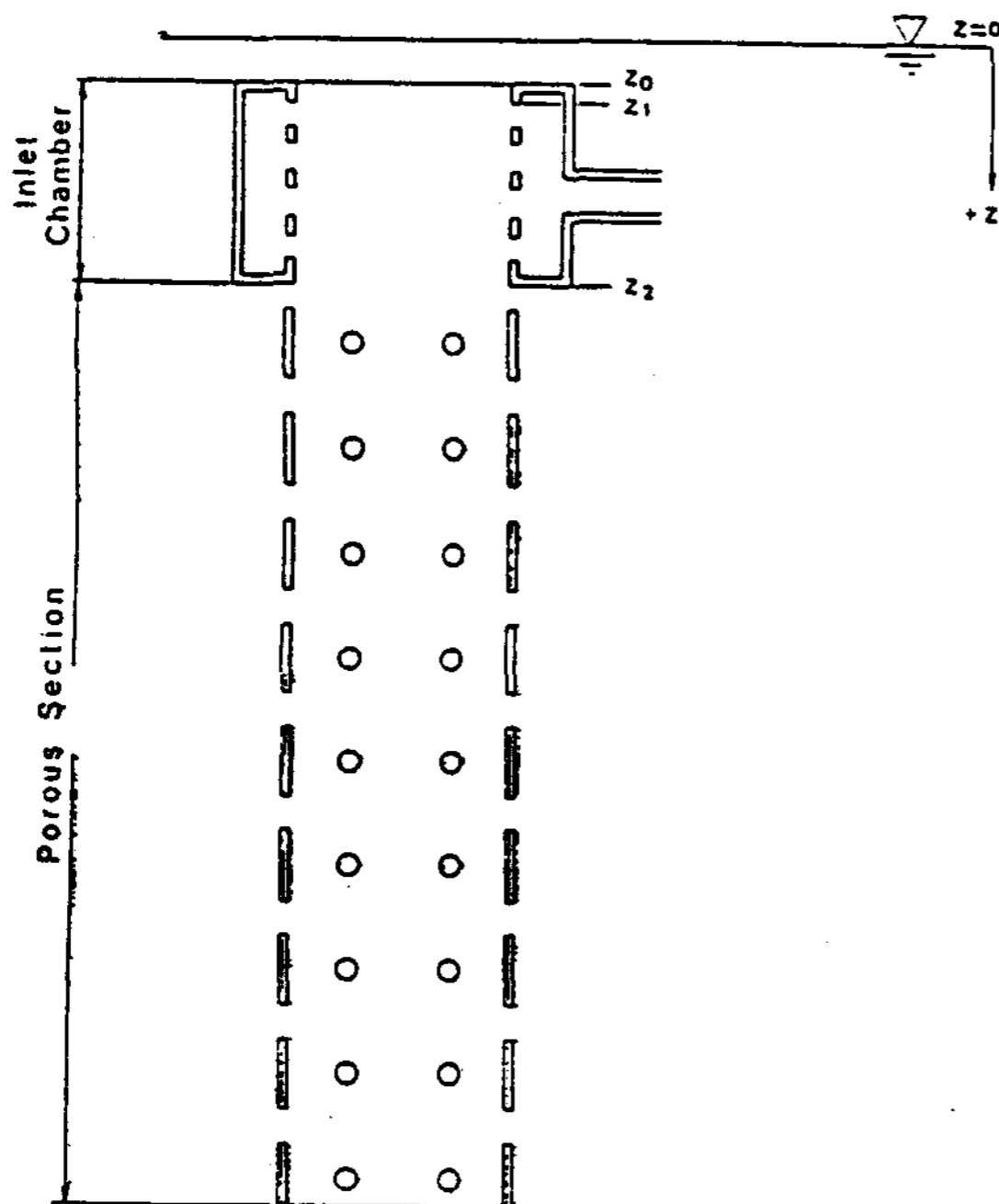


Fig. 2 Rigid, porous distribution manifold

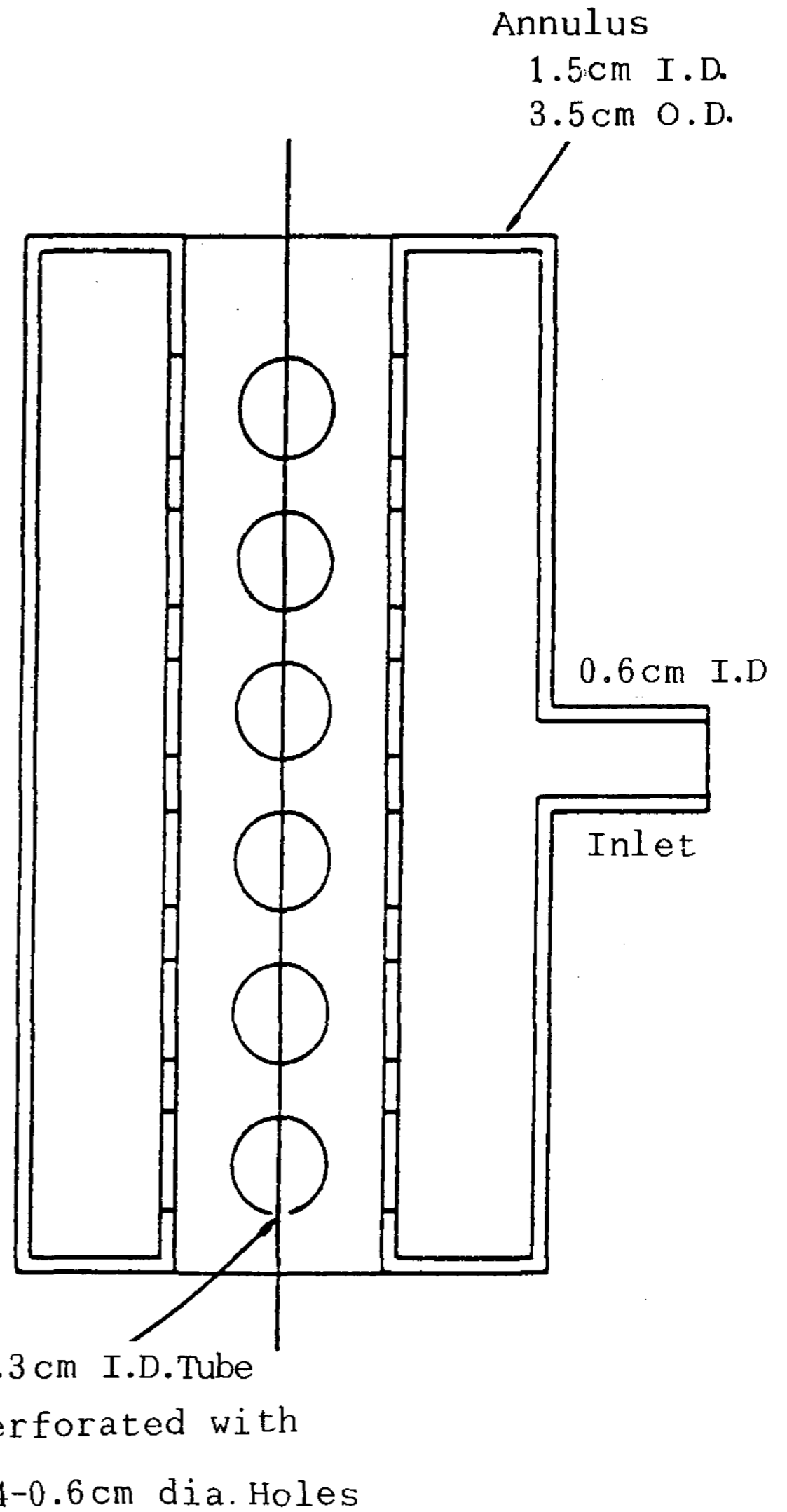


Fig. 3 Inlet chamber

이와 같은 실험장치의 개요도는 Fig.1과 같다. Fig.2는 단단한 다공질 유입구의 형상을 나타내며, Fig.3은 inlet chamber의 상세도이다.

3-2 실험절차

저장조 내에 20°C인 청수를 채운 후 안정상태가 형성되면, 고온 항온 수조에 일정량의 색소와 혼합된 온수를 준비하고, 균일한 온도를 유지하도록 한 후, 온수를 유량계에 의해 일정

하게 inlet chamber내로 유입시킨다.

유동율은 0.25, 0.4, 0.8 (LPM) 인 3 단계로 변화시키며, 각 유동율에 따라 저장조 내의 저장물의 초기 평균온도와 유입되는 온(냉) 수의 온도차인 ΔT 를 -30, -20, -10, 5, 10, 15($^{\circ}\text{C}$) 인 6 단계로 변화시키면서 저장조 내의 온도변화를 측정하였다. 이때, 저장조 뒤쪽 상단에 500W, 110V인 두개의 전구를 설치하여 저장조 내로 유입되는 온수의 가시적 관찰이 가능토록 하였다.

$\Delta T (= T_{\infty} - T_i)$, 유동율의 변화에 따라 위의 절차를 반복 수행하며, 각 과정에 대해 porous section의 형상 및 구멍의 크기, 구멍의 수등을 변화시켜 차례로 반복 수행하였다.

그리고, 작동유체가 냉수인 경우는 저온 항온 수조를 사용하여 위의 과정을 수행하였다.

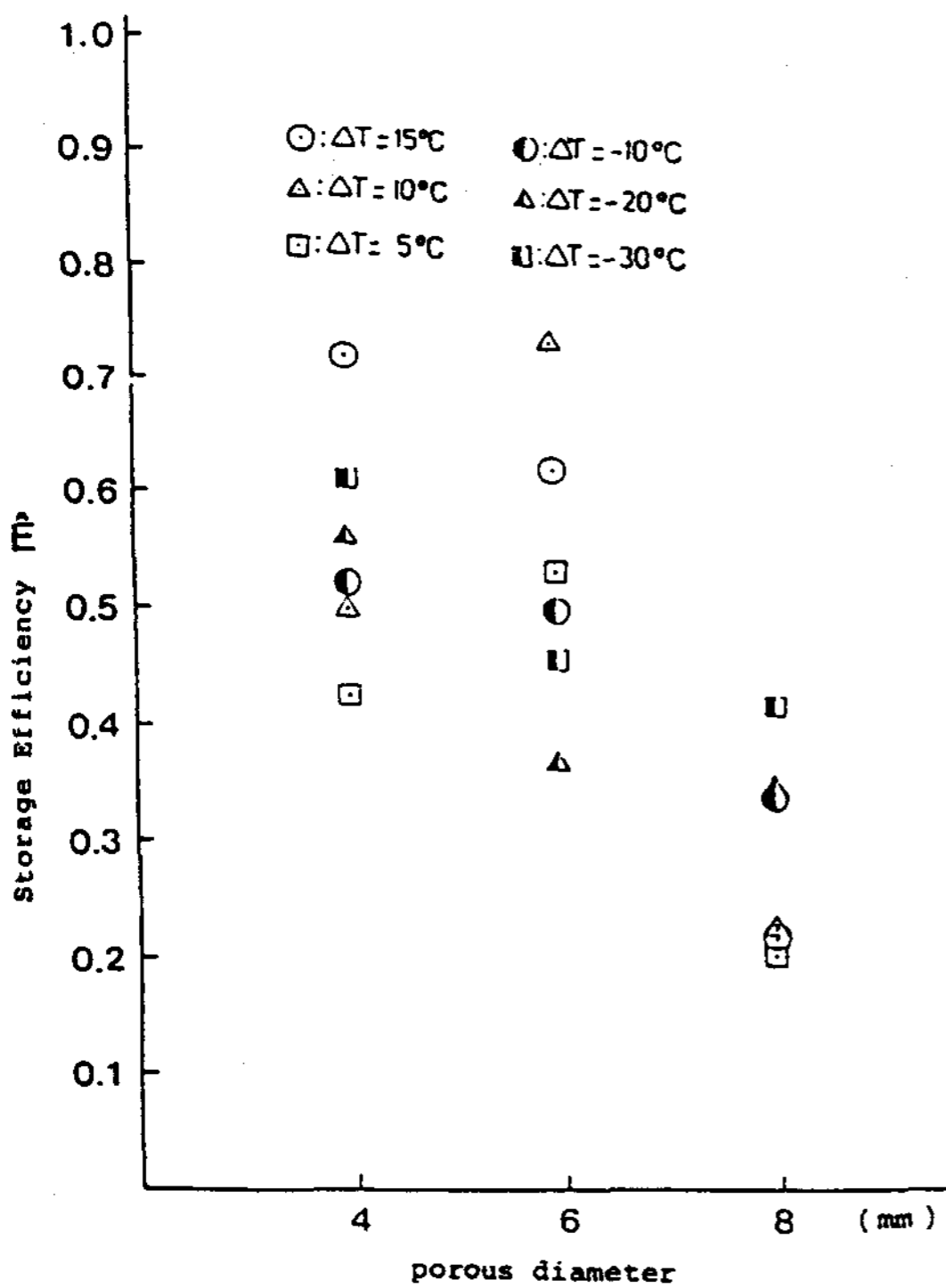


Fig. 4 Effect of porous diameter on Storage Efficiency ($M = 0.8 \text{ LPM}$)

4. 실험결과 및 고찰

유동율이 일정하고, porous section 부의 유입구 직경에 따른 열저장 효율은 Fig. 4에서 보여주며, 유입구 직경이 증가 할수록 열 저장 효율은 감소하고, 유입구 직경이 6mm 인 경우 열 저장 효율이 가장 높은 현상을 보여준다.

이는 porous section 부의 유입구 직경이 증가하게 되면, 유입구에서 porous section 내의 온(냉)수와 저장조 내의 저장물 사이에 전단력에 의한 혼합 유동을 크게하며, 직경 6mm 인 경우 열 저장 효율이 가장 큰 것은 저장조의 크기와 관계된다고 볼 수가 있다.

Porous Section 부의 유입구 직경이 일정하고, ΔT 가 변화할때 열 저장 효율은 Fig.5에서 보여주며, 유입구 직경이 4mm 로 일정할

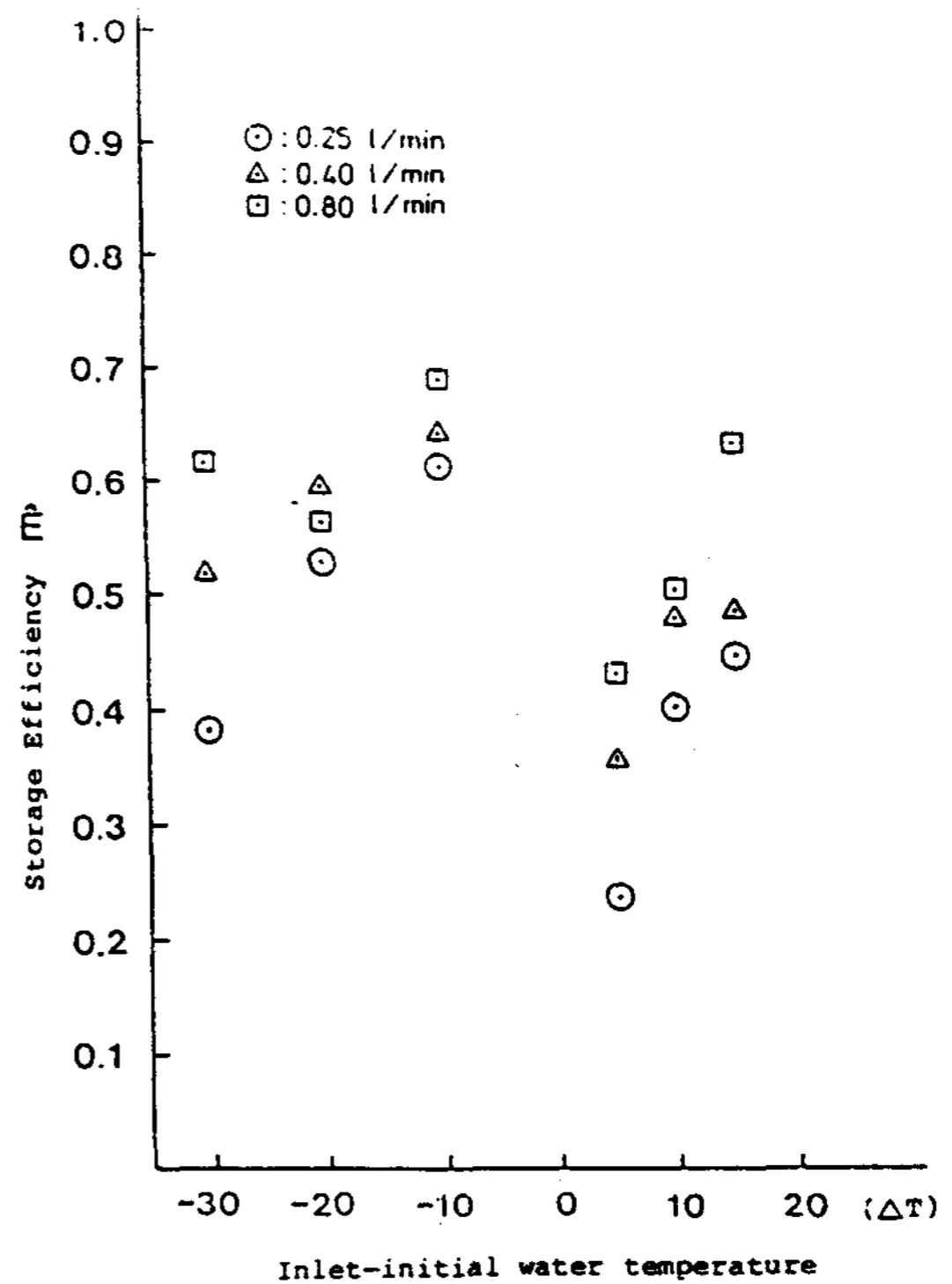


Fig. 5 Effect of inlet-initial water temperature difference on storage Efficiency. (Porous diameter (D) = 4mm)

때, ΔT 에 따라 열 저장 효율이 증가하며, 저온보다 고온의 경우 열저장 효율이 상대적으로 큰 것을 볼 수 있다.

이는 유입되는 작동유체가 고온이면, 수평성분의 운동량은 inlet chamber내의 벽면에서 항을 받게 되어 일부 운동량은 소멸하게 되고, 정미 운동량만이 부력에 의하여 발생하는 수직 운동량에 부가되어 저장조 상부로 확산을 일으켜 주위유체와의 혼합을 최소화하기 때문이며, 저온인 경우는 유입되는 냉수가 수조내의 주위 물과 밀도평형에 도달할 때까지 porous section부의 유입구에서 전단력에 의한 혼합이 존재하기 때문이다.

ΔT 가 일정하고, 유동을 및 porous section부의 형상에 따른 열 저장효율은 Fig.6에서 보여주며, 유동율이 증가 할수록 열 저장 효

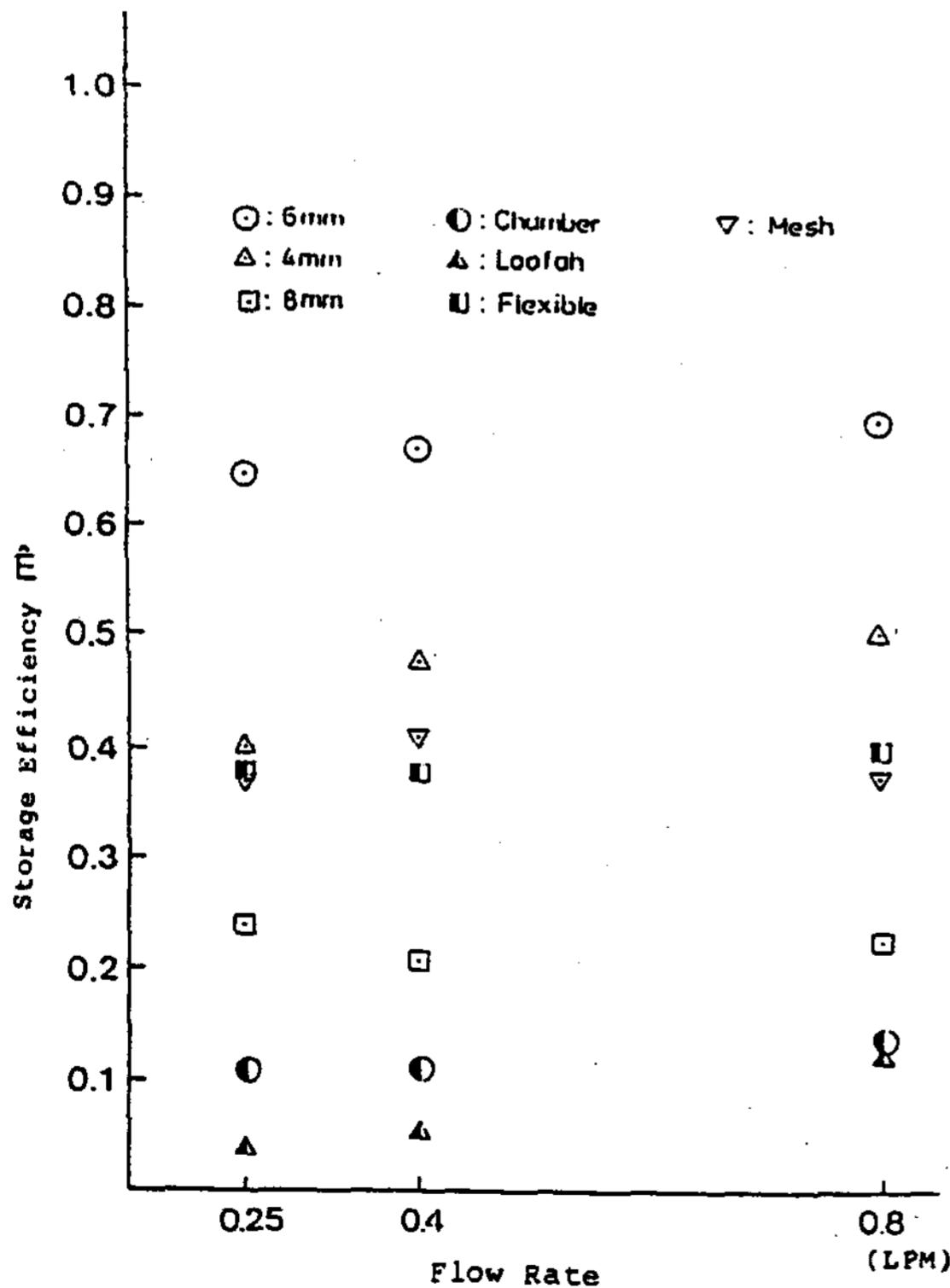


Fig. 6 Effect of Flow Rate on Storage Efficiency

율이 증가함을 보여준다.

이는 유동율이 적을수록 부력에 대한 관성력의 저하로 인하여 혼합유동이 감소하나, 레이놀즈 수가 아주 적은 영역에서는 관성력이 오히려 혼합유동을 억제하는 효과를 준다.

그리고, porous section부의 유입구 직경이 4mm인 rigid porous section 이 가장 높은 열 저장효율을 보여주며, flexible porous section와 mesh를 사용해도 비교적 높은 효율을 보여준다.

이는 rigid porous section을 사용하면, 유입되는 온(냉)수가 저장조내의 주위 물과 밀도 평형상태에 도달할 때까지 porous section부의 유입구에서 전단력에 의한 혼합을 최소화 시키기 때문이며, flexible porous section을 사용하면 porous section의 횡단면이 porous section내의 압력과 주위 물의 압력차에 따라 유연하게 변화하므로 이들 사이의 압력이 동일한 수준에 도달할때까지 유입구를 통한 유입 및 유출을 억제하기 때문이다.

5. 결론

(1) 유동율이 일정하고, porous section부의 유입구 직경이 감소할수록, 열 저장 효율은 증가한다.

(2) porous section부의 유입구 직경이 일정하고, 유입되는 온(냉)수의 온도와 저장조내의 주위 물과의 온도 차인 ΔT 가 증가 할수록, 열 저장 효율은 증가한다.

(3) ΔT 가 일정하고, 유동율이 증가할수록 열 저장 효율은 증가한다.

(4) porous section부의 형상이 rigid인 경우 가장 효과적인 열 저장효율을 얻으며 flexible porous section, mesh인 경우도 비교적 높은 효율을 얻을 수가 있다.

REFERENCES

1. H.P. Gari, S.C. Mullick and A.K. Bhargava, "Solar Thermal Energy Storage.", D. Reidel Publishing Company, pp.82-128, 1985.
2. Z. Lavan and J. Thompson, "Experimental Study of Thermally Stratified Hot Water Storage Tanks.", Solar Energy, Vol. 19, pp. 519-524, 1977.
3. R.I. Loehrke, et. al., "Stratification Enhancement in liquid thermal storage tanks." J. of Energy, Vol. 3, pp. 129, 1979.
4. M.K. Shavp and R.I. Loehrke, "Stratified Thermal Storage in Residential Solar Energy Applications.", J. of Energy, Vol. 3, pp.106-113, March-April 1979.
5. H.N. Gari and R.I. Loehrke, "A controlled Buoyant Jet for Enhancing Stratification in a Liquid Storage Tank.", J. of Fluids Engineering, Vol.104, pp.475-480, 1982.

후 기

본 연구는 1989년도 "대체에너지기술개발사업" 계획으로 연구된 것의 일부이며 관계제위에 감사를 드린다.