

태양열 온수 저장조의 성층 온수 추출에 관한 연구

박 이 동 · 정 운 철* · 성 상 우*

성균관대학교 기계공학과
성균관대학교 대학원*

Thermally Stratified Hot Water Extraction

Ee Tong Pak · Un Chul Jeong* · Sang Woo Sung*

Sung Kyun Kwan University
Graduate School, Sung Kyun Kwan University*

ABSTRACT

Thermal stratification enhancement for the higher extraction efficiency of hot water storage tank was experimentally studied with transparent fiber glass cylindrical tank(350ℓ, D=516mm, H=1680mm). Height to diameter ratio ($H/D = 1, 2, 3$), flow rate($Q = 8, 10, 12$ LPM), inlet-outlet temperature differences($\Delta T = 20, 25, 30^\circ\text{C}$), and geometry of inlet-outlet port were the parameters. In particular, three kind of distributors were used for geometry of inlet-outlet port. As a result, it was possible to get extraction efficiency of 95% by using the distributor having variable diameter but keeping a constant diameter of perforation. So it is recommendable to design the distributor so that the main pipe decrease in diameter toward the dead end.

NONENCLATURE

A : Cross section area of distributor(mm^2)
b : Perforation area per unit length of distributor(mm^2)
C : Extraction factor
D : Diameter of test tank(mm)
d : Diameter of perforation(mm)
 D_m : Diameter of distributor(mm)
f : Friction factor
g : Acceleration of gravity(cm/sec^2)

H : Height of test tank(mm)
h : Length between inlet-outlet port(mm)
j : Head loss due to energy dissipation
L : Length of distributor(mm)
K : Velocity coefficient
l : Distance between two holes of distributor(mm)
P : Pressure(kg_f/cm^2)
Q : Flow rate(LPM)
t : Time(min)
 t^* : Effective extraction time(min)

- T : Temperature(°C)
 U_i : Velocity at inlet port(cm/sec)
 V : Tank volume(mm³)
 α : Velocity distribution correction coefficient
 β : Thermal expansion coefficient
 ρ : Density of water(kg_f/cm³)
 η_e : Thermal extraction efficiency
 λ : Distance from dead end of main pipe(mm)

1. 서 론

현재 주된 에너지원 이라고 할 수 있는 석유, 석탄등의 화석연료는 그 매장량이 한정되어 있어서 계속적으로 증가하는 에너지 수요를 충족시키기 어려운 상태에 있으며 가까운 장래에 고갈될 위험에 처해있다. 따라서 에너지 공학자들은 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 대체 에너지원의 개발과 함께 에너지의 효율적인 이용에 관한 연구를 계속하고 있다.

에너지의 효율적인 이용에 관한 연구는 저장 방식에 대한 연구와 저장된 에너지의 이용에 관한 연구의 두가지로 나눌 수 있는데, Cabelli¹⁾는 온수저장탱크내에서의 열적인 성층은 부력효과에 의해 나타나고 유지된다고 하였고, Lavan과 Thompson²⁾은 탱크의 직경과 높이의 비(H/D), 유입 냉수와 탱크내의 저장 온수의 온도차(ΔT), 입구의 위치, 입구와 출구의 형상, 유량 등이 열성층을 안정되게 유지하는데 필요한 변수가 됨을 밝혔다. 그리고 그밖의 여러 연구자들^{3~6)}을 통해서 열 에너지의 저장 및 이용에 있어서, 특히 태양열을 저장했다가 저장된 온도대로 이용하는데 있어서 가장 효율적인 온수 저장탱크의 형태는 열성층(Thermal Stratification)을 이용한 열성층 저장장치라는 연구 결과가 제시되었으며 또한, 안정된 열성층을 유지하기 위한 연구가 계속적으로 진행되어 왔다. 그렇지만 완전한 열성층을 유지하는 것은 불가능 하므로 지금까지의 연구결과만으로 열성층의 안정화가 충분히 이루어졌다고 할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 지금까지의 연구결과를 토대로 저장탱크로부터 온수를 추출할때 열

성층을 보다 안정되게 형성, 유지시켜서 추출 효율을 높이기 위해 실제의 열 저장 시스템에 적용이 가능하도록 설계, 제작된 직경 516mm, 높이 1680mm, 용량 350ℓ의 원통형 실험 탱크를 사용하고 동적 변수로는 유입 유동율(Q=8LPM, 10LPM, 12LPM), 유입냉수와 저장되어 있는 온수의 온도차(ΔT=20°C, 25°C, 30°C) 그리고 기하학적인 변수로는 출구높이와 탱크의 직경의 비(H/D=1, 2, 3), 입구와 출구에서 세가지 형태의 Distributor를 사용하여 실험을 수행하였고 단순한 형태의 Inlet-outlet Port를 사용하여 이들과 비교하였다.

2. Distributor의 이론적 고찰

지금까지의 온수 저장조의 열적 성층을 유지하는데 가장 효과적인 입구와 출구의 형태로 제시된 Distributor는 주관의 직경이 일정하고, 각 Perforation의 직경이 일정한 형태(Distributor 1)를 갖고 있어서 각 Perforation에서의 유동이 일정하지 않기 때문에 온도 경계층을 불안정하게 만드는 단점을 갖고 있었다. 따라서, 본 연구에서는 이의 개선을 위해 Distributor의 기본적인 형태로부터 주관의 직경은 일정하게 두고 각 Perforation의 직경을 변화시키는 방법⁷⁾(Distributor 2)과 주관(Main Pipe)의 직경을 변화시키고 각 Perforation의 직경은 일정하게 두는 방법⁸⁾(Distributor 3)을 사용하여 어떤것이 보다 효과적인 입구와 출구의 형상인지 비교하였다.

1) Perforation의 직경을 변화시키는 방법 (Distributor 2)

주관의 직경은 일정하게 두고 각 Perforation의 직경을 변화시키면 에너지 손실을 고려한 수정 Bernoulli 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dp_x}{d\lambda} = -\frac{d}{d\lambda} \left(\alpha \frac{U_x^2}{2g} \right) - \frac{dj_x}{d\lambda} \quad (1)$$

여기서

U_x : λ에서의 평균 속도

α : 압력 보정 계수

j_x : 에너지 손실 수두

유체 정역학적인 조건을 만족한다면 α =

Const. 이고 Uniform flow에 대한 손실 수두식을 사용할 수 있다. 즉, Darcy-Weisbach식으로 부터

$$\frac{dj_x}{d\chi} = \frac{f}{Dm_x} \frac{U_x^2}{2g} \quad (2)$$

속도 수두를 무시하고 대기압하에서 Distributor의 유동이 층류라면

$$Q_x = cb_x p_x^m \quad (3)$$

각 식을 일반화 하기위해 무차원 변수를 다음과 같이 정의하였다.

$$P = \frac{p_x}{p_o}, \quad U = \frac{U_x}{U_o}, \quad A = \frac{A_x}{A_o},$$

$$B = \frac{Cb_x}{Cb_o}, \quad Q = \frac{Q_x}{Q_o}, \quad M_o = \frac{U_o^2}{2gp_o}$$

$$X = \frac{\chi}{L}, \quad Dm = \frac{Dm_x}{Dm_o}$$

식(1), (2), (3)은 다음과 같다.

$$\frac{dP}{d\chi} = \frac{d}{d\chi} (\alpha M_o U^2) - \frac{d}{d\chi} \frac{j_x}{p_o}$$

$$\frac{d}{d\chi} \frac{j_x}{p_o} = C_i K_i M_o \frac{U^{ni}}{Dm^{2mi}} \quad (\text{단, } i=1, 2, 3)$$

$$Q = BP^m$$

따라서 위의 식들로 부터 다음과 같은 식이 나온다.

$$\frac{dP}{d\chi} = M_o \left(-2\alpha U \frac{dU}{d\chi} - C_i P_i \frac{U^{ni}}{Dm^{2mi}} \right) \quad (4)$$

여기서 관의 각 Perforation으로 나가는 유량이 일정하게 하기 위해서 A, Dm, Q를 일정하다고 하면 A=1, Q=1, Dm=1에서

$$\frac{dP}{d\chi} = M_o [2\alpha(1-\chi) - C_i P_i (1-\chi)^{ni}]$$

위의 식을 관의 전 길이에 대해 적분하면 다음과 같다.

$$P = 1 + M_o \left[\alpha(2\chi - \chi^2) - \frac{C_i P_i}{ni+1} \{1 - (1-\chi)^{ni+1}\} \right] \quad (5)$$

따라서 $B = (1 - YM_o)^{-m}$

$$Y = \alpha F_o(\chi) - P_i F_i(\chi)$$

$$(\text{단, } i=1, 2, 3)$$

$$F_o(\chi) = (\chi^2 - 2\chi)$$

$$F_i(\chi) = \frac{C_i}{ni+1} [1 - (1-\chi)^{ni+1}] \quad (6)$$

$$(\text{단, } i=1, 2, 3)$$

앞의 (6)식이 관의 길이에 따른 Perforation 직경에 대한 식이다.

2) Main pipe의 직경을 변화시키는 방법 (Distributor 3)

Perforation의 직경은 일정하게 두고 주관의 직경을 변화시키면 Distributor의 임의의 인접한 두 Perforation사이의 정압차는 다음과 같다.

$$p_i - p_{i-1} = \frac{1}{2} \rho U_i^2 k_i - \frac{1}{2} \rho (U_i^2 - U_{i-1}^2) + \frac{1}{2} \rho U_{i-1}^2 \frac{f_{i-1} l_{i-1}}{Dm_{i-1}} + \rho g(Z_{i-1} - Z_i)$$

이때 Distributor가 수평하다면 우변의 마지막 항은 무시할 수 있다.

위의 식을 길이 χ 에 대해 미분을 취하면 다음과 같다.

$$\frac{dp}{d\chi} = -\frac{1}{2} \rho \frac{dU^2}{d\chi} + \frac{1}{2} \rho \frac{U^2 f}{Dm}$$

또한 속도 U는

$$U = U_L \frac{A_L \chi}{AL}$$

따라서 위의 식들로 부터 Distributor의 각 Perforation에서의 압력구배는 다음과 같다.

$$\frac{dp}{d\chi} = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{U_L A_L}{A} \right)^2 \left[\frac{4\chi^2 dDm}{Dm L^2 d\chi} - \frac{2\chi}{L^2} + \frac{f\chi^2}{Dm L^2} \right] \quad (7)$$

각 Perforation의 유동이 일정하려면 각 출구에서의 압력이 일정해여하기 때문에 $dp/d\chi = 0$ 이다. 이를 (7)식에 대입하면 다음과 같이 주관의 직경과 각 Perforation의 위치까지의 거리에 대한 식을 구할 수 있다.

$$\frac{dDm}{d\chi} = \frac{Dm}{2\chi} - \frac{f}{4} \quad (8)$$

위의 미분방정식을 풀어서 주관의 직경 D_L 로 무차원화 시키면 다음과 같다.

$$\frac{Dm}{Dm_L} = \left(1 + \frac{f_L}{2Dm_L} \right) \sqrt{\chi/L} - \frac{f_L}{2Dm_L} (\chi/L) \quad (9)$$

위의 (9)식이 Distributor의 길이에 대한 직경의 변화식이다.

3. 추출 효율

열성층 온수저장탱크로부터의 추출 효율은 저장된 일정온도의 온수를 처음온도를 유지하면서 모두 사용하였을때를 1로 하여서 탱크의 체적 V, 유입 냉수와 저장 온수의 온도차 ΔT 가 최소가 되는 유효시간 t^* 로 다음과 같이 정의된 실험식²⁾을 사용하였다.

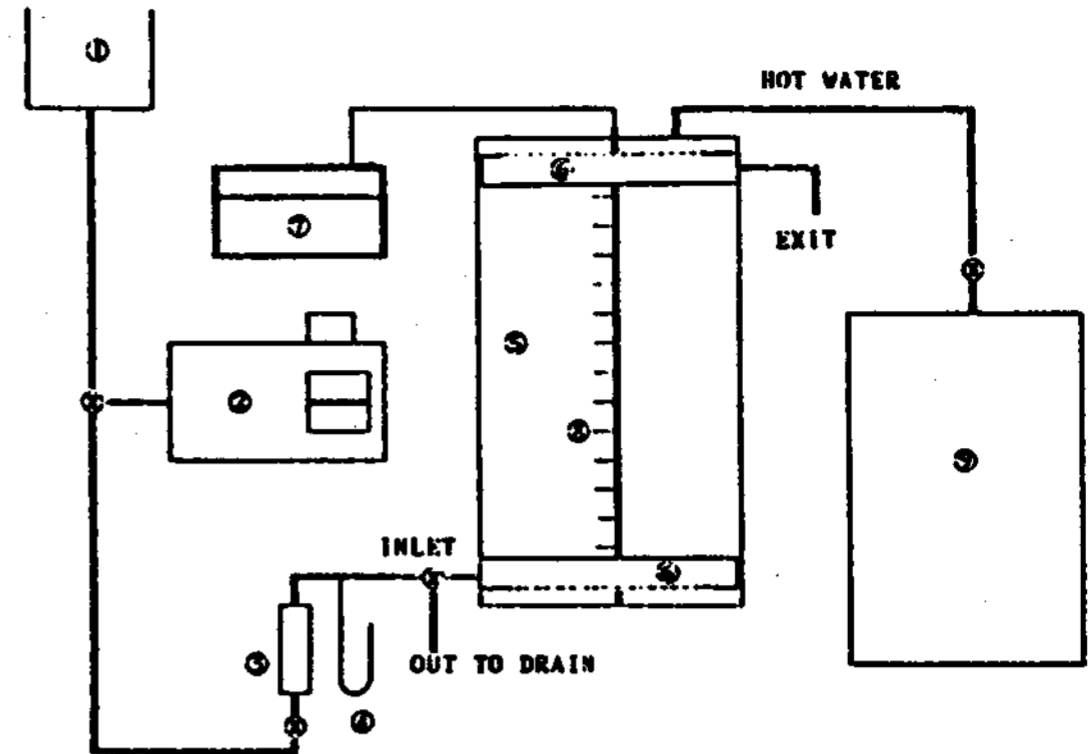
$$\eta_e = \frac{Qt^*}{V} \quad (10)$$

4. 실험장치 및 실험방법

본 실험의 실험장치는 Fig.1과 같이 실험탱크, 유량계, 유량 조절 밸브, 온수 급수장치와 유입구 및 유출구로 사용된 3가지 형태의 Distributor와 단순 유입구(Inlet-outlet Port)로 구성되어 있으며, 기록 및 측정 장치로 Yokogawa Hokushin Electric사의 Hybrid recorder Model 3088과 Stop watch, Manometer 등이 있고 성층의 가시화를 위해 자동 항온수조와 카메라를 사용하였다. 그리고, 본 실험에서 사용한 Distributor의 형태는 Fig.2와 같다.

본 실험의 실험방법은 다음과 같다.

- 1) 온수급수 장치의 온도 조절기를 정해진 온도에 맞추고 물을 가열한다.
- 2) 실험탱크로 유입시킬 냉수가 정상 상태가 될때까지 Bypass 밸브를 열고 냉수를 Bypass시킨다.
- 3) 온수를 실험탱크에 출구위치 보다 약 3cm 높아질때까지 채우고 실험탱크내의 상태가 안정될 때까지 약 5~6분 정도 기다린다.
- 4) 유량계를 조정하여 필요한 유량에 맞춘후 bypass 밸브를 닫는다.
- 5) Hybrid Recorder를 작동시키고 유입밸브를 열어 냉수를 실험 탱크의 하부로 유입시켜서 $H/D=3$ 와 $H/D=2$ 일때는 3분간격, $H/D=1$ 일때는 2분간격으로 각 위치에서의 온도를 유입 냉수와 저장 온수의 온도차(ΔT)가 최소가 되어서 출구에서의 온도 강하가 급격해질 때까지 측정한다.
- 6) 동적 변수인 Q를 8LPM, 10LPM,



① WATER TOWER ② HIGH TEMPERATURE BATH ③ FLOWMETER
④ MANOMETER ⑤ EXPERIMENTAL TANK ⑥ DISTRIBUTOR
⑦ HYBRID RECORDER ⑧ THERMOCOUPLE PROBE ⑨ WATER HEATER

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

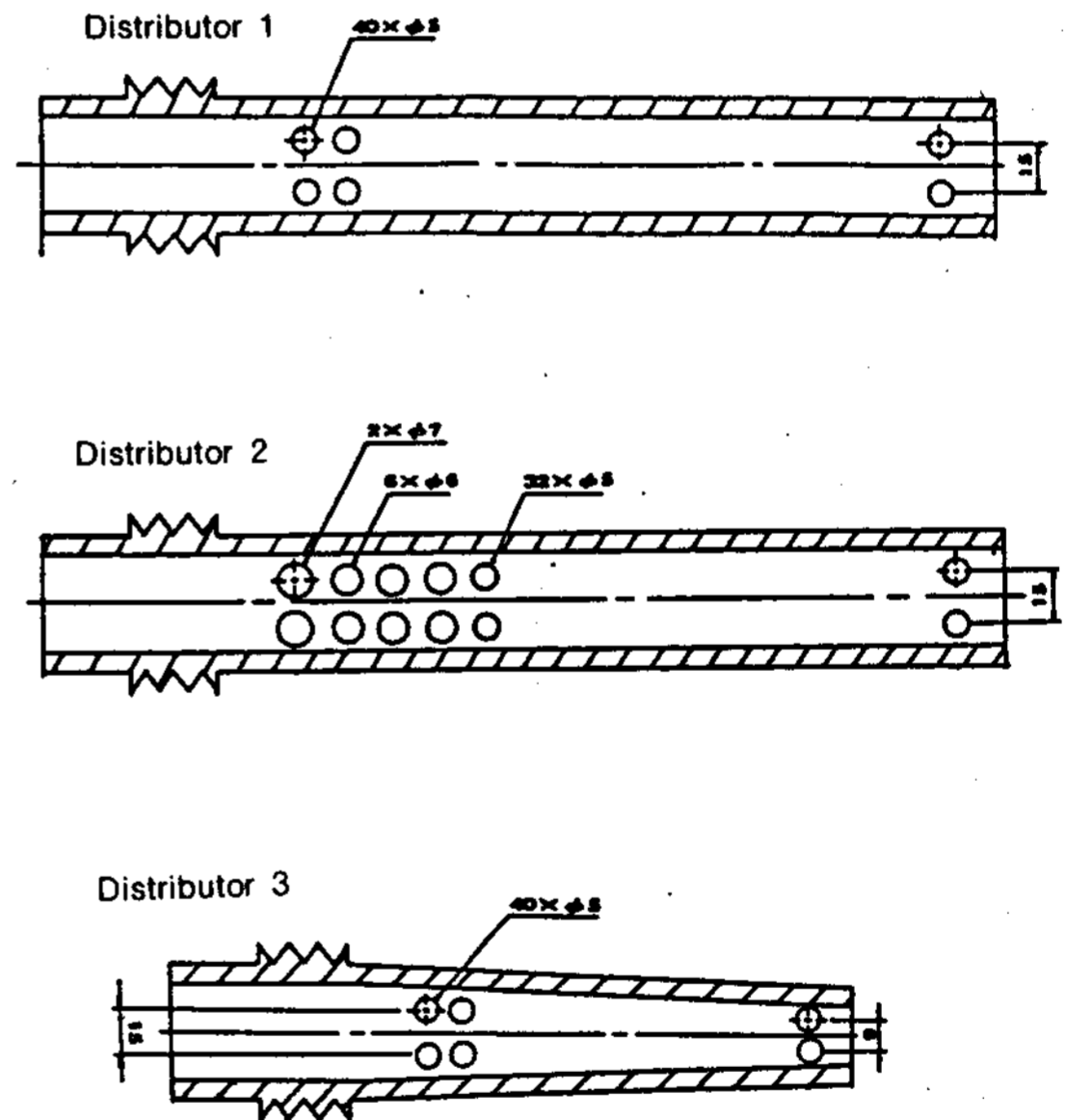


Fig.2 Geometry of distributor

12LPM로 ΔT 를 20°C, 25°C, 30°C로 기하학적 변수인 H/D를 1, 2, 3으로 변화시키면서 각 형태의 Distributor를 사용하여 위의 실험을 반복 수행한다.

7) 실험탱크의 상단에 100V, 500W인 두개의 전구를 사용하고 염료를 사용하여 초기의 유체 유동을 가시화하였다.

5. 결과 및 고찰

1) 온도 분포에 의한 고찰

Fig.3은 $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$, $Q=8\text{LPM}$, $H/D=3$ 일 때 Distributor 1($D_m=\text{Const.}$, $d=\text{Const.}$)을 사용한 실험의 결과이며 Fig.4는 $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$, $Q=12\text{LPM}$, $H/D=3$ 일 때 Distributor 1을 사용한

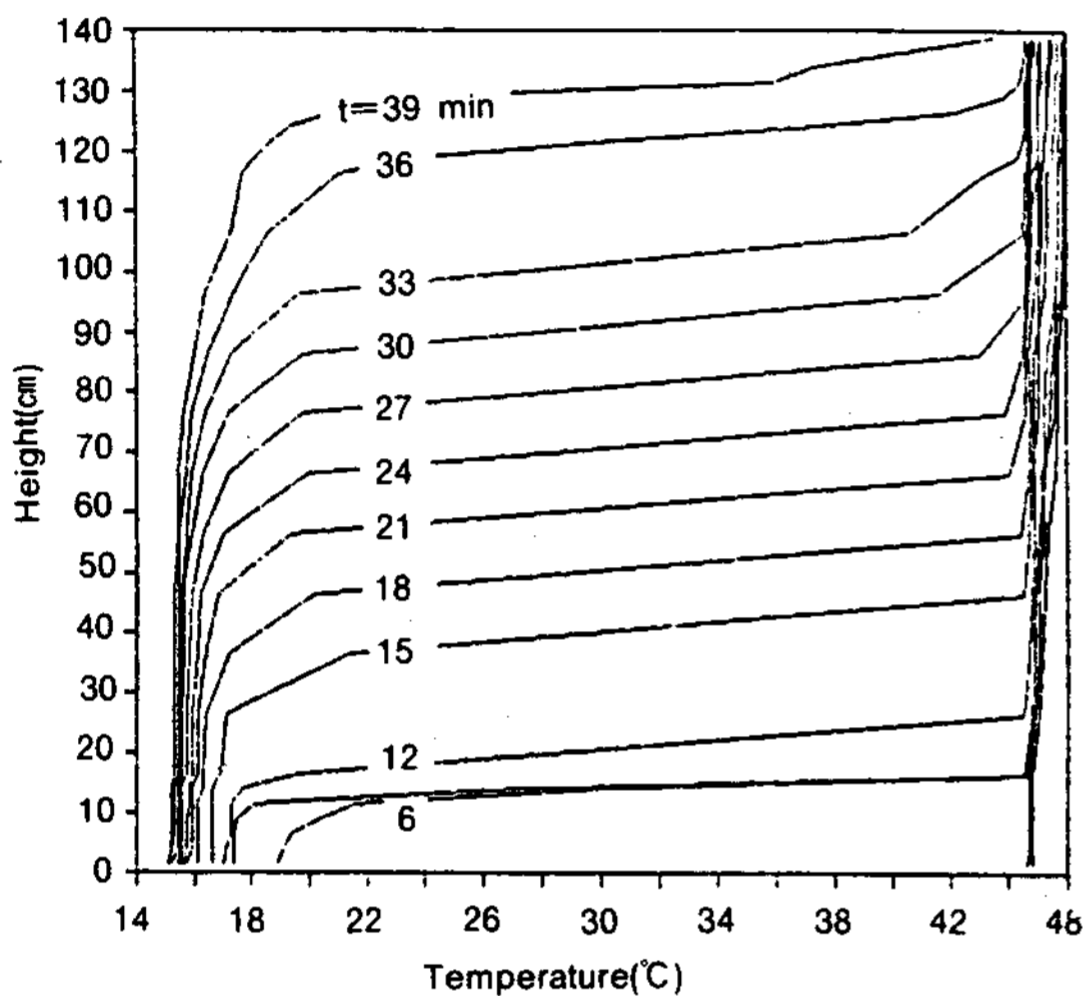


Fig.3 Temperature profile in test tank with distributor 1
($H/D=3$, $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$, $Q=8\text{LPM}$)

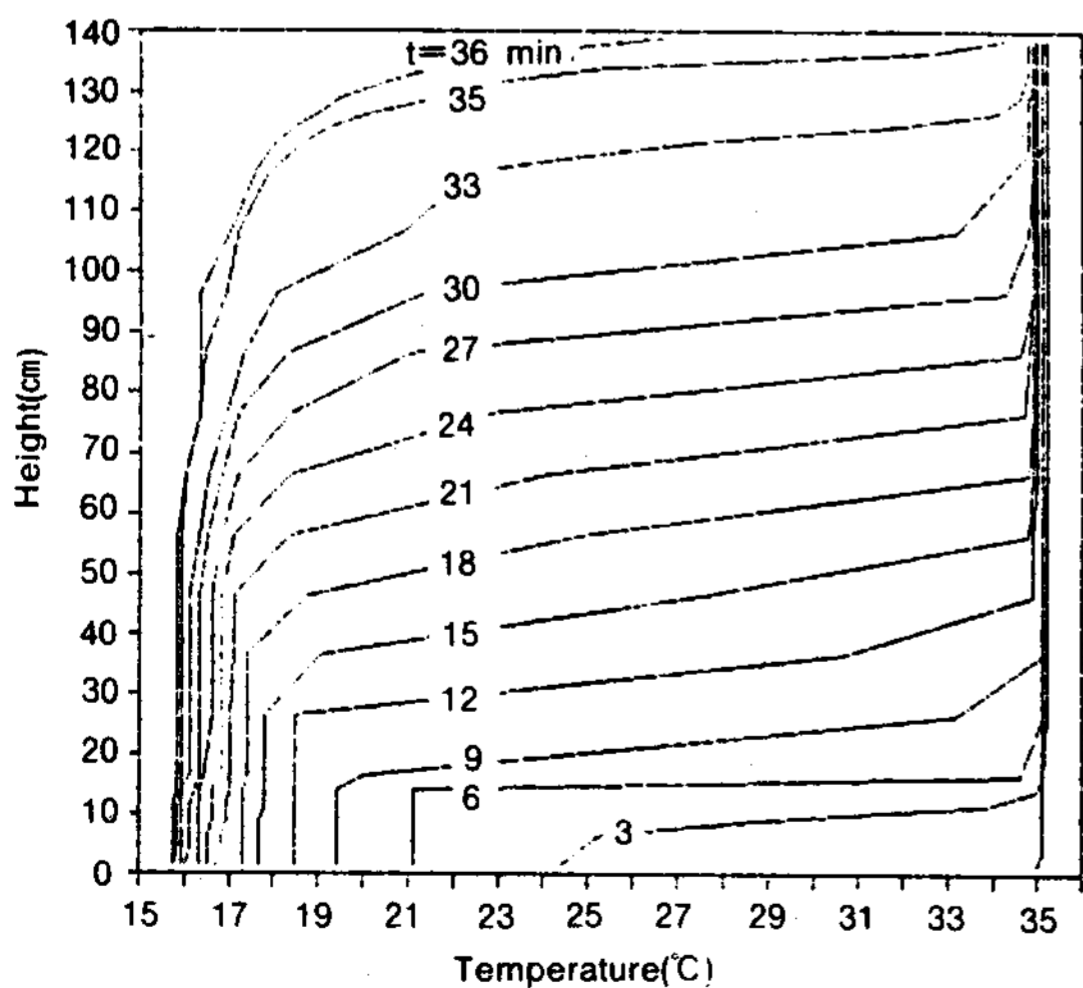


Fig.4 Temperature profile in test tank with distributor 1
($H/D=3$, $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$, $Q=12\text{LPM}$)

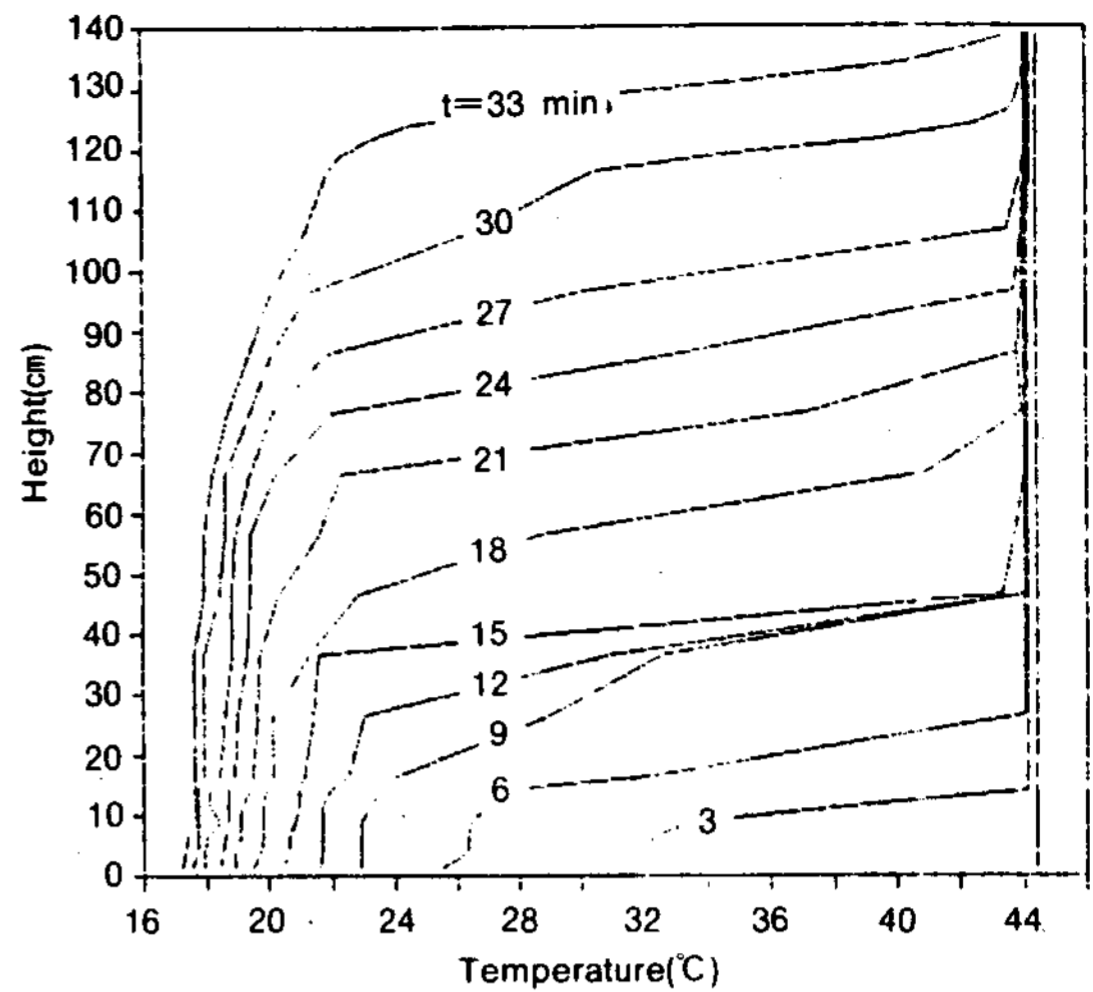


Fig.5 Temperature profile in test tank without distributor
($H/D=3$, $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$, $Q=8\text{LPM}$)

실험의 결과이다. Fig.5는 $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$, $Q=8\text{LPM}$, $H/D=3$ 일 때 Inlet-outlet Port를 사용한 실험의 결과이며, Fig.6은 $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$, $Q=12\text{LPM}$, $H/D=1$ 일 때 Inlet-outlet Port를 사용한 실험의 결과이다. 그래프에서보면 Distributor를 사용한 실험이 Inlet-outlet Port를 사용한 경우보다 매우 안정된 온도분포를 나타내고 있음을 알 수 있으며, ΔT 와 H/D 는 커지고 Q 는 작은 쪽이 보다 안정된 온도분포를 나타내고 있음을 알 수 있다.

2) 추출 효율에 의한 고찰

Fig.7, Fig.8은 $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$ 일 때 Distributor 2($D_m=\text{Const.}$), Distributor 3($d=\text{Const.}$)의 각 H/D 와 유량을 변화시킨 결과이며 Fig.9는 $Q=8\text{LPM}$ 일 때 Distributor 2($D_m=\text{Const.}$)의 H/D 와 ΔT 를 변화시킨 결과이다.

Fig.10은 $\Delta T=30^{\circ}\text{C}$, $Q=8\text{LPM}$, $H/D=3$ 와 $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$, $Q=12\text{LPM}$, $H/D=1$ 일 때 입구와 출구의 형상으로 각각의 Distributor와 Inlet-outlet Port를 사용한 실험의 결과를 나타내었다. 여기서 각 그래프를 보면 ΔT 와 H/D 가 커질수록, Q 가 작아질수록 추출효율이 증가함을 알 수 있으며 Distributor가 Inlet Port보다 매우 효과적인 입구와 출구의 형상임을 알 수 있다.

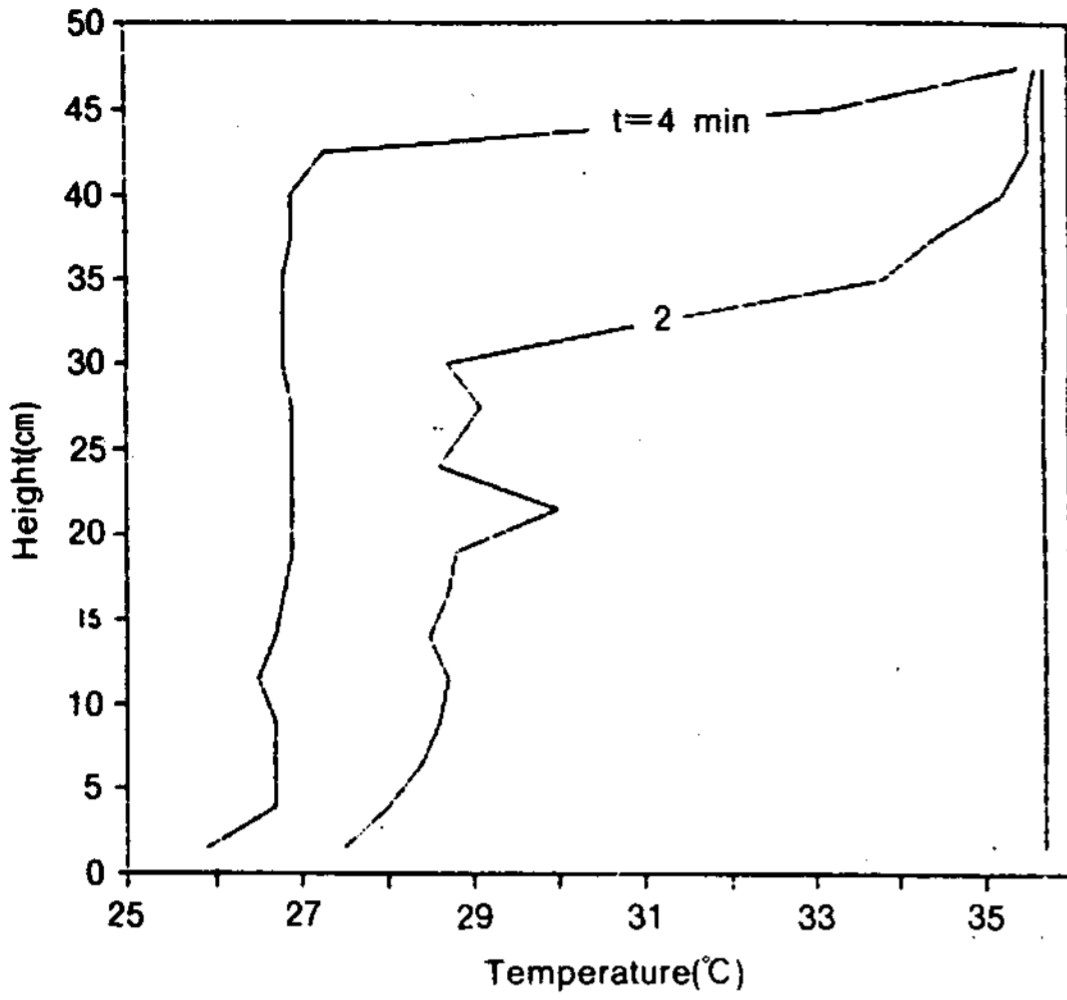


Fig.6 Temperature profile in test tank without distributor (H/D=3, $\Delta T=30^\circ\text{C}$, Q=12LPM)

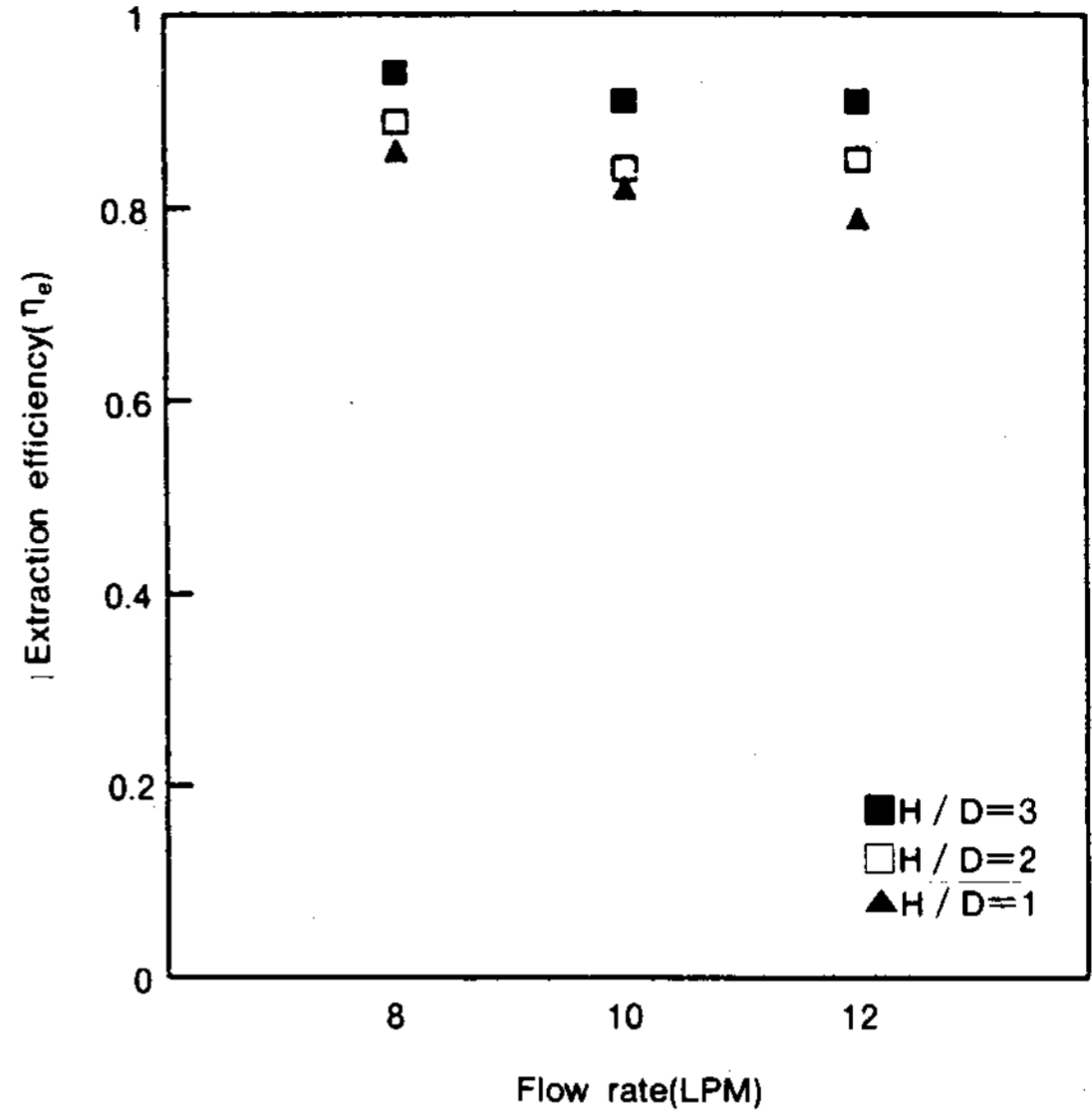


Fig.8 Effect of flow rate on extraction efficiency with distributor 3, $\Delta T=30^\circ\text{C}$

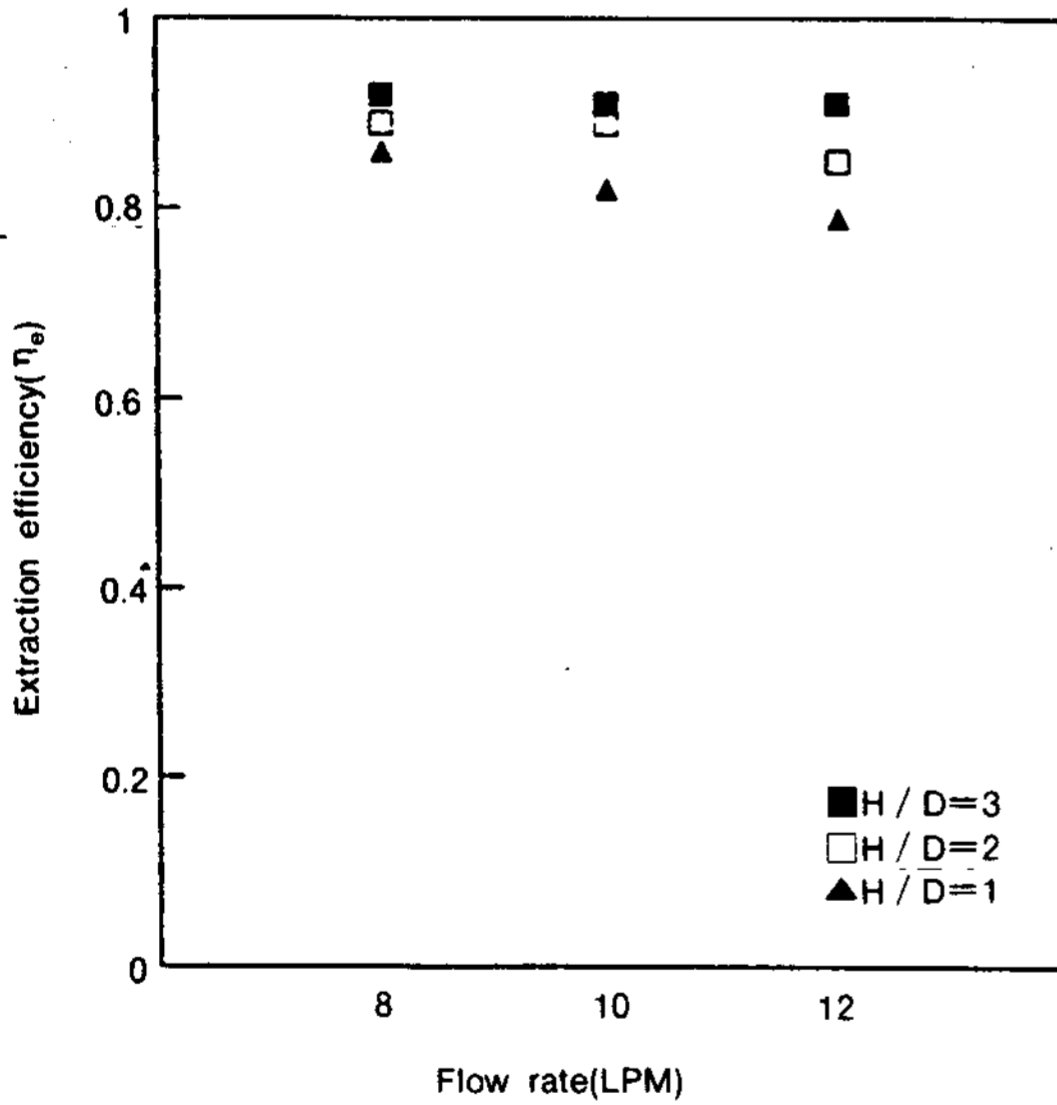


Fig.7 Effect of flow rate on extraction efficiency with distributor 2, $\Delta T=30^\circ\text{C}$

6. 결 론

1) 열추출 과정시에 유입 냉수와 저장 온수의 온도차와 입구와 출구의 높이차가 클수록, 그리고 유량이 감소할수록 보다 안정된 온도 경계층을 얻을 수 있다. 특히, 본 연구에서는 Inlet-outlet Port를 사용한 경우에 H/D=1, Q

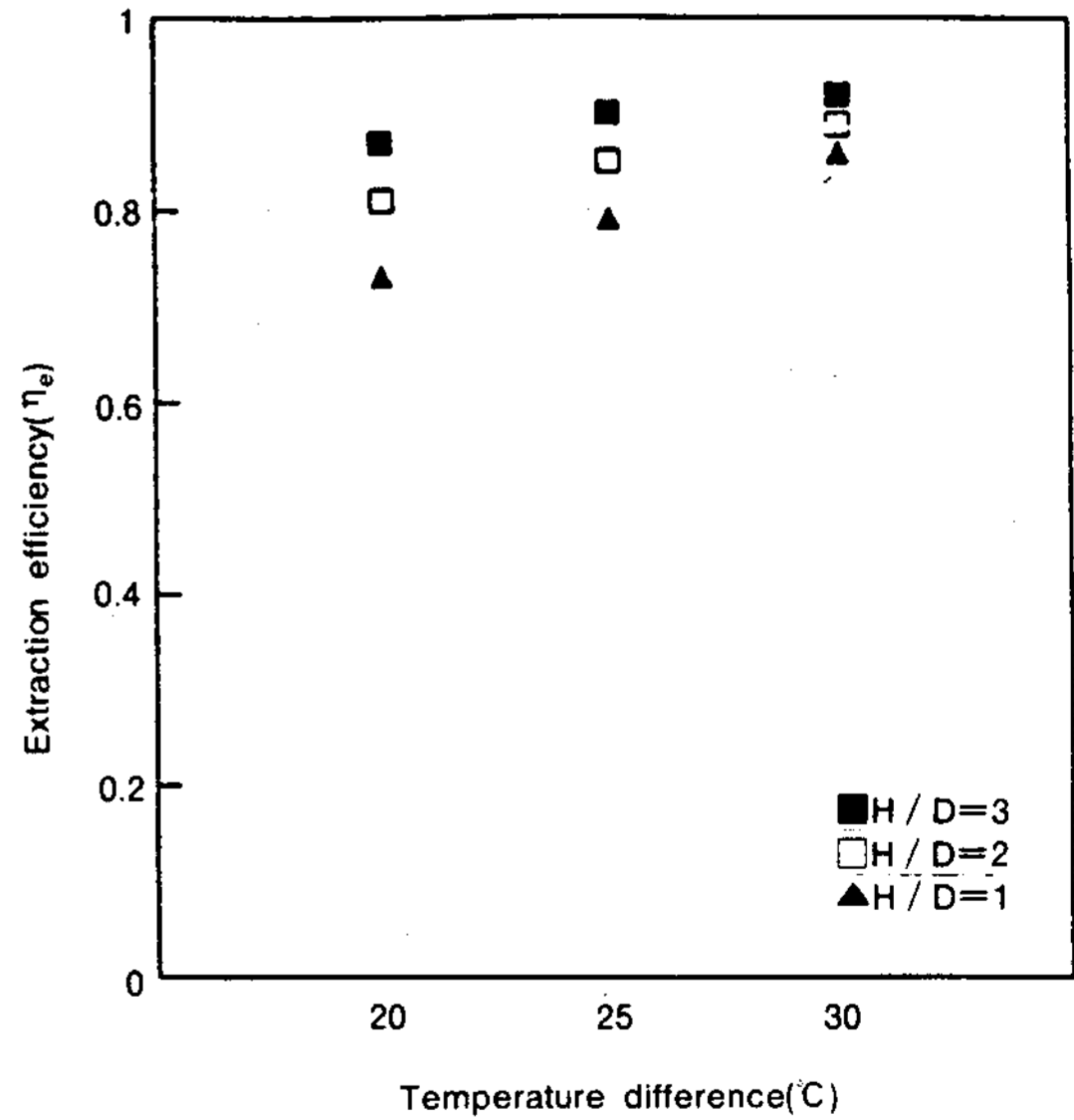


Fig.9 Effect of inlet-outlet temperature difference on extraction efficiency with distributor 2, Q=8LPM

=12LPM, $\Delta T=20^\circ\text{C}$ 일때 추출 효율이 40%로 가장 낮은 결과를 나타냈고, Distributor 1 (Main Pipe의 직경이 일정하며 각 출구의 직경은 일정한 형태)과 Distributor 3(Main Pipe의

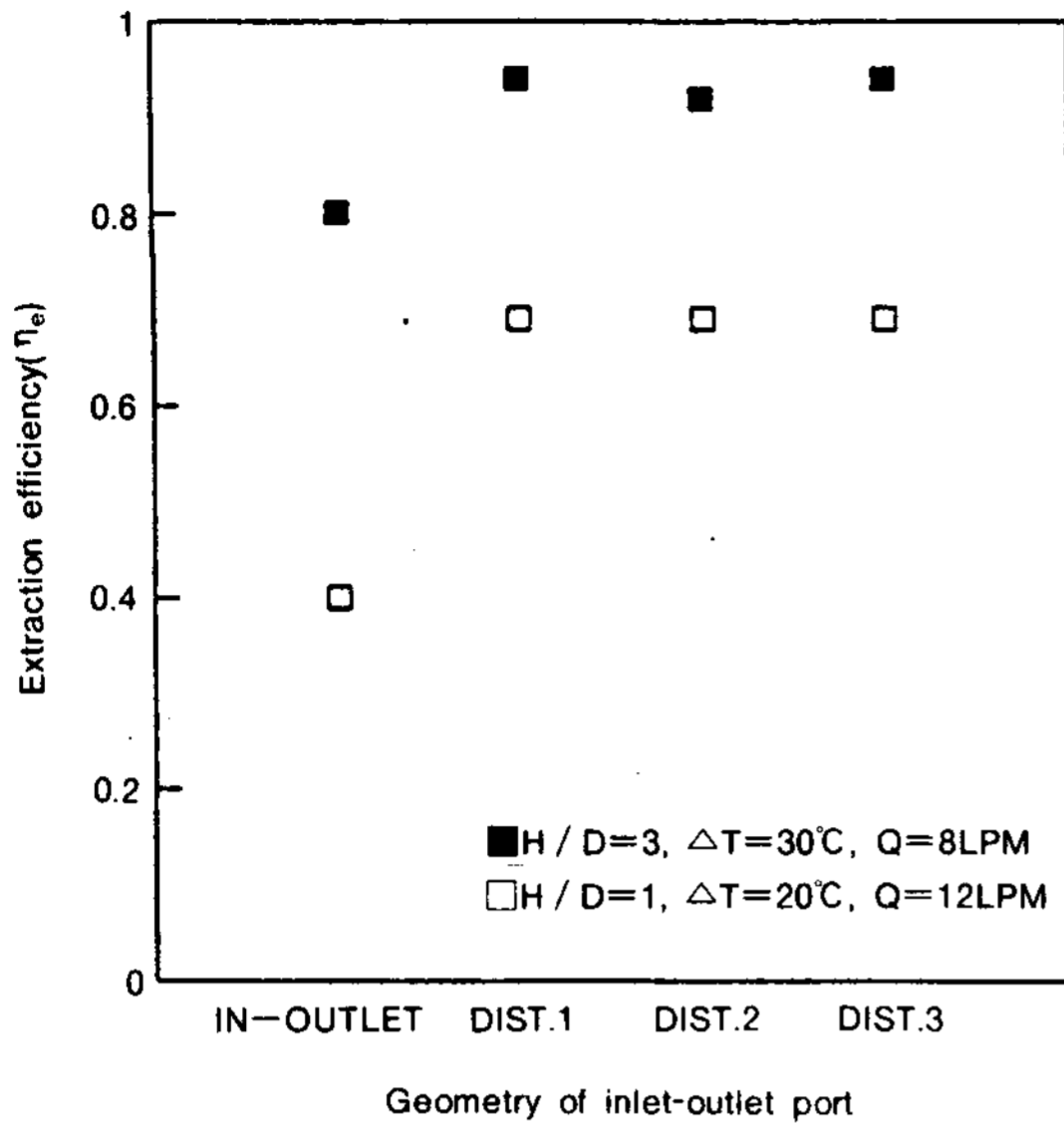


Fig.10 Effect of geometry of inlet-outlet on extraction efficiency(H/D=3, ΔT=30°C, Q=8LPM)

직경이 변화하며 각 출구의 직경은 일정한 형태)을 사용한 경우에 H/D=3, Q=12LPM, ΔT=30°C 일때 추출 효율이 95%로 가장좋은 추출 효율을 얻을 수 있었다.

2) 입구와 출구의 형상으로 사용한 Inlet-outlet Port와 3가지 형태의 Distributor를 비교해 보면 추출 효율은 거의 비슷하게 나타나지만, 유효시간 까지의 온도강하가 Distributor 1(Main Pipe의 직경이 일정하며 각 출구의 직경은 일정한 형태)은 처음의 유입 냉수와 저장 온수의 온도차의 약 10% 정도이고 Distributor 2(Main Pipe의 직경이 일정하며 각 출구의 직경은 변화하는 형태)와 Distributor 3(Main Pipe의 직경이 변화하며 각 출구의 직경은 일정한 형태)은 처음의 유입 냉수와 저장 온수의 온도차의 약 2% 정도로 Distributor 1 보다는 Distributor 2와 Distributor 3가 추출되는 온수의 온도가 안정되게 유지된다는 것을 알 수 있었다. 따라서 Distri-

butor 3이 가장 효과적인 입구와 출구의 형태라고 할 수 있으며 이와 같은 형태의 Distributor는 다음과 같이 제작할 수 있다.

$$\frac{D_m}{D_{m_L}} = \left(1 + \frac{f_L}{2D_{m_L}}\right) \sqrt{(\chi/L)} - \frac{f_L}{2D_{m_L}} (\chi/L)$$

참고문헌

1. A. Cabelli, "Storage Tanks—A Numerical Experiment," Solar Energy 19, pp.45-54, 1977
2. Z. Lavan and J. Thompson, "Experimental Study of Thermally Stratified Hot Water Storage Tanks," Solar Energy 19, pp.519-524, 1977
3. Chia-Shun Yih, "Stratified Flows," Academic press, 1980
4. K.L. Guo and S.T. Wu, "Numerical study of Flow and Temperature Stratifications in A Liquid Thermal Storage Tank," Trans. ASME, J. Solar Eng., Vol.107, pp.15-20, 1985
5. Y. Jaluria and B.T. O'Mara, "Thermal Field in A Water Body for Solar Energy Storage and Extraction Due to A Buoyant Two Dimensional Surface Water Jet," Solar Energy 43, pp.129-138, 1989
6. K.G.T. Hollands and M.F. Lightstone, "A Review of Low Flow, Stratified Tank Solar Water Heating Systems," Solar Energy 43, pp.97-105, 1989
7. J. Berlamont and A.V.D. Beken, "Solutions for Lateral Outflow in Perforated Conduits," Trans. ASCE, J. The Hydraulics, Vol.99, pp.1531-1549, 1973
8. Ee-Tong Pak, "Thermally Stratified Hot Water Storage," Solar Energy, Vol.10, No.3, 1990

ABSTRACT

The purpose of this paper is found consistent mathematical data of Inter-reflection of calculation as a mean to grasp characterises reflex of building materials that primarily uses in Building, and that comes in to the market. The measurement of directional characteristics of non-metallic Building Materials is based on separation measurement of Boundary Reflected and Layer Reflected component using a Reflectmeter with Polarized. And this study analyzed with not only experiment but simulation to furnish basic data for illumination design to daylighting.

A Thermal Performance Analysis on the Operation Modes of Radiant Floor Heating System Using SERI-RES

Wongee Chun · Myung-Seok Jeon · P.Chungmoo Auh

Korea Institute of Energy & Resources

ABSTRACT

The present paper deals with two types of heating methods widely used for the Radiant Floor heating systems in Korea. Of these, one method circulates hot water according to the predefined schedule ("intermittent heating") while the other runs the system with the aid of thermostats ("continuous heating"). The standard version of SERI-RES has been modified for the numerical simulation of the problem. Preliminary results show relatively large temperature swings in the case of intermittent heating with solar availability. On the other hand, the case of continuous heating would avoid such undesirable temperature fluctuations. These results are also verified by experimental evaluations.

Thermally Stratified Hot Water Extraction

Ee Tong Pak · Un Chul Jeong* · Sang Woo Sung*

Sung Kyun Kwan University

Graduate School, Sung Kyun Kwan University*

ABSTRACT

Thermal stratification enhancement for the higher extraction efficiency of hot water storage tank was experimentally studied with transparent fiber glass cylindrical tank(350 ℓ, D=516mm, H=1680mm). Height to diameter ratio(H/D=1,2,3), flow rate(Q=8,10,12LPM), inlet-outlet temperature differences($\Delta T=20,25,30^{\circ}\text{C}$), and geometry of inlet-outlet port were the parameters. In particular, three kind of distributors were used for geometry of inlet-outlet port. As a result, it was possible to get extraction efficiency of 95% by using the distributor having variable diameter but keeping a constant diameter of perforation. So it is recommendable to design the distributor so that the main pipe decrease in diameter toward the dead end.