

온수 추출과정의 열유동 특성에 관한 연구

장 영근*, 박 정 원*

국민대학교 자동차공학전문대학원, *유한대학 건축설비과

A Study on Heat Flow Characteristics during Hot Water Extraction Process

Young-Keun Jang*, Jung-Won Pak*

Department of Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

*Department of Architectural Equipment, Yuhan College, Seoul 422-749, Korea

(Received January 13, 2001; revision received April 20, 2001)

ABSTRACT: Heat flow characteristics during hot water extraction process was studied experimentally. Data were taken at various outlet port type for the fixed inlet port type, inlet-outlet temperature differences and mass flow rates. In this study, the temperature distribution in a storage tank and an outlet temperature were measured to predict a flow pattern in the storage tank, and a hot water extraction efficiency was analysed with respect to the variables dominating a extraction process. Experimental results show that the extraction efficiency is high in a low flow rate in case of using modified distributor I (MDI) as a outlet port type.

Key words: Modified distributor(수정 분배관), Thermocline region(온도구배영역), Outlet port(유출구), Inlet port(유입구), Hot water extraction efficiency(온수 추출효율)

기 호 설 명

A : 형상비, A_{dd}/A_{md}

A_{dd} : 분배관의 분배공 총단면적 [m^2]

A_{md} : 분배관의 주관 단면적 [m^2]

C_p : 정압비열 [$kJ/kg^\circ C$]

d : 분배관 분배공 직경 [m]

D : 축열조 직경 [m]

E_e : 실제 추출된 온수에너지 [kJ], 식(2)

E_s : 실제 축열된 온수에너지 [kJ], 식(1)

g : 중력가속도 [m/s^2]

Gr_d : Grashof 수, $g\beta\Delta Td^3/\nu^2$

H : 축열조 높이 [m]

h_x : 축열조 내의 임의 높이 [m]

\dot{m}_i : 유입 유동률 [kg/s]

\dot{m}_o : 유출 유동률 [kg/s]

Q : 유량, LPM

Re_d : Reynolds 수, vd/ν

t_i : 실제 온수 1회 축열시간 [s]

t_o : 실제 온수 1회 추출시간 [s]

$T_{c_{ms}}$: 추출된 냉수의 평균온도 [$^\circ C$]

$T_{h_{ms}}$: 추출된 온수의 평균온도 [$^\circ C$]

T_c : 유입되는 냉수의 온도 [$^\circ C$]

T_h : 저장된 온수의 온도 [$^\circ C$]

T_t : 축열조 내 임의 측정점의 온도 [$^\circ C$]

t_x : 실제 측정시간 [s]

v : 유출 속도 [m/s]

† Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4818; fax: +82-2-910-4718

E-mail address: ykjang@kmu.kookmin.ac.kr

그리스 문자

- β : 열팽창계수 [1/K]
 ΔT : 기준온도차 [°C], $T_h - T_c$
 η_e : 온수 추출효율, 식(4)
 θ : 무차원 온도, $(T_i - T_c)/(T_h - T_c)$
 ν : 동점성계수 [m^2/s]
 τ : 무차원 시간, t_x/t
 ζ : 무차원 높이, h_x/H

1. 서 론

최근 들어 에너지의 효율적인 이용을 위하여 축열시스템의 실용화가 가속화되고 있는 현실로 볼 때 에너지 저장문제와 저장된 에너지를 효과적으로 추출하여 냉·난방 부하에 적절히 사용하는 문제는 중요한 연구대상이 되고 있다.^(1,2)

축열조 내에 저장된 온수를 효과적으로 이용하기 위해서는 온수 추출과정 동안 추출되는 온수의 열유동 특성을 고찰하여 유입냉수와 저장온수의 혼합을 최소화시킬 수 있는 방법을 파악해야 한다. 온수 추출과정 동안 시간의 변화에 따른 축열조 내의 온도분포와 온도구배영역의 해석을 통하여 축열조 하부와 상부에서의 혼합 정도와 중간 경계면에서의 혼합 정도를 예측할 수 있다.^(3,4)

온수 추출에 대한 연구는 1977년 Lavan and Thompson⁽⁵⁾이 원통형 수직 저장조를 가지고 처음 시도하였다. 연구결과 축열조 직경에 대한 높이의 비(H/D)가 3인 경우에 저장수와 유입수와의 온도차가 증가하고, 유입수의 유동률이 감소할수록 열성층이 향상되어 온수 추출효율을 증가시키는 결과를 밝혔다. 또한, 각종 실험변수들을 포함하는 무차원 수인 Re 수와 Gr 수에 대한 추출효율과의 상관관계식을 도출하였다. 1979년 Loehrke et al.⁽⁶⁾은 축열조 유입구 형상을 단순원형관이 아닌 분배공 형태로 만들어서 유입되는 유입수의 관성력을 감소시켜 열성층을 향상시킬 수 있음을 실험을 통하여 밝혔다. 1989년 Pak et al.⁽⁷⁾은 축열조 상부로 유입되는 유동의 교란에 의하여 발생하는 혼합을 억제하기 위하여 분배관(perforated distributor)을 제작하여 실험한 결과 단순원형관을 사용한 경우보다 축열효율이 10~

30% 향상됨을 밝혔다. 또한, 1995년 Yoo and Pak^(8,9)은 성층 축열조에 대한 1차원적인 이론해석을 통하여 실험결과⁽⁷⁾와 잘 일치함을 밝혔다.

본 연구에서는 선행 연구결과에 따라 온수 추출 시에 유입냉수와 저장온수와의 혼합을 최소화시켜 성층을 안정되게 유지하고 온수 추출효율을 높이기 위한 적절한 유출조건을 제시하기 위하여 온수 추출과정을 지배하는 동적, 기하학적 인자들에 대한 축열조 내의 온수와 냉수의 열유동 특성 및 추출효율에 대하여 고찰하였다.

이러한 연구목적을 달성하기 위하여 태양열 집열시스템의 수축열조로 사용되고 있는 저장조를 직경에 대한 높이의 비(H/D)가 3인 원형 수직 탱크로 만들고 저장조의 설치공간을 최소화하기 위하여 집열된 고온수와 부하측에 이용된 저온수를 동일 탱크에 저장할 수 있도록 하였다. 또한, 유입구는 선행 연구결과^(7,10)에 따라 형상비(A)가 2인 분배관(perforated distributor)으로 고정시켰다. 유입 유동률은 4, 6, 8 LPM으로 변화시켰고, 저장온수와 유입냉수와의 기준온도차는 10, 20, 30°C의 3단계로 변화시켜 실험하였다. 그리고 축열조 상부 유출구를 형상비(A)가 2.5로 동일하게 하고 분배관의 분배공 배열을 달리한 4개의 수정 분배관(modified distributor)과 단순원형관을 사용하여 유출구 형상변화에 대한 축열조 내의 열유동 특성 및 추출효율에 대하여 파악하였다.

2. 온수 추출효율

온수 추출효율에 관한 연구는 Lavan and Thompson⁽³⁾에 의하여 연구되었으며 저장된 온수 중에서 유효하게 사용된 온수의 체적비로 표현한 효율식을 정립하였다. 이들의 온수 추출효율식은 열성층 정도가 안정된 장기축열인 경우나 온수의 열유동 형태가 1차원 유동에 근접할 때에는 온수 추출에 있어서 적절한 해석방법이지만 축열조 내의 온도구배영역의 기울기가 완만하게 변화하는 경우에 있어서는 효과적인 수 없다.

따라서 본 연구에서는 냉수 저장탱크에 온수를 저장한 후 다시 냉수를 유입시키면서 온수를 추출하는 Fig. 1과 같은 사이클을 도입하였다. 온수를 저장하는 동안의 온수와 냉수의 혼합현상을 고려한 실제 축열에너지를 측정하여 실제 축열에너지에 대한 실제 추출에너지의 비로 온수 추출

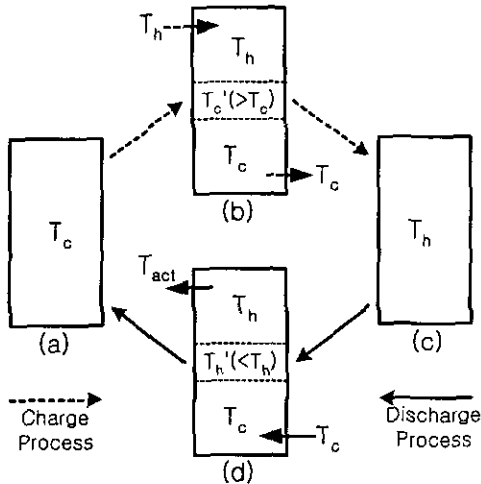


Fig. 1 The model of extraction process.

효율을 해석하였다.

먼저, 냉수 저장탱크에 온수를 유입시키는 축열과정(a→b→c)에서 실제 축열된 온수에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_s = \int_0^{t_i} \dot{m}_i C_p (T_h - T_{act}) dt \quad (1)$$

$$= \dot{m}_i C_p (T_h - T_{c_{avg}}) t_i$$

그리고 저장된 온수 탱크에 냉수를 유입시키면서 온수를 유출시키는 추출과정(c→d→a)의 실제 추출된 온수에너지는 다음과 같다.

$$E_e = \int_0^{t_o} \dot{m}_o C_p (T_{act} - T_c) dt \quad (2)$$

$$= \dot{m}_o C_p (T_{h_{avg}} - T_c) t_o$$

여기서, $T_{c_{avg}}$, $T_{h_{avg}}$ 는 실제 온수 축열 및 추출과정 동안 냉수와 온수의 혼합에 의해 변화된 온도 값들의 평균값이며 유출구에서 측정되는 값이다.

결국 식(1)과 식(2)를 이용하여 실제 축열에너지에 대한 실제 추출에너지의 비로 무차원식을 만들면 다음과 같다.

$$\frac{E_e}{E_s} = \frac{\dot{m}_o C_p (T_{h_{avg}} - T_c) t_o}{\dot{m}_i C_p (T_h - T_{c_{avg}}) t_i} \quad (3)$$

식(3)에서 온수의 유입 유동률(\dot{m}_i)과 추출 유동률(\dot{m}_o)은 실험에서 각각 같은 조건으로 주어졌으며 정압비열(C_p)은 같은 값을 갖는다. 따라서 식(3)은 다음과 같이 나타낼 수 있으며 이를 온수 추출효율(η_e)이라고 정의한다.

$$\eta_e = \frac{(T_{h_{avg}} - T_c) t_o}{(T_h - T_{c_{avg}}) t_i} \quad (4)$$

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

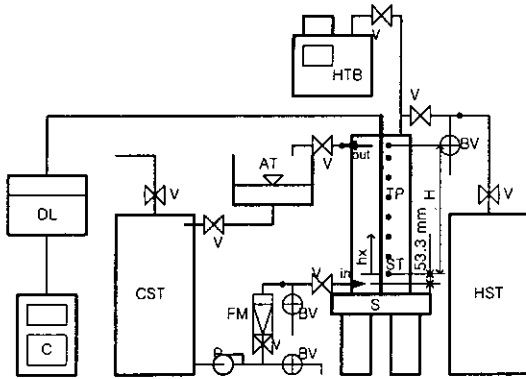
실험장치는 축열조(200 L), 온수 공급탱크(Rheem Manufacturing Cop., Model 81V120D), 고온 항온수조(Model C-BGS), 냉수 공급탱크(350 L), 보조탱크, 유량계, 유량조절밸브, PVC 골든 파이프, 순환펌프 등으로 구성되어 있다.

축열조($\phi 440 \text{ mm} \times H1370 \text{ mm}$)는 온수 추출과정 동안 내압에 충분히 견딜 수 있도록 두께가 15 mm인 안전 강화 아크릴로 제작하였다. 온수 추출과정 동안 축열조 내의 열유동 특성을 정확히 해석하기 위해서는 축열조 외부로의 열손실을 방지해야 하며 이를 위해서 두께가 20 mm인 유리섬유로 축열조 둘레를 감싸고, 그 위에 두께가 10 mm인 토이론과 비닐 테이프를 사용하여 충분히 단열시켰다.

축열조 하부에 암나사를 둔 직경 30 mm의 냉수 유입구를 설치하였으며 축열조 상부에도 역시 암나사를 둔 직경 30 mm의 온수 유출구를 설치하여 유출구 형상을 변화시킬 수 있도록 하였다. 이때 온수 유출구의 높이는 유입구로부터 축열조 직경에 대한 높이의 비가 3인 위치이다.

온수 공급탱크의 용량은 450 L, 전압은 220 V, 전력은 3.75 kW, 최대 사용 온수온도는 75°C이며 상·하부에 일정한 온도의 온수를 공급할 수 있도록 자동온도조절기가 부착되어 있다. 축열조의 용량이 200 L이기 때문에 실험조건에 맞는 초기 저장수인 온수를 공급하기에는 충분한 용량이다.

유입구 및 유출구 형상으로서 유입구는 분배관만을 사용하였고 유출구는 단순원형관과 4개의 수정 분배관 형태를 교체 사용하였다.



AT: Auxiliary tank BV: Bypass valve
 C: Computer CST: Cold water supply tank
 DL: Data logger FM: Flow meter
 HST: Hot water supply tank
 HTB: High temperature bath
 P: Pump S: Supporter ST: Storage tank
 TP: Thermocouple probe V: Valve

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

이외에 기록 및 측정장치로는 축열조 내의 온도측정을 위하여 Yokogawa사 Model DA 2500E를 사용하였다. 축열조 상부 중심부로부터 수직 하류 방향으로 유입구로부터 53.3 mm 높이 지점까지 53.3 mm의 등간격으로 열전대를 삽입하여 축열조의 수직 방향에 대한 온도분포를 측정하였다. 열전대는 직경이 0.3 mm인 T형을 스텐인레스 봉에 고정하여 사용하였으며, 사용 온도범위는 -270°C 에서 400°C 까지이다.

Fig. 2는 본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도이고, Fig. 3은 유입구와 유출구 형상이다.

3.2 실험방법

- (1) 유입냉수를 냉수 공급탱크에 저장하고 초기 실험조건 온도에 맞도록 유지시킨다.
- (2) 온수 공급탱크의 온도가 실험조건 온도에 도달하면 냉수가 저장된 축열조 내로 유입시키면서 냉수를 유출시킨다.
- (3) 유출되는 냉수온도가 실험조건 축열조 온수온도에 도달할 때까지 온수를 유입시키면서 유출되는 냉수온도와 실험시간을 기록한다.
- (4) 바이패스 밸브를 이용하여 배관 내의 유동을 정상화시키고 냉수 유입 유동률을 조절한다.
- (5) 냉수의 유입 유동률이 실험조건에 일치되

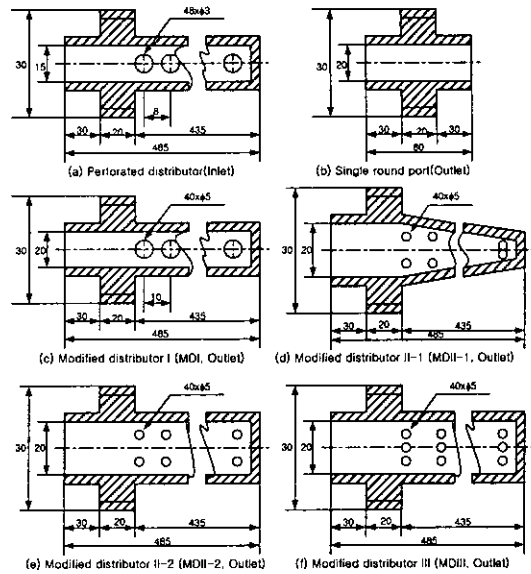


Fig. 3 Inlet/Outlet port types.

면 바이패스 밸브를 잠그고 순간적으로 축열조 유입구에 설치된 볼 밸브를 개구시킴과 동시에 유출구에 설치된 볼 밸브를 열어 온수를 유출시킨다.

(6) 냉수가 축열조 하부로 공급되는 순간부터 열전대를 통하여 온도 측정장치인 Yokogawa사 Model DA2500E를 작동시켜 실험 종료시간인 온수의 일회 추출시간 동안에 30초 간격으로 온도를 연속적으로 검출한다.

(7) 각종 실험조건을 변화시키면서 위와 같은 방법으로 온수 추출실험을 반복 수행한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 축열조 내의 온도분포

Fig. 4는 온수의 추출 유동률이 4 LPM, 유입냉수와 저장온수와의 기준온도차가 10°C 일 때 각각의 유출구 형상에 대한 축열조 내의 무차원 온도분포를 나타내고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 분배공을 여러 줄로 뚫은 것보다 한 줄로 뚫은 것이 온도구배영역 하부의 온도가 유입냉수에 가깝고 또한, 온도구배영역이 축열조 내에 더 낮게 유지한다. 그리고 단순원형관을 사용하는 경우가 분배공을 2줄, 3줄로 뚫은 수정 분배관 II-1, II-2, III보다도 온도

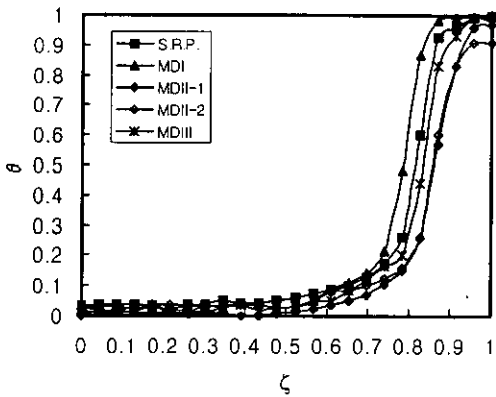


Fig. 4 Dimensionless temperature profiles in a storage tank for $Q=4$ LPM, $\Delta T=10^\circ\text{C}$ and $\tau=0.7$.

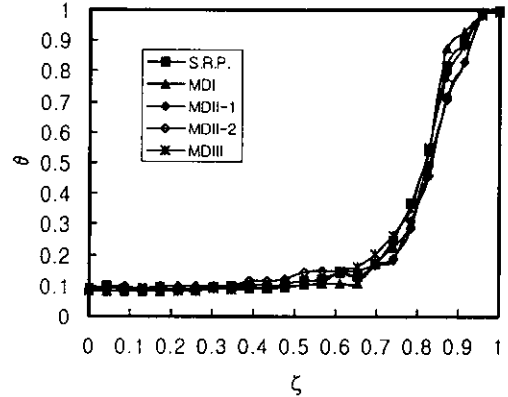


Fig. 6 Dimensionless temperature profiles in a storage tank for $Q=8$ LPM, $\Delta T=10^\circ\text{C}$ and $\tau=0.7$.

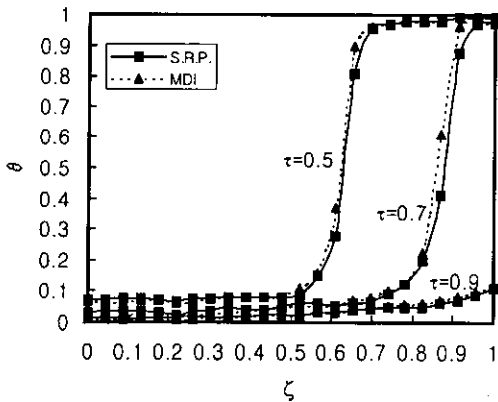


Fig. 5 Dimensionless temperature profiles in a storage tank for $Q=6$ LPM, $\Delta T=20^\circ\text{C}$.

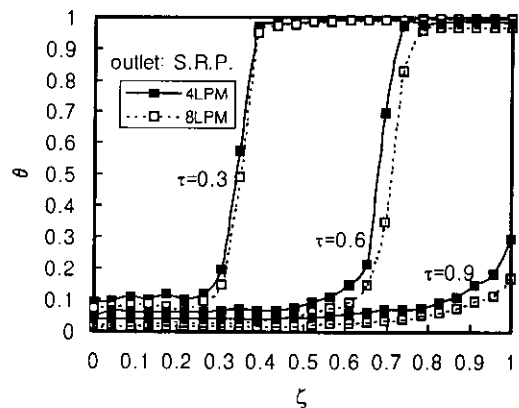


Fig. 7 Dimensionless temperature profiles in a storage tank for $\Delta T=10^\circ\text{C}$.

구배영역이 축열조 하부에 낮게 유지한다. 이는 수정 분배관 I과 단순원형관이 추출되는 온수의 유동을 원활하게 하여 유입 냉수와와의 혼합을 최소화시켰기 때문이다.

Fig. 5는 동일조건하에서 유출구로 사용한 단순원형관과 수정 분배관 I의 온도분포를 온수 추출 후반부에 대해서 비교한 그래프이다. 그림에서 볼 수 있듯이 수정 분배관 I이 단순원형관보다 온도구배영역이 축열조 하부에 더 낮게 유지한다. 따라서 동일 시간대에 축열조 내에 저장된 온수의 양이 많기 때문에 온수 이용률이 높다.

Fig. 6은 무차원 온수 추출시간 τ 가 0.7이고 유입냉수와 저장온수와의 기준온도차가 10°C 인 경

우 온수를 8 LPM으로 추출시켰을 때 축열조 내의 무차원 온도분포를 보여주고 있다. Fig. 4와 비교하여 볼 때 온수의 추출 유동률이 증가할수록 온도구배영역의 위치가 축열조 상부로 접근하고 있으며 또한, 온도구배영역의 경향이 불안정하다. 이는 축열조 하부로 냉수가 유입될 때 유속이 크기 때문에 발생하는 혼합의 증가로 인해 초기에 저장된 온수층 영역이 감소되고 유입냉수의 온도가 축열조 하부에서 증가된 형태로 나타났기 때문이다.

Fig. 7은 유출구 형상으로 단순원형관을 사용하였으며 유입냉수와 저장온수와의 기준온도차가 10°C 인 경우 온수를 각각 4 LPM, 8 LPM으로 추

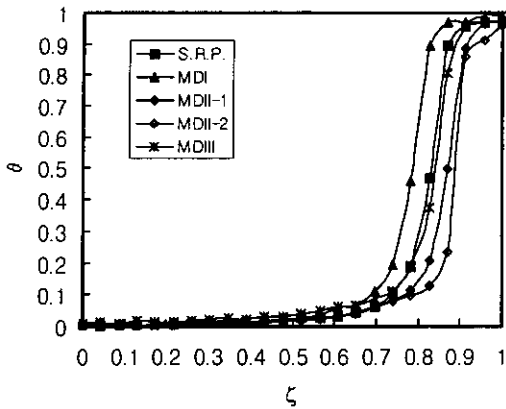


Fig. 8 Dimensionless temperature profiles in a storage tank for $Q=4$ LPM, $\Delta T=30^\circ\text{C}$ and $\tau=0.7$.

출시켰을 때 축열조 내의 무차원 온도분포를 온수 추출시간에 따라 비교하고 있다.

온수 추출 유동률이 4 LPM으로 관성력이 작은 경우에 동일 무차원 온수 추출시간에서 온도구배 영역의 위치가 축열조 하부에 더 낮게 형성된다. 또한, 이러한 경향은 유입구의 영향을 더 많이 받는 전반부보다는 유출구의 영향을 많이 받는 온수 추출 후반부로 갈수록 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 유입구로 분배관을 사용하고 유출구로 단순원형관을 사용하였기 때문에 관성력을 효과적으로 억제시켜 주는 분배관을 사용한 유입구의 영향을 받는 전반부의 경향 차이가 미소함을 알 수 있다.

Fig. 8은 온수의 추출 유동률이 4 LPM, 유입냉수와 저장온수의 온도차가 30°C 일 때 온수 추출 후반부의 축열조 내의 무차원 온도분포를 보여주고 있다. Fig. 4와 비교하여 볼 때 기준온도차의 변화에 따른 무차원 온도분포의 변화가 작음을 볼 수 있다. 이는 축열조 내의 온도분포가 유입냉수와 저장온수와의 기준온도차에 의한 영향을 작게 받음을 나타낸다. 이러한 경향은 Fig. 9에서도 알 수 있다. 기준온도차를 10°C , 30°C 로 변화시켰을 때 축열조 내의 무차원 온도분포를 동일 무차원시간에 대하여 비교한 그래프이다. 기준온도차가 10°C 일 때나 30°C 일 때나 무차원 온도분포의 변화가 작다. 또한, 온도구배영역 하부의 냉수층의 온도분포만이 차이가 있을 뿐 온도구배와 온도구배영역의 위치는 비슷한 경향을 나타내고

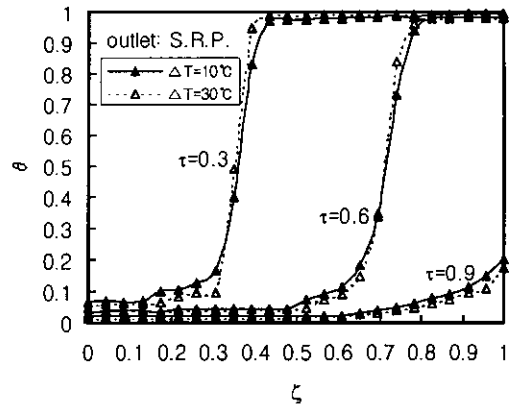


Fig. 9 Dimensionless temperature profiles in a storage tank for $Q=4$ LPM.

있다. 이는 온수 추출시간이 짧기 때문에 온수와 냉수의 중간 경계면에서의 열확산에 의한 혼합현상을 감소시켰기 때문이다.

따라서 Fig. 8,9에서 알 수 있듯이 단기간에 온수를 추출할 때는 유입냉수와 저장온수와의 기준온도차에 의한 영향보다는 온수 추출 유동률에 의한 영향이 지배적이다.

4.2 온수 추출효율

Fig. 10은 유입냉수와 저장온수와의 기준온도차가 30°C 일 때 온수 추출 유동률 변화에 따른 온수 추출효율값을 각각의 유출구 형상에 대해서 비교하고 있다.

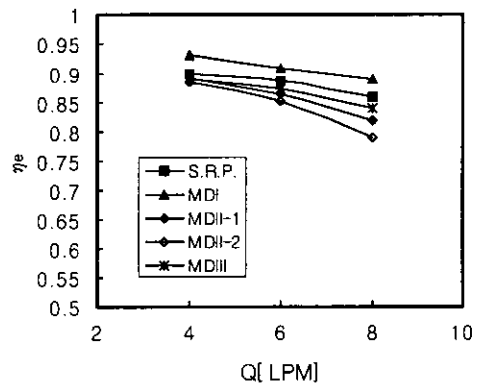


Fig. 10 Effects of the outlet geometries on the hot water extraction efficiency for $\Delta T=30^\circ\text{C}$.

유출구 형상으로 분배공 배열이 한 줄인 수정 분배관 I을 사용한 경우에 1회 온수 추출과정 전체에 걸쳐 안정된 열성층을 형성 유지함으로써 초기의 저장된 온수를 효과적으로 추출할 수 있기 때문에 온수 추출효율이 가장 높다. 온수 추출효율의 크기는 온수의 추출 유동률에 상관없이 단순원형관이 분배공의 배열을 2줄, 3줄로 뚫어서 제작한 유출구 형상보다 더 높은 효율값을 갖는다. 또한, 온수 추출효율값은 온수 추출유동률이 증가할수록 급격하게 감소한다.

그리고 추출되는 온수의 유동을 원활하게 시키는 수정 분배관 I이 수정 분배관 II-2보다 높은 온수 추출효율값을 나타내고 있다. 이는 수정 분배관 II-2가 수정 분배관 I보다 유출구의 형상비는 동일하지만 추출되는 온수와 접촉 표면적의 증가로 인하여 전단응력이 커지기 때문이다.

Fig. 11은 온수의 추출 유동률이 6 LPM일 때 유입냉수와 저장온수의 기준온도차의 변화에 따른 온수 추출효율값을 보여주고 있다.

유입냉수와 저장온수와의 기준온도차가 증가할수록 유입냉수와 저장온수 사이의 경계면에서 혼합의 크기가 감소함으로써 온수 추출효율값이 증가한다. 이는 기준온도차가 클수록 유입수의 관성력에 비하여 부력이 상대적으로 크게 발생하여 열성층을 촉진시키기 때문이다. 또한, 분배공 배열을 한 줄로 뚫은 수정 분배관 I을 사용한 경우에 온수 추출효율값이 완만하게 증가함으로써 유입냉수와 저장온수와의 기준온도차에 의한 영향을 적게 받음을 알 수 있다.

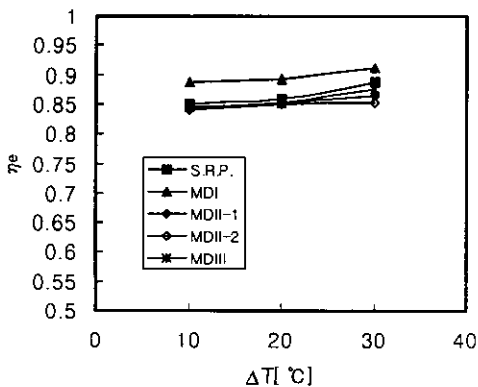


Fig. 11 Effects of the outlet geometries on the hot water extraction efficiency for $Q = 6$ LPM.

4.3 추출효율 상관 관계식

축열조의 효과적 이용을 위해서는 온수 추출효율에 영향을 미치는 각종 인자와 온수 추출효율과의 관계를 정립할 필요가 있다. 따라서 유출구로 단순원형관과 수정 분배관 I을 사용하는 경우에 온수 추출효율을 지배하는 각종 인자들을 포함하는 Reynolds 수와 Grashof 수(유출구 분배공 직경 기준)를 이용하여 온수 추출효율에 대한 관계식을 최소자승법을 이용하여 구하였다. 또한, 축열조 직경에 대한 높이의 비(H/D)가 3인 경우 온수 추출효율 상관관계식을 구한 Lavan과 Thompson의 선행 연구결과⁽³⁾와 비교 고찰하였다.

각종 실험변수들을 포함한 Re_d 수와 Gr_d 수에 대한 온수 추출효율값들이 Fig. 12에 나타나 있고 관계식은 다음과 같다.

$$\eta_e = 1 - (\exp - 0.0556 Re_d^{-0.57} Gr_d^{0.33})_{S.R.P.} \quad (5)$$

$$\eta_e = 1 - (\exp - 0.1026 Re_d^{-0.52} Gr_d^{0.41})_{MDI} \quad (6)$$

여기서, $H/D=3$, $150 < Re_d < 2700$, $3.2 \times 10^3 < Gr_d < 2.7 \times 10^5$ 이다.

그림에서 볼 수 있듯이 실험 측정값들이 비교적 고르게 분포하고 Lavan과 Thompson의 연구결과와 정성적인 경향이 잘 일치한다. 또한, 전반적으로 유입구와 유출구 모두 단순원형관을 사용한 Lavan과 Thompson의 연구결과보다 유입구는

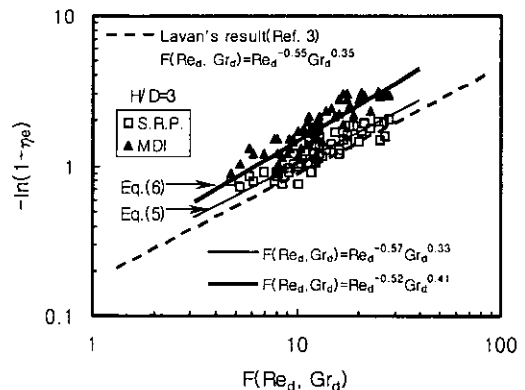


Fig. 12 Correlation of extraction efficiency data as compared with other experimental result.

분배관을 사용하고 유출구는 단순원형관과 수정 분배관을 사용한 본 실험결과의 추출효율값이 약간 높다. 유출구로 분배관이 한 줄인 수정 분배관 I를 사용한 경우의 추출효율값이 단순원형관을 사용한 경우보다 3.4~7.8% 정도 높다.

5. 결 론

온수 추출효율을 향상시키기 위하여 유출구 형상, 유출 유동률 및 기준온도차를 변화시켜 실험한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 같은 동적 조건하에서 온수의 유출구 형상으로 사용한 동일 형상비를 갖는 수정 분배관들 중 분배공 배열을 한 줄로 뚫은 수정 분배관 I이 추출되는 온수의 유동을 원활하게 하여 온도구배 영역의 위치가 축열조 하부에 더 낮게 위치함으로써 온수 이용률이 높다.

(2) 온수 추출 유동률이 감소할수록 동일 시간에 형성된 온도구배영역이 축열조 하부에 더 낮게 위치한다. 그리고 유입냉수와 저장온수의 기준온도차에 따른 온도구배영역의 변화는 미소하다.

(3) 동일 조건하에서 온수의 추출 유동률이 감소하고 유입냉수와 저장온수의 기준온도차가 증가할수록 온수 추출효율은 증가한다.

(4) 유출구 형태 중 저장온수와 수정 분배관과의 접촉 표면적에 의한 전단응력이 작은 수정 분배관 I의 온수 추출효율이 상대적으로 다른 유출구 형태보다 3.3~27.3% 높다.

참고문헌

- Garg, H. P., Mullic, S. C. and Bharagava, A. K., 1985, Solar thermal energy storage, Reidel Publishing Company, pp. 82-128.
- Kakac, S., Paykoc, E. and Yener, Y., 1989, Energy storage system, Kluwer Academy Publishers, pp. 129-161.
- Jaluria, Y. and Gupta, S. K., 1981, Decay of thermal stratification in a water body for solar energy storage, Solar Energy, Vol. 28, No. 2, pp. 137-143.
- Cole, R. L. and Bellinger, F. O., 1982, Thermally stratified tanks, ASHRAE Trans., Vol. 88, No. 1, pp. 1005-1015.
- Lavan, Z. and Thompson, J., 1977, Experimental study of thermally stratified hot water storage tanks, Solar Energy, Vol. 19, pp. 519-524.
- Loehrke, R. I., Holzer, R. I., Gari, J. C. and Sharp, M. K., 1979, Stratification enhancement in liquid thermal storage tanks, J. of Energy, Vol. 3, No. 3, pp. 129-130.
- Pak, E. T., Hwang, S. I. and Choi, Y. I., 1989, Experimental study on the thermal storage efficiency through variable porous manifolds in a test storage tank, Solar Energy, Vol. 9, No. 3, pp. 37-43.
- Yoo, H. and Pak, E. T., 1995, Analytical solutions to a one-dimensional model for stratified thermal storage tanks, SAREK, Vol. 7, No. 1, pp. 42-51.
- Yoo, H. and Pak, E. T., 1995, Theoretical analysis of the charging process with perfectly mixed region in stratified thermal storage tanks, SAREK, Vol. 7, No. 2, pp. 184-195.
- Yoon, Y. H. and Lee, S. H., 1998, Experimental study on flow distribution in manifolds by a tapered header, SAREK, Vol. 10, No. 1, pp. 1-10.