[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 17, No. 1, 1997

Insulated Raft가 장기온수저장에 미치는 영향

박이동* · 조운**

* 성균관대학교 기계공학과
** 용인공업전문대학 기계과

An Effect of Insulated Raft on Longterm Hot Water Storage

Ee-Tong Pak* · Woon Cho**

* *Sung Kyun Kwan University*
** *Yong-In Technical College*

Abstract

Thermal energy storage system used a storage tank is a reasonable method to solve energy problem. In thermal energy storage system, energy collected from many types of heat source is stored in a storage tank and then supply to load at the time is in demand.

In this study, flow characteristics and storage efficiency were analysed by using a insulated raft in longterm hot water storage system. From the experiment it is found that insulated raft has a important role in longterm hot water storage system and storage efficiency can be obtained to 96% using inletport type and insulated raft together.

1. 서 론

에너지의 근원인 태양열 에너지는 불확실성, 간헐성으로 인하여 에너지의 효율적인 집열 뿐만아니라 부하요구시에 적절하게 에너지를 공급하기 위해서는 저장 문제가 더욱 중요하며 새로운 에너지원의 개발과 더불어 에너지 공학자들의 관심을 불러 일으키는 분야로서 에너지의 효과적인 저장에 관한 연구가 현재까지 진행되어 왔다[1)-5)].

비 수요기의 열을 장기 저장하였다가 수요기에 효과적으로 이용하는 기술개발 요구는 현재 계속 증대되고 있으며, 또한 최근 10년간 저장기술에 대한 괄목할만한 기술 진전에 힘입어 보다 경제적인 장치 설계가 가능하여 실용화 단계로 이미 진입을 하였다.

현열 장기저장 방법에는 큰 지하탱크에 더운 물을 저장하는 방식, 지하 모래와 같은 토양 이용 방식, 천연 동굴이나 폐광 속에 돌과 자갈을 쌓아 이들의 현열 이용 방식, 천연적으로 물과 자갈을 함유한 토양을 이용하는 방식(Natural Aquifer Storage), 인공적으로 물과 자갈을 함유한 토양을 이용하는 방식(Artifical Aquifer Storage)등이 있다. 이들중 비교적 경제성이 큰 방식은 천연적으로 또는 인공적으로 물과 자갈을 함유한 토양을 이용하는 인공 대수층(Aquifer) 방법이며, 대용량의 장기 현열 에너지 저장이 가능하다. 비교적 경제성이 큰 대수층 저장 방법 뿐만 아니라 토양이나 지하암반을 이용한 저장조는 외곽에서의 단열이나 물질전달 차단이 불가능하기때문에 지하토양의 구조, 열역학적 성질, 열전달 및 물질전달 문제가 복잡하게 관여되므로 연구는 지열 이용에 관한 Hydrothermal Convective System 연구와 일치하게되므로 지열 이용에 관한 열. 유체공학적 연구 또한 중요하다고 볼 수 있다.

현재까지 이용 가능하다고 평가된 장기온수저장 방법으로는 성층 저장 기술을 이용한 Rock Cavern, Water Pit, Steel Tank 방법과 성층 저장 기술을 이용하지 않는 Confined Aquifer, Vertical Earth Coil, Horizontal Earth Coil 방법이 있으며, 이들 방법들은 기본 형태에서 많은 변화가 있을 수 있다.

본 연구는 Steel Tank 방법의 일종으로서 Steel Tank를 지하에 설치한 경우를 가정하여 실험결과를 무차원화함으로써 실제의 장기저장 방법에 적용할 수 있도록 하였다.

장기온수저장 시스템에서 사용되는 저장조의 용적은 단기온수저장 시스템에서 사용된 저장조의 용적보다 작게는 20배에서 크게는 50배까지의 더 큰 저장용적이 필요하며, 이러한 큰 저장용기는 저장용기로부터 외부로 손실되는 단면적 또한 크게되며 단면적을 통한 손실을 무시할 수 없게 된다. 그에 따라 단열을 위한 많은 설치가 필요하게되어 경제적 비용의 증가를 초래한다. 따라서 이러한 장기온수저장에 대한 체계적인 연구를 통하여 경제적 비용을 최소로 하면서 저장효율을 최대로 향상시킬 수 있는 방안을 제시하는 것이 필요하다.

온수의 장기저장 시스템에서 실질적 이용의 중요한 관건 중의 하나는 저장효율을 얼마나 효과적으로 높이는가에 있으며, 이는 저장조의 효과적 이용 측면에서뿐만 아니라 전체 저장 시스템의 성능 향상을 얻을 수 있다.

저장효율에 영향을 미치는 요인으로는 저장조 벽면의 열 전도에 의한 국부적 자연대류현상, 초기 유입수에서 저장조 내의 공기로의 자연대류에 의한 열전달, 저장조 용기의 열용량으로 인해 빠져나가는 열손실, 주위로의 열손실 등을 들 수 있는데 여기서 온수에서 초

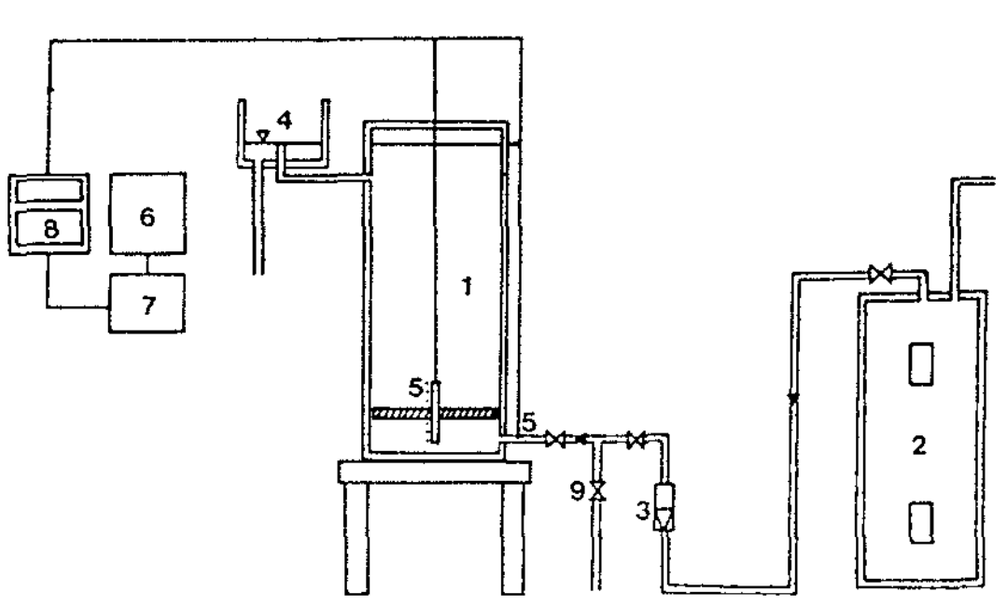
기저장조 내의 공기로의 자연대류에 의한 열 전달이 가장 크다.

따라서 본 연구에서는 온수와 공기사이에 Insulated Raft를 설치하여 온수저장과정중 저장조 내 열유동특성과 저장효율을 해석하여 장기저장 방법에서 가장 효율적인 장기저장 방법을 밝히고자 한다.

2. 실 험

2-1 실험 장치

본 연구에서 실험 장치를 크게 분류하면 저장조, 온수 공급 탱크(Rheem Manufacturing cop., Model 81V120D), Insulated Raft, 유량계 및 온도 측정 장치 등으로 이루어져 있다. 또한 유입구 형상으로서 단순 원형 유입구(inlet port type)와 성층 촉진 기구(perforated distributor)를 사용하며 저장조 내의 측정된 온도를 기록하기 위하여 Data Logger(YOKOGAWA,Model DA 2500E)를 사용하였다. Fig.1은 본 실험에서 사용한 실험 장치의 개략도를 나타내고 있다.



1. Experimental Storage Tank
2. Hot Water Supply Tank
3. Flow Meter
4. Surge Tank
5. Thermocouple Probe
6. Printer
7. Computer
8. Data Logger
9. Bypass Valve

Fig. 1. Schematic diagram of experimental appratus.

2-1-1 저장조

저장조는 작동유체의 유동특성 및 열적 거동을 가시화 할 뿐만 아니라 축열 기간 동안 내압에 충분히 견디도록 두께가 15mm인 안전 강화 아크릴로 제작하였으며 저장시간은 작동 유체인 고온유입수가 일회 충수되는 시간을 기준으로 하였다. 유입유동율이 낮은 범위에서 일회 충수 시간을 고려할 경우 저장조의 단열 문제가 저장효율에 중요한 영향을 미치므로 저장시간동안에 저장조 외부로의 열손실을 최대한으로 억제하기 위하여 본 실험에서는 두께가 10mm인 단열 섬유로 저장조 둘레를 충분히 감싸고, 그 위에 두께가 10mm인 토이론과 비닐 테이프를 사용하여 이중, 삼중으로 덮어 단열에 만전을 기했다. 저장조의 용량은 200ℓ로서 유입유동율이 0.4~0.8LPM으로 온수가 유입될 때 일회충수시간은 4~8 hr 정도 소요된다.

2-1-2 유입구 형상

저장과정동안에 저장조 하부로 들어오는 작동유체인 고온유입수는 점성력, 관성력, 부력을 동반하게 된다. 보통의 경우에는 관성력의 영향을 많이 받기 때문에 제트유동을 일으켜 혼합을 크게 한다. 이러한 문제점은 유입구

형상으로서 적절하게 설계된 성층 촉진 기구(Perforated distributor)를 사용하게 되면 유입수의 점성력 및 관성력은 약화되어 혼합은 밀도차에 의한 부력에 크게 영향을 받게 된다. 따라서 본 실험에서의 유입구 형상으로는 단순 원형유입구(Inlet port)와 성층촉진기구(Perforated distributor)를 사용함으로써 상호 비교를 하도록 하였다.

단순 원형유입구는 직경 15mm의 직관이다. 성층 촉진기구는 유입구 직경을 15mm로 하고 측면에 직경 3mm인 분배공을 48 개 뚫은 형태를 나타낸다. 이는 작동유체인 고온유입수가 유입될 때 갖고있는 관성력으로 인하여 저장조 하부에서의 국부적으로 발생하는 교란을 억제하기 위한 형태이다.

2-1-3 온수 공급 탱크

본 연구에서 태양열 온수 저장 장치의 집열기에 해당하는 역할을 하는 온수 공급 탱크는 용량이 450 ℓ 이고 220V, 3.75kw의 전력 용량을 가지며, 일정한 온도의 온수를 공급할 수 있도록 상 하부에 자동 온도 조절기가 부착되어 있다. 각각의 실험 조건에 맞추어 실험을 수행할 때 저장조의 용량이 200 ℓ 이기 때문에 일회 충수 시간 동안에 요구되는 온수를 공급하기에 충분한 용량이다.

2-1-4 Insulated Raft

본 연구에서 사용한 Insulated raft의 재질은 UC INDUSTRIES, INC. 사의 HYDRO-VAC™공법과의 기술제휴로 대한아이소풀라스트사에서 생산하는 진공압출 발포형 단열재 아이소핑크를 사용하였다. 진공 압출 발포방식으로 생산되는 아이소핑크는 미세한 독립기포 구조내에 기체중 열전도율이 가장 낮은(0.0083kcal/mh℃) 염화불화탄소를 충진하였기 때문에 다른 단열재보다도 낮은 열전도율로 뛰어난 단열성능을 발휘하며, 물의 열전도율이 0.51kcal/mh℃이므로 단열재가 습기를 흡수할 경우 단열재로서의 가치를 상실하나, 아이소핑크는 미세한 연속독립기포구조를 가짐으로써 흡수, 흡습이 쉽게 되는 다른 단열재와는 달리 수분이나 습기가 전혀 침투도지 않는 혁신적인 방수단열재이다.

아이소핑크의 물성치를 살펴보면, 밀도는 0.020~0.030g/cm³이상, 열전도율은 0.023kcal/mh℃이하, 흡수율은 용적기준 0.05% 이하이다. Insulated Raft는 직경 435mm, 두께 28mm인 원형으로서 중앙에 플라스틱봉을 삽입하여 Insulated Raft의 경계면에서의 고온 유입수와 저장조 내의 초기 공기온도를 측정하도록 하였다. Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 플라스틱 봉에는 20mm 간격으로 Insulated Raft의 중앙을 중심으로 위아래에 각각 2개씩의 열전대를 설치하여 온도를 측정하였다.

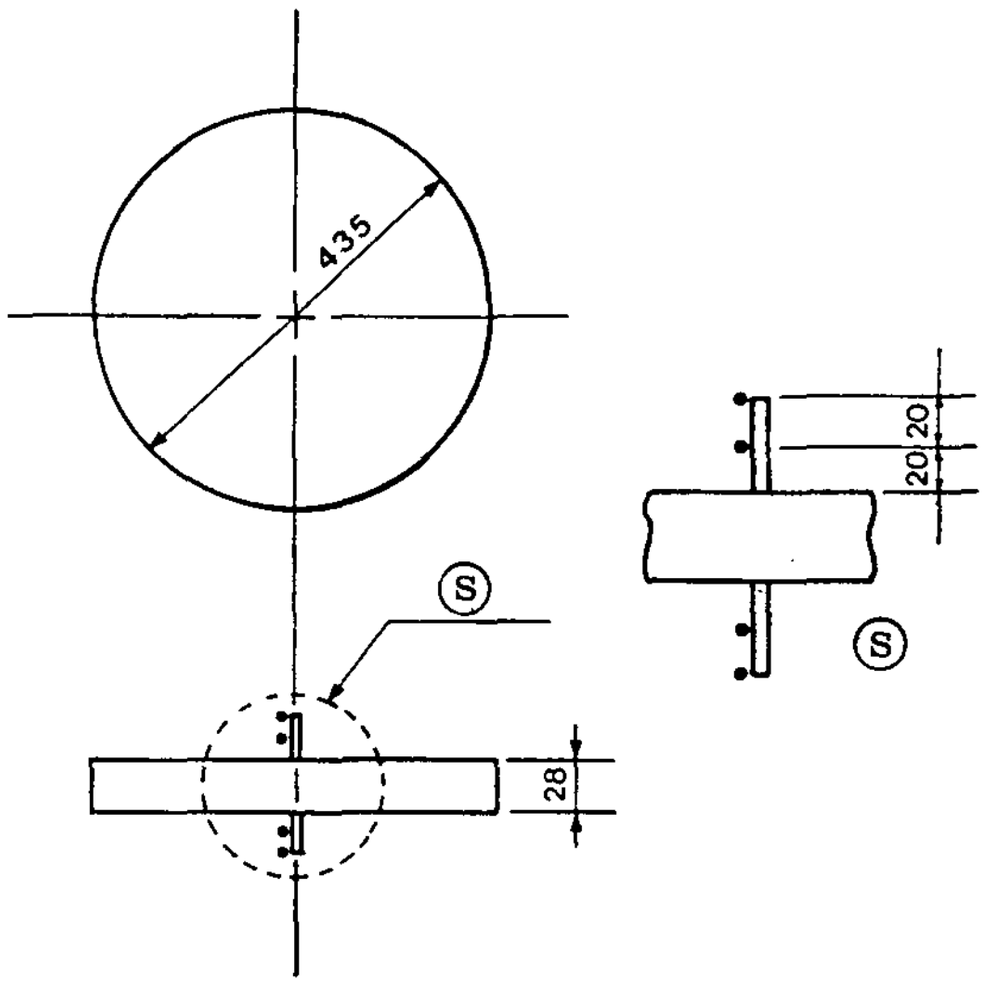


Fig. 2. Detail of Insulated Raft.

2-2 온도 측정

저장조에서 각종 동적, 기하학적 인자에 대한 저장효율 및 저장조 내의 온도거동을 분석하기 위해서는 저장조 내의 Insulated Raft 경계에서의 온도분포를 측정하는 일과 유입구에서의 온도 및 실험직후인, 일회 충수 과정 직후의 저장조 상부에서의 온도측정이 선행되어야 한다. Insulated Raft를 사용하지 않을 때에는 저장조 내의 온도는 저장조 중앙을 중심으로 저장조 하부에 설치된 유입구 위치로부터 수직 상류 방향으로 스테인레스 봉을 지지대로 사용하여 53.3mm의 등간격으로 열전대 25개를 설치하여 저장조 각각의 위치에서의 온도를 측정한다.

Insulated Raft를 사용할 때의 저장조 내의 온도측정은 일회 충수시간 직후에 Insulated Raft를 저장조에서 꺼내고 각각 53.3mm의 등간격으로 열전대 25개가 설치된 스테인레스 봉을 저장조 상부로부터 수직하부방향으로 빠른 시간에 삽입하여 저장조 각각의 위치에서의 온도를 측정한다. Insulated Raft가 실험시간동안 저장조 내에서 유입유동율에 따라 천천히 상승할 때의 저장조 내의 온도측정은 Insulated Raft의 가운데 부분에 수직상류 및 하류방향으로 20mm의 등간격으로 열전대가 각각 2개씩 설치된 플라스틱 봉을 삽입하여 온도를 측정한다. 또한 저장조 하부로 유입되는 작동 유체의 온도를 파악하기 위하여 유입구 부분에 열전대를 삽입하여 온도를 측정하고, 일회충수과정 직후의 저장수 온도를 측정하여 저장효율을 계산하는데 이용한다.

열전대는 직경이 0.3mm인 T형을 사용하였으며, 사용 온도 범위는 −270 ℃에서 400℃까지이다.

2-3 유량 측정

유량계는 Fig. 1의 실험장치 개략도에서 보여준 바와같이 온수 공급 탱크와 저장조 사이에 설치하였다. 유량 조절은 온수 공급 탱크의 출구에 설치한 게이트 밸브를 조절함으로써 실험 조건에 맞추도록 하였다.

본 연구에서 사용되는 유량계의 측정 범위는 0.1 LPM ~ 1 LPM로서 실험에서 사용할 유량인 0.4 LPM, 0.6 LPM, 0.8 LPM에서 사용하는데 적당하며, 실험유량의 선택은 실제 장기저장시스템에서 하절기의 태양에너지를 집열기를 통한 온수의 현열저장을 할 때 사용되는 예상유량으로 하였으며, 유량계의 종류는 부자식(floating type) 이다.

2-4 실험절차

서론에서 제시한 연구 목적을 달성하기 위하여 본 실험은 Insulated Raft를 사용할 때와 Insulated Raft를 사용하지 않을 때의 2가지 방법으로 다음과 같은 절차에 의하여 실험을 수행한다.

(1) Insulated raft를 초기 저장수가 없는 저장조 하단에 설치한다.
(2) 실험 조건에 알맞은 작동유체 온도를 결정하여 온수 공급탱크의 온도 조절기를 세팅한 후 충분한 시간을 기다린다.
(3) 온수 공급 탱크의 출구에 설치한 게이트 밸브를 이용하여 작동 유체의 유입 유동율을 일정하게 조절을 한다. 그리고 작동 유체의 온도가 설정한 온도에 도달 할 때까지 유입구 부근에 설치한 바이패스 밸브를 통하여 배출시킨다.
(4) 작동 유체의 온도가 요구되는 온도에 도달하게 되면 순간적으로 유입구에 설치된 볼밸브를 열면서 바이패스 밸브를 잠근다.
(5) 저장조 하부로 유입되는 유입수가 피스톤

유동으로 저장조 상부로 닿을 수 있도록 일정한 유동율로 조정하고, 저장조 상부에 닿는 순간의 저장조 내의 수위를 일정하게 유지시키기 위해서 서어지 탱크(surge tank)에 연결되어 있는 배수관을 주어진 수위에 맞도록 조절한다.

(6) 작동 유체가 공급되는 순간부터 축열 장치에 설치된 열전대를 통하여 온도측정 장치인 Data Logger를 작동시켜 저장조 내의 유입수가 한번 순환될 때까지 저장조 내의 Insulated Raft 경계면의 온도거동을 1분 30초 간격으로 연속적으로 검출한다.

(7) 유입수가 Turnover Time에 이르면 Insulated Raft를 축열조에서 꺼내고, 유입구 위치로부터 수직 상류방향으로 53.3mm의 등간격으로 25개의 열전대를 설치한 스테인레스 봉을 재빨리 삽입하여 축열조 전체의 온도분포를 파악한다.

(8) 실험이 종료되면 각종 인자들을 변화시켜서 반복 · 수행한다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1 저장조 내의 온도거동

본 실험에서 사용된 무차원 온도차 $\overline{\Theta}$는 고온유입수와 저장조 내의 공기와의 무차원 온도차를 의미하며 다음과 같이 정의하였다.

$$\overline{\Theta}=\theta_1-\theta_2 \qquad (3-1)$$

여기서 θ_1은 τ=0.5에서의 고온유입수의 무차원 온도로써 다음과 같이 나타낸다.

$$\theta_1=\frac{T_{avr-w}-T_a}{T_{inlet}-T_a} \qquad (3-2)$$

여기서 T_{avr-w} , T_a는 각각 τ=0.5에서의 고온유입수의 각 측정점온도의 산술평균온도와 초기 저장조 내의 공기온도를 나타내며, T_{inlet}은 저장조 내로 유입되는 초기 고온유입수의 온도를 나타낸다. 그리고 θ_2는 τ=0.5에서의 저장조 내의 공기의 무차원 온도를 의미하며 다음과 같이 나타낸다.

$$\theta_2=\frac{T_{avr-a}-Ta}{T_{inlet}-Ta} \qquad (3-3)$$

여기서, T_{avr-a} , T_a는 각각 τ=0.5에서의 저장조 내의 공기의 각 측정점 온도의 산술평균온도와 초기 저장조 내의 공기온도를 나타내며, T_{inlet}은 저장조 내로 유입되는 초기 고온유입수의 온도를 나타낸다. 따라서 Θ_1이 1인 경우 θ_2가 0이 되어 고온유입수로부터 공기로의 열누수가 전혀 없음을 의미하며 높은 저장효율을 얻는 효과를 볼 수 있다.

또한 본 실험에서 사용된 무차원시간 τ는 다음과 같이 정의하였다.

$$\tau=\frac{t}{t^*} \qquad (3-4)$$

여기서 t는 임의의 측정시간을 의미하며 t*는 일회충수시간(Turnover time)을 의미한다. 따라서 τ=0.5는 유입유동율에 관계없이 저장조 내의 1/2 만큼 고온유입수가 유입되었음을 의미한다.

3-1-1 Insulated Raft의 영향

Fig. 3-Fig. 6에서 나타난 바와 같이 Insulated Raft를 사용한 경우가 저장조 내의 온수와 공기의 온도차를 더욱 증가시킴을 볼 수가 있는데 이는 유입되고 있는 온수로부터 공기로의 열확산을 차단하기 때문이다. 또한 Fig.3과 Fig.4에서는 Insulated Raft를 사용한

경우에 있어서 유동율의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 온수와 공기의 온도차의 기울기가 Insulated Raft를 사용하지 않는 경우에 비해 작게 나타나고 있음을 볼 수 있다.

이 사실로서 Insulated Raft를 사용하는 경우 저유동율(0.4LPM, 0.6LPM)에서 온수와 공기와의 열혼합을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6에서는 Insulated Raft를 사용한 경우에 있어서 기준 온도차의 증가에 따라 선형적으로 감소하는 온수와 공기와의 온도차의 기울기가 Insulated Raft를 사용하지 않는 경우에 비해 작게 나타나고 있는데 이를 통해 볼 때 결국 Insulated Raft를 사용하는 경우 중간 경계면에서의 온도구배의 크기를 효과적으로 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

3−1−2 유입구 형상의 영향

Fig. 3과 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 유입구 형태로서 Distributor 형태를 사용한 경우가 온수와 공기의 온도차가 더욱 작게 나타남을 보여주고 있는데 이는 Distributor를 사용한 경우 온수저장 과정 초기에 Distributor의 분배공을 통해 온수가 저장조 내로 유입될 때 공기와 더욱 큰 접촉면을 가지고 있기 때문이고 특히 저장조 바닥과의 마찰에 의한 혼합의 증가가 중요한 열확산의 원인이 아닌가 생각된다. 또한 유입유동율의 증가에 따른 온수와 공기의 온도차의 증가율은 Inlet port를 유입구 형태로 사용했을 때가 더욱 완만함을 알 수 있는데 이는 온수저장 초기단계의 공기와의 혼합이 유동율에 의한 영향이 Distributor를 사용했을 때보다 상대적으로 작기 때문으로 생각된다.

Fig. 5와 Fig. 6은 기준 온도차가 증가할수록 모든 유입구형상에 대해 온수와 공기의 온도차가 감소하고 있음을 보이고 있는데 전반적으로 유입유동율에 의한 영향보다는 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 유입온수와 공기와의 접촉면에서의 온도구배가 커짐에 따라서 온수의 대류 및 전도에 의한 열확산이 촉진되어 공기의 온수로부터 더 많은 열량을 전달받기 때문이며, 또한 유입유동율로 인하여 0.8LPM일 때보다 0.4LPM일때가 온수로부터 열량을 전달받는 시간이 길기 때문이다.

3−1−3 유입유동율의 영향

Fig. 3과 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 Insulated Raft의 사용에 관계없이 유입유동율이 증가할수록 무차원 온도차가 증가하는데 이는 유입유동율이 커짐에 따라 고온유입수와 공기사이에 접촉하는 시간(turnover time)이 길어져서 온수에서 공기로의 열전달량이 증가하기 때문이다. 또한 Insulated Raft를 사용하여 온수와 공기사이의 열전달을 차단한 경우 매우 높은 무차원 온도차를 보여주고 있다. 그리고 Insulated Raft를 사용한 경우에 있어서 유입유동율의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 온수와 공기의 온도차의 기울기가 Insulated Raft를 사용하지 않는 경우에 비해 작게 나타나고 있는데 이를 통해 볼 때 Insulated Raft를 사용하는 경우 저유동율(0.4LPM, 0.6LPM)에서 온수와 공기와의 열혼합을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

3−1−4 기준온도차의 영향

Fig. 5와 Fig. 6에서 보여지는 바와 같이 온수와 공기와의 기준 온도차가 증가할수록 온수와 공기의 중간경계면에서의 온도차가 감소하고 있음을 볼 수 있는데 이는 접촉면에서의 온도구배가 커짐으로 인해서 온수의 대류 및 열전도에 의한 열확산의 크기를 증가시키기 때문이다.

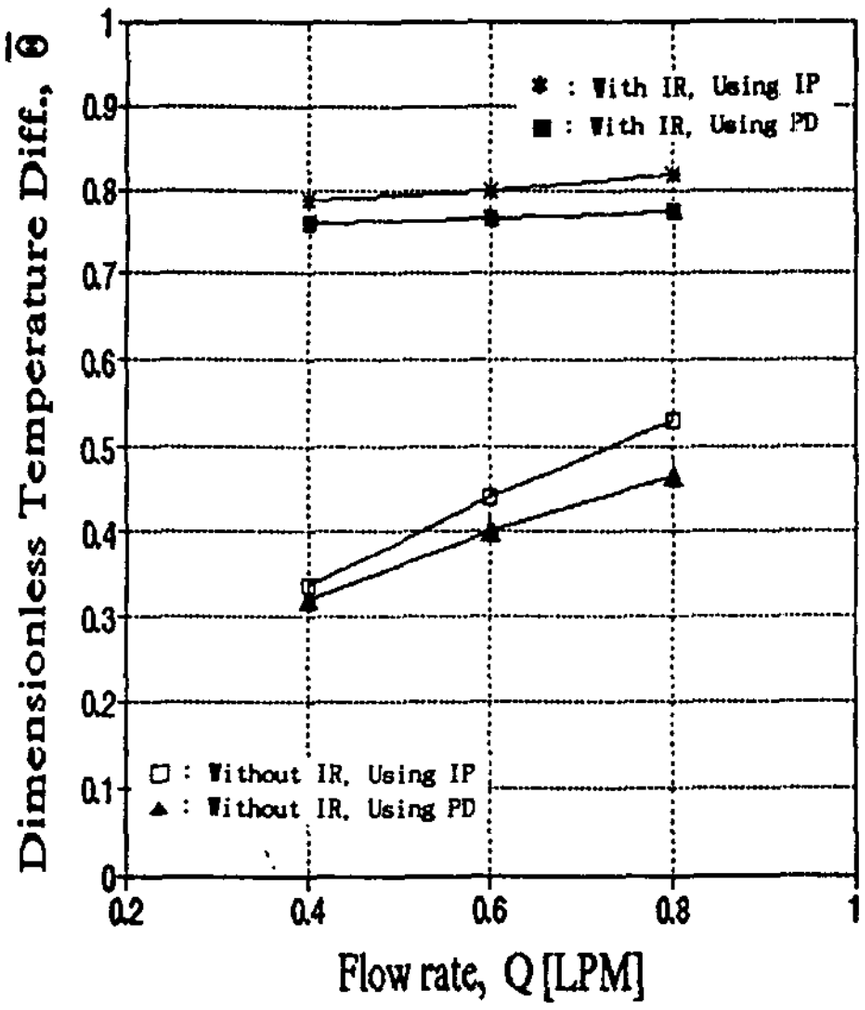


Fig. 3 Dimensionless temperature difference in a storage tank due to the variation of flow rate at τ=0.5.(△T=20℃)

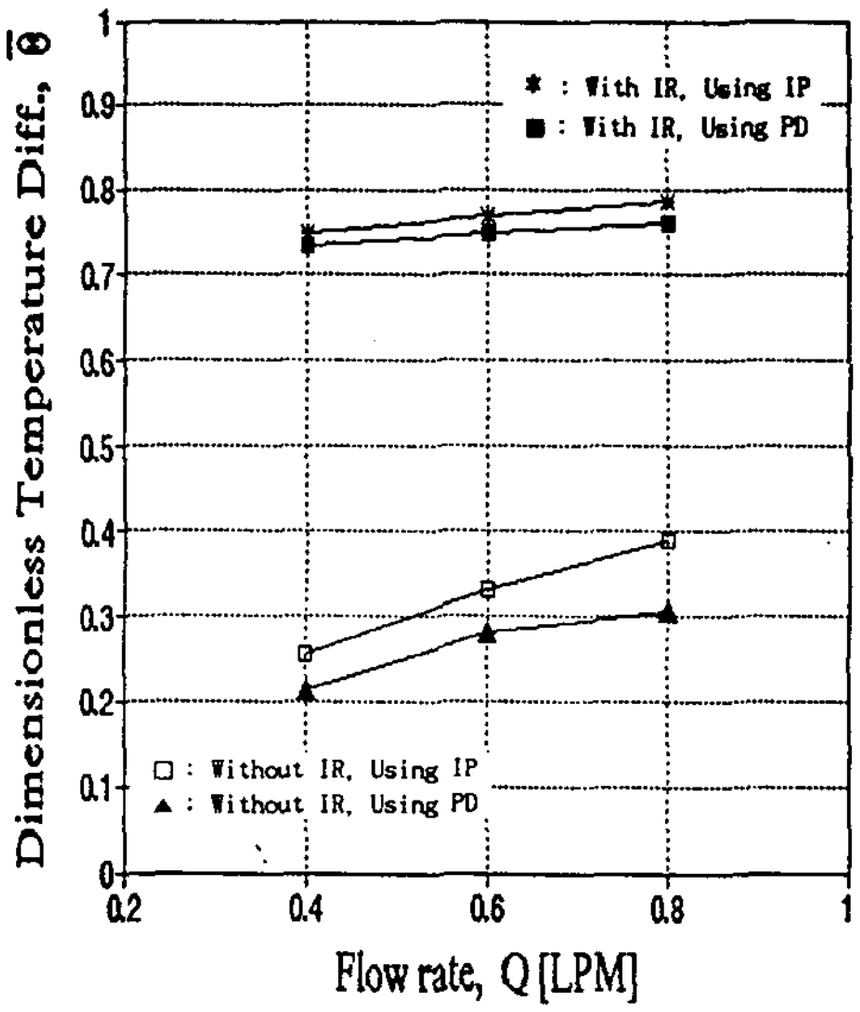


Fig. 4 Dimensionless temperature difference in a storage tank due to the variation of flow rate at τ=0.5.(△T=40℃)

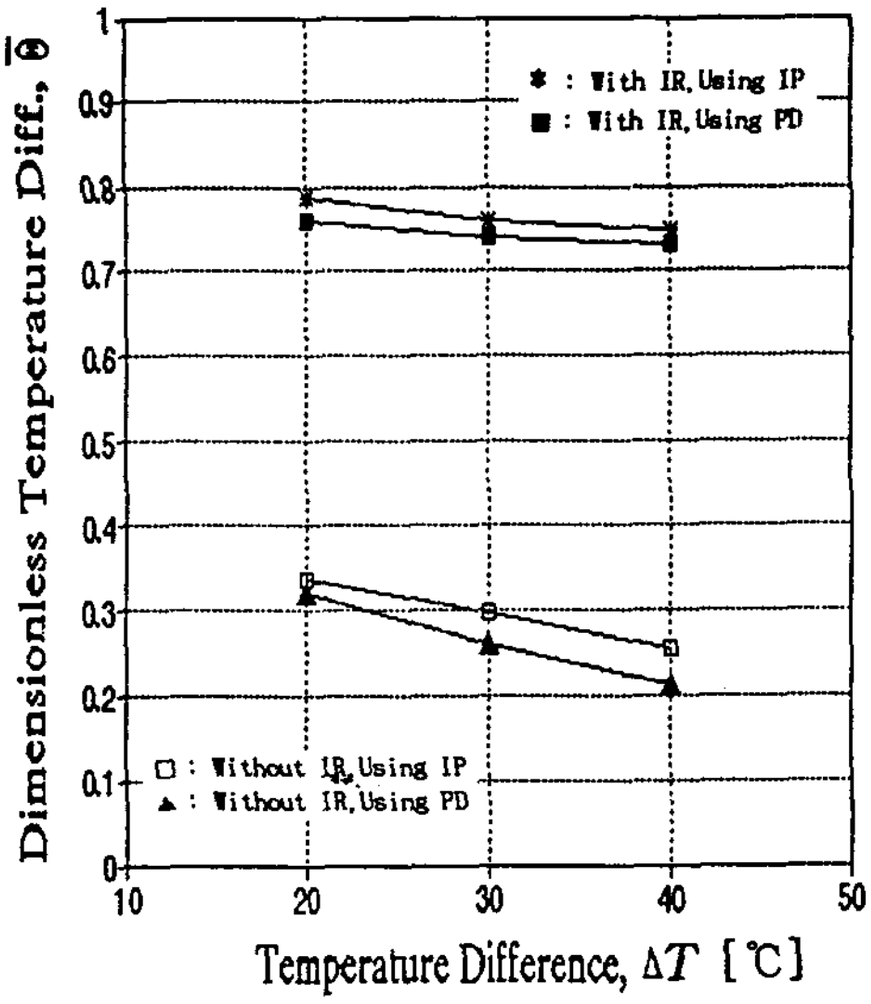


Fig. 5 Dimensionless temperature difference in a storage tank due to the variation of initial temperature difference at τ=0.5.
(Q=0.4LPM)

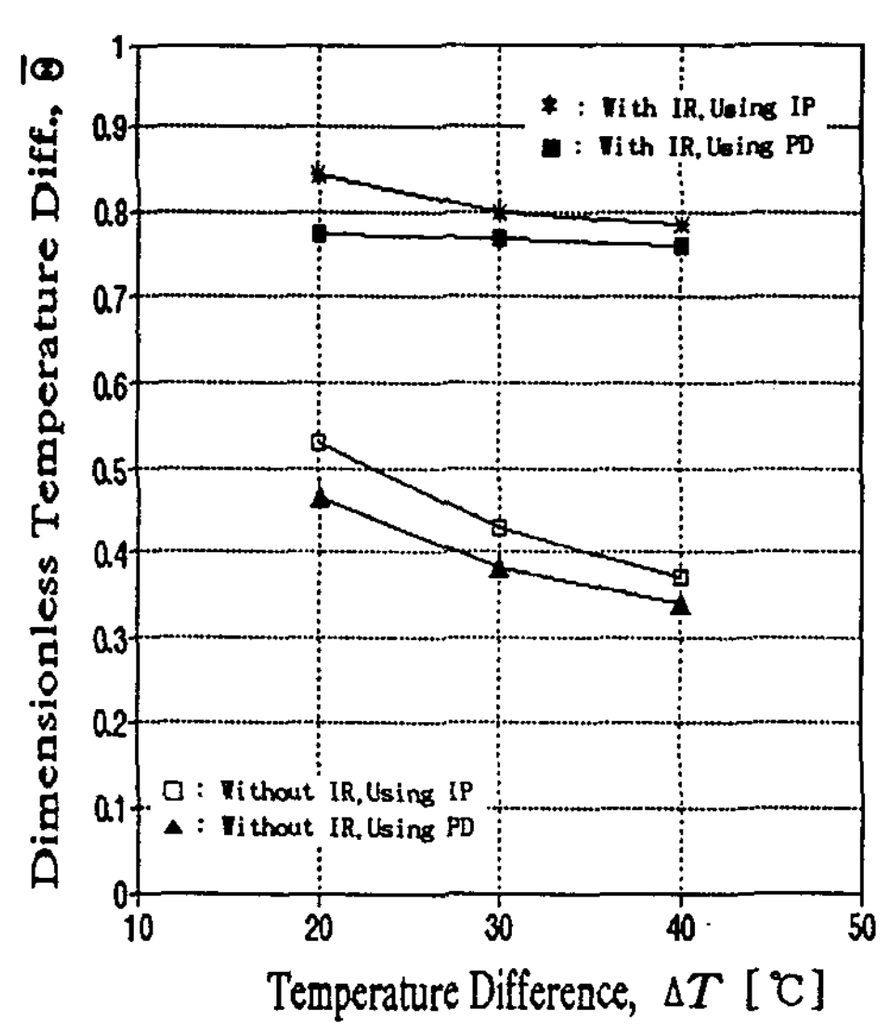


Fig. 6 Dimensionless temperature difference in a storage tank due to the variation of initial temperature difference at τ=0.5.
(Q=0.8LPM)

3-2 온수저장시간에 따른 열확산

온수저장조 내로 온수가 유입될 때 일회 충수시간 동안에 걸쳐 일어나는 온수로부터 공기로의 열확산의 정도를 온수저장시간에 따라 파악하는 문제는 유입구의 영향이라든지 Insulated Raft의 영향을 더욱 자세히 고찰하는데 중요한 자료를 제공하게 된다.

Fig. 7은 온수의 유입유동율이 0.4LPM이고 기준 온도차가 20℃인 경우 무차원 시간에 따른 온수와 공기의 경계면에서의 온도차를 유입구 형상의 변화와 Insulated Raft의 사용유무에 따라서 나타낸 그림이다. τ=0.1일 때까지 온수와 공기의 온도차가 급격히 감소하고 있음을 볼 수있는데 이는 유입 초기에 상대적으로 낮은 저장조 내의 공기사이에서 일어나는 열적 확산이 저장조 바닥으로 온수가 유입될 때 발생되는 마찰에 의한 영향으로 생각된다. 또한 약 τ=0.1 이후에는 온수와 공기의 온도차의 감소율이 완만한 것을 볼수 있는데 이는 유입 초기에 상승된 주위 공기와 유입 온수의 위 경계면과의 온도구배가 감소하기 때문이다. 그리고 Insulated Raft를 사용한 경우 유입 초기에 발생되는 열확산을 효과적으로 차단시킬 수 있음을 알수있고 온수의 층이 확립되고 피스톤유동이 시작됨에 따라 온수와 공기의 온도차의 기울기도 완만하게 감소되고 있음을 보여주고 있다. 한편, Insulated Raft를 사용하지 않는 경우 유입구 형태로 Distributor를 사용한 경우에 τ=0.1일 때까지 온수와 공기의 경계면에서의 온도차가 급격히 감소되고 있음을 알 수 있는데 이는 온수의 유입 초기에 분배공을 통해 유입되는 온수와 공기와의 접촉면의 증가로 인한 운동량의 교환과 함께 저장조 바닥과의 마찰손실 등이 주된 원인으로 생각된다. 그러므로 온수저장 초기에 급격히 감소된 기울기는 피스톤 유동이 진행됨과 동시에 경계면에서의 온두구배가 감소되고 τ=1일 때까지 선형적으로 완만하게 감소하고 있음을 알 수 있다. 그리고 Insulated Raft를 사용하지 않는 경우 온수와 공기의 경계면에서의 전도 및 대류에 의한 열손실이 온수저장시간 동안 계속 증가하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 8은 Fig. 7의 실험조건에서 온수와 공기의 기준온도차를 증가시킨 경우에 무차원 시간에 대하여 저장조 내의 열확산 정도를 나타내고 있다. 이 경우에도 Insulated Raft를 사용한 경우 온수의 유입 초기에 열환산을 효과적으로 차단할 수 있음을 알 수가 있고 기준 온도차의 증가에 따른 경계면에서의 온도구배의 증가로 인해 열확산의 크기가 증가하고 있음을 볼 수가 있다. 결국 온수와 공기의 기준온도차의 증가는 Insulated Raft사용유무

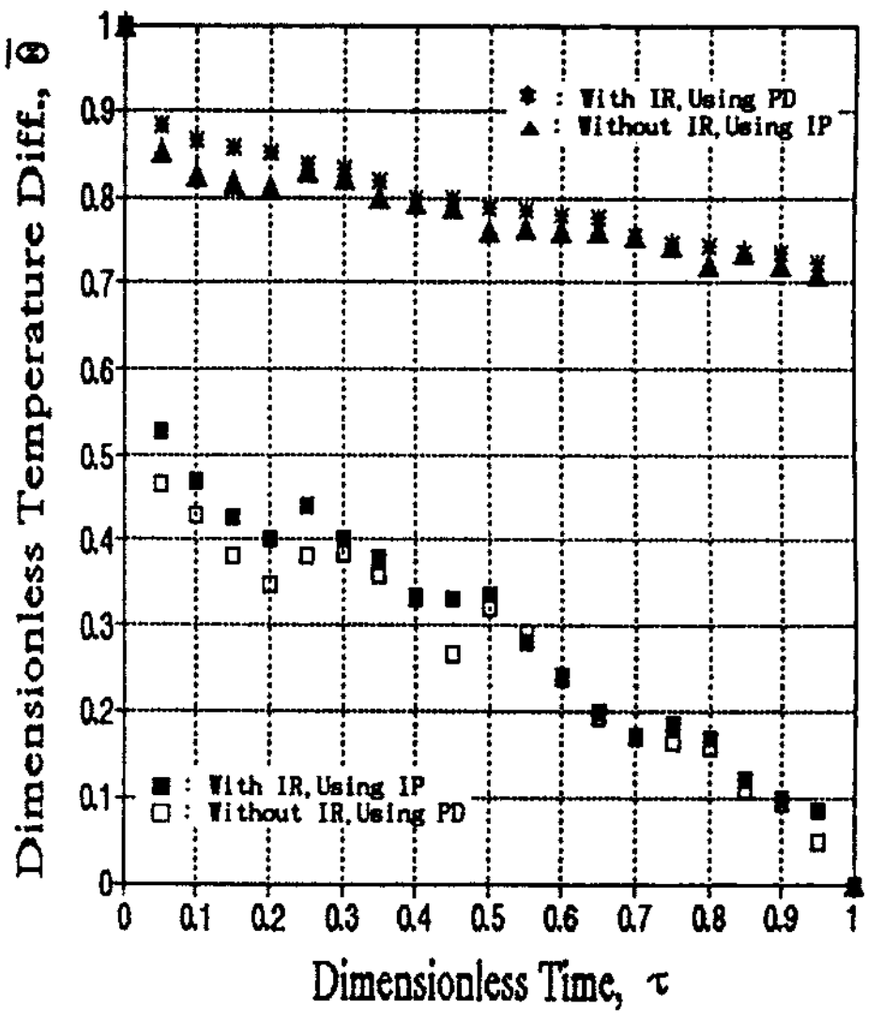


Fig. 7 Dimensionless temperature difference in a storage tank due to the variation of dimensionless time.
(Q=0.4LPM ΔT=20℃)

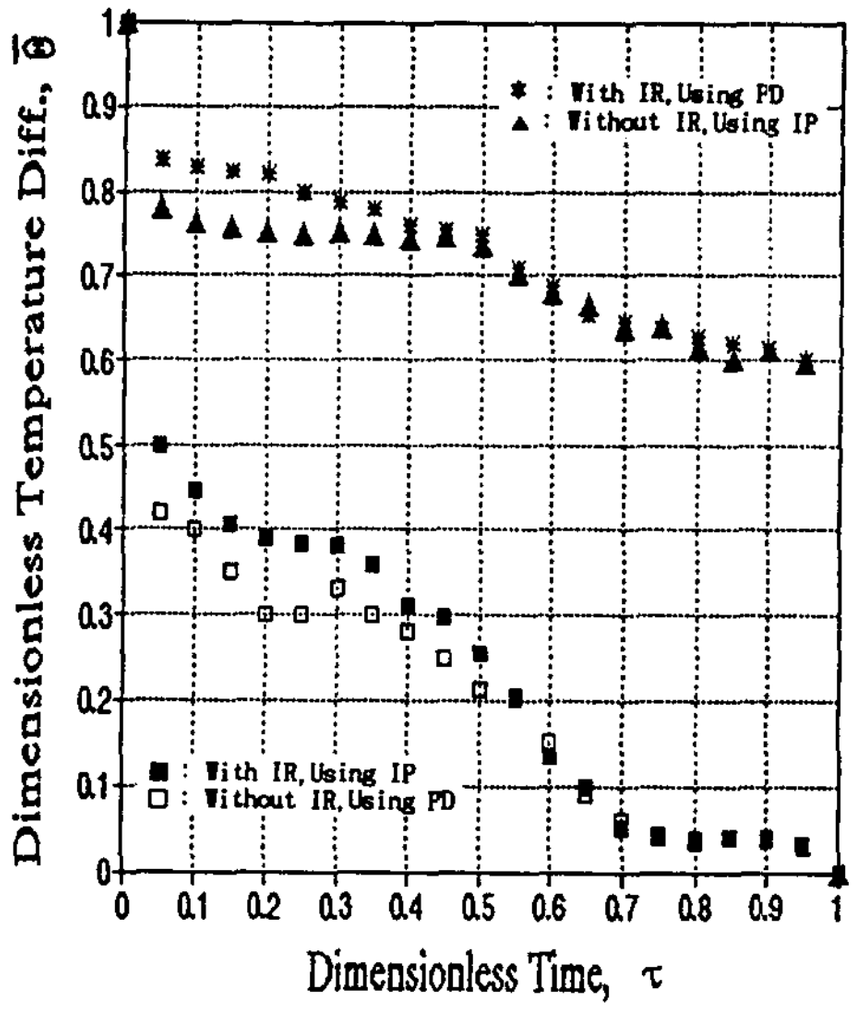


Fig. 8 Dimensionless temperature difference in a storage tank due to the variation of dimensionless time.
(Q=0.4LPM, ΔT=40℃)

나 유입구 형상에 관계없이 열확산의 크기를 증가시키고 τ=0.7일 때까지 그 기울기가 가파름을 알 수가 있다. 특히 Insulated Raft를 사용하지 않는 경우 열확산의 정도가 급격히 증가한 후 τ=0.7 이후에 온수와 공기와의 열적상태가 거의 평형상태에 도달하고 있음을 볼 수 있는데 이는 온수저장효율에 있어서 중요한 영향을 미칠 것으로 예측할 수 있다.

3-3 저장 효율

저장효율의 향상은 저장조의 효과적 이용측면에서 뿐만 아니라 전체 저장 시스템의 성능향상을 얻을 수 있으며 저장조의 성능평가 뿐만아니라 저장조의 최적 설계를 위한 기초 자료를 제시하는데 중요한 지표가 된다. 그러므로 저장조의 온도거동을 지배하는 각종 동적, 기하학적 인자 등에 대한 축열효율을 해석하는 일은 중요하다. 저장시스템에서 일반적으로 저장 효율은 열원장치로부터 현열에너지를 이상 상태 하에서 저장가능한 열량에 대한 실제 저장된 열량의 비로서 정의한다. 본 연구에서는 저장효율을 보다 간편하게 해석하기 위하여 다음과 같은 가정을 취한다.

(1) 저장조 벽면을 통하여 전도에 의한 열손실은 무시한다.

(2) 벽면의 두께에 따른 열용량을 무시한다.

(3) 주위로의 열손실을 무시한다.

(4) 저장조 하부로 유입되는 작동유체의 유입유동율은 일정하다.

임의의 t시간 동안에 이상적으로 저장 가능한 열량은 다음과 같다.

$$Q_{id}=\dot{M}_{inlet}\ Cp\Delta T_t \qquad (3-5)$$

본 연구는 일회충수기간(t_s) 즉 τ=1인 경우에서는 축열률을 저장효율로 정의하며 이론상 이상적으로 완전한 저장조에서의 저장효율은 1이다. 그러나 실제의 경우에 있어서 손실된 열량을 고려하게 되면 실제 저장효율은 이론 저장효율보다 작아지게 되며 실제 저장효율식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta=\frac{M_{inlet}Cp(T_{avr}-T_a)t}{M_{inlet}Cp(T_{inlet}-T_a)t^*}$$

$$=\left(\frac{T_{avr}-T_a}{T_{inlet}-T_a}\right)\cdot\tau \qquad (3-6)$$

$$=\left(\frac{T_{avr}-T_a}{T_{inlet}-T_a}\right)$$

여기서 T_a :공기의 평균온도(℃)

T_{avr} : 고온유입수의 평균온도(℃)

M_{inlet} : 질량유동율(kg/sec).

Cp : 정압비열(Kcal/kg℃)

본 연구는 일회충수기간(t_s) 즉 τ=1인 경우에서는 축열률을 저장효율로 정의하며 이론상 이상적으로 완전한 저장조에서의 저장효율은 1이다. 그러나 실제의 경우에 있어서 손실된 열량을 고려하게 되면 실제 저장효율은 이론 저장효율보다 작아지게 되며 실제 저장효율식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

t* : 일회충수시간

t : 실험시간

3−3−1 Insulated Raft의 영향

Fig. 9와 Fig. 10에서 나타난 바와 같이 Insulated Raft를 사용한 경우 더 높은 저장효율을 얻을 수 있는데 이는 Insulated Raft를 사용함으로써 온수의 유입 초기에 발생되는 동적, 열적인 확산을 효과적으로 억제시킬 뿐만 아니라 온수저장이 진행되는 동일한 온수와 공기의 경계면에서 발생되는 전도 및 대류에 의한 열전달을 감소시키기 때문이다. 또한 Insulated Raft를 사용하게 되면 저장효율의 크기에 중요한 원인이 되는 유일유동율의 영향을 상대적으로 감소시킴을 알 수 있었다.

3−3−2 유입구 형상의 영향

Fig. 9와 Fig. 10에서 나타난 바와 같이 유입구 형태로 Inlet port를 사용한 경우 더욱 높은 저장효율을 얻을 수 있음을 알 수 있는데 이는 온수가 초기에 유입될 때 형상비(α)가 2인 Distrubutor보다 상대적으로 작은 유입 단면적으로 인해서 경계면에서의 열확산이 작아지기 때문으로 생각된다. 또한 온수의 유입유동율의 증가에 따라서 저장효율의 증가율이 Distrubutor를 사용한 경우가 더 완만함을 볼 수가 있는데 이는 온수의 유입유동율의 증가로 인한 온수와 경계면에서 열전도 및 대류에 의한 열전달량의 감소와 온수의 유입초기에 관성력에 의한 열확산에 의한 영향 때문으로 생각할 수 있다.

3−3−3 유입유동율의 영향

Fig. 9와 Fig. 10에서 보는 바와 같이 유입유동율이 증가할수록 온수 저장효율이 증가하고 있음을 볼 수가 있는데 이는 일회충수시간을 줄임으로써 온수와 공기의 경계면에서의 열전달량을 감소시키기 때문이며 그리고 온수의 유입유동율의 증가로 인한 온수와 경계면에서 열전도 및 대류에 의한 열전달량의 감소와 온수의 유입초기에 관성력에 의한 열확산에 의한 영향 때문으로 생각할 수 있다.

3−3−4 기준온도차의 영향

Fig. 9와 Fig. 10을 비교해 보면 기준 온도차가 증가한 Fig. 10의 경우가 Insulated Raft의 사용에 관계없이 온수 저장효율이 감소함을 볼 수가 있는데 이는 유입온수와 공기와의 접촉면에서의 온도구배가 커짐에 따라서 온수의 대류 및 전도에 의한 열확산이 촉진되어 공기가 온수로부터 더 많은 열량을 전달받기 때문이다. 그러나 전반적으로 유입유동율에 의한 영향보다는 작게 나타나고 있음을 알 수 있으며 유입구 형상으로 perforated distributor type을 사용한 경우에도 똑같은 결과가 나타난다.

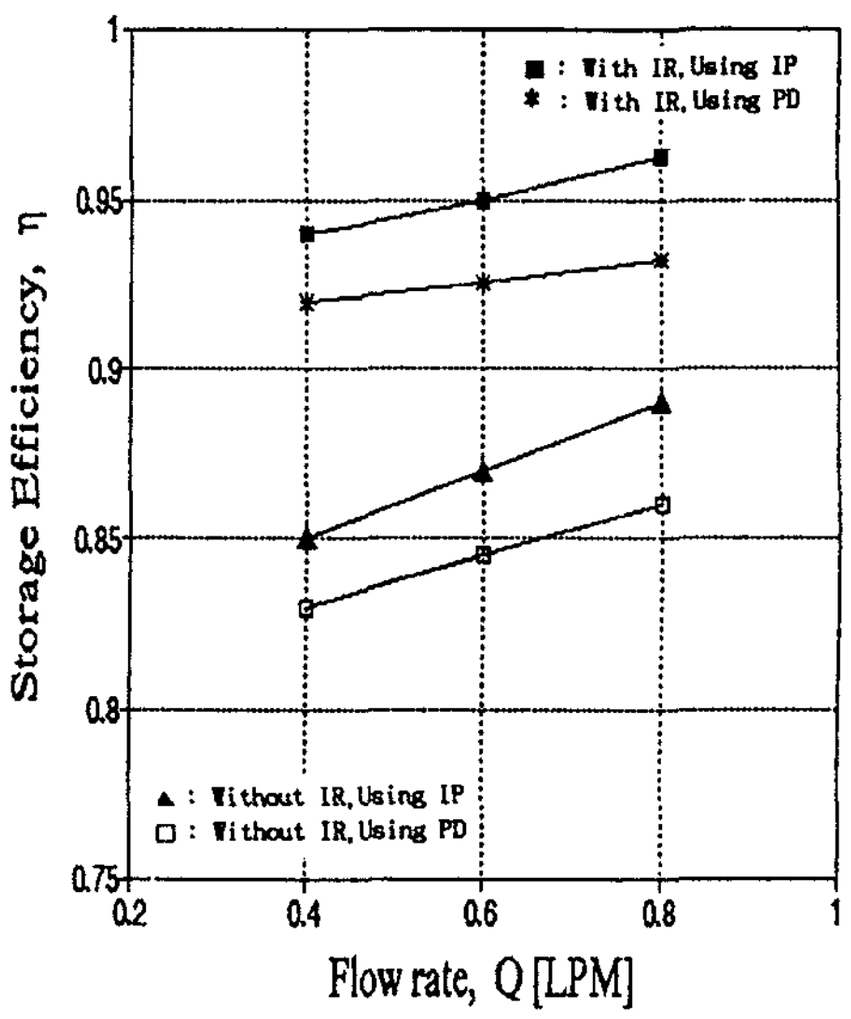


Fig. 9 Storage efficiency of storage tank due to the variation of flow rate.(ΔT=20℃)

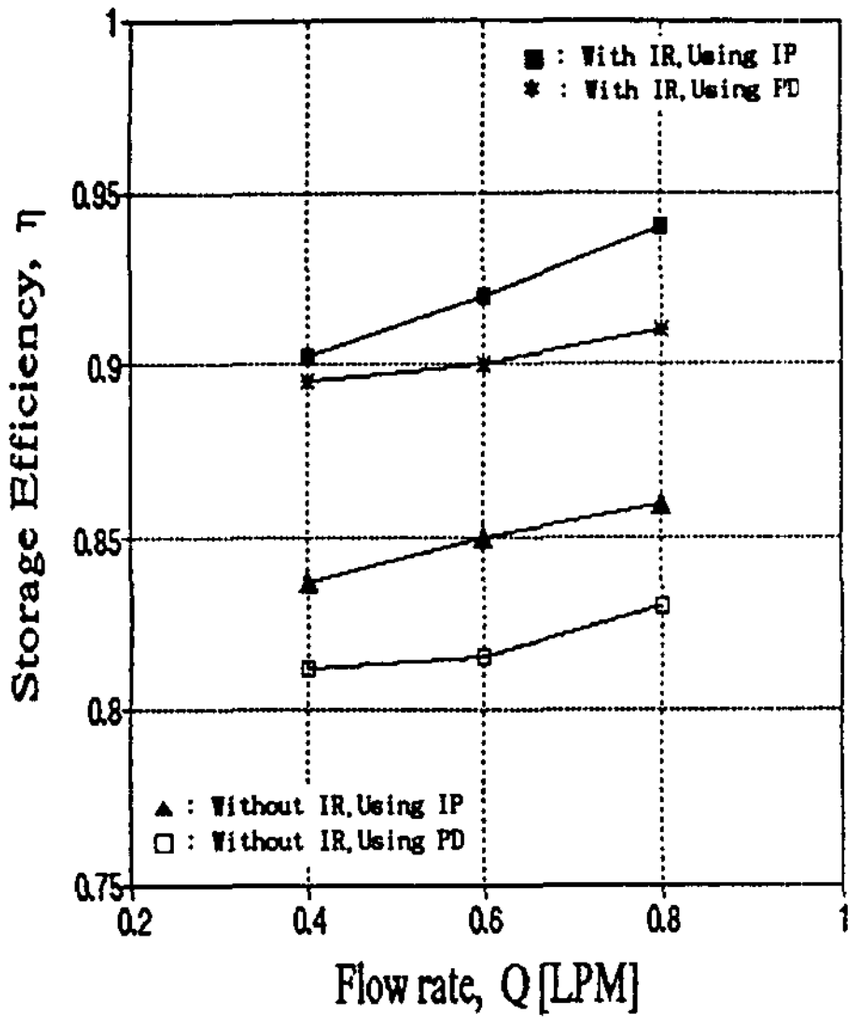


Fig. 10 Storage efficiency of storage tank due to the variation of flow rate.(⊿T=40℃)

3−4 Downward flow의 온수 저장 효율과의 비교

Fig. 11은 선행연구의 downward flow[5]의 저장효율과 본 연구의 upward flow와의 저장효율을 비교하여 나타낸 것으로 선행연구의 downward flow의 실험조건에 준하여 기준 온도차는 40℃로 고정하였고 유입구형상은 inlet port와 perforated distributor type을 사용하여 유입유동율의 변화에 따라 저장효율을 비교하였다.

본 연구의 upward flow에서는 유입유동율이 증가함에 따라 저장효율이 증가하는 경향을 보이는 반면, downward flow에서는 유입유동율이 증가함에 따라 저장효율이 감소하는 경향을 보인다. 이는 upward flow에서는 유입유동율이 증가함에 따라 관성력의 효과에 의한 고온유입수의 혼합에 의한 열손실 효과보다 고온유입수와 공기와의 접촉시간(Turn-over time)이 길어짐에 따라 중간 경계면에서의 고온유입수에서 공기로의 열전달량이 증가하는 효과가 크기 때문이다. downward flow에서는 유입유동율이 증가함에 따른 경계면에서의 열전달량의 증가율보다 중간 경계면에서의 열전도에 의한 손실이 교란보다 우세하기 때문에 접촉시간이 길어질수록 저장효율이 감소하는 경향을 보인다. 그리고 upward flow에서는 유입구형상으로 inlet port를 사용한 경우가 distributor를 사용한 경우보다 높은 저장효율을 얻을 수 있으나 downward flow에서는 distributor를 사용한 경우가 보다 높은 저장효율을 얻을 수 있다. 이는 upward flow에서는 온수가 초기에 유입될 때 형상비(a)가 2인 distributor보다 상대적으로 작은 inlet port의 유입단면적으로 인해 경계면에서의 열확산이 작아지기 때문으로 생각되며 downward flow에서는 distributor를 사용한 경우 유입단면적의 증가효과보다 distributor 사용에 따른 관성력이 작아져서 순수한 부력

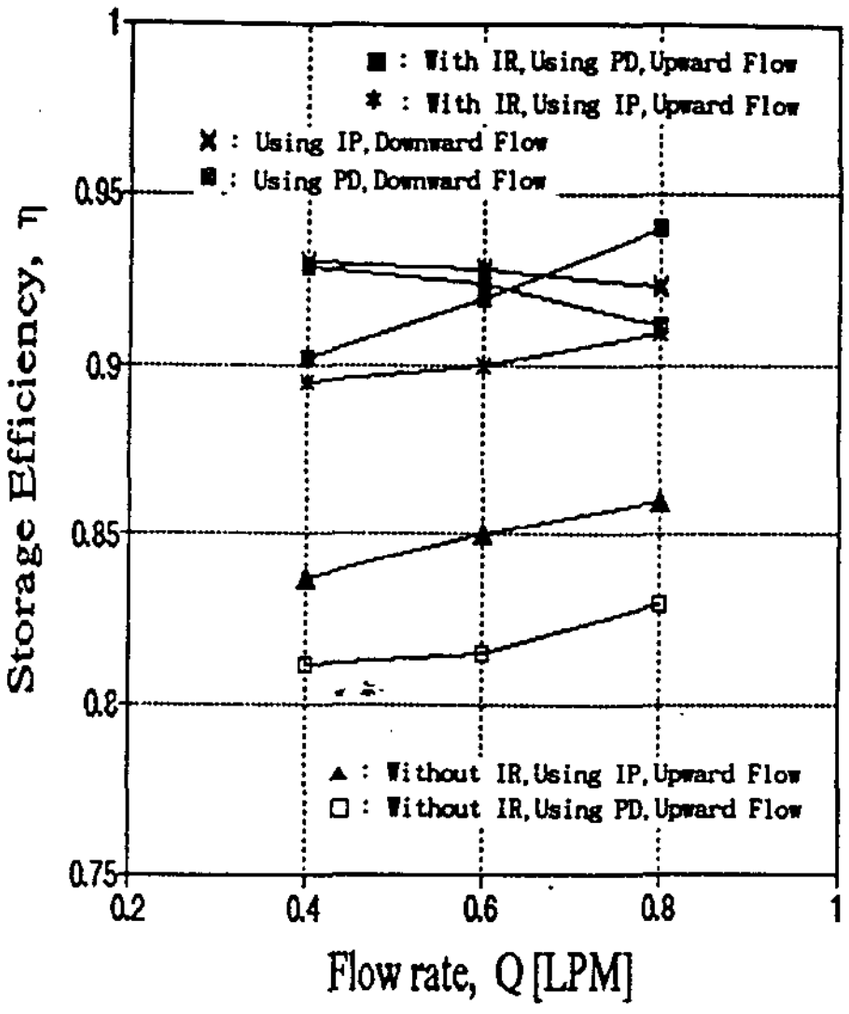


Fig. 11 Comparison of storage efficiency (⊿T=40℃)

에 의한 영향만이 작용하여 고온유입수와 공기사이의 열확산을 감소시키기 때문으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 Insulated Raft가 저장효율에 미치는 영향을 비롯하여 온수저장과정중 동적, 기하학적 인자를 변화시켜가며 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Insulated Raft를 사용하여 온수에서 공기로의 열전달을 차단하는 경우 경계면에서의 온도구배의 크기를 효과적으로 줄일 수 있어서 저장효율을 증가시킬 수 있었다. 적절한 동적조건을 사용한 결과 96%의 저장효율을 얻었다.
2. 유입유동율이 작을수록 경계면에서의 온도구배가 커져서 저장효율이 감소하였다. 이는 관성력에 의한 연손실 효과보다 고온유입수와 공기와의 접촉시간(Turn-over time)이 길어짐에 따라 중간 경계면에서의 온수에서 공기로의 열전달량이 증가하는 효과가 보다 크게 작용하기 때문이다.
3. 기준온도차가 증가할수록 저장효율이 감소하였다. 이는 유입온수와 공기와의 접촉면에서의 온도구배가 커짐에 따라서 온수의 대류 및 전도에 의한 열확산이 촉진되어 공기가 온수로부터 더 많은 열량을 전달받기 때문이다.
4. 유입구형상으로 Perforated distributor를 사용한 경우보다 Inlet Port type을 사용한 경우가 저장효율이 높게 나타남을 알 수 있었다. 이는 온수가 초기에 유입될 때 형상비(a)가 2인 distributor보다 상대적으로 작은 inlet port의 유입단면적으로 인하여 열확산 면적이 감소하는 효과가 보다 크게 작용하기 때문으로 생각된다.
5. 본 실험의 저장효율과 Downward flow의 저장효율을 비교할 경우, 유입유동율이 작고 기준온도차가 작을수록 저장효율이 증가하는 경향을 보이는 Downward flow와는 달리 유입유동율이 크고 기준온도차가 클수록 저장효율이 증가함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Z.Lavan and J.Thompson, "Experimental Study of Thermally Stratified Hot Water Storage Tanks", Solar Energy, Vol. 19, pp. 519~524, 1977.
2. R. I. Loehrke et al, "Stratification Enhancement in Liquid Thermal Storage Tanks", J. of Energy, Vol. 3, No. 3, pp. 129~130, 1979.
3. Y.Jaluria and S.K.Gupta, "Decay of Thermal Stratification in A Water Body for Solar Energy Storage", Solar Energy, Vol.28, No.2, pp.137~143, 1982.
4. R.L.Cole and F.O.Bellinger, "Thermally Stratified Tanks", ASHRAE Trans., Vol.88, No.1, pp.1005~1015, 1982.
5. 박이동, 황성일, "현열 축열조의 열 성층 특성과 축열효율에 관한 연구", 성균관대학교, 1991.

An Effect of Insulated Raft on Longterm Hot Water Storage

Ee-Tong Pak* · Woon Cho**

* *Sung Kyun Kwan University*
** *Yong-In Technical College*

Abstract

Thermal energy storage system used a storage tank is a reasonable method to solve energy problem. In thermal energy storage system, energy collected from many types of heat source is stored in a storage tank and then supply to load at the time is in demand.

In this study, flow characteristics and storage efficiency were analysed by using a insulated raft in longterm hot water storage system. From the experiment it is found that insulated raft has a important role in longterm hot water storage system and storage efficiency can be obtained to 96% using inletport type and insulated raft together.