〔논문〕 태양에너지
Solar Energy
Vol.18. No.1, 1998

Ice Ball을 內裝한 氷蓄熱槽內의 熱流動 特性에 관한 實驗的 硏究

장 영 근*, 이 원 섭**, 박 정 원***

* 성균관대학교 기계공학과 대학원
** 원주전문대학교
*** 유한전문대학교

An Experimental Study on Characteristics of Heat Flow in the Cylindrical Storage Tank with Ice Ball

Y. G. Jang*, W. S. Lee **, J. W. Pak***

* *Graduate School, Sung Kyun Kwan University*
** *Won Ju Junior College*
*** *Yu Han Junior College*

요 약

공기조화 설비에 있어서 시스템의 성능을 향상시키고 에너지의 유효이용 및 경제성을 높일 수 있는 빙축열 시스템에 대한 연구이다. Ice Ball을 내장한 빙축열조를 횡형 사각형과 입형 원통형 축열조에 대하여 조내로 유입하는 브라인의 유량(2, 4, 6LPM)과 온도(-3, -5, -7℃)를 변화시키 고, 또한 유입 브라인의 유동을 상·하향유동으로 하면서 빙축열조 내의 온도분포를 파악하여 열유동 특성 및 빙충전율에 대하여 고찰하였다.

연구결과 빙축열조내 열성층을 향상시키기 위해서는 조내 유입 브라인의 유동이 상향 압출흐름이어야 한다는 것을 알았다.

Abstract

The study on ice thermal storage system is to improve total system performance in actual air-conditioning facilities. To abtain the high efficiencies in ice thermal storage system, the improvement of thermal stratification is essential, therfore the process flow must be piston flow in thermal storage tank.

Ice packing factor is better on condition that the inflowing temperature is low, the flow direction in the thermal storage is upward and the cylindericalthermal storage type is used.

This result shows that the cylinderical ice storage tank has better storage capacity than the rectangular type in case of the same porocity.

Nomenclature

C : Electric conductivity (μs/cm)

C_o : Initial electric conductivity (μs/cm)

$\overline{H}$: Dimensionless hight

IPF : Ice packing factor of storage tank

n_i : Number of frozen ice ball

n_t : Measurement point number at storage tank

V_i : Volume of ice ball and water in the storage tank before thermal charging(cm^3)

V_l : Volume of ice ball and water in the storage tank after thermal charging(cm^3)

V_s : Total volume freezed due to freezing of ice balls after thermal charging(cm^3)

θ : Dimensionless temperature

τ : Turn over time

1. 서 론

잠열을 이용한 저장은 상변화물질을 이용하는 방법으로서 축열밀도가 크다는 장점을 지니고 있다. 그러므로 잠열저장에 이용되는 잠열재는 압력에 견딜 수 있도록 증기압이 작아야 하며 축열과 방열과정이 열전달 속도와 관계하므로 열전도 및 응고 속도가 빨라야 하고, 일정한 온도에서 상변화가 일어나야 하며 상변화에 대한 체적 변화가 작아야 하는 등의 축열 재료로써의 특성을 가지고 있어야 한다[1, 2].

최근들어 현열저장에 비해 단위 체적 및 단위 중량당 열에너지의 저장용량이 크므로 체적과 중량을 크게 줄일 수 있는 상변화물질의 잠열방식이 관심의 대상이 되고 있다. 이와 같은 저장 방식은 심야전력을 이용한 에너지 절약 차원에서도 활용되고 있는데 최근의 주·야간의 전력 수요 형태의 불균형을 해소하기 위해 냉방 수요의 일부 또는 전부를 주간 최대 전력 시간대를 피해 저장하였다가 사용하는 냉방용 빙축열 시스템의 이용이 비교적 용이하면서 전력 부하의 균형에 기여도가 크므로 석유 파동 이후 선진국에서 활발하게 연구되어지고 있다[3].

1983년 Saitoh[4]는 구형축열잠열재의 실험

과 시뮬레이션을 수행한 구형캡슐시스템에 관한 연구를 통해 기초적인 전열 응답특성에서 축열량이 구형축열조는 현열에 비하여 용량이 50% 정도임을 밝혔고, 열손실은 55% 이상 감소시킬 수 있음을 제시하였다. 1986년 Tetsuo[5]는 원통형 축열조에 캡슐을 이용하여 축·방열과정동안 열교환에 관한 영향의 연구를 통하여 축열과 방열과정을 비교하였다. 이 결과 축열과정은 캡슐의 전도의 영향 때문에 밀도에 영향을 많이 받으며 방열시는 이 영향이 작기 때문에 급냉의 현상이 없음을 밝혔다. 1986년 Yoo와 Wilden[6]은 성층화된 열저장탱크에서 thermocline의 초기 형성에 관하여 연구하였으며 중력 흐름 형태로 빙축열조내 브라인을 유입시킴으로써 thermocline의 초기 형태를 얻을 수 있음을 보여주었고 속도와 온도분포는 온도와 밀도차에 의해 중력흐름에 영향을 주고, 레이놀즈수에 대한 영향은 Fr<1 작은 유동일 경우 초기 최대 이동속도에 영향을 준다고 제안했다. 1991년 Yamaha[7]는 빙축열조의 열특성에 관한 연구를 통하여 성능예측과 최적 설계법에 관한 해석을 하였으며 모형 실험에서 기초적인 열특성을 파악하기 위해 Archimedes수와 유입 열량 및 IPF의 영향을 조사하여 성능 평가를 위한 model화를 시도하였다. 1993년 Yoshiyuki[8]는 구형캡슐 잠열축열재를 사용한 고밀도 축열조 system개요와 축·방열특성에 관한 연구를 통하여 입구형상 및 브라인 온도를 변화시키고 축열과 방열에 대한 축열단독운전 및 축·방열 동시운전에 관한 실험을 통하여 동시운전시 에너지 저장효율이 높다는 것을 제시하였다.

이상의 선행 연구를 바탕으로 본 연구에서는 구형캡슐(Ice Ball)을 이용한 빙축열조에 대하여 유입구를 distributor로 고정시키고, 빙축열조의 성능에 영향을 미치는 요소인 축열조의 형상을 원통형 및 사각형으로 변화시킴에 따라 순환수의 온도, 유량변화 등이 축열조내의 빙충전율(IPF) 및 열유동에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 고찰하였다.

2. 관 련 이 론

2.1 빙충전율

빙충전율(Ice Packing Factor)은 빙축열조내 얼음과 물의 전체 용적에 대한 빙축열조내의 최대 얼음량으로 나타내며 빙충전율이 적은 경우는 얼음이 빨리 녹기 때문에 간접 냉각 방식이나 대형 시스템에 유리하고 빙충전율이 큰 경우는 중소형 시스템에 적합하며 또한 빙충전율이 작은 경우 축열량을 점하고 있는 현열량이 크기 때문에 현열범위를 유효하게 이용 가능한 온도 성층형이 바람직하고 충전율이 큰 경우는 성층이나 혼합방식으로도 가능 하지만 캡슐형의 경우는 브라인유동에 의해서 캡슐 내부가 전도되어 얼게 되므로 성층이 형성되는 것이 충전율을 향상시킬 수 있으며 일반적으로 충전율은 대형 시스템의 경우는 10% 소형은 40% 이상을 유지하며 (1)식과 같이 측정한다

제빙량을 측정하는 방법으로는 축열조내의 수위를 측정하는 간접방식이 있으며 (2)식과 같다.

$$\text{빙충전율(IPF)} = \frac{\text{빙축열조내최대얼음량(㎤)}}{\text{빙축열조내얼음과물의용적(㎤)}} \quad (1)$$

$$\text{빙충전율(IPF)} = \frac{V_l - V_i}{V_l} = \frac{V_s}{V_l} \quad (2)$$

또한 전기 전도성을 이용한 방식으로는 일반적으로 불순물의 밀도에 비례하여 전극에 의해 측정될 수 있으므로 Ice Ball 내부로 물질의 전달이 없다면 전기 전도성은 얼음이 생성될 때 불순물의 밀도에 비례하는 것으로 표시할 수 있고, (3)식과 같다.

$$\text{빙충전율(IPF)} = \gamma\left(1 - \frac{C_o}{C}\right) \quad (3)$$

이와 같은 빙충전율의 계산방법은 본 실험에서 사용한 Ice Ball내 상변화물질이 응고될 때 부피팽창이 되지 않으므로 부적절하다. 여기서 적용한 빙축열조의 최대 얼음량은 측정 Ice Ball 중 제빙된 것의 비율에 전체 Ice Ball의 갯수를 곱하여 구할 수 있고 Ice Ball 내부의 온도가 영하로 측정되면 완전 제빙된 것으로 본다. 따라서 본 연구에서 이용한 빙충전율은 다음과 같다.

$$\text{빙충전율(IPF)} = \frac{n_i}{n_t} \times 100(\%) \quad (4)$$

2.2 관련 무차원 인자

각종 실험조건을 통한 실험결과를 동일조건화 하여 비교 고찰하고 실제 사용되는 빙축열조의 기초설계 자료를 제시하기 위하여 빙축열 및 방열과정 동안 열성층의 발달과정을 다음과 같이 무차원화 하여 사용한다.

$$\tau = \frac{t}{t_x}$$

여기서,

τ : 빙축열 및 방열과정동안의 무차원 시간

t : 실제 측정 실험 시간(sec)

t_x : 1회 빙축열 및 방열시간(sec)

$$\theta = \frac{T_s - T}{T_s - T_i}$$

여기서, θ : 무차원 온도

T : 실제 측정점의 온도(℃)

T_s : 초기 빙축열조내의 온도(℃)

T_i : 빙축열조 입구 온도(℃)

$$\overline{H} = \frac{h_x}{H}$$

여기서, $\overline{H}$: 무차원 높이

h_x : 빙축열조내 임의 위치까지의 높이(cm)

H : 유입구와 유출구 높이의 차(cm)

3. 실 험

3.1 실 험 장 치

공조설비용 빙축열 시스템의 성능에 영향을 미치는 인자를 파악하기 위한 실험장치는 빙축열조, 냉동기, 브라인 탱크, 공조 부하용 보조탱크와 이들 각 부분을 연결하는 배관 및 펌프로 구성되어 있으며, 전체 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타냈다.

빙축열조는 가시화가 용이하도록 15mm 두께의 안전강화 투명 아크릴로써 횡형 사각형 빙축열조와 입형 원통형 빙축열조를 제작하였으며, 외기로 인한 열손실을 최소화 하기 위하여 두께 100mm의 부직포로 빙축열조를 감

싸고 그 외에 10mm 두께의 은박 단열보드를 사용하여 충분히 단열 시켰다. 본 연구에서 사용한 빙축열조의 사양은 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of storage tank

ITEM	REMARKS	
Storage Tank	Cylindrical	Rectangular
Material	Acryl	Acryl
Size	500(D) × 1860(H)	700(W)×1700(L)×700(H)
Tank Volume	330ℓ	833ℓ
Wall Thickness	15mm	15mm
Surface Area	3.10m^2	5.74m^2
Thermal Conductivity	0.68Kcal/mh℃	0.68Kcal/mh℃

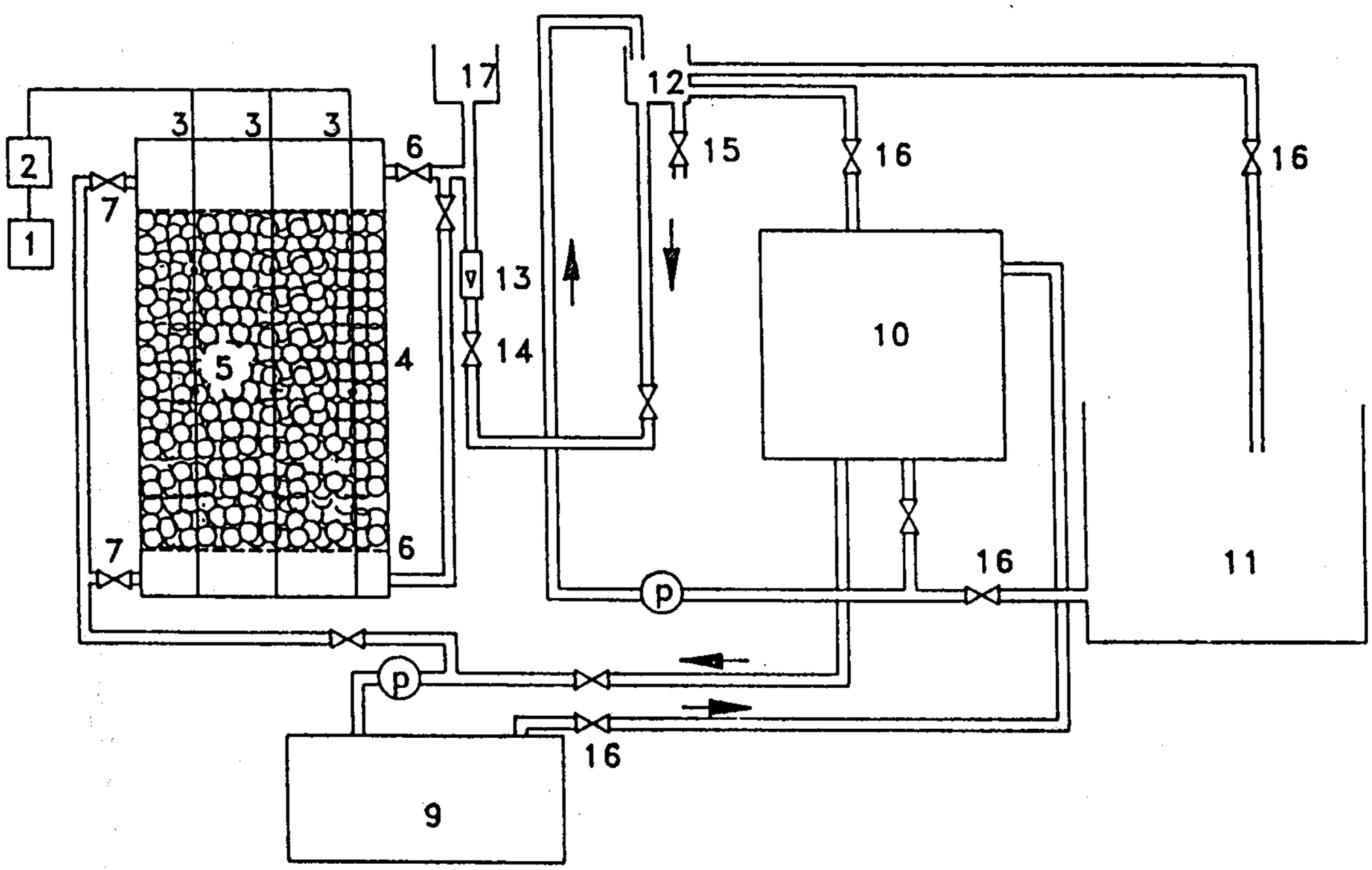

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

실험에 이용한 Ice Ball은 외경이 76mm, 두께 1mm의 고밀도 폴리에틸렌 재질로 되어 있으며 내부는 증류수와 제빙을 용이하게 하기위한 무기물질의 혼합으로 되어 있다. 또한 외경 76mm의 Ice Ball인 경우 porosity는 0.55였으며 이 경우 효율이 가장 좋은 것으로 나타났다[9].

3.2 실 험 방 법

본 실험에서는 76mm 크기의 Ice Ball을 내장한 사각형 빙축열조와 원통형 빙축열조 입·출구에 형상비가 2이고, 배관직경이 20mm인 distributor를 사용하여 다음과 같은 방법으로 실험하였다.

1) 빙축열조내 브라인의 온도를 정상상태로 만든다.
2) 빙축열조내 브라인의 온도가 정상상태로 되면 냉동기를 작동시켜 유입브라인의 온도를 -3℃, -5℃, -7℃로 맞추고, 유량을 2LPM, 4LPM, 6LPM으로 변화시켜 가면서 빙축열조내로 유입시킨다.
3) 실험시간은 심야전력 시간대에 맞추어 8시간으로 하고, 빙축열조내 33곳에 설치한 T-type 열전대를 이용하여 1분 간격으로 온도를 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 유량 변화에 의한 영향

Fig. 2와 Fig. 3은 유입 브라인 온도를 -5℃, τ=0.5인 경우 유입 유량변화에 따른 빙축열조 축방향 중앙 부분의 무차원 온도 분포

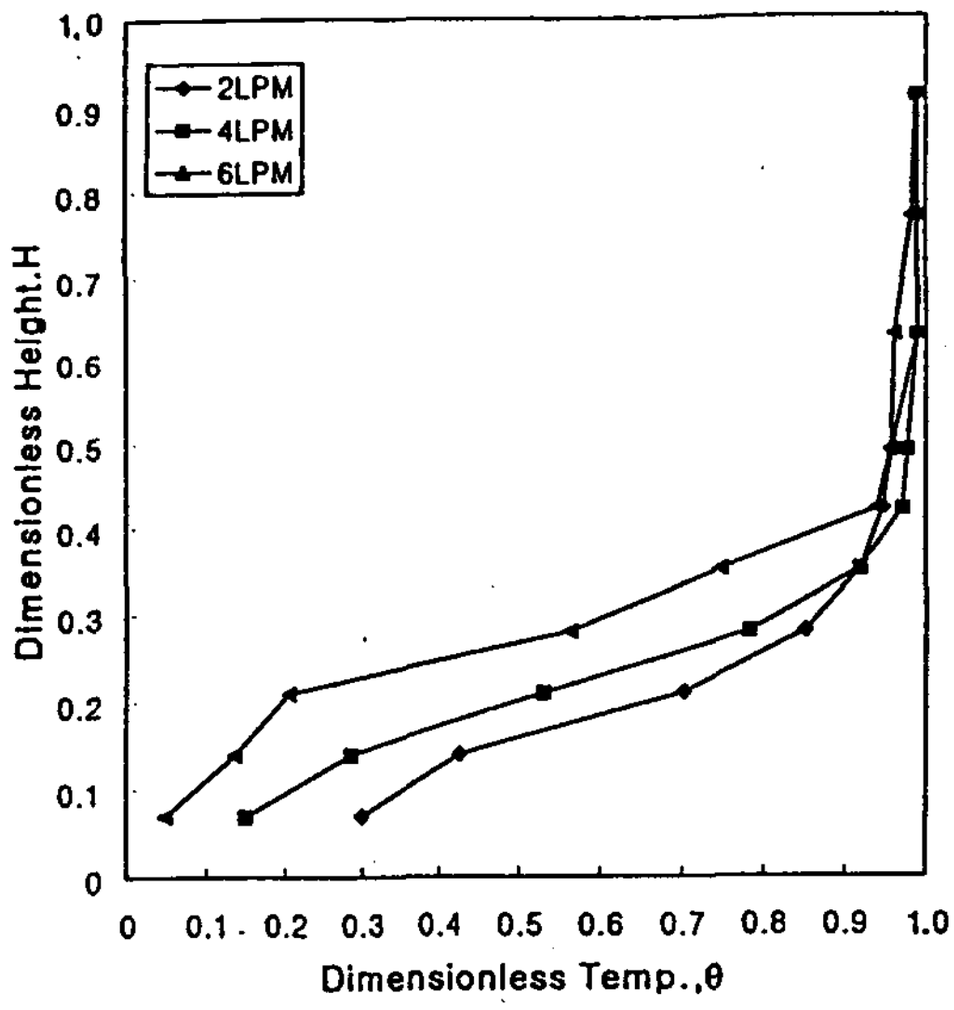

Fig. 2 Vertical dimensionless temperature profiles in a storage tank due to flow rate during charging processes for up-ward, T_i 1=-5℃ and τ = 0.5

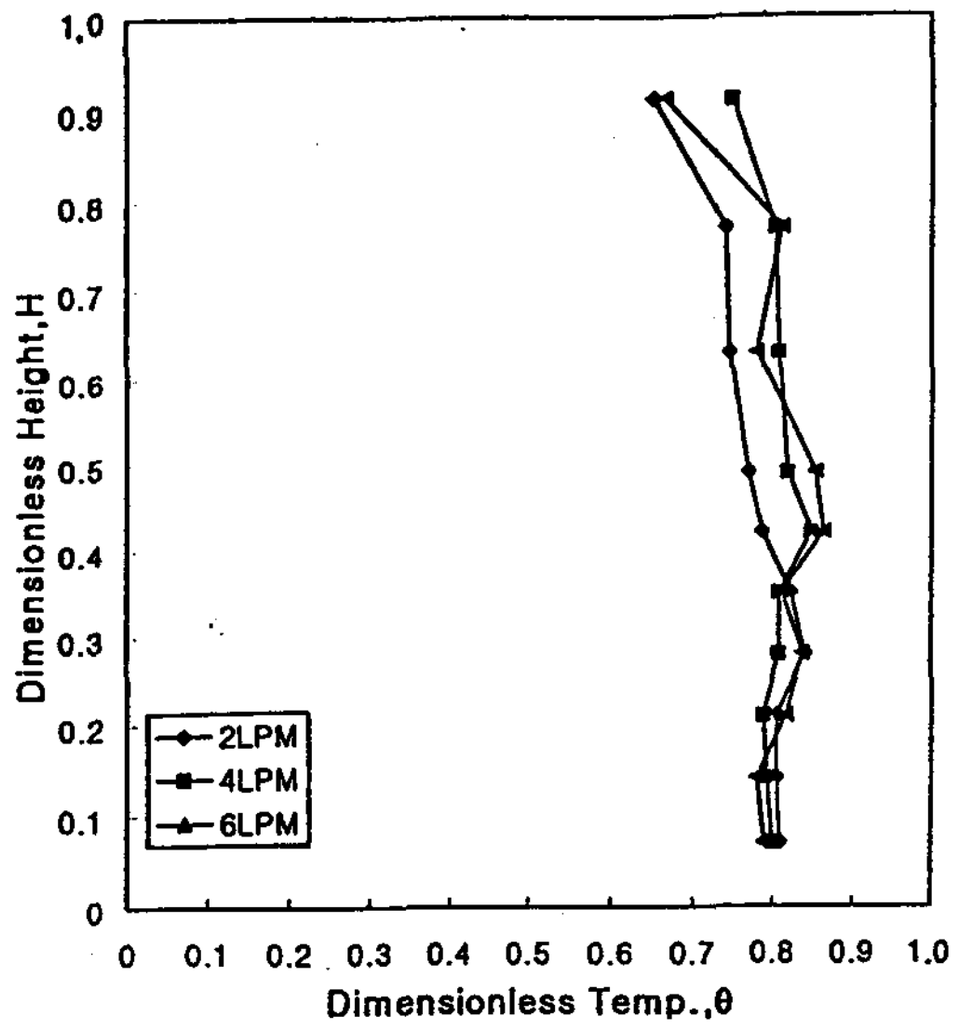

Fig. 3 Vertical dimensionless temperature profiles in a storage tank due to flow rate during charging processes for down-ward, T_i 1=-5℃ and τ = 0.5

를 조내 브라인의 상향 유동 방식과 하향 유동방식에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 2는 유입유량을 2LPM, 4LPM, 6LPM으로 변화시킨 상향 유동의 경우로 빙축열조내 온도부포는 유량이 증가할수록 성층이 잘 일어나고 잇음을 볼 수 있다. 특히 2LPM의 경우 빙축열조내로 유입된 저온의 브라인이 유입 초기부터 조내의 바닥 부분의 온도가 높게 나타나고 있다. 이것은 유량이 적을수록 Ice Ball로의 열전도가 많이 일어나 조내의 브라인이 빙축열조 상부로 이동되어 갈수록 혼합이 빨리 일어나기 때문이다.

Fig. 3은 Fig. 2와 동일한 조건에서 브라인을 하향유동을 시킨 경우이다. 그림에서와 같이 하향유동에서는 유량변화에 관계없이 온도구배가 거의 보이지 않고 있다. 이는 조 상부와 하부와의 온도차가 크게 나타나지 않고 있으며, 또한 조 상부로 유입된 저온 브라인의 밀도차로 인한 하향유동과 조 하부의 높은 온도의 저장수가 부력에 의하여 상승하면서 나타나는 현상으로 혼합이 빨리 일어나기 때문이다. 즉, Ice Ball로의 열전도에 관계없이 혼합의 속도가 빠르다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 Fig. 2, 3과 동일한 조건에서 시간을 연장시켜 혼합이 일어나는 경향을 본 것으로 Fig. 4의 경우와 같이 빙축열조내 브라인의 유동이 상향인 것은 τ=0.5 부근에서 성층이 시작되어 τ=0.75 부근에서 빙축열조 무차원 높이 0.15~0.6사이에 성층을 이루고 있으나, τ=1.25가 지나면서 Ice Ball로의 열전도와 하부와 상부 사이의 브라인 온도차가 감소되어 시간이 경과할수록 조 상부에서 혼합의 속도가 점점 빨라지고 있음을 볼 수 있다. Fig. 5의 경우와 같이 하향유동인 경우에는 상·하부의 온도차가 시간이 경과하여도 크게 증가하지 않고 있다.

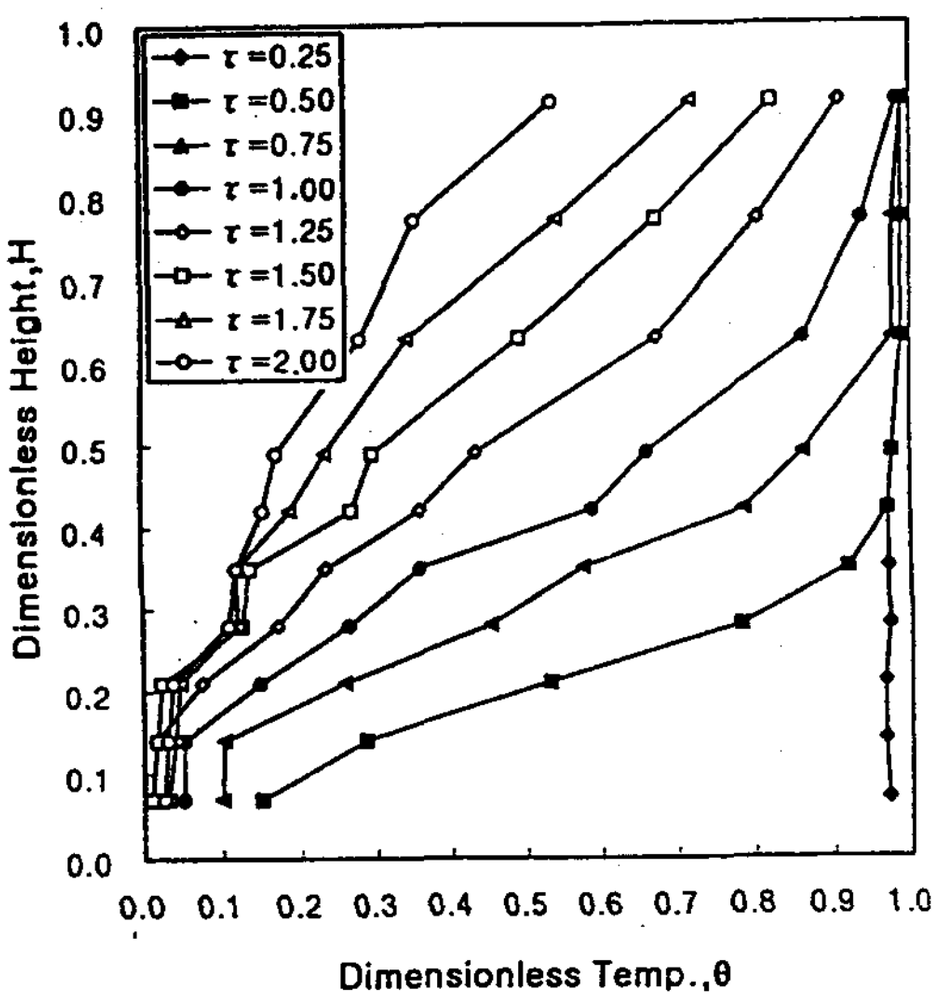

Fig. 4 Vertical dimensionless temperature profiles in a storage tank due to flow rate during charging processes for up-ward, T_i 1=-5℃ and Q= 4LPM

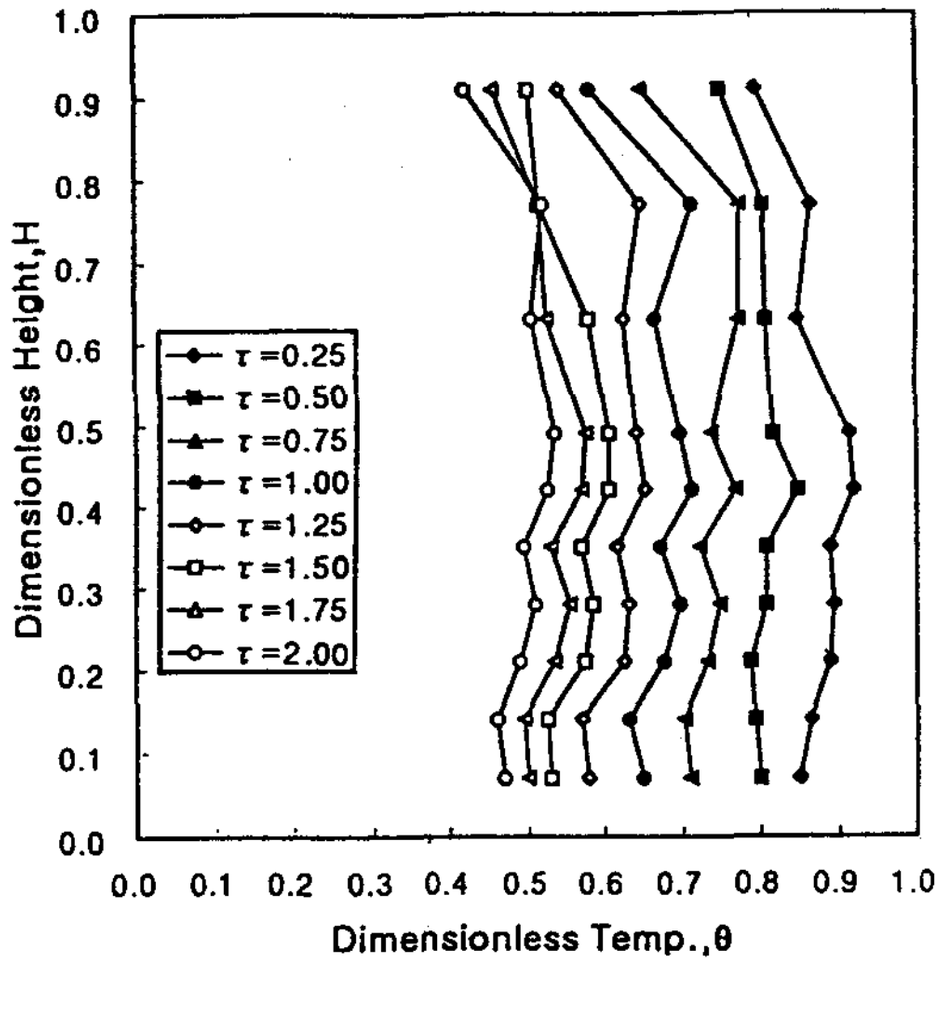

Fig. 5 Vertical dimensionless temperature profiles in a storage tank due to flow rate during charging processes for down-ward, T_i 1=-5℃ and Q= 4LPM

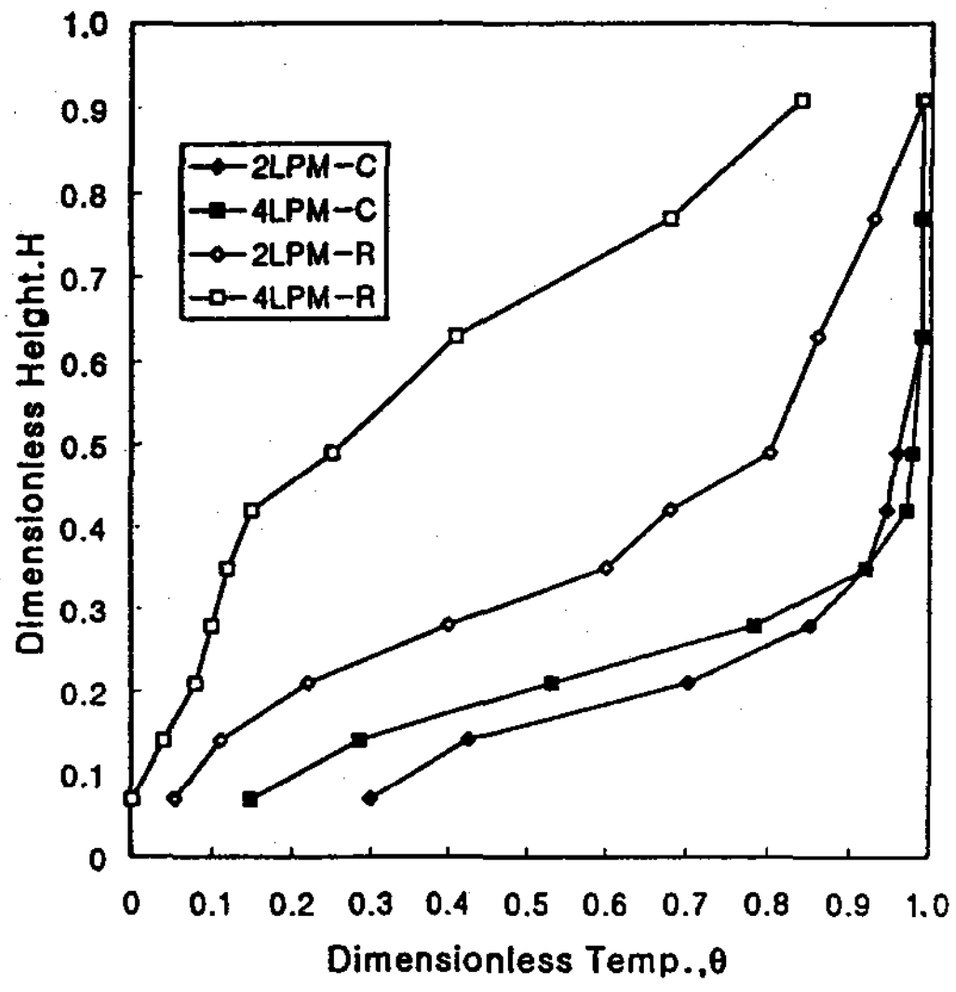

Fig. 6 Vertical dimensionless temperature profiles in a cylindrical and rectandular storage tank for charging processes for up-ward and T_i 1=-5℃

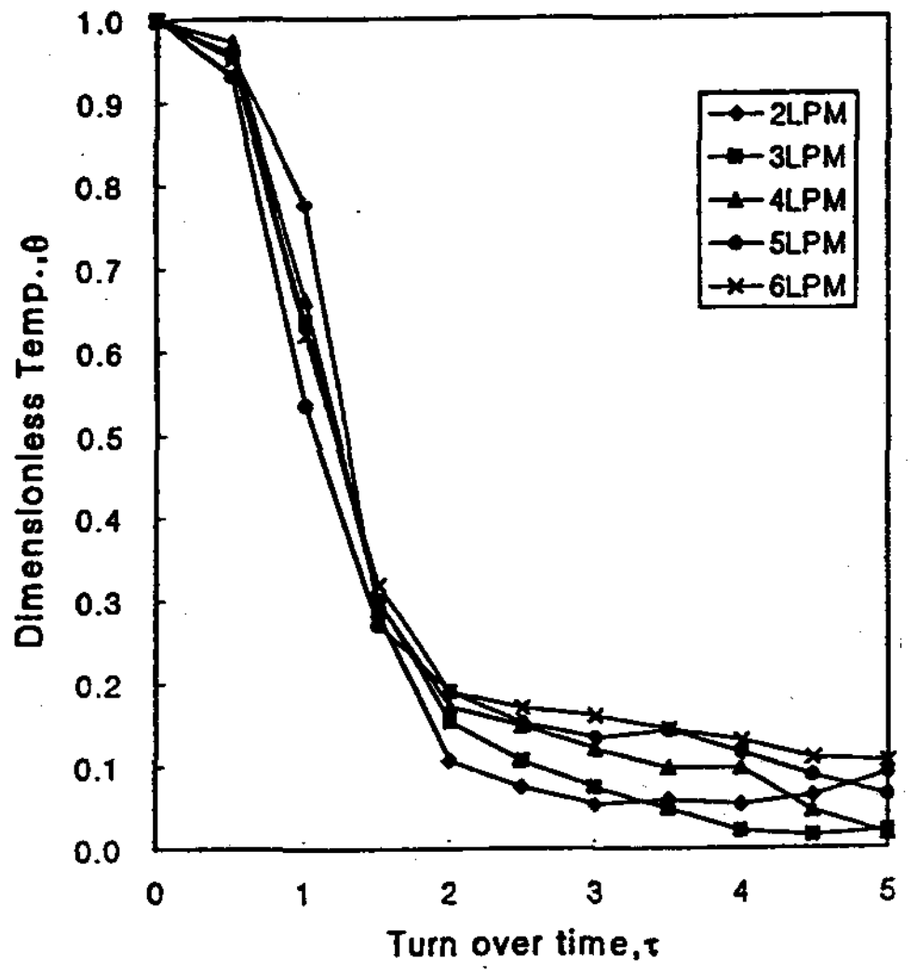

Fig. 7 Dimensionless temperature profiles in a Ice Ball during charging processes for up-ward and T_i 1=-5℃

Fig. 6은 사각형과 원통형 빙축열조에 대한 무차원 수직온도 분포를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 높이가 높은 원통형 빙축열조가 성층이 잘 일어나고 있음을 알 수 있다. 이것은 사각형 빙축열조의 경우 브라인의 수평방향으로의 이동 시간이 길어서 Ice Ball로의 열전도에 의한 혼합이 잘 일어나기 때문이다.

Fig. 7과 Fig. 8은 빙축열조 중심부분에 있는 Ice Ball 내부의 무차원 온도변화를 나타낸 것이다. Fig. 7은 상향유동으로 Ice Ball 내의 온도가 τ=2를 경과하면서 정상상태에 도달하여 거의 선형적으로 변화하면서 강하된 것을 보여주고 있으며, Fig. 8은 하향유동으로 완만한 곡선을 그리며 강하하는 것으로 보아 빙축열조내로 유입된 저온의 브라인이 Ice Ball과의 열전달 외에도 조 하부로부터 올라오는 고온의 저장수와의 혼합 마찰이 발생하고 있다.

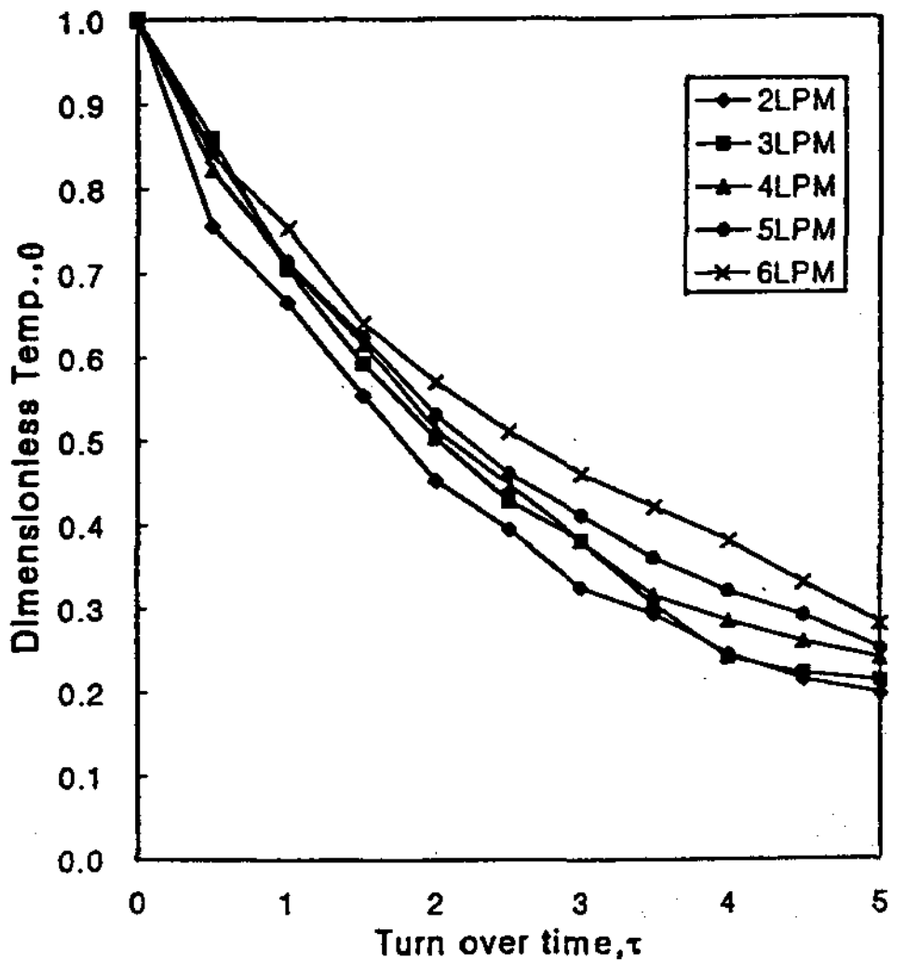

Fig. 8 Dimensionless temperature profiles in a Ice Ball due to during charging processes for down-ward and T_i 1=-7℃

4.2 유입 온도에 의한 영향

Fig. 9는 유입온도를 -3℃, -5℃, -7℃로 변화시킨 상향유동의 경우로 축열조내 축방향 무차원 온도분포는 유량이 일정하면 유입온도의 변화가 조내의 유동특성에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

Fig. 10과 Fig. 11은 상·하향 유동방식의 시간에 따른 조 중심부에 위치한 Ice Ball내의 무차원 온도변화를 나타낸 것으로 상향유동의 경우는 축열 초기 급격한 온도 강하를 나타내다가 τ=2 부근부터 완만한 하강곡선을 그리고 있으며 유입온도가 낮을수록 온도 강하는 크게 나타났다. 또한 상향유동의 경우는 유입온도에 관계없이 빙축열초기부터 완만한 곡선을 그리고 있다.

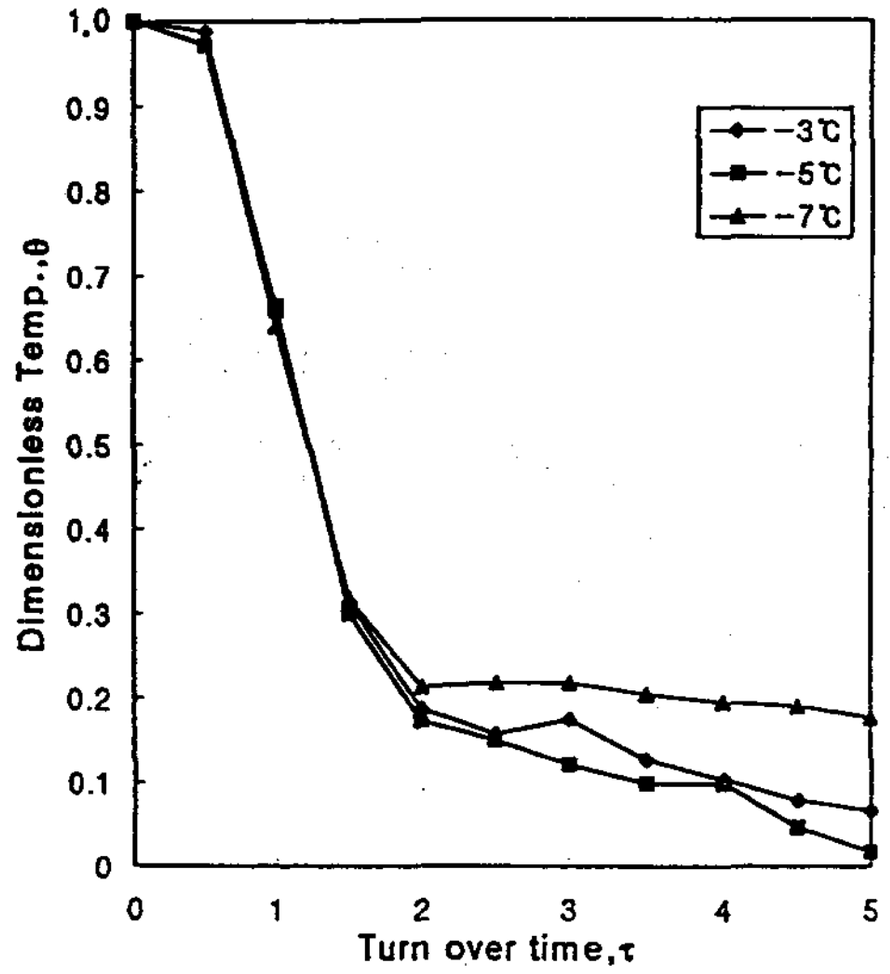

Fig. 10 Vertical dimensionless temperature profiles in a Ice Ball due to time charging processes for up-ward, and Q= 4LPM

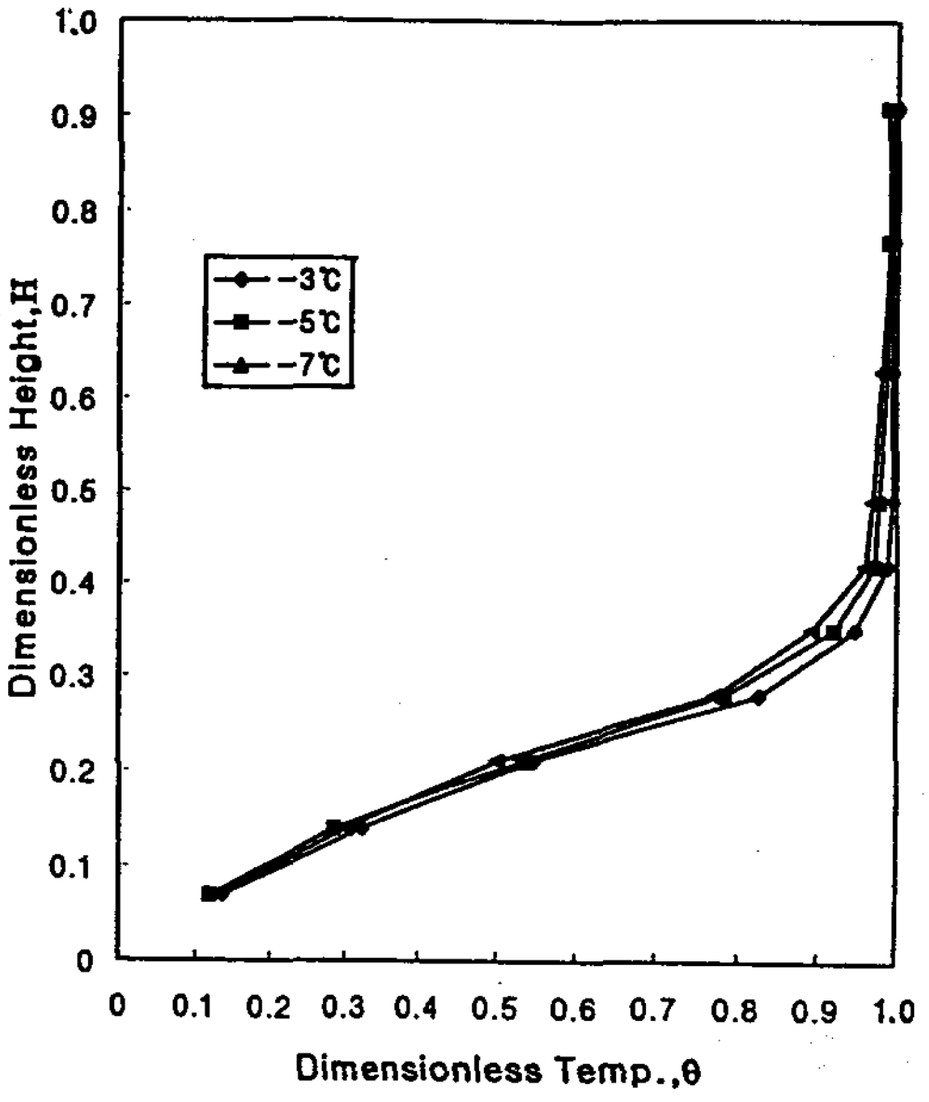

Fig. 9 Vertical dimensionless temperature profiles in a storage tank due to temperature difference during charging processes for up-ward, τ=0.5 and Q= 4LPM

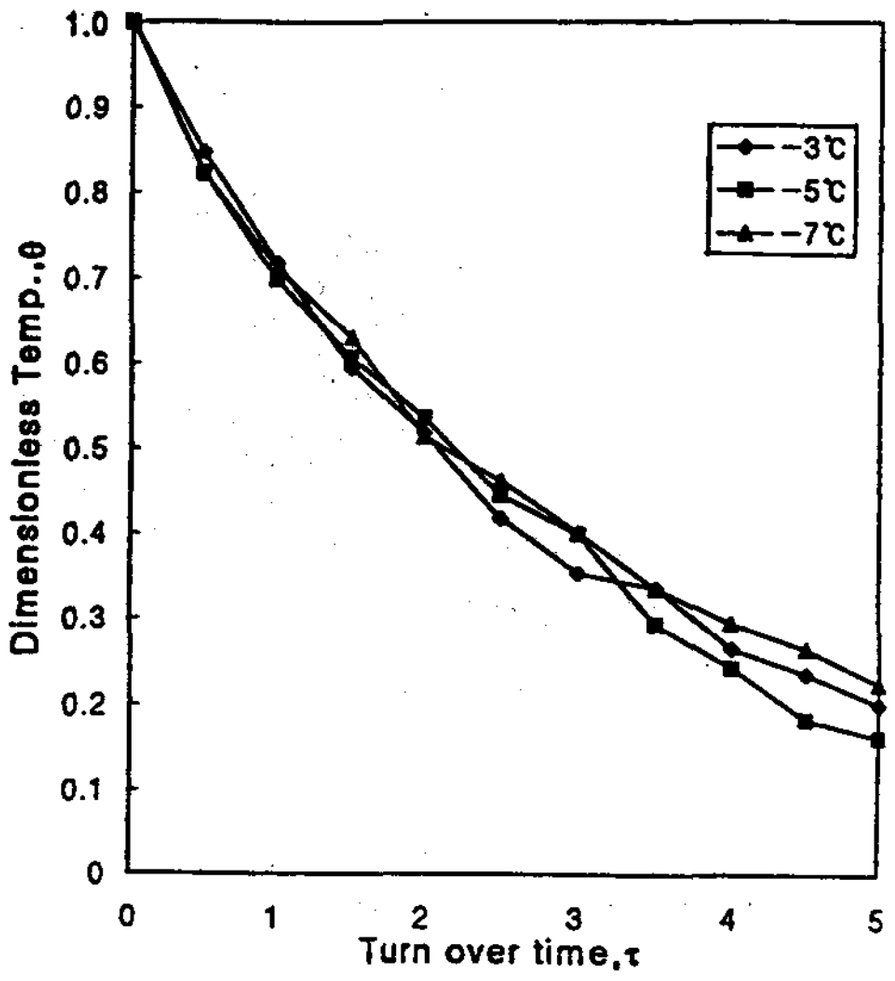

Fig. 11 Vertical dimensionless temperature profiles in a Ice Ball due to time during charging processes for down-ward and Q= 4LPM

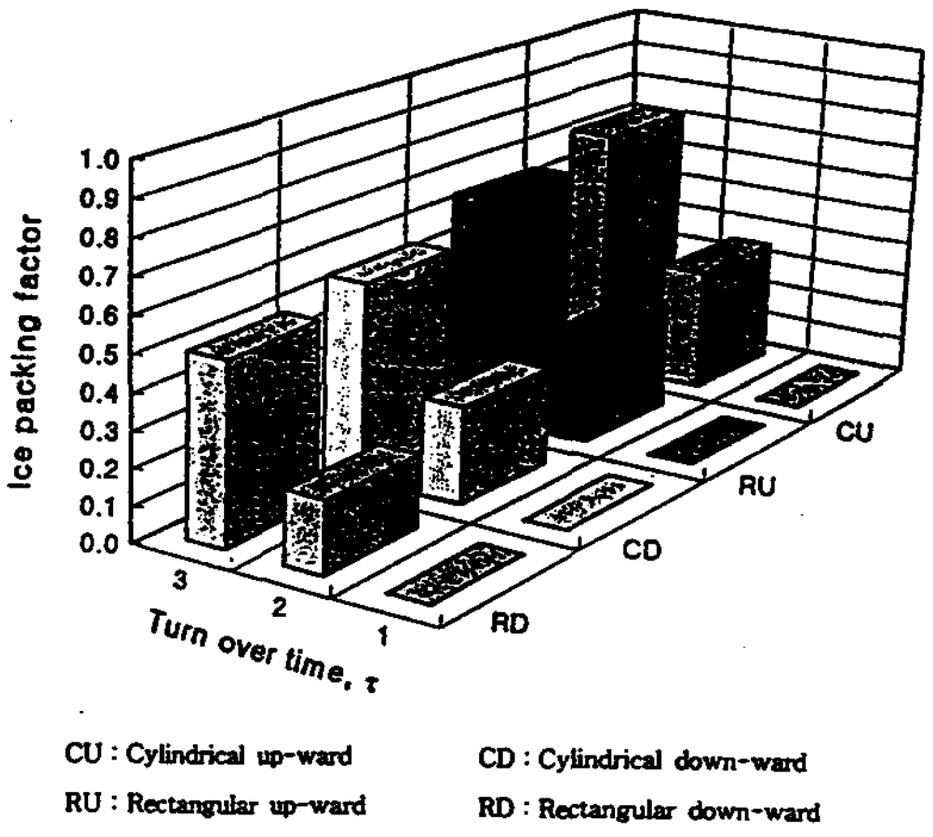

Fig. 12 Variation of ice packing factor with due to flow direction and profiles for charging processes(T_i = -3℃)

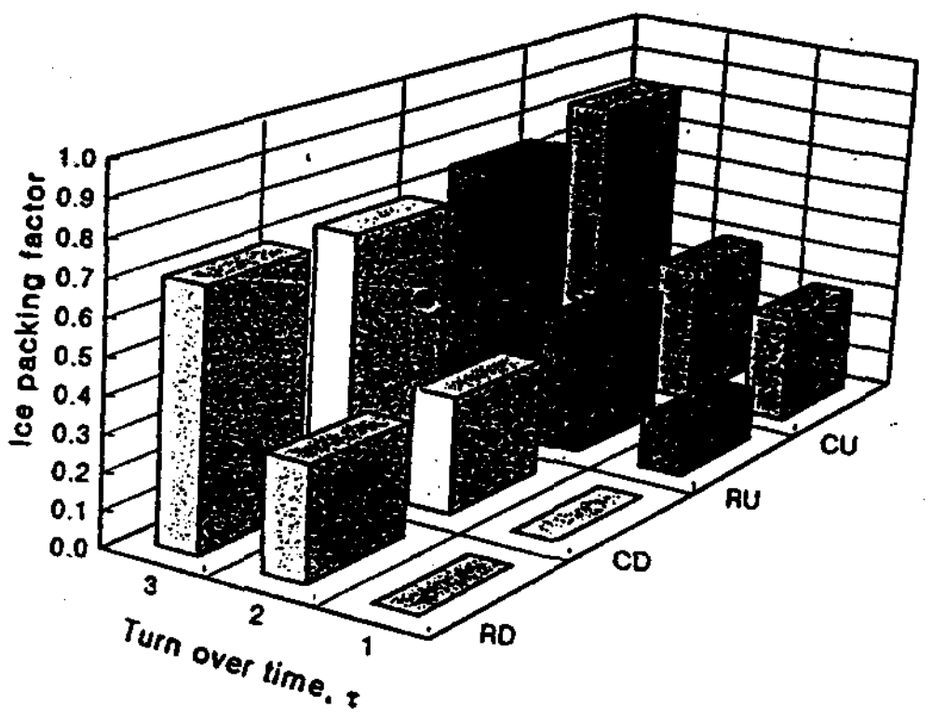

Fig. 13 Variation of ice packing factor with due to flow direction and profiles for charging processes(T_i = -7℃)

4.3 빙충전율

Fig. 12는 빙축열조내 저온 브라인의 상·하향유동과 실험에 이용한 사각 및 원통형 빙축열조내의 유입온도가 -3℃인 경우로 충수시간 τ=1, τ=2, τ=3에 대하여 Ice packing factor을 나타낸 것이다. 실험결과 상향유동인 경우 원통형 빙축열조는 τ=1인 경우 0%, τ=2인 경우는 30%이고 τ=3인 경우는 63%의 빙충전율을 나타내고 있으며, 이것은 원통형 빙축열조의 하향유동, 사각형 빙축열조의 상향·하향유동보다 높은 충전율로서 그 진행과정은 τ=1일 때는 모두 IPF=0을 나타내지만 τ=2부터 원통형 및 사각형 빙축열조내 상향유동이 약 30% 정도로 하향유동보다 높게 나타났다. 또한 시간이 경과함에 따라 IPF의 차는 56~63%와 45~50%로 커졌다. 따라서 원통형 빙축열조의 경우 상향유동이 가장 빠른 제빙효과가 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 Fig. 12와 동일 조건하에서 유입온도만 -7℃로 한 경우의 빙충전율을 나타낸 것이다. 전체적으로 Fig. 12와 비슷한 경향을 나타내고 있지만, τ=3일 경우를 살펴보면 사각 하향유동은 52%, 원통형 하향유동은 55%, 사각 상향유동은 69%, 원통형 상향유동은 가장 빠르게 진행되어 72%의 높은 충전율을 나타내고 있다.

5. 결 론

빙축열 시스템에 대한 연구는 실제 공기조화 설비에 있어서 시스템 성능을 향상시키고 에너지를 효율적으로 이용할 수 있게 한다.

이러한 빙축열 시스템에 대한 조내 유동특성 및 빙충전율을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 빙축열조내 Ice Ball로의 열전도에 대한 영향이 미소하므로 저온의 브라인이 빠른 시간에 유출구를 통하여 유출되기 때문에, 유량이 큰 경우에는 유입 브라인과 초기 저장수와의 온도차 영향을 많이 받는다. 그러므로 빙축열시 저유량으로 온도차가 클수록 빙축열율이 증가하는 반면 유량이 증가할수록 유입 브라인의 온도차에 대한 영향이 감소하는 것을 볼 수 있다.

2) 유입온도가 낮을수록, 빙축열조내 유동이 상향유동이고, 빙축열조의 형태가 횡형 사각형 빙축열조 보다는 입형 원통형 빙축열조일 때 조내 Ice Ball의 빙충전율이 높게 나타났다.

참 고 문 헌

1. S. Kakac, E. Paykoc and Y. Yener, 1989, "Energy Storage System", Kluwer Academy Publishers, pp. 129-161.
2. H. P. Garg, S. C. Mullic and A. K. Bharagava, 1985, "Solar Thermal Energy Storage", D. Reidel Publishing Company, pp. 82-128.
3. C. Den Ouden et al., 1977, "Thermal Storage of Solar Energy", pp. 173-258.
4. T. Saitoh, 1983, "A Study on the Latent Heat Thermal Energy Storage Reservoir of Spherical Capsule Type", Refrigeration, Vol. 58, No. 672, pp. 21-28.
5. H. Tetsuo and U. Hideki, 1986, "Heat transfer of thermal energy storage Capsule", JSME, Vol. 53, No. 480, pp. 204-209.
6. J. Yoo, M. W. Wildin and C. R. Truman, 1986, "Initial Formation of a Thermocline in Stratified Thermal Storage Tank", ASHRAE Transactions, Vol. 92, Part 2, pp. 280-292.
7. M. Yamaha, 1991, "Studies on Thermal Characteristics of Ice Storage Tank", SHASE of Japan, No. 46.
8. N. Kamiya, S. Yoshiyuki et al., 1993, "High Density Heat Storage Tank Using Spherical Capsule Type Latent Heat Accumulators", SHASE of Japan, pp. 425-429.
9. 이원섭, 1996, "Ice Ball의 크기가 빙축열조내 열유동 특성과 빙축열 효과에 미치는 영향" 성균관대학교 박사학위 논문.

An Experimental Study on Characteristics of Heat Flow in the Cylindrical Storage Tank with Ice Ball

Y. G. Jang*, W. S. Lee **, J. W. Pak***

* *Graduate School, Sung Kyun Kwan University*
** *Won Ju Junior College*
*** *Yu Han Junior College*

Abstract

The study on ice thermal storage system is to improve total system performance in actual air-conditioning facilities. To abtain the high efficiencies in ice thermal storage system, the improvement of thermal stratification is essential, therfore the process flow must be piston flow in thermal storage tank.

Ice packing factor is better on condition that the inflowing temperature is low, the flow direction in the thermal storage is upward and the cylindericalthermal storage type is used.

This result shows that the cylinderical ice storage tank has better storage capacity than the rectangular type in case of the same porocity.