

빙축 및 냉방열과정중 냉각유체와 Ice Ball사이의 열적 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Thermal Characteristics
between Cooling Fluid and Ice Ball during Charging
and Discharging Processes

박경원(성균관대 원), 박이동, 황영규, 김윤제(성균관대)

Abstract

This paper deals with experimental study on thermal characteristics that a cooling fluid is affected to ice ball as being measuring the temperature in storage tank and ice ball governing the rate of heat storage. Distributor was taken as inlet geometry factor. Flow rate of cooling fluid which was a brine were 2, 4, and 6LPM, and 8, 10, and 12°C in the temperature difference for dynamic factors with respect to three ice ball types(103, 96, 76mm).

In case of inflowing cooling fluid, since inertia force is suppressed by lower flow rate the amount of heat was transferred to ice ball by heat conduction high because density difference is high. And in case of larger ice ball, a long-term storage was available because reaching time at steady state is relatively long. Consequently, smaller ice ball could be suitable to a short-term storage.

1. 서 론

연료를 비롯한 각종 에너지원으로부터 동력이나 다른 형태의 열에너지로의 전환 시에 효율을 최대화하고 에너지를 이용할 때 발생하는 비가역적인 손실을 최소화함과 동시에 이에 소요되는 경제적인 비용을 적정한 선으로 유지함은 에너지의 합리적 이용에 있어서 항상 대두되는 문제점들이다. 이러한 관점에서 볼 때 시간에 따른 부하 변동을 평균화하여 조절할 수 있는 축열은 에너지의 이용에 있어서 대단히 중요한 문제로 부각되고 있다.

빙축열 냉방시스템(Ice Thermal Storage System)은 야간에 얼음을 생성하여, 저장하였다가 주간에 이 얼음을 녹여서 건물의 냉방에 활용하는 시스템이다. 그리고, 빙축열 시스템을 도입할 때, 예상되는 장점으로는 열원 기기의 운전시간이 연장되므로, 냉동기 및 열원설비 용량감소가 가능하고, 심야전력 사용에 따른 전력 사용비의 절감 및 수전 설비와 계약전력 감소에 의한 기본 전력비의 절감이 가능하다. 또한, 공급 열원 기기를 전 부하 연속운전에 의해 정격운전이 가능하고, 부하 변동이 심하거나 공조계통 시간대가 다양한 곳에서도 안정된 열공급이 가능하다.

본 연구는 실제 빙축열량과 연관되는 Ice Ball에 관한 해석을 하여 냉각유체와의 열전도에 의한 영향을 고찰하여 최적의 빙축열 시스템을 개발 및 시공하는데 있어서 필요한 기초자료를 제시하기 위하여 실제 실험을 통해 빙축열 및 냉방열 과정동안 Ice Ball과 냉각유체 사이의 열적 특성을 고찰하고자 하는데 그 목적을 두고 있다.

Ice Ball의 온도특성을 해석하기 위하여 빙축열 및 냉방열 과정동안 동적·기하학적 인자에 따라 Ice Ball에 미치는 영향을 밝혀서 최적인자를 결정하고, 정상상태에 도달하는 시점을 알아보고, 빙축열 과정동안 축열조 내로 유입되는 냉각브라인과 Ice Ball과의 열전도에 의한 영향을 알아보고자 한다.

2. 무차원 온도

빙축열 및 냉방열 과정동안 Ice Ball과 축열조 내부의 온도를 해석하기 위해서 유량과 기준온도차가 다른 각각의 실험 data를 해석하기 위해서 실험 결과치를 무차원화 하였다.

무차원 온도는 각 조건에 따른 실험결과들을 해석하는 데 있어서 동일 조건하에서 비교, 고찰하기 위해서 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{무차원 온도} : \theta = \frac{T_s - T}{T_s - T_i}$$

T : 각 측정지점 온도 (℃)

T_i : 축열조내 유입 온도 (℃)

T_s : 축열조내 초기 온도 (℃)

θ : 무차원 온도

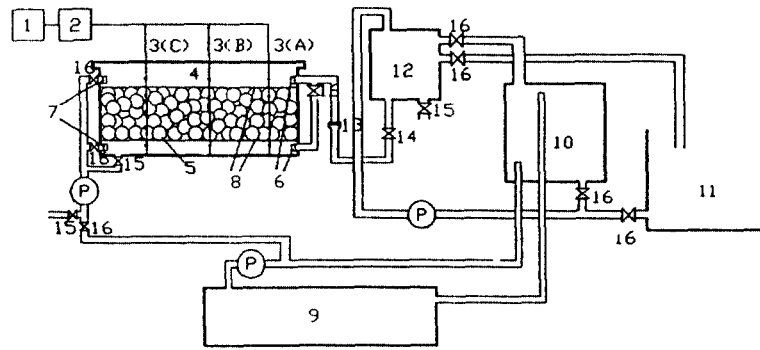
3. 실험

3.1 실험장치 개요

본 연구의 실험장치는 축열조(833ℓ), 냉동기(CR-W5GG1, 13800kcal/h), 보조공급탱크, 정압탱크, 순환펌프, 유출입구(distributor), 유량계, 유량조절밸브, PVC 파이프 및 측정장치 등으로 이루어졌다. 측정장치로는 data logger(model:YOKOGAWA DA 2500E)를 사용하여 측정된 data를 직접 computer로 받아들였다. Fig. 3.1은 실험장치의 개략도를 나타내고 있다.

축열조는 빙축열 과정중의 저온내압에 충분히 견딜 수 있도록 두께가 10mm인 안전강화 아크릴로 제작하였고 열손실 방지를 위해 두께가 20mm인 유리섬유와 두께 15mm인 스티로폼, 10mm의 은박보드를 사용하여 충분히 단열시켰다.

냉동기는 왕복식 냉동기(CR-W5GG1, 4RT)이고 빙축열 시 저온의 Brine을 일정 온도로 축열조 내부로 유입시키기 위한 보조공급탱크(sub-tank(brine), 200ℓ)와 냉방열시 일정 온수를 공급시키는 보조공급탱크(sub-tank(water), 3000ℓ)를 축열조와 같이 열손실을 방지하기 위해 20mm두께의 유리섬유와 10mm두께의 은박 단열 보드로 단열시켰다. 게이트밸브와 정압탱크(300mm×300mm×



- | | | | |
|-----------------------|-----------------|--------------------------|------------------------|
| 1. Personal Computer | 5. Ice Ball | 9. Chiller | 13. Flow Meter |
| 2. Data Logger | 6. Inlet Union | 10. Sub-Tank (Brine) | 14. Flow Control Valve |
| 3. Thermocouple Probe | 7. Outlet Union | 11. Sub-Tank (Water) | 15. Drain Valve |
| 4. Ice Storage Tank | 8. Grid | 12. Static Pressure Tank | 16. Gate Valve |

Fig. 3.1 Schematic diagram of experimental apparatus

300mm)를 사용하여 일정한 유량으로 공급할 수 있도록 하였고, 유출입구 형상은 distributor(두께 3.6mm, 직경 20mm, 길이 600mm의 PVC 직관, 구경 4mm의 분배공 47개)를 사용하였다. Fig. 3.2는 유출입구 형상의 개략도이다.

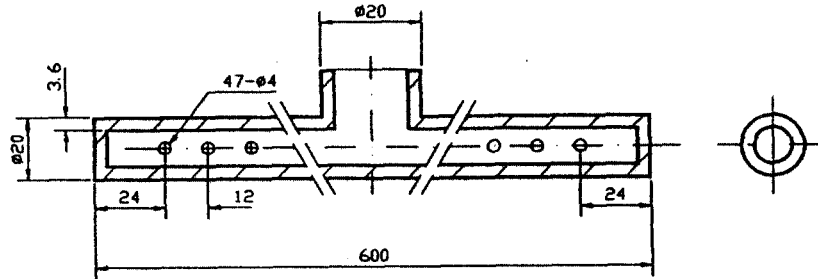


Fig. 3.2 Schematic diagram of distributor

냉동액으로는 에틸렌글리콜($\text{CHOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) 25%의 브라인(brine)을 사용하였고 축열재로는 Ice Ball을 각각 103mm, 96mm, 76mm 3가지로 사용하였다.

Ice Ball의 외부재질은 고밀도폴리에틸렌(HDPE)이고 내부는 증류수와 제빙을 용이하게 하기 위한 약간의 무기물질의 혼합액이며, 빙점은 0°C 로서 1개당 축열가능한 잠열량은 약 40 kcal이고 비열은 내부가 물일 경우 $0.96 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$, 얼음일 경우는 $0.62 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$ 이다. 측정 장치는 축열조 내 저장수의 국소 온도를 측정하기 위해 T형 $\phi=0.1\text{mm}$ 의 열전대를 6개의 스테인레스 봉(probe)에 5개씩 30개를 등간격(100mm)으로 부착시켰고, 18개의 열전대를 Ice Ball내에 삽입하여 빙축열, 냉방열과정 동안 data logger(model : YOKOGAWA DA 2500 E)를 이용하여 5분 간격으로 각 열전대로부터 검출하였다. Fig. 3.3와 Fig. 3.4는 축열조와 Ice Ball내부의 열전대 위치도를 나타낸 것이다.

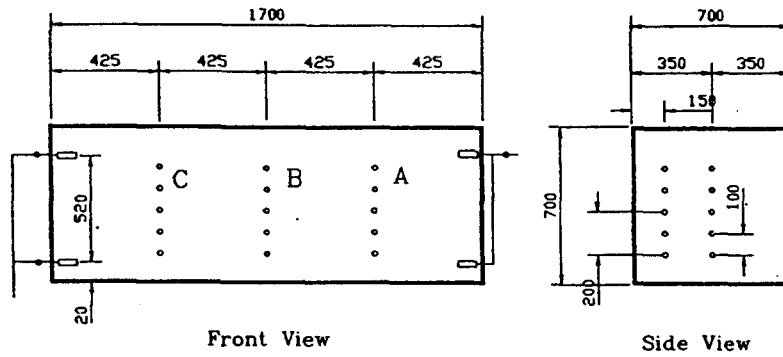


Fig. 3.3 Sketch showing location of thermocouples in the ice storage tank

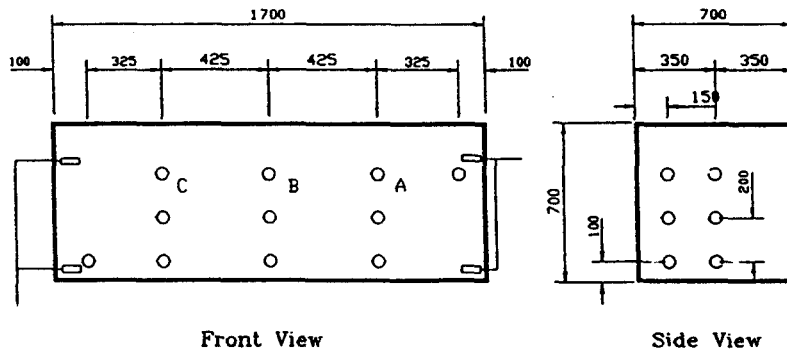


Fig. 3.4 Sketch showing location of thermocouples in Ice Ball

3.2 실험 방법

- (1) 시스템을 빙축열시스템으로 전환(축열조와 sub-tank(b)를 연결하고 각 valve를 조절)한다.
- (2) 전체 시스템을 가동하여 축열조의 온도를 실험 조건에 맞도록 5°C로 조절 한 뒤 축열조로의 순환을 정지시키고 sub-tank(b)의 온도를 설정한 유입온도로 맞춘다.
- (3) 보조공급탱크(sub-tank(b)) 내의 온도가 요구 조건에 도달하면 전체 시스템을 순환시켜 빙축열 실험을 8시간 동안 수행한다.
- (4) 빙축열 실험이 끝난 후 축열조 내부의 brine을 sub-tank(b)로 회수하며 빙축열 시스템을 냉방열 시스템으로 전환(축열조와 sub-tank(w)를 연결하고 각 valve를 조절)한다.
- (5) 보조공급탱크(sub-tank(w))로부터 유입되는 상온의 수돗물을 이용하여 냉방열 실험을 8시간 동안 수행한다.

4장 결과 및 고찰

4.1 Ice Ball의 온도특성

4.1.1 유동율에 의한 영향

Fig. 4.1은 Ice Ball 76mm로 유입온도를 -3°C 를 기준으로 유입유량을 2LPM, 4LPM, 6LPM으로 변화시켰을 때 전축열 시간에 대한 무차원 온도변화를 나타내고 있다. 축열 초기의 온도특성은 유동율이 큰 경우가 높은 온도구배를 나타내고 상대적으로 유동율이 작은 경우는 낮은 온도구배를 보이고 있다. 축열이 시작되어 405분까지 계속 비슷한 경향으로 진행됨을 알 수 있고 405분 이후는 정상상태를 나타내고 있는데 이는 유동율이 감소할수록 축열조내 저온의 유입수가 빠른 속도로 조내 온도를 하강시키므로 Ice Ball의 열전도에 대한 전열량은 상대적으로 증가되기 때문이다.

Fig. 4.2와 Fig. 4.3은 Fig. 4.1과 동일 조건하에서 유입온도를 -5°C 와 -7°C 로 변화시킨 경우에 대하여 나타내고 있는데 유입온도가 -5°C 일 경우는 Fig. 4.1과 거의 유사한 경향을 보이고 있으나 Fig. 4.3의 경우는 유입온도의 영향을 받아 유동율의 변화가 크게 나타나고 있는데 이는 저온의 유입유량에 대한 Ice Ball내의 열전도의 영향은 급속도로 진행되기 때문이다. 그러므로 유입온도가 낮은 온도로 유입될수록 더욱 유동율은 고유동율의 선정이 이 열전도에 대한 전열량을 증가시킬 수 있다고 할 수 있다.

4.1.2 기준 온도차에 의한 영향

Fig. 4.4는 76mm Ice Ball로 유입유량을 2LPM으로하고 유입온도를 -3°C , -5°C , -7°C 로 변화시켰을 때 전축열 시간에 대한 무차원 온도변화를 나타내고 있다. 축열 초기온도특성은 2LPM인 경우 온도구배의 영향은 큰 차이를 나타내고 있는데 저유량으로 진행시 조내 유입온도의 영향이 크므로 Ice Ball내의 열전도에 대한 영향이 크게 나타남을 알 수 있고 이는 155분까지 계속되고 있으며 그 이후 서서히 안정되는 경향을 보이고 있다.

Fig. 4.5와 Fig. 4.6은 Fig. 4.4와 동일조건하에 유입유량을 4LPM과 6LPM으로 변화시킨 각 경우에 대하여 나타내고 있으며 이는 유동율이 증가할수록 Ice Ball내의 열전도에 대한 전열량의 영향은 감소함을 알 수 있다. 특히 6LPM인 경우 축열초기부터 유동율 변화에 대한 영향이 거의 차이가 없음을 알 수 있었다. 그러므로 유동율의 적절한 선정이 축열량을 효과적으로 이용할 수 있는 중요한 요인이 되고 저유동율의 적절한 선정이 필요하다고 할 수 있다.

4.2 축열조내부와 Ice Ball내부의 온도특성

Fig. 4.7과 Fig. 4.8은 유량을 2LPM으로 일정하게 하고 유입온도 -3°C 와 -7°C 에 대한 축열조내와 Ice Ball내의 축열과정동안의 온도분포를 보여 주고 있다.

Fig. 4.7은 Ice Ball 76mm인 경우 축열조내부로 유입된 저온의 브라인이 빠르게 Ice Ball내에 열전달되는 경향을 보이고 있으며 이는 305분 정도에서는 정상상태로 진행됨을 볼 수 있다.

Fig. 4.8도 Fig. 4.7에서와 동일 조건하에 유입온도만 -7°C 로 한 온도특성을

나타내고 있는데 유입온도의 영향이 전도량에 큰 영향을 줄 수 있다. 이는 초기 유입 유체와 상변화 물질 사이의 열전도에 의한 영향이 크게 지배됨을 알 수 있다.

Fig. 4.9와 Fig. 4.10은 유입유량을 2LPM으로 일정하게 하고 유입온도 -3°C 와 -7°C 에 대한 축열조와 Ice Ball내의 축열과정동안의 온도분포를 나타내고 있다.

Fig. 4.9는 Ice Ball이 103mm인 경우 저온의 유입브라인이 초기 150분까지는 열전도되는 전열량이 거의 미소하게 진행되고 150분 이후부터는 상대적으로 Ice Ball내의 전열이 빠르게 진행되어 정상상태를 나타내고 있으며 Fig. 4.10은 Fig. 4.9와 동일조건하에 유입온도를 -7°C 로 한 경우의 온도특성을 나타내고 있다.

유입온도 -7°C 인 경우는 -3°C 인 경우에 비하여 초기부터 축열조내의 온도가 Ice Ball내로 급격히 진행됨을 알 수 있으며 이는 초기유입유체와 상변화물질 사이의 열전도에 의한 영향이 유입온도에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

4.3 Ice Ball내의 방열특성

Fig. 4.11은 유입온도 -3°C , 유입유량이 2LPM으로 축열시키고 기하학적 인자인 Ice Ball을 103mm, 96mm, 76mm 크기로 변화시킨 경우의 방열과정에 대한 온도특성을 나타내고 있다. 76mm Ice Ball은 열전도의 영향이 빠르게 진행되어 초기 30분 이후 급격히 해빙됨을 알 수 있는데 Ice Ball 96mm와 103mm는 1시간 정도 지나서 서서히 해빙됨을 알 수 있는데 이는 Ice Ball의 축열량이 크기 때문이다.

Fig. 4.12는 Fig. 4.11과 동일조건하에 유입온도를 -7°C 로 한 경우 방열과정동안의 온도분포를 나타내고 있으며 전반적으로 Ice Ball 크기에 따른 영향은 작아지고 축열량이 크기 때문에 저장된 축열량을 효과적으로 이용할 수 있고 유입온도를 낮게 하는 것이 축열량을 증가시킬 수 있다고 할 수 있다.

5. 결 론

- (1) Ice Ball내의 온도특성은 저온의 유입수가 유입될 때 Ice Ball내의 열전도에 대한 전열량이 증가된다.
- (2) 기준온도차에 의한 영향은 유동율이 클수록 감소하고 유동율이 작을수록 온도차에 의한 영향을 많이 받게 된다.
- (3) 축열조와 Ice Ball 내부의 온도특성은 유입온도의 영향이 Ice Ball의 전열량에 크게 지배됨을 알 수 있다.
- (4) Ice Ball 크기에 따른 방열 특성은 Ice Ball이 클수록 효과적이고 또한 유입온도를 낮게 하는 것이 축열량을 증가시킬 수 있다.

참 고 문 헌

1. J. P. Coutier and E. A. Farber, "Two applications of a numerical approach of heat transfer process within rock-beds", Solar Energy 29(6), pp.451-462, 1982

2. T. Saitoh, "A Study on the Latent Heat Thermal Energy Storage Reservoir of Spherical Capsule Type", Refrigeration, Vol.58, No. 672, pp.21~28, 1983
3. S. Ito "Heat transfer problems of a cylindrical capsule for Latent heat Thermal Energy Storage", JSME, Vol.14, NO.2
4. T. Saitoh and K. Hirose, "High Performance Phase Change Thermal Energy Storage Using Spherical Capsule", Chem. Eng. Common, 41, pp.39~58, 1988
5. S. K. Roy and S. Sengupta, "The melting process within spherical enclosures ", J. of Heat transfer, Trans. of ASME, Vol.109, pp.460-462, 1988
6. D. R. Laybourn, "Thermal energy storage with encapsulated ice", ASHRAE. Trans. DA-88-27-1, pp. 1971-1988, 1988
7. 김영인 외, "빙축열조 내부의 열적 유동특성", 공기조화·냉동공학, vol.17, No.4, pp.369~376, 1988
8. D. Arnold, "Laboratory Performance of an encapsulated Ice storage", ASHRAE Trans, pp.1170-1178, 1991
9. M. Yamaha, "Studies on Thermal Characteristics of Ice Storage Tank", 공기조화·위생공학회, No.46, 1991
10. S. L. Chen and J. S. Yue, "A Simplified Analysis for Cold Storage in Porous Capsules with Solidification", J. of Energy Resources Tech. Trans. of the ASME, vol.113, pp.108~116, 1991
11. S. L. Chen and J. S. Yue, "Thermal Performance of Cool Storage in Packed Capsule for Air Conditioning", Heat Recovery Systems & CHP, Vol.11, No.6, pp.551~561, 1991

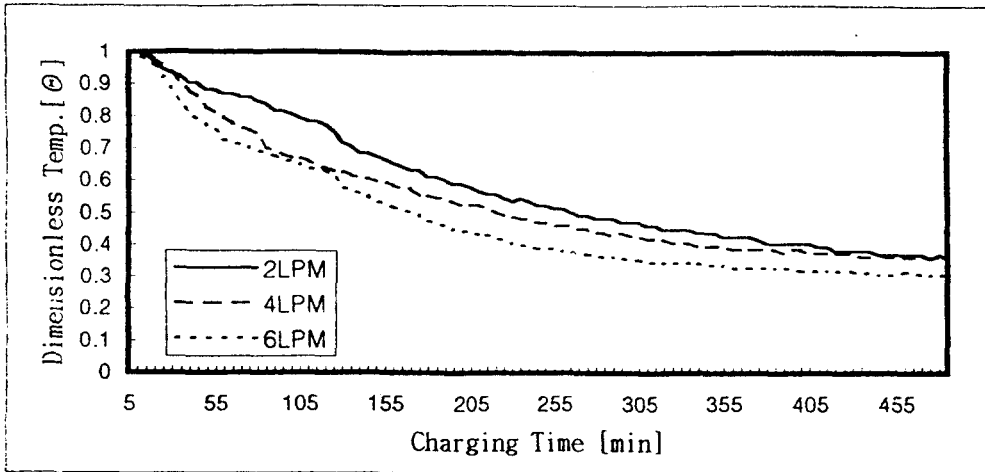


Fig. 4.1 Dimensionless temperature in Ice Ball with respect to flow rate for charging processes at diameter 76mm and inlet temperature -3°C

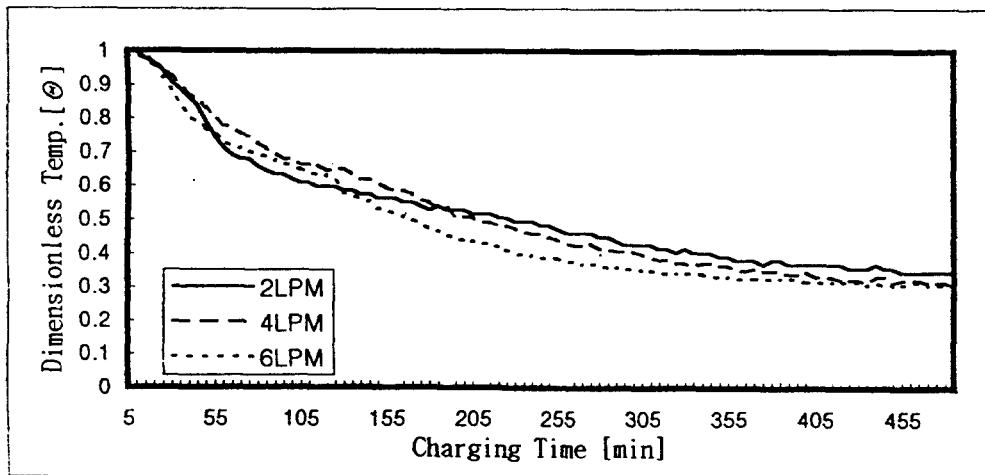


Fig. 4.2 Dimensionless temperature in Ice Ball with respect to flow rate for charging processes at diameter 76mm and inlet temperature -5°C

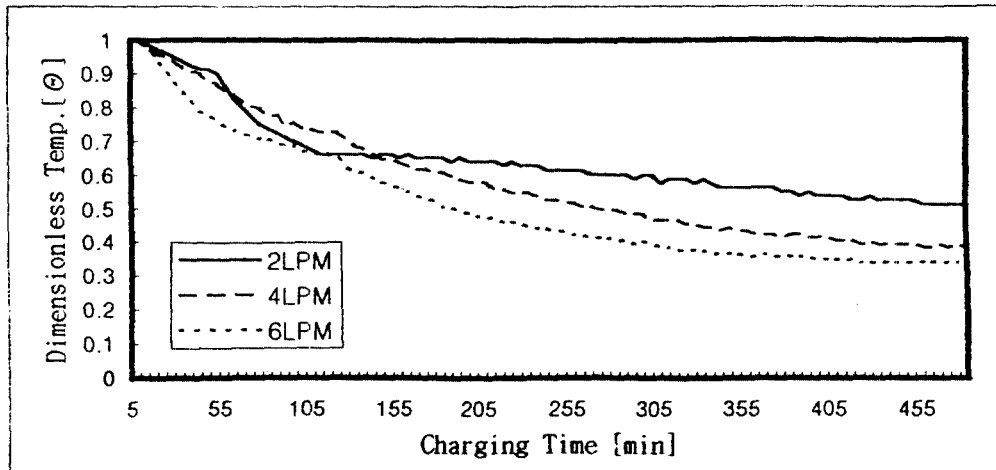


Fig. 4.3 Dimensionless temperature in Ice Ball with respect to flow rate for charging processes at diameter 76mm and inlet temperature -7°C

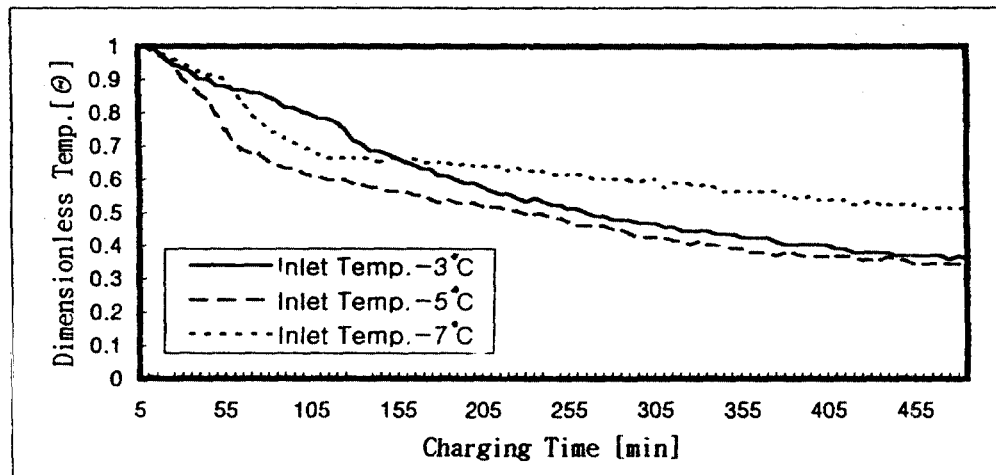


Fig. 4.4 Dimensionless temperature in Ice Ball with respect to inlet temperature for charging processes at diameter 76mm and flow rate 2LPM

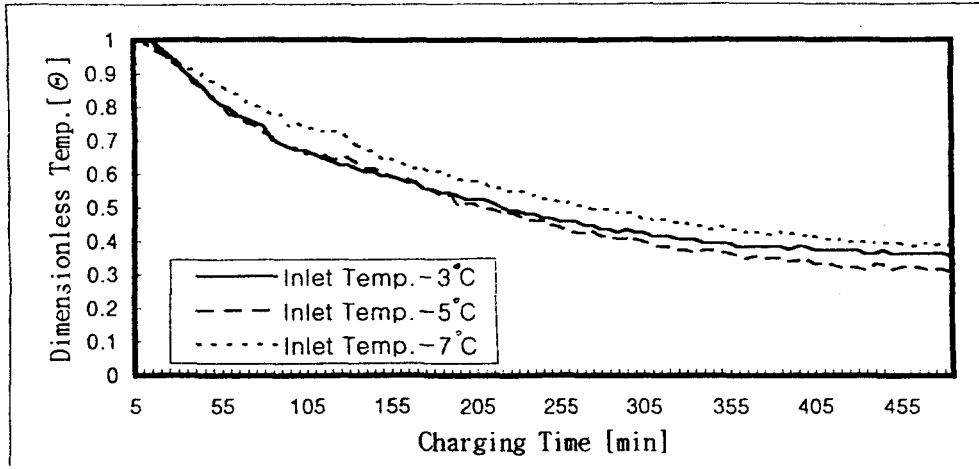


Fig. 4.5 Dimensionless temperature in Ice Ball with respect to inlet temperature for charging processes at diameter 76mm and flow rate 4LPM

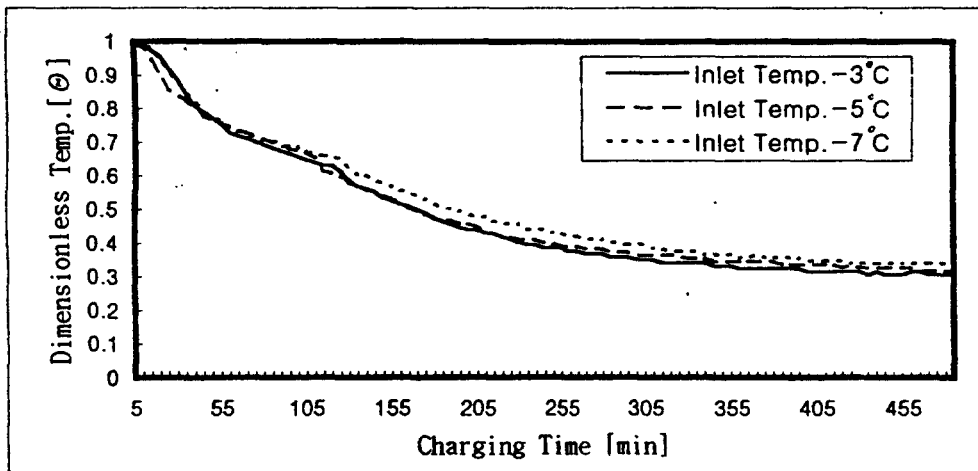


Fig. 4.6 Dimensionless temperature in Ice Ball with respect to inlet temperature for charging processes at diameter 76mm and flow rate 6LPM

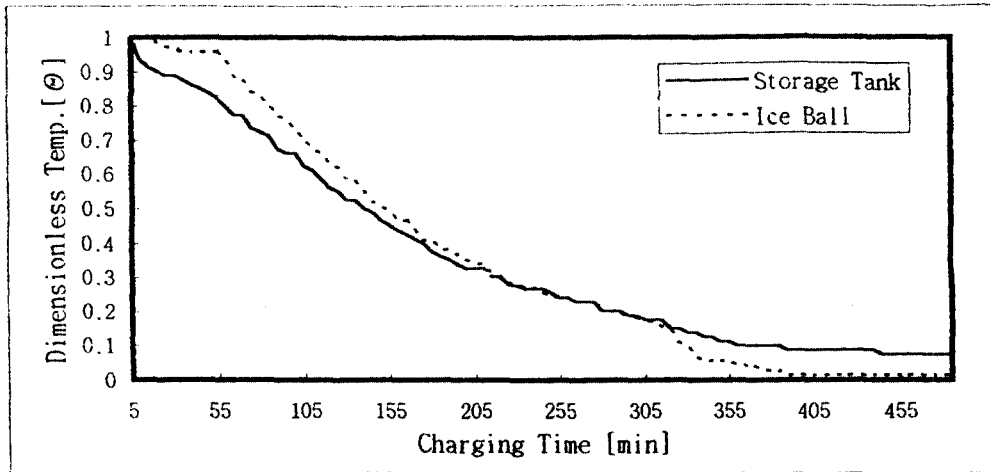


Fig. 4.7 Dimensionless temperature in Ice Ball with respect to storage tank temp. for charging processes at 2LPM, 76mm and inlet temperature -3°C

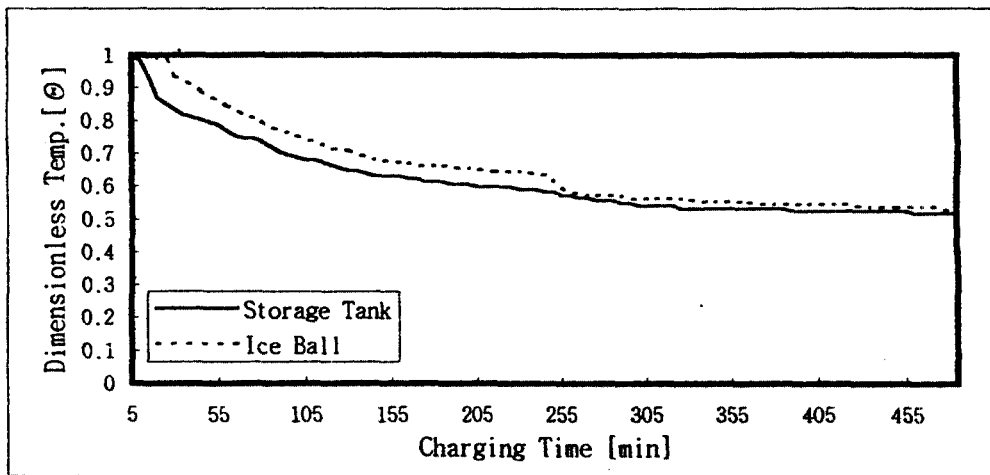


Fig. 4.8 Dimensionless temperature in Ice Ball with respect to storage tank temp. for charging processes at 2LPM, 76mm and inlet temperature -7°C

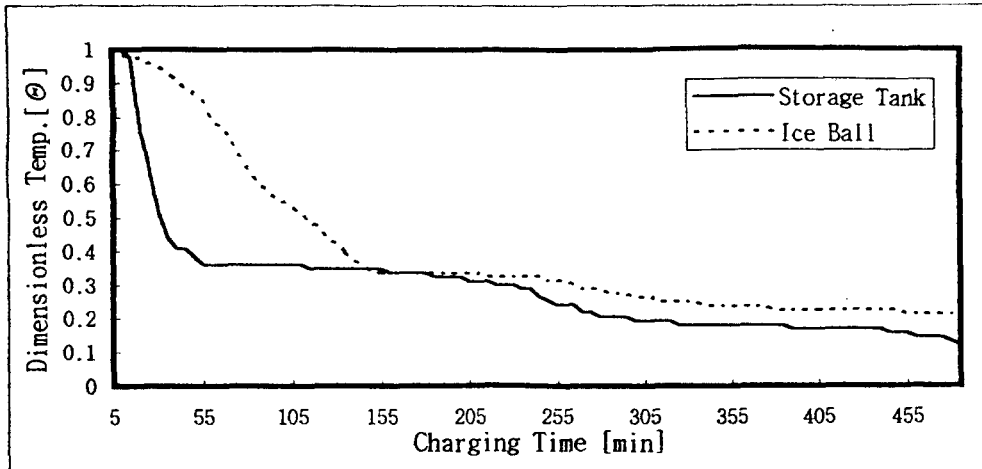


Fig. 4.9 Dimensionless temperature in Ice Ball with respect to storage tank temp. for charging processes at 2LPM, 103mm and inlet temperature -3°C

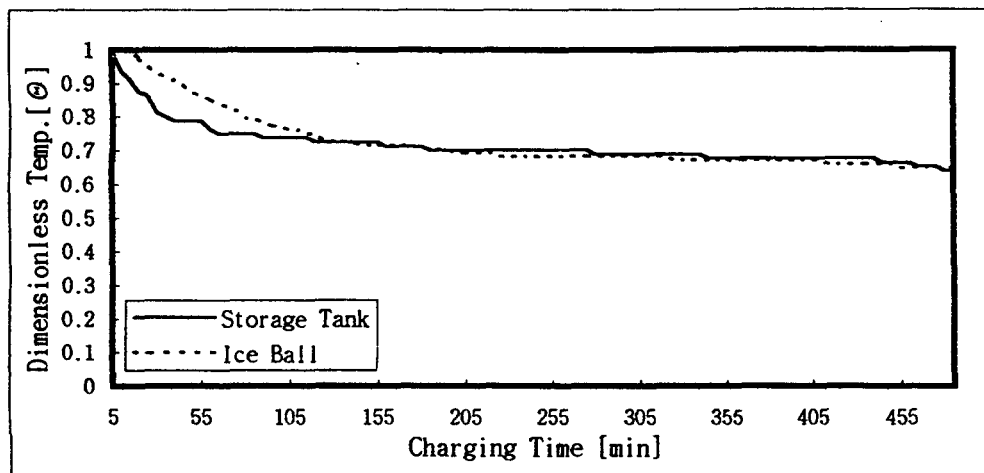


Fig. 4.10 Dimensionless temperature in Ice Ball with respect to storage tank temp. for charging processes at 2LPM, 103mm and inlet temperature -7°C

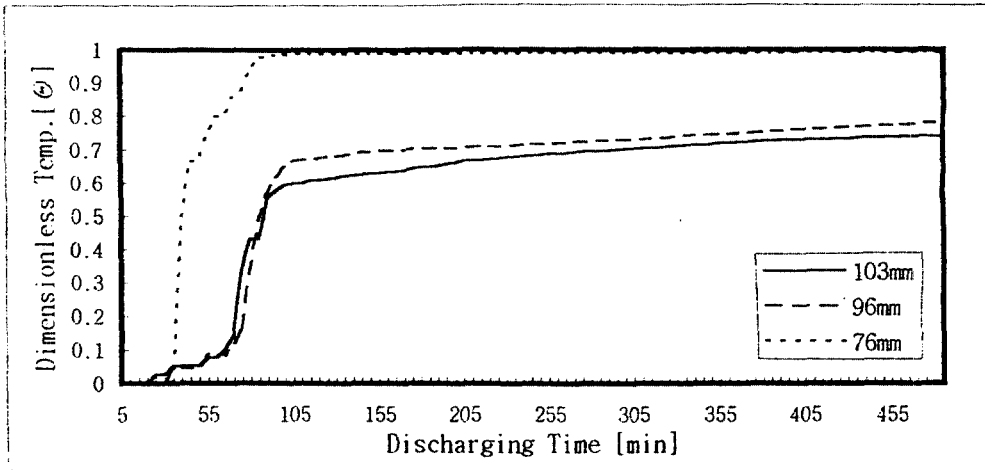


Fig. 4.11 Dimensionless temperature in Ice Ball with respect to diameter for discharging processes at 2LPM and inlet temperature -3°C

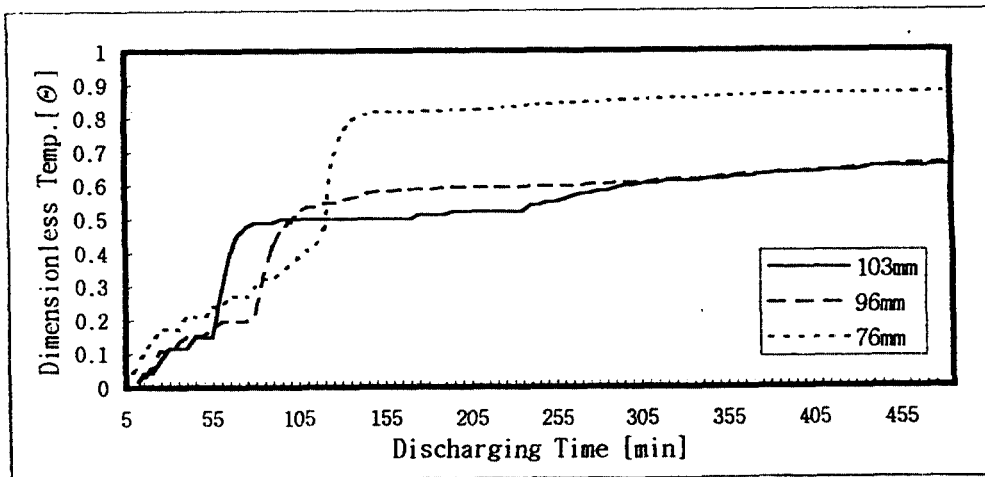


Fig. 4.12 Dimensionless temperature in Ice Ball with respect to diameter for discharging processes at 2LPM and inlet temperature -7°C