

磁性流體를 이용한 다이내믹형 氷蓄熱 시스템에 관한 實驗的 研究

황 승 식*

(2004년 2월 27일 접수, 2004년 9월 8일 심사완료)

An Experimental Study of Dynamic Type Ice Storage System Using Magneticfluid

Seungsic Hwang

Key Words: Magneticfluid(자성유체), Shape Control(형상 제어), Supercooling Ends(과냉각 해제)
Supercooling Degree(과냉도), Dynamic Type Ice Storage System(다이내믹형 빙축열
시스템), Continuous Ice Making(연속제빙)

Abstract

In this study, it induced to a conclusion below by experiment consideration to regarding an effective supercooling ends method of the flow cooling water in a tube of continuous ice making method and the static cooling water in a tube of continuous ice making method which used magneticfluid in a dynamic type ice storage system. Continuous ice making in a tube of the flow cooling water was shortened about 12 minutes until supercooling ends that case which gave vertical eccentricity rotation magnetic field 120rpm than did not provide magnetic field by experimental result that was tested to supercooling ends effect from shape control of magneticfluid. Continuous ice making method in a tube of the static cooling water compared with and reviewed the case that was not provided with the magnetic field and exposed cooling surface instantaneously by magnetic field. It confirmed that supercooling degree ΔT_c , ΔT_s and ΔT_w became lower because of heat transferring increasing by the occurrence of natural convection between after cooling starting progress time 1~3 minutes if it did not give a magnetic field, and performed the supercooling ends when natural convection occurred confirmed that refrigerating capacity was better. That relation ΔT_c and $t_e/(\Delta T_c - \Delta T_s)$ after convection occurred, was not depended on T_b and initial temperature if the depth of water and thickness of magneticfluid were regular and it was possible to verify conjecture of t_p from ΔT_s and ΔT_c .

기호설명

M : 자성유체의 유기자화
T : 온도
 ΔT : 과냉도
t : 냉각개시로부터 과냉각 해제까지의
경과 시간
 t_p : 냉각개시로부터 자장의 작용까지의
시간

t_e : 자장의 작용으로부터 과냉각해제까
지의 시간
 δ : 두께

첨자

n : 자장이 없는 경우
vs : 정지 수직자장
vi : 수직 충격자장
vr : 수직 동축 회전자장
ve : 수직 편심 회전자장
b : 브라인(brine)
w : 시험수

* 회원, 국민대학교 기계·자동차공학부

E-mail : hwangss@dreamwiz.com

TEL : (02)910-5032, FAX : (02)910-4839

- m : 자성유체
- s : 시험수와 자성유체의 경계면
- c : 냉각면

1. 서론

빙축열 시스템은 크게 정적 빙축열 시스템,⁽¹⁾ 캡슐형 빙축열 시스템⁽²⁾ 및 다이내믹형 빙축열 시스템⁽³⁾의 3가지 종류가 있다. 그중에서 다이내믹형 빙축열 시스템의 하나인 과냉각식 연속제빙 방식은 다른 제빙방식과 비교했을 때 장치가 복잡하지 않으며 비용 절감이라는 경제적인 측면에서도 우수하기 때문에 앞으로 각광받을 가능성이 있다. 과냉각식 연속제빙 방식에는 관외 연속제빙 방식과 관내 연속제빙 방식의 2가지 방식이 있다. 관외 연속제빙 방식은 냉각면의 과냉도가 적으면 제빙효율은 떨어지고, 반대로 냉각면의 과냉도가 크면 냉각면에 빙이 부착되어 관이 폐색되는 등의 문제가 발생한다. 반면에 관내 연속제빙 방식은 관내에서 제빙하는 방식이므로 일반적인 물을 사용하면 냉각관의 내부가 빙의 부착으로 폐색되는 문제가 있기 때문에 빙의 부착이 잘 이루어지지 않도록 응고점이 0°C이하인 특수한 수용액을 사용해야한다. 이러한 특수한 수용액을 사용하면 과냉도를 크게 만들 수 있으므로 관외 연속제빙 방식과 비교할 때 제빙효율을 향상시킬 수 있다. 그러나 특수한 수용액을 사용하는데는 비용이 많이 들기 때문에 경제적인 측면에서는 좋지 않으므로 관내 연속제빙 방식에서 비용이 적게 드는 일반적인 물을 사용하려면 빙의 성장에 의한 관내 폐색을 방지해야만 한다. 따라서 빙핵이 발생하는 위치의 제어와 냉동 시스템의 능력에 맞는 가장 이상적인 과냉도에서 과냉각 해제를 제어할 수 있는 효과적인 과냉각 해제 방법으로써 부동액인 자성유체를 냉각면과 물 사이에 개재시켜 과냉각을 해제한 얼음이 과냉각면에 부착되지 않게 연속제빙하는 새로운 기술인 유동 냉각수의 관내 연속제빙 방식⁽⁴⁾과 정지 냉각수의 관내 연속제빙 방식⁽⁴⁾이 있다.

관내 폐색에 대한 기존 연구에서 살펴보면 관내 폐색 발생의 한계가 냉각면의 과냉도와 레이놀드수⁽⁵⁾의 영향을 받고 난류와 층류에 따라서도 영향⁽⁶⁾이 있다고 밝히고 있다. 또한 과냉각 해체에 영향을 주는 인자와 그 방법에 관하여 많은

연구가 행해지고 있으며 과냉각 해제의 주요 요인으로는 진동, 냉각조건 및 냉각면과 물과의 접촉상태 등의 외적요인과 유동 형태와 불순물의 양 등의 내적요인이 있다. 이 두가지 요인이 서로 복잡하게 작용하고 있기 때문에 과냉각 해체에 대하여 정확하게 해석하는 것은 매우 어렵고 아직까지도 그것에 관하여 정확히 해석된 것은 없다. 따라서 과냉각을 해제할 때의 과냉도와 경과시간을 제어할 수 있는 효과적인 과냉각 해제 방법에 관한 연구가 필요하다.

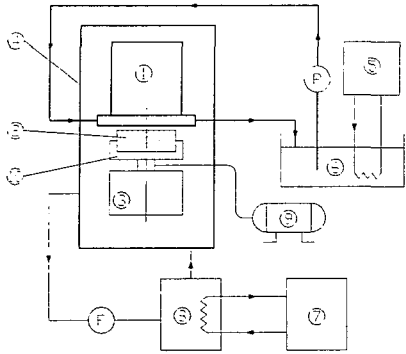
본 연구에서는 다이내믹형 빙축열 시스템 중 관내 제빙방식인 유동 냉각수의 관내 연속제빙 방식과 정지 냉각수의 관내 연속제빙 방식에서 적절한 과냉도와 자장의 작용시간 제어에 대한 기초적 자료를 찾고, 이를 통해 두 가지 방식의 제빙효율을 향상시키는 방법을 제시하고자 한다.

2. 실험 장치 및 측정 방법

2.1 실험장치

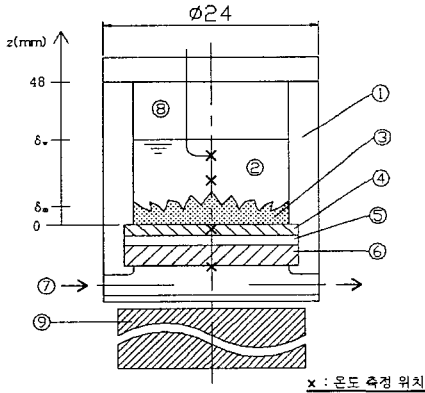
Fig. 1은 실험 장치의 개략도이며 유동 냉각수의 관내 연속제빙 방식과 정지 냉각수의 관내 연속제빙 방식을 동일한 조건하에서 실험하기 위하여 그림과 같이 만들었으며, 원통형 관내에서의 기초 자료를 얻기 위한 것이므로 한 면만 고려하였다. 실험 장치는 크게 시험부와 냉각부로 나누어진다. 시험부는 항온조 내에 있고, 항온조 안에는 열교환기에서 냉각된 공기가 순환되며 항온조의 온도는 2°C를 유지하고 있다. 냉각부는 브라인을 사용하여 시험부를 냉각시키는 부분으로 되어있다. Fig. 2는 Fig. 1에 있는 시험부의 상세도이다. 원통의 밑바닥은 브라인으로부터의 열전달을 촉진하기 위한 냉각판을 부착하였다. 냉각판은 3층으로 구성되어 있으며 브라인과 접촉하고 있는 아래로 부터 두께 3mm의 동판, 두께 0.3mm의 실리콘 러버 및 자성유체와 접촉하고 있는 두께 1.5mm의 동판으로 구성되어 있다.

자성유체의 형상을 제어하는 데에는 자장의 변동을 줄 수 있는 전자석을 사용하는 것이 좋지만 자장의 발생시 전자석은 발열을 동반하기 때문에 발열에 대한 영향을 제거하기 위하여 시험부의 사용되는 영구자석은 외경 30mm, 높이 15mm인 원기둥형 영구자석(최대 자장의 세기: 3000G)이며, 정지 냉각수의 관내 연속제빙 방식 실험에 사용되는



- ① Test section
- ② Magnet
- ③ Motor
- ④ Constant temperature oven
- ⑤ Cooler
- ⑥ Brine tank
- ⑦ Cooler
- ⑧ Heat exchanger
- ⑨ Compressor
- ⑩ Air cylinder
- Ⓟ Pump
- Ⓡ Fan

Fig. 1 Experimental apparatus



- ① Acrylic pipe
- ② Water
- ③ Magneticfluid
- ④ Copper plate(1.5t)
- ⑤ Silicone rubber(0.3t)
- ⑥ Copper plate(3.0t)
- ⑦ Brine
- ⑧ Thermocouple
- ⑨ Magnet

Fig. 2 Schematic diagram of the test section

영구자석은 외경 26mm, 내경 22mm 및 높이 12mm인 링형 영구자석(최대 자장의 세기 : 2500G)이다. 유동 냉각수의 관내 연속제빙 방식 실험 중에서 충격 자장 실험과 정지 냉각수의 관내 연속제빙 방식 실험시에는 영구자석과 부착된 피스톤을 왕복 운동시키기 위하여 에어 실린더와 압축기를 설치하였다. 그리고 자성유체의 형상변화 실험 중에

Table 1 Physical properties of HC-50

physical properties	specification
solute (wt %)	magnetite (43.0)
base-liquid (wt %)	kerosene (45.3)
surfactant (wt %)	olein acid (11.7)
allowable temperature (°C)	-20 ~ 120
specific gravity (25°C)	1.39±0.02
dynamic viscosity (Pa · s, 25°C)	0.0022±0.0005
surface tension (N/cm, 25°C)	26±2
staturated magnetization (G)	4750±300

서 회전 자장 실험을 하기 위하여 냉각관 아래에 설치된 원기동형 영구자석에 DC모터를 설치하였다. 온도측정은 Fig. 2에 나타난 위치에 T형 열전대를 2개의 동관의 중심에 각각 1개 동관의 표면으로부터 6.5 및 10mm 떨어진 수중에 각각 2개 및 원통 용기의 외측에 1개 설치하여 온도를 측정하였다.

본 연구에서는 관내 연속제빙 방식에서 냉각수로 물을 사용하기 때문에 -20°C에서도 동결하지 않으며 열전도율이 높고, 자화 특성이 있어 자장으로 제어가 가능한 자성유체를 사용하였다. 사용한 자성유체는 자화특성을 부여하는 자성 미립자를 마그네타이트(Fe_3O_4)로 하고, 등유를 베이스 유체로 하며, 미립자의 침전 등을 방지하기 위한 계면활성제로 올레인산을 사용한 일본 東北工業株式會社製 탄화수소류의 HC-50 (HC는 탄화수소, 50은 중량농도 50%)을 사용하였다.

Table 1에 HC-50의 물성치를 나타내었다.

2.2 실험 방법

2.2.1 유동 냉각수의 관내 연속제빙 방식

초기 조건은 δ_m 과 δ_w 를 각각 3mm와 10mm로 하였을 때, 물이 최대 밀도가 되는 4°C이상의 경우에는 복잡한 자연 대류가 발생하기 때문에 실용상의 이유로 초기 온도는 2°C로 설정하였다.

자장의 영향에 의하여 표면이 스파이크 모양으로 변형하는 성질을 지닌 자성유체가 물의 과냉각 해체에 미치는 영향을 알아보기 위하여 자성유체의 형상을 변화시켰다. 본 실험에서는 6종류

의 실험을 실시하였으며 동일한 시험유체에 대하여 냉각관의 입구에서 T_b 를 -25°C 로 하였으며, t 에 따른 ΔT_w , ΔT_s 및 ΔT_c 를 측정하였다.

자성유체의 형상변화에 대한 6종류의 실험방법은 다음과 같다.

첫째, 자장이 작용하지 않은 경우에 대하여 알아보았다.

둘째, 일정한 정지수직자장이 작용할 때의 형상에 대한 것으로 원기동형 영구자석의 중심축과 원통용기의 중심축을 동축으로 하여 실험하였다.

셋째, 수직 충격자장을 주었을 때의 형상에 대한 것으로 ΔT_w 가 3°C 로 될 때부터 1°C 증가할 때마다 자장을 1초 동안 작용시켜 자성유체 상면에 스파이크 형상이 반복적으로 발생하도록 실험하였으며 원통용기와 동축인 원기동형 영구자석을 설치하여 밑으로부터 위로 수직하게 순간적으로 접근시켰다.

넷째, 수직 동축 회전자장을 주었을 때의 형상에 대한 것으로 원통용기의 중심축과 원기동형 영구자석의 중심축을 동회전축으로하여 원기동형 영구자석을 모터에 의해 회전수 30rpm으로 회전시켰다.

다섯째, 수직 편심 회전자장을 주었을 때의 형상에 대한 것으로 원주상 영구자석의 중심축을 모터의 회전축으로부터 반경방향으로 3mm편심을 주어 30rpm으로 회전시켰다. 이때 자성유체 상면의 스파이크 형상도 자석의 회전과 함께 변하기 때문에 물은 원주방향으로 강제적으로 교반된다.

여섯째, 다섯 번째와 동일한 방법으로 회전수를 120rpm로 증가시킨 경우이다.

2.2.2 정지 냉각수의 관내 연속제빙 방식

자장이 작용하지 않은 상태에서 Fig. 3에 나타난 바와 같이 링형 자석으로 자장을 작용시키면 냉각면상을 피복하고 있는 자성유체의 일부가 순간적으로 박막으로 되고 마치 냉각면이 노출된 것과 같은 상태로 된다. 냉각면이 노출되면 국소적으로 물이 급냉되어 과냉각이 해제된다. 또한 노출된 냉각면에는 자성유체의 막이 부착하고 있기 때문에 과냉각이 해제된 직후에 빙의 부착은 없다. 자성유체의 이러한 상태를 순간적으로 얻기 위해 자석 상면을 냉각면으로부터 40mm가 떨어진 위치로부터 수직 상승시켰다. 과냉각 해체에 의해 만들어지는 빙은 물의 과냉도에 의해 형

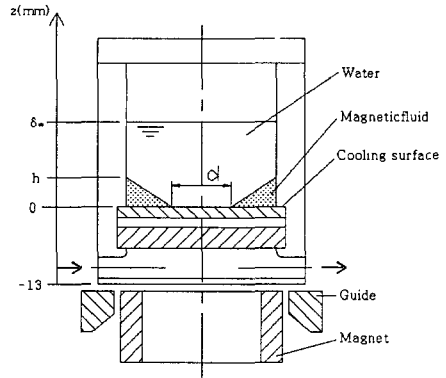


Fig. 3 Shape of magneticfluid under the ring magneticfluid

상이 달라진다. 링형 자석에 의한 자장을 작용시키면 막 상부 근방의 물만이 과냉상태가 되기 때문에 과냉각이 해제되면 막의 상부에 원추형의 빙이 만들어진다. 다시 자장을 제거하면 자성유체는 원상태로 되돌아오고 빙은 부력이 증가하여 위로 떠오른다. 물 전체가 과냉각된 상태에서 자장을 작용시켜 과냉각이 해제되면 침상의 빙이 자성유체막 위로 생성되어 전체로 확산된다.

δ_m 을 정지 냉각수의 관내 연속제빙 방식과 비교하기 위하여 3mm로 하였으며, 전열효율을 위해 1.5mm의 두 가지로 설정하였다. 자장을 작용시키지 않은 상태에서 δ_w 를 10mm, 20mm 및 30mm로 변화하고 T_b 를 -15°C 와 -25°C 로 변화시키면서 냉각한 경우의 과냉도 ΔT_w , ΔT_s , 및 ΔT_c 를 측정했다. 또한, t_p 와 t_e 를 측정했다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 유동 냉각수 관내 연속제빙 방식에서의 과냉각 해제

Table 2는 시험수의 과냉도 ΔT_w 의 최대값인 한계 과냉도 ΔT_1 의 평균값을 나타낸 것으로 N은 실험횟수, σ 는 표준편차이다.

Fig. 4에는 t 에 따른 ΔT_w 를 나타낸다. ΔT_w 는 시간이 경과함에 따라 증가하다가 ΔT_1 에 이르러 빙이 생성되면 0°C 로 급변함을 알 수 있고, 자장이 작용하지 않은 상태 M_0 과 나머지 다섯 종류의 실험을 비교했을 때 수직 편심회전자장을 120rpm으로 가한 상태의 t 가 제일 짧음을 알 수 있다. 이상의 결과로 자성유체의 형상변화가 냉

각 개시로부터 과냉각 해제까지의 시간 단축에 효과가 있으며, 특히 수직 편심 회전자장은 교반 작용으로 더욱 효과적이라는 것을 알 수 있다.

3.2 정지 냉각수 관내 연속제빙 방식

3.2.1 자장을 작용하지 않은 경우의 과냉도의 시간 변화

Fig. 5는 $\delta_w=1.5\text{mm}$ 이고 자장을 작용시키지 않은 상태에서 δ_w 를 10mm, 20mm 및 30mm로 변화시키고 T_b 를 -15°C 와 -25°C 로 변화시키면서 냉각한 경우의 과냉도 ΔT_w , ΔT_s 및 ΔT_c 의 측정결과이다.

Fig. 5의 (a)에서, T_b 가 -15°C 인 경우, $\delta_w=10\text{mm}$ 일 때 ΔT_c 의 변화는 냉각개시로부터 약 1분 동안 9.6°C 까지 급격하게 증가한 후 완만하게 증가한다. $\delta_w=20\text{mm}$ 의 경우도 1분 동안 9.2°C 까지 급격히 증가한 후 완만하게 증가한다. $\delta_w=30\text{mm}$ 의 경우도 역시 1분 동안 8.9°C 까지 급격히 증가한 후 완만하게 증가한다. 1분을 기준으로 한 ΔT_c 의 변화는 $\delta_w=10\text{mm}$ 보다 $\delta_w=20\text{mm}$ 가 약 0.4°C 의 차이로 낮아진다. ΔT_s 의 변화는 $\delta_w=10\text{mm}$ 의 경우 약 1.24분 동안 4.07°C 까지 급격하게 증가한 후 완만하게 증가한다. $\delta_w=20\text{mm}$ 의 경우에는 약 1.61분 동안 4°C 까지 급격하게 증가한 후 2.69분 동안 2.2°C 까지 감소하고 다시 완만하게 증가하기 시작했다. $\delta_w=30\text{mm}$ 의 경우에도 1.56분 동안 3.7°C 까지 급격히 증가한 후 약 2.69분 동안 1°C 까지 감소하다가 다시 증가한다. ΔT_w 의 경우, $\delta_w=10\text{mm}$ 일 때 ΔT_w 는 약 1분 까지 거의 변화가 없으나 그 후에 급격하게 증가하여 약 1.94분 동안 1°C 가 된 후부터는 완만하게 증가한다. $\delta_w=20\text{mm}$ 일 때도 역시 1분 후부터 약 1.61분 동안 -0.1°C 까지 증가한 후 감소를 시작하여 2.69분 동안 -1.5°C 가 된 후 다시 증가한다. $\delta_w=30\text{mm}$ 일 때도 1분 이후부터는 1.74분 동안 -0.6°C 까지 증가를 한 후 2.69분 동안 -2°C 까지 감소를 하다가 완만하게 증가하고 있다. T_b 가 -25°C 인 (b)의 경우 ΔT_c 의 변화는 $\delta_w=10\text{mm}$ 일 때 냉각 개시로부터 약 1.24분 동안 18.62°C 까지 급격하게 증가한 후부터 완만하게 증가한다. $\delta_w=20\text{mm}$ 의 경우도 $\delta_w=10\text{mm}$ 의 경우와 비슷한 경향을 나타내나 1.24분 동안 17°C 가 된다. $\delta_w=30\text{mm}$ 의 경우도 역시 1.24분 동안 15.7°C 가 된다. 1.24분을 기준으로 한 ΔT_c 의 변화는 $\delta_w=10\text{mm}$ 보다 $\delta_w=20\text{mm}$ 가 약 0.62°C 차이가

Table 2 Experimental result of critical degree of supercooling

experim-entation	N	Average of critical degree of supercooling	σ	t (min)
M_n	10	8.37	1	23.7
M_{vs}	10	8.17	1.8	20.5
M_{vi}	10	8.15	0.8	20.2
M_{vr}	10	8.04	1.1	17.4
M_{ve} at 30rpm	10	8.02	0.4	14.1
M_{ve} at 120rpm	10	8.08	0.6	11.7

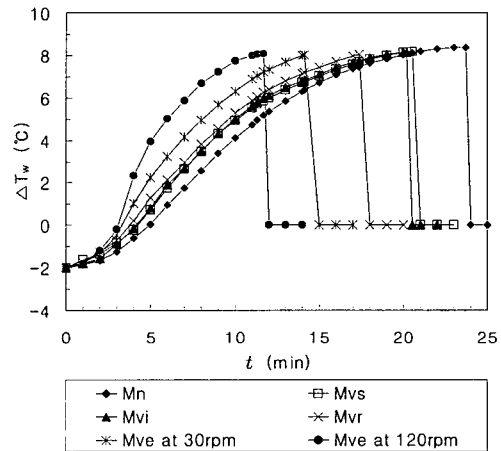
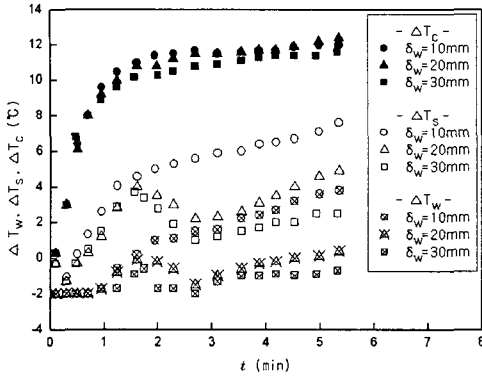
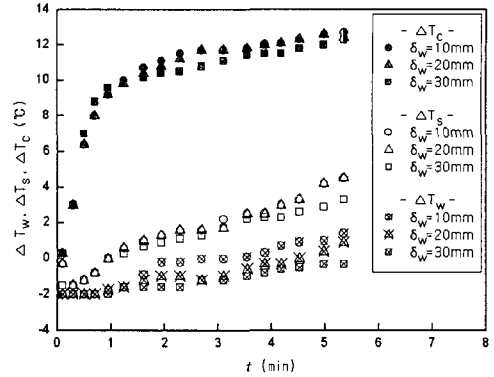


Fig. 4 Variation of bulk water temperature

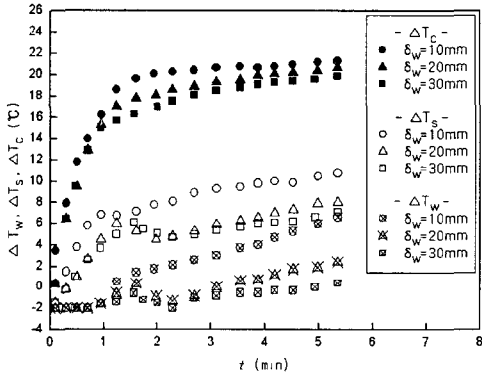
나고 $\delta_w=30\text{mm}$ 의 경우는 약 2.92°C 온도차이가 난다. ΔT_s 의 변화는 $\delta_w=10\text{mm}$ 의 경우 약 0.95분 동안 6.8°C 까지 급격하게 증가한 후 약간 감소를 하다가 완만하게 증가한다. $\delta_w=20\text{mm}$ 의 경우에는 약 1.24분 동안 6°C 까지 급격하게 증가한 후에는 1.98분 동안 4.9°C 까지 감소하다가 다시 완만하게 증가한다. $\delta_w=30\text{mm}$ 의 경우에도 1.56분 동안 6.1°C 까지 급격히 증가한 후 약 2.29분 동안 4.7°C 까지 감소하다가 다시 완만하게 증가한다. ΔT_w 의 경우, $\delta_w=10\text{mm}$ 일 때 ΔT_w 는 약 1분 후에 일단 급격히 증가하여 약 1.61분 동안 1.4°C 가 된 후부터는 완만하게 증가한다. $\delta_w=20\text{mm}$ 일 때도 역시 1분 후에 약 1.61분 동안 0.3°C 까지 증가한 후 감소를 시작하여 2.29분 동안 -1.3°C 가 된 후 다시 증가하기 시작한다. $\delta_w=30\text{mm}$ 일 때도 1분 이후부터 1.56분 동안 -0.6°C 까지 증가를 한 후 2.69



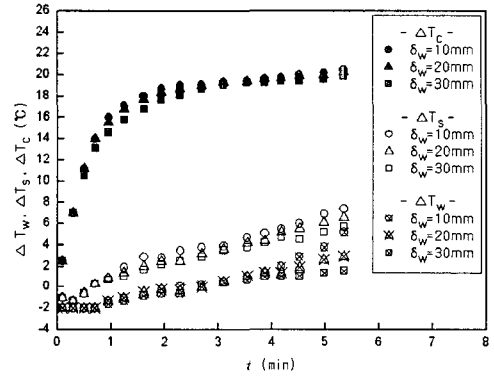
(a) $T_b = -15^\circ\text{C}$



(a) $T_b = -15^\circ\text{C}$



(b) $T_b = -25^\circ\text{C}$



(b) $T_b = -25^\circ\text{C}$

Fig. 5 Temperature variations for δ_w at super-cooling without magneticfield($\delta_m=1.5\text{mm}$)

Fig. 6 Temperature variations for δ_w at super-cooling without magneticfield($\delta_m=3\text{mm}$)

분 동안 -2°C 까지 감소를 하다가 다시 완만하게 증가하고 있다. Fig. 6의 (a)에서 $\delta_w=10\text{mm}$ 일 때 ΔT_c 의 변화는 냉각개시로부터 약 1.5분 동안 10.4°C 까지 급격히 증가를 한 후 서서히 증가를 한다. ΔT_s 의 변화는 처음부터 2분까지 증가한 후 약 1.6°C 로서 대체로 비슷한 값을 유지하다가 그 후 완만하게 증가한다. ΔT_w 의 변화는 1분 이후부터 1.94분 동안 -0.2°C 까지 서서히 증가를 하다가 2.29분 동안 거의 비슷한 경향을 보이다가 완만하게 증가한다. $\delta_w=20\text{mm}$ 일 때 ΔT_c 의 변화는 $\delta_w=10\text{mm}$ 의 경우와 유사한 경향을 보인다. ΔT_s 의 변화는 처음에는 증가를 하여 2.29분부터 3분까지 1.6°C 에서 1.73°C 로 거의 비슷한 경향을 유지하다가 완만하게 증가하지만 시간이 지날수록 약간의 온도차가 나기 시작한다. ΔT_w 의 경우는 $\delta_w=10\text{mm}$ 의 변화가 없다가 1분 이후부터는 서서히 증가를 하여 1.94분부터 2.29분까지 -1°C 에서 -0.9°C 로 거의 비

슷한 경향을 보인 후 증가한다. $\delta_w=30\text{mm}$ 일 경우는 ΔT_w , ΔT_s 및 ΔT_c 의 세 변화 모두 $\delta_w=20\text{mm}$ 의 경우와 약간의 온도차이가 있으나 거의 비슷한 경향을 나타낸다. Fig. 6의 (b)에서 $\delta_w=10\text{mm}$, 20mm 및 30mm 세 경우 모두 ΔT_c 의 변화는 약 15분 동안 16.7°C 까지 급격히 증가를 한 후 완만하게 증가한다. ΔT_s 의 변화는 $\delta_w=10\text{mm}$ 일 때는 약 1.61분 동안 2.9°C 까지 증가를 한 후 1.94분 동안 2.2°C 로 약간 감소한 후 다시 완만하게 증가한다. $\delta_w=20\text{mm}$ 일 때는 처음부터 증가를 하여 2.69분에서 3.54분 동안 1.6°C 로 비슷한 경향을 보인 후 다시 완만하게 증가한다. $\delta_w=30\text{mm}$ 의 경우, 증가를 한 후 1.94분에서 2.29분까지 0.9°C 와 0.91°C 로 거의 일정한 값을 유지하다가 다시 완만하게 증가한다. ΔT_w 의 변화는 $\delta_w=10\text{mm}$, 20mm 및 30mm 세 경우 모두 약 1분까지는 일정한 값을 유지하다가 완만하게 증가한다. 그러나

$\delta_w=30\text{mm}$ 의 경우는 증가의 폭이 나머지 두 경우보다 작다. 이상의 결과로부터 냉각개시 후 약 40~120초 사이에서 Ra 수가 대류 발생의 임계값 ($Ra \cong 1700$)⁽⁷⁾에 도달함을 일차원 정상열전도의 수치계산⁽⁸⁾을 통하여 확인 하였다. 경과시간 1~3분 사이에서 나타나는 ΔT_s 및 ΔT_w 의 변화는 자연대류의 발생에 의해 나타난다고 생각된다.

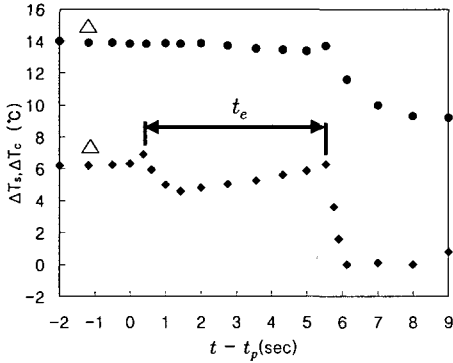


Fig. 7 Temperature variations at freezing

3.2.2 자장의 작용으로부터 과냉각 해제까지의 시간 Fig. 7은 자장의 작용으로부터 경과시간($t - t_p$)에 대하여 ΔT_s 와 ΔT_c 의 변화를 나타낸다.

자장의 작용 개시로부터 6초 후에 ΔT_s 는 급격하게 감소하고, 이때 과냉각 해제가 생기기 시작하며 이 경우 t_e 는 6초이다. 자장발생으로부터 과냉각 해제의 시간은 매우 짧으므로 자연대류가 발생할 때 자장을 작용시켜 냉각면을 노출시키는 것이 냉각 개시로부터 과냉각 해제까지의 시간을 크게 단축시킬 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 적절한 자장의 작용시점을 찾는 것이 중요하다.

3.2.3 냉각개시로부터 자장 작용 전까지의 시간이 자장의 작용으로부터 과냉각 해제까지의 시간에 미치는 영향

Fig. 8과 Fig. 9에는 t_e 에 미치는 t_p 의 영향을 나타내었다. 물의 과냉도가 증가하면 냉동능력이 저하되므로 과냉각을 조기에 해제하여야 한다.

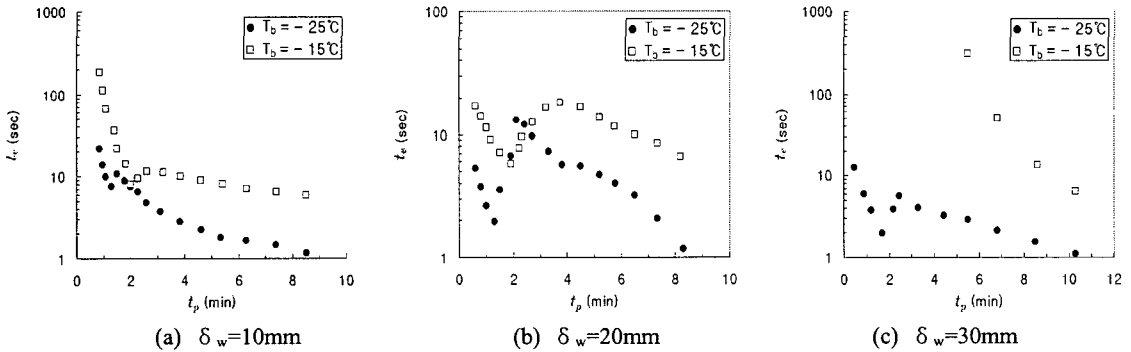


Fig. 8 Relation between t_e and t_p for δ_w ($\delta_m=1.5\text{mm}$)

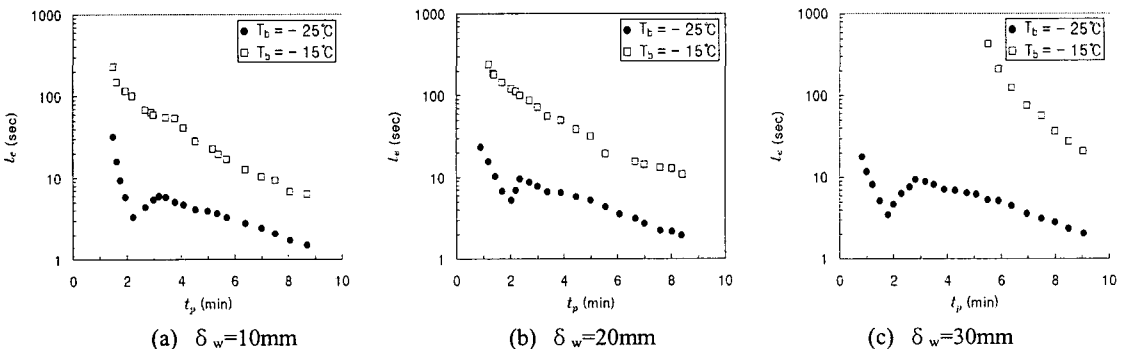


Fig. 9 Relation between t_e and t_p for δ_w ($\delta_m=3\text{mm}$)

따라서 본 연구에서는 자장을 작용시킴으로 인해 과냉각의 해제를 촉진하는 방법으로서 t_e 가 짧아질수록 어느 정도 소기의 목적이 달성되었다고 말할 수 있다. Fig. 8은 $\delta_m=1.5\text{mm}$, $T_b = -15^\circ\text{C}$ 와 -25°C 일 때의 δ_w 를 10, 20 및 30mm로 변환시키면서 t_e 에 미치는 t_p 의 영향을 나타낸 것이다.

δ_w 가 10mm와 20mm일 때는 t_p 가 1~2.5분에서 브라운의 온도에 상관없이 t_e 는 극소값을 나타냈지만 $\delta_w=30\text{mm}$ 인 경우는 T_b 가 -25°C 일 때 극소값을 나타냈다. 그 후 t_e 의 값은 다시 증가를 하여 극대값으로 된 후 서서히 감소한다. 또한 T_b 가 -25°C 일 때 낮은 정도에 따라 t_e 의 값은 더 짧아지는 것을 알 수 있었다.

Fig. 9은 $\delta_m=3\text{mm}$ 의 경우로 $\delta_m=1.5\text{mm}$ 와 비교하여 t_e 가 극소값을 나타내는 비슷한 경향을 보이고 있지만, 열유속이 적은 이유는 두께가 두꺼우므로 열저항이 커져서 대류의 발생에 따라 ΔT_s 의 증감은 적게 나타나기 때문에 T_b 가 -15°C 인 경우는 극소값을 갖지 않고 커짐을 알 수 있다.

3.2.4 냉각개시로부터 과냉각 해제까지의 경과 시간의 극대값 이후의 정리식

Fig. 10은 $\delta_m=1.5\text{mm}$ 일 때 Fig. 8에서 t_e 가 극대값을 나타내는 시각 t_p 이하의 데이터를 이용하여 정리한 ΔT_s 와 $t_e/(\Delta T_c - \Delta T_s)$ 의 관계를 나타낸다. 그림에서 ΔT_c , ΔT_s , 및 ΔT_w 는 자장을 작용시키기 직전의 값을 나타내었다. δ_w 와 δ_m 이 일정하다고 할 때, 종축을 $t_e/(\Delta T_c - \Delta T_s)$ 으로 하면 T_b 의 차이에 관계없이 데이터의 정리가 가능하다. T_b 가 -15°C 인 경우, -25°C 와 비교하여 ΔT_s 를 동일하게 봤을 때는 장시간 냉각한 것이 되고, $(\Delta T_c - \Delta T_s)$ 가 작기 때문에 열유속도 작아 T_w 는 낮아진다. 따라서 t_e 는 짧게 되고 T_b 에 의한 $t_e/(\Delta T_c - \Delta T_s)$ 의 차는 작게되고 이것의 실험식을 다음식으로 나타냈다.

$$t_e = C\Delta T_s^k(\Delta T_c - \Delta T_s)$$

각 조건에서 최소 자승법으로 구한 상수 k, 상수 C 및 $t_e/(\Delta T_c - \Delta T_s)$ 의 상용 대수값의 표준편차 σ 를 Table 3에 나타내었다. δ_m 이 일정하다면 δ_w 가 변화하여도 기울기 k는 변화하지 않을 것이다.

다음은 δ_w 의 영향으로서 δ_w 가 20, 30mm의

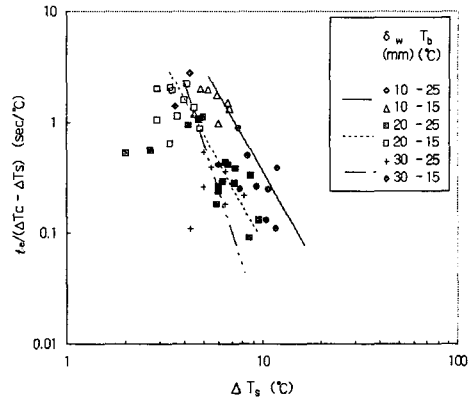


Fig. 10 Relation between ΔT_s and $t_e/(\Delta T_c - \Delta T_s)$ ($\delta_m=1.5\text{mm}$)

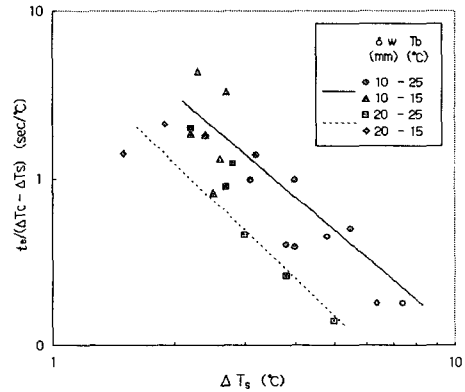


Fig. 11 Relation between ΔT_s and $t_e/(\Delta T_c - \Delta T_s)$ ($\delta_m=3\text{mm}$)

경우는 10mm의 경우와 비교하여 $t_e/(\Delta T_c - \Delta T_s)$ 의 값이 낮아지고 있다. 이것은 동일한 T_b 와 ΔT_s 로 비교한다면 δ_w 가 20mm와 30mm에서 t_e 가 짧아진 것이고, ΔT_c 의 δ_w 에 의한 차는 적다. 이 δ_w 에 의한 t_e 의 차이는 대류의 영향을 받고 있다고 사료된다. δ_w 가 20mm와 30mm에서는 동일한 ΔT_s 에서 ΔT_w , ΔT_c 및 t_e 의 값이 비슷하기 때문에 실험식은 거의 같게 된다.

Fig. 11에는 $\delta_m=3\text{mm}$ 의 경우를 나타낸 것으로 δ_w 의 영향은 $\delta_m=1.5\text{mm}$ 와 유사한 경향을 보인다. 또한 $\delta_m=1.5\text{mm}$ 와 비교하여 데이터가 좌로 이동하는 것은 열유속이 작기 때문에 ΔT_w 가 동일하지만, ΔT_s 는 작게 되고, 또한 자장에 의한 사발형상의 차이도 영향을 미치고 있는 것으로 생각된다.

Table 3 k , C and σ calculated from the method of least squares in each terms

	δ_w	k	C	σ
δ $w=1.5\text{mm}$	10	2.8	237	0.25
	20	2.5	58	0.18
	30	3	99	0.24
$\delta_w=3\text{mm}$	10	19	11	0.16
	20	22	8	0.18

4. 결 론

본 실험에서는 다이내믹형 빙축열 시스템에서 자성유체를 이용한 유동 냉각수 관내 연속제빙 방식과 정지 냉각수 관내 연속제빙 방식의 효과적인 과냉각해제 방법에 관하여 실험적인 고찰을 하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

유동 냉각수 관내 연속제빙 방식은 자성유체의 형상제어에 대한 6종류의 실험을 통하여 검토하였다. 자장을 가하지 않았을 경우를 정지 수직자장과 수직 충격자장을 가했을 경우와 비교해 보면 과냉각 해제까지의 시간이 약 3분 정도 단축되었고, 수직 동축 회전자장을 가했을 경우와 비교해 보면 약 6분 정도 단축되었으며, 수직 편심 회전자장을 30rpm과 120rpm으로 가했을 경우와 비교해 보면 각각 약 9분, 약 12분 정도 단축이 되었다. 따라서 자성유체를 이용한 관내 연속제빙 방식은 자성유체에 수직 편심회전자장을 가하여 제빙하는 방법이 과냉각 해제까지의 시간을 크게 단축시키므로 제빙효율을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

정지 냉각수 관내 연속제빙 방식은 자장을 가하지 않은 경우와 자장에 의해 냉각면을 순간적으로 노출시켰을 때의 경우를 비교 검토하였다. 자장을 가하지 않은 경우에 냉각개시후 경과시간 1~3분 사이에는 자연대류의 발생에 의해 열전달률이 높아지므로 과냉도 ΔT_c , ΔT_s 및 ΔT_w 가 낮아짐을 확인하였고, 과냉각 해제는 자연대류가 발생할 때에 이루어져야 냉동능력이 좋을 것을 확인하였다.

자장의 작용으로부터 과냉각해제까지의 시간 t_e 에 미치는 냉각개시로부터 자장의 작용시까지의 시간 t_p 의 영향에 대한 결과로부터 t_e 가 극소값에서 자장의 작용에 대한 냉각면의 순간 노출에 의하여 정지 냉각수 관내 연속제빙 방식의 제빙효율이 향상됨을 확인하였다.

자성유체를 이용한 유동 냉각수 관내 연속제빙 방식과 정지 냉각수 관내 연속제빙 방식에 대한 실험 결과를 비교했을 때 제빙효율 측면에서 과냉각 해체에 있어서는 정지 냉각수 관내 연속제빙 방식이 보다 우수하였다.

대류현상이 발생한 후 ΔT_c 와 $t_e/(\Delta T_c - \Delta T_s)$ 의 관계는 수심과 자성유체의 두께가 일정하다

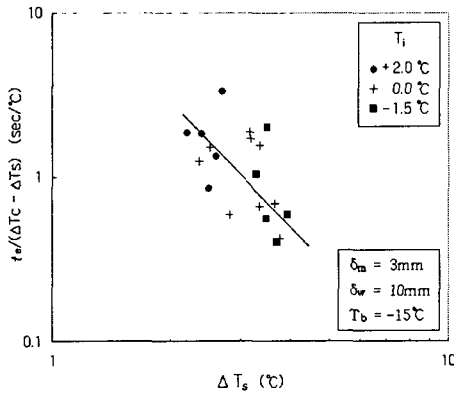


Fig. 12 Effect of initial temperature ΔT_s and $t_e/(\Delta T_c - \Delta T_s)$

3.2.5 초기온도의 영향

Fig. 12에, ΔT_s 와 $t_e/(\Delta T_c - \Delta T_s)$ 의 관계에 미치는 초기온도의 영향을 나타낸다. $\delta_m=3\text{mm}$, $\delta_w=10\text{mm}$, $T_b = -15^\circ\text{C}$ 로서 초기온도 T_i 를 0°C 와 -1.5°C 로 하고 2°C 의 경우와 비교했다. 그림에서 직선은 수심과 자성유체의 두께가 동일한 Fig. 11의 실험식의 결과를 나타낸 것이고, 초기온도가 달라도 동일한 실험식으로 표현된다.

이상의 결과 Fig. 5, 6, 8 및 9로부터 t_e 는 t_p 와 함께 감소한후 극소값을 갖고 다시 대류의 발생에 의해 증가한다. 따라서 이 t_e 가 극소값을 갖는 특성을 이용하여, t_p 를 단축시킬수 있는 적절한 제어 가 능함을 확인할 수 있었다. 대류현상이 발생한 후 ΔT_c 와 $t_e/(\Delta T_c - \Delta T_s)$ 의 관계는 수심과 자성유체의 두께가 일정하다면, T_b 와 초기온도는 영향을 미치지 않는다. 이 실험에 의해 ΔT_c 와 ΔT_s 로부터 t_p 의 추측이 가능하다.

면, T_b 와 초기온도는 영향을 미치지 않고 ΔT_c 와 ΔT_s 로부터 t_p 의 추측이 가능함을 확인하였다.

참고문헌

- (1) 鈴木・伊藤, 1992, エネルギー貯蔵システム, エネルギー資源學會.
- (2) 相場・土田, 1981, 碁盤木刑管群の熱傳達, 日本機械學會 論文集(B), Vol. 47, No. 422, pp. 2004~2013.
- (3) Takeo SAITOH and Hideki KATO, 1994, "Numerical Analysis for Combined Natural Convection and Close-Contact Melting in a Cylindrical Capsule," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers(B)*, Vol. 60, No. 569, pp. 223~228.
- (4) 稻富, 磁性流體を用いた氷蓄熱システム及びその装置, 特開平 - 128680.
- (5) Hideo INABA and Kengo TAKEYA, 1994, "Effects of Some Factors on Critical Condition of Ice Formation for Flowing Supercooled Water Solution Inside Cooled Circular Tube," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers(B)*, Vol. 60, No. 578, pp. 3440~3448.
- (6) Hideo INABA, Satoshi MIYAHARA and Kengo TAKEYA, 1995, "Fundamental Study on Continue Ice Making in a Circular Tube by Flowing Water Solution," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers(B)*, Vol. 61, No. 589, pp. 3296~3303.
- (7) Nield, D. A., 1964, "Surface Tension and Buoyancy Effects in Cellular Convection," *J. Fluid Mech.*, Vol. 19, pp. 341~352.
- (8) 中村, 1989, 伝熱解析 プログラム, サイエンス社.