

## 磁性流體를 이용한 氷蓄熱 시스템에서의 過冷却 解制에 관한 實驗的 研究

### An Experimental Study of Undercooling Ends in the Ice Storage System Using Magneticfluid

이희상\*\*, 전운학\*, 이봉규\*\*, 김충\*\*\*, 황승식\*\*  
Heesang Lee, Unhack Chun, Bonggyu Lee, Joong Kim, Seungsik Hwang

#### ABSTRACT

In this study, the new method which is used by magneticfluid for undercooling ends and continuous ice making is introduced to ice making in the ice storage system and its validity is studied experimentally. This study made sure how shape control of magneticfluid and instant exposure method can effect on the undercooling degree and its change by time change at the moments of undercooling ends and acquired the fundamental knowledge for control method about undercooling ends..

주요기술용어 : Magneticfluid(자성유체), Undercooling ends(과냉각 해제), Shape control(형상 제어), Undercooling degree(과냉도)

#### 1. 서 론

빙축열 제빙 방식중 과냉각식 연속제빙은 제빙시의 제어가 비교적 간단하여 매우 장래성 있는 제빙방식으로 많은 연구가 행해지고 있지만, 냉각면에서의 빙의 부착으로 제빙 능력의 저하와 관의 폐색(閉塞)이라는 문제가 발생하고, 과냉도가 작으므로 제빙효율이 낮아지는 단점이 있다. 이와 같은 관점으로부터 일반적인 수도물의 사용

이 가능하고, 관의 폐색이 발생하지 않으며 제빙 효율도 높은 관내 연속제빙방식의 개발이 요구된다. 또한 과냉각 해제를 행하는 상태에서 과냉도와 시간을 제어할 수 있는 효과적인 과냉각 해제 방법에 관한 연구가 필요하다. 이와 같은 관점에서 본 연구는 자장의 제어에 의해 자성유체를 냉각면과 물과의 사이에 삽입하여 빙을 냉각면에 부착되지 않게 하여 과냉각 해제가 가능한 새로운 방법을 제안<sup>[1]</sup>하고, 이 새로운 방법에 의해 과냉각 해제의 제어와 일반적인 물의 사용이 가능한 관내 연속제빙의 가능성을 실험적으로 밝히며, 그 기술적인 기초지식을 얻고자 하였다.

\* 정회원, 국민대학교 기계자동차 공학부

\*\* 정회원, 국민대학교 기계공학과 대학원

\*\*\* 국민대학교 기계공학과 대학원

## 2. 이 론

### 2.1 과냉각 현상

과냉각(undercooling)은 물이 응고점 이하로 냉각되어도 고상화되지 않는 현상을 말하고, 단순히 과냉이라고 한다. 그리고 응고점 이하로 냉각된 온도와 응고점 온도와의 차이를 과냉도라고 한다. 과냉각은 준안정 상태이므로 핵으로서 고체의 물질을 첨가한 후 진동을 가하면 곧 안정한 상태로 전이되고 이러한 과냉각 상태의 물을 과냉수 또는 과냉각수라고 말한다. 물은 과냉각이 해제되면 응고잠열(solidification latent heat : 332.4kJ/kg)에 대하여 과냉각에 의한 현열(sensible heat)이 작아지기 때문에 일부만이 동결되고 상변화한 미세한 빙과 응고점 상태의 물로 된다. 또한, 그 때의 제빙량은 과냉각 해제가 단열 변화를 하기 때문에 과냉도에 비례하게 되며 물이 응고점 이하로 냉각되는 순간부터 과냉각이 해제되어 응고되기 시작하는 순간까지의 시간인 과냉각 해제 시간을 단축시킬수록 냉각에 소비되는 에너지를 절약할 수 있다.

### 2.2 과냉각 해제에 영향을 미치는 요인

물의 과냉각 해제에 영향을 미치는 인자와 방법에 관하여 많은 연구가 행해지고 있다. 그중 외부적요인의 영향에 대하여 齊藤 등<sup>[2][3]</sup>은 대류, 진동 및 충격 그리고 전열면의 표면 조도와 성상이 과냉각 해제에 미치는 효과를 연구하였다. 내부적요인의 영향에 대하여 稲葉 등<sup>[4][5]</sup>은 시료용적과 냉각면 재질 그리고 냉각 속도 및 물의 성상 등의 영향을 관찰하였다.

정지수중에 온도차가 있을 때는 밀도의 전이가 일어나면서 유체의 운동이 일어나 자연대류가 발생하게 되고 참고로 물의 밀도는 4°C에서 가장 크게된다. 이것은 Ra 수(Rayleigh number)가 대류 발생의 임계값에 도달할 때 발생한다. 대류의 영향에 대하여 柏木 등<sup>[6]</sup>은 Ra 수가 103~

104의 자연대류로부터 난류로 변화하는 부근에서 과냉각수가 동결한다는 것을 보고하고 있다. 또한 냉각 속도와 유체내의 온도차가 큰쪽이 자연대류가 활발하여 열전달율이 크게되기 때문에 과냉각 해제에 효과가 있다고 한다.

### 2.3 자성유체의 응용

자성유체는 강자성( $Fe_3O_4$  등)의 초미립자(약 100Å), 용매 및 계면활성제로 구성되어 있고, 외전상 유체가 자성을 띠는 것과 같은 고액(固液) 혼상의 콜로이드용액(colloid liquid)이다. 자성유체는 자력선에 따라 변형하고, 자기력과 동력 및 표면장력의 조합에 의해 그 표면은 스파이크상으로 변형하는 특징이 있다. 빙축열에서 제빙시 자성유체를 이용하는 것은 새로운 분야로의 응용이다. 물과 혼합되지 않고, 비중이 1.0이상이므로 저온(-20°C)에서 동결하지 않으며 열전도율이 높고, 저가이며 자화성이 강한 등의 자성유체의 특성은 본실험에 적합하다.

## 3. 실험 장치 및 방법

### 3.1 실험 장치

Fig. 1은 실험 장치의 개략도를 도시한 것으로, 실험 장치는 크게 시험부와 냉각부로 나누어진다. 시험부는 항온조 내에 있고, 항온조 안에는 열 교환기에서 냉각된 공기가 순환되며 항온조의 온도는 2°C를 유지하고 있다.

냉각부는 시험부를 냉각시키는 냉매인 브라인을 냉각시키는 부분으로 되어있다. 냉매인 브라인은 대형 쿨러에서 냉각되어 탱크로부터 시험부의 하부로 순환 공급되고 냉각 공기는 소형 쿨러와 열교환기에 의해 만들어지고 팬을 통해 항온조에 공급된다.

Fig. 2는 Fig. 1에 있는 시험부의 상세도이다. 원통의 밑바닥은 브라인으로부터의 열전달을 촉진하기 위한 냉각판을 부착하였다. 냉각판은 3층으로 구성되어 있으며 브라인과 접촉하고 있는 아래로부터 두께 3mm의 동판 및 두께 0.3mm의

실리콘 러버 및 자성유체와 접촉하고 있는 두께 1.5mm의 동판으로 구성되어 있다. 시험부와 자성유체의 냉각은 브라인 탱크와 냉각판 사이를 흐르는 브라인의 순화에 의해 이루어진다. 자성유체에 자장을 걸기위하여 시험부의 하부인 냉각판 아래 부분에 영구자석을 설치할 수 있도록 하였다. 에어 실린더와 압축기는 영구 자석이 부착된 피스톤을 왕복 운동시키는 충격 자장 실험에 사용되고 DC모터는 회전 자장 실험시 영구자석을 회전시키는데 사용한다. 온도 측정에는 T형 열전대를 사용하였다.

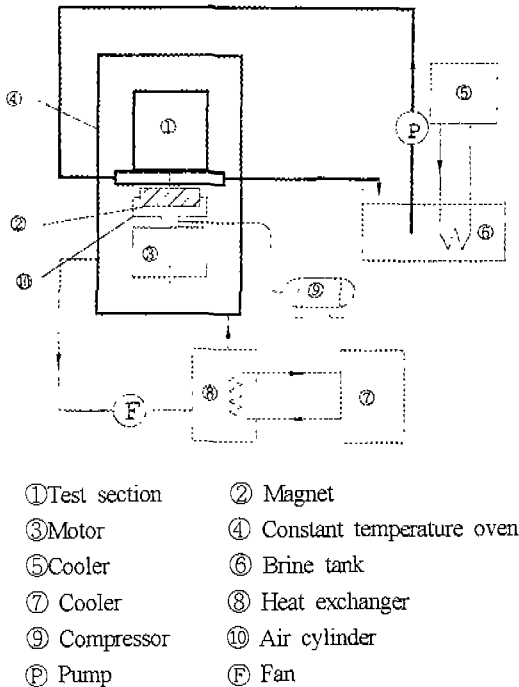
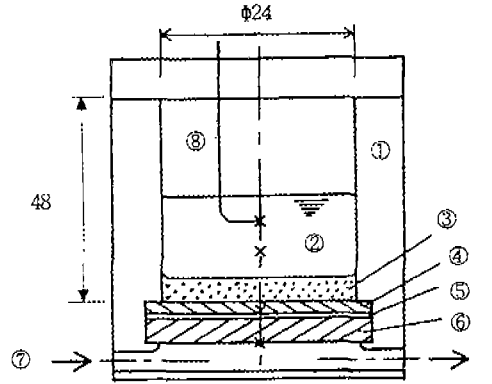


Fig. 1 Experimental apparatus

### 3.2 시험수 및 자성 유체

본 연구에 사용한 자성유체는 HC-50(일본 다이오 공업 제조)이다. 이온수와 자성유체를 강제 혼합시킨후 이온수와 자성유체가 이층 분리되면 불순물이 물위로 용출되는 과정을 반복하여 자성유체로부터 불순물을 최대한 용출시켰다. 그리고 시험수는 수돗물을 이온 교환기에 통과시킨 후

세정한 순수한 물을 사용하였다. Table. 1에 HC-50의 물성치를 나타내었다.



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

Fig. 2 Schematic diagram of the test section

### 3.3 실험 방법

#### 3.3.1 자성유체의 형상 변화

냉각면상의 자성유체에 외부로부터 다양한 자장을 걸어 자성유체의 형상을 변화시키고, 이와 같은 외적요인이 파냉각 해체에 미치는 영향을 조사한다. 측정 개시 조건은 자성유체의 평균두께  $\delta_m$  및 수심  $\delta_w$ 는 각각 3mm와 10mm로 했다. 그리고 초기 온도는 2°C로 설정하였다. 물이 최대 밀도가 되는 4°C이상의 경우에는 복잡한 자연 대류가 발생하기 때문에 실용상의 이유로 2°C로 설정했다.

자성유체 형상의 제어 방법은 Table. 2와 같다. 형상 제어 ①은 자장이 작용하지 않은 상태이다. 형상 제어 ②는 일정한 정지 자장이 작용할 때의 형상에 대한 것이다.

외경 30mm, 높이 15mm, 3000Gs의 원주상 영구 자석을 Fig. 3과 같이 배열하여 실험하였다. 형상 제어 ③은 수직 충격자장을 주었을때의 형상에 대한 것으로 시험수의 과냉도  $\Delta T_w$ 가 3 K

가 될 때 충격자장을 1초 동안 작용시켜 자성유체 상면에 스파이크를 만든 후 자장을 제거하였다가 다시 과냉도가 1 K증가한 후인 4K가 되었을 때 수직 충격자장을 1초 동안 작용시켰다. 이와 같은 방법으로 물에 슬러리가 생길 때까지 반복하였다. ②의 경우와 동일한 자석을 원통 용기와 동일축으로 아래로부터 위로 수직하게 순간적으로 접근시켰다. 형상 제어 ④는 수직 동축 회전자장을 주었을 때의 형상에 대한 것으로 원통 용기의 중심축과 자석의 중심축을 동회전축으로 하여 ②의 경우와 동일한 자석을 모터에 의해 회전 속도 30rpm으로 회전시킨다. 형상 제어 ⑤는 수직 편심 회전자장을 주었을 때의 형상에 대한 것으로 외경 22mm, 높이 10mm의 원주상 영구 자석의 중심축을 회전축으로부터 반경 방향으로 3mm 편심을 가하여 자석을 30rpm의 속도로 회전시켰다. 형상 제어 ⑥은 수직 편심 회전자장을 주었을 때의 형상에 대한 것으로 ⑤와 모두 동일한 방법이나 회전속도를 120rpm으로 증가시킨 경우이다.

### 3.3.2 냉각면의 순간 노출

시험유체의 초기온도( $T_i$ )를 2°C로 자성유체막 수직 두께  $\delta_m$ 을 1.5 및 3mm로 수심  $\delta_w$ 를 10, 20 및 30mm로, 브라인 온도  $T_b$ 를 -25 와 -15°C로 설정하여 물을 과냉각 상태로 만든후 Fig. 4에 나타난 바와 같이 외경 26mm, 내경 22mm, 높이 12mm 및 2500Gs인 링 형상의 자석을 이용하여 자장을 작용시키면 냉각면상을 평평하게 덮고 있는 자성유체의 일부가 순간적으로 박락으로 되어 마치 냉각면이 노출되어 있는 것과 같은 상태로 된다.

이와 같이 냉각면이 노출되면 국소적으로 물이 급냉되어 과냉각이 해제된다. 또한 노출된 냉각면에는 자성유체의 막이 얇게 부착되어있기 때문에 과냉각이 해제된 직후에 생성된 빙이 냉각면에 부착되지 않는다.

Fig. 4와 같은 상태를 순간적으로 얻기위해 자

Table 1 Physical properties of HC-50

	specification
specific gravity (25°C)	1.39±0.02
dynamic viscosity (Pa · s, 25°C)	0.0025
surface tension (N/m, 25°C)	0.027
saturated magnetization ( $\times 10^{-3}T$ )	47.5±3.0
boiling point (°C, 760mmHg)	150~250
flashing point(°C)	30~60
allowable temperature(°C)	-20~120
solute (wt%)	magnetite (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ) (43.0)
base-liquid (wt%)	kerosene (45.3)
surfactant (wt%)	oleic acid (11.7)

Table 2 Shape control by various magneticfields

	Shape control method
①	Nonmagnetic field
②	Stationary magnetic field (3000Gs)
③	Impact magnetic field (3000Gs)
④	Rotating magnetic field (3000Gs, 30 rpm)
⑤	Eccentric rotating magneticfield (3000Gs, 30 rpm)
⑥	Eccentric rotating magneticfield (3000Gs, 120 rpm)

석 윗면을 냉각면에서 40mm 떨어진 위치로부터 약 30mm/sec의 속도로 수직으로 상승시켰다.

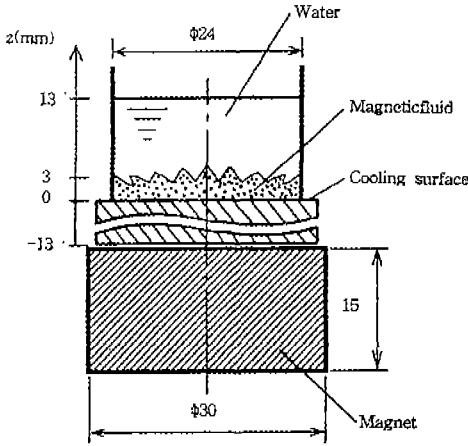


Fig. 3 Shape of magneticfluid under the coaxial magneticfield

Table 3 Experimental result of critical degree of undercooling

No.	N	Average of critical degree of undercooling [K]	$\sigma$	$\tau$ [min]
①	10	8.37	1	23.7
②	10	8.17	1.8	20.5
③	10	8.15	0.8	20.2
④	10	8.04	1.1	17.4
⑤	10	8.02	0.4	14.1
⑥	10	8.08	0.6	11.7

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 자성유체 형상이 과냉각 해제에 미치는 영향

Table. 3은 시험수의 과냉도( $\Delta T_w$ )의 최대값인 한계 과냉도( $\Delta T_\ell$ )의 평균값을 나타낸 것이고, Fig. 5는 냉각 개시로부터 과냉각이 해제될 때까지 걸리는 시간  $\tau$ 에 따른  $\Delta T_w$ 를 나타낸다.

Fig. 5에서  $\Delta T_w$ 는 시간이 경과함에 따라 증가하다가  $\Delta T_\ell$ 에 이르러 빙이 생성되면 0°C로

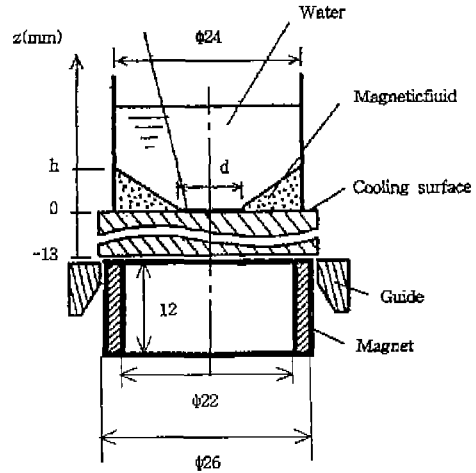


Fig. 4 Shape of magneticfluid under the ring magneticfield

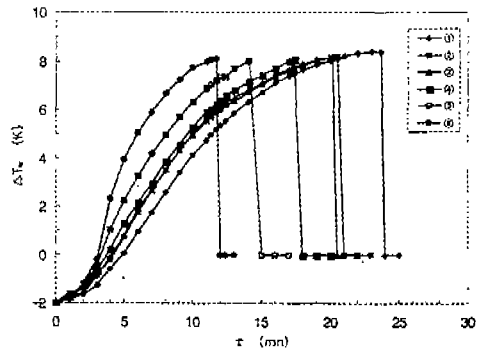


Fig. 5 Variation of bulk water temperature

수직 동축 회전자장 ④는 정지 수직자장 ②와 비교하여  $\tau$ 를 3.1분 단축시켰다. 수직 편심 회전자장 ⑤와 ⑥은 과냉각 해제까지의 시간을 더욱 단축시키고 있다.

### 4.2 순간 노출의 영향

순간 노출 실험을 하여 과냉각 개시로부터 자장의 작용까지의 시간( $\tau_p$ ), 자장의 작용으로부터 과냉각 해제까지의 시간( $\tau_e$ )와 물의 온도변화를 측정했다.

Fig.6은 자장의 작용시부터 경과시간( $\tau - \tau_p$ )에 대하여 과냉각 해체시 물과 자성유체의 계면에 있어서의 과냉도( $\Delta T_s$ ) 및 냉각면의 과냉도( $\Delta T_c$ )의 변화를 나타낸다. Fig. 6에서 자장의 작용 개시로부터 6초 후에  $\Delta T_s$ 는 급격하게 감소하고, 이 때 과냉각 해체가 생기기 시작한다. 이 경우  $\tau_e$ 는 6초이다.

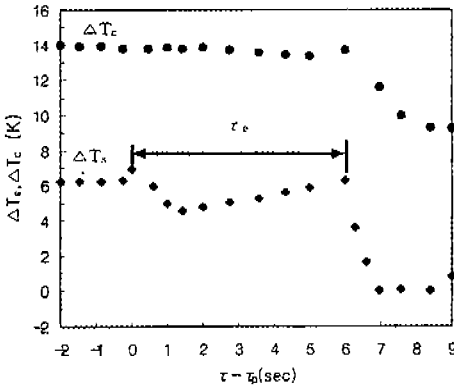


Fig. 6 Temperature variations at freezing

Fig. 7과 8에는  $\tau_e$ 에 미치는  $\tau_p$ 의 영향을 나타내었다. 물의 과냉도가 증가하면 냉동능력이 저하하기 때문에 과냉각을 조기에 해제하여야 한다. 따라서 Fig. 7과 8에서 나타내고자 하는 것은  $\tau_e$ 가 극소로 되는 점에서 자장을 작용시키면 가장 좋은 결과를 얻을 수 있다는 것이다.

## 5. 결론

본 실험에서는 자성유체를 이용한 빙축열의 제빙과정에서 효과적인 과냉각해제 방법에 관하여 실험적인 고찰을 하고 자성유체 형상의 제어방법이 과냉각 해체에 미치는 영향과 냉각면의 순간 노출 방법에서 수심, 자성유체의 두께 및 브라인 온도가 과냉각 해체에 미치는 영향에 대한 실험

으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

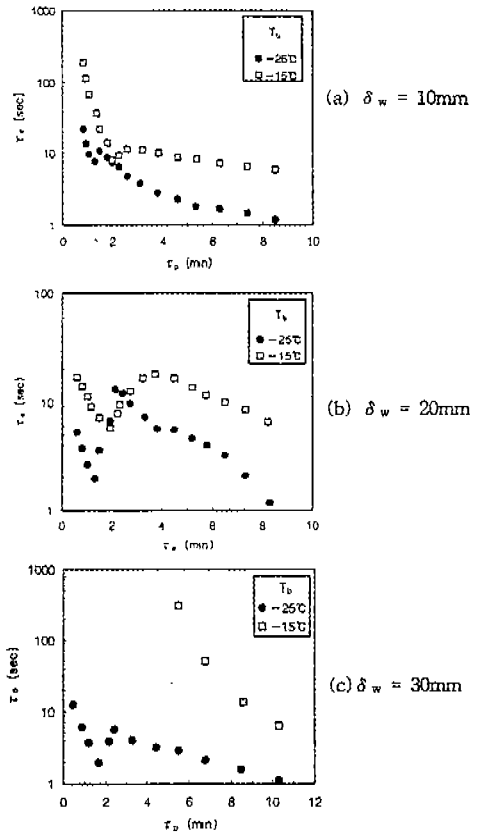


Fig. 7 Relation between  $\tau_e$  and  $\tau_p$   
( $\delta_w = 1.5\text{mm}$ )

1. 자성유체에 자장을 가하지 않은 상태에서 자성유체의 두께, 브라인의 온도 및 물의 두께가 변화할 때 수중에서는 밀도의 역전으로 인해 벨크수가 입계 레이레이수에 도달하면 자연대류가 발생하였고, 이 자연대류의 발생으로  $\Delta T_s$  및  $\Delta T_w$ 의 변화가 1~3분 사이에서 일어났다. 자성유체의 두께가 3mm일 때 보다 1.5mm일 때 과냉각 해체의 개시가 뚜렷이 나타나고 있다. 이는 자성유체의 두께가 얇을수록 열전달률이 높아지기 때문이다. 그리고 물의 두께가 20mm 및 30mm보다 10mm일 때 과냉각 해체가 빨리 일어난다.

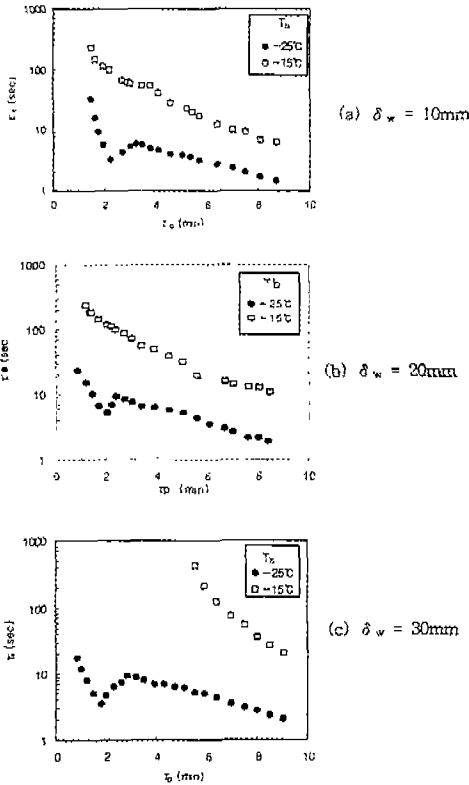


Fig. 8 Relation between  $\tau_e$  and  $\tau_p$   
( $\delta = 3\text{mm}$ )

2. 자성유체에 자장을 작용하여 스파이크 형상을 만들어  $\Delta T_w$ 의 시간 변화 및 열유속의 시간 변화에 의한 과냉각 해제에 미치는 영향에서 한계 과냉도를 줄이는 효과는 적지만 과냉각 해제까지 걸리는 시간은 자장을 가하지 않은 상태에서는 23.7분, 정지 수직자장은 20.5분, 수직 충격자장에서는 20.2분, 동축 회전자장에서는 17.4분, 편심 회전자장(30rpm)에서는 14.1분, 편심회전자장(120rpm)에서는 11.7분으로 과냉각 해제까지의 시간을 단축시킬 수 있었다.

3. 자장의 작용으로부터 과냉각 해제까지 걸리는 시간은 짧은 것이 바람직하고 냉각면의 순간 노출 방법에서는 자장의 작용으로부터 과냉각 해제까지 걸리는 시간  $\tau_e$ 는 약 6초가 걸렸다.

4. 대류 발생 시간과 냉각개시로부터 자장의 작용까지의 시간이 일치하는 점에서 자장의 작용으로부터 과냉각해제까지 걸리는 시간은 극소 값을 갖으므로 자장의 작용으로부터 과냉각 해제까지 걸리는 시간을 단축시킬 수 있다는 제어의 가능성을 확인하였다.

## 참고 문헌

1. 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.
2. 齋藤·大河·宇根·田之頭·戸敷, 過冷却水の凝固に影響を及ぼす外的要因に関する研究, 冷凍論文集, 8-2, 151-160, 1991.
3. 齋藤·宇高·大河·松澤·玉水, 傳熱面における過冷却解消過程に関する基礎研究, 冷凍論文集, 5-2, 65-75, 1988.
4. 稻葉·武谷, 静止水の 過冷却 現象に及ぼす 諸 因子の影響, 日本機械學會 論文集(B), 59-567, 3557-3564, 1993.
5. 稻葉·大竹·野津·福田, 水和塩の 過冷却 状態を利用した 潛熱蓄熱に関する 研究, 日本機械學會論文集(B), 58-553, 2848-2856, 1992.
6. 伊藤·柏木·黒崎·廣瀬, 過冷却水の凍結機構, 冷凍講演論文集, 81-84, 1985.