

제어압력 및 수용액의 농도가 관내 연속제빙에 미치는 영향

박 기 원[†], 오 후 규^{*}, 稻葉英男^{**}, 堀部明彦^{**}, 春木直人^{**}, 三浦秀俊^{**}

여수대학교 냉동공학과, ^{*}부경대학교 냉동공조공학과, ^{**}岡山大學 大學院 自然科學研究科

Influence of Control Pressure and Concentration of Water Solution at Continuous Ice Making in a Tube

Ki-Won Park[†], Hoo-Kyu Oh^{*}, Hideo Inaba^{**}, Akihiko Horibe^{**}, Naoto Haruki^{**}, Hidetoshi Miura^{**}

Department of Refrigeration Engineering, Yosu University, Yosu, Chonnam 550-749, Korea

^{*}Department of Refrigeration & Air-conditioning Engineering, Pukyung University, Pusan 608-737, Korea

^{**}Graduate School of Natural Science & Technology, Okayama University, Okayama 700-8530, Japan

(Received February 5, 2001; revision received October 29, 2001)

ABSTRACT: In the present study, the possibility of continuous slurry ice making using flowing water solution in a cooled tube has been investigated. The experiments were carried out at various concentration and velocity of water solution, temperature of cooled tube wall, and control pressure in a tube. As a result, four types of operating conditions, that is supercooling, continuous ice making, intermittent ice making and ice blockage, were classified. And it was found that the critical condition for the continuous ice making was acquired as a function of these experimental parameters.

Key words: Ice slurry(빙수 슬러리), Control pressure(제어압력), Continuous ice making(연속제빙), Ice blockage in tube(관폐쇄)

기 호 설 명

C_{sol} : 시험수용액의 질량농도 [mass%]

d_i : 시험부 내관 내경 [m]

IPF : 빙층전율(ice packing factor)

m_{ice} : 관내 제빙량 [kg/s]

m_{mix} : 빙수 슬러리의 혼합 질량유량 [kg/s]

P_{in} : 시험부 입구압력 [kPa]

P_{max} : 시험부내 최대제어압력 [kPa]

Re : Reynolds 수

t : 측정시간 [min]

T_{lwi} : 시험부 내관 벽면온도 [K]

T_{fs} : 수용액 초기농도에 대한 응고온도 [K]

T_{solin} : 시험부 입구에서의 수용액 온도 [K]

T_{solout} : 시험부 출구에서의 수용액 온도 [K]

T_{um} : 시험부 내관 내벽면 평균 온도 [K]

u_s : 수용액의 관내 평균 유속 [m/s]

x : 시험부 입구에서의 거리 [m]

η : 관내 제빙률 [%]

θ : 냉각온도비

ρ_{ice} : 빙결정의 밀도

ΔIPF : 시험부에서의 IPF 증가량

ΔT_{um} : 벽면과냉각도(= $T_{fs} - T_{um}$) [K]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-61-659-3274; fax: +82-61-659-3274

E-mail address: pkw@yosu.ac.kr

1. 서 론

최근에 화석연료에 의존하는 에너지 생산으로 인해 지구가 온난화되는 문제나 여름철에 주야간의 전력수요격차가 커지는 문제 등이 대두되면서 일반인들 사이에서도 환경보존에 관한 관심이 높아지고 있다. 또한 국내외적으로도 환경보존에 효과적이면서 에너지를 효율적으로 이용할 수 있는 기술개발에 박차를 가하고 있고, 그 대책 중 하나로서, 소비전력부하의 평준화가 가능한 빙축열 시스템의 도입이 추진되고 있는 실정이다.⁽¹⁾

빙축열 시스템에서 이용되고 있는 제빙방법으로는 여러 가지가 있지만, 크게는 스테틱형과 다이내믹형으로 나눌 수 있는데, 스테틱형은 전열면에 얼음이 생성됨에 따라 열저항이 증가하기 때문에 냉동기의 성적계수가 낮아질 수 있다는 단점을 지니고 있다. 따라서 최근에는 이를 해소하면서 미세한 슬러리 모양의 얼음을 생성함으로써 축열매체인 얼음입자를 쉽게 수송할 수 있는 다이내믹형 제빙법이 주목되고 있다.⁽²⁾

슬러리 모양의 제빙법에 관해서는 저농도의 수용액 속에 직접 액냉매를 취출하여 그 기화열을 이용하는 방법⁽³⁾이나 유동하는 물이나 수용액을 냉각관내에서 과냉각상태로 만든 뒤 과냉각상태를 해소시킴으로써 미세한 얼음조각을 만드는 방법^(4,5) 등이 보고되고 있다.

이처럼 슬러리 모양의 얼음을 냉각관내에서 만드는 다양한 방법이 유망한 것으로 인식되지만, 냉각관내에서 과냉각상태를 유지하기 곤란하다는 점과관이 폐쇄될 위험성이 존재하고 있다는 등의 문제를 안고 있다. 따라서 노즐에 의해 분무되는 물이나 수용액으로부터 슬러리 모양의 얼음을 생성하는 연구도 있다.^(6,7)

본 연구에서는 슬러리 모양의 얼음을 냉각관내에서 연속적으로 생성시키는 것을 목적으로 하고 있으며,관이 폐쇄되는 것을 억제하기 위하여 펌프의 토출압력을 조절함으로써 관내에서의 유동압력을 제어하는 방법을 사용하였다. 이때 조절압력, 수용액의 농도, 시험부의 벽면온도(과냉각도) 등이 관내에서의 제빙에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 실험장치 및 실험방법

실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험

장치는 시험부인 2중관식 열교환기를 포함한 시험수용액 순환계통, 시험부 냉각용 브라인 순환계통, 시험수용액을 저장하는 저류부, 저류부의 냉각 브라인 순환계통으로 크게 나누어진다.

제빙부인 2중관식 열교환기는 내관 내경이 10.0 mm, 외관 내경이 23.0 mm이며 길이가 980 mm인 스테인레스강제 원관으로 하였다. 시험부의 내관 내벽면의 평균 조도는 0.2 μm로 비교적 평활한 표면을 가지고 있다. 내관 외벽면에는 표면온도 측정용으로 T형 열전대를 시험부 입구에서 관측 방향으로 200 mm인 곳에 1점, 출구에서 110 mm 간격으로 3점을 두어 모두 4점의 관벽 상, 하, 좌, 우면에 부착하였다. 시험부에서의 제빙량을 측정하기 위해 시험부의 입·출구에 전기전도도법⁽⁸⁾을 이용한 IPF 측정기를 설치하였다.

시험수용액으로는 질량농도를 조절한 프로필렌 글리콜(분자식 : HOCH₂CH₂CH₂OH, 분자량 : 76.1) 수용액을 사용하였고, 이 수용액은 저류부에서 볼텍스 펌프에 의해 토출되어 전자유량계, 압력계, IPF 측정기를 통과한 뒤 시험부내로 유입한다. 시험부에서 유출된 시험수용액은 IPF 측정기를 통과한 뒤 저류부내에 유하하여 다시 순환하는 제빙 루프를 형성한다.

실험방법은 시험수용액을 관내 유동시키면서 소정의 유속 및 온도, 시험부 내관의 외벽면온도로 조

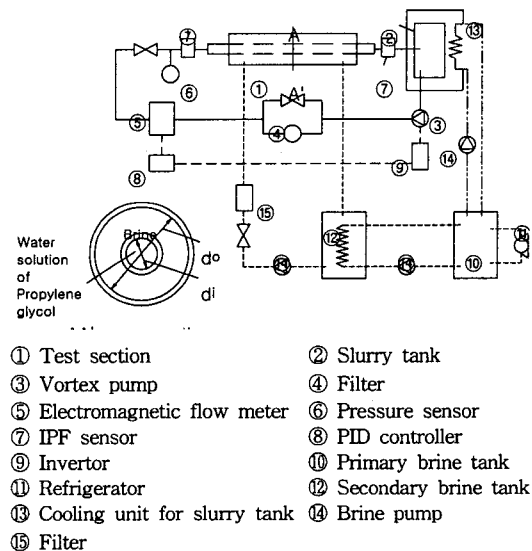


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1 Experimental conditions

Experimental fluid	
Water solution Concentration	Propylene glycol 5, 10, 15 mass%
Test section	
Material of tube	Stainless steel
Cooling method	Cooled brine circulation in double tube
Condition in tube	
Ice making condition	Continuous ice making (main)
Reynolds number	950~8000
Degree of supercooling	0.2~3.4 K
Control pressure	0, 12, 36 kPa(gauge)

정한 뒤 시험부에서의 과냉각 해소물질로서 빙결정을 슬러리 탱크내의 시험수용액 속에 투입하여 측정을 시작하였다. 투입된 빙결정은 슬러리 탱크내에서 교반기에 의해 시험수용액과 혼합되고, 볼텍스 펌프에 의해 토출되어 시험부내로 유입한다.

본 실험의 범위는 Table 1과 같다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 관내 제빙 영역

본 실험에서는 시험부내 냉각조건 및 관내 평균 유속 등에 따라 Fig. 2~6에서처럼 4종류의 관내 제빙이 관찰되었다.

여기서 과냉각(supercooling) 영역은 수용액 속에 빙핵물질로서 빙결정이 혼입되어 있음에도 시험부내에서 수용액이 과냉각상태로 유지되는 경우이다. 연속제빙(continuous ice making) 영역은 시험부내에서 수용액이 냉각되어 시험부 내관 내벽면 근처에서 과냉각상태로 되고 수용액 속에 존재하는 빙결정의 빙핵작용으로 인해 시험부내에서 빙결정이 연속적으로 성장하는 상태이거나 시험부 내관 냉각면상에서 새로운 빙결정이 생성하지만 시험유체의 흐름에 의한 외력에 의해 냉각면상에서 박리되어 시험부 밖으로 배출되는 경우이다. 본 실험에서는 시험부내에서 안정하게 빙결정이 생성되고 성장하여 IPF가 유지 또는 증가하는 상태가 60분 이상 지속될 때를 연속제빙으

로 하고, 그 제빙이 확인될 때의 조건을 연속제빙조건으로 정의하였다. 간헐제빙(intermittent ice making) 영역은 시험부 내관 냉각면상에 박리하기 어려운 얼음이 성장하여 관폐쇄상태로 되지만 관내 압력을 상승시키면 얼음(빙결정)이 시험부 밖으로 강제적으로 배출되어 수용액이 다시 유동하기 시작하는 경우이다. 관폐쇄(ice blockage) 영역은 빙결정이 냉각면상에서 박리하지 않고 고착된 상태로 성장함에 따라 유로를 좁히고 최종적으로는 수용액의 유동이 정지하는 경우이다.

3.1.1 온도과 압력분포

Fig. 2는 각 제빙영역에서 나타나는 시험부 벽면온도 T_{lwt} 와 시험부 입구 관내 압력 P_{in} 의 경향을 나타낸 것이다. 여기서는 수용액의 농도 15 mass%, 관폐쇄시 시험부 입구에 주는 관내 압력의 최대값을 36 kPa로 하였을 때의 결과를 나타내었다. 벽면과냉각도는 아래의 식(1)에 따라 구한 것이다.

$$\Delta T_{wm} = T_{fs} - T_{wm} \quad (1)$$

여기서, T_{fs} 는 수용액 초기농도에서의 응고점 온도이며, T_{wm} 은 시험구간의 내관 내벽 평균 온도이다.

그림 (a)는 수용액의 Reynolds 수를 4200, 벽면과냉각도를 1.6 K로 한 상태에서의 결과이다. 이 조건에서는 시험부 출구에서 과냉각상태가 되어 수용액의 IPF는 증가하지 않았고 관내에서 얼음의 생성이 관찰되지 않았다. 그림에 나타낸 것처럼 관벽온도는 매끄러운 변동을 나타내고 관내 압력도 큰 변동은 없다. 이러한 거동은 수용액의 유동이 난류이고, 벽면과냉각도가 작은 경우에 관찰되었다. 그 원인으로 난류가 되는 높은 Reynolds 수로 인하여 관내 유속이 빨라 체류시간이 짧고, 과냉각도가 작기 때문에 관내에서 빙결정이 성장할만큼 충분한 냉열량이 확보되지 않았으며, 이에 따라 과냉각상태가 해소되지 않고 벽면과냉각도가 낮아진 것으로 생각된다.

그림 (b)는 Reynolds 수 1840, 벽면과냉각도 1.2 K인 조건에서의 결과인데, 수용액의 IPF가 증가하였고, 출구에서의 수용액온도 T_{solout} 는 수용액의 초기농도에 대한 응고온도 T_{fs} 보다 약간 높게

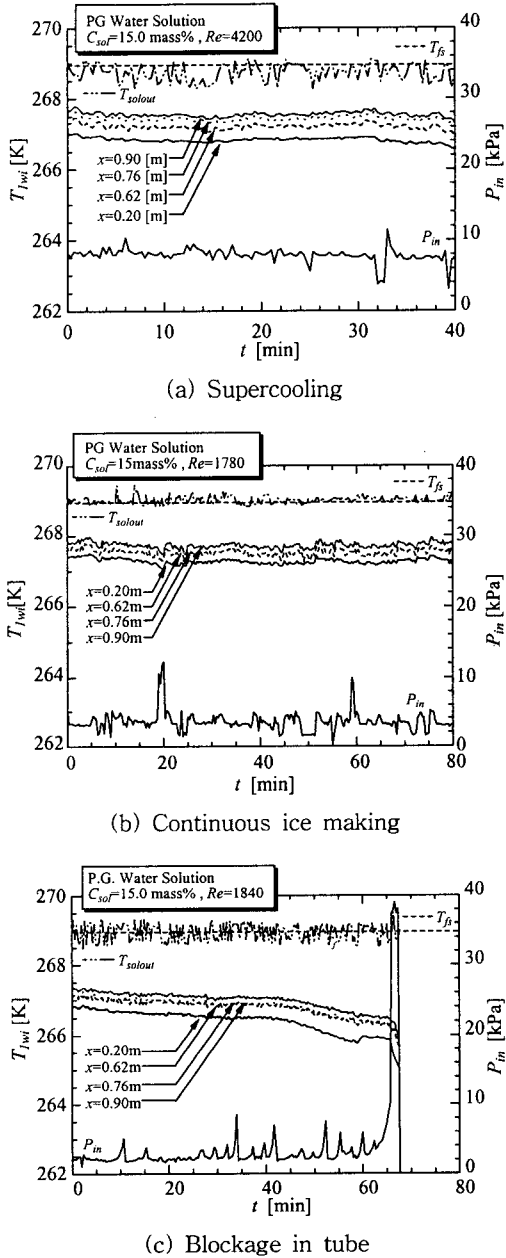


Fig. 2 Distribution of temperature and pressure in a tube.

유지됨을 알 수 있다. 이것은 시험부내에서 얼음이 생성될 때 응고잠열을 방출하고 관내 수용액과 함께 출구로 이동하면서 영향을 미치기 때문으로 생각되며, 이에 따라 관내에서 연속적으로 제빙이 이루어지고 있는 것으로 추정된다. 이 상

대에서는 관내를 유동하는 빙결정이 빙핵물질로 작용하여 수용액의 과냉각상태가 해소됨으로써 관내 제빙이 이루어지는 것으로 생각된다. 따라서 그림에서 벽면온도는 약간의 변동은 있지만, 거의 일정한 값을 유지하고 있고, 벽면온도의 변동은 외부에서의 냉각으로 인해 관내 벽면 근처에 형성되는 과냉각 영역에서 관내를 유동하는 빙결정에 의해 과냉각상태의 형성과 해소가 반복되기 때문으로 생각된다. 그리고 관내 압력은 스파이크와 같은 모양을 나타내고 있는데, 이는 관내에서 생성되고 성장하는 빙결정으로 인해 수용액의 유동이 방해받기 때문으로 생각된다.

또 그림 (c)는 Reynolds 수 1840, 벽면과냉각도 1.8 K인 조건에서의 결과인데, 그림에서처럼 일정 시간이 경과한 뒤에 관내 압력이 급격하게 상승함과 동시에 벽면온도가 급격하게 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 큰 벽면과냉각도로 인해 냉각열량이 증대함으로써 관 벽면에서의 과냉각상태 해소현상이 관 중심부까지 확대되어 급격하게 빙결정이 성장하기 때문으로 생각된다. 이로 인해 그림에서는 약 70분 후에 관이 폐쇄됨을 보여주고 있다.

이상에서 정의한 내관의 내벽 평균 온도는 관 내벽면에 빙결정의 생성유무와 관계없이 관의 내벽온도로 하였고, 관내 수용액의 유량을 시험부 입구에서 측정하였기 때문에 Reynolds 수도 시험부 내벽에서의 제빙에 관계없이 시험관의 내경을 그대로 고려하였다.

3.1.2 제어압력에 따른 영역분포

Fig. 3은 관내에서 유동하는 수용액에 압력제어를 실시하지 않은 경우와 36 kPa의 압력으로 제어하는 경우를 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 관내 제어압력을 증가시키게 되면 유량이 증가하게 되어 관내에서의 제빙영역이 확대됨을 알 수 있다. 따라서 압력제어를 실시하는 것이 관내 연속제빙에는 매우 효과적이라는 것을 확인할 수 있다.

앞에서 관내에서의 압력을 제어하는 것이 효과적이라는 결과를 얻었다. 여기서는 제어압력의 정도에 따른 효과를 살펴보고자 한다.

Fig. 4는 수용액을 5 mass%의 저농도로 하였을 경우의 결과를 나타낸 것이다. 여기서는 연속 제빙영역이 나타나지 않을 뿐만 아니라 제어압력

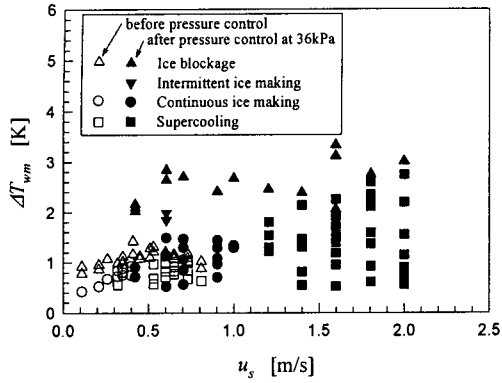


Fig. 3 Ice making pattern in a tube at concentration of 15 mass%.

에 의한 영향이 거의 나타나지 않았다. 이는 수용액의 농도가 낮아 관내에서 생성되는 빙결정이 물만인 경우에 가까운 성질을 나타내기 때문에, 빙결정끼리 또는 빙결정과 냉각면 사이의 부착력이 강해서 박리되기 어려울 뿐만 아니라 빙결정이 급격하게 성장하기 쉽기 때문으로 생각된다.

그러나 Fig. 5에서와 같이 수용액의 농도를 10 mass%로 하였을 경우에는 연속제빙영역의 벽면과냉각도가 다소 증가하는 경향을 나타내며, Fig. 4에 비하여 최대제어압력을 12 kPa(그림의 (a))에서 36 kPa(그림의 (b))로 증가시키에 따라 관쇄영역이 축소되고, 연속제빙 및 간헐제빙시의 벽면과냉각도가 다소 높아져 관내 연속제빙에 효과가 있음을 알 수 있다. 그러나 여기서도 연속제빙은 Reynolds 수 3000 이하에서만 그 효과가 나타난다. 이는 유속이 지나치게 빠르면 빙핵물질

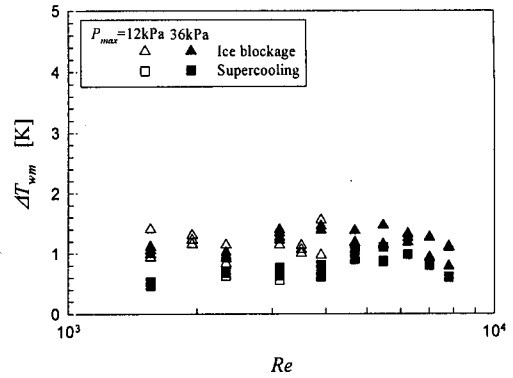


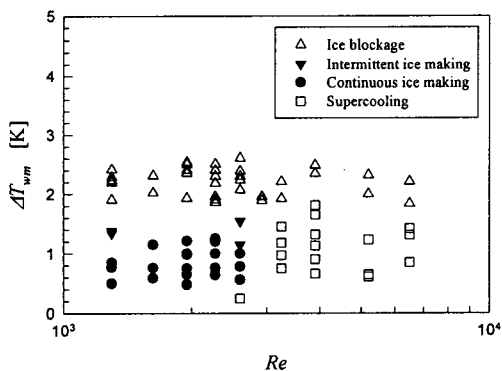
Fig. 4 Ice making pattern in a tube at concentration of 5 mass%.

로서의 빙결정이 관 중심부로 모여 유동하기 때문에 과냉각영역이 존재하는 관벽부를 통과하기 어렵고, 시험부 체류시간이 짧기 때문으로 생각된다.

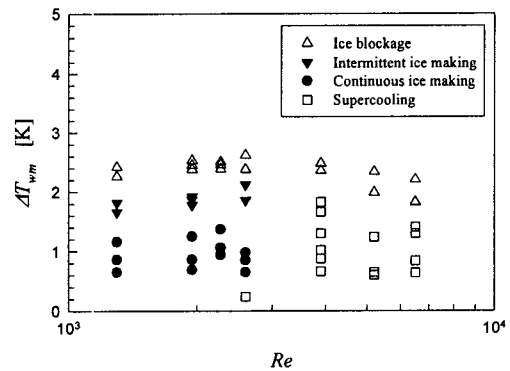
3.1.3 수용액의 농도에 따른 영역분포

여기서는 수용액의 농도에 따라 나타나는 관내에서의 제빙영역을 살펴보고자 한다.

Fig. 6은 관내 제어압력 36 kPa인 상태에서 수용액의 농도를 각각 10 mass%(그림의 (a))와 15 mass%(그림의 (b))로 하였을 때의 결과로서, 수용액의 농도가 높을수록 그다지 큰 변화는 아니지만 연속제빙영역이 약간 확대된다는 것을 알 수 있다. 이는 수용액의 농도가 높아질수록 동일한 벽면과냉각도에서 빙결정이 성장하지 않고 생성된 빙결정이 그대로 배출되기 때문으로 생각된다.



(a) $P_{max} = 12 \text{ kPa}$



(b) $P_{max} = 36 \text{ kPa}$

Fig. 5 Ice making pattern in a tube at concentration of 10 mass%.

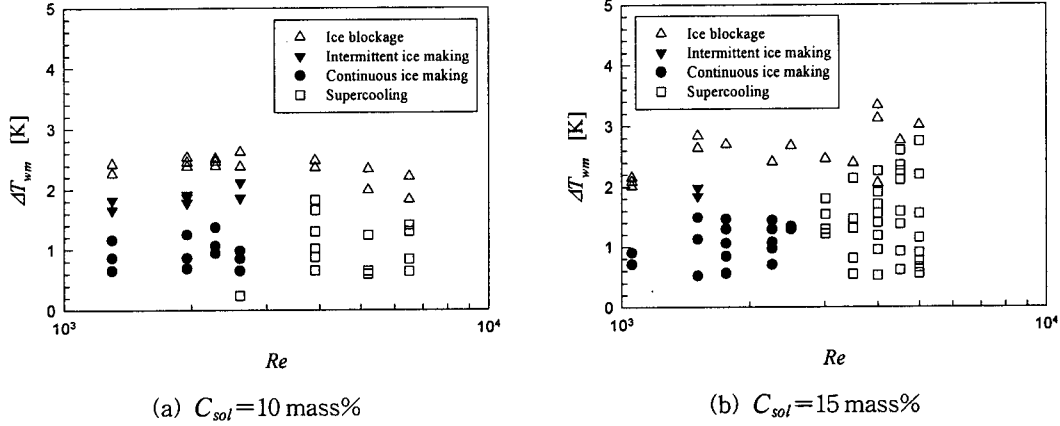


Fig. 6 Ice making pattern in a tube at maximum pressure of 36 kPa.

다. 또한 동일 Reynolds 수에서는 과냉각, 연속제빙, 간헐제빙, 관폐쇄의 순으로 벽면과냉각도가 증가된다는 것도 알 수 있다.

3.2 관내 제빙량

본 실험에서는 시험부 입·출구에 IPF 측정기를 설치하여 시험부에서의 IPF 증가량을 측정하고, 식(2)로부터 얼음생성량 m_{ice} 를 산출하였다.

$$m_{ice} = u_s \cdot \frac{\pi(d_i)^2}{4} \cdot \Delta IPF \cdot \rho_{ice} \quad (2)$$

여기서, u_s 는 시험수용액의 관내 평균 유속이고, d_i 는 시험부의 내관 내경이며, ΔIPF 는 시험부에서의 IPF 증가량, ρ_{ice} 는 빙결정의 밀도이다.

3.2.1 제어압력에 따른 제빙량

Fig. 7은 수용액의 농도가 15 mass%이고 연속제빙일 때 관내 제어압력의 차이에 따른 시험부 벽면과냉각도와 시험부에서의 단위시간당 얼음생성량의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서처럼 동일한 벽면과냉각도에서 Reynolds 수가 증가함에 따라 관내 제빙량은 증가한다. 이것은 Reynolds 수가 증가함에 따라 수용액온도가 평형동결온도로 되는 영역이 확대되고 있어 시험부 단면에서 관내 제빙하는 영역이 확대되고 있는 것도 하나의 원인이라고 판단된다.

그러나 수용액의 Reynolds 수가 2240인 경우에

는 제빙량이 오히려 약간 감소하고 있는데, 이것은 수용액농도가 높으면 빙결정이 벽면 근방에서 생성, 성장하기 어렵거나 Reynolds 수가 증가함에 따라 관내에서 유동하는 빙결정이 관 중심부로 모이기 쉬운 것이 원인이라고 생각된다.

그리고 동일한 Reynolds 수에서는 벽면과냉각도가 증대함에 따라 빙결정 생성량은 증가한다. 이것은 벽면과냉각도가 증가함에 따라 수용액과 시험부 내관 내벽면의 온도차가 커져 둘 사이의 교환열량이 증가하였기 때문이라고 생각된다.

또 관내 제어압력이 12, 36 kPa로 다름에도 불구하고 관내 제빙량에 대한 영향은 거의 나타나지 않는다. 이것은 관내 연속제빙상태에서는 관내 압력을 변경하여도 시험수용액의 관내 평균 유속은 거의 변하지 않은 상태에서 관내를 유동하기 때문으로 생각된다.

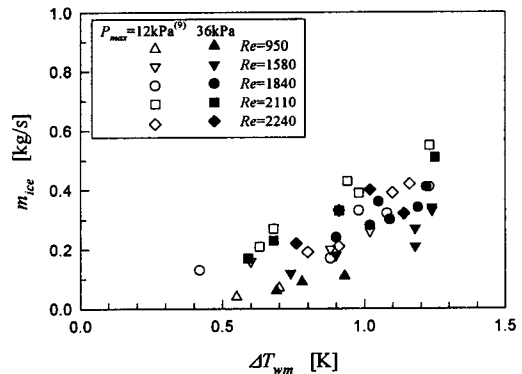


Fig. 7 Ice making quantity at concentration of 15 mass%.

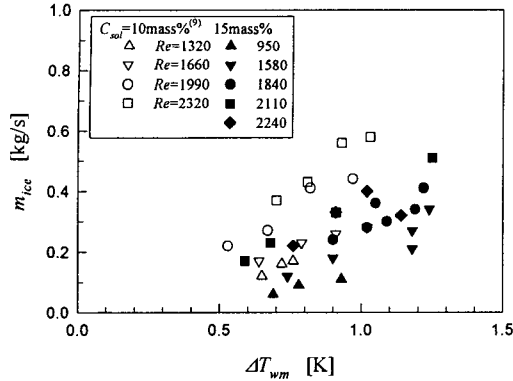


Fig. 8 Ice making quantity at maximum pressure of 36 kPa.

3.2.2 수용액의 농도에 따른 제빙량

Fig. 8은 관내 제어압력을 36 kPa로 하고, 수용액의 농도를 10, 15 mass%로 하였을 경우의 제빙량을 나타낸 것이다. 여기서도 Fig. 7에서와 마찬가지로 Reynolds 수가 증가하고, 벽면과냉각도가 증가할수록 제빙량이 증가하지만, 수용액의 농도가 증가하면 오히려 제빙량이 감소하는 것으로 나타나고 있다. 이는 다음과 같은 이유 때문으로 생각된다. 일반적으로 수용액이 동결할 때에는 물 분자 사이에 수소결합이 작용하기 때문에 수용액 속의 물분자만이 동결층을 형성하여 동결계면에서 수용액의 용질이 석출된다. 이 때문에 동결계면 근방에서 수용액의 농도분포가 생겨 수용액 농도가 높은 영역이 형성된다.⁽¹⁰⁾ 그 결과 수용액 농도가 높은 빙결정 표면 근방에서 국소적으로 열전도율이 낮아져 관 외부의 냉각 브라인으로부터 빙결정으로 냉열이 전달되기 어려워지므로 빙결정이 가지는 빙핵물질로서의 기능이 저하되기 때문으로 생각된다.

3.3 관내 제빙률

본 실험에서 사용한 관내 제빙률 η 는 빙수 슬러리의 혼합질량유량 m_{mix} 와 시험부에서 증가하는 시험수용액의 IPF에서 산출한 단위시간당 얼음생성량 m_{ice} 의 비로 정의하여 식(3)과 같이 나타낸다. 또 외부에서 냉각되는 시험부의 벽면온도가 유입되는 수용액의 상태에 따라 제빙에 미치는 영향을 무차원 온도비로 나타낸 냉각온도비 θ 를 식(4)처럼 정의하였다.

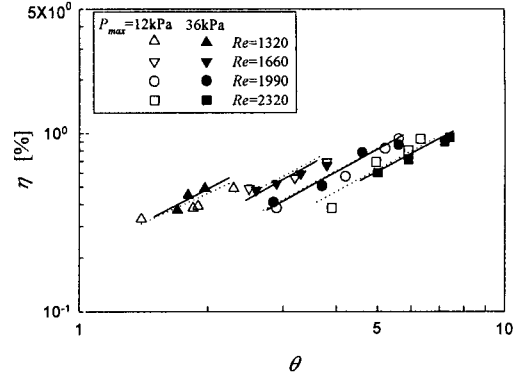


Fig. 9 Ice making efficiency at concentration of 10 mass%.

$$\eta = \frac{m_{ice}}{m_{mix}} \times 100 \quad (3)$$

$$\theta = \frac{T_{fs} - T_{wm}}{T_{solin} - T_{fs}} \quad (4)$$

여기서, T_{fs} 는 시험수용액의 초기농도시 응고온도, T_{wm} 은 시험부 내관 외벽 평균 온도, T_{solin} 은 시험부 입구에서의 수용액온도이다.

3.3.1 제어압력에 따른 제빙률

Fig. 9는 수용액의 농도를 10 mass%로 하고, 제어압력을 각각 12, 36 kPa로 하였을 때의 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 관내 제빙률은 냉각온도비에 따라 단조롭게 증가하고, Reynolds 수의 증가에 따라서는 감소하는 경향을 보인다. 이것은 Reynolds 수가 증가함에 따라 관내에서의 빙결정이 확산되고, 과냉각영역을 통과하는 빈도가 증가하는 것으로 생각되지만, 빙결정이 시험부내에서 체류하는 시간이 짧아지므로 과냉각해소가 충분히 이루어지기 어렵다는 점과 관내에서의 얼음생성량에 비해 시험부로 유입하는 수용액의 비율이 높기 때문이라고 생각된다. 또한 관내 제어압력에 의한 영향도 거의 없는 것으로 나타나고 있다.

3.3.2 수용액의 농도에 따른 제빙률

Fig. 10은 관내 제어압력을 12 kPa로 하고, 수용액의 농도를 각각 10, 15 mass%로 하였을 때의 결과이다. 여기서도 Fig. 9에서처럼 냉각온도

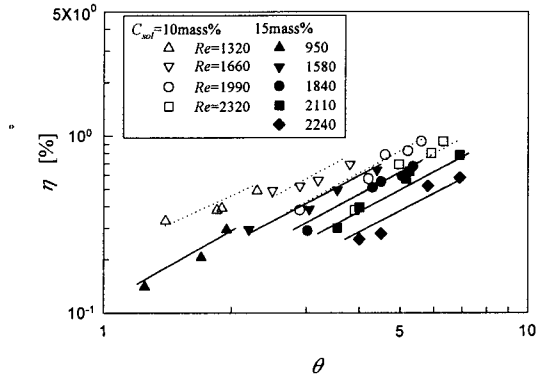


Fig. 10 Ice making efficiency at maximum pressure of 12 kPa.

비가 증가할수록 Reynolds 수가 감소할수록 제빙률이 증가한다는 것을 알 수 있다. 그러나 수용액의 농도가 높을수록 제빙률이 오히려 낮아지고 있음을 알 수 있다. 이것은 얼음입자가 성장하면서 입자계면에 생기는 용질농도가 상승하는 것과 과냉각 수용액 속에서의 얼음 성장속도가 고농도일수록 늦어지기 때문인 것으로 생각된다.

4. 결 론

냉각원관을 사용하여 프로필렌글리콜 수용액에 의한 관내 연속제빙에 대한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 수용액의 냉각조건, 관내 압력의 제어 등에 따라 관내 제빙시에는 과냉각영역, 연속제빙영역, 간헐제빙영역, 관폐쇄영역의 4영역이 나타났다.
- (2) 연속제빙일 때에는 출구에서의 수용액온도가 수용액의 초기농도에 따른 응고온도보다 약간 높게 유지되고, 냉각벽면온도는 거의 일정하며, 관내 압력은 급상승 없이 약간의 변동을 하였다.
- (3) 관내 유동하는 수용액에 대하여 압력제어를 하지 않은 경우보다 압력제어하는 경우에 제빙영역이 확대되었다.
- (4) 관내 제어압력과 수용액의 농도가 높을수록 연속제빙영역이 확대되었다.
- (5) 연속제빙일 때 관내에서의 제빙량은 관내 제어압력에 따른 영향은 거의 없었고, 수용액 농도가 높으면 제빙량이 오히려 감소하였다.
- (6) 관내 제빙률은 제어압력에 의한 영향은 거의 없으며, 수용액농도가 높을수록 낮았다.

(7) 관내에서의 제빙은 관내 제어압력, 관내 평균 유속, 수용액의 농도, 시험부의 벽면과냉각도 등에 의존하였다.

참고문헌

1. Park, S. S. and Back, J. H., 2000, Ice making thermal storage, energy saving and environment, Journal of Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 40, No. 4, pp. 40-44.
2. Park, K. W., 1998, Current status of research and new development on ice heat storage system technology, The Magazine of the Korean Refrigerating and Air Conditioning Technology Association, Vol. 15, No. 4, pp. 119-131.
3. Utaka, Y. and Saito, A., 1989, On the method of efficient ice cold energy storage using a heat transfer of direct contact phase change and a natural circulation of a working medium in an enclosure, Refrigeration, Vol. 64, No. 745, pp. 20-24.
4. Inaba, H., Lee, D. W. and Horibe, A., 1998, Study on the critical conditions of ice formation for a continuous ice making system in a cooled pipe, Heat Transfer Japanese Research, Vol. 27, No. 1, pp. 74-83.
5. Inaba, H. and Takeya, K., 1994, Effects on some factors on critical condition of ice formation for flowing supercooled water and water solution inside cooled circular tube, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (B), Vol. 60, No. 578, pp. 3440-3447.
6. Kim, B. S., Lee, Y. P., Yoon, S. Y. and Lee, J. H., 1997, A study on ice-slurry production by water spray, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 9, No. 2, pp. 134-143.
7. Shin, H. T., Kim, M. H., Lee, Y. P. and Choi, Y. D., 1998, Experimental study on the production of spherical ice particles using water as refrigerant, Korean Journal of

- Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 10, No. 4, pp. 475-482.
8. Kitahara, T. and Shirakashi, M., 1993, Hydraulic conveying of snow and ice-development of a snow-fraction meter-, Setpyo, Vol. 55, No. 4, pp. 307-315.
 9. Park, K. W., Miura, H., Horibe, A. and Inaba, H., 2000, Quantity of ice slurry in cooled tube by continuous ice making using organic water solution, Energy Engg. J., Vol. 9, No. 3, pp. 221-227.
 10. Otaki, H., 1987, Chemical of solution, Dainippon-tosho.