

유기수용액에 의한 냉각관내 연속제빙시의 제빙량

박기원 · 三浦秀俊* · 堀部明彦** · 稻葉英男**

여수대학교 냉동공학과

*岡山大學 大學院 工學研究科

**岡山大學 大學院 自然科學研究科

Quantity of Ice Slurry in Cooled Tube by Continuous Ice Making using Organic Water Solution

Ki-Won Park, Hidetoshi Miura*, Akihiko Horibe* and Hideo Inaba*

Yosu National University, *Okayama University

요 약

본 논문은 냉각된 원관내에서 유동하는 프로필렌글리콜 수용액의 제빙에 관하여 실험한 것이다. 실험은 수용액의 질량농도, 수용액의 유속, 관벽의 온도, 펌프의 압력 등을 변화시키면서 행하였다. 그 결과 관내에서의 제빙량은 프로필렌글리콜 수용액의 관내유속, 벽면과냉각도 및 수용액의 농도에 영향을 받고 있었고, 수용액의 질량농도가 낮을수록 또 시험수용액의 유속이 빠를수록 관내에서의 제빙량은 증가하는 경향을 띄었다. 그리고 관내제빙율에 영향을 미치는 인자들의 효과를 검토하여 관내제빙율에 관한 무차원식을 얻었다.

Abstract — Ice making characteristics of flowing water solution (propylene glycol) in a cooled circular tube were experimentally investigated. The experiment were carried out under some parameters of concentration of water solution, velocity of water solution, temperature of cooled pipe wall, and pump pressure etc. The results showed that it was found that the ice making quantity in tube were affected by some parameters of water solution velocity, degree of supercooling on wall, and concentration of water solution etc. The ice making quantity increase with an increase in the flow velocity in tube and an decrease in mass concentration of water solution. A dimensional correlation equation for the ice making efficiency was derived as a function of some parameters.

1. 서 론

최근 여름철에 주·야간의 소비전력차가 확대되고, 화석연료에 의존하는 에너지생산으로 인한 지구온난화문제 등이 일반인에게까지 알려질 정도로 문제화되고 있어 환경보전에 효과적이면서 에너지를 절약하고 효율적으로 이용할 수 있는 기술개발이 가장 큰 관심사로 부각되고 있다. 이러한 에너지 유효이용의 일환이라는 측면과 열의 생성 및 소비시간을 달리 할 수 있다는 측면에서 축열이 강조되어 왔고, 특히 값싼 야간전력으로 열을 만들고, 그 열을 위한 열을 주간에 이용함으로써 소비전력 부하평준화가 가능한 빙축열 시스템으로의 관심이 높아지고 있다.^{[1][2]}

빙축열 시스템에서 이용되고 있는 제빙방법으로는 크게 스테틱(static)형과 다이내믹(dynamic)형으로 나눌 수 있는데, 전열면에 얼음이 생성함에 따라 열저항이 증가하여 냉동기의 성적계수가 낮아질 수 있다는 스테틱형의 단점을 해소하면서 미세한 슬러리모양의 얼음을 생성함으로써 축열매체인 얼음입자를 쉽게 수송할 수 있는 다이내믹형이 주목되고 있다^[3]. 또 이는 제빙법을 다양화시킬 수 있다는 점과 용해시의 높은 부하추종성 등도 잇점으로 거론된다. 그러나 냉각관내에서 수용액의 과냉각상태를 유지하기 곤란하다는 점과 관이 폐쇄될 위험성이 항상 존재한다는 등의 문제점도 있다.

이와 같이 유동상태에 있는 물이나 수용액의 과냉각 현상에 관한 종래의 연구로는, Arora and Howell^[4]이 난

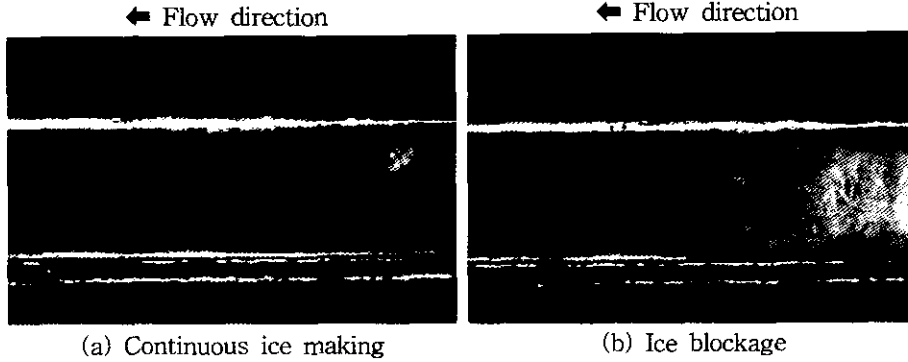


Fig. 2. Behavior of ice making in cooled tube.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 시험부내에서의 유동 및 IPF 측정

3-1-1. 관내에서의 빙수슬러리 생성 모습

Fig. 2 (a)와 (b)는 투명 가시화용 시험관을 통하여 각 연속제빙과 관폐쇄상태를 살펴본 것이다. (a)에 나타난 것처럼 연속제빙상태에서는 시험수용액의 유동에 의해 벽면 근방에서 생성된 빙결정이 내관 벽면상을 미끄러지듯이 이동함과 동시에 성장하는 모습이 관찰되었다. 그 후 빙결정은 내관 벽면에서 박리되어 시험수용액과 함께 시험부 밖으로 배출된다. 그러나 (b)와 같이 관폐쇄인 경우는 관벽 근방에서 빙결정이 급격하게 관길이 방향으로 성장하면서 관측방향으로도 성장하여 시험수용액의 유로를 좁히는 모습이 관찰되었다. 그 후 시간이 지나면서 더욱 성장한 빙결정은 시험부 내관내를 완전히 막아 관폐쇄상태에 이른다.

3-1-2. IPF 측정

본 연구에서 IPF의 측정에 사용한 전기전도도법은 전기전도도가 다른 물질이 혼합되어 있을 때 그 혼합물질의 겉보기 전기전도도가 구성물질의 혼합비율에 의존한다는 것을 이용한 것이다. 따라서 혼합물질의 평균전기전도도를 측정함으로써 그 혼합물질의 체적혼합비율을 산출할 수 있다. 본 연구에서는 체적혼합비율을 산출하는데, 충전율이 큰 경우에도 적용할 수 있고 구형입자끼리의 간섭에 의한 영향을 고려한 식(1)과 같은 Bruggeman의 식을 기초로 하였다. 그러나 본 실험의 대상인 빙수슬러리에서는 빙결정의 전기전도도($10^7 \sim 10^8 \Omega \cdot m$)에 비해 물의 전기전도도($83 \Omega \cdot m$ 정도)가 매우 작기 때문에, 식(2)와 같이 변형하였다.

$$\frac{\gamma_w - \beta}{\gamma_{mix} - \beta} \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_{mix}} \right)^{-1/3} = 1 - IPF \quad (1)$$

$$IPF = 1 - \left(\frac{\gamma_{mix}}{\gamma_w} \right)^\alpha \quad (2)$$

여기서, γ 는 체적 전기저항율이며, β 는 γ_w / γ_{ice} 이다. 또 첨자 mix는 빙수슬러리를, w는 물을 나타내고, 지수 α 는 $-2/3$ 이다.

Fig. 3(a)와 (b)에는 시험부 입구와 출구에서의 IPF 측정결과를 나타내었다. 그림에서와 같이 전기전도도법을

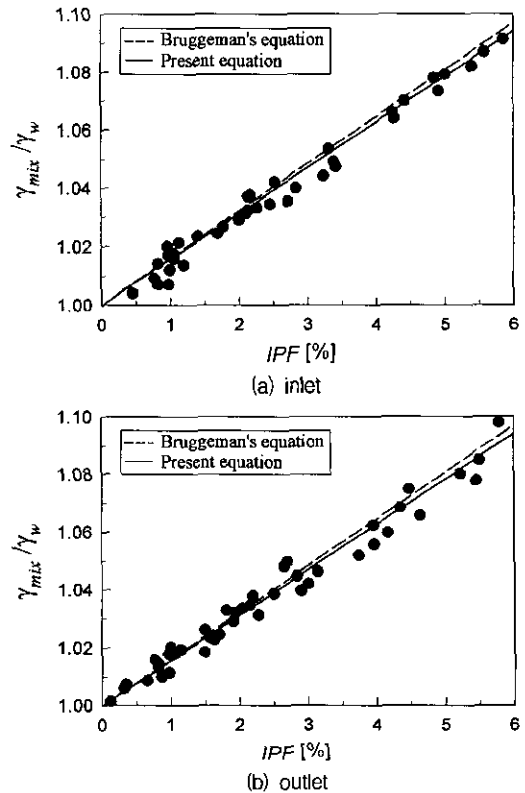


Fig. 3. Test results of IPF sensor at the test section.

이용하여 비교적 높은 정도로 연속적으로 관내를 유동하는 빙수슬러리의 IPF를 측정할 수 있다는 것이 판명되었다. 또 이 결과에 따라 식(2)에서의 지수 α 는 시험부 입구에서 -0.688 , 출구에서 -0.682 로 구해졌다.

3.2. 빙결정의 입자경

3.2-1. 빙핵물질용 빙결정

본 실험에서 빙핵물질로 사용한 빙결정은 직경 180 mm, 높이 180 mm인 스테인레스 용기에 수도수를 채운 뒤, -20°C 인 냉동고 속에 저장하여 만들어진 얼음덩어리를 썰빙기로 절삭한 것이다. 그러나 이 빙결정은 표면에 수분이 부착되어 있고 입자도 비교적 매끄럽지 못한 상태이기 때문에, 그대로 빙핵물질로 사용하면 장치내에서 관 폐쇄를 일으키는 요인으로 작용하기 쉬울 것이다. 따라서 이 빙결정을 다시 -20°C 에서 24시간 이상을 저장한 뒤에 빙핵물질로 사용하였다. 이런 방법으로 얻어진 빙핵물질용 빙결정의 평균입자경은 0.87 mm, 표준편차는 0.18 mm이어서 거의 균일한 입자경을 가지고 있는 것으로 확인되었다.

3.2-2. 관내연속제빙시의 변화

시험부를 통과한 시험수용액 속에 함유되어 있는 빙결정을 분리하기 위해 만든 슬러리 분리부(메쉬경 1 mm인 스테인레스강재 그물망과 0.1 mm인 그물망을 2중으로 겹쳐 만든 것)를 시험부 출구 하부에 설치하고, 그 위에 측정되는 빙결정의 입자경을 측정하였다. 본 실험에서는 빙결정의 입자경을 측정할 때 일정방향에서 얼음입자의 최대길이를 측정하는 방법¹¹⁾을 사용하였다.

Fig. 4(a)와 (b)는 각각 연속제빙이 시작되는 시점과 60분 후에 시험부 출구에서 채취한 빙결정의 입자경 분포를 나타낸 것이다. 여기서는 빙결정의 입자경을 평가할 때 체면적 평균직경¹²⁾을 사용하였는데, 이 체면적 평균직경 d_{m32} 는 식(3)과 같이 정의된다.

$$d_{m32} = \frac{\sum (d_{ice}^3 \times N)}{\sum (d_{ice}^2 \times N)} \quad (3)$$

여기서, d_{ice} 는 얼음입자의 직경이고, N 은 빙결정입자의 개수이다.

Fig. 4(a)에서 연속제빙이 시작된 직후의 빙결정 입자경은 비교적 그 분포가 집중화되고, 평균입자경은 0.79 mm, 표준편차는 0.17 mm였다. 또 (b)와 같이 연속제빙이 시작된지 60분이 지난 뒤에는 빙결정의 입자경이 완만한 분포를 보이고, 평균입자경은 1.28 mm, 표준편차는 0.27 mm였다. 따라서 시험부내를 유동하는 빙결정은 시험부에서 성장한다는 것을 알 수 있다.

이러한 경향은 Fig. 5와 같이 시험부에서 생성된 빙

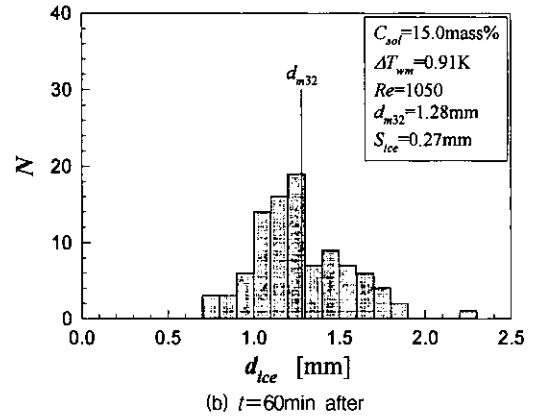
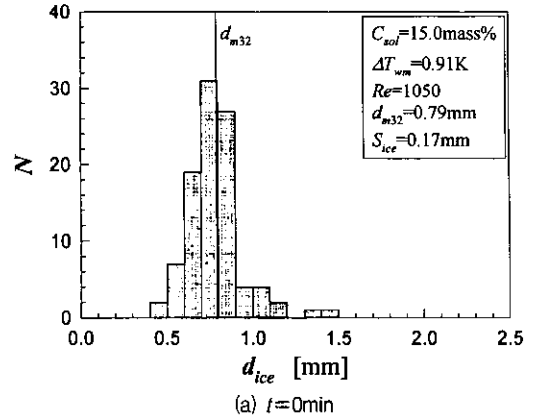


Fig. 4. Distribution of particle diameters flowing ice crystals in tube.

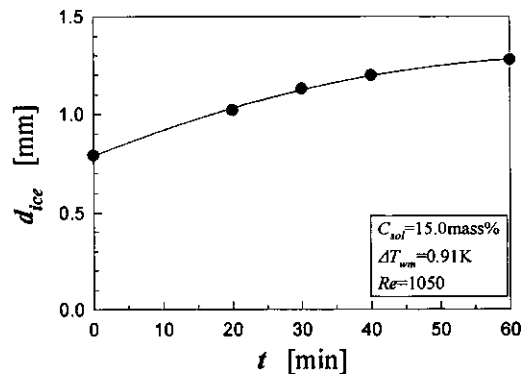


Fig. 5. Variation of Ice particle diameter with time.

결정에서 구한 평균입자경의 시간에 따른 변화에서도 알 수 있다. 즉, 시험부내에서 빙결정은 시간이 지남에 따라 성장하여 빙결정의 입자경은 커지지만, 그 증가비율은 서서히 낮아지는 경향을 보인다.

본 연구에서는 시험부 입구에서 거의 같은 IPF 가 되도록 조정된 슬러리모양 수용액을 유입시켰기 때문에, 빙결정 입자경이 작아짐에 따라 관내를 유동하는 얼음입자의 총표면적은 확대된다. 결국 내관 벽면 근방에서 수용액의 과냉각상태 해소에 의한 냉열량을 받는 전열면적이 증가하여 빙결정이 성장하기 쉽게 된다고 생각할 수 있다.

따라서 본 제빙법을 이용할 때 빙핵물질로서 입자경이 작은 빙결정을 이용하면 제빙부에서의 제빙효율이 향상할 가능성을 가지고 있다. 또 미소한 빙결정을 이용하는 경우 빙수슬러리는 보다 유동성이 풍부하고, 높은 IPF 도 달성될 가능성도 있다고 생각된다.

그러나 수용액의 농도가 10 mass%일 때에는 연속제빙영역의 상한을 나타내는 벽면과냉각도 부근에서 얇은 얼음조각이 생성되는 것도 관찰되었다. 또 가시화 시험부를 통해서는 내관 내벽면 위에서 덴드라이트(dendrite) 모양의 빙결정이 석출되고 있는 모습도 관찰되었다. 이러한 점으로부터 본 실험에서 사용한 냉각관내 제빙법에서는 시험부 내관내에서 일률적으로 빙핵물질인 빙결정이 성장하지 않고 실제로는 내벽면 근방에서 얼음의 석출, 박리현상도 생기는 것으로 추정되어 냉각관내에서는 복잡한 제빙거동이 이루어짐을 짐작할 수 있다.

3-3. 관내제빙량에 대한 검토

본 실험에서는 시험부 입·출구에 IPF 측정기를 설치하여 시험부에서의 IPF 증가량을 측정하여 얼음생성량을 산출하였다. 대상으로 한 실험조건은 관내연속제빙거동이 관찰된 시험수용액의 레이놀즈수 $Re \leq 3000$, 농도 $C_{sol} = 10, 15 \text{ mass\%}$ 로 하였다^[13].

실험에 의해 단위시간당 시험부에서 생성되는 빙결정의 질량 m_{ice} kg/s는 식(4)로부터 구하였다.

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

여기서, u_{sol} 은 시험수용액의 관내유속이고, d_i 는 시험부의 내관 내경이며, ΔIPF 는 시험부에서의 IPF 증가량, ρ_{ice} 는 빙결정의 밀도이다.

Fig. 6과 Fig. 7은 시험수용액의 농도가 10 mass%일 때 관내 제어압력의 차이에 따른 시험부 벽면과냉각도와 시험부에서의 단위시간당 얼음생성량의 관계를 시험수용액의 레이놀즈수를 변수로 하여 나타낸 것이다. 그림에서처럼 동일한 벽면과냉각도에서 레이놀즈수가 증가함에 따라 관내제빙량은 증가한다. 이것은 레이놀즈수가 증가함에 따라 시험수용액온도가 평형동결온도로 되는 영역이 확대되고 있어 시험부 단면에서 관내제빙하는 영역이 확대되고 있는 것도 하나의 원인이라고 판단

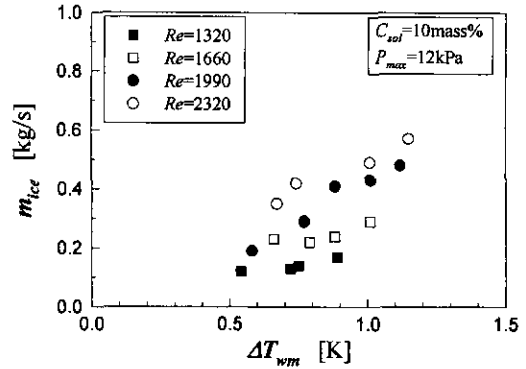


Fig. 6. Relation of tube wall supercooling and ice making quantity ($C_{sol} = 10 \text{ mass\%}$, $P_{max} = 12 \text{ kPa}$).

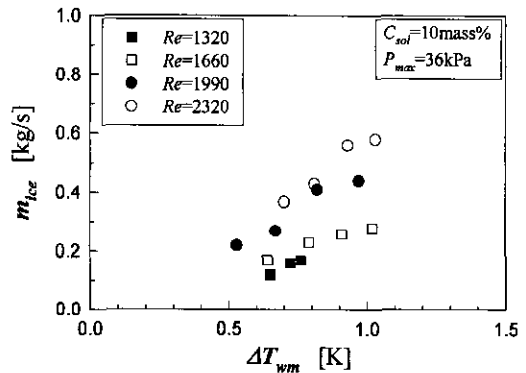


Fig. 7. Relation of tube wall supercooling and ice making quantity ($C_{sol} = 10 \text{ mass\%}$, $P_{max} = 36 \text{ kPa}$).

된다. 그러나 레이놀즈수가 본 실험범위를 넘어서면 연속제빙이 형성되지 않는다는 것을 확인할 수 있었다.

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

또 관내제어압력이 12, 36 kPa로 다름에도 불구하고 관내제빙량에 대한 관내압력제어의 영향은 거의 나타나지 않는다. 이것은 관내연속제빙상태에서는 관내압력을 변경하여도 시험수용액의 관내유속은 거의 변하지 않은 상태에서 관내를 유동하기 때문으로 생각된다.

Fig. 8은 시험수용액의 농도가 15mass%이고, 관내제어압력이 12 kPa인 경우의 결과이다. 여기서도 농도가 10 mass%인 경우처럼 시험수용액의 레이놀즈수가 증대하고, 시험부의 벽면과냉각도가 증대함에 따라 제빙량이 증가하고 있다.

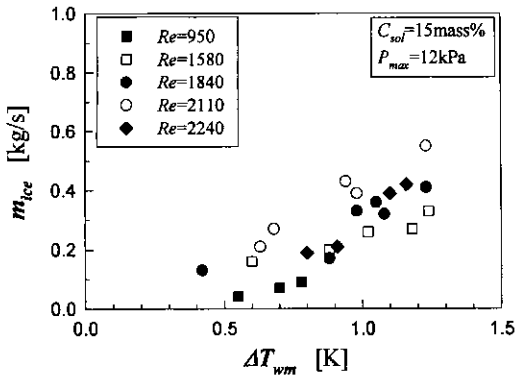


Fig. 8. Relation of tube wall supercooling and ice making quantity ($C_{sol}=15 \text{ mass\%}$, $P_{max}=12 \text{ kPa}$).

그러나 시험수용액의 레이놀즈수가 2240인 경우에는 제빙량이 약간 감소하고 있고, Fig. 6과 Fig. 8을 비교하면, 수용액농도가 높은 경우의 시험부내 제빙량이 농도가 낮은 경우보다 감소하는 경향이 관찰된다. 이것은 수용액농도가 높으면 빙결정이 벽면 근방에서 생성되거나 성장하기 어렵거나 레이놀즈수가 증가함에 따라 관내에서 유동하는 빙결정이 관 중심부로 모이기 쉬운 것이 원인이라고 생각된다. 일반적으로 수용액이 동결할 때에는 물분자 사이에 수소결합이 작용하기 때문에 수용액 속의 물분자만이 동결층(얼음)을 만들어 동결계면에서는 수용액의 용질이 배제된다. 이 때문에 동결층 계면 근방에 수용액의 농도분포가 생기고^[14], 그 결과 수용액농도가 높은 빙결정 근방영역에서 국소적으로 수용액의 열전도율이 낮아져 빙결정으로 냉각브라인에서의 냉열이 전달되기 어려워 빙결정이 가지는 비핵물질로서의 기능이 떨어진다고 생각된다.

이상에서 수용액농도가 낮을 때 얼음생성량이 증대하는 것으로 생각할 수 있지만, 관내제빙이 가능한 벽면과냉각도 범위가 좁기 때문에, 시험부 내관 벽면온도의 제어에 특히 주의할 필요가 있다.

3.4. 관내제빙율의 무차원 정리

본 실험에서 사용한 관내제빙율 η 는 빙수슬러리의 혼합질량유량 m_{max} 와 시험부에서 증가하는 시험수용액의 IPF에서 산출한 단위시간당 얼음생성량 m_{ice} 의 비로 정의하며 식(5)와 같이 나타낸다. 또 시험부 내관 벽면온도의 무차원수로서 냉각온도비 θ 를 식(6)처럼 정의하였다.

$$\eta = \frac{m_{ice}}{m_{max}} \times 100 \tag{5}$$

$$\theta = \frac{T_{fs} - T_{wm}}{T_{sol,in} - T_{fs}} \tag{6}$$

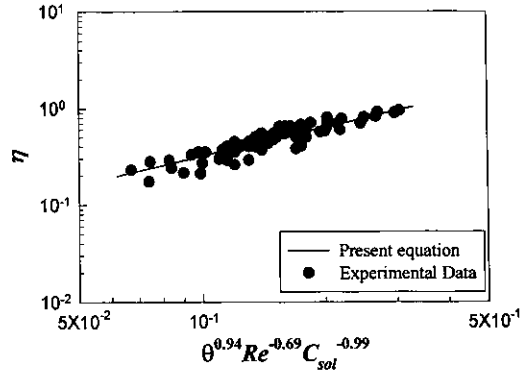


Fig. 9. Dimensionless result of ice making efficiency.

여기서, T_{fs} 는 시험수용액의 초기농도시 응고온도, T_{wm} 은 시험부 내관 외벽 평균온도, $T_{sol,in}$ 은 시험부 입구에서의 수용액온도이다.

프로필렌글리콜 수용액을 사용한 관내제빙의 제빙율은 수용액의 농도, 레이놀즈수 및 냉각온도비의 영향을 받기 때문에, 본 실험에서 얻어진 측정값을 기초로 하여 최소자승법으로 유도한 무차원 정리식을 식(7)과 같이 얻을 수 있었다.

$$\eta = 3.36 \cdot \theta^{0.94} \cdot Re^{-0.69} \cdot C_{sol}^{-0.99} \tag{7}$$

Fig. 9는 냉각온도비 θ 와 무차원변수 $\eta / (Re^{-0.69} \cdot C_{sol}^{-0.99})$ 의 관계를 나타낸 것이다. 또 그림 속의 점들은 본 실험에서 얻어진 측정값이며, 실선은 식(6)에 의한 것이다. 식(6)은 평균편차 12% 이내에서 실험값과 일치하고, 이 식의 적용범위는 $\theta = 1.3 \sim 7.1$, $Re = 950 \sim 2320$, $C_{sol} = 0.1 \sim 0.15$ 이다.

4. 결 론

본 논문에서는 2중관식 열교환기와 프로필렌글리콜 수용액을 사용하여 냉각관내 연속제빙법에 관한 실험을 하면서 관내연속제빙조건에서의 제빙량에 대하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 2중관식 열교환기내에서의 제빙량은 수용액의 관내유속이 빠를수록, 벽면과냉각도가 클수록, 수용액의 농도가 낮을수록 증가하였다.
- (2) 관내제어압력을 12, 36 kPa로 바꾸어도 관내에서의 제빙량에는 거의 영향을 미치지 않았다.
- (3) 관내제빙율에 영향을 미치는 여러 인자의 효과를 검토하여 프로필렌글리콜 수용액에 의한 관내연속제빙법에서 관내제빙율에 관한 무차원 정리식을 일정 범위 내에서 식(7)과 같이 얻었다.

사용기호

C_{sol}	: 시험유체의 질량농도[mass%]
d_i	: 시험부 내관 내경[m]
d_{ice}	: 얼음입자의 크기[m]
d_{m32}	: 체면적 평균직경 [mm]
d_o	: 시험부 외관 내경[m]
IPF_{in}	: 시험부 입구에서의 IPF
IPF_{out}	: 시험부 출구에서의 IPF
m_{ice}	: 단위시간당 얼음생성량[kg/min]
N	: 얼음입자수
P_{max}	: 관폐쇄시의 최대관내압력[kPa]
Re	: Reynolds수($= (u_{sol} \cdot d_i) / \nu$)
S_{ice}	: 얼음입자크기의 표준편차[mm]
t	: 시간 [min]
T_{fs}	: 시험수용액의 초기농도시 응고점[K]
$T_{sol, in}$: 시험부 입구에서의 수용액온도[K]
T_{wm}	: 시험부 내관 외벽 평균온도[K]
u_{sol}	: 시험유체의 시험부내 유속[m/s]
ΔIPF	: IPF의 증가량 ($= IPF_{out} - IPF_{in}$)
ΔT_{wm}	: 시험부 내관 벽면과냉각도($= T_{fs} - T_{wm}$)[K]
η	: 관내제빙율[%]
θ	: 냉각온도비
λ_{ice}	: 얼음의 체적 전기저항율[$\Omega \cdot m$]
λ_{mix}	: 빙수슬러리의 체적 전기저항율[$\Omega \cdot m$]
λ_w	: 물의 체적 전기저항율[$\Omega \cdot m$]
ν	: 동점성계수[m ² /s]
ρ_{ice}	: 얼음의 밀도[kg/m ³]

참고문헌

1. 福迫尙一郎, 稻葉英男: “低溫環境下の伝熱現象とその
応用”, 養賢堂, 400 (1996).
2. 박승상, 백종현: “빙축열과 에너지절약 및 환경문제”,
기계저널, 40(4), 40-44 (2000).
3. 稻葉英男: “氷蓄熱システムの現状とその新展開”, 冷凍,
71(830), 10-22 (1996).
4. Arora, A.P.S. and Howell, J.R.: “An Investigation of
the Freezing of Supercooled Liquid in Forced Tur-
bulent Flow inside Circular Tubes”, Int. J. Heat
Mass Transfer, 16, 2077-2085 (1973).
5. 六串俊巳, 高橋燦吉: “管内流における過冷却度と氷の
成長について”, 化学工學論文集, 7(5), 449-453 (1981).
6. 稻葉英男, 武谷健吾: “流動過冷却水および水溶液の管
内凍結發生限界に及ぼす諸因子の影響”, 日本機械學會
論文集(B), 60(578), 3440-3447 (1994).
7. 稻葉英男, 宮原里支, 武谷健吾: “流動水溶液による管内
連続製氷に関する基礎研究”, 日本機械學會論文集(B),
61(589), 3296-3303 (1995).
8. 김병선, 이운표, 윤성영, 이진호: “수분무에 의한 아이
스 슬러리 생성에 관한 연구”, 공기조화·냉동공학 논
문집, 9(2), 134-143 (1997).
9. 신흥태, 김민형, 이운표, 최영돈: “물을 냉매로 하는 구
형 얼음입자 제조에 관한 실험적 연구”, 공기조화·
냉동공학 논문집, 10(4), 475-482 (1998).
10. 北原拓夫, 白樫正高: “雪氷の水力輸送に関する研究”, 雪
氷, 55(4), 307-315 (1993).
11. 前野紀一, 黒田登志雄: “基礎雪氷學講座 雪氷の構造と
物性”, 古今書院 (1986).
12. 分體工學研究會編: “粒度測定技術”, 日刊工業新聞社, 6
(1975).
13. 堀部明彦, 稻葉英男, 春木直人, 三浦秀俊, 朴基元: “管
内流動水溶液による連続製氷舉動”, 37回日本伝熱シン
ポジウム, 1, 117-118 (2000).
14. 大瀧仁志: “溶液の化學”, 大日本圖書 (1987).