

수평냉각관내에서 유동하는 유기수용액의 제빙형태

박 기 원

Ice Making Pattern of Flowing Organic Water Solution
in a Horizontal Cooled Tube

K. W. Park

Key words : Ice making pattern(제빙형태), Supercooling(과냉각), Continuous ice making(연속제빙), Ice blockage in tube(관폐쇄)

Abstract

Recently large capacity of electric equipment and increasing in atomic power generation are shown. One of the reason is shortage of the electric power supply for air conditioning load during summer. And every consumer is concerning about economical refrigeration and air conditioning system to decrease electric power consumption and decrease in global warming. For these necessities, ice making thermal storage system is required.

Therefore, in this paper, the possibility of continuous slurry ice making using flowing organic water solution in cooled circular tube has been investigated. The experiments was carried out under some parameters of concentration and velocity of water solution, temperature of cooled tube wall, and control pressure in tube. As a result, four types of operating conditions in the pipe, that was supercooling, continuous ice making, intermittent ice making and ice blockage, were classified. And it was found that the critical condition for continuous ice making was acquired as a function of these experimental parameters.

기호설명

C_{sol} : 시험수용액의 질량농도 [mass%]
 P_{max} : 시험관내 제어압력 [kPa]
 Re : Reynolds 수

t : 측정시간 [sec]
 T_{fs} : 수용액의 응고온도 [K]
 T_{wm} : 시험부 내관 내벽면 평균온도 [K]
 x : 시험부 입구에서의 거리 [mm]
 ΔT_{wm} : 벽면과냉각도 [K]

* 여수대학교 냉동공학과(원고접수일 : 2000년 5월)

1. 서 론

최근 화석연료에 의존하는 에너지 생산으로 지구의 온난화나 여름철 주야간의 전력수요격차 증대 등의 문제로 인하여 환경보존과 에너지절약에 대한 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.

빙축열 시스템에서 이용되고 있는 제빙방법으로는 크게 스태틱(static)형과 다이내믹(dynamic)형으로 나눌 수 있는데, 최근에는 미세한 슬러리모양의 얼음 생성으로 축열매체인 얼음입자를 쉽게 수송할 수 있는 것 외에 제빙법의 다양화, 융해시의 높은 부하추종성 등을 가지는 다이내믹형 제빙법이 주목되고 있다¹⁾.

슬러리모양의 제빙법에 관해서는 저농도의 수용액속에 직접 액냉매를 취출하여 그 기화열을 이용하는 방법²⁾이나 유동하는 물이나 수용액을 냉각관내에서 과냉각상태로 만든 뒤 미세한 얼음조각을 만드는 방법^{3,4)} 등이 보고되고 있다. 이 외에도 유동하는 수용액을 냉각관내에서 냉각함과 동시에 인공적으로 과냉각상태를 해소시켜 빙결정을 만드는 방법⁵⁾ 등도 보고되고 있다.

본 연구에서는 냉각된 원관내에서 유동하는 유기수용액에 의한 슬러리모양의 얼음을 제조하는 방법으로, 기존의 관내제빙법을 더욱 발전시키고자 시험부 입구에서 시험유체의 압력상승이 감지되면 펌프의 토출압력을 상승시켜 관폐쇄를 해결하는 방법을 사용한다. 여기서는 이러한 방법으로 관내제빙할 때 수용액의 농도, 시험부 벽면온도, 관내제어압력 등에 따른 관내에서의 제빙형태를 실험적으로 검토하여 관내제빙기구에 대해 살펴보고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 실험장치는 시험부인 2중관식 열교환기를 포함하여 시험수용

액 순환계통, 슬러리탱크, 냉각브라인 순환계통 및 시험수용액의 유량제어부로 구성된다. 슬러리탱크내의 빙결정은 교반기로 시험수용액과 교반 혼합되어 볼텍스펌프에 의해 배관내를 유동하여, 전자유량계, 압력계, 시험부 입구의 IPF 측정기를 통과한 뒤 시험부인 2중관식 열교환기내로 유입한다. 열교환기내에서는 냉각에 의해 과냉각상태로 된 시험수용액에 혼합된 빙결정이 빙핵물질로 작용하여 관내에서 빙결정이 성장하거나 새로운 빙결정이 생성되면 시험수용액의 유동으로 박리시켜 시험부 밖으로 배출한다. 그 후 시험수용액은 시험부 출구의 IPF 측정기를 거쳐 슬러리탱크로 유입하고 다시 시험부 배관내를 유동하는 연속제빙루프를 형성한다.

관내제빙용 시험부는 길이 980mm, 내관의 내경 10.5mm, 외관의 내경 23.0mm인 스테인레스 제 원관을 사용하였고, 가시화 시험부는 내관에는 내경 10.0mm인 유리관을, 외관에는 내경 40.0mm인 아크릴수지제 원관을 사용하였다.

시험부는 내관과 외관 사이에 에틸렌글리콜 수용액 브라인을 유동시켜 내관내의 시험수용액을 냉각하며, 각 배관계에는 주위로의 열손실을 막기 위해 충분히 단열하였다. 그리고 시험부의 내관 외벽면온도를 측정하기 위해 T형 열전대를 시험부 입구에서 200mm인 지점에서 1개소와 출구에서 상류방향으로 110mm 간격마다 3개소에 설치하였으며, 각 측정부에서는 상, 하, 좌, 우의 4면에 설치

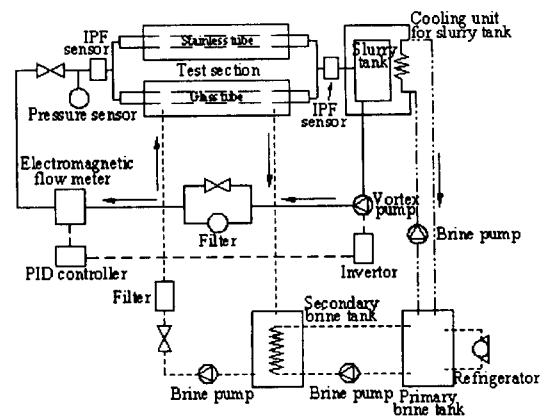


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

하였다.

관내제빙을 하는데에는 냉각관내에서의 관폐쇄가 큰 문제였기 때문에, 본 실험에서는 시험수용액의 시험부내 유량을 자동제어하였다. 즉, 관폐쇄시에 시험수용액의 유속이 저하하는 것을 전자유량계로 검지하여 PID 콘트롤러에서 볼텍스펌프의 인버터를 제어시킴으로써 시험부 입구압력을 강제적으로 상승시켜 소정의 유량으로 복귀시켰다.

시험유체로는 질량농도를 5~15mass%로 조절한 프로필렌글리콜(HOCH₂CH₂CH₂OH, 분자량 : 76.1) 수용액을 사용하였는데, 실험에서는 이를 소정의 유속으로 관내 유동시키면서 응고점온도 근처(응고점온도+0.2~0.4°C)까지 냉각한다. 시험수용액의 온도가 이 설정온도로 된 것을 확인한 뒤 시험부 냉각브라인온도와 유량을 재설정하고, 시험부 내관 내벽 근처에서 시험수용액의 과냉각상태를 해소시키는 물질로서 미립화된 빙결정을 슬러리탱크내의 시험수용액에 투입하고 측정을 시작하였다. 또 시험부에서의 내관 외벽면온도, 시험부 입출구에서의 냉각브라인 온도, 시험수용액의 유속, 시험부 입구압력, 시험부의 입출구에서의 IPF를 측정하였다. 측정개시후 시험부 내관 외벽온도를 서서히 강하시키면서 시험부내에서 시험수용액의 IPF가 증가되는 것을 확인하면 외벽온도의 강하를 정지시키고, 외벽온도가 일정하게 되도록 브라인온도를 조정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 제빙형태의 구분

본 실험에서는 시험유체의 시험부내 냉각조건 및 관내유속에 따라 다음과 같은 4종류의 관내제빙영역이 관찰되었다.

하나는 과냉각(supercooling)영역으로, 수용액 속에 빙핵물질로서 빙결정이 혼입되어 있음에도 시험부내에서 수용액이 과냉각상태를 유지한채 시험부에서 배출되는 경우이다. 또 하나는 연속제빙(continuous ice making)영역으로, 시험부내에서 수용액이 냉각되어 시험부 내관 내벽면 근처에서 과냉각상태로 되고 시험수용액 속에 존재하는

빙결정의 빙핵작용으로 인해 시험부내에서 빙결정이 연속적으로 성장하거나 시험부 내관 냉각면상에서 새로운 빙결정이 생성하지만 시험유체의 흐름에 의한 외력에 의해 냉각면상에서 박리되어 시험부 밖으로 배출되는 경우인데, 본 실험에서는 이런 상태가 60분간 유지되는 경우로 정의하였다. 다른 하나는 간헐제빙(intermittent ice making)영역으로, 시험부 내관 냉각면상에 박리하기 어려운 얼음이 성장하여 관폐쇄상태로 되지만 관내압력을 상승시킬 수 있도록 유량을 제어함으로써 얼음(빙결정)을 시험부 밖으로 강제적으로 배출시켜 시험유체가 다시 유동하기 시작하는 경우이다. 마지막 하나는 관폐쇄(ice blockage)영역으로, 빙결정이 냉각면상에서 박리하지 않고 고착된 상태로 성장함에 따라 유로를 좁히고 최종적으로는 수용액의 유동이 정지하는 경우이다.

3.2 제빙형태의 관찰

본 실험에 들어가기 전에 제빙용 시험부를 사용하여 관내제빙실험을 하였을 때 생성된 빙결정의 형상을 관찰하기 위해, 시험부 출구에서 시험수용액이 낙하하는 위치에 스테인레스강제 그물망을 설치하여 그 위에 축적된 빙결정을 살펴보았다. 이때 생성된 빙결정은 슬러리모양인 것으로 관찰되어 본 제빙방식에서 생성된 빙결정은 유동성이 풍부하여 배관에 의한 축열매체의 수송에도 가능성을 가지고 있다고 판단되었다.

Fig. 2와 3은 가시화용 시험부에서 내관내의 제

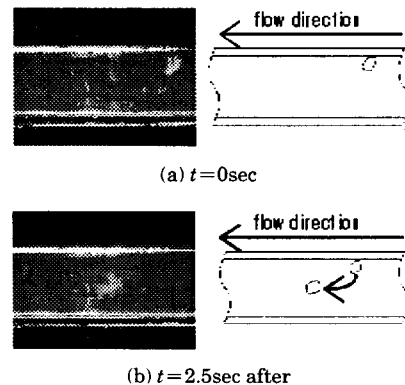


Fig. 2 Ice making pattern in tube at continuous ice making.

빙겨동을 관찰한 것과 그 모식도인데, 이들은 시험부의 내관 입구에서의 거리 180mm인 지점에서의 상태이다.

Fig. 2는 연속제빙상태로서, 최초 관찰상태 (a)와 그로부터 2.5초후의 관찰상태 (b)를 나타낸다. (a)에 나타난 것처럼 시험부 내관 내벽면상에 발생한 빙결정은 (b)와 같이 성장함과 동시에 수용액의 관내유동에 의한 힘을 받아 관내벽면 위를 미끄러지듯이 이동하고 있다.

Fig. 3은 관폐쇄상태에 이르는 과정으로, 최초 상태 (a)와 263초후의 상태 (b)를 나타낸다. (a)와 같이 시험부 내관 내벽면 근방에서 많은 빙결정이 짧은 시간에 석출한 후, 덴드라이트(dendrite)모양으로 성장하고, 시험부 내관 벽면에서 박리되지 않는 모습이 관찰되었다. 또 (b)와 같이 덴드라이트모양의 얼음은 시간이 지날수록 시험수용액의 흐름방향으로 성장하고 있다. 이것은 빙결정이 벽면 부착을 일으킨 장소보다 시험부 하류의 벽면 근방에서 수용액의 과냉각영역이 존재하기 때문에 얼음이 성장하였기 때문으로 생각된다. 그 후 시험부 냉각면에 부착한 빙결정은 시험부 출구 부근까지 성장을 계속하여 최종적으로 시험부는 관폐쇄상태가 된다. 그러나 이보다 벽면과냉각도가 크고, 관내유속이 빠른 조건에서는 보다 짧은 시간에 관폐쇄에 이르렀다. 이것은 시험부 냉각브라인과 시험수용액의 온도차가 증대함에 따라 이동하는 냉열량이 증가하게 되어 시험부 내벽면상에 석출한 빙결정이 급격하게 성장한 것이 원인이라고 생각된다.

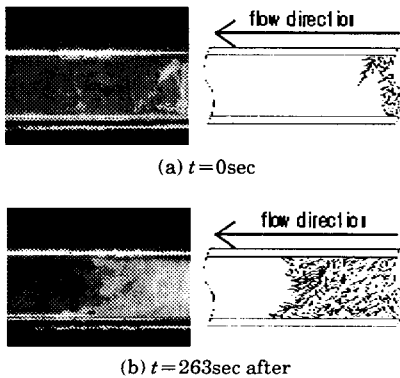


Fig. 3 Ice making pattern in tube at ice blockage.

3.3 관내제빙시의 영역분포

본 실험에서는 시험부 내관 벽면온도 기준의 과냉각도(벽면과냉각도)를 $\Delta T_{wm} = T_{fs} - T_{wm}$ 과 같이 정의하고, 이를 관내제빙에 관한 평가기준의 하나로 사용하였다.

Fig. 4, 5, 6은 각각 시험수용액의 농도가 5, 10, 15mass%이고, 시험부 내관의 폐쇄시에 시험부 입구에 걸리는 최대관내압력이 12kPa일 때 관내제빙시의 영역분포에 대해 시험수용액의 레이놀즈수와 벽면과냉각도를 비교하여 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 7은 시험수용액의 농도가 15mass%이고, 시험부의 최대관내압력이 36kPa일 때의 관내제빙시 영역분포를 나타낸 것이다.

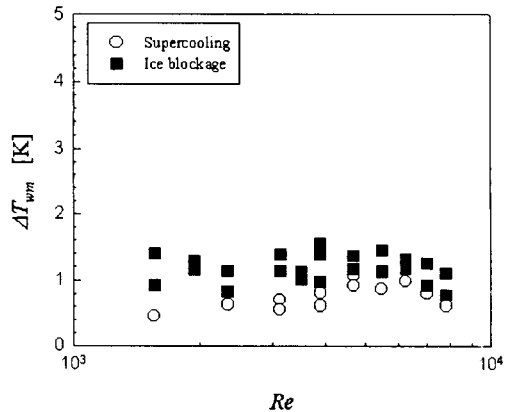


Fig. 4 Ice making pattern in tube ($C_{sol} = 5\text{mass}\%$, $P_{max} = 12\text{kPa}$).

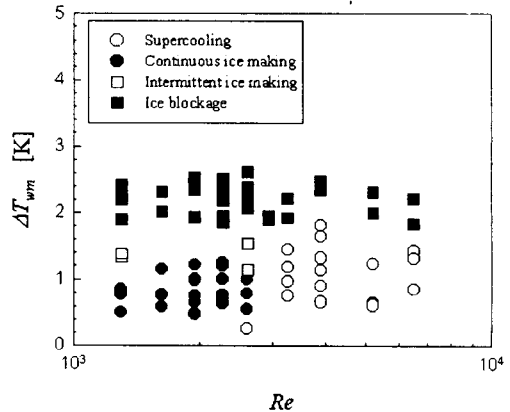


Fig. 5 Ice making pattern in tube ($C_{sol} = 10\text{mass}\%$, $P_{max} = 12\text{kPa}$).

Fig. 4~6을 비교하면, 관내최대압력이 동일한 12kPa인 상태에서는 수용액농도가 낮음에 따라 연속제빙영역은 축소되고 있다는 것을 알 수 있고, 특히 수용액농도가 5mass%인 경우(Fig. 4)에는 연속제빙영역이 전혀 나타나지 않았다. 이것은 수용액농도가 낮음에 따라 관내에서 생성되는 슬러리모양 빙결정의 성상이 물만인 경우에 생성되는 얼음의 성상에 가까워지고, 그 결과 시험부 내관 냉각면과 빙결정의 부착력이 증대하여 시험부내의 폐쇄부분에 최대관내압력을 주어도 시험부 내관 내벽면에서 빙결정을 박리시키기 어렵게 되기 때문이라고 생각된다.

Fig. 5, 6에 나타난 것처럼 수용액의 농도가 증

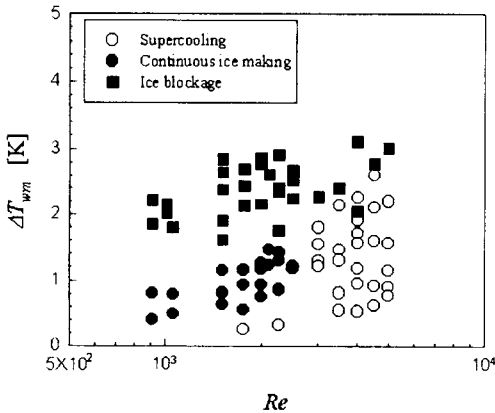


Fig. 6 Ice making pattern in tube ($C_{sol}=15\text{mass}\%$, $P_{max}=12\text{kPa}$).

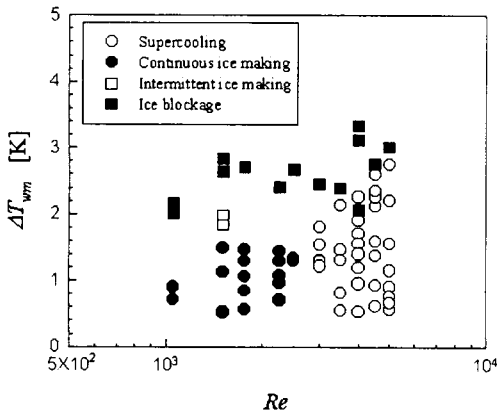


Fig. 7 Ice making pattern in tube ($C_{sol}=15\text{mass}\%$, $P_{max}=36\text{kPa}$).

가함에 따라 연속제빙영역이 확대되는 경향을 보이고는 있지만, 대개 $Re \leq 3,000$ 인 범위에 존재한다는 것을 알 수 있다. 이처럼 시험수용액이 $Re \geq 3,000$ 의 범위에서 관내연속제빙이 이루어지지 않는 이유로는, 관내유속이 빠른 경우에는 빙결정이 관의 축방향 중심부에 모여 유동하게 되고, 시험부 내관 내벽면 근방에서 형성된 시험수용액의 과냉각영역을 빙결정이 통과하기 힘들다는 점과 시험수용액의 유동이 난류상태로 되어 고유속에 따르는 빙결정의 시험부 체류시간이 감소하기 때문이라는 점 등을 들 수 있다.

Fig. 6과 7을 비교하면, 시험부 입구에 걸리는 최대압력이 12kPa인 경우(Fig. 6)에는 최대압력이 큰 36kPa인 경우(Fig. 7)보다 벽면과냉각도가 다소 낮은 상태에서 연속제빙이 이루어진다는 것을 관찰하였지만, 그 차이는 매우 미미하였다. Fig. 7에서는 간헐제빙이 이루어지는 영역도 존재하였다. 이것은 관폐쇄 초기에는 시험부 내관내를 막는 빙결정이 슬러리모양이고, 보다 높은 압력을 빙결정에 가함으로써 벽면에서 박리하기 쉽기 때문이라고 판단된다.

관폐쇄영역을 나타내는 하한의 벽면과냉각도는 레이놀즈수가 증가함에 따라 층류역에서는 증대하고, 난류역에서는 하강하는 경향을 보였다. 이것은 난류역에서 관내를 유동하는 시험수용액이 난류상태로 되면 유동에 의한 혼합촉진효과에 의해 내관 전열면에서의 수송냉열량이 증대하는데, 이때문에 시험부 내관 전열면상에서 빙결정이 급격하게 성장하여 보다 짧은 시간에 벽면에서 박리하기 어려운 얼음이 형성되기 때문이라고 생각된다.

4. 결 론

냉각원관을 사용하여 프로필렌글리콜 수용액에 의한 관내연속제빙에 대한 실험을 통하여 제빙형태를 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 관내를 유동하는 빙수슬러리는 관내유속에 따라 저유속일 때에는 부력의 영향을 받아 관상부에 편재하고, 고유속일 때에는 관전면에 걸쳐 분포되는 것을 알았다.
- (2) 수용액의 냉각조건, 관내압력의 제어 등에

따라 관내제빙시에는 과냉각영역, 연속제빙영역, 간헐제빙영역, 관폐쇄영역의 4영역이 존재함을 알았다.

- (3) 관내연속제빙영역은 시험수용액의 관내유속, 수용액의 농도, 시험부의 벽면과냉각도 등에 의존함을 알았다.

후 기

본 연구는 1999~2000년에 한국과학재단 지원(해외 Post-doc.)으로 일본의 岡山大學 稻葉英男 교수의 伝熱工學研究室에서 수행한 결과의 일부이다. 이에 관계자들에게 감사한다.

참고문헌

1. 稻葉英男, 1996, “氷蓄熱システムの現状とその新展開”, 冷凍, Vol.71, No.830, pp.10~22.
2. 宇高義郎·齊藤彬夫, 1989, “冷媒の自然循環·蒸氣相變化直接接觸熱伝達を利用する密閉容器内氷蓄熱の研究”, 冷凍, Vol.64, No.745, pp.20~24.
3. 稻葉英男·武谷健吾·野津滋, 1992, “流動過冷却水による連続製氷に関する研究”, 日本機械學會論文集B, Vol.58, No.548, pp.349~356.
4. 稻葉英男·武谷健吾, 1994, “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, Vol.60, No.578, pp.3440~3447.
5. 稻葉英男·宮原里支·武谷健吾, 1995, “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, Vol.61, No.589, pp.3296~3303.

저 자 소 개



박기원(朴基元)

1960년 1월 8일생. 1983년 부산수대 냉동공학과 졸업(공학사). 1985년 동 대학원 졸업(공학석사). 1993년 동 대학원 졸업(공학박사). 1999년 한국과학재단 Post-doc. (일본 岡山大). 1988년~1992년 동명전문대 가스냉동과, 현재 여수대학교 냉동공학과 부교수.