

빙축열에서의 전열 및 유동현상에 대하여⁽¹⁾

An introduction of heat transfer and fluid dynamics phenomena related to ice thermal energy storage

박 기 원
K. W. Park
여수대학교 냉동공학과



- 1960년생
- 냉동·공조공학을 전공하였으며, 축열 기술, 대체 및 혼합냉매에서의 전열 및 사이클 개선 기술 등에 관심을 가지고 있다.

1. 빙축열 기술에 대한 사회적인 요청과 그 배경

최근에 일반 매스미디어 등을 통하여 빙축열이 활발하게 보급되고 있는 상황을 볼 수 있는 것과 같이 여러 방면에서 빙축열 기술이 사용되리라라는 기대는 점점 커지고 있다. 이러한 빙축열이 사회적으로 어느 정도 인식되고 있는가 하는 것은 사전류 등에 게재되어 있는가를 살펴보면 알 수 있는데, 아직 일반 국어사전에는 게재되어 있지 않다. 그러나 전문용어사전에는 다음과 같은 설명으로 빙축열에 관하여 기술하고 있다. 즉, “냉열을 얼음의 형태로 저장하고, 그 용해열을 건물 등의 냉방용 열원으로 이용하는 것인데, 일종의 잠열 축열이다. 일반적으로는 야간이나 휴일의 잉여 전력으로 냉동기를 구동하여 제빙, 저장하였다가 주간에 그것을 방냉열하여 건물, 기기 등을 냉방하거나 냉각하는데 사용한다. 이는 냉방 및 냉각 에너지가 증대하고 있는 것에 대한 대책으로 효과적인 뿐만 아니라 전력 사용

량을 평준화시키는 방법으로도 효과적이다.”

더구나 지난 1997년 4월에 개최된 종합에너지에 대한 대책을 추진하기 위한 각료회의에서 「2000년을 대비한 종합적인 에너지절약 및 전원(電源)입지, 부하평준화대책」과 관련하여 여러 가지 규제 완화책이 제안되었는데, 그 중 부하평준화대책으로는 축열식 공조시스템의 보급을 확대한다는 것이 주장되었고, 축열 공조로는 냉수만이 기재되어 있던 현행 기준에 빙축열을 첨가하는 등 국가적인 차원에서도 적극적으로 빙축열을 권장하고 있다.

따라서 빙축열 시스템에 대한 사회적인 기대를 열거하면 다음과 같다. ① 전력부하를 평준화시키는 데 기여할 것이다. ② 생활공간의 환경을 쾌적하게 할 수 있을 것이다. ③ 경제적으로 저온을 얻을 수 있을 것이다. ④ 저온을 만들기 위하여 배출되는 지구온난화 가스를 삭감시킬 것이다.

2. 빙축열 시스템의 특징

빙축열 시스템의 특징은 지금까지 수축열 시스템 등과 비교하여 많이 보고되어 있기 때문에,

주 1) 稻葉英男, 1998, “水蓄熱の伝熱・流動現象についての總論”, 冷凍, Vol. 73, No. 844, pp. 98~106.

여기서는 그 장점과 단점에 대하여 개략적으로 서술한다.

2.1 빙축열 시스템의 장점

- 1) 얼음의 용해열을 이용하여 고 밀도의 냉열 에너지를 축열함에 따른 과급효과
 - ① 축열조의 소형화에 따라 축열 설비비나 기기를 절약
 - ② 축열조의 소형화에 따라 축열조에서의 열 손실을 삭감
 - ③ 축열 설비의 설치공간을 줄이거나 이용 토지면적을 줄이는 효과
- 2) 0℃ 부근의 저온인 열을 이용함에 따른 과급효과
 - ① 큰 온도차를 이용하기 때문에 배관설비를 줄이거나 2차축 열 매체를 수송하는 펌프나 팬의 동력비를 절감할 수 있다.
 - ② 저온을 이용하기 때문에 공조용 공기를 저 습도화할 수 있다.
- 3) 슬러리 모양의 얼음을 관을 통하여 수송함에 따른 고 밀도 수송 효과
 - ① 배관경의 축소
 - ② 수송 냉열 에너지당 반송(搬送) 동력을 절감
 - ③ 배관경 축소에 따라 배관의 열손실을 절감
 - ④ 냉열 에너지를 고속으로 반송 가능
- 4) 슬러리 모양의 얼음을 이용함에 따른 채냉 열법(採冷熱法)의 기동성
 - ① 2차축 코일로 슬러리 모양의 얼음을 유입 시킴으로써 큰 온도차나 저 습도의 공조용 공기가 발생되고, 그에 따라 기기의 소형화나 동력비를 절감
 - ② 따뜻한 공기의 고속 냉각

2.2 빙축열 시스템의 단점

- 1) 냉동기 등의 설비비가 높다.
- 2) 운전시 냉동기의 성적계수가 냉수 축열 시스템인 경우보다 낮아 운전비가 높아진다.
- 3) 냉열 이용 운전을 포함하여 전체적으로 시스템이 복잡해지고, 설비설계가 번잡해진다.

3. 빙축열 시스템의 보급방법

일본에서 처음으로 수축열 시스템이 등장한 것은 냉동설비의 용량을 줄이고 계약전력을 낮추기 위하여 1950년대에 건축물의 기초에 있는 2중 슬라브를 이용한 것이 시작이었다. 그 후에도 수축열조의 크기나 2중 슬라브의 파열 등과 같은 문제가 있음에도 불구하고 수축열 시스템의 보급이 착실하게 확대되었다. 더구나 1960년대 후반에 오일쇼크가 있는 후로 에너지를 절약하려는 흐름이 있으면서 태양에너지를 비롯한 자연에너지의 활용과 더불어 공조 시스템에 축열기술을 도입하려는 시도가 더욱 적극적으로 이루어졌다.

1980년대에 들어서는 공업화 사회에서 정보화 사회로 이동하면서 24시간 공기조화하는 인텔리전트 빌딩이 등장하고, 주간의 냉방부하가 증대하면서 전력의 연간부하율도 급격하게 떨어지기 시작하여 에너지 절약과 쾌적 공조에 대한 필요성이 대두되기 시작하였다. 이러한 문제를 해결하는 방법으로 각종 열펌프와 축냉열 기기를 조합한 복합 기술이 나타나게 되었다. 또 정보통신 기기나 OA 기기의 용량이 커지면서 주야간 전력수요의 격차가 커져 수축열 기술을 대신할 기술로 빙축열 기술에 대한 관심이 높아지기 시작하였다. 그러나 빙축열 시스템은 고가인 냉동 기기 등을 사용하기 때문에, 이를 보급하기 위하여 공공기관이나 전력회사 등에서 다양한 지원책을 내놓고 있다.

3.1 국가적인 차원에서의 지원제도

- 1) 세제면에서의 우대제도 (에너지 수요 구조를 개혁하기 위한 투자 촉진 세제)
- 2) 이자보급제도 (빙축열식 공조 시스템의 보급을 촉진하기 위한 융자제도)
- 3) 저리융자제도 (정부계 금융기관을 통한 저리융자제도)

3.2 전기요금제도와 전력회사의 보급제도

- 1) 전기요금제도 : ① 축열 조정계약(야간전력 이용으로 일반요금보다 약 1/3 할인한 요

금), ② 저압 축열 조정계약(200V, 50kW 미만일 때의 야간 할인요금), ③ 피크시간 조정계약(여름철 전력피크시간대에서의 부하조정<냉동기기의 정지 등>, 여름철 전기 시간 또는 최대부하시기일 때 주간 단위로 부하조정)

- 2) 전력회사의 지원제도 : ① 빙축열 기기의 리스제도(기기 구입 자금이 불필요하고 리스요금은 경비로 처리), ② 빙축열 공조시스템 보급촉진제도(빙축열기기 제작사에 대하여 개발 기기의 전력부하 이행량에 따라 금전적으로 지원)

4. 빙축열 기술의 이용

북미에서 소비하는 냉열의 약 70%는 공조용이고, 약 30%는 냉동 및 공업용인데 반해, 구미

에서는 공조용이 약 30%이고, 냉동 및 공업용이 약 70%이다. 그러나 일본에서의 냉열 수요는 공조용, 냉동용 및 공업용이 각각 1/3 정도씩인데, 앞으로는 공조용으로의 수요가 증가할 것이다. 표 1은 냉열 에너지의 이용분야 및 이용기술, 현상을 분류한 것인데, 얼음을 포함하여 냉열에너지가 꽤 광범위하게 이용됨을 보여준다. 일본에서 빙축열을 이용하는 분야 중 화제가 되는 것으로는, 여름철에 가스터빈을 흡기 냉각시켜 발전효율을 향상시키거나 생선 식료품을 얼음온도 수준으로 유지하여 잡균번식을 억제하는데 빙축열을 이용하는 것, 또 건조한 얼음 입자를 만들어 인공스키장에 이용하는 것, 해수나 하수를 처리하여 동결 담수화 하였다가 재해시에 수원으로 이용하는 것 등이 있는데, 이와 같이 공조용으로 빙축열을 이용하는 외에도 다양한 분야에서 활용될 것으로 기대되고 있다.

표 1 냉열 에너지를 이용하는 분야 및 이용기술과 현상

이용 기술 분야	이용 기술 및 현상 예
공조 · 주거환경 관련	냉방, 제빙, 제습, 제열, 쓰레기의 동결 방취
건축 · 토목 관련	보냉, 구조체 냉축열, 지방 동결공법, 결로방지, 동결관 폐쇄공법, 오물의 동결탈수, 해수의 동결 담수화, 동상, 얼음 입자를 이용한 콘크리트 강화
농림수산업 · 식품 관련	저온 · 동결 보존, 냉풍 건조, 동결 건조, 동결 농축, 동결 착즙, 동결 결착, 동결 분쇄, 저온 숙성, 수목의 동파, 얼음용기, 한천, 얼음병, 냉맥주, 저온 발효, 인공 식물공장
의료 · 생체 관련	동결 단백 변성, 저온 살균, 약품 얼음, 빙침(얼음 베개), 저체온 마취, 동결 수술(냉동 메스, 냉동 탐침), 동결 염증, 동결 접착, 동결 고형화 현상, 동결 보존, 저온 배양
기계가공 · 측정기기 관련	냉동 척, 동결 분쇄, 얼음입자식 세정, 드라이아이스샌을 이용한 잡삭재 절삭, 아이스 브ラスト, 물의 동결팽창을 이용한 정밀 온도제어장치, 콜드 트랩, 저온 에칭, 저온신뢰성 시험장치, 배관 굽힘가공에 얼음을 이용
화학공업 관련	승화에 의한 성분분리, 동결농축반응 촉진
레이저산업 · 교통 관련	인공 스케이트링크, 스키장, 스케이트 전차, 내한 체험설비, 용설제, 관악기 및 자동차용 머플러의 굽힘가공
기타	아이스 콘덴서, 저온 표백, 얼음 베어링, 가스 터빈 및 공기 압축기의 흡기냉각, 냉동기기 기동 준비용 냉열원 등

5. 빙축열과 관련하여 얼음과 0℃ 부근인 물의 성질

여기서는 빙축열 기술에서 필요하다고 생각되는 얼음이나 물의 성질에 대하여 그 개요를 서술한다.

5.1 얼음의 종류

현재까지 11종류에 이르는 얼음이 밝혀져 있다. 그 중 빙축열에 관계되는 얼음은 육각결정구조를 가진 얼음(I_h)인데, 여기에는 하나의 결정으로 되어있는 단결정 얼음과 이러한 단결정 얼음이 뭉쳐진 다결정 얼음이 있다. 이 때 다결정 얼음을 구성하는 여러 단결정 사이의 경계를 결정입계라 한다. 이 다결정 얼음에 불순물이 포함되면 그 분자의 크기에 따라 얼음의 결정격자에 들어가는 경우와 결정 입계에 큰 덩어리로 응집하는 경우가 있는데, 일반적으로는 후자와 같이 결정 입계에 불순물이 들어간다. 또 얼음의 결정격자에 저분자 가스 등이 침입하면 가스분자 주위에 바구니모양으로 물분자가 배열되는 포접형 화합물(클래스레이트, clathrate)을 만든다. 이 화합물은 분해온도가 얼음의 융점보다 높은 경우가 있으며, 분해열도 얼음의 융해열에 상당하므로 유망한 저온의 축냉매체가 될 수 있다.

5.2 얼음의 물성(대기압, 0℃)

- ① 얼음의 열전도율은 2.2W/(m.K)로, 물의 약 4배이므로 정지상태의 물에 비해 많은 열을 전달한다.
- ② 얼음의 밀도는 917kg/m³으로, 물이 약 1,000kg/m³인데 비해 작아 그 밀도차에 따른 부력 때문에 물 속에서 얼음 입자가 균일하게 분산되기 힘들다.
- ③ 얼음의 정압비열은 2.1kJ/(kg.K)로, 물의 약 반 정도이기 때문에 냉각이나 가열하기는 쉽지만, 단위 질량당 현열 축열량은 물의 반 정도에 지나지 않는다.
- ④ 얼음의 열확산율은 1.2mm²/s로, 물보다 약 9배 정도 온도를 빨리 전달한다.

- ⑤ 얼음의 체적팽창계수는 1.58×10⁻⁴(1/K)로, 물의 -0.6×10⁻⁴(1/K)보다 크다.
- ⑥ 얼음의 반발계수는 0.8로 비교적 크며 탄성적 성질이 있다. 그러나 항복응력 이상에서는 소성 변형하는 소성적 성질도 있다.
- ⑦ 단결정 얼음의 강에 대한 동마찰계수는 0.004 정도로 작아 얼음은 매우 미끄러지기 쉬운 물질이라 할 수 있다.
- ⑧ 얼음이 물로 상변화할 때의 융해잠열은 0℃에서 334kJ/kg으로 크고, 이 융해잠열은 온도에 따라 감소한다.

5.3 얼음에 관한 여러 가지 현상

- ① 얼음입자끼리의 소결현상: 0℃~-30℃ 정도로 얼음의 융점에 가까운 온도환경에서는 얼음입자끼리 그 접촉부에서의 물질확산이나 증발·응결 등에 의해 변형하거나 합체하면서 성장한다. 따라서 구운 물질에서 볼 수 있는 소결현상이 일어나 얼음덩어리가 만들어진다.
- ② 얼음결정입자의 성숙효과: 수 μm 정도로 작은 얼음입자는 표면에너지가 작용하여 그 잠열량이 감소하거나 융해속도가 빨라지는 등의 효과가 일어나고, 이 효과로 인해 융점이 낮아진다. 따라서 작은 얼음입자가 융해하면 주위의 물 온도도 낮아지고, 큰 얼음입자는 더 크게 성장한다.
- ③ 얼음의 압력융해: 100기압 정도의 압력에서 얼음의 융점은 약 0.75℃ 낮아지는데, 공기포를 가지고 있는 일반적인 얼음에서는 약 1℃ 낮아진다. 따라서 가압 및 감압조작으로 얼음입자의 조대화(粗大化)가 가능해진다.
- ④ 수용액 첨가에 따른 빙점 강하: 용질을 1몰 첨가하면 빙점은 1.86℃ 낮아진다. 따라서 수용액의 농도를 조정하면 얼음의 생성온도를 조절할 수 있다.
- ⑤ 얼음 표면의 의사 액체막 형성: -6℃~0℃의 융점에 가까운 얼음의 표면은 수십 옹스트롬(10⁻¹⁰m) 두께의 의사 액체막으로

피복된다. 이 의사 액체막 때문에 얼음끼리 부착하는 등 얼음의 성장과 관련된 여러 가지 현상이 나타난다.

- ⑥ 수용액 등과 같은 저융고점 물질에 의한 얼음끼리의 소결 결합 방식: 얼음의 성장은 배타적인데, 수용액을 사용하면 빙결점이 성장할 때 계면에 용질을 배출하여 얼음 표면이 수용액막으로 피복되기 때문에 얼음입자끼리 부착하여 결합되는 것을 방지할 수 있다.

5.4 얼음 발생 및 성장에 관련된 물의 특성

- ① 과냉각 현상: 물(또는 수용액)에서 얼음이 만들어지고 그 얼음이 성장하는 것은 물(또는 수용액)이 과냉각 상태로 되기 때문이다. 불순물을 포함하지 않는 수심 μm 인 초순수의 미세한 물방울인 경우의 열적인 과냉각도(얼음의 융점(0°C) - 실제의 동결온도)는 약 -42°C 로 추정하고 있다. 이와 같이 순수한 물속에서 과냉각 상태로 인해 생기는 얼음핵은, 물 분자 클러스트가 온도저하에 따라 큰 집단을 이루고 이 물 분자 클러스트가 얼음핵 물질로 작용하기 때문에 생성되는데, 이것을 균질핵 생성이라 부른다. 또 일반적인 벌크상태의 물에 함유된 불순물이나 용기벽이 얼음핵 물질로 작용할 때에는 $-3^\circ\text{C} \sim -7^\circ\text{C}$ 정도로 높은 온도에서 얼음이 만들어지는, 소위 불균질핵 생성이 동결을 지배한다. 그리고 과냉각도가 작을 때의 얼음의 성장속도는 과냉각도에 비례하여 조밀한 진빙(眞氷)을 만들지만, 큰 과냉각도일 때의 얼음의 성장속도는 과냉각도의 2승에 비례하여 나무가지모양의 얼음을 만들게 된다. 수용액으로 인해 얼음이 성장하는 것은 얼음 계면 앞으로의 열확산이 수용액의 물질확산보다 크기 때문이고, 계면 부근의 농도가 짙은 수용액속에 그 농도에 있어서의 결빙 평형 온도보다 실제 온도가 낮은 영역의 존재하는, 소위 조성적 과냉각 상태가 나타난다.

- ② 물의 최대밀도가 존재: 물은 저온에서 온도를 높이면 밀도가 커지는데, 3.98°C 에서 최대밀도가 나타나고, 여기서 온도를 더 높이면 다른 유체와 마찬가지로 밀도가 감소한다. 이러한 현상은 얼음 상태의 물 분자 배치구조에서 물 상태의 분자배치구조로 바뀌면서 밀도가 증가하는 것과 온도가 상승하면서 밀도가 감소하는 상호작용 때문에 일어나는 것이다. 이 3.98°C 의 최대밀도는 저빙조 하부에서 최대밀도층을 형성하고 물층에서의 자연대류에 큰 영향을 미치게 된다.

- ③ 수용액에 의한 얼음 계면의 용해현상: 수용액의 농도에 따라 빙점 강하현상이 나타나기 때문에 동결계면으로 배출된 진한 수용액이 다시 얼음 계면으로 이동하면서 얼음의 용해작용이 나타나는데, 이로 인해 얼음의 계면에 요철이 생기고, 그 결과 무른 얼음이 만들어지게 된다.

6. 빙축열 시스템의 각 요소기술

빙축열 시스템에 관한 각 요소기술은 (1) 냉열 발생 기술, (2) 제빙 기술, (3) 저빙 기술, (4) 얼음 반송(搬送) 기술, (5) 채냉열(採冷熱) 기술, (6) 제어계측 및 부하예상기술 등으로 나눌 수 있다. 여기서는 전열 및 유동의 현상론적 입장에서 각 요소기술에 대하여 화제가 될만한 내용을 소개하고자 한다.

6.1 냉열 발생 기술

빙축열 시스템의 제빙에서는 천연 얼음이나 눈을 냉열원으로 이용하였으면 좋겠으나, 주로 냉동기기를 이용하는 인공냉열 발생 기술에 의존한다. 현재까지 채용되거나 개발중인 빙축열용 냉열 발생 기기를 열거하면 다음과 같다.

- 1) 증기압축식 냉동기: 가장 널리 보급되어 있는 냉열 발생 기기이고 여러 가지의 증기압축식 냉동기가 있지만, 냉매로는 프레온을 탈피한다는 취지에서 대체 프레온계 냉매를 사용하거나 지구온난화가스를 피하

기 위하여 암모니아와 같은 자연냉매를 사용하는 경향으로 가고 있다. 또 냉열 뿐만 아니라 냉동기의 응축열도 이용하는 열펌프 형식으로 하여 열에너지를 효율적으로 이용하고자 하는 시스템의 구축도 적극적으로 이루어지고 있다. 그리고 냉동기의 제빙운전효율을 향상시키기 위한 방법으로, 냉동사이클에서 단열팽창하기 전의 과냉각 부를 이미 만들어진 얼음의 용해열로 더욱 과냉각시킴으로써 제빙능력을 증가시키고자 하는 「과냉각 방식」이나 일반적인 냉동사이클 외에 별도의 냉동사이클을 구동하고 이 냉동사이클의 응축과정에서 생기는 얼음의 용해열을 이용함으로써 제빙능력을 증가시키고자 하는 새로운 냉동사이클도 출현되고 있다.

- 2) 흡수식 냉동기 및 흡착식 냉동기 : 흡수식 냉동기는 시스템을 개량하거나 특수냉매를 사용하여 냉수 제조에서 제빙용으로 기술을 발전시키고 있고, 폐열이나 잉여 증기를 열원으로 하는 흡착식 냉동기도 발전되고 있다. 또 흡수식과 증기압축식을 조합한 하이브리드형 시스템을 이용하여 종합 성적계수를 향상시키려는 시도도 이루어지고 있다. 흡착식 냉동기도 사이클을 개선하거나 흡착제 및 신냉매를 사용함으로써 제빙운전이 가능하도록 개발하고 있다.
- 3) 가스의 단열팽창을 이용한 냉동기 : 대기환경에 대한 대책으로 ① 공기팽창 터빈에서의 저온공기를 이용하여 제빙, ② 압축공기와 불텍스 튜브를 이용한 저온 공기로 제빙, ③ 잉여 수증기를 이용하는 증기분사식 냉동기에 의한 제빙 등과 같은 냉열 발생 기술이 개발되고 있다.
- 4) 기타, 냉매를 사용하지 않는 냉열 발생 기술 : 계측기거나 컴퓨터 등의 냉각열원으로 사용하는 펠티에형 냉동기 등을 제빙기술에 작용하는 것도 검토되고 있다.

6.2 제빙기술

제빙기술은 냉열 발생 기기에서의 냉열을 효

율적으로 이용하여 얼음을 만드는 기술인데, 제빙법을 세밀하게 분류하면 제빙기기 제작사에 따라 달라져 40여 종류에 이르는 방법이 제안되고 있다. 그러나 기본적으로는 격벽 냉각면에 층모양으로 얼음을 부착시키는 스테틱형, 냉각면에 얼음을 부착시키지 않고 유동성이 있는 사베트모양의 얼음-물 슬러리를 만드는 다이나믹형 제빙법으로 나눌 수 있다.

- 1) 스테틱형 제빙(정적 제빙)에서의 현상 검토 : 스테틱형 제빙법에는 ① 판의 제빙, ② 관내 제빙, ③ 캡슐내 제빙이 있고, 어느 방법이나 냉각벽면에 층모양으로 얼음을 만들기 때문에 얼음층 두께 δ_i 가 열저항으로 작용하여 얼음층이 두꺼워질수록 제빙효율이 떨어진다. 이런 관계는 그림 1에 나타난 것처럼 제빙량에 비례하는 냉열 전달량은 $Q=(T_w-T_b)/R$ 으로 표현되고 열저항은 $R=(1/h_b + \delta_p/\lambda_p + \delta_i/\lambda_i + 1/h_w)$ 로 표현된다. 따라서 격벽 중 냉매측을 냉매액 직팽식으로 하면 그 열전달을 h_D 가 커져 제빙효율이 향상될 수 있지만, 격벽 냉각면의 배치에 따라서는 등온 냉각면이

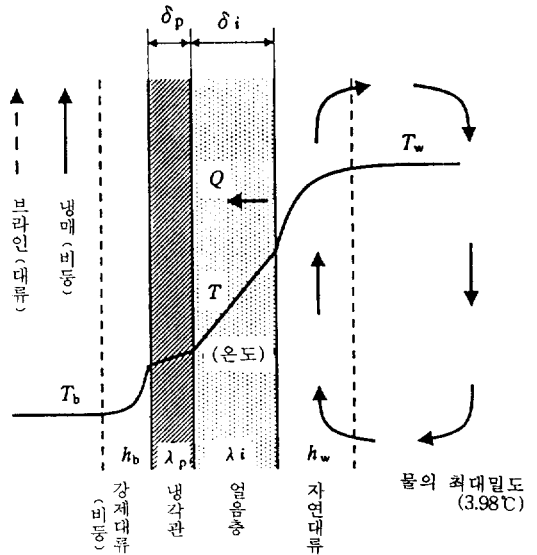


그림 1 얼음층 두께 δ_i 와 냉열 전달량 Q 의 관계

얻어질 수 없어 얼음층 두께가 일정하게 되지 않을 수 있다. 반면에 브라인 등과 같은 액체 냉각제를 사용할 때에는 그 유속(유량)을 크게 함으로써 대류 열전달을 h_b 가 커지기 때문에 제빙효율이 향상되고 비교적 균일한 두께의 얼음층을 만드는 것도 가능해진다. 또 냉매측의 팽창밸브를 사용하여 감압비율을 크게 하면 저온을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 제빙비율도 증가시킬 수 있지만, 냉동기의 성적계수는 낮아진다. 한편 얼음 계면의 물측에서는 수온 T_w 와 얼음 표면(0°C)의 온도차로 인해 발생하는 자연대류가 성장속도를 억제하지만, 물측의 온도가 낮아질수록 얼음성장속도의 감소비율은 줄어들게 된다. 또 격벽 재질이 열전도율 λ_p 가 큰 동이나 강과 같은 금속에서 폴리에틸렌과 같은 비금속계로 바뀌면서 제빙효율이 낮아진다. 한편 캡슐내 물의 제빙에서는 캡슐벽 내표면에서 얼음이 성장하고, 캡슐내압의 상승은 캡슐의 변형량 및 내부 기포의 수축의 균형으로 결정되는데, 그 내압이 상승하면 빙점이 낮아진다. 또 구형 캡슐 등일 때에는 동결 계면의 면적이 서서히 감소하면서 제빙효율도 감소한다.

- 2) 다이아믹형 제빙(동적 제빙)에서의 현상 검토 : 다이아믹형 제빙은 얼음층 두께 δ_i 에 따른 열저항을 작게 하기 위하여, 간접 열교환법일 경우에는 냉각면에서 얼음층을 기계적으로 긁어모으는 방법이나 냉각면에서 얼음층을 성장시키지 않으면서 얼음을 만드는 방법을 사용한다. 또 직접 열교환법에서는 냉매액을 물속에서 증발시키거나, 냉매액과 물, 또는 저온 기체와 물을 직접 접촉 열교환시켜 얼음입자를 만드는 방법을 사용한다.

① 간접 열교환 제빙

- (i) 하베스트 제빙 : 평판 모양 또는 원통 모양의 냉각면에 얼음층을 만들고, 얼음 두께가 수 mm에 이르면 소취기(擷取機)로 얼음층을 긁어모으는 방법과 냉매측으로

핫가스 등과 같은 온열 매체를 흘려 냉각면에 부착되어 있는 얼음층의 일부를 녹여 얼음층을 박리하는 방법이 있다. 전자인 경우에는 긁어모은 얼음층의 두께 결정, 기계(소취기)축에 걸리는 응력 및 기계 사용시 발생하는 소음 등이 문제가 된다. 반면에 후자에서는 얼음층의 용해 두께와 투입해야 할 열에너지량의 최적 관계 및 박리될 얼음층을 냉각면에서 원활하게 이탈시키는 방법 등이 중요하다.

- (ii) 리키드 아이스(액상 얼음) 제빙 : 수직이면서 매끄러운 냉각면 위로 수용액이 자연 유하(流下)하면서 냉각되어 미세한 얼음조각을 만드는 것이다. 여기에는 냉각원통 내면에서 수용액을 강제적으로 순환시켜 과냉각 상태로 만들면 저속인 원통 중심영역에서는 과냉각으로부터 해방됨으로써 미세한 얼음조각을 만드는 방법이 있고, 냉각 원관내에서 수용액을 유동시키고 이 관내면에서 만들어지는 얼음조각을 수용액의 유동에 따르는 유체력으로 박리하는 방법도 있다. 그러나 어느 방법이나 냉각면 온도를 지나치게 떨어뜨리면 얼음이 냉각면에서 너무 많이 발생하게 되어 얼음덩어리가 만들어지고 이것이 수용액의 흐름을 방해하기 때문에, 최적의 제빙 상태를 유지하기 위한 수용액 농도, 냉각 온도 및 유량 등과 얼음의 성질 및 상태의 관계가 앞으로의 연구과제가 되고 있다.
- (iii) 과냉각수 제빙 : 냉각관내에 물 도는 수용액을 유동시켜 이것을 과냉각 상태로 만들고, 관 바깥에서는 과냉각 상태를 해방시킴으로써 제빙하는 방법인데, 냉각면 위에 얼음이 만들어지지 않도록 하기 위해 열교환 효율을 좋게 해야 한다. 이 때에는 과냉각도가 수 $^\circ\text{C}$ 정도로 그다지 크지 않기 때문에, 과냉각도를 크게 할 수 있는 방법을 찾는 것이 큰 과제이고, 관내에서 얼음이 만들어질 때를 대비한 대책이 필요하다.
- ② 직접 접촉 열교환 제빙(미세한 얼음조각을

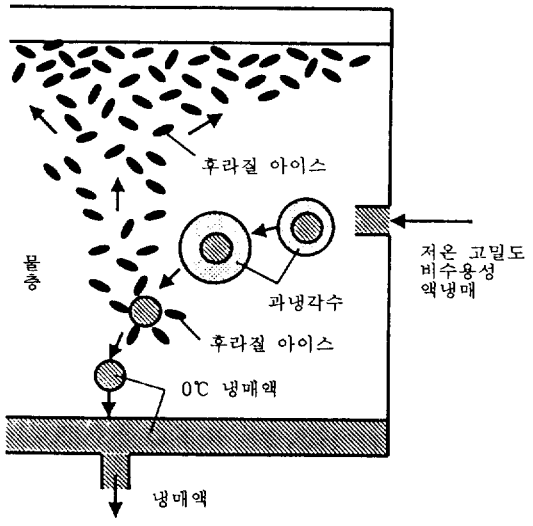
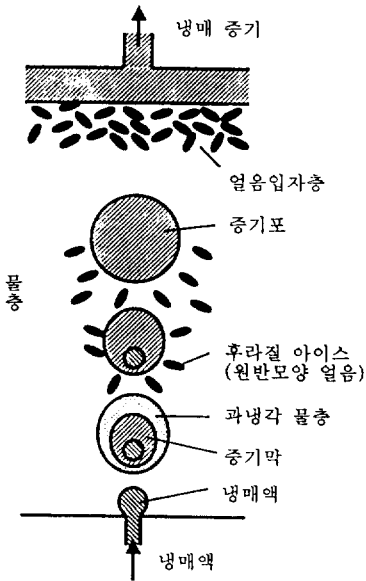


그림 2(a) 냉매액을 증발시켜 제빙하는 방법의 개요

그림 2(b) 저온인 고밀도의 비수용성 액냉매를 이용한 제빙법의 개요

만드는 후라질 제빙): (i) 저비점 냉매인 물속이나 (ii) 분무되는 미세 물방울속에서 증발에 의해 미세한 얼음조각을 만드는 제빙법, (iii) 저온 고밀도인 비수용성 액을 물속에 분사함으로써 현열교환시켜 제빙, (iv) 저온의 기름방울을 물속에 분사함으로써 현열교환시켜 제빙하는 방법 등이 있다.

관한 검토가 필요하다. 또 그 외에도 저온 공기 등과 같은 가스를 물속에 분사하고 이 저온의 기포가 가진 현열로 주위의 물을 과냉각시켜 미세한 얼음조각을 만드는 방법이 있는데, 이것은 기포의 크기나 양, 온도 등이 제빙에 영향을 미치고, 저온공기의 작은 현열을 이용하기 때문에 최적의 공기 취출 조건을 설정하는 것이 중요하다.

6.3 저빙기술

증발 잠열을 이용할 때에는 그림 2(a)와 같이 냉매액적이 물속을 통과하면서 그 표면에서의 증발에 의해 주위의 물을 과냉각시키고, 그 과냉각도에 따라 미세한 후라질 아이스를 만드는 방법이 있는데, 이 때에는 최적의 냉매액적 직경을 검토하는 것이 중요하다. 또 미세한 물방울속에서 냉매액적이 증발하는 데에는 물방울과의 접촉빈도나 물방울 자신의 과냉각도가 문제가 된다. 저온인 고밀도 액적의 현열을 이용하는 것은 저온의 액적과 주위의 물이 열교환함으로써 이루어지는 것인데, 그림 2(b)와 같이 그 액적 주위에 과냉각 상태의 수막이 형성되고 부유하는 얼음조각 등의 빙핵작용으로 미세한 후라질 아이스를 만든다고 생각되지만, 아직 명확하게 밝혀진 것은 아니며, 최적의 액적 직경이나 온도에

빙축열이 가지는 최대의 특징으로는 냉열로 얼음의 잠열을 이용하기 때문에 빙축전율(IPE)이 50%일 때의 축열조 용량은 냉수 축열에 비해 계산상 약 1/10로 축소할 수 있어(실제로는 겨울철 난방용으로 온수 축열을 하는 등 다른 요인을 고려하면 1/5 정도로 축열조 치수를 줄일 수 있다) 축열조 설치공간의 측면에서 유리하다는 것과 축열조를 소형화함으로써 열손실을 줄일 수 있다는 것 등을 들 수 있다. 또 축열조로서의 저빙조로는, 지역냉방 등과 같이 대용량일 때에는 대기 개방형, 고층빌딩 등의 공급수압수두 등을 고려할 때에는 밀폐형이 주로 사용된다. 그리고 결로로 인해 단열성능이 떨어지는 것

을 피하기 위해 저빙조를 단열할 때에는 비흡습 및 비흡수성인 발포 단열재나 진공 단열이 일반적으로 채용된다.

저빙법은 1) 저빙조로 저빙만 할 때, 2) 저빙조로 제빙도 할 때, 3) 저빙조로 제빙과 채냉열도 할 때로 나누어 살펴볼 수 있다.

- 1) 저빙만 하는 경우 : 이 저빙법은 다이나믹 제빙으로 만들어진 얼음-물(수용액) 슬러리를 저빙하고, 그 후에 얼음-물 슬러리를 채냉열부로 관을 통해 수송하는 시스템에 채용하는 것이다. 얼음의 성상은 슬러리로 양의 미세한 얼음조각이기 때문에 얼음과 물의 밀도차만큼 수면 위로 얼음입자가 뜨고, 얼음끼리의 승화 응결, 소결, 융해 재결정화에 의해 얼음덩어리가 만들어지기 쉽다. 또 수면 위의 얼음입자도 소결 등으로 인해 얼음덩어리가 되기 쉽다. 따라서 저빙조내에서 기계적으로 교반시키거나 펌프나 송풍기 등을 사용하여 물이나 기포를 분사하는 유체적 교반으로 얼음덩어리가 만들어지는 것을 막아야 한다. 또 저빙조의 중횡비(세로/가로)가 클수록 얼음 자체의 무게나 수압으로 인해 저빙조 하부에서 얼음입자끼리 결합하는 비율이 커지고, 밀도차에 의해 온도층이 생기는 정도로 커진다. 즉, 약 4°C인 저온의 물은 저빙조의 바닥에 정체하고, 위로 갈수록 얼음과 물의 혼합수가 되며, 0°C의 온도층이 형성된다.

한편 수용액-얼음 슬러리인 경우에는 얼음입자가 저융점인 고농도 수용액으로 둘러싸여 얼음입자끼리의 결합을 방지하게 된다. 이와 같은 상태의 얼음 온도는 수용액의 융점과 평형 상태가 된다. 따라서 저빙조내에서 시간이 흐를수록 밀도가 큰 고농도 수용액이 저빙조 하부로 흘러내림과 동시에 얼음입자의 융해와 재응고가 일어나고, 조의 바닥에 고밀도의 수용액이 체류하여 복잡한 온도, 수용액 농도층이 형성된다. 그러므로 얼음입자끼리의 결합을 방지하기 위해 계면활성제나 부동 단백질 물질 등을 얼음-물 슬러리에 첨가하는 것도 시도되고 있다.

- 2) 저빙부와 제빙부가 일체 구조인 경우 : 이 때에는 저빙조내에 슬러리모양 얼음을 만드는 다이나믹형 제빙기구를 설치하고, 수조 속이나 상부에서 냉매액을 분사 증발시켜 미세한 얼음조각을 만드는 방법이나 저온의 비수용성 열매체를 물 속에 분사시켜 미세한 얼음조각을 만드는 방법 등이 있다. 이 저빙법은 만들어진 얼음-물 슬러리를 관을 통하여 채냉열부로 수송하는 것을 전제로 하는 것이기 때문에 외부로 얼음-물 슬러리를 취출하는 기구를 고려해야 하고, 저빙조의 빙층전율은 (a)의 저빙만인 경우에 비해 그다지 크지 않다. 또 발생한 냉매 가스나 비수용성 열매체가 얼음-물 슬러리로 휩쓸림으로써 비산되는 것을 방지하기 위한 검토도 필요하다.

- 3) 저빙부, 제빙부와 채냉열부가 일체 구조인 경우 : 이 저빙법에서는 제빙한 얼음을 저빙조 밖으로 이동시키지 않고 그 내부에서 채냉열한다. 따라서 원관 등의 냉각벽 외부에 얼음층을 형성시키는 제빙법에서는 얼음층 두께를 균일하게 한다든지 하여 얼음층끼리의 브릿징이나 아징 현상을 피하고, 귀환 온수를 사용하여 채냉열을 고효율화시키는 연구도 필요하다. 저빙기간 동안에는 밀도차에 의한 자연대류가 저빙조내에서 발생하여 조의 아래부분에 4°C인 물이 체류하는 온도성층화가 진행되기 때문에, 채냉열을 시작한 직후에는 일정온도의 냉수를 취출할 수 없게 된다. 또 채냉열 후 얼음이 남아 있는 상태에서 제빙하기 시작할 때에는 브릿징이나 아징에 주의해야 한다. 한편 저빙조에서 얼음-물(수용액) 슬러리로부터 채냉열할 때에는 귀환 온수를 위에서 뿌려 직접 접촉시켜 채냉열하는 방법과 동관 등의 열교환기를 저빙조내에 설치하여 간접적으로 열교환하는 방법이 있다. 전자는 온수가 얼음입자층을 통과함으로써 수로가 형성되는 것을 방지하면서 효율적으로 전체 얼음입자를 녹이는 방법을 강구하여야 한다. 그 방법으로는 온수를

얼음입자층 내부에서 분사하여 용해하는 방법이나 저빙조 벽의 얼음입자를 녹이도록 그 벽에 온수 유로를 만드는 방법 등이 검토되고 있다. 한편 후자에서는 자연 대류가 잘 되어 채냉열관에서 멀리 떨어진 영역에 있는 얼음입자의 용해를 촉진할 수 있도록 채냉열관을 배치하는 것이 중요하다. 또 조 내부에 교반기를 설치하여 강제적으로 얼음입자를 순환시키는 방법 등도 검토되고 있다.

저빙조에서 얼음-물 슬러리를 취출하는 데에는 얼음입자와 물의 부력차 및 얼음 슬러리의 유연성이 영향을 미치고, 저빙조에서 관을 통하여 얼음-물 슬러리를 수송하기에는 곤란하다. 따라서 얼음-물 슬러리를 간단하게 취출하기 위해서는 저빙조의 측벽에 배출구를 설치하는 방법이나 가요관(flexible tube)을 얼음입자층에 직접 설치하여 펌프로 취출하는 방법이 있다. 이 때에는 큰 얼음덩어리가 배관내로 유입하여관이 폐쇄되는 것을 막기 위해 편칭 메탈 등과 같은 그물망을 설치한다. 또 적극적인 방법으로는 저빙조 상부의 끝에 얼음입자군을 끊어내는 회전날개를 설치하여 얼음입자군을 저빙조 밖으로 배출하고, 아래에 설치한 스크류 콘베어나 로타리 밸브와 같은 반송기기를 통해 배관내로 얼음-물 슬러리를 유입시키는 방법도 있다.

6.4 얼음-물 슬러리의 수송기술

다이나믹 제빙법으로 만든 얼음-물(또는 수용액) 슬러리는 반송성이 우수하고 얼음의 잠열분을 수송할 수 있기 때문에, 배관 치수의 축소나 냉열 수송 설비·시행 비용의 절감, 수송동력의 경감 등과 같은 경제적 장점이 있어, 스태틱형 제빙을 대신하는 새로운 빙축열 시스템으로 발전할 가능성이 있다. 그러나 물보다 가벼운 얼음입자를 좋은 효율로 배관내에서 수송하기 위해서는 얼음입자의 결합이나 응집작용으로 만들어지는 얼음덩어리로 인해관이 폐쇄되는 현상이나 얼음입자가 관내에서 부상하여 체류함으로써

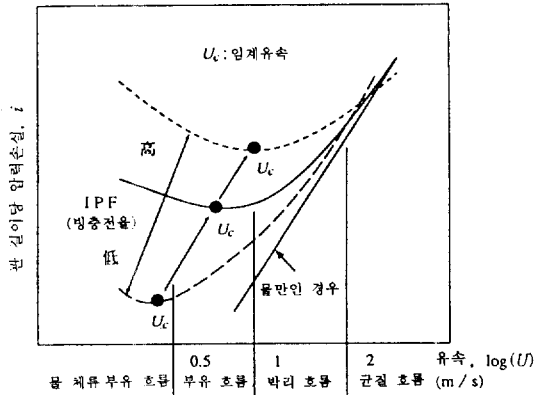


그림 3 관 길이당 압력손실 i 와 얼음-물 슬러리 평균유속 U 의 관계

반송효율이 저감되는 문제 등 아직 기술적으로 해결해야 할 과제가 많이 남아 있다. 여기서는 얼음입자를 물(또는 수용액)이나 공기로 수송할 때의 특징에 대하여 서술한다.

- 1) 얼음-물 슬러리를 관으로 수송할 때의 특징:
 - ① 얼음-물 슬러리의 유동 상태: 그림 3에 나타난 관 길이당 압력손실 i 와 얼음-물 슬러리 평균유속 U 의 관계를 보면, 얼음-물 슬러리가 저속으로 수평관내를 흐르고 있을 때에는 얼음입자의 부력 때문에 얼음입자가 원관내의 상부에 체류하거나 접동(摺動)하면서 흐르는데, 이를 유동저항이 큰 체류동반하는 부유 흐름 상태라고 한다. 관내 유속이 약 0.5m/s 이상으로 빨라지면 체류하던 얼음입자 중 일부는 관의 중앙으로 확산하고, 유동저항은 한계유속 U_c 에서 극소값을 나타낸다. 또 관내 유속이 1m/s를 초과하면 상부에서 박리한 얼음입자가 관 전체로 확산하고, 유동저항이 증가한다. 관내 유속이 2m/s를 초과하면 얼음입자의 관내 분포가 균일하게 되고, 그 유동저항은 물뿐인 경우의 관내 유동저항에 가까워지고, 더욱 유속이 증가하면 오히려 물의 유동저항보다 작아지는 균질흐름 상태가 된다. 이와 같이 얼음-물 슬러리의 유동저항이 물뿐인

경우보다 작아지는 것은 얼음입자 때문에 관내의 난류가 억제되는 효과(소위 톰스효과 등)가 생겨 흐름의 층류화가 이루어지기 때문이라고 생각된다. 또 빙층전율이 높은(20% 이상) 경우에는, 관 중앙에서는 얼음입자가 모이는 플러그류(栓流)가 되고, 관의 내벽 근처에서는 수막류(水膜流)가 되는 2층의 흐름이 되어 유동저항을 줄이게 된다.

- ② 얼음덩어리로 인해 배관계가 폐쇄되는 현상: 얼음-물 슬러리를 관으로 수송하는 경우의 가장 큰 문제점은 얼음덩어리가 생겨관이 폐쇄되는 것이다. 얼음덩어리가 만들어지는 것은 얼음입자의 소결이나 융점이 낮은 작은 입자의 얼음이 소멸되면서 큰 입자의 얼음이 만들어지기 때문이다. 또 얼음입자가 체류하는 부분에서의 탈수와 압밀(壓密) 작용으로도 얼음덩어리가 형성된다. 그리고 수 cm의 각형 얼음인 경우에는 관내에서 각형 얼음이 연결되어관 유로를 폐쇄하는 아징 현상을 일으키는 경우도 있다. 이와 같이 얼음덩어리로 인해관이 폐쇄되는 것을 방지하기 위해서는 (i) 관경을 증대, (ii) 곡관에서 곡률을 증대시키거나 가요관을 사용, (iii) 유동이 변하는 것을 방지하기 위하여 정유량 펌프를 사용, (iv) 얼음입자가 체류하는 것을 방지하거나 관내 유속을 높임으로써 균질 흐름을 확보, (v) 유기성 수용액, 계면활성제나 부동 단백질질을 첨가하여 얼음입자끼리 결합하는 것을 방지하는 등의 방법이 고려된다.

- ③ 다른 직경을 가진 얼음입자를 혼합하여 수송 얼음량을 증가: 흐름에 의한 얼음입자의 분급(分級) 효과로 큰 얼음입자는 관의 중앙부로 흐르고, 작은 얼음입자는 관의 내벽 근처를 흐르게 된다. 이 때 관내 유동저항은 관벽 근처의 흐름에 지배받기 때문에, 균일한 크기의 얼음 슬러리와 빙층전율을 같게 한다면 서로 다른 크기의 얼음을 혼합한 얼음-물 슬러리쪽이 많은 얼

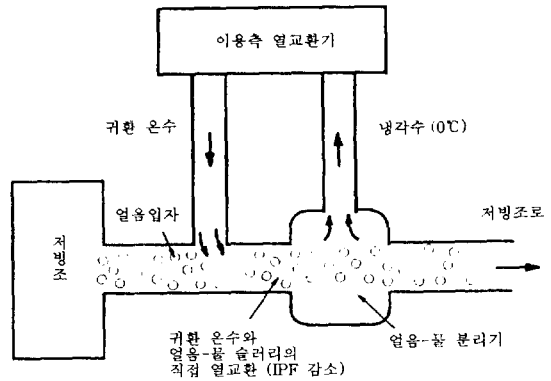


그림 4 루프 단관 방식에서 상류측으로 귀환 온수를 유입하는 방식

음을 수송할 수 있다. 따라서 같은 빙층전율일 때에는 다른 크기의 얼음을 혼합한 얼음-물 슬러리쪽이 유동저항이 더 작다.

- ④ 배관 방식 및 분기가 많은 관에서 얼음-물 슬러리의 유동특성: 배관 방식으로는 왕복 복관 방식과 루프 단관 방식이 있다. 전자는 얼음-물 슬러리를 수송하기 위한 공급관과 귀환 온수용 관 등 복수의 주관을 설치하기 때문에, 귀환 온수의 온도를 높여 큰 현열을 이용할 수 있다. 후자는 2차측에서의 귀환 온수를 하류측으로 귀환하는 방식(상류측 냉수 공급)과 상류측으로 귀환하는 방식(하류측 냉수 공급)으로 구분할 수 있다. 여기서 하류로 온수를 귀환할 때에는 상류에서 2차측으로 냉수를 공급하기 때문에, 높은 빙층전율을 가지는 배관 영역이 하류의 귀환부까지 존재하여관이 폐쇄되는 원인이 된다.

한편 그림 4와 같이 상류로 귀환하는 경우는 귀환 온수와 유동하고 있는 얼음입자가 직접 접촉 열교환할 수 있어 냉열부하에 알맞은 얼음의 체냉열이 가능해진다. 또 상향 배관으로 하면 얼음입자의 부력을 이용할 수 있기 때문에, 관내 유동저항을 줄일 수 있다. 따라서 분기관에서 얼음을 분배하는 경우에는 얼음의 부력이나 분기관의 유동저항 등을 고려하여 상향 분기하는 것이

얼음입자의 분기량을 많이 할 수 있고, 수평이나 하향으로 분기하면 얼음입자의 분기량이 줄어든다.

- 2) 얼음입자를 공기로 수송할 때의 특징 : 열용량이 작은 저온 공기를 사용하여 얼음입자를 고속으로 수송하는 기술도 공조용 외에 인공 스키장에서 눈을 공급하는 경우 등에서 주목되고 있다. 관내 유속이 약 25m/s 이상이 되는 고속에서는 얼음입자가 관내에서 비산되어 비교적 균질 흐름 상태가 된다. 그러나 10m/s 이하인 저속류에서는 플러그 흐름 상태가 되어 큰 얼음입자 사이에 작은 입자의 얼음이 압밀되고, 관이 폐쇄되기 쉬운 상태가 된다.

6.5 채냉열기술

채냉열 기술은 가장 마지막으로 얼음이 가진 잠열을 냉방 공조에 이용하는 열교환 기술이다. 채냉열 방법을 크게 구분하면 앞에서 서술한 것처럼, 저빙조내에서 2차 액냉매(물 또는 수용액)와 얼음입자 사이에서 열교환하는 방법과 이용측으로 수송한 얼음-물 슬러리와 냉각매체 사이에서 열교환하는 방법을 들 수 있다. 여기서는 후자의 이용측으로 수송한 얼음-물 슬러리에서의 채냉열에 대하여 서술한다.

- 1) 유동하는 얼음-물 슬러리와 귀환 온공기의 간접 열교환에 의한 채냉열 : 코일형 열교환기 등의 코일내에 직접 얼음-물 슬러리를 흘리고, 코일 바깥을 흐르는 온공기와 간접 열교환시켜 채냉열하는 방법이다. 이 방법은 노점 이하로 공기를 냉각하기 때문에 동시에 제습작용도 이루어진다. 또 코일내를 흐르는 얼음입자는 용해나 자기 교반을 동반하면서 열교환하기 때문에, 물의 단상 열교환일 때보다 그 교환열량이 크게 된다.

- 2) 유동하는 얼음-물 슬러리와 귀환 온공기의 직접 접촉 열교환에 의한 채냉열 : 얼음-물 슬러리의 충전조 하부에서 귀환 온공기를 직접 송출하여 얼음 입자, 물 그리고 공기포의 3상 상태로 하고, 난류 교반에 의해 직접 접촉 열교환시킴으로써 저온 공기를 얻는 고효율의 채냉열법이다.

6.6 제어 계측과 냉방부하 예상 기술

빙층전율을 측정하는 것은 빙층전율을 결정하거나 얼음의 체적 팽창으로 인하여 저빙조나 배관이 압력 파괴되는 것을 방지하기 위한 중요한 제어 계측 기술이다. 빙층전율의 측정법으로는 저빙조내에서 정지한 상태에서 측정하는 방법과 배관내의 얼음-물 슬러리와 같이 유동 상태에서 측정하는 방법이 있다. 전자로는 ① 얼음의 체적 팽창에 의한 수위 측정법, ② 얼음층 두께를 기계적으로 측정하는 방법이나 얼음 성장에 따른 측정관 내압의 측정법, ③ 저빙조내 수온과 냉각관 내관의 냉매 온도의 온도차에 따른 측정법, ④ 열량계를 사용하여 투입 열량과 손실 열량의 차로 측정하는 방법 등이 있다.

한편 후자의 유동하는 얼음-물 슬러리의 빙층전 측정으로는 ① 얼음-물 슬러리의 전기 전도율 측정법, ② 얼음-물의 정전 용량 측정법 ③ 회전 토크계에 의한 측정법, ④ 마이크로 모션 유량계에 의한 측정법, ⑤ 유동 얼음-물 슬러리의 수직관내 압력손실 측정법, ⑥ 얼음-수용액 슬러리의 수용액 온도 측정법, ⑦ 얼음-물 슬러리를 추출하여 열량계, 원심 분리기 또는 얼음-물의 적외선 흡수율차를 측정하는 등으로 빙층전율을 측정하는 방법 등이 있다.

냉방부하를 예상하는 것은 최적 제빙량을 결정하는 것, 즉, 빙층열 시스템의 효율화에 중요한 요소이다. 그 냉방부하에는 인적 환경부하(열원기기에서의 방열, 인체 등 생체에서의 방열 부하)와 기후 부하(기온, 강우량, 습도, 풍속, 구름량 등) 등이 있고, 일일 단위나 주간 단위로 냉방부하를 예상하는 것이 중요하다.

7. 결 론

여기서는 빙층열 시스템에 대한 사회적 요청의 배경, 얼음이나 저온수와 관계있는 여러 가지 현상 및 빙층열 시스템의 요소 기술에서 전열·유동 현상 등의 관계에 대하여 개략적으로 서술하였다. 빙층열 기술은 복잡한 상황에서 물이나 수용액의 동결 현상, 얼음의 용해 현상 그리

고 얼음-물 슬러리의 수송에 따르는 여러 가지 현상을 취급하는 것이므로, 전열공학, 냉동공조공학, 유체역학 등의 학문분야가 발전하는 데에도 큰 기여를 할 것이다. 이러한 학문적 체계화는 다른 분야에서 빙축열 기술을 활용할 수 있도록 길을 열어주는 것이기도 하다. 또 현재 개발되고 있는 각종 빙축열 시스템의 성능 등에 따라 앞으로 정착할 것인지 도태될 것이냐가 결정될 것으로 예상되므로, 산학관의 연구자나 기술자의 적극적인 교류 및 정보교환이 요망된다.

참 고 문 헌

1. 日本機械學會編, 機械工學用語辭典.
2. 稻葉英男, 1996, 冷凍, 71(830), 1346.
3. 稻葉英男, 1993, 混相流, 7(2), 113.
4. 福迫尚一郎, 稻葉英男, 1996, 「低溫環境下の傳熱現象とその應用」, pp. 383~394, 養賢堂, 東京.
5. 稻葉英男, 1997, 化學工學, 61(11), 883.