

아이스슬러리형 빙축열시스템의 그 이용

동적제빙 방식인 아이스슬러리형 빙축열 시스템과, 제빙된 아이스슬러리를 배관 내에 직접반송하는 기술에 대하여 소개하고자 한다.

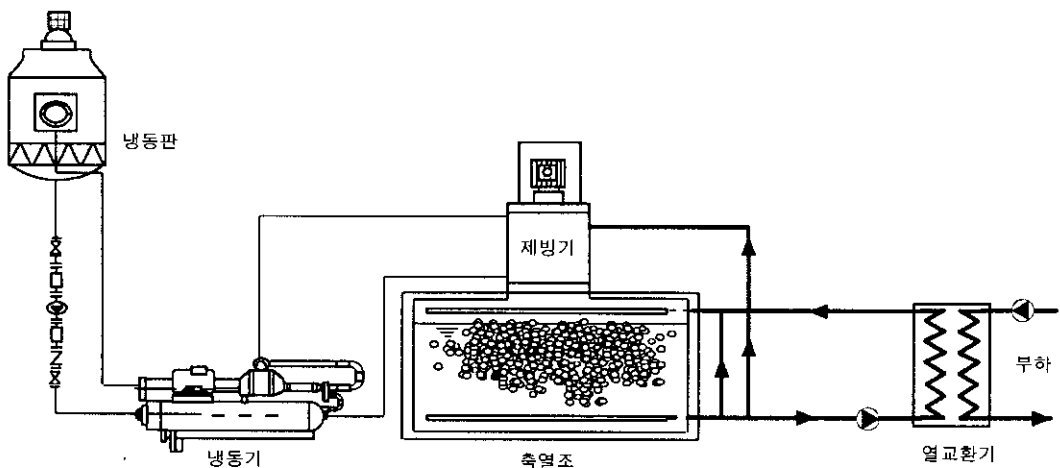
이 동 원

아이스슬러리형 빙축열 시스템

개요

아이스슬러리형 빙축열 시스템은 물 또는 브라인 수용액을 이용해 수십 μm 에서 수 mm 크기의 작은 얼음입자를 만들고, 이를 슬러리 형태로 축열조에 저장하였다가 부하에 대응하는 동적제빙 방식의 빙축열 시스템으로 그림 1에 나타내었다. 일반적으로 널리 보급되고 있는 관외 착빙형이나 캡슐형과 같은 정적제빙 방식의 빙축열 시

스템과는 달리, 두꺼운 얼음층이 형성되지 않아 제빙효율이 높을 뿐만 아니라 용해속도가 빨라 방냉효율이 우수하다는 장점을 가지고 있다. 또한 제빙방법이나 첨가제의 종류 및 농도의 조절을 통하여 얼음입자 크기나 제빙온도 등을 조절할 수 있으며, 부하측으로의 직접반송이 가능하여 냉열수송 배관 및 펌프동력을 줄일 수 있다는 큰 장점도 갖고 있다. 직접반송이 가능한 아이스슬러리는 브라인이나 냉매를 이용하는 냉각시스템에 대체 적용할 수 있으므로, 우수한 2차 냉매라고도 한다.



[그림 1] 아이스슬러리형 빙축열 시스템 개념도

필요성 및 특징

빙축열 시스템이 건물의 냉방공조외에 산업 및 상업용 칠러로써 그 이용이 확대되기 위해서는, 기존의 정적제빙 방식이 갖고 있는 여러 가지 문제, 특히 낮은 제빙효율과 부하에 대한 속응력(速應力) 문제를 해결하는 것이 필요하다. 정적제빙 방식의 빙축열 시스템에서는 제빙과정 중 생성되는 얼음이 단열재 역할을 하여 냉매(또는 브라인)와 축열매체 사이의 열전달율이 낮아지고 이에 따라 냉동기 성적계수가 저하되기도 하는데, 정적제빙 방식의 이러한 전열특성은 융해시에도 단점으로 작용하여 부하에 대한 속응력을 저하시키는 요인이 되고 있기 때문이다.

그러나 아이스슬러리형과 같은 동적제빙 방식에서는 제빙기와 축열조가 분리되어 있고 제빙기에서 만들어진 얼음이 연속적으로 축열조로 이송되어 저장되므로(그림 2), 제빙과정 중 열전달율이나 냉동기 성적계수의 저하가 발생하지 않는다. 물론 브라인 수용액(6~8%)을 이용하여 아이스슬러리를 제빙하는 방식에서는, 제빙과정에서 진행됨에 따라 축열조내 수용액 농도가 증가하고 이에 따라 빙점이 낮아짐으로써 냉동기의 성적계수가 저하되는 것으로 알려져 있다. 그러나 저자의 경험으로는 제빙과정 중 브라인과 얼음입자가 완전히 분리되는 것이 아니라 브라인이 얼음입자 사이에 갇혀있기도 하므로, 축열조내



[그림 2] 제조되어 축열조로 운반되는 아이스슬러리

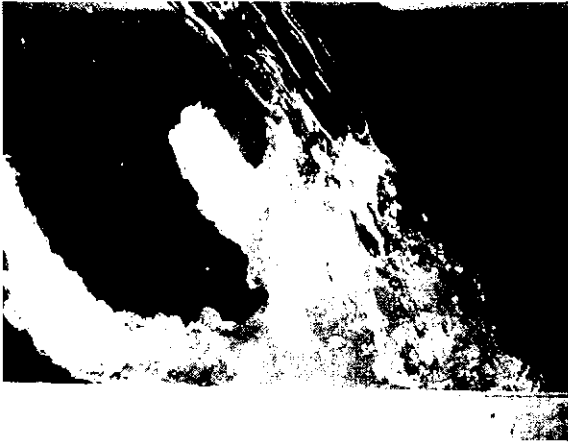
수용액의 농도가 짐작하는 바와 같이 크게 증가하지는 않는다고 생각된다.

한편 아이스슬러리 내 얼음은 과냉되지 않은 작은 입자 형태를 갖고 있어 해빙특성이 뛰어나므로, 아이스슬러리형 빙축열 시스템은 부하변동이 심한 과부하성 건물의 냉방이나 빠른 냉각속도가 요구되는 각종 산업·상업분야의 유용한 칠러로써 인정받고 있다. 또한 아이스슬러리는 유동성을 갖고 있어 배관내 직접반송이 가능하고 냉열수송량이 크기 때문에, 기존 시스템의 냉방 또는 냉각용량 확대가 요구될 때 기존의 각종 배관 등을 그대로 사용할 수 있는 장점도 갖고 있다.

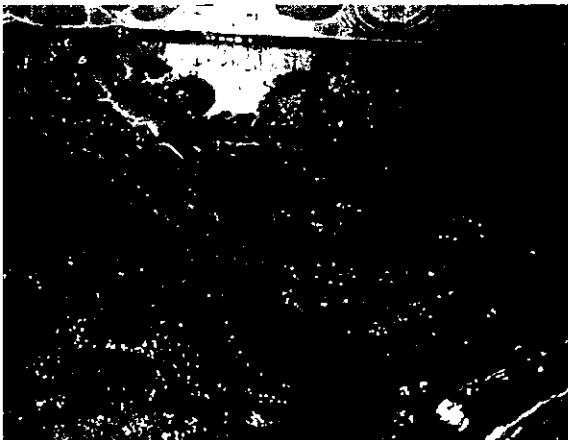
아이스슬러리의 제빙방식

아이스슬러리의 제빙방식으로는 여러 방법이 제안되고 있으나, 그 중 증발판형이 가장 상용화된 방식이다. 이 방식은 브라인 수용액이 순환하면서 증발판에 얇은 얼음층 또는 과냉각층을 형성하면, 회전하는 스크래퍼(scraper)가 이를 긁어내림으로써 얼음입자를 만드는 방식이다. 과냉각수형은 주로 일본에서 개발되고 있는 방식으로써, 물 또는 브라인 수용액을 열교환기로 순환시켜 과냉각수를 만든 후 이를 축열조에 떨어뜨리면서 과냉각을 해소시켜 얼음입자를 만드는 방식이다(그림 3), 이 방식은 시스템 구성이 간단하고 특히 브라인과 같은 첨가제 없이 수도수를 그대로 이용할 수도 있다는 점에서 주목받고 있다. 한편 진공이용형은 물의 삼중점 이하로 챔버내를 감압함으로써 물의 증발열에 의해 미세한 얼음결정을 얻는 방식이며, 이 외에도 특수 코팅 처리된 증발판의 표면에 첨가제를 포함한 물을 흘려보내면서 얼음입자를 만드는 슬리퍼리형과, 챔버내 물에 저온의 냉매를 분사시키면서 직접 접촉 열교환에 의해 작은 얼음입자를 만드는 냉매직접분사형 등이 있다.

현재 국내에서 한국전력의 승인을 받아 아이스슬러리형 빙축열 시스템을 보급하고 있는 업체는 청도, 에너텍(수입 판매), 디아이, 디와이 주식회사가 있으며, 이 밖에 엑서지 주식회사도 아이스슬러리형 제빙기를 제작·판매



(a) 제빙과정



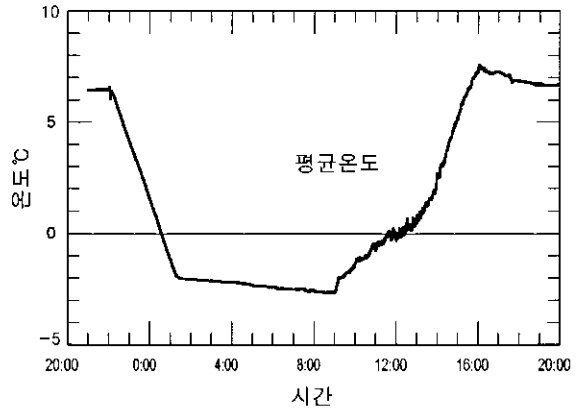
(b) 축열조내 아이스슬러리

[그림 3] 과냉각수 이용 아이스슬러리 제빙방식(수도수 이용)

하고 있다. 현재는 모두 증발판형 제빙방식을 이용하고 있고 직접반송은 이루어지고 있지 않지만, 앞으로 연구개발이 더욱 지속된다면 여러 가지 방식의 아이스슬러리형 빙축열 시스템이 상용화되고 다양한 분야에 활용될 수 있을 것이다.

앞으로의 과제

아이스슬러리형 빙축열 시스템에서 가장 중요한 것은 아이스슬러리를 만드는 제빙기의 신뢰성과 경제성을 확



[그림 4] 축냉 및 방냉과정시 축열조내 평균온도의 변화

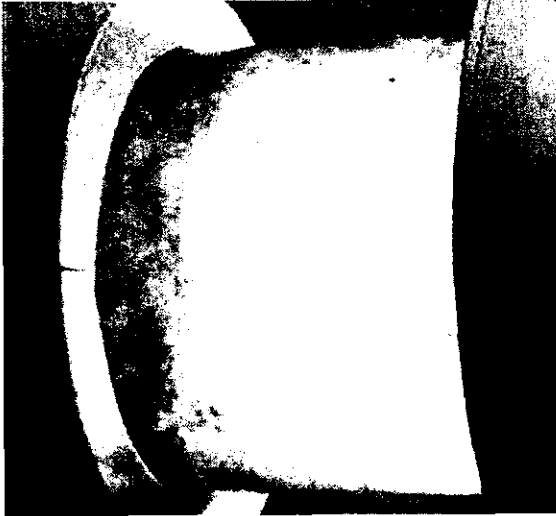
보하는 것이다. 오랫동안 이용되어 오면서 그 신뢰성이 확인된 정적제빙 방식에 비해서 아이스슬러리 제빙방식은 아직 충분한 신뢰성을 확보하지 못한 것이 사실이기 때문이다. 또한 아이스슬러리의 해빙특성은 우수하지만 축열조내 부유하는 얼음덩어리는 녹이기 어려운 경우도 있으므로, 설계시 축열조내 아이스슬러리가 고르게 용해 되도록 유의해야 한다. 그림 4는 축열조내 수용액의 평균온도가 약 7°C가 될 때까지 방냉을 했지만 아이스슬러리를 충분히 녹이지 못했기 때문에, 방냉이 끝난 후 녹지 않은 얼음입자가 용해되면서 축열조내 수용액의 평균온도가 다시 낮아지는 것을 보여주고 있다.

아이스슬러리의 축열조내 빙층진율은 이용 가능한 범위에서 일반적으로 50%정도라고 알려져 있지만, 저자의 경험으로 보아서는 최대 40~45% 정도라고 할 수 있다. 이것은 일반적인 관외착빙형이나 캡슐형 빙축열 시스템에 비해 낮은 값이므로, 이를 보상하기 위해서는 아이스슬러리의 장점이 좀 더 효과적으로 발휘되도록 노력하는 것이 필요하다.

아이스슬러리 직접반송 시스템

필요성

빙축열 시스템이 현재와 같이 단순히 제빙된 얼음의



[그림 5] 직접반송되고 있는 아이스슬러리

저장과 축열조 내 용해에 의한 냉열공급에 머무른다면, 얼음의 용해잠열을 이용한 고밀도 축열이라는 장점 외에는 소비자에게 별다른 이익을 실현해주지 못하는 것이 사실이다. 물론 얼음을 이용한 고밀도 축열은 축열조 부피를 축소시켜 냉열축열 시스템이 보급되는데 크게 기여하였고, 축열조 부피축소에 따른 열손실의 감소와 일정한 온도(대체로 0℃ 부근)의 냉열공급이라는 부가적인 이익을 실현해 주고는 있다. 그러나 빙축열 시스템을 냉동기 자체만을 기준으로 판단했을 때는 수축열 시스템에 비해서 에너지절약 효과가 뒤떨어지는 것이 사실이다. 빙축열 시스템의 경우 제빙을 위해 낮은 증발온도를 유지해야 하기 때문에 냉동기의 성적계수가 수축열 시스템에 비해 약 20%정도 낮을 수밖에 없기 때문이다. 또한 저장된 냉열을 부하에 공급할 때에도 일반적으로는 저장된 0℃ 부근의 냉열을 직접 이용하는 것이 아니라, 별도의 열교환기를 거쳐 7℃ 정도의 냉수를 다시 만들어 이용하기 때문에 이와 관련된 에너지 손실을 피할 수 없게 된다.

따라서 빙축열 시스템에서만 얻을 수 있는 낮은 온도의 냉열원을 직접 이용할 수 있는 대온도차 공조(저온급

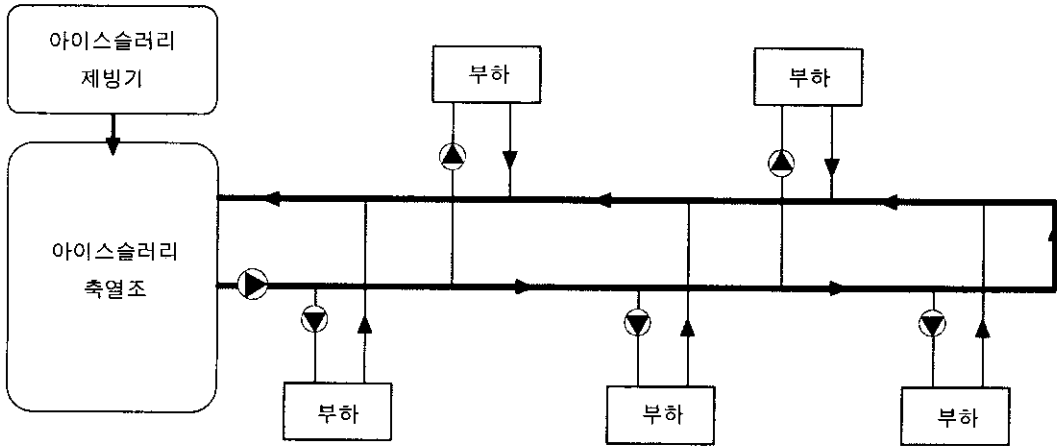
기 공조)를 채용하거나 산업체에 응용하지 않고서는, 빙축열 시스템의 장점을 충분히 활용한다고 할 수 없다. 제빙된 얼음입자를 배관을 통하여 부하측에 직접반송하고 대온도차를 충분히 이용하려는 아이스슬러리 직접반송 시스템은, 이러한 이유로 빙축열 시스템을 가장 효과적으로 활용하는 방법이라고 할 수 있다.

직접반송의 장점

유동성을 갖고 있는 아이스슬러리의 직접반송은 동일한 배관을 이용할 때 열수송 능력을 크게 증가시키며, 동일한 열수송 능력을 갖는 조건에서는 수송유량이 작아지므로 배관 직경이나 운송동력의 큰 감소를 기대할 수 있다. 예를 들어, 4℃ 물을 이송하여 부하측에서 12℃ 까지 이용할 경우 수송되는 열량은 8kcal/kg이지만, IPF(아이스슬러리 내 얼음의 질량비율, 빙분율) 30%인 아이스슬러리를 같은 조건으로 이송하는 경우에는 36kcal/kg의 열수송 능력을 갖게 되는 것이다. 만약 같은 조건에서 냉수수송의 경우와 동일한 냉열을 수송하고자 한다면, 아이스슬러리의 수송유량은 약 23%만으로도 충분하므로 이에 비례하여 배관크기나 반송동력을 줄일 수 있다.

냉열을 먼 거리까지 운반해야 하는 지역냉방 시스템에서의 아이스슬러리 직접반송은 더욱 큰 의미를 갖게 된다. 지역냉방 시스템에 냉수를 이용하는 경우에는, 수송 배관을 통한 열손실에 의해 부하측에 도달했을 때의 냉수온도가 냉방에 이용가능한 온도인지 의심스러울 수 있기 때문에, 냉열의 수송량과 수송거리에 한계가 있을 수밖에 없다. 그러나 이 시스템에 아이스슬러리 직접반송 개념을 도입할 경우에는, 얼음이 존재하는 한 냉열의 공급온도를 0℃로 유지할 수 있게 되고 전술한 바와 같이 열수송량도 크게 증가시킬 수 있어, 냉열의 수송량과 수송거리의 한계를 크게 확대시킬 수 있게 된다.

즉, 아이스슬러리 직접반송 시스템은 냉열수송 밀도의 증대에 따른 배관설비(시설비용)의 절감, 반송동력 저감에 의한 운전비용의 절감, 냉열수송의 장거리화 등을 도모할 수 있으며, 이것은 지역냉방 시스템의 광역화는 물



[그림 6] 아이스슬러리 직접반송 시스템 개념도

론 부하와 거리가 멀어 그 이용이 제한되었던 미이용 에너지의 활용을 촉진시키게 된다. 1990년대 초 일본에서 냉열수송량 33,000RT, 수송거리 1km인 경우의 지역냉방 시스템에 아이스슬러리 직접반송을 도입할 때의 경제성을 살펴본 예를 보면, IPF 30%인 경우 시설비는 냉수시스템의 1/2 이하이고 운전비는 1/4 정도로 계산되고 있다.

직접반송에서의 문제점

• 유동형태

일반적인 고액이상류(固液二相流)와는 달리 얼음입자와 물(또는 브라인 수용액)이 섞인 아이스슬러리는, 밀도차가 아주 작고 경우에 따라 얼음입자가 서로 응집하거나 배관에 부착하여 얼음덩어리로 성장하기 때문에, 특이한 유동형태를 보여준다. 또한 이러한 유동형태는 IPF, 제빙방법에 따른 얼음입자의 크기, 첨가제에 따른 빙질, 제빙된 후 또는 정체된 후 경과시간, 배관의 종류 및 내경, 배관의 형태(수평, 하향, 상향, 엘보우, 티, 분기 등) 등에 따라 달라지는 것으로 알려져 있기 때문에, 유동형태를 단상유동과 같이 상사법칙에 의해 간단하게 설명하는 것은 매우 어려운 실정이다.

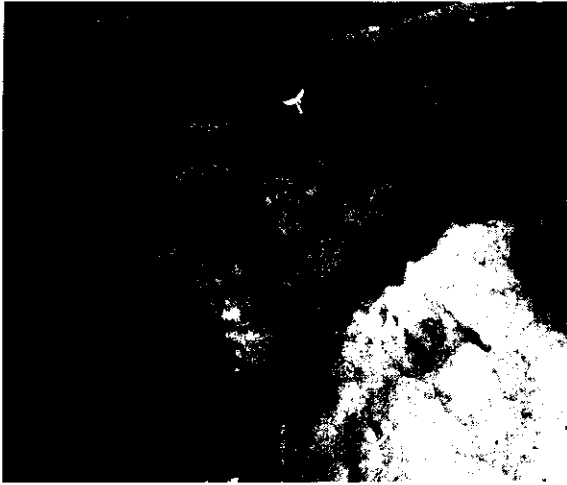
• 관내폐색(管内閉塞)

아이스슬러리의 직접반송에서 가장 우려되는 현상은 배관내에서 얼음이 응집(agglomeration)하여 배관을 밀폐시키는 이른바 관내폐색이다. 이러한 관내폐색은 냉열수송의 중단을 초래하여 전체 시스템의 안정성과 신뢰성을 상실하게 함으로써, 아이스슬러리 직접반송 시스템의 실용화를 저해하는 주 요인이 되고 있다.

얼음입자에 의한 관내폐색은 IPF가 높거나 유속이 작은 경우, 또는 어떠한 이유로 유동이 정체되는 부분에서 발생하기 쉽다는 것이 실험적 연구를 통해서 알려져 있다. 즉, 어떤 원인에 의해 얼음입자가 정체하기 시작하면 뒤따르던 얼음입자가 부착하여 응집되기 시작하고, 이것이 얼음덩어리(밀압형)가 되어 관을 밀폐시킨다는 것이 관내폐색에 대한 일반적인 설명이다. 따라서 아이스슬러리 직접반송 시스템에서는 해당 시스템에서의 한계 IPF를 확인하고, 배관내에 유동의 정체가 일어날 부분을 최소화하는 것이 중요한 설계요소 중의 하나이다. 배관내에서는 일반적으로 30% 이하의 IPF 하에서 운전해야 안전하다는 것이 알려져 있다.

• 축열조로부터의 추출

야간에 제빙되어 축열조에 저장된 아이스슬러리는 일



[그림 7] 축열조 상부에 쌓여 굳어진 아이스슬러리

반적으로 축열조 상부에 모이게 되고 여기서 서로 응집하여 큰 얼음 덩어리 형태를 이루는 것이 보통이다. 특히 공기중에 노출된 아이스슬러리는 주변 공기내 수증기를 동결시키거나 주변의 물과 함께 융해와 응고를 반복하면서 점차 굳은 얼음덩어리로 변한다고 알려져 있다. 따라서 축열조 상부에 모여있는 얼음입자를 어떻게 효과적으로 분포시키고 축열조 외부로 추출하는냐 하는 것은 매우 중요한 기술중의 하나이다. 이를 위해 축열조 내 교반기를 설치하거나 얼음과 물을 따로 추출하여 축열조 외부에서 서로 섞는 방법 등이 제안되고 있으나, 이것이 실제 현장에서 사용되는 큰 규모의 축열조에서 어느 정도 가능한지에 대해서는 아직 많은 연구가 필요한 실정이다.

• IPF의 측정

배관내 아이스슬러리의 IPF를 정확하고 간단하게 측정하는 방법도 제어와 관련하여 반드시 필요한 기술이다. IPF를 측정하는 고전적인 방법으로는 수직배관에서

의 수력구배를 측정하여 산출하는 방법이 있는데, 이 방법은 IPF에 따라 유체의 평균밀도가 변하여 수직흐름에 있어서 부력과 압력손실과의 균형에 영향을 미치는 점을 이용하는 방법이다. 최근에 연구되어 활용되고 있는 전기전도도법은, 물과 얼음의 전기전도도에 큰 차이(물과 얼음의 체적전기저항률은 각각 $83\Omega\text{m}$, $10^7\sim 10^8\Omega\text{m}$)가 있는 점을 이용하여, 아이스슬러리의 전기전도도를 측정해서 IPF를 계산하는 방법이다. 이 밖에 질량유량계를 이용하여 유체의 밀도를 측정함으로써 IPF를 산출하는 방법 등이 알려져 있다.

앞으로의 과제

아이스슬러리 직접반송을 효과적으로 수행하기 위해서는, 우선 유동성이 좋으며 높은 IPF에서도 응집되지 않는 아이스슬러리를 경제적으로 제조할 수 있어야 한다. 경제성 측면에서는 물론 공조기기의 부식과 누출시 환경오염을 방지하기 위해서 브라인과 같은 첨가제를 사용하지 않으면 좋지만, 불가피한 경우에도 장기적 안전성이 확보된 첨가제를 사용해야 할 것이다. 또한 얼음입자를 고르게 분포시킨 상태로의 저장 및 추출에 관한 기술, 각종 형태의 배관내에서 관내폐색 없이 아이스슬러리를 반송하는 기술, 분기배관에서의 아이스슬러리 분배기술, 얼음의 비율을 측정하는 IPF 측정기술, 아이스슬러이용 열교환기 기술, IPF 제어기술 등이 모두 갖추어져야 한다. 한편 이와 같은 아이스슬러리 직접반송 시스템 자체에 대한 연구개발 외에도, 직접반송 시스템을 효과적으로 활용할 수 있는 저온급기 등 대온도차 공조에 대한 연구개발도 병행해 나아가야 한다.

아이스슬러리의 직접반송이 단지 학술적인 관점에서 연구되는 것을 벗어나 실제 산업체나 공조부분에 널리 이용되기 위해서는, 앞으로 더 많은 관심과 다양한 실험적 연구개발이 수행되어야 하며, 아울러 신뢰성 있는 기기의 개발과 경제성 확보 등이 필요하다고 하겠다. ㉔