

아이스슬러리를 이용한 냉열수송

물 또는 수용액에 작은 얼음입자가 섞인 아이스슬러리를 배관을 통해 직접 수송하는 효과적인 냉열수송 기술과 이와 관련된 연구개발 동향 및 이용사례를 소개하고자 한다.

이 동 원

아이스슬러리를 제빙하여 냉열을 저장하는 아이스슬러리형 빙축열 시스템과, 제빙된 아이스슬러리를 직접수송하는 방식에 대해서 지난 6월호에 '아이스슬러리형 빙축열 시스템과 그 이용'으로 이미 소개한 바 있다. 여기서는 아이스슬러리형 빙축열 시스템의 특징, 그리고 직접수송의 장점과 이때 나타날 수 있는 문제점 등을 간략하게 설명하였는데, 본 고에서는 이러한 아이스슬러리의 직접수송에 대한 보다 자세한 내용과 외국의 실제 적용사례를 소개하고자 한다.

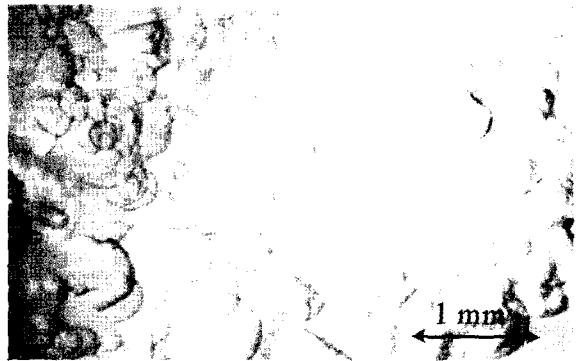
아이스슬러리에 의한 냉열수송

개요

아이스슬러리는 물 또는 수용액에 작은 얼음입자가 섞인 2상유체(二相流體)이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 얼음의 입자는 수십 μm 에서 수 mm 의 크기를 갖는 것이 일반적이며, 유동의 안정성이 입증되는 경우 수십 mm 의 크기를 갖는 얼음이 이용되기도 한다. 아이스슬러리는 그 제빙방법에 따라 물 또는 수용액을 이용하게 되는데, 활용측면에서는 물만을 이용하는 방법이 바람직하지만 융점을 낮추고 제빙의 안정성과 아이스슬러리의 유동성을 증가시키기 위해서 5~10%의 첨가제를 섞는 것이 보통이다.

아이스슬러리는 포함된 얼음의 질량비율(빙충진율)에 따라 갖고 있는 냉열량이 일반 냉수보다 크다는 장점이 있으며, 그림 2, 3과 같이 유동성을 갖고 있어 일반배관을 통해 직접수송할 수 있다는 큰 특징이 있다. 이와 같이 아이스슬러리를 배관을 통해 직접수

송할 경우 단위유량당 냉열수송 능력을 크게 증가시킬 수 있는데, 바꾸어 말하면 배관 직경이나 펌프동력을 크게 줄여도 동일한 냉열수송이 가능하다는 것이다(그림 4). 이 때문에 아이스슬러리 직접수송 기술은 건물의 냉방뿐만 아니라 지역냉방 시스템이나 식품제조공정 또는 화학공정과 같은 각종 산업용 냉각 시스템에 적용될 수 있으며, 기타 농·수산업, 유통



[그림 1] 아이스슬러리의 확대사진



[그림 2] 유동성이 있는 아이스슬러리

이 동 원 한국에너지기술연구원(dwlee@kier.re.kr)

용, 의료용 냉각장치에도 그 이용분야를 확대할 수 있을 것으로 제안되고 있다.

냉열수송에 따른 장점

현재 국내에서 이용되고 있는 공조용 빙축열 시스템은 에너지의 효율적 이용기이라고 할 수는 있어도 에너지 절약기이라고 하기에는 무리가 있다. 이것은 냉방에 필요한 냉열원을 얻는데 과도하게 낮은 냉열을 생산하기 때문인데, 낮은 온도의 냉열을 생산하는 것은 냉동기의 성능을 그 만큼 감소시키는 원인이 되기 때문이다. 물론 야간의 낮은 응축온도에 따른 냉동기의 효율상승과 냉동기의 정격운전 등으로 전반적인 에너지 절약이 가능하다는 점도 있으나, 이러한 이득이 낮은 증발온도와 외기로의 열손실 그리고 기타 추

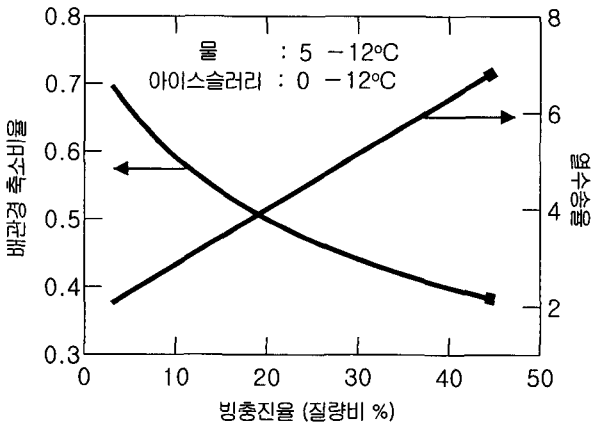
가되는 소비동력을 상쇄시킬 수 있는 정도인지는 의문이다. 따라서 저렴한 심야전기 요금과 설치지원금과 같은 한국전력의 지원이 축소되는 방향으로 정책이 변경된다면, 빙축열 시스템의 장점은 크게 약화될 것이 분명하다. 그러나 아이스슬러리에 의한 냉열수송은 이와는 달리 에너지의 효율적 이용과 함께 에너지 절약을 동시에 실현시켜주는 특징을 갖고 있다.

일반적으로 냉방이나 냉각에 필요한 에너지는 냉열의 생산에 소비되는 에너지와 생산된 냉열을 부하에 공급하기 위해 필요한 운반 에너지로 구분할 수 있다. 아이스슬러리의 생산에 필요한 에너지는 다른 빙축열 시스템과 마찬가지로 일반적인 냉방 에너지보다 많이 소모되는 것이 사실이지만, 전술한 바와 같이 동일한 양의 냉열을 운반하는 데에는 훨씬 적은 양의 에너지

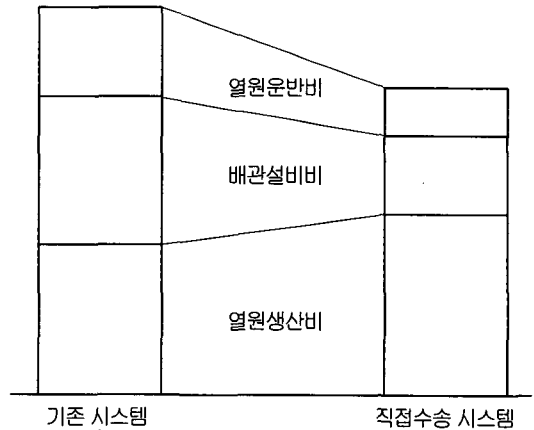


(a) 0% (b) 4% (c) 8%

[그림 3] 브라인 농도에 따른 아이스슬러리의 유동성 변화



[그림 4] 빙혼진율에 따른 배관경계의 축소비율(수송열량과 유속 동일) 및 수송열량의 증가비율(유량 동일)



[그림 5] 직접수송에 따른 장점

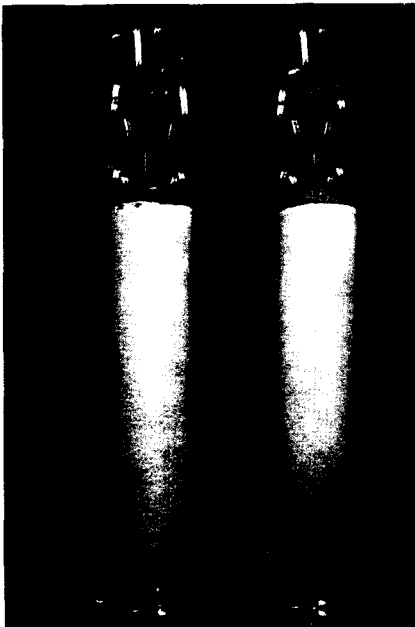
가 소비되어 에너지 절약에 기여할 수 있는 것이다. 또한 지역냉방 시스템과 같이 냉열원 생산설비와 부하 사이의 거리가 먼 경우에는 그 사이의 배관설비 비용이 큰 비중을 차지하는데, 아이스슬러리를 이용하여 냉열수송을 하는 경우에는 배관비용도 크게 감소하므로, 그림 5에서와 같이 전체적인 설비비 및 운전비가 감소하는 이익을 실현할 수 있다.

냉열수송에서 고려해야 할 사항

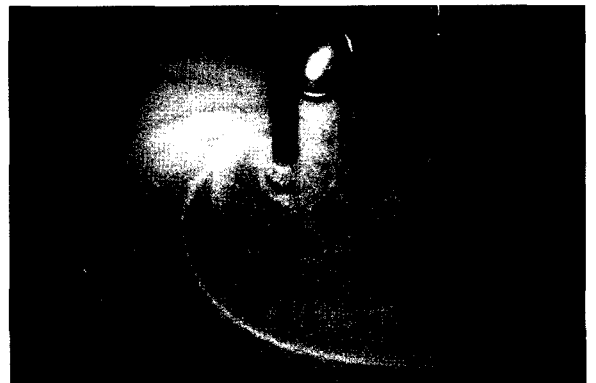
아이스슬러리에 의한 냉열수송 시스템의 주요 구성 요소는 제빙기, 축열조 그리고 분배 시스템이라고 할 수 있다. 제빙기는 2중 열교환 방식의 증발기 내부 또는 외부에 브라인(또는 에탄올) 수용액을 통과시키면서 스크레이퍼(scraper)로 증발기 벽면을 긁어주거나 휘저어주는(wiper type이라고도 함) 방식이 일반적으로 많이 활용되고 있으며, 상용화된 대부분의 제빙기는 이러한 방식을 채택하고 있다. 최근에 주목받고 있는 제빙방식은 일본에서 활발하게 연구되고 있는 과냉각수 이용 방식인데, 이 방식은 첨가제 없이

순수한 물(수도수)을 이용하여 제빙할 수 있다는 큰 장점이 있는 반면, 제빙기 내에서 물이 얼어버리는 관내동결을 방지하기 위한 여러 가지 제어가 필요하다는 단점도 함께 갖고 있다. 이 밖에도 상용화된 하베스트(harvest)형 제빙기에서 생산된 얼음조각을 잘게 부수어 냉열수송에 이용하는 방법이 제안되고 있으며, 진공이용형, 냉매직접분사형 등의 아이스슬러리 제빙기가 연구개발되고 있다. 제빙기에서 가장 중요한 사항은 고효율의 안정적인 제빙이 이루어져야 한다는 점과 제빙기의 경제성이 확보되어야 한다는 점이다.

아이스슬러리를 직접수송하기 위해서는 축열조 내에서 아이스슬러리가 유동성을 계속 유지하는 것이 필요하다. 아이스슬러리는 움직이지 않고 정체되는 경우 그림 6에서 보는 바와 같이 부력에 의해 얼음입자와 물 또는 수용액이 서로 분리되어서, 적절한 빙층진율(IPF)을 갖는 아이스슬러리를 추출할 수 없기 때문이다. 따라서 그림 7과 같이 축열조내 교반기 설치가 거의 필수적이며, 여의치 않은 경우 외부에 펌프를 설치하여 축열조 내 아이스슬러리를 계속 순환시키면서 균일한 분포를 갖도록 할 필요가 있다. 이때는 아이스슬러리의 유출 또는 유입방향이나 위치 등이 중요한 설계요소이다. 축열조내 정체된 아이스슬러리는 점점 그 크기가 커지고 굳어지는 경향을 보이므로, 어떤 경우에도 축열조내 아이스슬러리가 정체되지 않도록



[그림 6] 정체된 아이스슬러리의 분리



[그림 7] 축열조 내에서 교반되고 있는 아이스슬러리

록 하는 것이 중요하다. 또한 제빙기에 얼음입자가 섞인 아이스슬러리가 유입되면 제빙기의 안정성이 떨어지는 것이 일반적이므로, 물 또는 수용액만이 존재하는 영역이 축열조내에 확보되어야 한다는 점도 고려해야 한다.

아이스슬러리를 부하측에 수송하는 분배 시스템은 배관과 펌프, 그리고 각종 배관부속 및 밸브 등으로 구성된다. 전술한 바와 같이 아이스슬러리를 이용하여 냉열을 수송하는 경우 배관의 크기를 감소시킬 수 있고, 수송유량 및 배관의 구경 감소에 따라 펌프동력 및 열손실을 줄일 수 있으므로, 장거리 냉열수송에 있어서는 아이스슬러리를 이용하는 것이 더욱 유리하게 된다. 아이스슬러리의 수송에 있어서 일반적인 원심펌프나 용적식펌프를 그대로 이용하는 경우 문제가 있다는 보고가 없고, 배관 또한 일반적인 금속 또는 플라스틱 재질을 그대로 사용할 수 있다. 엘보나 티 등 기존 배관부속을 사용할 때 곤란한 점이 알려진 바 없으며, 볼 밸브나 버터플라이 밸브 등도 무리 없이 사용 가능한 것으로 알려져 있다. 다만 니들 밸브나 글로브 밸브 등 내부 유로가 복잡한 배관부속은 사용하지 않는 것이 바람직할 것이다. 또한 축열조에서와 마찬가지로 배관 내에서도 아이스슬러리가 정체되는 부분이 없도록 하는 것이 중요하다.

관련된 연구개발 동향 및 이용사례

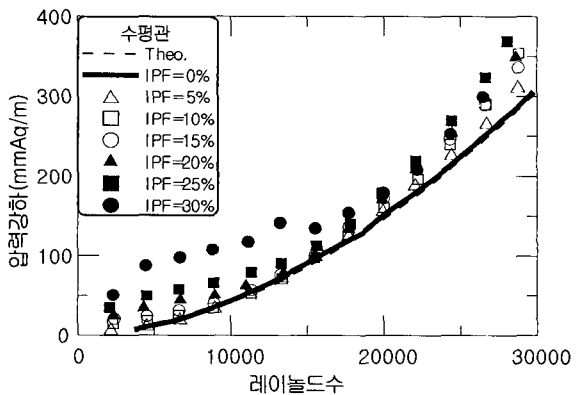
연구개발 동향

오래 전부터 각종 고액이상류에 대한 연구를 통해서 얼음입자가 섞인 아이스슬러리 관련 연구가 수행된 바 있지만, 현실적인 요구에 의해 수행된 본격적인 아이스슬러리 직접수송 연구는 1980년대 중반 제철 작업을 위한 연구로부터 시작됐다고 짐작된다. 그 이후 다양한 아이스슬러리 제빙기가 개발되어 보급되면서 관련된 연구개발이 이루어졌으며, 특히 이러한 연구는 일본과 유럽 그리고 북미를 중심으로 활발하게 진행되고 있다. 이들의 연구는 아이스슬러리 제빙기 개발과 함께 아이스슬러리의 직접수송과 관련된 연구가 주를 이루며, 특히 지역냉방 등 아이스슬러리에 의

한 냉열수송을 실현시키는 내용의 연구를 추진하고 있다. 1999년부터 IIR/IIF의 지원을 받아 아이스슬러리 국제 학술회의가 매년 개최되고 있으며, 특히 올해는 5월과 11월 두 차례에 걸쳐 스위스 루체른과 일본 오사카에서 학술회의가 개최되었다.

우리나라에서는 1990년대 중반 이후 한국에너지기술연구원, 한국생산기술연구원, 한국과학기술원에서 다양한 아이스슬러리 제빙기가 연구되었으며, 미국 뮐러사의 아이스슬러리 제빙기(ORE)가 수입·판매되기 시작하였다. 국내 기업에서도 이러한 제빙기의 국산화가 시도되었고 현재 3~4개 기업이 아이스슬러리형 빙축열 시스템을 판매하고 있다. 최근에는 아이스슬러리의 직접수송과 관련된 연구가 한국에너지기술연구원과 일부 대학에서 수행되고 있다.

아이스슬러리의 직접수송과 관련된 연구개발은 국내외를 막론하고 주로 아이스슬러리의 유동특성 및 전열특성과 관련된 것이다. 아이스슬러리는 CWM(석탄+물 혼합물)과 같은 일반적인 고액2상류와 달리 고상과 액상간의 밀도차가 크지 않고 얼음입자 상호간에 부착성이 있으므로, 배관내 안정적인 수송을 위한 다양한 종류의 실험이 계속적으로 진행되어 왔다. 유동특성에 대한 연구는 주로 아이스슬러리가 수송되는 배관의 압력손실을 측정하고 이 결과를 액상(液相)의 경우와 비교하는 방법으로 수행된다. 그러나 2상유동의 특성상 실험결과 사이에 큰 차이



[그림 8] 아이스슬러리의 IPF와 유량에 따른 압력손실

를 보이는 경우도 많은데, 대체적인 유동특성 연구결과는 저유량인 경우 액상인 경우보다 배관 압력손실이 증가하며 고유량인 경우에는 IPF에 관계없이 거의 비슷하다는 결과이다. 그러나 저자의 실험결과로는 고유량에서도 IPF에 따라 압력손실의 증가가 관찰되었으며(그림 8), 특히 저유량에서는 IPF 20% 이상에서 압력손실이 크게 증가함을 확인할 수 있었다. 이러한 연구결과와의 차이는, 대체로 연구에 이용된 아이스슬러리의 특성이 서로 다르기 때문인 것으로 판단된다.

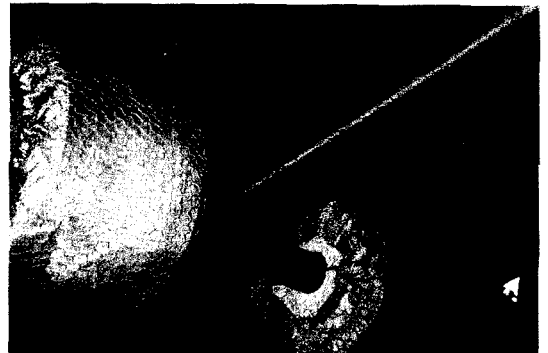
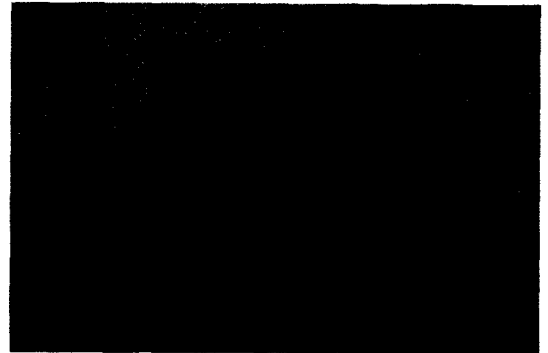
아이스슬러리의 유동특성 연구에서 다루는 또 하나의 과제는 전술한 바와 같이 관내밀폐(管内密閉)에 대한 것이다. 일반적인 배관에서는 크게 문제되지 않는 것으로 알려져 있으며, 단지 수직분배관이나 정체 발생이 가능한 배관 또는 유로가 복잡한 배관부속에서 관내밀폐가 보고되고 있다. 그러나 배관 또는 축열조의 극히 일부분에서 아이스슬러리 정체가 발생하는 경우, 처음에는 이에 따른 유동특성 변화가 거의 나타나지 않아 간과하기 쉽지만, 시간이 경과할수록 이 부분이 성장하여(얼음입자의 응집이 증가함) 결국 원활한 유동에 큰 지장을 주는 상황이 발생할 수 있으므로 이에 유의해야 한다.

아이스슬러리의 전열특성에 대한 연구도 유동특성 연구에서와 같은 방법으로 진행된다. 전술한 바와 같이 동일한 양의 냉열을 수송하는 경우 아이스슬러리

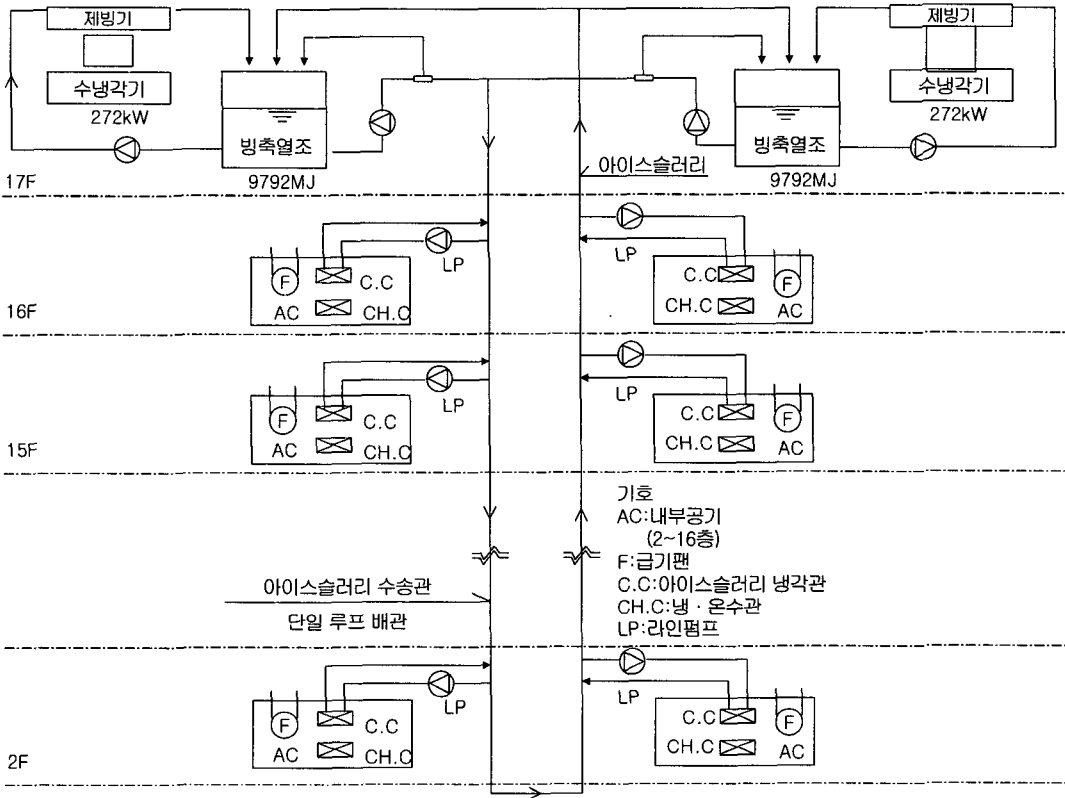
를 이용하면 수송유량을 크게 줄일 수 있는데, 이것은 외부로의 열전달이 그만큼 감소한다는 것을 의미한다. 이러한 현상은 장거리 냉열수송 측면에서는 유리한 반면, 실제로 냉열을 회수하는 열교환기 부분에서는 오히려 불리한 조건이 된다. 유량이 같은 조건하에서 아이스슬러리와 물 또는 수용액만의 열전달 성능을 비교하는 연구가 최근에 이루어지고 있는데, 이 결과도 서로 차이가 나는 경우가 많다. 아이스슬러리의 경우 액상만인 경우보다 열전달 계수가 약간 감소한다는 보고가 있는 반면, 약 2~3배 정도 열전달 계수가 증가한다는 보고도 있다. 이러한 차이는 전술한 바와 같이 연구에 이용된 아이스슬러리의 특성이 서로 다른 점과 유량과 IPF에 따른 유동형태 변화에 기인한 것으로 짐작된다.



[그림 9] 일본 교토역 주차장 아래의 아이스슬러리 빙축열조



[그림 10] Capcom R&D 빌딩(일본 오사카) 및 아이스슬러리 배관



[그림 11] Capcom R&D 빌딩의 아이스슬러리 직접수송 시스템도

이용사례

냉열을 효과적으로 수송할 수 있는 아이스슬러리 직접수송 시스템은 건물의 냉방공조는 물론 각종 산업용 냉각 시스템에 적용되고 있다. 아직은 직접수송에 따른 안정성과 신뢰성이 완전하게 입증되지는 않았기 때문에, 서울 테크노마트 빌딩에서와 같이 아이스슬러리를 생산하고 축열조에서 녹이면서 건물의 냉방공조에 활용하는 예가 많다. 하지만 앞으로 관련된 연구개발이 꾸준히 진행되고 신뢰성 있는 결과가 도출된다면, 아이스슬러리의 직접수송에 따른 냉열수송과 활용이 다방면에서 이루어질 것이다.

그림 9는 일본 교토역 주차장 아래의 아이스슬러리 빙축열조이다.

1990년대 중반까지 시범적으로 아이스슬러리 직

접수송 시스템을 운용하던 일본에서는 최근 건물냉방에 직접 적용하는 예가 증가하고 있다. 그림 10, 11에서 보는 바와 같이 타 건물보다 냉방부하가 큰 17층 규모의 건물에 최소구경 30mm 배관을 이용해서 아이스슬러리를 부하측까지 직접수송하여 냉방에 활용하고 있는 예가 있다. 또한 직접냉방은 아니지만 냉방에 이용되는 2차냉매의 응축을 위하여 아이스슬러리를 최대 약 100m까지 수송하는 건물이 있으며, 이 외에 유가공 시설 등 산업용 냉각 시스템에 아이스슬러리 직접수송 시스템을 이용하는 예가 있다.

구미에서도 아이스슬러리를 이용한 냉열수송은 산업용으로 또는 지역냉방용으로 활용되거나 시범운영되고 있다. 덴마크(DTI), 독일, 스위스 등 유럽에서는 주로 산업용 또는 저장 및 유통용으로의 활용가능성

에 관심을 기울이고 있고, 캐나다와 미국은 아이스슬러리를 지역냉방 시스템에 도입하기 위한 연구가 진행되고 있다. 미국 Minneapolis에 소규모 지역냉방 시스템이 시범적으로 구축 중에 있으며, Argonne에는 대규모 상업용 지역냉방 시스템이 계획되어 있다. 또한 IEA(International Energy Agency)의 지역냉난방 프로그램, 미국의 ANL(Argonne National Lab.), Wisconsin대학, 캐나다의 NRC(National Research Council Canada) 등에서 아이스슬러리를 이용한 냉열수송 연구가 진행되고 있다.

맺은말

아이스슬러리를 이용한 냉열수송은 전술한 바와 같이 기존 방식에 비해 많은 장점이 있는 반면, 아직은 신뢰성이 완전하게 확보되지 않았다고 할 수 있다. 또

한 국내에서는 아이스슬러리 관련 연구가 아직 미진한 상태이며, 특히 직접수송과 관련된 연구는 이제 막 시작하고 있는 초기단계이다. 따라서 아이스슬러리를 이용한 냉열수송을 여러 분야에 적용하기 위해서는 기본적인 연구를 통해 실용성 있는 데이터를 확보하는 것이 우선적으로 요구되며, 이를 바탕으로 산업분야의 냉장·냉각 시스템 그리고 소규모 지역냉방 시스템에 시범운용하는 것이 필요하다고 판단된다. 기술선진국의 사례를 따라 아이스슬러리 직접수송 시스템을 성급하게 설치·운전하는 경우, 기본적인 데이터와 기술적 경험의 부족으로 여러 가지 문제를 야기시키고 인식만 나빠질 수 있기 때문이다.

앞으로 우리나라에서도 에너지를 효율적으로 이용하며 에너지 절약 효과도 있는 아이스슬러리를 이용한 냉열수송이 활발하게 연구개발되고 보급되기를 기대해본다. ●