

마이크로캡슐 잠열재 이용 기술 현황

열저장 및 열수송 측면에서 장점을 가진 기능성 유체인 마이크로캡슐 잠열재 슬러리의 특징 및 국내외 이용 기술 현황을 소개하고자 한다.

최종민

한밭대학교 기계공학부 (jmchoi@hanbat.ac.kr)

황윤제 / 편집위원
LG 전자 (hyj@lge.co.kr)

이재구

한국에너지기술연구원 (jaegoo@kier.re.kr)

머리말

전세계적으로 주 에너지원인 화석연료의 고갈과 환경적 측면에서 지구온난화의 주범인 이산화탄소 발생을 감축하기 위한 협약이 진행됨에 따라 에너지 절약의 중요성이 증대되고 있다. 이에 따라 화석 연료의 사용을 최소화하면서 대체연료와 도시 및 산업 폐열을 새로운 에너지원으로 활용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 새로운 에너지 개발보다는 기존 에너지를 효율적으로 이용하기 위한 에너지 절약에 관한 제품 및 기술 개발이 이루어지고 있다. 특히, 국내의 에너지 이용현황을 공급측면에서 살펴보면 국내 전력생산이 원자력 발전설비 및 대형 발전소에 집중되어 있으므로 부하 변동에 따른 설비운전과 에너지 생산량 및 공급량 조절 등에 많은 어려움이 있으며, 에너지 수요측면에서는 하절기 냉방 및 동절기 난방 사용의 급격한 증가로 인해 전력부하가 일정시기에 집중·편재되는 문제점을 가지고 있다. 따라서 전력부하 평준화를 위한 열 저장 및 수송기술의 필요성이 심각하게 대두되고 있는 동시에 냉·난방수요의 현격한 증가에 따라 기존 시스템의 변경 없이도 공급열량을 보다 증가시킬 수 있는 신기술의 개발도 함께 요구되는 실정이다.

현재까지 냉·난방 시스템에서는 주로 현열에 의한 축열 및 열 수송방식을 채택하고 있으므로 그 효율 면에서는 어느 정도 한계에 이르렀는데, 이러한

현열 온도차를 이용하는 수축열 방식은 축열밀도가 작아 수송 및 저장량이 증가하게 되고, 열저장조의 대형화 및 배관크기 증가에 따른 설비비용이 증가되는 단점을 가지고 있다.

현열사용에 따른 이러한 한계점들을 극복하기 위하여 잠열을 이용한 열 저장 및 수송 매체와 시스템 적용에 관한 연구가 최근 대학 및 연구소를 중심으로 활발하게 진행되고 있으나 대부분의 잠열재 활용 기술은 정적인 축열개념에 국한되어 있다. 특히, 최근에는 에너지원의 다양화에 따라 도시 및 산업 폐열이나 하천수 및 해수와 같은 온도차 에너지 이용의 필요성이 증대됨에 따라 축열뿐만 아니라 열수송의 중요성이 증대되고 있으나 현재까지는 주로 물을 열매체로 사용하는 현열수송 체계를 따르고 있어 에너지 이용 효율을 획기적으로 향상시키는 데에는 기술적인 한계가 있다.

본 고에서는 잠열물질이 가지고 있는 높은 축열 특성을 갖고 열수송이 가능한 마이크로캡슐 잠열재 슬러리의 특징과 국내외의 기술 현황을 소개하고자 한다.

잠열재를 이용한 열수송 기술

축열재로서 상 변화시 얻어지는 잠열을 가장 쉽게 이용할 수 있는 것이 물이다. 그러나 물은 잠열에너지가 큰 반면에 상 변화시 과냉각 현상이 크게 나타나고 부피의 변화가 심하다. 물의 단점을 보완하기

위한 축열재로서 무기수화물이나 유기물을 이용한 다양한 종류의 상 변화 물질이 이용되고 있다. 그림 1은 잠열을 이용한 축열 냉방시스템의 개략도로써 축열을 위해서는 상 변화 물질을 용기에 담아 열교환을 시키는 것이 가장 일반적인 방법으로 이용되고 있다. 즉, 저장된 열을 이용하기 위해서는 작동유체가 축열조로부터 열을 회수하여 수요처에 공급하게 된다. 열을 회수하는데 열교환기의 효율만큼 열손실이 발생하게 된다. 특히 최근에는 미활용에너지를 회수하여 사용함으로써 에너지의 효율적 이용을 통한 국가적 에너지 절약의 중요성이 증대됨에 따라 잠열을 이용한 고밀도의 축열 및 수송 능력을 갖는 기능성 열매체에 관한 연구 및 개발이 수행되고 있다.

기능성 열유체에 관한 연구는 수송시 발생하는 배관 내 마찰저항의 감소를 통하여 소비동력을 저감하기 위한 첨가제 이용 연구로부터 시작되었다. 최근에는 고밀도 축열기능을 열 수송 매체에 부여하기 위해 고-액상변화 물질을 작동유체와 혼합한 형태로 이용하는 기능성 열유체에 관한 기술개발에 관심이 집중되고 있으며, 아이스 슬러리, 마이크로 에멀전, 액체수화물 슬러리 및 마이크로캡슐 잠열재 슬러리가 대표적인 잠열을 이용한 기능성 열유체이다.

아이스 슬러리

아이스 슬러리를 이용하는 방법이 잠열형 열유체 기술의 대표적인 예로써 이는 얼음을 미세한 조각으로 조제하여 물과 혼합한 형태의 슬러리를 사용하는 기술인데, 얼음 농도가 25% 정도인 슬러리를 사용하

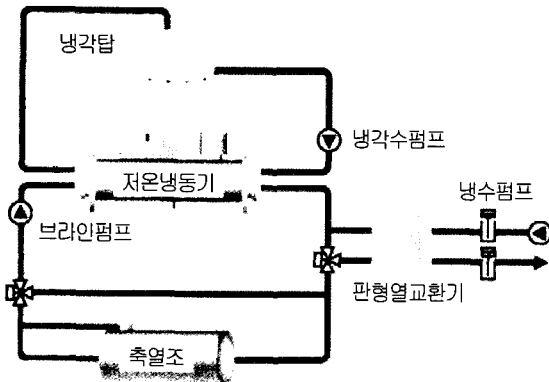
는 경우 얼음의 잠열과 물의 현열을 합치면 수축열 방식보다 2~4배의 열을 수송할 수 있게 된다. 하지만, 아이스 슬러리는 운전온도 범위에서 높은 점도를 가지고 있어 수송과정에 막대한 동력손실이 수반되며 반복되는 상변화를 통하여 자체 응집 및 상 분리현상 등이 발생되거나 관 내벽에 고착되어 장치의 부식을 촉진시키는 등의 문제점들이 야기될 수 있어 실용화에 많은 어려움이 있다.

마이크로 에멀전

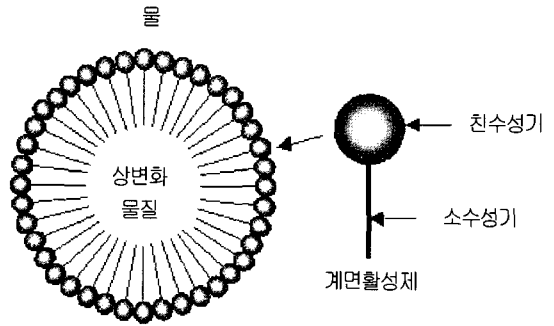
아이스 슬러리와 동일한 원리로 물과 혼합되지 않는 N-alkane계열의 잠열 축열물질을 수용액상에서 분산하여 얻은 것을 마이크로 에멀전이라 한다. 물에서 소수성 물질을 분산시키기 위하여 소량의 유화제를 사용하게 되는데, 유화제는 그림 2와 같이 친수성기와 소수성기로 구성되어 연속상 물질인 물 내부에서 소수성 물질을 내부 물질로 하는 분산상을 형성한다. 마이크로 에멀전은 얇은 유화제 피막의 손상으로 물질간에 뭉치는 현상이나 배관벽에 부착되는 현상이 발생한다.

액체수화물 슬러리

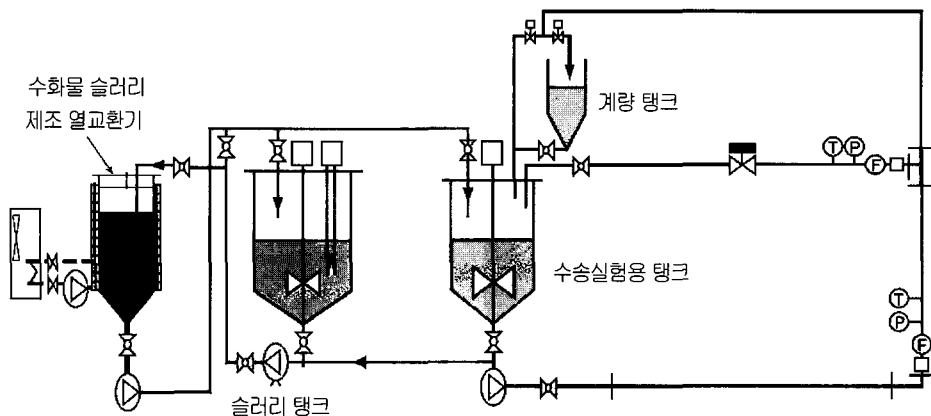
액체수화물 슬러리는 Tetra-n-butyl ammonium 염과 물이 혼합 제조된 슬러리로서 Tetra-n-butyl ammonium 염과 물이 45% 대 55%의 체적비로 혼합될 경우 117 J/g의 열량을 얻을 수 있다. 슬러리 조제과정을 통하여 40~70 m 크기로 조절된 수화물 슬러리 입자를 얻을 수 있는데, 냉각된 슬러리를



[그림 1] 축열 냉방시스템 개념도



[그림 2] 상변화물질로 형성된 미셀(Micelle)



[그림 3] 수화물슬러리 제조 및 열 수송시스템

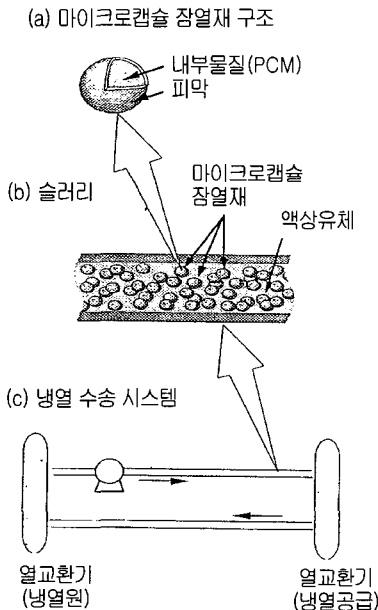
그림 3과 같은 시스템에 적용함으로써 열 수송이 가능하다. 액체수화물 슬러리는 축열재를 슬러리 형태로 조합하여 이용하는 경우에 일반적으로 발생하는 입자간의 응집으로 저장조에 침전이 발생되거나 배관이 막히는 등의 현상을 예방하는 것이 중요하다.

마이크로캡슐 잠열재 슬러리

마이크로캡슐 잠열재 슬러리에 관한 연구는 에멀전화 슬러리의 취약점을 보완하는데서 출발되었다. 캡슐화 기술을 이용하여 고체·액체 상변화물질을 캡슐 내부에 포함시킴으로써 반복되는 상변화 과정에서 물질간에 뭉쳐지는 것을 방지할 수 있으며, 슬러리 제조를 위한 별도의 설비가 요구되지 않아 아이스 슬러리카나 마이크로 에멀전을 이용한 시스템 보다는 장치가 간단해질 수 있다.

마이크로캡슐 잠열재 구조 및 특성

마이크로캡슐이란 미세하게 분산된 물질의 외부에 고분자 피막을 형성시킨 것으로 대표적인 제조방법으로는 계면중합법, In-situ 중합법, Complex coacervation법, 분사건조법, 회전법 등이 있다. 이러한 캡슐화 방법들을 통하여 특정 온도범위에서 상변화를 일으키는 잠열물질 및 견고하면서도 신축적인 피막의 형성이 용이한 고분자 물질을 내·외부물질로 각각 선정하고, 이러한 물질들의 물리·화학적 거동에 잘 부합되는 효과적인 캡슐화공정을 선택하



[그림 4] 마이크로캡슐 잠열재 슬러리 이용 시스템의 개략도

게 되면 열 전달 및 수송 면에서 높은 효율을 나타내는 마이크로캡슐 잠열재(MPCM, microencapsulated phase change materials)를 제조할 수 있는데, 그 대표적인 예가 테트라데칸(tetradecane)에 멜라민 수지를 외부 피막으로 하는 냉방용 잠열 미립자이다. 그림 4는 마이크로캡슐 잠열재와 마이크로캡슐 잠열재 슬러리 이용시스템의 구조를 나타낸다.

마이크로캡슐 잠열재는 외피가 고분자 물질로 구

성되어 유체 속에서 반복적으로 상변화되는 경우에도 잠열재가 서로 문치는 현상을 방지함으로써 미립자 상태를 지속적으로 유지할 수 있다. 장기간에 걸쳐 열 저장 및 수송의 용도로 마이크로캡슐형 잠열 미립자를 이용하기 위해서는 내구성 확보가 무엇보다 중요한데, 이를 위하여 외부 피막물질은 적절한 내구성과 상변화에 따른 부피변화를 수용할 수 있는 우수한 신축성을 동시에 지니고 있어야 한다. 외부 피막물질로 사용되는 대표적인 고분자 물질로는 Urea, Melamine, Teflon, Nylon 및 Gelatin 등이 있으며, 대부분 마이크로캡슐 잠열재의 외피로서 요구되는 다음과 같은 조건을 만족한다.

- PCM 부피변화에 따른 신축성이 있어야 함.
- PCM과 화학적인 반응이 없어야 함.
- 이송유체와 용화되어 수송이 용이해야 함.
- 장시간 안정적으로 표피물질이 파괴되지 않고 고유물성을 유지할 것.

마이크로캡슐 잠열재를 열 수송매체로 이용함으로써 열 저장 및 수송분야에서 얻을 수 있는 대표적인 장점들은 다음과 같다.

- 고밀도 축열 및 수송
- 열 교환기에서의 전열 촉진
- 마찰저항 및 열 손실의 감소
- 축열이용 온도영역의 확대
- 관련 기기류의 설비 소형화

마이크로캡슐 잠열재 슬러리는 물과 같은 현열을 이용하는 단일성분 유체에 비하여 잠열 이용에 의한 열밀도 증가와 더불어 다성분 유체이므로 질량 확산 계수나 열전도 계수와 같은 전달성질이 향상된다. 이는 액체에 고체입자를 부유시키면 전단흐름 상태에 놓여 있는 고체입자들의 회전 및 반경방향으로의 이동과 더불어 고체입자와 액체와의 상대적인 운동으로 인하여 고체입자의 뒤에서 와류가 형성되므로, 이로 인해 고체입자 주변에 미세한 대류현상이 나타나기 때문이다.

또한, 마이크로캡슐 잠열재 슬러리는 아이스 슬러리와 비교하여 적용하기 위한 시스템의 사용목적 및 운전점에 따라 시스템에 적합한 잠열 물질 선택이 가능하므로 잠열 온도변화가 가능하여 시스템의 효율 향상을 통한 에너지 절약이 가능하다. 예를들면, 냉동기에서 냉열매체를 냉각시키기 위해서 소비되는

에너지는 냉동기 형식, 용량, 외기 조건과 더불어 냉열매체의 온도에 따라 변화된다. 300RT급 터보냉동기에서 냉열매체를 0℃로 제조할 때 냉동기성적계수(COP)는 2.9인 반면, 5℃로 제조하는 경우에는 4.97로 향상되어진다. 따라서, 연간 축열조 가동일 150일, 축열량 117 MJ/일로 가정하면 COP 향상에 따른 에너지 절감량을 계산하면 전력소모량은 0℃로 열매체를 제조할 때 1,684 kWh, 5℃에서 983 kWh가 되어 약 48%의 에너지 절감 효과를 얻을 수 있다.

마이크로캡슐 잠열재의 이용 기술 개발 현황

열 저장 및 수송에 이용되는 마이크로캡슐 잠열재에 관한 연구는 잠열물질 및 미립자의 열 전달에 관한 연구, 마이크로캡슐화 공정, 마이크로캡슐 잠열재 슬러리 제조 및 마이크로캡슐 잠열재를 이용한 잠열축열식 냉·난방 시스템 구축 등의 과정을 통하여 단계적으로 이루어졌다. 마이크로캡슐 잠열재는 다른 활용분야의 마이크로캡슐과는 달리 내부 상변화 물질을 잘 보호할 수 있는 적절한 내구성이 보장되어야 하며 제조상의 경제성이 동시에 보장될 수 있는 최신 기술의 확보를 전제한다. 이와 더불어 적절한 시스템 적용기술의 개발이 주된 내용을 차지하게 되는데, 관련된 국·내외 연구개발 동향 및 기술 수준을 비교하여 요약하면 표 1과 같으며, 본 고에서는 마이크로캡슐 잠열재의 이용 기술에 대하여 주로 살펴본다.

국내 기술 현황

상변화물질에 관한 국내 이용기술은 주로 태양열 및 심야전기 활용을 위한 열 저장방법에 관련된 것으로서 1980년대부터 KIER 및 KIST 등의 연구기관을 통하여 많은 연구개발이 활발히 이루어져온 상태이다. 상변화물질에 의한 축열 방법은 볼(ball)형태의 캡슐에 상변화물질을 넣은 것들이 주종을 이루는데, 이러한 캡슐의 경우 그 크기가 상대적으로 크기 때문에 상변화 시에 수반되는 부피팽창에 의해 자체 응력이 발생하여 상변화물질이 외부로 유출되는 등의 문제점을 야기하게 되므로 이를 억제할 수 있는 개선방안에 대하여 부분적으로 많은 대안들이 도출되어왔다.



<표 1> 마이크로 캡슐 슬러리 제조 및 이용기술에 관한 국내·외 연구개발 동향 및 기술수준 비교

	국 내	국 외
연구	잠열미립자 제조기술 · 식품 및 의약 분야에서 국한되어 있음 · 특정분야에서 수입대체용으로 연구	잠열미립자 제조기술 · 다양한 기능의 마이크로캡슐제조기술 보유 · 다양한 기능성 적용에 대한 연구
개발 동향	잠열미립자 이용 시스템 기술 · 볼(Ball)형태의 캡슐로 냉난방에 이용 · 난방시스템은 현열 축열이 지배적임 · 냉방시스템은 수축열에서 방축열로 대체되는 추세	잠열미립자 이용 시스템 기술 · 발전소 폐열회수 이용시스템 적용성 연구 · LNG 냉열 회수 이용 방안에 대한 적용성 연구 · 소규모 및 통신키기류로의 적용 연구
기술 수준	잠열미립자 제조기술 · 잠열미립자의 활용을 위하여 요구되는 탄력적이며 높은 내구성의 마이크로캡슐 제조 사례는 시작단계	잠열미립자 제조기술 · 기 확립된 잠열미립자 제조기술에 대한 경제성 확보 및 고기능성 부여에 관한 연구가 활발히 진행중임
	잠열미립자 이용 시스템 기술 · 잠열미립자를 이용하는 시스템 관련기술은 보고된 바 없음	잠열미립자 이용 시스템 기술 · 소규모 Unit에 대한 다수의 적용사례 확보 · 대규모 폐열회수 체계에 대한 연구·개발단계에 있음

1990년대 들어서는 빙축열을 이용하는 냉방기술 개발에 많은 관심이 모아지기 시작하였으며 KIST, 생산기술연구원, KIER 등과 기타 대기업을 주축으로 많은 연구개발 또는 기술도입이 이루어져 온 것이 사실이다. 그러나 마이크로캡슐 잠열재를 이용한 축열 및 열 수송에 대한 연구는 마이크로 캡슐 잠열재 제조기술의 부족으로 아직까지 이루어지지 못하였으며, 다만 파라핀 슬러리를 이용한 냉열 수송에 관한 연구만이 일부 대학을 통하여 수행된 바 있으며, 최근에는 KIER에서 마이크로캡슐 잠열재의 평균 입자 크기가 10 μm인 마이크로 캡슐 잠열재를 개발하였으며, 신뢰성 확보 및 시스템 적용을 위해 개발에 박차를 가하고 있다.

국외 기술 현황

마이크로캡슐 잠열재에 대한 연구는 상변화물질의 개발과 미립자 열 전달특성이 규명된 다음 단계에 해당되므로 마이크로캡슐화 제조기술이 개발되어진 시점으로부터 비로소 본격적인 마이크로캡슐 잠열재 및 마이크로캡슐 잠열재 슬러리 관련연구가 시작될 수 있었다. 마이크로캡슐 잠열재에 관한 구체적인 연구는 1983년 이후 TRDC(triangle research and development corporation), Argon 연구소 및 Drexel 대학 등에서 마이크로캡슐 잠열재를 이용한 냉각 시스템 연구를 시작하면서 비롯되었고, 현재 입자 크기가 1~수백 μm에 이르는 다양한 종류의 상변화

물질을 사용하여 이들이 나타내는 열 저장 및 수송 능력, 열 전달성능 등에 관한 연구를 수행하고 있다. 마이크로캡슐 잠열재의 개발단계에 해당되는 1970년대 초기, GE사에서는 미국 DOE의 지원 하에 마이크로캡슐 잠열재를 활용하는 태양열시스템을 개발하였는데, 당시에는 입자의 내구성이 현저히 낮고 미립자 제조가격이 상대적으로 높아 보급화에 많은 문제점이 수반되었다. 경제성 및 응용성과 연관시켜 NASA 및 USAF의 지원 하에 군용 항공기 및 우주선에 탑재하는 전자기기의 냉각용으로 마이크로캡슐 잠열재 슬러리를 순환 매체로 활용하도록 설계된 열교환시스템과 층류조건에서 마이크로캡슐 잠열재의 열 전달특성에 관한 연구가 수행되었다.

가까운 일본에서는 마이크로캡슐 잠열재 슬러리를 냉방용 열 매체로 이용하는 기술의 개발을 위하여 HNIRI, Daido Hoxane Inc., Okayama 대학 등을 중심으로 한 연구가 NEDO의 New Sunshine Project의 일환으로 수행되어 오고 있다. 특히, 기존에는 마이크로캡슐 잠열재를 냉동기의 축열 및 열수송 매체로 적용하기 위한 연구 개발이 주를 이루었으나, New Sunshine Project에서는 폐열과 같은 미활용 에너지의 회수 및 이용을 위한 열 수송에 마이크로캡슐형 축열물질 사용에 관한 내용을 포함하고 있으며, 냉열 밀도가 낮은 현열 수송 방식을 대체하기 위한 목적으로 1990년부터 시작된 연구과정을 통하여 다양한 재질을 사용하는 마이크로캡슐 잠열재 제조기술

<표 2> 축열 시스템 비교

시스템	마이크로캡슐 잠열재 시스템	빙축열 시스템	수축열 시스템
축열 밀도	67 MJ/m ³	167 MJ/m ³	21 MJ/m ³
운전 COP	4.5	3.5	4.5

및 이들의 과냉각 특성, 내구성 및 축열조 적용 시의 경제성 등에 관한 고찰 및 평가가 이루어졌고, 현재 이를 실제 냉방 시스템에 이용하기 위한 상용화 연구를 계속적으로 수행 중에 있다.

마이크로캡슐 잠열재 슬러리 이용 시스템의 개발 사례

본 고에서는 열저장 및 열수송 측면에서 장점을 가진 기능성 유체인 마이크로캡슐 잠열재의 대표적인 적용사례로 일본 나리타 공항의 중앙냉난방 시스템을 소개하고자 한다.

신도쿄 국제공항공단은 나리타 공항의 중앙냉난방 시스템의 냉동기의 냉매를 CFC-11과 HCFC-22에서 HCFC-123과 HFC-134a로 교체함에 따라 냉동기의 성능 저하가 발생하게 되어 이를 극복하기 위하여 잠열 축열 시스템을 도입하였다. 경제성, 환경성, 신뢰성 및 조작성 등을 종합 평가하여 냉수온도 수준의 잠열축열 시스템이 가장 적합하다고 판단하고 신도쿄 국제공항공단과 미쓰비시 중공업이 공동으로 수행하고 동경전력의 협조로 수행되었다.

잠열 축열 시스템 개발은 냉동기 냉매 교체에 따른 용량 저하를 보완하고, 주간 전력 피크를 shift하여 전력부하를 평준화하고 오존층 파괴 억제와 환경보호에 기여한다는 목표 하에 수행되었다. 축열재 선정을 위하여 축열재의 물성과 내구성에 관한 분석과 기존 공간에 적합한 축열조의 구조 검토와 축열조 모델 실험을 현장에서 실시함과 동시에 새로운 시스템의 타당성 조사를 실시하였으며, 타당성 조사과정에서 빙축열 캡슐 시스템 도입방안과 비교 검토하였다.

축열재 요소 시험결과 평균 입경 2 μm의 파라핀계 잠열재를 내부물질로 갖는 농도 45%의 마이크로캡슐 잠열재 슬러리를 최적 물질로 선정하였으며, 슬

러리의 작동온도는 4.25℃에서 11.25℃로 선정하였다. 10℃에서 90℃의 가열열화 실험과 실제 운전 시간 25년에 상당하는 열적·기계적 내구성 실험을 통하여 내구성을 확인하였다. 이후 1년간의 필드테스트를 수행하였으며, 다음의 결과를 얻었으며, 표 2는 마이크로캡슐 잠열재 적용 시스템과 빙축열 및 수축열 시스템과의 성능 비교를 나타낸다.

마이크로캡슐 잠열재 슬러리 적용 시스템은 수축열과 동등한 에너지 절약특성을 가지며 수축열 시스템보다 3배의 축열밀도를 갖는다.

축열조에서 우수한 온도 성층을 얻을 수 있었으며, 방열량에 관계없이 안정된 운전이 가능하여 고부하 추종성을 갖는다.

설비면에서 축열조가 높지 않고 기존의 냉동기를 그대로 사용가능하며 시스템 구성이 간단하여 운전을 포함한 부대 배관 설비가 적고, COP가 높게 운전되어 운전비용 절감이 커서 빙축열 시스템 보다 투자 회수면에서 우수성을 갖는다.

맺음말

세계적으로 에너지 절약과 다양한 에너지원의 효율적 이용의 중요성이 증대됨에 따라 효율적 열 저장 및 수송에 관한 기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 마이크로캡슐 잠열재는 고체-액체 상변화 물질을 캡슐 내부에 포함하고 외부에 고분자 피막을 형성시킨 기능성 유체로서 열 저장 및 수송 분야에 적용할 경우 고밀도 축열 및 열수송이 가능하며 열교환기에서의 전열 축진이 가능하고 시스템의 용도에 따른 축열 온도 조절이 가능하여 기기 효율 증가 및 설비 소형화를 이룰 수 있을 것이다. 해외에서는 마이크로캡슐 잠열재의 제조 및 적용 기술에 관한 연구는 1970년대 초기부터 시작되어 현재 다양한 열원 기기 및 폐열 회수 등에 적용되고 있으며, 마이크로캡슐 잠열재의 신뢰성이 증대됨에 따라 적용범위는 증가될 것으로 예상된다. 하지만, 국내에서는 마이크로캡슐 잠열재의 적용사례는 전무하며, 제조 기술도 기초단계에 있다. 그러므로, 이에 대한 투자와 연구가 좀 더 활발히 진행되어 다양한 열수요에 적합한 마이크로캡슐 잠열재와 시스템 개발이 필요할 것으로 예상된다. (㉔)