집중기획

콜드체인 시스템에서의 저온 PCM(잠열재) 적용사례 및 이용가능성

본고에서는 일반 냉동냉장설비, 특히 콜드체인 분야에 저온 잠열재의 응용 가능성 및 적용사례에 대하여 소개하고자 한다.

백 종 현
한국생산기술연구원 선임연구원(jh6240@kitech.re.kr)
박 승 상
한국생산기술연구원 수석연구원(sspark@kitech.re.kr)

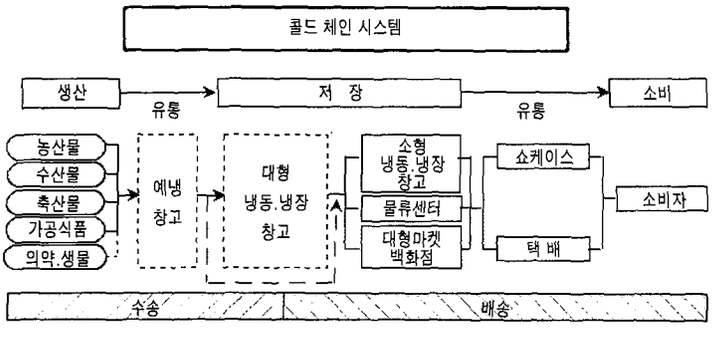
머리말

현재 국내의 유통산업은 규모면이나 질적인 면에서 모두 괄목할만한 성장세를 유지하고 있으며, 특히 국민생활 수준의 향상과 식생활의 서구화로 인하여 인스턴트식품(fast food)류, 육류, 냉동생선류 및 채소류, 과실류등의 저온유통이 날로 증가되고 있고, 이에 따라 식품의 장거리 및 단거리 운반수단으로 사용되는 냉동차량 및 냉동 · 냉장용 저온저장창고, 쇼케이스, 소포장용 냉동 박스 등에 관련된 산업 역시 지속적인 성장을 거듭하고 있다.

그러나 유통산업의 외형적인 성장과는 달리 콜드체인 시스템은 아직 도입단계에 머물고 있으며, 저온유통의 고리가 부분적 또는 상당부분 단락된 상태로 소비자 단계에서 접할 수 있는 쇼케이스나 업소용 냉동 · 냉장고등에 치중되어 있어 선진국형의 콜드체인 시스템과는 격차가 있다. 냉동 · 냉장창고 및 수 · 배송용 냉동차등 설비가 갖추어진 경우에도 운영비 문제로 유지온도를 지키지 않는 경우가 발생되고, 보다 근본적으로는 "유통등급제"를 실시하는 선진국과 달리 국내에서는 양질의 저온유통시스템을 통하여 공급된 물건이 그렇지 않은 물건과 비교하여 차별화될 수 있는 제도가 없어 가격 차이에 의한 투자동기가 유발되지 않고 있다.

콜드체인 시스템은 **그림 1**에서 보는바와 같이 상온보다 낮은 온도로 유지되어야 할 대상물을 생산단계에서부터 소비자에 이르기까지 지속적으로 적절한 온도로 유지시켜 생산 당시의 품질상태 그대로 소비자에게 공급하는 유통체계 시스템을 의미하는 것으로, 여기서 대상물이란 구체적으로 농 · 수산물, 화훼, 가공식품, 의약품 등을 의미한다. 콜드체인 시스템의 본질적인 목적은 이들 대상물을 적정온도하에서 일정하게 유지함으로써 생물학적 반응을 적절히 억제하여 대상물의 선도 및 본질적 가치를 연장시키는 것을 포함한다.

특히 농 · 수산물(화훼포함)과 각종 가공식품이 대표적인 대상물로써 국민경제의 발전과 더불어 소비자의 식품소비 성향이 고급화 · 다양화되면서 식품의 신선도와 안정성을 중시하는 소비자의 선호도 변화를 고려해 볼 때, 앞으로 양질의 콜드체인 시스템 구축은 필수적이라고 사료된다.



[그림 1] 콜드체인 시스템의 개념

저온 잠열재

현재 사용되고 있는 대표적인 잠열재로서 물(H_2O)의 경우 단일(순수)물질이므로 여타 다른 대부분의 단일물질과 같이 일정한 상변화 온도와 잠열량을 갖고 있

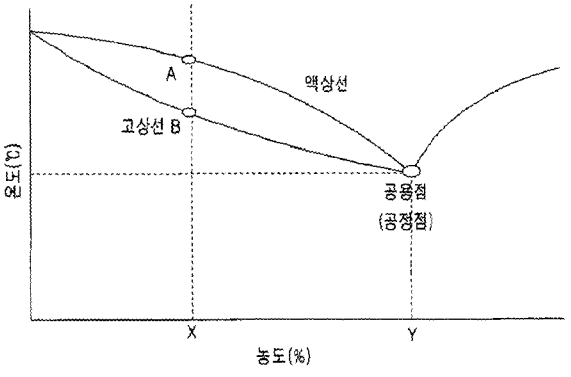
나, 저온 잠열재와 같이 두 가지 이상의 혼합물질는 화합물질로 이루어진 경우에는 물질에 따라 고의 공융점을 갖는 상변화 상태도를 갖게 된다.

그림 2에서 보는바와 같이 순수물질이 아닌 2개 이상의 혼합물에서 어떤 물질의 농도가 Y%일 때는 액상선과 고상선이 만나는 점이기 때문에 동결개시와 완료시에 농도 변화 없이 순수물질과 마찬가지로 일정한 온도에서 상변화 하는 특성을 갖게 된다. 이와 같은 Y%의 용액을 그 물질의 공융용액(eutectic solution)이라 하며 그 동결온도를 공융점(eutectic point)이라 한다.

이와 같이 2가지 이상의 혼합 또는 화합물로 이루어진 잠열재의 경우, 공융점의 농도를 갖추고 있어야만 단일물질에서와 같이 일정한 상변화온도와 그 온도에서의 잠열량이 보장되어 질 수 있으며, 저온 잠열재란 바로 공융액을 의미한다. 대부분의 저온잠열재는 앞에서 설명한 공융점을 갖는 혼합 또는 화합물질이며, 특히 냉동·냉장을 위한 공융액의 적정 상변화온도는 축냉시스템의 방법에 따라 사용온도(고내온도)보다 5℃~10℃정도 낮게 선정되고 있다.

이러한 공융액을 실용화하기 위하여 갖추어야 할 조건을 살펴보면 다음과 같다.

- 과냉각이 작고 사용온도에 적합한 공융점을 가진 용액
- 잠열량 및 기타 열물성치가 우수한 용액
- 장기간의 주기적인 동결·해빙과정에서 변형이 없는 물질
- 가격이 저렴하고 독성이 적은 물질
- 부식성이 작고, 화학적으로 안정된 물질



[그림 2] 2가지 이상의 혼합물 상태도(Phase Diagram)

저온 잠열재의 적용사례

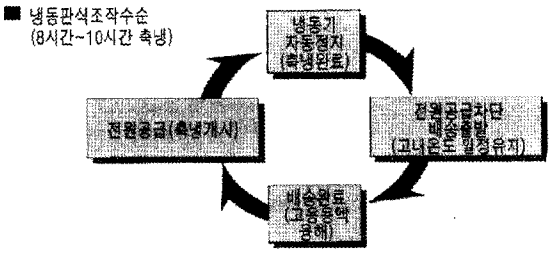
저온 잠열재는 콜드체인 전 분야에 걸쳐 사용목적에 따라 효율적인 적용이 가능하다. 이들 분야 중 선진국에서 이미 적용·사용되고 있는 냉동차 분야에 저온 잠열재를 적용하여, 그 성능 및 특성을 파악하였다.

일반적으로 냉동차는 탑재된 냉동기의 동력원을 2.5톤급 용량을 기준으로 소형인 경우 주(main) 엔진으로부터 취득하고 있으며, 대형인 경우에는 별도의 보조엔진을 사용하고 있다. 이와는 별도로 운송품목 또는 운영시스템에 따라 유럽, 미국, 일본 등에서는 냉동차에 고내 온도유지를 위해 적절한 잠열재를 축냉판 또는 특정형태의 용기에 봉입한 축냉시스템을 장착하여, 야간전기로 냉열을 축적하고 주간에는 별도의 구동원 없이 저온상태로 고내 온도를 유지시키는 축냉식 냉동차 시스템을 채택하고 있다.

그림 3은 축냉식 냉동차의 1일 사이클이다.

축냉식 냉동차의 가장 큰 특징이자 장점은 엔진구동식 냉동차에 비교하여 환경 친화적이라는 점이다. 엔진구동식의 경우 운행외에 소모되어야할 연료만큼 배기가스에 의한 환경오염이 심각한 정도에 이르고 있기 때문이다. 이 밖에 축냉식 냉동차가 갖는 장점들을 요약하면 다음과 같다.

- 고내의 습도가 높게 유지되어 제품의 신선도 유지용이
- 물류기지 한곳에 축냉을 위한 중앙냉동장치를 설치하여 운용시 설비비용 감소
- 야간에 축냉하여 주간에 방열하므로 운전시 연료비 절감
- 운행중에는 냉동장치가 정지되어 있어 운행소음이 없음
- 운전부위감소로 고장 및 손상이 발생할 확률이



[그림 3] 축냉식 냉동차의 1일 사이클

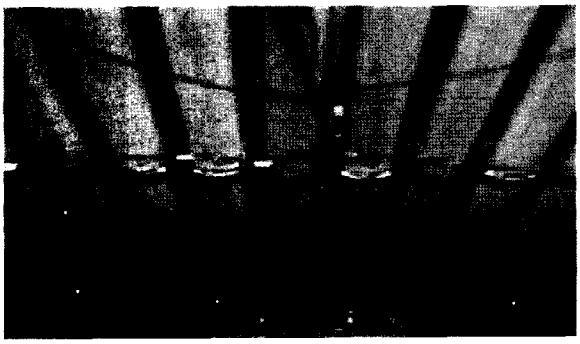
많지 않아 수명이 반영구적

- 도어 개폐시 외기부하에 의한 고내온도 상승이 설정온도로 신속하게 복귀

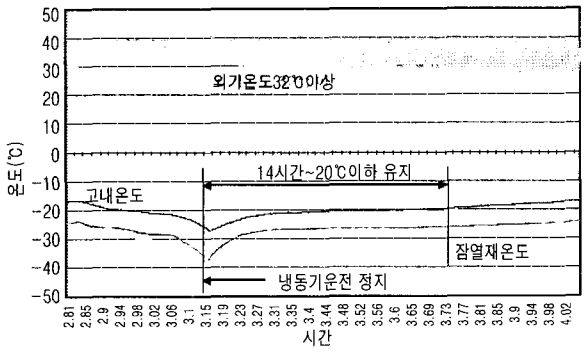
축냉식 냉동차의 단점으로는 잠열재 및 축냉용기 자체 무게에 의한 하중부담(주엔진 구동방식에 비해)과 설정온도조절 폭의 제한 등을 들 수 있다.

축냉식 냉동차의 원활한 기능을 수행하기 위해서는 잠열재, 축냉용기, 차체의 단열 등 세 가지가 각자의 역할을 충실히 발휘해야 한다. 본 적용사례에서는 **그림 4**에서에서 보는 바와 같이 바(bar)타입의 축냉용기를 제작하여 차체의 천정부분에 장착하였다.

축냉식 냉동차의 가장 근본요소가 바로 차체의 단열성능이다. 특히 외국의 경우 차체 자체를 프레임을 성형하여 일체구조로 고밀도의 우레탄을 발포하여 제작하고 있으나, 국내의 경우에는 우레탄 발포(저밀도가 대부분임)로 판을 제작한 후, 이들 판을 조립하여 차체를 조립하므로 연결부위 또는 접합부위로부터 심한 열누수 현상이 발생되고 있다. 또한 축냉식 냉동차의 경우, 사용분야에 따라 측면 개폐도어의 크기 및 위치 등을 다양하게 할 수 있으나, 문틀 및 실링(sealing) 부위로부터 역시 심한 열누수 현상이 발생되고 있음을 확인할 수 있었다. 본 적용사례에서는 차량의 단열재로 발포된 우레탄 판넬을 사용하였으며, 연결부위 및 열누수 현상이 심한 부분에 세심한 작업을 수행하였다.



[그림 4] 냉동차내부 축냉용기 설치모습



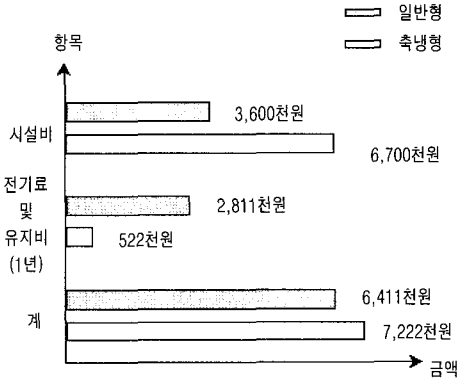
[그림 5] 축냉식 냉동차의 온도유지 특성 그래프(폴리우레탄 두께 100mm)

그림 5는 제작된 축냉식 냉동차의 축냉 및 보냉유지시의 온도특성 그래프이다. 잠열재의 상변화온도는 -26℃ 이고 축냉시 냉동기의 운전시간은 7시간 정도이며, 냉동기 정지 후 -20℃이하에서 고내온도가 유지되는 시간은 14시간이다.

1톤급 기준 일반식 대비 축냉식 냉동차의 경제성을 실측하여 산출한 결과를 **그림 6**에 나타내었다. 유지비는 디젤연료 소비량과 여러 전력요금의 평균전력요금 단가(65원/kWh)를 기준으로 산출한 전력소비량을 근거로 계산하였으며, 일반식 냉동차의 경우 공회전 운전에 의한 연료소비량의 증가요인은 배제하였다.

저온 잠열재의 이용 가능성

축냉식 냉동차외에도 저온 잠열재를 이용하여 기존시스템을 개선 또는 대체할 수 있는 분야로는 택배분야의 수동형 및 능동형 이동식 냉동박스(cold roll box), 정확한 온도조절이 요구되는 농산물 저온창고, 기타 냉동 · 냉장창고 및 쇼케이스에도 적용이 가능하며, 본 원고의 마지막에서 제안하는 통합형 콜드체인 시스템 구현에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.



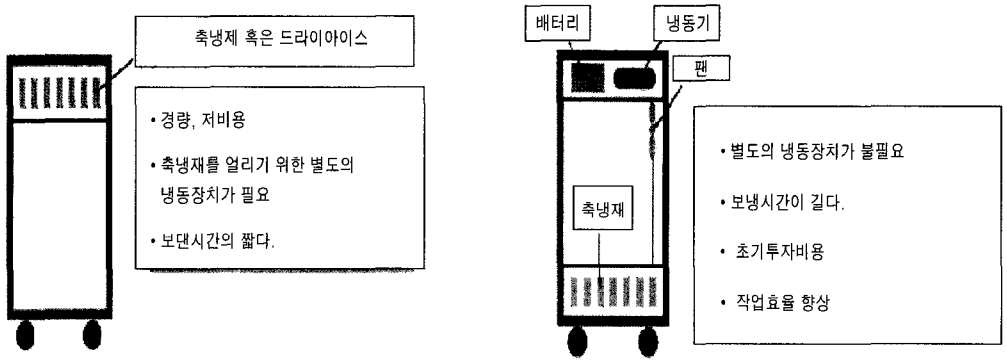
[그림 6] 일반식 대비 축냉식 냉동차의 경제성 비교

택배용 냉동박스

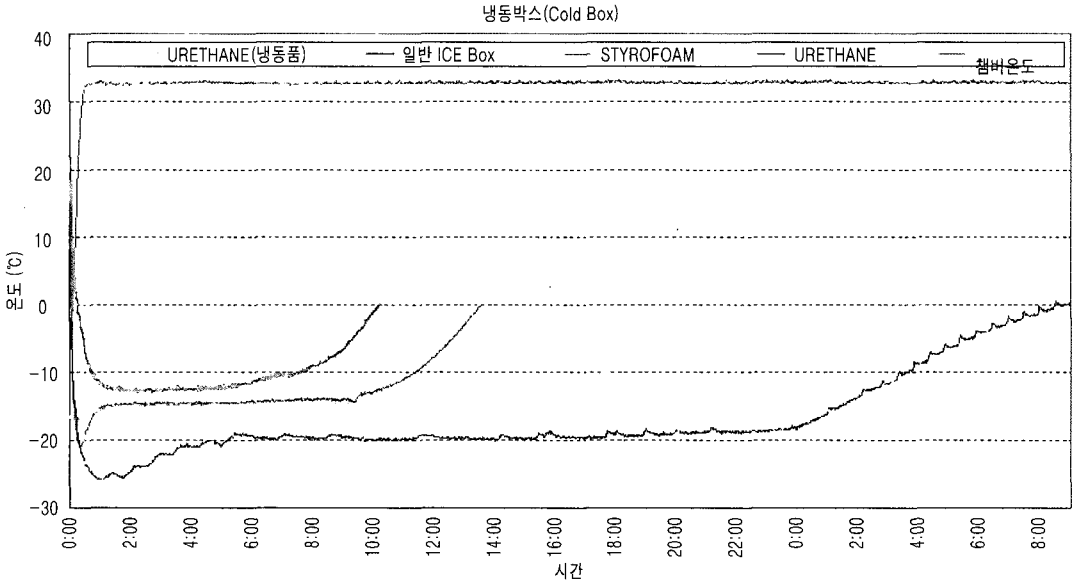
그림 7에서 보는바와 같이 택배용 냉동박스에는 이미 얼려진 축냉 잠열재를 단열 처리된 박스 안에 충진하여 이동시간 동안 보냉효과를 유지하는 수동형 이동식 냉동박스와 박스내부에 냉동유닛이 추가 설치되어 장시간 대기시에도 적용이 가능한 능동형 이동식 냉동박스로 구분된다. 일본에서 이미 저온유통에 사용되고 있는 방식으로 가까운 시일내에 국내에서도 도입 또는 개발이 이루어 질 것으로 기대된다.

국내 적용의 가능성을 알아보기 위하여 일반 아이스박스(25ℓ 용량기준)에 2ℓ의 저온 잠열재(상변화온도 -22℃)를 충진하여 보냉유지 시간을 측정하였으며, 그 결과를 **그림 8**에 나타내었다.

단열소재가 우레탄인 경우 동일한 두께(50t)의 여타 다른 소재와 비교하여 온도유지 시간이 24시간으로 월등하였으며, 일반 아이스박스의 경우에는 내외장재 및 외부 돌출 마개에서 발생되는 열손실이 더해져 가장 짧게 나타났다. 우레탄에 냉동품(육류)을 적재한 경우에는 냉동품을 보관한 일반 냉장고의 냉동실 온도가 -10℃~-12℃로 잠열재의 냉열이 오히려 냉동품 쪽으로 이동하여 적재하지 않은 경우에 비하여 유지시간이 짧은 현상을 나타내고 있다.

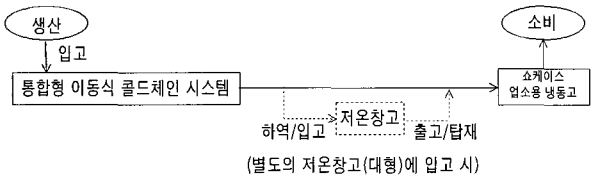


[그림 7] 수동형 및 능동형 이동식 냉동박스(CRB) 비교



[그림 8] 아이스박스 단열소재에 의한 유지시간 비교

[그림 9] 현재의 저온유통 단계



[그림 10] 통합형 이동식 콜드체인 시스템의 저온 유통 단계

저온 저장창고 및 기타 냉동 · 냉장 설비

저온 잠열재의 또 다른 장점은 일정한 온도유지를 위한 냉동기 제어방식을 간편하게 할 수 있으며, 정확한 온도유지를 구현할 수 있다는 장점이다. 특히 냉매 또는 브라인 냉각방식에서 유닛쿨러를 제어하여 온도조절을 수행하는 것과 비교하여 냉동기의 on/off 횟수를 줄일 수 있고, 보다 정확한 온도유지가 매우 용이하기 때문에 냉장저장 분야에 적용가능성이 클 것으로 사료된다.

통합형 콜드체인 시스템 제안

정부에서도 수년전부터 농수산물 유통혁신을 위해 생산지 위주의 유통시설 개선사업에 지속적인 지원을 해오고 있으나 다품종 소량생산지, 또는 소품종 집중생산지등에 따라 출하시기 및 물량에 따른 산지의 다양한 요구 및 유통특성을 수용하지 못하는 설비로 인해 가동률이 저조한 편이며, 수송, 배송 및 도매시장의 콜드체인 시스템기반은 매우 취약하다. 이는 저온유통이라는 큰 범위에서 체계적인 개발을 수행하지 못하고 단품성격의 설비 자체를 위주로 개발하고자 하였으며, 따라서 전체 콜드체인 시스템 상 이전 단계 또는 이후 단계와의 호환성(규격, 수배송간의 불편 등) 결여, 또는 국내 유통특성을 살리지 못하는 설비개발 등으로 인하여 장비의 효율적 운영 및 가동률이 떨어지고 이는 곧 운영비과다에 의한 가동중 단 사태 등으로 이어지고 있다. **그림 9**는 현재의 저온유통 단계를 나타낸 것이다.

따라서 본 고에서 마지막으로 제안하는 **그림 10**의 통합형 이동식 콜드체인 시스템은 상기에서 언급한 축냉식 냉동탑차와 이동형 냉동박스의 개념을 혼합하여 규격화된 콘테이너형의 시스템으로 필요에 따라 예냉창고, 냉동차(차량에 탑재), 보관창고 기능을 하나로 통합한 개념이다. 생산에서 소비에 이르기까지 중간단계 없이 일정온도로 유지할 수 있으며, 시스템의 규격 표준화로 유통량에 맞는 용량을 선정하여 운용함으로써 생산물량에 따른 신축적인저온창고 대응과 더불어 이동이 가능하므로 장비의 효율성을 극대화 할 수 있다. 특히 이러한 시스템의 효과적인 운용을 위해서는 전문 저온물류 유통회사가 설립되고, 물류망의 네트워크가 이루어져야 할 것이다.

맺음말

콜드체인 시스템의 안정적이고 효율적인 정착은 몇몇 회사나 연구개발 주체가 노력하여 이루어지기 보다는 선진 유통산업 구축에 대한 정부의 효과적 정책(표준화 및 유통등급표시제) 및 소비자의 의식고취, 그리고 국내 유통실정에 적합한 저비용, 고효율의 유통시스템 개발이 동시에 추진되어야 하므로 정부지원에 의한 다자간 협력개발이 필요하다고 사료된다.