열저장 방식을 이용한 에너지 절약형 냉동탑차 개발

(Development of High Efficient Refrigerated Vehicle using Thermal Storage)

문 제 철
대림산업(주)(S0901240@daelim.co.kr)

서 론

식생활의 향상 및 다양화로 고품질에 대한 요구가 증대되면서 생산지로부터 시장이나 소비자에게 운송되는 Cold Chain이 유통산업으로써 질적 및 양적으로 성장해 왔다. 통계에 의하면 세계적으로 육상 냉동(장)수송 차량은 100만대 이상인 것으로 보고되고 있다. 냉동(장) 차량은 운반중이나 정차 중에도 식품의 환경이 지속적인 저온상태로 유지될 수 있도록 차량의 엔진 동력을 사용하여 냉동기를 가동하는 것과 엔진과 분리된 별도의 냉동기가 장착된 두가지 형태가 있다. 그러나 현재 대부분의 식품 유통에 사용되어지는 냉동(장)탑차는 소형인 경우 냉동기의 동력원을 엔진으로 취득하는 main-engine type, 대형인 경우에는 별도의 보조엔진을 사용하는 sub-engine type으로 나눌 수 있다.

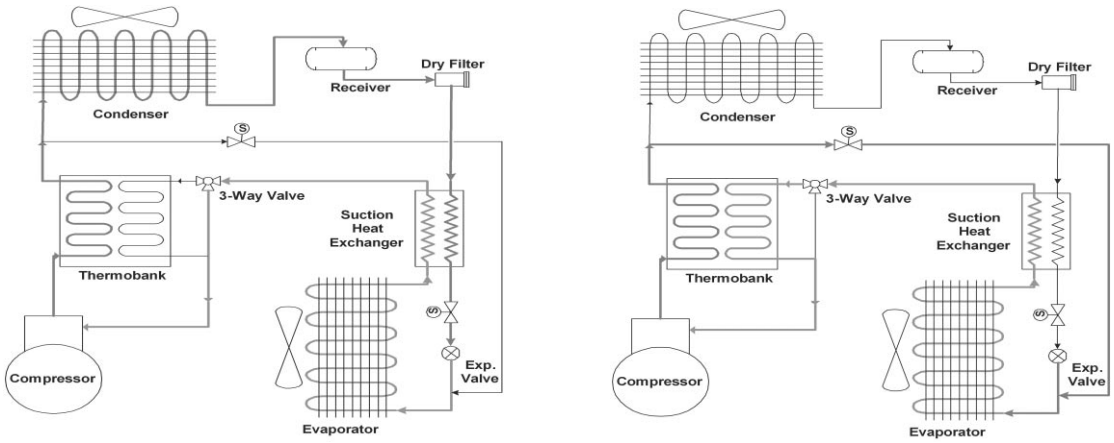
냉동시스템에서 에너지 성능에 있어서 고려되는 것 중에 하나로 빙점이하에서 운전하는 동안 증발기에서의 착상이다. 이러한 착상은 냉동시스템의 능력에 2가지 좋지 못한 영향을 미친다. 즉, 증발기 표면에 착상이 되면 Fin과 순환공기 사이의 열저항 증가로 증발기에서 열전달이 감소하고, 다음은 Fin과 Fin 사이에 착상된 얼음으로 순환공기의 압력강하가 증가하기 때문에 결국 냉동능력이 감소하고 압축기의 소요동력이 증가한다. 착상으로 인한 냉각성능 및 시스템의 성능계수가 20~30% 감소하는 것으로 알려져 있다.

본 연구의 가장 큰 특징은 기본냉동사이클에 열저장 방식을 적용하여 냉각시간 및 제상시간을 단축시키고 제상 후 고내온도 변화를 최소화시켜 에너지를 절약시키는 냉동(장)탑차를 개발하는 것이다. 본 시스템은 냉각운전 동안에 열저장 장치에서 열을 저장하여 제상시에 저장된 열을 이용한다. 축열 물질로서는 많이 이용되고 있는 물과 파라핀을 사용하였으며, 냉동(장)탑차에 열저장 장치를 이용했을 때와 그렇지 않았을 때의 냉각시간 및 제상시간을 비교하였다. 또한 냉동(장)탑차 콘테이너 내의 온도편차를 열저장 방식을 이용하여 감소시키고, 최종적으로는 저온물품을 수송할 수 있고 현재 생산 및 운전되고 있는 냉동(장)탑차 보다 에너지 절약적인 냉동(장) 탑차를 개발하고자 하였다.

실험장치 및 방법

본 연구는 압축기를 토출한 고온의 핫가스 냉매를 응축기 입구 전에 열저장 장치를 설치하여 냉각운전 시에는 축열을 하고 제상 운전시에는 축열된 열을 이용하는 시스템으로 실험장치도는 **그림 1**과 같다.

그림 1을 간단히 설명하면 냉각운전 동안에 압

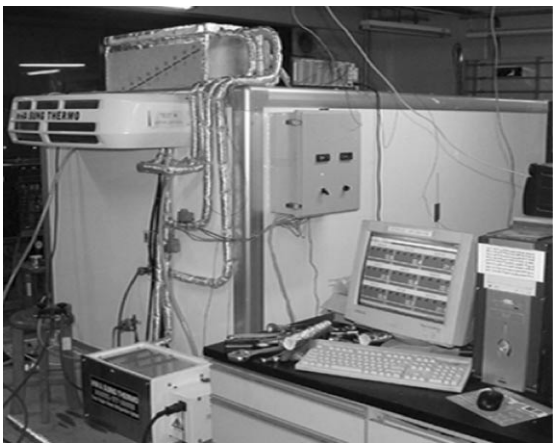


a) 냉각운전 b) 제상운전

[그림 1] 열저장 장치를 이용한 냉동

축기를 토출한 고온의 냉매가 열저장 장치에 열을 저장하게 되고 제상운전 시 고온의 핫가스 냉매가 응축기를 바이패스 하고 증발기 코일에 착상된 서리를 제거한다. 제상 시 냉매는 저온으로 상변화를 하게 되며, 응축된 냉매액은 열저장 장치로 되돌아와 기상으로 증발한 후 압축기로 흡입되어 재순환하게 된다.

그림 2와 **그림 3**은 실험에 사용된 실험 장치이다. 즉 **그림 2**는 실험실에 설치한 실험장치로 컨테이너 크기는 3020(L)×1740(W)×1640(H), **그림 3**은 실제 냉동(장)탑차에 적용하여 실험한 장치로 main-engine type의 1톤 일반 냉동차량으로 탑의 크기는 2700(L)×1500(W)×1400(H)이다. 그리고 실험에 사용된 열저장 장치인 경우 직접 설계에 의해 제작하였다. **그림 2**에서 열저장 장치는 실험의 안전성을 고려하여 컨테이너 위쪽에 설치하였으나, 실제 냉동(장)탑차의 경우 도로교통 기준법에 의해서 차량의 높이 제한으로 인해 응축기와 일체화 시켜 **그림 3**과 같이 전면부에 설치하였다.



[그림 2] 열저장 장치를 이용한 실험장치용 냉동탑차

[그림 3] 열저장 장치를 이용한 수송용 냉동탑차

실험장치의 사양은 **표 1**과 같다.

냉각시간 측정

냉동(장)탑차의 고내 온도변화 및 냉각시간 측정은 **표 2**와 같이 열저장 장치를 이용하지 않고 운전한 HSI-0, 열저장 장치를 이용하여 운전한 HSI-1으로 나누어 각각 2 row×4 circuit Cooper tube, Size : 400(L)×800(W)×300(H) 형태와 Aluminum Fin-tube, Size : 400(L)×350(W)×250(H)의 열교환기에서 측정하였다.

실험장치인 **그림 2**와 **그림3**은 별도로 설계된 microprocessor 컨트롤러에 의해 전자밸브, 시간, 컨테이너 박스 설정온도 등에 따라 작동된다. 열누설과 냉각능력 테스트 동안의 온도센서 위치 설정과 온도측정은 ARI 1110-2006에 기술된 수송냉동의 calibrated-box 방법에 근거하여 이루어졌다. 온도데이터는 초기 고내온도를 25℃로 동일하게 유지하여 설정온도까지의 냉각시간을 요코가와 MX-100 데이타로 기록하였다. 그리고 동일한 방법으로 열저장장치 내의 열저장 매체에 따라 냉각시간을 측정하였다.

제상시기 선정 및 제상시간 측정방법

증발기의 핀-관 표면에 착상이 시작되면 처음에는 눈과 같이 되었다가 시간이 경과하면 계속 동결되어 두꺼운 얼음으로 변하고, 그 두께는 계속 증가한다. 이러한 현상은 전열불량으로 증발관의 온도강하가 커지고 증발량이 적어지기 때문에 액압축을 유발하게 되고 결국에는 압축기의 파손 등 냉동장치의 운전불능 상태가 일어난다. 이러한 이유로 적당한 시기에 제상을 함으로써 냉동장치의 안전운전을 유지하고 냉동능력을 향상 시킬 수 있다. 이때 가장 중요한 요소가 제상시기로 전열제상에 있어서는 착상상태의 변화에 따른 증발기 팬 모터의 부하 전류값으로 최적 상태의 제상시기를 판단하였다. 그리고 국내의 경우 히트펌프 시스템에 있어서 착상이 난방능력의 감소로 이어지기 때문에 제상시기를 실외기 입구와 출구 공기의 온도차를 이용하거나 압축기 입출구의 압력차를 이용하여 제상시기를 선정한다.

그러나 금번 실험에서는 증발기 토출풍속을 측정하여 제상시기를 선정하였다. 증발기에서 핀 코일의 착상과정과 공기속도 변화 측정 및 착상과정에서의 서리 두께 측정을 위해 비디오카메라를 이용하였으며 동영상 및 스틸화면을 동시에 컴퓨터에 저장하였다. 그리고 Solomat vane-type anemometer (vane-type 풍속계)를 이용하여 증발기 토출 공기 속도를 측정하였다. 대부분 냉동시스템에 있어서의 제상 시기는 주기적으로 냉동운전을 한 후에 일정한 시간간격으로 제상이 이루어진다. 그렇지만 본 연구에서는 제상시기를 증발기의 풍속이 초기 풍속보다 50% 감소할 때까지로 결정하고, 제상시간은 핀-코일 증발기를 모니터링하면서 착상이 완전히 제거될 때까지로 하였다.

제상운전 조건으로는 열저장을 이용한 핫가스 제상 시스템과 열저장이 없는 핫가스 제상, off 제

<표 1> 실험장치 사양

구성 요소	장치 사양
압축기	Seltec TM-15HD Nominal 2,000 rpm, Displacement 147 cm^3
냉 매	R-404A
증발기	Aluminum finned, 6 row, 9.53 mm diameter aluminum tube, total area 8.52 m^2, frontal area 0.172 m^2 ; Fan: 2×250 mm diameter, 80 W, 12/24 V, 1,400 m^3/hr
응축기	Aluminum finned, 4 row, 9.53 mm diameter Cooper tube, total area 13.635 m^2, frontal area 0.2 m^2 ; Fan: 2×250 mm diameter, 80 W, 12/24 V, 1,400 m^3/hr
팽창밸브	FSE-1/2-C
열저장 장치	2 row×4 circuit Cooper tube
	400×350×250 Fin tube
부하 장치	5 kw heater element with single fan

<표 2> 냉각시간 측정 방법

측정 조건	측정 방법		설정 온도 (℃)
냉각 시간	HSI-0	무부하	-10, -5, 0
		부하	
	HSI-1	무부하	
		부하	

HSI-0 : 열저장 장치 비적용 시스템
HSI-1 : 열저장 장치 적용 시스템

상을 비교 분석하였다. 핫가스를 이용한 제상운전은 제상 시 증발기의 토출 온도가 10℃ 증가할 때 수동으로 정지시켰다.

실험결과

실험장치용 냉동탑차의 냉각시간 비교

실험장치 **그림 2**의 냉동컨테이너 냉각성능을 측정하기 위해서 냉동컨테이너의 내부온도를 균일하게 25℃로 유지하여 냉동기를 기동한 후에 설정온도까지 냉각된 시간을 측정하였다. 그리고 냉동컨테이너의 고내 부하를 형성하기 위해 5 kw 싱글팬 타입의 히터를 내부에 설치하여 부하를 유지시켰다. 냉동컨테이너 고내 온도변화를 살펴보기 위하여 컨테이너 내부에 27개의 Thermo-couple을 부착하였으며, 열저장 장치의 이용 여부와 부하의 ON/OFF로 나누어 냉각시간을 측정하였다. **표 3**이 냉동컨테이너의 냉각시간을 측정한 결과값이다.

열저장을 부착하지 않은 사이클, 즉 기본냉동사이클은 냉장시스템 고내온도를 0℃로 설정했을 때 무부하(unload)는 10분, 부하(load) 상태일 때는 15분이 소요되었으나 열저장 장치를 이용한 냉동사이클은 부하 및 무부하 모두 7분이 소요되었다. 그러므로 열저장장치를 이용한 냉장시스템이 기본냉동사이클의 냉장시스템보다 냉각시간이 2배 이상 단축되었다. 고내온도가 -5℃로 설정했을 때는 약 2.5배 단축되었다. 이것은 열저장 공간이 냉각운전 시 예냉기 또는 예비응축기로서 열저장이 없는 전형적인 냉각시스템과 비교할 경우 시스템의 응축능력이 향상되었고 증발온도의 상승으로 시스템 냉동능력이 증가되었기 때문이다.

<표 3> 열저장 장치 이용 여부에 따른 실험장치용 냉동탑차 냉각시간 비교

실험 조건	내부 설정 온도〔℃〕	냉각 시간 (분)	
		HSI-1	HSI-0
무부하 상태	0	7	10
	−5	10	15
	−10	19	23
	−20	42	58
부하 상태	0	7	15
	−5	10.5	26
	−10	28	39
	−20	108	122

HSI−0 : 열저장 장치 비적용 시스템
HSI−1 : 열저장 장치 적용 시스템

차량 냉동(장)탑차의 냉각시간 비교

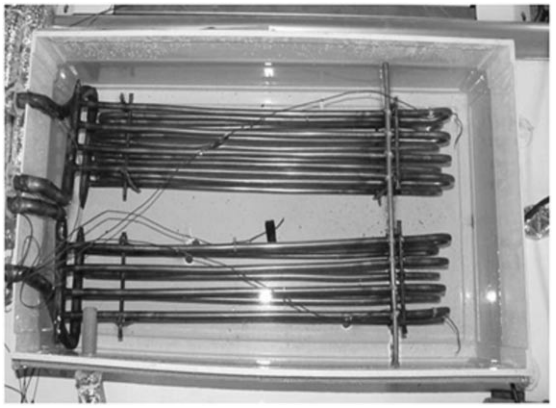
실험장치인 **그림 2**에서 실험한 데이터를 기본으로 하여 저온저장 수송을 위해 **그림 3**과 같이 열저장 장치인 thermobank를 냉동(장)탑차에 설치하였다. 도로교통관리기준법에 의해서 냉동(장)탑차의 차량의 높이가 제한이 되기 때문에 [그림 3]과 같이 응축기와 일체화시켜서 설치하였다. 그리고 열저장장치도 **그림 4a)** 즉 Cooper tube with 2 row×4 circuit, Size : 400(L)×800(W)×300(H) 형태에서 **그림 4b)** 즉 Aluminum Fin-tube, Size : 400(L)×350(W)×250(H)로 변경해서 열저장 내 열교환이 잘 이루어지도록 제작하여 실험실에서 측정한 방법과 동일하게 냉각시간을 측정하였다.

표 4는 열저장 장치를 적용시킨 냉동(장)탑차와 일반 냉동(장)탑차와 같은 조건의 열저장 장치를 이용하지 않는 상태에서의 냉각시간 속도를 비교

<표 4> 열저장 장치 이용 여부에 따른 수송용 냉동탑차의 냉각시간 비교

실험 조건	내부 설정 온도〔℃〕	냉각시간 (분)	
		HSI-1	HSI-0
무부하 상태	0	5.5	8.5
	−5	12	16
	−10	21	25
부하 상태	0	5.5	9.5
	−5	13	19.5
	−10	32	40

HSI−0 : 열저장 장치 비적용 시스템
HSI−1 : 열저장 장치 적용 시스템



a) Cooper tube with 2 row × 4 circuit,
Size : 400(L)×800(W)×300(H)

b) Aluminum Fin-tube,
Size : 400(L)×350(W)×250(H)

[그림 4] 열저장 장치 Thermobank

한 것이다. 고내온도를 0℃로 설정하고 부하를 주었을 때 열저장 장치를 부착한 냉동 사이클은 5분 30초, 일반 냉동(장)탑차에 장착된 냉동사이클은 9분이 소요되었으므로, 열저장시스템이 냉각시간을 약 40% 이상 단축시켰음을 알 수 있다. 또한 -5℃로 설정했을 때는 열저장시스템이 약 30% 냉각시간을 단축시켰다. 그러므로 냉각시간 단축에 의한 압축기 가동시간이 단축되므로 냉동(장)탑차 운전연료인 에너지를 그 만큼 절약시킬 수 있다.

열저장 매체 종류의 냉각시간 비교

열저장 장치는 시스템의 냉각 운전시에는 고온의 핫가스 냉매와 열저장 매체와의 열교환을 통해 축열을 이루게 되고, 이 축열된 열은 적상에 의해 냉각능력 및 시스템의 성적계수가 약 30% 감소되는 시점의 제상 운전시에 이용된다. 일반적으로 핫가스 제상에서 증발기 코일에 적상된 서리를 제거하면서 고온의 냉매는 저온의 액상태로 상변화를 하게 되는데, 이때 액상태로 압축기에 흡입될 경우 액압축으로 인해 압축기 수명 단축 및 전체적인 냉동 시스템에 좋지 않은 영향을 미치게 된다. 따라서 축열된 열저장 장치와의 열교환을 통해 저온의 액냉매는 다시 기체 상태로 상변화 하여 압축기로 흡입하게 된다.

열저장 매체로는 물과 파라핀을 사용하였다. 두 물질의 물성치는 **표 5**에 나타내었다. 두 물질 모두 상변화 물질이기는 하지만 열저장 장치 내의 온도가 100℃ 이하로 유지되기 때문에 물은 현열변화만 존재하고 파라핀의 경우 많은 종류 중에서 40℃에서 상변화는 파라핀을 사용하였으므로 현열 및 잠열의 변화가 동시에 일어난다. 물의 경우는 조달비용이 거의 들지 않고 열전도도가 좋은 특성을 가지고, 파라핀의 경우 현재 많은 분야에서 활용되고 있는 축열 물질로서 물에 비해 열전도도가 50% 정도 낮지만 잠열에 의한 열저장 때문에 소형화 할 수 있다는 장점을 가지고 있다. **표 6**은 열저장 매체에 따른 냉동탑차의 냉각시간을 비교한 것이다. 고내 설정온도 각각의 냉각시간을 살펴보면 부하 여부에 관계없이 열저장매체로 물을 사용했을 때의 냉각시간이 파라핀을 사용했을 때보다 약 50% 정도 단축됐다. 이 경우 물은 열저장장치 내에서 응축열과 열교환시 자연 순환으로 예냉역할을 함으로써 응축기에서 응축능력이 향상되었기 때문이라고 생각된다. 반면 파라핀의 경우에는 열저장장치 내에서 고체상태로 존재하다가 동일하게 응축열과 열교환을 하지만 열전도도가 물보다 50%정도 낮고 융해되었을 때에도 순환이 이루어지지 않아서 물보다 예냉능력이 줄어들

<표 5> 열저장 매체 물/파라핀 물성치

	파라핀	물
비열 (고체)	2.4 kJ/kg · K	–
비열 (액체)	1.8 kJ/kg · K	4.187 kJ/kg · K
열전도율	0.21 W/m · K	0.58 W/m · K
밀도(고체)	765 kg/m^3	–
밀도(액체)	910 kg/m^3	1000 kg/㎥
잠 열	175 kJ/kg	

<표 7> 열저장 매체에 따른 제상시기 및 제상시간 비교

설정 온도 〔℃〕	실험 조건	제상 시기	제상시간 (분)
−10℃	HSI−0	증발기 토출 풍속 50% 감속 지점 (냉동기 기동 후 약 125분 지난 시점)	5
	물		4
	파라핀		3
	Off−cycle defrost		40

HSI−0 : 열저장 장치 비적용 시스템

었기 때문이라고 생각된다.

열저장 매체 종류의 제상시간 측정

제상운전 시기는 착상에 의한 공기 풍속이 50% 감소했을 때이며 제상운전을 결정하기 전에 육안으로도 증발기의 핀-코일에 완전히 착상이 된 것을 확인하였다. 제상 시 컨테이너내의 온도변화는 핫가스를 이용한 제상운전이 off 제상운전보다 작게 나타났다. 또한 핫가스를 이용한 제상운전이 off 제상운전보다 제상시간이 단축되었다. **표 7**과 같이 열저장 장치인 thermobank를 이용하지 않았을 때의 제상시간은 5분, 열저장 매체로 물을 이용했을 때는 4분, 파라핀을 이용했을 때 3분으로 열저장을 이용한 것이 이용하지 않은 것 보다 제상시간이 약 20% 단축되었고 열저장 매체간 비교했을 땐 냉각시간과는 달리 파라핀을 이용했을 때의 제상시간이 물을 사용했을 때의 제상시간보다 약 20% 단축되었다. 이는 잠열변화에 의한 열저장 장치내의 축열량이 물보다 많아서 제상 시 이용되었기 때문이라 사료된다. 제상종료 시는 증발기의 핀 및 튜브의 적상이 완전히 제거 된 것을 확인하

<표 6> 수송용 냉동탑차의 열저장 매체에 따른 냉각시간 비교

실험 조건	설정 온도 〔℃〕	냉각시간 (분)	
		물	파라핀
무부하 상태	0	7	13.5
	−5	10	21
	−10	19	33
	−20	42	79
부하 상태	0	7	21
	−5	10.5	33.5
	−10	28	53.5
	−20	108	289

였다. off 제상은 40분이 소요되었으며 열저장 이용 제상시간의 10배나 되었다. 그러므로 시스템의 제상 방법에 따라서 컨테이너의 온도상승을 억제시키고 제상시간을 단축시킬 수 있다.

결 론

본 연구는 저온물품 수송을 위한 냉동(장)탑차의 개발로써 일반적인 main-engine type의 차량용 냉동기에 열저장 장치인 Thermobank를 설치하여 냉동(장)탑차의 제상시간 단축, 제상 시 냉동(장)탑차 컨테이너의 온도상승 억제 및 냉각시간 단축 등에 대해 실험하였다.

열저장 장치의 열교환기를 Cooper tube with 2 row×4 circuit 으로 제작한 컨테이너와 도로교통관리기준법의 차량높이 제한으로 인해 응축기와 유닛화 된 Aluminum Fin-tube 형태의 열저장 장치를 적용시킨 냉동(장)탑차의 냉각시간을 비교한 결과 열저장 매체로 물을 이용했을 때의 냉각시간이 열저장 장치를 이용하지 않았을 때의 냉각시간보다 부하여부에 관계없이 30% 단축되었다.

열저장 장치내의 열저장 매체에 따른 냉각시간을 비교한 결과 열저장 매체로 물을 이용했을 때의 냉각시간이 파라핀을 이용했을 때보다 약 50% 정도 단축되었으며, 제상시간을 비교한 결과 열저장 이용여부에 따라서는 열저장 장치를 이용한 핫가스 제상 시간이 열저장 장치를 이용하지 않는

핫가스 제상 시간보다 20% 단축되었고, 열저장 매체로 파라핀을 사용했을 때의 제상시간이 물을 이용했을 때의 제상시간 보다 20% 단축되었다.

본 시스템은 기본냉동사이클에 열저장 장치인 Thermobank를 적용시켜 일반 냉동탑차에 설치할 수 있도록 하였다. 기존 냉동시스템에 Thermobank를 추가함으로써 축냉식 냉동차량에 비해 재료비 절감 및 냉동(장)탑차의 고내 용적을 최적화 할 수 있고 에너지 절약을 위한 열저장 방식을 적용시켜 냉각시간의 단축 및 고내온도 변화의 범위을 축소시켜 0℃ 이상의 냉장수송이나 0℃ 이하의 냉동수송에 있어서 단축된 냉각시간만큼 냉동기를 가동 하지 않음으로써 그 만큼 에너지를 절약시켜 주게 된다.