



복미 냉동/냉장 쇼케이스 관련 연구 소개

■ 박 창 응 / 서울과학기술대학교, cypark@seoultech.ac.kr

콜드체인(cold chain)의 최종단계로 제품과 소비자를 연결시키는 냉동/냉장 쇼케이스는 대형마트나 슈퍼마켓의 대표적인 에너지 다소비 기기이다. 쇼케이스가 소비하는 에너지를 감소시키는 기술은 오랫동안 관련 엔지니어들의 관심 대상이었다. 본 원고에서는 ASHRAE Journal에 게재되었던 냉동/냉장 쇼케이스의 에너지 절약 및 회수에 관한 복미의 연구사례를 소개하고자 한다.

서론

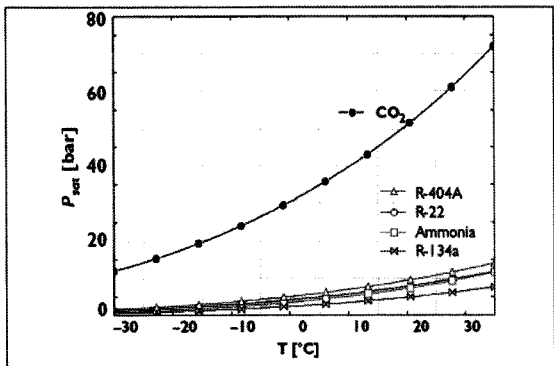
콜드체인(cold chain)은 상품가치를 손상시키지 않기 위해 저온처리가 필요한 상품을 일정한도로 유지하면서 유통시키도록 하는 일종의 저온유통 체계를 말한다. 여기서 상품은 주로 수산물, 냉동 육류, 아이스크림 종류, 청과물 등의 식료품, 약품, 유제품 등이 해당된다. 냉동/냉장 공학의 관점에서 열거할 수 있는 콜드체인의 구성요소는 생산지에서 이루어지는 냉동/냉장 처리, 저온저장시설, 냉동/냉장 수송(트럭 및 컨테이너), 포장기술, 그리고 최종 소비자에게 연결되는 냉동/냉장 쇼케이스 등이 있다. 그 중 냉동/냉장 쇼케이스는 대표적인 에너지 다소비 기기로, 소비전력 감소에 대한 연구는 관련 엔지니어의 오랜 관심분야였다. 본 원고에서는 복미에서 최근 수행된 CO₂ 냉매 적용 냉동/냉장 쇼케이스 연구 및 활용과 소매 식료품점에서 가동되는 냉동 쇼케이스에 관한 열회수 시스템 적용 예를 소개하였다.

CO₂ 냉매를 적용한 냉동/냉장 쇼케이스

이산화탄소는 슈퍼마켓 냉동에 있어서 점점 인기

가 증대되고 있다. 이산화탄소가 냉매로서 주목받기 시작한 이후, 슈퍼마켓에서는 간접시스템의 이차냉매로서 사용되어 왔으나, 최근 캐스케이드나 다단 시스템이 상업적으로 사용되고 있다. 이산화탄소를 간접 방식으로 사용하는 주된 이유는 시스템의 간소함과 이산화탄소회로를 구성하는데 다른 냉매 구성요소를 사용할 수 있기 때문이다. 이산화탄소는 초기 냉동산업부터 사용된 오래된 냉매지만 높은 작동압력과 그에 대응하는 요소부품을 찾는 데 어려움이 있었기 때문에 합성냉매의 등장으로 경쟁력을 잃게 되었다. 하지만, 최근의 기술은 높은 작동압력을 가진 이산화탄소를 활용할 수 있는 방법들을 제공하고 있다. 그림 1은 다른 냉매와 함께 이산화탄소의 압력-포화온도 선도를 나타내고 있다.

이산화탄소가 특정 영역에만 제한되는 중요한 이유는 낮은 임계온도(31℃)때문이다. 응축이 임계온도에 가깝게 일어나거나 임계온도 이상에서 열방출이 발생하는 경우 시스템은 냉방용량과 효



[그림 1] 다양한 냉매의 포화압력 곡선

울에 있어서 많은 손실을 겪게 된다. 이것은 여전히 몇몇 적용에 있어서 문제가 되고 있다. 하지만 저온에서 작동하는 냉동기에 적용하게 되면 CO₂의 열물성적 장점을 충분히 활용할 수 있게 된다.

일반적으로 슈퍼마켓에서는 냉장과 냉동을 위한 두 온도 영역이 필요하다. 즉 +2℃와 -18℃ 부근의 식품온도가 통상적으로 유지되어야 한다. 이처럼 증발과 응축에 있어서의 큰 온도차를 가진 응용에서는 캐스케이드 시스템이나 기타 2단 압축 시스템이 유리하며, 이를 이용한 시스템이 많이 사용된다. 그림 2는 CO₂를 활용한 다양한 2단 냉동 사이클을 보여주고 있다.

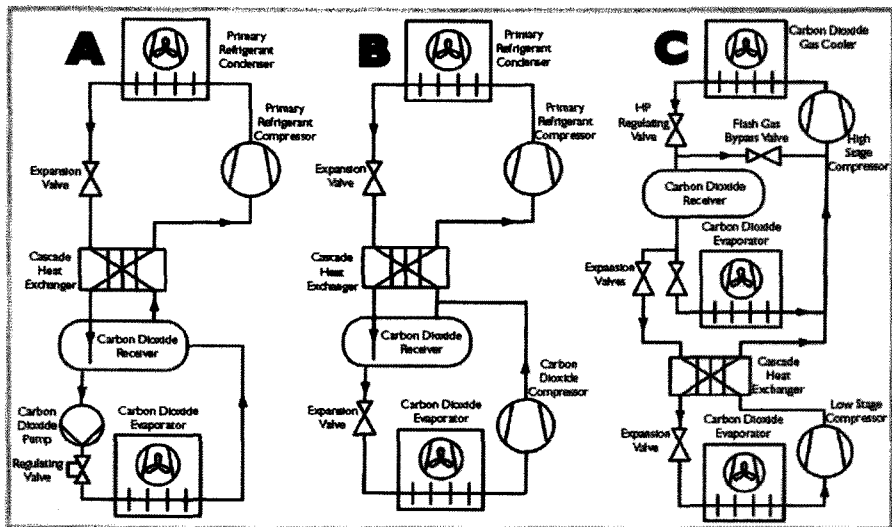
2차 유체 시스템

1990년대 초반 냉매로서 이산화탄소가 부활한 직후 상업적으로 적용된 주 기술은 이산화탄소를 간접시스템 내 2차유체로 활용하는 것이었다. 이산화탄소 회로는 주 냉동 사이클의 증발기를 통해서 사이클과 연결되는데, 증발기에서 주 냉매는 증발하고 열교환기 내 다른 한 쪽에서 이산화탄소가 응축된다. 이산화탄소 간접방식을 위한 기본적인 배열은 그림 2(A)와 같다. 이 회로들은 수액기 역할을 하는 용기를 가지고 있으며, 응축기/증발

기로부터 되돌아오는 이산화탄소를 저장하게 된다. 이산화탄소는 펌프를 통해 회로 내에서 일정한 유량으로 순환한다. 낮은 압력강하와 이산화탄소의 높은 기체 밀도에 의한 체적 유량의 감소는 펌프의 소비동력을 최소화하는데 기여할 것이고, 이는 기존 부동액 기반 시스템에 비해서 이산화탄소가 갖는 이점이 된다. 이와 같은 구성에서 증발기 내부는 펌프에 의해 공급된 이산화탄소로 항상 젖은 상태로 유지되기 때문에, 증발기의 우수한 열전달을 확보하고 냉방부하의 변화에 유연하게 대처할 수 있다.

캐스케이드 시스템

그림 2(B)에서 보여주고 있는, 저온부의 이산화탄소 적용 캐스케이드 시스템은 보다 경쟁력 있는 대체 시스템이 되고 있다. 고온부 냉매는 일반적으로 프로판, 암모니아 혹은 R-404A등이 사용된다. 중온부 냉매 회로에는 이산화탄소 혹은 다른 부동액이 이용된다. 저온부와 중온부에서 작동유체로 이산화탄소를 사용함으로써 중온부 또는 저온부에서 필요로 하는 냉동효과는 하나의 열교환기를 활용함으로써 가능하다. 다양하게 활용될 수 있는 캐스케이드 시스템에 관한 응용 예는 그림



[그림 2] (A) CO₂를 저온측 2차 유체로 사용하는 사이클. (B) CO₂를 캐스케이드 시스템의 저온부로 활용하는 사이클. (C) 고온부 및 저온부를 모두 CO₂ 시스템으로 활용하는 사이클



3에 제시되어있다.

2단 및 다단 CO₂ 시스템

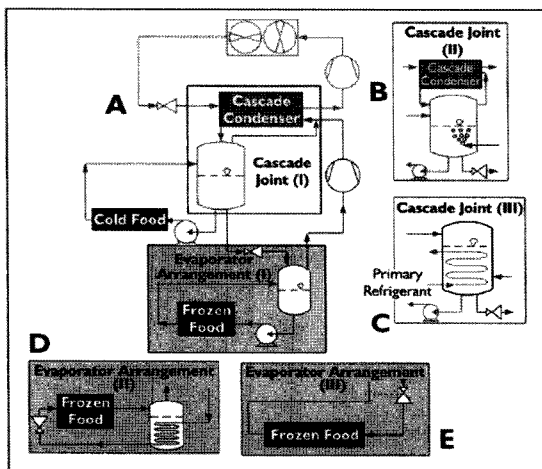
냉동설비에서 이산화탄소만을 냉매로 사용하는 것이 점차적으로 인기를 더하고 있다. 캐스케이드 개념과 비교하여 이산화탄소만을 사용한 2단 시스템을 고려하는 가장 큰 이유는 캐스케이드 응축기가 필요 없기 때문이다. 이 시스템의 단점은 상단의 응축압력이 기존 일반 냉매에 비해서 매우 높다는 것이다. 또한 주위 온도가 높은 경우 이산화탄소는 임계점보다 높은 점에서 작동하게 되어 높은 응축/냉각 온도에서의 활용은 COP의 손실을 초래한다. **그림 4**는 중간냉각기와 내부 열교환기가 장착된 다단 이산화탄소 시스템의 개략도를 나타낸다. **그림 4**와 같이 다단 시스템에 있어서 캐스케이드 응축기가 없이 3개의 회로(고온, 중온 및 저온 회로)가 중간 압력/온도를 유지하는 용기에 의해서 연결될 수 있고, 이 용기는 캐스케이드 응축기와 같은 역할을 수행할 수 있다. **그림 3**에 나타난 증발기의 다양한 배열 또한 **그림 4**의 다단 시스템에서 적용이 가능하다.

CO₂ 냉동기의 슈퍼마켓 응용 사례

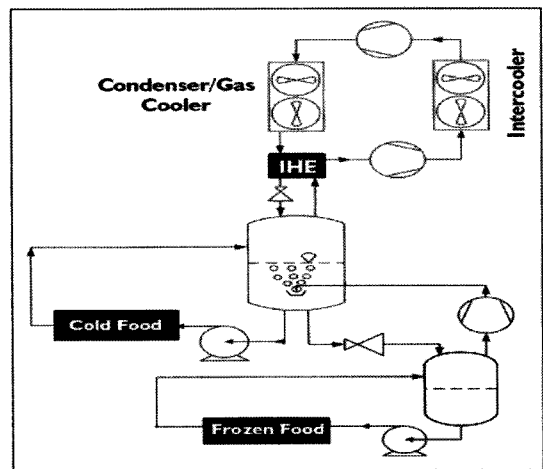
CO₂를 2차 유체로 사용한 실제 시스템을 제작하기

위해 미국에서는 2001년부터 실험적 연구가 수행되었고, 2006년 중반 상용제품이 설치되었다. 실제 운용되고 있는 CO₂ 냉동 시스템과 주변에 설치된 3대의 HFC 직접 팽창 시스템의 소요 전력을 비교 하였으며, 2007년 여름 수개월 간의 비교 결과로 비추어 보아 CO₂를 2차 냉매로 사용하는 시스템의 소요전력이 기존 시스템의 소요전력에 비해 최대 3% 정도 감소됨을 확인하였다. 하지만 1년간의 소요 전력을 평가하는 데는 추가적인 분석이 요구되었다. 이러한 추가적 분석을 위해 면적이 3600 m²인 실제 매장을 연구 대상으로 하여 3가지 서로 다른 시스템을 적용한다는 조건하에 시뮬레이션을 통한 경제성 평가가 진행되었다. 시뮬레이션을 위해 기상데이터가 사용되었으며, 매장의 크기를 고려한 배관의 길이 및 배관을 통한 열 침투량에 관한 고려가 이루어졌다. 분석 대상이 된 저온 냉동 시스템의 형태는 **그림 5**에 제시되었다.

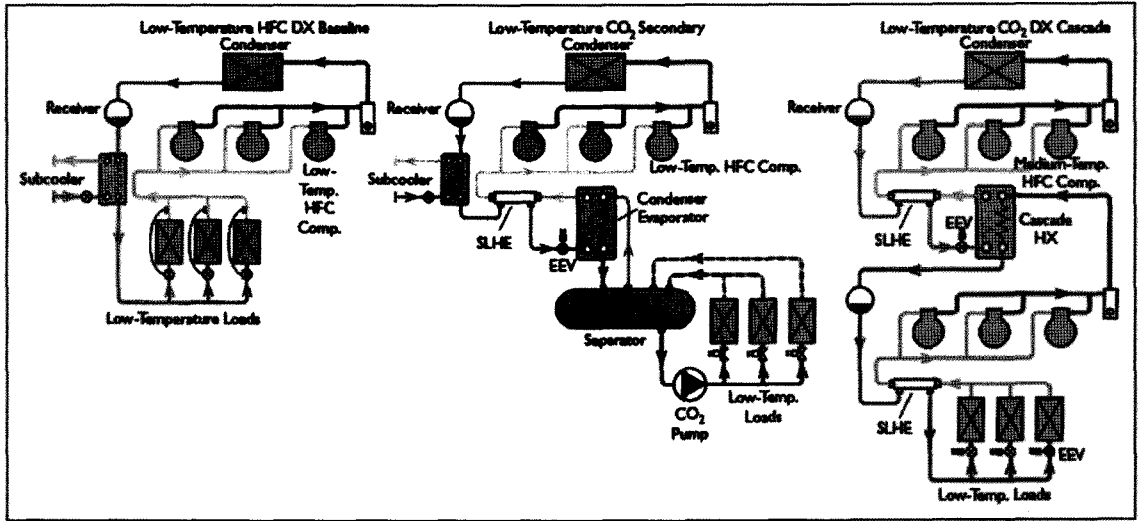
연구 대상이 된 매장에서 3가지 형태의 냉동 시스템이 1년간 소비하는 에너지량을 시뮬레이션을 통해 구하였으며, 이를 위해 미국의 세 지역, Atlanta, Boston, 그리고 Los Angeles의 기상 데이터가 활용되었다. 최소 응축온도는 HFC를 직접 팽창시키는 시스템에 대해서는 21℃, 저온부에 CO₂를 적용하는 시스템의 경우에는 10℃로 정하였다. **그림**



[그림 3] 저온부 사이클에 CO₂를 적용한 캐스케이드 시스템. B와 C는 캐스케이드 연결부를 위한 다른 배열 예. D와 E는 증발기의 다른 배열 예.



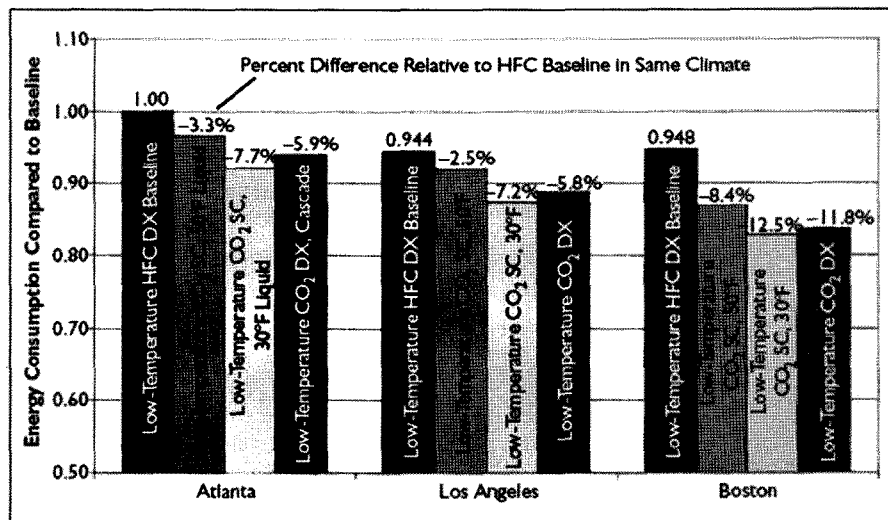
[그림 4] CO₂ 다단 시스템 개략도



[그림 5] 연구 대상인 세 가지 저온 냉동 시스템 개략도 (좌측) HFC 직접팽창 시스템, (중앙) CO₂ 저온측 2차 유체 적용 시스템, (우측) CO₂ 캐스케이드 시스템

6은 세 가지 기후 조건에서 각 시스템이 1년간 소요하는 동력을 시뮬레이션 한 결과이다. 분석결과 저온 영역에 CO₂를 2차 냉매로 사용하는 경우 HFC를 직접 팽창시키는 방법에 비해 3% ~ 12%의 에너지 절감이 가능하였으며, 그 효과는 매장이 위치한 지역의 기후와 과냉각기에서 냉각온도에

따라 달라졌다. 또한 CO₂를 직접 팽창시키는 캐스케이드 시스템의 경우에도 5% ~ 11%의 에너지 절약 효과가 있었다. 이를 통해 CO₂를 슈퍼마켓의 쇼케이스에 사용하는 경우 기존의 시스템에 비해 충분한 경제성이 있다는 것을 확인할 수 있었다.



[그림 6] 세 기후에서 다양한 냉동 시스템이 1년간 소모한 전력 비교



소매 식료품점의 냉동/냉장 쇼케이스 시스템 열회수

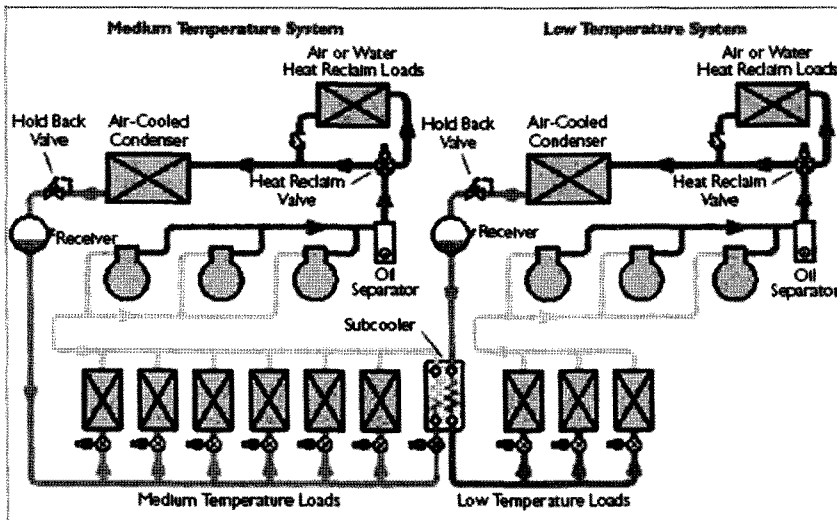
대부분의 소매 식료품점에서 가동되는 냉동시스템은 하루 24시간 작동하고 있으며, 건물전체가 소비하는 전기에너지의 1/3에서 1/2을 소모하고, 낮은 질의 열(low quality heat)을 지속적으로 제공한다. 여기에서 언급한 열의 “질”은 열을 공급하는 시스템과 회수하는 시스템 사이에 이용 가능한 온도차와 관련되어있다. 냉동 시스템에서 회수할 수 있는 열은 압축기 출구에서 과열증기 상태가 디슈퍼히팅(desuperheating: 과열증기 또는 고온/고압의 증기를 포화증기나 저온/저압의 증기로 만드는 과정)과 응축 과정을 거치는 동안 방출하는 열을 의미하며, 그 응용에 따라 온수생산, 난방시 외부공기 예열 또는 히트펌프 적용을 위한 온수생산 등으로 나눌 수 있다. 본 연구는 R-404A를 이용하는 냉동부하 378 MBh, 증발온도 -29℃인 저온시스템과, 냉동부하 889 MBh, 증발온도 -7℃인 중온시스템으로부터 미국의 각 기후 조건에 따라 회수 가능한 에너지의 양과 적용 방식을 제시한 결과를 보여준다.

온수생산을 위한 열회수

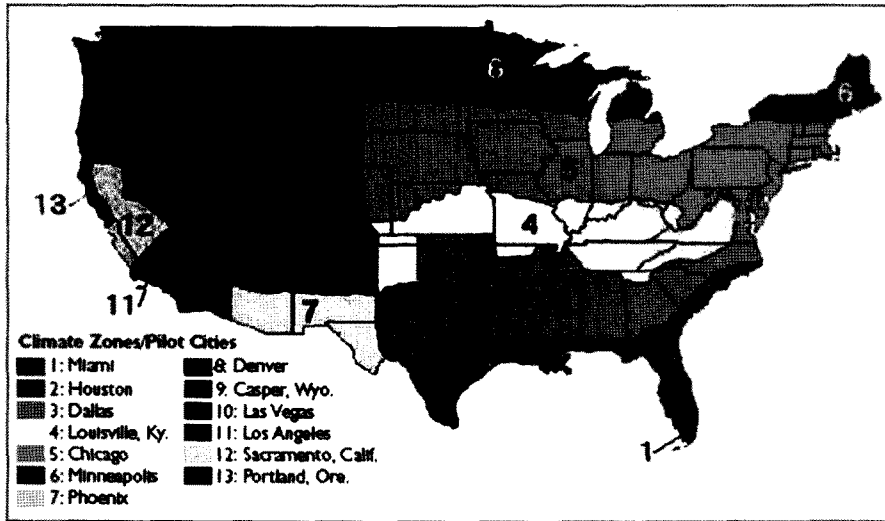
온수생산을 위한 열회수 시스템의 활용은 온수시스템이 만족해야 하는 온수온도에 의해 좌우된다. 대형매장의 경우, 순환량 0.21 L/s, 온도 55℃의 온수를 지속적으로 공급하는 저수조를 유지할 수 있는 온수생산 시스템을 요구한다. 냉동시스템을 이용한 온수생산은 저온냉동을 위한 압축기의 토출부에 연결된 열교환기를 통해 가능하다. 병렬로 연결된 압축기에서 토출된 과열상태의 냉매는 디슈퍼히팅 과정을 통해 물을 가열하게 된다. 이러한 열회수가 가능한 냉동시스템의 개략도가 그림 7에 제시되어있다.

외부공기 예열 또는 열펌프 응용을 위한 열회수

실내 공기온도와 습도를 유지하기 위해, 공급되는 외부공기를 원하는 조건으로 만드는 과정은 상당한 양의 공조부하와 에너지 소모의 원인이 된다. 건물의 지리적인 위치는 건물의 공조와 냉동시스템 설계의 선택에 큰 영향을 준다. 건물 공조시스템의 요구 난방부하와 냉동시스템으로부터 회수되는 가용 열 에너지량은 외기의 기후조건에 따라 조정될 수 있다. 그림 8은 미국 Walmart에서 제시한 냉동/냉장 설비 운전관련 미국 13개 기후지



[그림 7] 온수생산 열재생 과정이 포함된 공랭식 응축 냉동시스템



[그림 8] 기후지역과 각 기후지역에서 기준이 되는 도시

역을 보여주고 있으며, 냉동시스템에서 회수 가능한 열에너지량은 기후지역에 따라 크게 달라진다. 일반적으로 외기의 온도가 47.5°F (8.6°C) 이상인 경우에는 모든 기후지역에서 열회수를 통한 난방이 필요하지 않다.

공기조화 장치의 열교환기를 이용하여 외기를 예열하는 방식에서, 가열용량은 상대적으로 질이 낮은 열에너지를 통해 만족된다. 일반적으로 예열 코일로 유입되는 물의 유량과 온도는 각각 2 L/s와 16°C, 그리고 유출되는 물의 온도는 7°C 정도이다. 냉동시스템은 주어진 외기온도 조건에서 발생하는 열부하를 만족시켜야 하며, 또한 외기 온도에 상응하는 최저 응축온도를 가져야 한다. 이러한 요구사항을 충족시키는 냉동시스템의 개략도가 그림 9에 제시되어 있다. 그림 9의 냉동시스템은 수냉식 응축을 적용하였고, 응축기에서 발생한 온열 상태의 작동유체가 펌프에 의해 예열코일에 공급되고 다시 순환되어 돌아오도록 구성되었다.

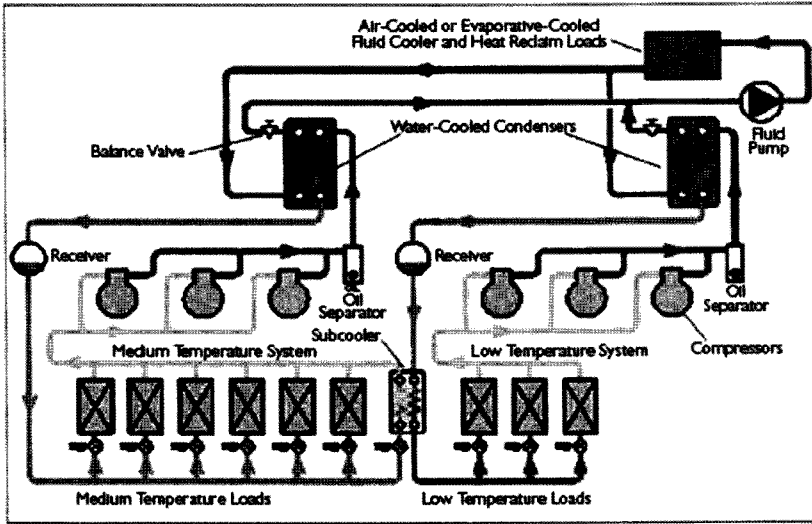
외부 공기에열 또는 열펌프 응용을 위한 열회수를 통해 얻을 수 있는 투자수익률(ROI: Return on Investment)을 분석해 보면 미국남부(그림 8의 지역2)의 ROI는 15.1년으로 미국중북부(그림 8

의 지역6)의 4.2년에 비해 상대적으로 낮은 값을 보여주고 있으며, 이는 열회수 적용지역은 각 프로젝트의 지리적 위치에 따라 고려되어야 한다는 것을 보여주고 있다.

냉동시스템과 공조시스템을 통합시키는 시스템을 구현하기 위해서는 상당한 노력이 필요하며, 장치와 제어에 관한 올바른 이해를 통해서만 소요하는 에너지 요구량을 감소시키는 시스템을 현실화 할 수 있다. 또한 공조업계와 냉동업계의 협력을 통해 두 기술영역의 전통적인 경계를 넘어 새로운 시장을 창출하는 것도 가능하다. 공조와 냉동산업은 종종 두 개의 분리된 독립 영역으로 간주되지만, 두 산업을 에너지와 관련된 규약과 기준으로 통합시키는 노력이 필요함을 알 수 있다.

결론

본 원고는 냉동/냉장 쇼케이스와 관련된 북미의 연구 및 적용 사례로 CO₂ 냉매 사용 쇼케이스와 식료품점의 냉동 쇼케이스를 위한 열회수 시스템을 소개하였다. 북미의 경우 지역에 따른 기후 특성이 매우 다르게 나타나므로, 이를 고려한 기술의 세분화 및 전문화가 두드러지게 나타났다. 또



[그림 9] 공기예열 열재생 과정이 포함된 수냉식 응축 냉동시스템

한, 시공 이전에 시뮬레이션을 포함한 철저한 설계, 시공, 분석, 그리고 경제성 평가로 이어지는 북미의 실용적 기술 성향이 냉동/냉장 쇼케이스 관련 연구에서도 그대로 투영되고 있음을 알 수 있다.

참고문헌

1. Sawalha, S., 2005, Using CO₂ in Supermarket Refrigeration, ASHRAE Journal, August, pp. 26-30.
2. Hinde, D., Zha, S. and Lan, L., 2009, Carbon Dioxide in North American Supermarkets, ASHRAE Journal, February, pp. 18-26.
3. Pearson, A. and Campbell, A., 2010, Using CO₂ in Supermarkets, ASHRAE Journal, February, pp. 24-28.
4. Royal, R., 2010, Heat Recovery in Retail Refrigeration, ASHRAE Journal, February, pp. 14-22.
5. Wal-Mart Climate Zone Map. 