

## 저온 축열에 의한 에너지의 합리적 이용

### Cold Storage and Rational Utilization of Energy

노 승 탁

S. T. Ro

서울대학교 공과대학 기계공학과



- 1943년생
- 열공학을 전공하였으며 대체냉매, 냉동기 / 열펌프, 에너지 저장 등에 관심을 가지고 있다.

#### 1. 서 론

연료를 비롯한 각종 에너지원으로부터 동력이나 다른 형태의 열에너지로의 전환시에 효율을 최대화하고 이를 이용할 때에 발생하는 비가역적인 손실을 최소화함과 동시에 이에 소요되는 경제적인 비용을 적정한 선으로 유지함은 에너지의 합리적 이용에 있어 항상 대두되는 문제점이다.

시간에 따른 부하 변동을 평준화하여 조절할 수 있는 축열은 에너지의 이용에 있어서 대단히 중요한 문제로 부각되어 있다. 자연의 에너지 이용 측면에서 보면 주간에만 취득이 가능한 태양에너지를 야간의 난방에, 또는 야간의 열복사에 의하여 냉각된 저온을 주간의 냉방에 이용하고, 여름철의 열에너지를 저장하여 겨울철에 사용하는 문제 등이 이에 속한다. 그러나 최근에 이르러서는 에너지 가격의 상대적 하락에 따라 오히려 설비 투자비의 경제성을 고려한 에너지의 저장에 더욱 중점을 두고 있다. 특히 원자력발전을 주전력원으로 사용하는 경우 부하 조절의 한가지 방법으로 축열을 권장하고 있다.

현재 국내의 소비전력의 계절별, 시간대별 편중현상이 날로 심화되고 있으며, 그 원인은 여름철 냉방수요의 급증으로 인한 여름철로의 전력소비 최고 기간의 천이 현상과 함께 주, 야간의 전력소비의 불균형이라 볼 수 있다. 이러한 현상은 앞으로도 지속될 전망이다. 이러한 전력부하의 불균형의 문제점을 해결하기 위해서는 양수 발전소, 열병합 발전소 건설 등 여러가지 방법이 있으며, 한편으로 값싼 심야 전력을 이용하는 빙축열 시스템도 효과적인 방법으로 주목을 받고 있다.

빙축열 시스템은 부하 편중의 주요인인 여름철 전력수요의 해결방안으로서 전력부하를 균형화하며 실용화가 다른 시스템에 비하여 용이하므로 세계 각국에서 활발히 연구 개발되고 있다. 우리나라에서도 초기 개발 보급 단계에 있으며, 몇몇 건물에 설치하여 그 성능을 검토해 본 바 있다. 그림 1은 여름철의 전형적인 냉방부하에 대하여 냉축열에 의해서 전력부하를 평준화시키는 예를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 주간에 건물이 필요로 하는 냉방 부하를 야간의 냉축열로 공급할 때 최대부하의 50% 정도로 부하를 낮출 수 있

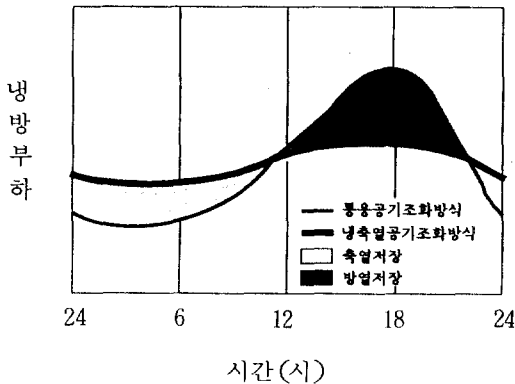


그림 1. 냉축열에 의한 냉방부하 조절

다. 이 비율은 물론 축열조의 크기 등 투자효과를 감안하여 결정해야 한다.

일반적으로 축열 방식은 현열만을 이용하는 것과 현열 및 잠열을 동시에 이용하는 것으로 나뉠 수 있으며, 빙축열 시스템은 후자에 속한다. 현열 및 잠열을 이용한 축열 방식은 현열만을 이용한 방식보다 축열조의 부피가 작아지고 열손실 또한 낮아지는 장점을 가진다. 공학적인 측면에서 빙축열 시스템은 축열 방식에 따라 여러가지 방식으로 구분될 수 있으며, 각각 장단점이 보고되고 있다.

## 2. 빙축열 방식

빙축열 시스템은 기본적으로 냉동기, 축열조, 열교환기 등으로 이루어진다. 야간 축냉 시에는 냉동기의 저온부를 축열조에 연결하여 냉열을 얼음의 잠열로서 저장하며, 주간에는 축열조내의 냉열을 부하측에 방열한 후 다시 냉동기에 의하여 재충전된다. 빙축열 방식은 기본구성은 모두 동일하나 냉매 순환방식, 제빙방식, 2차 매체 순환방식 및 운전방식에 따라 여러 형태로 분류할 수 있다. 빙축열 시스템의 전반적인 분류와 장단점 및 일본, 미국 등에서의 시험 또는 개발 예는 김영인 등의 보고서에 상세히 기술되어 있다.

빙축열 시스템의 성능은 일반적으로 최대 저장가능 열량, 전체 축열량에 대한 야간축열의 의존도, 축열된 열량중 유효한 방출량, 열

원기기의 효율 등으로서 측정될 수 있다. 이러한 여러가지 요인들을 고려하여 종합평가가 가능하다. 빙축열 시스템의 목적함수는 경제성이라 할 수 있다. 즉 야간 전력을 이용하여 운전비용을 줄여서 필연적으로 수반되는 설치비용을 가능한한 상쇄시키는 것이 바람직하며, 이를 위해 시스템 성능해석을 통해 적절한 빙축열 시스템을 선정하고 또한 그 운전 형태를 결정해야 한다. 이를 위하여는 현재 우리나라에서 적용하고 있는 심야전력요금제도 같은 제도는 필수적이다.

빙축열 방식은 제빙 형식에 따라서는 빙박리형(harvest)형, 캡슐(capsule)형, 관외착빙(ice-on-coil)형 등으로 분류된다. 부하처리 면에서 분류하면 심야 시간에 주간 냉방용량의 100%를 축열하고 주간에는 냉동기의 가동 없이 축열조의 방열로만 냉방하는 전체 축열식과 냉동기와 축열조를 동시에 운전하여 부하에 맞는 용량 조절을 하는 부분축열식으로 나뉜다. 전체축열식은 에너지 절감효과는 최대이나, 장비 용량이 커져 투자비가 과다하며 경제성이 떨어진다. 부분축열식은 다시 냉동기가 기저부하를 담당하고 용량초과분을 축열조 방열로서 냉방하는 방식과 축열조의 방열로서 일정부하를 만족시키고 부족된 냉방부하를 냉동기를 가동하여 보충하는 방식으로 분류된다. 전자의 경우 자동제어가 간단하고 냉동기의 효율이 좋으나 최대전력 제어가 곤란하며, 후자는 최대전력제어가 용이하나 자동제어가 복잡하고 냉동기의 운전효율은 저하된다. 그러나 계절별, 시간대별 전기요금이 상이할 경우 후자가 경제적인 운전 방법이라 하겠다.

제빙에 필요한 냉열원 공급방식은 냉동기의 증발기에서 생산된 저온의 브라인을 빙축열조의 열교환기 내로 순환시켜 제빙하는 브라인 순환식과 냉동기 순환 냉매를 축열조의 열교환기 내에서 직접 팽창, 증발시켜서 제빙하는 냉매 직접 팽창식이 있으나, 균일한 제빙과 초기 비용감소, 제빙효율 등의 측면에서 브라인 순환식이 많이 사용된다. 그림 2에 브라인 순환식의 계통도를 보였다. 한편 직접팽창식의

단점을 보완하는 방법이 연구되기도 한다.

일반적으로 열교환 코일을 축열조에 배치하는 방식은 축열조 설계시 코일의 배치 및 코일의 길이가 길어짐으로서 코일내의 냉매의 큰 출입구 온도차로 인하여 코일주위의 균일한 얼음의 생성 등에는 많은 어려움이 따른다. 이러한 문제점을 해결하고 단위 시간당 생성 얼음량의 증가를 위해 우수한 열적 성능을 가진 2상 밀폐서모사이폰(two phase thermosyphon)의 이용가능성이 연구된 바 있으며, 실험결과 얼음의 부피 및 평균 두께의 상승 추세로부터 약간 전력이용의 빙축열 시스템에 대한 적용이 가능할 것으로 보인다.

해빙방식에는 열교환기내에 브라인이 순환하여 제빙한 뒤 별도의 냉수계통을 통해 냉수를 부하측으로 열교환시키는 직접 접촉방식과

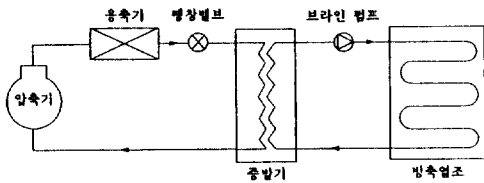
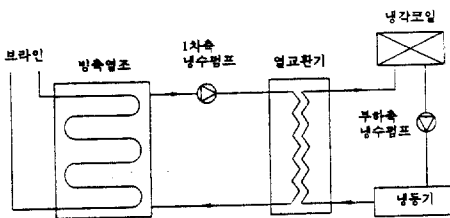
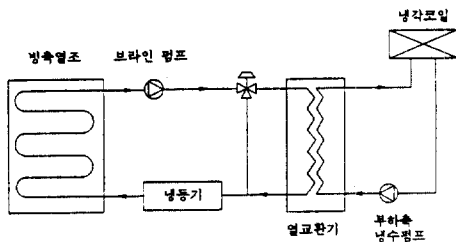


그림 2. 브라인 순환식 냉열원 공급 방식



(a) 직접 접촉식



(b) 간접 접촉식

그림 3. 축열조 해빙 방식

방빙시 브라인이 제빙시의 브라인계통으로 순환하여 온도가 낮아진 뒤 열교환을 통해 냉수를 생산하는 간접접촉식이 있다. 간접접촉식이 냉동기의 성능이 감소하는 단점은 있으나, 시스템이 간단하고 경제적이다. 그림 3에 직접접촉식과 간접접촉식의 계통도를 보였다.

현재 도입된 빙축열 시스템들은 대부분 부분부하 축열방식이며 물/브라인 열교환기를 설치하여 부하측에 물을 순환시키는 방식을 택하고 있으나 브라인을 직접 순환시키는 방식을 택하기도 한다. 빙축열 시스템의 운전방식은 각 시스템에 따라 약간의 차이가 있으나 크게 다음과 같이 구분할 수 있다.

○ 축열 운전 (storage charge)

심야전력으로서 축열조에 얼음을 생성시켜 냉열을 저장하는 과정

○ 방열 운전 (storage discharge)

주간냉방을 위하여 축열조내의 얼음의 방열로서 냉방하는 과정

○ 동시 운전 (parallel discharge)

부분 축열의 형태로서 주간냉방을 위하여 축열조 해빙과 동시에 냉동기를 가동시키는 과정

○ 냉동기 운전 (chiller only)

주간 시간대에 냉동기만으로 가동시키는 과정

3. 빙축열에서의 문제점

빙축열과 같은 잠열 축열방식이 일반적으로 체적당의 열용량이 현열 시스템에 비하여 크고 이것이 잠열 축열의 이점이 되는 것은 잘 알려져 있다. 그러나 얼음을 포함한 잠열재는 일반적으로 자체의 열전도율이 낮아 교체화되는 과정의 시간당 열전달량이 작아지는 단점이 있다. 이를 극복하기 위하여는 저온냉동축의 온도를 더욱 낮추어야 하나 이는 냉동기의 성능계수, 즉 소요 동력의 증가를 초래한다. 또한 주어진 열용량을 만족하기 위하여는 축열조의 크기가 커져야 하는 문제점이 따르게 된다.

빙축열의 경우 만약 물 또는 얼음과 유사한 열적 성능을 가지고 빙점만이 0℃ 대신

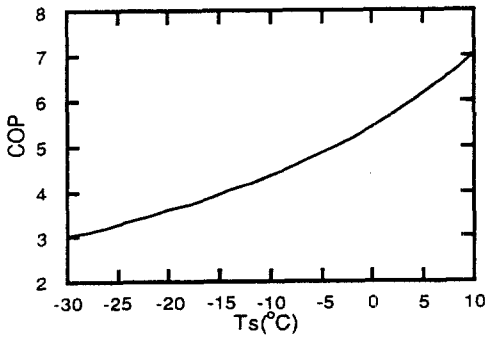


그림 4. 증발기 냉매온도에 따른 역카노사이클 냉동기의 성적계수 변화

5°C 또는 10°C인 잠열재를 이용한다면 동일한 온도차에 의하여 열교환을 시킬 때 훨씬 유리한 측면에서 냉동기를 작동시킬 수 있다. 이상적인 역카노사이클에서 저온 증발부의 온도( $T_s$ )에 따른 냉동기의 성적계수(COP)는 그림 4에 나타낸 바와 같다. 이 그림에서 고온응축부의 온도는 50°C로 고정된 것이다. 실제 냉동기의 경우에 성적계수의 값은 이상적인 경우와는 달라지나 저온부의 온도에 따른 경향은 그림 4에서와 유사하다.

다른 하나의 문제점은 열전달 성능상의 문제이다. 관 주위에 얼음이 생성되는 율은 시간이 경과함에 따라 얼음층이 열저항으로 작용하여 점차 감소하게 된다. 따라서 관 주위에 생성되는 얼음의 양을 일정한 수준 이하로 제한하여 축열조를 설계하거나 열전도를 촉진시키는 방안을 모색해야 한다.

한편 냉동기로부터 브라인에 의한 열교환을 거쳐 얼음을 얼리는 경우 브라인 관의 길이와 길어지면 자체의 압력 손실과 온도의 상승이 나타나게 된다. 이는 브라인 관을 단일관이 아닌 분관으로 설치하여 해결할 수 있을 것이며, 서모사이폰을 이용할 수도 있다.

#### 4. 빙축열에서의 열전달과 냉동기의 성능

앞서 서술한 축열과정시 수반되는 성적계수의 감소를 극복할 수 있다면 빙축열방식의 이점이 더욱 부각될 것이다. 방열량이 주어진

경우 증발부 온도를 높이면 성적계수는 증가하나 반면에 축열시간이 증가할 것이다. 한편 동일한 조건에서 상변화 물질인 물의 빙점온도를 높인다면 축열시간이 감소할 것이다. 따라서 빙점온도를 높여서 축열시간을 증가시키지 않고서도 성적계수를 증가시킬 수 있을 것이다. 물론 이러한 조건을 만족시키는 축열재는 일부 개발되어 있는 것으로 알려져 있다.

간단한 경우로서 주어진 방열량( $Q_L$ )에 대하여 증발부 온도, 빙점온도 변화에 따른 축열소요시간, 소요동력의 변화를 기술하면 다음과 같다. 축열량은 5000 kJ로 설정하고, 하나의 냉매 파이프가 무한 수조의 축열조안을 축열하는 경우로 단순화하였다. 물의 초기온도  $T_0$ 는 15°C, 빙점온도를  $T_f$ (°C), 증발기의 냉매온도를  $T_s$ (°C)로 표기한다. 이 경우 냉동기는 R-12를 사용하고 압축기는 등엔트로피 과정으로 작동하며 압축기에 유입되는 냉매의 상태는 포화증기인 것으로 가정하였다. 축열조의 냉매관은 지름이 2 cm, 길이는 1 m로 택하고 빙결과정은 순수 열전도에 의해서만 일어난다고 가정하였다.

##### 4.1 증발기 온도의 영향

냉동사이클에서 증발부의 온도가 높아지면 압축일(W)은 감소한다. 그러나 증발온도가 높아지면 필요한 열량만큼의  $Q_L$ 을 축열하는데 걸리는 시간이 늘어나고, 증발온도가 너무 높아지면 주어진 시간, 예를 들어 야간전력 시간대에 필요한  $Q_L$ 을 축열할 수 없는 경우가 생기므로 일정한 한계가 존재한다. 그림 5는 빙점온도가 각각 0°C, 5°C와 10°C인 경우에 증발부의 온도에 따라 5000 kJ을 냉축열하는데 소요되는 시간을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 증발기의 온도가 상승함에 따라 5000 kJ을 축열하는데 필요한 시간은 급증하게 된다. 그러나 그림 6은 이에 소요되는 압축기 일을 나타낸 것으로 앞서 서술한 바와 같이 증발기 온도 상승에 따라 압축기 일이 감소함은 자명하다.

##### 4.2 상변화 온도의 영향

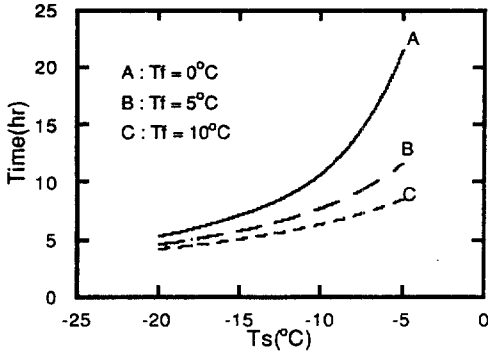


그림 7. 빙점온도에 따른 얼음 두께의 변화

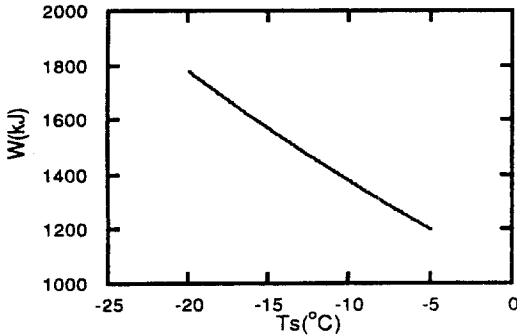


그림 6. 증발기 냉매온도에 따른 압축기 일의 변화

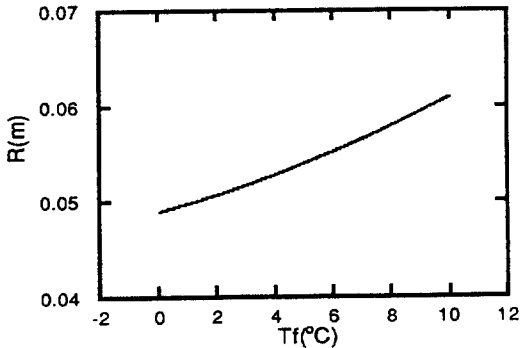


그림 5. 증발기 냉매온도에 따른 축열시간 변화

상변화물질인 물의 다른 물성치는 변하지 않고 빙점온도만 변한다고 생각하였다. 빙점온도가 높을수록 액체가 차지하는 현열이 감소하므로 잠열이 차지하는 비중이 커진다. 따라서 단기간에 축열이 가능하다. 그림 5에 나

타난 바와 같이 빙점온도가 상승함에 따라 축열에 소요되는 시간은 크게 감소하며, 증발부 온도가 상당히 높아진 경우에도 제한된 시간 범위내에서 축열용량을 만족시킬 수 있음을 알 수 있다.

반면에 잠열부하가 클수록 제빙되는 얼음의 양이 많아진다. 그림 7은 물의 초기온도가 15°C인 경우 5000 kJ을 축열하였을 때 빙점온도에 따라 얼음의 두께를 나타낸 것이다. 그림에서 반경 R은 관의 중심으로부터의 거리를 뜻한다.

위의 계산은 초기 물의 온도를 15°C로 가정한 경우이나, 초기 온도가 낮을수록 같은 량의 에너지를 축열하는데 소요되는 압축기 일은 작게 된다.

결국 축냉시의 소요동력을 줄이기 위해서는 증발부 온도를 높여야 하며, 그로 인한 축열 시간의 증가를 막기 위해서 상변화 온도를 높여주는 것이 바람직하다. 그러나 이때 고려되어야 할 것은 제빙되는 얼음의 부피가 증가한다는 것이며, 이러한 요인들을 감안한다면 시스템의 구속조건(가능한 축열시간, 축열조 크기)에 따라서 적절한 최적의 운전조건이 존재할 것이다.

## 5. 결 어

잠열을 이용한 냉축열은 에너지의 합리적 이용, 특히 전력부하의 평준화에 따른 국가적 투자를 감소시키기 위하여 대단히 중요한 방법이 된다. 그러나 이에 수반되는 축열 시스템의 설계, 축열재의 개발 등이 에너지의 효율적 이용에 필수적인 요건이다.

## 참 고 문 헌

1. 윤호식, 노승탁, "냉열 잠열 축열조의 성능해석", 공기조화냉동공학회 하계 학술대회 초록집, pp. 33-37, 1988.
2. 유호선, 김영인, "빙축열조의 방냉과정해석", 공기조화냉동공학 논문집, 1권 1호, pp. 9-20, 1989.

3. 경익수, "2상 밀폐 서모사이폰을 이용한 빙축열 시스템의 실험적 연구", 서울대학교 석사학위논문, 1989.
4. 김영인, "공조용 축열시스템 개발", 과학기술처 보고서 2N473-3515-2, 1989.
5. 윤창현, "빙축열 시스템의 성능평가", 냉동공조기술, Vol.8. pp. 38-43. 1991.
6. 이석준, "아이스 렌즈 타입 (Ice Lens Type) 시스템 소개 및 시공 사례", 냉동공조기술, Vol. 8. pp. 44-58. 1991.
7. 최규명, "아이스 온 코일형 빙축열 시스템 및 설치 사례", 냉동공조기술, Vol.8. pp. 59-67. 1991.
8. 신용식, "Dynamic Harvest 방식 빙축열 시스템", 냉동공조기술, Vol.8. pp. 68-75. 1991.
9. 유영태, "Ice-Ball 시스템의 소개 및 시공 사례", 냉동공조기술, Vol. 8. pp. 76-83. 1991.