

連載

빙축열의 시스템적 효과에 관한 고찰 (Ⅲ)

Systematic Effects of Ice Storage System (Ⅲ)

생산기술연구원 빙축열 연구팀
Ice Storage Research Group
KAITECH

전력 부하의 평준화를 도모하여 발전설비를 효율적으로 이용하고 쾌적한 냉방환경을 조성하기 위하여 우리나라에서도 빙축열을 이용한 냉방시스템의 활발한 보급이 이루어지기 시작했습니다. 이와 때를 같이하여 최근 일본 東電建設(株)의 中本泰發씨가 省에너지誌에 게재한 “빙축열의 시스템적 효과에 관한 고찰”이 우리나라 빙축열 관련 종사자 제위에게도 많은 참고가 되리라 사료되어 생산기술연구원 빙축열 연구팀에서 번역하여 금번 '94년 4월 호부터 7회에 걸쳐 연재할 예정입니다. 참고로 원문의 내용 및 분위기를 살리기 위하여 직역하였음을 밝힙니다.

6. 얼음의 생성·저장에 관한 에너지 경제

지금까지는 방축열시스템의 평가가 아직 제대로 이루어지고 있지 않은 요인으로 에너지 소비와 초기투자가 크다는 점을 서술하였으며, 고에너지 밀도저장, 잠열직접반송 및 큰 온도차이용 등의 특성을 갖는 빙축열시스템은, 수축열시스템과는 별개의 독립시스템인 점을 제기하였다. 그래서 그 공간이 되는 얼음반송에 있어서 해결할 수 없는 기술상의 문제는 없다는 점, 즉 관로내에 얼음의 정체·폐색을 발생시키지 않는 적절한 설계와 요소·기구의 사용이 가능한 것, 물단상과 같은 기준으로 설계할 수 있다는 점 등에 대해서 서술하였다.

그러면, 고에너지 밀도저장이라고 하지만 그것은 과연 어느 정도의 것일까? 그것은 또 다른 잠열축열장식에 비하여 눈에 띄게 「뛰어난 것」일까? 그리고 냉동기의 동력소비에 관계된 본질적인 문제는 무엇일까?

이번 호에서는 얼음의 저장한계나 제빙과정에서의 에너지 경제에 대해서 고찰해보도록

한다.

6.1 얼음의 저장에 관한 한계분률

동적제방(dynamic) 방식에 의한 얼음의 저장에는 다른 장소에서 생성한 얼음을 저장조의 상부에서 투입하는 경우와 저장도내의 브라인중에 저온의 냉매를 직접 분사하여 생성시키는 경우 등 여러가지 방식이 있다. 이처럼 얼음의 생성·처리의 방법에 따라 다르지만, 얼음의 안식각(angle of rest)은 의외로 작아(harvest 얼음인 경우 약30°), 어느 경우에 있어서도 단지 분작위로 얼음을 저장 조내에 투입하는 것만으로는 큰 빙충전율을 실현하는 것은 불가능하다.

일반적으로 빙충전율이 50% 정도에 근접하면, 외관상 얼음은 축열조의 바닥면에 다다르며, 60% 정도를 넘으면 표면에서 위로 솟아오르는 상태가 된다. 이렇게 되면 얼음이 공기와의 접촉하는 면적이 증가하며 또 순환수의 showering 등 냉열을 빼내어 이용하는데에 지장을 주게 되므로 이 정도가 거의 저장한계라고 볼 수 있다. 특히 건물의 이중 슬라브 아래

를 저장조로서 이용하는 경우에는, 조의 전면적에 걸쳐서 골고루 얼음을 분산시키는 것은 매우 귀중한 기술이다. 이 기술의 난이도는 대규모가 됨에 따라서 더욱 높아지므로 실패하면 평균적으로는 20% 정도의 빙층전율밖에 안되는 시스템도 있을 수 있다.

그런데, 단위저장조용적당 얼음의 에너지 저장밀도는 어느 정도가 되는 것일까? 얼음의 밀도를 $\rho_i \cdot \Delta H [=920\text{kg}/\text{m}^3]$, 얼음의 용해열을 $\Delta H [=333.5=\text{KJ}/\text{kg}]$ 이라고 하고 현열분을 고려하지 않는다면,

$$\begin{aligned} \rho_i \cdot \Delta H &= 920 \times 333.5 \\ &= 306,820 [\text{KJ}/\text{m}^3] \\ &(\text{약 } 73,300 \text{ kcal}/\text{m}^3) \end{aligned}$$

빙층전을 60%로 한다면, 약 184,000KJ / m^3 (약 44,000kcal / m^3) 정도가 된다.

이것을 다른 잠열축열방식과 비교하면, 예를들어 축열용기에 충전한 노즐(nodule : 유기질 수화염 공정물을 축열재로써 봉입한 직경 약 70mm의 수지제 구형 capsule) 에 냉매로 통과시켜 노즐표면에서 축·방열을 행하는 STL(Storage par Chaleur Latente, 프랑스, Cristopia 사)은 상변화 온도 0°C의 것으로 40,000kcal / m^3 가 가능하다고 한다.

이렇게 보면, 확실히 물의 현열축열에 비하면 상당히 고밀도의 에너지 저장이 가능하지만, 잠열축열방식끼리를 비교하면, 다이나믹 방식이라 할지라도 스태틱(static) 방식이나 60%에 가까운 STL 등, 다른 잠열방식에 비해서 현격하게 우수하다고 말할 수 있는가는, 축열밀도의 관점만으로 보면 즉시 납득할 수 있다고는 말할 수 없을 것 같다.

이러한 수송관내의 빙분율은 유속등의 조건에도 의존하지만 대략 40%정도가 되면 외관상 얼음은 관내를 완전히 채우며, 기동형태로 되어 강제처럼 이동한다. 이와같은 관찰에서 보듯이 유속 2m/s 전후를 유지하는 것이 가능하므로, 실용적으로는 25~30% 정도까지가 안전할 것이다. 이것에 대해서는 다음 호에 자세히 서술한다.

6.2 냉동기에서의 에너지 소비

물 단상에 의한 현열축열에 비해 얼음에 의한 잠열축열의 고 에너지 밀도저장화, 소형화의 장점은 누구나 인정하는 바이다. 그러나 5~7°C의 냉수보다도 온도가 낮은 얼음을 생성하는 것은 냉동기 냉매증발온도의 필연적 저하를 의미하며, 냉동기 성적계(cop)수의 극단적인 저하를 초래한다. 증발온도가 1°C 내려가면 성적계수는 2~3% 저하하므로, 수축열의 증발온도인 0~2°C 일 때의 성적계수에 비해, 0°C의 얼음을 생성하기 위해서 -5~7°C 정도의 증발온도를 필요로 하는 제빙 사이클에서는 수축열 보다 15% 정도 성적계수가 뒤떨어진다.

성적계수를 계산하는 경우는, 실제로 냉동 사이클을 작동시키는 냉매의 증기선도(p-h선도 등)을 이용하지만, 그러기 위해서는 냉매등을 결정하지 않으면 안되므로 지금 여기서는 역 카르노 사이클 효율에 따라서 이상적인 상태에서의 성적계수의 비교를 해보도록 한다.

일정한 열 사이클에 기초해서 작동하는 계에 일을 주어 열을 이동시키는 냉동기나 열펌프에 있어서, L을 외부에서부터 주어진 일량(동력), Q_L, Q_H 을 각각 온도 T_L 의 저온열원에서 퍼올려지는 열량 및 고온 T_H 의 고온열원으로 방출하는 열량이라고 한다면, 성적계수 ϵ 는

$$\epsilon = \frac{Q_L}{L} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

로 정의될 수 있다.

만일 응축온도 T_H 을 42°C라고 하고, 증발온도 T_L 을 수축열과 빙축열에 대해서 각각 -2°C ~ -12°C로 한다면, 각각의 성적계수 ϵ_w 는 대략,

$$\begin{aligned} \epsilon_w &= \frac{273-2}{42+2} = 6.16 \\ \epsilon_i &= \frac{273-12}{42+12} = 4.83 \end{aligned}$$

이 되고 얼음쪽이 20% 이상이나 낮다. 이것은 그대로 동력차가 되므로 예를 들면 냉방능력 1Gcal/h 마다의 압축일은

$$L_w = 1,000,000 / 860 / 6.16 \approx 190\text{kW}$$

$$L_i = 1,000,000 / 860 / 4.83 \approx 240\text{kW}$$

이고, 그 차는 약 50kW가 된다. (물론 지금은 역 카르노 사이클 효율을 사용하고 있으므로 실제의 동력차는 이것보다도 작아진다.)

그런데, 지금까지 많은 운전실적을 갖고 있는 정적 빙축열방식에서는 대부분은 축열조에 설치한 냉각부인 코일형태의 전열관의 외측(또는 내측)에 솔리드 아이스(solid ice)를 성장시킨다. 이 얼음은 전열관 표면에서 얼음 자신이 열의 저항체가 되므로 축열운전시 얼음의 두께가 증가함에 따라서 열전달율이 악화되며, 냉동기의 성적계수가 저하되어 간다. 이것은 얼음의 열전달율이 $2.22\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ [약 $1.9\text{kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$]로서 콘크리트의 $1.8\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ 와 토양의 $2.9\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})$ 의 중간에 상당하는 단열효과를 갖기 때문이다. 이 얼음의 전열특성의 나쁜점은 당연히 열수요시에 얼음을 용해하고자 할 때에도 단점으로 작용하며, 열부하 응답을 악화시키는 것과 동시에 해빙의 불균일을 가져오는 큰 요인이 되고 있다는 것이다.

이것은 시스템의 원리에서 기인하는 정적 방식의 숙명적인 특성이지만, 동적 방식에는 이와같은 약점이 없는 것일까?

다이나믹 방식은 얼음생성을 위한 열전달기구부(냉각부)와 얼음생성부가 분리되어 있으며, 만들어진 얼음을 연속적으로 저장조로 수송·저장하므로 제빙과정에서 제빙기 그것에 얼음이 부착·성장하는 것이 아니며, 원리적으로 얼음의 단열성이 제빙때문에 열전달을 저해하는 것이 아니므로 운전이 계속됨에 따라서 생기는 냉동기 성적계수의 저하가 기본적으로는 없고, 따라서 축열조내의 빙층전율에 관계없이 항상 일정한 전열특성을 유지하

는 것이 가능하다.

그렇지만 동적방식에서도 직접접촉식 제빙 방식처럼 제빙기의 일부가 되는 축열조에 브라인(수%의 에틸렌 글리콜이나 프로필렌 글리콜 수용액 등)을 채우고, 조의 바닥부분에 설치된 스프레이 노즐로 냉매를 분사시켜 브라인의 수분을 동결·석출시키며 생성된 얼음은 저장조의 상부로, 비중이 큰 냉매는 저장조 바닥부분으로 분리·순환하므로써 연속적으로 얼음을 생성시키는 방식(브라인과 냉매가 반대인 방식도 있다.)에서는 제빙 운전이 진행되어 저장조내의 빙층전율이 커짐에 따라서 용액이 농축되며 그 결과 용액의 응고점이 저하되어 가므로 냉동기의 성적계수가 낮아진다.

그래서 농축된 조내의 용액으로는 점점 얼음이 석출되기 어려운 상태가 되며, 저장조가 만방이 되기 이전에 실용적인 한계가 생긴다. 브라인에 6%의 에틸렌 글리콜을 사용한 예에서는 조내용액의 온도가 -2.2°C 에서 얼기 시작해서 -4.5°C 까지 변화하며 이 사이에 냉동기증발온도는 -7°C 에서 -10°C 까지 저하한다고 한다.

이처럼 직접접촉식제빙방식에만 한하지 않고 제한없이 부동액등 이차 매체를 브라인으로 사용하며 그 용액중의 수분을 얼음으로 석출시키는 제빙방식에서는 몰로부터 직접 얼음을 만드는 하베스트방식이나 과냉각방식 등에 비해서 일반적으로 낮은 증발온도가 요구되며, 더우기 운전이 계속되면서 성적계수의 저하가 불가피한 방식이 많다. 따라서 이와같은 방식에서는 냉동기의 용량이나 전열관의 면적도 주어진 축열용량을 달성하기 위해서는 성적계수가 저하되었을 때를 예상해서 크게 설계해 두지 않으면 안되며 초기 투자비와 동력비도 증가한다.

이처럼 빙축열은 수축열에 비해서 냉동기 증발온도가 낮으므로 성적계수도 뒤떨어질 뿐만 아니라 운전의 경과에 따라서 성적계수가 한층 저하한다고 하는 것은 정적 방식만의 특

질은 아니다. 그러나 같은 동적 방식끼리도 제빙방식의 차이에 따라서 에너지 소비에 현저한 차가 나타나는 것은, 좀더 주목되어야만 하는 것은 아닐까?

갖고 있는 데이터만으로는 단정적으로 말할 수 없지만 구체적인 예에서 성적계수를 보면 과냉각방식은 생성되는 얼음의 온도가 다른 방식에 비해서 가장 높기(=0°C) 때문인지 냉동기단체로는 3.75라고 하는 높은 값을 얻을 수 있는 것 같다. 또한 맑은 물로부터 얼음을 생성시키는 동적 방식은 증발온도 -5°C에서 성적계수는 3.1이 된다. 이것에 비해 브라인을 사용하는 방식에서는 증발온도가 -10°C 전후로 낮기 때문에 성적계수도 2.6 정도가 되며, 직접 물로부터 얼음을 만드는 방식에 비해서 어느쪽도 10수 %에서 최대 30%의 동력차가 있다. 이를테면 생성분해 온도 8.5°C의 포집화합물을 만드는 잠열축열 시스템에는 3.70이라고 하는 예가 있다.

최근에는 냉동기증발온도를 주야로 바꾸어서 낮 동안에는 증발온도를 높게 운전하여 냉동기의 효율을 향상시키는 방식이 일반화 되어가고 있는 것 같다.

6.3 부대적 에너지 손실

동적 제빙방식에서의 에너지 경제상 또 하나의 문제는 물이 일회의 순환 사이클로 전부 얼음이 되어버리는 것은 아니라는 점이다. 예를들면 과냉각방식에서는 냉동기에 의해서 냉각되어 -2~-3°C 정도의 과냉각 상태가 된 물에 어떠한 충격을 주어서 이 상태를 깨뜨리며 순간적으로 샤베트 상태의 얼음을 석출시키지만 이 때 생성되는 얼음의 전순환수량에 대한 비율은 겨우 수% 정도에 지나지 않으며 나머지 대부분의 물은 얼음과 분리되어 축열조 하부로부터 순환 펌프로 과냉각기에 재순환한다. 이것은 동적 방식에서도 브라인 직접접촉식에서도 모두 같으며 얼음이 갖는 큰 잠열의 역효과에 기인한다.

즉, 이때 생성되는 얼음의 전순환 수량에

대한 비율은 순환수온도 T_w 와 냉매온도 T_c 와의 온도차(또는 과냉각도) Δt 에 의해서 결정된다. 물의 정압비열 C_p 를 4.217kJ/(kg·K) (1 kcal/kg·°C), 물의 응고잠열 ΔH 를 333.5kJ/kg (약 80kcal/kg)이라고 하면,

$$R = \Delta t \cdot C_p / \Delta H$$

에서 온도차(또는 과냉각도) 1°C마다 순환수량의 약 1.26% 만이 얼음으로 변화하지 않아 얼음이 되지않은 물은 다시 순환 펌프로 냉동기로 보내지며 이것을 반복함으로써 축열조내의 빙층진율을 증가시켜 가는 것이다.

이때 대부분의 물 재순환계는 노즐 등 산수부가 말단에서 개방되어 있기 때문에 싸이폰 효과가 없어 순환 펌프에는 순환계배관의 전압력손실과 노즐에서의 분사압력손실에 노즐 높이의 위치 에너지를 주기 위한 정적 수두가 더 필요하다. 이 동력은 동적 방식에서는 특유한 것으로 냉동기의 압축기 소비전력이외에 얼음제조에 따른 무시할 수 없는 직접적 시스템 손실이라고 보여지며 그 값은 냉동기와 제빙부의 거리가 클수록 커진다. 결국 이것은 냉동기와 제빙부를 분리해서 설치할 수 있다는 동적 방식의 특징이 낳은 과잉 에너지 소비이다.

이외에 팬이나 브라인 펌프 등 많은 보조기기가 있으며 성적계수를 평가할 경우에는 이들을 합한 전 시스템 동력으로 행해야 하는 점을 잊어서는 안된다. 다음 회에서 서술할 예정이지만 축열조에서 얼음을 수송로에 균일하게 내보내기 위한 교반기 등의 장치가 필요하다면 이것도 적지않은 전력을 소비할 것이다. 냉동기의 압축기 소비전력에 이들 부대적 시스템 보조기기(소내동력)을 가미한 것을 시스템 성적계수라 부르기로 한다면 앞에 쓴 냉동기단체의 성적계수에 비해서 거의 1.0 정도 저하하는 것 같다.

6.4 에너지의 손실

이렇게 해서 얼음생성부에서의 에너지 소비가 수축열 시스템에 비해서 현저하게 뒤떨어

지는 점은 누가 보아도 분명하다. 그러면 빙축열시스템의 에너지 경제면에서 본질적인 문제는 0°C 라고 하는 이용 레벨의 에너지를 얻기 위해서 -10°C 전후의 증발온도를 사용하지 않으면 안되는 것에 있는 것일까?

그러나 생각해볼 것도 없이 빙점하의 온도의 얼음은 잠열이외에 현열분만큼 냉수보다도 보유 에너지가 크다. 결국 현열분 만큼 취해 보아도 0°C 의 냉수는 5°C 의 냉수보다도 엑서지(exergy)가 클 것이다.

물에 투입된 빙점하 온도의 얼음은 물과 현열차에 상당하는 에너지를 방출해서 주위의 물을 냉각하며 0°C 의 물이 되어서 평형한다. 냉동기의 성적계수를 논하지 않는다면 이 시점에서 냉동 사이클에 있어서 지나치게 낮은 냉매증발온도의 일부는 에너지적으로 물중으로 회수되며 부가가치를 높이는 것이 된다. 이렇게 보면 이 경우 어떻게 하면 증발 온도가 낮은 것만이 시스템이 안고 있는 문제인 것은 아닌 것 같다.

귀중한 외부 에너지를 투입시켜 얻든 이 0°C 라고 하는 냉수의 엑서지가 그대로는 이용되지 않으며 어디엔가 큰 비가역손실을 발생시켜 버리고 있다는 것에 본질적인 문제가 잠재한다고 추론하는 것은 빗나간 것일까? 만약 시스템에 이와같은 「에너지의 손실」이 있고 이것을 방치해서 개선의 노력이 되지 않은 채 평가의 불확실한 대립만을 계속하고 있다면 「빙축열시스템은 에너지 절약이 안된다.」라고 세간에서 돌아보지 않아도 그것은 어쩔수 없는 것이 아닌가. 특히 엑서지적 평가에 대

해서는 시스템 전체를 종합해서 다른 기회에 고찰할 예정이다.

이상, 이번 호에서는 제빙·저장부에 있어서 에너지 경제에 대해서 고찰하였다. 우선, 저장에서 빙층전율의 상한은 60% 정도이고 적정한 값은 50% 전후라고 볼 수 있는 점, 그러나 이 값을 실규모 플랜트에서 실현하는 것은 꽤 곤란하다고 생각되는 것, 얼음의 제조에는 냉동기 냉매 증발온도의 필연적인 저하가 수반하여 냉동기의 성적계수의 극단적인 저하로 연결되는 점, 더욱 주목할 것은 동일한 빙축열방식끼리도 제빙방식에 따라서 큰 차이가 있으며 게다가 다이내믹 방식이라고 해도 운전의 경과에 따라서 성적계수가 저하하는 방식도 있는 점등이다.

이렇게 빙축열시스템의 얼음생성·저장부에서의 에너지 경제는 예상이상으로 나쁘고 또 얼음이외의 점열축열방식에 비해서 조차도 현저히 우수하다고 할만한 점은 보이지 않는다. 그러면 이 손실분을 회복하고 빙축열시스템에 효과적 평가를 줄 수 있는 방법은 어떤 것일까? 다음 회에서는 특히 수송계의 경제성에 대해서 고찰해 보고자 한다.

《참고문헌》

- 11) Hosuka, 1992, "Harvest식 빙축열 시스템과 빙수반송", 제9회 혼상류 lecture series, 일본혼상류학회.
- 12) Mori, 1993, "공냉식 열펌프 STL축열시스템", 성에너지 중간호 Vol.45, No.4.