

連載

빙축열의 시스템적 효과에 관한 고찰 (V)

Systematic Effects of Ice Storage System (V)

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.

8. 이상(二相) 수송관로의 경제성

전회까지 서술한 것은 얼음 제조과정에 있어서 냉동기 성적계수(COP)는 냉수의 경우에 비해 20% 이상이 낮다는 점, 더우기 같은 빙축열방식이더라도 제빙방식에 따라서 20% 전후까지의 큰 차이가 있다는 점은 주목되어야 한다는 것, 저장에 있어서 적정한 빙층전율은 50% 전후라고 볼 수 있다는 점, 애써 얼음을 만들지만 현재는 축열조에서 0℃의 물을 꺼내 사용할 수 없는 비가역 손실을 초래하고 있는 점 등에서 볼 때 적어도 제빙·저장과정에서의 에너지 경제는 다른 잠열축열방식에 비해서 확연히 뛰어나다고는 볼 수 없다는 점, 이와 같이 큰 에너지 소비나 비가역손실이나 초기투자에 의한 부정적인 평가를 상쇄할만한 축열시스템의 장점을 발휘시키기 위해서는 그래도 수축열 시스템에 비해 6~10배에 이르는 고에너지 밀도저장과 재래의 냉수단상(單相)에 의한 현열반송에 대해 동일유량에서 거의 3~5배, 대온도차(大溫度差) 이용이 가능한 경우는 실제로 5~7배의 냉열을 수송하

는 것이 가능한 얼음·물 이상 흐름에 의한 잠열 직접반송과 그 대온도차 이용을 결합하여 수축열 시스템으로부터 독립된 시스템의 구축이 중요하다는 것을 강조하였다.

그중에서도 축열조로부터 0℃의 물을 취할 수 없는 데서 기인하는 비가역 손실을 피하기 위해서도 유효한 수단인 되는 얼음의 반송을 수송한계분율이 40% 정도이고 실용적으로는 30% 전후가 적절하다고 생각되는 점, 이와 같은 반송을 충분한 확증시험에 의해서 모든 조건의 최적화를 도모하면 실용화를 위한 기술적인 문제는 없을 것이라는 점, 즉 물단상과 거의 같은 기준으로 설계할 수 있고, 또 관로내에 얼음의 정체·폐색을 일으키지 않는 적절한 요소·기구의 사용이 가능한 점, 그렇지만 관직경이 작을수록 한계분율에 빨리 도달하는 경향이 있으므로 아직 연구에 착수되지 않고 있는 수백 mm을 넘는 관구경을 사용한 장치에서의 확증시험이 불가결하다는 점 등을 서술하였다.

그러면 이번 호에서는 이 열수송계의 경제성에 대해서 재래의 냉수 단상반송시스템과

비교하면서 고찰해 보기로 한다.

8.1 배관 크기의 상정(想定)

얼음의 잠열을 이용한 고에너지밀도 냉열반송은 대규모 지역열공급 플랜트 등에 적용할 때 그 장점이 최대로 발휘된다.

이때 반송가능한 단위유량당 열량을 보면 온열에서는 예를 들어 60℃의 온탕인 경우에 251.1kJ/kg(약 60kcal/kg), 0.8MPa(약 8kg/cm²)의 포화증기(170.4℃)이면 2767.5kJ/kg(약 600kcal/kg)까지도 달하는 것에 비해, 냉수인 경우에는 이용온도차와 상한온도가 정해져 있으므로 반송 가능한 열량은 고작해야 20~30kJ/kg(5~7kcal/kg)에 지나지 않는다.

게다가 최근의 열수요는 냉열량이 온열량보다도 많으므로 이것이 한층 냉열수송관의 크기와 반송동력을 크게 하거나 혹은 냉수의 용량부족을 초래하고 있다. 플랜트의 규모가 커지면 냉수수송관의 구경은 1m을 넘게 되고 설치할 때 큰 공간의 확보가 필요하며 또한 건설비도 높아 냉수배관이 지역열공급 플랜트 전체의 20%을 넘는 경우도 적지 않다. 따라서 배관직경을 작게 하는 것은 시스템상 큰 장점을 주게 된다.

그러면 이와 같은 지역열공급 배관이 어느 정도의 크기가 되는가를 계산해 보기로 한다. 배관 크기를 결정하기 위해서는 가까운 장래의 지역열공급 프로젝트의 열수송 규모를 상정해야만 한다. 그러기 위해서는 현재 진행중, 혹은 계획중인 대규모 지역열공급 프로젝트의 동향을 보는 것이 참고가 될 것이다. 예를 들면, 수도권에서 보면 “Makuhari 도심·확대지구”가 있으며, 또 관서지구에서는 “Nakanojima Rokchome Nishi 지구”의 예가 있다. 전자의 열공급량은 6만냉동톤(약 200Gcal/h), Makuhari 신도심 전체합계는 12만2천냉동톤(약 405Gcal/h)에 이르며 전부 완성되면 세계 최대규모가 된다. 한편, 후자의 최종적인 냉열설비용량은 약 2,740USRT(약 8.3Gcal/h)으로, 이들과 같은 대규모의 지역열공급 시스템은

이후의 부도심·신도시개발·재개발의 단계에서 점점 증가할 것이 예상된다. 따라서 이후 예상되는 열수송량의 규모는 적어도 10Gcal/h을 예측해 두는 것이 타당하며, 장소와 상황에 따라서는 50~200Gcal/h을 고려해 둘 필요가 있을 것이다.

재래의 냉수단상 수송배관의 경우에는 통상 5~7℃에서 수송되어 12~14℃로 되돌아오므로 그 현열이용열량은 30~20kJ/kg(7~5kcal/kg)이다. 50Gcal/h을 수송하고자 생각한다면 그 냉수배관 직경 D_w 은 1.1m, 100Gcal/h라면 1.6m(양쪽 다 유속 2m/s라고 할 때)가 된다. 이것에 대해 얼음과 물과의 고액이상 수송에서 기대할 수 있는 열수송량은 전회에서도 계산했듯이 빙분율 C 가 30%에서 140.9kJ/kg(33.64kcal/kg)이었다. 단, 축열조출구 온도는 빙수온도 t_m 으로 0℃, 귀환온도(축열조입구 냉수온도) t_i 는 12℃이다.

여기서 상기한 냉수단상수송과 같이 얼음·물 이상수송관에 대해서도 50Gcal/h와 100Gcal/h인 경우의 관경을 계산해 보면,

$$50\text{Gcal/h인 경우, 직경 } D_m = 0.573\text{m}$$

$$100\text{Gcal/h인 경우에는 } = 0.810\text{m}$$

이 되고, 배관 크기는 거의 1/2이 된다.

여기서도 전회와 같이 얼음·물 이상수송관경 D_m 과 냉수단상수송관경 D_w 와의 비를 일반식으로 나타내면(도중의 식의 전개 생략함) 반송열량 및 유속이 같다면 대략,

$$(D_m/D_w)^2 \doteq t_i/(80C + t_i)$$

이 되고 전회의 수송가능열량비(10월호 본란 p.417)와 일치하는 모양이 된다. 이 시산식에서 보면, 빙분율 30%인 경우의 상기직경비는 0.579, 약 60%가 된다. 이 비는 현열분이 작아질수록 작게 된다.(빙분율이 일정할 때는 온도차가 작아질수록, 또한 귀환온도가 일정한 경우는 빙분율이 클수록 작음) 즉, 이상수송이 배관을 작게 하는 효과가 커진다. 이를테면 빙분율 30%에서 t_i 가 7℃(소온도차)인 때는 약 48%로 배관을 축소시킬 수 있다. 이 때는 역설적으로 냉수 단상수송에서 대온도차

를 이용할 수 있다면 얼음을 운반할 필연성이 상대적으로 작아진다는 것을 의미한다.

참고로 이미 만들어진 열공급배관으로의 적용가능성을 생각해서 직경 약 0.1m(100A)인 기설배관으로 어느 정도의 열량을 수송할 수 있는가를 역산하면, 빙분율이 30%인 이상류 1t/h의 보유열량은 112.6MJ(26.9Mcal)이므로, 유속 2m/s일 경우의 유량 56.5t/h에서는 약 1.5Gcal/h의 수송이 가능하게 된다.

8.2 시스템 비용 비교

얼음·물 이상류에 의한 잠열 직접반송방식에서 기대되는 장점은,

- ① 열반송밀도의 향상에 따른 공간, 공사비 및 그 관련비의 삭감
- ② 열반송밀도의 향상에 따른 반송동력비의 절감
- ③ 열반송의 장거리화

가 있다.

그래서 여기서는 주로 열반송계의 공사비와 운전비에 따른 연간경비를 평가지표로 해서 대충 비교를 해보자.

(1) 검토조건

경제성의 엄밀한 해석은 다음회에서 서술할 예정인 지역공급배관 방식의 선정을 위시해 수요상징, 운전 패턴 등 다양한 모델화, 또는 모든 단가 등에 따라서 다소의 차이가 생길지도 모른다. 그러나 그것은 얼음·물 이상반송 시스템의 최적화와 다른 방식의 잠열반송 시스템과 비교할 경우로 적어도 냉수단상 시스템과 얼음·물 이상시스템과의 비교에 있어서는 결과의 평가에 영향을 주는 조건은 아니라고 판단된다. 양자의 차는 그만큼 현저하다는 것이다. 그래서 여기서는 검토조건을 다음과 같이 설정하였다.

- 열 수 송 량 10Gcal/h(약 3,300RT)
- 열 수 송 거 리 1km
- 공급배관방식 왕복 2모관(main pipe), 전용구(專用溝)방식 (주변온도 20℃)

유 속 2m/s 전후

수송거리에 대해서는 비용이나 소요동력 등을 비례적으로 생각하면 좋으므로 평가의 단위 길이는 1km로 하였다. 이것이 실용상 상한이 되는 것은 아니다. 이점에 대해서도 다음회에 서술한다.

또한 아직은 여기서의 비교 시산범위는 열반송계로 제한하는 것으로 하며, 부지가격이 축열조 크기, 전용구 등을 포함한 토목·건축 관련비용, 혹은 열공급모관자신의 축열효과 등에 대한 차이는 검토에서 제외한다. 이것들은 말할 것도 없이 얼음반송 시스템측의 가치를 한층 부가시키는 것이다. 여기서 기재하는 경우는 지면의 형편상,

Case 1. 재료 시스템(냉수단상 현열반송)

- 송수온도 $t_o = 5℃$
- 귀환온도 $t_i = 12℃$

Case 2. 얼음·물반송 시스템

- 빙 분 률 $C = 30\%$
- 송수온도 $t_o = t_m = 0℃$
- 귀환온도 $t_i = 12℃$

의 두 경우만 보도록 한다. 단위유량당 냉열 반송량은 앞에 서술한 조건에서 각각

$$\begin{aligned} \text{Case 1. } H_1 &\div (t_i - t_o) \cdot r \cdot C_p \\ &= (12 - 5) \cdot 1000 \times 1 \\ &= 7\text{Mcal/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Case 2. } H_2 &\div (Q_m + t_i C_p) \cdot C \cdot r \\ &+ (t_i - t_o)(1 - C) \cdot r \cdot C_p \\ &= 35.7\text{Mcal/m}^3 \end{aligned}$$

이다.

(2) 배관 크기와 펌프 용량

지역열공급배관(모관)내를 흐르는 유량은,

$$\begin{aligned} \text{Case 1. } 10[\text{Gcal/h}] \div 7 [\text{Mcal/m}^3] \\ = 1,430\text{m}^3/\text{h}(23,800\text{l/min}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Case 2. } 10 [\text{Gcal/h}] \div 35.7 [\text{Mcal/m}^3] \\ = 280\text{m}^3/\text{h}(4,670\text{l/min}) \end{aligned}$$

관내유속을 2.0m/s 전후로 해서 시판하는 강관 크기로부터 선정하면,

- Case 1. 500A
- Case 2. 250A

가 되며, 마찰손실과 관내유속은 각각,

Case 1. 마찰손실 7mmAq/m
유 속 2.0m/s

Case 2. 마찰손실 11mmAq/m
유 속 1.7m/s

이 된다. 이 수치는 일반적인 냉각수계에 대한 마찰손실값인 10~40mmAq/m, 가장 많이 자주 이용되는 25mmAq/m에 비해서도 매우 작다. 이들 조건에서 pump 용량을 구하면,

Case 1. 75kW × 3대

Case 2. 55kW

이 된다. Case 1.은 유량이 크기 때문에 펌프를 3대로 분할하였다. 펌프의 소요수두는 위의 직관부에 있어서 각각의 마찰손실 외에 곡관부, 분기·합류, 밸브류, 사용자측의 사용설비 등의 분량을 더하여 Case 1.에서는 약 40m Case 2.에서는 약 50m로 하였다. 또한 펌프효율은 약 70%로 하였다.

(3) 열손실비용

배관에서의 방열손실비용을 다음 식으로 계산한다.⁽¹⁸⁾

$$C_h = H_q \cdot T_o \cdot C_e / 800 \quad [\text{엔/년}]$$

여기서,

$$H_q = -W(t_o - t_a) \cdot \{1 - e^{-L/(W \cdot R)}\}$$

$$W = Q \cdot r \cdot C_p$$

C_h : 배관으로부터의 열손실비용 [엔/년]

H_q : 배관으로부터의 열손실량 [kcal/h]

T_o : 전부하상당운전시간 [h/년 = 800]

C_e : 전기종량요금 [엔/kWh = 11.17]

t_a : 배관주변 평균온도 [°C = 20]

L : 배관길이 [m = 1,000]

R : 배관의 총열저항 [$\frac{m \cdot h \cdot ^\circ C}{kcal} = 3$]

Q : 유량 [m³/h]

r : 물의 비중량 [kg/m³ = 1,000]

C_p : 정압비열 [kcal/kg · °C = 1.0]

이것으로부터,

Case 1. $C_{h1} = 58,100\text{엔/년}$

Case 2. $C_{h2} = 69,500\text{엔/년}$

을 얻을 수 있다.

(4) 펌프의 동력비

냉수 펌프의 운전에 의한 연간 소비동력비는,

$$C_r = H_m \cdot (T_o \cdot C_e + 12C_{ec})$$

여기서,

C_r = 펌프의 소비동력비 [엔/년]

H_m = 모터의 소비동력 [kW]

(= 펌프 정격출력)

C_{ec} = 전기기본요금 [엔/kw · 월 = 1,600]

그 결과는,

Case 1.에서는

$$H_{m1} = 75\text{kW} \times 3 = 225\text{kW}$$

$$C_{r1} = 225 \times (800 \times 11.17 + 12 \times 1,600) = 6,330,000\text{엔/년}$$

Case 2.

$$H_{m2} = 55\text{kW}$$

$$C_{r2} = 55 \times (800 \times 11.17 + 12 \times 1,600) = 1,548,000\text{엔/년}$$

(5) 배관공사비

열공급배관은 왕복 2관식 같은 크기의 모관 형식으로 하며 배관중량당 공사비는 200만엔/t을 기초로해서 산출한다. 이들 중에는 배관·밸브류, 단열재, 배관지지장치를 포함하지 않 앞에서 서술한 것처럼 토목·건축관련공사는 포함하지 않는다.

Case 1. (500A)

배관중량 195t

공사비 195t × 200만엔/t = 390,000,000엔

Case 2. (250A)

배관중량 85t

공사비 85t × 200만엔/t = 170,000,000엔

(6) 펌프 설비비

펌프의 설비비는 펌프의 정격동력[kW]을 기준으로 하며 설비비 단가를 37,000엔/kW로 해서 산출한다.

Case 1.

설비동력합계 225kW
 설비비 225kW×37,000엔/kW
 = 8,325,000엔

Case 2.

설비동력합계 55kW
 설비비 55kW×37,000엔/kW
 = 2,035,000엔

(7) 에너지 경비

이상의 계산결과를 종합하면 연간 운전에너지 경비는 (3)과 (4)항으로부터

Case 1. 58,100+6,330,000
 = 6,388,000엔/년
 Case 2. 69,500+1,548,000
 = 1,618,000엔/년

(8) 설비비

또한 총건설비는 (5)와 (6)항에 의해

Case 1. 390,000,000+8,325,000
 = 399,000,000엔/년
 Case 2. 170,000,000+2,035,000
 = 172,000,000엔/년

이 된다.

표 8.1 종합비교

항목 \ Case	Case 1 종래시스템	Case 2 빙분률 30%
운전비 (천엔/년) (%)	6,388 100	1,618 25
운전비 (백만엔) (%)	399 100	172 43

(9) 비교결과

이상의 결과를 종합하면 표 8.1과 같이 된다. 또한 참고로 에너지 단가를 계산하면 설비비를 년경비로 환산해서,

Case 1. 399,000,000엔×0.15

= 59,850,000엔/년

Case 2. 172,000,000엔×0.15
 = 25,800,000엔/년

단, 여기서 사용한 년평균경비율 0.15는 다음식으로 계산하였다. 즉, 년평균 경비율중 고정비분 r 은 잔존가액 10%로서,

$$r = 0.9 \cdot \frac{r(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} + 0.1 \cdot i$$

여기서,

i : 금리(= 8%/년)

n : 내용년수(= 20년)

이것으로부터 고정비분 r 은 0.1, 이외에 보수비를 0.03, 제경비 및 기타를 0.02로 예상하여 년평균경비율을 약 0.15로 하였다.

이것으로 위의 표에 운전비를 더하면,

Case 1. 59,850,000엔+6,388,000
 = 66,238,000엔/년
 Case 2. 25,800,000엔+1,618,000
 = 27,418,000엔/년

년간 전부하상당 운전시간 T_0 을 800시간으로 한 10Gcal/h의 에너지 단가는,

Case 1. 8.25엔/Mcal
 (그중 고정비분 90.4%)
 Case 2. 3.43엔/Mcal
 (그중 고정비분 94.1%)

이 값은 배관방열손실, 펌프 운전동력비(전기값), 배관 및 펌프 설비공사비만의 주로 열수송계만의 비교이므로 이 값 그 자체가 곧바로 에너지 경비라고 말할 수 없을지도 모르지만, 각각의 성격을 잘 표현하고 있다고 해도 좋을 것이다.

이처럼 얼음·물 이상류 흐름에 의한 잠열반송 시스템을 채용하면, 물단상에 의한 재래형 현열반송 시스템에 비해 운전비에서 약 1/4(소비동력도 약 1/4), 설비비에서 1/2 이하로 아주 싸진다는 것이 판명되었다. 이때 표 8.1에서도 밝혀졌듯이 냉열공급 시스템에서 연간경비가 차지하는 비율은 고정비분이 압도적이고 운전비는 전경비의 10%을 넘지 않는다. 따라서 우선 설비비의 대폭적인 저감

이 필요하고 얼음·물 이상흐름에 의한 잠열 반송 시스템의 채용이 그것을 가능하게 한다고 예견할 수 있다는 것은 의의가 크다.

고정비나 변동비를 잡는 방법은 물론 여기서 계산한 항목만은 아닐지도 모르겠으나 결과로써 얻어진 경향은 대체적으로 틀림없다는 점은 여러분 스스로의 손으로 확인하기 바란다. 번잡하지만 계산의 근거를 모두 제시한 것은 그 때문이다.

참고로 빙분률의 차이에 따른 효과로서는 만약 50%로서 반송가능하면 약 30%의 경우보다도 운전비에서 약 15%, 설비비에서 더욱 저감 가능하다. 단위반송열량당 냉열단가는 재래형 물단상 현열반송 시스템에 비해서 4.85엔/Mcal이라고 하는 큰 차가 발생되었다. 이들 결과는 모델화나 계산조건의 차이가 있으므로 절대값을 그대로 채용할 수는 없을지라도 하나의 방향을 시사하고 있는 것이라고

할 수 있다.

여하튼 냉열공급 시스템의 에너지 단가는 고정비의 저감에 의해서 대폭적으로 절감할 수 있는 가능성이 있으며 얼음의 이상반송은 그것을 실현함과 동시에 얼음제조과정에 있어서 필연적인 낮은 냉매증발온도에서 기인하는 동력증가분을 열수송과정에서 충분히 회복할 수 있다는 것이 판명되었다.

다음 회는 장거리운송, 배관방식에 관한 고찰·평가와 요소기술개발 등에 대해서 서술한다.

참고문헌

- 18) S. Kurihara, "지역 냉난방의 경제적 규모 결정에 관한 연구(제1보)-온열공급시의 경제적 면적에 대하여", 동경전력설계기술연구지. No.4(1989)