

## 관외착빙형 코일에 대하여

### Ice on Coil of Ice Storage System

이 희 찬

H. C. Lee

금성전선(주) 공조설계실



- 1959년생
- 빙축열 설비중 빙축조판  
런 개발에 관심을 가지고  
있다.

#### 1. 머리말

심야전력을 이용하여 주간전력 사용량의 Peak 시간대 전력수요를 격감시키고 열장치의 효율적 활용을 위해 축열의 개념이 도입되었다. 축열 공조에 있어서 많이 사용되는 시스템 중의 하나로 관외착빙방식을 들 수 있다.

빙축열 방식이 기존공조방식과 상이한 점은 주간부하 분배를 위하여 심야시간대에 열을 저장해야 하므로 증발온도가 기존재래방식에 비하여 낮게 운영되며, 특히 얼음의 성층이 증가하면서 열저항으로 인하여 초기 설정 증발온도보다도 낮아질 수가 있다.

이러한 현상은 냉동기 운영에 있어 성능, 전력소모, COP 면에서 영향을 미치는 중요한 요소들이므로 시스템 결정전에 충분히 검토되어야 할 사항들이다. 이 경우 ASHRAE 에서는 전산도구(Component Based Simulator)로 DOE-2(Department of Energy)를 추천하고 있다.

본 장에서는 빙축시스템에서 가장 중요하다

고 할 수 있는 빙축코일에 대하여 관련 연산식을 소개하기로 한다.

#### 2. CBS/ICE 방식이란?

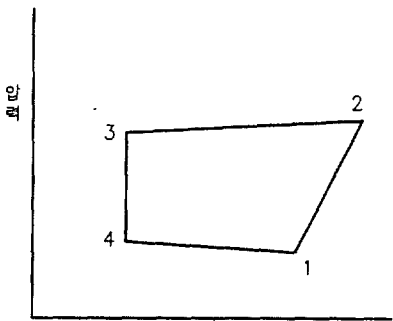
DOE-2 건물부하분석 자료는 적절한 빙축량 추정을 위하여 적용될 수 있으며 특히 CBS(Component-Based-Simulator) 방식으로 다음과 같은 내용을 제시한다.

- 1) 각 시간대에 대한 열저장율(빙축량) 및 장치증발온도
- 2) 각 순환 계통의 온도, 압력, 유량, 열유동(Heat Flux) 및 열전달
- 3) 최적의 운전상태 제시

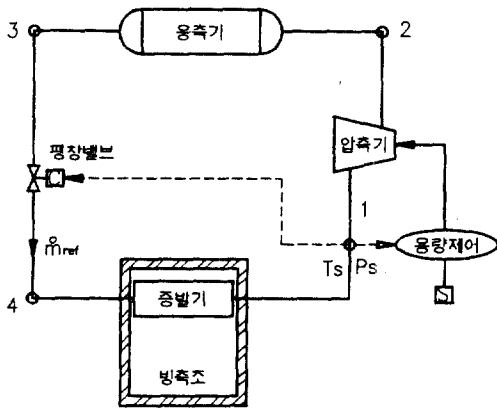
또한 각 냉동구성요소는 냉동기, 펌프, 밸브 외에 증발기, 응축기, 빙축조 등을 포함한다.

#### 3. 빙축열방식의 냉매의 흐름

그림1은 관외착빙형 방식을 나타내는 것으



< 냉매선도상의 상태점 >



< 냉매의 흐름도 >

그림 1

로 증발기가 빙축조내에 있는 경우이다.

각 구성요소는 이해를 돕기 위하여 필수적인 주요 요소만을 도시하였고 각 순번은 운전 상태점을 나타낸다.

계통상(Cycle)에서 보는 바와 같이 각 구성요소는 운전특성(용량, 설계조건)을 정의함에 따라 입출력 구조에 의해 모형화 된다.

예를 들면 냉동기의 경우 용량제어장치를 포함하여 증발기 운영 조건에 의해 필요 냉동능력이 결정된다.

이와 유사하게 응축기 입구조건(온도, 압력)은 냉동기로부터 토출되는 가스의 상태에 의해 결정된다.

특히 응축기에서는 부하에 적절한 열균형(Heat Balance)이 이루어져야 하며 이는 액화된 냉매가 어느정도 과냉상태가 되어야 함을 의미한다.

응축기에서 냉매유로가 형성되어 유량 제어 역할을 하는 전자변, 팽창변을 통하게 된다. 또한 이러한 계통이 이루어지는 과정에서 생기는 압력손실 등은 충분한 고려가 되어야 할 사항이다.

증발기는 빙축조내에서 제빙역할을 하며 증발기 Tube와 제빙 외주 부위와의 경막상의 열전달이 상호 균형을 이루어야 한다.

이 점은 제빙과정에서 Tube 내부의 냉매와 얼음 외주에 열전달이 용이치 못할시는 장치 운전이 제빙상태임에도 불구하고 해빙이 일어날 수 있음을 뜻한다.

부하 운전시는 빙축조내로 유입되는 회수냉수에 의해 열수수가 이루어지며 이 경우 열교환을 돕기 위하여 기계식 교반기(Agitator)나 저압의 압축공기로 조내를 교반시킨다.

증발기에 있어서 통상적으로 적용되는 증발온도는  $-10^{\circ}\text{C}$  ( $14^{\circ}\text{F}$ ) 내외이고 내부유체(냉매)의 열전달율은  $100 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$  ( $18 \text{ Btu/h-ft}^2 \cdot ^{\circ}\text{F}$ ) 정도이다.

얼음의 두께는 1시간 단위로 유추 해석되며 이 값의 오차는 3% 정도이다. 특히 이러한 현상은 제빙초기 운전시에 생길 수 있으며 제빙두께가 얇아 열전도율 값이 변화할 때 이러한 현상이 두드러진다.

#### 4. 얼음의 열균형(Heat Balance)

얼음의 열균형(Heat Balance)과 열전달과의 관계를 다음과 같이 나열한다.

\* 제빙과 해동은 얼음표면의 경막상태의 열유지와 증발기 Tube의 표면, 길이와 연관된다.

1) 냉동효과( $Q_{\text{evap}}$ ) 및 증발기에 영향을 미치는 인자는 다음과 같다.

- (1) 얼음의 열전도율
- (2) 증발기 Tube 두께층의 열전도율
- (3) 2상류 대류(냉매가 증발할 때), 증발기 출구에서 냉매가스가 과열상태일 때

2) 강제 대류에 의한 물과 얼음의 열전달율( $Q_{\text{ice}}$ )

3) 전열(현열+잠열)

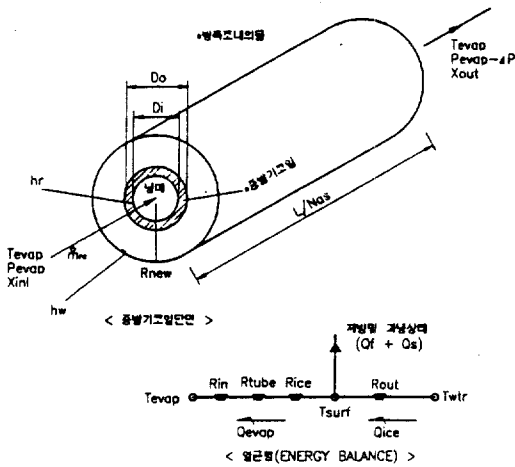


그림 2

- (1) 얼음의 0°C (32°F) 이하에서의 과냉 상태까지의 현열량(Qs)
- (2) 얼음이 용해될 때의 잠열량(Qf)

**5. 열의 연산해석(Algorithm Description)**

본 계산은 코일내의 냉매의 증발 및 코일 외면에서의 제빙, 해동상태와 연관된다.

첫 단계로 증발기 전체의 냉매 순환량은 각 단위코일로(1 Circuit)로 세분된다.

$$\dot{m}_{rc} = \dot{m}_{ref} / N_c \dots\dots\dots (1)$$

열전달 및 압력강하는 냉매의 유량(질량유량 : Mass Flux)에 의하여 결정되며 이 유량은 (G) 각 단위 코일내경(Di)으로 유동되는 유량에 의해 산출된다.

$$G = \frac{\dot{m}_{rc}}{\pi \times (D_i / 2)^2} \dots\dots\dots (2)$$

냉매의 열역학적 특성은 기화시의 엔탈피(hfg)와 증발 온도상태에서의 가스상태 엔탈피(hg)에 연관된다.

이상의 조건에서 증발 온도상태에서의 포화액의 엔탈피(hg)를 산출할 수 있다.

$$h_f = h_g - h_{fg} \dots\dots\dots (3)$$

한편, 증발기내에서의 냉매의 열전달율은 냉

매의 상태에 따라서 달라지며 냉매의 상태분류는 다음과 같다.

- (a) 이상류(액과 가스의 혼합상태)
- (b) 과열 상태
- (c) 이상류(가스가 95% 상태)
- 1) (a)의 해설

상기 (a) 이상류에 있어서는 냉매의 열전달율은 Shah(1976)의 “냉매가 수평관내에서 증발(비등)할 때의 열전달율”을 적용할 수 있다.

또한, 순수 액상태에서의 냉매의 열전달율은 (hi) Dittus-Boelter(1976)의 “강제 대류 상태(난류)의 열전달율”을 적용시킨다.

$$h_i = 0.023[G(1-X) \times D_i / \mu]^{0.8} \times Pr^{0.4} \times K_i / D_i \dots\dots\dots (4)$$

여기서 μ, Pr, Ki은 각각 점도(lbm/h-ft), 프란틀수와 열전도율(Btu/h, ft, °F)로서 ASHRAE(1985)나 (1976)판 냉매 특성표란을 참조한다.

Di는 증발기 코일 내경으로 Feet 단위이고 X는 냉매의 건조도를 의미하며 G(1-X)는 증발기 코일내를 통과하는 냉매 액상태에서의 유동량을 의미한다.

증발기 코일이 만액상태일 때 냉매 대류수(A Convection Number)는 아래와 같다.

$$C_o = \left( \frac{1-X}{X} \right)^{0.8} \times (V_f / V_g)^{0.5} \dots\dots\dots (5)$$

여기서 Vf, Vg는 각각 냉매의 액, 가스 상태에서의 비체적을 의미한다.

냉매 비등수(A Boiling Number)는 다음과 같다.

$$B_d = \frac{q}{G \times h_{fg}} \dots\dots\dots (6)$$

여기서 q는 증발기 코일 내벽을 기준한 냉매의 열부하(Heat Flux)이다.

$$q = \frac{Q_{evap}}{\pi \times D_i \times L / N_{as}} \dots\dots\dots (7)$$

Qevap는 다음에 나오는 식 (17)에 의함. L은 증발기 코일의 길이

$N_{as}$ 는 코일이 분할된 계통(Circuit)

프로이드수(A Froude Number)는 냉매 액 상태의 조건에 따라서 변화하며 중력의 영향을 받는다.

$$Fr = \frac{G^2}{(1/V_f)^2 \times D_i \times g} \dots\dots\dots (8)$$

여기서  $g$ 는 중력 가속도이고, 실질적으로 관 내의 열전달율은 다음과 같다.

$$h_r = h_l \times fh_l \dots\dots\dots (9)$$

2) (b)의 해설

(b)이번에는 냉매가 단상류 상태로(과열상태) Dittus-Boelter의 식을 적용한다(Holman 1986 참조).

$$h_r = 0.023 \times (GD_i / \mu_g)^{0.8} \times Pr^{0.4} \times K_g / D_i \dots\dots\dots (10)$$

여기서  $\mu$ , Pr,  $K_l$ 은 각각 점도(lbm/h-ft), 프란틀수와 열전도율(Btu/h·ft·°F)을 의미한다.

3) (c)의 해설

(c) 건조도 0.9와 1 상태의 냉매의 열전달율은 상기 이상류 (a)와 단상류 (b)의 평균값을 취한다.

이제 얼음 표면에서의 냉매측의 열전달( $U_o$ )에 이르기까지의 총괄전열계수( $U$ )를 산출 할 수 있다.

(1) 냉매측 경막의 열전달율

$$R_{in} = 1 / (2 \times \pi \times R_i \times h_r) \dots\dots\dots (11)$$

(2) 코일측의 전열저항

$$R_{tube} = [\ln(R_o / R_i)] / (2 \times \pi \times K_t) \dots\dots\dots (12)$$

(3) 얼음의 전열저항

$$R_{ice} = [\ln(R_{new} / R_o)] / (2 \times \pi \times K_i) \dots\dots\dots (13)$$

여기서,

$R_i$  = 코일의 내경

$R_o$  = 코일의 외경

$K_t$  = 코일벽의 열전도율(Steel의 경우 = 26.2 Btu/h·ft·°F)

$K_i$  = 얼음의 열전도율(Btu/h·ft·°F)

$$= 1.305547 - 0.0017 T_{bulk} \dots\dots\dots (14)$$

$T_{bulk}$  = 아래 24)식에 의한 얼음의 온도이다(°F).

\* 참고문헌 : Herman(1982)

그러므로 전열계수 ( $U_o$ )는 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

$$U_o = [1 / (R_{in} + R_{tube} + R_{ice})] \times (L / N_{as}) \dots\dots\dots (15)$$

벽측의 전열계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{wall} = [1 / (R_{in} + R_{tube})] \times (L / N_{as}) \dots\dots\dots (16)$$

증발기부하 ( $Q_{evap}$ )는 얼음층에서 내부로 이르는 저항값들을 통하여 전달된다.

이때 얼음의 온도는 0°C로 정의하며, 장치의 증발온도를 감하면 다음 식이 정립된다.

$$Q_{evap} = U_o (32 - T_{evap}) \dots\dots\dots (17)$$

\*  $T_{evap}$  = °F

코일 벽의 온도는 다음과 같다.

$$T_{wall} = T_{evap} + (Q_{evap} / U_{wall}) \dots\dots\dots (18)$$

한편, 코일이 나관일 때에 ( $R_{new} = R_o$ ) 총괄전열계수  $U$  값과 나관의 열전달계수 ( $U_o'$ )에 의해 다음 식이 성립된다.

$$T_{wall} = T_{evap} + (U_o' / U_{wall}) \times (T_{wtr} - T_{evap}) \dots\dots\dots (19)$$

여기서,

$T_{wall}$  = 나관에서의 증발기 코일의 벽온도

$$U_o' = [1 / (R_{in} + R_{tube} + R_{out})] \times (L / N_{as})$$

$$R_{out} = 1 / \pi \times R_o \times h_w$$

$h_w$  = 공식 8)에 의해 얻어지며 코일 외면과 물 사이의 전열계수이다.

$T_{evap}$  = 장치내 증발온도

$T_{wtr}$  = 빙축조(Ice-Builder)내에 물의 온도

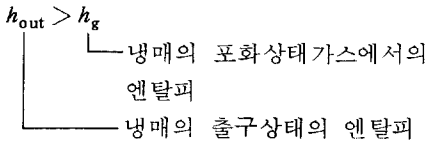
고로, 증발기의 부하는 다음과 같이 얻어진다.

$$Q_{evap} = U_o (T_{wall} - T_{evap}) = U_{wall} (T_{wall} - T_{evap}) \dots\dots\dots (20)$$

또한, 냉매가 완전 증발할 때의(다소간 과열된 경우) 조건에서의 냉매의 엔탈피가 요구된다.

$$h_{out} = (Q_{evap} / \dot{m}_{rc}) + h_{inl} \dots\dots\dots (21)$$

$h_{inl}$ 은 냉매가 증발기내로 유입될 때의 엔탈피이고 증발기 출구의 냉매가 과열상태라면 엔탈피 조건은 다음과 같이 표현된다.



만약,  $h_{out} < h_g$  조건이라면  $X_{out}$ 는 다음과 같다.

$$X_{out} = (h_{out} - h_f) / h_{fg} \dots\dots\dots (22)$$

결국 비등수는(Boiling Number)  $Q_{evap}$ 에 연관된다.

또한 얼음의 온도( $T_{bulk}$ )는 제빙상태에서의 과냉을 포함한 평균온도상태를 의미한다.

코일 벽을 기준하여 원관외주상으로 열전도가 이루어질 때 얼음의 온도는 다음과 같이 산출된다.

$$T(R) = \frac{(T_{wall} - 32)}{\ln(R_{ii} / R_{io})} \times \ln(R / R_{io}) + 32 \dots\dots\dots (23)$$

$T(R)$ 이란 =  $R$ 만큼 떨어진 거리에서의 온도 ( $^{\circ}F$ )

$R_{io}, R_{ii}$  = 얼음의 외측 및 내측의 반경

(23)식에 의해 코일 벽면에 대한 얼음 외주사이와의 온도상관관계는 다음과 같다.

$$T_{bulk} = \int_{R=D_o/2}^{R=R_{new}} RT(R) / \int_{R=D_o/2}^{R=R_{new}} R dR$$

$$= 32 - (32 - T_{wall}) \left\{ 1 - \frac{R_{new}^2}{R_{new}^2 - (D_o/2)^2} + \frac{1}{2 \ln(R_{new}/D_o/2)} \right\} \dots\dots\dots (24)$$

(단,  $T = 32^{\circ}F (0^{\circ}C)$ 이고,  $R = R_{new}$  일때임)

또한 제빙과 해빙일은 증발기 코일 전후의 열균형(Energy Balance)에 의해 계산될 수

있다.

$$\dot{m}_{ice} < 0 \dots\dots\dots \text{해빙상태}$$

$$\dot{m}_{ice} > 0 \dots\dots\dots \text{제빙상태}$$

$$\dot{m}_{ice} = p_i \times \rho_{ice} \times (R_{new}^2 - R_{old}^2) \times L / N_{as} \dots\dots\dots (25)$$

여기서,

$$\rho_{ice} = \text{얼음의 비중량}$$

$$= 57.21 \text{ bm/ft}^3 = 916 \text{ kg/m}^3 \text{ (London \& Sevan 1943)}$$

얼음의 과냉을 위한 열량은 다음과 같다.

$$Q_s = \dot{m}_{ice} \times CP_{ice} \times (32 - T_{bulk}) \dots\dots\dots (26)$$

여기서,

$$CP_{ice} = 0.5 \text{ Btu/lbm} \cdot ^{\circ}F = 2.093 \text{ kJ/kg} \cdot ^{\circ}C$$

(Dorsey 1940)

물이  $32^{\circ}F (0^{\circ}C)$  상태에서 얼음으로 제빙될 때의 필요한 잠열량은 다음과 같다.

$$Q_p = H_{fice} \times \dot{m}_{ice} \dots\dots\dots (27)$$

여기서,

$$H_{fice} = 143.4 \text{ Btu/lbm} = 333.5 \text{ kJ/kg}$$

(Dorsey 1948)

참고로 빙축조는 제빙, 해빙상태에서 교반을 필요로 하며 특히 물축의 전열계수( $h_w$ )는 빙축조 단면을 기준하여 유로(Flow)가 형성될 때 상당한 영향을 받는다.

한편 자연대류 상태에서의 열유동시 조내유속은  $32 \text{ ft/h} (0.09027 \text{ m/sec})$  정도이다. 통상 제빙상태에서 적절한 유속은 ( $V_{nom}$ ) 유로 단면의 축소에 의해 증가될 수 있다.

$$V = V_{nom} \times [ (S_{nom} - D_o) / (S_{nom} - 2 \times R_{new}) ] \dots\dots\dots (28)$$

여기서,

$$S_{nom} = \text{증발기 코일간의 간격(Pitch)} = 0.56 \text{ ft} (0.17 \text{ m}) \text{로 가정}$$

$$R_{new} = \text{얼음의 반경}$$

불과 코일축 사이의 온도는 다음과 같이 얻어진다.

$$T_{film} = \frac{T_{wtr} + T_{surf}}{2} \dots\dots\dots (29)$$

$T_{surf}$ 는  $32^{\circ}F (0^{\circ}C)$ 이거나 (19)식에 의해 산

출된다.

그러면, 물의 열역학적 특성을 기초로 레이놀드수 (Re)를 구한다(ASHRAE 1985년 자료 기초).

$$Re = 2 \times R_{new} \times V / \nu_{wtr} \dots\dots\dots (30)$$

여기서,

$\nu_{wtr}$  = 물의 동점성계수

$R_{new}$  = 얼음의 반경(범위)

결국, 강제대류에서의 뉴셀트수(Nusselt Number)는 다음 식으로 표현된다(Holman 1986).

$$h_w = Nu \times \frac{K_{wtr}}{2 \times R_{new}} \dots\dots\dots (31)$$

$$Nu = (0.35 + 0.56 \times Re^{0.52}) \times Pr^{0.3} \dots (32)$$

$$Q_{icc} = 2 \times \pi \times R_{new} \times (L/N_{as}) \times h_w \times (T_{wtr} - T_{surf}) \dots\dots\dots (33)$$

그러므로 이상의 식에서 제빙에 필요한 열량을 산출할 수 있다.

#### 4. 맺음말

현재 전력수요는 폭발적으로 증가되는 추세이며, 이의 대처 방안으로 빙축열 시스템이 확산될 조짐이다.

한편 빙축열 시스템중 가장 핵심적인 부분인 빙축조중 빙축코일(제빙부위)에 대하여 수입을 탈피하고 국산 개발에 주력할 때이다.

본 장에서 언급한 연산 방식을 참고로 하여 보다 효율적이고 실용적인 빙축조를 개발하기 위하여 보다 더 세밀한 연구가 필요하다고 생각된다.

#### 참 고 문 헌

1. ASHRAE (1976) Thermophysical Properties of refrigerants. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc.
2. ASHRAE (1985) "Refrigerant tables and charts." ASHRAE handbook-(1985) fundamentals, chapter 17, Atlanta: American Society of heating, refrigerating and air conditioning-engineers, Inc.
3. Dorsey, N.E. (1940) Properties of ordinary water substance. New York: Reinhold Publishing Corporation.
4. Dorsey, N.E. (1948) "The freezing of super cooled water." Transactions of the American Philosophical Society, Vol. 38, Part 3.
5. Herman, J. (1982) "Experimental study on melting and freezing of ice.
6. ASHRAE (1989) Transactions Parts 2.