

# 냉동시스템의 모세관 설계

정백영 · 함성훈 · 김태진

## Design of Capillary Tube for a Refrigeration Systems

Baik-Young Chung · Seong-Hoon Hahm · Tae-Jin Kim



- 정백영 (금성사 생활시스템연구소)
- 1961년생
- 열전달을 전공하였으며, 냉동공조기기의 냉매 및 사이클해석과 제어에 관심을 가지고 있다.



- 함성훈 (금성사 생활시스템연구소)
- 1959년생
- 열전달을 전공하였으며, 냉동공조기기의 설계와 해석에 관심을 가지고 있다.



- 김태진 (금성사 생활시스템연구소)
- 1942년생
- 기계공학을 전공하였으며, 공조기 열기기의 시스템과 제어공조에 관심을 가지고 있다.

### 1. 머리말

모세관(capillary tube)은 일정면적식 팽창기구의 대표적인 것으로서 사용역사가 길고, 신뢰성이 높고, 가격이 저렴하므로 냉동공조시스템의 냉매제어장치로 매우 많이 사용되고 있다.

이것은 냉동시스템의 응축기와 증발기 사이에서 유입하는 고압의 액상냉매를 증발기에서 증발하기 쉬운 증발압력까지 압력을 강하시키는 감압팽창작용과 증발기의 증발 용량에 적당한 냉매 질량유량을 공급하는 역할(이 작용은 냉동시스템의 용량과 작동범위를 결정하는데 매우 중요하다.)을 한다.

이 글에서는 모세관의 형상, 재질 및 그 장·단점과 작동원리, 내부 유동현상 등 일반적인 사항에 관하여 기술한다.

### 2. 모세관의 종류

#### 2.1 관의 형상

모세관은 지름이 0.65 mm에서 2.6 mm 정도이고 길이가 1m에서 6m 정도의 가늘고 긴 동관이다. 동관 내부의 조도와 재질 등의 세부사항은 ASTM B 360-88에 상세히 규정하고 있으며, 이 규정에는 기체의 제어 기구로 사용될 수 있는 모세관으로서 갖춰야 할 조건들이 제시되어 있다.

#### 2.2 관의 재질

모세관으로 사용할 수 있는 동관의 재질에 관하여서도 ASTM B 360-88에서 규정하고 있는데, 이 재질에 관한 사항은 반드시 필수적인 사항은 아니다. 다만, 동관일 경우 재질 기호와 화학적 조성은 표 1과 같다.

표 1 재질기호와 화학적 조성

Copper UNS No.	C10800	C12200
Copper 최소치 (%)	99.95A	99.9B
인 (P) 함유율 (%)	0.005-0.012	0.015-0.040

\* A의 성분 : 구리+은+인,  
B의 성분 : 은+구리

### 2.3 모세관내의 유동 현상

#### (1) 압력, 온도 강하현상

일반적인 냉동사이클에서 모세관 입구에는 과냉각되어 있는 냉매액으로 가득차 있게 된다. 이와 같은 경우 모세관내에서 냉매 유동의 온도와 압력강하현상에 대해서 살펴보면 그림 1에 나타난 바와 같다.

즉, 관 입구의 0-1 부분에서는 일반압력계로는 감지되지 않을 정도의 아주 미미한 압력강하가 발생하여 관 0-1-2의 부분에서의 냉매는 완전한 액체이다. 그리고 점 2부분에서 증발하여 기포가 발생하기 시작한다. 점 2에서 관의 끝 부분까지에서 압력 강하는 선형적으로 변화하지 않고 하류로 갈수록 그구배가 점점 증대한다.

이 사이는 포화액체와 포화증기가 공존하고 있고, 흐름의 방향에 따라서 냉매 가스의 비율 및 체적은 점차로 증가한다.

다음에 온도분포에 대해서 살펴보면, 관의 0-1-2의 부분의 온도는 일정하다. 점 2에서는 이 일정온도에 상응하는 포화압력까지 강하한다. 점 2부터 압력은 더욱 강하하고, 온도의 강하에 따라서 같은 형태로 강하한다. 온도는 그 압력에 상응하는 포화온도이고 따라서 압력과 온도의 곡선은 점2부터 관의 끝까지의 사이이고 따라서 압력과 온도의 곡선은 점 2부터 관의 끝까지의 사이는 일치한다.

그림 1에 있어서 최초로 기포가 나타나는 점인 점2를 flash point (bubble point)라고 부른다. 또, 이 점보다 상류부분을 액구간 길이 (liquid length)라고 부르고, 점2의 하류

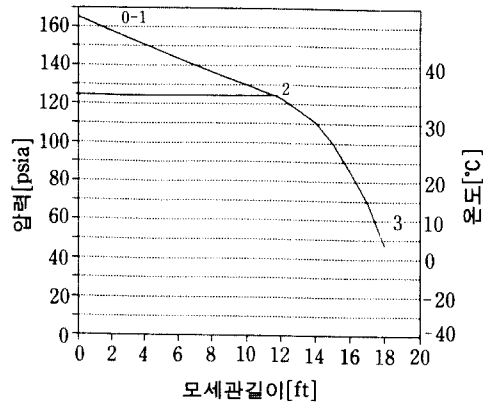


그림 1 모세관의 길이에 따른 온도, 압력강하 특성곡선

부분을 이상 구간 길이 (two-phase length)라고 부르고 있다. 모세관의 저항이 냉동장치 고압측(응축기)에 과도한 액을 잔류시키지 않으면서, 모세관의 입구 부분의 액용 (100%액으로 충만한 상태)된 것 같은 상태인 때에, 냉동장치는 능력 평형으로 작동한다.

#### (2) 유동 폐쇄 (choked flow)

모세관을 흐르는 냉매량은 모세관 입구압력이 상승하면 증가한다. 또, 모세관의 출구압력이 저하하면 같은 모양으로 증가한다. 그러나 출구압력이 어떤 값 이하로 되면, 흐름에 변화가 발생한다.

그림 2는 모세관의 출구 압력이 증발기내의 압력보다 높게 된 경우를 나타낸다. 흐르는 유체가 이상류로 되어 가스가 있는 경우에는 하류 압력이 감소하여 관 출구의 유속이 음속에 도달하게 되면, 하부 유동 압력을 더 낮추게 되어도 그 유량 이상으로 유량은 증가하지 않는다.

이때의 열역학적 조건들은 그림 3과 같은 엔탈피-엔트로피 선도에 나타낼 수 있다. 이때 관내의 유체유동에 따라서 모세관의 출구에서는 음속에 도달하고, 엔탈피가 감소하면서 엔트로피는 정체하게 되는 마치 벤츨리

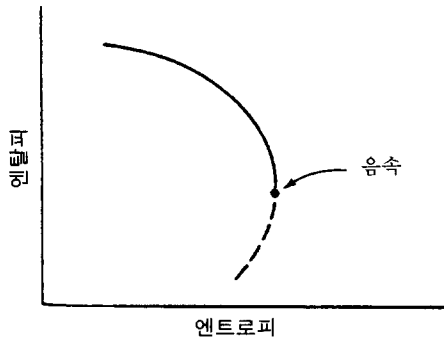


그림 2 유동폐쇄시의 엔탈피와 엔트로피의 관계

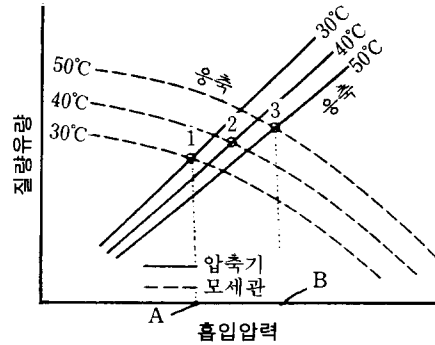


그림 4 주어진 응축온도에서 압축기와 모세관의 질량유동량 평형

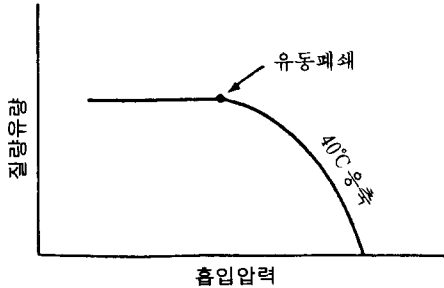


그림 3 유동폐쇄시의 압축기 흡입압력과 질량순환량

출구단의 조건과 비슷하게 된다. 이러한 출구 유동을 폐쇄되었다 라고 말한다.

### 3. 냉동 사이클에서 모세관

#### 3.1 압축기와 능력 평형

냉동 시스템에서 모세관은 압축기가 토출하는 냉매질량 유량만큼을 증발기로 공급할 수 있어야 한다.

모세관에 의하여 공급되는 질량 유량과 압축기에 의해 토출되는 질량유동유량을 압축기의 흡입압력에 대해 나타내 보면 그림 4와 같이 된다. 그림 4에서 실선은 압축기의 토출질량 유량이고, 점선은 모세관을 통과하는 질량유동량이다.

여기서 알수 있는 것으로 모세관은 응축압력이 높을수록 보다 많은 질량순환량을 통과시키고, 압축기는 그와는 반대이다.

그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 모세관은 주어진 응축온도와 압력하에서 압축기의 토출냉매 질량순환량과 같은 질량순환량을 통과시키는 흡입압력이 존재하게 된다. 즉, 모세관과 압축기는 주어진 응축, 흡입 압력하에서 동일한 질량순환량을 갖는 평형점을 갖게 되고, 이것이 반드시 정해져 있어야 한다는 것을 알 수 있다.

그림 4의 점 ①은 응축온도 30°C일 경우 평형점이고, 점 ③은 응축온도 50°C의 평형점임을 알 수 있고, A, B는 그때의 흡입압력이다.

#### 3.2 모세관의 자기조정작용

압축기와 모세관이 평형되는 점에서 증발기내의 열전달 관계를 만족시키지 못한다면 비평형 조건으로서 증발기의 냉매량 부족, 혹은 과량이라는 결과로 이어진다. 즉, 증발기내의 냉매가 과소한 것은 흡입압력이 증가하고 모세관이 증발기 표면을 냉각시키기에 충분한 냉매를 공급하지 못한 경우이다. 증발기에서 과중한 열부하를 받을 때, 고온 유체가 응축되어질 수 있도록 스스로 조절한다.

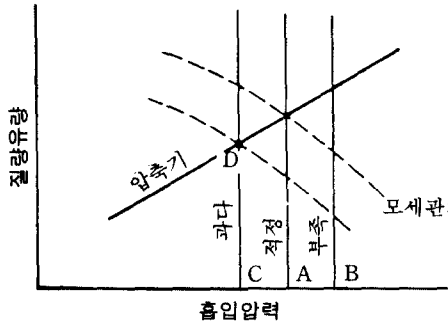


그림 5 응축압력이 일정할 때 증발기의 냉매가 과량 혹은 과부족으로 인한 질량 유동량의 비평형 상태

앞의 그림 5는 일정한 응축압력 하에서 어떤 흡입압력 A에서 모세관과 압축기 사이의 평형점을 나타낸 것이다.

흡입압력과 온도는 어떤 점 B로 상승한다. 흡입압력 B에서 압축기는 증발기로부터 모세관이 공급할 수 있는 것보다 많은 냉매를 흡입한다. 그래서 증발기는 곧 냉매가 부족하게 된다.

증발기는 무한정 빌 수는 없으므로 균형을 이루기 위하여 어떤 조건인가가 반드시 변화하여야 한다. 일반적인 가정용 전기 공조기 제품에는 수액기가 없으므로 응축기의 압력이 상승한다. 응축압력이 상승하면 압축기의 용량은 감소하게 되고 모세관이 공급하는 냉매량은 균형상태에 다시 도달할 때까지 증가하게 된다. 한편 냉매가 부족한 증발기에서는 열전달률이 감소한다. (공기와 온도 차가 감소하므로) 이것이 회복되려면 흡입압력이 다시 A로 회복되어 냉각 공기와 온도차가 정상적으로 되어야만 한다.

반대로 증발기의 부하가 감소하면 흡입냉매의 온도와 압력은 점C까지 떨어지게 된다. 흡입압력C에서 모세관이 보낼 수 있는 양보다 많은 냉매를 증발기로 보내게 된다.

그렇게 되면, 증발기에는 액으로 넘치게 되고 결국 압축기까지 흘러 들어가게 되므로 사전에 방지하지 않으면 안된다.

#### 4. 모세관의 설계(선정)방법

##### 4.1 개요

모세관의 선정 방법은 크게 단열 팽창에 의한 압력강하 이론에 기초한 모세관의 내부 유동해석을 통한 지름 및 길이를 계산하는 해석적인 방법과 ASHRAE Handbook Equipment편에 수록되어 있는 실험 자료의 그래프를 이용하여 길이 및 출구의 압력 등을 구할 수 있는 도해적 선정방법의 두 가지가 있다. 도해적인 방법과 해석적인 방법은 아래와 같다.

##### 4.2 선도를 이용한 질량순환량 예측방법<sup>(1)</sup>

###### (1) 개요

ASHRAE Handbook Equipment 편에는 냉동시스템에 적합한 모세관을 선정할 수 있는 몇 가지 방법중 하나인 선도를 이용한 선정방법을 소개하고 있다. 이 방법을 이용하면 비교적 쉽게 모세관을 선정할 수 있다.

이 선도를 이용하는 선정방법은 모두 4개의 선도를 필요로 하는데 이에 대한 순서를 설명하면 다음과 같다.

###### (2) 선도의 종류와 구성

ASHRAE Handbook Equipment 편에서 구성하고 있는 선도는 다음 네 가지 이다.

① 모세관 한 개당 기초 질량유동률 선도 (그림 6)

② 내경차 보정계수곡선

③ 임계압력 보정계수곡선

④ 임계출구 압력곡선

상기한 네 가지 종류의 선도중 ①의 질량 유동률 선도는 모세관의 형상이 내경 1.62 mm, 길이 2.03 m인 기초 모세관을 이용한 실험자료들을 기본으로 하여 작성된 것이다. ②의 내경 보정계수 곡선은 선정하고자 하는 모세관의 내경이 1.62가 아닐 경우 내경 보정계수  $\phi_1$ 을 구하는데 사용한다. ③의 임계 압력보정계수는 모세관의 출구압력이 임계압

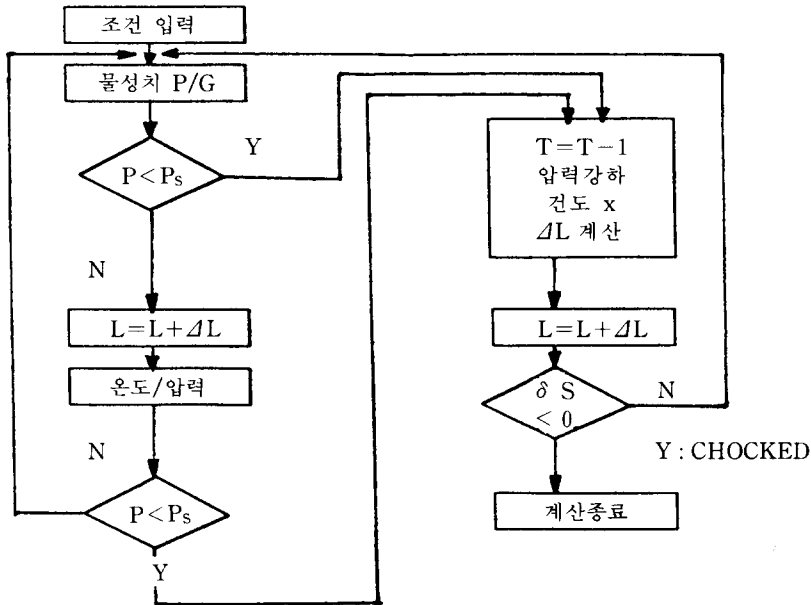


그림 6 이론해석 프로그램의 순서도

력보다 높은 조건에서 작동되는 경우의 보정 계수  $\phi_2$ 를 구한다. ④의 임계출구압력곡선은 입구압력, 과냉도에 대한 출구 임계압력 값을 구하여  $\phi_2$ 를 구하는데 이용하도록 되어 있다.

(3) 질량유량의 상관식

ASHRAE Handbook Equipment 편에 의하면 주어진 모세관을 통하여 흐르는 냉매의 질량유량은 다음 관계식으로 구하도록 되어 있다.

$$M = N_t M_{basic} \phi_1 \phi_2 \quad (1)$$

여기서,  $M$ 은 한 개의 모세관을 통하여 흐르는 냉매의 질량유동량(kg/s),  $M_{basic}$ 은 모세관 한 개당의 질량유동량(그림 6으로부터 구함),  $\phi_1$ 은 내경보정계수(주어진 모세관과 기초 평가 모세관의 내경과 다른 경우),  $\phi_2$ 는 주어진 모세관 출구압력이 임계압력보다 높은 조건에서 작동되는 경우 보정 계수,  $N_t$ : 모세관의 수량을 나타낸다.

(4) 선정순서

만약 모세관의 기하학적 조건(내경, 길이)이 선정되고 질량순환량  $M$ 을 구하고자 한다면 식 (1)로부터 구한다.

즉, 그림 6에서 모세관의 기초 질량유동률 선도로부터 모세관 1개당의 질량유동률을 구하고, 모세관의 내경이 1.62 mm이 아닌 경우는 그림 7의 내경보정계수  $\phi_1$ 을 읽어서 식 (1)에서와 같이 곱하여 보정하고, 또 출구압력이 임계압력이 아닌 경우에는 임계압력 보정계수를 읽어서 역시 식 (1)과 같이 곱하여 보정해 주면 정확한 질량 유량을 구할 수 있다.

4.3 모세관내의 유동에 대한 이론 해석<sup>(2)</sup>

(1) 유동해석을 위한 기본가정

- ① 유동은 1차원이고, homogeneous 유동이다.
- ② 외부와의 열교환이 없는 단열과정이다.
- ③ 단상류, 이상류에서 모세관내의 냉매의

물성치는 일정하다.

(2) 유동해석의 지배방정식

① 연속 방정식

$$\delta(\rho V) = 0 \quad (2)$$

여기서,  $V$ 는 속도(m/s),  $\rho$ 는 密度(kg/m<sup>3</sup>)를 나타낸다.

② 운동량 방정식

$$A_c \delta p + \rho A_c V \delta V + \gamma S \delta L = 0 \quad (3)$$

여기서,  $A_c$ 는 단면적(m<sup>2</sup>),  $S$ 는 관둘레(m),  $\gamma$ 는 전단력(kg, m)을 나타낸다.

③ 에너지 방정식

$$H + \frac{V^2}{2g} = H_3 \quad (4)$$

여기서,  $H$ 는 엔탈피(kcal/kg)를 나타낸다.

(3) 압력강하의 계산

① 액 역에서의 압력강하의 계산

$$\Delta P l = \frac{\Delta L}{d} \frac{V^2}{2} \rho \quad (5)$$

$$*f = \frac{0.33}{Re^{0.25}}$$

$$*Re = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (6)$$

여기서,  $\mu$ 는 점성계수(kg·s/m),  $d$ 는 관내경(m)을 나타낸다.

② 이상역에서의 압력강하의 계산

이상역에서의 냉매는 증발하게 되고 온도, 압력이 강하하여 건도는 증가한다. 냉매의 상태변화를 알기 위하여서는 건도를 계산하여야 한다.

$$H + \frac{V^2}{2g} = H_3 = \text{일정} \quad (7)$$

$$V = \frac{M}{A_c} \nu \quad (8)$$

여기서,  $M$ 은 냉매의 유량을 나타낸다.

기체 액체의 상태를 각각 첨자 1, 2로 나타내면 식 (9), 식 (10)과 같다.

$$\nu = (1-x)\nu_2 + x\nu_1 \quad (9)$$

$$H = (1-x)H_2 + xH_1 \quad (10)$$

식 (2), (8), (9)를 식 (2), (7)에 대입하면 식(11)과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{A}{2g} \left( \frac{M}{A_c} \right)^2 (\nu_1 - \nu_2)^2 x^2 \\ & + \left[ (H_1 - H_2) + \frac{A}{g} \left( \frac{M}{A_c} \right)^2 \nu_2 (\nu_1 - \nu_2) \right] x \\ & + H_2 + \frac{A}{2g} \left( \frac{M}{A_c} \right)^2 \nu_2^2 - H_3 = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,  $g$ 는 중력가속도(m/s<sup>2</sup>)를 나타낸다. 건도  $x$ 에 대해서 풀면 식 (12)와 같다.

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (12)$$

여기서,  $a, b, c$ 는 아래식과 같다.

$$a = \frac{A}{2g} \left( \frac{M}{A_c} \right)^2 (\nu_1 - \nu_2)^2$$

$$b = (H_1 - H_2) + \frac{A}{2g} \left( \frac{M}{A_c} \right)^2 \nu_2 (\nu_1 - \nu_2)$$

$$c = H_2 + \frac{A}{2g} \left( \frac{M}{A_c} \right)^2 \nu_2^2 - H_3$$

여기서,  $A$ 는 일의 열당량을 나타낸다.

한편, 이상류에서의 마찰계수  $f$ 는 식 (13)을 사용할 수 있다.

$$f = (1-x)f_1 + xf_2 \quad (13)$$

(4) 이상역의 길이 계산

① 이상역에서 엔트로피 계산

미소길이  $\delta L$ 에서의  $\delta q$ 에 의한 엔트로피 증가량  $\delta S$ 는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta q = A f \frac{\delta L}{d} \frac{V^2}{2g} \quad (14)$$

$$\delta S = \frac{\delta q}{T} \quad (15)$$

이 식으로부터 이상역의 길이와 엔트로피와의 관계는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\delta L = \frac{d}{A f} \left( \frac{V_2}{2g} \right) \delta S \quad (16)$$

## ② 이상역의 길이 계산

상기한 이상역의 길이와 엔트로피의 관계 식 (5)를 길이에 대하여 적분하면 식 (17)과 같이 되어 이 식을 풀면 이상역의 길이를 계산할 수 있다.

$$\Delta l = \int_{s_1}^{s_2} \frac{d}{Af} \left( \frac{T}{V^2} \right) \delta S \quad (17)$$

## 4.4 모세관의 이론 해석 프로그램에 대하여

## (1) 프로그램의 구성

이론 해석 프로그램은 냉매 R-22를 이용하는 냉동 사이클의 모세관에 관하여 전술한 이론식들을 사용하여 주어진 압력에 대한 길이 및 길이에 대한 압력강하 특성 등을 구할 수 있도록 냉매 물성치를 구하는 부 프로그램과 연결되어 있다.

이 프로그램에서 모세관에 대한 계산을 수행하는 과정은 다음과 같이 요약 될 수 있다.

- ① 모세관의 주어진 조건들을 입력한다.
- ② 냉매 물성치 프로그램으로부터 각 조건에 대한 냉매의 물성치를 계산한다.
- ③ 액역에서  $\delta L$ 을 1 cm씩 증가시키면서 길이에 대한 압력강하를 계산한다.
- ④ 냉매의 압력이 주어진 온도의 포화 압력에 도달하였는지 확인하여 포화 압력보다 높으면 ③단계의 계산부터 반복한다.
- ⑤ 포화압력보다 낮으면 이상류 상태의 계산을 수행한다.
- ⑥ 이상역 계산에서는 온도 T를 1°C 씩 감소시켜 그에 따른 건도의 증가와 압력강하를 계산하여 이 압력강하에 대응하는

구간의 미소길이  $\delta L$ 을 구한다.

- ⑦  $\delta S < 0$ 인지 확인한다. 만약  $\delta S > 0$ 이면

⑥단계의 계산부터 다시 반복하여 수행한다. 반대로  $\delta S < 0$ 이면 유동은 폐쇄된 것으로 보고 계산을 종료한다.

이상의 순서도는 그림 6에 나타나 있다. (3)

## 5. 맺음말

우리는 소형 냉동시스템의 설계시 사이클의 밸런스를 맞추는 주요한 역할을 수행하는 모세관의 재질, 형상 및 유동특성과 그 해석 방법에 대하여 알아 보았다. 현재까지는 도식적인 방법이 많이 사용되었으나, 이 방법에는 선도해독 오차가 존재하여 때로 부정확한 결과를 얻을 수 있다. 이에 비해 해석적인 방법을 이용한 결과는 실험값과 약 1~5% 정도의 오차를 보이는 비교적 정확한 방법이다. (4)

향후 이 해석적인 방법을 더욱 발전시켜 냉동사이클 제어기구로서의 모세관 설계를 보다 정확하고 손쉽게 할 수 있도록 하여야 한다.

## 참고문헌

- (1) 1979, "ASHRAE HandBook and Product Directory," Equipment Volume, ASHRAE.
- (2) Stoecker, W. F. and Jones, J. W., 1984, "Refrigeration and Air Conditioning," pp. 260~280.
- (3) 김병순, 1987, "모세관 설계," 금성사.
- (4) 정백영, 1992, "팽창기구," 금성사. ■