

압축기 계가 결합된 응축기의 동특성

김 재 돌*
(1997년 1월 21일 접수)

Dynamic Characteristics of the Compressor-Combined Condenser System

Jae-Dol Kim

Key Words : Condenser(응축기), Compressor(압축기) Dynamic Characteristics(동특성), Mathematical Model(수학적 모델), Heat Transfer Coefficient(열전달 계수), Transfer Function(전달함수), Frequency Response(주파수 응답)

Abstract

This paper reports the analysis of dynamic characteristics of air-cooled condenser. At first, there is an assumption that the superheated vapor flows into the condenser inlet. And in order to consider the effect of pressure change in the dynamic characteristics of the condenser the combined system of condenser and compressor was used. By using the equation of energy balance and the equation of mass balance, the basic equation for describing the dynamic characteristics of condenser can be derived. The transfer function for describing dynamic response of the condenser to flow rate change outlet can be obtained from using linearizations and Laplace transformations of the equation. From this transfer function, analytical investigation which affects the frequency responses of condenser has been made. Through this study, it became possible that the information about the dynamic characteristics of air-cooled condenser is offered. While the average heat transfer coefficient of the refrigerant side necessary for the theoretical calculation of the dynamic characteristics is given by calculation method for the tube length and pressure drop of air-cooled condenser.

기호 설명

A	: 면적, 또는 원주길이, m^2, m	M	: 유량, kg/s
C	: 압축기 극간체적비	n	: 폴리트로픽 지수
C_m	: 단위 길이당 열용량, J/mK	P	: 압력, kPa
c_p	: 정압비열, J/kgK	Q	: 열량, W
d	: 내경, m	R	: 가스정수
H	: 엔탈피, J/kg	s	: 라플라스 연산자
K	: 총괄열전달 계수, W/mK	t	: 시간, s
L	: 길이, m	U	: 내부에너지, W
l	: 무차원 길이	V	: 체적, m^3
		W	: 중량, kg
		θ	: 온도, K
		α	: 열전달률, W/m^2K

* 회원, 동명대학 건축설비과

ρ : 밀도, kg/m^3
 x : 비열비

상첨자
 - : 하첨자에 표시된 구간의 적분 평균값

하첨자
 0 : 평형상태
 1~9 : 영역표시
 a : 공기
 ad : 압축기 토출관로
 c : 유분리기 입구
 d : 토출
 f : 포화액
 g : 포화증기
 i : 관내
 L : 경계 6~9
 m : 관벽
 o : 관외
 s : 흡입, 경계 1~4
 shm : 내분평균
 T : 경계 4~6
 t : 유분리기
 tm : 유분리기 관벽
 U-Bend : U-벤드
 Δ : 미소변화

1. 서론

냉동 및 공기조화기의 에너지 절약화는 시대의 요청으로 현재 이 부분에 대해 많은 연구가 진행되고 있다. 공조기의 구성요소인 압축기 및 열교환기 등의 각 콤포넌트들에 대한 연구는 현재까지 많이 진행되어 공조기의 고성능화에 많은 기여를 하고 있다. 이에 따라 공조기의 소형화 및 에너지 소비 효율이 향상되었다. 그러나 기기 자체의 성능이 아무리 향상되어도 사이클을 넓은 온도 범위에 걸쳐 효율 좋고 안전하게 운전할 수 없으면 에너지 절약화를 도모할 수 없다. 특히, 최근에는 인버터 구동에 의한 용량제어형 공조기가 개발됨에 따라 넓은 온도 범위에서 운전할 수 있게 되어 기존 공조기의 온-오프 운전시에 있어서 무효열량을 개선하는 것이 가능하게 되었다. 그러나 전운전 범위에서 사이클 효율이 충분히 높다고는 말할 수 없으며, 이것

을 해명하기 위해서는 사이클의 동적특성 검토가 대단히 중요한 과제로 대두되고 있다.

지금까지 동적특성에 관한 연구는 열교환 매체의 증발⁽¹⁾이나 응축시 상변화를 동반하지 않은 경우의 각종 열교환기에 대해 많은 연구가 이루어 졌으며, 이들의 동특성도 상당히 해명되고 있다. 그러나 상변화를 동반하는 응축기의 동특성 연구는 실제 기기에서의 스텝응답법⁽²⁾이나 직교류 수평 유리관 응축기를 대상으로한 응축완료점 위치의 응답 연구⁽³⁻⁴⁾가 있다. 이들 연구는 냉매가 포화증기 상태로 유입되어 응축압력은 변하지 않는 작동조건에서 연구를 수행하였다. 그러나 실제 응축기에서는 냉매가 과열증기로 유입하여 열 및 물질전달에 따른 상변화 및 압력변동을 동반⁽⁵⁻⁷⁾하여 상당히 복잡한 현상이 발생되므로 응축기의 동특성에 관한 자료로 활용하기에는 충분하지 못하다.

따라서, 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 보완하고, 압축기, 유분리기, 압축기 토출관로를 포함하여 응축기의 동적특성을 해석하였다. 해석에 있어서는 응축기 출구 냉매유량 변화에 대한 응축압력 변동을 고려하였으며, 냉매가 과열증기로 유입하는 것으로 하여 주파수 응답에 의한 전달함수법으로 응답에 미치는 각종 인자의 영향을 밝혀 공냉 응축기의 동특성에 관한 정성적 및 정량적 자료를 제공하고자 하였다.

2. 동특성 해석 모델

본 연구에서 대상으로 한 응축기는 다단 플레이트핀 코일형 공냉응축기로 Fig. 1과 같이 응축기 입구측에 압축기, 유분리기, 압축기 토출관로 및 출구측에 팽창밸브가 설치된 것으로 가정하였다.

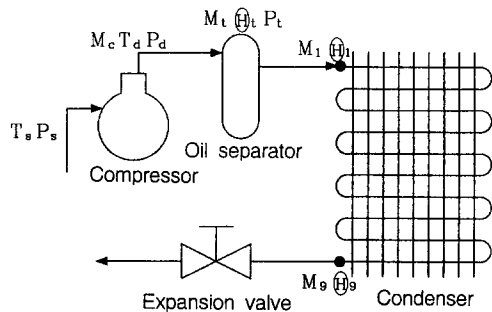


Fig. 1 Schematic diagram of the combined air-cooled condenser system.

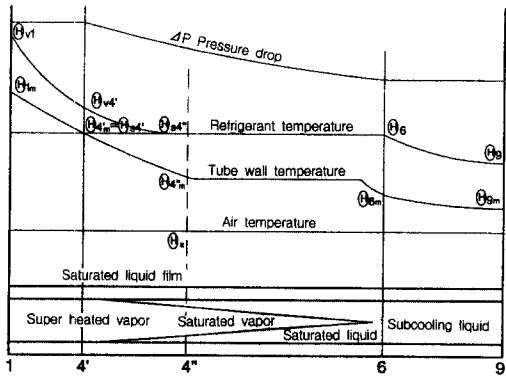


Fig. 2 Model of static characteristics of air-cooled condenser.

2.1 응축기 정특성 모델

Fig. 2는 응축기를 직관으로 고려한 경우 그 개략도를 나타낸다. 그림에서와 같이 실제 응축기에서는 냉매가 과열증기 상태로 유입하여 응축을 개시하는 경계 4'에서 4''에 이르는 사이에 있어 관중심부에서는 과열증기이다. 응축을 개시하는 경계 4'에서 응축이 완료하는 경계 6까지 액과 증기가 혼합 존재하는 2상부에서의 냉매는 온도분포를 가진다. 동시에 냉매측 열전달률은 입구의 위치에 따라 변화한다. 이와 같은 이유에서 동특성 해석을 위한 전달함수를 구할 때 기초방정식의 선형화가 대단히 곤란하다. 따라서 Fig. 3에서와 같이 동특성 모델에서 응축개시점에서는 관단면에서의 냉매는 완전히 포화증기로 되는 것으로 가정하였다. 또한, 냉매의 상변화에 따라 과열부, 2상부 및 과냉각부의 3구간으로 분할하여 각 구간에 있어서 평균열전달률을 구하여 해석하였다. 이 동특성 모델화시 냉매의 방열량은 정특성 모델과 모순이 없어야 한다. 이와 같은 이유에서 먼저 정특성 해석에서 응축완료점의 위치와 방열량을 구하였으며, 응축기 입구에서 응축완료점까지 냉매의 방열량이 동일한 값이 되도록 동특성 모델에서 과열부와 2상부의 평균열전달률을 구하였다. 또한, 과냉각부의 평균열전달률은 Dittus-Boelter식에 의해 계산하였다.

2.2 응축기 동특성 모델

동특성 해석시 응축기는 수평으로 위치한 직관내를 냉매가 흐르고, 냉각매체인 공기가 편이 부착된 관외측을 직교하여 흐르는 것으로 고려하였으며, 모델화시에는 다음과 같은 가정들을 두었다.

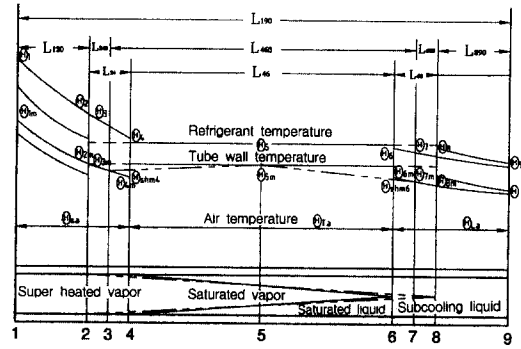


Fig. 3 Model of dynamic characteristics of air-cooled condenser.

(1) 관외를 직교하여 흐르는 냉각매체인 공기는 일정한 온도 및 풍속으로 유입하는 것으로 한다.

(2) 냉매측 열전달률은 정상상태에서 과열부, 2상부 및 과냉각부의 각 구간에서 일정한 것으로 고려한다. 따라서, 응축개시점과 응축완료점 전후에서 열전달률은 불연속적으로 변화하고, 과열영역과 과냉각영역의 경우 냉매유량 변화에 따라 냉매측 열전달률은 변화하므로 미소 유량변화시에는 선형관계에 있는 것으로 한다.

(3) 응축관내의 2상냉매는 응축개시점에서 응축완료점까지 선형의 온도분포를 가지며, 그 사이에서는 포화상태로 한다.

(4) 관내 압력강하는 정특성 해석 결과 2상응축영역에서 크기 때문에 이 값을 이용하여 압력강하를 고려한 응축압력 및 응축온도를 결정하였으며, 이 영역내에서 압력 및 온도는 각각 같은 것으로 고려한다. 또한, 미소 냉매유량 변화에 따른 압력변화와 응축 온도변화는 동일한 것으로 가정하고, 각각 선형관계에 있는 것으로 한다.

이상에서와 같은 가정들을 바탕으로 응축기 입구 경계 1에서 응축기 출구 경계 9까지 냉매와 관벽의 온도분포는 Fig. 3과 같이 고려하여 응축기의 동특성 해석 모델을 작성하였다.

2.3 압축기 계 모델

압축기 계(압축기+유분리기+토출관로) 모델에서는 단상과열증기 냉매가 관내를 흐르는 것으로 고려하여 모델화시 다음과 같은 가정들을 두었다.

(1) 냉매는 이상기체로 가정한다.

(2) 압축기 실린더내에서 냉매증기는 폴리트로픽 변화하는 것으로 가정한다.

(3) 압축기 토출구에서 유분리기 사이의 배관은 짧고, 그 사이에서 냉매의 온도강하와 압력강하는 생략한다.

(4) 압축기 토출관로에 있어서 관내외면의 열전도율은 냉매유량 변화의 영향을 받지 않는 것으로 한다.

이상과 같은 가정들을 기초로 각 부분의 기초방정식을 도출하였다.

3. 동특성 기초방정식

동특성 기초방정식은 앞에서의 가정과 해석 모델을 기초로 연속의 식, 냉매와 관벽의 에너지 평형식 및 열전달식으로 나타낼 수 있다. 기초방정식 도출시 과열증기영역과 과냉각영역은 분포계로, 응축개시점영역, 2상영역 및 응축완료점영역은 집중계로 고려하였다.

3.1 응축기

Fig. 3으로부터 과열증기영역의 검사체적은 1과 2 모두 고정된 경계를 가지며, 다음과 같이 시간에 대한 편미분 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$M_1 = M_2 \quad (1)$$

$$A\rho_{12}C_{p12} \frac{\partial \Theta_2}{\partial t} + \frac{M_1 C_{p12}}{L_{12}} \frac{\partial \Theta_2}{\partial l} = -\alpha_s A_i (\Theta - \Theta_m) \quad (2)$$

$$C_m \frac{\partial \Theta_m}{\partial t} = \alpha_s A_i (\Theta - \Theta_m) - \alpha_a A_o (\Theta_m - \Theta_{sa}) \quad (3)$$

여기서, L_{12} 는 경계 1에서 과열영역내 임의의 위치까지 거리, $l = L_{12}/L_{120}$ 은 경계 1에서 임의의 무차원 위치 (L_{120} 은 경계 1~2까지의 고정거리), Θ , Θ_m 은 무차원 위치 l 에서 과열영역내 냉매 및 관벽 온도를 나타낸다.

응축개시점영역의 검사체적은 고정경계 2와 이동경계 4를 가지며 다음과 같이 상미분방정식으로 표시된다.

$$M_2 - M_4 = A \left[\frac{d}{dt} (\rho_3 L_{24}) - \rho_4 \frac{dL_{24}}{dt} \right] \quad (4)$$

$$M_2 H_2 - M_4 H_4 - Q_{24} = A \left[\frac{d}{dt} (\rho_3 U_3 L_{24}) - \rho_4 H_4 \frac{dL_{24}}{dt} \right] \quad (5)$$

$$C_m L_{24} \frac{d\Theta_{3m}}{dt} = \alpha_s A_i L_{24} (\Theta_3 - \Theta_{3m}) - \alpha_a A_o L_{24} (\Theta_{3m} - \Theta_{sa}) \quad (6)$$

여기서, 식(5)의 좌변 제 3항 Q_{24} 는 다음과 같다.

$$Q_{24} = \alpha_a A_o L_{24} (\Theta_{3m} - \Theta_{sa}) + C_m (\Theta_{3m} - \Theta_{shM4}) \frac{dL_{24}}{dt} + C_m L_{24} \frac{d\Theta_{3m}}{dt} \quad (7)$$

2상영역은 경계 4와 6을 가변 검사체적으로 고려하고, 4와 6의 중간을 경계 5로 하여 기초방정식을 세우면 다음과 같다.

$$M_4 - M_6 = A \left[\frac{d}{dt} (\bar{\rho}_5 L_{46}) + \rho_4 \frac{dL_{24}}{dt} + \rho_6 \frac{dL_{68}}{dt} \right] \quad (8)$$

$$M_4 H_4 - M_6 H_6 - Q_{46} = A \left[\frac{d}{dt} (\bar{\rho}_5 H_5 L_{46}) + \rho_4 H_4 \frac{dL_{24}}{dt} + \rho_6 H_6 \frac{dL_{68}}{dt} \right] \quad (9)$$

$$C_m L_{46} \frac{d\Theta_{5m}}{dt} = \alpha_T A_i L_{46} (\Theta_5 - \Theta_{5m}) - \alpha_a A_o L_{46} (\Theta_{5m} - \Theta_{Ta}) \quad (10)$$

여기서, 식(9)의 좌변 제 3항 Q_{46} 은 다음과 같다.

$$Q_{46} = \alpha_T A_i L_{46} (\Theta_5 - \Theta_{5m}) + C_m (\Theta_{shM4} - \Theta_{5m}) \frac{dL_{24}}{dt} - C_m (\Theta_{5m} - \Theta_{shM6}) \frac{dL_{68}}{dt} \quad (11)$$

응축완료점영역은 길이가 짧고, 입구측 경계 6과 출구측 경계 8을 가변 검사체적으로 고려하고, 6과 8의 중간점을 경계 7로 한다. 이 영역내에서 냉매의 열물성치와 관벽의 온도분포는 모두 선형인 것으로 가정하면 기초방정식은 다음과 같다.

$$M_6 - M_8 = A \left[\frac{d}{dt} (\rho_7 L_{68}) - \rho_6 \frac{dL_{68}}{dt} \right] \quad (12)$$

$$M_6 H_6 - M_8 H_8 - Q_{68} = A \left[\frac{d}{dt} (\rho_7 H_7 L_{68}) - \rho_6 H_6 \frac{dL_{68}}{dt} \right] \quad (13)$$

$$C_m L_{68} \frac{d\Theta_{7m}}{dt} = \alpha_L A_i L_{68} (\Theta_7 - \Theta_{7m}) - \alpha_a A_o L_{68} (\Theta_{7m} - \Theta_{La}) \quad (14)$$

여기서, 식(13)의 좌변 제 3항 Q_{68} 은 다음과 같다.

$$Q_{68} = \alpha_L A_i L_{68} (\Theta_7 - \Theta_{7m}) - C_m (\Theta_{shM6} - \Theta_{7m}) \frac{dL_{68}}{dt} \quad (15)$$

그리고 과냉각영역은 고정경계 8과 9를 검사체적으로 고려하고, 8에서 9까지 냉매와 관벽의 온도분포는 모두 분포계인 것으로 가정한다. 이러한 가정을 기초로 이 영역에서의 기초방정식은 다음과 같

다.

$$M_8 \doteq M_9 \quad (16)$$

$$A_{\rho_{89}C_{p89}} \frac{\partial \Theta}{\partial t} + \frac{M_8 C_{p89}}{L_{89}} \frac{\partial \Theta}{\partial l} = -\alpha_L A_t (\Theta - \Theta_m) \quad (17)$$

$$C_m \frac{\partial \Theta_m}{\partial t} = \alpha_L A_i (\Theta - \Theta_m) - \alpha_a A_o (\Theta_m - \Theta_{La}) \quad (18)$$

여기서, L_{89} 는 경계 8에서 이 영역내 임의 위치까지의 거리를 나타내며, $l = L_{89}/L_{890}$ 는 경계 8에서 임의의 무차원 위치를 나타내고, Θ , Θ_m 은 무차원 위치 l 에서의 냉매 및 관벽온도를 나타낸다.

3.2 압축기

압축기의 특성을 해석하기 위한 기초방정식은 실린더내 냉매의 폴리트로픽 변화와 냉매유량으로 다음과 같이 나타내었다.

$$\frac{\Theta_d}{\Theta_s} = \left(\frac{P_d}{P_s} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (19)$$

$$M_c = \frac{V}{R} \frac{P_s}{\Theta_s} \eta_v = \frac{V}{R} \frac{P_s}{\Theta_s} \left[1 - C \left\{ \left(\frac{P_d}{P_s} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right\} \right] \quad (20)$$

여기서, n 는 폴리트로픽 지수, η_v 는 압축기의 체적효율을 나타낸다.

3.3 유분리기

유분리기내 냉매의 압력은 압축기 토출 관로계 모델의 가정에 의해 냉매의 압력 및 냉매와 관벽의 열에너지 평형식으로 다음과 같다.

$$M_c - M_t = \frac{V_t}{kR\Theta_t} \frac{dP_d}{dt} \quad (21)$$

여기서, $M_t \doteq M_1 = M_9 - A_{\rho_4} \frac{dl_{24}}{dt}$ 를 나타낸다.

$$M_1 (H_d - H_t) = \alpha_{ts} A_{jt} (\Theta_t - \Theta_{tm}) \quad (22)$$

$$C_{mt} W_t \frac{d\Theta_{tm}}{dt} = \alpha_{ts} A_{jt} (\Theta_t - \Theta_{tm}) - \alpha_{ta} A_{ot} (\Theta_{tm} - \Theta_{ta}) \quad (23)$$

3.4 압축기 토출관로

유분리기 출구와 응축기 입구 사이의 배관에 있어 냉매의 온도변화는 유량변동의 영향을 생략하며, 다음과 같이 위치와 시간에 관한 편미분 방정식으로 표시할 수 있다.

$$A_d \rho_a C_{pd} \frac{\partial \Theta}{\partial t} + \frac{M_t C_{pd}}{L_{ado}} \frac{\partial \Theta}{\partial l} = -\alpha_{as} A_{jd} (\Theta - \Theta_m) \quad (24)$$

$$C_{md} \frac{\partial \Theta_m}{\partial t} = \alpha_{aa} A_{od} (\Theta_{da} - \Theta_m) - \alpha_{as} A_{jd} (\Theta_m - \Theta) \quad (25)$$

여기서, L_{ad} 는 유분리기 출구에서 압축기 토출관로내 임의의 위치까지의 거리를 나타내며, $l = L_{ad}/L_{ado}$ 는 유분리기 출구에서의 무차원 위치를 나타내고, Θ , Θ_m 은 무차원 위치 l 에서의 냉매 및 관벽온도를 나타낸다.

4. 기초방정식의 조합과 선형화

각 영역의 기초방정식을 조합하고, 각 변동량은 정상상태에서 평형상태량과 변동분의 합으로 나타내었으며, 여기에 응축기의 작동을 정상상태에서 미소변동으로 고려하고, 고차의 미소량을 생략하여 선형화하였다.

4.1 응축기

과열영역의 기초방정식 (2), (3)에 다음과 같은 정의를 두고, 각 변동량은 평형상태량에 첨자 0을 붙이고 변동분을 소문자로 표시하여 선형화 하면 온도변화에 따른 선형화된 냉매 및 관벽의 열에너지 평형식은 아래의 식과 같다.

$$\gamma_{a1} = \frac{\alpha_a A_o}{\alpha_s A_i + \alpha_a A_o}, \quad \gamma_{b1} = 1 - \gamma_{a1},$$

$$\tau_{a1} = \frac{A_{\rho_{12}} L_{120+U-Bend}}{M_1}, \quad \tau_{w1} = \frac{C_m}{\alpha_s A_i + \alpha_a A_o},$$

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_s A_i \alpha_a A_o}{\alpha_s A_i + \alpha_a A_o} \frac{L_{120}}{M_1 C_{p12}}, \quad c_1 = \alpha_1 \frac{\gamma_{b1}}{\gamma_{a1}},$$

$$\Theta = \Theta_0 + \theta, \quad \Theta_m = \Theta_{m0} + \theta_m, \quad \Theta_{sa} = \Theta_{sa0} + \theta_{sa},$$

$$M_1 = M_{10} = M_{90}, \quad \alpha_a = \alpha_{a0}, \quad \alpha_s = \alpha_{s0}, \quad \alpha_1 = \alpha_{10},$$

$$\rho_{12} = \rho_{120} = (\rho_{10} + \rho_{20})/2, \quad c_1 = c_{10}, \quad \gamma_{a1} = \gamma_{a10},$$

$$\gamma_{b1} = \gamma_{b10}, \quad \tau_{a1} = \tau_{a10},$$

$$\tau_{w1} = \tau_{w10} \frac{\partial \theta}{\partial l} + \tau_{a10} \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\alpha_{10}}{\gamma_{a10}} \theta = \frac{\alpha_{10}}{\gamma_{a10}} \theta_m \quad (26)$$

$$\tau_{w10} \frac{\partial \theta_m}{\partial t} = \gamma_{a10} \theta_{sa} + \gamma_{b10} \theta - \theta_m \quad (27)$$

또한, 각 변동량을 고려하여 평형상태에서 $(\gamma_{a10} + \Delta\gamma_{a1})^{-1}$ 을 Taylor 전개하고, 고차의 미소항을 생략하여 정리하면 평형상태에서 무차원 위치에 관한 상미분 방정식을 도출할 수 있다. 이 방정식에 경계조건 $l=0$ 에서 $\Theta_0 = \Theta_{10}$ 을 이용하여 정리하면 유량변화에 대한 선형화된 냉매 및 관벽의 열에너지 평형식은 다음과 같다.

$$\tau_{\alpha 10} \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial \theta}{\partial l} + (\Theta_{sa0} - \Theta_{10}) e^{-\alpha_{10} l} \left[\frac{\Delta \alpha_1}{\alpha_{10}} - \frac{\Delta \gamma_{a1}}{\gamma_{a10}} \right] - \frac{\alpha_{10}}{\gamma_{a10}} (\theta - \theta_m) \quad (28)$$

$$\tau_{w10} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \Delta \gamma_{a1} (\Theta_{sa0} - \Theta_{10}) e^{-\alpha_{10} l} + \gamma_{a10} \theta_{sa} + \gamma_{b10} \theta - \theta_m \quad (29)$$

여기서, $\tau_{\alpha 10}$, τ_{w10} 은 각각 $(\tau_{w10} + \Delta \tau_{a1})$, $(\tau_{w10} + \Delta \tau_{w1})$ 의 평균값이다.

응축개시점영역은 기초방정식 (5)를 (4)에 대입하여 M_2 를 소거하여 정리하고, 동일한 방법으로 각 변동량을 가정하여 정리하면 선형화된 냉매 및 관벽의 열에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_4 (H_{20} - H_{40}) = & -M_{90} C_{p24} (\theta_2 - \theta_5) \\ & + \alpha_{50} A_i L_{240} (\theta_3 - \theta_{3m}) + \alpha_{50} A_i (\Theta_{30} - \Theta_{3m0}) l_{24} \\ & - AL_{240} (H_{20} - H_{30}) \left[\left\{ \frac{\partial \rho_3}{\partial P_a} \right\}_{\Theta_{30}} \left\{ \frac{\partial P_a}{\partial T_4} \right\} + \left\{ \frac{\partial \rho_3}{\partial T_3} \right\}_{P_4} \right] \\ & \frac{\partial \theta_3}{dt} + \frac{1}{2} A \rho_{30} L_{240} C_{p24} \frac{\partial \theta_2}{dt} \\ & + \frac{1}{2} A \rho_{30} L_{240} C_{p24} \frac{d\theta_5}{dt} [A \{ \rho_{30} (H_{20} - H_{30}) \\ & - \rho_{40} (H_{20} - H_{40}) \} - C_m (\Theta_{3m0} - \Theta_{sh40})] \frac{dl_{24}}{dt} \quad (30) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_4 = m_9 - A (\rho_{70} - \rho_{50}) \frac{dl_{46}}{dt} - A (\rho_{70} - \rho_{40}) \\ \frac{dl_{24}}{dt} + AL_{460} \left(\frac{\partial \bar{\rho}_5}{\partial \theta_5} \right)_0 \frac{d\theta_5}{dt} \quad (31) \end{aligned}$$

또한, 2상영역은 기초방정식 (10)에 (9)식을 대입하여 M_4 를 소거하고, 이것에 (11)식을 대입하여 정리하여 기초방정식을 선형화하면 선형화된 냉매 및 관벽의 열에너지 평형식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M_6 (H_{40} - H_{60}) = & -M_{90} \left[\left(\frac{\partial H_4}{\partial \Theta_4} \right)_0 - \left(\frac{\partial H_6}{\partial \Theta_6} \right)_0 \right] \theta_5 \\ & + \alpha_{70} A_i L_{460} (\theta_5 - \theta_{5m}) + \alpha_{70} A_i (\Theta_{50} - \Theta_{5m0}) l_{46} \\ & + [A \rho_{60} (H_{40} - H_{60}) + C_m (\Theta_{sh40} - \Theta_{sh60})] \frac{dl_{24}}{dt} \\ & + [A \{ \rho_{60} (H_{40} - H_{60}) - (\rho_{50} H_{40} - \rho_{50} H_{60}) \} \\ & + C_m (\Theta_{5m0} - \Theta_{sh60})] \frac{dl_{46}}{dt} + AL_{460} \left[\left(\frac{\partial \rho_5 H_5}{\partial \Theta_5} \right)_0 \right. \\ & \left. - H_{40} \left(\frac{\partial \bar{\rho}_5}{\partial \theta_5} \right)_0 \right] \frac{d\theta_5}{dt} \quad (32) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_6 = m_9 \\ - A (\rho_{70} - \rho_{60}) \frac{dl_{24}}{dt} - A (\rho_{70} - \rho_{60}) \frac{dl_{46}}{dt} \quad (33) \end{aligned}$$

응축완료점영역은 동일한 방법으로 M_6 을 소거하고, 각 변동량을 동일한 방법으로 정리하면 이 영

역의 선형화된 냉매 및 관벽의 열에너지 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_9 (H_{60} - H_{80}) = & -M_{90} C_{p68} (\theta_5 + \theta_8) + \alpha_{L0} A_i L_{680} \\ & (\theta_7 + \theta_{7m}) - \alpha_{L0} A_i (\Theta_{70} - \Theta_{7m0}) (l_{24} + l_{46}) + A \rho_{70} L_{680} \\ & \frac{C_{p68}}{2} \frac{d\theta_5}{dt} + A \rho_{70} L_{680} \frac{C_{p68}}{2} \frac{d\theta_8}{dt} + [A \rho_{70} (H_{60} - H_{70}) \\ & + C_m (\Theta_{sh60} - \Theta_{7m0})] \left(\frac{dl_{24}}{dt} + \frac{dl_{46}}{dt} \right) \quad (34) \end{aligned}$$

$$C_m \frac{d\theta_{7m}}{dt} = \alpha_{L0} A_i \theta_7 - (\alpha_{L0} A_i + \alpha_{a0} A_o) \theta_{7m} \quad (35)$$

과냉각영역은 과열영역과 동일한 방법으로 각 변동량을 고려하여 정리하면 온도변화에 대한 선형화된 냉매 및 관벽의 열에너지 평형식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial l} + \tau_{a20} \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\alpha_{20}}{\tau_{a20}} \theta = \frac{\alpha_{20}}{\gamma_{a20}} \theta_m \quad (36)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \gamma_{a2} = & \frac{\alpha_a A_o}{\alpha_L A_i + \alpha_a A_o}, \quad \gamma_{b2} = 1 - \gamma_{a2}, \\ \tau_{w2} = & \frac{C_m}{\alpha_L A_i + \alpha_a A_o}, \quad \tau_{a2} = \frac{A \rho_{89} L_{890} + U - Bend}{M_8}, \\ \tau_{w20} \frac{\partial \theta_m}{\partial t} = & \gamma_{a20} \theta_{La} + \gamma_{b20} \theta - \theta_m \end{aligned}$$

또한, 유량변화에 대한 선형화된 냉매 및 관벽의 열에너지 평형식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_{a20} \frac{\partial \theta}{\partial t} = & -\frac{\partial \theta}{\partial l} + \alpha_{20} (\Theta_{La0} - \Theta_{80}) e^{-\alpha_{20} l} \left[\frac{\Delta \alpha_2}{\alpha_{20}} \right. \\ & \left. - \frac{\Delta \gamma_{a2}}{\gamma_{a20}} \right] - \frac{\alpha_{20}}{\gamma_{a20}} (\theta - \theta_m) \quad (37) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{w20} \frac{\partial \theta_m}{\partial t} = & \Delta \gamma_{a2} (\Theta_{La0} - \Theta_{80}) e^{-\alpha_{20} l} + \gamma_{a20} \theta_{La} \\ & + \gamma_{b20} \theta - \theta_m \quad (38) \end{aligned}$$

4.2 압축기

기초방정식 (19)을 미소변동으로 고려하여 미분하고, 각 변동량을 고려하여 선형화하면 냉매유량 변화에 따른 선형화된 압축기 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M_{90} \frac{d\dot{m}_s}{dt} + \Theta_{s0} \frac{d\dot{m}_c}{dt} = & \frac{V}{R} (1 + C) \frac{dP_s}{dt} - \frac{C}{n} \frac{V}{R} \frac{\Theta_{s0}}{\Theta_{a0}} \\ \frac{dP_a}{dt} - \frac{n-1}{n} \frac{CV}{R} \frac{\Theta_{s0}}{\Theta_{a0}} \left(\frac{P_{a0}}{P_{s0}} \right) \frac{dP_s}{dt} \quad (39) \end{aligned}$$

4.3 유분리기

기초방정식 (21)에 (22)식을 대입하여 M_L 를 소거

하고, 각 변동량을 고려하여 정리하면 유분리기의 선형화된 냉매 및 관벽의 열에너지 식은 다음과 같다.

$$M_{90}C_{pt}(l_d - \theta_t) = \alpha_{ts0}A_{jt}(\theta_t - \theta_{tm}) \quad (40)$$

$$C_m W_t \frac{d\theta_{tm}}{dt} = \alpha_{ts0}A_{jt}\theta_t - (\alpha_{ts0}A_{jt} + \alpha_{ta0}A_{ot})\theta_{tm} \quad (41)$$

4.4 압축기 토출관로

유분리기 출구와 응축기 입구사이의 배관에 있어 냉매 온도변화는 유량변동의 영향을 생략하고, 각 변동량을 고려하여 정리하면 이 부분의 냉매 및 관벽의 열에너지 평형식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial l} + \tau_{ad0} \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\alpha_{a0}}{\gamma_{ad0}} \theta = \frac{\alpha_{a0}}{\gamma_{ad0}} \theta_m \quad (42)$$

$$\tau_{wd0} \frac{\partial \theta_m}{\partial t} = \gamma_{ad0} \theta_{da} + \gamma_{bd0} \theta - \theta_m \quad (43)$$

5. 동특성 전달함수 및 블록선도

각 영역에 있어서 동특성을 나타내는 전달함수는 기초방정식을 조합하여 선형화한 식을 라플라스 변환하여 구하였으며, 이들 전달함수들을 블록선도화하여 해석을 수행하였다.

5.1 전달함수

5.1.1 응축기

과열증기영역의 온도변화에 대한 선형화된 냉매 및 관벽의 열에너지 평형식 (23)과 (24)를 라플라스 변환하여 정리하고, 무차원 위치 $l=0$ 에서 경계조건 $\theta = \theta_1$ 을 이용하여 해석하면 관측방향의 냉매 온도분포는 다음과 같다.

$$\theta(s) = \theta_1(s) e^{-f_1(s)l} + \theta_{sa}(s) \frac{\alpha_{10}(1 - e^{-f_1(s)l})}{(1 + \tau_{w10}S) f_1(s)} \quad (44)$$

여기서, $l=1$ 에서 경계조건 $\theta = \theta_2$, 유입공기의 온도변동이 없는 것으로 하면 $\theta_{sna}=0$ 이므로 응축기 입구 냉매온도 변화에 대한 경계 2에서의 냉매 온도의 응답은 다음과 같다.

$$\frac{\theta_2(s)}{\theta_1(s)} = e^{-f_1(s)} = e^{-(\alpha_{10} + \tau_{a10}S + c_{10} \frac{\tau_{w10}S}{1 + \tau_{w10}S})} \quad (45)$$

여기서, $e^{-\alpha_{10}}$ 은 계인정수, τ_{a10} 은 관내 냉매의 수송지연에 따른 낭비시간, $c_{10} \tau_{w10}S / (1 + \tau_{w10}S)$ 은 관벽 열용량의 위상지연요소를 나타낸다.

또한, 선형화된 식(28), (29)를 라플라스 변환하

여 정리하면 유량변화에 대한 응답은 다음과 같다.

$$\theta_2(s) = \mu_{a1}(1 - \eta_{10}) \frac{1 - e^{-h_1(s)}}{h_1(s) + \alpha_{10}} \frac{1 + (1 - \mu_{10}C_{10}) \tau_{w10}S (\Theta_{sa0} - \Theta_{10})}{1 + \tau_{w10}S} \frac{1}{M_{90}} m_1(s) \quad (46)$$

여기서, $\mu_{a1}(1 - \eta_{10})(\Theta_{sa0} - \Theta_{10})/M_{90}$ 은 계인정수이다.

응축기시점영역은 이 영역의 선형화된 냉매 및 관벽의 열에너지식을 각각 라플라스 변환하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{K_3}{(1 - T_3S)} m_4(s) + K_3(1 - T_3S) \left[\frac{(1 - T_{3BS})}{K_{3C}} \right. \\ & \left. - \frac{1}{K_{3A}} \left\{ (1 - T_{3CS}) - \frac{K_{3B}}{(1 + T_{3AS})} \right\} \right] \theta_2(s) \\ & - \frac{K_3}{(1 - T_3S)} \left[\frac{(1 + T_{3BS})}{K_{3C}} + \frac{1}{K_{3A}} \left\{ (1 - T_{3CS}) \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{K_{3B}}{(1 + T_{3AS})} \right\} \right] \theta_5(s) = l_{24}(s) \end{aligned} \quad (47)$$

여기서, 각 계인정수 및 시정수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_3 &= \frac{L_{240}}{M_{90}}, \quad K_{3A} = \frac{2(\Theta_{30} - H_{3m0})}{M_{90}}, \\ K_{3B} &= \frac{\alpha_{s0}A_i}{\alpha_{s0}A_i + \alpha_{a0}A_o}, \quad K_{3C} = \frac{\Theta_{20} - \Theta_{40}}{M_{90}}, \\ T_3 &= \frac{A[\rho_{30}(H_{20} - H_{30}) - \rho_{40}(H_{20} - H_{40})] - C_m(\Theta_{3m0} - \Theta_{sm0})}{K_{140}(\Theta_{30} - \Theta_{sa0})}, \\ T_{3A} &= \frac{C_m}{\alpha_{st0}A_i + \alpha_{a0}A_o}, \\ T_{3B} &= \frac{A\rho_{30}L_{240}}{2M_{90}}, \quad T_{3C} = \frac{A(H_{20} - H_{30})}{\alpha_{s0}A_i} \\ & \left[\left(\frac{\partial \rho_3}{\partial p_d} \right)_{\Theta_{30}} \left(\frac{\partial p_d}{\partial \Theta_5} \right)_0 + \left(\frac{\partial \rho_3}{\partial \Theta_3} \right)_{p_d} \right] \\ T_{3D} &= \left[\frac{AL_{460}(H_{20} - H_{40})}{M_{90}} \right] \left(\frac{\partial \bar{\rho}_5}{\partial \Theta_5} \right)_0, \\ T_{3E} &= \frac{AL_{240}(\rho_{70} - \rho_{40})}{M_{90}}, \\ T_{3F} &= \frac{AL_{240}(\rho_{70} - \bar{\rho}_{50})}{M_{90}} \end{aligned}$$

동일한 방법으로 2상영역도 이 영역의 선형화된 냉매 및 관벽의 열에너지 평형식을 라플라스 변환하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{K_5}{(1 + T_5S)} m_6 + \frac{K_5}{(1 + T_5S)} \left[\frac{1}{K_{5C}} - \frac{1}{K_{5D}} - \frac{1}{K_{5A}} \right. \\ & \left. \left\{ (1 - T_{5CS}) - \frac{K_{5B}}{(1 + T_{5AS})} \right\} \right] \theta_5 - \frac{T_{5BS}}{(1 + T_5S)} l_{24}(s) \\ & = l_{46}(s) \end{aligned} \quad (48)$$

여기서, 계인정수 및 시정수는 아래와 같이 각각 정의하였다.

$$\begin{aligned}
 K_5 &= \frac{L_{460}}{M_{90}}, & K_{5A} &= \frac{(\Theta_{50} - \Theta_{5m0})}{M_{90}}, \\
 K_{5B} &= \frac{\alpha_{70} A_i}{\alpha_{70} A_i + \alpha_{7a0} A_o}, & K_{5C} &= \frac{(H_{40} - H_{60})}{M_{90} \left(\frac{\partial H_4}{\partial \Theta_4} \right)_0}, \\
 K_{5D} &= \frac{(H_{40} - H_{60})}{M_{90} \left(\frac{\partial H_6}{\partial \Theta_5} \right)_0}, \\
 T_5 &= \frac{A[\rho_{60}(H_{40} - H_{60}) - (\bar{\rho}_{50} H_{40} - \rho_{50} H_{50})] + C_m(\Theta_{5m0} - \Theta_{shm60})}{K_{460}(\Theta_{50} - \Theta_{7a0})}, \\
 T_{5A} &= \frac{C_m}{\alpha_{70} A_i + \alpha_{7a0} A_o}, \\
 T_{5B} &= \frac{A\rho_{60}(H_{40} - H_{60}) + C_m(\Theta_{shm40} - \Theta_{shm60})}{K_{460}(\Theta_{50} - \Theta_{7a0})}, \\
 T_{5C} &= \frac{A}{\alpha_{70} A_i} \left[H_{40} \left(\frac{\partial \bar{\rho}_5}{\partial \Theta_5} \right)_0 - \left(\frac{\partial \rho_5 H_5}{\partial \Theta_5} \right)_0 \right], \\
 T_{5D} &= \frac{AL_{460}(\rho_{70} - \rho_{60})}{M_{90}}
 \end{aligned}$$

응축완료점영역의 경우도 동일한 방법으로 선형화된 냉매 및 관벽의 열에너지 평형식을 라플라스 변환하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 &\frac{K_7}{(1 - T_{7S})} m_9(s) + \frac{K_7(1 - T_{7BS})}{K_{7C}(1 - T_{7S})} \theta_5(s) \\
 &- \frac{K_7}{K_{7A}(1 - T_{7S})} \left\{ 1 - \frac{K_{7B}}{(1 + T_{7AS})} \right\} \theta_5(s) \\
 &- \frac{K_7}{K_{7A}(1 - T_{7S})} \left[1 - \frac{K_{7B}}{(1 + T_{7AS})} \right] \theta_8(s) + l_{24}(s) + l_{46}(s) \\
 &= \frac{K_7(1 + T_{7BS})}{K_{7C}(1 - T_{7S})} \theta_8(s) \tag{49}
 \end{aligned}$$

여기서, 계인정수 및 시정수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 K_7 &= \frac{L_{680}}{M_{90}}, & K_{7A} &= \frac{2(\Theta_{70} - \Theta_{7m0})}{M_{90}}, \\
 K_{7B} &= \frac{\alpha_{L0} A_i}{\alpha_{L0} A_i + \alpha_{La0} A_o}, & K_{7C} &= \frac{\Theta_{60} - \Theta_{80}}{M_{90}}, \\
 T_7 &= \frac{A\rho_{70}(H_{60} - H_{70}) + C_m(\Theta_{shm60} - \Theta_{7m0})}{K_{690}(\Theta_{70} - \Theta_{La0})}, \\
 T_{7A} &= \frac{C_m}{\alpha_{L0} A_i + \alpha_{La0} A_o}, & T_{7B} &= \frac{A\rho_{70} L_{680}}{2M_{90}}
 \end{aligned}$$

과열영역과 동일한 방법으로 과냉각영역의 온도 변화에 대한 이 영역의 선형화된 냉매 및 관벽의 열에너지 평형식을 라플라스 변환하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\theta_9(s)}{\theta_8(s)} = e^{-\left\{ \alpha_{20} + \tau_{a20} s + C_{20} \frac{\tau_{w20} s}{(1 + \tau_{w20} s)} \right\}} \tag{50}$$

여기서, $C_{20} = \alpha_{20} \frac{\gamma_{b20}}{\gamma_{a20}}$

또한, 온도변화와 동일한 방법으로 유량변화에 대한 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \theta_9(s) &= \mu_{a2}(1 - \eta_{20}) \frac{1 - e^{-\lambda_2(s)}}{h_2(s) + \alpha_{20}} \frac{1 + (1 - \mu_{t2} C_{20}) \tau_{w20} s}{(1 + \tau_{w20} s)} \\
 &\frac{(\Theta_{La0} - \Theta_{80})}{M_{90}} m_8(s) \tag{51}
 \end{aligned}$$

여기서, $\eta_{20} = 1 - e^{-\alpha_{20}}$, $\mu_{a2} = M_{80} \frac{\Delta \alpha_2}{\Delta M}$, $\mu_{t2} = \frac{M_{90}}{\gamma_{b20}}$

$$\frac{\Delta \gamma_{a2}}{\Delta M}, \mu_{t2} = \frac{\mu_{t2}}{\mu_{a2}}$$

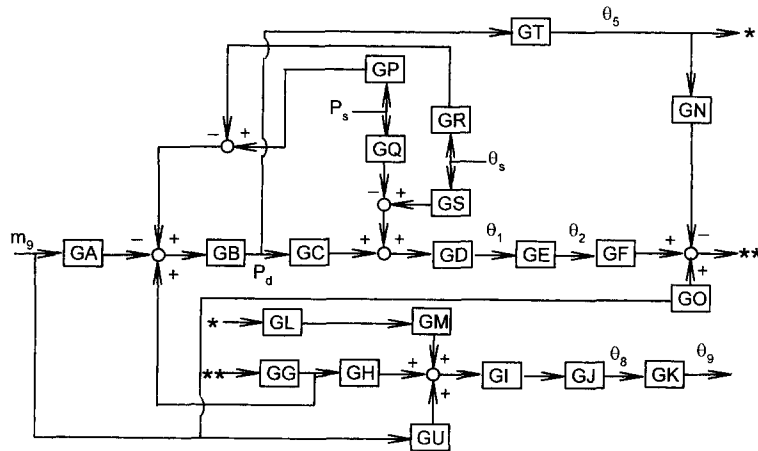


Fig. 4 Block diagram of air-cooled condenser.

5.1.2 압축기 및 유분리기

선형화된 압축기의 냉매유량식을 라플라스 변환하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & -m_0(s) + A\rho_{40}sl_{24}(s) - \frac{M_{90}}{\Theta_{s0}}t_s(s) + \frac{1}{K_c}P_s(s) \\
 & = \frac{(1+T_{dS})}{K_d}P_d(s) \tag{52}
 \end{aligned}$$

여기서, 계인정수 및 시정수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 K_c &= \frac{P_{s0}}{M_{9c}} \frac{\left[1+C-C\left(\frac{P_{d0}}{P_{s0}}\right)^{\frac{1}{n}}\right]}{\left[1+C-Cn\frac{1}{n}\left(\frac{P_{d0}}{P_{s0}}\right)^{\frac{1}{n}}\right]}, \\
 K_d &= \frac{n}{C} \frac{P_{d0}}{M_{90}} \left(\frac{P_{d0}}{P_{s0}}\right)^{\frac{n-1}{n}} \left[1+C-C\left(\frac{P_{d0}}{P_{s0}}\right)^{\frac{1}{n}}\right] \\
 T_d &= \frac{nV_t P_{s0}}{kC\Theta_{t0}M_{90}R} \left(\frac{P_{d0}}{P_{s0}}\right)^{\frac{n-1}{n}} \left[1+C-C\left(\frac{P_{d0}}{P_{s0}}\right)^{\frac{1}{n}}\right]
 \end{aligned}$$

또한, 선형화된 유분리기의 냉매 및 관벽의 열에너지 평형식을 라플라스 변환하여 정리하면 다음과 같다.

$$\theta_t(s) = \frac{K_{dA}}{1 - \frac{K_{dB}}{(1+T_{dP}S)}} t_d(s) \tag{53}$$

여기서, 계인정수 및 시정수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 K_{dA} &= \frac{M_{90}C_{pt}}{(M_{90}C_{pt} + \alpha_{ts0}A_{jt})}, \\
 K_{dB} &= \frac{(\alpha_{ts0}A_{jt})^2}{(M_{90}C_{pt} + \alpha_{ts0}A_{jt})(\alpha_{ta0}A_{ot} + \alpha_{ts0}A_{jt})}, \\
 T_{dP} &= \frac{C_{mt}W_t}{(\alpha_{ta0}A_{ot} + \alpha_{ts0}A_{jt})}
 \end{aligned}$$

5.1.3 압축기 토출관로

토출관로의 냉매 및 관벽의 열에너지 평형식을 라플라스 변환하여 정리하면 유분리기 출구 냉매온도 변화에 대한 응축기 입구 냉매온도의 응답은 다음과 같다.

$$\frac{\theta_1(s)}{\theta_t(s)} = e^{-f_d(s)} \tag{54}$$

여기서, $f_d(s) = \alpha_{d0} + \tau_{ad0}S + C_{d0} \frac{\tau_{wd0}S}{(1 + \tau_{wd0}S)}$, $C_{d0} = \alpha_{d0} \frac{\tau_{bd0}}{\tau_{ad0}}$ 를 각각 나타낸다.

5.2 블록선도

응축기의 동특성을 나타내는 블록선도는 과열,

Table 1 Transfer functions of the condenser and the combined compressor system.

Symbols	Transfer functions
GA	$\text{EXP}[-(\tau_{ad0} + \tau_{160})s]$
GB	$\frac{K_d}{(1+T_{dS})}$
GC	$\frac{n-1\Theta_{d0}}{nP_d}$
GD	$\text{EXP}\left[-\left\{\alpha_{d0}S + \tau_{ad0}S + C_{d0} \frac{\tau_{wd0}S}{(1 + \tau_{wd0}S)}\right\}\right]$
GE	$\text{EXP}\left[-\left\{\alpha_{10}S + \tau_{a10}S + C_{10} \frac{\tau_{w10}S}{(1 + \tau_{w10}S)}\right\}\right]$
GF	$\frac{K_3}{(1-T_{3S})} \left[\frac{1-T_{3BS}}{K_{3C}} - \frac{1}{K_{3A}} \left\{ (1-T_{3CS}) \frac{K_{3B}}{(1+T_{3AS})} \right\} \right] \text{EXP}(-\tau_{240}S)$
GG	$\frac{1-T_{3S}}{1+(T_{3E}-T_3)S}$
GH	$\frac{1-T_{5BS}}{1+(T_5+T_{5D})S} \text{EXP}(-\tau_{40}S)$
GI	$\frac{1}{1 + \frac{K_{7C}}{K_{7A}(1+T_{7BS})} \left[1 - \frac{K_{7B}}{(1+T_{7AS})} \right]}$
GJ	$\frac{K_{7C}(1-T_{7S})}{K_7(1+T_{7BS})} \text{EXP}(-\tau_{680}S)$
GK	$\text{EXP}\left[-\left\{\alpha_{20} + \tau_{a20}S + \frac{C_{20}\tau_{w20}S}{(1 + \tau_{w20}S)}\right\}\right]$
GL	$\frac{K_5}{1+(T_5+T_{5D})S} \left[\frac{1}{K_{5C}} - \frac{1}{K_{5D}} - \frac{1}{K_{5A}} \left\{ (1-T_{5CS}) - \frac{K_{5B}}{(1+T_{5AS})} \right\} \right]$
GM	$\frac{K_7}{(1-T_{7S})} \left[\frac{(1-T_{7BS})}{K_{7C}} - \frac{1}{K_{7A}} \left\{ 1 - \frac{K_{7B}}{(1+T_{7AS})} \right\} \right]$
GN	$\frac{K_3}{(1-T_{3S})} \left[\frac{1+(T_{3B}-T_{3D})S}{K_{3C}} + \frac{1}{K_{3A}} \left\{ (1-T_{3CS}) - \frac{K_{3B}}{(1+T_{3AS})} \right\} \right]$
GO	$\frac{K_3}{(1-T_{3S})} \text{EXP}(-\tau_{460}S)$
GP	$\frac{1}{K_C}$
GQ	$\frac{n-1\Theta_{d0}}{nP_{s0}}$
GR	$\frac{M_{90}}{\Theta_{s0}}$
GS	$\frac{\Theta_{d0}}{\Theta_{s0}}$
GT	$\left[\frac{\partial \theta_5}{\partial P_d} \right]_0$
GU	$\frac{K_5}{1+(T_5+T_{5D})S}$

Table 2 Specifications and operating conditions.

Items	Features	
	Dynamic conditions	Static conditions
Fin area	38.1mm×231mm×301ea (6.707ea/cm)	38.1mm×231mm×301ea (6.707ea/cm)
Length of condensing tube	length of included bend : 12.978m	length of included bend : 12.978m
Diameter	I. D. : 9.39mm, O. D. : 10.11mm	I. D. : 9.39mm, O. D. : 10.11mm
Condensing temperature	45°C	45°C
Refrigerant flow rate	0.0124~0.0137kg/s	0.013kg/s
Air temperature	32°C	32°C

응축개시점, 2상, 응축완료점 및 과냉각의 각 영역 및 압축기 토출관로계의 전달함수로 표시하여 이들을 결합하여 블록선도화하였다. Fig. 4는 압축기 결합계 응축기의 동특성 블록선도를 나타낸다. 그림에서 각 블록의 전달함수는 Table 1과 같다.

6. 결과 및 고찰

본 연구에서 동특성 해석을 위한 대상 응축기의 사양 및 작동조건은 Table 2와 같다. 그리고 Fig. 4에 표시한 전달함수에서 $s=j\omega$ ($j=\sqrt{-1}$, ω : 각주파수, rad/s)로 해석하여 응축기 출구 냉매유량 변화에 대한 압축기 계가 결합된 응축기 각 부분의 동적특성을 주파수 응답법(frequency response method)에 의해 평가하였다. 주파수 응답이란 정현파 입력 즉, $a \sin \omega t$ 에 대하여 입력의 크기를 일정하게 하고, 주파수(1sec 동안에 발생하는 정현파의 발생 수)를 변화시키면서 그 시스템의 정상상태 응답을 평가하는 것이다. 그리고, 어떤 선형 시스템에 진폭이 a 이고, 주파수가 ω 인 $a \sin \omega t$ 의 입력이 작용할 때, 그 시스템의 출력은 진폭 b , 주파수 ω , 위상 ϕ 를 갖는 $b \sin(\omega t + \phi)$ 로 나타나게 된다. 여기서, 입력과 출력의 진폭비 b/a 및 위상 ϕ 는 주파수 ω 에 따라 변하게 되는 데 이때, 진폭비 b/a 를 게인(gain), ϕ 를 위상(phase)이라 정의한다.

따라서, 본 연구에서는 임의 시스템(압축기 계가 결합된 응축기)의 입력 신호(응축기 출구 미소 냉매유량 변화, m_a)에 대한 출력(응축압력, P_a , 응축완료점의 위치, l_6 및 응축기 출구 냉매온도, θ_6)의 동적특성을 비교적 넓은 주파수 범위에서 평가할 수 있는 보오드 선도상(Bode diagram)에서

게인 및 위상값으로 평가하였다. 특히, 본 연구의 경우 냉동·공조시스템 결합계(압축기+유분리기+토출관로+응축기)의 안정성 즉, 온도식 팽창밸브를 사용하는 시스템에서 증발기내 냉매의 온도 및 압력이 주기적으로 변동하는 현상현상의 해석을 목적으로 하는 경우 응축기 출구 미소 냉매유량 변화에 대해 그 해명이 중요한 응축압력, 응축완료점의 위치 및 응축기 출구 냉매온도의 동적특성 응답을 조사하였다. 수치해석은 $\omega=0.001\sim 0.1$ 의 범위에서 10points/decade, $\omega=0.1\sim 1$ 의 범위에서 100 points/decade, 또한 $\omega=1\sim 10$ 의 범위에서는 200 points/decade로 구분하여 수행하였다

6.1 응축압력의 응답

Fig. 5는 출구 냉매유량(m_a)변화 입력에 대한 응축압력(P_a)의 응답을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 저주파수 대역 즉, 일정 주기내에서 냉매의 미소유량 변화가 천천히 변화 입력될 경우, 미소유량 변화에 대한 응축압력의 진폭비인 게인값은 주파수 0.001(rad/sec)에서 약 70dB이며, 고주파수 대역으로 갈수록 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 출구 냉매의 미소유량 변화가 응축기내 냉매의 흐름에 영향을 미쳐 입구측 유분리기내 냉매증기의 유출량에 영향을 미치게 된다. 그리고 압축기 입구의 냉매 상태량은 고정되어 있으므로 압축기 출구의 냉매압력이 다소 변하여도 압축기 출구 증기 유량으로 결정되는 유분리기 유입 냉매 증기량의 변화는 작다. 이들의 동작에 따라 유분리기내 냉매증기의 압력은 낭비시간 $\text{EXP}[-(\tau_{aa0} + \tau_{160})s]$ 을 동반한 1차지연 $K_d/(1+T_{ds})$ 의 응답을 발생시키고, 이 압력의 응답이 응축압력(P_a), 응축온도(θ_6)의 응답으로 지연을 동반하여 응축기 전체에

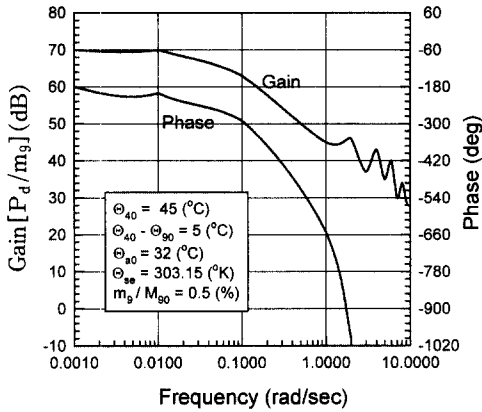


Fig. 5 Responses of condensing pressure (P_d) to refrigerant flow rate change outlet.

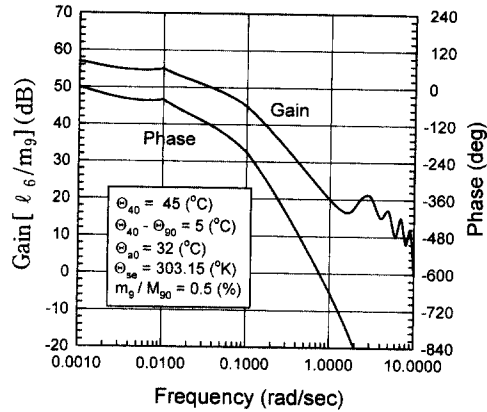


Fig. 6 Responses of condensation ending position (l_6) to refrigerant flow rate change outlet.

전해지는 것으로 생각된다. 또한, Fig. 4의 블록선도에서도 응축개시점의 위치변화가 응축압력 변동에 영향을 미치는 것으로 이해할 수 있으며, $m_g/M_{90}=0.5\%$ 정도의 미소변화 입력 진폭에 대해서 그 영향은 작게 나타났다. 따라서, 출구 냉매의 미소유량 변화에 대한 응축압력 변화의 응답은 근사적으로 다음과 같이 1차지연과 낭비시간요소로 표시할 수 있다.

$$\frac{P_d(s)}{m_g(s)} = -\frac{K_d}{(1+T_d s)} e^{-(\tau_{d0} + \tau_{16})s}$$

그리고 고주파수 대역 즉, 유량변화가 일정 주기 내에서 빠르게 변화하여 입력될 경우, 계인의 진동적 현상은 응축온도(θ_6)와 응축완료점의 변동이 합쳐진 영향이 응축개시점의 위치(l_{24})변동에 미쳐 발생된 것으로 생각된다. 또한, P_d 의 응답은 $s=0$ 에 있어서 전체 -180 도의 위상지연을 가지고 있다. 이것은 열교환기 특유의 응답특성으로 해석되며, 이것을 주파수 응답에 의한 위상지연으로 고려할 수는 없을 것으로 생각된다.

6.2 응축완료점 위치의 응답

Fig. 6은 출구 냉매유량(m_g)변화 입력에 대한 응축완료점 위치(l_6)의 응답을 나타낸 것이다. 이 응답에 미치는 요소는 Fig. 4의 블록선도를 참조하면 3가지로 대별할 수 있다. 먼저 응축압력변동(P_d)에 따른 응축온도 변화(θ_6)와 이것에 동반하여 입구 냉매온도변화(θ_1)가 응답에 영향을 미치는 것으로 생각된다. 또한 출구 냉매유량 변화(m_g)가 직

접 응축완료점의 위치(l_6)의 응답에 미치는 것이다. 특히, 상기 응축압력에서 설명한 바와 같이 응축기 출구 냉매유량 변화는 유분리기 내에 냉매증기의 압력변동을 발생시켜 응축압력 및 응축온도의 응답으로 응축기 전체에 전달된다. 따라서, 이 응축온도의 변동이 응축완료점의 위치(l_6)를 크게 변화시키는 것으로 생각된다. 또한, 응축기 전체 관 길이는 고정되어 있으므로 이 응축완료점 위치의 변화는 그대로 응축액의 과냉각을 위한 전열면적의 변화로 되어 응축기 출구 냉매온도(θ_6)의 응답특성과 비례관계를 가지게 된다.

Fig. 6의 게인 및 위상값을 Fig. 5와 비교하면, 그림에서와 같이 게인값은 전체 주파수 대역에서 작게 나타났으며, 위상값은 크게 나타났다. 이것은 응축기 출구 냉매가 미소 변동할 경우, 응축완료점의 위치는 응축압력의 변화보다 작으며, 그 영향을 받기까지의 시간도 많이 걸린다는 것을 의미한다. 또한, 계인곡선의 절점 위치가 저주파수 대역으로 이동하고 있고, $\omega=0.1\text{rad/s}$ 부근 계인곡선의 경향은 약 30dB/decade 이며, 그 이후의 고주파수 대역에서는 근사적으로 20dB/decade 의 경사를 가지고 있다. 또 위상에 있어서도 절점부근에서 지연이 크게 나타나고 있으며, 이것은 복잡하게 조합된 전달함수가 위상지연 요소로 영향을 미치기 때문으로 생각된다.

6.3 출구 냉매온도의 응답

Fig. 7은 출구 냉매유량(m_g)변화 입력에 대한 출구 냉매온도(θ_6)의 응답을 나타낸 것이다. Fig. 6

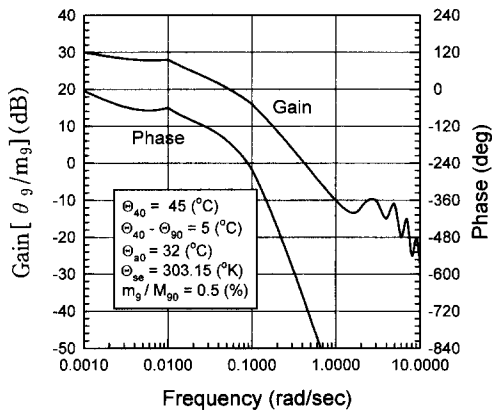


Fig. 7 Responses of refrigerant temperature outlet (θ) to refrigerant flow rate change outlet.

과 비교한 경우 계인곡선은 정성적으로 거의 응축 완료점 위치의 응답과 동일한 경향이며, 위상만이 큰 지연을 나타낸다. 이것은 과냉각영역에 있어서 냉매가 액상태로 흐르고, 그 때문에 유속이 작고, 낭비시간이 큰 영향인 것으로 판단된다. 이상의 결과를 종합하면 미소 응축기 출구 냉매유량 변화에 대한 출구 냉매온도의 응답은 1차지연+위상지연+낭비시간요소로 표시할 수 있다.

7. 결 론

플레이트 핀코일형 공냉응축기의 출구 냉매유량 변화 입력에 대한 응축압력, 응축완료점 위치 및 출구 냉매온도의 주파수 응답을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 정특성 모델을 작성하여 열평형에 모순이 없는 동특성 모델을 얻을 수 있었고, 각 영역의 평균 열전달률을 계산하여, 응축기 전체 동특성 해석을 위한 각 영역의 기초방정식을 도출할 수 있었다.

(2) 출구 냉매유량변화 입력에 대한 응축압력, 응축완료점 위치 및 출구냉매온도 응답을 표시하는 전달함수를 구할 수 있었고, 이들을 결합하여 블록선도화 할 수 있었다.

(3) 응축기 출구 냉매유량이 미소 범위에서 변화

할 경우, 출구 냉매온도의 응답은 응축압력, 응축 온도 및 응축완료점 위치 응답의 복합적 영향으로 근사적으로 $K_d/(1+T_{as})$ 과 같은 전달함수를 가지는 1차지연요소와 위상차가 발생하는 위상지연요소 및 입력신호가 출력에 그 영향을 미치지까지 상당한 시간이 걸리는 낭비시간요소의 합으로 나타났다. 특히, 응축압력의 변동과 낭비시간이 응답에 큰 영향을 미치는 것으로 판명되었다.

4. 응축기의 동특성을 표시하는 전달함수가 구해짐으로서 냉동·공조시스템에 있어서 결합계의 안정성 해석에 중요한 정보를 제공할 수 있었으며, 앞으로 전체 시스템의 동적해석을 위한 기초자료를 제공할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Kim, J. D., Yoon, J. I. and Ku, H. G., 1997, "Dynamic Analysis of Evaporator Characteristics," *KSME International Journal*, Vol. 11, No. 2, pp. 221~228.
- (2) Mitalas, G. P., 1978, "Transfer Function Method of Calculating Cooling Loads, Heat Extraction and Space Temperature," *Refrigeration*, Vol. 53, No., 614, pp. 81~83.
- (3) Wedekind, G., L., 1975, "Transient Response of the Mixture Vapor Transition Point in Two-Phase Horizontal Evaporating Flow," Ph., D., Thesis, Univ. of Illinois.
- (4) Asok Ray, 1974, "A Nonlinear Dynamic of Once-Through Subcritical Steam Generator," Northeastern Univ.
- (5) 桶口 金次郎, 1983, "流入冷媒量 變動にともなうプレートフィンコイル形蒸發器出口溫度の周波數 應答", 冷凍, Vol. 58, No. 672, pp. 941~956.
- (6) 藤井 哲, 1982, "空冷コンデンサの傳熱面積の 計算法, 冷凍, Vol. 57, No. 660, pp. 1007~1013.
- (7) 藤井 哲, 1983, "空冷コンデンサの平均凝縮熱 傳達係數と摩擦係數の式の提案, 冷凍, Vol. 58, No. 670, pp. 733~736.