

# 초임계조건에서 CO<sub>2</sub>-PEC9 혼합물의 물성예측을 통한 냉각 열전달특성 연구

윤 린<sup>†</sup>

한밭대학교 기계공학과

## Gas cooling heat transfer coefficient for CO<sub>2</sub>-PEC9 mixture under supercritical condition

Rin Yun<sup>†</sup>

*Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea*

*(Received May 15, 2009; revision received May , 2009)*

**ABSTRACT:** Due to environmental concerns CO<sub>2</sub> has been reintroduced as a potential candidate to replace HFCs in refrigeration systems. Oils are always required in a vapor-compression cycle, and thus actual working fluid in the system is CO<sub>2</sub>-oil mixtures even though the oil concentrations are low at the heat exchangers and the expansion device. The cooling heat transfer coefficients for CO<sub>2</sub>-oil mixtures under supercritical condition are required to designing of the gas cooler in the CO<sub>2</sub> refrigeration system properly. In the present study, the gas cooling heat transfer coefficients for CO<sub>2</sub>-PEC9 was estimated by using the Gnileinski correlation, and the Kim and Ghajar model through the previous prediction models for the thermo-physical properties of CO<sub>2</sub>-oil mixture. The Gnileinski correlation was used when the oil wt.% in the mixture is less than 1.0, and for the higher oil concentration the Kim and Ghajar model was applied. The estimated results agree with the experimental results conducted by the Dang et al.

**Key words:** Gas cooling heat transfer coefficient(가스냉각 열전달계수), CO<sub>2</sub>-oil mixture(이산화탄소-오일 혼합물), Oil-rich layer(오일농후층), EoS(상태방정식)

### 기 호 설 명

<p>a : 상태방정식 인수, Helmholtz 자유에너지</p> <p>b : 상태방정식 인수 [-]</p> <p>C<sub>p</sub> : 정압비열</p> <p>d : 내경</p> <p>f : 마찰계수</p> <p>G : 질량유량</p>	<p>h : 엔탈피 [kJ/kgK], 열전달계수</p> <p>M : 분자량 [g/mol]</p> <p>k,l,m : 상호작용계수</p> <p>P : 압력, [kPa]</p> <p>Pr : 프란틀 수</p> <p>R : 기체상수 [kJ/kg · K], 반경 [m]</p> <p>Re : 레이놀스 수</p> <p>s : 엔트로피</p> <p>T : 온도 [K]</p> <p>V : 부피 [m<sup>3</sup>]</p> <p>x : 몰분율, 건도</p> <p>u : 유체속도[m/s]</p>
--	---

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-42-821-1732; fax: +82-42-821-1587

E-mail address: yunrin@hanbat.ac.kr

Z : compressibility factor

### 그리스 문자

$\eta$  : 점성 계수 [ $\mu Pas$ ]  
 $\lambda$  : 열전도계수 [ $W/mK$ ]  
 $\tau$  : 점성모델의 변수, 전단응력  
 $w$  : 이심인자 [-]  
 $\delta$  : 두께 [m]  
 $\varepsilon$  : 기공율  
 $\rho$  : 밀도 [ $kg/m^3$ ]

### 하첨자

b : 끓는점  
c : 임계값  
i,j : 순수물질의 인덱스  
m : 혼합물의 물성  
r : 환산값, 잔여  
w : 벽면  
B : bulk

### 상첨자

R : 기준물질

## 1. 서론

HCFC 혹은 CFC 계열의 냉매는 1930년대 이후 냉동 및 공조시스템에 널리 사용되었으나 대기 중 오존층을 파괴하고 온실가스로서 지구온난화에 미치는 영향이 크기 때문에 범국가적인 규제와 노력이 90년대 이후로 계속되고 있다. 최근 천연냉매인 암모니아와 이산화탄소는 이 점에서 다시 주목을 받고 슈퍼마켓 쇼케이스와 벤딩머신에서 가정용 냉난방 시스템, 대형 건물 공조 시스템에 이르기까지 천연냉매를 적용하려는 노력이 전 세계적으로 이루어지고 있다. 암모니아와 이산화탄소의 경우 이미 1900년도 초 시스템이 완성되었으나 최근에는 보다 효율적이고 안전한 시스템의 개발을 위해 다양한 시도가 이루어지고 있다. 이산화탄소 시스템은 외부로의 열배출 시 초임계상태의 열전달이 발생하고 작동압력이 매우 높다. 현재 이산화탄소 시스템에 맞는 압축기 및 열교환기를 개발하고 익스팬더와 같은 부가적인 장치를 설치함으로써 효율적인 측면에서는 기존 냉동시스템과 거의 비슷한 기술수준까지 발전하였다. 그러나 아직도 해결해야 할 분야가 있는데 이산화탄소와 적합한 오일을 개발하고 찾는

것과 순수 CO<sub>2</sub>와 다른 오일-CO<sub>2</sub> 혼합물의 열역학적 물성특성을 반영하여 열교환기를 설계하는 것이라 할 수 있다. 특히, 초임계영역에서 발생하는 냉각과정은 열역학적 물성이 임계온도 근처에서 크게 변화하기 때문에 이 부근에서의 순수 co<sub>2</sub>의 열역학적 물성과 크게 다른 오일-CO<sub>2</sub> 혼합물의 열전달계수와 압력강하를 예측하는 것은 co<sub>2</sub>의 가스쿨러를 설계하는데 반드시 필요하다고 할 수 있다.

현재 초임계영역에서 오일의 영향에 따른 co<sub>2</sub>의 냉각열전달특성에 관한 연구는 매우 제한적이다. Dang 등<sup>(1)</sup>은 내경이 각각 2mm와 6mm의 단일관을 이용해 PAG-type(partially miscible)의 오일과 이산화탄소의 초임계조건에서 냉각이 일어나는 과정의 유동양식을 관찰하고 냉각열전달계수를 측정하였다. Yun 등<sup>(2)</sup>은 마이크로채널을 이용하여 초임계영역에서 오일의 농도를 최대 4.0 wt.%까지 증가시키면서 압력과 온도의 변화에 따른 냉각 열전달계수와 압력강하를 측정하였다. 혼합물의 오일농도가 0 wt.%에서 4.0wt.%로 변화할 때 co<sub>2</sub>-오일 혼합물의 냉각열전달계수는 20.4%감소하였고, 압력강하는 평균 4.8배 증가하였다. Mori 등<sup>(3)</sup>은 실험장치의 제약으로 인해 정확하게 오일농도를 측정하지 못했지만 초임계조건에서 오일-이산화탄소 혼합물의 냉각 열전달계수를 측정하고 내부 유동을 가시화 하였다. 실험 압력은 9.5Mpa이고 냉각온도는 20℃ - 70℃이다. CO<sub>2</sub>-oil 혼합물의 열전달계수는 순수 co<sub>2</sub>의 열전달계수보다 낮았고, 특히 40℃와 55℃에서 그 감소폭이 매우 컸다. 가시화를 통해 오일층이 벽면에 생성되는 것을 관측할 수 있었고 40℃와 60℃의 오일농후층의 두께를 비교해 볼 때 60℃일 때의 오일농후층의 두께가 두껍게 나타났다. Cheng 등<sup>(4)</sup>은 그들의 리뷰논문에서 초임계상태의 이산화탄소 냉각특성에 관해 관의 내경의 변화와 오일의 농도변화에 따른 냉각 열전달계수 및 압력강하에 관하여 분석하였다. 본 연구에서는 기존에 수행된 CO<sub>2</sub>-오일의 물성예측모델을 바탕으로 초임계영역에서 CO<sub>2</sub>-오일 혼합물의 냉각열전달계수를 예측하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1 오일-CO<sub>2</sub>의 물성예측

본 연구에서 오일-이산화탄소의 물성은 Yun<sup>(5)</sup>이 수행한 기존연구를 통해 계산하였다. 본 연구와 기존 물성예측모델의 차이점은 점성예측에서 보다 다양한 오일 및 냉매에 적용하기 위해 기존 오일-HC에 주로 적용되던 상관모델을 모든 고밀도 물성에 적용할 수 있는 TRAPP모델로 바꾸어 계산을 수행하였다<sup>(6)</sup>. 각 물성예측방법을 간단히 요약하면 다음과 같다.

### 2.1.1 오일-CO<sub>2</sub>의 밀도예측

오일-CO<sub>2</sub> 혼합물의 밀도는 식(1)에서 V를 구함으로써 얻을 수 있다. 식(1)의 a와 b는 Redlich-Kwong 형태의 상태방정식의 계수로서 CO<sub>2</sub>와 oil의 상호작용계수를 통해 구했다.

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b)} \quad (1)$$

### 2.1.2 오일-CO<sub>2</sub>의 점성예측

점도예측은 식(2) - (12)에 나타난 바와 같이 TRAPP모델을 적용하여 점도를 예측하였다. PEC5, PEC7, PEC9의 CO<sub>2</sub>혼합물과 실험결과와의 경우 다양한 실험범위에서 각각 21, 25, 32%의 오차를 보였다.

$$\eta_m - \eta_m^o = F_{\eta m} [\eta^R - \eta^{Ro}] + \Delta\eta^{ENSKOG} \quad (2)$$

$$h_m = \sum_i \sum_j x_i x_j h_{ij} \quad (3)$$

$$f_m h_m = \sum_i \sum_j x_i x_j f_{ij} h_{ij} \quad (4)$$

$$h_{ij} = \frac{[(h_i)^{1/3} + (h_j)^{1/3}]^3}{8} \quad (5)$$

$$f_{ij} = (f_i f_j)^{1/2} \quad (6)$$

$$T_o = T/f_m \quad (7)$$

$$\rho_o = \rho h_m \quad (8)$$

$$F_{\eta m} = (44.094)^{-1/2} (h_m)^{-2} \sum_i \sum_j x_i x_j (f_{ij} M_{ij})^{1/2} (h_{ij})^{4/3} \quad (9)$$

$$\Delta\eta^{ENSKOG} = \eta_m^{ENSKOG} - \eta_x^{ENSKOG} \quad (10)$$

식 (10)에서  $\Delta\eta^{ENSKOG}$ 는 강구(hard sphere) 모델에 대한 수정 항으로 분자사이의 거리와 반경 방향의 분포에 대한 함수이다.

$$f = \frac{T_c}{T_c^R} [1 + (\omega - \omega^R)(0.05203 - 0.7498 \ln T_r)] \quad (11)$$

$$h = \frac{\rho_c^R}{\rho_c} \frac{Z_c^R}{Z_c} [1 - (\omega - \omega^R)(0.1436 - 0.2822 \ln T_r)] \quad (12)$$

### 2.1.3 오일-CO<sub>2</sub>의 열전도계수 예측

혼합물의 열전도계수도 점도예측과 마찬가지로 식(13) - (16)에 나타낸바와 같이 TRAPP모델을 사용하였다.

$$\lambda_m - \lambda_m^o = F_{\lambda m} X_{\lambda m} [\lambda^R - \lambda^{Ro}] \quad (13)$$

$$F_{\lambda m} = (44.094)^{-1/2} (h_m)^{-2} \sum_i \sum_j y_i y_j (f_{ij}/M_{ij})^{1/2} (h_{ij})^{4/3} \quad (14)$$

$$X_{\lambda m} = \left[ 1 + \frac{2.1866(\omega_m - \omega^R)}{1 - 0.505(\omega_m - \omega^R)} \right]^{1/2} \quad (15)$$

$$\omega_m = \sum_i y_i \omega_i \quad (16)$$

### 2.1.4 오일-CO<sub>2</sub>의 정압비열예측

혼합물의 Cp예측은 식(17)-(20)을 이용하여 계산하였다.

$$a_r = a^* - a = RT \ln \frac{|V-b|}{V} - \frac{a(T)}{2\sqrt{2}b} \ln \frac{|V-0.414b|}{V+2.414b} + RT \ln \frac{V}{V^*} \quad (17)$$

$$s_r = s^* - s = R \ln \frac{|V-b|}{V} - R \ln \frac{V}{V^*} \quad (18)$$

$$h_r = a_r + T s_r + p V^* - p V \quad (19)$$

$$C_{pr} = C_p^* - C_p = \left( \frac{\partial h_r}{\partial T} \right)_p \quad (20)$$

## 2.2 초임계조건에서 오일-CO<sub>2</sub>의 유동양식

초임계조건에서 이산화탄소와 오일의 유동양식은 오일농후층의 유무에 따라 크게 분류류(mist flow)와 환상류로 구분할 수 있다. 오일농후층의 유무는 혼합물 내 오일농도와 오일농후 층 내 이산화탄소의 용해도에 따라 결정되게 되는데 Fig. 1에 나타난 바와 같이 온도 및 압력에 따라 오일농후층 내 이산화탄소의 용해도가 달라진다. 오일농도가 1.0 wt.%보다 낮고 동시에 온도가 낮아서 오일농후 층 내 이산화탄소의 용해도가 높은 경우에는 오일 농후 층이 나타나지 않는데 이런 경우 일반적으로 mist flow로 분류할 수 있다. 오일농도가 5.0 wt.%이상인 경우에는 25℃의 낮은 온도에서도 오일농후층이 확연하게 나타나게 되는데 환상류로 분류할 수 있다.

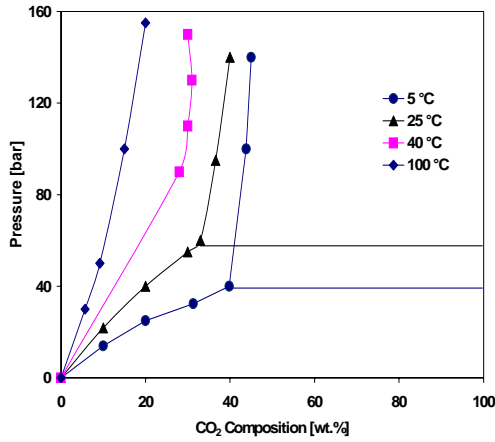


Fig. 1 Solubility between CO<sub>2</sub> and PAG.<sup>(7)</sup>

### 2.3 오일-CO<sub>2</sub>의 열전달계수 예측

오일-CO<sub>2</sub> 혼합물의 가스쿨링 열전달계수는 오일과 이산화탄소의 유동양식 그리고 오일농후층의 두께에 따라 크게 의존한다. 혼합물의 오일 농도가 1 wt.%이하로 낮은 경우에는 오일농후층의 두께가 무시할 만큼 작고 오일 액적의 형태로 CO<sub>2</sub>와 섞여서 흘러가기 때문에 오일과 CO<sub>2</sub>가 균일하게 섞여있는 균질류형태로 생각 할 수 있다. 한편 오일의 농도가 1 wt.% 이상으로 증가할수록 오일농후층이 선명하게 튜브 벽안 쪽으로 나타나게 되는데 이 경우의 유동은 오일농후층과 이산화탄소와 오일액적이 혼합되어 흐르는 중앙부분으로 분리하여 생각할 수 있다. 따라서 초임계영역에서의 오일과 이산화탄소의 열전달계수의 예측을 위해서는 이와 같은 유동특성을 반영해야 할 것이고 본 연구에서는 각각 균질혼합유동모델(Homogeneous model)과 분리모델(Two-flow model)을 적용하여 열전달계수를 예측하였다.

#### 2.3.1 균질모델(Homogeneous model)

식(21)과 (22)는 오일-CO<sub>2</sub> 혼합물의 유동양식이 분무류일 때 적용한 Gnileinski 모델을 나타낸다.

$$N_m = \frac{hD}{\lambda_m} = \frac{f_m}{8} \times \left( \frac{(Re_m - 1000)Pr_m}{1 + 12.7 \left( \frac{f_m}{8} \right)^{1/2} \times (Pr_m^{2/3} - 1)} \right) \quad (21)$$

$$f_m = 0.079 \left( \frac{GD}{\eta_m} \right)^{-0.25} \quad (22)$$

#### 2.3.2 분리 모델(Two-fluid model)

분리모델의 경우 열전달계수는 Kim and Ghajar 모델<sup>(8)</sup>을 이용하여 식(23) - (31)을 연립하여 계산하였다.

$$\begin{aligned} \dot{m}_o = & \frac{2\pi\rho_l}{\mu_l} \left( \tau_i(R-\delta) + \frac{(R-\delta)^2}{2} \frac{dP}{dZ} \right) \times \left( \frac{R^2 - (R-\delta)^2}{4} - \frac{(R-\delta)^2}{2} \ln \frac{R}{R-\delta} \right) \\ & - \frac{\pi\rho_l}{8\mu_l} \frac{dP}{dz} (R^2 - (R-\delta)^2) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\frac{dP}{dz} + \frac{4\tau_i}{D\sqrt{\alpha}} = 0, \quad D_c = 2 \times (R-\delta), \quad \alpha = \left( \frac{D_c}{D} \right)^2 \quad (24)$$

$$\tau_i = \frac{1}{2} f_i \rho_g u_g^2 \quad (25)$$

$$f_i = 9.287 \times 10^{-5} Re_g^{0.2976} \left( \frac{\delta}{D} \right)^{-0.6515} \quad (26)$$

$$h_{TP} = F_P h_L \left\{ 1 + c \left[ \left( \frac{x}{1-x} \right)^m \left( \frac{1-F_P}{F_P} \right)^n \left( \frac{Pr_G}{Pr_L} \right)^p \left( \frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^q \right] \right\} \quad (27)$$

$$h_L = 0.027 Re_L^{4/5} Pr_L^{1/3} \left( \frac{k_L}{D} \right) \left( \frac{\mu_B}{\mu_W} \right)_L^{0.14} \quad (28)$$

$$Re_L = \frac{4\dot{m}_L}{\pi \sqrt{1-\epsilon} \mu_L D} \quad (29)$$

$$F_P = (1-\epsilon) + \epsilon F_S^2 \quad (30)$$

$$F_S = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{\rho_G (u_G - u_L)^2}{gD(\rho_L - \rho_G)}} \right) \quad (31)$$

### 3. 결과 및 고찰

Table 1은 압력조건 8.0 MPa과 온도 30°C에서 오일-CO<sub>2</sub> 혼합물의 초임계조건에서의 냉각열전달계수를 나타낸다. 혼합물의 오일농도는 0 - 4.4 wt.%까지 단계적으로 변화시켰다. 한편 분리모델(two-fluid model)의 경우 관 벽면에 위치하는 오일농후막이나 관 중앙의 대부분을 차지하는 이산화탄소 모두 각각 순물질이 아니라 오일-CO<sub>2</sub>의 혼합물이라는 것은 중요한 사실이다. 오일 농후 층에는 CO<sub>2</sub>가 Fig. 1에 나타난 바와 같이 일정량 녹아있고, 관 중앙 또한 CO<sub>2</sub>와 오일의 혼합물이라고 생각할 수 있다. 이를 반영하기 위해서 본 연구에서는 관 중앙부의 유동 내 포함된 이산화탄소의 wt.%와 오일농후층의 오일의 wt.%를 각각 0.99/0.01, 0.92/0.08, 그리고 0.85/0.15로 변화

Table 1. Heat transfer coefficients with the variation of oil wt.% in the CO<sub>2</sub>-oil mixture.

oil wt. %	Heat transfer coefficient (homogeneous)	heat transfer coefficient (CO <sub>2</sub> wt% in core, oil wt.% in oil layer)		
		(0.99, 0.01)	(0.92, 0.08)	(0.85, 0.15)
0.001	4068	N/A	N/A	N/A
0.67	3853	2170	1687	1036
1.3	3678	3039	2356	1445
2.2	3485	3866	2994	1836
4.4	3134	5305	4106	2518

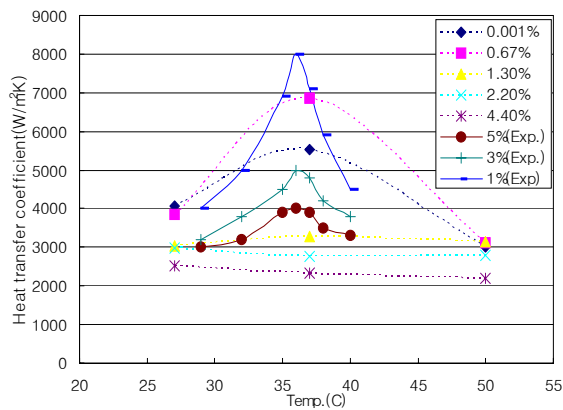


Fig. 2 The cooling heat transfer coefficient of CO<sub>2</sub>-oil mixture with the variation of oil concentration under supercritical condition

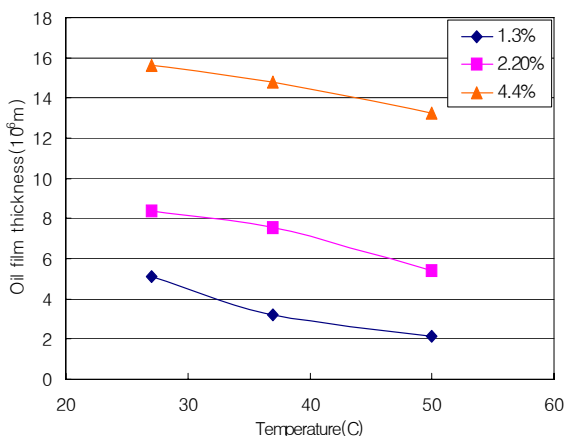


Fig. 3 The variation of oil rich layer thickness with the change of oil wt.%

시키며 그 결과를 도출하였다. 균질유동의 경우 혼합물 내 오일농도의 증가에 따라 냉각 열전달 계수는 점차 감소하는 경향을 보이는데 이는 혼

합물의 정압비열( $C_p$ )의 변화경향과 정확히 일치함을 확인할 수 있다. 분리모델의 경우는 혼합물의 오일농도가 0 wt.%인 경우는 제외하였다. 분리모델의 결과 관 중앙부의 유동 내 포함된 일정한 이산화탄소의 wt.%와 오일농후층의 오일의 wt.%조건에서 오일농도의 증가에 따라 열전달계수가 증가함을 볼 수 있다. 이는 본 논문에서 적용한 분리모델의 열전달예측모델에서 오일농후막과 중앙부 혼합물의 물성은 고정된 상태에서 오일의  $Re_L$ 의 증가로 인한  $h_L$ 의 증가로 인해 나타난 결과이다. 이제는 오일-이산화탄소 혼합물의 wt.%를 고정시키고 오일농후층과 중앙부 혼합물의 오일농도를 변화시켜가며 열전달계수의 변화를 고찰하였다. 각 영역에서의 오일 wt.%의 증가는 각 영역의 혼합물의 물성을 변화시키고 이에 따라 열전달계수가 감소하는 경향을 나타냈다. 이를 종합해볼 때 오일 wt.%가 0.001과 0.67인 조건에서는 Dang 등<sup>(1)</sup>의 가시화실험에서 관찰된 것 같이 오일농후층이 뚜렷하지 않거나 무시할 수 있는 정도이기 때문에 균질모델을 이용하여 열전달계수를 예측하고, 오일 wt.%가 Table 1과 같이 1.3이상인 경우에는 분리모델을 이용하는 것이 적절하다. 한편, 오일농도의 증가에 따라 오일농후층과 중앙부 혼합물의 오일의 wt.%는 이에 비례하여 증가할 것이기 때문에 이를 반영하여 Table 1에 표시한 바와 같이 최종적으로 열전달계수를 선택하였다. 이와 동일한 방법으로 압력조건은 8.0 MPa로 고정하고 온도를 37°C, 40°C로 변화시키면서 그 결과를 Fig.2에 나타냈다. Fig. 2의 실험결과는 Dang 등<sup>(1)</sup>의 결과로서 본 모델과 비교하기 위해 표시하였다. 혼합물 내 오일 농도의 증가에 따라 열전달계수는 감소하는 경향을 나타냈고, 온도 변화에 따라서는 가상임계온도 근처에서 가장 큰 값을 보였다. 다만 오일농도가 0.67wt.%인 경우에 가상임계온도부근에서 오일농도가 0wt.%에 가까운 경우보다 열전달계수가 높게 나타났는데, 두 경우 균질모델을 적용하여 계산한 값으로 가상 임계온도 부근에서의 정압비열( $C_p$ )값의 변화와 동일한 경향을 나타냈다. 혼합물의 오일농도가 1.8%이상에서는 순수 이산화탄소의 열전달 특성인 임계온도 부근에서의 급격한 열전달계수의 증가가 나타나지 않았

다. Fig. 3은 혼합물의 오일농도의 변화와 냉각온도에 따른 오일농후층의 두께변화를 나타낸다. 주어진 혼합물의 오일농도 조건에서 오일농후층의 두께는 10 $\mu$ m 내외에서 형성되었고 이는 Dang으로부터 개인적인 자료제공으로 실험결과도 10 - 20 $\mu$ m에서 오일농후층의 두께가 형성됨을 확인하였다. 다만 Dang 등<sup>(1)</sup>의 가시화 결과로부터 동일한 혼합물의 오일농도에서 온도의 증가에 따라 오일농후층의 두께가 오일 내 이산화탄소의 용해도의 변화에 따라 증가하는 현상을 관찰하였는데 본 모델링 결과와는 다른 경향을 나타내고 있다. 우선적으로 이는 본 모델에서 냉각온도의 변화에 따른 용해도를 고려하지 않았기 때문일 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

- 1) 균질모델은 오일농도가 낮은 경우에는 적용가능하다.
- 2) 오일농도가 높은 경우에는 분리 모델을 사용해야하며, 오일농후층과 이산화탄소측은 각각 순물질이 아닌 서로의 혼합물로서 존재해야만 실험결과와 유사한 경향을 나타냈다.
- 3) 오일농후 층 내 이산화탄소와 오일의 농도를 변화면 혼합물의 증발 및 응축 열전달계수 예측으로 본 모델을 적용할 수 있다.
- 4) 시험온도와 압력에 따른 용해도를 본 모델에 적용하여 보다 정확한 오일 내 이산화탄소의 양을 결정해야 할 것이다.

#### 참고 문헌

1. Dang, C., Iino K., Hihara, E., 2008, Study on two-phase flow pattern of supercritical carbon dioxide with entrained PAG-type lubricating oil

in a gas cooler, International Journal of Refrigeration, Vol. 31, pp. 1265-1272.

2. Yun, R. Hwang, Y., Radermacher, R., 2007, Convective gas cooling heat transfer and pressure drop characteristic of supercritical CO<sub>2</sub>/oil mixture in a minichannel tube, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.50, pp. 4796-4804.

3. Mori K, Onishi J, Shimaoka H, Nakanishi S., Kimoto H, 2003, Cooling Heat transfer characteristics of co<sub>2</sub> and co<sub>2</sub>-oil mixtures at supercritical pressure conditions, JSRAE, Vol. 20, No. 3 pp. 407-412.

4. Cheng, L., Ribatski G., Thome, J.R., 2008, Analysis of supercritical CO<sub>2</sub> cooling in macro- and micro-channels, International journal of refrigeration, Vol.31, pp. 1301 - 1316.

5. Yun, R., 2008, Prediction of Thermo-Physical Properties for CO<sub>2</sub>-Oil mixtures at low oil concentration, The seventh JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Oct. 13-16, Sapporo, Japan, B311.

6. Brude E. P., , John M., 2000 The Properties of GASES AND LIQUIDS, fifth edition, McGraw-Hill, New York, Ch. 9 - 10.

7. Hauk, A. and Weidner E., 2000, Thermodynamic and Fluid-Dynamic Properties of Carbon Dioxide with Different Lubricants in Cooling Circuits for Automobile Application, Ind. Eng. Chem. Res., Vo. 39, No.12, pp 4646-4651.

8. Kim, J., Ghajar A.J., 2006, A general heat transfer correlation for non-boiling gas-liquid flow with different flow patterns in horizontal pipes, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 32, pp. 447-465.