

압축기 작동압력 범위에서 CO₂/오일 시스템의 기-액 상평형 실험

이 치 석, 이 경 렬, 유 한 연, 강 병 하*, 박 경 근**

국민대학교 대학원, *국민대학교 기계·자동차공학부

Experimental Vapor-Liquid Equilibra for CO₂/Oil Systems in the Range of Compressor Working Pressure

Chi Seok Lee, Kyoung Youl Lee, Han Yeon You, Byung Ha Kang*, Kyoung Kuhn Park**

Graduate School, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

**School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea*

(Received September 13, 2006; Revision received January 3, 2007)

ABSTRACT: An experimental apparatus was constructed to obtain vapor-liquid equilibrium data for CO₂/oil mixtures using mass analysis method with sample cylinder. Lubricants employed were POE (poly-ol ester) and PAG (poly alkylene glycol). The phase equilibria of CO₂/oil mixtures prevailed in an equilibrium cell were observed through a couple of sight glasses at the opposite ends. Data were obtained over the temperatures -10°C, -5°C, 0°C, 5°C, 10°C, 25°C, 40°C, 60°C, and 80°C under pressures up to 14 MPa and then mole fractions were calculated, respectively. In general, more solubility of CO₂ is observed in POE than in PAG. Miscibility gap is closed for CO₂/POE mixture but not for CO₂/PAG.

Key words: Carbon dioxide(이산화탄소), POE, PAG, Vapor-liquid equilibrium(기-액 상평형)

기 호 설 명

그 리 스 문 자

P : 압력 [MPa]
 T : 온도 [°C]
 W_1 : 샘플 실린더 질량 [kg]
 W_2 : 각 추출 상+샘플 실린더 질량 [kg]
 W_3 : CO₂+샘플 실린더 질량 [kg]
 X_1 : 오일질량 [kg]
 X_2 : 기상, 액상 추출질량 [kg]
 Y : 오일질량 분율 [wt%]

ε_1 : 저울 1의 부정확도
 ε_2 : 저울 2의 부정확도

1. 서 론

이미 냉매로 사용하였거나 현재 사용하고 있는 CFC 및 HCFC 계열 냉매는 오존층 파괴(ozone layer depletion)의 원인이 된다. 그 대안으로 개발된 HFC 계열 냉매 또한 지구 온난화(global warming)의 원인이 되어 2005년 2월 교토의정서의 발효에 따라 사용제한이 불가피하게 되었다. 다른 대체냉매로서 자연냉매(natural refrigerant)인 CO₂(R-744), 암모니아(R-717), 이소부탄(R-

† Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4679; fax: +82-2-910-4839

E-mail address: pkk@kookmin.ac.kr

600a) 등이 고려되었다. 그 중에서도 CO₂는 독성과 악취가 없고 가연성면에서도 안전하며 냉매로서 뛰어난 열물성 및 초임계 사이클 특성으로 콤팩트화가 가능하기 때문에 관심이 높아지고 있다.⁽¹⁾

대체냉매로서 CO₂를 작동유체로 사용할 경우 초임계 사이클로 인한 고압 설계가 필요하다. 그 중 압축기 개발에 있어 압축기 내의 윤활 역할을 하는 냉동기유의 선정은 중요한 문제라고 할 수 있다. Choi et al.⁽²⁾은 실험을 통하여 AB와 PAO는 CO₂ 냉매에 적합하지 않은 냉동기유라고 보고하였다. 또한 Choi et al.⁽³⁾은 추가실험으로 POE와 PAG 및 광유에 대하여도 CO₂/오일 혼합물에 대한 상용성을 보고하여 POE가 상용성이 좋아 냉동기유로 적합하다고 보고하였다. Seeton et al.⁽⁴⁾은 CO₂와 PAO, AB, PAG, POE 혼합물의 윤활 성능을 비교하여 PAG가 가장 뛰어나다고 보고하였다. Tsuji et al.⁽⁵⁾은 오일 선정에 중요한 요소인 CO₂/PAG 혼합물의 344.3 K일 때 기포점 압력과 포화액체 밀도에 대한 자료를 제시하였다.

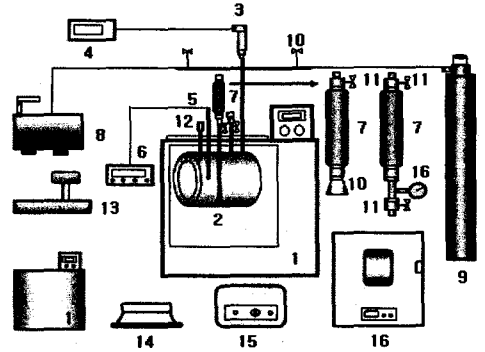
본 연구에서는 적절한 오일의 선정을 위하여 CO₂와 상용성이 좋은 POE와 윤활 마모 특성이 우수한 것으로 알려져 있는 PAG를 선택하여 압축기 작동압력 범위에서 기-액 상평형 측정을 하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

기-액 상평형(Vapor Liquid Equilibria, VLE) 상태에서 CO₂ 냉매(순도 99.995%)와 오일(ISO 점도등급 68인 POE와 ISO 점도등급 100인 PAG) 혼합물의 기-액상 성분분석을 위해 사용된 실험장치를 Fig. 1에 개략적으로 나타내었다. 실험장치는 평형셀(equilibrium cell), 온도제어장치, 진공펌프, 저울, 온도계, 압력계, 정밀 저울, 샘플 실린더(sample cylinder), 초음파세척기(ultrasonic cleaner), 강제순환오븐(forced convection oven)으로 구성되었다.

평형셀은 냉매/오일 혼합물의 기-액 평형이 이루어지는 곳으로써 부식과 냉매와의 화학반응을 방지하기 위하여 SUS 316을 사용하여 자체 제작하였다. 평형셀의 내부크기는 직경 50.0 mm, 길이 123.4 mm로 체적은 약 242.3 ml이다. 평형셀



1. Constant temperature bath
2. Test section
3. Pressure transmitter
4. Pressure indicator
5. Platinum resistance thermometer
6. Thermometer indicator
7. Sample cylinder
8. Vacuum pump
9. The vessel CO₂
10. Quick connector
11. Needle valve
12. Relief valve
13. Electronic balance
14. Precious electronic balance
15. Ultrasonic cleaner
16. Convection oven
17. Pressure gauge

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

전후면에는 내부를 관찰할 수 있도록 15 mm 두께의 강화유리를 각각 설치하였다. 셀 내부 압력을 측정하고 진공 유지 및 냉매와 오일 주입을 위한 구멍을 뚫었다. 또한, 기-액 평형 상태에서 기상과 액상 성분을 추출하기 위한 구멍을 각각 뚫었다. 평형셀은 항온조에 완전히 잠겨져 있으며, 온도제어장치에 의하여 0.1°C 이내에서 온도가 유지된다. 온도제어장치는 냉동 항온 순환수조(Jeio Tech, Korea)를 사용하였다.

평형셀의 온도는 셀 상부에 구멍을 뚫어 삽입한 백금저항센서(Hart Scientific, USA)와 디지털 온도표시기(Model 1502A)로 측정하였다. 온도 측정장치의 오차범위는 $\pm 0.12^\circ\text{C}$ 이내이다. 압력 측정장치는 압력 변환기(Keller, Swiss)와 디지털 압력계(Ism LTD, Korea)로 측정하였고 오차범위는 $\pm 0.01\text{ MPa}$ 이내이며 오차범위 $\pm 0.1\%$ 이내인 자중점사기(Ametek, USA)로 보정하였다. 평형셀에 주입하는 CO₂와 오일의 질량을 측정하기 위한 저울(AND, Japan)과 기상과 액상을 추출한 샘플 실린더의 질량변화를 측정하기 위한 저울(Precisa, Swiss)을 각각 사용하였으며, 오차범위는 각각 $\pm 0.1\text{ g}$, $\pm 0.0027\text{ g}$ 이내이다. CO₂/오일 혼합물을 추출한 샘플 실린더의 세척을 위하여 초음파 세

척기(금성 초음파, Korea)를 사용하였으며, 빠른 건조를 위해 강제순환오븐(조선계측기, Korea)을 사용하였다.

기상과 액상을 추출하는 샘플 실린더의 체적은 40 mL이고 니들밸브(Parker, USA)와 샘플 실린더 본체(Swagelok, USA), 콕커넥터(Swagelok, USA) 3부분으로 나뉘어져 있으며, 모두 SUS 316 재질로 제작되었다. 기상과 액상 추출시 각각 별도의 샘플 실린더를 사용하였다.

실험장치에 대한 보다 자세한 설명은 Lee⁽⁶⁾에 있다.

2.2 실험방법 및 조건

CO₂ 냉매와 오일 혼합물의 기-액 상평형 상태에서 기-액상 성분을 분석하기 위한 실험은 다음과 같은 방법으로 수행하였다.

먼저, 아세톤을 이용하여 평형셀 내부 및 기-액상 추출관을 세척하고 강제순환오븐을 이용하여 건조한다. 오일을 비이커에 담아 평형셀 내부에 주입 후 주입량을 측정한다. 모든 불활성 가스를 제거하기 위해 평형셀 내부를 진공시킨 후 평형셀을 항온조 속에 넣어 온도를 내린 후 일정량의 CO₂를 주입한다. CO₂와 오일의 주입과 질량 측정이 끝나면 평형셀을 실험조건 온도에 맞춰진 항온조 속에 넣는다. 항온조 속의 평형셀 내부가 평형상태에 이르렀다고 판단될 때 온도와 압력을 측정한다.

평형셀 내부가 평형상태 도달 후 먼저 기상을 샘플 실린더를 이용하여 추출 후 기상의 오일질량 분석을 하고 다시 평형셀이 평형상태에 도달하면 액상을 샘플 실린더로 추출하여 액상의 오일질량 분석을 수행하였다. 질량분석을 수행한 샘플 실린더의 세척은 CO₂(25°C일 때 64.0 MPa)를 실린더 내부로 통과시킨 후 초음파세척기를 사용하여 실린더 내 잔여 오일을 제거하였으며 강제순환오븐에서 건조시켰다. 그 후 평형셀 내부 조성을 변화시키기 위하여 상부의 유체를 강제 CO₂ 주입관을 통하여 방출시켰다. 이 과정을 반복하여 설정온도에서 CO₂/오일 혼합물의 각 상의 조성을 파악하였다.

실험은 온도 -10°C, -5°C, 0°C, 5°C, 10°C, 25°C, 40°C, 60°C, 80°C에서 수행하였다.

2.3 CO₂/오일 혼합물의 오일질량 분석

먼저, 진공시킨 샘플 실린더의 무게(W₁)를 정밀 저울을 이용하여 측정하고 기록한다. 평형셀에서 각각 기상과 액상을 추출한 샘플 실린더의 무게(W₂)를 정밀 저울을 이용하여 측정하고 기록한다. 각상을 추출한 샘플 실린더에 보조 샘플 실린더를 부착하여 CO₂를 방출시키고, 샘플 실린더 내 오일에 녹아 있는 CO₂와 불활성 기체의 제거를 위하여 샘플 실린더를 진공시킨 후 샘플 실린더의 무게(W₃)를 측정한다.

보조 샘플 실린더는 2개의 니들밸브와 압력계로 구성되어 있다. CO₂ 방출시 샘플 실린더 내의 압력과 대기압과의 압력차 때문에 오일이 CO₂와 함께 방출되는 것을 최소한으로 하기 위하여 샘플 실린더 앞에 적절한 압력의 CO₂가 충전된 보조 샘플 실린더를 부착하여 압력차를 줄인 후 CO₂를 방출시켰다.

이와 같은 CO₂/오일 혼합물의 오일질량 분석은 대부분 ASHRAE Standard(41.4-1996)⁽⁷⁾를 따른 것이다.

2.4 질량분율 계산

CO₂/오일 혼합물 중 액상과 기상의 오일질량 분율을 계산하고 각각의 오차해석을 수행하였다. 오일질량 분율 계산식은 다음과 같다.

$$Y = \frac{W_3 - W_1}{W_2 - W_1} = \frac{X_1}{X_2} \quad (1)$$

질량 분율 오차해석 관계식은 다음과 같다.

X₁ ≅ 0일 경우

$$Y = \frac{X_1 \pm \varepsilon_1}{X_2 \pm \varepsilon_2} = 0 \pm \frac{\varepsilon_1}{X_2} \left(1 + \frac{\varepsilon_2}{X_2} \right) \quad (2)$$

X₁ ≠ 0일 경우

$$Y = \frac{X_1}{X_2} \left(1 \pm \frac{\varepsilon_1}{X_1} \pm \frac{\varepsilon_2}{X_2} \right) \quad (3)$$

여기서 X₁은 추출상 중 오일질량, X₂는 추출상 질

량, Y 는 오일질량 분율, ϵ_1 과 ϵ_2 는 각각 X_1 과 X_2 의 질량을 측정 한 저울의 부정확도이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 CO₂/POE 혼합물

Fig. 2에는 온도와 압력에 따른 CO₂/POE 혼합물의 조성변화를 표현하였다. Fig. 2의 왼편에 주로 나타나는 기호(▶▼■●▲…)는 각 온도에 대한 하부 액상을 나타낸다. 오른편에 기호(▷▽□○△…)는 각 온도에 대한 상부 기상(25℃와 40℃에서는 일부 액상)을 나타낸다. 하부 액상에서는 압력이 증가할수록, 그리고 온도가 감소할수록 CO₂ 용해도가 증가했다. 그 이유는 압력이 증가하고 온도가 감소하면 CO₂가 POE 안으로 섞이기 쉽기 때문으로 판단되었다. 그러나 60℃ 이상의 온도에서는 압력에 따른 CO₂ 용해도 증가율은 급격히 줄어들었다. 이는 CO₂ 임계온도(31℃) 이상에서는 압력이 CO₂ 용해도 증가에 미치는 영향이 줄어들기 때문이라고 판단된다. 실험 온도 중 25℃와 40℃에서는 상부 액상이 일부 나타났다. 40℃의 상부 액상의 경우 POE가 최대 5%까지 섞여 있었다. 이는 다른 온도조건들의 상부 기상 중에 오일이 1% 정도 섞여 있는 경우와 대비된다.

상평형의 특성은 온도에 따라 다르게 나타났다.

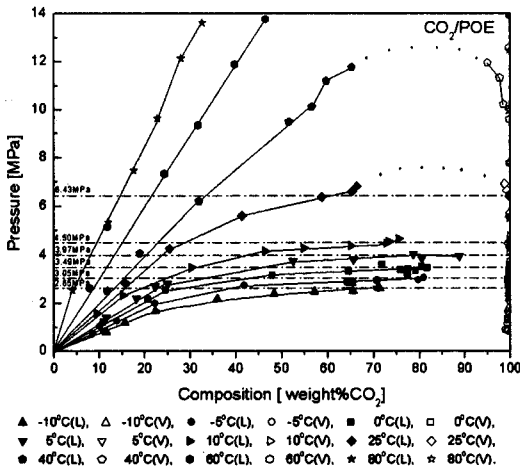


Fig. 2 Pressure-composition diagram of the system CO₂/POE.

-10℃, -5℃, 0℃, 5℃, 10℃에 대한 상평형은 공통점이 있었다. 대표적인 예로 0℃에 대한 CO₂/POE 혼합물의 상평형 사진을 Fig. 3의 (a)~(c)에 나타났다. 0℃의 순수 CO₂ 포화압력은 3.49 MPa이다. Fig. 3(a)는 압력이 3.39 MPa(<3.49 MPa)로 2상(VL)이 나타났다. 2상 중 하부 액상은 CO₂와 POE로 구성되어 있으며, 상부 기상은 CO₂가 대부분을 차지하고 있었다. Fig. 3(b)는 압력이 3.60 MPa(≥3.49 MPa)로 3상(VLL)이다. 3상 중 하부 액상은 CO₂와 POE로 구성되어 있고, 중간 액상은 CO₂가 대부분을 차지할 것으로 추정되며, 상부 기상은 CO₂가 대부분을 차지하고 있었다. Fig. 3(c)는 압력이 4.64 MPa(>3.49 MPa)로 CO₂와 POE

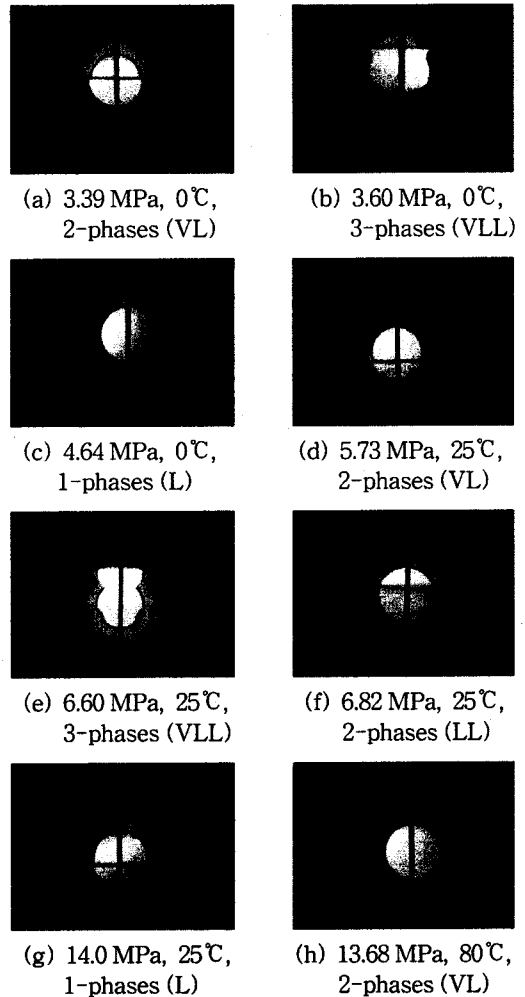


Fig. 3 Phase equilibrium of CO₂/POE.

단일액상이 나타나며 이는 일부 혼합물을 방출하여도 평형셀 내 상변화가 없는 것으로부터 확인할 수 있었다.

25°C와 40°C에 대한 상평형은 공통점이 있다. 두 온도 중 25°C일 때 CO₂/POE 혼합물의 상평형 사진을 Fig. 3의 (d)~(g)에 나타냈다. 25°C의 순수 CO₂ 포화압력은 6.43 MPa이다. Fig. 3(d)는 압력이 5.73 MPa(<6.43 MPa)로 2상(VL)이 나타났다. 2상 중 액상은 CO₂와 POE로 구성되고 기상은 CO₂가 대부분을 차지하고 있었다. Fig. 3(e)는 압력이 6.60 MPa(≥6.43 MPa)로 3상(VLL)이다. 3상 중 하부 액상은 CO₂와 POE로 구성되어 있고, 중간 액상은 CO₂가 대부분을 차지할 것으로 추정되며, 상부 기상은 CO₂가 대부분을 차지하고 있었다(단, 40°C의 경우 임계온도 이상이므로 3상(VLL)은 나타나지 않음). Fig. 3(f)는 압력이 6.82 MPa(>6.43 MPa)로 2상(LL)이다. 하부 액상은 CO₂와 POE로 구성되어 있었고 상부 액상은 98% 이상 CO₂로 구성되어 있었다(단, 40°C의 경우 약 9~12 MPa의 경우 2상(LL)이 나타남). Fig. 3(g)는 압력이 14.0 MPa(≫6.43 MPa)로 단일 액상이 나타났다(40°C의 경우 약 12 MPa 이상인 경우임).

60°C와 80°C는 전체 압력범위에서 2상(VL)을 나타냈다. 두 온도 중 80°C일 때 CO₂/POE 혼합물의 상평형 사진을 Fig. 3(h)에 나타내었다. Fig. 3(h)는 14.0 MPa로 2상(VL) 상태이다. 2상 중 액

상은 CO₂와 POE로 구성되어 있으며, 상부 기상은 CO₂가 대부분을 차지하고 있었다.

3.2 CO₂/PAG 혼합물

Fig. 4에 온도와 압력에 따른 CO₂/PAG 혼합물의 조성변화를 나타내었다. Fig. 4의 왼편에 주로 나타나는 기호(▶▼■●▲····)는 온도에 대한 하부 액상을 나타낸다. 오른편에 기호(▷▽□○△····)는 각 온도에 대한 상부 기상(각 온도의 순수 CO₂ 포화압력 미만인 경우) 또는 상부 액상(각 온도의 순수 CO₂ 포화압력 이상인 경우)을 나타낸다. 왼편 기호가 나타내는 하부 액상에서는 순수 CO₂ 포화압력보다 낮은 압력에서는 압력이 증가할수록, 그리고 온도가 감소할수록 CO₂ 용해도가 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 순수 CO₂ 포화압력보다 높은 압력에서는 압력이 증가할수록 CO₂ 용해도 증가가 미미하였다. 오른편 기호가 나타내는 상부(기상 또는 액상)에서는 CO₂가 대부분을 차지하며, 기상보다는 액상일 때 미미하지만 PAG가 많았다.

상평형 특성은 온도에 따라 다르게 나타난다.

-10°C, -5°C, 0°C, 5°C, 10°C, 25°C, 45°C에 대한 상평형은 공통점이 있다. 대표적인 예로 10°C에 대한 CO₂/PAG 혼합물의 상평형 사진을 Fig. 5의 (a)~(c)에 나타냈다. 10°C의 순수 CO₂ 포화압력은 4.50 MPa이다. Fig. 5(a)는 압력이 4.15 MPa

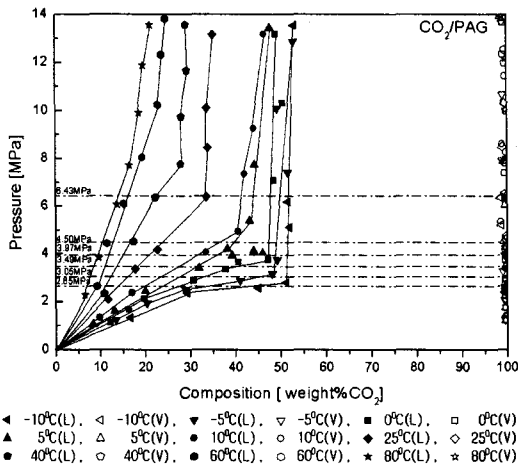


Fig. 4 Pressure-composition diagram of the system CO₂/PAG.

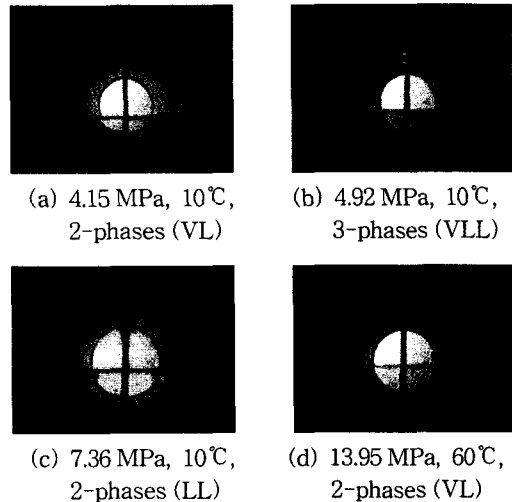


Fig. 5 Phase equilibrium of CO₂/PAG.

(<4.50 MPa)로 2상(VL)이다. 2상 중 하부 액상은 CO₂와 PAG로 구성되어 있으며 상부 기상은 CO₂가 대부분을 차지하고 있다. Fig. 5(b)는 압력이 4.92 MPa(≥4.50 MPa)로 3상(VLL)이다. 3상 중 하부 액상은 CO₂와 PAG로 구성되어 있고, 중간 액상은 CO₂가 대부분을 차지할 것으로 추측되며, 상부 기상은 CO₂가 대부분을 차지하고 있다(단, 40℃의 경우 임계온도 이상이므로 3상(VLL)은 나타나지 않음). Fig. 5(c)는 압력이 7.36 MPa(≫4.50 MPa)로 2상(LL)이다. 2상 중 하부 액상은 CO₂ 및 PAG로 구성되어 있으며 상부 액상은 CO₂가 대부분을 차지하고 있다.

60℃의 경우는 전체 압력범위에서 2상(VL)이 나타난다. 60℃일 때 CO₂/PAG 혼합물의 상평형 사진을 Fig. 5(d)에 나타내었다. Fig. 5(d)는 13.95 MPa로 2상(VL) 상태이다. 2상 중 하부 액상은 CO₂와 PAG로 구성되어 있으며 상부 기상은 CO₂가 대부분을 차지하고 있었다.

3.3 CO₂/POE와 CO₂/PAG 혼합물 특성 비교

두 혼합물의 용해도를 비교해 보면 상부(기상 또는 액상)에서는 두 혼합물 모두 대부분 CO₂가 차지하고 있었다.

하부 액상에서 같은 온도와 압력의 경우를 비교해 보면 CO₂ 용해도는 CO₂/POE 혼합물의 경우가 더 높게 나타났다. 저온의 대표적인 예로 0℃인 경우 하부 액상의 CO₂ 용해도는 압력 증가에 따라 CO₂/POE 혼합물에서는 80%까지, CO₂/PAG 혼합물에서 50%까지 증가하였다. 고온의 대표적인 예로 60℃인 경우 하부 액상의 CO₂ 용해도는 압력 증가에 따라 CO₂/POE 혼합물에서는 45%까지, CO₂/PAG 혼합물에서는 25%까지 증가하였다. 두 혼합물 모두 저온에 비하여 고온에서 압력에 따른 CO₂ 용해도 증가율이 줄어든 것을 알 수 있었다.

고압에서 CO₂/POE 혼합물은 단상(L)으로 존재하는 온도가 있었지만 CO₂/PAG 혼합물에서는 2상(LL)이 유지되었다. 즉, 상용성 겹은 CO₂/POE 혼합물 경우에만 닫혀 있다.

두 혼합물 모두 온도, 압력에 따라 2상(LL) 또는 3상(VLL)이 되는 경우가 있었다. 이때 평형셀을 흔들어 주면 CO₂/POE의 경우는 두 액상이 잠시 섞인 후 다시 원래의 상으로 회복되지만

PAG는 두 액상이 전혀 섞이지 않았다. 이는 교란이 있는 경우 CO₂/POE 혼합물이 잘 섞일 가능성이 있음을 뜻한다.

4. 결 론

CO₂/오일 혼합물의 기-액 상평형을 연구하기 위하여 평형셀, 온도제어장치, 저울 등의 실험장치를 구성하였다. CO₂/POE와 CO₂/PAG 혼합물에 대하여 압축기 작동압력 범위(0~14 MPa)에서 기-액 상평형 자료를 측정하고 조성을 계산하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) CO₂/POE 혼합물 : (a) -10℃, -5℃, 0℃, 5℃, 10℃에서는 시스템 압력이 순수 CO₂ 포화압력보다 낮은 경우 2상(VL), 근처인 경우 3상(VLL), 높은 경우 단상(L) 상평형이 각각 관찰되었다. (b) 25℃, 40℃에서는 압력 증가에 따라 각각 2상(VL), 3상(VLL), 2상(LL), 단상(L)이 차례로 관찰되었다(단, 40℃의 경우 3상 없음). (c) 60℃, 80℃에서는 전체 압력 범위에 걸쳐 2상(VL) 상평형이 관찰되었다. 하부 액상에서는 CO₂ 용해도가 45% 미만이었다.

(2) CO₂/PAG 혼합물 : (a) -10℃, -5℃, 0℃, 5℃, 10℃, 25℃, 40℃에서는 시스템 압력이 순수 CO₂ 포화압력 미만인 경우 2상(VL), 근처인 경우 3상(VLL), 이상인 경우 2상(LL) 상평형이 각각 관찰되었다(단, 40℃의 경우 3상 없음). (b) 60℃, 80℃에서는 전체 압력 범위에 걸쳐 2상(VL)이 관찰되었다. 하부 액상에서는 CO₂ 용해도가 25% 미만이었다.

(3) CO₂/POE 및 CO₂/PAG 혼합물 모두에 대하여 압력이 증가할수록, 그리고 온도가 감소할수록 하부 액상에서 CO₂의 용해도가 증가하였다. 상부(기상 또는 액상)는 전체 온도와 압력에서 CO₂가 대부분을 차지하고 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 차세대 신기술 개발 사업 중 '환경친화적 자연냉매인 CO₂를 적용한 고효율 냉방시스템 개발' 과제에 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Devotta, S., Padalkar, A. S., Joshi, S. N., Sawant, N. N. and Sane, N. K., 2000, Comparative assessment of CO₂ for window air-conditioners, Preliminary Proceedings of the 4th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, Purdue, pp.17-24.
2. Choi, H. S., Kang, B. H., Park, K. K. and Kim, S. H., 2003, Study on vapor pressure and miscibility of R-744/AB and PAO oil mixtures, Proceedings of the SAREK 2003 Summer Annual Conference, pp.822-827.
3. Choi, H. S., Kang, B. H., Park, K. K. and Kim, S. H., 2004, An experimental study on miscibility and vapor pressure of R-744/oil mixtures, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol.16, No. 2, pp.150-157.
4. Seeton, C., Fahl, J. and Henderson, D., 2000, Solubility, viscosity boundary lubrication and miscibility of CO₂ and synthetic lubricants, Preliminary Proceedings of the 4th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, Purdue, pp.417-424.
5. Tsuji, T., Tanaka, S., Hiaki, T. and Saito, R., 2004, Measurement of bubble point pressure for CO₂+decane and CO₂+lubricating oil, Fluid Phase Equilibria, Vol.219, pp.87-92.
6. Lee, C. S., 2005, An Experimental Study on Miscibility and Vapor-Liquid Equilibria of CO₂/Oil Mixtures in the Range of Compressor Working Pressure, MS thesis, Kookmin University, Seoul, Korea.
7. ANSI/ASHRAE Standard 41.4-1996, Standard Method for Measurement of Proportion of Oil in Liquid Refrigerant.