

제습 사이클에서의 냉매-오일 혼합물의 유동특성

박 세 민[†], 하 삼 철, 신 종 민, 이 장 호^{*}
LG전자 디지털 어플라이언스 연구소 냉동공조팀, 포항공대 대학원

Flow Characteristics of Refrigerant-oil Mixtures in a Dehumidifying Cycle

Se-Min Park[†], Sam-Chul Ha, Jong-Min Shin, Jang-Ho Lee^{*}

HVAC & R Team, Digital Appliance Company Lab, LG Electronics, Changwon, Kyongnam 641-711, Korea

^{*}Department of Mechanical Eng., POSTECH, Pohang University, Pohang 790-784, Korea

(Received April 25, 2000; revision received October 11, 2000)

ABSTRACT: This paper deals with refrigerant-oil mixtures in a dehumidifying cycle. Two different oils such as Alkylbenzene (AB) and Polyol-esters (POE) lubricants are used for R134a to investigate the effect of miscibility on oil returnability. It was found that R134a/AB mixture had more unstable interface between oil and refrigerant than R134a/POE mixture. However, overall flow patterns of both refrigerant-oil mixtures were almost same. The minimum height of oil measured in the compressor was as high as twice of the least permissible height of oil in the compressor required to insure its reliability. Thus, it is considered that immiscible oil, i. e., AB for R134a can be used without causing oil returnability problem.

Key words: Visualization(가시화), Oil returnability(오일순환성), Miscibility(상용성)

기 호 설 명

- U : 한계유속 [m/s]
- d : 관내경
- ρ : 밀도 [kg/m³]
- g : 중력가속도 [m/s²]
- n : 한계속도 계산 지수, $n=0.5$
- C : 한계속도 계산 상수

그리스 문자

- ν : 동점성 계수

하첨자

- oil* : 오일
- g* : 냉매 증기

1. 서 론

지구의 온난화와 오존층 파괴에 따라 HCFC-22의 사용규제가 강화됨으로써 HFC계 혼합물이 대체냉매로 부각되었다. 대체냉매의 개발과 병행하여 필수적으로 수행되어야 할 연구과제는 대체냉매에 적용할 수 있는 새로운 오일을 개발하는 것이다. 현재, 냉동기유로서 HFC와 상용성(Miscibility)이 좋은 POE가 일반적으로 사용되고 있으나 수분관리, 윤활성의 문제가 연구과제로 남아 있다.⁽¹⁾ 반면 기존 HCFC에 사용하는 광유는 윤활성이 양호하고 수분관리에서 장점을 가지고 있으나, HFC와 비상용성이기 때문에 오일순환성

[†] Corresponding author

Tel.: +82-0551-260-3834; fax: +82-0551-260-3507

E-mail address: mach4780@lge.com

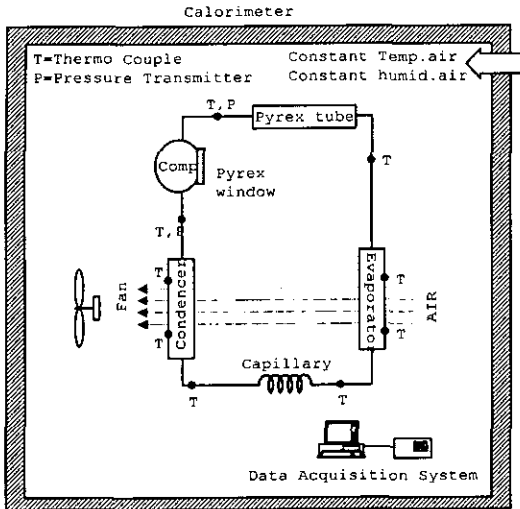


Fig. 1 Schematic diagram of cycle experiment apparatus.

에 문제가 있다고 알려져 있다.⁽²⁾ 오일순환(Oil Return)에 관한 일련의 연구⁽²⁻⁴⁾는 일본의 미쯔비시사가 냉장고에 비상용성 오일을 적용하면서 대두되었다. 증기압축식 사이클에서 압축기의 기구부 마모방지, 냉각, 절연 등의 역할을 하는 냉동기유의 오일순환에 문제가 있을 때 신뢰성에 치명적인 결과를 초래할 수 있으므로 냉매와 비상용성인 오일의 경우 선택에 있어 매우 신중함을 요구한다.

본 연구에서는 압축기 입구부분과 압축기내에서 R134a와 비상용성인 알킬-벤젠(AB)과 R134a와 상용성인 폴리올-에스테르(POE)의 거동을 각각 가시화하고 냉동사이클의 시간적 추이에 따른 온도 및 압력의 비교분석을 통해 비상용성 냉매-오일의 적용 가능성을 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 사이클 실험장치

본 시험에는 증발기를 통과하는 공기와의 물질 전달을 통하여 실내의 습도를 낮추는 것을 목적으로 하는 제습기를 사용하였다. 이 제습기는 제습능력이 50 PINT(0.983 l/h)로서 하나의 팬을 사용하여 정해진 실험조건외의 공기를 흡입하여 증발기를 통과한 찬 공기가 바로 응축기에 유입되어

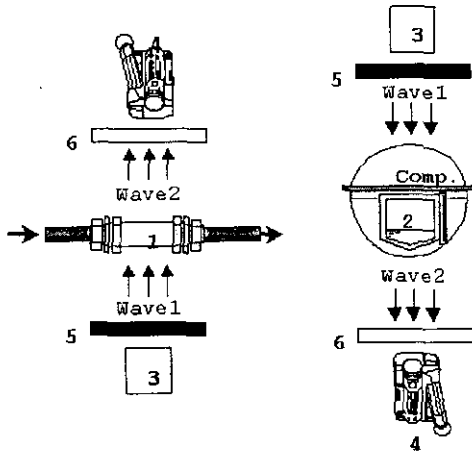
Table 1 Specification of experimental apparatus

Equipments	Specification
Pressure transmitter	Model: PTX1000
	Range: $-1 \sim 35 \text{ kgf/cm}^2\text{g}$ Supply: 9~30 Vdc O/P: 4~20 mA
Hybrid Recorder	Model: DE240
	Range T: $-200 \sim 400^\circ\text{C}$ Volt: $-50 \sim 50 \text{ V}$

열교환을 한 후 뜨거운 공기를 토출시키는 것을 특징으로 한다. Fig. 1에 실험장치의 개략도를 나타내었다. 실험장치는 Energy Balance $\pm 3\%$ 의 항온 항습 열량계에서 수행하였으며, 제습 사이클 구성부품의 주요 위치에 T형 열전대를 부착하고 압축기의 입구와 출구부분에 압력센서(Pressure Transmitter)를 장착하였으며, 동시에 자료수집기와 PC 사이에 GPIB 통신을 이용하여 사이클 거동을 실시간으로 측정할 수 있게 하였다. 실험장치는 Table 1과 같다.

2.2 가시화 장치

냉매와 비상용성을 가지는 오일을 냉동 사이클에 적용하는 경우에는 오일이 압축기로의 순환이 확실히 되어야 하는 것이 필수 조건이므로 사이클 내의 배관에 체류가 생기지 않는지를 반드시 검증해야 한다. 선행 연구문헌⁽¹⁾에 따르면 오일은 크게 세 가지 메커니즘에 의해 관내에 체류하는 것으로 분류했다. 즉, (1) 증기냉매가 수평관을 통과할 때 밀도가 작아서 오일과의 전단력이 감소하기 때문에, (2) 증기냉매가 수직으로 상승하는 배관에서는 중력에 의하여 오일이 누르는 힘과 냉매가 가지고 있는 모멘텀의 균형에 의해서, (3) 액냉매가 수직하강 하는 배관에서는 비중이 낮은 오일이 가지는 부력과 균형 때문이라고 하였다. 본 연구에서는 배관의 길이가 분리형 에어컨과 같이 장배관이 존재하지 않고, 수직상승 배관이나 수직하강 배관부분의 길이가 매우 짧기 때문에 증기냉매로 존재하는 압축기 입구부분에 가시화 유리관을 장착하여 (1)의 메커니즘에 의한 오일체류 여부를 조사하고자 한다. 동시에 압축기 측면하단부에 강화유리관을 장착하여 오일



1: Pyrex Tube 2: Pyrex Window 3: Light
4: Camera 5: Light Filter 6: Camera Filter

Fig. 2 Schematic diagram of visualization apparatus.

순환에 문제가 없는 지도 관측하였다. 가시화 장치부분의 개략도는 편의상 사이클 장치구성도와 별도로 분리하여 Fig. 2에 도시하였다. 가시화 장치의 구체적 내용으로서는, 압축기 입구배관의 가시화는 증발기 출구와 압축기 입구 사이에 길이 80 mm, 내경 9.52 mm의 강화유리배관(Pyrex Tube)을 사용하였고, 압축기의 측면 하단부에는 100 mm×100 mm의 강화유리판을 사용하였다. 오일의 거동을 관찰하기 위한 방안으로 연구대상인 오일에만 착색될 수 있는 형광물질을 사용하였으며, 광원측에 형광물질이 가장 잘 흡수하는 파장대역(Wave1)으로 걸러 주는 필터를 장착하고, 동시에 형광물질이 발진하는 파장에 부합하는 대역(Wave2)으로 파장을 다시 한번 더 걸러 주는 필터를 카메라측에 부착함으로써 최적의 가시화 상태를 유지하고 PC에 영상데이터와 음성데이터를 실시간 전송하여 관찰할 수 있도록 장치를 구성하였다. 본 연구에서 사용한 필터는 열에 취약하므로 온도발생이 없는 스트로보스코프를 광원으로 선택하였다. 형광물질과 필터에 관한 구체적인 사양은 Table 2에 나타내었다.

2.2 실험조건 및 측정방법

R134a 냉매에 상용성 오일 POE22와 비상용성 오일 AB15 및 AB10을 적용하여 실험조건에 따

Table 2 Specification of dye and filter

Equipments	Specification
Dye	Model: NKX-846
	Absorption Maximum: 458 nm
	Lasing Range: 507585 nm
	Molecular Weight: 350.43
Light Filter	Model: HOYA, B-390
Camera Filter	Model: HOYA, Y-52

Table 3 Test condition

Test Condition	Condition	
	Dry (°C)	Wet (°C)
A(Standard)	26.7	20.9
B(Low temperature1)	18.0	13.5
C(Low temperature2)	5.0	2.1
D(Maximum operating)	32.0	23.0

라 각각 비교하였다. AB 오일은 R134a와 비상용성이므로 POE보다 순환점도가 낮은 것을 사용하였고, 윤활성과 순환점도 등을 고려하여 AB15와 AB10을 선정하여 실험하였다. Table 3과 같은 조건에서 실험하였고, 이는 AHAM(Association of home appliance manufacturers)의 제습기 시험 기준⁽⁵⁾을 따른 것이다. 제습량(PINT), 소비전력(W), 압축기 기동 후 빠져나간 오일이 다시 압축기로 돌아오는 시간(sec), 그리고 압축기내 오일의 유면(mm)을 실시간으로 동시에 측정하였다. 측정된 제습량은 표준조건에서 측정하는 것을 원칙으로 하고, 사이클 안정 후 6시간 동안 측정된 응축수량으로 정의하였다. 오일순환 시간은 압축기 기동부터 가시화관(Pyrex Tube)에 오일이 처음 보일 때까지의 시간으로 정의하였고, 동시에 압축기내 오일의 유면은 압축기 측면에 장착된 가시화 창의 측면에 액주를 달아 눈금을 측정하여 기록하였다. 실험 풍량, 압축기, 열교환기, 팽창기구의 사이클 최적화 문제는 본 연구에서는 언급하지 않는다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 AB오일의 점도 선정

A조건에서 냉매 R134a에 적용한 AB10, AB15

Table 4 Comparison of circulation viscosity

Position	Condition	POE22	AB10	AB15
Inside Compressor	20°C	8.0 cst (23%)	13 cst (6%)	27 cst (6%)
	60°C	8.0 cst (6%)	4 cst (2.5%)	6 cst (2.5%)
Discharge Pipe	12 kg/cm ² 60°C	2.1 cst (30%)	2.0 cst (14%)	3 cst (15%)
Suction Pipe	2.8 kg/cm ² 10°C	6.5 cst (30%)	13 cst (13%)	25 cst (13%)

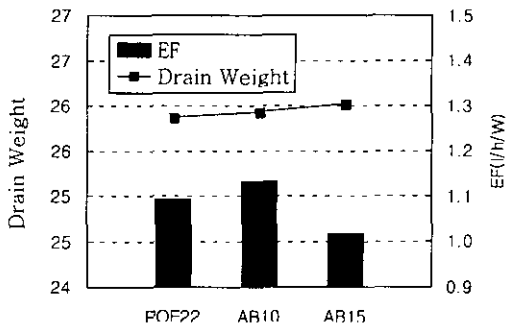


Fig. 3 Comparison of drain weight and EF.

와 POE22에 대한 냉매의 작동상태와 제습기 성능을 비교하여 각각 Table 4와 Fig. 3에 나타내었다. 단위입력 및 시간당 제습량으로 정의되는 제습기 효율(EF, l/h/W)은 AB10이 가장 좋은 것으로 나타나고, 제습량 또한 POE22와 비교할 때 동등 이상이며, 사이클내에서 R134a와의 용해도를 고려한 순환점도 또한 AB10이 AB15보다 POE22와 유사하여 AB10을 선택하여 가시화 실험을 수행하였다.

3.2 포밍 현상

포밍 현상은 오일에 녹아 있던 냉매가 증발하면서 기포가 발생하는 현상으로 주로 저온 분위기에 압축기를 오래 방치할 때 발생하는 현상이다. Fig. 4는 압축기를 4시간 이상 방치한 후 초기 기동 시 발생하는 포밍 현상을 시간별로 포착한 사진이다. 기동 후 압축이 시작되면서 주위의 온도와 압력이 상승하여 냉매가 증발할 수 있는 조건이 구축되고, 압축기 회전축의 끝단부는 오일과 접촉해 있으므로 기동하면서 냉매와 오일에 가진력을 발생시켜 냉매가 더욱더 쉽게 증발할 수 있는 조건을 만들어 주는 것으로 보여진다.

압축기가 기동하면 회전부의 끝단부에 의해 교란되면서 거품이 발생하기 시작하고(Fig. 4a), 유

where, () is solubility of R134a

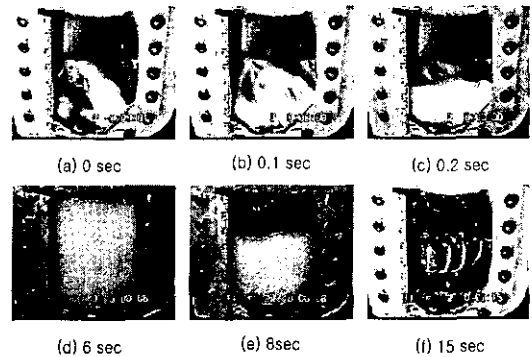


Fig. 4 Visualization of oil-foaming after start driving for 15 seconds (POE22).

동의 교란이 더욱 가속되고(Fig. 4b, Fig. 4c), 그 후 순간적으로 포밍이 발생하여 압축기내의 전체가 거품의 형태로 가득차게 되는데(Fig. 4d), 오일이 거품의 형태로 존재하여 오일급유에는 문제가 없을 것이라 판단된다. 압축이 진행됨에 따라 압축기내 온도와 압력이 상승하여 냉매가 증발하면서 거품이 사라지기 시작하고(Fig. 4e), 기동 15 sec 후에는 Fig. 4f와 같이 오일의 유면을 확실히 볼 수 있다. 본 연구에서 오일의 종류와 실험조건에 관계없이 포밍 현상의 진행 경과는 거의 유사한 형태를 취하였으며 거품이 제거되어 유면을 확실히 관찰할 수 있는 Fig. 4f의 상태를 최저유면으로 정의하였다.

3.3 오일순환성(Oil Returnability)

3.3.1 오일순환 시간과 압축기내 최저유면점

각 조건에서의 오일순환 시간과 압축기내 유면의 변화를 관측하여 오일순환의 수준을 판단할 수 있다. 오일이 압축기에서 토출되어 다시 압축기내로 유입되는 시간이 너무 길다면 압축기 내부의 윤활에 문제가 있을 수 있고, 유면변화를

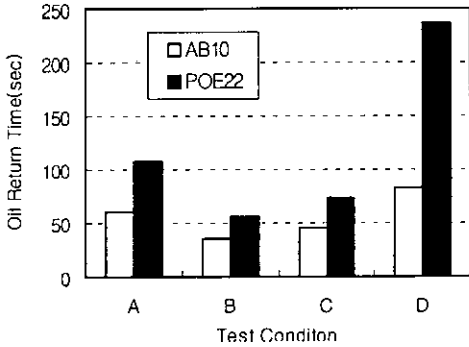
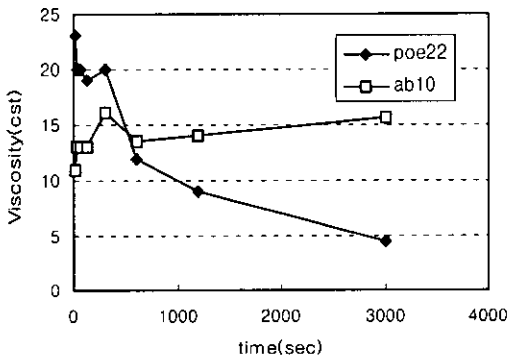
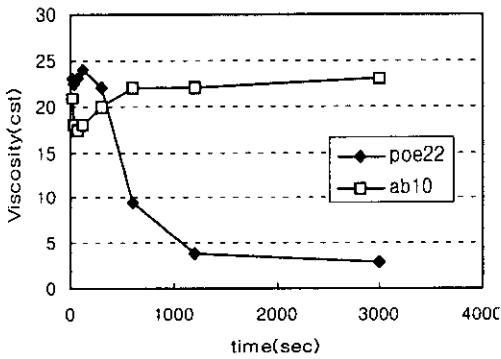


Fig. 5 Comparison of oil return time.



(a) Test condition A



(b) Test condition B

Fig. 6 Comparison of lowest oil level.

측정하여 변화가 없다면 오일의 순환성에는 문제가 없다는 것이 검증될 수 있다. Fig. 5은 Table 3과 같은 실험조건별 오일순환 시간을 측정한 것으로 AB10과 POE22를 비교하였을 때 모든 조건에서 AB10의 순환시간이 더 짧은 결과를 보이고 있다. 이는 AB10의 초기기동시 순환점도가 낮기

때문이며 초기기동시 압축기 윤활에 긍정적 요인으로 작용될 수 있다. 또, Fig. 6은 운전중 압축기내 최저유면점을 조사한 것으로 Table 3의 C, D 조건에서 AB10의 경우 POE22보다 더 낮았지만 오일유면이 압축기로부터의 끝단 부분에 닿는 최소한의 신뢰성이 확보되는 압축기의 유면과 비교 하였을 때 200% 이상의 안전율이 보장되고 있다.

3.3.2 오일순환 한계유속

압축기의 토출관이나 흡입관 내에서의 오일체류가 생기지 않는 냉매증기 유속은 일반적으로 다음과 같이 정의한다.⁽²⁾

$$U_g = C \cdot [g \cdot d \cdot (\rho_{oil} - \rho_g) / \rho_g]^n \quad (1)$$

여기서, d , ρ_{oil} , ρ_g , g , n 은 각각 관내경, 오일 밀도(kg/m^3), 냉매 증기밀도(kg/m^3), 중력가속도 (m/s^2)를 뜻하며, $n=0.5$ 로 주어진다. 계산결과 AB10의 한계유속이 4 m/s, 배관내에서의 유속은 21 m/s(냉매유량을 계측하여 환산함)임을 고려할 때 최저 신뢰 수준의 5배 이상임을 확인하였다.

3.3.3 외부조건에 따른 비정상 상태의 오일의 유동 형태와 거동

이상유동의 유동형태는 많은 선행 연구자들에 의하여 45년 이상 연구되어 왔다.⁽⁶⁻⁷⁾ 고전적인 유동형태 분류로서는 순수냉매에 대하여 냉매유량, 건도에 따라 형태를 구분한 Baker map⁽⁶⁾ 등이 있고, 좀더 최근에는 Taitel and Dukler,⁽⁷⁾ Weisman et al.⁽⁸⁾이 더욱 복잡하게 인자를 고려하여 연구한 바 있다. 또한, Manwell and Bergles⁽⁹⁾은 오일-냉매의 혼합물을 관의 형상까지 고려하여 연구결과를 발표하였다. 본 연구에서는 Bergles의 기준에 따라⁽⁹⁾ 유동형태를 Fig. 7과 같이 정의하고 AB10과 POE22의 가시화 결과를 시간의 함수로서 유동형태를 정성적으로 분석하였다. 모든 실험조건에서 기동 후 연속적으로 압축기 입구 투명가시화관을 촬영한 후에 압축기를 빠져나간 오일이 압축기 입구 배관에서 처음 보이는 시점과 440 sec, 1200 sec일 때의 유동을 순간 포착하여 Fig. 8에 나타내었다. 전체적으로 초기에는 Stratified-wavy 형태를 취하고 있으며, 시간이 흐름에 따라 Semi-Annular 형태로 변화하며, 안

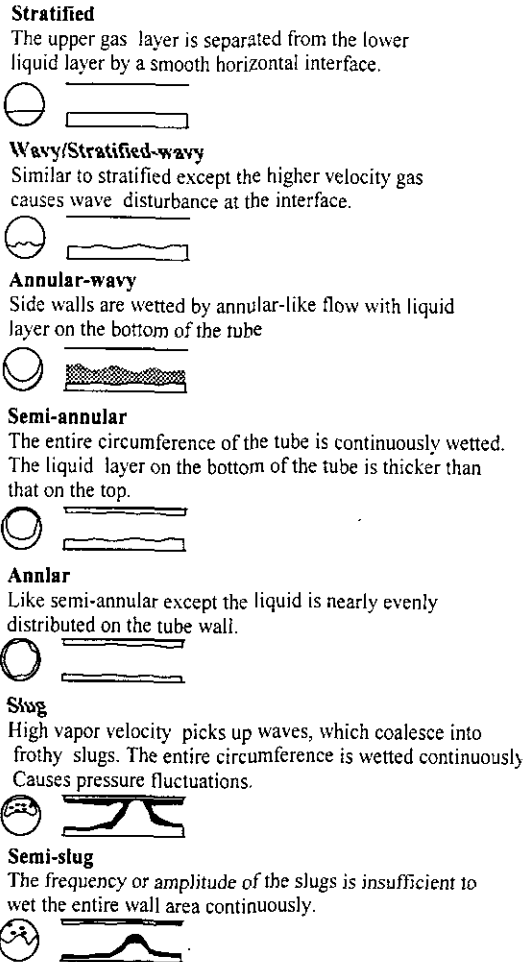


Fig. 7 Flow pattern sketches and definitions.

정 후에는 모든 조건에서 Annular 형태를 취함을 볼 수 있다. 또한, 가시화 부분을 제외한 배관은 주름관(Grooved Tube)을 사용하였기 때문에 관성이 작용하여 가시화 유리관에서 유동방향이 나선형태를 취하고 있음을 볼 수 있다. R134a에 대한 두 가지 오일의 주된 차이점은 AB10이 POE22보다는 유동형태가 불규칙적이고 궤면의 상태가 매우 산만하다는 것이다. AB10과 R134a가 서로 비상용성이라는 점을 감안 할 때, 이는 냉매와 오일이 서로 섞이지 않으려고 하는 성질에서 비롯된 것이라 유추할 수 있다. Fig. 9는 Table 3의 A, B조건에서 오일-냉매의 용해도와 측정된 압력-온도를 기반으로 순환점도 Table⁽¹⁰⁾에 따라 환산한 결과를 시간축으로 나타내었다.

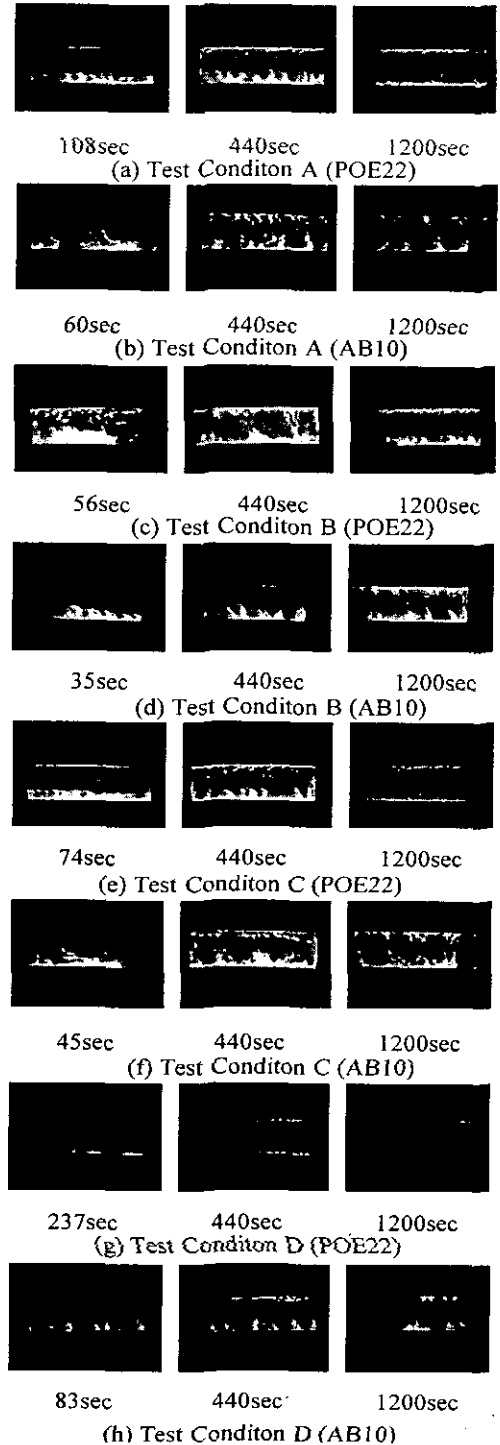
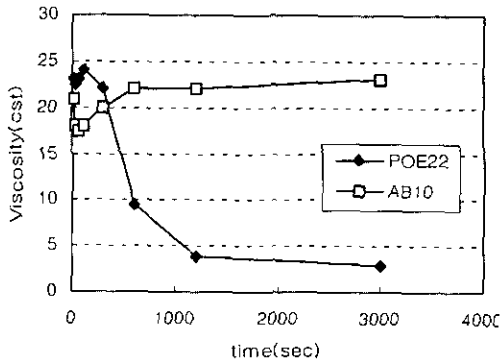
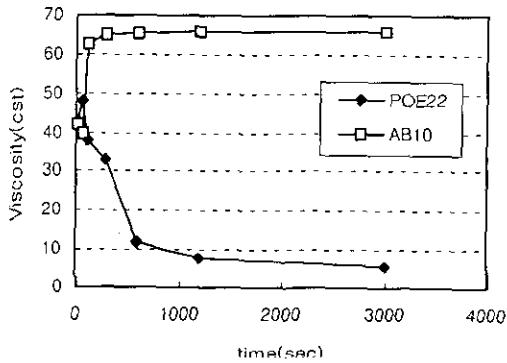


Fig. 8 Flow visualization for entrance of compression.



(a) Test condition A



(b) Test condition B

Fig. 9 Comparison of oil level history.

POE22와 AB10과는 정반대의 추이를 보이고 있다. 즉, POE22는 초기에 순환점도가 높고 시간이 지날수록 낮아지는 추세를 보이는 반면, AB10은 POE22의 경우와 반대로 초기에는 순환 점도가 낮고 시간이 지날수록 높아지는 경향으로 나타났다. 이는 오일순환 시간과도 관계가 있다.

즉, 오일순환 시간 이전에는 POE22가 AB10보다 순환점도가 더 높은 데 기인하며 또한, 압축기 입구배관에서의 가시화 결과에서도 전반적으로 시간이 지나가면서 POE22와 AB10을 비교해 볼 때 눈에 보이는 오일의 양이 현저히 차이를 알 수 있다. 즉, 형광물질로 착색된 오일의 양이 시간에 따라 감소하는 속도가 POE22가 AB10보다 빠르다. 또한 주위 공기온도가 높을수록(Fig. 8g: Fig. 8h, Fig. 8a: Fig. 8b, Fig. 8c: Fig. 8d, Fig. 8e: Fig. 8f 순) 가시화 창에 보이는 오일의 양이 많아진다. 이는 증발온도가 낮아짐에 따라 오일의 용해도가 높아지고 따라서 오일의 점도가

낮아지기 때문이라고 추측되어진다.

3.3.4 압축기내 유면변화

유면은 Fig. 10과 같이 초기기동시 급격히 저하되고 포밍이 끝난 시점에서 최저유면을 나타내었다. 그후 유면은 서서히 복구되며 압축기 정지 후 방치 1시간 정도에 초기유면의 94%까지 회복하는 결과를 나타내고 있으며 100% 회복하는 데 걸리는 시간은 기동 후 4시간 정도임을 확인하였다. 초기기동시에는 압축기 구동부에 급유되는 양과 내벽에 부착된 오일량, 토출관을 통해 빠져나간 오일이 복구하지 않았기 때문에 유량이 급격히 저하되며, 압축기 내부의 압력이 점점 높아짐에 따라 오일 속에 녹아 드는 냉매량과 복구한 오일에 의해 오일유면이 회복되고, 방치 후에는 약 4시간에 걸쳐 구동부와 벽면에 묻어 있던 오일이 복구되고, 오일로 녹아 드는 냉매량이 증가하여 초기유면으로 복구하게 된다. POE22는 R134a와 사용하는 데 신뢰성이 충분히 확보된 오일이라는 점을 고려할 때 AB10은 압축기 내부에서의 윤택 메커니즘이 거의 흡사함을 유추할 수 있고, R134a와 비상용성 오일인 AB10을 사용했을 때 우려했던 압축기내 윤택에는 문제가 없다는 결과이다.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 압축기 입구부분과 압축기내에서 R134a에 비상용성인 알킬-벤젠오일(AB)과 상용성인 POE의 유동을 가시화하고 냉동사이클의

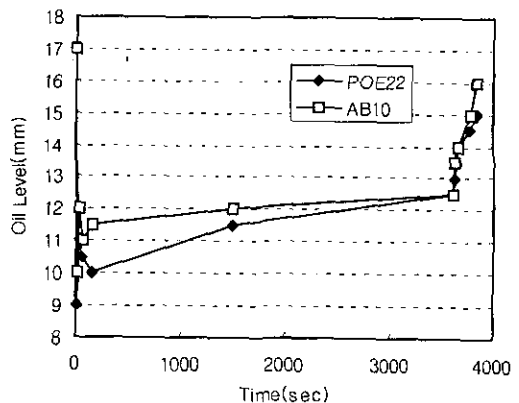


Fig. 10 Comparison of Viscosity history.

시간적 추이에 따른 순환점도 및 유면변화를 비교, 분석하였다. 압축기 기동 초기에는 AB10의 오일 순환시간이 POE22보다 빠르지만 시간이 지날수록 POE22의 오일복귀가 가속화됨을 확인하였고, 압축기 초기기동시의 유동형상은 전체적으로 유사함을 보였지만, R134a와 상용성 오일인 POE에 비해 R134a와 비상용성 오일인 AB10의 오일-냉매간의 켈면 상태가 불안정한 특성을 보였다. 시간경과에 따른 압축기내 유면변화 및 기동시 압축기내 포밍 현상의 가시화 결과로 볼 때 AB10과 POE22가 정성적, 정량적으로 거의 유사한 추이를 보였다. 두 종류의 오일 모두 신뢰성을 확보하기 위한 최저 한계 유면보다 200% 이상의 유면을 확보하여 비상용성 오일인 AB과 R134a와의 적용 가능성이 더욱 확보된 셈이다. 비상용성 AB 냉동기유의 R134a 적용에 대한 연구는 현재 선진국에서 실험실 수준으로 시작품을 제작하여 성능과 신뢰성 향상을 위한 연구가 진행되고 있는 단계이며, 실용화를 위해서는 장기 신뢰성, 정확한 오일-냉매 유동의 메커니즘 등 해결되어야 할 여러 가지 문제점들이 아직 많이 남아 있다.

후 기

가시화 시험장치 제작에 조언을 주신 LG전자 이인섭 연구원께 감사드립니다.

참고문헌

1. Sunami, M., Takigawa, K. and Suda, S., 1994, Optimization of POE type refrigeration lubricant, Proceedings of 1994 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 153-158.
2. Yoshihiro, S., 1994, The development of refrigerator with rotary compressor for HFC-134a. Japanese Refrigeration Journal, Vol. 69, No. 800, pp. 640-644.
3. Takaichi, K. and Sakai, H., 1992, Lubricants for HFC-134a compatible rotary compressors, Proceedings of 1992 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 1035-1044.
4. Iizuka, T. and Ishiyama, A., 1994, Reliability of compressor for HFC-based refrigerants, The International Symposium on R22 & R503 Alternative Refrigerants '94 Proceedings, pp. 139-144.
5. AHAM Standard, dehumidifiers, DH-1-1986.
6. Baker, O., 1954, Simultaneous flow of oil and gas, The Oil and Gas Journal, July 26, pp. 185-195.
7. Taitel, Y. and Dukler, A. E., 1976, A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow American Institute of Chem. Eng. Journal, Vol. 22, pp. 47-55.
8. Weisman, J., Duncan, D., Gibson, J. and Crawford, T., 1992, Effects of fluid properties and pipe diameter on two-phase flow patterns in horizontal lines, Int. J. of Multi phase Flow, Vol. 5, pp. 437-462.
9. Manwell, S. P. and Bergles A. E., 1990, Gas-Liquid flow patterns in refrigerant-oil Mixtures, ASHRAE Trans, Pt. 2, pp. 456-464.
10. Sunami, M., 1997, NOC (Nippon Oil Company) Table, Private communication.