

오일 분리기에서 CO₂/PAG오일 혼합물의 오일 분리특성에 관한 실험적 연구

김 경 재, 이 성 광, 조 은 영, 강 병 하^{*†}, 김 석 현^{*}
국민대학교 대학원, *국민대학교 기계자동차 공학부

An Experimental Study on Oil Separation Characteristics of CO₂/PAG Oil Mixture in the Oil Separator

Kyung Jae Kim , Sung Kwang Lee , Eun Young Cho , Byung Ha Kang^{*†} ,
Suk hyun Kim^{*}

ABSTRACT: The oil separation in an oil separator is one of the most important characteristics for proper compressor operation. In this study, a gravity type of oil separator is used. Oil separation characteristics has been investigated for CO₂/PAG mixture in the range of oil concentration 0 to 5 weight-percent and the mixture temperature range of 0°C to 15°C and 70°C to 90°C. The results obtained indicate that the oil separation is increased with an increase in the oil concentration. It is also found that the oil separation in liquid state is increased with an increase in the mixture temperature while the oil separation in gas state is decreased.

Key words: Concentration(농도), Oil(오일), PAG(Poly Alkylene Glycol), Density(밀도), Carbon dioxide(이산화탄소), Oil separator(오일분리기)

기 호 설 명

R : 오일 분리율

그 리 스 문 자

- ρ_0 : 순수 CO₂ 밀도 [g/ml]
- $\rho_{separator}$: 오일 분리기 부착시 밀도 [g/ml]
- $\rho_{no-separator}$: 오일 분리기 탈착시 밀도 [g/ml]

1. 서 론

지구 환경문제로의 관심이 높아지면서 오존층 파괴의 원인이 되는 HFC, HCFC 계열 물질의 규제에 이어 교토의정서에 의한 지구 온난화 물질에 대한 규제는 HFC 계열 냉매의 사용에도 제동을 걸게 되었다. 이로 인해 환경문제에 대한 근본적인 해결책으로서 암모니아, 탄화수소, 질소, 물 및 공기와 같은 환경 친화적인 자연냉매를 사용할 것을 요구하고 있다. 자연냉매는 환경적인 측면에서 오존층 파괴와 지구 온난화에 미치는 영향은 미미하다. 그리고 인체에 무해하며, 독성이 없고, 화학적으로 안정하며, 기존의 냉동기 재료를 그대로 사용할 수 있는 장점이 있다.⁽¹⁾ 특히 자연냉매 중 이산화탄소는 다른 냉매들과는

[†] Corresponding author
Tel.: +82-2-910-4681; fax: +82-2-910-4839
E-mail address: bhkang@kookmin.ac.kr

달리 인화성과 악취 및 독성이 없어 안전성이 뛰어나며, 높은 비열과 체적열용량을 가지고 있으므로 냉매로서도 탁월한 열역학적 물성을 가지고 있어 차세대 대체냉매로서의 관심이 집중되고 있다. 대체냉매의 개발과 병행하여 필수적으로 수행해야 할 연구과제는 대체냉매에 적용할 수 있는 적합한 냉동기유를 개발하는 것이다.

일반적으로 냉동기유는 압축기의 접촉부위에 공급되는 윤활유로서 냉각, 세정, 실링, 부식방지 등의 기능을 수행한다. 또한 압축기의 파손을 방지할 뿐 아니라 열교환기, 팽창장치 및 시스템 전체의 성능에 영향을 끼친다. 특히 냉매/오일 혼합물의 용해도 및 상용성 등에 영향을 받아 압축기를 떠난 오일의 양보다 회수되는 오일의 양이 적을 경우 압축기 내부의 오일의 양이 줄어들게 되며, 이로 인해 베어링, 크랭크샤프트 등이 과열로 인하여 고착되며 최종적으로 압축기의 파손을 초래하는 경우가 생긴다.

그러므로 냉매/오일 혼합물에서 오일을 분리하여 다시 압축기로 보내주는 오일분리기의 역할은 시스템 내에서 매우 중요하며, 이러한 오일 분리의 문제점들은 오일회수기를 적용함으로써 시스템내부의 오일을 회수하여 압축기 내부의 오일을 적정 수준으로 유지시켜주고 오일슬러지를 감소시키므로 시스템의 효율을 증가시킬 수 있다.

CO₂냉매/오일 혼합물과 오일분리기에 대한 기존 연구들을 살펴보면 다음과 같다. 우선 CO₂냉매/오일 혼합물에 관한 연구로써 Schlager et al.⁽²⁾은 냉매/오일 혼합물의 micro-fin tube에서 오일의 회수 양을 측정하고, 질량 유속, 오일 비율, 혼합물 점도, 증발기 출구의 상태에 따라 오일의 회수양이 변함을 제시하였다. Reyes-Gavilan et al.⁽³⁾은 가정용 냉장고의 다른 증발 온도에서 오일회수와 윤활유의 유동 특성을 실험적으로 밝히고, R-134a/POE 혼합물과 R-134/MO 혼합물의 오일 회수 특성을 비교 실험하였다. 이 실험에서 압축기로의 오일 회수에 냉매 유속의 중요한 역할을 제시하였다. Sumida et al.⁽⁴⁾은 액관에서 R-410A/AB 혼합물의 유동 특성과 오일 회수 특성을 분석하였다. 이 실험에서 액관에서는 오일 유속이 냉매유속보다 더 적음을 알고, 1 wt.% 이하의 오일 순환 농도에서 오일은 100% 회수됨을 보였다. 오일분리기에 관한 연구로써 Kim et al.⁽⁵⁾은 기액이상류 원심분리기 내부의 유동 특성

을 수치해석 적으로 해석하여 분리기에서 석출되는 수분의 양과 속도와 원심분리기 길이와의 관계를 규명하고 원심분리기 내부에서의 압력 분포에 대한 경향을 제시하였다. 또한 Andresen et al.⁽⁶⁾은 중력을 이용한 분리기를 입구 형태를 달리하며 유액과 물방울 크기 분포에 따른 안정성에 대한 연구를 수행하여 입구 형태에 따른 분리기의 효율을 실험적으로 분석하고 지속적으로 유액이 유입되는 것이 압력강하와 유량에 의존한다는 연구 결과를 보였다.

이러한 연구로부터 HFC/오일 혼합물의 오일 회수 특성에 관한 연구와 CO₂/오일 혼합물의 오일 회수 특성에 관한 연구 및 원심력을 이용한 오일분리기의 분리특성에 관한 연구는 다양하게 이루어졌지만 중력을 이용한 오일분리기의 분리 특성 및 CO₂ 냉매를 사용한 오일분리기에 관한 연구는 미비한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 중력식 오일분리기에서 CO₂/PAG 오일 액상과 기상 혼합물의 오일 분리특성을 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

폐회로 시스템에서 냉매/오일 혼합물이 액체 또는 기체 상태로 혼합되어 유동할 수 있게 시스템을 설계 제작하였다. 본 연구의 실험 장치는 높은 임계 압력을 갖는 CO₂냉매의 특성을 고려하여 실험 장치의 각 부분을 고압 피팅으로 연결하였다. Fig. 1 은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

실험 장치는 크게 CO₂냉매 순환부와 냉매의 설정온도를 유지시키기 위해 에틸렌글리콜/물을 사용한 냉 항온조 순환부, 냉매와 오일을 분리시키는 오일분리기 등으로 구성되어 있다. 에틸렌글리콜/물 순환부에 의해 설정온도로 유지되어 수액기내에 저장되어 있는 CO₂냉매는 마그네틱 기어펌프에 의해서 순환을 하게 되며, CO₂/오일 혼합물의 유량은 기어펌프의 회전속도를 변환시키는 속도조절기로 조절되며 유량은 질량 유량계로 측정하였다. 오일혼합을 위한 오일의 주입은 오일주입기(oil injector)를 사용하였다. CO₂를 관내에 충전하기 전에 진공펌프를 이용하여 관내를 진공으로 유지시키면서 실험조건의 농도에 해당

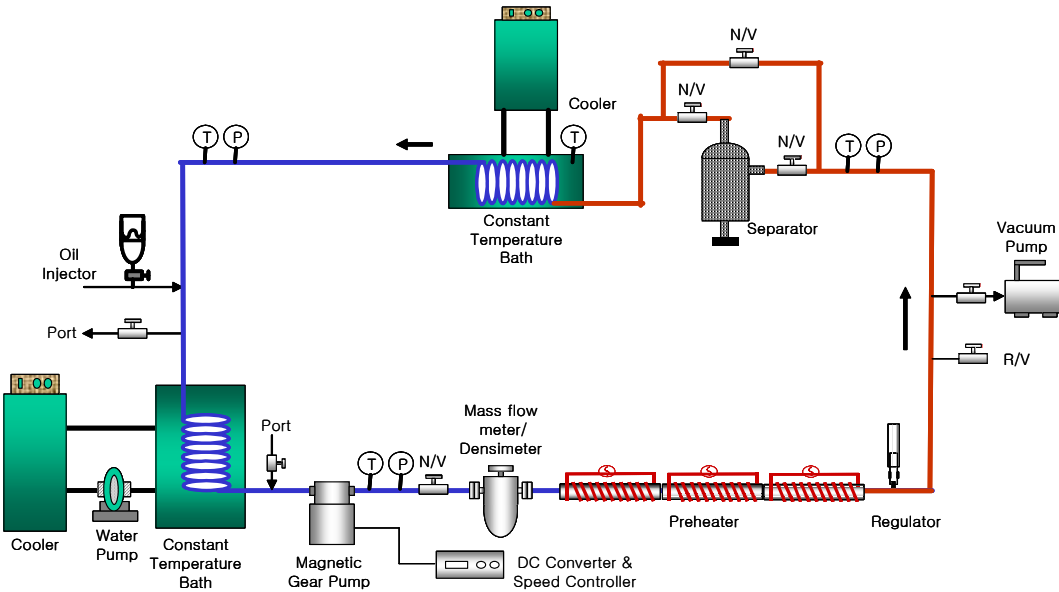


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

하는 오일이 주입된 오일주입기를 반대편 충전포트에 연결하고 밸브를 열어 압력차를 이용하여 주입시켰다.

실험은 혼합물이 액상일 때와 기상일 때의 두 조건을 모두 고려해야 하므로 CO₂냉매를 기체 상태로 만들기 위해 온도를 조절할 수 있는 가열 시스템을 제작하여 실험을 수행하였다.

액상의 CO₂냉매가 가열시스템을 통과하여 기체상태가 된 후 오일분리기를 통과하여 오일과 CO₂냉매가 분리되어 진다. CO₂/오일 혼합물의 밀도측정을 위해서는 U관 밀도계를 이용하였으며, 실험에 사용된 오일분리기는 유입되는 물질의 밀도차를 이용하는 것으로 상대적으로 밀도가 작은 CO₂냉매는 위쪽 유동라인으로 연결된 관으로

배출되고 밀도가 큰 오일은 아래로 가라앉아 압축기로 돌아가게 되는 원리이며 Fig. 2 에 나타내었다.

2.2 실험조건 및 방법

실험에 사용된 오일은 CO₂냉매와 상용되며 극성 냉동기유인 PAG(Poly Akylene Glycol) 오일을 사용하였다. 이 오일은 화학적 안정성, 윤활성, 혼화성이 우수한 합성오일이다. 오일의 물성은 Table. 1 과 같다. 액상실험의 조건으로서 압력조건은 60 bar, 온도는 0~15℃ 범위 내에서 5℃ 간격으로 실험을 수행하였다.

초임계상태를 구현하기 위한 기상실험에서는 시스템의 압력조건을 80 bar로 유지 시켰고, 온도는 70~90℃ 범위 내에서 10℃ 간격으로 실험을 수행하였다. 밀도계는 액상상태에서 측정되므로 10℃의 액상상태에서 CO₂/오일 혼합물의 밀도를 측정하였다. 또한 두 실험 모두 혼합된 오일의 농도는 0~5 wt% 범위에서 수행하였고, 시스템 전체의 온도분포를 1℃ 이내로 고르게 분포할 수 있도록 질량유량을 0.8~1.0 kg/min 으로 고정하고 실험을 수행하였다. 시스템 내부를 진공펌프로 진공상태로 만든 후 오일 주입기와 정밀저울을 사용하여 차압을 이용하여 시스템 내에 오일

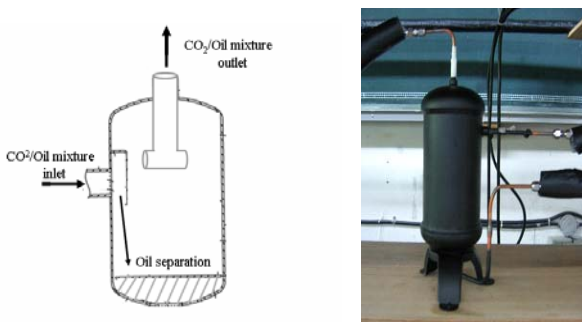


Fig. 2 Schematic diagram and photo of oil separator

Table. 1 Typical properties of oils

Items	Property
Type	PAG oil
Manufacturer	CPI engineering
Model	RPAG-100
Specific gravity at 15°C	1.007
Pour point (°C)	-40
Flash point (°C)	168
Viscosity at 40°C(cSt)	100

을 주입한다. 그리고 시스템 내부의 체적, 압력과 온도 조건을 고려하여 냉매가 액상 또는 기상으로 순환할 수 있는 조건에 따라 실험 장치에 적절한 양의 CO₂ 냉매를 충전한다. 기어펌프와 항온조, 가열시스템을 가동시키고 시스템 내부가 설정 온도로 균일하게 분포되었는지 확인한다. 시스템이 정상상태가 되었을 때 혼합물의 온도, 압력, 밀도를 측정한다.

한 경우의 실험이 끝나면 시스템 내에 있는 혼합물을 방출시키고 관을 분해하여 아세톤으로 세척하고 질소를 이용하여 시스템내의 잔류 오일을 고압으로 밀어내어 완전히 세척한 후 다음 실험을 수행하였다.

냉매/오일 혼합물의 온도변화와 농도변화에 따른 오일분리기의 오일 분리율(R)의 변화를 식(1)을 이용하여 계산하였다.

$$R_{s, \text{ oil return ratio}} = 1 - \frac{\rho_{\text{separator}} - \rho_o}{\rho_{\text{no-separator}} - \rho_o} \quad (1)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 액상에서 혼합물의 오일분리 특성

오일분리기를 탈착했을 경우에 CO₂/PAG 오일 혼합물의 여러 설정 온도에서 농도에 따른 밀도 변화를 Fig. 3 에 나타내었다. 오일분리기를 부착했을 경우의 설정온도 15°C에서 오일농도가 1 wt% 일 때 오일분리기를 거친 혼합물의 밀도는 0.8202 g/ml, 오일농도 3 wt% 일 때 0.8225

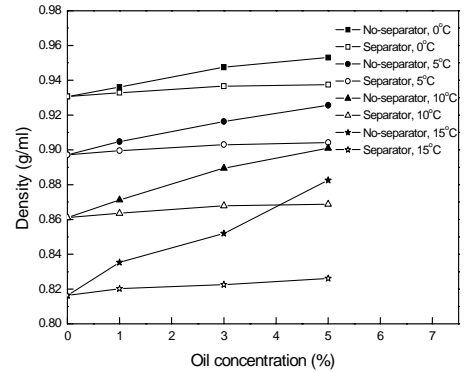


Fig. 3 Effect of oil concentration on mixture density for various mixture temperatures in liquid state.

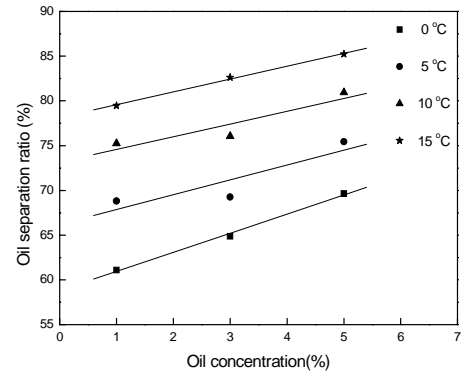


Fig. 4 Effect of oil concentration on oil separation ratio for various mixture temperatures in liquid state.

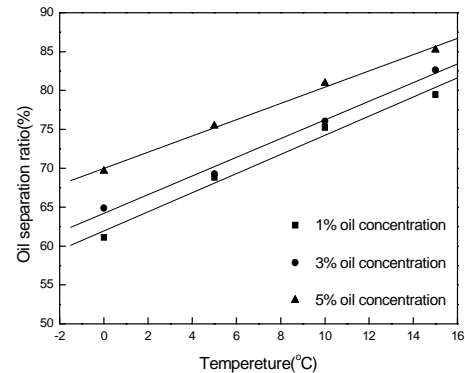


Fig. 5 Effect of mixture temperature on oil separation ratio for various oil concentration ratio in liquid state.

g/ml, 오일농도가 5 wt% 일 때의 혼합물의 밀도는 0.8261 g/ml 로 측정되었다. 모든 설정 온도에서 농도가 증가할수록 밀도가 증가함을 보였다.

혼합물의 농도 변화에 따른 오일분리율의 변화를 Fig. 4 에 나타내었다. 온도가 15°C에서 오일 농도가 1 wt% 일 때 오일분리기에서의 오일 분리율은 79%, 오일농도 3 wt%일 때 83%, 오일농도가 5 wt%일 때 오일 분리율은 85%를 보였다. 모든 온도범위에서 CO₂/PAG 오일 혼합물의 농도가 증가함에 따라 오일분리기에서 분리되는 오일의 분리율은 증가하였다. CO₂/PAG 오일 혼합물의 온도 변화에 따른 오일 분리율은 Fig. 5 에 나타내었다. 오일농도가 5 wt%이고 온도가 0°C 일 때 오일분리기의 오일 분리율은 70%, 5°C일 때 오일 분리율은 75%, 10°C일 때 81%, 15°C일 때 오일 분리율은 85%를 보였다. 모든 농도 범위에서 CO₂/PAG 오일 혼합물의 온도가 증가함에 따라 오일분리기의 오일 분리율은 증가하였다.

3.2 기상에서 혼합물의 오일분리 특성

오일분리기 탈착에 따른 CO₂/PAG 오일 혼합물의 여러 설정 온도에서 농도에 따른 밀도 변화를 Fig. 6 에 나타내었다. 오일분리기를 부착했을 경우의 설정온도 70°C에서 오일농도가 1 wt% 일 때 오일분리기를 거친 혼합물의 밀도는 0.8978 g/ml, 오일농도 3 wt% 일 때 0.9011 g/ml, 오일 농도가 5 wt% 일 때의 혼합물의 밀도는 0.9026 g/ml 로 측정되었다. 모든 설정 온도에서 농도가 증가할수록 밀도가 증가함을 보였다. 또한, 오일 분리기를 부착했을 경우의 밀도가 오일분리기를 부착하지 않았을 때의 밀도보다 작음을 알 수 있다.

혼합물의 농도 변화에 따른 오일분리율의 변화를 Fig. 7 에 나타내었다. 온도가 70°C에서 오일 농도가 1 wt% 일 때 오일분리기에서의 오일 분리율은 41%, 오일농도 3 wt%일 때 57%, 오일농도가 5 wt%일 때 오일 분리율은 64%를 보였다. 모든 온도범위에서 CO₂/PAG 오일 혼합물의 농도가 증가함에 따라 오일분리기 에서 분리되는 오일의 분리율은 증가하였다.

CO₂/PAG 오일 혼합물의 온도 변화에 따른 오일 분리율은 Fig. 8 에 나타내었다. 오일농도가 5 wt%이고 온도가 70°C일 때 오일분리기의 오일

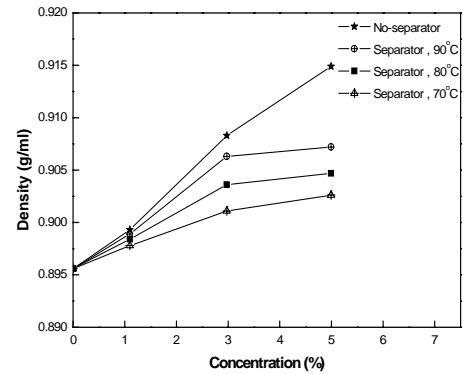


Fig. 6 Effect of oil concentration on oil mixture density for various mixture temperatures in gas state.

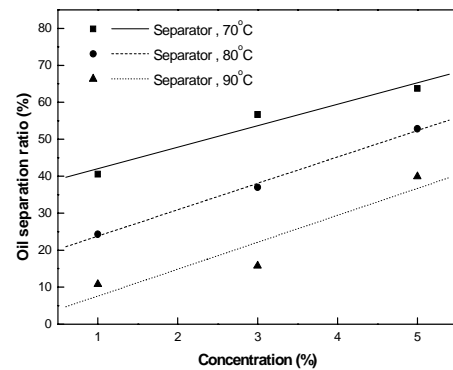


Fig. 7 Effect of oil concentration on oil separation ratio for various mixture temperatures in gas state.

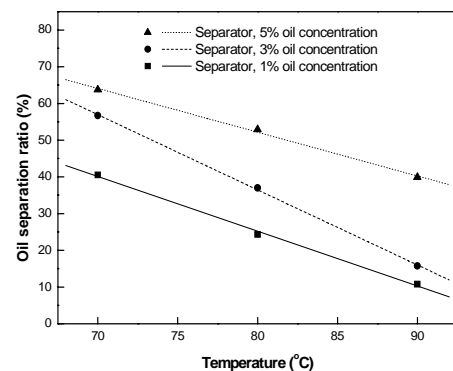


Fig. 8 Effect of mixture temperature on oil separation ratio for various oil concentration ratio in gas state

분리율은 64%, 80℃일 때 오일 분리율은 53%, 90℃일 때 40%를 보였다. 모든 농도범위에서 CO₂/PAG 오일 혼합물의 온도가 증가함에 따라 오일 분리기에서 분리되는 오일의 분리율은 감소하였다. 온도와 농도를 변화시키며 실험한 결과 두 경우 모두 오일분리기를 부착한 경우의 혼합물의 밀도가 그렇지 않은 경우의 밀도보다 작게 측정되었다. 모든 온도범위에서 CO₂/PAG 오일 혼합물의 농도가 증가함에 따라 오일분리기에서의 오일분리율은 증가하였다. 모든 농도범위에서 CO₂/오일 혼합물의 온도가 증가함에 따라 오일분리기에서의 오일 분리율은 감소하였다.

이로서 오일분리기를 부착하였을 때 그렇지 않은 경우보다 최대 64%의 오일분리가 이루어지고 있음을 알 수 있었다. PAG 오일은 CO₂/오일 혼합물의 농도가 증가할수록 오일분리기에서의 오일 분리율은 증가하고, CO₂/오일의 온도가 증가할수록 오일분리기에서의 오일 분리율은 감소하는 것으로 나타났다.

4. 결론

오일분리기의 탈부착에 따른 혼합물의 밀도 변화를 온도와 농도를 변화시키면서 밀도계를 이용하여 측정하였다. 오일분리기를 부착하였을 경우 밀도가 더 작게 측정되었다. 오일분리율에 관한 변화를 측정한 경우 오일분리기가 부착되었을 때 액상에서는 85%, 기상에서는 64%의 오일이 분리되는 것을 확인할 수 있었다.

또한 PAG오일은 액상과 기상실험 모두 혼합물의 농도가 증가함에 따라 오일분리율이 증가하는 것을 확인할 수 있었으나 혼합물의 온도가 증가할수록 액상실험에서는 오일분리율이 증가되는 경향을 보였고, 기상실험에서는 이와 반대로 혼합물의 온도가 증가할수록 오일분리율이 감소하는 경향을 보였다. 액상에서는 CO₂/PAG오일의 상용성에 따라 오일분리율이 결정된다고 판단할 수 있으나 기상에서는 혼합물의 온도가 높을수록 증발된 오일이 시스템 내부로 유입되어 분리율이 감소하는 것으로 판단할 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부 차세대 신기술 개발사업

중 “환경친화적 자연냉매인 CO₂를 적용한 고효율 냉난방 시스템 개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

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 at Purdue, pp. 17-24.
2. Schlager, L. M., Pate, M. B. and Bergles, A.E. 1990, oil quantity measurements in smooth and micro-fin tubes during evaporation and condensation of refrigerant-oil mixtures, ASHRAE Trans., Vol. 1, pp. 465-469
3. Reyes-Gavilan, J., Flak, G. T. and Tritcak, T. R. 1996, Lubricant Return Comparison of Naphthenic and Polyol Ester Oils in R-134a Household Refrigeration Applications, ASHRAE Trans., Vol. 102(2), pp. 180-185.
4. Sumida, Y., Nakayama, M., Suzuki, S. and Kawaguchi, S., 1998, Alkylbenzene for Split Air Conditioner with R-410A Part 2: Oil Return Characteristics, In Proc. 1998 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 471-476.
5. Kim. J. M., Lee. J. H. Yoon. Y. K. and Kim. H. D. 2007, A Study of the Performance Improvement of a Centrifugal Separator for Gas-Liquid Two-Phase Flow, The Korean Society of Mechanical Engineers Vol. 5 pp. 3352~3357
6. Andresen, P. A. K. Richard, A. J. S., 2000, Stability of model emulsions and determination of droplet size distributions in a gravity separator with different inlet characteristics, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 170 pp. 33-44.