

냉매 오염에 따른 냉동장치의 성능저하와 냉매의 재생을 통한 경제적 및 환경적 효과 분석

Performance Degradation by Refrigerant Contamination and Economic & Environmental Effect Analysis by Refrigerant Recycling

이준호* · 설성훈*†

Joon-Ho Lee* and Sung-Hoon Seol*†

(Received 08 November 2023, Revision received 28 November 2023, Accepted 28 November 2023)

초록 : 본 연구는 첫째로 냉동장치의 장기 사용에 따라 발생할 수 있는 냉매의 오염에 의한 장치의 성능변화를 실험적으로 분석하는 것과, 둘째로 오염된 냉매를 재생하여 사용함으로써 얻을 수 있는 경제적 그리고 환경적 효과에 대해 다루고자 한다. 냉매의 오염 요인으로는 불응축가스와 압축기 오일의 과다 주입으로 정하였다. 냉매는 GWP 수치가 높아 냉매 재생의 수요가 예상되는 HFC계열의 R-134a를 적용하였다. 불응축가스는 압축기 일량을 증가시키며 COP 감소를 야기하였고, 냉동기 오일의 과다 주입은 증발열량의 감소를 초래하였지만, 냉각 및 윤활 성능의 개선도 이루어져 압축기 토출가스 온도는 감소하는 경향을 보였다. 재생된 냉매가 기준을 제대로 충족하면 신품 냉매와 비교해 성능에 차이가 없음을 실험적으로 확인하였다. 냉매의 재생에 수반되는 비용의 회수 기간은 오염 정도에 따라 다르나 대체로 수개월 내로 분석되며, 온실가스 배출량은 신규냉매의 소비억제로 인해 1,256 kgCO₂eq/RT, 운전효율 저하 억제로 인해 연간 25.44 kgCO₂eq/RT의 효과를 보였다.

키워드 : 냉매오염, 재생 냉매, 불응축가스, 초과 오일, 경제성 및 환경성 분석

Abstract : This study aims, firstly, to experimentally analyze the performance variations of a refrigeration device based on contamination factors. Secondly, it also includes investigation of the economic and environmental effects of use of recycling contaminated refrigerants. Contamination factors for the refrigerant were determined as non-condensable gases and excessive injection of compressor oil. The refrigerant selected for this study is R-134a, belonging to the HFC series with anticipated demand for refrigerant recycling due to its high GWP value. Non-condensable gases increase compressor workload and lead to a decrease in COP. Excessive refrigeration oil resulted in a reduction in evaporation capacity, but improvements in cooling and lubrication performance led to a decrease in the discharge gas temperature of the compressor. It was experimentally confirmed that recycled refrigerant, if it meets the specified standards (KS I 3004), exhibits no performance differences compared to fresh refrigerant. The payback period for the cost associated with refrigerant regeneration varies depending on the degree of contamination but is generally

*† 설성훈(<https://orcid.org/0000-0001-9724-9707>) : 조교수,
부경대학교 냉동공조공학전공

E-mail : seolsh@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6184

*이준호(<https://orcid.org/0009-0008-0785-7150>) : 대학원생,
부경대학교 냉동공조공학전공 대학원

*† Sung-Hoon Seol(<https://orcid.org/0000-0001-9724-9707>) :
Assistant Professor, Department of Refrigeration and
Air-conditioning Engineering, Pukyong National University.

E-mail : seolsh@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6184

*Joon-Ho Lee(<https://orcid.org/0009-0008-0785-7150>) : Graduate
student, Department of Refrigeration and Air-conditioning
Engineering, Pukyong National University.

analyzed to occur within several months. The reduction in greenhouse gas emissions is observed at 1,256 kgCO₂eq/RT due to the restraint of new refrigerant consumption and an annual effect of 25.44 kgCO₂eq/RT due to the suppression of operational efficiency degradation.

Key Words : Refrigerant Contamination, Recycled Refrigerant, Non-condensable Gas, Excess Oil, Economic and Environmental Analysis

1. 서 론

시대적 배경에 따라 모든 부문에서의 에너지 절감이 가장 중요한 이슈 중 하나로 대두되고 있는 요즘, 건물의 냉동 및 냉장 그리고 공조 부문에 사용되는 냉동장치에서의 에너지 절감 또한 중요하게 다루어질 필요가 있다. 냉동설비를 장기간 운영 시, 장치 내의 냉매가 오염되어 효율 저하 및 장치의 수명 단축 그리고 에너지 소비 증가 등의 문제가 발생할 수 있다.

냉매의 오염은 크게 세 가지 종류로 구분할 수 있다.¹⁾ 첫째는 불응축가스(Non-condensable gas)인데, 냉동장치로 대기 중의 공기가 유입되거나 냉매 혹은 냉동기유의 분해에 따라 발생할 수 있다. 냉동장치로의 공기 유입은 초기 냉매 충전 혹은 유지보수 과정에서 진공 작업의 불량으로 인해 발생하거나, 누설 부위가 있으면 냉동기의 진공 운전에서 따라 혼입될 수 있다. 이보다 더 직접적인 불응축가스의 발생은 냉매 혹은 냉동기유의 산화 및 분해 과정에서 일어나며, 이는 사용되는 냉동기유의 종류 및 산화 정도 그리고 온도에 따라 발생량이 달라질 수 있다. Espindola 등²⁾의 연구에서도 불응축가스의 양이 증가함에 따라 압축기의 토출압력이 증가하며 성능에 부정적인 영향이 나타남을 보인 바 있다. Hu 등의 종래 연구³⁻⁵⁾에서 장치 내 불응축가스 잔존 정도를 Fault Intensity (FI) 즉, 장치 내 불응축가스의 mol 질량과 장치 내 압력이 대기압일 때의 mol 질량의 비율이라는 개념으로 설명하고 0~100% 사이의 FI 값을 적용하여 냉동기의 성능 저하를 보였다.

둘째는 수분의 유입이나, 냉동기 내로 액체상태인 수분이 단독으로 유입되는 경우는 흔치 않고 대체로 공기 중에 포함된 수분이 공기의 유입에

따라 함께 유입되는 경우를 생각할 수 있다. Moon 등⁶⁾은 냉매 내 수분의 혼입이 차량용 에어컨의 냉각성능에 미치는 영향에 관한 연구를 진행하였는데, 냉매 내 수분 혼입량이 증가함에 따라 동결에 의한 팽창밸브 막힘과 해소가 불규칙적으로 반복되는 결과를 나타내었다. 하지만 수액기를 적용하는 냉동시스템의 냉매 충전량은 그렇지 않은 경우 대비 상당히 많기 때문에 공기와 함께 침입한 수분의 상대적인 크기는 수액기의 유무에 따라 상당히 달라지게 된다. 또한 액상태 냉매의 밀도(R-134a 기준 1206.7 kg/m³@25℃)가 수분의 밀도보다 무거운 점을 감안하였을 때, 수액기를 적용한 냉동장치에서는 수분에 의한 효과가 미미할 것으로 짐작할 수 있다.

마지막으로 냉동기 오일에 의한 오염은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 오일의 산화 및 탄화에 의한 성능변화이다. 냉동기유의 경우 수분을 만나며 산화되거나 고온에 노출되어 탄화될 수가 있는데, 전술한 바와 같이 이 과정에서 불응축가스가 발생할 수 있으며 또한 오일의 윤활 성능이 저하되어 냉동장치에 부정적인 영향을 초래할 수 있다. 나머지는 오일의 초과 주입에 따른 성능의 저하이다. Zou 등⁷⁾은 오일의 양이 증가함에 따라 압력강하의 증가 및 일정량을 초과한 오일의 충전에 따라서는 성능계수 및 전열 성능 등이 감소하는 경향을 나타내었다. Sun⁸⁾ 등은 냉동기 오일의 초과 주입에 따라 증발열량이 감소하고, 증발 온도는 증가하며 COP는 감소하는 결과를 보인 바 있다. Nam⁹⁾ 등은 오일의 충전량에 따른 증발기 입출구 온도와 오일 회수율, 압축기 체적효율 등을 다양한 압축기 회전수에 대하여 비교하였다. 해당 연구에서는 실험을 통해 오일의 충전량이 과다할 경우 냉매의 질량유량이 감소하

지만, 반대로 너무 적은 충전량일 경우 체적효율의 감소가 발생한다고 나타낸 바 있다.

오염된 냉매의 무단 방출은 대기 환경오염의 원인이 되어 국내외에서 대기환경보전법 등에 의해 금지되고 있으므로 냉매의 오염으로 인한 냉동시스템의 성능 저하를 막기 위해서는 적절하게 회수 및 정제되어야 한다. 이러한 과정을 통해 소비에너지 절감효과 및 냉매의 신규 사용에 따른 환경오염을 예방하는 효과를 기대할 수 있다. HFC계 냉매로 인한 연간 온실가스 배출량은 연간 약 930만 톤 이산화탄소 환산톤(Carbon dioxide equivalent)으로 추정되며, 이는 2018년 국가 배출량 기준 약 1.3%에 해당한다. 국내 연간 냉매 소비량이 35,000톤에 달하지만, 회수·처리되는 냉매의 양은 1% 수준에 그치고 있어 중요성의 인식과 관련 제도의 마련이 필요한 상황이다.

따라서, 본 연구과제는 폐냉매의 효율적인 처리 및 활용의 중요성에 대해 강조하고자 냉매의 오염에 따른 냉동시스템의 성능변화에 대해 실험적인 분석을 제공하는 것을 목표로 하며, 여기서 말하는 냉매의 오염 요인은 총 두 가지로써 불응축가스의 유입 혹은 발생 그리고 기준량 이상의 냉동기유의 주입으로 한정한다. 또한 본 연구는 KS I 3004에 만족하는 재생 냉매와 신품 냉매의 성능 비교 실험을 통해 재생 냉매 사용의 타당성을 보이고자 하며, 이러한 실험들에 근거하여 재생 냉매 사용에 따른 경제적 그리고 환경적 영향을 분석하고자 한다.

2. 냉매 오염 실험장치 및 실험조건

2.1 실험장치의 구성

종래 연구의 상당수가 소형 장치를 대상으로 실험을 진행한 것에 반해, 본 연구에서는 R-134a 냉매를 사용하는 10 HP급의 스크롤 압축기(ZR125KC-TF7-522)를 사용하여 수액기를 포함한 중형급의 냉동장치에서의 성능 변화를 실험적으로 분석하였다. 냉각수의 온도 유지를 위한 항온시설의 용량과 증발기에서 열원의 용량을 줄이기 위해 증발기와 응축기에서 배출된 냉수 및 냉각

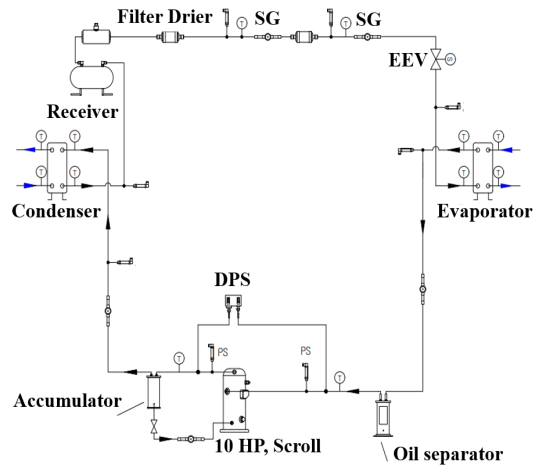


Fig. 1 Drawing of the experimental equipment



Fig. 2 Manufactured Experimental equipment

수를 물탱크에서 혼합하여 다시 장치로 공급하는 방식으로 실험을 진행하였으며, 응축 열량 대비 부족한 증발 열량의 부분은 항온 칠러를 사용하여 물탱크의 수온을 일정하게 유지하였다. 냉수와 냉각수의 유량을 측정하기 위해 유량계를 설치하고, 각 주요 지점에서 온도와 압력을 측정하기 위해 열전대와 압력 센서가 설치되었다. Fig. 1에서는 장치의 구조도를 보여 주며, Fig. 2에서는 완성된 실험장치의 모습을 나타낸다.

2.2 실험조건 설정

2.2.1 불응축가스 주입 실험조건

전술한 불응축가스의 발생 시나리오 중, 초기의 진공이 불충분하여 발생하는 불응축가스의 혼입

Table 1 Non-condensable gas according to FI

%Vol	M _{nc} [-]	FI [-]
0	0	0
2	6.47	0.13
4	12.94	0.26
6	19.42	0.39
8	25.89	0.52
10	32.36	0.66

※ System volume: 0.0416 m³, Charge amount: 17.0 kg

을 가정하였다. 즉, 대기로부터 장치로 불응축가스가 침입하므로 이론상 장치 내의 불응축가스의 압력은 최대 대기압(101.3 kPa) 수준까지 형성 가능하다. AHRI(미국냉동공조협회) Standard 700 및 KS I 3004(회수 재생 냉매) 표준에서는 허용 가능한 불응축 공기 혼입량을 1.5% Volume@25℃로 명시하고 있으므로, 본 연구에서는 상기의 근거와 동일한 단위로 불응축가스의 혼입에 따른 냉동기 성능실험 범위를 나타내었다. Table 1은 실험장치의 주요 치수 정보 및 gram 단위의 불응축가스 주입 질량(M_{nc}) 그리고 각 주입량 조건에서의 Fault intensity(FI) 정보를 나타낸다.

2.2.2 냉동기 오일 초과 주입 실험조건

오일은 주기적인 보충에 따라 초기에 비해 양이 증가하는 것으로 가정하고 실험을 진행하였다. Table 2에 나타난 비율(Ratio)은 냉매와 오일의 질량 합 중 오일의 질량의 비를 의미하며, 초과량(Excess)는 기준량 대비 초과 비율을 말한다.

Table 2 Amount of injected refrigeration oil

Amount [L]	Excess [%]	Ratio [%]
3.25	0	16
3.95	22	19
4.65	43	21
5.35	65	24
6.05	86	26
6.75	108	28

3. 실험결과 및 분석

3.1 불응축가스 주입 실험

불응축가스가 냉동장치에 미치는 영향을 분석하기 위해 앞서 언급한 Table 1에 나타난 양만큼의 질소 가스를 장치에 주입하여 장치운전을 실시하였다. Fig. 3은 불응축가스의 양에 따른 압축기 토출압력 및 온도의 변화를 나타낸다. 주입된 불응축가스의 양이 증가할 때, 시스템의 압축기 토출압력 및 온도가 유의미하게 상승하였다. 0%Vol 대비 10%Vol의 경우 토출압력이 6.09 bar에서 1.89 bar 상승하여 최종적으로 7.98 bar 수준으로 나타났고, 토출가스 온도는 53.05℃에서 8.14℃ 상승하여 최종적으로 61.19℃ 수준에 수렴하였다. 이는 불응축가스가 응축되지 않고 응축기에 잔류하며 응축기의 열교환 유효 면적이 감소하였고, 그에 따라 시스템의 고압 측이 상승한 것으로 분석된다.

Fig. 4는 불응축가스의 양에 따른 응축온도 및 증발온도의 변화를 나타낸다. 고압 측 압력의 상승에 따라 응축온도도 또한 약 8.22℃ 상승하였다. 반면 증발온도는 비교적 일정하였는데, 이는 불응축가스가 고압부에 체류하여 저온부의 전열을 방해하지는 않기 때문으로 해석된다.

Fig. 5는 불응축가스의 유입에 따른 증발 열량 및 응축 열량을 나타낸다. 시스템의 고압 측이 상승하면서 압축기의 토출 온도가 상승함에 따라 압축기 토출 엔탈피가 증가하여 응축 열량은 5.24%

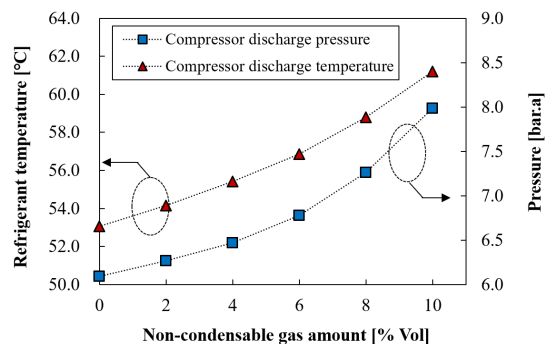


Fig. 3 Discharge pressure and temperature according to non-condensable gas amount

상승하였다. 증발 열량은 유의미한 차이가 발생하지 않았는데, 냉매의 질량 유량이 거의 일정한 것과 증발압력 및 과열도에 큰 변화가 없어 증발기 측 엔탈피 차에 큰 변화가 없었던 것이 원인으로 보인다.

Fig. 6은 불응축가스의 양에 따른 압축기 동력 및 COP의 변화를 나타낸다. 압축기 동력은 불응축가스의 양이 증가함에 따라 함께 증가하는 경향을 보였다. 시스템의 저압 측에서 큰 차이가 없었으며, 과열도를 일정하게 유지하여 압축기의 흡입 엔탈피가 일정하게 유지되는 상태에서 압축기의 토출 온도가 상승하여 토출 엔탈피가 상승하여 압축기 측 엔탈피 차가 커져 압축기 동력이 증가한 것으로 보이며, 이에 따라 압축기 동력이 최대 약 15.5% 증가함을 보였다. 또한 앞서 확인한 것과 같이 증발 열량은 큰 차이가 발생하지 않았으

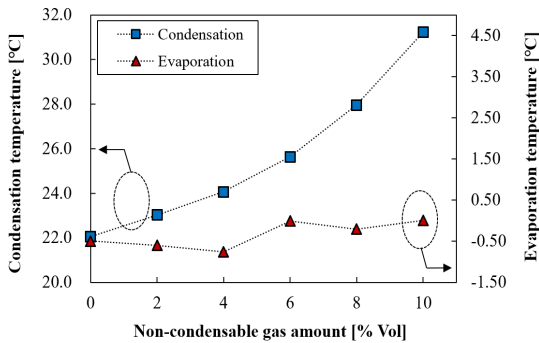


Fig. 4 Condensation and evaporation temperature according to non-condensable gas amount

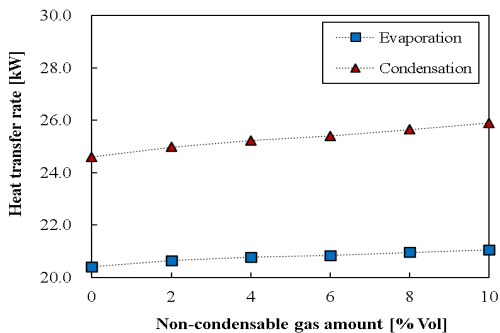


Fig. 5 Heat transfer rate of condensation and evaporation according to non-condensable gas amount

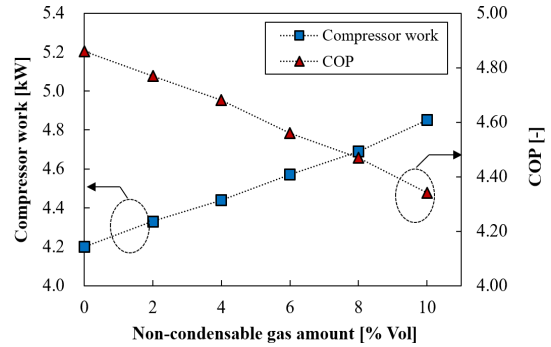


Fig. 6 Compressor work and COP according to non-condensable gas amount

며, 압축기 동력은 증가하였기 때문에 COP가 감소한 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 불응축가스의 유입은 성능계수의 감소를 초래하며 압축기의 소요 동력을 증대시키는 부정적 영향을 발생시킴을 확인하였으며, 정략적인 정도로는 장치 내 불응축가스의 분압이 대기압의 약 66% 수준인 경우에 약 15.5%의 동력 증가와 10.7% 수준의 COP 저하 야기를 확인하였다.

3.2 냉동기 오일 초과 주입 실험

Fig. 7은 오일의 양에 따른 압축기 토출압력 및 온도 변화를 나타낸다. 압축기 오일의 과다 주입에 따라 토출압력의 상승은 약 1.5% 내외로 무시할 수준이며, 원인을 따지자면 유분리기를 통과하여 응축기로 넘어가는 오일의 양의 증가에 따른 결과로 사료되나 전술한 바와 같이 그 정도가 미미하여 대체로 압축기 토출과 오일회수장치 사이의 순환으로 보여진다. 반면, 오일의 초과 주입에 따라 스크롤에서 냉매가스와 함께 토출되는 오일의 양이 증가하여 토출가스냉각 정도는 개선되어 압축기 토출온도가 약 5.45°C 가량 감소됨을 확인하였다. 이러한 경향은 종래의 연구에서도 동일하게 나타난 바 있다.¹⁰⁾

Fig. 8은 오일의 양에 따른 응축온도 및 과냉각도의 변화를 나타낸다. 응축기 출구에서의 냉매온도 저하는 앞선 압축기 토출가스 온도의 저하로 인한 연속적인 영향으로 보이며, 이로 인해 팽창 후의 액체-기체 상태 냉매의 건도가 변화하게 된

다. 과냉각도의 증가에 따른 플래시가스의 감소는 냉동효과[kJ/kg]의 증대로 이어질 수 있으나, 냉매 유량의 변화 여부에 따라 냉동능력[kW]은 상승할 수도 오히려 저하될 수도 있다.

Fig. 9는 오일의 양에 따른 냉매유량과 증발열량의 변화를 나타낸다. 냉동기유의 과주입에 따라 스크롤을 통해 냉매가스와 함께 흡입되는 오일의 양이 늘어났으며, 이는 Fig. 10에 나타난 오일 회수관에 설치된 사이트글라스를 통해 확인할 수 있다. 스크롤의 일부 체적을 냉동기유가 차지함에 따라 냉매가스의 흡입량은 오일의 초과 주입에 따라 상대적으로 감소하였을 것으로 분석되며, 이것의 영향과 과냉각도의 증대에 의해 발생하는 냉동효과의 영향을 모두 반영한 결과인 냉각 능력은 감소하는 결과를 보였다.

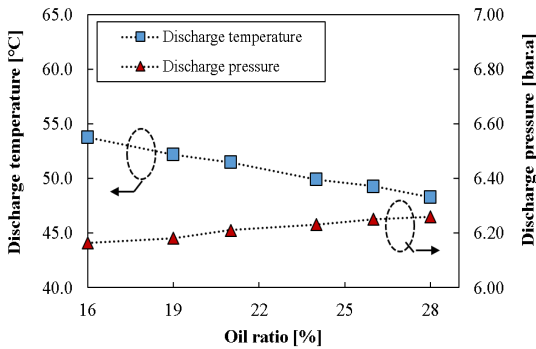


Fig. 7 Compressor discharge pressure and temperature according to oil ratio

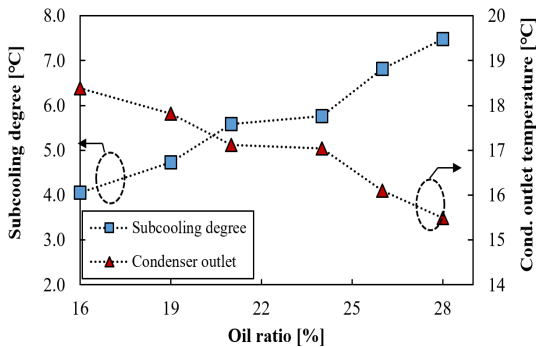


Fig. 8 Subcooling degree and condenser outlet temperature according to oil ratio

Fig. 11은 오일의 양에 따른 냉각 능력당 압축 일량 및 COP의 변화를 나타낸다. 앞선 결과로부터 증발온도는 변하지 않은 상태에서 압축기의 토출온도가 감소하여 토출 엔탈피가 감소하였기에 압축기 입출구의 엔탈피 차가 감소하여 압축

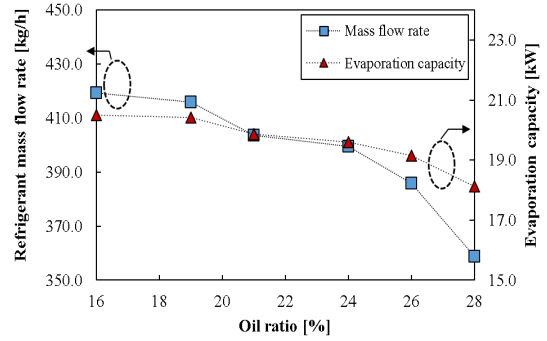


Fig. 9 Refrigerant mass flow rate and evaporation capacity according to oil ratio

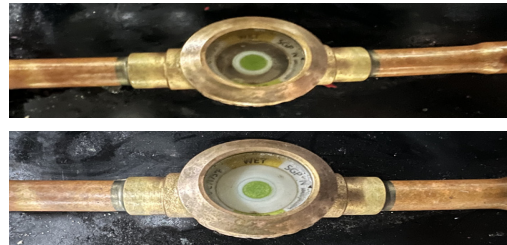


Fig. 10 Sight glass installed at the oil return side of compressor (top: at standard ratio, bottom: at over charging ratio)

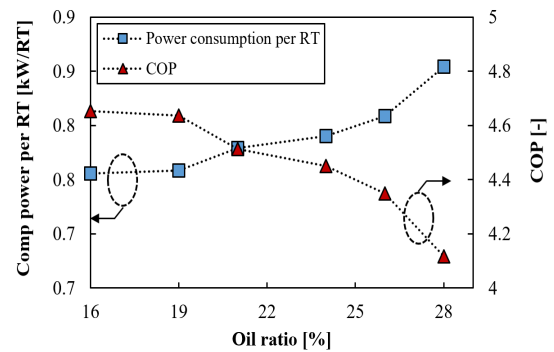


Fig. 11 Compressor power per RT and COP according to oil ratio

일량이 감소한 것으로 볼 수 있으나, 지금과 같이 압축기에 의해 토출되는 오일의 양이 대단히 많은 경우에는 냉매의 질량 유량과 압축기 입구 및 출구 측 냉매의 엔탈피 차이만으로 압축기 동력을 산출하는 것이 부정확하다. 토출가스의 온도 감소는 오일의 흡열량 증가가 원인이며, 오일의 흡열량 증가는 압축기 흡입측의 오일 온도 대비 압축기 토출 측의 오일 온도의 상승을 의미한다. 여기서, 온도의 상승은 현열 변화만을 포함한 오일의 경우 엔탈피의 상승으로 볼 수 있다. 즉 적정 오일 충전량인 경우 대비 오일량을 늘렸을 때 토출가스 온도가 감소하는 만큼의 열량은 오일이 흡열한다는 점을 감안하여야 한다. 실제로 Ramaraj¹⁰⁾ 등의 연구결과에서도 압축기의 Isentropic power를 계산 시, 오일의 질량 유량과 냉매의 질량유량을 모두 고려해야 한다고 밝혀진 바 있다. 따라서 본 연구에서는 냉매의 엔탈피 증가에 의한 소요 에너지와 오일의 엔탈피 증가에 소요되는 에너지의 합은 오일의 양과 관계없이 일정하다는 가정 수립하여 관련 결과를 산출하였다. 결과적으로 냉동능력당 압축일량은 증가하는 경향을 보였고, COP는 감소하는 결과를 나타냈다.

3.3 재생 냉매와 신품 냉매의 비교 실험

앞선 결과에서 냉동장치의 장기적인 운전에서 발생할 수 있는 불응축가스 및 초과 오일에 의한 시스템의 영향을 실험적으로 분석하였다. 이렇게 오염된 냉매는 적절하게 회수 및 정제 과정을 거치며 성능저하를 방지할 수 있다. 본 절에서는 회수 및 정제과정을 거친 재생 냉매를 실험장치에 충전하여 신품 냉매와의 성능 비교를 통해 재생 냉매의 사용에 따른 장치의 성능 회복 여부를 실험적으로 규명하고자 한다. Table 3은 KS I 3004에 근거한 재생 냉매와 신품 냉매의 주요 성분 비교를 정리하여 나타낸다.

Fig. 12에는 재생 냉매와 신품 냉매의 압축기 토출압력 및 온도를 비교한다. 실험 결과, 재생 냉매는 성능에 있어 신품 냉매와 큰 차이가 발생하지 않았다. 재생 과정에서 대부분의 오염 물질이

제거되어 장치에 영향을 주지 않을 수준이 된 것으로 보인다. 토출압력은 0.61 kPa, 토출 온도는 0.08℃의 차이가 발생하여 유의미한 차이가 없는 것으로 보인다.

Table 3 Comparison of various parameters of recycled and new refrigerant

Parameters	Recycled	New
Purity [%]	99.5	99.8
Non-condensable gas [%]	1.50	0.20
Moisture [ppm]	10.0	9.10
Oil [%]	0.01	0.01
Acidity [ppm]	-	-

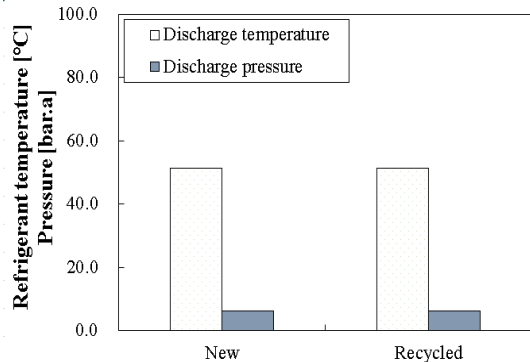


Fig. 12 Comparison of discharge temperature and pressure of new and recycled refrigerant

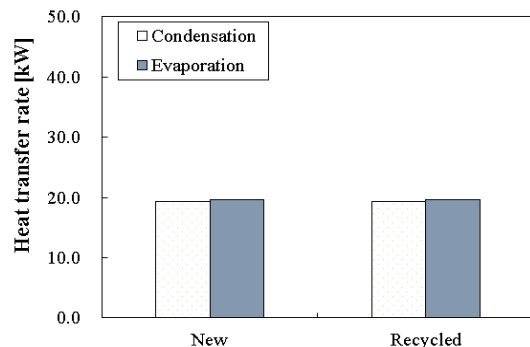


Fig. 13 Comparison of condensation and evaporation heat transfer rate of new and recycled refrigerant

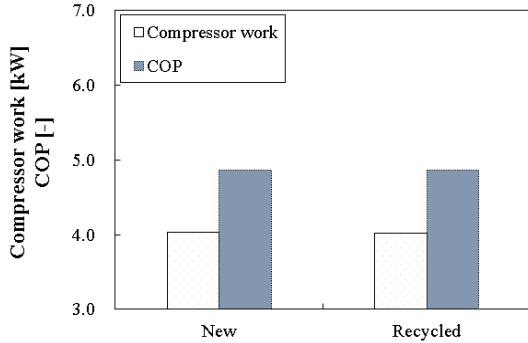


Fig. 14 Comparison of compressor work and COP of new and recycled refrigerant

Fig. 13 그리고 Fig. 14는 재생 냉매와 신품 냉매의 응축 열량 및 증발 열량 그리고 압축기 소요 동력과 성능계수의 비교를 나타낸다. 응축 열량에서는 0.13 kW, 증발 열량에서 0.03 kW의 차이가 발생하여 약 1% 미만으로 실험 오차 미만 수준의 차이를 보였다. 압축기 동력과 COP 또한 0.005 kW, 0.002의 차이를 각각 보이며, 신품 냉매와 재생 냉매를 사용하였을 때 성능의 차이가 발생하지 않음을 실험적으로 확인할 수 있었다.

3.4 재생 냉매 사용의 경제적 효과

앞선 실험을 통해 불응축가스에 의한 오염 정도가 0~10Vol%인 경우 및 오일의 과다 주입에 의한 오일 비율이 16~28%로 변화함에 따라 냉동기의 성능이 저하됨을 실험을 통해 확인하였다. 이에 본 절에서는 실험을 통해 얻은 냉동장치의 오염 발생에 따른 COP 변화 정보를 토대로 재생 냉매의 사용에 따른 경제성을 분석하고자 한다.

분석을 위한 가정에서, 냉동기는 1일 12시간 가동하며 365일 가동하는 것을 가정하였고, 1 kWh 당 전기요금은 130원으로 산정하였다(고압B, 선택Ⅱ, 중간부하, 계절은 평균값을 사용).

경제성 분석을 위해서는 냉동능력에 따른 냉매의 주입량이 필요한데, 이는 Fig. 15에 나타나 있는 L사 스크류 냉동기(만액 및 건식) 냉동기의 용량별 냉매충전량 정보에 근거하여 냉각능력 kW 당 0.25 kg 충전하는 것을 가정하였다.

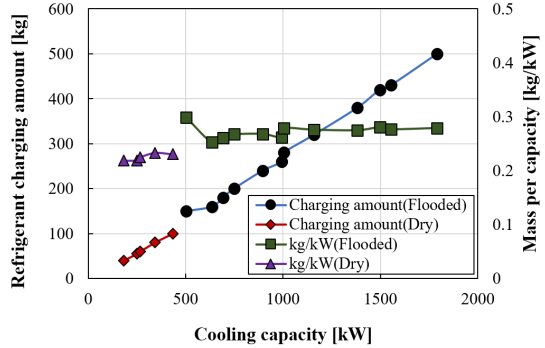


Fig. 15 Refrigerant charge amount per cooling capacity

Table 4 Assumptions regarding operation and costs for economic analysis

Parameters	Unit	Value
Daily operating hours	hour/day	12
Annual operating days	day/year	365
Electricity price	Won/kWh	130
Contaminated refrigerant withdrawing cost	Won/kg	3,500
Contaminated refrigerant purifying cost	Won/kg	2,500
Contaminated refrigerant re-injection cost	Won/kg	1,500
Refrigerant charging amount	kg/kW	0.25

한편, 오염된 냉매를 회수하여 정제하고 재주입하는 과정에서 냉매 질량당 비용(원/kg)이 투입되는데, 이는 Table 4에 정리되어 있다.

Fig. 16과 Fig. 17은 각각 불응축가스와 초과 오일에 의해 오염된 냉동장치의 재생 냉매 사용에 대한 경제성 분석 결과를 나타낸다. 즉 냉매의 회수 및 정제 그리고 재주입 비용이 발생하는 것을 투입비용으로, 그리고 냉동기의 오염에 따라 발생하는 냉동기 효율의 저하를 방지하여 운전에너지 절감을 도모하는 것을 회수비용으로 한다. 오염의 정도에 따라 다르나 전체적으로 수개월 수준에서 회수기간이 계산됨을 확인할 수 있다.

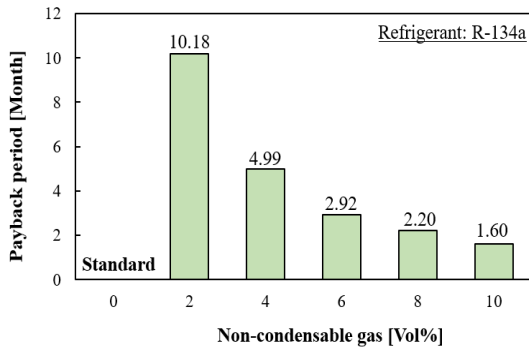


Fig. 16 Payback period by use of recycle refrigerant (by non-condensable gas)

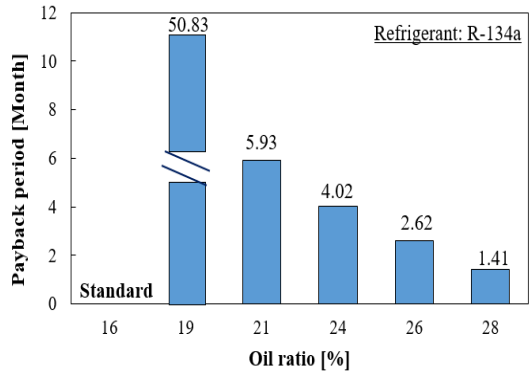


Fig. 17 Payback period by use of recycle refrigerant (by excess oil)

3.5 재생 냉매 사용의 환경적 효과

재생 냉매의 사용으로 인해 얻어지는 긍정적 요인은 크게 두 가지로서, 하나는 신규 냉매를 소비하지 않음으로 인해 발생하는 온실가스 배출 저감, 그리고 다른 하나는 오염 냉매 회수 및 정제 사용에 따라 소요동력 낭비를 줄여 얻어지는 온실가스 배출 저감으로 구분할 수 있다. 후자의 경우 연간 소비되는 에너지량에 비례하여 발생하므로 연간 배출 저감량 분석이 필요하며, 전자의 경우 냉매회수 및 정제 1회당 발생하는 저감량의 개념으로 다소 차이가 있다. 본 절에서는 실험을 통해 얻은 냉동장치의 오염 발생에 따른 COP 변화 정보를 토대로 재생 냉매의 사용에 따른 환경성

을 분석하였다. 참고로, 냉동기 가동시간 및 냉동 능력당 냉매충전량은 모두 앞선 경제성 분석과 동일하게 적용하였고, 전력 1 kWh당 발생하는 이산화탄소 환산량은 국내 발전 에너지원의 비율을 고려하여 0.129 kgCO₂eq/kWh로 계산하였다 (Table 5).

Fig. 17과 Fig. 18은 각각 불응축가스와 초과 오일에 의해 오염된 냉동장치의 재생 냉매 사용에 대한 환경성 분석 결과를 나타낸다. 여기서 나타난 연간 절감량은 냉동기의 오염에 따라 발생하는 냉동기 효율의 저하를 방지하여 운전에너지 절감에서 기인한 것이며, 냉매충전량과 GWP를 고려한 냉매 신규 소비의 억제로부터 발생하는 환경적 이익은 1,256 kgCO₂eq/RT로 계산된다.

Table 5 The carbon intensity of electricity generation and domestic proportion

Energy source	A: gCO ₂ eq /kWh	B: Ratio [%]	AB: gCO ₂ eq /kWh
Coal	1,001	41.9	419.42
Oil	840	0.5	4.2
Natural gas	469	18.2	85.35
Nuclear	16	37.8	6.05

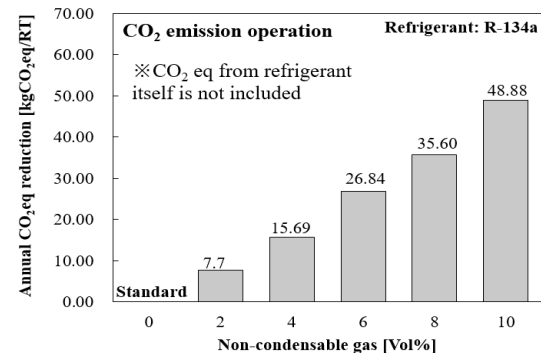


Fig. 18 Annual CO₂eq reduction by use of recycle refrigerant (contamination by non-condensable gas)

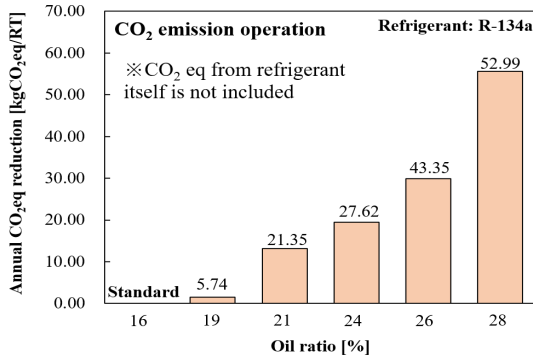


Fig. 19 Annual CO₂eq reduction by use of recycle refrigerant (contamination by excess oil)

4. 결 론

본 연구를 통해 확인한 주요 결과를 요약하면 아래와 같다.

1) 불응축가스는 응축기의 유효 열교환 면적을 감소시켜 시스템의 고압 측의 상승을 유발하여 압축기 토출압력 및 온도를 상승시켰다. 반면, 냉매의 질량 유량과 저압 측에는 큰 차이가 발생하지 않아 응축 열량과 압축기 동력이 증가하는 결과를 보였으며, 증발 열량에서는 차이가 없어 결과적으로 COP는 감소하는 경향을 보였다.

2) 냉동기 오일의 과다주입은 냉매의 유량을 감소시켜 증발열량의 감소를 초래하는 반면, 오일의 냉각 작용 촉진으로 토출가스 온도는 저하되는 것을 확인하였다. 하지만 압축기 소요 동력의 산출에서는 냉매의 유량뿐만 아니라 증가된 오일의 순환량을 함께 고려해야 한다는 점에서 이것이 압축기 소요동력의 감소를 의미한다고 보기는 무리가 있다.

3) KS I 3004 기준을 만족하는 재생 냉매는 실험결과에서 신품 냉매와 유의미한 차이가 발생하지 않아 신품 냉매와 성능의 차이가 없음을 확인하였다.

4) 재생 냉매 사용에 따른 경제성 및 환경성 분석에서 오염 정도에 다르나 회수기간은 대체로 수개월 내로 나타났으며, 온실가스 배출 감축량은 운전동력 절감으로 인해 연간 25.44 kgCO₂eq/RT, 그리고 신품 냉매 소비 억제로 인해 1,256kgCO₂eq/RT

로 나타났다.

후 기

연구는 2023년도 부산녹색환경지원센터의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 22-4-90-92, 폐냉매를 활용한 부산지역 온실가스 저감에 관한 연구).

Author contributions

J. H. Lee; Conceptualization, Investigation, Validation, Visualization, Writing-original draft. S. H. Seol; Data curation, Methodology, Project administration, Supervision, Writing-review & editing.

References

1. D. Skrzyniowska, 2014, "Presence of contaminations in refrigerant and their effect on refrigeration cycle", *Journal of Energy and Power Engineering*, 8, 226-231. (<https://doi.org/10.17265/1934-8975/2014.02.003>)
2. R. S. Espíndola, F. T. Knabben, C. Melo and C. J. Hermes, 2020, "Performance evaluation of household refrigerators running with R600a contaminated with non-condensable gases", *International Journal of Refrigeration*, 111, 86-93. (<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.11.032>)
3. Y. Hu, D. P. Yuill, A. Ebrahimifakhar and A. Rooholghodos, 2021, "An experimental study of the behavior of a high efficiency residential heat pump in cooling mode with common installation faults imposed", *Applied Thermal Engineering*, 184, 116116. (<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116116>)
4. Y. Hu and D. P. Yuill, 2021, "Effects of multiple simultaneous faults on characteristic fault detection features of a heat pump in cooling mode", *Energy and Buildings*, 251, 111355. (<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111355>)

5. Y. Hu and D. P. Yuill, 2022, "Impacts of common faults on an air conditioner with a microtube condenser and analysis of fault characteristic features", *Energy and Buildings*, 254, 111630.
(<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111630>)
6. S. W. Moon, Y. B. Min and T. S. Chung, 2011, "Effects of water amount in refrigerant on cooling performance of vehicle air conditioner", *Journal of Biosystems Engineering*, 36(5), 319-325.
(<https://doi.org/10.5307/JBE.2011.36.5.319>)
7. H. Zou, Z. Tang, R. Zhang, Z. Qi, G. Li and M. Tang, 2023, "Experimental research on the effect of oil charge ratio on the cooling performance of CO₂ air conditioning system for electric vehicles", *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 3, 100118.
(<https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100118>)
8. J. K. Sun, S. N. Chae and D. S. Jung, 2002, "Effects of refrigerant and oil charges on the performance of an refrigeration system", *The Society of Air-Conditioning and Refrigerant Engineers of Korea*, 14, 617-625.
9. D. L. Nam, P. Y. Lee, C. G. Lee, Y. K. Kwon and J. H. Lee, 2015, "Optimization of an oil charge amount on electric driven scroll compressor for eco-friendly vehicle", *International Journal of Refrigeration*, 57, 54-61.
(<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.05.009>)
10. S. Ramaraj, B. Yang, J. E. Braun, E. A. Groll and W. T. Horton, 2014, "Experimental analysis of oil flooded R410A scroll compressor", *International Journal of Refrigeration*, 46, 185-195.
(<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.08.006>)