

# 차량용 에어컨에 사용되는 냉매 및 냉동기유의 기술 동향

이대용 · 황승용<sup>†</sup>

한온시스템 연구본부 APIC, 책임연구원

## Development Trends of Refrigerant and Refrigerant Oil for Automotive Air-conditioner

Daewoong Lee and Seungyong Hwang<sup>†</sup>

Principle researcher, APIC, Research and Development Division, Hanon Systems

(Received June 20, 2019 ; Revised July 3, 2019 ; Accepted July 9, 2019)

**Abstract** – This study investigates alternative refrigerants and refrigerant oils as well as the tendency of protecting the global environment in view of automobile air-conditioning systems. Since decades, the R12 refrigerant is not used in automobile air-conditioners because of the ozone depletion potential (ODP) problem, and for the last 20 years, the ODP-free R134a refrigerant is leading the new automotive air-conditioning market. However, owing to its high global warming potential (GWP), the R134a refrigerant use in automobile air-conditioning system is also prohibited by law, and alternative refrigerants with a low GWP need to be proposed. Therefore, recently, the application of R1234yf, R152a, or other alternative refrigerants has started worldwide. By contrast, natural refrigerant R744 was introduced in the market several years ago by VDA (Verband Der Automobilindustrie), which is a German association in the automotive industry. This study also deals with refrigerant oils. For a long time, polyalkylene glycol (PAG) oil has been traditionally used with automobile air-conditioners, and polyolester (POE) oil is suitable for HEV, PHEV, and EV air-conditioning systems, where it is used by the electrically driven compressor owing to its excellent electrical insulation properties. Finally, PAG is an excellent lubricant for all the R134a, R152a, R1234yf, and R744 refrigerants, and has the advantage that it can be applied rapidly to alternative refrigerant air-conditioning systems.



© Korean Tribology Society 2019. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License(CC BY, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction of the work in any medium, provided the original authors and source are properly cited.

**Keywords** – air-conditioning system(에어컨 시스템), automobile(자동차), GWP(지구 온난화 지수), DP(오존층 파괴 지수), refrigerant(냉매), refrigerant oil(냉동 율활유)

### 1. 서 론

냉매는 냉동-공조기기 내를 순환하면서 상변화를 통하여 열을 이동시키는 작동유체로, 수 세기 전부터 식품을 오래 보관하고 싶은 인간의 갈망으로 냉동기기가 등장하면서부터 인류와 함께해 왔다. 1805년 미국 필라델피아에

서 발간된 “The Abortion of Young Steam Engineer's Guide”란 잡지에 미국의 올리버 에반스가 휘발성 유체인 에테르의 증발을 이용한 밀폐 냉동사이클을 처음으로 제안하였다. 이후 1850년대에 냉매로 사용되기 시작한 암모니아는 증기 압축식 냉동기에서 흡수식 냉동기의 발전을 가져왔으며, 1971년 데이비드 보일이 암모니아를 이용한 냉동기기에 대하여 특허를 받음으로써 비로소 완성되었다. 1875년경에 스위스의 라울 픽텟에 의해 냉매로서 처음 제안된 아황산가스는 암모니아를 사용하는 냉동기기

<sup>†</sup>Corresponding author: [shwang@hanonsystems.com](mailto:shwang@hanonsystems.com)  
Tel: +82-42-930-5929, Fax: +82-42-930-6992  
<http://orcid.org/0000-0002-1796-6544>

의 여러 가지 문제점을 해결하기 위하여 제안되었으며, 이후 다시 증기압축식 냉동사이클로 발전하게 된다. 한편, 탄소가스와 탄소 무수화합물로써 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>)가 1850년에 알렉산더 트위닝에 의해 증기 압축 시스템에 냉매로 제안된 이래, 1900년대까지 미국에서 냉동·공조기에 사용되었지만 그다지 널리 보급되지는 못하였다[1].

이처럼 초기의 냉동·공조기는 조잡하고, 열악하며 냉각제의 위험성까지 내포하고 있었으나, 1920년대 말 미국 듀폰 (Dupont)에서 기존의 아황산가스나 암모니아를 대체하는 CFC (Chloro Fluoro Carbon)가 등장하면서 끓는점이 낮고, 독성이 없으며, 열역학적 특성은 우수하고, 반응성이 낮은 안전하고 훌륭한 냉매가 등장한 것이다. 이 화학물질은 듀폰의 상표명인 프레온 (Freon)으로도 잘 알려져 있다[2].

하지만, 1974년 미국 캘리포니아 (California) 대학의 F. S. Rawland 등이 Nature지에 화학적으로 안정한 CFC 냉매가 대기로 방출되면 오존층 파괴와 인류 생태계에 문제를 일으킬 수 있다는 지적을 한 후 지구 환경 문제에 대한 관심이 높아졌고, 오존층 파괴가 거론되기 시작했다. 이후 1987년 Montreal 의정서가 채택되면서 높은 오존 파괴 지수 (ODP: Ozone Depletion Potential)를 가진 CFC계 냉매는 오존층 파괴의 주범으로 지목되면서 이를 대체하기 위한 냉매 연구가 지속되었다[3].

그 결과, CFC계 냉매와 거의 동등한 열적 안정성을 갖고 있는 HFC (Hydro Fluoro Carbon)계 냉매가 대체냉매 후보군으로 미국을 선두로 일본과 영국 등에서 연구되었다. R12 (CFC12)는 화학구조식이 CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>인 반면 R134a (HFC134a)는 CH<sub>2</sub>FCF<sub>3</sub> 지로서 오존층을 파괴하는 주범으로 알려진 염소 (Cl) 대신 수소 (H)가 결합되어 있기 때문에 생태학적인 면에서도 오존 파괴지수가 전혀 없다. 이에 따라 R134a를 냉매로 사용하는 자동차 에어컨 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되었다[4].

지구 환경의 변화와 함께 온실화 효과로 인하여 1997년 교토에서 개최된 지구 온난화 방지 국제회의에서 구체적으로 이산화탄소 저감 수치를 목표로 정하는 교토 의정서가 채택 되었다[5]. 따라서 HFC계 냉매와 같이 지구 온난화 지수 (GWP : Global Warming Potential)가 높은 냉매에 대한 우려의 목소리가 높아지는 가운데, 유럽연합의회는 2017년부터는 지구 온난화 지수가 150이상인 냉매를 사용하는 자동차의 판매 및 운행금지 법안을 통과시켰다[6]. 이러한 규제와 법규에 대한 산업계의 대응 방안은 냉매의 누출 및 냉매 충전량을 줄이고 효율을 향상시켜 이산화탄소 배출량을 감소시키는 한편, 근

본적인 해결책으로 현재의 R134a 냉매를 지구 온난화 지수가 낮은 냉매로 교체하는 것이었다.

낮은 지구 온난화 지수를 갖는 자동차용 대체냉매로서 하니웰 ( Honeywell)에서 개발한 Fluid H 가 연구되었고, 듀폰과 함께 R1234yf (HFO1234yf) 로 발전하면서 GWP를 현격히 낮추면서, 기존의 R134a 에어컨 시스템과 거의 동등한 성능을 확보할 수 있었다[7].

한편 이러한 냉매의 변천은 압축기 부품 및 냉동기유에도 많은 변화를 가져왔다.

CFC계열과 HCFC계열의 냉매를 사용할 때에는 에어컨 시스템 윤활유로 광유를 주로 사용하였다. 또한 압축기 구동부품에서도 R12냉매의 경우 염소 성분이 자기 윤활성을 갖고 있어 구동부품의 소재를 가공 후 그대로 사용해도 되었지만, 광유는 HFC계열인 R134a 냉매와는 상용성이 부족하여 에어컨 시스템 내 순환이 원활하지 않아 압축기의 손상을 초래하여 R134a 냉매를 사용하는 에어컨 시스템 압축기의 구동 부품에 주석 도금이나 테프론 코팅을 하는 등 내구성 확보를 추구하였고, 냉매의 기밀을 위하여 사용하는 NBR(Nitrile Butadiene Rubber) 재질의 고무와도 적합하지 않아 결국 R134a 냉매에 적합한 새로운 냉동기 윤활유를 검토하게 되었으며, 그 결과 PAG가 개발되었다.

본 논문에서는 지구 환경과 맞물려 자동차용 에어컨 시스템에서 검토되고 있는 대체 냉매들과 냉동기 윤활

**Table1. Thermodynamic properties of R12 and R134a refrigerants[28, 29]**

Refrigerant	R12	R134a
Chemical formula	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>
Molecular weight	120.9	102.3
Freezing point (°C)	-158	-101
Normal point (°C)	-29.8	-26.5
Critical temperature (°C)	112.1	101.1
Critical pressure (kPa)	412	4067
Critical density (kg/m <sup>3</sup> )	558.1	512.2
Liquid density (kg/cm <sup>3</sup> )	1304.7	1201.1
Vapor pressure at 10°C (kPa)	423.5	414.6
Specific heat of liquid at 26.7°C (kJ/kg·K)	0.871	1.431
Specific heat of vapor at 1 atm (kJ/kg·K)	0.590	0.854
Heat of vaporization at NBP (kJ/kg)	167.2	217.8
Flammability limits (Vol.%)	None	None
Ozone depletion potential	1	0

유 (Refrigerant oil)의 개발 동향과 각 에어컨 시스템들의 특징과 장단점에 대하여 살펴보고, 극복과제에 대하여 소개하고자 한다.

## 2. 자동차용 에어컨 시스템의 냉매

### 2-1. R134a 냉매

1920년대 말 듀폰에서 개발한 R12 냉매는 당시로는 획기적인 발명품이었지만, 높은 ODP로 인하여 시장에서 사라지고 그 자리를 HFC계인 R134a가 대체하게 되었다. Table 1에 R12와 R134a 냉매의 열역학적 특성에 대하여 비교를 하였다. R134a가 포화증기의 비체적이 크므로 압축기가 커져야 하며, 증발잠열과 비열이 R12보다는 약 30% 정도 크기 때문에 시스템의 열교환 성능 및 효율은 우수할 것으로 기대된다[8].

실제로 냉매의 변경에 따른 자동차 부품 산업의 변화를 살펴보면, 응축기의 경우 서펜틴 형태 (Serpentine type)에서 PF (Parallel flow type)로 변경되면서 열교환 능력이 약 30%정도 향상되었고, 냉매 충전량이 줄어들게 되었다. 또한 증발기도 이때까지만 해도 제작형태에 따라 서펜틴 형태와 적층형 (Laminated plate type)이 같이 사용되었으나, R134a 냉매의 등장 이후 적층형만 사용되게 된다. 이밖에 에어컨 시스템내의 수분을 제거하기 위한 건조제가 변경되었고, 냉동기 윤활유의 변경에 따라 시스템 밀폐를 위한 O-ring의 재질도 변경되었다[9].

Kang과 Kim은 윤활유가 혼합된 R134a 냉매에 대하여 유량과 열유속 및 건도를 변경하면서 냉방성능을 실험한 결과, 윤활유가 전체 순환 냉매량의 3~4%까지는 증발기 성능이 증가하지만, 그 이상에서는 냉방 성능이 감소하였다고 하였다[10].

R134a 냉매를 사용하는 자동차 에어컨 시스템은 2000년 초반까지 큰 문제없이 사용되었으나, 지구 온난화에 영향을 미치는 GWP 냉매의 사용금지 및 HFC 총 사용량 감축 (Europe F-Gas), 몬트리올 의정서, 미국의 SNAP개정, 키크리 의정서 등으로 새로운 GWP가 낮은 새로운 냉매가 필요하게 되었다[11].

낮은 GWP 냉매로는 여러 후보군들이 있으나, HFO계의 혼합 냉매와, 친환경 냉매, 그리고 약 가연성을 (A2L) 가진 후보 냉매들이 언급되고 있다[12,13].

### 2-2. R152a 냉매

2004년 유럽 연합의회에서 자동차용 에어컨 시스템에 사용하는 냉매에 대하여 GWP가 150 이상인 냉매를 사용하는 차량에 대하여는 2017년부터는 생산하지 못하도

록 법적으로 금지를 하였다. 따라서 선진 각국에서 낮은 지구 온난화 지수를 갖는 대체 냉매시장을 선점하기 위한 연구와 투자가 시작되었고 그중의 하나가 R134a와 유사한 열화학적 특성을 가진 R152a가 GM을 중심으로 검토되기 시작하였다[14].

R152a와 R134a 냉매의 화학적 특성을 살펴보면 임계점이 비슷하고, 비등점과 응고점 등 열역학적 특성이 R134a와 유사하기 때문에 기존의 R134a 에어컨 시스템 부품들과 냉동기 윤활유를 변경 없이 그대로 사용할 수 있는 장점이 있다.

R152a의 분자 질량은 R134a의 대략 60% 수준이므로, 동일한 에어컨 시스템에서 충전되는 냉매의 양은 R152a가 작게 충전될 것이다. 또한 R152a는 R134a보다 포화 밀도가 작기 때문에 압축기에서의 토출압력이 기존의 R134a보다 낮을 것이고, 따라서 압축비도 낮아질 것이다. R152a 냉매 시스템은 기존 에어컨 시스템의 구성 부품을 변경 없이 그대로 사용할 수 있고, 시스템 내에서의 질량 유량은 작지만, 동일한 압력에서 엔탈피가 크기 때문에 우수한 냉방성능과 성능계수를 얻을 수 있고 냉매의 충전량이 기존 R134a 대비 약 20%정도 저감할 수 있다[15].

R152a는 우수한 압축비와 냉동기 윤활유와의 상용성 등의 장점도 있지만, 비공비 혼합냉매이므로, 배관과 연결부를 통한 누설에 주의하여야 하며, 정비소 등에서 에어컨 시스템에 냉매를 충전할 때 보관 냉매의 혼합조성비가 일정하게 유지될 수 있도록 관리가 필요하다.

이와 유사한 냉매로 저온용 대체냉매인 R452A, R448A가 있으나, 비공비 혼합냉매의 특성상 이상영역(Two phase)에서 온도구배가 발생하므로 열교환기 설계시 주의가 필요하고 팽창밸브의 개도 분석을 통한 유량조절 제어 기술이 중요하다[16].

무엇보다 HFC계 냉매는 가연성의 위험을 가지고 있으므로 차량에서의 사용에 있어서는 정비 등의 취급 시나, 사고 시에 누설에 대한 대책을 고려하여야 한다.

### 2-3. R1234yf 냉매

2006년 3월 하니웰은 일본에서 개최된 심포지엄에서 H 냉매를 소개하였고, 같은 해 6월 미국 피닉스에서 개최된 대체 냉매 심포지엄에서는 H 냉매에 대한 개선 평가 결과를 발표하면서 자동차업계의 관심을 모으기 시작했다. 이어 하니웰은 DP-1을 개발한 듀폰과 공동으로 양사가 개발한 H 냉매와 DP-1 냉매의 잠재적 문제점인 독성과 가연성을 보완한 새로운 대체 냉매인 R1234yf를 개발하였다. 개발한 R1234yf 대체 냉매는 오존층 파괴

**Table 2. Thermodynamic properties alternative refrigerants [24]**

Refrigerant	R152a	R1234yf	R744
Chemical formula	CF <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub>	CF <sub>3</sub> CF-CH <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
ODP (Ozon Depletion Potential)	0	0	0
GWP (Global Warming Potential)	140	4	1
Flammability	A2	A2	A1
Atmosphere life time (Year)	1.5	0.03	None

성이 없고, 지구 온난화 지수가 낮아 안정된 물질로 분류되고 있으며, 기존 R134a를 사용하는 에어컨 시스템 부품들을 약간만 변경하여 사용이 가능하기 때문에 기존 인프라의 활용 등 여러 가지 장점을 가지고 있다[17].

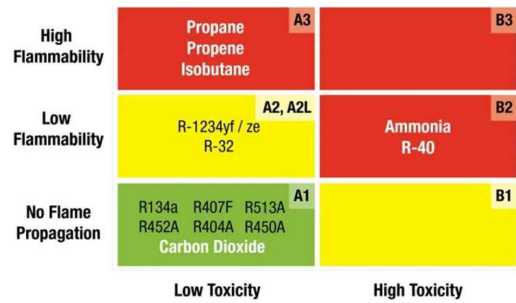
R1234yf 냉매는 Table 2의 대체 냉매들의 열역학적 특성 비교에서 보듯이 GWP가 4이고, ODP가 0, 독성은 없고 대기 중에 분해되는 속도가 기존의 R134a가 14년인 것에 비하면 빠른 시간에 분해되어 없어진다는 점이다.

R1234yf는 R134a 대비 증발열이 19% 감소함에 따라 R134a 대비 약 4.4% 정도 냉방 성능이 열세이다. 따라서 증발 잠열을 증가시키기 위하여 응축기를 통과한 액 냉매의 과냉도 (Sub-cool)를 크게 할 수 있는 응축기에 대한 기술이 필요하다. 또한 R134a 보다 가스 밀도가 18% 증대되며, 이는 압축기의 효율을 향상시킬 수도 있으나, R1234yf의 포화압력이 증기부에서는 낮고, 압축기 입구에서의 건도가 높기 때문에 과열도 (Superheat)가 커질 수 있어 유량 감소와 압축기의 냉매 토출온도가 상승하여 내구에 불리하게 작용할 수 있다. 따라서 팽창밸브를 조절하여 과열도를 줄여야 하며, 고 효율 증발기 개발이 필요하다[18].

R1234yf 냉매 시스템의 경우 흡입 (Suction) 배관과 증발기에서의 압력손실을 개선하면 R134a 에어컨 시스템과 유사한 성능 확보가 가능하다. 실제로 흡입배관에서의 압력손실 개선과 팽창밸브의 변경만으로 R134a 에어컨 시스템과 -5% 이내의 성능 확보가 가능하였다[19].

하지만, R1234yf 냉매는 가연성 냉매로 ASHRAE (American Society of Refrigeration and Air-conditioning Engineers, 미국 공조냉동공학회) 분류에 따르면, 미가연성 냉매 (A2L)에 해당된다[20].

Fig. 1은 ASHRAE에서 분류하는 냉매의 독성과 화염성 기준이다. 독성은 Class A, Class B로 나뉘지며, 인화성에 따라 1, 2, 3의 3가지 그룹으로 구분된다. 여기서



**Fig. 1. ASHRAE classification of toxicity and flammability for refrigerant.[20]**

Class 2L 은 냉매의 연소속도가 10cm/s 이하로 자동차용 냉매로 사용되는 R1234yf를 수용하기 위하여 나중에 추가되었다. GWP 방지를 위하여 HFCs 퇴출 시나리오에 따르면, 국제적으로 A2L 냉매는 허용을 하고 있다[21].

Monforte와 Caretto는 R1234yf 냉매의 화염성에 대하여 다양한 방법으로 검증을 진행하여 R134a와 차이가 없음을 밝혔다. 단지 디젤 엔진에서 온도가 높은 특정 부분에서의 누설 또는 충돌에 대한 위험을 제외하면 큰 문제는 없었다[22].

Seybold 등은 SAE CRP1234 의 일환으로 R1234yf 냉매의 화염성을 평가하기 위하여 PAG 오일과 혼합하여 여러 조건에서 발화 시험을 한 결과 차량용 냉매로 사용이 적합하다고 결론을 내렸다[23].

**2-4. R744 냉매**

R744는 이미 1800년대 후반부터 선박용 냉동고에 사용되어 왔으나, 프레온 냉매의 등장으로 자취를 감추었다. 하지만, 지구 온난화 지수가 높은 냉매의 사용금지에 대한 대응으로 일부 R152a 또는 R1234yf 와 같은 새로운 냉매가 출현하였으나, 화재로부터의 안전성, 생산량과 가격, 독성에 대한 검증 등의 문제가 해결되지 않자, 자연 친화적인 R744 에어컨 시스템에 대한 연구가 일부 유럽의 자동차 제조사들과 부품메이커들에 의하여 진행되었다. Table 2에 나타난 것처럼 R744 냉매는 GWP가 1이고, 무독성, 비가연성을 가진, 환경문제로부터 자유로운 친환경적인 냉매로 오래전부터 관심을 가지고 있으며, 독일을 중심으로 상당한 기술수준에 도달한 것으로 알려져 있다[24].

Yoo 등은 유럽 Directive 2006/40/EC 법규 대응을 위하여 R134a, R1234yf, R744 냉매를 차량에 장착하고 냉방 시험을 한 결과, 주행시 성능은 R744가 가장 우수하였고, R134a와 R1234yf는 비슷하게 나타났다. 이어

북미에서 시험한 도로 평가결과에서도 R744는 R134a 대비 약 22~28% 우수하였으나, 높은 작동압으로 인하여 압축기 투입일은 다소 불리하게 나타났다[25].

고온에서 압축기 투입일이 R744 에어컨 시스템에 미치는 영향을 살펴보기 위한 Lee 등의 실험 결과에 따르면, R134a 대비 R744는 97% 수준의 냉방능력과 약 70% 수준의 시스템 효율을 가지며, 이는 내부 열교환기, 팽창밸브의 변경으로 극복이 가능하다고 하였다[26].

R744 냉매의 열역학적 특성은 열전달 성능이 우수하고, 비체적이 작아 냉매의 순환량이 증가하는 장점은 있지만, 다른 에어컨 시스템에 비해 상대적으로 높은 압력인 초임계 사이클로 작동되기 때문에 구성 부품의 내압성 확보가 중요하고 신규로 개발해야 할 부품들의 투자 비용이 커져 자동차 메이커들로부터 큰 호응은 얻지 못하고 있다[27].

하지만 R744는 히트펌프 사이클로의 전환이 용이하기 때문에 전기자동차와 같은 친환경차량에 적용할 경우 냉방과 난방을 하나의 시스템의 해결할 수 있는 장점 때문에 자동차 에어컨용 냉매로의 적용을 위한 연구는 지속될 것으로 보인다.

2-5. 그 밖에 검토되는 대체 냉매

기존 R134a를 대체하는 냉매는 현재 R1234yf가 약간의 유리한 고지를 점령하고 있지만, 가연성과 장기독성 측면에서 자유롭지 못하며 또한 생산 단가가 비싸 완전한 대체 냉매로의 전환은 어려움이 있다. 따라서 이를 보완하여 새로운 냉매로 시장에 진입하려는 시도들이 많다.

일례로 영국의 멕시켄 (Mexichem)은 이러한 R1234yf 냉매의 단점을 보완하여 새롭게 개발한 AC-6(R445a)라는 냉매를 발표하였다. AC-6는 R1234Ze (85%), R134a (9%), CO<sub>2</sub> (6%)의 혼합 냉매로, CO<sub>2</sub>는 가연성을 낮추기 보다는 이산화탄소의 우수한 잠열을 이용하여 효율을 높이기 위한 목적으로 추가되었다. Fig. 2는 자동차 조립 라인에서 AC-6 냉매를 충전할때에 대한 개략도이다. Fig. 3은 시중에서 정비시에 AC-6 냉매를 충전할 수 있

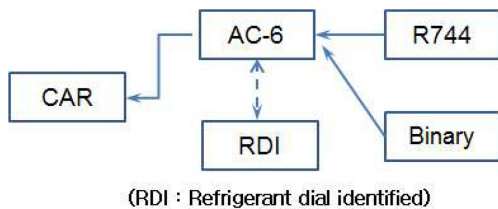


Fig. 2. Schematic of AC-6 refrigerant charge systems for vehicle assembly line (Source, Mexichem).

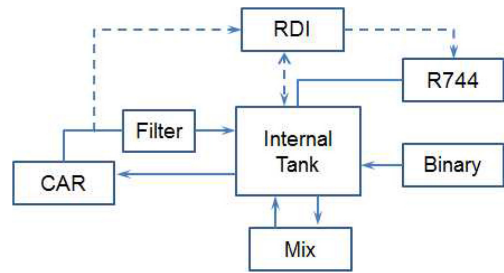


Fig. 3. Schematic of AC-6 refrigerant charge system for warranty market (Source, Mexichem).

는 전용 충전기의 구성에 대하여 나타내었다. Fig. 2와 Fig. 3에서 보듯이 AC-6 냉매는 전용주입기를 사용해야 하는 어려움이 있고 혼합 냉매이다 보니, 조성이 서로 다른 냉매를 어떻게 관리할 것인가에 대한 고민이 필요하다. 예를 들면, 혼합 기체중 이산화탄소는 타 혼합기체들 보다 가볍기 때문에 충전탱크나 차량에서 장시간 미 가동시에는 이산화탄소가 위로 몰려 있을 수 있고, 이때 압축기를 가동하면 먼저 압축 할 수 있으므로 각 부품의 고압에 대한 대책수립도 필요할 것으로 생각된다.

그밖에 대체 냉매중 탄화수소계 냉매는 가연성 문제로 유럽 등에서 극히 소량이 요구되는 가정용 냉장고에만 허용하고 있으며, 암모니아는 독성문제로 산업용 냉동기와 같은 환경적인 환경에서만 적용이 되고 있다[28].

우리나라도 세계 자동차 생산 5위의 위치를 생각하면, 대체 냉매를 사용하는 에어컨 시스템과 부품 개발에 대하여 관심과 집중이 필요하다.

3. 자동차용 에어컨 시스템의 냉동기 윤활유

3-1. 냉동기 윤활유의 특징

일반적으로 냉동기 윤활유는 냉동·공조기기 부품에서 압축기의 구동부에 적절한 윤활과 마찰에 인한 온도 상승을 방지하는 역할을 한다. 하지만, 압축기는 작동유체인 냉매를 흡입하여 압축하기 때문에 냉동기 윤활유는 냉매와 잘 혼합되어 시스템 내를 순환하여야 한다. 이때 냉동기 윤활유는 냉매와는 달리 상변화를 하지 않기 때문에 압축비의 상승을 초래하고, 압축기를 떠난 윤활유의 양보다 회수되는 냉동기유의 양이 적을 경우 압축기 내에 냉동기유의 양이 줄어들게 되어 윤활에 문제가 발생하고, 나아가 압축기의 손상을 초래할 수 있다. 또한 윤활유가 증발기나 응축기에 유입되면 열교환기의 열전달 성능을 떨어뜨리고, 냉방성능의 저하를 가져 올 뿐만 아니라, 팽창밸브를 지나는 냉동기 윤활유에 의하여 팽

창손실의 증가도 초래한다[29].

냉동기 윤활유는 가급적이면 압축기 내에 많이 머무를 수 있도록 유분리기를 설치하거나, 에어컨 시스템을 내를 최소한으로 순환 하도록 하는 것이 중요하고, 비중, 점도, 인화점, 유동점, 항 흡습성, 절연성 등에 대한 검토와 함께 압축기의 토출경, 냉동기 윤활유 순환홀의 크기, 윤활유의 주입량 등 다양하고 많은 연구들이 진행되어 왔다[30].

이의 냉동기 윤활유는 냉매에 적절히 용해 되어야 하며, 냉매와 윤활유는 전체 운전온도 및 압력이 서로 상용성을 가져야 한다. 즉, 윤활과 순환이라는 두 가지 조건을 만족하는 점성을 가져야 하며 압축기의 특성 및 윤활유가 노출되는 환경을 고려해야 한다.

**3-2. 냉동기 윤활유의 평가 항목**

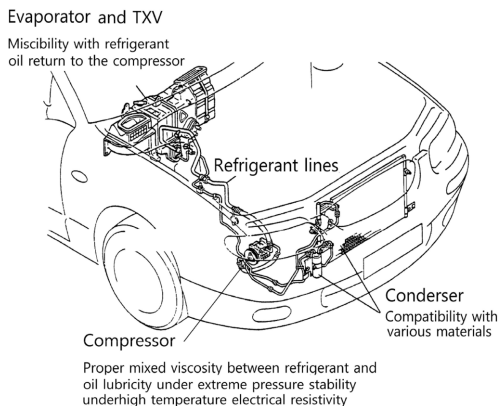
냉동기 윤활유가 갖추어야 할 기능을 만족하기 위하여 유성제, 산화방지제, 극압제 등 다양한 첨가제들을 넣어 제조를 하고, 이렇게 개발된 냉동기 윤활유는 요구되는 기능을 만족하는지 시험을 통하여 검증하게 된다.

Fig. 4는 자동차 에어컨 시스템에서 냉동기 윤활유의 특성에 대하여 나타내었다. 시스템 내를 순환하는 윤활유는 압축기에서 가스 상태의 냉매가 압축될 때 고온과 고압에도 손상 없이 윤활과 냉각의 성능을 가지고 있어야 한다.

아래에 기본적으로 윤활유가 가져야 할 특성에 대하여 기술 하였다.

**3-2-1. 일반 특성**

- 동점도, 점도지수, 색, 산가, 밀도, 인화점, 발화점, 유동점, 소포성
- 표면장력, 굴절률



**Fig. 4. Vehicle air-conditioning system and characteristics of refrigerant oil.**

- 절연특성(절연과괴전압, 체적저항률)

**3-2-2. 냉매 상용성**

- 층 분리온도, 냉매 용해도, 냉매 용해점도

**3-2-3. 안정성 (Autoclave시험, Shield tube시험)**

- 열, 화학 안정성, 산화 안정성, 가수분해 안정성

**3-2-4. 재료 적합성**

- 유기재료 적합성, 금속재료 적합성, 각종 금속가공유제와의 적합성

**3-2-5. 윤활성**

- Falex 시험, 마찰 마모 시험

상기 특성들은 냉동기유 개발시 반드시 평가하는 항목이며 각 자동차 회사에서는 자사 규격으로 만들어 관리하고 있다.

**3-3. 차량용 냉동기 윤활유 적용 현황**

자동차 에어컨용 윤활유 역시 R12 냉매를 사용할 때에는 냉동기유로 광유를 주로 사용하였다. 하지만 전술한 바와 같이 광유는 HFC계열인 R134a 냉매와는 상용성이 부족하여 에어컨 시스템 내 순환이 원활하지 않아 압축기의 손상을 가져왔고, 유기재료와의 적합성이 좋지 않아 R134a 냉매에 적합한 새로운 냉동기 윤활유인 PAG가 개발되었다.

PAG는 Ethylene Oxide 와 Propylene Oxide 혼합 또는 Propylene Oxide 단독으로 얻어지며, 윤활성이 좋고 낮은 온도에서 유동성이 우수하여 HFC계열인 R134a나 R152a, R1234yf 와는 모두 상용성이 우수하다. R134a에 적용되는 PAG계 냉동기유는 Ester계 냉동기유보다 점도가 낮고, 효율이 향상되기 때문에 R12에 비하여 냉동-공조기기의 성능과 압축 효율이 나쁘지 않고, 에너지 손실도 크지 않다.

하지만, HFC계열의 냉매를 사용하는 경우에도, 전동식 압축기를 사용하는 경우 전기 절연성이 요구되기 때문에 PAG보다는 PVE나 POE를 사용하며, 주로 많이 사용되는 POE는 알코올(Alcohol)과 지방산(Fatty acid)의 에스테르화 반응에 의해 제조된다.

POE 오일의 경우 수분을 흡습할 경우 가수 분해를 일으키기 쉬우므로 분자 구조를 분기형으로 변경하여 가수 분해를 일으키기 어렵게 만들고 혹시 가수 분해되어 산이 발생한다 하더라도 산 포착제를 첨가하여 이를 해결하고 있다.

**Table 3. Comparison of general properties of automotive refrigerant oils**

Oils		Mineral	PAG	PVE	POE
Viscosity (mm <sup>2</sup> /s)	40°C	97.7	48.2	66.4	87.5
	100°C	11.58	10.24	8.10	9.86
Viscosity Index		106	207	84	92
Density (g/cm <sup>3</sup> )		0.8701	0.9954	0.9369	0.9631
Flash point (°C)		272	246	204	230
Pour point (°C)		-20	-40	-37	-37

자동차 에어컨 시스템에서도 최근 친환경차의 증가로 EV나 PHEV와 같은 차량에는 전동 압축기가 사용되므로 에어컨 시스템의 윤활유 선정에 주의하여야 한다.

Table 3은 차량용 에어컨 시스템에 적용 되는 냉동기유의 일반 물성을 비교 하였으며, Table 4는 냉동·공조 기기에서 사용되는 여러 냉매들과의 상용성을 고려하여 사용이 가능한 윤활유의 종류와 적용처에 대하여 나타내었다. 냉매와 윤활유의 개발 방향을 살펴보면, 일부 룸에어컨 (Room air-conditioner)과 저온용 냉매인 R600이 사용되는 냉동기 (Refrigerator)를 제외하곤 대부분 PAG가 사용될 수 있음을 알 수 있다.

### 3-4. 대체 냉매용 냉동기 윤활유

압축기의 윤활에서 가장 중요한 것은 윤활유가 적절 한 점도를 가지는 것이다. 예를 들면 R744 냉매를 사용하는 에어컨 시스템은 압축기의 토출압력이 16 MPa 이상에서도 윤활유가 변함없이 냉매에 용해된 상태로 에어컨 시스템을 순환해야 하므로 극압제 및 유성제 등의 첨가제가 필요하고, 토출 온도도 150°C 이상이므로 열적 안정성도 요구된다.

R134a와 R1234yf 냉매에 대한 윤활유의 연구로 Jin과 Hrnjak은 PAG 46의 혼합 특성으로 OCR(Oil Circulation Ratio)은 2~4%로 두 냉매가 거의 비슷하였고, 윤활유의 잔류량은 압축기에 거의 1/4정도가 남아 있었고, 응축기와 증발기의 윤활유 잔류량은 과열도에 따라 크게 달라졌다[31].

R152a는 연소성을 가지는 것이 특징이며, 열역학적 특성은 R134a와 비슷하다. 따라서 R134a와 같은 특성인 상용성, 적절한 용해점도, 윤활성, 안정성 및 재료 적합성을 가진 윤활유가 요구된다. PAG의 용해 점도는 R134a와 비교하여 R152a가 낮다. 바꾸어 말하면 R152a 냉매에서 윤활유의 용해량 때문에 상용성이 우수하며, R134a보다 분자량이 적고, 밀도가 적기 때문에 점도 조정은 검토되어야 한다. 결론적으로 R152a 냉매의 윤활유로 PAG는 열안정성, 산화안정성 및 내기수분해성 등에서 문제는 보이지 않는다.

POE 오일도 기계식 압축기의 R1234yf 냉매에 대한 다양한 연구가 진행되었는데 일례로 일본 혼다자동차는 R1234yf 냉매에 대하여 POE 발화 온도가 PAG 발화 온도보다 높기 때문에 인화성이 우수하다는 이유로 그동안 주로 전동 압축기에 사용하던 POE 오일을 기계식 압축기에도 사용하고 있다.

또한 Kwon 등은 PVE68과 R1234yf 냉매와의 상용성 검토를 위하여 질량농도를 변경하면서 다양한 온도에서 평가한 결과, 질량 밀도 50%에서 온도가 10°C 이하를 제외하고는 모두 상용성이 있다고 보고 하였다[32].

한편 R1234yf 냉매의 윤활유에 대하여는 독일 자동차 공업협회를 중심으로 한층 더 강화된 전산가(TAN)를 관리하고 있는데, 이는 R1234yf 냉매 시스템이 수분을 흡수하게 되면 불산 (HF)이 발생하여 에어컨 시스템에 악영향을 끼치게 되므로 산 포착제를 첨가하여 산을 제어

**Table 4. Evolution trends of refrigerants and refrigerant oils**

		Before	Presents	Future
Room A/C	Refrigerant	R22	R410A	R32, R1234yf
	Refrigerant oil	Mineral	PVE, POE	PVE, POE
Vender Machine	Refrigerant	R22	R407c	R744
	Refrigerant oil	Mineral	PVE, POE	PAG
Show case	Refrigerant	R22, R502	R404a	R744
	Refrigerant oil	Mineral	PVE, POE	PAG
Refrigerator	Refrigerant	R12	R134a	R600
	Refrigerant oil	Mineral	POE	Mineral
Car A/C	Refrigerant	R12	R134a, R1234yf	R1234yf, R744, AC6
	Refrigerant oil	Mineral	PAG, POE	PAG, POE

하도록 하고 있다.

R744 냉매와 PAG의 분리율을 농도와 온도별로 실험한 결과, 온도와 농도가 높을수록 분리율은 증가하였다 [33].

R744 대체 냉매에서 PAG를 사용한 경우에는 초 임계 사이클에서도 용해 점도가 높고, 내마모성, 내인화성, 피로수명이 뛰어나고, 안전성과 상용성에서 우수하게 평가되었다. Lee는 대체 냉매로 R744를 사용하는 에어컨 시스템에서 PAG와 POE에 대하여 윤활유 회수율을 분석한 결과, POE가 PAG보다 회수율이 조금 더 우수하다고 하였다[34].

이상으로 대체 냉매로 거론되는 후보 냉매군들에 대하여 PAG는 여러 대체 냉매와의 상용성이 다른 냉동기 윤활유에 비하여 우수하게 나타났다. 또한 전기 절연성이 요구되는 전동식 압축기에도 최근에는 모터와 인버터의 전원 공급기 플러그 (Plug)에 코팅을 하는 등 압축기 부품에서 절연성 확보를 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있으며 독일을 중심으로 일부 자동차회사에서 PAG를 적용중이므로 PAG는 향후 자동차 에어컨 시스템에서의 대체 냉매 냉동기 윤활유로 확대 적용될 것으로 생각 된다.

#### 4. 결 론

지구 환경은 전 세계가 해결해야 할 중요한 문제로 향후 각종 법적 규제가 한층 더 강화될 것으로 예상되고 있다. 자동차 에어컨 시스템의 대체 냉매로 검토 중인 작동 유체와 이들 냉매와 적합한 냉동기 윤활유에 대하여 검토한 결과를 아래와 같이 요약하였다.

1) R152a는 약 가연성을 가진 냉매로 기존 에어컨 시스템의 구성 부품을 변경 없이 그대로 사용할 수 있고, 우수한 냉방성능과 냉매 충전량을 기존 R134a 대비 저감이 가능한 장점이 있다.

2) R1234yf는 A2L 등급의 약 가연성 냉매로 R134a 에어컨 시스템 대비 팽창밸브, 저압 측에서의 압력손실 개선 등 약간의 부품 변경만으로 동등한 성능을 확보할 수 있다.

3) R744는 열역학적 특성이 우수하여 열전달 성능, 냉매의 순환량 증가 등의 장점이 있지만, 초임계 사이클로 작동하기 때문에 부품의 내압성이 확보와 신규 개발 부품들에 대한 투자가 필요하다.

4) R134a, R152a, R1234yf, R744 냉매 모두에 대하여 PAG는 우수한 윤활유로 대체냉매 에어컨 시스템 설계 시 시간 단축이 가능하고, 기존 에어컨 시스템과 혼용

해도 문제가 발생하지 않는 장점이 있다.

지구 온난화 규제에 대응하기 위하여 자동차 에어컨 시스템에 있어 대체 냉매 적용 기술은 미래가 아닌 당장 우리가 넘어야 할 장벽인 것이다. 이 장벽을 극복하기 위하여 우리도 자동차 에어컨 시스템의 대체 냉매의 개발과 함께 효과적인 윤활유의 개발과 시스템의 성능을 향상하고, 효율을 높이는데 주력하여야 할 것이다.

#### References

- [1] ASHRAE, "100 Years of Refrigeration; A Supplement to ASHRAE Journal," *ASHRAE Journal*, S31-S34, 2004.
- [2] Song, Y. K., "The State of the Art of the Automotive Air-Conditioning Systems Using HFC-134a", *Auto Journal*, Vol.16, No.2, pp.22-32, 1994.
- [3] United nations environment programme, "Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer, Final act", New York, United Nations, 1987.
- [4] Kim, H. J., Jung, D. S., Kim, K. H. and Kang, D. S., "Computer Simulation of Automotive Air-Conditioners using HFC134a, CFC12", *Autumn conference of SAREK*, 95-W-040, pp.257-262, 1995.
- [5] Menstruate, D., "A(Preliminary) Analysis of the Kyoto Protocol: Using the OECD Green Model," pp.1-32, 1998.
- [6] Directorate-general environment, consultation paper, "How to considerably reduce greenhouse gas emissions due to mobile air conditions", *European Commission*, Brussels, 4, 2003.
- [7] Choi, J., Nam, S. and Bang, S., "A Study on the Fluid H in Automotive Air Conditioning System as an Alternative Refrigerant", *Transaction of KSAE*, Vol.15, No.6, pp.170-176, 2007.
- [8] Minor, B. H., "Dupont Next Generation Refrigerant MAC Global Industry Solution", SAE 7th Alternative Refrigerant Systems Symposium, 2006.
- [9] Bourini, E., Adachi, R. T. and Tajima, K., "Performance Evaluation of an Automotive Air Conditioner with Expansion Valve control Using CFC-12 & HFC-134a Refrigerants", *SAE Paper* 910218, 1991.
- [10] Kang, J. and Kim, J., "The effect of refrigerator oil on the evaporation heat transfer coefficient inside plate type evaporator for automotive air conditioner", *KSAE Fall Conference Proceedings*, 943927, pp.391-396, 1994.
- [11] Lim, B. H., Jin, D. S., Yun, I. C. and Seo, H. J., "Trends of Low GWP Refrigerants", *SAREK18-W-054m*, pp.200-201, 2018.
- [12] Park, J., Kim, B. and Oh, S., "Global regulation on HFC refrigerant and response strategies", *SAREK17-*



- W-016*, pp.53-57, 2017.
- [13] Lim, B. H., Kim, K. J., Seo, H. J. and Lee, C. S., "Updated Safety Standards and Recent Risk Assessments using Low GWP Refrigerants", *SAREK17-W-015*, pp.51-52, 2017.
- [14] Ghobane, M., Baker, J. A. and Kadle, P. S., "Potential application of R-152a Refrigerant in vehicle climate control", Part II, *SAE Paper* 2004-01-0918, 2004.
- [15] Hill, W. and Papisavva, S., "Life Cycle Analysis Framework; A Comparison of HFC-134a, HFC-134a Enhanced, HFC-152a, R744, R744 Enhanced and R290 Automotive Refrigerant Systems", *SAE Paper* 2005-01-1511, 2005.
- [16] Lee, H., Won, J., Cho, K. and Kim, J., "The Development Trend of A/C system using alternative refrigerant for a vehicle", *SAREK16-W-081*, pp.301-304, 2016.
- [17] Won, J. P. "Technology Trends of Automotive Refrigerant Automotive Air Conditioning System for Climate Change Regulations", *Magazine of the SAREK*, Vol.39, No.2, pp.10-16, 2010.
- [18] Del, D., Torresin, Col. D. and Cavallini, A., "Heat transfer and pressure drop during condensation of the low GWP refrigerant HFO1234yf", *International Journal of Refrigeration* 33, pp.1307-1318, 2010.
- [19] Koban, M., "HFO-1234yf low GWP refrigerant LCCP analysis", *SAE Paper* 2009-01-0179, 2009.
- [20] ASHRAE, "ASHRAE Standard 34-2010, Designation and safety classification of refrigerants", 2010.
- [21] Choi, J., Cho, K. and Kim, J., "A Study on the compliance of IEC standard to use of A2L refrigerant for KC safety standard", *SAREK18-W-052*, pp.192-194, 2018.
- [22] Moforte, R. and Caretto, L., "Safety issues in the application of a flammable refrigerant gas in MAC systems: the OEM perspective", *SAE Paper* 2009-01-0541, 2009.
- [23] Seybold, L., Styles, B., Lazaridis, I. and Kneusels, H., "Vehicle hot surface ignition and mitigation measures of R-1234yf refrigerant for MAC systems", *SAE Paper* 2014-01-0422, 2014.
- [24] Makino, M., Ogawa, N. Abe, Y. and Fujiwara, Y., "Automotive Air-conditioning Electrically Driven Compressor", *SAE Paper* 2003-01-0734, 2003.
- [25] Yoo, J., Bang, S., Ryan, F., Bae, Y. and Sung, N., "Alternative refrigerant MAC system to prevent global warming", *KSAE Annual Conference Proceedings*, 09-B0049, pp.298-305, 2009.
- [26] Lee, H., Won, J., Lim, Jung, Y. and Kim, Y., "An Rxperimental Study on Direct Expansion System's Performance of Mobile Alternative Refrigerant Air Conditioning System", *KASE Annual Conference Proceedings*, 12-B0085, pp.423-428, 2012.
- [27] Lee, D., "Experimental Study on the Performance Characteristics of a CO<sub>2</sub> Air-Conditioning System for Vehicles", *Transactions of KSAE*, Vol.23, No.1, pp.18-24, 2015.
- [28] Kim, O. J., Kim, D. H., Yoon, S. H. and Song, C. H., "Global Trends of the Technology for Low GWP Refrigerant", *SAREK15-W-036*, pp.130-133, 2015.
- [29] ASHRAE, "Lubricants in refrigerant system", *ASHRAE Handbook*, Refrigeration, Sled., Ch.7, pp.1-24, 1994.
- [30] ASHRAE, "Lubricants in refrigerant system", *ASHRAE Handbook*, Refrigeration System and Applications, Ch.29, 1998.
- [31] Jin, S. and Hrnjak, P., "Refrigerant and lubricant distribution in MAC system", *SAE Paper* 2013-01-1496, 2013.
- [32] Kwon, J., Lee, B. and Kim, M., "Mscibility of lubricants with low GWP refrigerant", *SAREK16-W-012*, pp. 47-48, 2016.
- [33] Cho, E., Lee, K., Kang, B. and Kim, S., "An Experiemntal Study on PAG Oil Separation Characteristics of an Oil Separator for a CO<sub>2</sub> Refrigeration system", *SAREK* 08-S-044, pp.271-276, 2008.
- [34] Lee, S., "An Experimmental Study on Oil Return of PAG and POE from Liquid Line for a CO<sub>2</sub> Refrigeration System", *Magazine of the SAREK*, Vol.38, No.12, pp.61-65, 2009.