

냉장고의 대체냉매 냉동 Cycle의 특성연구

Study on Refrigeration Cycle Applied Alternative Refrigerant in Domestic Refrigerator

이 재 승
J. S. Lee

삼성전자(주) 가전종합연구소



- 1960년생
- 냉동공조 분야를 전공하였으며 대체냉매 관련 냉동공조 시스템에 관심을 가지고 있다.

장 필 수
P. S. Chang

삼성전자(주) 가전종합연구소



- 1961년생
- 열유체 분야를 전공하였으며 대체냉매 관련 System 설계 전산화에 관심을 가지고 있다.

1. 서 론

가정용 냉장고의 냉매로 지금까지 가장 널리 사용되어 온 CFC-12 냉매가 지구의 오존층을 파괴한다는 이유 때문에 국제적으로 이에 대한 생산 및 소비의 규제가 시작되어¹⁾ 새로운 대체냉매 개발이 대두되었다.

대체냉매 선정시 고려해야 할 사항은

- 1) 높은 증발잠열
- 2) 낮은 빙점
- 3) 높은 임계온도
- 4) 양의 증발압(positive evaporating pressure)
- 5) 낮은 응축압

등의 열역학적 특성이다.

이런 열역학적 특성과 유사한 대체냉매 개발은 크게 두가지로 모색되어 왔다.

그 한가지는 기존 냉매의 특성을 가지면서 오존층 파괴 효과가 없거나 또는 적은 새로운 순수물질을 개발하는 것이며, 다른 한가지는 기존의 냉매 중에서 대체물질을 선택 또는 적절히 혼합하여 필요한 냉매의 특성을 얻는 것이다.

전자의 경우 대표적인 것이 HFC-134a 등이며 세계적인 냉매 메이커인 DuPont, Allied Signal(미국), ICI(영국), Atochem(프랑스), Hoechst(독일) 및 Asahi Glass, Showa Denko(일본) 등에서 CFC-12 대체물질 개발에 박차를 가하고 있다. 후자의 경우 HCFC-22, HFC-152a 및 HCFC-141b 등에 대한 연구 및 이러한 비규제 물질을 혼합한 binary mixture(비공해 혼합냉매)에 대하여는 많은 학술적 연구가 진행되고²⁾ 있다. 특히 DuPont에서는 3가지 성분(HCFC-22/

HCFC-124/HFC-152a)을 혼합한 ternary blend 를 물질특허로 취득, 실용화 연구중이다.

본 고에서는 CFC 규제배경의 간략한 소개와 가정용 냉장고의 대체냉매로 가장 유력한 HFC-134a³⁾의 화학적 성질등을 검토하고 냉장고 실제 set에 적용, 테스트하여 CFC-12와 비교 평가를 행함으로써 HFC-134a 적용시의 문제점을 도출하여 이를 최적의 대체냉매 냉동 사이클을 구성하는데 이용하고자 하는 것이다.

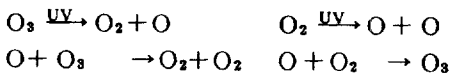
2. CFC 규제 배경

2.1 CFC의 오존층 파괴 메커니즘

지구를 둘러싼 성층권에는 태양에서 방출되는 유해한 자외선을 흡수하는 오존층(O₃)이 존재한다. 오존층의 형성은 자외선이 산소 분자(O₂)와 충돌하여 두개의 산소 원자(O)를 해리시키고, 이것이 다시 다른 산소 분자와 결합하여 오존을 만드는 과정을 통해 이루어진다. 또한 오존은 자외선을 흡수해 산소 분자와 산소 원자로 해리되고 위의 과정을 되풀이 하면서 생성과 소멸이 같아지는 동적인 평형상태에 도달한다.

그런데 대류권에서는 매우 안정한 CFC 화합물이 성층권에 도달하여 자외선과 염소(Cl)를 방출시켜 산소 원자와 결합, 일산화염소(CIO)를 생성시켜 오존의 생성을 감소시킨다. 중요한 것은 질소나 수소 화합물 같이 염소는 촉매처럼 작용하며, 염소 원자 하나가 불활성화 되거나 안정한 대류권으로 돌아가기까지 10만개의 오존을 파괴할 수 있다는 것이다. 미국 환경보호국(EPA)의 분석에 따르면 1%의 오존층 파괴는 지구 표면에 도달하는 자외선량을 2~3% 증가시키고, 이에 따라 피부암(4.8~7.5%), 백내장, 면역성 질환 등의 발생률이 증가하고 작물이나 생태계도 악영향을 받을 위험이 있다고 한다.⁴⁾

오존의 분해·생성



프레온의 오존층 파괴

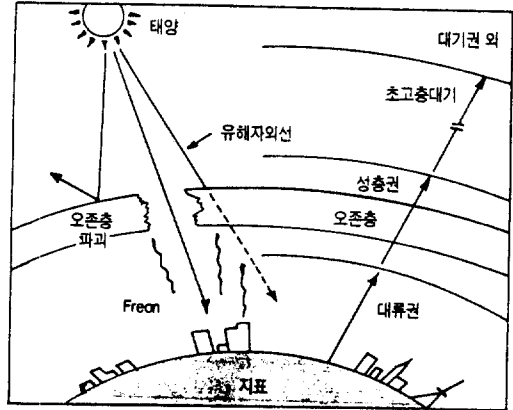
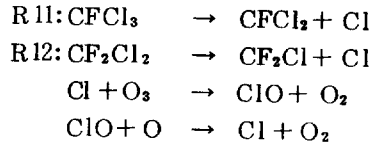


그림 1 프레온의 오존층 파괴 메커니즘

2.2 CFC 규제 배경

CFC 문제는 '74년 캘리포니아 대학의 F. S. Rowland 교수와 M. J. Molina 박사가 "프레온이 대기권에 방출되어 분해되지 않고 성층권까지 상승하면 우주로부터 강한 자외선에 의해 분해되어 오존층이 파괴된다"는 학설을 발표하면서 제기되었다. 이후 '70년대 후반부터 구미 제국을 중심으로 오존에 대한 관심이 높아져 연구한 결과 여러가지의 규제와 금지조치가 취해지게 되었다.

이에 따라 '85년 '오존층 보호를 위한 빈 협약'이 채택되고 '87년에는 국제기구인 UNEP(UN 환경보호계획)에서 '오존층 파괴 물질 규제에 관한 몬트리올 의정서'를 채택했다. 더욱이 '91년 런던에서 몬트리올 의정서 가입국가가 모여 CFC 규제내용을 대폭 강화, 금세기 안에 CFC를 전면적으로 폐기하기로 합의하였다. 규제내용을 세부적으로 살펴보면 오는 '95년까지 '86년 실적의 50%로 CFC의 생산 및 사용량을 규제하고 '97년에 '86년 실적의 85%를 감축, 2000년에는 전면 사용금지하는 것이 주요내용이다.

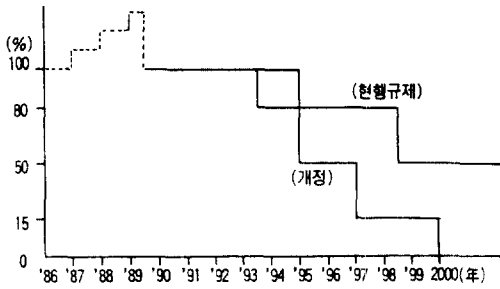


그림 2 몬트리올 의정서와 런던회의에서의 규제내용

또한 '91년 6월 케냐 나이로비에서 열리는 몬트리올 의정서 가입국 회의에서 규제가 더 강화될 것이 예상된다.

CFC 규제로 가장 피해가 우려되는 분야로는 전자산업과 자동차산업을 들 수 있다. 전자기기의 경우 PCB를 비롯한 전자부품을 세척하는 세정제로 CFC가 가장 많이 쓰이고 있으며, 냉장고 등의 냉동·공조기기 분야에도 없어서는 안될 주요냉매로 사용되고 있다.

그림 2는 '87년 몬트리올 의정서의 규제안과 '90년 런던회의에서의 강화된 규제내용을 나타낸다.

3. CFC-12 및 HFC-134a의 화학적성질

HFC-134a(이하 R-134a라 한다)는 비등점, 임계온도 등 냉매로서 필요한 열역학적 성질이 CFC-12(이하 R-12라 한다)와 비교하여 가장 유사한 성질을 가지고 있다. 또한 분자 중에 염소(Cl)를 함유하고 있지 않기 때문에 오존파괴지수(ODP: ozone depletion potential)가 제로이므로 지금까지 알려진 가장 유력한 CFC-12의 대체냉매이다.

표 1은 HFC-134a와 CFC-12와의 화학적 특성비교를 나타냈다.^{5,6)}

4. 성능시험 조건 및 방법

성능시험의 표준조건은 주위온도 30°C 상태에서 제상 타이머와 thermostat를 단락시킨 상태의 pull down condition으로 5시간 이

표 1 CFC-12 및 HFC-134a의 화학적특성

	CFC-12	HFC-134a
Chemical Name	Dichlorodifluoromethane	Tetrafluoroethane
Chemical Formula	CCl ₂ F ₂	CH ₂ FCF ₃
Molecular Weight	120.91	102.3
Boiling Point (°C)	-29.8	-26.3
Freezing Point (°C)	-158.0	-108.0
Density (g/cm ³)		
(liquid) at 30°C	1.292	1.118
(vapor) at B.P.	0.00631	0.00433
Critical Temperature (°C)	111.8	106.5
Critical Pressure (kgf/cm ²)	42.063	37.20
Thermal Conductivity (kcal/mhk)		
Saturated Liquid at 25°C	0.0604	0.07
Vapor at 25°C	0.00876	0.01157
Heat of Vaporization (kcal/kg)		
at 1 atm	39.79	47.97
Vapor Pressure (kgf/cm ²)		
at 30°C	7.593	7.830
Viscosity (cP)		
Saturation Liquid at 25°C	0.2075	0.20
Vapor at 25°C, 1 atm	0.01252	0.012
Toxicity	Low	Low
U/L Group	No. 6	현재 Test중
Flammability	None	None
Ozone Depletion Potential	1.0	0
Greenhouse Potential	1.0	0.1

상 운전시킨 정상 상태 조건을 표준조건이라 정의하였다.

냉동 사이클 각 요소의 특성을 분석하기 위하여는 응축기 및 증발기의 온도를 일정하게 유지시켜 줄 수 있는 항온조가 필요하지만 본

시험에서는 항온조의 설계 및 온도조절이 난이하고 항온조에서 시험할 수 있는 모의 냉동사이클 구성이 어렵기 때문에 1차적으로 주위온도를 조절할 수 있는 항온실의 온도변화에 의하여 응축기의 응축온도를 조절시켜 성능시험을 실시하였다. 이때 증발기의 항온조건은 고내온도에 의해 유지된다.

본 시험에서는 냉동 사이클을 구성하는 각 요소의 기하학적 형상의 변화없이 R-12 냉매 봉입시의 기준 데이터를 측정하고, 동일기종의 시료에 부품을 R-134a로 교체시킨 압축기를 적용, R-134a의 냉매 봉입량의 변화에 의한 시험을 시행하여 각각의 냉매에 대한 특성 변화를 고찰하고자 한다. 냉매 봉입량을 변화시키는 가장 큰 이유는 냉매의 질량 유량을 변화시키는 가장 편리한 방법이기 때문이다.

질량 유량의 측정은 압축기 흡입측에서 turbine type 유량계에 의하여 가스상태의 체적 유량을 측정한 후 질량 유량으로 환산하였다. 또 질량유량을 변경시키는 하나의 방법으로써 압축기 실린더의 행정체적을 변경시키는 것이다. 이에 따라 본 연구에서는 압축기의 기종을 변경시켜 행정체적을 4.33cc와 5.11cc를 적용하여 냉동 사이클 성능변화를 고찰하였다.

냉동기 Oil은 현재 R-134a용으로 개발된 Ester계 Oil (Kyodo Oil, Japan)을 적용하였으며 dryer는 UOP(U.S.A)사의 dessicant XH-7 타입을 적용하였다. 기타 압축기 내부의 고분자 재료는 R-134a용의 것을 사용하였다.

5. 결과 및 고찰

기존의 R-12 냉매 냉동 사이클에 대체냉매로서 R-134a의 적용성을 검토하기 위하여 요소의 형상 변화없이 R-134a 냉매를 적용하여 성능평가시험을 실시하였다. 이는 현 냉장고의 구조변경을 최소화 하여 대체냉매를 적용한 냉장고를 개발하기 위한 기초 검토로서 동일한 사이클에 R-12 및 R-134a 냉매를 변경 적용하여 냉동 사이클 특성 변화를

고찰하였다. R-134a는 냉매의 비체적이 R-12와 다르기 때문에 냉매 봉입량을 변화시켜가며 적정 냉매 봉입량을 구하고 이 적정의 냉매상태에서 각 냉매의 사이클 특성을 비교 평가하였다.

또한 냉매의 질량유량을 변화시키기 위하여 압축기의 행정체적을 변경 적용하였다. 즉 국내 모사에서 양산 중인 4.33cc(DL 43 BIWR) 및 5.11cc(DL 50 BIWR)의 두 기종에 대하여 테스트 및 상호 비교하였다. 이 방법으로 실시한 테스트 결과를 R-12의 냉동 사이클 성능과 비교하여 다음과 같은 방법으로 분석하고자 한다.

- 1) R-134a 냉매 봉입량에 따른 R-12 기준 사이클과의 비교
- 2) 압축기 행정체적 변화에 의한 영향

5.1 R-134a 냉매 봉입량에 따른 R-12 기준 Cycle과의 비교

국내 모사에서 생산중인 표준사양 냉장고에 R-12의 경우에 대한 성능평가시험과 동일용량의 냉장고에 냉매 및 기타 부품들을 R-134a로 교체하여 테스트한 후 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

시험결과로부터 냉동능력은 13% 정도 감소하며 이 경우 압축기의 소요동력은 7% 감소하는 것으로 나타났다. 시험에 의하여 측정된 질량유량, 응축온도 및 압력, 증발온도 및 압력을 기준으로 하여 응축과정이 포화상태로 끝나는 것으로 가정하고 모세관에서는 등엔탈피 과정, 압축기에서는 등엔트로피 과정으로 가정하여 계산한 결과 COP(coefficient of performance)는 0.17 감소하는 것으로 나타났다.

R-134a 냉매 봉입량을 R-12와 동일량(140gr)으로 한 경우 질량유량은 R-12일때 2.19kg/hr로 측정되었으며 R-134a를 적용했을 때는 1.54kg/hr로 약 30% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 이는 압축기 실린더에서 토출되는 체적유량은 R-12와 거의 유사하지만 압축기 입구의 비체적이 R-134a가 30% 정도 크기 때문이라 생각된다.

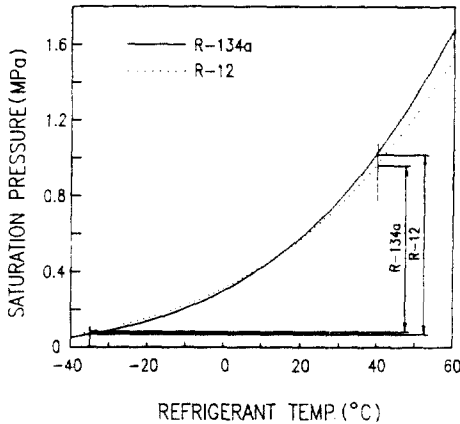


그림 3 Variations of Sat. Pressure for R-12 & R-134a

그림 3에서와 같이 응축온도 및 압력은 R-12보다 약간 낮게 나타나며 증발온도는 높게, 증발압력은 낮게 나타남을 알 수 있다. 따라서 R-134a의 압축비는 R-12보다 크다 (응축온도 40°C, 증발온도 -30°C의 경우 R-12의 압축비는 10.3이고 R-134a의 경우에는 11.3이다).

냉장고의 냉각능력을 결정하는 가장 중요한 냉각 스피드 측면에서는 R-134a의 경우가 매우 나쁘게 나타난다. 냉장고의 실제 운전조건이라 할 수 있는 N-N 컨디션, 즉 냉동실 -18°C까지 도달하는데 걸리는 시간은 R-12의 경우 107분이지만 R-134a의 경우에는 124.5분으로써 냉각 스피드가 16.4% 증가함을 알 수 있다.

R-134a 냉매를 160gr 봉입하는 경우 140gr의 경우보다 질량유량이 증가하고 이에 따라 소비전력이 증가한다. 또한 증발온도 및 압력은 모두 감소하게 된다. 즉 냉동 사이클이 P-h선도의 아래부분에서 형성되기 때문에 사이클의 운전효율이 증가하고 냉동능력이 증가하게 됨을 알 수 있을 것이다. 180gr의 경우에는 응축온도, 압력 및 증발온도가 과도하게 상승된다. 또한 질량유량이 과도하게 상승하기 때문에 증발기 출구에서 과열영역이 감소하여 압축기의 입구온도가 매우 낮아지는 이상현상이 발생하였다. 이에 따라 냉

동능력이 감소하고 소비전력이 증가하는 등 매우 효율이 떨어지게 된다.

5.2 Compressor Displacement 변화에 의한 영향

표준사양의 기존 냉동 사이클에 R-134a를 적용한 경우 R-134a가 R-12보다 압축기 실린더 입구에서의 비체적이 크기 때문에 질량유량의 감소가 예상되며 압축기의 실린더 크기를 변경 테스트하여 행정체적 변화시 사이클의 성능변화를 예측하고자 한다.

압축기의 행정체적을 4.33cc에서 5.11cc로 증가시킨 경우 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 소비전력은 동일수준인데 비하여 냉동능력이 증가하므로 냉동효율은 증가하는 것으로 나타났다. 그런데 행정체적이 18% 증가하였으나 질량유량의 증가는 3% 정도에 그치고 있다. 또 응축온도 및 압력은 상승하고, 증발온도 및 압력은 떨어진다.

2) 그러나 동일 소비전력임에도 불구하고 운전전류가 26% 증가한다. 이는 행정체적을 증가시킨 경우에 효율향상을 기대할 수 있으나 운전전류의 상승으로 기동문제의 발생이 예상된다. 따라서 행정체적의 변경과 아울러 적정 capacitor의 선정 및 적정 냉매 봉입량, capillary 선정이 따라야 할 것이다.

6. 결 론

가정용 냉동 냉장고의 냉동 사이클에 R-12의 대체냉매로서 R-134a의 적용성을 평가하기 위하여 각각의 냉매를 기존의 R-12 냉동 사이클에 적용하여 특성 변화를 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 질량유량이 R-12에 비하여 30% 감소하였고 냉동능력의 감소, 소비전력의 증가로 인하여 COP가 0.17 감소하였다. 따라서 질량유량을 증가시키기 위해서는 냉매 봉입량의 증가보다 압축기 실린더의 행정체적 증가가 필요하다.

2) 냉매 봉입량의 경우 R-12보다는 10% 증가시킨 0.16kg 정도가 적정 냉매 봉입량이다.

그러나 R-134a의 경우가 R-12보다 압축비가 크기 때문에 capillary size의 변경이 필요하다. 따라서 행정체적 및 capillary size가 변경될 경우 적정 냉매 봉입량의 재산정이 필요하다.

3) 압축기 행정체적을 4.33cc에서 5.11cc로 증가시킨 경우 소비전력은 동일수준인데 비하여 냉동능력이 증가하므로 냉동 사이클의 효율이 증가한다. 그러나 운전전류가 상승되므로 효율향상과 기동 테스트(냉기동, 온기동)에 대한 상세한 검증후 최적의 행정체적을 산정해야 한다.

참 고 문 헌

1. The Montreal Protocol, 1987. Brief Book Alliance for Responsible CFC Policy, Dec.,
2. Morrison G. and McLinden M.O., 1986. Application of a Hard Sphere Eq. of State to Refrigerants and Refrigerant Mixture, NBS Technical Note 1226.
3. H. O. Spauchus, 1988. HFC 134a as a Substitute Refrigerant for CFC 12. US-NC/11R Purdue University Gas Research Institute, 397-400.
4. McLinden M. and Didion D., Quest for Alternatives ASHRAE J. (1987) 29, 32-42.
5. R-12 냉매 열물성치표, 일본공업협회, Japan.
6. R-134a 냉매 열물성치표, Keio University, Japan.