

# R-22 대체 상황

By James M. Calm, P.E., Fellow ASHRAE and Piotr A. Domanski, Ph.D., Member ASHRAE  
(ASHRAE Journal, Vol. 46, No. 8, 2004, pp. 29~37)

번역: 박경근 / 국민대학교 기계자동차공학부(pk@kookmin.ac.kr)

1928년에 처음 나오고 1936년부터 상용화된 R-22를 적용한 시스템은 가장 작은 창문형 공기조화기부터 가장 큰, 지역 냉난방용을 포함하는, 칠러 및 열펌프에 이르고 있다. 이 다목적 냉매를 사용하는 각 장치의 냉동 용량은 2 kW에서 33 MW(0.5 톤에서 9,500 톤)에 이르고 있다. R-22는 로타리식 피스톤, 왕복동식 피스톤, 스크롤, 스크류, 원심 압축기가 있는 설비, 그리고 실험적으로 흡수식 사이클에 사용된다. 다른 어떤 냉매도 이렇게 넓은 용량 범위에서 다양하게 상용화되지 않았다.

그러나 R-22는 염화불화탄화수소(HCFC, hydrochlorofluorocarbon)라는 종류의 화학물질 중 하나로서 오존층 파괴 물질에 대한 Montreal 의정서<sup>(1,2)</sup>라는 환경 보호를 목적으로 하는 국제 협정에 따라서 단계적으로 폐지되고 있다. 이 의정서의 통제 조치로서 언급한 '소비량'의 정의는 생산량에 수입량을 더하고 수출량 및 검정 폐기량을 뺀 값이다. 의정서에서 앞으로의 사용을 제한하지 않는 것으로는 일단 생산된 또는 수입된 화학물질 즉 이른바 냉매로서 단계적 폐지 일정 이전에 이미 사용, 재사용, 비축하고 있는 것들이다. 사용을 제한하지 않는 다른 것으로는 공급재료(다른 화학물질을 제조하기 위한 중간재)가 있다.

표 1에는 Montreal 의정서 및 캐나다와 미국 국가 요건에 따른 R-22 생산과 수입의 단계적 폐지 일정이 나와 있다. 표의 연도는 완전 폐지 시한이며, 조기 동결 또는 점진적 감축 절차가 적용되고 있다. 일부(주로 유럽의 많은) 국가에서는 이 일정을 앞당기고 있다. 과거와 현재 광범위하게 사용하고 있으므로, R-22

용으로 설계된 다수의 설비가 R-22 생산이 끝난 오랜 후 수 십년간 계속 운전될 것이다. 이 설비의 유지를 위한 주 공급원은 이를 위해 제한적으로 허용된 생산 물량, 생산 종결 이전에 비축한 재고 물량, 전환 또는 폐기된 설비에서 회수한 물량 등이 될 것이다. 다른 대안으로는 설비를 대체 냉매용으로 전환하는 방법이 있다. 이 방법 중 일부는(신규 구매가 아닌) 수리용품 시장에서 냉매 전환을 특히 용이하게 하기 위하여 개발되었다.

소수의 국가, 특히 유럽의 국가에서는 더 엄격한 제한을 하고 있다. R-22의 사용 및 서비스를 설비의 종류와 크기를 근거로 지정된 일정에 맞추어 이미

〈표 1〉 R-22 생산의 단계적 폐지 일정(당해년도 1월1일 기준). 폐지 대상은 R-22의 생산 및 수출 물량이며, 기존 또는 재활용 R-22를 사용하는 계속 운전은 대상에서 제외됨.

	신 설비	기존 설비
Montreal 의정서		
선진국	2020 <sup>a</sup>	2030
조항 5(1) 해당국	2040 <sup>a</sup>	2040
미국 <sup>b</sup> 및 캐나다	2010	2020

a. 의정서는 HCFC 총소비량의 단계적 감축(조항 5(1) 해당국에 게는 2015년의 1회 동결)을 의무화하고 있으나, 나라별로 각 물질의 양(각 물질의 ODP(오존층파괴지수)를 가중치로 부여함)과 사용량 간의 조절을 통하여 상한선을 맞추는 방법을 결정하는 것을 허용하고 있음.  
b. 1990년의 CAAA(Clean Air Act Amendments, 환경법 개정판) 및 40 CFR 82 실행 법규에 따름.

금지하고 있거나 그렇게 할 것이다. 역으로, Montreal 의정서에 의하면 개발도상국(제한 물질의 사용 수준에 근거한 조항 5(1)에서 확인함)의 '소비' (생산량 및 수입량, 수출량과 폐기량은 제외함)는 2040년까지 허용된다.

### R-22의 대체 방법 선택

단일 화합물 냉매로 R-22를 직접 대체할 수 있는 물질은 없으므로 제조업체에서는 기존 설비를 (적절한 전환을 통해) 유지하기 위해 최소한 8개 냉매 블렌드(역자주: 혼합물)를 상용화하였고, 새 설비를 위해 몇몇 블렌드를 추가로 상용화하였다. R-502(닐리 사용된, 저온 상용 냉동을 위한, R-22가 포함된 블렌드)에 대하여는 그 개수가 전환용이 20 개 이상, 새 설비용이 10 개 이상이 된다. 이들 블렌드를 표 2에 요약하였다. 본 원고의 후반부에서 이전의 R-22를 대체하는 몇몇 단일 화합물 냉매를 언급하고 적용 시 차이점이 무엇인지를 논의한다.

각 화학물질 제조업체와 설비 제조업체, 대학과 연구기관, 정부지원 연구소 등에서 수행되는 포괄적인 연구 개발 내용을 상호 보완적으로 합하여, 공기조화 및 냉동 산업계가 R-22 대체 물질의 광범위한 선별에 협조하기 위한 노력으로 조직을 만들었다. 이 국제 프로그램은 'AREP' (R-22 Alternative Refrigerants Evaluation Program)으로 알려져 있다. 여기에는 일본의 대응 조직인 'JAREP' 이 포함된다. 이 1990년대 초반의 시험검사 프로그램의 목적은 대체물질 선택 방법의 평가에서 중복 작업 및 한정된 재원의 낭비를 피하기 위해서였다.

유럽, 일본, 북미의 39 개 회사가 참여하였다. 그들은 'drop-in' (최소 전환) 및 냉매-최적화 설계 모두를 위한 칼로리미터 및 설비 시험의 해석 결과 및 시험 내용을 공유하였다.

AREP은 R-22의 잠재 대체 물질로 선정된 14 개의 후보 냉매를 조사하였다. 이 후보 물질은 R-134a; R-32/125 (60.0/40.0); R-32/134a (20.0/80.0), (25.0/75.0), (30.0/70.0), (40.0/60.0); R-32/227ea (35.0/65.0); R-125/143a (45.0/55.0); R-32/125/134a (10.0/70.0/20.0) [R-407B], (24.0/16.0/60.0), (30.0/10.0/60.0); R-32/125/290/134a (20.0/55.0/5.0/20.0) 등이었다. 여기에 R-290(프로판)과 R-717(암모니아)가 추가되었으나 이들 두 냉매의 실제 시험은 제한적이었다. 추가된 후보 물질로는 R-502에 대한 4 가지 대체 물질로 이른바 R-125/143a (45.0/55.0), R-32/125/134a (20.0/40.0/40.0)[R-407A]; R-125/143a/134a (10.0/45.0/45.0), R-125/143a/134a (44.0/52.0/4.0) [R-404A]이 포함되었다.

과각된 내용을 바탕으로 대부분의 소형 압축기 및 일체형 설비 제조업체의 의견으로 수렴된 것이 인화성을 피하면서 성능을 최대화한 R-32/125 2성분 블렌드, 후에 성분비가 재조정된 R-32/125 (50.0/50.0) [R-410A]이다. 이 공비가 가까운 블렌드는 공랭식 시스템에 대해서는 R-22보다 약 60% 높은 응축기 압력에서 운전되지만 설비 크기를 줄일 수 있는 장점이 있다. 3성분 블렌드로 R-32/125/134a가 서로 다른 성분비로 구성되어 R-22와 R-502의 압력-온도 특성을 근사시킬 수 있는 서비스 후보로 떠올랐다. R-32/125/134a (30.0/10.0/60.0)가 단기 대체 선택 물질 및 미래의 서비스 유체로 물망에 올랐다. 이후 제

<표 2> R-22 대체용 블렌드

	기존 설비(전환이 필요할 수 있음)				신 설비	
R-22	R-407C	R-411A	R-417A	R-419A	R-407C	R-407E
	R-421A	R-421B			R-410A	R-410B
R-502	R-402A	R-402B	R-403A	R-403B	HCs	R-407A
	R-404A	R-407A	R-407B	R-408A	R-404A	R-509A
	R-411B	R-422A	R-507A		R-507A	
					HCs	

이 외에도 사용 중인 블렌드가 추가로 많이 있으나 총 시장점유율은 아주 낮음. 이 표에는 표준 지정 번호가 부여된 블렌드만을 나열하였음.

조업체들은 잠재적인 가연성을 줄이기 위해 R-32/125/134a (23.0/25.0/52.0) [R-407C]로 성분비를 세분화하여 개편하였다.

AREP은 단지 경쟁력만을 예비 평가하였다. 개개의 제조업체들은 실제 설비를 설계하고 최적화하기 위해 경쟁력 있는 접근 방법을 개발하였다. Minor<sup>(3)</sup>는 광범위한 문헌을 조사하여 시험결과와 실제 설비에 필요한 변경 내용을 요약하였다. 그 내용으로는 압축기와 열교환기, 제어장치 외에도 윤활유(후반부에 논의함) 변경도 포함된다. 인용된 보고서의 대부분이 R-22와 비교하여 R-410A의 에너지 효율이 동등하거나 높음을 보였다. 구체적으로 냉각의 경우 1%에서 7%의 증가를, 난방의 경우 3%의 감소에서 7%의 증가를 보였다.

주택용 설비 및 상용 경설비의 경우에는 일부 압축기 및 제어장치의 공통점과 서비스 기반 시설로 인해 동일한 선택이 실질적으로 필요하였으나, 대형 설비의 경우에는 일관성이 적어진다. R-134a는 공랭식 및 수냉식 스크류 압축기(175~1,500 kW [50~450 톤])가 있는 칠리에서 가장 많이 쓰이는 대체품이다. 대안으로는 R-410A 및 주로 유럽에서 제한적으로 선택된 R-717(암모니아) 및 R-1270(프로필렌)이 있다. 초기에 있었던, 시장 진입을 가속화했던 R-407C 그리고 덜 일반적이긴 하지만 R-404A에 대한

관심은 사라지고 있다. R-134를 이용하는 신제품이 매우 소형인 인버터 구동형 원심 압축기를 사용하여, 왕복동식 피스톤 및 스크류 압축기를 대체하면서 유사한 냉동 능력으로 크게 향상된 성능에 도달하고 있다.

수열원 칠리용 R-407C에 대한 관심은 특히 유럽에서 계속되었다. 재래식 설계의 결과로는 일반적으로 효율이 R-22보다 최고 7% 낮지만 두 가지 개선 방안이 고려되고 있다. 흡입관-액체 열교환기를 사용하여 효율을 2% 올릴 수 있다. 더 큰 향상이 R-407C의 큰 글라이드(glide, 증발기와 응축기 온도 변화 폭)가 4℃에서 5℃(7°F에서 9°F)인 장점을 이용하면 가능할 수도 있다. 최고 5%의 향상이 실현될 수도 있다. 그 방법은 열역학적 Lorenz 사이클이 사이클에서는 대향류 증발기와 응축기를 사용하여 총 온도 리프트(lift)를 감소시키기 위해 이 글라이드를 활용함을 근사적으로 실현하기 위해 대향류 열교환기를 이용하는 것이다.

### 환경 특성

R-22의 단계적 폐지 결정은 성층권 오존의 파괴 가능성에만 근거하지만 대안을 고려할 때에는 추가적인 환경 데이터도 고려해야 한다. 표 3에는 R-22에

<표 3> R-22 및 대체 물질의 특성<sup>(4-6)</sup>

냉매	대기중 수명 (년)	ODP	GWP (100년)
R-22	12.0	0.034	1780
R-134a	14.0	~0.0	1320
R-407C	a	~0.0	1700
R-407E	a	~0.0	1400
R-410A	a	~0.0	2000
R-32	4.9	~0.0	543
R-32/600 (95.0/5.0)	a	~0.0	520
R-32/600a (90.0/10.0)	a	~0.0	490
R-290 (프로판)	b	0.0	~20
R-717 (암모니아)	b	0.0	< 1
R-744 (이산화탄소)	> 50	0.0	≡ 1
R-1270 (프로필렌)	b	0.0	~20

a. 구성 성분이 대기 중에서 흩어지므로 블렌드에 대한 대기중 수명은 주어지지 않음.  
 b. 알려져 있지 않음.

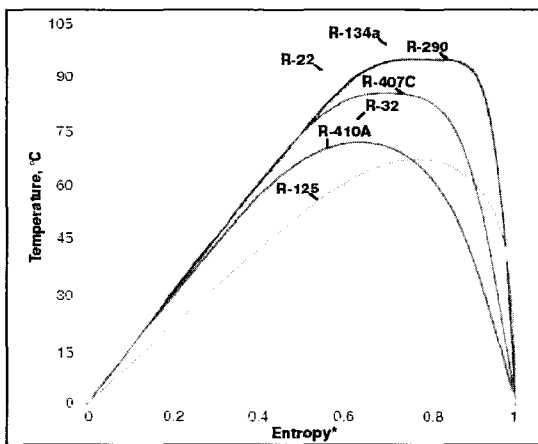
대한 대기중 수명( $\tau_{atm}$ ), 오존층파괴지수(ODP), 지구온난화지수(GWP)와 선택된 대체 물질에 대한 데이터를 비교하고 있다.

$\tau_{atm}$ 은 대기 중으로 방출된 냉매가 분해되거나, 다른 화학 물질과 반응하거나, 눈·비에 섞여 내려오거나, 아니면 다른 방법으로 제거될 때까지의 평균 지속력을 나타낸다. 이는 대기중 평균 체류 기간을 제시하며, 따라서 축적 가능성을 나타낸다. 긴 대기중 수명은 이미 알려진 그리고 미래에 파악될 수도 있는 추가적인 환경 문제로부터 늦게 회복될 가능성을 뜻한다. 그러므로 대기중 수명이 짧은 것이 바람직하다.

냉매의 수명으로 나타낸 값은 복합적인 대기중 수명이다. 이 수명은 대류권(우리가 살고있는 저층 대기), 성층권(지구 오존 파괴가 염려되는 다음 대기층), 그리고 상부층들에 대하여 별도로 나타낼 수도 있다. 그 이유는 각 층별로 주요 제거 메커니즘이 변하기 때문이다.

ODP는 냉매(및 다른 화학 물질)가 성층권 오존 분자를 파괴하는 능력을 나타내는, R-11에 상대적인 정규화 지시값이다. 제시된 데이터는 국제적인 과학 평가에 의해 채택된 모델 값이다. 블랜드에 대한 ODP는 질량 가중 평균치이다.

ODP와 GWP 모두  $\tau_{atm}$ , 화학 물성 측정치 및 다른 대기 데이터로부터 계산되었다.  $\tau_{atm}$ , ODP, GWP 모두는 이상 냉매에 대하여 가능한 한 낮아야 한다.



[그림 1] R-22 및 선택된 대체 물질의 온도-엔트로피 선도 (\*비교를 위해 무차원 비율로 정규화한 엔트로피가 그려짐)

그러나, 이러한 목표치는 성능, 안전성, 그리고 사용 중의 화학적 및 열적 안전성 등의 기준과 함께 평가되어야 한다. Calm and Hourahan<sup>(4)</sup>는 이들 변수에 대하여 논의하고 ODP를 결정하는 다른 방법 및 그 방법의 중요성을 언급하였다.

### 효율 비교

냉매의 비교 효율은 주로 다음의 5 가지 인자에 달려있다.

#### 열역학적 상태량 :

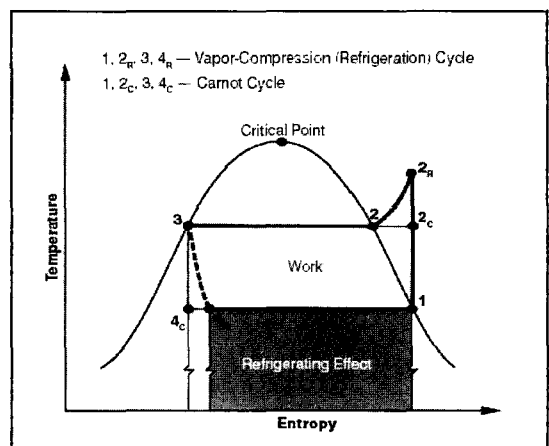
1. 냉동 사이클이 임계점 아래로 얼마나 멀리 떨어져서(이것은 증발 잠열과 액체 정압 비열의 비율에 영향을 줌) 작동하는가.
2. 포화 흡입선과 액체선의 기울기. 이는 과열도, 과냉도 및 스로틀링의 비교 효과를 좌우한다. 기울기는 주로 물 비열의 영향을 받는다.

#### 전달 상태량 :

3. 열전도도와 점도. 이는 열전달과 유체마찰에 영향을 끼친다.

#### 응용 :

4. 냉매 글라이드 및 열교환기 형상의 영향을 받는다



[그림 2] 온도-엔트로피 일반 선도에 그린 증기압축 (냉동) 사이클

열전달량

5. 유체에 대한 사이클 최적화 방법. 과열도, 과냉도 제어, 이코노마이저를 이용한 다단화, 그리고 액체선/흡입선 열교환기 등과 같은 특정 장치의 삽입이 있다.

그림 1은 R-22 및 선택된 대체 냉매의 온도-엔트로피 관계를 나타내고 있다. 목적은 열역학적 상태량이 성능계수(COP)에 미치는 영향을 정성적으로 평가하기 위해서이다. 그림에서 엔트로피는 2상 돔의 폭을 기준으로 정규화(즉 포화 액체 = 0, 포화 증기 = 1)한 무차원 양이다. 2상 영역 최상부의 임계점 온도는 R-134a의 값이 R-22의 그것보다 높다. 유사하게 R-410A 및 R-125(R-410A 블렌드의 한 성분, 50 wt%)의 임계 온도는 상대적으로 낮다. 같은 증발 온도 및 응축 온도에서 R-134a를 이용하는 사이클은 R-22보다 임계점에서 멀리, R-410A 및 R-125보다는 훨씬 더 멀리 떨어져서 작동한다.

그림 2는 기본 증기압축 (냉동) 사이클을, 단순화한 온도-엔트로피 선도에 그린 것이다. 단위 질량 유동 당 냉동 효과는 증발 곡선 아래의 면적과 같다. 반면에 사이클을 운전하기 위한 일은 응축 곡선과 과열저감(desuperheating) 곡선 밑의 면적에서 냉동 효과를 나타내는 면적을 뺀 면적이다. Carnot 사이클을 기준으로 스로틀링에 기인한 비가역성이 냉동 효과를 감소시키며, 이는 4C-4R 선 밑의 면적이고, 스로틀링(팽창일 손실)으로 인해 추가로 필요한 일량을 나타낸다. 과열증기 뿔(horn)에 의해 추가로 필요한 일은 면적 2-2C-2R에 해당한다. 스로틀링에 기인한 그리고 과열증기 뿔에 의한 비가역성은 포화 곡선 기울기의 영향을 받는다. 이러한 손실은 임계점 근처에서 커지며, 여기서 포화 곡선은 2상 돔을 닫기 위해 점진적으로 평평해진다.

R-410A의 임계 온도는 R-22의 그것보다 낮다. 이 때문에 과열증기 뿔에 의한 비가역성과 스로틀링에 기인한 비가역성은 R-410A가 R-22보다 크다. R-410A의 두 성분 중에서 R-32는 주요 관심 조건에서 R-125보다 높은 열역학적 성능을 제공한다. R-125 성분은 R-32의 제한된 가연성을 상쇄하지만, 이 블렌드의 GWP도 증가시킨다. 따라서, 다른 R-32 블렌드들이 관심의 대상일 수 있다. 두 가지 예로 R-32/600 (95.0/5.0)와 R-32/600a (90.0/10.0)가 비교를 위해

표 3과 4에 포함되어 있다. 이들 R-32와 n-부탄 및 이소부탄 각각의 공비 블렌드는 성능 면에서 장점이 있고<sup>(7)</sup>, 광유 윤활유와 함께 사용할 수 있을 것이다. 그러나 두 블렌드 모두 다소의 가연성이 있다.

열역학적 모사실험은, 이른바 전달 물성 효과, 맞춤형 사이클, 윤활유 효과 등을 제외하고 이론 사이클로 도달할 수 있는 효율에 대한 통찰력을 제공한다. 표 4와 5에는 단순 사이클 (1단, 특정 냉매의 특성에 대한 맞춤이 없음) 일체형 공기 조화기와 수냉

<표 4> 일체형 공기 조화기의 냉매 효율 비교

조건	이상 사이클 <sup>ab</sup>		전형적인 조건 <sup>bc</sup>	
평균 증발 온도	10.0	50.0	10.0	50.0
과열도 <sup>d</sup>	0.0	0.0	5.0	9.0
평균 응축 온도	35.0	95.0	46.1	115.0
과냉도 <sup>d</sup>	0.0	0.0	5.0	9.0
압축기 등엔트로피 효율	100%		70%	
모터 효율	100%		90%	
제어 및 다른 동력 사용량	0%		0%	
냉매	COP (kW/kW)	비동력 (kW/ton)	COP (kW/kW)	비동력 (kW/ton)
R-22	9.85	0.36	4.06	0.87
R-32 <sup>e</sup>	9.55	0.37	3.84	0.92
R-134a	9.86	0.36	4.13	0.85
R-290 (프로판) <sup>e</sup>	9.68	0.36	4.05	0.87
R-407C	9.60	0.37	3.97	0.89
R-407E	9.67	0.36	4.00	0.88
R-410A	9.29	0.38	3.77	0.93
R-32/600 (95.0/5.0) <sup>e</sup>	9.54	0.37	3.85	0.91
R-32/600a (90.0/10.0) <sup>e</sup>	9.43	0.37	3.81	0.92

a. 조건은 일체형 공기조화기와 열펌프에 대한 표준 평가 'A' 조건임.<sup>(8)</sup> 평가 표준은 단지 실내 입구 (26.7°C, 80.0°F) 및 실외 (35.0°C, 95.0°F) 공기 온도만을 지정하지만, 증발 온도는 제습을 위해 실제로는 10°C (50.0°F)로 제한됨.

b. CYCLE\_D 3.0으로 계산하였음.<sup>(9)</sup>

c. 이 조건은 사이클상 전형적인 냉매 측 조건에 가까움. 나타난 '전형적'인 효율은 과냉도와 과열도의 최적화, 다만 적용, 또는 그와 유사한 사이클 변형을 통하여 높일 수 있음. 마찬가지로 부실한 설계는 성능을 낮출 수 있음.

d. 전형적인 과열도 및 과냉도는 냉매에 따라 다름. 비교를 위해 선택한 대표값임.

e. 표시 냉매는 가연성이 있음.

식 칠러에 대한, 선정된 R-22 대체 냉매의 냉각 효율 계산치를 나타내었다. 이 표에는 COP와 비동력 (specific power, 효율의 역수) 값이 나와 있다. 후자는 칠러를 논의할 때 더 일반적으로 사용된다.

열전달 성능이 낮은 냉매는, 열역학적 장점이 있다고 하더라도, 열전달 성능이 우수한 냉매보다 사이클 성능이 우수하지 않을 수 있다. 그러나 설계 보안을 거쳐 이 차이를 상쇄시킬 수 있다. 마찬가지로 R-407C와 같이 글라이드가 높은 블렌드는 직교형 (공기 또는 드물게 물의 유동 방향이 냉매 유동과 수직임) 열교환기 설계에서 보여주는 성능을 얻지 못할 수도 있다. 그러나 대항류 열교환기로는 그 성능을

〈표 5〉 수냉식 칠러의 냉매 효율 비교

조건	이상 사이클 <sup>ab</sup>		전형적인 조건 <sup>bc</sup>	
	COP	비동력	COP	비동력
평균 증발 온도	6.7	44.0	5.0	41.0
과열도 <sup>d</sup>	0.0	0.0	1.0	1.8
평균 응축 온도	29.4	85.0	35.0	95.0
과냉도 <sup>d</sup>	0.0	0.0	5.0	9.0
압축기 등엔트로피 효율	100%		80%	
모터 효율	100%		95%	
제어 및 다른 동력 사용량	0%		0%	
냉매	COP (kW/kW)	비동력 (kW/ton)	COP (kW/kW)	비동력 (kW/ton)
R-22	6.18	0.32	10.92	0.57
R-32 <sup>e</sup>	5.97	0.33	10.64	0.59
R-123	6.52	0.31	11.42	0.54
R-134a	6.24	0.32	10.93	0.55
R-407C	6.09	0.33	10.69	0.58
R-410A	5.90	0.34	10.42	0.60
R-717(암모니아) <sup>e</sup>	6.24	0.31	11.21	0.56
R-1270(프로필렌) <sup>e</sup>	6.10	0.33	10.72	0.58

a. 조건은 수냉식 칠러에 대한 표준 평가 조건임.<sup>13)</sup>

b. CYCLE\_D 3.0으로 계산하였음.<sup>3)</sup>

c. 이 조건은 사이클상 전형적인 냉매 측 조건에 가까움. 나타난 '전형적' 인 효율은 과냉도와 과열도의 최적화, 단단 적용, 또는 그와 유사한 사이클 변형을 통하여 높일 수 있음. 마찬가지로 부실한 설계는 성능을 낮출 수 있음.

d. 전형적인 과열도 및 과냉도는 냉매에 따라 다름. 비교를 위해 선택한 대표값임.

e. 표시 냉매는 가연성이 있음.

초과할 수도 있다.

칠러에서 R-134a 등과 같은 일부 대체 냉매는 R-22 보다 높은 성능을 제공한다. 다른 대체 냉매에 대해서는 제조 회사에서 설비 설계 개선을 통해 이론 효율 손실을 상쇄시켰다. Domanski<sup>(11)</sup>와 Calm and Didion<sup>(12)</sup>은 낮은 이론 효율이 뜻하는 바와 그의 수용 여부를 검토하였다. Domanski and Payne<sup>(13)</sup>은 R-410A가 높은 응축 온도에서 R-22에 비해 상대적으로 효율 저하를 가져오지만 전형적인 운전 조건에서는 성능이 R-22와 견줄만하다는 것을 보였다. Spatz and Yana Motta<sup>(14)</sup>는 압력 강하를 검토하고, 효율 향상을 가져오는 열교환기를 다루었다. Yoshida et al.<sup>(7)</sup>은 가연성이 있기는 하지만 공비 또는 공비에 가까운 R-32와 탄화수소의 블렌드를 이용하여 더 높은 효율을 얻고 광유 윤활유를 다시 사용할 수 있는 흥미로운 방법을 제시하였다.

이산화탄소(R-744, CO<sub>2</sub>)의 효율에 관한 다수의 상반되는 주장이 있다. 이렇게 되는 하나의 이유는 통상적인 증기압축 사이클보다는 초월임계 사이클을 적용하는 것이 대부분 필요하기 때문이다. 이 매우 오래된 냉매는 일부 적용 예에서 상당한 가능성을 제공한다. 하나의 예를 산업용 캐스케이드 냉동 시스템의 하단부에서 찾을 수 있지만 가장 일반적으로는 그러한 용도로 쓰이는 암모니아를 대체한다. Brown et al.<sup>(15)</sup>은 통상적인 증기압축 사이클 모델과 초월임계 사이클 모델을 사용하여 주택용 시스템을 자세히 평가하였다. 그들의 결론은 동등한 열교환기를 사용하는 경우에 이산화탄소를 쓰면 효율이 상당히 낮아진다는 것이었다. 이것이 시사하는 바는 우수한 전달 물성과 다양하게 주장되는 압축기 등엔트로피 효율 향상으로도 열역학적 불리함을 보상할 수는 없다는 것이다. 이러한 불리함은 오늘날 일반적으로 선택되는 효율보다 상당히 높은 효율 기대 수준을 생각하면 더 뚜렷해진다.

탄화수소 성능은 표 4에서 프로판(R-290)에 대해, 그리고 표 5에서 프로필렌(R-1270)에 대해 나타난 효율로 예시하였다. 이는 표 3에 나타난 유리한 환경 관련 특성과 대비된다. 이들의 사용이 제한되는 주 이유는 성능이 아니라 다음에 논의할 안전성이다.

효율의 중요성이 강조되는 이유는 두 가지이다. 첫째로, 지구 기후 변화를 언급하자면 에너지와 관련된

온실 가스의 배출을 감소시키기 위해서 성능을 상당히 향상시켜야 한다. 둘째로, 미국에서 R-22가 가장 많이 쓰이는 일체형 설비에 대해 의무화된 최저 효율 수준이, 새로운 설비에 대해서는 R-22를 대체하는 과도 기간 동안에 30% 증가할 것이기 때문이다.

Kul et al.<sup>(16)</sup>은 R-22의 대체 냉매로 제안된, 다양한 HFE(hydrofluoroether) 및 HFE와 HFC의 블렌드에 대한 성능 평가를 요약하였다. 그들의 결론에 의하면 계산된 성능계수(COP)는 R-22의 80%에서 90% 범위에 있었다. R-E125 (CHF<sub>2</sub>OCF<sub>3</sub>) 자체 및 3성분 블렌드로서 R-E125, R-32, 그리고 R-134a 또는 R-152a 중 하나로 이루어진 혼합물을 가장 유망한 후보로 확인하였으나, COP는 R-22의 90%에서 93% 정도밖에 못 미치는 것으로 파악하였다.

## 안전성의 고려

플루오르 화합물 냉매는 안전성을 향상하기 위해 도입되었다. R-22를 포함한 일부 주요 냉매의 단계적 폐지에 따라서 혹자는 '자연 냉매'라고 부르는 물질로 돌아가자고 제안하고 주장했다. 이러한 물질로는 암모니아, 이산화탄소, 탄화수소가 있다. 암모니아(R-717)는 표 5에 보인 바와 같이 효율과 가격 면에서 상당한 설득력이 있다. 암모니아는 식품과 음료 공정 및 냉동 보관 창고 설비에서 가장 널리 사용되는 냉매이다. 그러나 독성(그리고 특히 피부에 손상을 일으키는 작용) 및 가연성에 대한 염려로 인해 쾌적 시설용 시스템에 사용하는 것이 지지부진하다. 이산화탄소(R-744)는 초기 냉매 중 하나로 산업용 시스템에서 여전히 사용되고 있다. 그러나 이산화탄소는 R-22보다 훨씬 더 높은 압력에서 운전되며, 초월임계 사이클이 필요한데, 그 이유는 통상의 응축 온도가 임계 온도보다 높기 때문이다. 탄화수소, 특히 에탄(R-170), 프로판(R-290), n-부탄(R-600), 이소부탄(R-600a), 에틸렌(R-1150), 프로필렌(R-1270)은 효율이 좋고, 특성은 일부 플루오르 화합물 냉매와 유사하다. 이것들은 값이 상당히 싸고 환

경 친화적인 것으로 생각된다. 그러나 가연성이 상당히 높아서 안전성에 관한 중대한 우려를 야기한다. 이들을 사용할 시에는 안전 요인에 대한 세심한 주의가 필요하다.

유럽에서는 소형 시스템(예를 들어 가정용 냉장고와 상용 음료 냉각기에서 R-12를 대체하기 위한) 및 격리된 대형 시스템에서 탄화수소를 꽤 많이 채용하고 있다. 암모니아와 프로필렌은 방호 기계실에 설치한 수냉식 칠러에서 쓰는 것이 허용되었다. 그러나 총 시장규모는 비교적 작다. 책임 문제와 안전 규약 문제로 북미 지역 및 아시아 선진국에서는 사용이 잘 되지 않고 있다. ANSI/ASHRAE 표준 15, '냉동 시스템의 안전 표준'에 의하면 대형 시스템에서 사용할 수 있는 가연 냉매 양은 제한된다. 제조업체의 주 관심사는, 특히 주택용 시스템과 소형 상용 시스템에 대하여 ANSI/ASHRAE 표준 34, '냉매의 번호 지정 및 안전성 분류'에서 A1으로 분류된 냉매(독성이 낮고, 소정의 시험 검사에서 화염 전파를 나타내지 않는)이다.

## 재료 적합성

R-22 대체 냉매의 도입으로 인한 가장 큰 변화는 윤활유의 선택과 관련된다. R-22 시스템에는 일반적으로 첨가 나프텐 광유를 사용했던 것에 반해서, 불화탄화수소(HFC) 대체 냉매는 압축기로 윤활유가 돌아오도록 하는 혼화성을 고려하여 합성 윤활유를 사용한다. 새로운 주요 윤활유로는 적절한 점도의 다양한 POE(polyolester)<sup>\*</sup>가 있다. AB(Alkylbenzene)와 PVE(polyvinylether)도 특수 용도로 이용이 가능하다. 비록 차량용 공기조화기와 냉동 시스템에서는 R-134a와 함께 널리 사용되지만, PAG(polyalkylene glycol) 윤활유는 고정용 시스템에서 혼하지 않다.

윤활유의 선택은 복잡하므로, 사용자는 설비 제조업체의 권고 내용을, 설비 설계 시에는 압축기 제조업체의 권고 내용을 따라야 한다. 대부분의 합성 윤활유에 대하여 냉매 회로에 수분과 여타 오염 물질이

\* 이 원고를 작성할 때에 POE가 광범위하게 부족하였다. POE를 제조하기 위해 사용되는 산성 물질의 대부분을 전세계에 생산 공급하는 공장이 그 산성 물질과 관계없는 안정성 문제로 폐쇄되었다. 예측하지 못한 이 공장 폐쇄로 발생한 생산 혼란을 바로잡는 데는 1년여의 기간이 필요할 수도 있다.

있지 않도록 관리하는 것이 훨씬 더 많이 요구된다.

R-22를 대체 냉매로 개조·전환할 때에는 윤활유 제거를 위한 특수 절차가 일반적으로 필요하다. 몇몇 냉매 제조업체에서 R-22 대체 냉매를 특별히 구성하여 윤활유 교체 없이 냉매 전환이 가능하도록 하고 있다. R-22는 현재 즉시 입수할 수 있으며 가까운 장래에도 그러할 것이다. 따라서 대부분의 사용자가 기존의, 또는 앞으로 수년 후에 생산되는 것일지라도, R-22 설비에 대하여 정상적인 수명기간 동안 누설을 방지하고 수리하는 등 관리를 잘 한다면 냉매 전환이 필요하지 않을 것이다.

다른 재료 적합성 문제는 복잡하다. 공기조화 냉동 산업계에서는 MCLR(Material Compatibility and Lubricant Research)로 알려진 광범위한 다년간의 연구를 수행하여 냉매 회로를 구성하는데 사용되는 재료와 대체 냉매의 적합성을 평가하였다. 설비 및

부품 공급사는, 냉매 및 윤활유 제조사와 함께, 광범위한 추가 연구를 수행하여 대체 냉매에 적합한 재료의 자격을 부여하였다. 적합성 문제는 일반적으로 R-22 대체에 대하여는 해결이 되었으나 부품 및 설비 설계자는 적절한 재료를 선정하는데 있어서 주의 를 기울여야 한다.

암모니아는 특이한 R-22 대체 냉매이다. 사용 설비는 서로 아주 다르다. 그 이유는 전형적으로 암모니아 시스템이, 혼합되지 않는 윤활유를 대상으로 설계되었기 때문이다. 암모니아 자체는 구리와 양립하지만 수분이 있을 때에는 그렇지 않다. 그 결과로 암모니아는 일반적으로 열교환기, 모터 권선 또는 배관 용 제1구리 금속과 함께 사용되지 않는다. R-22용 설비를 암모니아용으로 전환하는 것은 통상적으로는 실현 가능하지 않다.

탄화수소 냉매는 R-22용으로 설계된 시스템에서 사용하는 재료와 일반적으로 양립하며 때때로 같은 또는 유사한 윤활유를 사용할 수 있다. 그러나 대체 시에는 적용 예에 따른 고려가 필요하며, 안전성 문제에 매우 주의를 기울일 필요가 있다.

<표 6> 설비 종류에 따른 주요 R-22 대체 냉매

설비 그룹	전형적인 적용 예	주요 대체 냉매
창문형 공기조화기	주택용	R-410A
일체형 단일 패키지 및 분리형 시스템 공기조화기 및 열펌프 (공기 대 공기)	주택용, 소형 상용	R-410A
적용 시스템: 패키지 단말기형 공기조화기, 지열원 및 수열원 열펌프, 다중분리형	상용, 공공기관용	R-410A
적용 시스템: 다중분리형	주택용, 상용, 공공기관용	R-410A, R-407C
대형 일체형 칠러	상용, 공공기관용	R-134a, R-410A
공랭식	중앙 시스템	R-134a, R-410A, R-123
수냉식	중앙 시스템	R-123, R-134a
상용 냉동	상용	R-134a, R-404A, R-410A, R-507A
산업용 냉동	산업용	R-134a, 암모니아
차량용 냉동	차량용	R-134a

### 주요 R-22 대체 물질

R-22가 냉매로 가장 많이 사용되는 일체형 공기조화기 및 열펌프에서 주요 대체 물질은 R-410A이다. 그러나 대체 작업은, 이 두 냉매의 차이로 인해 설계 내용이 달라져야 하므로, 직접적으로 되지 않는다. 대부분의 주요 설비 제조업체는 이미 공통 크기의 R-410A 생산품을 제공하고 있다. 현재 약 10%의 일체형 상품에서 R-410A가 사용되고 있으나, 이 비율은 미국에서는 2007년 말까지 80%를 초과할 것이고 2009년 말에는 100%에 접근할 것이다.

또한 R-410A는 재설계된 창문형 공기조화기, 패키지 단말기형 공기조화기, 지열원 및 수열원 열펌프, 소형 칠러 등의 주요 대체 냉매이다. 설비 크기가 커지면, 특히 스크류 압축기를 사용하는 칠러에 대하여, 물질 선택 내용이 달라진다. R-134a는 이들 중간 크기의 칠러에서 가장 널리 사용된다. 일부 제조업체에서는 R-410A 또는 다른 냉매를 적용한다. R-134a는 저압에서 작동하며 R-410A는 고압에서 작동하므로 설비 설계 내용이 역시 서로 다르다. 제조업



체들은 원심 압축기를 사용하는 초대형 칠러에서 대부분의 R-22 사용을 종료하였다. 이로 인해 선택의 문제가 R-123과 R-134a를 사용하는 설계의 문제로 바뀌었으며, 현재 R-123이 더 널리 사용되고 있다. R-123 역시 HCFC이므로 단계적 생산 폐지가 예정되어 있으나, 낮은 ODP 및 중요한 추가적인 이로움을 인식함으로 인해 R-22보다 폐지 일정이 늦추어져 있다. <sup>(12,17,18)</sup>

표 6에 주요 R-22 대체 물질을 설비 종류 및 적용을 기준으로 요약하였다.

현재의 R-22 생산량은 배분된 생산 할당량보다 적다. 그러나 심각한 R-22 부족 현상이 앞으로 일어나지는 않을 것이다. 그 이유로는 서비스용 여유 생산량, 미래의 사용을 위한 일부 저장량, 대체 서비스 유체의 존재, 이미 사용 중인 R-22의 재생 이용 잠재성 등을 들 수 있다. 미래의 서비스 필요로 인해 늘어나는 물량 부족은 가격 상승으로 이어지며, 대체 냉매의 사용을 촉진하고, 대체 서비스 유체 쪽으로 방향이 바뀌며, 재생량이 증가하게 될 것이므로 대규모의 공급 부족은 예상되지 않는다.

## 결론

모든 상황이 R-22를 대체하는 방향으로 질서있게 변화하고 있음을 가리키고 있다. 대부분의 적용 사례에 대한 적절한 대체 물질로써 단일 화합물 냉매가 확인된 것은 없으며, 블렌드가 만족할 만한 선택이 될 수 있다. 공기조화 및 냉동 산업체에서는 대체 유체를 사용하면서도 효율이 대등하거나 증가된 설비를 개발하였다. 초기 생산품으로 좋은 결과가 있었고, 이전의 단계적 CFC(chlorofluorocarbon) 폐지를 경험한 바에 의하면 단계적 R-22 폐지는 관리가 가능하며, 중요한 기술 진보에 박차를 가하게 될 것이다. 그리고 단계적 CFC 폐지와 마찬가지로 R-22의 생산 종결에도 불구하고 미래의 R-22 서비스 필요성에 의한 심각한 공급 부족은 예상되지 않는다.

## 참고문헌

1. UNEP. 1987 with subsequent amendments. Montreal Protocol on Substances that Deplete

the Ozone Layer. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme (UNEP).

2. UNEP. 2003. Handbook for the International Treaties for the Protection of the Ozone Layer (sixth edition). Nairobi, Kenya: UNEP Ozone Secretariat.

3. Minor, B.H. 2004. "R410A and R407C design and performance - a literature review," Proceedings of the Earth Technologies Forum. Arlington, Va: Alliance for Responsible Atmospheric Policy.

4. Calm, J.M., and G.C. Hourahan. 2001. "Refrigerant data summary." Engineered Systems 18(11):74-88.

5. IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis - Contribution of Working Group I to the IPCC Third Assessment Report. Intergovernmental Panel on Climate Change of the World Meteorological Organization and the United Nations Environment Programme (UNEP). Edited by J. T. Houghton, et al. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press.

6. WMO. 2003. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002, report 47. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO) Global Ozone and Research Monitoring Project. Nairobi, Kenya: UNEP. Washington, D.C.: National Oceanic and Atmospheric Administration, Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration Office of Earth Science. Brussels, Belgium: European Commission, Research Directorate General. Chaired by A-L.N. Ajavon, D.L. Albritton, G. Mégie, and R.T. Watson.

7. Yoshida Y., et al. 1999. "Residential use air conditioner for advanced COP: acceptability of HFC-32/hydrocarbon mixtures." Heat Pumps - a Benefit for the Environment (proceedings of the Sixth IEA Heat Pump

- Conference). Frankfurt am Main, Germany: VVEW-Verlag.
8. ARI. 2003. Standard for Unitary Air-Conditioning and Air-Source Heat Pump Equipment (Standard 210/240-2003). Arlington, Va.: Air-Conditioning and Refrigeration Institute.
  9. Domanski, P.A., D.A. Didion, and J.S.W. Chi. 2003. CYCLE\_D: NIST Vapor-Compression Design Program (version 3.0), Standard reference database 49. Gaithersburg, Md.: National Institute of Standards and Technology.
  10. ARI. 1998. Standard for Water Chilling Packages Using the Vapor-Compression Cycle (Standard 550/590-1998). Arlington, Va.: Air-Conditioning and Refrigeration Institute.
  11. Domanski, P.A. 1995. "Minimizing throttling losses in the refrigeration cycle." Proceedings of the International Congress of Refrigeration pp. 766-773. Paris: International Institute of Refrigeration.
  12. Calm, J.M. and D.A. Didion. 1997. "Trade-offs in refrigerant selections: past, present, and future." Refrigerants for the 21st Century (proceedings of the ASHRAE/NIST Refrigerants Conference, Gaithersburg, Md, October 6-7, 1997) 6-19. Atlanta: ASHRAE.
  13. Payne, W.V. and Domanski, P.A. 2002. "A comparison of an R22 and an R410a air conditioner operating at high ambient temperatures." Proceedings of the 9th International Refrigeration Conference at Purdue, paper R2-1. West Lafayette, Ind.: Purdue University.
  14. Spatz, M.W. and S.F. Yana Motta. 2003. "An evaluation of options for replacing HCFC-22 in commercial refrigeration systems." Proceedings of the International Congress of Refrigeration paper ICR0510. Paris: International Institute of Refrigeration.
  15. Brown, J.S., Y. Kim, and P.A. Domanski. 2002. "Evaluation of carbon dioxide as R-22 substitute for residential air conditioning." ASHRAE Transactions 108(2).
  16. Kul, I., D.D. DesMarteau and A.L. Beyerlein. 2004. "Coefficient of performance of fluorinated ether and fluorinated ether mixtures." ASHRAE Transactions 110(2).
  17. Calm, J.M. 2000. "Options and outlook for chiller refrigerants," Proceedings of the Earth Technologies Forum pp. 239-248. Arlington, Va.: Alliance for Responsible Atmospheric Policy.
  18. UNEP. 2003. Report of the Refrigeration, Air-Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee - 2002 Assessment, United Nations Environment Programme (UNEP) Ozone Secretariat, Nairobi, Kenya.
- 주) 일부 냉매, 특정 제조 공정, 또는 그의 적용 내 용은 다른 관계자가 소유한 특허에 의해 보호되고 있음. 본 원고에서의 언급이 생산 또는 사용에 제한 이 없음을 뜻하지는 않음. 