

CFC 대체용 압축기 개발동향

Status of Refrigerating Compressors for CFC Alternatives

김 현 진

H. J. Kim

생산기술연구원 기계기술실용화센터



- 1954 년생
- 에어컨용 고효율 SCROLL 압축기 연구
- R134a용 Hi-EER 왕복동 압축기 연구

1. 머릿말

최근들어 냉동공조기기의 냉매로서 사용되고 있는 CFC 계열물질의 오존층 파괴효과와 지구 온난화효과로 인해 이의 사용에 대한 규제가 점점 엄격해 지고 있는 가운데 전 세계적으로 대체냉매의 적용에 대한 방안이 강구되고 있는 상황이다. 기존의 냉동공조기기는 종래의 냉매에 맞도록 설계되고 제작된 것들이기 때문에 대체냉매의 적용에 따르는 성능저하, 신뢰성 감소 등의 제반 문제가 발생하게 된다.

본 논문에서는 대체냉매의 사용이 냉동공조기기의 핵심 구성품인 압축기에 끼치는 영향을 요약해보고 이에 대한 기술적인 대책이 어떤 방향으로 진행되고 있는가를 다루었다. 여기서 살펴보고자 하는 냉동공조용 압축기로서는 가전용 냉장고의 왕복동 압축기, 대형냉동기의 원심압축기, 그리고 패키지 에어컨이나 자동차 에어컨의 압축기로서 최근 관심이 집중되고 있는 스크롤압축기 등이다.

2. 왕복동 압축기

2.1 전기냉장고 압축기의 대체냉매

현재로서는 단순히 냉매 CFC-12를 빼내고 새로운 냉매를 넣어서(drop-in) 압축기를 비롯한 냉동시스템이 아무 문제없이 작동될 수 있는 그러한 대체냉매는 없다. 이것은 이제까지 제시된 대체냉매를 사용할 경우 시스템 설계를 개조시키거나 윤활유를 바꾸어야 한다는 뜻이다.

단순히 열역학적 물성치만을 고려했을 때 단일 물질로는 HFC-134a가 CFC-12 대체용으로, 혼합냉매로는 R22/R124의 이종혼합(binary blends), 또는 R22/R152a/R124의 삼중혼합(ternary blends)냉매 등이 거론되고 있다. 그러나 아래의 표 1에서 볼 수 있듯이 혼합냉매들은 ODP가 영이 아니기 때문에 일시적인 대안에 지나지 않으며, HFC134a의 경우 ODP는 영이지만 GWP가 영이 아니므로 이 또한 궁극적인 대안은 아니라고 여겨진다.

현재로서는 이같은 GWP의 문제가 남아 있는 하지만 HFC-134a는 자동차용 A/C의 경우 대체냉매로 사용키로 확정되었으며, 전기냉장고에서도 가장 유력시되는 대체냉매이다. 따라서 앞으로의 논의는 HFC-134a에 국한시키기로 한다. CFC-12와 HFC-134a의 물성치 비교가 표2에 보인다.

표1 각 냉매의 환경파괴 지수

	R12	R134a	R22/R124(0.55 : 0.45)	R22/R152a/R124(0.5 : 0.2 : 0.3)
ODP	1.00	0.00	0.0362	0.031
GWP	3.05	0.285	0.246	0.219

표2 R12와 R134a의 물성치 비교

	CFC-12	HFC-134a
분자량	120.93	102.03
비등점 (°C)	-29.8	-26.5
빙점 (°C)	-157.8	-101.0
임계온도 (°C)	112.0	101.1
임계압력 (bar)	41.2	40.7
C _{po} (60°C)	0.6338	0.9494
C _{vo} (60°C)	0.5664	0.8692
C _{po} /C _{vo}	1.1192	1.0923

2.2 대체냉매 적용시의 신뢰성(reliability)

대체냉매를 적용했을 때, 확인되어야만 하는 사항들로써 신뢰성, 성능, 소음 등이 있다. 이 중에서도 가장 선결되어야 하는 것은 신뢰성 문제이다. 신뢰성 확보에 매우 중요한 부분을 차지하는 것은 적합한 윤활제의 선정이라 할 수 있다. 흡습성(hygroscopicity) 및 전기절연성 등이 아직 문제로 남아 있기는 하지만 일단 자동차용 A/C에 적용 예정으로 알려져 있는 HFC-134a+PAG(polyalkylene glycol oil)의 조합은 'CFC 대체용 자동차 에어컨 개발동향'에서 다루기 때문에 여기서는 단지 전기냉장고의 경우 현재 가장 유력시 또는 HFC-134a+Ester 오일의 조합만을 대상으로 살펴보고자 한다.

(1) 혼화성과 윤활성(miscibility and lubrication)

HFC-134a+Ester계열 윤활유의 조합은 HFC-134a와 그 어떤 다른 윤활유와의 조합보다도 상호호해성(compatibility or miscibility)과 열 및 화학적 안정성에 있어 우수한 것으로 알려져 있다. 그런데 에스터 오일의 특성 중 점성(viscosity)과 R134a와의 혼화성(miscibility)은 어느

한쪽이 좋으면 다른 한쪽의 특성은 좀 떨어지므로 이 에스터 오일의 계열 중 어느 것을 선택하는가 하는 것은 압축기의 설계에 관련되어 있다.

(2) 가수분해(hydrolysis)와 생산성(formation of acids)

윤활유의 가수분해 특성은 압축기의 장기적 안정성에 영향을 끼친다. 냉동시스템에서 가수분해가 어느 정도 일어나는 가하는 것은 그 시스템 내의 수분의 양에 달려 있다. 보통 밀폐형 압축기에서는 조립시 각 부품을 건조시키지만, 에스터오일의 경우 좋은 공정을 거쳤다 할지라도 초기 수분함유량이 80-100ppm으로 이는 CFC-12에 사용되는 미네랄오일의 15ppm에 비해 많은 양이다. 또한 HFC-134a 자체의 흡습성도 CFC-12보다 30배 정도 좋다. 따라서 HFC-134a 압축기에서는 가수분해가 일어나기 쉬우며 이는 산(acids)의 생성에 기여한다. 산이 과다하게 생성될 경우 금속의 부식, 마모 등이 일어나기 쉽다.

그림 1과 그림 2는 압축기 가속실험에서 수분의 양과 산 생성의 지표인 TAN(total acid number)의 시간에 따른 변화를 보여준다¹⁾. 건조제

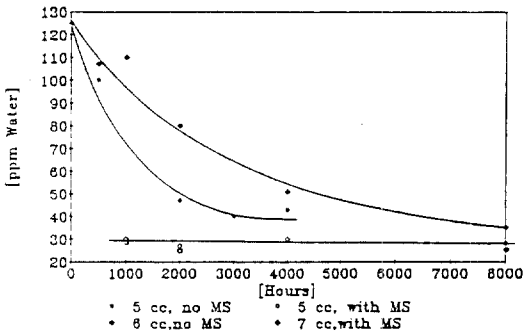


그림 1 수분함유량의 시간에 대한 변화⁽¹⁾

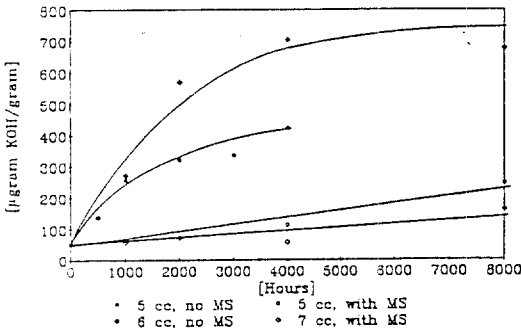


그림 2 TAN의 시간에 대한 변화⁽¹⁾

(molecular sieve)가 없는 수분의 양이 급격히 감소하며 TAN은 증가한, 건조제가 있는 경우에는 가수분해가 저지된다. HFC-134a 자체의 분해(decomposition)로 인한 산발생량은 다른 어떤 냉매보다도 적은 것으로 알려져 있다²⁾,

(3) 고무호스 및 밀봉재질(sealing material)

CFC-12와 비교해서 HFC-134a는 분자의 크기가 작고, 고무나 플라스틱에 용해되는 성질이 강하다. 이같은 HFC-134a의 투과성은 자동차용 A/C의 호스등에서 뿐만 아니라 일반적으로 압축기의 가스켓과도 같은 재질에서 문제를 야기시킬 수 있다. 따라서 밀봉재질의 개선 등의 밀봉기술의 개발이 진행되고 있다.

2.3 성능변화

이제까지 발표된 HFC-134a 압축기의 시험 결과는 기존의 CFC-12에 적합하도록 설계된 압축기에 단지 냉매와 윤활유만을 바꾸어 넣은

것이기에 때문에 여기서의 비교는 진정한 의미에서의 HFC-134a용 압축기와 CFC-12압축기의 비교라 할 수는 없고 단지 CFC-12압축기에 대체 냉매를 적용하였을 때 일어나는 성능상의 변화를 살펴보는 것이다.

(1) 이론적 성능해석

HFC-134a 압축기와 CFC-12압축기의 성능을 먼저 열역학적 특성만을 가지고 Mollier 선도상에서 비교해 보자. 이때 모터효율, 기계효율, 그리고 압축효율이 같다고 가정하고 압축기의 실린더 체적은 $V_c=6.72$ cc, 흡입효율은 0.7로 생각한다.

표준조건하 ($T_{cond}=54.4^{\circ}C$, $T_{eva}=-23.3^{\circ}C$, $T_{expansion-valve-inlet}=32.3^{\circ}C$, $T_{return\ gas}=32.2^{\circ}C$)에서 압축기가 운전된다면 압축기 입출구에서의 가스상태를 비롯한 냉동사이클 주요 점에서의 상태는 CFC-12와 HFC-134a의 Mollier 선도로 부터 다음의 표 3과 같이 정리된다.

여기서 알 수 있는 것은 냉매 HFC-134a의 특성이 CFC-12의 특성과 다르다고 할 지라도 표 3에서 보는 바와 같이 이 모든 열역학적 특성의 차이들이 COP나 EER로 조합되어 계산하면 결국은 거의 같은 값으로 나타난다는 것이다. 즉 단일압축효율이 같고 모터 및 기계적 효율이 같기만 하면 냉매에 관계없이 압축기의 이론적 E.E.R.은 같다. 따라서 실제 압축기에서의 성능차이는 이같은 효율들을 살펴보면 된다.

운전조건이 표준조건으로부터 벗어나 변화가 있을 때의 COP 변화를 살펴보자. 그림 3에서는 증발기 온도가 바뀔 때, 그림 4는 응축기의 온도, 그리고 그림 5는 과열도가 바뀔 경우의 COP 대비를 보여 준다.

(2) 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 해석

앞의 해석에서는 압축기의 제효율, 즉 단일 압축효율, 기계적효율, 그리고 모터효율이 같다고 가정하였다. 여기서는 단지 기계적효율과 모터효율만이 같다고 생각하고, HFC-134a의 적용시 압축효율의 변화를 컴퓨터 프로그램을 통해 구한 결과를 살펴보자³⁾ 압축기 입출구의 가스압력과 시뮬레이션의 결과로부터 분석된 효율은 표 4에 보인다.

표 3 Mollier 선도상의 EER 계산

	R12	R134a
P_1 (Mpa)	0.1323	0.1149
T_1 (C)	32.2	32.2
v_1 (m ³ /kg)	0.155	0.211
H_1 (kJ/kg)	375.29	430.26
P_2 (MPa)	1.349	1.4605
T_2 (C)	126.05	118.22
H_2 (kJ/kg)	427.92	498.51
H_4 (kJ/kg)	231.32	244.78
Volume Flow(cc/sec)	274.32	274.32
Mass Flow(g/sec)	1.77	1.299 (-26.6%)
$H_1 - H_4$ (kJ/kg)	143.97	185.48
$H_2 - H_1$ (kJ/kg)	52.63	68.25
CAP(W)	254.83	240.94 (-5.45%)
Work(W)	93.16	88.66 (-4.83%)
COP	2.7355	2.7177 (-0.65%)
EER	9.334	9.274

표 4 압축기 입출구 조건 및 예측 효율⁽³⁾

	R12	R134a
P_s (bar)	1.325	1.152
P_d (bar)	13.480	14.701
P_d/P_s	10.2	12.7
$H_1 - H_4$ (kJ/kg)	144.17	185.72
m (kg/hr)	5.85	4.54 (-22%)
흡입효율	0.75	0.74
단열압축효율	0.888	0.901 (+1.46%)
WPV(W)	96.3	95.5
EER-PV	8.31	8.38 (+0.8%)

그림 6은 시뮬레이션을 통해 얻은 P-V 선도를 보여준다. P-V 선도의 내부면적에 상응하는 지시일량은 HFC-134a의 경우 많이 감소하였으며 압력 최고치는 더 증가하였다. 그림 7에 보여지는 실린더내 가스의 온도는 HFC-134a의 경우가 낮게 나타났다.

(3) 시험결과

실제 압축기에서 냉매를 CFC-12에서 HFC-134

a로 바꾸었다는 것은 말처럼 그리 간단한 문제는 아니며, 보고된 자료마다 압축기의 상태뿐만 아니라 냉동사이클을 함께 구성하고 있는 증발기 및 응축기의 상태가 조금씩 다르기 때문에 각 자료의 결론에 차이를 보인다. 따라서 여기서는 먼저 사례별로 내용을 살펴본 후 비교 검토를 실시하여 정리하는 방향으로 살펴 보고자 한다.

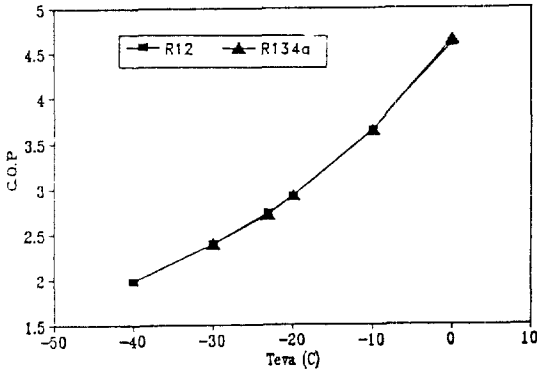


그림 3 증발기 온도변화에 따른 COP변화 ($T_{cond}=54.4^{\circ}C$, $T_{expansion}=32.2^{\circ}C$, $T_{return gas}=32.2^{\circ}C$)

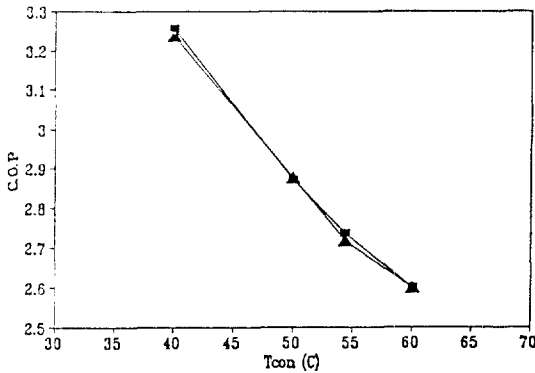


그림 4 응축기 온도변화에 따른 COP변화 ($T_{eva}=-23.3^{\circ}C$, $T_{expansion}=32.2^{\circ}C$, $T_{return gas}=32.2^{\circ}C$)

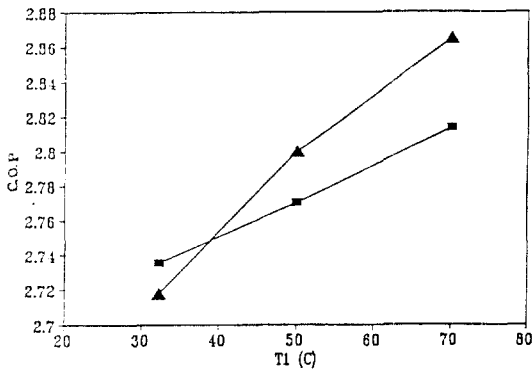


그림 5 Return 가스 온도변화에 따른 COP변화 ($T_{eva}=-23.3^{\circ}C$, $T_{cond}=54.4^{\circ}C$, $T_{expansion}=32.2^{\circ}C$)

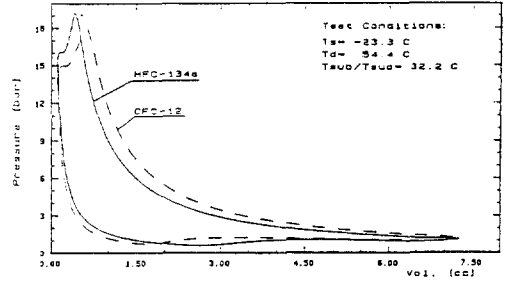


그림 6 P-V선도⁽³⁾

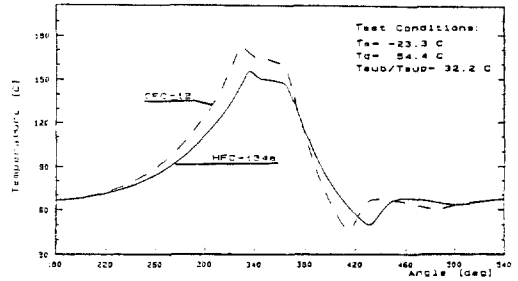


그림 7 실린더 온도⁽³⁾

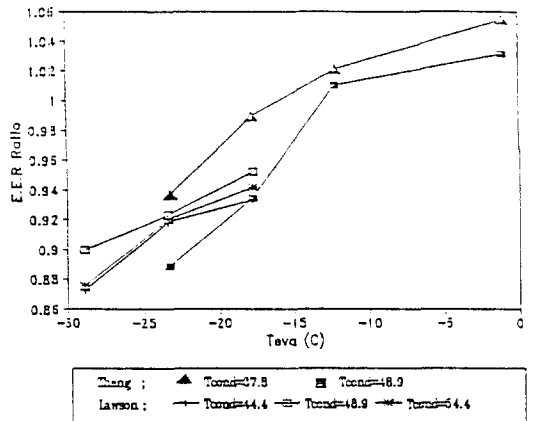


그림 8 압축기 열량계 시험결과⁽⁴⁾⁽⁵⁾

그림 8은 Zheng and Pelva⁴⁾의 압축기 열량계 시험 결과와 Lawson⁵⁾의 시험 결과중에서 HFC-134a의 CFC-12에 대한 EER비를 발췌하여 다시 그린 것이다.

Zheng and Pelva⁴⁾의 경우 $T_{eva} = -23.3^{\circ}\text{C}$ 및 $T_{cond} = 48.9^{\circ}\text{C}$ 에서 HFC-134a의 EER이 CFC-12에 비해 약 11.2% 정도 낮지만, 증발기의 온도가 올라가면 HFC-134a의 EER이 CFC-12보다 높아지는 경향을 보인다. 또한 응축기의 온도가 낮을 경우 HFC-134a의 EER이 상대적으로 좋다.

Lawson⁵⁾의 시험 데이터에서 증발기의 온도가 올라가면 HFC-134a의 EER이 CFC-12보다 높아지는 경향을 보이는 것은 Zheng and Pelva⁴⁾의 경우와 일치하나 그 절대값에서는 차이를 보인다. 예를 들면 $T_{eva} = -23.3^{\circ}\text{C}$ 및 $T_{cond} = 48.9^{\circ}\text{C}$ 에서 HFC-134a의 EER이 CFC-12에 비해 약 8.2% 정도 낮다. 응축기의 온도변화에 대해서는 일관성을 찾을 수 없다.

Lawson⁵⁾은 HFC-134a에서는 PAG를 CFC-12에는 naphthenic 유를 사용했으나 사용한 윤활유의 점도에 대한 명시가 없으며, Zheng and Pelva⁴⁾은 윤활유에 대해 전혀 언급하지 않았다.

Krueger and Driessen³⁾은 HFC-134a의 적용에 따른 압축기 성능의 변화를 가스압축일, 기계적손실, 그리고 모터 손실로 각각 분리하여 측정하였다. 압축기는 표준조건하 ($T_{cond} = 54.4^{\circ}\text{C}$,

$T_{eva} = -23.3^{\circ}\text{C}$, $T_{expansion-valve-inlet} = 32.2^{\circ}\text{C}$)에서 운전되었으며 시험 결과는 표 5에 정리되었다.

압축일만을 고려한 성능(EER-PV)은 사용한 오일의 종류 및 점도에 상관없이 HFC-134a가 CFC-12에 비해 약간 향상된 값을(2.1-2.7%) 보인다. 마찰과 모타손실이 고려된 전체적인 성능(EER)은 같은 점도의 오일을 사용했을 때는 HFC-134a가 CFC-12에 비해 1.0% 정도 향상된 것으로 나타났으나, HFC-134a에 점도가 높은 윤활유를 사용한 경우는 4.1% 정도의 성능 감소를 보였다.

표준시험 조건하에서 Ray Riffe⁶⁾는 오일의 점도를 변화시켜 가면서 HFC-134a에 CFC-12의 효율을 측정하였다. HFC-134a에는 에스터 오일을, CFC-12에는 naphthenic 오일을 사용하였으며 시험 결과는 그림 9에 보인다.

압축기의 효율은 오일의 점도가 낮을 수록 높아지는데, 이는 낮은 점도에서 마찰손실이 적기 때문이다. 모든 점도의 영역에서 HFC-134a의 경우가 CFC-12보다 효율이 매우 미세하나(0.2-0.3% 정도) 좋은 것으로 나타났다.

(4) 냉동능력과 실린더 크기

HFC-134a 압축기의 EER이 비록 CFC-12에 비해 손상이 없다고 할지라도 같은 크기의 실린더를 사용하면 냉동능력 자체는 적게 나타난

표5 CFC-11과 HFC-134a의 성능특성 비교⁽³⁾

Oil Type	CFC-12	HFC-134a	
	Mineral 3.8cP(100C)	Mineral 3.8cP(100C)	PAG 6.0cP(100C)
CAP(Btu/h)	939.3	870.5	87.4
WPV(W)	142.2	128.9	129.2
EER-PV	6.61	6.75	6.79
WF(W)	14.4	14.5	22.8
WMEC(W)	156.6	143.4	152.0
EER-MEC	6.0	6.07	5.77
rpm	3490	3506	3500
WMOT(W)	36.7	33.9	35.7
WT(W)	193.3	177.3	187.7
EER	4.86	4.91	4.67

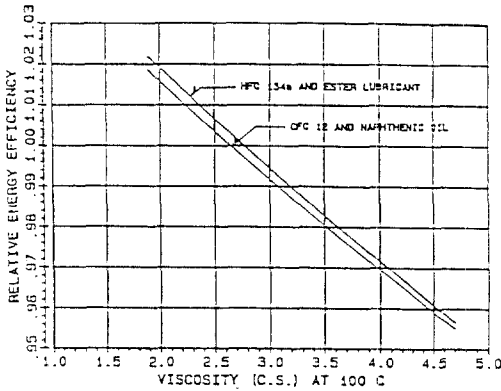


그림 9 윤활유 점도의 압축기 효율에 대한 영향⁽⁶⁾

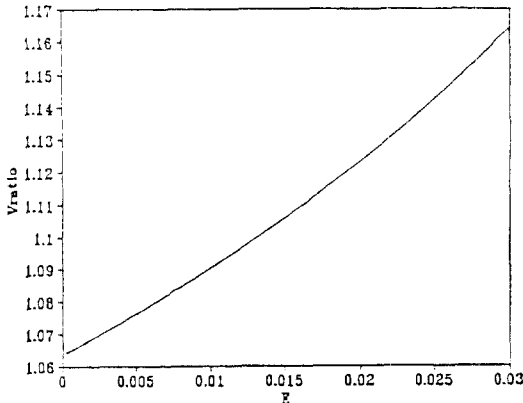


그림 10 같은 냉동능력을 얻기 위한 HFC-134a 압축기의 실린더 체적

다. 따라서 같은 냉동능력을 얻기 위해서는 HFC-134a의 경우 실린더의 크기를 늘리는 수밖에 없다.

$T_{cond} = 54.4^{\circ}\text{C}$ 및 $T_{eva} = -23.3^{\circ}\text{C}$, 그리고 $T_{return\ gas} = 32.2^{\circ}\text{C}$ 일때, 밀도비는 $\rho_{R12}/\rho_{R134a} = 1.3702$ 이고, R12의 압력비는 $P_2/P_1 = (1.349/0.1323) = 10.2$, 그리고 HFC-134a의 압력비는 $P_2/P_1 = (1.4605/0.1149) = 12.71$ 이므로 간극체적비의 변화에 따라 흡입효율이 변화하여 HFC-134a의 CFC-12에 대한 실린더 체적의 비는 그림 10과 같이 된다.

2.4 종합검토

두 냉매의 열역학적 특성만을 가지고 성능을 구해 보았을 때, 냉동능력은 HFC-134a가 적으나

압축일 또한 적으므로 결국 EER값에서는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 즉 압축기의 압축효율, 마찰손실, 그리고 모터의 손실이 같다면 HFC-134a를 사용함에 따른 에너지면에서의 불리는 없다고 할 수 있다.

Zheng and Pelva⁴⁾의 경우나 Lawson⁵⁾의 경우에서와 같이 마찰손실을 별도로 구분하여 생각하지 않았을 때에는 시험결과가 모호하나, 각 손실의 영향을 구분하여 성능을 분석한 Krueger & Driessen³⁾이나 Riffe⁶⁾의 결과는 압축효율 자체는 HFC-134a 압축기가 CFC-12에 비해 나쁘지 않다는 것이다.

압축효율에 영향을 주는 인자들로는 압축비, 가스온도, 그리고 흡입효율 등을 생각할 수 있다. HFC-134a의 경우 비열이 크므로 가스의 온도 상승이 더디며, 주어진 증발 및 응축온도에서 CFC-12에 비해 압력비가 커지게 된다. HFC-134a에서 압력비가 큰 것은 흡입효율 및 압축효율에 손상을 끼치는 요인이 되나, 온도가 낮다는 것은 전열 특성을 바꾸어 주므로 종합적으로 상쇄효과를 얻어 결국 압축효율이 비슷하게 나타나는 것으로 여겨진다.

HFC-134a 압축기 시험결과들이 성능면에서 CFC-12에 비해 뒤떨어지는 것으로 보고된 자료들에서는 아마도 HFC-134a에 점도가 높은 윤활유를 사용한 것으로 생각되어 진다.

결론적으로 HFC-134a를 사용했을 경우 냉매의 열역학적 특성이 변화함에 따른 에너지면에서의 손실은 없으며 시험 압축기의 종류에 따라 약간의 차이를 보이기는 하지만 압축효율 또한 CFC-12에 비해 나쁘지 않다. 단지 윤활유의 점도변화로 인한 마찰손실의 변화가 전체 압축기의 성능에 영향을 주는 요인이 된다. 따라서 점도가 같은 오일을 사용한 경우라면 HFC-134a의 사용에 따른 효율면에서의 손실은 없다고 여겨진다.

신뢰성면에 있어서는 HFC-134a에 ester유를 적용한 압축기의 가속시험(accelerated tests)에서 단편적으로나마 '조심스러운 낙관'을 보이는 결과들이 보고되고 있다.

HFC-134a+ester유 압축기의 소음은 기존의 CFC-12+mineral 유에 비해 약간 증가한 것으로

알려져 있다. 이것은 기존의 CFC-12 압축기의 소음 감소방안들이 이 냉매의 특성에 맞추어 고안된 것이기 때문이며, HFC-134a에 적용시에는 이에 따른 개조가 필요하다.

3. 원심압축기

3.1 원심식 압축기의 대체냉매

원심식냉동기에 사용되는 원심압축기는 그 운전 조건에 따라 흡입구에서의 가스압력이 대기압보다 낮은 저압식과 대기압보다 높은 고압식으로 분류할 수 있다. 저압식에는 기존의 냉매로서 CFC-11이 사용되고 있고, 고압식에는 CFC-12이 사용되고 있다. 앞서 언급한 CFC 계열물질의 오존층 파괴 및 지구온난화 효과로 인해 원심식압축기의 작동냉매도 저압식의 경우 CFC-11에서 HCFC-123으로, 고압식의 경우 CFC-12에서 HFC-134a로 대체되고 있는 실정이다. 국내에서는 주로 저압식이 이용되고 있으므로 논의를 저압식에 국한시키기로 한다. 표 6은 CFC-11과 HCFC-123의 특성 및 환경파괴 지수를 보여준다.

3.2 대체냉매 적용에 따른 신뢰성 등의 문제점

저압식 원심압축기에서 냉매를 CFC-11에서 HCFC-123으로 대체하였을 경우 흡습성은 CFC-11에 비해 약 6배 정도 높고 가수분해 특성(hydrolysis stability)에 있어서는 HCFC-123이 CFC-11보다 더 안정하다²⁾. 윤활유인 광유와 새 냉

매와의 혼화성 특성은 왕복동식 압축기에서와는 달리 별 문제가 없으나, 가스켓 등의 elastomer 재질들에 대한 개선은 필요하다. 구동 모터와 임펠러가 한 케이스속에 들어가 있는 밀폐형 압축기의 경우 HCFC-123의 강한 용해성으로 인해 CFC-11에 적합하도록 설계된 모터의 권선에 손상을 가져오는 문제가 발생한다. 또한 HCFC-123의 마취특성으로 인해 냉매의 누출에 각별한 주의가 요망되어 밀봉기술의 향상과 함께 누출감지 및 경보장치, 환기장치 등의 강화가 필요하다.

3.3 대체냉매 적용에 따른 압축기의 성능변화

(1) 열역학적 특성에 의한 성능변화

성능면에서 있어 HCFC-123이 CFC-11 대체용으로 유망한 이유는 무엇보다도 먼저 그림 11

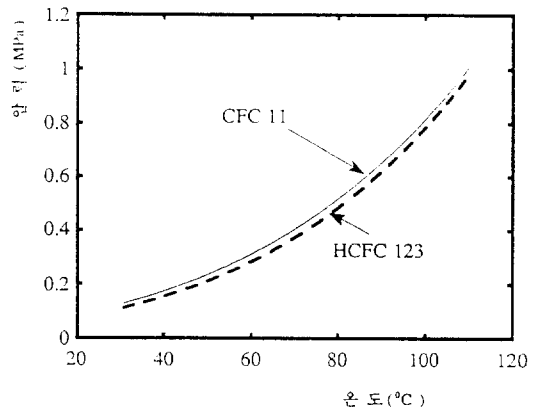


그림 11 CFC-11과 HCFC-123의 포화증기압

표 6 CFC-11과 HCFC-123의 특성비교

	CFC-11	HCFC-123
분자식	CCl ₃ F	C ₂ HCl ₂ F ₃
분자량	137.37	152.93
빙점(C)	23.9	27.6
임계온도(C)	198	183
임계압력(MPa)	4.4	3.6
ODP	1	0.02
GWP	0.4	0.017-0.020

의 포화증기압선도에서 볼 수 있듯이 HCFC-123의 증기압선도가 CFC-11의 증기압선도와 거의 흡사하기 때문이다. 냉동사이클의 증발온도(t_1) 및 응축온도(t_2)가 주어지면 이로부터 요구되는 냉매가스의 압력상승은 각각 t_1 및 t_2 에서 냉매의 포화증기압력에 의한 $P_2 - P_1$ 으로 정해진다. 원심식 압축기의 경우 냉매가스의 운동에너지를 압력 에너지로 변환시켜 압력상승을 얻게 되므로 필요로 하는 압력상승이 클 수록 냉매 가스에 부과해야 하는 속도는 커지게 된다. 큰 속도를 얻기 위해서는 임펠러의 직경이 커지거나 또는 회전속도가 커져야만하는 추가부담이 따르게 된다. 따라서 원심식압축기에 적합한 새로운 대체냉매는 주어진 온도 차이에서 포화증기압의 차이가 CFC-11의 경우보다 적거나 최소한도 거의 같은 수준을 보여야 한다. 이같은 기본 조건을 갖춘 CFC-11의 대체냉매로서 현재까지 알려진 바로는 HCFC-123뿐이다.

표 7은 CFC-11과 HCFC-123의 원심식 압축기의 운전조건에서 증발온도는 5°C, 응축온도는 45°C, 과냉각 6°C, 과열도는 8°C의 경우, 열역학적 특성치를 비교하여 보여준다.

주어진 온도 조건을 이루기 위해서는 HCFC-123의 경우 압력비가 CFC-11대비 약 6.9% 정도 높아야 한다. 단위 냉매질량당의 압축일은 7.3% 감소하나 단위 질량당 냉동능력도 8.4% 정도 감소하여 결국 성적계수는 HCFC-123의 사용시 약 1.25% 정도의 감소를 보인다. 냉동능력 R을 얻기 위해서 필요한 체적유량 Q는 $Q = \frac{v_1}{\Delta h_{cooling}} \cdot R$ 로 표현되므로 흡입효율상의 변화가 없을 경우 같은 냉동능력을 얻으려면 HCFC-123의 사용시 약 18.7% 정도의 흡입체적 유량의 증가가 필요하다. 또한 이렇게 할 경우 이론 압축기의 일은 약간 증가한다.

운전조건이 변화함에 따른 폴리에르 선도상에서 구한 이론성적계수의 변화를 그림 12에서

표 7 CFC-11과 HCFC-123의 이론적 특성치 비교

	냉 매	CFC-11	HCFC-123	비 고
증발압력	P_1 (kPa)	49.7	41.5	
응축압력	P_2 (kPa)	203.9	182.0	
압 력 비	P_2/P_1	4.103	4.386	6.9%
저압 P_1 에서의 냉매 비체적	v_1 (m ³ /kg)	0.340	0.3703	8.9%
고압 P_2 에서의 냉매 비체적	v_2 (m ³ /kg)	0.0943	0.0911	
압축기일	Δh_{21} ($\frac{kJ}{kg}$)	25.46	23.61	-7.3%
냉동능력	Δh_{14} ($\frac{kJ}{kg}$)	162.89	149.2	-8.4%
단위 체적당 냉동효과	$\frac{\Delta h_{14}}{v_1}$ ($\frac{kJ}{m^3}$)	479.09	402.92	
단위 냉동능력당 흡입 제척	$\frac{v_1}{\Delta h_{14}}$ ($\frac{m^3}{kJ}$)	0.00209	0.00248	18.7%
	COP	6.4	6.32	-1.25%

($T_3=5^\circ\text{C}$, $T_c=45^\circ\text{C}$, $T_{sc}=6^\circ\text{C}$, $T_{sh}=8^\circ\text{C}$)

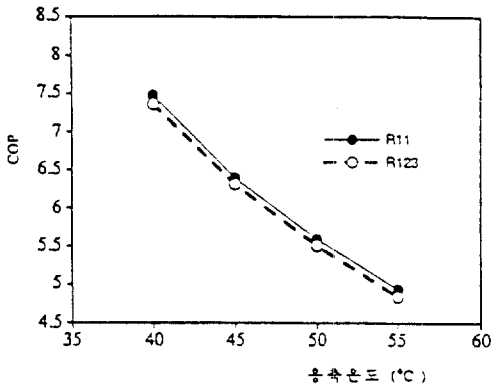


그림 12 응축기 온도변화에 따른 COP변화

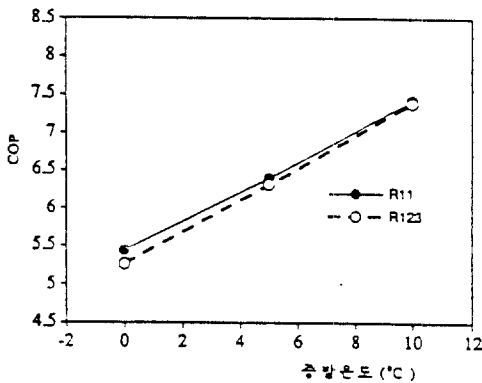


그림 13 증발기 온도변화에 따른 COP변화

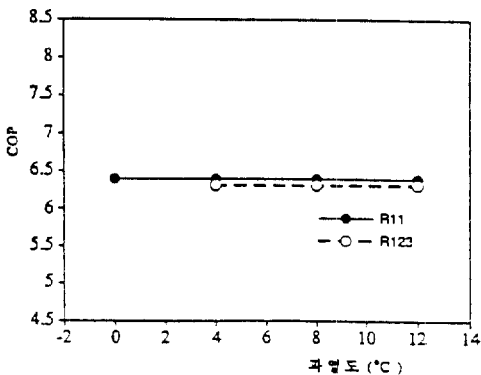


그림 14 과열도변화에 따른 COP변화

그림 14에 나타내었다. 그림 12는 응축기의 온도가 변화함에 따른 성적계수의 변화로서 응축온도가 변화하여도 두 냉매의 성적계수의 상대적인 변화는 거의 동일함을 알 수 있다. 그림 13은 증발온도의 영향을 보여주는 데 증발온도가 높을수록 두 냉매간의 차이는 줄어든다. 그림 14의 과열도의 변화는 상대 성적계수에 거의 영향을 끼치지 않는다.

이상에서 알 수 있듯이 새 냉매인 HCFC-123을 사용했을 경우 열역학적인 특성상으로는 성적계수 자체는 CFC-11에 비해 1-2% 정도의 손실밖에는 없다.

(2) 대체냉매 압축기의 시험결과

실제 대체냉매용 원심압축기의 성능시험평가의 결과는 CFC-11용으로 설계된 원심압축기에 HCFC-123을 사용했을 경우에 효율은 2-7%, 냉동능력은 5-18%, 초우크 유량은 5-10% 정도 감소하는 것으로 보고되고 있다. 그림 15는 300 냉동톤급 원심 압축기에서의 예를 보여준다⁷⁾. HCFC-123을 적용하였을 때 초우크 유량이 감소하는 주된 이유로는 HCFC-123의 경우 비열비와 가스상수 모두가 CFC-11에 비해 작아서 음속이 낮아지기 때문이고, 효율이 감소한 이유는 CFC-11에 맞도록 설계된 임펠러 및 디퓨저에 HCFC-123의 적용시 임펠러 입출구의 감속비 변화, 디퓨저 베인에오로의 입사각 변화 등에 의한 추가손실이 발생했기 때문이고, 또한 분자량이 큰 HCFC-123의 임펠러 출구에서의 유동분포가 비교적 덜 균일하여 디퓨저에서의 압력회복 능력이 상대적으로 저하하기 때문이다. 그밖에도 HCFC-123의 경우 음속이 낮아짐에 따라 임펠러입구의 마하수가 높아져 충격파의 발생에 의한 추가손실의 가능성도 매우 높아진다.

3.4 성능향상방향

中川幸二 등⁷⁾은 HCFC-123의 적용에 따른 성능저하의 개선책으로서 입출구의 감속비를 CFC-11의 경우와 같게 되도록 임펠러 및 디퓨저의 개조를 시도하여 동일 수준의 성능을 얻을 수 있었음을 보였다.

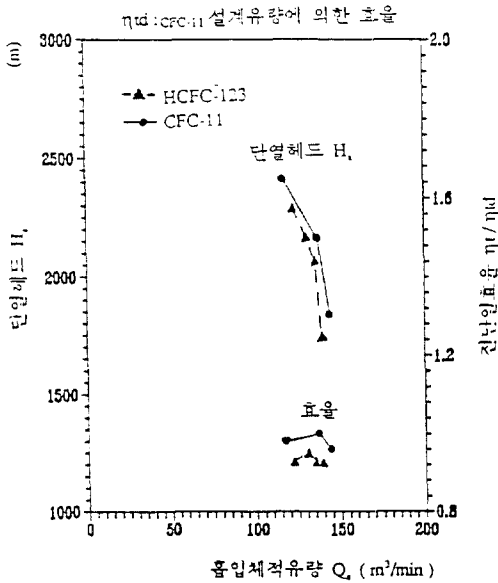


그림 15 300US냉동톤 원심압축기의 실험결과 (동일한 임펠러 사용)

그러나 이와 같이 임펠러 등의 개조를 통해 HCFC-123의 사용시에도 동등한 성능을 얻을 수 있다고 하더라도 동일한 냉동능력을 얻기 위해서는 어쨌든 약 20% 정도의 체적유량의 증가가 필요하므로 임펠러의 크기를 늘리거나 회전수를 높여주는 방안이 필요하다. 그러나 이와같은 경우 압축기의 소요동력의 증가가 수반되므로 CFC-11의 압축기를 상회하는 고효율화 방안이 요망된다.

Klassen 등⁸⁾은 천음속이중익렬 임펠러에 대한 연구를 통해 일반 원심압축기의 효율을 높여주는 방안을 제시하였다. 그림 16과 같은 천음속 축류익과 원심익의 조합으로 구성되는 이중익렬의 잇점으로는 천음속축류익에서의 효과적인 천음속류에서 아음속류로의 감속과 날개면상의 경계층 발달을 두 날개 사이의 간극 공간에서 일단 소산시켜 경계층이 비대하게 두꺼워 지는 것을 방지할 수 있다는 것이다.

中川幸二 등⁹⁾은 이같은 천음속이중익렬을 적용한 HCFC-123을 작동유체로하는 압축기 시험에서 일반적인 임펠러가 장착된 원심압축기의 경우에 비해 약 20%의 흡입체적 유량의 증가와 2% 정도의 효율향상을 얻었다고 보고했다.

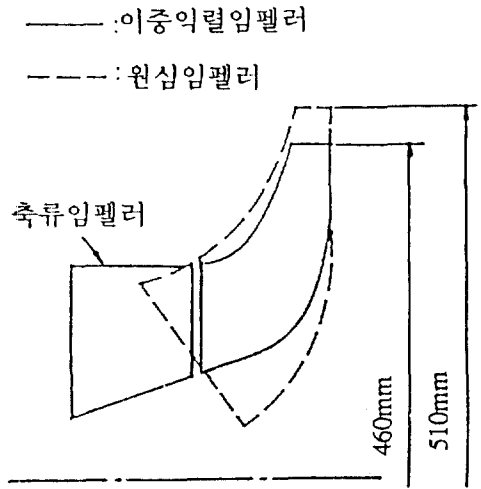


그림 16 이중익렬임펠러와 원심임펠러 형상비교

3.5 종합검토

저압식 원심압축기에서 기존의 냉매인 CFC-11의 대체냉매로 가장 유력시되는 것은 HCFC-123로서 열역학적 특성으로부터 계산한 이론성적계수는 CFC-11대비 약 1-2% 정도 저하하며 이는 넓은 운전조건의 영역에서 거의 일정하다. HCFC-123의 단위냉동능력당 체적유량은 20% 정도 증가하고 CFC-11용으로 설계된 원심압축기에 HCFC-123을 사용했을 경우 효율 및 유량이 저하하여 냉동능력은 감소하고 압축기 소요동력은 증가하게 된다. 이에 대응하기 위해서는 HCFC-123에 적합하도록 원심압축기의 임펠러 및 디퓨저의 설계 개선에 대한 기술개발이 요망된다.

4. 스크롤압축기

4.1 개요

1980년대 들어 실용화 되기 시작한 스크롤 압축기는 같은 용량의 왕복동식에 비해 크기 및 중량이 작고, 밸브가 없어 밸브통과 압력손실이 없으며 흡입효율이 월등히 좋다. 또한 여러개의 압력실을 통해 압축이 서서히 일어나므로 압축 효율이 좋고 정숙한 운전이 이루어지며, 토오

크의 변동치가 적고 진동 및 소음이 낮다는 등의 타 압축기에 비해 많은 장점을 지니고 있어 앞으로 그 사용 영역이 크게 확대될 전망이다.

최근 에너지 절약형으로 각광을 받고 있는 스크롤압축기는 현재 패키지 에어컨용으로 가장 널리 쓰이고 있으며 콘덴싱 유니트에도 적용이 확대되고 있고, 차량용 에어컨의 압축기로도 사용이 본격화 될 전망이다. 패키지 에어컨의 냉매로는 HCFC-22가 사용되고 있으나 그안에 함유된 염소(Cl)성분으로 인해 오존층 파괴의 영향과 지구온난화지수 또한 낮지 않기 때문에 앞으로 그 규제가 앞당겨 질 예정이며 차량용 에어컨의 냉매인 CFC-12는 시급히 대체냉매인 HFC-134a로 전환되어야 하는 상황에 있다. HFC-134a와 기존의 율활유인 광유와의 제반 문제점, 밀봉재질 등의 신뢰성 문제들은 앞서 왕복동식 압축기에서 간략하게 다루었다.

따라서 본 장에서는 패키지 에어컨용 압축기로서 그리고 자동차 에어컨용 압축기로서의 스크롤압축기에 대체냉매로서 HFC-134a 넣었을 때의 성능상의 변화를 열역학적인 특성치 계산과 압축기 성능해석 컴퓨터 시뮬레이션⁹⁾을 통해 조사해 보고자 한다.

4.2 패키지 에어컨용 스크롤 압축기

먼저 패키지 에어컨에서 압축기의 운전조건을 증발온도는 7.2℃, 응축온도 54.4℃, 과냉각은 없고, 흡입가스온도는 18℃로 하면, 이때의 냉동 사이클상의 각점의 상태에서부터 압축기 등을 비롯한 이론성적계수를 표 8과 같이 얻을 수 있다. HFC-134a를 적용할 경우 고압부의 절대압력은 2146.8kPa에서 1469.1kPa로 낮아지지만 압력비는 약 13.3% 높아지며, 이론성적 계수는 4.456에서 4.470으로 미세하게 (0.3% 정도) 상승한

표8 패키지 에어컨용 스크롤 압축기에서 HCFC-22와 HFC-134a의 성능특성 비교

	HCFC-22	HFC-134a	비 고
P_1 (kPa)	625.33	377.75	
P_2 (kPa)	2146.8	1469.05	
$\frac{P_2}{P_1}$	3.433	3.889	13.3%
v_1 (m ³ /kg)	0.03986	0.05773	
v_2 (m ³ /kg)	0.01288	0.01505	
Δh_{21} ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$)	32.793	30.01	-8.5%
Δh_{14} ($\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$)	146.137	134.23	-8.15%
$\frac{\Delta h_{14}}{v_1}$ ($\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$)	3663.0	2325.6	-36.5%
$\frac{v_1}{\Delta h_{14}}$ ($\frac{\text{m}^3}{\text{kJ}}$)	0.000273	0.000430	57.5%
C. O. P	4.456	4.470	0.3%
η_v	93.2%	94.2%	1.07%
η_{ad}	87.95%	89.61%	1.89%

$$(T_e = 7.2^\circ\text{C}, T_c = 54.4^\circ\text{C}, T_{s,H} = 10.8^\circ\text{C}, T_{s,C} = 0^\circ\text{C})$$

다. 단위냉동능력당 흡입체적은 57.6% 증가하여 같은 냉동능력을 얻기 위해서는 스크롤의 용적을 증가 시키거나 고회전 속도가 필요함을 알 수 있다.

그림 17은 HCFC-22용의 스크롤압축기에 HFC-134a를 적용하였을 때의 압축특성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 얻은 것이다. 이 P-V 선도의 면적으로부터 계산한 단위압축효율은 HFC-134a의 경우 HCFC-22 대비 약 1.9% 정도 높게 나타났으며 흡입효율도 HFC-134a편이 약간 높다.

4.3 차량용 에어컨 스크롤 압축기

차량용 에어컨에서 압축기의 운전조건을 증발온도 0°C, 응축온도 70°C, 그리고 과냉각 및 과열도가 없다고 하면, 표9와 같은 열역학적 상

태량들을 얻을 수 있다. HFC-134a를 적용할 경우 토출압이 높아지며 압력비도 약 18.6% 높아진다. 이것은 냉장고용 왕복동 압축기에서 얻어진 것과 같은 경향이다. 이론성적계수도 1.8% 높으나 단위냉동능력당 흡입체적은 7% 정도 크게 나타났다.

그림 18은 CFC용의 스크롤압축기에 HFC-134a를 적용하였을 때의 P-V 선도를 컴퓨터시뮬레이션을 통해 얻은 것이다. 단위압축효율과 흡입효율은 HFC-134a의 경우 각각 2.56% 및 2.33% 정도 낮아 졌다.

4.4 종합검토

패키지 및 차량용 에어컨에 사용되는 스크롤 압축기에 대체냉매로서 HFC-134를 적용했을 때 이론적 성적계수는 패키지의 경우 거의 변화가 없고, 차량용의 경우에는 미소하게 증가한다.

표9 차량용 에어컨의 스크롤 압축기에서 CFC-12와 HFC-134a의 성능특성 비교

	HCFC-12	HFC-134a	비 고
P_1 (kPa)	308.55	293.32	
P_2 (kPa)	1878.6	2115.24	
$\frac{P_2}{P_1}$	6.083	7.212	18.6%
v_1 (m ³ /kg)	0.05571	0.06937	
v_2 (m ³ /kg)	0.009492	0.009413	
Δh_{21} ($\frac{kJ}{kg}$)	35.82	40.96	
Δh_{14} ($\frac{kJ}{kg}$)	80.61	93.8	
$\frac{\Delta h_{14}}{v_1}$ ($\frac{kJ}{m^3}$)	1446.97	1352.27	-6.5%
$\frac{v_1}{\Delta h_{14}}$ ($\frac{m^3}{kJ}$)	0.0006911	0.0007395	7%
C. O. P	2.25	2.29	1.8%
η_v	78.06%	76.24%	-2.33%
η_{ad}	63.65%	62.02%	-2.56%

($T_e=0^\circ\text{C}$, $T_c=70^\circ\text{C}$, $T_{s.H}=0^\circ\text{C}$, $T_{s.C}=0^\circ\text{C}$)

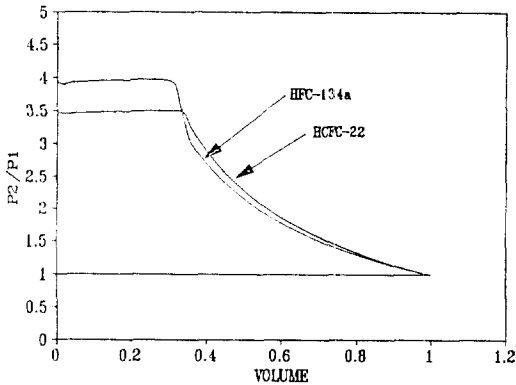


그림 17 패키지 에어컨 스크롤 압축기에서 HFC-134a의 적용에 따른 성능변화

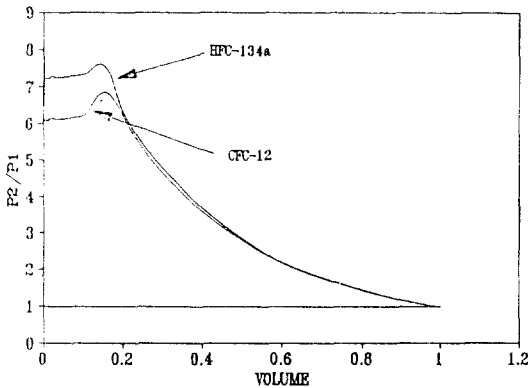


그림 18 자동차 에어컨 스크롤 압축기에서 HFC-134a의 적용에 따른 성능변화

효율면에 있어서는 성능해석 컴퓨터프로그램을 이용해 계산한 바로는 흡입효율은 팩키지의 경우 미세하게 상승하고, 차량용은 약간 감소하며, 이러한 경향은 단열압축효율에서도 나타난다. 물론 이러한 성능해석의 결과는 대상 스크롤 압축기의 사양에 따라 다소의 차이를 보이리라고 여겨지며 전반적으로 작동냉매가 바뀔에 따른 제 효율상의 변화는 미소하리라고 여겨진다. 다만 문제가 되는 것은 HFC-134를 적용함에 따른 단위냉동능력당 흡입체적이 증가하는 것인데 패키지 에어컨의 경우 그 증가가 57%에 달하며, 차량용의 경우 약 7% 정도이다.

5. 맺음말

기존의 전기냉장고나 자동차용 에어컨 압축기에 사용되고 있는 CFC-12는 그 규제의 시급성으로 인해 아직 고무호스나 밀봉재질 등과의 문제가 남아 있기는 하지만 전기냉장고의 경우는 HFC-134a+Ester Oil으로, 자동차 에어컨에서는 HFC-134a+PAG Oil으로 대체될 전망이다. Ester 오일이 PAG오일 보다 HFC-134a와 어울려 사용되기에 더 적합하지만, 자동차 에어컨용 압축기에서 PAG오일이 사용될 전망으로 되어 있는 것은 자동차 업계의 경우 일찍부터 재질 등에 대한 대책이 HFC-134+PAG Oil을 대상으로 이루어져 왔기 때문이다.

왕복동식 압축기의 경우 기존의 CFC-12용 설계구조를 지나고도 적합한 점도의 오일을 선정하기만 하면 대체냉매의 적용에 따른 성능상의 손실은 거의 없다는 주장이 있으나 지구온난화 등으로 인한 압축기 효율향상의 필연성에 부응하기 위해서는 대체냉매에 적합한 압축기 최적설계가 수행되어야 한다.

원심압축기의 경우 대체냉매의 적용시 이론 성적계수에서의 손실은 거의 없으나, 실시험에서는 유량 및 효율 등이 감소하는 것으로 보고되고 있다. 왕복동의 경우와는 달리 원심식에서 실제의 압축효율이 감소하는 것은 왕복동식의 경우 용적압축의 방식이므로 냉매의 유동특성 변화가 밸브통과시에는 다소 영향을 끼치나 실린더 내부의 유동양상은 압축특성에 거의 영향을 주지 못하며, 가스의 운동에너지를 압력에너지로 변환시켜주는 원심식 압축기에서는 임펠러 및 디퓨저의 변화가 압축 특성에 영향을 주기 때문에 여겨진다.

스크롤 압축기는 고효율, 저소음 등의 장점으로 인해 점차 그 사용범위가 확대될 전망으로서 차세대 압축기로 큰 역할을 담당할 것이므로 일단 HFC-134a를 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 성능해석을 수행하여 보았다. 기존의 냉매를 적용하였을 경우와 비교하여 보았을 때 효율상의 추가부담은 별로 없는 것으로 나타났다. 이는 스크롤 또한 용적형 압축을 수행하기 때문으로 여겨진다.

검토되어진 모든 종류의 압축기에서 대체냉매를 적용하였을 때 공통적으로 발생하는 심각

한 문제는 질량유량의 감소와 단위냉동능력당의 흡입 체적이 현저하게 증가한다는 것이다. 이는 대체냉매의 적용시 동일한 냉동능력을 얻기 위해서는 여건히 허락하는 범위내에서 압축기의 회전수를 늘리거나 압축기의 크기가 증대되어야만 함을 의미한다. 효율적으로 흡입유량을 늘리고 이에 따른 동력소모의 증대를 효과적으로 흡수하기 위해서는 이에 대한 압축기설계 및 제작기술의 꾸준한 연구개발이 필요하다.

참 고 문 헌

1. Hansen, P.E. and Snitkjer, L., 1991, "Development of Small Hermetic compressors for HFC 134a," 18th IIR Conference, Montreal, Canada
2. Japanese Association of Refrigeration, 1990, "Thermophysical Properties of Environmentally Acceptable Fluorocarbons : HFC-134a and HCFC-123"
3. Krueger, M. and Driessen, J.L., 1991, "The Potentiality of the HFC-134a Refrigerant in Replacing the CFC-12 for Domestic Refrigeration," 18th IIR Conference, Montreal, Canada
4. Zheng, J. and Pelava, J.W., 1991, "Performance Test of R-12 Alternatives in a Hermetic Compressor," 18th IIR Conference, Montreal, Canada
5. Lawson, C.C., 1991, "Performance of Alternative Refrigerants for CFC-12 in Stationary Refrigeration Equipment," 18th IIR Conference, Montreal, Canada
6. Riffe, R., 1991, "Efficiency of Refrigerator/Freezer Compressors Operating with R134a Refrigerant," 18th IIR Conference, Montreal, Canada
7. 中川辛二, 田中定司, 金子淳一, 1991, "대체냉매 프레온 R123사용시의 터보냉동기용 압축기의 공력특성," 터보기계 19권 4호
8. Klassen, H.A., et al, 1977, "Experimental Performance of a 13.65-Centimeter Tip Diameter Tandem Bladed Sweptback Centrifugal Compressor Designed for a Pressure Ratio of 6," NASA Technical Paper, 1091
9. 김현진/은탁, 1991 "에어콘용 고효율 Scroll Compressor의 설계 및 제작기술 개발," KALTECH-BS-PGR00100-9108, 상공부