

R-502 대체 혼합냉매의 성능에 관한 실험적 연구

Experimental study on the performance of R-502 alternative refrigerant mixtures

박 동 민*, 정 동 수**, 김 종 보**, 강 득 주***
D. M.Park, D. S.Jeoung, J. B. Kim, D. J.Kang

Key words : R-502(냉매 502), Transport refrigeration(수송냉동), Low temperature refrigeration (저온냉동), Alternative refrigerants(대체냉매)

Abstract

This paper is concerned about the performance of alternative refrigerants of R-502 which has been widely used in transport and low temperature refrigeration. A breadboard heat pump was constructed with counterflow heat exchangers and tested with R-502 and transitional alternatives of R-402A and R-402B and long-term alternatives of R-404A and R-507 to compare the performance of each refrigerant. Measurements were conducted at two different condensing temperatures of 43.3°C and 52.0°C and the evaporating temperature was varied over a range from -25°C to -5°C. The evaporator superheat and condenser subcooling were maintained constant at about 5°C for all tests. Test results showed that all alternative fluids tested in this research work can be used as 'drop-in' fluids to replace R-502 without any major problem. It is also found that in the long run HFC alternatives are to be used due to their favorable environmental characteristics and better performance.

기 호 설 명

C_p : 정압비열, kJ/kg·°C

COP : 성적계수

\dot{m} : 유량, kg/s

P : 압력, kPa

Q : 열량, kJ

T : 온도, °C

W : 압축기 소요동력, kW

그리스 문자

Δ : 차이(difference)

하 첨 자

* 인하대 대학원 기계공학과, 현 (주) 두원공조 기술연구소 연구원

** 인하대학교 기계공학과

*** (주) 제이오

c : 응축

e : 증발

1. 서 론

R-502는 48.8%의 R-22와 51.2%의 R-115를 혼합하여 만든 CFC계 공비혼합냉매(azeotropic refrigerant mixture)로서, 단일냉매와 같이 행동하며 R-22보다 용량이 크고 토출온도가 R-22보다 아주 낮아 R-22를 대체하여 쉽게 쓸 수 있으므로 저온용 냉동공업계에서 선호해온 냉매이다. 또한 오랫동안 이 냉매에 대한 기술개발이 잘 이루어져 응용범위가 다양하게 발전되어 왔다. 현재 R-502는 슈퍼마켓의 저온 냉동기, 냉동탑차, 저온 chiller, 과학기구의 냉각, 다단압축을 이용한 초저온 냉각장치 등 다양한 분야에서 사용되고 있으며, 문화 및 생활 수준이 향상되면서 저온냉동의 필요성이 급속도로 증가하고 있으므로 앞으로 그 필요성이 더 증가할 것이다.

그러나 기존의 CFC계열 냉매 R-12, R-113, R-114, R-115 등이 오존층 파괴와 지구 온난화의 주요 원인 중의 하나로 밝혀짐에 따라 1987년에 채택된 몬트리얼 의정서에 의하여 이들의 사용이 국제적으로 규제되고 있다^{(1), (2)}. R-502도 R-115를 포함하고 있으므로 규제대상에 속해 있으며 그 결과 R-502는 유럽에서는 1994년 말에, 미국에서는 1995년 말에 생산이 중지되었다⁽²⁾. 한국의 경우 개발도상국으로 분류되어 10년의 유예기간을 갖고 있기는 하지만, R-502가 지금까지 선진국에서만 생산되어 왔고 앞으로 계속해서 사용량의 규제를 받아야 한다는 점을 감안할 때 저온냉동용의 작동 유체로서 R-502를 대체할 냉매개발이 절실하게 요구되고 있다.

이러한 요구에 부응하기 위해 현재 전세계적으로 R-502 대체 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 미국 냉동공조협회(ARI)에서는 R-22 및 R-502 대체냉매를 체계적이며 효율적으로 평가 분석하기 위해 냉동공조기기 제조업자가 회원이 되고 냉매, 오일 제조회사 및 관련 연구기관이 참관인이 되는 대체냉매 평가 프로그램(Alternative Refrigerants Evaluation Program, AREP)을 구성하여 이미 제1차 연구를 종료하였으며, 현재는 제2차 연구를 진행하고 있다⁽³⁾. AREP의 연구결과 단일냉매로는 성능, 안정성, 취급의 용이함 등과 같은 제반성질

이 R-502와 비슷한 것은 현재까지 개발되지 않고 있으며 오직 조성비율을 잘 맞춘 혼합냉매만이 그 구성 단일냉매들의 장·단점들을 서로 보강하여 R-502와 비슷한 효율과 용량을 낼 수 있는 것으로 나타났다^{(3), (4)}.

이러한 연구 결과를 토대로 여러 종류의 혼합냉매들이 냉동공업계에 제시되고 있다. 현재로서는 과도기에 임시로 쓰거나 또는 기존 냉동기기에 사용할 수 있는 혼합냉매(HCFC 계열의 혼합냉매로서 염소함유)와 장기적으로 새로 제작되는 냉동기기에 응용할 수 있는 혼합냉매(HFC 계열의 혼합냉매로서 염소 비함유)의 두 가지로 구분할 수 있다^{(3), (4)}. 첫째로 과도기에 일정한 기간만 쓸 수 있는 냉매로는 R-22를 포함하고 있는 혼합냉매들을 들 수 있는데, 시스템의 큰 변화 없이 R-502 대체 냉매로 쓸 수 있으며 같은 윤활유를 사용할 수 있는 장점이 있다. 이같은 혼합냉매로서 R-402A, R-402B, R-403B, R-408A 등이 현재 전 세계에서 판매되고 있다. 이 중 R-403B는 56% R-22, 39% R-218, 5% R-290으로 구성된 혼합냉매로 지구 온난화 지수가 높은 R-218을 다량 포함하고 있어 장기적인 대체물로는 매우 부적합한 것으로 밝혀져 있다⁽³⁾. 둘째로 장기적인 관점에서 새로 제작되는 냉동기기에 응용될 수 있는 혼합냉매의 구성성분이 될 수 있는 단일 화합물로서는 R-32, R-125, R-134a, R-143a 등을 들 수 있는데, 이들 모두 독자적으로는 R-502를 대체할 수 없고 여러 가지 성질상 부족한 점이 있어 그들을 적절하게 혼합하여 서로의 단점을 상호 보강시켜서 R-502와 비슷한 성능과 용량을 갖추게 함으로써 R-502 대체냉매로 쓸 수 있게 되었다. 이같은 냉매로서는 현재 R-404A, R-407A, R-407B, R-507 등이 있으며 이들 또한 판매 시장에서 구할 수 있다. 이러한 R-502 대체냉매들의 조성 및 물성치들은 Table 1과 Table 2에 요약되어 있다^{(3), (4)}.

기존에 사용하던 냉매를 대체하기 위해서는 시스템에 대한 종합적인 연구 및 개발이 필요한데, 여기에는 새로운 냉매의 선정 및 물성치 파악, 열역학적 사이클 특성연구를 비롯하여 압축기 열교환기 등 냉동 사이클의 기본 구성장치 내에서 각 대체냉매의 거동에 대한 연구가 포함된다^{(5), (6)}. 단계적

Table 1 Physical and environmental properties of R-502 alternatives(transitional HCFC blends)

Refrigerant Number	Refrigerant and Molecular Weight				Average Blend Molecular Weight	Boiling Point °C (°F)	Critical Properties			ODP	HGWP	Temp. Glide °C (°F)
	R-22	R-125	R-143a	R-290			Temp. °C (°F)	Press. MPa (PSIa)	Volume m ³ /kg (ft ³ /lb)			
	86.5	120	84	44								
R-402A	38%	60%		2%	101.55	-49.0 (-56.2)	75.5 (167.9)	4.14 (599.7)	0.00185 (0.0296)	0.02	0.63	2.0 (3.6)
R-402B	60%	38%		2%	94.71	-47.4 (-53.3)	82.6 (180.7)	4.44 (644)	0.00189 (0.0302)	0.03	0.49	2.3 (4.1)
R-408A	47%	7%	46%		87	-43.5 (-46.3)	83.5 (182.3)	4.34 (629.5)		0.026	0.75	0.5 (0.9)

Table 2 Physical and environmental properties of R-502 alternatives(long term HCFC blends)

Refrigerant Number	Refrigerant and Molecular Weight				Average Blend Molecular Weight	Boiling Point °C (°F)	Critical Properties			ODP	HGWP	Temp. Glide °C (°F)
	R-32	R-125	R-134a	R-143a			Temp. °C (°F)	Press. MPa (PSIa)	Volume m ³ /kg (ft ³ /lb)			
	50.02	120	102	84								
R-404A		44%	4%	52%	97.6	-48.0 (-54.4)	72.6 (162.7)	3.79 (549.8)	0.00205 (0.0329)	0	0.94	0.7 (1.2)
R-507		50%		50%	98.86	46.7 (-52.11)	70.9 (159.62)	3.79 (550.2)	0.0020 (0.0320)	0	0.96	0
R-407A	20%	40%	40%		90.11	46.4 (-51.6)	83.0 (181.4)	4.54 (658.6)	0.0020 (0.0320)	0	0.49	6.6 (12)
R-407B	10%	70%	20%		102.9	-45.5 (-49.9)	76.0 (168.8)	4.16 (602.8)	0.00189 (0.0302)	0	0.70	4.4 (8)

으로 사라질 기존의 냉매를 대신할 대체냉매는 오존층 파괴지수가 0이어야 하며 지구 온난화에 미치는 영향도 적어야 한다. 뿐만 아니라 가연성과 독성이 없어야 하며, 냉동 시스템을 구성하는 기계 재료와 상용성도 있어야 한다. 아울러 대체냉매에 적용할 수 있는 적절한 윤활유도 개발되어야 한다. 또한 기존의 냉매를 대체할 수 있으려면 위의 조건들을 만족해야 함은 물론이고, 우선적으로 실제 시스템에 적용했을 때 기존의 냉매와 유사한 성능특성을 나타내야만 한다¹⁷⁾.

따라서 본 연구에서는 현재 개발, 시판되는 냉매들 중에서 R-402A, R-402B, R-404A 그리고 R-507의 성능을 실험으로 측정하여 비교해 보고, 궁

극적으로는 R-502를 대체할 수 있는 혼합냉매 시스템의 개발에 필요한 데이터 및 지침을 제공하려 한다.

2. 실험

2.1 실험 장치

본 연구에서는 Fig.1에 도시된 바와 같이 압축기, 증발기, 응축기, 팽창밸브 및 2차 유체 구동장치 등의 기본요소로 구성된 Breadboard 냉동기를 제작하여 실험을 수행했다. 냉동장치의 핵심 부품인 압축기로는 R-502용으로 제작된 밀폐형 왕복

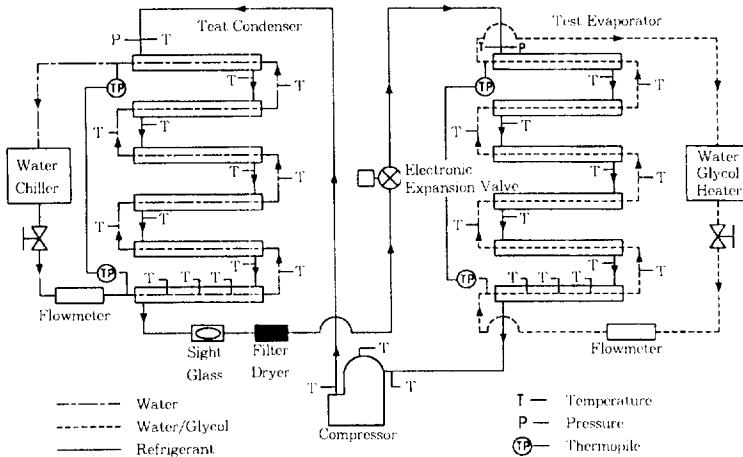


Fig.1 Schematic diagram of the alternative refrigerant test facility

동식 압축기를 사용했으며, 증발기와 응축기는 열전달 향상을 위하여 내관 외벽에 Fin을 가공해 놓은 이중원관 열교환기 스틱들로 제작하였다. 이 스틱의 길이는 609.6mm이고 내관과 외관의 외경은 각각 12.8mm와 22.8mm 그리고 두께는 1mm이다. 증발기와 응축기 모두 내관으로 2차 유체가 순환하도록 하고, 내관과 외관 사이의 환상공간으로 냉매가 순환하도록 하였으며, 두 유체의 흐름은 대항류가 되도록 하였다. 2차 열전달 유체로 응축기 쪽에는 물을 사용했고, 증발기 쪽에는 온도가 0°C 이하로 내려감으로 인한 결빙문제 때문에 물과 에틸렌 글라이콜의 혼합물(75/25 wt%)을 사용하였다.

시스템의 상태를 파악하는데 필요한 온도 및 압력을 측정하기 위해서 주요 위치에 열전대와 압력 변환기를 부착하였으며, 열량계산에 있어서 중요한 요소인 2차 유체인 입구와 출구사이의 온도차(ΔT)를 정확히 측정하기 위해서 2차 유체의 입/출구에는 열전대 외에 Thermopile을 부착하여 열전대로 읽은 입구온도와 출구온도의 차와 Thermopile에 의해 측정된 전위차를 Seebeck 계수로부터 얻어낸 상관식으로 계산한 입/출구 사이의 온도차를 비교할 수 있게 하였다. 또 증발기와 응축기를 지나는 냉매의 압력강하를 관찰하기 위해 3-방향 밸브를 압력변환기와 연결하여 각 열교환기의 입/출구 압력을 측정하였으며, 디지털 와트미터(Digital Wattmeter)를 이용하여 압축기 소요 동력을 측정

하였다. 냉매의 유량 및 증발 압력은 전자회로에 의해 구동되는 스텝핑 모터(Stepping Motor)와 연결된 팽창밸브로 조절하였고, 시스템의 상태와 적정 냉매량을 확인할 수 있도록 싸이트 글래스(Sight Glass)를 연결하였으며, 이물질과 수분침입시 미치는 악영향을 없애기 위해 팽창밸브 앞부분에 필터 드라이어(Filter Drier)를 설치하였다.

이상과 같은 장치를 통해서 얻은 결과들을 저장하기 위해 휴렛 팩커드사의 HP3852 자료 획득/제어 장치(Data Acquisition/Control Unit)을 이용하였고, Instrument Basic(I-Basic)언어로 작성된 프로그램을 이용하여 IBM PC와 접속시켜서 온도, 압력, 유량 등 각종 수치들을 컴퓨터의 하드 디스크에 저장하는 동시에 모니터로 직접 볼 수 있게 하였다.

2.2 실험 방법

실험으로 대체냉매의 시스템 성능을 평가하는 방법 중 시스템의 특성을 유지하면서 가장 간단하게 냉매들의 성능을 측정할 수 있는 방법은 'Drop-in 성능' 방법이다¹³⁾. 이 방법은 기존의 냉매를 사용하는 시스템을 그대로 유지한채 팽창밸브의 개도를 조절하는 것 등의 최소한도의 시스템 수정을 한 상태에서 대체냉매를 충전시켜 그 성능을 측정하는 방법이다¹⁷⁾. 아무 것도 없는 상태에서 처음부터 대체냉매를 사용하여 새로운 시스템을 개발하는 것에 비해

‘Drop-in 실험 방법’을 사용하면 시간과 노력과 자본을 크게 절감할 수 있으므로 지금까지 많은 연구자들이 이 방법을 채택해왔다. 이러한 추세에 따라 본 연구에서도 대체하고자 하는 냉매인 R-502와 그것의 대체냉매들의 ‘Drop-in 성능’을 비교하기 위하여 위에서 묘사한 실험장치를 바꾸지 않고 냉매 및 냉동유만을 바꾸어서 실험을 수행하였다.

이를 위해 우선 대체 대상 냉매인 R-502를 시스템에 충전하고 다음과 같은 방법으로 실험을 수행하여 대체 혼합냉매의 결과와 비교할 수 있는 기준 측정치를 만들었다. 냉매를 주입하기 전에 먼저 진공펌프를 이용하여 약 한 시간 동안 시스템내의 공기 및 불응축 가스 등을 제거했고, 원하는 작동 조건에 알맞는 냉매량을 주입할 수 있도록 시스템내의 변수들을 주시해 가며 사이트 글래스(Sight Glass)를 통해 사이클의 상태를 확인하면서 천천히 실험 대상 냉매를 주입하였다. 이 때 2차 유체의 온도는 각각의 수조에 연결된 온도조절기와 Heater 그리고 Chiller를 이용하여 원하는 온도로 일정하게 유지시켰고 실험조건에 따라 밸브의 개폐 조작으로 그 유량을 조절하였다. 원하는 조건이 만족될때까지 냉매량과 팽창밸브 등을 조절하는데는 보통 3~4시간 정도가 소요되었고, 그 후 정상 상태에서 1시간에 걸쳐 매 30초마다 데이터를 취해 컴퓨터에 수록했다.

이렇게 R-502 실험을 수행한 뒤 R-402B, R-402A, R-404A, R-507의 순으로 냉매를 바꾸고 R-502의 기준실험조건과 거의 같은 상태에서 실험을 수행했다. 냉매를 바꿀 때에는 실험을 마친 냉매를 배출시키고 진공펌프를 사용하여 시스템을 다시 초기화한 후에 실험 대상 냉매를 충전하였다. 또한 본 연구의 목표인 ‘Drop-in 성능 비교’를 위해서 냉매를 바꿀 때마다 일체의 장치는 그대로 두고 필터 드라이어(Filter Drier)만 교체하였다. 냉동유는 R-502와 R-402A 그리고 R-402B에 대해서는 점도가 $32\text{mm}^2/\text{s}$ (150 SUS)인 미네랄 오일을 사용했으며, R-404A와 R-507은 HFC계 냉매로서 염소를 포함하지 않는 냉매의 특성상 같은 점도의 폴리올 에스터 오일(Mobil, EAL Arctic 32)을 사용했다^{(4), (9)}.

2.3 실험 조건

여러 종류의 냉매의 성능을 비교하려면 증발 및 응축온도, 과열도, 과냉도 등을 일정하게 유지한 채 실험을 진행해야만 한다. 열교환기 내에서 압력 강하가 없다고 가정할 경우에 증발 및 응축 온도가 일정한 순수냉매와는 대조적으로 혼합냉매의 경우에는 증발시 온도가 올라가고 응축시 온도가 내려간다. 따라서 동일한 조건하에서 실험 데이터를 비교하기 위해서는 증발 및 응축 온도의 기준을 선정해야만 하며, 본 연구에서는 이를 위해 미국 냉동공조협회에서 논의되어 결정된 지침을 따랐다⁽³⁾. 이 지침에 의하면, 증발 온도는 증발기 입구와 출구의 압력에 상응하는 포화 온도의 평균치로 정의된다. 실제로 이렇게 정의된 증발 온도는 증발기의 중간 부분인 두 번째 열교환기 끝과 세 번째 열교환기 입구 사이에 부착된 열전대가 읽은 값과 0.5°C 내에서 일치했다. 응축온도 역시 비슷한 방법으로 정했다.

한편 증발기측의 과열도는 증발기 출구에서 측정된 냉매의 온도와 출구의 압력에 상응하는 포화 온도와의 차로 정했고, 응축기측의 과냉도는 응축기 출구의 압력에 상응하는 포화 온도와 출구에서 측정된 냉매의 온도와의 차로 정했다. 모든 실험에서 가능한 한 과열도와 과냉도를 5°C 로 유지하려 했으며, 그 편차는 0.5°C 내외였다. 과열도는 증발기측 2차 유체인 물/에틸렌 글라이콜의 혼합물의 온도와 유량으로 조절하였고 과냉도는 실험장치에 충전된 총 냉매량으로 조절하였다. 특히 많은 연구자들이 조사한 바와 같이 HFC의 경우에는 과냉도에 따른 시스템의 성능변화가 CFC보다 더 민감하기 때문에 올바른 ‘Drop-in 성능’ 비교를 위해 냉매량 조절에 각별히 유의하였다⁽⁶⁾. 동일한 상태에서 비교하였을 때, 전반적으로 대체냉매들의 충전량이 R-502와 거의 같거나 약간 적은 것으로 나타났다.

2.4 실험 데이터

응축기에는 공냉식 및 수냉식이 있으며, R-502 대체냉매를 평가할 때는 이 두 가지 응축기의 온도 조건에서 데이터를 취해 그 성능을 평가하는 것이 관례이다^{(3), (4)}. 따라서 본 논문에서도 응축 온도(T_c)를

52.0°C(126°F)와 43.3°C(110°F)로 고정된 채 모든 실험을 진행하였다. 일단 응축 온도가 정해지면 각 냉매에 대해서 처음에는 약 -25°C 정도의 증발온도(T_e)에서 실험을 수행한 후 -5°C 정도까지 3~4°C 정도씩 차이를 두어가면서 실험을 하여 5~6개의 데이터를 취했다.

냉동시스템의 성능을 비교, 분석하기 위해서는 압축기 소요동력과 냉동용량을 측정해야 하는데, 소요동력은 밀폐형 압축기를 사용했기 때문에 전력량계(Wattmeter)를 이용하여 압축기의 크랭크축과 연결된 구동모터의 일을 측정하여 대신하였으며, 냉동용량은 증발기쪽 2차 유체인 물/에틸렌 글라이콜(75/25wt%)의 입/출구 사이의 온도차와 유량을 측정하여 다음과 같은 식으로 구하였다.

$$\dot{Q}_e = \dot{m} C_p \Delta T \quad (1)$$

여기서 ΔT =Thermopile에 의해서 측정된 2차 유체의 입/출구 사이의 온도차이다.

본 연구에서는 2차 유체의 유량을 측정하기 위해 터빈 미터를 사용하였다. 터빈 미터는 체적유량계로 유체의 점성 등에 의해 측정치가 크게 영향을 받으므로 정확한 유량 측정을 위해 정밀한 유량계로 보정할 필요가 있다. 이를 위해 Coriolis 힘의 측정 원리를 이용하므로 유체의 물성치의 영향을 받지 않으며 정도가 0.2% 이하인 질량유량계를 사용하여 터빈 미터를 보정하였다. 특히 에틸렌 글라이콜은 온도에 따른 밀도의 변화가 순수한 물보다 크므로 밀도의 변화에 의한 영향을 고려해야 하며, 또 같은 온도라 하더라도 유량에 따라 터빈 미터의 회전수는 변하게 된다. 이와 같은 사실을 염두에 두고 정확한 보정식을 얻기 위하여 실제 실험시 측정되리라고 예상한 온도범위보다 좀 더 넓은 온도 구간에서 유량을 변화시키면서 데이터를 취한 뒤 회귀분석을 통해 온도와 회전수에 대한 4차식으로 보정식을 만들어 사용했다. 물/에틸렌 글라이콜의 비열은 순수한 물의 비열보다 온도 의존성이 강하므로 상수로 하지 않고 미국냉동공조학회에서 제시하고 있는 수치를 근거로 하여 온도에 대한 4차의 함수를 이용하여 구하였다⁽¹⁰⁾.

3. 결과 및 검토

3.1 대체냉매의 성능비교

냉동시스템의 성능평가지 가장 중요하게 생각되는 변수 중 하나는 냉동용량이다. 본 실험에서는 앞 절에서 언급했던 것처럼 증발기쪽 2차 유체인 물/에틸렌 글라이콜의 유량과 비열 그리고 증발기 입구온도와 출구온도의 차를 곱하여 구하였고, 각 냉매의 냉동용량을 증발기 온도의 함수로 Fig.2와 Fig.3에 도시하였다. 냉동용량은 두 응축온도에 대

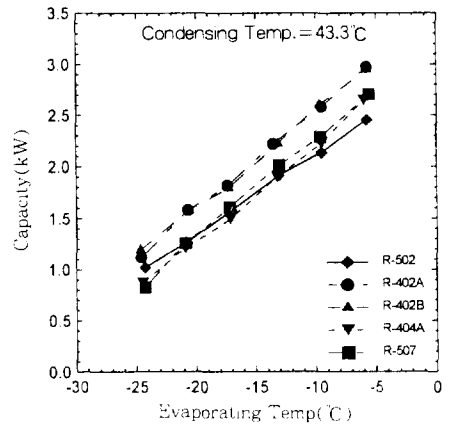


Fig.2 Refrigeration capacity of R-502 and its alternatives($T_c=43.3^\circ\text{C}$)

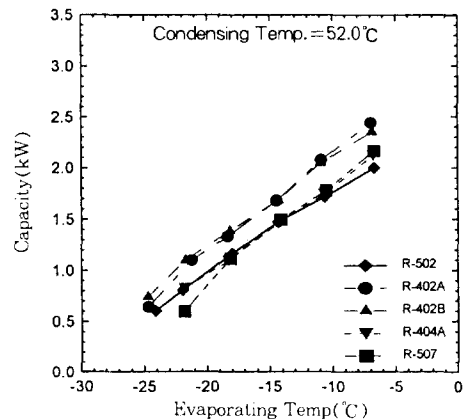


Fig.3 Refrigeration capacity of R-502 and its alternatives($T_c=52.0^\circ\text{C}$)

해서 서로 비슷한 양상을 나타내는데, HCFC 계열의 냉매인 R-402A와 R-402B는 전 범위에서 R-502보다 용량이 크고, HFC 계열의 냉매인 R-404A와 R-507은 R-502와 거의 -동일한 용량을 내는 것으로 밝혀졌다. 구체적인 수치를 살펴보면, R-402A는 R-502에 비해 평균 18.5% 정도 용량이 크며, 최저 6.8%에서 최고 36.8% 정도 용량이 증가한다. 반면에 R-402B는 R-502에 비해 평균 20.3% 정도 용량이 크며, 최저 13.8%에서 최고 36.7% 정도 용량이 증가한다. 또한 두 냉매 모두 증발온도가 올라갈수록 그 증가폭이 약간 커지는 특징을 나타낸다.

한편 R-404A와 R-507은 낮은 증발온도에서는 R-502보다 냉동용량이 작지만, 증발온도가 올라감에 따라 용량이 커지며 증발온도가 약 $-18^{\circ}\text{C} \sim -13^{\circ}\text{C}$ 인 구간에서 R-502와 비슷하다가 좀더 높은 온도에서는 결국 R-502보다 용량이 더 커진다. 전 온도 구간에서 R-404A의 평균 용량은 R-502와 비슷하며, R-502에 비해 최대 14.4%의 용량 감소를 보였고, 최대 7.9%의 용량 증가를 보였다. R-507의 평균 용량도 R-502와 비슷하며, R-502에 비해 최대 25.6%의 용량감소를 보였고 최대 10.1%의 용량 증가를 보였다.

Fig.4 및 Fig.5는 각각의 냉매에 대해서 증발온도의 변화에 따른 소요동력의 변화를 도시한 것이

다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼, 본 실험에서 검토된 대체냉매들은 같은 증발온도에서 한결같이 기존의 R-502 보다 더 많은 압축일을 필요로 하고 있다. 특히 눈여겨보아야 할 점은 R-22를 포함하고 있는 과도기용 R-402A와 R-402B가 장기적 대체냉매인 R-404A와 R-507보다 그 증가폭이 더 크다는 것이다. 수치상으로 비교를 해 보면, R-402A와 R-402B의 압축일은 R-502에 비해서 각각 평균 15% 정도 증가하는 반면에 R-404A와 R-507의 압축일은 평균 4.0% 및 1.4% 정도밖에 증가하지 않는다. 또 R-402A와 R-402B는 R-502와 거의 같은 기유키를 갖고 있으므로 일정한 폭을 유지하며 증가하는데 반해, R-404A와 R-507의 경우는 증발온도가 낮은 곳에서는 R-502와 거의 같지만 증발온도가 높아짐에 따라 증가폭이 커져서 각각 최대 7.9%와 7.0%까지 증가하는 서로 다른 양상을 보여준다. 압축기 소요동력의 증가는 필연적으로 시스템 성능의 감소를 동반하므로 위 사실만 가지고 판단해 볼 때, 장기적 관점의 대체냉매인 R-404A와 R-507이 R-502 대체에 더 유리하다고 할 수 있다.

냉동시스템이나 냉매의 성능을 평가할 때 냉동용량과 더불어 가장 중요하게 여겨지는 변수는 성능계수(Coefficient of Performance, COP)이다. COP는 냉동용량을 압축기 동력으로 나누어 준 값

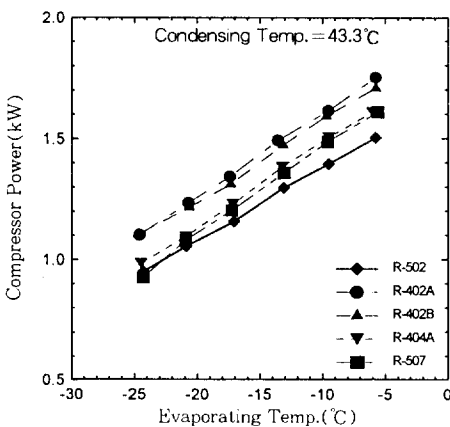


Fig.4 Compressor power of R-502 and its alternatives($T_c = 43.3^{\circ}\text{C}$)

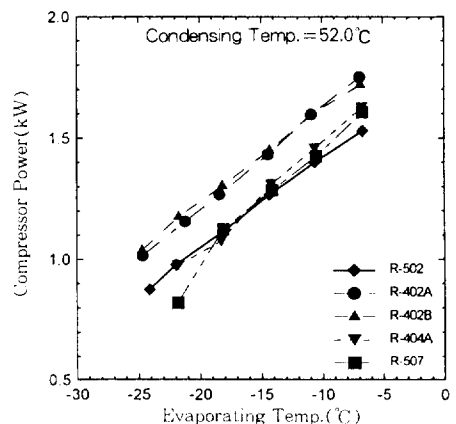


Fig.5 Compressor power of R-502 and its alternatives($T_c = 52.0^{\circ}\text{C}$)

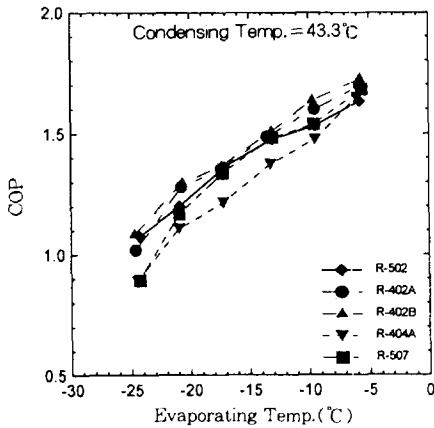


Fig.6 COP of R-502 and its alternatives($T_c=43.3^{\circ}\text{C}$)

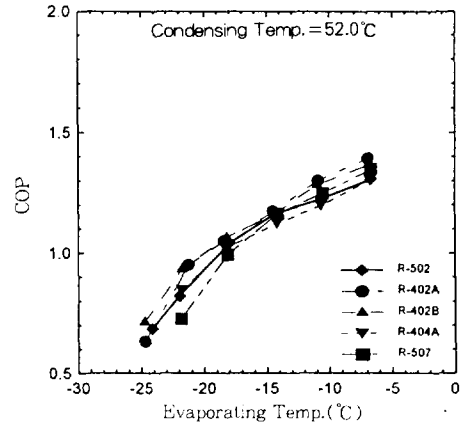


Fig.7 COP of R-502 and its alternatives($T_c=52.0^{\circ}\text{C}$)

으로 그 안에 경제적 개념이 포함되어 있다. 또한 냉동 공조기를 사용할 때 필연적으로 발생하는 지구 온난화의 간접 효과를 줄이기 위해서는 효율을 높여야 하므로, 무엇보다도 오존층 붕괴를 일으키지 않으며 COP가 좋은 냉매를 선정하는 것이 매우 중요하다. 따라서 같은 냉동용량을 낼 때에는 소요동력이 적을수록, 같은 소요동력을 쓸 때에는 냉동용량이 클수록 그 시스템이나 냉매의 성능이 좋다고 할 수 있다.

Fig.6과 Fig.7은 본 연구에서 검토된 네 가지 대체냉매들의 COP를 보여준다. 한 냉매씩 R-502와 비교하여 살펴보면, 우선 HCFC 냉매인 R-402A는 응축온도가 43.3°C 일 때와 52.0°C 일 때 모두 낮은 증발온도에서는 R-502의 COP보다 약간 작거나 거의 같다가 약 -15°C 를 기점으로 R-502의 COP를 능가함을 알 수 있다. R-502에 비해 전 온도구간에서 COP가 평균적으로 2.7% 정도 향상되며, 특히 높은 응축온도에서는 증발온도가 올라감에 따라서 그 향상 폭이 커진다. 같은 과도기용 대체냉매인 R-402B도 R-402A와 그 특성이 매우 비슷하며, R-502에 비해 전 온도구간에서 평균적으로는 4.4% 정도 COP가 향상되는 것으로 나타났다. 그러나 R-402A와는 달리 낮은 응축 온도에서 증발온도가 올라감에 따라 그 향상 폭이 커진다.

한편, 장기적 대체냉매인 R-404A는 전 구간에

서 R-502보다 COP가 낮은 것으로 나타났으며, 특히 증발온도가 낮은 경우(응축온도 43.3°C)에 성능저하가 뚜렷했고, 최고 17.3%까지 저하되는 것으로 나타났다. 그러나 증발온도가 높아지면 R-502와의 차이가 좁아지며 최고 2.8% 정도 성능이 향상된다. 역시 같은 HFC계 냉매인 R-507은 기존냉매인 R-502와 거의 성능이 같은데, 다만 증발온도가 -20°C 이하로 내려가면 성능이 많이 저하됨을 알 수 있다.(Fig.6, Fig.7 참조)

시스템의 신뢰성에 가장 큰 영향을 미치는 변수 중 하나는 냉매의 압축기 토출온도이다. Fig.8과 Fig.9는 두 개의 응축온도에 대해 압축기 출구쪽에서 측정된 과열증기냉매의 토출온도를 보여준다. 그림을 통해 금방 알 수 있는 것은 기존 냉매인 R-502 데이터를 중심으로 과도기용 대체냉매들의 데이터는 위쪽에 그리고 장기적 대체냉매들의 데이터는 아래쪽에 있다는 것이다. 조금 더 자세히 살펴보면, R-402A는 전 실험구간에서 R-502와 거의 같은 온도를 나타내며, R-402B는 R-502보다 평균 11.0°C 정도 높은 온도를 보이는데, 최저 6.4°C 에서 최고 15.4°C 높음을 알 수 있다. 한편 장기적 대체냉매들은 전 구간에서 비교적 일정한 온도만큼 낮게 나타나는데, R-404A는 R-502에 비해 평균 6.3°C 낮으며 최저 4.8°C 에서 최고 8.7°C 낮다. R-507은 평균 6.7°C 낮으며 최저 3.8°C 에서 최고 9.9°C 낮다.

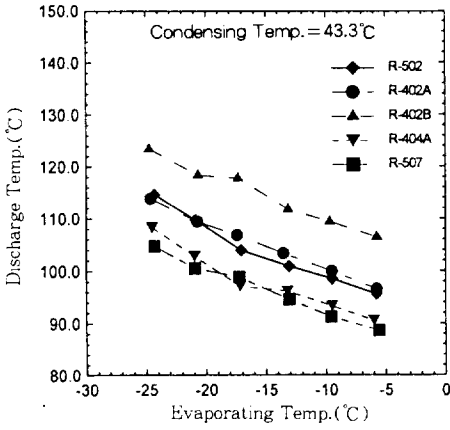


Fig.8 Discharge temperature of R-502 and its alternatives($T_c=43.3^\circ\text{C}$)

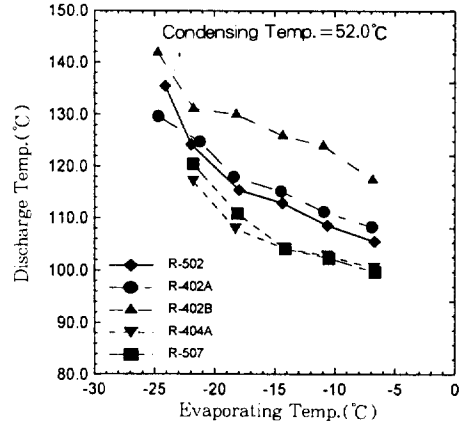


Fig.9 Discharge temperature of R-502 and its alternatives($T_c=52.0^\circ\text{C}$)

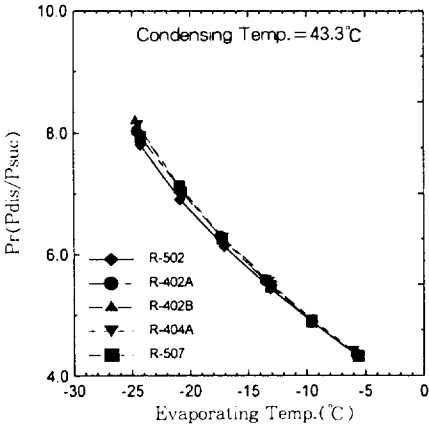


Fig.10 Pressure ratio of R-502 and its alternatives($T_c=43.3^\circ\text{C}$)

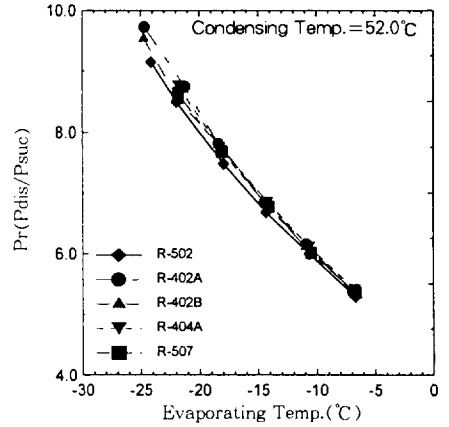


Fig.11 Pressure ratio of R-502 and its alternatives($T_c=52.0^\circ\text{C}$)

압축기 토출온도는 특히 압축기의 수명과 관계가 깊다. 토출온도가 너무 높게 되면 냉동유나 냉매가 분해될 수 있고 그로 인하여 윤활에 문제가 생기고 시스템내의 산성이 높아지게 되며 더 나아가 부식이라든가 동도금이 생겨 냉동기기의 운영에 지장을 초래하며 압축기의 밸브를 손상시킴으로 수명을 단축시키는 원인이 된다¹¹⁾. 따라서, 냉동용량이나 소요동력 등 다른 조건이 동일하다면, 가능한 한 토출온도가 낮은 대체냉매를 선택하는 것이 합리적인데 이 면에서는 본 실험 결과를 토대로 볼 때 장기적 HFC 대체냉매들이 더 좋은 조건을 갖추고 있

음을 알 수 있다.

마지막으로 Fig.10과 Fig.11은 전체 증발온도에서의 압축기의 압력비(Pressure Ratio : Pr, 압축기 토출압력/압축기 흡입압력)를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이, 이번 실험에서 검토된 모든 대체 냉매들의 압력비는 단 한 경우를 제외하고는 전 온도구간에서 R-502보다 약간 상회하고 있다. 네 가지 냉매를 통틀어서 볼 때 낮은 응축온도에서는 R-502에 비해 압축비가 최저 -0.2%에서 최고 5.0% 증가하며 높은 응축온도에서는 최저 0.2%에서 최고 6.3% 증가한다. 특히 응축온도가 높을

수축 또 증발온도가 낮을수록 R-502와 차이가 더 크게됨을 볼 수 있는데, 이것은 냉매의 유량이 적을수록 또 흡입압력과 토출압력의 차이가 커짐에 따라 압력비 차가 증가하기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 이 정도의 압력비 증가는 R-502용으로 제작된 압축기에 위의 네 가지 냉매들을 넣어 사용해도 아무 문제도 일으키지 않을 것임을 시사해준다. 그러므로 압력비의 관점에서는 시스템의 변경 없이도 대체냉매의 사용이 가능하다고 할 수 있다.

이처럼 성능에 대한 사항들을 조합해 보면, 대체로 같은 계열이며 혼합물을 구성하는 순수냉매들이 동일하거나(조성비는 다름) 약간만 다른 대체 혼합냉매들은 서로 비슷한 특성을 갖고 있으며, 그에 따라 시스템 내에서의 거동도 매우 유사하다는 결론을 이끌어 낼 수 있다. 전반적으로 시스템의 성능 면에서는 과도기용 대체냉매가 우수한 것을 알 수 있다.

3.2 이론 및 실험 값과의 비교

Shiflett와 Yokozeki⁽¹²⁾는 R-402A와 R-402B 그리고 R-404A에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 이들은 세 개의 다른 응축온도(54.4°C, 43.3°C, 32.2°C)에 대하여 증발온도를 -40°C ~ -17.8°C로 변화시키며 열역학적 성능을 평가하였다. 이들의 시뮬레이션 결과 R-402A의 경우 토출온도는 R-502와 같고 냉동용량은 6%~11% 증가하며 COP는 미소하게 낮은 것으로 나왔다. R-402B의 경우 토출온도는 5°C~15°C 높고 냉동용량은 4%~7% 증가하며 COP는 0%~2% 높은 것으로 나왔다. 또 R-404A의 경우 토출온도는 5°C~8°C 낮고 냉동용량은 4%~5% 증가하며 COP는 약 2% 높은 것으로 나왔다. 한편 박운범⁽¹³⁾은 본 연구의 실험장치와 유사한 장치를 시뮬레이션 모델로 사용하여 증발온도를 -30°C, -20°C, -10°C로 변화시켜가면서 40°C와 30°C의 응축기 온도에서 시뮬레이션을 수행하였다. 비록 박운범의 시뮬레이션 조건이 Shiflett와 Yokozeki의 실험 조건과 달라 절대적인 비교는 할 수 없지만, R-502를 기준으로한 대체냉매들의 상대적 성능 순위 및 용량 등은 매우 유사했다. 이 외에도 Snelson 등⁽¹⁴⁾, Barreau 등⁽¹⁵⁾, Weng과 Wu⁽¹⁶⁾(이상은 R-404A

에 대해서만), 그리고 Kwon^{(4), (17)}의 실험결과들도 서로 비슷한 양상을 보여주고 있다. 특히 이들은 모두 본 실험에서와 마찬가지로 대체냉매의 'drop-in 성능'을 평가했기에 이들과의 비교는 큰 의미가 있다고 할 수 있다. Snelson 등⁽¹⁴⁾은 여러 가지 대체냉매들의 'Drop-in' 성능에 대한 실험을 연속적으로 수행하였는데, 이들의 실험결과 R-404A의 경우 전반적으로 토출온도는 4.8°C~6.3°C 낮고 냉동용량은 증발온도가 낮은 구간에서는 약간 적으며 증발온도가 올라감에 따라 최고 5.5%까지 증가하는 것으로 나타났다. COP는 전 구간에서 R-502보다 약간 적게 나타났다.

또한 가장 최근에 열린 국제 오존보호 기술회의에서 Barreau 등⁽¹⁵⁾, Weng과 Wu⁽¹⁶⁾, 그리고 Kwon⁽¹⁷⁾은 R-404A가 최적의 R-502 대체냉매로서 현재 유럽전역에서 모든 산업용 시설에 사용되고 있다고 보고하였으며, 또한 앞으로 수년 내에 R-404A가 전 세계적으로 쓰이게 될 것으로 예상하고 있다. 그 중에서 Weng과 Wu⁽¹⁵⁾의 실험결과는 본 실험결과와 거의 같으며 특히 냉동용량과 COP의 변화를 비교해 보면 본 논문의 Fig.2 및 Fig.3 그리고 Fig.6 및 Fig.7과 같이 R-404A와 R-502의 그래프가 서로 교차하는 것을 볼 수 있다. Kwon⁽¹⁷⁾의 실험결과도 같은 경향을 보여주고 있다. 이같은 비교를 통해서 본 실험결과가 기존의 시뮬레이션 및 실험결과들과 일치함을 알 수 있고, 이로써 간접적으로 본 실험장치 및 데이터의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 R-502 대체냉매들의 'Drop-in 성능'을 실험적으로 측정하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 연구된 네 가지 냉매 모두 R-502 'Drop-in 대체'에 전반적으로 적합한 것으로 판명되었다.
- 2) 압축기 소요동력 면에서는 장기적 대체냉매인 R-404A와 R-507이 더 유리하게 나타났다.
- 3) 냉동용량 면에서는 과도기적 대체냉매인 R-402A와 R-402B가 우수한 것으로 나타났다.
- 4) 성능계수는 네 가지 냉매 모두 R-502와 거

의 비슷했다.

5) R-402B를 제외하고는 기존의 R-502에 비해 토출온도가 낮은 것으로 나타났다. R-402B로 대체할 경우에는 토출온도의 상승에 대한 조치를 취해야 할 것으로 사료된다.

6) 검토된 모든 사항들을 고려해 볼 때 HFC계 냉매가 대체에 더 적합한 것으로 여겨지며 그 중에서도 R-507이 더 뛰어나다고 할 수 있다. 그 이유는 살펴본 네 가지 대체냉매들 중에서 동력은 가장 적게 소비하면서도 기존 냉매인 R-502의 용량을 대체적으로 능가하며, 그에 따라 COP도 R-502만큼 되기 때문이다.

후 기

본 연구는 1996년도 과학재단 핵심전문연구(과제번호 : 961-1006-047-2)의 연구비로 수행되었으며, 이에 과학재단에 감사를 드린다. 또한 냉매를 제공해준 럭키 얼라이드시그날, 듀폰 코리아, 울산 화학과 윤활유를 제공해준 모빌 코리아, 이수화학, 그리고 냉동기 제작에 도움을 준 (주) 제이오에 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- Molina, M. J. and Rowland, F. S., 1974, "Stratospheric sink for chlorofluoromethane : chlorine Atom catalyzed destruction of ozone", Nature, Vol. 249, pp.810~812.
- Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer, Final Act, United Nations Environment Programme, 1987.
- ARI, "R22 and R502 Alternative Refrigerants Evaluation Program", US Air-conditioning and Refrigeration Institute, 1992~1997.
- 권승림, 1994, "냉동설비의 R-22, R-502 대체동향", 1994 오존층 파괴물질 사용 합리화 대책 설명회, 한국 정밀 화학 공업 진흥회, pp.81~98.
- 권승림, 박윤범, 정동수, 김종보, 강득주, 1995, "저온용 R-502 대체냉매의 이론 및 실험적 평가", 공기조화·냉동공학 논문집, 제7권, 제4호, pp.654~666.
- Didion, D. A., and Bivens, D. B., 1990, "Role of refrigerant mixtures as alternatives to CFCs", International Journal of Refrigeration, Vol. B, pp.163~175.
- 주종문, 박영무, 1995, "R-22 대체용 혼합냉매의 Drop-in 열역학적 성능 계산", 공기조화 냉동공학회 1995년도 하계학술발표논문집, pp.255~262.
- Linton, J. W. and Snelson, W. K., 1992, "Effect of Condenser Liquid Subcooling on System Performance for Refrigerants CFC-12, HFC-134a, and HFC-152a", ASHRAE Trans, Vol.98, part1, 3558.
- Didion, D. A., 1994, "The Impact of Ozone-Safe Refrigerants on Refrigeration Machinery Performance and Operation", Proceedings of the Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- ASHRAE, 1993, "Fundamentals Handbook", Ch.18, pp.5~7.
- Stoecker, W. F. and Jones, J. W., 1982, "Refrigeration and Air Conditioning", Second Edition, McGraw-Hill, pp.205~220.
- Shiflett, M. B. and Yokozeki, A., 1993, "Near-azeotropic refrigerants as alternatives for R-502", ASHRAE Journal 35(2), pp.24~28
- 박윤범, 1995, "R-502 대체 혼합냉매들의 성능에 관한 연구", 인하대학교 기계공학과 공학 석사 학위논문.
- Snelson, W. K., Linton, J. W., Triebe, A. R. and Hearty, P. F., 1995, "System Drop-in Tests of Refrigerant Blend R-125/R-143a/R-134a (44%/52%/4%) Compared to R-502", ASHRAE Trans, Vol.101, part1, pp.17~24.

15. Barreau, M., Macaudiere, S., Weiss, P. and Joubert, M., 1996, "R-404A in industrial refrigeration application for CFC-502 and HCFC-22 replacement", Proceedings of the International Conference on Ozone Protection Technologies, 1996. 10. US. Washington. D. C. pp.81~90.
16. Weng, W. and Wu, Z., 1996, "A comparison of performance between R404A and R502", Proceedings of the International Conference on Ozone protection Technologies, 1996. 10. US. Washington. D. C. pp.91~96.
17. Kwon, S. L., 1996, "Practical evaluation results of alternative refrigerants and their application in transport refrigeration system", Proceedings of the International Conference on Ozone Protection Technologies, 1996. 10. US. Washington. D. C. pp.290~299.