

R-407C 냉매의 흐름비등 열전달 특성

Flow boiling heat transfer characteristics of R-407C ternary refrigerant mixtures

오 종택
J. T. Oh
여수대학교 냉동공학과



- 1957년생
- 열교환기 및 열펌프 시스템의 대체 냉매사용, 기액이상 열전달 및 냉동시스템 분야에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

1974년 6월 Rowland와 Molina가 CFCs 등의 화학물질이 성층권의 오존층을 파괴시킨다는 가설의 발표¹⁾는 많은 환경론자들의 관심과 함께 논쟁의 대상이 되었다. 이 가설은 1985년 10월 Farman 등의 영국 남극조사팀에 의해 남극상공의 성층권 오존이 1970년대에 비해 약 40% 정도 감소된 것이 확인되면서 지구전체의 심각한 환경문제로 대두되었다.²⁾

오존층 보호의 절박함을 인식한 선진국들은 1987년 9월 UNEP(국제환경프로그램) 주관하에 23개국이 오존층을 보호하기 위한 몬트리올 의정서를 체결하였고, 우리나라는 1992년 5월 의정서의 가입국이 되었다. 1992년 11월 덴마크의 코펜하겐에서 열린 제4차 가입국회의에서는 93개국이 오존층 보호를 위해 선진국은 1996년 1월 1일부터 CFC 등의 물질을 전폐하도록 정하는 한편, 그동안 경과물질로서 규정한 HCFC도 규제물질로 규정하고 삭감일정을 정하였다.

HCFC물질에 대한 규제강화는 1995년 3월에 발표된 UNEP의 TEAP(기술 및 경제평가패널) 보고서와 1995년 12월 비엔나에서 열린 몬트리올 의정서 제7차 가입국 회의에서 더욱더 구체화 되

었다. 즉, HCFC 물질에 대해 선진국은 그림 1과 같이 규제 일정이 단축되었고, 개발도상국은 2015년의 HCFC 소비량을 기준으로 2016년부터 생산량을 동결하여 2040년에 전폐하도록 정하였으며, 2000년에 오존층 동향을 분석한 후 일정을 재검토하도록 하였다.³⁻⁵⁾ 이러한 규제는 1998년 11월 아르헨티나 부에노스아이레스에서 개최된 기후변화협약 제 4차 당사국총회에서 175개국이 1997년 12월 '교토의정서⁶⁾'의 핵심사항을 논의하여 온실가스 감축의무를 이행하지 않는 국가에 대한 제재방안 등 3가지 사항에 대한 '부에노스아이레스 행동계획⁷⁾'을 채택한 것과 같이 더욱 더 강화될 것으로 예측된다. 특히 우리나라는 1997년 온실가스

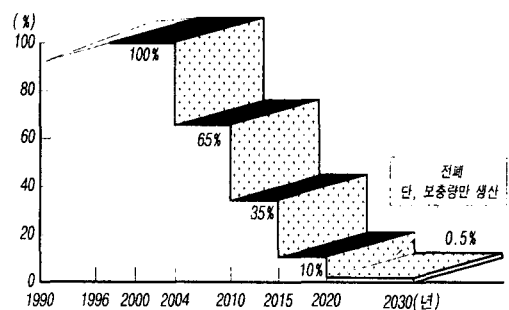


그림 1 HCFC의 선진국 사용 규제

배출량이 1억4천1백만톤(세계배출량의 1.8%)으로 세계 11위가 되는 것을 감안하면 지구온난화방지 및 오존층보호등 세계적 차원의 지구환경문제 해결을 위해 선진국과 같은 규제가 따를 것으로 사료된다. 그러므로 CFC 및 HCFC 물질을 이용하는 국내산업과 지구환경보호를 위해서라도 대체물질 개발이 절실히 필요하다. CFC 단일냉매의 대체물질 개발은 거의 완성단계이지만 HCFC 단일냉매인 R-22의 대체물질은 오존층 및 지구환경을 보호하면서 그와 같은 특성을 지닌 순수(단일)냉매가 최근까지 개발되지 못했기 때문에 선진국들은 HFC 혼합냉매와 탄화수소계의 자연냉매 개발에 총력을 기울이고 있다.

미국 및 일본 등은 유럽에서 R-22의 대체냉매로 개발하고 있는 탄화수소계 냉매의 가연성 및 폭발성 때문에 HFC 2성분 및 3성분 혼합냉매인 R-410A와 R-407C를 R-22의 대체냉매로 거의 확실시하고 있으며, 그 중에서도 R-410A보다 R-22와 증기압이 거의 비슷한 R-407C를 이용하여 중소형 공조기를 제조회한 단계이다.

따라서 본고에서는 R-407C 3성분 혼합냉매의 특성, 그 냉매의 평활관(smooth tube) 및 마이크로핀관(microfin tube)에서의 흐름비등 열전달 특

성, 또한 최근에 연구가 되고 있는 미세관(micro-channels)에서의 흐름비등 열전달 특성에 대하여 최근의 연구 동향을 중심으로 간략히 기술하고자 한다.

2. R-407 3성분 혼합냉매의 특성

중소형 공조기 및 칠러(chiller)에 널리 사용되고 있는 R-22의 대체냉매로 유력한 HFC 단일냉매 및 혼합냉매의 특성은 표 1과 같다.

R-407C 3성분 혼합냉매는 그림 2와 같이 일정한 압력에서 온도구배(temperature glide)의 범위가 0.5~5℃인 비공비(非共沸, nonazeotropic, zeotropic) 혼합냉매로써 증발 및 응축온도는 혼

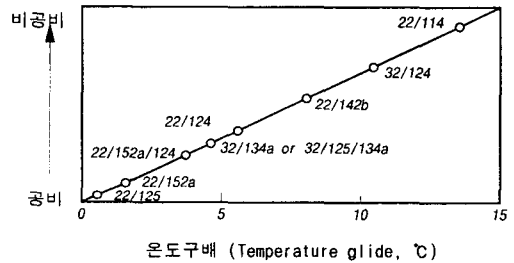


그림 2 혼합냉매의 온도구배 영역

표 1 단일냉매 HFC-32, 125, 134a와 혼합냉매의 특성

		단 일 냉 매				혼 합 냉 매		
						비 공 비		유사공비
냉 매		HCFC-22	HFC-32	HFC-125	HFC-134a	HFC-32/134a (30/70 wt%)	R-470C	R-410A
냉 매 물 성	응축압력 [kPa] (50℃)	1940 (중압)	3140 (고압)	2530 (고압)	1320 (저압)	1970 (중압)	2110 (중압)	3060 (고압)
	ODP	0.05	0	0	0	0	0	0
	GWP	0.37	0.13	0.79	0.30	0.25	0.38	0.46
	체적능력 (기준: R-22)	100	162	87	62	96	98	140
	물성COP (기준: R-22)	100	95	73	98	99.5	95	89
연소성 (ASHRAE 판정기준)		불연	미(微)연	불연	불연	약(弱)연	불연	불연

합냉매의 증기성분에 따라 달라진다.⁸⁾ 일정한 압력에서 R-407C와 같은 비공비 3성분 혼합냉매의 상평형 선도를 나타내면 그림 3과 같다.⁹⁻¹¹⁾ 그림 3에서 알 수 있듯이 비점면(bubble point surface) 및 노점면(dew point surface)은 양손바닥으로 오목하게 만든 모양의 아래 손등과 윗 손등에 해당 되는 것으로서 물질은 3성분으로 이루어진 혼합물 이지만 상태는 기액 2상이다.

그림 3에서 냉매의 상태변화를 좀더 이해하기 쉬운 방법으로 설명하기 위하여, Thome¹²⁾의 2성분 기액평형 모델과 같은 형태로써 압력이 일정할 때 2성분 물질에 대한 온도-성분 상평형 선도를 나타내면 그림 4⁹⁾와 같다. 즉 R-134a와 R-32로

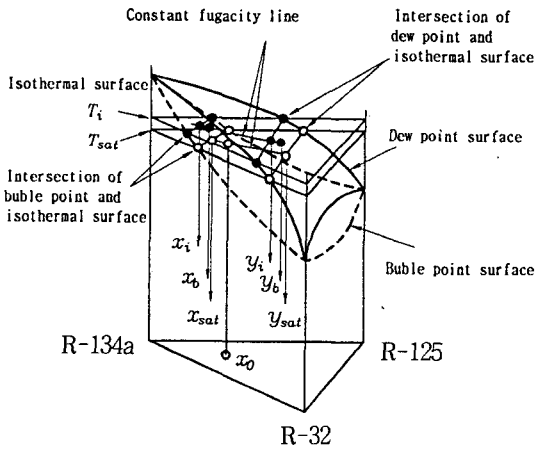


그림 3 압력이 일정한 상태에서 3성분 혼합냉매의 상평형선도

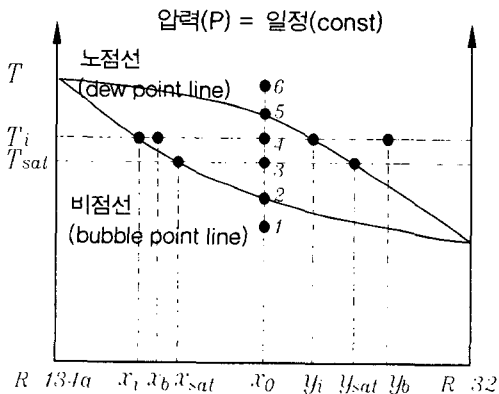


그림 4 압력이 일정한 상태에서 2성분 혼합냉매의 상평형 선도

구성된 2성분 혼합냉매의 상평형선도가 된다. 그림 4에서 혼합냉매 x_0 의 상태변화를 간단히 설명하면, 우선 과냉각된 액의 초기 상태 1을 일정한 압력하에서 상태 2가 될 때 까지 온도를 상승시킨다. 이때 액상은 일정한 성분을 유지하게 된다.

상태 2에 도달하면 기포가 처음으로 발생하며 이 점을 기포점(bubble point)이라 하고 비점선(bubble point line)위에 놓이게 된다.

온도를 더 증가시키면 증발온도가 상대적으로 낮은 물질(또는 증발성이 강한물질로써 그림 4에서는 R-32가 해당됨)이 높은 물질보다 더 많이 증발되어 기상영역에 더 많이 존재하게 되며 액상에는 상대적으로 증발온도가 높은 물질(R-134a)이 더 많이 남아 있게 된다.

상태 3의 포화온도가 되면 포화증기(기상성분)는 증발온도가 낮은 물질(R-32)이 더 많고 포화액(액상성분)은 상대적으로 증발온도가 높은 물질(R-134a)이 더 많이 존재하게 된다. 이와 같은 두 물질의 성분비 차로 인해 기상에서 기액계면 및 액상에서 기액계면으로 향하는 물질확산이 일어나며, 결국은 포화온도보다 높은 기액계면 온도 T_i 가 존재하는 상태 4가 된다. 상태 3의 포화상태 및 상태 4의 벌크상태를 이용한 건도를 구하면 식 (1)과 같다.

$$X = \frac{x_0 - x_{sat}}{y_{sat} - x_{sat}} = \frac{x_0 - x_b}{y_b - x_b} \quad (1)$$

온도를 더 증가시켜 점 5가 되면 증기(기체) 성분은 최초의 성분 1과 같아진다. 그리고 그 이상으로 온도를 상승시키면 성분이 일정한 증기 상태가 된다. 상태 5는 초기의 증기상태 6에서 냉각시킬 경우 최초로 응축되는 점을 나타내며 노점(dew point)이라 하고 역시 노점선(dew point line)위에 있게 된다. 이와 같이 비공비 혼합냉매는 기상과 액상으로 존재하는 경우, 각각의 성분비가 다르며 증발 및 응축과정에서 온도가 변화하는 특성을 가지고 있다.

이상과 같이 3성분 혼합냉매는 2성분 혼합냉매와 달리 입체형상이므로 상평형선도가 다소 복잡하지만 증발 및 응축되는 기액 2상이므로 2성분 혼합냉매와 같이 생각하면 쉽게 이해 할 수 있다.

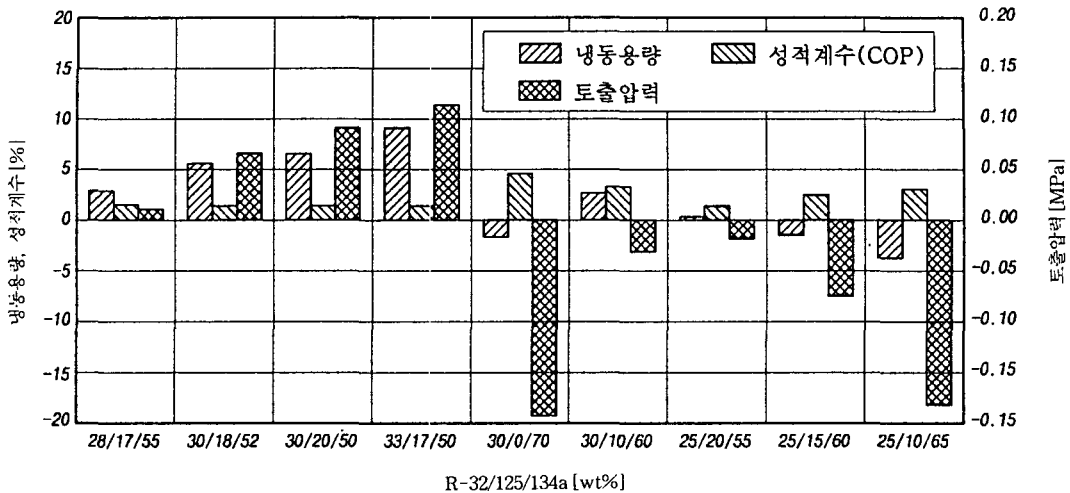


그림 5 R-32/125/134a 혼합냉매의 각 성분물질 변화에 따른 성능비교, 응축온도 50°C, 증발온도 0°C, 과냉각 및 과열도 0°C

R-407C는 R-22와 증기압이 비슷하고 기존 시스템의 별도 수정 없이 이용 가능하다(시스템내의 오일은 교환해야함)는 장점을 가지고 있다. 뿐만 아니라 온도구배매칭(temperature gliding matching)을 이용하기 위해 'counter flow'나 'cross counter flow'형 열교환기를 이용하는 등의 시스템 재설계를 통하여 효율도 증가시킬 수 있으므로 누설시에 재충전에 대한 문제만 해결된다면 R-22의 대체냉매로써 가장 좋은 냉매라고 할 수 있다.⁴⁾

그림 5는 R-407C(R-32/125/134a(23/25/52 wt%))의 각 냉매성분을 변화시켜 성적계수, 냉동용량 및 토출압력을 각각 계산한 것으로써 R-407C를 기준으로 하여 비교한 것이다.¹³⁾ 냉매의 각 성분 혼합비율에 따라 능력이 상당히 다르다는 것을 알 수 있다.

3. 평활관(smooth tube)의 흐름비등 열전달

3.1 열전달 저하

2성분 및 3성분 혼합냉매는 기액계면에서의 물질전달 저항 때문에 단성분 물질인 순수냉매보다 열전달 및 에너지 효율(COP)이 저하한다. 열전달 저하율도 냉매의 종류, 물성 및 온도, 유동속도,

관의종류, 실험조건 및 방법에 따라 각각 다르지만, 일반적으로 질량속도가 증가함에 따라 그림 6¹⁴⁾과 같이 R-407C의 3성분 혼합냉매는 혼합냉매의 물질전달 저항에 의해 R-22 보다 10~20% 정도 저하한다. 이것은 한 등¹⁵⁾과 최 등¹⁶⁾이 질량속도를 증가시키면서 건도변화에 따른 열전달 계수를 정리한 연구결과와도 일치하고 있다. 즉 질량속도 300 kg/m²s일 때 R-407C, R-22 및 타 냉매와 열전달계수를 비교한 것을 나타내면 그림 7과 같다. 그림 6 및 그림 7에서 알 수 있듯이 단일냉매 및 혼합냉매 모두 질량속도 및 건도가 증가함에 따라 열전달 계수가 증가하고 있다.

그림 6에서 R-32가 가장 열전달계수가 높은 것은 우수한 열역학적 물성에 의한 것으로 사료되며, 이것은 R-410A가 R-407C보다 R-32의 성분비가 높으므로 열전달계수가 증가하는 것과 일치한다. 그림 6과 같은 현상은 Zhang 등¹¹⁾ 및 오 등¹⁷⁾의 연구에서 나타난 실험결과와도 일치하였다.

R-22 및 R-407C 실험데이터에 대해 순수(단일)냉매 상관식과 비교한 것을 그림 8 및 그림 9에 각각 나타내었다.¹⁸⁾ 그림 8은 시험부 내경 7.92 mm, 시험관 길이 1300 mm, 열유속 6~14 kg/m², 질량속도 100~300 kg/m²s, 압력 0.6~0.68 MPa일 때의 R-22 실험데이터와 타 연구자들의 상관식을 비교한 것이다.

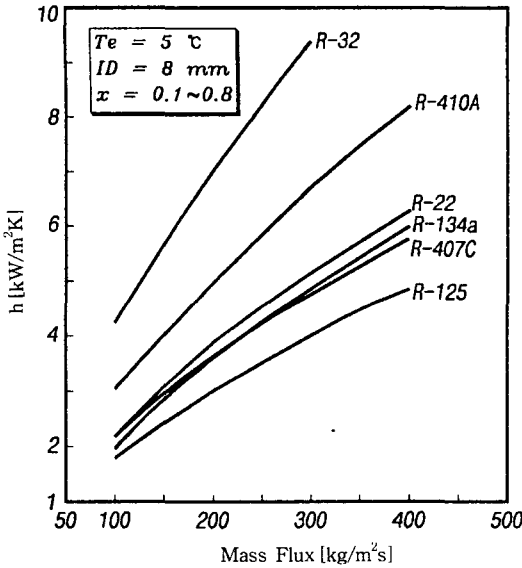


그림 6 평활관내 단일 및 대체 냉매의 질량속도에 따른 열전달계수 변화

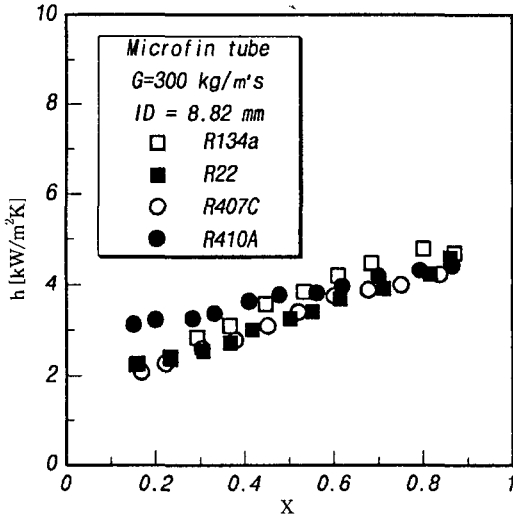


그림 7 평활관내 단일 및 대체 냉매의 건도증가에 따른 열전달계수 변화

그림 8에서 알 수 있듯이 타 연구자들의 상관식과 비교한 실험데이터는 어느정도 잘 일치 하고 있으나 Shah의 상관식과 비교한 실험데이터 오차는 40% 이상으로써 실험적으로 구한 열전달 계수가 상당히 높음을 알 수 있다. 이것은 상관식에 이용되는 데이터 뱅크(data bank)의 데이터들이 시험부 환경이 비교적 큰 것으로부터 구한 것이기 때문이라고 생각된다. 그리고 각 연구자들의

상관식과 실험데이터 차이는 시험부의 형상, 질량 속도 및 실험의 오차에 의한 것이라고 할 수 있다.

그림 9는 R-407C 냉매의 시험부 압력을 0.6 MPa로 고정시키고 다른 실험조건은 그림 8과 같이 했을 때의 실험 데이터와 타 연구자들의 단일 냉매 상관식과 비교한 것이다. 기액계면에서 R-407C 냉매의 물질확산에 의해 실험값이 상관식으로 구한 열전달계수보다 50% 이상 저하함을 알 수 있다.

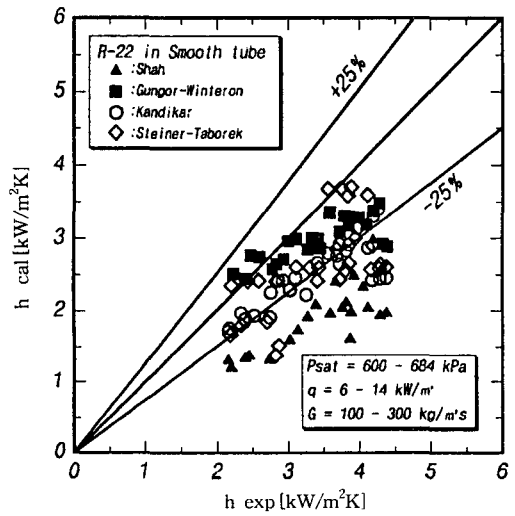


그림 8 R-22 열전달 실험데이터와 타 연구자들의 단일냉매 상관식과의 비교

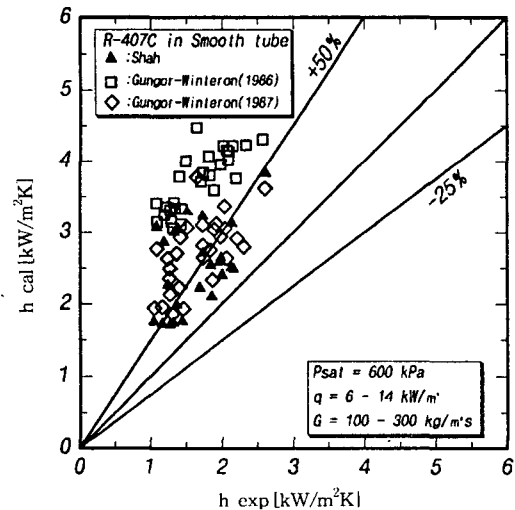


그림 9 R-407C 열전달 실험데이터와 타 연구자들의 단일냉매 상관식과의 비교

4.0 m 질량속도 310 kg/m²s 및 열유속 20 kW/m² 일때 식 (3), (4)을 이용하여 건도변화에 따른 흐름비등 열전달 저하 계수를 구한 것이다.

그림 10에서 k_b 는 건도가 증가함에 따라 조금 저하하지만 거의 0.4 정도로써 핵비등 열전달에 미치는 물질전달 저항이 상당히 크다는 것을 알 수 있다. 또한 강제대류증발 열전달 저하 계수 k_f 는 물질전달 저항을 고려하면 그 저하율은 5% 정도가 되지만 그렇지 않을 경우($F_{mG} = 1$) 저하율은 건도가 증가함에 따라 최대 20% 정도 된다.

그림 11⁽¹⁰⁻¹¹⁾은 식 (2)로 구한 계산값과 실험 데이터를 비교한 것으로써 ±30% 이내에서 잘 일치하고 있다. 그러나 3성분 혼합냉매에 대한 타 연구자들의 열전달 상관식이 거의 없으므로 여기에 대한 비교연구가 어렵기 때문에 실험데이터 및 상관식의 정도를 확인할 수가 없었다.

따라서 3성분 혼합냉매 열전달 상관식에 관한 많은 연구가 절실히 필요하다.

3.3 압력강하

평활관에서 유동양식이 환상류이고 상대적으로 고건도 및 고질량속도일 경우의 마찰압력강하는 단일냉매 및 혼합냉매의 종류에 관계없이 증기압이 비슷하면 대부분 거의 같다. 그림 12⁽²⁰⁾는 관경 6.4 mm, 시험부길이 4.7 m인 비가열 수평관에서의 마찰압력 강하를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 R-22와 증기압이 비슷한 R-407C는 질량속도가 증가할수록 마찰압력 강하가 증가하지만 건도 변화에 따른 두 냉매의 마찰압력 강하는 비슷하다.

이것은 그림 13의 김 등⁽²¹⁾이 관경 8.82 mm에서 실험한 결과와 같은 경향을 나타내고 있다. 즉 그림 13에서 알 수 있듯이 건도변화에 따른 R-22와 R-470C의 압력강하는 거의 비슷하고 상대적으로 증기압이 가장 낮은 단일냉매인 R-134a의 압력강하가 가장 높음을 알 수 있다. 그리고 증기압이 비교적 큰 R-410A의 압력강하가 가장 낮다.

따라서 단일냉매 및 혼합냉매의 압력강하는 냉매의 종류에 관계없이 증기압이 비슷하면 거의 같다고 할 수 있다.

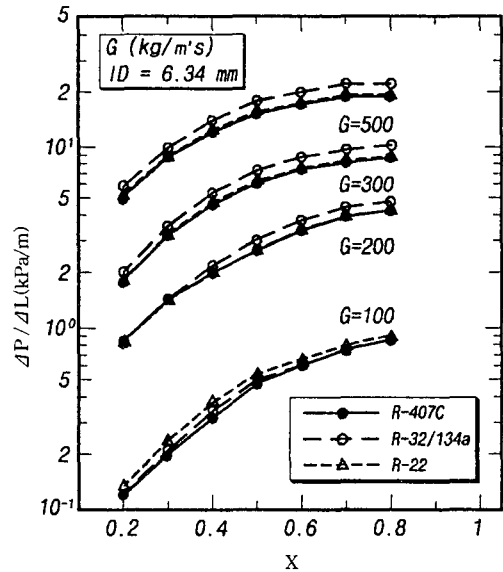


그림 12 평활관내 비가열 냉매의 마찰압력강하

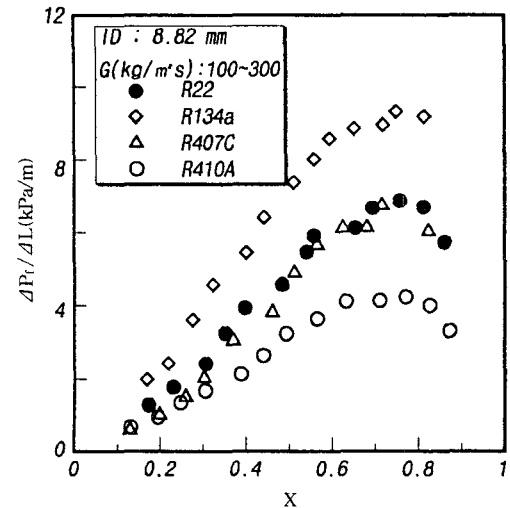


그림 13 평활관내 순수 및 혼합 냉매의 압력강하

4. 마이크로핀관(microfin tube)의 흐름비등 열전달

4.1 열전달 저하

마이크로핀관 역시 평활관과 마찬가지로 저질량속도 및 저건도에서 혼합냉매의 열전달계수는 순수냉매보다 저하한다.

그림 14는 마이크로핀관과 평활관의 건도 변화

에 따른 국소열전달계수의 비교를 나타낸 것으로써²⁰⁾ 시험부인 마이크로핀관과 평활관의 사양은 표 2와 같다. 그림 14에서 알 수 있듯이 R-32/134a(30/70 wt%)의 혼합냉매도 R-22의 단일냉매와 마찬가지로 마이크로핀관이 평활관보다 열전달 계수가 상당히 증가하므로 전열이 촉진됨을 알 수 있다. 또한 건도의 증가와 함께 열전달 계수도 상당히 증가하고 있다. 이것은 Ebisu 등²²⁾, 内田 등²³⁾ 및 蛭子 등²⁴⁾의 연구와도 일치한다.

질량속도 100 kg/m²s 및 열유속 10 kW/m²과 질량속도 500 kg/m²s 및 열유속 30 kW/m²을 비교하면 상대적으로 저질량속도 및 저열유속 일때의 R-407C 및 R-32/134a의 열전달계수가 R-22보다 상당히 저하함을 알 수 있다.

이것은 열유속보다 질량속도의 영향이 더 지배적임을 뜻하는 것으로써, 한 등¹⁵⁾이 표 3에 나타낸 사양의 마이크로핀관으로 실험하여 그림 15 및 그림 16에 나타낸 연구결과와도 일치하고 있다.

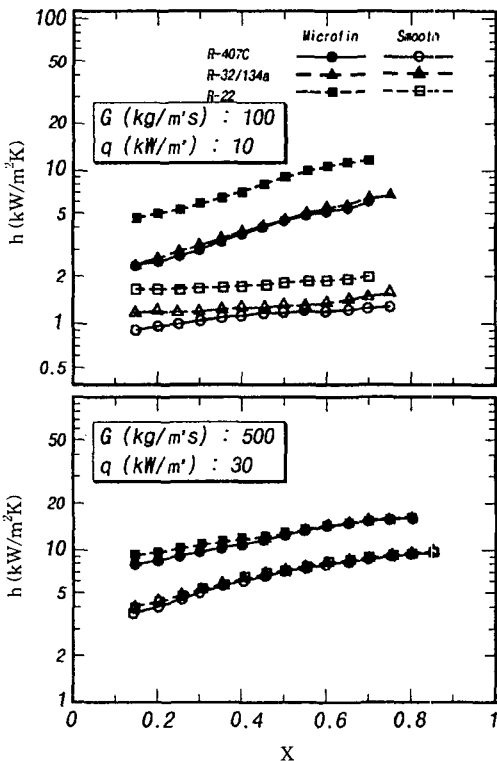


그림 14 마이크로핀관과 평활관의 건도변화에 따른 열전달계수의 비교

표 2 마이크로핀관과 평활관의 사양

항 목	단 위	마이크로핀관	평활관
외경(OD)	mm	7.00	7.00
내경(ID, 최대)	mm	6.50	6.34
내경(ID, 평균)	mm	6.38	6.34
나선각	도	18	-
핀 높이	mm	0.21	-
핀 수		50	-
면적비		1.76	1.00
시험부 길이	m	4.70	4.70

표 3 그림 15 및 그림 16의 마이크로핀관 사양

항 목	단 위	마이크로핀관
외경(OD)	mm	9.52
내경(ID)	mm	8.80
평균두께	mm	0.36
저면두께	mm	0.3
핀 높이	mm	0.2
나선각	도	18
핀 수		60
핀각도	도	50
시험부 길이	m	1.0

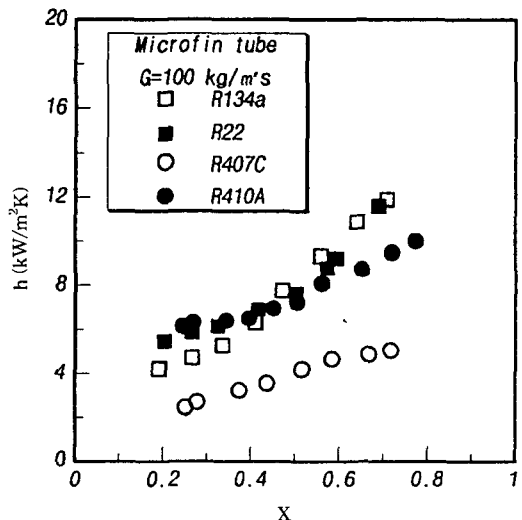


그림 15 마이크로핀관의 냉매종류에 따른 열전달계수의 비교, G=100 kg/m²s

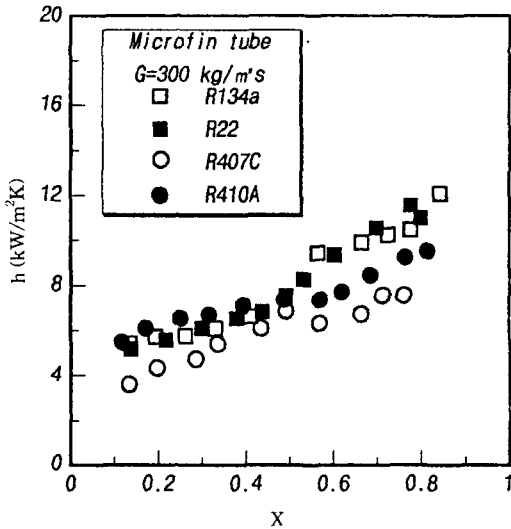


그림 16 마이크로핀관의 냉매종류에 따른 열전달계수의 비교, $G=300 \text{ kg/m}^2\text{s}$

따라서 마이크로핀관의 경우 저질량속도에서는 순수냉매 R-22와 3성분 혼합냉매 R-407C의 열전달계수 차이가 평활관보다 더 크지만 상대적으로 고질량속도가 되면 평활관과 마찬가지로 위의 두 냉매에 대한 열전달계수 차는 비교적 작음을 알 수 있다.

4.2 압력강하

실험조건이 같을 때 마이크로핀관이 평활관보다 열전달계수가 상승하는 전열 축진이 일어나듯이 압력강하도 증가한다. 그림 17²⁰⁾은 표 2 및 그림 12와 같은 실험조건에서 시험부를 가열시키지 않고 질량속도 증가에 따른 건도변화와 시험부 단위 길이당 마찰 압력강하를 나타낸 것이다.

평활관과 마찬가지로 질량속도 및 건도가 증가할수록 압력강하도 증가하고 있다. 그림 12의 평활관 마찰압력강하와 비교하면 같은 질량속도 및 건도에도 평활관보다 압력강하가 증가함을 알 수 있고 역시 상대적으로 저질량속도 및 저건도에서 더욱 더 압력강하의 차가 크게 나타나고 있다. 또한 R-407C 및 R-32/134a(30/70 wt%)와 R-22를 비교하면 압력강하는 평활관과 같은 경향임을 알 수 있다. 그리고 평활관에 대한 마이크로핀관의 마찰압력강하 증가는 냉매의 종류에 상관없이 20~60% 정도로 나타났다.

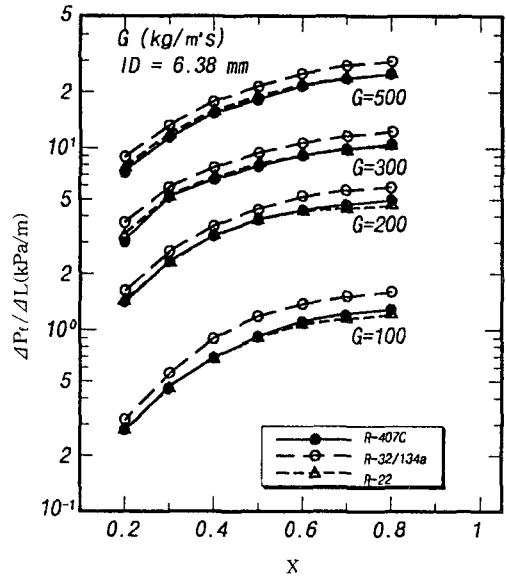


그림 17 마이크로핀관내 비가열 냉매의 마찰 압력강하

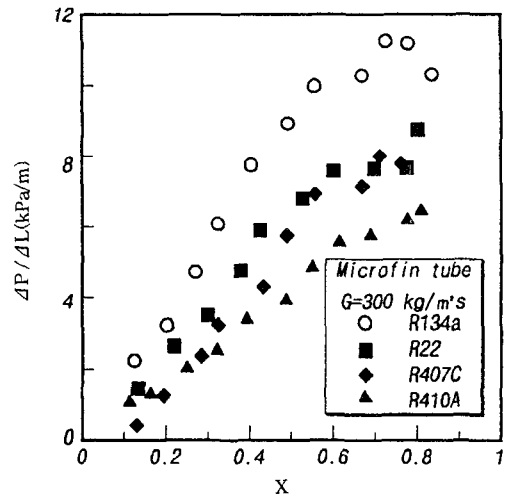


그림 18 마이크로핀관내 순수 및 혼합 냉매의 압력강하

그림 18은 한 등¹⁵⁾이 마이크로핀관에서 표 3과 같은 실험조건 및 질량속도 $300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 일 때 4종류의 냉매에 대해 압력강하를 비교한 것이다. 그림 13의 평활관과 비슷한 유형으로 증기압이 비슷한 R-407C와 R-22의 압력강하는 고건도 구역에서 거의 같게 나타나고 있다.

이와 같이 압력강하도 열전달처럼 저질량속도에서는 R-22인 순수냉매와 R-407C인 혼합냉매

의 압력강하 차가 컸으며 상대적으로 고질량속도가 되면 건도가 증가할수록 두 냉매의 압력강하는 거의 같았다. 또한 질량속도 및 건도가 같을 때 마이크로핀관이 평활관보다 압력강하가 더 증가하였다.

5. 미세관(micro-channels)의 흐름비등 열전달

5.1 열전달

기액 2상 흐름비등 열전달에 대한 연구는 대부분 10 mm 이상의 큰 직경을 갖는 원형관에 대해 이루어져 왔다. 그러나 최근들어 5 mm 미만의 미세원형관과 미세사각 유로로 연구범위가 확대되고 있다(일반적으로 관내경 5 mm 미만의 관을 미세관이라고 함). 이러한 미세 유로에서의 열전달에 대한 연구결과는 전자장치의 냉각과 원자로 핵 연료봉의 냉각등과 같이 작은 폭의 유로에 2상 흐름 열전달이 발생하는 경우와 고효율 밀집형 열교환기의 설계에 적용할 수 있다.²⁵⁾ 그리고 5 mm 미만의 미세관을 이용하여 5 mm 이상의 관경에서보다 상대적으로 질량속도를 증가시킴으로써 열전달을 촉진시키는 방법이 연구되고 있다.^{26~27)} 즉 수평관내 흐름비등 열전달물은 강제대류증발이 핵비등보다 비교적 높으므로 관내 유동양식을 액상의 농도경계층이 얇은 고건도 및 고질량속도의 환상류 영역으로 되게 하면 열전달계수를 상당히 증가시킬 수 있게 된다.²⁸⁾

그림 19²⁹⁾는 시험부(증발기) 내경 4.3 mm에서 R-407C 및 R-22의 증발온도가 5 °C일 때 질량속도 및 건도의 증가에 대한 열전달계수를 나타낸 것이다. 저질량속도인 100 kg/m²s의 경우 R-22가 R-407C보다 열전달계수가 다소 증가하고 있으나 상대적으로 고질량속도인 300 kg/m²s의 저건도 영역에서는 R-407C의 열전달계수가 R-22보다 근소한 차이지만 상승하였고 건도가 점점 증가할수록 두 냉매의 열전달계수 증가는 거의 같은 경향을 나타내고 있다. 이것은 저질량속도의 경우 냉매의 농도 경계층이 두껍고 물질전달의 영향이 있는 핵비등영역이 지배적이지만 고질량속도 및 고건도 구역에서는 농도 경계층이 얇은 강제대류

영역이 지배적이기 때문이라고 할 수 있다. 이러한 경향은 냉매의 증발온도를 15 °C로 상승시키더라도 전체적으로 열전달계수가 조금 저하하는 것을 제외하면 그림 20²⁹⁾과 같이 거의 같음을 알 수 있다.

그림 21²⁸⁾은 R-407C의 증발온도가 5 °C일 때 시험부 내경 4.3 mm의 미세관과 내경 6.4 mm에 대해 건도변화에 따른 열전달계수를 비교한 것이다. 즉 질량속도가 100 kg/m²s일 경우 내경 4.3 mm의 열전달계수가 내경 6.4 mm보다 평균 40% 이상 높음을 알 수 있다. 그러나 건도의 증가에 따른 비등열전달계수의 증가는 거의 나타나지 않고 있다. 또한 질량속도 200 kg/m²s 및 300

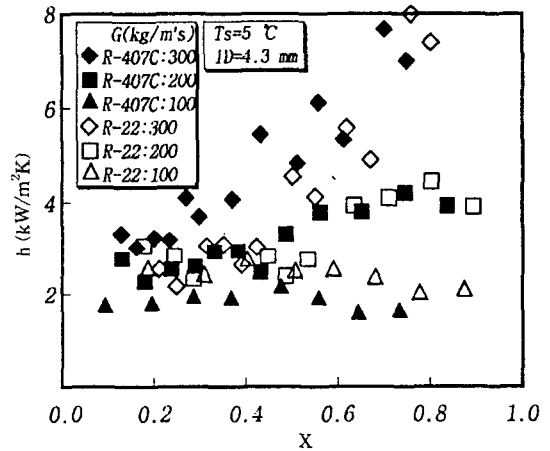


그림 19 R-407C 및 R-22의 질량속도와 열전달계수의 관계, 냉매포화온도 5 °C

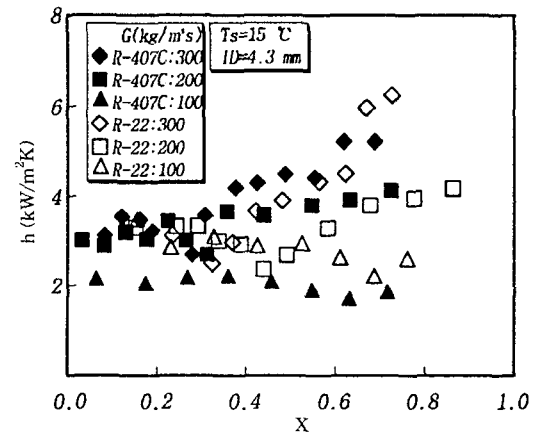


그림 20 R-407C 및 R-22의 질량속도와 열전달계수의 관계, 냉매포화온도 15 °C

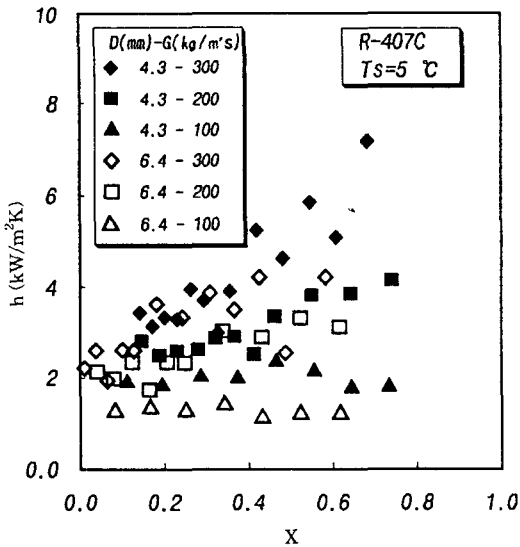


그림 21 질량속도 및 건도 변화에 따른 열전달계수에 미치는 관경의 영향, 냉매 포화온도 5°C

kg/m²s일 때 내경 4.3 mm와 6.4 mm 모두 건도의 증가와 함께 열전달계수의 증가가 확실히 나타나며, 관경 변화에 따른 열전달계수의 차이는 질량속도 100 kg/m²s일 때보다 뚜렷하지는 않으나 전반적으로 관경 4.3 mm의 열전달계수가 조금 높은 경향을 나타내고 있다. 이것은 관경이 작을수록 기액 2상류의 유동이 더욱 더 격렬한 난류가 되고 냉매의 단위체적당 관벽 접촉면적이 크게 되기 때문이라고 생각된다. 또한 관경이 같을 때 상대적으로 고질량속도에서 R-407C가 R-22보다 열전달계수가 높게 나타나는 것은 R-22의 액상 레이놀즈(Reynolds)수가 작아 흐름에 영향을 받았기 때문이라고 생각할 수 있으며, 앞으로 이러한 현상에 대한 체계적인 연구가 필요하다고 사료된다.

5.2 압력강하

미세관내 유동압력강하에 대한 연구는 고효율 밀집형 열교환기의 설계 및 전자장치의 냉각 등에 이용이 가능한 것으로서, 냉매를 작동유체로 한 연구는 대단히 부족하다. Mishima³⁰⁻³¹⁾ 등은 5 mm 이하의 미세 수직관내 기액 2상류의 마찰 압력강하에 대한 연구에서 Lockhart-Martinelli 상

관식내의 상수가 관경에 따라 달라지므로 관내경 변화를 고려한 상관식을 사용할 것을 제안하였다. 이 등³²⁾은 단면 종횡비가 1보다 작은 수평사각 유로에 대하여 유로의 높이를 4 mm 이하로 고정시켜 물과 공기에 대한 2상 유동 압력강하 특성을 파악하였으며, 단면 종횡비 0.02~0.2 범위의 미세 사각유로에 적용할 수 있는 압력강하에 대한 실험식을 제안하였다. Oh 등³³⁾은 관내경 2.0 mm, 질량속도 480 kg/m²s에서 실험으로 구한 압력강하 데이터와 Chisholm의 압력강하 상관식에 대해 비교한 것을 그림 22와 같이 나타내었다. 그림에 나타나 있듯이 계산값과 실험값이 ±1% 이내

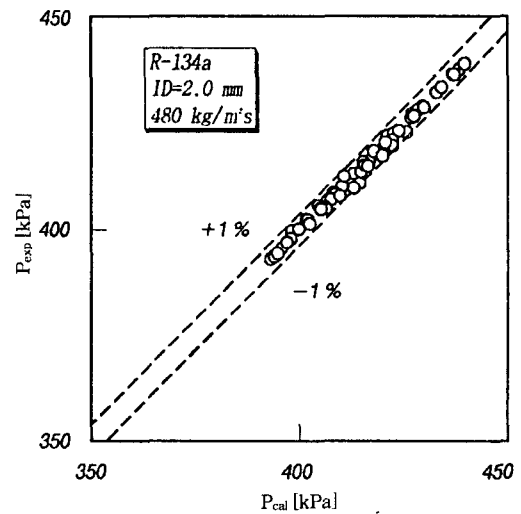


그림 22 측정된 데이터와 Chisholm의 압력강하 상관식과의 비교

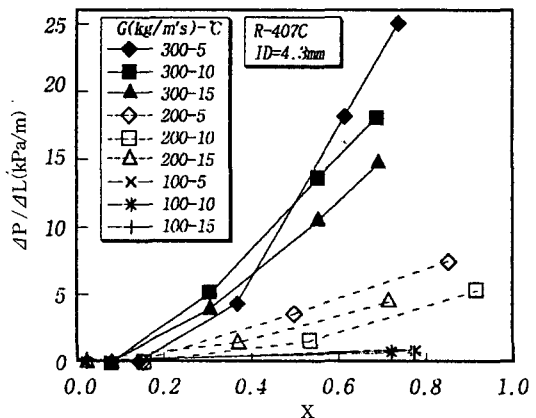


그림 23 4.3 mm 미세관경내의 압력강하

에서 잘 일치하고 있다. 미세관에서 R-407C의 압력강하에 대한 연구는 劉³⁴⁾가 관내경 4.3 mm에서 질량속도 및 증발온도를 변화시키면서 건도에 따른 압력강하를 그림 23과 같이 나타내었다. 그림 23에서 알 수 있듯이 질량속도가 미세관의 압력강하에 가장 큰 영향을 미치고 있다.

이상과 같이 전열관경을 미세관으로 하여 상대적으로 질량속도를 증가시키으로써 R-407C와 같은 비공비 혼합냉매의 증발열전달이 촉진된다는 것을 알 수 있다. 현재까지 냉매를 이용한 미세관내 흐름비등 열전달 및 압력강하에 대한 연구는 상당히 부족한 실정이다. 앞으로 콤팩트한 열교환기 및 냉동시스템, 전자장치 냉각시스템 등의 개발과 에너지 절약적인 기기 및 장치의 제작을 위해서라도 이에 대한 집중적인 연구가 필요하다고 사료된다.

6. 맺음말

지금까지 R-407C 혼합냉매의 특성과 그 냉매를 평활관, 마이크로핀관 및 미세관의 작동유체로 사용했을 때 R-22 등 타 냉매와의 열전달 및 압력강하 특성에 대해 비교 고찰 하였다. 본 고에서 나타낸 바와 같이 R-407C 흐름비등 열전달에 관한 연구는 대단히 부족하며, 더구나 오일이 첨가된 관련 연구는 거의 없는 실정이다. R-407C 냉매는 R-22와 유사한 압력특성을 갖는 비공비 혼합냉매로서 압축기 오일의 대체에 따른 일부 부품변경을 제외하면 큰 설계 변경 없이 R-22의 대체 냉매로 사용할 수 있을 것이다. 그러나 시스템 운전조건에 따른 냉매의 조성비 변화가 전열성능에 어느정도 영향을 미치며 그때의 온도구배는 어떻게 변화하는 등 여기에 관한 연구가 상당히 중요함에도 불구하고 거의 이루어지지 않고 있다.

또한 물질전달 저항에 의해 전열저하가 일어나는 기구(mechanism) 및 열전달 상관식에 대한 체계적인 연구 뿐만 아니라 시스템에서의 누설 및 재충진에 따른 성능변화도 함께 연구검토가 되어야 할 것이다. 특히, 최근 고효율 밀집형 열교환기 및 전자장치의 냉각 등에 이용 가능한, 5mm 이하의 미세관내 혼합냉매의 비등열전달 특성에 대

해서도 열전달 기구(mechanism)와 관련된 체계적인 연구가 절실히 필요하다고 하겠다.

따라서 앞으로 혼합냉매, 열교환기, 냉동공조시스템 등의 개발과 관련된 연구 및 종사자들의 이에 대한 지속적인 관심과 노력을 촉구하는 바입니다.

참고 문헌

1. Rowland, F. S., and Molina, M. J., 1974, Stratospheric sink for chlorofluoromethanes ; chlorine atom catalyzed destruction of ozone, Vol. 249, pp. 810~812.
2. 황선희, 1996, CFCs 대체물질의 개발동향, 공기조화 냉동공학, 제25권, 제1호, pp. 5~27.
3. 志村-廣, 1998, 代替冷媒(R407C)対応のパッケージエアコン開発, 冷凍, 第73卷, 第847号, pp. 421~424.
4. 정동수, 1996, 신냉매 개발동향, 공기조화 냉동공학, 제25권 제6호, pp. 479~488.
5. UNEP, 1999, Alternative technologies to HCFCs in refrigeration and air conditioning, UNEP Division of Technology, pp. 2~15.
6. UN Climate Change Convention, 1997, Kyoto Protocol to the united nation framework convention on climate change (<http://www.unep.ch>).
7. UN Climate Change Convention, 1998, Climate change meeting adopts buenos aires plan of action(<http://www.un.org>).
8. Thome, J. R., 1996, Boiling of new refrigerants : a state-of-the-art review, Int. J. Refrig., Vol. 19, No. 7, pp. 435~457.
9. 吳鍾垞, 張力牛, 飛原英治, 齊藤孝基, 飯島等, 1995, HFC系混合冷媒の水平平滑管内沸騰熱傳達特性, 第8回熱工學シンポジウム, No. 95~51, pp. 70~71.
10. 오종택, 박기원, 오후규, Zhang, L., Hihara, E., 1996, HCFC22 대체냉매를 위한 3성분

- 혼합냉매의 강제대류비등 열전달, 대한기계학회 추계학술대회 논문집 B, pp. 749~754.
11. Zhang, L., Hihara, E., Saito, T. and Oh, J.-T., 1997, Boiling heat transfer of a ternary refrigerant mixture inside a horizontal smooth tube, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, No. 9, pp. 2009~2017.
 12. Thome, J. R., 1983, Prediction of binary mixture boiling heat transfer coefficients using only phase equilibrium data, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 26, No. 7, pp. 965~974.
 13. Okaza, N., Funakura M. and Yoshida Y., 1998, Evaluation of new composition of R407-series for air conditioning, *Thermal science Engineering*, Vol. 6, No. 1, pp. 179~184.
 14. 横關昭道, 1995, R22代替冷媒의의現狀-最近의成果と問題點, *冷凍*, Vol. 70, No. 808, pp. 177~185.
 15. 한재웅, 김신중, 정동수, 김영일, 1999, 순수 및 혼합냉매의 흐름비등 열전달 특성, 공기조화 냉동공학회 '99동계학술발표회 논문집 (I), 99-S-004, pp. 19~24.
 16. 최태열, 김민수, 1996, 수평원관내 R-22 및 R-407C의 증발 열전달계수 측정, 대한기계학회 1996년 추계학술대회 논문집 B, pp. 737~742.
 17. 오종택, 박기원, 오후규, 張力生, 飛原英治, 1996, HFC 순수냉매 및 혼합냉매의 수평관내 비등열전달 특성, 공기조화 냉동공학회 '96동계학술발표회 논문집, pp. 91~98.
 18. Wang, C.-C. and Chang, Y.-J., 1996, Two-phase flow heat transfer and friction characteristics of R-22 and R-407C, *ASHRAE Transactions* Vol. 102, part I, pp. 830~838.
 19. Yoshida, S., Mori, H. and Matsunaga, T., 1994, Prediction of heat transfer coefficient for refrigerations flowing in horizontal evaporator tubes, *Trans. of the JAR*, Vol. 11, No. 1, pp. 67~78.
 20. 森英夫, 吉田駿, 大石克己, 1997, 非共沸混合冷媒HFC-32/HFC-125/HFC-134aおよびHFC-32/HFC-134aの水平蒸發管内熱傳達と壓力損失, *日本冷凍空調學會論文集*, Vol. 14, No. 1, pp. 39~45.
 21. 김중원, 한재웅, 정동수, 김종보, 1998, R22 대체냉매의 수평원관내 흐름비등 열전달 특성, 공기조화 냉동공학회 '98동계학술발표회 논문집(II), 98-W-090, pp. 553~558.
 22. Ebisu, T. and Torikoshi, K., 1998, Experimental study on evaporation and condensation heat transfer enhancement for R-407C using herringbone heat transfer tube, *ASHRAE Transactions Part II*, To-98-16-2, pp. 1044~1052.
 23. 内田麻理, 伊藤正昭, 藤園直毅, 火田敏夫, 大谷忠男, 1997, 非共沸混合冷媒對應傳熱管の高性能化(第2報 : 實驗的檢計), 第34回日本傳熱シンポジウム講演論文集, F132, pp. 301~302.
 24. 蛭子毅, 藤野宏和, 鳥邦越和, 1997, 對称形狀内面溝付管における3成分非共沸混合冷媒の傳熱促進, 第34回日本傳熱シンポジウム講演論文集, F134, pp. 305~306.
 25. 이한주, 이상용, 1999, 미세 수평 사각유로에서의 2상 유동양식에 관한 실험적 연구, 대한기계학회논문집 B권, 제23권 제4호, pp. 492~501.
 26. Carey, V. P. and Mandruisak, G. D., 1986, Annular film-flow boiling of liquids in a partially heated, vertical channel with offset strip fins, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 29, No. 6, pp. 927~939.
 27. Wambsgans, M. W., France, D. M., Jendrejczyk, J. A. and Tran, T. N., 1993, Boiling heat transfer in a horizontal small-diameter tube, *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 963~972.
 28. 오종택, 최광일, 青山辛義, 齊藤靜雄, 飛原英

- 治, 1999, R-407C의 수평관내 비등열전달에 미치는 관경의 영향, 공기조화 냉동공학회 '99 하계학술발표회 논문집(I), pp. 14~18.
29. 오종택, 박기원, 青山辛義, 齊藤靜雄, 飛原英治, 1998, 수평 미세관내 R-407C 및 R-22의 비등열전달, 공기조화 냉동공학회 '98동계학술발표회 논문집(II), 98-W-094, pp. 577~582.
30. Mishima, K., Hibiki, T. and Nishihara, H., 1993, Some characteristics of gas-liquid flow in narrow rectangular ducts, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 19, No. 1, pp. 115~124.
31. Mishima, K. and Hibiki, T., 1996, Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 22, No. 4, pp. 703~712.
32. 이한주, 이상용, 1999, 미세 수평 사각유로에서의 2상 유동 압력강하에 관한 실험적 연구, 대한기계학회 논문집 B권, 제23권, 제5호, pp. 637~645.
33. Oh, H. K., Katsuta, M. and Shibata, K., 1988, Heat transfer characteristic of R-134a in a capillary tube heat exchanger, *Heat Transfer 1998, Proceedings of 11th IHTC*, Vol. 6, pp. 131~136.
34. 劉勝芳, 1996, 三成分混合冷媒의 沸騰·凝縮熱傳達における管徑の影響, 日本東京大學機械工學科修士論文.