

< 논 문 >

## 순수 및 혼합냉매의 원관내 증발열전달 실험

신지영\* · 김민수\*\* · 노승탁\*\*

(1995년 10월 30일 접수)

### Experimental Study on Convective Boiling Heat Transfer for Pure Refrigerants and Refrigerant Mixtures in a Horizontal Tube

Jee Young Shin, Min Soo Kim and Sung Tack Ro

**Key Words :** Refrigerant Mixtures(혼합냉매), Convective Boiling(대류비등), Nucleate Boiling(핵비등), Heat Transfer Coefficient(열전달계수)

#### Abstract

Boiling heat transfer coefficients of pure refrigerants (R22, R32, R134a, R125, R290, and R600a) and refrigerant mixtures (R32/R134a, R290/R600a, and R32/R125) are measured experimentally and compared with Chen's correlation. The test section is a seamless stainless steel tube with inner diameter of 7.7mm and uniformly heated by applying electric current directly to the tube. Heat fluxes range from 10 to 30kW/m<sup>2</sup>. Mass fluxes are set to 424~742kg/m<sup>2</sup>s for R22, R32, R134a, R32/R134a, and R32/R125; 265~583kg/m<sup>2</sup>s for R290, R600a, and R290/R600a. Heat transfer coefficients depend strongly on heat flux at a low quality region and become independent as quality increases. Convective boiling term in the Chen's correlation predicts experimental data of the pure refrigerants fairly well (relative error of 12.1 % for the data of quality over 0.2). The correlation for pure substances overpredicts the heat transfer coefficients for nonazeotropic refrigerant mixtures.

#### 1. 서 론

혼합냉매는 크게 등온증발, 변온증발 혼합냉매 두 종류로 나눌 수 있다. 등온증발 혼합냉매 (azeotropic refrigerant mixture)는 특정한 성분비에서 등압 상변화과정 중에 증발온도가 변화하지 않는다. 반면에 변온증발 혼합냉매 (nonazeotropic refrigerant mixture)는 등압증발 과정에도 온도가 증가하는 특성 (gliding temperature effect)이 있어 열교환시에 발생하는 평균 온도차를 줄일 수 있는 가능성을 제공한다. 또한, 증발과정 중에 액상과

기상의 성분비가 초기 성분비와 같이 유지되지 않고 계속 변화하는 것이, 순수냉매와는 다른 또 하나의 특징이다.

증발온도가 차이 나는 순수물질들을 혼합하게 되면 온도, 압력, 밀도 등의 열역학적 물성치는 각 순수물질의 물성치를 토대로, 혼합법칙을 이용하여 혼합물의 특성을 나타낼 수 있다. 혼합냉매는 성분비에 따라 증발온도, 잠열 등의 열역학적인 성질이 변하기 때문에, 냉동 및 공기조화기에 적용하면 시스템의 용량을 조절할 수 있다. 부하가 변동할 때에도, 이의 변동에 적절히 대응하여 성분비를 바꿈으로써 용량을 조절할 수 있다. 또한, 외기조건, 열교환 방법 등의 특정한 조건을 일정하게 유지한 상태에서 순수냉매를 사용할 때보다 성능계수가 향

\*회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

\*\*회원, 서울대학교 기계공학과

상될 수 있다.<sup>(1~3)</sup> 따라서, 혼합냉매, 특히 변온증발 혼합냉매를 냉동 및 공기조화기기에 적용할 때 전체 시스템의 성능평가, 열전달 특성 파악 등에 관한 연구가 여러 분야에서 진행되고 있다.

반면에, 변온증발 혼합냉매의 열전달계수가 각 순수냉매의 열전달계수를 동일한 조건에서 성분비에 따라 선형보간한 값보다 작다는 것이 많은 연구 결과에 의해 알려지고 있다.<sup>(4~6)</sup> 변온증발 혼합냉매의 등압증발과정에서는 액상과 기상의 성분비가 증발이전의 총 성분비와는 다른 값을 가지면서 계속 변화하기 때문에 물성치가 선형적으로 변화하지 않으며, 액상과 기상의 경계면에서 농도구배에 따른 물질유속이 존재하게 된다. 많은 연구자들은 물성치의 비선형 효과와 더불어 이러한 농도차에 의한 물질유속을 계면에서의 열전달을 방해하는 물질전달저항으로 판단하고 있으며, 혼합냉매의 열전달계수가 각 순수물질에 대한 열전달계수를 선형보간한 값보다 작게 나타나게 하는 큰 원인 중의 하나로 생각한다. 따라서, 변온증발 혼합냉매의 열전달계수를 예측하기 위한 연구가 필요하다.

한편, 냉동 및 공기조화 산업에 널리 사용되어 온 CFC(chlorofluorocarbon), HCFC(hydrochlorofluorocarbon) 계열의 냉매가 대기중으로 방출되면 오존층 파괴와 지구 온난화를 유발하는 것으로 밝혀졌다. 따라서, 이들 냉매의 생산과 사용을 규제하게 되었고,<sup>(7,8)</sup> 기존의 냉매들을 대체할 수 있는 새로운 물질들의 개발과 이러한 대체냉매들을 사용하는 시스템에 관한 연구가 활발히 진행 중이다. 대체냉매는 지구환경을 파괴시키는 성분을 포함하고 있지 않아야 함은 물론이고, 기존에 사용하던 냉매와 열역학적 물성치들이 유사한 것이 바람직하다. 순수냉매이면서 열역학적 물성치와 성능, 효율, 안전성 등의 모든 조건을 만족하는 물질이 없는 경우 2가지 혹은 그 이상의 냉매를 혼합하여 비슷한 성능 및 효율을 얻을 수 있는 방안이 검토되고 있다.<sup>(9~12)</sup>

이러한 시점에서 환경문제를 유발하지 않을 뿐 아니라 시스템의 효율도 향상시켜야 하는 2중의 목적을 달성하기 위해서 혼합냉매의 사용이 적극 검토되고 있기 때문에, 새로운 혼합냉매를 사용하는 냉동 및 공기조화 시스템 설계의 적절한 수단이 개발되어야 한다. 또한, 설계의 큰 비중을 차지하는 증발기, 응축기에서의 냉매의 열전달 특성에 대한 연구가 반드시 이루어져야 한다. 특히, 혼합냉매의

열전달 특성은 순수냉매의 경우와는 다르기 때문에 그 차이를 예측할 수 있는 적절한 방법에 대한 연구가 시급한 실정이다.

본 연구에서는 HCFC 계열의 냉매로서 대체에 대한 연구가 진행 중인 순수냉매 R22와 그 대체가능성이 검토되고 있는 변온증발 혼합냉매인 HFC(hydrofluorocarbon) 계열의 R32/R134a, 환경문제 측면에서 유리하기 때문에 장기적인 측면에서 사용이 고려되고 있는 HC(hydrocarbon) 계열의 R290/R600a, R22에 비해 고압에서 작동하지만 성능 및 효율 면에서 우수하여 사용 가능성이 검토되고 있는 등온증발 혼합냉매 R32/R125 (질량비 50/50)를 선정하여, 이들 냉매의 증발열전달특성을 실험을 통해 고찰하였다. R22나 R12 등 기존의 냉동 및 공기조화기기의 작동 유체로 사용되어 온 물질들에 대한 설계 자료들은 어느 정도 확보되어 있다고 보이나, 최근에 사용이 거론되고 있는 HFC 계열의 냉매(R32, R134a, R125 등) 및 HC 계열의 냉매(R290, R600a 등)의 열전달 특성에 관한 자료는 거의 없는 실정이다. 특히, R22의 대체냉매로서 사용이 거론되고 있는 혼합냉매의 경우, 앞서의 순수 냉매들보다도 더 자료가 부족한 현실이다. 따라서, 본 실험자료는 대체냉매로 고려되고 있는 혼합냉매의 열전달 특성에 대한 기초 자료를 제공하며, 변온증발 혼합냉매의 열전달계수를 예측하기 위한 새로운 열전달 상관식의 필요성을 검증하기 위한 기초 자료라는 측면에서도 큰 의미를 가지게 된다.

본 연구에서는 우선 순수냉매에 대한 실험자료를 Chen의 상관식과 비교하고, 변온증발 혼합냉매의 열전달계수 자료 또한 순수냉매에 대한 상관식과 비교하여 적용 가능성을 검토하였다. 또한, 순수냉매 R22와 변온증발 혼합냉매 R32/R134a, R290/R600a, 등온증발 혼합냉매 R32/R125 (질량비 50/50)의 열전달계수를 동일한 작동조건에서 비교함으로써, 대체냉매 관점에서 각 냉매의 열전달계수를 고찰하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

냉매의 2상유동 열전달계수를 실험으로 구하는 방법으로는 첫째, 전기저항 가열방식, 즉 전류를 공급하여 유체가 흐르는 관을 가열하는 방식이 있고, 둘째, 2차유체를 사용한 가열방식이 있다. 전

자가 많이 쓰이는 방법이지만 냉동시스템과 연관하여 서로 다른 작동유체(냉매)의 성능을 비교하고자 할 때, 즉 2차유체의 입출구 조건을 모두 고정시킴으로서 똑같은 외기조건에서의 열전달 특성을 살펴보고자 할 때는 후자를 사용하기도 한다. 전기저항 가열방식은 일정 열유속을 공급하는데 가장 적합하고 실험조건이 변화가 비교적 용이하여, 다양한 조건에서 열전달 특성의 변화를 살펴보고자 할 때 유용하다. 여기에는 관에 직접 전류를 가하는 직접가열 방식과 관벽에 균일하게 열선을 감고 그 열선을 가열하는 간접가열방식이 있다. 균일한 열유속조건을 유지하는데는 단위길이당 저항을 일정하게 유지할 수 있다고 판단되는 직접가열방식이 더 적절하다.

본 연구에서는 냉매가 순환되는 원관에 전류를 공급하여 직접가열하는 방식을 택하여 대상냉매의 열전달 특성을 살펴보고자 한다. 열유속, 질량유속을 바꿈으로써 작동유체의 열전달 특성의 변화를 정성적으로 고찰하고 작동 매체들의 열전달계수에 대한 기초 자료를 얻는데 그 목적이 있다. 또한, 대체냉매 관점에서 각 냉매의 열전달계수를 서로 비교, 고찰하고자 한다.

## 2.1 실험 및 계측장치

실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 실험장치는 기본적으로 냉매펌프, 질량유량계, 예열기, 시험부, 냉각부로 구성되어 있다. 냉매의 순환과정을 살펴보면 다음과 같다. 마그네틱형 액체 펌프는 과냉된 냉매를 예열기로 순환시키며, 예열기에서는 원하는 시험부 입구조건을 얻기 위한 열량이 공급된다. 한편, 예열기 전에는 질량유량계를 설치하여 냉매의 질량유량을 액체상태에서 직접 측정하고, 냉매는 예열기를 거쳐서 시험부로 순환되며 여기에서 교류 직접가열방식으로 가열되어 증발된다. 시험부에서 가열된 냉매는 냉각부에서 냉각되어 수액

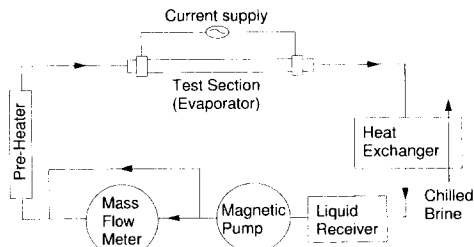


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

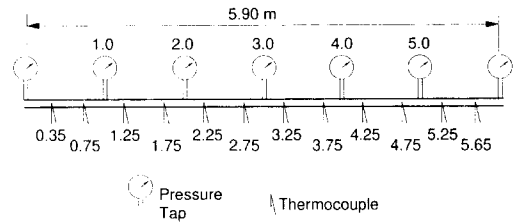


Fig. 2 Representation of the measuring points in the test section (numbers indicate actual length in meters)

기(liquid receiver)로 들어가고 다시 냉매 펌프를 통해 순환된다.

시험부는 내경 7.7 mm, 두께 0.9 mm인 스테인리스스틸 원관이며 유효 가열 길이는 5.9m이다. 가능한한 균일한 전기적, 열적조건을 갖추기 위해 이유매 없는 관을 사용하였으며 상온에서의 열전도율은 약 14.7 W/mK이다. 시험부에는 1m 간격으로 압력을 재기 위한 압력탭이 설치되었으며, 관의 외벽면온도를 측정하기 위한 열전대가 길이 방향으로 12곳에 부착되었고, 각 위치에서 원주방향으로 위, 아래, 양 옆면 등 4곳에서 외벽면의 온도를 측정한다. 온도를 측정하기 위한 열전대는 T형(copper-constantan)을 사용하였다. 시험부와 압력탭은 테플론 연결로 다른 부위와 전기적으로 절연된다. Fig. 2에 압력과 벽면온도의 측정위치를 나타내었다.

시험부에 전력을 공급하기 위한 전력단자는 압력탭이 설치된 위치와 동일하며, 원하는 열유속조건에 따라 길이를 변화시킬 수 있다. 이는 시험부내에서 증발이 완료되어 과열증기가 되면 벽면온도가 급격히 상승하여 실험장치가 손상될 우려가 있으므로, 질량유속이 작고 열유속이 큰 경우 과열이 우려될 때는 전력이 공급되는 길이를 줄임으로써, 열유속은 그대로 유지하면서 전체 열량을 줄여 과열을 방지할 수 있다. 전력공급은 220V, 50A의 1차 전원을 가변 전원공급기를 사용하여 조절하고 2차로 변류하여 최대 60V, 300A로 만들어 시험부에 공급한다.

열전달계수를 결정하기 위해서는 열유속, 냉매 온도, 벽면온도를 측정하여야 한다. 내벽면온도를 측정하는 것은 용이하지 않기 때문에 외벽면온도를 측정하고 1차원 열전도식을 이용하여 내벽면온도를 계산하였다. 열전대의 접점을 미리 탄소봉 용접으로 만든후, 벽면에 테이프를 사용하여 잘 부착하고

관벽에 5 cm 가량 밀착시킨 다음 계측기로 연결한다. 냉매의 온도는 열전대를 관내에 삽입하여 냉매 온도를 측정하는 방법이 그 정확성이 보장되지 않고 유동장을 교란하는 단점이 있기 때문에, 압력을 측정하고, 에너지 보존에 의해 건도를 계산한 뒤, 이 압력과 건도에 해당하는 포화온도를 냉매의 온도로 하였다. 냉매의 압력은 시험부에서는 입출구를 포함 7곳에서 측정하였으며, 예열기 입구, 냉각부 출구에서도 측정하였다. 예열기 입구의 압력은 절대압을, 나머지 압력은 차압을 측정하였다. 냉매의 유량은 질량유량계를 사용하여 액체펌프 출구의 과냉된 상태에서 측정하였고, 시험부 및 예열기에 공급되는 열량은 전력계로 측정하였다.

벽면온도, 냉매온도, 절대압력계의 출력은 60 채널 용량의 다채널 기록계를 사용하여 측정하였고, 측정된 자료들은 컴퓨터로 전송된다. 냉매의 유량은 질량유량계를 사용하여 액체상태의 질량유량을 직접 측정하였고, 출력되는 펄스 신호를 컴퓨터에 장착된 카운터로 측정하였다. 시험부에 공급되는 열량은 시험부 양단의 전압차와 시험부에 흐르는 전류를 측정하여 구하였다. 압력계는 절대압계와 차압계를 각각 사용하였으며, 절대압 센서는 증폭기가 내장되어 있는 형이고, 차압계는 별도의 증폭기를 사용하여 전압 신호를 측정하였다.

2.2 열전달계수의 계산

열전달계수는 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$h = \frac{q''}{T_{wi,k} - T_s} \tag{1}$$

$q''$ 는 열유속,  $T_{wi}$ 는 계측한 외벽면온도를 1차원 열전도식을 고려하여 보정한 내벽면온도,  $T_s$ 는 주어진 압력과 엔탈피를 이용하여 상태방정식으로부터 계산한 포화온도이다. 하첨자  $k$ 는 각각 윗면,

아랫면, 좌측면, 우측면을 나타낸다. 포화압력으로 부터 냉매의 온도를 계산하기 위해 수정된 Carnahan-Starling 상태방정식<sup>(3)</sup>을 사용하였다.

국소위치에서 반경방향 평균 열전달계수는 윗면, 아랫면, 양 옆면의 4곳에서 계측한 값을 평균한 식 (2)로 계산한다.

$$h = \frac{\sum_k h_k}{4} \tag{2}$$

2.3 실험 조건 및 방법

본 연구에서 사용한 냉매는, 전술한 바와 같이 순수냉매 R22, R32, R134a, R125, R290, R600a 와 이들 냉매의 혼합물인 변온증발 혼합냉매 R32/R134a, R290/R600a, 등온증발 혼합냉매 R32/R125이다. 변온증발 혼합냉매는 구성요소인 순수 냉매의 질량비 기준 25/75, 50/50, 75/25, 세 가지 혼합비로 섞어서 사용하였고, 등온증발 혼합냉매 R32/R125는 질량비 50/50인 냉매를 사용하였다.

증발열전달 특성에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 냉매의 질량유속, 외부에서 가해지는 열유속이다. 냉매의 질량유속을 세 가지, 열유속을 네 가지로 변화시키며 실험하였다. Table 1에 대상냉매와 냉매별 실험조건을 정리하여 나타내었다. 각 냉매의 포화압, 증발잠열 등의 열역학적 물성치가 다르게 나타나며, 냉매간의 열전달 특성의 비교를 위해 실험조건을 동일하게 맞추는 필요가 있으므로 증발기 출구 온도를 일정하게 유지하였다.

실험방법은 다음과 같다. 우선 실험장치의 내부를 진공펌프를 이용하여 진공상태로 만든 후 약 2 kg 정도의 냉매를 충전한다. 이 때 냉매의 양이 너무 적으면 냉매 펌프 입구에 기체가 들어가게 되고, 그렇게 되면 실험시 정상상태가 유지될 수 없기 때문에 예비실험을 통해 적절한 양을 결정하였

Table 1 The experimental conditions

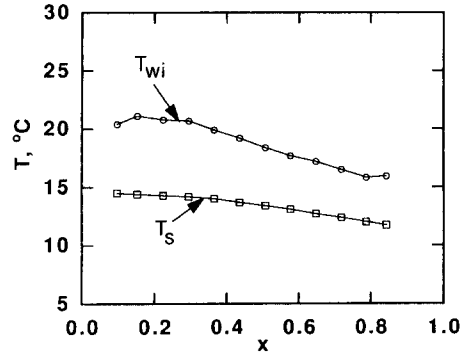
Refrigerants	Mass flux kg/m <sup>2</sup> s	Heat flux kW/m <sup>2</sup>
R22, R32, R134a	424,583,742	10, 18, 25, 30
R32/R134a, R32/R125		
R290, R600a	265,424,583	
R290/R600a		
R125	583,742,901	10, 14, 19

다. 냉동기를 운전하지 않은 상태, 즉 실온상태에서의 냉매 주입은 한계가 있기 때문에, 진공상태에서부터 어느 정도 냉매가 들어간 후 냉동기를 작동시켜 시스템 내부의 압력을 낮추어 주입하였으며, 혼합냉매의 경우 고온증발 냉매를 먼저 충전하였다. 실험조건, 즉 작동온도, 질량유량, 열유속 등의 조건을 냉매 펌프 회전속도, 전압조절기, 냉각수의 온도와 유량 등을 조절하여 어느 정도 맞춘 후 시스템의 운전상태를 확인하고, 정상상태에 이른 것으로 판단되면 다시 냉매유량과 가해지는 열량을 미세 조절한다. 다시, 정상상태에 도달하면 온도, 압력, 질량유량, 전력을 측정한다.

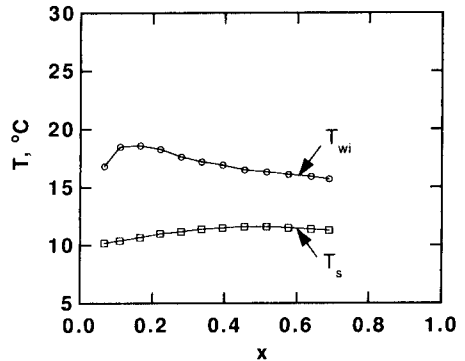
### 3. 실험결과 및 토론

#### 3.1 증발열전달 특성

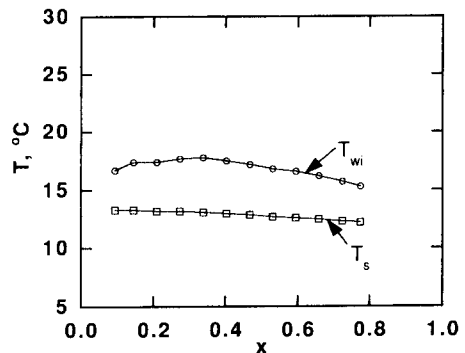
먼저 Fig. 3에 순수냉매 R22와 변온증발 혼합냉매 R32/R134a (질량비 25/75) 및 등온증발 혼합냉매 R32/R125 (질량비 50/50)의 온도 변화율 각각 나타내었다. Fig. 3(a)에 나타낸 순수냉매의 경우 증발이 진행되면서 압력강화로 인해 냉매의 온도는 감소하게 된다. 열전달 과정이 시작되면서 증발 초기에 핵비동의 영향으로 열전달이 활발히 이루어지다가 차츰 대류증발 영역으로 천이되기 때문에, 시험부 입구에서 벽면과 냉매의 온도차이는 작게 나타나지만, 대류증발 영역으로 천이되면서 온도차는 약간 커진다. 계속 증발이 진행되면서 열전달능력이 커지고, 이로 인해 온도 차이가 줄어드는 것을 알 수 있다. 한편, 마지막 부분의 벽면온도가 약간 상승하는 것을 볼 수 있으며, 벽면온도가 급격히 상승하는 현상이 나타나기도 한다. 이것은 고건도 지역에서 부분적으로 기체가 벽면에 접촉할 수 있는 기회가 상대적으로 많아지면서 열전달이 급격히 저하되기 때문이다. Fig. 3 (b)에 나타낸 변온증발 혼합냉매의 경우 압력강화에 의한 온도강하 효과도 물론 존재하지만, 증발시 상변화 온도의 변화로 인한 온도상승 효과가 지배적이어서 냉매 온도가 증발의 진행과 더불어 증가한다. 그러나, 유속이 빠른 경우 증발이 진행되면서 압력강하가 어느 정도 커지게 되면, 혼합냉매의 온도상승 효과에도 불구하고 압력 강하에 의한 온도 강하가 커지게 되기 때문에 증발의 진행과 더불어 온도가 약간 낮아지는 경우도 있다. 이러한 결과는 만일 열교환기에서 냉매의 압력강하가 클 경우, 열교환과정에



(a) R22



(b) R32/R134a (25/75 by mass %)

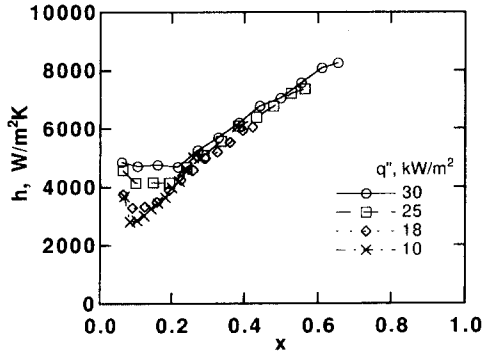


(c) R290/R600a (50/50 by mass %)

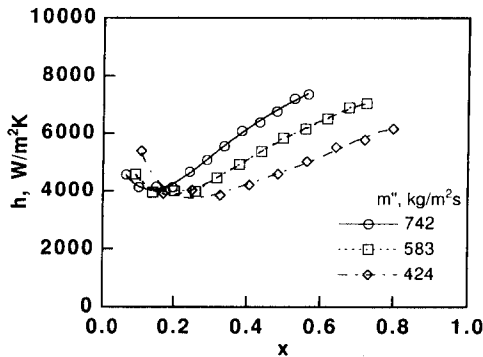
Fig. 3 Temperature change of the inner wall and refrigerant with respect to quality for  $m''=583\text{kg/m}^2\text{s}$ ,  $q''=30\text{kW/m}^2$

서 변온증발 혼합냉매의 이점을 충분히 이용할 수 없다는 것을 뜻한다. 등온증발 혼합냉매인 R32/R125의 온도분포를 Fig. 3 (c)에 나타내었는데 순수냉매와 같이 압력강하와 더불어 냉매온도는 낮아지는 것을 실험결과로부터 확인할 수 있다.

증발의 진행에 따른 열전달계수의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4 (a)는 질량유속이 같고 열



(a) Dependence on heat flux for a constant mass flux of 742kg/m<sup>2</sup>s



(b) Dependence on mass % flux for a constant heat flux of 25kW/m<sup>2</sup>

Fig. 4 Heat transfer coefficients with respect to quality for R22

유속이 변화하는 경우이며 Fig. 4 (b)는 열유속이 같고 질량유속이 변화하는 경우이다. 같은 질량유속을 유지하고 열유속을 변화시키는 경우, 초기의 핵비등 영역에서 열유속의 영향이 강하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 저전도 지역에서는 열전달과 열유속의 연관성을 무시할 수 없음을 보여주는 결과이며, 증발 초기에는 벽면에서의 기포생성, 액막에서의 기포성장 및 소멸에 의한 열전달, 즉 핵비등 열전달에 의한 영향이 크게 나타나기 때문에, 대류증발에 의한 열전달의 영향과 합쳐져서 열전달이 활발히 일어나는 것으로 판단된다. 이후 핵비등의 영향이 감소하면서 열전달계수가 약간 감소하게 된다. 그러나, 증발이 조금만 진행되어도 기상의 유속이 빨라지고 대류증발의 영향이 강해지면서, 열전달이 활발히 이루어지고 열유속이 열전달에 미치는 영향이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 열유속이 같고 질량유속이 바뀌는 경우, 질량유속이 빨

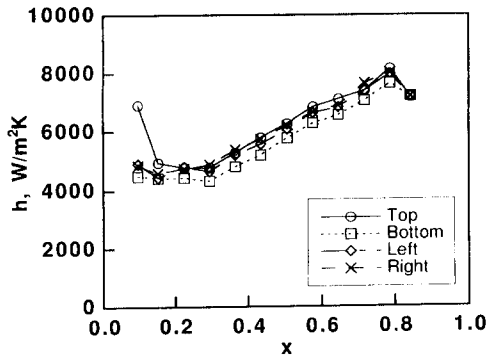
라지게 되면 Reynolds 수가 커지게 되고 결과적으로 열전달이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 또한 질량유속이 커지면, 증발 초기의 핵비등에 의한 영향도 질량유속이 작은 경우에 비해 상대적으로 약해지는 것을 고찰할 수 있으며, 따라서 열유속의 영향이 미치는 범위도 다소 좁아지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5에는 윗면, 아랫면, 양 옆면, 4 곳에서 측정한 열전달계수를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 증발초기, 즉 열량이 가해진 직후 상부의 열전달계수가 아주 크게 나타난다. 이는 증발 초기에 핵비등의 영향으로 발생한 기포의 운동이 중력의 영향으로 인해 하부에서 상부로 활발히 이루어져서 상부의 유동장이 하부에 비해 더 교란되기 때문으로 생각된다. 그러나, 증발이 조금만 진행되면, 유동장이 어느 정도 안정된 환상유동 형태를 확립하고 대류비등의 영향이 점차 강해지면서 상부와 하부의 열전달의 차이는 급격히 줄어든다. 한편, 순수냉매와 등온증발 혼합냉매의 경우 상부가 하부에 비해 열전달계수가 크게 나타나는 것을 살펴볼 수 있는데, 이는 수평관의 환상유동에서 중력의 영향으로 인해 상부의 액막 두께가 하부에 비해 약간 얇게 유지되고, 이로 인해 액막 내에서의 열전달 저항이 상부가 하부에 비해 작기 때문으로 판단된다. 그러나, 변온증발 혼합냉매의 경우 증발 초기에 상부의 열전달이 하부에 비해 활발히 일어나는 것은 순수냉매의 경우와 같지만, 곧이어 상부가 하부에 비해 열전달계수가 작게 나타나고, 후반부에 가서는 그 차이가 많이 줄어들거나 혹은 다시 역전되는 경향을 보인다. 순수냉매와 혼합냉매의 원주방향 열전달 특성이 다르게 나타나는 이러한 현상은 Ross 등<sup>(14)</sup>, Jung 등<sup>(15)</sup>의 결과에서도 나타나고 있으며, 변온증발 혼합냉매의 경우 수평 환상유동에서 원주방향 액막의 두께가 균일하지 않고, 이로 인해 국소 위치에서 액막의 냉매 온도가 원주방향으로 일정하지 않기 때문으로 판단된다. 즉, 증발이 진행되면서 상부 액막에서 하부에 비해 저온 증발매체의 증발이 활발히 일어나기 때문에, 저온 증발매체의 성분비가 상부에서 더 작아질 것이고, 이로 인해 상부 액막의 온도가 하부보다 약간 높게 유지될 것이다. 이러한 온도차의 차이는 상부 액막이 얇기 때문에 열전달이 하부에 비해 열전달이 잘 이루어지는 효과와는 반대로서, 벽면과 기상 중심의 냉매 온도와의 차이를 크게 하여 열전달계

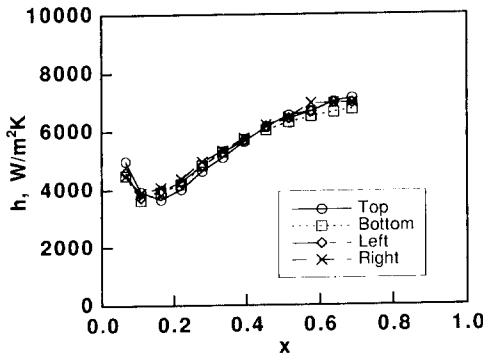
수를 저하시키는 것으로 생각된다. 그러나, 건도가 커지게 되면 기상의 유속이 빨라지기 때문에 액막의 두께가 많이 균일해지면서 얇아지게 되고, 원주 방향의 혼합이 활발히 이루어져서 성분비의 차이가 줄어들 것이다. 이렇게 되면, 성분비 변화에 의한 열전달 감소의 영향이 작아져서 순수냉매와 마찬가지로 액막이 상대적으로 얇아 열저항이 작은 상부

에서의 열전달이 하부에 비해 잘 이루어지는 것으로 판단된다. 한편, Fig. 5(a)와 (c)의 경우 마지막 부분의 열전달계수가 급격히 낮아지는 현상을 볼 수 있다. 특히 Fig. 5(c)의 경우는 상부의 열전달계수만이 급격히 감소하고 있는데, 이는 앞서의 설명과 같이, 열역학적 상태는 포화상태이지만 건도가 1.0에 가까워지면 안정된 환상유동 형태가 붕괴되어 기체가 직접 벽면에 접촉하는 기회가 많아지기 때문으로 판단된다.

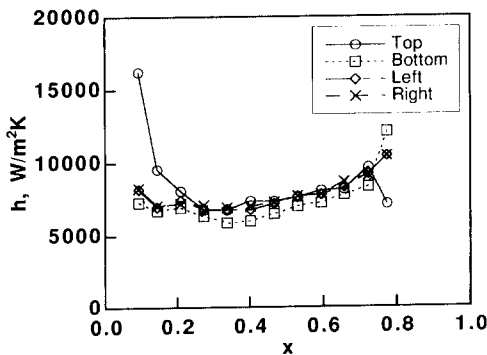
한편, 질량유속이 같고 열유속이 변하는 경우, Fig. 4(a)에 나타낸 바와 같이 증발이 진행되면서 핵비동의 영향이 약해지고 대류비동의 영향이 지배적인 것으로 판단할 수 있다. 따라서, Chen의 상



(a) R22

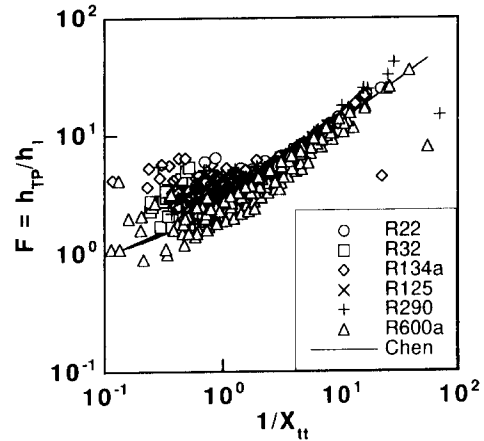


(b) R32/R134a (25/75 by mass %)

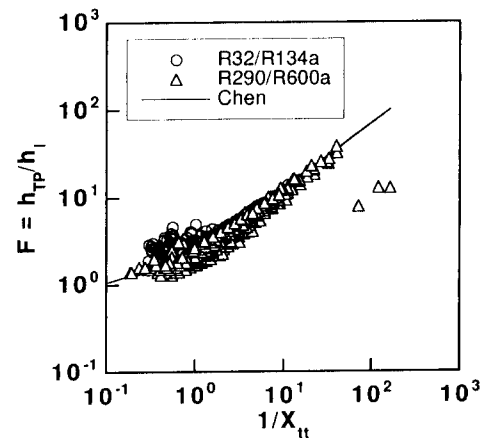


(c) R32/R125 (50/50 by mass %)

Fig. 5 Heat transfer coefficients at the top, bottom, and both sides of the tube with respect to quality for  $m''=583\text{kg/m}^2\text{s}$ ,  $q''=30\text{kW/m}^2$



(a) Pure refrigerants



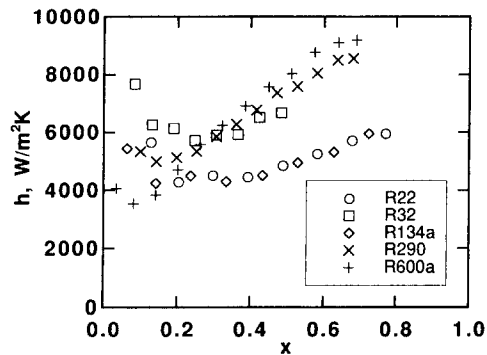
(b) Refrigerant Mixtures

Fig. 6 Chen's F factor with the experimental data in this study

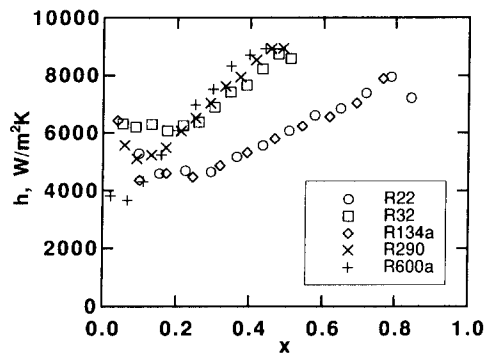
관식<sup>(16)</sup>에서 2상유동에 의한 열전달의 향상 효과를 뜻하는  $F$  인자를 순수 및 혼합냉매의 실험자료와 비교하여 Fig. 6에 각각 나타내었다. 그림에서 Martinelli 파라미터는 건도에 반비례하는 인자이기 때문에, 그 역수로 표현된 가로 축의 변화는 건도의 변화로 판단할 수 있다. 핵비등의 영향이 강하게 나타나는 저건도 지역을 제외하면, Chen의  $F$  인자가 대상냉매인 6가지의 순수냉매의 열전달 계수 실험자료와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다 (상대오차 12.1 % ; 건도 0.2 이상 실험자료). 그러나, 순수물질에 사용하던 Chen의 식은 Fig. 6 (b)에 나타낸 변온증발 혼합냉매 R32/R134a (질량비 25/75, 50/50, 75/25), R290/R600a (질량비 25/75, 50/50, 75/25)의 자료들을 정성적으로는 잘 표현하고 있지만, 절대적인 크기를 예측하기는 어려울 것으로 판단된다. 즉, 전술하였던 바와 같이 변온증발 혼합냉매의 열전달계수는 순수냉매의 열전달계수를 선형적으로 보간한 값보다는 작게 나타나며, 순수냉매에 적용하던 열전달 상관식으로 계산한 값보다도 낮게 나타나고 있음을 보여준다. 이로부터 변온증발 혼합냉매의 2상유동 증발열전달 특성을 기술하기 위한 새로운 인자의 도입이 필요함을 알 수 있다. 한편, 고건도 지역에서의 급격한 열전달 감소를 보여주는 자료들이 순수 또는 혼합냉매의 경우 존재하는 것을 볼 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 안정된 환상유동이 유지되지 못하기 때문이며, 상관식은 이러한 결과를 예측하지는 못하는 것으로 판단된다.

3.2 증발 열전달계수의 비교

먼저 순수냉매의 열전달계수를 열유속 30 kW/m<sup>2</sup>, 질량유속 424, 583 kg/m<sup>2</sup>s인 경우에 대해 Fig. 7에 나타내었다. R32, R290, R600a의 열전달 계수가 R22와 R134a에 비해 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 2상유동 열전달계수는 대류비등 항만을 고려한다면, 액상만을 고려한 열전달계수와 2상유동에 의한 열전달의 향상효과와 곱으로 표현할 수 있다. 액상만을 고려한 열전달계수는 무차원화된 Nusselt 수로부터 계산할 수 있고, 이는 Reynolds 수와 Prandtl 수로 표현될 수 있음을 감안할 때, 액상의 점도, 비열, 열전도율의 함수로 생각할 수 있다. 따라서, 질량유량, 건도 등의 작동 조건이 같을 경우, 이러한 물성치들이 열전달계수에 영향을 미치게 된다. 액상의 점도가 다른 냉



(a)  $m''=424\text{kg/m}^2\text{s}$ ,  $q''=30\text{kW/m}^2$ .



(b)  $m''=583\text{kg/m}^2\text{s}$ ,  $q''=30\text{kW/m}^2$ .

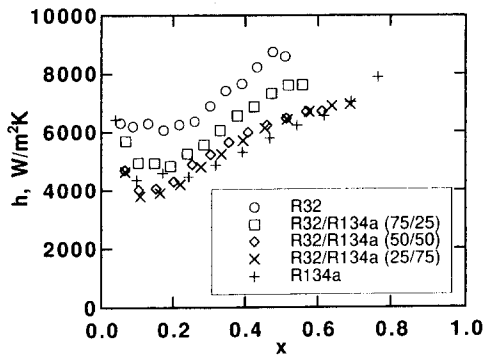
Fig. 7 Comparison of the heat transfer coefficients of the pure refrigerants R22, R32, R134a, R290, and R600a

매에 비해 상대적으로 큰 R22, R134a는 Reynolds 수가 작고, 이는 같은 조건에서 점도가 작은 다른 물질에 비해 열전달계수가 낮아지는 한 원인이다. 액상의 열전도율은 Nusselt 수를 계산하는데 있어 Prandtl수에 영향을 주지만, 실제 Nusselt 수에 곱해짐으로써 열전달계수를 계산하는데 쓰인다. 즉, 액상의 열전도율은 R32, R290, R600a가 R22, R134a에 비해 상대적으로 크며, 앞서의 점도에 의한 효과와 더불어 R32, R290, R600a의 열전달계수가 크게 나타나는 원인으로 판단된다. 한편, 2상유동에 의한 열전달의 향상효과는 건도, 액상과 기상의 밀도비, 점도비의 함수로 나타낼 수 있는데, 이 값은 밀도비, 점도비에 의존도가 낮기 때문에 건도가 같을 경우 물질에 따라 큰 차이를 보이지는 않는다. 따라서, 2상유동 열전달계수 또한 액상의 열전도율이 상대적으로 큰 R32, R290, R600a가 R22, R134a에 비해 큰 값을 보인다.

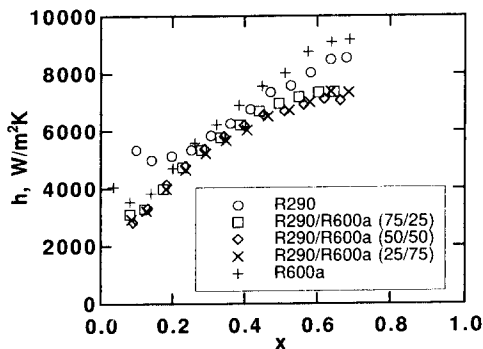


변온증발 혼합냉매 R32/R134a, R290/R600a와 각 순수냉매들의 열전달계수를 Fig. 8에 나타내었다. 두 혼합냉매의 열전달계수는 같은 실험 조건에서 모두 각 순수냉매의 열전달계수 값의 사이에 나타난다. 그러나, 그림에 나타난 바와 같이 성분비에 따라 선형적으로 변화하지는 않는 것을 알 수 있는데, 이는 전술한 바와 같이 혼합냉매의 액상과 기상의 성분비가 증발과정에서 변화하기 때문인 것으로 판단된다. 한편, R290/R600a의 경우 성분비에 따른 열전달계수의 변화폭이 R32/R134a에 비해 상당히 작은 것을 알 수 있다. 이는 순수냉매 R290, R600a는 R32, R134a에 비해 불성치 차이가 상대적으로 작기 때문으로 생각된다. 즉, 순수냉매 R32와 R134a의 열전달계수 자체가 심하게 차이 나기 때문이며, R290과 R600a는 그렇지 않기 때문에 혼합에 따라 열전달계수의 변화 폭 또한 작게 나타났다.

전술한 바와 같이 환경문제로 인해 사용이 규제



(a) R32/R134a ( $m'' = 583 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ ;  $q'' = 30 \text{ kW/m}^2$ )



(b) R290/R600a ( $m'' = 424 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ ;  $q'' = 30 \text{ kW/m}^2$ )

Fig. 8 Comparison of the heat transfer coefficients of the refrigerant mixtures

될 예정인 R22와 그 대체냉매로서의 사용이 연구되고 있는 변온증발 혼합냉매 R32/R134a, 등온증발 혼합냉매 R32/R125, 또한, 환경문제 측면에서 장기적으로 HFC 계열의 물질보다 지구온난화 정도가 무시할 정도로 작기 때문에 사용이 고려되고 있는 변온증발 혼합냉매 R290/R600a의 열전달계수를 같은 조건 (질량유속  $583 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ ; 열유속  $30 \text{ kW/m}^2$ )에서 비교하여 Fig. 9에 각각 나타내었다. R32/R134a (질량비 25/75)는 R22와 비슷한 값을 보이고, R32/R125 (질량비 50/50)는 이 두 냉매들에 비해 다소 큰 값을 보인다. 따라서, R32/R134a는 질량비 25 대 75 근처의 혼합비를 택할 경우 R22와 유사한 열전달 특성을 가지므로 대체냉매로 사용하여도 기존에 R22를 사용하던 열교환기 설계를 크게 변경하지 않을 수 있는 가능성을 제공한다. R32/R125는 비슷한 온도 범위에서 작동할 때 R22에 비해 압력이 높지만 열교환 특성이 우수하여 유사한 용량을 내면서 시스템을 소형화할 수 있다는 장점이 있는 것으로 판단된다. 이는, 압축기 열량 시험을 통해 에너지 효율의 우수성<sup>(17)</sup>이 이미 알려져 있는 상태에서 R22의 대체냉매로 사용되는데 또 하나의 장점으로 작용할 것이다. 한편, R290/R600a는 R22 또는 R134a에 비해 열전달계수가 크게 나타난다. 이는 부하, 냉매의 질량유량 등 냉동기의 모든 작동조건을 동일하게 유지하고 냉매만 혼합냉매 R290/R600a로 대체한다면, 열교환기를 작게 설계할 수 있다는 것을 의미한다. 또한, 이러한 탄화수소 계열의 냉매는 환경적인 추

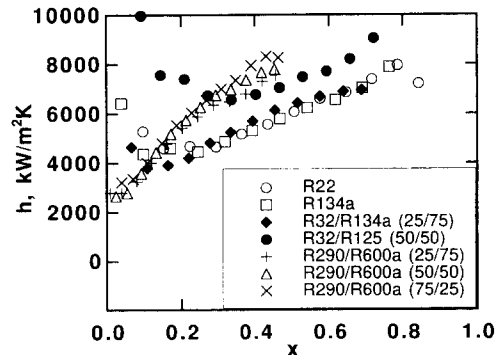


Fig. 9 Comparison of the heat transfer coefficients of the refrigerants R22, R32/R134a (25/75 by mass %), R32/R125 (50/50 by mass %), R290/R600a (25/75, 50/50, 75/25 by mass %) for  $m'' = 583 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$  and  $q'' = 30 \text{ kW/m}^2$

면에서 오존층을 파괴하지 않으며, 지구온난화에 미치는 영향이 미미하고, 기타 여러가지 안전성을 만족한다는 측면에서 그 사용이 가시화되고 있다.<sup>(18)</sup>

#### 4. 결 론

HCFC 계열의 냉매로서 대체에 대한 연구가 진행 중인 R22 순수냉매와 그 대체 가능성이 검토되고 있는 HFC 계열의 변온증발 혼합냉매인 R32/R134a, 등온증발 혼합냉매인 R32/R125 및 HC 계열의 R290/R600a를 선정하여 이들 냉매의 증발열전달 특성을 실험적으로 고찰하였다.

같은 질량유량의 경우 증발의 진행에 따라 초기의 핵비등 영역에서 열유속이 클수록 열전달계수가 커지게 되는 연관성이 나타나지만, 대류비등의 영향이 강해지게 되면 열유속이 열전달에 미치는 영향이 작아졌다.

본 연구를 통해 새롭게 사용이 고려되고 있는 냉매들의 열전달 특성에 대한 기초 자료를 마련하였고, 대류비등 항만을 고려한 Chen의 식과 비교하여 대류비등이 지배적인 영역에서 실험자료와 잘 일치하는 것으로 판단할 수 있다. 변온증발 혼합냉매의 경우 성분비의 변화에 따른 실험 자료를 순수냉매의 열전달 상관식에 적용한 결과 상관식이 열전달계수를 크게 예측함을 알 수 있다.

동일한 작동조건에서 R32/R134a (질량비 25/75)의 국소 열전달계수는 R22와 비슷한 값을 보이고, R32/R125 (질량비 50/50)는 이 두 냉매들에 비해 약 15% 정도 큰 값을 보이며, R290/R600a는 R22 또는 R134a에 비해 열전달계수가 약 30% 정도 크게 나타난다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 및 서울대학교 터보·동력기계연구센터의 지원에 의하여 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) Schwind, H. O. H., 1960, "Multiple Fluid Refrigerating System," U. S. Patent 2938362.
- (2) Mulroy, W., Kauffeld, M., McLinden, M. and Didion, D. A., 1988, "Experimental Evaluation of Two Refrigerant Mixtures in a Breadboard Air Conditioner," *DOE/ORNL Heat Pump Conference Proc.*, pp. 55~61.
- (3) Kim, T. S., Shin, J. Y., Chang, S. D., Kim, M. S. and Ro, S. T., 1994, "Cycle Performance and Heat Transfer Characteristics of a Heat Pump Using R22/R142b Refrigerant Mixtures," *Int. J. Refrig.*, Vol. 17, No. 6, pp. 391~400.
- (4) Hihara, E. and Saito, T., 1990, "Forced Convective Boiling Heat Transfer of Binary Mixtures in a Horizontal Tube," *Proc. 9th Int'l Heat Transfer Conf.*, Vol. 2, Paper No. 1-BO-21, pp. 123~128.
- (5) 신지영, 김동섭, 노승탁, 1993, "수평원관 내에서 R22/R142b 혼합냉매의 증발과정 열전달에 관한 연구," *대한기계학회논문집*, 제17권, 제4호, pp. 971~979.
- (6) Takamatsu, H., Momoki, S. and Fujii, T., 1993, "A Correlation for Forced Convective Boiling Heat Transfer of Nonazeotropic Refrigerant Mixture of HCFC22/CFC114 in a Horizontal Smooth Tube," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, No. 14, pp. 3555~3563.
- (7) UNEP, 1987, Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer.
- (8) UNEP, 1992, Copenhagen Decision, the Fourth Meeting of the Parties to the Montreal Protocol.
- (9) Didion, D. and Bivens, D. B., 1990, "Role of Refrigerant Mixtures as Alternatives to CFCs," *Int. J. Refrig.*, Vol. 13, pp. 163~175.
- (10) 장세동, 신지영, 노승탁, 1993, "R12 및 R22 대체냉매의 열역학적 물성치 및 냉동기의 성능비교," *공기조화·냉동공학 논문집*, 제5권, 제1호, pp. 73~83.
- (11) 장영수, 신지영, 노승탁, 1994, "R134a, R152a, R22/R142b를 이용한 냉동기의 성능실험," *공기조화·냉동공학 논문집*, 제6권, 제1호, pp. 39~46.
- (12) Kim, M. S., Mulroy, W. J. and Didion, D. A., 1994, "Performance Evaluation of Two Azeotropic Refrigerant Mixtures of HFC-134a With R-290 (Propane) and R-600a (Isobutane)," *J. Energy Resources Technology*, Vol. 116, pp. 148~154.

- (13) 김민수, 김동섭, 노승탁, 1991, "수정된 Carnahan-Starling 상태방정식을 이용한 혼합냉매의 물성계산," 대한기계학회논문집, 제15권, 제6호, pp. 2189~2205.
- (14) Ross, H., Radermacher, R., Di Marzo, M. and Didion, D., 1987, "Horizontal Flow Boiling of Pure and Mixed Refrigerants," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, No. 5., pp. 979~992.
- (15) Jung, D. S., McLinden, M., Radermacher, R., and Didion, D., 1989, "Horizontal Flow Boiling Heat Transfer Experiments with a Mixture of R22/R114," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 32, No. 1, pp. 131~145.
- (16) Chen, J. C., 1966, "Correlation for Boiling Heat Transfer to Saturated Fluids in Convective Flow," *I&EC Process Design and Development*, Vol. 5, No. 3, pp. 322~329.
- (17) Spatz, M. W. and Zheng, J., 1993, "R-22 Alternative Refrigerants: Performance in Unitary Equipment," *ASHRAE Trans.*, Vol. 99, Part 2, pp. 779~785.
- (18) Chen, S., Judge, F. F., Groll, E. A. and Radermacher, R., 1994, "Theoretical Analysis of Hydrocarbon Refrigerant Mixtures as a Replacement for HCFC-22 for Residential Uses," *Proc. of the 1994 International Refrigeration Conference, Purdue University, Indiana.*, U. S. A., pp. 231~236.