

## 자동차용 열교환기 냉매의 압력 강하 특성에 관한 연구

임 태 우<sup>\*1)</sup> · 박 종 윤<sup>2)</sup>

부경대학교 기계공학부<sup>\*1)</sup> · 부경대학교 수산교육과<sup>2)</sup>

### A Study on Pressure Drop Characteristics of Refrigerant in Heat Exchanger for Automobile

Taewoo Lim<sup>\*1)</sup> · Jongun Park<sup>2)</sup>

<sup>\*1)</sup>School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

<sup>2)</sup>Department of Fisheries Education, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

(Received 10 June 2002 / Accepted 13 December 2002)

**Abstract** : An experiment study on pressure drop was carried out for both an adiabatic and a diabatic two-phase flow with pure refrigerants R134a and R123 and their mixtures as test fluids in a uniformly heated horizontal tube. The frictional pressure drop during flow boiling is predicted by using two models; the homogeneous model that assumes equal phase velocity and the separate flow model that allows a slip velocity between two phases. The measured frictional pressure drop was compared to a few available correlations. Homogeneous model considerably underpredicted the present data for mixture as well as pure component in the entire mass velocity ranges employed in the present study, while Friedel correlation was found to satisfactorily correlate the frictional pressure drop data as compared to other correlation.

**Key words** : Homogeneous flow(균질류), Mixture(혼합물), Pressure drop(압력강하), Two-phase frictional multiplier(이상 마찰 승수)

#### Nomenclature

D : tube inner diameter, m  
 f : friction factor  
 Fr<sub>TP</sub> : two-phase Froude number  
 G : mass velocity, kg/m<sup>2</sup>s  
 L : tube length, m  
 ΔP : pressure drop, Pa  
 Re : Reynolds number  
 We<sub>TP</sub> : two-phase Weber number  
 X<sub>tt</sub> : Martinelli parameter  
 z : axial distance, m

#### Greek symbols

α : void fraction  
 β : vapor quality  
 ρ<sub>TP</sub> : homogeneous density, kg/m<sup>3</sup>  
 μ : viscosity, Pa · s

#### Subscripts

α : acceleration  
 fo : total flow assumed as liquid  
 in, out : inlet and outlet  
 l : liquid  
 TP : two-phase  
 v : vapor  
 vo : total flow assumed as vapor

\*To whom correspondence should be addressed.  
kyunlim@hanmail.net

### 1. 서론

자동차용 에어컨 시스템은 에어컨 냉매를 압축-응축-팽창-증발시키는 과정이 반복됨으로써 냉방과 제습을 시스템적으로 조절하여 사계절 언제나 차 실내를 쾌적한 상태로 유지하게 해주는 공기조절 시스템입니다.

이러한 자동차용 열교환기의 설계 시 냉매의 이상 압력 강하에 대한 문제를 중요하게 고려해야 한다. 관내 유동 비등에 대한 연구는 이미 실험적인 연구와 경험적인 예측 방법을 통하여 이루어져 왔다. 그 결과 수평관내 이상 압력 강하에 대한 수많은 경험식이 개발되었다. 그러나, 이들의 대부분은 증기-스팀 또는 물-공기 혼합물을 매개 물질로 사용하여 결과를 얻었다. 이러한 결과는 압력강하의 특성을 이해하는 점에서는 도움이 된다. 그러나 물-공기 시스템에서의 이상 유동 현상은 냉매 시스템의 것과는 다르기 때문에 자동차용 냉매에 직접 적용하기에는 어렵다.

이상 유동 비등 시 측정된 압력 강하는 두 가지 성분의 합으로 구성된다. 즉, 마찰 압력 강하와 가속에 의한 압력 강하이다. 마찰 압력 강하는 예측하기 가장 어려운 성분으로 총 압력 강하에 가장 중요한 기여를 한다. 반대로, 상 변화에 따른 운동량 유속의 변화에 의해 기인되는 가속에 의한 압력 강하는 마찰 압력 강하에 비해 일반적으로 작다. 유동 비등시 마찰 압력 강하는 두 가지 방법에 의해 예측되는데, 즉 각 상의 속도가 똑 같다고 가정하는 균질 모델<sup>1)</sup>과 슬립류 모델로 언급되는 분리 모델이다.

Pierre<sup>2)</sup>는 균질 모델을 토대로 냉매 R12, R22 그리고 R502에 대해 측정된 압력 강하로부터 상관식을 개발하였다. Lockhart- Martinelli<sup>3)</sup>는 분리 모델을 처음 사용하여 그들의 유명한 상관법을 제안하였다. 이것은 나중에 수평 유동 비등 시 압력 강하를 예측하기 위해 Martinelli-Nelson<sup>4)</sup>에 의해 수정되었다. Jung et al.<sup>5)</sup>은 냉매 R22, R114, R12 그리고 R152a를 사용하여 수평 유동 비등의 압력 강하에 관한 실험적인 연구를 수행하여, Martinelli-Nelson의 상관식을 수정함으로써 새로운 상관식을 개발하였다.

본 연구의 목적은 작동 유체로서 순 냉매 R134a와 R123 그리고 이들의 혼합 냉매를 사용하여 수평

관내 유동 비등시 압력 강하에 대한 실험 데이터를 얻는 것이며, 본 연구에서 얻어진 결과로부터 이상 마찰 계수를 사용하여 증기 건도와 질량 유속에 따른 압력 강하 특성을 고찰하는 것이다. 마지막으로, 측정된 데이터를 기존의 여러 상관식들과 비교·검토하는 것이다.

### 2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 시스템은 저장 탱크, 펌프, 유량계, 혼합실, 예열기, 시험 구간, 관찰부(sight glass section), 응축기 그리고 보조 장치들로 구성된다. 모든 실험은 혼합실의 입구에서 과냉액으로 진행되었다. 과냉액 상태의 냉매는 먼저 예열기에서 시험구간 입구의 주어진 엔탈피까지 가열되며, 시험 구간으로 들어가 다시 가열된다. 유동 양식은 시험부 출구에 놓인 관찰부를 통해 관찰되었으며, 이 관찰부는 시험부와 동일한 내경을 가진다.

Fig. 2는 2m의 길이를 가지는 스테인레스 스틸 튜

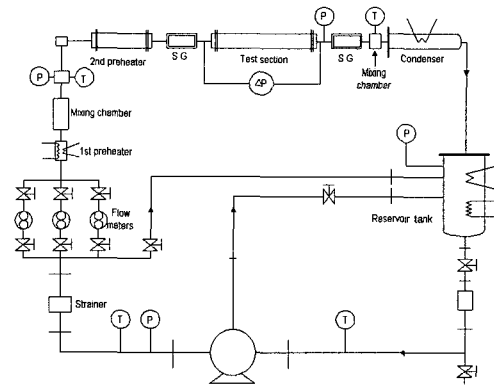


Fig. 1 Experimental apparatus

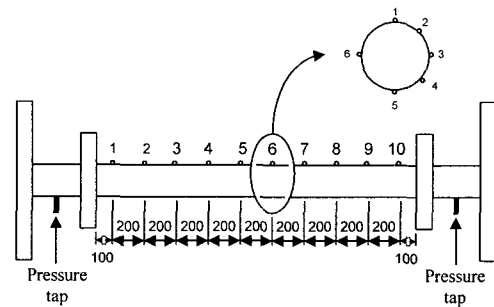


Fig. 2 Test section

브인 시험부로 내경은 10mm, 두께는 1.5mm이다. 시험부는 저 전압 고 전류 변압기를 통해 안정화 되는 교류에 의한 전기적 가열방법에 의해 가열된다. 시험구간의 바깥 벽면 온도는 200mm 간격으로 튜브의 바깥 표면상에 점 용접(spot-welded)된 크로멜-알루멜(Chromel-Alummel) 열전대에 의해 측정되었다.

시험부와 예열기는 파이버 글래스(fiber glass)로 잘 단열 되어 있지만, 주위로의 열 손실은 필연적이다. 따라서, 주위로의 열손실은 튜브 벽면과 주위 온도 사이의 온도차의 함수로 계산되어 벽면 온도와 열 유속을 평가할 때 사용된다.

유체 온도와 압력은 입·출구에 있는 혼합실에서 측정되었으며, 시험부 입·출구에 아주 가까이 설치된 압력 탭을 가로지르는 압력 강하는 차압계를 사용하여 측정되었다. 유체 온도와 압력에 대한 이들 데이터는 시험부에 따른 국소 유체 온도와 압력을 결정하기 위해 사용된다.

냉매 R134a와 R123은 순 냉매들에 대한 작동 유체로 사용되며, 각각은 혼합 냉매를 구성하기 위해 저온 증발 성분(more volatile component)과 고온 증발 성분(less volatile component)으로 구성된다. 혼합물에서 저온 증발 성분(R134a)의 몰비는 27, 49 그리고 75%로 설정되었다. 유동 비등시 열전달과 압력강하에 영향을 미치는 주요 변수로는 질량 유속과 열유속 그리고 증기 건도라 할 수 있다. 혼합물의 열역학적인 물성치(thermodynamic properties)는 BWR<sup>6)</sup> (Benedict -Webb-Rubin) 상태 방정식으로부터 계산되며, 전달 물성치(transport properties)는 Reid<sup>7)</sup>에 의해 추천된 방법을 사용하여 계산하였다. 본 연구에서 질량 유속은 150, 225, 300 그리고 600 kg/m<sup>2</sup>s에서 그리고 열 유속은 5, 10, 20 그리고 50 kW/m<sup>2</sup>에서 수행되었으며, 건도는 0에서 거의 1까지의 범위를 커버할 수 있다.

### 2.1 유동양식

본 연구에서 관측된 이상 유동 양식은 다음과 같이 몇가지 기본 형태로 분류된다.

1) 간헐류(Intermittent flow) : 액체는 슬러그류(slug flow)처럼 관내를 흐른다. 슬러그내 유입된 증

기 기포는 관의 상부 근처에서 집중된다.

2) 층류(Stratified flow) : 액체와 증기상은 관의 상·하로 분리되어 흐른다. 이 때 관의 원주는 부분적으로 젖게된다.

3) 파형류(Stratified-wavy flow) : 액체와 증기상은 분리되어 흐르지만, 그 때 계면을 교란시키는 파를 가지고 있다. 이 때 교란에 의한 파형은 관의 상부까지는 이르지 못한다. 액상에서 증기상으로 액적의 유입은 교란된 계면에서 발생하게된다.

4) 환상류(Annular flow) : 관 벽면의 원주를 따라 액상이 관 중심부에는 증기상이 흐른다. 이 때 관 하부의 액막은 중력에 의해 상부보다 더 두껍게 된다. 고 건도 영역에서 관의 상부는 부분적으로 드라이아웃 될 수 있다.

5) 분무류(Mist flow) : 관내의 증기상의 형태로 연속적으로 흐르며, 액체는 액적의 형태로 존재하게 된다.

### 3. 압력 강하

수평관내 유동 비등시 총 압력 강하는 두 가지 성분의 합으로 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_a \tag{1}$$

여기서,  $\Delta P_f$ 는 마찰 압력 강하를 나타내고,  $\Delta P_a$ 는 가속으로 인한 압력 강하를 나타낸다.

마찰 압력 강하는 예측하기에 가장 어려운 성분이며, 총 압력 강하에 가장 중요한 기여를 한다. 반면, 가속으로 인한 압력 강하는 일반적으로 마찰 압력 강하와 비교해서 작은 값을 가진다.

유동 비등시 압력 강하를 해석할 때 여러 연구자들에 의해 언급되는 두 가지 물리적인 모델이 존재한다. 즉, 균질 모델과 분리 모델이다. 일반적으로 분리 모델을 토대로 한 상관식들은 압력 강하를 과대 평가하는 경향이 있는 반면, 균질 모델을 토대로 한 상관식들은 압력 강하를 낮게 예측하는 경향이 있다. 분리 모델은 원래 Lockhart and Martinelli에 의해 제안되었으며, 이후 Martinelli and Nelson에 의해 수정되었다.

이상 마찰 승수는 종종 이상 유동 비등시 마찰 압력 강하를 예측하기 위해 사용되며, 여기서 몇몇 상

관식들에 관한 이들의 정의가 간략하게 주어진다.

균질 모델은 이상 마찰 압력 강하를 계산하기에 가장 쉬운 상관식 중에 하나이며, 그 때 이상 마찰 승수는 다음과 같이 된다.

$$\phi_{fo}^2 = \left[ 1 + \beta \left( \frac{\rho_f}{\rho_v} - 1 \right) \right] \left[ 1 + \beta \left( \frac{\mu_f}{\mu_v} - 1 \right) \right]^{-1/4} \quad (2)$$

Lockhart and Martinelli의 상관식은 다음과 같이 주어진다.

$$\phi_{fo}^2 = \phi_f^2 (1 - \beta)^{1.75} \quad (3)$$

여기서  $\phi_f^2$ 는 가스-액체 혼합물의 유동 비등 시 Martinelli 변수  $X_H$ 의 항으로 다음과 같이 표시된다.

$$\phi_f^2 = 1 + \frac{C}{X_H} + \frac{1}{X_H^2} \quad (4)$$

여기서 C는 액상과 기상의 유동 영역이 층류인지 난류인지에 따라 5에서 20까지 변하며, 본 연구에서는 C의 값으로 20을 사용하였다.  $X_H$ 는 액체의 단상 마찰 압력 강하의 가스의 단상 압력 강하에 대한 비로 다음과 같이 정의된다.

$$X_H^{12} = (dp/dz)_{F,L} / (dp/dz)_{F,V} \quad (5)$$

Friedel<sup>8)</sup>의 경험식은 수많은 데이터를 토대로 이상 마찰 승수에 대한 다음과 같은 식을 얻었다.

$$\Phi_{fo}^2 = A + 3.24\beta^{0.78}(1-\beta)^{0.224} \left( \frac{\rho_f}{\rho_v} \right)^{0.91} \left( \frac{\mu_v}{\mu_f} \right)^{0.19} \times \left( 1 - \frac{\mu_v}{\mu_f} \right)^{0.7} Fr_{TP}^{-0.0454} We_{TP}^{-0.035} \quad (6)$$

여기서

$$A = (1 - \beta)^2 + \beta^2 \rho_f f_{vo} (\rho_v f_{fo})^{-1} \quad (7)$$

이상 Froude수와 Weber수는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$Fr_{TP} = \frac{G^2}{gD\rho_{TP}^2}, \quad We_{TP} = \frac{G^2 D}{\sigma\rho_{TP}} \quad (8)$$

Friedel의 이상 마찰 승수는 원래 단 성분 이상류 데이터를 토대로 유도되었지만, 이 성분에 대한 현

데이터도 잘 예측하고 있다.

Jung et al.은 Martinelli and Nelson의 상관식을 수정하여, 이상 마찰 승수를 증기 건도와 환산 압력의 함수로 다음과 같이 제시하였다.

$$\phi_{fo}^2 = 30.78\beta^{1.323}(1-\beta)^{0.477} p_r^{-0.7232} \quad (9)$$

## 4. 결과 및 고찰

본 연구에서 압력 강하 측정은 시험부의 단열(adiabatic)유동 조건과 가열(diabatic)조건 하에서 수행되었다. 단열 실험에서, 시험부 입구에서 건도 변화는 예열기에 공급되는 열유속을 조절함으로써 이루어졌다. 이러한 단열 실험은 단지 측정된 압력 강하 중에서 가속으로 인한 손실을 고려하지 않고 마찰 압력 강하 데이터를 얻을 수 있다는 것이다.

### 4.1 단열(adiabatic) 압력 강하

일반적으로, 측정된 마찰 압력 강하는 이상 마찰 승수를 사용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\phi_{fo}^2 = \frac{\Delta p_{TP}}{\Delta p_{fo}} \quad (10)$$

여기서,  $\Delta P_{TP}$ 는 이상 마찰 압력 강하이며,  $\Delta P_{fo}$ 는 이상 유동이 액체 단상으로 흐른다고 가정했을 때의 단상 마찰 압력 강하를 나타낸다. 따라서,

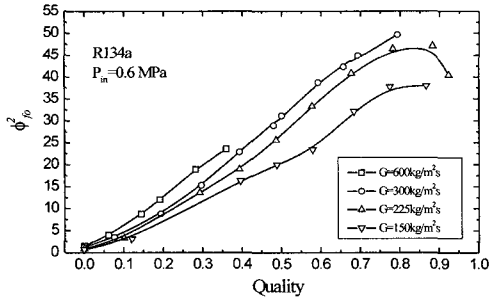
$$\Delta P_{fo} = \frac{2f_{fo}G^2L}{D\rho_1} \quad (11)$$

여기서 난류 유동에 대한 마찰 계수는 다음과 같이 주어진다.

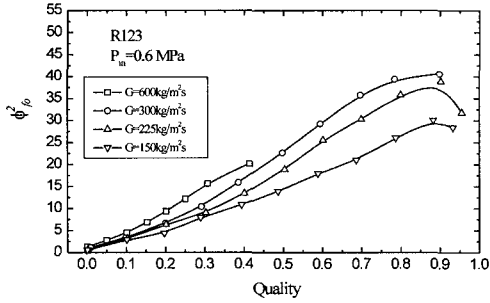
$$f_{fo} = 0.079Re^{-1/4} \quad (12)$$

Fig. 3(a)와 (b)는 측정된 마찰 압력 강하로부터 식 (10)을 이용하여 계산된 이상 마찰 승수의 변화를 나타낸다. 본 연구에서 사용된 전 질량 유속에 대하여 얻어진 이상 마찰 승수는 건도와 질량 유속의 증가와 더불어 증가한다는 것을 알 수 있다. 그리고 순 냉매와 혼합 냉매에 있어서 건도와 질량 유속에 따른 마찰 압력 강하의 변화는 유사하게 나타났다.

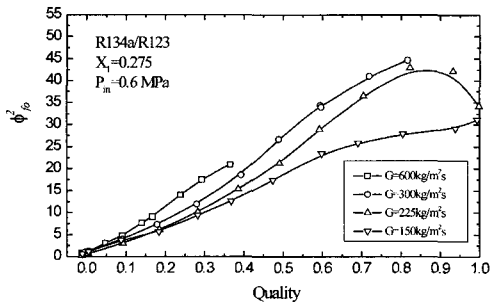
Fig. 4(a)와 (b)에 플롯된 것과 같이 측정된 마찰 압력 강하로부터 계산된 이상 마찰 승수는 여러 가



(a) Pure component, R134a



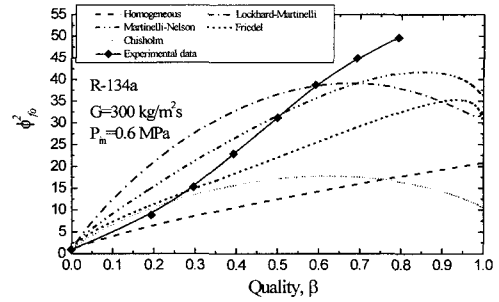
(b) Pure component, R123



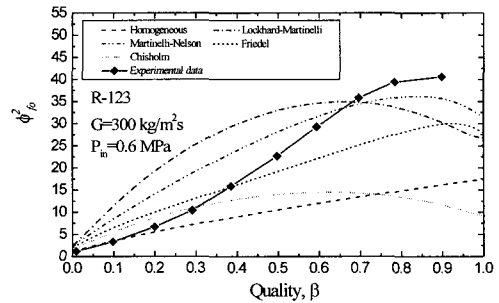
(c) Mixture

Fig. 3 Variations of the two-phase frictional multipliers against quality

지 상관식에 의해 평가된 것과 비교될 수 있다. 기존의 상관식들은 본 연구에서 얻어진 마찰 손수의 변화와 아주 다르다는 것을 알 수 있다. 그림에 나타나 있듯이 균질류 모델은 다른 상관식들 보다 훨씬 작은 값을 나타내고 있다. Friedel 상관식은 거의 선형적으로 변하면서 다른 상관식의 중간에 위치하는 반면, Lockhart-Martinelli와 Martinelli-Nelson 상관식은 다른 상관식들과 비교했을 때 비선형적으로 변화하면서 보다 큰 값을 나타내고 있다. 결과적으로 기존의 어떤 상관식도 현 데이터를 만족하지 못한다는 것을 알 수 있다.



(a) R134a



(b) R123

Fig. 4 Comparison between the measured frictional multiplier and several correlations

#### 4.2 가열(diabatic) 압력 강하

시험 구간을 가열할 경우 압력 강하는 가속에 의한 압력 강하가 고려되어야 한다. 즉, 식 (1)에서처럼 총 압력 강하는 마찰 압력 강하와 가속에 의한 압력 강하의 합으로 이루어진다. 본 연구에서 가속 압력 강하는 다음식을 사용하여 계산하였다.

$$\Delta P_a = G^2 \left[ \left\{ \frac{\beta^2}{\alpha \rho_v} + \frac{(1-\beta)^2}{(1-\alpha)\rho_l} \right\}_{out} - \left\{ \frac{\beta^2}{\alpha \rho_v} + \frac{(1-\beta)^2}{(1-\alpha)\rho_l} \right\}_{in} \right] \quad (13)$$

여기서  $\alpha$ 는 기공률을 나타낸다. 본 연구에서 기공률은 가장 큰 값을 가지는 균질류 모델에서부터 가장 작은 값을 가지는 Fauske에 이르기까지 여러 상관식들 중에서 CISE<sup>9)</sup> 상관식을 사용하여 평가하였다. Fig. 5는 증기 건도에 대해서 기공률의 변화를 나타내고 있다. 또한 기공률의 상관식을 슬립비(slip ratio)에 대한 상관식이라 할만큼 슬립비는 중요하다. 즉, 슬립비의 편차가 곧 기공률의 편차가 되는

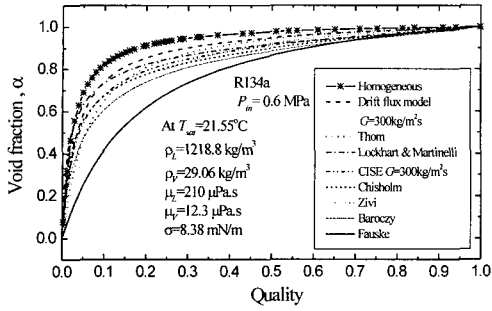


Fig. 5 Variations of the void fraction predicted from various correlations

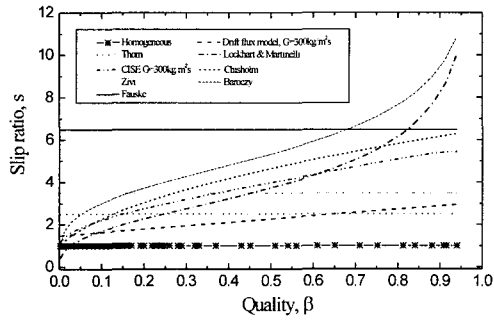


Fig. 6 Variations of slip ratio for various correlations with R134a

것이다. Fig. 6은 R134a에 대해서 슬립비에 대한 몇몇 상관식들을 사용하여 계산된 결과를 나타내고 있다. Whalley<sup>10)</sup>에 언급되었듯이 CISE상관식은 슬립비에 대해 가장 정확하게 일반적으로 적용할 수 있는 상관식이며, 또한 질량 유속에 관한 영향을 반영하고 있다.

식 (13)를 사용하여 계산된 가속 압력 강하는 저건도 영역에서는 그다지 중요하지 않지만, 건도가 증가함에 따라 가속 압력 강하는 총 압력 강하의 약 30%까지 차지한다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 따라서 시험 구간의 가열시 마찰 압력 강하는 총 압력 강하에서 가속 압력 강하를 뺀으로서 계산할 수 있으며, 가열 길이 L에 걸쳐  $\beta_i$ 에서  $\beta_o$ 까지 건도의 변화를 가지는 이상 마찰 승수는 다음과 같이 계산 될 수 있다.

$$\bar{\phi}_{fo}^2 = \frac{\Delta P_{TP,F}}{\Delta P_{fo}} = \frac{1}{\beta_o - \beta_i} \int_{\beta_i}^{\beta_o} \phi_{fo}^2 dx \quad (14)$$

Fig. 8은 시험 구간의 가열시 순 냉매와 혼합 냉매에 대하여 측정된 마찰 압력 강하를 Homogeneous모

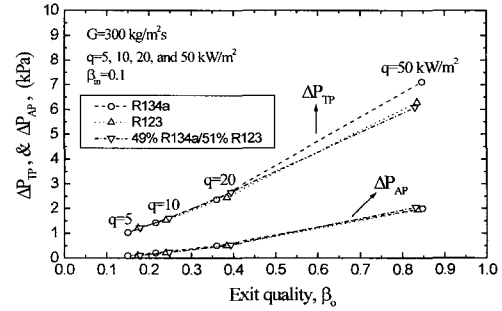
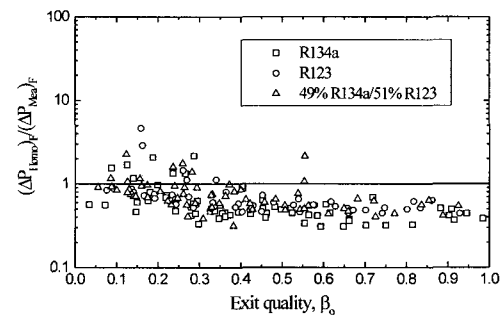
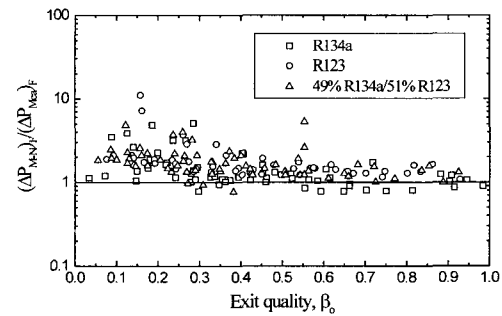


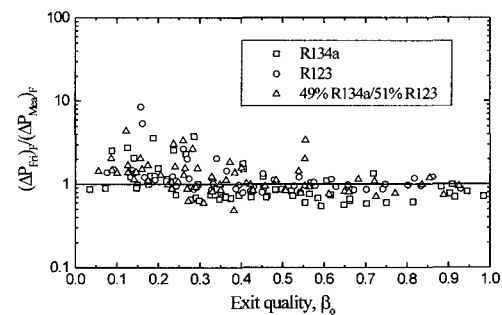
Fig. 7 Variations of the total and acceleration pressure drop as a function of exit quality



(a) Homogeneous model



(b) Martinelli-Nelson correlation



(c) Friedel correlation

Fig. 8 Comparisons between measured data and several correlations

델과 Martinelli-Nelson상관식 그리고 Friedel상관식을 사용하여 계산된 결과와 비교한 것을 나타낸다. Homogeneous모델은 본 연구에서 사용된 전 질량 유속 영역과 건도에서 순 냉매뿐만 아니라 혼합냉매에 대한 마찰 압력 강하를 낮게 예측하였다. 반면, Martinelli-Nelson상관식은 Homogeneous모델과 반대로 현 데이터를 높게 예측하였다. Friedel상관식은 저 건도의 증류와 과형류 영역에서 현 데이터를 약 20%정도 높게 예측한 반면, 환상류 영역에서는 약 20%정도 낮게 예측하였다.

### 5. 결론

수평관내 유동 비등시 순수 냉매 R134a와 R123 그리고 이들의 혼합 냉매의 이상 마찰 압력 강하에 관한 실험적인 연구가 수행되었으며, 측정된 데이터를 토대로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 단열 실험에서 이상 마찰 승수는 건도와 질량 유속의 증가와 더불어 증가한다는 것을 알 수 있다. 그리고 순 냉매와 혼합 냉매에 있어서 건도와 질량 유속에 따른 마찰 압력 강하의 변화는 유사하게 나타났다.

2) 가열 실험시 가속에 의한 압력 강하는 저 건도 영역에서는 그다지 중요하지 않지만, 건도가 증가함에 따라 가속 압력 강하는 총 압력 강하의 약 30%까지 차지하였다.

3) Homogeneous모델은 전 질량 유속과 건도 영역에서 현 데이터를 낮게 예측하였고, Martinelli-Nelson상관식은 반대로 높게 예측하였다. Friedel상관식은 순 냉매와 혼합 냉매에 대한 마찰 압력 강하를 잘 예측하였지만, 증류와 과형류에서는 현 데이터를 다소 높게 예측하였으며, 환상류에서는 낮게 예측하였다.

### References

1) J. G. Collier, J. R. Thome, Convective Boiling

and Condensation, 3rd Edition. Oxford University Press, London, 1994.

2) B. Pierre, "Flow Resistance with Boiling Refrigerants," ASHRAE Trans. pp.28-42, 1966.

3) R. W. Lockhart, R. C. Martinelli, "Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase," Two-Component Flow in Pipes, Chemical Engineering Progress, Vol.45, pp.39-48, 1949.

4) R. C. Martinelli, D. B. Nelson, "Prediction of Pressure Drop During Forced-Circulation Boiling of Water," Trans. of American Society Mechanical Engineers, Vol.70, pp.695-702, 1948.

5) D. S. Jung, R. Radermacher, "Prediction of Pressure Drop During Horizontal Annular Flow Boiling of Pure and Mixed Refrigerants," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.32, pp.2435-2446, 1989.

6) H. Nishiumi, S. Saito, "Correlation of the Binary Interaction Parameter of the Modified Generalized BWR Equation of State," Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol.10, pp.176-180, 1977.

7) R. C. Reid, J. M. Prausnitz, T. K. Sherwood, The Properties of Gases and Liquids, 3rd Edn., McGraw-Hill, New York, 1977.

8) L. Friedel, "Improved Friction Pressure Drop Correlations for Horizontal and Vertical Two-Phase Pipe Flow," Presented at the European Two-phase Flow Group Meeting, Ispra, Italy, Paper E2, June, Vol.18, pp. 485-492, 1979.

9) A. Premoli, D. Francesco, A. Prina, "An Empirical Correlation for Evaluating Two-Phase Mixture Density Under Adiabatic Conditions," European Two-Phase Flow Group Meeting, Milan, 1970.

10) P. B. Whalley, Boiling Condensation and Gas-Liquid Flow, Oxford University Press, 1987.