

수정된 등압법을 이용한 매니폴드의 유량분배

예 휘 열, 김 두 환, 이 관 수[†], 차 우 호^{*}
한양대학교 기계공학부, *LS 엠트론

Flow Distribution in Manifold Using Modified Equal Pressure Method

Huee-Youl Ye, Doo-Hwan Kim, Kwan-Soo Lee[†], Woo-Ho Cha^{*}
Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea
**Air conditioning division, LS Mtron, Jeallabuk-Do 565-904, Korea*
(Received October 27, 2008; revision received February 11, 2009)

ABSTRACT: A general flow distribution model and a simple process of numerical analysis, which can be applied to multi-pass systems with manifolds, are presented. A numerical procedure, namely a modified equal pressure method based on the discrete model, was developed to predict flow rates at branch tubes. The predicted pressure distribution agreed well with the previous research with the average error less than 11%. A parametric study was performed to demonstrate the effect on the flow distribution.

Key words: Discrete model(불연속 모델), Equal pressure method(등압법), Flow distribution(유량분배), Manifold(매니폴드)

기 호 설 명

A : 면적 [m^2]
 A_r : 총 면적비
 C : 부차손실계수
 C_d : 송출계수
 d : 지름 [m]
 F : 분배비
 f : 마찰계수
 H : 분지관 내 유로저항
 i : 분지 번호
 J : 매니폴드 내 마찰인자
 K : T-분지관 부차손실계수
 l : 길이 [m]
 \dot{m} : 질량유량 [kg/s]
 N : 총 분지수
 p : 압력 [Pa]
 R : 유로저항
 S : 유량 불균일도
 v : 유속 [m/s]

그리스 문자

ρ : 밀도 [kg/m^3]
 λ : 증속변수

하첨자

b : 분지관
 com : 혼합 매니폴드
 div : 분배 매니폴드
 in : 입구
 $ideal$: 이상적인 유량분배
 out : 출구
 $total$: 전체

1. 서 론

매니폴드(manifold) 형태의 분배 헤더는 구조가 간단하고, 유량 분배시 압력 손실이 적다는 장점에 의해 다패스 열교환기, 태양 집열기, 연료전지

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-2220-0426; fax: +82-2-2295-9021

E-mail address: ksleehy@hanyang.ac.kr

등 다패스 기계 장치들에 많이 사용되고 있다. 일반적으로 이러한 매니폴드 형태의 분배헤더를 사용할 경우 중력의 영향, 마찰의 영향, 운동량의 변화 등에 의해 매니폴드 내에 압력이 불균일하게 분포되고, 불균일한 압력 분포에 의해 각 분지의 유량 역시 불균일하게 분배되는 결과를 낳게 된다. 불균일한 유량 분배는 다패스 기계 장치들의 성능을 저하시키는 주요한 요인 중 하나이므로, 유량의 균일한 분배를 위해 각 분지의 유량을 예측하고, 최적화된 분배 헤더 형상을 제시하는 과정은 필수적이다.

유량 분배에 관한 해석 모델은 크게 연속 모델과 불연속 모델로 나누어 볼 수 있다. 연속 모델은 매니폴드에 연속 방정식과 모멘텀 방정식에 대한 미분 방정식을 세운 뒤 경계조건을 적용해 압력 분포 및 유량을 해석 하는 방법이고, 불연속 모델은 매니폴드를 분지 수만큼의 T-분지관으로 나눈 뒤에 각 T-분지관에 대해 연속 방정식과 Bernoulli식을 적용하여 수치적으로 압력 분포 및 유량을 계산하는 방법이다. Bajura and Jones⁽¹⁾는 연속 모델을 제시하고 이를 실험결과와 비교하였다. Bassiouny and Martin⁽²⁾은 U-Type과 Z-Type의 판형 열교환기에 대한 연속 모델을 제시하고, 인자에 따른 유체 거동에 대해 분석하였다. Datta and Majumdar⁽³⁾는 미분방정식을 유한차분화 하여 수치적으로 풀이 하였으며, 이를 Bajura and Jones⁽¹⁾의 연구와 비교하였다. 과거의 연속 모델들은 계산의 편의를 위해 고정된 마찰계수(friction factor)와 압력 회복 계수(pressure recovery factor)를 가정하였다면, Wang et al.⁽⁴⁾은 형상과 Reynolds수에 따른 가변적인 계수를 사용하여 좀 더 일반화된 모델을 제시하였다. Mahardrayya et al.⁽⁵⁾은 U-Type과 Z-type의 Fuel cell에 Bassiouny and Martin⁽²⁾의 모델을 적용하여 층류 유동에 대한 모델 제시하였고, CFD결과와 비교하였다. 이러한 연속 모델들은 U-Type과 Z-type의 형상에 일반적으로 사용할 수 있는 관계식을 제시하며, 미분방정식 형태의 관계식들은 매니폴드 내의 유속 변화에 연속적으로 대응하여 불연속 모델에 비해 누적 오차가 작다. 그러나 관계식들의 손실계수가 유량의 함수임을 가만할 때 이러한 미분방정식은 비선형성을 가지며, 그 결과 복잡한 수치과정을 동반한다. 또한, 다분지 응축기와 같이 유체의 상변화를 동반하는 경우에는 연속 모델로 전체 시스템을 해석하는 것은 불가

능하다. Lu et al.⁽⁶⁾는 다패스 열교환기에서 일반적으로 사용할 수 있는 불연속 모델을 제시하였으며, 이를 연속 모델과 비교, 분석 하였다. Koh et al.⁽⁷⁾은 Fuel cell에서의 불연속 모델을 제시하였고, 분배비를 이용한 수치적 계산 과정에 대해 언급하였다. 이러한 불연속 모델은 연속 모델에 비해 다양한 형상에 유연하게 적용 가능하다는 이점이 있으나, 이 역시 손실계수의 비선형성으로 인해 복잡한 수치계산을 동반한다. 특히, 다분지 응축기와 같이 열전달에 의한 상변화를 동반하는 경우에는 비선형성의 증가에 의해 수치적 방법으로 유량을 계산하기는 어렵다. 실제로 이러한 비선형성 때문에 실제 다분지 응축기 해석 프로그램에는 매니폴드의 영향을 고려하지 않는 등압법을 사용하고 있다.

따라서 본 연구는 불연속 모델의 단점을 보완하기 위하여 단상에서의 일반화된 불연속 모델을 제시하고, 이를 간단하게 계산할 수 있는 수치적 계산 과정을 소개하고자 한다. 또한, 제시한 모델을 기존 연구자의 실험과 비교하여 검증하고, 유량 분배에 대한 설계 인자의 영향을 살피고자 한다.

2. 해석 방법

2.1 불연속 모델

이 절에서는 불연속 모델을 이용하여 매니폴드와 분지관 내의 유량 및 압력 분포에 관한 관계식을 유도하고자 한다. 불연속 모델은 Fig. 1과 같이 매니폴드를 분지 수만큼의 구역으로 나누어 각 구역에 대한 유속 및 압력 분포를 구하고, 이를 조합하여 전체 매니폴드의 유속 및 압력 분포를 구하는 방법이다. 일반적으로 각 구역은 Fig. 2와 같이 T-분지관 구역(section of a diverging tee)과 T-분지관 사이의 구역(section between tees)으로 나눈다. T-분지관에서는 유량 분배선(dividing streamline)을 기준으로 수평 방향과 수

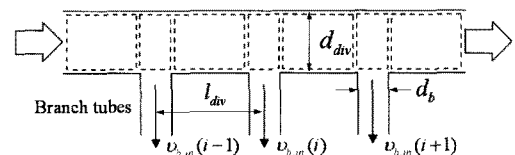


Fig. 1 Configuration of a dividing manifold.

직 방향으로 유선이 분리되어 들어간다고 가정하고, 각 유선에 대해 연속 방정식과 Bernoulli식을 적용한다. 분배 매니폴드(dividing manifold)의 T-분지관 구역에 대한 연속 방정식과 Bernoulli식은 다음과 같다.

연속방정식

$$\dot{m}_{div, in} = \dot{m}_{div, out} + \dot{m}_{b, in} \quad (1)$$

Bernoulli 식

수평방향 :

$$\begin{aligned} p_{div, in}(i) + \frac{\rho v_{div, in}^2(i)}{2} \\ = p_{div, out}(i) + \frac{\rho v_{div, out}^2(i)}{2} + K_{div} \frac{\rho v_{div, in}^2(i)}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

수직방향 :

$$\begin{aligned} p_{div, in}(i) + \frac{\rho v_{div, in}^2(i)}{2} \\ = p_{b, in}(i) + \frac{\rho v_{b, in}^2(i)}{2} + K_{div, b} \frac{\rho v_{div, in}^2(i)}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

$$(i = 1, 2, \dots, N)$$

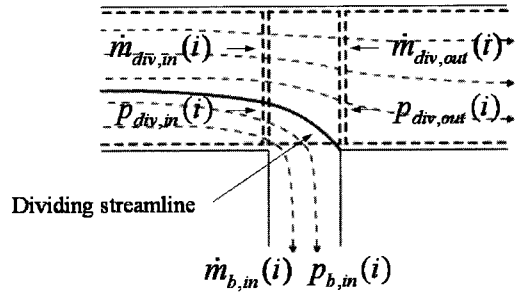
$$K_{div} = \lambda_{div} (\dot{m}_b / \dot{m}_{in})^2 \quad (4)$$

$$K_{div, b} = \lambda_{div, b} [1 + (v_b / v_{in})^2] \quad (5)$$

여기서 K_{div} 와 $K_{div, b}$ 는 분지관에서의 손실 계수로서 참고문헌⁽⁸⁾의 데이터를 이용하였다. 여기서 종속변수 λ_{div} , $\lambda_{div, b}$ 는 Table 1과 Table 2에 정리하였다. K_{div} 와 $K_{div, b}$ 는 유동 단면의 형상과 분지 형태에 따라 달라질 수 있으며, 경우에 따라 적절한 계수를 참고문헌⁽⁸⁾으로부터 선택해 사용해야 한다.

T-분지관 사이의 구역에서는 마찰에 의한 압력강하가 일어나며, 이는 Darcy-Weisbach식에 의해 다음과 같다.

$$\begin{aligned} p_{div, out}(i) - p_{div, in}(i+1) \\ = f \frac{l_{div} - d_b}{d_{div}} \frac{\rho v_{div}^2(i+1)}{2} \end{aligned} \quad (6)$$



(a) section of a diverging tee



(b) section between tees

Fig. 2 Configuration of a section.

여기서 f 는 관마찰계수이며 Moody선도에 의해 구한다.

각 분지관 내에서 일어나는 압력 강하는 마찰과 부차적인 손실(minor loss)에 의해 발생되며, 이를 수식화 하면 다음과 같다.

$$p_{b, in}(i) - p_{b, out}(i) = \left(C + f \frac{l_b}{d_b} \right) \frac{\rho v_b^2(i)}{2}, \quad (7)$$

$$(i = 1, 2, \dots, N)$$

여기서 C 는 부차손실계수로서 orifice, bend등을 관내 부차적인 장치의 손실로 고려하기 위한 것이다.

혼합 매니폴드(combining manifold) 역시 Fig. 3과 같이 T-분지관 구역과 T-분지관 사이의 구역으로 나누어 계산한다. 단, 압력 강하 계산시 분지 때와는 달리 합지 된 이후의 유속을 기준 유속으로 사용한다. 유량 혼합선(combining streamline)을 기준으로 수평 방향과 수직 방향의 유선

Table 1 Value of λ_{div} ⁽⁸⁾

A_b/A_{div}	≤ 0.4	> 0.4	
	\dot{m}_b/\dot{m}_{in}	≤ 0.5	> 0.5
λ_{div}	0.4	$2(2\dot{m}_b/\dot{m}_{in} - 1)$	$0.3(2\dot{m}_b/\dot{m}_{in} - 1)$

Table 2 Value of $\lambda_{div,b}^{(8)}$

A_b/A_{div}	≤ 0.35		> 0.35	
\dot{m}_b/\dot{m}_{in}	≤ 0.4	> 0.4	≤ 0.6	> 0.6
$\lambda_{div,b}$	$1.1 - 0.7(\dot{m}_b/\dot{m}_{in})$	0.85	$1.0 - 0.6(\dot{m}_b/\dot{m}_{in})$	0.6

Table 3 Value of $\lambda_{com}^{(8)}$

A_b/A_{com}	≤ 0.35	> 0.35	
\dot{m}_b/\dot{m}_{out}	≤ 1.0	≤ 0.4	> 0.4
λ_{com}	1.0	$0.9(1 - \dot{m}_b/\dot{m}_{out})$	0.55

에 대해 각각 연속 방정식과 Bernoulli 식을 적용하면 다음과 같다.

연속방정식

$$\dot{m}_{com, out} = \dot{m}_{com, in} + \dot{m}_{b, out} \quad (8)$$

Bernoulli 식

수평방향 :

$$p_{com, in}(i) + \frac{\rho v_{com, in}^2(i)}{2} = p_{com, out}(i) + \frac{\rho v_{com, out}^2(i)}{2} + K_{com, i} \frac{\rho v_{com, in}^2(i)}{2} \quad (9)$$

수직방향 :

$$p_{b, out}(i) + \frac{\rho v_{b, out}^2(i)}{2} = p_{com, out}(i) + \frac{\rho v_{com, out}^2(i)}{2} + K_{com, b} \frac{\rho v_{com, out}^2(i)}{2} \quad (10)$$

$(i = 1, 2, \dots, N)$

$$K_{com} = 1.55 \frac{\dot{m}_b}{\dot{m}_{out}} - \left(\frac{\dot{m}_b}{\dot{m}_{out}} \right)^2 \quad (11)$$

$$K_{com, b} = \lambda_{com} \left[1 + \left(\frac{\dot{m}_b}{\dot{m}_{out}} \frac{A_{com}}{A_b} \right)^2 - 2 \left(1 - \frac{\dot{m}_b}{\dot{m}_{out}} \right) \right] \quad (12)$$

여기서 K_{com} 와 $K_{com,b}$ 는 합지 될 때의 손실 계수로써, 이 역시 참고문헌⁽⁸⁾의 데이터를 이용하였다. 종속 변수 λ_{com} 는 Table 3에 정리하였다.

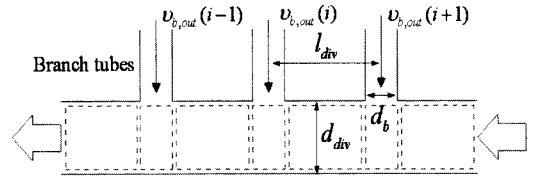


Fig. 3 Configuration of a combining manifold.

2.2 수치적 방법

앞 절에서 불연속 모델을 이용하여 매니폴드와 분지관 내의 유량과 압력분포에 대한 관계식을 유도하였다. 이러한 관계식은 회로망 해석(network analysis)을 통해 계산되는데 일반적으로 Hardy-Cross method를 사용한다. Hardy-Cross method는 폐회로(closed loop)에서 수두손실이 0임을 이용하여 각 폐회로 식(network equation)을 도출해 이를 수치적으로 계산하는 방법이다. 그러나 연속 방정식을 제외한 다른 관계식들의 비선형성을 가만할 때 이러한 방법으로 계산하기에는 어려움이 따른다. 특히 다분지 응축기와 같이 분지관 내에 열전달에 의한 상변화가 발생하는 경우에는 폐회로 식을 도출하기 힘들뿐 아니라 이를 수치적으로 계산하는 것은 매우 어렵다. 이런 이유로 인해 실제 다분지 응축기에서는 매니폴드를 고려하지 않고 분지관 내의 압력강하만 고려하는 등압법을 사용해 유량을 계산하고 있다. 등압법은 유체회로와 전기회로의 유사성을 이용하여 병렬연결 되어 있는 각 분지관 입·출구의 압력이 같다고 가정하고, 각 분지관 내의 유로저항을 구한 후 이를 분배비로 사용하여 유량을 계산하는 방법이다. 이 해석법은 분배비를 총 유량에 곱해주는 과정을 반복하는 간단한 연산에 의해 각 분지의 유량을 계산하기 때문에 비선형적인 유체 유동에서도 사용할 수 있다. 그러나 매니폴드를 고려하지 않기 때문에 실제 유량 분배와의 오차가 발생할 수밖에 없다. 따라서 이 절에서는 이러한 등압법의 단점을 보완하기 위하여 매니폴드까지 고려 가능한 수정 등압법을 제안하고자 한다.

기존의 등압법은 각 분지관의 입·출구를 제 2장점으로 하여 그 압력 차이가 같다고 가정하였다면, 수정 등압법은 분배 매니폴드의 입구와 혼합 매니폴드의 출구를 제 2장점으로 가정한다. 압력강하에 대한 정보가 없기 때문에 각 분지의 유

량을 가정하고 식(1)~식(12)을 이용하여 분배 매니폴드, 분지관, 혼합 매니폴드의 압력을 계산한다. 분배 매니폴드의 입구와 혼합 매니폴드의 출구를 제 2절점으로 가정하였기 때문에 압력 강하는 모든 경로에 대해 동일하여야 하며, 이를 수식화 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} p_{in} - p_{out} &= \Delta p_{total}(i) \\ &= \Delta p_{div}(i) + \Delta p_b(i) + \Delta p_{com}(i) \end{aligned} \quad (13)$$

이들 압력강하는 유로 저항과 유량의 제곱에 비례하기 때문에 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_{total}(i) = R(i) \dot{m}_b^2(i) \quad (14a)$$

또는

$$\dot{m}_b(i) = \sqrt{\frac{\Delta P_{total}(i)}{R(i)}} \quad (14b)$$

여기서 $R(i)$ 을 가상의 유로 저항으로 정의한다.

이는 각 분지관의 가정한 유량이 매니폴드와 분지관을 지나면서 받은 유로 저항을 의미한다. $\Delta p_{total}(i)$ 은 모든 경로에 대해 동일하여야 한다는 가정에 의해 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} \dot{m}_b(i) &= \frac{\dot{m}_b(i)}{\sum_{i=1}^N \dot{m}_b(i)} \dot{m}_{total} \\ &= \frac{\sqrt{1/R(i)}}{\sum_{i=1}^N \sqrt{1/R(i)}} \dot{m}_{total} = F(i) \dot{m}_{total} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 $F(i)$ 는 분배비이며 다음과 같다.

$$F(i) = \frac{\sqrt{1/R(i)}}{\sum_{i=1}^N \sqrt{1/R(i)}} \quad (16)$$

식(15)에서 보듯이 분배비를 총 유량에 곱해 줌으로써 $\Delta p_{total}(i)$ 가 모든 경로에 대해 같도록 각

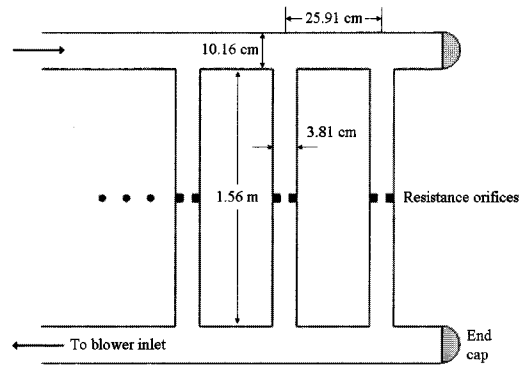


Fig. 4 Schematic of experimental apparatus.

분지관에 유량을 재분배한다. 이와 같이 처음 계산에는 가정한 유량으로부터 구한 분배비를 총 유량에 곱해주어 새로운 유량과 압력분포를 구하며 이러한 과정을 반복함으로써 매니폴드의 입출구 압력이 같아지게 하는 각 분지의 유량을 구할 수 있다.

3. 결과 및 토의

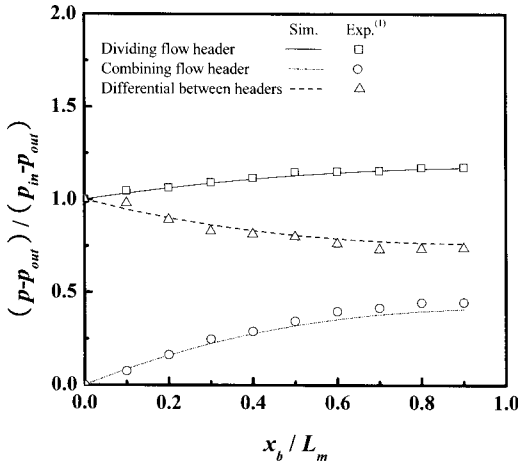
3.1 검증

본 연구에서 언급한 불연속 모델과 수정 등압법의 타당성을 검토하기 위해 Fig. 4와 같은 Bajura and Jones⁽¹⁾의 실험 모델에 대한 검증을 실시하였다. 실험 모델은 PVC 재료를 사용하여 제작되었으며, 작동 유체로는 공기가 사용되었다. 헤더에서의 Reynolds 수는 60,000~80,000이고, 각 분지관 내의 Reynolds 수는 8,000~10,000이다. 분지관 중간에 설치되어 있는 orifice의 지름은 2.54 cm와 3.18 cm이고, 이의 고려를 위해 다음과 같은 참고문헌⁽⁹⁾의 식을 사용하였다.

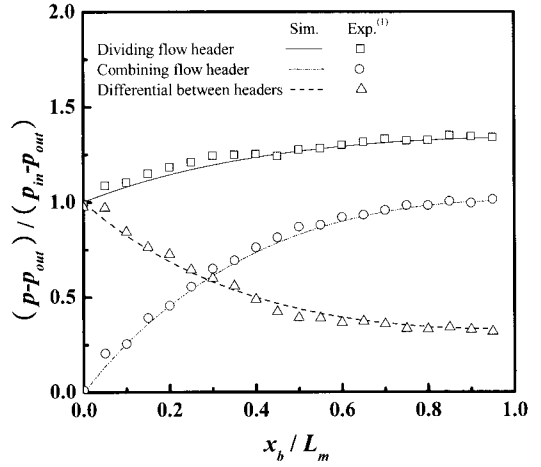
$$\Delta p_{orifice} = \left(\frac{1}{C_d^2} \right) \left\{ \left(\frac{A_b}{A_{orifice}} \right)^2 - 1 \right\} \frac{\rho v_b^2}{2} \quad (17)$$

여기서 C_d 는 송출 계수로서 전형적으로 $0.94 < C_d < 0.98$ 의 값을 갖는다.

Fig. 5에 오리피스의 지름이 2.54 cm인 경우, Fig. 6에 3.18 cm인 경우 각각 10분지와 20분지에 대한 유량 분배 실험 결과와 해석 결과를 나타내었



(a) 10 branch tubes



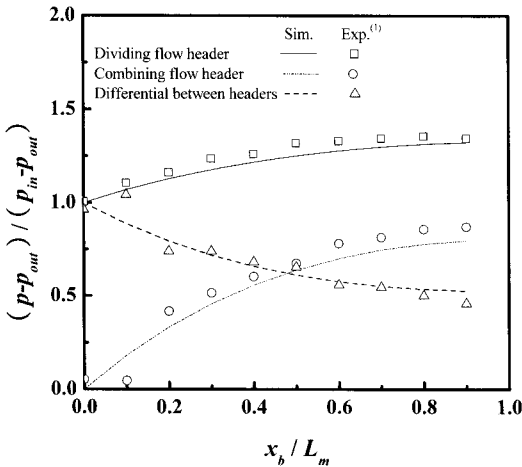
(b) 20 branch tubes

Fig. 5 Pressure profiles for manifolds with 2.54 cm diameter orifices.

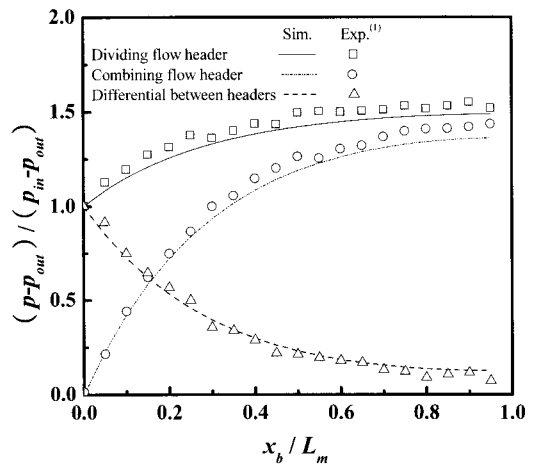
다. 그래프의 가로축은 분배 매니폴드의 입구로부터 분지까지의 거리를 무차원화 하였고, 세로축은 각 분지의 입·출구 압력을 분배 매니폴드 입구와 혼합 매니폴드 출구의 압력차를 기준 압력으로 하여 무차원화 하였다. 분배 매니폴드와 혼합 매니폴드의 압력차는 각 분지관 유량의 제공에 비례하기 때문에 압력차 그래프를 통하여 각 분지관의 유량을 판단할 수 있다.

실험 결과와 해석결과를 비교하였을 때 orifice

지름이 2.54 cm일 때는 10분지의 경우 평균 2%, 20분지의 경우 평균 4%의 오차를 보였고, orifice 지름이 3.18 cm일 때는 10분지의 경우 평균 7%, 20분지의 경우 평균 11% 오차 범위 내에서 유량 분배를 잘 예측하였다. 대체로 20분지의 경우가 10분지에 비해 더 큰 오차를 보이는데, 이는 오차의 축적에 의한 것이다. 일반적으로 불연속 모델은 후반부 분지로 갈수록, 그리고 분지수가 많을수록 오차가 더 축적된다. 이러한 오차의 원인



(a) 10 branch tubes



(b) 20 branch tubes

Fig. 6 Pressure profiles for manifolds with 3.18 cm diameter orifices.

은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 불연속 모델이 T-분지관에서 유속 변화에 연속적으로 대응하지 못해 발생하는 오차
- (2) 관계식들의 손실 계수에서 발생하는 오차
- (3) 인접한 T-분지관의 교란에 의한 오차
- (4) 유체가 매니폴드 끝단에 도달하였을 때 발생하는 재순환의 영향에 의한 오차

또한, 오리피스 지름이 2.54 cm인 경우가 3.18 cm인 경우 보다 실험 결과와 더 잘 일치한다. 오리피스 지름이 2.54 cm인 경우 분지관내 큰 유로저항에 의해 매니폴드 끝단의 재순환 영향이 매니폴드 전반에 영향을 미치지만, 3.18 cm인 경우에는 재순환의 영향이 멀리가지 못하고 끝단에 한정되기 때문에 실험결과가 해석 결과에 비해 다소 오차가 커졌다.

3.2 설계 인자의 영향 조사

앞서 제시한 모델을 이용하여 유량 분배에 대한 인자들의 영향을 살펴보고자 한다. 이를 위해 이상적인 유량 분포에 대한 각 분지관 유량을 나타내는 유량 불균일도(Flow distribution non-uniformity)를 이용하였다.⁽¹⁰⁾ 이는 다음과 같이 정의한다.

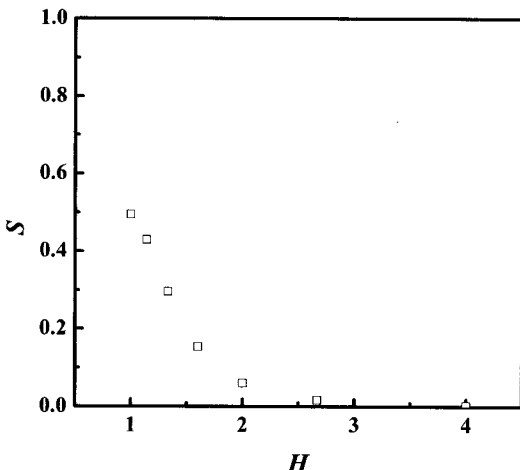


Fig. 7 Effect of flow resistance in branch tubes on flow distribution.

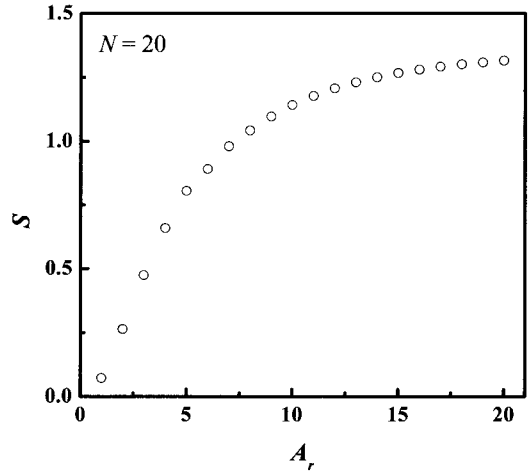


Fig. 8 Effect of area ratio on flow distribution.

$$S = \sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^N \left(\frac{m_i - m_{ideal}}{m_{ideal}} \right)^2 \right\} / (N-1)} \quad (18)$$

여기서 i 와 N 은 각각 분지 번호와 총 분지수이고, m_{ideal} 은 각 분지에서 유량이 이상적으로 분배될 때의 유량이다.

유량 분배에 영향을 주는 설계 인자에는 분지관내 유로저항, 총 면적비, 분지수, 그리고 분지관 사이 길이가 있다. Bajura and Jones⁽¹⁾의 실험 모델을 기준으로 하여 이러한 인자들에 대한 영향을 살펴보았으며, 일반화를 위해 오리피스의 영향을 제거하였다.

3.2.1 분지관내 유로저항

Fig. 4에서 오리피스는 분지관내 유로저항으로 작용한다. 식(17)에서 보듯이 오리피스 면적이 줄어들수록 유로저항은 증가한다. 따라서 분지관내 유로저항이 유량분배에 미치는 영향을 살펴기 위해 분지관내 유로저항을 다음과 같이 정의하였다.

$$H = \frac{A_b}{A_{orifice}} \quad (19)$$

Fig. 7에서 볼 수 있듯이 분지관 내 유로저항이 증가함에 따라 유량은 균일하게 분배되었다. 식(17)에서 유로저항은 오리피스 면적 감소량의 제곱에 비례하여 증가하기 때문에 분지관내의 압력강하는 급격하게 증가한다. 그 결과 매니폴드 내

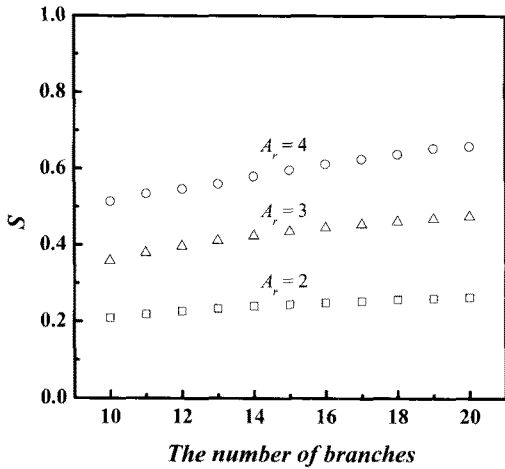


Fig. 9 Effect of number of branches on flow distribution.

의 불균일한 압력 분포의 영향은 분지관내 압력 강하의 영향에 비해 상대적으로 작아져 각 분지관내의 유량은 균일한 분배가 이루어졌다. 따라서 균일한 분배를 위해서 관내 유로저항을 증가시키는 것도 한 가지 방법이 될 수 있으나, 압력 손실이 커지므로 이에 대한 적절한 설계가 요구된다.

3.2.2 총 면적비

유체가 흐를 때 유동면적은 유로저항을 결정하는 중요한 인자이다. 일반적으로 유동면적이 작으면 유로저항은 크게 작용하고, 유동면적이 크면 유로저항은 작게 작용한다. 이 절에서는 매니폴드 유동면적(A_{div})과 분지관 총 유동면적(NA_b)의 비율을 통하여 분지관 내 유로저항의 영향을 살펴보고자 한다. 총 면적비는 다음과 같이 정의한다.

$$A_r = \frac{NA_b}{A_{div}} \quad (20)$$

총 면적비가 크면 매니폴드의 유동면적에 비해 분지관 총 유동면적이 크므로 분지관으로의 유로저항은 작게 작용한다. 반대로 총 면적비가 작으면 매니폴드의 유동면적에 비해 분지관의 총 유동면적이 작으므로 분지관으로의 유로저항은 크게 작용한다. 유량 분배에 대한 총 면적비의 영향을 살펴보기 위해 분지수(N)를 20으로 고정하고,

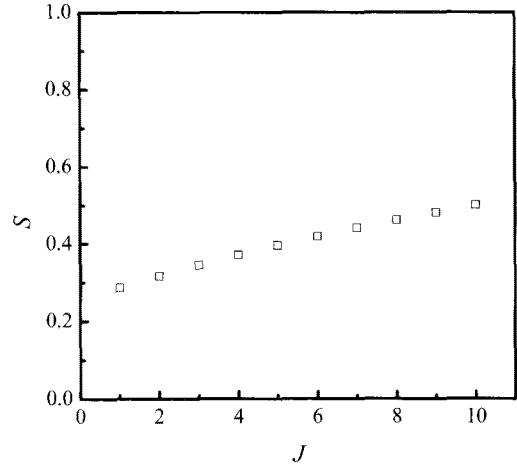


Fig. 10 Effect of the length between branches on flow distribution.

총 면적비를 1부터 20까지 증가시키며 유량 불균일도를 조사하여 이를 Fig. 8에 도시하였다. 총 면적비가 증가할수록 유량은 불균일하게 분배되었다. 총 면적비가 증가하면 분지관 총 유동면적이 증가하여 분지관내의 유로저항은 매니폴드의 유로저항에 비해 상대적으로 작아진다. 그 결과 유체는 유로저항이 작은 입구부 근방의 분지관으로 많이 유입되었다. 반면 총 면적비의 감소는 분지관내 유로저항을 증가시켜 매니폴드의 유로저항은 큰 영향을 미치지 못하게 된다. 그 결과 유체는 모든 분지에 균일하게 분배되었다.

또한 매니폴드의 유동면적보다 분지관 유동면적이 커지는 경우($A_r \geq N$)에는 입구부 근방의 분지관에 거의 모든 유체가 유입되어 불균일도는 일정 값을 갖는다.

3.2.3 분지수

유량 분배에 대한 분지수의 영향을 살펴보기 위해 총 면적비(A_r)를 2, 3 및 4로 고정하고, 10~20분지까지의 유량 불균일도를 조사하였다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 총 면적비가 증가할수록 유량 불균일도는 증가하는 반면 분지수의 증가는 불균일도를 약간 증가시켰지만 그 폭이 적었다. 분지수의 증가는 매니폴드 내 마찰 손실을 증가시켜 유량 불균일도에 영향을 미치지만, 다른 인자에 비해 그 정도가 미비한 것으로 나타났다. 그러나 주어진 조건 외에 분지관 사이의 거리가 멀거나 매니폴드 내 유동이 층류일 때는 마찰의

영향이 증가하므로 불균일도에 더 큰 영향을 미칠 수 있다.

3.2.4 분지관 사이의 거리

매니폴드에서의 마찰 손실이 유량분배에 미치는 영향을 조사하기 위해, Datta and Majumdar⁽³⁾는 마찰 인자($J = 4fL_{total}d_{div}/Nd_b^2$)를 정의하여 유량의 불균일 정도를 조사하였다. 그러나 마찰 손실 계수(f)가 유량의 함수임을 가만할 때 이 인자를 인위적으로 바꾸는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 마찰 인자를 다음과 같이 정의하여 유량 불균일도에 미치는 영향을 조사하였다.

$$J = \frac{l_{div}}{d_b} \quad (21)$$

여기서 총 면적비는 유량분배에 큰 영향을 미치므로 분지관 지름(d_b)은 고정하고 분지관 사이의 길이(l_{div})를 변화시켜가며 계산을 수행하였다. 분지관 지름이 변하는 경우 계산 결과는 달라질 수 있다.

Fig. 10에서 보듯이 분지관 사이의 거리가 증가함에 따라 유량 불균일도는 선형적으로 증가하였다. 이는 분지관 사이의 거리가 증가함에 매니폴드 내의 마찰에 의한 유로 저항은 증가하게 되고, 그 결과 유체는 유로 저항이 상대적으로 적은 전반부 분지에 집중되기 때문이다. 따라서 균일한 유량 분배를 위해서는 분지관 사이의 거리를 최대한 적게 하는 설계가 요구된다.

4. 결 론

본 연구에서는 매니폴드를 포함하는 다패스 시스템에 일반적으로 적용할 수 있는 단상 유량 분배 모델과 이를 간단히 계산할 수 있는 수치적 과정을 제시하였다. 불연속 모델을 이용하여 매니폴드 및 분지관에 대한 관계식을 유도하였고, 이를 수정 등압법을 이용하여 수치적으로 계산하였다. 제안된 해석모델은 Bajura and Jones⁽¹⁾의 실험 모델과 비교하여 검증하였으며 평균 11% 오차 내에서 잘 예측하였다. 또한, 제시한 모델을 이용하여 유량 불균일도에 대한 인자의 영향을 조사하였으며, 이를 통하여 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 분지관내 유로저항을 증가시킬수록 분지관 내의 유량은 균일하게 분배되었으나, 관내 압력 손실 역시 증가하므로 이에 대한 적절한 설계가 요구된다.
- (2) 총 면적비가 증가할수록 유량은 불균일하게 분배되었다.
- (3) 매니폴드 면적보다 분지관의 면적이 커지는 경우 입구부 근방의 분지관으로 거의 모든 유체가 유입되어 불균일도는 일정 값을 갖는다.
- (4) 분지수가 증가할수록 유량은 불균일하게 분배되었으나, 총 면적비에 비해 그 영향이 작았다.
- (5) 분지관 사이의 거리가 증가할수록 유량 불균일도는 선형적으로 증가한다.

후 기

이 연구는 에너지관리공단의 에너지·자원 기술개발사업 과제 'R410a용 GHP 시스템'의 연구비에 의해 수행되었으며, 주관기관 LS엠트론의 위탁과제 '고효율 GHP 열교환기 최적설계'의 연구의 일부입니다.

참고문헌

1. Bajura, R. A. and Jones, JR. E. H., 1976, Flow Distribution Manifolds, *Journal of Fluids engineering*, Vol. 98, pp. 654-666.
2. Bassiouny, M. K. and Martin, H., 1984, Flow Distribution and Pressure Drop in Plate Heat Exchangers, *Chemical Engineering Science*, Vol. 39, No. 4, pp. 693-700.
3. Datta, A. B. and Majumdar, A. K., 1980, Flow Distribution in Parallel and Reverse Flow Manifolds, *The International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 2, No. 4, pp. 253-262.
4. Wang, J. and Gao, Z., 2001, Analytical Solution of Flow Coefficients for a Uniformly Distributed Porous Channel, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 84, No. 1, pp. 1-6.
5. Maharudrayya, S. and Jayanti, S., 2005, Flow Distribution and Pressure Drop in Parallel-Channel Configuration of Planar Fuel Cells,

- Journal of Power Sources, Vol. 144, pp.94-106.
6. Fang, L., Yong-hao, L. and Shi-ming, Y., 2008, Analytical and Experimental Investigation of Flow Distribution in Manifolds for Heat Exchangers, Journal of Hydrodynamics, Vol. 20, No. 2, pp. 179-185.
 7. Koh, J.H. and Seo, H.K., 2003, Pressure and Flow Distribution in Internal Gas Manifolds of a Fuel-Cell Stack, Journal of Power Sources, Vol. 115, pp.54-65.
 8. Idelchik, I. E., 1994, Handbook of Hydraulic Resistance, 3rd ed., Boca Raton, FL : CRC, pp. 413-501.
 9. Gerhart, P.M., Gross, R.J. and Hochstein, J.I., 1996, Fluid Dynamics, 2nd ed., Addison Weseley, pp. 557-707.
 10. Kim, M.S. and Lee, K.S., 2008, Effects of Pass Arrangement and Optimization of Design Parameters on the Thermal Performance of a Multi-Pass Heat Exchanger, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 29, pp. 352-363.