

대향류 매니폴드 입-출구 면적비에 따른 열교환기의 성능특성에 관한 수치적 연구

김상조* · 최병익* · 김귀순**† · 손창민*** · 하만영*** · 정지환*** · 고정상***

Numerical Investigation of the Performance of a Heat Exchanger for the Inlet-outlet Area Ratio of Counter Flow Manifold

Sangjo Kim* · Byoung-ik Chio* · Kuisoon Kim**† · Changmin Son*** · Man Young Ha*** · Ji Hwan Jeong*** · Jeong Sang Go***

ABSTRACT

In present paper focused on the influence of the inlet-outlet area ratio of counter flow manifold on the flow distribution and pressure drop characteristics of a tubular heat exchanger. The characteristics of flow distribution and pressure loss can be obtained depending on the inlet-outlet area ratio. In this paper, a tubular heat exchanger can be designed with minimum flow mal-distribution and better characteristic of pressure loss by choosing the optimum inlet-outlet area ratio.

초 록

본 논문에서는 대향류 매니폴드의 면적비에 따른 튜브형 열교환기에서의 압력강하와 유량 균일도를 분석하기위해 전산해석을 수행하였다. 유동 분배와 압력손실 특성은 입-출구 면적비에 따라 영향을 받는다. 본 연구에서, 최적의 입-출구 면적비를 선택함으로써 튜브형 열교환기의 유동 불균일도 최소와 향상된 압력손실 특성을 얻을 수 있었다.

Key Words: Heat Exchanger(열교환기), Inlet-Outlet Area Ratio(입-출구 면적비), Flow Maldistribution (유량 불균일), Pressure Drop(압력강하)

1. 서 론

최근 재생기(recuperator), 중간냉각기(intercooler), 냉각공기 냉각기(cooling air cooler)등의 열교환기를 적용한 친환경적 엔진 개발에 대한 연구가 늘어나고 있다. 엔진에 적용되는 열교환기의 경우, 무게의 가벼움과 고온고압에 적용가능성, 그리고 고효율을 요구하며, 이에 따라 튜브

* 부산대학교 항공우주공학과 대학원

** 부산대학교 항공우주공학과

*** 부산대학교 기계공학부

† 교신저자, E-mail: kuskim@pusan.ac.kr

형 열교환기가 주로 연구의 대상이 되고 있다. 튜브형 열교환기의 경우에는 유동을 분배시키기 위해 매니폴드를 사용한다. 일반적으로 이러한 매니폴드를 사용하는 열교환기의 경우, 마찰과 운동량의 변화 등에 의해 매니폴드 내의 압력분포가 불균일하게 되고, 그로인해 각 튜브로 유입되는 유량이 불균일(maldistribution)하게 분배된다. 불균일한 유량분배는 열교환기에서의 전체 성능을 저하시키는 주요한 요인 중의 하나이므로, 유량의 균일한 분배를 위해 예측하고 이를 개선시키는 것은 항공기용 엔진의 성능을 향상시키기 위해 매우 중요하다.

예휘열 등[1]은 수정된 등압법을 이용하여 매니폴드의 유량분배에 대해 고찰하였다. Bassiouny and Martin[2]은 대향류 형태와 평행류 형태의 매니폴드를 사용하는 판형 열교환기에 대해 연속모델을 제시하고, 인자에 따른 유체 거동에 대해 분석하였다. London 등[3]은 매니폴드 헤더 형상을 유량 분배에 영향을 미치는 인자로 제시하였다. Choi 등[4]은 평행류와 대향류 매니폴드의 입구와 출구의 면적비에 따른 유량 분배 특성에 관해 연구를 수행하였다. 위의 연구들은 연속모델과 불연속모델을 이용하여 수치적 계산을 수행하였다. 이러한 모델을 이용한 계산의 경우 CFD(computational fluid dynamic)를 이용한 계산에 비해 시간이 적게 든다는 장점이 있지만, 계산의 오차가 크고 내부의 유동현상을 예측할 수 없다는 단점이 있다.

따라서 본 연구는 전산해석을 통하여 대향류 매니폴드 입-출구 면적비에 따른 열교환기의 성능특성에 관한 연구를 수행하였다. 그리고 열교환기의 형상과 운용조건에 따른 매니폴드 입-출구 영향을 알아보기 위해서 매니폴드 유동면적과 튜브 총 유동면적의 비로 정의된 총면적비를 1.42, 2.84, 5.68세 가지로, 레이놀즈수를 49,000, 74,000, 99,000로 나누어 성능특성을 분석하였다.

2. 수치해석 기법 및 경계조건

본 연구에서의 해석대상이 되는 열교환기는

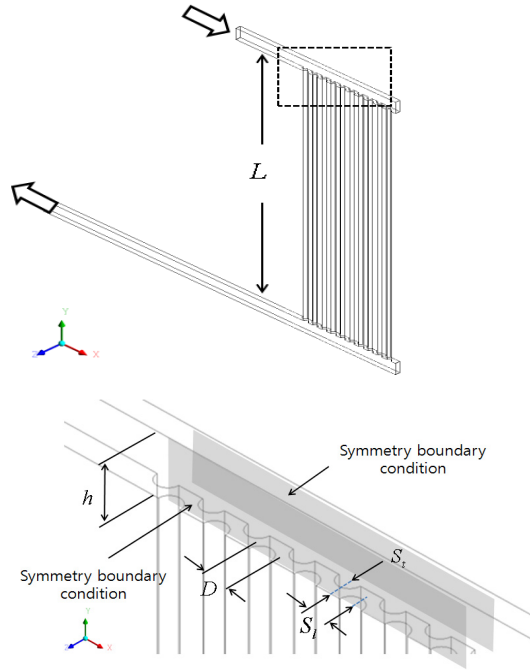


Fig. 1 Schematic of Heat Exchanger

Table 1. Specification of the heat exchanger

Notation	Meaning	Value
L	tube length(m)	0.155
D	tube diameter(m)	0.0015
h	height of manifold(m)	0.0025
S_t	transverse pitch(m)	0.0015
S_l	longitudinal pitch(m)	0.00158
Nr	number of tube rows	20

Fig. 1과 같이 매니폴드의 길이 방향으로 20개의 튜브가 배치되어 있으며, 대향류 매니폴드를 통해 분지되는 형태로 되어있다. 수평방향(z-축)으로의 튜브배열은 충분한 튜브가 있다 가정하고 양쪽 벽면에 대칭(symmetry)조건을 주어 계산을 수행하였다. 계산에 사용된 모델의 형상과 관련된 치수는 table 1에 나타내었다.

매니폴드 입-출구 면적비(AR)는 다음과 같이 매니폴드 입구 유동면적(A_{in})과 매니폴드 출구 유동면적(A_{out})의 비로 정의하였다.

$$AR = A_{in}/A_{out}$$

열교환기의 형상에 따른 매니폴드 입-출구 영향을 알아보기 위해 총면적비(A_r)를 다음과 같이 매니폴드 입구 유동면적(A_{div})과 튜브 총 유동면적(NA_b)의 비로 정의하고 1.42, 2.84, 그리고 5.68로 나누어 성능특성을 분석하였다.

$$A_r = NA_b/A_{div}$$

본 연구에서는 상용 전산유체 해석프로그램인 FLUENT를 사용하여 여러 가지 조건에 대한 유동현상을 해석하였다. 계산조건은 매니폴드에서의 레이놀즈수 49,000, 74,000, 그리고 99,000이다. 입구에는 일정유량 조건, 후류에는 압력출구 조건을 주었다. 또한 기준속도는 매니폴드 입구에서의 속도를, 기준 길이는 매니폴드 입구 수력지름으로 정하고 레이놀즈수에 반영하였다.

본 연구에서 적용된 지배방정식은 3차원 Navier-Stokes방정식이며, 난류모델은 Realizable $k-\epsilon$ 을 사용하고, 벽면영역은 Standard wall function으로 처리하였다. Realizable $k-\epsilon$ 난류모델은 매니폴드 형태의 유동 분지 현상을 잘 묘사할 수 있는 것으로 알려져 있다[5]. 공간차분화는 2차원 상류차분 도식(second order upwind difference)을 사용하였다. 알고리즘은 SIMPLEC를 사용하였으며, 방정식의 오차는 1.0×10^{-5} 가 되면 수렴한 것으로 판단하였다.

3. 결과 및 고찰

앞서 제시한 모델을 이용하여 유량 분배와 압력강하에 대한 매니폴드 입-출구 면적비의 영향을 살펴보고자 한다. 압력강하는 열교환기의 입구와 출구의 압력 차이를 입구의 동압으로 나누어 무차원화 하였다. 유량 분배 정도는 유량 분포에 대한 각 분지관 유량을 나타내는 유량 불균일도(S)를 이용하였으며, 다음과 같다.

$$S = \sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^N \left\{ (\dot{m}_i - \dot{m}_{ideal}) / \dot{m}_{ideal} \right\}^2 \right\} / (N-1)}$$

여기서 i 와 N 은 각각 분지 번호와 총 분지수이고, \dot{m}_{real} 은 각 분지에서 유량이 이상적으로 분지 될 때의 유량이다.

3.1 매니폴드 입-출구 면적비에 따른 유량 불균일도 변화

Figure 2에는 A_r 이 2.84, 레이놀즈수가 74,000인 경우의 입-출구 면적비에 따른 유동 분포를 나타낸 것이다. 튜브의 유량은 각 튜브로 유입되는 평균유량으로 나누어 무차원화 하였다. 입-출구 면적비가 0.4인 경우의 유량 분포는 입구 쪽에서 가까운 튜브로 유입되는 유량이 적고, 상대적으로 먼 튜브로 유입되는 유량이 많은 경향을 보인다. 입-출구 면적비가 증가할수록 입구 쪽에서 가까운 튜브로의 유량 유입이 증가하는 것을 볼 수 있다.

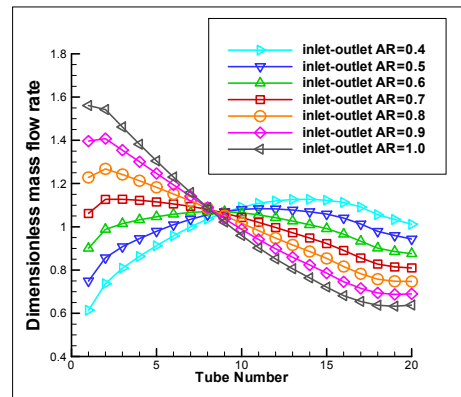
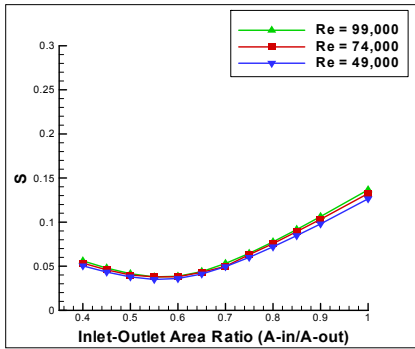


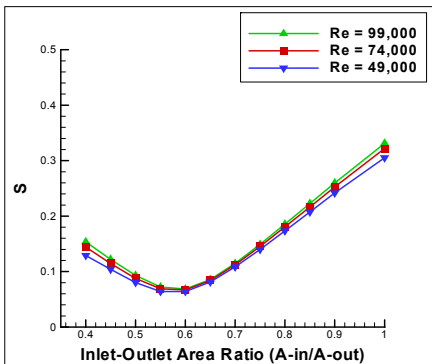
Fig. 2 Flow distribution in the tube ($A_r = 2.84$, $Re = 74,000$)

Figure 3의 (a), (b), (c)에는 A_r 이 1.42, 2.84, 5.68인 경우의 레이놀즈수와 입-출구 면적비에 따른 유동 불균일도를 각각 나타내었다. 입-출구 면적비가 증가하면서 유동 불균일도가 감소하는 경향을 보이지만, 입-출구 면적비가 각각 0.55, 0.60, 0.65 이상의 영역에서는 유동 불균일도가 증가하는 경향을 보인다. 각 A_r 에서 레이놀즈수

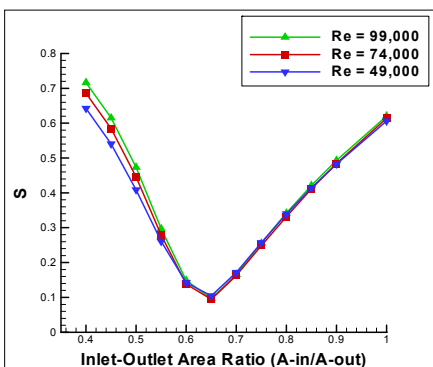
가 커짐에 따라 불균일도가 증가하지만, 그 정도는 적다.



(a) $A_r = 1.42$



(b) $A_r = 2.84$



(c) $A_r = 5.68$

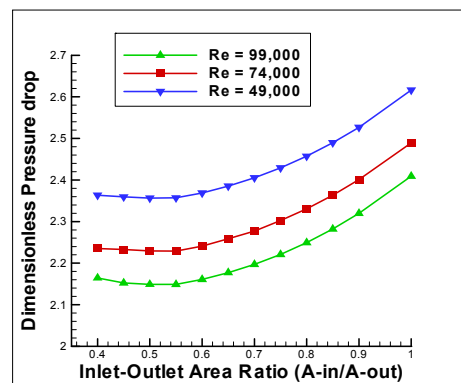
Fig. 3 The effect of area ratio on flow distribution

3.1 매니폴드 입-출구 면적비에 따른 압력강하 변화

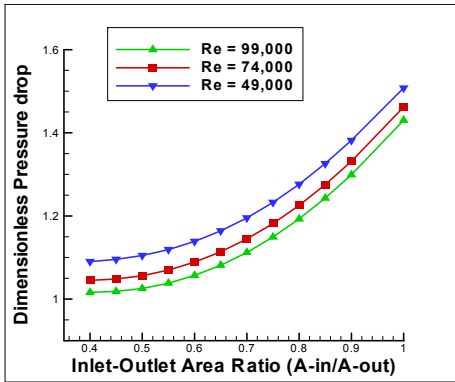
Figure 4의 (a), (b), (c)에는 A_r 이 1.42, 2.84, 5.68인 경우의 레이놀즈수와 입-출구 면적비에 따른 무차원화된 압력강하를 나타내었다. A_r 이 1.42인 경우, 입-출구 면적비가 0.4~0.55에서는 무차원화된 압력강하가 소폭 감소하는 경향을 보이며, 0.55~1.0에서는 증가하는 경향을 보인다. 각각의 레이놀즈수에 따른 그래프들은 비슷한 경향을 보이며, 레이놀즈수의 증가에 따라 무차원화된 압력강하는 감소한다.

A_r 이 2.84인 경우에는 A_r 이 1.42인 경우에 비하여 무차원화된 압력강하가 전체적으로 작은 값을 가진다. 입-출구 면적비가 증가할수록 무차원화된 압력강하는 점차적으로 증가하며, 그 기울기 또한 증가한다. 그리고 레이놀즈수의 증가에 따라 무차원화된 압력강하는 감소하며, A_r 이 1.42인 경우에 비하여 레이놀즈수에 따른 무차원화된 압력강하 감소의 정도가 작다.

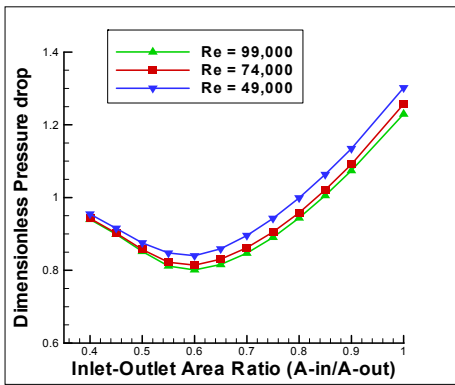
A_r 이 5.68인 경우에는 A_r 이 1.42와 2.84인 경우에 비하여 무차원화된 압력강하가 전체적으로 작은 값을 가진다. 입-출구 면적비가 0.4~0.6에서는 압력강하가 감소하는 경향을 보이며, 0.6~1.0에서는 증가하는 경향을 보인다. 레이놀즈수의 증가에 따라 무차원화된 압력강하는 감소하지만, 감소하는 정도는 A_r 이 1.42와 2.84인 경우에 비하여 작다.



(a) $A_r = 1.42$



(b) $A_r = 2.84$



(c) $A_r = 5.68$

Fig. 4 The effect of area ratio on dimensionless pressure drop

4. 결 론

본 연구에서는 대향류 매니폴드 입-출구 면적비에 따른 열교환기의 성능특성을 분석하기 위해 전산해석을 수행하였다.

유동 불균일도는 입-출구 면적비가 변하면서 감소하거나 증가하는 경향을 보였으며, A_r 의 1.42, 2.84, 5.68 각각의 경우, 입-출구 면적비가 0.55, 0.60, 0.65에서 최소의 값을 보였다.

A_r 이 1.42인 경우의 무차원화된 압력강하는 입-출구 면적비가 0.6에 이르기까지는 소폭 감소하지만, 입-출구 면적비가 0.6이상에서는 증가

하는 경향을 보였다. A_r 이 2.84인 경우의 무차원화된 압력강하는 입-출구 면적비가 커짐에 따라 증가하는 경향을 보였다. A_r 이 5.68에서의 무차원화된 압력강하는 입-출구 면적비가 0.6에 이르기까지 감소하는 경향을 보이지만, 입-출구 면적비가 0.6이상에서는 증가하는 경향을 보였다.

후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 해외우수연구기관유치사업 연구임(No. K20703001798-11E0100-00310)

참 고 문 헌

1. 예휘열, 김두환, 이관수, 차우호, "수정된 등압법을 이용한 매니폴드의 유량분배", 설비공학논문집, 제21권, 제3호, 2009, pp.176-185
2. M. K. Bassiouny, H. Martin, "Flow distribution and Pressure drop in Plate Heat Exchangers-I", Chemical Engineering Science, Vol. 39, No. 4, 1984, pp.693-700
3. A. L. London, G. Klopper, S. Wolf, "Oblique flow Headers for Heat Exchangers", ASME J. Eng. Power, Vol. 90, Ser. A, 1968, pp.271-286
4. Choi, S. H., Shin, S. and Cho, Y. I., "The effect of area ratio on the flow distribution in liquid cooling module manifolds for electronic packaging", Heat Mass Transfer, Vol. 20, No. 2, 1993, pp.221-234
5. Andrew Chen, Ephraim M. Sparrow, "Turbulence modeling for flow in a distribution manifold", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 52, No. 1, 2009, pp.1573-1581