

히트싱크 미세채널 내의 입구유동 영역에서의 단상 열유동 특성에 관한 연구

장 용 희, 김 용 찬^{**}, 이 규 정^{*}

고려대학교 대학원 기계공학과, ^{*}고려대학교 기계공학과

Study on Single-Phase Thermal and Hydrodynamic Characteristics in the Entry Region of a Mini-Channel Heat Sink

Yong-hee Jang, Yongchan Kim^{**}, Kyu-Jeong Lee^{*}

Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Korea University, Seoul 136-701, Korea

^{}Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea*

(Received May 23, 2006; revision received November 7, 2006)

ABSTRACT: Although the advance in electronic technology enables a large number of circuitry to be packed in a small volume, it is simultaneously required to remove the high heat load produced by them. In this study, the heat transfer and pressure drop characteristics of a mini-channel heat exchanger, which is designed for liquid cooling of electronic components, are investigated by varying operating conditions. Water and FC-72 were used as working fluids. The mini-channel heat exchanger was made with circular shape channels having diameters of 2, 3, and 4 mm in regular intervals, and the channel length was 100 mm. The header and inlet guide pathway to provide uniform inflow were attached at the inlet of the test section. Copper block including the heaters was attached at the sidewall of the test section as a heat source, which provided the heat flux from 5 to 15 W/cm². The entrance effects enhanced the heat transfer coefficient in the mini-channel significantly. In addition, the single-phase pressure drop in the mini-channel was very similar to that predicted by the laminar flow correlation except that the transition Re decreased due to flow instability in the entrance region.

Key words: Mini-channel(미세채널), FC-72, Heat exchanger(열교환기), High heat flux(고열유속), Pressure drop(압력강하)

기 호 설 명

A : 냉매와 접한 채널 면적 [m²]
 C_p : 비열 [kJ/kgK]
 D : 채널 직경 [mm]

f : 마찰계수
 G : 질량유속 [kg/m²s]
 h : 열전달계수 [W/m²K]
 L : 채널 길이 [mm]
 \dot{m} : 질량유량 [kg/s]
 N : 채널 개수
 Nu : Nusselt 수, hD/k
 Pr : Prandtl 수, $C_p\mu/k$
 Q : 열량 [W]

[†] Corresponding author

Tel: +82-2-3290-3366; fax: +82-2-921-5439

E-mail address: yongckim@korea.ac.kr

Q_m : 시험부에 통과하는 전체 유량 [g/min]
 Re : Reynolds 수, GD/μ
 x^+ : 무차원 축방향거리, $\{2(x/D)\}/\text{Re Pr}$

하첨자

r : 냉매
 x : 특정위치(local)

1. 서 론

전자산업의 발전과 더불어 전자통신 장비들은 고속 및 고밀도화 실장(electronic packaging)을 통하여 시스템의 부피 및 비용을 줄이고 시스템 성능의 극대화를 추구하고 있다. 그러나 실장 밀도의 증가는 모듈에서 발생하는 발열량 및 열유속의 증가를 동반하게 되었고, 이는 모듈의 신뢰성 및 내구성을 떨어뜨리는 결과를 초래하게 되었다. 따라서 전자부품이 최적의 성능을 유지하기 위해서는 이와 같은 좁은 공간에서 발생된 고열유속의 열을 효과적으로 냉각할 수 있는 기술의 개발이 절실히 요구된다.

기존 공냉식 냉각시스템의 경우, 고발열이 존재하는 부품 위에 공냉형 히트싱크를 부착하여 냉각을 하고 있으나, 소형의 고열유속 통신장비에 적용하기 위해서는 히트싱크 표면에 고밀도의 핀을 부착하고 핀 사이에 고속으로 기체를 통과시켜야만 고열유속의 열을 감당할 수 있으므로 이에 따른 제작상의 한계 및 소음발생의 문제로 인해 그 적용이 한계에 이르렀다고 하겠다. 따라서 이를 대체할 방안의 하나로 액체를 이용한 냉각방식에 대한 연구가 이루어지고 있다. 액체냉각을 이용할 경우, 칩에서 발생하는 열량을 효과적으로 제거할 수 있다는 이점이 있으나 냉매의 유출로 인한 전자부품의 오작동 가능성이 존재하게 되므로 이에 대한 안전이 우선적으로 확보되어야만 할 것이다.

단상에 대한 압력강하와 열전달에 관해서는 기존에 많은 연구들이 진행되어 왔다. 압력강하의 경우, 직경이 작게는 $1.6\mu\text{m}$ 까지 실험한 결과가 보고되었으며, 그 결과는 물을 냉매로 하고 채널 형상이 원형인 경우에 대해서는 대체로 기존 결과와 비슷하거나 크게 압력강하를 예측하고 있다. Mala and Li⁽¹⁾나 Kandlikar et al.⁽²⁾은 직경이

1mm 이하인 경우 기존의 결과에 비해 큰 마찰계수를 갖는다고 발표하였으며, Sharp et al.⁽³⁾, Yang et al.⁽⁴⁾ 그리고 Bucci⁽⁵⁾ 경우는 기존 상관식과 비슷한 마찰계수를 갖는다고 하였다. 이처럼, 수 백 μm 이하의 경우에 대해서는 마찰계수가 기존의 상관식 및 실험결과보다 크게 또는 작게 예측하는 등 그 경향이 명확하게 밝혀지지 않고 있으므로, 다양한 냉매와 채널 크기에 따른 실험과 해석을 통해 압력강하 특성의 명확한 해석이 필요할 것으로 보인다. 그러나 직경이 1mm 이상에서의 압력강하는 대부분 기존 결과와 유사한 값을 갖는 것으로 알려져 있으므로, 기존 상관식의 사용이 가능하다고 하겠다.

열전달계수와 관련한 기존 연구로는 Adams et al.⁽⁶⁾이나 Kandlikar et al.⁽²⁾은 마이크로채널 및 미세채널에서 열전달계수를 기존 결과에 비해 크게, 그리고 Gao et al.⁽⁷⁾ 등은 작게 예측하고 있다. 기존 연구는 주로 완전히 발달된 영역에 대해 해석적인 해를 제공하고 있으나, 실제 미세채널 히트싱크에서 나타날 수 있는 열경계층과 속도경계층이 동시에 발달하고 있고 균일한 열유속이 가해지는 경우에 대한 연구결과는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 FC-72(Tetradecafluorohexane)로 알려져 있는 유전율이 낮은 냉매에 대한 열전달 및 압력강하 특성을 측정하였고, 이와 비교를 위해 물을 냉매로 하여 동일 운전조건에 대해 실험을 수행하였다. 여기에 실제 히트싱크에 적용 가능한 형태의 헤더 형상을 제시하고 각각의 경우에 대한 열전달 성능의 비교를 통해 헤더에서의 유동 특성에 따른 열전달 성능 변화에 대해 고찰하였다. 특히, 직경 2~4mm의 미세채널에 대하여 입구영역에서의 열전달 특성을 기존 완전발달된 유동과 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치를 나타내고 있다. 실험장치는 냉매를 순환시키기 위한 펌프, 온도조절을 위한 판형 열교환기와 히터, 유량 측정을 위한 질량유량계 및 개별유입시 각 채널의 유량을 조절하기 위한 면적식 유량계로 구성하였다.

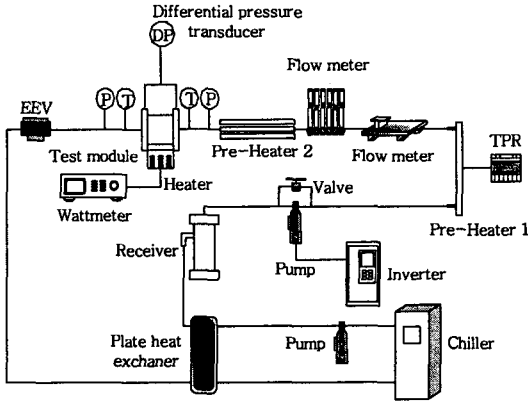
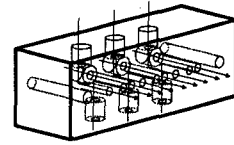


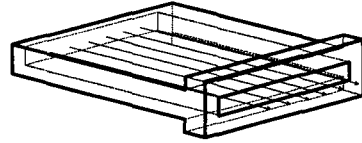
Fig. 1 Schematic diagram of the test facility.

본 연구에서는 유입조건에 따른 열유동 특성을 파악하기 위하여 양단유입, 균일유입 및 개별유입의 세 가지 형태의 헤더를 적용하여 실험을 수행하였다. 양단유입의 경우, 간접냉각방식의 히트싱크에 적용시, 그 구조가 간단하고 헤더 부분의 부피가 작은 이점이 있으나 유체의 유입과정에서 발생할 수 있는 헤더 내에서의 교란으로 인해 채널 간 유량분배의 불균형과 더불어 열전달 성능 향상도 나타나게 된다. 이와 같은 영향을 비교하기 위해 균일유입 헤더 형상에 대해 실험을 수행하였다. 그러나 이 두 가지 형상의 헤더는 유체가 헤더로부터 채널로 자연적으로 분배되는 형태이므로, 히트싱크가 수평으로 설치되지 않을 경우 각 채널별로 유량이 고르게 분배되지 않아 그 사용이 제한적일 수 있으므로 보다 일반적으로 사용 가능한 형태인 개별유입 헤더 형상을 도입하게 되었다. 따라서 본 연구에서는 헤더 내에서의 유동교란에 대해서는 양단유입과 균일유입 헤더를 적용하여 냉매를 물에 대해 실험을 수행하였으며, 냉매에 따른 비교는 균일유입 헤더와 개별유입 헤더에서의 실험결과를 통해 비교하였다.

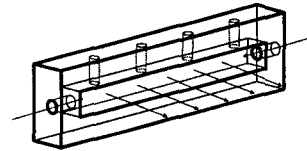
Fig. 2는 각각의 헤더 형상을 나타내고 있다. 개별유입 헤더(a)의 경우는 헤더의 세 면에 위치해 있는 입구 포트로부터 개별 채널로 유입되는 방식이다. 균일유입 헤더(b)의 경우는 채널 이전의 사각의 유입구간에서 유체의 유동을 안정화시켜 채널로 유입되는 형태이며, 양단유입 헤더(c)의 경우는 냉매가 헤더의 양 측면에서 헤더의 가운데로 유입되어 각각의 채널로 분배되는 형태이다. 이와 같은 헤더의 형상에 따라 실험장치의 구성



(a) Individual inflow header



(b) Duct-type header



(c) Pipe-type header

Fig. 2 Schematics of the headers used in this study.

에도 차이를 보이고 있는데, 개별유입 헤더의 경우는 균일유입이나 양단유입 헤더를 적용한 경우와는 달리 각각의 채널에서의 유량과 온도를 조절하는 방식이므로 질량유량계와 시험부 사이에 채널수와 동일한 개수의 면적식 유량계와 히터를 부착하였다.

냉매의 순환과정은 균일유입과 양단유입의 경우는 판형 열교환기에서 냉매를 냉각하여, 가열 및 유동 과정에서 발생할 수 있는 기포를 제거하기 위해 수액기로 보낸 후 펌프로 유입시키고, 펌프에서 나온 유체는 Pre-heater 1에서 실험조건으로 조절하여 시험부로 유입시킨다. 개별유입의 경우는 Pre-heater 1에서 1차적으로 실험조건에 가까운 온도로 조절하고, 면적식 유량계에서 각 채널별 유량을 균일하게 조절한 후 면적식 유량계를 지나는 과정에서의 냉매로부터 외부로의 열전달을 보정하기 위해 Pre-heater 2에서 실험조건에 해당하는 온도로 조절한다.

Fig. 3과 Fig. 4는 본 연구에 사용된 개별유입 시험부와 양단유입 시험부의 형상을 보여주고 있다. 균일유입의 경우는 헤더부분을 제외하고는 양

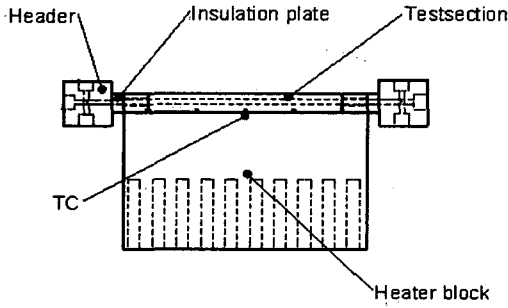


Fig. 3 Details of the test section with the individual inflow header.

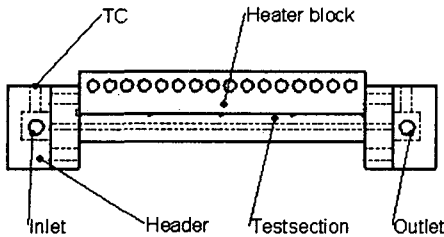


Fig. 4 Details of the test section with the pipe-type header.

단유입과 동일한 구조이다. 양단유입과 균일유입의 경우는 외부 온도 및 열손실의 영향을 최소화하여 채널에서 열전달 성능을 측정하기 위해 시험부의 면적을 넓게 하고 다수의 원형 채널을 가공하였다. 개별유입의 경우는 유량계 및 Pre-heater 2의 부가적인 부착으로 인한 공간적 제약으로 인해 상대적으로 적은 수의 채널을 가공하고 시험부의 외부 단열을 보강하여 실험을 수행하였다.

전체 시험부의 크기는 차이가 있으나 동일한 채널 직경의 시험부에 대해 히터와 시험부 상호간의 기하학인 관계는 동일하게 설계하였다. 시험부와 관련한 세부적인 치수는 Table 1에 나타나 있다.

Table 1 Dimensions of mini-channels

Item	Water	FC-72
Inner diameter [mm]	2, 3, 4	
Channel spacing [mm]	4, 6, 8	
Test section thickness [mm]	8, 9, 10	
Number of channels	12, 16, 24 / 4, 6, 9	
Channel length [mm]	100	

시험부와 히터가 접촉하는 면에는 열전대를 부착하기 위해 폭 1 mm 홈을 일정한 간격으로 가공하였으며, 시험부 입구와 출구 부분에는 압력 강하를 측정하기 위한 압력 탭과 온도측정을 위한 열전대 삽입용 홈을 가공하였다. 채널의 전체 길이는 모든 시험부에 대하여 100 mm로 동일하게 하였으며, 채널 간의 간격은 채널 직경과 동일하게 하였다. 시험부에 가해지는 열은 히터블록을 통하여 공급하였으며, 히터블록은 시험부와 동일한 단면적을 갖는 구리블록에, 일정간격으로 냉매의 유동방향과 수직으로 홈을 가공하여 카트리리지 히터를 삽입하였다. 외부로의 열손실을 최소화하기 위해 단열성능이 우수한 유리섬유 단열재를 이용하였으며, 시험부 표면과 냉매의 입·출구 온도를 측정하기 위해 T-type 열전대를 사용하였고, 냉매유량은 질량유량계를 이용하여 측정하였다.

2.2 실험조건 및 결과처리

본 연구에 사용된 냉매인 물과 FC-72는 그 물성치에 있어서 큰 차이를 보이고 있다. Table 2는 냉매의 주요 물성치를 요약한 표이다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 물이 FC-72에 비해 열전도계수가 10배, 비열은 4배, 그리고 점성계수는 1.5배 정도 큰 값을 갖는 것을 볼 수 있다.

압력강하 실험은 채널 입구 헤더에서의 급속으로 인한 손실 및 채널 출구 헤더에서의 급확대로 인한 압력회복의 영향을 배제하기 위해 개별유입 헤더를 부착한 시험부에 대해 채널 상부에 압력

Table 2 Properties of water and FC-72

Refrigerant	T [°C]	c_p [J/kgK]	k [W/mK]	μ [Ns/m ²]
Water	5	4200	0.5705	0.0015
	10	4188	0.5800	0.0013
	15	4184	0.5893	0.0011
	20	4183	0.5984	0.0010
	25	4183	0.6071	0.0009
FC-72	5	1019	0.0582	0.0009
	10	1026	0.0576	0.0008
	15	1034	0.0570	0.0007
	20	1042	0.0564	0.0007
	25	1050	0.0559	0.0006

Table 3 Experimental conditions

Item	Range
Inlet temperature [°C]	5, 15, 25
Mass flux [kg/m ² s]	110.5 < G < 884.2
Inlet type	Individual, pipe, duct
Reynolds number	Re < 2300
Heat flux [W/cm ²]	0.5 ~ 15

템을 가공하여 순수한 채널에서의 압력강하만을 측정하였다. 이 과정에서 유입되는 냉매의 온도를 실험조건으로 조절한 후 유량을 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다. 열전달 실험에서는 초기에 냉매의 온도를 조절한 후 시험부에 부착된 히터를 이용하여 시험부에 가해지는 열유속을 변화시켜 가면서 열전달 성능을 측정하였다. 구체적인 실험조건은 Table 3에 요약하여 나타내었다.

본 연구의 압력강하 실험조건이 층류영역에 해당하므로 층류에서의 마찰계수상관식과 실험값을 비교하였다. 본 실험에 사용된 시험부와 같이 길이 짧은 경우, 시험부 전체 구간이 속도경계층이 완전히 발달하지 않은 입구유동에 해당하고 이와 같은 입구유동 영역에서는 완전 발달된 유동에 비해 압력강하가 크게 나타나는 것으로 알려져 있다. 본 실험에서 채널 직경 4mm의 경우 Re=446, 3mm의 경우 Re=595, 2mm의 경우 Re=893 이상일 때 시험부 전 구간이 입구영역에 해당하게 된다.

냉매가 단상인 경우 히터로부터 냉매로 전달된 열량, Q_r 은 식(1)과 같이 계산하였다.

$$Q_r = \dot{m}_r C_p \Delta T \tag{1}$$

여기서 \dot{m}_r 은 냉매의 질량유량이고, C_p 는 냉매의 비열, ΔT 는 각 구간에서의 냉매의 온도변화를 나타낸다. 채널 형상이 복잡한 관계로 채널 내벽의 온도는 Fluent를 이용하여 관 내벽과 시험부 표면 온도차를 계산하였다. 계산된 값을 이용해 관 외측에서 측정된 온도로부터 관내측 표면온도를 예측하였다.

관내측 대류열전달계수는 유체와 접촉하는 면적, 온도차 및 열전달량에 관한 식(2)를 이용하여 계산하였다. 본 실험조건이 수력학적으로나 열적으로 동시에 발달하고 있는 조건에 해당하므로 수

Table 4 Nusselt number for a circular tube with constant heat flux

x^+	Nu_x
0	∞
0.002	12.00
0.004	9.93
0.010	7.49
0.020	6.14
0.040	5.19
0.1	4.51
∞	4.36

력학적으로는 완전 발달된 유동이고 열적으로는 발달하고 있는 유동에 관한 기존 결과와 비교하였다. 이와 같은 유동에서의 무차원화된 입구로부터의 길이변화에 따른 Nu_x 수는 Table 4에 나타나 있다.

$$h_r = \frac{Q_r}{A \Delta T} = \frac{Q_r}{(\pi D L N) \Delta T} \tag{2}$$

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 직경 4 mm 미세채널에서 FC-72 냉매를 적용하여 Re 수의 변화에 따른 마찰계수를 나타낸 그래프이다. 본 연구의 압력강하 실험은 대부분 층류영역에서 수행하였으며, 측정결과도 층류에 관한 상관식으로 계산한 값과 유사하게 나타났다. 직경이 4 mm인 경우, Re 수가 작은 구간에서는 차압이 매우 작아 측정오차가 상대적으로

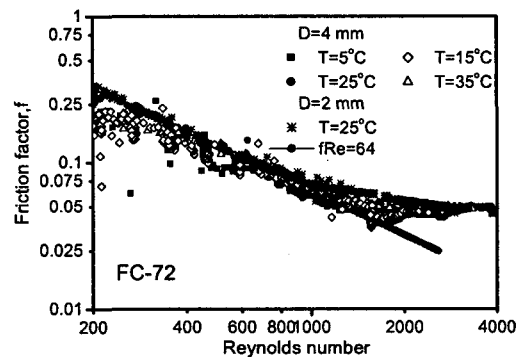


Fig. 5 Variation of friction factor with Reynolds number and fluid temperature of FC-72.

크기 때문에 측정값과 상관식이 서로 차이를 나타내는 것을 볼 수 있으나 Re 수가 증가하거나 직경이 감소함에 따라 그 영향이 줄어들어 측정값과 상관식의 오차가 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 기존에 알려져 있는 입구영역에서 압력강하량이 증가하는 경향은 뚜렷이 나타나고 있지는 않고 있다. 이와 관련된 기존 실험결과가 제한된 관계로, 본 실험결과만을 비교할 때 입구유동 영역에서의 압력강하의 증가는 크지 않은 것으로 보인다. 입구유동 영역에서의 특징적인 변화는 천이영역으로 전환되기 시작하는 Re 수의 변화로 그 값이 1200~1700으로 $Re_{cr} = 2300$ 보다 낮았고, 이는 입구부분에서의 유동 불안정 및 표면 조도가 채널 내의 속도 분포에 영향을 주기 때문으로 보인다. 이와 같은 경향은 기존 연구결과에서도 유사하게 나타나고 있다. 특히 마이크로 채널과 같이 수력 직경이 작을수록 조도에 의한 영향이 증가하여 더욱 낮은 Re 수에서 천이영역으로 전환되는 결과들을 볼 수 있다.⁽¹⁰⁾

본 연구에서는 양단유입, 균일유입 및 개별유입의 세 가지 형태의 헤더에 대해 열전달 실험을 수행하였다. Fig. 6은 운전조건을 동일하게 유지한 상태에서 균일유입 헤더와 양단유입 헤더를 부착한 시험부에 대해 물을 냉매로 하여 채널 구간에 따른 단상 열전달계수를 비교한 것이다. 실험조건이 동일한 경우에 대해 양단유입의 열전달계수가 균일유입에 비해 크게 나타나고 있다. 이와 같이 열전달계수값이 차이를 보이는 이유는 양단

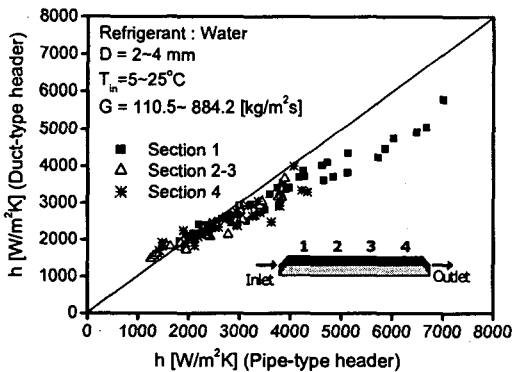


Fig. 6 Comparison of the heat transfer coefficients for the test section using the duct-type header with those using the pipe-type header.

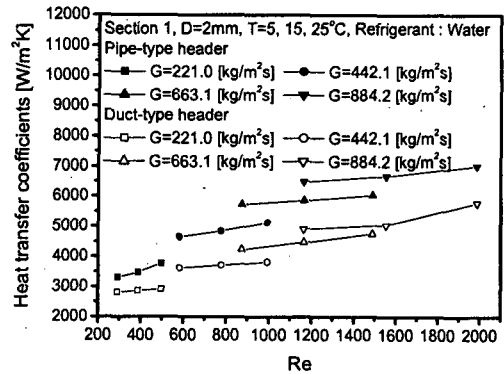


Fig. 7 Heat transfer coefficients for section 1 in the test section.

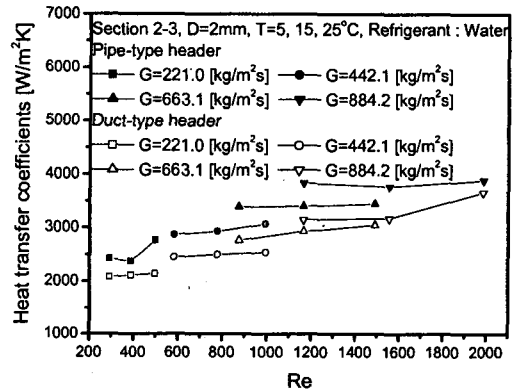


Fig. 8 Heat transfer coefficients for section 2 ~3 in the test section.

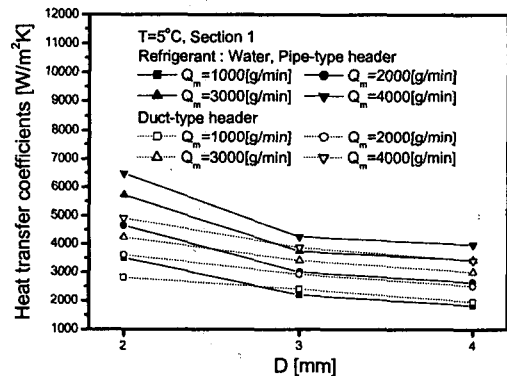


Fig. 9 Variation of heat transfer coefficients with channel diameter and total mass flow rate in section 1.

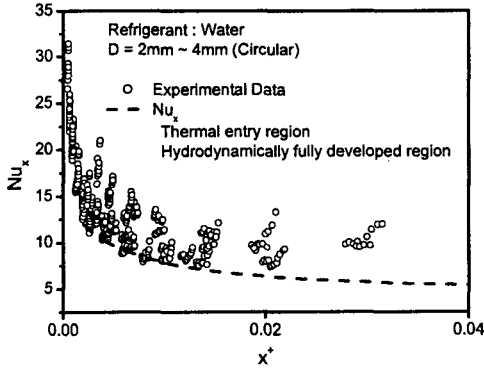


Fig. 10 Variation of Nu_x with x^+ of water in the test section using the pipe-type header.

유입 헤더 내의 유체의 교란이 균일유입에 비해 크게 발생하여 열전달 성능을 향상시키기 때문이다. Figs. 7~9에 나타난 바와 같이 헤더 내에서의 교란은 채널 직경이 작고 유량이 큰 경우에 채널의 입구 부분에서 가장 크게 나타나므로 열전달계수도 가장 큰 차이를 보인다.

Fig. 10은 물을 냉매로 하고, 양단유입 헤더를 부착한 경우 채널의 길이방향 위치에 따른 Nu_x 수의 변화를 나타낸 것이다. 식(3)에 나타난 x^+ 는 층류에서의 열경계층 발달 정도를 나타낸 무차원 수이다. 층류에서 열경계층이 완전히 발달되는 지점까지의 거리는 식(4)와 같이 표현할 수 있으며,⁽¹¹⁾ x^+ 는 x 와 $x_{th,e}$ 의 비를 나타낸다. Fig. 10에 점선으로 나타난 것은 Table 4에 주어진 완전 발달된 유동에 대한 값으로 본 연구에서 측정된 Nu_x 보다 상대적으로 낮게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 이는 Table 4에 나타난 Nu_x 값은 수력학적으로는 완전히 발달되었으나 열적으로 발달되고 있는 층류유동에 대한 Nu_x 수를 나타내고 있으며, 본 실험결과는 채널 입구에서 수력학적 과 열적으로 동시에 발달하고 있는 영역에 해당하기 때문으로 보인다.

$$x^+ = \frac{2(x/D)}{Re Pr} \quad (3)$$

$$x_{th,e} = 0.05 D Re Pr \quad (4)$$

본 연구에서 고찰한 Nu_x 는 x^+ 에 반비례하여 감소하는 경향을 나타내고 있다. 따라서 본 연구

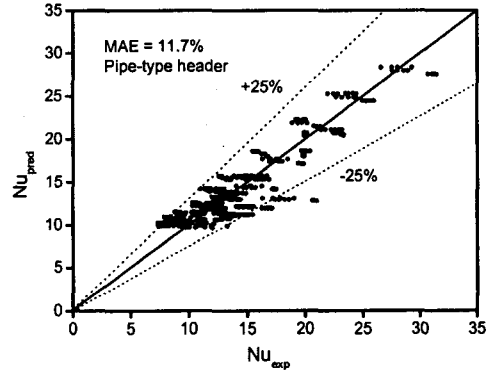


Fig. 11 Comparison of the predicted Nu_x using Eq. (5) with the measured value.

에서 얻은 양단유입 헤더에 대한 측정결과에 기초하여 Nu_x 와 x^+ 의 경향을 식(5)와 같은 상관식으로 작성하였다.

$$Nu_x = 9.2528 + \frac{0.0137}{x^+} - \frac{2.1851}{x^{+2}} \times 10^{-6} \quad (5)$$

본 실험에 사용된 시험부의 경우 시험부 출구에서의 측방향 열전달과 같은 열손실의 영향으로 인해 출구 영역에서 상대적으로 Nu_x 값이 크게 나타나고 있고, 이로 인해 전체 실험결과와 가장 근접한 상관식을 제시하는 과정에서 상수 부분이 완전 발달된 유동에 대한 값과는 차이를 보이고 있다. 이러한 영향은 측방향 열전달의 영향이 줄어드는 길이가 긴 시험부에 대해 실험을 수행할 경우 감소할 것으로 보인다. Fig. 11은 본 연구에서 구한 경험적 상관식과 실험결과를 비교한 것이다. 경험적 상관식은 $\pm 25\%$ 편차범위 내에서 실험결과를 잘 예측하였다. 실험결과를 바탕으로 한 경험적 상관식의 정확도는 식(6)으로 정의되는 MAE(Mean Absolute Error)로 나타낼 경우 실험값과의 평균 편차는 11.7%로 나타났다.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum \left[\frac{|Nu_{pred} - Nu_{exp}|}{Nu_{exp}} \times 100 \right] \quad (6)$$

Fig. 12는 균일유입 헤더를 부착한 시험부에서의 열전달계수를 나타내고 있다. 이 경우의 입구로부터의 길이에 따른 열전달계수의 변화 경향은

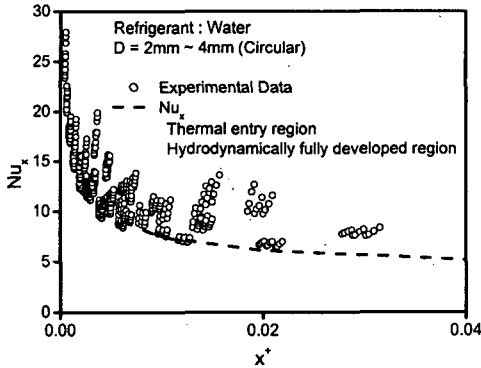


Fig. 12 Variation of Nu_x with x^+ of water in the test section using the duct-type header.

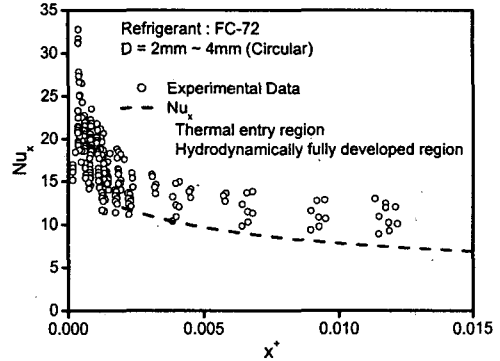


Fig. 14 Variation of Nu_x with x^+ of FC-72 in the test section using the individual inflow header.

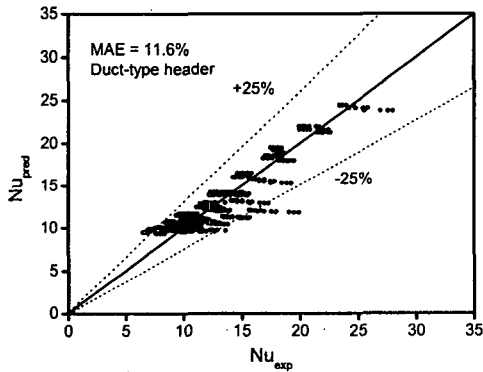


Fig. 13 Comparison of the predicted Nu_x using Eq. (7) with the measured value.

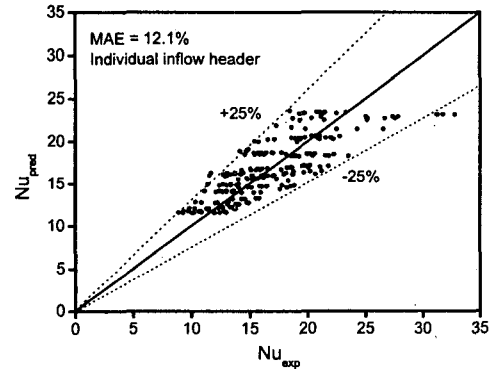


Fig. 15 Comparison of the predicted Nu_x using Eq. (8) with the measured value.

양단유입 헤더를 부착한 경우와 유사한 경향을 보이고 있으나, 양단유입에 비하여 다소 작게 나타나고 있다. 양단유입에서와 마찬가지로 균일유입 헤더에 대한 실험결과에 기초하여 균일유입에 대한 경험적 상관식을 식(7)과 같이 개발하였다.

$$Nu_x = 9.0204 + \frac{0.0109}{x^+} - \frac{1.6920}{x^{+2}} \times 10^{-6} \quad (7)$$

Fig. 13은 균일유입 헤더에 대한 실험값과 상관식을 통해 예측한 결과를 비교한 것이다. 균일유입에 대한 경험적 상관식의 MAE는 11.6%이고, 상관식 편차범위 $\pm 25\%$ 내에서 실험결과를 잘 예측하고 있다. 일반적으로 $x^+ = 0.05$ 이상에서 열경계층이 완전히 발달하는 것으로 알려져 있고,⁽¹¹⁾

본 연구의 실험조건이 그보다 작은 영역이므로 열경계층이 완전히 발달하지 않아, 측정된 Nu_x 값이 완전발달유동에 대한 기존 상관식을 적용하여 예측한 Nu_x 수보다 크게 나타났다.

Fig. 14는 FC-72의 개별유입 시험부의 채널 길이에 따른 Nu_x 의 변화를 나타내고 있다. 양단유입과 균일유입의 결과와 마찬가지로 FC-72에서도 유사한 경향을 나타내고 있다. FC-72에 대한 실험결과를 기초로 작성한 개별유입에 대한 상관식은 식(8)과 같다.

$$Nu_x = 10.9797 + \frac{0.0076}{x^+} - \frac{1.1144}{x^{+2}} \times 10^{-6} \quad (8)$$

Fig. 15는 개별유입에 대한 상관식으로 예측한

결과와 실험결과를 비교한 것이다. 이 경우 MAE는 12.1%이고, 상관식은 편차범위 $\pm 25\%$ 내에서 실험결과를 잘 예측하고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 물과 FC-72를 작동유체로 하여 직경 2 mm, 3 mm, 4 mm의 다채널관에 대해 헤더의 형상을 변화시키면서 입구유동 영역에서 단상 압력강하 및 열전달 특성에 대한 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 채널 형상이 원형인 미세채널에서의 단상 압력강하 실험결과, 기존의 층류에 관한 상관식과 유사한 값을 갖는 것으로 나타났으며, 본 실험결과로 볼 때 기존에 알려져 있는 입구유동에 의한 압력강하의 증가가 뚜렷이 확인되지는 않았다. 그러나 헤더에서 유동의 불안정에 의해 친이영역으로 변화하는 Re 수는 낮게 나타났다.

(2) 헤더의 형상에 따라서는 양단유입의 경우가 균일유입에 비해 열전달계수가 높게 나타났다. 이와 같은 경향은 직경이 작고, 유량이 큰 경우 채널의 입구 부분에서 그 차이가 더욱 뚜렷하게 나타났다.

(3) 시험부 출구에서의 축방향 열전달로 인해 실험결과를 기초로 작성된 상관식과 기존 완전 발달된 유동에 대한 Nu_x 수가 차이를 보이고 있다. 이는 채널의 길이가 짧은 관계로 유동이 완전히 발달되기 이전에 시험부의 출구에 도달하기 때문으로 판단된다.

(4) 실험결과를 바탕으로 헤더 형상에 따른 입구영역에서 물과 FC-72에 관한 상관식을 작성하였으며, 개발된 상관식은 편차범위 25% 내에서 실험결과를 잘 예측하고 있다.

(5) 물과 FC-72는 입구로부터의 길이에 따른 Nu_x 값의 크기와 변화 경향은 서로 유사하게 나타났다. 그러나 FC-72의 열전도계수 k 가 물에 비해 매우 낮은 값을 가지므로 FC-72의 단상 열전달계수값은 물에 비해 매우 낮음을 알 수 있다. 이와 같이 낮은 열전달계수를 갖는 경우 본 연구에서 다루고 있는 입구영역에 대한 해석과 활용의 중요성이 증대될 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 2003년도 한국과학재단의 지원(R01-

2002-000-00481-0)에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Mala, G. M. and Li, D., 1999, Flow characteristics of water in microtubes, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 20, pp. 142-148.
2. Kandlikar, S. G., Joshi, S. and Tian, S., 2001, Effect of channel roughness on heat transfer and fluid flow characteristics at low Reynolds numbers in small diameter tubes, *Proceedings of 35th National Heat Transfer Conference*, Anaheim CA, USA, Paper 12134.
3. Sharp, K. V., Adrian, R. J. and Beebe, D. J., 2000, Anomalous transition to turbulence in microtubes, *Proceedings of International Mechanical Engineering, Congress Expos 5th Micro-Fluidic Symposium*, Orlando, FL, pp. 150-158.
4. Yang, C. Y., Chien, H. T., Lu, S. R. and Shyu, R. J., 2000, Friction characteristics of water, R134a and air in small tubes, *Proceedings of International Conference on Heat Transfer and Transport Phenomena in Microscale*, Begell House, New York, USA, pp. 168-174.
5. Bucci, A., Celata, G. P., Cumo, M., Serra, E. and Zummo, G., 2003, Fluid flow and single-phase flow heat transfer of water in capillary tubes, *Proceedings of the Int. Conference on Mini-channels and Micro-channels*, Rochester, USA, Paper ICMM-1037.
6. Adams, T. M., Abdel-Khalik, S. I., Jeter, S. M. and Qureshi, Z. H., 1997, An experimental investigation of single-phase forced convection in microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 851-857.
7. Gao, P., Le Person, S. and Favre-Marinet, M., 2002, Scale effects on hydrodynamics and heat transfer in two-dimensional mini and microchannels, *International Journal of Thermal Science*, Vol. 41, pp. 1017-1027.

8. Jiang, P.-X., Fan, M.-H., Si, G.-S. and Ren, Z.-P., 2001, Thermal-hydraulic performance of small scale micro-channel and porous media heat-exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.44, pp. 1039-1051.
9. Agostini, B., Watel, B., Bontemps, A. and Thonon, B., 2002, Friction factor and heat transfer coefficient of R134a liquid flow in mini-channels, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 22, pp. 1821-1834.
10. Li, Z.-X., Du, D.-X. and Guo, Z.-Y., 2003, Experimental study on flow characteristics of liquid in circular microtubes, *Microscale Thermophysical Engineering*, Vol. 7, pp. 253-265.
11. Kays, W.M. and Crawford, M.E., 2005, *Convective Heat and Mass Transfer*, 4th ed., McGraw-Hill, New York.