

헤더-채널 분기관에서의 헤더 입구 형상이 2상 유동 분배에 미치는 영향에 대한 실험적 연구

Effect of Inlet Geometries on the Two-Phase Flow Distribution at Header-Channel Junction

이준경(Jun Kyoung Lee)[†]

경남대학교 기계공학부

Department of Mechanical Engineering, Kyungnam University, Masan 631-701, Republic of Korea

(Received January 9, 2013; revision received April 5, 2013)

Abstract The main objective of this work is to experimentally investigate the effect of inlet geometries on the distribution of two-phase annular flow at header-channel junctions simulating the corresponding parts of compact heat exchangers. The cross-section of the header and the channels were fixed to 16 mm×16 mm and 12 mm×1.8 mm, respectively. Experiments were performed for the mass flux and the mass quality ranges of 30~140 kg/m²s and 0.3~0.7, respectively. Air and water were used as the test fluids. Three different inlet geometries of the header were tested : no restriction (case A), a single 8 mm hole at the center (case B), and nine 2 mm holes around the center (case C) at the inlet, respectively. The tendencies of the two-phase flow distribution were different, in each case. For cases B and C (flow resistance exists), more uniform flow distribution results were seen, compared with case A(no flow resistance), due to the flow pattern change to mist flow from annular flow at the inlet, and the flow recirculation near the end plate of the header.

Key words Flow distribution(유동분배), Two-phase(2상), Header(헤더), Inlet geometries(입구형상)

[†] Corresponding author, E-mail: jklee99@kyungnam.ac.kr

기호설명

D : 직경 [m]
 G : 질량유속 [kg/m²s]
 W : 질량유량 [kg/s]
 x : 건도, $W_g/(W_g + W_f)$

하첨자

c : 유로(Channel)
 f : 액체(Liquid)
 g : 기체(Gas)
 h : 수력(Hydraulic)
 i : index(Channel numbers)
 in : 입구

1. 서 론

최근 들어, 밀집형 열교환기의 성능 향상 및 예측을

위해 열교환기 내 헤더에서의 유동 분배에 대한 관심이 높아지고 있다. 보통의 경우, 열교환기 각 유로 내 유량이 균일하지 않고, 심할 경우 유체가 흐르지 않는 유로도 존재하게 되어 의도한 열교환기의 성능을 발휘할 수 없게 된다. 이와 같은 유동 분배 문제와 관련한 연구는 근래에 활발히 연구가 수행되었으며, Lee,⁽¹⁾ Lee and Lee,⁽²⁾ Webb and Chung,⁽³⁾ Hrnjak⁽⁴⁾은 이 분야에 대한 전반적인 리뷰 논문을 발표하였다. 리뷰 논문을 포함하여 기존의 논문을 간략히 정리하면, 헤더 기울기(수직, 수평)⁽⁵⁾ 및 입구유동조건⁽⁶⁾, 헤더의 입구부 형상,^(7, 8) 채널의 기울기(수직, 수평)⁽⁹⁾ 및 돌출길이^(10, 11) 등이 유동분배에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되었다. 그 외 헤더 크기,⁽¹²⁾ 입구유량, 채널의 수, 길이 및 채널간 간격⁽¹¹⁾ 등이 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 그러한 기존 연구에서 보듯이 헤더에서의 2상 유동 분배는 헤더의 형상뿐만 아니라 입구 유동 조건 등 많은 인자들의 영향을 받고, 헤더 내 유동형태에 따른 분배 메커니즘을 명확히 밝혀내지 못했기 때문에 여전히 이에

대한 연구가 많이 필요한 것이 현실이다.

헤더 내 2상 유동분배 현상과 관련한 연구는 크게 유동 분배에 대한 예측(해석 및 모델 개발)과 유동 분배를 균일하게 하는 방법(실험적 접근법)에 대한 것으로 나뉠 수 있는데, 특히 균일한 유동 분배를 얻기 위한 연구는 사례별로 적용이 다르기 때문에 이에 대한 체계적인 연구가 절실한 실정이다. 균일한 유동분배를 얻는 방법에 대한 기존의 연구를 정리해보면 크게 3가지 정도로 분류해 볼 수 있다. 각 방법에 대한 특징과 관련 연구를 간단히 살펴보면 다음과 같다.

첫 번째, 헤더 입구부에 노즐, 오리피스, 미립화기 등의 유동저항(Flow Restrictions)을 두어 입구부에서의 유동 양식에 상관없이 헤더내 유동을 균질하게(homogeneous) 만드는 방법이 있다. 이와 관련하여 Ahmad et al.⁽⁷⁾은 2×50 mm 8개의 채널이 연결된 50 mm 직경의 수평 헤더에 대해 입구부 오리피스(직경 2 mm) 및 직경 0.5 mm, 41개의 구멍의 설치에 따른 각각의 분배에 대한 영향을 살펴보았고, 입구부 저항이 분배를 크게 개선할 수 있음을 확인하였다.

두 번째 방법은 균일한 유동 분배를 갖도록 헤더 내에 유동저항부나 가이드부를 설치하는 방법으로, 이와 관련하여 Lee and Lee⁽¹⁰⁾와 Lee⁽¹¹⁾는 16 mm의 수력직경을 갖는 사각형 단면의 헤더에 대해 6개의 채널의 돌출 길이와 간격을 변화시켜가며 환상류에 대한 분배 실험을 수행하였고, 채널의 간격에 상관없이 채널의 돌출 길이가 바뀔 때 따라 분배의 형태가 많이 달라짐을 확인하고, 균일 분배를 얻을 수 있는 최적의 돌출 길이를 제안하였다. 비교적 압력강하가 적고, 쉽게 균일한 유동분배를 얻을 수 있어 좋은 방법이 될 수 있다. 그러나 헤더 및 채널의 방향 등에 따라 불균일이 클 수 있는 단점도 존재한다.

그리고 다른 방법은 액상과 기상을 분리(Separation)하고, 재분배하는 방법으로 열교환기 등의 설계에 있어 공간의 제약이 없는 경우에 사용하면 좋은 방법이나, 그렇지 않은 경우는 적용하기가 어렵다.⁽⁴⁾

위의 결과를 종합하면, 헤더의 입구부에 유동저항을 두는 방법이 헤더 및 채널의 방향 및 형상에 상관없이 균일한 2상 유동분배를 얻기 용이한 방법임을 알 수 있으나, 입구부 단면의 형태에 따라 헤더 내에서의 유동 형태가 달라지고, 그에 따라 2상 유동의 분배 경향이 달라지는 복잡한 문제가 존재하며 이에 대한 연구가 필요함을 알 수 있다. 특히 기존의 연구는 헤더 입구부 유동 저항이 있는 경우 유동의 분배가 비교적 일정함을 단순 실험데이터 제시를 통해서만 언급하고 있다. 따라서 헤더 입구부 유동 저항을 용이하게 적용하기 위해서는 유동저항의 유무에 따른 헤더 내 유동 양식의 변화와 유동의 분배와의 관계에 대한 면밀한 분석이 필요하다. 그러므로 본 연구는 증발기나 응축기

내에 나타나는 2상 유동의 형태 중 흔히 볼 수 있는 환상류를 기준으로 입구부 단면 형상의 변화에 따른 헤더 내에서의 유동 형태를 유동가시화를 통해 살펴보고, 유동 형태와 유동의 분배에 대한 관계를 분석하여 보다 균일한 유동분배를 얻기 위한 입구부 형상 조건을 파악하는 연구를 실험적으로 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 물과 공기를 작동 유체로 하였으며, 물은 펌프를 거쳐 혼합부로 유입되고, 기체는 압축기로부터 필터를 거쳐 혼합부로 유입되며 각각은 미터링 밸브(metering valve)로 양이 조절된다. 각 상은 보정된 유량계로 측정된다. 환상류를 만들어 주기 위해 기체는 동심관 내부를 따라, 액체는 혼합부 아래 네 부분에 유입되어 동심관 외부를 따라 흘러가도록 제작되었다. 환상류가 완전히 발달되도록 믹서(Mixer)와 헤더 입구까지의 거리를 1200 mm로 설정하였고, 아크릴로 유로를 제작하여 헤더로 유입되는 유동의 형태를 살펴볼 수 있도록 하였다. Fig. 2는 본 실험에서 사용한 헤더의 형상을 나타내고 있다. 단면이 정사각형이며(16 mm×16 mm, $D_h = 16$ mm), 유동 가시화를 위해 아크릴로 제작하였고, 헤더와 연결된 유로는 소형 사각 유로(12 mm×1.8 mm)이며, 돌출길이는 없고 알루미늄으로 만들어졌다. 유로 간 거리는 9.8 mm로 헤더 단면 수력 직경보다 작다. 본 연구에서는 15개의 수평 사각 유로가 수직 헤더에 연결되어 있고, 이는 대부분의 밀집형 열교환기에서, 하나의 헤더에 10~20개의 유로가 연결되어 있는 경우가 보통이기 때문이다. 헤더 입구 형상의 변화에 따른 영향을 살펴보기 위해 입구부와 헤더의 단면이 동일한 것(Case A)과 더불어 Fig. 3의 헤더 입구부 중앙에 8 mm 원형의 유로가 있는 것(Case B, Fig. 3(a))과 중앙을 중심으로 2 mm 원형 유로가 4 mm 간격으로 9개가 있는 것(Case C, Fig. 3(b))에 대해 각각 실험을 수행하였다. 특히, Case C는 Case B 유로 면적의 절반 정도이며, 유로의 면적을 단순히 줄이지 않고, 작은 유로를 입구부에 일정하게 분포시켜 유동이 중앙으로만 집중되는 것을 피하고자 하였다. 2개 Case 모두 두께는 10 mm로 일정하고, 첫 번째 채널까지의 거리는 15 mm이다.

유로를 지나온 물/공기 혼합물은 대기압 상태의 기/액 분리기(air/liquid separator)로 유입된다. 액체의 경우 일정 시간 동안 받은 후 질량을 측정함으로써 질량 유량을 구하였다. 공기의 유량은 기액분리기의 상부에 설치된 수축노즐(converging nozzle)을 나오는 공기의 속도를 피토투브를 이용하여 측정하여 구하였다. 노즐은 30 mm 직경이며, 균일 유동을 만들어 주는 역할을 하는데, 실제 단면 내 속도의 편차는 0.7% 미만임을 실험

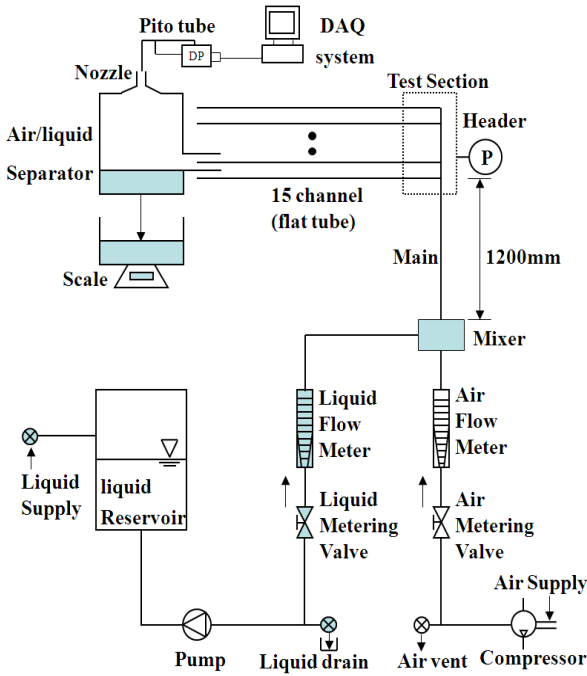


Fig. 1 Experimental setup.

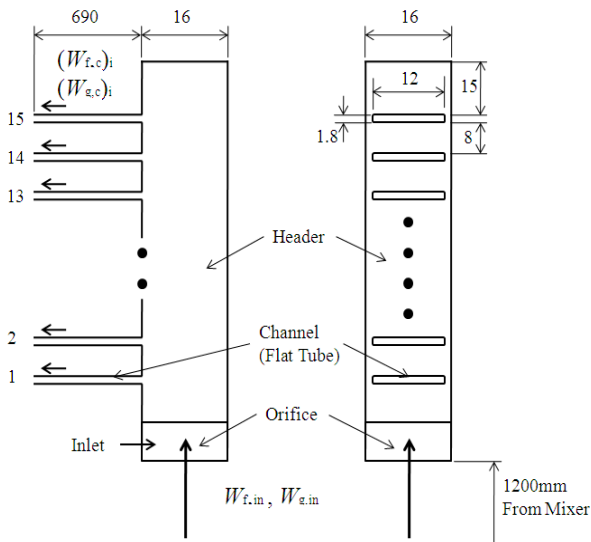


Fig. 2 Test section.

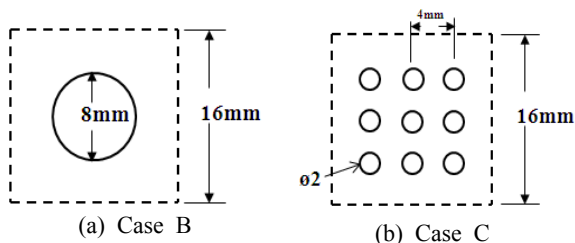


Fig. 3 Inlet geometries.

으로 확인하였다.

기/액 혼합 유체의 입구 질량 유속은 $30 \sim 140 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$, 건도는 $0.3 \sim 0.7$ 의 범위를 가진다. 이러한 범위에서 입구의 유동 양식은 환상류이고, 이는 유동가시화 및 Trotniewski and Ulbrich⁽¹³⁾의 유동양식 선도를 통하여 확인하였다. 측정 불확실도의 경우, 기체와 액체 질량 유량의 경우 각각 $\pm 7\%$, $\pm 9\%$ 의 오차 범위를 가진다. 액체의 오차범위가 큰 이유는 유동불안정에 의한 유동의 주기적인 현상으로 오차가 커지는 경향이 관찰되었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 입구 저항이 없는 경우(Case A)

입구부 유동저항이 없는 경우(Case A)에 대해, 헤더에서의 2상 유동 분배 시 헤더 내에서의 전체적인 유동의 형태를 보기 위해, 15개 채널을 가진 헤더의 경우에 대해 실험을 수행하였고, 액체와 기체의 분기 유량을 Fig. 4(a)에 각각 나타내었다.

액체와 기체의 분기 중 각 채널에 따라 액체의 분기 ($(W_{f,c})_i$)에 대한 차이가 크게 나므로, 액체 분기의 경향에 대해 살펴보면, 헤더 상류의 경우는(channel #1~#4, region A) 뒤 유로로 갈수록 액체의 양이 감소한다. 그러나 헤더의 중간 부분에서는 (channel #5~#9, region B) 하류로 갈수록, 액체의 양이 증가하는 반대의 경향이 나타난다. 그러나 그 이후의 유로(region C)에서는 다시 액체의 분기가 감소하는 경향을 가진다.

그러한 경향은 Fig. 4(b)의 유동 가시화에 따른 헤더 내부 액체유동을 살펴봄으로써 그 이유를 파악할 수 있는데, 고속카메라(MotionPro X1, IDT Co.)를 활용하여 유동가시화를 수행하였고(1000 frame/sec), 그 결과를 Fig. 4(b)에 나타내었다.

헤더 상류 부분에서는 와류의 발생이 없이 뒤 유로로 갈수록 액체의 양이 작아지는 영역이 발생한다(region A). 그러나 헤더 끝에서 발생하는 재순환에 의해, 중간 부분은 상류에서의 헤더 끝 방향으로의 유동과 재순환에 의한 하류로의 유동이 만나는 부분이 발생하고(region B), 그에 의해 유량이 증가하는 경향을 가지게 된다. 그리고 재순환 발생 부분에서는 region A와 같이 뒤 유로로 갈수록 액체의 분기가 다시 작아지는 경향을 가지게 된다(region C). 따라서 재순환 영역과 재순환에 의한 상류 유동의 교란 영역 및 재순환에 영향을 받지 않는 영역 등으로 유동의 형태를 나눌 수 있음을 알 수 있었다.⁽¹⁴⁾

3.2 입구 저항이 있는 경우(Case B and C)

Case A에 대한 실험을 바탕으로, 입구부 저항의 영

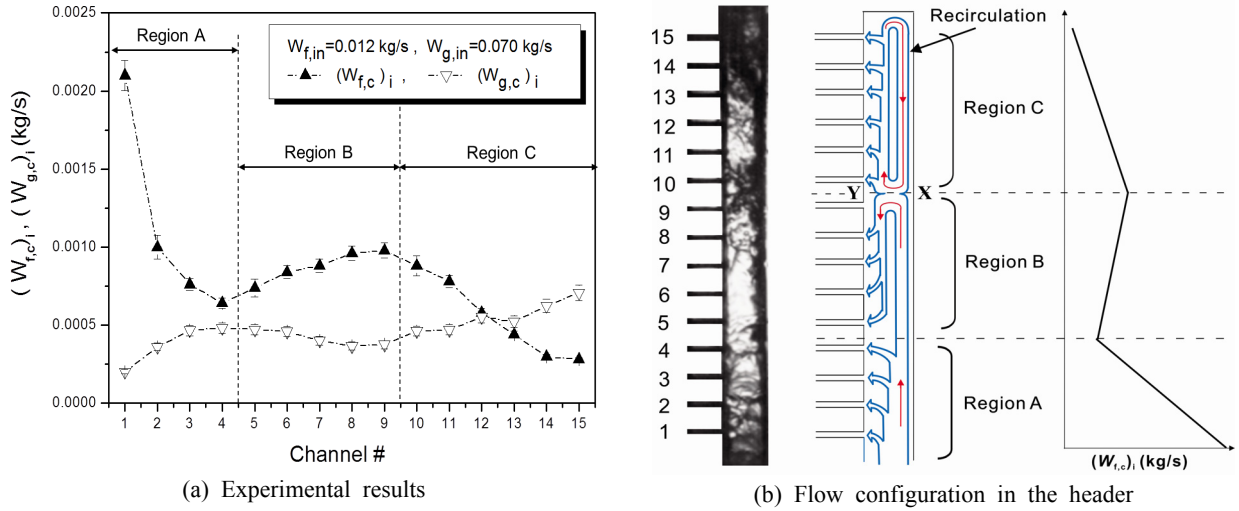


Fig. 4 Flow distributions of the header with no inlet restriction(Case A).

향을 살펴보기 위해, Fig. 4의 입구유량조건은 동일하게 설정하고 Fig. 3(a) 및 Fig. 3(b)의 입구부 형상을 바꾸어가며 실험을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 5 및 Fig. 6에 각각 나타내었다. 입구저항이 없는 경우와는 다른 유동분배 경향을 살펴볼 수 있었으며, 그것을 정리하면 다음과 같다.

우선, 같은 입구조건에 대해 입구의 유동저항이 존재하는 경우(Case B, C)가 없는 경우(Case A)에 비해 대체적으로 유동의 분배가 균일하게 나타남을 알 수 있다(Fig. 5(a) 및 Fig. 6(a)). 그리고 액체 분배에 대해, Case A보다는 액체 분배의 불균일이 많이 개선되었지만 유동분배 경향(하류로 갈수록 대체로 액체의 분기가 감소, 증가, 감소하는 경향)이 Case B에도 유사하게 나타남을 확인할 수 있다. 그러나 Case C의 경우는 그러한 경향이 분명히 나타나는 것은 아니나, 액체의 분기가 전체적으로 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이에 대한 원인을 분석하기 위하여 유동 가시화를 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 5(b)와 Fig. 6(b)에 나타내었다.

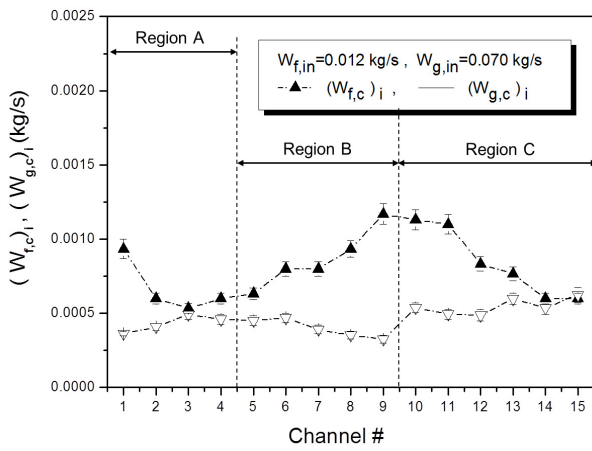
Case B의 경우는 헤더 입구의 8 mm 직경의 유동저항(오리피스)에 의해 환상류의 액막이 중심공기와 섞여 급격히 환상-분무류 형태로 변함을 확인할 수 있고, 그에 의해 헤더 단면의 중심부(Core)와 벽근처(Near wall) 유동의 형태가 달라 Fig. 5(b)에 그것을 각각 나타내었다. 중심부의 경우 환상-분무류의 제트가 형성되고 강한 모멘텀에 의해 헤더 하류로 바로 흘러가 헤더 끝의 재순환을 발생시킨다. 그에 의해 유동저항이 없는 경우보다 상류부 채널에서의 분기가 조금 더 균일해짐을 볼 수 있다(region A). 그리고 헤더 끝에서의 재순환 영역에 의해 헤더 하류에서는 Case A와 같은

유동분배의 경향이 관찰됨을 확인할 수 있었다(region C). 그러나 벽근처의 경우는 여전히 헤더 끝에서 발생하는 재순환에 의한 하류에서 상류로의 역방향 유동(주로 액막의 유동)과 상류에서의 정방향 유동이 만나는 부분이 발생하고, 그에 의해 9번 채널 부분에서의 액체 분배량이 증가함을 알 수 있다(region B). 결과적으로 입구저항이 없는 경우(Case A)와 유동분배 경향은 유사하나 입구부 오리피스에 의해 헤더 상류에서의 액체분기가 지연되었고, 그로 인해 유동분배가 보다 균일해졌다고 판단할 수 있다.

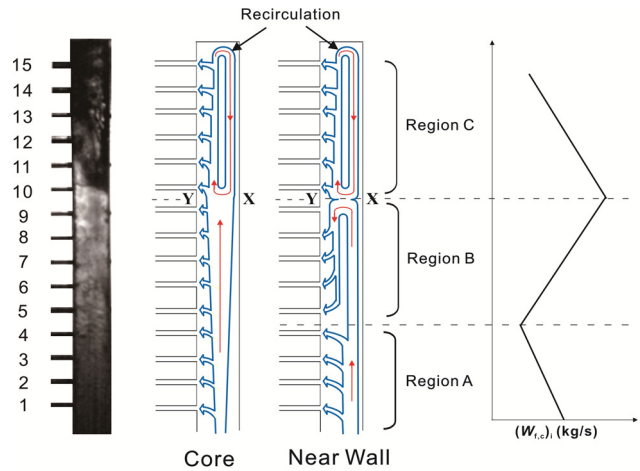
Case C의 경우는 유동저항이 Case B의 경우보다 더욱 큼으로 인해 입구부에서 액적이 발생하여 상류에서부터 액적류 형태로 분배가 발생됨을 확인하였다(Fig. 6(b)). 그에 의해 Case A의 입구부 액막의 분기와는 달리 상류로 빠져나가는 액체의 양이 줄어들며 상대적으로 균일한 유동 분배를 확인할 수 있었다(region A). 그리고 재순환 영역은 관찰은 되었으나 다른 Case에 비해 상대적으로 하류에서 액막의 형태 보다는 액적으로 흐르는 액체의 유동이 많아 그 영향이 미비함을 확인할 수 있었다(region C). 따라서 하류에서 상류로의 역방향 유동은 거의 관찰이 되지 않았으며, 그에 의해 전체적으로 액체분기가 감소하는 경향을 보였다.

따라서 입구부 유동저항이 존재하는 경우 입구 유로의 축소 및 확대에 의한 팽창효과에 의해 발달된 환상류가 급격히 액적류로 변하고, 헤더 끝에서 발생하는 재순환으로 인한 혼합에 의해 유동저항이 없는 경우와 비교할 경우 보다 균일한 유동분배가 이루어지는 것으로 판단할 수 있다.

모든 Case에 대해 입구 조건을 변화시켰을 경우, 유동분배의 경향이 다르게 변화할 것인지를 확인하기 위

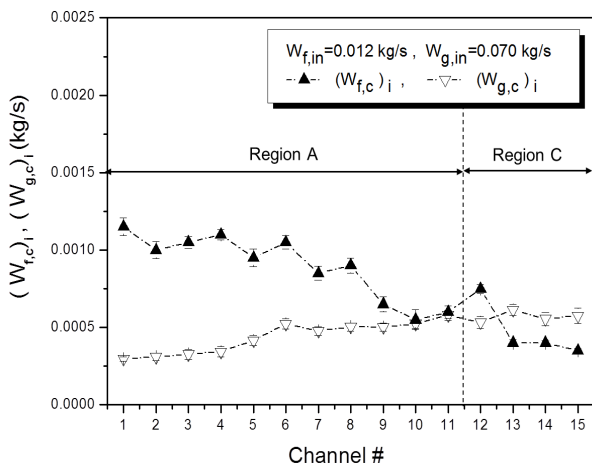


(a) Experimental results

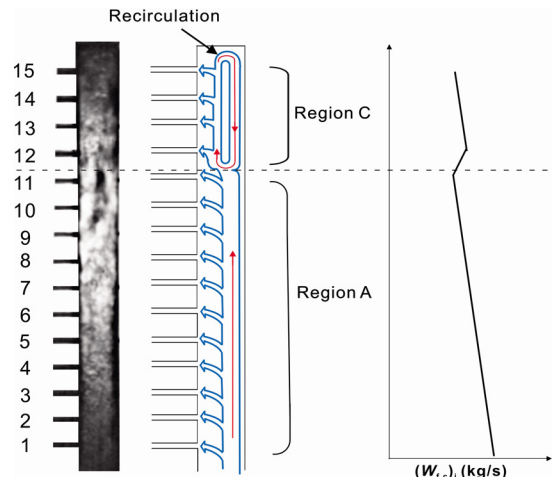


(b) Flow configuration in the header

Fig. 5 Flow distributions of the header with inlet restriction(Case B).



(a) Experimental results



(b) Flow configuration in the header

Fig. 6 Flow distributions of the header with inlet restriction(Case C).

해 입구 유량 조건을 변경시키면서 실험을 수행하였다. 유량 조건의 변경시 액체 유량의 변화가 분배에 미치는 영향이 크다는 기존 연구⁽¹⁰⁾를 반영하여, 본 연구에서도 입구 기체 유량은 그대로 유지하고 액체 유량을 변경시켜 실험을 수행하였고, 그 결과를 각각의 입구부 단면에 따라 Fig. 7~Fig. 9에 나타내었다.

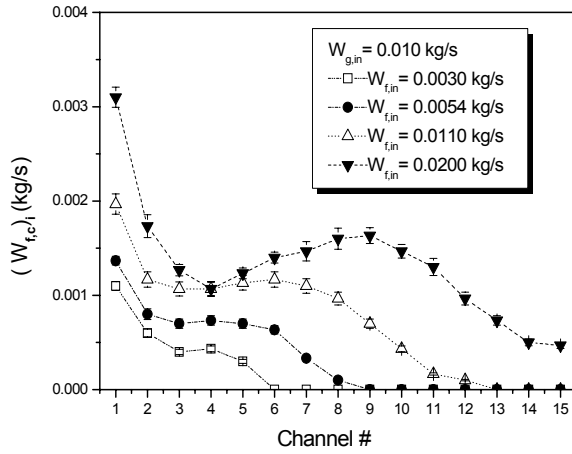
각 Case에 대해 유량조건이 바뀌더라도 전체적인 경향은 거의 바뀌지 않음을 확인할 수 있었다. 그리고 입구부 형상에 관계없이 입구부 액체 유량이 증가할수록 전체적으로 하류 채널로의 액체 분기량이 커짐을 확인할 수 있다(Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9(a)) 그것은 입구부 액체의 유량이 큰 경우, 액체 모멘텀 증가에 의해 하류로 흘러가는 액체의 양이 상대적으로 많아지고, 그

에 의해 하류에서의 액체 분기가 증가하는 것으로 볼 수 있다. 특히 Case B 및 C의 경우에 액체의 유량이 큰 경우(Fig. 8(a)의 $W_{f,in} = 0.012 \text{ kg/s}$ 이상인 경우 및 Fig. 9(a)의 $W_{f,in} = 0.0115 \text{ kg/s}$ 인 경우), 액체 모멘텀 증가에 의해 하류에서의 분기가 용이해짐에 따라 유동 분배가 비교적 균일하게 나타남을 볼 수 있다.

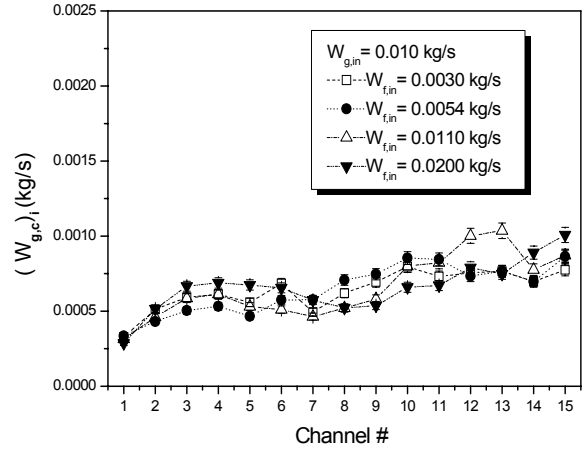
4. 결론

본 논문에서는 입구부 유동저항이 분배에 미치는 영향을 실험적으로 파악하였다.

(1) 입구부 유동저항이 없는 경우, 액체의 분기에 대해 하류로 갈수록 감소, 증가, 감소의 경향이 나타났으며,

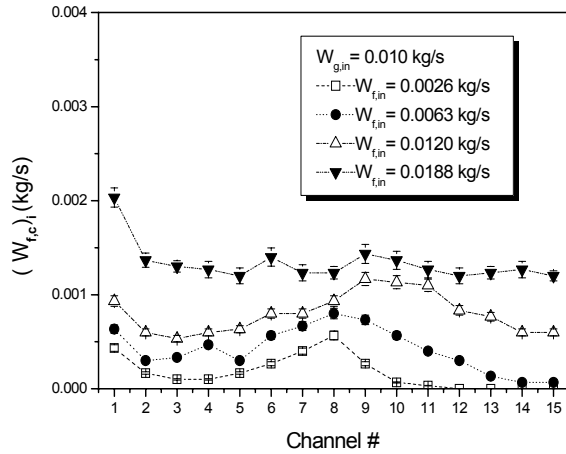


(a) Liquid flow distribution

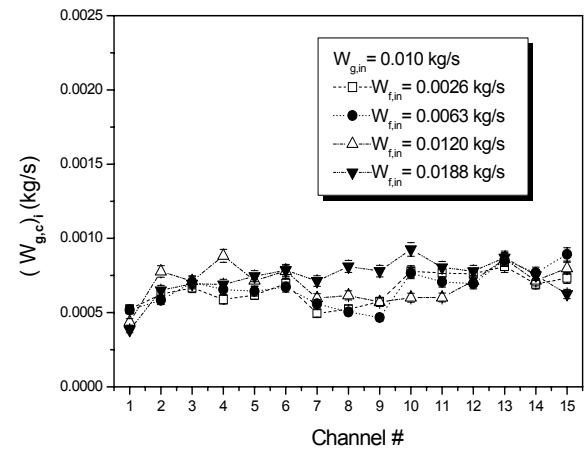


(b) Gas flow distribution

Fig. 7 Effect of inlet liquid flow rate(Case A).

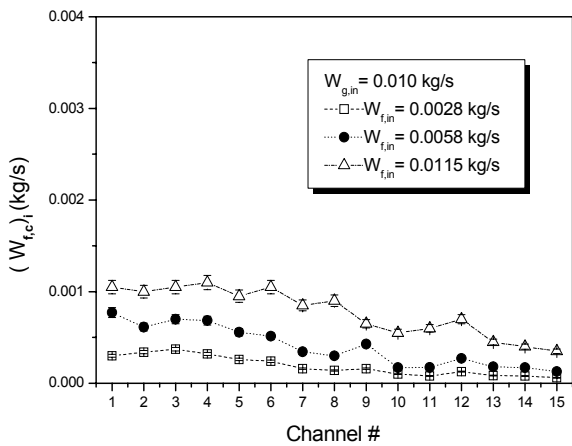


(a) Liquid flow distribution

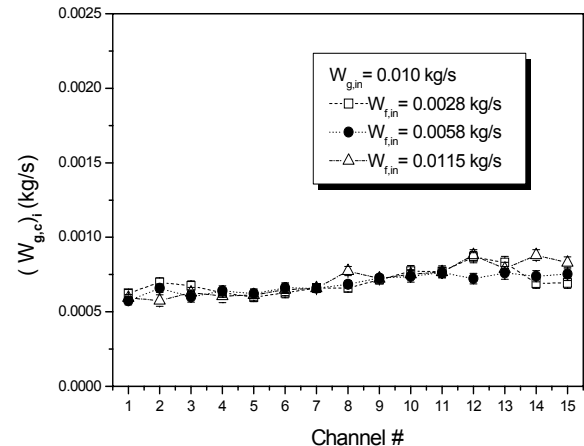


(b) Gas flow distribution

Fig. 8 Effect of inlet liquid flow rate(Case B).



(a) Liquid flow distribution



(b) Gas flow distribution

Fig. 9 Effect of inlet liquid flow rate(Case C).

이는 상류에서 많은 액체가 분기하고, 헤더 끝에서의 재순환 영역에 의해 하류에서 상류로의 역유동이 발생하기 때문이었다. 특히 상류에서의 많은 액체 분기는 유동 분배의 불균일을 크게 하는 가장 큰 원인이었다.

(2) 입구부 유동저항이 있는 경우, 헤더 끝에서의 재순환 영역이 여전히 존재하지만, 입구부 저항에 의해 액적류로의 유동 형태가 변하고 그에 의해 상류에서의 많은 액체 분기를 지연시키며 하류로의 액체 유량을 증가시키는 역할을 수행하였다. 그리고 헤더 끝에서 발생하는 재순환에 의한 혼합에 의해 유동분배의 불균일이 개선됨을 확인할 수 있었다.

(3) 입구부 형상에 관계없이 입구부 액체 유량이 증가할수록 액체의 모멘텀이 증가하여 전체적으로 하류 채널로의 액체 분기량이 커짐을 확인할 수 있었다.

후 기

이 연구결과물은 2011학년도 경남대학교 학술진흥연구비 지원에 의한 것임.

참고문헌

1. Lee, S. Y., 2006, Flow distribution behavior in condensers and evaporators, Proceedings of the 13th Int. Heat Transfer Conference, Sydney, Australia, August.
2. Lee, S. Y. and Lee, J. K., 2005, An Experimental Study on Two-Phase Flow Distribution at Header-Channel Junctions of a Compact Heat Exchanger, Fifth International Conference on Enhanced, Compact and Ultra-Compact Heat Exchangers : Science, Engineering and Technology, British Columbia, Canada, Sept, pp. 11-16.
3. Webb, R. L. and Chung, K., 2004, Two-phase flow distribution in tubes of parallel flow heat exchangers, Heat Transfer Engineering, Vol. 26, pp. 3-18.
4. Hrnjak, P., 2004, Developing Adiabatic Two Phase Flow in Headers-Distribution Issue in Parallel Flow Microchannel Heat Exchangers, Heat Transfer Engineering, Vol. 25, pp. 61-68.
5. Cho, H., Cho, K., Youn, B., Kim, Y.-S., and Kim, J. H., 2004, Two-phase Flow Distribution, Phase Separation and Pressure Drop in Multi-Microchannel Tubes, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 16, No. 9, pp. 828-837.
6. Vist, S. and Pettersen, J., 2004, Two-phase Flow Distribution in Compact Heat Exchanger Manifolds, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 28, pp. 209-215.
7. Ahmad, M., Berthoud, G., and Mercier, P., 2009, General characteristics of two-phase flow distribution in a compact heat exchanger, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 52, pp. 442-450.
8. Winkler, C. M. and Peters, J. E., 2002, Refrigerant Droplet Size Measurements in Conjunction with a Novel Method for Improving Flow Distribution in Evaporators, Aerosol Science and Technology, Vol. 36, pp. 734-741.
9. Rong, X., Kawaji, M., and Burgers, J. G., 1995, Two-phase Header Flow Distribution in a Stacked Plate Heat Exchanger, ASME FED Gas Liquid Flows, Vol. 225, pp. 115-122.
10. Lee, J. K. and Lee, S. Y., 2004, Distribution of two-phase annular flow at header-channel junctions, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 28, pp. 217-222.
11. Lee, J. K., 2010, Optimum Channel Intrusion Depth for Uniform Flow Distribution at Header-Channel Junctions, J. of Mech. Sci. and Tech., Vol. 24, pp. 1011-1017.
12. Bernoux, P., Mercier, P., and Lebouche, M., 2001, Two-phase Flow Distribution in a Compact Heat Exchanger, Proc. of the 3rd Int. Conf. on Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industries, Davos, Switzerland, pp. 347-352.
13. Troniewski, L. and Ulbrich, R., 1984, Two-phase gas liquid flow in rectangular channels, Chem. Eng. Sci., Vol. 39, pp. 751-765.
14. Lee, J. K., 2009, Two-phase flow behavior inside a header connected to multiple parallel channels, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 33, pp. 195-202.