

헤더-채널 분기관의 각도변화가 2상 유동 분배에 미치는 영향에 대한 연구

The Effect of Header and Channel Angle Variation on Two-Phase Flow Distribution at Multiple Junctions

이준경 (Jun Kyoung Lee)[†]

경남대학교 기계공학부

Department of Mechanical Engineering, Kyungnam University, Masan, 51767, Korea

(Received March 9, 2015; revision received August 23 2015; Accepted: September 9, 2015)

Abstract The main objective of this work is to experimentally investigate the effect of angle variation on the distribution of two-phase flow at header-channel junctions. The cross-sections of the header and the channels were fixed at 16 mm × 16 mm and 12 mm × 1.8 mm, respectively. Air and water were used as the test fluids. Four different header-channel positions were tested : Vertical header with Horizontal channels (case VM-HC), Horizontal header with Horizontal channels (case HM-HC), Horizontal header with Vertical Downward channels (case HM-VDC), and Horizontal header with Vertical Upward channels (case HM-VUC). In all cases, liquid flow distribution tended to decrease gradually in the upstream header region. However, in the downstream region, different trends could be seen. The reason for these different tendencies were identified by flow visualization in each case. The standard deviations for the liquid and gas flow distribution in each case were calculated, and the case of VM-HC had the lowest values compared to other cases because of the symmetrically distributed liquid film and strong flow recirculation near the end plate.

Key words Flow distribution(유동분배), Two-phase(2상), Angle variation(각도변화), Header(헤더)

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

기호설명

D : 직경 [m]
 G : 질량유속 [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
 W : 질량유량 [kg/s]
 x : 건도, $W_g/(W_g + W_f)$

첨자

c : 유로
 f : 액체
 g : 기체
 i : 유로 번호
 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 유

량이 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,^(1,2) Webb and Chung,⁽³⁾ Hrnjak,⁽⁴⁾ Dairo et al.⁽⁵⁾ 등은 분야에 대한 전반적인 리뷰 논문을 발표하였다. 그를 통해 유동 분배에는 헤더의 기울기(수직, 수평),⁽⁶⁻⁸⁾ 채널의 기울기(수직, 수평),^(6,7) 헤더의 단면적크기,⁽⁹⁾ 헤더의 입구부 단면형상,^(10,11) 채널 돌출길이,^(7,12,13) 헤더 내 유량 입력 위치 등이 유동분배에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되었다. 그 외에 헤더 크기, 입구 유량, 채널의 수, 길이 및 채널 간격⁽¹³⁾ 등이 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

이러한 기존 연구에서 보듯이 헤더에서의 2상 유동 분배는 헤더의 형상뿐만 아니라 입구 유동 조건 등 많은 인자들의 영향을 받고, 헤더 내 유동 형태에 따른 분배 메커니즘을 명확히 밝혀내지 못했기 때문에 여전히 이에 대한 연구가 필요한 실정이다. 특히 동일한 열교환기라도 설치에 따라 헤더-채널의 각도변화는 다양하

게 나타나며, 동일 헤더-채널 모델에 대한 헤더-채널의 각도변화가 유동분배에 어떠한 영향을 주는 지에 대한 전반적인 연구가 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 다양한 헤더-채널의 위치 변화에 따른 헤더내의 유동 형태를 유동가시화를 통해 살펴보고, 유동 형태와 유동의 분배에 대한 관계를 분석하여 그 경향이 어떻게 다른지를 제시하고자 한다.

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. 2상 유동을 만들어 주기 위해 기체는 동심관 내부를 따라, 액체는 혼합부 아래 네 부분에 유입되어 동심관 외부를 따라 흘러가도록 제작되었다. 또한 헤더-채널이 회전할 수 있도록 회전 기어(rotation gear)를 장착하였다. Fig. 2는 본 실험에서 사용한 헤더의 형상을 나타내고 있다. 단면이 정사각형이며(16 mm×16 mm, $D_h = 16$ mm), 유동의 가시화를 위해 아크릴로 제작하였고, 헤더와 연결된 유로는 소형 사각 유로(12 mm×1.8 mm)이며, 알루미늄으로 만들어졌으며 돌출길이는 없다. 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-채널의 위치변화에 따른 영향을 살펴보기 위해서 Fig. 3과 같이 수직 헤더(Vertical Main)에 수평 채널(Case VM-HC, Fig. 3(a))과 수평 헤더(Horizontal Header) 수평 채널(Case HM-HC, Fig. 3(b)), 수평 헤더와 수직 하향 채널(Case HM-VDC, Fig. 3(c)), 수평 헤더와 수직 상향 채널(Case HM-VUC, Fig. 3(d))에 대해 유량조건의 변경시 액체 유량의 변화가 분배에 미치는 영향이 크다는 기존 연구⁽¹²⁾를 반영하여, 본 연구에서도 입구 기체 유량은 그대로 유지하고 액체 유량을 변경시켜 실험을 수행하였다.

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. 그리고 공기의 유량은 기액분리기의 상부에 설치된 수축노즐(converging nozzle)을 나오는 공기의 속도를 피토투브와 연결된 마노미터(FCO12, Furness Co.)를 이용하여 측정하여 구하였다. 노즐 단면에 대한 기체 속도 변화는 0.7% 미만이었다.

기/액 혼합 유체의 입구 질량 유속은 40~150 kg/m²s

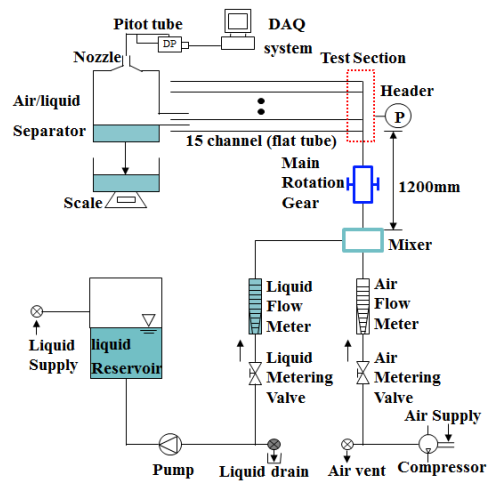


Fig. 1 Experimental setup.

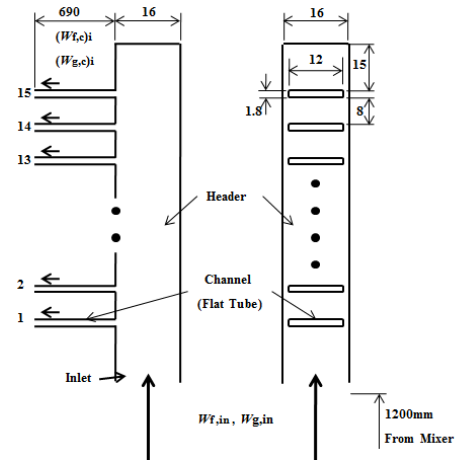


Fig. 2 Test section.

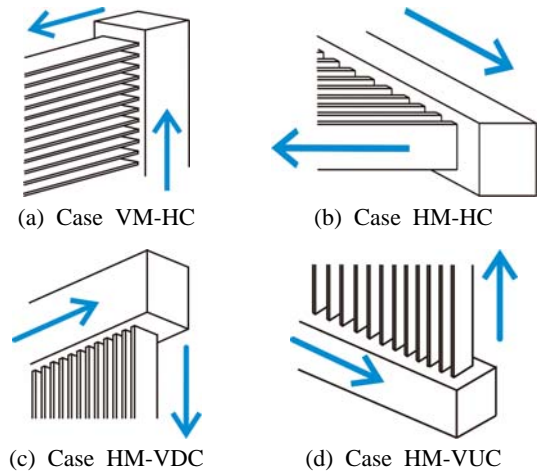


Fig. 3 Operating conditions of header-channel geometry.

이며, 대부분의 2상 유동 불균일 문제가 증발기의 입구 부에서 많이 발생함을 감안하여 건도는 0.1~0.4로 설정하였다. 이러한 범위에서 입구의 유동 양식은 환상류와 처언류를 가지며, 이는 유동가시화 및 Troniewski and Ulbrich⁽¹⁴⁾의 유동양식 선도를 통하여 확인하였다. 측정 불확실도의 경우, 기체와 액체 질량 유량의 경우 $\pm 7\%$, $\pm 5\%$ 의 오차 범위를 가진다.

3. 실험결과

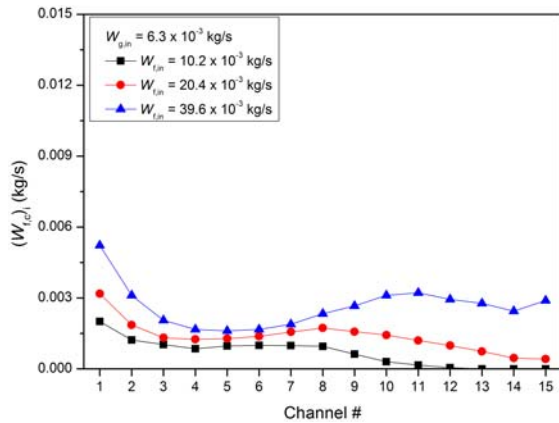
3.1 수직 헤더 수평 채널(Case VM-HC)

헤더-채널의 방향이 수직 헤더, 수평 채널에 대해 동일한 입구 유량조건으로 실험을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 4(a), Fig. 4(b)에 나타내었다. 액체와 기체의 분기 중 각 채널에 따라 액체의 분기에 대한 차이가 크다. 액체 분기의 경향에 대해 살펴보면, 헤더 상류(region A)는 하류로 갈수록 감소하는 경향을 보이며, 중간 부분

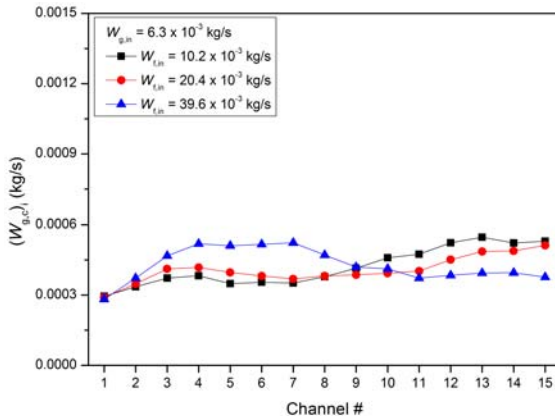
(region B)은 하류로 갈수록 다시 증가하는 반대의 경향을 가진다. 하지만 헤더의 하류(region C) 쪽에서는 다시 액체의 분기가 감소하는 경향을 가진다. 기체 분기의 경우는 액체 분기의 경향과 반대 경향을 나타내었다.

이러한 경향에 대한 원인은 Fig. 4(c)의 유동 가시화를 통해 내부 유동을 살펴봄으로 파악할 수 있었다. 고속카메라(MotionPro Y3, IDT Co.)를 활용하여 유동가시화를 수행 하였고(1,000 frame/sec), 그 결과를 Fig. 4(c)에 나타내었다.

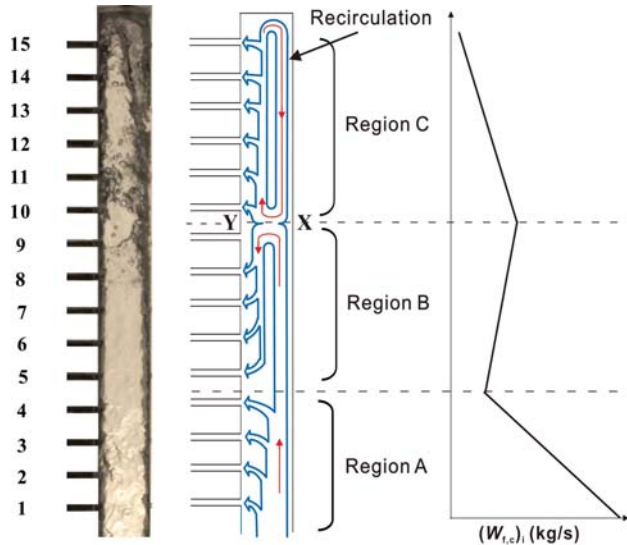
헤더 상류 부분에서는 하류로 갈수록 액체의 분기양이 작아지는 영역이 발생한다(region A). 그러나 하류를 흐르던 액체는 헤더의 끝 부분(End plate)에 부딪히며 재순환이 발생하게 되고, 하류 영역(region C)은 채널과 가까운 부분은 상류영역(region A)과 같이 하류로 갈수록 액체 분기가 작아지게 된다. 그러나 중간영역(region B)에서는 헤더 끝으로 이동하는 액체와 재순환에 의해 액체가 만나는 부분(region B)이 발생하여, 그에 의해 하류로 갈수록 유량이 증가하는 경향을 가진다.



(a) Liquid flow distribution



(b) Gas flow distribution



(c) Flow configuration in the header

Fig. 4 Effect of inlet liquid flow rate(Case VM-HC).

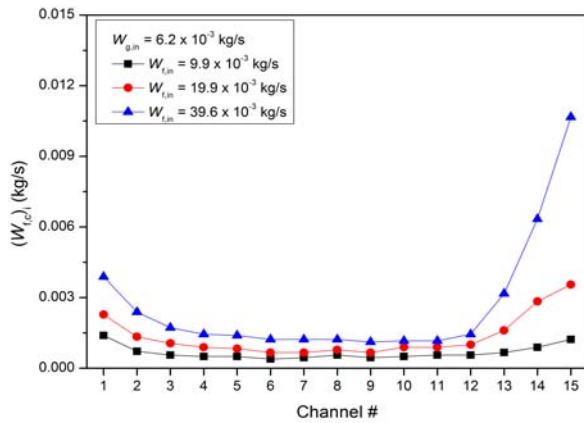
3.2 수평 헤더 수평 채널(Case HM-HC)

헤더-채널의 방향을 수평 헤더, 수평 채널로 변경하여 같은 입구 조건에 대해 실험을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 5(a), Fig. 5(b)에 각각 나타내었다. 액체 유량 분기는 헤더의 상류(region A)에서 하류로 갈수록 감소하는 경향을 보이며, 하류에서 액체 분기가 다시 급증하는 경향(region B)을 보인다. 액체 유량이 증가할수록 이러한 경향이 크게 나타나서 하류에서 분기되는 유량이 증가하며, 기체의 분기는 액체의 분배와 반대 경향이 나타났다. 유동가시화(Fig. 5(c))를 통해 액체의 경우 중력에 영향으로 인해 주로 헤더의 아래면을 따라 하류로 이동함을 확인하였고, 헤더 상류(region A)에서는 액체 분기가 순차적으로 일어나 하류로 갈수록 그 양이 서서히 감소하는 것을 알 수 있었다. 반면에 하류(region B)에서는 액체가 헤더 끝 부근에 누적되고, 그에 의해 많은 양의 액체가 하류 채널을 통해 빠져나감을 확인할 수 있다. 액체 유량이 커질수록 하류

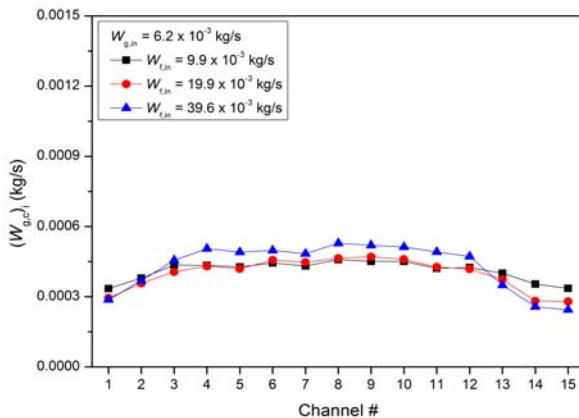
에 누적되는 액체의 양이 많아져 불균일이 커짐을 알 수 있다.

3.3 수평 헤더 수직 하향 채널(Case HM-VDC)

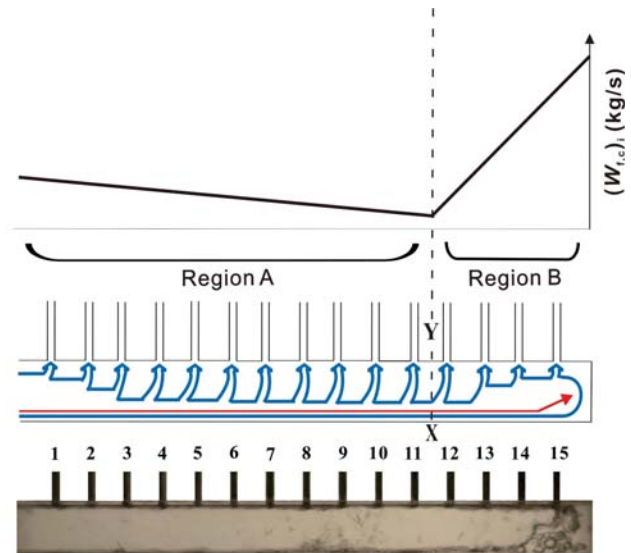
헤더-채널의 방향이 수평 헤더, 수직 하향 채널에 대해 동일한 입구 유량 조건으로 실험을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 6(a), Fig. 6(b)에 나타내었다. 액체의 유량 분배 경향은 헤더의 상류부터 하류까지 계속 감소하며, 입구 액체 유량이 증가할 경우 액체가 분기되는 채널수가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 기체의 유량 분기는 액체와 반대의 경향을 보인다. 유동가시화(Fig. 6(c))를 통해 중력에 의해 헤더 내 액막의 비대칭성(Asymmetry)이 커지게 되고, 헤더 단면에 대해 아래 부분에 액막이 많이 분포하게 된다. 따라서 헤더 아래의 채널을 통해 액체의 분기가 용이하게 되며, 상류에서 하류로 차례대로 분기됨에 따라 지속적으로 액체 분기가 감소됨을 알 수 있다. 헤더입구의 액체 유량이 증가할



(a) Liquid flow distribution

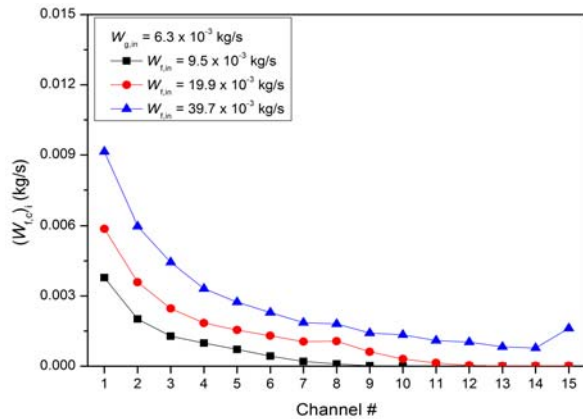


(b) Gas flow distribution

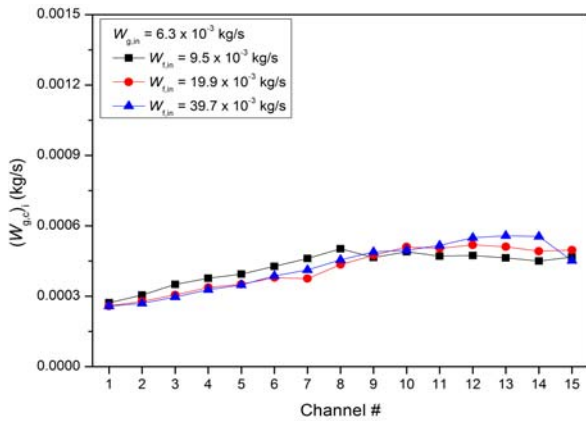


(c) Flow configuration in the header

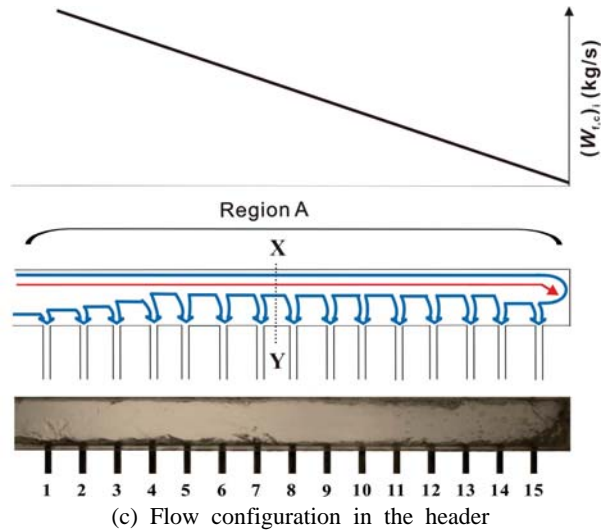
Fig. 5 Effect of inlet liquid flow rate(Case HM-HC).



(a) Liquid flow distribution



(b) Gas flow distribution



(c) Flow configuration in the header

Fig. 6 Effect of inlet liquid flow rate(Case HM-VDC).

경우 액체 모멘텀이 증가하기 때문에 하류로 갈수록 액체 분기가 증가하는 것도 확인할 수 있다.

3.4 수평 헤더 수직 상향 채널(Case HM-VUC)

헤더-채널의 방향이 수평 헤더, 수직 상향 채널에 대해 동일한 입구 유량조건으로 실험을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 7(a), Fig. 7(b)에 나타내었다. 액체의 경우 상류(region A)에서 하류로 갈수록 분기되는 액체 유량이 점점 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그러나 중간(region B)영역에서는 분기되는 액체량이 급증하고, 하류(region C)영역에서는 액체 유량 분기가 일정해진다. 기체의 경우는 액체와 반대의 경향을 보이고 있으며, 입구 액체 유량이 증가할수록 기체가 분기되는 채널이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 유동가시화(Fig. 7(c))를 통해 앞에서 전술하였듯이 액막이 헤더단면에 대해 아래쪽에 분포함으로써 인해 위쪽의 채널을 통한 액체의 분기는 거의 없게 된다. 따라서 분기되지 못한 액체는

하류에 지속적으로 누적되고, 기체는 액체의 누적을 지속시키는 역할을 하게 된다. 따라서 대부분의 액체 분기가 하류에서 발생하게 되고, 액체 유량이 증가하면 액체 분기의 불균일이 심화됨을 알 수 있다.

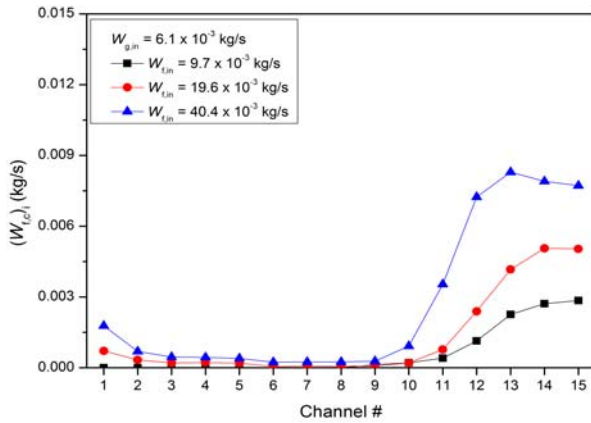
3.5 유동 균일도 비교

헤더-채널 분기관의 각도 변화에 따른 유동의 균일도에 대한 비교를 위해 각 채널 유량 측정값의 표준편차를 아래 식을 사용하여 계산하였다.

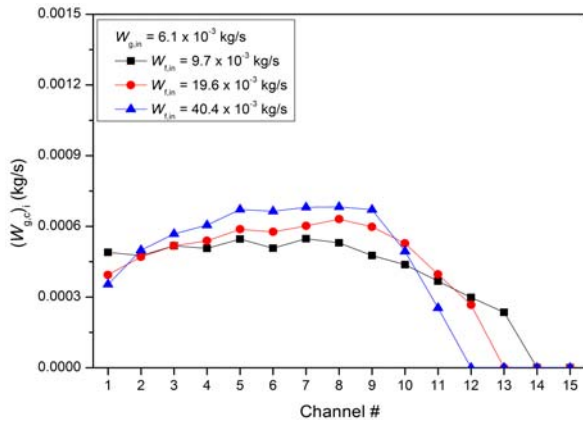
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N ((W_{p,c})_i / W_{p,in} - \overline{(W_{p,c})_i} / W_{p,in})^2}{N}} \quad (1)$$

(p = liquid and gas)

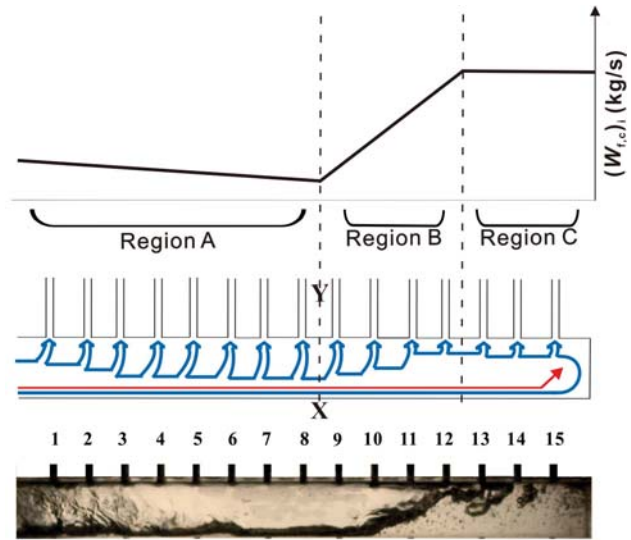
모든 입구 조건(각 형상조건 당 9개)에 대한 액체와 기체의 유동분배 결과의 표준편차를 헤더-채널의 각도 변화에 대하여 Fig. 8(a)와 Fig. 8(b)에 각각 나타내었다.



(a) Liquid flow distribution



(b) Gas flow distribution

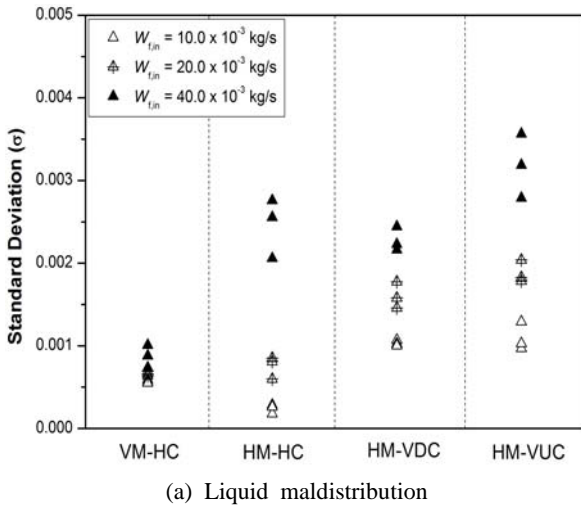


(c) Flow configuration in the header

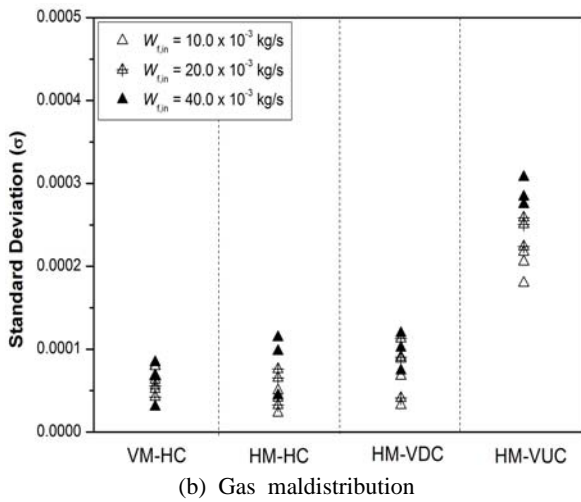
Fig. 7 Effect of inlet liquid flow rate(Case HM-VUC).

Case VM-HC의 경우가 상대적으로 가장 균일한 유동 분배를 보이는 반면, Case HM-VUC가 가장 불균일한 결과를 나타내었다. 그 이유는 헤더를 흐르는 액막의 유동과 헤더 끝에서 발생하는 재순환영역과 큰 관계가 있고, 다음과 같이 정리할 수 있다. 우선, 액막의 유동과 관련하여 헤더 단면에 대한 액막 분포의 개략도를 Fig. 9에 나타내었다. 수직헤더의 경우(Fig. 9(a))는 중력이 헤더 단면에 대해 수직으로 작용하므로 일정 두께의 액막이 대칭(symmetry)형태로 분포하게 되고, 그에 따라 편중 없이 액체의 분기가 이루어짐을 알 수 있었다. 그러나 수평헤더의 경우(Fig. 9(b)), 헤더단면의 방향으로 중력이 작용하게 되고 따라서 헤더 단면의 하부에 액막의 두께가 두꺼워짐이 발생하게 되고(asymmetry) 그에 의해 채널방향에 대한 분기 경향이 크게 달라지게 된다. 즉, 수평 채널의 경우는 액막이 헤더 옆면에 분포해서 중력의 영향을 크게 받지 않아, 비교적 균일한 유동분배를 보이고 있지만, 수직 하향 채널의 경우는 액막이 하부에 집중 분포함에 따라 하류로 갈수록 채널

의 분기가 지속적으로 낮아짐을 알 수 있었다. 또한 수직 상향 채널의 경우는 상부에 액막의 분포가 거의 없으므로 상류 채널에 대해 분기가 거의 이루어지지 않으며, 그에 의해 분기되지 못한 액체가 헤더 끝에 누적됨으로 인해 대부분의 액체가 하류에서 분기가 이루어지게 되며, 기체의 경우는 하류에 누적된 액체로 인해서 상류에서만 분기되어 불균일도가 매우 커지게 된다. 그리고 수직 헤더 끝의 end plate에 의해 발생하는 재순환 영역의 경우에 대해, 액체와 기체의 섞임 효과(mixing effect)가 커지게 되고, 그에 의해 균질유동(Homogeneous flow)과 유사한 형태가 되어 유동분배가 균일해 지는 경향이 있음을 Dairo et al.,⁽⁵⁾ Lee⁽⁶⁾이 보고하였고, 그러한 관점에서 본 실험결과를 살펴보면 수직 헤더의 경우 헤더 끝에서 충돌한 액체가 중력의 영향으로 상류로의 재순환 영역이 크게 생성이 되고 그에 의해 유동 분배가 조금 더 균일해 짐을 확인할 수 있다. 그러나 수평 헤더의 경우는 재순환 영역이 중력의 영향을 받지 않으므로 그 크기가 그리 크지 않으며, 따

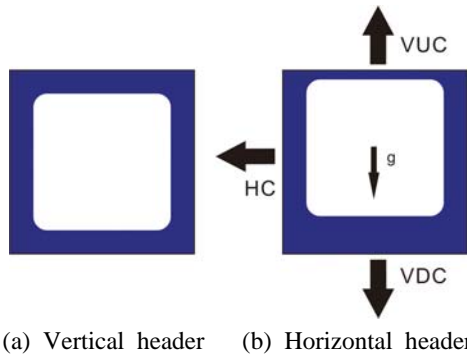


(a) Liquid maldistribution



(b) Gas maldistribution

Fig. 8 Effect of Header and Channel angle variation.



(a) Vertical header (b) Horizontal header

Fig. 9 Effect of angle variation on the liquid film distribution at header inside.

라서 수직헤더에 비해 표준편차가 증가하는 경향이 나타난다고 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 헤더-채널의 위치 변화가 유동분배에 미치는 영향을 실험적으로 파악하였다.

- (1) 헤더와 채널의 방향이 유동분배에 매우 크게 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 중력의 영향으로 인한 헤더 단면에 대한 액막의 분포와 헤더 끝(end plate)에서 발생하는 재순환 영역에 의해 분배의 경향이 결정되었다.
- (2) 유동균일도 파악을 위해 실험결과와 표준편차를 각 경우에 대해 비교 하였으며, 수평헤더 수직채널 (VM-HC)의 경우가 가장 균일한 유동분배 경향을 나타내었다. 그 이유는 헤더 단면에 대한 액막의 두께가 일정하게 분포하고, 헤더 끝에서 발생하는 재순환영역의 크기가 중력의 영향으로 커짐에 의한 것으로 설명할 수 있다.

후 기

본 과제(결과물)는 교육과학기술부의 재원으로 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업의 연구결과입니다.

References

1. Lee, S. Y., 2006, Flow distribution behavior in condensers and evaporators, Proceedings of the 13th Int. Heat Transfer Conference, Sydney, Australia.
2. Lee, J. K., 2005, An Experimental Study on Two-phase Flow Distribution at Header-Channel Junctions, Ph.D. Dissertation, Department of Mechanical Engineering, KAIST.
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. Dario, E. R., Tadrist, L., and Passos, J. C., 2013, Review on two-phase flow distribution in parallel channels with macro and micro hydraulic diameters : Main results, analyses, trends, Applied Thermal Engineering, Vol. 59, pp. 316-335.
6. 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.
7. Kim, N. H. and Han, S. P., 2008, Distribution of air-water annular flow in a header of a parallel flow heat exchanger, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, pp. 977-992.
 8. Cho, H. and Cho, K., 2004, Mass flow rate distribution and phase separation of R-22 in multi-micro-channel tubes under adiabatic condition, *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, Vol. 8, pp. 129-139.
 9. 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.
 10. Marchitto, A., Devia, F., Fossa, M., Guclielmini, G., and Schenone, C., 2008, Experiments on two-phase flow distribution inside parallel channels of compact heat exchangers, *International Journal of Multiphase Flow* Vol. 34, pp. 128-144.
 11. Ahmad, M., Berthoud, G., and Mercier, P., 2009, General characteristics of two-phase flow distribution in a compact heat exchanger, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 442-450.
 12. Lee, J. K. and Lee, S. Y., 2004, Disbution of two-phase annular flow at header-channel junctions, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 28, pp. 217-222.
 13. 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.
 14. Troniewski, L. and Ulbrich, R., 1984, Two-phase gas liquid flow in rectangular channels, *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 39, pp. 751-765.