

알루미늄 평판관 증발기 헤더 내 공기-물 2상류 분지 실험

김 내 현[†], 신 태 룡^{*}, 심 용 섭^{*}

인천대학교 기계공학과, ^{*}인천대학교 대학원

Distribution of Air-Water Two-Phase Flow in a Header of Aluminum Flat Tube Evaporator

Nae-Hyun Kim[†], Tae-Ryong Shin^{*}, Yong-Sup Sim^{*}

Department of Mechanical Engineering, University of Incheon, Incheon 402-749, Korea

^{}Graduate School, University of Incheon, Incheon 402-749, Korea*

(Received August 10, 2005; revision received November 29, 2005)

ABSTRACT: The air and water flow distribution are experimentally studied for a round header - flat tube geometry simulating a parallel flow heat exchanger. The number of branch flat tube is thirty. The effects of tube outlet direction, tube protrusion depth as well as mass flux, and quality are investigated. The flow at the header inlet is identified as annular. For the downward flow configuration, the water flow distribution is significantly affected by the tube protrusion depth. For flush-mounted configuration, most of the water flows through frontal part of the header. As the protrusion depth increases, more water is forced to the rear part of the header. The effect of mass flux or quality is qualitatively the same as that of the protrusion depth. Increase of the mass flux or quality forces the water to rear part of the header. For the upward flow configuration, however, most of the water flows through rear part of the header. The protrusion depth, mass flux, or quality does not significantly alter the flow pattern. Possible explanations are provided based on the flow visualization results. Negligible difference on the water flow distribution was observed between the parallel and the reverse flow configuration.

Key words: Flat tube evaporator(평판관 증발기), Parallel flow heat exchanger(평행류 열교환기), Header(헤더), Two-phase distribution(2상류 분배), Air-water(물-공기)

기 호 설 명

D : 헤더 내경 [mm]
 G : 질량유속 [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]
 ΔP : 압력차 [Pa]
 x : 건도

1. 서 론

알루미늄 평판관 열교환기는 루버핀과 평판관으로 구성된다. 공기는 루버핀 사이를 흐르고 냉매는 수력 직경 1~2mm의 다채널 평판관 내로 흐른다. 이 열교환기는 전열성능이 기존 환-관 열교환기보다 우수하여 자동차 응축기로 널리 사용되고 있고 가정용 공조기의 증발기로도 적극 검토되고 있다.

평판관 열교환기의 냉매측은 헤더에 여러 개의

[†] Corresponding author

Tel.: +82-32-770-8420; fax: +82-32-770-8410

E-mail address: knh0001@incheon.ac.kr

평판관이 병렬로 연결된 구조로 되어 있다. 이는 냉매를 다수의 평판관으로 분지함으로써 관내 압력손실이 과대해지는 것을 막기 위함이다. 이 경우 각각의 평판관에 균일하게 냉매를 분배하는 것이 중요하다. 최근 일리노이대학 공조연구센터(ACRC)의 보고서⁽¹⁾에 따르면 평판관 열교환기를 증발기로 사용할 경우 냉매 분배의 불균일에 따른 성능감소는 30%까지 된다고 한다. 증발기에서는 채널 벽면이 액막으로 덮여 있어야 증발이 제대로 일어나게 되므로 채널마다 액체가 균일하게 분배되는 것이 중요하다.

평판관 증발기는 공기층에 결로에 의해 생성된 응축액의 배출을 용이하게 하기 위하여 평판관은 수직으로(헤더는 수평으로) 배열된다. 이 경우 냉매측 구성에는 네 가지 방법이 있을 수 있다(Fig. 1 참조). 냉매는 상부헤더로 공급되어 수직 평판관을 지나 하부헤더로 배출될 수도 있고(하향류), 반대로 하부헤더로 공급되어 상부헤더로 배출될 수도 있다(상향류). 또한 입출구가 동일한 방향으로 구성될 수도 있고(평행류), 반대 방향으로 구성될 수도 있다(대향류). 헤더 입구의 유동형태, 헤더 내로 돌출된 평판관의 삽입 깊이 또한 채널 간 유량분배에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

그간 헤더 내의 2상류 분지에 관해서는 일부 연구결과가 보고되었다. Watanabe et al.⁽²⁾은 내경 20 mm의 수평 원형 헤더와 4개의 내경 6 mm 수직 원형 분지관에 대하여 R-11을 사용하여 상향류 분지 실험을 수행하였다. 실험은 질량유속 $40 \sim 120 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 건도는 $0 \sim 0.4$ 범위에서 수행되었고, 헤더 입구의 유동형태는 성층류이었다. 그들은 유량분배가 질량유속과 건도에 따라 크게 달라진다고 보고하였다. Tompkins et al.⁽³⁾은 수

평 직사각형 헤더와 15개의 수직 평판관으로 이루어진 시험부에서 물-공기를 사용하여 상향류 분지 실험을 수행하였다. 실험은 질량유속 $50 \sim 400 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 건도 $0 \sim 0.4$ 범위에서 수행되었다. 헤더 입구 유동형태는 낮은 질량유속에서는 성층류, 높은 질량유속에서는 환상류이었다. 그들은 낮은 질량유속(성층류)에서 좀더 균일한 유량분배를 얻을 수 있었다. Vist and Pettersen⁽⁴⁾은 직경이 다른 두 개의 수평 원형 헤더(내경 8 mm와 16 mm)에 내경 4 mm의 수직 원형 분지관이 10개 장착된 시험부에서 R-134a를 사용하여 분지 실험을 수행하였다. 실험은 상향류와 하향류에 대하여 수행되었고 질량유속은 $124 \sim 836 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 건도는 $0 \sim 0.5$ 까지 변화되었다. 헤더 입구에서의 유동은 높은 질량유속을 제외하고는 성층류이었다. 그들은 하향류의 경우 대부분의 액체는 헤더의 앞부분에 있는 분지관으로 흐르고 상향류에서는 이와는 반대로 액체 대부분이 헤더 뒤쪽으로 흐른다고 보고하였다. 액체 유량분포는 건도가 증가할수록 개선되었고 질량유속에는 크게 영향을 받지 않았다. Lee and Lee⁽⁵⁾은 수직 직사각형 헤더($24 \times 24 \text{ mm}$)에 5개의 수평 직사각형 분지관이 설치된 형상에서 물-공기를 사용하여 분지 실험을 수행하였다. 시험부 입구 유동형태는 환상류이었다. 유량분배는 분지관의 삽입 깊이에 따라 크게 영향을 받았는데 삽입 깊이가 증가할수록 헤더의 후방에 있는 분지관으로 흐르는 물유량이 증가하였다. Cho et al.⁽⁶⁾은 원형 헤더와 15개의 평판관으로 구성된 시험부에서 R-22를 사용하여 헤더 방향과 냉매 주입관의 방향이 유량분배에 미치는 영향을 검토하였다. 질량유속은 $60 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 로 고정되고 건도는 $0 \sim 0.3$ 까지 변화되었다. 수직헤더의 경우 대부분의 액체유량은 헤더의 전방으로 흘렀고 냉매주입 방향은 별다른 영향을 미치지 않았다. 하지만, 수평헤더에서는 냉매의 주입방향에 따라 유량분배가 크게 변화하였다. Rong et al.⁽⁷⁾ Bernoux et al.⁽⁸⁾은 판형 열교환기에 대한 냉매 분배 실험을 수행하였다.

상기 문헌조사는 수평헤더의 경우 대부분의 연구가 성층류에서 수행되었음을 보여준다. 헤더 내 유동형태는 질량유속과 건도가 증가할수록 성층류에서 환상류로 바뀐다. 또한 분지관의 수도 10개 이내에서 수행되었다. 평판관 열교환기의 분지관의 수는 용량에 따라 다르지만 수십개가 될

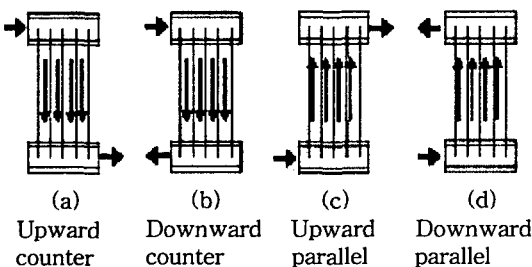


Fig. 1 Four different methods of flow distribution.

수도 있다. 본 연구에서는 현재 사용되고 있는 자동차용 열교환기를 모사하여 내경 17 mm 수평 원형 헤더에 30개의 수력 직경 1.32 mm의 평판관이 수직으로 장착된 시험부에 대하여 물-공기를 사용하여 질량유속은 $50 \sim 200 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 전도는 0.2 ~ 0.6 범위에서 실험을 수행하였다. 이 영역에서 헤더 입구의 유동형태는 환상류로 나타났다. 상기 실험범위에서 유동방향의 영향(상향류와 하향류), 유출입 방향의 영향(평행류와 대향류), 그리고 삽입 깊이($h/D=0.0, 0.25, 0.5$)가 미치는 영향을 검토하였다. 자동차 응축기의 경우 평판관은 대략 헤더의 중심부까지 삽입된 후 브레이징된다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 2에 실험장치의 개략도를 나타내었다. 시험부는 91 cm 간격, 내경 17 mm의 상하부 헤더와 9.8 mm 핏치의 평판관 30개로 구성되었다. 헤더는 가시화를 위하여 투명 PVC를 가공하여 제작하였다. 헤더 하부에는 평판관이 삽입될 수 있도록 알루미늄 블록을 장착하였고 알루미늄 블록과 헤더 사이에는 O-ring을 장착하여 기밀을 유지하였다. 시험부 중간에는 평판관과 6.0 mm 내경의 원관을 연결하기 위한 연결부가 두 곳 설치되었다. Fig. 3에 연결부의 개략도를 나타내었다. 연결

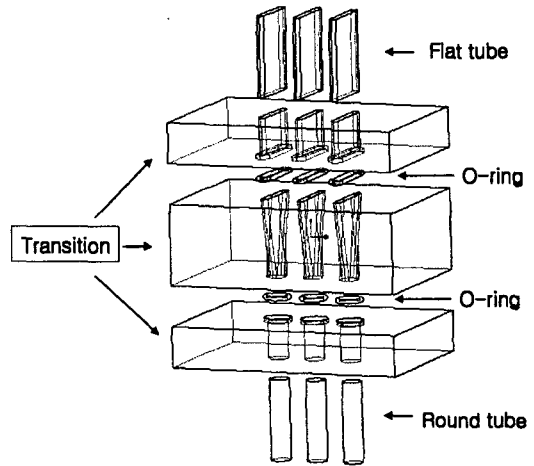


Fig. 3 Schematic drawing of the transition pieces.

부는 알루미늄 블록을 가공하여 제작되었고 O-ring으로 기밀을 유지하였다. 유량이 측정된 물(질량유량계 사용)과 공기(체적식 유량계 사용)는 믹서에서 혼합된 후 시험부에 2상 상태로 공급된다. Fig. 4에 믹서의 개략도를 나타내었다. 믹서는 하부에서 유입되는 공기와 측부에서 유입되는 물을 혼합하여 시험부로 공급한다.

헤더 전방에는 유동이 발달할 수 있도록 길이 1 m의 입구부를 설치하였다. 평판관에 흐르는 유량은 밸브를 조작하여 기액분리기로 흐르게 한

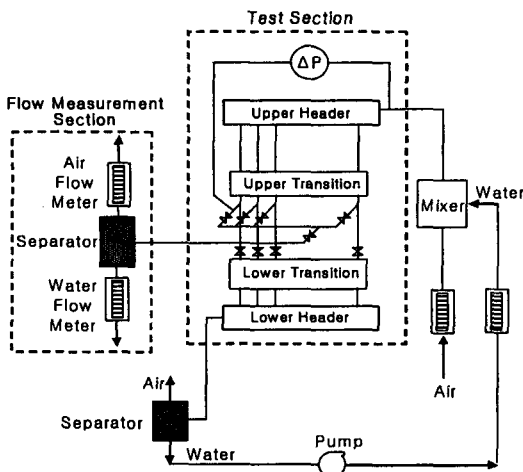


Fig. 2 Schematic drawing of the apparatus.

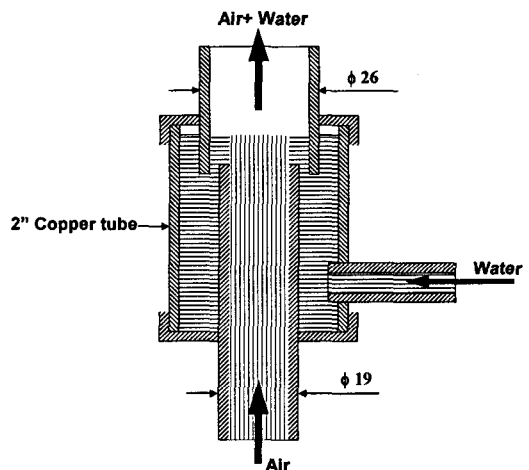


Fig. 4 Schematic drawing of the air-water mixer (Unit: mm).

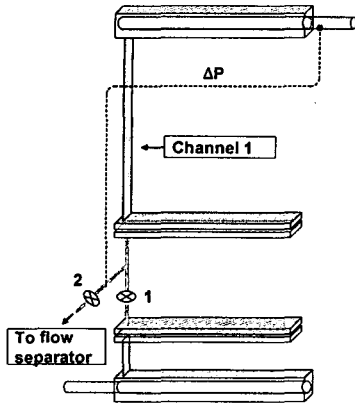


Fig. 5 Schematic drawing illustrating the flow measurement method.

후 공기와 물의 유량을 각각 측정하였다. 기액분리기는 20리터 용량의 플라스틱 용기로 측부로 물-공기 혼합물이 유입되고 상부로는 공기, 하부로는 물이 유출되도록 제작되었다. 공기유량은 체적식 유량계로 측정하였고 물의 유량은 메스실린더로 측정하였다.

유량은 삼십 개의 분지관 중 하나 건너 하나씩 15개의 분지관에서 측정하였다. 유량계측시 유의할 점은 계측 전후의 평판관 내 유동상태가 변해서는 안된다는 것이다. 이를 위하여 헤더 전방과 평판관 하부에 차압계를 설치하여 유량계측 전후에 차압이 일정하게 유지되도록 하였다. Fig. 5에 압력측정 개략도를 나타내었다. 평판관 내 유량계측의 원리는 다음과 같다. 계측하고자 하는 채널을 1번 채널이라고 가정하자. 초기에는 유량계측장치로 가는 밸브를 닫고 모든 유량이 평판관 내로 흐르게 한다. 흐름이 정상상태가 되었을 때 ΔP_1 (시험부 입구와 1번 평판관 출구의 차압)을 측정한다. 다음에 1번 채널 하부의 밸브를 닫고 1번 채널에서 유량계측장치로 가는 밸브를 열어 1번 채널의 유량이 모두 유량계측장치로 가도록 한다. 이때 관로의 변화로 채널 내의 유량이 달라질 수 있으므로 이를 방지하기 위하여 시험부 입구와 1번 평판관 출구의 차압이 이미 측정한 ΔP_1 과 같도록 유량계측장치 전방의 밸브를 조정한다. 이와 같이 하여 측정 전후에 동일한 유동형태를 유지하도록 하였다. 나머지 채널의 유량도 동일한 방법으로 측정하여 채널별 물-공기 유량 분포를 구하였다. 실험 중 차압계의 변동은 측정

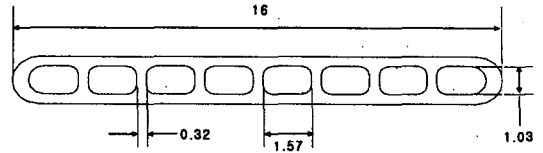


Fig. 6 Cross-sectional view of the flat tube used in this study (Unit: mm).

치의 2% 내에서 유지되었다. 유량계측 채널 이외의 시험부를 통과한 물-공기는 시험부 하부의 기액분리기로 유입되어 물은 재순환되고 공기는 대기 중으로 방출된다.

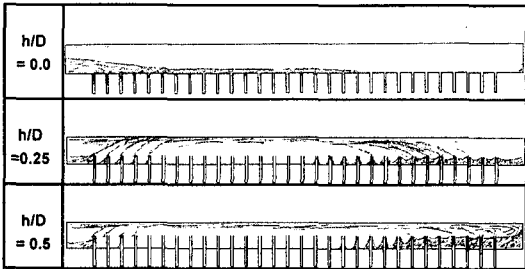
실험에 사용된 질량유량계의 정확도는 $\pm 1.5 \times 10^{-6}$ kg/s이고, 체적식 유량계의 정확도는 $\pm 1\%$ 이내이다. 반복 실험결과 물 유량분포는 $\pm 10\%$ 내에서 공기 유량분포는 $\pm 5\%$ 내에서 재현이 가능하였다. 또한 시험부에 유입된 물과 공기 유량과 각 채널에서 측정된 물과 공기 유량을 비교해 본 결과(유량을 측정하지 않은 채널은 앞과 뒤 채널의 평균값을 사용하였음) 각각 5% 내에서 일치하였다. 본 연구에서 물과 공기 데이터는 각 채널에 흐르는 유량을 평균 유량값(전체유량이 각 채널에 균일하게 분배되었을 때 얻어지는 값)으로 나눈 '유량비'(water flow ratio와 air flow ratio)로 나타내었다. Fig. 6에 본 실험에 사용된 평판관의 단면을 나타내었다. 수력 직경은 1.32 mm이고 유동 단면적은 12.24 mm^2 이다.

3. 실험결과 및 고찰

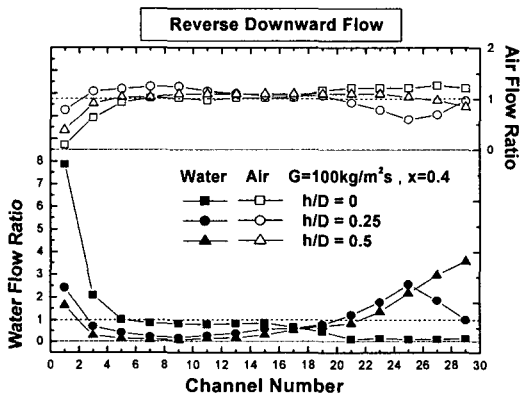
3.1 하향류

3.1.1 삽입 깊이의 영향

하부분지 유동의 대표적 유동형태를 Fig. 7에 나타내었다. 평판관이 헤더 내로 돌출되지 않은 경우($h/D=0$), 대부분의 물은 헤더 전방부 채널로 흐름을 알 수 있다. 질량유속 $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 건도 $x=0.4$ 에서 취득한 데이터를 보면 첫번째 채널의 물 유량비는 7.9이고 급격히 감소하여 5번째 채널에 이르러 대략 1이 된다. 또한 21번째 채널부터는 거의 물이 공급되지 않음을 알 수 있다. 질량유속과 건도에 따라 유량비가 다소 달라지기는 하지만 이러한 경향은 동일하였다. 공기 분배는 물 분배와 반대의 경향을 보인다. 즉, 물



(a) Typical flow pattern in a header with downward configuration



(b) Corresponding water and air distribution

Fig. 7 Typical flow pattern in a upper header with downward flow configuration and the corresponding water and air distribution.

유량이 많은 곳은 공기 유량이 적고, 물 유량이 적은 곳은 공기 유량이 많다. 채널을 흐르는 물과 공기의 양은 채널 입출구 압력차에 의해 결정되는데 채널 간 압력차의 변화가 그다지 크지 않아 물 유량과 공기 유량이 반대의 경향을 보이는 것으로 판단된다. 첫번째 채널에는 거의 공기가 흐르지 않다가 5번째 채널에서 유량비가 대략 1이 된다. 21번째 채널부터는 채널 내 공기 유량이 다소 증가함을 보인다. 또한 공기 분배는 물 분배에 비해 훨씬 균일함을 알 수 있다.

평판관이 헤더 내로 돌출하면 유동형태가 크게 바뀐다. 스캐치에 나타나 있듯이 유입되는 물의 일부는 첫번째 돌출부에 부딪혀 일부는 관 내로 흡입되고 나머지는 관 상부에서 박리되어 헤더 하부에서 재부착된다. 첫번째 돌출부를 우회한 물과 헤더 상부로부터 공급된 물은 두번째 돌출부

에 부딪혀 일부는 흡입되고 나머지는 관 상부에서 박리되어 헤더 하부로 이송된다. 이 과정은 물이 더 이상 없을 때까지 계속되는데 재부착 길이는 삽입 깊이, 질량유속, 건도에 따라 달라진다. 스캐치에 나타나 있듯이 평판관 삽입 깊이가 깊어질수록 재부착 길이는 길어진다. 물 유량 측정 데이터도 삽입 깊이의 영향을 명확히 보여준다. 헤더의 1/4 깊이까지 평판관이 삽입된 경우($h/D = 0.25$), 첫번째 채널의 물 유량비는 2.5이고 9번째 채널까지 감소하다가 25번째 채널에서 최대 2.7을 나타내고 이후로 다시 감소한다. 평판관이 헤더 중앙까지 삽입된 경우($h/D = 0.5$), 첫번째 채널의 물 유량비는 1.4이고 5번째 채널에서 최소를 보이다 이후로 계속 증가하여 마지막 채널에서 최대인 3.0을 나타낸다. Fig. 7에 그려진 $h/D = 0.5$ 의 유동 스캐치를 보면 박리된 유선의 재부착 길이가 헤더 길이보다 큰 경우 박리된 유선은 헤더 반대쪽 벽에 부딪히고 재순환하여 후방으로부터 물이 공급됨을 알 수 있다. 공기 분배는 물 분배와는 반대의 경향을 보인다.

3.1.2 입출구 방향의 영향

평판관 열교환기에서 출구는 입구와 같은 방향으로 설치될 수도 있고(평행류), 또는 반대 방향에 설치될 수도 있다(대향류). Fig. 1에 평행류와 대향류 설치예를 나타내었다. Fig. 8에는 $h/D = 0.5$ 인 경우 평행류와 대향류에서 물과 공기의 분배를 보여준다. 물 분배의 경우는 거의 일치함을 알 수 있다. 하지만 공기 분배는 다른 경향을 보인다. 평행류에서는 공기유량이 하류방향으로 다소 증가하지만(또는 거의 일정하지만) 대향류의 경우는 하류방향으로 감소하는 경향을 보인다. 이는 Bajura and Jones⁽⁹⁾가 지적했듯이 채널 간 압력차의 경향이 대향류와 평행류에서 반대이기 때문이다. 2상류에서 헤더 내의 압력손실은 마찰과 가속손실의 합으로 나타난다. 상부헤더에서 유동은 분지손실로 인하여 감속하고 이로 인해 헤더 내 압력은 상승한다. 하부헤더에서는 유동방향으로 유량이 증가하고 마찰력과 가속력이 동일한 방향으로 작용한다. 따라서 대향류에서는 채널 간 압력차가 하류로 갈수록 감소하는 반면, 평행류에서는 이와 반대로 증가하게 된다. Bajura and Jones⁽⁹⁾는 단상류의 경우 대향류에서보다 균일한 유량분배를 얻을 수 있음을 보여주었다. 하지만

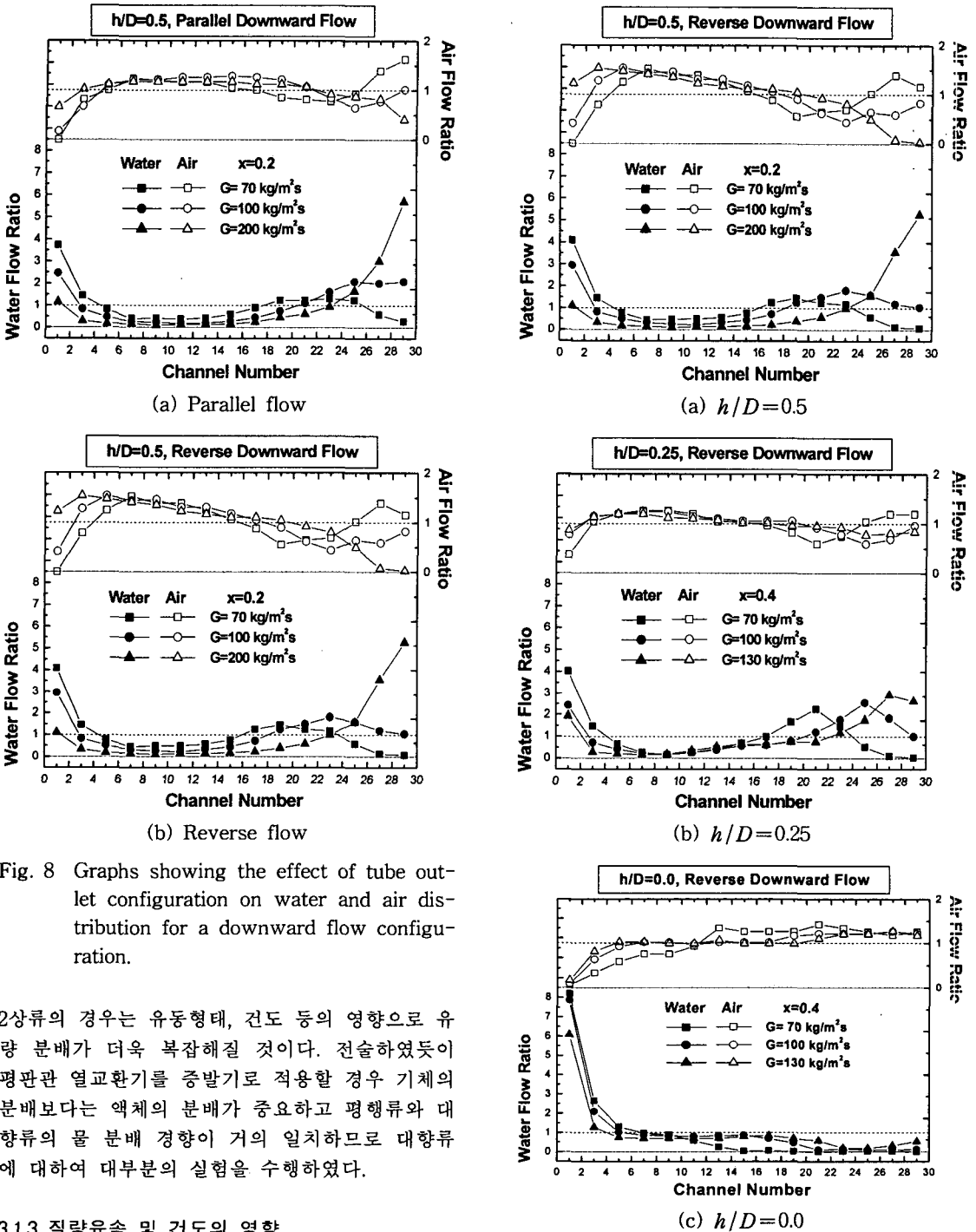


Fig. 8 Graphs showing the effect of tube outlet configuration on water and air distribution for a downward flow configuration.

2상류의 경우는 유동형태, 건도 등의 영향으로 유량 분배가 더욱 복잡해질 것이다. 전술하였듯이 평판관 열교환기를 증발기로 적용할 경우 기체의 분배보다는 액체의 분배가 중요하고 평행류와 대향류의 물 분배 경향이 거의 일치하므로 대향류에 대하여 대부분의 실험을 수행하였다.

3.1.3 질량유속 및 건도의 영향

Fig. 9는 삽입깊이가 다른 세 형상에서 질량유속의 영향을 보여준다. 모든 삽입 깊이에서 질량유속이 증가할수록 헤더 후방으로 물이 이동함을

Fig. 9 Effect of mass flux on air and water distribution in the header of downward configuration.

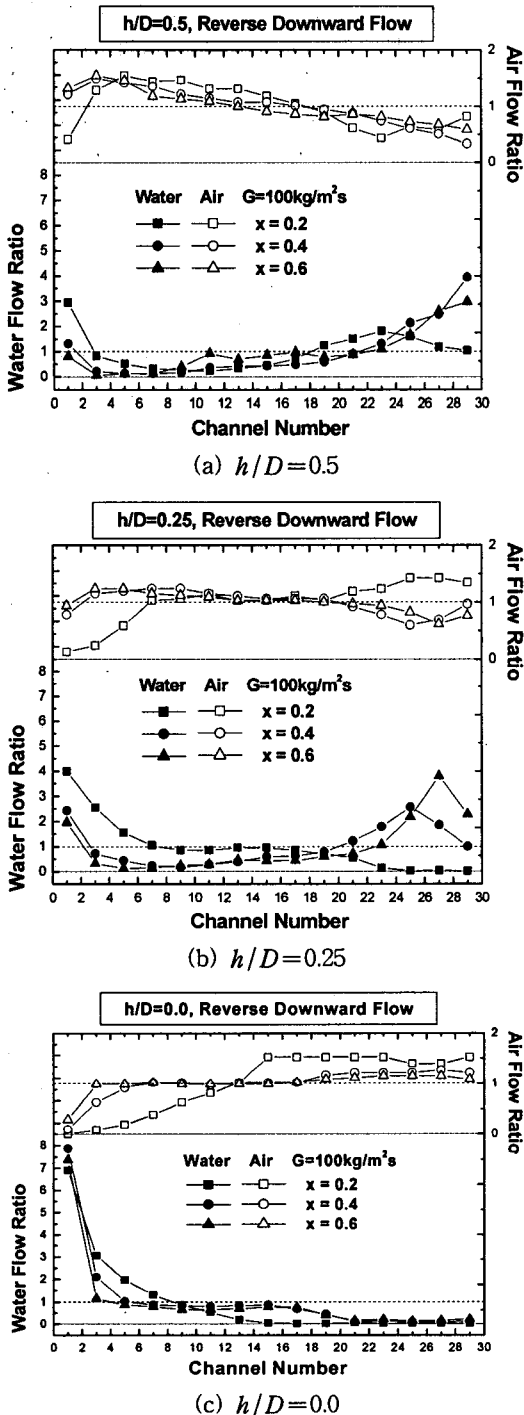


Fig. 10 Effect of quality on air and water distribution in the header of downward configuration.

알 수 있다. 예를 들어 $h/D=0.5$, $G=70 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $x=0.2$ 인 경우 첫번째 채널의 물 유량은 4.1이고 5번째 채널에서 0.5가 되었다가 19번째 채널에서 피크값 1.5를 나타낸다. 질량유량이 $100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 로 증가하면 첫번째 채널의 물 유량비는 3.0으로 줄어들고 최대 유량은 23번째 채널에서 2.0이 된다. 질량유량이 $200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 로 증가하면 첫번째 채널의 물 유량비는 1.1이 되고 최대값은 마지막 채널에서 5.2로 된다. 이 경향은 Fig. 7의 삽입 깊이의 변화에 따른 경향과 유사하다. 즉, 질량유속이 증가할수록 유체 운동량이 증가하여 돌출부에서 박리된 유선의 재부착 길이가 증가하는 것으로 판단된다. 공기 분배는 물 분배와 반대의 경향을 보인다. 삽입 깊이 $h/D=0.25$ 의 경우도 동일하게 설명할 수 있을 것이다. 평판관이 돌출되지 않은 경우 ($h/D=0.0$), 질량유속 $G=70 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 건도 $x=0.4$ 에서 첫번째 채널의 물 유량비는 8.2이다. 이 값은 현저히 감소하여 7번째 채널에서는 대략 1이 되고 점차로 감소하여 15번째 채널에서는 0이 된다. 질량유속이 $100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 로 증가하면 물 유량비는 다소 감소하여 첫번째 채널에서 7.9가 되고 21번째 채널부터 물이 흐르지 않는다. 질량유속 $130 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 에서는 23번째 채널에서 물 유량비가 최소가 되고 그 이후로는 다소 증가한다. 이는 물 일부가 헤더의 후방 벽에 충돌하고 후방으로부터 채널로 공급되기 때문이다. 전반적으로 질량유속의 영향은 평판관이 돌출된 경우보다 약한데 이는 평판관이 돌출되지 않은 경우에는 유동 박리나 재부착 현상은 없고 단지 전단력에 의해 액체가 이동되기 때문으로 판단된다.

Fig. 10은 건도의 영향을 보여준다. 이 그래프는 Fig. 9와 상당히 유사하다. 따라서 건도의 영향은 질량유속의 영향과 유사하다고 판단된다. 즉, 건도가 증가할수록 유동의 운동량이 증가하여 돌출부로부터 박리된 유선의 길이가 길어지고 물 유량비의 최대치가 하류로 이동한다. 또한 돌출부가 없는 경우는 건도의 영향이 그다지 크지 않음을 알 수 있다.

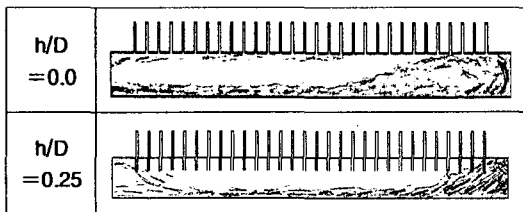
3.2 상향류

3.2.1 삽입 깊이의 영향

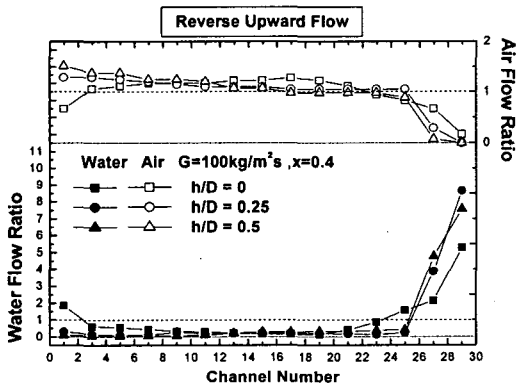
대표적인 유동 형태를 데이터와 함께 Fig. 11에 나타내었다. 모든 경우 대부분의 물은 헤더의 후

방으로 흐름을 보여준다. 평판관이 돌출되지 않은 경우($h/D=0.0$) 물 일부가 헤더의 전방으로 흐르나 대부분의 물은 헤더 뒤쪽으로 이동하여 후방으로부터 채널을 채워 온다. 질량유속 $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $x=0.4$ 의 데이터는 첫번째 채널에서 물 유량비가 1.8이고 점차로 감소하여 20번째 채널에서 0이 되고 그 이후로는 급격히 증가하여 마지막 채널에서 5.3이 됨을 보여준다. 이러한 유동 형태는 질량유속이나 건도가 아주 낮지 않은 한 ($G>100 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $x>0.4$) 동일하였다. 공기 분포는 물 분포와 반대의 경향을 보인다.

헤더 내로 평판관이 삽입되면 유동 형태가 다소 바뀐다. 스킵치에 나타나 있듯이 유입되는 물의 일부는 첫번째 삽입 평판관에 부딪히고 상부에서 박리하여 헤더 하부에 부착한다. 박리된 물과 헤더 하부로 유입된 물은 헤더 뒤쪽으로 이동되어 후방으로부터 채널을 채워 온다. 질량유속 $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 건도 0.4의 데이터는 26번째 채



(a) Typical flow pattern in a header with upward configuration



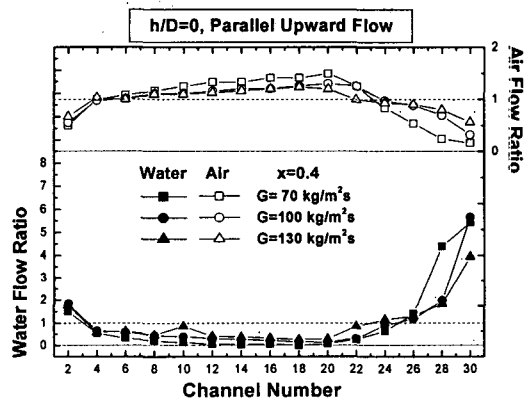
(b) Corresponding water and air distribution

Fig. 11 Typical flow pattern in a lower header with upward flow configuration and the corresponding water and air distribution.

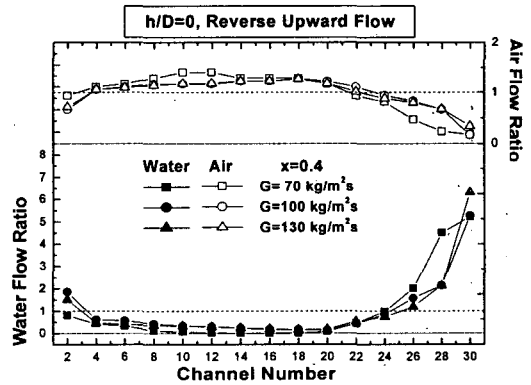
널까지 물이 공급되지 않다가 그 이후로 물 유량비가 급격히 증가함을 보여준다. 삽입 깊이는 유동 형태에 그다지 영향을 미치지 않는다. 상부 분지의 경우 평판관에서 박리된 물이 헤더의 하부에 부착되고 이 경우 삽입 깊이는 크게 영향을 미치지 않으리라 판단된다.

3.2.2 입출구 방향의 영향

Fig. 12에 $h/D=0.0$ 인 경우 평행류와 대향류의 물 및 공기 분포를 나타내었다. 물 분배는 거의 차이가 없음을 보여준다. 공기 분포도 거의 유사하다. 하부 분지($h/D=0.5$)의 경우는 대향류와 평행류에 있어서 공기 분포가 다소 달랐고 그 이유를 Bajura and Jones⁽⁹⁾의 해석으로 설명하였



(a) Parallel flow



(b) Reverse flow

Fig. 12 Graphs showing the effect of tube outlet configuration on water and air distribution for an upward flow configuration.

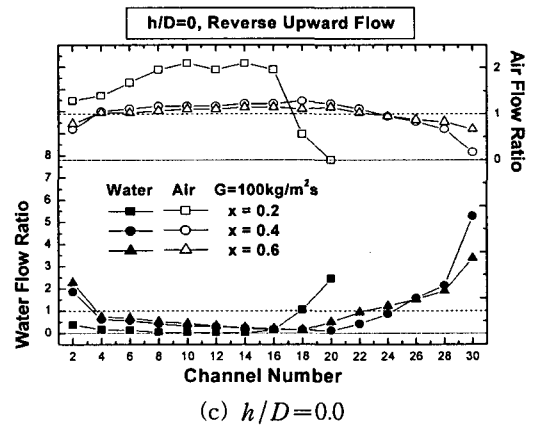
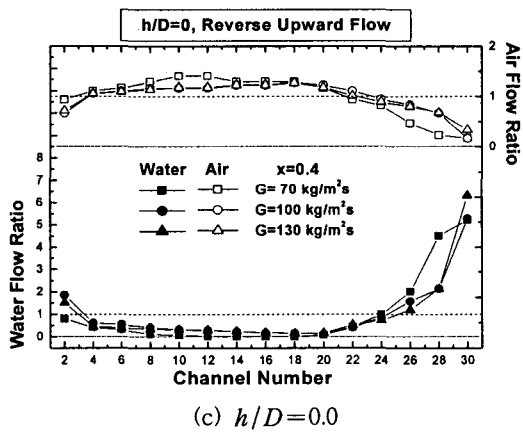
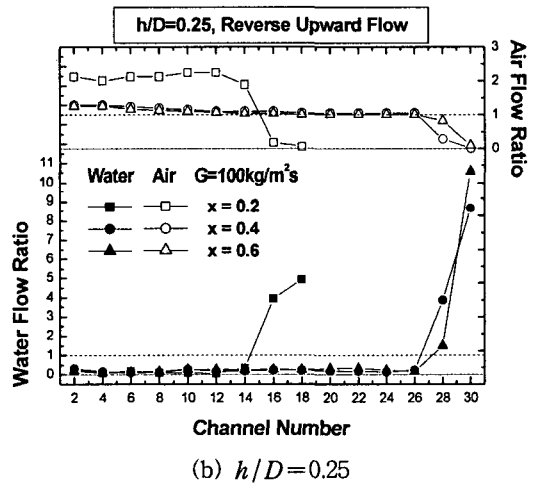
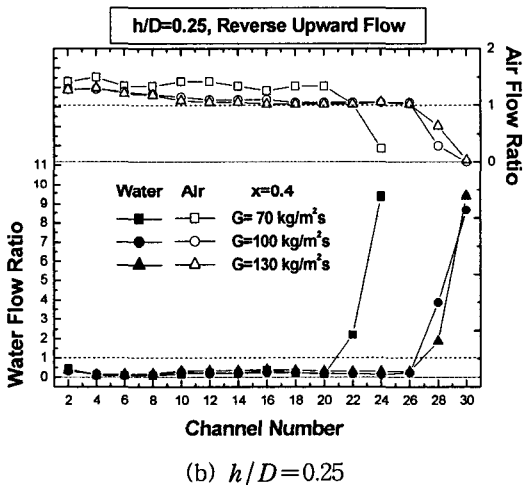
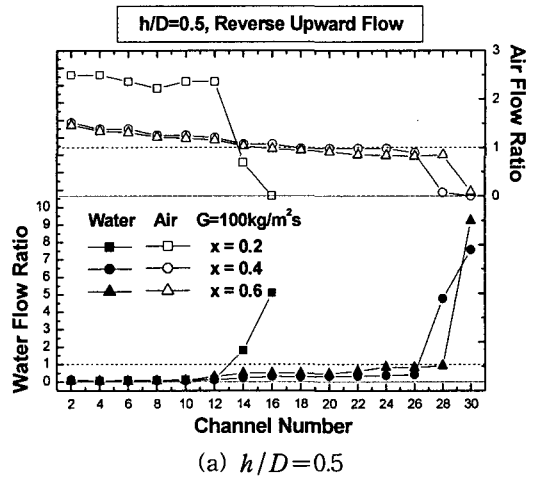
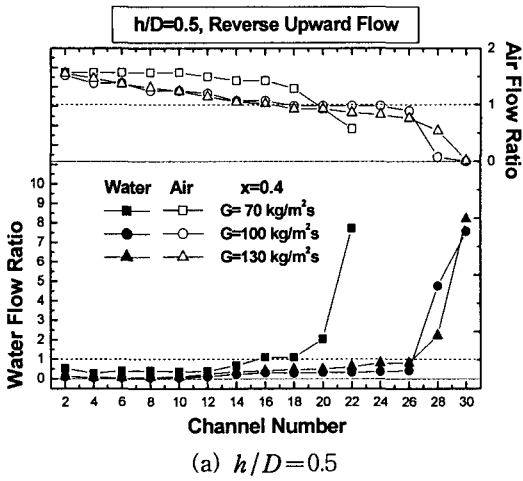


Fig. 13 Effect of mass flux on air and water distribution in the header of upward configuration.

Fig. 14 Effect of quality on air and water distribution in the header of upward configuration.

다. Bajura and Jones의 해석은 단상류에 적용이 가능하고 2상류의 경우는 유동 양식, 건도 등이 부가적으로 영향을 미칠 것이다. 상부분지의 경우도 하부분지와 마찬가지로 대향류와 평행류의 물 분포의 차이가 없어서 대부분의 실험을 대향류에 대하여 수행하였다.

3.2.3 질량유속과 건도의 영향

Fig. 13에 질량유속의 영향을 나타내었다. 모든 삽입 깊이에서 $G \geq 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 이면 질량유속의 영향은 무시할 만하다(질량유속이 높아지면 헤더 후방에서 물 유량비가 다소 증가하지만). 그러나 질량유속 $70 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 에서는 상부 헤더의 후방에 정체 영역이 형성되어 물이나 공기의 흐름이 없었다. 또한 최대 물 유량비는 정체 영역 전방의 채널에서 나타났다. Bajura and Jones⁽⁹⁾에 의하면 대향류의 경우 마지막 채널에서 채널 전후 압력차가 최소가 된다. 만일 채널 압력차가 물 유동에 필요한 수두보다 적다면 유동은 형성되지 않을 것이다. 질량유속이 낮은 경우 헤더 후방 채널에서 압력차가 유동에 필요한 값보다 작아 유동이 형성되지 않은 것으로 판단된다. 질량유속이 증가하면 정체영역은 사라졌다. Fig. 13의 (c)는 $h/D=0.0$ 에서는 정체 영역이 없음을 보여준다.

Fig. 14에는 건도의 영향을 나타내었다. 이 그림은 Fig. 13과 매우 유사하므로 질량유속의 영향에 적용된 논의가 건도에도 적용될 수 있을 것이다. 높은 건도($x \geq 0.4$)에서는 건도의 영향이 거의 없음을 보여준다(건도가 높아지면 채널 후방에서 다소 물 유량비가 커지지만). 낮은 건도($x=0.2$)에서는 상부 헤더의 후방에 정체 영역이 형성되거나 건도가 증가하면 이 영역은 없어진다.

3.3 여타 인자의 영향

본 연구에서는 30개의 평판관으로 이루어진 수평 헤더에서 유동방향, 입출구방향, 평판관 삽입 깊이가 유량 분배에 미치는 영향을 검토하였다. 이 외에도 평판관의 개수, 평판관 핏치, 헤더 관경 등이 유량 분배에 영향을 미치리라 판단된다. 이 중 평판관 핏치가 유량 분배에 미치는 영향에 대해서는 아직 알려진 바가 없으나 공기층 루버 흰 높이의 변화 폭 내에서 그 영향은 그다지 크지 않으리라 예상된다. 평판관의 개수가 미치는

영향은 개수가 줄어들면 유량 분배는 개선될 것이다(예를 들면 한 개인 경우는 분배 문제가 없음). 헤더 관경의 경우는 관경이 크게 되면 유속이 줄어들어 헤더 내 유동 형태가 환상류에서 성층류로 변화하리라 예상된다. Tompkins et al.⁽³⁾은 성층류에서보다 균일한 유량 분배를 얻을 수 있었다. 하지만 이는 헤더 내 돌출부가 없는 경우이고 돌출부가 있는 경우는 경향이 다를 수 있으리라 예상된다. 평판관의 개수, 헤더 직경 등이 유량분배에 미치는 영향에 대해서는 계속해서 연구해 나갈 예정이다.

4. 결 론

본 연구에서는 원형 헤더와 30개의 평판관으로 이루어진 시험부에서 물-공기를 사용하여 유동방향, 입출구방향, 평판관 삽입 깊이, 질량유속, 건도 등이 유량 분배에 미치는 영향을 검토하였다. 실험범위에서 헤더 입구 유동 형태는 환상류이었다.

하향류의 경우 물 분배는 평판관 삽입 깊이에 따라 크게 영향을 받는다. 평판관 돌출이 없는 경우 대부분의 물은 헤더 전방으로 흐른다. 삽입 깊이가 증가하면 물 유동은 헤더 후방으로 이동하는데 유입된 물은 돌출부에 충돌한 후 헤더 후방에서 재부착한다. 재부착 길이는 삽입 깊이가 증가할수록 증가한다. 질량유속과 건도도 삽입 깊이와 유사한 경향을 유발한다. 즉, 질량유속과 건도가 증가할수록 물은 헤더 후방으로 이동한다.

상향류의 경우 대부분의 물은 헤더 후방으로 흐른다. 하향류와 달리 삽입 깊이, 질량유속, 건도는 유량 분배에 큰 영향을 미치지 않는다. 이는 상향류에서는 평판관 상부로부터 박리된 유선이 헤더의 하부에 재부착하고, 따라서 재부착 길이의 변화가 유동 분배에 별다른 영향을 미치지 않기 때문으로 판단된다. 상향류, 하향류 모두에서 열교환기 출구 위치(평행류와 대향류)가 물 분배에 미치는 영향은 미미하였다.

후 기

상기 연구는 한국 과학재단 지역대학 우수과학자 육성지원 연구(R05-2003-000-10170)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Bullard, C. W., 2002, Design tradeoffs in micro-channel heat exchangers, ACRC Report #124.
2. Watanabe, M., Katsuda, M. and Nagata, K., 1995, Two-phase flow distribution in multi-pass tube modeling serpentine type evaporator, ASME/JSME Thermal Engineering Conf., Vol. 2, pp. 35-42.
3. Tompkins, D. M., Yoo, T., Hrnjak, P., Newell, T. and Cho, K., 2002, Flow distribution and pressure drop in micro-channel manifolds, 9th Int. Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue, R6-4.
4. Vist, S. and Pettersen, J., 2004, Two-phase flow distribution in compact heat exchanger manifolds, Exp. Thermal Fluid Sci., Vol. 28, pp. 209-215.
5. Lee, J. K. and Lee, S. Y., 2004, Distribution of two-phase annular flow at header-channel junctions, Exp. Thermal Fluid Sci., Vol. 28, pp. 217-222.
6. Cho, H., Cho, K. and Kim, Y., 2003, Mass flow rate distribution and phase separation of R-22 in multi-microchannel tubes under adiabatic condition, 1st Int. Conf. Microchannels and Minichannels, pp. 527-533.
7. Rong, X., Kawaji, M. and Burgers, J. G., 1995, Two-phase header flow distribution in a stacked plate heat exchanger, FED-Vol. 225, Gas Liquid Flows, pp. 115-122.
8. Bernoux, P., Mercier, P. and Lebouche, M., 2001, Two-phase flow distribution in a compact heat exchanger, Proc. 3rd Int. Conf. Compact Heat Exchangers, pp. 347-352.
9. Bajura, R. A. and Jones, E. H., 1976, Flow distribution in manifolds, J. Fluids Eng., Vol. 98, pp. 654-666.