

평판관 열교환기 내 공기-물 2상류 분지

김 내 현[†], 박 태 균^{*}, 한 성 필^{*}, 신 태 룡^{*}

인천대학교 기계공학과, ^{*}인천대학교 대학원

Distribution of Air-Water Two-Phase Flow in a Flat Tube Heat Exchanger

Nae-Hyun Kim[†], Tae-Gyun Park^{*}, Sung-Pil Han^{*}, Tae-Ryong Shin^{*}

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

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

(Received May 15, 2005; revision received July 10, 2006)

ABSTRACT: The air and water flow distribution are experimentally studied for a heat exchanger composed of round headers and 10 flat tubes. The effects of tube protrusion depth as well as mass flux, and quality are investigated, and the results are compared with the previous 30 channel results. The flow at the header inlet is annular. For the downward flow configuration, the water flow distribution is significantly affected by the tube protrusion depth. For flush-mounted geometry, significant portion 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, different from the downward configuration, significant portion of the water flows through the rear part of the header. The effect of the protrusion depth is the same as that of the downward flow. As the protrusion depth increases, more water is forced to the rear part of the header. However, the effect of mass flux or quality is opposite to the downward flow case. As the mass flux or quality increases, more water flows through the frontal part of the header. Compared with the previous thirty channel configuration, the present ten channel configuration yields better flow distribution. Possible explanation is provided from the flow visualization results.

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

기 호 설 명

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

h : 평판관 삽입깊이 [mm]
 x : 진도

1. 서 론

알루미늄 평판관 열교환기는 루버핀과 평판관으로 구성된다. 공기는 루버핀 사이를 흐르고 냉매는 수력 직경 1~2mm의 다채널 평판관 내로

[†] Corresponding author

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

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

흐른다. 이 열교환기는 전열성능이 기존 핀-관 열교환기보다 우수하여 자동차 응축기로 널리 사용되고 있고 가정용 공조기의 증발기로도 적극 검토되고 있다.

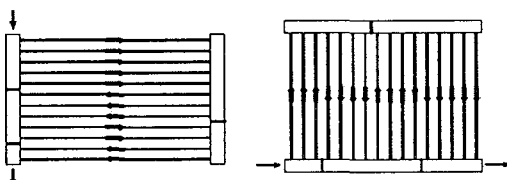
평판관 증발기는 공기측에 결로에 의해 생성된 응축액의 배출을 용이하게 하기 위하여, 평판관은 수직으로(헤더는 수평으로) 배열된다. 평판관의 수는 수십 개에서 많으면 수백 개가 되기도 한다. 이 경우 단일 패스로 열교환기를 구성하면 냉매측 유속이 너무 작고 냉매분배가 나빠지므로 헤더 내에 격막을 설치하여 다패스로 구성하는 것이 바람직하다. 증발기의 경우는 냉매가 증발하면서 유속이 증가하므로 흐름방향으로 패스당 평판관 수를 늘려나간다. 반대로 응축기의 경우는 흐름방향으로 패스당 평판관 수를 줄여나간다. 패스당 평판관의 수(또는 패스당 헤더길이)는 헤더 내 유동을 변화시키고 따라서 유량분배에 큰 영향을 미치리라 예상된다. Fig. 1에 평판관 응축기 및 증발기 회로구성의 예를 나타내었다. 증발기의 경우 냉매는 상향류와 하향류를 반복함을 보여준다. 평판관의 수 외에 유동방향, 헤더 내로 돌출된 평판관의 삽입깊이 등도 채널간 유량분배에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

그간 헤더 내의 2상류 분지에 관해서는 일부 연구결과가 보고되었다. Watanabe et al.⁽¹⁾은 내경 20 mm의 수평 원형 헤더와 4개의 내경 6 mm 수직 원형 분지관에 대하여 R-11을 사용하여 상향류 분지 실험을 수행하였다. 실험은 질량유속 40~120 kg/m²s, 건도는 0~0.4 범위에서 수행되었고 헤더 입구의 유동형태는 성층류이었다. 그들은 유량분배가 질량유속과 건도에 따라 크게 달라진다고 보고하였다. Tompkins et al.⁽²⁾은 수평 직사각형 헤더와 15개의 수직 평판관으로 이루어진 시험부에서 물-공기를 사용하여 상향류 분지 실험을 수행하였다. 실험은 질량유속 50~

400 kg/m²s, 건도 0~0.4 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⁽³⁾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 124~836 kg/m²s 건도는 0~0.5까지 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⁽⁴⁾는 수직 직사각형 헤더(24×24 mm)에 5개의 수평 직사각형 분지관이 설치된 형상에서 물-공기를 사용하여 분지실험을 수행하였다. 시험부 입구 유동형태는 환상류이었다. 유량분배는 분지관의 삽입깊이에 따라 크게 영향을 받았는데 삽입깊이가 증가할수록 헤더의 후방에 있는 분지관으로 흐르는 물 유량이 증가하였다. Cho et al.⁽⁵⁾은 원형 헤더와 15개의 평판관으로 구성된 시험부에서 R-22를 사용하여 헤더 방향과 냉매주입관의 방향이 유량분배에 미치는 영향을 검토하였다. 질량유속은 60 kg/m²s로 고정되고 건도는 0~0.3까지 변화되었다. 수직헤더의 경우 대부분의 액체유량은 헤더의 전방으로 흘렀고 냉매주입 방향은 별다른 영향을 미치지 않았다. 하지만, 수평헤더에서는 냉매의 주입방향에 따라 유량분배가 크게 변하였다.

Kim et al.⁽⁶⁾은 내경 17 mm의 원형 헤더와 30개의 수직직경 1.32 mm 평판관으로 구성된 시험부에서 물-공기를 사용하여 분지실험을 수행하였다. 실험은 상향류와 하향류, 무차원 평판관 삽입깊이(h/D) 0.0~0.5, 질량유속 70~130 kg/m²s, 건도 0.2~0.6 범위에서 수행되었다. 헤더 입구 유동은 환상류이었다. 실험결과 하향류에서는 평판관 삽입깊이, 질량유속, 건도의 영향이 현저하게 나타났다. 헤더 내로 평판관이 돌출되지 않은 경우($h/D=0.0$) 대부분의 물은 헤더 전방 채널



(a) Flat tube condenser (b) Flat tube evaporator

Fig. 1 Refrigerant side circuiting.

을 통하여 흘렀으나 평판관 삽입깊이가 증가할수록 물은 헤더 후방으로 이동하였다. 또한 질량유속과 건도가 증가할수록 물은 헤더 후방으로 이동하였다. 하지만 상향류에서는 하향류와 반대로 대부분의 물이 헤더 후방으로 흘렀다. 또한 실험 범위에서 평판관 삽입깊이, 질량유속, 건도가 유량분배에 미치는 영향은 크지 않았다. Rong et al.,⁽⁷⁾ Bernoux et al.⁽⁸⁾은 판형 열교환기에 대한 냉매분배 실험을 수행하였다.

상기 문헌조사 결과는 다채널관의 유량분배에 대해 많은 연구가 수행되었으나 분지관 수가 유동분배에 미치는 영향에 대해서는 아직 검토된 바 없음을 알려 준다. 헤더의 길이는 분지관 수에 비례하므로 유량분배에 적지 않은 영향을 미치리라 예상된다. 본 연구는 Kim et al.⁽⁶⁾의 후속 연구로 10개의 평판관으로 이루어진 시험부에 대한 유량분배 실험을 수행하고 Kim et al.⁽⁶⁾의 30개 평판관의 결과와 비교함으로써 평판관의 수가 유량분배에 미치는 영향을 고찰하였다. 시험부 형상(내경 17 mm 원형 헤더, 평판관 수력직경 1.32 mm)과 실험범위(질량유속 70~130 kg/m²s, 건도는 0.2~0.6)는 Kim et al.⁽⁶⁾과 동일하다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험장치와 방법은 Kim et al.⁽⁶⁾에 상세히 기술되어 있으므로 여기서는 개략적으로 기술하도록 한다. Fig. 2에 실험장치의 개략도를 나타내었다. 시험부는 91 cm 간격, 내경 17 mm의 상하부 헤더와 9.8 mm 피치의 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. 유량이 계측된 물(질량유량계 사용)과 공기(체적식 유량계 사용)는 믹서에서 혼합된 후 시험부에 2상 상태로 공급된다. 헤더 전방에는 유동이 발달할 수 있도록 길이 1m의 입구부를 헤더와 동일한 방향으로 설치하였다. 평판관에 흐르는 유량은 밸브를 조작하여 기액분리기로 흐르게

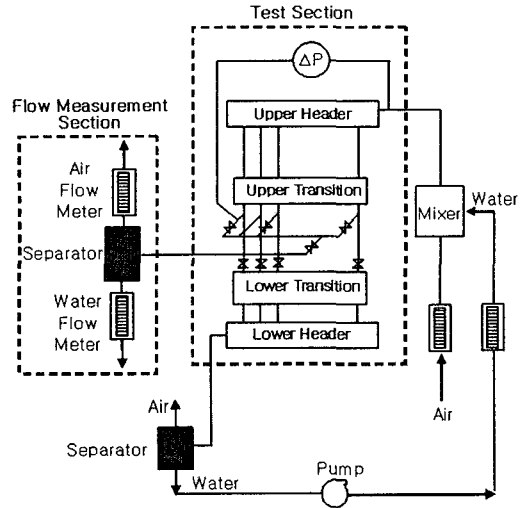


Fig. 2 Schematic drawing of the apparatus.

한 후 공기와 물의 유량을 각각 계측하였다. 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 10개의 분지관 중 하나 건너 하나씩 5개의 분지관에서 측정하였다. Fig. 2에 도시되어 있듯이 유량측정 채널에는 두 개의 밸브가(하나는 시험부에, 다른 하나는 유량측정부로 가는 배관에) 설치되어 있다. 시험시 우선은 유량측정부로 가는 배관에 설치된 밸브를 모두 닫고 시험부의 밸브를 모두 열어 유동이 정상상태가 될 때까지 기다린다. 유동이 정상상태라고 판단되면 채널의 유량측정을 시작한다. 예를 들어 1번 채널의 유량을 측정하려면 1번 채널의 시험부 밸브를 닫고 유량측정부로 가는 밸브를 열어 유량을 유량측정부로 보낸다. 유량계측시 유의할 점은 계측 전후의 평판관 내 유동상태가 변해서는 안된다는 것이다. 이를 위하여 헤더 전방과 평판관 하부에 차압계를 설치하고 유량계측 전후에 차압이 일정하게 유지되도록 유량측정부로 가는 배관에 설치된 밸브를 조절하였다. 유량측정 전후의 압력이 일정하다면 채널 내 유량도 동일하리라 판단된다. 실험 중 차압계의 변동은 측정치의 2% 내에서 유지되었다. 유량계측 채널 이외의 시험부를 통과한 물-공기는 시험부 하부의 기액분리

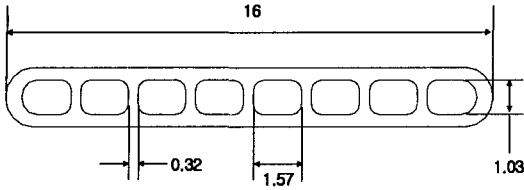


Fig. 3 Cross-sectional view of the flat tube used in this study (Unit: mm).

기로 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 실험 결과 물 유량분포는 $\pm 10\%$ 내에서, 공기 유량분포는 $\pm 5\%$ 내에서 재현이 가능하였다. 또한 시험부에 유입된 물과 공기유량과 각 채널에서 측정된 물과 공기유량의 합을 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(전체 유량이 각 채널에 균일하게 분배되었을 때 얻어지는 값)으로 나눈 '유량비'(water flow ratio와 air flow ratio)로 나타내었다. Fig. 3에 본 실험에 사용된 평판관의 단면을 나타내었다. 수력직경은 1.32 mm이고 유동단면적은 12.24 mm²이다.

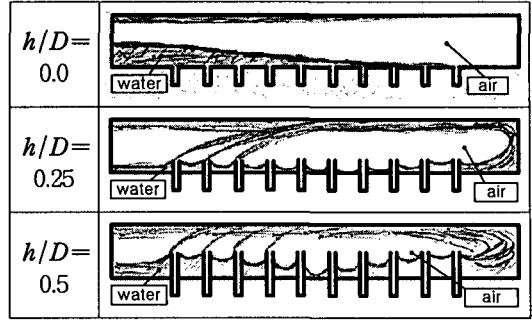
3. 실험결과 및 고찰

3.1 하향류

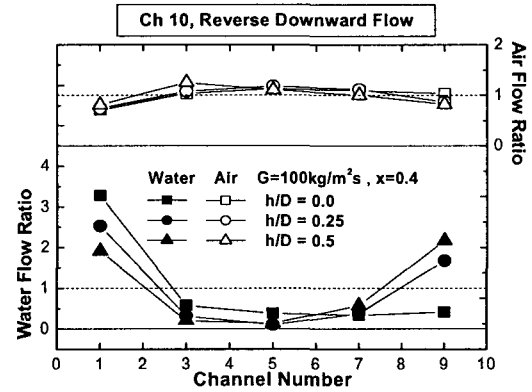
3.1.1 삽입깊이의 영향

본 연구에서 수행한 10채널 하부분지 유동의 대표적 유동형태를 Fig. 4에 나타내었다. 이 그림은 헤더 입구 유동이 환상류를 보여준다. 또한, 본 실험범위(질량유속 70~130 kg/m²s, 건도는 0.2~0.6)의 데이터를 대표적인 수평 2상 유동양식 선도인 Baker⁽⁹⁾ 선도에 도시해 본 결과 환상류에 속함을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 평판관이 헤더 내로 돌출되지 않은 경우 ($h/D=0.0$), 대부분의 물은 헤더 전단부 채널로 흐름을 보여준다. 질량유속 $G=100$ kg/m²s, 건도 $x=0.4$ 에서 취득한 데이터를 보면 첫번째 채널의 물유량비는 3.3이고 급격히 감소하여 세번



(a) Typical flow pattern in a 10 channel header with upward configuration

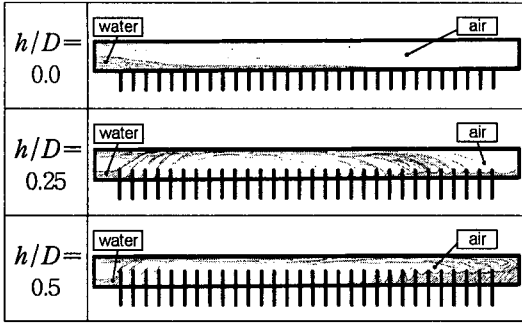


(b) Corresponding water and air distribution

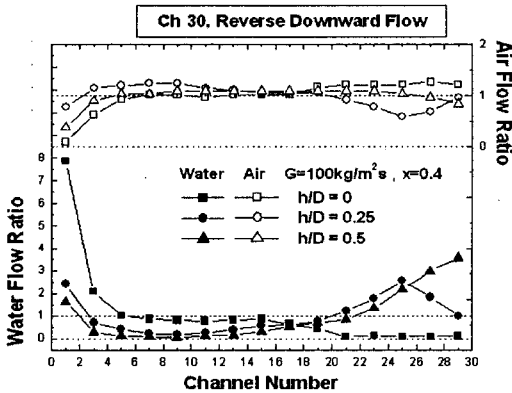
Fig. 4 Typical flow pattern in a upper 10 channel header with downward flow configuration and the corresponding water and air distribution.

째 채널에서 0.6이 되고 그 이후로는 거의 일정함을 보인다. 공기분배는 물분배와 반대의 경향을 보인다. 즉, 물유량이 많은 곳은 공기유량이 적고 물유량이 적은 곳은 공기유량이 많다. 또한 공기분배는 물분배에 비해 훨씬 균일함을 알 수 있다. Fig. 5에는 동일한 조건 ($G=100$ kg/m²s, $x=0.4$)에서 수행된 Kim et al.⁽⁶⁾의 30채널 실험자료를 나타내었다. 평판관이 헤더 내로 돌출되지 않은 경우 ($h/D=0.0$) 유동형태와 유량분배 데이터의 경향은 10채널과 유사하나 전방 채널의 물유량비가 훨씬 크고 후방 채널로는 물이 거의 공급되지 않음을 알 수 있다.

평판관이 헤더 내로 돌출하면 유동형태가 크게 바뀐다. Fig. 4의 스케치에 나타나 있듯이 유입되



(a) Typical flow pattern in a 30 channel header with downward configuration



(b) Corresponding water and air distribution

Fig. 5 Typical flow pattern in a upper 30 channel header with downward flow configuration and the corresponding water and air distribution (from Kim et al.⁽⁶⁾).

는 물의 일부는 첫번째 돌출부에 부딪혀 일부는 관내로 흡입되고 나머지는 관 상부에서 박리되어 헤더 후방으로 이송된다. 첫번째 돌출부를 우회한 물과 헤더 상부로부터 공급된 물은 두번째 돌출부에 부딪혀 일부는 흡입되고 나머지는 관 상부에서 박리되어 헤더 하부로 이송된다. 이 과정은 박리될 물이 더 이상 없을 때까지 계속된다. 박리된 물은 헤더 반대쪽 벽에 부딪힌 다음 후방으로부터 채널로 공급된다. 30채널에서 $h/D=0.5$ 인 경우는 유동형태와 데이터의 경향이 10채널과 유사함을 보인다. 하지만 $h/D=0.25$ 인 경우는 박리된 물이 반대쪽 벽까지 이송되지 못하고 헤더 후방에서 재부착함을 알 수 있다. 즉, 헤더길이가 박리된 유동의 재부착길이보다 긴 경우 유동은 헤

더 후방에 재부착한다. 또한 Fig.5는 재부착지점 부근에서 물유량비의 피크가 형성됨을 보여준다.

Kim et al.⁽⁶⁾은 30채널 실험에서 삽입깊이와 질량유속, 그리고 건도가 증가할수록 재부착길이 증가하여 물이 헤더 후방으로 이송된다고 보고하였다. Fig.4의 10채널 데이터도 평판관 삽입깊이가 증가할수록 후방 채널에 공급되는 물의 양이 증가함을 보여준다. 즉, $h/D=0.25$ 인 경우는 첫번째 채널의 물유량비는 2.6이고 5번째 채널에서는 0.1로 감소하다가 마지막 채널에서 1.7이고 $h/D=0.5$ 인 경우는 첫번째 채널의 물유량비는 1.9이고 5번째 채널에서 최소를 보이다 이후로 계속 증가하여 마지막 채널에서 최대인 2.4를 나타낸다.

Fig.4와 Fig.5의 채널 간 물유량비의 최대와 최소값의 차이를 비교하여 보면 10채널의 경우 $h/D=0.0, 0.25, 0.5$ 에서 각각 3.3, 2.4, 2.1이고 30채널에서는 7.8, 2.4, 3.5로 $h/D=0.25$ 를 제외하고는 10채널에서 차이가 더 적음을 알 수 있다. 삽입깊이 $h/D=0.25$ 의 경우는 두 유동형태가 다르기 때문에(10채널의 경우는 박리된 유동이 채널 반대 벽에 부딪히고 30채널의 경우는 헤더 후방에 재부착함) 직접적인 비교는 큰 의미가 없다고 판단된다. 또한 Fig.4와 Fig.5의 데이터로부터 물유량비의 표준편차를 구하였다. 물유량비의 표준편차도 10채널에서는 $h/D=0.0, 0.25, 0.5$ 에서 각각 1.29, 1.05, 0.98이고 30채널에서는 1.95, 0.80, 1.13으로 $h/D=0.25$ 를 제외하고는 10채널에서 편차가 적다. 따라서 10채널에서 유량분포가 더 균일해진다고 결론지을 수 있다.

Fig.4의 데이터에 물과 공기의 채널 평균 유량을 곱하면 각 채널에서의 물과 공기의 유량을 구할 수 있다. 이 그림들에 나타나 있듯이 물과 공기의 유량분포는 반대의 경향을 보인다. 즉, 물이 많이 흐르는 채널에는 공기가 적게 흐르고, 물이 적게 흐르면 공기가 많이 흐른다. 헤더 내 물-공기 유량분포, 채널별 물-공기 유량데이터들은 향후 유량분지 모델의 개발에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

3.1.2 질량유속 및 건도의 영향

Fig.6은 10채널의 경우 삽입깊이가 다른 세 형상에서 질량유속의 영향을 보여준다. 모든 삽입깊이에서 질량유속이 증가할수록 헤더 후방으로

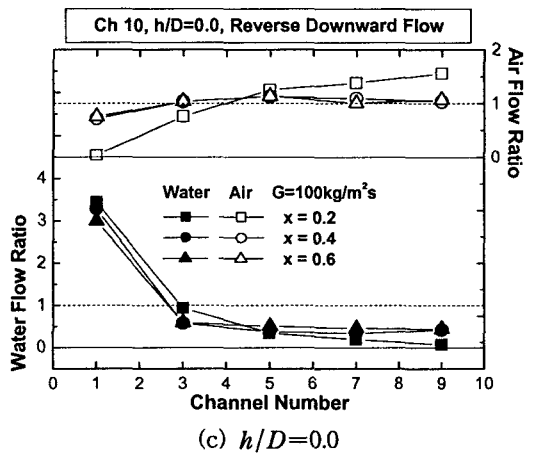
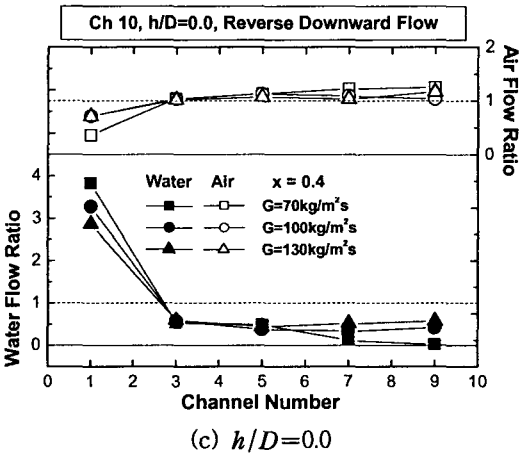
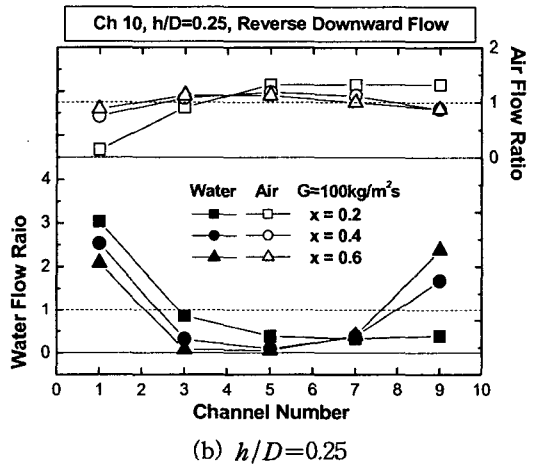
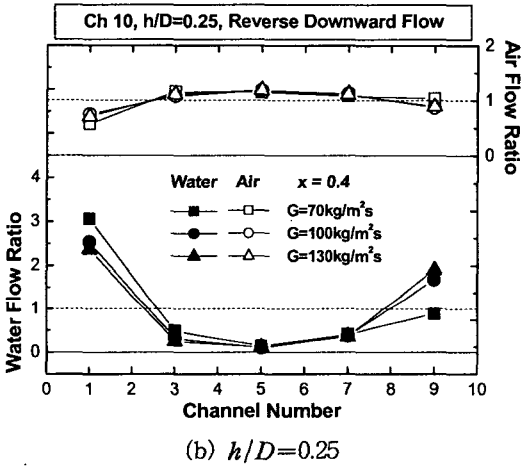
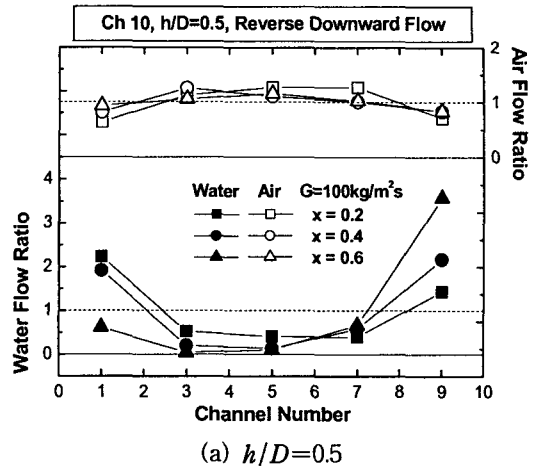
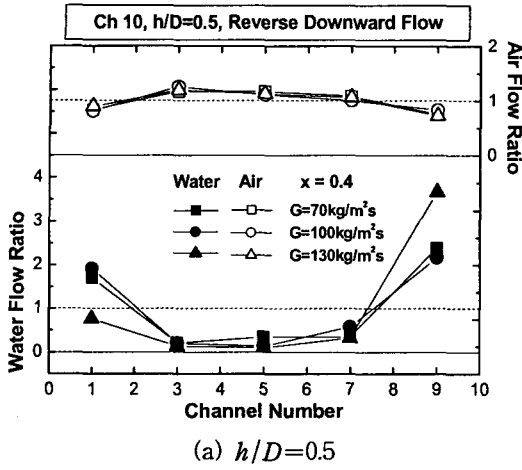


Fig. 6 Effect of mass flux on air and water distribution in the 10 channel header of downward configuration at $x=0.4$.

Fig. 7 Effect of quality on air and water distribution in the 10 channel header of downward configuration at $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

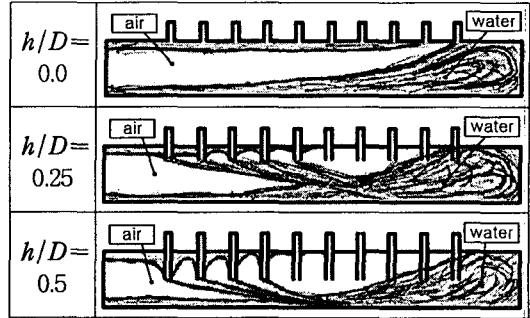
물이 이동함을 알 수 있다. 예를 들어 $h/D=0.5$, $G=70 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $x=0.4$ 인 경우 첫번째 채널의 물유량비는 1.9이고 세번째 채널에서 0.2가 되었다가 증가하여 마지막 채널에서 2.2가 된다. 질량유량이 $100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 로 증가하면 첫번째 채널의 물유량비는 1.7로 줄어들고 마지막 채널에서는 2.4로 증가한다. 질량유량이 $130 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 로 증가하면 첫번째 채널의 물유량비는 0.8이 되고 마지막 채널에서는 3.8로 된다. 이 경향은 Fig.4의 삽입깊이의 변화에 따른 경향과 유사하다. 그 이유는 질량유속이 증가할수록 돌출부에서 박리된 유선의 재부착길이가 증가하고 이에 따라 물이 헤더 후방으로 이송되기 때문으로 판단된다. 삽입깊이 $h/D=0.25$ 의 경우도 동일하게 설명할 수 있을 것이다. 평판관이 헤더 내로 돌출되지 않은 ($h/D=0.0$) 경우는 질량유속이 증가할수록 액체의 운동량이 증가하고 따라서 더 많은 물이 헤더 후방으로 이송된다고 판단된다. 공기분배는 물분배와 반대의 경향을 보인다.

Fig.7은 건도의 영향을 보여준다. 이 그래프는 Fig.6과 상당히 유사하다. 따라서 건도의 영향은 질량유속의 영향과 유사하다고 판단된다. 즉, 건도가 증가할수록 유동의 운동량이 증가하여 돌출부로부터 박리된 유선의 길이가 길어지고 따라서 물유량이 하부로 이동한다. 지면의 제약으로 여기에 수록하지는 않았지만 30채널 데이터(Kim et al.⁽⁶⁾ 참조)도 10채널과 동일한 경향을 보인다. 즉, 질량유속과 건도가 증가할수록 헤더 후방으로 물이 이동한다. 한편 30채널과 10채널의 채널 간 물유량비의 표준편차, 최대와 최소값의 차이를 계산해 보면 유동형태가 동일한 경우 모든 질량유속과 건도에서 10채널에서 편차가 더 적음을 확인할 수 있었다.

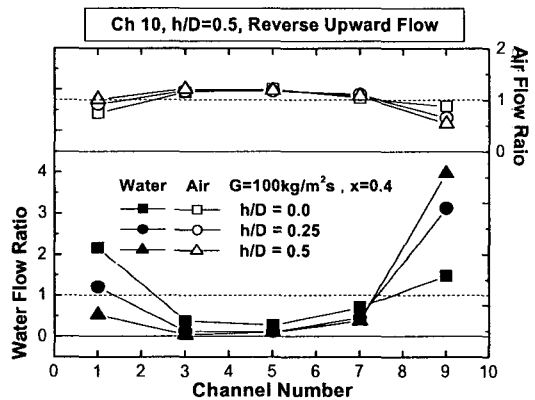
3.2 상황류

3.2.1 삽입깊이의 영향

본 연구에서 수행한 10채널의 대표적인 유동형태를 데이터와 함께 Fig.8에 나타내었다. 이 그림은 헤더 입구유동이 환상류임을 보여준다. 또한, 하향류와는 달리 상당부분의 물이 헤더의 후방으로 흐름을 알 수 있다. 평판관이 돌출되지 않은 경우 ($h/D=0.0$) 헤더의 상부를 흐르는 물은 헤더 전방 채널로 흐르고 헤더 하부를 흐르는



(a) Typical flow pattern in a 10 channel header with upward configuration

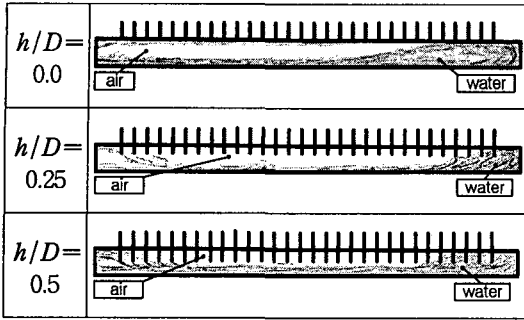


(b) Corresponding water and air distribution

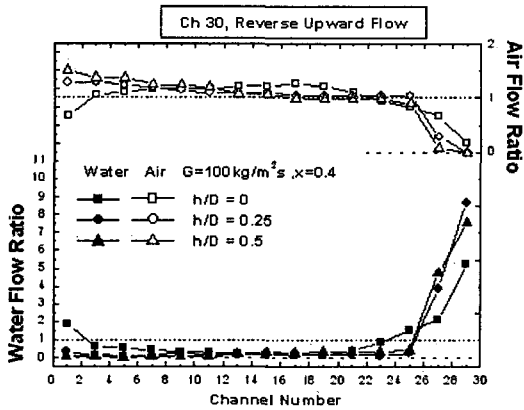
Fig. 8 Typical flow pattern in a lower 10 channel header with upward flow configuration and the corresponding water and air distribution.

물은 헤더 뒤 쪽으로 이동하여 후방으로부터 채널을 채워온다. 질량유속 $G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $x=0.4$ 의 데이터는 첫번째 채널에서 물유량비가 2.2이고 점차로 감소하여 5번째 채널에서 0.4가 되고 그 이후로는 증가하여 마지막 채널에서 1.5가 됨을 보여준다. 공기분포는 물분포와 반대의 경향을 보인다.

헤더 내로 평판관이 삽입되면 유동형태가 다소 바뀐다. 스케치에 나타나 있듯이 헤더 상부로 유입되는 물은 상부의 평판관에 부딪히고 상부에서 박리하여 헤더 하부에 부착한다. 박리된 물과 헤더 하부로 유입된 물은 헤더 뒤쪽으로 이송되어 후방으로부터 채널을 채워온다. 삽입깊이 $h/D=0.25$ 인 경우 물유량비는 첫번째 채널에서 1.2이고



(a) Typical flow pattern in a 30 channel header with upward configuration



(b) Corresponding water and air distribution

Fig. 9 Typical flow pattern in a lower 30 channel header with upward flow configuration and the corresponding water and air distribution (from Kim et al.⁽⁶⁾).

5번째 채널에서는 0.1로 감소하였다가 마지막 채널에서 2.9가 된다. 삽입깊이 $h/D=0.5$ 인 경우는 물유량비가 첫번째 채널에서 0.5이고 마지막 채널에서는 4.1로 증가한다. 따라서 상향류에서도 하향류의 경우와 같이 삽입깊이가 증가하면 더 많은 물이 헤더 후방으로 이송됨을 알 수 있다.

Fig. 9에는 Kim et al.⁽⁶⁾이 동일한 유동조건에서 실험한 30채널 데이터를 유동형태와 함께 나타내었다. Fig. 9는 30채널의 유동형태와 유량분포 특성이 10채널과 유사함을 보인다. 하지만 30채널에서 헤더 후방 채널의 물유량비가 더 크고 평판관 삽입깊이의 영향은 10채널에 비하여 적게 나타남을 보인다. 이는 30채널의 경우, 헤더의 길이가 더 길고 따라서 물이 헤더 하부의 넓은 영역

에 걸쳐 흐르므로, 평판관 삽입깊이의 영향이 적게 나타나는 것으로 판단된다. Fig. 8와 Fig. 9의 채널 간 물유량비의 최대와 최소값의 차이를 비교하여 보면 10채널의 경우 $h/D=0.0, 0.25, 0.5$ 에서 각각 1.2, 3.0, 3.9이고 30채널에서는 5.2, 8.6, 7.5로 10채널에서 차이가 더 적음을 알 수 있다. 또한 물유량비의 표준편차도 10채널에서는 $h/D=0.0, 0.25, 0.5$ 에서 각각 0.81, 1.26, 1.69이고 30채널에서는 1.35, 2.33, 2.17로 10채널의 값이 적다. 따라서 10채널에서 유량분포가 더 균일해진다고 결론지을 수 있다.

3.2.2 질량유속과 건도의 영향

Fig. 10에 질량유속의 영향을 나타내었다. Fig. 11에는 건도의 영향이 나타나 있다. Fig. 10과 Fig. 11은 질량유속과 건도가 증가할수록 헤더의 전방 채널로 흐르는 물의 양이 증가하고 후방 채널로 흐르는 물의 양은 감소함을 보여준다. 또한 이러한 경향은 평판관 삽입깊이가 감소할수록 현저해짐을 보인다. 예를 들어 Fig. 11(c)의 경우($h/D=0.0, G=100 \text{ kg/m}^2\text{s}$) 건도 0.2에서 첫번째 채널의 물유량비는 0.9이고 5번째 채널에서 0.1로 감소하였다가 마지막 채널에서 3.8로 된다. 하지만 건도가 0.6으로 증가하면 첫번째 채널의 물유량비는 2.8이고 마지막 채널에서는 0.7로 감소한다. Fig. 11(b)의 경우 첫번째 채널에서 $x=0.4$ 의 물유량비가 1.3으로 $x=0.6$ 의 값인 0.9보다 더 큰데 그 이유는 명확치 않다. 본 연구의 유량측정의 불확실도는 $\pm 10\%$ 이다.

본 실험의 헤더 입구유동은 환상류이고 환상류에서는 질량유속, 건도 등에 따라 상부와 하부의 액막두께가 달라진다. 질량유속이나 건도가 작은 경우에는 관성력보다는 중력이 지배적이 되어 상부 액막의 두께가 감소하고 따라서 헤더 상부에 위치한 전방 채널에 공급되는 물의 양은 감소할 것이다. 질량유속이나 건도가 증가하면 관성력의 영향으로 헤더 상부 액막의 두께가 증가하고 따라서 헤더 전방 채널로 공급되는 물의 양도 증가하리라 예상된다. 이러한 경향은 전 절의 하향류의 경우와는 반대이다. 하향류의 경우는 채널이 헤더 하부에 위치하고 이러한 형상에서는 원주방향의 액막분포보다는 유체의 운동량이 중요하게 작용하여 질량유속이나 건도가 증가에 따라 물이 헤더 후방으로 이송되는 것으로 판단된다.

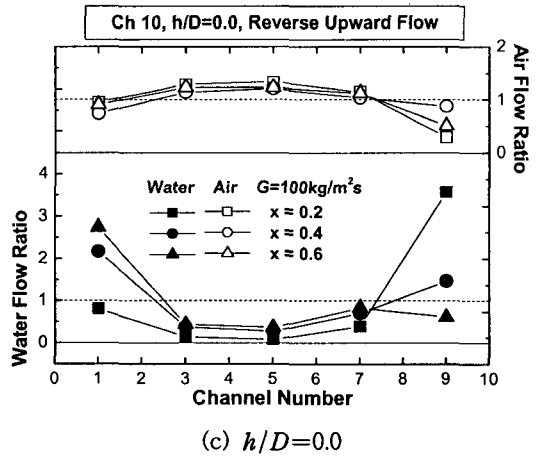
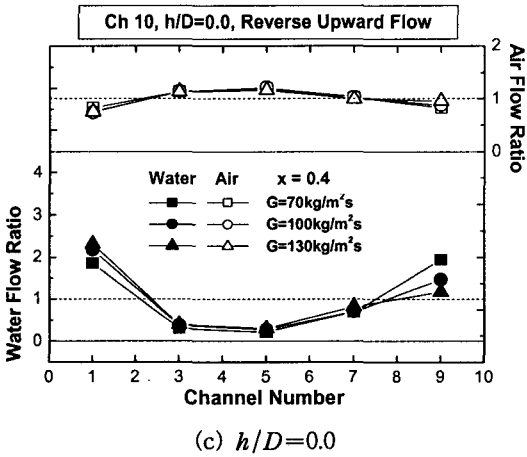
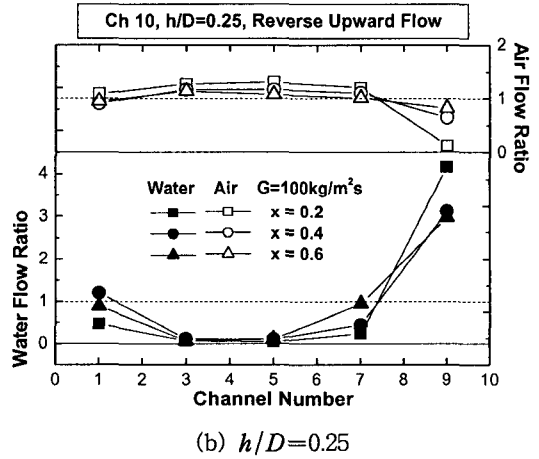
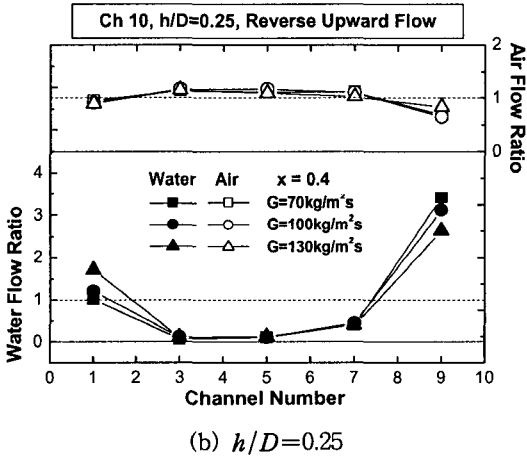
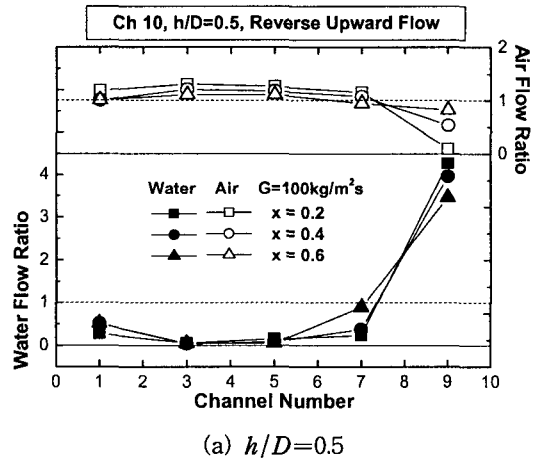
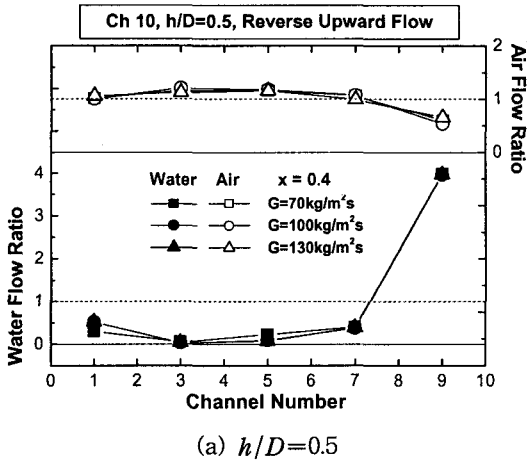


Fig. 10 Effect of mass flux on air and water distribution in the 10 channel header of upward configuration at $x=0.4$.

Fig. 11 Effect of quality on air and water distribution in the 10 channel header of upward configuration at $G=100\text{kg/m}^2\text{s}$.

Kim et al.⁽⁶⁾의 30채널 데이터도 10채널과 유사하다. 하지만 30채널에서 헤더 후방 채널의 물유량비가 더크고 질량유속 및 건도의 영향은 10채널에 비하여 적게 나타났다. 한편 30채널과 10채널의 채널 간 물유량비의 표준편차, 최대와 최소값의 차이를 계산해 보면 10채널에서 편차가 더 적게 나타남을 확인할 수 있었다.

3.3 여타 인자의 영향

본 연구에서는 10개의 평판관으로 이루어진 수평 헤더에서 유동방향, 평판관 삽입깊이 등이 유량분배에 미치는 영향을 검토하고 30채널의 결과와 비교하였다. 이 외에도 평판관 피치, 헤더 관경, 헤더 입구형상 등이 유량분배에 영향을 미치리라 판단된다. 이 중 평판관 피치가 유량분배에 미치는 영향에 대해서는 아직 알려진 바 없으나 공기층 루버핀 높이의 변화폭 내에서 그 영향은 그다지 크지 않으리라 예상된다. 헤더 관경의 경우는 관경이 크게 되면 유속이 줄어들어 헤더 내 유동형태가 환상류에서 성층류로 변화하리라 예상된다. Tompkins et al.⁽²⁾은 성층류에서보다 균일한 유량분배를 얻을 수 있었다. 하지만 이는 헤더 내 돌출부가 없는 경우이고 돌출부가 있는 경우는 경향이 다를 수 있으리라 예상된다. 헤더 입구형상이 유량분배에 미치는 영향에 대한 연구로는 Cho et al.⁽⁵⁾이 유일하다. 그들은 수평 헤더에서는 주입방향에 따라 유량분배가 크게 영향을 받는다고 보고하였다. 평판관 피치, 헤더 직경, 헤더 입구형상 등이 유량분배에 미치는 영향에 대해서는 계속해서 연구해 나갈 예정이다.

4. 결 론

본 연구에서는 원형 헤더와 10개의 평판관으로 이루어진 시험부에서 물-공기를 사용하여 유동방향, 평판관 삽입깊이, 질량유속, 건도 등이 유량분배에 미치는 영향을 검토하고 그 결과를 기존의 30채널 결과와 비교하였다. 주된 결론은 다음과 같다.

(1) 하향류의 경우 물분배는 평판관 삽입깊이에 따라 크게 영향을 받는다. 평판관 돌출이 없는 경우 대부분의 물은 헤더 전방으로 흐른다. 삽입깊이가 증가하면 물유동은 헤더 후방으로 이동한다.

(2) 하향류의 경우 질량유속과 건도도 삽입깊이와 유사한 경향을 유발한다. 즉, 질량유속과 건도가 증가할수록 물은 헤더 후방으로 이동한다.

(3) 상향류의 경우 상당부분의 물이 헤더 후방으로 흐른다. 평판관 삽입깊이의 영향은 하향류와 유사하다. 삽입깊이가 증가하면 물유동은 헤더 후방으로 이동한다.

(4) 상향류의 경우 질량유속과 건도의 영향은 하향류와 반대이다. 질량유속과 건도가 증가할수록 물은 헤더 전방으로 이동한다. 건도와 질량유속이 증가할수록 헤더 상부의 액막두께가 증가하여 상부 채널에 많은 유량을 공급하기 때문에 판단된다.

(5) 30채널에 비하여 10채널에서 채널 간 물유량비의 표준편차, 최대와 최소값의 차이가 더 적었다 따라서 10채널에서 유량분배가 개선된다고 결론지을 수 있다.

후 기

상기 연구는 한국 과학재단 지역대학 우수과학기술 육성지원 연구(R05-2003-000-10170)로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 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.
2. 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.
3. Vist, S. and Pettersen, J., 2004, Two-phase flow distribution in compact heat exchanger manifolds, Exp. Thermal Fluid Sci., Vol. 28, pp. 209-215.
4. 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.

5. 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.
6. Kim, N.H., Shin, T.R. and Sim, Y.S., 2006, Distribution of air-water two-phase flow in a header of aluminum flat tube evaporator, J. SAREK, Vol. 18, No. 1, pp. 55-66.
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. Baker, O., 1954, Design of pipe lines for simultaneous flow of oil and gas, Oil and Gas Journal, Vol. 26, July.