



관형 열교환기의 전열판 개수에 따른 유량 분배 특성에 대한 수치해석

이 나 리,¹ 정 재 혁,¹ 허 남 건^{*2}

A NUMERICAL STUDY ON THE CHARACTERISTIC OF FLOW DISTRIBUTION IN THE CHANNEL OF PLATE HEAT EXCHANGER FOR VARIOUS NUMBER OF CHANNELS

Nari Lee,¹ Jae Hyuk Jung¹ and Nahmkeon Hur^{*2}

In the present study, the characteristic of flow distribution in the channel of a plate heat exchanger is investigated numerically. In order to accomplish the efficient and fast analyses of the flow characteristics in the channel, a semi-microscopic analysis has been performed using a porous media model. For semi-microscopic analysis using porous media, the flow resistance coefficients are obtained through the result of pressure drop in the experimental data. The results showed that the variation of mass flow rate, geometry and chevron angle strongly depend on the flow distribution in the channel. Particularly, the chevron angle is most important factor for uniform flow distribution.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 관형 열교환기(Plate Heat Exchanger), 다공성 물질(Porous Media), 준미시적 해석(Semi-microscopic Analysis)

1. 서 론

관형 열교환기는 전열판을 적층시켜 유로를 형성하고 형성된 유로에 고온 유체와 저온 유체를 교대로 흐르게 하여 두 유체의 온도차에 의한 열전달로 작동유체의 온도를 감소, 증가, 유지시키는 장치이다. 다른 열교환기에 비해 유체에 의해 발생하는 진동, 소음, 입구 영향이 적고 고온, 저온의 두 유체가 입구에서 출구까지 도달하는 시간이 거의 같아 난방, 폐열 회수, 공기조화, 냉각기 등 산업 전반에 널리 쓰이고 있다. 관형 열교환기는 전열판의 형상에 따라 압력 강하, 열전달 특성 등이 결정된다. 따라서 다양한 전열판에 대한 연구가 진행 중이며, 그 중 웨브론 타입의 전열판을 가지는 관형 열교환기는 전열판의 주름이 가지는 각과 주름의 형상에 의해 열교환기의 성능이 결정된다. 웨브론 타입의 관형 열교환기의 열전달 특성에 대한 다양한 실험이 수행되고 있고, 그에 대한 수치해석적 연구 또한 활발하다. 또한 관형 열교환기 내에 분포하는 유량의 균일한 분배에 대한 연구도 진행되고 있는데, Zhang

등[1]은 웨브론 타입의 관형 열교환기의 전열판이 웨브론 각에 대해 서로 반대로 적층되어 있을 경우 웨브론 각에 대한 유동의 분배에 대해 연구를 수행하였고, Kho 등[2]은 웨브론 타입의 관형 열교환기의 유로 내에서의 분배에 대해 연구를 수행하였는데 특히 열교환기가 작동 중에 생길 수 있는 파울링에 대해 파울링이 유동 분배에 주는 영향을 해소하고, 파울링을 완화시킬 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 Lu 등[3]은 열교환기의 유동 분배에 대해 manifold에 의한 영향을 알아보고 실험과 해석을 통한 연구를 수행하여 manifold의 향상된 설계 모델을 제시하였다. Lalot 등[4]은 입구 헤더(header) 부분의 형상에 의한 유량의 불규칙 분배(maldistribution)를 해결하기 위하여 헤더에 장애물을 설치하거나 길이를 변경하는 등 형상을 변화시키거나 속도를 변화시켜 헤더에서의 유량 분배에 대해 수치해석하였다. Jiao 등[5]은 판-환 열교환기의 두 입구 헤더 중 두 번째 입구 헤더에 크기와 개수를 달리하여 구멍을 내어 유량 분배에 대해 수치해석하였다.

본 연구에서는 관형 열교환기의 전열판의 채널 개수에 따른 입구 속도 및 전열판의 웨브론 각에 대한 채널당 유동 분배를 알아보았다. 열교환기의 경우 전열판에 의한 유동의 저항으로 인해 발생하는 난류로 열전달을 향상시키므로 열교환기의 전열판으로 형성된 유로 내에 유동이 고르게 분포하게

¹ 학생회원, 서강대학교 대학원

² 종신회원, 서강대학교 기계공학과

* Corresponding author, E-mail: nhur@sogang.ac.kr

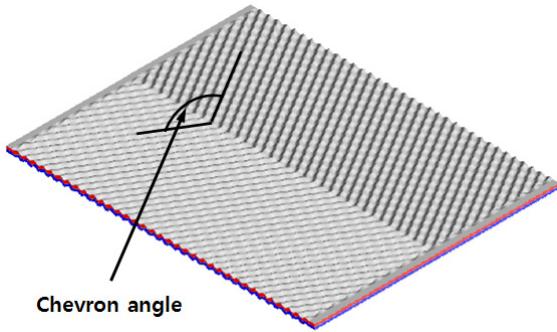


Fig. 1 Plate of heat exchanger with chevron angle 120°

함으로써 열전달 성능의 향상을 기대할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 실험을 통한 압력강하 값을 이용하여 열교환기의 전열관의 채널 부분을 다공성물질로 대체하여 열교환기의 유량 분배에 대한 준미시적 해석을 수행하였다.

2. 판형 열교환기

2.1 판형 열교환기

판형 열교환기는 다양한 형상을 가지는 전열관을 적층시켜 유로를 형성하는데, 웨브론 타입의 판형 열교환기의 경우 웨브론 각을 가지는 전열관을 웨브론 형상에 대해 반대로 교차시켜 적층하여 유로를 형성한다. 전열관의 웨브론 형상은 Fig. 1과 같이 뱀처럼 구불구불한 형상을 가지며 이 형상은 길이 방향에 평행한 축으로부터 대칭이고, 대칭한 웨브론이 이루는 각을 웨브론 각이라고 한다. 본 연구에서 해석한 판형 열교환기 전열관의 웨브론 각은 각각 120°, 60°이다. 이러한 두 가지 웨브론 각을 가지는 전열관을 웨브론 각이 120°인 전열관만 적층한 H type과 120°, 60°를 교대로 적층한 M type, 60°만 적층한 L type 등 세 가지로 해석을 수행하였다.

2.2 압력강하특성

판형 열교환기는 다양한 형상을 가지는 전열관을 적층시켜 유로를 형성하여 입, 출구의 압력강하와 고, 저온측 유로간의 열전달이 일어나게 된다. 따라서, 전열관 형상에 따른 열교환기의 성능이 매우 중요하다. 판형 열교환기 전열관에 의한 열교환기의 성능을 구하기 위하여 전열관을 실제와 똑같이 모사하는 방법인 미시적 방법은 전열관의 크기가 크고 형상이 복잡하게 되면 격자수가 많아져 계산을 수행하는데 있어 많은 시간이 걸리게 된다. 따라서 본 연구에서는 전열관의 형상으로부터 발생하는 유동 저항에 의한 압력강하 특성을 이용하여 전열관과 유로 부분을 다공성물질로 대체하여 계산을

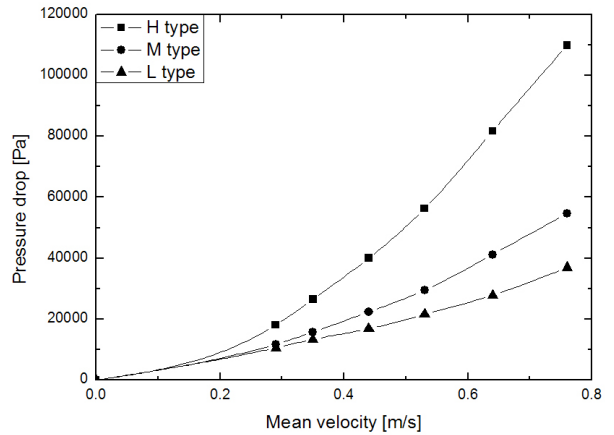


Fig. 2 Pressure drop from experimental results

수행하는 준미시적 방법을 이용하였다. 준미시적 방법의 이용을 위해서 전열관을 10장을 적층시켜 실험을 수행한 결과로부터 얻은 압력강하 값을 Fig. 2에 나타내었다. 각각의 type에 대한 입, 출구에서의 압력 차이로부터 얻은 압력강하 특성으로 x축은 입구에서의 유속을 나타내며 유속의 범위는 0.29 ~ 0.76 m/s로 이때 유량은 약 50 ~ 130 CMH이다. 웨브론 각이 작을수록 유동에 대한 저항이 적고 열교환 영역 내부의 속도가 빨라 압력강하가 작게 일어나는 것을 알 수 있다. 실험을 수행한 작동 조건 범위 내에서 전열관의 형상에 따라 압력강하가 약 3배 정도 차이가 나게 된다. 이러한 압력강하 특성으로부터 다공성물질의 계산을 위해 2차 다항식 식 (1)에 적용하여 유동저항계수를 구하여 해석을 수행하였다.

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = -(\alpha_i |U| + \beta_i) U \quad (1)$$

여기서 α 와 β 는 유동저항계수이며 U 는 속도이다. 실제 형상으로부터 생기는 유동에 대한 저항에 대해 유동저항계수로 부터 다공성물질에 대한 저항을 준다.

2.3 해석 모델

본 연구에서는 판형 열교환기의 다양한 입구유량과 전열관의 웨브론 각에 의한 형상에 대하여 채널 개수에 대한 채널당 유동 분배에 대해 수치해석하였다. 판형 열교환기는 작동 유체가 전열관의 형상에 따라 유동 특성을 가지고 열교환을 하므로 입구에서 유입된 작동유체가 열교환기의 여러 채널에 고르게 분포해야 전열관의 형상에 따른 열교환 특성이 잘 나타나게 되어 열전달량을 증가시킬 수 있다. 각각의 채널당 유동 분배를 알아보기 위해 고온측, 저온측 두 유로가 아닌 단

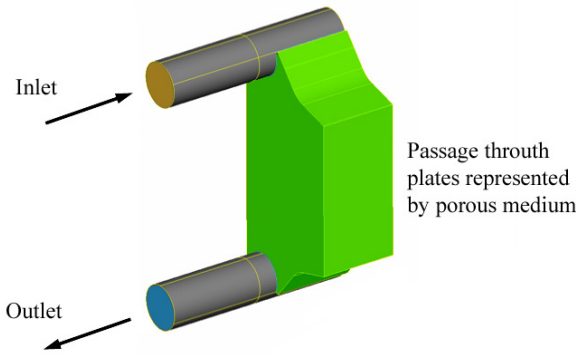


Fig. 3 Geometry of plate heat exchanger with 100 channels

일 유로에 대해 해석하였으며 열전달 특성은 고려하지 않았다. 열교환기는 입, 출구와 전열판이 적층된 채널 부분으로 Fig. 3와 같이 모델링하였다. 전열판이 적층된 채널 부분이 열교환 영역으로서 열교환 영역 전체를 다공성물질로 설정하였다. 또한 다공성물질 해석에서 실제 전열판으로 인해 구분된 각각의 채널과 같이 채널 사이에 유동이 흐르지 않는 것을 모사하기 위해 채널이 증가하는 방향으로 매우 큰 유동 저항 계수값을 설정하였다. 수치해석에 사용된 해석격자는 49,632 ~ 256,320개로 해석모델의 높이는 1.62 m, 너비는 1.28 m이다. 입, 출구의 헤더의 길이는 채널의 개수에 따라 늘어나게 된다. 또한 실린더 형태의 입, 출구 헤더에서 유입된 유체가 전열판 내부에서 가지는 유동 분포에 대해 알아보기 위하여 채널의 입, 출구 중간지점에서 유체의 평균속도를 구하여 각 채널당 평균속도를 비교하였다.

2.4 해석 조건

본 연구에서는 판형 열교환기의 채널 내 유동 분배에 영향을 주는 입구 유량과 열교환기 전열판의 쉘브론 각에 따른 채널 내 유량에 대하여 수치해석하였다. 열교환기의 채널 내 유동 분배에 대하여 알아보기 위해서 유량은 입구와 출구의 중간위치에 해당하는 채널의 위치에서 구하였다. 유동 분배의 영향을 알아보기 위하여 입구 유량은 실제 열교환기에서 쓰이는 3,500 ~ 5,000 CMH으로, 속도는 5.655 ~ 8.081m/s 이다. 열교환기의 채널 개수는 100 ~ 600장으로, 채널 개수에 따른 열교환기 영역의 길이는 0.81 ~ 4.86 m이다. 본 연구에서는 전열판을 모사하지 않고 다공성물질로 대체하여 계산을 수행하므로 길이를 증가시켜 채널 개수의 증가를 나타낸다. 입구는 유속 경계조건, 출구는 압력 경계조건으로 설정하였으며, 열교환기 영역에 다공성물질을 적용하기 위하여 열교환기 영역은 벽 경계조건으로 slip 조건을 적용함으로써, 다공성물질에 의한 유동 저항만을 가지게 하였다. 작동 유체는 상온의

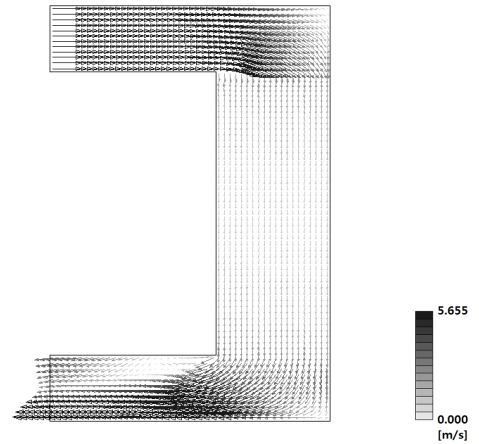


Fig. 4 Velocity distribution in the heat exchanger (100 channels, H type, 3500 CMH)

물로 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 상용 CFD 프로그램인 STAR-CD를 사용하여 정상상태 비압축성 난류유동에 대한 해석을 수행하였다[6]. 지배방정식으로는 다음과 같은 연속 방정식과 Navier-Stokes 방정식을 이용하였다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \tag{3}$$

3. 수치해석 결과

3.1 적층된 전열판 내부의 유동 분포 특성

판형 열교환기는 전열판을 적층시켜 유로를 형성하게 된다. 입구에서 유입된 유량은 헤더에서부터 전열판으로 이루어진 유로를 거쳐 출구로 빠져나가게 되는데 헤더로부터 적층된 전열판 내부로 유동이 균일하게 분배되어야한다. 이를 확인하기 위해 열교환기 내 속도 분포를 가시화하였다. Fig. 4는 열교환기 내 유동이 완전 발달되었을 때 속도 분포를 나타낸 그림이다. 입구에서 유입된 유체는 입구에서 가까운 채널부터 유입되기 시작하여 헤더를 통해 각 전열판에 분배되게 되며, 각 채널로 유입된 유체는 열교환 영역의 내부에서 전열판의 유동 저항의 영향으로 비교적 균일하게 흐르게 된다. 열교환 영역을 거친 유체는 출구쪽 헤더에 균일하게 유출된다.

3.2 채널 개수에 따른 유량 분배 특성

판형 열교환기의 채널 개수가 늘어나게 되면 헤더 영역의 길이가 길어지게 되고 입구로부터 유입된 유체의 헤더 영역

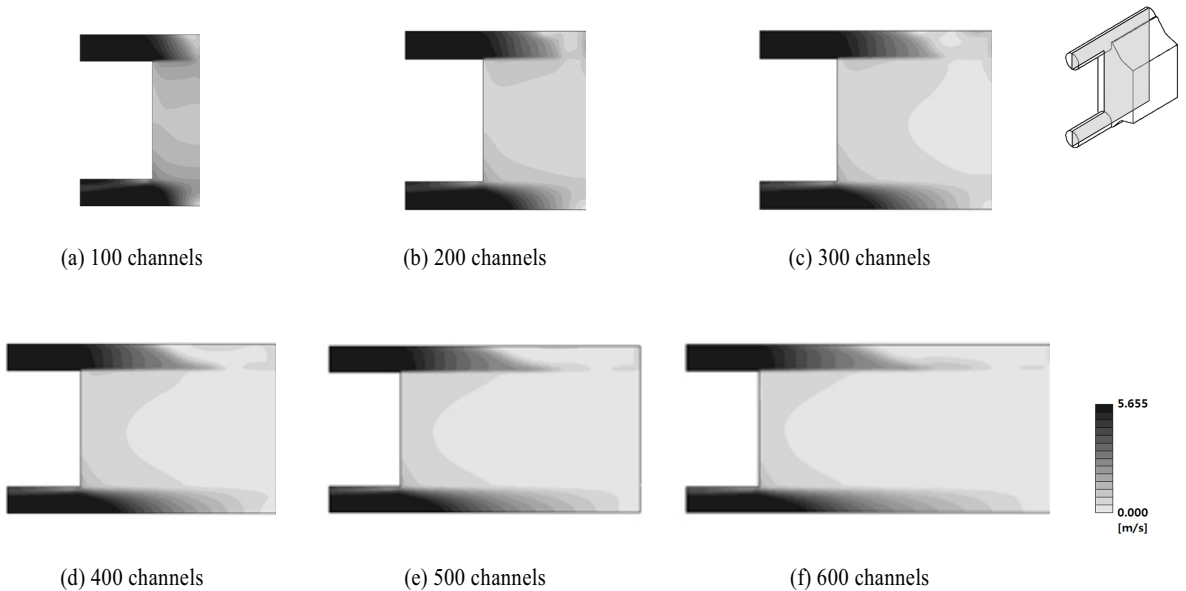


Fig. 5 Velocity distribution for heat exchangers with various numbers of channels (L type, 3500 CMH)

내 분포에 의해 전열판으로 유입되는 유량이 달라지게 된다. 본 연구에서는 채널 개수에 따른 열교환 영역의 길이를 고려하고자 채널이 100 ~ 600장일 때 전열판의 실제 두께를 고려하여 적층된 전열판의 두께와 같은 0.81 ~ 4.86 m를 적용하여 해석을 수행하였다. Fig. 5는 채널 개수에 따른 채널 내 속도 분포를 나타낸다. 채널 개수가 적을수록 채널 내 유동이 고르게 분포하는 것을 볼 수 있으며 채널 개수가 증가할수록 채널 내 유동이 불균형한 것은 채널 개수 증가에 따른 헤더의 길이가 증가하면서 유체가 증가한 헤더 끝까지 속도를 유지하지 못하여 채널 내 유입되는 유량이 줄어들기 때문이다. 채널 내 유동 분포를 확인하기 위해 채널 내 평균 유량으로 입구에서의 거리에 따른 각 채널 내 유량을 나누어 무차원시켜 채널 개수에 따른 유동 분포를 Fig. 6과 같이 비교하였다. 채널 개수가 증가함에 따라 채널 내 평균 유량이 약 2.5배까지 차이 나는 것을 볼 수 있다. 채널 개수가 증가할수록 평균 유량을 가지는 위치가 입구에 가까운 것 또한 헤더 길이의 증가에 따른 입구 유속의 감소 때문이다.

3.3 유량에 따른 유량 분배 특성

관형 열교환기는 전열판에 의한 열교환 영역 내의 열전달 특성을 위해서 적절한 속도의 유체가 채널 내에 흐르게 하기 위해서 그에 따른 입구 유량의 산정이 필요하다. 관형 열교환기는 유체의 이동에 의해 열교환이 이루어지므로 유체의 속도가 중요한 변수이다. 열교환기의 유량은 열교환기 내 속도를 결정하게 되는데, 본 연구에서는 3,500 ~ 5,000 CMH의 입

구 유량에 대해 해석을 수행하였다. Fig. 6은 각각 채널 개수에 따라 다양한 웨브론 각과 유량에 대해 열교환 영역의 중심에서 각 채널당 유량 분포로 x축은 입구에서부터의 거리를 각 채널 개수에 따른 전열판의 적층된 길이로 나누어 무차원화하였고, y축은 각 위치에서의 유량을 채널 내부에 흐르는 평균 유량으로 나누어 무차원시킨 결과로 입구 속도에 따른 각 채널당 유동 분배의 영향을 보면 큰 차이를 보이지 않는다. 실제 열교환기의 작동 조건의 범위 이내인 본 연구의 조건에서는 유량에 따른 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

3.4 웨브론 각에 따른 유량 분배 특성

본 연구에서는 열교환기 전열판의 웨브론 형상이 서로 대칭한 각인 웨브론 각이 120°, 60°인 전열판을 웨브론 각에 대하여 교차로 적층하여 H, M, L type의 세 전열판 type을 가지게 된다. Fig. 7은 세 type에 대해서 채널의 증가방향에 따른 단면과 전열판에 평행한 단면으로 속도 분포를 나타낸 그림으로서 입구에서 유입된 유체가 채널에 도달하기 전까지 헤더 내에서 유동 분포는 유사하나, 유체가 다공성물질로 대체된 열교환기 영역으로 유입될 때 전열판 type에 따라 헤더로부터 서로 다른 유량이 유입됨을 알 수 있다. 특히 입구에서 가까운 채널에서 전열판 형상에 따른 유체의 속도가 많은 차이를 보인다. H type의 경우 다른 두 type에 비해 큰 유동저항으로 입구에서 가까운 채널에서 작은 양이 유입되어 다른 채널로의 고른 유동 분배가 이루어진 반면, 웨브론 각이 작은 L type일 때 다른 type에 비해 유동 저항이 작으므로 입구에

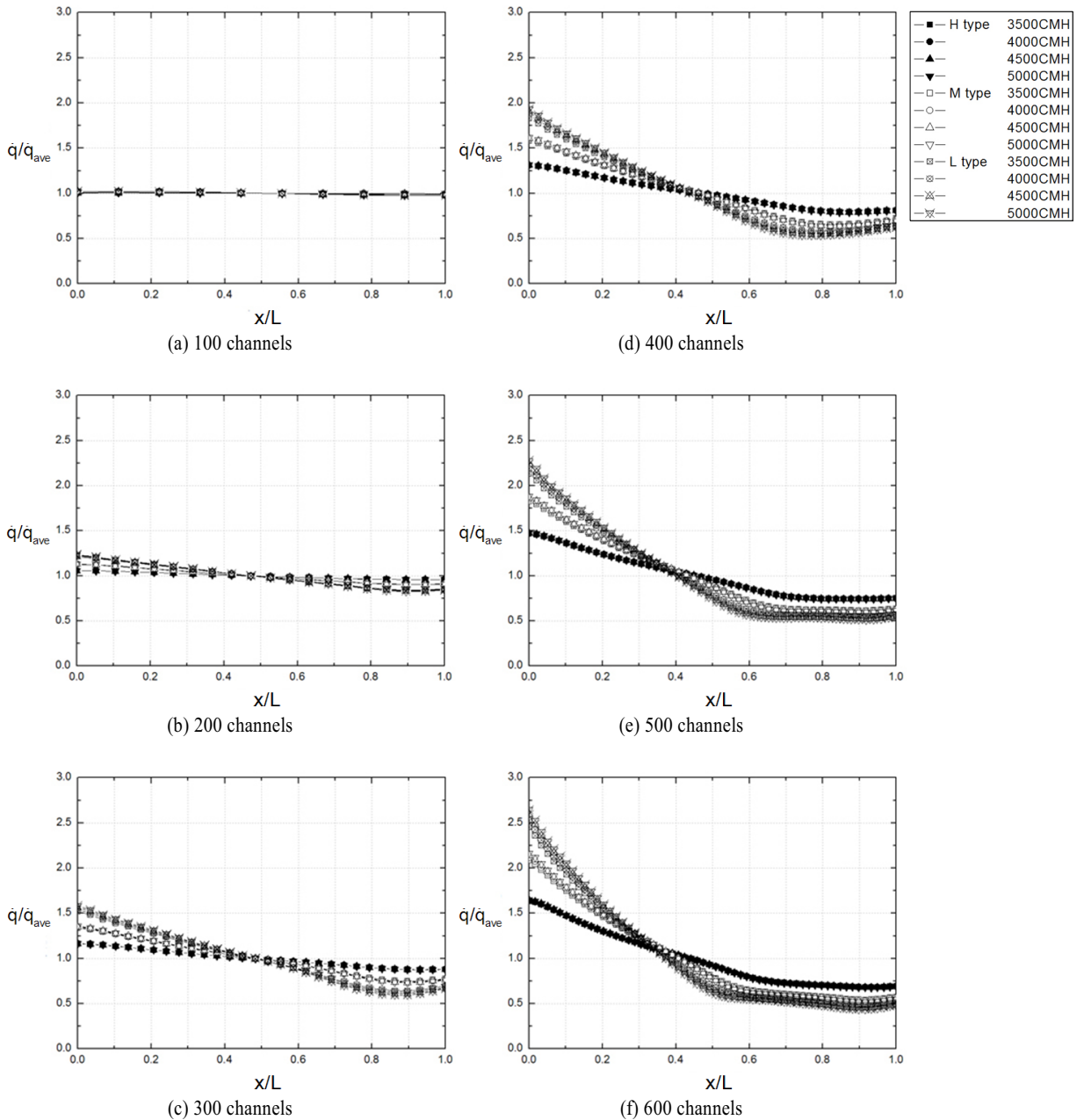


Fig. 6 Flow rate distribution in the channels with various chevron angle and inlet flow rates

서 가까운 영역에서 많은 양의 유량이 유입되어 입구에서 가장 먼 채널로 전달된 유량이 적어 입구에서 가까운 채널 내에서 유체의 속도가 다른 두 type에 비해 빠르나 유동 분포는 고르지 못한 것을 알 수 있다. 각 type에 따른 채널당 유량을 Fig. 6에서 확인할 수 있는데 채널 개수가 작을 때 type에 따

른 유량 분포는 비교적 동일한 반면, 채널 개수가 증가할수록 유량의 불균형 분배가 심해지는데 채널 개수가 600장일 때 H type과 L type은 최대 1.5배정도의 차이가 난다. 이는 동일한 유량이 유입되는 조건에서 채널 개수가 증가함에 따라 각 채널에 분배되는 채널당 유량이 감소하게 되는데 입구에서 가

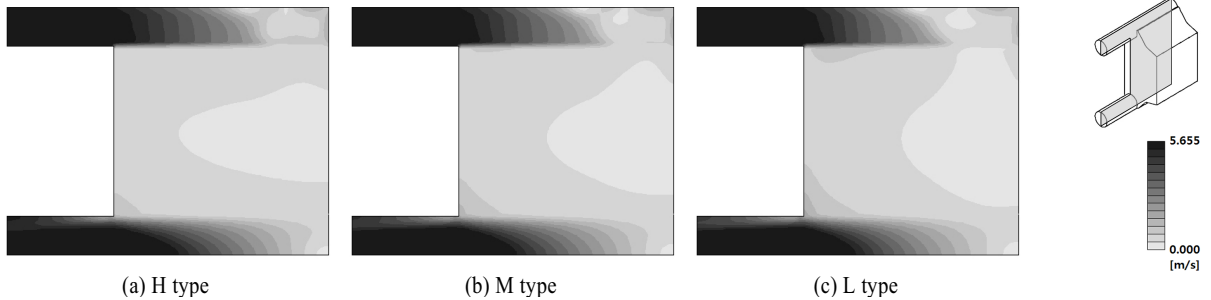


Fig. 7 Velocity distribution for plates with various chevron angle (300 channels, 3500 CMH)

까운 채널에 유입되는 유량은 여전히 많으므로 각 type의 유량 분배도 더 큰 차이를 나타내게 된다. 웨브론 각이 클수록 채널당 유동 분배가 고르고 이는 전열판 형상에 의한 유동 저항이 클수록 유동 분배가 잘 형성된다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 대형 관형 열교환기에서 채널 개수 증가에 따른 채널당 유량 분배에 대해 수치해석하였다. 입구 유입 유량과 전열판의 웨브론 각 등 작동 조건을 변형시키고, 실제 실험값으로부터 얻은 압력강하 값을 이용하여 열교환기의 채널 부분을 다공성 물질로 대체하여 준미시적 해석을 수행하였다. 각 채널 개수에 따른 유량분배 특성을 확인하기 위하여, 고, 저온의 유체에 대해 모두 고려하지 않고 단일유로에 대하여 해석을 수행하였으며, 입구 유입 유량과 전열판의 웨브론 각에 대하여 채널 개수에 따른 유량 분포를 확인하였다. 이때 H type이 가장 고른 분배성을 나타내었다. 이로 인해 입구 유입 유량에 대한 영향보다 웨브론 각에 의한 영향이 더 큰 것을 알 수 있었다. 웨브론 각에 의한 유동 저항이 작아지게 되면 입구에서 유입된 유량 중 많은 유량이 헤더의 끝에 도달하기 전에 열교환기로 유입되게 되므로 채널 개수에 따라 적절한 전열판의 웨브론 각에 의한 유동 저항에 대해 고려하여 유동 분배가 이루어지도록 해야 한다.

후 기

본 연구는 중소기업청에서 시행한 선도형 기술혁신개발 지원사업(S1051989)으로 수행된 연구 결과임.

참고문헌

- [1] 2006, Zhang, G.-M., Tian, M.-C. and Zhou, S.-J., "Simulation and analysis of flow pattern in cross-corrugated plate heat exchanger", *Journal of hydrodynamics*, Vol.18, No.5, pp.547-551.
- [2] 1997, Kho, T., Zettler, H.U., Muller-Steinha, H. and Hughes, D., "Effect of flow distribution on scale formation in plate and frame heat exchanger", *Chemical Engineering Research and Design*, Vol.75, No.7, pp.635-640.
- [3] 2008, Lu, F., Luo, Y.-H. and Yang, S.-M., "Analytical and experimental investigation of flow distribution in manifolds for heat exchanger", *Journal of Hydrodynamics*, Vol.20, No.2, pp.179-185.
- [4] 1999, Lalot, S., Florent, P., Lang, S.K. and Bergles, A.E., "Flow maldistribution in heat exchanger", *Applied Thermal Engineering*, Vol.19, No.8, pp.847-863.
- [5] 2003, Jiao, A. Zhang, R. and Jeong, S., "Experimental investigation of header configuration on flow maldistribution in plate-fin heat exchanger", *Applied Thermal Engineering*, Vol.23, No.10, pp.1235-1246.
- [6] 2004, *STAR-CD Methodology Version 3.24*, Computational Dynamics Ltd.