

Chevron 유로 내의 미시적 해석 결과를 통한 대형 판형열교환기 특성에 대한 준미시적 해석

이 나 리, 이 명 성, 이 상 혁, 허 남 건^{†*}

서강대학교 대학원, *서강대학교 기계공학과

A Semimicroscopic Analysis for the Characteristics of a Large Plate Heat Exchanger through a Microscopic Flow and Heat Transfer Analyses inside a Chevron Passages

Nari Lee, Myungsung Lee, Sang Hyuk Lee, Nahmkeon Hur^{†*}

Graduate school, Department of Mechanical Engineering, Sogang University, Seoul 121-742, Korea

^{*}Department of Mechanical Engineering, Sogang University, Seoul 121-742, Korea

ABSTRACT: In the present study, the flow and heat transfer characteristics of a large plate heat exchanger are investigated numerically. The flow passages are very complicated due to the grooved corrugation patterns of the plate surface so that the detailed mesh and the large amount of the computation time have to be required in the numerical simulation for the conjugate heat transfer analysis. In order to accomplish the efficient and fast analysis of the heat transfer characteristics in the plate heat exchanger, a semimicroscopic method using the porous media model has been investigated numerically. The results showed that the characteristics of the heat transfer and pressure drop, which are respectively presented with Colburn j-factor and Fanning f-factor, are in a good agreement between the detailed mesh and the porous media model. The results of the present study could be applicable to the numerical analysis of entire flow passages in the large plate heat exchanger using porous media treatment.

Key words: Plate heat exchanger(판형열교환기), CFD(전산유체역학), Conjugate heat transfer(복합 열전달), Porous medium(다공성 매질)

1. 서 론

판형 열교환기는 전열판으로 유로를 형성하여 고온측 유체와 저온측 유체를 분리시키고 두 유체가 서로 다른 방향으로 교대로 흐르게 하여 유

체간의 온도차에 의한 열전달에 의해 작동 유체의 온도를 감소, 유지, 증가 시키는 장치로서, 난방, 폐열회수, 공기조화, 냉각기, 증발기, 응축기 등 산업 전반에 널리 쓰이고 있다. 판형 열교환기는 전열판의 형상에 따라 열전달 및 압력강하 특성을 가지게 된다. 따라서 열전달 성능 향상을 위한 다양한 형상의 전열판을 가지는 열교환기의 개발이 진행중이다. 그 중 웨브론 타입의 판형 열교환기는 전열판이 주름진 형상을 가지게 되는

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-705-8637; fax: +82-2-712-0299

E-mail address: nhur@sogang.ac.kr

데 이러한 주름의 형태에 따라서 열전달 성능이 달라지게 된다. 이에 Croce와 D'Agaro⁽¹⁾은 판형 열교환기의 적층된 전열판으로 구성되는 유로의 형상에 대하여 3차원으로 모델링하여 유동 및 열전달 특성을 연구하고, 난류유동일 때 Nu가 Pr와 Re에 연관성이 더 높아짐을 확인하였다. Kanaris 등⁽²⁾은 열교환기의 전열판에 따른 열전달 특성을 분석하기 위해 실험과 수치해석 연구를 수행하였다. Jain 등⁽³⁾은 입구 부분을 제외한 열교환기를 모델링하고 수치해석을 수행하여 기존 연구의 결과와 비교함으로써 열교환기의 다양한 작동조건에 대한 열전달 특성을 분석하였다.

이와 같이 열교환기의 전열적 특징에 대하여 다양한 수치해석적 연구가 진행되었으나, 최근에는 열교환기 전체 형상을 구현하기 위하여 격자를 생성하여 미시적 해석을 수행하는 경우도 많아졌다. Tsai 등⁽⁴⁾은 쉘브론 타입 판형 열교환기에 대해 유로 두 개와 입출구 형상을 모델링하여 실험과 수치해석 결과를 비교하고 열교환기의 압력강하 특성에 대한 여러 연구를 진행하였다. 하지만, 최근 판형 열교환기 뿐만 아니라 대부분의 열교환기의 성능 향상을 위하여 난류 유동 향상 및 전열면 확대를 위한 내부에 복잡한 형상의 구조물을 설치함에 따라, 이러한 복잡한 형상을 구현한 미시적 해석은 격자수 및 계산 시간의 증가를 초래하기 때문에 해석을 수행하는데 어려움이 많다. 따라서, 복잡한 형상의 열교환기의 압력강하 및 열전달 특성을 고려한 다공성 물질 해석을 기반으로 하는 준미시적 연구가 수행되고 있다. Hur 등⁽⁵⁾은 차량용 라디에이터를 하기 위한 다공성 물질을 사용한 준미시적 해석을 수행하여 기존 실험 및 상관식과 비교하여 일치하는 결과를 보여주고 있다. 그러나 이와 같은 해석을 위해서는 압력강하 및 열전달 특성을 요구하기 때문에 실험 및 해석을 통하여 얻은 상관식을 사용하게 된다. Lee 등⁽⁶⁾은 열교환기의 압력강하 및 열전달 특성에 대해 형상을 구현한 미시적 해석으로부터 얻은 수치해석적 상관식을 사용하여 다공성 물질을 사용하는 준미시적 해석을 수행하는 방법론을 제안하였다. 이와 같은 열교환기 해석방법은 국부적인 영역에 대한 미시적 해석으로부터 성능을 도출하고, 이를 적용한 준미시적 해석으로부터 열교환기 특성 파악이 가능하게 한다.

본 연구에서는 우선 판형 열교환기의 전열판의

주름진 부분의 복잡한 형상을 구현하여 다양한 입구 속도에 따른 열전달 및 압력 강하 성능에 대한 무차원 수인 Fanning f-factor와 Colburn j-factor를 구하여 레이놀즈수와와의 상관식을 얻기 위한 미시적 해석을 수행하였다. 이와 같은 미시적 해석으로부터 얻은 열전달 및 압력강하 특성을 사용하여 열교환기의 유로 영역을 다공성 물질로 대체하여 열교환기의 유동 및 열전달 특성에 대한 준미시적 해석을 수행하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 판형 열교환기의 압력강하 및 열전달 특성

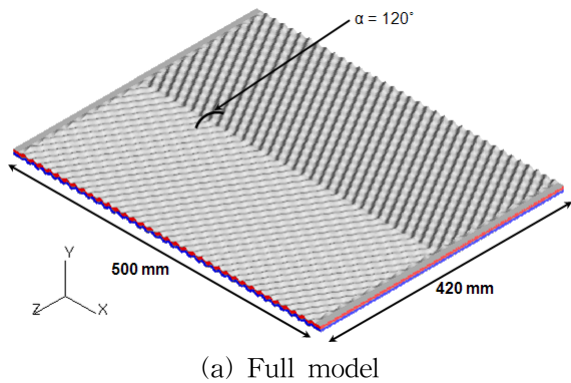
쉐브론 타입의 판형 열교환기는 쉘브론 형상을 갖는 전열판이 반복적으로 배열된 형태로, 본 연구에서는 쉘브론 타입 판형 열교환기에 대한 계산을 위해 Fig. 1와 같이 전체 판형 열교환기 중 쉘브론 형상이 주기적인 영역을 해석 영역을 설정하여 격자를 구성하였다. 이와 같은 쉘브론 형상을 갖는 판형 열교환기의 열전달 및 압력강하 특성은 쉘브론 형상 및 레이놀즈수에 영향을 받으며, 특정 형상의 전열판에 대한 열교환기 특성은 전열판의 유동방향 길이(L)에 대해 다음과 같이 정의된 레이놀즈수(Re_L)에 의해 결정된다.

$$Re_L = \frac{\rho U_{avg} L}{\mu} \quad (1)$$

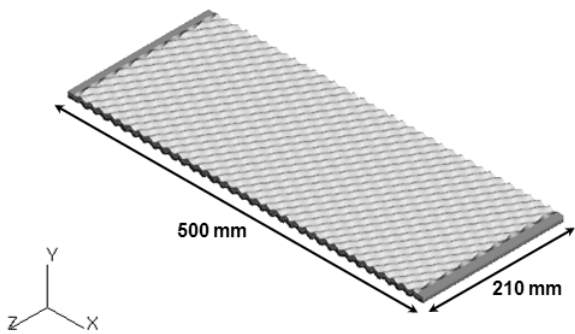
이 때, 대표속도(U_{avg})는 판형 열교환기의 주기적인 영역에 대한 유동에 수직인 방향 단면을 통과하는 평균 속도로 정의하였다. 열교환기의 열전달 특성을 파악하기 위하여, 비열(c_p)과 질량유량(\dot{m}), 입출구에서의 온도(T_{in}, T_{out})를 이용하여 얻은 열전달량(Q)으로부터 다음과 같이 열전달계수(h_h, h_c)를 구하였다.

$$\begin{aligned} Q_h &= \dot{m}_h c_p (T_{h,in} - T_{h,out}) = h_h A_s (T_{h,\infty} - T_{c,\infty}) \\ Q_c &= \dot{m}_c c_p (T_{c,in} - T_{c,out}) = h_c A_s (T_{c,\infty} - T_{h,\infty}) \end{aligned} \quad (2)$$

이와 같이, 고온측과 저온측의 입출구에서 온도 차로부터 얻은 열전달량을 이용하여 전열판의 전



(a) Full model



(b) Half Model

Fig. 1 Geometry of plate of heat exchanger

열면적(A_s)과 고온측과 저온측의 평균 온도차 ($T_{c,\infty} - T_{h,\infty}$)로부터 열전달계수의 특성을 얻었다. 이러한 판형 열교환기의 열전달계수의 특성을 일반화하기 위하여 무차원수인 Colburn j -factor를 다음과 같이 구하였다.

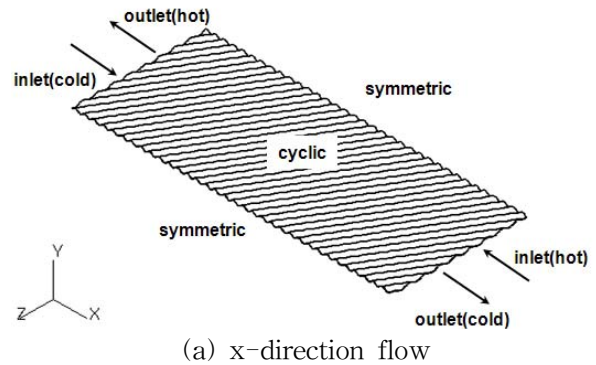
$$j = St \cdot Pr^{2/3} = \frac{h}{\rho U_{avg} c_p} \left(\frac{c_p \mu}{k} \right)^{2/3} \quad (3)$$

열전달 특성 뿐만 아니라, 판형 열교환기의 성능을 결정하는데 있어 압력강하 특성도 매우 중요하다. 본 연구에서는 압력강하의 특성을 나타내는 무차원수인 Fanning f -factor를 사용하였다.

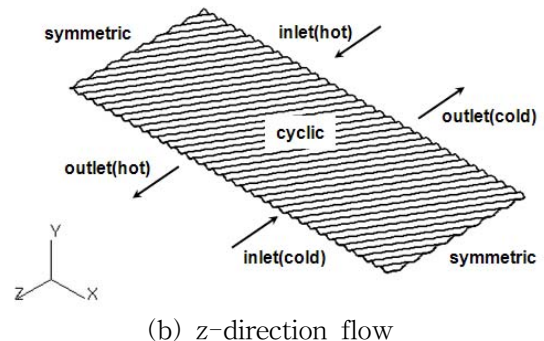
$$f = \frac{2\Delta p}{\rho U_{avg}^2} \left(\frac{A_c}{A_s} \right) \quad (4)$$

여기서 A_c 는 유체가 흐르는 유동방향에 수직한 평균단면적이다.

2.2 미시적 해석 기법



(a) x-direction flow



(b) z-direction flow

Fig. 2 Boundary condition

본 연구에서는 Fig. 1(a)과 같은 쉘브론 타입의 판형 열교환기에 대하여 수치해석하였다. 쉘브론 타입의 전열판은 전체 $500 \times 8.708 \times 420 \text{ mm}^3$ 으로, z 방향의 중심을 기준으로 양쪽으로 대칭된 형상을 갖고 있다. 대칭축을 기준으로 뱀처럼 구불구불한 패턴을 갖는 쉘브론은 서로 120° 의 각을 이룬다. 유체의 전열판은 x 축에 대해 대칭이므로 해석은 Fig. 1(b)와 같이 전열판의 절반만 모델링하여 수행하였다. 판형 열교환기는 전열판을 쉘브론 각에 대해 반대로 교차시켜 적층하여 유로를 형성하게 된다. 형성된 유로에 대하여 한쪽은 고온의 유체를 한쪽은 저온의 유체가 교대로 흐르게 하여 각 유로에 대한 열전달 및 압력강하 성능을 식 (3,4)와 같이 구하였다. 작동유체는 고온측 유체, 저온측 유체 모두 물이며, 입구에서 고온측 유체, 저온측 유체의 온도는 각각 373K, 293K으로 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 유체의 유동방향이 x 축 방향과 z 축 방향인 두 가지 경우로 나누어 해석을 진행하였다. 이 때, 각각의 유동 방향에 대해 입구속도를 0.2~1.0 m/s로 0.2 m/s의 간격으로 주어 고온측과 저온측의 속도가 동일하거나 다르게 하여 각각 13개씩 총 26개의 해석조건에 대하여 해석을 수행하였다. 해석격자

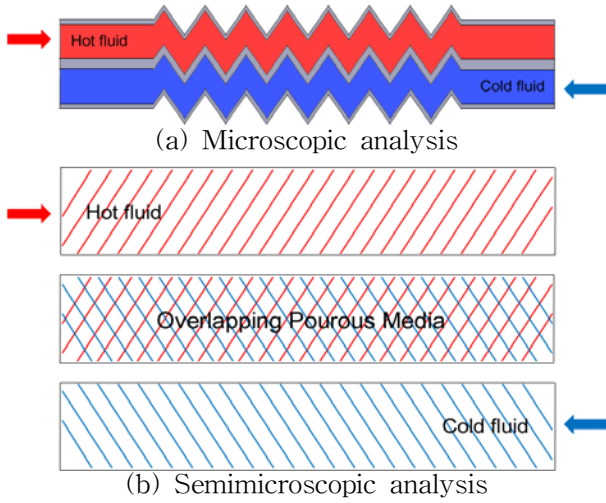


Fig. 3 Schematics of the computational domain for the microscopic and semimicroscopic analysis of the plate heat exchanger

는 유체격자 약 390만개와 고체격자 약 42만개로 전체 약 430만개이다. x축 방향 및 z축 방향의 유동 해석에 대한 경계조건은 Fig. 2와 같이 주기 경계조건과 대칭 경계조건을 사용하여 Fig. 3(a)와 같이 전열판의 주기적으로 반복되는 구조에 대하여 복잡한 형상을 묘사하여 미시적 해석을 수행하였다. 이와 같은 미시적 해석에 있어, 상용 프로그램인 STAR-CD V3.24⁽⁷⁾로 AMD Opteron 2GHz Linux Cluster의 4 CPU를 사용하여 정상상태 계산을 수행하는데 약 20시간 정도의 해석 시간이 소요되었다.

2.3 준미시적 해석 기법

판형열교환기의 해석에 있어 복잡한 전열판의 형상을 묘사하여 미시적 해석을 수행하기 위해서는 매우 많은 격자수를 요구되며 이로 인하여 해석에 많은 시간이 걸리게 된다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3(a)와 같이 판형 열교환기 실제 형상을 묘사한 미시적 해석을 수행하여 얻은 j-factor와 f-factor에 대한 상관식을 이용하여 Fig. 3(b)와 같이 다공성 물질 처리 기법을 기반으로 하는 준미시적 해석을 통해 열교환기 성능 결과를 얻었다. 이와 같은 다공성 물질 처리 기법을 사용함으로써, 복잡한 형상의 전열판에서 복합 열전달이 발생하는 영역을 다공성 물질로 대체하여 해석을 수행하였다. 이 때, 고온측 및 저온측의 유로를 주기적인 영역에 해당하는 크기로 격자를 생성하고 별개로 구성된 고온측 및 저

온측 유로를 서로 오버랩하여 해석격자를 구성하였다. 이러한 준미시적 해석을 위해서는 미시적 해석에서 얻은 압력강하 및 열전달 특성을 구현하여야 한다. 본 연구에서는 미시적 해석에서 다공성 물질에서의 유동 특성을 해석하기 위하여 Brinkman-Forchheimer에 의해 수정된 Darcy Eqn.을 다음과 같이 사용하였다.

$$\frac{\rho}{\epsilon} \left(\frac{\partial U}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla U \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\mu'}{\epsilon} \nabla^2 U - \frac{\mu}{K} U - \frac{\rho C_E}{K^{1/2}} |U| U + \rho f_i \quad (5)$$

여기서, 열교환기 형상을 구현한 해석으로부터 얻은 압력강하 특성에 대한 f-factor의 상관식을

$$\frac{\partial P}{\partial x_i} = - (\alpha_i |U| + \beta_i) U \quad (6)$$

와 같이 적용하여 해석을 수행하였다. 또한, 다공성 물질을 통한 열전달을 위해, 고온측과 저온측 다공성물질 사이의 온도차를 고려한 열원을 계산하여 다음과 같이 다공성 물질에서의 열유동 해석을 수행하였다.

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} + (U_D \cdot \nabla T_f) = \left(\frac{k_{f,eff}}{\epsilon(\rho C_p)_f} + D^d \right) \nabla^2 T_f + \frac{ha}{\epsilon(\rho C_p)_f} (T_{f,h} - T_{f,c}) \quad (7)$$

이와 같은 다공성 물질 처리 기법을 사용한 준미시적 해석에서는 형상을 구현한 미시적 해석에서 사용한 격자의 약 1/10에 해당하는 전체 38만개의 격자를 사용하여 해석을 수행하였으며, 상용 프로그램인 STAR-CD V3.24⁽⁷⁾로 AMD Opteron 2GHz Linux Cluster의 1CPU를 사용하여 약 1시간 정도의 해석 시간이 소요되었다.

3. 결과

3.1 미시적 해석 결과

본 연구에서는 쉘브론 타입 판형 열교환기의 전열판의 실제 형상을 자세히 묘사하여 미시적

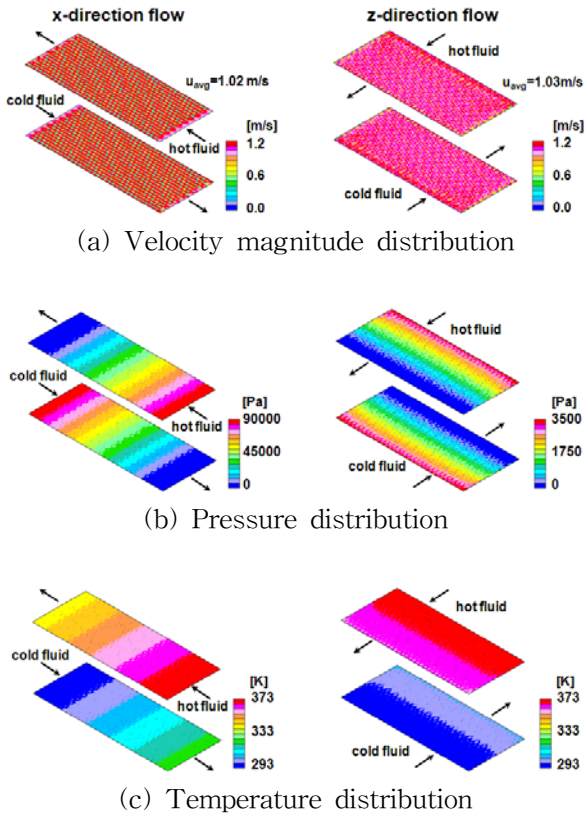
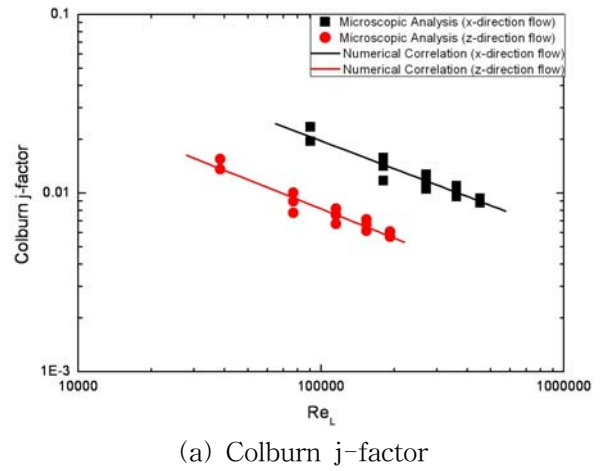
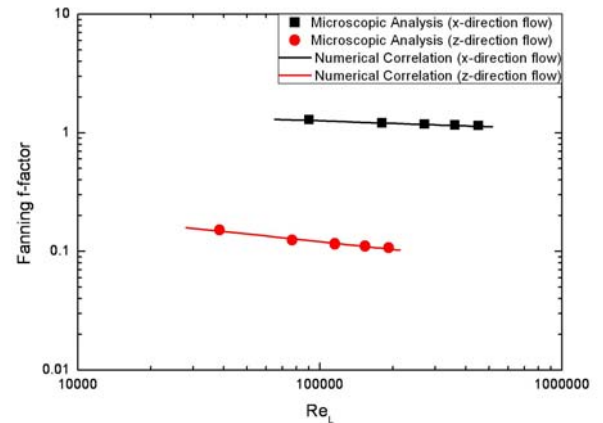


Fig. 4 Flow and heat transfer characteristics of the microscopic analysis for the plate heat exchanger ($U_{in}=1\text{m/s}$)

해석을 수행하여, 열교환기를 통한 유동 및 열전달 특성을 얻었다. Fig. 4은 입구 속도가 1.0m/s 인 경우 x방향 및 z방향 유동을 갖는 판형 열교환기를 통한 유동 및 열전달 특성을 보여주고 있다. 유동속도 특성을 보여주는 Fig. 4(a)를 보면, 1m/s로 입구에서 유입된 유체는 전열판을 따라 출구방향으로 흐르게 되며, 유로 내 유체의 평균 속도는 전열판이 차지하는 영역으로 인해 1.02m/s와 1.03m/s의 값을 가지며, 전열판 형상으로 인해 단면적이 변화하는 국소적인 부분에서 다소 속도의 변화가 발생하게 되며, 이는 난류 유동을 촉진시켜 열전달을 향상시키게 된다. 압력강하 특성을 보여주는 Fig. 4(b)를 보면, 입구에서 출구 방향으로 유동이 흐르면서 전열판 사이에서 형상의 영향으로 압력강하가 발생하게 된다. 또한, 열전달 특성을 보여주는 Fig. 4(c)를 보면, 고온측과 저온측 유로 사이의 고체 부분을 통해 열전달이 발생하게 되며, 이로 인해 출구방향으로 유체가 흐를수록 고온측 유로에서는 온도가 낮아지고 저온측 유로에서는 온도가 높아지는 결과를 볼 수 있다. 이러한 열교환기 내 압력강



(a) Colburn j-factor



(b) Fanning f-factor

Fig. 5 Colburn j-factor and Fanning f-factor of the microscopic analysis for the plate heat exchanger

하 및 열전달 특성은 유로를 통과하는 유동속도에 의해 결정되며, 본 연구에서 수행한 0.2~1.0m/s의 입구속도에 따른 열전달 및 압력강하 특성은 Fig. 5와 같이 무차원 수인 j-factor와 f-factor로 얻을 수 있었다. 이를 보면, 압력강하 및 열전달 특성은 속도의 변화로 인한 레이놀즈수 값에 의해 결정되며, 레이놀즈수가 증가할수록 j-factor 및 f-factor의 값이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 무차원수를 구하는데 있어 유동속도나 유동속도의 제곱값으로 나누어짐에 따라 레이놀즈수가 증가할수록 감소하게 되며, 실제 압력강하 및 열전달값은 레이놀즈수의 증가에 따라 증가하게 된다. 이와 같은 j-factor 및 f-factor값은 레이놀즈수의 거듭제곱 형태로 일반화시킬 수 있으며, 본 연구에서는 x-방향 및 z-방향으로 열교환기 내 유동이 형성될 경우 압력강하 및 열전

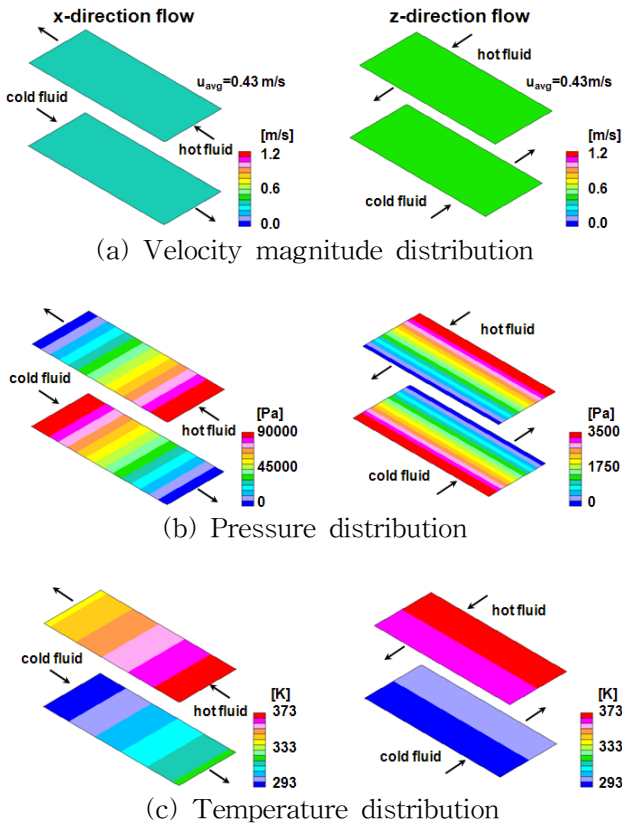


Fig. 6 Flow and heat transfer characteristics of the semimicroscopic analysis for the plate heat exchanger ($U_{in}=1\text{m/s}$)

달 특성에 대해 다음과 같이 상관식을 구하였다.

$$x\text{-방향 유동} : j = 7.5299 Re^{-0.517} \quad (7)$$

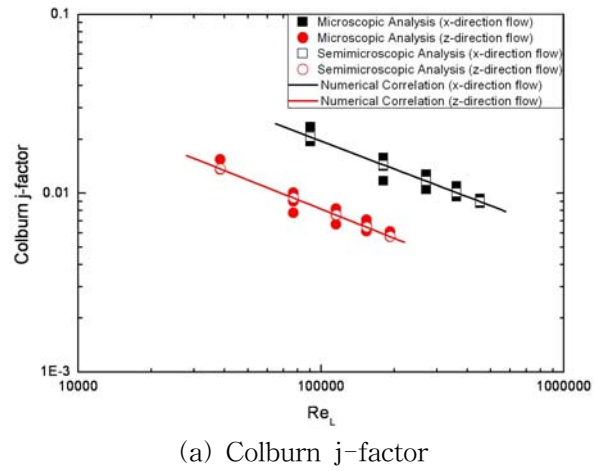
$$z\text{-방향 유동} : j = 4.1839 Re^{-0.542} \quad (8)$$

$$x\text{-방향 유동} : f = 2.8567 Re^{-0.071} \quad (9)$$

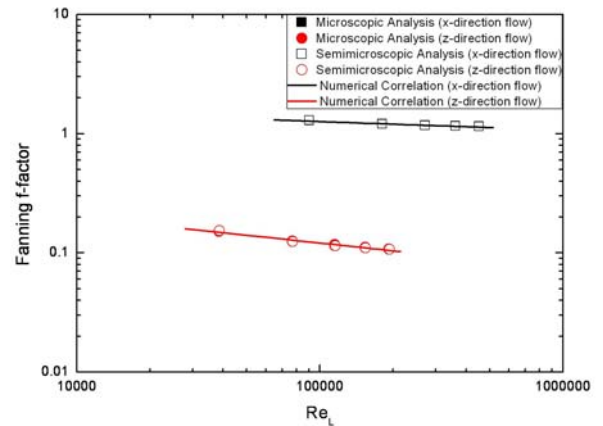
$$z\text{-방향 유동} : f = 1.4522 Re^{-0.216} \quad (10)$$

3.2 준미시적 해석 결과

본 연구에서는 전열판 형상 구현을 통해 얻은 식 (7~10)의 압력강하 및 열전달 특성 결과를 사용하여 다공성 물질 처리 기법을 기반으로 하는 준미시적 해석을 수행하였다. 준미시적 해석의 경우 고온측 및 저온측의 유로를 주기적인 영역의 크기로 격자를 생성하여 다공도가 0.43인 다공성 물질에 대한 유동을 해석하고, 다공성 물질을 통과하는 유동에 대한 레이놀즈수에 해당하는 열전달량을 계산하여 고온측과 저온측 사이의 열전달량을 적용하였다. 이와 같은 준미시적 해



(a) Colburn j-factor



(b) Fanning f-factor

Fig. 7 Comparison of Colburn j-factor and Fanning f-factor of microscopic analysis and semimicroscopic analysis

석을 통해 Fig. 6와 같은 열교환기 내 유동 및 열전달 특성을 얻을 수 있었다. 이는 Fig. 4과 같이 입구속도가 1m/s인 작동조건에서의 열교환기 특성이다. 이와 같은 준미시적 해석의 타당성을 검증하기 위해서는 실제 형상을 구현한 미시적 해석 결과와 비교해 보아야 한다. 따라서, Fig. 4과 6의 결과를 서로 비교해 보면, 압력 및 온도 분포 결과는 서로 거의 일치하는 경향 및 결과값을 갖는 것을 볼 수 있다. 그러나 속도 분포 결과는 서로 차이가 발생하게 된다. 이는 준미시적 해석에서는 유로의 단면적을 주기적인 영역만큼 확장시킴으로써 다공도가 0.43인 다공성 물질로 해석을 수행하게 됨에 따라 다공도에 해당하는 만큼 평균 속도의 차이가 발생하였다. 그러나 압력강하 및 열전달 특성을 나타내는 식(1,3,4)에서 열교환기 대표속도가 미시적 및 준미시적 해석시

같은 속도로 정의되었기 하였기 때문에 압력강하 및 열전달 특성에 있어 결과값이 서로 일치하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 준미시적 해석을 사용하여 입구속도의 변화하여 얻은 열전달 및 압력강하에 대한 무차원수인 j -factor 및 f -factor를 형상을 자세히 구현한 미시적 해석 결과와 Fig. 7과 같이 비교하였다. 이를 보면, 미시적 해석과 준미시적 해석으로부터 얻은 j -factor와 f -factor 값이 서로 잘 일치함을 볼 수 있다. 이와 같이 본 연구에서 사용한 다공성 물질 처리 기법을 사용한 열교환기 해석 방법은 실제 형상을 구현한 해석에서 사용한 격자의 1/10의 격자와 1/20의 해석시간을 필요함에도 불구하고도 형상을 모두 구현한 해석 결과와 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 따라서, 관형 열교환기의 복잡한 형상의 일부분에 대한 실제 형상을 구현한 미시적 해석으로부터 압력강하 및 열전달 특성을 얻어, 이를 적용한 다공성 물질 해석 기법을 기반으로 하는 준미시적 해석은 복잡한 형상을 갖는 대형 관형 열교환기의 전반적인 특성 분석에 활용될 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 웨브론 타입 관형 열교환기에 대하여 복잡한 형상을 구현한 미시적 해석과 다공성 물질 처리 기법을 기반으로 하는 준미시적 해석을 수행하였다. 미시적 해석에서는 복잡한 형상의 관형 열교환기에 대한 실제 형상을 자세히 모델링하여 해석을 수행하고, 이에 따른 결과로 관형 열교환기 내의 온도분포와 압력분포를 얻어 열전달 특성에 대한 j -factor와 압력강하 특성을 나타내는 f -factor에 대한 상관식을 구하였다. 이와 같은 압력강하 및 열전달 특성에 대한 상관식을 적용하여 열교환기의 고온측 및 저온측 유로를 다공성 물질로 대체하는 방법으로 준미시적 해석을 수행하였다. 이와 같은 준미시적 해석 결과는 미시적 해석 결과와 일치하는 결과를 보였으며, 준미시적 해석 방법은 미시적 해석에서 보다 적은 격자를 사용하여 짧은 시간동안 해석을 수행할 수 있어 대형 관형 열교환기 해석과 같은 넓은 영역에서 복잡한 형상을 갖는 열교환기의 해석에 사용될 수 있다.

후 기

본 연구는 중소기업청에서 시행한 선도형기술 혁신개발지원사업(S1051989)으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

1. Croce, G. and D'Agaro, P., 2002, Numerical analysis of forced convection in plate and frame heat exchangers, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, Vol. 12, No. 6, pp. 756-771.
2. Kanaris, A.G., Mouza, A.A. and Paras, S.V., 2005, Flow and heat transfer in narrow channels with corrugated walls a CFD code application, *Trans IChemE, Part A, Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 83(A5), pp. 460-468.
3. Jain, S., Joshi, A. and Bansal P.K., 2007, A new approach to numerical simulation of small sized plate heat exchangers with chevron plates, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 129, pp. 219-297.
4. Tsai, Y.-C., Liu, F.-B. and Shen, P.-T., 2009, Investigations of the pressure drop and flow distribution in a chevron-type plate heat exchanger, *International Communications in heat and mass transfer*, in press.
5. Hur, N., Park, J.-T., Lee, S.H., Choi, B. and Ahn, B.-J., 2009, Development of a Semimicroscopic Heat Exchange (SHE) method for a vehicle underhood thermal management, *Progress in Computational Fluid Dynamics*, Vol. 9, Nos. 3/4/5, pp. 141-149.
6. Lee, S.H., Kim, J.H, Lee, N. and Hur, N., 2008, A numerical process for the underhood thermal management with the microscopic and semi-microscopic heat transfer method, (in Korean) *Proceedings of the 5th National Congress on Fluids Engineering*, pp. 75-79.
7. CD-Adapco group, 2004, STAR-CD V3.24 Methodology.