

미시적/준미시적 방법을 이용한 자동차용 열교환기 해석기법

이상혁*, 김주한**, 이나리*, 허남건***

A Numerical Process for the Underhood Thermal Management with the Microscopic and Semi-microscopic Heat Transfer Method

Sang Hyuk Lee*, Joo Han Kim**, Nari Lee* and Nahmkeon Hur***

Key Words : Automotive Heat Exchanger(자동차용 열교환기), Louver Fin(루버핀), Heat Transfer(열전달), Flow Friction(유동저항), Porous Medium(다공성물질)

Abstract

In this study, the numerical process for analyzing the automotive louver fin heat exchanger was developed with a 3D microscopic and semi-microscopic analysis. In the microscopic analysis, the simulation with the detailed meshes was performed for obtaining the characteristics of the heat exchanger. From this simulation, the numerical correlations of the heat transfer and flow friction were obtained. In the semi-microscopic analysis, the Semi-microscopic Heat Exchanger (SHE) method, which is characterized by a conjugate heat transfer and porous media analysis was used with the numerical correlation from the microscopic analysis. This analysis predicted the flow and heat transfer characteristics of the louver fin heat exchanger in the wind tunnel and vehicle. In the design of the louver fin heat exchanger, this numerical process can predict the performance and characteristic of the louver fin heat exchanger.

1. 서론

최근 차량 엔진의 성능 향상 및 엔진룸의 축소로 인해 차량에 사용되는 부품과 장치의 고효율 및 안정성이 요구된다. 특히, 차량에 사용되는 열교환기는 엔진에서 발생하는 열을 대기로 방출하여 엔진이 작동 온도를 유지하게 하기 때문에 차량의 성능에 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서, 고성능을 갖는 열교환기를 개발하기 위한 연구가 계속 진행되고 있다.

열교환기는 요구하는 열전달 및 압력강하를 충족시키도록 설계되어야 한다. 차량에 사용하는 열교환기는 고성능을 필요로 하기 때문에, 연속적인 면을 갖는 열교환기에 비해 더 많은 압력 강하를 요구하지만 열전달 측면에서 높은 성능을 보이는 불연속적인 면을 갖는 열교환기가 널리 사용되고 있다. 현재 냉각수를 냉각시키기 위한 차량용 열교환기의 공기측에 보편적으로 사용되는 핀의 형태로는 웨이비핀, 오프셋핀, 루버핀 등이 있다. 이 중에서 루버핀 형상을 갖는 열교환기가 대부분의 차량에서 널리 사용되고 있다.

이와 같은 루버핀 열교환기의 성능을 향상시키기 위하여 열전달 및 압력강하 특성에 대해 그 동안 많은 연구자들에 의하여 진행되어 왔다. 그러나 루버핀 열교환기는 루버와 핀, 튜브와 같은 다양한 설계인자들에 따라 복잡한 형상을 갖는다. 따라서, 설계인자들이 열전달 및 압력강하에 미치는 영향에 대해 실험을 통해 분석하는 연구들이 대부분이었다. Webb and Jung[1]은 루버핀 열교환기가 기존 관형핀 열교환기에 비해 높은 성능을 가짐을 보였다. 이와 같은 고성능의 루버핀 열교환기의 특성을 파악

하기 위한 연구들이 진행되어 왔으며, Davenport[2]는 형상이 다른 32 종류의 루버핀 열교환기에 대한 실험을 수행하여 열전달 및 압력강하에 대한 상관식을 제시하였다. 또한, 여러 형태의 루버핀 열교환기에 대한 성능을 분석하기 위하여, 91 종류의 루버핀 열교환기로부터, Chang and Wang[3]은 열전달 특성에 대한 상관식을, Chang et al.[4]은 압력강하에 대한 상관식을 제안하였다. 열교환기의 열전달 성능에 대한 실험적 연구와 더불어 이론적 연구도 진행되어 왔다. 실험으로부터 얻어진 상관식을 이용하여, Song et al.[5]은 루버 형상에 대해 다공성 물질로 대체하여 냉각 효과의 증대를 위하여 이론적인 연구를 수행하였다.

이와 같은 실험적 및 이론적 연구는 열교환기 전체 및 국부적인 영역에 대한 특성을 파악하는데 큰 역할을 하였다. 그러나 이러한 연구 결과는 차량의 열교환 시스템 전반에 대한 특성을 파악하기 위해서는 한계를 가지고 있다. 최근 CFD의 발달로 인해 복잡한 유동 현상에 대한 수치해석을 수행하고 설계 및 개발에 적용되고 있으며, 차량용 열교환기에 대한 특성 파악에 있어서도 CFD를 이용한 연구가 진행되고 있다. Jung and Lee[6]는 실험 결과를 토대로 열교환기의 열전달 및 압력강하 특성에 대한 3D 수치해석을 수행하였으며, Perrotin and Clodic[7]은 루버핀 형상에 대한 자세한 형상 묘사를 통해 열교환기의 열전달 특성을 수치해석하였다.

본 연구에서는 CFD를 통한 루버핀 형상을 갖는 차량용 열교환기의 성능 및 특성을 파악할 수 있는 해석 과정에 대해 제안하였다. 이와 같은 수치적 해석 과정은 크게 미시적 해석 및 준미시적 해석으로 구분된다. 미시적 해석으로부터 루버핀 형상에 대한 열전달 및 압력강하에 대한 상관식을 얻었으며, 이를 이용하여 준미시적 해석에서 루버핀 열교환기 및 차량 열교환 시스템 전반에 대한 해석을 수행하였다.

* 서강대학교 대학원

** 전자부품연구원

*** 서강대학교 기계공학과, nhur@sogang.ac.kr

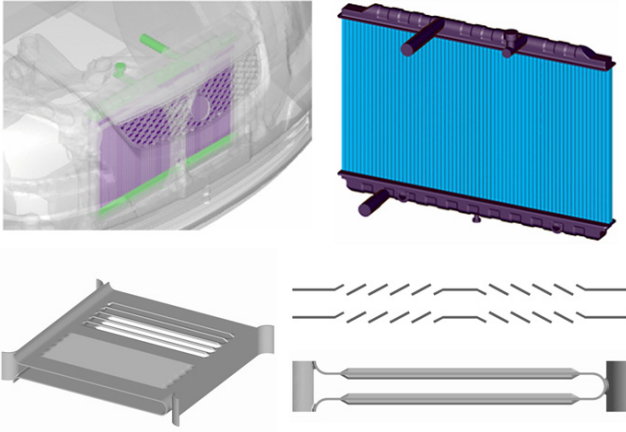


Fig. 1 Automotive louver fin heat exchanger

2. 루버핀 열교환기 (Louver Fin Heat Exchanger)

차량용 열교환기 중에 Fig. 1과 같은 루버핀 열교환기의 특성에 대해 분석하였다. 여기서 사용한 루버핀의 형상은 Chang and Wang[3]이 상관식을 제시하기 위해 사용한 형상 중에 하나로써, 형상에 대한 변수는 Table 1과 같다. 이와 같은 형상의 열교환기에 대한 수치해석을 위해 상용 프로그램인 STAR-CD[8]를 사용하였다.

루버핀 열교환기의 열전달 및 압력강하 특성을 파악하는데 있어, 가장 중요한 변수는 루버 피치 (louver pitch)를 기반으로 하는 레이놀즈수이다.

$$Re_{Lp} = \frac{\rho_a V_{max} L_p}{\mu_a} \quad (1)$$

열교환기의 특성을 파악하는데 있어, 열전달량은 열전달계수 및 비열을 사용하여

$$Q = hA_s(T_c - T_{a,m}) = \dot{m}c_p(T_{a,out} - T_{a,in}) \quad (2)$$

$$T_{a,m} = (T_{a,out} + T_{a,in})/2 \quad (3)$$

와 같이 구할 수 있다. 이로부터, 열전달계수는 공기측의 입/출구 온도 및 튜브벽의 온도를 사용하여 구할 수 있다. 열전달 특성에 대해 보다 일반적으로 표현하기 위해서, 본 연구에서는 다음과 같은 Colburn j-factor를 사용하였다.

$$j = St \cdot Pr^{2/3} = \frac{h}{\rho_a V_{max} c_{p,a}} \left(\frac{c_{p,a} \mu_a}{k} \right)^{2/3} \quad (4)$$

기존 실험을 통하여 루버핀 열교환기에 대한 상관식을 제시하였으며, 이 중에서 Chang and Wang[3]이 제안한 j-factor는 다음과 같다.

Parameter	Value	Parameter	Value
Louver angle	28 degree	Fin pitch	1.8 mm
Fin thickness	0.16 mm	Fin depth	22 mm
Louver pitch	1.318 mm	Fin length	16 mm
Louver length	12.44 mm	Tube pitch	21 mm
Hydraulic diameter	3.069 mm	Tube depth	22 mm

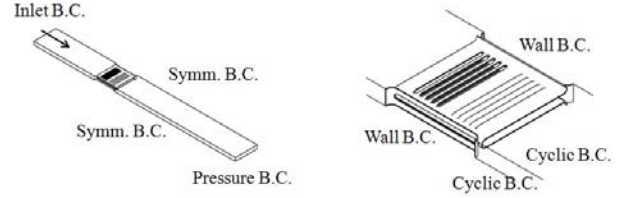


Fig. 2 Geometry and boundary conditions for the microscopic analysis

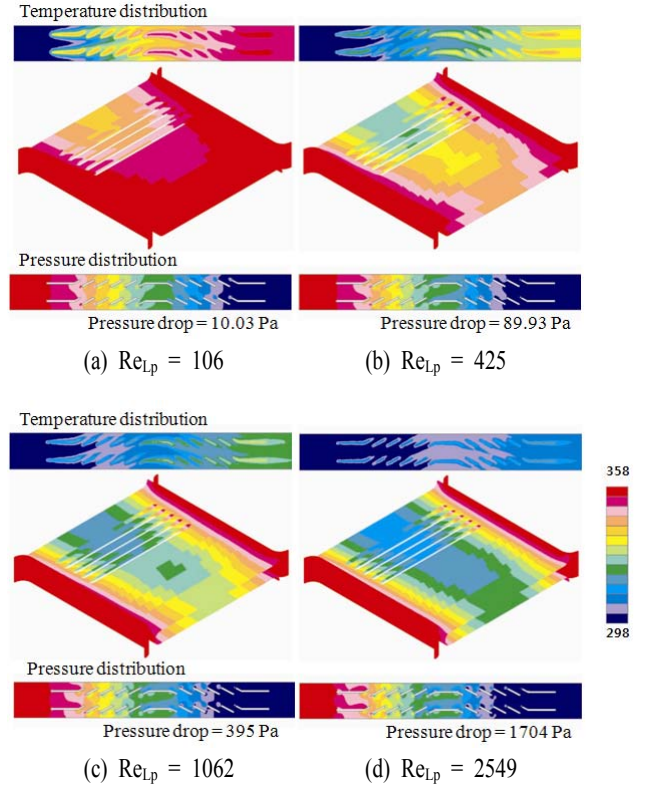


Fig. 3 Temperature and pressure distribution with various Reynolds number

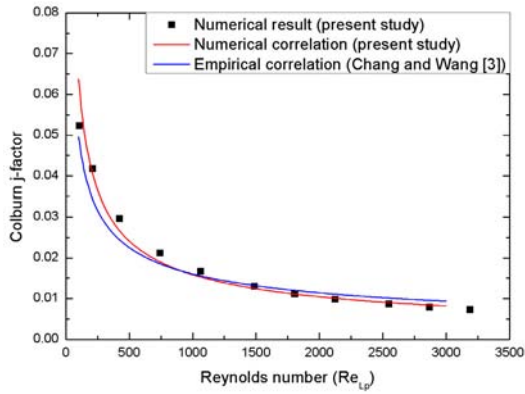
$$j = Re_{Lp}^{-0.49} \left(\frac{\theta}{90} \right)^{0.27} \left(\frac{F_p}{L_p} \right)^{-0.14} \left(\frac{F_l}{L_p} \right)^{-0.29} \left(\frac{T_d}{L_p} \right)^{-0.23} \left(\frac{L_l}{L_p} \right)^{0.68} \left(\frac{T_p}{L_p} \right)^{-0.28} \left(\frac{\delta_f}{L_p} \right)^{-0.05} \quad (5)$$

열교환기의 성능에 있어, 열전달과 더불어 압력강하도 매우 중요하다. 본 연구에서는 열교환기의 압력강하 특성을 표현하기 위하여, 다음과 같은 Fanning f-factor를 사용하였다.

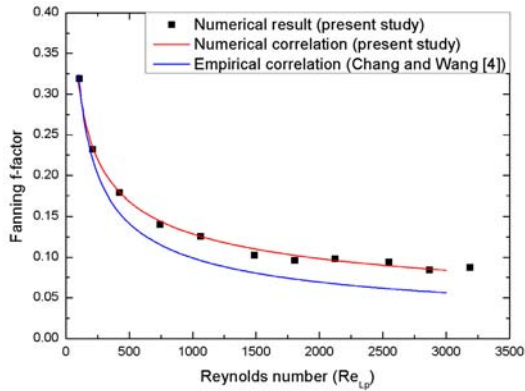
$$f = \frac{2\Delta p}{\rho_a V_{max}^2} \frac{A_c}{A_s} \quad (6)$$

열교환기의 열전달 뿐만 아니라 압력강하에 대해서도 상관식을 제시하기 위한 실험을 통한 많은 연구가 진행되어 왔다. Chang et al.[4]은 루버핀 열교환기의 압력 강하에 대한 상관식을 다음과 같이 제시하였다.

$$f = 0.805 Re_{Lp}^{-0.514} \left(\frac{F_p}{L_p} \right)^{-0.72} \left(\frac{F_l}{L_p} \right)^{-1.22} \left(\frac{L_l}{L_p} \right)^{1.97} \quad (7)$$



(a) Colburn j-factor



(b) Fanning f-factor

Fig. 4 Comparison of j-factor and f-factor obtained by the microscopic analysis with the empirical correlation

3. 미시적 해석 (Microscopic Analysis)

본 연구에서는 루버핀 열교환기의 특성에 대한 상관식을 수치해석을 통해 얻었다. 루버핀의 형상에 대해 자세히 묘사함으로써, 열교환기에 대해 미시적 해석을 수행하였다. 이와 같은 미시적 해석을 위해, 주기 및 대칭 경계조건을 사용하여 Fig. 2와 같이 열전달 및 압력에 대해 주기적인 특성을 갖는 영역에 대해 격자를 생성하였다. 410만개의 유체격자와 40만개의 고체격자를 사용하여 총 450만개의 해석 격자를 구성하였다. 튜브 안쪽 벽면에 358K으로 일정 온도 조건을 설정하여 루버핀의 열전달 성능을 평가하였다. 이 때, 열전달 및 압력강하에 대한 상관식을 얻기 위해 공기의 입구속도를 1 m/s ($Re_{Lp}=106$)에서 30 m/s ($Re_{Lp}=3187$)로 변화시켜 수치해석하였다.

Fig. 3은 다양한 공기의 입구속도에 따른 루버핀 주변에서의 온도 및 압력 분포를 보여주고 있다. 이를 보면, 높은 입구속도 일 때 출구에서 온도는 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이는 속도가 빠를수록 루버핀 주변에서 공기가 빨리 흐르기 때문에 출구온도가 낮았다. 그러나 속도 증가는 루버핀 주변의 공기를 계속 순환시키기 때문에 루버핀에서의 온도도 낮추는 것을 볼 수 있다. 따라서, 공기의 입구속도가 증가할수록 튜브 벽과 공기 출구의 온도차를 크게 하기 때문에 열전달 성능을 증진시키게 된다. 이와 같이 입구속도 증가는 열전달 측면에서 좋은 영향을 미치지 만, 높은 압력강하를 요구하게 된다.

Table 1과 같은 설계인자를 갖는 루버핀 열교환기의 성능을 얻기 위해서, 미시적 해석 결과로부터 열전달에 대한 Colburn j-factor와 압력강하에 대한 Fanning f-factor를 구하였다. 이와 같

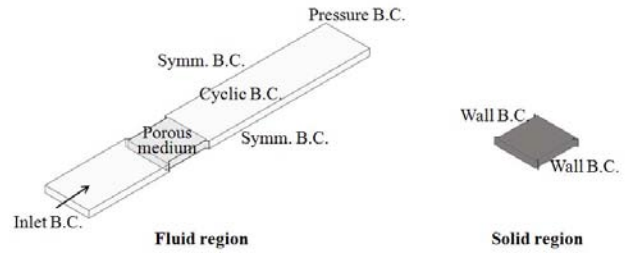


Fig. 5 Geometry and boundary conditions for the semi-microscopic analysis

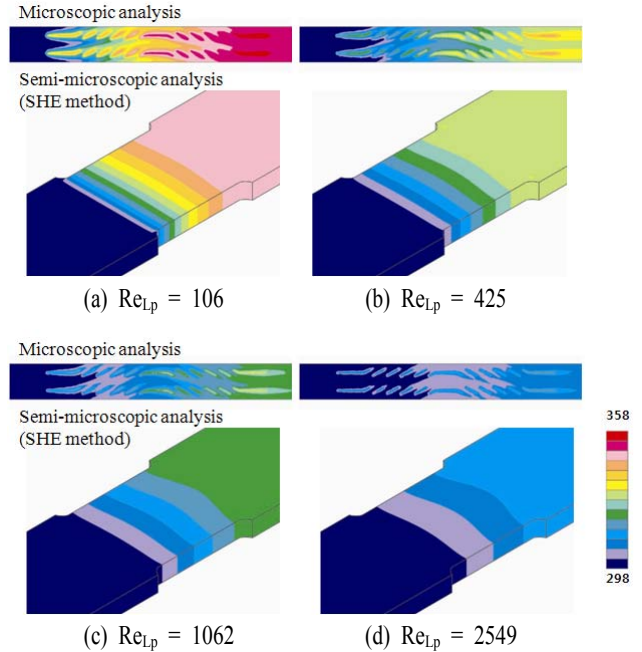


Fig. 6 Temperature distribution of the microscopic and semi-microscopic analysis

이 얻은 j-factor 와 f-factor의 값을 레이놀즈수의 함수 형태로

$$j = 1.0243 Re_{Lp}^{-0.603} \quad (8)$$

$$f = 1.8779 Re_{Lp}^{-0.388} \quad (9)$$

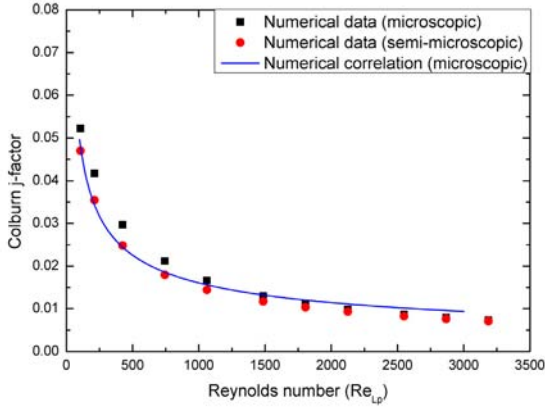
와 같이 보간하였다. Fig. 4는 미시적 해석으로 얻은 루버핀 열교환기의 열전달 및 압력강하 특성을 기존 실험을 통한 상관식과 비교하였다. 미시적 해석을 통해 얻은 상관식은 실험을 통해 얻은 상관식과 유사한 것을 볼 수 있다. 레이놀즈수가 증가할수록 j-factor와 f-factor의 값은 감소하는 경향성을 보였으며, 높은 레이놀즈수에서는 값이 일정해지는 것을 볼 수 있다.

4. 준미시적 해석 (Semi-microscopic Analysis)

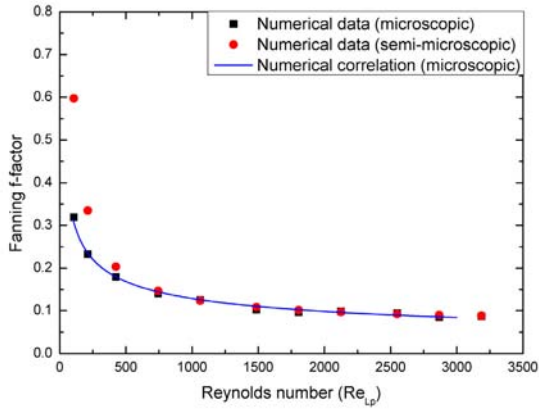
루버핀 열교환기의 해석을 위해, 3D 준미시적 해석 기법인 SHE (Semi-microscopic Heat Exchange) 방법을 개발하였다. 준미시적 해석을 통해 실험이나 수치해석으로부터 얻은 j-factor와 f-factor에 대한 상관식을 이용하여 열교환기의 특성을 예측할 수 있다.

4.1 준미시적 해석 기법

준미시적 해석 기법은 냉각수 유로와 튜브, 루버핀, 대기 영역으로 구성된 전체 해석영역에서 Conjugate heat transfer 해석을



(a) Colburn j-factor



(b) Fanning f-factor

Fig. 7 Comparison of j-factor and f-factor obtained by the semi-microscopic analysis with the numerical correlation

특징으로 한다. 이 때, 루버핀 열교환기에서 대부분의 열교환이 일어나는 부분인 루버핀 영역은 같은 위치에 공기와 고체 다공성 물질로 대체하여 모델링하였다. 따라서, 전체 해석 격자는 냉각수 유로와 튜브, 루버핀 영역의 고체 다공성 물질로 구성된 해석 격자와 루버핀 영역을 통과하는 공기 다공성 물질과 대기로 구성된 해석 격자로 구분할 수 있다.

이와 같이 구성된 해석 격자를 사용하여 열교환기 해석시, 다공성 물질에서의 유동과 압력은 Brinkman-Frochhimer에 의해 수정된 Darcy Eqn.을 사용하였다.

$$\frac{\rho}{\epsilon} \left(\frac{\partial U_D}{\partial t} + U_D \nabla U_D \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\mu}{K} U_D - \frac{\rho C_E}{K^{1/2}} |U_D| U_D + \rho f_i \quad (10)$$

이 때, 미시적 해석에서 압력강하에 대한 f-factor 상관식을

$$\frac{\partial P}{\partial x_i} = -(\alpha_i |U_D| + \beta_i) U_D \quad (11)$$

와 같은 형태로 다공성 물질에서의 유동저항으로 적용하였다.

다공성 물질에서의 열해석을 위한 방법은 크게 one-medium과 two-media 방법으로 구분할 수 있다. One-medium 방법은 미리 정해진 열원으로부터 하나의 다공성 물질에서 처리되므로 공기와 루버핀 사이의 국부적인 열전달 효과를 표현하기에는 다소 미흡하다. 그러나, two-media 방법은 유체와 고체 다공성물질 사

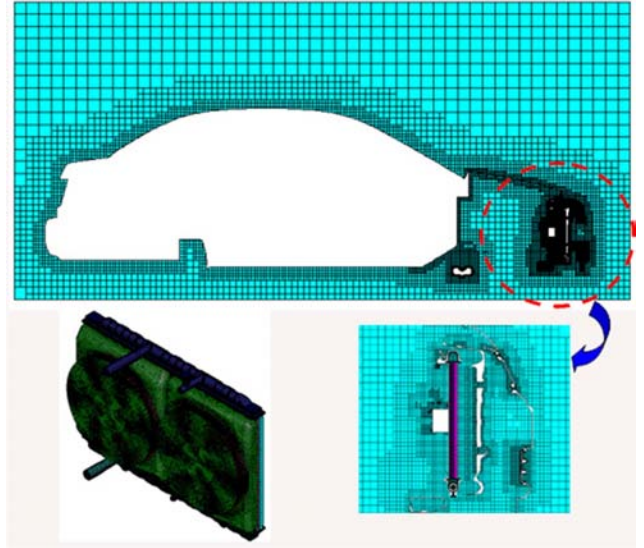


Fig. 8 Computational mesh for the underhood thermal management

이의 온도차를 고려하여 열원을 계산한다. 따라서, 본 연구에서는 다음과 같은 two-media 방법을 적용하여 다공성 물질에서의 열유동을 해석하였다.

Fluid Phase :

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} + (U_D \nabla T_f) = \left(\frac{k_{f,eff}}{\epsilon(\rho C_p)_f} + D^d \right) \nabla^2 T_f + \frac{ha}{\epsilon(\rho C_p)_f} (T_s - T_f) \quad (12)$$

Solid Phase :

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \left(\frac{k_{s,eff}}{(1-\epsilon)(\rho C_p)_s} \right) \nabla^2 T_s + \frac{ha}{(1-\epsilon)(\rho C_p)_s} (T_s - T_f) \quad (13)$$

이와 같이, two-media 방법에서는 두 다공성 물질의 온도차에 의해 열전달이 발생한다. 이 때, 열전달량은 열전달계수와 온도차에 의해 결정되게 되며, 열전달계수는 수치해석 및 실험을 통한 열전달에 대한 j-factor 상관식을 사용하여 얻을 수 있다.

4.2 준미시적 해석을 통한 루버핀 열교환기 해석

준미시적 해석을 이용한 자동차 열교환 시스템 해석에 앞서, 준미시적 해석 방법을 사용한 준미시적 해석을 검증하기 위해 미시적 해석 결과와 비교해 보았다. Fig. 5는 Fig. 2와 같은 미시적 해석에서 사용한 해석 영역에 대해 준미시적 해석을 적용하기 위한 해석 격자를 보여주고 있다. 준미시적 해석에서 루버핀 영역에서의 고체와 유체 사이의 Conjugate heat transfer를 기반으로 하기 때문에 유체와 고체역역으로 나누어서 해석 격자를 생성하였으며, 루버핀 영역의 유체와 고체 다공성 물질 영역을 서로 겹치게 모델링하였다. 이 때, 해석격자는 유체 45만개와 고체 7만개의 격자를 사용하여 총 52만개로 구성하였다.

이와 같은 해석 격자와 방법을 사용하여 준미시적 해석을 수행하였다. Fig. 6은 준미시적 해석으로부터 얻은 입구 속도에 따른 온도 분포를 보여주고 있다. 준미시적 해석 결과를 미시적 해석 결과와 비교해 보면, 두 결과가 일치하는 것을 볼 수 있다. 또한, 준미시적 해석 결과로부터 얻은 열전달 및 압력강하에 대한 상관식을 Fig. 7에서 미시적 해석 결과와 비교하였다. 이 결과도 두 해석의 결과가 동일하게 나타남을 볼 수 있다. 그러나

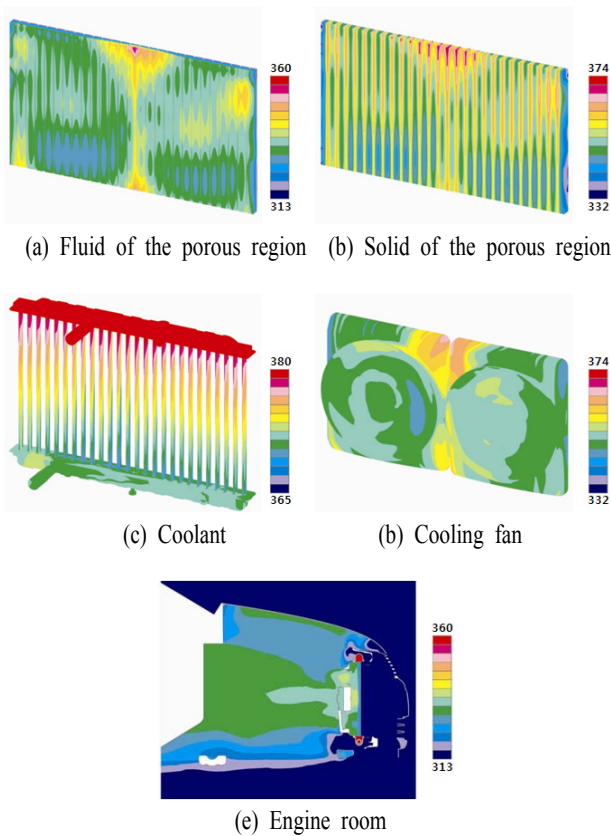


Fig. 9 Temperature distribution of the underhood thermal management

f-factor의 낮은 레이놀즈를 갖는 부분에서 다소 오차가 발생하였다. 이는 압력강하에 대한 f-factor의 값을 다공성물질의 유동저항을 식 (11)과 같이 적용함에 있어 다소 오차가 발생하였다.

4.3 준미시적 해석을 이용한 차량 열교환 시스템 해석

위와 같이 검증된 준미시적 해석 방법을 차량용 열교환기 특성 분석에 효과적으로 사용될 수 있다. 이를 통해 열교환기의 풍동 테스트 뿐만 아니라 전체 차량에서의 열교환 시스템 분석에도 적용될 수 있다. 이번 장에서는 준미시적 해석 방법을 사용한 전체 차량 열교환 시스템 해석을 수행하였다. 이 때, 차량에 장착된 루버핀 열교환기의 열전달 및 압력강하 특성은 미시적 해석으로부터 얻은 상관식을 사용하였다.

Fig. 8은 준미시적 해석을 위한 차량 열교환 시스템 해석을 위한 해석 격자를 보여주고 있다. 전체 해석 영역에 대해 열교환기와 대기 영역으로 나누어 총 700만개의 격자를 사용하였다. 열교환기 영역은 루버핀, 튜브와 냉각수로, 대기 영역은 루버핀을 통과하는 공기와 대기로 구성되어 있다. 이 영역 중에 루버핀과 이를 통과하는 공기 부분은 다공성 물질로 대체하고, 이들 사이에 온도차로부터 식 (12)와 (13)과 같이 열교환이 가능하도록 하였다.

본 연구에서는 준미시적 해석을 통해 차량이 20 m/s로 주행할 때 열교환 시스템에 대한 유동 및 열해석을 수행하였다. Fig. 9는 차량 속도가 20m/s 일 때 열교환 시스템에서의 온도 분포를 보여준다. 유체와 고체 다공성 물질 사이의 온도차에 의해 분리되어 있는 두 영역에 대한 열전달을 계산하였다. 이로부터 냉각수 및 대기의 온도 분포도 얻을 수 있었다.

루버핀 열교환기 특성에 있어 준미시적 해석을 통해 매우 효

과적으로 분석을 수행할 수 있었다. 준미시적 해석은 적은 격자를 사용하고도 매우 정확하게 특성을 예측하였다. 이와 같이 차량용 열교환기의 설계 및 제작에 있어 준미시적 해석 기법은 성능 평가 및 설계 자료 구축에 큰 도움을 줄 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 차량용 루버핀 열교환기의 성능 및 특성을 파악할 수 있는 해석 과정을 소개하였다. 이는 크게 미시적 해석과 준미시적 해석을 통해 수행되었다.

미시적 해석은 루버핀 형상을 자세히 모델링한 해석 격자를 사용하여 수치해석하였다. 이와 같은 해석을 통해 루버핀 형상에 따른 온도 및 압력 분포를 얻을 수 있었으며, 열전달에 대한 j-factor와 압력강하에 대한 f-factor를 구할 수 있었다. 여기서 구한 상관식은 기존 루버핀 열교환기의 실험을 통한 상관식과 일치하는 것을 볼 수 있었다.

준미시적 해석은 미시적 해석에서 얻은 상관식을 사용하여 Conjugate heat transfer과 다공성 물질 처리를 기반으로 수치해석하였다. 해석 영역을 크게 열교환기 및 대기 영역으로 나누어 생성하였으며, 루버핀과 이를 통과하는 공기에 대해 다공성 물질로 처리하였다. 서로 분리된 두 영역 사이의 열전달은 유체와 고체 다공성 물질의 온도차로 구하였다. 이로부터 얻은 해석 결과는 미시적 해석 결과와 같은 결과를 보였다. 이와 같은 루버핀 열교환기 분석 과정은 매우 효과적이며 실용적으로 사용될 수 있다.

참고문헌

- [1] Webb, R.L and Jung, S.-H., "Air-Side Performance of Enhanced Brazed Aluminium Heat Exchangers," ASHRAE Winter Meeting, Anaheim, CA, USA, (2002), pp.391-401.
- [2] Davenport, C.V., "Correlation for Heat Transfer and Flow Friction Characteristic of Louvered Fin," AIChE Symp., Vol.79, No.25, (1983), pp.19-27.
- [3] Chang, Y.-J. and Wang, C.-C. "A Generalized Heat Transfer Correlation for Louver Fin Geometry," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.40, No.3, (1997), pp.533-544.
- [4] Chang, Y.-J., Hsu, K.-C., Lin, Y.-T. and Wang, C.-C., "A Generalized Friction Correlation for Louver Fin Geometry," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.43, (2000), pp.2237-2243.
- [5] Song, C.H., Lee, D.-Y. and Sung, T.R., "Cooling Enhancement in an Air-Cooled Finned Heat Exchanger by Thin Water Film Evaporation," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.46, No.7, (2003), pp.1241-1249.
- [6] Jung, J.-S. and Lee, C.S., "Design of the Heat Dissipation Rate of Automotive Radiation (I) Analysis of Heat Dissipation," KSAE, Vol.11, No.5, (1989), pp.65-75.
- [7] Perrotin, T. and Clodic, D., "Thermal-Hydraulic CFD Study in Louvered Fin-and-Flat-Tube Heat Exchanger," International Journal of Refrigeration, Vol.27, (2004), pp.422-432.
- [8] STAR-CD V.3.24 User Guide, (2004), Computational Dynamics, LTD.