

플라스틱 판형 열교환기의 와류발생기에 관한 연구

오윤영*, 유성연**, 고성호***

A Study on the Vortex Generators of Plastic Plate Heat Exchangers

Yunyoung Oh*, Seongyeon Yoo** and Sungho Ko***

Key Words : Heat Exchanger(열교환기), Vortex Generators(와류발생기), Heat Transfer Enhancement(열전달향상), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학)

Abstract

The present study deals with CFD analysis of 'The vortex generators on plastic plate heat exchanger'. When a vortex generator is placed on the heat transfer surface, the flow gets more complex because it entails complicated three-dimensional flows such as separation, reattachment, and recirculation. CFX-5.4, a commercial code utilizing unstructured mesh, has been used as a computational method for solving RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) equations, and the applied turbulence model is k-ε model. In addition, those computational analyses were implemented under various conditions ; with or without the vortex generator between two plates, the number, form and the size of vortex generator, and different attack of angle. From the calculated temperature, velocity and pressure distribution, vorticity, wall heat flux and so on under those conditions, this study shows the effect of vortex on heat transfer.

1. 서론

열에너지의 효율적인 이용을 위해서는 열에너지 이용 기기에 열전달매체와 전열면 사이의 열전달을 촉진시켜 이들 시스템의 열교환 성능을 향상시켜야 한다. 열전달을 촉진시키기 위하여 지금까지 개발된 기술에는 유체 혹은 전열면에 진동을 가하는 방법, 유체에 정전장을 발생시키는 방법, 환을 사용하여 열전달 면적을 증대시키는 방법, 유체에 첨가물을 혼합시키는 방법 등이 있다. 위의 기술 중에 유체 혹은 전열면에 진동을 가하는 방법이나 유체에 정전장을 발생시키는 방법은 외부로부터의 추가적인 동력 투입이 필요하기 때문에 에너지절약이라는 측면에서는 바람직하지 못하다. 열에너지 이용 기기의 열전달을 촉진시키기 위해서 오래 전부터 가장 많이 사용되고 있는 방법이 환이나 확대 전열면을 부착하는 것이다. 최근에는 가공 기술의 진보와 이용 목적의 다양화에 따라 특수한 형태의 환이나 확대 전열면을 제작하여 열전달 면적의 증가와 난류 촉진에 의한 열전달 계수 증대의 이중의 효과를 얻고 있다.

열교환기의 전열면에 와류발생기를 부착하면 유동의 형태는 박리, 재부착, 재순환 등을 수반하는 매우 복잡한 3차원 유동을 수반하기 때문에 실험이나 이론만으로는 해석하기 어려운 부분이 많다. 따라서 본 연구에서는 실험이나 이론만으로 해석하기 어려운 부분(-와류발생기가 평판에 설치되었을 때 복잡한 내부의 유동장과 열전달 현상)을 전산유체역학(CFD)를 이용하여 해석하고 그것을 이용하여 새로운 형태의 열교환기 개발에 따른

설계에 정확한 방향을 제시하는데 그 목적이 있다.

Mitra^[1]은 매우 얇은 형태의 와류발생기를 사각 유동장 내에 설치하였을 때, 와류발생기에 의한 열전달 촉진을 전산해석을 통하여 계산하였다. Fiebig^[2]은 한 쌍의 삼각날개 와류발생기와 얇은 삼각날개 형태의 와류발생기를 사각관 유동장 내에 설치하였을 때 속도장, 온도장, 열전달계수를 구하였다. 와류발생기의 설치 각도에 따라서 유동 특성과 열전달 특성의 변화를 연구한 사람은 Biswas^[3]이다. 그는 논문에서 와류발생기의 설치각도를 20°, 26°, 30°로 변화시켜 가면서 연구를 하였으며, 동일한 설치각도일 때는 Re수가 500일 때보다는 Re수가 1850일 때가 Nu수가 98.3% 증가하였으며, 설치각도가 26°인 경우에는 설치각도가 20°인 경우 보다 Nu수가 10.6% 증가하였고, 30°인 경우에는 설치각도가 20°인 경우 보다 Nu수가 26.42% 증가하는 것으로 나타났다. 지금까지 와류발생기(vortex generator)를 사용한 열교환기의 해석에서는 열전달이 증대됨에 따라 압력강하 또한 수반되었는데 우리는 이번 연구에서 열전달 증대와 함께 압력강하를 작게 하는 것을 연구 방향으로 삼는다.

두 평판 사이에 와류발생기의 형상, 와류발생기의 설치위치, 와류발생기의 설치각도와 같은 변수를 변화시켜 가면서 채널 내에서의 속도분포, 압력분포, 와류도(vorticity) 등을 구하여 여러 가지 해석조건에서 와류의 유동 특성과 열전달의 상관관계를 분석하여 와류의 열전달 촉진을 고찰할 것이다.

2. 경계조건 및 전산 해석 방법

2.1 경계조건

해석에 쓰이는 기본 형상의 경계면에는 입구, 출구, 벽면 및 symmetric plane이 존재한다. Fig. 1은 이러한 경계면을 보여주

* 충남대학교 대학원, ohyy@netian.com

** 충남대학교 기계설계공학과, syyooh@cnu.ac.kr

*** 충남대학교 기계설계공학과, sunghoko@cnu.ac.kr

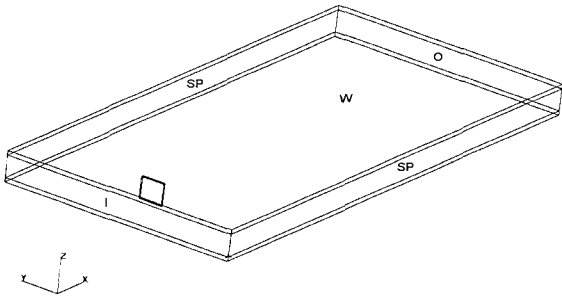


Fig. 1 Coordinate system and boundary surface in the physical domain

고 있으며 이 열교환기에 대한 경계조건은 다음과 같다.

- (1) 입구 경계면에서 속도는 U_0 로 일정하다고 가정하였다.
- (2) 입구와 출구를 제외한 두 평판사이의 옆면은 symmetric plane으로 한다.
- (3) 판과 와류발생기 벽면의 온도는 50°C 로 일정하게 유지된다.
- (4) 평판 입출구의 벽면은 단열조건을 사용하였다.

2.2 전산해석방법

각각의 판형 열교환기는 차가운 공기가 입구에서 유입되고 위와 아래의 열교환기 판은 입구에서의 공기 온도보다 높은 온도로 일정하게 유지되고 있다고 가정하여 전산해석을 하였다.

전산해석연구에서는 각 단계별로 하나의 형상만 고려하였고, 하나의 유동 조건이 모든 단계에 똑같이 적용되었다. 이때 사용된 평판과 평판사이의 간격은 5mm 이며 벽면의 온도는 50°C 로 일정하게 유지되며 입구속도는 10m/s 의 균일한 속도 U_0 로 20°C 의 공기가 유입된다. 이때 일관적인 교차를 위하여 각 단계 모두 관성 좌표계를 사용하였으며 x 방향은 유동방향으로서 공기가 유입되는 입구에서 출구 쪽으로 방향을 양(+)으로 하였으며, y 방향은 유선을 가로지르는 방향으로서 평판의 너비 방향이며, z 방향은 xy 평면에 수직인 방향으로서 아래 평판에서 위 평판으로의 방향이 양이다. 전산해석에서의 유체유동은 난류유동으로 가정한 모델을 사용하였다.

본 연구에서는 범용 열·유체해석 프로그램인 CFX-5.4를 사용하여 계산하였다. CFX는 전 처리장치인 CFX-Build, solver인 CFX-Solver와 후 처리장치인 CFX-Visualise로 되어있다. 난류 모델은 일반적으로 많이 사용하는 k- ϵ 모델을 사용하였다. Mach 수가 매우 낮으므로 유동을 비 압축성으로 간주하여 압력 변화에 따른 밀도의 변화는 무시하였다.

3. 결과 및 고찰

경계층 유동이 장애물을 만나면 동압력(dynamic pressure)이 정압력(static pressure)으로 바뀌면서 유선 방향으로 압력구배가 생긴다. 이 압력구배가 원을 향한 유동을 유발하고, 이 유동이 원과 만나서 역유동(back flow)이 되면서 와류를 형성한다. 와류란 하나의 회전축을 중심으로 소용돌이(swirl)치는 유동을 지칭하며 주로 유체의 마찰과 박리에 의하여 발생한다. 이러한 와류는 주변의 유동장을 불안정하게 만듦으로써 여러 가지 전달현상을 촉진시키는 효과를 유발시킨다. 많은 열유체 응용 기계들은 와류에 의한 열전달 촉진 효과를 보기 위하여 특별히 고안된 형상의 와류발생기를 설치하여 의도적으로 와류의 생성을 피하고

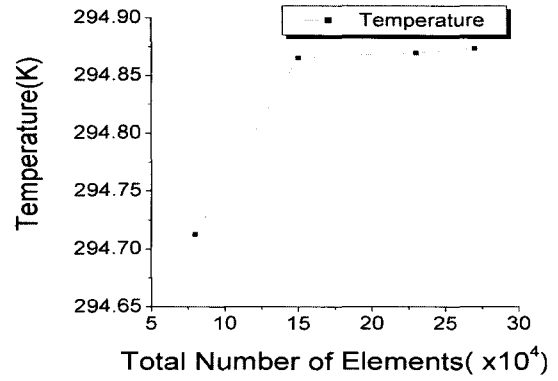


Fig. 2 Grid Independence Test for the simulation of the Vortex Generator

있다. 일반적으로 와류발생기는 길이 방향의 와류(longitudinal vortex)를 형성시킴으로써 경계층과 와류의 상호작용으로 인한 복잡한 3차원 혼합이 형성되어 열전달을 촉진시킨다. 두 원 사이에 하나의 사각형 와류발생기가 xz 평면상에서 유입공기 속도 벡터에 대하여 45° 혹은 90° 각도로 서있고, xy 평면상에는 수직으로 설치되어 있다. 와류발생기는 두 원까지 연결되어 있다.

Fig. 2는 격자 수에 따른 두 평판사이 어느 한 지점의 온도 값을 구함으로 수렴하는 것을 보여 이 계산에 사용된 격자수를 결정하였음을 보이고 있다.

사각형 와류발생기가 유동방향에 대하여 90° 로 설치되어 있고, 대칭적으로 배열되어 있는 경우에 중심면($z=2.5\text{mm}$)에서의 속도벡터가 Fig. 3에 나타나 있다. 와류발생기가 유선에 대하여 90° 의 각도를 가지고 대칭적으로 배열되어 있으므로 와류발생기 후방에 생성되는 두 개의 와류도 대칭적으로 형성되는 것을 볼 수 있다. 중심선 부근에서는 속도가 크고 벽면부근, 핀과 가까운 부근에서는 속도가 작으므로, 이러한 속도차에 의하여 유체가 회전한다고 생각된다. 즉 유선에 직각으로 서 있는 와류발생기는 너비방향으로 속도를 유발시키고, 이러한 속도는 벽면 근처에서는 작고 중심선 부근에서 최대가 되므로 이러한 속도의 크기차에 의하여 와류가 생성된다. 사각형 와류발생기가 유동방향에 대하여 45° 로 설치되어 있고, 비대칭적으로 배열되어 있는 속도 중심면($z=2.5\text{mm}$)에서의 속도벡터가 Fig. 4에 나타나 있다.

Fig. 5는 와류발생기의 유무에 따른 두 판의 중심대칭평면에서의 정압력의 분포를 보여주고 있는데 이 때의 정압력은 너비 방향으로 평균한 값이다. 와류발생기가 없는 경우에는 압력이 입구에서 출구까지 완만하게 감소함을 관찰할 수 있다. 하지만 와류발생기가 설치되어 있는 경우 와류발생기의 부근에 이르러

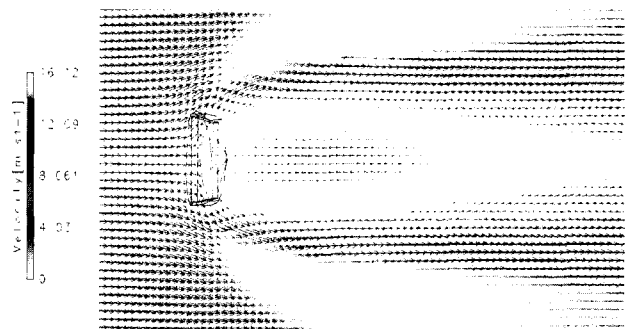


Fig. 3 Rectangular wing vortex generator with $\beta=90^\circ$

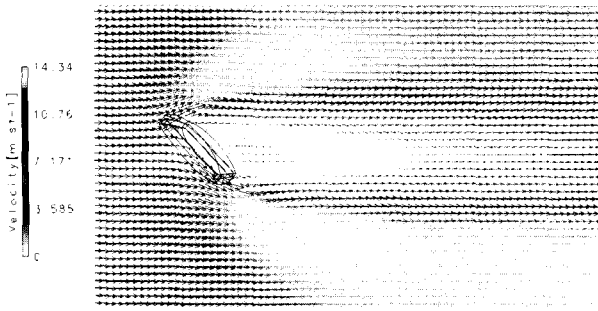


Fig. 4 Rectangular wing vortex generator with $\beta=45^\circ$

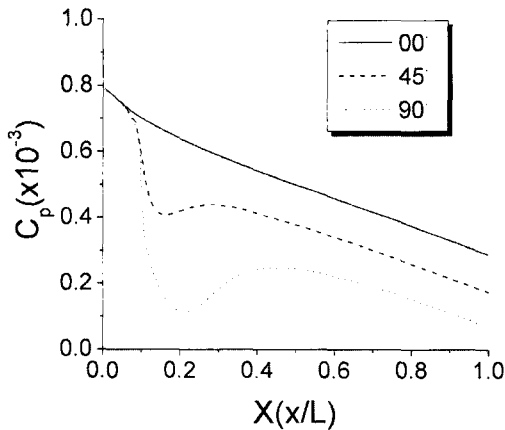


Fig. 5 Computed, static pressure distribution along the wall at $z=3$ mm for the fin with rectangular wing vortex generators

압력이 강하며 후면의 후류영역 즉 재순환영역에서는 압력의 최저값을 나타내고 있다. 가장 큰 압력강하를 보이는 90° 인 경우 입구에서 출구까지의 계산된 총 압력강하는 83Pa 이며 이는 와류발생기가 없는 두 평판 사이의 유동과 비교했을 때 약 1.5 배의 압력강하로써 이 증가된 압력손실은 와류발생기에 의한 형상저항(form drag)이 주된 원인이라 하겠다.

Fig. 6은 두 판의 중심대칭평면에서의 공기의 온도 분포를 보여주고 있는데 역시 판의 너비로 평균된 값이다. 효과적인 열전달은 두 판을 지나는 공기의 온도를 높일 것이다. Fig. 6에서 보듯이 공기의 온도는 와류발생기를 지나며 급격히 상승을 하고 이러한 온도의 상승은 출구까지 계속 유지된다. 와류발생기는 45° 인 경우보다 90° 인 경우 더 효율적으로 공기의 온도를 상승시킨다는 것을 잘 보여주고 있다. 와류발생기가 없는 경우와 비교하여 90° 인 경우 평균온도 상승은 1.5°C 이고 이는 입구에서의 판과 공기의 온도차이 30°C 에 기준하여 5%에 달하는 것이다. 물론, 이러한 온도상승의 원인은 두 가지로 생각할 수 있다. 첫째는 와류발생기의 설치로 인한 전열면적의 증대이고, 둘째는 와류발생기의 효과적인 열전달 촉진이다. 그러나 와류발생기의 설치로 인한 전열면적의 증대는 겨우 0.5%라는 점을 생각할 때 대부분의 온도상승은 와류의 복잡한 열전달 촉진현상에 의한 것이라 판단할 수 있다.

Fig. 7는 판에서의 너비로 평균된 열유속을 나타내고 있다. 공기에 전달되는 열유속은 공기와 벽면의 온도차의 감소에 의해 출구쪽으로 가면서 점차적으로 감소함을 잘 볼 수 있다. 전체적으로 와류발생기가 90° 로 설치된 경우가 45° 로 설치된 경우보다 높은 열전달을 나타내고 있으며 이 둘은 와류발생기가 없

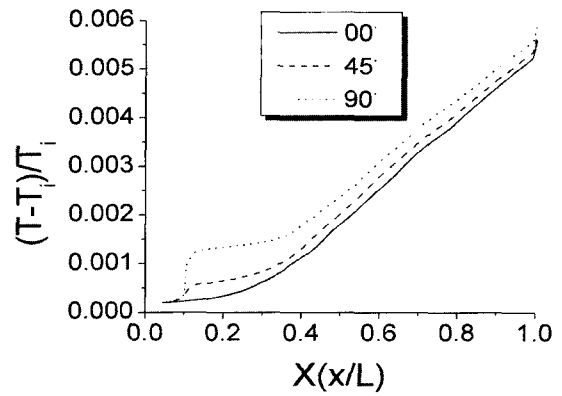


Fig. 6 Computed, temperature distribution along the wall at $z=3$ mm for the fin with rectangular wing vortex generators

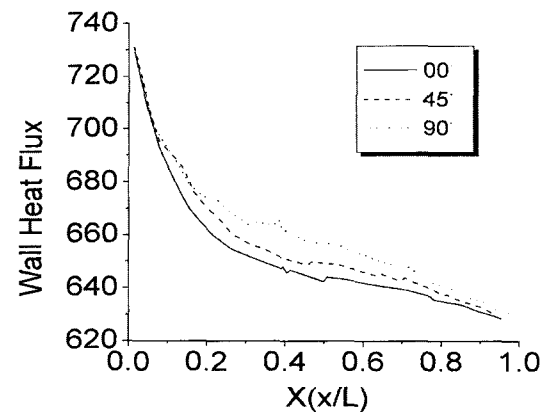


Fig. 7 Computed, wall heat flux distribution along the wall for the fin with rectangular wing vortex generators

는 경우보다 열전달이라는 관점에서 우수하게 나타나고 있다. 지금까지의 결과로 볼 때 와류발생기를 xz 평면에 90° 로 세웠을 때 가장 좋은 열전달 효과를 보였다. 물론 와류발생기를 xz 평면에 90° 로 세움으로써 압력강하는 발생하나, 그것은 와류발생기를 xz 평면에 45° 로 세웠을 경우의 압력강하와 열전달 효과를 비교하였을 때 90° 로 세운 경우가 더 좋은 열전달 효과를 보여주었기에 xz 평면에 90° 로 와류발생기를 여러개 세운 경우를 생각해 볼 수 있다.

Fig. 1과 같이 하나의 와류발생기에 똑같은 형상의 와류발생기를 중심 축을 기준으로 50mm 떨어진 곳에 세웠다. 이와 같은 이유는 중심 축으로부터 압력강하와 온도 변화량이 너비 방향에 대하여 일정하기 시작하는 값을 구해서 세운 것이다.

와류발생기가 하나 서 있는 상태에서 너비 방향으로 와류발생기의 영향이 없는 지점에 중심 축을 중심으로 양쪽에 10mm 의 간격으로 세웠다. 3개의 와류발생기를 길이방향으로 50mm 만큼 떨어진 곳에 세웠다. Fig. 8은 z 축에 2.5mm 의 높이에 있는 길이방향의 평면을 압력에 대하여 너비방향으로 평균한 값을 나타내고 있으며 압력강하는 무차원 시킨 값이다. Case 1은 xz 평면에 90° 인 와류발생기를 하나만 세웠을 경우이고 Case 2는 Case 1의 와류발생기에서 x 방향으로 50mm 떨어진 곳에 와류발생기를 놓은 경우이다. Case 3은 Case 1의 와류발생기에서 x, z 방향으로 각각 10mm 떨어진 곳에 두 개의 와류발생기를 설치

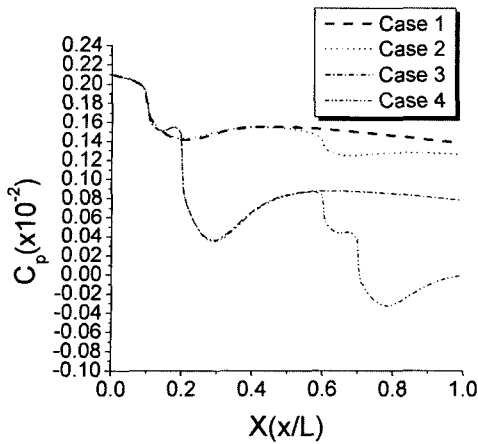


Fig. 8 Computed, static pressure distribution along the wall at $z=3\text{mm}$ for the fin with rectangular wing vortex generators

하였으며 Case 4는 Case 3의 세 개의 와류발생기를 x 방향으로 50mm 떨어진 곳에 세 개의 와류발생기를 설치한 것이다. Fig. 8을 보면 알 수 있듯이 압력강하는 와류발생기를 여러 개 사용하면 할수록 압력강하는 개수에 비례하여 늘어나는 것을 볼 수 있다. Fig. 9는 z축에 2.5mm의 높이에 있는 길이 방향의 평면의 온도 값을 너비방향으로 평균한 것이며 입구온도에 대하여 무차원 시켰다. Fig. 8, Fig. 9에서 보면 알 수 있듯이 여러 개의 와류발생기를 사용함에 따라서 온도가 증가하는 것이 보이지만 압력강하 또한 그에 못지 않게 늘어나는 것을 볼 수 있다. 우리는 압력강하가 늘어나면 그에 따라 송풍기의 동력 또한 높아야 하며 이것은 이번 열교환기의 효율적인 측면에서 그다지 큰 효과가 없음을 나타내는 것이다.

4. 결론

와류발생기의 형상과 설치각도를 고려한 두 흰, 와류발생기를 여러 개 사용하여 열전달 효과와 압력강하를 와류도, 속도장, 압력강하, 열유속 등을 전산해석 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 와류발생기의 설치각도와 와류발생기 형태에 따른 압력강하는 투영면적이 증가할수록 압력강하도 증가하였다.
- 2) 두 흰 사이에 와류발생기가 설치되면 와류발생기에 의하여 생성된 종방향 와류와, 와류발생기가 설치된 바로 뒷 영역에서 재 순환 영역이 형성되면서 활발한 난류 활동으로 인하여 와류발생기가 없는 경우보다 국부적으로 최대 3배, 평균적으로

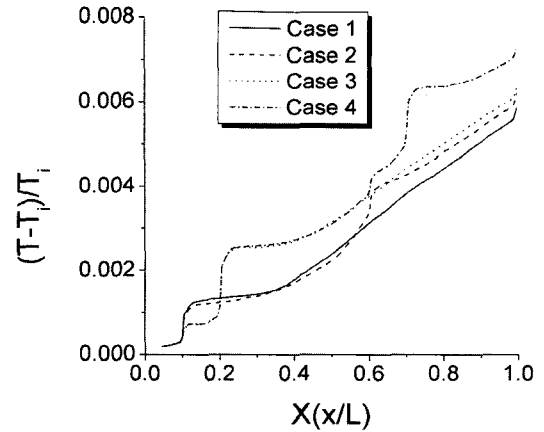


Fig. 9 Computed, temperature distribution along the wall at $z=3\text{mm}$ for the fin with rectangular wing vortex generators

로 1.3-1.7배 급격히 증가하다가 재 순환 유동이 소멸하면서 감소하는 경향을 보였다. 사각형 와류발생기가 두 흰에 설치된 경우 와류발생기 후류 영역에서는 설치각도가 90°인 경우가 45°인 경우보다 열전달이 촉진되었다.

후기

본 연구는 에너지 관리공단에서 시행한 에너지·자원기술개발사업 수행결과의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] G. Biswas, N. K. Mitra and M. Fiebig, "Heat Transfer Enhancement in Fin-Tube Heat Exchangers by Winglet Type Vortex Generators" *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, No 2 (1994), pp.283-291.
- [2] M. Fiebig, U. Brockmeier, N. K. Mitra and T. Guntermann, "Structure of Velocity and Temperature Fields in Laminar Channel Flows With Longitudinal Vortex Generators," *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 15 (1989), pp.281-302.
- [3] G. Biswas and H. Chattopadhyay, "Heat Transfer in a Channel with Built-in Wing-Type Vortex Generators", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 35, No. 4 (1992), pp.803-814.