

Shell & Tube 열교환기 Shell 측 열전달 및 유동에 대한 수치해석

이 상혁,¹ 이 명 성,¹ 허 남 건²NUMERICAL ANALYSIS ON THE HEAT TRANSFER AND FLOW
IN THE SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGERSang Hyuk Lee,¹ Myungsung Lee² and Nahmkeon Hur^{*3}

The numerical simulations on the heat transfer and flow field were carried out for the improvement of the performance of the shell and tube heat exchanger. The steady incompressible 3-D Navier-Stokes solution is obtained with the actual operational condition and geometry of the heat exchanger. The present geometry of the heat exchanger causes poor heat transfer since the air inside shell dose not flow through the tube bundle, but around it. The enhancement of the heat transfer can be achieved by the variation of the design factor like the sealing strip located on the top/bottom and middle of the baffle.

Key Words : 원통다관형 열교환기(Shell & Tube Heat Exchanger), 전산유체역학(CFD), 설계인자(Design Parameter), 형상변수(Shape Variables)

1. 서 론

열교환기는 고체 벽으로 분리된 서로 다른 온도의 두 유체 사이 열교환 과정을 수행하는 장치로써, 난방, 공기조화, 동력 발생, 폐열회수 및 화학 반응 등에서 사용되며, 열교환기 종류로는 원통다관형 열교환기, 이중관식 열교환기, 평판형 열교환기 등이 있다. 이 중에서 원통다관형 열교환기(Shell and Tube Heat Exchanger)는 가격이 저렴하고 유지 보수가 간편하며 다양한 크기의 제작이 가능하다. 또한 260℃ 이상의 고온에서 뿐만 아니라 30기압 이상의 고압용으로 적용범위가 매우 넓고 신뢰성과 효율성이 좋다. 이로 인해 원통다관형 열교환기는 활용분야가 넓으며 전체 산업용 열교환기의 60% 이상을 차지하고 있다.

따라서 원통다관형 열교환기를 설계하는데 있어 많은 연구가 진행되어 왔으나 주로 수행되는 실험을 통한 방법은 유체의 입출구 위치 및 형상, Head의 형식, 가로막(Baffle)의 형상 및 간격 등 고려해야 할 설계 인자들이 다양하고 원통(Shell)

내 유동 및 열전달 현상이 복잡하기 때문에 그 특성을 파악하는데 한계가 있었다. 이러한 어려움을 해결하기 위해서 지금까지 원통다관형 열교환기의 이론적 해석 방법이 연구되어 왔다. 이론적 해석 방법[1]은 전열량과 압력 손실로부터 열교환기의 성능을 평가하는 것으로 종류로는 관의 외측 흐름에 관한 해석에 따라 크게 세 종류로 나눌 수 있다. Kern 방법에서는 관과 가로막, 원통과 가로막 등의 누설류와 관관과 원통 사이의 우회류를 고려하지 않고 열전달 상관식을 이용하였고, Bell-Delaware 방법에서는 누설류와 우회류를 실험을 통한 보정인자를 사용하였으며, Stream Analysis 방법은 누설류와 우회류에 대한 유동 저항 회로를 활용하여 열교환기의 성능을 평가하였다. 하지만 상관식을 통한 열교환기의 해석은 유동 및 열전달 현상에 있어서 실험에서 얻어진 상관식을 사용하기 때문에 성능을 평가하는데 있어 국부적인 현상이나 특성을 알아보는데 한계를 가지고 있다.

최근 전산유체역학의 발전으로 복잡한 유동 현상에 대한 수치 해석을 수행하고 설계를 개선하는 사례들이 늘고 있다. Karlsson과 Vamling[2]은 원통다관형 열교환기의 2-D 해석을 통하여 열교환기 내부 유동 현상과 열전달 효과를 수치해석하였고, Philpott와 Deans[3]는 냉매의 응축으로 인한 열전달 계수의 영향을 구명하였으며, Mohr와 Gelbe[4]는 수치해석을

1 서강대학교 기계공학과 대학원

2 종신회원, 서강대학교 기계공학과

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

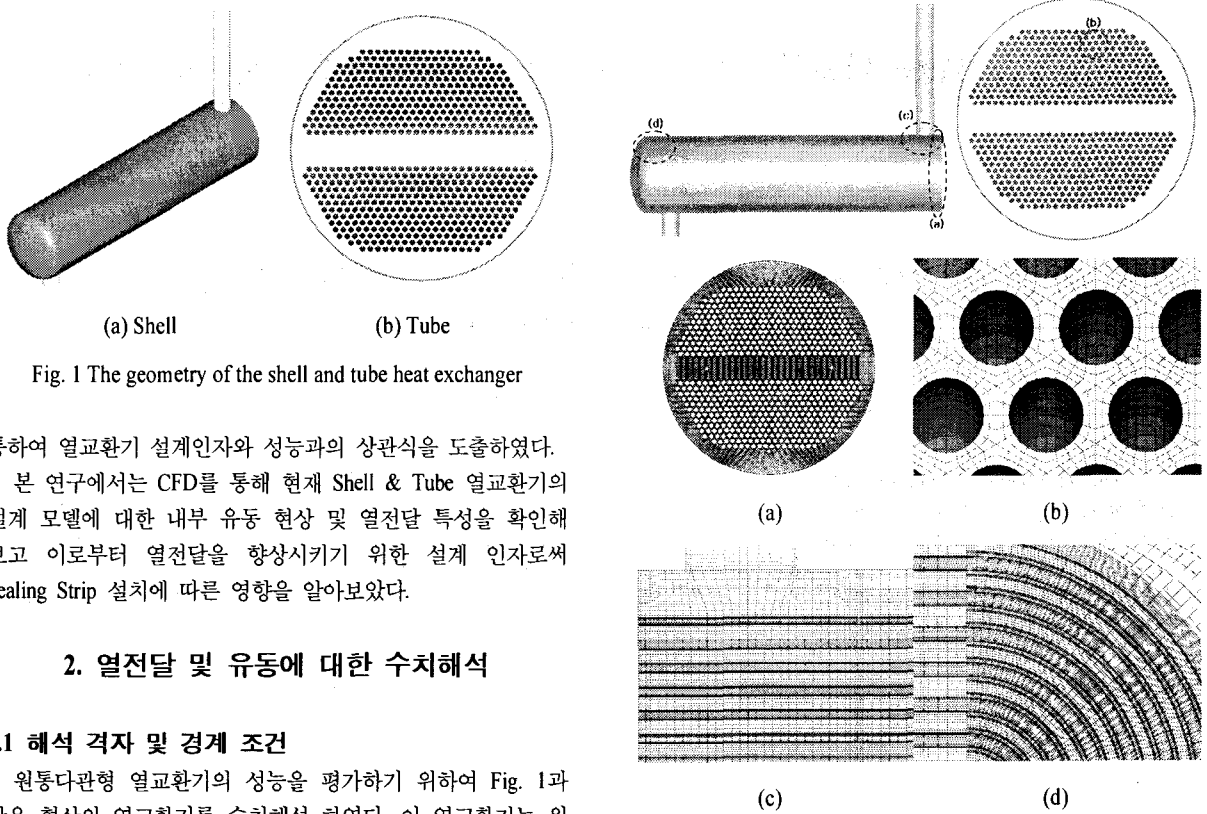


Fig. 1 The geometry of the shell and tube heat exchanger

Fig. 2 The computational mesh of the shell and tube heat exchanger

통하여 열교환기 설계인자와 성능과의 상관식을 도출하였다.

본 연구에서는 CFD를 통해 현재 Shell & Tube 열교환기의 설계 모델에 대한 내부 유동 현상 및 열전달 특성을 확인해 보고 이로부터 열전달을 향상시키기 위한 설계 인자로서 Scaling Strip 설치에 따른 영향을 알아보았다.

2. 열전달 및 유동에 대한 수치해석

2.1 해석 격자 및 경계 조건

원통다관형 열교환기의 성능을 평가하기 위하여 Fig. 1과 같은 형상의 열교환기를 수치해석 하였다. 이 열교환기는 원통 부분 길이가 2,239mm이고 내경이 590mm이며, 외경이 12.7mm인 660개의 관으로 구성되어 있다. 또한 열교환기의 원통 부분 입구 및 출구 직경은 140mm이다. 이를 수치해석하기 위하여 Fig. 2와 같은 계산 격자를 생성하였다. 이 때, 전체 열교환기는 입출구 방향으로 대칭이므로 절반만을 해석 격자로 사용하였으며 절반의 형상에 대해 1,450만개의 유체 격자로 구성하였다.

본 연구에서 사용된 원통 다관형 열교환기는 관 내부에 흐르는 냉매(R-22)가 원통 내부의 뜨거운 유체(Air)와 열전달을 하여 냉매의 잠열로 인하여 원통 내부 유체를 냉각 시킨다. 이 때, 열교환기 내부의 유동 및 열전달에 대한 특성을 알아보기 위하여 원통의 입구에는 40℃ 온도의 Air가 5,400 Nm³/hr의 유량을 갖는 것으로 설정하였다. 냉매는 상변화가 일어나는 상태에서 열전달이 진행되기 때문에 냉매의 온도는 0℃로 유지된다고 가정하였다. 따라서 관의 바깥면을 0℃의 벽 경계조건으로 설정하였다. 또한 해석에 있어 대칭인 입출구 방향에 대해 절반의 격자만을 사용하였고 대칭인 면에 대해서는 대칭 경계조건을 사용하였다.

원통다관형 열교환기에 대한 수치해석을 하는데 있어 실제 관 내부 유체와 원통 내부 유체 사이에 열저항이 존재하며 좀 더 정확한 결과를 얻기 위해서는 이를 고려해야 한다. 이

때 열저항으로는 관에서 관 주변의 유체로 열이 전달됨에 있어서 관의 벽면에서 고체의 전도에 위한 열저항과 원통 부분 유체의 관 주변에서의 응축에 위한 열저항이 있다. 이를 고려하기 위해서 관 부분에 해당되는 일정 온도를 갖는 벽 경계 조건에 열저항을 고려하였다.

이 때 원통다관형 열교환기의 내부 유동 및 열전달에 대하여 상용 프로그램인 STAR-CD를 사용하여 정상상태 비압축성 난류유동을 해석하였으며, 지배방정식은 기본적인 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 사용하였고, 난류 모델은 $k-\epsilon$ 모델, 해석 알고리즘은 PISO 법을 적용하였다.

2.2 해석 결과

원통다관형 열교환기의 성능을 알아보기 위해서는 우선 열교환기 내부 유동해석 및 이에 대한 적절한 가시화가 필요하다. 특히 Fig. 3과 같은 원통 부분에서 관군에 수직인 면의 유동장은 열교환기의 열전달에 있어 직접적인 영향을 미치는 영역이라 할 수 있다. 관군에 수직인 단면 유동장인 Fig. 3을 보면, 전체적으로 아랫부분에서 윗부분으로 또는 윗부분에서 아랫부분으로 유동장이 형성되며 관의 배치 형상이 중간부분

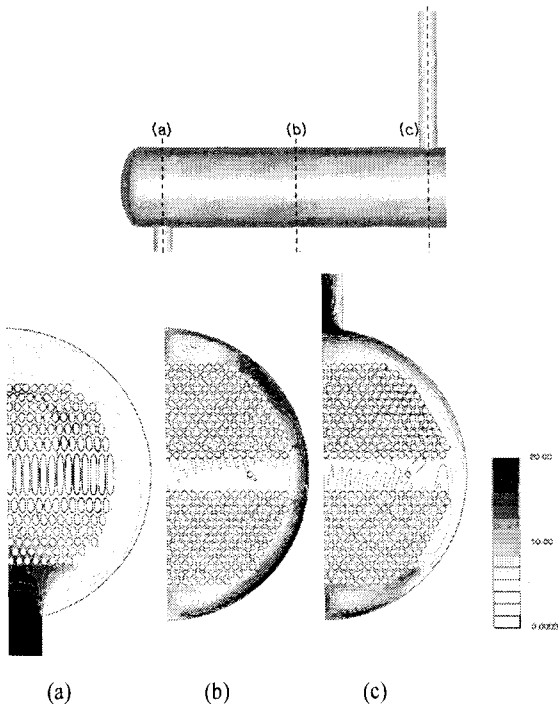


Fig. 3 Velocity Magnitude inside the shell

에서의 유동장에 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 이 때, 열교환기의 성능을 높이기 위해서는 저온의 관 주변으로 유동장이 형성되어야 저온 관과 Air 사이의 열교환이 활발히 이루어진다. 그러나 이 결과를 보면, 관 주변으로의 유동장은 거의 형성되지 않고 관군의 바깥쪽으로 유동이 형성되어 흘러간다. 이로 인해 관 주변의 Air는 정체되어 있고 입구로부터 들어온 Air는 관군 바깥쪽의 통로를 통해 출구로 빠져 나가기 때문에 관군 주변에서의 효과적인 열전달을 얻지 못하는 결과를 초래한다.

원통다관형 열교환기의 성능이라고 할 수 있는 출구에서의 온도를 구하기 위한 열유동 해석을 수행하였다. Fig. 4는 원통다관형 열교환기의 원통 내의 온도 분포를 보여주고 있다. 전체적인 온도분포에서 입구 부분에서 출구 부분으로 갈수록 점점 온도가 낮아지는 것을 볼 수 있으며 가로막 사이의 온도 분포를 보면 관군 주변에서의 온도는 낮으나 관군 주변으로 관군보다 높은 온도의 유체가 존재한다. 이 때 가로막 사이에서 유동이 열전달에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 열유동 해석의 결과로 출구에서 온도는 1.15℃의 결과를 얻었다. 관 내에 흐르고 있는 유체에 위해서 원통 부분의 유체인 공기의 열을 많이 빼앗아가나 열교환기의 내부 유동 결과에서 확인한 것과 같이 관군을 통해서 유동장이 형성되지 않고 관군 주변으로의 유동장이 대부분 형성되기 때

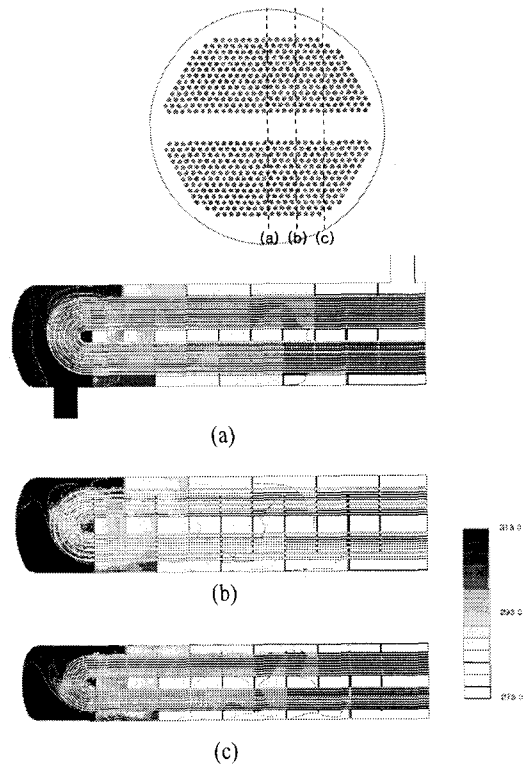


Fig. 4 Temperature distribution inside the shell

문에 충분한 열교환은 이루어지지 않는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 관군을 통해 흐르는 유동장을 더욱 활발하게 한다면 더 많은 열전달 효과를 얻을 수 있을 것이다. 또한 열교환기 내부에서 관과 관 주변의 유체와의 정확한 열전달 현상을 알아보기 위해서는 관과 주변 유체에서의 열저항 및 관 주변에서의 응축에 위한 영향과 같은 현상에 대한 연구가 진행되어야 한다.

3. 설계 인자 변화에 따른 영향

본 장에서는 열교환기의 성능을 향상시키기 위해 기존 형상과 설계 인자 중 원통 내부에서 관 주변 유동을 활발히 하기 위한 Sealing Strip의 설치 유무와 설치 위치에 따른 유동에 대해 비교를 통해 열전달 현상에 미치는 영향에 대해 알아보았다.

3.1 해석 격자 및 경계 조건

열교환기 성능 향상을 위한 Sealing Strip 설치에 따른 유동을 비교하기 위하여 Fig. 5와 같은 형상을 모델링하여 수치해석을 수행하였다. 해석 격자는 가로막을 경계로 주기적인 유

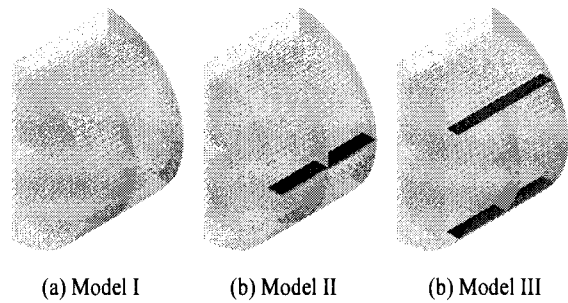


Fig. 5 Various geometry type depending on the design factor

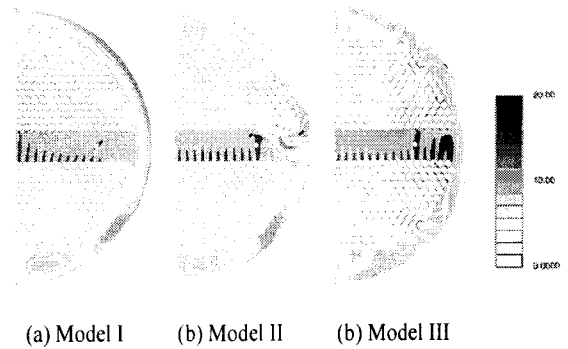


Fig. 6 Velocity magnitude with the variation of the design factor

동 특성을 갖는 부분을 사용하여 주기 경계조건을 사용하여 해석하였으며 입출구 방향으로 대칭이므로 대칭 경계조건을 사용하였다.

Sealing Strip의 설치 유무 및 설치 위치에 따라서 Fig. 5와 같이 3개의 Model로 구분하였다. 우선, Model I은 기존 설계와 같이 Sealing Strip이 설치되어 있지 않은 경우의 원통 다관형 열교환기의 형상에 대한 경우이다. Model II와 III은 Sealing Strip이 설치되어 있는 형상으로 열교환기의 가로막 사이를 지나가는 유동장이 관군의 바깥으로 형성되는 것을 방지하기 위하여 Fig. 5와 같이 가로막의 상하단 및 중심 부분에 설치하였다. 여기서 사용한 Sealing Strip의 넓이는 50mm × 4mm로 Model II에서는 중심 부분에 1개가 설치되어 있으며 Model III에서는 상하단부에 각각 1개씩 설치되어 있다.

3.2 해석 결과

Model I, II & III의 속도 분포를 나타낸 Fig. 6을 통해 Sealing Strip 설치에 따른 유동장 변화를 볼 수 있다. Model I의 경우 관군 바깥으로 유동이 모두 형성된다. 그러나 Model II와 III의 경우 Model I 보다 관군 바깥으로 흘러가는 양이 줄어들고 관 주변으로 유동장이 형성된다. 이 때 형성된 Tube 주변의 평균 속도 크기를 알아보면, Model III > Model II > Model I의 순으로 나타난다.

이로부터 3가지 Model에 대한 성능 평가를 해 보면, Model I의 경우, Tube 바깥으로 유동이 활발하기 때문에 실제적으로 열전달이 일어나는 관 주변에서 유동이 정체되어 열전달 성능이 좋지 않다. Model II의 경우 중심부분에 유동 방해 판으로 인해 중심 부분에 정체 되어 있던 부분에서 속도 성분이 커지는 것을 볼 수 있고 중심에 있는 관 주변에서 유동이 활발하여 Model I보다 열전달 성능이 좋다. Model III는 상하단부에 유동 방해 판으로 인해 유동이 모두 관을 통하여 일어나기 때문에 열전달 성능이 가장 좋다.

4. 결론

본 연구에서는 냉각장치로 사용되는 원통다관형 열교환기에 대해서 수치해석을 수행하였다. 열교환기의 성능을 알아보기 위하여 유동 및 열전달에 대한 연구를 진행하였다. 원통 내의 온도 분포를 통해서 원통 다관형 열교환기 내의 전체적인 열전달 현상을 확인할 수 있었다. 또한, 열교환기의 원통 부분의 유동장에서 관군이 중심 부분에 집중되어 있어 관군 바깥으로 유동이 우회하는 것을 확인할 수 있었으며 이는 열전달 성능을 저하를 초래하였다. 또한 원통 내부 유체의 관 주변 유동을 활발하게 할 수 있는 가로막 상하단부 및 중심 부분에 Sealing Strip과 같은 설계 인자 변화는 열전달을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] G.F. Hewitt, G.L. Shires, T.R. Bott, 1994, "Process Heat Transfer," Begell House, pp.271-292.
- [2] T. Karlsson, L. Vamling, 2005, "Flow fields in shell-and-tube condensers: comparison of a pure refrigerant and a binary mixture," International Journal of Refrigeration 28, pp.706-713.
- [3] C. Philpott, J. Deans, 2004, "The enhancement of steam condensation heat transfer in a horizontal shell and tube condenser by addition of ammonia," International Journal of Heat and Mass Transfer 57, pp.3683-3693.
- [4] U. Mohr, H. Gelbe, 2000, "Velocity distribution and vibration excitation in tube bundle heat exchangers," Int. J. Therm. Sci., Vol.39, pp.414-421.