

판형 열교환기의 맥동유동에 의한 열전달 향상에 관한 수치해석연구

이명성¹, 허남건², 강병하³

A NUMERICAL STUDY ON HEAT TRANSFER ENHANCEMENT BY PULSATILE FLOW IN A PLATE HEAT EXCHANGER

Myungsung Lee, Nahmkeon Hur and Byung Ha Kang

The heat transfer enhancement by pulsatile flow in the plate heat exchanger has been investigated numerically in the present study. The numerical study was performed in the range of the mass flux from 0.04 to 0.12 kg/s.

The results showed that the pulsatile flow produces resonating vortex shedding at the groove sharp edges and a strong transient vortex rotation within the grooved channels. As a result, the mixing between the trapped volume in the grooved cavity and the main stream was enhanced. Good agreements between the predictions and measured data are obtained in steady flow. And the heat transfer of pulsatile flow is about 2.4 times than steady flow when frequency is 10 Hz and the mass flux of cold side is 0.04 kg/s.

Key Words: 판형 열교환기(Plate Heat Exchanger), 삼각형상 그루브 채널(Triangular Grooved Channel), 대향류(Counter current flow), 맥동 유동(Pulsatile Flow), 전산유체역학(CFD)

1. 서 론

판형열교환기의 열전달 성능을 향상시키기 위해 유체의 유속을 증가시켜 대류열전달 계수를 높이거나 열전달 면적을 증가시킴으로서 총 열전달량을 증대시키는 방법이 있다. 하지만 이러한 방법들은 최근의 소형화 및 경량화 추세와 효율성 측면에서 많은 제약이 따르므로 열전달 촉진에 한계가 있다. 따라서 이러한 단점을 보완하고자 열교환기의 층류유동에 맥동을 가함으로써 유체의 불안정성을 증가시켜 열교환기 내부의 정체된 영역에서 유동의 혼합을 촉진하는 다양한 연구 [1-3]들이 수행되어 왔다.

Kwon[1]등은 판형 열교환기를 2차원으로 단순화시킨 삼각형상 그루브 채널 내부의 맥동유동 실험을 통해, 열전달이 최대가 되는 맥동 주파수가 존재함을 밝혔으며, Lee[2]등은 삼

각형상 그루브 채널에 맥동유동을 가할 경우, 특정한 레이놀즈 수 이상에서는 Tollmien-Schlichting 웨이브가 발생하며, 웨이브가 발생한 채널의 하류에서는 난류유동이 관측됨을 확인하였다. 또한 Nishimura[3]는 그루브 채널에서의 맥동 유동에 의한 물질전달 향상에 관한 연구를 통해, 맥동유동에 의하여 그루브 채널 내부의 와류와 주유동과의 혼합이 촉진되어 물질전달이 향상됨을 확인하였다. 하지만 이러한 기존 연구에서는 대부분 판형열교환기를 단순화시킨 그루브 채널에 대한 맥동유동의 영향만을 확인하였기 때문에, 복잡한 3차원 유동을 갖는 실제 판형열교환기에 적용시키기에는 무리가 따른다. 실제 판형열교환기에 맥동유동을 적용한 연구로는 Kim[4]등이 실제 판형 열교환기를 대상으로 맥동유동 영역 중 특정한 레이놀즈 수와 스트라울 수에서 열전달이 최대가 됨을 확인하였다. 본 연구에 앞서 수행된 판형 열교환기 유로 구조를 모사한 2차원 삼각형상 그루브 채널에서의 맥동 유동에 대한 수치해석[5]을 통해 삼각형상 그루브 채널에서 맥동 유동을 가함으로써 그루브 채널 내부의 와류가 생성 및 소멸을 반복하여 열전달이 향상됨을 검증하였다. 이를 바탕으로 삼각형상 그루브 채널을 3차원으로 확장시킨 단일유로 모델에 대한 수

1 학생회원, 서강대학교 대학원 기계공학과

2 정회원, 서강대학교 기계공학과 교수

2 정회원, 국민대학교 기계공학과 교수

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

치해석[5]에서도 열전달 향상이 최대가 되는 맥동 주파수가 존재함을 확인하였다.

그렇지만 실제 판형 열교환기에서 온도가 다른 두 유체가 대향류로 흐르면서 상호 열전달이 이루어지는 특성 또한 열전달 연구에서 중요한 고려 인자이다. 이에 본 연구에서는 실제 판형 열교환기의 복잡한 유로구조와 입구형상을 모사하고, 온도가 다른 두 유체 사이의 열전달을 고려하여 실제 판형 열교환기 모델에 대한 수치해석을 수행함으로써 맥동유동에 의한 판형 열교환기의 열전달 향상 가능성을 수치적으로 평가하였다. 수치해석을 위해서는 상용 프로그램인 Star-CD v3.24를 사용했으며, 본 연구실이 보유하고 있는 AMD Opteron 250(2GHz) 10 CPU Linux cluster를 이용하였다.

2. 판형열교환기 - 복합 열전달

2.1 수치 해석

판형 열교환기 복합열전달의 수치해석은 Fig. 1과 같은 한상규[6]의 실험에서 사용된 모델을 계산 격자화하였다. Fig. 1은 실제 판형 열교환기의 형상정보를 나타낸다. 판형 열교환기의 실제 모델은 Fig. 2 (a)와 같이 10장의 전열판으로 구성되어 있고 유효 전열판은 외측의 2장을 제외한 8장이며 유로는 총 9개이다. 이 중 5개의 유로는 고온측 유체가 흐르고 4개는 저온측 유체가 흐른다. 유량이 유입되고 충분한 시간이 지났을 때 저온측과 고온측의 각 유로에는 균등한 양의 유체가 흐른다고 가정하였다. 수치해석의 효율성을 고려하여 전열판 모두를 모사하지 않고 그 중 가장 평균적인 유량이 흐를 것이라고 예상되는 Fig. 2 (b)처럼 5번 전열판의 양쪽에 전열판을 1개씩 추가하여 음영으로 표시된 만큼 수치해석 격자에 사용하였다.

Fig. 3은 위와 같은 방식으로 실제 판형열교환기를 모사한 수치해석 격자를 나타낸다. Fig. 3의 확대된 그림처럼 다수의 전열판들 사이로 유체를 분배해 주는 원형 형상의 유로(입출구)를 모델링하였다. 그리고 전열판 3개를 서로 반대방향으로 엇갈려 적층하였으며 전열판들 사이에 대향류인 고온측과 저온측 유로를 모사하기 위하여 유체가 흘러갈 수 있는 유로를 생성하였다. 유로의 바깥면에는 순환식 경계조건을 가지는 전열판 2개를 맞닿게 하여 총 4,130,000개의 수치해석 격자를 생성하였다. 그리고 저온측과 고온측 유체의 계산 격자는 온도에 따라서 서로 다른 물성치를 지닌 물(H₂O)로 설정하여 계산을 수행하였으며, Fig. 4의 (4), (5), (6) 전열판의 경우에는 전도에 의하여 열전달이 가능한 Conduction wall로 처리된 고체격자(solid mesh)로 설정하여 저온측과 고온측의 두 유체 사이에서 열전달이 가능하게 하였다. 또한 (4),(6) 전열판은 주기 경계조건(Cyclic boundary)을 적용하여 실제 판형 열교환기 처

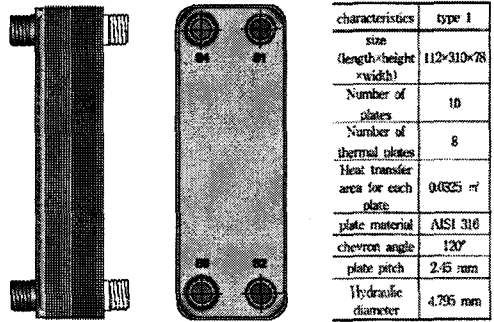


Fig. 1 Plate heat exchanger used in experimental study by Han et al.[6]

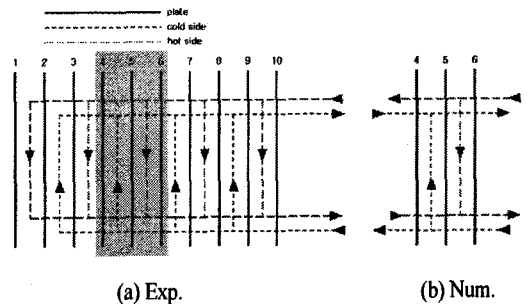


Fig. 2 Plate and flow passage of hot and cold side

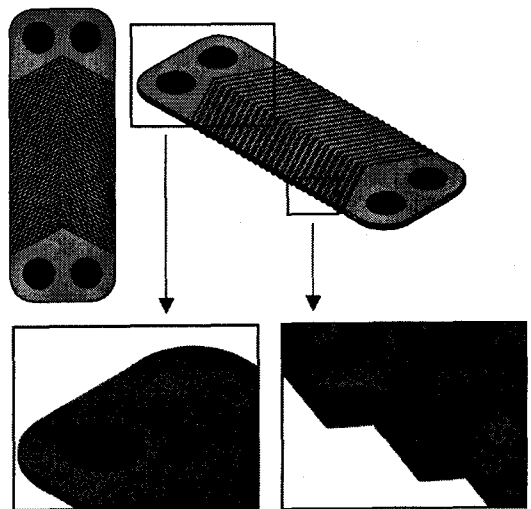


Fig. 3 Plate heat exchanger used in numerical study

럼 다수의 적층된 전열판을 모사하였다.

그리고 Fig. 4에 나타난 것처럼 저온측의 inlet ①,②는 25℃로 고정하고 고온측의 inlet ①,②는 40℃로 고정하였다. 또

한 저온측과 고온측 출구(outlet)의 반대쪽 면(inlet③)에 해당하는 온도는 계산이 진행됨에 따라 변하는 값이므로 각각의 iteration에서 계산이 수렴한 후 출구 경계면에서 계산된 평균 온도로 갱신함으로써 보다 실제적인 경계조건을 구현하였다. 또한 맥동유동을 가하기 위해 유로의 입구에는 다음과 같은 속도 성분을 주었다.

$$v_f = v_{mean}(1 + a \cdot \sin(2\pi f_a t)) \quad (1)$$

여기서 v_f 는 유로입구속도, v_{mean} 은 평균속도, a 는 맥동 유동의 진폭 그리고 f_a 는 맥동 주파수를 나타낸다.

2.2 결과 처리

열전달 향상 정도를 평가하기 위해 계산 결과로부터 열전달 향상비를 다음과 같이 정의하였다.

$$E = \frac{h_{c,p}}{h_{c,s}} \quad (2)$$

또한 온도가 다른 두 유체가 각기 분리되어 대향류로 흐르기 때문에, 열교환기의 열전달 측정을 위해 일반적으로 사용하는 대수평균온도차(Log Mean Temperature Difference)를 다음과 같이 정의하여 이용하였다.

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln\left(\frac{T_{h,i} - T_{c,o}}{T_{h,o} - T_{c,i}}\right)} \quad (3)$$

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{i,b} - T_{o,b}) \quad (4)$$

위 두 식에서 구한 열량 및 대수평균온도차를 이용하여 총합 열전달 계수, U를 식 (4)을 통해 구하였다.

$$U = \frac{Q}{\Delta T_{LMTD} A} \quad (5)$$

식 (5)의 총합 열전달 계수인 U는 고온측과 저온측의 대류 열저항으로 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$h_h = 2\left(\frac{1}{U} - \frac{\Delta x}{k_{ss}}\right)^{-1} \quad (6)$$

$$h_c = \left(\frac{1}{U} - \frac{1}{h_h} - \frac{\Delta x}{k_{ss}}\right)^{-1} \quad (7)$$

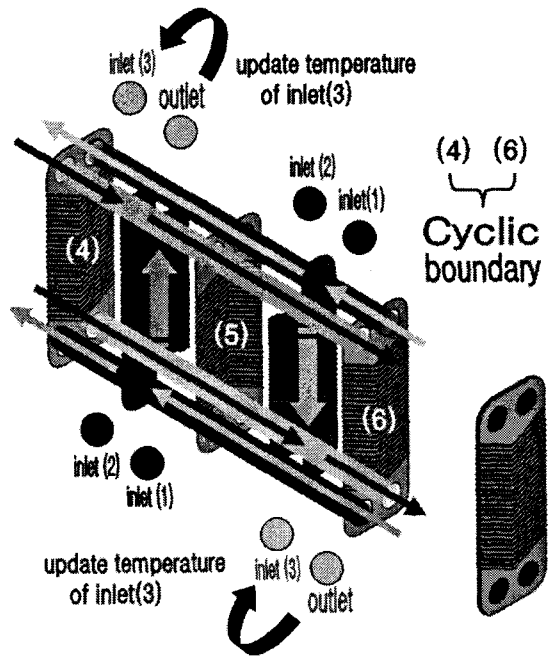


Fig. 4 Boundary condition in numerical study

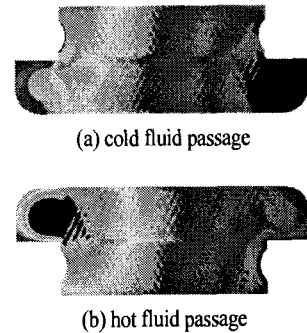


Fig. 5 Temperature distribution on fluid passage when mass flux is 0.04 kg/s

3. 해석 결과

3.1 정상 유동

Fig. 5는 질량유량이 0.04 kg/s인 고온측과 저온측 유로의 온도장을 나타내고 있다. 질량유량이 0.04 kg/s일 때 저온측의 온도장을 살펴보면 입구에서 출구쪽으로 나아갈수록 고온측과의 열교환으로 인해 온도가 상승하며, 특히 저온측 출구에서는 온도가 국부적으로 상승되었다. 이와 반대로 고온측의 온도장에서는 출구쪽으로 나아갈수록 온도가 감소하며 고온측 출구에서는 상대적으로 온도가 낮아진다. 이를 통해 온도가 다른 두 유체가 대향류로 흐르면서 열교환이 이루어지는

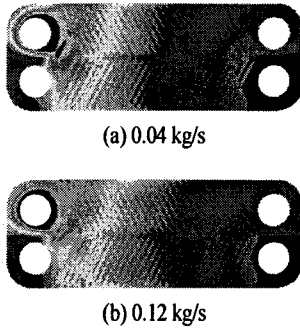


Fig. 6 Temperature distribution on plate according to mass flux

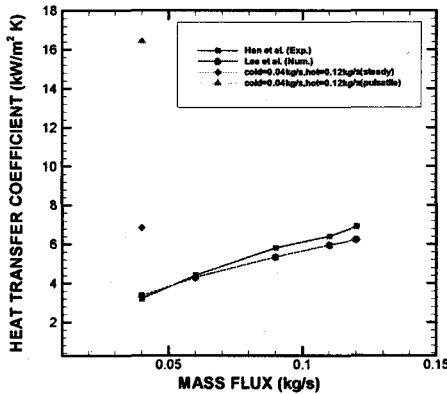


Fig. 7 Comparison of heat transfer coefficient of cold side between steady and pulsatile flow

판형 열교환기의 특성을 확인할 수 있다. Fig. 6과 같이 질량 유량이 증가하는 0.04 kg/s와 0.12 kg/s를 비교한 경우에도 서로 동일한 온도 특성을 보이고 있으며 다만 채널 내부의 평균 유속이 빨라짐으로서 더 온도분포가 균일해진 모습을 보인다.

정상 상태에서 질량 유량에 따른 열전달 정도를 자세히 파악하기 위해 Fig. 7에 질량유량에 따른 열전달 계수를 나타내었고 실제 판형 열교환기의 실험적 연구에 따른 결과값과 비교하였다. Fig. 7로부터 질량유량의 증가에 따른 열전달 계수가 변화하는 결과가 정성적, 정량적으로 근접하다는 것을 알 수 있다.

3.2 맥동 유동

판형 열교환기의 맥동유동에 의한 열전달 향상을 평가하기 위하여 고온측 유량을 0.12 kg/s, 저온측 유량을 0.04 kg/s로 설정한 후 맥동 주파수 10 Hz를 저온측 입구에 가함으로서 수치해석을 수행하였다. 맥동성분으로 인해 각 시간대에서 저온과 고온측의 상호 열교환이 비평형상태를 유지하므로 출구

온도를 한 주기에 대하여 주기평균 하여 열전달량을 산출한다. 해석 결과 Fig. 7과 같이 맥동유동의 경우 정상상태 유동보다 저온측 열전달 계수가 약 2.5배 증가하였다. 위 결과로 맥동 유동으로 인해 채널 내부에서 고립된 유체의 혼합이 촉진됨으로써 열전달이 향상됨을 확인 할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 판형 열교환기를 대상으로 입구에 유입되는 질량유량을 다르게 하고, 원형 형상의 실제적인 입,출구 형상을 모사하며 경계조건을 갱신하는 방법을 사용하여 정상상태 계산을 수행하였다. 정상상태 해석을 통해 열교환기의 중요한 성능인자인 열전달계수를 구하고 기존의 실험 연구 결과와 비교하여 수치 해석의 타당성을 입증하였다. 그리고 맥동 유동을 통한 비정상 상태 계산을 수행하여 가진주파수가 10Hz 일 때 열전달이 250%까지 증가하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-20-03-000-10 132-0)의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 권오중 등, 2001, "삼각형상 그루브 채널에서 맥동유동에 의한 열전달 향상에 관한 실험적 연구," 한국냉동공조학회지, 제13권, 제10호, p.1009-1016.
- [2] 이대영, 김동욱, 이윤표, 2003, "맥동유동에 의한 그루브 채널내의 유동혼합 촉진에 관한 연구," 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, p.115-120.
- [3] Nishimura, T., Oka, N. and Yoshimaka, Y., 2000, "Influence of imposed oscillatory on the mass transfer enhancement of grooved channels for pulsatile flow," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.43, p.2065-2074.
- [4] 김도규, 강병하, 김석현, 2003, "판형 열교환기에서 맥동 유동에 의한 열전달 촉진에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 춘계학술발표대회 논문집, p.1479-1484.
- [5] 진상문, 허남건, 강병하, 2004, "맥동유동에 의한 판형 열교환기의 열전달 성능 향상에 관한 수치연구," 제3회 유체공학술대회 논문집, p.169-173.
- [6] 한상규, 강병하, 2005, "유동공진이 판형 열교환기의 열전달 향상과 압력강하에 미치는 영향," 설비공학논문집, 제17권, 제2호, p.165-172.