

웨이비 패턴을 가진 판형 열교환기의 성능에 관한 연구

박 재 흥†

디에이치피이엔지(연구원)

A Study on Thermal Performance of Plate Heat Exchanger with Wavy Patterns

Jae-Hong PARK†

DHP Engineering(researcher)

Abstract

In terms of space-saving, the design of more compact heat exchangers is important. Also, to meet the demand for saving energy and resources today, manufacturers are trying to enhance efficiency and reduce the size and weight of heat exchangers. Over the past decades, there have been tremendous advancements in the manufacturing technology of high-efficiency heat exchangers. This has allowed the use of high-performance heat exchangers. Consequently, those heat exchangers have applied to almost all industries. When compared with the well-established shell & tube heat exchangers, plate heat exchangers show a lot of advantages like high NTU values, compactness, low cost, multi duties, and reduced fouling, etc. To get better thermal performances of plate heat exchangers, a new wavy patterned heat plate was developed through CFD analysis, and it then was experimentally tested to verify the validity of CFD and to compare with a plate heat exchanger with a conventional herringbone pattern. In this study, the development process is introduced, and the results are shared which wavy patterns are better than herringbone patterns.

Key words : Plate heat exchanger, Plate pattern, Herringbone, Wavy, Thermal performance

I. 서론

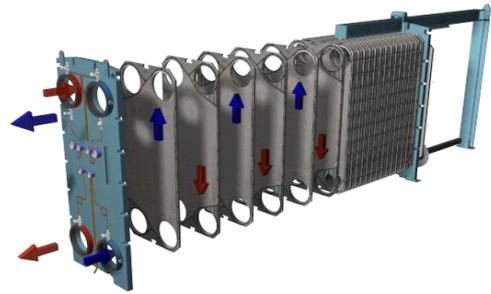
지속되는 고유가 사태로 인하여 에너지 절감에 대한 요구가 높아지고 있으며, 또한 오늘날 산업 경제에서 항상 화두가 되고 있는 것 중 하나가 에너지 정책이다. 에너지는 21세기의 국가 경쟁력과 기타 산업의 여파로 인하여 나라마다 각각의 방식으로 이를 대체할 방법과 효율성 측면에서 부단한 노력과 기술 개발이 이루어지고 있다.

에너지의 효율적인 이용을 위해서 다양한 방법들을 채택하고 있지만 가장 보편적으로 사용되는

방법은 에너지 효율이 좋은 기기를 사용하는 것과, 버려지는 에너지 즉, 폐열 등을 재활용하는 것으로 이를 위해서는 반드시 열교환기가 필요하다. 많은 산업적 용도를 갖는 에너지 변환기로서 열교환기는 현재까지도 성능 개선을 위한 지속적인 연구와 개발이 이루어지고 있으나 아직도 그 성능과 효율 개선의 여지가 많으며, 실질적으로도 극복해야 할 문제점들을 여전히 가지고 있다. 세계적으로도 고성능의 열교환기를 개발하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 국내에서도 이에 대한 연구가 지속적으로 요구되고 있

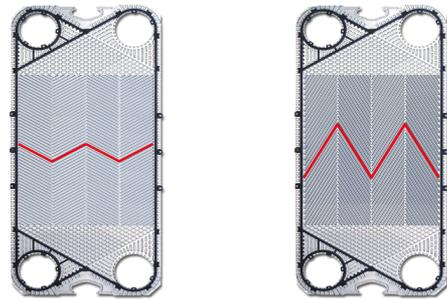
† Corresponding author :  gdays@naver.com

다. 각종 산업설비에서 사용되는 열교환기는 보다 고효율의 열교환기가 요구되고 있으며, 갈수록 심화되는 사용공간의 제한성으로 인해 단위부피당 전열면적을 극대화시킨 콤팩트 열교환기(compact heat exchanger)가 점점 많이 이용되고 있다. 액체 대 액체 열교환기에 있어 가장 대표적인 콤팩트 열교환기인 [Fig. 1]의 판형 열교환기(plate heat exchanger)는 이미 오래 전부터 그 열교환 성능의 우수성으로 많은 플랜트 산업과 각종 설비에 적용되고 있다.



[Fig. 1] Plate heat exchanger.

최근 들어 전 세계적으로 판형 열교환기의 형태가 각종 설비들의 대형화로 인해 갈수록 용량이 요구되고 있다. 이러한 요구에 부합하기 위해서는 판형 열교환기의 핵심인 대형 전열판의 설계기술과 이를 생산할 수 있는 제작기술이 뒷받침되어야 한다. 제작기술은 장치의 대형화가 필요한 부분으로 논의로 하고, 설계기술의 경우 단지 전열판의 크기를 크게 한다고 해결되는 것은 아니다. 전열판의 경우 그 크기는 원소재 제작업체의 사양에 의해 통상 정해지게 된다. 즉, 주어진 원소재 크기 안에서 원하는 용량을 달성해야만 한다.



High θ (120°) plate Low θ (60°) plate

[Fig. 2] Types of heat plates.

이를 위해 본 연구에서는 기존 헤링본(herring bone) 패턴보다 전열성능이 우수할 것으로 예상되는 웨이비(wavy) 패턴의 전열판을 개발하고자 하였다. 이를 위해 우선 개발하고자 하는 전열판의 형상을 모델링하여 [Fig. 2]의 체크론각(chevron angle)의 변화에 따른 유동특성에 의한 열전달 및 압력강하를 수치해석적으로 분석하였으며, 이를 설계에 응용하여 웨이비 패턴 전열판을 개발하였다. 신규로 개발된 전열판과 기존 헤링본 패턴의 전열판에 대하여 전열성능 및 압력강하 특성을 비교, 분석하기 위하여 테스트를 진행하였다.

II. 연구 방법

1. CFD 이론해석

열교환기의 설계방법 중에는 타 연구들에서 제안된 설계 상관식을 이용하는 방법이 있다. 그리고 이러한 상관식들이 탑재된 상용 설계프로그램들을 시중에서 구할 수도 있다. 그러나 이러한 프로그램들은 각 열교환기 제조사마다 가지고 있는 고유 형상에 대한 고려가 부족하기 때문에 제조사 입장에서는 정확한 열설계를 하기 어려운 부분이 있다. 그렇다고 모든 열교환기 제품에 대한 성능을 실제 테스트를 통해서 파악한다면 시간적, 경제적 비용이 많이 소요된다. 더욱이 전세계적으로 열교환기의 대형화, 고효율 집적화가 되어가고 있는 상황에서 성능테스트를 하기 위한 실험장비도 이에 따라 대형화가 되어야만 하기 때문에 경제적 부담이 더 커질 수밖에 없다. 이러한 실험적 방법에서 발생하는 한계를 극복

하기 위한 방안으로 실제 제품을 제작하기 전 여러 형태의 설계인자를 변화시켜가며 최적의 설계를 하기 위한 수치해석 연구가 활발한 진행 중에 있다(Bae et al., 2011; Moh, 2012; Kim et al., 2014; Cho, 2015; Lim et al., 2019).

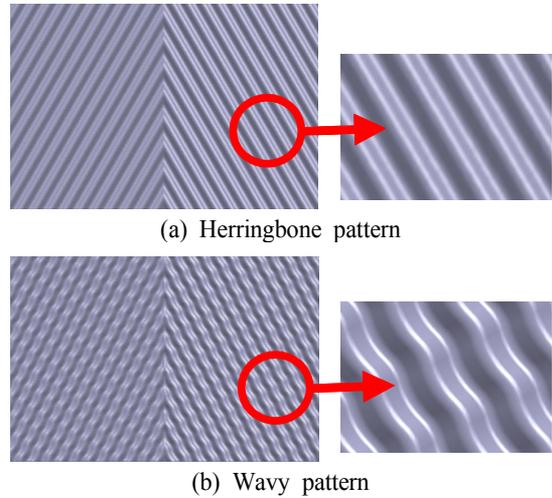
본 연구에서는 현실적으로 개발 가능한 전열판 형상 중 최상의 효율이 기대되는 웨이비 패턴 전열판에 대하여 쉘브론각(High $\theta=120^\circ$, Mixed $\theta=90^\circ$, Low $\theta=60^\circ$)에 따른 열전달 효과 및 압력강하 분포가 어떠한지를 수치해석적으로 분석하여 이를 설계에 응용하고자 한다. 열유동장에 대한 수치해석은 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) 알고리즘을 사용하여 이산화 방정식의 해를 구하였고, 연립 이산화 방정식의 종속변수들은 TDMA(Tri-Diagonal Matrix Algorithm)를 적용하여 해를 구하였다. 지금까지와 같이 설정된 설계를 계산하기 위하여 열·유체 해석용 상용코드인 ANSYS를 사용하였다.

2. 수치해석

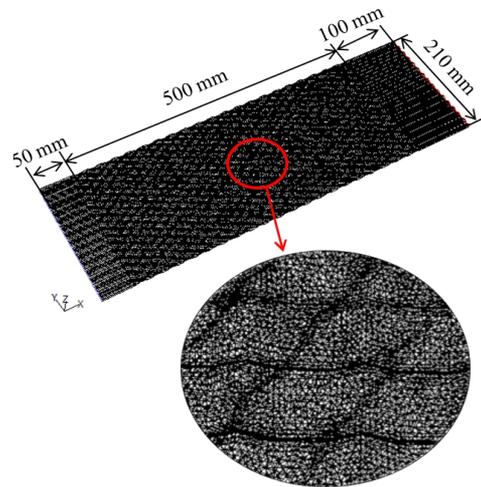
[Fig. 3]은 수치해석에 사용된 각 전열판 형상을 나타내고 있다. [Fig. 3(a)]는 헤링본 패턴의 전열판이고, [Fig. 3(b)]는 본 연구에서 개발하고자 하는 웨이비 패턴의 전열판이다. 수치해석은 하드웨어의 성능한계로 인해 전열판의 일부분만을 해석하여 경향성을 파악하고자 하였으며, 해석모델은 [Fig. 4]에 나타나 있다. 두 모델 모두, 동일 골깊이와 주름피치를 가지고 있으며, 기존 헤링본 전열판을 참고하였다. 격자는 약 340만여개의 tetra mesh를 사용하였다. 수치해석 조건은 입구 유체(물)온도 30°C , 벽면온도 50°C , 입구난류강도 5%, 레이놀즈수 범위는 2500~4500으로 하였다.

열교환기에 있어서 가장 중요한 변수는 열전달 특성을 나타내는 열전달계수와 펌프 동력과 직결되는 압력강하이다. 두 가지 변수의 특성을 Nu수와 마찰계수 f 에 의해 나타내었다.

실제 판형 열교환기의 전열면 온도는 균일하지



[Fig. 3] Heat plate patterns for CFD analysis.



[Fig. 4] CFD analysis model.

않지만 본 해석에서는 전열성능에 대한 경향성을 파악하고자 하였기 때문에 전열면의 온도를 고정하였다. 열전달계수는 유량과 입·출구온도로부터 아래와 같이 구해진다.

$$h = \frac{Q}{A(T_m - T_{wall})} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 h 는 대류열전달계수($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$), Q 는 전열량(W), A 는 전열판 면적(m^2)이고, T_{wall} 는 벽면온

도(°C), T_m 은 열교환기의 입구(T_i) 및 출구(T_o)측에서의 유체 평균온도로 다음과 같다.

$$T_m = \frac{T_i + T_o}{2} \dots\dots\dots (2)$$

전열량은 다음의 식으로 구하였다.

$$Q = \dot{m} c_p (T_i - T_o) \dots\dots\dots (3)$$

여기서 m 은 유량(m^3/h), c_p 는 유체비열($kJ/kg\cdot K$)이다.

위 식들로부터 Nu 수를 구하면 다음과 같다.

$$Nu = \frac{h D_h}{k_l} = \frac{Q D_h}{k_l A (T_m - T_{wall})} \dots\dots\dots (4)$$

여기서, D_h 는 수력직경(m), k_l 은 유체의 열전도도($W/m\cdot K$)이다.

열전달 성능에 대한 수치해석 결과를 j -factor로 나타내면 다음과 같다.

$$j_{Nu} = \frac{Nu}{Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.17}} \dots\dots\dots (5)$$

여기서, Pr 은 Prandtl수이고, μ 는 점성계수($N\cdot s/m$)이다.

유동마찰에 의한 압력손실을 무차원수인 마찰계수 f 로 나타내면 다음과 같다.

$$f = \frac{\Delta p_f}{\frac{4L}{D_h} \frac{1}{2} \rho u^2} \dots\dots\dots (6)$$

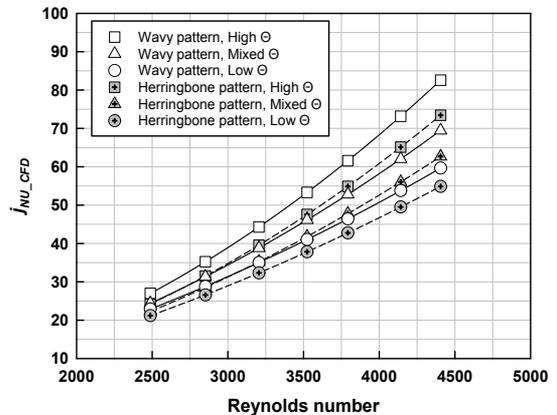
여기서, Δp_f 는 채널마찰압력강하(Pa), L 은 유동길이(m), ρ 는 밀도(kg/m^3), u 는 채널속도(m/s)다.

3. 수치해석 결과

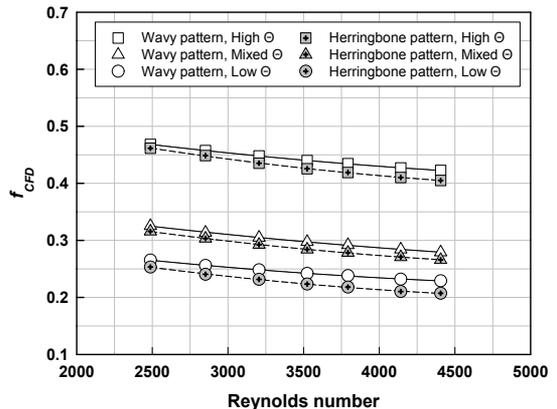
[Fig. 5]는 레이놀즈수와 웨브론각에 따른 j -factor의 변화를 나타내고 있다. j -factor는 레이놀

즈수와 웨브론각이 증가함에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 웨브론각이 증가할수록 전열관의 주름이 난류를 더욱 촉진시켜 열전달을 향상시켰기 때문이다. 그리고 개발 대상인 웨이비 패턴이 기존 헤링본 패턴보다 High θ 의 경우 평균 12.1%, Mixed θ 의 경우 10.3%, 그리고 Low θ 의 경우 약 8.4% 정도 j -factor가 더 높게 나타났으며, 전체 평균으로는 약 10% 정도 웨이비 패턴이 헤링본 패턴보다 j -factor가 더 높게 나타났다.

[Fig. 6]은 레이놀즈수와 웨브론각에 따른 f -factor의 변화를 나타내고 있다. 웨브론각이 증



[Fig. 5] Comparison of j -factors by CFD analyses according to pattern and chevron angle.



[Fig. 6] Comparison of f -factors by CFD analyses according to pattern and chevron angle.

가할수록 f -factor도 증가하는데, 이는 전열판의 주름형태가 웨브론각이 커질수록 유동에 대한 저항이 커지는 방향으로 나타나 있기 때문이다. 일반적으로 웨브론각이 커지면 열전달은 향상되지만, 이와 함께 압력강하도 증가하는 경향을 나타낸다. 웨이비 패턴과 헤링본 패턴의 비교에서는 웨이비 패턴이 헤링본 패턴에 비해 High θ 의 경우 평균 3.1%, Mixed θ 의 경우 4.3%, 그리고 Low θ 의 경우 7.5% 정도 f -factor가 더 높음을 알 수 있다. 그리고 전체적으로는 웨이비 패턴이 헤링본 패턴보다 평균 5% 정도 f -factor가 더 높게 나타났다.

상기 j -factor와 f -factor 비교를 통해 웨브론각에 따라 다소 차이는 있으나 모든 웨브론각에 대해서 웨이비 패턴이 헤링본 패턴에 비해 압력강하 증가분보다 열전달 증가분이 높음을 알 수 있다. 이는 현재 개발방향이 맞다는 것을 의미한다.

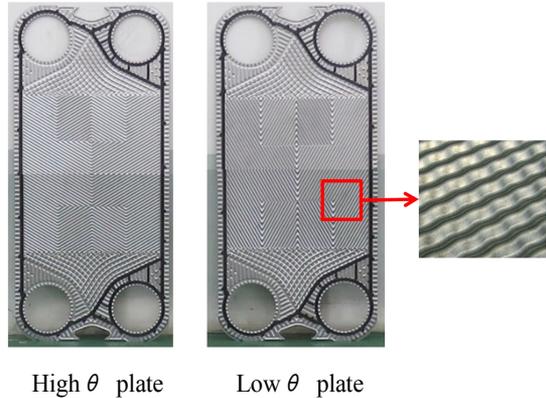
4. 테스트용 판형 열교환기 제작

[Fig. 7]은 웨이비 패턴을 적용하여 개발한 소형 전열판을 나타내고 있다. 크기는 $380 \times 780 \text{ mm}^2$ 으로 많은 산업군에 활용할 수 있는 크기이다. 골깊이는 3.0 mm, 포트홀은 85 mm, 재질은 스테인리스 스틸 304, 전열판 두께는 0.5 mm이다.

성능테스트를 위해 신규 개발된 전열판과 기존 헤링본 전열판을 이용하여 총 6종류의 테스트 제품을 제작하였다. 신규 웨이비 패턴과 기존 헤링본 패턴의 High θ 전열판만을 이용한 H-type 제품 2종류, 동일한 방법으로 Low θ 전열판만을 이용한 L-type 제품 2종류, 그리고 High θ 와 Low θ 전열판의 조합인 M-type 제품 2종류 등 총 6종류의 판형 열교환기를 제작하였다.

5. 실험장치 및 방법

[Fig. 8]은 개발대상 판형 열교환기 시제품과



[Fig. 7] Heat plates with wavy patterns.



[Fig. 8] Performance test.

기존 헤링본 패턴의 열교환기에 대한 열전달 및 압력강하 특성을 파악하기 위한 성능테스트 장면을 나타내고 있다. 일반적으로 판형 열교환기의 경우 끝단 효과(End plate effect)를 무시하려면 40장 이상의 전열판이 필요하며(Wang et al., 2007), 이에 각 열교환기는 61장의 전열판을 사용하였다.

실험장치는 수(water) 펌프를 이용한 강제 순환식 사이클이며, 온수가 순환되는 회로와 냉수가 순환되는 회로로 구성되어 있다.

평균 열전달율은 열교환기 입구와 출구사이에 설치된 검교정된 RTD(Resistance Temperature Detectors)에 의한 온도 측정결과와 체적유량계(Volume flowmeter)를 이용한 유량 측정결과로 계산하였다. 또한 열교환기 입구와 출구사이에 차압계를 설치하여 압력강하를 측정하였다. 각 센

서의 데이터는 데이터로그를 통해서 PC로 실시간으로 획득 및 처리하였다.

열전달량은 온수와 냉수의 유량을 조절하여 변화시켰다. 실험에서 실험조건변화는 온도와 압력의 요동(fluctuation)을 야기한다. 밸브들로 유량을 조절한 다음, 각 RTD와 압력센서들로부터 3초 간격으로 1분 동안 데이터를 읽은 후 평균을 취한다. 1분 후에 다시 데이터를 읽어서 유량 변화가 $\pm 2.0\%$ 이내, 각 RTD의 평균온도차가 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 이하, 압력 변화가 $\pm 2.0\%$ 이내가 되면 정상상태라고 판단한다(AHRI, 2015; ASME, 2000). RTD의 평균온도차가 하나라도 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 이상이거나 유량과 압력 변화가 $\pm 2.0\%$ 를 벗어나면 정상상태에 도달할 때까지 위의 과정을 반복한다. 정상상태에 도달하면 15분 동안 3초 간격으로 데이터를 읽은 후 평균치를 취하여 데이터를 처리하였다.

본 연구에서는 온수의 온도를 $52.0^\circ\text{C}(\pm 0.3^\circ\text{C})$, 냉수의 온도를 $32.0^\circ\text{C}(\pm 0.3^\circ\text{C})$ 로 하였으며, 열전달 성능시험과 압력강하 실험에서 레이놀즈수의 범위는 2,500~6,000로 하였다. 일반적으로 판형 열교환기는 레이놀즈수가 1,000 이상이면 난류로 간주된다(Muley and Manglik, 1999).

III. 연구 결과 및 고찰

1. 전열성능 특성

일반적으로 판형 열교환기는 직접적인 벽면 온도의 측정이 불가능하였기 때문에 Farrell 등(1999)이 제안한 수정된 Wilson plot 방법을 응용하여 대류열전달계수를 구하였다. 이 방법을 사용할 때 주의할 점은 양측의 흐름이 모두 난류가 되어야 한다.

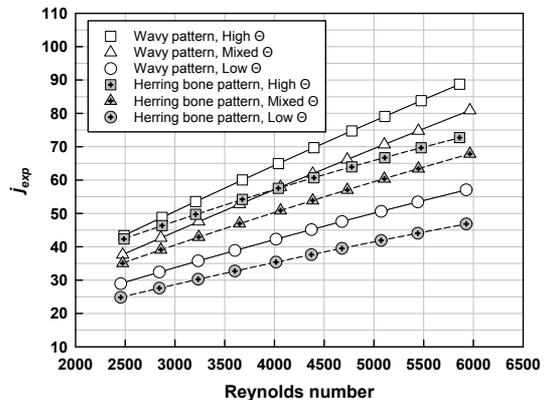
성능테스트에서 유체의 물성치들은 입·출구온도의 체적평균온도에 의해 계산되었으며, 온수측과 냉수측 사이에서의 에너지 밸런스는 모든 경우에 대하여 $\pm 5\%$ 이내로 나타났다.

[Fig. 9]는 웨이비 패턴 제품과 헤링본 패턴 제

품의 전열성능 비교를 나타내고 있다.

수치해석에서는 웨이비 패턴이 쉘브론각에 따른 전체 평균에서 약 10% 정도 전열성능이 높게 나타났으나, 실제 성능실험에서는 쉘브론각에 따라 다소 차이는 있으나 전체적으로 평균 15% 정도 높게 나타났다. 이는 수치해석의 경우 전열관의 일부분만을 모델링하여 해석하였기 때문에 정성적인 경향성은 실험결과와 유사하였으나, 실제 실험값과는 차이가 난 것으로 판단된다.

그리고 낮은 레이놀즈수에서는 웨이비 패턴과 헤링본 패턴 사이에서 전열성능의 차이가 적다가 레이놀즈수가 증가할수록 그 차이가 커짐을 알 수 있다. 이는 저(low) 레이놀즈수에서는 두 패턴 사이에서 발생하는 난류강도 또는 와류(vortex)의 차이가 크지 않다가 레이놀즈수가 증가할수록 웨이비 패턴에서의 난류강도가 헤링본 패턴에서의 난류강도보다 더 커지기 때문인 것으로 사료되며, 이는 웨이비 패턴의 유동 특성으로 볼 수 있다. 그러나 이러한 난류강도의 증가는 압력강하 증가라는 반대급부를 발생시킨다.

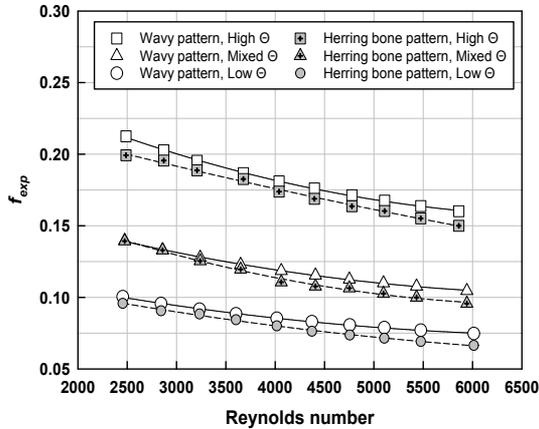


[Fig. 9] Comparison of j-factor by tests according to each pattern and chevron angle.

2. 압력강하 특성

[Fig. 10]은 압력강하 비교를 나타낸 것으로 전열성능과 마찬가지로 웨이비 패턴이 일반 헤링본

패턴보다 높게 나타났으나, 그 증가분은 수치 해석 결과보다 다소 높은 평균 8% 정도였다.



[Fig. 10] Comparison of f-factor by tests according to each pattern and chevron angle.

그러나 [Fig. 10]의 실험결과를 [Fig. 6]의 수치 해석결과와 비교해보면 절대값의 차이가 상당히 크음을 알 수 있다.

이는 [Fig. 5]와 [Fig. 9]의 전열성능비교에서도 동일하게 관찰되는데, 이에 대한 가장 큰 원인으로 앞서 기술한 바와 같이 수치해석을 전체 전열판이 아닌 전열판 일부분에 대해서만 수행하였기 때문인 것으로 사료된다. 참고로 본 연구에서의 수치해석 활용은 두 패턴 사이에서의 열전달과 압력강하에 대한 경향성 파악을 목적으로 하였다.

IV. 결론

주어진 원소재 내에서 갈수록 판형 열교환기의 대용량화를 요구하는 조건과 가격경쟁력을 갖추기 위해서는 기존 헤링본 패턴으로는 힘들어지기 시작하여, 새로운 형태의 전열판 패턴 개발이 필요하게 되었다. 이에 웨이비(Wavy) 패턴이 제시되었으며, 이 중 현실적으로 개발 가능한 형상 중 최상의 효율을 낼 수 있을 것으로 예상되는

형상에 대하여 수치해석을 실시하였다.

수치해석 결과 웨이비 패턴과 헤링본 패턴 사이의 전열성능이 웨브론각에 따라 다소 차이는 있었으나, 웨이비 패턴이 기존 헤링본 패턴보다 전열성능은 전체적으로 평균 10% 상승, 압력강하는 약 5% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 웨이비 패턴이 헤링본 패턴에 비해 압력강하 증가분보다 열전달 증가분이 큰 것으로 웨이비 패턴을 활용하고자 하는 개발방향성은 맞다는 것을 의미한다. 그리고 이 결과를 실제 전열판 설계에 적극 활용하여 신규 전열판을 개발하였다.

신규로 개발된 웨이비 패턴 전열판과 기존 헤링본 패턴 전열판을 이용하여 총 6종류의 테스트 제품을 제작하여 실제 성능테스트를 실시하였다.

성능테스트 결과, 수치해석 결과와 마찬가지로 웨브론각에 따라 다소 차이는 있었지만 신규 웨이비 전열판이 기존 헤링본 전열판에 비해 압력강하는 전체적으로 평균 8% 정도 높았으나 전열성능은 전체 평균 약 15% 이상 높았다. 실제 압력강하가 증가하면 이송펌프의 동력이 증가지만 본 연구에서는 전열성능 증가분이 압력강하 증가분보다 높았기 때문에 향후 웨이비 패턴의 활용이 더 많아질 수 있을 거라 생각된다.

수치해석 결과의 정성적인 경향성은 실제 실험에서도 유사하게 나타났지만, 정량적인 수치에 대해서는 상당한 차이가 나고 있음을 알 수 있었다. 이는 전열판 일부분만을 수치해석하였기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 수치해석을 통한 전열성능의 경향성은 충분히 파악할 수 있었기 때문에 향후 대형 전열판 개발의 사전 단계로써 수치해석의 유용성은 더 커질 것으로 사료된다.

본 연구에서 소개한 열교환기 개발의 전반적인 과정과 그 과정을 통해 도출된 결과들에 대한 분석방법은 본 논문에서 기술한 판형 열교환기뿐만 아니라 일반 열교환기를 공부하는 학생들이나 열교환기 관련 업계에서 제품개발을 담당하고 있는 연구원들이 실무적으로 활용할 수 있기 때문에 이러한 관점에서 본 논문은 학술적 가치와 더불어

어 교육적 가치 또한 충분하다고 할 수 있겠다.

References

- AHRI(2015). Performance Rating of Liquid to Liquid Heat Exchangers, AHRI.
- ASME(2000). ASME PTC 12.5-2000 Single Phase Heat Exchangers, ASME.
- Bae KJ, An SK, Cho HU and Cho HH(2011). Comparison of Performance Characteristics in the Chevron Type Plate Heat Exchanger with Performance Correlation, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigerating Engineering, 23(8), 535~542.
<https://doi.org/10.6110/KJACR.2011.23.8.535>
- Cho DH(2015). A Study on the Improvement of Efficiency of Heat Transfer of Double Pipe Heat Exchanger with Helical Insert Device on Cooling of a Fuel Cell, Journal of Fisheries and Marine Sciences Education, 27(6), 1872~1879.
<http://dx.doi.org/10.13000/JFMSE.2015.27.6.1872>
- Farrell P, Wert K and Webb R(1991). Heat Transfer and Friction Characteristics of Turbulator Radiator Tubes, SAE Technical Paper Series, 910197.
<http://dx.doi.org/10.4271/910197>
- Kim HJ, Jung YK, Lee HS, Yoon JI and Son CH(2014). Numerical Study for the Optimal Design of Plate Heat Exchanger Using at Seawater Air Conditioning, Journal of the Korea Society for Power System Engineering, 18(4), 29~35.
<https://doi.org/10.9726/kspse.2014.18.4.029>
- Lim TW, Choi YS and Lim WT(2019). Characteristics of Shell side Pressure Drop in Shell and Tube Heat Exchanger, Journal of Fisheries and Marine Sciences Education, 31(3), 839~845.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2019.6.31.3.839>
- Moh JH(2012). Numerical Simulation of the Fully Developed Flow and Heat Transfer of a Plate Heat Exchanger Taking into Account Variation in the Corrugation Height, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, 36(1), 1~8.
<https://doi.org/10.3795/KSME-B.2012.36.1.001>
- Muley A and Manglik RM(1999). Experimental Study of Turbulent Flow Heat Transfer and Pressure Drop in a Plate Heat Exchanger with Chevron Plates, Journal of Heat Transfer, 121(1), 110~117.
<http://dx.doi.org/10.1115/1.2825923>
- Wang L, Sunden B and Manglik RM(2007). Plate Heat Exchangers, WIT Press Publishing.

-
- Received : 26 December, 2019
 - Revised : 16 January, 2020
 - Accepted : 28 January, 2020