

판형-핀 열교환기 분배면의 유동 가시화 연구

정태식* · 박승하** · 김창수** · 김형범†

Flow Visualization Study around the Distributor of Plate-fin Heat Exchangers

Tae-Sik Jeong, Seung-Ha Park, Chang-Su Kim and Hyoung-Bum Kim

Abstract. Plate-fin heat exchanger is a kind of compact heat exchangers with a good performance in heat transfer. It is widely used in various engineering fields such as aerospace, chemical and biomedical industries. Quantitative and qualitative flow visualization study were performed using the water model of commercial plate-fin heat exchanger with header angles of 30°. The Reynolds number was 100. Conventional digital particle image velocimetry was used to measure the instantaneous velocity fields of the header region and the flow visualization using dye injection and hydrogen bubble method were applied to capture the qualitative flow characteristics. The results showed the existence of separation flow region at the junction area and the bottom wall of the exit region.

Key Words: Flow Visualization (유동가시화), Plate-fin Heat Exchanger (판형-핀 열교환기), Distribution Characteristics (분배특성), Particle Image Velocimetry (입자화상속도계)

1. 서 론

판형-핀 열교환기는 열에너지 교환 분야에서 널리 사용되고 있는 우수한 성능을 가진 소형 열 교환기 종류 중 하나이며, 단상 유체뿐만 아니라 공기와 액체 간의 열 교환과 같은 다상 유체에서의 열전달 문제에도 많이 사용된다. 대표적인 응용 예로써 자동차 라디에이터, 증발기, 응축기, 전기냉방장치 등으로 항공, 화학 및 의학 등 다양한 분야에서 활용되고 있다⁽¹⁾.

판형-핀 열교환기는 단위 부피 당 유효 전열면적이 나선형 열교환기에 비해 4배, 셸-튜브형 열교환기에 비해 5배나 더 큰 전열면적을 가지며 다양한 종류의 유체가 동시에 열 교환이 가능하다는 장점을 가지고 있다^(2,3).

지금까지 세계적으로 판형-핀 열교환기의 성능을 향상시키기 위한 많은 연구가 진행되었으며, 주로 판형-핀 열교환기의 열 교환 성능 및 입구부 및 분배면의 분배성능에 관한 실험적, 수치적으로 고찰한 내용들이

발표되고 있다. Wang⁽⁴⁾등은 전산유체해석기법을 사용하여 판형-핀 열교환기에서 핀 형상에 따른 열교환기의 열전달 성능을 분석하였고, 그 결과 톱니형 핀이 판형 핀보다 균일한 속도 및 온도 분포를 가진다는 것을 확인하였다. Peng⁽⁵⁾등은 톱니형 핀을 가지는 판형-핀 열교환기의 Colburn 계수 및 마찰 계수를 수치적으로 연구하였다. 박⁽⁶⁾등은 삼각 형태의 와류발생기를 유동 방향에 직각으로 부착한 판형-핀 열교환기의 최적 형상을 수치적으로 연구하였다. 그 결과, 와류 발생기는 열전달을 향상시키지만 압력강하를 증가시키는 역할을 한다는 사실을 확인하였으며, 입구부가 판형-핀 열교환기의 전체 성능을 결정하는 중요한 요소 중 하나라는 것을 확인하였다.

앞의 연구로부터 판형-핀 열교환기의 열전달 성능에 유체의 분배 문제가 중요하다는 것이 밝혀진 이후, 균일한 유체의 분배를 위해 많은 연구가 수치적, 실험적으로 수행되고 있다. Wen⁽⁷⁾등은 판형-핀 열교환기에서 기존 입구부의 분배성능을 유동 장 분석을 통해 보여 주었다. 그리고 열교환기의 불균등 분배성능을 개선하기 위해 입구부에 추가로 다공성 판을 설치함으로써 분배성능을 향상시킬 수 있다는 것을 실험적으로 증명

†경상대학교 항공기부품기술연구소

E-mail : kimhb@gnu.ac.kr

*경상대학교 기계항공공학부

**주식회사 동화엔텍

하였다. 이⁽⁸⁾등은 CFD를 이용하여 측면입구 형태의 관형-핀 열교환기의 분배면에서의 입구 조건과 형상비의 변화에 따른 분배성능을 고찰하여 최적 분배면 형상비를 제시하였다. Gandhi⁽⁹⁾등은 높은 레이놀즈수 조건 하에서 전산유체해석기법을 이용해 입구부의 성능을 분석하여, 입구부의 튜브 수와 위치가 입구부의 분배성능에 중요한 영향을 미친다는 것을 수치적으로 확인하였다. Reneaume⁽¹⁰⁾등은 관형-핀 열교환기의 열교환 성능을 최적화 할 수 있는 방법을 수치적 해석으로 제안하였다. Zhang⁽¹¹⁾등은 2단계로 나누어진 관형-핀 열교환기의 입구부를 설계하여 분배성능이 향상될 수 있음을 연구하였다. Jiao⁽¹²⁾등은 2단계로 이루어진 입구부의 디자인에 따른 분배성능을 불균등 분배도를 통해 고찰하고 최적화된 분배성능을 가지는 디자인을 제안하였다.

기존의 연구들은 대부분 관형-핀 열교환기의 입구부 성능에 관한 수치적/실험적 연구로 열교환기 분배면 자체에 대한 실험적 연구는 본 연구자들이 확인한 바로는 아직까지 보고된 적이 없었다. 본 연구에서는 관형-핀 열교환기의 분배면에서의 유동을 정량적, 정성적으로 가시화하였다. 저자들은 이 연구를 통하여 관형-핀 타입 열교환기 유동의 물리적 이해의 향상과 함께 이를 이용하여 분배면 설계에 대한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

실험 장치는 관형-핀 열교환기의 입구부, 분배면, 전열면 중 분배면 1개 층만이 제작되었다. 분배면 영역

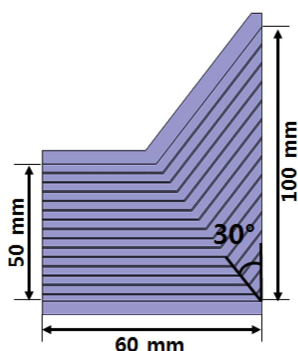


Fig. 1. Distributor model.

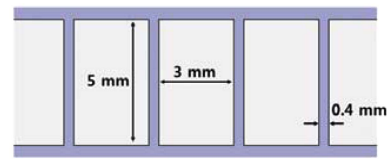


Fig. 2. Channel geometry of distributor.

만을 고려하기 위하여 분배면 입구에서 균일한 속도를 가지는 유체가 흐르도록 실험환경을 조성하였으며 Fig. 1과 같이 분배면의 입구길이는 50 mm, 출구길이는 100 mm 이고, Fig. 2와 같이 채널 각각의 길이는 3 mm, 높이 5 mm 이며 채널 벽의 두께는 0.4 mm 로 실제 LNG액화 플랜트에서 사용되고 있는 관형-핀 열교환기의 분배면과 동일한 비율로 제작되었다. 분배면 출구와 채널 교차영역을 기준으로 채널 각도는 30°이며 분배면 입구길이와 채널높이로부터 계산되어진 레이놀즈수는 100 이다.

2.2 실험방법

분배면의 유동의 정량적 유동가시화를 위해 PIV (particle image velocimetry) 실험을 수행하였다. Fig. 3에 PIV 시스템을 포함한 전체적인 실험 장치의 구성을 나타내었다. 1.6 k×1.2 k pixel의 공간 해상도를 가진 CCD 카메라가 분배면 및 분배면 후방의 영상을 획득하는데 사용되었다. Dual-head 형 Nd:YAG 레이저가 조명을 위해 사용되었으며 CCD카메라와 레이저는 동기화 장치(delay generator)를 이용하여 연계되어 동작된다. 분배면 및 후방 영역에서 800장의 순간 속도장을 획득하고, 양상을 평균하여 유동 특성을 측정하였다. 일반적인 상호상관기법의 PIV 알고리즘을 사용하여

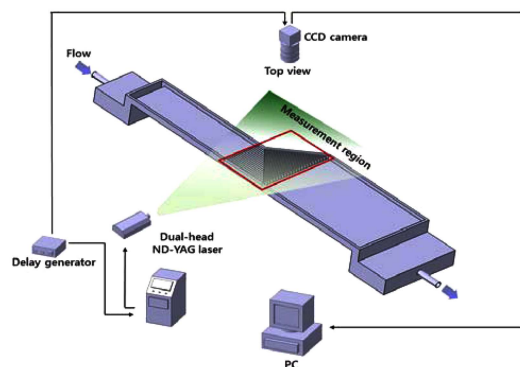


Fig. 3. Experimental apparatus PIV method.

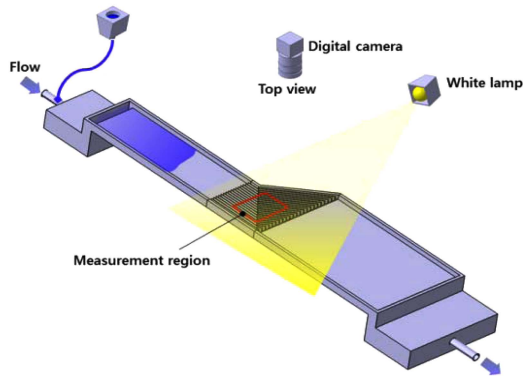


Fig. 4. Flow visualization using dye injection.

순간 속도 벡터를 획득하고 계산에 사용되는 최종적인 조사 영역을 50% 중첩된 16×16 pixel 로 고정하였다. 알루미늄 미세 입자가 산란입자로 사용되었다.

분배면 및 분배면 후방의 유동을 정성적으로 가시화 하기 위해 염료주입법 및 수소기포법 가시화 실험이 수행되었다. 정성적 유동 가시화는 정량적 유동 가시화에 비해 결과 해석이 주관적이지만, 유체의 복잡한 유동 구조를 쉽게 이해하는데 도움이 될 수 있다. Fig. 4에서는 염료주입법 가시화 시스템의 전체적인 실험 장치 구성을 보여준다. 실험을 위해 연속광원인 할로겐 조명과 식용 색소가 염료로 사용되었다. 염료주입법은 분배면 전방에서 유체가 흐를 때, 입구에서 염료가 주입되어 분배면 및 분배면 후방의 유동을 유맥선으로 관찰 할 수 있으며 특히 분배면 내부 채널 구배구간의 유동을 상세하게 가시화 할 수 있다. 반면에 색소가 작동 유체에 손쉽게 확산되어 오염되므로 짧은 시간 내에 사용하는 가시화 방법이다. Fig. 5에서는 수소기포법 가시화 실험의 장치 구성을 나타내었다. 전기를 사용하여 수소기포를 발생시키는 수소기포법은 수소기포가 시간이 지남에 따라 작동유체에 다시 녹아들어 오염이 되지 않으므로 작동유체를 손쉽게 재사용 할 수 있다는 장점이 있다. 또한 입구면을 따라 동일 위치에서 수소기포를 가시화할 수 있다면 시간선의 가시화도 가능하다. 수소기포 발생을 위해 분배면 전방 5 mm 거리에서 알루미늄 판 및 텅스텐 선을 설치하였다. 텅스텐 선은 분배면 입구의 흐름방향을 따라 설치되었으며 전해질로 황산나트륨(Na_2SO_4)을 작동유체에 투입하였다. 수소기포가 분배면 모든 채널 입구에서 동시에 발생되기 때문에 분배면의 분배성능을 시간선으로

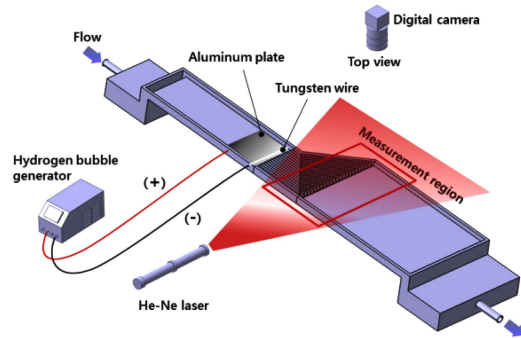


Fig. 5. Flow visualization using hydrogen bubble method.

가시화하였다. 수소기포법에서는 He-Ne 레이저가 조명장치로 사용되었으며 모든 영상은 디지털 비디오 카메라를 사용하여 획득하였다.

3. 실험결과

3.1 정량적 가시화 결과

PIV 실험 결과를 통해 분배면 내부에서의 앙상블 평균된 속도장을 획득할 수 있었다. 유체의 균일한 흐름 분포는 열교환기의 성능을 결정하는 중요한 요소 중 하나이며, Fig. 6은 레이놀즈수 100에서 유체의 흐름 분포를 보여준다. 분배면의 입구부에서는 위쪽 채널에서 아래쪽 채널로 갈수록 속도가 증가하는 경향을 보이며, 이는 분배면 내에서 유체는 아래쪽 영역에 강한 운동량을 가지고 있다는 것을 나타낸다. 이러한 운동량 편중 현상의 주요 원인은 위쪽채널과 아래쪽 채널의 관로 길이 차이로 인한 저항 손실에서 기인된 것으로 해석된다.

또한 직선부와 경사부 사이의 연결부위에서 유선의 변화가 있음을 알 수 있다. PIV 실험에서의 측정 공간 해상도가 낮아 연결부에서의 박리 기포의 유무가 정확히 나타나지 않았다. 다음 장에서의 염료주입법을 통한 유맥선 가시화 결과에서는 연결부위의 박리 구간의 존재를 확인할 수 있었다.

3.2 분배면 및 후방의 정성적 가시화

분배면 유동구조의 정성적 해석은 염료투입법 및 수소기포 가시화 기법을 이용하여 연구하였다. 염료투입법은 유맥선을 수소기포법은 시간선을 발생시켜 유동의 정성적 구조를 보여준다. 염료투입 가시화 결과인

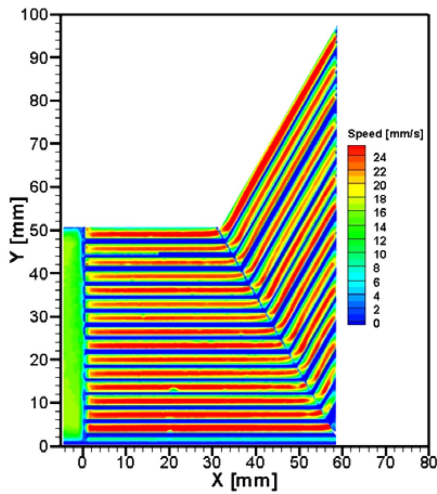


Fig. 6. Averaged velocity fields at the distributor.

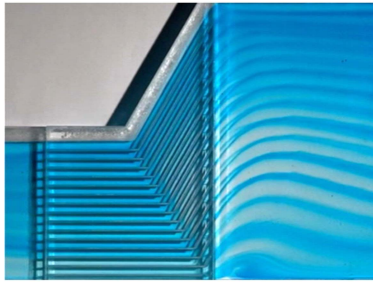


Fig. 7. Channel flow visualization using dye injection method (outlet area).

Fig. 7에서는 분배면 후방의 유동 구조를 관찰할 수 있었다. 분배면에서 유출된 유체는 채널구조에 따라 출구에서 강한 양의 y방향 속도성분을 가지는 것을 알 수 있다. 이후 하류로 나아가면서 점차 y축 방향 속도 성분이 작아진다. 분배면 후방의 아래쪽 벽면에서의 높은 염료 농도 구간은 분배면 후방 박리기포의 존재로 인해 정체된 유체로 인해 발생하는 현상으로 해석된다. 이러한 박리기포의 존재는 분배면의 분배성능 및 열교환기 전체의 성능을 저하시키는 주요한 요인으로 작용한다. 분배면의 연결 부위 유동을 가시화하기 위하여 관심구간을 확대하여 획득한 유동 가시화 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 그 결과로 채널 교차영역의 위쪽 벽면에서 유동박리 현상이 나타남을 확인할 수 있었다. 이 때, 교차되는 채널이 서로 맞물리는 형태이지만 채널 간에 누설방지 공정을 사용하지 않았기 때문

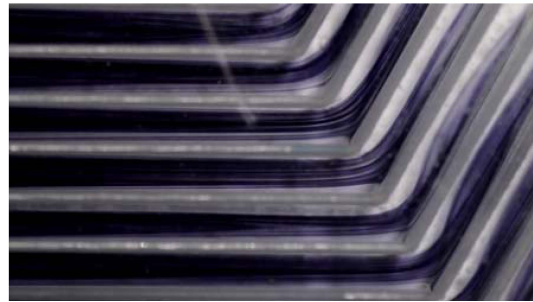


Fig. 8. Channel flow visualization using dye injection method (channel area).



Fig. 9. Flow visualization of distributor outlet using hydrogen bubble method.

에 일부 염료는 채널 간 틈새 사이로 빠져나감을 확인할 수 있었으며, 유체가 채널 틈새로 누설되는 현상은 누설방지 공정이 없는 실제 관형-핀 열교환기에서도 동일한 현상을 보일 것으로 생각된다. 또한 유맥선이 보여주는 경사부 채널에서의 유선 변화는 그 부위에서의 압력 변화를 의미하며 분배부 설계 시 구조해석의 필요성을 보여준다.

수소기포법 가시화는 분배면 후방 영역에서의 유동 가시화를 위해 사용되었으며 분배면의 분배성능을 시간선으로 가시화하였다. 수소기포 발생을 위해 설치한 텅스텐 선에 펄스 형태의 전원을 공급하여 단속적으로 수소기포를 발행하였으나, 채널을 지나면서 혼합에 의해 연속적인 수소기포 가시화 결과를 획득하였다. 수소

기포 가시화 결과 분배면의 아래쪽 채널에서 가장 빨리 기포가 배출되었음을 확인할 수 있으며 위쪽 채널로 갈수록 느리게 기포가 배출되었음을 확인할 수 있었다. 수소기포법 실험 결과에서도 염료투입법 가시화 실험결과와 마찬가지로 분배면 출구 아래쪽 벽 지역에 박리영역의 존재를 확인할 수 있었다는 것이다. 이러한 박리영역의 존재는 분배면에 대한 수두 손실에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 관형-핀 열교환기의 분배면 및 분배면 후방의 내부 유동 특성을 정량적, 정성적 가시화를 통해 실험적으로 조사하였다. PIV 실험 결과를 통해 분배면내에서 유체는 아래쪽으로 운동량이 편중됨을 확인할 수 있었다.

정성적 가시화 실험을 통해 분배면 내부 및 분배면 후방에서 박리영역의 존재를 확인할 수 있었고, 이는 분배면 내부 및 분배면 후방의 급격한 채널 각도의 변화가 주요 원인으로 생각된다. 분배면의 분배성능을 시간선으로 나타내어 실제 분배면의 성능을 확인할 수 있었으며, 실험에 사용된 분배면 모델이 이상적인 분배면의 조건인 균일한 분배성능을 보이지 않는다는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과는 열교환기의 분배면 설계 및 전체 열교환기의 성능을 향상시키는 것에 도움을 주리라 생각된다.

후 기

본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원 사업(2012-048078)과 기초연구사업(2012-008918), 국토해양부 가스플랜트 사업단의 연구 지원으로 수행되었고 이에 감사드립니다. 정태식 군은 BK21사업 첨단기 계항공 고급인력 양성사업단의 참여 대학원생입니다.

참고문헌

1) Nam, K. E., Oh, D. W., Song, C. H., Yoon, S. H., Lee, K. H., and Kim O. J., 2011, "An Experimental Study on Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Plate-Fin Heat Exchanger with Variation in Fin Config-

uration", *J. Fluid Mech.*, Vol. 20(5), pp. 449-464.

2) Alpema, 2000, *The Standard of the Brazed Aluminum Plate-fin Heat Exchanger Manufacturer's Association*, ALPEMA.

3) Feldman, A., Marvillet, C. and Lebouche M., 2000, "Nucleate and Convective Boiling in Plate Fin Heat Exchangers", *Heat and Mass Transfer*, 43, 3433-3442.

4) Wang, Y. Q., Dong, Q. W., Liu, M. S. and Wang, D., 2009, "Numerical Study on Plate-Fin Heat Exchangers with Plain Fins and Serrated Fins at Low Reynolds Number", *Technol.Chem.Eng.*, Vol. 32(8), 1219-1226.

5) Peng, H. and Ling X., 2008, "Numerical Modeling and Experimental Verification of Flow and Heat Transfer over Serrated Fins at Low Reynolds Number", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32, 1039-1048.

6) Park, K. W and Choi, D. H., 2004, "Optimal Design of a Heat Exchanger with Vortex Generator", *Transaction of the KSME*, 1219-1224.

7) Wen, J., Li, Y.Z., Zhou, A. M. and Ma, Y. S., 2006, "PIV Investigations of Flow Patterns in the Entrance Configuration of Plate-fin Heat Exchanger", *Chinese J. Chem. Eng.*, Vol. 14(1), 15-23.

8) Lee, E. C., Kang, H., Heo, J. Y., Kim, Y. C., Park, J. H. and Cho, S. Y., 2011, "Numerical Study on the Distribution Characteristics of Aluminum Plate-Fin Heat Exchangers According to the Distributor Aspect Ratio", *Journal of KSME*, Vol. 35(8), 805-814.

9) Gandhi, M. S., Ganguli, A. A., Joshi, J. B. and Vijayan, P. K., 2012, "CFD Simulation for Stream Distribution in Header and Tube Assemblies", *Chemical Engineering Research and Design*, 90, 487-506.

10) Reneaume, J. M., Pingaud, H., Niclout, N., 2000, "Optimization of Plate Fin Heat Exchangers a Continuous Formulation, *Institution of Chemical Engineers Transfer*", 78, 849-859.

11) Zhang, Z. and Li, Y. Z., 2003, "CFD Simulation on Inlet Configuration of Plate-Fin Heat Exchangers", *Cryogenics*, 43, 673-678.

12) Jiao, A. J., 2003, Zhang, R. and Jeong, S. K., "Experimental Investigation of Header Configuration on Flow Maldistribution in Plate-Fin Heat Exchanger", *Applied Thermal Engineering*, 23, 1235-1246.