

김 용 찬 고려대학교 기계공학과 교수

| e-mail : yongckim@korea.ac.kr

강 용 태 고려대학교 기계공학과 교수

| e-mail : ytkang@korea.ac.kr

이 글에서는 냉동·공조산업에서 쓰이는 냉매들의 변천사와 앞으로 다가올 미래 공조산업을 준비하기 위한 Low GWP 냉매를 적용한 판형 증발기 및 응축기에 관한 연구에 대하여 소개하고자 한다.

다양한 산업분야에서 사용되는 열교환매체로서 적절한 열교환기 설계는 기술의 발달에 따라 그 중요성이 나날이 증가하여 왔다. 그 중에서도 판형열교환기는 낮은 오염성과 쉬운 유지·개·보수 등 다양한 장점으로 널리 사용되고 있다. 판형열교환기의 설계에 있어서 중요한 요소로는 사용되는 작동유체와 유체의 입출구 온도, 압력을 들 수 있다. 이러한 시스템 설계치를 이용하여 적절한 열교환기를 설계하기 위하여서는 작동유체에 잘 들어맞는 열교환 상관식과 이에 맞는 무차원수(누셀트수, 마찰계수)에 대한 연구가 필연적으로 필요하게 된다. 따라서 이 글에서는 앞서 소개된 Low GWP 냉매를 적용한 판형열교환기의 최적 설계를 위해 필수적으로 요구되는 열전달 및 압력 강하에 대한 상관식을 실험적으로 도출하는 연구들과 열교환기 설계 프로그램을 개발하는 연구에 관해 소개하고자 한다.

판형열교환기

판형열교환기는 유체와 유체 간의 효율적인 열전달을 위해 만들어진 장치로, 단위부피당 열교환양이 큰 열교환기 중 하나이다. 판형열교환기는 전열판의

면적과 판의 개수를 조정함으로써 작은 용량부터 대용량의 열교환기가 생산가능하며, 비교적 작은 용량의 열교환기로 주로 사용된다. 판형열교환기의 종류는 전열판의 결합방법에 따라 실링부품을 사용하는 가스켓타입, 각 전열판을 브레이징 하는 브레이징타입, 두 장의 전열판이 한 쌍으로 레이저 용접된 채 가스켓을 사용하는 반응접타입, 전열판을 셀로 둘러싼 셀 & 플레이트 타입 등이 있다. 판형열교환기의 전열판 재질로서는 열저항이 작은 금속재질이 사용되며 주로 구리와 니켈이 사용된다. 전열판의 형상은 웨브론타입이 일반적이며 유체의 난류도를 최대화하고 유체와의 접촉면적을 최대화할 수 있게끔 물결무늬와 유사하게 설계되어 있다. 따라서 판형열교환기에서 난류 천이점의 레이놀즈수는 일반적으로 400 정도로 50만인 평판보다 현저하게 낮은 수치이다. 이 같은 장점들로 인하여 많은 산업분야, 특히 공기조화 및 냉동분야에서 열교환기로서 판형열교환기가 널리 사용되고 있다. 그림 1은 판형열교환기 및 전열판의 사진, 그리고 판형열교환기 내에서 유체의 유동을 이해하기 위한 해석결과이다.

표 1 전열관 및 냉매별 총합 열전달계수 비교

Fluid	T _{crit} (°C)	P _{crit} (bar)	P _{sat} (5°C) (bar)	잠열(5°C) (kJ/kg)	GWP	Safety
HFC134a	101.0	40.59	3.497	194.7	1430	A1
HFO1234ze(E)	109.3	36.35	2.593	180.9	<5	A2L
HFO1234yf	94.7	33.82	3.729	160	4	A2L
HCFC123	183.7	36.68	0.409	179.9	77	B1
HFC245fa	154	36.51	0.662	201.7	1030	B1
HFO1233zd(E)	165.6	35.73	0.5941	202.3	1-7	A1
HFO1234ze(Z)	150.1	35.33	0.858	217.7	<10	A2L

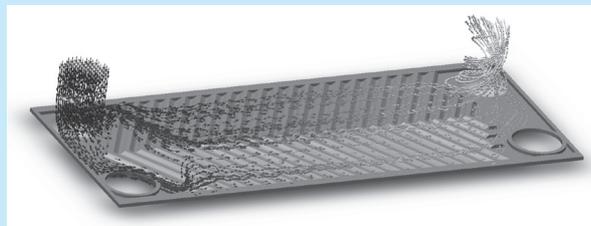
판형열교환기에서의 응축·증발 실험연구

판형열교환기는 앞서 서술한 내용에서도 언급되어 있듯이, 높은 효율성과 낮은 오염률로 다양한 산업에서 사용되고 있다. 이러한 판형열교환기를 산업현장에서 요구하는 사양에 맞게 설계하기 위하여는 냉매의 종류와 질량유속, 시스템 압력 등 다양한 변수를 고려한 실험 결과가 필요하다. 이에 따라, 세계 각지에서 신냉매를 적용한 판형열교환기에서의 응축·증발 실험이 진행되고 있으며, 그에 대한 개요와 개발동향은 다음과 같다.

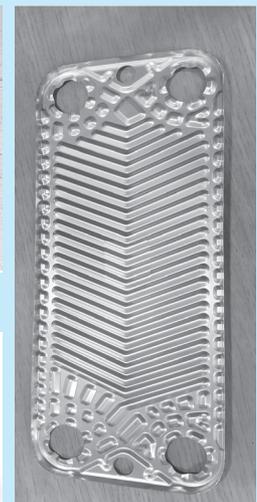
응축·증발 실험의 실험 장치는 실험자마다 다른 형태와 구조를 가지지만, 기본적인 구조는 대체적으로 동일하다. 시험하고자 하는 열교환기가 들어가는 ‘시험부’, 시험부의 조건(냉매의 압력, 온도 등)을 맞춰주기 위한 ‘보조 열교환부’, 시험부를 통과한 냉매를 완전 응축시켜주기 위한 ‘응축부’, 그리고 이러한 실험 장치를 냉매가 흐를 수 있게 하는 펌프와 기타 장치들이 부착된다. 펌프를 지난 냉매의 유량과 시험부에서



(a) 브레이징타입 판형열교환기



(b) 판형열교환기 유동해석



(c) 판형열교환기의 전열판

그림 1 판형열교환기의 형상 및 유동형태

의 온도와 압력 등을 통하여 냉매의 질량유속별, 시스템 압력별, 건도별 열전달계수 및 압력강하를 구할 수 있으며, 이러한 데이터를 바탕으로 최적의 열교환기를 설계할 수 있다.

또한 이러한 연구에 쓰인 냉매로서 기존의 냉동산업에서 사용되던 냉매들을 대체하기 위해 등장한 Low GWP 냉매들은 각각의 압력에 따른 응축온도, 비열 등을 따져 비슷한 물성을 가지는 냉매들을 대체하기 시작하였다. 공조용 칠러와 냉동기, 차량용 에어

킨 등에 사용되던 HFC134a 냉매를 대체하기 위하여 HFO1234ze(E)와 HFO1234yf 냉매가 등장하였으며, 저압냉매로서 고온 히트펌프와 발전 사이클에 주로 사용되던 HCFC123과 HFC245fa 냉매의 대체 냉매로서 HFO1233zd(E)와 HFO1234ze(Z) 등의 냉매가 등장하였다. 표 1은 각 냉매들의 응축온도, 비열 등을 나타낸 표이다.

응축실험 연구동향

- 응축기로 사용된 판형열교환기에서 HFC134a 대체냉매에 관한 연구

2013년도 이탈리아의 Longo 등은 HFO1234yf를 작동유체로 하는 판형열교환기에서의 열전달계수와 마찰 압력강하에 대한 연구를 실험적으로 진행하였으며, 실험결과를 HFC134a와 비교한 결과 HFC134a보다 10~12% 낮은 열전달계수와 10~20% 낮은 마찰 압력강하를 나타내었다. 또한, 2012년도 스웨덴의 Sad Jarral은 HFO1234yf를 작동유체로 하는 판형열교환기에서의 열전달계수와 마찰 압력강하에 대하여 실험적 및 이론적으로 분석하였다. 연구결과 HFO1234yf는 HFC134a보다 낮은 냉방용량, COP, 압축기 효율을 보였으며, 과냉과 과열에 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

2014년도 이탈리아의 Longo 등은 HFO1234ze(E)에 관한 연구를 진행하였으며, 이를 통해 HFO1234ze(E)는 HFC134a보다 4~6% 낮은 열전달계수와 10% 높은 마찰 압력강하를 보이는 것을 실험적으로 증명하였다. 또한, 2016년도 일본의 Keishi, K 등은 HFO1234ze(E)를 작동유체로 판형 열교환기에서의 벽면 온도를 고려한 국소 열전달계수와 온도구배에 대한 연구를 진행하였다.

- 응축기로 사용된 판형열교환기에서 HFC245fa 대체냉매에 관한 연구

2014년도 이탈리아의 Longo 등은 몬트리올 협정

이전에 고온 히트펌프에 주로 쓰이던 냉매들을 대체하기 위해 HFO1234ze(Z) 냉매에 관한 연구를 진행하였다. 연구결과 HFO1234ze(Z)는 기존에 히트펌프에 사용되던 냉매(HFC134a, HFC600a, HFC236fa)들보다 높은 열전달계수와 마찰 압력강하를 보였다. 이를 통하여 HFO1234ze(Z)가 고온 히트펌프에 매우 적합한 대체냉매라는 것을 알 수 있었다.

- 그림 2와 그림 3에 최근에 개발된 Low GWP 냉매들에 대한 포화증기 응축 열전달계수 및 과열증기 평균 응축 열전달계수의 값들이 제시되어 있다.

증발실험 연구동향

- 증발기로 사용된 판형열교환기에서 HFC134a 대체냉매에 관한 연구

2014년도 이탈리아의 Longo 등은 판형열교환기에서 HFC134a의 대체냉매 후보인 HFO1234ze(E)에 대한 증발열전달 실험을 진행하였다. 실험결과 열전달계수는 HFC134a가 약간 더 높았고, 압력강하는 HFO1234ze(E)가 조금 더 높았다. 전반적으로 열전달계수와 압력강하의 차이는 두드러지지 않았다. 또한, 동일 저지는 2015년에 HFO1234yf와 HFC134a의 열전달 성능비교 실험을 판형열교환기를 이용하여 진행하였다. 실험결과 HFC134a가 HFO1234yf보다 다소 높은 열전달계수를 보였으나 절대적인 수치는 상당히 비슷한 값을 보였다.

2012년도 미국의 Karber 등은 HFC134a와 그 대체냉매인 HFO1234ze(E), HFO1234yf를 이용하여 실제 냉방시스템에서 에너지 효율을 각각 냉매별로 분석하였다. HFO1234yf의 경우에는 HFC134a와 비슷한 에너지소비와 용량을 보이므로 drop-in에 적합하다고 판단하였다. 대조적으로, HFO1234ze(E)는 에너지소비의 측면에서는 HFC134a와 거의 비슷하지만, 작은

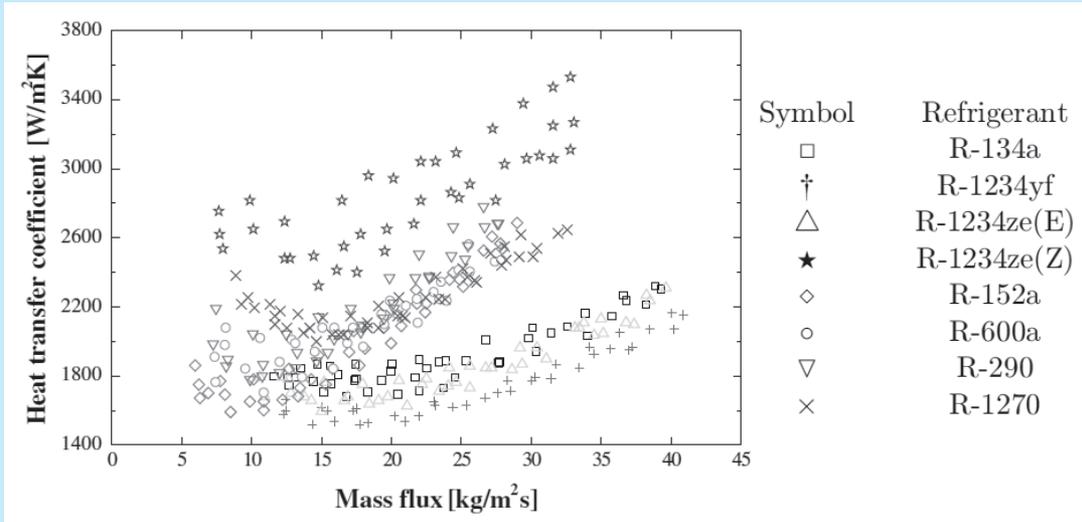


그림 2 포화증기의 평균 응축 열전달계수

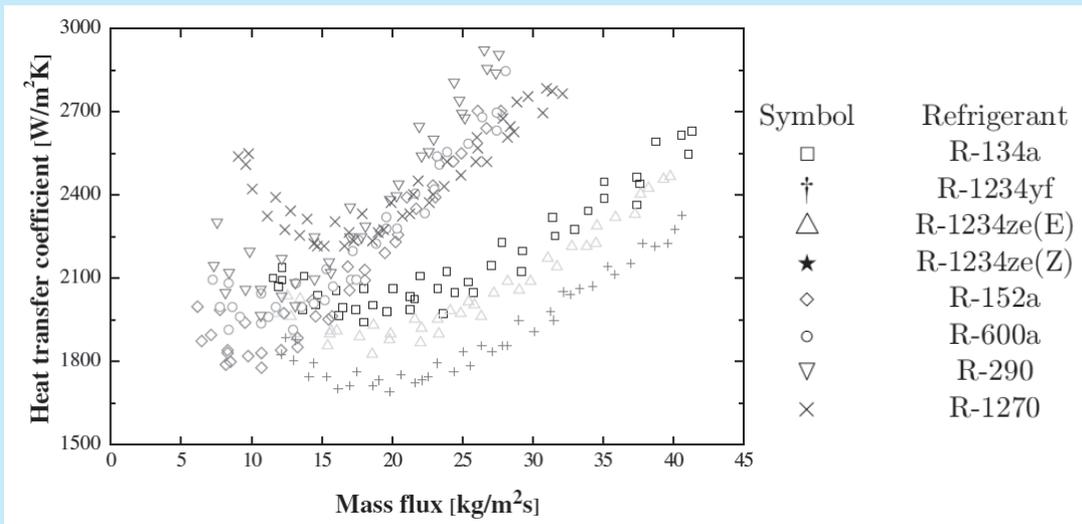


그림 3 과열증기의 평균 응축 열전달계수

용량으로 인한 압축기 운전시간 증가로 시스템의 변형이 불가피하다고 판단하였다. 그림 4에 냉매별 열유속에 따른 증발 열전달계수 값들이 나타나 있다.

- 증발기로 사용된 판형열교환기에서 HFC245fa 대체냉매에 관한 연구
2017년도 벨기에의 Desideri 등은 판형열교환기

를 이용해 HFO1233zd(E)와 HFC245fa의 증발열전달실험을 진행하였다. HFC245fa는 저압냉매로서 고온히트펌프나 발전시스템에서 주로 사용되는 냉매이며, 폐열을 회수하여 발전하는 Organic Rankine Cycle(ORC)에서 널리 사용되고 있다. 일반적인 ORC 운전조건에서 HFC245fa와 HFO1233zd(E)를 실험한 결과, 열전달계수는 HFC245fa가 조금 더 높

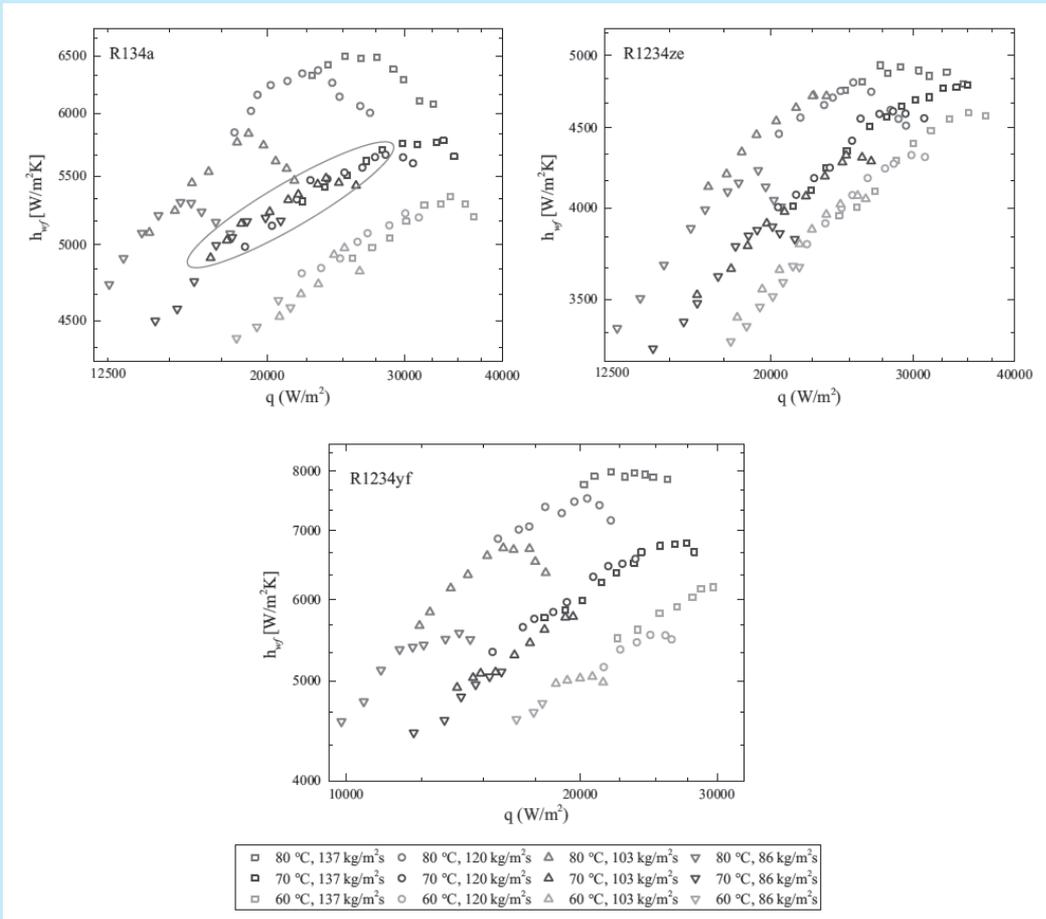


그림 4 냉매별 열유속에 따른 증발 열전달계수(Ji Zhang 등)

계 측정이 되었고, 압력강하는 HFO1233zd(E)가 더 높았다. 하지만 열전달계수의 감소폭과 압력강하의 증가폭이 비교적 작아 대체냉매를 적용을 위한 열교환기의 큰 변형은 필요하지 않을 것으로 예상되었으며, 실제로 2016년도 독일의 Eyerer 등은 기존냉매 HFC 245fa를 사용하는 ORC 시스템에 HFO1233zd(E)의 drop-in 가능성에 대해 연구를 하였으며, 사이클 전반적인 효율은 HFC245fa가 다소 높았지만, 최대효율은 오히려 HFO1233zd(E)를 사용하였을 때 더 높은 것으로 나타났다. 또한 증발기와 응축기에서의 열교환 성능과 압력강하는 거의 비슷한 것으로 나타났다.

Low GWP 냉매 적용 판형열교환기 전망

앞서 살펴본 바와 같이 Low GWP 냉매의 개발과 이를 판형 열교환기에 적용하려는 시도는 활발하게 이뤄지고 있다. Low GWP 냉매는 분명히 현재 환경 기준을 만족시키는 냉매이지만, 성능 측면에서는 기존 high GWP 냉매에 비해 다소 부족한 것도 사실이다. 이를 고려하였을 때 작은 면적에서도 우수한 열효용도를 보이는 판형 열교환기는 환경뿐만 아니라 성능 조건도 만족시키는 열교환기라 할 수 있다. 따라서 Low GWP 냉매를 적용한 판형열교환기는 향후 냉동공조 산업에서 중요한 위치를 차지할 것이라 판단된다.