가정용 공조기용 열교환기의 개발동향

김 현 영
다이킨공업(주) 환경기술연구소(hyunyoung.kim@daikin.co.jp)

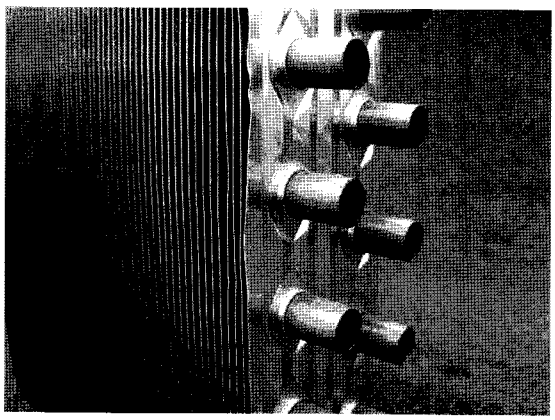
머리말

지구온난화의 관점에서, 가정용 전체 소비전력의 약 1/4을 차지하는 공기조화기의 고효율화는 이산화탄소 배출량 감소를 위해 빼놓을 수 없는 중요한 과제이다. 현재까지 공기조화기 시스템의 성능개선을 위해 여러 가지 연구개발이 진행되어 왔고 특히 과거 십 수년간은 괄목할 만한 변화가 있었다. 일본에서 가정용 및 소규모 업소용의 주력을 차지하는 분리형 히트펌프의 성능을 예로 들면 냉난방평균COP가 십 수년전의 약 2배에 달하는 6.0 이상의 값을 달성하였다. 동시에 공기조화 시스템의 주요 구성 부품인 열교환기 역시 많은 연구개발이 이루어져 왔고 그 결과로 괄목할 만한 성능 개선을 달성하였다.

그러나 한편으로 열교환기가 점점 고성능화 되어 가면서 기존의 열전달 촉진기술이 한계에 부닥치고 있는 것도 현실이다. 이러한 관점에서 본 고에서는 가정용 에어컨의 열교환기를 중심으로 고성능화의 기술과 기타 관련 기술의 연구 동향을 필자가 활동하고 있는 일본을 중심으로 살펴보고, 나아가 앞으로 공조용 열교환기에 있어서의 연구 과제 및 전망에 대해 기술하고자 한다.

공조용 열교환기의 특징

한국, 일본 등의 아시아 지역에서 일반 가정용/업소용의 공조시스템은 냉매가 직접 실내기까지 공급되어 실내공기와 열교환을 일으키는 직냉식이 주력 모델을 차지하고 있다. 이 때 열교환기는 냉매와 공기 사이에서 열을 전달시키는 작용을 하게 되며, 냉매는 열교환기 내부에서 상변화 열전달과정을 수반하게 된다. 현재 일본에서는 소형 가정용 에어컨에 대하여는 HFC계의 R410a를 냉매로 사용하고 있다. 상변화가 수반되는 냉매측 열전달에 비하여 공기측의 열전달 계수는 낮은 비열로 인해 냉매측 열전달 계수의 약 1/100 정도의 낮은 값을 보이므로 공기측의 열전달을 증가시키기 위해 공기측에는 핀을 달아 열전달 면적을 올리게 된다. **그림 1**은 공조용 열교환기로서 일반적으로 사용되는 핀관 열교환기(fin and tube heat exchanger)를 나타낸다. 알루미늄재



[그림 1] 공조용 핀관 열교환기

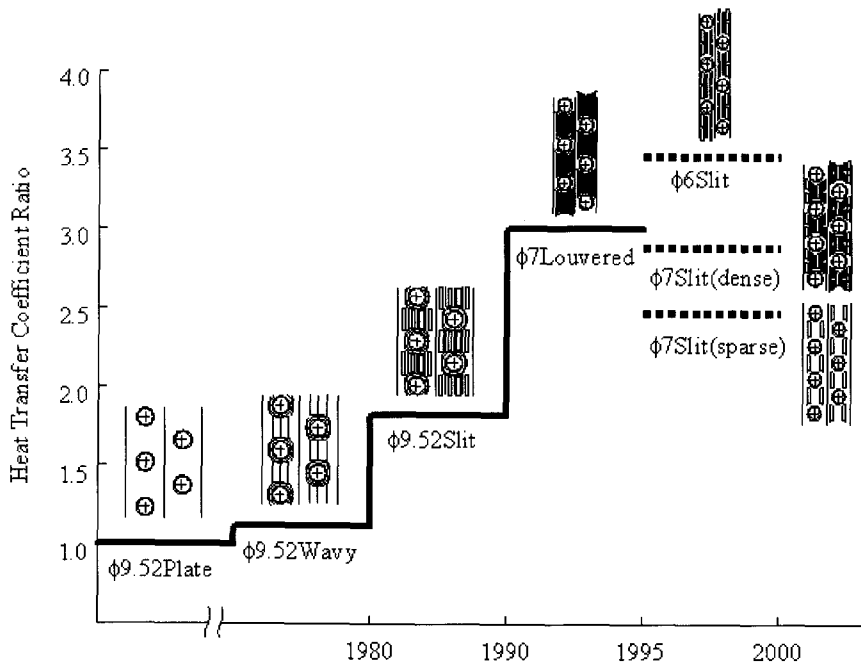
질의 핀과 구리 관으로 구성되어 있다. 생산과정에서 핀과 관의 접촉 열저항을 감소시키기 위해 관에 핀을 삽입한 후에 관내부에 관의 내경보다 약간 지름이 큰 확관봉을 강제 삽입함으로써 관에 소성변형을 일으켜 관을 핀에 밀착시키는 확관 과정을 거친다. 핀관 열교환기에서의 열저항은 (1) 관과 냉매간의 이상유동 열저항, (2) 관과 핀과의 접촉저항, (3) 핀에서의 전도에 의한 열저항, (4) 핀과 공기간의 열저항으로 분류할 수 있다. 핀관 열교환기의 고성능화는 이런 각각의 열저항을 최소화하는 것으로 달성할 수 있게 된다.

한편 일본에서의 공조 시스템은 여름에는 냉방, 겨울에는 난방으로 이용할 수 있는 열펌프 시스템(heat pump system)이 전체 공조기의 95% 이상을 차지한다. 이러한 열펌프 시스템에 있어서 실내 및 실외 열교환기는 냉방과 난방시에 증발기와 응축기의 역할을 서로 바꾸게 되기 때문에 열펌프 시스템에 있어서 각각의 열교환기는 응축과 증발의 두 가지 성능을 동시에 고려하여 최적화 설계를 수행하여야만 한다.

공기측 성능의 연구동향

고효율화 연구동향

공조용 열교환기에서는 핀(fin)의 사용이 필수적이므로 공기측의 성능개선은 통상 핀 형상의 개선을 통하여 이루어진다. 현재 사용되고 있는 일반적인 공조용 열교환기의 핀은 약 0.1 mm 정도 두께의 알루미늄판에 프레스 성형을 통하여 루우버(louver) 또는 슬릿(slit)의 형상을 가공하며, 가공된 형상에 따라 열전달계수 및 압력손실이 영향을 받는다. **그림 2**는 현재까지의 핀의 가공형상 및 열전달계수의 상승률의 일반적 경향을 보여준다. 핀의 가공은 평판(plate)핀부터 파형(wavy), 루우버(louver)등으로 발전되어 왔으며 현재는 실내기 핀의 경우 압력손실 대비 열전달계수의 상승률이 높은 루우버 또는 슬릿 핀의 사용이 일반적이다. 또한 **그림 2**에서 알 수 있듯이 핀 형상의 천이와 더불어 관의 직경은 9.52 mm부터 6 mm까지 점점 작아지고 있는 것을 알 수 있다. 현재는 5 mm 정도의 관을 사용한 열교환기도 상용화 되고 있다. 이러한 세경관의 장점으로는 관



[그림 2] 실내기 열교환기의 핀형상[1]

의 저항에 의한 공기의 유동저항을 줄일 수 있으므로, 일정한 소음조건 하에서의 공기의 풍량을 늘리는 것이 가능하고 따라서 높은 열전달계수 및 온도효율을 얻을 수 있게 된다. 하지만 한편으로 관경을 줄이게 되면 관내부의 냉매의 전열면적이 줄어들고 핀과 관의 접촉면적도 줄어들게 되어 열전달 성능상 부(-)의 효과도 존재한다. 따라서 세경관을 사용할 때는 관피치(관과 관사이의 간격)를 줄임으로써 단위체적당의 관내측 열전달 면적을 올리고 동시에 핀에서의 핀효율을 올려 성능을 개선하는 방법을 채택하고 있다. 한편 핀피치는 최근 점점 작아지는 경향으로 가고 있지만 너무 작은 핀피치의 사용은 열교환기의 핀 표면의 응축수 흐름성의 감소, 먼지 부착에 의한 공기 유로 차단, 실외기에서의 서리 부착으로 인한 잦은 제상운전 등 성능상 제한을 주기 때문에, 현재 일반적으로 실내기의 경우는 1.0 mm 부터 1.6 mm정도, 실외기는 1.3 mm부터 2.0 mm의 핀피치를 채용하고 있다.

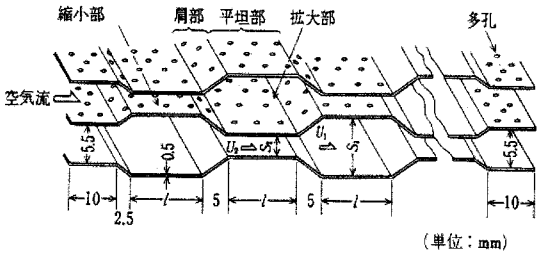
최근에 가장 일반적으로 사용되는 슬릿핀 및 루우버핀은 단속적으로 선단부(leading edge)를 구성하여 공기의 열경계층(thermal boundary layer)을 파괴함으로써 열전달촉진을 이루는 형식의 핀이다. 슬릿 및 루우버의 형상과 배치에 따라 핀에서의 열전달계수 및 압력손실 값의 차이를 보이며 각 기업들별로 자사의 독자적인 형상을 특허로써 보호하고 있어 외견상 다양한 형태가 존재한다. 슬릿이나 루우버 이외의 독특한 핀의 형상을 살펴보면, Fujii[2]는 **그림 3**과 같이 핀의 호흡효과를 이용한 형상을 제안하였다. 이는 벽면에서의 blowing또는 suction이 있을 경우 열전달이 촉진되는 원리를 이용한 것으로서 핀에 가공된 다수의 구멍을 통하여 공기가 출입을 함으로써 핀 표면의 발달된 공기의 경계층을 파괴하게 되고 이로 인하여 평판핀에 비하여 약 2배의 열전달 성능의 촉진을 얻을 수 있다고 발표되었다.

한편 Nishino[3]와 Mochizuki[4]의 연구그룹에 의하여 기존의 슬릿이나 루우버를 이용한 열전달 촉진과는 달리 핀에 윙(wing) 또는 윙글렛(winglet)과 같은 와류발생기(vortex generator)를 설치하여 이차유동(secondary flow)을 유도함으로써 열전달을 촉진하는 방법이 제안되었다. 이러한 와류발생기는 과거부터 난류에는 효과가 있는 것으로 널리 알려져 있었으나 최근의 연구로 층류에서도 난류보다 효과는 적지만 어느 정도의 효과를 보이는 것으로 밝혀졌다. Mochizuki[4]는 **그림 4**와 같이 관의 전면에 델타윙(delta wing)을 관의 측면을 따라 윙글렛쌍(winglet pair)을 설치한 핀에 대하여 single blow방법을 이용한 측정방법을 이용하여 열전달계수 및 압력강하의 특성을 살펴보고 동일한 펌프동력조건 하에 있어서 40%의 상승이 있다고 보고하였다. **그림 4**의 와류발생기를 설치한 열교환기는 실제로 자동판매기용의 열교환기에 적용되었다고 발표되었다.

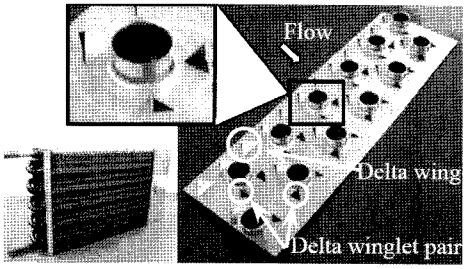
공기측 열전달의 상관식

공조기에 있어서 공기측의 열저항은 약 70% 정도를 차지하며 따라서 열교환기의 성능 해석을 위해서는 공기측의 열전달계수의 예측이 매우 중요하다. 평판핀에 대하여 일찍이 Seshimo[5]는 비교적 낮은 레이놀즈수에서 적용 가능한 열전달계수 및 압력손실에 대한 다음과 같은 상관식을 제안하였다.

$$Nu = 2.1 \cdot (\mathrm{Re} \cdot \mathrm{Pr} \cdot De_c / L_2)^{0.38} \qquad (1)$$



[그림 3] 다공사다리꼴형상 핀[2]



[그림 4] 와류발생기를 설치한 열교환기 핀[4]

$$f \cdot L_2 / De_c = 0.43 + 35.1 \cdot (\mathrm{Re} \cdot De_c / L_2)^{-1.07} \qquad (2)$$

여기서 De_c는 자유유동체적 및 열전달 면적을 이용하여 구한 특성길이이며 L_2는 열교환기의 유동방향깊이를 나타낸다.

최근 Kondou[6]는 평판핀에 대한 수치계산을 수행하여, 열전달계수에 대해서는 Seshimo가 제안한 상관식이 비교적 잘 일치하지만, 압력손실의 값에 대해서는 Dec/L2의 무차원값만으로는 정리에 무리가 있다고 주장하고 관피치와 관련한 두개의 무차원수를 추가 도입하여 압력손실의 상관식을 수정보완 하였다. Wang[7]등은 평판핀에 관한 기존 연구자들의 많은 연구결과를 데이터베이스로 이용하여 형태는 비교적 복잡하지만 넓은 범위에서 신뢰 가능한 상관식을 제안하였다.

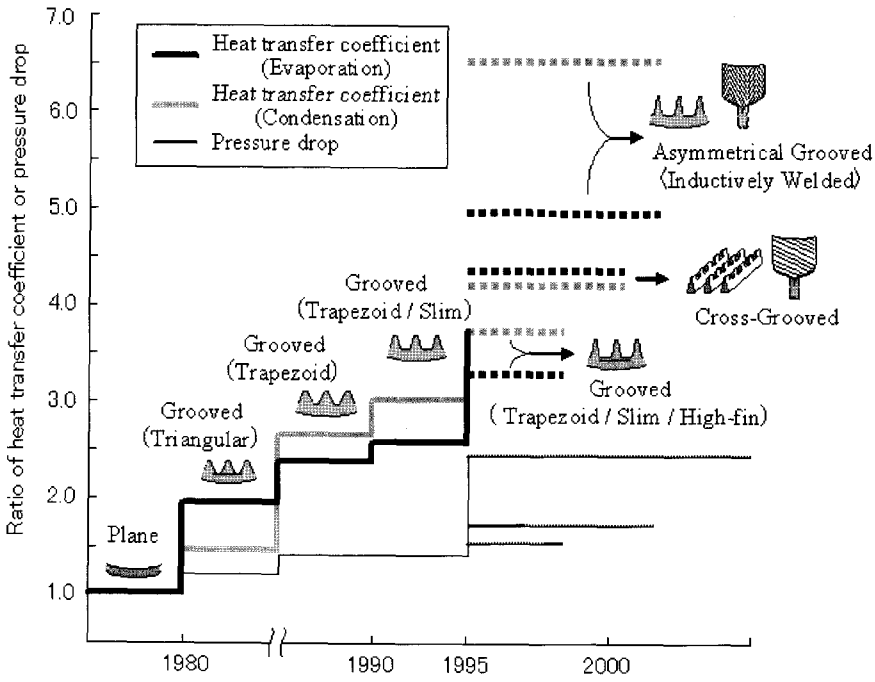
루우버핀에 대하여 Wang[8]은 열전달계수 및 압력손실을 정리한 상관식을 발표하였다. 이 상관식은 루우버의 각도, 폭 등의 개별형상에 관련된 형상변수를 포함하고 있어 그 적용범위가 비교적 넓다고 할 수 있다.

냉매측 성능의 연구동향

고성능화

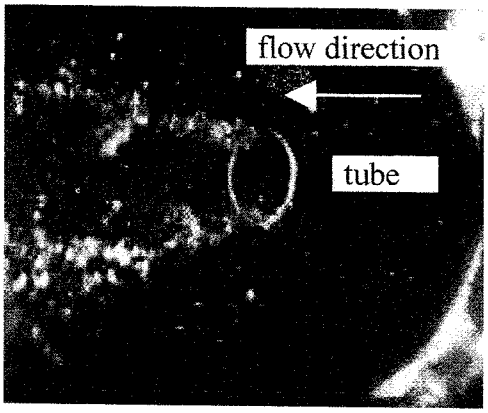
냉매측의 열전달계수는 증발 또는 응축을 수반하기 때문에 공기측의 열전달계수보다 높은 값을 보이지만, 더 높은 열전달 계수를 얻기 위해 여러 가지의 촉진기술이 이용되어 왔다. **그림 5**에 에어컨용 내면가공관에 있어서 관내면의 형상변화에 관한 추이를 개략적으로 나타내었다. 현재 가장 널리 사용되는 형상은 마이크로핀(micro fin)을 내면에 가공한 그루브관이다(grooved tube). 마이크로핀관은 구리를 인발(extrusion)가공을 함으로써 생산되며, 마이크로핀의 형상을 최적화 함에 따라 압력손실의 증가를 최대한 억제하면서 열전달계수의 증가를 꾀할 수 있다. 이 형태의 관에 대해서는 현재까지 다수의 연구자들에 의해 데이터(data)가 수집되어 왔으며 내면핀의 형상, 예를 들어 헬리컬 각도, 핀 높이, 핀 폭 등의 형상이 성능에 미치는 영향 등이 알려져 있다.

마이크로핀관의 사용이 일반화된 이후에 기존의

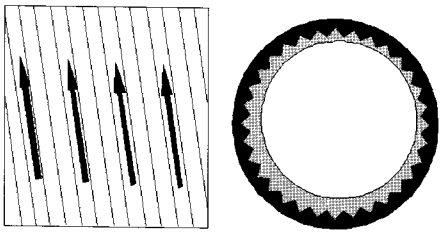


[그림 5] 관내 형상의 변화 추이[1]

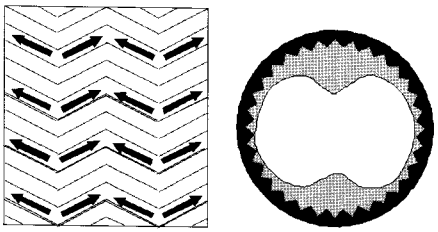
마이크로핀관과는 상이한 가공방법으로 제조되는 헤링본관(herringbone tube)이 등장하였다. 헤링본관은 평면상태의 구리시트의 한쪽 면을 톱니모양으로 가공된 로울러(roller)를 이용하여 압착함으로써 내면의 형상을 가공한 후 구리시트를 둥글게 말아 양단을 레이저(laser)로 용접하는 방법을 통하여 원형의 관을 제작한다. 헤링본관은 내면가공을 평면상에서 수행하기 때문에 관내면의 형상가공의 자유도가 높다. Ebisu[9]는 헤링본관에서 R410a냉매를 이용한 실험을 통하여 기존의 마이크로핀관보다 높은 열전달계수를 보여 열전달 촉진관으로서의 가능성이 있음을 보고하였다. Miyara[10]는 **그림 6**과 같이 헤링본관 출구에서의 액냉매의 가시화를 통하여 관의 원주방향으로 특정부분에 액냉매가 모여서 흐르고 있음을 보여주었다. **그림 7**과 **그림 8**은 마이크로핀관과 헤링본관 내면을 따라 흐르는 냉매의 거동을 모식적으로 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 헤링본관은 액냉매를 관의 특정부분으로 모아주는 역할을 하기 때문에 부분적으로 액막이 두꺼운 부분과 얇은 부분이 존재하게 된다. 응축과정에 있어서는 국소적인 얇은 액막 부분의 존재로 인하여 높은 열전달계수를 얻을 수 있게 되는 장점이 있지만, 증발과정에 있어서는 냉매의 드라이아웃을 촉진하는 원인을 제공하게 되고 특히 저유량영역에서 열전달계수가 저하된다. Fujino[11]는 이러한 문제를 해결하기 위해 **그림 9**와 같은 비대칭의 헤링본내면관을 제안하고 이러한 비대칭성이 액냉매를 반경방향으로 선회시키는 역할을 하여 저유량의 증발에 있어서 드라이아웃을 억제함으로써 열전달 개선 효과가 있음을 보고하였다.



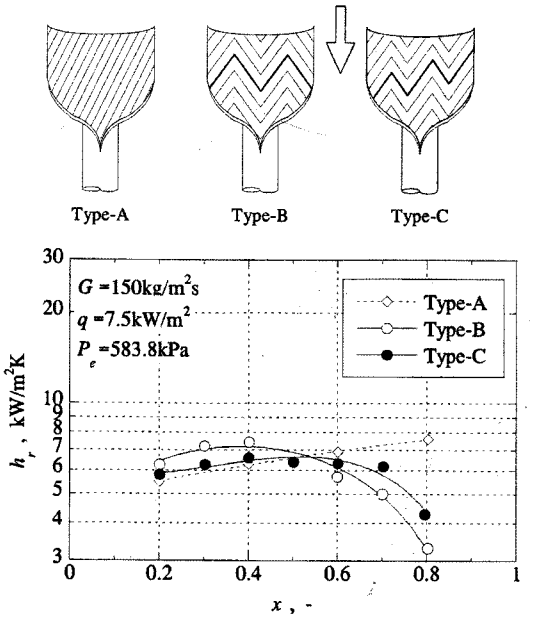
[그림 6] 헤링본관의 액냉매 거동[9]



[그림 7] 마이크로핀관내의 액냉매의 거동



[그림 8] 헤링본관의 액냉매 거동



[그림 9] 비대칭 헤링본관과 증발 열전달계수[11]

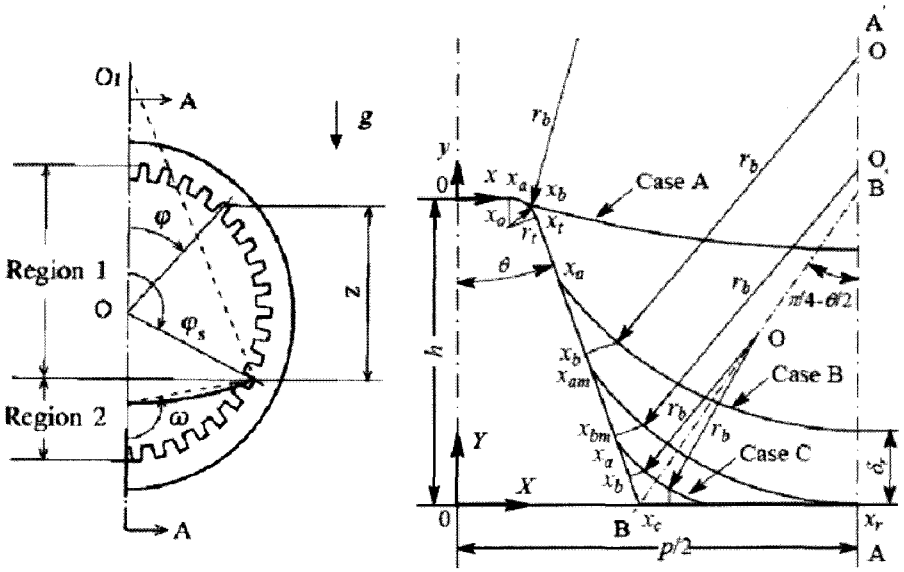
냉매측 열전달의 상관식

현재 가장 널리 사용되며 신뢰성이 있는 평활관 내에서의 응축 열전달계수의 상관식으로는 Haraguchi의 식[12]을 들 수 있다. HCFC22, HFC134a, HCFC123의 프레온계 냉매의 실험결과를 이용하였으며, 강제대류응축영역과 자연대류응축영역을 고려한 반실험식형태로 질량유속 100 kg/m^{2}s 정도의 저유량범위에서도 적용할 수 있다고 알려져 있다. 또한 이 식은 R410a냉매의 경우에도 충분히 적용이 가능하다. 한편 마이크로핀관의 경우에 대해서는 모든 형상에 적용가능한 범용(universal) 상관식은 아직 확립되지 않았으나 제한된 영역 안에서는 몇 가지 제안된 식들이 있다. Yu[13]는 마이크로핀관에 대한 응축실험결과의 분석을 통하여 마이크로핀관의 열전달촉진의 효과는 면적확대비가 가장 중요한 인자임을 밝혀내고 평활관에 대한 Haraguchi의 식을 수정하여 상관식을 제안하였다.

최근 색다른 접근방법으로 Wang과 Honda[14]는 관의 내부의 이상유동 및 액막의 직접적인 모델링을 수행하여 보다 이론적으로 열전달계수를 예측하는 수단을 제시하였다. 그들은 마이크로핀관의 그루브(groove)내부에서의 액막의 형상을 **그림 10**과 같이 모델링을 통하여 기액계면에 작용하는 표면장력, 전단응력(shear stress) 등의 힘을 고려한 미분방정식을 수립하고 이를 수치적으로 풀어 액막의 형상을 구하였다. 그리고 액막의 형상 및 액상의 속도분포를 가지고 열전달계수를 계산하였다. 또한 기존 실험치와 비교를 통하여 그들의 모델이 충분히 신뢰성을 가지고 있음을 보여 주었다. 이 방법은 기존의 실험식과는 달리 많은 내용이 이론적인 접근을 기초로 하고 있어 보다 광범위한 핀 형상에 적용이 가능할 것으로 보여 주목된다.

R407C 등을 포함한 비공비 혼합냉매의 경우 열전달계수에 대하여 Koyama[15]는 열전달과 물질전달을 동시에 풀어 열전달계수를 예측하는 계산알고리즘을 제안하였다. 그들은 기상(vapor phase)에 있어서 물질전달방정식을 도입하고, 연립계산을 통해 열전달방정식과 물질전달방정식을 만족하는 기액계면에서의 온도를 구한다. 얻어진 기액계면의 온도와 벽면온도를 기준으로 액막을 통한 열전달량을 구하게 되면 기존의 순수냉매에 대한 열전달상관식을 이용하여 계산할 수 있음을 보여 주었다.

마이크로핀관의 관내측 증발열전달에 관해서는 몇몇 실험식이 제안되었다. Kido[16]와 Mori[17]의 식이 비



[그림 10] 마이크로핀관 내의 액막형상의 모델링[14]

교적 범용성이 높은 것으로 알려져 있으며, 마이크로핀의 핀의 높이와 피치, 면적확대비 등의 기하학적인 형상의 영향을 고려한 증발열전달계수의 실험식이 제시되었다. 또한 Mori[17]는 액막이 차지하는 부분의 면적을 젖음경계각을 이용하여 정의함으로써 분리류(straitfied flow)와 환상류(annular flow) 두 유동양식 모두에서 적용 가능하도록 하여, 식의 사용 범위를 저유량범위까지 넓힌 것이 특징이다.

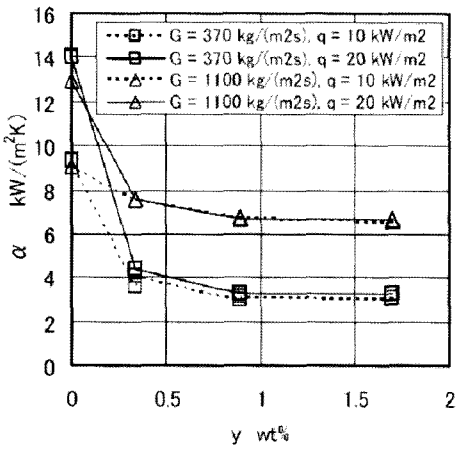
열교환기 설계 및 성능예측의 관점에서 보면 이상유동(two phase flow)부분의 증발열전달계수 못지않게 중요한 부분이 드라이아웃(dry-out)점의 예측 및 드라이아웃점 이후의 열전달이다. 드라이아웃점 이후의 열전달은 증발 열전달계수에 비해 현저히 낮은 열전달을 보이기 때문에, 열교환기에서 열량에 비해 많은 열전달 면적을 차지하게 된다. 이러한 측면에서 포스트드라이아웃 열전달을 정확히 계산하는 일은 열교환기의 필요 사이즈를 결정하는데 매우 중요하다. Yoshida[18]는 평활관, 마이크로핀관을 가지고 드라이아웃에 대한 계통적인 실험을 수행하고 드라이아웃 시작점 및 완료점의 특성을 3개의 영역으로 구분한 후, 각 영역에 대한 정리식을 제안하였다. Mori[19]는 드라이아웃점 이후의 열전달에 대한 실험을 수행하여 그 결과가 단상유동 열전달과 일치하지 않음을 보였다. 이는 드라이아웃 완료점 이후의 영역에서는 과열상태의 증기류안에 포화온도의 미세액적이 존재하는 국소적인 비평형상태가 존재하기 때문이라고 설명하였다.

냉매의 종류에 따른 열전달

최근 공조기에 주로 사용되고 있는 R410a냉매는 GWP지수가 1400정도의 높은 값을 보이기 때문에 교토의정서에 입각한 CO_2규제가 필수적인 이때에 새로운 냉매로의 전환이 요구되고 있다. 몇 가지 대체냉매의 후보들 중 최근 가장 많은 연구가 일어나고 있는 분야가 이산화탄소(CO_2)의 냉매로의 적용이다. 일본에서는 이미 몇 년 전부터 CO_2를 이용한 가정용 급탕 열펌프시스템을 시판하고 있다. CO_2를 냉매로 사용할 경우, 사이클상 고압부가 임계압력(critical pressure)을 넘어가게 되는 천이임계사이클을 구성하게 된다. 즉 CO_2냉매의 사이클에서는 냉각은 임계압력이상에서 일어나게 되며 증발은 임계압력에 가까운 아임계 상태에서 일어나게 된다. 따라서 증발과 응축과정 모두 임계압력보다 현저히 낮은 압력에서 사이클이 구성되는 일반 프레온냉매의 열전달과는 다른 특성이 존재한다. Huai[20]등에 의하면 CO_2의 증발과정에서의 열전달계수는 기존의 프레온냉매를 기반으로 작성된 상관식의 예측값보다 상당히 높은 값을 보이고 또한 건도에 따른 변화가 프레온냉매보다 미미하다. 이는 CO_2의 증발과정에서 기존의 프레온냉매와는 달리 작은 기액 밀도차 때문에 비등에 의한 열전달이 활발하게 일어나게 되고 강제대류(convective evaporation)에 의한 영향도가 상대적으로 작아지게 되기 때문에 일어나는 것으로 설명된다.

Dang[21]의 실험결과에 의하면 초임계영역에서의 가스냉각에 대하여는 Gnielinski 등의 기존의 단상 열전달의 식으로 어느 정도 설명이 가능한 것으로 알려져 있다. 단 냉각과정 중에 유사임계온도(pseudo-critical temperature) 근방에서 물성치의 변화가 급격히 일어나므로 열교환기의 성능을 예측하고자 할 때 물성치의 변화를 국소적으로 따라가며 계산을 수행할 필요가 있다.

CO_2 냉매 사이클은 공조시스템으로서의 작동압력이 높으므로(설계압력10 MPa 이상) 압축공정에서 구동부에 가해지는 힘도 상대적으로 매우 크게 되고, 따라서 압축기에서 요구하는 오일의 점도



[그림 11] 증발 열전달계수에 대한 오일농도의 영향[24](x=0.2)

(viscosity)도 보통의 냉매보다 높다. 현재로서는 높은 점도를 얻을 수 있고 내구성측면에서 신뢰성이 높은 PAG오일이 사용된다. 하지만 PAG오일은 CO_2에 대하여 상용성(miscibility)이 작기 때문에 열교환기 내부에서 냉매와 오일이 분리되어 흐른다. Hihara[22]는 가시화실험을 통하여 냉매에 섞이지 못한 상당량의 오일이 관벽을 따라 천천히 흘러감을 보여주었고, 이러한 분리된 오일이 열저항으로 작용함을 알아 내었다. 따라서 PAG오일이 함유된 경우 CO_2 냉매의 열전달 계수는 **그림 11**에서 보여주듯이 소량의 오일농도만으로도 급격한 감소를 보이는 것으로 알려져 있다[22)-25)]. Koyama[25]는 마이크로핀관에 있어서 오일에 의한 열전달계수의 저하율이 마이크로핀의 형상에 따라 달라진다고 보고하였다. 따라서 관형상의 개선 등을 통하여 오일로 인한 열전달계수의 저하를 억제시킬 수 있을 것으로 보이며 앞으로 더 많은 연구결과가 기대된다.

열교환기의 성능 해석

핀관 열교환기에 있어 패스(path)설계는 실용적인 측면에서 매우 중요하다. 열교환기의 패스 수를 너무 적게 하면 관내 냉매의 압력손실이 커져 온도저하에 의한 성능저하를 야기하고 패스 수를 너무 과다하게 설정할 경우, 냉매유속의 저하로 인한 성능저하가 우려되며 또한 불균일 분배가 일어날 가능성이 커진다. 한편 최근에는 사이클COP를 극대화하기 위하여 응축기에서 최대한의 과냉각도를 얻고자 하고 있다. 따라서 열교환기내부에서 냉매의 액단상 유동(liquid single phase flow)부분의 전열면적이 증가하고 있고 이러한 액단상 영역에서는 냉매의 온도가 변화하므로 열교환기의 패스구성에 따라 열교환 성능의 차를 보이게 된다. 최근 들어 열교환기의 패스구성은 이러한 배경을 바탕으로 점점 부각되고 있으나 패스설계에 있어서의 실험을 통한 접근은 시간과 비용이 많이 요구됨으로 인해 보다 간단히 패스의 설계가 가능한 열교환기 성능해석 프로그램이 중요시 되고 있다.

일찍이 Domanski[26]는 열교환기의 패스를 따라서 성능해석을 할 수 있도록 한 관순법(tube by tube method)의 해석방법을 제안하였다. 이는 하나하나의 관을 대상으로 각 관에 대한 계산을 냉매의 흐름 순으로 입구부터 출구까지 순차적으로 진행하며 열전달식을 계산하여 전체의 반복수행을 통해 수렴시키는 방법이다. 많은 열교환기 해석 프로그램이 기본개념에서 보면 Domanski의 해석법을 이용하고 있다. 이와는 다른 독특한 해석방법으로 Kaga[27]는 열회로망법(thermal network method) 알고리즘을 제안하였다. 이는 열교환기의 열저항을 분해하여 전체의 열저항을 마치 전기저항을 계산하는 듯한 방법으로 회로도를 구성한 후 전체의 매트리스를 반복계산을 통해 해를 구하는 방법이다. 최근 미국의 Maryland대학에서는 Coil Designer라는 범용 열교환기 성능계산 프로그램을 개발하고 그 내용을 발표하였다[28]. 기본 알고리즘은 관순법(tube by tube)을 확대하여 입구 공기의 수평방향 불균일 분포를 계산할 수 있도록 각각의 관을 몇 개의 구역 (block)으로 분할하여 계산을 수행하도록 하였다. 또한 프로그램 내부에 유전 알고리즘(GA)을 이용한 최적화기법을 삽입하여 열교환기의 최적설계계산이 가능하도록 한 것이 특징이다.

이와 같은 열교환기 성능해석 프로그램은 각 기업체 또는 몇몇 대학 등에서 개발되고 있으나, 최근 열교환기의 배치가 복잡해지고, 과냉각 열교환기를 별도로 설치하는 등 한 대의 실내기 또는 실외기에 상이한 사양의 열교환기를 복수 사용하는 경우 등으로 인해 해석이 더욱 복잡해지고 있다. 다양한 열교환기의 고성능화 및 최적화의 요구에 대응할 수 있도록 앞으로의 성능해석 프로그램은 정량적인 신뢰성은 물론이고 사용상의 유연성(flexibility)이 요구될 것으로 보인다.

냉매의 분배

핀관열교환기가 가지고 있는 능력을 최대한 유효하게 이용하기 위해 열교환기 입구에서의 냉매 분배기 또는 열교환기에서의 분기관의 역할은 매우 중요하다. 특히 최근의 고성능화의 추구로 인해 열교환기에 사용되고 있는 관의 사이즈가 점차로 작아짐에 따라 냉매측의 압력손실을 저감하기 위한 목적으로 냉매의 패스 수를 늘려가고 있어 분배성능 및 분배기의 중요성은 점점 커져가고 있다. 분배에 관련된

연구로써 아직까지는 신뢰성 있는 수치해석적인 접근은 전무하며 거의 실험에 의존하고 있는 현실이다. 하지만 실험의 경우에도 분기의 수가 많아지면 필요한 정보를 얻기 위한 계측기(특히 유량계)의 수가 증가하여 실험장치의 구성에 어려움이 따른다. 따라서 실험의 간단화를 위해 여러 가지의 실험방법이 제안되고 있다. Vist[29]는 다수의 분기부를 가진 분배헤더를 대상으로, 각 분기부 출구의 냉매를 순차적으로 측정부로 보내서 측정하는 방법을 이용하여 각 분기(branch)별로 기상(vapor phase)과 액상(liquid phase)의 유량을 측정하였다.

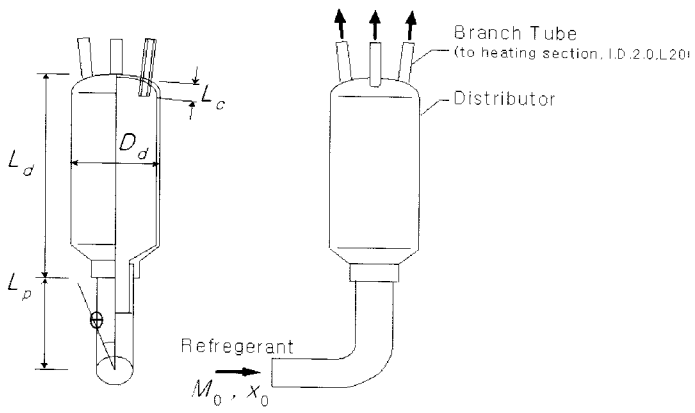
최근 Yoshioka[30]는 열교환기 입구에 설치된 분배기를 대상으로 하여 분배실험을 수행하였다. 실험장치는 분배기 직후의 복수의 분지(branch)별로 열선을 감은 관(히터부)을 설치하고, 히터부에서의 냉매의 압력손실 및 열선에 가해진 열량을 측정할 수 있도록 구성되었다. 측정된 열량과 압력손실을 가지고 사전에 작성된 맵을 이용하여 각각의 분기입구에서의 냉매의 유량과 건도에 대한 예측이 가능하다. 그들은 실험계획법(design of experiment)에 입각한 실험을 수행하여 냉매의 유입조건(유량,건도) 및 설치각도가 변화하더라도 균일한 분배성능을 얻을 수 있는 최적의 분배기 형상을(**그림 12**) 제안하였다. 이러한 분배성능에 대한 연구는 열교환기의 성능에 직접적인 영향을 주는 중요한 부분이지만 아직 정확한 분배원리(mechanism) 등이 거의 밝혀져 있지 않아 앞으로 더욱 많은 연구가 기대되고 있는 분야이다.

신형상 열교환기

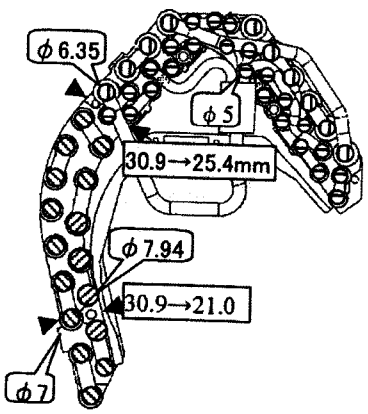
공조기에서 널리 사용되는 핀관열교환기에서 다양한 고성능화가 이루어지고 있지만 그 발전이 한계에 다다르고 있는 것도 사실이다. 따라서 핀관열교환기에서는 이루기 힘든 획기적 성능개선의 가능성을 찾아 많은 신형상 열교환기의 연구가 탐색 되고 있다.

신형상의 핀관열교환기로서Yokoyama[31]가 최근 발표한 이경관(variable diameter tube)열교환기가 주목을 받고 있다(**그림 13**). 하나의 연결된 열교환기에 관경이 5, 6.35, 7, 8 mm의 네 종류의 직경의 관을 사용하여, 응축 또는 증발과정 중 변화하는 냉매의 유동상태에 최적화 되도록 각 관경의 관을 최적으로 배치 구성하였다. 냉매유속이 작은 증발기 입구의 저건도 영역에서는 관경이 작은 5 mm, 6.35 mm 관을 사용하여 열전달계수를 향상시키고 높은 압력손실을 유발하는 고건도 영역에서는 7 mm, 8 mm의 대형관을 사용하여 압력손실을 억제함으로써 열교환기의 성능개선을 이루었다.

또한 핀관열교환기를 대치할 수 있는 하나의 대안으로 제시되고 있는 것이 자동차용 에어컨에서 일반적으로 사용되고 있는 마이크로채널(micro channel) 열교환기이다. 마이크로채널 열교환기는 일반적으로 구성재질이 전부 알루미늄으로 이루어져 있어 흔히 알루미늄 열교환기라고도 불리운다. **그림 14**는 마이크로채널 열교환기의 일반적인 형태를 보여준다. 관은 내부에 격벽으로 분리된 작은 유동채널을 가진



[그림 12] 최적화 분배기 형상[30]

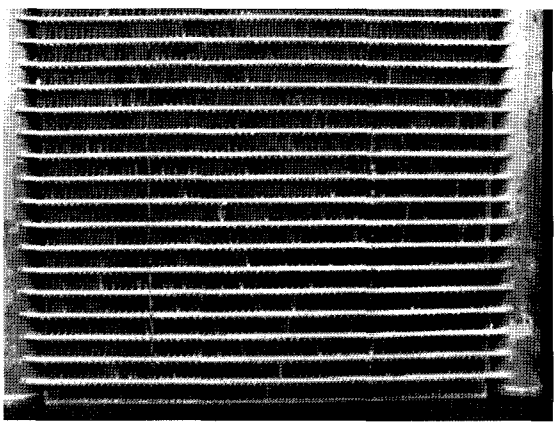


[그림 13] 이경관 열교환기[31]

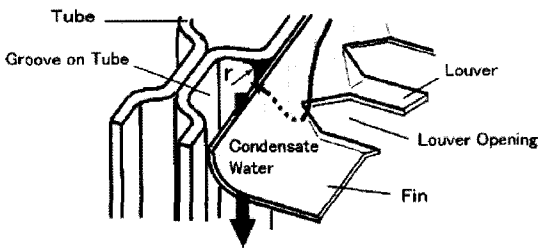
납작다공관이 사용되며 핀은 코르게트핀(corrogate fin)이 사용된다. 이 형태의 열교환기는 1) 관이 공기의 유동에 방해가 되지 않아 상대적으로 낮은 통풍저항을 보여주며, 2) 핀과 관의 거리가 일정하여 핀효율이 높고, 3) 관과 핀이 브레이징에 의해 금속결합으로 접합됨으로써 접촉저항이 거의 없다는 장점이 있다. 그러나 단점으로서는 1) 헤더내부에서 냉매의 불균일 분배가 일어나기 쉬우며, 2) 증발기로서 사용될 경우 응축수의 배출이 용이하지 않고, 3) 착상에 의한 공기통로의 폐쇄가 빠르며, 4) 장기간에 걸친 부식에 대한 신뢰성의 데이터가 아직 확립되어 있지 않은 점들이 있다.

헤더내부의 냉매의 분배성능에 대해서 Koyama[32]는 수평으로 설치된 헤더에 있어서 관의 삽입부분의 길이, 유량, 입구 건도를 파라메터로 하여 액상유량 및 기상유량을 측정하였으며, 실제로 헤더내부의 유동을 가시화하여 유량패턴을 관찰하였다. Koyama는 헤더내부의 관의 삽입길이가 분배성능의 중요인자라고 보고하였다. Watanabe[33]는 T자형 분기관에서의 기본특성을 파악하기 위한 일련의 실험을 수행하여 분배현상에 대한 일반모델의 수립을 목표로 연구를 진행하고 있다. 그러나 아직까지는 실제적인 문제에 있어서 분배현상을 지배하는 요인이 유동요인, 냉매의 종류, 기하학적형상 등 다수이며, 서로 상호복합적으로 작용하기 때문에 일반적으로 적용가능한 모델의 수립은 아직 정립되어 있지 않다.

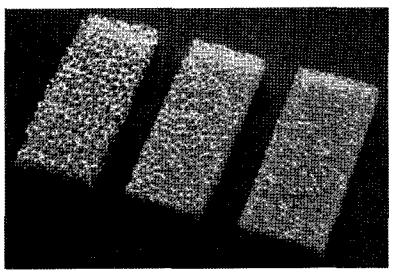
또한 일본에서는 히트펌프(heat pump)시스템이 일반적이므로 공조용 열교환기에 증발기/응축기 양쪽의 역할을 요구한다. 따라서 증발기로 운전시 발생하는 응축수의 배출문제는 반드시 해결해야만 할 필수과제이다. 관을 수평으로 배열할 시 마이크로채널 열교환기는 납작관이 응축수의 흐름을 막게 되므로 자동차용 에어컨의 증발기에서는 관을 수직으로 배치하는 구조를 이용한다. 또한 동시에 관에는 응축수의 흐름을 위한 통로(groove)를 **그림 15**와 같이 구성하는 것이 일반적이다[34]. 이를 통하여 응축수가 열교환기에서 공기 중으로 날리는 현상(carryover)은 상당히 억제되며 또한 표면처리재의 개선을 통하여도 응축수의 흐름성은 많이 개선된다. 한편 핀표면에 응축수가 맺히게 되면 핀의 루우버(louver) 사이가 응축수에 의하여 막힘으로써 열전달이 저하되는 것으로 알려져 있다. Mclaughlin[35]은 루우버의 꺽임각 및 루우버의 길이를 최적화함으로써 물 흐름성을 개선하고 열전달계수의 저하를 억제할 수 있다고 발표하였다. 최근에는 공조기업체들도 차세대 열교환기의 하나의 대안으로서 마이크로채널 열교환기에 대한 연구를 진행하고 있으므로 앞으로의 기술발전에 기대를 해본다.



[그림 14] 마이크로채널 열교환기



[그림 15] 자동차용 에어컨의 증발기에서의 물빠짐구조[34]



[그림 16] 알루미늄 발포금속[36]

최근 Kim[36) 37)]은 발포금속의 열교환기로의 적용가능성에 대한 실험결과를 발표하였다. **그림 16**의 발포금속은 단위체적당 표면적이 넓고 내부구조가 복잡하여 유도의 난류화 및 열전달촉진이 가능할 것으로 예상되었다. Kim은 실험을 통하여 일정한 밀도 이상의 발포금속에 있어서는 기존의 루우버핀보다 열전달이 촉진되며 이는 습표면에서도 동일하게 기능한다고 발표하였다. 하지만 공기측의 압력손실이 상당히 높은 약점을 가지고 있어 압력손실을 줄일 수 있는 새로운 제조방법의 개발이 필요하다고 사료된다.

일본의 차세대 열교환기기술 조사 프로젝트 소개

최근 사단법인 일본냉동공조학회에서 주관하는 기술기획위원회 산하의 기술분과회 중 하나인 열교환기 기술분과회가 흥미 있는 조사 프로젝트 결과를 발표하였다. 냉동공조기술분야에서의 열교환기 관련 기술의 니즈/시즈 (needs/seeds)를 조사하고, 이를 바탕으로 중장기의 예상 기술 로드맵을 작성하여, 그 내용을 정리/발표하였기에[38)] 본 지면을 통해 간단히 그 내용을 소개하기로 한다. 본 분과회에서는 각 산업체 관련분야에 종사하고 있는 핵심멤버들에 대한 앙케이트 조사를 통해 기술 시즈를 수집 조사한 후, 조사된 각 시즈에 대한 중요도 및 시급도를 다시 앙케이트 조사를 통해 점수화하였다. 조사결과 중요연구과제로서 의견이 모아진 내용은 다음과 같다.

- 1년 이내의 기술요소

1) 오일혼합시의 CO_2의 열전달특성
2) 초임계CO_2의 열전달특성의 실험해석과 정리식의 확립

- 3년 이내의 기술요소

1) 나노스케일에서의 열전달특성
2) 자연냉매의 관내외 열전달
3) 단일성분냉매 (주로 자연냉매)
4) 냉매분배의 실험해석 및 정식화
5) 학술적 관점에서의 냉매 선정
6) 신불소계의 온난화대응 대체냉매
7) 핀관열교환기의 고성능화
8) CO_2용 미세관의 한계 및 groove형상
9) 비원관(non-circular tube)의 열전달

CO_2관련 기술 및 대체냉매 관련기술이 다수 보이고 있는 것이 특징이며, 그 외 냉매분배 등의 실용적 기술의 선정도 눈을 끈다.

맺음말

공조용 열교환기에 관련한 기술동향을 일본을 중심으로 하여 살펴 보았다. 에어컨 고효율화를 위한 핵심 요소인 열교환기 고효율화의 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않다. 그 동안 에어컨용 열교환기는 꾸준한 발전이 있었고 현재에도 고효율, 저코스트, 친환경 등의 관점을 중심으로 대학과 기업에서 많은 연구가 진행되고 있다. 앞으로 지금까지 알려진 기존 기술의 한계를 넘어서는 혁신적인 연구결과를 기대해 본다.

참고문헌

1. Kazushige Kasai, "Trend of heat exchanger for air-conditioning system", 냉동 75권, 878호, 2000.
2. Fujii M. and Seshimo Y., "Enhanced heat transfer method "Breathing Effect" at low Reynolds number and its applications", 일본냉동공조학회논문집, Vol. 19, No.4, pp.329-338, 2002.
3. Song K.D. and Nishino K., "Optimization of heat-transfer enhancement of compact fin-tube heat exchangers", 제42회 일본전열심포지움강연논문집, H213, 2005.
4. Iwasaki M., Saito H., Mochizuki S. and Murata A., "Development of a high-performance fin-and-tube heat exchanger with vortex generators for a vending machine, 제43회 일본전열심포지움강연논문집, E224, 2006.
5. Seshimo, "Compact heat exchanger", 일간공업신문, 1992.
6. Kondou C., Senshu T. and Oguni K.," Investigation of Dimensionless Function for

Plane Fins", 제43회 일본전열심포지움강연논문집, E212, 2006.
7. Wang C.C., Chi K.Y. and Chang C.J., "Heat transfer and friction characteristics of plain fin-and-tube heat exchangers, part II: Correlation", Int J Heat and Mass Transfer, Vol. 43, pp.2693-2700, 2000.
8. Wang C.C., Lee C.J., Chang C.T. and Lin S.P., "Heat transfer and friction correlation for compact louvered fin and tube heat exchangers", Int J Heat and Mass transfer, Vol. 42, pp. 1945-1956, 1999.
9. Ebisu T., Fujino H. and Torikoshi K, "Heat transfer characteristics and heat exchanger performance for R407C using herringbone heat transfer tube", Proc of 1998 Int Refrigetration Conf at Purdue, pp. 343-348, 1998.
10. Miyara A. et al. "W字內面溝付管의 응축열전달 과 유동양식", 제32회공기조화냉동연합강연회 강연논문집, pp. 77-79, 1998.
11. Fujino H, Yoshioka S., Kasai K. and Nakata H., "Evaporation and condensation heat transfer characteristics in asymmetrical herringbone tube", Proceedings of the Asian conference on refrigeration and air conditioning, Kobe, Japan, 2002.
12. Haraguchi H., Koyama S. and Fujii T., "Condensation of refrigerants HCFC22, HFC134a and HCFC123 in a horizontal smooth tube (2nd report, Proposals of empirical expressions for local heat transfer coefficient)", 일본기계학회논문집, 60권 574호, pp.2117-2124, 1994.
13. Yu J. and Koyama S., "Condensation of pure refrigerants in microfin tubes-A correlation for local heat transfer coefficient-", 큐슈대학 기능물질과학연구소보고, 10권, 2호, pp. 145-150, 1996.
14. Wang Y. and Honda H. "Stratified Flow Model of Evaporation Heat Transfer in Horizontal Microfin Tubes", 제40회 일본전열심포지움강연논문집, D331, 2003.
15. Koyama S. and Ishibasi, "A Prediction Method for Condensation of Binary Refrigerant Mixtures Inside a Horizontal Smooth Tube.", 제33회 일본전열학회심포지움, Vol. 3, pp. 747-748, 1996.
16. Kido O. and Uehara H., "Correlation for evaporation heat transfer of pure refrigerant inside an internally grooved horizontal tube", 일본냉동협회논문집, Vol. 11, No. 2, pp. 143-153, 1994.
17. Mori H, Yoshida S., Kakimoto Y. and Ohishi K., "Reform of the correlation for the prediction of heat transfer coefficient for refrigerants flowing in horizontal evaporator tubes", 일본냉동공조학회논문집, 16권2호, pp. 177-187, 1999.
18. Yoshida S., Mori H. Kakimoto Y. and Ohishi K., "Dryout Quality for refrigerants flowing in horizontal evaporator tubes", 일본냉동공조학회논문집, Vol.17 No.4, pp.511-520, 2000.
19. Mori H., Yoshida S., Kakimoto Y., Ohishi K. and Fukuda K., "Post-dryout heat transfer to a refrigerant flowing in horizontal evaporator tubes", 일본냉동공조학회논문집, Vol. 17, No. 4, pp. 521-528, 2000.
20. Huai X, Koyama S., Zhao T.S., Shinmura E., Hidehiko K., and Masaki M., "An experimental study of flow boiling characteristics of carbon dioxide in multiport mini channels", Applied thermal eng, Vol. 24, pp. 1443-1464, 2004.
21. Dang C. and Hihara E., "In-tube cooling heat transfer of supercritical carbon dioxide . Part 1. Experimental measurement" , Int J refrigeration, Vol 27, pp. 736-747, 2004.
22. Iino K. Fukuoka K. Dang C. and Hihara E., "Effect of lubricating oil on cooling heat transfer of supercritical carbon dioxide", 제43회 일본전열학회심포지움, C331, 2006.
23. Katsuta M, Kinpara H., Yagi, S. and Mukaiyama H., "The effect of oil contamination on

evaporator heat transfer characteristics of CO_2 refrigeration cycle", 일본냉동공조학회논문집, Vol. 21, No. 3, pp.275-283, 2004.

24. Gao L. and Honda T., "Effects of lubricant oil on boiling heat transfer of CO_2 inside a horizontal smooth tube", 제42회 일본전열학회심포지움, E212, 2005.
25. Koyama S., Ito D., Lee S.M., Kuwahara K. and Saeki C., "Experimental on flow boiling of CO_2 inside smooth and micro-fin tubes", 제42회 일본전열학회심포지움, C241, pp. 727-728, 2005.
26. Domanski P.A., "EVSIM - an evaporator simulation model accounting for refrigerant and one dimensional air distribution", NIST report. NISTIR 89-4133, 1989.
27. Kaga K., Kotou S., Okusi T. and Yamada G., "Prediction of Capacity of a Heat Exchanger by Thermal Network Method.", 일본기계학회논문집B, Vol.66, No.647, pp.1826-1832, 2000.
28. Jiang H, Aute V. and Radermacher R, "CoilDesigner; A general purpose simulation and design tool for air to refrigerant heat exchangers", Int J of Refrigeration , Vol. 29, Issue 4, pp. 601-610, 2006.
29. Vist S. and Pettersen J., "Two-phase flow distribution in compact heat exchanger manifolds", Exp Ther and Fluid Sci, Vol 28, pp.209-215, 2004.
30. Yoshioka S, Kim H.Y. and Kasai K., "Performance evaluation and optimization of a refrigerant distributor for air conditioner", Proceedings of 2007 ASME-JSME Thermal Engineering Summer Heat Transfer Conference, HT2007-32664, Vancouver, Canada, July 2007.
31. Yokoyama S., "Technology of the indoor compact heat exchanger", 일본냉동공조학회연차대회강연논문집, B214, 2006.
32. Koyama S., Kuwahara K., Wijayanta A.T. and Ikuta S., "Developing Adiabatic Two-Phase Flow Distribution in Minichannel-Branch Headers", Proc of the 3rd Asian Conf on Refrig and Air-Conditioning, Vol. 1, pp. 125-128, 2006.
33. Nomura D., Watanabe M., Itakura D. and Katsuta M., "Two-Phase Flow Distribution in T-junction with Vertical Upward Main Pipe - Comparison of Air-Water and R410A -", 일본냉동공조학회 연차대회, A202, 2007.
34. Kamiya S, Torigoe E., Mori M. and Ohara T., " Development of high performance evaporator", Denso Technical review, Vol. 3, N o. 2, 1998.
35. Mclaughlin W.J. and Webb R.L., "Condensate drainage and retention in louver fin automotive evaporators", SAE Tech Pap Ser, SAE-2000-01-0575, 2000.
36. Kim H.Y., Fujino H., Shibatqa Y., Yoshioka S. and Nakata H., "Experimental investigation on heat transfer for open-cell foam metal",41회 일본전열학회심포지움, Vol. 3, pp. 737-738, Japan, 2004.
37. Kim H.Y., Fujino H., Shibatqa Y., Yoshioka S. and Nakata H., "Experimental Investigation on pressure drop and heat transfer performance of aluminum foam metal on dry and wet conditions", Proceedings of the sixth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Jeju-do, Korea, EH04, March 2005.
38. Koyama S., Mori H. and Sawada N., "Technical Survey on Heat Exchanger Technology for Refrigerating and Air-conditioning-Summary Report of Subcommittee of Heat Exchanger Technology-", 냉동, Vol.82, No.952, pp.154-160, 2007.