

핀-관 열교환기에 사용되는 핀의 종류와 연구동향

Fin Types and Its Research Trends in Fin and Tube Heat Exchanger

윤 집 열
J. Y. Yun
LG전자(주) 생활시스템 연구소



- 1960년생
- 핀관 열교환기의 성능해석 및 실험, 공기측 열전달성능 향상, 최적 설계 등에 관심을 가지고 있다.

이 옥 용
W. Y. Lee
LG전자(주) 생활시스템 연구소



- 1969년생
- 핀관 열교환기에서 공기측 해석 및 실험, 핀의 형상 변화에 따른 전열성능 향상에 관심을 가지고 있다.

이 관 수
K. S. Lee
한양대 기계공학과



- 1952년생
- 착상·제상, 열교환기 성능해석, 전자장비 냉각 등에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

열교환기는 수년동안 냉동 및 공기조화, 화학 공정 등 여러 분야에서 기체와 액체(단상 혹은 2상) 사이의 열전달 장치로 사용되어 왔으며, 작동 유체의 유동형태, 사용재질 및 열교환기의 구조 등에 따라 여러 가지 형태로 구분할 수 있다. 이 중에서 핀-관 열교환기는 고밀도화 및 소형화를 요구하는 냉동 공조기기에서 가장 널리 사용되고 있다. 특히 에어컨과 같은 상업용 공조기에서 이들 열교환기가 전체 시스템의 성능에 영향을 미치는 비율이 상당히 크기 때문에 열교환

기의 최적 설계는 매우 중요한 과제이다. 일본과 미국 등의 선진국에서는 이미 이에 대한 연구를 상당히 오래 전부터 수행하여 온 관계로 수백건 이상의 기술적인 특허를 확보하고 있고 이를 제품개발에 적용하여 왔다. 또한 끊임없는 노력의 결과로 앞으로도 더욱 심화된 기술 및 특허의 확보가 예상되고 있다. 이에 비해 국내에서는 열교환기와 관련된 연구결과가 거의 없고 제품 개발 시에도 금형 자체를 도입하여 사용하고 있는 실정이다. 따라서 열교환기가 관련 산업에 미치는 중요성을 감안해 볼때, 점점 증대되고 있는 기술보호주의에 강력히 대처하고 자체적인 설계기술

을 확보하기 위해서는 이에 대한 연구가 매우 시급한 실정이다.

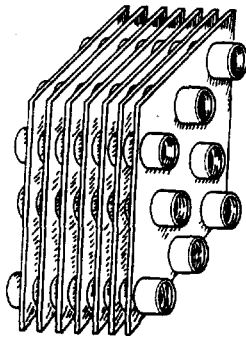
핀-관 열교환기는 관과 핀으로 구성되는 데, 특히 공기와 1차로 접촉하는 핀에서의 열저항은 전체 열저항 중 70% 이상을 차지할 만큼 크기 때문에 이러한 부분의 개선 없이는 전체 열교환기의 성능 향상을 기대할 수 없다. 특히 핀에 의한 공기측 열저항을 감소시키기 위한 방법은 크게 두가지로 나눌수 있는데, 전열면적을 크게 하는 방법과 열전달계수를 증가시키는 방법이 있다. 전열면적을 증가시키는 방법은 상대적으로 압력손실의 증가를 수반하며, 이에 의한 영향으로 팬의 부하가 증가되어 시스템 소음의 원인이 된다. 따라서 열교환기 설계시에는 전열성능의 향상 뿐만 아니라 압력손실의 감소 또한 만족시켜야 하기 때문에 반드시 최적화가 이루어져야 한다. 열전달계수를 증가시키는 방법은 핀 측에 밀도가 큰 유체를 유동시키는 방법과 핀의 형상에 변화를 줌으로써 핀표면에서의 공기의 교란을 야기하는 난류 촉진 방법이 있다. 그러나 공조기에 사용되는 핀-관 열교환기는 이미 공기냉각방식으로 열전달 유체가 결정되어 있기 때문에 밀

도가 큰 유체를 유동시키는 경우는 특별한 경우를 제외하고는 사용하지 않는다.

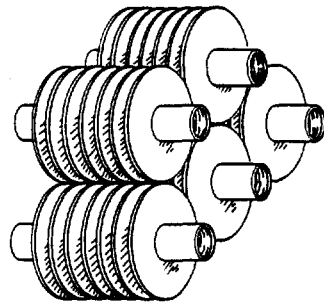
따라서 대다수의 열교환기 연구가 고성능 핀의 개발에 집중되고 있으며, 이로인해 끊임없이 새로운 형상의 핀이 제시되고 있다. 특히 새로운 핀형상을 적용한 열교환기들은 기존의 모델보다 현저한 능력향상을 보임에 따라 시장에서의 성공으로 이어지고 있는 실정이다. 최근 국내에서도 공조업체를 중심으로 신형상의 핀개발을 시도하고 있으며 일부에서는 성공적인 결과를 얻고 있어서 현재 단계에서 여러 가지 핀형상에 대한 연구결과들을 검토해 보는 것은 매우 의미가 있을 것이다. 따라서 이 글에서는 냉동 공조기에 사용되고 있는 여러가지 핀형상에 대한 기존의 연구결과들을 고찰해 보고 열교환기 설계자들이 어떤 핀형상을 선정하는 것이 가장 적절한가를 결정하는 지침을 주고자 한다.

2. 핀-관 열교환기의 개요

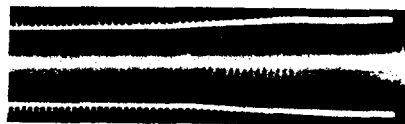
핀-관 열교환기는 그림 1(a), (b)에 나타난 바와 같이, 원형관 외측에 부착된 것으로 부착된



(a) 연속핀 (cotinuous fin and tube)



(b) 개별핀 (individually finned tube)



(c) 마이크로 핀

그림 1 핀-관 열교환기에 사용되는 핀의 기본 구조 예

위치 및 방법에 따라 연속핀과 개별핀으로 나누어진다. 이들 핀은 작동유체가 가스일 때 사용하며, 일반적으로 가스측의 열전달계수가 낮아 접촉표면을 넓혀줄 필요가 있기 때문에 다른 작동유체에 비해 핀 높이가 높다. 관은 원형이기도 하지만, 자동차 라디에이터에서와 같이 타원형(oval)관이나 납작관을 사용하기도 한다. 관배열은 정열(inline)배열과 엇갈림(staggered)배열로 구분되며, 일반적인 사용 Reynolds수의 범위(5m/s 이하)에서 엇갈림 배열이 정열배열보다 성능이 훨씬 우수하기 때문에 가장 많이 사용되고 있다.⁽¹⁾ 그림 1(c)는 관내측에 부착되어 관내부를 흐르는 액상의 열교환에 주로 사용되는 마이크로 핀관을 나타낸 것이다. 액상의 열전달계수는 가스의 열전달계수보다 크기 때문에, 가스의 경우보다 핀의 효율에 대한 고려가 크게 필요하지는 않다. 따라서 가스측에서 사용한 핀보다 높이가 훨씬 낮은 핀을 사용하며, 이 때의 핀높이는 1.5에서 3.0mm이다.

일반적으로 공기와 액상간의 열교환에 가장 많이 사용되는 핀-관 열교환기는 공기측 열전달계수가 관내측 열전달계수보다 훨씬 작으므로, 공기측 hA 값을 증가시키는 것이 성능 향상에 있어서 매우 중요하다. 그림 1(a)에서와 같이 연속 평판형 형상의 경우는 열전달 표면적(A)을 증가시키므로써 hA를 증가시킬 수 있다.

또한 평판핀의 표면에 향상된 표면형상을 가공함으로써 평판핀보다 열전달계수를 더욱 증가시킬 수 있다. 따라서 여기서는 주로 공기측의 열전달 향상에 사용되는 고성능 핀 형상의 구조와 연구동향에 대하여 서술하기로 한다.

3. 핀의 종류 및 연구동향

3.1 원관과 평판핀

앞서 설명한 바와 같이 평판핀은 연속핀과 개별핀으로 나누어지며 핀표면에 가공이 불필요하기 때문에 가공비용이 저렴하며 고밀도화가 요구되지 않은 대형공조시스템에서 아직도 많이 사용되고 있다. 그러나 평판핀에서는 핀과 핀 사이(채널)에서의 공기유동속도가 유동이 진행됨에 따라 점점 발달한다. 이로 인해 열교환기 출구에서 유동소음이 발생하는 문제점 등이 야기되어 가정용 공조기 등에서는 향상된 핀형상으로 대체되어 가고 있는 실정이다.

평판핀을 이용한 연구는 핀자체에 대한 중요도가 상대적으로 낮기 때문에 주로 관배열과 병행하여 수행되어 왔다. 평판핀과 연계된 가장 보편화된 관배열은 엇갈림 배열이며 특히 이등변 삼각형 구조가 가장 우수한 성능을 보유하고 있는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 열전달 성능 면에서의 차

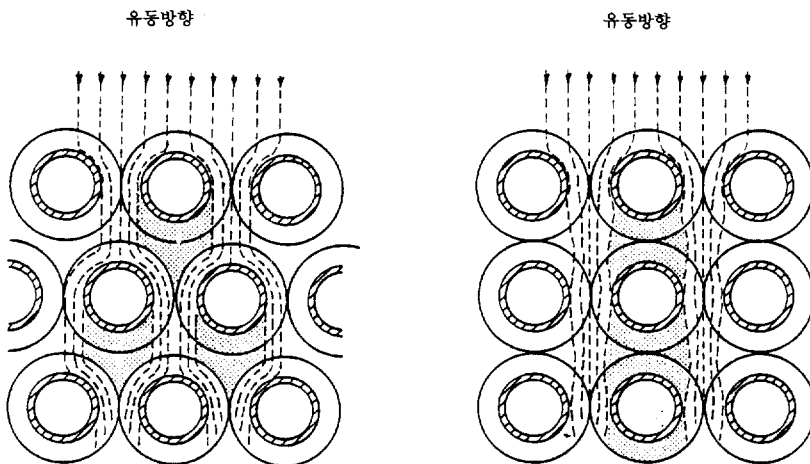


그림 2 엇갈림 배열과 정열배열의 유동패턴⁽²⁾

이는 엇갈림 배열과 정열배열 사이에 유동현상의 차이에 기인하며, 그림 2에 Brauer⁽²⁾가 제시한 정열 배열과 엇갈림 배열의 유동 형태를 나타내었다.

여기서, 점선은 유선(stream line)을 의미하며, 저속후류영역(그림에서 dead space로 표시)은 미세한 점으로 해칭된 부분이다. 그림에 나타난 바와 같이 정열 배열일 때가 엇갈림 배열에 비해 저속후류영역의 면적이 더 크며, 이는 정열 배열의 평균 열전달계수가 더 작다는 것을 의미한다.

그림 3에 Brauer⁽²⁾에 의해 수행된 두 배열에 대한 열전달 성능을 비교하였다. 핀의 높이가 낮은 경우($e/d=0.07$) 엇갈림 배열이 정열배열에 비해 열전달 성능이 약 30% 높은 값을 보이고 있으며, 핀의 높이가 높은 경우($e/d=0.53$)는 100% 이상의 높은 값을 나타낸다. 그는 이러한 이유를 정열배열의 경우 공기의 바이패스 효과가 엇갈림 배열에 비해 크기 때문이라 하였다. 엇갈림 배열을 갖는 평판핀에 주로 사용되는 관계식은 개별핀에 대해서는 Briggs 등⁽³⁾의 열전달 관

계식과 Robinson 등⁽⁴⁾의 압력강하 관계식이고, 연속핀에 대해서는 Gray and Webb⁽⁵⁾의 관계식이다. 이들 관계식은 4열 이상의 관을 갖는 열교환기에 대한 실험식이며 특히 연속핀에 대한 관계식은 4열 이하로 설계되고 있는 가정용 공조기에 대해서는 약간의 편차를 발생시킬 우려가 있다. 그 실험으로 확대모델실험과 수치해석을 통한 최근의 국내 연구 결과⁽⁶⁾⁽⁷⁾에 의하면 속도가 비교적 큰 영역에서는 그 결과가 매우 잘 일치하고 있지만 속도가 낮은 영역에서는 다소 큰 편차를 발생시키고 있다. 이는 Gray and Webb의 관계식이 4열을 기본으로 구성한 것으로써 2열 이하를 주로 사용하는 가정용 공조기에는 다소 적합하지 않은 것으로 사료된다. 특히 그들의 관계식이 속도가 비교적 큰 영역에서 측정하여 가공된 실험식이라면, 국내 연구 결과는 저속영역을 위주로 측정을 한 것이어서 실제 가정용 공조기의 운전범위인 풍속 1.5m/s 이하에서는 후자의 결과가 보다 타당하다고 볼 수 있다. 따라서, 평판핀에 대한 기본적인 열전달 관계식은 사용기기 및 속도영역에 따른 적절한 선정이 요구되고 있다.

3.2 원판과 고성능핀

파상핀과 단속핀으로 분류되는 슬릿(slit)핀(offset strip 핀의 일종)과 루버핀 등이 원판에 사용된 주요 고성능핀의 일종이다. 이들 핀은 실제 상업용 에어컨에 현재까지 가장 많이 사용되고 있으며, 구리 또는 알루미늄 판을 기계적으로 확장하여 제작한다. 이들 핀은 평판핀보다 적게는 50%에서 많게는 200%까지 열전달 성능이 향상되는 관계로 지금까지 활발한 연구가 이루어지고 있으며 앞으로도 계속될 전망이다.

(1) 파상핀(wavy fin)

그림 4는 원형관에 부착된 파상핀의 구조를 나타낸 것이며, 여기에 열전달 및 마찰특성에 영향을 미치는 주요 기하학적인 인자를 표시하였다. 파상핀은 핀표면에 굴곡을 주어 난류를 촉진시킨 경우로 실제품에는 아직 많이 사용되고 있으나 성능의 대폭적인 증가에는 한계성이 존재하기 때문에 연구가 거의 정체된 상태이다. 파상핀

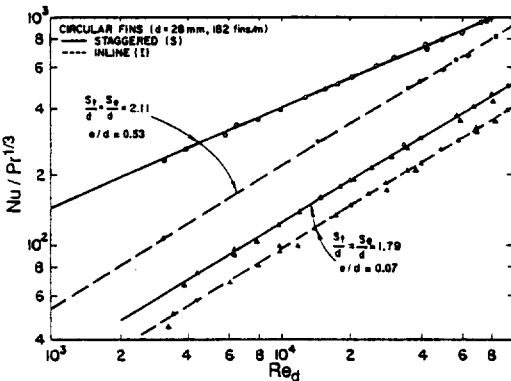


그림 3 엇갈림 배열과 정열배열의 성능비교⁽²⁾

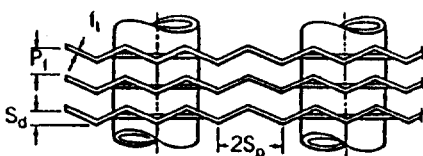


그림 4 파상핀

에 대한 핀표면 구조는 관과 더불어 매우 복잡한 유동을 형성하며 이로 인해 열전달계수는 일반적으로 평판핀보다 50~70% 이상의 높은 값을 가진다.

Beecher 등⁽⁸⁾은 20개의 3열 파상핀 열교환기에 대한 열전달 실험자료를 제시하였다. 실험에 사용된 모든 열교환기는 $S_1/S_1=1.5$ 인 3열 엇갈림 배열이며, 2개의 관외경, 즉 9.53mm와 12.7mm에 대해, 핀피치는 6.2fpi에서 13fpi까지 변화시켜 측정한 것이다. 그들은 열전달 평가에 $Gz = RePr(D_H/L)$ 로 표시되는 Graetz수를 도입하였으며, Nusselt수의 계산은 산술평균 온도차(AMTD)를 이용한 것이 특징이다.

Webb⁽⁹⁾은 Beecher 등의 실험자료를 이용하여 다음과 같은 새로운 관계식을 개발하였다. 이 관계식은 대수좌표에서 직선으로 나타나지 않기 때문에 두영역으로 구분하여 표시하였다.

$$Nu_a = 0.5 Gz \left(\frac{S_1}{d_o}\right)^{0.11} \left(\frac{s}{d_o}\right)^{-0.09} \left(\frac{S_d}{S_1}\right)^{0.12} \left(\frac{2S_p}{S_1}\right)^{0.34} \quad (1)$$

$Gz > 25$

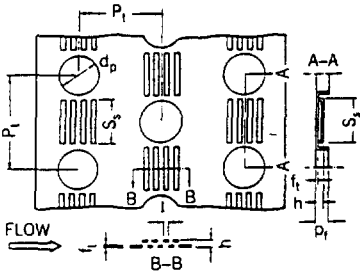


그림 5 슬리트 핀⁽²⁾

$$Nu_a = 0.83 Gz \left(\frac{S_1}{d_o}\right)^{0.13} \left(\frac{s}{d_o}\right)^{-0.16} \left(\frac{S_d}{S_1}\right)^{0.25} \left(\frac{2S_p}{S_1}\right)^{0.43} \quad (2)$$

$Gz < 25$

(2) 슬리트 핀

그림 5는 최근 원관을 채용한 공조용 열교환기에 가장 많이 사용되고 있는 슬리트 핀의 구조를 나타낸 것으로 납작(flat)핀에 주로 사용되는 offset strip핀(이하 OSF)과 동일한 열전달 메카니즘을 보유하고 있다. 이 형상에 대한 연구는 Nakayama 등⁽¹⁰⁾에 의해 발표된 것이 전부이며, 그들은 직경 9.5mm, 13.3fpi를 갖는 2열 엇갈림 배열의 열교환기에 대한 슬리트 핀과 평판핀의 열전달계수를 구하였고 그 결과를 그림 6에 제시하였다. 그림에서 보듯이 슬리트 핀은 3m/s의 공기속도에서 평판핀보다 78% 이상 높은 열전달계수 값을 가진다. 이는 슬리트에 의한 경계층선단효과와 관 후류에서의 유체혼합 효과에 기인한다. 또한 이 결과는 슬리트 폭이 2mm, 핀두께가 0.2mm이며, 슬리트 수가 4개일 때의 결과로써 최근에는 폭이 1.0mm, 두께 0.1mm, 슬리트 수가 6개인 다양한 형상의 슬리트 핀이 개발되고 있기 때문에 평판핀 보다 150% 이상의 더욱 향상된 성능을 보이고 있다.

그림 7에 최근에 발표된 다양한 슬리트 핀의 형상을 제시하였다. 이러한 형상은 선진 공조업체들의 기술 특허화되어 있어 국내 업체에서도 새로운 형상의 슬리트 핀의 개발을 서둘러야 할 것이다. 특히 슬리트 핀은 가정용 공조기에 있어서 다른 어떤 종류의 핀 보다 적합한 것으로 밝혀지고 있어 더욱 더 많은 노력이 요구되고 있는

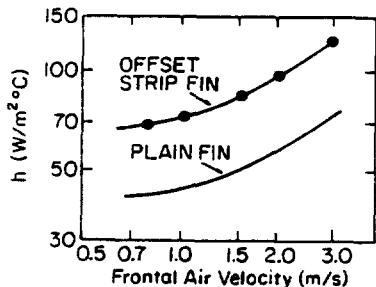
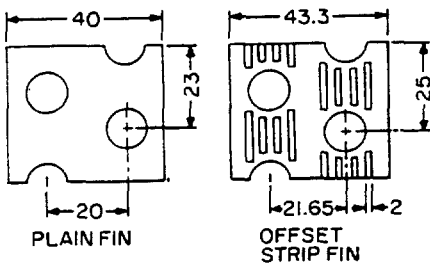


그림 6 슬리트 핀과 평판핀의 열전달계수 비교 결과⁽¹⁰⁾

실정이다.⁽¹¹⁾

(3) 갈매기형 루버핀(convex louver fin)

그림 8에 히다저에 의해 상업용 공조기에 갈매기형 루버핀을 적용한 9φ 열교환기를 카탈로그 자료를 인용하여 제시하였다. 갈매기형 루버핀에 대한 체계화된 연구는 1열 갈매기형 루버핀 열교환기에 대한 성능 자료를 발표한 Hata-da 등⁽¹²⁾에 의해 이루어졌다. 그들은 루버각이 17.5°, 4°의 루버핀 두모델과 기준모델인 평판핀에 대한 열전달 성능을 고찰하였다. 17.5°일 때가 4°일 때에 비해 10% 더 향상된 열전달 성능을 보이며, 동일 유속에서 평판핀 보다는 2.85배 더 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 상업용 원형 핀-관 열교환기에 있어서 가장 평범한 형상

인 평행(parallel) 루버핀에 대한 연구결과는 다중(multi) 루버핀의 결과를 이용하였던 관계로 공식적으로 발표된 결과가 없다.

(4) 다공핀(perforated fin)

Fujii 등⁽¹³⁾은 그림 9에 도시한 바와 같이 주름진 다공판형 핀을 가진 열교환기에 대한 연구를 수행하였다. 다공핀은 핀간에 이루어지는 1차유동과 다공을 통한 2차유동에 의해 열전달을 촉진시킨다. 이들은 0.5mm 두께의 구리핀과 직경이 28mm인 전열관, 판피치 76mm와 핀폭 66mm인 1열의 열교환기에 대해 실시되었다. 그림 10에 No.1과 No.3, No.2와 No.4가 서로 동일한 핀형상을 가지며 판피치가 6mm와 8mm로 각각 다른 다공핀에 대한 연구 결과를 평판핀의 성능과 비교하여 놓았다. 두종류의 핀은 서로 동일한 Nu 수를 갖지만 6mm 판피치에서 No.3은 No.4보다 더 낮은 마찰계수 값을 갖는 것으로 나타났다. 그리고 평판핀에 비해 Nu 수는 거의 100% 정도 높으나 No.3의 경우 마찰계수는 2.3배 까지 증가된다. 따라서 압력손실 측면에서 볼 때 다른 핀에 비해 비교적 큰 관계로 아직까지는 실험실적인 연구에 그치고 있는 실정이다.

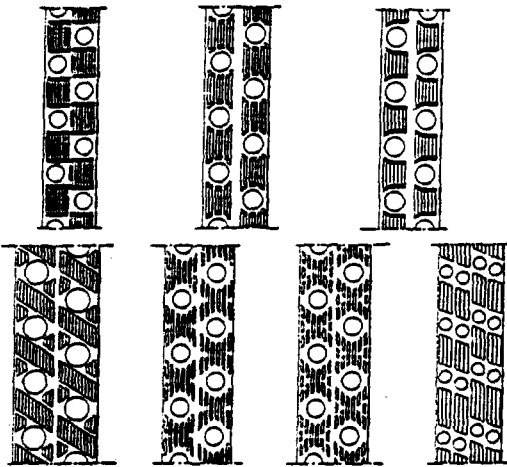


그림 7 최근 제시된 각종 슬리트 핀의 구조

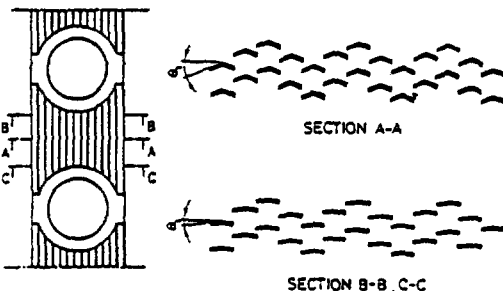


그림 8 갈매기형 루버핀⁽¹²⁾

3.3 원관 나선형 고성능핀

원관 나선형핀은 원형관 외부에 세경의 와이어나 납작한 알루미늄 스트립 등이 부착된 핀을 평행하게 감아서 에폭시 수지 등으로 결합시켜 구성한 것이다. 열전달 향상은 무수히 많은 이러한 핀 스트립들에 의해 얇은 경계층이 주기적으로 발달함과 동시에 이들 요소의 후류영역에서의 경계층의 분산에 기인한다. 이들 핀의 대표적인 예가 가시돌기형 핀이고 기본적으로는 읍셀 스트립핀의 일종으로 취급된다. 또한 이러한 핀들은 공조기에서 부터 보일러의 economizer에 이르기까지 광범위하게 사용되고 있다.

(1) 가시돌기형 핀(spine fin or segmented fin)

그림 11(a), (b)에 상업용 냉동 공조기에 사용되는 두가지 형태의 대표적인 가시돌기형 핀을 제시하였다. 이들 두 종류의 핀은 각각 LaPorte 등⁽¹⁴⁾과 Eckels 등⁽¹⁵⁾에 의해 연구가 수행되었으

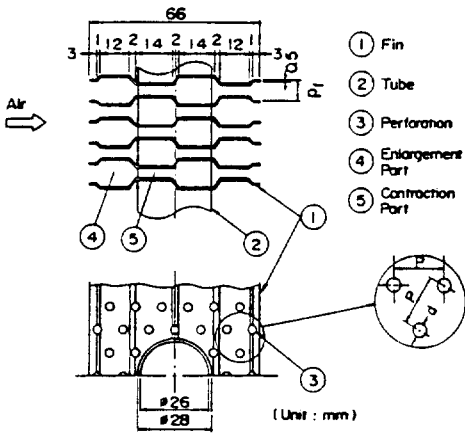


그림 9 다공핀

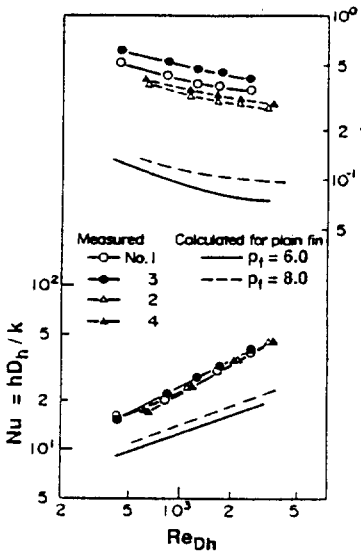


그림 10 각종 다공핀과 평판핀의 성능비교 결과⁽¹³⁾

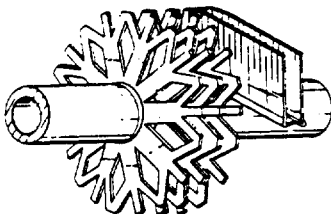
며, 동일한 핀간격에서는 거의 동일한 열전달 성능과 압력손실을 갖는다. 그러나 평판핀보다 열전달계수는 대략 2.1배, 압력손실은 대략 4.2배 정도 증가하여 열전달 향상과 더불어 압력손실도 비교적 커지는 등의 문제점이 보고되었다. 특히 그림 11(a)의 핀은 동일 핀팁 직경을 갖는 평판핀 표면적의 43%에 불과하지만 2배 정도의 성능향상이 가능하다. 그 결과 동일한 hA에 대해서 53% 정도의 핀 재료 절약이 가능하여 최근 업계를 중심으로 무섭게 전개되고 있는 가격파괴 운동에 가장 능동적으로 대처할 수 있는 핀형상이다. 또한 이러한 핀들은 열전달 성능을 더욱 높이기 위하여 원관이 아닌 타원관, 납작형관, 라운딩된 사각형관에 쉽게 적용할 수 있기 때문에 보다 심도있는 관심을 기울여야 할 것으로 사료된다.

(2) Wire-loop 핀

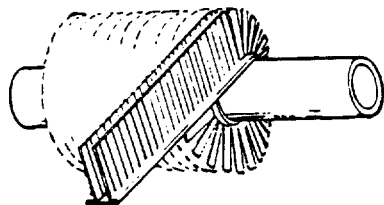
Wire-loop 핀은 앞서 설명한 가시돌기형핀 대신에 가는 철선을 감아서 부착한 것으로 Benforado 등⁽¹⁶⁾에 의해 수행된 연구결과에 의하면 wire loop핀은 동일 핀피치 및 높이를 가진 평판 나선형핀에 비해 50% 이상의 열전달계수를 가지며, 압력손실은 거의 동일한 값을 갖는 것으로 나타났다.

3.4 타원관용 핀

이 절에서는 그림 1(b)에 제시된 개별핀이 타원관에 적용되었을 경우를 다룬다. 이제까지 설명된 모든 종류의 핀이 생산성 문제만 해결되면 타원관에 모두 적용이 가능하기 때문에 여기서는 개별핀이 적용된 원관과의 비교 결과만을 제시한



(a)



(b)

그림 11 냉동공조기에 적용되고 있는 가시돌기형 핀의 실례⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾

다. Brauer⁽²⁾는 표 1에 제시된 기하학적인 형상과 엇갈림 배열을 갖는 타원관과 원관에 대한 열전달 및 마찰 계수를 비교한 결과를 제시하였으며 그 결과를 그림 12에 나타내었다. 그림에서 보듯이 타원관은 원관에 비해 열전달 면에서는 15% 정도 향상된 결과를 보이며, 압력손실은 25% 정도 낮은 값을 갖는다. 타원관이 이와 같이 열전달 성능이 향상된 이유는 관에서의 form drag가 적고, 관 후면의 핀에서의 후류의 영향이 더 적기 때문이다. 그러나, 관내측의 내압성이 충분히 커지지 않는 한 타원관의 사용은 아직 현실적이지 못하다.

3.5 납작관(flat tube)용 핀

(1) 개요

일반적인 원관 사용 열교환기에 있어서 관내측의 높은 압력은 압출(extrusion) 공정을 통해 생산된 알루미늄 납작관의 사용을 가져오게 되었다. 여기에 사용된 납작관은 내부에 막(membranes)을 만들어서 높은 관내측 압력을 견디도록 설계한 것이다. 자동차용에 주로 사용되며, 브레이징(brazing)과정을 통해 결합되는 이러한 납작관 열교환기는 R-12 및 R-134a의 파열압력인 11,000kPa(1600psi)를 견딜 수 있도록 하기 위해 막을 사용한다. 이러한 납작관형 열교환기는 그림 11과 그림 5 또는 7에 제시된 원관에 사용된 고성능핀에 비해 몇가지 장점을 가지고 있다.

- 1) 납작관 열교환기는 관후면에 저속 후류영역이 발생하지 않는다. 원관 열교환기에

서는 저속 후류영역의 발생이 열전달 감소의 실질적 요인이다.

- 2) 납작관 열교환기는 핀 전체 표면적에서의 루버부위가 원관의 경우보다 상당히 크다. 따라서 핀효율도 상당히 높은 값을 나타낸다. 만일 원관 열교환기에 루버면적을 증가시키면, 핀효율은 실제로 감소한다. 왜냐하면, 슬릿가 관으로 부터의 전도열전달을 단절시키기 때문이다.

- 3) 이러한 구조의 열교환기는 루버의 돌출이 낮기 때문에 profile drag가 더 적어진다.

이와 같은 이유로 납작관형 열교환기는 다른 원관에 비해 보다 우수한 성능을 보여주고 있으며, 관 자체에 의한 열전달 성능이 우선하기 때문에 핀을 사용한 연구 결과가 그렇게 많지 않은 실정이다. 그림 13에 납작관에 적용되는 2가지의 대표적인 핀형상을 제시하였다.

(2) 다중 루버핀

그림 13(a)의 다중 루버핀은 가장 전형적인 루버핀의 일종이며 자동차용 응축기 등에 현재 가장 많이 사용되고 있다. 이러한 핀은 1950년대 이래 계속 사용되어 왔지만 열전달 특성과 유동현상에 대한 본격적인 연구는 20년전 부터였다. Davenport⁽¹⁷⁾가 32종의 1열 열교환기를 이용하여 최초의 정형화된 연구를 시도하였으며, 열전달과 마찰계수에 대한 관계식을 제시하였다. 그는 이 관계식들로 자동차 라디에이터의 열전달 성능을 예측했고 모든 데이터가 15% 이내에 든

표 1 비교에 사용된 타원관과 원관의 기하학적 형상

	Circular	Oval
Tube diameter (d)	2.9	19.9/35.2
Fin height (e)	9.8	10/9.3
Fin thickness (t)	0.4	0.4
step pitch (St/d)	1.03	1.05
Row pitch (Sl/d)	1.15	1.04
Fins/m	312	312

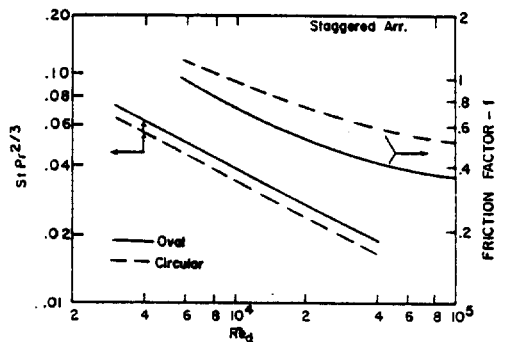


그림 12 타원관과 원관의 열전달 및 압력강하 특성⁽²⁾

다는 것을 확인했다. 그러나 이식은 다중 루버핀의 모든 차원의 변수들을 고려하지 않은 관계로 약간의 결점을 가지고 있다. 그는 또한 루버핀에 대한 유동가시화 연구를 시도하였고, 그 결과 낮은 Re수에서 주유동이 루버를 통과하지 않으나 높은 Re수에서는 유동이 루버에 거의 평행한 유동을 갖는다는 것을 발견하였다. 따라서 이러한 루버핀은 주로 저속에서 운전되는 가정용 공조기에는 비교적 적합하지 않지만 고속에서 작동하는 자동차용 열교환기에서는 매우 적합한 핀형상이라 할 수 있다.

또한 Webb 등⁽¹⁸⁾이 루버핀 배열의 유동을 정확히 모사하기 위하여 확대모델을 이용한 실험을 실시하였고 여기서 그들은 이 실험을 정량화하기 위하여 “유동효율”이라는 함수를 정의하였다. 여기서 유동효율은 유동이 루버통과할 때 평행이면 1이고, 측방향일 때 0으로 정의된다.

최근 국내에서도 전창덕 등⁽¹⁹⁾에 의해서 자동차용 방열기로 사용되고 있는 루버핀을 15배 확대하여 상사시킨 27종의 모델에 대한 유동 및 열전달 특성 연구가 수행된 바 있다. 결과적으로 이 핀은 소요량이 많은 자동차 등에 아직도 널리 사용되고 있는 가장 일반적인 루버핀 형상으로 생산기술이 먼저 발달한 관계로 일찍부터 많은 연구들이 활발하게 수행되어 왔으며 앞으로도 계속될 전망이다.

(3) Skive 핀

알루미늄 압출공정으로 부터 여러 가지 모양의 핀과 관이 만들어질 수 있는데 이 과정에서 생성된 핀 모양이 그림 13(b)에 제시된 skive 핀이다. 이는 두꺼운 관벽을 갖는 압출관에 고압핀치 프레스를 이용하여 핀을 가공하여 구성한 것이다. 핀치 프레스는 두꺼운 알루미늄관에 슬리트를 가공하고, 동시에 바깥쪽으로 칩을 구부려 준다. Haberski 등⁽²⁰⁾이 이러한 종류의 다양한 열교환기에 대한 사진을 보여주었고, Cox 등⁽²¹⁾이 원관과 납작관에 대한 열전달 실험결과를 제시하였다.

3.6 판형(plate-and-fin type) 열교환기용 핀

(1) 옴셀 스트립핀(OSF)

판형 열교환기에 사용되는 가장 전형적인 핀은 그림 14에 제시한 옴셀 스트립핀이다. 이 핀은 경계층 선단효과에 의한 고성능 특성때문에 판형 열교환기에 가장 널리 사용되는 전형적인 핀형상으로 알려져 있다. 특히 이 핀은 시장성이 큰 장점으로 인해 핀-관 열교환기의 루버핀에 연구가 집중되어온 가운데서도 대표적인 단속 열전달 표면으로 알려져 있어서 활발한 연구가 수행되어 왔다.

또한 이러한 핀형상은 수치해석적인 접근이 쉽고 실험결과도 관계식으로 표현하기가 루버핀 보

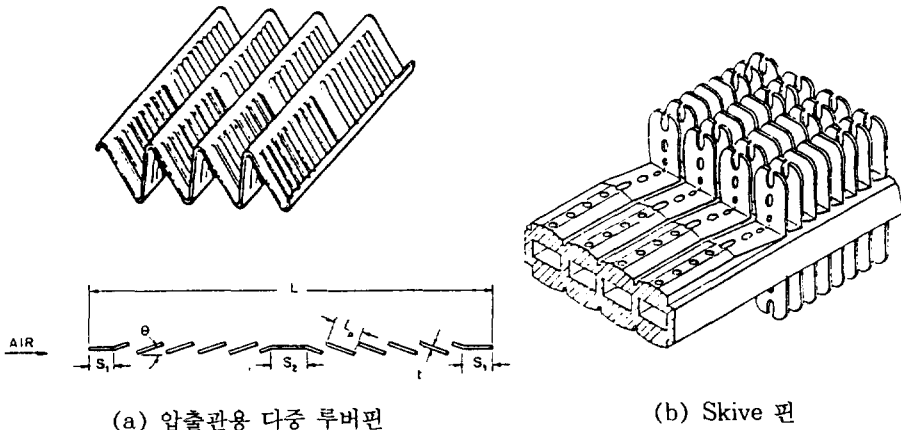


그림 13 납작관용 핀의 실례⁽²⁰⁾

다 훨씬 용이한 것으로 알려져 있다. 이와 관련된 대표적인 연구는 Joshi 등⁽²²⁾, Sparrow 등⁽²³⁾이 수행한 수치 해석적인 접근과 실험적인 접근에 의해 가장 널리 사용되고 있는 관계식을 개발한 Wieting⁽²⁴⁾에 의해 이루어졌다. Wieting은 수력직경에 대한 스트립 길이의 비가 0.7에서 2.7인 22개의 열교환기를 분석한 결과, 데이터의 85%가 열전달 성능은 10% 이내, 마찰계수에 대해서는 15% 이내에 있음을 확인하였다. 열전달 및 마찰계수에 대한 관계식은 Re 수 1,000을 기준으로 두 개로 나누어 제시하였으며, 제작과정에서 핀의 선단과 후단부에서 발생하는 burr 등으로 말미암아 정확도는 약간 떨어지는 수준이나 OSF의 성능예측에 대해서는 큰 공헌을 한 것으로 알려지고 있다. 따라서 이와같은 OSF에 대한 제 연구들은 단속표면에서 일어나는 기본적인 열전달 현상과 유동특성의 메카니즘을 이해하는데 매우 유용한 결과들로 간주되고 있다.

(2) 자동차용 판형루버핀

그림 15는 자동차용 라디에이터에 사용되는 납작관에 부착된 판형 루버핀을 보여준다. 이러한 종류의 핀은 앞서 납작관용에서 설명한 다중 루버핀과 동일한 형상이지만 용도에 따른 문헌상⁽²⁰⁾의 분류가 다르기 때문에 여기서도 그에 따른 것이다. 낮은 압력에서 작동하는 열교환기는 관내

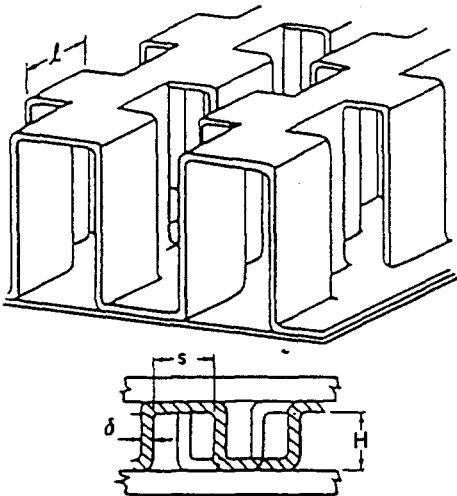


그림 14 U형 스트립핀의 형상^{(22), (23)}

에 막(membrane)을 설치할 필요가 없으며, 여기서 이러한 관에 대한 연구결과를 제시하고자 한다. 여기에 사용되는 관은 대개 단면적이 1.0~1.5mm×12.0~19.0mm이다. 그림 15의 형상을 이용한 최초의 연구는 Achaichia 등⁽²⁵⁾에 의해 이루어졌으며, 정열배열을 갖는 16개의 열교환기에 대한 실험을 수행하여 다음과 같은 관계식을 개발하였다.

$$j = 1.234r Re_L^{-0.59} \left(\frac{S_L}{L_p}\right)^{-0.09} \left(\frac{p_f}{L_p}\right)^{-0.04} \quad (3)$$

$$r = \frac{1}{\alpha} \left(0.936 - \frac{243}{Re_L} - 1.76 \frac{p_f}{L_p} + 0.995\alpha\right) \quad (4)$$

$$f = 533 p_f^{-0.22} L_p^{0.25} S_L^{0.26} H^{0.33} [Re_L^{(0.318 \log_{10} Re_L - 2.25)}]^{1.07} \quad (5)$$

여기서, $1.7 \leq p_f \leq 3.44\text{mm}$, $0.81 \leq L_p \leq 1.4\text{mm}$,
 $8 \leq S_L \leq 14\text{mm}$, $22 \leq \theta \leq 30\text{mm}$

3.7 특수형상의 핀

(1) 직조형 핀(또는 매트릭스형 핀)

직조형 핀은 원, 타원 또는 사각형상의 가는 철선(wire)을 직물을 짜듯이 일정한 다공을 갖도록 망상형태로 성형하여 만든 특수 직조형 핀이다. 이 핀은 고성능을 보일 수 있으나 OSF 또는 루버핀과 같은 얇은 판을 이용하여 가공하는 비용보다 높은 것으로 알려져 있기 때문에 널리

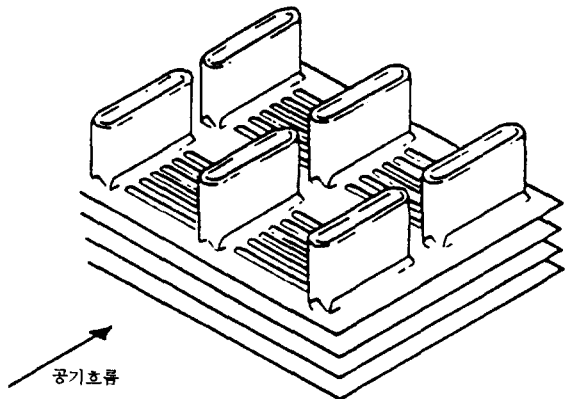


그림 15 정열배열을 갖는 자동차용 판형 루버핀⁽²⁵⁾

사용되지 않고 있다. 그림 16(a)에 대표적인 직조형 편형상이 제시되었으며, Tong⁽²⁶⁾에 의한 연구결과가 Kays & London⁽²⁷⁾에 주어졌다. 그러나 그가 제시한 관계식은 고·저 Reynolds 수에 따라 각각 다른 형상의 시료로 시험한 결과이어서 직조형 편 of 일반적인 관계식으로 보지 않고 있다. 결과적으로 이러한 형상의 편은 냉동 공조용 열교환기의 하나의 연구경향으로 인식되고 있는 고밀도화를 쉽게 달성할 수가 있어서 차세대 열교환기로 각광 받을 수 있을 것으로 사료된다.

(2) 메쉬(wire mesh) 편

메쉬편은 그림 16(b)에 보여준 바와 같이 0.2 mm 두께의 편에 원관과 접촉 브레이징되는 부분을 제외한 모든 부분에 금속그물망의 편을 성형하여 구성한 것이다. Torikoshi⁽²⁸⁾에 의해 보고된 이 편은 경계층이 아주 작은 선에 의해서 형성되고 소산됨으로써 열전달 성능의 향상을 가져오는 원리를 이용한 것이며, 원형관에 이러한 다수개의 망을 압착 적층 구성하여 이 효과를 반복시켜 기존의 편-관 열교환기에 비해 2배 이상의 성능 향상을 보여주었다. 아직 실용화되지는 않았지만 이 열교환기 또한 차세대 열교환기로 인정되고 있다.

4. 각 편간의 열전달성능 비교

표 2에 제시된 6종류의 서로 다른 열교환기의

기하학적인 형상에 대한 열전달 및 압력강하 특성 결과를 그림 17과 18에 각각 비교하였다. 기준편은 그림 11(b)의 가시돌기형 편으로 하였고 표 2의 각 열교환기는 동일 열효율, 동일 공기측 압력손실 및 공기유량에서 작동한다. 높은 압력손실 때문에 낮은 공기 전면속도에서 작동하도록 하였고, 동일 공기유량을 맞추기 위해 전면적을 증가시켰다. 예를 들면, 판형 OSF의 경우 공기속도가 1.42m/s일 때, 가시돌기형 편은 전면속도를 0.96m/s로 하였다. 왜냐하면, 동일 공기유량에서 공기측 전면적은 전면속도에 역비례하기 때문에, OSF 열교환기는 가시돌기형 편보다 31% 적은 값을 요구한다. 그리고 갈매기형 루버편은 원관 열교환기에 사용하는 편 중 최고의 성능을 가지며, 무게도 가장 적다. 이를 가시돌기형 편과 비교하면, 22%정도의 무게가 감소하는 잇점이 있다. 또한, OSF와 루버편은 가시돌기형 편에 비해 각각 53%와 48%정도 무게가 감소하였다. 반면 슬리트 편은 그림 7에 제시된 최근의 슬리트 편에 대한 결과가 아닌 그림 5에 제시된 단순형상의 슬리트 편에 대한 결과로 비교하였기 때문에 성능이 좋지 못한 것으로 나타나 있다. 그러나 최근의 편에 대한 연구결과를 보면 그림 17 및 18의 풍속대역에서 루버편 보다 오히려 좋은 결과를 보이고 있어 결과의 수정이 요구된다.

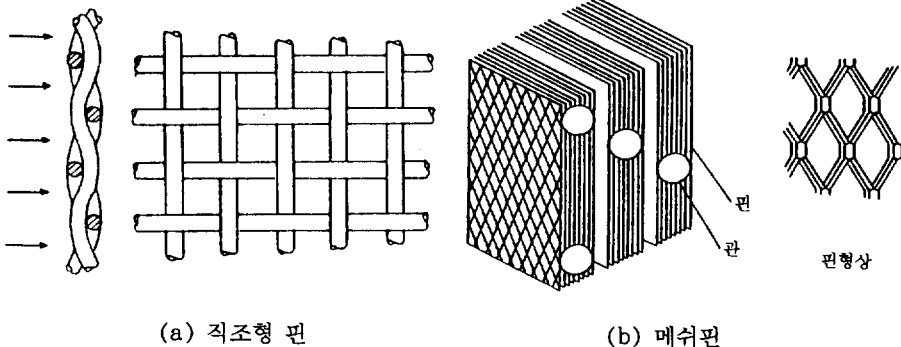


그림 16 특수형상의 편^{(26), (28)}

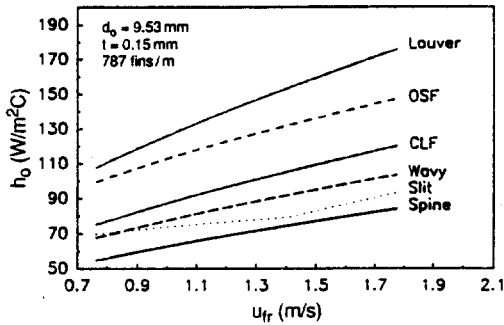


그림 17 6종류의 핀형상에 대한 열전달 성능 비교⁽³⁰⁾

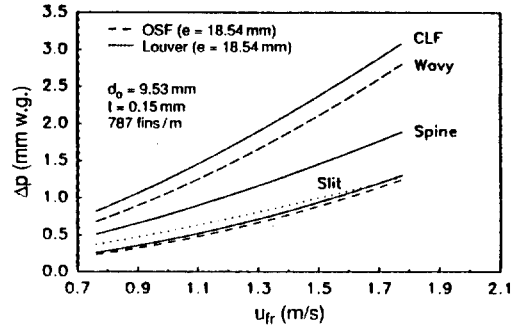


그림 18 6종류의 핀형상에 대한 압력손실 비교⁽³⁰⁾

표 2 6종류의 핀형상에 대한 성능파라미터 비교

Feature	Spine	Wavy	Slit	CLF	OSF	Louver
Rows	1	1	1	1	0.59	0.59
Fin/m	728	433	590	433	866	866
U_{ref} (m/s)	0.96	1.07	1.32	1.19	1.39	1.44
h_c (W/m ² C)	64.8	81.7	77.7	93.1	130.0	133.1
η	0.93	0.91	0.90	0.89	0.83	0.83
G_{ref} (kg/m ² s)	336	336	336	336	1127	1107
h_i (kg/m ² C)	3351	3354	3690	3667	10288	9732
w_{fin} (kg)	1.96	1.58	1.85	1.49	0.97	0.93
w_{tube} (kg)	1.23	1.19	0.96	0.99	0.84	0.84
w_{tot} (kg)	3.19	2.77	2.81	2.48	1.81	1.77

모델이 필요하며 모든 가능한 실험적인 수단들이 동원되어야 한다. 그리고 열교환기에 대한 대다수의 연구가 미국과 일본을 비롯한 선진국들에 의해 주도 되고 있으며, 기술 및 특허도 이들 선진국들이 대다수를 보유하고 있다. 이러한 결과에 비추어 볼 때 국내에서도 산업전반에 걸쳐 고부가가치를 줄 수 있는 열교환기에 대한 연구를 꾸준히 수행해서 국내 고유기술화를 이루어야 할 것으로 사료된다.

또한 지금까지 제시된 몇몇 연구자들에 의해 이들 고성능핀에 대한 관계식이 개발되었지만, 열교환기 자체가 워낙 많은 기하학적 변수들로 구성되어 있는 관계로 이들 변수를 모두 고려할 만큼 충분히 일반적이지는 못하다. 따라서 이로 인해 발생하는 모든 편차들을 최소화하기 위한 노력들도 병행되어야 할 것이다. 최근의 열교환기 연구는 고성능, 고밀도화에 저가격이라는 항목이 추가되고 있어서 이에 대비한 연구도 병행되어야 한다.

참 고 문 헌

1. 이동진, 윤점열, 1993, "열교환기 성능에 영향을 미치는 인자들의 특성과 연구 동향", 대한기계학회지, Vol 33, pp. 936~941
2. Brauer, H., 1964, "Compact Heat Exchanger", Chem. Progress Eng., London, Vol. 45, No. 8, pp. 451~460
3. Briggs, D. E. and Young, E. H., 1963,

5. 맺음말

지금까지 모든 형태의 열교환 장치에 사용되는 각종 핀형상과 그 연구동향에 대하여 간략히 서술하였다. 현재의 추세에 비추어 볼 때 세계적으로 더욱 더 향상된 핀표면 형상을 찾아가는 노력들이 계속될 것이고, 그 사용범위 또한 점점 늘어나고 있다. 전술한 바와 같이 현재 사용되는 있는 주된 핀형상은 파상핀 또는 루버나 슬릿핀과 같은 단속표면을 갖는 핀이다. 원관에 이들 핀을 사용할 경우 단순 평판핀을 사용할 때보다 80~100%의 열전달 향상이 얻어진다. 따라서 한 단계 더 진보된 핀형상을 개발하기 위해서는 열전달 성능을 예측하는 심도있는 수치해석적인

- “Convection Heat Transfer and Pressure Drop of Flowing Across Triangular Pitch Banks of Finned Tubes”, Chem. Eng. Progress Sym. Series, No. 41, Vol. 59, pp. 1~10
4. Robinson, K. K. and Briggs, D. E., 1966, “Pressure Drop of Air Flowing Across Triangular Pitch Banks of Finned Tubes”, Chem. Eng. Progress Sym. Series, No. 64, Vol. 62, pp. 177~184
 5. Gray, D. L. and Webb, R. L., 1986, “Heat Transfer and Friction Correlations for Plate Fin-and-Tube Heat Exchangers Having Plain Fins”, Proc. of the 9th International Heat transfer Conf., San Francisco
 6. 강희찬, 김무환, 윤점열, 김현영, 1995, “공조기용 열교환기의 공기측 유동 및 열전달 특성을 고찰하기 위한 확대 모형실험”, 공기조화냉동공학회 동계학술발표 논문집, pp. 42~47
 7. 윤준원, 윤점열, 김무환, 1995, “핀-관 열교환기의 공기측 유동 및 전열특성에 관한 수치해석적 연구”, 공기조화냉동공학회 동계학술발표 논문집, pp. 74~79
 8. Beecher, D. T. and Fagan, T. J., 1987, “Effects of Fin Pattern on the Air-Side Heat Transfer Coefficient in Plate Finned-Tube Heat Exchangers”, ASHRAE Trans., Vol. 93, Part 2, pp. 1961~1984
 9. Webb, R. L., 1990, “Air-Side Heat Transfer Correlations for Flat and Wavy Plate Fin-and-Tube Geometries”, ASHRAE Trans., Vol. 96, Part 2, pp. 445~449
 10. Nakayama, W. and Xu, L. P., 1983, “Enhanced Fins for Air-Cooled Heat Exchangers-Heat Transfer and Friction Factor Correlations”, Proc. of the 1983 ASME-JSME Thermal Eng. Conf., Vol. 1, pp. 495~502
 11. 윤점열, 강희찬, 이관수, 김무환, 1995, “확대모형을 이용한 특성화된 핀형상의 열전달 평가”, 공기조화냉동공학회 동계학술발표 논문집, pp. 80~85
 12. Hatada, D., Ueda, U., Oouchi, T. and Shimizu, T., 1989, “improved Heat Transfer Performance of Air-Coolers by Strip Fins Controlling Air Flow Distribution”, ASHRAE Trans., vol. 95, Part 1, pp. 166~170
 13. Fujii, M., Seshimo, Y. and Yoshida, T., 1991, “Heat Transfer and Pressure Drop of Tube-Fin Heat Exchanger with Trapezoidal Perforated Fins”, Proc. of the 1991 ASME-JSME Thermal Eng. Conf., Vol. 4, pp. 361~368
 14. Laporte, G. E., Osterkorn, C. L. and Marino, S. M., 1979, “Heat Transfer Fin Structure”, U. S. Patent 4,143,710
 15. Eckels, P. W. and Rabas, T. J., 1985, “Heat Transfer and Pressure Drop Performance of Finned Tube Bundle”, J. of Heat Transfer, Vol. 107, pp. 205~213
 16. Benforado, D. M. and Palmer, J., 1964, “Wire Loop Finned Surface-A New Application”, Chem. Eng. Progress Sym. Series, No. 57, Vol. 61, pp. 315~321
 17. Davenport, C. J., 1984, “Correlations for Heat Transfer and Flow Friction Characteristics of Louvered Fin. Heat Transfer-Seattle 1983”, AIChE Sym. Series, No. 225, Vol. 79, pp. 19~27
 18. Webb, R. L. and Trauger, P., 1991, “The Flow Structure in the Louver Fin Heat Exchanger Geometry”, Exp. Thermal and Fluid Science, Vol. 4, pp. 205~217
 19. 전창덕, 홍주태, 이진호, 1995, “루버핀형 열교환기의 열전달 특성에 관한 실험적 연구”, 공기조화냉동공학회 하계학술발표 논문집, pp. 37~45
 20. Webb, R. L., 1994, “Principles of Enhanced Heat Transfer”, John Wiley &

- Sons, Inc., Chap. 6, pp. 125~165
21. Cox, B. and Jallouk, P. A., 1973, "Methods for Evaluating the Performance of Compact Heat exchanger Surfaces", *J. of Heat Transfer*, Vol. 95, pp. 464~469
 22. Joshi, H. M. and Webb, R. L., 1987, "Heat Transfer and Friction in the Offset Strip Fin Heat Exchanger", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 69~84
 23. Sparrow, E. M. and Liu, C. H., 1979, "Heat Transfer, Pressure Drop and Performance Relationships for In-line, Staggered, and Continuous Plate Heat Exchangers", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 22, pp. 1613~1625
 24. Wieting, A. R., 1975, "Empirical Correlations for Heat Transfer and Flow Friction Characteristics of Rectangular Offset-Fin, Plate-Fin Heat Exchangers", *J. of Heat Transfer*, Vol. 97, pp. 488~490
 25. Achaichia, A. and Cowell, T. A., 1988, "Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Flat Tube and Louvered Plate Fin Surfaces", *Exp. Thermal and Fluid Science*, Vol. 1, pp. 147~157
 26. Tong, L. S., 1957, "Heat Transfer and Flow Friction Characteristics of Woven-Screen and Crossed-Rod Matrices", *Trans. ASME*, Vol. 79, No. 10
 27. Kays, W. M. and London, A. L., 1984, "Compact Heat Exchangers, 3rd Ed.", McGraw-Hill, New York
 28. Torikoshi, K., Kawabata, K., Yamashita, H. and Yasuao, K., 1992, "Heat Transfer Performance of Mesh Fin Type Air-Cooled Heat Exchanger", *Proc. of Symposium of Heat Transfer Soc. of Japan*, pp. 539~540
 29. Marvillet, Ch., 1993, "Recent Development in Finned Tube Heat Exchanger Theoretical and Practical Aspects", DTI, Energy Tech., Denmark, pp. 91~159
 30. Webb, R. L. and N. Gupte, 1990, "Design of Light Weight Heat Exchangers for Air-to-Two Phase Service", *Compact Heat Exchangers: A Festschrift for A. L. London*, R. K. Shah, A. Kraus, and D. E. Metzger, Eds., Hemisphere Publishing Corp., Washington, D. C., pp. 311~334