

냉동장치용 열교환기의 성능 향상(II)

The Performance Improvement of Heat Exchanger for Refrigeration Equipment (II)

김 영 호*
Young Ho Kim

4. 비등전열

4.1 비등과 응축 열전달

열의 전달방법에는 복사, 전도, 대류 및 비등과 응축이 있다. 이들중에서 유체의 상변화를 수반하는 비등과 응축은 대단히 복잡한 현상으로서 이 경우에 대한 열전달 현상에 대하여는 잘 알려져 있지 않은 부분도 많다. 그래서 비등과 응축열전달 부분에서 오히려 열전달을 촉진시키기 위한 착상이 풍부하게 발견될 수 있다고 믿고 있다.

비등의 열전달에는 전열면에서 가능하면 많은 양의 증기포가 발생하여 주위의 액을 적극적으로 교반해 주는 것이 바람직하다. 관찰에 의하면 비등열 전달에 있어서 증기포가 발생하는 장소는 특별히 정해져 있지 않으며 전열면에 부착된 미세한 요철부위에서 발생하는 확률이 높다.

따라서 열전달율을 크게 하기 위해서는 전열면의 표면을 거칠게 해야 한다는 것을 알게 되었으며 가늘은 금망을 감아 붙이거나 다공질 조직으로 변형시키므로서 열전달율이 증대된다는 것을 알았다.

실제적으로 증기포의 발생을 쉽게 하기 위하여 다공질의 소결금속의 층으로 전열관을 감싸게 되면 표면을 단순히 거칠게 만든 관보다

도 열전달율이 대단히 증대된다.

응축현상도 비등현상과 같으며 그림 25에 나타난 바와 같이 이미 응축된 액의 층을 통하여 증기분자의 에너지를 빼앗는다.

증기분자는 대개 포화온도에서 응축하므로 액층이 두꺼울수록 전열면의 온도를 낮게 유지하지 않으면 안된다.

결국 어떤 열량을 전달하는 데 커다란 온도차를 필요로 하게 되며 열전달율이 적어지고 만다.

Low fin tube는 그림 26에 나타난 바와 같이 전열면적이 커질 뿐만 아니라 핀의 끝부분에 얇은 액막의 영역이 형성되어 열전달율이 커진다는 장점이 있다. 또한 적상(適狀) 응축은 막상(膜狀)응축에 비하여 2~20배의 열량을 전달할 수가 있다.

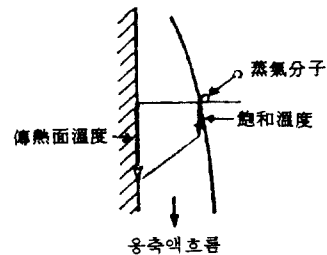


그림 25. 응축현상

* 정회원, 우원설비(주) 대표

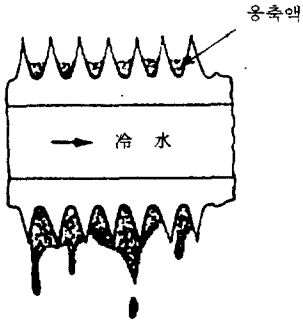


그림 26. Low fin tube의 응축

4.2 비등전열의 촉진

최근에는 소온도차 에너지의 유효이용과 관련하여 비등전열의 촉진을 중요시하게 되었다. 비등전열의 촉진이란 풀비등에서는 핵비등열전달의 촉진을 말하며 강제대류 비등에서는 열전달의 촉진과 한계열유속의 향상을 말한다.

일반적으로 핵비등에서는 다른 전열과정에 비교하여 대단히 높은 열전달계수가 얻을 수 있다는 것을 특징으로 하지만 이것은 전열면 과열도가 높은 경우이고 핵생성이 충분히 이루어지지 않는 정도의 저과열도가 되면 전열의 우위성은 없어지고 만다.

따라서 핵비등의 전열촉진이 필요한 것은 특히 저과열온도의 경우이며 Bergles 및 Webb는 여러가지 핵비등열전달의 촉진법을 능동형과 수동형으로 분류하고 있다.

능동형은 외부동력 또는 에너지를 필요로 하는 촉진법으로서 전열면의 진동이나 회전, 표면의 흡입, 유체진동, 전계부여 등이 있으며 전열면에 발생한 증기포를 신속하게 제거하므로서 전열촉진을 이루는 방법이다.

이것은 열전달계수의 증대 또는 한계열유속의 향상에 유효하지만 실제적인 응용이 어렵기 때문에 실용적 연구는 많지 않다.

한편 수동형이란 외부에너지를 필요로 하지 않는 것으로 전열면의 표면처리 또는 표면가공에 의하여 표면의 습윤특성이나 표면의 미

세구조를 핵생성이나 핵안정성에 적합하도록 개선하여 전열촉진을 이루는 방법이며 소위 전열면자체의 고성능화를 목표로 하는 방법이다.

최근 이러한 수동형의 고성능비등 전열면의 개발에 대한 여러가지 제안이 발표되고 있는데 전열표면에 데프론이나 에폭시 등의 수지를 반전형으로 도포하여 젖기 어려운 부분과 젖기 쉬운 부분이 공존하는 면을 만들어서 물처럼 면을 젖게 하기 어려운 액체인 경우의 전열촉진을 도모하고 냉매, 저온유체 및 액체 금속과 같이 표면장력이 적어서 면을 젖게 하기 쉬운 액체인 경우에는 그림 27에 나타낸 바와 같이 끝이 넓어지는 표면구조를 갖게 하여 저과열도에 있어서도 증기포획이 쉽게 되어 비등의 안정성 및 전열촉진을 이루도록 한다.

금속입자층의 소결, 용사 또는 도금하여 얻어지는 다공질층의 표면구조를 갖는 면도 우수한 비등전열 특성을 나타낸다.

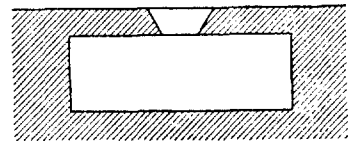


그림 27. 말광형 공동(Cavity)

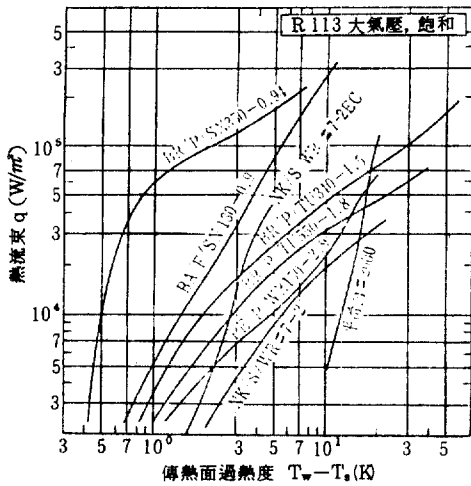
그림 28은 각종 다공질층의 성능을 비교한 예를 나타내고 있으며 매끈한 면에 비하여 어떤 경우이건 전열성능이 개선되고 있다.

전열촉진의 정도는 다공질층의 재질, 입자경, 층의 두께, 간격을, 다공질층과 기재 사이의 결합상태 등에 따라서 복잡하게 변화한다.

직경 $350\mu\text{m}$ 의 청동입자를 층두께 0.94mm 로서 원형관 표면에 소결시킨 BR/P/SN 350~0.94의 경우 동일한 열유속을 전달하는데 요하는 전열면 과열도는 매끈한 관에 비하여 대단히 감소하고 있다.

실용적인 고성능비등 전열면으로는 공정수가 적은 기계가공 또는 성형가공에 의한 고밀도의 공동(空洞)을 만드는 일이 중요하다.

그림 29는 이와 같은 고성능 비등 전열면의 일례를 나타낸 것이다. 각 면에 공통적인 사



記號：[A]/[B]/[C]/[D]-[E]의 說明
 [A]... BR : 青銅, BA : 黃銅, NK : 니켈,
 PE : 폴리에치렌
 [B]... P : 粒子, F : 파이버, S : 사이트
 [C]... SN : 燒結, TU : 嵌込, WR : 卷付
 [D]... 粒子徑(μm), [E]... 層厚계(mm)

그림 28. 각종 다공질층 전열면의 핵비등 전열 특성

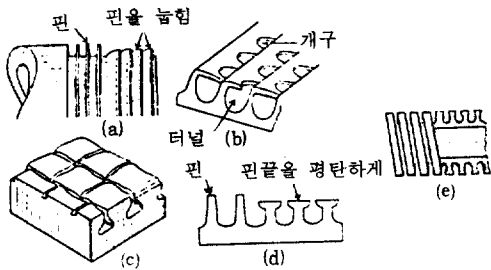
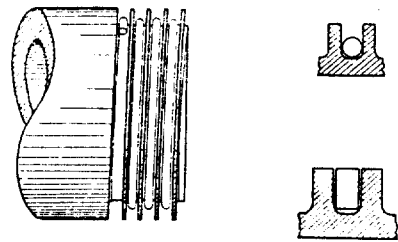


그림 29. 터널구조의 각종 고성능 비등전열면

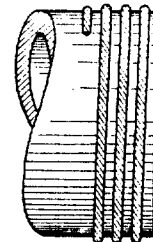
항은 고밀도의 말광형(末廣形) 공동을 갖고 있으며 각 공동(Cavity)은 내부의 터널에 의하여 서로 연결되는 구조라는 점이다.

전열촉진에는 터널안으로 액체를 흡입하여 내표면에서의 얇은 액막에 의한 증발, 말광형(末廣形)구조에 의한 저과열도 일때의 증기포획의 안정화, 내부연결에 의한 인접공동의 활성화 등이 관계된다.

전열성능은 특히 공동의 개구부 치수에 따라 민감하며 최적조건은 액체의 종류, 압력, 전열면 과열도를 지정한 경우에 귀납적으로 구



(a)



(b)

그림 30. 간이 고성능 전열면

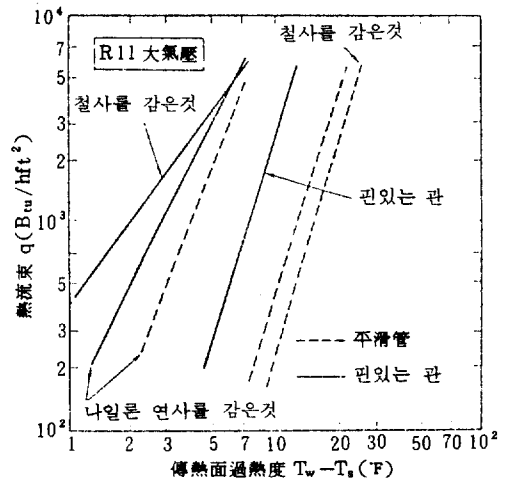


그림 31. 간이 고성능 전열면의 핵비등 전열 특성

할 수 있는 단계에 이르지 못하고 있다.

그림 30은 간이 고성능 비등 전열면의 예이며 홈이 파인 관에 철사를 감거나 평활관에 나일론의 연사를 감아서 그림 31에 나타난 바와 같이 상당한 성능향상을 실현시키고 있다.

5. 열교환기용 신형 전열관

5.1 냉동공조용 열교환기의 종류

냉동공조기기는 전자냉동등의 특수장치를 제외하고는 냉매라는 작동액의 상변화에 의한 열의 이동을 이용하는 것으로 냉매의 응축, 증발을 연속적이고 효과적으로 행하는 사이클을 구성한다.

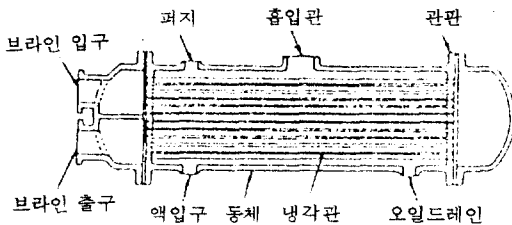
한편 냉동공조기기는 그 사용목적 및 규모에 따라서 여러가지의 형태가 있으나 열교환기에 있어서는 수·냉매용 열교환기와 공기·냉매용 열교환기로 대별한다.

5.2 수-냉매용 열교환기

터보냉동기, 스크류 냉동기, 흡수냉동기 등은 일반적으로 대형이며 수냉응축기와 브라인 냉각기(증발기)에 의하여 구성되고 만액식의 Shell and tube형 열교환기가 이용된다.

여기에 사용되는 전열관은 열전도성, 내식성 또는 가공성을 고려하여 일반적으로 1/2경질 동관이 사용되고 있으며 동관의 외표면에 스파이럴형의 핀(높이 1.3~1.5mm)을 감은 핀튜브 또는 로우핀 튜브가 있다.

(가) 만액식 열교환기



(나) 건식열교환기

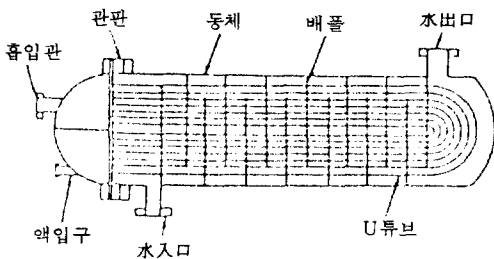


그림 32. Shell and tube식 열교환기

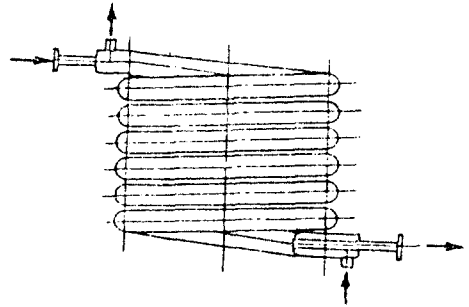


그림 33. 2중 관형 열교환기

수냉식 패키지형 공조기의 대형기종에는 Shell and tube식 응축기가 사용되지만 소형기종에는 강관안에 로우핀튜브를 전열관으로 삽입한 2중관형 또는 다관형 코일응축기가 채용된다.

터보냉동기 또는 흡수식 냉동기는 냉매속에 윤활유의 혼입이 적기 때문에 열교환기의 형식에 제한을 받지 않으나 왕복동식 압축기를 사용하는 칠링유닛에서는 냉매속에 혼입되는 윤활유가 10~20% 정도이므로 증발기(수냉각기등)는 기름이 쉽게 되돌아 올 수 있는 형식이어야 하므로 일반적으로 전열관의 관내에 냉매가 흐르는 형식의 것이 이용된다.

그런데 냉매와 물과의 열교환에 있어서는 냉매측의 열전달율이 물측보다 불량하기 때문에 열관류율을 향상시키기 위하여 냉매측의 전열면적을 증가시키는 것이 효과적이므로 동관안에 알루미늄핀을 삽입고정한 inner fin tube가 이용된다.

이와 같은 냉매의 상변화(비등, 응축)에 수반되는 열교환의 전열특성 개량방법으로서 확대표면적을 갖는 전열관의 개발이 추진되어 오다가 최근에는 전술한 바와 같은 비등, 응축현

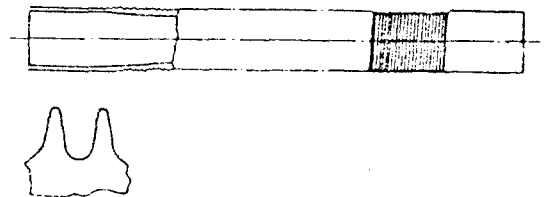


그림 34. Low fin tube

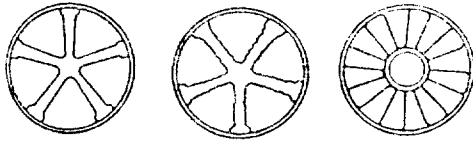


그림 35. Inner fin tube

상을 촉진하는 전열면 개량방법이 채택되기에 이르렀다.

비등의 열전달에 있어서는 가능하면 많은 증기포가 전열면에서 발생하여 주위의 액을 교반해 주는 것이 바람직하다. 열전달율을 크게 하기 위해서 우선 고려해야 할 사항은 표면을 거칠게 하는 일이므로 눈이 가는 금망을 감아 붙이거나 다공질의 소결금속층을 관표면에 만들어서 다공질 소결금속층이 그림 36에 나타난 바와 같이 증기포의 발생핵으로 작용하여 비등열전달을 크게 해야 한다.

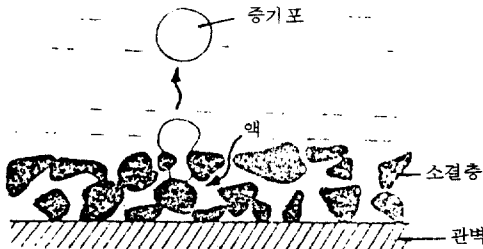


그림 36. 소결금속층

그러나 이들방법은 가격문제, 품질관리상의 문제때문에 공업적으로 널리 실용화되지는 못하고 있다.

일부회사에서 소결금속층과 동일한 원리를 이용하여 표면구조를 기계적으로 가공하여 관표피의 원주방향으로 터널을 만들고 그 터널에는 많은 개구부가 있어서 외부와 연결되는 구조로 되어 있으며 터널안의 냉매액이 금속하게 가열되면 기포가 되어 이탈하면서 인접 개구부에서 액이 보충되어 터널안에 일부 잔유해 있는 증기에 의하여 연속적으로 비등이 이루어져서 전열효율이 향상되도록 제작하고 있다.

이러한 비등, 열전달을 이용한 전열관은 만

액식 Shell and tube 형 열교환기에서 최대의 효과를 발휘한다.

그림 37에 각종 전열관의 비등상태를 그림 38에는 비등전열관의 단면형상, 그림 39에는 표면형상 그리고 그림 40은 프레온 22인 경우에 있어서 각종 전열관의 비등전열 특성을 표시한다.

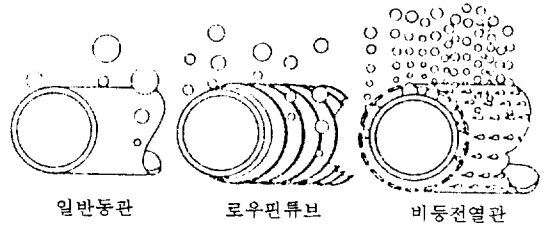


그림 37. 각종전열관의 비등상태



그림 38. 비등전열관의 단면형상

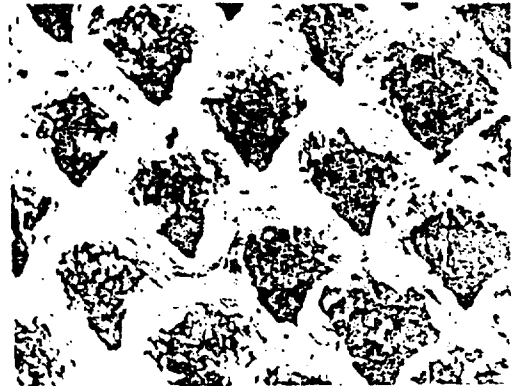


그림 39. 비등전열관의 표면형상

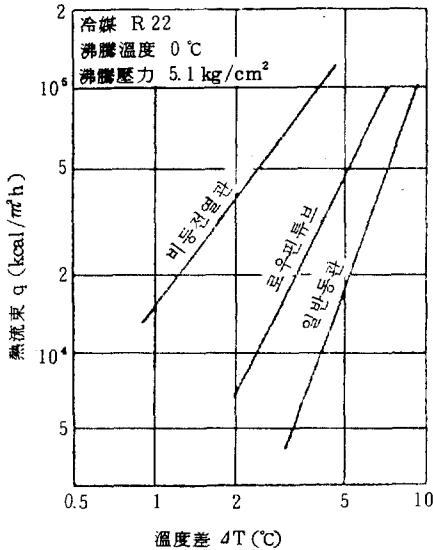


그림 40. 비등전열관의 전열특성

한편 응축전열관에 적용되던 종래의 방법은 그림 41에 나타낸바와 같이 관표면에 많은 핀을 설치하는 방법이였으며, 이러한 방법으로 전열면적을 크게하면 핀 끝에서 액막이 얇아져서 열전달율이 향상되기 때문이다.

또한 이상적인 응축은 적상응축(滴狀凝縮)으로 막상응축(膜狀凝縮)에 비하여 2~20배의 열전달율을 얻을 수가 있으므로 데프루코팅 등이 시도되고 있으나 공업적으로 성공하지 못하고 있는 실정이다.

일부회사에서 냉매가스가 응축하기 쉽고 응축액이 적하(滴下)하기 쉽도록 튼이형의 핀이 직립하여 언제나 미세한 핀에 얇은 응축액의 액막이 이루어져서 적상응축과 근사한 상태를 이루도록 실용화하고 있으며 그림 42에 적상응축과의 단면, 그림 43에는 표면을 나타내며 각종 전열관에 대한 응축전열특성은 그림 44에 표시한다.

수-냉매용 열교환기 중에서 비교적 출력이 적은 경우에 이용되는 2중관형 응축기에 있어서의 전열관은 장척코일상으로서 구조적으로 냉매측의 압력손실이 커지기 때문에 외면 압력손실이 적은 전열관이 요구되므로 동관의 표면에 0.3~0.5 φ의 동선을 Corru-

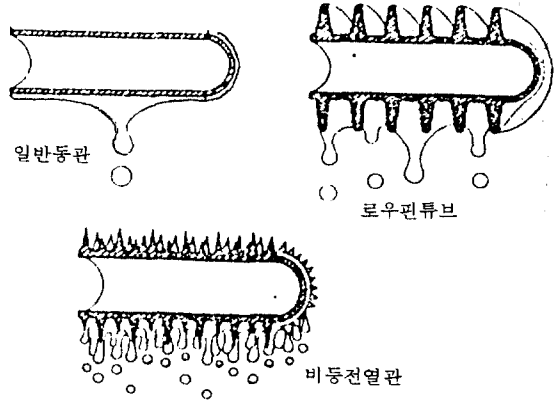


그림 41. 각종 전열관의 응축상황

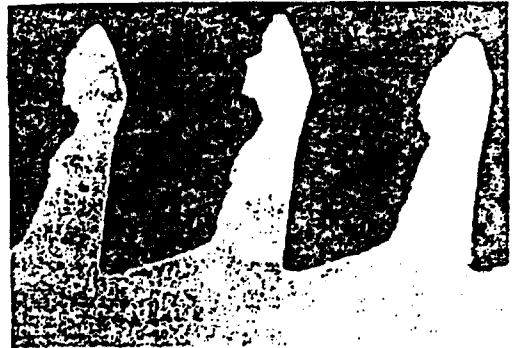


그림 42. 적상응축면의 단면

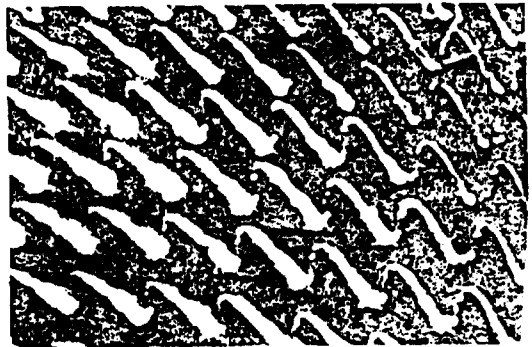


그림 43. 적상응축관의 표면

가공하여 접합시킨 Wire fin tube 또는 침상핀 튜브 등이 개발되고 있다.

5.3 공기-냉매용 열교환기

공냉식냉동기 또는 팩케이지형 공조기, 룬

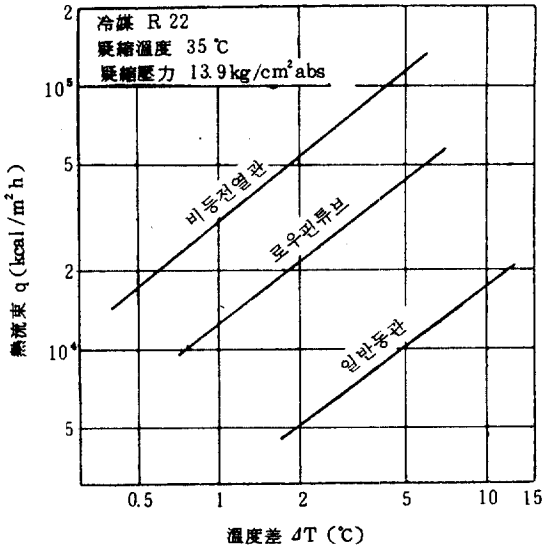


그림 44. 각종 전열관의 용속특성

쿨러 등에는 공기와 냉매와의 열교환을 행하는 열교환기가 설치되는데 공기와 냉매와의 열교환에 있어서는 공기측의 열전달율이 냉매측에 비교하여 대단히 낮기 때문에 열관류율을 향상시키기 위하여 공기측(관외측)의 전열면적을 증가시킬 필요가 있으며 일반적으로 알루미늄 핀에 의하여 전열면적의 증가를 이루게 한다.

따라서 공기-냉매용 열교환기에 있어서는 공기측의 열저항을 어떻게 해서 적게 할 것인가가 기기의 성능에 크게 영향을 미친다.

이러한 용도로는 동관에 프레스성형 알루미늄판을 조합시킨 다통로 Cross fin형 열교환기가 사용되며 일부에서는 알루미늄 핀을 동관에 감아 붙인 High fin tube 또는 핀폭을 2~3mm로 분할하여 동관에 감아 붙인 Spine fin tube가 이용된다.

아울러 시대의 요구에 부응한 산업계의 기술 개발에 의하여 종래의 평판 알루미늄핀에서 Corrugate fin으로 또 다시 Slit fin으로 공기측 열저항을 적게하고 있다.

따라서 최근 10년간 공조기용 동관도 대폭적으로 변화하였는 바 종래에는 외경 9.53φ, 두께 0.5~0.6mm의 동관이 두께 0.41

~0.35mm에서 또다시 0.25mm로서 종래 동관의 절반두께로 얇아지고 있다.

공기는 열수송 특성이 나빠서 공기전열면에서의 열저항이 크므로 전열핀의 성능향상은 열교환기의 소형화와 에너지절약에 상당한 효과를 나타낸다.

그래서 공기열교환기의 개량은 공기측 열저항을 감소시키기 위하여 전열핀을 Plate fin에서 파형의 Corrugate fin으로 또다시 핀의 일부를 띠모양으로 하여 규칙적으로 끌어올린 형상의 Slit fin(자동차의 라디에타에 사용되는 루우버와 비슷함)으로 개량하였으며 그것을 Corrugate형상으로 구부리게 되면 공기측의 열저항 감소대책도 한계에 이르러 관내면의 전열특성 향상의 효과가 최고로 발휘되고 있다.

그림 45는 종래의 Plate fin, 그림 46은 Slit fin의 예를 나타내며 핀재의 판두께는 0.3t→0.29→0.23→0.2→0.15→0.14t에서 최근에는 친수처리된 0.115t의 판을 사용한다.

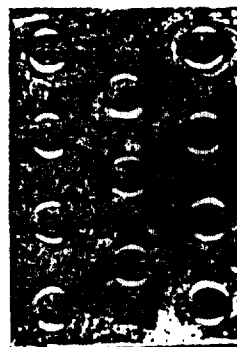


그림 45. Plate fin

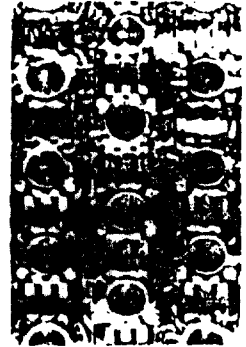


그림 46. Slit fin

중전에는 관내측 열전달율을 높이기 위하여 관내에 핀을 설치하여 전열면적을 증가시키거나 Spiral ribbon을 삽입하는 등의 방법을 시도했으나 이러한 방법들은 압력손실의 증가, 가격상승, 제조상 알루미늄 핀의 고정방법의 문제점이 있어서 공조기에서의 적용이 어려워지자 관내면에 나선형 홈을 파는 전열관이 개발되기에 이르렀다.

내면나선흡관은 관내부에 미세한 나선형 홈을 전조가공에 의하여 성형한 것으로 공조기 용으로는 나선각도 7~25도, 홈깊이 0.1~0.2 mm의 것이 사용되며 내면나선 흡관은 다음과 같은 특징이 있다.

- (1) 내면나선흡관의 관내 전열성능은 일반동관과 비교하여 평균 증발열전달율 2-2.5 배, 평균응축열 전달율 1.5-2 배의 뛰어난 특성을 갖는다.
- (2) 내면나선흡관의 압력손실은 일반동관과 비교하여 다소 크지만 별다른 차가 없다.
- (3) 내면나선흡관을 열교환기에 적용한 경우, Hair pin가공성, 확관성, 접합성등에 있어서 일반동관과 동일하다.
- (4) 내면나선흡관의 내압강도는 일반동관과 동일한 두께이면 거의 동일하다.

그림 47은 실용화되고 있는 내면나선흡관을 나타내며 이들 내면나선흡관은 앞으로 공기 열교환기에 대대적으로 활용될 것으로 전망된다.

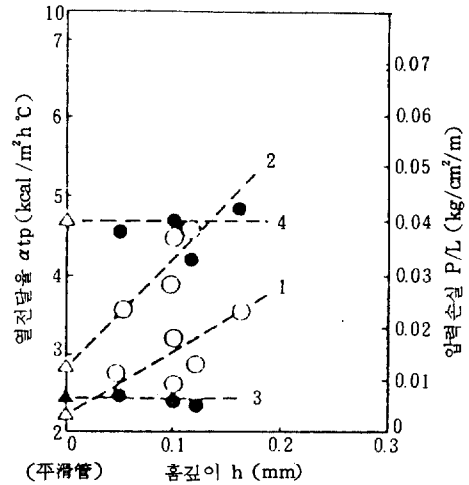


그림 47. 내면나선 흡관

한편 그림 48에는 내면나선흡관의 홈깊이의 영향에 따른 비등전열특성, 표 3에 내면나선흡관의 사양을 나타낸다.

표 3. 내면나선 흡관의 치수

홈깊이 (mm)	홈피치 (mm)	홈각도 (도)	최소관내경 (mm)	내표면적 증가율	열전달율-홈깊이의 관계	압력손실-홈깊이의 관계
0.06	0.52	7	11.60	1.07	○ ●	△ ▲
0.10	0.32	7	11.64	1.17		
0.10	0.54	7	11.58	1.10		
0.12	0.43	7	11.54	1.24		
0.16	0.52	7	11.58	1.10		
일반동관						



1. 열전달율-홈깊이의 관계(냉매량 29 kg/h)
2. 열전달율-홈깊이의 관계(냉매량 72 kg/h)
3. 압력손실-홈깊이의 관계(냉매량 29 kg/h)
4. 압력손실-홈깊이의 관계(냉매량 72 kg/h)

그림 48. 내면나선 흡관의 비등특성 (홈깊이의 영향)

내면나선흡관의 열유속의 영향에 의한 비등전열특성을 나타내면 그림 49와 같으며 표 4에는 내면나선흡관의 사양을 제시하였다.

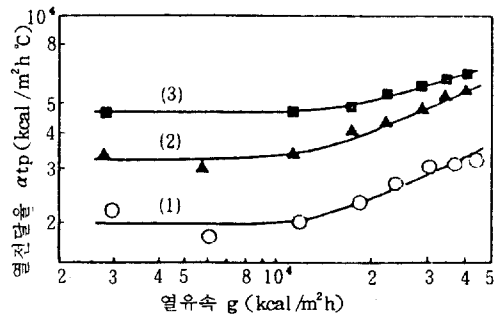


그림 49. 내면나선흡관의 비등특성 (열유속의 영향)

표 4. 내면나선 흡관의 치수

기호	홈깊이 (mm)	홈피치 (mm)	홈각도 (도)	최소관내경 (mm)	내표면적 증가율
○	일반동관			11.10	1.00
▲	0.10	0.54	7	11.58	1.10
■	0.16	0.52	7	11.46	1.26

이와같이 냉매-공기열교환기에 있어서는 관외의 전열핀의 개선과 내면나선홈관의 개발에 의하여 뛰어난 열교환기를 완성할 수가 있다. 이들의 각종 전열핀 형상별 일반동관과 내면나선홈관을 조합시킨 경우의 열관류율을 나타내면 표 5와 같다.

표 5. 각종전열핀과 전열관의 조합에 의한 열관류율

전열핀	일반동관		내면나선홈관		B/A
	W/m ² ·°C (A)	비율	W/m ² ·°C (B)	비율	
Plate fin	30	1.00	33	1.10	1.10
Corrugate fin	32	1.07	36	1.20	1.125
Slit fin	36	1.20	42	1.40	1.167
Super slit fin	42	1.40	51	1.70	1.214

(조건) 전면풍속 : 1.0 m/s, 진구온도 : 27°C,
 습구온도 : 19.5°C

6. 전열관의 개발방향

에너지절약과 자원절약을 추구하기위한 전열관의 기술개발은 끊임없이 계속되고 있다. 따라서 냉동공조분야에 있어서는 비등전열관, 내면

나선홈관등의 개선과 더불어 가공기술의 복합화가 적극적으로 추진되어야 한다.

즉, 비등전열관은 상변화에따른 전열면의 개선이므로 수축(관내측)의 열저항에 대하여 재검토되어야하며 수축의 열전달율을 향상시키기 위해서는 내면핀 또는 Corrugation 가공으로 인한 내면부식에 대한 검토도 전열관 재질의 검토와 더불어 이행되어야 한다.

전열관은 내외면의 열전달율을 개선하므로써 전열관 길이를 종래의 Lowfin tube 의 약 3분의 2 정도로 소형화할 수 있으며 냉매-공기열교환용 전열관에 있어서는 홈의 복합화와 더불어 비등전열관에서와 같은 비등, 응축에 대한 이상적인 전열면을 전열관 내면에 형성시키는 공업적 기술개발이 이루어져야 소기의 성과를 거둘 수 있다.

결론적으로 기기의 효율향상에 의한 에너지의 절약화는 냉동공조계의 가장 긴급한 당면과제이며 가격인하를 고려한 기기의 소형화와 더불어 이제부터 가일층 관심을 갖고 추진시켜 나가야 할 기술적 과제이다. 아울러 각종 용도에 적용할 수 있는 전열관의 특성을 향상시키고 가공기술을 개선하므로써 이들 과제를 성취시키기 위하여 최대의 노력을 경주하여야 한다.