

# 습표면 열교환기의 기술동향

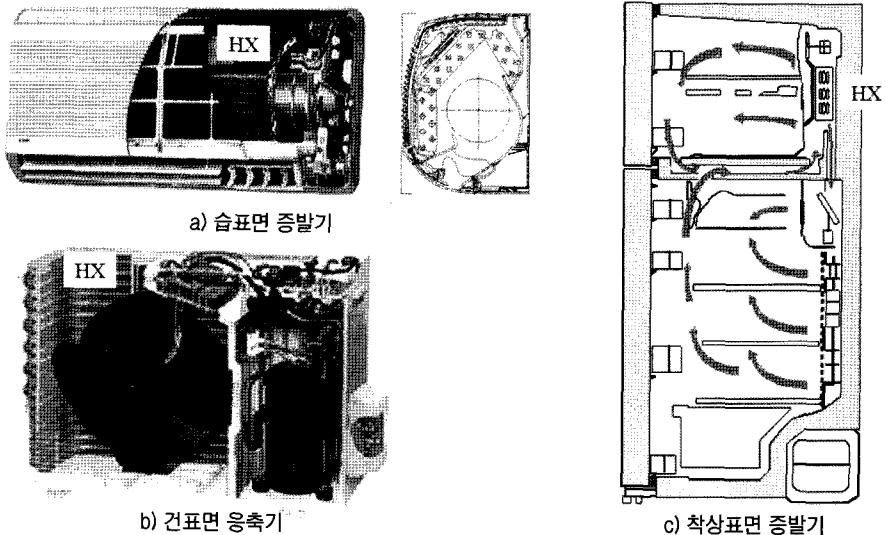
김 만 회 / 편집위원

KAIST 기계공학과(manhoe.kim@kaist.ac.kr)

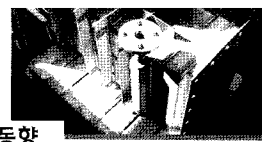
## 머리말

HVAC 시스템에 사용되는 열교환기는 응축기와 증발기로 대별할 수 있다. 응축기의 경우 공기측 표면은 주위공기와 현열에 의해서만 열교환이 이루어지는 건표면 열교환기이다. 증발기의 경우는 열교환기의 공기측 표면의 온도에 따라서 습표면 또는 착상표면 열교환기로 구분할 수 있다. 열교환기의 공기측 표면 온도가 노점온도 이하이고 영상일 경우에는

열교환기 표면에 응축수가 생기고 현열과 잠열에 의하여 열교환이 이루어지는 습표면 열교환기가 된다. 만약, 열교환기의 공기측 표면의 온도가 영하일 경우에는 열교환기의 표면에 착상이 생기는 착상표면 열교환기가 된다. 그림 1에 공기측 표면 특성에 따른 열교환기의 종류를 냉방전용 에어컨과 냉장고에 사용되는 열교환기를 예를 들어 나타내었다. 가정용이나 차량용 냉방전용 에어컨의 증발기로 사용되는 습표면 열교환기는 원하는 공간의 온도는 물론 습도



[그림 1] 공기측 특성에 따른 열교환기의 종류



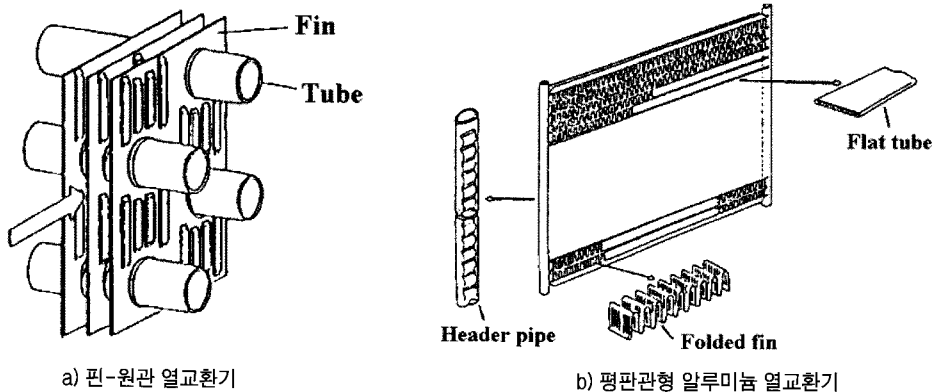
를 동시에 제어하여 쾌적한 실내 공간을 조성하는 중요한 역할을 한다. 냉장고의 증발기나 열펌프의 실외 열교환기(난방모드 운전)와 같은 착상표면 열교환기는 시간에 따라서 착상량이 증가하기 때문에 열교환기의 성능을 일정수준으로 유지하기 위해서는 주기적으로 제상을 해 주어야 한다. 가정용 공조기의 증발기의 경우 주로 핀-원관 열교환기가 사용되고 있으나, 시스템의 소형화와 성능향상을 목적으로 평판관형 알루미늄 열교환기로 대체하기 위한 연구가 진행되고 있다. 열교환기의 공기측 표면에 생기는 응축수 또는 착상은 열교환기의 공기측 성능에 크게 영향을 미치게 되므로, 이에 대한 현상을 이해하고 문제점을 해결하는 것은 대단히 중요하다.

본고에서는 습표면 조건에서의 열교환기 기술의 최근동향에 대하여 기술하고 착상표면 열교환기에 대해서도 간단히 다룬다. 또한, 평판관형 알루미늄 열교환기를 가정용 공조기의 습표면 또는 착상표면 열교환기로 사용하기 위한 연구내용도 소개하기로 한다.

### 습표면 열교환기

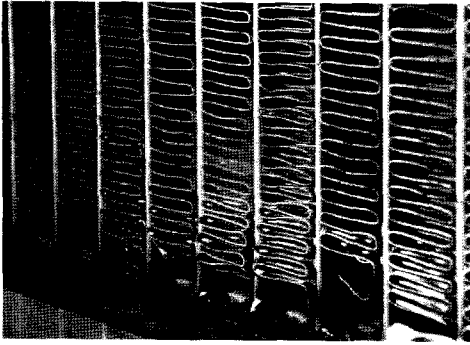
열교환기의 공기측 표면이 입구 습공기의 노점 온도보다 낮아지면 열교환기 표면에 응축수가 생긴다. 표면에 생기는 응축수의 형상은 열교환기의 표면 성질에 따라서 물방울(dropwise), 막(filmwise) 및 혼합형(stripwise)으로 나누어진다. 물방울 형상의 응

축수는 열교환기의 표면이 친수성이 나쁜 경우(hydrophobic)에 생기고 막 형상은 친수성이 좋은 경우(hydrophilic)에 생긴다. 응축수의 원활한 배출에는 막 형상이 유리한 것으로 알려져 있으므로 알루미늄 핀 소재는 친수성 표면처리를 하여 사용되고 있다. 일단 응축수가 열교환기의 표면에 생기면 중력, 모세관력 또는 전단력 등에 의하여 서로 모여져서 열교환기의 핀 사이에 브리지를 형성하거나 열교환기 밖으로 배출된다. 열교환기 표면의 응축수는 열교환기의 공기측 열유동 특성에 영향을 미치고 가정용이나 공조용 증발기로 사용되는 경우에는 실내의 쾌적성에도 크게 영향을 미치게 된다. 그림 2와 그림 3에 핀-원관 열교환기와 평판관형 알루미늄 열교환기(PF type: Parallel Flow type)의 구조와 성능을 비교하여 나타내었다. 그림 3 a)에서 보는 바와 같이 건표면의 경우 평판관형 열교환기의 핀-원관 열교환기에 비하여 압력강하는 작고 열전달계수는 큰 것으로 나타나고 있다. 따라서 자동차에어컨의 응축기와 라디에이터 등으로 사용되고 있는 평판관형 알루미늄 열교환기를 가정용 공조기의 열교환기로 사용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 그러나 그림 3 b)에 나타난 바와 같이 습표면의 경우에 압력강하는 평판관 열교환기가 핀-원관 열교환기에 비하여 크게 나타난다. 평판관 열교환기의 경우는 설치 방향에 따라서도 압력강하가 크게 차이가 나는데, 이는 열교환기 표면에 생긴 응축수의 배출 문제에 기인한다. 따라서 평판관 열교환기를 증발기로

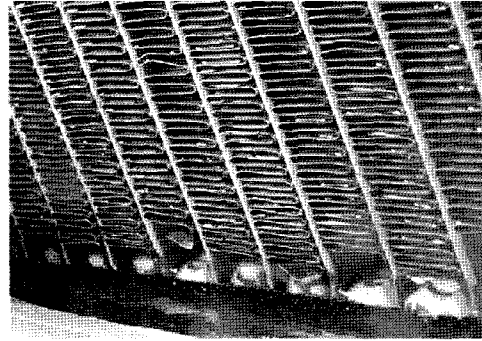


[그림 2] 핀-원관 열교환기와 평판관형 열교환기의 비교



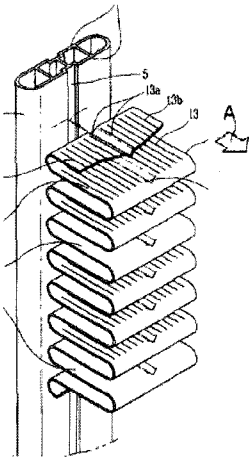


a) 수직 설치

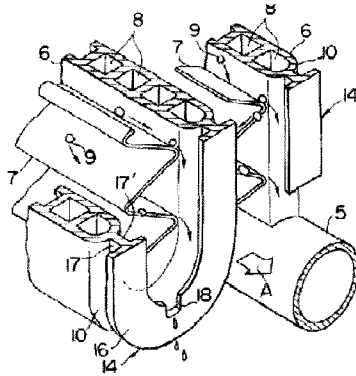


b) 27도 경사설치

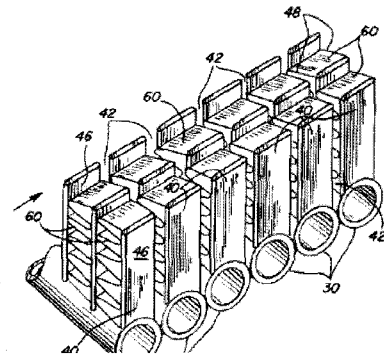
[그림 5] 열교환기 하단부에 모인 응축수



a) US Patent 4,089,188

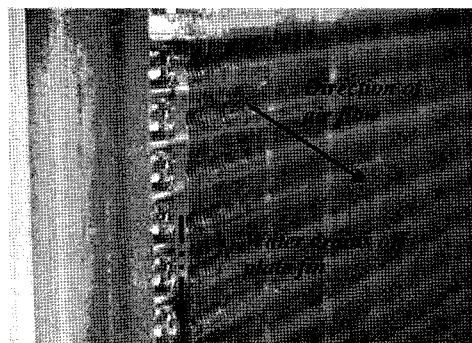
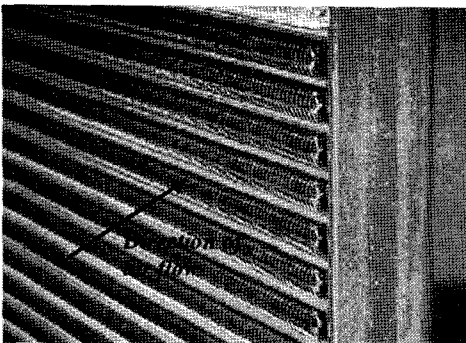


b) US Patent 4,350,025



c) US Patent 5,111,876

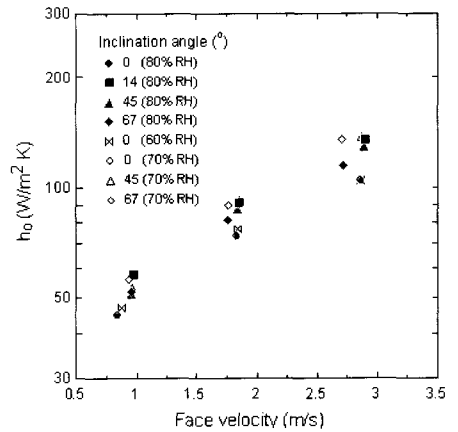
[그림 6] 평판관 열교환기의 응축수 배출 구조



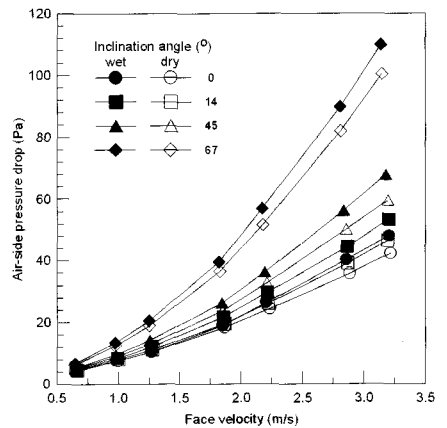
[그림 7] 열교환기의 수평설치시 응축수 배출구조

고여 있는 것으로 관찰되고 있다. 이러한 현상은 루버핀의 상류와 하류 모두에서 나타나고 있는데, 열교환기를 그림 5 b)와 같이 경사지게 설치한 경우에는 루버의 하류부근에서만 나타나고 있다. 열교환기의 하단부에 응축수가 모여서 배출되지 않은 상태로 고여 있는 이유 중의 하나는 열교환기의 하단부에 냉매의 헤더파이프가 존재하여 응축수가 수평으로만 이동이 가능하기 때문일 것이다. 평판관 열교환기에서 응축수의 배출을 원활히 하기 위한 여러 가지 방법이 연구되고 있는데, 그림 6과 그림 7에 몇 가지 사례를 나타내었다. 그림 7의 경우는 열교환기를 수평으로 설치하고 루버핀을 하류 방향으로 냉매관 쪽에 비해 다소 크게 하여 응축수가 공기흐름에 의하여 하류 방향으로 이동된 후 핀을 따라서 흘러내리게 한 구조이다. 실제로 그림 7의 열교환기를 실험한 결과를 보면 응축수가 잘 배출되어 공기측 압력강하와 공기유량에는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 상기와 같은 구조의 열교환기에서 돌출된 부분의 핀의 형상을 평판 또는 꿀의 형상을 사용하면 응축수의 배출을 더욱 용이하게 할 수 있을 것이다.

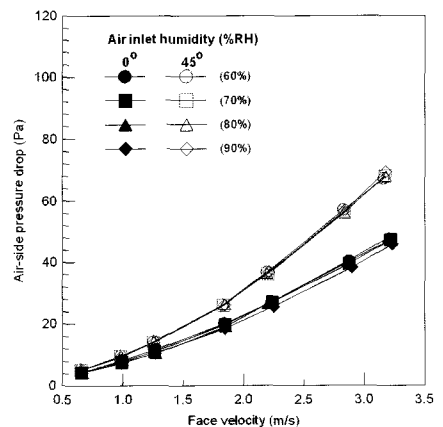
또한, 실제로 자동차 에어컨의 증발기의 경우는 응축수의 원활한 배출과 열교환기의 성능 향상을 위하여 증발기를 경사지게 설치하여 사용하고 있으며, 평판관형 증발기의 경사 설치의 경우에 대한 열교환기의 열유동 특성에 대한 연구가 여러 기관에서 진행되고 있다. 그림 8에 평판관 열교환기의 설치각도와 입구공기의 상대습도에 따른 열전달 계수와 압력강하를 비교하여 나타내었다. 열전달계수는 설치각도에 따라 큰 변화는 없으나 14도의 경사설치시에 열전달계수가 약간 증가 하는 것으로 나타나고 있다. 이는 경사설치시에 앞에서 기술한 바와 같이 응축수의 배출이 수직 설치시에 비하여 잘 되기 때문이다. 그러나 설치 각도가 일정값 이상이 되면 그에 따른 압력강하의 증가와 함께 열전달 계수도 감소한다. 그리고 입구공기의 상대 습도는 열교환기의 열유동 특성에 크게 영향을 주지 않는 것으로 나타나고 있다. 그림에서 압력강하 특성을 살펴보면 습표면의 경우가 건표면보다는 모든 경우에 압력강하가 크고 설치각도에 따라서 증가한다. 또한, 전면 공기 유속이 커질수록 설치 각도에 따른 압력강하의 차이



a) 열전달계수



b) 경사각도 영향



c) 입구습도의 영향

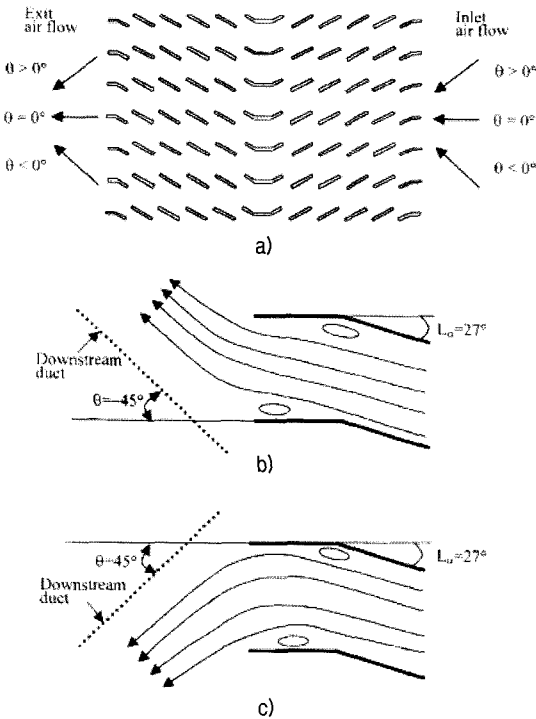
[그림 8] 열교환기의 설치각도와 입구공기 습도의 영향



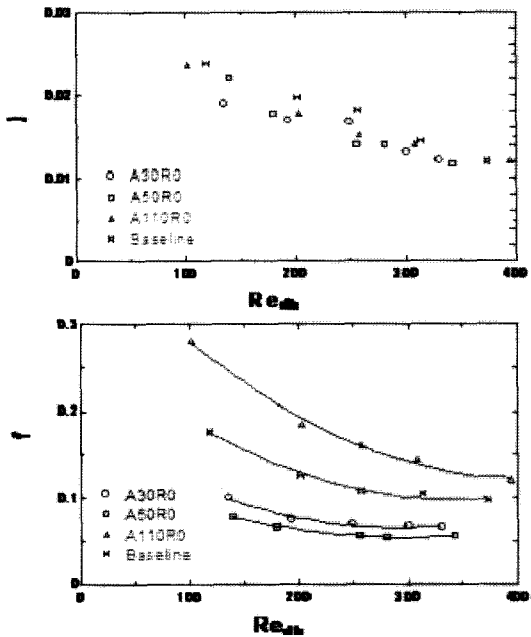
는 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 열교환기의 구조에 따른 적절한 설치 각도를 선정하는 것이 필요하다. 또한, 루버판을 사용하는 평판관 열교환기를 경사지게 설치할 경우에는 열교환기의 열유동특성에 덕트의 영향이 크게 나타날 수 있으므로 유의하여야 한다. 그림 9에서와 같이 열교환기 하류의 루버 방향에 따라서 공기 흐름이 변하게 되는데, 그림 9 b)와 같이 열교환기가 설치된 경우는 루버를 나온 공기가 자연스럽게 덕트를 따라서 이동하게 된다. 그러나 그림 9 c)의 경우와 같이 동일한 열교환기라도 반대로 설치하게 되면 루버를 나온 공기가 덕트로 유입되면서 유동방향이 바뀌게 되어 추가적인 압력강하가 발생하게 된다. 즉, 루버판을 갖는 평판관 열교환기를 덕트내에 경사지게 설치할 경우에는 하류 루버 방향을 고려하여 그림 9 b)와 같이 설치하는 것이 요구된다.

지금까지 기술한 습표면 열교환기의 성능은 실제로 열교환기의 공기측 표면성질에 의하여 크게 영향

을 받는다. 열교환기 표면의 특성은 일반적으로 액적의 접촉각(contact angle)으로 표현한다. 접촉각은 평형상태에서 고체와 액체의 표면장력에 의하여 주로 결정되며, 퍼짐접촉각(advancing contact angle)과 수축접촉각(receding contact angle)을 사용하기도 한다. 그림 10에 접촉각에 따른 열교환기의 열전달 계수와 압력강하 특성을 나타내었는데, 접촉각은 열전달계수(j-factor)에는 큰 영향을 주지 않으나, 압력강하(f-factor)에는 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 즉, 퍼짐접촉각이 130도(A110R0 : 퍼짐접촉각 110도, 수축접촉각 0도)의 경우는 기본 표면(baseline)에 비하여 압력강하가 대단히 크고 퍼짐접촉각이 30도(A30R0)와 50도(A50R0)의 경우는 기본 표면보다 마찰계수가 매우 작게 나타나고 있다. 이와 같이 습표면 열교환기에 사용되는 핀의 소재에 대한 표면 성질은 열교환기의 성능과 실내 쾌적성에 크게 영향을 미치게 된다. 또한, 습표면 열교환기의 경우 열교환기의 표면이 습하기 때문에 곰팡이나 균이 발생할 소지가 크고 냄새도 나게 되므로 표면처리 시에 최근에는 항균처리를 같이 하는 경우가 많



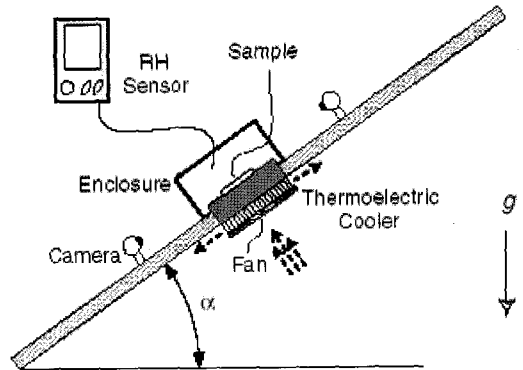
[그림 9] 경사설치시 덕트의 영향



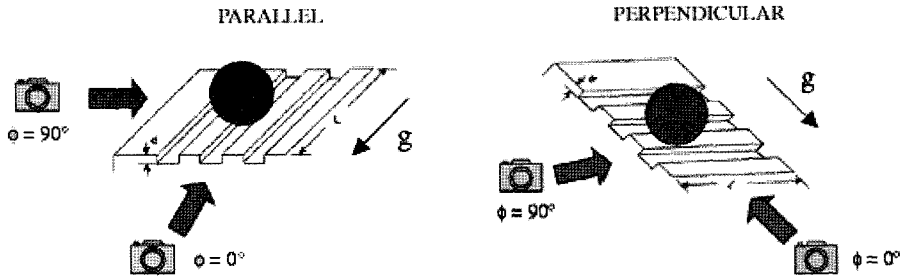
[그림 10] 접촉각에 따른 열전달계수(j)와 마찰계수(f)



a) 에칭표면(microgroove 깊이 : sample 2 = 25  $\mu$ m, sample 3 = 27  $\mu$ m)



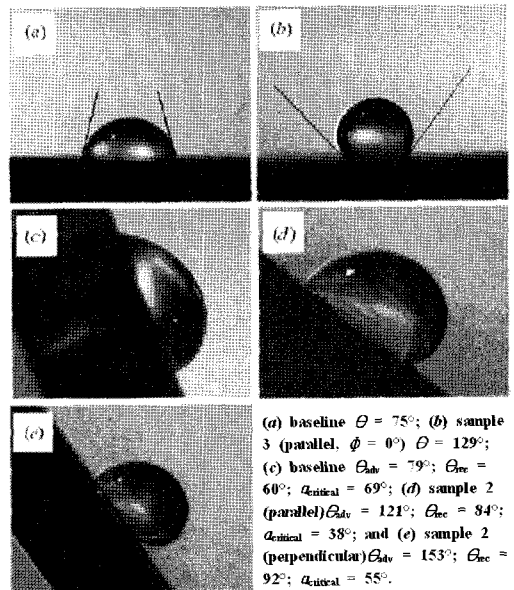
b) 펠티어소자를 이용한 접촉각 측정  
PARALLEL PERPENDICULAR



c) 접촉각 측정시 채널 방향과 중력

[그림 11] 알루미늄 에칭표면과 접촉각 측정

다. 표면처리에 의한 열교환기의 표면 특성은 시간이 지남에 따라서 변화하는데, 이는 열교환기의 온도변화에 의하여 코팅한 표면에 미세한 균열이 발생하고 여기에 이물질 등이 들어가 생긴다. 따라서 표면 특성을 장기간 유지할 수 있는 표면 처리 기술의 개발도 중요하다. 최근에는 표면처리를 통한 표면특성의 개질에는 한계가 있기 때문에 그림 11과 같이 초소형그루브(microgroove)를 표면에 생성시켜 표면특성을 변화시키고자 하는 연구도 진행되고 있다. 그림과 같이 열전소자를 이용하여 그루브의 깊이가 수십  $\mu$ m인 그루브 표면에 응축이 되도록 하고 액적을 그루브와 수평 또는 수직으로 이동하게 하여 측정한 접촉각과 이에 따른 임계직경을 그림 12, 그림 13에 도시하였다. 초소형그루브를 에칭한 표면의 특성이 기존 표면 특성과 크게 차이가 남을 알 수 있는데, 이는 MEMS기술을 이용하면 표면개질을 획기적으로 변화시킬 수 있다는 것을 뜻한다. 이와 함



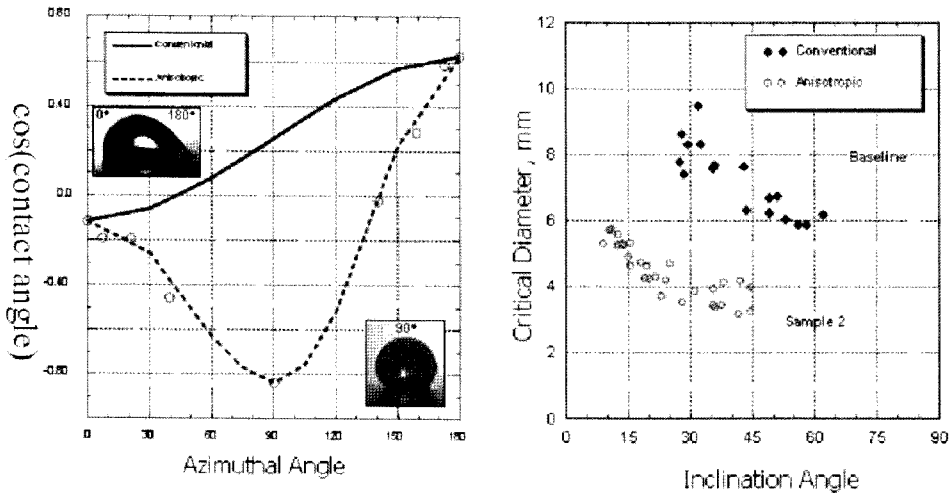
[그림 12] 수평표면과 경사표면에서의 물방울 형상



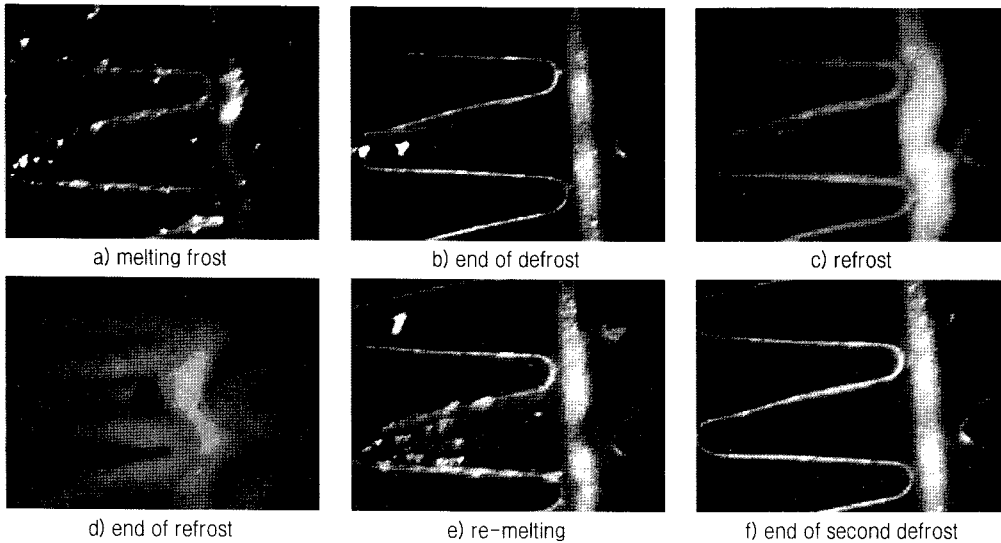
깨 열교환기 표면에 생기는 응축수의 모델 개발, 응축수의 이동 및 배출 현상에 대한 가시화 연구들도 습표면 열교환기의 열유동 특성을 향상시키기 위해 진행되고 있다.

### 착상표면 열교환기

열교환기의 공기측 표면 온도가 영하이고 입구 습공기의 노점온도 보다 낮으면 열교환기의 표면에는 착상이 생기게 된다. 착상 초기에는 착상에 따른 공기측 전열면적의 증대와 표면 거칠기 등으로 인하여 열전달량이 착상직전의 건표면에 비하여 크게 나타난다. 그러나 시간이 지나면서 착상량은 계속 증가하게 되고, 일정시간 후에는 열교환기의 공기통로가



[그림 13] 에칭에 따른 접촉각과 임계직경 (sample 2)

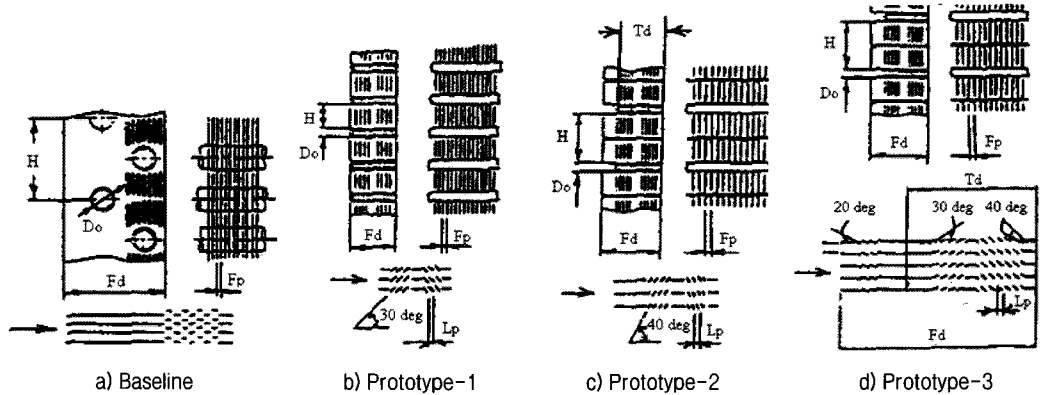


[그림 14] 제상 사이클에 따른 핀 표면 이미지



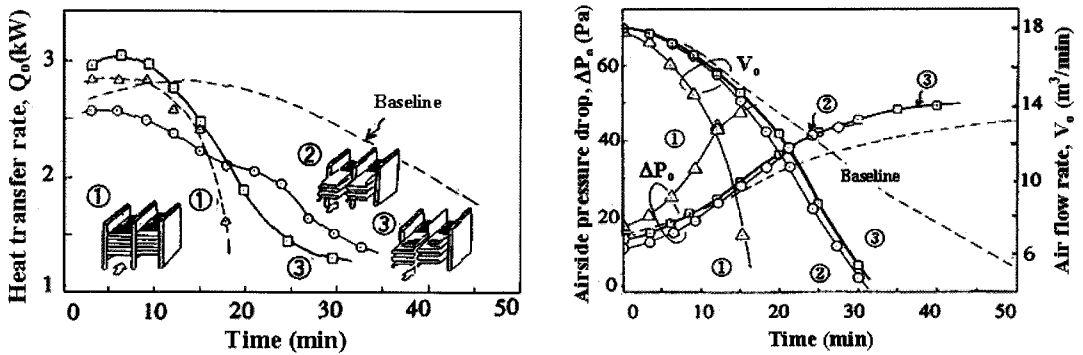
착상에 의하여 부분적으로 막히게 되고 압력강하의 증대와 함께 열교환기의 성능은 감소하게 된다. 이러한 착상에 의한 성능 저하를 완화시키기 위하여 제상운전을 하게 되는데, 제상모드에서는 시스템의 성능은 물론 열펌프의 경우 실내 쾌적성의 저하도

함께 수반된다. 따라서 착상량을 감소시켜 제상주기를 증가시키는 것이 필요하며, 제상모드에는 제상수가 잘 배출될 수 있도록 하는 열교환기의 구조와 표면 처리 기술이 필요하다. 제상모드에 제상수가 잘 배출되지 않으면 제상수가 다시 열교환기 표면에 동



| Items                          | Fin and tube heat exchanger (baseline)                         | Microchannel heat exchangers |                                       |                                       |
|--------------------------------|--|------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|                                |  | Prototype - 1                | Prototype - 2                         | Prototype - 3                         |
| Fin type                       | Plane fin in the front low and offset slit fin in the rear low | Folded louver fin            | Folded louver fin with splitter plate | Folded louver fin with splitter plate |
| Fin height, H (mm)             | 25   | 8.1                          | 16.2                                  | 16.2                                  |
| Fin pitch, $F_p$ (mm)          | 1.6  | 1.4                          | 1.8                                   | 1.5                                   |
| Louver pitch, $L_p$ (mm)       | -  | 1.4                          | 1.2                                   | 1.0                                   |
| Louver angle, $L_\alpha$ (deg) | -  | 30                           | 40                                    | 20, 30, 40                            |
| Tube depth, $T_d$ (mm)         | -  | 20                           | 16                                    | 16                                    |
| Tube diameter, $D_o$ (mm)      | 7.0  | 2.0                          | 3.0                                   | 3.0                                   |
| Flow depth, $F_d$ (mm)         | 31.25  | 20                           | 20                                    | 24                                    |

e) 열교환기 상세 사양



f) 열전달과 압력강하

[그림 15] 열교환기 종류별 착상표면에서의 성능

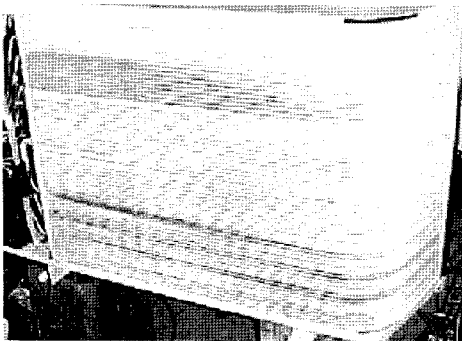


결하게 되고 이는 성예의 밀도나 열전도율 등을 변화시키게 된다(그림 14). 일반적으로 열교환기의 핀 표면을 발수성 처리를 하면 착상이 균일하게 생기게 되어 친수성 표면처리 보다 좋은 것으로 알려져 있다. 그러나 제상수의 원활한 배출을 위해서는 친수성 처리가 유리하므로 이러한 상반되는 결과를 해결하기 위한 연구가 필요하다. 예를 들어 저온에서는 발수성 성질을 고온에서는 친수성 특성을 갖는 표면처리기술이 있다면 이를 해결할 수 있는 하나의 방법이 될 수 있을 것이다. 착상 메커니즘에 대한 상세한 내용은 참고문헌을 참조하기 바라며 여기서는 평판관형 알루미늄 열교환기에 대한 착상조건에서의 성능과 열펌프의 실외기 적용 가능성에 대해 간단히 기술한다.

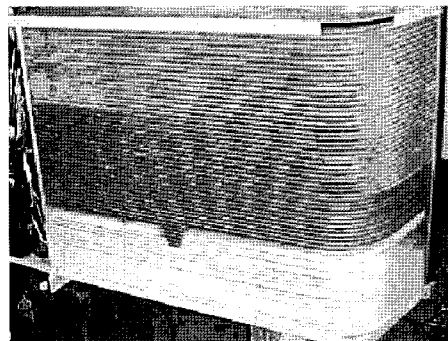
그림 15에 평판관형 알루미늄의 착상조건에서의 성능을 핀-원관 열교환기와 비교하여 각 열교환기의 간단한 형상 및 사양과 함께 나타내었다. 전술한 바와 같이 착상초기의 열전달량은 모든 열교환기에서 착상에 의한 열전달면적의 증가로 시간에 따라서 증가하다가 일정시간 후에 다시 감소한다. 통상적인 평판관형 알루미늄 열교환기의 경우(그림 15 b)에는 시간이 20분 정도 지나면서 열전달량이 핀-원관 열교환기에 비하여 50% 정도 감소하는데, 이는 착상에 의한 공기유로의 막힘으로 인한 압력강하의 증대와 풍량의 감소에 의한 것으로 볼 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 냉매관 사이에 격판을 삽입하고 핀의 일부가 평판관의 앞으로 나오도록

(그림 15 c, d) 유동깊이를 냉매관 깊이보다 크게 함) 하여 핀 효율을 감소시킴으로써 착상량을 감소시키고자 하였다. 그러나 그림 15 f)와 같이 이들 열교환기의 열전달량은 착상초기에는 시간에 따라서 약간 증가하거나 또는 일정하다가 약 20분 후에 핀-원관 열교환기에 비하여 75% 정도 낮게 나타나서, 열펌프의 실외기 열교환기로의 사용은 부적합한 것으로 나타나고 있다.

그림 16과 표 1에 최근에 평판관형 알루미늄 열교환기(MCHEX)를 열펌프의 실외기에 적용하여 수행한 연구결과를 기본시스템(핀-원관 열교환기 적용)과 비교하여 나타내었다. 그림 16 a)에 나타난 착상 시작 30분 후의 착상 분포를 보면 열교환기의 상부 밀 부분에 착상이 되지 않은 영역이 존재하는데, 이는 냉매 분배에 문제가 있음을 나타내는 것이다. 그림 16 b)에는 제상 시작 후 3분 후의 상태를 나타내었는데 열교환기의 상부에서부터 제상이 진행되는 것을 볼 수 있다. 실제로 전체 제상시간은 7분으로 기본 열교환기의 4분에 비하여 약간 길게 나타났으나 착상/제상 주기는 35분 정도로 큰 차이가 없었다. 표 1에는 평판관형 알루미늄 열교환기를 적용한 열펌프의 성능과 특성을 기본시스템과 비교하여 나타내었는데, 냉매 봉입량 41% 저감, 냉방능력/COP 는 8%와 14% 각각 향상되는 효과를 보였다. 난방모드의 경우에는 약간 성능이 저하(난방능력 1%, COP 3%)되는 것으로 나타났으나 제상수는 원활하게 배출 되는 것으로 나타났다. 이러한 성능저



a) 착상시작 30분후



b) 제상운전 3분후

[그림 16] 실외 열교환기의 착상/제상 상태

<표 1> 평판관형 열교환기 적용 열펌프의 성능비교

|                     | Baseline HP  |              | HP with MCHEX   |              |
|---------------------|--------------|--------------|-----------------|--------------|
|                     | Cooling mode | Heating mode | Cooling mode    | Heating mode |
| Refrigerant Charge  | 100          | 100          | -41%            | -41%         |
| Refrigerant feedign | /            | /            | GOOD            | MEDIUM       |
| Refrigerant P       | 0.08         | 0.43         | 0.14            | 0.48         |
| Thermal duty        | 100          | 100          | 8%              | -1%          |
| Power Input         | 100          | 100          | -5%             | 1%           |
| EER/COP             | 100          | 100          | 14%             | -3%          |
| Drainage of water   | /            | OK           | /               | GOOD         |
| Defrosting time     | 4 minutes    |              | about 7 minutes |              |

하의 문제는 앞에서 기술한 바와 같이 냉매의 분배 문제에 기인한다. 그림과 같이 수평으로 열교환기를 설치할 경우 냉매를 분배하는 헤더는 수직방향이 되므로 난방운전시에 냉매가 이상유동으로 들어오게 되면 액냉매와 기상냉매의 밀도차로 인하여 액냉매가 열교환기 하부에 고이게 되어 냉매의 불균일 분배가 일어나게 된다. 평판관 열교환기를 열펌프에 적용하는데 있어서 냉매분배 문제는 응축수의 배출 문제와 함께 해결해야할 가장 중요한 이슈이다.

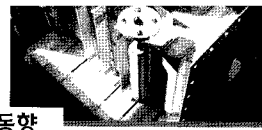
**맺음말**

본고에서는 습표면과 착상표면 조건에서의 열교환기의 특성을 고찰하고 습표면과 착상표면의 평판관 열교환기 기술에 대한 최근 동향에 대해 기술하였다. 평판관형 알루미늄 열교환기는 가볍고 소형화가 가능하여 현재 자동차 에어컨의 응축기와 라디에이터 등의 건표면 열교환기로 많이 사용되고 있는데, 습표면 또는 착상표면 열교환기로 사용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 평판관형 열교환기를 습표면 열교환기로 사용하기 위해서는 응축수가 잘 배출되는 형상설계와 표면처리 기술 및 헤더에서의 냉매분배 문제를 해결하는 것이 선행되어야 한다. 또한 착상표면 열교환기로 사용하기 위해서는 착상에 의한 성능저하와 제상수의 배출 문제 등이 동시에 해결되어야 한다. 평판관형 알루미늄 열교환기는 기존의 핀-원관 열교환기에 비하여 냉매봉입량을 40% 정도 저감할 수 있고, 재료비 자체도 상대적으로 낮기 때

문에 상기에서 제기한 몇 가지 문제가 해결된다면 습표면 또는 착상 표면 열교환기로의 사용도 가능할 것이다.

**참고문헌**

1. M.-H. Kim, S. Y. Lee, S. S. Mehendale, R. L. Webb, "Microchannel heat exchanger design for evaporator and condenser applications," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 37, pp. 297-429, 2003.
2. Y.-G. Park, "Predicting the air-side thermal-hydraulic performance characteristics of flat-tube louver-fin heat exchangers under dry and wet conditions," Ph. D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2007.
3. D. Hantz, G. Gulyas, A. Bensafi, and K. B. Mercer, "Demonstration of a microchannel heat exchanger for operation in a reversible heat pump system," *Proc. of 8th IEA Heat Pump Conference*, 2005.
4. A. D. Sommers and A. M. Jacobi, "Creating micro-scale surface topology to achieve anisotropic wettability on an aluminum surface," *J. of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 1571-1578, 2006.
5. A. Elsherbini and A. M. Jacobi, "A model for condensate retention model on plain-fin heat



- exchangers," J. of Heat Transfer, Vol. 128, No. 5, pp. 427-433, 2006.
6. J. Min and R. L. Webb, "Condensate carryover phenomena in dehumidifying, finned-tube heat exchangers," Exp. Thermal Fluid Sci., Vol. 22, pp. 175-182, 2000.
7. Y. Hayashi, A. Aoki, S. Adachi, and K. Hori, "Study of frost properties correlating with frost formation types," J. of Heat Transfer, Vol. 99, pp. 239-245, 1977.
8. Y. Xia, Y. Zhong, P. S. Hrnjak, and A. M. Jacobi, "Frost, defrost, and refrost and its impact on the air-side thermal-hydraulic performance of louvered-fin, flat-tube heat exchangers," Int. J. of Refrigeration, Vol. 29, No. 7, pp. 1066-1079, 2006. 