

## 착상을 수반한 핀-관 열교환기의 성능평가계수에 관한 연구

최 봉 준<sup>†</sup>, 황 준 현, 신 중 민

LG전자 디지털 어플라이언스 사업본부연구소

### The Study of Performance Evaluation Coefficient of Fin-and-Tube Heat Exchangers with Frosting

Bong-Jun Choi<sup>†</sup>, Jun-Hyun Hwang, Jongmin Shin

Digital Appliance Company Research Lab., LG Electronics, Changwon 641-711, Korea

(Received June 20, 2002; revision received January 10, 2003)

**ABSTRACT:** For the study of performance evaluation on different shape heat exchangers that have the same energy consumption in a refrigerator, we make performance evaluation coefficient (PEC) which can distinguish performance of different shape heat exchangers. The results were reported in order to compare with for the dry frosting and wet frosting test as various definition of PECs. Results showed that PEC of dry frosting test is higher than that of wet frosting test because attached water droplet increases pressure drop of air-side then this decreases performance of heat exchanger.

**Key words:** Fin-and-tube heat exchanger(핀-관 열교환기), Performance evaluation coefficient (성능평가계수), Discrete(단절형), Straight(일체형), Dry frosting test(건조표면 착상실험), Wet frosting test(습표면 착상실험)

| 기 호 설 명   |                              |                      |                           |
|-----------|------------------------------|----------------------|---------------------------|
|           |                              | $V_c$                | : 열교환기 전면 공기속도 [m/s]      |
|           |                              | $t$                  | : 온도 [°C]                 |
| $A$       | : 면적 [m <sup>2</sup> ]       |                      |                           |
| $c_p$     | : 비열 [kJ/kg · °C]            |                      | 그리스 문자                    |
| $f$       | : 압력강하계수                     |                      |                           |
| $h$       | : 열전달계수 [W/m <sup>2</sup> K] | $\Delta$             | : Difference              |
| $j$       | : Colburn factor             | $\rho$               | : 밀도 [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $\dot{m}$ | : mass flow rate [kg/s]      |                      | 하첨자                       |
| $P$       | : 압력 [Pa]                    |                      |                           |
| $PEC$     | : 성능평가계수                     | $a$                  | : 공기                      |
| $Pr$      | : Prandtl 수                  | $c$                  | : 냉매                      |
| $Q$       | : 열전달량 [kW]                  | <i>Dimensionless</i> | : 무차원                     |
| $V$       | : 열교환기 체적 [m <sup>3</sup> ]  | <i>Discrete</i>      | : 단절형                     |
|           |                              | $i$                  | : 입구                      |
|           |                              | $n$                  | : 노즐                      |
|           |                              | $o$                  | : 출구                      |
|           |                              | <i>Straight</i>      | : 일체형                     |

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-55-260-3828; fax: +82-55-260-3507

E-mail address: choibj@lge.com

1. 서론

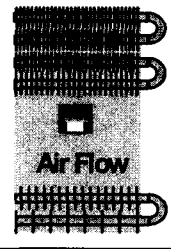
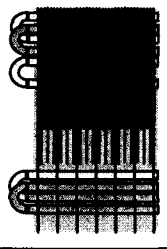
최근 지구온난화 등에 따른 지구환경보호가 세계적인 과제로 대두되면서 가전제품의 에너지소비효율 규제가 본격화되었고, 이에 에너지소비 규제에 대처하기 위한 냉동기기의 설계기술개발이 국내외적으로 활발하게 진행되고 있으며, 특히 냉동기기의 주요 구성요소 중의 하나인 열교환기의 기술개발에 관해서 소형화, 고효율화 등에 많은 연구가 진행되었다.<sup>(1,2)</sup> 하지만 열교환기의 성능향상을 위해 오랜 연구의 결과로 표면처리나 형상변경 등의 복잡성 등으로 상대적으로 열교환기의 성능평가에 많은 어려움이 있어 왔다. 특히 냉장고 증발기 설계에 있어서는 공조기용 증발기와는 다르게 그 특성상 영하의 온도에서 작동하므로 그 표면에 착상이 발생하게 되며, 냉장고 운전조건 및 부하특성에 의해 그 착상이 계속적으로 성장하게 되므로 어떻게 그 증발기를 평가할 것인가가 매우 중요한 문제로 대두되었다. 또한, 기존의 대부분의 논문들에서는 공조기용 증발기와 같은 방법으로 열교환기 표면이 건조한 초기상태(Dry frosting test)에서 성능을 평가하여 냉장고용 증발기를 평가하거나<sup>(3,4)</sup> 착상을 고려한 경우에도 착상이 발생했을 때 나타나는 제반 특성에 대하여서는 많은 논의가<sup>(4-6)</sup> 있었지만 서로 다른 증발기, 즉 서로 다른 형상을 가지는 증발기에 대해서는 단순히 증발기의 열전달계수나 압력강하만을 비교 평가함으로써 총체적으로 그 성능을 비교 평가하는 데는 한계가 있어 왔고, 전반적으로 착상을 수반한 냉장고용 증발기를 어떻게 평가할 것인가에 대한 연구는 제한적이었다. 따라서 본 연구에서는 서로 다른 두 가지 형상의 열교환기를 가정용 전기냉장고에 부착하여 KS 규격<sup>(7)</sup>에 따라 소비전력량 시험을 하였을 경우 동등한 소비전력량을 보이도록 설계하여 간단한 단품으로 성능실험을 수행하여 그 결과를 다양한 성능평가계수에 따라 비교 평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 열교환기 시료

본 연구에서는 Table 1과 같이 서로 다른 형상의 핀-관 열교환기로 실험을 하였다. 열교환에 가

Table 1 Two types of fin-and-tube heat exchangers

|        |  |   |
|--------|--|---|
| Figure |  |  |
| Type   | Discrete   | Straight  |

장 많이 사용되는 핀-관 열교환기는 공기측 열전달계수가 관내측 열전달계수보다 작으므로 공기측  $hA$  값을 증가시키는 것이 열교환기 성능향상에 있어서 대단히 중요하며 이러한 성능향상은 여러 가지 요인에 의하여 이루어지지만 중요한 인자는 핀피치, 핀형상, 핀효율 등에 있으며 이에 따라 본 연구에서는 핀의 형상을 단절형(Discrete)과 일체형(Straight)으로 열교환기를 제작하였고, 그 특징으로 단절형은 관의 각 열수에 각각의 핀이 형성되고 일체형의 핀은 다수의 열수에 하나의 핀으로 형성되어 있다. 단절형의 열수는 2단 21개, 일체형의 열수는 2단 13개이며 두 열교환기는 관의 외경이 8mm로 알루미늄으로 제작되었다.

2.2 실험장치 및 실험방법

Fig. 1는 본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도이다. 열교환기 표면이 건조한 상태에서 실시

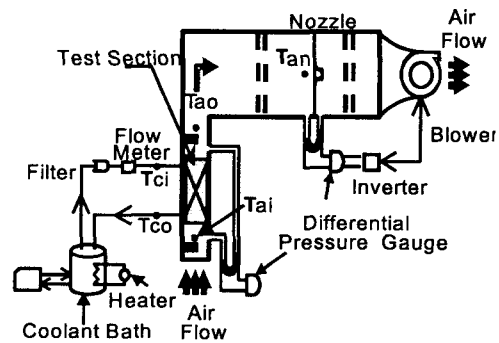


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

되는 실험(Dry frosting test)은 보여지는 실험장치의 테스트부(test section)에 열교환기를 설치하여 항온조 온도와 공기 입구온도 및 습도가 정상 상태에 도달하면 착상시험을 시작한다. 입구공기의 시험조건은 히터와 가습기를 이용하여 건구온도 5℃, 상대습도는 90%로 관리하였고, 항온조 온도와 냉매유량은 -30℃, 126 kg/hr로 고정하여 열교환기 내로 순환시켰으며 입구공기 체적유량은 1.5 m<sup>3</sup>/min로 하여 60분간 착상을 진행하였다. 실제 냉동사이클에서는 착상과 제상의 과정을 순환하면서 열교환기 표면에 제상수가 존재하고 다시 착상이 되는데 이를 고려한 습표면 실험은 건표면 실험 후 제상히터를 사용하여 표면에 부착된 서리를 녹인 후 표면에 부착된 물방울이 중력에 의해 떨어지지 않는 일정한 수렴상태에 도달했을 경우 건표면 실험과 동일한 순서에 의해 습표면 상태에서 착상을 실험하였다.

3. 실험결과 및 고찰

실험장치의 전체적인 정확성을 평가하기 위하여 중요 측정항목인 냉매측 열전달량, 공기풍량, 그리고 공기측 현열열전달량에 대해서 불확실도(uncertainty)를 평가하여 본 실험의 실험장치의 불확실도는 ±8%이었다.

3.1 성능평가계수(PEC)

본 연구에서는 실제 냉장고에서 동일한 성능을 가지는 형상이 서로 다른 핀-관 중발기에 대해 성능을 어떻게 비교 평가할 것인지 각각 건조한 상태에서 착상을 시키는 실험과 습표면에서 착상을 시키는 실험을 실시하였다. 일반적으로 열교환기의 성능은 식(1), 식(2)와 같이 정의된 무차원 값인 압력강하계수인  $f$ 와 열전달계수인 Colburn  $j$  factor<sup>(8)</sup>의 비로 표시되나 계산절차가 매우 복잡하고, 또한 복잡한 형상의 열교환기의 경우 Reynolds 수의 정의가 어려운 점이 있다.

Table 2 Definition of performance evaluation coefficient

| Sort       | PEC1                 | PEC2                          | PEC3                     | PEC4                       | PEC5                   |
|------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------|
| Definition | $\frac{Q}{\Delta P}$ | $\frac{Q/\Delta T}{\Delta P}$ | $\frac{Q}{\Delta P m_a}$ | $\frac{Q/V}{\Delta P m_a}$ | $\frac{Q/V}{\Delta P}$ |

$$f = \frac{\Delta P}{2\rho V_c^2} \tag{1}$$

$$j = \frac{hPr^{2/3}}{\rho c_p V_c} \tag{2}$$

따라서 열교환기의 성능수준을 손쉽게 구별할 수 있으며 단품의 실험으로 실제 사이클에서도 열교환기의 성능을 구별할 수 있는 성능계수 개발에 대해 논하고자 한다. Table 2는 본 연구에 사용된 다양한 성능계수의 정의이다. PEC1의 경우  $j/f$ 의 개념을 가장 손쉽게 대변하는 형태이며 PEC2은 UA의 개념을 이용한 성능평가계수이다. PEC3은 PEC 예측의 주인자인 공기측 질량유량을 고려하여 열교환기의 성능을 대표할 수 있는 것으로 판단되어진다. PEC4와 PEC5는 PEC1과 PEC3에서 체적(volume)의 개념을 도입하여 열교환기의 소형화(compactness)를 고려한 PEC이다.

3.1.1 성능평가계수 비교

Fig. 2는 식(3)과 같이 서로 다른 형상의 일체형 열교환기와 단절형 열교환기의 PEC의 비로 정의된 각각의 무차원 PEC에 대해 시험종료시점이 60분의 결과를 도시한 것이다.

$$PEC_{dimensionless} = \frac{PEC_{Discrete}}{PEC_{Straight}} \tag{3}$$

$PEC_{dimensionless}$ 가 “1”이라는 것은 단절형과 일체형 열교환기의 PEC가 같다는 것을 의미한다. 실제 냉장고에 부착했을 때 동일한 소비전력을

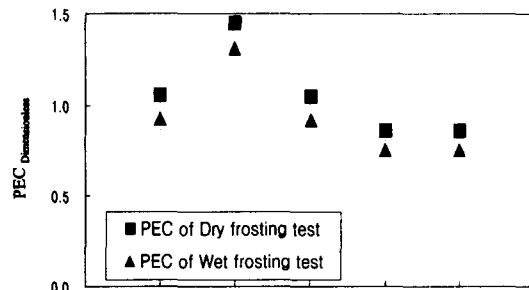


Fig. 2  $PEC_{dimensionless}$  according to various definitions of PEC for dry & wet frosting tests.

Table 3 Merits and demerits of each definition of PEC

|      | Merits   | Demerits  |
|------|--|---|
| PEC1 | Simplest expression in the form of $j/f$                                 | Omission of air mass flow rate that is one of main parameters in PEC                          |
| PEC2 | Introduction of overall heat transfer coefficient                        | Higher prediction of performance of discrete than that of straight on same energy consumption |
| PEC3 | Introduction of air mass flow rate that is one of main parameters in PEC | Bad prediction of performance for dry surface   |
| PEC4 | Introduction of heat exchanger volume concept in PEC3                    | Lower prediction of performance of discrete than that of straight on same energy consumption  |
| PEC5 | Introduction of volume concept in PEC1                                   | Effect of shape and increase of area unconsidered   |

가지는 형상이 다른 두 열교환기에 대해 다양한 PEC의 정의에 따라 비교한 결과 PEC1과 PEC3의 경우가  $PEC_{dimensionless}$ 가 "1"에 근접하여 각각의 열교환기에 대해 동일한 성능을 나타내고 있다. 또한 Fig. 2에서 전체적으로 건표면에서 무차원 PEC가 습표면의 무차원 PEC보다 높게 나타나고 있는데 이것은 습표면에서는 열교환기 표면에 부착된 물방울로 인하여 단절형 열교환기의 형상의 특성상 각각의 끝단에 물방울이 맺히게 되는데 이것이 재착상 되면서 공기측 압력손실을 가져오게 되어 상대적으로 핀의 끝단이 작은 일체형의 열교환기에 비해 성능이 떨어지는 것으로 판단되어진다. Table 3은 각 PEC의 정의에 대해서 장단점을 분석비교한 것이다.

3.1.2 온도와 시간에 따른 PEC의 변화

Fig. 3은 실제 냉동시스템의 운전조건과 유사한 습표면의 착상조건에서 시간에 따른 PEC3의 추이과정을 단절형 열교환기에 대해서 나타내고 있

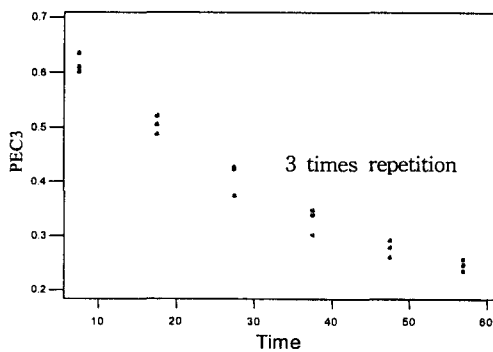


Fig. 3 PEC3 of discrete type according to test time.

다. 착상이 진행됨에 따라 PEC3은 시간에 따라 감소하게 되는데 이는 상대적으로 열전달량의 감소보다는 공기측 압력손실이 빠르게 증가하기 때문이다. PEC3은 초기 30~40분까지는 감소하는 기울기가 크지만 그 이후에는 완만한 감소를 보이는데 이것은 초기에 착상이 빠르게 진행되면서 열교환기 양단의 압력손실이 크지만 어느 정도 시간이 흐른 뒤에는 압력강하의 증가폭이 둔화에 의한 것으로 판단되어진다.

Fig. 4은 습표면에 착상이 발생할 때 온도변화에 따른 일체형 열교환기의 성능을 시간에 따라서 PEC3에 대해서 나타낸 그림이다. 공기측 입구온도가 14°C인 경우 5°C보다 PEC가 낮으며 또한 기울기가 급격하게 감소하고 있다. 이것은 열교환기에 보다 따뜻한 공기의 유입으로 착상이 빠르게 성장하여 공기측 압력손실이 보다 빨리 증가하여 PEC의 감소가 급격하게 일어날 뿐만 아니라 과도한 착상에 의해서 열교환기의 성능도 또한 떨어진다. 공기측 입구온도가 14°C의 경우

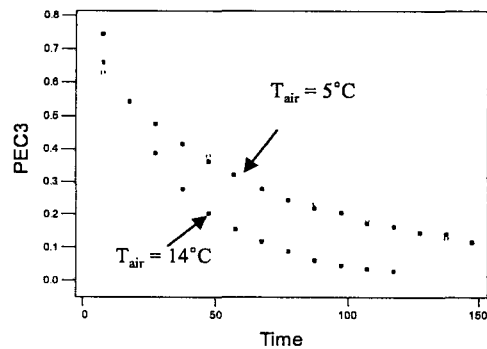


Fig. 4 PEC3 of straight type according to test time for air inlet temperature.

50분을 전후로 기울기가 완만하게 변하는 반면, 5°C의 경우는 80분을 전후로 PEC가 수렴을 보이고 있다. 이것은 열교환기 표면에 착상이 발생할 때 시간의 경과에 따라 서리의 두께는 핀피치의 길이만큼 성장하게 되고 이때가 공기측 압력손실의 최고치에 도달하게 된다. 그래서 과착상이 발생하게 되는 조건에서는 그만큼 빨리 열교환기의 성능이 떨어지고 또한 공기측 압력손실이 최고치에 도달하는 시간이 짧기 때문에 열교환기 성능 곡선의 기울기도 빨리 수렴하게 된다.

#### 4. 결 론

동등한 소비전력량을 가지는 형상이 다른 각각의 열교환기의 성능평가를 위해 정의된 다양한 PEC에 따른 실험결과, 다음과 같이 결론지을 수 있다.

(1) 정의된 PEC 중 PEC1과 PEC3이 동일한 소비전력량을 가지는 형상이 다른 두 열교환기의 성능을 동일하게 평가하고 있으며 시간과 온도의 변화에 따른 PEC의 추이과정도 상관계수가 0.9 이상으로 실험결과와 잘 일치하여 성능평가계수로 적합하다고 판단되어진다.

(2) 실제 냉장고에서 대표적인 성능 중의 하나인 소비전력량을 예측할 수 있는 PEC의 개발로 증발기 단품실험을 통해 형상이 다른 열교환기의 성능을 예측할 수 있다.

#### 참고문헌

- Jacobi, A. M. and Shah, R. K., 1988, Air-side Flow and Heat Transfer in Compact Heat Exchangers: a Discussion of Enhancement Mechanisms, Heat Transfer Engineering, Vol. 19, No. 4, pp. 1-13.
- Webb, R. L., 1988, Advances in air-cooled heat exchanger technology, Proceedings of Int. Conference on Heat Exchanger for Sustainable Development, Lisbon, Portugal, pp. 677-692.
- Aoki, K. and Sawada, M., 1988, Characteristics estimation of heat exchanger operating with frosting, Thermal Science & Engineering, Vol. 6, No. 1, pp. 99-104.
- Stoecker, W. F., 1957, How frost formation on coils affects refrigeration systems, Refrigerating Engineering, Vol. 65, No. 2, pp. 42-46.
- Aoki, K., Hattori, M. and Itoh, T., 1986, A study of extended surface heat exchanger with frosting, Bulletin of JSME, Vol. 29, No. 251, pp. 1499-1505.
- Rite, R. W. and Crawford, R. R., 1991, A parametric study of the factors governing the rate of frost accumulation on domestic refrigerator-freezer finned-tube evaporators coils, ASHRAE Transactions, Vol. 97, No. 2, pp. 438-446.
- Korean Standards, An electric refrigerator and freezer, C9305-1995, Appendix 3 Test of energy consumption.
- Webb, R. L. and Shah, R. K., 1983, Compact and Enhanced Heat Exchangers, in Heat Exchangers: Theory and Practice, ed., Taborek, J., Hewitt, G. F. and Afgan, N., Hemisphere, Corp., Washington D. C., pp. 425-468.