

핀의 전도 열전달 및 과열도 변화에 따른 증발기 성능 특성에 관한 연구

최종민[†], 김용찬^{*}

국립 한밭대학교 기계공학과, ^{*}고려대학교 기계공학과

Effects of Fin Conduction and Superheat Unbalance on the Performance of an Evaporator

Jong Min Choi[†], Yongchan Kim^{*}

Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

^{}Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea*

(Received July 13, 2004 ; revision received December 28, 2004)

ABSTRACT: An experimental investigation was executed to determine the capacity degradation due to fin conduction and non-uniform refrigerant distribution in a multi-path evaporator with cross-counter flow. The finned-tube evaporator, which had a three-path and three-depth-row, was tested by controlling inlet quality, exit pressure, and exit superheat for each refrigerant path. The capacity reduction due to superheat unbalance between each path was as much as 25% for non-cutting evaporator, even when the overall evaporator superheat was kept at a target value of 5.6°C. It indicates that the internal heat transfer within the evaporator assembly causes the partial capacity drop. The capacity of cutting-evaporator with respect to non-cutting evaporator was enhanced according to the increment of air flow rate when superheat or superheat unbalance increased.

Key words: Superheat(과열도), Multi-path(다중패스), Fin conduction (핀-전도), Cutting-evaporator (커팅 증발기), Non-cutting evaporator (비커팅 증발기)

기 호 설 명

그 리 스 문 자

h : 엔탈피 [J/kg]

ρ : 밀도 [kg/m³]

\dot{m} : 질량유량 [kg/s]

Q : 공기 풍량 [m³/s]

하첨자

q : 열량 [W]

a : 공기

in : 입구

out : 출구

r : 냉매

[†] Corresponding author

Tel.:+82-42-821-1731; fax:+82-42-821-1587.

E-mail address: jmchoi@hanbat.ac.kr

1. 서론

대부분의 증발기는 압력손실을 줄이면서 효율적인 열전달을 위하여 다중 유로(multi-path)로 설계되고 있다. 팽창장치에서 토출된 2상 상태의 냉매는 분지관을 통하여 증발기의 각 유로로 공급되며, 증발기 출구에서 각 유로는 합쳐지고 송과열도는 팽창장치를 이용하여 조절된다. 증발기의 각 유로에 흐르는 냉매유량의 최적화를 통하여 열교환기의 열전달계수와 압력강하를 최적으로 유지할 수 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 압축기의 신뢰성 측면에서 증발기 출구 냉매는 과열상태로 유지되며, 냉매의 과열 영역에서는 열전달 성능이 저하되고, 증발기 출구측의 핀 온도는 냉매 입구의 핀보다 높은 온도를 갖고 핀을 통한 전도열전달로(이후 핀-전도) 인하여 냉매간의 열전달이 존재한다.

Liang et al.⁽³⁾은 증발기의 입구에서 공기속도의 분포가 균일한 경우에 각 냉매 유로를 최적화한다면 열교환기의 면적을 5%가량 감소시킬 수 있다는 결론을 얻었다. Lee et al.⁽⁴⁾은 냉매 유로와 입구 공기의 속도 분포에 대한 수치해석적 연구를 수행하였으며, 불균일한 공기속도의 분포에 따른 성능의 변화가 불균일한 냉매의 분포에 따른 변화보다 크게 나타난다는 연구결과를 얻었다.

대부분의 증발기의 핀에 관한 연구는 주로 핀 형상, 핀 간격 등에 대하여 수행되었으며, 다중 유로에서 각 개별 과열도 변화 및 핀-전도에 관한 연구는 매우 부족하다. 본 논문에서는 3개의 다중 유로를 갖는 증발기에 대하여 각 유로 출구에서 냉매 과열도의 불균형에 따른 증발기의 성능 변화 및 핀-전도에 따른 증발기의 성능 변화에 관한 실험적 연구를 수행하였다.

정이라는 가정 하에 설정하였다. 팽창장치 입구 압력은 압축기 회전수와 응축기의 2차 유체 온도와 유량을 변화시켜 조절하였으며, 과냉도는 응축기 출구에 있는 과냉기의 2차 유체 온도와 유량 변화를 통하여 제어하였다.

Fig. 2는 본 연구에 사용한 증발기의 구조를 나타낸다. 증발기는 3열 3패스의 구조를 갖는다. 각 냉매 유로는 수직으로 평행하게 설계되었으며 공기와는 대향류의 유동을 갖는다. 냉매 유로의 입구마다 개별적인 수동 팽창밸브를 설치하여 각 유로 출구의 과열도를 임의로 조절할 수 있도록 구성하였다. 증발기의 출구에서 각 유로가 합쳐진 뒤에 압력조절밸브를 이용하여 증발압력을 조절하도록 하였다.

증발기 출구의 과열도 변화에 따른 증발기에서의 핀-전도 영향을 고찰하기 위하여 튜브 각 열사이의 핀을 절개한 열교환기(이후 커팅 증발기)와 연속핀에 대한 열교환기(이후 비커팅 증발기)를 제작하여 실험을 수행하였다. 커팅 증발기와 비커팅 증발기는 Fig. 2의 각 열사이의 점선

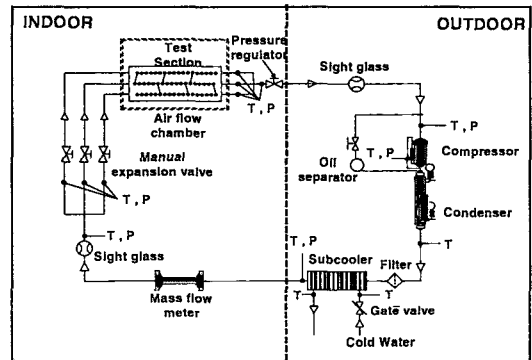


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup.

2. 실험장치 및 실험 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 3개의 다중 유로를 갖는 증발기 출구의 과열도 변화에 따른 성능 및 핀-전도 특성을 측정하기 위한 실험장치의 개략도를 나타낸다. R-22를 냉매로 사용하였으며, 실험장치는 증발기 입구조건과 출구조건을 쉽게 조절할 수 있도록 설계하였다. 증발기 입구조건은 팽창장치 입구의 압력과 과냉도 조절을 통하여 팽창장치가 단열과

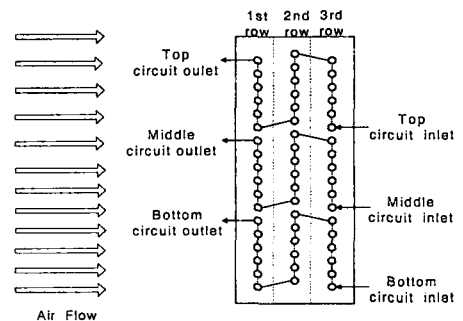


Fig. 2 Schematic diagram of an evaporator.

으로 나타낸 곳의 핀 절개 여부를 제외하고는 모두 동일한 형태를 갖는다.

냉매유량은 코리올리 형태의 질량유량계를 사용하여 측정하였으며, T형 열전대와 압력계를 이용하여 실험장치의 주요 위치에서 온도 및 압력을 측정하였다. 증발기에 유입되는 공기측 풍량 및 열량은 ANSI/ASHRAE 규격⁽⁵⁾에 따라 제작한 항온항습실에서 ANSI/AMCA 규격⁽⁶⁾에 따라 풍동을 설치하여 측정하였다.

2.2 실험조건 및 실험 방법

증발기 입구 공기의 건구온도를 26.7℃로 고정하고, 이슬점 온도(dew point temperature)를 4.7℃ 이하로 유지하면서 건코일(dry coil) 시험을 실시하였다. 습코일 시험은 26.7℃의 건구온도와 50.3% 및 70.4%의 상대습도 조건에서 수행하였다. 증발기 입구 엔탈피는 응축온도 48.9℃와 과냉도 8.3℃에서의 엔탈피와 동일한 값을 얻을 수 있도록 설정하였으며, 증발기의 출구는 7.2℃에 해당하는 포화압력을 갖도록 조절하였다.

증발기 출구에서 각 유로에 대한 개별 과열도와 모든 유로가 합쳐진 상태에서 총 과열도를 모

두 변화시키며 실험을 실시하였으며, 각 과열도의 조합 및 실험조건을 Table 1에 나타내었다.

2.3 열량 계산

실험으로부터 얻은 온도, 압력, 유량 등의 데이터를 이용하여 증발기의 공기측 열량(식(1)) 및 냉매측 열량(식(2))을 계산하였다. 공기의 풍량은 풍동의 노즐 차압 및 공기의 상태량을 이용하여 계산하였으며, 공기의 엔탈피는 건구온도와 이슬점 온도를 이용하여 계산하였다. 냉매측 엔탈피는 측정된 온도 및 압력을 REFRPOP⁽⁷⁾에 적용하여 계산하였다.

$$q_a = \rho Q_a (h_{a,in} - h_{a,out}) \quad (1)$$

$$q_r = \dot{m}_r (h_{r,out} - h_{r,in}) \quad (2)$$

공기측 열량과 냉매측 열량은 $\pm 4.6\%$ 이내에서 서로 일치하였으며, 공기측 열량은 3.2% 이내의 불확실성을 나타냈다.

3. 결과 및 고찰

3.1 과열도 변화에 따른 성능 특성

증발기를 통과한 냉매는 압축기로 들어가게 되므로 증발기 출구의 냉매는 과열상태를 유지하여야 한다. Fig. 3은 다중 유로 증발기에서 각각의 유로가 5.6℃, 16.7℃의 과열도로 조절될 때 풍량 변화에 따른 비커팅 증발기의 냉방용량을 나타낸다. 풍량이 증가함에 따라 공기측 열전달계수가 증가하여 증발기의 냉방용량이 증가하였다. 모든 풍량에 대하여 과열도가 낮을 때 냉매측의 열교환 효율이 증가하고, 증발기 출구 영역의 냉매와 공기와의 온도차이가 커서 과열도가 큰 경우에 비하여 높은 냉방용량을 나타냈다.

다중 유로증발기에서 각 유로를 통과하는 냉매유량은 곡관부의 형상, 배관의 저항 차이 및 배관 분배기의 불균일 분배 등의 요인으로 인하여 각기 다르게 나타난다.⁽³⁾ Figs. 4 및 5는 각각 총 과열도는 모두 5.6℃로 동일하게 조정하고, 증발기 중간 및 하단 유로 출구의 과열도가 변화되는 경우에 대한 용량 변화와 모든 과열도가 5.6℃이고 풍량이 975 m³/h인 조건에서의 증발기 용량에

Table 1 Test conditions

Parameter	Superheat at each circuit (℃)			
	Top	Middle	Bottom	Overall
Case A	5.6	5.6	5.6	5.6
Case B	*	11.1	11.1	5.6
Superheat Case C	*	16.7	16.7	5.6
Case D	16.7	*	16.7	5.6
Case E	16.7	16.7	16.7	16.7
Air flow rate (m ³ /h)	975, 1300, 1700			
DB (℃)	26.7			
RH (%)	Dry, 50.3%, 70.4%			

* The circuit superheat was adjusted to set the overall superheat at 5.6℃.

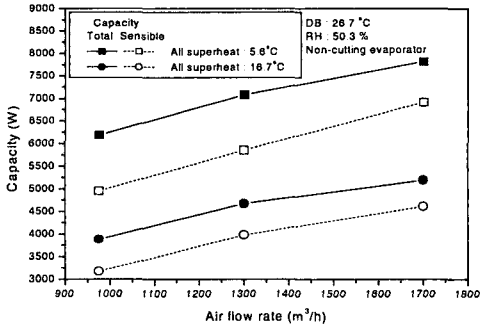


Fig. 3 Capacity variation as a function of air flow rate for non-cutting evaporator.

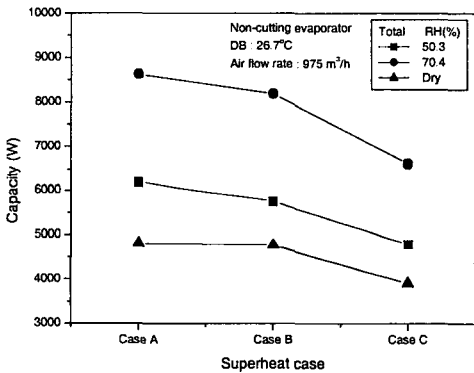


Fig. 4 Capacities with different superheat combinations for non-cutting evaporator.

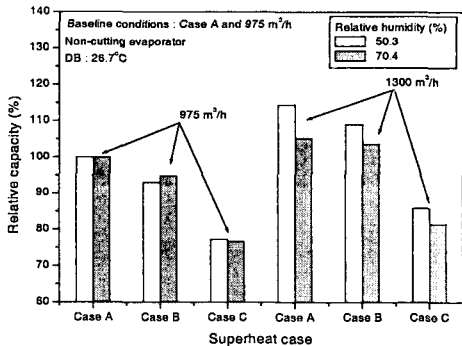


Fig. 5 Relative capacities as a function of superheat for non-cutting evaporator compared with Case A and 975 m³/h.

대한 용량비를 나타낸다.

Case A는 개별 과열도와 총 과열도가 모두 5.6°C일 때 증발기의 용량을 나타낸다. Case B, C는 중간 및 하단 유로의 출구에서 각각 11.1°C 16.7°C의 과열도를 갖고, 상단 유로의 팽창장치를 조절하여 총 과열도를 5.6°C로 유지한 경우이다. Case B와 C의 경우 상단 유로의 출구에서 냉매가 2상 상태를 나타냈다. 풍량이 1300 m³/h이고 상대습도가 50.3%인 경우 Case A에서 Case B, C로 과열도 불균형이 발생함에 따라 증발기의 냉방용량은 각각 4.8%, 25%씩 감소하였으며, 풍량이 975 m³/h인 경우에도 유사한 경향을 나타냈다.

총 과열도가 동일하지만, 증발기 중간 및 하단 유로의 과열도가 증가함에 따라 증발기의 용량이 감소하였다. 이는 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 과열도 불균형 증가에 따른 냉매측 유량감소로 인한 열저항 증가와 중간 및 하단 유로의 과열도 상승으로 출구 영역에서 냉매와 공기와의 온도차이 감소와 더불어 과열도 차이에 따라 서로 다른 온도의 냉매사이의 열전달로 인하여 냉매와 공기 사이의 열전달량이 감소하였기 때문인 것으로 판단된다. Case A에서 Case C로 과열도 불균형이 발생함에 따라 건표일의 경우 18.7%, 상대습도 50.5%인 경우 22.7%, 상대습도 70.4%인 경우 23.4%의 용량감소가 발생하였다. 즉, 습표일의 경우 과열도 불균형에 따른 용량감소가 크게 발생하고 있다. 이는 습표면의 경우 핀 효율이 건표면보다 감소하므로⁽⁸⁾, 냉매 배관에 접한 핀(핀뿌리)온도보다 냉매배관에서 떨어진 핀부위(핀끝)의 온도 상승이 건표면보다 증가하여 핀 전도에 의해 핀 평균온도가 상승하였기 때문인 것으로 판단된다. 그러므로 다중 유로 열교환기가 최대 성능을 갖기 위해서는 각 유로의 개별 과열도 조절이 필요하다.

3.2 과열도 변화에 따른 핀-전도 영향

Fig. 7은 과열도의 변화에 따라 커팅 증발기와 비커팅 증발기의 용량 변화를 나타내며, Fig. 8은 모든 과열도가 5.6°C인 비커팅 증발기의 용량에 대한 과열도 변화에 따른 커팅 증발기 및 비커팅 증발기의 냉방용량비를 나타낸다. 모든 과열도가 5.6°C인 경우에 커팅 증발기가 비커팅 증발기에 비하여 미소한 용량 증가를 나타냈으며, 이는 핀

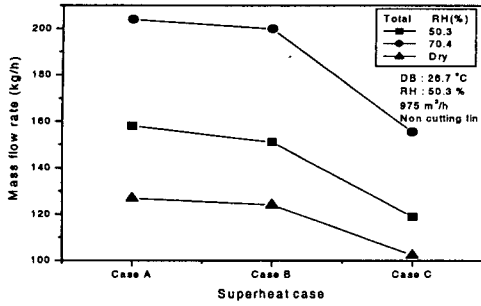


Fig. 6 Mass flow rate with different superheat combinations for non-cutting evaporator.

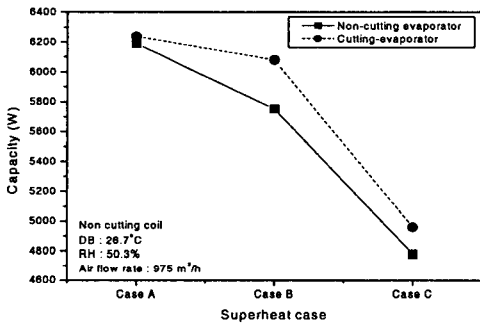


Fig. 7 Capacities with different superheat combinations for non-cutting evaporator and cutting evaporators.

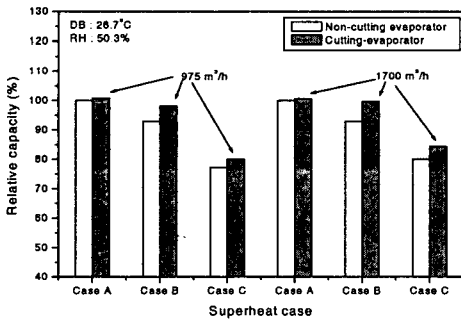


Fig. 8 Relative capacities with different superheat combinations for non-cutting and cutting evaporators.

커팅 부위에서 공기측 난류도 증가에 기인한 것으로 판단되지만, 용량차이는 1%이하로 핀 커팅에 의한 난류도 증가에 의한 열전달량은 매우 작다.

과열도 불균형이 증가함에 따라 커팅 증발기가 비커팅 증발기에 비하여 큰 냉방용량을 나타내고 (Fig. 7), 과열도 불균형 증가에 따른 용량 감소 폭이 작게 나타났다 (Fig. 8). 이는 다중 유로 증발기에서 각 유로 사이의 과열도가 불균일한 경우 각 유로에 접촉된 핀 온도 차이 및 냉매 입구측과 출구측의 핀 온도 차이에 의한 핀을 통한 전도 현상으로 냉매간 열전달이 존재한다는 것을 의미한다. 풍량이 975 m³/h이고 과열도가 Case A에서 Case B, C로 변함에 따라 비커팅 증발기의 용량은 7%, 23%씩 감소하였으며, 커팅 증발기는 2%, 20%씩 감소하였다.

Fig. 9은 비커팅 증발기에 대하여 중간과 하단 유로 과열도는 16.7°C이고, 상단 유로 입구에 연결된 수동팽창밸브를 이용하여 총 과열도를 5.6°C로 조절한 경우(Case C)와 상단과 하단 유로 과열도는 16.7°C이고 중간 유로의 과열도를 변화시켜 총 과열도를 5.6°C로 조절한 경우(Case D)에 대한 증발기의 용량변화를 나타낸다. 건코일의 경우 Case C와 Case D는 0.8%의 용량차이를 나타냈고, 습코일의 경우 1%의 작은 차이를 나타냈다. 그러므로, 대항류의 유동 구조를 가지고 다중 냉매유로로 구성된 증발기의 각 유로 사이의 과열도 불균형시에 패스 사이의 핀-전도에 의한 열전달 보다 열교환기 입구측과 출구사이의 핀-전도 현상에 의한 냉매사이의 내부 열전달에 의한 용량강화가 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 과열도 변화시에 풍량 변화에 대한 커팅 코일과 비커팅 코일의 용량 변화를 나타낸다. 풍량이 큰 경우 과열도 불균형이 일어나거나 모든 유로의 과열도가 증가하는 경우에 비커팅 코일과 커팅 코일의 용량 차이가 크게 나타났다. 이는 풍량이 증가함에 따라 냉매유량이 증가하고, 핀-효율이 감소하여⁽⁸⁾, 핀 끝단의 온도가 상승하여 핀 전도에 의해 핀 평균온도가 상승하여 공기측과의 열전달량이 감소하였기 때문인 것으로 판단된다. Case C의 과열도 불균형 조건에서 커팅 코일은 비커팅 코일에 비해 975 m³/h와 1700 m³/h의 풍량조건에서 각각 4.7%와 5.7%씩 냉매유량이 증가하였다.

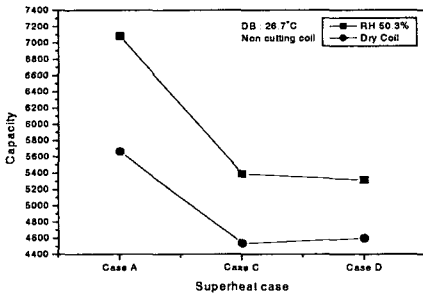


Fig. 9 Capacities as a function of superheat combination for non-cutting evaporator at different humidity conditions.

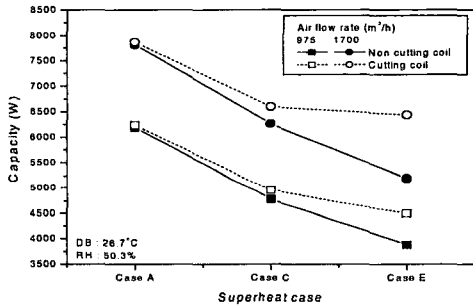


Fig. 10 Capacities as a function of superheat case for non-cutting and cutting evaporators at different air flow rates.

모든 유로의 과열도가 16.7°C로 모두 상승한 경우에 커팅 증발기는 비커팅 증발기에 비하여 풍량이 975 m³/h와 1700 m³/h인 경우 각각 16%, 24% 큰 용량을 나타냈다.

4. 결론

본 연구에서는 3개의 다중유로를 갖는 증발기에서 각 유로사이의 과열도의 불균형에 따른 성능 변화 및 핀-전도에 의한 증발기의 용량 변화에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 본 연구에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 입구속도가 균일한 조건에서 총 과열도를 목표 설정치인 5.6°C를 유지하여도 각 유로의 과열도가 균형을 이루지 못하면 증발기 용량이 최대 25% 감소하였으며, 과열도 불균형에 따른 용량 감소는 건코일보다 습코일에서 크게 나타났다.

(2) 다중유로 증발기에서 총 과열도가 적절한 값으로 조절되어도 각 유로의 과열도 불균형에 따른 용량 감소가 존재하며, 이때 핀-전도에 의해 핀 평균온도가 상승하여 용량감소가 발생한다. 각 패스사이의 과열도 불균형으로 인한 핀-전도는 패스 사이의 열전달보다 냉매 입구 및 출구의 온도 차이로 인한 핀-전도에 의한 핀 평균 온도 상승에 의한 손실이 크다.

(3) 과열도 불균형 및 모든 과열도 증가시 커팅 증발기와 비커팅 증발기 사이의 용량차이는 풍량이 증가함에 따라 증가하였다.

후 기

본 논문은 과기부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어사업(이산화탄소저감 및 처리기술 개발)의 일환으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ellison, P.R., Crewick, F.A., Ficher, S.K., Jackson, W.L., 1981, A computer model for air-cooled refrigerant condenser with specified refrigerant circuiting, ASHRAE Trans., Vol. 72, No. 2, pp. 1106-1124.
2. Liang, S.Y. Wong, T.N., Nathan, G.K., 1998, Study of refrigerant circuitry of evaporator coil with a distributed simulation model, 7th Int. Refrigeration Conference, Purdue, pp. 823-833.
3. Kirby, E.S., Bulland, C.W., Dunn, W.E., 1998, Effect of airflow nonuniformity on evaporator performance, ASHRAE Trans., Vol. 194, No. 2, pp. 755-762.
4. Lee, J., Domanski, P.A., 1997, Impact of air and refrigerant maldistributions on the performance of finned-tube evaporators with R22 and R407C, Report DOE/CE/23810-81 for ARI, NIST, Gaithersburg, MD.
5. ANSI/ASHRAE Standard 37, 1988, Methods of Testing for Rating Unitary Air Conditioning and Heat Pump Equipment, ASHRAE, Atlanta.
6. ANSI/AMCA 210, 1985, Laboratory methods of testing fans for rating, ANSI, Arlington, USA.
7. McLinden, M.O., Klein, S.A., Lemmon, E.W.,

Peskin, A.P., 1998, NIST thermodynamic and transport properties of refrigerant and refrigerant mixtures (REFPROP). Version 6.01. Gaithersburg, MD:NIST, USA

8. Lin, Y.T., Hsu, K.C., Chang Y.J., Wang C.C., 2001, Performance of rectangular fin in wet conditions: visualization and wet fin efficiency, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 123, pp. 827-836.