대한설비공학회 2009 하계학술발표대회 논문집 pp. 1294 ~ 1299

09-S-228

핀-관 가스쿨러에서 열교환기 구성에 따른 성능 비교

배 경 진, 신 은 성, 홍 명 석*, 조 홍 현*†

조선대학교 기계공학과 대학원, *조선대학교 기계공학과

Comparisons of Performance with Heat Exchanger Constitution in the Fin-tube Gascooler

Kyungjin Bae, Eunsung shin, Myung-suk Hong*, Honghyun Cho*†

ABSTRACT: Since the operating pressure of CO_2 gascooler is so high compared with that of previous subcritical condenser, the optimization of gascooler is needed for improve heat exchanger performance. In this study, the performance characteristics of five kinds of heat exchangers were analyzed and compared with operating conditions. As a result, the 4-20 HX-tube shows the maximum gascooler capacity because the heat transfer is effective and pressure drop is small. Beside, the high performance of 4-20 HX-tube could be keep for wide operating condition.

Key words: Carbon dioxide(이산화탄소), Heat exchanger(열교환기), Gascooler(가스쿨러), Pressure drop(압력강하)

기 호 설 명

T : 온도(°C)
P : 압력(kPa)

1. 서 론

최근 전세계는 지구의 온도상승으로 인한 자연재해 및 생태계 파괴로 인류에게 큰 영향을 미치고 있어서 고효율과 함께 친환경적인 기술에 대하여 많은 관심이 모아지고 있다. 이러한 상황에서 기존의 공조기기의 작동유체로 쓰인 HCFCs, HFCs 계열의 냉매는 오존층파괴와 지구온난화 등을 유발시켜 환경문제를 발생시킴으로 2005년 2월 국제적 협약인 교토의정서 발휘에 따라 기존의 공조기기에 사용되었던 작동유체들이 규제의 대상이 되었고 이를 대체할 새로운 친환경적인 자연냉매의 개발 및 이용에 관한 많은 연구가 진행 중에 있다. 자연냉매인 이산화탄소는 열역학적 물성치가 뛰어나고 독성과 인화성이 없으며 기존의 냉매에 비해 단위체적당 열용량이 큼으로써 시스템의 소형화 설계에 유리하다.

따라서 이산화탄소의 물성 및 이용에 대한 기초연구와 이를 냉동공조 시스템에 적용시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있지만 시스템 성능 향상과 구성요소의 최적화를 위한 더욱 체계적인 연구가 필요하다. 이산화탄소용 가스쿨러에 관한 기존의 연구를 살펴보면 Chang and Kim[1]은 이산화탄소 히트펌프 시스템의 가스쿨러로 핀-관 열교환기를 사용할 경우 설계변수의 변화에 따른 성능해석을 통하여 최적설계를 위한 자료를 제공하였으며 Yin et al.[2] 등은 가스쿨러에서 열역학적 과정을 분석하는 방법과 가스쿨러 성능에서 열물성 특성 변화의 영향에 대한 모델을 개발하였다.

하지만 기존의 이산화탄소 시스템의 열교환기

† Corresponding author
Tel.: +82-62-230-7050; fax: +82-62-230-7055
E-mail address: hhcho@chosun.ac.kr

에 관한 연구는 아직 미흡하고 고압의 작동압력에서 운전되는 특성으로 인하여 아임계 응축기와 다른 특성을 가짐으로 가스쿨러의 해석 및 성능 특성에 대한 분석이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 핀-관 형태의 가스쿨러 모델링을 통해 여러 가지 구성에 따른 성능특성을 고찰하고 운전조건을 변화시켜 각각의 성능을 비교·분석함으로써 핀-관 가스쿨러의 최적화에 관한 연구를 진행하려 한다. 본 연구를 통하여 이산화탄소용 핀-관 가스쿨러의 최적화를 통한 제품개발의 기초적인 데이터를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 열교환기 모델링

열교환기는 여러 가지 형태가 있지만 가장 대표적인 공조용 열교환기인 핀-관 열교환기는 원형 동관과 알루미늄 핀으로 구성되어 있으며 동관 내에는 냉매가 흐르며 유동과 직각 방향으로 공기가 핀 사이를 흐르게 설계되어 있다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 핀-관 형태의 열교환기를 선정하였으며 관 내경 4 mm, 외경 5 mm 구리관으로, 핀의 형태는 오프셋 스트립(off-set strip)핀을 사용하였다. 본 연구에서 제안된 열교환기의 사양을 Table 1에 나타내었다.

가스쿨러에서 냉매측 열전달 특성을 고려하기 위한 열교환계수는 Gnielnski[3]가 제안한 식을 사용하였고, 냉매측 압력강하는 Churchill[4]가 제안한 식을 사용하였으며, 공기측 열전달 계수 j인자는 Wang[5]이 제안한 식을 사용하였다. 또한 핀 효율은 Schmidt[6]가 제안한 식을 이용하였다. 일반적으로 비교적 간단하면서도 정확한 결과를 얻을 수 있어 공랭식 열교환기 해석에 널리 적용되고 있는 관순법[7](tube-by-tube method)을 이용하여 가스쿨러를 해석하였으며 공기와 냉매가 직교류형이며 하나의 핀-관이 해석의 대상으로 이전 관의 출구에서 냉매의 상태량이 다음 관의 입구 상태량이 된다. 먼저 1열의 가정된 냉매의 입구상태와 주어진 1열의 공기측 상태량을 이용하여 1열의 공기측 출구상태량를 계산하고 주어진 2열의 냉매 입구상태량과 함께 1열 공기 출구 상태량이 2열 공기 입구상태량이 되어 1열 냉매 출구온도를 계산한다. Fig. 2와 같이 가정된 1열의 냉매 입구상태량과 2열 냉매 출구상태량을 비교하여 온도차가 0.5°C, 압력차는 200 kPa이하로

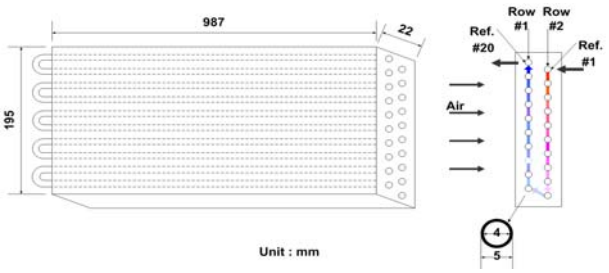


Fig. 1 Schematics of Fin-tube heat exchanger.

Table 1 Specification of the gascooler

	Gascooler
Tube in diameter (mm)	4
Tube thickness (mm)	0.5
Tube material	Copper
Row number	2
Tube number	80
Row pitch (mm)	12
Fin material	Al
Fin shape	Slit
Fin pitch (mm)	1.2
Fin thickness(mm)	0.11
Number of slit	7
Slit height (mm)	0.8
Slit width (mm)	1
Height (mm)	788
Length (mm)	846

오차범위 안에 수렴할 때까지 1열의 입구상태량을 변화시켜가면서 반복 계산을 수행하였다.

동일한 크기의 열교환기에서 배열에 따른 성능특성을 해석하기 위하여 Fig. 3과 같이 열교환기 전체 크기를 동일한 크기(846×780 mm)로 선정하고 각각의 배열변화를 통하여 총 5가지 열교환기 형태를 선정하였다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 각각의 열교환기에서 냉매는 2, 4, 5, 8, 10개로 나누어지고 이때 각각의 열교환기에 사용된 관의 개수는 40, 20, 16, 10, 8개로 전체 관의 수를 80개로 고정하여 설계하였다. 우선 냉매 유량(66 g/s)을 일정하게 고정하고 열교환기 수와 관 수를 변화시켜 표준외기조건(35/24°C)에서 각각의 열교환기의 성능 특성을 분석하였다. 이후 각각의 열교환기에서 운전조건 변화에 따라 성능을 비교 분석하기 위하여 공기의 유속, 냉매의 질량유량, 냉매의 입구온도, 그리고 외기온도를 변화시켜 가면서 성능을 예측하여 분석하였다. 본 연

구에서 설정된 열교환기의 운전조건은 Table 2에 나타내었다.

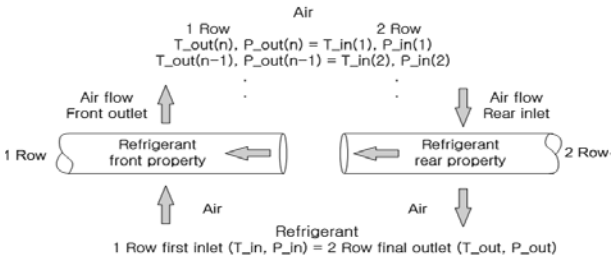
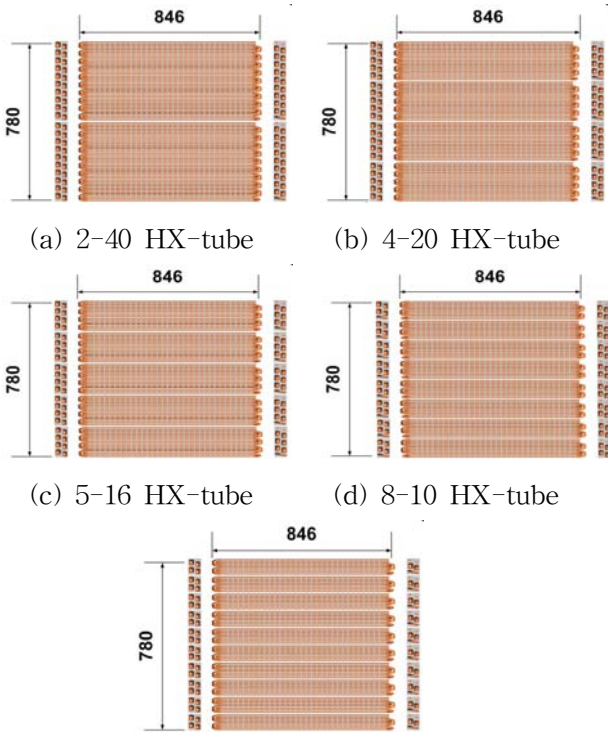


Fig. 2 Property of 1 Row first inlet tube and 2 Row final outlet tube.



(a) 2-40 HX-tube (b) 4-20 HX-tube

(c) 5-16 HX-tube (d) 8-10 HX-tube

(e) 10-8 HX-tube

Fig. 3 Schematics of five kinds of HX.

Table 2 Test condition

Parameters	Value
Air velocity (m/s)	1, 1.25, 5, 1.75, 2
Ref. mass flow rate (g/s)	60, 63, 66, 69, 72
Ref. inlet temperature (°C)	80, 90, 100, 110, 120
Outdoor temperature (°C)	30, 32.5, 35, 37.5

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열교환기 배열에 따른 성능 비교

Fig. 4는 열교환기의 출구온도와 용량변화를 각각의 열교환기 구성에 따라 비교하여 보여주고 있다. 일반적으로 열교환기의 길이가 짧으면 열교환기는 소형화 시킬 수 있지만 충분한 열교환이 일어나지 못해 냉매 출구 온도가 외기온도보다 매우 높게 형성되어 열교환기 효용성이 떨어진다. 반면 열교환기의 길이가 길어지면 충분한 열교환을 통하여 냉매의 출구온도가 외기온도와 거의 유사해지고 열교환기 효율은 높아지지만 열교환기 길이가 크게 증가하여 제품의 유용성이 적어진다. 따라서 적당한 길이와 크기의 열교환기를 설계하는 것이 시스템 성능향상 및 최적화를 위하여 매우 중요하다. 핀-관 열교환기의 경우 냉매의 입구에 가까운 관들은 냉매와 외기의 온도 차가 커서 열교환량이 증가하는 반면 관의 길이가 길어지면 냉매와 외기의 온도 차가 작아져 열교환량이 감소하고 냉매의 온도 감소폭이 크게 줄어든다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 한 열교환기가 16(13.5 m)개 이상의 관을 지날 때 냉매의 출구 온도는 외기온도와 비슷하게 감소하지만 16개 이하의 관에서는 냉매의 출구온도가 충분히 낮아지지 않는 것으로 나타났다. 따라서 관의 수가 16개 이하가 될 때는 열교환기 용량이 급격히 감소한다. 본 연구에서 2-40 HX-tube의 열교환 용량은 4-20 HX-tubed의 열교환 용량에 비하여 약 0.15% 증가하는 반면 5-16 HX-tube은 0.22%, 8-10 HX-tube는 2%, 10-8 HX-tube는 3.39% 감소하는 것으로 확인되었다.

Fig. 5는 열교환기의 압력강하와 질량유속의 변화를 열교환기 구성에 따라 비교하여 보여주고 있다. 열교환기의 질량유속은 보통 450 kg/m^{2}s에서 1550 kg/m^{2}s까지 주로 사용되는데 본 연구에서 설계된 대부분의 열교환기의 질량유속은 사용범위 안에 들지만 2-40 HX-tube는 질량유속이 2626 kg/m^{2}s로 상대적으로 크게 나타났다. 이 열교환기는 실제 열교환기로 쓰기는 부적합하지만 다른 열교환기 배열에 따른 성능을 비교·분석하기 위해서 해석을 수행하였다. 압력강하는 열교환기의 길이가 길어지고 질량유속이 클수록 증가하는데 본 연구에서도 열교환기의 길이와 질량유

속이 4-20 HX-tube보다 2배 큰 2-40 HX-tube의 압력강하가 가장 크게 나타났으며 4-20 HX-tube 이후에 압력강하는 100 kPa이하로 2-40 HX-tube에 비하여 50% 이하로 감소한다. 따라서 열교환기 출구온도, 압력강하, 질량유속의 변화에 대한 성능은 4-20 HX-tube가 가장 효율적인 것으로 확인되었다.

3.2 운전조건 변화에 따른 가스쿨러 성능 비교

Fig. 6은 공기의 입구속도 변화에 따른 각각의 열교환기 용량을 비교하여 보여주고 있다. 공기의 유속이 빨라지는 것은 공기측 질량유량 증가와 난류를 형성함으로 냉매와 더 많이 열교환 할 수 있고 이에 열교환기 냉매 입·출구 온도 차가 증가되어 열교환 성능을 향상시킨다. 하지만 공기 속도가 일정 이상 빨라질 경우 열교환 시간이 짧아 미쳐 열교환을 하지 못하고 지나가 버리기 때문에 공기의 입구속도 변화에 따라 열교환기 용량이 계속해서 증가하지는 않는다. 본 연구에서도 이러한 경향은 잘 보여주고 있는데 공기속도가 증가함에 따라 성능이 향상하는 경향을 가진다. 하지만 성능의 향상정도는 공기 속도변화가 증가함에 따라 감소하는 경향을 가진다. 공기 입구속도 변화에 대한 열교환 용량 정도는 4-20 HX-tube가 상대적으로 일정하게 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 7은 냉매의 입구온도 변화에 따른 열교환기의 용량을 비교하여 보여주고 있다. 냉매의 입구 온도가 증가하게 되면 냉매의 입·출구 온도차가 커짐에 따라 열교환 효과가 증대되고 이에 열교환기 용량은 증가된다. 본 연구에서는 냉매 입구온도가 80°C에서 120°C로 증가될 때 4-20, 5-16, 8-10, 10-8 HX-tube는 약 34%로 비슷한 성능향상을 보이지만 2-40 HX-tube의 경우 31%로 상대적으로 낮은 성능향상 정도를 나타냈다. 이는 냉매유량 증가에 비해 입·출구 온도차의 증가정도가 열교환기 용량에 더 큰 영향을 미치기 때문이다.

Fig. 8은 냉매의 질량유량 변화에 따른 열교환기 용량을 비교하여 보여주고 있다. 일반적으로 냉매의 질량유량이 증가할수록 열교환기의 용량은 증가하는데 본 연구에서도 냉매 질량유량 증가에 따라 모든 열교환기 용량이 증가하는 경향

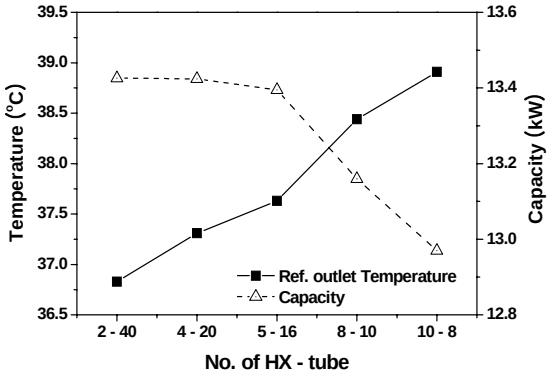


Fig. 4 Variations of Ref. outlet temperature and capacity with Number of HX-tube.

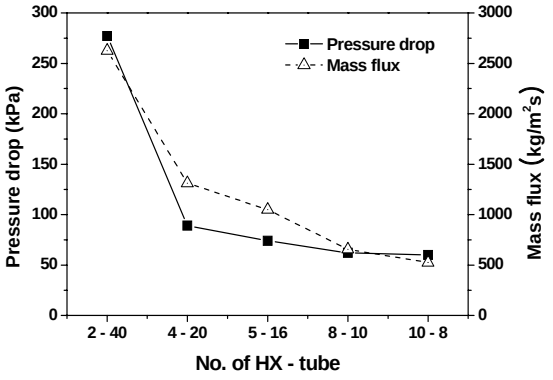


Fig. 5 Variations of pressure drop and mass flux with Number of HX-tube.

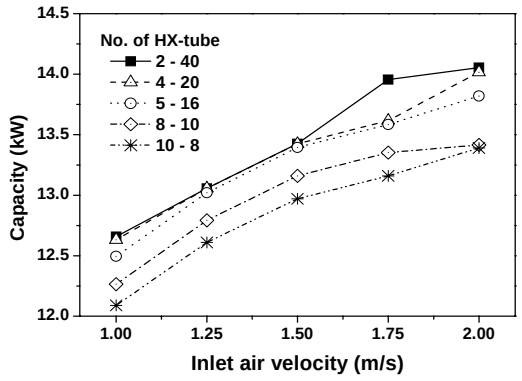


Fig. 6 Comparison of gascooler capacity with inlet air velocity.

을 잘 보여주고 있다. 열교환기 길이가 길어짐에 따라 질량유량 변화에 대한 용량의 증가는 10-8 HX-tube의 경우 15.3%, 8-10 HX-tube는 15.4%, 5-16 HX-tube는 15.6% 4-20 HX-tube 17%로 증가하는 경향을 보이다가 열교환기 길이가 가장긴 2-40 HX-tube에서는 12.7%로 향상정도가 상대적으로 크게 감소하는 것으로 나타났다. 이는 열교환기 길이가 일정이상 길어지는 경우 냉매의 질량유속의 증가와 열교환 온도차의 감소로 열교환량이 줄어들기 때문이다.

이산화탄소 가스쿨러의 경우 외기온도 변화에 따라 성능변화가 크기 때문에 외기온도 변화에 따른 시스템 성능변화를 고찰하는 것은 매우 중요하다. Fig. 9은 외기온도 변화에 따른 열교환기의 용량변화를 보여주고 있다. 외기온도가 증가함에 따라 열교환기의 냉매와 외기의 온도 차가 감소하기 때문에 열교환 효과의 감소로 열교환기 용량이 줄어드는 경향을 보인다. 2-40 HX-tube의 용량이 18.7%로 감소하여 감소정도가 가장 크게 나타나며 외기온도 변화에 따른 성능 민감도가 가장 큰 것으로 확인되었다. 반면 4-20 HX-tube와 10-8 HX-tube는 외기온도 변화에 따라 용량이 17%정도 감소하여 성능의 감소정도가 가장 작게 나타나 외기 온도변화에 대한 성능변화가 작은 것으로 확인되었다. 운전조건 변화에 따른 성능고찰 결과는 4-20 HX-tube가 입구공기속도, 냉매유량, 냉매출구온도, 외기온도 변화에 따라 일정 이상의 열교환기 용량을 확보함으로써 주어진 구조에서 가장 신뢰성 있는 열교환기로 확인되었다.

4. 결론

본 연구에서는 이산화탄소용 핀-관 가스쿨러를 여러 가지 구성에 따른 성능특성을 파악하고 운전조건을 변화시켜 각각의 성능을 비교 분석하였다. 이를 위해 2-40, 4-20, 5-16, 8-10, 10-8 HX-tube 형태로 5가지 열교환기를 설계하였으며 각각의 열교환기에서 압력강하, 질량유속, 열교환기 용량을 분석하고, 운전조건을 변화시키면서 성능을 비교 고찰하였다. 이를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 열교환기 구성에 따른 열교환기 용량은 4-20 HX-tube가 13.424 kW로 가장 크게 나타났

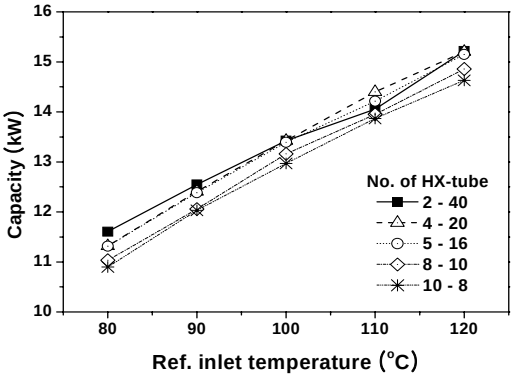


Fig. 7 Comparison of gascooler capacity with Ref. inlet temperature.

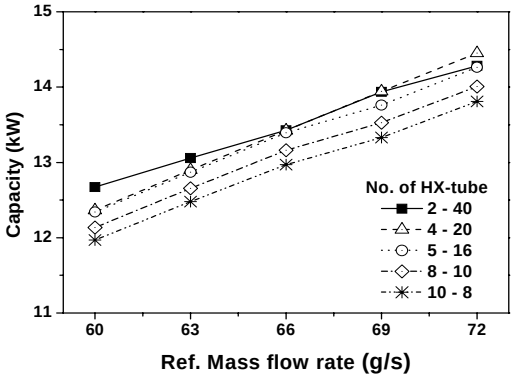


Fig. 8 Comparison of gascooler capacity with Ref. mass flow rate.

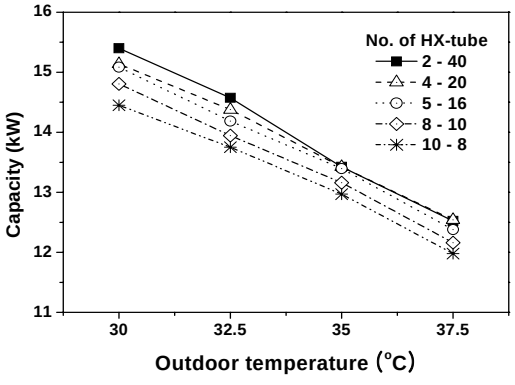


Fig. 9 Comparison of gascooler capacity with outdoor temperature.

으며 이는 8-10 HX-tube에 비하여 약 3.5% 증가한 값을 보였다. 또한 압력강하는 4-20, 5-16, 8-10, 10-8 HX-tube가 100 kPa 이하로 상대적으로 적게 나타나는 것으로 확인되었으며 2-40 HX-tube의 경우 큰 질량유속으로 인하여 277 kPa 정도 감소하는 것으로 나타났다.

(2) 공기 입구속도와 냉매입구온도 그리고 냉매 질량유량 변화에 따른 열교환기 성능은 4-20 HX-tube가 가장 효율적으로 나타났으며 넓은 운전 범위에서 열교환기 성능 감소가 가장 작게 나타나 열교환기의 신뢰성이 가장 높은 것으로 나타났다.

후 기

본 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 학술진흥재단의 지원(KRF-2008-313-D00112)을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Chang, Y. S., Kim, M. S., 2006, Performance Analysis with Change in Design Parameters of CO2 Heat Pump Gas Cooler, Proceedings of the SAREK, pp. 639-644.
2. Yin, J. M., Bullard, C. W., Hrnjak, P. S., 2001, R-744 gas cooler model development and validation, Int. Journal of Refrigeration, Vol. 24, No. 7, pp. 692-701.
3. Gnielinski, V., 1976, New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow, Int. Chem. Eng., Vol. 16, pp. 359-368.
4. Churchill, S. W., 1977, Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes, Chemical Engineering, No. 7, pp. 91-92.
5. Wang, C. C., W. S. Lee and W. J. Sheu, 2001, A Comparative Study of Compact Enhanced Fin-and-Tube Heat Exchangers, International Journal of Heat and Mass Transfer, 44, 3565-3573.
6. Schmidt, T. E., 1945-46, La Production Calorifique des Surface Munies D'ailettes, Annexe Du Bulletin De L'Institut International Du Froid, Annexe G-5.
7. Domanski, P. A., 1989, EVSIM-An evaporator simulation model accounting for refrigerant and one dimensional air, NISTIR-89-4133, NIST, Washington, DC.