

# CO<sub>2</sub> 히트펌프 가스쿨러의 설계변수 변화에 따른 성능해석

장 영 수<sup>†</sup>, 김 민 석

한국과학기술연구원 열·유동제어연구센터

## Performance Analysis with Change in Design Parameters of CO<sub>2</sub> Heat Pump Gas Cooler

Young-Soo Chang<sup>†</sup>, Min-Seok Kim

**ABSTRACT:** The outlet temperature of gas cooler has a great effect on the efficiency of carbon dioxide heat pump system. In order to obtain a small approach temperature difference at gas cooler, near-counter flow type heat exchanger has been proposed, and larger heat transfer area is demanded. The optimum design of gas cooler involving the analysis of trade-offs between heat transfer performance and cost is desirable. In this study, the effects of geometric parameters, such as the circuit arrangement, tube diameter, transverse tube spacing, longitudinal tube spacing and the number of tube rows and fin spacing on the performance of heat transfer were investigated using the developed model. This study suggested various simulation results for optimum designs of gas cooler.

**Key words:** Gas cooler(가스 냉각기), Counter flow(대향류), Heat exchanger(열교환기), Optimum design(최적 설계)

### 기 호 설 명

- f : 수정 계수
- h : 열전달계수 [W/m<sup>2</sup>K]
- Q : 열전달량 [kW]
- $\Delta T_m$  : 평균 온도차 [°C]
- $\Delta P$  : 압력 강하 [Pa, kPa]

### 그 리 스 문 자

- $\phi$  : 핀 효율

### 상첨자

- \* : 기준값

### 1. 서 론

오존층 파괴와 지구 온난화를 비롯한 지구 환경 문제에 따라 기존 냉매의 대체 물질에 대한 연구가 진행되고 있다. 1987년 몬트리얼 의정서에 의한 오존층을 파괴한다고 알려진 CFCs와 HCFCs의 규제에 이어 1999년 교토의정서에서 지구온난화 방지를 위하여 HFCs의 사용이 규제됨에 따라 자연 냉매에 대한 관심이 높아지고 있다. 대표적인 자연냉매로는 탄화수소, 암모니아, 물, 공기, 이산화탄소 등이 있다. 그 중에서도 최근 가장 주목 받고 있는 것은 이산화탄소이며 자연냉매 중에서도 가연성과 독성이 없는 몇 안 되는 물질 중 하나이다. 그러나 이산화탄소는 임계

<sup>†</sup>Corresponding author  
 Tel.: +82-2-958-6746; fax: +82-2-958-6709  
 E-mail address: yschang@kist.re.kr

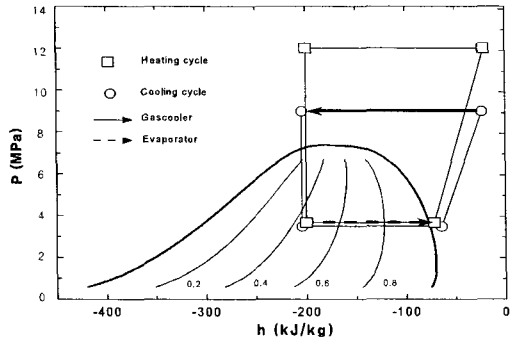


Fig. 1 P-h diagram of CO<sub>2</sub> cycle.

Table 1. Simulation conditions

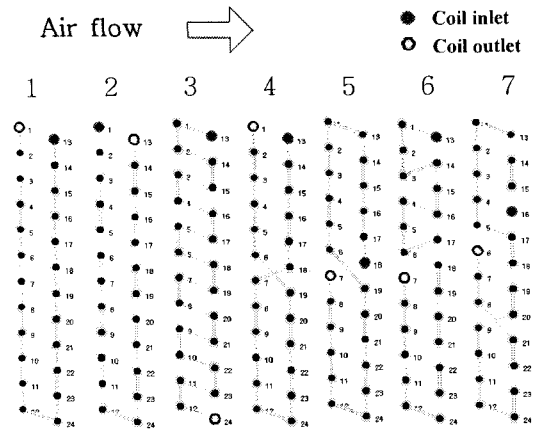
Inlet conditions		Value
Air	Temperature(°C)	35
	Flow rate (CMM)	82.65
	Frontal velocity (m/s)	1.5
	Temperature(°C)	93.1
CO <sub>2</sub>	Pressure(kPa)	9000
	Mass flow rate(g/s)	70

압력이 74 bar 이고, 임계온도가 31.1°C로 여름철 외기온도보다 낮다. 이산화탄소를 이용한 히트펌프 사이클을 나타낸 Fig. 1에서 보듯이, 임계온도가 히트싱크인 공기온도보다 낮기 때문에 보통의 냉매를 사용하는 냉동시스템의 응축과정이 존재하지 않고, 고온의 가스냉매가 단상 냉각되는 가스냉각과정이 존재한다. 본 연구에서는 이러한 이산화탄소 히트펌프 시스템의 가스쿨러로 핀-튜브 열교환기를 사용할 경우 설계변수의 변화에 따른 성능 해석을 통하여 최적설계를 위한 자료를 제공하고자 하였다.

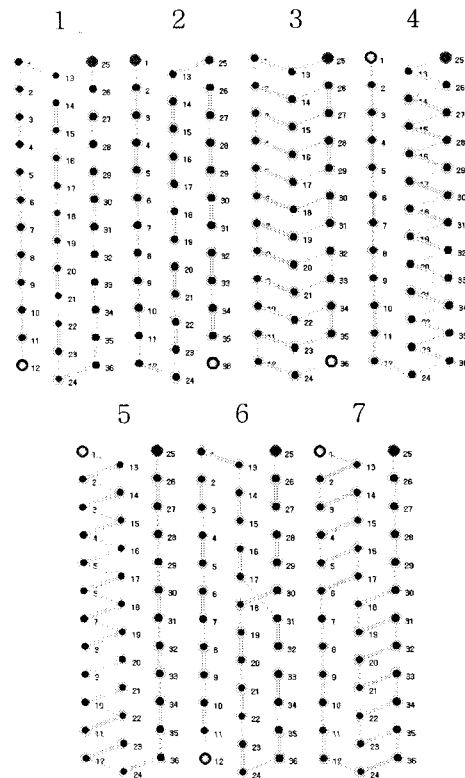
## 2. 해석방법

가스쿨러의 성능 시뮬레이션은 2열과 3열 열교환기에 대하여 Table.1에 나타낸 바와 같이 냉매와 공기의 입구조건을 고정하고 설계 변수를 변화시켜 가면서 수행하였다. 시뮬레이션 프로그램은 관순법<sup>(3)</sup>을 사용한 CO<sub>2</sub> 가스쿨러 시뮬레이션 프로그램을 사용하였다. 냉매측 열전달 계수는 마이크로핀관에 대한 적절한 초임계열전달 상관식을 적용하기 어려움에 따라 평활관에서의 단상

열전달 식에 마이크로핀의 적용에 의한 향상계수를 산출해서 곱해서 사용하였다. 공기측 열전달 계수는 실험 열교환기를 물을 이용한 열전달 계수 측정 실험에서 구한 열전달 상관식을 사용하였고 환경이 변할 경우 적용할 수 없을 때에는 Wang<sup>(1)</sup>의 루버핀 열전달 식을 사용하였다.

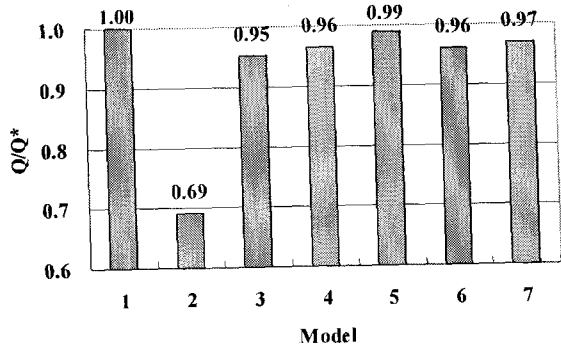


(a) 2 rows

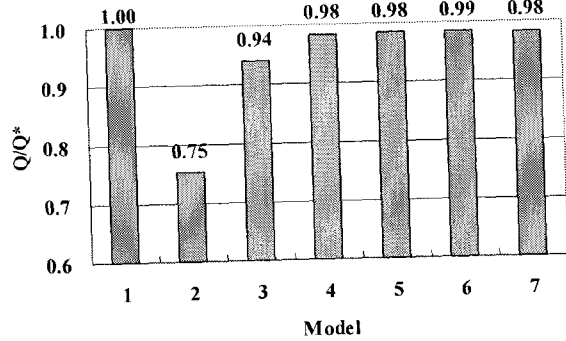


(b) 3 rows

Fig. 2. Various circuit arrangements



(a) 2 rows



(b) 3 rows

Fig. 3. Heat transfer rate with changes in circuit arrangement

### 3. 성능해석 결과

#### 3.1 회로 배열에 따른 성능 변화

회로 배열에 따른 성능 변화를 알아보기 위하여 2열과 3열의 경우에 대하여 Fig. 2와 같은 다양한 회로 배열에서의 성능 시뮬레이션을 수행하여 열전달량을 2열과 3열 각각의 경우 대향류일 때의 값을 기준으로 놓았을 때의 비율로 표시하였다. 2열과 3열의 각 7개의 model중 가장 왼쪽에 표시된 model 1번이 대향류, 2번이 평행류이다. 대향류의 경우에서 2열과 3열의 경우 모두 가장 높은 성능을 보였으며, 대향류의 성능을 기준으로 할 때 평행류의 경우 2열에서는 70%, 3열

에서는 75%의 저조한 성능을 보였고, 다른 회로 배열에서는 90%이상의 성능을 나타냈다. 따라서 가스쿨러의 성능은 대향류일 때 최적의 성능을 보이며, 대향류와 유사한 다른 배열에서도 거의 근접한 성능이 나온다. 히트펌프의 난방 또는 냉방 조건의 경우 실내기와 실외기의 역할이 바뀌므로 증발기로 사용될 수 있으므로 그때의 성능도 고려하여 종합적으로 판단해야 한다.

#### 3.2 관경 변화에 따른 성능 변화

관경이 바뀔 경우의 성능 변화를 시뮬레이션 하였다. 전면적과 핀 종류 등은 7mm일 때와 동일하게 놓고, 단간격, 열간격을 5mm 일 경우에 맞게 고치고 전면적에 맞는 단수를 조정하여 시

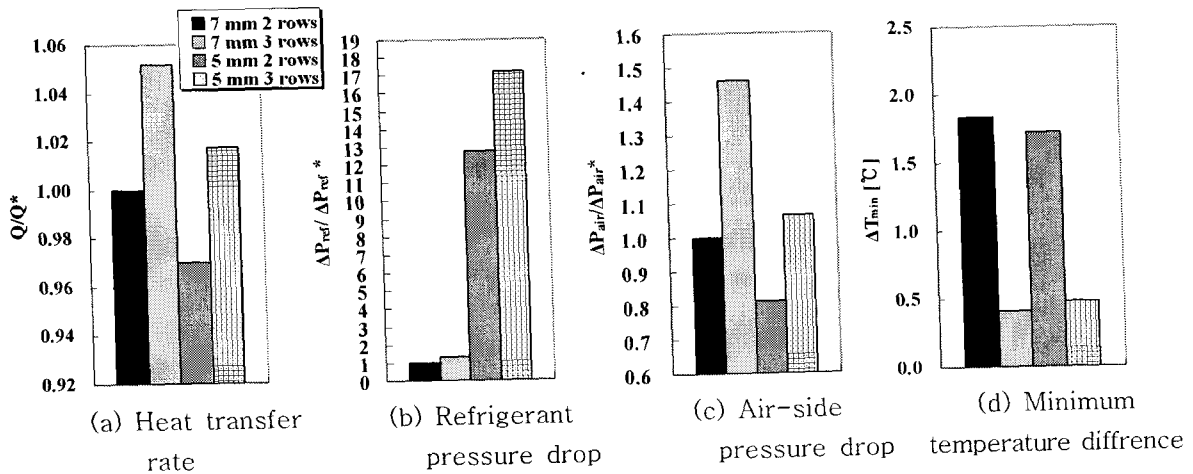
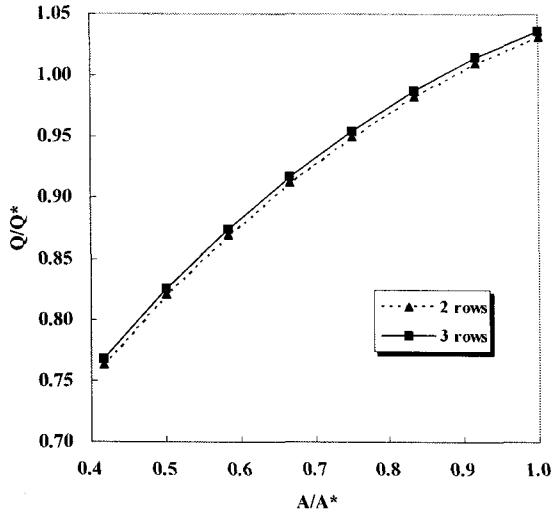
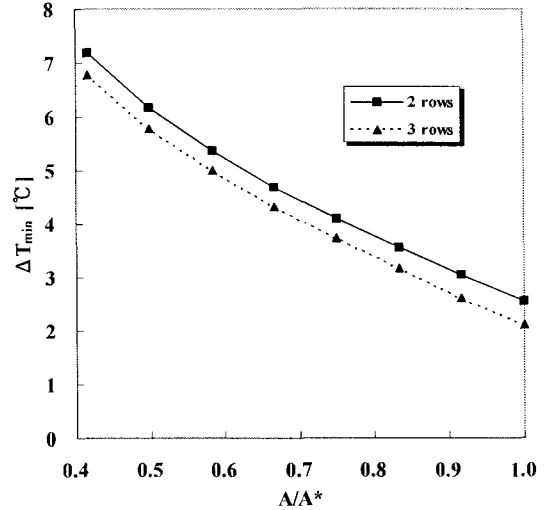


Fig. 4. Simulation results with changes in tube outside diameter

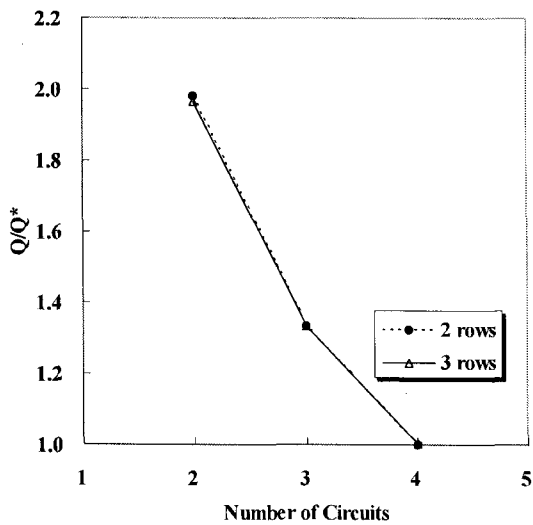


(a) Heat Transfer Rate

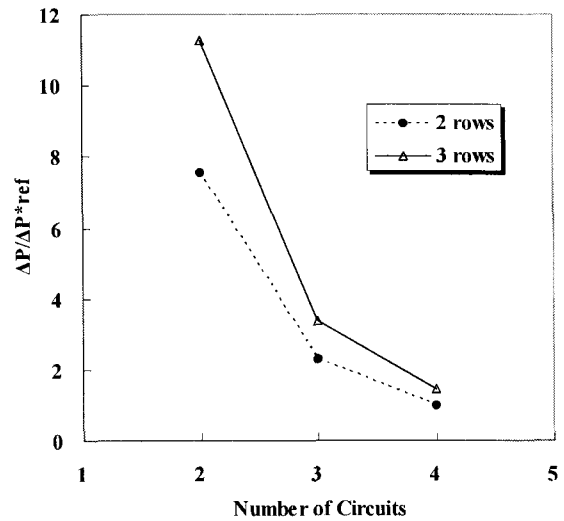


(b) Minimum Temperature Difference

Fig. 5. Simulation results with changes in frontal area



(a) Heat Transfer Rate



(b) Refrigerant Pressure Drop

Fig. 6. Simulation results with changes in number of circuits

물레이션하였다. Fig. 4에 관경이 7 mm일 때를 기준으로 할 때 관경이 5mm일 때의 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 관경이 7 mm에서 5 mm로 줄어들었을 경우 열전달량은 거의 변화가 없다. 관경이 작아지므로 냉매측 유속이 크게 증가하여 냉매 압력강하는 10배 이상 증가하고, 공기측의 경우 최소유동면적이 늘어나게 되므로 공기측 압력강하는 80%가량으로 감소한다.

### 3.3 전면적 변화에 따른 성능 변화

전면적을 감소시킬 경우 전열량과 냉매출구에서 냉매와 공기 온도차를 Fig. 5에 나타내었다. 기준조건에서 최소온도차가 2°C로 매우 작음을 알 수 있다. 전면적의 감소로 최소온도차는 증가하고, 열전달량이 감소한다.

### 3.4 회로수 변경에 따른 성능 변화

전면적이 일정한 상태에서 냉매의 회로를 2, 3, 4개로 하였을 경우에 대한 성능해석을 수행하여, Fig. 6에 나타내었다. 가스쿨러에 공급되는 냉매가 각 회로에 분배되는 형태를 가지므로, 회로가 4개인 경우 실제 냉매 배관으로 흐르는 냉매는 공급 냉매량의 1/4에 해당된다. 따라서 회로수가 작아지면 배관에 흐르는 냉매량이 증가하게 된다. 냉매량이 증가하면 열전달계수는 증가하지만, 압력강하 또한 증가하게 된다. 냉매 회로가 4에서 3으로 감소한 경우 성능이 1% 정도 감소하고, 회로수가 2인 경우 압력강하량은 10배 가량 증가하고, 전열량도 10% 가량으로 크게 감소하였다.

### 3.5 간격 변화에 따른 성능 변화

공기측 열전달계수는 공기측 조건이나, 핀 형상의 변화에 의해 가장 크게 영향을 받지만, 열교환기의 핀간격, 단간격, 열간격에 의해서도 영향을 받게 된다. Fig. 7에 열교환기의 형태가 바뀔 경우, 열전달계수의 예측이 가능한 Wang<sup>(1)</sup>의 열전달 모델을 이용하여, 열전달계수와 핀효율의 변화 정도를 예측하여 나타내었다. 열전달계수

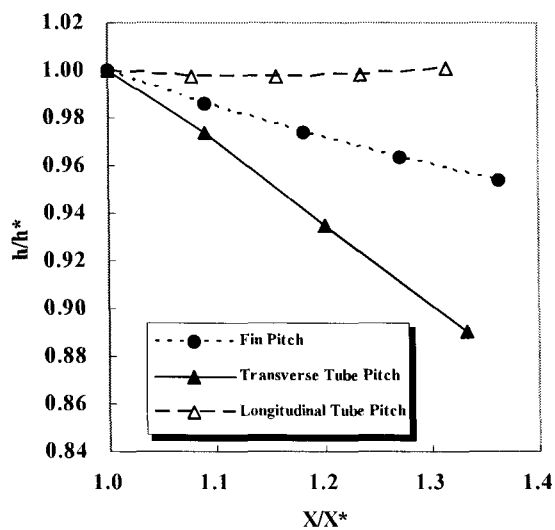
의 경우, 핀간격과 단간격이 증가하면 열전달계수가 감소하는 경향을 보이며, 30% 간격이 넓어지면, 열전달계수는 각각 4%, 10% 감소한다. 열간격의 변화에 의한 열전달계수의 변화는 미미하였다. 핀효율의 경우에는 핀피치의 변화에는 큰 영향이 없으나, 열전달계수와 마찬가지로 단간격의 증가로 핀효율이 가장 크게 감소하였다.

본 연구에서 제시한 공기측 열전달 상관식의 경우, 주어진 핀의 형상과 간격에만 적용될 수 있는 상관식이므로, 실제로 핀 간격, 단간격, 열간격의 변화에 따른 성능시뮬레이션은 정확도가 떨어질 가능성이 있다. 따라서 Fig. 7의 핀간격, 열간격, 단간격의 변화에 따른 열전달계수의 변화율( $f$ )을 이용하여, 본 모델의 열전달계수를 식 (1)과 같이 구하여 성능시뮬레이션을 수행하였다.

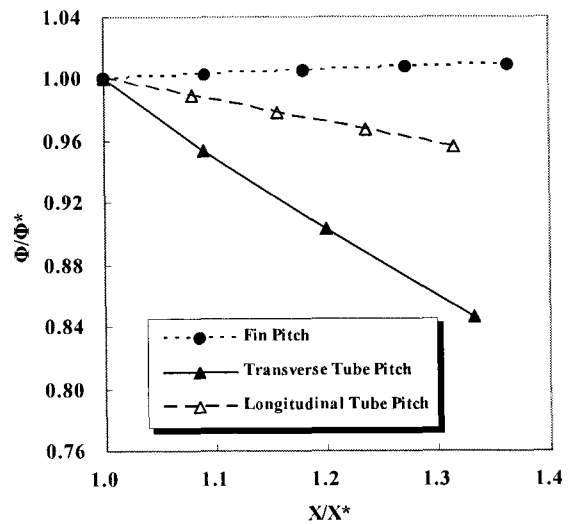
$$h = f \times h^* \quad (1)$$

여기서 상첨자 \*는 기준 조건을 의미한다.

핀 간격과 단 간격, 열 간격 변화에 따른 전열량과 공기측 압력 강하량의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 핀 간격 또는 단 간격이 감소하면, 공기측 열전달계수의 감소로 인하여 열전달량이 감소한다. 이와는 대조적으로, 열 간격이 증가하면

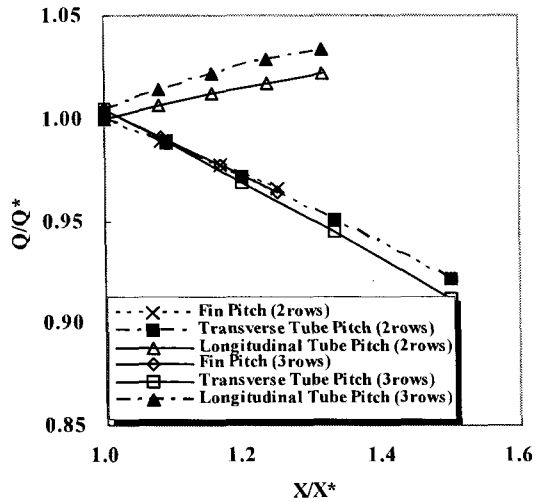


(a) heat transfer coefficient

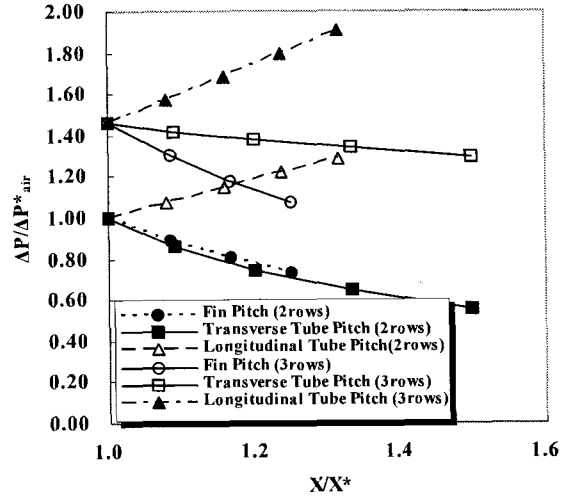


(b) fin efficiency

Fig. 7. Variation in heat transfer coefficient and fin efficiency



(a) Heat transfer rate



(b) Refrigerant pressure drop

Fig. 8. Simulation results with changes in fin pitch, transverse tube pitch, and longitudinal tube pitch

전열 면적의 증가에 따라 열전달량과 압력강하가 증가한다.

#### 4. 결론

가스쿨러 모델을 이용하여 설계 변수를 변경해 가면서 시뮬레이션을 수행하여 최적 설계를 위한 자료를 얻을 수 있었다.

본 연구의 결론을 정리하면 아래와 같다.

- (1) 가스쿨러의 회로 배열은 대향류일 때 해당 되는 배열 중 가장 높은 성능을 얻을 수 있다.
- (2) 관경이 작아지면 열전달량은 차이가 작으며 냉매측 압력강하가 상당히 증가한다.
- (3) 전면적이 감소하면 최소온도차가 증가하고 열전달량이 감소한다.
- (4) 회로수가 감소하면 열전달량이 감소하고 압력강하량이 증가한다.
- (5) 핀 피치나 단간격이 증가하면 열전달량과 압력강하가 감소하며 열간격이 증가하면 열전달량과 압력강하량이 증가한다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 지정 차세대 신기술 개

발 사업 중 ‘환경친화적 자연 냉매인 CO<sub>2</sub>를 적용한 고효율 냉난방 시스템 개발’ 과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Wang, C.C., Lee, C.J., Chang, C.T., Lin, S.P., 1999, Heat transfer and friction correlation for compact louvered fin-and-tube heat exchangers, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 42, pp. 1945-1956.
2. Han, D.H, Lee, K.J., 2005, Single-phase heat transfer and flow characteristics of micro-fin tubes, Applied Thermal Engineering, Vol. 25, pp. 1657-1669.
3. Domanski, P. A., 1989, EVSIM-An evaporator simulation model accounting for refrigerant and one dimensional air, NISTIR-89-4133, NIST, Washington, DC.