

이산화탄소를 사용하는 냉동 시스템의 성능 평가 (I)

신 지 영*

Performance Evaluation of CO₂ Air-Conditioning System (I)

J. Y. Shin

Key words : CO₂, Alternative Refrigerant (대체냉매), Coefficient of Performance (성능계수)**Abstract**

The high-pressure natural refrigerant CO₂ is now being evaluated for use in the motor vehicle air-conditioning systems and for several types of unitary equipment. In this study thermodynamic properties of CO₂ is compared to those of R-22 and R-134a and the performance characteristics of CO₂ refrigeration cycle is analyzed. The results show that the optimum discharge pressure for the cycle performance exists. New design concept for the CO₂ refrigeration system should be developed due to the high-operating pressure of itself.

기호설명

COP_R : 냉동기의 성능계수
 h : 엔탈피 [kJ/kg]
 h_{fg} : 증발잠열 [kJ/kg]
 \dot{m} : 냉매의 질량유량 [kg/s]
 p : 압력 [MPa]
 \dot{Q}_c : 냉동시스템의 방열량(응축열량) [kW]
 \dot{Q}_e : 냉방용량 [kW]
 R_p : 압력비
 s : 엔트로피 [kJ/kgK]
 T : 온도 [°C]
 ΔT_{LM} : 열교환기의 대수평균 온도차 [°C]
 UA : 총열관류율 [kJ/K]

VCR_R : 냉매의 단위체적당의 열량 [kJ/m³]
 v : 비체적 [m³/kg]
 W_c : 압축기 소요동력 [kW]

1. 서 론

CFC 및 HCFC 계열의 물질들은 우수한 열역학적 성질을 가지고 있을 뿐 아니라 화학적으로 안정하고 기타 가연성, 독성 등의 측면에서 안전하기 때문에 냉매, 세정제, 분사 추진체, 발포제 등 각종 용도로 사용되어져 왔다. 그러나, 산업과 문명의 발달과 함께 그 수요가 급속도로 증가한 (H)CFC는 오존층 파괴와 지구온난화의 주원인으로 판명됨에 따라 국제 협약인 몬트리올 의정서^{1,2)}에 따라

* 정회원, 동의대학교 기계·산업시스템공학부(원고접수일 : 99년 11월)

사용이 규제되고 있어 이를 대체하는 물질과 기술 개발이 절실히 요구되고 있다. 우리나라는 1992년 몬트리올 의정서에 가입하였고 국내 냉동공조산업에서는 (H)CFC 규제에 대해 이미 대체냉매의 적용이 완료되었거나 진행 중인 상태이다. HFC(Hydro-Fluoro-Carbon) 계열의 냉매는 염소가 없기 때문에 오존층 파괴의 위험이 없다. 따라서, R134a와 같은 HFC 계열의 냉매를 냉장고 및 차량용 에어컨에 사용하던 CFC 계열의 냉매인 R12의 대체냉매로서 이미 사용하고 있다. 또한, HCFC 계열의 냉매인 R22 또한, HFC 계열의 냉매로서 대체하려는 연구가 완성단계인 것으로 알려져 있다. 이 경우 단일 냉매로는 적합한 냉매를 선정하기 힘들기 때문에 여러 가지 냉매의 2성분 혹은 3성분 혼합 냉매를 사용하기 위한 연구가 상당히 진척되어 있다³⁻⁵⁾.

그러나, 이러한 HFC 계열의 냉매가 ODP(Ozone Depletion Potential)가 0이기는 하나, 지구 온난화도는 무시 못할 정도이므로 환경문제의 관점에서 결국 HFC 계열의 냉매도 장기적으로는 바람직하지 않다. 환경측면에서 가장 확실한 해결책은 합성물질이 아닌 지구상에 존재하는 천연물질을 이용하는 것이다. 자연친화적인 대체냉매로서 고려되고 있는 냉매로는 물, 공기, 이산화탄소, 탄화수소 계열의 냉매인 프로판(propane), 이소부탄(isobutane) 등이 있다⁶⁻⁸⁾.

탄화수소 계열의 냉매가 폭발성으로 인해 상용화에 어려움을 겪고 있는 반면에, 이산화탄소는 이미 CFC 냉매가 출현하기 이전 암모니아와 더불어 냉매로서 가장 많이 사용되었던 냉매여서 안정성 측면에서는 검증되었다. 그러나 효율 및 성능 면에서 우수한 CFC의 등장으로 이산화탄소의 사용은 점차 감소하였고, 최근에는 특수한 용도를 제외하고는 거의 쓰여지고 있지 않다. 그러나, 이산화탄소의 가장 큰 장점은 천연물질이므로 환경에 추가적으로 미치는 피해가 전혀 없고 안정성이 뛰어나다는 점이다. 특히, 이산화탄소의 임계온도는 31.1°C로 무척 낮아 방열과정은 임계점 이상에서 일어나고 증발과정은 임계점 이하에서 일어난다. 실험결과에 의하면 이산화탄소 냉동시스템은 R12에 비하여 효율이 동등하거나 약간 높다고 알려져

있으며, 임계점 이상 영역의 온도구배 열전달 특성을 이용하면 2차유체의 열교환기 입구온도를 이산화탄소 방열기 출구 온도와 거의 같게 할 수 있어 효율 향상이 가능하다는 장점이 있다. 노르웨이에서는 자동차용 공조시스템에 이산화탄소를 이용하는 실용화 연구를 진행하여 왔다. 이산화탄소는 인체와 환경에 무해하여 회수가 불필요한데 이 특성은 특히 자동차용 냉매로 적합하다고 알려져 있다. 자동차는 진동이 많고 냉매 유로 연결부위가 견고하지 못하여 다른 시스템에 비해 냉매의 누설량이 많기 때문이다⁹⁻¹¹⁾.

환경친화적인 자연냉매인 이산화탄소를 작동유체로서 사용하는 냉동/공조 시스템은 이제 기존의 냉매를 대체하면서 또한 고효율을 달성하여야 하는 이중의 과제를 지니고 있다. 본 연구는 이러한 이산화탄소 냉동/공조 시스템을 연구하기 위한 초기 단계로서 이산화탄소의 열역학적 성질과 냉동 시스템의 작동 특성을 이론적인 사이클 모사를 통해 고찰하고자 한다.

2. 이산화탄소의 열역학적 성질

냉동/공조 시스템의 냉매를 선정하기 위해서는 우선 열역학적 물성치에 대한 평가가 이루어져야 한다. 이를 위하여 이산화탄소와 R22, R134a에 대하여 온도의 변화에 따른 포화압력, 증발잠열, VCR의 변화를 계산하여 Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3에

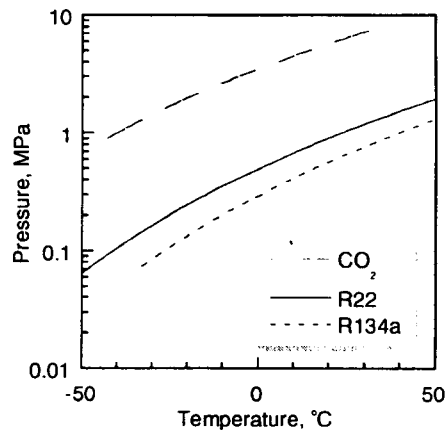


Fig. 1 Vapor pressure of CO₂, R22, and R134a with temperature.

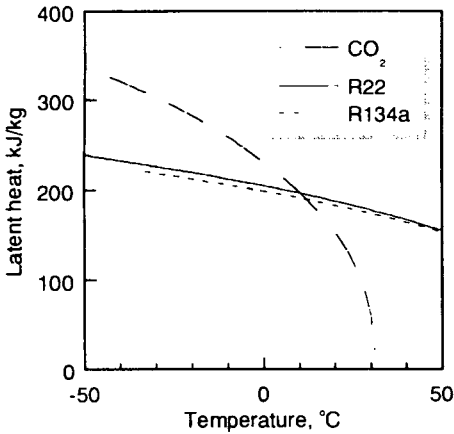


Fig. 2 Latent heat of CO₂, R22, and R134a with temperature.

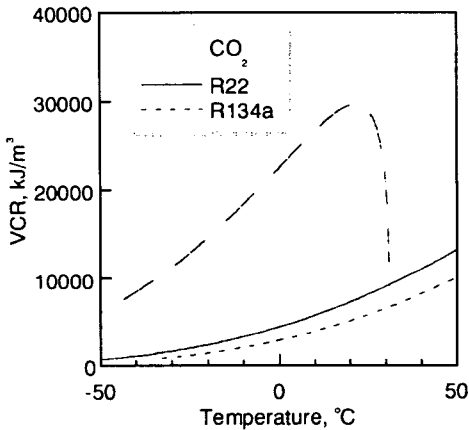


Fig. 3 VCR of CO₂, R22, and R134a with temperature.

나타내었다. 여기서 VCR은 증발잠열을 포화기체의 비체적으로 나눈 값이다. R12의 대체 냉매로 사용되고 있는 R134a와 대체가 진행 중인 R22를 이산화탄소와 비교하기 위하여 함께 검토하였다. 냉매들의 물성치 계산에는 전산화된 프로그램으로부터 구하였다¹²⁾.

포화증기압을 고려하면 기존의 대체 냉매를 선정하던 방식으로는 이산화탄소가 R134와 R22의 대체 냉매로서 적절하지 못하다. 이는 대체냉매를 선정할 때 기존의 시스템의 변경을 최소화하려고 하기 때문인데, 예를 들어 혼합냉매를 사용하고자 할 때에도 연구자들은 대체하고자 하는 냉매의 포화증기압보다 높은 물질 A와 그보다 낮은 물질 B

를 혼합하는 방식으로 되도록 포화증기압이 비슷한 물질을 찾기 때문이다. 이러한 관점에서 이산화탄소의 경우 압력 범위가 기존의 냉매에 비해 매우 높기 때문에 적절하지 않다고 판단될 수 있으나, 현재 이산화탄소 냉동시스템에 대한 연구의 관점은 기존의 냉동/공조시스템에 비해 고효율, 고성능이면서 반드시 환경친화적인 냉매를 사용하자는 것이기 때문에 기존의 방식과는 새로운 관점에서 접근하여야 한다고 판단된다.

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 단위질량당 증발 잠열을 비교하여 볼 때 이산화탄소는 저온에서 기존의 냉매에 비해 크게 나타나지만 약 10°C 이상의 영역에서는 오히려 작아진다. 이는 이산화탄소의 임계점이 31.1°C로 낮기 때문에 임계점에 가까워질수록 0에 접근하기 때문이며, 따라서, 시스템을 설계할 때 임계점 근처에서의 작동을 피할 수 있도록 증발기, 방열기 압력 조건 설정에 세심한 주의가 필요함을 알 수 있다.

Fig. 3에 나타낸 바와 같이 VCR은 기존의 냉매에 비해 아주 큰 값을 보인다. 이는 동일한 압축기 배제 체적에서 큰 냉동 효과를 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 다시 말하면 소형의 압축기로도 동일한 냉동 효과를 얻을 수 있다는 의미이기도 하다.

3. 이산화탄소 냉동 시스템의 성능

3.1 사이클 모사

이산화탄소의 임계온도는 31.1°C로 무척 낮아 냉동사이클을 구성할 경우 방열과정은 임계점 이상에서 일어나고 증발과정은 임계점 이하에서 일어날 수 있다. 이를 trans-critical cycle이라 한다. 임계점 이상의 압력에서는 포화상태가 존재하지 않고 등압과정이라 할 지라도 온도는 변화한다. 따라서, 단순히 방열부 압력과 증발부 압력을 갖게 하더라도 방열부의 온도를 결정할 수 없기 때문에 다른 냉매를 사용하는 시스템과 비교하기가 불가능하다. 따라서 2차유체의 방열기(응축기)와 증발기의 입출구의 온도를 비교기준으로 삼아 사이클 모사를 하는 것이 합리적이다¹³⁾. 본 연구에서 택한 계산의 조건은 다음과 같다. Fig. 4에 본 연구에서

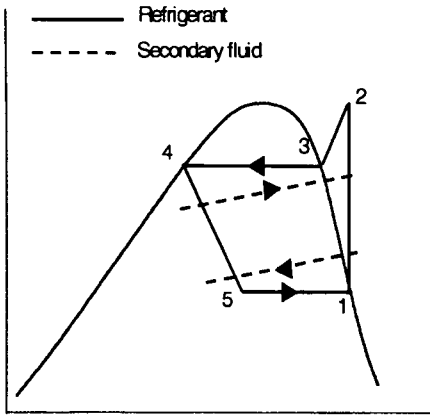


Fig. 4 Temperature-entropy diagram and operating cycle of refrigeration system with secondary fluids.

채택한 기본적인 냉동 사이클의 온도-엔트로피 선도를 나타내었다. 이해를 돕기 위하여 기존의 냉매를 사용하는 경우에 대한 선도를 나타내었다. 이산화탄소를 사용하는 경우는 특히, 과정 (2-4)가 임계점 이상에서 일어나는 경우로 기존의 냉매를 쓰는 경우와 다르게 나타난다.

- 2차유체의 방열기(응축기) 입구온도 : 25 °C
- 2차유체의 방열기(응축기) 출구온도 : 35 °C
- 2차유체의 증발기 입구온도 : 15 °C
- 2차유체의 증발기 출구온도 : 5 °C
- 냉방용량 : 3 kW
- 증발기의 총열관류율(UA) : 0.20 kW/°C
- 방열기(응축기)의 총열관류율(UA) : 0.24 kW/°C

나머지 모든 조건은 이상적인 표준 냉동사이클의 조건과 동일하게 택하였다¹⁴⁾. 즉, 과열, 과냉은 없으며 압축기에서는 등엔트로피 압축이 일어나는 것으로 가정하였고, 열교환기에서의 압력강하는 고려하지 않았다.

사이클 모사의 과정은 다음과 같다.

우선 증발부에서 주어진 냉방용량, 2차유체의 증발기 입출구 온도, 증발기의 총열관류율을 만족하는 증발압력(증발온도)을 식 (1)을 이용하여 반복계산으로 찾는다.

$$Q_e = (UA)_e (\Delta T_{LM})_e \quad (1)$$

이산화탄소 시스템의 경우 점2의 압력(p_2)가 주어져야 방열과정의 상태점을 결정할 수 있다. 따라서, 주어진 압력 p_2 에 대하여 등엔트로피 압축 조건으로부터 2점의 상태점을 결정한다. 한편, p_2 가 주어져도 이산화탄소의 경우 4점의 상태가 포화액이 아니기 때문에 직접적으로 4점의 상태점을 결정할 수는 없다. 따라서, 4점의 온도를 반복계산으로 구하게 되는데, 이 과정은 증발기에서의 조건을 찾는 과정과 유사하다. 즉, 4점의 온도를 가정하면, 주어진 압력(p_2)과 2점의 온도(T_2)에 대해서 계산된 조건인 방열량은 식 (2)로부터 구할 수 있고, 식(3)에 표현한 바와 같이 주어진 조건인 방열기의 총열관류율이 같아지는 점을 반복계산으로 찾아낼 수 있다.

$$Q_c = \dot{m}(h_2 - h_4) \quad (2a)$$

$$\dot{m} = \frac{Q_e}{(h_1 - h_5)} \quad (2b)$$

$$Q_c = (UA)_c (\Delta T_{LM})_c \quad (3)$$

이러한 반복계산을 통해 4점의 온도 T_4 를 찾으면 나머지 모든 상태점과 냉동시스템의 변수를 결정할 수 있다. 냉동시스템의 성능계수, 냉방용량, 압축기 소요동력, 냉매의 단위체적당 열량 등은 식 (4)~식(7)로 정의되는 값이다.

$$COP_R = \frac{Q_e}{W_c} \quad (4)$$

$$Q_e = \dot{m}(h_1 - h_5) \quad (5)$$

$$W_c = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (6)$$

$$COP_R = \frac{Q_e}{\dot{m} \cdot v_1} \quad (4)$$

3. 2 사이클 모사 결과

주어진 조건, 즉, 2차유체의 입출구 온도가 정해진 상태에서 주어진 냉방용량을 만족하기 위한 시스템의 각 상태점을 반복계산을 통해 결정하였다. 이산화탄소를 사용하는 냉동시스템의 작동 특성을 고찰하였으며, 비교를 위하여 기존의 냉매

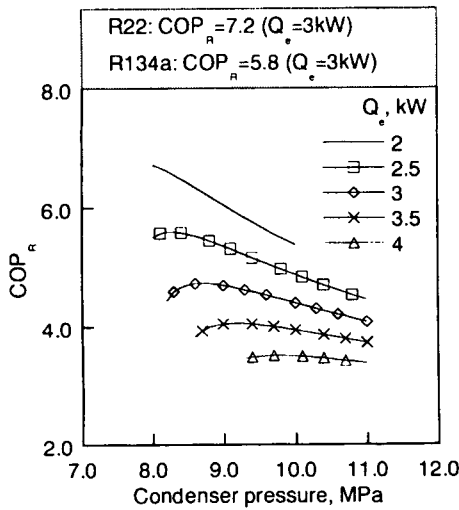


Fig. 5 Influence of varying high-side pressure on COP in a trans-critical CO₂ cycle

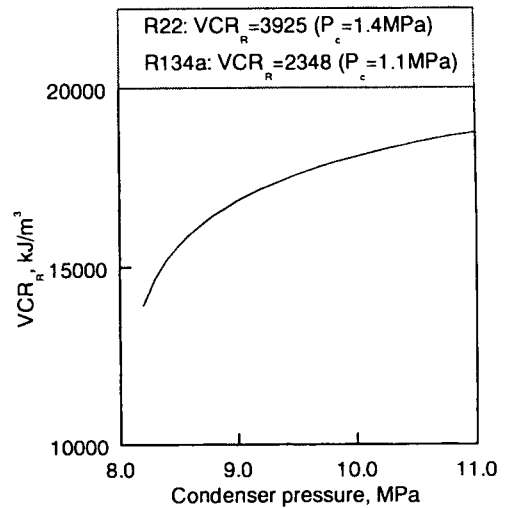


Fig. 6 Variation of VCR with high-side pressure in a trans-critical CO₂ cycle

R22, R134a를 사용하는 냉동 시스템의 특성도 같이 나타내었다.

이산화탄소의 경우 방열기 작동 압력의 변화에 따른 성능계수(COP_R)의 변화를 냉방용량 2kW~4kW에 대해서 Fig. 5에 나타내었다. 이산화탄소를 사용하는 경우 냉동시스템의 성능계수는

동일한 냉방용량을 유지한 조건에서 비교하면, 냉매 R22와 R134a를 사용하는 경우보다 다소 작은 것으로 나타나고 있다. 그러나, 환경문제 등 다른 측면에서 이산화탄소를 냉매로 사용하기 위해서는 이러한 단점을 극복할 수 있도록 성능향상에 관한 연구도 지속되어야 할 것이다. 또한, 본 연구의 경우 각 열교환기에서 열전달과 관련한 정확한 정보 대신 총열관류율로서 그 특징을 표현하였기 때문에 개별 냉매의 정보를 도입함으로써 좀더 정확한 사이클 모사가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

한편, 증발부의 온도가 고정된 상태에서 방열압력을 변화시키면, 등엔트로피 압축에 의한 점2의 온도가 상승하고 따라서 압축일이 증가하여 성능계수는 감소한다. 그러나, Fig. 5에서와 같이 성능계수를 최대화하는 점이 존재한다는 것을 알 수 있다. 방열 압력이 높아지면 방열기에서 냉각된 냉매(이산화탄소)가 팽창과정을 거친, 점5의 건도가 감소하면서 냉동효과가 증가하고 냉매유량은 감소

한다. 그러나, 방열압력이 증가하면 점2의 온도가 상승하여 엔탈피 또한 증가하며, 그 증가율이 냉매유량의 증가율보다 크기 때문에 압축기 일이 증가하여 성능계수가 감소한다. 한편, 낮은 압력 범위에서는 주어진 냉방용량에서 냉동효과의 증가로 인한 냉매유량의 감소율이 압축기에서의 엔탈피 차이의 증가율보다 상대적으로 크기 때문에 성능계수는 오히려

증가하는 경향을 보인다. 이는, 기존의 냉매를 사용할 때에는 나타나지 않는 현상으로 이산화탄소를 사용하는 냉동시스템을 설계할 경우 방열부 압력 조건 등의 선정이 전체 시스템의 성능을 결정짓는 주요한 변수가 됨을 알 수 있다.

방열기 작동 압력의 변화에 따른 VCR의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 이 때, VCR은 식 (7)과 같이 정의한다. 다른 냉매와의 성능을 비교하기 위하여 동일한 냉방용량을 유지하는 것으로 가정하였다. 이 때, 이산화탄소의 경우 이 값이 기존의 냉매 R22, R134a에 비하여 4배 이상 큰 값을 나타낸다. 즉, 동일한 냉방용량을 유지하고자 할 때 냉매의 체적유량이 작아도 되기 때문에 압축기의 소형화, 경량화가 가능하다는 것을 의미한다. 이는 자동차 공조용 시스템에 이산화탄소를 도입할 경우 설치 공간과 차량 중량 등 여러 가지 측면에서 바람직한 특징으로 판단된다.

동일한 냉방용량을 유지하는 본 사이클 모사의 경우 방열부(응축부)에서의 방출 열량과 대수평균 온도차를 Fig. 7, Fig. 8에 나타내었다. 방열부 압력이 증가함에 따라 대수평균온도차도 증가하고, 총열관류율이 일정한 것으로 가정하였으므로 방출열량 또한 증가한다. 그러나, 낮은 방열압력에서는 오히려 압력이 증가할수록 방출열량이 감소하는 경향을 보이며 따라서 대수평균온도차 또한 감

소한다. 이는 전술한 바와 같이 냉매 유량의 감소율이 이 부분에서 엔탈피차의 증가율보다 크게 나타나기 때문에, 엔탈피 차와 질량유량의 곱으로 표현되는 방열량이 감소하는 것이다. 이러한 경향은 앞서 고찰한 성능계수 뿐만 아니라 열교환기의 설계에도 최적설계의 개념을 도입해야 한다는 것을 의미하고 있다.

4. 결 어

본 연구에서는 이산화탄소를 사용하는 냉동시스템의 성능 특성을 알아보기 위하여 2차유체의 입출구온도를 일정하게 유지하는 조건 하에 사이클 모사를 수행하였다. 또한, 기존의 냉매 R22와 R134a에 대하여도 동일한 사이클 모사를 수행하였다.

이산화탄소를 사용하는 경우 이론적인 성능계수 측면에서는 기존 냉매 R22와 R134a에 비교하여 그다지 큰 이점이 없지만, 압축기를 소형화 경량화할 수 있는 가능성이 있고 열교환기 설계 측면에서도 기존의 순수 냉매에서는 이용할 수 없는 방열과정에서의 온도구배 현상을 이용함으로써 경제적인 설계가 가능하다는 이점을 고찰하였다. 또한, 방열기 작동 압력이 전체 시스템의 성능을 최적화하는 범위가 존재함을 고찰하였다.

마지막으로, 성능과 관련된 모든 장단점에도 불구하고 환경문제 측면에서 모든 규제를 만족하는 새로운 냉매를 개발하는 것과 더불어 이를 만족하는 기존의 냉매의 사용을 고려함으로써, 전세계적인 규제 사항에 효율적으로 대처한다는 측면에서 이산화탄소를 냉동/공조 시스템에 사용하기 위한 전반적인 연구가 계속되어야 한다고 판단된다.

참고문헌

1. UNEP, Montreal Protocol on substances that deplete the ozone layer, 1987.
2. UNEP, Copenhagen Decision, the fourth meeting for the parties to the Montreal Protocol, 1992.
3. J. M. Calm and D. A. Didion, "Trade-offs in

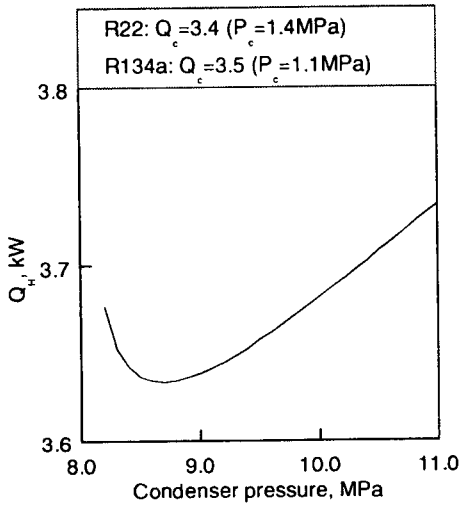


Fig. 7 Variation of rejected heat at gas cooler with high-side pressure in a trans-critical CO₂ cycle

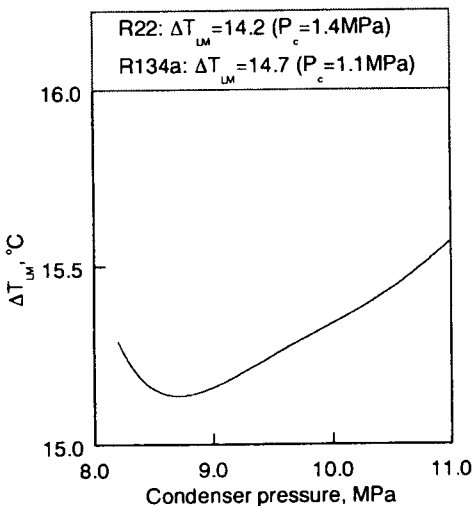


Fig. 8 Variation of LMTD at gas cooler with high-side pressure in a trans-critical CO₂ cycle

- refrigerant selections : past, present, and future," *Int. J. Refrig.*, Vol. 21, No. 4, pp. 308~321, 1998.
4. 신지영, 김민수, 노승탁, "순수 및 혼합냉매의 유동 증발 열전달 상관식", *공기조화냉동공학 논문집*, 제 8권, 제2호, pp. 254~266, 1996.
 5. J. Y. Shin, M. S. Kim, and S. T. Ro, "Experimental Study on Convective Boiling Heat Transfer of Pure Refrigerants and Refrigerant Mixtures in a Horizontal Tube", *Int. J. Refrig.*, Vol. 20, No. 4, pp. 267~275, 1997.
 6. 장영수, 김민수, 노승탁, "탄화수소 냉매를 사용한 냉방시스템의 성능 및 열전달특성", *대한기계학회 논문집(B)*, 제21권, 제5호, pp. 713~723, 1997.
 7. S. B. Riffat, C. F. Afonso, A. C. Oliveira, and D. A. Reay, "Natural refrigerants for refrigeration and air-conditioning systems," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 33~42, 1997.
 8. N. J. Hewitt and J. T. McMullan, "The replacement of CFCs in refrigeration equipment by environmentally benign alternatives," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 17, Nos. 8-10, pp. 955~972, 1997.
 9. J. Petersen, A. Hafner, and G. Skaugen, "Development of compact heat exchangers for CO2 air-conditioning systems", *Int. J. Refrig.*, Vol. 21, No. 3, pp. 180~193, 1998.
 10. Y. Hwang and R. Radermacher, "Theoretical evaluation of Carbon Dioxide refrigeration cycle," *HVAC&R Research*, Vol. 4, No. 3, pp. 245~263, 1998.
 11. P. Neska, H. Rekstad, G. R. Zakeri, and P. A. Schiefloe, "CO2-heat pump water heater : characteristics, system design and experimental results," *Int. J. Refrig.*, Vol. 21, No. 3, pp. 172~179, 1998.
 12. PROPATH Ver. 8.1, PROPATH Group, 1993.
 13. 장세동, 신지영, 노승탁, "R12 및 R22 대체냉매의 열역학적 물성치 및 냉동기의 성능비교," *공기조화냉동공학 논문집*, 제5권, 제1호, pp. 73~83, 1993.
 14. 노승탁, *공업열역학*, 문운당. 1994.

저 자 소 개



신지영(申智榮)

1967년 7월생, 1990년 서울대학교 기계공학과 졸업, 1992년 동 대학원 졸업(석사), 1996년 동 대학원 졸업(박사), 1996년~1998년 현대 엔지니어링 주식회사, 1998년~1999년 서울대학교 정밀기계설계공동연구소, 1999년~현재 동의대학교 기계산업시스템공학부 전임강사, 당학회 회원, 대한기계학회, 공기조화냉동공학회, 대한냉동협회 회원.