

이산화탄소에어컨의 효율적인 운용을 위한 실용알고리즘

한도영[†], 박승호^{*}

국민대학교 기계·자동차공학부, 국민대학교 기계공학과 대학원^{*}

Practical Algorithms for the Effective Operation of a CO₂ Air-conditioner

Doyoung Han[†], Seungho Park^{*}

ABSTRACT: For the effective control of a CO₂ air-conditioning system, the system high-side pressure algorithm, the indoor temperature algorithm, and the outdoor fan algorithm were developed. The system high-side pressure algorithm was composed of the setpoint algorithm, the reset algorithm, and the electronic expansion valve control algorithm. The indoor temperature algorithm was composed of the compressor control algorithm and the indoor fan control algorithm. These algorithms were tested by using mathematical models developed from the previous study. Results from the setpoint step change test and the disturbance test showed good control performances. Therefore, algorithms developed in this study may practically used for the control of a CO₂ air-conditioning system.

Key words: CO₂ air-conditioning system(이산화탄소에어컨시스템), High-side pressure control(고압 측압력제어), Indoor temperature control(실내온도제어), Practical algorithm(실용알고리즘), Polynomial equation(다항식)

기 호 설 명

P : 압력 [bar]
 rpm : 압축기회전수 [rpm]
 T : 온도 [°C]
 ϵ : 유용도
 Ntu : 전달단위수

하첨자

e : 오차
in : 실내
out : 실외
reset : 재설정
set : 설정
system : 시스템

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4675; fax: +82-2-910-4839

E-mail address dyhan@kookmin.ac.kr

1. 서론

현재의 자동차 에어컨시스템은 R-134a를 냉매

로 사용하고 있다. 그러나 환경문제로 인하여 R-134a 냉매의 사용이 어려운 실정이며 이에 따라 환경피해가 적은 천연냉매인 이산화탄소가 주목받고 있다.^(1,2)

하지만 이산화탄소 냉매를 이용한 냉방시스템은 아임계 상태에서 초임계 상태로 운전되는 특성을 갖고 있으며 따라서 이산화탄소에어컨시스템은 시스템고압 제어방식과 같은 새로운 제어방법으로 시스템효율을 향상시키고 있다.

시스템고압을 제어하기 위한 기존의 방법은 시스템효율이 최대가 되는 시스템고압값을 설정하기 위한 고압설정알고리즘과 시스템효율과 동시에 냉방능력을 고려하여 필요에 따라 설정된 압력을 재설정하는 고압재설정알고리즘으로 구성되어 있다. 고압설정알고리즘으로 실내온도, 실외온도, 압축기회전수를 입력으로 하는 3×8×1의 다층 신경망을 사용하였고 고압재설정알고리즘으로 실내온도차와 고압설정알고리즘에서 계산된 고압설정값을 입력으로 하는 퍼지알고리즘을 사용하였다.⁽³⁾ 그러나 기존의 신경망을 이용한 고압설정알고리즘과 퍼지로직을 이용한 고압재설정알고리즘은 프로그래밍이 비교적 복잡하고 계산시간이 많이 소요되기 때문에 실제 제품에 적용하기에는 많은 한계를 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 실제시스템에 적용할 수 있는 실용적인 알고리즘을 개발한 후 그 제어결과를 시뮬레이션을 통해 확인하는 것을 목적으로 한다.

2. 에어컨시스템 모델

이산화탄소에어컨은 Fig. 1과 같이 가스쿨러, 증발기, 내부열교환기 등의 열교환기와 압축기, 전자팽창밸브, 어큐뮬레이터, 오일분리기 등으로 구성되어 있다. Table 1에는 본 연구에서 사용된 각 부품의 사양을 보여준다.

이산화탄소에어컨시스템에 대한 각종 자료와 시제품을 분석한 후 에어컨시스템의 동적모델을 개발하였다.⁽⁴⁾ 실험에서 획득한 시스템고압, 시스템저압, 압축기회전수에 따른 냉매유량 데이터를 사용하여 압축기의 정적모델을 개발하였고 전자팽창밸브의 냉매유량 특성을 고려하여 전자팽창밸브의 정적모델을 개발하였으며 가스쿨러와 증발기는 직교류 열교환기로, 내부열교환기는 대향

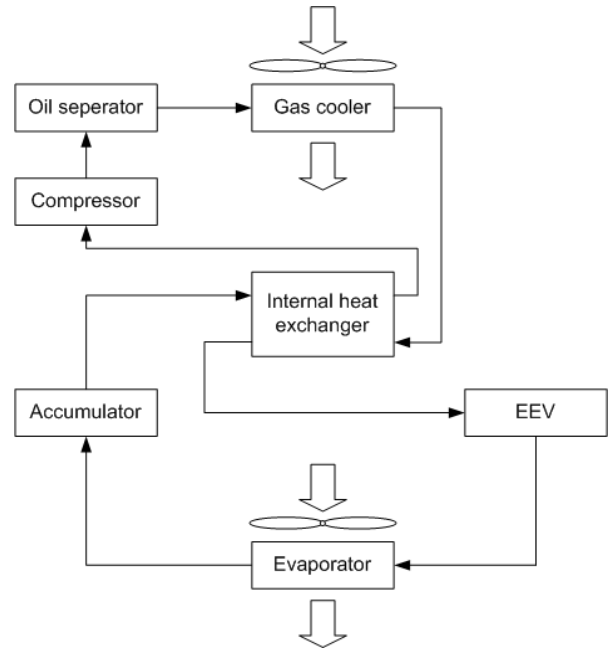


Fig. 1 The CO₂ automotive air-conditioner.

류 열교환기로 가정하여 ϵ -Ntu방법⁽⁵⁾을 사용하여 열교환기의 정적모델을 개발하였다. 개발된 각종 정적모델은 시간지연을 갖는 1차시스템으로 가정하여 에어컨의 동적모델로 전환하였으며 에

Table 1 Components of the CO₂ air-conditioning system

	Specification
Compressor	Reciprocating type Displacement: 33.5 cc/rev
Expansion device	Electronically controlled expansion valve: 440 steps
Gas cooler	Micro-channel, Al extruded tubes 3 and 4 Pass, Multi flow type Core size: 635(W)×392(H)×17.2(D) mm Front area: 0.249 m ²
Evaporator	Micro-channel, Al extruded tubes 2 Slab, 4 Pass, Multi flow type Core size: 228(W)×180(H)×44(D) mm Front area: 0.0410 m ²
Internal heat exchanger	Micro-channel, Al extruded tubes 2 Row, Counter flow type Size: 250(W)×60(H) mm (H/P: Φ 1.0 mm) 200(W)×60(H) mm (L/P: Φ 1.5 mm)

어컨모델을 덕트와 자동차실내로 구성된 적용시스템모델에 사용하여 실용알고리즘을 개발하고 분석하였다.

3. 실용알고리즘

이산화탄소에어컨시스템을 효과적으로 운용하기 위하여 Fig. 2와 같이 시스템고압알고리즘, 실내온도알고리즘, 그리고 실외팬알고리즘을 개발하였다.⁽⁶⁾

3.1 시스템고압알고리즘

전자팽창밸브를 사용하여 시스템고압을 제어하기 위하여 고압설정, 고압재설정, 고압제어알고리즘으로 구성된 시스템고압알고리즘을 사용하였다.

3.1.1 고압설정

실내온도 T_{in} , 실외온도 T_{out} , 압축기회전수 rpm에 대해서 시스템효율이 최대가 되는 시스템고압값을 구하기 위해 T_{in} , T_{out} , rpm을 각각 선택한 후 전자팽창밸브 개도량을 440스텝에서 100스텝으로 10스텝씩 감소시켜 고압측 압력을 증가시키면서 시스템의 효율이 최대가 되는 고압설정값 P_{set} 을 얻은 후 그 결과를 고압설정알고리즘 개발을 위한 데이터로 사용하였다.⁽⁷⁾ 주어진 T_{in} , T_{out} , rpm에 대하여 P_{set} 을 얻기 위하여 식 (1)과 같은 다항식을 사용하였으며

$$P_{set} = [(a_1 T_{out}^2 + a_2 T_{out} + a_3)rpm + a_4 T_{out}^2 + a_5 T_{out} + a_6] T_{in} + (b_1 T_{out}^2 + b_2 T_{out} + b_3)rpm + b_4 T_{out}^2 + b_5 T_{out} + b_6 \quad (1)$$

여기서 $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$ 과 $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$ 은 상수로 최소제곱법을 사용하여 얻을 수 있다. Table 2에서는 750, 1000, 1250, 1500, 1750 rpm의 rpm, 30, 32, 34, 36, 38, 40°C의 T_{out} , 20, 22.5, 25, 27.5, 30°C의 T_{in} 중 각각 하나씩 선정하여 그때의 고압설정값을 사용하여 최소제곱법을 통해 얻은 상수를 보여준다.

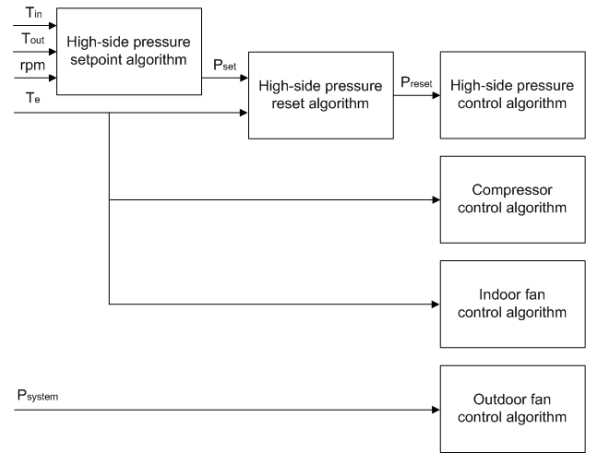


Fig. 2 Algorithms for a automotive CO₂ air-conditioner control.

3.1.2 고압재설정

고압설정알고리즘에서는 에어컨의 최대효율만을 고려하여 P_{set} 을 설정하였으나 필요에 따라 시스템 효율과 시스템 냉방능력을 동시에 고려한 운전이 요구된다.⁽⁸⁾ 이를 위해 고압설정알고리즘에서 계산된 P_{set} 을 P_{reset} 으로 재설정하기 위한 고압재설정 알고리즘이 요구된다. 설정된 시스템고압을 시스템 냉방능력을 고려하여 재설정하기 위해 식 (2)과 같은 다항식을 사용하였으며

$$P_{reset} = k_p T_e + P_{set} \quad (2)$$

여기서 실내온도차 T_e 는 실내온도 T_{in} 과 실내설정온도 T_{set} 의 차이를 의미하고 k_p 는 상수로 1.575를 선정하였으며 P_{reset} 의 테드밴드는 1.0으로 선정하였다.

Table 2 Coefficients obtained from the least square method

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
3.572×10^{-7}	-1.955×10^{-5}	2.973×10^{-4}	-3.058×10^{-3}	0.1674	-2.546
b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
-1.684×10^{-5}	9.319×10^{-4}	-2.660×10^{-2}	0.1442	-7.978	227.8

3.1.3 고압제어

시스템고압을 설정된 압력으로 유지하기 위하여 전자팽창밸브를 제어하였다. 전자팽창밸브를 제어하기 위해 고압설정값과 측정값의 오차를 입력변수로 하고 비례게인 3, 적분게인 0.0001, 데드밴드 0.05 bar인 비례적분로직을 사용하였다. 제어주기는 10초로 선정하였다.

3.2 실내온도알고리즘

압축기와 실내팬을 사용하여 실내온도를 제어하기 위하여 실내온도알고리즘을 사용하였다.

3.2.1 압축기제어

단속으로 제어가능한 압축기를 사용하여 실내온도를 설정된 온도로 유지하기 위하여 실내의 설정온도와 측정온도의 차를 입력으로 하고 비례게인 2, 적분게인 0.0001, 데드밴드 1.5로 하는 비례적분로직을 사용하였다. 제어주기는 10초로 선정하였다.

3.2.2 실내팬제어

4단으로 제어가능한 실내팬을 사용하여 실내온도를 설정된 온도로 제어하기 위하여 설정된 실내온도와 센서에 의해 측정된 실내온도와의 차를 입력으로 하는 비례적분로직을 사용하였다. 비례게인, 적분게인으로 3, 0.001을 사용하여 신호값을 계산한 후 Fig. 3과 같이 11, 18, 23을 기준으로 하고 데드밴드 1을 사용하여 실내팬의 단수를 결정하였다. 제어주기는 5초로 선정하였다.

3.3 실외팬알고리즘

실외팬을 사용하여 시스템안전을 위하여 선정된 시스템고압값인 90~140 bar로 유지하기 위하여 시스템고압을 입력으로 하고 신호값 115 bar를 기준으로 데드밴드가 40 bar인 단속제어로직을 사용하였다. 실외팬의 제어주기는 10초로 선정하였다.

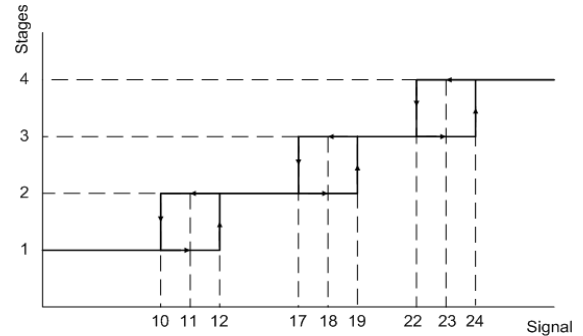


Fig. 3 Indoor fan stage control.

4. 알고리즘의 성능분석

실용알고리즘의 성능을 분석하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 실내온도가 안정되게 제어되는 정상상태에서 실내설정온도를 계단변화시키는 경우와, 실외공기를 600초 동안 실내로 유입시켜 시스템에 외기외란을 주었을 경우에 대하여 제어성능을 확인하였다.

4.1 실내설정온도계단변화시험

실내온도가 안정하게 제어되는 정상상태에서 실내설정온도를 계단변화시켜 실내설정온도계단변화성능시험을 수행하였다. 실외온도 35℃, 압축기회전수 1800 rpm, 가스쿨러 입구풍속 3 m/s의 조건을 사용하였다. 실내온도가 안정하게 제어되고 있을 때인 시험시작 후 500초에 설정온도를 27℃에서 +5℃ 계단변화 시켰고 1000초에 32℃에서 -5℃ 계단변화 시켰으며 그 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보듯이 설정온도를 계단변화 시켜도 시스템고압과 실내온도는 설정값으로 적절히 제어되었으며 그때의 전자팽창밸브, 압축기, 실내팬도 안정적으로 제어됨을 확인하였다. 실내설정온도를 5℃ 높은 500초부터 214초 동안 압축기가 정지되어 실내온도를 설정온도로 상승시킨 후 상승된 설정온도로 적절히 제어되었다가, 설정온도를 5℃ 낮춘 1000초부터 압축기가 운전되고 실내팬이 32초 동안 2단으로 운전되어 실내온도를 설정온도로 하강시킨 후 하강된 설정온도로 적절히 제어되는 것을 알 수 있었다.

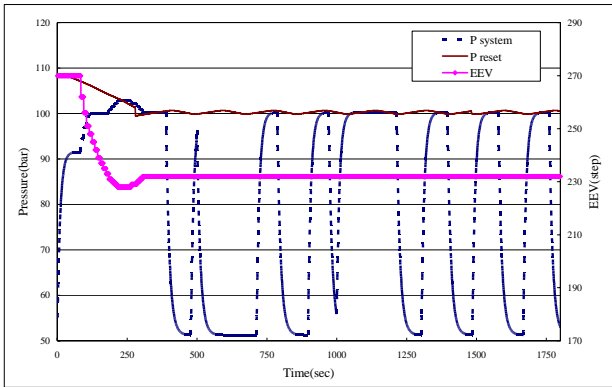


Fig. 4 High-side pressure and EEV control steps (Setpoint step change test).

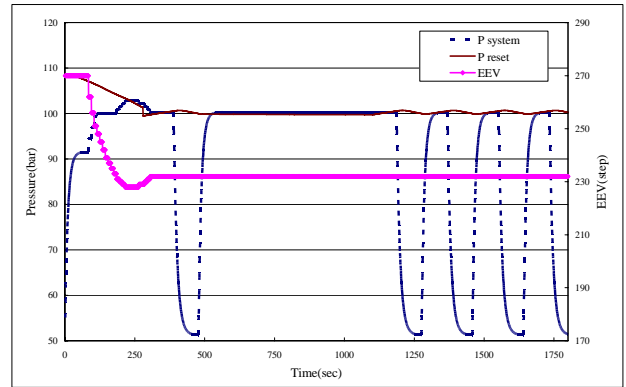


Fig. 6 High-side pressure and EEV control steps (Disturbance test).

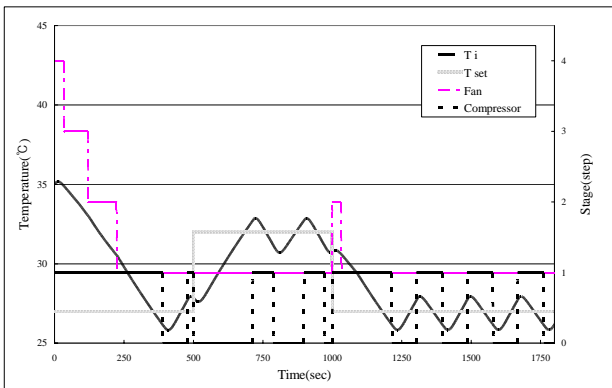


Fig. 5 Indoor temperature, indoor fan stages and compressor state (Setpoint step change test).

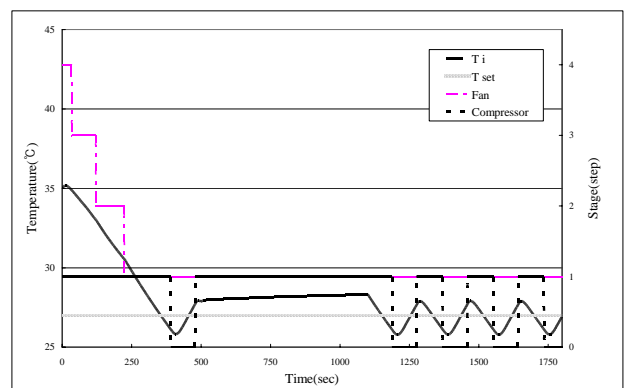


Fig. 7 Indoor temperature, indoor fan stages and compressor state (Disturbance test).

4.2 외기외란성능시험

외란에 대한 제어알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 실외온도 35℃, 실내설정온도 27℃, 압축기회전수 1800 rpm, 가스쿨러 입구속도 3 m/s로 유지하면서 실내온도가 안정된 시험시작 후 500초에 실외공기를 실내로 600초간 유입시켜 시스템에 외란을 제공하면서 외기외란성능시험을 수행하였다. Fig. 6과 Fig. 7에서 보듯이 실내온도가 안정된 시험시작 후 500초에 600초 동안 실외공기가 유입되어 실내온도가 설정온도 이상으로 상승되었을 때 압축기는 이를 보상하기 위해 계속 가동되었으며 외기외란이 제거된 후에는 실내온도가 설정온도 부근에서 적절히 제어되었고 그때의 전자팽창밸브, 압축기, 실내팬 등도 안정되게 제어되어 개발된 알고리즘이 외기외란에도 강인함을 확인하였다.

5. 결론

이산화탄소에어컨시스템을 효과적으로 운용하기 위하여 가스쿨러, 증발기, 내부열교환기, 압축기, 전자팽창밸브 등으로 구성된 에어컨모델과 덕트, 자동차실내로 구성된 적용시스템모델을 사용하여 시스템고압알고리즘, 실내온도알고리즘, 실외팬알고리즘으로 구성된 실용알고리즘을 개발하였다.

시스템고압알고리즘은 고압설정, 고압재설정, 고압제어알고리즘으로 구성되어 있다. 고압설정 알고리즘으로 실내온도, 실외온도, 압축기회전수를 입력으로 하고 고압설정값을 출력으로 하는 다항식을 사용하였고 고압재설정알고리즘으로 고압설정값과 실내온도차를 입력으로 하고 고압재설정값을 출력으로 하는 일차식을 사용하였으며, 고압제어알고리즘으로 시스템고압오차를 입력으로 하고 데드밴드를 적용한 비례적분 알고리즘을

사용하여 전자팽창밸브를 제어하였다. 실내온도 알고리즘은 압축기제어, 실외팬제어알고리즘으로 구성되어 있으며, 제어알고리즘으로 실내온도오차를 입력으로 하고 데드밴드를 적용한 비례적분 알고리즘을 사용하였다. 실외팬알고리즘으로 시스템 고압설정값을 입력으로 하고 데드밴드를 적용한 단속제어 알고리즘을 사용하였다.

동적모델과 개발된 제어알고리즘을 사용하여 시뮬레이션 프로그램을 개발한 후 실내설정온도 계단변화와 외기외란에 대한 성능을 평가하였다. 실내설정온도계단변화의 경우와 외기외란을 적용한 경우 모두 시스템고압과 실내온도가 적절히 제어되었으며 그 때의 전자팽창밸브, 압축기, 실외팬, 실외팬도 안정되게 제어됨을 확인할 수 있었다.

따라서 개발된 실용알고리즘은 기존의 신경망을 이용한 고압설정알고리즘과 퍼지로지을 이용한 고압제설정알고리즘에 비해 프로그래밍이 간단하고 계산시간도 적게 소요되기 때문에 자동차 이산화탄소에어컨시스템 제어에 실용적이면서도 효과적으로 적용할 수 있을 것이라고 판단된다.

참고문헌

1. Culter, B., and Hwang, Y. H., 2000, Comparison of automotive air-conditioning with CO₂ and R134a, Center of Environmental Energy Engineering, Department of Mechanical Energy Engineering, University of Maryland.

2. Hirao, T., Mizukami, H., Takeuchi, M., and Taniguchi, M., 2000, Development of air conditioning system using CO₂ for automobile, Mistubishi Heavy Industries, Nagoya R&D Center.
3. Han, D., and Jang, K., 2006, Dynamic models and intelligent control algorithms for a CO₂ automotive air conditioning system. KSAE, Vol. 14, No. 4, pp. 49-58.
4. Han, D., and Jung, J., 2004, Effective dynamic models of a CO₂ automotive air-conditioning system for the control algorithm development, Proceedings of SAREK, pp. 813-818.
5. Mills, A. F., 1999, Basic heat and mass transfer, Prentice hall, pp. 615-711.
6. Han, D., and Noh, H., 2007, Control performances of a CO₂ automotive air-conditioning control system, Proceedings of KATECH, pp. 111-117.
7. Han, D., and Jung, J., 2004, High-side pressure setpoint algorithm for a CO₂ automotive air-conditioning system by using fuzzy logics, Proceedings of SAREK, pp. 481-486.
8. Han, D., and Jang, K., 2005, High-side pressure reset algorithm for a CO₂ automotive air conditioner, Proceedings of SAREK, pp. 926-931.