

최소제곱법과 비례로직을 이용한 시스템고압 알고리즘

한 도 영[†], 노 희 전^{*}

국민대학교 기계·자동차공학부, 국민대학교 기계공학과 대학원^{*}

The High-side Pressure Algorithm by using a Least Square Method and a Proportional Logic

Doyoung Han[†], Heejeon Noh^{*}

ABSTRACT: In order to protect the environment from the refrigerant pollution, the CO₂ may be regarded as one of the most attractive alternative refrigerants for an automotive air-conditioning system. Control methods for a CO₂ system should be different because of CO₂'s unique properties as a refrigerant. Especially, the high-side pressure of a CO₂ system should be controlled for the effective operation of the system.

High-side pressure algorithms, which were composed of the pressure setpoint algorithm and the pressure setpoint reset algorithm, were developed. Pressure setpoint algorithms, by using a neural network and by using a least square method, were developed and compared. Pressure setpoint reset algorithms, by using a fuzzy logic and by using a proportional logic, were also developed and compared. Simulation results showed that a least square method was more useful than a neural network for the pressure setpoint algorithm. And a proportional logic was more practical than a fuzzy logic for the pressure setpoint reset algorithm.

Key words: Automotive CO₂ air-conditioning system(자동차 이산화탄소 냉방시스템), High-side pressure control(고압측 압력제어), Neural network(신경망), Least square(최소제곱법), Fuzzy logic(퍼지로직), Proportional logic(비례로직)

기 호 설 명

COP : 성능계수
 P : 압력 [bar]
 Rpm : 압축기 속도 [rpm]
 T : 온도 [°C]

하첨자

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

[†] Corresponding author

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

E-mail address dyhan@kookmin.ac.kr

1. 서론

자동차용 에어컨의 냉매로써 환경 친화적이고

열역학적 물성치가 우수한 이산화탄소 냉매의 사용이 주목받고 있다.⁽¹⁾ 기존의 자동차에어컨 시스템은 과열도를 제어하지만 이산화탄소 냉매를 이용한 자동차에어컨 시스템은 일반냉매의 냉방 사이클과 달리 10배 이상 높은 압력의 초임계 상태에서 운전되기 때문에⁽²⁾ 시스템 효율을 고려한 시스템고압 제어방식⁽³⁾과 같은 새로운 제어방법이 요구된다.

따라서 본 논문에서는 CO₂ 자동차에어컨 시스템의 특성을 고려하여 시스템고압을 설정할 수 있는 알고리즘을 개발한 후 성능을 확인하는 것을 목적으로 한다.

2. 냉방시스템 운용알고리즘

CO₂ 자동차에어컨 시스템을 효과적으로 운용하기 위하여 Fig. 1과 같이 고압설정, 고압재설정 알고리즘으로 구성된 시스템고압 알고리즘과 전자팽창밸브, 압축기, 실내팬, 실외팬 제어알고리즘으로 구성된 시스템 제어알고리즘을 사용하였다.

3. 고압설정 알고리즘

실험을 통해 시스템의 고압측 특성을 파악하기 위하여 실내온도 T_{in} , 실외온도 T_{out} , 압축기 속도 Rpm을 선택한 후 전자팽창밸브 개도량을 440스텝에서 100스텝으로 10스텝씩 감소시켜 고압측 압력을 증가시키면서 시스템의 효율이 최대가 되는 최대COP고압 P_{set} 을 얻은 후⁽⁴⁾ 그 결과를 고압설정알고리즘 개발에 사용하였다.

3.1 신경망 알고리즘

신경망 알고리즘으로 입력변수 T_{in} , T_{out} , Rpm 출력변수 P_{set} 으로 구성된 3×8×1의 다층신경망을

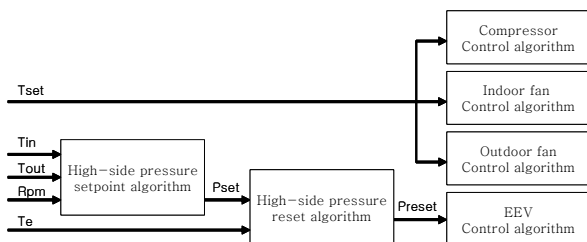


Fig. 1 Operating algorithms for a automotive CO₂ air conditioner.

사용하였다. 실험데이터를 통해 연결강도를 학습하기 위하여 역전파 알고리즘을 사용하였으며 입력층, 은닉층, 출력층의 활성화함수로 탄젠트 시그모이드함수, 로그 시그모이드함수, 선형함수를 사용하였다.⁽⁵⁾

3.2 최소제곱법 알고리즘

주어진 T_{in} , T_{out} , Rpm에 대하여 P_{set} 을 산출하기 위해 최소제곱법 알고리즘을 사용하였다. 최소제곱법 알고리즘에서는 주어진 Rpm의 범위에 따라 식(1), 식(2), 식(3)을 사용하여 P_{set} 을 계산한 후 주어진 Rpm에 대해서는 보간하여⁽⁶⁾ P_{set} 을 계산한다.

$$P_{set} = A T_{in} + B \quad (1)$$

$$A = a_1 T_{out}^2 + a_2 T_{out} + a_3 \quad (2)$$

$$B = b_1 T_{out}^2 + b_2 T_{out} + b_3 \quad (3)$$

여기서 a_1 , a_2 , a_3 , b_1 , b_2 , b_3 는 최소제곱법을 사용하여 얻은 상수를 의미한다. Table 1에는 750, 1000, 1250, 1500, 1750rpm과 같은 각각의 Rpm에 대해서 T_{out} 30, 32, 34, 36, 38, 40℃ 중 하나, T_{in} 20, 22.5, 25, 27.5, 30℃ 중 하나를 각각 선정하여 주어진 조건에서 실시된 실험결과를 사용하여 최소제곱법을 통해 얻은 상수를 보여준다.

4. 고압재설정 알고리즘

고압설정알고리즘에서는 자동차에어컨시스템의 최대효율만을 고려하여 P_{set} 을 설정하였으나 필요에 따라서 효율과 동시에 냉방능력을 고려한 운전

Table 1 Coefficients for least square method

Rpm (rpm)	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3
750	-0.007536	0.503043	-8.954000	0.270027	-17.22770	389.53850
1000	-0.002692	0.147352	-2.240649	0.126937	-7.022453	200.47268
1250	0.000183	-0.022369	0.105732	0.063759	-3.248067	144.95195
1500	-0.002888	0.141273	-1.925247	0.156402	-8.525669	214.63755
1750	-0.002951	0.166048	-2.466748	0.144286	-8.066655	204.09596

이 요구된다.⁽⁷⁾ 이를 위해 고압설정알고리즘에서 계산된 P_{set} 을 P_{reset} 으로 재설정하기 위한 고압재설정알고리즘을 개발하였다.

4.1 퍼지로지용 고압재설정알고리즘

T_{in} 과 T_{set} 의 차이로 정의된 T_e 와 P_{set} 을 입력으로 하고 P_{reset} 을 출력하는 퍼지로지용을 이용한 고압재설정알고리즘을 개발하였다.⁽⁸⁾ 입력에 사용된 멤버쉽은 Fig. 2, Fig. 3과 같고 출력에 사용된 멤버쉽은 Fig. 4와 같으며 사용된 룰베이스는 Table 2와 같다.

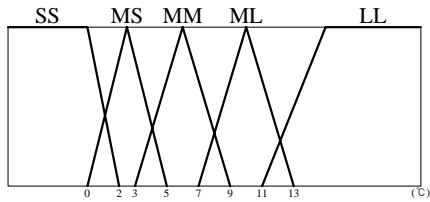


Fig. 2 Membership for input T_e .

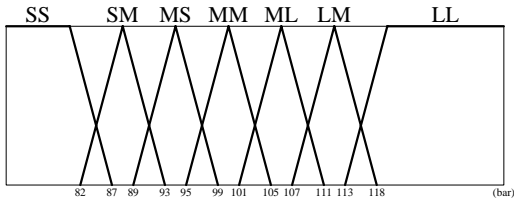


Fig. 3 Membership for input P_{set} .

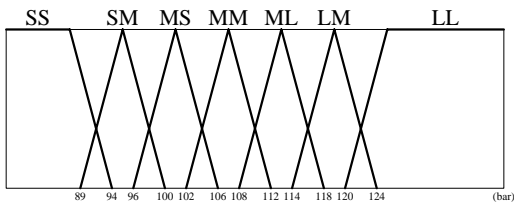


Fig. 4 Membership for output P_{reset} .

Table 2 Rule base for reset algorithm

P_{reset} [bar]	P_{set} [bar]						
	SS	SM	MS	MM	ML	LM	LL
T_e [°C]	SS	SS	SS	SS	SM	MS	MM
	MS	SS	SS	SM	MS	MM	ML
	MM	SS	SM	MS	MM	ML	LL
	ML	SM	MS	MM	ML	LL	LL
	LL	MS	MM	ML	LM	LL	LL

4.2 비례로지용 고압재설정알고리즘

비례로지용 고압재설정알고리즘으로 식(4)와 같은 다항식을 사용하였으며

$$P_{reset} = k_p T_e + P_{set} \quad (4)$$

여기서 비례게인 k_p 는 1.5752, 데드밴드는 $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 로 선정하였다.

5. 시스템 제어알고리즘

시스템 제어알고리즘은 전자팽창밸브 제어알고리즘, 압축기 제어알고리즘, 실내팬 제어알고리즘, 실외팬 제어알고리즘으로 구성되어있다.⁽⁹⁾

전자팽창밸브 제어알고리즘은 시스템고압을 설정된 압력으로 유지하기 위한 알고리즘으로써 설정된 압력과 측정압력과의 오차를 입력변수로 하고 비례게인 3, 적분게인 0.0001, 데드밴드 0.05bar인 비례적분 알고리즘을 사용하였다.

압축기 제어알고리즘은 압축기를 단속 제어하여 실내온도를 설정된 온도로 유지하는 것을 목적으로 하며 실내 설정온도와 측정온도의 차를 입력으로 하고 비례게인 2, 적분게인 0.0001, 데드밴드 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 인 비례적분 알고리즘을 사용하였다.

실내팬 제어알고리즘은 설정된 실내온도와 센서에 의해 측정된 실내온도와의 차를 입력으로 하여 실내팬의 단수를 출력하는 비례게인 3, 적분게인 0.001, 데드밴드 $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 인 비례적분 알고리즘을 사용하였다.

실외팬 제어알고리즘은 실외팬을 단속 제어하여 시스템고압을 90~140bar로 유지하는 것을 목적으로 하며 115bar를 기준으로 데드밴드가 40bar인 단속 알고리즘을 사용하였다.

6. 알고리즘의 제어성능 분석

고압설정알고리즘과 고압재설정알고리즘의 성능을 분석하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 고압설정알고리즘의 성능은 신경망을 이용한 경우와 최소제곱법을 이용한 경우로 구분하여 확인하였으며, 고압재설정알고리즘의 성능은 고압재설정알고리즘을 적용하지 않은 경우와, 퍼지로지

이용 고압재설정알고리즘을 사용한 경우, 그리고 비레로직이용 고압재설정알고리즘을 사용한 경우로 구분하여 성능을 확인하고 분석하였다.

6.1 고압설정알고리즘

최소제곱법을 이용하여 개발된 고압설정알고리즘의 적정성을 확인하기 위하여 압축기 속도를 1000rpm으로 고정하고 실내온도 20, 25, 30℃, 실외온도 30, 32, 34, 36, 40℃중 각각 한 개를 선정하여 최대COP고압을 계산한 후 그 결과를 실험데이터와 비교하였다.

Fig. 5과 Fig. 6에는 신경망을 이용했을 때와 최소제곱법을 이용했을 때의 고압설정알고리즘으로부터 계산된 결과와 실험데이터의 비교결과를 보여준다. 그림에서 보듯이 신경망을 이용했을 경우 0.15%, 최소제곱법을 이용했을 경우 0.16%의 평균오차가 있지만 두 경우 모두 매우 작은 오차범위 내에서 시스템고압을 설정할 수 있음을 확인할 수 있었다.

그러나 신경망을 이용한 고압설정알고리즘을 상업용 신경망 프로그램으로 구현할 경우 알고리즘을 쉽게 프로그램할 수 있었지만 신경망 프로그램을 직접 개발할 경우 알고리즘 구현이 매우 복잡하고 큰 메모리용량이 요구되는 반면에, 최소제곱법을 이용한 고압설정알고리즘을 구현할 경우 상대적으로 프로그램이 간단하고 비교적 작은 메모리용량이 요구된다. 또한 신경망을 이용한 계산시간은 0.203초가 소요되었지만 최소제곱법의 경우 0.001초가 소요되어 계산시간이 대폭 축소되었다.

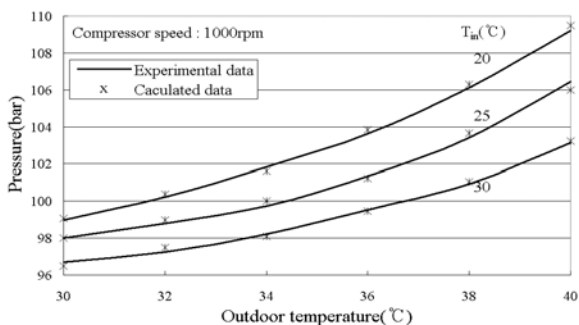


Fig. 5 Maximum COP high-side pressure (Neural network).

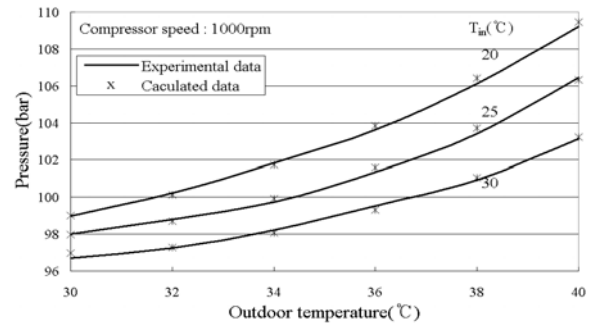


Fig. 6 Maximum COP high-side pressure (Least square method).

6.2 고압재설정알고리즘

개발된 고압재설정알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 실외온도 35℃, 실내설정온도 27℃, 압축기속도 900rpm로 고정한 후 Test 1에서는 고압재설정알고리즘을 적용하지 않았고, Test 2에서는 퍼지로직을 이용한 고압재설정알고리즘을 적용하였으며, Test 3에서는 비레로직을 이용한 고압재설정알고리즘을 적용하였다. Test 1의 결과는 Fig. 7, Fig. 8에, Test 2의 결과는 Fig. 9, Fig. 10에, Test 3의 결과는 Fig. 11, Fig. 12에 나타내었다. 그림에서 보듯이 Test 1, Test 2, Test 3 모두 시스템고압은 설정된 압력으로 적절하게 제어되었고 그때의 전자팽창밸브도 안정적으로 제어되었으며, 실내온도도 설정온도로 적절히 제어되었고 그때의 실내팬과 압축기도 안정적으로 제어되었다.

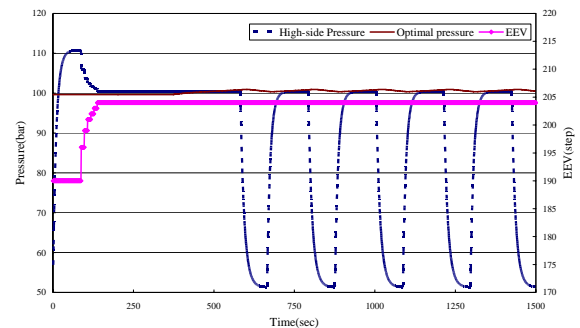


Fig. 7 High-side pressure and EEV steps (Test 1).

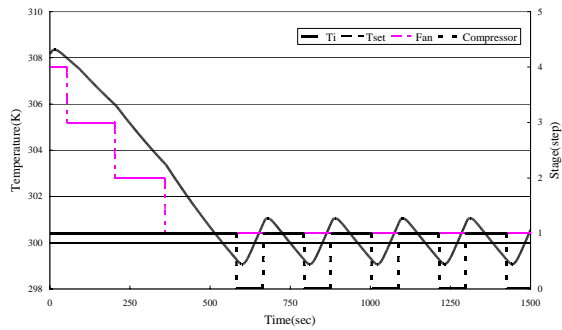


Fig. 8 Indoor temperature, indoor fan and compressor state (Test 1).

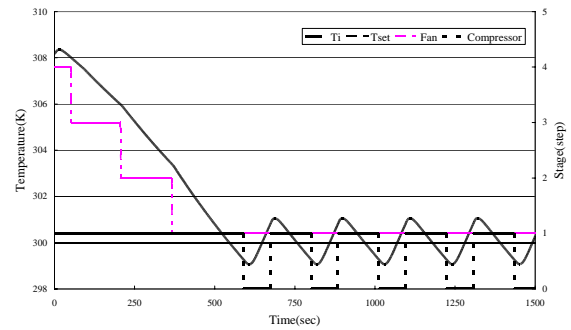


Fig. 12 Indoor temperature, indoor fan and compressor state (Test 3).

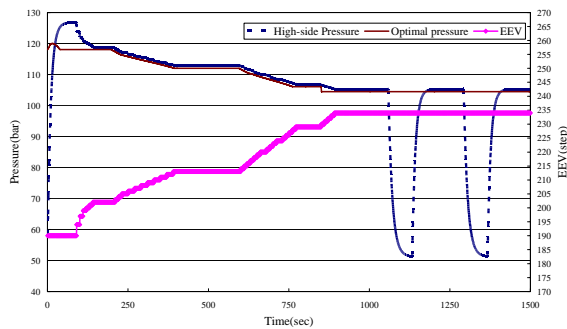


Fig. 9 High-side pressure and EEV steps (Test 2).

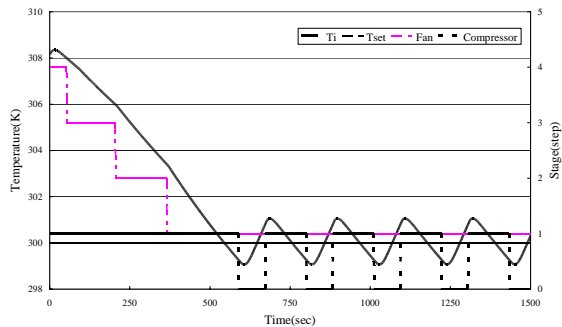


Fig. 10 Indoor temperature, indoor fan and compressor state (Test 2).

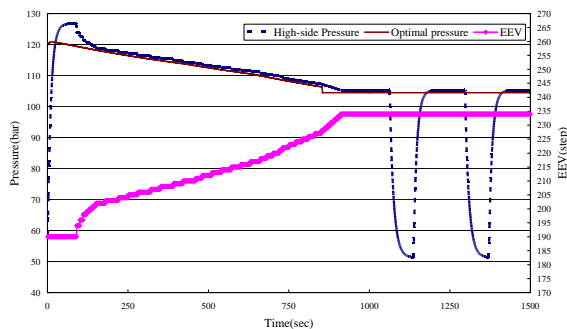


Fig. 11 High-side pressure and EEV steps (Test 3).

Table 3 Results from the system high-side pressure control algorithm test

Test No.	Average COP	Compressor On time(sec)	T_{set} reaching time(sec)
Test 1	2.86	1093	545
Test 2	2.81	1101	539
Test 3	2.79	1102	538

Table 3에는 Test 1, Test 2, Test 3의 평균 COP, 압축기 가동시간, 설정온도 도달시간 결과를 보여준다. 퍼지로그직을 이용한 Test 2의 경우 고압설정알고리즘을 적용하지 않은 Test 1의 경우에 비해 압축기 가동시간이 8초 증가하였지만 설정온도 도달시간은 6초 단축되었고, 비례로그직을 이용한 Test 3의 경우 압축기 가동시간이 9초 증가하였지만 설정온도 도달시간은 7초 단축되었음을 알 수 있었다. 따라서 퍼지로그직과 비례로그직을 이용한 고압재설정알고리즘을 적용한 경우 모두 고압재설정알고리즘을 적용하지 않은 경우에 비해 COP는 다소 낮았으나 냉방능력의 증가로 실내온도가 설정온도로 다소 빠르게 도달하였다.

그러나 퍼지로그직을 이용한 고압재설정알고리즘을 상업용 프로그램으로 쉽게 구현할 수 있지만 실제 시스템에 적용하기 위해 프로그램을 직접 개발할 경우 프로그램 구현이 복잡한 반면에, 간단한 다항식으로 구성된 비례로그직을 이용한 고압재설정알고리즘은 프로그램의 구현이 상대적으로 용이한 장점을 가지고 있다.

6. 결론

CO₂ 자동차냉방시스템을 효과적으로 운용하기 위하여 고압설정, 고압재설정알고리즘으로 구성된 시스템고압 알고리즘과 전자팽창밸브, 압축기, 실내팬, 실외팬 제어알고리즘으로 구성된 시스템 제어알고리즘을 사용하였다.

시스템의 효율이 최대가 되는 고압측 압력을 설정하기 위해 최소제곱법을 이용한 고압설정알고리즘을 개발하였고 신경망을 이용한 고압설정알고리즘의 성능과 비교하였다. 최소제곱법과 신경망을 이용한 고압설정알고리즘을 사용한 성능 시험결과를 실험데이터와 비교분석한 결과 모두 평균오차 0.16%이하로 냉방시스템의 최대효율시스템고압을 예측함을 알 수 있었으나, 알고리즘의 프로그래밍 용이성과 계산시간 등을 고려할 때 최소제곱법을 이용한 고압설정알고리즘이 보다 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

효율과 냉방능력을 동시에 고려하여 설정된 시스템고압을 재설정하기 위하여 비례로직을 이용한 고압재설정알고리즘과 퍼지로직을 이용한 고압재설정 알고리즘을 개발한 후 성능을 비교하였다. 두 경우 모두 고압재설정알고리즘을 적용하지 않았을 경우에 비해 평균효율은 감소하였고 압축기 동작시간은 늘어났지만 증가된 냉방능력을 사용함으로써 설정온도으로의 도달시간이 단축되었음을 알 수 있었다. 비례로직과 퍼지로직을 이용한 고압재설정알고리즘의 성능은 비슷하였지만, 프로그래밍의 용이성 등을 고려할 때 비례로직을 이용한 고압재설정알고리즘이 보다 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 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, Control algorithms for the effective operation of a CO₂ automotive air-conditioning system, Proceedings of SAREK, pp. 19-30.
4. Han, D., and Jang, K., 2006, Development of control algorithms for a CO₂ automotive air conditioning system by using experimental data, Proceedings of SAREK, pp. 681-686.
5. 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.
6. Steven, C., Raymond, C., 1998, Numerical methods for engineers, McGraw-Hill, pp. 485-490.
7. Han, D., and Jang, K., 2006, High-side pressure reset algorithm for a CO₂ automotive air conditioner, Proceedings of SAREK, pp. 926-931.
8. Han, D., and Jung, J., 2004, High-side pressure setpoint algorithm of a CO₂ automotive air-conditioning system by using fuzzy logics. Proceedings of SAREK, pp. 481-486.
9. Han, D., and Noh, H., 2007, Control performances of a CO₂ automotive air-conditioning control system, Proceedings of KATECH, pp. 111-117.