

콘덴싱 가스보일러시스템의 제어 알고리즘 개발을 위한 효과적인 동적모델

한 도 영[†], 김 성 학^{*}

국민대학교 기계·자동차공학부, 국민대학교 기계공학과 대학원^{*}

Effective Dynamic Models for the Development of Control Algorithms of a Condensing Gas Boiler System

Doyoung Han[†], Sunghak Kim^{*}

ABSTRACT: Condensing gas boiler units may make a big role for the reduction of energy consumption in heating industries. In order to decrease the energy consumption of a condensing gas boiler unit, the effective operations and controls of the system are necessary.

In this study, mathematical models of a condensing gas boiler system were developed and programmed in order to predict dynamic behaviors of the system. These include dynamic models for a blower, a gas valve, a pump, a burner, a boiler heat exchanger, and a hot water heat exchanger. Control algorithms for the control of a gas valve, a blower, and a pump were also assumed.

Simulation results showed good predictions of the dynamic phenomena of a boiler system. Therefore, the simulation program developed for this study may be effectively used for the development of control algorithms of the boiler system.

Key words: Condensing gas boiler(콘덴싱 가스보일러), Control algorithm(제어알고리즘), Dynamic models(동적모델), Boiler heat exchanger(보일러 열교환기), PI algorithm(비례 적분 알고리즘)

기 호 설 명

하첨자

<p>A1 : 현열 열교환구간 전열면적 [m^2]</p> <p>A2 : 잠열 열교환구간 전열면적 [m^2]</p> <p>C : 비열 [kJ/kg$^{\circ}C$]</p> <p>\dot{m} : 유량 [kg/s]</p> <p>T : 온도 [$^{\circ}C$]</p>	<p>ai : 연소가스</p> <p>ao : 배기가스</p> <p>wi : 저온수</p> <p>wo : 난방수</p>
--	---

1. 서론

지구 온난화에 대한 환경규제가 강화되고 지하

[†] Corresponding author

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

E-mail address dyhan@kookmin.ac.kr

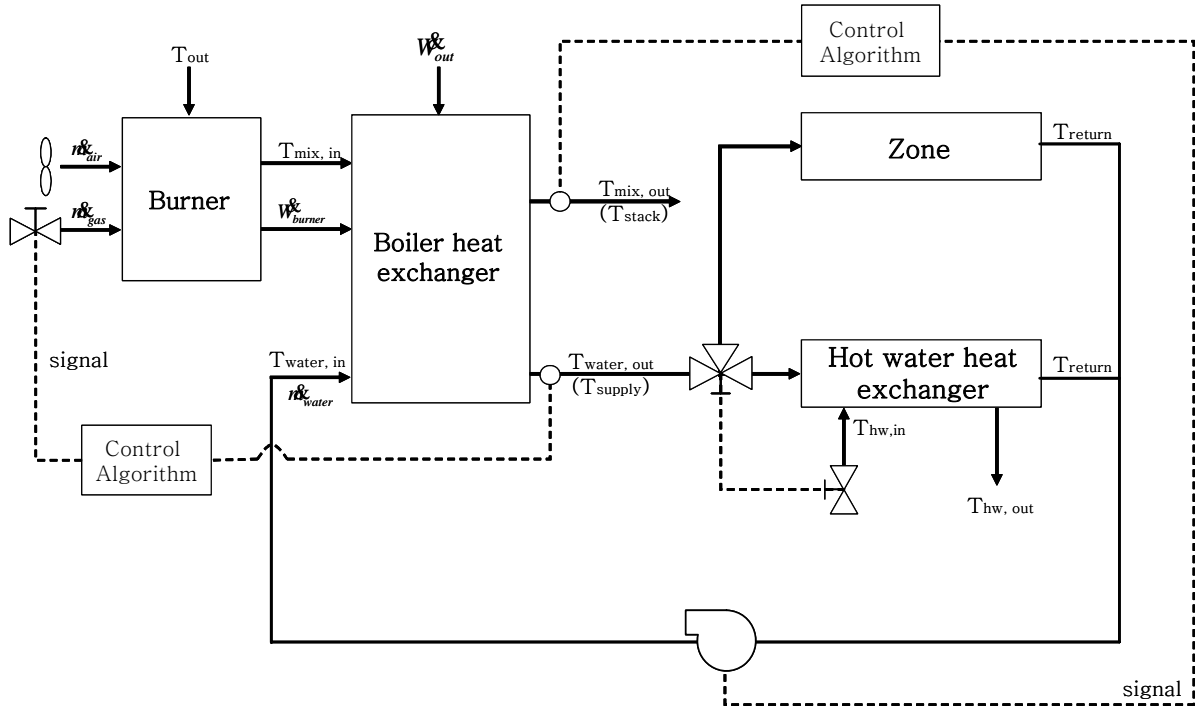


Fig. 1 Control block diagram of a condensing gas boiler system.

자원의 고갈이 진행됨에 따라 보일러의 저공해와 고효율화에 대해 관심이 높아지고 있다. 이를 반영하듯이 유럽에서는 고효율 저공해 콘덴싱 가스보일러의 설치를 의무화하고 있고 중국에서는 유럽 EN규격에 부합되는 기술을 개발하고 있다. 그러나 국내에서는 비콘덴싱 가스보일러에만 집중되어 있어 글로벌 경쟁력을 가지기 위해서는 고효율 저공해 콘덴싱 가스보일러의 개발이 절실히 요구되는 상황이다.⁽¹⁾

국내에서 개발되어 사용되고 있는 가스보일러의 평균효율은 90%정도로써 유럽보일러의 100%에 가까운 효율에 비해 매우 낮으며 인체에 유해한 CO가스, 대기 중 오존을 발생시키는 NOx, 그리고 지구온난화의 주범인 CO₂ 등의 배기가스가 다량으로 배출되고 있어 이를 개선하기 위해 보일러의 각 부품은 물론 시스템 전체를 고려한 최적설계 및 최적제어 기술 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다.⁽²⁾

따라서 본 연구에서는 콘덴싱 가스보일러의 제어 알고리즘 개발을 위한 시스템 동적모델을 개발한 후 개발한 동적모델을 통해 시스템 특성을 파악하고 간단한 제어 알고리즘을 적용하여 동적모델의 성능을 확인하는 것을 목적으로 한다.⁽³⁾

2. 콘덴싱 가스보일러시스템 동적모델

Fig. 1에는 콘덴싱 가스보일러시스템의 제어 블록선도를 보여준다. 그림에서 보듯이 콘덴싱 가스보일러시스템을 효과적으로 제어하기 위해서는 실내온도 제어를 위한 난방수온도 설정 알고리즘과 가스밸브 및 송풍기 제어 알고리즘, 배기가스온도를 제어하기 위한 배기가스온도 설정 알고리즘과 펌프 제어 알고리즘 등이 필요하며 이를 효과적으로 개발하기 위해 송풍기, 가스밸브, 펌프, 버너, 보일러 열교환기, 온수 열교환기 등의 보일러시스템의 동적현상을 모사할 수 있는 동적모델개발이 요구된다.^(4, 5)

2.1 송풍기

송풍기형식으로 BLDC모터 타입을 가정하였다. 송풍기의 동적모델로는 식(1)과 같이 시그널(0 ~ 1)이 입력되면 그에 해당되는 풍량(\dot{m}_{air})이 출력되게 구성하였고

$$\dot{m}_{air} = \frac{\dot{m}_{air, max} e^{-T_a S}}{\tau S + 1} \times signal \quad (1)$$

여기서 $\dot{m}_{air, max}$ 는 송풍기의 최대풍량, τ 와 T_d 는 송풍기의 시간상수와 시간지연을 나타낸다.

2.2 가스밸브

가스밸브는 연소기로 들어가는 공기압력에 따라 가스량(\dot{m}_{gas})을 비례적으로 조절하는 공기비례제어식으로 가정하였다. 가스밸브의 동적모델로 식(2)와 같이 시그널(0 ~ 1)이 입력이 되면 해당되는 가스량이 출력되게 구성하였고

$$\dot{m}_{gas} = \frac{\dot{m}_{gas, max} e^{-T_d S}}{\tau S + 1} \times signal \quad (2)$$

여기서 $\dot{m}_{gas, max}$ 는 가스의 최대유량, τ 와 T_d 는 가스밸브의 시간상수와 시간지연을 나타낸다.

2.3 펌프

펌프는 3단 제어가 가능하다고 가정하였다. 펌프의 동적모델로 식(3)과 같이 시그널(0 ~ 1)이 입력되면 해당 유량(\dot{m}_{water})이 출력이 되도록 구성하였고

$$\dot{m}_{water} = \frac{\dot{m}_{water, max} e^{-T_d S}}{\tau S + 1} \times signal \quad (3)$$

여기서 $\dot{m}_{water, max}$ 는 펌프의 최대유량, τ 와 T_d 는 펌프의 시간상수와 시간지연을 나타낸다.

2.4 버너

\dot{m}_{air} 와 \dot{m}_{gas} 를 입력으로 하고 연소가스 출구온도($T_{mix, in}$)를 출력으로 하는 버너의 동적현상을 모사하기 위하여 Fig. 2와 같이 버너의 성능시험 결과를 사용하여 열량(capacity)를 계산한 후 식(4)를 사용하여 버너에서 연소된 연소가스의 온도($T_{air, burner}$)를 계산하였으며 식(5)를 사용하여 $T_{mix, in}$ 의 동적현상을 모사하였다.

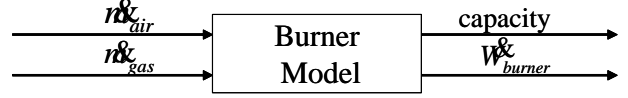


Fig. 2 Burner model.

$$T_{air, burner} = T_{out} + \frac{capacity}{\dot{m}_{mix} C_{p, mix}} \quad (4)$$

$$T_{mix, in} = \frac{T_{air, burner} e^{-T_d S}}{\tau S + 1} \quad (5)$$

여기서 연소가스량(\dot{m}_{mix})는 \dot{m}_{air} 와 \dot{m}_{gas} 를 합한 값이고 $C_{p, mix}$ 는 연소가스의 비열, T_{out} 은 외기온도를 나타내며 τ 와 T_d 는 버너의 시간상수와 시간지연을 나타낸다.

2.5 보일러 열교환기

Fig. 3과 같이 $T_{mix, in}$ 와 저온의 환수온도($T_{water, in}$)를 입력으로 하고 난방수온도(T_{supply}), 배기가스 온도(T_{stack})를 출력으로 하는 보일러 열교환기의 동적현상을 모사하기 위하여 정적모델과 동적모델로 구분하여 수학적모델을 개발하였다.

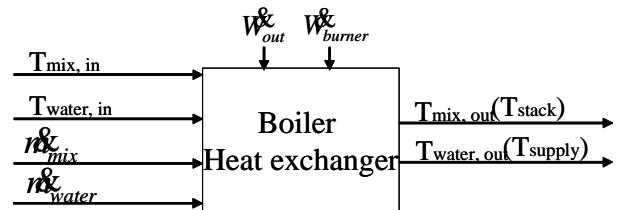


Fig. 3 Boiler heat exchanger model.

열교환기의 정적모델 개발을 위해 $\epsilon - N_{tu}$ 법^(6, 7)을 사용하였다. 식(6)과 식(7)을 사용하여 C_{mix} , C_{water} 를 계산하고 식(8)을 사용하여 용량비(R_c)를 계산하며

$$C_{mix} = C_{p, mix} \dot{m}_{mix} \quad (6)$$

$$C_{water} = C_{p, water} \dot{m}_{water} \quad (7)$$

$$R_c = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (8)$$

여기서 $C_{p, mix}$, $C_{p, water}$ 는 연소가스와 물의 비열,

$\dot{m}_{mix}, \dot{m}_{water}$ 는 연소가스와 물의 유량을 의미하며, C_{min}, C_{max} 는 C_{mix}, C_{water} 값 중 최소값, 최대값을 의미한다. 전달 단위수(N_{tu})를 계산하기 위하여 식(9)를 사용하며

$$N_{tu} = \frac{UA}{C_{min}} \quad (9)$$

여기서 U 는 총 열전달계수, A 는 열교환기의 면적을 의미한다. 열교환기 유용도(ε)를 계산하기 위하여 식(10)을 사용한다.

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-N_{tu}(1-R_c)}}{1 - R_c e^{-N_{tu}(1-R_c)}} \quad (10)$$

보일러 열교환기를 모사하기 위하여 Fig. 4과 같이 현열 열교환구간과 잠열 열교환구간으로 구분하여 수학적모델을 개발하였다. 버너에서 공급되는 $T_{mix,in}$ 는 열교환기의 현열 열교환구간과 잠열 열교환구간을 거쳐, $T_{water,in}$ 에 대향류방식으로 열을 전달하여 $T_{water,out}$ 을 배출 시키고 $T_{mix,out}$ 를 배출한다.

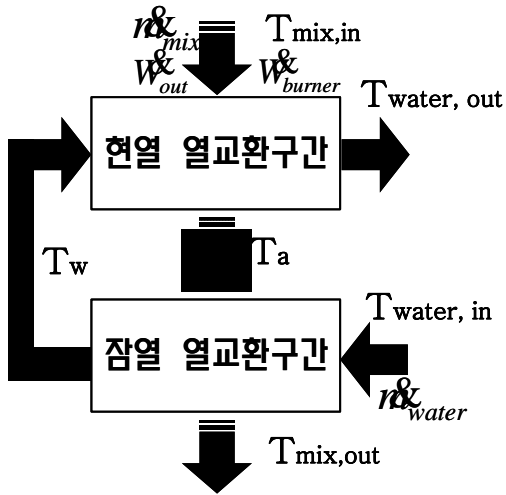


Fig. 4 Boiler heat exchanger mathematics model.

현열 열교환구간에서 사용한 식은 식(11), 식(12)와 같고

$$T_{water,out} = T_w + (T_{mix,in} - T_w) \times \frac{C_{min}}{C_{water}} \times \varepsilon_1 \quad (11)$$

$$T_a = T_{mix,in} - (T_{water,out} - T_w) \times \frac{C_{water}}{C_{mix}} \quad (12)$$

잠열 열교환구간에서는 식(13), 식(14)를 사용하였으며

$$T_w = T_{water,in} + (T_a - T_{water,in}) \times \frac{C_{min}}{C_{water}} \times \varepsilon_2 \quad (13)$$

$$T_{mix,out} = T_a - (T_w - T_{water,in}) \times \frac{C_{water}}{C_{mix}} \quad (14)$$

현열구간과 잠열구간의 경계는 열교환기로 유입되는 공기의 습기량(\dot{W}_{out})과 연소가스의 습기량(\dot{W}_{burner})에 따라 정해진 응축온도에 의해 구분된다.

보일러 열교환기의 동적모델은 시간지연이 있는 1차모델로 가정하였다. 동적값인 T_{supply} 와 T_{stack} 을 구하기 위해 정적모델에서 계산된 $T_{water,out}$ 과 $T_{mix,out}$ 을 식(15)와 식(16)을 사용하여 변환하였다.

$$T_{supply} = \frac{e^{-T_d S}}{\tau S + 1} \times T_{water,out} \quad (15)$$

$$T_{stack} = \frac{e^{-T_d S}}{\tau S + 1} \times T_{mix,out} \quad (16)$$

여기서 τ 와 T_d 는 열교환기의 연소가스와 물의 시간상수와 시간지연을 나타낸다.

2.6 온수 열교환기

Fig. 5와 같이 T_{supply} 와 저온수($T_{hw,in}$)을 입력으로 하고 $T_{water,in}$ 와 온수온도($T_{hw,out}$)를 출력으로 하는 온수 열교환기의 동적현상을 묘사하기 위하여 정적모델과 동적모델로 구분하여 수학적모델을 개발하였다.

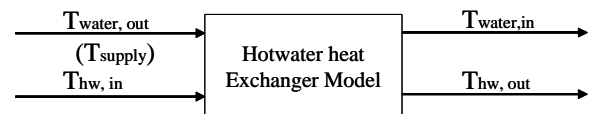


Fig. 5 Hot water heat exchanger model.

온수 열교환기의 정적모델로는 식(17)과 식(18)과 같이 보일러 열교환기에 사용한 $\varepsilon-N_{tu}$ 법을 사용하였으며

$$T_{hw,out} = T_{hw,in} + (T_{water,out} - T_{hw,in}) \times \frac{C_{min}}{C_{hw}} \times \varepsilon \quad (17)$$

$$T_{return} = T_{water,out} - (T_{hw,out} - T_{hw,in}) \times \frac{C_{hw}}{C_{water,out}} \quad (18)$$

온수 열교환기의 동적모델로는 식(19)과 같이 시간지연이 있는 1차모델로 가정하였고

$$T_{hw,supply} = \frac{e^{-T_d s}}{\tau s + 1} \times T_{hw,out} \quad (19)$$

여기서 $T_{hw,supply}$ 는 온수 최종온도를 나타내며 τ 와 T_d 는 가스밸브의 시간상수와 시간지연을 나타낸다.

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

개발된 동적모델을 사용하여 Matlab 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 제어 알고리즘 개발을 위한 성능을 확인하기 위하여 가스밸브 및 송풍기 제어 알고리즘으로 PI 알고리즘을 가정하였고 펌프를 1단 작동으로 가정하였으며 보일러의 환수온도는 30℃, 연소가스의 온도는 210℃, 난방수온도의 설정온도는 50℃로 가정하였다.

Fig. 6은 난방수온도의 제어결과를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 보일러의 난방수온도는 과도기 상태를 거쳐 정상상태에 도달하였으며, 정상상태에서 30℃의 환수온도는 보일러 열교환기의 잠열 열교환구간에서 7℃, 현열 열교환구간에서 13℃ 상승하여 설정온도인 50℃로 적절히 제어되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 7에는 가스밸브의 개도량을 보여준다. PI 제어 알고리즘에 의해 가스밸브의 개도량이 난방수의 온도가 설정값에 도달 할 때까지 꾸준히 증가하다가 설정값에 도달 한 후 안정되게 제어되는 것을 확인하였다.

Fig. 8은 연소가스의 온도를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 연소가스 온도는 과도기 상태를 거쳐 정상상태에 도달하였으며, 정상상태에서 210℃의 연소가스 온도는 현열 열교환구간에서 110℃ 하락하였고 잠열 열교환구간에서 53℃ 하락하여 최종 배출되는 배기가스 온도가 47℃임을 확인하였다.

Fig. 9는 보일러 열교환기의 현열 열교환구간과 잠열 열교환구간의 면적을 나타내고 있다. 열교환기 전체면적 1.2 m²중 연소가스의 온도에 따라 현열면적과 잠열면적으로 구분되어 상대적으로 면적이 변화하였으며 그에 따라 열교환기의 열전달 특성이 변화되는 것을 확인하였다.

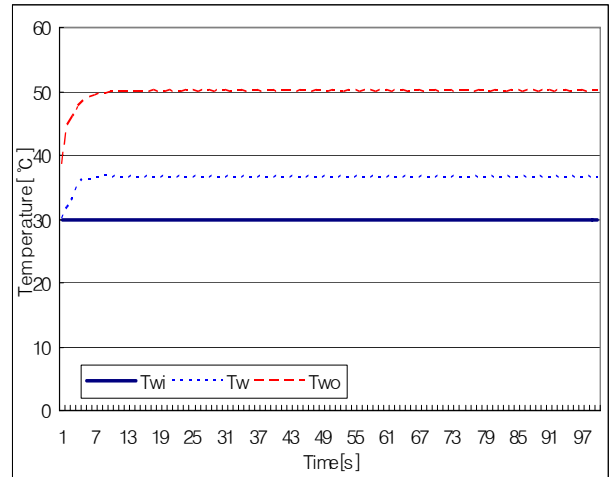


Fig. 6 Supply temperature.

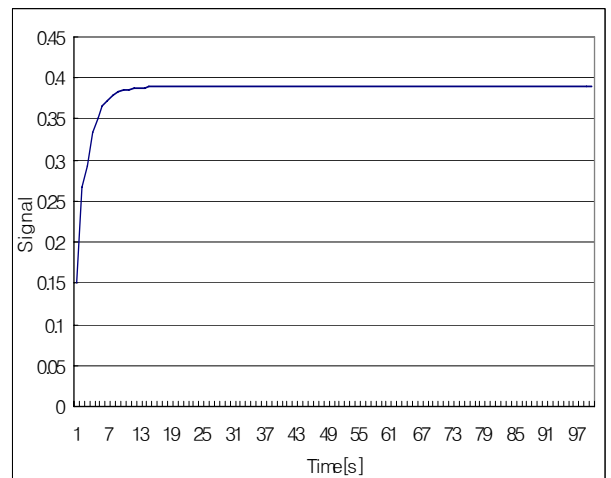


Fig. 7 Gas valve position.

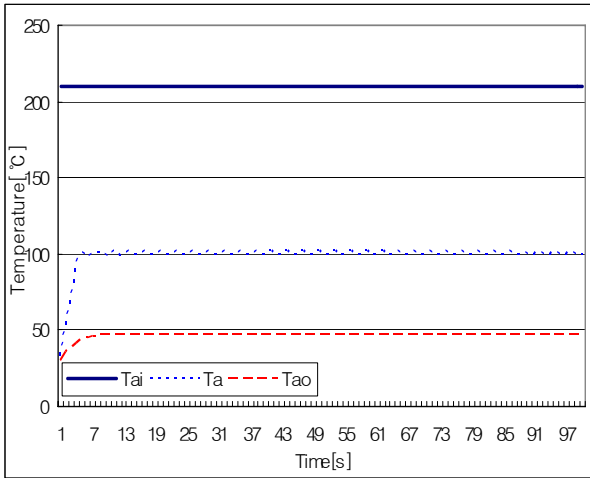


Fig. 8 Exhaust temperature.

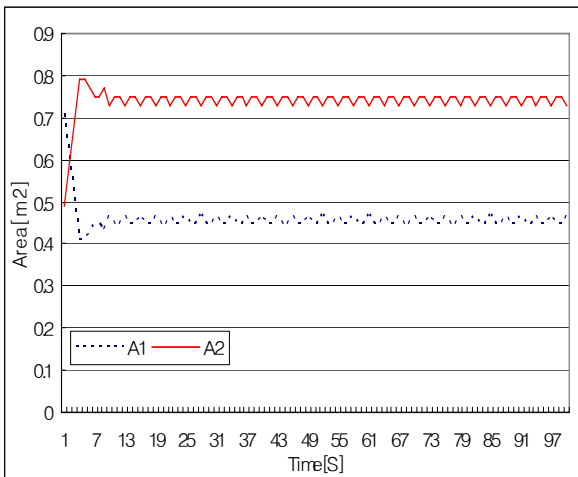


Fig. 9 Heat transfer area.

4. 결론

콘덴싱 가스보일러시스템의 제어 알고리즘을 효과적으로 개발하기 위하여 송풍기, 펌프, 가스밸브, 버너, 열교환기로 구성된 수학적모델을 개발한 후 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 가스

밸브 및 송풍기 제어 알고리즘을 PI 알고리즘으로 가정한 후 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 제어 시뮬레이션을 수행하였으며 시뮬레이션 결과 개발된 동적모델을 사용하여 콘덴싱 가스보일러시스템의 제어 알고리즘 개발이 가능함을 확인하였다.

따라서, 본 연구에서 개발된 동적모델은 콘덴싱 가스보일러시스템 제어 알고리즘 개발을 위하여 효과적으로 사용될 수 있다고 사료된다.

참고문헌

1. Cho, H. W. et al., 2004, Development status and effect of condensing boiler, proceedings of the KOSCO, pp. 269-275.
2. Che, D. et al, 2004, Evaluation of retrofitting a conventional natural gas fired boiler into a condensing boiler, Energy Conversion and Management, pp. 3251-3266.
3. Han, D., 2007, The development of control algorithms of a condensing gas boiler system, Report of Kookmin University.
4. Clark, D. R., 1985, HVACSIM+ building systems and equipment simulation program reference manual, U.S. department of commerce, pp. 51-67.
5. Clark, D. R. and May, W. B., 1985, HVACSIM+ building systems and equipment simulation program user guide, U.S. department of commerce, pp. 93-106.
6. Mills, A. F., 1999, Basic heat mass transfer, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, pp. 621-646.
7. Han, D., and Jung, J., 2004, Effective dynamic models of CO₂ automotive air conditioning system for the control algorithm development, Proceedings of the SAREK, pp. 813-818.