

응축형 가스보일러시스템의 제어 알고리즘 개발을 위한 효과적인 동적모델

한도영[†], 김성학^{*}

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^{*}

School of Mechanical and Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

**Graduate School of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea*

(Received February 14, 2008; revision received April 4, 2008)

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, effective operations of the system are necessary. In this study, mathematical models of a condensing gas boiler system were developed in order to develop control algorithms of the system. These include dynamic models of a blower, a gas valve, a pump, a burner, a boiler heat exchanger, and a hot water heat exchanger. Control algorithms of a blower, a gas valve, and a pump were also assumed. Simulation results showed good predictions of dynamic behaviors of a boiler system. Therefore, the simulation program developed for this study may be effectively used for the development of control algorithms of a boiler system.

Key words: Condensing gas boiler(응축형 가스보일러), Dynamic models(동적모델), Heat exchanger(열교환기), Burner(연소기), Gas valve(가스밸브), Blower(송풍기), Pump(펌프), Control algorithm(제어 알고리즘)

기 호 설 명

A : 열교환기 전체면적 [m^2]
 C_p : 정압비열 [kJ/kgK]
 \dot{m} : 유량 [kg/s]
 N_{tu} : 전달 단위수
 R_c : 용량비
 s : 복소수 변수
 S : 신호(0~1)
 T : 온도 [$^{\circ}C$]

T_d : 시간지연 [s]
 U : 총열전달계수 [kJ/m²sK]
 \dot{W} : 습기량 [kg/s]
 τ : 시정수 [s]
 ε : 유용도

하첨자

air : 공기
burner : 연소기
gas : 연료
hw : 온수
in : 입구

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-910-4675; fax: +82-2-920-4839

E-mail address: dyhan@kookmin.ac.kr

<i>max</i>	: 최대
<i>min</i>	: 최소
<i>mix</i>	: 연소가스
<i>out</i>	: 출구
<i>outside</i>	: 실외
<i>return</i>	: 환수
<i>latent</i>	: 잠열
<i>sensible</i>	: 현열
<i>stack</i>	: 배기가스
<i>supply</i>	: 공급수
<i>water</i>	: 보일러수

1. 서 론

최근 지구 온난화에 대한 환경규제가 강화되고 지하자원 고갈현상이 급격히 진행됨에 따라 보일러의 저공해와 고효율화에 대한 관심이 높아지고 있다. 이를 보여주듯이 유럽에서는 고효율 저공해 응축형 가스보일러의 설치를 의무화하고 있고 중국에서는 유럽공동체규격(EN)에 부합되는 기술을 개발하고 있지만 국내에서는 비응축형 가스보일러에만 집중되어 있어 글로벌 경쟁력을 가지기 위해서는 고효율 저공해 응축형 가스보일러의 개발이 절실히 요구되는 상황이다.⁽¹⁾

현재 국내에서 개발되어 사용되고 있는 가스보일러의 평균효율은 90% 정도로써 100%에 가까

운 유럽보일러의 효율에 비해 매우 낮으며 인체에 유해한 일산화탄소, 대기 중 오존을 발생시키는 NOx, 그리고 지구온난화의 주범인 이산화탄소 등의 배기 가스가 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 응축형 가스보일러의 제어 알고리즘 개발을 위한 시스템 동적모델을 개발한 후 간단한 제어 알고리즘을 적용하여 동적모델의 제어성능을 확인하는 것을 목적으로 한다.⁽³⁾

2. 응축형 가스보일러시스템 동적모델

Fig. 1에는 응축형 가스보일러시스템의 제어 블록선도를 보여준다. 그림에서 보듯이 응축형 가스보일러시스템을 효과적으로 제어하기 위해서 가스밸브, 송풍기, 펌프의 제어 알고리즘이 필요하며 이를 개발하기 위해 송풍기, 가스밸브, 펌프, 연소기, 보일러 열교환기, 온수 열교환기 등으로 구성된 보일러시스템의 동적현상을 모사할 수 있는 동적모델개발이 요구된다.^(4, 5)

2.1 송풍기

송풍기형식으로 BLDC(brushless direct current)

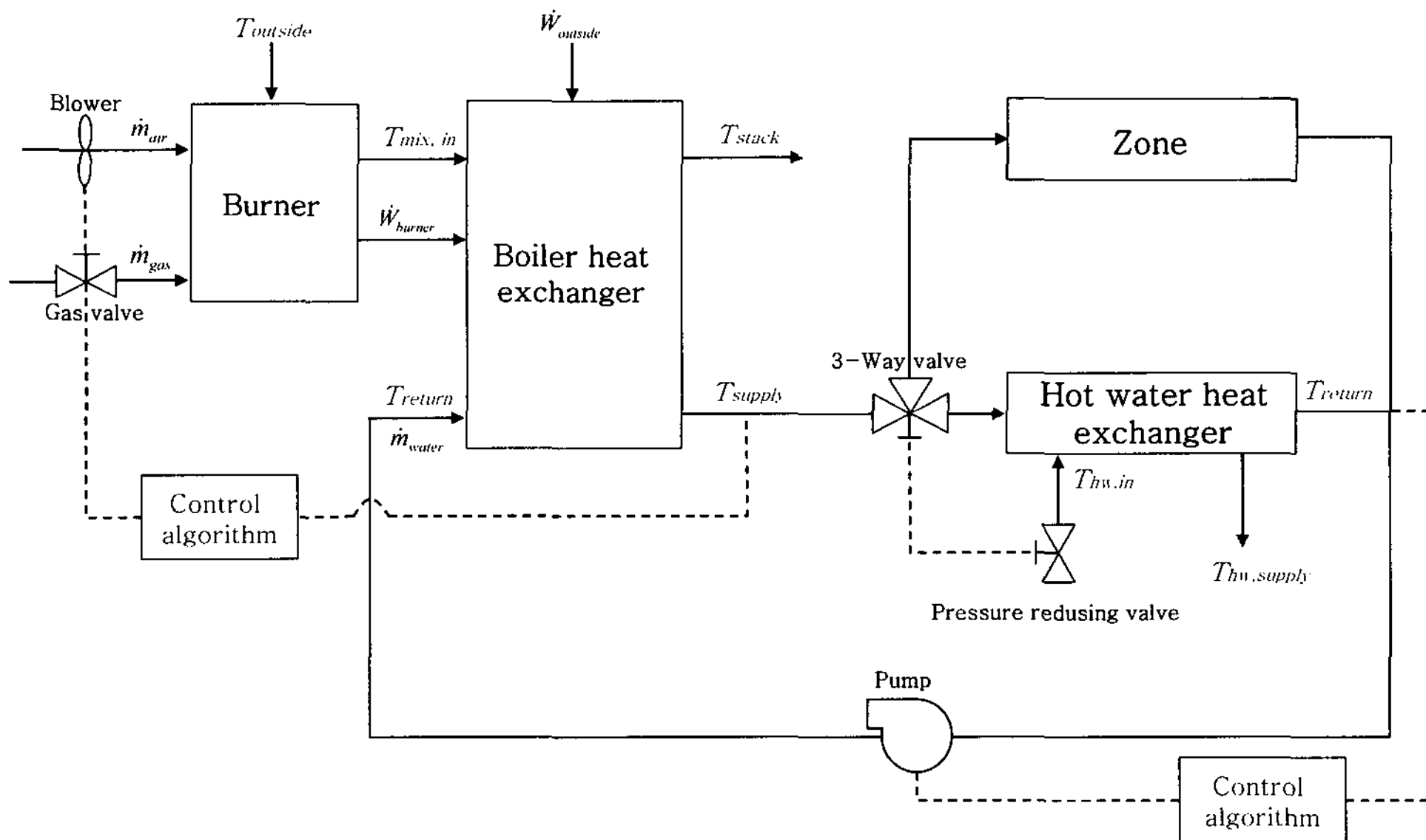


Fig. 1 Control block diagram of a condensing gas boiler system.

모터 타입을 가정하였다. 송풍기의 동적모델로는 식(1)과 같이 신호가 입력되면 그에 해당되는 \dot{m}_{air} 가 출력되게 구성하였다.

$$\dot{m}_{air} = \frac{\dot{m}_{air,max} e^{-T_{d,blower}s}}{\tau_{blower}s + 1} \times S_{blower} \quad (1)$$

2.2 가스밸브

가스밸브는 연소기로 들어가는 \dot{m}_{air} 에 따라 \dot{m}_{gas} 를 비례적으로 조절하는 공기비례제어식으로 가정하였다. 가스밸브의 동적모델로 식(2)와 같이 신호가 입력되면 해당되는 \dot{m}_{gas} 가 출력되게 구성하였다.

$$\dot{m}_{gas} = \frac{\dot{m}_{gas,max} e^{-T_{d,gasvalve}s}}{\tau_{gasvalve}s + 1} \times S_{gasvalve} \quad (2)$$

2.3 펌프

펌프는 3단 제어가 가능하다고 가정하였다. 펌프의 동적모델로 식(3)과 같이 신호가 입력되면 해당 \dot{m}_{water} 가 출력이 되도록 구성하였다.

$$\dot{m}_{water} = \frac{\dot{m}_{water,max} e^{-T_{d,pump}s}}{\tau_{pump}s + 1} \times S_{pump} \quad (3)$$

2.4 연소기

\dot{m}_{air} 와 \dot{m}_{gas} 를 입력으로 하고 $T_{mix,in}$ 과 \dot{m}_{mix} 를 출력으로 하는 연소기의 동적현상을 모사하기 위하여 Fig. 2와 같은 연소기의 성능시험 결과로부터 얻은 capacity를 이용하여 식(4)를 사용하여 연소기에서 연소된 $T_{mix,burner}$ 를 계산하였으며, 식(5)를 사용하여 $T_{mix,in}$ 의 동적현상을 모사하였다.

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

$$T_{mix,in} = \frac{T_{mix,burner} e^{-T_{d,burner}s}}{\tau_{burner}s + 1} \quad (5)$$

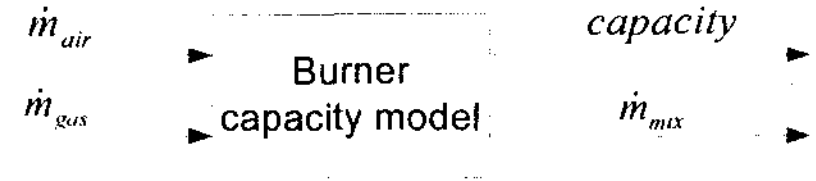


Fig. 2 Burner capacity model.

여기서 \dot{m}_{mix} 는 \dot{m}_{air} 와 \dot{m}_{gas} 를 합한 값을 나타낸다.

2.5 보일러 열교환기

Fig. 3과 같이 $T_{mix,in}$ 와 T_{return} 을 입력으로 하고 T_{supply} 와 T_{stack} 을 출력으로 하는 보일러 열교환기의 동적현상을 모사하기 위하여 정적모델과 동적모델로 구분하여 수학적모델을 개발하였다.

열교환기의 정적모델 개발을 위해 $\epsilon - N_{tu}$ (effectiveness number of transfer units)법^(6,7)을 사용하였다. 식(6), 식(7)을 사용하여 C_{mix} , C_{water} 를 계산한 후

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

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

C_{mix} , C_{water} 중 최대값과 최소값인 C_{max} , C_{min} 을 계산하고 식(8)을 사용하여 R_c 를 계산한다. 전달 단위수를 계산하기 위하여 식(9)를 사용하며

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

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

열교환기의 ϵ 를 계산하기 위하여 식(10)을 사용한다.

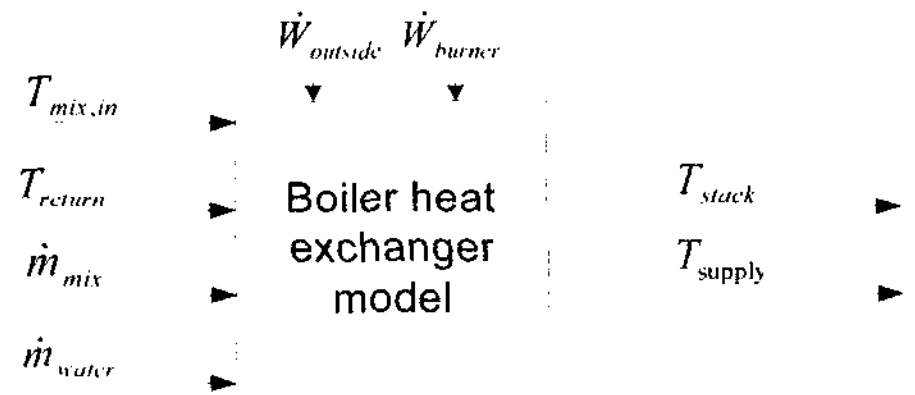


Fig. 3 Boiler heat exchanger model.

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

보일러 열교환기를 모사하기 위하여 Fig. 4와 같이 현열 열교환구간과 잠열 열교환구간으로 구분하여 수학적모델을 개발하였다. 연소기에서 공급되는 $T_{mix,in}$ 은 열교환기의 현열 열교환구간과 잠열 열교환구간을 거쳐, $T_{water,in}$ 에 대항류방식으로 열을 전달하여 $T_{water,out}$ 을 배출 시키고 $T_{mix,out}$ 을 배출한다.

현열 열교환구간에서 사용한 식은 식(11), 식(12)와 같고

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

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

잠열 열교환구간에서는 식(13), 식(14)를 사용하며

$$T_{water} = T_{water,in} + (T_{mix} - T_{water,in}) \times \frac{C_{min}}{C_{water}} \times \varepsilon_{water,latent} \quad (13)$$

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

현열구간과 잠열구간의 경계는 열교환기로 유입되는 $\dot{W}_{outside}$ 와 \dot{W}_{burner} 에 따라 정해진 응축온도에 의해 구분된다.

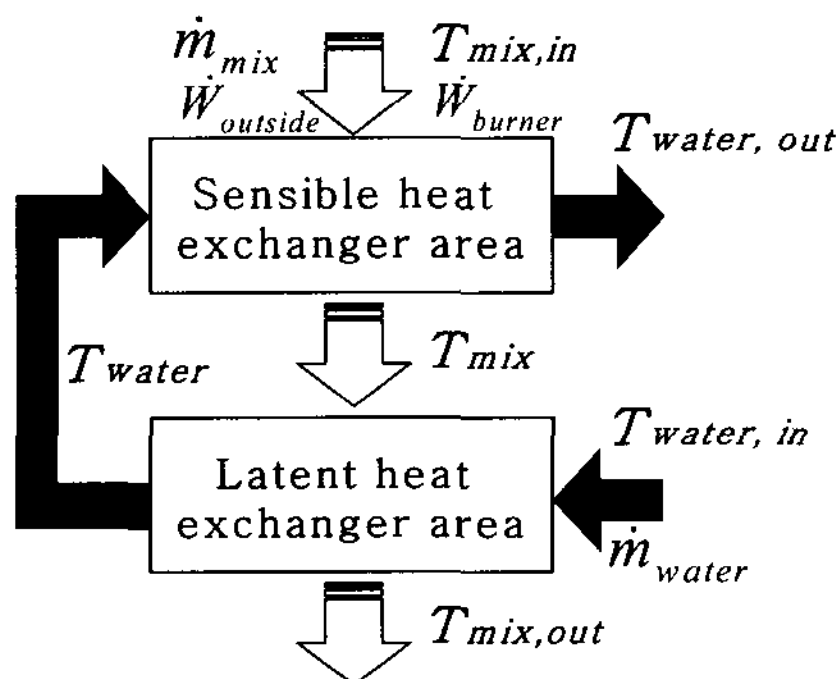


Fig. 4 Boiler heat exchanger model.

보일러 열교환기의 동적모델은 시간지연이 있는 1차모델로 가정하였다. 동적값인 T_{supply} 와 T_{stack} 은 정적모델에서 계산된 $T_{water,out}$ 과 $T_{mix,out}$ 을 사용하며 식(15), 식(16)으로부터 계산한다.

$$T_{supply} = \frac{e^{-T_{d,water}s}}{\tau_{water}s + 1} \times T_{water,out} \quad (15)$$

$$T_{stack} = \frac{e^{-T_{d,air}s}}{\tau_{air}s + 1} \times T_{mix,out} \quad (16)$$

2.6 온수 열교환기

Fig. 5와 같이 T_{supply} 와 $T_{hw,in}$ 을 입력으로 하고 T_{return} 과 $T_{hw,supply}$ 를 출력으로하는 온수 열교환기의 동적현상을 묘사하기 위하여 정적모델과 동적모델로 구분하여 수학적모델을 개발하였다.

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

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

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

온수 열교환기의 동적모델로는 식(19)와 같이 시간지연이 있는 1차모델로 가정하였다.

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

3. 보일러 제어 알고리즘

개발된 가스보일러시스템 제어모델의 동적 특

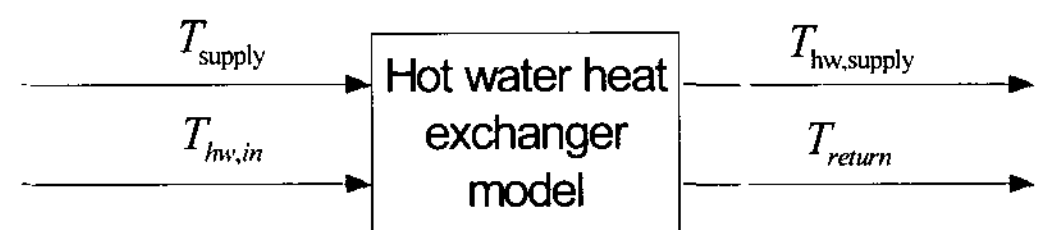


Fig. 5 Hot water heat exchanger model.

성을 확인하기 위하여 Fig. 6과 같은 제어 흐름도를 가정하였다. 그림에서 보듯이 공급수 온도 설정 알고리즘에 의해 공급수 온도가 설정되고 가스밸브, 송풍기, 펌프 제어 알고리즘에 의해 가스밸브, 송풍기, 펌프의 위치가 제어된다. 가스밸브, 송풍기, 펌프는 매 10초마다 제어되며 공급수 온도는 매 60초마다 설정된다.

3.1 공급수 온도 설정 알고리즘

보일러시스템에서 제어될 공급수 온도는 공급수 온도 설정 알고리즘에 의하여 설정된다. Fig. 7과 같이 환수온도에 의하여 공급수 온도가 설정

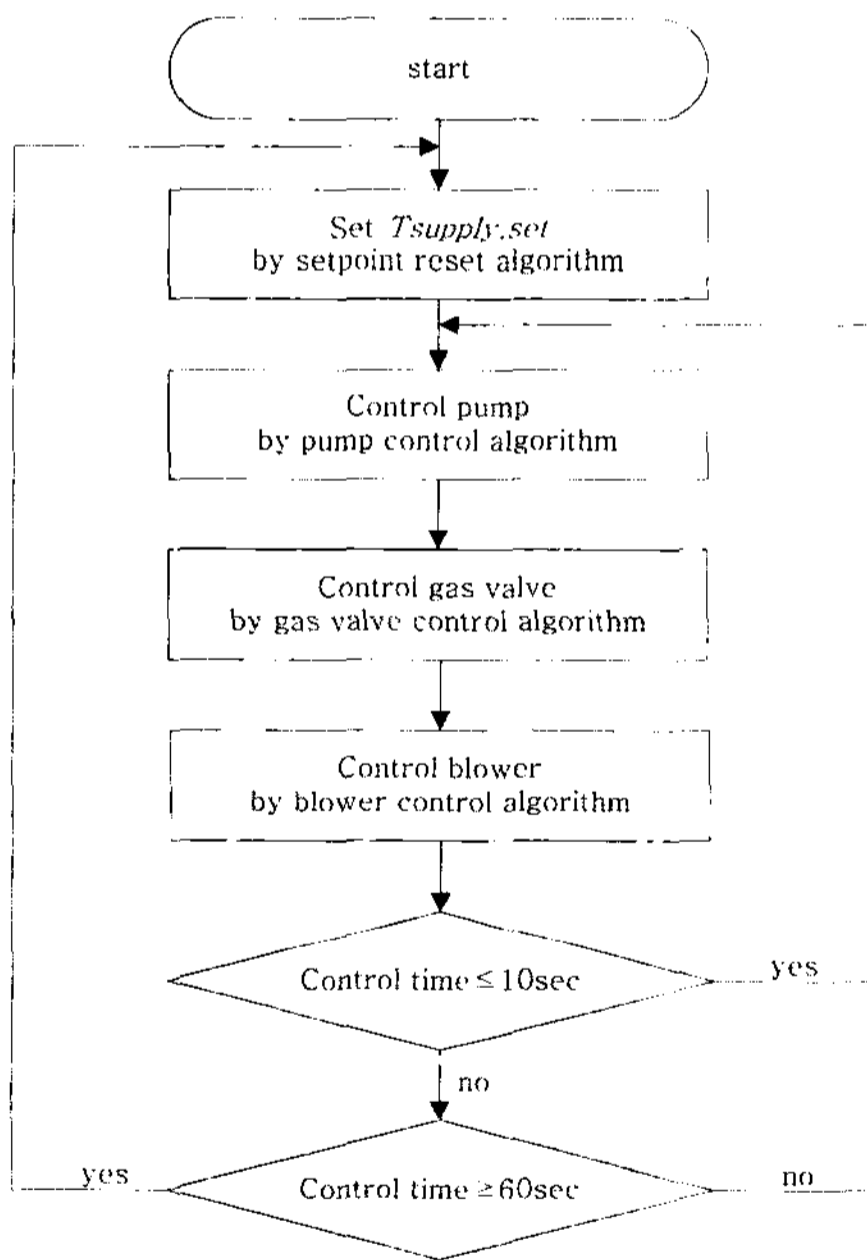


Fig. 6 Control flow diagram.

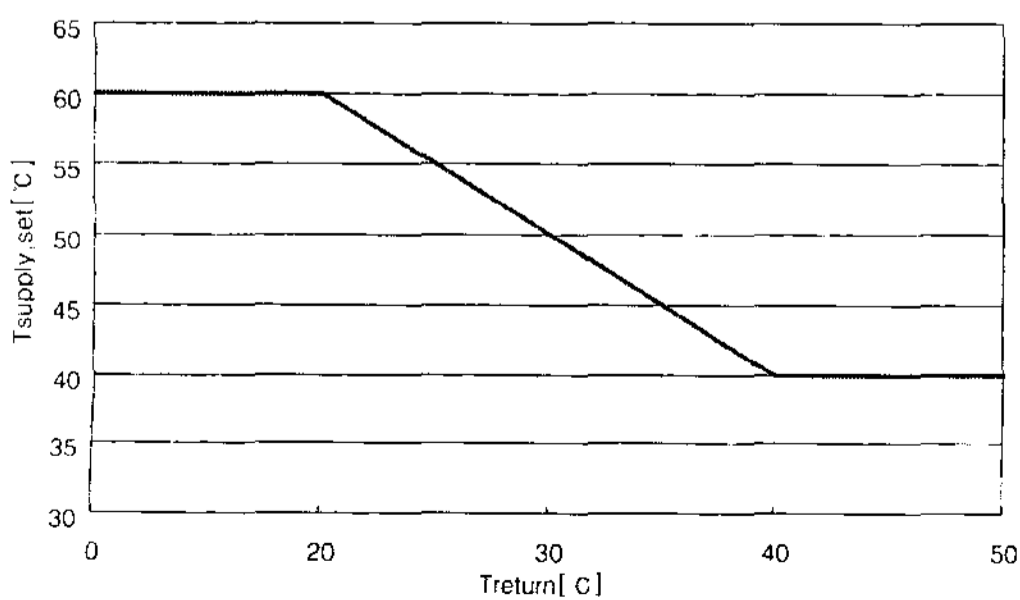


Fig. 7 Supply water set temperature.

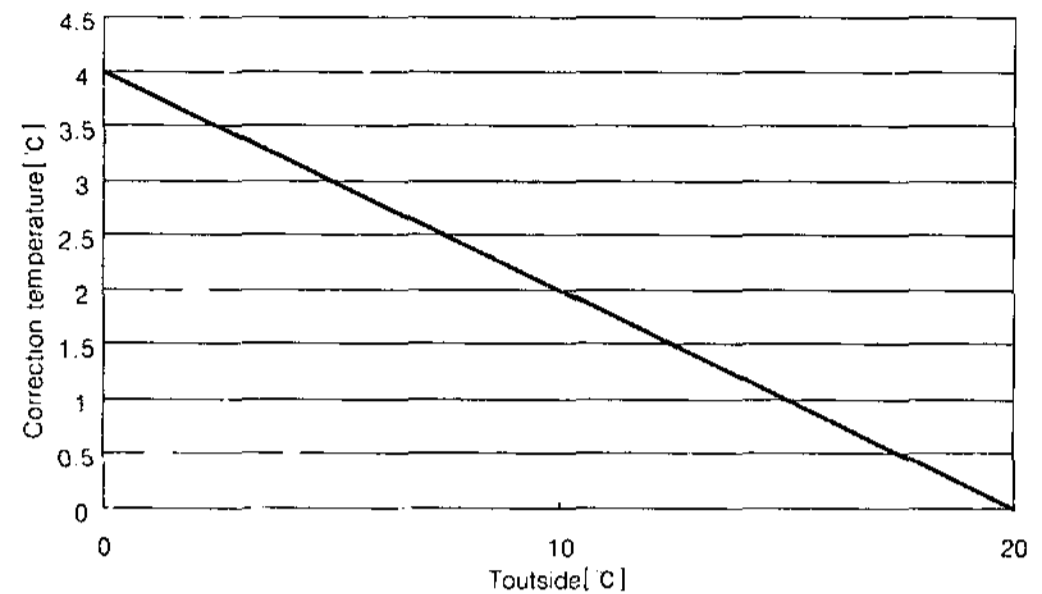


Fig. 8 Correction of supply water set temperature.

되고 Fig. 8과 같이 외기온도에 의하여 설정온도가 보정되며 공급수의 온도제어가 30초 이상 설정온도 부근에서 ±0.5°C이하로 유지되면 설정온도가 -1°C 낮추어져 재설정된다.

3.2 공급수 온도 제어 알고리즘

공급수 온도를 설정된 온도로 유지하기 위해 가스밸브, 송풍기, 펌프를 제어하였다. 가스밸브의 제어는 공급수 온도차를 이용한 비례적분 알고리즘을 사용하였으며

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (20)$$

여기서 $e(t)$ 는 공급수 설정값과의 온도차, $m(t)$ 는 가스밸브의 위치, K_p 는 0.8, K_i 는 0.05로 가정하였다. 송풍기는 가스밸브의 제어위치에 따라 연료와 공기의 연공비에 연동되어 제어 되었으며 펌프는 Fig. 9와 같이 환수온도에 의해서 제어되었다.

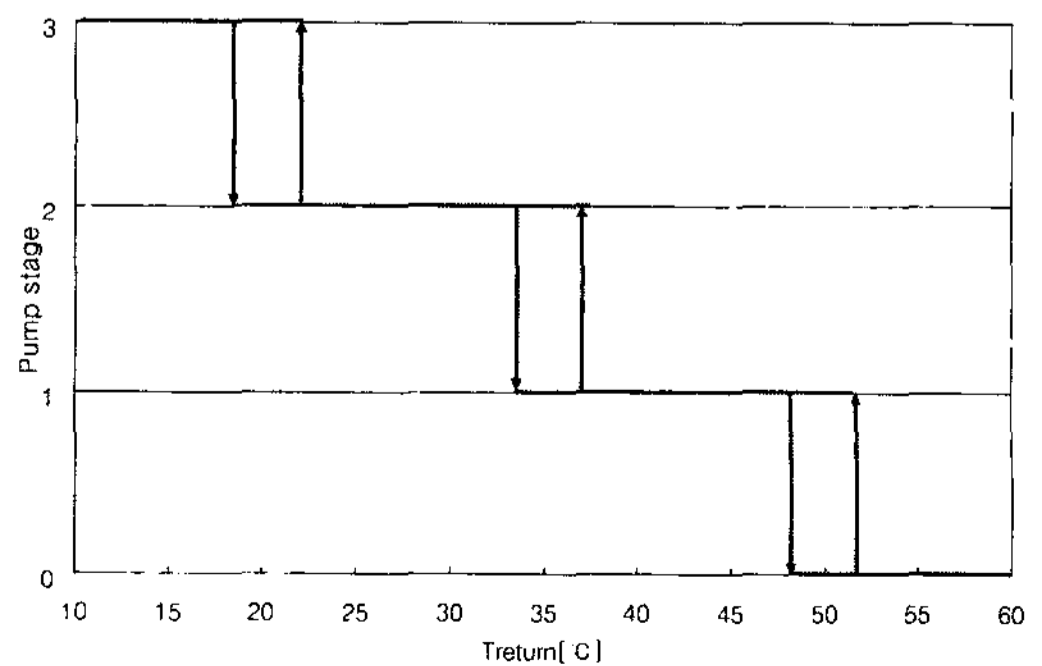


Fig. 9 Pump stage control algorithm.

4. 동적모델의 제어성능

현재 50평형대에 사용되는 37kW급 보일러로서 송풍기, 가스밸브, 펌프의 최대유량이 41.76 kg/h, 2.43 kg/h, 1587 kg/h인 시스템의 각종 동적 데이터를 Table 1과 같이 가정한 후 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램의 제어 성능을 확인하기 위하여 Fig. 10과 같은 15℃에서 시작하여 최대 40℃까지 증가하였다가 다시 15℃로 감소하는 시간별 환수온도를 가정하였다.

Fig. 11은 공급수 설정 온도와 제어된 공급수 온도를 보여주고 있으며 Fig. 12는 가스밸브와 펌프의 제어 결과를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 공급수 온도 설정은 환수온도, 외기온도, 온도제어결과를 사용한 공급수 온도 설정 알고리즘에 의해 적절하게 설정되었으며, 공급수 온도는 초기 과도기와 보일러 용량부족구간을 제외한 구간에서 공급수 온도 제어 알고리즘에 의해 설정 온도로 적절하게 제어되는 것을 확인 할 수 있었다. 시험시작 초기과도기를 거친 후 350초까지 최대 가스량이 사용되었고 그 후 공급수의 온도가 설정온도에 접근되도록 가스밸브의 개도량이 적절하게 제어되었다. 541초에 펌프용량이 2단에서 1단으로 감소됨으로써 환수유량이 급격히 감소되어 가스밸브 개도량도 급격히 감소되었으며 그 후 공급수의 설정 온도에 맞춰 가스밸브의 개도량이 안정되게 제어되는 것을 알 수 있었다. 1321초에 펌프가 1단에서 2단으로 증가됨으로써 환수유량이 급격히 증가되어 가스밸브 개도량도 급격히 증가되었으며 그 후 공급수 온도에 따라 적절히 제어되는 것을 확인 할 수 있었다. 1561초부터는 최대 가스량이 사용되었다.

Fig. 13은 연소가스 온도를, Fig. 14는 공급수 온도를, Fig. 15는 보일러 열교환기의 전체면적 1.2m² 중 현열 및 잠열 열교환에 사용된 면적을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 121초, 541초에

Table 1 Dynamic data used for the simulation

	Time constant	Time delay
Blower	2	1
Gas valve	2	1
Pump	5	1
Burner	5	1
Heat exchanger	10	2

공급수 온도의 급격한 상승은 펌프 용량이 3단에서 2단으로, 2단에서 1단으로 감소함에 의한 결과이고, 1321초, 1741초에 공급수 온도의 급격한 하강은 펌프 용량이 1단에서 2단으로, 2단에서 3단으로 증가함에 의한 결과이다.

시뮬레이션 기간 1800초 동안 연소가스로부터 공급수에 전달된 총열량은 30529.2kJ이고 같은 기간 사용된 총 가스량 0.606kg임으로 LNG 저위 발열량 50113kJ/kg 기준으로 100.5%의 효율로 운용되었음을 알 수 있었다.⁽⁸⁾

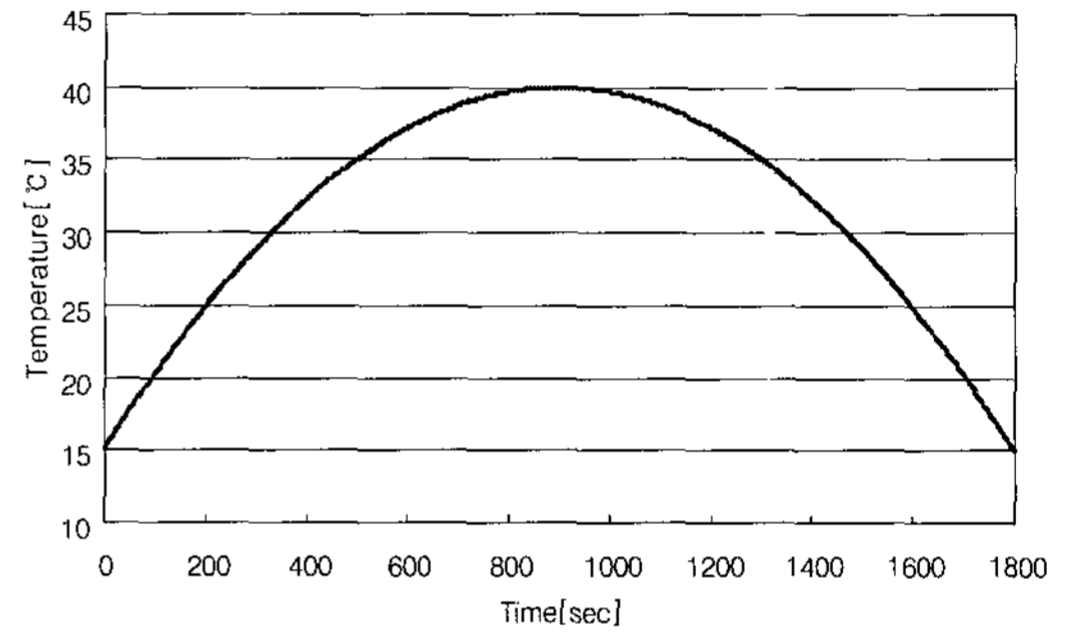


Fig. 10 Return water temperature.

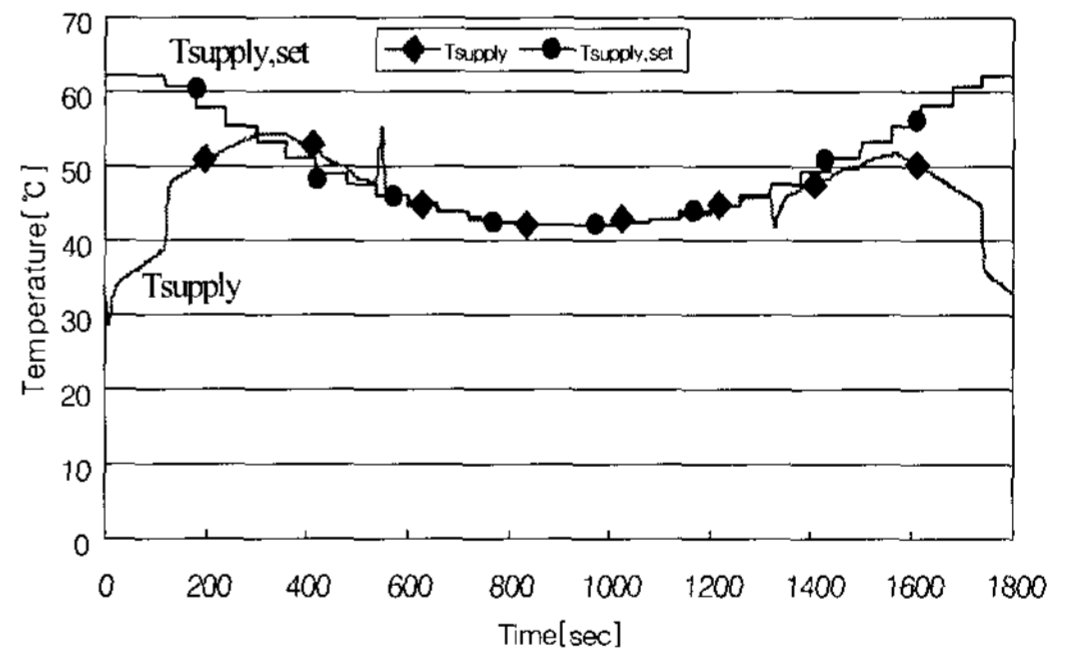


Fig. 11 Supply water temperature and setpoint.

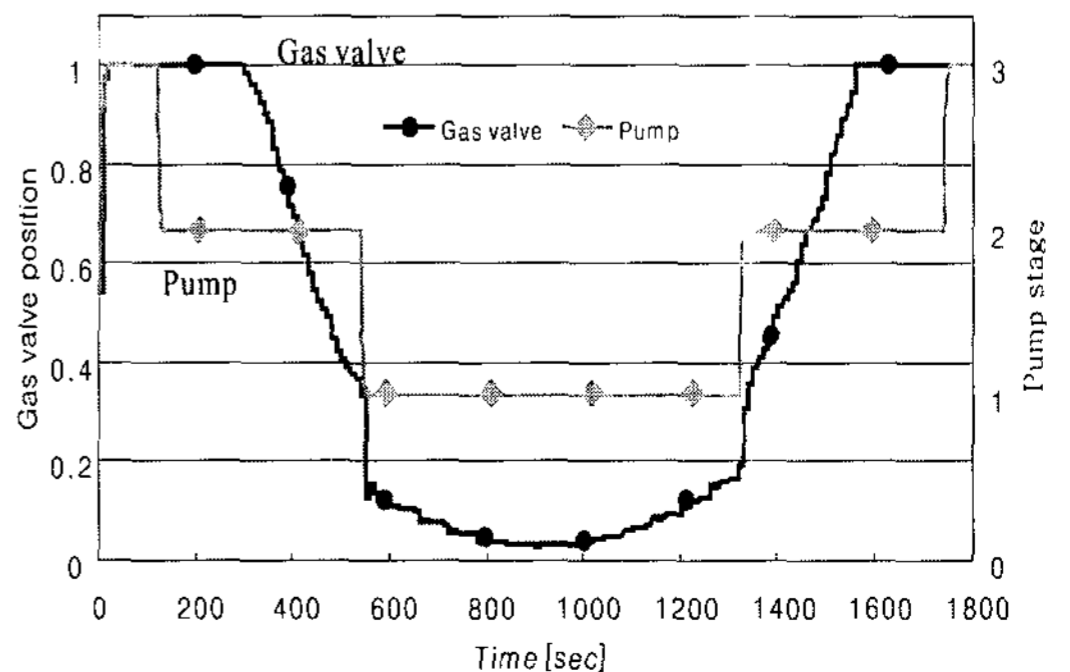


Fig. 12 Gas valve position and pump stage.

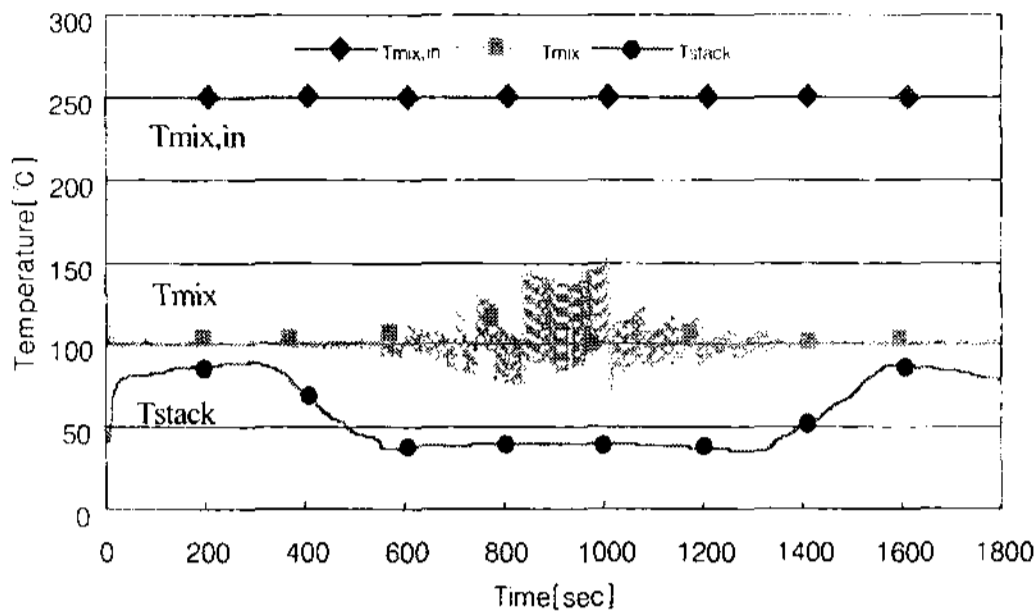


Fig. 13 Exhaust gas temperature.

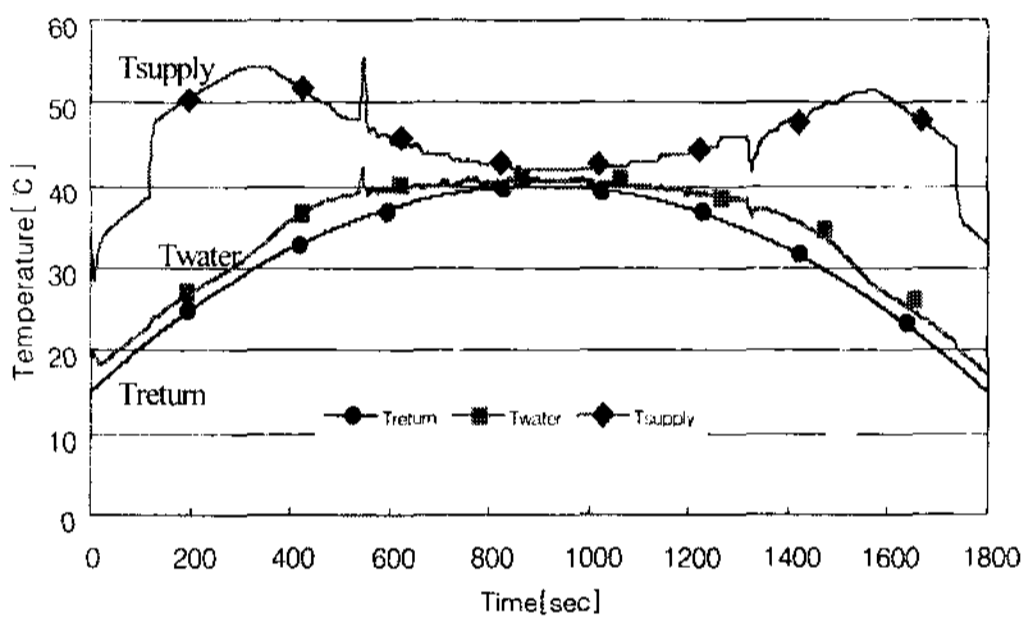


Fig. 14 Water temperature.

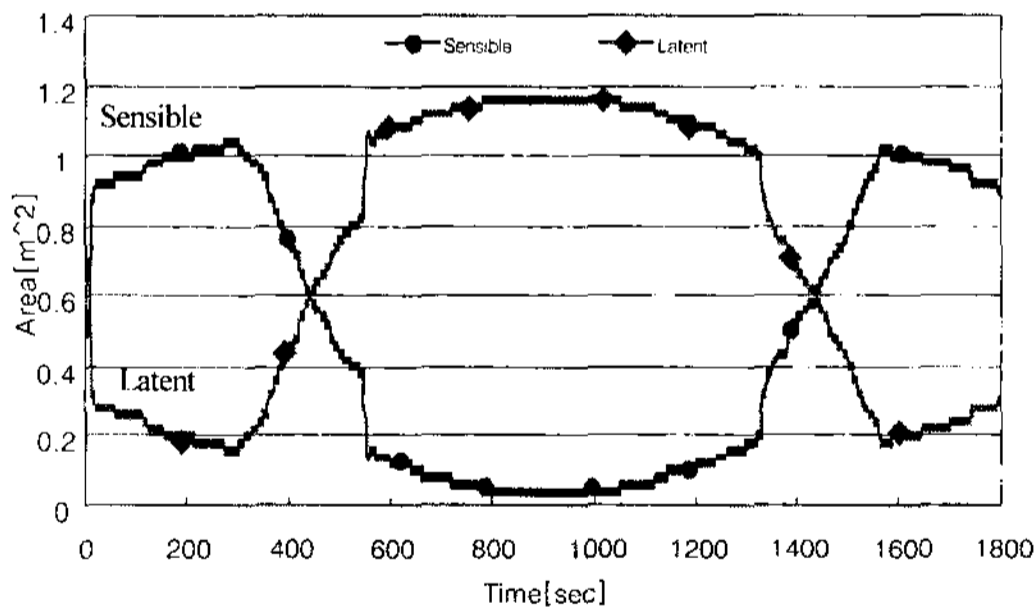


Fig. 15 Sensible and latent heat exchanger area.

5. 결 론

응축형 가스보일러시스템의 제어 알고리즘을 효과적으로 개발하기 위하여 송풍기, 펌프, 가스 밸브, 연소기, 열교환기로 구성된 시간지연이 있는 1차모델의 수학적모델을 개발한 후 개발된 동적모델을 사용하여 시뮬레이션 프로그램을 작성하였다. 개발된 동적모델의 유용성을 확인하기 위하여 공급수 온도 설정 알고리즘과 공급수 온도 제어 알고리즘을 가정한 후 시뮬레이션 프로

그램을 사용하여 제어성능을 확인하였다. 시뮬레이션 결과 개발된 동적모델은 응축형 가스보일러시스템의 제어 알고리즘 개발에 적절히 사용가능함이 확인되었다.

따라서, 본 연구에서 개발된 동적모델은 현재 개발되고 있는 가스보일러시스템의 제어 알고리즘 개발과 제어성능확인을 위하여 효과적으로 사용될 수 있다고 판단된다.

후 기

본 연구는 2008년도 국민대학교 교내 연구비지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Cho, H. W., Park, I. S. and Yang, K. Y., 2004, Development status and effect of condensing boiler, proceedings of the KOSCO, pp. 269-275.
2. Jang, K., 2004, A study on the development of Low-NOx condensing gas boiler system, Ph.D. thesis, Inha University.
3. Han, D., 2007, The development of control algorithms of a condensing gas boiler system, Report, 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, 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.
8. Cho, Y. and Min, M., 1993, Heating performance of small gas boiler on steady state and cyclic operations, Proceedings of SAREK, pp. 51-55.