

지역난방 공동주택 시스템에서 Smith Predictor 제어기 적용성 연구

정 상 훈[†], 문 연 진, 하 재 순*, 조 성 환**

전주대학교 에너지·자원기술개발사업단, *전주대학교 대학원 기계자동차공학과, **전주대학교 기계자동차공학과

Strategy to Maintain the Smith Predictor Controller in the District Heating System for Apartment Buildings

Sang-Hoon Jung[†], Youn-Jin Moon, Jae-Sun Ha*, Sung-Hwan Cho**

Energy Resources R&D Center, Jeonju University, Jeonju 560-759, Korea

[†]Graduate student of Mechanical and Automotive Engineering, Jeonju University, Jeonju 560-759, Korea

^{**}Department of Mechanical and Automotive Engineering, Jeonju University, Jeonju 560-759, Korea

ABSTRACT : It is known that the classical tuning formula for typical PID controllers in general provides unsatisfactory results for industrial plants where the time delay exceeds the dominant lag time. For this reason, alternative strategies have been studied in order to cope with this problem and the most popular scheme is the Smith Predictor(SP).

In this paper, the dynamic model of a unit apartment in the district heating system ,which is the control process effected by the dead-time, is developed, and the on/off room temperature control method with the SP simulate using Matlab-Simulink. The simulation results show that the SP works effectively in outdoor temperature variation.

Key words : PID controller, Smith Predictor(SP), the district heating system, dead-time

기 호 설 명

- $c_{p_{water}}$: 물의 비열 [J/kg·°C]
- $c_{p_{air}}$: 공기의 비열 [J/kg·°C]
- $m_{c_{water}}$: 물의 질량 유량 [kg/sec]
- $m_{c_{air}}$: 공기의 질량 [kg/sec]
- T_{inlet} : 공급수 온도 [°C]
- T_{Room} : 건물 내부 온도 [°C]
- R_{eq} : 건물의 등가 열저항 [°C/W]

1. 서 론

공정 제어시스템은 전달시간에 기인한 부동시간(dead-time)의 영향을 받게 된다. 이는 전형적으로 파이프라인과 같은 배관공정 시스템에서 더욱 분명하게 나타나게 된다. 길이 d 와 단면 A 를 가진 파이프 시스템에서, 밀도 ρ 와 유량 w 의 유체는 전체 거리를 대해 $\tau = \rho Ad/w$ 의 관계가 성립한다. (Fig 1. 참조)⁽¹⁻³⁾

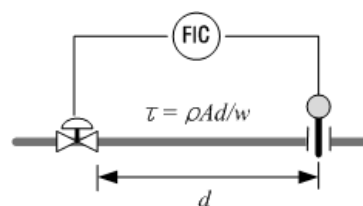


Fig 1. 배관공정 time-delay를 나타내는 개요도

[†] Corresponding author

Tel.: +82-63-220-3242; fax: +82-63-220-3241

E-mail address: arthor@nate.com

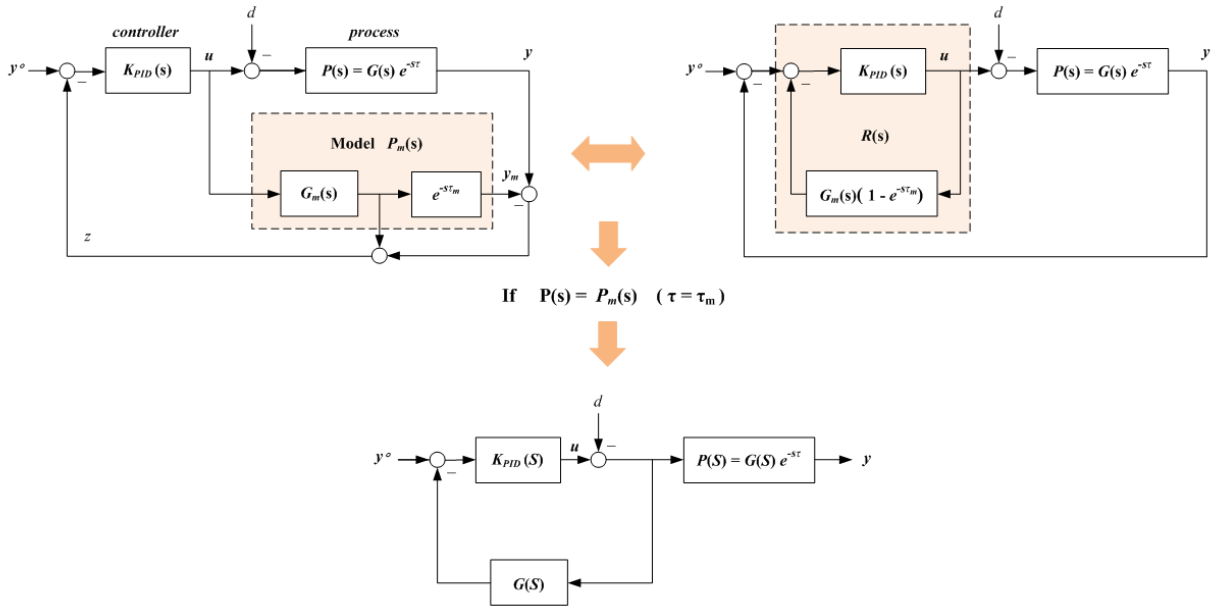


Fig 2. Smith Predictor 구현을 위한 등가 블록선도

수학적으로 부동시간에 의해 영향을 받는 1차 시스템은 다음과 같은 미분방정식 형태로 나타낼 수 있다.^(1, 2)

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t); u(t-\tau)) \\ &= a \cdot x(t) + b \cdot u(t-\tau) \end{aligned} \quad (1)$$

이때, $x(t)$ 와 $u(t)$ 는 각각 시간 t 에 대한 측정 변수값, 조작변수값 이고 τ 는 부동지연시간 이다. 이를 라플라스변환에 의해 복소변수 s 에 대한 대수방정식의 형태로 변환하면 다음과 같다.

$$X(s) = \frac{\mu \cdot e^{-s\tau}}{1 + sT} U(s) \quad (2)$$

이때, $\mu = -b/a$, $T = -1/a$ 이다.

일반적인 공정시스템의 PID제어부 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{s} T_i + s T_d \right) \quad (3)$$

제어응답은 세부분의 합산에 의해 연산되며, K_p , T_i , T_d 값의 보정을 통하여 페루프 시스템에 요구되는 성능 추종이 가능하게 된다.

비례(P)제어 특성은 오차에 대해 거의 동일한 경향을 유지하게 되며, 적분(I)제어(과거 오차의 합에 비례한 제어) 특성은 정상상태 오차를 보정하기 위해 사용된다. 또한 미분(D)제어(과거 오차 경향들에 비례한 제어) 특성은 과도상태 동안의 오차특성을 보정할 수 있다. 그러나 마지막 미분

제어 특성은 제어공정이 부동시간의 영향을 받게 되었을 때, 이전 실행동작의 평가치 누적으로 미분값이 커지게 되어 제어입력에 나쁜 영향을 미치게 된다. 따라서 유량이나 압력, 온도와 같은 공정제어 시스템에서는 PI제어만을 사용하는 것이 일반적이다. 더욱이 지역난방시스템과 같은 대규모 공정시스템에서 PID 파라미터들의 보정이 어려울 경우에는 외란 등에 의한 과도상태 특성이 더 나빠지게 되며, 이에 따른 정상상태 도달시간 및 응답특성이 나빠지게 된다.

2. Smith Predictor 제어기

공정 제어기술의 발달과 함께 부동시간이 존재하는 제어공정에 대한 다양한 Prediction-PI제어 (PPI Control) 방식이 제안되어 왔다.^(4, 5) 그중에서도 시간지연의 영향을 받는 제어공정에 적용 가능한 제어방식이 50여 년 전에 O. J. M. Smith에 의해 제안 되었으며, 이 알고리즘을 일반적으로 Smith Predictor라 부른다.⁽⁶⁾

이 알고리즘의 이해를 위하여 공정 전달함수를 $P(s) = G(s) e^{-s\tau}$, 설정치를 y° , 일반적인 부하 외란을 d 라 정의하면, 일반 공정에 대한 전달함수를 다음과 같이 구할 수 있어야만 한다.

$$P_m(s) = G_m(s) e^{-s\tau_m} \quad (4)$$

여기서 $G_m(s) = \frac{\mu_m}{1+sT_m}$ 은 지연이 없는 공정으로 근사화 된 복소변수 s 에 대한 유리함수이다. 이 공정모델 변수들은 스텝입력에 대한 개루프 시스템 응답을 통한 규준화 방식을 통하여 구해지게 된다.

Fig 2.에서와 같이 페루프는 공정의 출력값인 y 에 의해서 닫혀있지 않고, τ_m 초 만큼의 선행시간이 있는 z 에 의해 닫혀있게 된다. 따라서 이에 따른 궤환 측정값의 “예측(prediction)”이 이루어지게 되고, 이러한 이유로 상기 제어구조는 Smith “Predictor”라 불리게 되었다.

최종적으로 제어기의 전달함수는 다음과 같다.

$$R(s) = \frac{R_{PID}(s)}{1 + R_{PID}(s) \cdot G_m(s) \cdot (1 - e^{-sT_m})} \quad (5)$$

또한 시스템적 측면에서 외란을 포함한 두 개의 입력에 따른 출력 전달함수를 구하게 되면 다음과 같다.

$$\frac{Y(s)}{Y^o(s)} = \frac{R_{PID}(s)P(s)}{1 + R_{PID}(s)G_m(s)(1 - e^{-sT_m}) + R_{PID}P(s)} \quad (6)$$

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{P(s)}{1 + R_{PID}(s)G_m(s)(1 - e^{-sT_m}) + R_{PID}P(s)} \quad (7)$$

만약에 $\tau_m = \tau$ 라면 위의 두 식은 다음과 같이 축약되게 된다.

$$\frac{Y(s)}{Y^o(s)} = \frac{R_{PID}(s)G(s)}{1 + R_{PID}(s)G_m(s)} e^{s\tau} \quad (8)$$

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{G(s)}{1 + R_{PID}(s)G_m(s)} e^{s\tau} \quad (9)$$

따라서 정확한 $G_m(s)$ 의 모델 파라미터를 선정하게 되면 PID제어기는 시간지연 없는 공정상의 제어로 조율 되어질 수 있게 된다. 이는 곧 최적의 성능 구현이 가능하게 됨을 의미하게 된다.

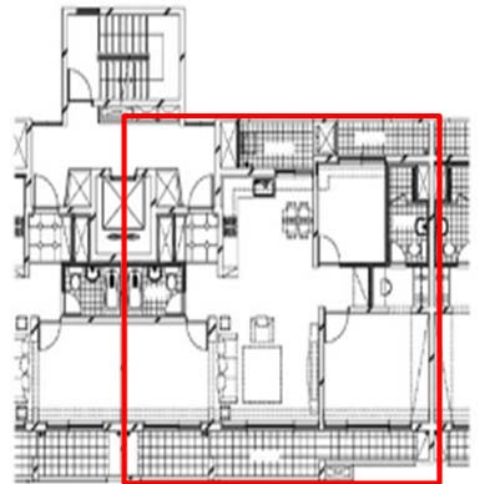
오늘날 디지털 컴퓨터 기술의 발전에 따라, Smith Predictor 알고리즘 구현은 어렵지 않게 되었다. 근래의 많은 PLC등의 공정제어기들은 전달함수 블록 구현이 용이하도록 다양한 파라미터와 함수 블록들을 라이브러리화 하고 있다.

3. 실온해석을 위한 시뮬레이션

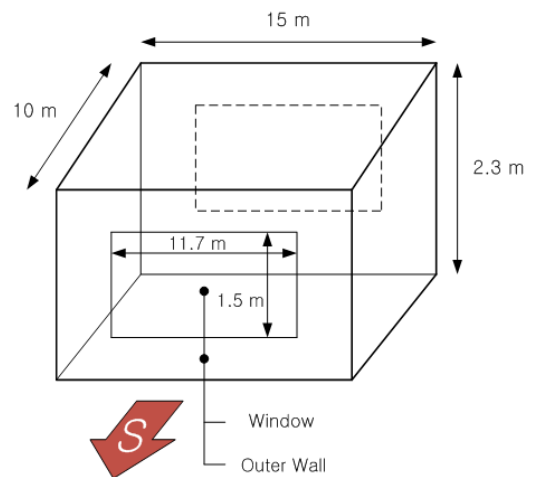
본 논문에서는 난방공간의 실온을 해석하고, Smith Predictor의 적용 가능성을 확인하기 위하여 Matlab-Simulink를 기반으로 작성된 시뮬레이션 프로그램을 사용하였다.



(a) 서울지역 34평형 공동주택 조감도



(b) 서울지역 34평형 공동주택 평면도



(c) 모델링 적용 공간의 입체도

Fig 3. 모델링 적용을 위한 공동주택

시뮬레이션을 실시할 대상공간은 Fig 3.과 같이 국내에서 가장 일반적인 34평형 공동주택으로 선정하였다.

Table 1. 벽체의 구성

	구 분	두께(mm)	열저항(m ² K/W)
세 대 벽	실내표면		0.110
	석고보드	9.5	0.050
	공기층	10.0	0.086
	콘크리트	200.0	0.125
	공기층	10.0	0.086
	석고보드	9.5	0.050
	실내표면		0.110
	열관류율	1.621 (W/m²K)	
외 벽	구 분	두께(mm)	열저항(m ² K/W)
	실내표면		0.110
	석고보드	9.5	0.050
	공기층	10.0	0.086
	단열재	70.0	2.000
	콘크리트	200.0	0.125
	실외표면		0.043
	열관류율	0.414 (W/m²K)	
천 정 및 바 닥	구 분	두께(mm)	열저항(m ² K/W)
	실내표면		0.086
	마루판	8.0	0.067
	모르터	40.0	0.029
	기포콘크리트	40.0	0.250
	단열재	20.0	0.571
	콘크리트	150.0	0.094
	공기층	40.0	0.086
	석고보드	9.5	0.050
	실내표면		0.086
	열관류율	0.758 (W/m²K)	

서울지역에 위치한 이 공간의 설계 공급 온수의 온도는 60℃로 설계되어 있다.

모델링 적용공간의 크기는 15m×10m×2.3m이며 남향이다.(Fig 3.참조) 건물 내부를 구성하고 있는 벽체의 구성은 외기에 면하고 있는 벽과 내부 세대벽에 따라 달라지게 된다. 또한 천장과 바닥 면도 다른 구성을 갖게 되는데, 그 세부적 내용은 Table 1.과 같다.

기타 건물 특성은 남측과 북측 외벽에 있는 등가창문의 크기는 11.7m×1.5m이며, 알루미늄 프레임에 이중유리로 구성되어 있어 창문의 총열관류율은 3.719 W/m²K이다.

이 공간의 설정 실온은 21℃이며, 서울지역 설계 외기온은 -11.9℃을 이용하였다.

3.1 공급온수에 의한 열역학 모델링

온수공급을 통해 주택 내부로 전달되는 열량은 on/off 제어를 통한 공급온도차에 비례한 열용량의 계산에 의해 구할 수 있다.⁽¹⁻³⁾ 지역난방을 도입한 공동주택 시스템의 공급열량은 다음과 같은 열역학방정식 모델로 설명될 수 있다.

$$\frac{dQ}{dt} = T_{inlet} \cdot mC_{water} \cdot cP_{water} - T_{Room} \cdot mC_{air} \cdot cP_{air} \quad (10)$$

여기서 물의 질량유량인 mC_{water} 의 단위는 [kg/sec]로 약 10 lpm에서 13 lpm 사이의 체적유량을 질량유량으로 변환하여 시뮬레이션 하였다. 유량선정이 적절하지 못할 경우 부적절한 실온해석 응답특성을 얻게 된다.

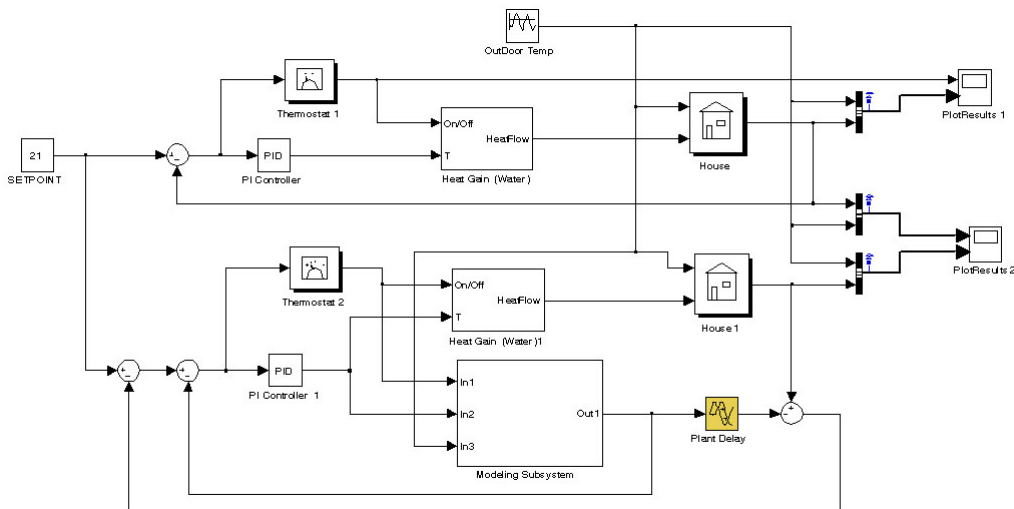


Fig 6. 적용공간에 대한 Matlab-Simulink 모델링

3.2 주택의 열역학 모델링

열역학 해석상 주택은 실내 내부온도와 외기온도 보상을 통한 등가 열저항-열용량법에 의해 모델링 될 수 있다. 이때 고려할 사항은 온수공급을 통한 열공급과 외기온도에 의한 열손실율이다. 열손실율과 실내 온도의 시간변화율은 다음과 같이 열역학 방정식으로 모델링 될 수 있다.

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_{losses} = \frac{T_{Room} - T_{outdoor}}{R_{eq}} \quad (11)$$

$$\frac{dT_{Room}}{dt} = \frac{1}{M_{air} \cdot cp_{air}} \cdot \left(\frac{dQ_{inlet}}{dt} - \frac{dQ_{losses}}{dt}\right) \quad (12)$$

3.3 모델링 적용공간에 대한 시뮬레이션

상기 모델링 적용 공간의 형상 및 물성치 정보를 시뮬레이션 프로그램(Matlab-m파일)에 입력하고, 실내온도 21±0.5℃로 설정한 후 on/off 피드백 제어를 실행 하였다.(Fig 6. 참조)⁽¹⁰⁻¹³⁾

겨울철 최저기온이 나타나는 1월 30일경의 외기온도 -11℃~8℃(서울지역 기준)를 사용하여 48시간(2일)의 실온 해석을 실시한 결과를 Fig 7~Fig 9.에서와 같이 얻을 수 있다.

지연시간은 30초, 60초, 120초 일 경우를 설정하여 시뮬레이션을 하였을 때 상단은 Smith Predictor가 없는 on/off 피드백 제어 결과이고, 하단은 Smith Predictor를 적용한 on/off 피드백 제어 결과이다.

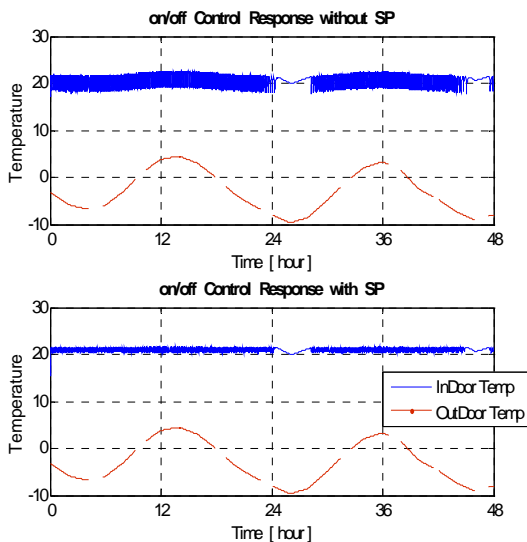


Fig 7. on/off 제어 실온해석 결과 (at time-delay : 30[s])

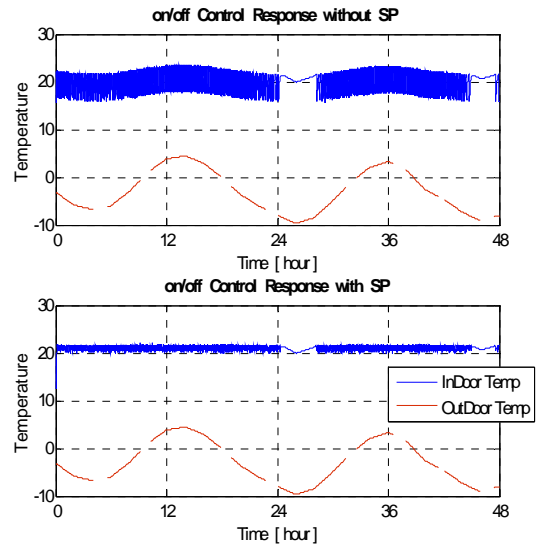


Fig 8. on/off 제어 실온해석 결과 (at time-delay : 60[s])

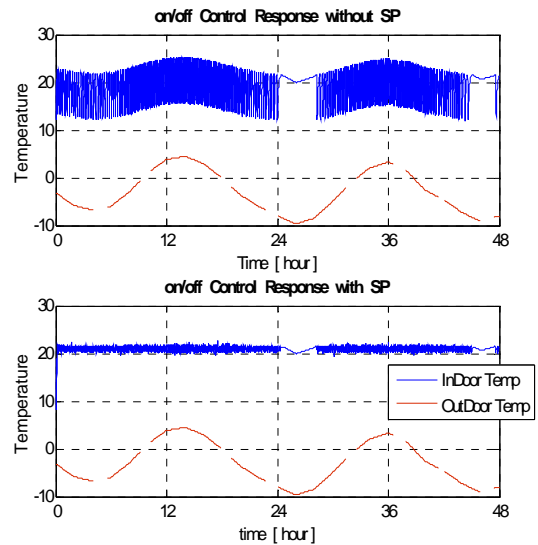


Fig 9. on/off 제어 실온해석 결과 (at time-delay : 120[s])

지연시간에 따른 설정 온도에 대한 정상상태 오차는 Table 2.와 Table 3.에서와 같이 나타나며, 이를 통하여 지연시간이 건물의 실내온도 응답특성에 상당한 영향을 주고 있음을 확인할 수 있다.

출력 결과를 확인하면 Smith Predictor를 적용하지 않은 경우(without SP) 지연시간이 120[s]일 때에는 정상상태 오차가 7℃나 되었고, 60[s]일 때, 30[s]일 때는 정상상태 오차가 각각 4℃,

2℃로 작아졌으나, 여전히 오차율이 커짐을 확인할 수 있다. 반면에 Smith Predictor를 적용한 경우(with SP)에는 지연시간이 120[s], 60[s] 일 때에도 정상상태 오차가 1℃정도로 비교적 우수한 특성을 보였으며, 지연시간을 무시할 정도인 30[s]에서는 정상상태 오차가 0.5℃정도로 우수한 특성을 보이고 있다.

Table 2. 정상상태 비교 (without SP)

지연시간	정상상태 편차	정상상태 오차
30 [s]	19~22℃	2℃
60 [s]	16~23℃	4℃
120 [s]	14~23℃	7℃

Table 3. 정상상태 비교 (with SP)

지연시간	정상상태 편차	정상상태 오차
30 [s]	20.5~21.5℃	0.5℃
60 [s]	20~22℃	1℃
120 [s]	20~22℃	1℃

4. 결론

본 논문에서는 실제 지역난방 시스템 적용을 위한 기초로서, 난방공간에서의 실온해석 시뮬레이션을 통하여 Smith Predictor의 적용 가능성을 살펴보았다.

Smith Predictor를 이용한 on/off 피드백 제어 시스템에서 정상상태응답 편차는 큰 차이가 없으나, Smith Predictor가 없는 on/off 피드백 제어 시스템에서는 지연시간이 길수록 정상상태응답 편차가 큰 것을 확인할 수 있었다.

이를 통하여 결과를 요약하면 다음과 같다.

Smith Predictor는 시간지연이 있는 지역난방 시스템 적용했을 때에도 외기온의 변화에 우수한 정상상태 응답특성을 보일 수 있음을 확인할 수 있었으며, 실제 지역난방 시스템에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 에너지·자원기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. W. F. Stoecker, 1989, "Design of Thermal Systems", 3rd ed., McGraw-Hill.
2. K. Ogata, 1997, "System Dynamics", 3rd ed., McGraw-Hill.
3. Yunus A. Cengel, 1996, "Introduction to Thermo-dynamics and Heat Transfer", McGraw-Hill.
4. J. E. Normercy-Rico, 1999, E. F. Camacho, "Robust tuning of dead-time compensator for process with an integrator and long dead time", IEEE Transaction on Automatic Control, Vol. 44, No. 8, pp. 1597-1605.
5. Z. Palmor, 1980, "Stability properties of Smith dead-time compensator controllers", International Journal of Control, Vol. 32, No. 6, pp. 937-949.
6. O. J. M. Smith, 1995, "A Controller to Overcome Dead time", ISA Journal, Vol. 6, No. 2, pp. 28-33.
7. Cho, S. H., Shin, K. S., Won, S. H., 1995, "An Experimental Study for the Improvement of Heating Control Method of Ondol House", Korean Journal of Architectural Institute of Korea, Vol. 11, No. 9, pp. 117-127.
8. Ahn, B. C., Cho, S. H., Tae, C. S., 1997, "Control Characteristics of a Radiant Floor Heating System using Fuzzy Control Algorithm", Winter Proceedings of the SAREK, pp. 464-469.
9. Lee, J. Y., 1999, "A Study on the Predictive Control of Ondol System in Apartment Buildings", MS Thesis Seoul University, Seoul, Korea.
10. K. Ogata, 2008, "Matlab for Control Engineers", Prentice-Hall.
11. B. D. Hahn, D. T. Valentine, 2006, "Essential Matlab for Engineers and Scientists", 3rd ed., ELSEVIER.
12. Lim J. S., 2005, "Simulink Power", A-jin.
13. Kim, J. J., 1996, "Dynamic Systems and Control Engineering" CMG, pp. 524-549.