〈응용논문〉 **DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.12.1917** ISSN 1226-4873

냉각 프로세서의 모델규명 및 선행미분형 2 자유도 PID 유량 제어 알고리즘에 관한 연구§

황 이 철*† · 박 철 재**
* 동의대학교 메카트로닉스공학과, ** 대구대학교 자동차/산업/기계공학부

Study on Model Identification and Pre-Differential 2-DOF PID Flow Control Algorithm for Cooling Processes

I Cheol Hwang*† and Cheol Jae Park**
* Dept. of Mechtronics Engineering, Dongeui Univ.
** School of Automotive/Industrial/Mechanical Engineering, Daegu Univ.

(Received July 5, 2010 ; Revised October 13, 2010 ; Accepted October 18, 2010)

Key Words: Butterfly-Type Control Valve(버터플라이형 제어밸브), Model Identification(모델규명), Flow Control(유량제어), 2-DOF PI-D Control(2 자유도 선행미분형 PID 제어)

초록: 이 논문은 공압식 버터플라이 제어밸브를 이용한 냉각 프로세서의 모델규명 및 선행미분형 2 자유도 PID 제어 알고리즘 개발에 대한 연구를 수행한다. 구동 제어밸브를 포함한 냉각 프로세서의 모델 구조는 시간지연을 포함한 2차 지연 시스템 형태로 주어지며, 이는 데모 플랜트로부터의 입출력 데이터를 통하여 전달함수의 형태로 규명된다. 2 자유도 PID 제어기에서 피드백 제어게인은 Kitamori 제어게인 조정법을 이용하여 설정되며, 피드포워드 제어게인은 제어 시스템의 성능을 만족하도록 하는 관점에서 결정된다. 이 논문에서 제안된 제어 알고리즘의 유용성은 컴퓨터 모의실험과 데모 플랜트의 실험을 통해 검증된다. 결과적으로 논문에서 제안된 제어 알고리즘은 기존의 1 자유도 PID 알고리즘보다 제어게인 설정이 매우 명확하고, 제어성능이 우수함을 보인다.

Abstract: This study focuses on model identification and a 2-DOF PID control algorithm for cooling processes; a pneumatic butterfly-type control valve is used for this purpose. The mathematical model is a transfer function composed of a time delay and a second-order delay system. The control valve is identified as a first-order delay system with a time delay and included in the controlled plant. From the experimental data sets for a demo plant, the model parameters are identified, and the 2-DOF PID control gains are analytically derived by Kitamori's method. We show via a computer simulation and an experimental test that the performance of the proposed 2-DOF PID control system is better than that of a conventional 1-DOF PID control system.

1. 서 론

이 논문에서는 철강 및 화학 공정에서 많이 사용되는 냉각 설비의 모델 규명 및 유량 제어 알고리즘 개발에 관한 연구를 수행한다. 냉각 설비에서 유량 제어밸브는 버터플라이형 제어밸브이며, 이는 공압식 솔레노이드 밸브를 통하여 구동되는 복동식 실린더에 의해 동작된다. 먼저 제어밸브를 포함하는 냉각 프로세서의 수학모델을 규명하고, 이에 기초하여 선행 미분형 2 자유도 PID 유량 제어 알고리즘을 개발한다.

공압식 구동 제어밸브를 포함한 냉각 프로세서 모델링에 관한 연구는 주로 제어밸브를 중심으로 지금까지 많은 연구가 수행되어 왔다.[1~3] 그러나 기존 연구에서의 모델구조는 거의 열유체학적 이론에 기초한 비선형 모델이어서, 이를 기초로 PID 제어 게인들을 해석적으로 설계하기에는 이론적으로 많은 어려움이 있다. 그래서 이 연구의

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 부산지회 춘계학술대회(2010. 5. 7., 신라대) 발표논문임

† Corresponding Author, ichwang@deu.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

저자는 선행 연구[4]에서 냉각 프로세서의 비선형 모델을 도출하고, 이를 통하여 동특성을 해석한 후, 구동 제어밸브와 냉각 프로세서를 각각 시간지연 요소와 1차 지연 요소로 결합된 형태의 전달함수로 모델링 가능함을 보였다. 이 결과를 기초로 이 논문에서는 먼저 냉각 프로세서의 데모 플랜트를 구성하여, 이로부터 획득한 입출력 실험 데이터들을 이용하여 전달함수에 포함된 감도, 시정수, 시간지연 파라미터들을 각각 실험적으로 규명하기로 한다.

그리고 시간지연 요소와 1차 지연 요소의 직렬 결합으로 표현되는 구동부와 냉각 프로세서는 대부분 PID 제어기법이 매우 유용한 것으로 알려져 있다. 그러나 일반화된 1 자유도 PID 피드백 제어기는 제어성능 상 여러 가지 부족한 점이 있어, 최근에는 다양한 형태의 개량형 PID 제어기가 개발되어 이용되고 있다. 예를 들면, 선행미분형 PID(PI-D), 선행 비례-미분형 PID (I-PD), 피드포워드 제어기를 포함한 2 자유도 PID 제어기, 그리고 Smith 예측기를 가진 PID 제어기 등을 들 수 있다[5]. 또한 최근에는 LQI 최적제어, H^{∞} 견실제어, 슬라이딩모드 제어, 모델예측제어 등과 같은 현대 최적 제어기 설계법이 실용화되어 그 응용 범위를 점점 넓혀 나가고 있다. 그 가운데 이 논문에서는 피드포워드 제어기와 선행 미분형 PID 피드백 제어기가 결합된 2 자유도 제어 알고리즘을 적용하기로 한다.

따라서 이 논문에서는 먼저 구동 제어밸브를 포함한 냉각 프로세서의 전달함수를 규명하고, 선행 미분형 2 자유도 PID 제어기(이하 2 자유도 PI-D 제어기라고 한다)를 설계한다. 그리고 데모 플랜트에 적용하기 위하여 연속시간역에서 설계된 2 자유도 PI-D 제어기를 간접적으로 디지털화하는 방법으로 디지털 제어로직으로 구현한다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 냉각 프로세서의 모델 파라미터인 시간지연, 시정수, 감도 파라미터들을 실험적으로 규명한다. 제 3장에서는 2 자유도 PI-D 제어 알고리즘을 설계하고, 이를 디지털 제어로직으로 구현한다. 제 4장에서는 모의실험 및 데모 플랜트 실험 결과를 통하여 제안한 제어로직의 유용성을 고찰한다. 마지막으로 제 5장에서는 결론과 향후 연구과제를 간략히 기술하기로 한다.

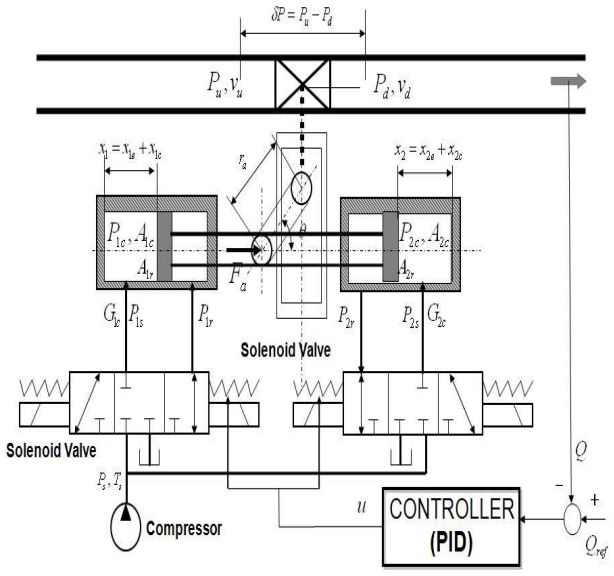

Fig.1 A configuration of a cooling process

2. 냉각 프로세서 모델규명

Fig. 1은 공압식 복동식 버터플라이형 제어밸브를 포함한 냉각 프로세서의 개략도를 나타낸다.

Fig. 1에 포함된 기호들에 설명은 이 논문의 선행 연구결과인 참고문헌[4]을 참조바란다. 선행 연구에서는 버터플라이형 제어밸브를 포함한 냉각 프로세서의 비선형 미분방정식을 유도하고, 그 결과를 기초로 냉각 프로세서의 제어기 설계를 위한 수학모델을 다음 식 (1)과 같은 전달함수로 규명하였다.

$$G_P(s) = G_a(s)G_b(s) = G(s)e^{-sL} \qquad (1)$$
$$= \frac{K_aK_b}{(1+T_as)(1+T_bs)}e^{-s(L_a+L_b)}$$

위의 식에서 K_a, K_b는 각각 구동밸브 및 프로세서의 감도계수, T_a, T_b는 각각의 시정수, 그리고 L_a, L_b는 각각의 시간지연 크기를 나타낸다. 여기서 감도는 입력 크기 대비 출력 크기의 비를 나타내고, 시정수는 프로세서의 출력이 정상상태 값의 63.2%에 도달하는 시간에서 시간지연 크기를 뺀 값으로 정의한다.

먼저 데모 플랜트로부터 입출력 실험 데이터를 획득하여 식 (1)의 모델 파라미터를 규명하기로 한다. 여기서 데모 플랜트에 사용된 버터플라이형 제어밸브의 직경은 300mm로서, 상하 냉각 라인에 두 개(이하 각각 FCV 301, FCV 401라고 한

다)를 사용하고 있다. 동일 제원의 두 밸브를 사용한 이유는 밸브마다 동일 제원이라도 주위 환경과 실험조건에 따라 그 특성이 조금씩 다르기 때문에 각각의 파라미터 변동 특성을 해석하기 위해서이다. 실험 데이터들은 밸브 동작구간인 밸브 개도를 40%에서 5%씩 70%까지 스텝형으로 증가시키면서 획득하였다.

Fig. 2는 밸브 개도 명령치에 따른 실제 밸브의 개도와 유량에 대한 데이터를 나타낸다. Fig. 3은 밸브 개도 명령치를 50%에서 55%까지 스텝형으로 인가하였을 때의 FCV 301 밸브에 대한 규명결과를 나타내고 있다. 즉 입출력 실험 데이터와 식 (1)의 규명모델(ID 모델)을 비교한 결과이다. 그리고 FCV 401 밸브에 대해서도 동일한 방법으로 파라미터 규명을 수행하였다. Fig. 3에서 규명된 모델은 실제 입출력 데이터를 양호하게 표현하고 있음을 알 수 있다. 이때 주 동작구간에서 규명된 모델 파라미터들의 값은 Table 1과 같다. 즉 Table 1에서는 밸브의 주 동작영역이 밸브 개도 40%-70% 범위 내이어서, 밸브 개도를 40%에서 5%씩 70%까지 스텝형으로 증가시켰을 경우에 대한 각각의 파라미터 규명결과를 나타내고 있다. 이때 각 파라미터 규명값은 밸브 개도 동작 범위 내에서 규명된 파라미터들의 최소 및 최대값을 나타내고 있다.

Table 1에서 밸브 개도가 5%씩 증가할 때마다 각 파라미터 값이 다르게 규명됨을 알 수 있으며, 특히 냉각 프로세서의 감도계수는 비선형적인 특성을 나타내고 있어 최소, 최대값의 차가 크며, 그리고 시간지연과 시정수는 프로세서가 밸브보다 작음을 알 수 있었다.

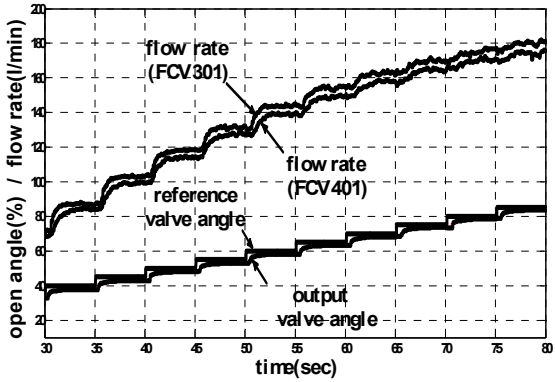

Fig. 2 Experimental data sets of output valve angle(%) and flow rate(l/min)

3. 2 자유도 PI-D 제어기 설계

Fig. 4는 이 논문에서 설계한 냉각 프로세서의 2 자유도 PI-D 제어 시스템의 블록선도를 나타낸다. 단, 피드백 제어기는 선행 미분형 PID 제어기 구조를 가짐에 주의하자.

Table 1 Identified model parameter values

(a) Control valve(FCV 301 and 401)

항목	L_a(sec)		T_a(sec)		K_a	
	min	max	min	max	min	max
FCV 301	0.28	0.45	0.60	0.65	1.00	1.06
FCV 401	0.28	0.59	0.15	0.30	0.98	1.05

(b) Cooling process(FCV 301 and 401)

항목	L_b(sec)		T_b(sec)		K_b	
	min	max	min	max	min	max
FCV 301	0.15	0.30	0.15	0.45	1.00	3.08
FCV 401	0.15	0.30	0.15	0.45	1.10	3.08

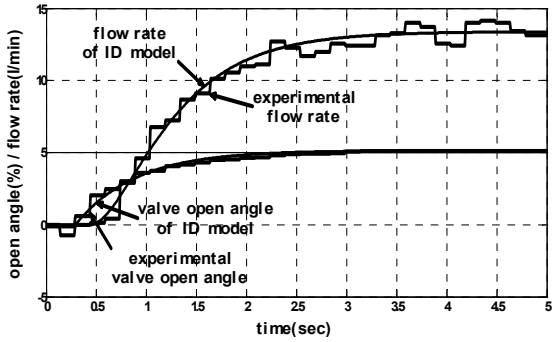

Fig. 3 Model identification result for the DEMO plant with a FCV 301 control valve

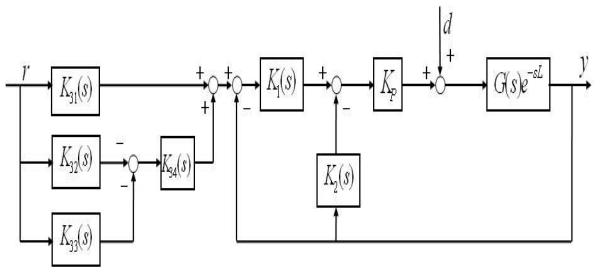

Fig. 4 Block diagram of 2-DOF PI-D control system

위의 Fig. 4에서 r, y, d는 각각 기준입력, 출력, 외란을 나타내며, 제어대상의 전달함수는 식 (1)에서 주어진 것과 같으며, 피드백 및 피드포워드 제어기의 전달함수는 각각 다음과 같다.

$$K_1(s)=1+\frac{1}{T_I s},\quad K_2(s)=\frac{T_D s}{1+\eta T_D s},$$
$$K_{31}(s)=\frac{1+\alpha T_I s}{1+T_I s},\ K_{32}(s)=\frac{\beta}{1+T_I s},\qquad (2)$$
$$K_{33}(s)=\frac{\gamma T_D s}{1+\eta T_D s},\ K_{34}(s)=\frac{T_I s}{1+T_I s}$$

여기서 K_P, T_I, T_D는 각각 피드백 제어기의 비례게인, 적분시간, 미분시간을 나타내며, α, β, γ는 피드포워드 제어기의 게인을 나타낸다. 그리고 식 (2)의 $K_2(s)$는 근사화 미분으로서 η는 매우 작은 값을 가지는 것으로 한다.

3.1 2 자유도 PI-D 제어게인 설정

피드백 PID 제어게인을 해석적으로 구하는 방법은 매우 많이 제안되어 있지만[5], 이 논문에서는 Kitamori가 제안한 제어게인 선정법을 이용하여 먼저 피드백 PID 제어게인을 설정한다. 이에 대한 구체적인 알고리즘은 참고문헌[5]을 참고바라며, 여기서는 구체적인 내용은 생략한다.

식 (1)의 냉각 프로세서에 대한 피드백 PID 제어게인은 각각 다음과 같이 주어진다.

$$K_P=\frac{a_0}{\tau}\left(\frac{a_1}{a_0}-0.5\tau\right),\qquad (3)$$
$$T_I=\frac{K_P}{K_I}=\frac{a_1}{a_0}-0.5\tau,$$
$$T_D=\frac{K_D}{K_P}=\frac{(a_2/\tau)-0.5a_1+0.1a_0\tau}{(a_1/\tau)-0.5a_0}$$

위의 식에 포함된 각 파라미터들은 다음과 같다.

$$a_0=\frac{1}{K},\ a_1=\frac{1}{K}(\eta_1+L),\qquad (4)$$
$$a_2=\frac{1}{K}(\eta_2+\eta_1 L+\frac{1}{2}L^2),$$
$$a_3=\frac{L}{K}(\eta_2+\frac{1}{2}\eta_1 L+\frac{1}{6}L^2)$$

여기서,

$\eta_1=T_a+T_b$, $\eta_2=T_aT_b$, $K=K_aK_b$, $L=L_a+L_b$

이며, τ는 피드백 제어 시스템의 목표 시정수로서 아래의 특성방정식을 만족하는 것으로 한다.

$$0.005a_0\tau^3-0.1a_1\tau^2+0.5a_2\tau-a_3=0\qquad (5)$$

그리고 피드포워드 제어게인 α, β, γ는

$$0\le\alpha\le 1,\ 0\le\beta\le 1,\ 0\le\gamma\le 2\qquad (6)$$

범위의 값으로 설정하였고, 성능 해석 시 기본값으로 $\alpha=0.7$, $\beta=0.15$, $\gamma=0$으로 설정하였다.

식 (3)에서와 같이 Kitamori 제어게인 선정법은 일반적인 Ziegler-Nichols 방법과는 달리 제어게인이 모델 파라미터의 함수로 명확히 주어져 있어 제어게인의 튜닝이 매우 명확하고 용이함을 알 수 있다. 특히 실시간에서 파라미터들이 규명되어지면 그 변동 특성이 제어게인에 반영되어 자동적으로 제인게인 조정이 가능함을 알 수 있다.

3.2 2 자유도 PI-D 디지털 제어로직 구현

디지털 제어로직 구현 시 샘플링 시간을 Δt, 이산시간역에서 샘플링 시점 상의 각 신호 값 $\cdot(k\Delta t)$을 $\cdot(k)$라고 나타낸다. 여기서 샘플링 시간 Δt는 샘플링 이론에 따라 결정되어야 하지만, 연속신호의 변화율을 이산신호로 충분히 표현할 수 있을 정도가 되도록 작게 선정하기로 한다. 그리고 적분 및 미분 제어를 위해서는 적당한 수치적분 및 수치미분법을 적용해야 하지만, 적분은 신호의 합산, 미분은 근사미분을 후진차분 변화율로 계산하기로 한다.

이때 식 (2)에서 주어진 2-자유도 제어기에 대한 디지털 제어로직은 다음과 같이 각각 구현된다.

먼저 선행 미분형 PI-D 피드백 제어기에 대한 디지털 알고리즘을 구현하면 다음과 같다.

■ 비례 제어입력

$$u_P(k)=K_P e(k)\qquad (7)$$

■ 적분 제어입력

$$u_I(k)=u_I(k-1)+\Delta u_I(k),\qquad (8)$$
$$u_I(0)=0,\ (\ k=1,2,\cdots)$$
$$\Delta u_I(k)=K_P\frac{\Delta t}{T_I}e(k)$$

■ 미분 제어입력

$$u_D(k)=u_D(k-1)+\Delta u_D(k),\qquad (9)$$
$$u_I(0)=0,\ (\ k=1,2,\cdots)$$
$$\Delta u_D(k)=(\eta\phi-1)u_D(k-1)$$
$$+\phi y(k)-y(k-1),$$
$$\phi=\frac{T_D}{\Delta t+\eta T_D}$$

여기서 위의 미분 제어입력은 피드백 신호의 대역폭을 제한하고자 불완전 미분을 이용하였음에 주의하자.

다음에는 식 (2)에서 주어진 피드포워드 제어기를 단순화($\gamma=0$)하여 즉,

$$K_3(s)=\frac{1+\alpha\beta T_I(s)}{1+\beta T_I(s)} \qquad (10)$$
$$=\alpha+(1-\alpha)\frac{1}{1+\beta T_I(s)}$$

에 대한 디지털 로직을 구현한다. 결과적으로 피드포워드 제어기의 출력은 기준입력인 목표치를 정형화(shaping)한 값으로서 정형화된 r_F는 다음과 같이 구현된다.

$$r_F(k)=r_F(k-1)+\Delta r_F(k),\quad r_F(0)=0,\ k=1,2,\cdots$$

$$\Delta r_F(k)=F_1 r_F(k-1)+F_2 r(k)+F_3\Delta r(k),\quad \Delta r(k)=r(k)-r(k-1)$$

$$F_1=(\beta T_I\Psi-1),\ F_2=\Psi\Delta t,\quad F_3=\alpha\beta T_I\Psi,\ \Psi=\frac{1}{\Delta t+\beta T_I} \qquad (11)$$

이상과 같이 연속시간역에서 설계된 2 자유도 PI-D 제어기를 디지털 제어로직으로 구현하였다.

다음 장에서는 컴퓨터 시뮬레이션과 데모 플랜트 테스트를 통하여 이 논문에서 제안한 2 자유도 PI-D 제어기에 대한 성능을 고찰하기로 한다.

4. 모의실험 및 테스트 결과 및 고찰

4.1 컴퓨터 모의실험 결과 및 고찰

이 절에서는 2 자유도 PI-D 제어기에 대한 컴퓨터 모의실험을 수행한다. 모의실험은 MatLab Ver.7.5(R2007b)를 이용하였으며, 그 결과를 기존 1 자유도 PID 제어 시스템과 시간지연을 포함한 프로세서 제어에 유용한 Smith PID 제어 시스템과 비교, 고찰한다.

모의실험 시 고려한 적용 대상밸브는 FCV 301 밸브이며, 이의 전달함수 모델은 식 (1)과 같으며, 각 모델 규명 파라미터는 밸브 개도를 50%에서 55%로 증가하였을 경우에 해당되는 파라미터를 사용하였다. 즉

$$L_a=0.29,\ T_a=0.60,\ K_a=1.00$$
$$L_b=0.15,\ T_b=0.31,\ K_b=2.60$$

그리고 2 자유도 제어 시, 피드백 제어게인들은 각각 Table 2와 같으며, 피드포워드 제어게인은 각각 $\alpha=0.7$, $\beta=0.15$로 설정하였다. 그리고 미분제어 근사 시의 파라미터 η는 0.04로 설정하였다.

Table 2 PID control gain(open angle: 50-55%)

	K_P	$T_I(\sec)$	$T_D(\sec)$
1-PID	0.6610	1.0132	0.2703
2-PID	0.5801	0.8103	0.2254
SMITH-PID	0.3500	0.9100	0.2044

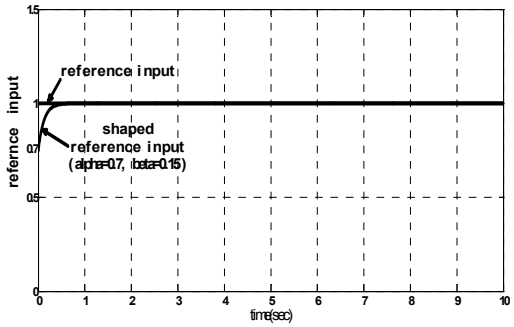

Fig. 5 Shaped reference input($\alpha=0.7$, $\beta=0.15$)

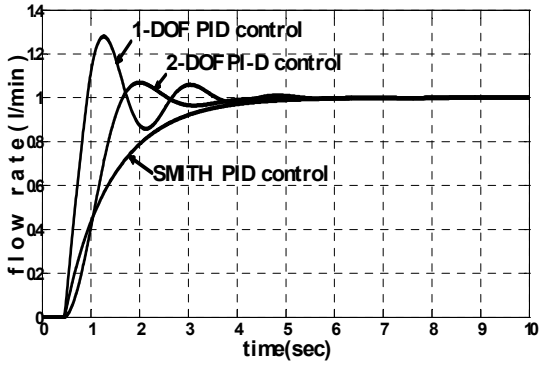

Fig. 6 Flow rate of 2-DOF PI-D control system

Fig. 5는 피드포워드 제어기를 통한 기준입력의 정형화에 대한 결과를 나타낸다. 위의 Fig. 5에서 목표값을 나타내는 기준입력의 정형화는 피드포워드 제어게인 α, β값에 따라 결정된다. 여기서 α는 목표값의 초기값을 결정하는데, 위에서 α가 0.7이므로 목표값(1)의 70%인 0.7이 된다. 그리고 β는 0.7에서 목표값에 도달하는 속도를 나타내는 시정수를 나타낸다. 따라서 α, β를 조정하여 스텝형의 목표치를 정형화할 수 있게 된다.

Fig. 6은 단위 계단형 기준입력에 대한 냉각 프로세서의 모의실험 결과를 나타낸다. Fig. 6에서 각각의 제어 시스템 모두 적분제어의 효과로 인해 정상상태오차는 없지만, 과도응답에서 오버슈트량이나 응답속도에서 다소 차이가 발생함을 알

Table 3 PID control gains(open angle: 40-70%)

	K_P		T_I(sec)		T_D(sec)	
	min	max	min	max	min	max
1-PID	0.51	1.10	0.95	1.30	0.26	0.35
2-PID	0.35	0.87	0.56	1.33	0.19	0.51
SMITH - PID	0.48	0.65	0.56	0.69	0.15	0.24

수 있다. 즉 1 자유도 PID 제어는 응답속도는 빠르지만, 다소 과도한 오버슈트가 발생함을 보이고, 반면에 2 자유도 PI-D 및 Smith-PID 제어는 오버슈트가 크지 않지만, 과도상태에서의 응답속도가 다소 느림을 알 수 있다. 이는 오버슈트량을 줄이기 위해 피드포워드 제어기로서 기준입력을 정형화하였기 때문이다.

위와 같은 방법으로 냉각 프로세서의 동작구간(밸브 개도: 40%-70%)에서의 각 PID의 제어게인 범위를 구하면 Table 3과 같다.

참고로 각 제어게인들의 변동에 따른 제어성능의 변화를 요약하면 다음과 같다.

(i) 피드포워드 제어기 파라미터 α가 증가하면 응답 속도는 빨라지지만, 오버슈트가 증가하고, 반면에 β가 증가하면 오버슈트는 감소하지만, 응답 속도가 느려짐을 보인다. 일반적으로 α, β의 권장치는 $\alpha = 0.4$, $\beta = 0.35$로 하는 것이 좋지만, 제어대상이나 응답 사양에 따라 적절히 선정하는 것이 바람직하다.

(ii) 비례 제어게인 K_P의 값이 증가할수록 응답속도는 빠르지만, 오버슈트가 증가함을 알 수 있다. 적분시간 T_I의 값이 증가할수록 오버슈트는 감소하지만, 응답속도가 느려진다. 그리고 미분시간 T_D의 값이 감소할수록 진동이 커지면서 안정성이 저하된다.

4.2 데모 플랜트 실험 결과 및 고찰

이 논문에서의 데모 플랜트는 열간압연 공정의 냉각설비를 모사한 데모 플랜트이다. 이에 대한 구체적인 시스템 및 제원은 생략하기로 한다.

Fig. 7과 8은 각각 기존 1 자유도 PID 제어와 이 논문에서 제안한 2 자유도 PI-D 제어의 테스트 결과를 나타낸다. 여기서 각 제어게인들은 제 4.1절에서 설정한 게인들을 그대로 사용하였다.

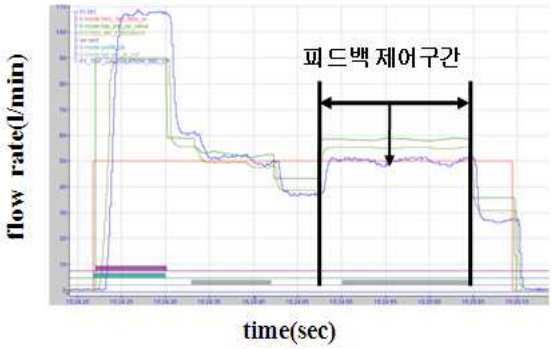

Fig. 7 Flow rate of 1-DOF PID control system for the DEMO plant

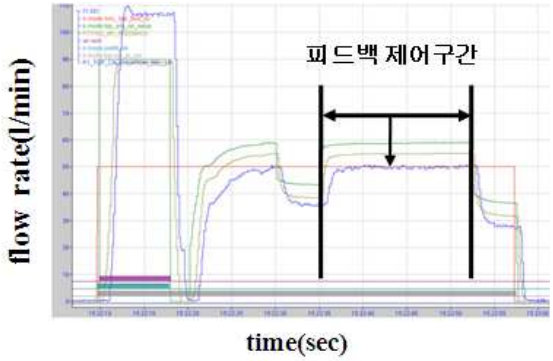

Fig. 8 Flow rate of 2-DOF PI-D control system for the DEMO plant

Fig. 7, 8에서 기존 1 자유도 PID 제어 시스템은 응답속도는 빠르지만, 오버슈트가 발생한다. 반면에 2 자유도 PI-D 제어 시스템은 오버슈트가 거의 없이 응답속도는 다소 느리지만 정상상태에서 매우 안정적으로 유량 제어가 이루어짐을 볼 수 있다. 따라서 피드포워드 제어게인(α, β)와 피드백 제어게인(K_P, T_I, T_D)의 역할을 충분히 활용하여 게인들을 적절히 튜닝하면, 오버슈트를 줄이면서 응답속도가 빠른 안정적인 제어 성능을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 논문에서는 냉각 프로세서에서 각 동작영역에서의 전달함수 모델 및 파라미터를 규명하고, 이를 기초로 선행미분형 2 자유도 PID 제어기를 설계하였다. 모의실험 및 데모 플랜트 실험으로부터 선행미분형 2 자유도 PID 제어 시스템은 기존 1 자유도 PID 제어보다 응답 속도는 다소 느리지만 오버슈트가 거의 없고, 안정적으로 유량

제어가 가능함을 알 수 있었다. 그리고 제어게인들이 모델 파라미터의 함수로 주어져 있어 제어게인 조정도 매우 명확하게 수행될 수 있음을 보였다. 향후 다양한 실험을 통해 각 제어게인들에 대한 설정법을 확보하고, 특히 밸브의 동작범위에 따라 모델 파라미터가 달라지므로, 모델 파라미터를 실시간에서 규명하여 각 제어게인들을 자동적으로 조정하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2009년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(과제번호: 2009AA164).

참고문헌

(1) Kimura, T., Tanaka, T., Fujimoto, K. and Ogawa, K., 1995, "Hydrodynamic Characteristics of Butterfly Valve-Prediction of Pressure Loss Characteristics," *ISA Transactions,* Vol. 34, pp. 319~326.

(2) Ogawa, K. and Kimura, T., 1995, "Hydrodynamic Characteristics of Butterfly Valve-Prediction of Torque Characteristics," *ISA Transactions,* Vol. 34, pp. 327~333.

(3) Messina, A., Giaaaoccaro, N. I. and Gentile, A., 2005, "Experimenting and Modelling the Dynamics of Pneumatic Actuators Controlled by the PWM Technique," *Mechatronics,* Vol. 15, pp. 859~881.

(4) Hwang, I. C. and Park, C. J., 2009, "Study on the Modeling of a Pneumatic Butterfly-Type Control Valve," *Proceedings of the KSME 2009 Spring Annual Meeting,* pp. 174~177.

(5) Tsuda, 1992, "PID Control," *Jochang Press, The Japan Society of System Control Information.*