

Temperature Control of Injection Molding Machine
using PI Controller with Input Restriction

張 惟 進[†]
(Yu Jin Jang)

Abstract - Injection molding is the most common method of shaping plastic resins for manufacturing a variety of parts. This injection molding is accomplished by injection molding machines (IMM) which consists of a hopper, a reciprocating screw, barrel assembly, and an injection nozzle. The plastic resin is fed to the machine through the hopper and it should be heated to the target melting temperature, which depends on material properties, as closely as possible with very small temperature overshoot in the barrel. Since the barrel, which has temperature dependent specific heat and thermal conductivity in the operating temperature range, is heated by the several electric heater bands, it is not an easy task to control the temperature of the barrel owing to the interference of neighboring heaters and its material properties. Though PID controller with auto-tuning capability is widely adopted in the IMM, the auto-tuning process should be carried out whenever the operating temperature is changed significantly. Recently, though the predictive controller is developed and shows good performance, it has drawbacks: 1. Since the heat transfer modeling process is very complicated and should be carried out again when the barrel is changed, it is somewhat inappropriate in the field. 2. The controller performance is not validated in whole operating temperature range. In this paper, cascade type simple PI controller with input restriction is proposed to find the possibility of controlling the barrel temperature in the whole operating temperature range. It is shown by experiment that the proposed controller shows good performance. This result can be applied to design of PI controller with auto-tuning capability.

Key Words : Injection Molding Machine, Barrel, Temperature Control, Input Restriction

1. 서 론

사출 성형은 성형 재료를 가열 용융시켜 미리 단련 금형의 사출 캐비티에 사출 충전한 후 냉각시키는 기법으로서 복잡한 형상의 제품을 대량 생산하는데 적합하다. 사출 성형기는 그림 1과 같은 구조를 가지고 있으며 호퍼(hopper)를 통하여 바렐(barrel)이라 불리는 원통형의 금속파이프 속으로 수지(resin)를 투입한다. 이때 바렐에 설치되어 있는 히터(밴드타입 또는 코일타입)에 의해 바렐이 가열되면서 투입된 수지가 용융되기 시작한다. 이러한 수지는 범용 플라스틱, 범용 EP (Engineering Plastic), 고성능 EP, 초내열 EP로 구분할 수 있으며 사출 온도 범위는 범용 플라스틱이 대략 150 ~ 180℃ 이고, 초내열 EP는 약 350 ~ 400℃ 이다 [1]. 수지 특성에 따른 바렐 온도제어는 제품의 질을 향상시키기 위하여 매우 중요하며 이상적인 제어기는 바렐 온도를 설정 온도에 오버슈트(overshoot) 없이 도달하도록 동작하여야 한다. 그러나 이웃한 히터들에 의한 간섭은 오버슈트 없는 온도제어기 설계를 어렵게 하는 요인이 되고 있다. 현재 대부분의 사출 성형기에는 자동 튜닝(auto-tuning) 방식의 PID 제어기가 사용되고 있으며, 수지에 따른 바렐의 설정온도가 결정되면

사용자의 개입 없이 자동 튜닝과정을 거쳐 사출 성형 작업을 시작 할 수 있도록 해준다. 튜닝이 끝난 후 생기는 오버슈트는 제어기에 따라 다양하지만 대략 3 ~ 5℃ 이다. 그러나 작업 조건이 변하여 바렐의 설정 온도를 일정 크기 이상 변화 시킬 상황이 발생하면 다시 자동 튜닝 과정을 거쳐야만 하는 단점이 있다. 바렐의 온도제어에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔으며[2-5], 그 중 [4,5]에서는 복잡한 바렐의 열전달 특성을 사실적으로 모델링하고 이를 이용하여 예측제어기를 설계하였으며 뛰어난 온도제어 성능을 보였다. 그러나 범용 EP 온도 범위인 180 ~ 230℃ 범위에 대한 제어성능을 보였을 뿐이며, 초내열 EP의 온도 범위에 대해 어떤 성능을 보이는지는 알 수 없다. 또한 제어기 설계까지의 과정이 복잡하고 많은 실험이 필요한 단점이 있기 때문에 온도 제어기 제조업체와 사출기 제조업체가 다른 현실을 고려할 때 이러한 방식은 적절치 못한 면이 있다. 가장 현실적인 대안은 기존의 자동튜닝 기능을 가진 PID 제어기가 한번의 튜닝으로 모든 동작 온도 범위에 대해 만족할 만한 성능을 보이도록 하는 것이다. 따라서 이러한 방식의 실현 가능성을 타진하기 위하여 자동튜닝 기능을 배제한 채 고정된 PI 제어기를 이용하여 모든 동작 온도 범위에서 만족할 만한 제어가 가능한지 살펴볼 필요가 있다.

본 논문에서는 바렐의 구조적인 특징으로 인해 호퍼에 가까운 부분의 온도제어가 쉽다는 사실을 이용한 PI 제어기를 제안하였으며, 일정 시간동안 변할 수 있는 최대 제어 입력

[†] 교신저자, 正會員 : 東國大學 情報通信工學科 助教授 · 工博

E-mail : season@dongguk.ac.kr

接受日字 : 2006年 12月 18日

最終完了 : 2007年 1月 10日

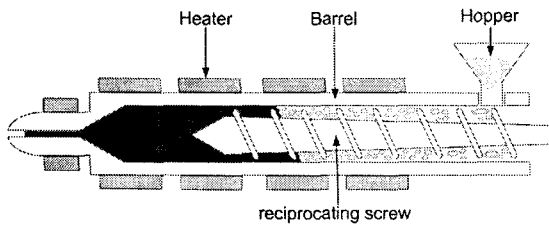


그림 1 사출 성형기 주요 구조
Fig. 1 System structure

의 크기를 제한함으로써 모든 가능한 온도 범위에 대해 만족할 만한 성능을 가지는 제어기를 설계할 수 있었다.

2. 실험용 바렐

그림 2는 실험용 바렐을 나타내고 있다. 4개의 영역(zone)으로 나뉘며 각각의 영역을 가열하는 코일타입 히터가 그림과 같이 설치되어 있으며, 또한 각 영역의 온도데이터 수집을 위해 $TC_1 \sim TC_4$ 로 표시된 4개의 열전대(thermocouple, 이하 TC)가 설치되어 있다. 사출기의 바렐은 보통 표면경도의 우수성 때문에 질화강(nitriding steel)을 사용한다. 질화강은 보통 C: 0.3 ~ 0.4%, Mn: 0.4 ~ 0.7%, Cr: 1.2 ~ 1.8%, Al: 0.6 ~ 1.5%, Mo: 0.15 ~ 0.3%의 성분 범위를 가지고 있으며, 금속의 물성(비열과 열전도도)은 주로 탄소 함유량에

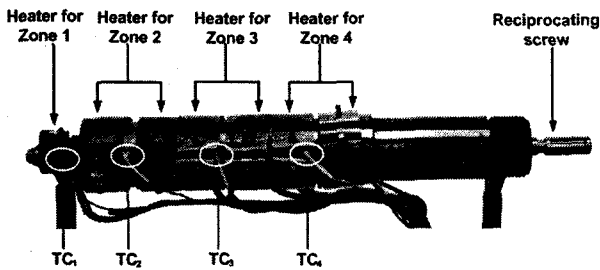


그림 2 실험용 바렐
Fig. 2 Testing barrel

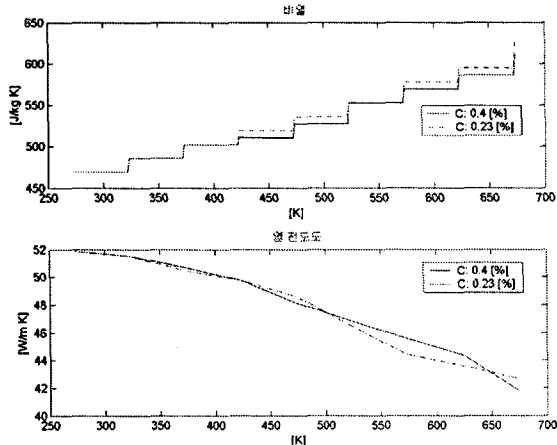


그림 3 온도에 따른 바렐의 물성
Fig. 3 Temperature dependent material properties

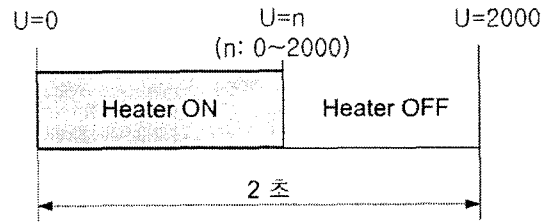


그림 4 히터 제어 입력
Fig. 4 Control input

의해 결정된다. 질화강의 전형적인 탄소 함유량과 비슷한 탄소 함유량을 갖는 철의 물성을 참고하여 질화강의 온도에 따른 물성의 특징을 살펴보자. 그림 3은 탄소 함유량이 0.23%, 0.4%인 철의 온도에 따른 비열과 열전도도를 나타내고 있다 (이때 비열은 50°C 마다의 평균값을 사용했다.) [6]. 사출 성형기의 작업온도 범위인 150 ~ 400°C (즉, 423 ~ 673K)를 살펴보면 비열과 열전도도가 크게 변하는 것을 알 수 있다. 따라서 특정 동작 온도 근처에서 목적하는 성능을 내도록 튜닝된 PID 제어기는 그 특정 동작 온도에서 벗어나는 정도가 커질수록 제어 성능을 내지 못할 것임을 쉽게 예측할 수 있다.

바렐에 장착되어있는 히터들은 ON/OFF 방식으로 제어가 이루어지며 그림 4에 제어입력에 대해 나타내었다. 2초 주기로 제어가 이루어지며 히터의 제어입력 U 가 0일 때는 히터가 언제나 OFF 상태이고, 2000일 때는 언제나 ON 상태이다. 입력으로 n 이라는 0 ~ 2000사이의 값을 주면 2초마다 $n/1000$ 초 동안 히터가 ON된다.

3. 초기 PI 제어기 설계

바렐에 대한 어떠한 제어기도 없는 초기의 상황에서 흔히 쓰이는 스텝응답(step response)법을 통하여 얻은 시스템 모델을 이용한 간단한 PI 제어기를 설계 해보자. 즉, 각 히터에 일정한 크기의 스텝입력(step input)을 넣어서 온도데이터를 수집하고 이 데이터에 대해 시스템식별(system identification)을 통해 간단한 모델을 만든다. 그 후 식별된 모델에 대한 PI 제어기 튜닝을 통하여 오버슈트 없는 제어기를 만든다. 그러나 이렇게 하더라도 바렐의 각 영역에 대한 제어가 동시에 동작하면 이제까지 고려하지 않았던 이웃 영역간의 간섭으로 인하여 오버슈트 발생 할 것이다. 또한 적당한 입력의 크기를 설정하여 스텝응답 데이터를 수집해보면 처음부터 상온에서 400°C 까지 변하는 스텝응답을 얻는다는 것은 힘들며 대략 상온에서 몇 십도 변하는 수준의 데이터를 수집하게 된다. 이러한 데이터를 이용하여 도출된 모델은 온도에 따라 변하는 물성과 주변으로의 복사 및 대류를 고려했을 때, 바렐의 동작 온도범위인 150 ~ 400°C에 대하여 잘 적용 된다고 할 수 없다. 즉, 동일한 제어기를 사용해도 바렐의 온도가 변함에 따라 오버슈트 달라질 것을 예상할 수 있으며 바렐의 온도가 높아질수록 이러한 오버슈트는 작아질 것이다. 본 절에서는 목표한 성능을 내지는 못하지만 적절한 시간에 목표온도에 도달 할 수 있도록 하는 초기의 제어기를 우선 설계한다.

3.1 스텝응답

$TC_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 에 대응되는 히터 입력을 U_i 라 하자. 각 영역(zone)에 대한 스텝응답 데이터를 수집할 때 그 영역에 해당되는 히터 입력만 적절히 설정하고 나머지 부분에 대한 히터입력은 0으로 설정하자. 스텝응답을 얻는데 사용한 입력은 zone 1에서 400이며 zone 2, 3, 4에서는 200으로 통일 시켰다. 각 영역에 대한 스텝응답은 그림 5에 나타내었으며, 이때 샘플링 간격은 2초이다.

3.2 시스템 식별

수집된 스텝응답 데이터를 이용하여 각 영역에 대한 전달 함수 $G(z)$ 를 다음과 같은 3차의 모델로 가정하자.

$$Y(z) = G(z)U(z) \tag{1}$$

$$G(z) = \frac{z^{-v}(b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2})}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3}} \tag{2}$$

식 (2)에서 v 는 시간 지연을 나타내며 관찰에 의하면 zone1~3에서는 대략 15 샘플(30초)이며 zone 4에서는 10 샘플(20초)이다. 식 (1)은 식 (2)를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y(k) + a_1Y(k-1) + a_2Y(k-2) + a_3Y(k-3) = b_0U(k-v) + b_1U(k-v-1) + b_2U(k-v-2) \tag{3}$$

θ^T 와 φ 를 다음과 같이 정의하자.

$$\theta^T = [a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2] \tag{4}$$

$$\varphi = \begin{bmatrix} -Y(k-1) \\ -Y(k-2) \\ -Y(k-3) \\ U(k-v) \\ U(k-v-1) \\ U(k-v-2) \end{bmatrix} \tag{5}$$

식 (3)의 $Y(k)$ 는 식 (4),(5)를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y(k) = \theta^T\varphi \tag{6}$$

식 (6)의 θ 는 최소자승법(least square method)으로 쉽게 구할 수 있으며[7], 표 1에 식별된 결과를 나타내었다.

표 1 시스템 식별 결과

Table 1 System identification results

Model Coefficient	$\theta^T = [a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2]$			
	zone 1	zone 2	zone 3	zone 4
a_1	-1.0036	-1.1137	-1.0080	-1.1364
a_2	0.0033	0.1309	0.0092	0.1548
a_3	0.0024	-0.0163	0.0003	-0.0175
b_0	0.0001	-0.0004	0.0001	0.0007
b_1	0.0000	0.0016	0.0005	-0.0007
b_2	0.0003	-0.0007	0.0000	0.0004

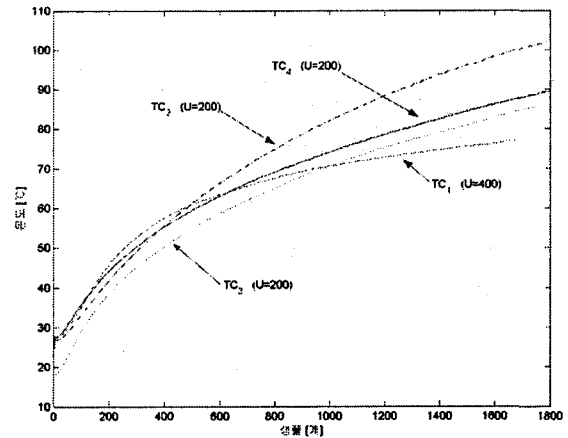


그림 5 스텝 응답

Fig. 5 Step response

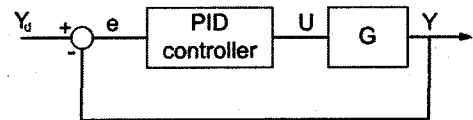


그림 6 PID제어기 구조

Fig. 6 Structure of PID controller

3.3 PI 제어기

그림 6은 PID 제어기가 포함된 시스템 구조를 나타내고 있다. Y 는 각 영역에서의 측정온도(TC 출력 값)이며 Y_d 는 설정 온도 값을 나타내며 에러를 $e = Y_d - Y$ 로 표시하였다.

라플라스 영역(Laplace domain)에서 P,I,D 이득(gain)을 각각 K_p, K_i, K_d 라 했을 때 PID 제어기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{U(s)}{e(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \tag{7}$$

그러나 식 (2)에서 z 영역에서 전달 함수를 나타냈기 때문에 식 (7)을 z 영역으로 표현해야 한다. 이를 위해 다음과 같은 변환(bilinear transform)을 사용한다. [8]

$$s = \frac{2(1-z^{-1})}{T_s(1+z^{-1})} \tag{8}$$

여기서 T_s 는 샘플링 간격을 나타내며 본 논문에서는 전술한 바와 같이 2초이다. 식 (8)을 이용하여 식(7)을 변형하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{U(z)}{e(z)} = \frac{C_0 + C_1z^{-1} + C_2z^{-2}}{1 - z^{-2}} \tag{9}$$

$$C_0 = K_p + \frac{K_i T_s}{2} + \frac{2K_d}{T_s} \tag{10}$$

$$C_1 = K_i T_s - \frac{4K_d}{T_s} \tag{11}$$

$$C_2 = -K_p + \frac{K_i T_s}{2} + \frac{2K_d}{T_s} \tag{12}$$

식(9)를 전개하면 다음과 같은 제어 입력을 얻을 수 있다.

$$U(k) = U(k-2) + C_0e(k) + C_1e(k-1) + C_2e(k-2) \quad (13)$$

시스템 식별을 통해 얻어진 모델에 식 (9)를 적용하여 오버슈트가 없도록 튜닝된 PI 제어기의 제어이득을 표 2에 나타내었다. 이때 PI 제어기를 사용했기 때문에 $K_i = 0$ 이다.

표 2 PI 제어기 튜닝 (1차)

Table 2 PI controller tuning (1st)

gain	zone 1	zone 2	zone 3	zone 4
K_p	25	25	30	40
K_i	0.03	0.0125	0.018	0.0205

3.4 관찰 및 문제점

위에서 설계한 PI 제어기를 이용하여 각 영역에 대한 제어를 하면 쉽게 예상 할 수 있듯이 이웃 영역의 간섭에 의해 오버슈트가 나타난다. 또한 목표 온도를 높일수록 적절한 시간 내에 목표온도에 도달하지 못하는 상황이 발생한다. 일단 오버슈트를 무시하고 목표 온도가 400℃ 일때 적절한 시간에 목표 온도에 도달 하도록 PI 이득을 표 2를 기준으로 조금씩 조절하였으며 이를 표 3에 나타내었다.

실험을 통하여 바렐의 온도에 따른 비열과 열전도도 변화 및 주변으로의 열 방출이 온도 제어에 미치는 영향을 알아보기 위하여 표 3의 이득 값을 이용하여 다음과 같은 테스트를 수행하였다: 1. 바렐의 목표 온도를 125℃, 175℃, 225℃, 275℃, 325℃, 375℃로 설정한다. 2. 각 목표 온도에 도달하여 안정화 됐을 때 다음 목표 온도로 설정을 변경한다.

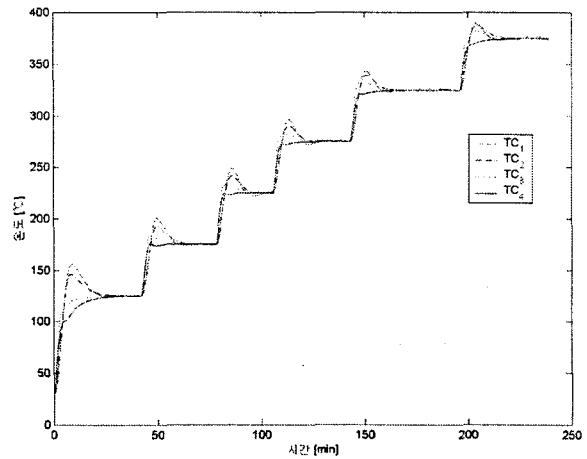
이러한 과정을 통하여 바렐 각 영역의 온도 데이터를 수집 하였으며 그림 7에 입력 값과 함께 나타내었다. 그림을 살펴보면 zone 1, 2, 3번에서는 오버슈트가 뚜렷이 관찰되며 zone 4에서는 거의 관찰되지 않는다. 또한 모든 온도 영역에서 동일한 제어기를 사용하지만 zone 1, 2, 3번에서는 목표 온도가 높아질수록 오버슈트가 줄어드는 경향을 보이고 있다. 이는 바렐의 온도가 상승할수록 주변 대기로 대류와 복사를 통해 빠져나가는 열량이 증가 되는 것도 한 원인이지만, 바렐의 온도 상승에 따라 비열은 커지고 열전도도는 낮아지기 때문에 일어나는 현상이라는 것을 쉽게 짐작 할 수 있다. 표 4에 각 영역에서 각 목표 온도에 대한 퍼센트 오버슈트(%OS) 변화를 나타내었다. 그림 7 또는 표 4를 살펴보면 zone 4에서의 오버슈트가 다른 zone에 비해 매우 작거나 없는 경우가 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 히터의 위치와 바렐의 구조와 매우 밀접한 관련이 있다. 그림 2에서 zone 4는 가장 오른쪽에 위치하며 다른 zone과 달리 열을 방출 할 수 있는 부분(즉, zone 4에서 히터가 없는 바렐 오른쪽 부분)이 매우 넓어서 이웃한 영역의 영향에도 불구하고 온도의 오버슈트가 다른 영역에 비해 작거나

표 3 PI 제어기 튜닝 (2차)

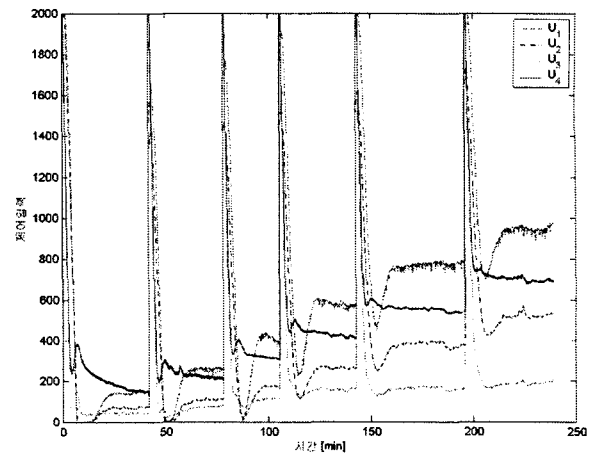
Table 3 PI controller tuning (2nd)

gain	zone 1	zone 2	zone 3	zone 4
K_p	26	25	35	43
K_i	0.08	0.06	0.09	0.09

없을 수밖에 없다. 이러한 바렐에서의 히터 위치는 다른 사출기도 마찬가지이다. 또한, 그림 7의 입력 부분을 보면 온도가 안정화 된 상태에서 50℃ 만큼 목표온도를 높게 설정 했을 때 초기의 모든 입력이 입력의 최대 값인 2000을 기록하고 있다. 이러한 과도한 입력은 이웃한 영역간의 간섭에 의한 영향을 크게 만든다.



(a) 측정 온도



(b) 제어 입력

그림 7 설정온도별 PI 제어기 반응

Fig. 7 PI control results for various target temperatures

표 4 목표 온도에 따른 오버슈트 변화

Table 4 Temperature overshoots

Target Temperature	%OS of each zone [%]			
	zone 1	zone 2	zone 3	zone 4
125℃	25.04	16.88	-	-
175℃	14.63	10.17	5.43	0.69
225℃	10.76	7.47	3.82	0.13
275℃	8.22	5.78	2.91	-
325℃	5.66	4.31	2.62	-
375℃	4.11	3.36	2.16	-

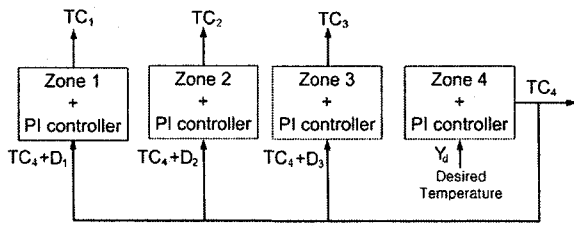


그림 8 캐스케이드 형태의 제어기
Fig. 8 Cascade type PI controller

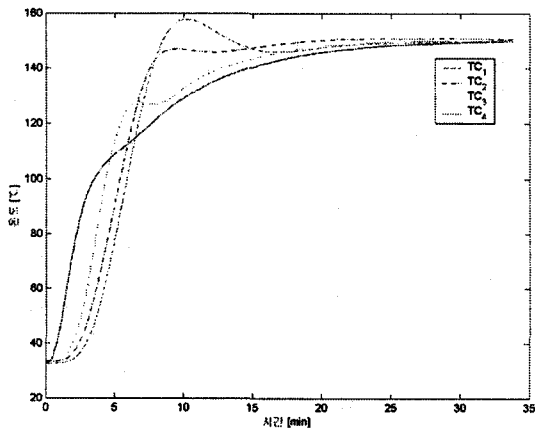
4. 입력을 제한한 캐스케이드 PI 제어기

zone 4의 온도는 이웃한 영역의 온도에 의한 영향을 거의 받지 않는다는 사실을 이용하기 위하여 그림 8과 같은 캐스케이드(cascade) 형태의 제어를 적용해보자.

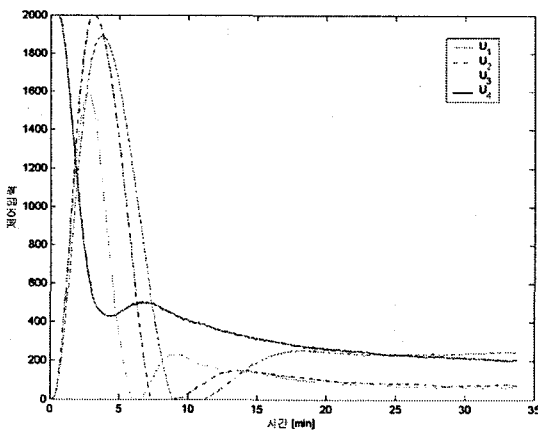
각 영역의 설정온도는 투입되는 수지에 따라 다르지만 보통 호퍼에서 노즐쪽으로 갈수록 온도를 약간 높게 설정한다 (즉, zone 4에서 zone 1으로 갈수록 설정 온도가 높다). 그림 8에서 Y_d 는 zone 4의 목표 온도를 나타내며 zone 4의 현재 온도인 TC_4 에 D_1, D_2, D_3 를 각각 더하여 zone 1, 2, 3의 목표 온도로 설정한다. 이러한 구조를 사용하면 zone 1, 2, 3의 온

도는 오버슈트가 거의 없는 zone 4의 온도 변화에 따라 서서히 변하므로 그림 7(b)와 같은 과도한 입력이 인가되는 것을 줄여줄 수 있다. 따라서 zone 4에 과도한 입력이 인가되는 것만 막아준다면 모든 영역에 대하여 오버슈트를 매우 작게 만들 수 있다. zone 4에 인가되는 과도한 입력은 설정된 목표 온도가 변경된 후에 일정 시간동안 변할 수 있는 입력의 크기를 제한함으로써 손쉽게 달성될 수 있다.

우선 그림 8과 같은 제어구조를 적용하고 모든 영역의 목표 온도를 동일하게 설정하자. zone 4의 입력에 제한을 두지 않은 상태에서 목표 온도를 150°C로 설정해보자. 그림 9는 이러한 상황에서 각 영역에 대한 온도 변화를 측정할 것을 나타낸 것이다. 이웃한 영역들간의 영향으로 인해 오버슈트가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 그림 7의 경우보다 많이 줄어들었음을 알 수 있다 (zone 1의 오버슈트도 크게 줄었지만 나머지 zone의 오버슈트는 더욱 크게 줄어들었다). 이제 zone 4의 입력을 제한해보자. 바렐의 동작 온도 범위에 대해 zone 4의 입력제한 효과를 살펴보기 위하여 모든 영역의 목표 온도가 150°C, 350°C인 상황을 가정하자. 본 연구에서는 목표 온도 설정이 변경된 시점에서 20분간 최대로 변할 수 있는 입력의 크기를 조절하였다. 그림 10, 11에서는 20분간 변할

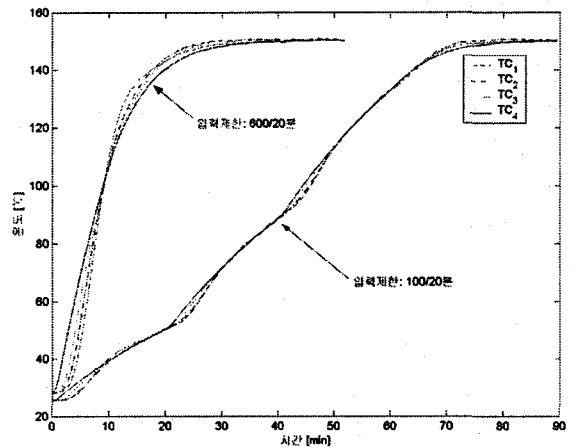


(a) 측정 온도 (목표온도: 150°C)

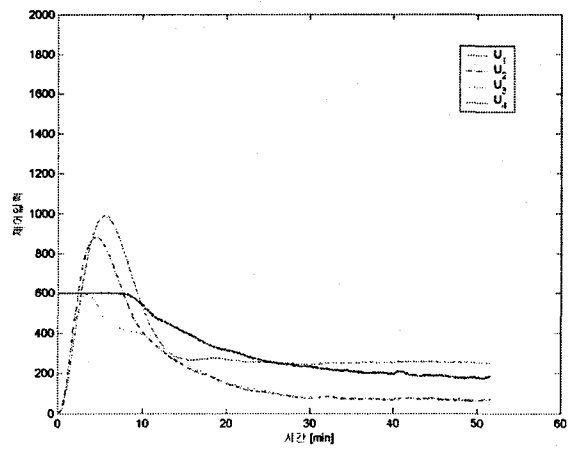


(b) 제어 입력

그림 9 zone 4의 입력제한이 없는 경우
Fig. 9 Results (no input restriction on zone 4)



(a) 측정 온도 (목표온도: 150°C)



(b) 제어 입력 (입력제한: 600/20분)

그림 10 zone 4의 입력제한이 있는 경우
Fig. 10 Results (input restriction on zone 4)

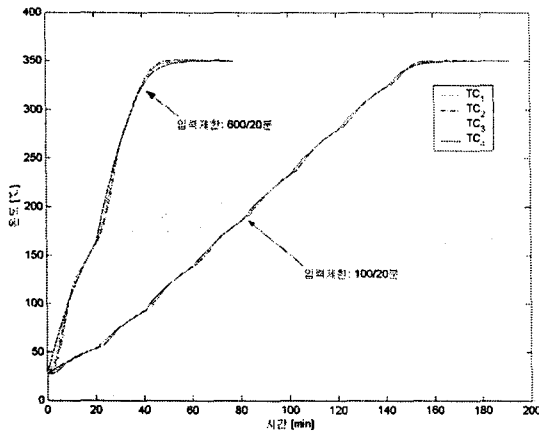


그림 11 측정온도(목표온도 350°C)
 Fig. 11 Results (target temperature 350°C)

표 5 목표 온도 및 영역별 최고 온도 (입력제한: 600/20분)
 Table 5 Maximum temperature on each zone (input restriction: 600/20min)

목표 온도	최대 값 [°C]			
	zone 1	zone 2	zone 3	zone 4
150°C	150.5	150.8	150.5	150.4
350°C	350.8	351.6	351.4	350.6

수 있는 입력의 최대 값을 100에서부터 600까지 증가 시키면서 제어성능을 살펴보았다. 입력 변동 허용폭을 20분간 600으로 설정 했을 때 온도 상승 속도와 오버슈트 면에서 원하는 성능을 얻을 수 있었다. 표 5에는 입력 변동 허용폭이 20분간 600인 상황에서 측정된 최고 온도를 목표온도와 함께 나타내었다. 전술한 바와 같이 보통 zone 4에서 zone 1으로 갈수록 목표 온도를 조금씩 높게 설정한다. 이러한 상황을 테스트하기 위해 입력 변동 허용폭이 20분간 600인 상태에서 zone 1, 2, 3, 4를 각각 170°C, 160°C, 155°C, 150°C로 설정한 경우와 370°C, 360°C, 355°C, 350°C로 설정한 경우에 대하여 온도제어를 수행하였다. 그림 12와 13에 결과를 나타내었으며, 표 6에는 측정된 최고 온도를 목표온도와 함께 나타내었다. 제안된 제어가 만족할 만한 성능을 보임을 알 수 있다.

4. 결 론

전술한 바와 같이 자동튜닝 기능이 있는 PID 방식의 사출 성형기 온도제어기는 산업현장의 현실적인 제약을 고려한 이상적인 제어기이다. 그러나 현재까지 사용되고 있는 이러한 방식의 제어기는 바렐의 동작 온도 범위가 달라질 때마다 튜닝을 다시 해야 하는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 단점을 극복할 수 있는 가능성을 타진하기 위하여 자동튜닝 기능을 배제한 채 고정된 PI 제어기를 이용하여 모든 동작 온도 범위에서 만족할 만한 제어가 가능한지 살펴보았다. 바렐의 구조적인 특징을 이용한 캐스케이드 형식의 입력제한을 가지는 PI 제어기를 제안하였으며 만족스러운 성능을 가짐을 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

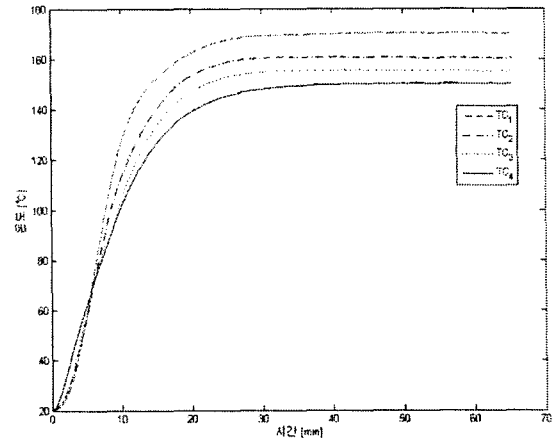


그림 12 영역별 목표온도: 170°C, 160°C, 155°C, 150°C
 Fig. 12 Target temperatures on each zone: 170°C, 160°C, 155°C, 150°C

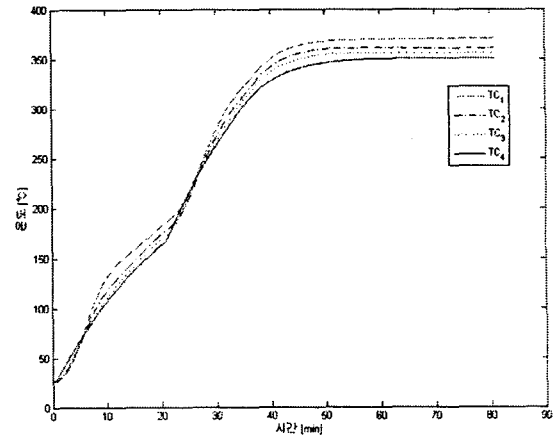


그림 13 영역별 목표온도: 370°C, 360°C, 355°C, 350°C
 Fig. 13 Target temperatures on each zone: 370°C, 360°C, 355°C, 350°C

표 6 목표 온도 및 영역별 최고 온도
 Table 6 Maximum temperature on each zone

온도 [°C]		zone 1	zone 2	zone 3	zone 4
실험 1	목표온도	170	160	155	150
	최대 값	170.4	160.8	155.5	150.4
실험 2	목표온도	370	360	355	350
	최대 값	370.9	361.1	356	350.7

참 고 문 헌

[1] 플라스틱 사이언스 정보 DB 서비스, <http://www.plasticinfo.co.kr>
 [2] V. G. Gomes, W. I. Patterson, and M. R. Kamal, "An injection molding study, Part II: Evaluation of alternate control strategies for melt temperature", Polymer Sci. Eng., vol. 26, no. 12, pp.854-866, 1986

- [3] R. Dubay, A. C. Bell, and Y. P. Gupta, "Control of plastic melt temperature: a multiple input multiple output model predictive approach", *Polymer Sci. Eng.*, vol. 37, no. 9, pp. 1550-1563, 1997.
- [4] C. Diduch, R. Dubay, and W. G. Li, "Temperature control of injection molding. Part I: Modeling and identification", *Polymer Sci. Eng.*, vol. 44, no. 12, pp. 2308-2317, 2004.
- [5] C. Diduch, R. Dubay, and W. G. Li, "Temperature control of injection molding. Part II: Controller design, simulation, and implementation", *Polymer Sci. Eng.*, vol. 44, no. 12, pp. 2318-2326, 2004.
- [6] A measurement of heat transfer in a reheating furnace and its computation method, a subcommittee on reheating furnace, The Iron and Steel Institute of Japan, 1971.
- [7] L. Ljung, *System Identification - Theory For The User*, 2nd ed., Prentice Hall, 1999.
- [8] G. F. Franklin, J. D. Powell, and M. Workman, *Digital Control of Dynamic Systems*, 3rd ed., Addison Wesley, 1998.

저 자 소 개



장 유 진 (張 惟 進)

1996년 한국 과학기술 대학교 전기전자 공학과 졸업. 1998년, 2002년 포항공과대학교에서 석사, 박사학위를 받음.

2000년~2005년 철강제어 연구센터 연구원. 2005년~현재 동국대학교 정보통신공학과 조교수.

Tel : (054) 770-2275

E-mail : season@dongguk.ac.kr