

# 디지털 PI 제어기 구현에 관한 고찰

변승현, 마복렬  
(한전 전력연구원)

## Survey of Implementation of a Digital PI Controller

S.H.Byun, B.R.Ma  
(KEPCO, KEPRI)

### 요 약

발전소 등의 대규모 공정 플랜트에서 사용하고 있는 대부분의 상용 제어기는 PID 제어기이며, 온도 루프를 제외한 대부분의 제어루프가 PI 제어를 채용하고 있다. 제어 시스템의 성능이 제어기 파라미터의 값에 의해 결정되므로, PI 제어기의 튜닝이 중요하다. 한편, 실제 현장에서의 PI 제어기의 튜닝은 많은 시간과 노력을 필요로 하는 시행 착오에 의해서 이루어지고 있으며, 각 제어 루프 제어기 파라미터의 초기값 설정에 어려움을 갖고 있는 실정이다. PI 튜닝 기법이 많이 나와 있지만 시험 신호의 인가 문제로 인해 현장 활용에는 많은 어려움을 가지고 있다. 본 논문에서는 단순한 시험 신호로부터 PI 초기 설정값을 산출할 수 있는 방법에 대해서 알아본다. 또한 발전소에 적용된 국산 분산 제어 시스템을 보면, 대부분 데이터 로깅 시스템으로서만 활용되고 있고, 제어 시스템으로의 활용은 거의 이루어지지 않고 있으며, PID 제어기에 대한 구현도 완벽하지 못하여 디지털 PI 제어기의 구현 방법에 대한 고찰도 요구되고 있다. 본 논문에서는 디지털 PI 제어기를 구현하는데 있어서 필요한 사항들, 즉 아날로그 제어기의 디지털 등가 제어기로의 변환 기법, 샘플링 주기의 결정 방법, 그리고 그외에 공정 제어기가 가져야 할 기능들에 대해서 언급한다. 그리고 나서 PI 튜닝 기법과 아날로그 제어기의 디지털 등가 제어기로의 변환기법, 샘플링 주기 결정 방법 등에 대해 플랜트 모델을 선정하고 시물레이션을 통해 그 효용성을 보인다.

### 1. 서론

발전소 등의 대규모 공정 플랜트에서 사용되고 있는 대부분의 상용 제어기는 PID 제어기이며, 그 중에서 PI 제어기가 상당 부분을 차지하고 있다. 온도 제어 루프를 제외한 대부분의 제어 루프가 PI 제어를 채용하고 있다.

각 공정의 제어상태는 제어기 파라미터의 값에 의해서 결정되므로, PID 제어기의 튜닝이 각 공정과 전체 공정의 효율과 성능에 중요하게 작용을 한다. 실제 발전 현장에서의 PID 제어기 튜닝은 많은 시간과 노력을 필요로 하는 시행착오에 의해서 이루어지고 있으며, 각 제어 루프의 제어기 파라미터 초기값 설정에 어려움을 갖고 있다.

대부분의 PI 제어기의 튜닝 방법들은 PI 제어기 파라미터의 초기 설정값을 결정하는 방법이

며, 일단 초기 설정된 파라미터에 의해 제어가 이루어지면, 그 후에는 전문가가 개입되어진 시행착오 방법에 의해 PI 제어기의 파라미터에 대한 정밀 튜닝이 이루어진다.

PI 제어기의 파라미터 초기 값 설정을 위한 PI 제어 튜닝 방법은 여러가지가 있지만, 시험 신호의 인가 문제로 인해, 실제 발전 현장에서 활용하기에는 많은 어려운 점을 가지고 있다.

본 논문에서는 실제 발전 현장에서 활용할 수 있는 복잡한 시험신호를 요구하지 않으면서도 간단하게 PI 제어기의 파라미터 값을 산출할 수 있는 PI 제어기 튜닝 방법을 알아본다. 또한 발전소에 적용된 국산 분산 제어 시스템을 보면, 대부분 데이터 로깅 시스템으로서만 활용되고 있고, 제어 시스템으로의 활용은 거의 이루어지지 않고 있으며, PID 제어기에 대한 구현도 완벽하지 못하여

디지털 PI 제어기의 구현 방법에 대한 고찰도 요구되고 있다. 본 논문에서는 디지털 PI 제어기를 구현하는데 있어서 필요한 사항들, 즉 아날로그 제어기의 디지털 등가 제어기로의 변환 기법, 샘플링 주기의 결정 방법, 그리고, PI 제어기를 실제 현장에서 활용하기 위해 필요한 추가적인 기능들에 대해서 기술하고, 앞서 언급한 사항들에 대한 시물레이션을 통해 그 효용성을 보인다.

## 2. 대상 공정 모델과 PI 튜닝 기법

### 2.1 PI 튜닝 기법

PI 제어기의 튜닝 기법은 여러가지가 있지만, 실제 발전 현장에서는 사용하기 어려운 시험 신호를 요구하고 있는 기법이 많이 있다. 본 논문에서는 플랜트 모델의 개방 루프 응답으로부터 추정할 수 있는 시상수와 데드타임으로부터 PI 제어기 파라미터를 비교적 손쉽게 얻을 수 있는 PI 튜닝 기법을 알아본다.

#### 2.1.1 Z-N 개방 루프 스텝 응답법

이 방법은 Ziegler-Nichols가 제안한 방법으로 플랜트 모델을 데드 타임을 갖는 식(1)과 같은 1차 모델로 근사화하고, 식 (1)의 모델의 파라미터로부터 식 (2)의 튜닝 식을 이용하여 PI 제어기 파라미터를 구하는 방법이다[5].

$$G_p(s) = \frac{K e^{-T_D s}}{T_C s + 1}$$

(1)

$$K = \frac{0.9}{K} \left( \frac{T_D}{T_C} \right)^{-1}, T_i = 3.33 T_D$$

(2)

식 (1)의 시상수  $T_C$ 와 데드타임  $T_D$ 를 결정하는 방법이 여러가지가 있는데, 이 방법에서는 개방 루프 스텝 응답의 기울기가 최대인 점에서의 접선을 그려서 시상수와 데드타임을 구하는 방법을 취한다.

#### 2.1.2 [4]에 의한 튜닝 기법

[4]에서는 self-regulating 공정에 대한 시물레이션 결과와 보드 선도 분석으로부터 임계 주기  $T_u$ 를 식 (3)과 같이 근사화하고 있다.

$$T_u = 2 * \left[ 1 + \left[ \frac{T_C}{(T_C + T_D)} \right]^{0.65} \right] * T_D$$

(3)

임계 비례대  $PB_u$  도 임계 주기, 시상수, 루프의 정상 상태 이득으로부터 임계주기와 시상수의 비에 따라서 식 (4)와 같이 근사화 하여 구할 수 있다.

$$\text{For } \frac{T_u}{T_C} < 4, PB_u = \frac{100 * T_u * K}{2 * \pi * T_C}$$

$$\text{For } \frac{T_u}{T_C} > 4, PB_u = 100 * K$$

(4)

PI 제어기의 파라미터는 식 (3)과 식 (4)의 임계 주기와 임계 비례대로부터 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$PB = 2.8 * PB_u, T_i = 1.0 * T_u$$

(5)

### 2.2 대상 공정 모델

본 논문에서 대상으로 삼은 모델은 self-regulating 공정 모델로 식 (6)과 같다.

$$G_1(S) = \frac{1}{(1+5S)^2}, G_2(S) = \frac{1-2S}{(1+5S)^2}$$

(6)

### 2.3 시상수와 데드타임을 추정 방법[5]

식 (2)와 식 (5)의 PI 제어기 파라미터 설정식을 이용하기 위해서는 식 (1)의 데드타임을 포함하는 일차 모델로 공정 모델을 근사화하여야만 한다. 식 (1)의 공정 모델로 공정을 근사화하기 위해서는 시상수  $T_C$  와 데드 타임  $T_D$ 를 구하여야만 한다.

#### 2.3.1 Fit 1

이 방법은 공정 응답 곡선의 최대 변화율 점에서의 접선을 이용한다. 최대 변화율 점에서의 접선은 데드타임  $T_D$  에서의 초기값과 시간  $T_C + T_D$  에서 최종값을 지나는데 이로부터 시상수와 데드타임을 추정한다. 이 방법은 실제 공정 시상수보다 더 큰 시상수를 산출한다.

#### 2.3.2 Fit 2

이 방법에서는 공정 응답의 출력 변화분의 0.632배가 되는 지점을 선택하여 시상수를 추정한다. 데드 타임은 Fit 1에서와 같은 방법으로 구한다. 이 방법으로 구한 시상수는 일반적으로 Fit 1에 의해 구한 시상수보다 더 작다.

2.3.3 Fit 3

Fit 1과 Fit 2에 의한 시상수와 데드 타임의 추정은 최대 변화율 점에서의 접선에 종속이다. 시상수와 데드타임을 구하는데 있어서 접선의 종속성을 없애기 위해, Fit 3에서는 모델과 실제 응답이 같아야 하는 두 점을 선택하여 시상수와 데드타임을 결정하는 방법을 채택한다. 출력 변화분의 0.283배가 되는 시간을  $T_1$ 이라 하고, 출력 변화분의 0.632배가 되는 시간을  $T_2$ 라 하면, 시상수와 데드타임을 식 (7)로부터 구할 수 있다.

$$T_c = \frac{3}{2}(T_2 - T_1), T_d = T_2 - T_c \tag{7}$$

3. 디지털 PI 제어기 구현에 있어서 고려사항

디지털 PI 제어기를 구현하는 방법은 크게 두 가지로 분류할 수 있는데, 첫번째 방법은 근계적법과 주파수 응답법과 같은 고전적인 방법에만 기반한 아날로그 제어기를 설계하고, 결과로 나온 제어기를 이산화하는 방법이며, 두번째 방법은 플랜트를 이산화하고, 디지털 기술을 이용하여  $z$  평면에서 극점-영점 구성을 이용하는 근계적법을 이용하거나,  $w$  평면에서 주파수 응답법을 이용하거나 디지털 제어기의 펄스 전달 함수를 조작함으로써 페루프 시스템의 요구되어지는 특성을 얻도록 하는 해석적인 방법을 이용하는 것이다[2]. 국내 분산 제어시스템의 기술이 오래된 아날로그 제어 시스템을 채용하고 있는 발전소에 대해서 디지털 제어 시스템으로의 개체하는데 적용되고 있고, 대부분의 PI 튜닝 기법들이 아날로그 제어기에 기반하므로 본 논문에서는 아날로그 PI 제어기를 이산화하여 디지털 PI 제어기를 얻는 방법에 대해서 알아본다.

3.1 아날로그 제어기의 디지털 제어기로의 변환 기법

아날로그 제어기의 디지털 등가 제어기를 얻는데는 몇 가지 방법이 있다. 아날로그 제어기의 디지털 등가 제어기는 원래의 아날로그 제어기와 근사적으로 같은 동특성을 가져야만 한다. 즉, 아날로그 제어기의 디지털 등가를 얻는데 있어서, 아날로그 제어기의 과도 응답, 주파수 응답과 디지털 등가의 과도 응답, 주파수 응답이 가능한한 가깝도록 하는 것이 요구되어진다. 일반적으로 디지털 제어기의 특성은 샘플링 주기와 이산화 기법에 달려 있다.

표 1에 아날로그 제어기를 디지털 등가 제어기로 변환하는 변환 기법과 변환 식이 나와 있다. forward difference 기법은 안정한 아날로그 제어기의 등가 이산 시간 제어기가 불안정할 수 있으므로, 실제적으로는 이용하지 않는 기법이며, 나머지 기법들은 원래의 아날로그 제어기와 비교하여 주파수 응답특성에서 왜곡이 발생하긴 하지만, 응용에 따라서 이용가능한 기법이다.

표 1. 아날로그 제어기의 이산 등가제어기로의 변환 기법

매핑 기법	매핑 식
Backward difference	$s = \frac{1-z^{-1}}{T}$
Forward difference	$s = \frac{1-z^{-1}}{Tz^{-1}}$
Bilinear 또는 Tustin transformation	$s = \frac{2}{T} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$
Impulse-invariance	$G_D(z) = TZ\{G(s)\}$
Step-invariance	$G_D(z) = Z\left\{\frac{1-e^{-Ts}}{s} G(s)\right\}$
Matched pole-zero mapping	$s = -a$ 에서의 극점, 영점은 $z = e^{-aT}$ 로 매핑, 무한 극점 영점은 $z = -1$ 로 매핑

과도 응답과 주파수 응답 특성에서의 왜곡의 정도가 샘플링 주파수, cutoff 주파수, 시스템에 연관되어진 가장 높은 주파수 성분, 시스템에 존재하는 전송 지연 등에 달려 있기 때문에 어느 주어진 시스템에 대해서 어떠한 등가 이산 제어기가 가장 좋다고 말할 수는 없다. 이산 시간 제어 시스템의 설계가 아날로그 제어 기법을 통하여 시도되어지고, 등가 이산 시간 제어기가 아날로그 제어기를 대신하여 이용될 수 있다면, 등가 이산 시간 제어기의 여러 형태들을 디지털 컴퓨터 상의 시물레이션을 통하여 여러 시도를 해보는 게 바람직하다[2].

아날로그 PI 제어기를 기술하면 식 (8)와 같다.

$$u(t) = K \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right] \quad (8)$$

흔히 문헌이나 상용 제어기의 매뉴얼에 나와 있는 디지털 PI 제어기의 구현 방법은 크게 2가지로 대변될 수 있다. 식 (8)을 디지털 PI 제어기로 근사화하면 식(9)과 식(10)의 두 가지 형태의 제어기로 근사화할 수 있다.

$$u(kT) = K \left[ e(kT) + \frac{T}{T_i} \sum_{h=1}^k e(hT) \right] \quad (9)$$

$$U(z) = K \left[ 1 + \frac{T}{T_i} \frac{1}{1-z^{-1}} \right] E(z)$$

$$\Delta u(kT) = K \left[ \left\{ e(kT) - e((k-1)T) \right\} + \frac{T}{T_i} e(kT) \right]$$

$$u(t) = K \left\{ e(kT) + \frac{T}{T_i} \sum_{h=1}^k \left[ \frac{e((h-1)T) + e(hT)}{2} \right] \right\}$$

$$U(z) = K \left\{ 1 + \frac{T}{2T_i} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} \right\} E(z) \quad (10)$$

$$\Delta u(kT) = K \left\{ \left[ e(kT) - e((k-1)T) \right] + \frac{T}{2T_i} [e(kT) + e((k-1)T)] \right\}$$

식 (9)는 표 1을 참조하면 backward difference 기법을 적용시킨 결과와 같으며, 식 (10)은 tustin 기법을 적용시킨 것임을 알 수 있다. 서울화력 보일러 제어 시스템의 아날로그 제어 백업 장치로 설치되었던 SLC(Single Loop Controller)와 국내 A사의 분산 제어 시스템의 PI 제어기의 기능 코드는 식(9)의 디지털 속도형 PI 제어기를 채용하고 있다.

### 3.2 샘플링 주기의 결정

아날로그 제어기를 디지털 제어기로 변환할 때, 이산화 기법뿐만 아니라 샘플링 주기도 이산화되어지는 제어기의 동특성에 영향을 주며, 시스템 안정도에도 영향을 준다. 샘플링 주기를 결정하는 방법은 대부분 경험적인 규칙이다. 샘플링 주기를 결정하는 방법을 알아보면, 부족제동인 경우에는 출력 감쇠 진동 주기동안 8번에서 10번 정도 샘플링을 할 수 있게 하고, 과제동인 경우에는 과도 응답의 상승시간 동안 8번에서 10번 정도의 샘플링 할 수 있게 샘플링 주기를 설정하는 방법이 있다[2]. 또다른 방법으로는 제어 성능과 컴퓨터 자원의 효율적인 이용을 위해서는, 샘플링 주기가 지배적인(dominant) 시상수의 대략 10분의 1 정도 되게 샘플링 주기를 선정하는 방법이 있다[5]. 데드 타임이 지배적인 시상수보다 같거나 크다면, 더 긴 샘플링 주기를 이용할 수 있다. 샘플링 주기의 가장 좋은 선택 방법

은 제어 시스템의 요구 성능 조건을 만족하는 가장 큰 샘플링 주기를 선택하는 것이다.

### 3.3 PI 제어기가 가져야할 부가적인 기능

공정 제어에 사용되는 PI 제어기가 가져야할 부가적인 기능을 언급한다. PI 제어기는 공정 제어의 특성상 수동 모드, 자동 모드, 리모트 모드, 트랙 모드의 4가지 제어 모드를 수용하여야 한다. 수동 모드는 제어기의 수학적 계산 값에 관계없이 운전원의 제어기 조작에 의한 값이 출력되는 모드를 말하며, 자동 모드는 제어기의 수학적 계산 값이 제어기 출력 값이 되며, 설정치를 운전원이 해당 제어기의 설정치 파라미터를 변경함으로써 설정치를 발생시키는 모드를 말한다. 리모트 모드는 자동 모드와 비슷하나, 설정치를 외부 기능 블록으로부터 받아들이는 제어 모드를 말한다. 트랙 모드는 수동 모드와 비슷하나, 제어기 출력을 다른 기능 블록으로부터 받아들이는 제어 모드를 말한다. 또한 제어 모드간 전환시 제어 출력에 범프(bump)가 없게끔 해야하며, 적분항의 wind-up 방지기능도 가지고 있어야 한다. 경우에 따라서는 선행신호도 수용할 수 있어야 한다. 제어기에서 선행신호를 입력으로 수용하게끔 하여 선행신호의 존재로 인한 불필요한 외부로직의 추가가 필요없게끔 하는 게 좋다. 제어기에서 선행 신호를 처리할 경우에는 제어기 출력에서 선행 신호를 뺀 값을 제어 알고리즘 계산의 이전 출력이 추종하게끔 하여야 한다. 대규모 공정 제어에서 흔히 볼 수 있는 캐스케이드 제어기를 제어 모드간 범프가 없게끔 구성하기 위해서는 슬레이브 제어기가 수동이거나 트랙 모드일 경우에는 마스터 제어기의 출력이 슬레이브 제어기의 공정치 입력 값을 추종하는 트랙 모드로 운전되어야 하며, 속도형 PI 제어기의 이전 계산 값이 제어기 출력값에서 선행신호를 뺀 값을 추종하고 있어야 제어 모드 전환 시에 범프가 없게 된다. 제어모드간 우선순위도 고려하여 모드간 충돌이 일어날 경우에 자동이나 리모트 모드보다는 트랙이나 수동 모드의 우선순위가 높게끔 구성을 해야한다.

## 4. 시물레이션

4.1 시상수, 데드타임의 추정

2.2절에 기술한 공정 모델에 대해서 2.3절에 기술한 시상수와 데드 타임 추정 기법을 적용하여 모델  $G_1$ ,  $G_2$  에 대해 추정한 시상수와 데드 타임은 표 2와 같다.

표 2. 공정모델  $G_1$ ,  $G_2$ 에 대한 시상수와 데드타임 추정

모델	Fit 1		Fit 2		Fit 3	
	시상수	데드타임	시상수	데드타임	시상수	데드타임
G1	13.59	2.41	9.29	2.41	8.10	3.60
G2	12.92	4.51	8.99	4.51	7.95	5.55

표 1에서의 추정 결과를 토대로 일차 모델로 각 모델을 모사하여, 2.2 절에 기술한 공정 모델의 스텝 응답과의 차의 절대치의 적분값을 비교해본 결과 Fit 3의 시상수와 Fit 2의 데드타임을 채용하는 것이 가장 좋은 결과를 보여 주었다. 따라서 시상수는 Fit 3에서 선택하고, 데드타임은 Fit 2에서 선택하도록 한다.

4.2 각 모델에 대한 PI 제어기 파라미터 설정

식 (2)와 식 (5)의 식으로부터 표 2의 시상수와 데드 타임을 이용하여 PI 제어기의 파라미터를 산출하면 표3과 같다.

표 3. 각 모델에 대한 PI 제어기 파라미터 산출 값

모델	식 (2)		식 (5)	
	$K_p$	$T_i$	$K_p$	$T_i$
G1	5.08	8.02	2.04	8.89
G2	2.58	15.02	1.13	15.76

표 3의 PI 제어기 파라미터를 이용하여 공정 모델  $G_1$ 과  $G_2$ 에 적용한 스텝 기준 입력에 대한 제어 결과가 그림 1, 2와 같다. 그림 1, 2의 결과로부터 식 (5)에 의한 PI 제어기 튜닝이 더 보수적임을 볼 수 있다.

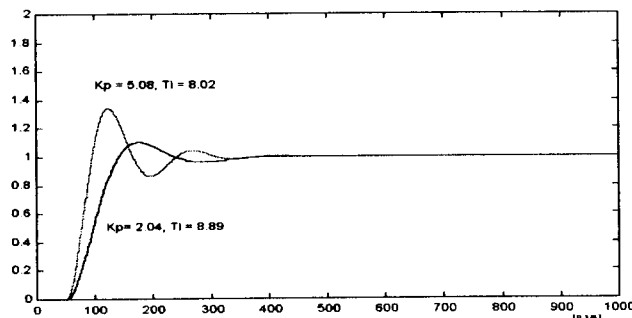


그림 1. 공정 모델  $G_1$ 에 대한 PI 제어 결과

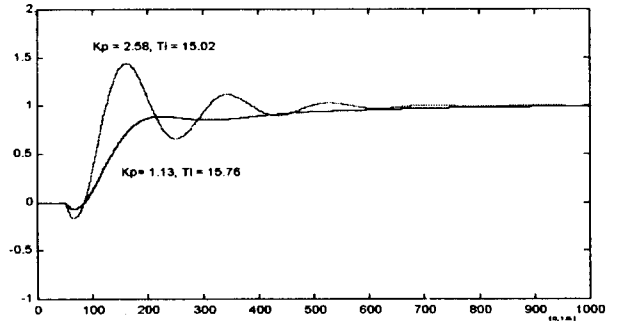


그림 2. 공정 모델  $G_2$ 에 대한 PI 제어 결과

4.3 디지털 제어기로의 변환기법에 따른 시물레이션

아날로그 제어 시스템의 디지털 제어 시스템으로의 변환은 그림 3에서와 같이 아날로그 제어기를 디지털 등가 제어기로 변환하고, 디지털 등가 제어기 앞에 샘플러를 두고, 디지털 제어기와 아날로그 공정 모델의 연결을 위해 ZOH(Zero Order Hold)를 두는 것이다. 아날로그 제어기의 디지털 등가 제어기로의 변환 기법에 따른 디지털 제어기의 아날로그 제어기의 추종성을 알아보기 위해 backward difference 기법과 tustin 기법을 적용하여 그림 3과 같이 제어 시스템을 구성한 후, 식 (6)의 각 공정 모델에 대해 표 3의 PI 제어기 파라미터를 적용하여 시물레이션을 하여 두 변환기법의 아날로그 제어기의 추종성을 비교해 보았다. 샘플링 주기는 0.1초로 하고, 100초동안 시물레이션 한 후, 아날로그 제어기에 의한 모델 출력값과 디지털 제어기에 의한 모델 출력 값의 차의 절대치를 합산하여 디지털 제어기의 아날로그 제어기의 추종성을 알아본 결과가 표 4와 같다.

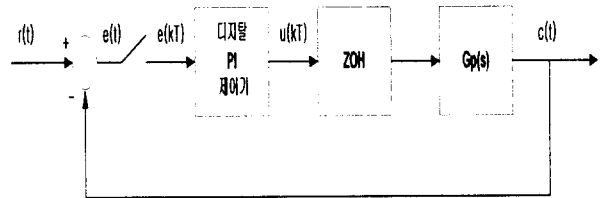


그림 3. 디지털 제어 시스템의 블록 다이어그램

표 4. 디지털 제어기로의 변환기법에 따른 아날로그 제어기 추종성 비교

	backward	tustin	backward	tustin
G1	Kp=5.08, Ti=8.02		Kp=2.04, Ti=8.89	
(IAE)	2.12	1.90	0.93	0.74
G2	Kp=2.58, Ti=15.02		Kp=1.13, Ti=15.76	
(IAE)	4.94	4.71	0.62	0.55

표 4의 시물레이션 결과로부터 tustin 기법을 채용한 디지털 PI 제어기가 backward 기법을 채용한 디지털 PI 제어기보다 아날로그 PI 제어기의 추종성이 좋음을 볼 수 있다.

#### 4.4 샘플링 주기에 따른 시물레이션

본 절에는 샘플링 주기를 변화시켜 가면서 시물레이션을 해보았다. 디지털 제어기는 tustin 기법을 이용하였으며, G1 모델에 대해서 샘플링 주기를 시상수의 0.8초와 4.0초로 하고서 시물레이션한 결과가 그림 4와 같다.

그림 4의 결과는 샘플링 주기가 길어질수록 제어 성능이 안 좋아지고 아날로그 제어의 특성에서 차이가 많이남을 보여주고 있으며, 샘플링 주기가 표 2에서 추정된 모델 G1에 대한 시상수의 10분의 1 정도는 되어야함을 보여주고 있다.

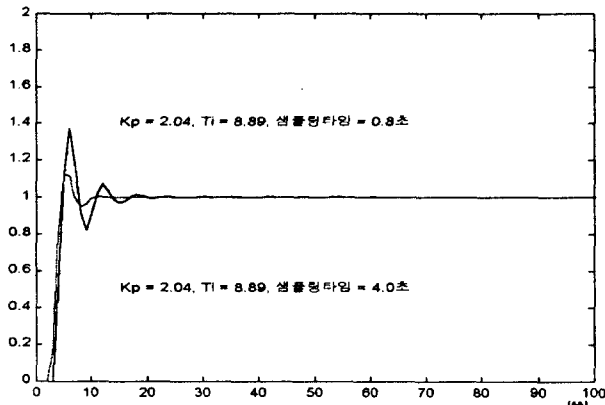


그림 4. 공정 모델 G1에 대한 샘플링 주기에 따른 제어 결과

### 5. 결론

본 논문에서는 현장에서 간단한 시험을 통해서 공정 모델을 데드타임을 갖는 1차 모델로 근사화할 수 있는 방법과 구한 1차 모델 파라미터를 이

용해 PI 제어기의 파라미터를 산출할 수 있는 방법에 대해서 알아보고, 아날로그 제어기의 디지털 등가 변환 기법과 샘플링 주기의 결정 방법, 그리고 부가적으로 PI 제어기가 가져야할 기능에 대해서 기술하였다. 그리고 기술한 내용에 대한 시물레이션을 통해 그 효용성을 보였다. 실제 발전소나 플랜트에서 시운전이나 새로운 제어 루프 추가시 PI 제어기 파라미터 선정에 도움이 되리라 보며, 분산 제어 시스템이나 디지털 제어기의 기능 코드 구현시 활용할 수 있으리라 본다.

### 참고문헌

- [1] 한전 전력연구원, "발전소 보일러용 디지털 분산제어 시스템 개발(I)", 중간보고서, 1999
- [2] KATSUHIKO OGATA, "Discrete-Time Control Systems", Prentice-Hall, 1987
- [3] Eurotherm, "LIN Blocks Reference Manual", 1993
- [4] Gregory K. McMillan, "Tuning and Control Loop Performance", ISA, 1994
- [5] Carlos A. Smith and Armando B. Corripio, "Principles and Practice of Automatic Process Control", WILEY, 1997
- [6] Karl Johan Aström and Tore Hägglund, "Automatic Tuning of PID Controllers", ISA, 1988