



## **A Study on Control System Identification Using Fuzzy Logic**

**Houng-Kun Jung<sup>1</sup>, Sang-Min Lee<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Division of Converged Electronic Engineering, Cheongju University*

<sup>2</sup>*Industry-Academic Cooperation Foundation, Korea National University of Transportation*

### **A B S T R A C T**

This is a control system identification study using a fuzzy logic algorithm to handle the issue of the controller parameter tuning in a control system with time delay. Among the studies related to the controller parameter tuning for control system identification, Yunwana-Seborg's controller parameter tuning method showed a rapid response in plants with no time delay or with small-time delays due to the phase error caused by Pade's first-order approximation method. However, a large time delay causes a higher time delay estimate and it cannot be applied to the actual system. Zigler-Nichols' loop tuning method, which is widely applied in the industrial field, requires much time to tune controller parameters because it goes through many trials and errors. Although Cohen-Coon's controller parameter tuning method using the process response curve has an advantage of shortening the time required for controller parameter tuning than the Zigler-Nichols's loop tuning method, it can only be applied to an open loop system. To overcome these shortcomings, Suh proposed to set a phase controller in Pade's approximation method to reduce the phase error, between the estimated model transfer function while converting time delay into Pade's first-order approximation and the time delay of an actual plant, as a controller parameter tuning. However, it has a disadvantage that it is not analytical because this method derives by substituting a phase regulator proportional to a constant value in time delay. This study discussed an analytical method that could solve the issue of the phase error between the actual plant and the estimated transfer function using a fuzzy logic algorithm. This study proved that the proposed method could overcome the shortcomings of causing the large time delay estimation and provide quick response and stability by suggesting a logical way to set up a phase regulator based on the comparisons of Zielger-Nichols' loop tuning method, Yunwana-Seborg's method, and the proposed controller parameter tuning method.

© 2020 KKITS All rights reserved

**KEYWORDS :** Fuzzy, PID Control, Time Delay, Pade' Aproximaion, System Identification

**ARTICLE INFO:** Received 22 September 2020, Revised 5 October 2020, Accepted 13 October 2020.

\*Corresponding author is with the Industry-Academic Cooperation Foundation, Korea National University of Transportation, 50,

Daehak-ro, Geomdan-ri, Daesowon-myeon, Chungju-si, Chungcheongbuk-do, KOREA. *E-mail address:* leesm@ut.ac.kr

## 1. 서론

산업현장에서 요구되는 일반적인 제어기는 입력들에 의해서 요구되는 기준에 만족하도록 시스템의 응답이 출력으로 나오는데 목적이 있다.

제어기의 파라미터를 위한 동조 방법은 빠른 응답과 안정성을 만족시키는 파라미터들을 최적화시키는 것이 목적이다. 제어기 파라미터의 동조에 관한 연구는 Ziegler-Nichols[1]에 의하여 처음 시작되었으며 루프 동조방법으로 불린다.

Ziegler-Nichols의 루프 동조 방법은 산업현장에서 많이 쓰이는 방법이나 최종 주기와 이득을 얻기 위하여 많은 시행착오를 거쳐 많은 시간이 소비되는 단점을 가지고 있다. 루프 동조 방법의 단점을 보완하기 위한 방법으로 Cohen-Coon[2]에 의하여 프로세스 반응 곡선을 이용한 제어기 파라미터 동조 방법에 제시되었다. 그러나 Cohen-Coon이 제안한 제어기 파라미터 동조 방법은 루프 동조 방법보다 편리하지만 추정 모델의 전달함수를 구하기 위해 프로세서 반응곡선을 구하기 위하여 정확한 기울기를 결정해야 하는 단점이 있고, 또한 개루프 시스템에서만 적용할 수 있고 폐루프 시스템에서는 적용하지 못하는 단점을 가지고 있다.

루프 동조 방법과 프로세스 반응곡선을 이용한 제어기 파라미터 동조 방법의 단점을 보완한 방법으로 Yunwana-Seborg[3]에 의하여 해석적인 방법이 제시되었다. Yunwana-Seborg가 제안한 제어기 파라미터 동조 방법은 폐루프 시스템에서 PID 제어기 동조 파라미터인 비례, 적분, 미분 파라미터 중 비례 파라미터만 입력하여 시간 응답곡선을 구하고 이 응답 곡선으로부터 추정된 모델파라미터를 결정하고 관련된 수식을 유도하여 PID 제어기 동조 파라미터들을 최적화하여 빠른 응답과 안정성은 보장하는 방법이다. 그러나 Yunwana-Seborg[3]가 제시한 제어기 파라미터 동조 방법은 유도된

관련 식에 오류가 있어, Suh[4,5]에 의하여 해결 방안이 해 제시되었다. 이 방법의 특징으로는 시간 지연 항과  $pade'$ 근사에 대한 위상 오차를 줄이기 위하여 위상 조절인자를  $pade'$ 근사식에 삽입하여 PID 제어기 동조 파라미터들의 계수들을 최적화하는 방법이 사용되었다. 그러나 Suh가 제시한 방법은 빠른 응답과 안정성을 가지고 있지만 시간 지연의 상수 부분과 비례적으로 위상 조절인자를 설정하는 방법으로 해석적으로 증명하지 못한 단점이 있다.

Suh가 제시한 위상 조절인자를 이용한 제어기 파라미터 동조 방법을 보완하기 위하여 쌍선형변환을 이용한 위상 조절인자의 설정 방법[6]과 딥러닝을 이용한 조절인자의 설정방법[7]을 이용한 PID 제어기 파라미터 동조 방법이 제안되었다. 하지만 쌍선형 변환을 이용한 위상 조절인자의 설정 방법은 빠른 응답을 보장하지만 저주파수 영역에서만 안정성을 보장하고 중간 주파수 대역과 고주파수 영역에서는 안정성을 보장하지 못한 단점을 가지고 있다. 그리고 딥러닝을 이용한 방법은 빠른 응답과 안정성을 보장하지만 위상 조절인자를 설정하는 방법이 복잡한 단점을 가지고 있다.

또 다른 해석적인 방법은 릴레이 피드백 자동 동조 방법[8-10]이 있으나 광범위한 모델에서는 적용하지 못하는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는  $Pade'$ 근사로 발생하는 위상 오차를 줄이기 위하여 퍼지 논리 알고리즘[11]를 이용하여 Suh(1984)[4]방법에서 제시한 위상 조절인자의 설정을 논리적인 방법으로 위상 오차를 효과적으로 줄고 빠른 응답과 안정성을 보장하는 방법을 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는  $Pade'$ 근사와 위상 조절인자의 설정과 퍼지 논리를 이용한 설정 방법에 대하여 소개하고 3장에서는 위상 조절인자를 고려한 제어기 동조에 대하여

설명하고 4장에서는 본 논문에서 제안하는 방법으로 시뮬레이션을 실행하고 결과를 보여주며 5장에서는 결론을 설명하여 본 논문을 마무리한다.

## 2. Pade' 근사와 위상 조절인자

### 2.1 Pade' 근사에 의한 오차의 발생

시간 지연 항  $e^{-d_m s}$ 을 Pade'근사 방법을 이용하여 1차식으로 근사화하면 식 (1)과 같다.

$$e^{-d_m s} \cong \frac{1 - \frac{1}{2}d_m s}{1 + \frac{1}{2}d_m s} \quad (1)$$

시간 지연  $e^{-d_m s}$ 과 Pade'근사 방법을 비교하면 <그림 1>에서 보여주는 것처럼 이득(Gain)오차는 발생하지는 않지만 위상(Phase)오차의 경우에는 시간 지연의 상수항이 커질수록 많은 오차가 발생하는 것을 알 수 있다. 시간 지연의 상수 항이 커진다는 의미는 시간 지연  $e^{-d_m s}$ 에서  $d_m$ 의 값이 커지는 것이다. 이러한 위상 오차의 발생은 시간 지연이 증가함에 따라 발생 되는 응답으로부터 유도된 관계식에 의하여 추정된 시간 지연  $d_m$ 이 실제 플랜트의 시간보다 많게 추정되기 때문에 Pade' 1차 근사 방법을 이용하면 시간 지연이 큰 시스템에서는 추정된 모델의 변수들을 유도할 수 없다. 그리고 <그림 2>에서 식 (1)과 달리 Pade' 근사 방법을 2차 이상으로 근사화하면 추정되는 시간지연  $d_m$ 은 실제 플랜트의 시간 지연과 오차가 줄어드는 장점을 보이지만 관련된 식을 유도하지 못하는 단점을 가지고 있다.

### 2.2 위상 조절인자의 설정

Pade'1차 근사에 의한 위상 오차를 줄이기 위한 방법[4]으로 위상 조절인자  $\alpha$ 를 고려하여 식 (2)와 같이 Pade'근사 방법을 다시 정의한다.

$$e^{-d_m s} \cong \frac{1 - \frac{\alpha}{2}d_m s}{1 + \frac{\alpha}{2}d_m s} \quad (2)$$

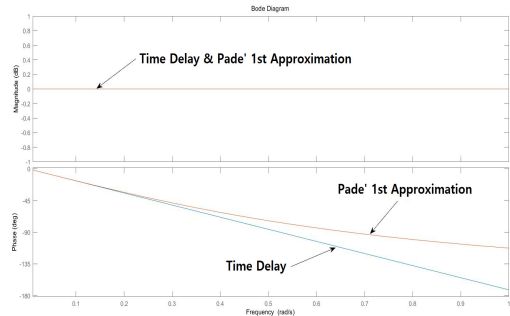


그림 1. 시간지연  $e^{-d_m s}$ 와 Pade' 1차 근사의 보드선도  
Figure 1. Bode Plot of Pade' 1<sup>st</sup> Approximation to Time Delay

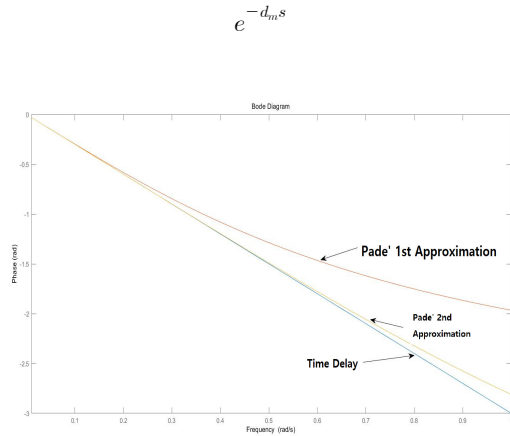


그림 2. 시간지연  $e^{-d_m s}$ 와 Pade' 1차 및 2차 근사의 위상여유  
Figure 2. Phase Margin of Pade' 1<sup>st</sup> & 2<sup>nd</sup> Approximation to Time Delay  $e^{-d_m s}$

### 2.3 퍼지 논리를 이용한 위상 조절인자의 설정

위상 조절 인자  $\alpha$ 를 이용하여 실제 플랜트의 시간 지연과 Pade'1차 근사방법 사이에 발생하는 오차를 줄이기 위하여 퍼지논리 알고리즘을 사용한다[11]. 퍼지 논리 알고리즘은 위상 조절 인자  $\alpha$ 를 퍼지규칙과 추론을 최적화된 값으로 정의한다. 제안된 방법의 위상 조절인자  $\alpha$ 는 현재의 실제 플랜트의 시간지연과 추정된 모델의 시간지연 항의 오차  $e$ 와 오차의 변화율  $\Delta e$ 를 기반으로 결정한다. 그리고 위상 조절인자  $\alpha$ 의 퍼지 규칙은 <표 1>과 같다.

표 1. 퍼지규칙에 대한 표  
Table 1. Table of Fuzzy Rule

$\Delta e \setminus e$	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	ZO
NS	NB	NS	NS	ZO	PS
ZO	NB	NS	ZO	PS	PB
PS	NS	ZO	PS	PS	PB
PB	ZO	PS	PB	PB	PB

퍼지 추론 방법은 일반적으로 많이 쓰이고 있는 Mandani 추론 방법을 이용한다. 위상조절인자  $\alpha$ 를 추종하기 위한 소속함수와 규칙표는 <그림 3>과 같이 정의한다.

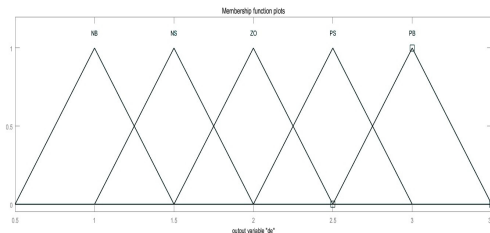


그림 3. 단위시스템입력 변화에 의한 시간응답곡선  
Figure 3. Time Response Curve of Process to a Unit Step input Change

### 3. 조절인자를 고려한 제어기 동조

<그림 4>의 블록다이어그램에서 프로세서 전달 함수  $G_p(s)$ 는 모르는 상태로 가정하고, 프로세서의 추정된 모델은 식 (3)과 같이 가정한다.

$$G_m(s) = \frac{k_m e^{-d_m s}}{\tau_m s + 1} \quad (3)$$

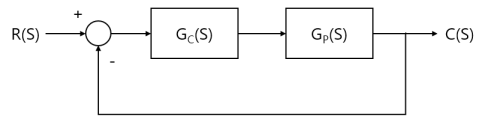


그림 4. 단위회환시스템의 블록선도  
Figure 4. Block Diagram of a Unit Feedback Control System

여기서  $k_m$ 은 안정 상태 이득이고  $\tau_m$ 은 시간상수이다. 그리고 제어기 전달함수  $G_c(s)$ 를 비례모드  $k_c$ 로 가정하면 식 (3)은 식 (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K e^{-d_m s}}{1 + \tau_m s + K e^{-d_m s}} \quad (4)$$

여기서  $K$ 는 개루프 이득으로  $K = k_c k_m$ 이다. 식 (6)의 페루프 전달함수에서 단위시스템입력 변화에 대한 단위계단응답은 <그림 5>와 같다.

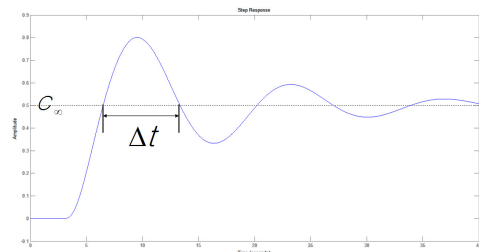


그림 5. 추정된 프로세서의 단위계단응답  
Figure 5. Unit Step Response of the estimated Processor

<그림 5>의 단위계단응답에서 추정 모델 변수를 결정하기 위해서 식 (2)를 식 (4)에 대입하면 식 (5)와 같다.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K'(1 + \frac{1}{2}\alpha d_m s)e^{-dms}}{\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1} \quad (5)$$

$$K' = \frac{K}{K+1}, \tau = \left[ \frac{\alpha d_m \tau_m}{2K+1} \right]^2$$

$$\zeta = \frac{\tau_m + 0.5\alpha d_m(1-K)}{[2\alpha d_m \tau_m(K+1)]^{\frac{1}{2}}}$$

<그림 5>의 응답 결과를 이용하여 추정된 모델의 변수를 계산하면 안정상태 이득에 관한 식 (6)과 시간상수에 관한 식 (7), 그리고 추정된 시간 지연항 식 (8)과 같다.

$$\hat{k}_m = \frac{C_\infty}{k_c(A - C_\infty)} \quad (6)$$

$$\hat{\tau}_m = \frac{\Delta t}{\pi} \left[ \zeta \sqrt{K+1} + \sqrt{\zeta^2(K+1) + K-1} \right] \times [(1-\zeta^2)(K+1)]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$\hat{d}_m = \frac{2\alpha \Delta t \left[ (1-\zeta^2)(K+1)^{\frac{1}{2}} \right]}{\pi \left[ \zeta \sqrt{K+1} + \sqrt{\zeta^2(K+1) + K+1} \right]} \quad (8)$$

A: 계단 입력 크기,  $C_\infty$ : 정상 안정상태 값,  
 $\Delta t$ : 시간 응답 반주기

#### 4. Simulation

시간 지연을 포함하고 있는 플랜트를 Simulation 대상으로 하여 다음과 같은 전달함수를 고려하였다. 그리고 실제 플랜트의 시간 지연항과 Pade'1

차 근사방법에서 발생하는 시간 지연항에 대한 오차를 줄이기 위하여 퍼지 논리 알고리즘을 사용하였으며 제안된 방법으로 추정된 모델의 시간지연을 추정한 값과 비교하였다. Fuzzy Logic Matlab Toolbox를 참고하여 시뮬레이션을 진행하였다.[12-16]

#### 4.1 Example 1

$$G_p(s) = \frac{e^{-s}}{(s+1)(2s+1)(0.5s+1)} \quad (9)$$

식 (9)와 같이 추정된 모델의 전달함수에 대한 시스템의 변수를 계산하기 위하여 페루프 전달함수에서 시간 지연 항  $e^{-dms}$ 에 대한 추정된 계산이 필요하기 때문에 Suh방법에 의한 위상 조절인자를 퍼지 추론 방법으로 구한 결과 0.9가 계산되었고 위상 조절인자로부터 얻어지는 추정된 전달함수의 변수는 <표 2와> 같다. 그리고 추정된 모델에 대한 계단응답곡선은 <그림 6>과 같다.

표 2. Example 1에 대한 추정 모델 변수

Table 2. Estimated Model Parameters for Example 1

	R	$k_c$	$k_m$	$\tau_m$	$d_m$
Propose	1.0	2.0	1.0	2.78	0.92
Y-S	1.0	2.0	1.0	2.63	3.27

표 3. Example 1에 대한 PID제어기 파라미터

Table 1. PID Parameters for Example 1

	$K_u$	$P_u$	$K_P$	$K_I$	$K_D$
Propose	2.48	7.57	1.33	3.74	0.86
Y-S	1.87	9.85	1.08	4.78	1.12
Z-N	2.98	6.81	1.75	3.35	0.76

그리고 <표 3>에서 추정된 파라미터 값들을 이용하여 구한 PID 제어기 파라미터 값들과 Y-S, 그

리고 Z-N 방법에 의하여 결정된 PID 제어기의 초기 값들은 <표 4>와 같다. 본 논문에서 제안한 방법과 Y-S 방법을 비교한 Simulation 결과는 <그림 7>과 같고 본 논문에서 제안한 제어기 파라미터 동조 방법이 Y-S 방법보다 좋은 결과를 볼 수 있다.

<표 3>에서  $K_u$ 는 최종 이득,  $P_u$ 는 최종 주기,  $K_p$ 는 비례 이득,  $K_I$ 는 적분 시간,  $K_D$ 는 미분 시간이다.

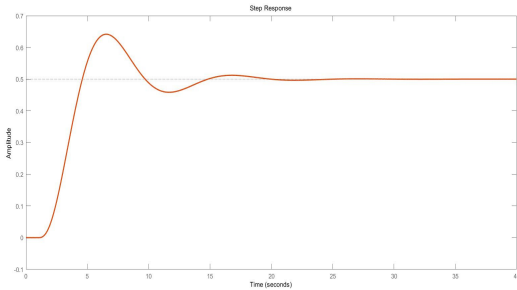


그림 6. Example 1의 모델에 대한 계단 응답  
Figure 6. Step Response for Example 1

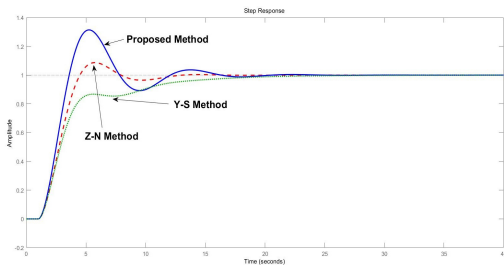


그림 7. Example 1의 모델에 대한 단위 계단 응답  
Figure 7. Unit Step Response for Example 1

### 4.2 Example 2

$$G_p(s) = \frac{e^{-3s}}{(s + 1)^2(2s + 1)} \quad (10)$$

식 (10)과 같이 시간 지연의 상수가 3인 전달함수 모델에서 추정된 파라미터의 계산을 위한 시간 지연 항  $e^{-d_m s}$ 의 오차를 줄이기 위한 퍼지 추론 방법을 이용하여 계산된 위상 조절인자  $\alpha$ 는 2.95가 계산되었고 추정된 시스템의 변수와 Y-S방법에 의한 계산된 시스템 변수는 <표 4>와 같다. 그리고 추정된 모델에 대한 단위계단응답은 <그림 8>과 같다. <표 4>를 이용하여 본 논문에서 제안한 방법, Y-S방법, 그리고 Z-N 방법에 의하여 계산된 제어 파라미터 값은 <표 5>와 같고 제어기 동조 효과에 대한 단위 계단응답은 <그림 9>와 같다.

표 4. Example 2에 대한 추정된 모델 변수  
Table 4. Estimated Model Parameters for Example 2

	$R$	$k_c$	$k_m$	$\tau_m$	$d_m$
Suh	1.0	1.0	1.1	1.45	3.13
Y-S	1.0	1.0	1.0	1.54	10.74

표 6. Example 2에 대한 PID제어기 파라미터  
Table 6. PID Parameters for Example 2

	$K_u$	$P_u$	$K_c$	$T_i$	$T_d$
Propose	1.47	11.3	0.93	5.25	1.40
Y-S	1.2	26.5	0.76	13.3	3.40
Z-N	1.83	13.9	1.14	6.55	1.71

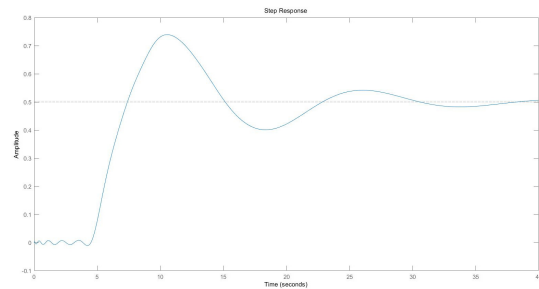


그림 8. Example 2에 대한 단위 계단 응답  
Figure 8. Unit Step Response for Example 2

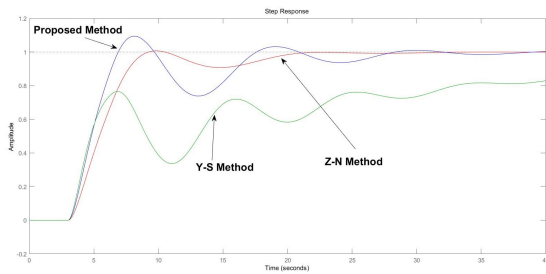


그림 9. Example 2의 모델에 대한 단위 계단 응답  
Figure 9. Unit Step Response for Example 2

<그림 9>에서 알 수 있듯이 시간 지연이 큰 시스템일수록 본 논문에서 제안한 방법이 다른 두 방법과 비교하여 빠른 응답과 안정성을 보이고 특히 Y-S 방법의 경우에는 시간 지연이 큰 시스템일수록 안정성이 떨어지고 응답이 발산하는 결과를 볼 수 있다.

## 5. 결론

Suh[4]가 제시한 제어기 파라미터 동조 방법은 다른 해석적인 동조 방법보다 빠른 응답과 안정성이 입증되었으나 추정된 시스템의 전달함수를 모르는 상태에서 위상 조절인자의 설정을 시간 지연의 상수값과 비례하여 선택하는 방법을 이용하였다. 그러나 이러한 방법은 위상 조절인자의 값을 비례적으로 대입하는 방법이므로 해석적이지 못한 단점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 위상 조절인자의 결정을 비례적인 방법이 해석적인 방법으로 퍼지논리 알고리즘을 이용한 위상 조절인자의 설정으로 최적의 위상 조절인자 값을 설정하여 최적의 제어기 파라미터 동조방법의 효율성을 검증하였다.

본 논문에서 제시된 동조방법은 해석적인 방법이므로 Ziegler-Nichols의 루프 동조방법은 시행착오로 인한 동조에 많은 시간이 걸리는 단점과

Cohen-Coon의 프로세서 반응곡선은 개루프 시스템에서만 적용되고 폐루프 시스템에서는 적용하지 못하는 단점을 가지고 있기 때문에 광범위한 플랜트에서는 제한성이 부여된다. 그리고 폐루프 시스템에서 위상 조절인자의 설정을 비례적인 방법이 아닌 퍼지 알고리즘을 이용한 해석적인 방법으로 빠른 응답과 안정성을 보장하는 제어를 할 수 있다.

## References

- [1] J. G. Ziegler, and N. B. Nichols, *Optimum settings for automatic controllers*, Trans American Society of Mechanical Engineers, Vol. 64, No. 11, p. 759, 1942.
- [2] G. H. Cohen, and G. A. Coon, *Theoretical considerations of retarded control*, Transactions of the ASME, Vol. 75, pp. 827-834, 1952.
- [3] M. Yuwana, and D. E. Seborg, *A new method for on-line controller tuning*, American Institute of Chemical E Journal, Vol. 28, No. 3, pp. 434-440, 1982.
- [4] H. G. Park and B. S. Suh, *A study on the controller tuning*, Institute of Electronics Engineers of Korea, Vol. 5, No. 8, pp.46-54,1984.
- [5] B. S. Suh, *A controller tuning method by pade second order approximation*, Vol. 23, No. 8, pp. 647-652, 1986.
- [6] H. K. Joung, and J. Lee, *PID controller tuning using system identification*, Vol. 22, No. 11, pp. 3214-3217, 2016.
- [7] H. K. Joung, and W. G. Oh, *A study on system identification using deep learning*, Vol. 14, No. 4, pp. 359-368, Aug. 2019.
- [8] J. H. Youn, D. G. Koo, and S. W. Sung

and J. T. Lee, *System identification of the hammerstein process for automatic tuning of PID controller using relay feedback*, Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems, pp. 2266-2269. 2001.

- [9] S. K. Lee, S. H. Yang, and K. Y. Lee, *Improved response of time-delay system with integrator*, Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 930-932, 1999.
- [10] N. L. V. Truong, H. G. Le, T. N. Dang, and L. Le, and T. L. Doan, and T. T. Nguyen, and M. Y. Lee, *Fractional-order PI controllers design based on IMC scheme for enhanced performance of dead-time processes*, Institute of Control, Robotics and Systems, pp. 1407-1410, 2013.
- [11] Mandani, E.H. and S. Assilian, *An experient in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller*, International Journal of Man Machine Studies, Vol. 7 No. 1, pp. 1-13, 1975.
- [12] fuzzy logic toolbox, <https://kr.mathworks.com/products/fuzzy-logic.html>, Jul. 2020.
- [13] G. J. Balas, J. C. Doyle, and K. Glover, A. and Packard, and R. Smith, *User's guide to the analysis and synthesis toolbox for MATLAB*, The Mathworks Inc., 1991.
- [14] F. M. Callier, and C. A. Desoer, *Linear system theory*, Springer-Verlag New York, Inc., 1991.
- [15] R. Y. Chiang, and M. O. Safonov, *User's guide to the robust control toolbox for MATLAB*, The Mathworks Inc., 1988.
- [16] H. Saadat, *computational aids in control systems using MATLAB*, McGraw-Hill, 1993.

---

## 퍼지논리를 이용한 제어 시스템 식별에 관한 연구

정형근<sup>1</sup>, 이상민<sup>2</sup>

<sup>1</sup>청주대학교 융합전자공학부 조교수

<sup>2</sup>한국교통대학교 산학협력단 조교수

---

### 요 약

본 논문에서는 시간지연이 존재하는 시스템에서 제어기 파라미터 동조 문제에서 퍼지논리 알고리즘을 이용한 제어 시스템 식별 연구이다. 제어 시스템 식별과 관련된 제어기 파라미터 동조에 관련된 연구 중에 Yunwana-Seborg가 제안한 제어기 파라미터 동조방법은 Pade' 1차 근사 방법과 실제 플랜트의 시간 지연항과 오차의 발생 때문에 시간 지연이 없는 플랜트나 작은 시간 지연이 존재하는 플랜트에서는 빠른 응답을 보여주고 있으나 실제 플랜트에서 시간 지연이 클수록 추정되는 시간 지연 항이 크게 설정되기 때문에 실제 시스템에서는 적용할 수 없다. 그리고 일반적으로 산업현장에서 많이 적용하고 있는 Zigler-Nichols가 제안한 루프 동조방법은 많은 시행착오를 거치기 때문에 제어기 파라미터 동조를 위하여 많은 시간이 필요하다. Cohen-Coon의 프로세스 반응곡선을 이용한 제어기 파라미터 동조방법은 Zigler-Nichols의 루프 동조 방법보다는 제어기 파라미터 동조에 걸리는 시간이 단축되는 장점이 있으나, 개루프 시스템에서만 적용할 수밖에 없다. 이를 보완하기 위한 방법으로 Suh가 제안한 방법은 시간 지연을 Pade'1차 근사로 변환 시 추정된 모델 전달함수와 실제 플랜트의 시간 지연에서 발생하는 위상 오차에 대하여 Pade'근사 방법에서 위상 조절인자의 설정으로 위상 오차를 줄여 제어기 파라미터 동조방법에 대하여 제시하였지만, 시간 지연에서의 상수값과 비례적인 방법으로 위상 조절인자를 대입하여 유도한 방법으로 해석적이지 못한 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 실제 플랜트와 추정된 전달함수 사이에서 발생하는 위상 오차에 대한 문제점을 보완하기 위하여 퍼지논리를 이용하여 해결할 수 있는 해석적인 방법을 제안한다. 그리고 시뮬레이션을 통하여 Zielger-Nichols의 루프 동조방법과 Yunwana-Seborg가 제시한 방법, 그리고 제안된 제어기 파라미터 동조방법을 비교하여 본 논문에서 제시한 방법이 시간 지연이 크게 추정되는 단점을 보완하고 위상 조절인자의 설정을 논리적인 방

---

법을 제안하여 빠른 응답과 안정성을 보장함을 입증하였다.

signal processing, Information and  
Communication Engineering  
E-mail address: leesm@ut.ac.kr

## 감사의 글

본 논문은 2020년 한국교통대학교 지원을 받아 수행하였음



**Houng-Kun Joung** received the bachelor's degree in the Department of Electrical Engineering from the Semyung University in 2002.

He received the M.S. degree and the Ph.D. degree in the Department of Electrical Engineering from Hanyang University in 2004 and 2017, respectively. From 2011 to 2017, he was a Assistant professor at Korea Polytechnic College. He has been a Assistant professor in the Division of Converged Electronic Engineering at Cheongju University since 2019. His current research interests include Control System, Motor Control System, Power Electronics. He is a Regular member of the KKITS.

*E-mail address:* 21c8545@cju.ac.kr



**Sang-Min Lee** received a bachelor's degree, the M.S. degree and the Ph.D. degree in Information and Communication Engineering from the Chungbuk

University, Korea, in 2018, 2002 and 2005, respectively. He is currently professor of ndustry-Academic Cooperation Foundation at the Korea National University of Transportation. His research interests include the applications of machine learning to control systems, digital