

HS 알고리즘을 이용한 계단응답으로부터 FOPDT 모델 인식

Identification of First-order Plus Dead Time Model from Step Response Using HS Algorithm

이 태 봉

가천대학교 전자공학과

Tae-Bong Lee

Department of Electronic Engineering, Gachon University, Gyeonggi-do 461-701, Korea

[요 약]

본 논문에서는 계단응답으로부터 시 지연을 갖는 선형 연속시스템을 식별하기 위해 HS 최적화 알고리즘을 적용에 관하여 연구하였다. 인식 모델은 1차 시 지연 모델(FOPDT)으로써, FOPDT는 많은 화학 공정과 HAVC 공정에 실효성이 있으며 PID 튜닝에도 적합하다. 최근에 개발된 HS 알고리즘은 완벽한 하모니를 찾아가는 음악적 과정을 개념화 한 것이다. 수학을 기반으로 하는 전통적 기법과 달리 HS는 확률적인 방법을 사용하므로 미분과 같은 수학적 접근을 필요로 하지 않는다. 제시된 인식 방법의 효과를 입증하기 위해 많은 수치 예를 수행하여 결과를 제시하였다.

[Abstract]

This paper presents an application of heuristic harmony search (HS) optimization algorithm for the identification of linear continuous time-delay system from step response. Identification model is first-order plus dead time (FOPDT), which describes a linear monotonic process quite well in most chemical processes and HAVC process and is often sufficient for PID controller tuning. This recently developed HS algorithm is conceptualized using the musical process of searching for a perfect state of harmony. It uses a stochastic random search instead of a gradient search so that derivative information is unnecessary. The effectiveness of the identification method has been demonstrated through a number of simulation examples.

Key word : Harmony search, Heuristic, Optimization, First-order plus dead time, Step response, Stochastic random search.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2015.19.6.636>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 19 November 2015; Revised 25 November 2015

Accepted (Publication) 7 December 2015 (30 December 2015)

*Corresponding Author; Tae-Bong Lee

Tel: +82-31-750-5816

E-mail: tblee@gachon.ac.kr

I. 서론

제어에서 시스템 식별은 매우 활발히 연구가 진행되어온 분야로써 그동안 식별 방법에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다 [1]-[2]. 시스템 인식은 크게 매개변수 형과 비 매개변수 형으로 구분되며 전달함수는 가장 전형적인 매개변수 식 모델 이다[3]. 그러나 그동안 대부분 전달함수 모델 인식 연구는 지연요소를 고려하지 않거나 혹은 기 알고 있다고 전제하였다[4].

산업 공정의 핵심적 요소의 하나는 시지연이며 이는 공정 제어와 매우 긴밀한 관계가 있는 값이다. 이에 따라 지연공정에 대한 시스템 인식은 지속적인 관심의 대상이다. 흔히 사용되는 기존 연구에서는 지연요소를 다항식으로 근사 화하여 표현함으로써 추정해야하는 매개변수의 수가 늘어나며 시지연이 큰 경우 근사 화에 따른 오차가 크게 되는 문제점을 갖고 있다.

공정인식시 인식에 사용되는 시험신호는 인식 결과에 매우 큰 영향을 주며 계단입력, 펄스입력, 정현파 및 pseudo-random binary sequence 등이 사용되거나[5]-[6] relay feedback 시험을 통해 이루어진다[7]-[8]. 선택은 장비 유무를 비롯한 여러 가지 요소와 관련되며 그 중 가장 쉽고 간단하게 할 수 있는 것이 계단신호를 이용하는 것이다[7],[9]-[10].

인식 모델에 있어 공정제어 분야에서는 PID나 IMC (internal model control)와 같은 보편적인 제어기 구현이 쉬운 연속시간 전달함수 모델이 선호된다. 특히 대부분의 단순 화학공정은 FOPDT (first order plus dead time)로 모델화 할 수 있으며 좀 더 복잡한 경우는 SOPDT (second order plus dead time) 모델로 표현 가능하다.

Astrom과 Hagglund[7]는 계단응답을 이용하여 공정을 FOPDT 모델로 인식하는 그래픽 기법을 제안하였다. 이러한 방식은 SOPDT 모델 인식에 적용하는데 한계가 있으며 Mamat과 Fleming은 같은 방식을 사용하여 제한된 특성을 갖는 SOPDT 모델 인식으로 확대하였다[11]. 한편 Shin 등은 유전알고리즘을 사용한 최적화 기법으로 공정을 FOPDT와 SOPDT로 인식 할 수 있음을 보이고 그 성능의 우수성을 입증하였다[12].

본 논문에서는 비교적 최근에 연구가 시작된 meta-heuristic 최적화 기법인 HS (harmony search) 알고리즘[13]-[16]을 적용하여 공정을 FOPDT로 인식하는 방법을 제시하고자 한다. HS는 음악의 즉흥연주에서 음악가들이 최고의 하모니를 찾아가는 과정에 영감을 받아 개발된 최적화 기법이다. 즉, 즉흥연주에서 음악가들은 처음에 임의 적인 화음에서 출발하여 서로가 낼 수 있는 음역을 사용하여 점점 더 좋은 화음을 만들어 낸다. HS는 이러한 과정을 무작위 선택 (random selection), 기억회상 (memory consideration) 및 피치조정 (pitch adjustment)이라는 세 개의 알고리즘으로 표현하였다. HS는 비수학적인 알고리즘으로 설계변수에 대한 초기 값을 요구하지 않으며 경사법 (gradient search) 대신 확률변수 기법 (stochastic random search)을 기반으로 하고 있다.

II. HS 알고리즘

HS는 음악의 즉흥연주에서 연주자들이 즉흥적으로 여러 화음의 조화를 시도해가며 가장 좋은 화음을 만들어가는 과정을 모방한 최적화 알고리즘이다. 즉흥연주에서 각 연주자는 악기의 선택 가능한 음역 내에서 서로의 음을 내어 그 화음이 좋고 나쁨을 판단하여 나쁜 것은 버리고 좋은 것은 그 경험을 기억하여 이를 좀 더 나은 연주를 위한 토대로 사용한다. 이러한 과정은 목적함수에 설계변수의 값을 대입하여 그 값의 적합성 (비용이나 효율 등)을 판단하여 해를 결정해가는 공학적인 최적화 문제 해법 과정과 유사하다 할 수 있다. 두 과정에서 연주자는 설계변수, 각 악기의 음역 범위는 설계변수가 가질 수 있는 값의 범위, 시도된 악기의 음은 선택된 설계변수 값 그리고 만들어진 화음은 설계변수 값에 대응하는 목적함수 값에 비유 할 수 있다. 이러한 음악적 과정과 유사성을 알고리즘으로 구현하기 위해 초기 화음 즉, 해 벡터 (solution vector)를 저장할 기억공간과 이 후 저장된 값을 개선해 나가는 전략이 필수적으로 요구된다. 이때 필요한 기억공간을 HM (harmony memory)라 하며, HM을 개선해 나가는 기본적인 전략을 무작위 선택, 기억회상 및 피치조정이라 한다.

HS 알고리즘을 좀 더 구체적으로 살펴보기 위해 식(1)에서 최적화 문제를 고려하도록 한다.

$$\text{Minimize } f(x) \text{ s. t. } x = [x_1 x_2 \dots x_n], x_i \in X_i \quad (1)$$

$f(x)$ 는 목적함수이고 x_i 는 연속 설계변수 이며 X_i 는 각 설계변수 범위를 나타내는 집합으로 식(2)와 같이 정의 한다.

$$x_i^L \leq X_i \leq x_i^U \quad (2)$$

HS를 구현하기 위해서는 먼저 일련의 해 벡터를 저장하고 개선하기 위해 필요한 HM 을 정의하고 이를 초기화해야 한다. 이는 식(3)과 같은 행렬로 나타낼 수 있다.

$$HM = \begin{pmatrix} x^1 & | & f(x^1) \\ \vdots & | & \vdots \\ x^{HMS} & | & f(x^{HMS}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1^1 & \dots & x_n^1 & | & f(x^1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & | & \vdots \\ x_1^{HMS} & \dots & x_n^{HMS} & | & f(x^{HMS}) \end{pmatrix} \quad (3)$$

HMS (harmony memory size)는 HM에 저장 할 수 있는 최대 해벡터 수로 HM 크기를 결정하는 값이다. HM 각 행은 설계변수 값과 그에 대응하는 목적함수 값으로 구성되며 본격적인 연산이 시작되기 전 무작위로 발생시킨 설계변수 값으로 초기화 한다.

HM을 정의 및 초기화 하고 나면 해 벡터를 개선해 나가는 harmony improvisation 작업을 수행하여야 한다. 개선된 해 벡터를 찾는 작업은 해집합 전역을 탐색하며 목적함수를 최적화

하는 최적해를 찾는 과정이다. 이러한 작업은 음악의 즉흥연주에서 최고의 화음을 찾아가는 과정을 모방하여 이루어진다. 즉, 화음을 개선해 나갈 때 연주자는 기억 속에 좋았던 이전 음을 바로 사용하거나 음역 조정을 하고 이것이 만족스럽지 못할 때 가능한 음역 범위에서 완전히 새로운 음을 선택하게 된다. 이렇게 선택된 화음은 기존의 화음과 비교되어 버려지거나 기존의 화음을 대체하게 된다. 이런 작업은 연주 화음이 만족스러울 때까지 계속하여 반복 된다. 이러한 음악적 최적화 과정을 HS는 기억회상, 피치조정 및 무작위 선택이라는 것으로 모방하고 있으며 이를 위해 HM과 더불어 HMCR (harmony memory considering rate)와 PAR (pitching adjustment rate)라는 두 개의 알고리즘 확률 매개변수를 사용하여 최적화 과정을 수행한다.

2-1 기억회상

기억회상은 새로운 해벡터 생성에 필요한 설계변수 값을 HM 내 기존의 값에서 선택하는 것을 말한다. HS에서 이러한 선택은 확률적으로 하게 되는데 이 확률 값을 나타내는 매개변수가 HMCR 이다. HMCR은 0과 1 또는 그 사이의 값을 사용한다.

기억회상이 선택된 경우 새로운 설계변수 값 x_i^{New} 는 식(4)와 같이 결정된다.

$$x_i^{New} = x_i^j, \quad j = \text{int} (U_i(0,1) \cdot HMS) + 1 \quad (4)$$

$U_i(0,1)$ 는 균일분포를 의미하여 HM내 해벡터의 구성에 따라 다른 분포 함수를 사용하는 것이 바람직 할 수 있다.

2-2 PAR

기억회상으로 새로운 설계변수 값을 HM 내에서 선택하도록 결정된 경우라 하더라도 기존의 값을 그대로 사용하거나 그 값을 피치 조정 즉, 미세 값의 가감을 통해 사용 할 수 있다. 이러한 결정 또한 확률적으로 하게 되는데 이 때 확률값을 나타내는 매개변수가 PAR 이다. PAR 또한 0과 1 또는 그 사이 값을 사용하게 된다. 이와 같이 기존 HM내 값을 기반으로 설계변수 값을 조정하여 결정하는 것을 피치조정이라 한다.

피치조정이 선택된 경우 기억회상으로 결정된 설계변수 값 x_i^{New} 는 식(5)와 같이 피치 조정이 된다.

$$x_i^{New} = x_i^{New} + \Delta \quad \Delta = U_i(-1,1) \cdot BW_i, \quad (5)$$

식(5)에서 $U_i(-1,1)$ 은 -1과 1사이 균일 분포를 나타내고 BW_i 는 임의의 진폭을 의미 한다.

2-3 무작위 선택

무작위 선택은 새로운 설계변수 값 x_i^{New} 를 변수 범위,

$x_i^L \leq X_i \leq x_i^U$ 내에서 무작위로 선택하는 것으로 이는 HM을 초기화 할 때와 같은 방식이다. 이 또한 확률적으로 결정되는데 이 확률은 (1-HMCR)이다.

살펴본 바와 같이 HS에서 최적해를 찾아가는 세부 알고리즘은 기억회상, 피치조정 및 무작위 선택이며 이들의 선택은 확률인자 HMCR과 PAR에 의해 결정된다. 피치조정은 기억회상이 선택된 후 결정된다. 따라서 이들의 확률관계는 다음과 같다.

$$x_i^{New} = \begin{cases} x_i \in HM, & \text{w.p. } HMCR \cdot (1 - PAR) \\ x_i + \Delta \text{ if } x_i \in HM, & \text{w.p. } HMCR \cdot PAR, \\ x_i \in X_i, & \text{w.p. } (1 - HMCR), \end{cases}$$

HS 알고리즘은 기억회상, 무작위 선택 및 피치조정을 정해진 확률적 선택에 따라 반복적으로 수행해 가며 HM을 개선해 가며 이를 기반으로 최적해를 찾는다. 이러한 과정을 흐름선도로 나타내면 다음 그림 1과 같다.

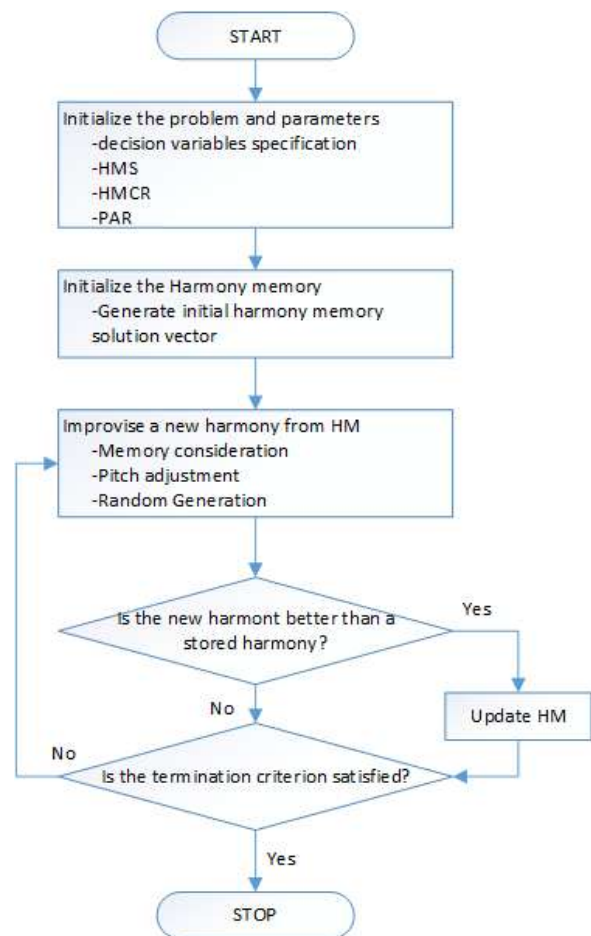


그림 1. HS 알고리즘 순서도
Fig. 1. Flowchart of HS algorithm.

III. 시스템 식별

3-1 선형 모델 식별

대부분의 화학 플랜트와 선형 단조증가 공정의 모델은 대부분 일차 지연시간 (FOPDT) 모델로 근사화 된 식을 사용하고 있다. 이를 수식으로 나타내면 식(6)과 같다.

$$Y(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-Ls} U(s) \quad (6)$$

여기서, K , T , L 은 각각 공정의 DC 이득, 시정수, 그리고 지연시간을 나타낸다. 공정인식은 공정제어에서 매우 중요한 요소이며 이 때 사용되는 입력신호는 모델식별에 매우 중요한 영향을 미친다. 일반적으로 시험 입력신호로 사용되는 것은 펄스, 계단, 램프, 그리고 정현파함수 등이다. 그러나, 이들 가운데 계단입력시험이 가장 단순하며 장비가 거의 필요하지 않고 수동으로 이루어질 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한, 계단입력 시험은 대부분 PLC (programmable logic controller) 혹은 DCS (distribute control system) 내부에 표준 모듈로 구성되어 있기 때문에 쉽게 구현 가능하다. 먼저 면적 식별법과 직접 식별법을 살펴보고 HS 알고리즘을 이용한 식별에 대해 살펴보기로 한다.

3-2 면적 식별법

면적 식별법에서 DC 이득 K 는 공정 입·출력의 정상상태로부터 구할 수 있다. 단위계단응답이 정착되는 시간을 가늠할 수 있는 평균잔류시간 T_{ar} 은 그림 2에서와 같이 면적 A_0 로부터 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{ar} = \frac{A_0}{K} = \frac{\int_0^{\infty} [y^{(\infty)} - y(t)] dt}{K} = L + T \quad (7)$$

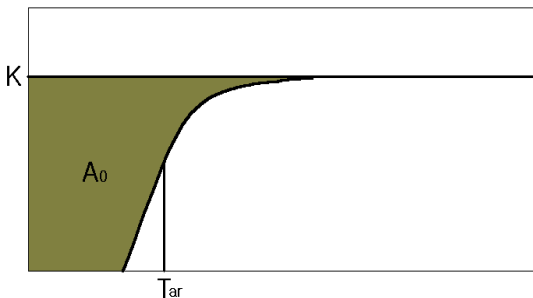


그림 2. 면적 식별법을 위한 계단응답
Fig. 2. Area identification for a step response.

시간 T_{ar} 까지의 계단응답 면적을 A_1 으로 설정하여 시정수와 지연시간을 식(8)과 같이 각각 구할 수 있다.

$$A_1 = \int_0^{T_{ar}} y(t) dt = \int_0^{T_{ar}} K(1 - e^{-t/T}) dt = KTe^{-1} \quad (8)$$

$$T = \frac{eA_1}{K}$$

이 관계식을 식(7)에 대입하면 지연시간은 식(9)와 같이 구할 수 있다.

$$L = T_{ar} - T = \frac{A_0}{K} - \frac{eA_1}{K} \quad (9)$$

이 방법은 식별 정확도가 주로 면적 A_0 와 A_1 에 의해 결정되며, 정확도를 높이기 위해서는 공정의 정상상태가 완전히 이루어질 때까지 충분한 시험 범위를 가지고 시험하여야 한다.

3-3 직접 식별법

직접 식별법은 $t=0$ 에서 크기 h 의 계단입력이 인가되기 전 공정 초기상태는 "0" 이라 가정한다. 또한 새로운 정상상태에 공정이 도달할 때 까지 입력과 출력 값을 저장한다. 식(6)으로 주어진 공정은 $t=L$ 이후 과도응답은 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(t) = hK(1 - e^{-(t-L)/T}) + w(t) \quad (10)$$

여기서, $w(t)$ 는 출력 $y(t)$ 측정 시 백색잡음을 나타낸다. 식(10)은 $t \geq L$ 에 대해 식(11)과 같이 표현할 수 있다.

$$e^{-(t-L)/T} = 1 - \frac{y(t)}{hK} + \frac{w(t)}{hK} \quad (11)$$

한편 $t=0$ 부터 $t=\tau$ ($\tau \geq L$) 까지 식(10)을 적분하면 식(12)를 얻는다.

$$\begin{aligned} \int_0^{\tau} y(t) dt &= hK(t + Te^{-(t-L)/T})|_L^{\tau} + \int_0^{\tau} w(t) dt \\ \int_0^{\tau} y(t) dt &= hK[\tau - L - T\frac{y(\tau)}{hK}] \\ &\quad + [Tw(t)]|_L^{\tau} + \int_0^{\tau} w(t) dt \end{aligned} \quad (12)$$

그리고, $A(\tau)$ 와 $\delta(\tau)$ 를 다음과 같이 설정하고

$$A(\tau) = \int_0^{\tau} y(t) dt$$

$$\delta(\tau) = [Tw(t)]_L^r + \int_0^\tau w(t) dt$$

식(12)을 다시 표현하면,

$$A(\tau) = hK[\tau - L - T\frac{y(\tau)}{hK}] + \delta(\tau)$$

또는

$$[h(\tau) - h - y(\tau)] \begin{bmatrix} K \\ LK \\ T \end{bmatrix} = A(\tau) - \delta(\tau) \tag{13}$$

로 식(13)으로 나타낼 수 있다. $\tau \geq L$ 에 대해 모든 $y(\tau)$ 샘플을 모으면 식(14)와 같은 선형방정식을 얻을 수 있다.

$$\Psi\theta = \Gamma + \Delta \text{ for } \tau \geq L \tag{14}$$

여기서, $\theta = [K \ LK \ T]^T$,

$$\Psi = \begin{bmatrix} hmT_s & -h & -y[mT_s] \\ h(m+1)T_s & -h & -y[(m+1)T_s] \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h(m+n)T_s & -h & -y[(m+n)T_s] \end{bmatrix},$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} A[mT_s] \\ A[(m+1)T_s] \\ \vdots \\ A[(m+n)T_s] \end{bmatrix}, \Delta = \begin{bmatrix} -\delta[mT_s] \\ -\delta[(m+1)T_s] \\ \vdots \\ -\delta[(m+n)T_s] \end{bmatrix}$$

T_s 는 샘플링 간격이며 $mT_s \geq L$ 이다. 식(14)에서 θ 의 추정값 $\hat{\theta}$ 는 최소자승법을 이용하여 식(15)와 같이 얻을 수 있다.

$$\hat{\theta} = (\Psi^T\Psi)^{-1}\Psi^T\Gamma \tag{15}$$

잡음이 없는 경우의 시험환경에서는 위 추정기가 실제 파라미터를 만들어 내지만, 잡음이 많이 존재하는 경우에는 $\delta(t)$ 가 백색잡음이 아니므로 (15)식이 경도(biased)되게 된다. 이를 해결하는 하나의 방법은 도구변수(instrumental variable)최소자승법을 이용하는 것이다.

3-4 HS를 이용한 FOPDT 식별

HS 최적화 알고리즘은 다음과 같은 절차로 문제를 해결한다.

- S1. 최적화목적함수, 설계변수 및 알고리즘 매개변수를 설정 한다.
- S2. HM를 초기화 한다.
- S3. HM으로부터 새로운 하모니를 조성한다.
- S4. HM을 최신화 한다,

S5. 조건이 만족 될 때까지 S3과 S4를 반복한다.

HS 알고리즘으로부터 공정을 식별하기 위해서는 목적함수와 설계변수를 설정하여야 한다. 식(6)과 같은 형태를 갖는 FOPDT의 공정 식별은 DC 이득 K , 시정수 T 와 지연시간 L 세 개의 매개변수를 포함하고 있으며 이들이 최적화 과정을 통해 결정되어야 할 설계변수이다. 이 설계변수들이 만족해야 할 목적함수를 식(16)과 같이 설정하도록 한다.

$$\min \epsilon(K, T, L) = \frac{1}{n+1} \sum_{k=m}^{m+n} [y(kT_s) - \hat{y}(kT_s)]^2 \tag{16}$$

설계변수의 값 범위를 설정하기 위해 단위 계단응답과 매개변수와의 관계를 살펴보기로 하자.

단위 계단입력에 대해 식(6)의 출력은 식(17)과 같다.

$$y(t) = K(1 - e^{-(t-L)/T}) \tag{17}$$

이론적으로 K 는 식(17)로부터 식(18)과 같이 표현 된다.

$$K = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = y_{ss} \tag{18}$$

실험을 통해 식(18)을 만족 시킬 수는 없으므로 계단응답을 통해 K 를 결정 할 때는 정상상태 이후 출력의 최종 값, Y_f 로 대체하고 설계변수 K 의 범위는 식(19)와 같이 정하기로 한다.

$$0.8Y_f \leq K \leq 1.2Y_f \tag{19}$$

한편 출력 $y(t)$ 가 크기 $aK(0 < a < 1)$ 에 도달 할 때 까지 걸리는 시간은 식(20)과 같다.

$$t_a = L + T \cdot \ln \frac{1}{1-a} > L \tag{20}$$

식(20)으로부터 시정수 T 는 식(21)과 같이 표현할 수 있다.

$$T = (L - t_a) / \ln(1-a) < -t_a / \ln(1-a) \tag{21}$$

식(20) 및 식(21)을 이용하여 두 설계변수 L 과 T 의 변화 범위를 식(22-1)과 식(22-2)와 같이 설정할 수가 있다.

$$0 \leq L < t_a \tag{22-1}$$

$$0 < T < -t_a / \ln(1-a) \tag{22-2}$$

알고리즘 매개변수 중 HMS는 일반적으로 크게 할수록 식별 성능이 좋으나 너무 크게 하면 식별 시간이 길어질 수 있다.

표 1. 설계변수 범위

Table 1. Range of design variables.

$G(s)$	K	L	T
$\frac{e^{-s}}{s+1}$	$0.8 \leq K \leq 1.2$	$0 < L \leq 1.7$	$0 < T \leq 2.5$
$\frac{e^{-4s}}{(10s+1)(2s+1)}$	$0.8 \leq Y_f \leq 1.2$	$0 < L \leq 13.2$	$0 < T \leq 19.0$
$\frac{1-s}{(s+1)^5}$	$0.8 \leq Y_f \leq 1.2$	$0 < L \leq 5.6$	$0 < T \leq 8.0$
$\frac{1}{(s+1)^8}$	$0.8 \leq Y_f \leq 1.2$	$0 < L \leq 7.7$	$0 < T \leq 11.1$

HMCR은 하모니를 개선할 때 HM을 반영할 확률로 일반적으로 1에 가까운 값으로 설정하나 1은 사용하지 않는다. PAR은 HM에 저장된 값을 그대로 사용하지 않고 인접 값을 선택할 확률과 관계된 것으로 통상 0.5 내외로 설정한다. 본 연구에서 사용한 구체적인 알고리즘 매개변수 값들은 수치 예에서 살펴보기로 한다.

IV. 수치 예

수치 예는 4개의 서로 다른 공정에 대해 수행하였다[12]. HS 알고리즘 파라미터에 사용한 값은 통상적인 원칙을 적용하여 HMS=10, HMCR=0.85, PAR=0.5 으로 결정하였다. 이에 따라 하모니 개선 방법 세 가지에 대한 확률은 다음과 같다.

Memory Consi. Probability : $HMCR \cdot (1 - PAR) = 0.425$
 Pitch Adj. Probability : $HMCR \cdot PAR = 0.425$
 Random Sel. Probability : $1 - HMCR = 0.15$

표 2. 식별 성능 비교

Table 2. Comparison of the performance of identification.

Plant, $G(s)$	Proposed method		Direct method		Area method	
	$\hat{G}(s)$	ϵ	$\hat{G}(s)$	ϵ	$\hat{G}(s)$	ϵ
$\frac{e^{-s}}{s+1}$	$\frac{1}{0.99s+1} e^{-s}$	2.44×10^{-10}	$\frac{1.00}{0.99s+1} e^{-s}$	7.5×10^{-7}	$\frac{1}{0.99s+1} e^{-1.01s}$	1.8×10^{-6}
$\frac{e^{-4s}}{(10s+1)(2s+1)}$	$\frac{1.00}{10.58s+1} e^{-5.63s}$	4.49×10^{-5}	$\frac{1.03}{11.41s+1} e^{-5.47s}$	2.16×10^{-4}	$\frac{1}{10.19s+1} e^{-5.83s}$	6.08×10^{-5}
$\frac{1-s}{(s+1)^5}$	$\frac{1.03}{2.82s+1} e^{-3.53s}$	5.64×10^{-4}	$\frac{1.01}{2.45s+1} e^{-3.73s}$	7.25×10^{-4}	$\frac{1}{2.11s+1} e^{-4.00s}$	1.4×10^{-3}
$\frac{1}{(s+1)^8}$	$\frac{1.02}{3.58s+1} e^{-4.89s}$	7.83×10^{-4}	$\frac{1.06}{3.81s+1} e^{-4.94s}$	1.6×10^{-3}	$\frac{1}{4.3s+1} e^{-4.3s}$	7.4×10^{-3}

모든 예에서 공정의 계단입력 시험은 $y(t) \geq 0.999$ 의 조건을 만족하도록 하였으며 설계변수 지연시간, L 과 시정수, T 와 관련하여 $a=0.5$ 를 택하였다. 예시로써 사용한 4개의 공정에 이와 같은 조건을 적용한 경우 설계변수의 범위는 표 1과 같다.

표 1과 같은 조건을 사용하여 수치 예를 수행하여 그 결과를 직접 식별법 및 면적 식별법과 비교하였다.

표 2는 그 결과로 오차, ϵ 는 (16)식을 사용하여 계산하였다. 표에서 보듯이 제안된 알고리즘이 오차가 제일 적음을 보여주고 있다. 이는 공정의 FOPDT 식별에 있어 HS의 우수성을 보여주는 것이다[12].

V. 결론

공정 식별은 공정제어에 있어 매우 중요한 요소이며 이를 위해 여러 가지 신호가 이용 된다. 그 중 계단신호를 이용하는 것이 가장 간단한 방법으로 알려져 있다. 계단신호를 이용한 여러 가지 공정 식별법이 이용되고 있지만 그 중 가장 대표적인 것이 많은 화학 공정과 HVAC 공정에 적합한 FOPDT로 모델화 하는 것이다.

본 논문에서는 비교적 최근 개발된 meta-heuristic 최적화 기법인 HS 알고리즘을 이용하여 여러 가지 공정을 FOPDT로 모델화 하고자 하였다. HS 알고리즘은 음악인들이 즉흥연주에서 가장 좋은 화음을 찾아가는 방식을 흉내낸 최적화 기법이다.

HS 알고리즘을 적용한 결과 기존의 방법보다 더 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 사실은 기존의 식별법의 결과와 비교하여 제시하였다.

참고 문헌

[1] H. Kurz and W. Goedecke, "Digital parameter-adaptive control of process with unknown dead time," *Automatica*,

- Vol. 17, No. 5, pp. 245-252, Jan. 1981.
- [2] S. Sagara, and Z. Y. Zhao, "Numerical integration approach to on-line identification of continuous-time systems," *Automatica*, Vol. 26. No. 1, pp. 63-74, Jan. 1990.
- [3] P. E. Wellstead, "Non-parametric methods of system identification," *Automatica*, Vol. 17, No. 1, pp.55-69, Jan. 1981.
- [4] L. Ljung, "On the estimation of transfer functions," *Automatica*, Vol. 21, No. 6, pp 677-696. Nov. 1985.
- [5] M. Yuwana and D.E. Seborg, "A new method for on-line controller tuning", *American Institute of Chemical Engineers Journal*, Vol. 28, No. 3, pp 434-440, May 1982.
- [6] A. Jutan and E.S. Rodriguez II, "Extension of a new method for on-line controller tuning," *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 62, pp. 802-807, Dec. 1984.
- [7] K.J. Astrom, and T. Hagglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, 2nd ed. Triangle Park, NC: Instrument Society of America, 1995.
- [8] Q. Bi, Q. G. Wang and C. C. Hang, "Relay-based estimation of multiple points on process frequency response," *Automatica*, Vol. 33, No. 9, pp 1753-1757, Sep. 1997.
- [9] F. G. Shinskey, *Process Control Systems, Application, Design, and Tuning*, 3rd ed., New York, NY: McGraw-Hill, 1988.
- [10] T. E. Marlin, *Process Control. Designing processes and Control System for Dynamic Performance*, New York, NY: McGraw-Hill, 1995.
- [11] R. Mamat, and P. J. Fleming, "Method for on-line identification of a first order plus dead-time process model," *Electronics Letters*, Vol. 31, No. 15, pp. 1297-1298, Jul. 1995.
- [12] Gang-Wook Shin, Young-Joo Song, Tae-Bong Lee and Hong-Kyoo Choi, "Genetic algorithm for identification of time delay systems from step response," *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 5, pp. 79-85, Feb. 2007.
- [13] Z. W. Geem, J.-H. Kim, G. V. Loganathan, "A new heuristic optimization algorithm: harmony search," *Simulation*, Vol. 76, No. 2, pp. 60-68, 2001
- [14] K. S. Lee and Z. W. Geem, "A new meta-heuristic algorithm for continues engineering optimization: harmony search theory and practice," *Computer Methods in Applied Mechanics Engineering*, Vol. 194 , No. 36-38, pp. 3902-3933, Sep. 2005.
- [15] Z. W. Geem, "Effects of initial memory and identical harmony in global optimization using harmony search algorithm," *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 218 , No. 22, pp. 11337-11343, Jul. 2012.
- [16] Z. W. Geem, *Recent Advances in Harmony Search Algorithm* , Warsaw: Poland, Springer-Verlag, 2010



이 태 봉 (Tae-Bong Lee)

1986년 2월 : 홍익대학교 전자공학과 (공학사)
1989년 2월 : 홍익대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
1994년 2월 : 홍익대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
1995년 3월 ~ 현재 : 가천대학교 전자공학과 교수
※ 관심분야: 강인제어, GMDH, USN, HS