

# HS 최적화 알고리즘을 이용한 계단응답과 연속시스템 인식

## Identification of Continuous System from Step Response using HS Optimization Algorithm

이 태 봉\* · 손 진 근†  
(Tae-bong Lee · Jin-geun Shon)

**Abstract** - The first-order plus dead time(FOPDT) and second-order plus dead time(SOPDT), which describes a linear monotonic process quite well in most chemical and industrial processes and is often sufficient for PID and IMC controller tuning. This paper presents an application of heuristic harmony search(HS) optimization algorithm to the identification of linear continuous time-delay systems from step response. 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 proposed identification method has been demonstrated through a number of simulation examples.

**Key Words** : FOPDT, SOPDT, Harmony search(HS), Heuristic, Optimization, Step response, Stochastic random search

### 1. 서 론

제어에서 시스템 식별은 매우 활발히 연구가 진행되어온 분야로써 그동안 식별 방법에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다[1-3]. 모델을 기반으로 하는 제어는 여러 산업 및 화학 공정에 있어 보다 나은 성능을 얻기 위한 좋은 방법으로 알려져 있으며 이에 따라 제어 중심의 모델 인식에 대한 연구가 최근 증가하고 있다.

시스템 인식은 크게 매개변수 형과 비 매개변수 형으로 구분되며 전달함수는 가장 전형적인 매개변수 형 모델이 되었다[4]. 그러나 그동안 대부분 전달함수의 모델 인식 연구는 지연요소를 고려하지 않거나 혹은 기 알고 있다고 전제하였다[5]. 산업 공정에 있어 핵심적 요소 중 하나는 시지연이며 이는 공정제어와 매우 긴밀한 관계가 있다. 이에 따라 지연 공정에 대한 시스템 인식은 지속적인 관심의 대상이다. 기존 연구에서 흔히 사용하는 지연요소를 다항식으로 근사화하는 기법은 추정해야하는 매개변수의 수가 늘어나며 시지연이 큰 경우 근사 화에 따른 오차가 크게 되는 문제점을 갖고 있다.

공정인식에 매우 중요한 역할을 하는 시험신호는 인식 결과에 매우 큰 영향을 주며 계단입력, 펄스입력, 정현파 및 pseudo-random binary sequence 등이 사용되거나[6, 7] 릴레이 피드백(relay feedback) 시험을 통해 이루어진다[8, 9]. 선택은 장비 유무를 비롯한 여러 가지 요소와 관련되며 그 중 가장 쉽고 간단하게 할 수 있는 것이 계단신호를 이용하

는 것이다[8, 10, 11].

인식에 사용되는 모델은 공정제어 분야에서 흔히 사용되는 PID나 IMC(internal model control)와 같은 보편적 제어 기 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[8]는 계단응답을 이용하여 공정을 FOPDT 모델로 인식하는 그래픽 기법을 제안하였다. 이러한 방식은 SOPDT 모델 인식에 적용하는데 한계가 있으며 이러한 한계를 극복하고자 Wang 등[2]은 연속 시스템을 대상으로 일반적이고 강인한 계단인식 방법을 제안하였다. 한편 Shin[12] 등은 HS와 같은 meta-heuristic 일종인 유전알고리즘을 사용한 최적화 기법으로 공정을 FOPDT와 SOPDT로 인식 할 수 있음을 보이고 그 성능의 우수성을 입증하였다. Lee[13]는 HS 알고리즘을 사용하여 같은 시스템을 FOPDT로 인식하여 그 성능이 보다 우수함을 보였다.

본 논문에서는 기존 연구를 바탕으로 HS 알고리즘을 사용하여 좀 더 복잡한 시스템을 대상으로 FOPDT 및 SOPDT로 인식하고자 한다.

HS는 음악의 즉흥연주(improvisation)에서 음악가들이 최고의 하모니를 찾아가는 과정에 영감을 받아 개발된 최적화 기법이다[14-17]. 즉흥연주에서 음악가들은 처음에 임의적인 화음에서 출발하여 서로가 낼 수 있는 음역을 사용하여 점점 더 좋은 화음을 만들어 낸다. HS는 이러한 과정을 무작위선택(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.

이러한 HS 알고리즘을 적용한 결과 기존의 방법으로 적

\* Dept. of Electrical Engineering Gachon University, Korea

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering Gachon University, Korea

E-mail : shon@gachon.ac.kr

접수일자 : 2016년 11월 3일

수정일자 : 2016년 11월 20일

최종완료 : 2016년 11월 22일

용이 안되는 공정에도 적용이 가능함을 보였으며 FOPDT 모델의 경우 더 좋은 결과를 얻을 수 있었다. SOPDT 모델 인식의 경우 직접 식별법에 비해 다소 오차가 크지만 이는 HS 알고리즘의 성능 개선을 통해 해결 할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. HS 알고리즘

최적화 문제를 해결하는데 있어 기존의 고전적 수치 알고리즘이 갖는 복잡함과 초기 값에 대한 민감성 등과 같은 단점을 극복하고자 1970년대 이 후 자연현상을 모방한 많은 meta-heuristic algorithm이 고안되었다. 그 중 유전 알고리즘(Genetic algorithm)은 생물의 유전적 진화 과정을 모방한 것이고, 안정된 결정 상태의 고체를 얻는 어닐링 과정을 모사한 시뮬레이티드 어닐링(Simulated anneling), 기존의 메타휴리스틱 방법을 종합적으로 구성한 터부탐색(Tabu search) 등이 대표적이라 할 수 있다. HS는 2001년 Geem 등이 제안한 메타 휴리스틱 알고리즘으로 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.

이와 같은 두 과정의 유사성은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다[15].

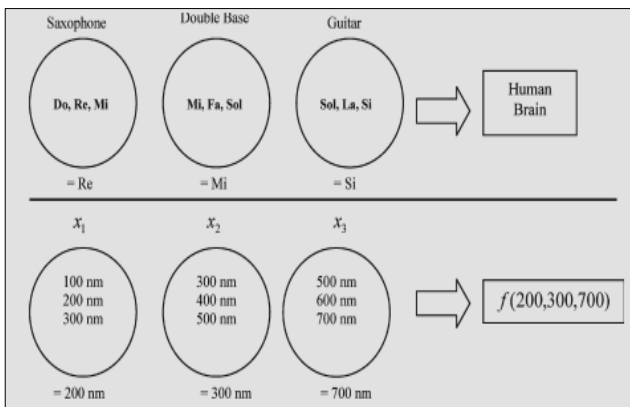


그림 1 즉흥연주와 공학적 최적화의 유사성  
Fig. 1 Analogy between music improvisation and engineering optimization

그림에서 각 연주자는 공학적인 최적화 연산에서 결정변수  $x_1, x_2, x_3$ 로 볼 수 있다. 각 악기의 음역은 각 변수가 가질 수 있는 변수의 범위라 할 수 있다. 또 즉흥연주에서 각 연주자가 악기의 음역에서 임의의 소리를 내어 구성된 화음은 최적화 연산에서 각 변수들에 변수의 값이 대입되어

하나의 해벡터를 구성하는 것으로 대응 할 수 있다. 이러한 음학적 과정에서 좋다고 판단되는 화음은 기억되고 그렇지 않은 것은 버려진다. 이러한 것이 반복되면서 화음의 질이 더 높아진다 할 수 있다.

이와 유사하게 공학적 최적화 문제에서는 각 결정변수의 범위에서 임의의 값을 선택하여 해벡터를 구성한다. 이렇게 구성된 결정변수 값이 목적함수에 대입되어 좋은 해인 경우 해벡터는 각 변수의 메모리에 저장된다. 이러한 과정을 반복하면 더 좋은 해를 얻게 될 가능성이 커지게 된다.

연주자가 하나의 음을 즉흥적으로 낼 때는 1)연주자의 기억에 있는 음을 내거나 2)기억 속 음을 기준으로 그에 이웃한 음을 연주하거나 3)기억에 의존하지 않고 악기의 음역에서 임의로 선택하여 연주를 한다. HS 알고리즘은 이와 유사한 방식으로 다음 세 가지 방식 중 하나에 따라 결정변수 값을 선택한다.

1) 기억회상(Harmony Memory Consideration)이라 정의된 방식으로 하모니 메모리(HM-Harmony Memory)에서 값을 선택하거나 2) 피치 조정(Pitch Adjustment)라 정의된 방식이므로 HM내 한 값을 기반으로 이에 가까운 값을 선택하거나 3)무 작위 선택(Random Selection)이라 정의된 방식으로 주어진 변수의 범위내에서 임의의 값을 선택하는 것이다.

지금까지 서술한 알고리즘 개념을 구체적으로 종합하면 HS 알고리즘은 다음과 같은 5단계로 표현할 수 있다.

**Step 1.** 최적화 문제와 알고리즘 파라미터를 초기화 한다. 첫 단계에서 기술해야 하는 최적화 문제는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

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

식에서  $f(x)$ 는 목적함수이고  $x_i$ 는 연속 설계변수 이며  $X_i$ 는 각 설계변수 범위를 나타내는 집합으로 다음과 같이 정의 되며  $n$ 은 결정변수의 개수이다.

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad (i = 1, \dots, n) \quad (2)$$

(1)과 (2)식으로 주어진 최적화 문제를 풀기 위해 이 단계에서 HS 알고리즘 매개변수를 설정한다. 초기화 될 HS 알고리즘 매개변수는 기억해야 할 해 벡터 갯 수를 나타내는 위한 하모니 메모리 크기(Harmony Memory Size - HMS), HMCR(Harmony Memory Considering Rate), PAR(Pitch Adjustment rate) 및 종료 기준 또는 반복횟수이다. HMCR과 PAR은 해벡터 개선에 사용되는 매개변수이다.

**Step 2.** HM(Harmony Memory)를 초기화 한다. 이 단계에서는 HMS의 크기를 갖는 HM를 각 결정변수의 범위 내에서 균일 분포 무작위 수를 발생시켜 구성된 해벡터를 저장한다. 즉,  $j$ 번째 해벡터의  $i$ 번째 요소는 다음과 같이 발생되어 저장된다.

$$x_i^j = x_i^L + rand(0,1) \cdot (x_i^U - x_i^L), i = 1, \dots, n \quad \text{and} \quad j = 1, 2, \dots, HMS \quad (3)$$

이렇게 초기화된 HM은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$HM = \begin{bmatrix} x^1 \\ \vdots \\ x^{HMS} \end{bmatrix} \quad (4)$$

**Step 3.** 새로운 하모니를 생성한다. 이 단계에서는 기억 회상(Memory Consideration), 피치조정(Pitch Adjustment) 및 무작위 선택(Random Selection) 세 가지 중 하나의 규칙에 따라 새로운 하모니 벡터,  $x^N = \{x_1^N, x_2^N, \dots, x_n^N\}$  를 생성한다. 기억회상은 새로운 하모니 벡터의 원소,  $x_i^N$ 를 생성할 때 기존 HM 내 값,  $\{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{HMS}\}$  중 하나를 선택하는 방식이며 이러한 방식을 선택할 확률을 나타내는 것이 0과 1 사이 값을 갖는 HMCR 이다. 따라서  $(1-HMCR)$ 은 새로운 하모니의 원소가 HM 내 기존 값과 달리 정의된 변수 범위 내 임의의 값으로 선택 될 확률을 나타낸다. 즉, 새로운 임의의 원소 생성은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$x_i^N = \begin{cases} x_i \in \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{HMS}\}, & \text{w.p. } HMCR \\ x_i \in X_i, & \text{w.p. } (1-HMCR), \end{cases} \quad (5)$$

기억회상이 선택 된 경우 HM 내 값을 그대로 사용 할 것인지 피치 조정을 할 것인지를 다시 한 번 결정하게 되는데 이 때 사용되는 매개 변수가 PAR 이며 다음과 같이 결정된다.

$$x_i^N = \begin{cases} x_i^N \pm rand(0,1) \cdot \Delta, & \text{W.P. PAR} \\ x_i^N, & \text{W.P. (1-PAR)} \end{cases} \quad (6)$$

식에서  $\Delta$ 는 임의의 크기의 대역폭이다.

**Step 4.** HM을 최신했다. 새로 생성된 하모니 벡터가 HM 내 가장 나쁜 하모니 보다 더 나은 목적함수 값을 가질 때 새로운 하모니 벡터는 해당 하모니를 대체 한다.

**Step 5.** 중단 요건을 검사 한다. 이 단계에서는 미리 설

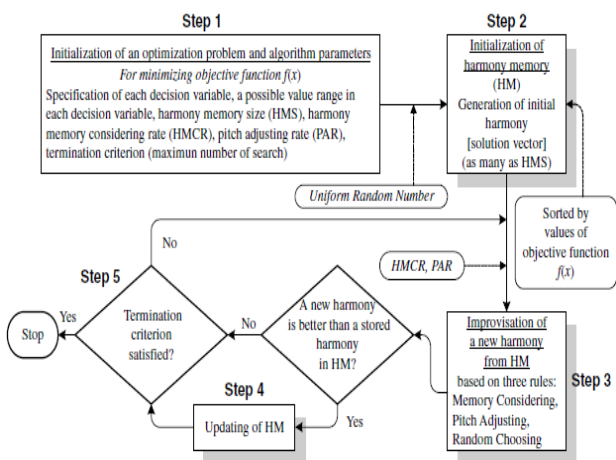


그림 2 HS 알고리즘의 최적화 과정  
Fig. 2 Optimization procedure of the harmony search algorithm

정된 종료 기준이 만족하는지를 검사하여 안 된 경우 단계 3과 4를 반복하고 아니면 알고리즘을 종료한다. 지금까지 과정을 그림 2에 나타내었다[15].

### 3. 시스템 식별

#### 3.1 FOPDT 및 SOPDT 모델

지난 수십 년간 계단입력을 이용한 시스템 인식(이하 계단인식)과 관련된 연구에서는 모델에 기반한 제어에 대한 실질적 수요로 인해 시지연을 갖는 저차 모델에 대해 이루어져 왔다. 이러한 모델 인식에 있어 가장 기본적인 관심은 저주파수 범위에서 정확성을 맞추는 것이다. 가장 흔히 사용되는 모델이 1차시지연(FOPDT)와 2차시지연(SOPDT) 모델이다. 일반적으로 FOPDT 모델은 다음과 같은 형태로 표시된다.

$$Y(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-Ls} U(s) \quad (7)$$

SOPDT 모델은 다양한 형태가 있으나 본 연구에서는 많은 공정 모델에 적합한 다음과 같은 형태에 대해 다루기로 한다.

$$Y(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} e^{-Ls} U(s) \quad (8)$$

(7)과 (8) 식에서  $K$ 는 시스템 이득,  $T$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ 는 시정수  $L$ 은 시지연 요소이다.

#### 3.2 HS를 이용한 식별

HS 알고리즘을 이용하여 공정을 식별하기 위해서는 목적 함수와 설계변수를 설정하여야 한다. 본 연구에서 최적화에 사용되는 목적함수는 다음과 같다.

$$\min \epsilon = \min \frac{1}{n+1} \sum_{k=m}^{m+n} [y(kT_s) - \hat{y}(kT_s)]^2 \quad (9)$$

식에서  $y(kT_s)$ 는 식별하고자 하는 공정의 출력이고  $\hat{y}(kT_s)$ 는 식별모델의 출력이다.

단위 계단 입력에 대한 1차 및 2차 시스템의 출력은 다음과 같다.

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

$$y(t) = K \left\{ 1 - \frac{T_1}{(T_1 - T_2)} e^{-(t-L)/T_1} + \frac{T_2}{(T_1 - T_2)} e^{-(t-L)/T_2} \right\} \quad (10)$$

정확한 인식을 위해서 입력은 출력이 정상상태에 이를 때까지 인가되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 오차범위  $\pm 2\%$ 에 대한 정착시간,  $t_s$ 의 1.5배를 모사 시간,  $t_{final}$ 로 설정하였다.

한편 단위계단 입력에 대한 시스템 직류 이득  $K$ 는 각각

표 1 식별 성능 비교

Table 1 Comparison of the Performance of Identification

Plant, $G(s)$	Identification method	$\hat{G}(s)$	$\epsilon$
$\frac{1.08}{(s+1)^2(2s+1)}e^{-10s}$	Proposed method n=1	$\frac{0.3742}{(s+0.341)}e^{-11.3s}$	$2.77 \times 10^{-4}$
	Proposed method n=2	$\frac{0.3981}{s^2+1.282s+0.3665}e^{-10.6s}$	$2.99 \times 10^{-5}$
	Direct method n=1	$\frac{0.2449}{(s+0.2268)}e^{-13.8146s}$	$2.9 \times 10^{-2}$
	Direct method n=2	$\frac{0.1055}{s^2+0.5543s+0.0981}e^{-12.2713s}$	$5.0116 \times 10^{-5}$
$\frac{-4s+1}{9s^2+2.4s+1}e^{-s}$	Proposed method n=1	$\frac{0.9018}{(s+0.8517)}e^{-6.72s}$	$2.95 \times 10^{-2}$
	Proposed method n=2	$\frac{1.551}{s^2+2.42s+1.464}e^{-6.23s}$	$2.28 \times 10^{-2}$
	Direct method n=1	not applicable	
	Direct method n=2	$\frac{0.4444s+0.1111}{s^2+2.667s+0.1111}e^{-s}$	$1.7318 \times 10^{-8}$
$\frac{2.15(-2.7s+1)(158.5s^2+6s+1)-4s+1}{(17.5s+1)^4(20s+1)}e^{-14s}$	Proposed method n=1	$\frac{0.03465}{(s+0.01502)}e^{-49s}$	$4.3 \times 10^{-3}$
	Proposed method n=2	$\frac{0.001825}{s^2+0.05924s+0.0008239}e^{-35s}$	$1.3 \times 10^{-3}$
	Direct method n=1	$\frac{0.0396}{(s+0.0184)}e^{-49.9839s}$	$8.6 \times 10^{-3}$
	Direct method n=2	$\frac{0.0011}{s^2+0.0343s+0.0005}e^{-28.8861s}$	$4.0631 \times 10^{-4}$

다음과 같다.

$$Y(s) = \frac{K}{(T_1s+1)(\alpha T_2s+1)}e^{-Ls} U(s), \quad (14)$$

$$K = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} K\{1 - e^{-(t-L)/T}\}$$

$$K = \lim_{t \rightarrow \infty} K\left\{1 - \frac{T_1}{(T_1 - T_2)}e^{-(t-L)/T_1} + \frac{T_2}{(T_1 - T_2)}e^{-(t-L)/T_2}\right\} \quad (11)$$

따라서 이득  $K$ 를 실험적으로 구 할 수 없으므로 두 시스템에 대해  $K$ 의 범위를 다음과 같이 설정하였다.

$$0.8 \times Y_{final} \leq K \leq 1.2 \times Y_{final} \quad (12)$$

(12) 식에서  $Y_{final} = y(t_{final})$  이다. 시스템의 지연시간은 출력이 최종치의 50%, 시정수는 최종치의 63%에 도달하는데 걸리는 시간으로 정의 된다. 이러한 사실을 감안하여 (7)과 같이 주어진 FOPDT 모델에서 나머지 설계변수  $\{T, L\}$ 의 범위는 다음과 같이 설정하기로 한다.

$$\begin{aligned} 0 \leq T \leq t_{90} \\ 0 \leq L \leq t_{50} \end{aligned} \quad (13)$$

위 수식에서  $t_{90}, t_{50}$ 은 각각 출력이 최종치의 90% 및 50%로 도달하는데 걸리는 시간이다. SOPDT 모델의 설계변수는  $\{K, T_1, T_2, L\}$  이다. 이들 변수의 범위 설정을 위해 (8)식의 시스템을 다음과 같이 나타내기로 하자.

그러면 시스템 극점은  $-1/T_1 \equiv -1/T$  과  $-T_2 \equiv -1/\alpha T$  가 된다. 제어에서 두 극점의 상대적 거리가 최소 5배 이상이 되면 우세극의 좌측에 있는 극은 무시 가능하다 따라서 이 조건이 성립하는 경우 2차 모델은 큰 의미가 없다 할 수 있다.  $\alpha > 1$  이면 우세극은  $-1/\alpha T$ 이며 이 때  $\alpha \geq 5$  이면 나머지 극점은 무시 가능하다.  $\alpha < 1$  이면 우세극은  $-1/T$  이며 이 때  $\alpha \leq 0.2$  이면 나머지 극점은 무시 가능하다. 이를 기반으로 SOPDT 모델의 매개변수 범위는 다음과 같이 설정하기로 한다.

$$\begin{aligned} 0.8 \times Y_{final} \leq K \leq 1.2 \times Y_{final} \\ 0 \leq T = T_1 \leq t_{90} \\ 1/8 \leq \alpha \leq 8, T_2 = \alpha T \\ 0 \leq L \leq t_{50} \end{aligned} \quad (15)$$

4. 수치 예

수치 예는 3개의 서로 다른 공정에 대해 수행하였다[2]. 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

$$\begin{aligned} \text{Memory Consi. Probability: } & HMCR \cdot (1 - PAR) = 0.425 \\ \text{Pitch Adj. Probability} & : HMCR \cdot PAR = 0.425 \\ \text{Random Sel. Probability} & : 1 - HMCR = 0.15 \end{aligned}$$

모든 예에서 정정시간,  $t_s$ 의 기준은 오차 2%를 기준으로 설정하였으며 최종치  $Y_{final}$ 은  $t=1.5t_s$ 에서 값으로 하였다.

표 1은 그 결과로 오차,  $\epsilon$ 는 (9)식을 사용하여 계산하였다. 표에서 보듯이 제안된 알고리즘이 주어진 공정에 대해 FOPDT와 SOPDT 모델 인식에 적용 가능하며 FOPDT의 경우 가장 우수함을 알 수 있다. SOPDT 모델 인식의 경우 직법 식별법에 비해 오차가 다소 크지만 실질적인 응용이 가능하다 할 수 있다.

### 5. 결 론

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 FOPDT 또는 SOPDT로 모델화 하는 것이다.

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

HS 알고리즘을 적용한 결과 기존의 방법으로 적용이 안 되는 공정에도 적용이 가능함을 보였으며 FOPDT 모델의 경우 더 좋은 결과를 얻을 수 있었다. SOPDT 모델 인식의 경우 직접 식별법에 비해 다소 오차가 크지만 이는 HS 알고리즘의 성능 개선을 통해 해결 할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 논문에서는 비 수학적 기법인 HS 최적화 알고리즘이 복잡한 공정의 모델 인식에 사용할 수 있음을 확인하여 그 효용성을 확인하였다. 이를 기반으로 전통적인 수학적 기법으로 해결하기 어려운 전력용 변압기의 자산관리(Asset Management)를 위한 경제적 수명평가 기법에 대하여 유지보수비용 및 공급장비용 등의 추정기법에 본 알고리즘을 적용할 계획이다.

### 감사의 글

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2015년 선정 기초연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것임. (과제번호 : R15XA03-38)

### References

[1] Q. Bi, W. J. Cai, E. L. Lee, Q. G. Wang, C. C. Hang and Y. Zhang, "Robust identification of first-order plus dead-time model from step response," Control Engineering pratice, Vol. 7, pp. 71-77, 1999.  
 [2] Q. G. Wang and Y. Zhang, "Robust identification of continuous system with dead-time from step response," Automatica, Vol. 37, pp. 377-390, 2001.  
 [3] L. Chen, J. Li and R. Ding, "Identification for the second order systems based on the step response," Mathematical and Computer Modeling, Vol. 53, pp.

1074-1083, 2011  
 [4] P. E. Wellstead, "Non-parametric methods of system identification," Automatica, Vol. 17, No. 1, pp.55-69, Jan. 1981.  
 [5] L. Ljung, "On the estimation of transfer functions," Automatica, Vol. 21, No. 6, pp 677-696. Nov. 1985.  
 [6] 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.  
 [7] 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.  
 [8] K.J. Astrom, and T. Hagglund, PID Controllers: Theory, Design, and Tuning, 2nd ed. Triangle Park, NC: Instrument Society of America, 1995.  
 [9] 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.  
 [10] F. G. Shinskey, Process Control Systems, Application, Design, and Tuning, 3rd ed., New York, NY: McGraw-Hill, 1988.  
 [11] T. E. Marlin, Process Control. Designing processes and Control System for Dynamic Performance, New York, NY: McGraw-Hill, 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] T. B. Lee, "Identification of First-order Plus Dead Time Model from Step Response Using HS Algorithm," J. of Advanced Navigation Technology, Vol. 19, 636-642, 2015  
 [14] 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  
 [15] 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.  
 [16] 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.  
 [17] Zong Woo Geem, "Recent Advances in Harmony Search Algorithm", Warsaw Poland Springer-Verlag, 2010

---

저 자 소 개



**이 태 봉 (李 泰 奉)**

1986년 홍익대학교 전자공학과 졸업.  
1989년 동 대학원 전자공학과 (석사/박사)  
1995년 ~현재 : 가천대학교 전자공학과  
교수  
E-mail : tblee@gachon.ac.kr



**손 진 근 (孫 珍 勳)**

1990년 숭실대학교 전기공학과 졸업.  
1992/1997년 동 대학원 전기공학과 졸업  
(석사/박사). 1997~현재, 가천대학교 전  
기공학과 교수  
E-mail : shon@gachon.ac.kr