

# 이중 탱크 시스템의 정밀 수위 제어를 위한 RVEGA SMC에 관한 연구

(RVEGA SMC for Precise Level Control of Coupled Tank System)

김태우\* · 이준탁\*\*

(Tae-Woo Kim · Joon-Tark Lee)

## 요 약

슬라이딩 모드 제어기(SMC)는 파라미터의 변동과 급격한 외란을 가진 이중 탱크 시스템과 같은 비선형 제어 시스템에 대해 견실성을 갖는 가변구조로써 널리 알려져 있다. 그러나, 이러한 파라미터에 대한 적응 동조 알고리즘은 만족하지 못한다.

그러므로, 본 논문에서는 이중 탱크 시스템의 정밀한 수위제어를 하기 위해 슬라이딩 모드에 기반을 둔 실변수 유전 알고리즘(RVEGA SMC)을 시도하였다. SMC의 스위칭 파라미터는 RVEGA에 의해 쉽고, 빠르게 최적화 되었다. 시뮬레이션 결과에서는 제안된 RVEGA SMC에 의해 탱크의 수위가 오버슈트나 정상상태 오차 없이 만족한 제어결과를 보여준다.

## Abstract

The sliding mode controller(SMC) is known as having the robust variable structures for the nonlinear control systems such as coupled tank system with the parametric perturbations and with the rapid disturbances. But the adaptive tuning algorithms for their parameters are not satisfactory.

Therefore, in this paper, a Real Variable Elitist Genetic Algorithm based Sliding Mode Controller (RVEGA SMC) for the precise control of the coupled tank level was tried. The SMC's switching parameters were optimized easily and rapidly by RVEGA. The simulation results showed that the tank level could be satisfactorily controlled without any overshoot and any steady-state error by the proposed RVEGA SMC.

## 1. 서 론

고차의 큰 시간 지연을 갖는 이중 탱크 시스템은 불안정하고 비선형이 강한 시스템으로 이들의 안정화 제어문제는 많은 제어 공학자들에 의해 오래 전

부터 연구되어 온 과제이다[1-4]. 일반적으로, 동작점 근방에서 피이드백하여 선형화 한 PID, LQ 제어[5,6] 등의 고전 제어기법이 이용되고 있으며, 무모델 제어가 가능한 Fuzzy 및 신경회로망, GA(Genetic Algorithm) 등에 의한 다양한 지능제어 기법들도 제안되고 있다[3,7,8]. 이들 대부분의 경우, 제어기의 설계 파라미터의 동정이 어렵고, 내·외부 외란이나 다양한 동작 모드들에 따른 제어기 파라미터들의 적응

\* 정회원 : 동아대학교 전기공학과 대학원 박사과정

\*\*정회원 : 동아대학교 전기공학과 부교수

접수일자 : 1999년 8월 3일

성이 저하되어 동작 영역이 상이해지면 안정화 가능 영역이 협소해지거나 시스템이 불안정해지는 문제점을 갖고 있다. 한편, 슬라이딩 모드(Sliding Mode)를 갖는 가변구조 시스템(Variable Structure System, VSS)은 스위칭 평면(Switching Surface)을 이용하여 슬라이딩 모션(Sliding Motion)이라는 독특한 스위칭 특성이 발생하는 일종의 비선형 제어기로서[9], 파라미터의 변동이나 외란에 거의 둔감한 특징을 갖고 있지만, 매 순간 변화되어지는 시스템의 상태에 따른 최적의 스위칭 평면 설정 및 상태 가중치의 결정이 곤란하다.

따라서, 본 논문에서는 이중 탱크 시스템의 2차 탱크의 수위 제어를 위해, 넓은 범위의 동작 모드와 고차의 큰 지연시간에 대응하여 적응성이 높고, 파라미터의 변동과 외란에 비교적 강인한 실변수 유전 알고리즘 기반의 슬라이딩 모드 제어기(RVEGA SMC)를 제안한다.

시뮬레이션을 통하여, 종래의 PID 제어기에 비해, RVEGA SMC가 견실성을 가지며, 빠르고 정밀하게 목표치에 도달하게 됨을 보이게 될 것이다.

## 2. 이중 탱크 시스템의 모델링

이중 탱크의 수위제어의 목적은 탱크 내로의 유입량을 부드럽게 변화시키고, 탱크의 수위를 신속 정확하게 목표 수위에 도달시키는 것이다. 그림 1은 본 논문에서 사용된 이중 탱크 시스템을 나타낸다.

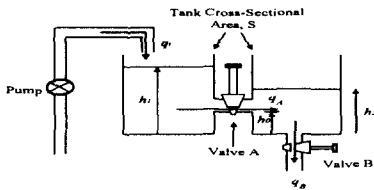


그림 1. 이중 탱크 시스템  
Fig. 1. Coupled Tank system

그림 1에서 1차 탱크의 유입율을  $q_i$ , 밸브 A를 통한 유출율을  $q_A$ , 그리고, 밸브 B를 통해 나가는 유출물을  $q_B$ 로 정의하면, 1차 및 2차 탱크에서의 유

량 변화율은 각각 다음과 같다.

$$q_i - q_A = \frac{dv_1}{dt} = S \frac{dh_1}{dt} \quad (1)$$

$$q_A - q_B = \frac{dv_2}{dt} = S \frac{dh_2}{dt} \quad (2)$$

여기서,  $v_{1,2}$ : 1, 2차 탱크의 액체 용적[cm<sup>3</sup>]

$h_{1,2}$ : 1, 2차 탱크의 수위 [cm]

S: 1차 및 2차 탱크의 단면적[cm<sup>2</sup>]

$q_{A,B}$ : 밸브 A, B를 통한 유출율[cm<sup>3</sup>/sec]

$q_i$ : 1차 탱크로의 유입율 [cm<sup>3</sup>/sec]

이다. 식 (2)에서  $q_A$ 와  $q_B$ 가 모든 가능한 동작조건에서 수위  $h_1$  및  $h_2$ 의 제곱근에 비례한다고 가정하면, 유출율  $q_A$ 와  $q_B$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$q_A = f(h_1 - h_2) = a_A c_A \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (3)$$

$$q_B = f(h_2) = a_B c_B \sqrt{2g(h_2 - h_0)} \quad (4)$$

여기서,  $v_1 = Sh_1$  및  $v_2 = Sh_2$ 이므로, 2차 탱크에서의 외란  $d$  [cm/sec]를 고려하면, 식 (1) 및 식 (2)로부터,

$$\begin{cases} S\dot{h}_1 = u - a_A c_A \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \\ S\dot{h}_2 = a_A c_A \sqrt{2g(h_1 - h_2)} - a_B c_B \sqrt{2g(h_2 - h_0)} + d \end{cases} \quad (5)$$

로 된다. 여기서, 제어입력  $u$ 는 유입율  $q_i$ 와 같으며, 즉,  $u = q_i = U \times 7.33$  [cm<sup>3</sup>/sec]과 같고, 여기서,  $U$ [V]는 펌프의 구동전압을 나타낸다. 또한,  $a_A$  및  $a_B$ 는 밸브 A 및 B의 오리피스 면적이며,  $c_A$  및  $c_B$ 는 각 밸브의 유출계수이고,  $h_0$ 는 오리피스의 높이에 기인한 offset을 나타내며,  $g$ 는 중력 가속도를 나타낸다.

### 3. 슬라이딩 모드 제어

슬라이딩 모드 제어기는 설정된 스위칭 평면을 중심으로 스위칭 특성을 발생하는 비선형 제어기[8]이다. 먼저, 비선형 시스템을 다음과 같이 정의하자.

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (6)$$

여기서,  $x \in R^n$  : 상태 벡터,  $u \in R^m$  : 입력 벡터,  $n$  : 시스템의 차수,  $m$  : 입력 수를 나타낸다. 이 때, 발생하는 슬라이딩 평면  $s(e, t)$ 는

$$s(e, t) = g_a^T e(t) = 0 \quad (7)$$

로 정의될 수 있다. 여기서,  $g_a \in R^n$ 은 슬라이딩 평면의 기울기를 나타낸다. 이중 탱크 시스템의 경우, 탱크 2의 목표 수위  $h_2^*$ 에 대한 오차  $e_{h2}$ 는,  $e_{h2}^{(n-1)}$ 을  $e_{h2}$ 의  $(n-1)$ 차도함수로 정의할 때,

$$e_{h2} = h_2 - h_2^* = [e_{h2} \ \dot{e}_{h2} \ \dots \ e_{h2}^{(n-1)}]^T \quad (8)$$

로 되므로, 시변 슬라이딩 평면  $s(t)$ 는 다음과 같이 상태공간  $R^2$ 에서 정의된다.

$$s(e_{h2}; t) = \left( \frac{d}{dt} + g_a \right)^{n-1} \cdot e_{h2} = 0 \quad (9)$$

따라서, 2차 상태 궤적은 식 (9)로부터

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq 0, \quad s \cdot \dot{s} \leq 0 \quad (10)$$

와 같은 조건을 만족하며,  $s \rightarrow 0$ 이 되는 1차 안정화 문제로 간략화할 수 있다. 이 경우 안정상태에 대한 강인성은 Lyapunov 함수로부터 다음과 같이 유도되며, 식 (10)으로부터 수렴조건은 식 (11)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$s \cdot \dot{s} \leq -\lambda |s| \quad (11)$$

여기서,  $\lambda$ 는 양의 상수이며,  $s \cdot \dot{s}$ 의 최대값 즉,

$\beta$ 를 구하기 위해 스위칭 평면  $s$ 를

$$|s| \geq \frac{\beta}{\lambda} = \delta \quad (12)$$

과 같이 슬라이딩 영역으로 변환하면, 슬라이딩 모드의 제어입력은 식 (13)과 같이 구해질 수 있다.

$$u = -k \cdot \text{sgn}(s \cdot \dot{s}) + u_{smc} \quad (13)$$

여기서,

$$\text{sgn}(s \cdot \dot{s}) = \begin{cases} +1, & s \cdot \dot{s} > 0 \\ 0, & s \cdot \dot{s} = 0 \\ -1, & s \cdot \dot{s} < 0 \end{cases}$$

이며, 식 (13)의 두 번째 항  $u_{smc}$ 는 식 (14)와 같이 PID 제어기에 의해 발생하는 등가 제어 입력  $u_{eq}$ 와 같다고 정의한다.

$$u_{eq} = -K_0 - (K_P \cdot e_{h2} + K_I \int e_{h2} \cdot dt + K_D \cdot \dot{e}_{h2}) \quad (14)$$

또한, 일반화된 스위칭 동작을 행하는 SMC의 이득 파라미터들은

$$K_0 = \begin{cases} K_{11}, & s < 0 \\ K_{12}, & s > 0 \end{cases}, \quad K_P = \begin{cases} K_{P1}, & e_{h2} \cdot s < 0 \\ K_{P2}, & e_{h2} \cdot s > 0 \end{cases}$$

$$K_I = \begin{cases} K_{I1}, & s \cdot \dot{s} < 0 \\ K_{I2}, & s \cdot \dot{s} > 0 \end{cases}, \quad K_D = \begin{cases} K_{D1}, & \dot{e}_{h2} \cdot \dot{s} < 0 \\ K_{D2}, & \dot{e}_{h2} \cdot \dot{s} > 0 \end{cases} \quad (15)$$

로 정의된다. 이 시스템에 대한 슬라이딩 평면과 이의 동작 패턴은 그림 2와 같이 도시된다.

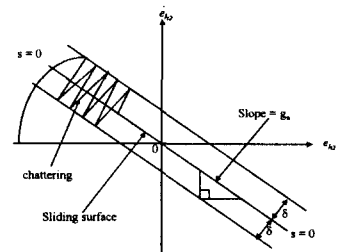


그림 2. 슬라이딩 동작의 형태  
Fig. 2. Pattern of Sliding Motion

### 4. RVEGA SMC의 설계

대표적인 비선형 프로세스의 하나인 이중 탱크 시스템의 수위를 오버 플로우나 고갈 현상없이 제어하기 위해 RVEGA SMC를 제안한다. 즉, RVEGA를 이용하여 식 (15)의 SMC 이득 파라미터들을 최적화함으로써, 2차 탱크의 목표 수위에 빠르고, 정확하게 추종할 수 있을 뿐만 아니라, 파라미터의 변동과 외란에 강인한 제어를 설계하고자 한다.

일반적인 유전 알고리즘에서 변수들을 2진 문자열 (string)로 표현하는 경우, 높은 정밀도가 요구될 수록 문자열의 길이는 매우 길어지게 된다. 또한, GA는 다른 알고리즘과는 달리 많은 연산을 필요로 하기 때문에, 많은 계산 시간과 기억 용량을 요구하게 되며, 수렴속도도 느려지게 된다. 따라서, 많은 파라미터의 최적화를 필요로 하는 SMC의 경우, 2진 문자열로 표현하는 데 한계가 따른다. 그리고, 유한 길이의 이진 문자열로 표현된 각각의 염색체는 목적 함수에 의해 적합도(fitness)를 산출하기 위해 실제 변수들의 값으로 변환하는 것이 요구되며, 정도가 저하될 수 있다. 또한, 평가, 복제, 교배 과정에서 계속적으로 생성되어지는 염색체들은 세대가 지남에 따라 더 이상 우수한 새로운 염색체를 생성하지 못하거나, 퇴조시키는 국부적 최적 값에 빠질 가능성이 높다.

이상에서 지적한 바와 같이 일반적인 GA는 그 구조의 단순성으로 인해 조기수렴의 문제가 발생할 수 있으며, 가장 좋은 염색체가 roulette wheel 선택 과정에 의해 파괴될 수도 있다. 따라서, 세대가 지나도 해가 목적 함수의 최적값에 수렴하지 못하고 진동을 초래하는 원인이 되기도 한다.

본 논문에서는 이를 해결하기 위해 RVEGA를 도입하였다. 이것은 GA와 같이 교배, 복제 및 돌연변이 연산자를 사용하며, 새로운 염색체들의 적합도를 이전 세대의 가장 우수한 염색체의 적합도와 비교하여 그 값보다 크면 새로운 염색체로서 선택하고, 그렇지 않으면 버리는 것이다. 또한, RVEGA는 각각의 염색체를 변수의 상·하한치 내에서 랜덤하게 발생시켜, 탐색할 각각의 변수를 실수치 자체로 구성한다. 즉, 파라미터 각 개체의 특성들은 관련 스트링들을 하나로 통합한 유전 염색체로 나타낼 수 있다. 그림 3에 RVEGA의 흐름도를 나타내었다.

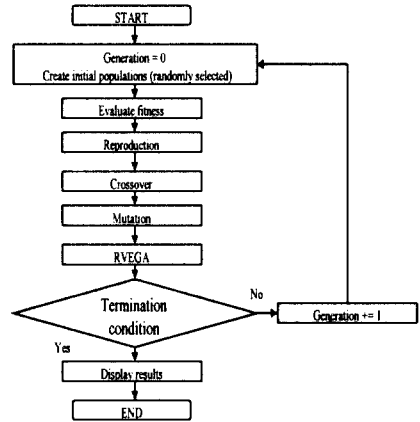


그림 3. RVEGA의 흐름도  
Fig. 3. Flowchart for RVEGA

본 논문에서 제안하고자 하는 RVEGA SMC의 설계는 이상에서 기술한 RVEGA에 의해 식 (15)의 8개 이득 파라미터들과  $G_a^T = [g_a \ 1]$ 에 의해 결정되는 식 (7)의 슬라이딩 평면을 구성하는 파라미터  $g_a$ 를 탐색하는 문제 즉, 다음 파라미터 벡터  $P$ 를 최적화하는 문제로 요약된다.

$$P = [g_a \ K_{11} \ K_{12} \ K_{F1} \ K_{F2} \ K_{F3} \ K_{D1} \ K_{D2}]^T \quad (16)$$

### 5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

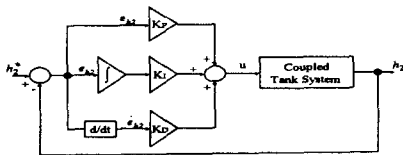
본 논문에서는 제안된 RVEGA SMC의 성능을 입증하기 위하여 종래의 PID 제어기의 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 시뮬레이션에 사용된 1차 및 2차 탱크의 단면적은  $S=100\text{cm}^2$ 이고, 밸브 A 및 B의 오리피스 단면적은 각각  $a_A=0.886\text{cm}^2$  및  $a_B=0.396\text{cm}^2$ 이다. 그리고, 탱크의 유출계수는  $c_A = c_B = 0.58$ 로 동일하다. 또한, 초기 offset은  $h_0=3\text{cm}$ 으로 설정하였다.

본 시스템의 사양은 표 1과 같다.

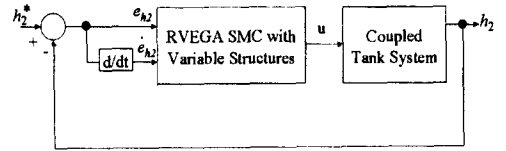
표 1. 이중 탱크 시스템의 사양  
Table 1. Specification of Coupled Tank System

Parameter	Value
Height	25[cm]
Orifice Cross Sectional Area of Valve A : $a_A$	0.886[cm <sup>2</sup> ]
Orifice Cross Sectional Area of Valve B : $a_B$	0.396[cm <sup>2</sup> ]
Tank Cross Sectional Area : S	100[cm <sup>2</sup> ]
Max. Flow-in rate : $q_{imax}$	73.3[cm <sup>3</sup> /sec]
Gravitational constant : $g$	981[cm/sec <sup>2</sup> ]
Discharge Coefficient : $C_A, C_B$	0.58
Pump Drive Voltage U[V]	Max. 10[V], Min. 0[V]

또한, 이중 탱크 시스템의 제어 입력  $u$  즉, 유입율  $q_i$ 는 모터 펌프 구동전압  $U$ 의 7.33배와 같으므로,  $U$ 가 10[V]일 때, 최대 유입율은 73.3[cm<sup>3</sup>/sec]로 된다. 이중 탱크 시스템의 모터 펌프에 인가되는 구동 전압  $U$ 는 0~10[V]의 아날로그 전압으로 하며, 시스템의 펌프 모터를 구동시키는 조작량이 된다. 따라서, 펌프 구동전압  $U$ 가 인가되면, 유입율  $q_i$ 로 물이 1차 탱크에 유입되며, 유입된 물의 양에 따른 압력과 밸브 A의 오리피스 면적 및 유출계수에 따라 2차 탱크의 수위  $h_2$ 가 제어된다. 실제의 탱크 수위는 목표 수위와 비교되어, 수위 오차  $e_{h_2}$ , 오차의 적분치 및 오차의 변화량  $\dot{e}_{h_2}$ 가 제어기로 각각 입력된다. 시물레이션에 사용된 종래의 PID 제어기의 구조와 본 논문에서 제안된 RVEGA SMC의 구성도를 그림 4(a), (b)에 각각 나타내었다.



(a) 종래의 PID 제어기



(b) RVEGA SMC

그림 4. 종래의 PID 및 RVEGA SMC의 구조  
Fig. 4. Architectures of Conventional PID Controller and RVEGA SMC

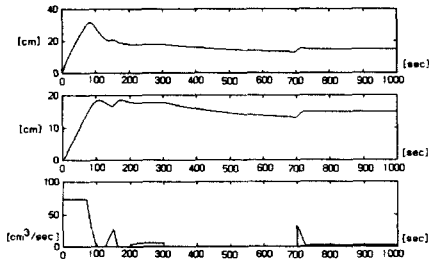
그림 4(a)의 PID 제어기에서는 Ziegler-Nichols법에 의해  $K_P = 15$ ,  $K_I = 5$ ,  $K_D = 5$ 로 설정하였으며, 그림 4(b)에서 2차 탱크의 목표 수위  $h_2^*$ 와 현재 수위  $h_2$ 와의 차  $e_{h_2}$ 로부터 RVEGA에 의해 SMC의 파라미터  $K_0$ ,  $K_P$ ,  $K_I$  및  $K_D$ 를 각각 최적화하였다. 적합도  $F(P)$ 는 식 (17)과 같이  $t_i$  시간 동안에 취득한 오차와 오차의 변화율에 대한 각각의 제곱의 합에 대한 평균의 역수를 취하였다.

$$F(P) = \frac{1}{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^t (e_{h_2}^2 + \dot{e}_{h_2}^2)} \quad (17)$$

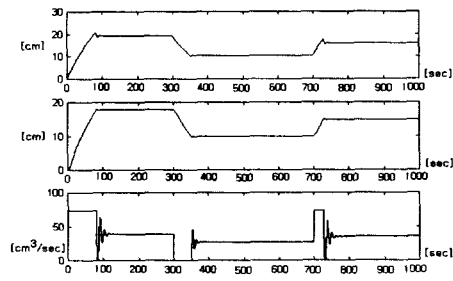
단, 여기서  $N$ 은 시간  $t_i$  동안 취득한 데이터의 수를 나타내며, 각 세대의 최대 적합도는 식 (17)에 의해 신속하게 수렴하여 최대치에 도달한다. 이상의 절차로부터 얻어진 RVEGA SMC의 최적화된 파라미터들은 식 (18)과 같다.

$$K_0 = \begin{cases} 7.174, & s < 0 \\ 59.796, & s > 0 \end{cases}, K_P = \begin{cases} 38.098, & e_{h_2} \cdot s < 0 \\ 76.153, & e_{h_2} \cdot s > 0 \end{cases}$$

$$K_I = \begin{cases} 68.803, & s \cdot \dot{s} < 0 \\ 84.299, & s \cdot \dot{s} > 0 \end{cases}, K_D = \begin{cases} 35.924, & \dot{e}_{h_2} \cdot \dot{s} < 0 \\ 26.180, & \dot{e}_{h_2} \cdot \dot{s} > 0 \end{cases} \quad (18)$$

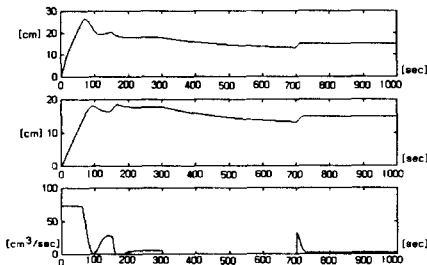


(a) PID 제어결과

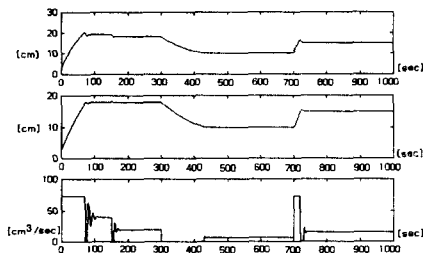


(b) RVEGA SMC 제어결과

그림 5. 외란 미 부가시 제어결과  
Fig. 5. Control Results without Disturbance



(a) PID 제어결과



(b) RVEGA SMC 제어결과

그림 6. 외란 부가시 제어결과  
Fig. 6. Control Results with Disturbance

본 시뮬레이션에서는, 0~300[sec], 300~700[sec] 및 700~1000[sec]의 시간 축을 구간 I, II, III으로 나누고, 각 구간의 목표 수위는 18[cm], 10[cm], 15[cm]로 각각 설정하였다. 그림 5는 외란을 부가하지 않았을 경우의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있으며, 그림 5(a)의 종래의 PID 제어시, 구간 I에서의 도달시간 및 5[%] 정정시간은 각각 87.5[sec] 및 197.25[sec]로 관측되었고, 3.2[%]의 오버슈트를 나타내었다. 그러나, 구간 II에서는 목표 수위에 도달하지 못하였으며, 구간 III에서의 도달시간 및 정정시간은 각각 26.25[sec] 및 28.12[sec]로 관측되었다. 그림 5의 (b)는 제안된 RVEGA SMC의 결과이며, 구간 I에서 도달시간 및 정정시간은 종래의 PID 제어기에 비해, 각각 17.81[sec], 121[sec] 빨라짐을 알 수 있었다. 그림 6은 150~250[sec], 350~650[sec], 750~950[sec] 동안  $d=20$ [cm/sec]의 외란을 부가한 경우의 시뮬레이션 결과를 각각 나타내고 있다. 그림 6(a)와 같이, 종래의 PID 제어시 구간 I에서는 5[%]이내 도달시간 및 정정시간이 74.38[sec] 및 187.63[sec]로 관측되었고, 3.27[%]의 오버슈트 및 7.52[%]의 언더슈트를 나타내었다. 구간 II에서는 목표 수위에 도달하지 못하였으며, 구간 III에서의 도달시간 및 정정시간은 각각 16.56[sec] 및 21.87[sec]로 이러한 현상은 구간 I 및 III에서의 외란 부가로 인해, 도리어 수위 상승을 가속시켜 목표 수위에 빨리 도달하게 하는 효과에 기인한 것으로 볼 수 있다.

그러나, 제안된 제어기의 경우, 구간 I에서는 PID 제어시 보다 도달시간 및 정정시간이 현저히 줄었고, 특히, 구간 II에서는 2차 탱크에서의 밸브 B의 유출율이 일정함에도 불구하고, 유입을  $d=20$ [cm/sec]인 외란이 부가되므로, 외란이 없을 때 보다 도달시간 및 정정시간은 각각 73.91[sec] 및 60.01[sec]로 지연되고 있으나, 언더슈트없이 정확하게 목표 수위에 도달함을 확인하였다. 이는 목표 수위에 도달하지 못한 PID 제어기 적용의 결과보다 RVEGA SMC의 성능이 현저하게 개선되어 졌음을 보인 것이다. 이상과 같은 일련의 시뮬레이션 결과를 통해 알 수 있는 바와 같이 본 논문에서 제안한 RVEGA SMC는 제어 성능이 우수하며, 외부 외란에 대해서도 견실하다는 것을 알 수 있었다.

## 6. 결론

각종 냉동장치나 여과장치 등과 같은 비선형성이 강한 시스템은 탱크의 유입량의 변화에 대해 탱크의 수위를 정밀하고, 안정되게 제어하는 것이 필수적이다.

따라서, 본 논문에서는 RVEGA를 이용하여 제어기의 구조가 변경되는 SMC의 파라미터들을 최적화 시킴으로써, 이중 탱크 시스템의 목표 수위에 고속이면서도 정확하게 추종할 수 있는 RVEGA SMC를 제안하였다. 즉, RVEGA에 의해 최적 스위칭 파라미터들을 갖는 SMC는 스위칭 평면을 이용하여 슬라이딩 모션이라는 독특한 스위칭 특성과 외란에 둔감한 장점을 가진 최적의 비선형 제어기로 동작하도록 설계하였다.

시뮬레이션 결과, 외란 부가에 관계없이 종래의 PID 제어기는 오버슈트 및 언더슈트를 발생시키면서 구간 I 및 III에서는 목표 수위에 도달하였으나, 구간 II에서는 도달하지 못하는 결과를 나타내었다.

반면, 본 논문에서 제안한 RVEGA SMC는 극히 미소한 오버슈트(최대 0.1%)와 언더슈트(최대 1.31%)만 나타낼 뿐, 신속하고 정상상태 오차 없이 전 구간에서 정밀하게 목표 수위에 도달하는 우수한 성능을 나타내었다.

향후, RVEGA SMC의 하드웨어적인 실현 및 실제 원자로의 증기발생기와 같은 산업용 프로세스에 적용하는 방법을 검토하고, 세 개 이상의 탱크 시스템의 제어 및 적용 알고리즘 등에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] J. M. Fernandes, C. E. DE Souza, G. C. Goodwin., "Adaptive Control of a Coupled Tank Apparatus", Int. Journal of Control and Signal Processing, Vol. 3, pp. 319-331, 1989.
- [2] Li, Y., and NG, K. C., "Design of SISO Sliding Mode Control Systems Using Genetic Algorithms", Technical Report CSC-94002, Centre for Systems and Control, University of Glasgow, 14. June, 1994.
- [3] Li, Y., "Modern information technology for control systems design and implementation", proc 2nd Asia-Pacific Conf. Control and measurement, ChongQing, xna, pp. 17-22, 1995.
- [4] Li, Y., and Tan, K. C., "Physical Parametric Modelling of Nonlinear Systems by Evolution",

technical report CSC-95010, Centre for systems and control, University of Glasgow, 9 June, 1995.

- [5] Hunt, K. J., "Polynomial LQG and  $H_{\infty}$  Controller Synthesis a Genetic Algorithm Solution", Proc.31st IEEE Conf. Decision and Control, Tucson, AZ, 4, (865), pp. 3604-3609, 1992.
- [6] Harry N. Iordaoiu and Brian W. Surgenor, "Experimental Evaluation of Robustness of discrete Sliding Mode Control versus Linear Quadratic Control", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 5, no. 2, pp. 254-454, 1997.
- [7] Goldberg, D., "Genetic algorithms in search, optimization and machine learning" (Reading, MA : Addison-Wesley), 1989.
- [8] Jacob S. Glower and Jeffrey Munighan, "Designing Fuzzy Controllers from a Variable Structures Standpoint", IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol. 5, no. 1, pp. 138-144, 1997.
- [9] Itkis, U., "Control Systems of Variable Structure", Wiley, 1976.

## ◇ 저자소개 ◇

김 태 우 (金泰佑)

1963년 11월 20일 생. 1989년 동아대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 박사과정 수료.

(Tel) 051-200-6859

E-mail : i937598@seunghak.donga.ac.kr

이 준 탁 (李浚析)

1956년 11월 21일 생. 1979년 동아대 공과대학 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년 8월-1998년 2월 일본 쓰쿠바대학 객원 연구원. 현재 동아대 전기공학과 부교수.

(Tel) 051-200-7740

E-mail : jtlee@seunghak.donga.ac.kr