

## 이중탱크 시스템의 퍼지제어

\*최우진, \*지석준, \*\*이준탁  
\*한라레벨(주), \*\*동아대학교 전기공학과

### Fuzzy Control of Coupled Tank System

\*Woo-Jin Choi, \*Suk-Joon Ji, \*\*Joon-Tark Lee  
\*Hanla Level Co Ltd, \*\*Dept. of Electrical Engineering Dong-A University

**Abstract** - 산업 프로세스에서 볼 수 있는 이중탱크 시스템(Coupled Tank System)을 수학적으로 모델링하고 그에 대한 제어를 구성하여 제어성과 특성을 시뮬레이션을 통해 살펴 보고자 한다. 본 논문에서는, 다입력-다출력의 비선형적인 시스템에 대해서도 단순히 IF-THEN 형태의 규칙만으로 손쉽게 비선형 제어를 구현할 수 있는 퍼지제어(fuzzy control)를 이용하고자 한다. 이중탱크 시스템은 단일탱크에 비하여 시간지연이 크고, 비선형성이 큰데, 이러한 경우에도 퍼지제어를 이용하여 손쉽게, 그리고 유용하게 제어를 구성할 수 있음을 보이고자 한다. 특히, 첫번째 탱크에서 오버플로가 발생할 위험이 있는데, 이를 위해 본 논문에서는 이중 피드백 루프의 구조로 구성하여 레벨 제어를 하고자 한다.

## 1. 서 론

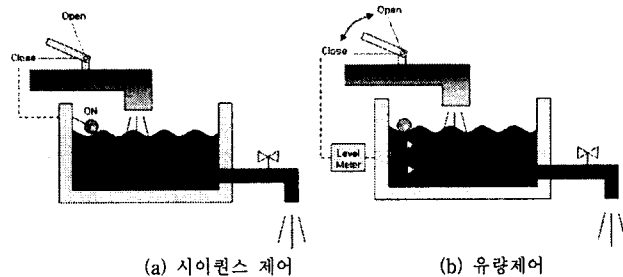
탱크에서의 액체레벨과 탱크 간의 플로를 제어하는 것은 프로세스 산업에서는 기본적인 문제이다. 프로세스 산업에서는 액체가 펌핑되거나 탱크에 저장되고, 또다시 인접한 다른 탱크로 펌핑되기도 한다. 매년 액체들은 화학처리 혹은 혼합 처리의 과정을 거치게 된다. 탱크에서의 액체 레벨은 이러한 과정에서 항상 제어되어야 하며, 탱크 간의 플로도 안정되도록 해야 한다. 종종 탱크는 두 개의 탱크로 이루어진 이중(couple) 구조로써 이용이 되기도 하는데 이 경우에는 레벨이 상호작용하게 되므로 이것을 함께 고려하여 제어하여야 한다.

레벨과 탱크에서의 플로제어는 특히, 화학 엔지니어링 시스템 분야의 핵심이며, 우리 경제의 근간을 이루고 있다. 액체레벨과 플로의 제어가 필수적인 산업으로는 석유화학산업, 제지산업, 수처리산업 등을 들 수 있으며, 우리 삶과 가장 가깝게는 우리 몸의 의학적 생리현상을 들 수 있다. 혈액의 속도제어는 바이오 컨트롤 시스템에 의해 제어된다.

## 2. 이중탱크 시스템

### 2.1 액체탱크의 레벨 제어 형태

일반적으로 액체탱크의 레벨 제어의 형태는 다음의 <그림1(a)>와 같은 시퀀스 제어와 <그림1(b)>와 같은 유량을 제어하는 경우로 크게 나눌 수 있다. 시퀀스 제어의 예에서는 탱크 내의 특정위치에 설치된 상한 스위치에 의해 레벨을 제어하게 되며, 유량제어의 경우에는 연속적으로 탱크의 레벨을 레벨미터로 측정하여 레벨을 보다 정밀하게 제어하고 있다. 즉, 레벨에 대응하여 액체의 공급을 연속적으로 가감하면서 제어하게 된다.



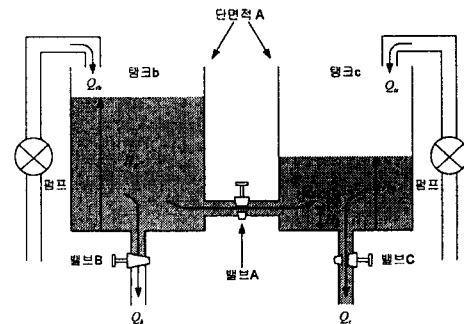
<그림 1> 액체탱크의 레벨제어 형태

본 논문에서는 연속적으로 탱크의 레벨을 측정하면서 유량을 제어하는 <그림1(b)>와 같은 형태를 다루며, 특히, 두 개의 탱크가 연결된 다음의 <그림2>와 같은 형태의 이중탱크 시스템(Coupled Tank System)의 제어에 대하여 살펴 보기로 한다.

두 개의 탱크와 이를 이어주는 통로로 구성된 이중탱크 시스템(Coupled Tanks System)은 첫번째 탱크b에 설치된 펌프를 조작하여 첫번째 탱크b에 물을 채우고, 이 물에 의해 두번째 탱크c의 레벨을 컨트롤 하는 시스템이다. 이중탱크장치에는 피드백 제어를 위해, 펌프에 의해 공급된 유량을 플로미터로 측정하고, 각각의 탱크에서의 액체레벨은 탱크 하부의 압력을 측정하여 측정하도록 되어 있다.

### 2.2 이중탱크 시스템의 수학적 모델링

이중탱크장치에서는 <그림2>와 같이 각 탱크에 펌프, 플로미터, 레벨센서 및 이들에 대한 적절한 전자처리회로를 갖추고 있다.



<그림 2> 이중탱크 시스템의 구조

탱크 내로 들어오는 입력 플로레이트( $Q_1$ )와 밸브A,B,C를 통해 나가는 플로레이트( $Q_2, Q_3, Q_4$ )를 고려하면 시스템의 수학적 모델은 다음과 같이 쓸 수 있다. 탱크의 바닥에서부터 밸브A까지의 높이  $H_a$ 가 작다면, 탱크b에 대해

$$A \frac{dH_b}{dt} + Q_b + Q_a = Q_{1b}$$

또는

$$A \frac{dH_b}{dt} + f(H_b) + f(H_b - H_c) = Q_{1b} \quad (2.1)$$

탱크c에 대해

$$A \frac{dH_c}{dt} + Q_c - Q_a = Q_{1c}$$

또는

$$A \frac{dH_c}{dt} + f(H_c) - f(H_b - H_c) = Q_{1c} \quad (2.2)$$

여기서,  $A$ 는 각 탱크의 단면적이며,  $H_b \geq H_c$ 이다. 시스템은 토리첼리의 정리(Torricelli's Theorem)를 이용하여 다음과 같은 비선형 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$A \frac{dH_b}{dt} = Q_{1b} - C_{ab} \cdot a_b \cdot \sqrt{2g \cdot H_b} - C_{ba} \cdot a_a \cdot \sqrt{2g \cdot (H_b - H_c)} \quad (2.3)$$

$$A \frac{dH_c}{dt} = Q_{1c} - C_{bc} \cdot a_c \cdot \sqrt{2g \cdot H_c} + C_{ba} \cdot a_a \cdot \sqrt{2g \cdot (H_b - H_c)} \quad (2.4)$$

두 출력 사이의 커플링은 밸브A의 특성에 의해 좌우되며, 만일 밸브A가 닫힌 시스템은 두 개가 디커플된 단일탱크 시스템이 된다. 물리적으로, 커플링은 밸브A의 개방된 단면적에 비례한다. 여기서는 밸브A가 열려 있고 밸브B가 닫힌 형태의 이중탱크 시스템의 제어에 대해 다룰 것이므로 입력 플로레이트  $Q_{1b}$ 만을 고려하면, 식(2.3) 및 식(2.4)는 각각 다음의 식(2.5) 및 식(2.6)으로 정리할 수 있다.

$$A \frac{dH_b}{dt} = Q_{1b} - C_{ab} \cdot a_b \cdot \sqrt{2g \cdot (H_b - H_c)} \quad (2.5)$$

$$A \frac{dH_c}{dt} = -C_{bc} \cdot a_c \cdot \sqrt{2g \cdot H_c} + C_{ba} \cdot a_a \cdot \sqrt{2g \cdot (H_b - H_c)} \quad (2.6)$$

위의 두 식은 선형화를 통하여 2차 전달함수의 형태로 표현할 수도 있지만, 그 시정수 및 게인을 스텝응답으로부터 얻는 것이 일반적으로 어렵다. 실험 데이터를 이용한 시스템 동정(System Identification) 기법을 이용하여 찾아내는 것이 가능하겠지만, 여기서는 위의 비선형 관계식을 수치해석적으로 직접 적분하여, 두 탱크에서의 각각의 레벨  $H_b, H_c$ 를 각각 얻기로 한다.

### 2.3 이중탱크에 대한 레벨 제어시스템의 설계

#### 2.3.1 PID제어기 설계

PID제어기에서 비례 및 적분 제어 입력량은 다음의 식(2.7), (2.8)로 각각 표현할 수 있다. 식(2.7)의 비례항은 정상상태에서 잔류편차가 생기므로 식(2.8)의 적분항을 이용하면 잔류편차를 없앨 수 있다. 식(2.9)는 미분항을 나타낸 것이다. PID 제어기에서는 식(2.10)과 같이 각 제어항의 산술합으로 표현되어진다.

$$u_p = K_p \cdot k_{p1} \quad (2.7)$$

$$u_i = K_i \cdot k_{i1} \quad (2.8)$$

$$u_d = K_d \cdot k_{d1} \quad (2.9)$$

$$u_{pid} = K_p \cdot k_{p1} + K_i \cdot k_{i1} + K_d \cdot k_{d1} \quad (2.10)$$

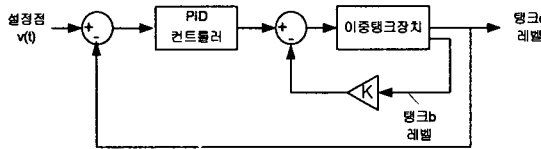
단,  $k_{p1} = \{e_n(H_c) - e_{n-1}(H_c)\} / T$ ,  
 $k_{i1} = e_n(H_c)$ ,  
 $k_{d1} = \{e_n(H_c) - 2 \cdot e_{n-1}(H_c) + e_{n-2}(H_c)\} / T^2$ .  
 $K_p, K_i, K_d$ 는 PID 제어기의 계수.  
 $T$ 는 샘플링 시간 간격.  
 $n$ 은 샘플링 횟수. 즉, 현재 샘플링 시간은  $nT$ .

탱크b에로의 입력 플로  $Q_{ib}$ 는 샘플링 시간 간격  $T$ 를 고려하면 식(2.11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{ib} = u_{n-1} + u_n \cdot T \quad (2.11)$$

위의 식은 펌프 용량의 제약조건에 의해 유량의 제한을 받게 된다. 따라서, 앞서 기술한 식(2.8)의 적분항의 동작이 식(2.10)의 입력플로에 미치는 과도한 동작을 제한하기 위해서  $e_n(H_c)$ 을 판단하여  $k_{i1}$ 의 최대치를 제한하는 Wind-up 제어를 수행하도록 설계하였다.

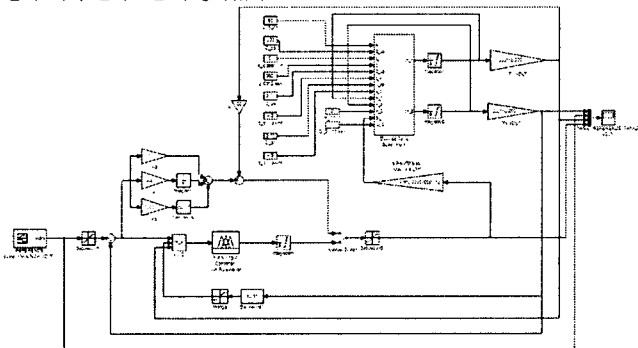
본 논문에서는 <그림3>과 같이 탱크c의 레벨 컨트롤러의 성능을 개선하기 위해 첫번째 탱크b의 레벨을 피드백하는 내부 루프를 부가하였다. 즉, 이중-루프로 제어는데, 내부루프(탱크b레벨 제어)를 가지면서, 탱크c의 레벨을 제어한다.



<그림 3> 이중 루프 제어 구조

#### 2.3.2 이중탱크의 퍼지 제어기 설계

우리는 탱크의 레벨 제어를 위한 다양한 연구들을 진행하였다. 단일탱크에 대한 퍼지제어<sup>[1]</sup>를 수행하였고, 이중탱크를 비롯한 비선형 시스템에 대한 SMC(Sliding Mode Control), 인공 신경회로망 제어기(Artificial Neural Network Controller)에 유전알고리즘을 이용한 제어 파라미터의 최적화에 관한 연구를 수행하였다.<sup>[2],[3],[4],[5],[6],[7],[8]</sup> 본 논문에서는 이중탱크 시스템의 퍼지제어를 위해 다음의 <그림4>와 같이 제어 블록도를 구성하였다.



<그림 4> 이중탱크 시스템의 제어 블록도

PID제어 루프와 퍼지제어 루프는 수동스위치로 전환이 가능하게 구성하였으며, PID제어기에는 적분항  $k_{i1}/s$ 이 포함되어 있어 정상상태 오차를 없애는데 사용하였다. 퍼지 제어기에서는 오차(Error)와 오차변화(Rate)에 대하여 위의 식(2.11)의 조작량의 증분을 퍼지추론하도록 설계하였다. 그리고, 탱크b의 오버플로 방지를 위해 레벨  $H_b$ 에 대한 추론도 함께 행해지도록 설계하였다.

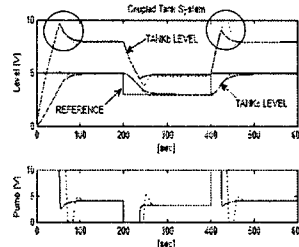
### 2.4 이중탱크의 PID제어기 및 퍼지 제어기의 시뮬레이션 및 검토

시뮬레이션에 사용된 이중탱크 시스템의 제원을 다음의 <표1>에 나타내었다. <표1>의 시스템 제원과 <그림4>의 SIMULINK 블록도를 이용하여, PID 및 퍼지 제어기로 제어한 시뮬레이션결과를 각각 <그림5>, <그림6>에 나타내었다.

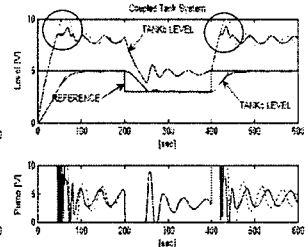
<표 1> 이중탱크 시스템의 제원

계수	값
탱크의 최대높이	250mm
방출 오리피스 위치설정 $\alpha_c$	3.5(=35mm <sup>2</sup> )
탱크b,c의 단면적	90cm <sup>2</sup>
탱크b의 최대 입력 플로레이트 $Q_{ib}$	4.4L/min
중력 가속도 $g$	980cm/sec <sup>2</sup>
방출계수 $C_{da}, C_{dc}$	0.55

<그림5>에서 신호파형은 각 그림의 맨 위쪽부터, 탱크b의 레벨(0~5V), 기준레벨신호의 스텝변경(4~2~4V), 탱크c의 출력레벨, 펌프입력전압(0~10V)을 각각 나타낸다. 점선은 내부루프가 없는 경우( $K_p = 60, K_i = 0.0006, K_d = 300$ )이며, 실선은 이중루프로 구성된 경우( $K_p = 100, K_i = 0.8, K_d = 1000$ ) 및 피드백계인  $K = 20$ 으로 지정한 경우이다. PID 제어기의 경우, 적절한 PID 계인을 찾아서 제어를 수행할 경우 부드러운 레벨출력신호와, 펌프에 의한 부드러운 유입량 변화를 얻을 수 있었다. 오버슈트 및 첫번째 탱크b에서의 오버플로 방지에 대한 부분이 고려 되어야 하므로, 내부 피드백 루프를 가지는 이중 피드백 루프를 구성하여 오버플로우에 대한 위험을 방지하고자 하였다. 원형마크부분에서 오버플로 방지 효과를 확인할 수 있으나, 내부 루프 계인  $K$ 의 변경시에는 PID 제어항의 전체의 계인을 다시 조정할 필요가 있었다.



<그림 5> PID Control



<그림 6> Fuzzy Control

<그림 6>의 퍼지제어의 경우, "If (levelb is high) then (dVOLT is negativebig)"의 규칙을 추가하여, 탱크b의 레벨을 고려하여 오버플로를 방지하는 이중 루프의 구조를 가지므로, 이것의 효과를 확인할 수 있다. 점선파형은 이 규칙의 추가전의 출력이며, 실선은 추가한 후를 보이는데, 오버플로가 억제되고 있음을 알 수 있다. 단, 펌프입력 전압파형은 퍼지제어의 경우 오버플로의 억제를 위한 부분에서 급변하고, 탱크b의 레벨이 요동하는 현상이 발생하였다.

### 3. 결 론

이중탱크 시스템의 제어의 목적은 첫번째 탱크b 내로 공급하는 유량의 유입량을 부드럽게 변화시켜 두번째의 탱크c의 레벨을 안정화시키는 것이다. 이중탱크 시스템은 단일탱크 시스템에 비해 상대적으로 시간지연이 크고, 첫번째 탱크에서는 순간적인 과도한 유입량에 대해서는 오버플로의 위험성이 있다. 이러한 제약조건을 고려하여 이중 피드백 루프를 가지는 PID, 퍼지 제어기를 구성하고 시뮬레이션하였다. 탱크b 레벨의 피드백이 포함되는 효과는 과도응답 특성을 개선하는 것이다. 레벨  $H_b$  신호가 크면, 레벨  $H_c$  신호도 시간이 지나면 매우 커지게 되므로, 레벨  $H_b$ 에 비례한 신호를 뺀서 오버슈트를 방지할 수 있었다.

퍼지제어가 모든 제어문제에 대한 완벽한 해답을 제공할 수 있는 아니지만, 비선형의 복잡한 제어문제에 대해서는 상대적으로 간편한 제어기 설계법을 제공하므로 다양한 분야에 응용이 가능한 장점이 있다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 지석준, "퍼지추론기법을 이용한 탱크레벨제어", 석사학위논문, 동아대학교 전기공학과 석사학위 청구논문, 지석준, 1997.
- [2] 김형배, "RVEGA SMC를 이용한 이중 탱크의 강인한 수위 제어", 동아대학교 전기공학과 석사학위 청구논문, 1999.
- [3] 이주필, "진화 신경회로망을 이용한 이중탱크 수위제어에 관한 연구", 동아대학교 전기공학과 석사학위 청구논문, 1999.
- [4] 김태우, "RVEGA SMC를 이용한 비선형 시스템의 안정화 제어에 관한 연구", 동아대학교 전기공학과 박사학위 청구논문, 2000.
- [5] 박현철, "GA-FSMC를 이용한 이중탱크의 정밀한 수위 제어", 동아대학교 전기공학과 석사학위 청구논문, 2002.
- [6] 박현철, 지석준, 정종원, 최우진, 이준탁, "GA-SMC를 이용한 이중탱크의 정밀한 수위제어", 한국박용기관학회 춘계학술대회, 2002.
- [7] Yong-Bum Kwon, Hyun-Chul Park, Woo-Jin Choi, Joon-Tark Lee, "GA-FSMC for Precise Water Level Control of Coupled Tank", International Conference on Marine Engineering(ICME2002), 29, November, 2002.
- [8] Yong-Bum Kwon, Hyun-Chul Park, Woo-Jin Choi, Joon-Tark Lee, Hyung Hwan Chong, "Precise Water Level Control of Double Tank using GA-FSMC", International Conference on Marine Engineering(ICME2002), 29, November, 2002.