

# 마찰을 고려한 버터플라이 밸브의 강인 제어기 설계

## Design of a Robust Controller for the Butterfly Valve with Considering the Friction

최정주<sup>1,✉</sup>  
Jeongju Choi<sup>1,✉</sup>

1 동아대학교 산학협력단 연구지원실 (Dong-A University Research Foundation for Industry-Academy Cooperation, Dong-a Univ.)  
✉ Corresponding author: jchoi72@dau.ac.kr, Tel: +82-51-200-6596

Manuscript received: 2012.4.3 / Revised: 2012.10.22 / Accepted: 2013.7.16

*We propose a tracking control system for butterfly valves. A sliding mode controller with a fuzzy-neural network algorithm was applied to the design of the tracking control system. The control scheme used the real-time update law for the unmodeled system dynamics using a fuzzy-neural network algorithm. The performance of the proposed control system was assessed through a range of experiments.*

Key Words: Butterfly Valve (버터플라이밸브), Friction (마찰), Robust Control (강인제어), Genetic Algorithm (유전알고리즘)

### 1. 서론

버터플라이(butterfly)밸브는 조선 및 플랜트 분야에서 유량 및 압력을 제어할 목적으로 널리 사용되는 밸브이다. 버터플라이 밸브의 작동은 밸브 바디 내에 있는 디스크의 개폐에 의해 작동된다. 밸브의 디스크 개폐 타입은 작업자의 수작업으로 이루어지는 수동식과 구동 장치에 의한 자동 밸브가 있다.<sup>1-3</sup> 자동 밸브에 주로 사용되는 구동 장치는 유압, 공압 그리고 모터가 있다. 자동 밸브의 구동을 위해서는 밸브의 디스크와 디스크를 지지하는 가이드 사이의 마찰현상에 대한 적절한 규명이 선행되어야 그 구동 성능을 향상시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 산업용 밸브에 대한 기계적 마찰 현상에 대해서 규명하고 이를 극복할 수 있는 제어 시스템을 제안하였다.

일반적으로 산업용 컨트롤 밸브의 구동은 PID 제어기를 주로 사용하고 있으나, 밸브의 구동 특성상 밸브 디스크와 가이드 사이의 마찰 현상으로

인해 만족할 만한 응답을 가지기에는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 기계적 마찰 현상을 규명하고 이를 바탕으로 PID제어기의 성능 향상을 위한 다양한 방법들이 제시되었다.<sup>4,5</sup> 이러한 논문은 PID제어기가 가지는 강인성의 한계를 극복하기 위한 방법으로 제시되고 있다. 본 논문에서는 비선형 강인제어기로 널리 알려진 슬라이딩 모드 제어기(Sliding Mode Controller) 및 퍼지-뉴럴 알고리즘을 이용하여 버터플라이 밸브의 제어 성능을 향상시키는 알고리즘을 제안하였다.

제안된 제어시스템은 제어기 설계 시 고려되지 않은 시스템의 불확실성을 퍼지-뉴럴 알고리즘을 이용하여 보상하도록 제안하였다. 본 논문에서는 모델 불확실성으로 기계적 마찰을 고려하였고 버터플라이 밸브의 마찰특성은 LuGre모델을 이용하여 규명하였다.<sup>6,7</sup> 규명된 버터플라이 밸브의 마찰 모델은 슬라이딩 모드 제어 및 PID제어기의 피드포워드 보상 향으로 이용하였다. 제안된 제어시스템의 성능은 컴퓨터 시뮬레이션 및 버터플라이 밸

브의 개폐 실험을 통해 검증하였다.

## 2. 버터플라이 밸브의 마찰특성 규명

버터플라이 밸브는 Fig. 1과 같이 좁은 먼간 사이에 장착하여 관내의 유량을 제어할 수 있다. 버터플라이 밸브의 유량 제어는 스템(stem)에 연결된 디스크의 회전에 의해 이루어진다.<sup>2</sup> 디스크의 구동은 스템과 연결된 구동기의 종류에 따라 그 응답 특성이 상이하게 된다. 본 논문에서는 모터 구동 방식의 컨트롤 밸브에 대한 마찰특성을 분석하고 이를 효과적으로 제어할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 우선 밸브의 마찰 특성을 분석하기 위해서 Fig. 2와 같이 마찰 토크 분석 시스템을 구성하였다. 실험에서 사용된 밸브의 사이즈는 100A (4inch)인 버터플라이 밸브이고, 마찰 토크 계측을 위한 센서는 sensortech사의 SBS-100K 모델을 이용하였다. 토크센서를 통해 계측된 신호는 NI사의 NI USB-6221 DAQ(Data Acquisition) 보드를 이용하여 그 값을 분석하였다.

마찰의 특성은 속도의 함수로 표현되므로 스템의 회전 속도에 따른 구동 토크를 계측하였다. 이때 계측된 구동 토크를 속도-마찰 선도로 Fig. 3에 나타내었다.

그림에서와 같이 버터플라이 밸브의 개폐 시 인가된 구동 토크는 전형적인 마찰 특성을 보임을 알 수 있다. Fig. 3과 같이 실험을 통해 계측된 마찰력을 G.A. 알고리즘을 이용하여 그 파라미터를 규명하였다. 이때 사용된 마찰 모델은 LuGre 모델을 이용하였다. G.A. 알고리즘의 일반적인 수행 루틴은 다음과 같다.

```

Procedure GA()
initialize (population);
evaluate (population);
while not (terminal condition satisfied) do
m_Pool = reproduce(population);
mutationPool = crossover(m_Pool);
population = mutation(mutationPool);
evaluate(population);
end while
end procedure
    
```

G.A.알고리즘을 이용하여 구한 버터플라이 밸브의 마찰 식은 다음과 같다.<sup>6</sup>

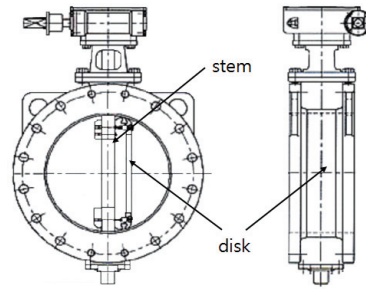


Fig. 1 Structure of butterfly valve

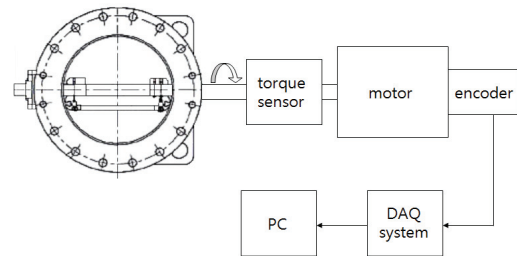


Fig. 2 Lay-out for experiment

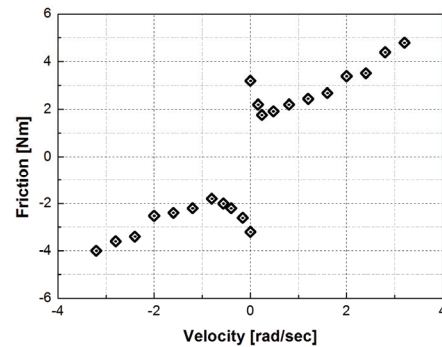


Fig. 3 Relation between friction and velocity

$$f_L = 1.4z + 0.7\dot{z} + 1.5\dot{\theta}$$

$$\dot{z} = \dot{\theta} - \frac{|\dot{\theta}|}{g(\dot{\theta})}z, \quad g(\dot{\theta}) = \frac{1}{1.4} [2.87 + 0.86e^{-(\dot{\theta}/0.18)^2}] \quad (1)$$

여기서  $z$ 는 LuGre마찰 모델의 상태변수이고  $\theta$ 는 버터플라이 밸브의 각 변위이다.

식(1)과 같이 LuGre모델을 이용한 버터플라이 밸브 디스크의 마찰력은 6개의 파라미터를 실험적으로 규명하여야 하고 또한 밸브의 작동 환경 및 형상이 변할 경우 그 파라미터를 새로이 규명하여야 하는 번거로움이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 이러한 마찰을 포함한 모델링 되지 않은 벨

브의 불확실성을 퍼지-뉴럴네트워크 알고리즘을 이용하여 그 제어 성능이 향상될 수 있도록 제안하였다. 제안한 제어시스템의 제어기는 비선형 강인 제어기로 널리 사용되는 슬라이딩 모드 제어를 기반으로 설계하였다.

### 3. 슬라이딩 모드제어기의 설계

슬라이딩 모드 제어기의 설계를 위해 버터플라이 밸브의 동역학 식을 식(2)와 같이 고려하였다.

$$J\ddot{\theta} = u + \Delta f + \Delta d \tag{2}$$

여기서  $J$ 는 회전 관성모멘트,  $\Delta f$ 는 마찰을 포함한 모델 불확실성,  $u$ 는 제어입력,  $\Delta d$ 는 외란이다.

슬라이딩 모드 제어기를 이용한 서보 시스템을 구성하기 위해서 참조 신호  $\theta_c$ 와 오차 신호  $e$ 를 다음과 같이 나타내었다.

$$e = \theta_c - \theta \tag{3}$$

식(3)의 오차 식을 이용한 슬라이딩 모드제어기의 슬라이딩 평면은 다음과 같이 정의 하였다.<sup>8</sup>

$$s = \dot{e} + ke \tag{4}$$

또한, 슬라이딩 평면의 도함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{s} = k\dot{e} + \ddot{e} \tag{5}$$

슬라이딩 모드제어기는 공칭제어입력과 강인항으로 설계되는데, 이때 공칭제어입력 항은 슬라이딩 평면의 도함수 식을 이용하여 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$u_{eq} = J(k\dot{e} + \ddot{\theta}_c) \tag{6}$$

강인 제어 항은 슬라이딩 모드 제어기의 채터링 현상을 줄이기 위하여 다음과 같이 설계하였다.

$$u_r = Ds + K \operatorname{sgn}(s) \tag{7}$$

여기서 설계 변수  $D$ 와  $K$ 는 양의 한정 스칼라이다.

따라서 최종적으로 설계된 슬라이딩 모드 제어기는 다음과 같다.

$$u = u_{eq} + u_r = J(k\dot{e} + \ddot{\theta}_c) + Ds + K \operatorname{sgn}(s) \tag{8}$$

이때  $D$ 와  $K$ 는  $\|D+K\| - \|\Delta f + \Delta d\| \geq \delta \geq 0$ 가 되도록 설계한다.

설계된 제어시스템의 안정도를 확인하기 위하여 식(9)와 같은 리아푸노브 함수를 선정하였다.

$$V = \frac{1}{2}s^2 \tag{9}$$

리아푸노브 함수의 도함수는 식(5)와 (8)을 이용하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\dot{V} = s\dot{s} = s \left[ \frac{1}{J} \{-Ds - K \operatorname{sgn}(s) - \Delta f - \Delta d\} \right] \leq 0 \tag{10}$$

설계된 슬라이딩 모드 제어기는 식(10)과 같이 리아푸노브 안정도 조건을 만족함을 알 수 있다.

슬라이딩 모드제어기는 시스템의 동역학이 슬라이딩 평면에 머무르게 하여 시간이 지남에 따라 시스템의 오차가 0으로 수렴하게 한다. 그러나 식(7)의 강인 제어 항은  $\Delta f, \Delta d$ 의 크기에 따라 과도한 제어입력을 요하게 되므로 모델 불확실성과 외란을 추정하여 공칭 제어 항에 보상함으로써 제어 성능을 높일 수 있다. 따라서 유도된 제어 입력식(8)을 다음과 같이 나타내었다.

$$u = \hat{F}(\theta, \dot{\theta}) + J(k\dot{e} + \ddot{\theta}_c) + D_1s + K_2 \operatorname{sgn}(s) \tag{11}$$

여기서  $\hat{F}(\theta, \dot{\theta})$ 는 모델링 되지 않은 동역학 및 외란의 추정치이다.

본 논문에서는  $\hat{F}(x)$ 를 실시간 추정하여 슬라이딩 모드 제어기의 과도한 스위칭 입력을 줄일 수 있도록 제안하였다. 제안된 제어시스템의 추정 알고리즘은 퍼지-뉴럴네트워크 알고리즘을 이용하였다.

### 4. 퍼지-뉴럴네트워크 알고리즘

본 논문에서는 모델링 불확실성의 크기를 줄임으로써 과도한 제어입력이 인가되는 슬라이딩모드 제어기의 단점을 보완하고자 퍼지-뉴럴네트워크 알고리즘을 사용하였다. 논문에서 사용한 퍼지-뉴럴네트워크 알고리즘의 블록다이어그램은 Fig. 4와 같다.<sup>9</sup> 설계된 퍼지-뉴럴네트워크 구조는 입력 레이어, 두 개의 히든 레이어 및 출력 레이어로 이

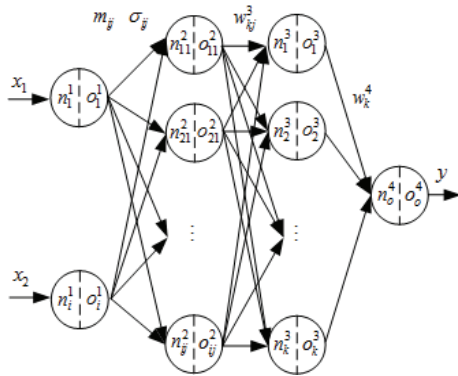


Fig. 4 Structure of fuzzy-neural network algorithm

루어져 있다. 여기서 네트워크 입력에 대한 입력 레이어는 버터플라이 밸브의 각도와 각속도를 이용하여 다음과 같이 선정하였다.

$$n_i^1 = x_i = [\theta \ \dot{\theta}]^T, \quad o_i^1 = n_i^1 \quad (12)$$

밸브 각도와 각속도에 대한 멤버쉽 (membership) 레이어는 다음과 같이 Gaussian 함수를 이용하였다.

$$n_{ij}^2 = -\frac{(o_i^1 - m_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2}, \quad o_{ij}^2 = \exp(n_{ij}^2) \quad (13)$$

여기서 \$m\_{ij}\$, \$\sigma\_{ij}\$ 는 Gaussian 함수를 구성하기 위한 평균과 표준편차이다.

본 논문에서는 입력 레이어의 각 상태 변수에 대해 5개의 멤버쉽 레이어를 설계하였다.

퍼지시스템의 룰(rule)을 구성하기 위해서 룰 레이어는 다음과 같이 설계하였다.

$$n_k^3 = \prod w_{kj} o_{kj}^2, \quad o_k^3 = n_k^3, \quad k=1, \dots, i \quad (14)$$

여기서 \$w\_{kj}\$ 는 룰 레이어의 가중행렬이다.

따라서 식(11)의 모델불확실성은 다음과 같이 출력 레이어를 통해 추정될 수 있도록 하였다.

$$n_o^4 = \sum w_k^4 o_k^3, \quad y = \hat{F} = n_o^4 \quad (15)$$

여기서 \$w\_k\$ 는 출력레이어의 가중행렬이다.

퍼지-뉴럴네트워크의 출력 가중행렬에 대한 실시간 업데이트 룰은 다음과 같이 설계하였다.

$$\Delta w_k^4 = -\eta_1 \frac{\partial s\hat{s}}{\partial w_k^4} = -\eta_1 \frac{\partial s\hat{s}}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial w_k^4} = -\eta_1 s o_k^3 \quad (16)$$

여기서 \$\eta\_1\$ 은 설계변수이다.

룰 레이어에 대한 가중행렬의 업데이트는 다음과 같이 설계하였다.

$$\begin{aligned} \Delta w_{kj}^3 &= -\eta_2 \frac{\partial s\hat{s}}{\partial w_{kj}^3} = -\eta_2 \frac{\partial s\hat{s}}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial n_o^4} \frac{\partial n_o^4}{\partial o_k^3} \frac{\partial o_k^3}{\partial n_k^3} \frac{\partial n_k^3}{\partial w_{kj}^3} \\ &= -\eta_2 s w_k^4 o_{kp}^2 \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 \$\eta\_2\$ 은 설계변수이다.

Gaussian함수의 파라미터에 대한 업데이트 룰은 다음과 같이 유도하였다.

$$\Delta m_{i,j} = -\eta_3 \delta \frac{\partial n_{i,j}^2}{\partial m_{i,j}} = -\eta_3 \delta \frac{2(o_i^1 - m_{i,j})}{(\sigma_{i,j})^2} \quad (18)$$

$$\Delta \sigma_{i,j} = -\eta_4 \delta \frac{\partial n_{i,j}^2}{\partial \sigma_{i,j}} = -\eta_4 \delta \frac{2(o_i^1 - m_{i,j})^2}{(\sigma_{i,j})^3} \quad (19)$$

여기서 \$\eta\_3\$, \$\eta\_4\$ 는 설계변수이고,

$$\delta = \frac{\partial s\hat{s}}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial n_o^4} \frac{\partial n_o^4}{\partial o_k^3} \frac{\partial o_k^3}{\partial n_k^3} \frac{\partial n_k^3}{\partial o_{i,j}^2} \frac{\partial o_{i,j}^2}{\partial n_{i,j}^2} = s w_k^4 o_k^3$$

이다.

### 5. 실험 및 고찰

제안된 제어시스템의 성능은 PID제어기를 이용하여 버터플라이 밸브의 개폐 시험을 한 경우와 제안된 제어시스템을 적용한 경우에 대해서 우선 비교하였다. PID제어기의 적용 시 각 파라미터는 시행착오적으로 선정하였으며, 마찰에 의한 응답 성능을 평가하기 위해 PID제어기에 앞 절에서 규명한 마찰 모델식을 피드포워드 보상한 경우에 대해서 비교하였다. 시간응답 특성을 확인하기 위해 계단입력에 대한 응답을 비교하였다. Fig. 5는 PID 제어기만을 이용한 경우와 PID제어기에 마찰보상항을 추가한 경우에 대한 실험결과이다. 결과에서와 같이 마찰 보상 항이 추가된 경우의 응답 성능이 현저히 나음을 알 수 있다. 이때, 상승시간은 각각 0.8s와 1.5s이다. 다음은 PID제어기에 마찰보상항을 추가한 경우와 제안된 제어시스템의 성능을 비교하였다. 실험의 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 결과에서와 같이 제안된 제어시스템의 응답특성의 상승시간과 정상상태 오차가 더 우수함을 알 수 있다.

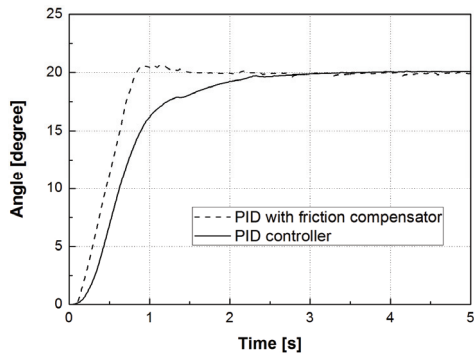


Fig. 5 Step response for PID controller and PID with friction compensator

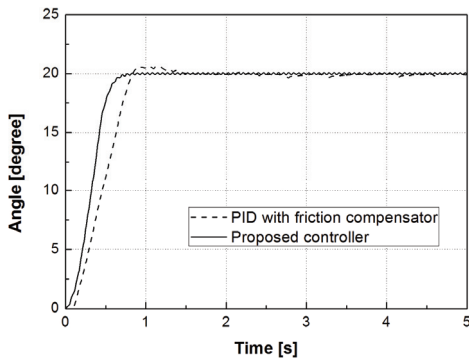


Fig. 6 Step response for PID with friction compensator and the proposed control scheme

다음은 제안된 제어시스템 중 퍼지-뉴럴네트워크 알고리즘의 설계변수 변화에 대한 추정 성능을 알아보기 위하여 Table 1과 같이 선정한 파라미터에 대한 추정치를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검토하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에서 모델 불확실성은 마찰만을 간주하였고 이 때 마찰모델의 정상상태 값은 4 Nm가 되도록 하였다. 시뮬레이션 결과는 Fig. 7에 나타내었다. 결과에서와 같이 추정치의 정상 상태는 파라미터 변화에 대해 비슷한 양상을 보이거나 추정 속도는 Case 1의 경우가 가장 우수한 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 Case 1의 파라미터를 이용하여 추가적인 실험을 수행하였다.

제안된 제어시스템의 명령 추종성능을 평가하기 위해 0.25Hz의 속도로 밸브 디스크가 개폐되도록 시험신호를 인가하고 그때의 응답결과를 비교하였다. 제안된 제어기의 성능을 평가하기 위해서 PID제어기에 마찰 보상 항을 추가한 경우, 식(8)과 같이 일반적인 슬라이딩 모드 제어기에 마찰 보상

Table 1 Parameters for fuzzy-neural network algorithm

Condition	$\eta_1$	$\eta_2$	$\eta_3$	$\eta_4$
Case 1	0.8	0.8	0.5	0.5
Case 2	0.3	0.3	0.5	0.5
Case 3	0.8	0.8	0.9	0.9
Case 4	0.3	0.3	0.2	0.2

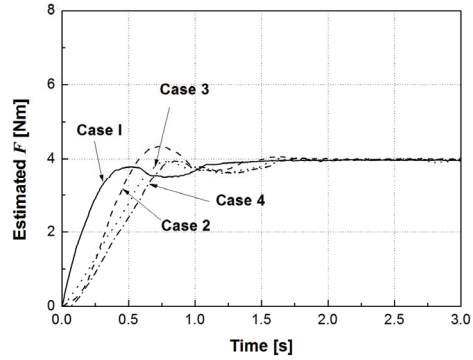


Fig. 7 Estimation performance according to parameters

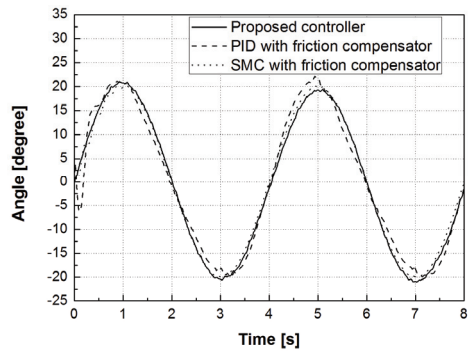


Fig. 8 Compared result for tracking response

을 적용한 경우 및 제안된 제어시스템을 적용했을 때의 추종성능을 비교하였다. 실험에 의한 응답결과를 Fig. 8에 나타내었다. 이때 추종 오차는 Fig. 9에 나타내었다. 추종 오차에 대한 RMS (Root Mean Square)는 마찰 보상 항을 가지는 PID 및 슬라이딩모드 제어기는 각각 2.1와 1.9이고 제안한 제어기는 0.2이다. Fig. 10은 이 중 마찰 보상 항을 가지는 슬라이딩모드 제어기와 제안된 제어기에 인가된 제어입력 값을 나타내었다. 그리고 Fig. 11은 퍼지-뉴럴네트워크 알고리즘을 통해 추정된 값이다. 결과에서와 같이 제안된 제어시스템은 추종성능은 향상되었으나, 인가된 제어입력의 크기는 더 적음을 알 수 있다.

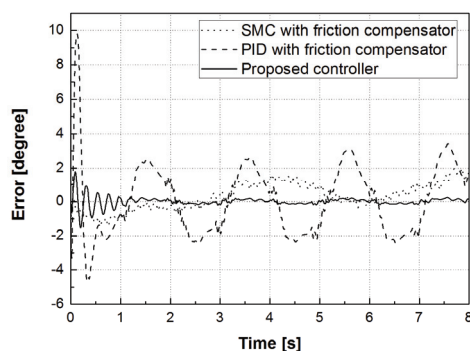


Fig. 9 Compared result for tracking error response

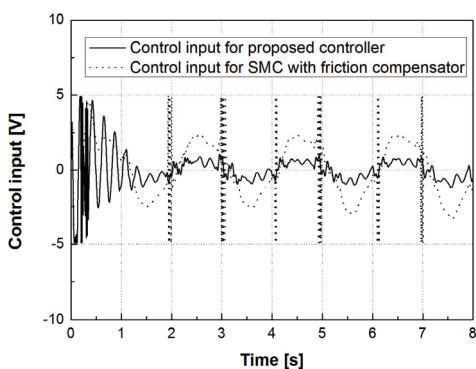


Fig. 10 Compared Control input

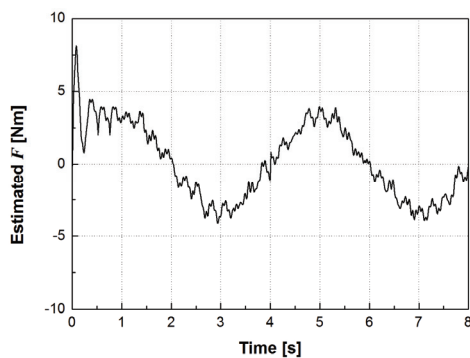


Fig. 11 Estimated uncertainties for the proposed controller

## 6. 결론

본 논문에서는 육상 및 해양 플랜트 분야에 널리 사용되는 버터플라이 밸브의 마찰 특성에 대해 분석하였다. 실험을 통해 획득한 마찰 특성을 이용하여 LuGre모델의 파라미터를 G.A.알고리즘을

이용하여 규명하였다. 또한 버터플라이 밸브의 제어성능을 개선하기 위한 퍼지-뉴럴네트워크 알고리즘을 적용한 슬라이딩모드 제어시스템을 제안하였다. 제안된 제어시스템의 성능을 산업현장에서 널리 사용되는 PID제어기 와 슬라이딩 모드제어기의 응답성능을 비교하여 평가하였다. 실험의 결과에서와 같이 제안된 제어시스템은 주어진 시스템에 대한 충분한 모델식이 존재하지 않아도 만족스러운 제어성능을 나타내었다.

## 후 기

이 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

1. Cho, S. H. and Lee, M. W., "Simple Adaptive Position Control of a Hydraulic Cylinder-load System Driven by a Proportional Directional Control Valve," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 28, No. 8, pp. 936-941, 2011.
2. Lee, S. M., Park, Y. C., and Jo, Y. J., "The Structural Safety Evaluation for Butterfly Valve of Extra-Large Type Using Fluid-Structure Interaction Techniques," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 571-572, 2008
3. Bae, T. S., Kim, S. P., and Lee, K. H., "Structural Optimization of a Manifold Valve for Pressure Vessel," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 26, No. 12, pp. 102-109, 2009.
4. Duan, H., Liu, S., Wang, D., and Yu, X., "Design and realization of hybrid ACO-based PID and LuGre friction compensation controller for three degree-of-freedom high precision flight simulator," Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 17, No. 6, pp. 1160-1169, 2009.
5. Armstrong, B. and Amin, B. "PID control in the presence of static friction: A comparison of algebraic and describing function analysis," Automatica, Vol. 32, No. 5, pp. 679-692, 1996.
6. Brian, A. H., Dupont, P., and De Wit, C. C., "A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction," Automatica, Vol. 30, No. 7, pp. 1083-1138, 1994.

7. Claudio, G., "Comparison of friction models applied to a control valve," *Control Engineering Practice*, Vol. 16, No. 10, pp. 1231-1243, 2008.
8. Slotine, J. J. and Li, W., "Applied Nonlinear Control," Prentice Hall, 1991.
9. Lin, F. J., Shen, P. H., Yang, S. L., and Chou, P. H., "Recurrent radial basis function network-based fuzzy neural network control for permanent-magnet linear synchronous motor servo drive," *IEEE Transactions on magnetics*, Vol. 42, No. 11, pp. 3694-3705, 2006.