https://doi.org/10.21289/KSIC.2016.19.4.193 KSIC

호퍼의 수준 제어를 위한 퍼지 PID 제어기의 설계

Design of Fuzzy PID Controller for Level Control of Hopper

권순홍[1], 진병연[1], 박강박[1*]

Soon Hong Kwon[1], Byungyun Jin[1], Kang-Bak Park1*

〈Abstract〉

There are many hoppers in the actual industrial plants such as grain hoppers in agricultural companies, surge hoppers in steel companies, and so on. In general, they are time-delay systems so that their level control is not easy. Thus, they have been manually controlled to avoid the overflow and empty out. In this paper, we proposed Fuzzy PID controller for level control of hopper systems. To show the effectiveness of the proposed scheme, some simulation results are given.

Keywords :
Time-Delay Systems, Hopper System, Fuzzy Control, Level Control

1*정회원, 박강박, 고려대학교 세종캠퍼스 제어계측공학과, 교수, 한국과학기술원 전기및전자공학과 박사,
(세종특별자치시 조치원읍 세종로 2511,
TEL: 044-860-1445, Email: kbpark@korea.ac.kr)

1*Dept. of Control and Instrumentation Engineering, Korea University Sejong Campus, Professor, KAIST Dept. of Electrical Engineering, (2511 Sejong-ro, Jochiwon, Sejong City, TEL: 044-860-1445,
Email: kbpark@korea.ac.kr) .

1. 서 론

호퍼(hopper)란 V자 형의 용기로, 무엇인가를 담아서 아래로 내려 보내는 역할을 한다. 적용하는 곳에 따라 배합된 곡물을 저장하는 데 사용되기도 하며, 철광석의 배합된 원료를 저장하는데 사용되기도 한다. 이와 같은 호퍼는 원재료들로부터 호퍼의 입구까지 운송되기까지 많은 시간이 소요되는 것이 일반적이므로 시간 지연이 긴 시스템이라 할 수 있다. 이렇게 시간 지연이 긴 시스템은 호퍼에서의 유출량의 변화에 유입량을 바로 맞추기가 어려우므로 일반적으로 조업자의 수동 제어에 의존하고 있는 실정이며, 호퍼가 넘치거나 반대로 비는 것을 방지하기 위하여 호퍼의 용량을 불필요하게 크게 설계하게 되어 자원의 낭비 및 유지비용의 증가 등을 초래하게 된다. 따라서 이 부분에 대한 자동화가 이루어지면 호퍼의 용량을 보다 작게 설계할 수 있고, 보다 효율적이고 안정적인 제어가 가능하게 되겠지만 아직까지 기존의 연구 결과도 별로 없는 실정이다 [1].

PID 제어기는 직관적이며 구현이 쉬운 제어 기법으로 가장 오래된 제어 기법중 하나이면서 동시에 여전히 산업 전반에 널리 사용되어오고 있는 기법이기도 하다 [2]-[4]. 이러한 PID 제어기의 제어 이득 값은, 지글러-니콜스(Ziegler-Nichols) 방법 등 일반적으로 널리 알려진 방법을 이용하여 설정하고, 시스템의 운영 상황을 봐가면서 조업자가 이득 값을 조금씩 변경시키는 것이 일반적이다.

퍼지 시스템은 소속 함수와 규칙을 기반으로 언어적 변수를 표현하여 활용하는 기법인 연유로 사람이 직접 개입하고 있는 분야에 적용하기 용이하다는 장점을 갖고 있다. 또한, 비선형 시스템에 널리 이용되어온 제어 기법 중 하나이며 Takagi-Sugeno(TS) 제어는 구조가 간단하고 수학적 분석이 가능한 장점 등이 있어 널리 사용되어오고 있다 [5]-[8]. 이에 본 논문에서는 호퍼가 원하는 수준을 기준으로 일정한 범위를 넘지 않도록 하기 위한 퍼지 PID 제어기를 설계하고, 제안된 제어기의 유효성을 보이기 위해 모의실험을 수행하고자 한다.

2. 호퍼 시스템

호퍼의 레벨은 내부에 담겨있는 내용물인 배합된 원료의 밀도가 일정하다고 가정하면, 무게와 비례한다고 볼 수 있다. 따라서 다음 수식과 같이 모델링 할 수 있다.

$$\dot{y}(t) = u(t-T) - d(t). \tag{1}$$

여기서 $y(t)$는 호퍼에 담겨있는 배합원료의 무게를 나타내고, $u(t)$는 호퍼에 들어가서 배합될 원료들의 시간당 무게(유입량)를 나타내며, $d(t)$는 호퍼에서 시간당 빠져나가는 배합원료의 양(유출량)을 의미하고, T는 배합될 원료들이 호퍼에 도달하기까지 소요되는 시간을 의미한다.

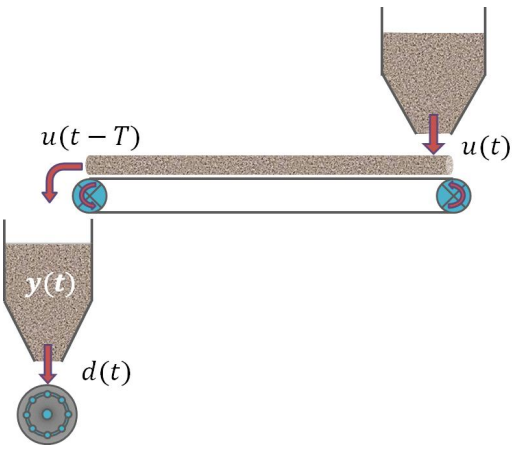

Fig. 1. Overview of the Hopper system

따라서 이것은 입력 지연 시스템으로 볼 수 있으며, 일반적으로 이 시간은 매우 길다. 그림 1은 이러한 시스템에 대한 개략도를 나타낸다.

3. 제어기 설계

일반적으로 호퍼로부터의 유출량을 원하는 양이 되도록 조절할 수 있게 되어있으므로, $d(t)$는 측정이 가능하다. 따라서 이를 활용하면 아래와 같은 가장 간단한 제어기를 생각해볼 수 있다.

$$u(t) = d(t). \tag{2}$$

이러한 제어기를 이용하면, $d(t)$를 측정하여 그만큼을 입력하려고 하면, T만큼 시간이 지난 후에 호퍼에 유입되게 된다. 즉, 시각 t에서 일어난 변화량을 보상하기 위한 실제 입력은 $t+T$에서 일어남을 알 수 있다. 따라서 이러한 지연 시간 동안에 일어나는 변화의 폭이 작은 일정한 범위 내에서 일어남을 보장할 수만 있고 호퍼의 전체 용량이 이를 수용할 수 있다면, 식 (2)와 같은 제어기를 사용해도 무방하다고 할 수 있다. 그러나 그러한 경우라 할지라도 만일 호퍼의 유출량의 측정치인 $d(t)$에 아무리 작더라고 편차가 있는 경우에는 그것이 계속 누적되어 호퍼가 넘치거나 비어버리는 일이 발생할 수 있게 된다. 따라서 본 논문에서는 퍼지 PID 제어기를 추가하여 개선된 성능을 보이는 제어기를 제안하고자 한다.

주어진 호퍼의 최대 용량을 100%라고 한다면, 적정 수준은 그에 많이 못 미치게 설정하게 된다. 이 수준에 비례하는 배합원료의 양을 y_d라고 하면, 수준 오차는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$e(t) = y_d - y(t). \tag{3}$$

이를 이용하여 다음과 같은 퍼지 PID 제어기를 제안한다.

$$u(t) = d(t) + F_p e(t) + F_I \int_0^t e(\tau)d\tau + F_D \dot{e}(t). \tag{4}$$

여기서 F_p는 퍼지 비례 이득(K_p)을 나타내고, F_I는 퍼지 적분 이득(K_I)을 나타내며, F_D는 퍼지 미분 이득(K_D)을 나타낸다. 각 변수의 퍼지화에 사용된 소속 함수(Membership Function)로는 그림 2와 같은 삼각함수(Triangular membership function)를 활용하였다.

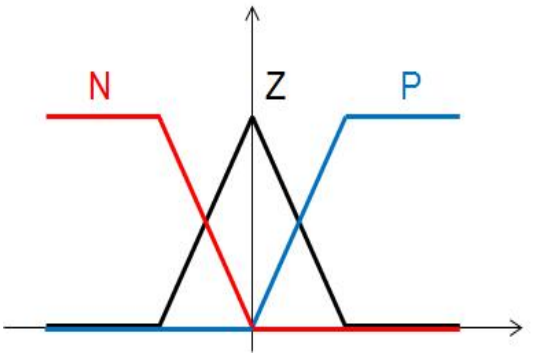

Fig. 2. Membership Function(Triangular Function) for Fuzzy Controller

이와 같은 소속 함수를 이용하여 소속 값을 구하여, 퍼지 추론을 통해 제안된 제어기에서 사용할 F_P, F_D, F_I 값들을 도출하였다. 퍼지 추론은 규칙기반(rule base)을 통해 수행하였으며, 세 가지 제어이득 중 F_P 및 F_D는 $e(t)$와 $\dot{e}(t)$값을 활용하여 2차원으로 도출하였고(그림 3 참조), F_I는 $\int_0^t e(\tau)d\tau$ 값만 활용하여 도출하였다.

그림 3 등을 기반으로 한 퍼지 추론을 통해 얻어진 제어기의 이득들을 수치화하는 과정인 역퍼지화(defuzzification)를 위해서 가장 많이 사용

되는 무게중심법(center of gravity method)을 사용하였다.

		$e(t)$		
		N	Z	P
$\dot{e}(t)$	N	NB	NS	ZR
	Z	NS	ZR	PS
	P	ZR	PS	PB

Fig. 3. Rules for F_P and F_D

4. 모의실험 결과

제안된 제어 기법을 적용하여 호퍼의 수준 제어를 수행하였다. 모의실험 결과 그래프에서 가로축은 시간 축(단위: 분)이고, 세로축은 호퍼의 전체 용량에 대한 상대적 수준(%)을 나타내며, 이에 대한 원하는 값인 y_d는 70%로 설정하였고, 유입량의 지연 시간은 15분으로 설정했다.

그림 4는 모의실험에 사용된 시간당 유출량을 나타낸다.

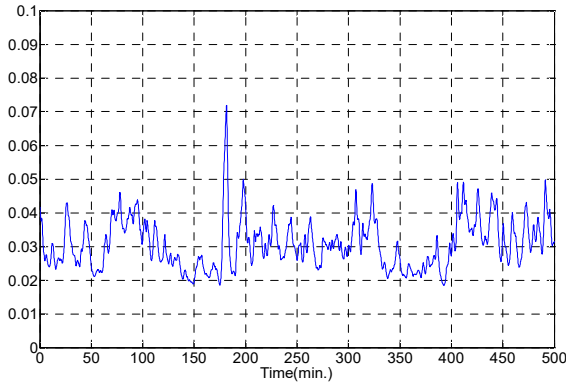

Fig. 4. The outflow rate of hopper

그림 5는 식 (2)의 제어기와 식 (4)의 제안된 퍼지 PID 제어기를 적용한 결과를 나타낸다. 그림 5에서 보이듯이, 제안된 방법은 녹색으로 표시된 원하는 수준에 근접하기 위하여 애쓰는 모습을 볼 수 있으나, 기존의 방법은 계속 처져있고 시간이 지나도 그러한 시도를 하지 않고 있음을 알 수 있다.

이러한 성능의 차이는 정량적으로도 관찰할 수 있었다. RMS 오차를 확인해 본 결과. 두 방법에 대한 RMS 오차는 다음 표와 같았다.

Table 1. RMS errors for Proposed and Conventional Control Schemes

Proposed	Conventional	Difference
4.71	6.18	31.2%

이 표로부터 알 수 있듯이, 제안된 방법이 기존의 방법보다 월등히 우수함을 알 수 있다.

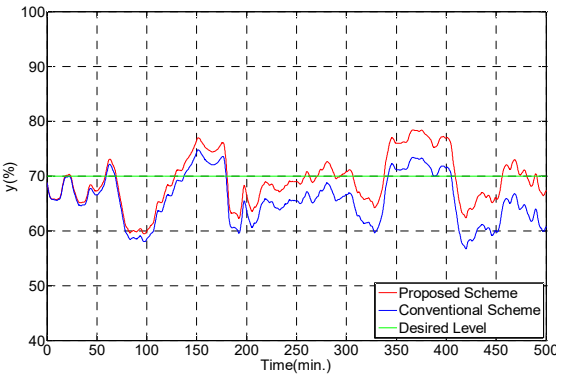

Fig. 5. Results of Proposed and Conventional Control Schemes

그림 6은 제안된 방법과 기존의 방법의 차이점만을 부각하기 위한 모의실험 결과이다. 이 모의실험에서는 y_d를 60%로 설정하여 진행했고, 일정 구간 동안 유출량이 일정하도록 실험 조건

을 설정했을 때의 결과이다.

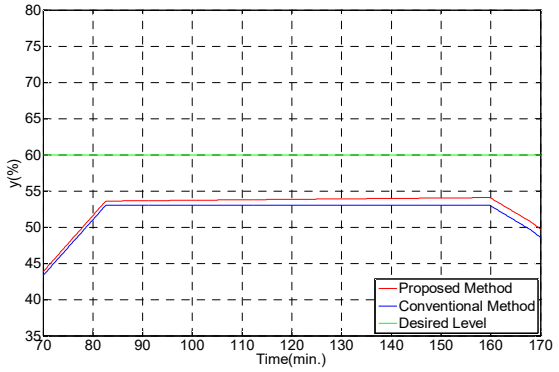

Fig. 6. Results for the case of constant outflow

그림 6에서 알 수 있듯이 유출량이 일정한 경우, 기존의 방법은 원하는 수준에 도달하지 못하더라도 유입량 또한 일정하게 유지하도록 제어하고 있음을 알 수 있다. 반면에 제안된 방법은 원하는 수준에 근접하는 방향으로 동작하고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 호퍼의 수준 제어를 위해 호퍼의 유출량 정보와 퍼지 PID 제어 기법을 결합한 형태의 제어기를 제안하였다. 모의실험 결과 호퍼의 유출량만 제어기에 적용하는 기존의 방법에 비해 퍼지 PID 제어 기법을 가미한 제안된 방법이 더 좋은 성능을 나타냄임을 보일 수 있었다.

참고문헌

[1] J. Xiang, M. Wu, P. Duan, W.-H. Cao, and Y. He, “Coordinating fuzzy control of the sintering process,” Proc. of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control, Korea, pp. 7717-7722, 2008.

[2] A. Visioli, “Practical PID Control,” Springer, 2006.

[3] L. Wang, S. Chai, D. Yoo, L. Gan, and K. Ng, “PID and Predictive control of electrical drives and power converters using MATLAB/ SIMULINK,” Springer, 2015.

[4] 이평기, “성능개선을 위한 룩업테이블 하이브리드 퍼지제어 시스템,” 한국산업융합학회 논문집 19(3), pp. 101-108, 2016.

[5] Li-Xin Wang, “A course in Fuzzy Systems & Control,” Prentice Hall Inc., 1997.

[6] H. Cao, Y. Wang, L. Jia, G. Si, and Y. Zhang, “Generalized Tagaki-Sugeno fuzzy rules based prediction model with application to power plant pulverizing system,” IEEE CDC, pp. 7409-7414, 2013.

[7] 신진호, “불확실성을 가지는 전기 구동 논홀로노믹 이동 로봇의 궤적 추종을 위한 강인 적응 퍼지 백스테핑 제어,” Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, pp. 902-911, 2012.

[8] 박철재, “CCD 폭 측정 시스템 및 퍼지 PID를 이용한 CFWC 제어기 설계,” Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, pp. 991-997, 2013.

(접수:2016.09.23.,수정:2016.10.13., 개제확정:2016.11.04)