

버터워스 필터를 이용한 감량식 정량연속공급장치 제어 시스템

A Control System Using Butterworth Filter for Loss-in-Weight Feeders

강인재¹, 문성민¹, 권준호¹, 홍대희²✉
In-Jae Kang¹, Sung-Min Moon¹, Joon Ho Kwon¹, and Daehie Hong²✉

¹ 고려대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea University)
² 고려대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea University)
✉ Corresponding author: dhong@korea.ac.kr, Tel: +82-2-3290-3369

Manuscript received: 2014.1.3 / Revised: 2014.5.21 / Accepted: 2014.7.3

A Loss-in-Weight (LIW) feeder, a type of automated measuring device, is a continuous feeder used in many mass production industries. Due to its versatility, there have been constant demands of LIW feeders in food production supply lines as well as chemical and pharmaceutical industries. In this paper, the process of designing a LIW feeder system with better performance will be examined and compared with commercial products. This system is characterized by low pass Butterworth filter and feed forward PI control. The filter is for noise disposal caused by dynamic condition of a LIW feeder. The feed forward PI control, based on linearity feature of feeders, is adequate for stable driving of the system. At the end, a possible evaluation method of LIW system will be proposed to verify the specific achievement of this paper.

Key Words: Loss-in-Weight Feeder (감량식 정량연속공급장치), Butterworth Filter (버터워스 필터), Load Cell (로드셀), Feed Forward PI Control (피드 포워드 컨트롤), Feeder Accuracy (공급기 정확도)

1. 서론

연속 계량 장치는 유동성이 있는 분체와 같은 물체를 특정 장치에 통과 시켜 배출 되는 양을 계량하는 기기로 정의 할 수 있다. 연속 계량 장치의 대표적인 예는 컨베이어 벨트 시스템으로 대량 생산을 요하는 식품, 유통업 등에 많이 이용되고 있다. 이 장치는 컨베이어 벨트 위에서 움직이는 물체의 무게를 계량하는 자동저울이라고 할 수 있다. 이 외에도 낙하하고 있는 물체의 충격량을 계산하여 유량을 측정하는 충격 저울, 코리올리 효과와 유량의 관계를 이용하는 회전 저울 또한 그

목적에 따라 이용되고 있다.¹

본 논문에서 주로 다루고자 하는 정량연속공급장치 역시 연속 계량 장치의 한 종류로써 계량하고자 하는 물질을 일정한 속도로 연속 공급하고자 개발된 장치이다. 기초적인 형태의 정량연속공급장치는 원하는 유량에 근접하도록 모터를 일정 속도로 운전하는 수준에 그치기 때문에 고 정밀도를 기대하기 어렵다. 또한 계량하고자 하는 물질의 밀도나 특성에 따라 계량 효율이 불규칙하기 때문에 구현할 수 있는 정밀도에 한계가 있다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위해 실시간으로 배출 되는 물체의 양을 감지하고 이를 모터 속도

에 반영하는 방식이 주로 사용되고 있다. 이를 감량식 정량연속공급장치라고 하며 본 논문에서는 명칭의 편의를 위하여 ‘감량식’을 생략한 정량연속공급장치라고 명명 하였다. 앞서 언급한 컨베이어 벨트 시스템과 비교해 볼 때 스크류 피더를 도입하여 분체 상태 물질을 계량하는데 더 유리한 구조이며 배출 속도를 직접 제어 할 수 있다는 데 장점이 있다. 이러한 특징을 이용하여 분당 수 그램 단위의 제약 분야에서 시간 당 수 톤 단위의 중공업 환경까지 다양하게 적용 할 수 있는 범용성이 있다.¹

무게 변화를 감지하기 위해 사용되는 센서인 로드셀은 감도가 높기 때문에 주변의 진동이나 모터의 회전 등에 의한 외란에 취약하다. 이는 계량 오차를 야기하며 고 정밀도를 구현하는데 어려움이 많다. 따라서 FIR 필터나 Kalman 필터 등과 같이 디지털 필터를 이용한 시스템 안정화에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.^{2,3} 또한 움직이고 있는 물체에 대한 무게 측정은 기존의 방식으로 수행 할 수 없기 때문에 이에 적합한 지능 알고리즘이나 자기동조제어 방법 등도 소개되고 있다.^{4,5}

본 논문 역시 외란을 처리 할 수 있는 디지털 필터를 사용하여 정밀한 제어를 구현하고자 한다. 가장 평탄화 성능이 우수한 버터워스 필터를 신호 처리에 적용하였으며 신호 분석을 통하여 통과 대역을 선정하는 과정을 기술 하였다. 더 나아가 시스템 출력의 선형성을 바탕으로 제어 입력 값을 예상하는 피드 포워드 제어를 적용하였다. 마지막으로 시스템 평가 방법을 소개하여 정량적인 결과를 도출하고자 한다.

2. 정량연속공급장치 개요

2.1 정량연속공급장치 구성

본 논문에서 다루고 있는 정량연속공급장치의 작동원리는 장치로부터 배출되는 물질을 정확하게 계량하여 감량되는 무게를 실시간으로 감지하고 이를 바탕으로 배출 속도를 조절한다. 스크류 타입의 이송 방식은 분체의 연속적인 흐름을 만들어 낼 수 있으며 이는 정량연속공급 장치의 가장 큰 특징이다. 따라서 정량연속공급장치가 주로 사용되는 산업 환경은 식품 산업과 같이 설탕이나 밀가루, 소금을 생산하는 라인이며 이 외에도 화학, 제약 산업이나 플라스틱 재료, 염료 등을 정밀 계량하는 환경에도 널리 사용되고 있다.⁶

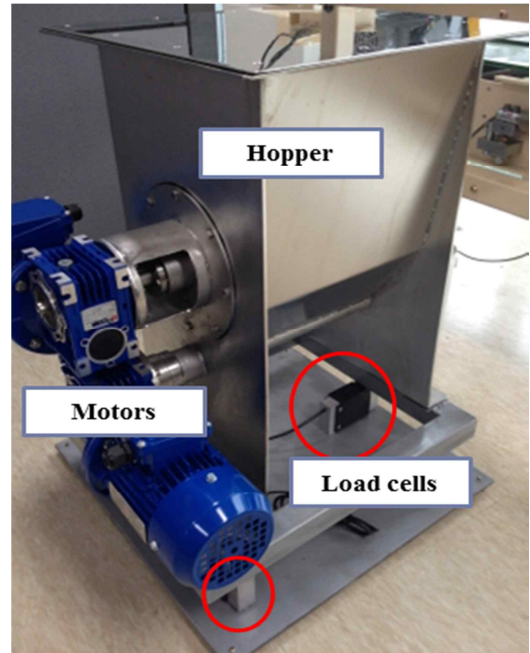


Fig. 1 LIW feeder Hardware configuration

정량연속공급장치의 외형은 Fig. 1과 같다. 계량할 분체를 상단에 저장할 수 있는 호퍼(hopper)가 있고 내부에서 멩치거나 부착할 수 있는 분체를 균일하게 섞는 교반기를 설치한다. 그 밑에는 분체 배출구가 있고 모터로 구동되는 스크류의 회전을 통해 저장된 분체를 장치 밖으로 이송, 배출하게 된다. 앞서 기술한 바와 같이 정밀한 계량을 위하여 시스템 전체 무게에 대한 감량 속도 제어가 필요한데 이러한 공급 방식을 Loss-in-Weight 줄여서 LIW라 한다. 전체 시스템 무게의 1/3000의 해상도로 무게 변화를 감지 해내는 것이 이론적으로 구현 가능한 정밀도로 평가된다.¹ 하지만 이에 따른 고해상도의 로드셀 적용은 높은 해상도만큼이나 주변 환경에 의한 외란에 민감하게 반응하므로 이 외란을 처리하는 과정이 필요하다.

2.2 정량연속공급장치 작동 원리

아래의 Fig. 2는 정량연속공급장치의 제어 개략도이다. 스크류 회전에 의해 이송되는 호퍼 내의 분체를 장치 밖으로 배출하면 전체 시스템 무게는 감소하게 된다. 감소하는 무게는 로드셀로 측정되며 이 무게 변화를 실시간으로 감지한다. 이를 바탕으로 컨트롤러에서 시간에 따른 정확한 감량 속도를 계산하고 이를 스크류 속도에 반영하는 것

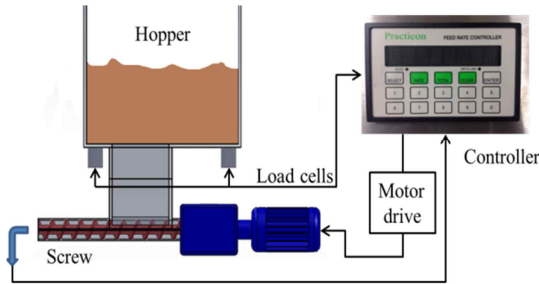


Fig. 2 A typical LIW controller

을 반복하여 감량속도를 일정하게 유지하게 된다. 목표 값보다 배출 속도가 빠르면 스크류 회전을 느리게 하고 그 반대의 경우 스크류 회전을 빠르게 하는 궤환 제어를 구현한다. 정량연속공급장치의 제어 목표를 수식으로 표현하면 (1)과 같다.

$$\frac{\Delta W}{\Delta T} = Constant \quad (1)$$

즉, 시간당 무게 변화를 일정하게 유지하여 일정한 속도로 배출하는 것이 본 장치의 목적이다.

3. 로드셀 신호 처리

3.1 로드셀 신호 분석

본 연구에서 사용한 로드셀은 TEDEA의 1010 제품으로 용량은 90kg이며 최대 150kg의 하중을 견딜 수 있다. 적재 하중의 0.02 %의 오차율을 나타낸다. 그러나 이 오차율은 정적인 상태에서 기대 할 수 있는 성능이며 실제 구동 환경에서는 모터 회전 등으로 인한 진동에 쉽게 노출 된다. 이러한 조건에서 로드셀 본래의 오차율에 근접하는 정밀도를 구현 할 수 있을 것인가가 본 논문의 주제라고 할 수 있다. 장치를 구동하면서 발생하는 신호는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 분체 배출에 의한 일정한 감소 신호와 분체 배출과는 관계가 없는 모터 진동 등에 의한 신호이다. 스크류 피더의 특성상 감소 신호의 맥동이 발생 할 수 있으며 본 장치에서의 맥동 주파수는 스크류의 최대 회전 속도인 약 2Hz 이다. 이 외에 모터 진동 등에 의한 외란을 알아보기 위하여 로드셀 신호를 시간에 따라 출력해 보았다. 로드셀 출력 신호의 중첩 상태에서는 외란의 특성을 파악하기 어렵다. 따라서 이 신호를 고속푸리에 변환을 통하여 분석해 보려고 한다.

3.2 디지털 필터 설계

모터 회전 속도에 따른 고속푸리에 변환 결과 그래프가 Fig. 3에 나타나있다. 스크류 회전 감속비는 15:1이며 모터에 의한 진동과 스크류에 의한 진동이 외란으로 나타날 것으로 예상 할 수 있다. 그러나 실제 변환 결과 모터 회전에 의한 외란만이 주요하게 나타났다. 또한 모터 속도가 느릴수록 외란의 진폭이 작아지는 특성이 있고 10 Hz 이하의 속도에서는 침점이 나타나지 않는다. 이러한 현상은 저회전 영역에서 입력 전류가 작아 모터가 저항을 이기지 못하고 정지하는 현상이 나타나기 때문에 발생한다. 따라서 이러한 외란을 처리하기 위해 저주파 통과 버터워스 필터를 적용하였다. 버터워스 필터는 리플을 발생시키지 않는 평탄화 성능이 가장 우수한 필터로 알려져 있다.⁷ 이 특성이 로드셀 신호 처리를 위해 적합한 필터라는 판단을 하였다. 컷오프 주파수는 10 Hz로 선정 하였다. 이는 10 Hz 이상의 영역에서 모터 회전에 의한 외란이 주요하기 때문이다. 일반적으로 운동 상태에 있는 계량 물체는 로드셀 출력 신호에서 약 10 Hz 내외의 저주파 영역에서 나타난다고 알려져 있다.⁴ 결국 계량 물체에 의한 신호는 통과시키고 모터 진동 신호는 통과시키지 않는 10 Hz 컷오프를 선정할 수 있다. 버터워스 필터의 크기에 대한 전달 함수는 (2)와 같다.

$$|H(j \omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{2n}}} \quad (2)$$

ω 는 주파수 입력이며 ω_0 는 컷오프 주파수, n 은 필터의 차수이다. 통과 대역의 평편성은 0.45 dB를 갖고 정지 대역은 10 Hz 이상으로 필터 설계를 하였다. 이를 만족하는 버터워스 필터의 차수는 3차이며 최종 전달 함수는 (3)과 같다.

$$|H(j \omega)| = \frac{3948}{s^2 + 62.83s + 3948} \quad (3)$$

전달함수를 토대로 주파수 응답 곡선을 도출해 본 결과가 Fig. 4에 나타나 있다. 외란의 최댓값을 갖는 주파수인 10 Hz 영역에서의 감소가 시작되며 위상 값 또한 아래의 그래프에서 역시 확인 할 수 있다. 위상곡선에서 10 Hz(62.8 rad/s) 영역에서 위상값은 -89.9이며 이때의 시간 지연은 10 Hz의 주기 0.1초의 1/4인 0.025초로 통과 대역에 있는

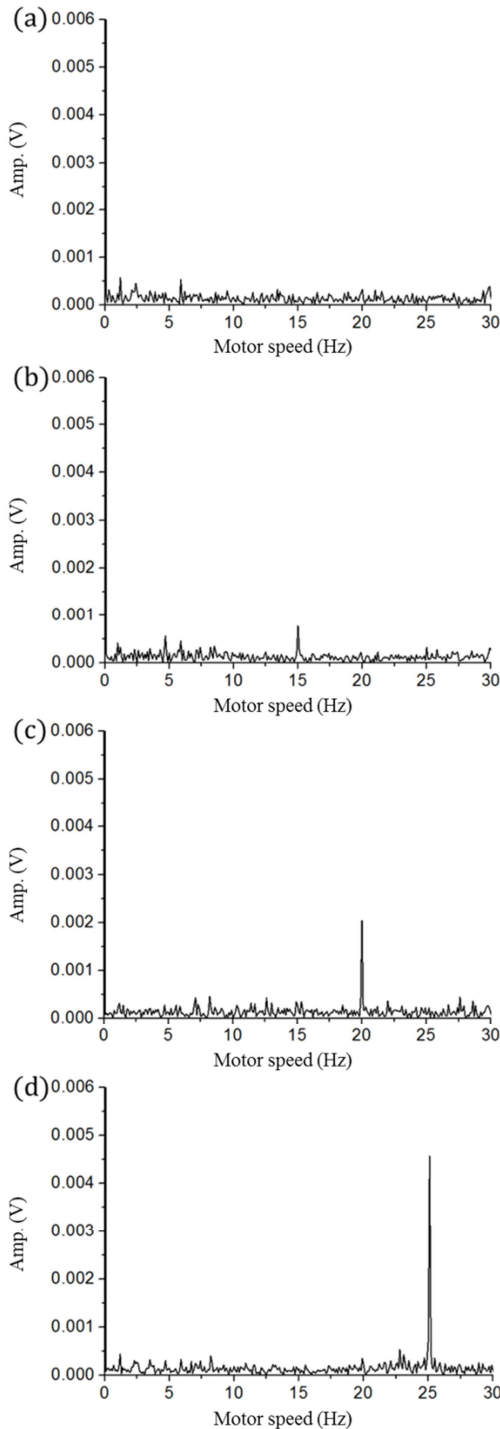


Fig. 3 FFT of load cell signal during operation with respect to motor speed (a) 10 Hz, (b) 15 Hz, (c) 20 Hz, (d) 25 Hz

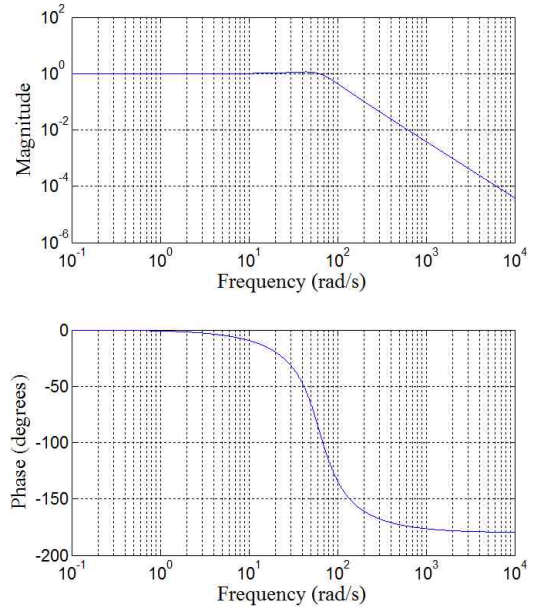


Fig. 4 Butterworth filter frequency response

신호는 0.025초 혹은 그 이하의 시간 지연을 나타내게 된다. 이는 다음 절에서 설명할 제어 주기 10 Hz보다 더 빠른 시간이기 때문에 시스템에 주는 영향이 거의 없다. 또한 정량연속공급장치는 한 번에 최소 10분 이상의 긴 운용시간을 가지고 있고 분당 배출 무게를 기준으로 평가하기 때문에 이러한 시간 지연은 무시 할 수 있을 정도로 짧다.

4 컨트롤러 설계 및 평가

4.1 컨트롤 알고리즘

로드셀에서 실시간으로 측정되는 무게 데이터로 정량연속공급장치의 배출 속도를 구할 수 있다. 따라서 이 배출 속도를 조절 할 수 있는 컨트롤러가 필요하다. 정량연속공급장치의 제어는 체적공급 방법과 중량 공급 방식 두 가지로 나뉜다.¹ 체적공급 방식은 스크류의 회전 속도를 일정하게 하여 원하는 배출 속도를 구현하고자 하는 것이다. 그러나 이는 밀도가 불균일하고 유동성이 좋지 못한 분체를 계량할 때 정확도가 낮고 로드셀이 없어 케환 제어가 불가능하다. 이와 같은 단점을 보완하고 고안된 것이 중량 공급 방법이다. 중량공급 방법은 앞 절에서 설명한 바와 같이 실시간으로 줄어드는 무게를 로드셀로 계량하기 때문에 케

환 제어가 가능하다. 본 논문에서 소개하는 제어는 체적 공급 방법에 의해 초기 입력을 예상하는 피드 포워드 방식을 적용한다. 이를 식으로 표현하면 (4), (5)와 같다.

$$u(s) = K_p * e(s) + K_I * \frac{e(s)}{s} + u_{ff}(s) \quad (4)$$

$$e(s) = w(s) - y(s) \quad (5)$$

u_{ff} 는 피드 포워드 입력이고 y 는 실제 배출 속도, w 는 사용자가 원하는 기준 배출 속도이다. e 는 오차를 의미하며 K_p 는 비례이득, K_I 는 적분이득을 나타낸다. 체적 공급 방법에 따라 예상되는 입력 값을 기준으로 제어하여 실시간으로 변화하는 배출 속도를 기준 속도에 맞게 추종할 수 있는 제어 방법이다.⁸ 피드 포워드 입력을 도출하는 방법은 다음과 같다. 스크류의 피치와 회전 속도에 따라 이송되는 부피를 알 수 있다. 계량하는 물체의 밀도를 알면 이송되는 부피에 따른 배출 질량을 구할 수 있으므로 이 과정을 통하여 초기 입력을 예상하고 제어에 반영하는 것이다.

4.2 컨트롤러 평가

설계한 정량연속공급장치를 다음 두 가지 평가 항목에 관해 실험 하였다. 먼저 반복성 평가 방법이다. 반복성 평가는 일정 시간 동안 배출 되는 분체의 양이 얼마나 일정한지를 측정한다. 1분 간격으로 10개의 표본을 연속으로 측정하여 평균과 표준 편차를 구한 뒤 백분율로 오차를 계산한다. 이를 식으로 표현하면 (6)와 같다.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (6)$$

X_i 은 각 표본의 측정값, \bar{X} 는 표본의 평균이며 n 은 표본의 개수이다. 구한 표준 편차 S 를 이용하여 반복성 오차를 백분율로 표기하면 (7)과 같다.⁹

$$\text{Repeatability (\%)} = \frac{S}{\bar{X}} \times 100 \quad (7)$$

측정한 10개의 표본이 모두 같은 값을 갖는 이상적인 경우 반복성 오차율은 0 %가 된다. 하지만 반복성이 완벽하여도 시스템의 오차가 발생할 수 있다. 목표 값에 얼마나 근접한지 확인 할 수 있

Table 1 Test result ($K_p = 1$ $K_I = 0.1$)

Repeatability & accuracy test				
Feed rate (g/min)		600		
Test duration (min)		10		
Bulk material		Millet (0.801 g/cm ³)		
P gain		1.0		
I gain		0.1		
Measuring results				
Sample	Time (sec)	Weight (g)	Loss (g)	Setpoint (g)
1	60	596	596	600
2	120	1197	601	600
3	180	1794	597	600
4	240	2388	594	600
5	300	2981	593	600
6	360	3585	604	600
7	420	4186	601	600
8	480	4783	597	600
9	540	5379	596	600
10	600	5982	603	600
Mean (g)			598.2	
Standard deviation (g)			3.6	
Repeatability error (%)			0.60	
Accuracy (%)			0.30	

는 방법이 정확성 평가이다. 정확성 평가 방법은 앞서 구한 10개의 표본을 그대로 이용한다. 표본의 평균값을 사용자가 목표한 값과 비교하여 백분율로 표기한다. 이를 식으로 나타내면 (8)과 같다.⁹

$$\text{Accuracy (\%)} = \frac{\text{total sample} - \text{setpoint}}{\text{setpoint}} \times 100 \quad (8)$$

n 은 표본의 개수이며 total sample은 측정 총량, setpoint는 사용자가 지정한 배출 속도이다. 평가 방법을 이용하여 실제 정량연속공급장치의 성능을 시험 하였다. 소개한 평가 방법에 의한 결과는 Table 1에 작성 하였다. 사용자가 원하는 기준 속도와 측정 시간, 사용한 분체의 종류와 밀도가 표기 되어 있다. 그리고 PI 제어 변수가 표기 되어 있다. 또한 10개 표본의 표준편차와 평균을 바탕으로 반복성과 정확성에 대한 백분율 오차가 최종 결과를 나타낸다. 실험에서의 반복성은 0.6%, 정확성에서는 0.3%의 오차율을 보였다. 이는 상용 장치의 정확도 오차율인 0.5~1% 보다 더 우수한 결과이다.

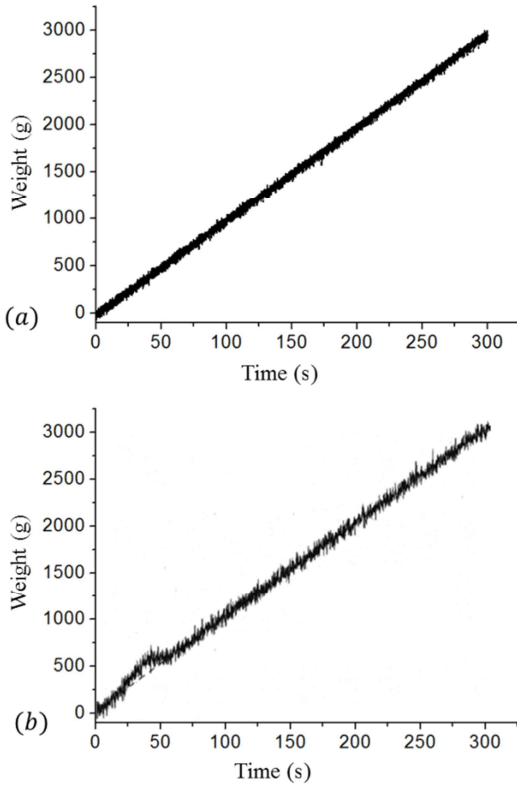


Fig. 5 Output results (a) feed forward PI, (b) extremum seeking method

다만 다양한 분체에 대하여 실험을 수행한 것이 아니기 때문에 실험에서 도출한 오차율은 달라질 수 있다. 위의 Fig. 5은 기존의 논문의 실험 결과와 본 논문의 실험 결과를 비교하는 그래프이다. (a)에 해당하는 본 논문의 실험 결과 그래프가 기존 연구결과 (b)보다 작동 초기부터 더 좋은 추종성을 나타내는 것을 확인 할 수 있다.¹⁰

5. 결론

본 논문에서는 정량연속공급장치의 오차를 줄이기 위해 외란을 분석하였으며 이를 제거하기 위한 디지털 필터를 적용하였다. 저주파 통과 버터워스 필터는 시스템의 왜곡 없이 필요한 성분만 추출하는 신호 처리를 가능하게 하였고 이를 바탕으로 피드 포워드 PI 제어를 설계하였다. 성능평가를 통하여 시스템 정확도를 정량적으로 도출하였고 본 연구 결과와 기존 연구 결과를 비교 하였다. 이를 근거로 신호 처리와 시스템 제어 방법

두 가지 측면에서 접근한 본 논문의 연구 결과의 우수성을 입증 할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(No. 2012 4010203250)과, 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2007-0056094).

REFERENCES

1. The Institute of Measurement and Control, "A Guide to Dynamic Weighing for Industry," Weighing & Force Measurement Panel, pp. 36-49, 2010.
2. Tasaki, R., Yamazaki, T., Ohnishi, H., Kobayashi, M., and Kurosu, S., "Continuous Weighing on a Conveyor Belt with FIR Filter," Conference on Force, Mass and Torque Measurement, Vol. 19, pp. 1-6, 2005.
3. Halimic, M. and Balachandran, W., "Kalman Filter for Dynamic Weighing System," Proc of the IEEE ISIE, Vol. 2, pp. 786-791, 1995.
4. Li, J., Zhou, L., and Wang, Q., "Study on Dynamic Weighing System Base on Intelligent Algorithm," IEEE ICCA, pp. 765-768, 2007.
5. Zare, B., Mohammadi, S. M. A., and Kiani, M., "A Self-Tuning Regulator by Using Bacterial Foraging Algorithm for Weight Belt Feeder," Computational Intelligence and Information Technology, pp. 38-43, 2011.
6. Lee, H., "Powder Quantitative Feeder," News & Information for Chemical Engineers, Vol. 27, No. 2, pp. 136-139, 2009.
7. Erer, K. S., "Adaptive Usage of the Butterworth Digital Filter," Journal of Biomechanics, Vol. 40, No. 13, pp. 2937-2943, 2007.
8. Sato, T. and Kumamoto, Y., "Adaptive PI Control with Feed-forward Compensator for a Weigh Feeder," Networking, International Conference on Sensing, and Control, pp. 428-433, 2009.
9. Steve, M., "Loss-in-weight Feeding Success: As Easy As 1, 2, 3," Powder and Bulk Engineering, Vol. 13, No. 12, pp. 59-67, 1999.

10. Araki, N., Sato, T., Kumamoto, Y., Iwai, Y., and Konishi, Y., "Design of Weigh Feeder Control System Using Extremum-Seeking Method," 7th Asian Control Conference, Vol. 7, pp. 250-255, 2009.