

단 신

계량탱크에서의 무게측정치를 이용한 원료투입량 제어

권오정 · 이광순 · 손종성* · 윤상철* · 이석호**

서강대학교 화학공학과

*제일모직(주)

**삼성엔지니어링(주)

(1993년 2월 26일 접수, 1993년 6월 14일 채택)

Feeding Rate Control Using Weight Measurement in a Weighing Tank

O Jeoung Kwon, Kwang Soon Lee, Jong Sung Son*, Sang Chul Yoon* and Suk Ho Lee**

Dept. Chem. Eng., Sogang Univ., Shinsoo-1, Mapogu, Seoul

*Cheil Industries

**Samsung Engineering Co., Ltd.

(Received 26 February 1993; accepted 14 June 1993)

요 약

유량계를 이용하지 않고 계량탱크(weighing tank)에서의 무게측정치를 이용하여 원료를 일정한 유량으로 투입할 수 있는 새로운 제어방법을 유량제어계의 루프해석을 통하여 제시하였다. 제시된 제어방법의 성능을 설정치 추적성능, 측정잡음에 대한 민감도의 관점에서 분석하였으며, 그 성능을 무게측정치를 직접 이용하는 다른 유량제어방법들과 비교하였다. 그 결과, 제시된 제어방법이 이 두 관점에서 모두 우수한 것으로 분석되었으며 실험을 통하여 이를 다시 확인할 수 있었다.

Abstract—A novel method for flow rate control in a batch feeding system was proposed through transformation of the conventional flow rate control loop. The proposed method does not need a flow rate measuring device, and directly utilizes the weight measurement in the weighing tank. Performance of the proposed control method was analyzed in the viewpoints of set point tracking as well as sensitivity to measurement noise, and was compared with those of other conceivable control methods which directly use the weight measurement. As a consequence, the proposed method was analyzed to be superior to the other flow rate control methods, which was again confirmed through experiments.

1. 서 론

회분식 공정에서는 정량의 원료를 일정한 유량으로 투입해야 하는 경우가 많다. 특히 회분식 반응기의 운전시 이러한 운전이 자주 요구되며 반응열의 분산을 위하여 혹은 중합생성물의 분자량 조절을 위하여 반응물을 일시에 투입하지 않고 일정한 유량으로 서서히

투입하는 경우가 많다. 이러한 운전을 위해서는 투입 원료 총량의 측정을 위하여 계량탱크(weighing tank)가 사용되고, 투입유량 제어를 위하여 유량계 혹은 무게 측정치의 미분에 의한 투입유량 추정기가 사용되는 것이 일반적이다. 유량계를 사용하는 경우는 추가적인 경제적 부담이 요구되며 유량계가 적은 오차를 가지더라도 이것이 누적되므로 투입총량에 대해서는 큰 오차를 유발

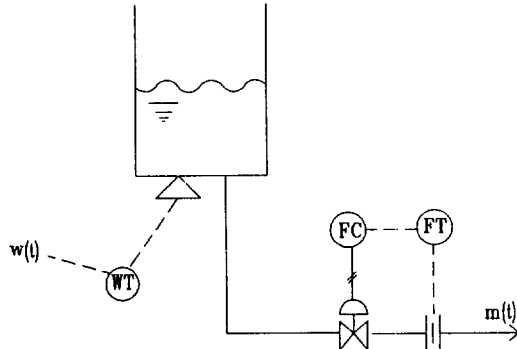


Fig. 1. Weighing tank with a flow rate control loop.

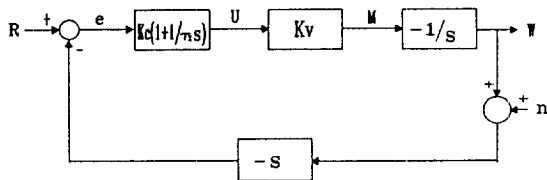


Fig. 2. Flow rate control loop which the flow rate is estimated through differentiating the weight measurement.

시킬 가능성이 있다. 한편 무게 측정치의 미분에 의한 유량추정은 잡음이 크게 증폭되는 문제점 때문에 제어계의 안정성이 심하게 손상을 받을 수 있으며 이에 따라 많은 제어오차가 발생될 가능성이 있다.

위에서 언급한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 유량제어계의 간단한 분석과 변환을 통하여 측정잡음에 대해 강한 성질을 갖는 무게측정치를 이용한 새로운 유량제어계를 제시하고자 하였다. 또한 제시된 유량제어계의 성능은 실험을 통하여 검증하고자 하였다.

2. 무게측정치의 미분치를 이용한 유량제어계

먼저 Fig. 1에 유량계가 설치되어 있는 공정의 유량 제어계를 생각해 보자. 여기서 공정자체의 전달함수는

$$W(s) = -\frac{1}{s}M(s), \text{ 여기서 } W = \omega - \omega_0, M = m \quad (1)$$

로 표현된다. 이제 유량은 시간에 따른 무게의 변화율 이므로, 무게측정치를 미분하여 유량을 추정할 때 Fig. 2와 같은 제어구조를 생각할 수 있다. 여기서 무게측정에는 잡음이 인가될 수 있으므로 비례-적분형 제어기가 사용되는 것을 가정하였다.

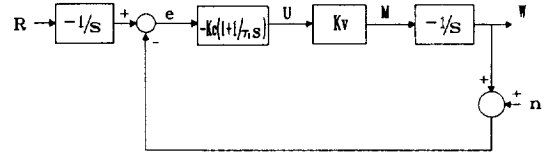


Fig. 3. Flow rate control loop which controls the weight decrease using a PI controller.

루프해석에 의하여 Fig. 2에 보인 제어계의 폐회로 성능식을 나타내면 아래와 같다.

$$\frac{M}{R} = \frac{K_c K_v \left(1 + \frac{1}{\tau_i s}\right)}{1 + K_c K_v \left(1 + \frac{1}{\tau_i s}\right)} = \frac{\tau_i s + 1}{\frac{\tau_i}{C K_v} s + 1} \quad (2)$$

$$\text{여기서 } C = \frac{K_c}{1 + K_c K_v}$$

$$\frac{M}{n} = \frac{M}{R} s = \frac{s(\tau_i s + 1)}{\frac{\tau_i}{C K_v} s + 1} \quad (3)$$

식 (2)로부터 설정점 R과 유량 M의 관계가 정상상태 이득이 1인 lead/lag의 형태로 표현되므로 동특성에 큰 문제가 없으나, 잡음 n과 유량 M의 관계는 분자항의 차수가 더 큰 순수한 미분기로 나타난다. 이것은 무게 측정시 동반되는 잡음이 크게 증폭되어 루프내 변수들에 심한 흔들림을 유발시킨다는 것을 의미한다.

위의 문제점이 있음에도 불구하고 Fig. 2의 제어방법은 실제 공정에서 사용된 예가 있으며 측정잡음에 의한 문제점을 완화하기 위하여 측정데이터에 강한 필터링을 가하고 있다[1].

3. 비례-적분제어기에 의한 무게감량 제어

Fig. 2 제어방법의 문제점을 개선할 수 있는 다른 접근방법의 하나는 무게측정치를 제어변수로 사용하고 유량설정치의 적분, 즉 탱크 무게의 시간에 따른 변화를 설정치로 하여 비례-적분제어기를 이용하여 무게제어를 직접 행하는 Fig. 3과 같은 제어계를 이용하는 것이다. 이 제어계에서는 미분을 행하지 않으므로 잡음이 증폭될 소지는 없다. 참고로 이 제어계에서 공정의 이득이 음(negative)이므로 제어기의 정상상태 이득은 음의 값을 가져야 한다.

루프해석에 의해 이 제어계의 폐루프 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{M}{R} = \frac{\tau_f s + 1}{\frac{\tau_f}{K_c K_v} s^2 + \tau_f s + 1} \quad (4)$$

$$\frac{M}{n} = \frac{\tau_f s^2 + s}{\frac{\tau_f}{K_c K_v} s^2 + \tau_f s + 1} \quad (5)$$

식 (5) 전달함수의 0 Hz 잡음에 대한 증폭도는 0이며, 고주파 잡음에 대한 증폭도는 $K_c K_v$ 로 수렴되는 것을 볼 수 있다. 따라서 K_c 를 조정하기에 따라 측정잡음의 감쇄정도를 임의로 조정할 수 있음을 알 수 있다. 한편 식 (4)로 주어진 설정치와 유량 사이의 전달함수는 분모의 차수가 분자의 차수보다 크게 나타나므로 제어기의 파라미터를 어떻게 결정하든지 필연적으로 응답이 지연되며, 이 때 응답의 지연정도는 K_c 에 의해 많은 영향을 받게 됨을 알 수 있다. 여기서 K_c 는 설정치 추적성능, 잡음감쇄효과에 대해 각각 상반된 방향을 미치게 되며, K_c 를 작게 하면 잡음억제효과가 향상되나 M/R 의 $\tau_f/K_c K_v$ 항이 커져 제어계의 설정치 추적능력이 저하되며, K_c 를 크게 하면 그 반대의 효과가 나타남을 알 수 있다. 따라서 이 두 성능사이에서 적절한 타협을 통해 제어기 파라미터를 결정하는 것이 필요하다.

4. 제시된 유량제어계

2장에서 제시된 제어계를 살펴보면 무게측정치가 미분이 되고 이것이 다시 제어기의 적분 동작에 의해 적분되는 것을 알 수 있다. 이 두 동작은 상쇄될 수 있는 것이며, 따라서 유량추정을 위해 미분을 행하지 않고 무게측정치를 직접 제어기의 비례동작으로 처리하는 것이 가능함을 알 수 있다. 이 개념이 본 연구에서 제시된 제어기 구성을 위한 시발점이 된다. 이 개념을 바탕으로 다음과 같은 제어방법을 전개할 수 있다.

유량추정이 가능하다고 가정할 때 비례-적분제어기의 동작은 다음과 같다.

$$U(s) = K_c(R - M) + \frac{K_c}{\tau_i} \left(\frac{R}{s} - \frac{M}{s} \right) \quad (6)$$

식 (6)에서 적분동작내에 있는 M/s 를 $W = -M/s$ 의 관계를 이용하여 치환하고, 비례동작내의 M 을 최종제어요소(final control element, 제어밸브 혹은 펌프)의 특성식 $M = K_v * U$ 의 관계를 대입한 후 제어기 출력 U 에 대해 정리하면 식 (7)을 얻게 된다.

$$U = \frac{K_c}{1 + K_c K_v} \left[\left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) R + \frac{1}{\tau_i} W \right]$$

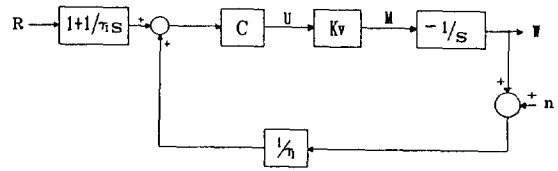


Fig. 4. Proposed flow rate control loop obtained by transformation of the loop in Fig. 2.

$$= C \left[\left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) R + \frac{1}{\tau_i} W \right] \quad (7)$$

이 식이 본 연구에서 제시하는 새로운 제어방법이며, 이 제어기를 적용한 제어루프의 구조를 Fig. 4에 보였다. 한편 제시된 제어계의 폐회로 전달함수는 식 (8) 및 (9)로 나타난다.

$$\frac{M}{R} = \frac{\tau_f s + 1}{\frac{\tau_f}{CK_v} s + 1} \quad (8)$$

$$\frac{M}{n} = \frac{s}{\frac{\tau_f}{CK_v} s + 1} \quad (9)$$

이 폐회로 전달함수에서 유량 설정치와 유량의 관계를 나타내는 식 (8)은 식 (2)와 일치됨을 볼 수 있으나, 무게측정 잡음과 유량 사이의 전달함수 식 (9)는 분자와 분모가 모두 s 의 1차식으로 미분기능이 제거된 것을 볼 수 있다.

먼저 측정잡음에 대한 민감도의 측면에서 제시된 제어기를 3장에서 고려한 제어계와 비교하여 보면, 식 (5)와 (9)의 두 경우 모두 0 Hz 주파수의 잡음에 대해서는 이득이 $0, \infty$ Hz 주파수의 잡음에 대해서는 이득이 상수(constant)로 나타난다는 점에서 그 특성이 일단 유사하다고 할 수 있을 것이다. 여기서 Fig. 4에 제시된 제어계는 Fig. 2나 3과 같은 error-feedback 비례-적분제어기를 사용하고 있는 것이 아니며 C 를 독립된 블록으로 취급하고 있으며 따라서 만약 K_v 를 정확히 알 수 있어 $CK_v = 1$ 를 만족하도록 C 를 결정한다면 동적상태에서도 완전한 제어를 이루는 것이 가능하여 진다. 이 점에서 제시된 제어방법은 3장의 제어방법에 비하여 우수함을 알 수 있다. 한편 일단 $CK_v = 1$ 이 만족된다면 τ_i 값은 설정치에 대한 응답에는 영향을 주지 않게 되며 따라서 τ_i 를 작게 줄수록 M/n 의 밴드폭이 작아지므로 억제되는 잡음의 주파수영역이 넓어져 결과적으로 잡음억제능력이 향상된다. 이러한 특성 또한 추적성능과 잡음억제성능의 사이에서 타협점을 찾아야 했던 3장의 제어계가 갖지 못하던 것으로 제시된 제어기의 우수성을 보여주는

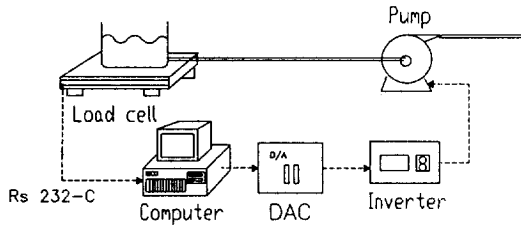


Fig. 5. Experimental setup.

것이라 할 수 있다.

5. 실험

5-1. 실험장치

제시된 제어계의 성능을 확인하기 위하여 Fig. 5와 같은 실험장치를 이용하여 실험을 수행하였다. 50리터 들이의 물통에 물을 채우고 top-loading 저울을 이용하여 무게를 측정하도록 하였다. 사용한 저울은 최대 측정치 200 kg, 분해능이 0.02 kg인 Toledo사 제품으로 측정된 무게를 RS-232C 직렬통신 방식으로 PC로 전송한다. PC는 계산된 제어신호(control signal)를 D/A 변환기, inverter를 통해 출력하여 원심펌프의 회전수를 직접 조작하도록 하였다. Inverter를 이용하여 유량을 제어하는 경우는 inverter에 가해지는 4-20 mA 사이의 제어신호와 펌프 회전수 사이가 선형적으로 나타나며 이것은 다시 토출유량과 대체로 선형적인 관계로 나타나게 된다. 본 실험에서 사용된 펌프의 K_v 는 전 조업범위에서 평균 0.052 kg/(sec V)로 확인되었다.

5-2. 실험조건

각 실험에서 샘플링 간격은 5초로 하였다. 실험은 잡음의 영향을 살펴보기 위한 것과 설정치 추적능력을 살펴보기 위한 것의 두가지로 나누어 행하였다. 실험 환경에 특별한 공정잡음 요인이 없었기 때문에 첫번째 실험에서는 프로그램내에서 무게측정치의 1% 이내의 값을 갖는 난수(random number)를 발생시켜 무게측정치에 더해 주었다. 설정치 추적능력을 비교하는 실험은 3장과 4장의 제어제에 대해서만 수행하였으며, 초기유량설정치는 0.14 kg/sec으로 한 후 중간에 0.16 kg/sec로 증가시켰다.

유량측정치가 설치되어 있지 않았기 때문에 유량제어 결과는 5초 간격으로 측정된 무게를 차분으로 근사하여 표현하였다. 3장의 무게감량제어계 실험에서 K_v 와 τ_f 는 폐회로의 pole이 각각 -0.0053과 -0.3327에 위치되도록 결정하였다. 이 값은 컴퓨터모사를 통해 좋은 설정치추적성능을 줄 것으로 기대되는 값이었다. 한편,

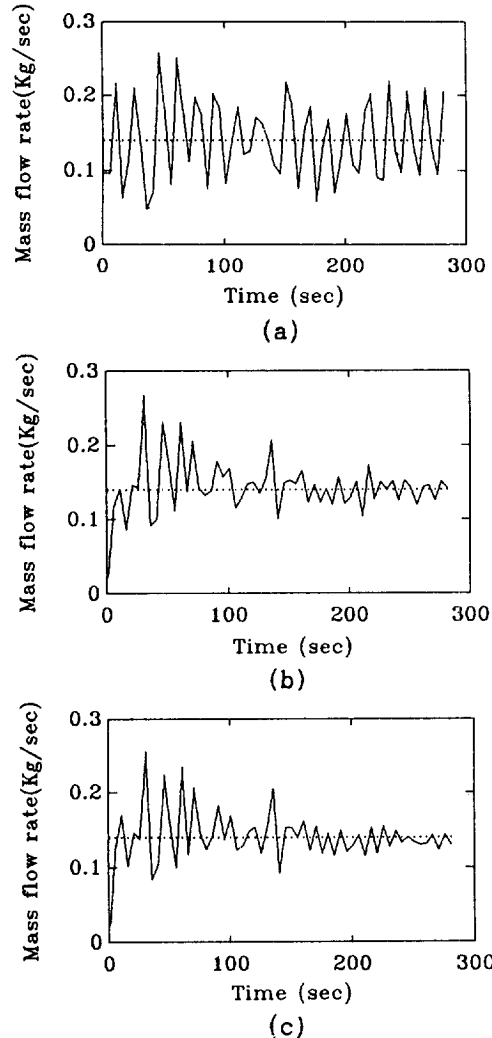


Fig. 6. Effects of the measurement noise on the controlled flow rate: (a) for the method in Fig. 2, (b) for the method in Fig. 3, (c) for the proposed method in Fig. 4.

5장에서 제시된 제어계의 실험에서는 $C=1/K_v$ 그리고 $\tau_f=1500$ sec로 결정하였다.

5-3. 결과 및 토의

먼저 Fig. 6에 유량설정치를 0.14 kg/sec으로 고정하고 무게측정치에 잡음을 인위적으로 인가시킨 경우의 제어결과를 보였다. 그림에 나타난 유량은 5초 간격으로 얻은 무게측정치의 차분치로 미분에 의한 문제점이 명확하게 노출되지는 않고 있다. 하지만 이미 예상되었던 바, 2장에 보인 제어계의 성능이 나머지 두 방법에 비하여 나쁘게 나타난 것을 볼 수 있다. 제어초기 계가

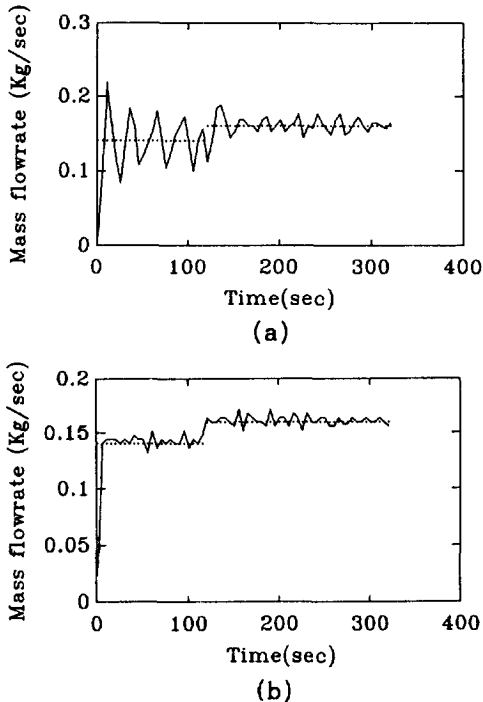


Fig. 7. Comparison of setpoint tracking performances: (a) for the method in Fig. 3, (b) for the proposed method in Fig. 4.

정상유량에 안정화되는 과도기 동안에는 제어신호의 변화가 크고 이것이 펌프의 동특성에 의해 잡음효과로 나타나므로 세 방법이 모두 심한 유량변화를 보이지만, 시간이 지남에 따라 3, 4장의 방법은 잡음에 대해 덜 민감한 응답을 보임을 알 수 있다.

Fig. 7에는 3장의 무게감량제어와 4장에서 제시된 제어방법에 대해서 인위적인 잡음을 인가하지 않고 유량 설정치를 0.14 kg/sec에서 0.16 kg/sec로 변환시킨 경우의 결과를 비교하여 보았다. 인위적으로 난수에 의한 잡음을 인가하지는 않았지만 사용한 저울의 분해능이 0.02 kg인 것, 그리고 펌프의 회전수가 변화할 때 나타나는 동특성 등이 잡음으로 작용하게 되어 그 영향이 실험결과에 나타나고 있다. 무게감량에 의한 제어방법은

설정치의 추적성능에 더 많은 비중을 두어 파라미터를 결정하였기 때문에 잡음이 크게 증폭되어 나타난 것을 볼 수 있다. 특히 처음 유량이 0에서 0.14 kg/sec로 상승하는 과도상태에서 잡음의 영향에 의하여 심한 흔들림이 있는 것을 관찰할 수 있다. 이에 반하여 제시된 유량제어방법은 전체적으로 안정된 제어성능을 보여주고 있어 이론적인 분석의 결과가 실험을 통해 잘 나타나고 있음을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

회분식공정에 많이 활용되는 계량탱크에서 무게측정치를 이용하여 일정유량으로 원료를 투입하는 새로운 유량제어방법을 제안하였다. 제안된 제어방법은 유량계를 사용하지 않기 때문에 경제성이 우수한 방법이라 할 수 있을 뿐 아니라, 무게측정시 인가되는 잡음에 대한 억제능력이 우수하며, 유량설정치 변화에 대한 추적능력도 우수한 것으로 분석되었다. 또한 제안된 제어방법은 제어기 파라미터의 결정도 명백한 성능지표에 의해 쉽게 결정할 수 있다는 잇점을 가지고 있다. 이러한 해석결과는 실험을 통해 검증될 수 있었다.

실제 공정의 응용에서는 저울의 분해능, 또는 무게측정에 인가되는 잡음의 정도에 따라 샘플링 간격을 적절히 선택하는 것이 중요한 문제가 될 것이며 이에 관한 분석이 필요하리라 생각된다.

감 사

본 연구수행을 위하여 연구비지원을 하여 주신 제일 모직 여천공장과 지능자동화연구센터(포항공대 소재)에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Private Communication with Jong Sung Son, Manager of Technical Team, Chemicals Division in Cheil Industries Inc.