

동적 저울의 진동응답 측정에 의한 질량 추정 알고리즘

Mass-estimation Algorithm by Vibration Response Measurement of Dynamic Balance

김 병 삼*

(Byoung-Sam Kim*)

요 약

생산공정에서의 사용을 전제로 하는 산업용 저울은 신속성과 정확성이 중요한 조건이다. 그러나, 상반되는 두 조건을 동시에 만족시키기는 어렵다. 본 연구에서는 종래의 저울이 가지고 있는 결점을 개선하기 위해 동적 저울의 진동응답 측정에 의한 질량 추정 알고리즘을 제시하고자 한다. 동적 저울의 진동응답 측정에 의한 질량 추정 알고리즘 개발을 위한 시스템은 변위와 속도 검출기, 스프링 저울, 마이크로 컴퓨터 등으로 구성되며, 측정계의 동특성을 적극적으로 이용하려는 동적 측정방식에 기초를 둔 것이다. 유도된 질량 추정 알고리즘은 피측정물의 변위와 속도 등을 검출하는 방식으로 변위만을 검출하여 질량을 추정하는 알고리즘과 비교하였다. 질량 추정 알고리즘은 관측잡음과 적분오차, 가동부의 감쇠 등에 대한 영향을 고려하고 검출기의 동특성에 대한 근사 모델링으로 부터 실용형 알고리즘을 제시하였다. 본 연구에서는 동적 저울의 진동응답 측정에 의한 질량 추정 알고리즘을 이용하여 생산공정에서의 사용을 전제로 하는 저울의 신속성과 정확성을 향상시킬 수 있는 가능성을 타진하고 자 하였다.

핵심용어: 동적 저울, 질량 추정, 관측잡음, 과도적 거동, 진동응답

투고분야: 구조음향 및 진동(11.3)

ABSTRACT

Quickness and precision are the two most important requirements for an industrial scale used in production lines. In this paper, a new approach, "Mass-estimation algorithm by vibration-response measurement of dynamic balance", is presented to improve some of drawbacks in conventional scales. The system, consisted of velocity and displacement sensors, spring scale, analog-digital converter and microcomputer, is based on full utilization of dynamic mass measurement of velocity and displacement via microcomputer-assisted real time monitoring. The resulting system, when combined with appropriate mass estimation algorithm software, has shown its effectiveness in terms of two desirable characteristics required.

Key words: Dynamic balance, Mass-estimation, Measurement noise, Transient behavior, Vibration response

I. 서 론

생산공정에서 이동하는 물체의 질량을 측정할 때, 측정의 신속성과 정확성은 중요한 조건중 하나이다. 그러나, 상반되는 두 조건을 동시에 만족시키기는 어렵다[1]. 따라서, 본 연구에서는 생산공정에서 이동하는 물체의 진동응답 신호를 이용하여 질량 측정의 신속성과 정확성을 만족시킬 수 있는 질량 추정 알고리즘을 개발하고자 하였다. 동적 저울의 진동응답 측정에 의한 질량 추정 알고리즘이란 측정하고자 하는 피측정물이 스프링 저울 위에서 진동할 때, 피측정물의 속도와 변위를 측정된 데이터로

부터 질량을 계산하는 방법으로 마이크로 컴퓨터를 이용하여 실시간에 처리하는 것을 전제로 하고 있다. 질량 추정 알고리즘의 실시에 필요한 하드웨어는 고정도의 스프링 저울, 속도와 변위 검출기, 아날로그-디지털 변환기, 마이크로 컴퓨터 등[2]이며, 측정계의 동특성을 이용한 동적 측정방식에 기초를 둔 것으로 피측정물이 정지된 상태에 이를 때까지 기다릴 필요가 없다. 또한, 마이크로 컴퓨터의 이용에 따라 하드웨어의 특성에 대한 유연한 대응이 가능하며, 이는 측정의 신속성과 정확성에 크게 기여할 것으로 예상된다.

II. 질량 추정 알고리즘의 기초

2.1. 알고리즘의 유도

* 순천제일대학 환경과

접수일자: 1999년 6월 16일

Fig. 1에서 제시한 하드웨어 구성을 질량 측정 시스템의 하드웨어라 가정하고 알고리즘을 유도하고자 한다. Fig. 1에서 스프링 저울의 가동부와 피측정물의 운동방정식은 식 (1)과 같다[3].

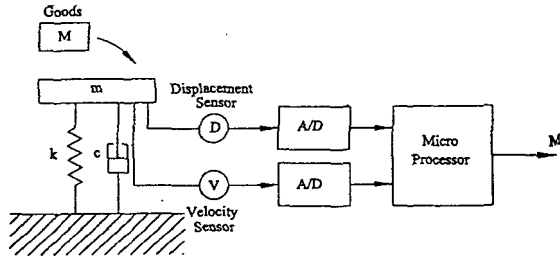


그림 1. 질량 측정 시스템
Fig. 1. Configuration of the mass measurement system to be considered.

$$(M + m)\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = Mg, \quad t > t_0 \quad (1)$$

식 (1)에서 속도 및 변위의 관측개시 시각을 t_0 라고 가정하고 식 (1)을 구간 (t_0, t) 로 적분하면 식 (2)와 같다.

$$(m + M)(\dot{x} - \dot{x}_0) + c(x - x_0) + K \int_{t_0}^t x(t) dt = Mg(t - t_0). \quad (2)$$

식 (2)를 피측정물의 질량 M 에 대하여 정리하면 식 (3)과 같다.

$$\hat{M} = \frac{m(\dot{x} - \dot{x}_0) + C(x - x_0) + K \int_{t_0}^t x(t) dt}{g(t - t_0) - (\dot{x} - \dot{x}_0)}, \quad t > t_0 \quad (3)$$

식 (3)에서 피측정물의 질량 M 을 \hat{M} 으로 표현한 것은 식 (3)에 의해서 계산된 수치는 피측정물의 질량 M 이 추정치이기 때문이고 이와같이 구해진 식 (3)을 질량 추정 알고리즘의 기초식이라고 가정하였다. 식 (3)에서 알 수 있듯이 질량 추정 알고리즘이란 피측정물을 싣고 진동하는 가동부의 속도와 변위를 관측하는 것에 의하여 피측정물의 질량을 구하는 방법이다. 한편, 속도와 변위의 검출신호와 신호의 변환과정에서 신호는 잡음을 수반하므로 잡음을 고려한 변위와 속도는 식 (4), (5)와 같다.

$$y_d = G_d x + e_d. \quad (4)$$

$$y_v = G_v \dot{x} + e_v. \quad (5)$$

식 (4), (5)에서 G_d, G_v 는 변위와 속도의 게인 값이며, e_d, e_v 는 변위와 속도신호의 관측잡음이다. 식 (4), (5)에

서 관측잡음을 무시하고 식 (3)에 대입하여 변위 속도 검출에 의한 질량 추정 알고리즘의 기초식을 구하면 식 (6)과 같다.

$$\hat{M} = \frac{F(t)}{H(t)}, \quad t > t_0 \quad (6)$$

여기서,

$$F(t) = mG_d \{ y_v(t) - y_{ve} \} + CG_v \{ y_d(t) - y_{de} \} + KG_v \int_{t_0}^t y_d(t) dt. \quad (7)$$

$$H(t) = G_d G_v g(t - t_0) - G_d \{ y_v(t) - y_{ve} \}. \quad (8)$$

시각 t_0 에서 관측신호는 y_{de}, y_{ve} 와 같으며, 식 (6)을 소프트웨어에 의해 실행 가능하도록 이산 시간화하면 식 (9)와 같다.

$$\hat{M} = \frac{F(2j)}{H(2j)}. \quad (9)$$

여기서,

$$F(2j) = mG_d \{ y_v(2j) - y_{ve} \} + CG_v \{ y_d(2j) - y_{de} \} + KG_v S_d(2j). \quad (10)$$

$$H(2j) = G_d G_v g \{ 2j\Delta \} - G_d \{ y_v(2j) - y_{ve} \}, \quad j = 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

식 (11)에서 Δ 는 표본주기이고, 시각 $t_0 + 2j\Delta$ 에 있어서 관측신호는 $y_d(2j)$ 및 $y_v(2j)$ 와 같다. 또한, $S_d(2j)$ 는 구간 $[t_0, t_0 + 2j\Delta]$ 에서 y_d 의 심프슨 법칙에 의한 수치적분[4]으로 구할 수 있다.

$$S_d(2j) = \frac{\Delta}{3} \sum_{l=1}^{2j} \{ y_d(2l-2) + 4y_d(2l-1) + y_d(2l) \}.$$

2.2. 속도 검출에 의한 질량 추정 알고리즘

변위·속도 검출에 의한 질량 추정 알고리즘 외의 질량 추정 알고리즘을 살펴보면 다음과 같다. 식 (1)을 적분하지 않고 질량에 대하여 대수적으로 풀면 식 (12)와 같이 가속도·속도 변위 검출에 의한 질량 추정 알고리즘을 구할 수 있다.

$$\hat{M} = \frac{m\ddot{x} + C\dot{x} + Kx}{g - \ddot{x}}. \quad (12)$$

변위·속도 검출에 의한 질량 추정 알고리즘의 기초식, 식 (3)에서 우변의 분자 제2항 및 제3항을 식 (13), (14)와 같은 관계를 이용하면 속도만 검출하여 피측정물의 질량을 구할 수 있는 속도 검출에 의한 질량 추정 알고리즘이 구해진다. 단, 이 경우에는 변위의 초기치를 구하여야 한다.

$$C(x-x_e) = C \int_{t_e}^t \dot{x}(t) dt. \quad (13)$$

$$K \int_{t_e}^t x(t) dt = K \left\{ \int_{t_e}^t \int_{t_e}^t \dot{x}(t) dt dt + x_e(t-t_e) \right\}. \quad (14)$$

2.3. 질량 추정치에 미치는 관측잡음과 적분오차의 영향

식 (12)의 가속도·변위 검출에 의한 질량 추정 알고리즘에 있어서 각각의 관측신호가 관측잡음을 수반하는 경우에는 그 영향이 직접적으로 질량 추정치의 정도에 미치는 일은 식의 구조상 쉽게 이해할 수 있다. 또한, 변위·속도 검출 및 속도 검출에 의한 질량 추정 알고리즘에 있어서는 분자 분모가 식 (2)의 단계에서 적분이 행해졌기 때문에 관측잡음이 직접적으로 영향을 미치지 않을 것으로 생각된다. 한편, 본 연구에서는 변위·속도 검출과 속도 검출에 의한 질량 추정 알고리즘에 대하여 비교·검토하였다. 비교·검토는 관측잡음과 수치적분에 수반되는 적분오차가 질량의 추정치에 미치는 영향을 추정치의 점근적 성질과 과도적 거동의 두 관점에서 조사하였다.

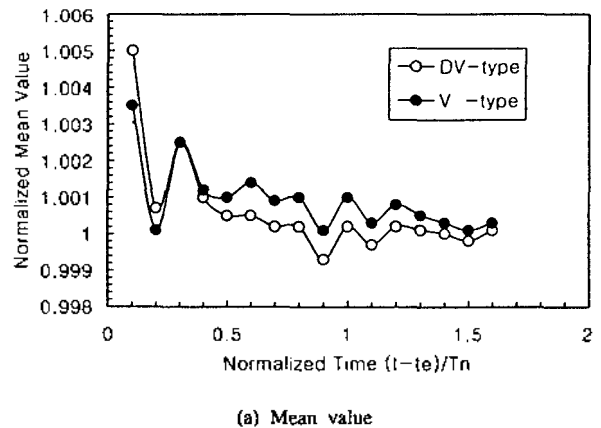
2.3.1. 추정치의 점근적 성질

관측잡음으로 인하여 평균치 영의 서로 독립된 정규성의 이산 시간형 확률과정을 가정으로 통계적인 해석을 실시한 결과 다음과 같은 내용이 확인되었다. i) 변위·속도 검출에 의한 알고리즘의 적분오차는 속도 검출형의 $1/(2\zeta+16)$ 이다. 단, ζ 는 가동부의 감쇠비이다. ii) 변위·속도 검출에 의한 질량 추정 알고리즘 추정치의 일치성은 보증되거나 속도 검출에 의한 알고리즘은 보증되지 않는다. iii) 변위·속도 검출에 의한 알고리즘이나 속도 검출에 의한 알고리즘도 추정치의 점근적 불편성은 보증되지 않는다. 따라서 추정치는 편차를 갖게되고, 변위·속도 검출에 의한 알고리즘의 경우 그 크기는 속도 검출형의 $1/(2\zeta+16)$ 이다. 단, 이때의 편차는 적분오차에 기인한 것이기 때문에 표본주기를 짧게 잡으면 편차를 작게 할 수 있다.

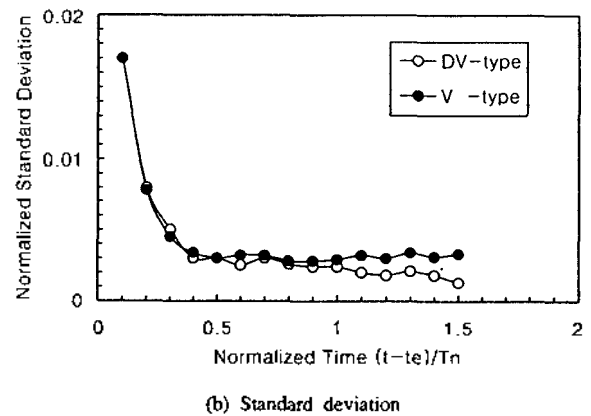
2.3.2. 추정치의 과도적 거동

추정치와 과도적 거동을 조사하기 위하여 수치해석을 실시하였다. 수치해석에 고려된 관측잡음 e_a 와 e_v 에는 평균치에 서로 독립된 정규난수를 대응시켰고, 그것들의 표준편차를 신호성분 크기의 1%이내로 하였다. Fig.2는 표본수가 20 이하인 경우 추정치의 과도적 거동이다. Fig. 2 (a)에서 y축은 추정치의 표본평균을 피측정물 질량의 진치에 대하여 정규화한 것이고, Fig. 2 (b)의 y축은 추정치 표본평균의 표준편차를 피측정물 질량의 진치에 대하여 정규화한 것이다. 또한, Fig. 2의 x축은 관측개시 시간 $(t-t_e)$ 을 가동부의 고유주기 T_n 으로 정규화한 것이다. Fig. 2로부터 추정치의 평균치는 약 1/2주기, 표준편

차는 1주기의 시간이 지나면 변위·속도 검출에 의한 알고리즘이 속도 검출에 의한 알고리즘 보다 진치에 더 근접하고 있음을 알 수 있다. 한편, 소프트웨어 처리 면에서도 한번의 적분식을 포함하고 있는 변위·속도 검출에 의한 알고리즘이 증적분을 포함하고 있는 속도 검출에 의한 알고리즘보다 프로그램이 간단하고 연산시간도 짧다.



(a) Mean value



(b) Standard deviation

그림 2. DV-type과 D-type의 질량추정의 과도적 거동 비교
Fig. 2. Comparison in transient behavior of the estimated mass value due to DV-type with that due to the D-type.

2.4. 감쇠의 영향

Fig. 3은 변위 속도 검출에 의한 알고리즘에 있어서 감쇠의 영향에 대한 결과이다. 감쇠의 정도는 가동부의 감쇠비(ζ)이다. Fig. 3은 Fig. 2와 같은 경우에 있어서 가동부의 감쇠비 증가에 대한 영향으로 가동부의 감쇠비가 증가하면 추정치의 시간적 거동은 $\zeta=0$ 인 경우에 비하여 나쁘게 됨을 알 수 있다. 따라서, 변위 속도 검출에 의한 질량 추정 알고리즘을 이용하는 경우에는 가동부 즉, 질량·변위 변환 기구의 감쇠가 되도록 작은 기구로 설계하는 것이 바람직하다.

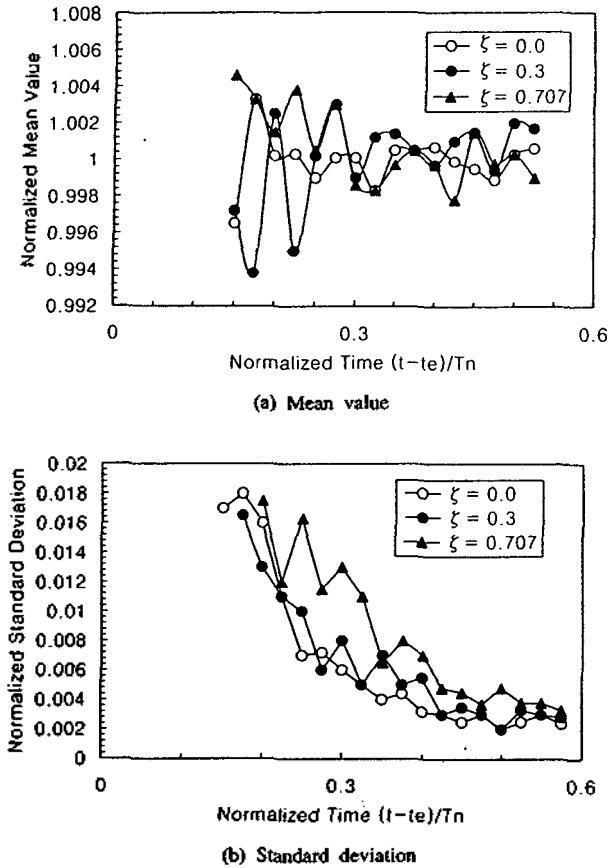


그림 3. 감쇠의 영향
Fig. 3. Effect of a damping element.

III. 실용형 변위 속도 검출에 의한 질량 알고리즘의 유도방법

3.1. 검출기의 동특성을 고려한 추정 기초식

식 (6)~식 (11)에서의 변위 속도 검출에 의한 질량 추정 알고리즘과 그 기초식은 검출기의 동특성이 가동부 즉, 질량 변위 변환기의 동특성에 비하여 무시할 수 있는 이상적인 경우에 대한 것으로 도출한 것이나 가동부의 고유진동수가 고주파 대역인 경우에는 검출기의 동특성을 고려하여야 한다. 본 연구에는 검출기의 동특성이 1차 지연 요소로 표현되는 경우에 대하여 검토하였다. 관측잡음을 생략한 경우의 변위·속도의 관측신호는 식 (15), (16)과 같다.

$$T_d \dot{y}_d + y_d = G_d x. \tag{15}$$

$$T_v \dot{y}_v + y_v = G_v \dot{x}. \tag{16}$$

식 (15), (16)에서 G_d, G_v 는 변위와 속도의 게인 값이고, T_d, T_v 는 각각의 시정수이다. 감쇠가 없는 경우, 가동부의 운동방정식을 식 (17)과 같이 표현할 수 있을 때

$$(m + M) \ddot{x} + Kx = Mg, \quad t > t_0. \tag{17}$$

검출기의 동특성을 무시하면 변위 속도 검출에 의한 질량 추정 알고리즘의 기초식은 식 (18)과 같이 되는데

$$\hat{M} = \frac{mG_d(y_v - y_{ve}) + KG_v \int_{t_0}^t y_d(t) dt}{G_d G_v g(t - t_0) - G_d(y_v - y_{ve})}, \quad t > t_0. \tag{18}$$

식 (15), (16)과 같은 검출기의 동특성을 고려하면 변위 속도 검출에 의한 질량 추정 알고리즘의 기초식은 식 (19), (20), (21)과 같다. 단, $y_{ve} = y_v(t_0)$ 이다.

$$\hat{M} = \frac{F(t)}{H(t)}, \quad t > t_0. \tag{19}$$

$$F(t) = mG_d [T_v (y_v - y_{ve} - \dot{y}_{ve}(t - t_0)) + \int_{t_0}^t y_v(t) dt - y_{ve}(t - t_0)] + KG_v [T_d (\int_{t_0}^t y_d(t) dt - y_{de}(t - t_0)) + \int_{t_0}^t \int_{t_0}^t y_d(t) dt dt]. \tag{20}$$

$$H(t) = \frac{1}{2} G_d G_v g(t - t_0)^2 - G_d [T_v (y_v - y_{ve} - \dot{y}_{ve}(t - t_0)) + \int_{t_0}^t y_v(t) dt - y_{ve}(t - t_0)]. \tag{21}$$

즉, 검출기의 동특성을 고려할 경우 \hat{y}_v 는 관측할 수 없기 때문에 식 (17)의 양변을 2회 적분한 후 질량 M 에 관한 해를 대수적으로 구하여야 한다. 따라서, 식 (19), (20), (21)과 같은 복잡한 식을 이용하여야 하며 이 경우에는 \dot{y}_{ve} 를 추정하여야 한다.

3.2. 검출기 동특성의 근사 모델링

속도 검출기의 시정수가 변위 검출기의 시정수에 비하여 작다고 가정하여 i) 속도 검출기의 동특성을 무시하고 검출기의 동특성을 근사 모델링하였다. ii) 근사 모델링에 대한 변위 속도 검출에 의한 질량 추정 알고리즘을 유도하였다. iii) 근사 모델링의 영향에 대해서는 변위 검출기의 시정수와 속도 검출기의 게인(gain)등으로 보상하였다. 이상과 같이 검출기의 동특성을 근사 모델링 한 경우, 검출기와 근사 모델의 변수 사이에 성립하는 관계를 구하기 위하여 $t_0 = 0$ 일 때 $x = 0, \dot{x} = 0, y_d = 0, y_v = 0$ 이라고 가정하고 식 (15), (16), (17)로부터 $y_d(t), \dot{y}_d(t)$ 를 구하면 식 (22), (23)과 같다.

$$y_d = G_d x_i (P_d - 1) e^{-\frac{t}{T_d}} + 1 - \sqrt{P_d} \cos(\omega_n t - \delta_d). \tag{22}$$

$$y_v = G_v \omega_n x_i (T_v \omega_n P_v e^{-\frac{t}{T_v}} + \sqrt{P_v} \sin(\omega_n t - \delta_v)). \tag{23}$$

식 (22), (23)에서

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{(m+M)}}, \quad x_s = \frac{Mg}{K},$$

$$P_d = \frac{1}{\{1+(T_d\omega_n)^2\}}, \quad P_v = \frac{1}{\{1+(T_v\omega_n)^2\}}$$

$$\tan \delta_d = T_d\omega_n, \quad \tan \delta_v = T_v\omega_n.$$

식 (22), (23)의 y_d, y_v 를 “실모델”이라고 하자. 실모델에서 변위와 속도 검출기 사이의 시정수 차이를 고려하고 속도 검출기의 동특성을 무시한 근사모델을 구하면 식 (24), (25)와 같다.

$$y_v = G_{va}\dot{x}. \quad (24)$$

$$T_{da}\dot{y}_d + y_d = G_{da}x. \quad (25)$$

식 (24), (25)를 식 (15), (16)에 대하여 대체하고 $y_d(t), y_v(t)$ 를 구하면 식 (26), (27)과 같다.

$$y_d = G_{da}x_s \{ (P_{da}-1)e^{-\frac{t}{T_{da}}} + 1 - \sqrt{P_{da}}\cos(\omega_n t - \delta_{da}) \}. \quad (26)$$

$$y_v = G_{va}\omega_n x_s \sin \omega_n t. \quad (27)$$

식 (26)에서 P_{da} 는 식 (28)과 같다.

$$P_{da} = \frac{1}{\{1+(T_{da}\omega_n)^2\}}, \quad \tan \delta_{da} = T_{da}\omega_n \quad (28)$$

식 (24)~(28)에서 첨자 “a”는 근사모델의 변수를 나타내고 있다. 한편, 근사 모델에 대한 기초식은 식 (17), (24), (25)로부터 식 (29)와 같다.

$$\hat{M} = \frac{mG_{da}(y_v - y_{ve}) + KG_{va} \{ T_{da}(y_d - y_{de}) + \int_{t_0}^t y_d(t) dt \}}{G_{da}G_{va}(t - t_0) - G_{da}(y_v - y_{ve})}, \quad t > t_e. \quad (29)$$

식 (29)에 실모델의 관측신호 식 (22), (23)을 대입하면 $(t - t_0) \rightarrow \infty, \hat{M} \rightarrow M$ 과 같고 이와 같은 조건으로 부터 식 30)과 같은 관계를 구할 수 있다.

$$G_{da} = G_d \quad (30)$$

또한, $t \gg T_v, t \gg T_d, t_e \gg T_v, t_e \gg T_d$ 와 같다고 가정하면 $\hat{M} \rightarrow M$ 의 관계를 구할 수 있고, $e^{-\frac{t}{T_v}} \rightarrow 0, e^{-\frac{t}{T_d}} \rightarrow 0, e^{-\frac{t}{T_v}} \rightarrow 0, e^{-\frac{t}{T_d}} \rightarrow 0,$

$M \rightarrow \hat{M}$ 등이라고 가정하면 식 (31), (32)와 같은 관계를 구할 수 있다.

$$G_{va} = \frac{1+T_dT_v\omega_n^2}{1+(T_v\omega_n)^2} \cdot G_v. \quad (31)$$

$$T_{da} = \frac{T_d - T_v}{1+T_dT_v\omega_n^2}. \quad (32)$$

또한, 식 (31), (32)는 피측정물의 질량에 따라 변하는 ω_n 을 포함하고 있으며 가동부의 등가질량은 ω_n 에 영향을 받지 않도록 충분히 크다고 가정하였다. 근사모델과 실모델 사이의 차이가 추정치에 미치는 영향을 조사하기 위하여 수치 해석하였으며 Fig. 4는 그 일 예이다. 수치 해석에 이용된 알고리즘은 기초식 (29)를 이산화한 것으로 식 (33), (34), (35)와 같으며 관측잡음은 없는 것으로 가정하였다.

$$\hat{M} = \frac{F(2j)}{H(2j)}, \quad j=1,2,3, \dots, \quad (33)$$

$$F(2j) = mG_d \{ y_v(2j) - y_{ve} \} + KG_{va} \{ T_{da} \{ y_d(2j) - y_{de} \} + S_d(2j) \}. \quad (34)$$

$$H(2j) = 2G_{va}G_d g_{j\Delta} - G_d \{ y_v(2j) - y_{ve} \}. \quad (35)$$

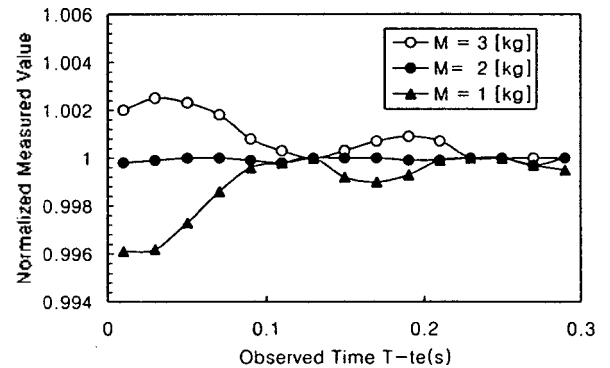


그림 4. 실용형 DV 알고리즘의 추정 성능
Fig. 4. Estimation performance of a practical DV-algorithm.

Fig. 4에서 x축은 관측개시로 부터의 경과시간이고 y축은 질량의 추정치를 정규화한 것으로 근사모델과 실모델 사이의 차이가 추정치에 미치는 영향은 시간이 경과함에 따라 작아지는 것을 알 수 있다. 또한, $t = t_0 (=0)$ 에서 $x=0, \dot{x}=0, y_d=0, y_v=0$ 라고 가정하였고 근사모델의 변수는 $M=2kg$ 일 때의 ω_n 을 기준으로 결정한 것이다. Table 1은 모델 변수들의 값이다.

식 (33), (34), (35)의 질량 추정 알고리즘은 검출기의

동특성을 무시한 경우의 변위 속도 검출에 의한 질량 추정 알고리즘과 거의 동일한 구조를 갖고 있으며 소프트웨어에 의한 실시간 처리에 적합하다. 따라서, 식 (33), (34), (35)를 실용형 변위 속도 검출형 질량 추정 알고리즘이라고 가정하였다.

표 1. Table 1. Values of the model parameters.

Symbol	Numerical value (Unit)	Symbol	Numerical value (Unit)
m	7.324 (rg)	G_d	19857
k	20531 (N/m)	G_s	470810
T_i	0.0082 (s)	T_{da}	0.0025 (s)
T_d	0.0112 (s)	G_{ω}	20794
t_e	$t_e + 0.068$ (s)	Δ	0.001 (s)

IV. 실용형 DV-알고리즘 변수의 감도

변수 감도의 정도는 추정 알고리즘의 기본적인 특성의 하나로 실용형 변위 속도 검출형 질량 추정 알고리즘의 경우 다음과 같은 변수들이 문제가 된다.

- G_{ω} : 속도 검출기의 게인(근사모델),
- T_{da} : 변위 검출기의 시정수(근사모델)
- m : 가동부의 등가질량,
- B_d : 변위 검출기 출력의 편차
- G_d : 변위 검출기의 게인,
- k : 스프링 상수

여기서, 편차 B_d 는 변수 검출기의 영점 보정에 상당하는 것으로 편차 B_d 가 존재하는 경우의 추정 알고리즘에 이용되는 y_d 는 실제로 구한 변위 관측신호 y_d 에서 B_d 를 뺀 것과 같다. 한편, 속도 관측신호의 경우에는 편차가 존재하더라도 알고리즘 중에 이용된 계산식의 구조상 편차를 상쇄하기 때문에 문제가 되지 않는다.

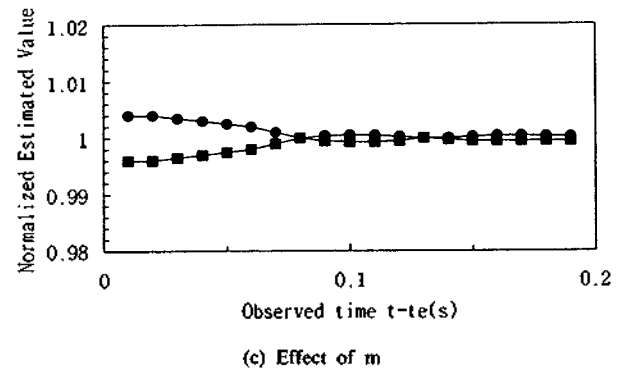
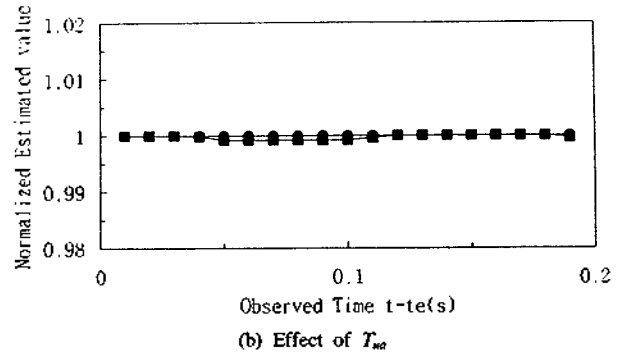
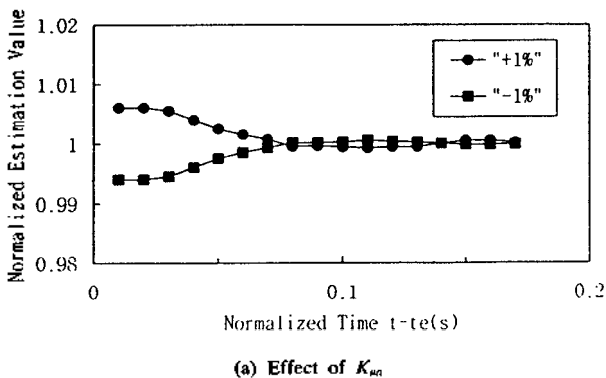
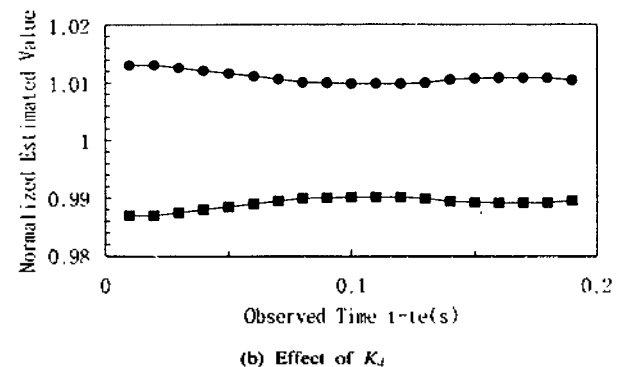
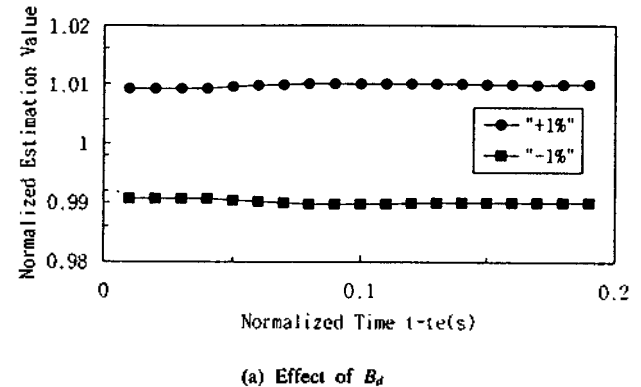


그림 5. Fig. 5. Estimation of parameter variations on the estimated value



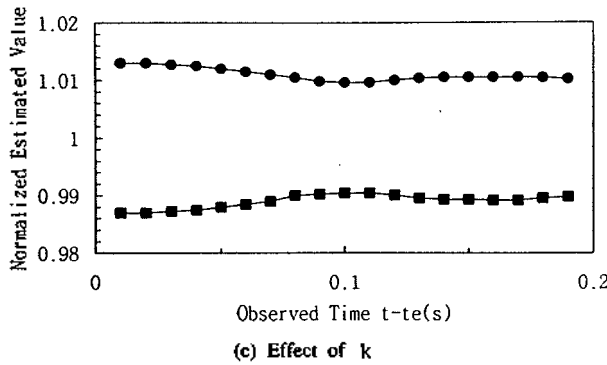


그림 6. 변수오차에 대한 추정치의 감도

Fig. 6. Estimation of parameter variations on the estimated value.

Fig. 5, 6은 변수의 오차에 대한 추정치의 감도를 조사한 결과이다. 관측신호를 계산하는데 이용된 변수는 Table 1과 같고 관측잡음은 없다고 가정하였다. Fig. 5, 6에서 6개의 변수를 과도상태와 정상상태로 분류해 보면 i) 과도상태에서만 추정치에 영향을 미치는 변수는 G_w ,

T_{d0} , m 등이고 ii) 정상상태에서도 추정치에 영향을 미치는 변수는 B_d , G_d , k 등이다. 단, 여기서는 변위 및 속도의 관측개시 후 약 1주기 사이를 과도상태라 하고 그 이후는 정상상태라고 정하였다. 즉 i)의 분류에 속하는 변수들의 오차에 기인한 추정치의 오차는 '0'에 수렴하나 ii)의 분류에 속하는 변수들의 오차에 의한 추정치의 오차는 시간이 무한대인 경우에 있어서도 일정한 값을 갖는다는 것이다. i)의 변수 중 G_w 와 m 은 주로 속도에, T_{d0} 는 주로 변위와 관계되는 변수이고 ii)에 속하는 세개의 변수는 주로 변위의 적분치에 관계되는 변수이다.

실용형 변위 속도 검출에 의한 질량 추정 알고리즘은 그 구조상, 추정치의 정도는 변위의 적분치에 영향을 받고 있으며 ii)에 속하는 변수의 정도가 직접적으로 추정치의 정도에 영향을 주고 있으므로 세심한 주의가 필요하다. 이에 비하여 i)의 변수에 의한 추정치의 오차는 '0'에 수렴하기 이전의 특정 시점에서 '0'이 되는 경우가 있는데 이는 G_w 와 m 에서는 속도가, T_{d0} 에서는 변위가 각각의 관측개시 시각에서의 값과 일치하기 때문으로 생각된다.

변위와 속도의 관측은 연속적인 것은 아니고 관측잡음을 고려하면 변위와 속도가 각각의 관측개시 시각에서 일치한다는 것은 있을 수 없다. 그러나 관측개시 후 약 1주기의 시점에서 추정하면 i)의 변수 오차의 영향은 적고 ii)의 변수만 주의하면 될 것으로 생각된다. 이와 같은 점들을 고려하면 근사모델의 변수의 영향은 적을 것으로 생각되며 추정알고리즘은 실용적인 것이라는 결론을 얻을 수 있다.

V. 결 론

동적 저울의 진동응답 측정에 의한 질량 추정 알고리즘의 도출방법을 모색하고, 질량 추정 알고리즘을 사용하여 산출된 추정치의 점근적 성질과 과도적 거동을 조사한 결과, 질량-변위 변환 기구에는 감쇠요소가 되도록 적은 기구가 바람직하였다. 검출기의 동특성을 고려한 동적 질량 추정 알고리즘의 실용형과 근사모델 변수의 도출방법을 모색하여 알고리즘의 실현 가능성을 수치해석으로 나타낼 수 있었다. 진동신호 측정에 의한 동적 질량 추정 알고리즘의 변수감도를 조사한 결과, 관측개시 후 약 1주기의 시점에서 추정하면 일부 변수 오차의 영향을 받지 않고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 생산공정에서의 사용을 전제로 하는 측정의 신속성과 정확성, 두가지 조건을 동시에 만족시키는 저울을 소프트웨어 측면에서 접근하였다. 따라서, 동적 저울의 진동응답 측정에 의한 질량 추정 알고리즘을 스프링 저울에 적용하여 이 두가지 조건을 만족시킬 수 있는 가능성을 타진하여야 한다.

참 고 문 헌

1. E. O. Doebelin, Measurement System, McGraw-Hill, pp.212~213, 1983.
2. 김병삼, "가속도 변위 검출형 동적 질량 측정 제어 시스템," 한국정밀공학회지, Vol.11, No.6, pp.109~116, 1994.
3. F. S. Tse, I. E. Morse, R. T. Hinkle, Mechanical Vibration, McGraw-Hill, pp.23~58, 1978.
4. S. D. Conte, C. D. Boor, Elementary Numerical Analysis, McGraw-Hill, pp.307~319, 1981.
5. 森村, 飯, "計測器の性能表示の體系化(2)," 計測と制御, 17 卷 6號, pp.486~491, 1978.

기 호 설 명

- C : 감쇠계수
- e_d : 변위신호 관측잡음
- e_v : 속도신호 관측잡음
- K : 스프링 상수
- g : 중력 가속도
- G_v : 가속도 게인값
- G_d : 변위 게인값
- M : 피측정물의 질량
- M_s : 스프링 저울의 질량
- m : 가동부의 등가질량
- t : 가동부가 피측정물과 진동하는 시각
- x : 물품대의 평형점에서의 변위
- v_{rc} : 속도의 관측신호 초기치

- y_{dc} : 변위의 관측신호 초기치
 $y_v(2j)$: 시각 $t_e + 2j\Delta$ 에 있어서의 속도 관측 신호
 $y_d(2j)$: 시각 $t_e + 2j\Delta$ 에 있어서의 변위 관측 신호
 Δ : 샘플 주기

▲ 김 병 삼(Byoung-Sam, Kim) 1962년 10월 11일생



1994년 2월 : 전북대학교 정밀기계공
학과 박사

1987년 7월~1995년 2월 : 한국타이어
(주) 중앙연구소 선임
연구원

1999년 11월~현재 : 이일산업주식회사
대표이사

2000년 3월~현재 : 한국환경기술학회 이사

1995년 2월~현재 : 순천제일대학 환경과 조교수

※ 주요관심분야 : 소음·진동, 회전기계 고장진단, 자동차
공학