

가속도 변위 검출형 동적 질량 측정 제어 시스템

김 병 삼*

Dynamic Mass-measurement control System of Acceleration and Displacement Sensing Type

Byoung-Sam Kim*

ABSTRACT

Quickness and precision are the two most important requirements for an industrial scale used in production lines. In this paper, a new approach, "Dynamic-Mass measurement control System of Acceleration and Displacement (DMS-AD) sensing", is presented to improve some of drawbacks in conventional scales. The system, consisted of acceleration and displacement sensors, spring scale and microcomputer, is based on full utilization of dynamic mass measurement of acceleration and displacement via microcomputer-assisted real time monitoring. The resulting system, when combined with appropriate dynamic mass estimation algorithm software, has shown its effectiveness in terms of two desirable characteristics required.

Key Words : Mass measurement(질량측정), Dynamic measurement method(동적측정방법), Mass estimation algorithm(질량추정 알고리즘), Spring scale(스프링 저울)

기호설명

C : 감쇠계수

e : 편심량

K : 스프링 상수

g : 중력 가속도

G_a : 가속도 게인값

G_d : 변위게인값

M : 피측정물의 질량

M_r : 로터(Rotor)의 질량

M_s : 스프링 저울의 질량

m : 가동부의 동가질량

m' : 편심 질량

t : 가동부가 피측정물과 진동하는 시각

x : 물품대의 평형점에서의 변위

Y_{ae} : 가속도의 관측신호 초기치

Y_{de} : 변위의 관측신호 초기치

$Y_a(2j)$: 시각 $t_e + 2j\Delta$ 에 있어서의 가속도 관측 신호

$Y_d(2j)$: 시각 $t_e + 2j\Delta$ 에 있어서의 변위 관측 신호

Δ : 샘플 주기

* 한국타이어(주) 중앙연구소(정회원)

1. 서 론

생산공정에서의 사용을 전제로 하는 질량의 측정방법은 측정의 신속성과 정확성이 중요한 조건으로 되고 있다. 그러나, 위의 상반되는 두 조건을 동시에 만족시키는 것은 어렵다. 그래서, 최근 급속히 발달하고 있는 마이크로 컴퓨터를 이용하여 위의 두 조건에 대한 접근을 시도하였다. 본 연구에서 소개하는 가속도 변위 검출형 동적 질량 측정 제어 시스템(Dynamic Mass-measurement control System of Acceleration and Displacement Sensing Type, 이하 DMS-AD로 약함)은 기본적으로 스프링 저울과 가속도 변위 검출기, 마이크로 컴퓨터 등으로 구성되어 있으며 측정계의 동특성을 적극적으로 이용하려는 동적 측정방식에 기초를 둔 것으로 종전의 정적 측정방법으로는 측정이 어려웠던 동적 질량을 측정하였다. 본 연구에 이용된 AD-알고리즘의 유용성에 관해서는 이론 해석과 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 연구된 바 있으며[1, 2, 3], 본 연구에서는 AD-알고리즘을 기초로 실제 시험적 시스템을 구성하고 하드웨어와 소프트웨어를 합한 가속도 변위 검출형 동적 질량 측정 제어 시스템의 신속성과 정확성 측면에서의 평가를 시도하여 정적인 측정방법의 시간 제한적인 단점을 해소하고 종전, 질량의 정적인 측정방식에서 측정이 어려웠던 동적인 상태의 질량을 컴퓨터 소프트웨어를 이용하여 정확하게 측정하였다 한다.

2. 이론적 배경

2-1. DMS-AD의 소프트웨어

2-1-1. AD-알고리즘

Fig. 1에서 제시한 하드웨어 구성을 DMS-AD의 하드웨어라 가정하고 AD-Algorithms을 유도하면, Fig. 1에서 스프링 저울의 가동부와 피측정물의 운동방정식은 식 (1)과 같다.

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

식 (1)을 M 에 대하여 정리하면 피측정물의 추정치 \hat{M} 은 식 (2)와 같다.

$$\hat{M} = \frac{m\ddot{x} + C\dot{x} + Kx}{g - \ddot{x}} \quad (2)$$

만약, 감쇠계수가 작아서 무시한다면 식 (2)는 다음과 같다.

$$\hat{M} = \frac{m\ddot{x} + Kx}{g - \ddot{x}} \quad (3)$$

여기서, M 을 \hat{M} 로 표시한 것은 식 (2), (3)에 의하여 계산된 수치는 피측정물의 질량이 추정치라고 가정하였기 때문이다. 식 (2)에서 x, \dot{x}, \ddot{x} 는 관측개시시간 $t_0 (> t_0)$ 에 대한 변위, 속도, 가속도이고 식 (3)을 AD-알고리즘의 기초식이라고 하자. 식 (3)으로 부터

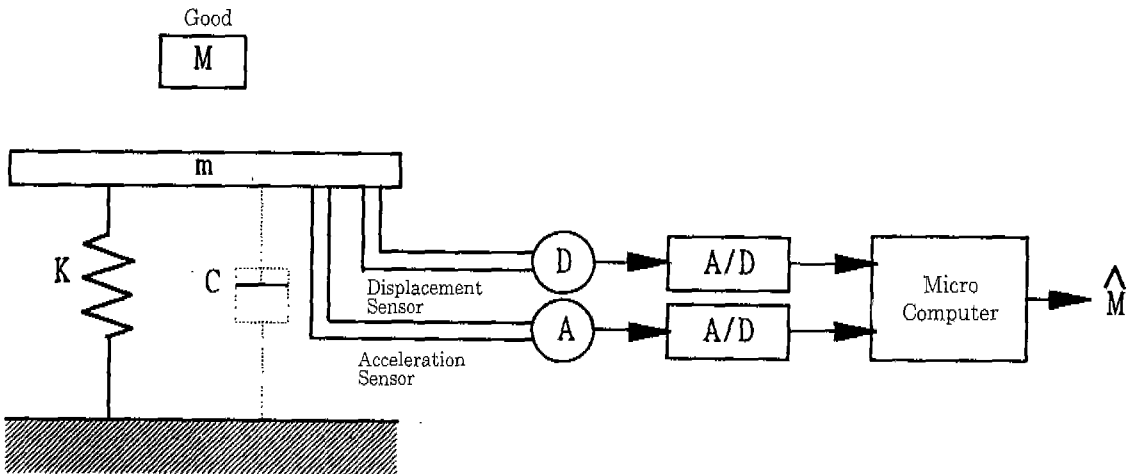


Fig. 1 Configuration of the Mass-measurement System to be Considered.

AD-알고리즘은 피측정물과 함께 진동하는 물품대의 가속도와 변위를 관측함으로써 피측정물의 질량을 구할 수 있다. 또한, 가속도와 변위의 검출과 신호 변환시 잡음이 있으나 무시하고, 관측신호를 나타내면 식 (4), (5)와 같다.

$$Y_a = G_a \ddot{x}. \quad (4)$$

$$Y_d = G_d x. \quad (5)$$

식 (3)에 식 (4), (5)를 대입하면 AD-알고리즘의 기초식은 식 (6)과 같다.

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

여기서,

$$F(t) = mG_d(Y_a(t) - Y_{ae}) + KG_d(Y_d(t) - Y_{de}). \quad (7)$$

$$G(t) = G_d G_a g(t - t_e) - G_d(Y_a(t) - Y_{ae}). \quad (8)$$

식 (6)을 컴퓨터 소프트웨어에 의해 실행가능하도록 이산 시간화하면

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

여기서,

$$F(2j) = mG(Y_a(2j) - Y_{ae}) + KG(Y_d(2j) - Y_{de}). \quad (10)$$

$$G(2j) = G_d G_a g(2j\Delta) - G_d(Y_a(2j) - Y_{ae}). \quad (11)$$

단, $j = 1, 2, 3, 4, \dots$

Δ : Sample 주기.

$Y_a(2j), Y_d(2j)$: 시각 $t_e + 2j\Delta$ 에 있어서의 관측신호.

2-1-2. 동적질량추정 알고리즘의 제형태.

AD-알고리즘 외의 동적질량추정 알고리즘을 살펴보면 식 (1)을 구간 $[t_e, t]$ 에 대하여 적분하고 M 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$(M + m)(\dot{x} - \dot{x}_e) + C(x - x_e) + K \int x(t) dt = Mg(t - t_e). \quad (12)$$

$$\hat{M} = \frac{m(\dot{x} - \dot{x}_e) + C(x - x_e) + K \int x(t) dt}{g(t - t_e) - (\dot{x} - \dot{x}_e)}. \quad (13)$$

식 (13)의 경우에는 속도와 변위를 검출하여 피측정물의 질량을 구하는 방법으로 속도 변위 검출형이다. 또한, 식 (13) 우변 분자의 제2항 및 3항에 각각 식 (14), (15)의 관계를 이용하면 속도만 검출하여 피측정물의 질량을 구할 수 있는 속도 검출형 알고리즘을 구할 수 있다.

$$C(x - x_e) = C \int \dot{x}(t) dt. \quad (14)$$

$$K \int x(t) dt = K \left[\int \dot{x}(t) dt + x_e(t - t_e) \right]. \quad (15)$$

속도 검출형 알고리즘에서 감쇠의 영향을 무시하면 식 (16)과 같다.

$$\hat{M} = \frac{m(\dot{x} - \dot{x}_e) + K \left[\int \dot{x} dt + x_e(t - t_e) \right]}{g(t - t_e) - (\dot{x} - \dot{x}_e)}. \quad (16)$$

한편, 가속도 변위 검출형 알고리즘에서 분모분자를 적분하면 식 (17)과 같다.

$$\hat{M} = \frac{m \int \ddot{x}(t) dt + K \int x(t) dt}{g(t - t_e) - \int \ddot{x}(t) dt}. \quad (17)$$

이 밖에 비감쇠 동적질량추정 알고리즘은 Table 1과 같다.

2-1-3. 동적질량추정 프로그램

AD-알고리즘에 의하여 실제로 질량의 추정을 행하는 동적질량추정 프로그램은 사용목적에 따라 온라인 실시간방식과 오프라인방식 등으로 구분된다.

(1) 온라인 실시간방식

본 연구의 중요한 조건중의 하나가 측정의 신속성이다. 그러므로 검출기에서 검출되는 가속도와 변위의 데이터는 실시간으로 처리되어야 한다. 그래서 A/D 변환기와의 입출력 및 변위 관측신호의 처리는 서브루틴으

로 처리하였다. 온라인 실시간방식 동적질량추정 프로그램의 순서도는 Fig. 2와 같다.

(2) 오프라인방식

오프라인방식 동적질량 추정 프로그램은 통상의 측정을 행하는 것이 아니라 추정치의 시간적 거동에 대하여 보조 기억장소에 저장하여 저장된 측정 데이터를 사용한다. 본 연구의 성능 및 특성을 조사하는 과정에서 특정의 측정시간에 있어서의 추정치를 계산한 추정치라는 한정된 데이터만으로는 불충분하며, 추정치의 시간적 거동까지도 알 필요가 있다. 또한, 가속도 변위 판측 데이터의 파형과 추정치의 시간적 거동은 시스템의 정도를 평가하는데 중요하다.

2-2. DMS-AD의 하드웨어

2-2-1. DMS-AD의 하드웨어 구성

DMS-AD의 하드웨어 구성은 Fig. 3과 같다. 본 연구에 이용된 스프링 저울은 Fig. 4와 같고 제원은 Table 2와 같다. 대수감쇠율을 이용하여 스프링 저울의 감쇠값을 구한 결과 ζ 가 0.004 정도로 감쇠의 영향을 거의 받지 않았다. 또한, 피측정물을 스프링 저울에 올려 놓기 위하여 물품대를 부착하였다. 본 연구에 이용된 스프링 저울의 운동방정식은 식 (18)과 같다.

$$\overline{m}\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = m'e\omega^2 \sin \omega t. \quad (18)$$

식 (18)에서 감쇠의 영향을 무시하고 $m = M + M_r + (17/35)M_s$ 로 치환한 후 피측정물의 질량에 관한 운동방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\left(M + M_r + \frac{17}{35}M_s \right) \ddot{x} + Kx = m'e\omega^2 \sin \omega t. \quad (19)$$

$$x = \frac{m'e\omega^2 \sin \omega t - \left(M + M_r + \frac{17}{35}M_s \right) \ddot{x}}{K} \quad (20)$$

$$M = \frac{m'e\omega^2 \sin \omega t}{\ddot{x}} - M_r - \frac{17}{35}M_s - \frac{Kx}{\ddot{x}}. \quad (21)$$

2-2-2. 시스템의 기본동작

본 연구에 이용된 스프링 저울에 편심로터를 장착하였다. 편심로터는 고정밀제어기에 의하여 4000 rpm 까지 회전되고, 편심로터의 회전에 의하여 스프링 저울은 상하 진동하게 된다. 상하 진동하는 스프링 저울에 부착된 물품대에 피측정물을 올려놓고 피측정물의 가속도와 변위를 검출기에 의해 검출하고 검출된 신호는 A/D 변환기를 통해 데이터를 변환한 후 마이크로 컴퓨터에 전

Table 1 List of Estimation Algorithms for Dynamic Mass Measurement.

Name of the algorithm	Variables to be observed	Initial values to be estimated	Basic equation of the estimation algorithm
1) AD-type(A)	\ddot{x} x	-	$\hat{M} = \frac{m\ddot{x} + kx}{g - \ddot{x}}$
2) AV-type	\ddot{x} \dot{x}	x_e	$\hat{M} = \frac{m\ddot{x} + k\left\{ \int \dot{x}(t)dt + x_e \right\}}{g - \ddot{x}}$
3) A-type	\ddot{x}	\dot{x}_e, x_e	$\hat{M} = \frac{m\ddot{x} + k\left\{ \iint \dot{x}(t)dt + \dot{x}_e(t-t_e) + x_e \right\}}{g - \ddot{x}}$
4) AD-type	\ddot{x} x	-	$\hat{M} = \frac{m\int \ddot{x}(t)dt + k\int x(t)dt}{g(t-t_e) - \int \ddot{x}(t)dt}$
5) VD-type	\dot{x} x	-	$\hat{M} = \frac{m(\dot{x} - \dot{x}_e) + k\int x(t)dt}{g(t-t_e) - (\dot{x} - \dot{x}_e)}$
6) V-type	\dot{x}	x_e	$\hat{M} = \frac{m(\dot{x} - \dot{x}_e) + k\left\{ \iint \dot{x}(t)dt + x_e(t-t_e) \right\}}{g(t-t_e) - (\dot{x} - \dot{x}_e)}$
7) D-type	x	x_e	$\hat{M} = \frac{m\left\{ (x - x_e) - \dot{x}_e(t-t_e) + k\iint x(t)dt \right\}}{1/2g(t-t_e)^2 - (x - x_e) + \dot{x}_e(t-t_e)}$

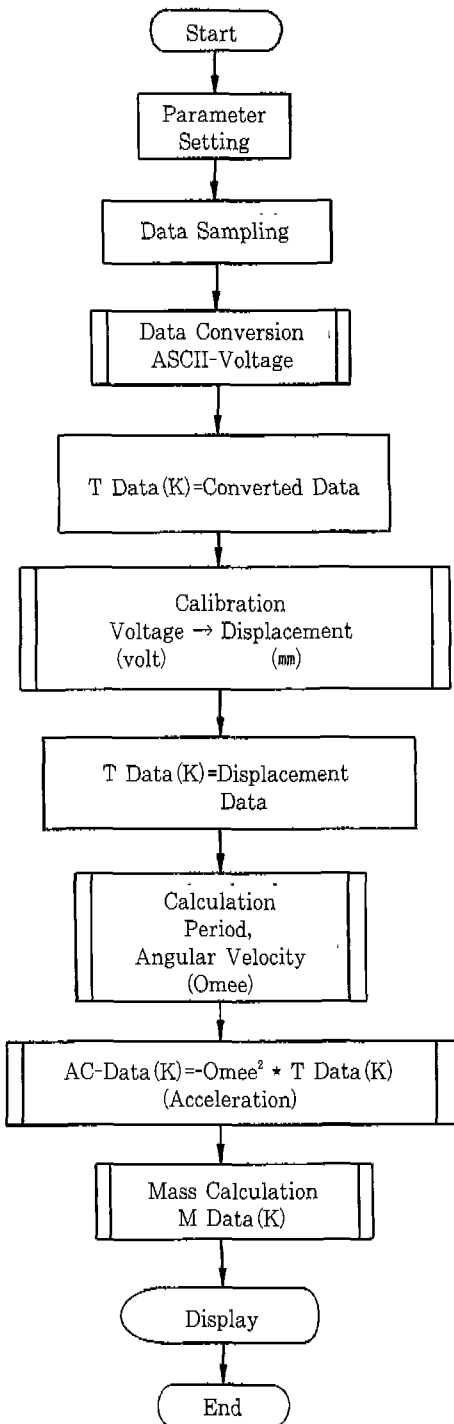


Fig. 2 Logic Flowchart of the Mass-estimation Program.

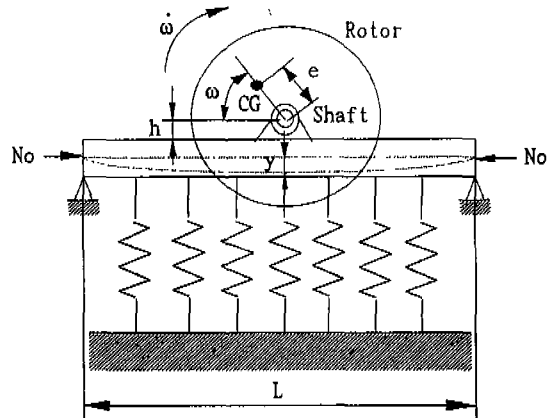


Fig. 4 Schematic Drawing of the Spring Scale.

Table 2 Specification of Spring Scale

L(Length)	M(Mass)	E(Young's Modulus)	Width	Thickness
78.50 cm	2.10 kg	2.10x10 kg/cm	2.54 cm	1.27 cm

송된다. 마이크로 컴퓨터는 미리 설정된 초기값에 도달하면 스프링 저울이 진동하기 시작한 것으로 인식하고 일정시간 대기후 변환된 변위의 관측신호를 사용하여 피측정물의 가속도를 구한다. 구해진 관측신호의 변위와 가속도를 AD-알고리즘에 대입하여 피측정물의 질량을 추정한다. 추정된 데이터는 온라인 실시간 처리되어 결과치로 보여지거나 보조 기억장치에 저장된다.

3. 실험방법 및 결과

3-1. 실험방법

본 연구에서는 피측정물을 수동으로 스프링 저울에 부착된 물품대에 올려놓고 스프링 저울을 가진시켜 피측정물의 질량을 측정하였다. 스프링 저울은 편심로터의 회전에 따라 가진하는 것으로 정상상태에서 피측정물의 질량을 추정하였고, 피측정물이 물품대에 올려지는 순간 발생하는 과도진동에 대한 영향을 배제한 후 피측정물의 질량을 추정하였다. 피측정물이 물품대에 올려지는 순간 발생하는 과도진동이 정상상태로 될때까지 걸리는 시간은 식 (20)에서 알 수 있듯이 가진력에

비해 피측정물의 질량 M 에 따른 변위 x 의 변화가 미세하기 때문에 피측정물이 물품대에 올려지는 순간 일어났던 과도진동은 순간적으로 정상상태에 도달하게 되는데, 피측정물의 관측개시시각은 과도진동의 정정시간 (Settling time)를 고려하였다. 한편, 피측정물의 측정순서는 다음과 같다. (1) 0~2.0 kg의 분동을 준비하고 스프링 저울의 탄성계수, 가동부의 등가질량 등 알고리즘 실행에 필요한 계수를 측정한다. 본 연구에 이용된 시스템의 계수값은 Table 3과 같다. (2) 스프링 저울에 부착된 물품대에 질량을 올려놓으면 질량의 변화로 인하여 스프링 저울과 검출기 사이에 변위의 차가 생긴다. 이 변위의 차와 검출기 출력과의 관계를 보정한다. (3) 오프라인방식에 의해 질량을 추정하고 추정치의 시간적 거동을 조사하였고, 온라인 실시간방식에 의해 N 번씩 반복 측정한다.

3-2. 실험결과

Fig. 5는 질량추정 프로그램에 의해 조사한 추정치의 시간적 거동이다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 추정치

값은 동적인 상태에서 구할 수 있어 정적측정에서 질량 추정이 어려웠던 동적질량을 추정할 수 있다. 또한, 본 시스템의 질량 추정시간은 피측정물의 과도진동에 기인한 관측대기시간과 질량추정 연산시간, 관측시간의 합으로 관측대기시간은 Fig. 6에서 알 수 있듯이 피측정물의 질량과 반비례 관계가 있다.

또한, 정확성의 측면을 살펴보면 피측정물의 질량이 증가함에 따라 오차의 평균값은 증가하였고, 오차의 평

Table 3 Value of the System Parameters

Symbol	Numerical values	units
Mr	5.06	kg
Ms	2.05	kg
m	0.03	kg
e	5.71	cm
K	5671.00	N/m
Δ	1.97E-5	sec
Observation time	2.00E-2	sec

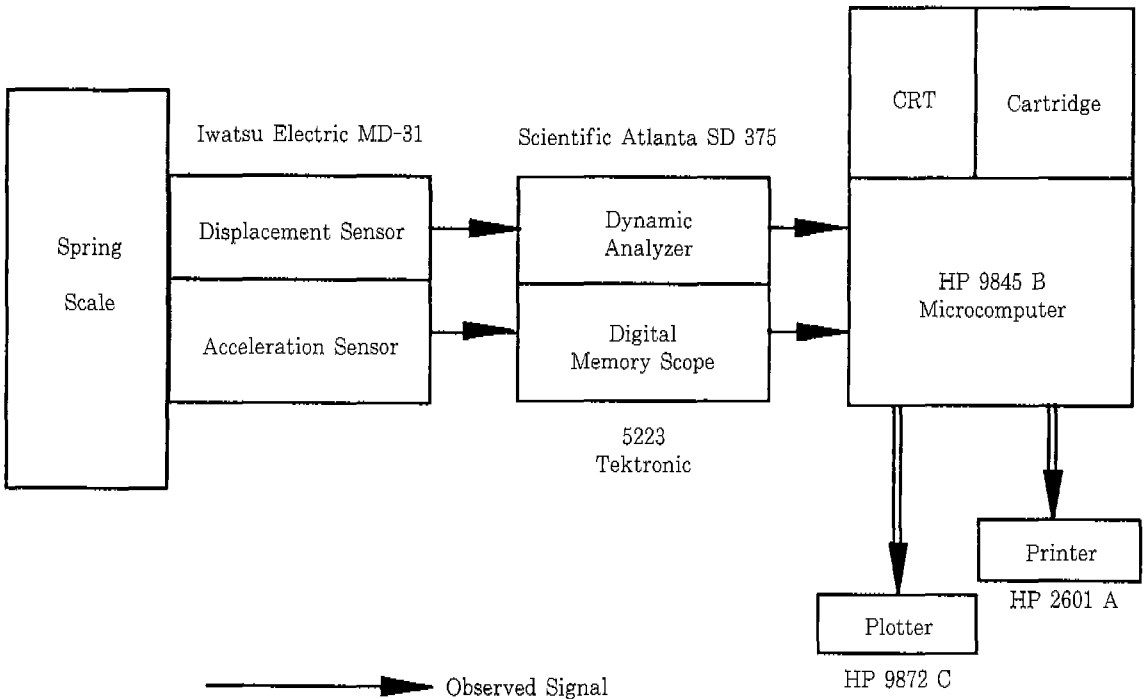


Fig. 3 Hardware System of the DMS-AD

균값을 피측정물의 질량으로 나눈 상대오차는 Fig. 7과 같이 0.06% 이내에 존재함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서 서술한 동적질량의 가속도 변위 검출형 측정 시스템은 종전, 질량의 정적인 측정방식에서 측정이 어려웠던 동적인 상태의 질량을 컴퓨터 소프트웨어를 이용하여 측정하였고, 생산공정상 제품의 질량을 다량 측정해야 할 경우, 정적인 측정방식이 가지고 있는 시간 제한적인 단점을 해결하였다. 또한, 동적 질량 측정시 상대오차가 0.06% 내에 존재하고 있어 종전, 정적인 측정방식의 정확성을 향상 시킬 수 있었다. 따라서, 생산공정에서 사용을 전제로 하는 질량의 측정조

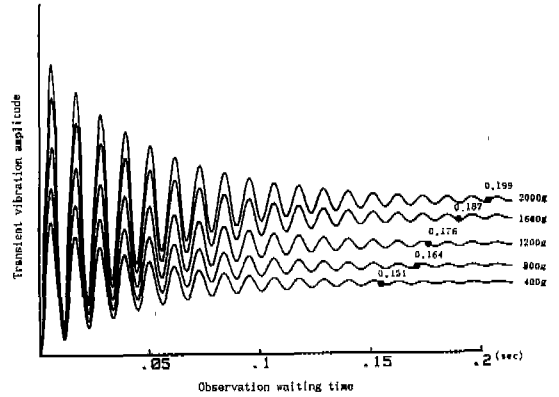


Fig. 6 Observation Waiting Time of the Mass-estimation at 0~2,000 g.

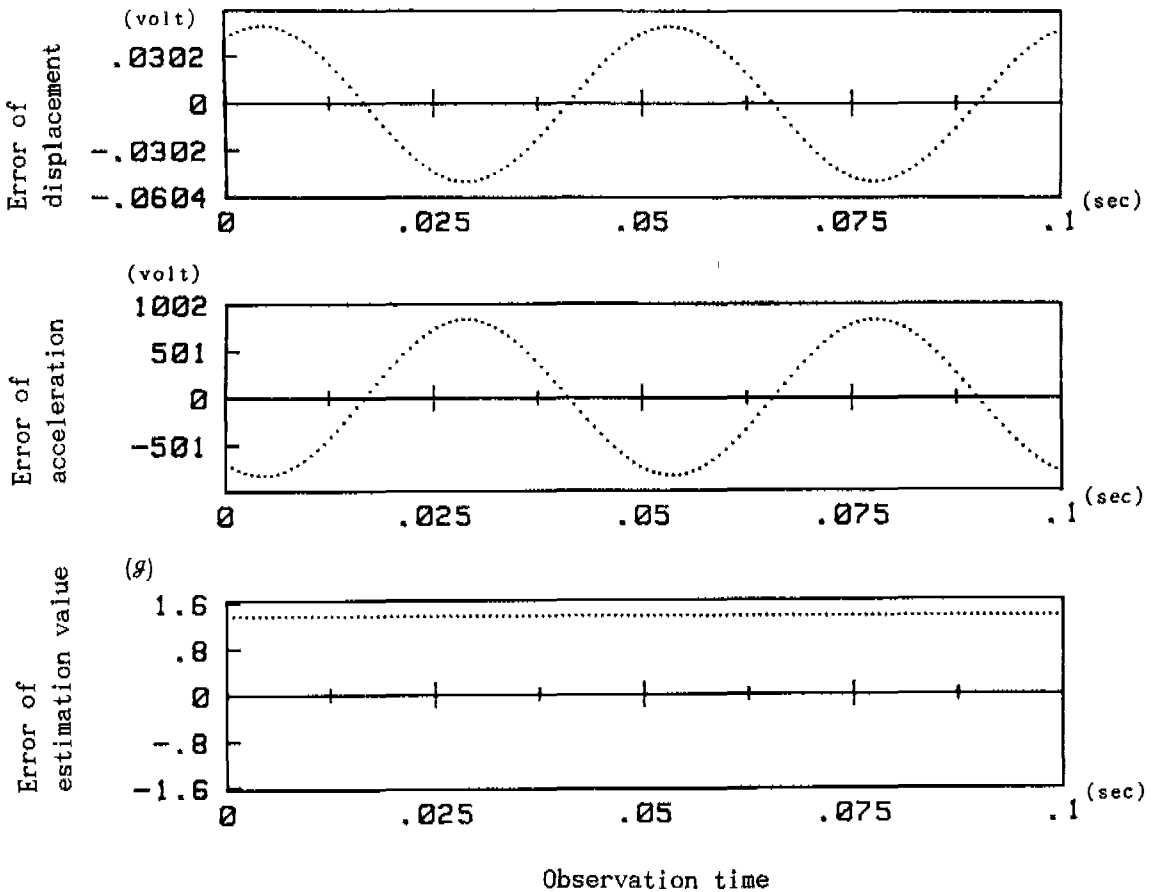


Fig. 5 Time-behavior of the Estimation value at 2,000g.

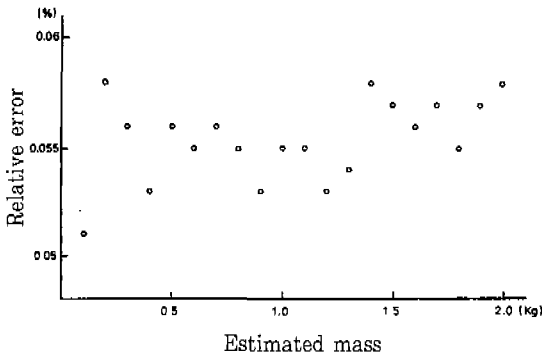


Fig. 7 Measured Value of Relative Error in DMS-AD.

건인 신속성과 정확성을 동시에 만족시킬 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 小野, 島岡, “速度 變位 檢出刑 質量動的推定 알고리즘,” 計測自動制御學會論文集, 19卷 4號 pp.300~307, 1982.
2. 小野, 島岡, “速度 變位 檢出刑 質量動的測定 시스템,” 計測自動制御學會論文集, 20卷 4號 pp.322~328, 1984.

3. 小野, 島岡, “速度 變位 檢出刑 質量動的推定 시스템의 소프트웨어,” 計測自動制御學會論文集, 21卷 4號 pp.382~388, 1985.
4. 小野, ほか, “マイクロプロセッサを利用した質量動的測定裝置の試作研究,” システムと制御, 24卷 3號 pp.185~191, 1980.
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.
6. 小野, 龜岡, 中島, “質量および重量の動的測定に関する研究(第1報),” 日本機械學會論文集, 44卷 384號 pp.2654~2662.
7. 小野, 龜岡, 中島, “質量および重量の動的測定に関する研究(第2報),” 日本機械學會論文集, 45卷 395號 pp.797~806.
8. E. O. Doebelin, Measurement System, McGraw-Hill, 1983.
9. F. S. Tse, I. E. Morse, R. T. Hinkle, Mechanical Vibration, McGraw-Hill, 1978.
10. L. I. Kronsjo, Algorithms, John wiley and sons, 1979.
11. M. S. Roden, Analog and Digital Communication System, Prentice-Hall, 1979.
12. 이성철, 정밀계측공학, 동명사, 1985.