

선형변이 차동변압기 센서의 직선성오차 보정기법

A Compensation Technique of the Linearity Error of Linear Variable Differential Transformer

최주호, 황의성, 홍성수, 유준

(Ju-Ho Choi, Eui-Seong Hwang, Sung-Soo Hong, and Joon Lyou)

Abstract : This paper presents the characteristics of the dynamic response and calibration technique on a linear variable differential transformer(LVDT). The linear error of the LVDT was proven $\pm 1\%$ in the static calibration and $\pm 0.5\%$ in the dynamic calibration. In this paper, the linearity error generated in the static and dynamic state of the core movement can be eliminated using the correction algorithm of the static and dynamic state derived from the least square linear approximation for the nonlinearity of the curves of direct data fitting and Lagrange polynomials. With the static and dynamic calibration method, the calibration accuracy of the LVDT can be reduced to within $\pm 0.5\%$.

Keywords : LVDT sensor, linearity error compensation

I. 서론

직선·왕복운동을 계측하기 위한 수단으로 여러 가지의 변위 센서들이 소개되고 있는데 센서의 선택은 변위의 크기와 정확도 및 환경조건에 따라 달라질 수 있다. 변위계측에 활용될 수 있는 계측기법에는 가변저항을 이용한 전위차계(potentiometer), 고속카메라를 이용한 사진 촬영식, 막대자석(magnet)을 이용한 솔레노이드 코일센서, 빛을 이용한 광 슬릿(slit) 센서 및 변압기를 이용한 선형변이 차동변압기 센서방식이 있는데 이 중에서 LVDT 센서기법은 운동체의 속도 및 변위의 크기에 관계없이 계측이 가능하며, 센서 및 센서어댑터가 소형 경량이므로 센서부착이 용이할 뿐 아니라 계측의 효율이 높다[1][2]. 그런데 LVDT 센서의 경우는 센서회로 내부를 운동하는 철심의 위치와 속도 및 코일의 감긴 상태에 따라 코일의 인덕턴스가 달라진다. 그러므로 철심이 정지된 정적상태와 철심이 운동하는 동적상태에 따라 LVDT 센서의 직선성오차가 달라져 정확도에 영향을 준다. LVDT 센서의 제작처에서는 직선성오차를 $\pm 2\%$ 이내라고 제시하고 있다.

본 논문에서는 비교적 변위의 크기가 수십cm 이상이고, 직선·왕복운동을 하는 물체의 변위 계측용으로 활용되고 있는 LVDT 센서의 직선성오차 보정기법을 제안하였으며, 보정방법으로는 직접데이터 피팅법과 라그랑주 데이터 피팅법에 직선근사 비선형도 추정법을 이용하는 정상태 보정기법과 LVDT 센서의 비선형도를 최소자승 직선근사법과 등속도 및 가속도에 의한 동상태 보정기법이 있다[3]. 본 연구에서는 LVDT 센서를 이용하여 직선·왕복운동을 계측할 때 발생할 수 있는 오차의 요인을 분석하고 오차보정기법을 연구하여 계측의 정확도를 $\pm 0.5\%$ 이내까지 향상시킬 수 있는 방법을 제시하였다.

II. LVDT 센서의 특성 및 회로해석

1. 센서의 구조와 특성

LVDT 센서의 구조는 그림 1의 (a)와 같이 원통형 내에 대칭적 구조로 하나의 1차코일과 두 개의 2차코일로 이루어진다. 이때 두 개의 2차코일은 직렬 역극성으로 연결되며, 이 코일 통로 사이를 강자성체의 철심이 운동할 때 발생하는 신호를 이용하면 변위계측이 가능하게 된다. 그림 1의 (b)는 코일과 철심 관계를 알기쉽게 표현한 등가회로이다.

LVDT는 DC형과 AC형이 있는데 본 논문에서는 Schaevlitz사의 AC형 LVDT(XS-D series) 센서를 사용

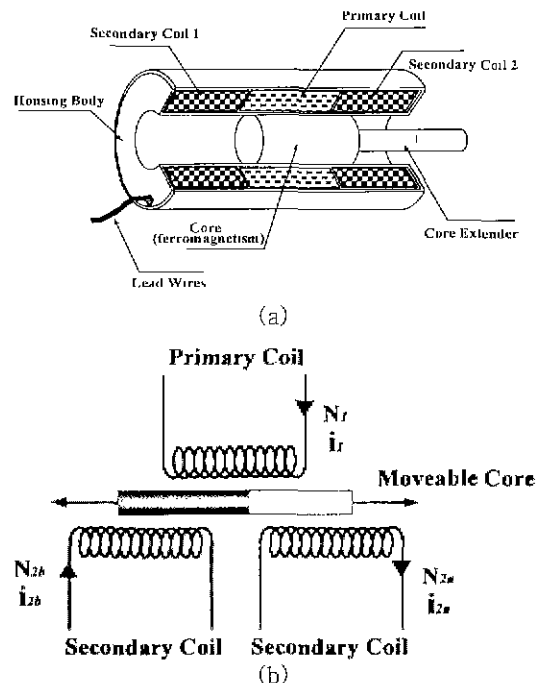


그림 1. LVDT 센서의 구조와 등가회로.
Fig. 1. LVDT sensor structure and equivalent circuit.

접수일자 : 1999. 11. 23., 수정완료 1999. 4. 20.
최주호, 황의성, 홍성수 · 국방과학연구소 계측기법연구실
유준 : 충남대학교 교수

하였으며, 공칭입력은 3Vrms, 선형범위는 ±180cm이고 주파수 범위는 400Hz에서 3kHz 범위를 갖는다. 그리고 허용진동은 2kHz까지 20g이며, 사용온도는 -55℃에서 150℃의 조건에서 오차범위가 전출력범위의 0.5% 이하의 영 전압을 갖는다[3].

2. 센서회로 해석[4]

LVDT 센서의 등가회로는 그림 2와 같다.

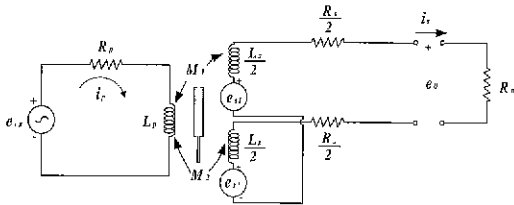


그림 2 LVDT 센서의 등가회로.

Fig. 2. Equivalent circuit of LVDT sensor.

그림 2에서 입력단위 KVL식은

$$e_s = L_p \frac{di_p}{dt} + R_p i_p \tag{1}$$

$$e_{s1} = M_1 \frac{di_p}{dt}, e_{s2} = M_2 \frac{di_p}{dt} \tag{2}$$

$$e_o = e_{s1} - e_{s2} = (M_1 - M_2) \frac{di_p}{dt} = e_o |_{open\ circuit} \tag{3}$$

(1)에서 미분연산자를 p 로 정의하여 i_p 를 구한후 (3)에 대입하면,

$$e_o = (M_1 - M_2) \frac{P}{L_p p + R_p} e_s \tag{4}$$

$$\frac{e_o}{e_s}(p) = \frac{[(M_1 - M_2)/R_p]p}{\tau_p p + 1}, \tau_p = \frac{L_p}{R_p} \tag{5}$$

그리고 2차측 출력단에 입력저항 R_m 인 부하가 연결되면 전류는 다음과 같다.

$$e_s = L_p p i_p + R_p i_p - (M_1 - M_2) p i_p \tag{6}$$

$$0 = L_s p i_s + (R_s + R_m) i_s + (M_1 - M_2) p i_p \tag{7}$$

(6)과 (7)에서 i_s 를 구하고 (8)의 i_p 를 얻을 수 있다.

$$i_p = \frac{(pL_s + R_s + R_m)e_s}{(M_1 - M_2)^2 p^2 + (pL_p + R_p)(pL_s + R_s + R_m)} \tag{8}$$

$$e_o = (M_1 - M_2) \frac{di_p}{dt} = (M_1 - M_2) p i_p \tag{9}$$

여기서 부하저항이 $R_m \gg (L_s p + R_s)$ 의 조건을 가정하면 다음과 같다.

$$\frac{e_o}{e_s}(p) = \frac{dp}{dp^2 + bp + c} \tag{10}$$

$$\begin{aligned} a &= [(M_1 - M_2)^2 + L_s L_p] \\ b &= [L_p(R_s + R_m) + L_s R_p] \\ c &= (R_s + R_m)R_p \\ d &= R_m(M_1 - M_2) \end{aligned}$$

LVDT 센서는 그림 3의 선형성이 보장되는 영역에서 항상 안정동작을 한다.

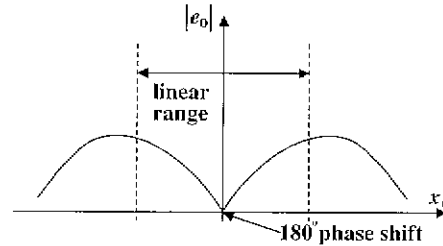


그림 3. LVDT 센서의 직선성.

Fig. 3. Linearity of LVDT sensor.

III. 직선성오차 보정이론

1. 정상상태 보정

정상상태 보정방법은 철심을 미소단위로 이동시킨 후 정지된 상태에서 LVDT의 출력을 얻어 변위대 전압의 관계로부터 정상상태 특성 그래프를 얻을 수 있으며, 이 방법에는 직접데이터 피팅방법과 라그랑지 다항식을 이용하는 피팅방법이 있다. 그리고 직선근사에 의한 비선형도 추정법은 최소자승 직선오차를 구할 수 있어 직접데이터 피팅 및 라그랑지 다항식을 이용하여 피팅곡선의 비선형도를 보정하는데 이용한다.

직접데이터 피팅법 : 직접데이터 피팅법은 (11)과 같이 변위 (l_k)대 전압 (V_{sk})의 출력집합이 주어졌을 경우 이식을 만족시키는 $m-1$ 차 다항식을 (12)로 정의할 수 있다. 여기서 $P_m(l)$ 은 각 변위를 만족시키는 전압 출력함수이다.

$$V_{sm} = \{(l_1, V_{s1}), (l_2, V_{s2}), (l_3, V_{s3}), \dots, (l_m, V_{sm})\} \tag{11}$$

$$P_m(l) = p_0 + p_1 l + p_2 l^2 + p_3 l^3 + \dots + p_{m-1} l^{m-1} \tag{12}$$

(11)의 데이터를 (12)에 대입하면 (13)의 식을 얻을 수 있다.

$$P_m(l_m) = V_{sm} = p_0 + p_1 l_m + p_2 l_m^2 + p_3 l_m^3 + \dots + p_{m-1} l_m^{m-1} \tag{13}$$

(13)은 선형연립방정식에서 P_k 를 얻으면 출력집합을 만족하는 다항식이 완성된다. 이 식에 (11)의 값을 대입하면 $m-1$ 차 방정식이 얻어지는데 고차인 경우 해를 얻기가 어렵다. 그러므로 뉴우톤의 방법을 적용하여 수치해석적으로 처리한다[5].

라그랑지 데이터 피팅법 · 직접데이터 피팅법은 많은 계산량이 요구되므로 라그랑지 다항식을 적용해보자. 어떤 두 점에 대한 함수값을 알고 있을 때 라그랑지 선형 다항식은 (14)와 같다[6].

$$P_1(l) = \frac{l-l_b}{l_a-l_b} V_s(l_a) + \frac{l-l_a}{l_b-l_a} V_s(l_b) \tag{14}$$

(14)에 l_a, l_b 값을 대입하면 $P_1(l_a) = V_s(l_a), P_1(l_b) = V_s(l_b)$ 가 되므로 함수 $P_1(l)$ 은 주어진 두 점을 통과함을 알 수 있다. 그러므로 (14)에 대한 라그랑지 다항식을 일반화시키면 (15)와 같다.

$$P_m(l) = \frac{(l-l_2)(l-l_3)\dots(l-l_m)}{(l-l_1)(l-l_2)\dots(l-l_{m-1})} V_s(l_1) + \dots$$

$$\frac{(l-l_1)(l-l_2)\dots(l-l_{m-1})}{(l-l_1)(l-l_2)\dots(l-l_{m-1})} V_s(l_m) \quad (15)$$

(15)도 직접데이터 핏팅법과 마찬가지로 역함수를 구해야하므로 $l=R_m(V_{sk})$ 의 역함수를 정의하면 (15)는 (16)으로 바꿀 수 있다.

$$R_m(V_s) = \frac{(V_s - V_{s2})(V_s - V_{s3})\dots(V_s - V_{sm})}{(V_{s1} - V_{s2})(V_{s1} - V_{s3})\dots(V_{s1} - V_{sm})} l(V_{s1})$$

$$+ \dots + \frac{(V_s - V_{s1})(V_s - V_{s2})}{(V_{sm} - V_{s1})(V_{sm} - V_{s2})}$$

$$\frac{\dots(V_s - V_{sm-1})}{\dots(V_{sm} - V_{sm-1})} l(V_{sm-1}) \quad (16)$$

(16)에 의해 각 출력값에 대응하는 변위를 쉽게 구할 수 있다. 그러나 이 식에서 $l=R_m(V_{sk})$ 는 선형다항식이 아닐 경우는 직접데이터 핏팅법으로 구해야 한다.

직선근사 비선형도 추정법 : (11)의 정보에 대해 선형성을 가정하고 직선근사를 만족하는 일치식을 (17)로 정의한다.

$$V = e_1 l + e_2 \quad (17)$$

(11)과 (17)로 (18)을 얻고 이것과 원시정보의 차는 (19)로 주어진다.

$$V_k = e_1 l_k + e_2 \quad R=1,2,3,\dots,m \quad (18)$$

$$\varepsilon_k = V_{sk} - V_k \quad k=1,2,3,\dots,m \quad (19)$$

(19)의 편차를 제곱하여 합하면 (20)과 같이 표현할 수 있다.

$$S(e_1, e_2) = \sum_{k=1}^m (\varepsilon_k)^2 = \sum_{k=1}^m (V_{sk} - e_2 - e_1 l_k)^2 \quad (20)$$

(20)에서 $\partial S / \partial e_1 = 0, \partial S / \partial e_2 = 0$ 을 만족하는 e_1, e_2 는 $S(e_1, e_2)$ 의 값을 최소가 되므로 (20)을 편미분하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial S(e_1, e_2)}{\partial e_2} = -\sum_{k=1}^m 2(V_{sk} - e_2 - e_1 l_k) = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial S(e_1, e_2)}{\partial e_1} = -\sum_{k=1}^m 2l_k (V_{sk} - e_2 - e_1 l_k) = 0 \quad (22)$$

(21)과 (22)를 정리하면,

$$e_2 m + e_1 \sum_{k=1}^m l_k = \sum_{k=1}^m V_{sk} \quad (23)$$

$$e_2 \sum_{k=1}^m l_k + e_1 \sum_{k=1}^m l_k^2 = \sum_{k=1}^m l_k V_{sk} \quad (24)$$

(23)와 (24)에서 e_1 과 e_2 에 대한 해를 구할 수 있다. 이 해를 (20)에서 실제적인 최소자승 오차를 구하기 위해 이용된다. 그러므로 (20)의 결과를 직선근사에 의한 비선형도 추정법으로 정상상태 보정에 적용하였다.

2 동상태 보정

LVDT 센서의 비선형도를 최소자승 직선근사법과 등속도 및 가속도에 의한 동상태 보정법을 제시한다. LVDT 센서의 철심 속도 (v_{2q})에 대한 전압 (V_{2q}) 및

변위데이터는 (25)와 같이 표현할 수 있다.

$$v_{2q} = \{(l_{a01} \cdot V_{a01}), (l_{a02} \cdot V_{a02}), \dots, (l_{a0p} \cdot V_{a0p})\} \quad (25)$$

이와 같이 변위에 대한 출력전압의 변화를 알게됨으로써 어떤 속도 $v=V_{sk}$ 일 때의 근사직선식은 (23), (24)을 이용하면 (26)와 (27)으로 표현된다.

$$e_{a12} \sum_{j=1}^m l_{aj1} + e_{a11} \sum_{j=1}^m l_{aj1}^2 = \sum_{j=1}^m V_{aj2} \quad (26)$$

$$e_{a12} m + e_{a11} \sum_{j=1}^m l_{aj1} = \sum_{j=1}^m l_{aj1} V_{aj2} \quad (27)$$

(26), (27)에서 직선근사에 대한 계수를 구하므로써 비선형도는 (28)과 같이 정의된다.

$$\sum_{j=1}^m (\varepsilon_j)^2 = S_{aj}(e_{a11}, e_{a12})$$

$$= \sum_{j=1}^m (V_{aj2} - e_{a12} - e_{a11} l_{aj1})^2 \quad (28)$$

(28)은 작을수록 이상적이거나 실제로 영이 아닌 어떤 값을 갖게된다. 각 속도에 대해 대응되는 비선형도는 (29)로 표현된다.

$$S_{aj}(e_{a11}, e_{a12}) = \sum_{j=1}^m (V_{aj2} - e_{a12} - e_{a11} l_{aj1})^2 \quad (29)$$

(29)의 결과를 이용하여 속도와 비선형도간의 관계를 파악할 수 있도록 완전 핏팅에 의한 다항식을 유도하는 것이 가능하다. (12)를 이용하면 (30)와 같이 표현할 수 있다[7][8].

$$Z_q = (v_{2q}) = z_0 + z_1 v_{2q} + z_2 v_{2q}^2 + z_3 v_{2q}^3 + \dots$$

$$+ z_{q-1} v_{2q}^{q-1} = S_{aj}(e_{a11}, e_{a12}) \quad (30)$$

등속도 운동시 직선성오차 보정 : 정적상태와 동적상태의 변위가 일치하는 위치에서 각 속도에 대한 출력전압과 정지상태에서의 전압과의 차는 (31)으로 표현된다. 여기서 v_{sk} 속도를 의미하고, V_{sk} 는 전압이다.

$$v_{sj} = \{\delta V_{s1}, \delta V_{s2}, \dots, \delta V_{spp}\} \quad (31)$$

(31)은 속도별 전압차의 집합으로 표현되었는데, 등속도운동 또는 가속도운동에 따라 다르게 보정을 해주어야 한다. 등속도운동의 경우 속도에 의한 비선형 값을 계산하고 각 변위에 대응하는 비선형 전압값을 보정해 주어야 한다. 가속도 운동의 경우는 속도에 대한 보정 알고리즘을 적용한 후 변위에 대한 비선형성을 보정한다. (31)을 변위기준으로 정리하면 (32)과 같다.

$$l_{sj} = \{\delta V_{spp}, \delta V_{spp}, \delta V_{s2p}, \dots, \delta V_{spp}\} \quad (32)$$

(31)에서 각 속도별 변위에 대한 전압오차를 나타내는 일반식은 (33)와 같다.

$$\Delta Z_{i,j}(l) = z_{0i} + z_{1i} l + z_{2i} l^2 + z_{3i} l^3 \dots z_{(p-1)i} l^{p-1} \quad (33)$$

그러므로 등속도로 이동했을 때 계측된 전압을 $V_a(l_n)$ 이라고 할 경우 정상상태에서 계측한 함수로 변환하기 위해서는 (34)과 같은 보정이 필요하다.

$$\begin{aligned}
 V_i(l_n) &= V_m(l_n) - \Delta Z_{vq}(l_n) \\
 &= V_m(l_n) - (z_{0k} + z_{1k}l_n + z_{2k}l_n^2 + z_{3k}l_n^3 + \dots + z_{(q-1)k}l_n^{q-1})
 \end{aligned} \quad (34)$$

그리고 어떤 변위 l_j 에 대해 전압오차는 다음과 같은 형태를 갖는다. 여기서 δV_{akj} 는 전압값이다.

$$\begin{aligned}
 \Delta Y_q(u_{akj}) &= y_{0k} + y_{1k}u_{akj} + y_{2k}u_{akj}^2 \\
 &+ y_{3k}u_{akj}^3 + \dots + y_{(q-1)k}u_{akj}^{q-1} = \delta V_{akj}
 \end{aligned} \quad (35)$$

(35)에서 유도된 다항식에 원하는 속도를 대입하면, 그에 대한 전압오차의 계산이 가능하다. 이러한 전압오차의 계산은 모든 변위에 대해 반복적으로 수행되어야 하며, 그 결과는 계측데이터 보정에 적용할 수 있다.

가속도 운동시 직선성오차 보정 : 가속도에 의한 방법은 등속도에 의한 방법과 비슷하지만 철심이 가속도 운동을하므로 (35)를 이용하여 변위데이터의 값과 일대일로 대응할 수 있는 속도에 따른 전압오차 데이터를 만들어야 한다. 변위정보가 (36)로 주어지면 속도는 (37)으로 된다.

$$l(t) = f(t) \quad (36)$$

$$v(t) = \frac{df(t)}{dt} \quad (37)$$

(37)과 같이 특정 변위에 대한 순간 속도의 계산이 가능하므로 (35)를 각 변위에 대해 (38)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{If } l_k &= f(t_k) \\
 \Delta Y_q\left(\frac{df_{ak}(t_k)}{dt}\right) &= y_{0k} + y_{1k}\left(\frac{df_{ak}(t_k)}{dt}\right) \\
 &+ y_{2k}\left(\frac{df_{ak}(t_k)}{dt}\right)^2 + y_{3k}\left(\frac{df_{ak}(t_k)}{dt}\right)^3 \\
 &+ \dots + y_{(q-1)k}\left(\frac{df_{ak}(t_k)}{dt}\right)^{q-1} = \delta V_{akj}
 \end{aligned} \quad (38)$$

(39)은 (34)과 유사한 방법으로 계측데이터에 적용되며, 속도에 의한 p개의 전체 변위에 대한 보정이 완료되면, 변위에 의한 보정이 이루어진다. 보정식은 (39)과 같다.

$$V_i(l_n) = V_m(l_n) - \Delta Z_{vq}(l_n) - \Delta Y_q(v_n) \quad (39)$$

IV. 실험 및 결과

1 시스템 구성

시스템 구성은 그림 4와 같이 LVDT 센서와 철심 운반체인 구동장치, A/D 변환기 및 컴퓨터 등으로 구성되어 있다.

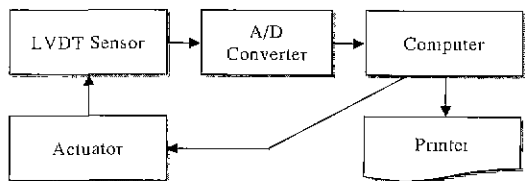


그림 4. 교정시스템 블록다이어그램.
Fig. 4. Block diagram of LVDT sensor calibration system.

그리고 그림 5에서 LVDT 센서 교정시스템에 대한 사진을 나타내었으며, 실제 LVDT 센서와 센서지지대, 단일운송자(mono carrier), 구동기, PC 및 주변기기 등을 볼 수 있다.

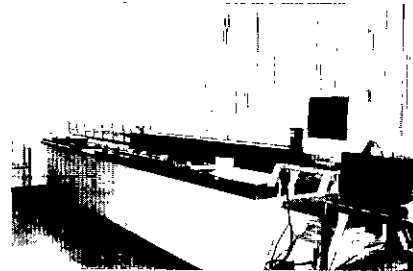


그림 5. LVDT 센서 교정시스템 사진.
Fig. 5. Picture of LVDT sensor calibration system.

구동기는 기계부, 구동부 및 제어부로 구분되고 기계부는 운송장치와 단일운송자 몸체, 사각 선형 슬리브 베어링(sleeve bearing)이 장착된 유도장치, 동력전달부, 윤활장치 등으로 구성되며, 구동부는 DC 서보모터, 전원 구동부, 기어상자 등으로 되어있다. 그리고 제어부는 모터제어회로, 휴대용 입력장치, 입·출력장치 및 기억용량 카드 등으로 구성된다.

2 철심운반체와 선형척도

철심운반체와 선형척도의 모형을 그림 6에서 볼 수 있으며, 단일운송자는 직류전동기를 동력원으로 하는 벨트구동방식의 장축로봇이다. 단일운송자와 수평으로 선형척도가 설치되어 철심의 변위에 대한 거리정보를 ±5μm/m까지 정확하게 읽을 수 있다[7]~[10].

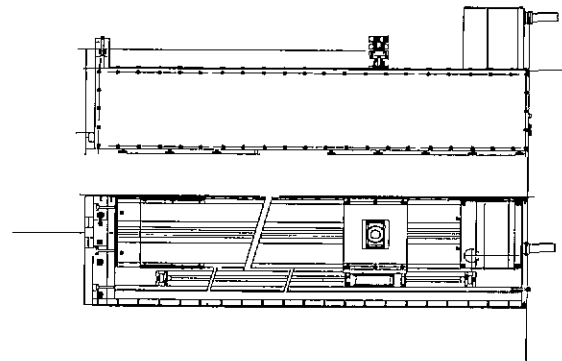


그림 6. 단일운송자와 선형척도.
Fig. 6. Mono carrier and linear scale.

3. A/D변환기

선형척도로부터 출력되는 거리정보를 정확하게 분석하기 위하여 샘플링 주파수를 1MHz 이상되게 하고 단일운송자가 최대 속도에서 약 2초간의 동작을하므로 최소 2Mbytes의 기억용량이 필요하다.

4. LVDT 센서 교정프로그램의 구조

그림 7은 교정프로그램의 구조이며 정상태 교정루틴(static state calibration routine:SSCR)과 동상태 교정루틴(dynamic state calibration routine : DSCR)으로

구성되어 있으며, 제어 루틴으로는 로봇제어, 선형척도 제어 및 컴퓨터의 일반제어 루틴으로 구성되어 있다.

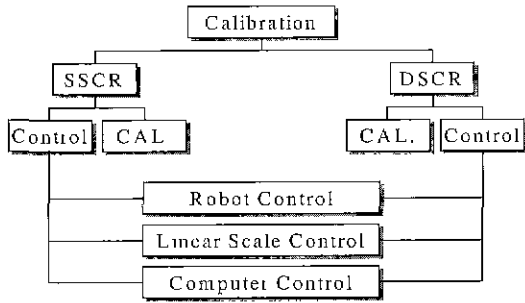


그림 7. 교정프로그램의 구조.
Fig. 7. Architecture of calibration program.

5. 교정결과

정상태 교정 실험결과 : 그림 8은 선형척도 데이터와 LVDT 출력데이터를 이용하여 작성된 변위에 대한 전압 출력을 나타내는 교정용 데이터 곡선이다 이 교정데이터는 라그랑지 데이터 피팅법과 직선근사 비선형도 추정법을 적용하였으며, 교정데이터의 LMS 오차는 1.293×10^{-3} V²의 비선형도를 보였다. 그림 9는 직선근사에 의한 비선형도를 나타낸 것으로 900mm 범위에서 최

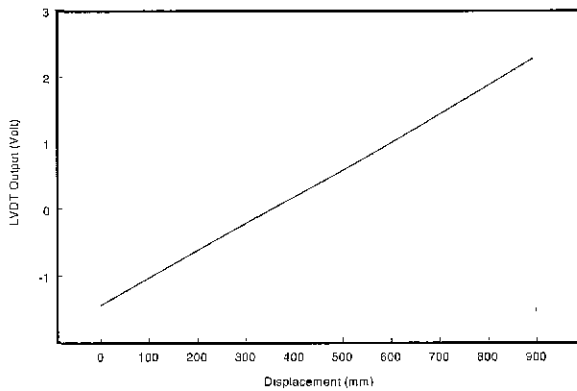


그림 8. LVDT 센서의 교정곡선.
Fig. 8. Calibrated curve of LVDT sensor.

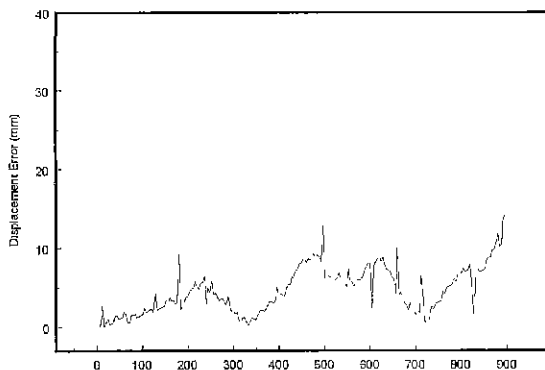


그림 9. 정상태에서 직선성오차.
Fig. 9. Linearity error of static state.

대 13mm 정도의 오차를 보이고 있다. 그림 9의 직선성오차는 LVDT의 고유오차인데 선형척도 데이터와 LVDT 출력의 차가 된다.

동상태 교정 실험결과 : 동상태 교정은 철심의 운동속도로 인하여 인덕턴스가 변하기 때문에 변위 및 속도의 최소자승 직선근사에 의한 비선형도 추정기법을 등속도 교정 알고리즘과 합성하여 구한 것이 그림 9의 그래프이다.

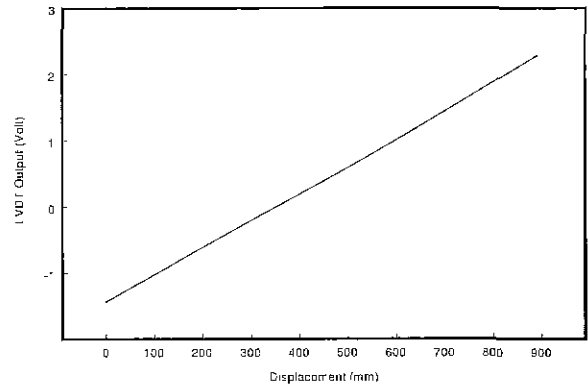


그림 9. 동상태 보정 곡선.
Fig. 9. Compensation curve of dynamic state.

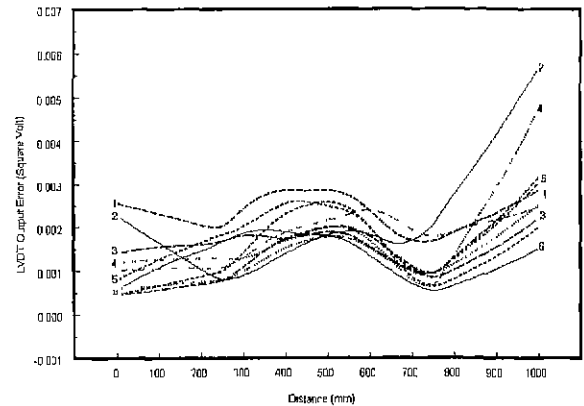


그림 10. 속도별 오차 피팅 곡선.
Fig. 10. Error pitting curve for each velocity.

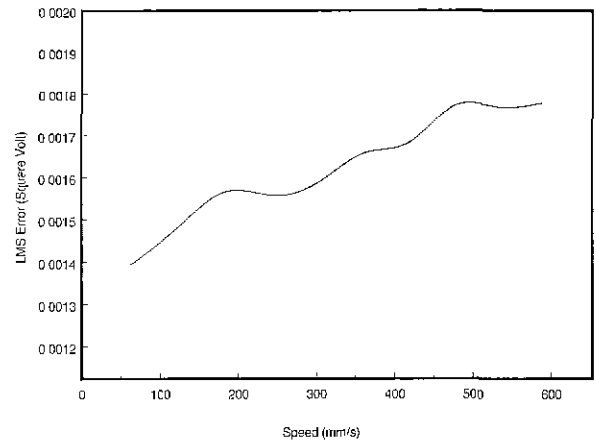


그림 11. 속도별 오차 변화 곡선.
Fig. 11. Error variation curve for each velocity.

그림 10은 10개의 속도데이터에 대해 변위의 최소자승 직선근사에 의한 비선형도 추정기법에 의한 오차 핏팅곡선을 그린 것이며, 각 속도에서 비선형성을 볼 수 있다.

동상태 실험에서 LVDT 센서의 철심 속도가 증가할수록 비선형성이 점차 증가함을 볼 수 있었다. 그러나 전체평균 오차가 전 범위의 $\pm 0.5\%$ 이내에 들어오므로, LVDT의 속도에 따른 선형 특성이 비교적 양호함을 알 수 있었다. 또한 정상태 교정에서도 비선형도가 평균적으로 $\pm 1\%$ 이내의 오차를 보였다. 여기에 LVDT 센서의 교정기법을 적용하면 보다 정확한 계측결과를 얻을 수 있다. 그림 12는 속도와 빈위에 대한 오차평면을 나타내고 있음을 보이고 있다.

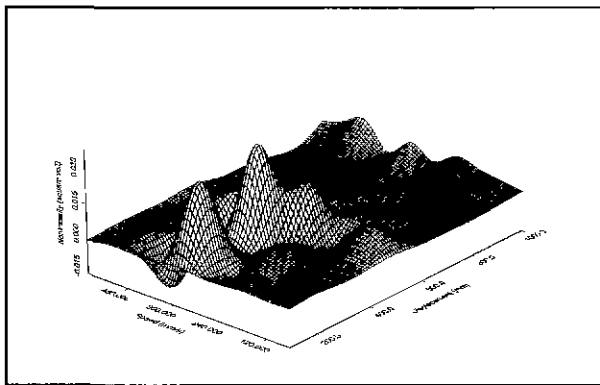


그림 12. 3차원 오차 평면.

Fig. 12. Three dimensional error plane.

LVDT 센서 교정시스템의 정확도 평가 : LVDT 센서 교정시스템의 오차는 계측의 기준이 되는 선형최도오차와 철심위치오차, 양자화오차, 랜덤오차, 로봇속도제어오차 및 LVDT 센서의 선형오차 등이 있다. 이들에 대한 오차값이 표 1에 주어지며 정확도는 (40)에서 구하였다[13].

표 1. LVDT 센서 교정시스템의 오차백분율.

Table 1. Error percentage of LVDT sensor calibration system.

오차항목	구분	변위측정 정확도(%)	속도측정 정확도(%)
Linear scale error	LE_1	$\pm 5 \times 10^{-4}$	$\pm 5 \times 10^{-1}$
Core position error	LE_2	± 0.10	± 0.10
양자화 오차	CE_1	± 0.02	± 0.02
랜덤 오차	CE_2	± 0.01	± 0.01
Robot 속도제어오차	EE_1	0.0	± 0.08
LVDT 선형오차	LE_3	± 0.03	± 0.11
전체오차		± 0.13	± 0.21

$$e_{total} = \sqrt{RE^2 + \left(\sum_{i=1}^3 LE_i\right)^2 + EE^2 + \sum_{i=1}^2 CE_i^2} \quad (40)$$

$= \pm 0.3\%$ (변위) 이내, $\pm 0.5\%$ (속도) 이내, (2σ 기준)

6. 고찰

- 개발한 LVDT 교정기는 최대 180cm까지 교정가능하며, A/D 변환기의 해상도는 12bits이다.
- LVDT 센서의 제작처에서는 정상태 및 동상태오차를 포함하여 직선성오차가 $\pm 2\%$ 이내라고 제시하였는데 정상태 및 동상태 보정이론을 적용하면 $\pm 0.5\%$ 이내로 직선성오차를 줄일 수 있다.
- 실험에서는 LVDT 센서를 최대 100cm까지 교정하였으며 정상태 직선성오차는 $\pm 1.0\%$ 와 동상태 직선성오차 $\pm 0.5\%$ 임을 확인할 수 있었다.
- LVDT 센서를 이용한 변위 계측시스템의 지배적인 오차항목은 센서의 직선성오차인데 본 연구의 보정기법을 적용하여 $\pm 0.03\%$ 까지 줄일 수 있었다.

V. 결론

본 연구에서는 변위계측용 LVDT 센서의 비선형 특성에 대한 분석과 교정기법에 대한 알고리즘 연구를 하였는데, 속도의 최소자승 직선근사에 의한 비선형도 추정기법으로 9m/s까지 추정하여 LMS 오차를 계산해 본 결과 약 $4.5967 \times 10^{-2} V$ 결과를 보였다. 본 실험에서 속도가 증가할수록 비선형성이 점차 증가하는 현상을 확인하였으며, 속도만의 평균오차는 $\pm 0.5\%$ 이내에 들어오는 것을 확인하였다. 그리고 정상태의 경우 비선형도가 평균적으로 $\pm 1\%$ 의 오차를 보이고 있음을 확인하였다. 이번에 연구한 교정기법을 정상태 및 동상태 교정에 적용하면 이러한 오차는 제거할 수 있어 계측의 정확도를 크게 증대시킬 수 있다.

참고문헌

- [1] 최주호, 유준, "선형변이 차동변압기를 이용한 왕복운동 계측기법," 제어자동화시스템공학회, 논문지 제3권 제5호, 1997. 10.
- [2] Edward E. Herceg, "Handbook of measurement and control," schaevitz engineering, pennsauken, N. J, pp 3-1~3-16, pp 14-1~14-14.
- [3] 최주호, 황의성, "LVDT 센서의 직선성오차 보정기법," 국방과학연구소, DSTC-414-99015, 1999.
- [4] Ernest, O. Doebelin, "Measurement systems application and design," McGraw-Hill pp. 211-246, pp. 367-371, pp. 695-701, 1983.
- [5] C Ray, Wylie & Louis C. Barrett, "Advanced Engineering Mathematics," McGraw-Hill, pp. 247-264, 1982.
- [6] 정태호, 유준, "비선형 측정에 대한 반복계수 측정기법," 한국항공우주학회지, 제22권 제1호, 1994. 4.
- [7] Roland E. Larson & Robert P. Hostetler, "Calculus with analytic geometry," D. C Heath and Company, pp. 891-895. 1990.
- [8] Curtis F. Gerald, and Patrick O. Wheatley, "Applied numerical analysis," Addison-Wesley Publishing Co. pp. 260~271.
- [9] LA Robot Actuator Manual, AL1-A, SHI-BAURA, 1997.

[10] *LA Roibot Actuator Safoty Introduction Manual*, ALI-A. SHIBAURA, 1997.
 [11] *LA Roibot Series SFI-98C Operating Manual* SHIBAURA, 1997.
 [12] *LA Roibot Series Controller Operating Manual*. SHIBAURA, 1997.

[13] Barry N. Tavior and Chris E. Kuyatt "Guide - lines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results," NIST Technical Note 1297, pp. 1-25, 1992.



최 주 호

1949년 9월 18일생. 1976년 2월 부산대학교 전자공학과(학사). 1995년 2월 충남대학교 전자공학과(석사). 1999년 8월 동 대학원(박사). 1977년 2월부터 현재까지 국방과학계측기법 연구실(실장). 주 관심 분야는 제어장치 자동화 센서 및 계측응용 등임.



황 의 성

1967년 4월 2일생. 1990년 2월 홍익대학교 전자공학과(학사). 1992년 2월 홍익대학교 전자공학과(석사). 1992년부터 현재까지 국방과학연구소 계측기법 연구실(선임연구원). 관심 분야는 로봇공학, 퍼지이론, 제어계측 응용 등임.



홍 성 수

1955년 11월 22일생. 1981년 2월 송전대학교 전자공학과(학사). 1987년 9월부터 1988년 8월까지 미 육군 APG 시험장에 교환 연구원으로 근무. 1981년 9월부터 현재까지 국방과학연구소 계측기법연구실(선임연구원). 주 관심 분야는 물리량 계측 및 센서교정 등임



유 준

1956년 3월 22일생. 1978년 2월 서울대학교 전자공학과 (학사). 1984년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(박사). 1984년 10월부터 현재까지 충남대학교 교수. 터 1995년 2월까지 독일 Fraunhofer IPA 연구소 방문 교수. 주 관심분야는 제어계측공학 산업공정예의 제어응용 등임.