

선형변이 차동변압기를 이용한 왕복운동 계측기법

An Alternating Motion Technique Using Linear Variable Differential Transformers

최주호, 김윤겸*, 유준**

*국방과학연구소 (Tel:671-2214; Fax:73-1122)

**충남대학교 전자공학과 (Tel:821-5669; Fax:823-5436)

Abstracts This paper presents a recoil and counter recoil(R&CR) motion measurement method using linear variable differential transformers(LVDT). The output of a LVDT is obtained from the differential voltage of the 2nd transformers. As a sensor core is attached at the motion body, the output is directly proportional to the core motion. Displacement, velocity and acceleration are measure from the core length. With a comparison between the measurement result and the known value which is obtained by the precision steel tape, the accuracy and the usefulness of the proposed scheme is validated.

Keywords Motion Measurement, LVDT Sensor

1. 서론

왕복운동을 하는 운동체는 여러 가지가 있다. 그중에서 총·포의 주퇴복좌(recoil & counter recoil)운동 계측에 관한 기법을 제시하고자 한다. 총·포에 있어서 주퇴복좌기의 성능은 총·포의 성능을 좌우하므로 매우 중요한 계측 항목중의 하나이다. 주퇴복좌운동 계측기법에는 가변저항을 이용한 potentiometer와 사진촬영식인 high speed camera, magnet을 이용한 magnet bar sensor, photo sensor 방식의 photo slit sensor 및 트랜스포머를 이용한 LVDT 시스템이 있는데 이들은 각각의 장단점을 가지고 있다.[1]

high speed camera 방식은 사격시 진동 및 충격으로 카메라의 변동과 자료처리기법에 따른 오차가 발생하기 쉬우며 사진인화 및 필름인식에 많은 시간소요와 필름비용이 고가이기 때문에 시험비용이 많이 든다. 그리고 magnet bar sensor 기법은 주퇴운동과 복좌운동을 정확하게 반전된 신호기울기 특성으로 구분할 수 있고 주퇴복좌운동의 진동현상을 세밀히 분석할 수 있는 장점이 있는 반면, 센서 부착이 용이하지 못하고 운동체의 운동속도가 느린경우는 계측이 불가능한 단점이 있다.

photo slit sensor 기법은 주퇴거리가 긴 주퇴운동계측에 적합한 방법이나 광센서의 응답특성 때문에 운동체의 속도가 빠른 경우 slit 간격을 크게해야 신호검출이 가능한 단점을 가지고 있다. 그리고 LVDT 센서기법은 주퇴복좌 속도에는 무관하며, 센서제작 관계로 주퇴거리가 짧은 운동계측에 적합하다. 또한 본 기법은 정밀계측이 가능하고 센서부착이 용이하다.

본 연구에서는 LVDT 센서를 대구경 포와 소구경 총의 주퇴복좌운동 계측에 적용하였으며 센서의 직선성과 주파수 응답특성을 이론적으로 고찰하였고, 계측신호 획득 및 자료처리에 필요한 필터부, A/D 변환부와 신호획득 방안과 변위와 속도 및 가속도 계측기법을 제시하였다.

2. LVDT 센서의 특성

LVDT 센서는 전기적인 부분과 기계적인 부분이 분리되어 기

계적 마찰 및 마모없이 영구적 수명을 가지며 신뢰도가 높은 특성을 갖는다. 그리고 코일과 코어가 분리되어 압력체 혹은 유동체의 매체에서도 사용가능하며, 무한대의 분해능을 가질 수 있고, null position 이 아주 안정되고 반복성이 좋다.[2]

2.1 센서의 구조와 직선성

LVDT 센서회로는 그림 1과 같으며 1차측에 여기전압을 입력하면 코어의 위치에 따라 출력전압이 결정된다. 센서에 연결하는 core는 Iron으로 하고 비자성체 재질의 core 연결봉을 사용해야 한다.

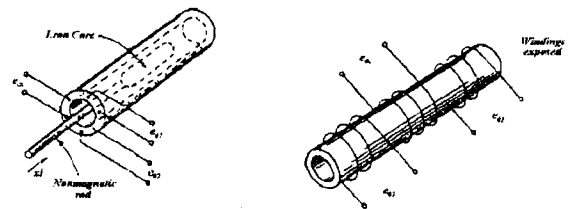


그림 1. 센서회로

Fig. 1. Sensor circuit

출력전압은 센서의 직선성이 보장되는 범위내에서 사용할 수 있으며, LVDT의 직선성은 양방향 특성을 갖는다.

2.2 센서의 주파수 응답특성[3]

LVDT 센서의 등가회로는 그림 2와 같으며, 입력단과 출력단의 식은 다음과 같다.

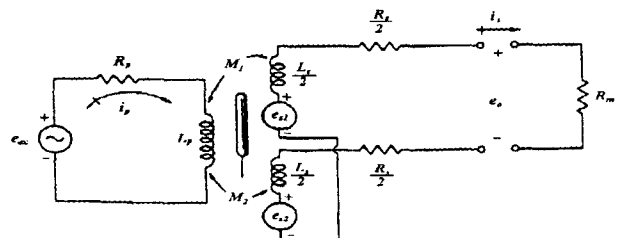


그림 2. LVDT 센서의 등가회로

Fig. 2. Equivalent circuit of a LVDT sensor

그림 2에서 입력단의 KVL 식은,

$$e_{ex} = L_p \frac{di_p}{dt} + R_p i_p \quad (1)$$

$$e_{s1} = M_1 \frac{di_p}{dt} \quad (2)$$

$$e_{s2} = M_2 \frac{di_p}{dt} \quad (3)$$

$$e_s = e_{s1} - e_{s2} = (M_1 - M_2) \frac{di_p}{dt} \quad (4)$$

$$= e_o |_{open\ circuit}$$

(1)에서 $\frac{di_p}{dt}$ 를 구하여 (4)에 대입하면,

$$\frac{e_o}{e_{ex}}(D) = \frac{[(M_1 - M_2)/R_p]D}{1 + (L_p/R_p)D} \quad (5)$$

여기서 $L_p/R_p \equiv \tau$ 로 두고 정현파의 미분요소 D 를 ju 으로 표현하면,

$$\frac{e_o}{e_{ex}}(ju) = \frac{W(M_1 - M_2)/R_p}{\sqrt{1 + (W\tau)^2}} < \phi \quad (6)$$

$$\phi = 90^\circ - \tan^{-1} W\tau$$

그리고 2차측 출력단에 입력 임피던스 R_m 인 voltage measuring device가 연결되면 전류 i_s 가 흐르게 된다. 이 경우 입·출력 단의 전압식은,

$$e_{ex} = L_p Di_p + R_p i_p - (M_1 - M_2) Di_s \quad (7)$$

$$0 = L_s Di_s + (R_s + R_m) i_s + (M_1 - M_2) Di_p \quad (8)$$

(8)에서 i_s 를 구하고 (7)에 대입하면,

$$i_p = \frac{(DL_s + R_s + R_m)e_{ex}}{(M_2 - M_1)^2 D^2 + (DL_p + R_p)(DL_s + R_s + R_m)} \quad (9)$$

(9)를 (4)에 대입하면,

$$e_o = (M_1 - M_2) \frac{di_p}{dt} = (M_1 - M_2) Di_p \quad (10)$$

$$\frac{e_o}{e_{ex}}(D) = \frac{(M_1 - M_2)D(DL_s + R_s + R_m)}{AD^2 + BD + C} \quad (11)$$

$$A = [(M_1 - M_2)^2 + L_s L_p]$$

$$B = [L_p(R_s + R_m) + L_s R_p] + L_s R_p$$

$$C = (R_s + R_m)R_p$$

여기서 $R_m \gg (R_s + L_s D)$ 의 조건을 가정하면 (11)은,

$$\frac{e_o(j\omega)}{e_{ex}} = \frac{R_m(M_1 - M_2)W 90^\circ}{AD^2 + BD + C} \quad (12)$$

(12)에서 낮은 주파수에서는 $+90^\circ$ 의 위상각을 가지고 높은 주파수에서는 -90° 의 위상각을 가지고 있음을 알 수 있다. 또 중간 주파수 범위에서는 zero phase angle이 되므로 LVDT 센서를 사용할 때 여기 신호의 주파수에 따라 센서의 동특성이 결정된다.

2.3 신호의 복조와 이파

신호의 복조를 위한 회로는 그림 3과 같다. 회로에서 f 가 positive, e 는 negative 일 때 전류는 efgdhe 방향으로 흐르고 f 가 negative, e 는 Positive 일 때 전류는 ehcdgf 방향으로 흐른다. 저장 R 은 $1k\Omega$ 에서 $10k\Omega$ 범위이다.

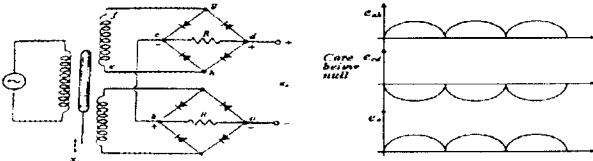


그림 3. 복조회로

Fig. 3. Demodulation circuit

그림 3의 출력전압 e_o 는,

$$e_o = e_{ab} + e_{cd} \quad (13)$$

여기서 low pass filter를 통과시키면 캐리어 성분이 제거되고 core의 변위곡선을 얻을 수 있다. 일반적으로 캐리어 주파수와 core의 운동주파수의 비는 10 : 1 정도로 하면 양호한 신호재생이 가능하다.[4]

3. 계측신호 획득 및 자료처리

3.1 계측신호 획득

계측신호는 LVDT 센서의 출력으로부터 얻는데 2차측 변압기를 직렬 반대부호(series opposing)로 연결하여 e_{o1} 과 e_{o2} 의 차신호를 이용한다. 입력신호와 2차측 신호파형을 그림 4에서 보이고 있다.

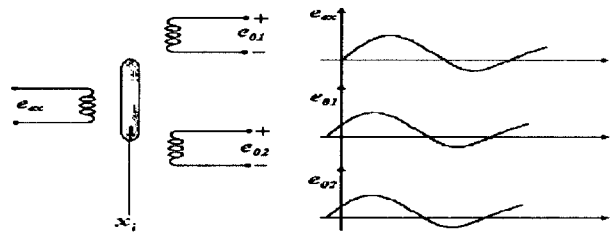


그림 4. 입력과 출력 신호파형

Fig. 4. Input and output signal waveform

3.2 A/D 변환부

A/D 변환부는 그림 5와 같으며 변위정보와 주퇴유압 및 복좌유압 등을 동시에 계측할 수 있도록 MUX가 입력단에 있으며, sample & hold는 선택된 채널에 대한 신호를 어떤 시점에서 디지털 값으로 변환이 완료될 때까지 hold 하는 기능을 한다.

A/D 변환부에서 sampling rate는 A/D Converter 와 control program에 의해 결정되며, 최대 50kHz 까지 samplig 할 수 있으며, bit 수는 12bit 이다.

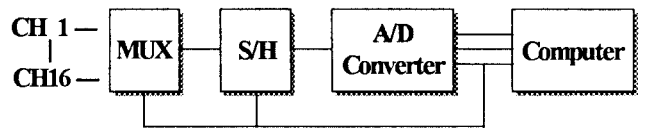


그림 5. A/D 변환부

Fig. 5. A/D converter unit

3.3 왕복운동 신호획득

왕복운동체의 신호획득은 운동체가 주퇴를 시작하기 전의 출력레벨을 입력하고, 이 입력값에 임의의 값을 더한값을 실제의 trig 레벨값으로 한다. 한편 trig 시점 이전에 주퇴운동에 대한 데이터와 trig 시점 이후로부터 복좌가 끝나는 시점까지의 데이터가 메모리에 저장된다. A/D 변환기의 bit 수는 12bit 이므로 한 개의 데이터당 2byte의 memory 를 차지하게 된다. 그러므로 주어진 채널수와 총 데이터 수에 따라 필요한 memory 크기가 결정된다.

$$\text{memory 크기} = (\text{채널수}) * (\text{총 데이터 수}) * 2 \quad (14)$$

주어진 메모리 크기에 대해 sampling rate가 정해지면 데이터 획득시간은,

$$\text{데이터 획득시간} = (\text{memory 용량}/2) * \text{sampling rate}/\text{채널 수} \quad (15)$$

3.4 자료처리부

그림 6은 자료처리 흐름도를 나타내고 있으며 A/D 변환부를 제어하여 data conversion, smoothing, 미분 등의 처리로 주퇴복좌시간, 주퇴거리, 변위-시간 및 속도-시간 곡선을 출력한다[5].

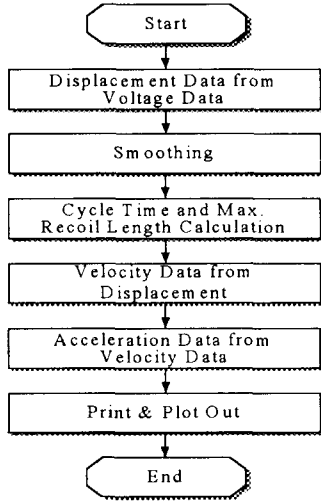


그림 6. 자료처리부

Fig. 6. Data processing unit

3.5 변위데이터

변위데이터는 메모리에 저장된 2진 데이터를 입력전압 등으로 환산된다. 여기서 A/D 변환기의 입력전압 V 는 2진 데이터로 부터 10진 데이터로 바뀐 v 이 식으로 주어진다.

$$V = v * \text{입력전압의 전 범위} / 2^{12} \quad (16)$$

그러므로 (16)으로 부터 LVDT의 변위는 구할 수 있다. 그러나 시간에 대한 완전한 변위데이터를 얻기 위해서는 trigger 이전의 데이터와 trigger 이후의 데이터를 시간순서에 따라 복원시켜야 한다.

3.6 변위데이터의 Smoothing

변위데이터에는 불필요한 잡음신호 외에 A/D 변환과정에서 발생하는 random error를 포함하므로 least square method (LSM)를 사용한 smoothing을 하였는데 고차 다항식의 차수와 fitting 간격은 운동체의 운동속도에 따라 결정할 수 있다. 위의 기법은 smoothing 외에도 변위에 대한 1차 및 2차 미분을 동시에 구할 수 있어 속도와 가속도 정보를 얻을 수 있다. 그림 7에서 고차 다항식의 차수와 fitting 간격 N 의 크기에 따라 변위곡선을 보이고 있다.

변위데이터의 smoothing시 차수와 fitting 간격의 선택은 변위와 속도 및 가속도 데이터에 영향을 미치므로 잘 선택해야 한다.

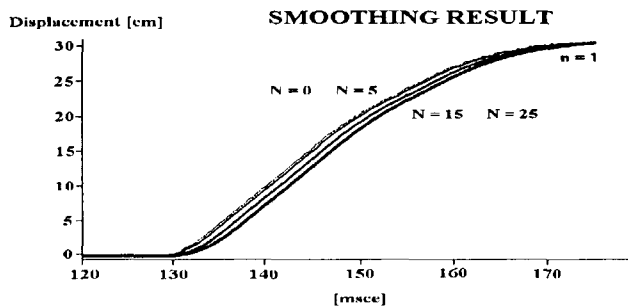


그림 7. 차수n과 fitting 간격 N에 따른 변위곡선

Fig. 7. Displacement curve to the fitting interval N and order n

3.7 주퇴복좌시간

주퇴복좌 시간은 운동체의 운동 시작점과 종료점 사이의 데이터 수를 계산하여 구한다.

4. 시험방법과 측정결과

4.1 시스템 구성

시스템 구성은 그림 8과 같이 LVDT 센서에서 변위에 해당하는 출력전압을 검출하여 신호증폭 및 A/D 변환하여 운동체의 변위와 속도 및 가속도 정보를 얻는다.

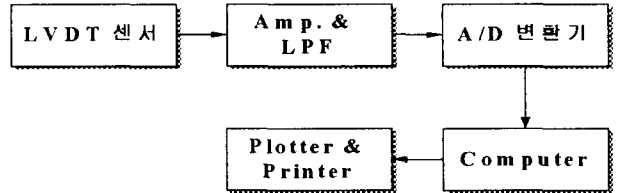


그림 8. 주퇴복좌운동 측정시스템 블록다이어그램

Fig. 8. Block diagram of R & CR recoil measurement system

4.2 센서 설치

센서 설치시 주의점은 운동체에 연결되는 코어는 자유롭게 왕복할 수 있도록 설치해야 하며, 연결봉은 비자성체인 스테인레스 스틸 등으로 하여야 하며, 최대 주퇴거리에 따라 연결봉의 길이를 정한다.

4.3 신호파형

왕복 운동체의 주퇴변위와 속도, 속도와 가속도 및 복좌변위와 속도와의 곡선이 그림 9, 그림 10, 그림 11에서 보이고 있다.

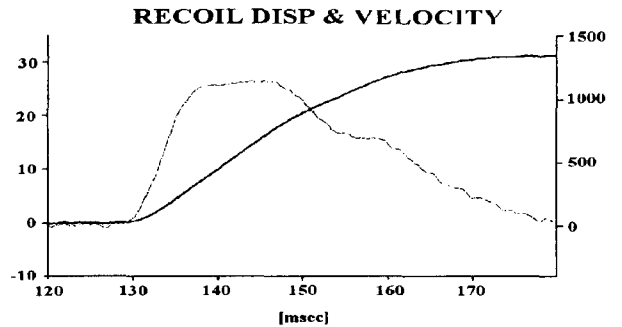


그림 9. 주퇴변위와 속도곡선

Fig. 9. Recoil displacement and velocity curve

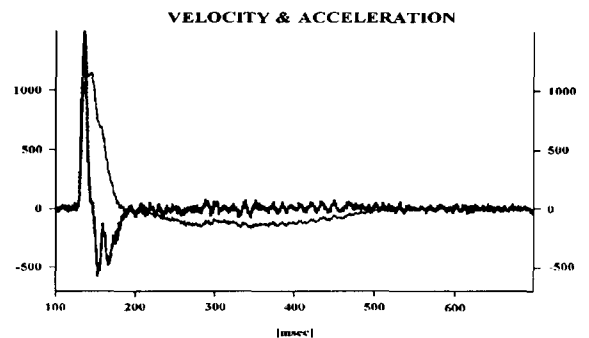


그림 10. 속도와 가속도 곡선

Fig. 10. Velocity and acceleration curve

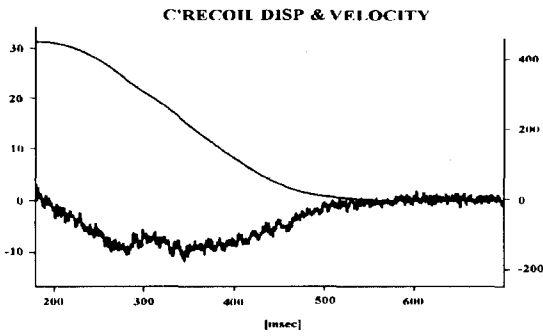


그림 11. 복좌변위와 속도곡선

Fig. 11. Counter recoil displacement and velocity curve

4.4 계측결과

표 1은 직사화기의 주퇴복좌운동 계측시 변위대 시간계측값을 나타낸 것이다.

표 1. 계측결과
Table 1. Test results

시간(ms)	변위(cm)	시간(ms)	변위(cm)
0.001	0.001	0.091	29.333
0.011	2.780	0.111	28.241
0.025	17.933	0.166	22.419
0.046	28.556	0.366	0.742
0.056	29.854	0.466	0.061
0.061	29.983	0.471	0.056
0.076	29.794	0.0491	0.061

4.5 LVDT 계측시스템 정확도 분석

이번에 연구한 주퇴복좌운동 계측기법의 정확도 분석은 실제 정밀측정용 자를 이용하여 측정한 변위값과 계측결과를 비교하여 표 2에 나타내었다.

표 2. 계측결과 정확도 비교

Table 2. Comparison of the accuracy for the measuring equipments

구분 번호	steel tape (cm)	LVDT (cm)	비 고
1	30.4	29.983	비교시험에서 steel tape 사용시 약 0.3cm의 오차가 발생하였다.
2	30.2	29.995	
3	30.0	29.997	
평균	30.2	29.990	

5. 결론

왕복 운동체의 운동을 해석하기 위하여 기계적 기어장치를 이용한 포토쇼미터나 photo slit sensor 및 high speed camera 기법은 센서의 부착이나 운동체의 속도, 진동 및 충격과 자료처리에 소요되는 시간 등으로 사용에 많은 제한요소를 가지고 있거나 정확도가 떨어지는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 기존의 왕복운동체 계측기법의 문제점을 보완하기 위하여 기계적 충격이나 내 마모성이 없고 소형경량인

LVDT 센서를 이용하여 저속 및 고속의 왕복운동체 변위와 속도 및 가속도 정보를 얻을 수 있는 기법을 연구하였다.

본 연구에서,

- 센서의 직선성과 주파수 응답특성을 고찰하였으며, 신호증폭 및 A/D 변환기를 설계제작하였다.
- LVDT 센서에서 얻어진 변위데이터를 이용하여 속도 및 가속도 데이터를 얻을 수 있었다.
- 신호파형을 획득하는데 있어서 한가지 중요한 일은 센서의 부착문제인데 화포나 전차포의 경우 상당한 충격과 진동이 따르기 때문에 매우 견고한 센서 adapter가 설계되어야 하며, 운동체의 운동방향과 센서 core가 동일선상에 있어야 한다.
- 본 시스템은 센서의 부착이 용이하고 저속 및 고속의 왕복운동체의 계측에도 사용가능하며 시험계측의 효율을 크게 개선시켰다.
- 본 기법은 정확도는 변위특성에 대하여 정밀 출자로 확인하였으며, 0.001cm 까지 계측이 가능하여 높은 정확도를 가지고 있음이 입증되었다.

참고문헌

- [1] APG(aberdeen proving ground) TECOM "Recoil Motion Measurement" Top 4-2-815 U.S Army TECOM 1976
- [2] EDWARDE HERCEG "Handbook of Measurement and Control"
- [3] Ernest O'Doebelin "Measurement Systems Application and Design" Third Edition 1983
- [4] Schaevits "Transducer Technology"
- [5] Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schafer "Digital Signal Processing"