

# 선형변이 차동변압기를 이용한 왕복운동 계측기법

## An Alternating Motion Measurement Technique Using Linear Variable Differential Transformers

최 주 호, 유 준  
(Ju Ho Choi and Joon Lyou)

**Abstract** : This paper presents a recoil and counter recoil 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 the sensor core is attached to the motion body, the output is directly proportional to the core motion. Displacement, velocity and acceleration are measured from the core length. A comparison between the measurement result and the known value, which is obtained by the precision steel tape, shows that the accuracy and the usefulness of the proposed scheme is validated.

**Keywords** : LVDT sensor, alternating motion measurement

### I. 서론

왕복운동을 하는 운동체는 여러 가지가 있으나 그중에서 총·포의 주퇴복좌(recoil & counter recoil ; R & CR)운동 계측에 관한 기법을 제시하고자 한다. 총·포에 있어서 주퇴복좌기의 성능은 총·포의 성능을 좌우하므로 주퇴복좌운동 계측은 매우 중요한 계측 항목중의 하나이다. 주퇴복좌운동 계측기법에는 가변저항을 이용한 전위차계(potentiometer), 사진촬영식인 고속카메라와 자석(magnet)을 이용한 막대자석 센서, 빛을 이용한 광 슬릿(slit)센서, 그리고 변압기를 이용한 LVDT 센서 방식이 있는데 이들은 각각의 장단점을 가지고 있다[1].

전위차계기법은 가공된 링(ring) 기어(gear)를 가변저항기에 연결하여 저항변화에 대한 출력을 이용하는 것인데, 링기어 등을 총·포 등에 부착하기가 매우 어려운 단점을 지니고 있다. 고속카메라는 사격시 진동 및 충격으로 카메라의 위치변동과 자료처리기법에 따른 오차가 발생하기 쉬우며 사진 인화 및 필름인식에 많은 시간소요와 다량으로 소요되는 필름 비용이 고가이기 때문에 시험비용이 많이 든다. 그리고 막대자석 센서 기법은 주퇴운동과 복좌운동을 반전된 신호기울기 특성으로 정확하게 구분할 수 있고 주퇴복좌운동의 진동현상을 세밀히 분석할 수 있는 장점이 있는 반면, 센서 부착이 용이하지 못하고 운동체의 운동속도가 느린 경우는 계측이 불가능한 단점이 있다. 광슬릿 센서 방식은 주퇴거리가 긴 주퇴운동계측에 적합한 방법이나 광센서의 응답특성 때문에 운동체의 속도가 빠른 경우 슬릿 간격을 크게 해야 신호검출이 가능한 단점을 가지고 있다. 그리고 LVDT 센서 기법은 주퇴복좌속도 및 주퇴거리에 관계없이 계측이 가능하며, 센서 및 센서 어댑터(adapter)가 소형경량이므로 센서부착이 용이할 뿐만 아니라 계측의 정밀도가 높은 특성을 가지고 있다.

본 연구에서는 각종 왕복운동 계측용 센서의 특성을 분석하여 화포의 주퇴복좌기 운동계측에 적합한 LVDT 센서를 검토하였으며, LVDT 센서를 이용한 계측신호 획득 및 자료처리에 필요한 H/W 및 S/W의 구성과 연구결과를 제시하였다.

### II. 왕복운동 계측기법 및 센서 특성비교

왕복운동 계측기법에는 전위차계를 이용하는 것과, 고속 카메라, 자석을 이용한 코일센서, 광 슬릿 및 선형변이 차동 변압기 센서 등이 있다. 이들에 대한 특성 및 장·단점을 본장에서 비교하고자 한다.

#### 1. 전위차계

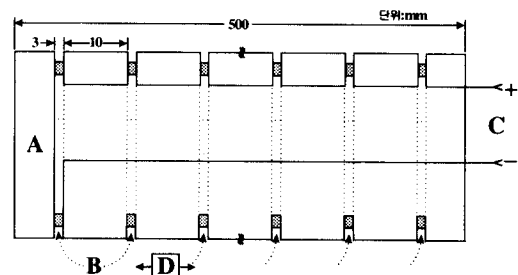
전위차계 센서는 주퇴복좌기의 왕복운동을 링 기어에 의해 회전운동으로 변환하여 볼륨저항의 변화를 검출하여 주퇴복좌기의 운동을 계측하는 기법인데, 이 기법의 장점으로 안정된 출력을 얻을 수 있다. 그러나 시험하고자 하는 화기의 종류에 따라 각각의 링 기어 제작과 링 기어를 화포에 부착하기 위한 어댑터 및 전위차계를 특수 제작해야 하는 단점이 있다.

#### 2. 고속카메라

고속카메라 기법은 주퇴복좌기에 기준점을 표시하고, 약 1만 프레임의 고속촬영으로 주퇴복좌기의 변위를 계측하는데 장점보다는 단점이 더 많은 기법이라 하겠다. 사격시 높은 충격으로 카메라의 진동이 발생하거나 화염 등으로 계측에 오차요인이 발생하기도 한다. 그리고 사진촬영, 현상 및 계측까지 많은 시간 소요와 인위적 오차요인이 많아 정확도가 떨어지며, 매 사격시마다 새로운 필름이 소모되므로 시험비용이 고가인 단점을 가지고 있다.

#### 3. 자석을 이용한 코일센서

자석을 이용한 코일센서는 그림 1과 같이 비자성체인



A : PVC magnet bar  
B : coil circuit  
C : sensor output  
D : magnet(운동체)

그림 1. 자석막대 센서.  
Fig. 1. Magnet bar sensor.

PVC 막대기에 3mm 폭으로 깊이 5mm의 홈을 내어 10mm 간격으로 에나멜 동선을 150회에서 200회로 감아 제작하였으며, 이와같이 제작한 센서를 화포의 주퇴복좌기 부근 비운동체에 부착시키고 영구자석을 주퇴복좌기에 부착시켜 영구자석이 코일센서 주위를 통과할 때 신호를 검출하는 방법이다.

이 기법은 센서 부착이 용이한 장점을 가지고 있다. 그러나 센서 출력의 크기가 주퇴복좌기의 운동속도에 비례하기 때문에 복좌 말기에 출력 레벨이 낮기 때문에 분석이 어려운 단점을 가지고 있다. 그림 2에서 주퇴(A) 및 복좌(B)시 출력파형을 보여주고 있다[2].

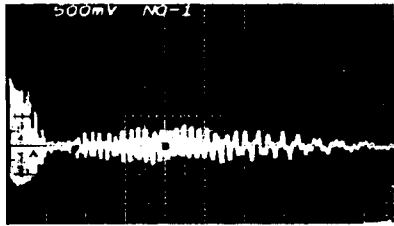
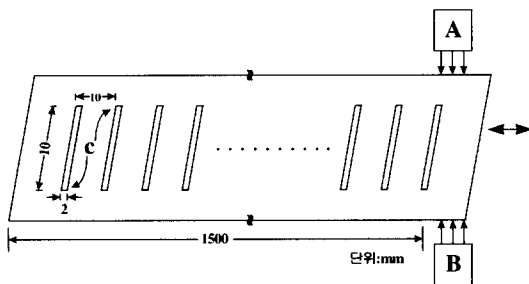


그림 2. 출력파형.  
Fig. 2. Output waveform.

4. 광 슬릿 센서

광 슬릿 센서는 그림 3과 같이 알루미늄 막대기에 10mm 간격으로 약 2mm의 슬릿을 내어 이 슬릿이 광원과 광센서가 있는 지역을 통과했을 때, 펄스를 얻어 왕복운동체의 운동을 계측할 수 있도록 제작한 것인데, 본 기법은 정확도가 높고 센서의 부착이 용이한 장점을 가지고 있다. 그러나 이 기법의 단점은 초기운동시 센서의 응답특성 때문에 신호검출이 불가능한 영역(그림 4의 A부분)이 발생하였다. 이러한 현상을 그림 4에서 볼 수 있다[2].



- A : light source
- B : photo sensor
- C : slit bar(운동체)

그림 3. 광 슬릿 센서.  
Fig. 3. Photo slit sensor.

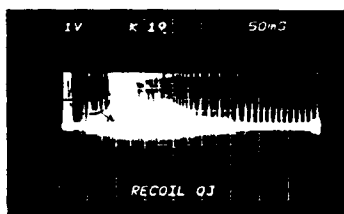


그림 4. 광 슬릿 센서의 신호파형.  
Fig. 4. Signal waveform of the photo slit sensor.

5. LVDT 센서

LVDT 센서회로는 그림 5와 같으며, 1차측에 여기 전압을 입력하면 코어의 위치에 따라 출력전압이 결정된다. 센서에 연결하는 코어는 자성체로 하고 비자성체 재질의 코어 연결봉을 사용해야 한다.

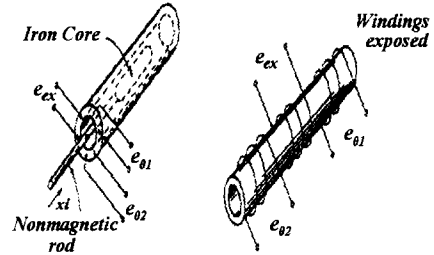


그림 5. 센서 모형.  
Fig. 5. A figure of sensor.

LVDT 센서는 전기적인 부분과 기계적인 부분이 분리되어 기계적 마찰이나 마모가 없고 영구적 수명을 가지며 신뢰도가 높다. 그리고 압력체 혹은 유동체의 매체에서도 사용 가능하며, 분해능이 높고 영점 위치가 아주 안정되고 반복성이 좋다[3][4].

LVDT 센서의 등가회로는 그림 6과 같다.

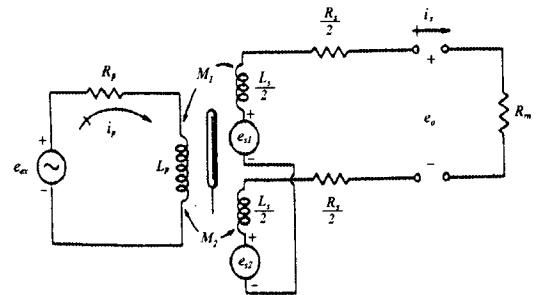


그림 6. LVDT 센서의 등가회로.  
Fig. 6. Equivalent circuit of LVDT sensor.

그림 6에서 입력단의 KVL 식은,

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

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

$$e_{s2} = M_2 \frac{di_p}{dt} \tag{3}$$

$$e_s = e_{s1} - e_{s2} = (M_1 - M_2) \frac{di_p}{dt} = e_o \text{ | open circuit} \tag{4}$$

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

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

그리고 2차측 출력단에 입력 임피던스  $R_m$ 인 전압 측정 소자가 연결되면, 전류  $i_s$ 가 흐르게 된다. 이 경우 전압식은  $i_s$ 와  $i_p$ 를 구하여 (6)과 같이 나타내어 진다.

$$e_o = (M_1 - M_2) \frac{di_p}{dt} = (M_1 - M_2) Di_p \tag{6}$$

$$\frac{e_o}{e_{ex}}(D) = \frac{(M_1 - M_2) D (DL_s + R_s + R_m)}{AD^2 + BD + C} \tag{7}$$

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

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

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

여기서  $R_m \gg (R_s + L_s D)$ 의 조건을 가정하면 (7)은, 다음의 식으로 간략화 된다.

$$\frac{e_0}{e_{ex}}(j\omega) = \frac{R_m(M_1 - M_2)\omega}{AD^2 + BD + C} \angle 90^\circ \quad (8)$$

입력과 출력의 위상각은 낮은 주파수에서는  $+90^\circ$ 의 위상각을 가지고 높은 주파수에서는  $-90^\circ$ 의 위상각을 가지고 있음을 (8)에서 알 수 있다. 또 중간 주파수 범위에서는 영 위상각이 되므로 LVDT 센서를 사용할 때 여기 신호의 주파수에 따라 센서의 동특성이 결정된다. 만약 위상각이 영이 되지 않을 경우는 R, C 소자로 간단하게 구성된 진상각과 지상각 회로를 2차측 초단에 연결하여 위상각을 조정할 필요가 있다[5].

이상과 같이 왕복운동 계측용 센서들을 비교 검토해 본 결과 화포 및 전차포의 주퇴복좌운동을 계측하는데 LVDT 센서기법이 최적임을 알 수 있었다. 제3장에서 LVDT 센서 시스템 구성과 H/W 및 S/W의 연구결과를 제시하였다.

### III. 계측신호 획득 및 자료처리

본 연구에서 개발한 왕복운동 계측시스템 구성은 그림 7과 같으며, LVDT 센서에서 변위에 해당되는 출력전압을 검출하여 신호증폭 및 A/D 변환하여 운동체의 변위와 속도 및 가속도 정보를 얻는다.

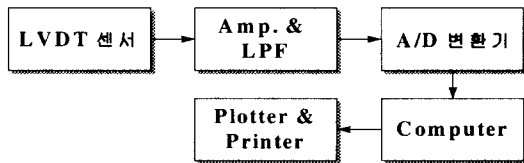


그림 7. 주퇴복좌운동 계측시스템 블록선도.  
Fig. 7. Block diagram for recoil & counter recoil measurement system.

#### 1. 센서신호

센서신호는 입력코일에 여기 전압  $e_{ex}$ 를 가하고 출력신호  $e_{01}$ 과  $e_{02}$ 를 얻는다. 출력은 변위  $x_1$ 가 영점 위치에서 상·하로 움직였을 때 상호 유도 인덕턴스의 변화로  $e_{01}$ 과  $e_{02}$ 의 크기가 서로 다르게 나타나며 2차측 변압기를 직렬 반대부호(series opposing)로 연결함으로써  $e_{01}$ 과  $e_{02}$ 의 차신호를 출력으로 검출하여 변위량을 측정한다. 그림 8은 코어가 영점 위치에서 입력신호와 출력신호 파형을 나타낸 것이다.

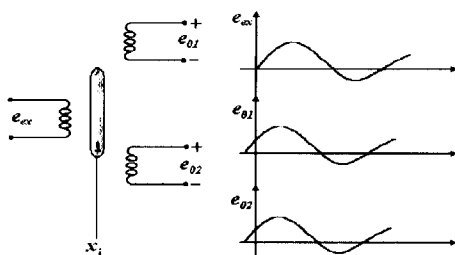


그림 8. 입력과 출력 신호파형.  
Fig. 8. Input output signal waveform.

#### 2. A/D 변환부

A/D 변환부는 그림 9와 같으며 변위정보와 주퇴유압 및 복좌유압 등을 동시에 계측할 수 있도록 MUX(multiplexer)가 입력단에 있으며, S/H(sample and hold)는 선택된 채널에 대한 신호를 어떤 시점에서 디지털 값으로 변환이 완료될 때까지 유지하는 기능을 한다. A/D 변환부의 샘플링율은 A/D 변환 시간과 자료처리 프로그램에 의해 결정되며, 최대 50kHz까지 샘플링 가능하다.

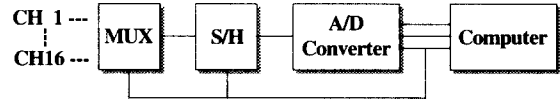


그림 9. A/D 변환부.  
Fig. 9. A/D converter unit.

#### 3. 왕복운동 신호획득

왕복운동체의 신호획득은 운동체가 주퇴를 시작하기 전의 출력레벨을 입력하고, 이 입력값에 임의의 값을 더한값을 실제의 트리거 레벨값으로 한다. 한편 트리거 시점 이전에 주퇴운동에 대한 데이터와 트리거 시점 이후로부터 복좌가 끝나는 시점까지의 데이터가 메모리에 저장된다. A/D 변환 후 12bit 데이터는 2byte를 필요로 하므로 주어진 채널수와 총 데이터 수에 따라 필요한 메모리 크기가 결정된다.

$$\text{메모리 크기} = (\text{채널수}) * (\text{총 데이터 수}) * 2 \quad (9)$$

주어진 메모리 크기에 대해 샘플링율이 정해지면 데이터 획득시간은,

$$\text{데이터 획득시간} = (\text{메모리 용량}/2) * \text{샘플링율}/\text{채널수} \quad (10)$$

A/D 변환과 데이터 획득과정은 그림 10에서 보이고 있다.

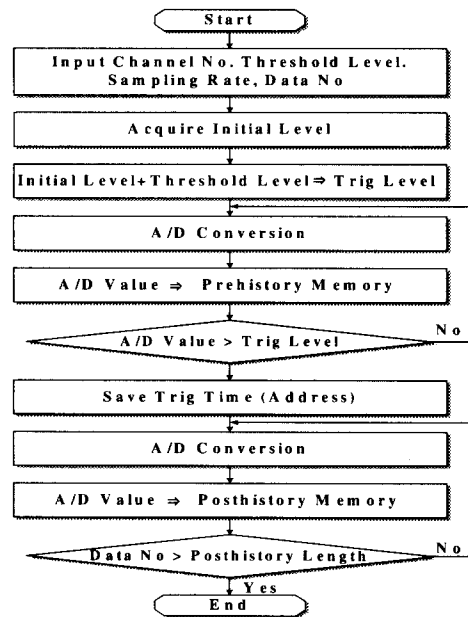


그림 10. A/D 변환과 데이터 획득.  
Fig. 10. A/D converter and data acquisition.

#### 4. 자료처리부

그림 11은 자료처리 흐름도를 나타내고 있으며 A/D 변환부를 제어하여 데이터 변환, 평활화(smoothing), 미분 등의 처리로 주퇴복좌시간, 주퇴거리, 변위대 시간 및 속도대 시간 곡선을 출력한다[6].

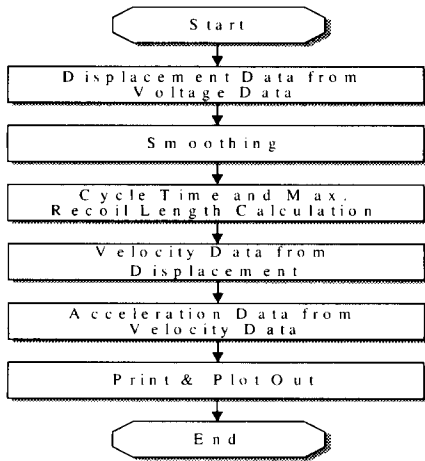


그림 11. 자료처리부.  
Fig. 11. Data processing unit.

5. 변위데이터

메모리에 저장된 2진 데이터를 A/D 변환 후 전압대 변위 환산식으로 변위데이터를 구한다. 여기서 A/D 변환기의 입력전압  $V$ 는 2진 데이터  $v$ 를 10진으로 바꾼 아래 식으로 주어진다.

$$V = v * \text{입력전압} / 2^{12} \quad (11)$$

그러므로 (11)로부터 LVDT의 변위를 구할 수 있다. 그러나 시간에 대한 완전한 변위데이터를 얻기 위해서는 트리거 이전의 데이터와 트리거 이후의 데이터를 시간순서에 따라 복원시켜야 한다. 그림 12, 13은 복원 전·후의 변위곡선을 보이고 있다.

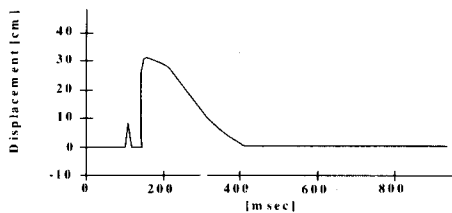


그림 12. 복원전 변위곡선.  
Fig. 12. Displacement curve for before recovery.

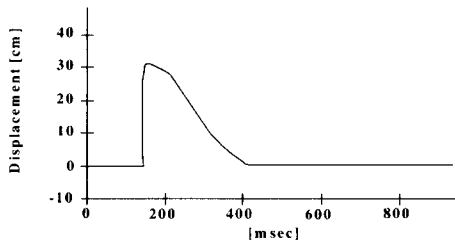


그림 13. 복원후 변위곡선.  
Fig. 13. Displacement curve for after recovery.

6. 변위 데이터의 평활화

변위데이터에는 불필요한 잡음신호 외에 A/D 변환과정에서 발생하는 랜덤 오차를 포함하므로 최소자승법(least square method : LSM)를 사용한 평활화를 하였는데 고차 다항식의 차수와 변위점 간격은 운동체의 운동속도에 따라 결정할 수 있다. 평활화 외에도 변위에 대한 1차 및 2차 미분을 동시에 구할 수 있어 속도와 가속도 정보를 얻을 수 있다. 그림 14는 고차 다항식의 차수와 변위점 간격  $N$ 의

크기에 따라 변위곡선을 보이고 있다. 변위데이터의 평활화 시 차수와 변위점 간격은 변위와 속도 및 가속도 데이터에 영향을 미치므로 잘 선택해야 한다.

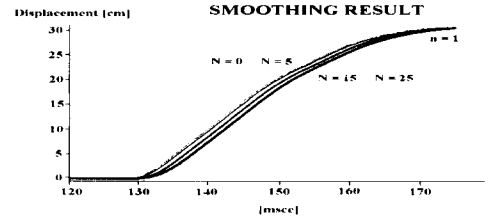


그림 14. 차수n과 fitting 간격 N에 따른 변위곡선.  
Fig. 14. Displacement curve for the fitting interval N and order n.

LSM 방식의 평활화시 변위곡선의 기울기  $m$ 은 다음식으로 주어진다.

$$m = \frac{\overline{X_i Y_i}}{\overline{X_i^2}} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i}{\sum_{i=1}^n X_i^2} \quad (12)$$

$n$  : 데이터 점들의 수

$X_i$  : 데이터 점들의 변위값

$Y_i$  : 데이터 점들의 값에 대한 출력전압비

$\overline{X_i Y_i}$  : 각 데이터 점의 X, Y축의 평균값

$\overline{X_i^2}$  : X축의 모든 데이터 점의 평균값의 제곱

그리고 변위곡선의 직선성의 최대편차는 다음과 같이 표현된다.

$$\text{직선성} = \frac{Y_i \max - m X_i}{m X_{F.S}} \times 100\% \quad (13)$$

$Y_i \max$  : 최적의 직선으로부터 최대 출력편차

$m X_i$  : 최적의 변위점 직선상의 출력값

7. 주퇴복좌 시간

주퇴복좌 시간은 운동체의 운동 시작점과 종료점 사이의 데이터 수를 계산하여 구한다. 그림 15에서  $N_i$ 와  $N_f$ 는 변위곡선의 샘플링 시작점과 종료점을 나타낸다. 변위  $D(N_i)$ 가 영이 아니면 한 구간 이전의 값으로  $D(N_i)$ 가 영인  $N_i$ 를 찾는다  $V(N_i)$ 는 변위가 영인 위치에서의 운동체의 속도값을 나타낸다.  $D(N_f)$ 는 주퇴복좌가 완료되는 위치에서 변위가 영이 되는가를 확인하며  $D(N_f)$ 가 영이 안되면 샘플구간을 하나 증가시켜  $D(N_f)$ 가 영이 되는 위치를 찾아 주퇴복좌운동 시간을 계산한다.

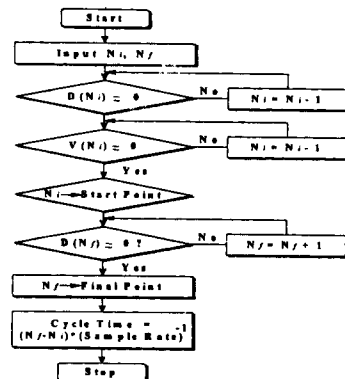


그림 15. 주퇴복좌시간 계측을 위한 흐름도.  
Fig. 15. Flow chart for R & CR time.

IV. 시험방법과 계측결과

1. 시스템 구성

센서 설치시 주의할 점은 운동체에 연결되는 코어가 자유스럽게 왕복할 수 있도록 하는 것이다. 연결봉은 비자성체인 스텐레스 강 등으로 하여야 하고, 최대 주퇴거리에 따라 연결봉의 길이를 정한다. 그림 16은 실제 LVDT 센서를 운동체에 장착한 모습을 보여주고 있다.

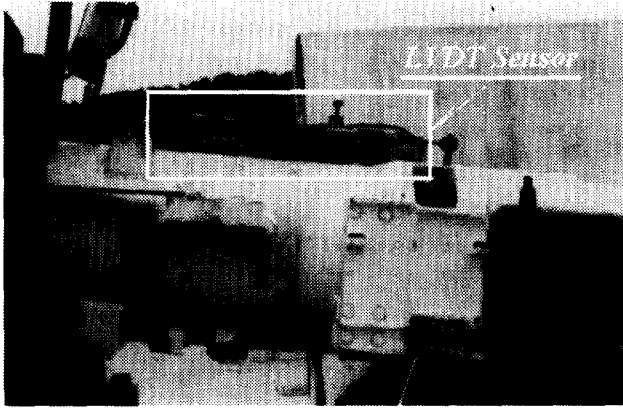


그림 16. LVDT 센서 부착.  
Fig. 16. The attachment for LVDT sensor.

2. 신호파형

왕복 운동체의 주퇴변위와 속도, 속도와 가속도 그리고 복좌변위와 속도를 측정하여 그림 17, 18, 19에서 도시하였다. 그림 17의 A와 B는 변위와 속도곡선이며, 속도는 변위데이터를 미분하여 구한 것이다. 그리고 그림 18의 A와 B는 가속도와 속도 곡선을 나타낸 것이며, A는 B를 미분하였다. 그림 19는 복좌운동시 속도곡선 A는 변위곡선 B로부터 구한 것이다.

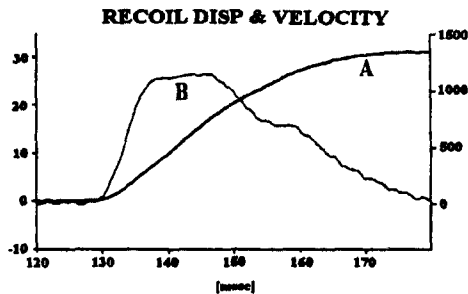


그림 17. 주퇴변위와 속도곡선.  
Fig. 17. Recoil displacement and velocity curve.

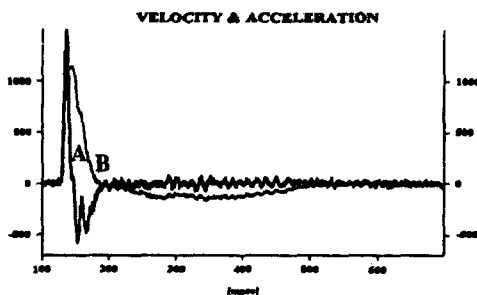


그림 18. 속도와 가속도 곡선.  
Fig. 18. Velocity and acceleration curve.

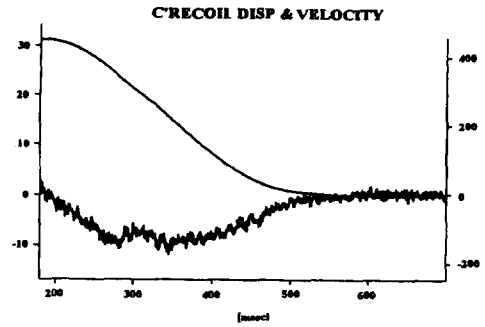


그림 19. 복좌변위와 속도곡선.  
Fig. 19. Counter recoil displacement and velocity curve.

3. 계측결과

표 1은 직사화기의 주퇴복좌운동 계측시 변위 대 시간 계측값을 정리한 것이다.

표 1. 계측결과.  
Table 1. Test results.

시간(sec)	변위(cm)	시간(sec)	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
<b>0.061</b>	<b>29.983</b>	0.471	0.056
0.076	29.794	0.0491	0.061

4. LVDT 계측시스템 정확도 분석

본 주퇴복좌운동 계측기법의 정확도를 분석 하기 위하여 실제 정밀측정용 자를 이용하여 측정한 변위값과 계측결과를 표 2에 비교하였다.

표 2. 계측결과 정확도 비교.  
Table 2. Comparison of the accuracy for the measuring equipments.

구분 번호	steel tape (cm)	LVDT (cm)	비 교
1	30.4	29.983	비교시험에서 steel tape 사용시 약 0.2cm의 오차 가 발생하였다.
2	30.2	29.995	
3	30.0	29.997	
평균	30.2	29.990	

### V. 결론

왕복 운동체의 운동을 해석하기 위하여 기계적 기어장치를 이용한 전위차계나 광 스톱 센서 및 고속카메라 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. 구체적으로,

- 센서의 직선성과 주파수 응답특성을 고찰하였으며, 신호 증폭 및 A/D 변환기를 설계 제작하였다.
- LVDT 센서에서 얻어진 변위데이터를 이용하여 속도 및 가속도 데이터를 얻을 수 있었다.
- 본 시스템은 센서의 부착이 용이하고 저속 및 고속의 왕복운동체의 계측에도 사용가능하며 시험계측의 효율을 크게 개선시켰다.
- 본 기법의 정확도는 정밀 출자로 측정된 결과와 비교하였으며, 특히 LVDT 시스템은 0.001cm까지 계측이 가능하여 높은 정확도를 가지고 있음이 입증되었다.
- 신호파형을 획득하는데 있어서 한가지 중요한 일은 센서의 부착 문제인데, 화포나 전차포의 경우 상당한 충격과



최 주 호

1976년 2월 부산대학교 전자공학과 졸업(학사). 1995년 2월 충남대학교 전자공학과 졸업(석사). 동대학원 박사과정(1996년 3월 ~ 현재). 1977년 2월 ~ 현재 국방과학연구소 계측기법연구실(실장). 주관심 분야는 제어장치자동

화, 센서 및 계측응용 등임.

진동이 따르기 때문에 매우 견고한 센서 어댑터가 설계되어야 하며, 운동체의 운동방향과 센서코어가 동일 직선상에 있어야 한다.

- 앞으로 왕복운동의 동특성이 심하게 변하는 경우 LVDT 센서의 동특성을 고려하여 계측정확도를 높이는 방안이 연구되어야 할 것으로 보인다.

### 참고문헌

- [1] APG(Aberdeen Proving Ground) TECOM, "Recoil motion measurement," Top 4-2-815, *US Army TECOM*, 1976.
- [2] 최주호, "주퇴복좌운동 계측기법에 관한 연구," TAEC-514-89003, 대전, 국방과학연구소, pp. 12~18, 21~23, 1990.
- [3] E. Herceg, *Handbook of Measurement and Control*, Schaevitz, 1976.
- [4] E. Hercdg, *Transducer Technology*, Schaevitz, 1980.
- [5] O'Doebelin, "Measurement systems application and design," 3rd ed. *McGraw-Hill*, pp. 238~246, 1983.
- [6] A. V. Oppenheim and R. W. Schafer *Digital Signal Processing*, Schaevitz, 1976.

### 유 준

제어·자동화·시스템공학회 논문지 제 1권 제 1호 참조.