

포구속도 계측 시스템의 정확도 분석

An Analysis of the Accuracy of Muzzle Velocity Measurement System

최 주 호, 황 의 성, 박 원 우, 홍 성 수, 유 준
(Ju Ho Choi, Eui Seong Hwang, Won Woo Park, Sung Soo Hong, and Joon Lyou)

Abstract : This paper presents an accuracy evaluation method for muzzle velocity measurement systems. Among various measuring techniques, the solenoid coil scheme and the doppler radar scheme are considered due to their popularity in applications. The error sources are first identified and their effects on the accuracy of the measuring systems are quantified using mathematical equations. The theoretic accuracy limits are then verified through comparison with experimental results. From the accuracy point of view, they turn out to be standard velocity measuring systems.

Keywords : muzzle velocity, Solenoid coil, Doppler radar

I. 서론

탄속은 각종 화포 및 탄약의 개발과 양산품 시험의 성능평가를 위한 기초자료로 이용되고 있다. 탄속 계측 장비는 사용하는 센서의 종류와 신호검출 방법에 따라 전자 광학식(electro-optical method), 전자기계식(electro-mechanical method) 및 전자기식(electro-magnetic method) 등으로 분류될 수 있다. 전자 광학적인 방법은 스키크린과 루미라인 스키크린이 있고, 전자기계식은 탄자가 속도 측정용 센서에 충돌되었을 때 센서 회로가 개방되는 스키크린(Break Screen: BS)과 회로가 형성되는 스키크린(Make Screen: MS)이 있으며, 전자기식은 도플러 레이더와 솔레노이드 코일 시스템 등이 있다. 이들은 각각의 장·단점을 가지고 있으며, 전자기식이 널리 이용되고 있다[1][2]. 솔레노이드 코일 시스템은 타 장비에 비하여 모든 탄속 범위에서 정확하고 안정된 탄속 계측이 가능할 뿐만 아니라 어떤 기후 조건에서도 계측이 가능하고 시스템의 정비유지 및 사용이 간편한 장점이 있는 반면 고각 사격시험 때는 높은 코일 거치용 탑이 필요하고 시험탄을 자화 시켜야 하는 번거로움이 있다. 그리고 도플러 레이더 장비는 속도계측 범위가 20m/s~2000m/s이고 최소 5.56mm 구경까지 계측이 가능 하다. 또, 포구속도 데이터를 최대 1000개까지 저장할 수 있으며, 사격시 도플러 신호의 S/N 비가 28[dB] 이하인 경우 계측된 데이터는 오류임을 알려주고, 추진제의 온도나 탄자의 무게 등을 고려한 속도 보정 기능 및 계측된 도플러 신호의 3차원 물기등 그래프 해석기능을 가지고 있다[3]. 계측의 정확도는 계측장비의 고유오차와 계측오차, 계측 환경에서 일어날 수 있는 환경오차 등이 있다. 지금까지는 계측시스템에 대한 체계적 정확도 분석 없이 장비 제작처에서 제공하는 장비의 정확도와 교정성적서 및 요구 규격에 일치하는 계측장비를 선정하여 사용하였기 때문에 사용하고 있는 계측 시스템의 계측 정확도는 엄밀히 말해 확립되지 않은 상태라고 말할 수 있다.

본 연구에서 솔레노이드 코일 센서에서 발생하는 신호를 이론적으로 해석하였으며, 두 센서의 계측오차, 신호 파형 검출오차 및 속도 보정 오차를 측정 및 이론식에 의하여 정확도를 계산하였다. 또 도플러 레이더 시스템은 최근에 실용화된 AN/UPQ6 모델과 기준장비로 사용중인 DR-810 및 장거리 도플러 레이더에 대한 정확도를 비교하였다. 특히 두 계측시스템을 운용할 때 발생할 수 있는 오차가 범위를 이론적으로 계산하였으며 그리고 두 장비 사이의 계측결과를 비교하여 이론적 오차한계를 입증할 수 있었다. 계측시스템의 정확도가 분석되므로, 운용자 및 시험 관련자에게 계측의 신뢰도를 높일 수 있는 효과를 얻을 수 있었다.

II. 계측 신호의 획득과 보정 이론

솔레노이드 코일 센서를 이용하여 탄자의 속도를 계측할 때는 포구전방 사선방향에 두 개의 센서를 설치한 후 자화된 탄자가 사격되었을 때 두 개의 정현 신호가 발생되는데, 두 정현신호의 영 교차(zero-crossing) 펄스를 검출하여 두 펄스 사이의 시간을 얻고 두 센서간의 거리정보로 비행 탄자의 속도 데이터를 얻는데, 도플러 레이더는 송신 주파수 빔 영역을 탄자가 비행할 때 수신 주파수가 생성된다. 이 두 주파수의 차, 즉 도플러 주파수를 검출하여 포구속도를 얻는다.

1. 코일센서의 유도기전력

그림 1과 같이 자화된 탄자가 솔레노이드 코일을 통과하면 유도기전력이 발생되는데 해석을 간단히하기 위하여 탄자를 균질 크기의 자석으로 보고, 탄자의 길이를 $L(m)$, 자극의 세기를 $m(\text{weber})$, 반경이 $a(m)$ 인 솔레노이드 코일을 사용할 때, 코일내부의 일점 P 의 자속 밀도 B_n 과 B_s 의 합성자장은 다음과 같다.

$$B_n = \frac{m}{4\pi\mu_0} \cdot \frac{1}{X^2} \quad (1)$$

$$B_s = \frac{m}{4\pi\mu_0} \cdot \frac{1}{Y^2} \quad (2)$$

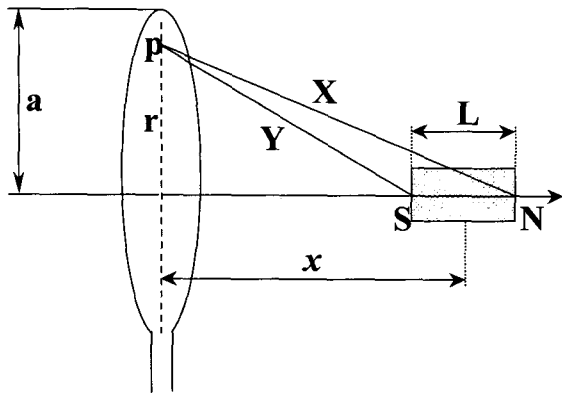
$$X = \sqrt{r^2 + (x+b)^2}, \quad Y = \sqrt{r^2 + (x-b)^2}$$

(단, $L = 2b$)

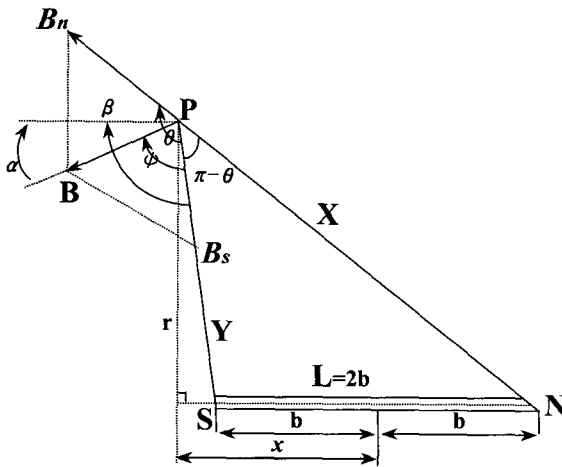
접수일자 : 1998. 1. 16., 수정완료 : 1998. 10. 1.

최주호, 황의성, 박원우, 홍성수 : 국방과학연구소

유 준 : 충남대학교 전자공학과



(a) 코일과 탄자



(b) 합성자계

그림 1. 솔레노이드 코일을 통과하는 탄자.
Fig. 1. Projectile passing through solenoid coil.

점 P의 직각 성분의 자속 밀도는 $B \cos \alpha$ 가 된다.

$$B \cos \alpha = B \cos (\beta - \phi) = B (\cos \beta \cdot \cos \phi + \sin \beta \cdot \sin \phi)$$

△ PBBs에서

$$B \cos \phi = B_s + B_n \cos \theta = \frac{m}{4\pi\mu_0} \cdot \frac{2X^3 + (L^2 - X^2 - Y^2)Y}{2X^3 Y^2} \quad (3)$$

$$B \cos \phi \cos \beta = \frac{m}{4\pi\mu_0} \left[\frac{(L^2 + Y^2 - X^2)}{4LX^3 Y^3} \cdot \frac{2X^3 + (L^2 - X^2 - Y^2)Y}{4LX^3 Y^3} \right] \quad (4)$$

△ PBBs에서

$$B \sin \phi = B_n \sin \theta = \frac{m}{4\pi\mu_0} \cdot \frac{\sin \theta}{X^2} \quad (5)$$

△ PBN에서

$$L \sin \beta = X \sin \theta \quad (6)$$

$$B \sin \phi \sin \beta = \frac{m}{4\pi\mu_0} \cdot \frac{\sin \theta}{X^2} \cdot \frac{X}{L} \sin \theta = \frac{m}{4\pi\mu_0} \cdot \frac{2L^2(X^2 + Y^2) - L^4 - (X^2 - Y^2)^2}{4LX^3 Y^2} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \therefore B \cos \alpha &= B \{ \cos \beta \cos \phi + \sin \beta \sin \phi \} \\ &= \frac{m}{4\pi\mu_0} \left[\frac{2X^3(L^2 + Y^2 - X^2) + 2Y^3(L^2 - Y^2 + X^2)}{4LX^3 Y^3} \right] \quad (8) \end{aligned}$$

$$B \cos \alpha = \frac{m}{4\pi\mu_0} \left[\frac{b-x}{Y^3} + \frac{b+x}{X^3} \right] \quad (9)$$

자속(磁束),

$$\phi = 2\pi N \int_0^a (B \cos \alpha) \cdot r \, dr \quad (10)$$

$$\begin{aligned} E &= - \frac{d\phi}{dt} \\ &= - \frac{ma^2 VN}{4\mu_0} \left[\frac{1}{\{\sqrt{a^2 + (x+b)^2}\}^3} - \frac{1}{\{\sqrt{a^2 + (x-b)^2}\}^3} \right] \quad (11) \end{aligned}$$

유도 기 전력은 자극의 세기 m(weber)과 코일을 통과하는 탄자의 속도 V와 탄의 길의 b 및 코일의 권선수와 반경 a의 함수가 되며, E가 영이되는 것은 x=0일 때, 즉, 탄자의 중심이 코일중심을 통과할 때가 된다.

2. 속도보정

솔레노이드 코일의 경우 실제 계측된 속도는 두 코일 센서의 중심속도이므로 포구속도를 얻기 위하여 탄도 계수, 탄자의 형태, 풍속, 중력 및 장약의 온도에 따라 속도를 보정할 수 있다[1].

1) 탄자의 모양 계수 및 탄도계수에 의한 속도 보정

$$\Delta V_i = \frac{\rho_i d^2 X G}{W} = \frac{\rho X G}{C} \quad (12)$$

- i : 탄자의 모양계수
- d : 탄자 직경
- X : 포구에서 두 센서 중심까지의 거리
- W : 탄자 중량
- C : 탄도 계수
- ρ : 해수면에서의 공기밀도
- G : 탄자의 기하학적 형태에 의한 감속 함수

2) 풍속에 의한 속도 보정

$$\Delta V_w = (\pm) \frac{\rho_i d^2 X G}{W} \frac{2W_x}{V} \quad (13)$$

W_x : 풍속, V: 탄자의 속도

3) 중력에 의한 속도 보정

$$\Delta V_g = \frac{32Hg}{V} \text{ m/s} \quad (14)$$

Hg: 두 센서 중심위치에서 수직으로 사선과 만나는 점까지의 거리

4) 장약의 온도에 의한 보정

장약의 표준온도는 21°C이며, 이외의 온도의 경우는 온도 보정표에 의해 보정해 주어야 한다.

3. 도플러 신호와 속도계산

도플러 신호로부터 포구속도를 산출해 내기까지는 A/D 변환, FFT 분석, 추적 및 탄도분석 단계의 처리과정을 거치게 되며, 그림 2에서 볼 수 있다. 송신 신호 파장을 λ, 도플러 주파수를 f_d 라 했을 때 비행 탄자의 속

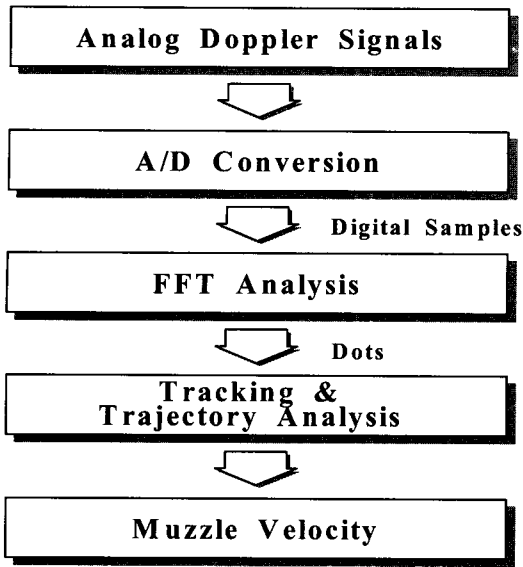


그림 2. 포구속도 계산을 위한 블록다이어그램.
Fig. 2. Block Diagram for muzzle velocity calculation.

도 v 는 (15)와 같다[4].

$$v = f_d \frac{\lambda}{2} \quad (15)$$

그리고 수신 주파수 f_R 와 송신 주파수 f_o , 광속도 C 및 비행물체의 속도 v_i , 도플러 주파수 f_d 의 관계는 (16)과 같다.

$$f_d = 2f_o \frac{v_i}{C} = f_o - f_R \quad (16)$$

v_i : i 번째 계측점에서 탄자의 속도

아날로그 도플러 신호는 최대 도플러 주파수의 2배 혹은 3배로 샘플링 및 디지털화 되어 FFT가 수행된다. FFT 결과는 비행물체의 속도에 해당하는 주파수 침두치로 나타나게 되며, 이 주파수 스펙트럼은 신호대 잡음비를 결정짓는 점 여파기(comb filter)에 의해 여과된다. 이렇게 해서 얻어진 모든 dot들은 각 스펙트럼의 최고의 침두치에 해당하는 속도대 시간의 2차원 값으로 순간 속도, 순간시간, 신호대 잡음비 및 분석 대역폭 정보를 갖고, 이미 있는 정보를 포함하는 이러한 점들의 연속적인 궤적을 트랙(track)이라 하며 각각의 트랙들은 시간변화, 속도변화, 가속도, 거리, 신호대 잡음비 및 분석 대역폭의 정보를 갖는다[5].

포구속도는 탄도상에 동일시간 간격의 최대 32개 계측점에서 얻은 속도 정보로부터 최소자승 오차법과 외삽법으로 계산된다. 포구속도 v_o 는 그림 3의 각 위치에서의 속도 v_i 와 도플러 주파수 계산시간 T_i 와의 관계에서 구할 수 있다. 그러므로 최소자승오차 S 는 (17)과 같이 나타 난다.

$$S = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (v_i - v)^2 \quad (17)$$

$$v = -\alpha t_i + \beta \quad (18)$$

α : 속도 회귀 직선의 기울기

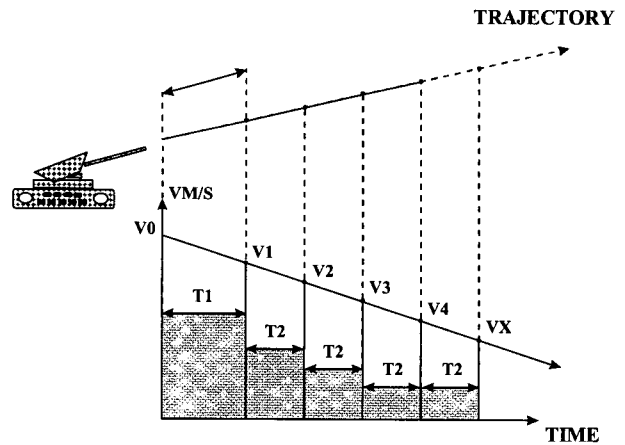


그림 3. 계측점 위치.
Fig. 3. Position of measurement points.

β : 속도 회귀 직선의 절편

t_i : 도플러 주파수 계산시간

포구속도 v_o 는 계측점의 중심속도 \bar{v} 와 회귀 계수 r 로 나타낼 수 있다.

$$v_o = \bar{v} + r(t - \bar{t}) = rt + \bar{v} - r\bar{t} \quad (19)$$

\bar{t} : 도플러 주파수 계산시간

$$r = -\alpha = \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \quad (20)$$

S_{XY} : 시간 구배점과 속도 구배점의 상관계수

S_{XX} : 시간 구배점의 자기 상관계수

$$\beta = \bar{v} - r\bar{t} \quad (21)$$

$$S_{XY} = \sum t_i v_i - \frac{\sum t_i \sum v_i}{n} = \sum (t_i - \bar{t})(v_i - \bar{v}) \quad (22)$$

$$S_{XX} = (\sum t_i^2 - \frac{\sum t_i^2}{2}) = \sum (t_i - \bar{t})^2 \quad (23)$$

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (24)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (25)$$

그림 3에서 최초 계측점이 T_1 만큼 시간지연이 생기므로 (19)는 (26)으로 표현되고 실제 포구속도 v_o 는 $t=0$ 일 때 이므로 (27)과 같이 된다.

$$v_o = r(t - T_1) + \bar{v} - r\bar{t} \quad (26)$$

$$\therefore v_o |_{t=0} = \bar{v} - r(T_1 - \bar{t}) \quad (27)$$

III. 계측정확도 분석

1. 솔레노이드 코일 시스템의 계측오차 요인

솔레노이드 코일을 이용한 경우는 우선 두 센서간 거리측정 오차, 신호증폭기 오차, 속도계산기 오차 및 속도 보정 오차 등이 있다.

1) 거리 측정오차

두 센서간 거리측정은 금속줄자와 레이저 레인지 파인더를 이용하였으며 금속줄자의 상대오차는 0.028%로 나타내며, 탄자 비행시간 10ms에서 0.295m/s의 오차가

발생됨을 확인하였다.

2) 신호증폭기 오차

신호증폭기 오차는 영 교차점 오차와 증폭기의 지연 특성에 의해 주로 발생하는데 두 신호가 동일조건으로 지연특성의 영향을 받게되고, 비 선형성을 고려하더라도 1M Hz 클락 사용할 때 1/2 클락 이하의 오차를 유발하므로 무시할 수 있었다.

3) 속도계산기 오차

계수용 발진자는 수정 발진자를 사용하여 0.01%의 정확도를 갖는다. 실험에 사용한 1M Hz 발진기는 항온조에서 제어되므로 ±10PPM 정도의 정확도가 보장된다. 그러므로 1초당 0.167 μs의 오차가 발생되어 무시 가능하다.

4) 속도 보정 오차

(12)의 속도 보정식은 공기밀도, 탄자의 중량, 탄자의 모양계수 및 탄자의 직경에 따라 탄자의 비행 감속도를 얻는 식인데 포구에서 두 센서의 중심까지 감속도를 (12)에 의해 계산하였는데 이 보정 수식의 정확도를 도플러 레이더의 감속도 계측에 의해 확인하였다.

2. 솔레노이드코일 시스템의 정확도계산

속도의 일반식은 S를 시간 t로 나눈 것인데 계산된 속도의 상대오차는 (28)과 같이 거리와 시간의 개별 상대오차의 합으로 표현된다.

$$\frac{\Delta V}{V} = \sqrt{\left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2} \tag{28}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{V\Delta t}{t}\right)^2}$$

그리고 상대적 시간오차는 절대적 시간오차, 속도 및 측정 길이오차 등과 연관되며, 시간오차를 δt라 하면 계수오차 δα, 타임 베이스 오차 δtd, 트리거 오차 δtr로 표현된다.

$$\delta_t = \sqrt{\delta_{ct}^2 + \delta_{td}^2 + \delta_{tr}^2} \tag{29}$$

실험에서 δα는 1M Hz의 클락 사용시 ±1count 오차, 즉, ±1μs 오차를 가지고 있었다. δtd는 ±0.167μs의 오차를 가지므로 두 코일을 지나가는 시간을 δtp라 하면 δtd는 (30)과 같다.

$$\delta_{td} = 0.167 \delta_{tp} \mu s \tag{30}$$

그리고 δtr는 트리거 신호의 형태 및 크기, 잡음 등에 의해서 결정된다. 일반적으로 δtr는 (31)과 같이 정의된다

$$\delta_{tr} = \frac{\pm 5 \times 10^{-3} \text{ Volt}}{\left(\frac{\text{signal value}}{\text{rise time}}\right) \frac{\text{Volt}}{\mu s}} = \pm 0.025 \mu s \tag{31}$$

그러므로 δtr는

$$\delta_{tr} = \sqrt{(1 \mu s)^2 + (0.00167 \mu s)^2 + (0.025 \mu s)^2} \tag{32}$$

$$= 1.0 \mu s$$

(32)에서 δtd(time base 오차)는 δtp가 0.01s라는 가정에 의해 계산된 수치이므로 베이스의 길이를 10m, 탄자의 비행시간을 10ms라고 했을 때 속도는 ±0.10m/s가 된다. (12)에 의한 감속도와 AN/UPQ6의 직접 계측에 의한 감

속도 편차는 0.015487m/s의 오차가 발생되고 있다. 10m의 베이스의 경우 ±0.15487m/s의 속도오차를 내고 있음이 확인되었다. 그러므로 Ver(슬라이드 시스템의 전체오차)는 (33)과 같다.

$$V_{er} = \sqrt{(0.295m/s)^2 + (0.10m/s)^2 + (0.15487m/s)^2} \tag{33}$$

$$= 0.35m/s$$

위에서 속도를 1000m/s로 가정하였으므로 시스템 오차는 0.035%임을 확인할 수 있다.

3. AN/UPQ6의 정확도 계산

MVR MKV FFT 시스템은 탄속 범위가 20m/s-2,000m/s인 경우는 샘플링율을 3.125 μs로 하고, 150m/s-1000m/s일 때는 6.25 μs로 1,024점에서 고속의 푸리에 변환(FFT)을 하고 있다. 즉,

$$N = 1,024 \text{ (point)}$$

$$t = 3.1253 \mu s \text{ (or } 6.25 \mu s)$$

$$DF = 1/t = 320 \text{ kHz (or } 160 \text{ kHz): sampled spectrum}$$

$$B = DF/N = 312.5 \text{ Hz (or } 156.25 \text{ Hz)}$$

그리고 속도 대역폭(velocity bandwidth: DV)은 MVR의 파장 W와 도플러 필터 대역폭 B의 함수로 주어진다.

$$DV = (W \times B)/2$$

$$= (0.0285 \times 312.5)/2 \text{ [or } (0.0285 \times 156.25)/2]$$

$$= 4.45m/s \text{ (or } 2.22m/s)$$

탄자의 속도는 보간법(interpolation method)으로 구해지며, 다음과 같이 표현된다.

$$V = \sum(V_i \times E_i) / I \tag{35}$$

V_i = velocity of filter
E_i = energy of filter *i*
I = number of filters in which target was detected

이와 같은 과정으로 탄자(target)의 속도가 필터폭의 부분들로 계산할 수 있다.

1) 프로세싱 오차요인

각 위치(point)별 계측에서 프로세싱 오차요인은 고정 바이어스(fixed bias) 오차와 잡음 오차가 있다. 고정 바이어스 오차는 보간법 프로세스의 결과로, 실제 탄자의 속도는 계측된 속도와 다소 다를 수 있는데 이것은 보간법에서 속도곡선의 비 직선성 때문이다. 이 오차는 도플러 필터 내부에 있는 탄자의 위치 함수로 변경시킬 수 있다. 탄자가 도플러 필터의 정 중앙에 있게 되면 오차가 없을 것이고, 양 측면에 있게 되면 최대오차가 발생된다. 이 오차를 수학적으로 최소화시킬 수 있는 것이 무게 함수이다. 이러한 오차의 최대편차는 RMS 오차로 계산해서 다음과 같다.

$$DV_f = 0.35m/s \text{ (or } 0.75m/s) \tag{36}$$

다음은 잡음 오차인데 각 계측점에 대한 랜덤 오차는 신호대 잡음비로 표현된다.

$$DV_n = DV / \sqrt{S/N} \tag{37}$$

검출을 위한 신호 대 잡음비는 최소 20dB로 고정시키

기 때문에 다음과 같다.

$$DV_n = 0.445\text{m/s (or } 0.2225\text{m/s)} \quad (38)$$

보통 bias 오차는 레이더 주파수 변화로 야기되며, 레이더 빔과 다른 위치에 안테나를 설치할 경우는 시차 설치(parallax mounting)가 되는데 탄도와 안테나 빔 사이의 거리(range location)에 의한 속도 오차는 계측시 이 거리 데이터를 레이더 장비에 입력함으로써 오차는 제거시킬 수 있다.

2) 오차산정

각 계측점 당 total RMS 오차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} DV &= \sqrt{DV_f^2 + DV_n^2} \\ &= \sqrt{(0.35)^2 + (0.445)^2} \\ &\text{or } \sqrt{(0.175)^2 + (0.2225)^2} \\ &= 0.566 \text{ m/s or } (0.283 \text{ m/s}) \end{aligned} \quad (39)$$

속도는 32point의 속도 평균값과 보간법 및 외삽법으로 계산된다. 그러므로 전체오차는 $\sqrt{32}$ 의 요소로 감소된다.

$$\begin{aligned} DV_{\text{total}} &= DV/\sqrt{32} \\ &= 0.1\text{m/s or } (0.05\text{m/s}) \end{aligned} \quad (40)$$

이러한 계산은 탄자가 20m/s~2,000m/s 혹은 150m/s~1,000m/s의 범위에서 운동할 때 적용 가능하며, 고정된 탄자로 모의실험 할 때는 고정 바이어스 오차를 줄일 수 없다. 그리고 속도가 200m/s 이하에서는 도플러 필터 폭을 줄이고 신호 대 잡음비를 증가시켜 고정 바이어스 오차와 이산 오차를 줄이고 있다.

본 시스템의 전체적인 정확도는 두 가지 동작 모드에서 구분된다.

- 0 to 2,000m/s Mode: $\pm 0.05\%$ (0.1m/s)
- 0 to 1,000m/s Mode: $\pm 0.05\%$ (0.05m/s)

VI. 시험방법 및 계측결과

1. 시스템 구성

솔레노이드 코일센서를 이용한 탄속 계측 시스템은 코일센서, 자화기, 신호증폭기 및 속도계산기로 구성되어 있다. 신호검출은 자화된 탄자가 코일속을 통과할 때 두 개의 정현신호가 발생되며, 신호증폭기에서 일정 레벨로

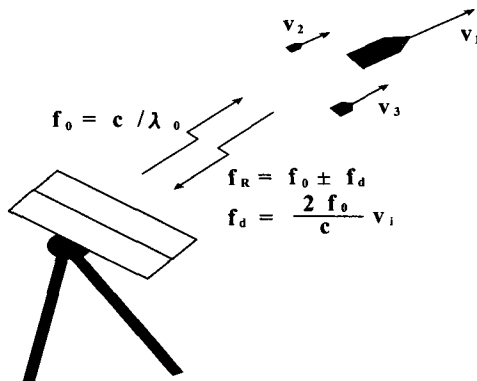


그림 4. 도플러 신호의 발생.
Fig. 4. Doppler frequency.

신호증폭 및 12k Hz의 LPF에서 여과되어 ZC 논리부에서 펄스가 출력되어 속도계산기에서 두 펄스사이의 시간을 계산하여 두 센서간 거리 S 정보에 대한 속도를 계산하게 된다. 그리고 AN/UPQ6는 송·수신 안테나와 원거리 표시부(RDU), 신호 및 전원케이블 및 삼각대로 구성되어 있으며, 도플러 신호발생은 송신신호와 수신신호의 차에 의해 얻어지며 그림 4에서 그 개념을 알 수 있다.

2. 계측결과

계측결과는 솔레노이드 코일 시스템과 AN/UPQ6, DR-810 및 장거리 도플러 레이더와의 비교시험 결과를 정리하였으며, AN/UPQ6의 분석 기능중 속도대 시간(V-T), 신호와 잡음(S-N), 감속도, 및 3차원 물기둥 그래프를 나타내었다.

1) Solenoid coil과 AN/UPQ6의 탄속 계측결과

표 1. Solenoid coil과 AN/UPQ6의 탄속 성능 결과표.

Table 1. Velocity performance results of solenoid coil and AN/UPQ6.

내용 구분	Solenoid	AN/ UPQ6	시험내용	시험일자	비고
평균탄속	687.20	686.73	155mm	'93. 4. 26.	18발
표준편차	5.49	5.55			
평균탄속	683.01	684.39	155mm	'93. 4. 27.	15발
표준편차	1.56	1.55			

2) DR-810과 AN/UPQ6의 탄속 계측결과

표 2. DR-810과 AN/UPQ6의 탄속 성능 결과표.

Table 2. Velocity performance results of 810 and AN/UPQ6.

내용 구분	DR-810	AN/ UPQ6	시험내용	시험일자	비고
평균탄속	594.96	594.68	8 inch	'93. 3. 24.	10발
표준편차	1.37	1.36			
평균탄속	267.38	267.50	155mm	'93. 5. 10.	25발
표준편차	3.24	3.25			

3) 장거리 도플러 레이더와 AN/UPQ6의 탄속 계측 결과

표 3. 장거리 도플러 레이더와 AN/UPQ6의 탄속 성능 결과표.

Table 3. Velocity performance results of deppler rader and AN/UPQ6.

내용 구분	장거리 도플러 레이더	AN/UP Q6	시험내용	시험일자	비고
평균탄속	819.78	818.13	155mm	'93. 5. 27.	10발
표준편차	4.66	4.54			

4) AN/UPQ6의 분석기능

AN/UPQ6의 분석기능 중 속도대 시간, 신호대 잡음비, 감속도 및 32개의 관측점 데이터의 3차원 그래프를 그림 5, 6, 7, 8에서 보여주고 있다. 그림 5는 32개의 각 속도에 대한 비선형성을 보여주고 있으며 선형화 알고리즘 설계와 프로세싱 오차 및 포구속도 보간법을 계산하는데 이용될 수 있는 속도 값들을 표시한 것이다.

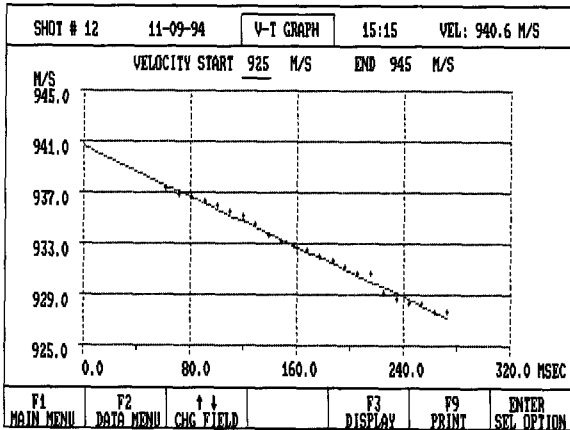


그림 5. V-T 그래프.
Fig. 5. V-T Graph.

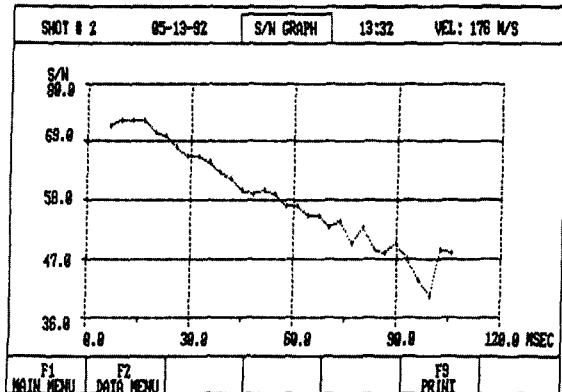


그림 6. S/N 그래프.
Fig. 6. S/N Graph.

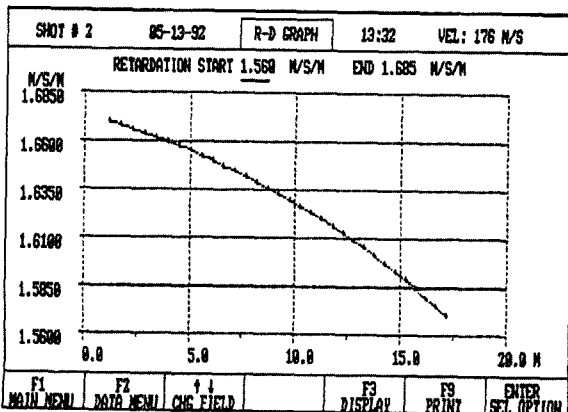


그림 7. R-D 그래프.
Fig. 7. R-D Graph.

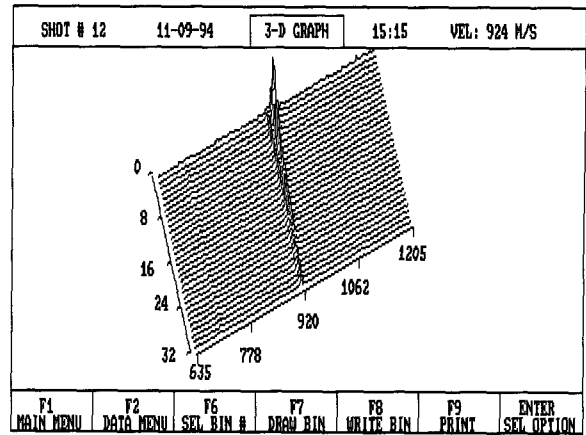


그림 8. 3D 물기둥 그래프.
Fig. 8. 3D Waterfall graph.

그림 6은 S/N비를 각 시간별로 나타낸 것으로 시간이 경과함에 따라 수신 안테나로 부터 탄자가 멀어져가기 때문에 S/N비는 감소해가며 종단에 가서는 신호 성분이 급격이 낮아지는 것을 알 수 있다. 이 S/N비의 결과를 이용하여 랜덤 오차를 계산하는데 이용하였다.

그림 7은 탄자가 포구를 출발하여 진행함에 따라 감속되어지는 것을 보이고 있으며 이 값들은 탄자의 모양과 크기 공기 밀도 등의 함수로 표현된다.

그림 8은 32 point별 속도 발생 범위를 3차원 그래프로 나타낸 것으로 예상 속도군과 비 정상적인 속도군을 파악할 수 있는 기능이다. 비 정상적인 속도군이라고 하는 것은 탄자가 분리될 경우 등에 해당된다.

V. 결론

현재 사용중인 솔레노이드 코일 시스템과 AN/UPQ6 도플러 시스템에 대한 계측오차 요인과 계측정확도를 확인해본 결과 솔레노이드 코일과 AN/UPQ6의 정확도가 $\pm 0.05\%$ 이하였으며, 주요 계측오차 요인은 다음과 같다.

1) 솔레노이드 코일 시스템의 경우 최대오차 요인은 두 센서사이의 거리측정 오차임을 알았으며, 레이저 레인지 파인더와 비교측정 결과 거리오차에 의한 속도오차가 $\pm 0.295\text{m/s}$ 의 오차를 유발시키고 있음을 확인하였다.

2) 계수오차 δ_c 와 time base 오차 δ_{td} 및 트리거오차 δ_r 에 의한 속도오차는 $\pm 0.10\text{m/s}$ 이다.

3) 탄자가 비행할 때 탄자의 모양계수(i)나 탄도계수(C)에 의한 감속도 오차는 수식에 의한 것과 실제 계측에 의한 것의 비교로 수식에 의한 감속도 오차는 $\pm 0.15487\text{m/s}$ 의 오차가 확인되어 전체 시스템 오차는 $\pm 0.35\text{m/s}$ 의 정확도를 가지고 있다.

4) 탄자가 포구를 출발하여 솔레노이드 두 센서의 중심까지 비행할 동안 감속도 값을 (12)로 계산하였는데 이 값은 도플러 레이더로 실제 감속도를 측정 한 값과 비교하였는데 계산값과 측정값 사이에 약 $\pm 0.1\text{m/s}$ 이하의 편차를 보이고 있음을 확인 하였다.

5) AN/UPQ6의 경우 프로세싱 오차요인은 고정바이어스오차(DV_i)와 잡음오차(DV_n)가 있는데 고정 바이어

스오차는 보간법 프로세서에서 속도곡선의 비직선성 때문이며, 잡음오차는 각 계측점에 대한 랜덤오차를 신호 대 잡음비로 표현된다. 이론적 계산에서 고정바이어스 오차는 $\pm 0.35\text{m/s}$ 이고, 잡음오차는 $\pm 0.445\text{m/s}$ 이므로 total RMS 오차는 $\pm 0.566\text{m/s}$ 인데 32계측점을 고려하면 $\pm 0.01\text{m/s}$ 가 되어 $\pm 0.05\%$ 의 정확도를 가지고 있다.

6) (36)의 결과 식은 도플러 레이더의 각 속도점 에서 비 직선성에 의한 프로세서 오차를 나타낸 것으로 장비 제작처로 부터 받은 값이며 (38)의 결과 식은 속도 대역 폭을 나타내는 4.45 m/s의 값에 20dB의 S/N비를 고려하여 계산된 결과이다.

7) 계측 결과에서 나타낸 평균 속도와 표준 편차는 현재 기준장비로 사용하고 있는 장비의 성능을 비교하기 위한 것이고 실제 장비의 시스템 오차는 오차 계산식에 의해 이론적으로 연구하였다. 그러므로 계측 결과에서

제시된 평균 탄속이나 표준편차는 실제 고유오차를 포함한 결과 값이다.

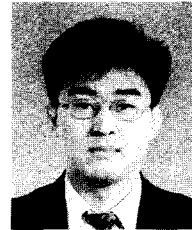
참고문헌

- [1] MTP4-2-805 *Common Engineering Test Procedure Projectile Velocity*, U.S Army. Test & Evaluation Command 1970.
- [2] 최주호 외, "탄속 측정기법에 관한 연구" 국방과학 연구소 TAEC- 519-89001, 1989. 12.
- [3] *AN/UPQ6 Mark V Velocimeter Technical Manual*, Lear Astronics Corp. 1992. 3.
- [4] Barton, David K, "*CW and Doppler Radar*" Mcynaw Hill Kogokoshal, 1980.
- [5] Schwartz, Mischa, *Discrete Spectral Analysis, Detection and Estimation*, Lear Siegler INC., 1975.



최 주 호

1976년 2월 부산대학교 전자공학과 졸업(학사), 1995년 2월 충남대학교 전자공학과 졸업(석사), 동대학원 박사과정(1996년 3월-현재), 1977년 2월-현재 국방과학연구소 계측기법 연구실(실장). 주관심 분야는 제어장치 자동화, 센서 및 계측응용 등임.



황 의 성

1990년 2월 홍익대학교 전자공학과 (학사), 1992년 2월 홍익대학교 전자 공학과 졸업(석사), 1992년-현재, 국방과학연구소 종합시험단 근무(선임 연구원). 주관심 분야는 로봇공학, 퍼 지이론, 제어계측응용 등임.



박 원 우

1991년 2월 광운대학교 전자공학과 (학사), 1993년 3월 광운대학교 전자 공학과(석사). 1993년 3월-현재. 국방 과학연구소 종합시험단 근무(연구원). 주관심 분야는 신호처리, 영상해석, 패턴인식 등임.



홍 성 수

1981년 2월 송전대학교 전자공학과 (학사), 미육군 APG시험장에 교환 연구원으로 근무(1987년 9월-1998년 8월), 1981년 9월-현재, 국방과학연 구소 종합시험단 근무(선임연구원). 주관심 분야는 물리량계측 및 센서

교정 등임.



유 준

1978년 2월 서울대학교 전자공학과 (학사), 1984년 8월 한국 과학기술원 전기 및 전자공학과(박사), 1984년 10월-현재 충남대학교 교수. 1994년 12월-1995년 2월 독일 Fraunhofer IPA연구소 방문 교수. 주관심 분야 는 제어계측 공학. 산업공정에의 제어응용 등임.