

탄속 측정 장비(AN/UPQ6)에 관한 연구

최 주 호, 박 원 우*, 유 준**

*국방과학연구소

**충남대학교

요 약

This paper presents a muzzle velocity measuring equipment(MVME) for the AN/UPQ6 model using doppler signals, which are generated from the difference of the transmitter signals and the receiver signals. It describes the principles of a velocity measurement, a ballistic analysis program and the accuracy of the MVME. With a comparison between the existence velocity meter and this system, the accuracy and the usefulness of this equipment is validates.

1. 서 론

탄속 자료는 각종 화포 및 탄약의 개발과 수탁시험의 성능평가 위한 기초 자료로 이용되고 있다. 탄속 측정 장비는 사용하는 센서의 종류와 신호를 검출하는 방법에 따라 Electrooptical, Electro-mechanical, Electro-magnetic 등으로 분류될 수 있다. [1]

도플러 신호를 이용하는 AN/UPQ6 모델의 탄속 측정 장비는 전자기식이며 기존 사용중인 DR-810 모델을 성능 개량하여 최근에 개발된 장비로 사용이 간편하고 정확도가 높은 장점을 가지고 있다. AN/UPQ6 의 탄속 측정 가능범위는 20m/s ~ 2,000m/s 이고 구경범위는 최소 5.56mm 에서부터 대구경의 탄자에도 적용가능하며, 포구속도와 초기 탄속 곡선도 동시에 산출할 수 있는 기능을 가지고 있다.

본 시스템의 주요기능은 포구 속도 데이터를 최대 1000개 까지 저장할 수 있으며, 사격시 도플러 신호의 S/N 비가 28[dB] 이하인 경우 계측된 데이터는 Error 임을 알리는 Error 표시기능, 추진체의 온도 및 탄자의 무게 등을 고려한 탄속 보정기능, RDU 는 비휘발성 메모리 기능을 가지고 있기 때문에 Power Off 데이터 재생기능, 시스템의 정상 동작상태를 확인할 수 있는 Self Test 기능, 계측된 도플러 신호의 3차원 Waterfall Graphic 해석기능을 가지고 있다.

본 시스템의 구성은 RDU(Remote Display Unit), Antenna Unit 386 랩탑 컴퓨터로 구성되어 있으며, 송신 주파수는 10.519GHz 에서 10.531GHz 까지 0.03GHz 의 간격으로 다섯가지 모드를 선택할 수 있다. [2]

이 송신 주파수와 탄자에서 반향되어 오는 수신신호의 차주파수가 도플러 주파수이며, 이 도플러 주파수를 계산하여 탄자의 속도를 알 수 있다. 본 연구에서 AN/UPQ6의 이론적 정확도 해석을 하였으며 사용상의 문제점을 제시하였다.

2. 도플러 신호와 속도 계산 원리

도플러 신호로부터 포구속도를 산출해 내기까지는 A/D Conversion, FFT Analysis, Tracking & Trajectory Analysis 단계의 처리과정을 거치게 되며, Fig. 1 에서 볼 수 있다.

송신 신호 파장을 λ , 도플러 주파수를 f_d 라 했을 때 비행탄자의 속도 v 는 (1)과 같다. [3]

$$v = f_d \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

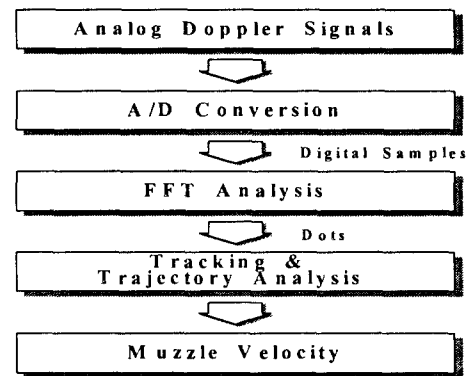


Fig 1. Blockdiagram for Muzzle Velocity Count

그리고 수신 주파수 f_R 와 송신 주파수 f_o , 광속도 C 및 비행 물체의 속도 v , 도플러 주파수 f_d 의 관계는 (2)와 같다.

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

아날로그 도플러 신호는 최대 도플러 주파수의 2배 혹은 3배로 Sampling 및 digitizing 되어 FFT 가 수행된다.

FFT 결과는 비행물체의 속도에 해당하는 주파수 Peak 로 나타나게 되며, 이 주파수 스펙트럼은 신호대 잡음비를 결정짓는 dot Filter(Comb Filter)에 의해 여파된다. 이렇게 해서 얻어진 모든 dot 들은 각 스펙트럼의 Highest Peak 에 해당하는 속도대 시간의 2차원 값으로 순간속도, 순간시간, 신호대 잡음비 및 Analysing Bandwidth 정보를 갖고, 이미 있는 정보를 포함하는 이러한 Dot 들의 연속적인 궤적을 Track 이라 하며 각각의 Track 들은 시간변화, 속도변화, 가속도, 거리, 신호대 잡음비 및 Analysing Bandwidth 의 정보를 갖는다. [4]

포구속도(muzzle velocity)는 탄도상에 동일시간 간격의 최대 32개, 계측점에서 얻은 속도정보로부터 최소자승 오차법과 외삽법으로 계산된다. 포구속도 v_o 는 Fig. 2의 각 위치에서의 속도 v_i 와 도플러 주파수 계산시간 T_i 와의 관계에서 구할 수 있다. 그러므로 최소자승오차 S 는 (3)과 같이 나타난다.

$$S = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (v_i - v)^2 \quad (3)$$

$$v = -at_i + \beta \quad (4)$$

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

$$v_o = \bar{v} + r(t - \bar{t}) = rt + \bar{v} - r\bar{t} \quad (5)$$

$$r = -a = \frac{S_{XY}}{S_{XX}} \quad (6)$$

$$\beta = \bar{v} - r\bar{t} \quad (7)$$

$$S_{XY} = \sum t_i v_i - \frac{\sum t_i \sum v_i}{n} = \sum (t_i - \bar{t})(v_i - \bar{v}) \quad (8)$$

$$S_{XX} = (\sum t_i^2 - \frac{\sum t_i^2}{2}) = \sum (t_i - \bar{t})^2 \quad (9)$$

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$$

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (10)$$

Fig. 2 에서 최초 계측점인 T_1 만큼 시간지연이 생기므로 (5) 식은 (11)로 표현되고 실제 포구속도 v_0 는 $t=0$ 일 때 이므로 (12)와 같이 된다.

$$v_0 = r(t - T_1) + \bar{v} - r\bar{t} \quad (11)$$

$$\therefore v_0|_{t=0} = \bar{v} - r(T_1 - \bar{t}) \quad (12)$$

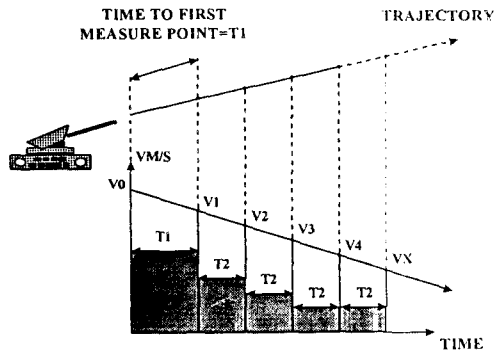


Fig. 2. Measurement Point Location

3. 탄도 해석 프로그램

탄도 해석 프로그램은 IBM 호환기종 PC 에 탑재하여 사광하며 장비의 제어기능, 결과 표시기능, 데이터의 (Graphic 해석기능 및 데이터 프린트 아웃기능 등을 가지고 있으며 Velocity 대 Time(V-T), S/N 대 Time(S-N) 및 3D Waterfall Graph 을 Fig. 3, Fig. 4 6 에서 볼 수 있다.

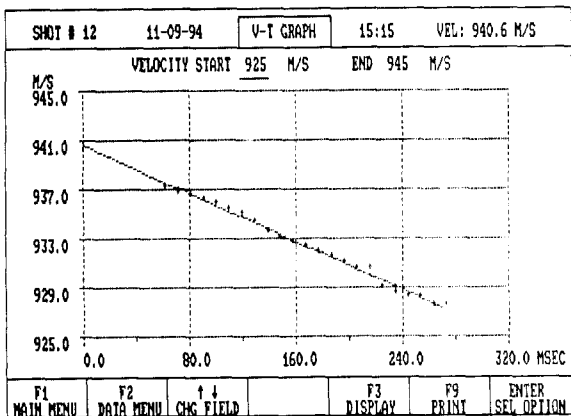


Fig. 3 V-T Graph

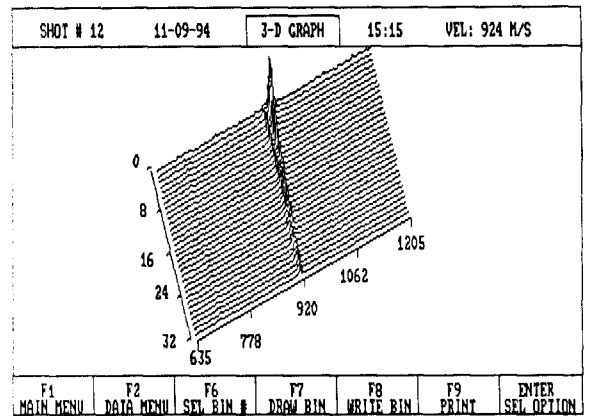


Fig. 4 3D Waterfall Graph

4. 정확도 분석

MVR MKV FFT 시스템은 탄속범위가 20m/s~2,000m/s 인 경우는 샘플링을 3.125 μ sec 로 하고, 150m/s~1000m/s 일 때는 6.25 μ sec 로 1,024점에서 Fast Fourier 변환을 하고 있다. 즉,

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

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

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

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

그리고 속도 대역폭(Velocity Bandwidth : DV)은 MVR 의 파장 W 와 도플러 필터 대역폭 B 의 함수로 주어진다.

$$DV = (W \times B) / 2 \\ = (0.0285 \times 312.5) / 2 \text{ [or } (0.0285 \times 156.25) / 2] \quad (13) \\ = 4.45 \text{ m/s (or } 2.22 \text{ m/s)}$$

탄자의 속도는 보간법(Interpolation Method)으로 구해지며, 다음과 같이 표현된다.

$$V = \text{SUM}(V_i \times E_i) / I \quad (14)$$

$$V_i = \text{Velocity of Filter}$$

$$E_i = \text{Energy of Filter } i$$

$$I = \text{Number of Filters in Which Target was Detected}$$

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

4.1. 프로세싱 오차요인

각 위치(Point)별 계측에서 프로세싱 오차요인은 고정바이어스(Fixed Bias) 오차와 잡음 오차가 있다. 고정바이어스 오차는 보간법 프로세스의 결과로, 실제 탄자의 속도는 계측된 속도와 다소 다를 수 있는데 이것은 보간법에서 속도곡선의 비직선성 때문이다. 이 오차는 도플러 필터 내부에 있는 Target Location 의 함수로 변경시킬 수 있다. 탄자가 도플러 필터의 정 중앙에 있게 되면 오차가 없을 것이고, 양 측면에 있게 되면 최대오차가 발생된다. 이 오차를 수학적으로 최소화 시킬 수 있는 것이 Weighting Function 이다. 이러한 오차의 최대편차는 rms 오차로 계산해서 다음과 같다.

$$DV_f = 0.35 \text{ m/s (or } 0.75 \text{ m/s)} \quad (15)$$

다음은 잡음 오차인데 각 계측점에 대한 랜덤 오차는 신호 대 잡음비로 표현된다.

$$DV_n = DV / \sqrt{S/N} \quad (16)$$

감출을 위한 신호 대 잡음비는 최소 20 dB 로 고정시키기 때문에 다음과 같다.

$$DV_n = 0.445 \text{ m/s (or } 0.2225 \text{ m/s)} \quad (17)$$

보통 Bias 오차는 레이다 주파수 변화로 야기되며, 레이다 빔과 다른 위치에 안테나를 설치할 경우는 Parallax Mounting 이 되는데 이것과 Range Location 은 레이다가 설치될 때 역방향 데이터를 주입함으로써 제거시킬 수 있다.

4.2. 오차산정

각 계측점당 Total RMS 오차는 다음과 같다

$$DV = \sqrt{DV_f^2 + DV_n^2}$$

$$= \sqrt{(0.35)^2 + (0.445)^2} \text{ or } \sqrt{(0.175)^2 + (0.2225)^2} \quad (18)$$

$$= 0.566 \text{ m/s or } (0.283 \text{ m/s})$$

속도는 32 Point 의 속도 평균값과 보간법 및 외삽법으로 계산된다. 그러므로 Total 오차는 $\sqrt{32}$ 의 요소로 감소된다.

$$DV_{total} = DV / \sqrt{32} \quad (19)$$

$$= 0.1 \text{ m/s or } (0.05 \text{ m/s})$$

이러한 계산은 탄자가 20m/s~2,000m/s 혹은 150m/s~1,000m/s 의 범위에서 운동할 때 적용 가능하며, 고정된 Target 으로 Simulation 할 때는 Fixed Error 를 줄일 수 없다. 그리고 속도가 200m/s 이하에서는 도플러 필터폭을 줄이고 신호 대 잡음비를 증가시켜 Fixed 오차와 Random 오차를 줄이고 있다.

본 시스템의 Overall Accuracy 는 두가지 Mode 에서 측정한다.

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

5. 계측결과

본 장에서는 기존의 Solenoid Coil 과 DR-810 과의 비교시험한 결과를 정리한 것이다.

5.1. Solenoid Coil 과 AN/UPQ6 의 탄속 계측 결과

<표 1> Solenoid Coil 과 AN/UPQ6 의 탄속 성능 결과표

구분 \ 내용	Solenoid	AN/UPQ-6	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			

5.2. DR-810 과 AN/UPQ-6 의 탄속 계측 결과

<표 2> DR-810 과 AN/UPQ-6 의 탄속 성능 결과표

구분 \ 내용	DR-810	AN/UPQ-6	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.	10발
표준편차	3.24	3.25			

5.3. Long Range Doppler 와 AN/UPQ-6의 탄속 계측 결과

<표 3> Long Range Doppler 와 AN/UPQ-6의 탄속 성능 결과표

구분 \ 내용	Long Range Doppler	AN/UPQ-6	시험내용	시험일자 및 시험장	비고
평균탄속	819.78	818.13	155mm	'93. 5. 27.	10발
표준편차	4.66	4.54			

6. 결 론

기존의 탄속 측정 장비인 DR-810 은 장비의 설치가 간단하고 높은 고각에서도 계측이 가능한 장점을 가지고 있는 반면 수평 사각시 포구속도 측정이 곤란하고 실제 포구속도 측정 범위가 비교적 좁은 단점이 있었는데, AN/UPQ6 는 포구속도 측정 범위의 측정데이터의 저장 메모리가 확장되었으며, 탄도 해석 기능이 있기 때문에 계측의 정확도와 신뢰도가 증대되었다. 그러나 한가지 문제점은 폭음압의 충격에 안테나의 파손(년 1회/Set)으로 인한 시험의 지연과 예산의 손실이 초래되고 있는 실정이다

참고문헌

- [1] 최주호 외 "탄속 측정기법에 관한 연구" TAEC-519-89001, 1989. 12
- [2] "AN/UPQ6 Mark V Velocimeter Technical Manual" Lear Astronics Corp. 1992. 3.
- [3] Barton, David K, "CW and Doppler Radar" 1980.
- [4] Schwartz, Mischa, "Discrete Spectral Analysis, Detection and Estimation" 1975.