

## 도플러 레이더를 이용한 포구속도 계측 시 클러터 제거 방법

# Removal of Clutter from Doppler Radar Signal to Measure Accurate Muzzle Velocity

김형래

국방과학연구소 제5기술연구본부

Hyoung-rae Kim

The 5th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Chungcheongnam-do, 32131, Korea

### [요 약]

포구속도는 총포탄약의 평가에 있어 가장 중요한 계측항목들 중 하나이다. 포구속도는 포탄이 포구를 떠나는 시점의 속도로 정의된다. 특히, 포구속도는 추진제의 성능과 밀접하게 관련이 있기 때문에 정확한 측정이 요구된다. 포구속도의 측정에는 도플러 레이더가 사용되나, 도플러 레이더 신호의 품질은 시험장 환경에 의존한다. 따라서 본 논문에서는 도플러 레이더의 신호 품질을 악화시키는 클러터를 시험장 구조 및 신호처리 방법의 개선을 통해 제거하는 방법을 제시하였다. 개선된 신호처리 방법의 적용을 위해 도플러 레이더의 원시 도플러 데이터를 획득하는 프로그램을 작성하였다. 시험장 구조 및 신호처리 방법의 개선을 통해 얻어진 속도 데이터에 대한 통계적인 검증으로 제안하는 방법이 기존에 사용하던 방법에 비해 클러터 제거에 효과가 있음을 증명하였다.

### [Abstract]

Muzzle Velocity is one of the most important measurement items for evaluation of ammunition. The muzzle velocity is defined as the velocity when the projectile leaves the muzzle. Particularly, since the muzzle velocity is closely related to the performance of the propellant, precise measurement of muzzle velocity is required. Doppler radar is used to measure the muzzle velocity, but the quality of Doppler radar signal depends on the test site environment. In this paper, a method to remove the clutter that degrades the signal quality of Doppler radar by improving the structure of the test site and the signal processing method is suggested. For the application of the improved signal processing method, a program for acquiring Doppler radar's raw Doppler data was created. Statistical verification of the velocity data obtained through the improvement of the test site structure and signal processing method proved that the proposed method is effective for the removal of clutter as compared with the existing method.

**Key word** : Muzzle velocity, Doppler radar, Clutter reduction, Radar signal processing, Ammunition evaluation.

<https://doi.org/10.12673/jant.2019.23.2.142>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 7 March 2019; Revised 5 April 2019  
Accepted (Publication) 23 April 2019 (30 April 2019)

\*Corresponding Author

Tel: +82-41-671-2356

E-mail: hrkim89@add.re.kr

## 1. 서 론

총포시스템의 약실에서 점화기로부터 발생한 화염이 추진체를 점화하게 되면, 추진체가 급격하게 연소하면서 발생한 다량의 가스에 의해 강한 압력이 발생한다. 이 압력에 의해 포열 내에서 가속된 포탄이 포열을 빠져나오는 순간속도를 포구속도라고 한다[1],[2]. 포구속도는 탄의 사거리 및 추진체의 성능과 밀접하게 관련이 있다. 추진체의 에너지 조성(고, 저)에 따라 탄의 포구속도의 크기가 결정된다. 추진체가 원하는 만큼, 원하는 속도로 연소하지 않으면 포구속도는 규격과 일치하기 어렵다. 또한, 탄의 사거리가 규격을 만족하기 위해서는 포구속도가 규격과 일치해야 한다. 따라서 포구속도를 정확, 정밀하게 측정하는 것이 탄의 전반적인 성능을 평가하는 데 있어 중요하다. 이에 탄의 속도를 계속하기 위한 방식들에 대하여 많은 연구가 진행됐다.

미 육군 시험평가 사령부에서 1982년에 발간한 시험 운용 절차서에 따르면 탄의 속도를 계속하는 방식은 크게 다섯 가지가 있다[3]. 첫 번째는 도플러 레이더를 이용한 측정방식이다. 이는 본 논문에서 다루는 방식으로 도플러 레이더의 송신부에서 공간을 향해 연속적인 전파가 전송되고, 움직이는 탄으로부터 반사된 전파가 도플러 레이더의 수신부에서 수신되는 방식이다. 그런데 탄이 이동하므로 송신된 신호의 주파수와 수신된 신호의 주파수가 달라진다. 이 두 주파수 간의 차이는 도플러 편이(shift)라고 불린다. 도플러 편이는 도플러 레이더의 수신부를 기준으로 탄의 시선속도에 비례한다.

두 번째는 탄의 경로에서 탄이 진행한 거리와 그 거리를 진행하는데 소요된 시간을 이용하여 평균속도를 얻어내는 방식으로, 쌍을 이루는 감지 장비를 이용하게 된다. 이 방식에 사용되는 감지 장비의 예로는 솔레노이드 코일, 스크린 (break screen, make screen, lumiline screen, sky screen) 등이 있다. 솔레노이드 코일은 탄을 자화시켜 탄이 솔레노이드 코일을 지나 는 순간에 전자자유도 원리로 전류가 흐르도록 하여, 탄이 지나 는 시각을 포착하게 해준다. 솔레노이드 코일을 2개 설치하여 그 사이의 거리를 알고 있다면, 각각의 솔레노이드 코일을 지나 는 시각의 차이를 이용하여 탄의 평균속도를 구할 수 있다. 또한, 스크린을 이용하는 방식은 스크린을 여러 개 설치하고, 각 스크린 간의 거리를 정확하게 알고 있다고 가정한다. 탄이 스크린을 지날 때 전류가 흐르거나 끊기는 시각을 측정하고, 탄이 스크린 사이를 지나 는 시간을 구하여 탄의 평균속도 (거리/시간)를 알 수 있다. 또한, 전기신호가 아닌 빛을 이용하면 탄이 스크린 위를 지날 때 빛이 약해지는 시각을 기록하여 탄이 스크린 사이를 지나는데 걸리는 시간을 알 수 있다. 스크린을 사용하면 거리는 알고 있으므로 스크린 사이를 탄이 지나 는 데 걸리는 시간만 정확히 측정할 수 있으면 포구속도를 측정할 수 있다.

세 번째와 네 번째는 카메라를 이용하는 방식이다. 스미어 (smear) 카메라는 셔터를 계속 열어놓고 탄이 좁은 슬릿(slit)

사이를 완전히 지나가는 동안 시각측정 시스템으로부터 수신한 시각을 표시하면서 영상을 획득하는 방식이다. 이 방식에서 거리는 탄의 길이가 되는데, 슬릿에 탄이 처음 나타났을 때부터 완전히 사라진 때 사이의 시간으로 탄의 길이를 나누어 평균속도를 구한다. 고속카메라는 스미어 카메라와 다르게 고속으로 많은 프레임을 찍은 후, 탄이 진행한 거리를 프레임 간의 시간으로 나누어 평균시간을 구한다. 하지만 고속카메라는 스미어 카메라와 비교하면 정확도가 떨어진다.

마지막 다섯 번째 방식은 플래시 라디오그래피 (flash radiography) 방식으로, 알고 있는 거리만큼 두 엑스레이 관이 떨어지도록 한다. 이후 탄이 각각의 엑스레이 관을 지나 는 시각을 기록하여 알고 있는 거리를 이동시간으로 나누어 탄의 평균속도를 구한다.

도플러 레이더 기술의 발달로 탄의 속도 측정에 있어 도플러 레이더를 많이 사용하는 추세이다. 하지만 도플러 레이더도 클러터나 잡음과 같은 외부 환경의 영향을 받는다. 본 논문에서는 도플러 레이더에서 클러터의 영향을 극복하기 위하여 시험장 주변 환경을 개선하는 방법과 신호처리 개선방안을 제시하였다.

다음 2장에서는 포구속도의 측정 원리를 살펴본 후, 3장에서 현 포구속도 측정 현황 및 한계를 설명하였다. 4장에서 포구속도 측정 시 오차 원인에 대해 분석을 하였다. 5장에서 클러터 제거를 위한 방법을 제안하고 그 방법을 적용한 결과를 제시하였다. 마지막으로 6장에서는 결론을 기술하였다.

## II. 포구속도 측정 원리

시험평가항목 중 포구속도(muzzle velocity)란 포탄이 포구를 떠나는 순간의 속도로 정의된다. 포구속도는 각종 화포와 탄, 추진체의 개발 및 수락시험에서 성능평가를 위한 주요 자료로 활용된다[4]. 안흥시험장에서는 포구속도를 Weibel 사의 도플러 레이더(모델명 SL-520PE)를 사용하여 계속하고 있다. (그림. 1)

SL-520PE 도플러 레이더에 대한 규격(specification)은 표 1과 같다.



그림 1. 와이벨사의 도플러 레이더  
Fig. 1. Doppler radar of Weibel. Co.

**표 1.** 도플러 레이더(SL-520PE)의 규격  
**Table 1.** Specification of Doppler radar(SL-520PE).

Output power(watt)	0.4 ± 0.1
Performance factor (dBm <sup>2</sup> /s)	179 ± 2
155mm projectile Tracking range(km)	2-4
7.62mm projectile Tracking range(km)	0.1-0.2
Antenna gain(dB)	20 ± 1
Antenna beam (Elevation, degree)	19° ± 1°
Antenna beam (Azimuth, degree)	9° ± 1°
Dimensions(mm <sup>3</sup> )	175 × 175 × 50
Image rejection	No
Weight(kg)	4
Transmitter type	Continuous wave
Frequency(GHz)	X-band(10.400-10.550)
Noise figure(dB)	8.0 ± 1
Phase noise(dBc/Hz)	-100 @ 10kHz offset

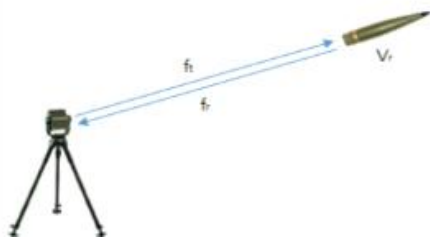
도플러 레이더는 전파가 송·수신되는 과정에서 표적의 이동에 의한 주파수의 변화(도플러효과)를 이용하여 표적의 속도를 계측한다. 도플러 레이더는 송신 안테나와 수신 안테나가 분리된 구조로, 그림. 2와 같이 송신 안테나에서 연속파(continuous wave)를 송신하면 전파 일부가 탄에 반사되어 수신 안테나로 입사하게 된다.

송신된 신호와 수신된 신호에 대하여 신호처리과정을 거치면 식 (1)의 관계를 갖는 도플러 주파수( $f_d$ )를 얻을 수 있다.

$$f_d = f_t - f_r \quad (f_t : \text{송신 주파수}, f_r : \text{수신주파수}) \quad (1)$$

$c$ 는 빛의 속도( $2.99793 \times 10^8$ m/s),  $v_r$ 은 탄의 진행 속도라고 하면, 안테나에서 멀어지는 방향으로 운동하는 탄의 전파에 대한 상대속도는  $c - v_r$ 이다. 이 관계를 이용하여 송신 신호의 한 파장이 탄에 입사되는 시간을 구하면 식 (2)와 같다.

$$t_1 = \frac{\lambda_t}{c - v_r} \quad (2)$$



**그림 2.** 도플러 효과를 이용한 속도 계측  
**Fig. 2.** Velocity measure using Doppler effect.

$t_1$ 의 시간 동안 탄은 안테나에서 멀어지는 방향으로 운동을 지속하므로,  $v_r t_1$ 만큼 움직이게 된다. 전파가 탄이 진행한 거리만큼 진행하는데 걸리는 시간을 계산하면 식 (3)과 같다.

$$t_2 = \frac{v_r t_1}{c} \quad (3)$$

안테나에서 송신된 신호의 한 파장이 발사된 탄에 입사되어 완전히 반사될 때까지 걸리는 시간은 식 (2)와 식 (3)의 합인  $t_1 + t_2$ 가 된다. 안테나에서 수신되는 신호의 주파수  $f_r$ 는  $t_1 + t_2$ 의 역수로서 식 (4)와 같이 계산된다.

$$f_r = \frac{1}{t_1 + t_2} = f_t \frac{c - v_r}{c + v_r} \quad (4)$$

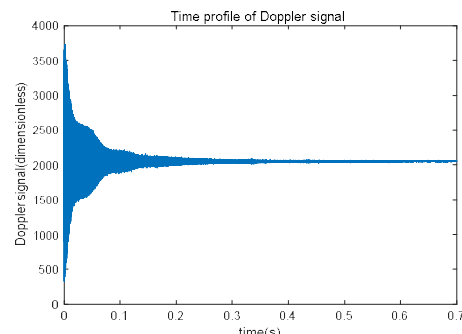
식 (1)에 식 (4)를 대입하여 도플러 주파수( $f_d$ )를 식 (5)와 같이 유도할 수 있다.

$$f_d = f_t \frac{2v_r}{c + v_r} \quad (5)$$

일반적으로 탄의 속도는 빛의 속도에 비해 매우 작다는 조건을 이용하면 식 (5)에서 탄의 속도와 도플러 주파수 간의 관계를 식 (6)과 같이 정리할 수 있다.

$$v_r = \frac{c f_d}{2f_t} \quad (6)$$

그림. 3은 도플러 레이더에서 획득한 도플러 신호 진폭의 시간에 대한 프로파일이다. 위 신호는 도플러 레이더에서 얻은 아날로그 신호가 A/D 컨버터를 거쳐 디지털 신호로 변환된 결과이다. 이 디지털화된 도플러 신호에 대하여 fast fourier transform(FFT) 연산을 수행할 때 그림. 4의 중첩(overlap) 기법을 이용하여 많은 수의 속도 데이터를 얻을 수 있다.



**그림 3.** 시간에 따른 도플러 신호의 변화  
**Fig. 3.** Time profile of Doppler signal.

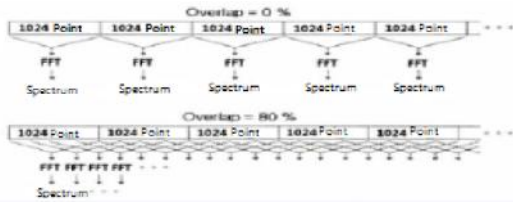


그림 4. 중첩 기법  
Fig. 4. Principle of overlap.

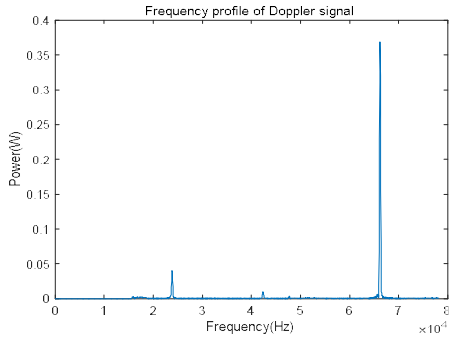


그림 5. 주파수에 따른 도플러 신호의 변화  
Fig. 5. Frequency profile of Doppler signal.

중첩 기법은 FFT 연산의 대상이 되는 데이터를 N 번째 FFT 연산에서와 N+1 번째 FFT 연산에서 중복으로 사용하는 방법이다.

FFT 연산을 수행하면 도플러 신호의 각 주파수 대역에 대한 프로파일을 얻는다. (그림. 5) 먼저 고정된 주변 환경의 전자파 산란에 의한 직경로(direct path)를 통해 들어온 신호의 제거를 위해 낮은 주파수 대역을 제외한다. 이후 가장 큰 전력을 가지는 주파수를 탄 속도에 의한 도플러 주파수( $f_d$ )로 간주하고, 식 (6)을 이용하면 송신 주파수는 도플러 레이더 규격에서 주어지는 값이므로 탄의 속도를 알 수 있다. 이 결과로 시간에 대한 탄 속도의 프로파일을 얻는다.

### III. 포구속도 측정 현황 및 한계

국방과학연구소 안흥시험장에서는 155 mm K-9 자주포와 관련하여 추진제, 완성탄, 탄체 금속 부품, 신관, 무장조립체 시험 등이 수행되고 있다. 이러한 시험이 진행될 때 사격 방식은 고각 사격과 탄받이 사격의 두 가지로 나뉜다.



그림 6. 탄의 진행경로에 있는 클러터  
Fig. 6. Clutter in the path of projectile.

고각 사격은 포열을 포신이 향하는 방향에서 위로 방열한 후 사격하는 방식이다. 반면, 탄받이 사격은 포열을 포신이 향하는 방향으로 방열한 후 탄받이에 사격하는 방식이다. 고각 사격의 경우 탄이 위로 발사되기 때문에 도플러 레이더를 이용하여 탄의 속도를 계측할 때 장애물에 의한 반사 신호가 없어 안정적으로 탄의 속도 데이터가 얻어진다. 그러나 탄받이 사격의 경우 탄의 진행경로에 존재하는 장애물에 의한 반사 신호로 인해 탄의 속도 데이터가 불안정해진다.

클러터란 안테나에서 수신하는 신호 중 표적에 의한 신호가 아닌 원하지 않는 신호를 의미한다. 클러터는 크게 고정된 주변 환경의 전자파 산란에 의한 클러터와 체적 클러터로 구분된다. 고정된 주변 환경의 전자파 산란에 의한 클러터에는 나무, 숲, 산, 건물, 바다 등이 있으며, 체적 클러터에는 채프, 강우, 새떼 등이 있다[5].

도플러 레이더를 이용하여 표적을 추적하는 경우, 주위 환경 및 구조물에 의해 다중경로 간섭이 발생한다. 전반적인 기하학적 구조에 따라 이 클러터는 안테나의 부엽(side lobe) 혹은 주엽(main lobe)을 통해 수신부로 입사된다. 두 경우 모두 동일한 표면에서 반사된 클러터는 전파의 파장, 반사체와 안테나 사이의 거리에 의해 결정되는 위상을 갖는 삼각 함수들의 합으로 구성된다[6].

그림. 6은 국방과학연구소 안흥시험장에 있는 전천후시험장의 전경이다. 전천후시험장에서 탄받이 사격을 진행하는 경우 탄의 진행경로에 나무, 숲, 콘크리트 구조물 등 고정된 주변 환경의 전자파 산란에 의한 클러터의 존재로 인한 도플러 레이더에서 수신하는 신호 품질의 악화를 예상할 수 있다.

### IV. 포구속도 측정 시 오차원인 분석

세부적으로 전천후시험장에서 도플러 레이더의 수신 신호 품질을 악화시키는 원인을 세 가지로 정리할 수 있다. 첫 번째는 폭압으로 인한 진동, 두 번째는 탄의 경로에 존재하는 고정된 주변 환경의 전자파 산란에 의한 클러터, 세 번째는 다중경로(multi path) 클러터이다.

#### 4-1 폭압으로 발생하는 포의 진동에 의한 오차

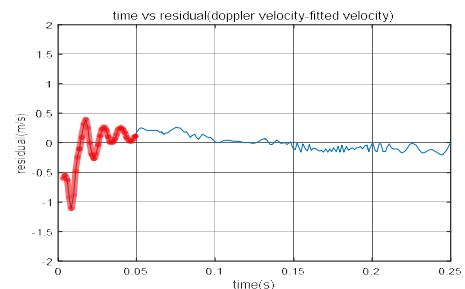


그림 7. 초기 데이터에 대한 화염과 진동의 영향  
Fig. 7. Influence of flame and vibration on initial data.

그림. 7에서 도플러 레이더의 계측 초기 데이터가 폭압으로 발생하는 진동으로 인해 변동(fluctuation)함을 확인할 수 있다. 이 변동 때문에 탄이 포구를 벗어난 후 50 ms 이내에는 도플러 신호의 계측이 어렵다. (그림. 7) 혹은 계측에 성공하더라도 신호 대 잡음 비(SNR)가 매우 낮다[4].

따라서 포구속도의 계산에 있어서 탄이 포구를 벗어난 후 50 ms 이내의 속도 데이터를 제외하고, 50 ms 이후의 속도 데이터를 이용하여 시험의 종류에 따라 n 차(주로 1, 2차) 다항식 곡선 적합(curve fitting)을 적용한다. 이 과정에서 얻어진 다항식을 이용하여 외삽법을 적용하여 역으로 포탄이 포구를 벗어나는 시점의 속도(포구속도)를 구한다.

이는 시간이라는 독립변수의 종속변수인 포탄의 속도에 대한 관계를 추정하여 흩어진 데이터 점들에 대한 특성을 가장 잘 나타내는 모델을 찾는 회귀분석으로 볼 수 있다.

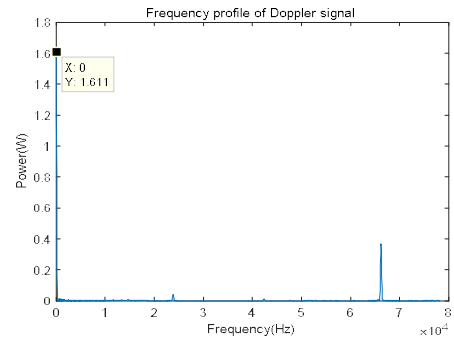
탄받이 사격에 대하여 향후에는 도플러 레이더를 폭압의 영향을 받지 않는 위치에 설치하여 계측 초기 데이터도 폭압의 영향을 받지 않도록 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 도플러 레이더를 포와 멀리 설치하면 계측 초기 데이터를 얻기 위해 도플러 레이더가 바라보는 방향과 탄받이 사격 시 탄의 진행 방향에 차이가 생긴다. 따라서 도플러 레이더에서 얻어지는 탄에 대한 시선속도를 실제 탄의 속도로 변환하기 위해서는 탄과 도플러 레이더를 연결한 직선과 탄과 포를 연결한 직선이 이루는 각도를 이용한 보상이 필요할 것이다.

고각사격의 경우는 계측 초기 데이터를 얻기 위해 도플러 레이더가 바라보는 방향이 탄의 진행 방향과 다르면 계측 가능 거리가 짧아지고, 시선속도에 대한 보상 문제도 3차원으로 복잡해진다. 따라서 고각사격에서 계측 초기 데이터를 얻기 위해 도플러 레이더가 바라보는 방향을 바꾸는 것은 적합하지 않다.

**4-2 고정된 주변 환경의 전자파 산란에 의한 클러터로 인한 오차**

이번 절에서는 먼저 고정된 주변 환경의 전자파 산란에 의한 클러터로 인한 오차에 대해 분석한다. 그림. 6에서 탄의 경로에 존재하는 클러터 중 가장 영향이 클 것으로 예상되는 곳은 탄받이 벽이다. 레이더에서 송신된 신호가 맞고 반사될 수 있는 부분의 넓이를 RCS (radar cross section)라고 하는데, 탄의 경로에 있는 클러터 중 탄받이 벽이 RCS가 가장 크기 때문이다. 탄받이 벽의 RCS는 포탄의 RCS보다 상당히 크기 때문에 직경로(direct path)를 통해 탄받이 벽에 반사되어 들어온 신호의 전력이 포탄에 반사되어 들어온 신호의 전력보다 크다. (그림. 8)

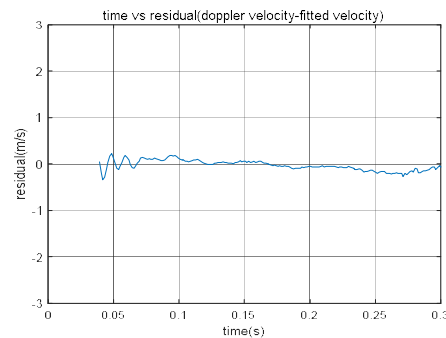
하지만 고정된 주변 환경의 전자파 산란에 의한 클러터에서 반사되어 직경로를 통해 레이더로 들어오는 신호는 그림. 8에서처럼 낮은 주파수를 가지기 때문에 2장에서 언급한 바와 같이 낮은 주파수 대역을 최대 전력을 찾는 주파수 범위에서 제외함으로써 쉽게 제거할 수 있다.



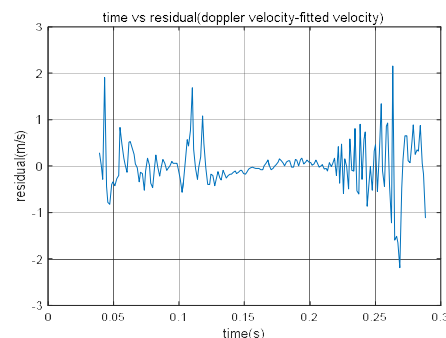
**그림 8.** 벽과 탄에 반사된 신호의 전력 비교  
**Fig. 8.** Comparison of reflected signal power between the wall and the projectile.

**4-3 다중경로(multi path) 클러터에 의한 오차**

이번 절에서는 다중경로 (multi path) 클러터에 대해 분석한다. 실제 사격 (K678 6호 장약) 결과로 얻어진 데이터를 살펴보면 다중경로 클러터의 영향을 확인할 수 있다. 그림. 9는 고각 사격에서 도플러 레이더로 계측한 탄의 속도 데이터와 다항식 곡선 적합 결과 사이의 잔차를 나타낸 그래프이다.



**그림 9.** 고각 사격에서 계측된 속도 데이터와 곡선 적합을 거친 속도 데이터의 차이  
**Fig. 9.** Difference between measured and fitted velocity data in high-angle fire.



**그림 10.** 탄받이 사격에서 계측된 속도 데이터와 곡선 적합을 거친 속도 데이터의 차이(경사면을 쌓기 전)  
**Fig. 10.** Difference between measured and fitted velocity data in low-angle fire(before the slope is piled up).



그림. 10은 탄받이 사격에서 속도 데이터의 다항식 곡선 적합 결과와의 잔차를 나타낸 그래프이다. 두 그래프를 비교하면 탄받이 사격에서 얻어진 신호의 품질이 고각 사격의 경우보다 좋지 않음을 알 수 있다.

위 결과를 바탕으로 탄받이 사격은 고각 사격보다 다중경로 클러스터의 영향이 커서 탄의 속도 데이터 품질이 나빠짐을 알 수 있다. 따라서 탄받이 사격의 경우 탄의 성능을 정확, 정밀하게 평가하려면 다중경로 클러스터의 영향을 줄여야 한다는 결론을 얻을 수 있다.

### V. 다중경로 클러스터 제거를 위한 방법 제안

전천후시험장에서 탄받이 사격 시 다중경로 클러스터의 영향을 줄여 탄의 속도 데이터 품질을 높이기 위해 본 논문에서 제안하는 첫 번째 방안은 다중경로 클러스터가 발생할 가능성이 큰 콘크리트 구조물의 변경이다. 두 번째 방안은 FFT 연산 이후 신호처리 방법 개선이다.

#### 5-1 전천후시험장 구조물 변경(방안 1)

탄받이 사격 시 도플러 레이더는 포구와 같은 고각과 높이로 설치되고, 이로 인해 도플러 레이더에서 방사되어 탄에 입사하는 전파의 고각 관점에서의 입사각은 클러스터도 0° 에 가깝게 되어 실제 표적 신호와 지면에서 반사된 클러스터의 구분이 어렵다.

하지만 방위각 관점에서 도플러 레이더에서 방사되어 탄에 입사하는 입사각은 클러스터의 경우 0° 가 아닌 다른 값을 가진다. 반사된 전파신호는 포탄의 진행 방향 전방에 있는 탄받이 벽에 일차적으로 반사되고, 포탄의 진행 방향 우측에 있는 옹벽에 이차적으로 반사되어 도플러 레이더로 들어올 가능성이 존재한다.

그림. 11(b)는 방위각 관점에서 도플러 레이더의 방사 신호를 고려했을 때, 탄에서 반사된 전파신호가 탄받이 벽과 옹벽에 반사되어 다시 도플러 레이더로 들어올 수 있는 경로를 알아내기 위한 기하학적 분석을 보여준다.

탄에서 반사되어 탄받이 벽과 옹벽을 맞고 도플러 레이더로 신호가 들어오는 경로는 도플러 레이더에서 송신된 신호가 옹벽과 탄받이 벽에 반사되어 탄에 도달하는 경로와 같다. 따라서 그림. 11(a)와 같은 삼각형으로 도플러 레이더에서 방사된 신호의 진행 방향을 분석하여 탄으로부터 반사되어 나오는 신호의 경로를 알 수 있다.

그림. 11(a)의 삼각형에서 포구를 기준으로 y축 방향으로 얼마나 떨어졌는지를 나타내는 h 값을 알면 식 (7)을 통해 신호가 옹벽으로 입사하는 각(θ)을 알 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1}(h/11.8) \quad (7)$$

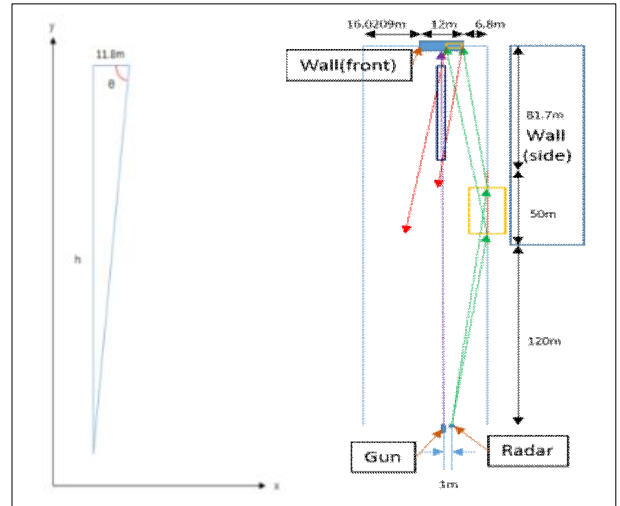


그림 11(a). 신호의 방향 분석을 위한 삼각형(좌측)

그림 11(b). 기하학적 분석(우측)

Fig. 11(a). Triangle to analyze the direction of signal(left).

Fig. 11(b). Geometric analysis(right).

식 (7)에서 11.8의 값은 그림. 11(b)에서 도플러 레이더의 중심과 시험장의 오른쪽 끝(옹벽)까지의 거리를 나타낸다. 먼저 θ의 값을 알게 되면, 옹벽에서 반사된 신호가 탄받이 벽 쪽의 어느 지점으로 도달하는지 알 수 있다. 그림. 11(b)를 보면 포구로부터 탄받이 벽까지 거리가 251.7 m이므로 식 (8)의 관계를 이용하면 옹벽에서 반사된 신호가 탄받이 벽 쪽에 도달했을 때 옹벽에서 x축으로 얼마만큼 떨어졌는지 거리( $d_x$ )를 구할 수 있다.

$$d_x = (251.7 - h) \times \tan(90 - \theta) \quad (8)$$

탄받이 벽 정중앙에 대한  $d_x$  값은 12.8 m이고, 탄받이 벽 정중앙의 ±1.8 m 범위에는 탄이 탄받이로 들어가는 입구가 있다. 탄이 탄받이로 들어가는 입구에서는 전파의 반사가 일어나지 않는다. 따라서  $d_x$ 가 11 m보다 작은 경우에 도플러 레이더에서 송신된 신호가 탄에 반사되어 탄받이에 도달할 수 있다.

h가 127.5 m라고 가정한다면, 식 (7)에 의해서 θ는 84.7124°가 된다. 이 θ 값에 대하여 식 (8)을 통해  $d_x$ 를 계산하면 11.4946 m가 얻어진다. 다음으로 h가 157.5 m라고 가정하면, 식 (7)에 의해 θ는 85.7154°가 된다. 이 θ 값에 대하여 식 (8)을 이용하여  $d_x$ 를 계산하면 7.0575 m가 얻어진다. 이 계산 결과를 바탕으로  $7.0575 \text{ m} \leq d_x \leq 11.4946 \text{ m}$ 의 구간에 해당하는 탄받이 벽에서 반사되는 신호가 다시 도플러 레이더로 들어오는 현상을 방지하려면 h의 범위가  $127.5 \text{ m} \leq h \leq 157.5 \text{ m}$ 인 옹벽에 대해 전파의 방향을 다른 방향으로 바꿔주는 구조물이 필요하였다. 따라서 그림. 12와 같이 해당하는 옹벽에 흙으로 경사면을 쌓는 작업을 수행하였다.



그림 12. 옹벽을 따라 흙으로 쌓은 경사면 전경  
 Fig. 12. The slope piled up along the wall with dirt.

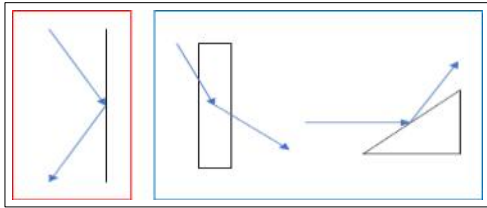


그림 13(a). 경사면 쌓기 전 전파의 진행경로(좌측)  
 그림 13(b). 경사면 쌓은 후 전파의 진행경로(우측)  
 Fig. 13(a). Propagation of wave before the slope is piled up(left).  
 Fig. 13(b). Propagation of wave after the slope is piled up(right).

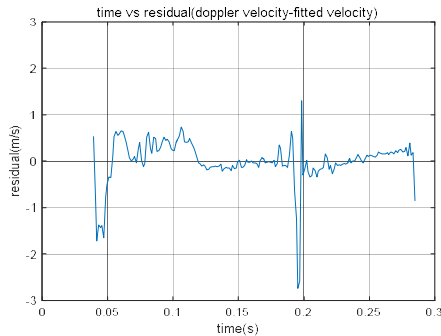


그림 14. 탄받이 사격에서 계측된 속도 데이터와 곡선 적합을 거친 속도 데이터의 차이(경사면을 쌓은 후)  
 Fig. 14. Difference between measured and fitted velocity data in low-angle fire(after the slope is piled up).

경사면을 쌓기 전 옹벽을 맞고 반사된 전파가 진행되는 경로는 그림. 13(a)와 같다. 그림. 13(a)는 전천후시험장 위에서 내려다보았을 때 전파의 진행경로를 나타낸 것이다.

그림. 13(a)를 보면 옹벽에 맞고 반사된 전파가 도플러 레이더의 수신부가 있는 방향으로 진행함을 알 수 있다. 이 경로를 통해 도플러 레이더로 수신된 신호가 다중경로 클러터로 작용하게 된다.

반면 그림. 13(b)는 경사면을 쌓은 후 옹벽에서 반사된 전파가 진행되는 경로를 나타낸다. 왼쪽은 전천후시험장 위에서 내려다보았을 때, 오른쪽은 전천후시험장 앞에서 보았을 때 옹벽에 반사된 전파의 진행방향이다. 경사면을 쌓기 전과 달리 시험장 바깥의 위쪽으로 전파가 진행하기 때문에, 전파가 도플러 레이더의 수신부로 진행할 가능성이 적다. 따라서 경사면을 쌓은 후 다중경로 클러터의 영향이 감소한다.

표 2. 분산 비교 결과(경사면 쌓기 전, 후)  
 Table 2. Variance comparison result (before vs. after).

Index	Number of data	Variance ( $m^2/s^2$ )
Low angle fire (Before)	2413	0.2488
Low angle fire (After)	1298	0.1402

경사면을 쌓는 작업을 수행하기 전, 후에 도플러 레이더로 계측한 탄의 속도 데이터의 다항식 곡선 적합 결과와의 잔차를 비교하여 경사면을 쌓은 작업을 통한 다중경로 클러터 제거 효과를 검증하였다. 그림. 14는 옹벽에 경사면을 쌓은 후 속도 데이터와 다항식 곡선 적합 결과의 잔차를 나타낸 그래프이다.

경사면을 쌓기 전 속도 데이터의 다항식 곡선 적합 결과와의 잔차를 나타낸 그림. 10과 그림. 14를 비교하면 경사면을 쌓은 후 속도 데이터와 다항식 곡선 적합 결과의 잔차가 감소하였음을 알 수 있다. 이를 통계적으로 확인하기 위해 K678 6호 장약의 경사면을 쌓기 전 탄받이 사격, 경사면을 쌓은 후 탄받이 사격에 해당하는 계측속도와 다항식 곡선 적합 결과의 잔차에 대한 분산을 비교하였다(표 2). 같은 조건에서의 비교를 위해 모두 0.3초 이내의 데이터만 고려하였다.

표 2에서 분산의 값이 작으면 속도 데이터를 이용한 다항식 곡선 적합의 결과가 도플러 레이더에서 얻어진 속도 데이터의 특성을 잘 반영하고 있다는 의미이고, 다항식 곡선 적합을 통해 얻어지는 포구속도의 신뢰성도 높아진다. 따라서 옹벽에 경사면을 쌓는 작업 전보다 후가 다중경로 클러터의 영향이 감소하여 다항식 곡선 적합 결과가 속도 데이터의 특성을 잘 반영하므로 포구속도의 신뢰성도 높아진다.

표 2의 결과에 F-검정 방식을 적용하면, 탄받이 사격(작업 전)-탄받이 사격(작업 후) 간에 속도 데이터와 다항식 곡선 적합 결과의 잔차에 대한 분산의 차이가 있는지 검정할 수 있다.

표 2에서 탄받이 사격에서 경사면을 쌓기 전과 쌓은 후의 속도 데이터와 다항식 곡선 적합 결과의 잔차에 대한 분산의 비는 1.7746이다. F-검정에서 사용되는 자유도는 (데이터 개수-1)이므로, 작업 전과 후의 자유도는 2412와 1297이다. 유의 수준(p)가 0.05라면, F-검정 값은 F-분포표에서 1이다. 경사면을 쌓기 전과 후의 속도 데이터와 다항식 곡선 적합 결과의 잔차에 대한 분산의 비가 1.7746으로 F-검정 값보다 크다. 따라서 경사면을 쌓기 전의 잔차 값의 분산이 쌓은 후 잔차 값의 분산보다 크므로, 경사면을 쌓은 후 도플러 레이더에서 얻은 속도 데이터에서 다중경로 클러터가 감소하였다고 결론지을 수 있다.

5-2 포구속도 결과 비교

경사면을 쌓기 전과 후, K678 6호 장약의 탄받이 사격(총 21라운드)에 대하여 다항식 곡선 적합 후 외삽법으로 추정된 포구속도의 평균과 표준편차를 비교결과를 표 3에 제시하였다.

표 2와 표 3을 비교했을 때, 속도 데이터와 다항식 곡선 적합 결과의 잔차에 대한 분산이 감소하면 포구속도의 분산도 감소하는 관계를 확인할 수 있다.

표 3. 포구속도 비교 결과

Table 3. Muzzle velocity comparison result.

Index	Mean (m/s)	Variance (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
Low angle fire (Before)	938.7667	2.0826
Low angle fire (After)	942.5524	1.8370

5-3 FFT 연산 이후 신호처리 방법 개선(방안 2)

다중경로 클러터를 제거하는 방안 이외에 본 논문에서는 도플러 신호의 FFT 연산 이후에 신호처리 방법의 개선을 통하여 속도 데이터와 다항식 곡선 적합 결과의 잔차를 줄일 수 있었다.

2장에서 설명한 방식을 통해 고정된 주변 환경의 전자파 산란에 의한 클러터에 의한 직경로 신호를 제거한 후, 가장 큰 전력을 가지는 주파수를 탄 속도에 의한 도플러 주파수( $f_d$ )로 선정하게 된다. 기존의 신호처리 방식은 도플러 주파수( $f_d$ )가 가지는 전력과 도플러 주파수를 제외한 다른 주파수 대역의 평균 전력이 크게 차이가 나지 않을 때도 데이터를 이용하여 탄의 속도를 계산하였다. 하지만 도플러 주파수( $f_d$ )의 전력과 다른 주파수 대역의 평균 전력이 크게 차이가 없다는 의미는 원하는 신호와 원치 않는 신호의 구분이 어렵고, 따라서 계산된 결과의 신뢰도가 낮다는 것을 의미한다. 그러므로 본 논문에서는 도플러 주파수( $f_d$ )의 전력과 다른 주파수 대역의 평균 전력의 차이가 10 dB이상인 데이터를 이용하여 탄의 속도를 계산하는 방식으로 신호처리 방식을 개선하였고, 새로운 신호처리 방식으로 계산하여 얻은 속도 데이터와 다항식 곡선 적합 결과 사이의 잔차 그래프는 그림. 15(공사 후 탄발이 사격)과 같다.

새로운 신호처리 방식을 적용하기 전과 후에, K678 6호 장약의 경사면을 쌓은 후의 탄발이 사격에 대한 계측속도와 다항식 곡선 적합 결과의 잔차에 대한 분산을 비교하였다(표 4).

기존의 방식과 새로운 방식으로 얻어진 분산에 대하여 F-검정을 적용하면 경사면을 쌓기 전, 후의 탄발이 사격은 새로운 방식의 기존 방식에 대한 분산의 비율이 1보다 작으므로 새로운 방식의 적용으로 신호의 질이 개선된 것으로 볼 수 있다. 따라서 새로운 신호처리 방식을 적용하면 기존의 방식보다 속도 데이터의 특성을 잘 반영하는 다항식 곡선 적합 결과를 얻을 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 국방과학연구소 안흥시험장 내 전천후시험장에서 포구속도 계측 시 계측품질 향상을 위해 전천후시험장

표 4. 분산 비교 결과(새로운 신호처리 방식, 기존 신호처리 방식)

Table 4. Variance comparison result(new method vs. old method).

Index	Number of data	Variance (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
Old method	1298	0.1402
New method	1072	0.0464

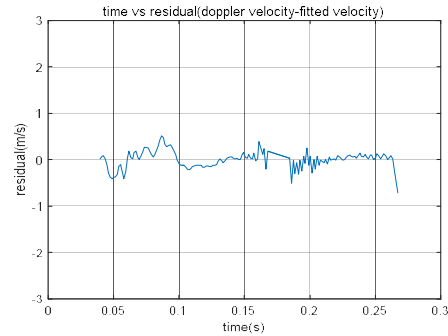


그림 15. 탄발이 사격에서 새로운 신호처리 방식을 통하여 계측된 속도 데이터와 곡선 적합을 거친 속도 데이터의 차이 (경사면을 쌓은 후)

Fig. 15. Difference between measured and fitted velocity data in low-angle fire with new signal processing method(after the slope is piled up).

의 구조개선을 통한 클러터 제거 및 신호처리의 개선방안을 제안하였다.

전천후시험장의 구조개선을 위해 먼저 어느 지점에서 도플러 레이더에서 송신된 신호의 반사가 일어나는지 확인이 필요하였다. 따라서 전천후시험장에 대한 기하학적 분석을 위해 전천후시험장의 가로, 세로 길이를 측정하였다. 측정된 가로, 세로 길이와 도플러 레이더의 빔 폭을 이용하여 전천후시험장에 대한 기하학적 분석을 진행하였다. 이 기하학적 분석의 결과로 전천후시험장에서 도플러 레이더의 송신 신호가 반사되어 다시 도플러 레이더로 들어오도록 만드는 지점을 확인하였고, 이 지점을 다중경로 클러터로 정의하였다. 이 다중경로 클러터에서 반사되는 신호를 감소시키기 위해 다중경로 클러터를 흙으로 덮어 경사면을 만드는 구조개선 작업을 수행하였다.

구조개선 작업 전/후 도플러 레이더를 이용한 탄의 속도 계측결과를 비교하면 표. 2와 표. 3, 그림. 10, 그림. 16을 바탕으로 구조개선 작업 후에 다중경로 클러터의 영향이 감소하였음을 알 수 있었다. 특히 표. 2과 표. 3에서 구조개선 작업 후 탄의 속도 계측결과에 대한 다항식 곡선 적합의 결과가 탄의 속도 데이터 특성을 잘 반영함을 확인하였다. 따라서 구조개선 작업 전보다 후에 다항식 곡선 적합으로 얻은 포구속도 값의 신뢰도가 높아졌다고 할 수 있다.

또한, 제안한 신호처리 방법을 이용하면 기존 신호처리 방법을 사용했을 때보다 다항식 곡선 적합 결과가 도플러 레이더에서 계측된 속도의 특성을 잘 반영함을 확인하였다. 추후



제한한 신호처리 방안을 이용하면, 포구속도 값의 신뢰도가 높아질 것이다.

앞으로는 전천후시험장에서 다중경로 클러터의 영향을 줄이는 방법으로 빔 폭이 작은 도플러 레이더의 개발, 도플러 레이더의 고각을 들어서 탄의 속도 계측 등의 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## References

- [1] V. Yang, T. B. Brill, and W. Z. Ren, Solid propellant chemistry, combustion and motor interior ballistics, The American Institute of Aeronautics and Astronautics, pp. 267-285, 2000.
- [2] S. Kwon, J. Hwang, M. Park, and M. Kim, "Thermal and internal ballistic properties of nitrocellulose based gun propellant Including RDX," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 20, No. 4, pp. 514-519, Oct. 2017.
- [3] US Army Aberdeen Proving Ground, Projectile velocity measurements, US Army Test and Evaluation Command, Maryland, TOP 4-2-805, 1982.
- [4] D. Kim, J. Lee, P. Bang, and S. Back, "The effect of zero time on the muzzle velocity", in *Korea Institute of Military Science and Technology Annual Conference Proceedings*, Jeju: Korea, pp. 954-956, 2011
- [5] S. Sun, B. Cho, J. Lee, and J. K. Kim, "Ground-based clutter modeling for small target detection", in *Korea Institute of Military Science and Technology Annual Conference Proceedings*, Jeju: Korea, pp. 205-206, 2017
- [6] J. L. Farrell, and R. L. Taylor, "Doppler radar clutter," *IEEE Transactions on Aerospace and Navigational Electronics*, Vol. ANE-11, No. 3, pp. 162-172, Sep. 1964.



**김형래 (Hyoung-Rae Kim)**

2014년 8월 : 서강대학교 전자공학과 (공학사)

2016년 8월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 (공학석사)

현재 : 국방과학연구소 연구원

※관심분야 : 레이더 신호처리, 물리량 계측, 광학 계측