

# 저감속 회수장비에서 초음속 시험탄 속도에 대한 이론적 및 실험적 비교 연구

송민섭<sup>1)</sup> · 김재훈<sup>\*,2)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 미사일연구원

<sup>2)</sup> 충남대학교 기계공학과

## Analytical and Experimental Comparison of the Velocity of a Supersonic Projectile in the Soft Recovery System

Minsup Song<sup>1)</sup> · Jaehoon Kim<sup>\*,2)</sup>

<sup>1)</sup> 1st R&D Institute, Agency for Defense Development, Korea

<sup>2)</sup> School of Mechanical Engineering, Chung Nam National University

(Received 27 June 2021 / Revised 14 October 2021 / Accepted 19 November 2021)

### Abstract

In order to compare numerical analyses made by Song and Kim needed for predicting gas and water filling with experimental results we conducted an experiment to recover a test projectile (43.7 kg with a 155 mm diameter) at a velocity of 775 m/s in a soft recovery system with a length of 179 m using pressurized gas and filled water. The soft recovery system consisting of a series of pressure tubes had a diaphragm, piston, and water plug for filling the pressurized gas and water. We installed a continuous wave Doppler radar system for velocity measurements of the test projectile travelling in the pressure tubes and pressure transducers for measuring the pressure in the soft recovery system. Continuous wave Doppler radar has the advantage of achieving real-time measurements of the velocity of a test projectile. The velocity-time curve of the test projectile, measured using the continuous wave Doppler radar, and the pressure profile were compared with the numerical analysis results. The experiment results show good agreement with the numerical analysis results based on the one-dimensional Euler equation with an HLL Riemann solver.

Key Words : Soft Recovery System(저감속 회수장비), CW Doppler(연속파 도플러), HLL Riemann Solver(HLL 리만 솔버)

### 1. 서론

탄약의 발전 추세에 따라 기존 재래식 탄약에서 지

\* Corresponding author, E-mail: kimjhoon@cnu.ac.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

능탄 형태의 탄약이 발전하기 시작하였으며, 이에 따라 탄약 내부에 구동장치, 항법부, 및 유도부와 같은 전자장비들이 적용되기 시작하였다. 하지만, 탄약의 경우 유도탄과 달리 발사시 최대 15,000 G 이상의 고충격이 발생하기 때문에 지능탄 내부에 장착되는 부품의 내고충격성이 요구되었다<sup>[4]</sup>. 상기 부품의 내고충격성 평가를 위해 탄약 내부에 시험품을 장착하고 호수나 연안수 쪽으로 탄을 발사하거나 수직으로 포탄을 발사하여 부드러운 입자가 깔린 회수영역으로 회수하는 방법이 있다. 시험탄의 회수를 위해 Chung은 여러장의 얇은 금속 판을 관통하도록 구성된 회수장비도 개발하였다<sup>[5]</sup>. 하지만, 상기와 같은 방법으로는 시험 및 회수시 발생하는 과도한 시간과 비용, 시험체에 가해지는 원치 않는 하중 등의 문제점으로 인해 U.S. Army, ARDEC에서는 탄도압축 감속장비를 이용한 저감속 회수장비를 개발하였다<sup>[6,7]</sup>. 탄도압축을 이용한 저감속 회수장비는 초음속 시험탄을 가스 및 물이 충전된 압력관에 진입시켜 충격파를 발생시키고 이로 인한 압력증가를 이용하여 시험탄을 감속시키는 장비이다.

Song과 Kim은 탄도압축을 이용한 저감속 회수장비에서 가스 및 물 충전량의 변화에 따른 시험탄의 감속특성을 확인하기 위해 HLL Riemann 솔버와 1차원 오일러 방정식을 이용하여 이론적 해를 개발하였다<sup>[8]</sup>.

일반적으로 발사장비로부터 발사된 시험탄의 감속특성을 확인하기 위해 가속도 센서가 장착된 이력장치를 사용하나<sup>[9,13]</sup>, 저감속 회수장비에서 이력장치를 이용할 경우 이력장치 회수시 손상 위험뿐 아니라 시간 및 비용 측면에서도 단점이 존재한다.

본 연구에서는 저감속 회수장비내 시험탄의 종말속도와 감속도에 영향을 미치는 가스 및 물 충전량 조건을 계산하기 위해 Song과 Kim에 의해 개발된 이론적 해가 초음속으로 발사된 155 mm 시험탄의 실험 결과와 유사한지 비교하였다. 즉, HLL Riemann 솔버 및 1차원 오일러 방정식을 이용한 수치해석 결과와 저감속 회수장비에서 CW(Continuous Wave) 도플러 레이더에 의해 실시간 계측된 시험탄의 속도를 비교하여 수치해석 결과가 타당한 것을 확인하였다. 따라서, 수치해석을 이용하여 저감속 회수장비의 가스 및 물 충전량 조건을 계산할 수 있을 것으로 판단하였다.

## 2. 저감속 회수장비

### 2.1 시험장비 개요

저감속 회수장비는 가속장비에서 발사된 시험탄을 안전하게 회수하는 장비이며 Fig. 1과 같이 총 길이 179 m에 6개의 구간으로 구분된다. 회수장비내에는 압력센서 10개와 CW 도플러 레이더 1개가 있어 시험탄이 압력관 내부를 이동하는 동안 압력이력과 속도 이력을 실시간으로 확인할 수 있다.

저감속 회수장비는 시험탄이 초음속으로 이동할 때 전방에 충격파가 발생하여 시험탄보다 빠른 속도로 전파되고 충격파 후방, 즉 시험탄 전방의 압력이 상승함에 따라 감속도가 증가한다.

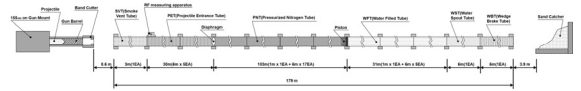


Fig. 1. Schematic figure of soft recovery system

### 2.2 시험장비 구성

가속장비로 155 mm 시험탄 발사가 가능한 K9 자주포 무장을 사용하였다. K9 포신 끝단에는 밴드커터가 장착되어 시험탄 발사시 동밴드를 제거할 수 있도록 구성하였다. 가속장비와 저감속 회수장비 사이에는 시험탄이 발사될 때 발생하는 추진가스와 미연소 추진제가 압력관 내부로 진입하지 않도록 이격시켰다.

회수장비는 1 m, 3 m, 6 m의 압력관을 조합하여 6개 구간으로 구성하였다. 압력관 이음매 사이에는 Fig. 2와 같이 오링이 삽입되어 충전된 가스나 충격파 압력이 압력관 외부로 누설되지 않도록 구성하였다.

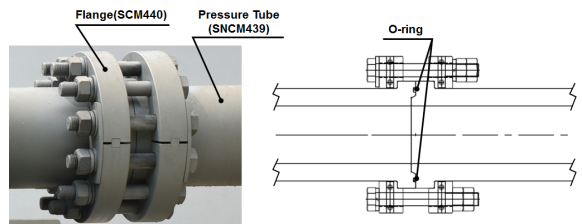


Fig. 2. Pressure tube interface

저감속 회수장비는 Table 1과 같이 기능별로 6개 구간으로 구분할 수 있다.

Table 1. Length of SRS(Soft Recovery System) section

Section	Length (m)
GVT(Gas Vent Tube)	3
PET(Projectile Entrance Tube)	30
HPT(High Pressurized Tube)	103
WFT(Water Filled Tube)	31
WST(Water Spout Tube)	6
WB(Wedge Brake)	6

가스 배기관(GVT)은 3 m 길이의 압력관으로 슬롯이 원주방향으로 배치되어 장약의 추진가스가 배기될 수 있도록 설계하였다. 가스 배기관 진입구는 발사체의 충격에 대응할 수 있도록 강건한 지지대로 구성되었으며 시험탄이 압력관에 안전하게 진입할 수 있도록 하는 역할을 한다.

상압관(PET)은 시험탄 진입에 따른 충격파 발생과 공기 압축을 위한 6 m 압력관 5개로 구성된다. 상압관과 고압관(HPT) 사이에는 노치(notch)가 있는 격막(AL1050, 2T)이 삽입되며 격막은 충전된 가스가 누설되지 않도록 압력관에 이중으로 오링이 삽입된다. 시험탄이 상압관에 진입하면 격막은 파열압(burst pressure)을 초과하는 충격파가 도달하기 전까지 충격파를 반사시켜 시험탄을 감속시킨다. 시험탄과 격막 사이를 왕복하는 충격파의 크기가 파열압을 초과하면 격막은 파열한다.

고압관(HPT)은 가스가 충전되는 구간으로 전체 압력관 중 길이가 가장 긴 구간(103 m)이다. 전방에는 격막과 후방에는 전단링이 있는 피스톤이 배치되어 가스 누설을 방지하며 충격파를 반사시켜 시험탄을 감속시키는 역할을 한다. Fig. 3에 압력관 내부에서 진행되는 시험탄과 피스톤 사이에서 발생하는 충격파의 진행 개념도를 나타내었다.



Fig. 3. Concept of shock wave in pressure tubes

물 충전부(WFT)는 31 m의 압력관으로 구성되며 시험 조건에 따라 약 10 kg ~ 30 kg의 물이 충전되며 댐을 설치하여 피스톤이 진행하기 전까지 물을 가둘

수 있도록 구성하였다. 피스톤이 충격파에 의해 전단되어 이동을 시작하면 충전된 물의 질량이 피스톤에 더해지고 물기둥이 형성되면서 물과 압력관 내부 표면 사이에 마찰력이 증가한다. 피스톤은 마찰력에 의해 감속하며 충격파는 시험탄과 피스톤 사이를 왕복하면서 시험탄을 감속시킨다.

토출부(WST)는 6 m 압력관으로 원주방향 및 축방향에 슬롯이 있어 충전된 물이 피스톤에 의해 토출되는 영역이다.

썰기 브레이크부(WB)는 3단의 마찰바로 구성되며 마찰력에 의해 시험탄을 최종 감속시킨다. 썰기 브레이크부에서 시험탄이 멈추지 못할 경우 모래 회수부로 진입한다.

Fig. 4에 저감속 회수장비 전경을 나타내었다.



Fig. 4. Soft recovery system

### 2.3 CW 도플러 레이더 구성

CW(Continuous Wave) 도플러 레이더는 Fig. 5와 같이 급전부, 송수신부, 신호처리부로 구성되며 각각은 케이블로 연결되어 있어 실시간으로 시험탄의 속도 및 거리 결과를 획득할 수 있다. CW 도플러 레이더는 시험탄에 연속적으로 전파를 송신하여 주파수 변이를 검출함으로써 속도를 측정할 수 있도록 구성하였다<sup>[14],[16]</sup>.

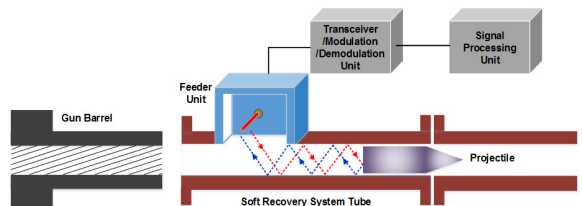


Fig. 5. Layout of the CW doppler radar

급전부(feeder unit)는 압력관 내부로 전파를 송수신하는 역할을 수행하며 상압관 입구 상부에 Fig. 6과 같이 설치하였다.

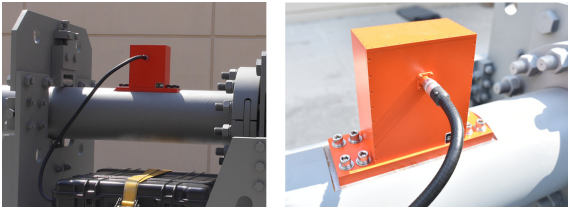


Fig. 6. CW doppler radar apparatus installed on PET tube

송수신부(transceiver unit)은 연속파(Continuous Wave)를 생성하여 급전부를 통해 송신하고 압력관내 시험탄 후방에 반사되어 급전부를 통해 수신한다.

신호처리부(Signal processing unit)는 송수신부가 연속파를 생성하도록 직접디지털합성기를 제어하며 전파 신호를 수신하여 도플러 주파수를 추출한다. 인터페이스부는 추출된 도플러 주파수를 연산하여 시험탄의 속도 및 거리를 도출한다.

저감속 회수장비는 실린더 형태의 압력관을 이용하여 시험탄을 감속시키기 때문에 압력관을 원형 도파관(Circular waveguide)으로 볼 수 있다. CW 도플러 레이더의 급전부는 압력관 내부로 전파를 송수신하며, 압력관 내부에서 주파수에 따라 여러 가지 고차모드(higher modes)가 전파될 경우 각각의 모드에 따라 전파속도가 다르므로 시험탄의 속도 및 거리를 정확하게 측정하기 어렵다. 따라서, dominant mode(TE<sub>11</sub>)만이 여기되도록 급전부는 1.4 GHz 대역을 사용하였다. Dominant mode란 cutoff 주파수가 가장 낮은 mode를 뜻하며 압력관 내부에서 cutoff 주파수보다 작은 주파수는 전파되지 않게 된다.

도플러 방식의 측정 원리는 속도 측정 송수신 주파수 변이를 검출하는 것이다. RF 측정장비의 송신주파수는 1.4 GHz로서 관내 파장( $\lambda_g$ )은 식 (1)과 같다.  $V_p$ 는 TE<sub>11</sub> 모드에서의 관내 위상 속도(5.06E8 m/s)이며,  $Freq.$ 는 사용 주파수(1.4 GHz),  $c$ 는 광속을 의미한다.

$$\lambda_g = \frac{v_p}{Freq.} \tag{1}$$

$$v_p = \frac{c}{0.61} \tag{2}$$

샘플링 주파수는 100 kHz로 도플러 주파수( $F_d$ )를 검출하며 측정 데이터는 AD 샘플링 12 bit로 변환된다.

도플러 주파수( $F_d$ )와 대상체 속도( $V_r$ )와의 관계식은 식 (3)과 같다. 따라서, 측정된 주파수 성분을 이용하여 시험탄의 속도를 실시간으로 계산할 수 있다.

$$F_d = \frac{2 \times V_r}{\lambda_g} \tag{3}$$

CW 도플러 레이더의 기록시점은 도플러 신호가 감지되는 시점인 시험탄이 상압관(PET)에 진입할 때이다.

### 2.4 압력센서 구성

압력센서는 상압관에 3개를 배치하였고 고압관에 7개를 배치하였다. 압력센서는 동적 압력 환경에 사용이 가능하도록 실리콘 집적 센서 타입을 사용하였다.

상압관과 고압관 후방의 3개 압력센서는 격막 전방과 피스톤 전방에서의 압력 이력을 측정하기 위해 1 m 이내에 배치하였으며 압력 강하 시간을 이용하여 시험탄의 속도를 계산할 수 있도록 하였다<sup>[7]</sup>. 각 압력센서의 위치는 CW 도플러 레이더 위치를 기준으로 Table 2와 같다. 압력센서는 시험탄이 K9 강내에서 발사되는 시점을 기준으로 압력이력을 기록하도록 구성하였다.

Table 2. Pressure transducer locations

Pressure Transducer No.	Distance from CW doppler radar
#1 (PET)	28.16 m
#2 (PET)	28.76 m
#3 (PET)	29.11 m
#8 (HPT)	131.16 m
#9 (HPT)	131.76 m
#10 (HPT)	132.11 m

## 3. 시험 결과 및 고찰

### 3.1 시험 조건

저감속 회수장비에서 CW 도플러 레이더 측정을 통해 시험탄에 대한 감속특성을 확인하기 위해 Table 3과 같이 시험탄, 장약, 격막, 피스톤, 가스압 및 물 충전량 조건을 사용하였다.

Table 3. Test conditions of test projectile firing

Projectile	Propellant	Diaphragm thickness /notch depth	Piston mass (rubber, wood)	Gas Pressure/ Water Mass <sup>1)</sup>
Test Projectile (43.7 kg)	K677 No.5	2 mm / 0.9 mm	4 kg	62 psi / 25 kg

1) 고압관과 물 충전부의 가스압(psi)과 물 충전량(kg)

시험탄은 Fig. 7과 같이 513.2 mm의 길이에 43.7 kg의 질량을 가지며, 내부에는 알루미늄 더미를 삽입하여 155 mm 양산탄과 유사한 질량으로 제작하였다. 시험탄의 재질은 Steel 4340이며 38 mm 폭의 동벤드가 하단에 용접되어 있다. 시험탄은 K9 강내에서 발사시 장약에 의한 압력(약 35,000 psi)을 받으며, 관내에서는 이론적으로 2,000 psi 이하의 반사충격과 압력이 시험탄 전방에 적용되므로 시험탄이 압력관내를 이동하는 동안에는 구조건전성 문제는 없을 것으로 판단하였다.

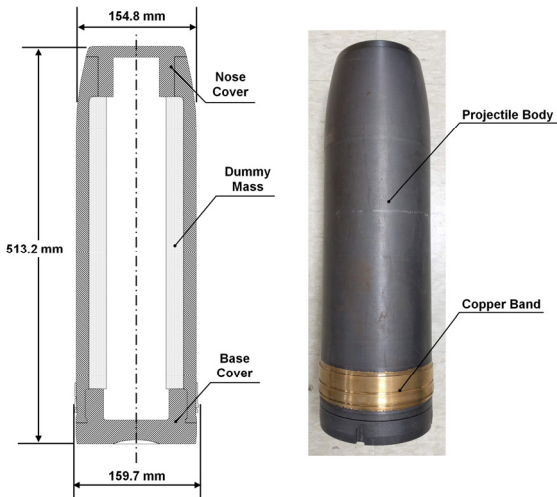


Fig. 7. SRS test projectile shape and dimension

K9 포미조립체 약실내 강내압력은 내부에 설치된 압력센서로 실시간 측정되며, 상용 프로그램을 통해 결과가 획득된다. 추진 장약은 K677 단위장약 #5호를 사용하였다.

격막은 2 mm 두께로 제작되며 노치 깊이는 0.9 mm를 적용하였다. 피스톤은 나무와 고무를 적층하여 4 kg의 중량으로 제작하였으며 전단링이 장착되어 충격

파에 의해 전단될 수 있도록 구성하였다.

### 3.2 시험 결과

시험 결과를 Table 4에 나타내었다. 시험탄 속도는 상압관 입구에서 CW 도플러 레이더에 의해 775.4 m/s의 시험탄 속도를 측정하였으며 썬기 브레이크부에서 멈추었다. 강내 압력은 33,450 psi로 측정되었다.

Table 4. Test results of SRS projectile firing

Velocity <sup>1)</sup> (m/s)	Chamber Pressure <sup>2)</sup> (psi)	Residual Velocity
775.4	33,450	0 m/s

- 1) 상압관 0.54 m 통과시 측정값(CW 도플러 레이더 측정 결과)
- 2) K9 무장의 약실내 최대 압력값(압력센서 이용)

K9 포에서 발사된 시험탄은 Fig. 8과 같이 썬기 브레이크부 2단에서 회수되었다. 탄체에 균열이나 변형은 발생하지 않았고 탄체 동벤드는 밴드커터에 의해 제거된 것을 육안으로 확인할 수 있다.

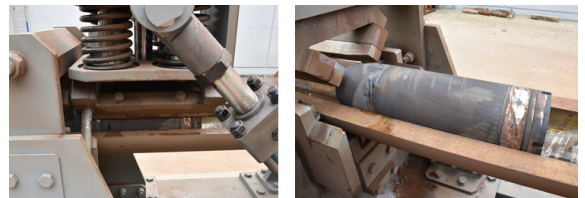


Fig. 8. Test projectile captured at wedge brake

상압관과 고압관 사이에 설치된 격막은 Fig. 9와 같이 시험전에는 노치가 있는 상태로 설치되었다가 시험탄이 통과한 후에는 왕관 형태로 회수되었다. 이는 충격파로 인해 파열된 격막을 시험탄이 통과하면서 압력관 내벽방향으로 밀려주기 때문이다.



Fig. 9. Diaphragm(left: before test, right: after test)

고압관과 물 충전부 사이에 설치된 피스톤은 Fig. 10과 같이 전단링과 피스톤이 한 몸체로 되어 있다가 충격파에 의해 전단링이 전단되면 피스톤은 물을 밀어내면서 회수장비 외부로 이동하여 모래 회수부로 진입하였다.



Fig. 10. Piston(before test), shear ring, piston recovered(after test)

CW 도플러 레이더를 사용하여 Fig. 11과 같이 시험탄의 속도 및 거리 이력을 계측하였다. 도플러 계측 결과에서 시험탄의 이동에 따라 측정된 도플러 주파수를 기준으로 대상체의 순간속도를 계산하고 순간속도를 기준으로 누적거리를 계산하였다.

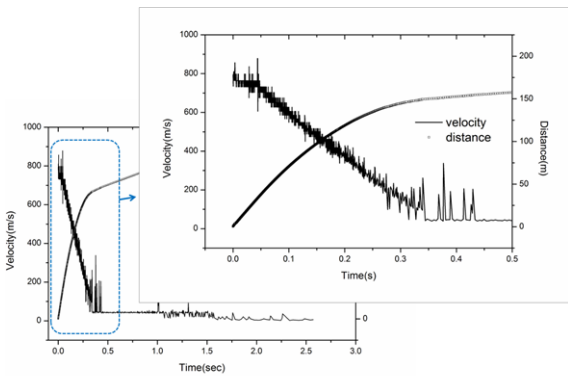


Fig. 11. Velocity and distance time history results(raw data) of test projectile

Fig. 12 및 13에 각각 상압관과 고압관의 압력이력을 나타내었으며 충격파의 발생과 반사 충격파의 생성을 확인할 수 있다. 아울러 시험탄이 압력센서 위치를 지난후 급격한 압력강하가 발생하는 것을 확인할 수 있으며 이를 통해 시험탄의 속도를 계산할 수 있다.

상기 시험을 통해 탄도압축식 저감속 회수장비가 초음속 시험탄 회수에 적용이 가능함을 확인하였으며, 압력관 내부를 원형도파관으로 가정하여 시험탄 속도를 CW 도플러 레이더를 통해 계측할 수 있음을 확인

하였다.

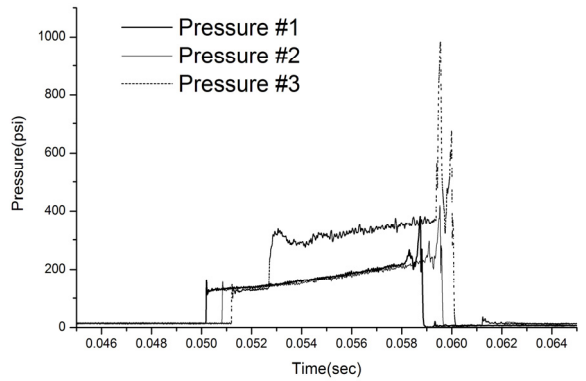


Fig. 12. Pressure time history measurements (pressure transducer #1 ~ #3)

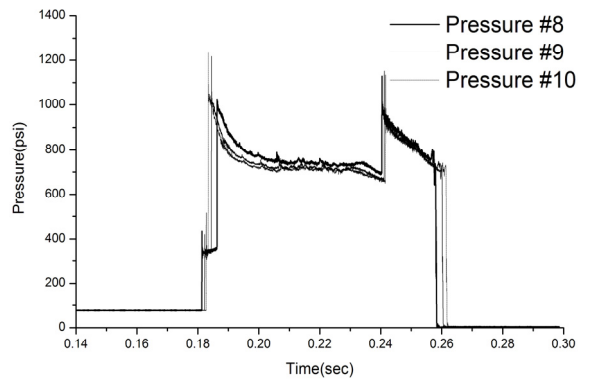


Fig. 13. Pressure time history measurements (pressure transducer #8 ~ #10)

#### 4. 해석적 모델 및 결과 고찰

##### 4.1 수치해석 모델 개요

초음속으로 발사된 시험탄이 회수장비로 진입하면 시험탄의 빠른 이동속도로 인해 충격파가 발생하며 압력관 방향을 따라 수평으로 전파된다. 충격파는 시험탄의 전방에서 발생하여 진행방향의 격막 및 피스톤에서 반사되고 반사된 충격파는 시험탄의 선두부에 작용하는 유동압력을 급격하게 상승시켜 시험탄을 감속시킨다. 식 (4)와 같이 오일러 방정식을 지배방정식으로 하여 수치해석을 수행하였으며 회수장비 전체에 대한 일차원 고정격자계를 설정하였다<sup>[8]</sup>.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

이때 보존변수 벡터  $U$ 와 유량 벡터  $F$ 는 식 (5)와 같다.  $\rho$ 와  $p$ 는 유동의 밀도와 압력이고  $u$ 는  $x$ 방향의 유동속도,  $e$ 는 단위 질량당 전에너지로 내부에너지를 나타낸다.

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ e \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ (e + p)u \end{bmatrix} \quad (5)$$

충격파와 같이 유동에 불연속성이 포함되는 경우 초기치 불연속 문제인 Riemann 문제를 적용할 수 있다. 아울러 Godunov 기법에 따라 이산화된 적분 형태로 표현하면 식 (6)과 같다.

$$U_i^{m+1} = U_i^m + \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[ F_{i-\frac{1}{2}} - F_{i+\frac{1}{2}} \right] \quad (6)$$

본 연구에서는 HLL Riemann solver에 의한 해는 파속인  $S_L$ 과  $S_R$ 에 의해 3개의 구간으로 나눌 수 있으며, 각 구간에서 보존변수가 계산되며 식 (7)과 같이 표현할 수 있다<sup>[15]</sup>.

$$F_{i+\frac{1}{2}}^{hll} = \begin{cases} S_R F_L - S_L F_R + S_L S_R (U_R - U_L) & \left( \begin{array}{l} \text{if } 0 \leq S_L \\ \text{if } S_L \leq 0 \leq S_R \\ \text{if } 0 \geq S_R \end{array} \right) \\ \frac{F_L}{S_R - S_L} & \end{cases} \quad (7)$$

시험탄의 속도와 변위는 식 (8)과 같은 운동 방정식으로 부터 계산할 수 있다.

$$M_{proj} \frac{d^2 x}{dt^2} = -(P_{proj} - P_{atm}) A_{proj} \quad (8)$$

여기에서  $M_{proj}$ 은 시험탄의 질량, 오일러 방정식으로 부터 계산되는  $P_{proj}$ 는 탄두부에 작용하는 압력,  $P_{atm}$ 은 시험탄 후방에 작용하는 대기압이고  $A_{proj}$ 는 시험탄의 단면적이다.

#### 4.2 CW 도플러 계측결과와 수치해석 결과의 비교

시험탄 속도에 대해 이론적/실험적 비교를 위해 본 연구에서는 Table 5와 같이 시험 조건과 동일한 변수

를 이용한 수치해석 결과와 CW 도플러 계측 결과를 비교하였다. 아울러 CW 도플러 주파수 수신값에는 노이즈가 포함되기 때문에 필터링이 요구되며 본 연구에서는 Averaging 필터(평균갯수: 50개)와 Kalman 필터(Process Noise Variance: 0.10, Measure Noise Variance: 2.00)를 이용하여 CW 도플러 계측값을 보정하였다<sup>[18]</sup>.

Table 5. Parameters of numerical analysis

Parameter	Value
Projectile mass(kg)	43.7
Burst pressure,diaphragm,piston(psi)	120
Gas pressure(psi.)	62
Water filled mass(kg)	25
Piston mass(kg)	4

Fig. 14에 시험탄의 CW 도플러 계측에 의한 속도와 이 속도에 의한 거리 결과를 수치해석 결과와 함께 도시하였다. 각 데이터를 동일한 시간축에서 비교하기 위해 시험탄이 상압관(PET) 입구, 즉 CW 도플러 레이더 하부를 통과하는 시점을 기준으로 비교하였다.

속도 측면에서 수치해석의 첫 번째 변곡점은 격막이 설치된 30 m 위치에서 0.04초에 발생하며 속도 차이는 3.55 m/s로 수치해석 결과가 더 크다. 두 번째 변곡점은 피스톤이 있는 130 m 위치에서 0.21초에 발생하며 속도차이는 27.41 m/s로 수치해석 결과가 더 크다. 수치해석 결과에서 속도값은 분명하게 감속도에 의해 속도의 기울기가 변하는 것을 보여주는 반면 CW 도플러 레이더에 의한 시험탄의 계측결과는 상압관 격막에서의 변곡점만을 보여주며 피스톤 부근에서 기울기는 변하지 않는 차이점을 보여준다.

계측된 시험탄의 속도와 수치해석 결과의 차이가 발생하는 시간은 0.18초이며, 이시간은 피스톤이 파열되어 이동하는 시간과 동일하다. 즉, 수치해석에서 피스톤의 이동속도가 실험 결과와 차이가 발생한다면 시험탄의 실험결과와 수치해석 결과 사이에도 차이가 발생하게 되므로, 피스톤의 거동에 대한 수치해석 모델의 보다 정확한 모사가 필요할 것으로 보인다. 또한, 수치해석에서 계산된 반사 충격파의 크기가 실제 실험에서는 높지 않게 나타난 것으로 볼 수 있다. 상

기와 같이 본 실험에서 시험탄이 피스톤 위치로 접근할 때 수치해석 결과와 같은 급격한 속도의 변곡점이 나타나지 않는 것은 압력관 내부에서 감속도를 최소화해야 하는 실험자 관점에서 좋은 효과로 받아들일 수 있다.

거리측면에서는 0.26초 이후에 속도 차이에 의해 거리의 차이도 발생하는 것을 확인할 수 있다. CW 도플러 계측에 의한 속도 차이에 의해 누적된 거리 결과는 5 m 내외로 확인되었다.

전반적인 속도와 거리값의 비교는 CW 도플러 계측값과 수치해석 결과가 유사함을 보여주고 있다.

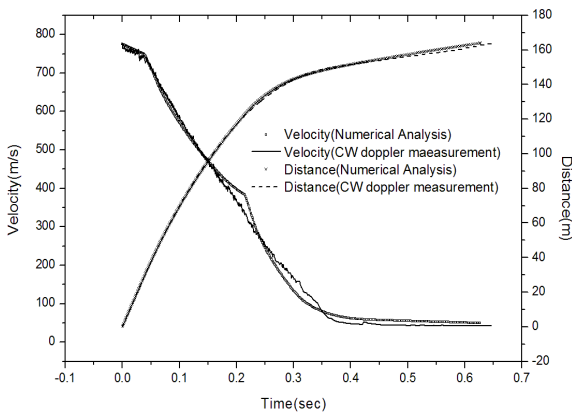


Fig. 14. Comparisons of CW doppler radar measurements and numerical analysis results of test projectile

Fig. 15는 감속도 결과값의 비교를 나타내고 있다. CW 도플러 계측 속도의 미분값을 이용하여 수치 해석 결과와 비교하였다. 수치해석에서 도출된 감속도 결과가 CW 도플러 레이더의 속도 결과처럼 검증 및 비교가 가능한지 확인하기 위해서다. 수치해석의 경우 최대 감속도는 0.04초(격막 부근)와 0.21초(피스톤 부근)에서 발생하며, Fig. 14에서 변곡점이 나타나는 시간과 일치한다. 즉, 시험탄의 감속특성에 큰 영향을 미치는 반사충격파가 시험탄 전방에 부딪힌 시간이다. 하지만, CW 도플러 계측에 의한 감속도 값은 RF 계측에 의한 특성으로 인해 고주파수 성분이 다수 나타난 것을 확인할 수 있다. Table 6에 최대 감속도와 발생 시간을 나타내고 있다. 격막 및 피스톤 부근에서 감속도의 경우 RF 계측 특성에 의해 직접적인 비교는 어려운 것으로 나타났다.

Table 6. Comparisons of max. deceleration between CW doppler and numerical analysis

Result	Max. Deceleration	Time
CW doppler	2,791 G	0.0351 sec
Numerical analysis	499.5 G	0.2157 sec

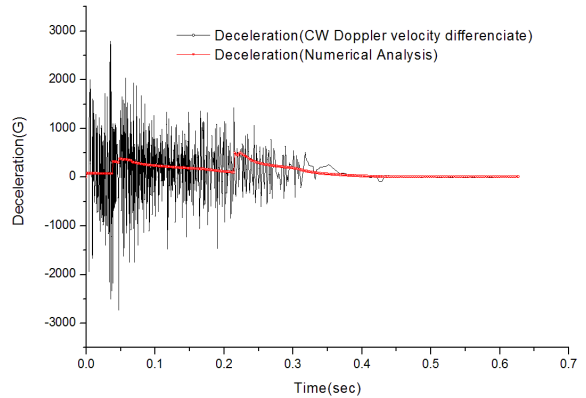


Fig. 15. Comparisons of deceleration between CW Doppler radar differentiate and numerical analysis

#### 4.3 압력 계측결과와 수치해석 결과의 비교

압력센서를 이용한 시험탄의 속도 계산은 Fig. 12 및 Fig. 13의 압력이력 결과를 이용하였다. 압력이력 결과에서 시험탄이 통과한 후 대기압(14.7 psi)이하로 떨어지는 시간과 압력센서(#1~#3, #8~#10)간 거리를 이용하여 압력센서간 중심에서 시험탄의 평균 속도를 계산하였다. Table 7 및 Fig. 16에 압력센서가 위치한 거리 기준으로 CW 도플러 계측에 의한 속도, 수치해석에 의한 속도, 및 압력센서에 의해 계산된 속도를 함께 도시하였다. 압력센서 계측결과를 시간 축에 나타내지 않고 거리 축을 이용한 이유는 압력결과를 이용하여 시험탄의 상압관 진입시간을 정확히 추정하기 어렵기 때문이다.

거리에 따른 속도 변화를 비교해보면 격막 위치 (29.18 m)에서 CW 도플러 레이더 계측결과를 기준으로 수치해석결과는 1.1 %, 압력센서에 의한 결과는 -3.7 % 차이가 발생하였다. 즉, 시험탄이 격막에 근접할 때 수치해석 결과는 CW 도플러 레이더 계측결과와 매우 유사하다고 볼 수 있으며, 압력센서에 의한



시험탄 속도의 경우 수치해석 대비 오차가 상대적으로 크다고 볼 수 있다. 그 이유는 압력센서의 경우 0.95 m 이격된 위치의 2개 센서를 이용하여 평균속도를 계산하였으며, 시험탄 통과시간 계산과정에서 오차가 발생할 수 있을 것으로 판단하였다. 즉, 시험탄 통과에 따른 압력강하 기준값에 따른 시간과 실제 시험탄이 통과한 시간과 다소 차이가 있을 것으로 보인다.

Table 7. Comparisons of velocity between CW doppler, numerical analysis, and pressure transducers

Location	Velocity(m/s)		
	CW dopper	Numerical analysis	pressure transducer(avg)
29.18 m	737.35	745.76	710.01
132.18 m	286.39	288.49	279.58

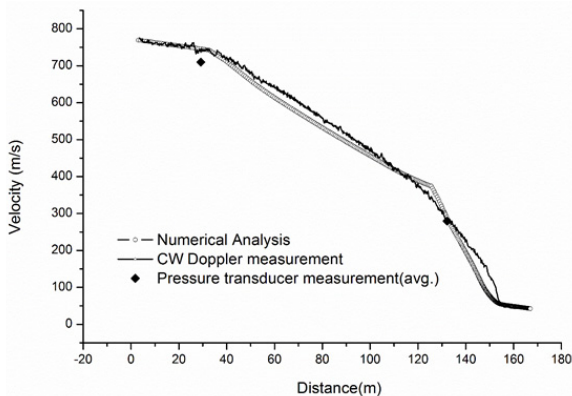


Fig. 16. Comparisons of velocities between numerical analysis, CW Doppler radar, and pressure transducers

피스톤 위치(132.18 m)의 경우 CW 도플러 레이더를 기준으로 수치해석결과는 0.7 %, 압력센서에 의한 결과는 -2.4 %의 차이가 확인되었다. 격막 위치에서와 유사하게 수치해석 결과는 CW 도플러 레이더 측정결과와 유사하였고, 압력센서는 다소 작은 속도값을 나타내었다. 이를 통해 압력센서 위치를 통과하는 시험탄 후방 압력기준을 어떻게 설정하느냐가 중요할 것으로 보인다. 아울러 123 m 위치를 기준으로 수치해석 결과는 변곡점을 보이나 CW 도플러 레이더 결과

에서는 변곡점 없이 시험탄이 감속하는 것을 확인할 수 있다. 수치해석상의 급격한 속도 기울기 변화는 4.2절에서 논의한 바와 같이 실제 실험에서는 속도의 변곡점이 발생할 정도의 반사충격파가 발생하지 않은 것을 확인할 수 있었다.

격막 및 피스톤 위치에서의 시험탄 속도 비교시 전반적으로 CW 도플러 측정결과, 수치해석 결과 및 압력 측정결과가 격막 및 피스톤 부근에서 4 % 이내의 차이를 갖는 것으로 나타났다.

## 5. 결론

본 논문에서는 K9 포에서 발사된 탄약의 회수를 위해 개발된 저감속 회수장비의 실험결과와 수치해석 결과를 비교하였다.

수치해석을 통해 계산된 가스 및 물 충전량은 시험탄의 종말속도 및 감속도에 큰 영향을 미치기 때문에 정확한 이론적 해 개발이 필요하며, 개발된 이론적 해를 검증하기 위해 본 시험을 수행하였다. 개발된 시험장비에는 시험탄의 속도 및 거리를 측정하기 위한 CW 도플러 레이더 및 압력센서를 장착하였고 수치해석 결과와 비교를 위해 시험을 수행하였다. 초음속으로 발사된 시험탄은 충전된 가스와 물에 의해 감속되어 회수장비의 종말단에서 멈추었음을 확인하였고, 측정된 시험탄의 속도 및 거리를 1차원 Euler 방정식과 Godunov HLL Riemann Solver 방법의 수치해석 결과와 상호 비교하여 이론적 해를 바탕으로 만들어진 수치해석 결과가 타당함을 확인하였다. 이를 통해 시험탄의 속도에 따른 가스 및 물 충전량을 계산할 수 있게 되었다.

하지만, CW 도플러 레이더에 의해 측정된 감속도는 수치해석에서 도출된 감속도와 비교가 어려웠으며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단하였다. 아울러 수치해석에서 피스톤의 거동을 보다 정밀하게 모사하여 실험결과와 차이를 최소화해야 할 것으로 판단하였다.

## References

- [1] D. S. Somasundaram, M. B. Trabia, et al, "Shock Mitigation for Electronic Boards within a Projectile,"

- Int. J. of Comp. Meth. and Exp. Meas., Vol. 1, No. 4, pp. 416-439, 2013.
- [2] D. D. Radford, V. S. Deshpande, N. A. Fleck, "The Use of Metal form Projectiles to Simulate Shock Loading on a Structure", Vol. 31, pp. 1152-1171, 2005.
- [3] T. Myers, D. Geissler, et al, "Statistical Comparison between Component Level and System Level Testing for the Excalibur Projectile," 23<sup>rd</sup> Int. Symposium on Ballistics, 2007.
- [4] Vinod Chakka, Mohamed B. Trabia, et al, "Modeling and Reduction of Shocks on Electronic Components within a Projectile," Int. J. of Impact Engineering, Vol. 35, pp. 1326-1338, 2008.
- [5] Chung, et al, "Development of a Soft Recovery System of Supersonic Projectiles," Engineering Transactions, Vol. 60, pp. 3-14, 2012.
- [6] Teng, R. N. Ballistic Compression Decelerator. U.S. Patent No. 3,678,745. issued to McDonnell Douglas Corporation.
- [7] A. Birk, et al, "Soft Recovery System for 155 mm Projectiles," 23<sup>rd</sup> Int. Symposium on Ballistics, 2007.
- [8] Minsup Song, Jaehoon Kim, "Numerical Studies on the Deceleration Characteristics of Supersonic Projectile According to the Test Condition Parameters in a Soft Recovery System," J. of the KIMST, Vol. 23, pp. 485-493, 2020.
- [9] Wendong Zhang, et al, "Ultra-High G Deceleration-Time Measurement for the Penetration into Steel Target," Int. J. of Impact Engineering, Vol. 34, pp. 436-447, 2007.
- [10] Bradford S. Davis, et al, "A Monolithic High-G SOI-MEMS Accelerometer for Measuring Projectile Launch and Flight Accelerations," Shock and Vibration, Vol. 13, pp. 127-135, 2006.
- [11] D. J. Frew, M. J. Forrestal, et al, "The Effect of Concrete Target Diameter on Projectile Deceleration and Penetration Depth," Int. J. of Impact Engineering, Vol. 32, pp. 1584-1594, 2006.
- [12] M. J. Forrestal, D. J. Frew, et al, "Penetration of Concrete Targets with Deceleration-Time Measurements," Int. J. of Impact Engineering, Vol. 28, pp. 479-497, 2003.
- [13] Wen Feng, Zhou Zhen, "Simulation and Experiment of Projectile Penetrate into Steel Target Acceleration Signal Processing," Int. J. of Image, Graphics and Signal Processing, Vol. 2, pp. 9-15, 2011.
- [14] Jae-Hyun Choi, Min-Sup Song, Jin-cep Roh, "Deceleration Hysteresis Measuring Apparatus for Soft Recovery System," Patent No. US 9,874,633 B1, Jan. 23, 2018.
- [15] E. F. Toro, M. Spruce, W. Spears, "Restoration of the Contact Surface in the HLL-Riemann Solver," Shock Waves, Vol. 4, pp. 25-34, 1993.
- [16] Richard J. Doviak, Dusan S. Zrnic, "Doppler Radar and Weather Observations : Second Edition," 2003.
- [17] Erheng Wang, Arun Shukla, "Analytical and Experimental Evaluation of Energies During Shock Wave Loading," Int. J. of Impact Engineering, Vol. 37, pp. 1188-1196, 2010.
- [18] Mohinder S. Grewal, Angus P. Andrews, "Kalman Filtering Theory and Practice Using MATLAB Second Edition," A wiley-Interscience Publication, 2001.